OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	コンクリート系構造部材の火害診断手法に関する研究
Author(s)	吉田, 正友
Citation	大阪大学, 1997, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3129194
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

コンクリート系構造部材の
火害診断手法に関する研究

平成８年１０月

吉田　正友

目　　次

頁

序論
1．本研究の背景及び範囲 …… 1
2．既往の研究 …… 3
2．1　火害診断・対策に関する研究 …… 3
2．2　コンクリート内部温度推定（計算）に関する研究 …… 5
2．3　コンクリート系部材の残存耐力に関する研究 …… 5
3．本論文の構成及び概要 …… 5
3．1　序論 …… 6
3．2　第1編：火害を受けたコンクリートの受熱温度推定に関する研究 …… 6
3．3　第2編：火災後のコンクリート系部材の受熱温度分布及び残存耐力の推定に関する研究 …… 6
3．4　第3編：コンクリート系部材の火害診断手法の提案 …… 7
3．5　結論 …… 7
3．6　Appendix：阪神淡路大震災におけるコンクリート系材料を使用した建物の火害特性 …… 7

第1編　火害を受けたコンクリートの受熱温度推定に関する研究

第1章　火害を受けたコンクリートの受熱温度推定方法の提案
1．1　はじめに …… 8
1．2　コンクリート系構造物の火害診断手法の現状とその問題点 …… 8
1．2．1　火害を受けたＲＣ造建物の被害度推定方法 …… 8
1．2．2　コンクリートの受熱温度推定方法 …… 9
1．3　既往の受熱温度推定方法による検証 …… 10
1．3．1　概要 …… 10
1．3．2　酸化カルシウム（CaO）の定量分析 …… 10
1．3．3　示差熱分析 …… 11
1．3．4　Ｘ線回折 …… 11
1．4　コンクリートの受熱温度推定方法の選択 …… 11
1．4．1　ＵＶスペクトル法の採用 …… 11
1．4．2　コンクリートのＵＶスペクトル特性 …… 13
1．5　ＵＶスペクトル法による
リグニン系混和剤入りコンクリートの受熱温度推定 …… 15
1．5．1　概要 …… 15
1．5．2　実験方法 …… 16
1．5．3　実験結果及び考察 …… 16
1．5．4　推定精度向上の検討 …… 16
1．5．5　推定式の誘導 …… 18
1．6　まとめ …… 18

第2章　火害を受けたコンクリートの受熱温度推定方法の検証
2．1　はじめに …… 35
2．2　加熱試験における温度推定 …… 35
2．2．1　概要 …… 35
2．2．2　柱の場合 …… 35
2．2．3　床の場合 …… 36
2．3　燃焼排ガスの本推定方法への影響 …… 36
2．3．1　概要 …… 36

２．３．２　試験体の作成 …… 36
２．３．３　試験体の加熱 …… 36
２．３．４　試料溶液の作成及び測定 …… 37
２．３．５　測定結果及び考察 …… 37
２．４　実火災への適用 …… 37
２．４．１　概要 …… 37
２．４．２　火災事例１ …… 37
２．４．３　火災事例２ …… 39
２．４．４　火災事例３ …… 40
２．５　ナフタリン系混和剤入りコンクリートの受熱温度推定方法 …… 42
２．５．１　概要 …… 42
２．５．２　ＵＶスペクトル法（水煮沸抽出法） …… 42
２．５．３　ＵＶスペクトル法（塩酸分解法） …… 42
２．５．４　定量分析法 …… 44
２．６　まとめ …… 45

第２編　火災後のコンクリート系部材の受熱温度分布及び残存耐力の推定に関する研究

第１章　火災時におけるコンクリート系部材の内部温度特性
１．１　はじめに …… 69
１．２　複合板の内部温度特性 …… 69
１．２．１　実験概要 …… 69
１．２．２　試験体 …… 69
１．２．３　試験装置 …… 70
１．２．４　実験方法 …… 70
１．２．５　実験結果及び考察 …… 71
１．３　骨材の種類の違いによるコンクリート内部温度特性 …… 75
１．３．１　実験目的 …… 75
１．３．２　供試体 …… 76
１．３．３　実験方法 …… 76
１．３．４　実験結果及び考察 …… 76
１．４　合成床版における断面形状の違いが内部温度に与える影響 …… 77
１．４．１　概要 …… 77
１．４．２　実験 …… 77
１．４．３　実験結果及び考察 …… 78
１．５　合成床版におけるコンクリートの種類が内部温度に与える影響 …… 79
１．５．１　概要 …… 79
１．５．２　実験 …… 79
１．５．３　実験結果及び考察 …… 80
１．６　火災時におけるコンクリート系区画部材の内部最高温度 …… 80
１．６．１　概要 …… 80
１．６．２　床の場合 …… 81
１．６．３　壁の場合 …… 81
１．７　まとめ …… 82

第２章　火災後における鋼管コンクリート柱の残存耐力
２．１　はじめに …… 128
２．２　実験方法 …… 129

２．２．１　試験体 …… 129
２．２．２　試験方法 …… 129
２．３　計算方法 …… 129
２．３．１　概要 …… 130
２．３．２　計算条件 …… 131
２．３．３　内部最高温度分布の把握 …… 132
２．３．４　残存耐力の算定 …… 136
２．４　計算結果及び考察 …… 138
２．５　実大部材へのシミュレーション …… 139
２．６　まとめ …… 139

第３章　火災後におけるコンクリート系区画部材の受熱温度及び残存耐力の推定に関する研究
３．１　はじめに …… 149
３．２　受熱温度の算定 …… 150
３．２．１　概要 …… 150
３．２．２　計算条件 …… 151
３．２．３　受熱温度分布の計算 …… 152
３．３　壁及び床部材の受熱温度分布 …… 155
３．３．１　概要 …… 155
３．３．２　計算結果との比較 …… 155
３．３．３　考察 …… 155
３．４　受熱温度分布推定式の誘導 …… 156
３．４．１　概要 …… 156
３．４．２　計算方法 …… 156
３．４．３　計算結果及び考察 …… 156
３．５　残存耐力の推定 …… 158
３．５．１　概要 …… 158
３．５．２　コンクリート及び鋼材の機械的性質 …… 158
３．５．３　残存耐力の算定 …… 159
３．５．４　計算結果及び考察 …… 160
３．６　まとめ …… 162

第３編　コンクリート系部材の火害診断手法の提案

１．　はじめに …… 174
２．　予備診断 …… 174
３．　一次診断 …… 175
４．　二次診断 …… 176
４．１　概要 …… 176
４．２　火災性状の予測 …… 177
４．３　火害を受けたコンクリート部材の受熱温度分布と残存耐力、剛性の推定 …… 177
４．４　対策 …… 177
５．　診断方法の実施例 …… 178
５．１　概要 …… 178
５．２　火災性状の推定調査 …… 178
５．３　構造部分の火害調査 …… 179
６．　補修方法の実施例 …… 180
６．１　概要 …… 180

6．2　補修方法 …… 181
7．　火害減少対策 …… 182
7．1　概要 …… 182
7．2　コンクリートの使用材料、種類について …… 182
7．3　コンクリートの爆裂について …… 183
7．4　残存耐力について …… 183
8．　まとめ …… 184

結論
1．研究結果のまとめ …… 188
1．1　概要 …… 188
1．2　第1編：火害を受けたコンクリートの受熱温度推定に関する研究 …… 188
1．2．1　第1章：火害を受けたコンクリートの受熱温度推定方法の提案 …… 188
1．2．2　第2章：火害を受けたコンクリートの受熱温度推定方法の検証 …… 188
1．3　第2編：火災後のコンクリート系部材の受熱温度分布及び残存耐力の推定に関する研究 …… 189
1．3．1　第1章：火災時におけるコンクリート系部材の内部温度特性 …… 189
1．3．2　第2章：火災後における鋼管コンクリート柱の残存耐力 …… 189
1．3．3　第3章：火災後におけるコンクリート系区画部材の受熱温度及び残存耐力の推定 …… 189
1．4　第3編：コンクリート系部材の火害診断手法の提案 …… 190
2．今後の研究課題 …… 190

参考文献 …… 191

発表論文
A．審査付き …… 197
B．口頭発表 …… 198
C．解説 …… 204
D．著書 …… 206
E．その他 …… 206

謝辞 …… 208

Appendix　阪神淡路大震災におけるコンクリート系材料を使用した建物の火害特性
1．はじめに …… 210
2．調査目的 …… 210
3．調査方法 …… 210
4．調査結果及び考察 …… 211
4．1　青木駅南（東灘区） …… 211
4．2　魚崎北5・6丁目（東灘区） …… 212
4．3　御蔵通5・6丁目（長田区） …… 212
4．4　高橋病院周辺（長田区） …… 213
4．5　千歳小公園（須磨区）及び水笠西公園周辺（長田区・須磨区） …… 213

４．６　新長田駅南（長田区）　…… 214
４．７　御蔵通５・６丁目及び菅原変電所周辺（長田区）　…… 214
５．まとめ　…… 215

記号一覧

本論文では特にことわらない限り、以下の記号を用いる。

《Alphabet》

A	:（火害を受けた採取サンプルの）吸光度（第１編）	[-]
A	:生成項（第２編）	[kcal/m³•h]
$_cA$	:コンクリート断面積	[cm²]
A_h	:履歴温度110℃における吸光度	[-]
A_i	:要素iの断面積	[cm²]
A_l	:履歴温度500℃における吸光度	[-]
a	:二次回帰式の係数	[℃]
a	:断面径（第２編第２章）	[cm]
a	:吸光係数（第１編）	[1/cm]
a_m	:加熱側からm番目の壁1cm幅の鉄筋断面積	[cm²]
a_t	:引張側鉄筋断面積	[cm²]
b	:二次回帰式の係数	[℃/cm]
C	:（火害を受けた採取サンプルの） N/40過マンガン酸カリウム消費量	[ml/g]
C_h	:履歴温度110℃における N/40過マンガン酸カリウム消費量	[ml/g]
C_l	:履歴温度500℃における N/40過マンガン酸カリウム消費量	[ml/g]
c	:比熱	[kcal/kg•℃]
c	:二次回帰式の係数	[℃/cm²]
c	:濃度（第１編）	[-]
D	:鋼管径	[cm]
d	:コンクリート部分の径	[cm]
d	:鉄筋のかぶり厚さ（第２編第３章）	[cm]
d	:木材の炭化深さ（第３編）	[mm]
E	:弾性係数	[kgf/cm²]
$E_{n,c}$	:常温時のコンクリートの見かけの弾性係数	[kgf/cm²]
E_c	:ＲＣ基準のコンクリートの弾性係数	[kgf/cm²]
f	:外的要因（加熱等）による定数	[-]
g	:材料特性による定数	[1/mm]
h	:部材長さ	[cm]
h/a	:径長さ比	[-]
j	:応力中心距離	[cm]
K	:温度伝導率（$=\lambda/\rho c$）	[m²/h]
K	:木材の材種による常数（第３編）	[-]
L_1	:径長さ比によるコンクリート強度の低減係数	[-]
L_2	:打ち込み高さによるコンクリート強度の低減係数	[-]
l	:吸収層（セル）の厚さ	[cm]
m	:曲げ残存耐力比（$=M_r/M_o$）	[-]
M_o	:常温時曲げ耐力	[tonf•cm]
M_r	:曲げ残存耐力	[tonf•cm]
N	:軸力（第２編第２章）	[tonf]
N	:層数（第２編）	[-]
n	:層番号	[-]
n_c	:軸力比	[-]
p	:周長（第２編第２章）	[cm]

p	：圧縮残存耐力比	[-]
P_{max}	：各要素の応力度の合算が最大となる値	[tonf]
P_o	：コンクリート部分の常温時耐力（第２編第２章）	[tonf]
P_o	：壁1cm幅の常温時圧縮耐力（第２編第３章）	[tonf/cm]
P_r	：壁1cm幅の火災後の圧縮残存耐力	[tonf/cm]
P_t	：火災後の残存耐力	[tonf]
Q	：熱量	[kcal]
T	：温度	[℃]
T	：透過率（$=I_2/I_1$，第１編）	[-]
t	：時間	[h]
t	：壁厚または床厚（第２編第３章）	[cm]
t_s	：鋼管厚	[cm]
w	：含水率	[%]
W(1)	：コンクリート加熱側表面の初期含水量	[kg/m³]
x	：加熱面からの距離	[mmまたはcm]
y	：加熱時間温度面積比率	[-]

《Greek Letters》

ΔT	：温度上昇分	[℃]
Δt	：時間の増分	[h]
ΔW	：杉板の厚さ	[cm]
Δx	：x方向の層分割	[m]
Δy	：y方向の層分割	[m]
$\Delta \varepsilon$	：ひずみ度の増分	[-]
α	：水分移動係数	[-]
α_f	：総合熱伝達率	[kcal/m²•h•℃]
α_{fr}	：対流熱伝達率	[kcal/m²•h•℃]
α_{fc}	：輻射熱伝達率	[kcal/m²•h•℃]
γ	：冷却曲線の勾配係数	[-]
ε	：放射率	[-]
ε_B	：コンクリートの最大応力度σ_Bに達したときのひずみ度	[-]
$\varepsilon_{T,axis}$	：全ひずみ度	[-]
ε_s	：応力に関するひずみ度	[-]
$\varepsilon_{thermal}$	：熱特性に関するひずみ度	[-]
ε_u	：コンクリートの最大ひずみ度	[-]
θ	：木材面の加熱温度	[℃]
λ	：熱伝導率	[kcal/m•h•℃]
ξ	：水の蒸発潜熱量（=539）	[kcal/kg]
ρ	：密度	[kg/m³]
σ	：ステファンボルツマン定数（=4.88）	[kcal/m²•h•°K]
σ_B	：コンクリートの最大応力度	[kgf/cm²]
$\sigma_{L,B}$	：コンクリートの低減強度	[kgf/cm²]
σ_Y	：鋼材の降伏点	[kgf/cm²]
χ	：含水量	[kg/m³]

《Subscripts》

c	：コンクリート
c1	：コンクリート内部１層目
cs	：コンクリート表面
f	：炉内雰囲気
i	：加熱側からのコンクリート内部の層の番号

j　　：加熱側からのコンクリート内部のグリッドのX方向の番号
k　　：加熱側からのコンクリート内部のグリッドのY方向の番号
Lc　　：軽量コンクリート
l　　：ひずみ度の番号
m　　：加熱側からの鉄筋位置の番号
Nc　　：普通コンクリート
n　　：常温時
r　　：室内雰囲気
s　　：鋼材
sr　　：鋼管裏面
src　　：鋼管の隅角部
ss　　：試験体表面
T　　：温度T時
W　　：杉板

《Superscripts》
n　　：時間

専門用語及び略語一覧

安全限界温度　：強度の著しい低下を生じさせる温度
温度時間面積　：温度曲線で、温度と時間で囲まれる面積
基準法　：建築基準法
吸収曲線　：UVスペクトルにおける波長と吸光度の関係
区画部材　：火災の拡大と煙の拡散を制限する性能を持つ耐火構造の壁や床の各部材
合成構造　：鋼とコンクリートの合成による構造
合成床版　：デッキプレート上にコンクリートを打設した床版
合成柱　：鋼とコンクリートの合成による柱
混和剤　：コンクリート用化学混和剤
再使用限界時間　：筆者が、部材がある荷重レベルで火災中も崩壊せず、火災終了後も崩壊しない限界の時の火災継続時間と定義。この場合が、部材が再使用可能な限界である。火災時間がこの時間より長ければ、いずれ崩壊するであろうし、この時間より短ければ、崩壊しない。
施行令　：建築基準法施行令
耐力部材　：区画部材を支持する耐火構造の柱及びはりの各部材
定量分析　：有機系化合物中の炭素を対象とした過マンガン酸カリウムによる酸素消費量の定量分析
崩壊時間　：部材がある荷重レベルで火災（加熱）中に崩壊した時の火災継続時間通常，耐火時間とも呼ばれる。

CFT　：コンクリート充填鋼管
DTA　：示差熱分析
GBRC法　：筆者らが提案したコンクリート中の混和剤に着目したコンクリートの受熱温度推定方法
ISO　：ISO 834 Fire-resistance tests -Elements of building construction-
JIS　：JIS A 1304　建築構造部分の耐火試験方法
PC　：プレキャスト・コンクリート
RC　：鉄筋コンクリート

S　　：鉄骨
TGA　　：重量分析
UVスペクトル　　：紫外吸収スペクトル

序　論

1．本研究の背景及び範囲
2．既往の研究
3．本論文の構成及び概要

１．本研究の背景及び範囲

わが国における耐火構造は、基準法第２条七で、「鉄筋コンクリート造、れんが造等の構造で政令で定める耐火性能を有するもの」と定義されている。ここでいう政令とは、施行令第107条のことである。鉄筋コンクリート造（以下、ＲＣ造と呼ぶ）は基準法上、耐火構造として認められ、法規上の制約は受けない。従って、ＲＣ造については耐火性があるものと考えられ、日本では法規で仕様が定められている。しかし、法規上の仕様規定に基づくＲＣ造の耐火性能については実験ではほとんど確かめられておらず、それに関する文献も甚だ少ないのが現状である。最近、コンクリートの高強度化が進み、火災時における爆裂の発生が懸念されるという問題が浮上し、ＲＣ造の耐火性能に疑問が持たれているのが現状である。また、日本では、ＲＣ造に関しては、従来よりいかに火災の被害を減少させようかという積極的な努力が示されていないのが実状である。この状況については1995年初めに発生した阪神・淡路大震災で痛感させられた（Appendix参照）。

ところで、一般に、合成構造をはじめとするコンクリート系構造部材（ＲＣ造を除く）は法規上、耐火性が認められていないため、耐火設計を行なう必要が生じる。耐火設計の考え方は終局設計法である。耐火設計されたコンクリート系建物はその設計条件での火災に対してのみ性能が保証され、設計条件の火災が生じた場合には取り壊すことが前提となる。しかし、火災の規模によっては、再使用可能な場合もありうる。また、耐火設計の安全性を信じ、耐火設計を行えば、火災に対して充分に対処できると過信するのも良くないと考えられる。絶対に安全であるという場合は存在しないから、謙虚な気持ちで、起こった事実に対し、どう対処すべきかを考えるのが技術者の取るべき姿勢であろうと思われる。従って、火害後の対処が重要となってくるが、火害診断については、耐震・耐久診断に比べ、その研究は遅れているのが現実である。

ＲＣ造を含めたコンクリート系建物の火害特性として大きく分けて、次の２つが考えられる。

（１）通常、火災を受けても建物は崩壊しない場合がほとんどである。それは火災が極限化している場合がほとんどであり、内装材料が防火の役割を果たしているとか、火災の規模が割合小さいという場合である。目視観察でたわみ、ひび割れ等の有害な変形、破壊、脱落等が認められない場合はコンクリート内部の受熱温度を推定し、使用の可否を決定しなければならない。Ｓ造の場合には、ＲＣ造の場合に比べ、目視観察による変形等の被害

状況から使用の可否の判断が容易であり、また、部材の取り替えも比較的容易である。しかし、ＲＣ造の場合には、コンクリート内部状況が目視観察では判明しないため、詳細な検討を行い、慎重に判断を下さなければならない。火害の損傷が軽微な場合には、損傷箇所のコンクリートの受熱温度を推定し、その温度が強度の著しい低下を生じさせる温度（以下、安全限界温度と呼ぶ）を越えている部分だけを補修すれば済む。また、火害が顕著な場合には、部材及びフレーム全体についてコンクリート及び鉄筋の受熱温度を推定し、部材の残存耐力を求め、部材を取り替えるか、あるいは、フレームを取り替えるか、さらには、建物を取り壊すかの判断を下すことになる。通常、火災は防火区画内で極限化されている場合がほとんどであり、火災は局所的にとどまり、全体架構までは被害が及ばず、建物全体を取り壊すことはほとんどないと考えられる。

（２）地震等の災害による火災で建物が崩壊または局所的に破壊する場合には明かに取り替える必要が生じてくる。なお、阪神淡路大震災のような大地震における火害状況についてはAppendixで述べる。

以上（１）及び（２）に示したように、建物が火災を受けた後は、適切な診断・対策（補修、補強あるいは取り壊し等）を講じる必要がある。現在、ＲＣ造の火害診断に関する研究は、一部、岸谷氏らのグループによって行われているが、それほど多くはない。建物を取り壊すか、再使用するかの判断を下すことはコスト上非常に重大な問題である。従来より筆者の所属する機関では、ＲＣ造をはじめとして火害調査の依頼を多く受けてきた。各種構造のうち、Ｓ造については前述したように、比較的診断は容易であり、その方法も確立されていると考えられる。ＲＣ造については、目視観察、コア強度等を主とした従前の方法を用い、火害調査を実施してきたが、正確な診断を下すためには、正確なコンクリートの内部温度特性を把握する必要がある。従前の方法には、内部温度の正確な把握を行う方法が含まれていないため、正確な診断を下すことは不可能であった。的確な内部温度推定方法が確立されていないのが現状である。その的確な診断に悩まされたため、筆者らは火災を受けたＲＣ造建物の診断方法の研究を進め、その中でもコンクリート内部温度の推定を主眼としてきた。本研究では、経済的な再建が図られることを目的として、コンクリート系構造部材を対象とした合理的な火害診断手法を確立した。すなわち、コンクリート系部材内の正確な受熱温度を推定し、より正確な残存耐力を把握した。最近、注目を集め、その使用が増加している合成構造の火害診断にも適用した。

以下に、本研究で用いた受熱温度推定方法の概要を述べる。

（１）破壊による受熱温度推定方法

従来、日本の耐火設計の考え方では、火源や火災シナリオが想定されているが、想定しうる全ての場合を考慮できているのか、また、想定より大きな火災が発生したらどうするのかという疑問が持たれる。これらの疑問は、アメリカをはじめとして多くの外国の研究者によって指摘されている。そこで、筆者らは、火災性状に関係なく、コンクリート自身の受熱温度を紫外吸収スペクトル（以下、ＵＶスペクトルと呼ぶ）により推定できる方法を開発した。通常、火災性状は予測が困難であるが、本方法を用いれば、火災性状の予測に頼らず、火害を受けたコンクリート・サンプルを採取し、その受熱温度、すなわち、火災後の最高温度を確定することが出来る。

（２）非破壊による受熱温度推定方法

コンクリート内部温度を簡易計算法によっても推定した。一般的に、解析手法には決定論的及び統計論的の両タイプの数学モデルがある。筆者は、その両タイプのモデルを用い、正確さの向上を試みた。従来、熱伝導解析には境界要素法、有限要素法等が用いられているが、大型コンピューターを利用すると、計算に多大な時間を要し、そのプログラム（FORTRAN）を作成するのにも非常に繁多な手間を要する。そこで、筆者は決定論的モデルとしては、偏微分方程式を簡略化させて、パーソナル・コンピューター・レベルで計算が可能である方法を開発した。これは火災外力をJISの標準加熱曲線をはじめとして、ISO等の種々の条件に変えることができ、偏微分方程式の解を実験により確かめ、計算による内部温度推定方法を確立したものである。また、統計論的モデルとして、区画部材に限定し、最高温度分布が実験値より多項（二次）回帰で表されることを示し、二次式による推定式を示した。さらに、熱伝導解析の偏微分方程式の解が二次式となることから二次の回帰を試みた。

従って、破壊及び非破壊の両方法によりコンクリート内部の受熱温度を正確に推定し、部材の残存耐力を算定し、コンクリート系建物の火害診断手法を提案した。

２．　既往の研究

２．１　火害診断に関する研究

コンクリート系構造物の火害診断に関する研究は、わが国では、第２次世界大戦の戦災による焼けビルの調査から始まった。坂[1]、[2]は精力的に研究を行い、火災を受けたＲＣ

造家屋を診断し、計算により内部温度の推定を試みている。また、藤田[3]は、予め求めたコンクリートの残存結合水率と最高経歴温度との相関曲線を戦災により火害を受けたＲＣ造に応用し、内部コンクリートの最高温度を推定している。その後、原田ら[4]、[5]は、ブリジストン横浜工場のＲＣ造ビルの火害調査を行い、熱応力の推定を試みた。高野[6]は昭和４５年１２月に発生した水戸市中央ビル（ＲＣ造）の大火災の調査で、外側柱にせん断亀裂が発生し、取り壊した例を紹介している。また、岸谷[7]は、コンクリートの化学的変化を調べる方法（Ｘ線回折、CO_2再吸収量、遊離石灰の変化、等）により火害程度の推定を試み、それらを実火災を受けた２、３のＲＣ造建物に応用し、火害調査方法を提案している。藤木[8]は、500℃以上の受熱温度を中性化及びＸ線回折によって確認している。増沢[9]は、材料関係の調査（表面硬度、コア強度、等）及び振動面からの構造躯体の被害の推定を行っている。中村[10]は、加熱による性能劣化を加熱温度600℃までのコンクリートの超音波伝播速度の測定により判定している。徐冷後１ヶ月で強度は最小になると述べている。山田[11]は、材料中を伝播する超音波の詳細な波形解析によって600℃までの内部構造を調べている。太田[12]は、超音波より波長の短いマイクロ波によるコンクリート内部の部分的な品質評価を行っている。一様加熱の場合と温度勾配を持った場合について位相定数で評価し、普通、高強度および超高強度の各コンクリートについて位相定数と残存強度との相関性が極めて良いと結論づけている[13]、[14]。松井ら[15]は、実例を挙げながら、火害を受けたＲＣ造建物の補修方法について述べている。長友ら[16]は、火災による被害度診断手法を提案している。各種被害状況を念頭において、火災規模や部材の温度分布などを理論的に求め、従来の方法を体系化した。補修方法についても述べている。荒井[17]は、ＲＣ造建物内の断熱材の燃焼により、火災が拡大した事例について、材料調査、火害温度の推定を行い、その建物の診断と補修方法を具体的に述べている。

また、外国では、Francis Placido[18]は、熱ルミネッセンスの技術を用いて、火害を受けたコンクリート中の砂のサンプルから300℃～500℃の範囲の温度推定方法を提案している。A. K. Tovey[19]は、1978年以来の火害診断方法の実状と評価方法の変化を加味し、改良点の提案の概要を示すとともに、補修方法について述べている。Richard A. Muenow[20]は、パルスエコー、磁気、超音波による非破壊試験方法を現場コンクリートの補修方法に用いている。K. Kordina[21]は、普通コンクリートについて、非定常温度条件下におけるクラックの成長と変形性状との関係を調べるために、全体の変形及びアコースチックエミッションを測定した。CIB W14 Report[22]では、1990年までの研究を概括し、火害診断と

補修方法についてまとめられている。

２．２　コンクリート内部温度推定（計算）に関する研究

火災時におけるコンクリート系構造部材の内部温度分布を計算により推定する方法は、種々提案されているが、簡便な方法として、藤井[23]による解析手法、若松[24]による積分法（簡易計算法）がある。また、より詳細な計算手法として、差分法を用いた数値解法が川越[25]、若松[26]、[27]により示されている。これらはいずれも、コンクリート系部材に限定したものではなく、ほとんどがＳ造の耐火被覆材料としてコンクリート系材料を用いた場合に関するものであるが、これらの解法を応用すると、コンクリート系部材にも使用できるというものである。川越，若松のモデルは比較的簡易に構造体の温度予測ができるため、広く用いられている[28]。小原[29]は解析解による方法と差分方程式を用いた数値計算による方法を比較している。ヨーロッパにおいても同様に、本来耐火被覆された鉄骨部材の温度応答を得るために開発された手法を、Pettersson[30]はコンクリート系部材にも拡張している。計算機が発達した今日では、有限要素法による定式化も行われている[31]。また、最近では、熱及び水分同時移動を考慮したコンクリート系部材の場合について、原田[32]は積分方程式を用いて内部温度を推定している。

２．３　コンクリート系部材の残存耐力に関する研究

合成構造も含めたコンクリート系構造部材の火災後の残存耐力に関する研究はほとんど見受けられない。また、ＲＣ造部材の残存耐力に関する研究は、さらに少ない。Chienら[33]は、ＲＣ柱部材の火災後の残存耐力を、黒岩ら[34]は高強度ＲＣ柱の加熱試験後の残存耐力を、それぞれ調べている。高幣ら[35]は、ＲＣ造集合住宅の実大火災実験後の床の載荷試験を行っている。田中[36]は、火害を受けたＲＣ造建物の耐震性について調べている。また、池田ら[37]は、プレストレストコンクリート梁の加熱後の曲げ耐力を調べている。さらに、池田ら[38]は、CFT柱の耐火試験後の残存耐力を調べている。

３．　本論文の構成及び概要

筆者は現在、防耐火構造試験・研究業務に従事しており、これらの業務を通して、火災に対する認識を新たにし、建物の火害後の方策が重要な課題と考えられるようになった。

本研究はコンクリート系部材に関して合理的な火害診断手法を提案するものである。

本論文は、序論、第１編、第２編、第３編、結論及びAppendixで構成され、各編の内容を以下に梗概する。

３．１　序論

本研究の背景、目的及び範囲について梗概した。

３．２　第１編：火害を受けたコンクリートの受熱温度推定に関する研究

第１章「火害を受けたコンクリートの受熱温度推定方法の提案」では、火害を受けたコンクリートの受熱温度の推定方法を提案した。すなわち、コンクリート中に含まれる混和剤に着目し、火害を受けたコンクリートのＵＶスペクトル分析を行い、リグニン系混和剤を用いたコンクリートの受熱温度を推定した。

第２章「火害を受けたコンクリートの受熱温度推定方法の検証」では、第１章で提案した受熱温度推定方法を確立するため、その妥当性を検証した。その内容は、①加熱試験による測定温度と推定温度との比較、②燃焼排ガスが推定方法に与える影響、③実火災への適用、④ナフタリン系混和剤を用いたコンクリートの推定方法の提案、である。

３．３　第２編：火災後のコンクリート系部材の受熱温度分布及び残存耐力の推定に関する研究

第１章「火災時におけるコンクリート系部材の内部温度特性」では、火害診断を的確に行うための基礎資料として、合成床版を取り上げ、火災時におけるコンクリートの内部温度特性を把握した。コンクリート内部温度に与える種々の要因を検討するため、複合板を用いて基礎的な実験を行った。さらに、実際の合成床版の耐火試験より、断面形状、コンクリートの種類の違い等が内部温度に与える影響について考察を加えた。最後に、火災時におけるコンクリート系区画部材の内部最高温度分布を回帰分析した。

第２章「火災後における鋼管コンクリート柱の残存耐力」では、耐力部材として、柱を取り上げ、CFT柱部材について、簡易な計算シミュレーションを用い、非破壊による内部最高温度を予測する方法を提案した。筆者らの提案した計算方法を実験値と比較・検証した上で、火災後のCFT柱部材の残存耐力を推定し、計算法の妥当性を検証した。また、実大部材へ適用した。

第３章「火災後におけるコンクリート系区画部材の受熱温度及び残存耐力の推定」では、区画部材を取り上げ、第２章で提案した計算方法を応用し、コンクリート系区画部材の受熱温度分布を計算した。その計算値を実験値と比較し、計算方法の妥当性を検証した。さらに、区画部材の受熱温度分布の推定式を開発するために、部材の断面方向の受熱温度分布を非線形回帰分析した。また、受熱温度分布の推定式より火災後の部材の残存耐力を推定した。

３．４　第３編：コンクリート系部材の火害診断手法の提案

本編では、コンクリート系部材の火害診断手法を提案し、その概略について述べた。具体的な手法については触れずに、予備診断、一次診断及び二次診断に関して診断方法の道筋を述べた。また、診断方法及び補修方法の実施例を紹介した。さらに、火害を出来るだけ最小限に食い止めるためには、施工するコンクリートに対して充分な配慮が必要であり、本研究の成果を基にコンクリート系部材の火害の減少対策についても提案した。

３．５　結論

本研究結果についてまとめると共に、今後の課題について述べた。

３．６　Appendix：阪神淡路大震災におけるコンクリート系材料を使用した建物の火害特性

阪神淡路大震災に見られる大地震を想定した火害診断方法を確立する必要がある。そのための基礎資料とするため、本震災によるコンクリート系部材の火害特性の調査をした結果を述べた。

第１編　火害を受けたコンクリートの受熱温度推定に関する研究

第１章　火害を受けたコンクリートの受熱温度推定方法の提案

１．１　はじめに
１．２　コンクリート系構造物の火害診断手法の現状とその問題点
１．３　既往の受熱温度推定方法による検証
１．４　コンクリートの受熱温度推定方法の選択
１．５　ＵＶスペクトル法によるリグニン系混和剤入りコンクリートの受熱温度推定
１．６　まとめ

１．１　はじめに

ＲＣ造建物の火災においては、火災区画内で長時間、火災が継続し、大被害を受ける場合が多い（写真1.1参照）。このような建物を再使用するかどうかの評価は火害の程度によって大きく異なる。火害を受けたＲＣ造建物の調査においては外観上の損傷だけではなく、主体構造部のコンクリートや鉄筋の受熱温度も推定し、各部材の被害度をより正確に診断することが重要である。現在、コンクリートの受熱温度推定方法として理論計算による方法及び化学的手法による方法があるが、いずれの場合もより正確な受熱温度を把握するには有効な手段とは言い難い。そこで、筆者は、コンクリート中に微量に含まれる有機系化合物、すなわち、混和剤の敏感な熱的変化に着目し、コンクリートの受熱温度を推定する方法を提案した。

近年、建築物の使用性が大いに変化しているが、本方法のメリットは計算による方法と違い、どのような火災外力に対しても、どのような室内条件に対しても、対応が可能なことである。コンクリートのサンプルから直接に受熱温度、すなわち、火災最高温度を評価できることである。

１．２　コンクリート系構造物の火害診断手法の現状とその問題点

１．２．１　火害を受けたＲＣ造建物の被害度推定方法

火害を受けたＲＣ造建物の評価方法のフローを図1.1[19]に示すが、図中の「被害の評価」の段階の「構造物は安全か？」の判断の際に、各部材の被害度をより正確に診断することが必要である。

現在、火害を受けたＲＣ造建物の主な被害度推定方法には、次に示すものがあるが、それぞれに以下に示す問題点がある。

（１）目視観察[15]、[22]

被災空間の全域について、外観上の被害状況を目視観察する。具体的には、コンクリートの変色、爆裂、ひび割れ、浮き、剥離、変形等を詳細に観察する。概括的な被害等級の分類しかできない。

（２）シュミット・ハンマーによるコンクリートの反ぱつ硬度測定[8]、[22]

シュミット・テスト・ハンマーにより加熱表面の反ぱつ硬度を測定し、加熱表面の圧縮

強度を推定する。表面の反ぱつ硬度しかとらえられず、深さ方向の強度分布は推定できない。また、加熱後の圧縮強度について、シュミット・ハンマーによる既往データが不十分であるため、被害程度の相対的な評価しかできない。

（３）コンクリートの中性化試験[8]、[15]、[22]

コンクリートが500℃以上の加熱を受けると中性化することを利用して、コンクリートのはつり部分にフェノール・フタレイン溶液を噴霧して、中性化深さを測定する。長期間経過したコンクリートについては、中性化の進行が経年劣化によるものか、または火災によるものかの判断が困難である。

（４）コンクリート・コアによる圧縮強度試験[22]

コンクリート・コアを採取して、残存圧縮強度を推定する。しかし、一般にコアは深さ方向で被害度が異なるため、当該部分の残存強度の推定は困難である。

（５）超音波による加熱劣化測定[22]、[39]、[40]

コンクリートの両面で超音波の透過時間を測定し、劣化状況を調べる。部材の全厚に対する平均透過時間しか求められないので、深さ方向の劣化状況の把握は困難である。

（６）マイクロ波による劣化診断[12]

コンクリートのマイクロ波の特性値（減衰定数及び位相定数）を調べ、高温時の劣化度（残存強度）を把握する。深さ方向の劣化状況の分布の把握は困難である。また、コンクリートの含水率によって測定誤差が生じる。

（７）熱ルミネッセンスによる方法[18]

火害を受けたコンクリートから採取された砂の中に残された熱ルミネッセンスを測定し、劣化状況を調べる。電子の移動に関わる測定となるため、高度な測定技術を要し、実用には供しない。また、コンクリートの受熱温度を500℃であるかどうかの判断しか出来ない。

以上、７種の診断方法を示したが、これらの方法はいずれも、コンクリート部材の深さ方向に対する正確な劣化状況の情報を与えるものではない。より正確な診断のためには、主体構造内部のコンクリートや鉄筋の受熱温度を的確に推定することが必要になる。

１．２．２　コンクリートの受熱温度推定方法

現在、主に用いられているコンクリートの受熱温度推定方法には、次に示すものがある。

（１）化学的手法による方法[7]－－－コンクリートの中性化深さの測定、炭酸ガス・遊離石灰量の分析、示差熱重量分析及びＸ線回折法等により受熱温度を推定する。

（２）理論的計算による方法[41]－－－火災室内の寸法・形状、可燃物量（内装材料及び積載物の種類と量）及び窓等の開口条件を設定し、火災性状を予測し、内部温度を計算する。

（３）火害状況より求める方法－－－消防署資料、火災室内の使用材料の燃焼特性及び桟木等の木材の炭化深さ・炭化速度より火災性状（火災継続時間及び火災最高温度）を推定し、さらにコンクリートの変色状況よりコンクリート表面温度の推定を行なった上で、内部温度を計算する。

上記の方法には、次に示す問題点がある。

（１）無機物質の場合、消火時の放水等により化学的変化が火害を受ける前の状態に戻ることがある。推定温度が800℃程度と高い、等いずれの場合も実用面で有効な方法がない。

（２）実火災の性状を正確に把握することは困難であり、また、火災前の火災室内の条件を正確に把握出来ないことが多い。コンクリートの内部温度は加熱時間及び加熱温度によって大幅に異なり、火災規模の適正把握が必要となる。

（３）実火災の性状を正確に把握することは困難である。また、コンクリートの微妙な変色状況の判断も容易ではない。

１．３　既往の受熱温度推定方法による検証

１．３．１　概要

前述のように、火害を受けたコンクリートの受熱温度推定方法には、化学的手法が従来、提案されている[7]。ここでは、酸化カルシウムの定量分析、示差熱分析及びＸ線回折を取り上げ、これらの方法が実際の火害を受けたコンクリートに適用が可能か検証した。

１．３．２　酸化カルシウム（CaO）の定量分析

各温度（100℃、300℃、400℃、500℃及び600℃）に加熱したコンクリート中のセメント量を知るため、酸化カルシウム（CaO）の定量分析を行った。試料を塩酸(1+1)にて加熱分解した後、濾過し、定容とした試料溶液を標準添加法により原子吸光にて定量とした。その結果、図1.2のように酸化カルシウム（CaO）と受熱温度の関係は一部を除いて、ほぼ直線関係となる。実際には、酸化カルシウム（CaO）は吸水性が強く、火害を受けたコンクリートは(1.1)式の反応により可逆反応を起こすと考えられる。

$CaO+H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$ (1.1)

また、消火による注水によりこの反応がさらに増長されるため、図1.2の関係は吸水により成立しなくなる。従って、火害を受けたコンクリートのサンプルからは正確な受熱温度を推定することは実際上、不可能と考えられる。

１．３．３　示差熱分析

各温度（400℃、500℃及び600℃）で加熱し、大気に３日間放置したコンクリートの示差熱重量分析（TGA、DTA）の関係を図1.3～1.5に示す。その結果、重量分析（TGA）においては、各温度時の重量減少の特異性が見出せないため、TGAからは、温度推定を試みることは困難である。また、示差熱分析（DTA）からは450℃前後、570℃前後で吸熱反応が生じる。450℃前後の吸熱反応は、(1.2)式で表される。

$Ca(OH)_2 \rightarrow CaO+H_2O$ (1.2)

この反応も、吸水により可逆反応を起こし、元の状態に戻る。すなわち、図1.5に示すように、600℃に加熱後、大気放置したコンクリートでも450～470℃で吸熱反応を起こしている。そのため、この傾向を利用して、受熱温度を推定することはできない。

１．３．４　Ｘ線回折

各加熱温度（110℃、300℃、500℃及び600℃）におけるコンクリートのＸ線回折を行った。Ｘ線回折計（Ｘ線ディフラクトメーター）を用い、測定した。その結果を図1.6～1.9に示す。４種類の結晶物質（石英（Quartz,SiO_2）、長石（Feldspar）、方解石（Calcite,$CaCO_3$）、ポルトランダイト（Portlandite,$CaO \cdot H_2O$））の同定を実施した。図中には各記号（○--石英、□--長石、◇--方解石、△--ポルトランダイト）で記してある。その結果、各結晶物質の温度変化による傾向は認められず、明確な差をつかむことはできない[7]。Ｘ線回折では受熱温度を推定することは無理と思われる。

１．４　コンクリートの受熱温度推定方法の選択

１．４．１　ＵＶスペクトル法の採用

（１）混和剤

混和剤の組成の種類はリグニンスルフォン酸系（以下、リグニン系と呼ぶ）、ナフタリ

ンスルフォン酸系（以下、ナフタリン系と呼ぶ）、メラミンスルフォン酸系、天然樹脂酸系及びオキシカルボン酸系である。現在、混和剤としては、減水剤が主に用いられ、その中では、リグニン系混和剤を使用するケースが最も多く、ナフタリン系混和剤がこれに次ぐ。これらの混和剤は２つ以上の二重結合が単結合を挟んだ共役二重結合（例えば、ブタジエン（CH_2=CH-CH=CH_2）、ベンゼン、等はその代表的なものであり、通常、ベンゼン環あるいはナフタリン環を有している（図1.10参照））を有する有機系化合物である。

（２）ＵＶスペクトル法

化学分析においては、目的成分に対しては最も感度が高く、かつ目的外の共存成分の構造に対しては逆に低感度であるような方法を選定することが重要である。両成分に対する感度差が小さい場合には反応により差を大きくするか、分離操作により他成分の影響を排除する等の前処理が必要となる。ガスクロマトグラフィー、液体クロマトグラフィー等の一連のクロマトグラフィーが分離を主内容とする分析法であるのに対して、吸光分析法は予め適切に分離された試料についての定性的確認に最も有効な方法である。

有機系化合物の化学構造の研究においては、官能基の種類と数を知ることが必要なので、一般には、官能基に対してシャープな吸収帯を示す赤外吸収スペクトルが一般的に利用される。これに対して、ＵＶスペクトルは共役系のある有機系化合物について、それぞれの官能基ではなく、その共役系全体を知るという方面に利用されている[42]。従って、筆者は、混和剤が共役二重結合を有する有機系化合物であるため、ＵＶスペクトル法の採用を検討したものである。筆者が採用したＵＶスペクトル法は、可視光線（波長：400～800nm）より短い波長の紫外線（波長：200～400nm）を有機系化合物に照射して、その光線の吸収の大小（以下、吸光度Aと呼ぶ）と波長の関係を連続的にスペクトルとして描くものである。実際には、分光光度計を用いて、一方の石英セルに試料を入れ、他方のセルに溶媒を入れて、通過する平行単色光における入射光強度I_0、各セルの透過光強度I_1、I_2をそれぞれ測定することにより、(1.3)式より吸光度Aを求めることができる[43]（図1.11参照）。

$$A=\log(1/T)$$
$$=a\cdot c\cdot l \qquad (1.3)$$

ここで、T:透過率（=I_2／I_1）、

a:吸光係数（1/cm）、

c:濃度

l:吸収層（セル）の厚さ（cm）

(1.3)式で、試料の吸光係数aを一定とすれば、試料の濃度cにより吸光度Aが変化することが分かる。そこで、筆者は混和剤の上記の性質に着目し、温度履歴を経たコンクリートの吸光度の変化を調べることにした。

本推定方法の利点としては、以下に示す内容が挙げられる。

1）混和剤は、水による化学的変化はなく、熱により熱分解するのみであるので、受熱温度の推定にとって有利な手法である。従来用いられている化学的手法[9]は水及び熱の両方による化学反応を起こすため、推定は困難である。

2）図1.12は、リグニン系混和剤の熱特性を調べる目的で、示差熱重量分析（DTA、TGA）を行なった結果である。約200℃から発熱反応による重量減少が始まり、約500～600℃で収束する。これは約200℃から混和剤の熱分解反応が起こり、約500～600℃でほぼ反応が終了するためである。この結果より、ＵＶスペクトル法により、鉄筋やコンクリートの使用可否の目安となる常温から600℃までの温度範囲において推定の可能性があることが分かる。

3）有機化合物のうち共役二重結合を有する化合物は吸光度が非常に大きいので、微量あるいは低濃度でも定量が可能である。一方、コンクリートの主構成材である無機物質は紫外線吸収がほとんど認められない。

従って、以上の理由により、分析にあたっては、ＵＶスペクトル法を採用した。すなわち、火害を受けていないコンクリートを各所定の温度に加熱し、吸光度の変化を調べ、それに火害を受けたコンクリートの吸光度を当てはめ、受熱温度を推定する方法を用いた。

１．４．２　コンクリートのＵＶスペクトル特性

（１）リグニン系混和剤のＵＶスペクトル特性

図1.13は、リグニン系混和剤を水に溶解した液（試料濃度：21.3mg/l、2.1mg/lの２種）の波長250～400nmにおける波長と吸光度の関係（以下、吸収曲線と呼ぶ）を求めたものである。試料濃度が小さくなると、吸光度は波長全域にわたって、小さくなることが分かる。また、混和剤の試料濃度が2.1mg/lという低濃度でもＵＶスペクトルの測定が可能であることが分かる。

（２）混和剤混入コンクリートのＵＶスペクトル特性

図1.14はリグニン系混和剤（セメントに対する標準使用量：0.25％）を添加したコンクリートを110℃より600℃まで100℃ごとに加熱した吸収曲線である。なお、この時の試料濃度は、5mg/lである。履歴温度110℃における吸光度は約340nmでピークを示した。また、履

歴温度の上昇とともに吸光度は全波長域にわたり減少し、履歴温度500℃以上ではほとんど変化しないことが分かる。

（３）混和剤無混入コンクリートのＵＶスペクトル特性

図1.15は混和剤が混入されていないコンクリートの履歴温度110℃及び500℃での吸収曲線である。混和剤混入の場合と異なり、波長約340nmにおける吸光度のピークは現れない。また、履歴温度が上昇しても、吸光度の減少はわずかである。ここで、火災にあったＲＣ造建物において、実際に混和剤が混入されていなかった非火害部分のコンクリート・コアの吸収曲線を図1.16に示す。図1.15と同様な傾向を示し、吸収のピークが現れていない。従って、混和剤の混入の有無が吸収曲線に大きな差を生じさせることがわかる。

（４）無機イオンの影響

混和剤は有機系化合物を含むため、通常、約400～500℃で燃焼し、無機イオンも生成される。その無機イオン（主に炭酸イオン、硝酸イオン、硫酸イオン、塩素イオン及びりん酸イオン）がＵＶスペクトルを用いた本推定方法に与える影響を調べるため、それらのＵＶスペクトルを分析した。50mmの石英セルを用いて、標準側のセルには水を入れ、波長200～400nmのＵＶスペクトルを測定した。無機イオン溶液は次のように作成した。

１）炭酸イオン（CO_3^{2-}）

試薬特級炭酸カリウム（K_2CO_3）1.1518gをはかり取り、水に溶かしてメスフラスコ1㍑に入れ標線まで加えた。

この溶液のCO_3^{2-}濃度は(1.4)式となる。

$$CO_3^{2-}(mg/l)=(CO_3^{2-}\text{分子量})\cdot(\text{秤取した}K_2CO_3)/(K_2CO_3\text{分子量}) \quad (1.4)$$

$$=59.198\times1.1518\times1000/138.21$$

$$=500$$

２）硝酸イオン（NO_3^-）

以下、同様に硝酸カリウム（KNO_3）にて作成した。

３）硫酸イオン（SO_4^{2-}）

硫酸カリウム（K_2SO_4）にて作成した。

４）塩素イオン（Cl^-）

塩化ナトリウム（NaCl）にて作成した。

５）リン酸イオン（PO_4^{3-}）

リン酸１カリウム（K_2H_2PO）にて作成した。

なお、無機イオン溶液の濃度はすべて500mg/lとした。その結果、図1.17に示すように硝酸イオンを除いた他のイオンは250～400nmにおける波長域の吸光度はほぼ0に近い値であった。硝酸イオンについては、波長260nmで最小の値を示した。波長260nmにおける無機イオンの常温での吸光度を表1.1に示す。実際、コンクリート中には濃度5mg/lの混和剤が添加されている（標準使用量0.25%の場合）。その混和剤が燃焼により熱分解するため、生成される無機イオン濃度は表1.1に示す値よりも大幅に小さくなり、吸光度は極めて小さくなる。従って、無機イオンの影響はさらに少なくなり、無視できるものと考えられる。

（５）波長の選定

コンクリートの受熱温度推定にあったては、①履歴温度と吸光度との間に明確な因果関係のあること、②燃焼にともなう無機イオンの影響を出来る限り排除すること、の２点が必要である。そこで、本推定方法では、この２点を満足する波長260nmにおける吸光度を採用することとした。

なお、本手法を長期材令のＲＣ造建物に適用する場合には、リグニン系混和剤の経年変化が懸念されるが、有機系材料である混和剤が単体の場合には、化学的変化を起こし、経年変化を生じる。しかし、混和剤が無機物質であるコンクリート中に含まれている場合には、本推定方法に有害な化学的変化を与えず、経年変化（主に、紫外線劣化）もしないので[44]、本手法を長期材令のＲＣ造建物に適用するのには差し支えない。

１．５　ＵＶスペクトル法によるリグニン系混和剤入りコンクリートの受熱温度推定

１．５．１　概要

混和剤のうち、現在、リグニン系混和剤が約８割以上用いられている。そこで、リグニン系混和剤入りコンクリートについて受熱温度推定方法を確立するための実験を実施した。ＵＶスペクトル法を用い、履歴温度と吸光度の関係を把握するとともに、①混和剤の添加率の違いが吸光度に明確に現れるか、②試料粉末の採取段階におけるセメントペーストの含有量の差違が測定結果にどのような影響を与えるか、を調べた。なお、本実験では、以下の理由によりポゾリスNo.70（日曹マスタービルダーズ社製）を用いた。

（１）実用面で広く使用されている。

（２）有機化合物であり、熱的に敏感である。熱分解が低温域（約150℃～）でも起こり、また、温度差が約50℃と小さくとも、分解差が生ずる。

（３）水に溶解し、抽出が容易である。

ポゾリスNo.70は無塩化物タイプのＡＥ減水剤である。主成分はリグニンスルフォン酸化合物およびポリオール複合体である。リグニンスルフォン酸化合物の分子構造は図1.10に示した。また、ポゾリスNo.70の示差熱重量分析（DTA、TGA）測定結果を図1.18に、２種類の濃度のポゾリスNo.70（110℃乾燥）のＵＶスペクトル測定結果を図1.19にそれぞれ示す。

１．５．２　実験方法

（１）測定用試料の作成

表1.2に示す２種類の調合（混和剤の使用量は標準使用量とその２倍の量）に基づいて、リグニン系混和剤を用いたコンクリート試験体（寸法：300mm×300mm×40mm）を作成した。試料の作成手順を以下に示す。

１）７日以上気乾養生させた試験体を150mm×40mm×40mmの形状の試験片に切断した。

２）上記試験片を電気炉内にて30分で各所定温度（110℃、300℃、400℃、500℃及び600℃）まで昇温し、60分間所定温度で加熱した。

３）加熱終了後、試験片を砕石が現状のまま残る程度に粉砕した。フルイのサイズにより採取される試料中のセメント・ペースト量を違えるため、10mesh及び35meshのフルイにて通過した部分を振動ミルにて微粉末（粒径：5～10μm）とした。なお、フルイ目が細かいほど、セメントペースト量は多くなっている。

４）試料粉末25gに純水100mlを加えて120分間煮沸した後、5Cろ紙を用いて吸引ろ過し、ろ液を試料溶液とした。なお、試料の種類は表1.3に示す４種類である。

（２）ＵＶスペクトルの測定

前述の試料溶液を分光光度計（UV-200、島津製作所製、写真1.2参照）に装着し、波長域200～400nmにおけるＵＶスペクトルを求めた。

１．５．３　実験結果及び考察

図1.20に波長260nmにおける履歴温度と吸光度との関係を示す。図1.20より混和剤の添加率が多いほど、また、フルイサイズが小さいほど、吸光度が大きくなることが分かる。混和剤の添加率及びフルイサイズに関わらず、履歴温度100～500℃の範囲では、概ねリニアーな関係となり、履歴温度が高くなるにつれて、吸光度は小さくなる傾向が認められた。

１．５．４　推定精度向上の検討

図1.20の結果から、実用面への適用を考えると、次の３点に関して、推定精度に問題があると考えられる。①履歴温度と吸光度の関係で直線上から逸脱する箇所がある、②混和剤の添加率の差が明確に現れていない箇所がある（試料記号:ＢとＣの300℃～600℃の部分）、③図1.12に示す混和剤の熱分解の過程から分かるように、吸光度は200℃までは一定となり、500℃以上では、混和剤が完全に熱分解するため、混和剤の添加率に関係なくほぼ同一の値とならねばならない。従って、履歴温度と吸光度の関係は模式的には図1.21のようにモデル化される。上記①～③の主な原因として次の３点を考えた。

ａ.試料抽出液の炭酸化による白濁・・・抽出液中に溶解しているセメント中のカルシウムイオン（Ca^{2+}）と大気中の炭酸ガス（CO_2）の反応により水不溶性炭酸カルシウム（$CaCO_3$）が生成され、抽出液中に濁りを生じるため、真の値よりも吸光度が相当増加する。

ｂ.混和剤のセメントに対する吸着・・・混和剤自身がセメントに対し吸着性がある。特に加熱温度が低いほど吸着性は高い。そのため、混和剤の抽出量が少なくなり、吸光度が真の値よりも減少する。

ｃ.試料採取量・・・試料採取量が多くなるほど、その中に含まれるセメント量も増える。そのため、ｂ.と関連して、混和剤の抽出処理が容易でなく、抽出量が少なくなり、吸光度が真の値よりも減少する。なお、図1.22には試料の採取量を1gから25gまで変化させ、それぞれ煮沸抽出した後、波長260nmにおける採取量1g当りの吸光度を求めた結果を示す。

上記、ａ.～ｃ.の３点の原因を取り除くために、次のような方法を採用した。

ａ.については、抽出液を塩酸酸性（pH1.6）とし、水不溶性炭酸カルシウム（$CaCO_3$）を分解し、濁りをなくした。

ｂ.については、水による煮沸抽出の効率を高めるため、同一試料を数回繰り返し煮沸抽出を行ない、混和剤の抽出量を増した。

ｃ.については、図1.21より、採取量としては1g当りの吸光度が最大となる量、3gを採用することとした。

上記の方法を採用し、推定精度の向上を図った結果、履歴温度と吸光度の関係は図1.23に示す一例のように、200℃～500℃までほぼ直線関係となった。これを回帰分析した結果、実験値に対する直線の相関係数は0.995となり、非常に良く一致した。図1.23の結果のばらつきは、履歴温度に対しては±20℃以下である。図1.20と図1.23を比較すると、上記ａ.～ｃ.の原因のうちａ.（炭酸化による白濁）の影響が大きかったと考えられる。すなわち、

加熱温度が低い範囲では吸光度がそのためにかなり大きくなり、100℃～200℃の範囲で一定となっていない。受熱温度推定方法には上記の方法を採用することで、より高い精度の推定が可能となることが判明した。

なお、実際の火害建物に適用する場合には、混和剤の添加率が不明でも、本手法を使用することが出来る。すなわち、最初に、火害を受けていない部分のコンクリートについて、吸光度と履歴温度の関係（検量線）を求める（図1.23参照）。その後、火害を受けたコンクリート・サンプルの吸光度を求め、検量線を用いて履歴温度が求められる。

1．5．5　推定式の誘導

図1.23の吸光度と履歴温度の関係（検量線）より、受熱温度の推定式は(1.5)式～(1.7)式で表わすことができる。

・$A = A_h$の時　　$T \leqq 200$　　(1.5)

・$A_h > A > A_l$の時

$$T = \{(3A+2A_l-5A_h)/(A_l-A_h)\} \times 100 \qquad (1.6)$$

・$A = A_l$の時　　$T \geqq 500$　　(1.7)

ここで、A:火害を受けた採取サンプルの吸光度、

A_h:履歴温度110℃における吸光度、

A_l:履歴温度500℃における吸光度、

T:推定受熱温度(℃)

従って、火害部分の受熱温度は、履歴温度110℃及び500℃における吸光度だけを求めれば、上記(1.5)式～(1.7)式を用いて、火害部分のサンプルの吸光度より推定が可能となる。

1．6　まとめ

本章では、混和剤に着目し、新たなコンクリートの受熱温度推定方法を提案した。得られた結論は以下のように要約される。リグニン系混和剤については、ＵＶスペクトル法を用いることにより、常温から600℃までの受熱温度推定式を提案した。

表1.1　無機イオンの吸光度

イオン名	吸光度	濃度（mg/l）
炭酸イオン	0.00	500
硝酸イオン	0.055	500
硫酸イオン	0.00	500
塩素イオン	0.00	500
リン酸イオン	0.00	500

表1.2　リグニン混和剤混入コンクリートの調合

（セメント100に対する重量比）

セメント（普通ポルトランド）	水	細骨材（砂）	粗骨材（砕石）	混和剤（AE減水剤）
100	50	250	360	0.25及び0.5

表1.3　試料の種類

試料記号	混和剤の添加率(%)（セメントに対して）	フルイ・サイズ（mesh）
A	0.25	10
B	0.25	35
C	0.5	10
D	0.5	35

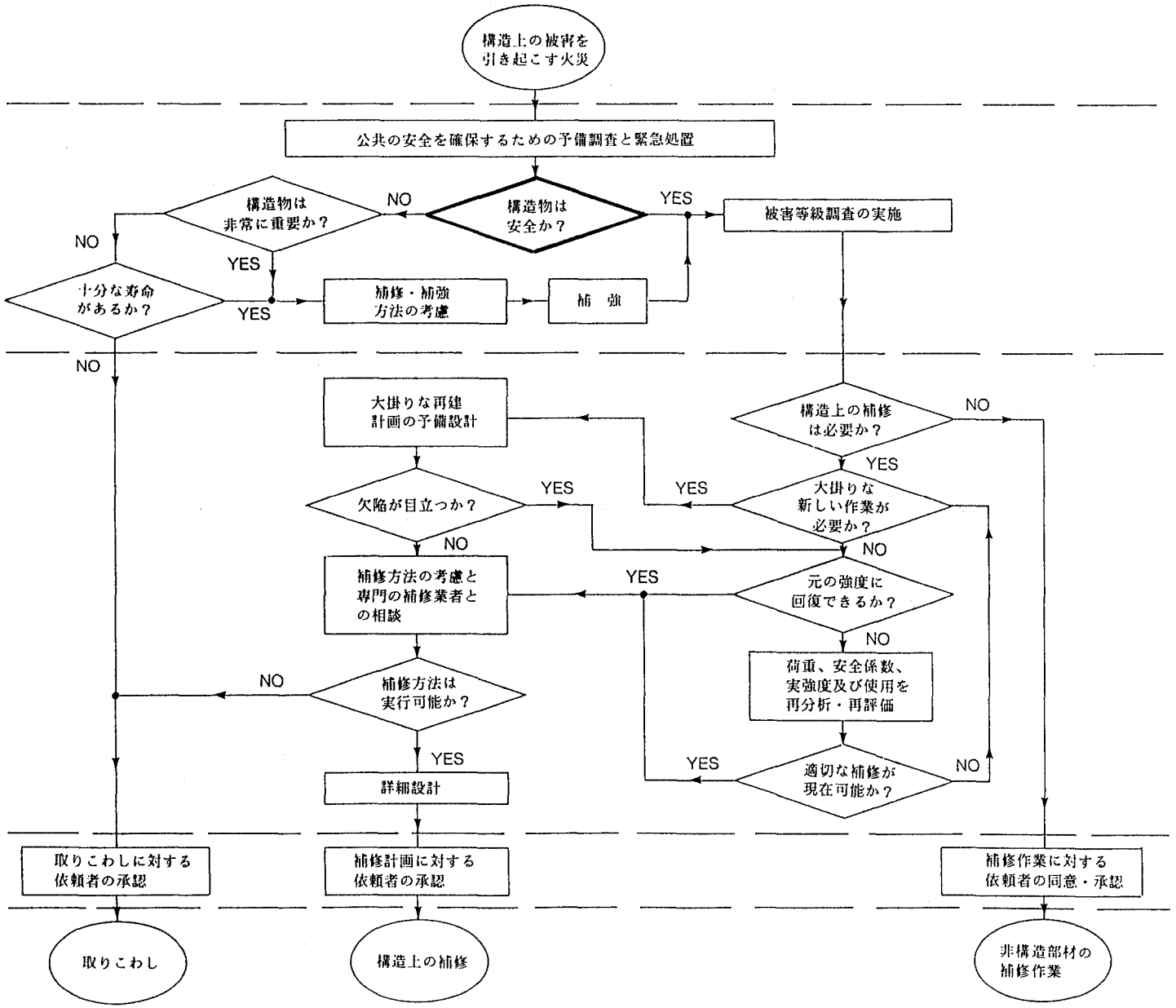


図1.1　火害を受けた構造物の評価方法

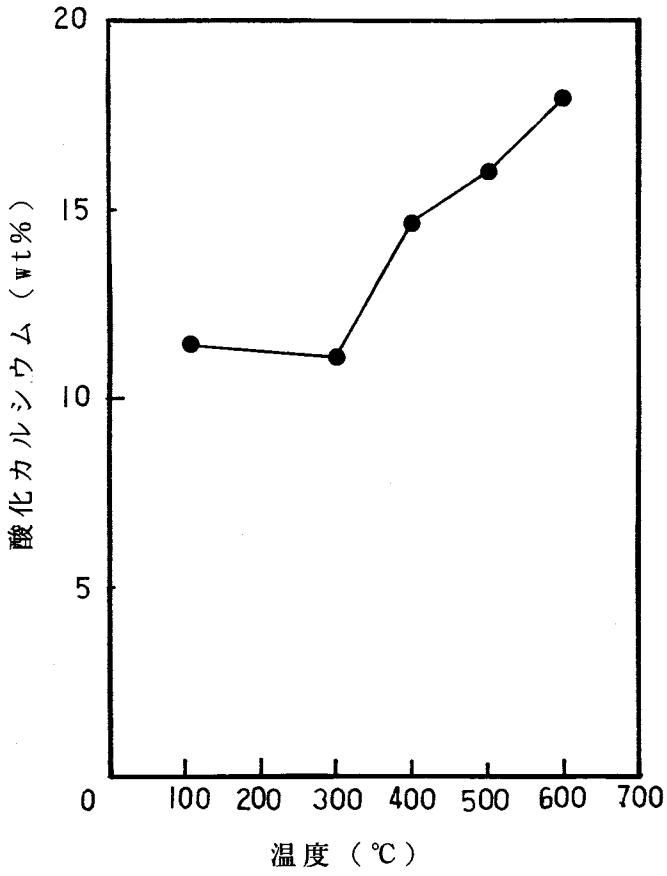


図1.2　酸化カルシウムと受熱温度の関係

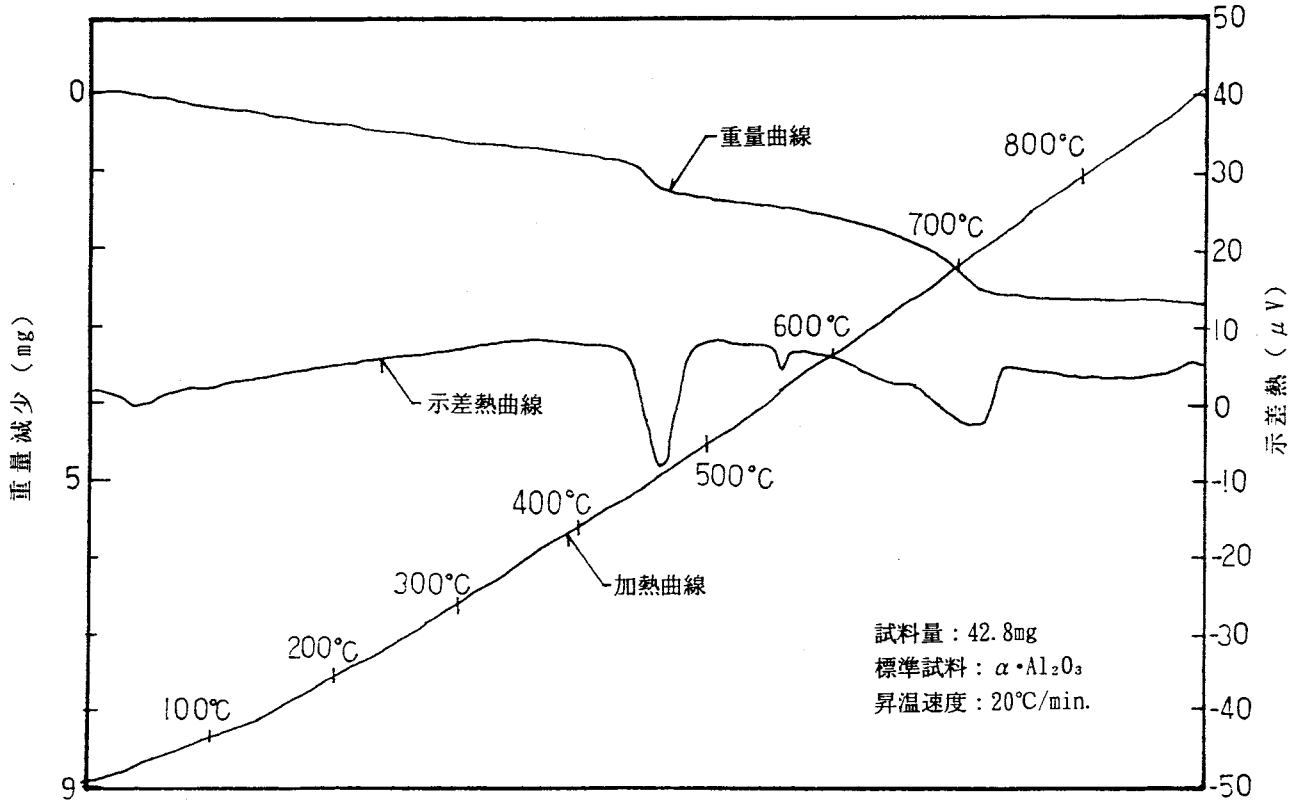


図1.3　コンクリートの示差熱重量分析結果（400℃）

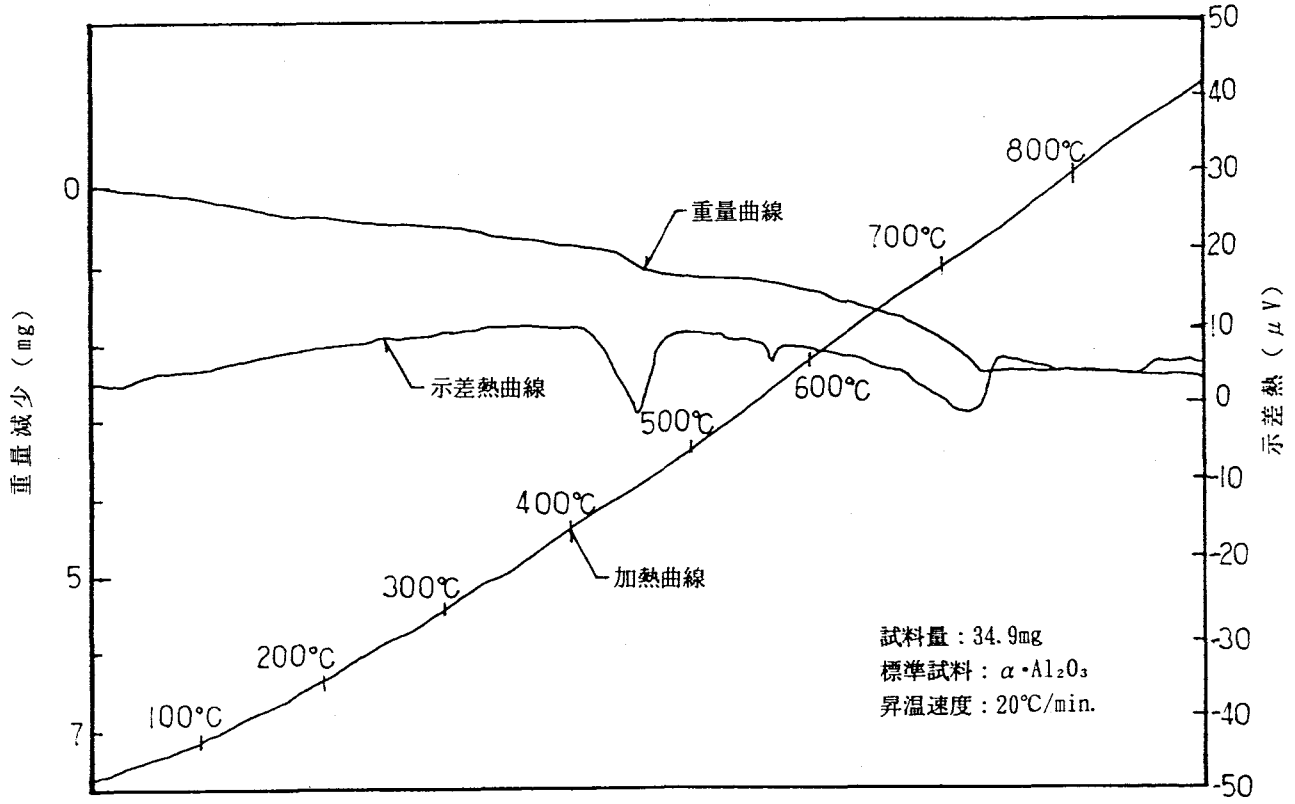


図1.4　コンクリートの示差熱重量分析結果（500℃）

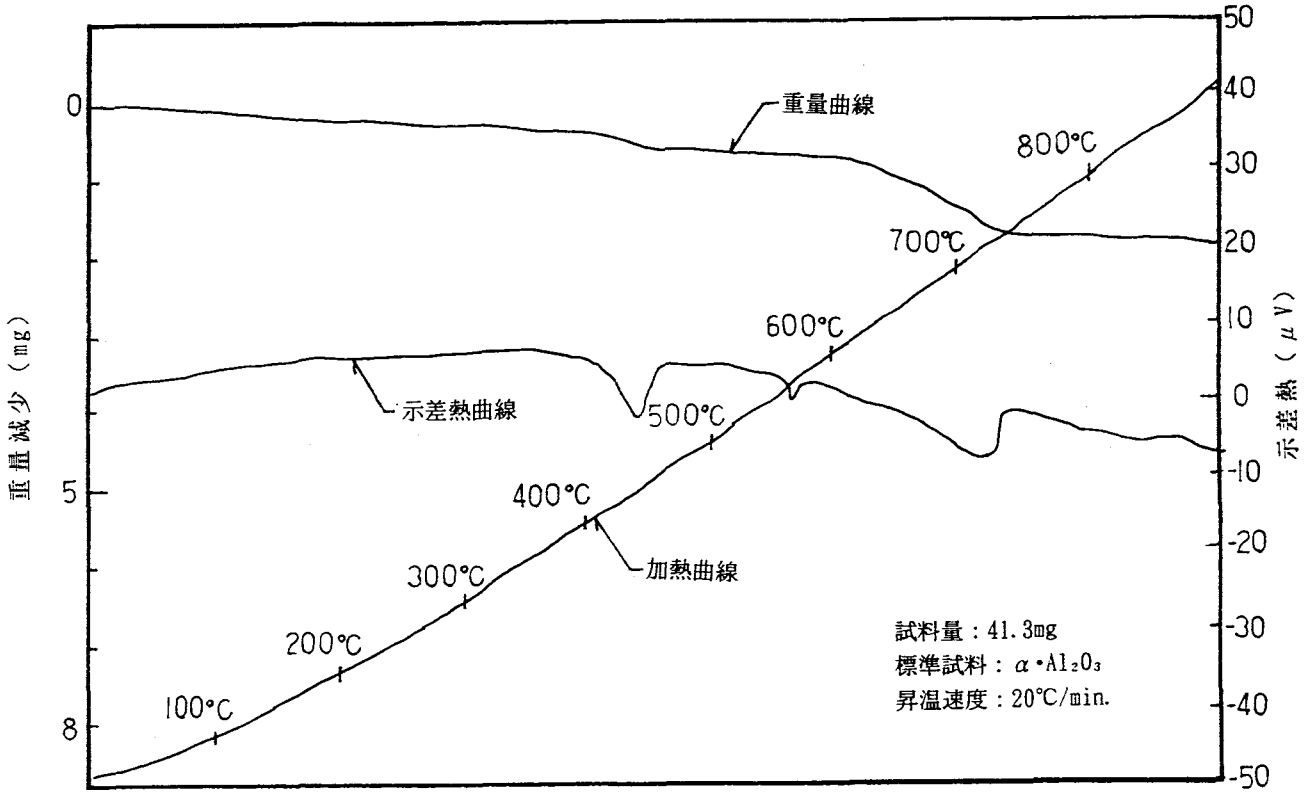


図1.5　コンクリートの示差熱重量分析結果（600℃）

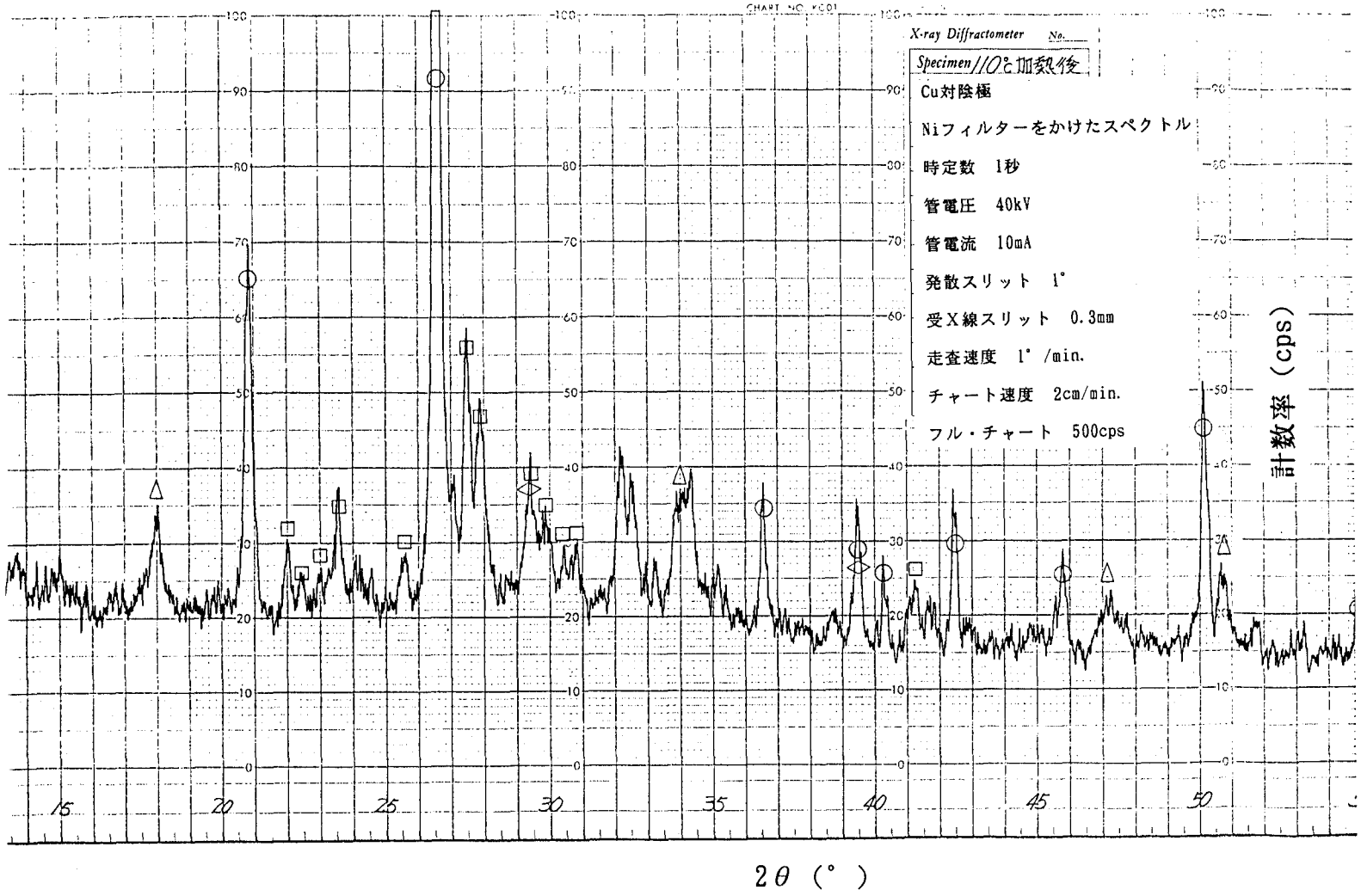


図1.6 コンクリートのX線回折示差熱重量分析結果（110℃）

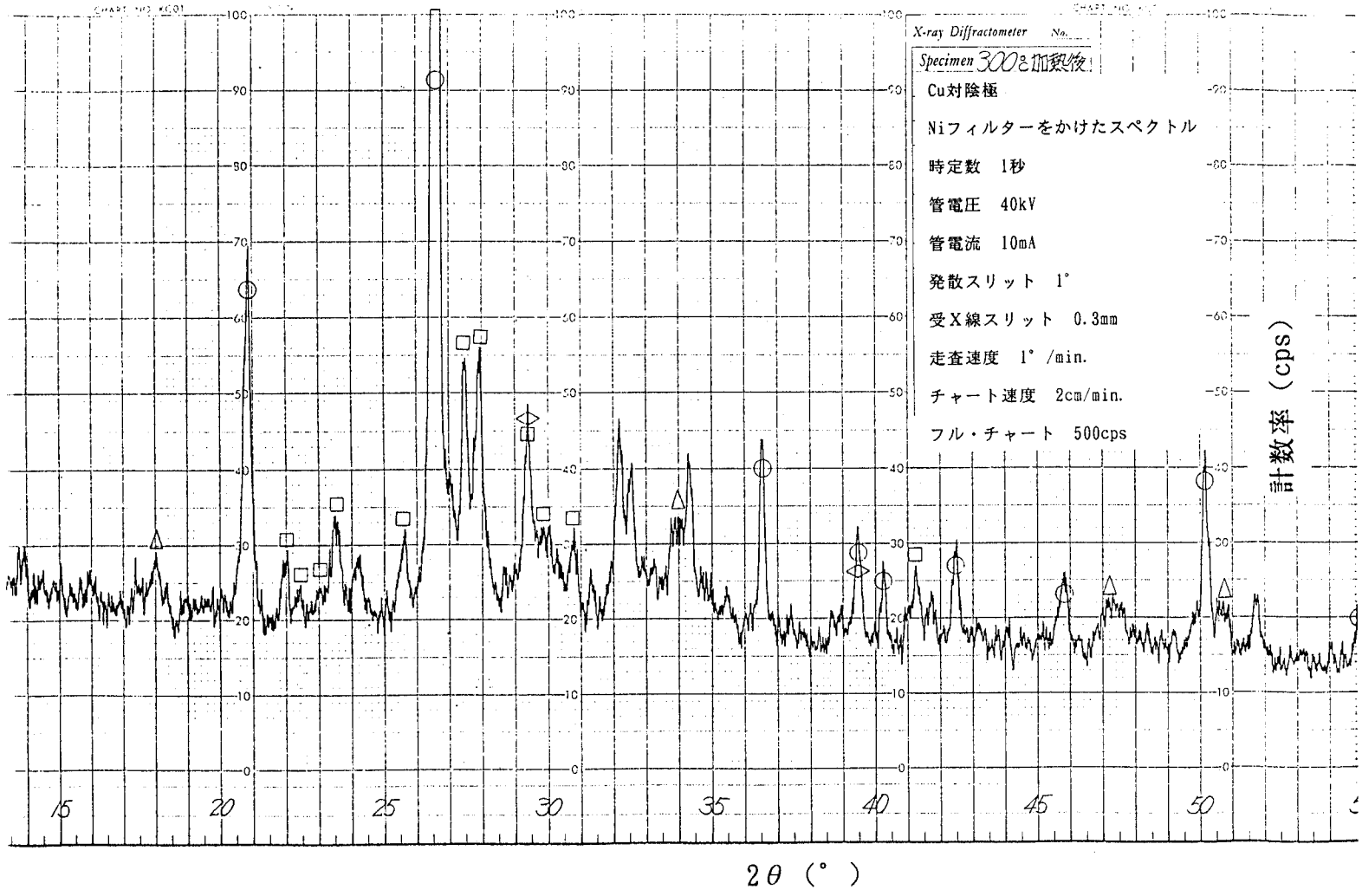


図1.7 コンクリートのX線回折示差熱重量分析結果（300℃）

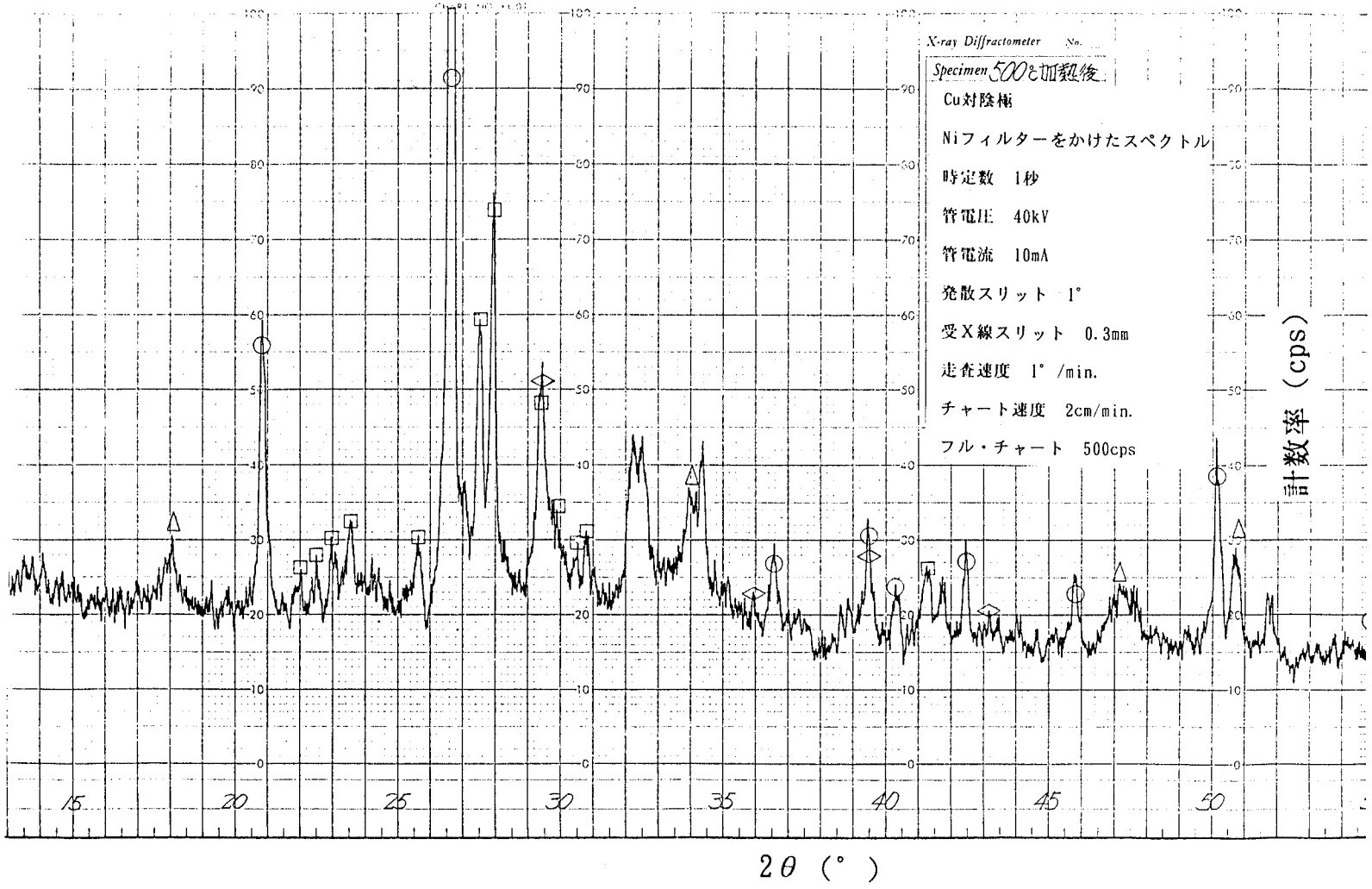


図1.8　コンクリートのX線回折示差熱重量分析結果（500℃）

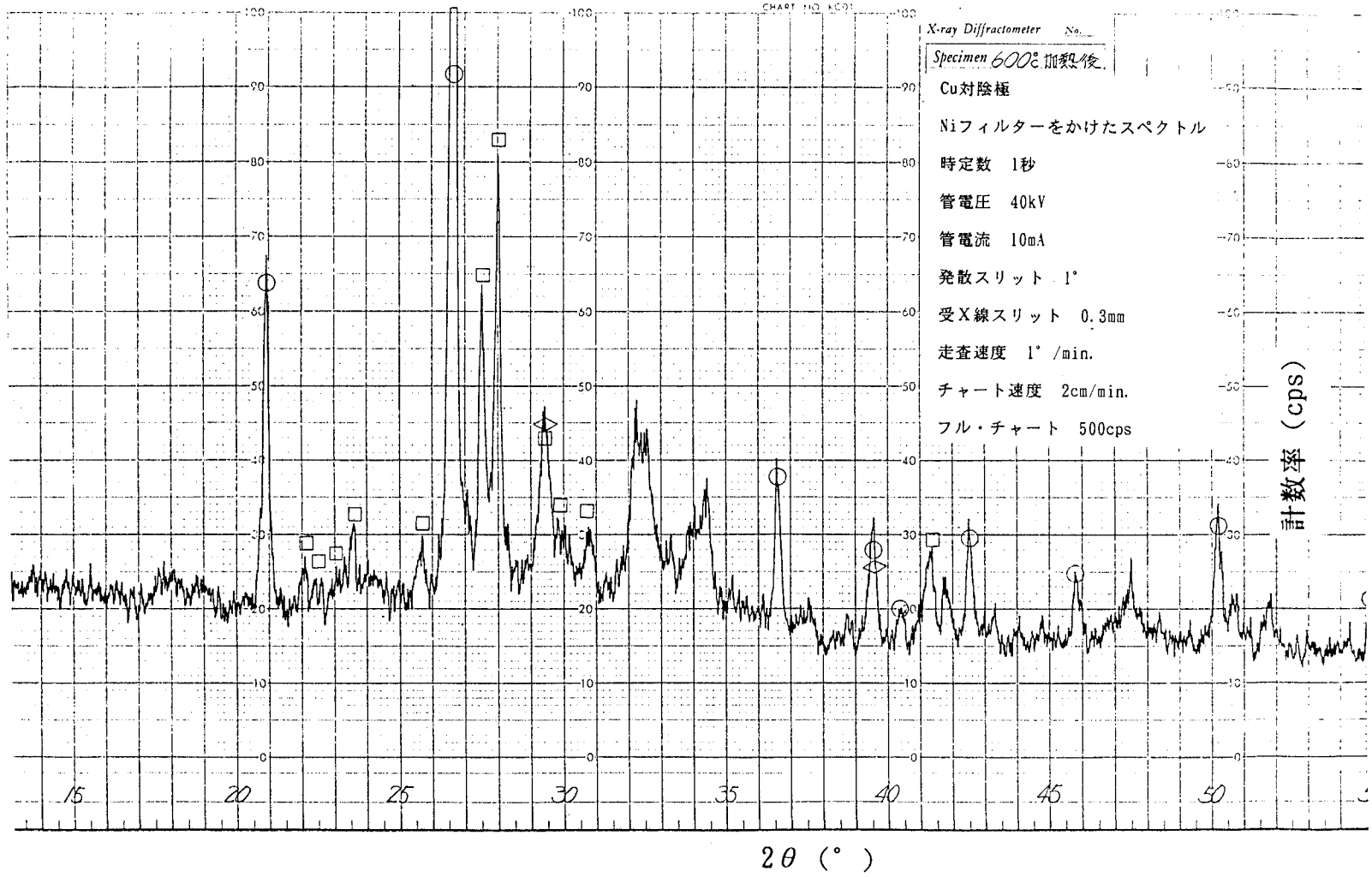
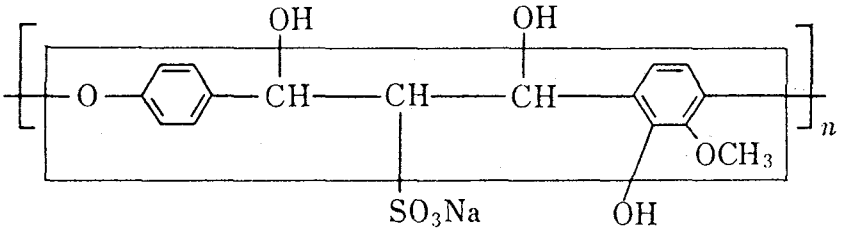
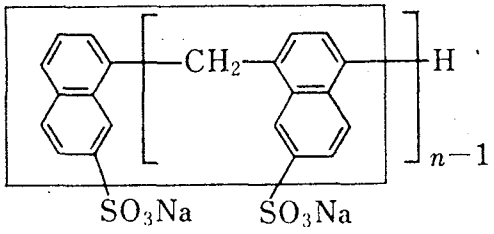


図1.9 コンクリートのX線回折示差熱重量分析結果（600℃）



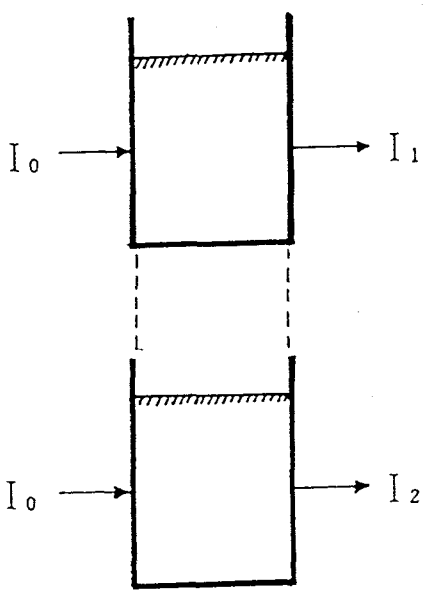
（リグニンスルフォン酸系混和剤）



（ナフタリンスルフォン酸系混和剤）

図1.10　混和剤の分子構造

（標準側セル）



（試料側セル）

図1.11　吸光度

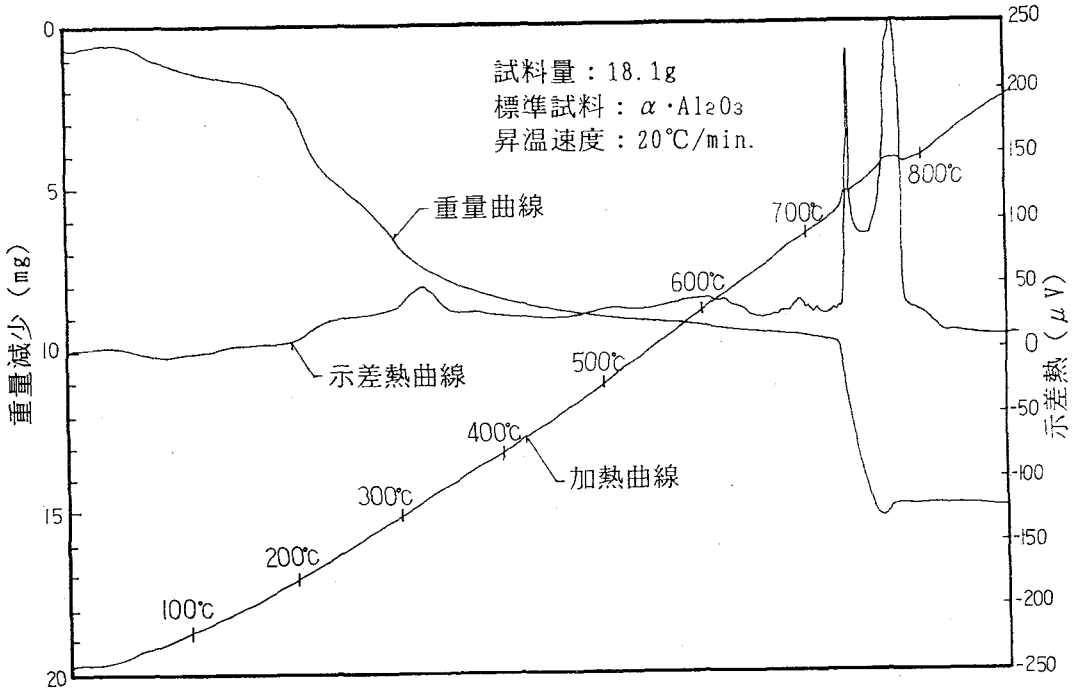


図1.12　リグニン系混和剤の示差熱重量分析結果

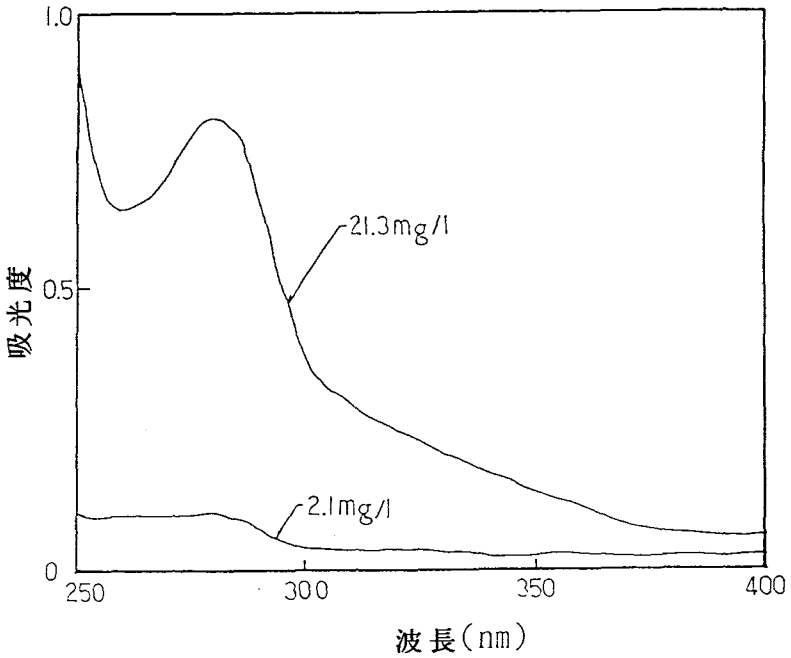


図1.13　リグニン系混和剤の吸収曲線

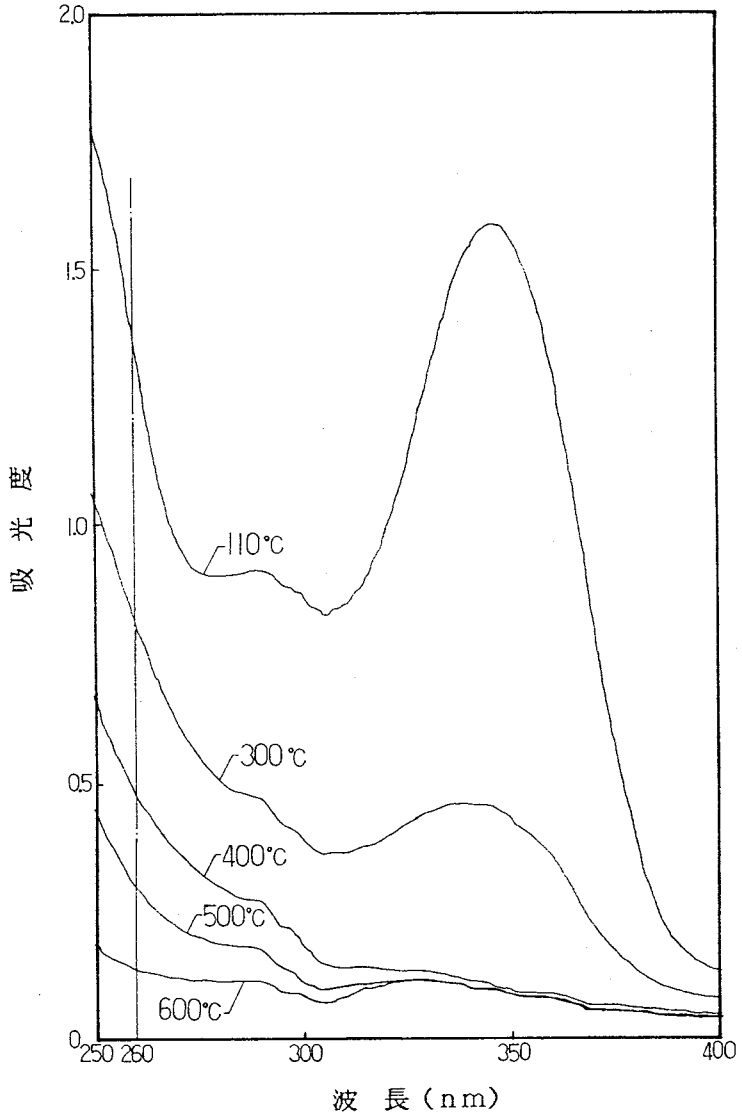


図1.14　混和剤混入コンクリートの吸収曲線

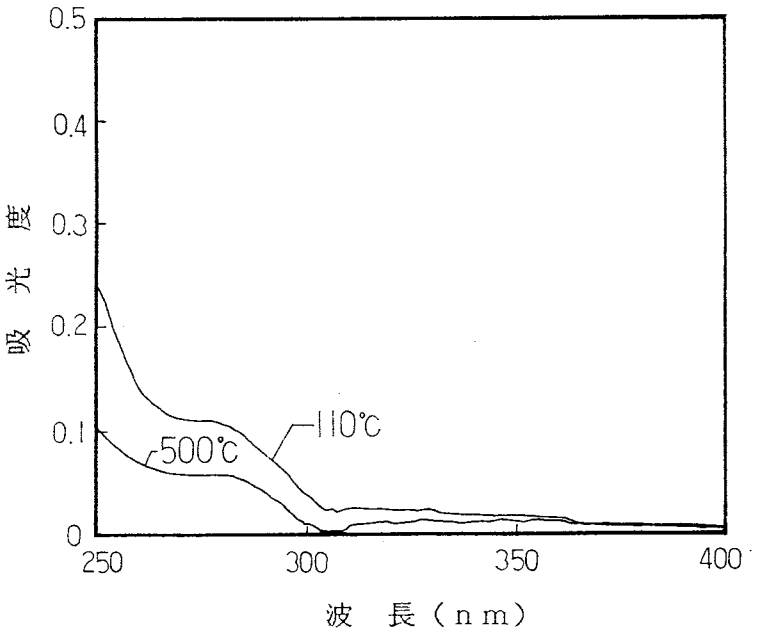


図1.15　混和剤無混入コンクリートの吸収曲線

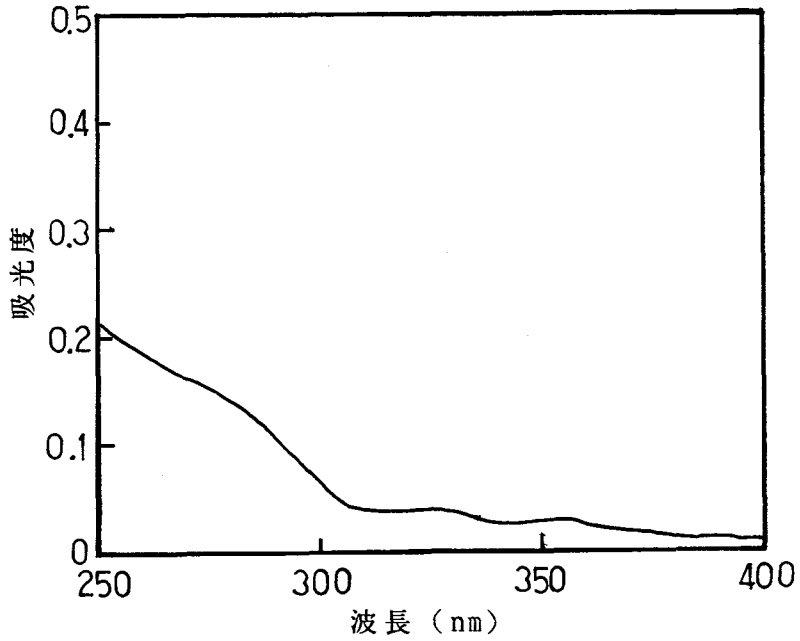


図1.16　ＲＣ造建物より採取したコンクリートの吸収曲線

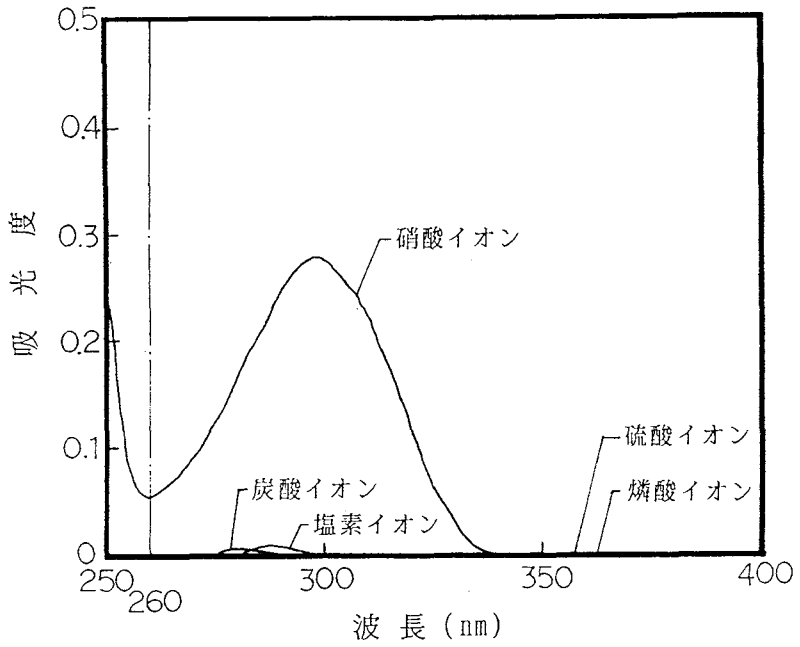


図1.17　無機イオンの吸収曲線

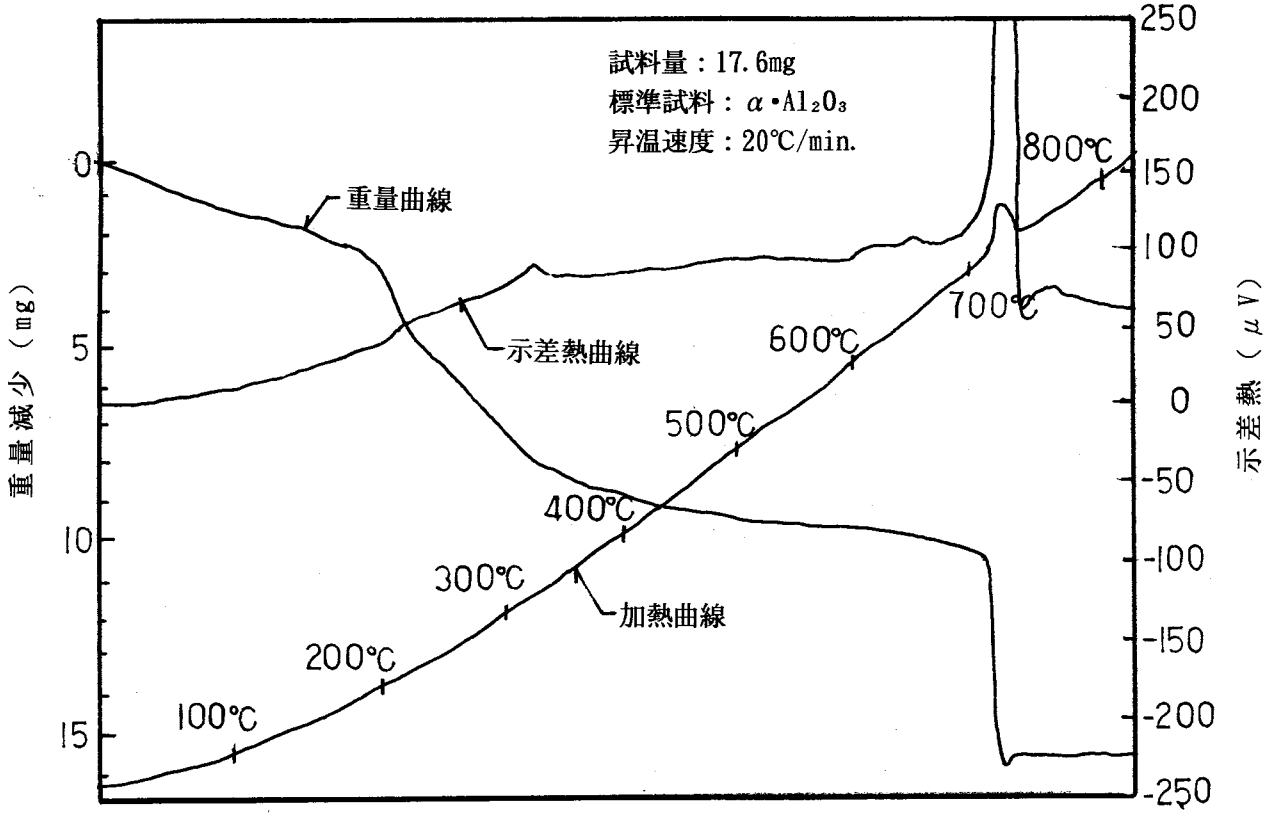


図1.18　ポゾリスNo.70の示差熱重量分析結果

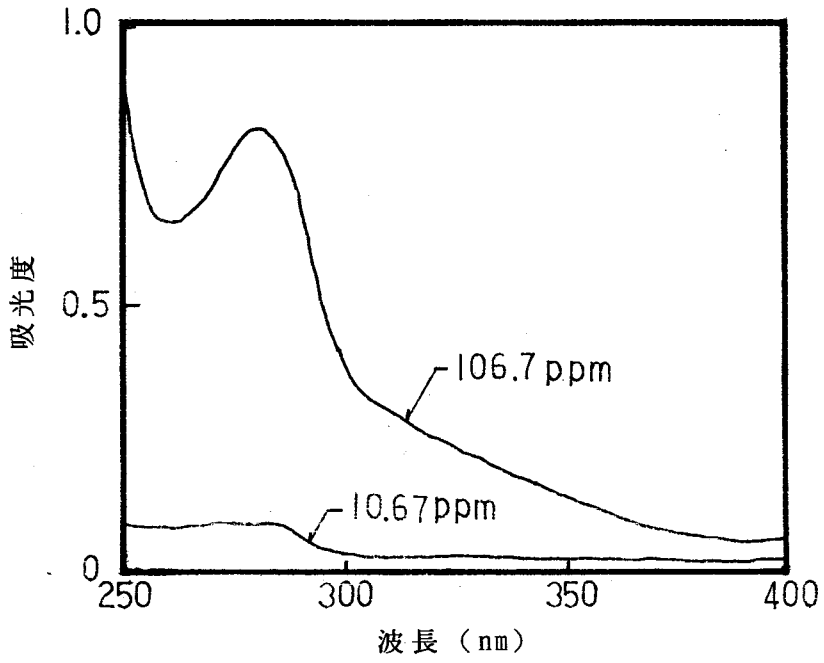


図1.19　ポゾリスNo.70のＵＶ曲線

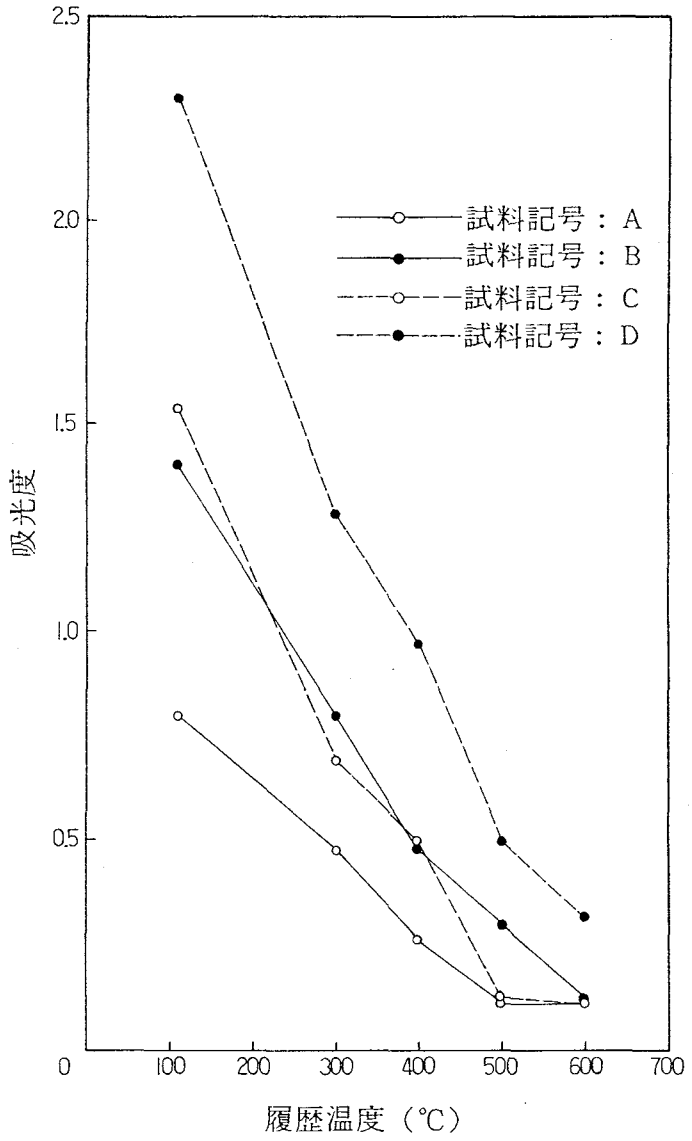


図1.20　履歴温度と吸光度の関係

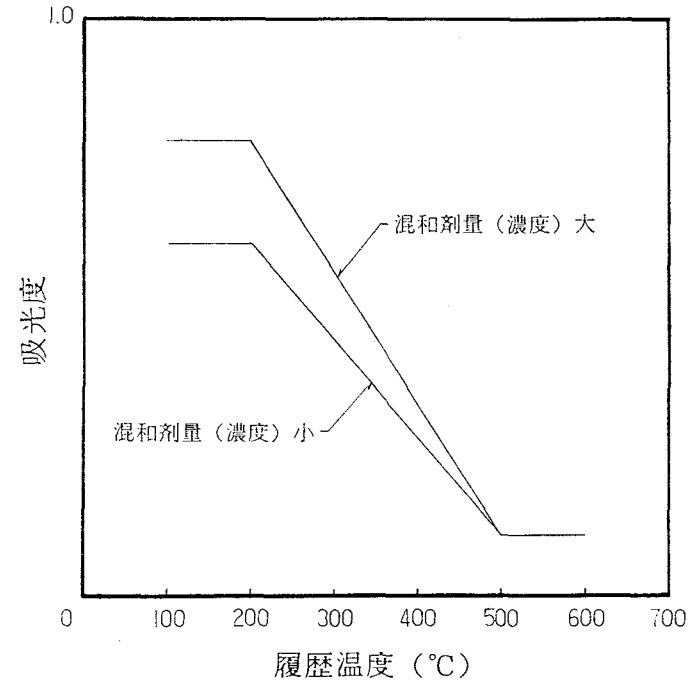


図1.21　履歴温度と吸光度の関係のモデル化

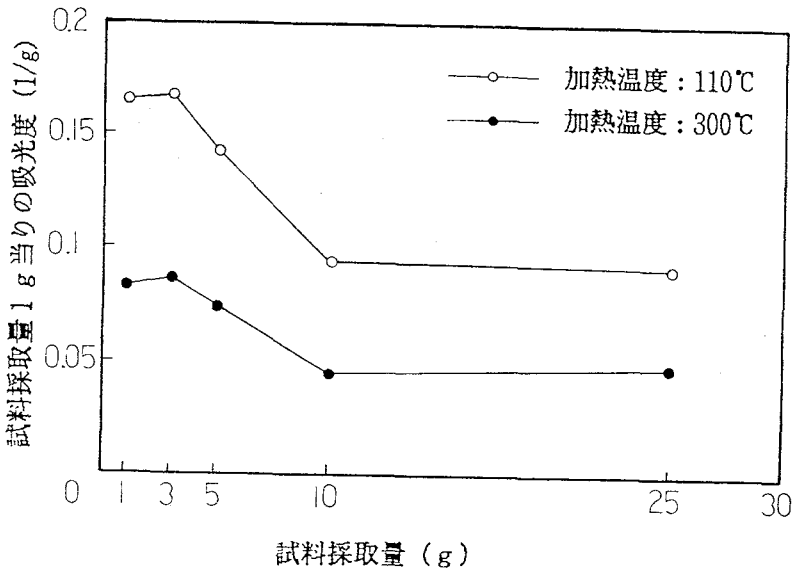


図1.22　試料採取量1g当りの吸光度

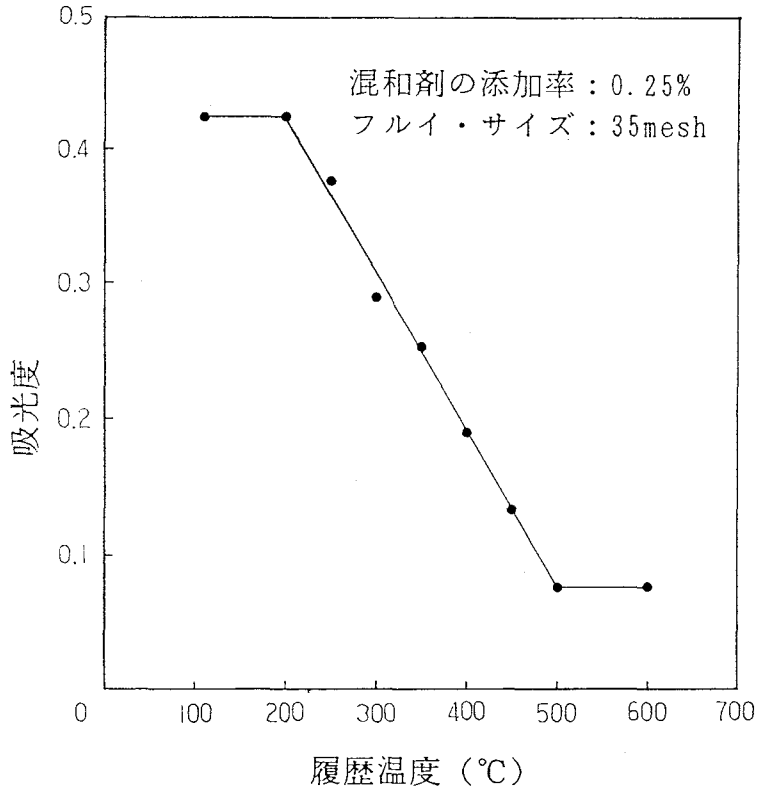


図1.23　履歴温度と吸光度の関係

（混和剤混入コンクリート試験体）

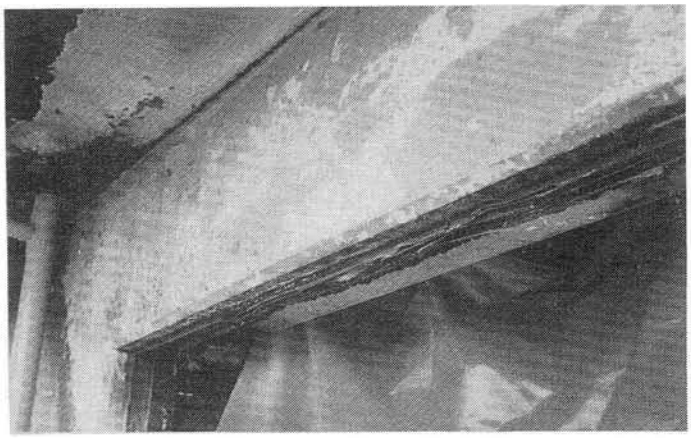


写真1.1　火害によるコンクリートの劣化状況

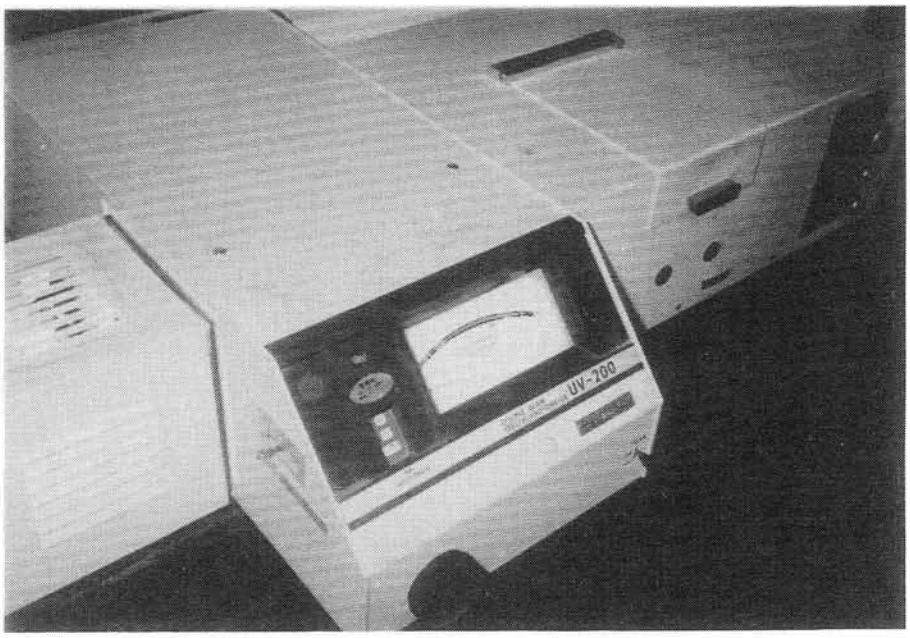


写真1.2　分光光度計

第２章　火害を受けたコンクリートの受熱温度推定方法の検証

２．１　はじめに
２．２　加熱試験における温度推定
２．３　燃焼排ガスの本推定方法への影響
２．４　実火災への適用
２．５　ナフタリン系混和剤入りコンクリートの受熱温度推定方法
２．６　まとめ

２．１　はじめに

筆者は、第１章において、混和剤に着目した新たなコンクリートの受熱温度推定方法を提案した。すなわち、ＵＶスペクトル法により、リグニン系混和剤を混入したコンクリートについて常温から600℃までの受熱温度を推定した。本章では、前章で提案した推定方法を確立するために、その妥当性を検証した。その主な内容は以下の通りである。

（１）加熱試験を実施し、推定による受熱温度と測定温度とを比較した。

（２）火災時における可燃物（主に有機系化合物）の燃焼排ガスが本推定方法に与える影響について調べた。

（３）本推定方法を実火災へ適用した。

（４）ナフタリン系混和剤を混入したコンクリートについて受熱温度を推定した。

２．２　加熱試験における温度推定

２．２．１　概要

加熱試験を実施し、内部温度が既知であるコンクリート試験体（柱と床）を用いて、本推定方法の妥当性を検証した。なお、同試験体の混和剤にはリグニン系混和剤が使用されていた（セメントに対する混和剤の添加率は柱及び床とも0.25％である）。

２．２．２　柱の場合

図2.1は３時間の耐火加熱を受けたＳＲＣ柱（断面は図2.2参照）の加熱温度と内部温度の測定結果である。加熱後の試験体の状況を写真2.1に示す。加熱を受けていない部分のコンクリートについて、110℃と500℃の温度履歴をそれぞれ与えた後、ＵＶスペクトルを測定し、波長260nmにおける吸光度を求めた（表2.1参照）。ＳＲＣ柱より主筋位置（かぶり厚さ:約7cm）までの部分をはつり取った。そのサンプルのＵＶスペクトルを測定した結果、吸光度が0.059であった。従って、前章の受熱温度の推定式(1.5)～(1.7)よりサンプルの受熱温度は500℃以上であったことが分かる。また、同位置の主筋の最高温度（熱電対による測定値）が640℃であった。ＵＶスペクトル法では、前章の図1.23に示すように、600℃までしか受熱温度を確認していないが、実際には、600℃以上では、混和剤中の有機系化合物は完全に熱分解が終了しているため、吸光度は変化しない。従って、熱電対による測定値

はＵＶスペクトル法による推定温度範囲内にあると考えられる。

２．２．３　床の場合

コンクリート床（厚さ：19.5cm）の下面を900℃で４時間一定加熱した。熱電対により測定された内部の最高温度分布を図2.3に示す。前記２．２．２と同様に、加熱を受けていない部分のコンクリートについて、110℃及び500℃の温度履歴をそれぞれ与えた後、ＵＶスペクトルを測定し、波長260nmにおける吸光度を求めた（表2.2参照）。次に、図2.3に示す２箇所よりコンクリート･サンプルを採取し、ＵＶスペクトルを測定した。前章の推定式(1.5)～(1.7)よりサンプルの受熱温度を推定した（表2.3参照）。その結果、ＵＶスペクトル法による推定温度は、サンプル①で230℃、サンプル②で265℃、熱電対による測定温度は、サンプル①で220℃、サンプル②で260℃であり、推定温度は、熱電対により測定された内部温度とほぼ一致していることが分かる。

２．３　燃焼排ガスの本推定方法への影響

２．３．１　概要

本推定方法は混和剤に含まれる有機系化合物に着目している。従って、火災時に室内の可燃物及び内装材料が燃焼した場合、燃焼排ガスに含まれる有機系化合物がコンクリート内部へ浸透し、本推定方法に影響を与える恐れがあると考えられる。そこで、表面に各種有機系材料を接着したコンクリートを加熱して、燃焼排ガスが本推定方法に与える影響を調べた。

２．３．２　試験体の作成

コンクリート片（寸法:40mm×40mm×150mm）の一面に４種類の有機系材料を接着したものを試験体とした。なお、混和剤にはリグニン系混和剤を使用した。試験体の仕様を表2.4に、試験体の加熱前の状況及び試験体の設置状況を写真2.2及び写真2.3にそれぞれ示す。示す。

２．３．３　試験体の加熱

るつぼ型電気炉（内のり寸法：300mm角）内に試験体を挿入し、20℃/min.の昇温速度で

約500℃まで昇温し、全試験体ともに約500℃で１時間保持した後、試験体を取り出し、自然放冷した。加熱後の試験体の状況を写真2.4に示す。

２．３．４　試料溶液の作成及び測定

加熱後の試験体から接着面のコンクリートの表層約1㎜を削り取ってサンプルとした。何も接着していない試験体は現状のままのものと表層を約1㎜削り取ったものの２種類とした。試料溶液作成後からＵＶスペクトル測定までの手順は前章の１．５．２で述べた方法に準じた。

２．３．５　測定結果及び考察

各サンプルの波長260㎚における吸光度の測定結果を表2.5に示す。各サンプル間では吸光度の差はほとんど認められず、本結果の範囲内では、排ガスがコンクリート内部へ浸透していないものと考えられる。

また、消火活動時の散水によって、燃焼排ガス（主に、有機系化合物）が溶解した場合、その溶液がコンクリート内部へ浸透し、本推定方法に影響を与えるかどうかについて考察した。通常、コンクリートの透水係数K_cは一般に使用される水セメント比の範囲（40%～70%）では、2×10^{-10}cm/sec以下[45]と考えられる。消火時からサンプリングまでの時間が仮に１ケ月経過したとしても、表層部分のごくわずか（深さ：約5×10^{-4}㎜）にしか水が浸透しないことになる。

従って、本方法を用いる際には、表層部分を削り取ってサンプルに供すれば、排ガスの影響はないものと考えられる。

２．４　実火災への適用

２．４．１　概要

ここでは、本推定方法を実火災に適用した３つの事例について述べる。

２．４．２　火災事例１

（１）概要

建設中、ＲＣ造建物（３階建て）の屋上部分において屋上防水用アスファルトコンパウ

ンドの過熱による発火により出火し、約50分火災が継続した。屋上の北隅部（約12m×8m）のスラブ及びパラペット部分が被災した。スラブ部分の火害は軽微であったが、パラペット部分で特に顕著な火害損傷を受けた。火害を受けたコンクリートの状況を写真2.5～2.9に、火害を受けた部分の平面図を図2.4にそれぞれ示す。特に顕著な火害を受けたパラペット部分のコンクリートの受熱温度を推定した。なお、混和剤にはリグニン系混和剤が使用されていた。

（２）推定方法

推定は次の手順によった。

１）パラペットより火害が顕著であると思われる部分２箇所（サンプル番号：１、２）と火害を受けていない部分１箇所（サンプル番号：３）についてコンクリート・コア（径：10cm、長さ：15cm）を抜取った（図2.4参照）。

２）火害を受けていない部分のコンクリート・コアを分割し、各所定温度（110℃、200℃、250℃、300℃、350℃、400℃、450℃、500℃及び600℃の９種類）で加熱した。

３）試験片を粉砕し、粉末を吸引ろ過し、ろ液を試料溶液とした。

４）試料溶液についてＵＶスペクトルを測定した。

５）得られた９種類の温度履歴をもつ試料の吸収曲線から、波長260nmでの履歴温度と吸光度の関係（検量線）を求めた（図2.5参照）。これは前章の推定式(1.5)～(1.7)の関係と同じであることが確認された。

６）次に、火害が顕著と考えられる部分のコンクリート・コアを表面より約4cm毎に切断し、各コアについてサンプルを３個ずつ採取した。各サンプルのＵＶスペクトルを測定し、波長260nmでの吸光度を求め、推定式(1.5)～(1.7)を用いて、受熱温度を推定した。

（３）推定結果及び考察

コンクリートの調合を表2.6に、得られた吸光度、推定受熱温度及びコンクリート・コアの圧縮強度の測定結果を表2.7にそれぞれ示す。

コンクリート内部については、吸光度より約250℃前後の受熱温度と推定されたが、その推定は次の１）～３）の考察から妥当であろうと考えられる。

１）火害が顕著と考えられた部分のコンクリート表面はピンク色を呈していたことから、同表面の受熱温度は約300℃～600℃と推定される[46]。内部の受熱温度は通常、外部より低く、上記温度範囲以下と考えられる。

２）ＵＶスペクトル法による受熱温度推定の前に、同じコア・サンプルで圧縮強度の測定

を行い、受熱による強度劣化を調べ、ＵＶスペクトル法により推定された受熱温度との相関を把握した。表2.7より、火害部分のコンクリートの圧縮強度は非火害部分とほぼ同等であった。圧縮強度は常温から300℃まではほとんど低下しない（図2.6[47]参照）。

３）ＵＶスペクトル法による受熱温度推定前に、コンクリートの中性化深さを測定し、火害による中性化の進行を調べ、ＵＶスペクトル法により推定された受熱温度との相関を把握した。コンクリートは500℃以上の温度履歴を受けると中性化するが[15]、表2.7より明らかなように、火害部分のコンクリートの中性化深さは、表層に限られ、非火害部分とほぼ同等であった。従って、コンクリート内部の受熱温度は500℃以下であったと推定される。

２．４．３　火災事例２

（１）概要

建設後約30年を経たＰＣパネル壁構造集合住宅（２階建て）の１住戸の１階部分台所でてんぷら油の過熱により出火し、階段室を通して同住戸２階へ延焼し、約30分火災が継続した。西隣の住戸へ一部類焼したが、その住戸の被災は軽微であった。火害を受けたコンクリートの状況を写真2.10～2.14に、火害を受けた住戸部分の平面図を図2.7にそれぞれ示す。当該住戸内における屋根、床及び壁の各部材のコンクリートの受熱温度を推定した。

（２）推定方法

火害が顕著と考えられる部分を中心に屋根２箇所（サンプル番号：１、２）、２階床２箇所（サンプル番号：３、４）、２階壁１箇所（サンプル番号：５）及び火害を受けていない隣戸の２階床１箇所（サンプル番号：６）よりコンクリート・コア（厚さ：約10cm）をそれぞれ抜き取り（図2.7参照）、本推定方法によりコンクリートの受熱温度を推定した。推定方法の手順は２．４．２に準じた。火災側及び非火災側の両面について、コンクリート表面より深さ約0.5cmの部分をＵＶスペクトル分析した。表面より少し内側へ入った部分を対象としたのは、表面にすす等が付着しているので、それらの影響を避けるためであった。履歴温度110℃及び500℃の吸光度の値A_h=0.448、A_l=0.310を推定式(1.5)～(1.7)に代入し、各サンプルの吸光度より受熱温度を推定した。

（３）推定結果及び考察

得られた吸光度、推定受熱温度及びコンクリート・コアの圧縮強度の測定結果を表2.8に示す。

受熱温度を推定した結果、以下に示す考察から本推定が妥当であろうと考えられる。

１）火害が顕著と考えられた部分のコンクリート表面（屋根及び２階床の下面）は灰白色を呈していたことから、同表面の受熱温度は600～950℃と推定され[46]、内部の受熱温度は外部より低く、ＵＶスペクトル法の結果とおおむね整合する。その他の壁部分はすすが表面に付着していたことから300℃以下と推定され[46]、その内部の受熱温度が210℃であるＵＶスペクトル法の結果と整合する。

２）前記２．４．２（３）の２）と同様の目的で、コンクリートの圧縮強度を測定した。表2.8より、火害が軽微な壁部分のコンクリートの圧縮強度は非火害部分の強度とほぼ同等である。常温から300℃までは強度はほとんど低下しないことから[47]、内部の受熱温度は300℃以下と推定され、ＵＶスペクトル法の結果と整合する。また、火害が顕著な部分は受熱温度が約300℃以上であり、受熱温度が高いほど、強度の低下は大きくなっていることから、ＵＶスペクトル法の結果とおおむね整合する。特に、約500℃以上の温度履歴を受けたと考えられる部分（２階床）は強度が健全部分に比べ約2/3に低下しており、これは文献[47]による結果と一致し、また、ＵＶスペクトル法による結果とも整合する。

３）前記２．４．２（３）の３）と同様の目的で、コンクリートの中性化深さを測定した。表2.8より明らかなように、中性化深さは火害が顕著な部分は特に大きい。火害を受けていない部分の中性化深さは大気中のCO_2による経年劣化で生じるものが主であり、コンクリートは500℃～580℃の加熱でコンクリート中の遊離アルカリ分である水酸化カルシウム（$Ca(OH)_2$）が熱分解し、アルカリ性を減ずる化学的被害を被る[15]。火害が顕著な部分（約500℃以上の火害を受けたと考えられる部分）は非火害部分の深さ以上に中性化が進行しており、ＵＶスペクトル法の結果と概ね整合する。

４）火害が顕著な部分のコア（サンプル番号：１～４）は下面側より全厚の約2/3の部分に火害によると思われるひび割れが認められている。

５）２階床（サンプル番号：３及び４）は１階から２階への延焼により上面からも火災の熱を受けたために、上面側も温度が上昇したと考えられる。

２．４．４　火災事例３

（１）概要

建設後約20年を経たＲＣ造共同住宅（４階建て）の２階の１住戸部分の台所で出火し、約20分火災が継続した。その住戸は全焼したが（焼失面積：約45㎡）、他の住戸への延焼はなかった。火害を受けた各部の状況を写真2.15～2.25に、火害を受けた住戸の平面図を

図2.8にそれぞれ示す。火害を受けた住戸内の床及び壁の各部材のコンクリートの受熱温度を推定した。

（２）推定方法

火害が顕著と考えられる部分の出火階直上の３階床２箇所（サンプル番号：１、２）、出火階の２階壁１箇所（サンプル番号：３）よりコンクリート・コア及び火害を受けていない３階床上面１箇所よりカット・サンプルをそれぞれ採取し（図2.8参照）、ＵＶスペクトル分析を行った。前記２．４．２の手順により、履歴温度110℃及び500℃における吸光度の値A_h=0.538、A_l=0.067を推定式(1.5)～(1.7)に代入し、火害を受けたコンクリート部分の吸光度より受熱温度を推定した。

（３）推定結果及び考察

得られた吸光度、推定受熱温度及びコンクリート・コアの圧縮強度の測定結果を表2.9に示す。

受熱温度を推定した結果、以下に示す考察から本推定が妥当であろうと考えられる。

１）火害が顕著と考えられた部分のコンクリート表面（３階床）は灰白色を呈していたことから、同表面の受熱温度は600～950℃と推定されるが[46]、計算によると、継続時間が約20分の火災においては、深さ2cm以上の内部では受熱温度は約300℃以下であり[41]、ＵＶスペクトル法による結果とおおむね整合する。特に、サンプル番号：１は出火推定位置近傍より採取したコアであったため、サンプル番号：２より高い温度を示したと考えられる。火害の軽微な壁はすすが表面に付着していたことから、同表面の受熱温度は約300℃以下と推定され[46]、ＵＶスペクトル法による結果とおおむね整合する。

２）前記２．４．２（３）の２）と同様の目的で、コンクリートの圧縮強度を測定した。設計基準強度は180kgf/cm^{2}であったが、表2.9より、３階床は強度の低下が認められていない。これは、前記２．４．２（３）の２）で述べたように、圧縮強度は常温から300℃までほとんど低下しないことから[47]、ＵＶスペクトル法の結果と整合する。

３）前記２．４．２（３）の３）と同様の目的で、コンクリートの中性化深さを測定した。表2.9より、中性化深さは火害の違いによりほとんど差はなく、ここでは、非火害部分とは比較していないが、恐らく、経年変化による進行が大部分であると考えられる。ＵＶスペクトル法による内部の推定受熱温度もほとんど差はないことから、中性化深さの結果の傾向とＵＶスペクトル法による結果の傾向がおおむね一致する。

２．５　ナフタリン系混和剤入りコンクリートの受熱温度推定方法

２．５．１　概要

コンクリート混和剤として、ナフタリン系混和剤は、リグニン系混和剤に次いで多く用いられているが、その使用量は、リグニン系混和剤に比べ極めて少ない。しかし、実施工で使用されているケースもあるので、ナフタリン系混和剤が混入されているコンクリートについて、ＵＶスペクトル法を用いて受熱温度の推定を行った。試料の抽出には、水煮沸抽出法及び塩酸分解法の２法によった。また、ここでは、他の推定方法として、有機系化合物中の炭素を対象とした過マンガン酸カリウムによる酸素消費量の定量分析（以下、定量分析と呼ぶ）[48]による方法についても以下の２点の理由から検討した。

（１）定量分析は特殊な機器を必要とせず、操作が簡単である。

（２）定量分析は混和剤の種類に関係なく、有機系化合物を定量できる。

２．５．２　ＵＶスペクトル法（水煮沸抽出法）

（１）実験方法

表2.10に示す調合により、ナフタリン系混和剤入りコンクリート試験体（寸法:40㎜×40㎜×150㎜）を作成した。次に、試験体を７日間以上気乾養生した後、電気炉内にて各所定温度（110℃，200℃，300℃，350℃，400℃，450℃，500℃及び600℃の８種類）で60分間加熱した。これらのコンクリート試験体より試料を採取し、ＵＶスペクトル分析を行ない、各履歴温度における吸収曲線を求めた。

（２）実験結果

図2.9に得られたコンクリートの吸収曲線を示す。吸収のピークである波長275㎚での履歴温度と吸光度の関係を図2.11に示す。吸光度は、リグニン系混和剤の場合、図2.5で示されるように、履歴温度110℃から200℃で最大となるが、本実験では、履歴温度400℃で最大となった。

２．５．３　ＵＶスペクトル法（塩酸分解法）

（１）実験方法

通常、試料の抽出に用いられている水煮沸抽出法（前記２．５．２）では、履歴温度400℃で吸光度が最大となった。その原因として、ナフタリン系混和剤は、リグニン系混和剤

に比べ、セメントに対する吸着が強く、水による煮沸抽出を行なっても抽出量が少ないと考えられ、コンクリート試料を塩酸分解して抽出する方法を試みた。表2.10に示す調合のコンクリートを用いて、各所定温度で加熱された試料について、以下の手順により分析を行なった。

1）試料粉末2gを精秤し、塩酸(1+1)5mlを加えて、熱盤上にて穏やかに加熱し、セメントを分解した。

2）水を加え、50mlとした後、30分間再加熱した。

3）放冷後、20wt%の水酸化ナトリウム溶液にてpHを12とし、生じた水酸化物の不溶物は遠心分離（7000rpm、10分間）をした。

4）上澄み液をビーカーに取り、沈澱物は約20mlの0.01wt%の水酸化ナトリウム溶液（pH：約11.5）にて洗浄し、遠心分離する工程を２回行なった。

5）上澄液を塩酸（1+1）にてpHを約1.6とした後、ＵＶスペクトル分析を行なった。

（２）実験結果及び考察

図2.10に吸収曲線を、図2.11に波長275nmにおける履歴温度と吸光度の関係をそれぞれ示す。水煮沸抽出法では、試料量3gで分析を行なったが、塩酸分解法では抽出の効果により、吸光度が大きくなることを予想して、試料量2gとした。しかし、試料量の差異にかかわらず、結果的には、400℃で吸光度が最大となり、水煮沸抽出法と同様な関係が得られた。

その原因として、ナフタリン系混和剤はリグニン系混和剤に比べ、熱的に安定した化学構造を有する物質であり、加熱されると、履歴温度400℃までは、中間生成物として多環構造（共役二重結合を有する環状組織の多い構造）を有する物質が生成される[49]。そのため、共役二重結合を対象とするＵＶスペクトル法では、吸光度が増大する。さらに、履歴温度400℃以上に加熱されると、熱分解生成物が揮散し、逆に吸光度は減少するものと考えられる。

また、リグニン系混和剤とナフタリン系混和剤の熱特性を示差熱重量分析（DTA、TGA）により比較すると（図2.12および図2.13参照）、ナフタリン系混和剤はリグニン系に比べて、耐熱温度が高く、400℃までは特に大きな重量減少がないことが分かる。これは、熱分解による揮散が少ないためである。

従って、ＵＶスペクトル法では、吸光度の値から推定温度が確定する温度範囲450℃以上の受熱温度の推定が可能である。

２．５．４　定量分析法

（１）実験方法

表2.10に示した調合のコンクリート試験体を前記２．５．２（１）で示した各所定温度で加熱した後、試料粉末を作成し、以下の手順により定量分析を行なった。

１）試料粉末0.5gを約10mlの水で分散させ、硫酸(1+8)10mlを加え、加熱分解した。

２）水を加え、全容量約50mlとし、再加熱後、アンモニア水(1+1)にて中和した後、鉄イオンを除去するため、さらにアンモニア水を2～3滴過剰に加えた。

３）JIS K 0102-14.1　「懸濁物質測定方法」によりガラス繊維ろ紙を用いて吸引ろ過し、アンモニア水(1+1)にて数回洗浄し、ろ液を300mlのフラスコに採取した。

４）上記３）によって得られたろ液に水を加え100mlとし、硫酸(1+1)10mlを加えた後、硫酸銀の微粉末1gを加え、攪はんした。

５）N/40しゅう酸ナトリウム10mlを加え、60～80℃に保持しながら、N/40過マンガン酸カリウム溶液で逆滴定した。

７）液の色が薄紅色を呈する点を終点として、N/40過マンガン酸カリウム消費量を求めた。

（２）実験結果及び考察

履歴温度とN/40過マンガン酸カリウム消費量の関係は図2.14に示す。その結果、110～600℃の範囲ではトリ・リニアーな関係が得られた。ナフタリン系混和剤の場合、110℃から300℃まではほとんど熱分解しないため、N/40過マンガン酸カリウム消費量は変わらず、また、500℃以上での熱分解残留物は過マンガン酸カリウムにて分解されないため、それぞれの温度範囲で一定値となるものと考えられる。

従って、炭素を有する有機系化合物を対象とする定量分析法を用いれば、常温から600℃までの受熱温度の推定が可能であることが判明した。

また、定量分析法による受熱温度の推定式は図2.14より、(2.1)式～(2.3)式で表わすことができる。

・$C=C_h$の時　　$T \leqq 300$　　(2.1)

・$C_h > C > C_l$の時

$$T=\{(2C+3C_l-5C_h)/(C_l-C_h)\}\times 100 \qquad (2.2)$$

・$C=C_l$の時　　$T \geqq 500$　　(2.3)

ここで、

C:火害を受けた採取サンプルのN/40過マンガン酸カリウム消費量(ml/g)、

C_h:履歴温度110℃におけるN/40過マンガン酸カリウム消費量(ml/g)、

C_l:履歴温度500℃におけるN/40過マンガン酸カリウム消費量(ml/g)、

T:推定受熱温度(℃)

2．6　まとめ

本章では、第１章で提案されたＵＶスペクトルによるコンクリートの受熱温度推定方法の実用化を検証した。得られた結論は以下のように要約される。

（１）加熱試験を実施した柱及び床のコンクリート部材からサンプルを採取し、受熱温度を推定した結果、推定値は温度測定値とほぼ一致し、本推定方法の実証が図られた。

（２）火災室内で発生する燃焼排ガス（主に有機系化合物）が本推定方法に与える影響を調べた結果、ほとんど影響はなく、表層部分を削り取ってサンプリングすれば、全く排ガスの影響はないものと考えられる。

（３）火害を受けたＲＣ造建物よりコンクリートのサンプルを採取し、受熱温度を推定した。その結果、コンクリートの変色状況、圧縮強度、中性化深さ、等による結果とＵＶスペクトル法による結果はおおむね整合することが分かった。従って、ＵＶスペクトル法により火害を受けたコンクリートの受熱温度を推定できることが分かった。

（４）ナフタリン系混和剤については、ＵＶスペクトル法により450℃から600℃までの受熱温度を、定量分析法によれば常温から600℃までの受熱温度をそれぞれ推定できることが判明した。

表2.1　コンクリート・サンプルの吸光度（柱）

履歴温度（℃）	吸光度
110	0.254
500	0.059

表2.2　コンクリート・サンプルの吸光度（床）

履歴温度（℃）	吸光度
110	0.297
500	0.021

表2.3　採取サンプルの推定受熱温度

サンプル番号	吸光度	受熱温度（℃）	
		推定値	測定値*
①	0.267	230	220
②	0.238	265	260

注）*:図2.3の温度分布より算出した平均温度

表2.4　試験体の仕様

試験体記号	有機系材料			接着剤	
	材料名	厚さ（mm）	使用量（g/m²）	材料名	塗布量（g/m²）
A	塩化ﾋﾞﾆﾙ板	0.6	733	塩化ﾋﾞﾆﾙ	80
B	軟質ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝﾌｫｰﾑ	30	433	一液性ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ	40
C	発砲ｽﾁﾛｰﾙ	30	820	酢酸ﾋﾞﾆﾙ系（溶剤型）	90
D	水性ｱｸﾘﾙ系ｼｰﾘﾝｸﾞ材	—	2000	な　し	
E*	な　し				

注）・コンクリート部分は各試験体とも同一である。
・*:コンクリート試験片のみの試験体である。

表2.5　試験体の吸光度

試験体記号	A	B	C	D	E	
					（表層）	（内部）
吸光度	0.070	0.071	0.069	0.095	0.070	0.051

表2.6　コンクリートの調合

水セメント比	単位容積質量　（kg/m³）					混和剤の添加率	呼び強度
（%）	セメント（普通）	水	細骨材（混合砂）	粗骨材（混合）	混和剤（AE減水剤）	（%）	（kgf/cm²）
60	315	189	807	935	1.575	0.5	210

表2.7　コンクリートの推定受熱温度と圧縮強度（火災事例１）

区　分	サンプル番　号		表面からの深さ（cm）	吸光度	推定受熱温度（℃）	圧縮強度（kgf/cm²）	中性化深さ（cm）
火害部分	1	A	2	0.276	275	220	0
		B	6	0.317	225		
		C	１０	0.317	225		
	2	A	2	0.290	260	227	0～0.3
		B	6	0.297	250		
		C	１０	0.317	225		
非火害部分	3		―――――	―――	―――――	238	0.2～0.5

表2.8　コンクリートの推定受熱温度と圧縮強度（火災事例２）

区分	採取場所	サンプル番号	測定面	吸光度	推定受熱温度（℃）	中性化深さ（cm）	圧縮強度（kgf/cm²）
火害部分	屋根	1	下面	0.301	≧500	2.5～3.0	397
			上面	0.387	340	0	
		2	下面	0.370	370	1.5～2.5	—*2
			上面	0.437	240	0～0.5	
	２階床	3	下面	—*1	——*1	2.0～2.5	429
			上面	0.387	340	0.5～1.0	
		4	下面	—*1	——*1	4.0～4.5	313
			上面	0.318	490	1.5～2.0	
	２階壁	5	火災面	0.442	210	0.5～1.0	488
			非火災面	—*1	——*1	1.5～2.0	
非火害部分	２階床	6	下面	—	——	0.5～1.0	483
			上面	—	——	0～0.5	

注)*1:表面にすすが付着、または中性化試験用フェノールフタレイン溶液による着色のため、ＵＶスペクトル分析不可能。
*2:試験体全厚にわたりびわれ発生、圧縮試験不可能。

表2.9　コンクリートの推定受熱温度と圧縮強度（火災事例３）

区分	採取場所	サンプル番号	コアの深さ（cm）	受熱温度推定結果			中性化深さ測定結果		圧縮強度（kgf/cm²）
				温度推定の深さ*1(cm)（表面より）	吸光度	推定受熱温度（℃）	測定面	中性化深さ（cm）	
火害部分	３階床	1	13	3.5	0.374	304	下面	5.0～5.5	184
				12.75	0.538	≦200	上面	4.5～5.0	
		2	12.4	2.25	0.502	223	下面	5.0～6.0	——*2
							上面	5.0～5.5	
	２階壁	3	18.3	2.25	0.380	301	火災面	4.5～5.0	147
				12.55	0.415	278			
				17.4	0.505	221	非火災面	4.0～5.0	

注)*1:コンクリート・コアの火災面からの距離を示す。
*2:試験体に打ち継ぎ部があり、圧縮試験不可能。

表2.10　ナフタリン系混和剤混入コンクリートの調合

水セメント比（%）	単位容積質量（kg/m³）					混和剤の添加率（%）
	セメント（普通）	水	細骨材（砂）	粗骨材（砕石）	混和剤（AE減水剤）	
40	300	120	750	1080	3.6	1.2

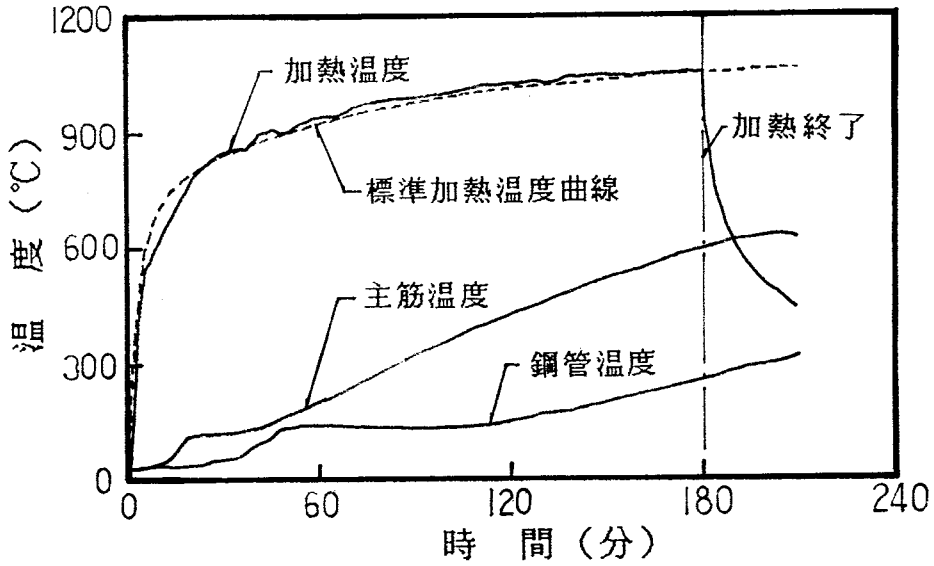


図2.1　柱の温度測定結果

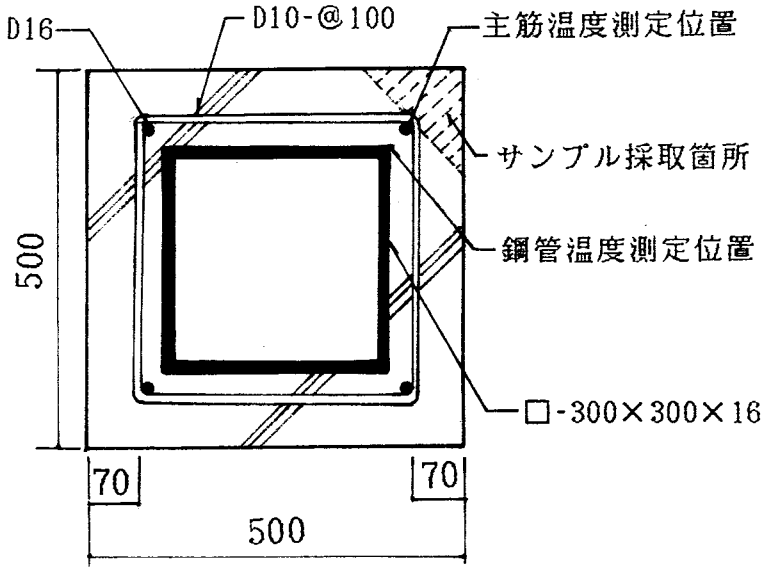


図2.2　柱の断面（寸法単位：mm）

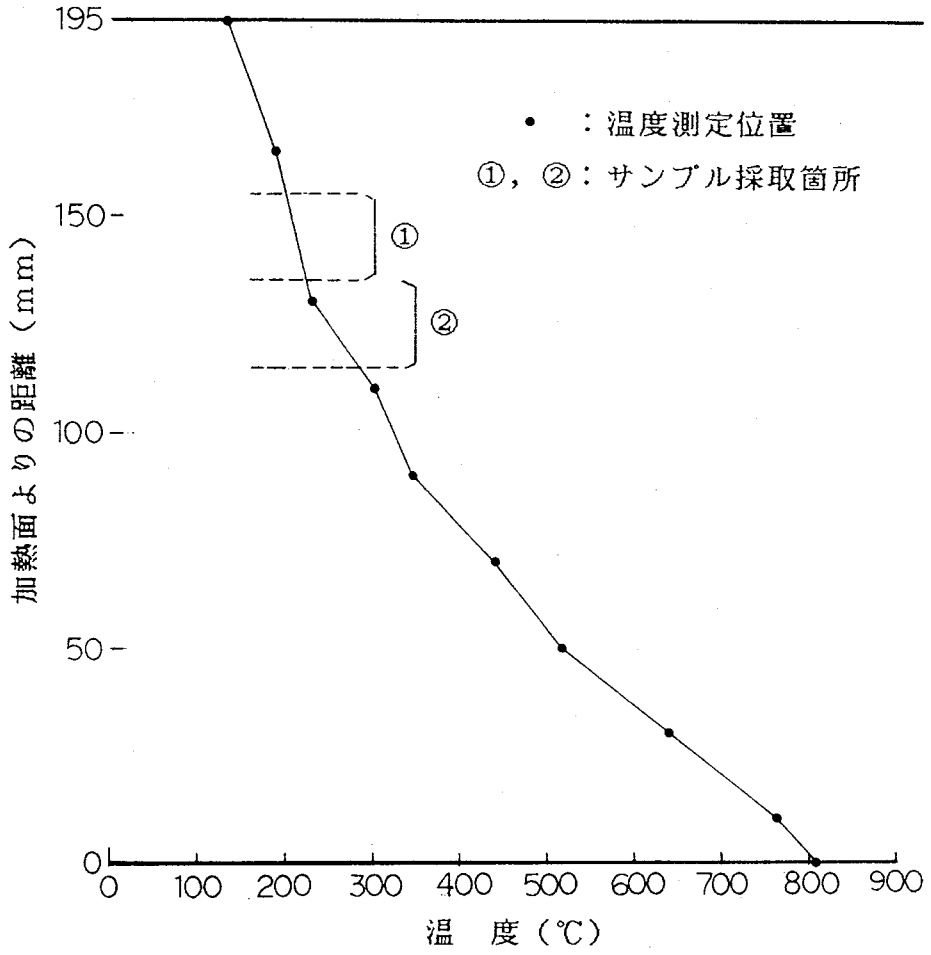


図2.3　コンクリート内部温度分布

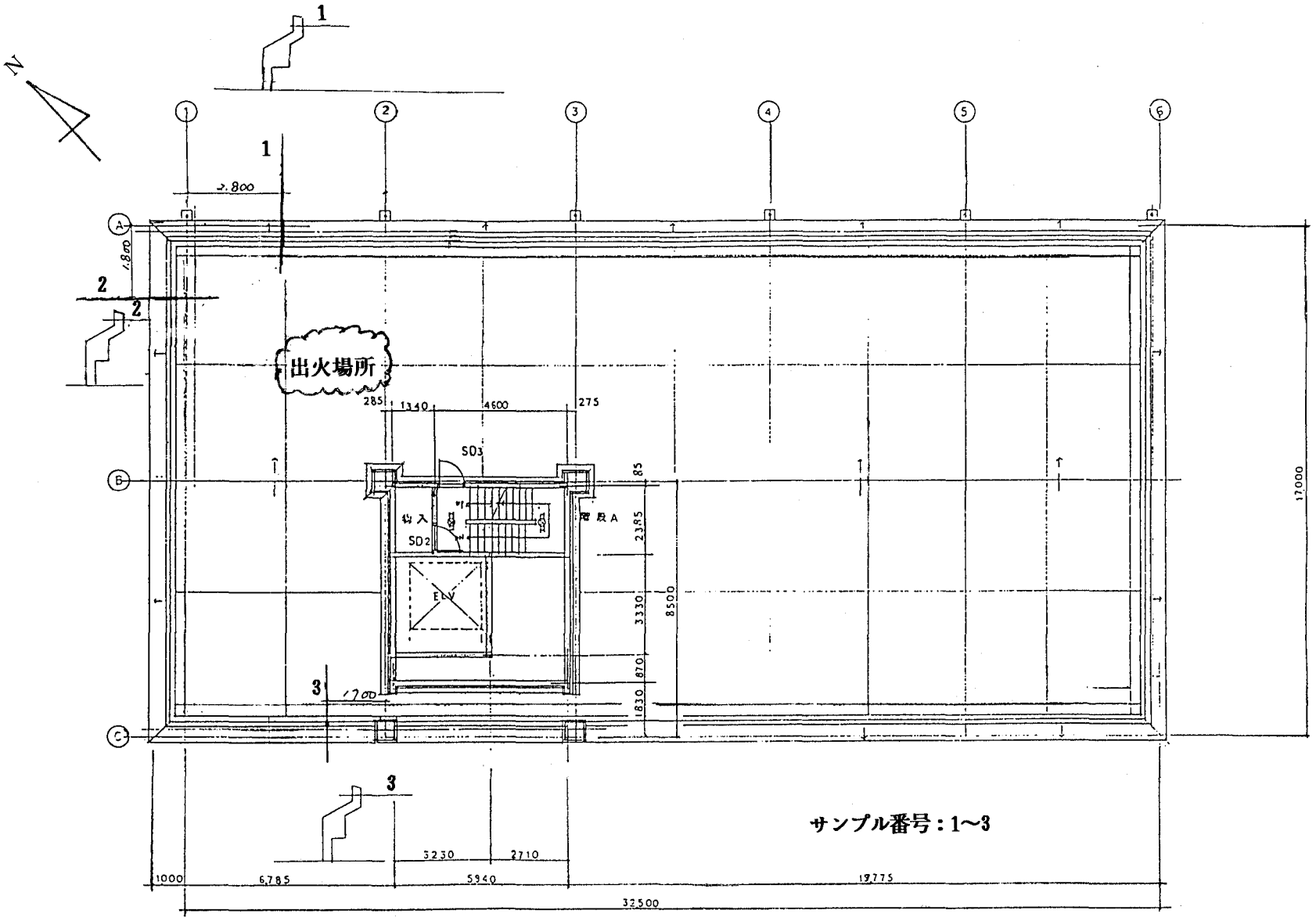


図2.4　火害を受けた屋上平面

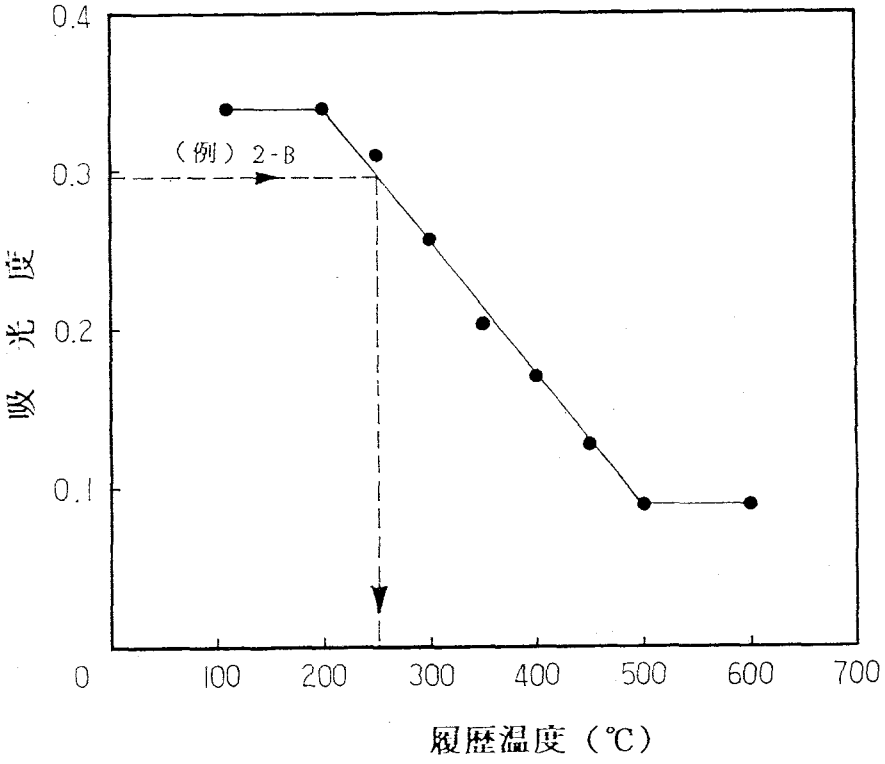


図2.5　履歴温度と吸光度の関係（検量線）

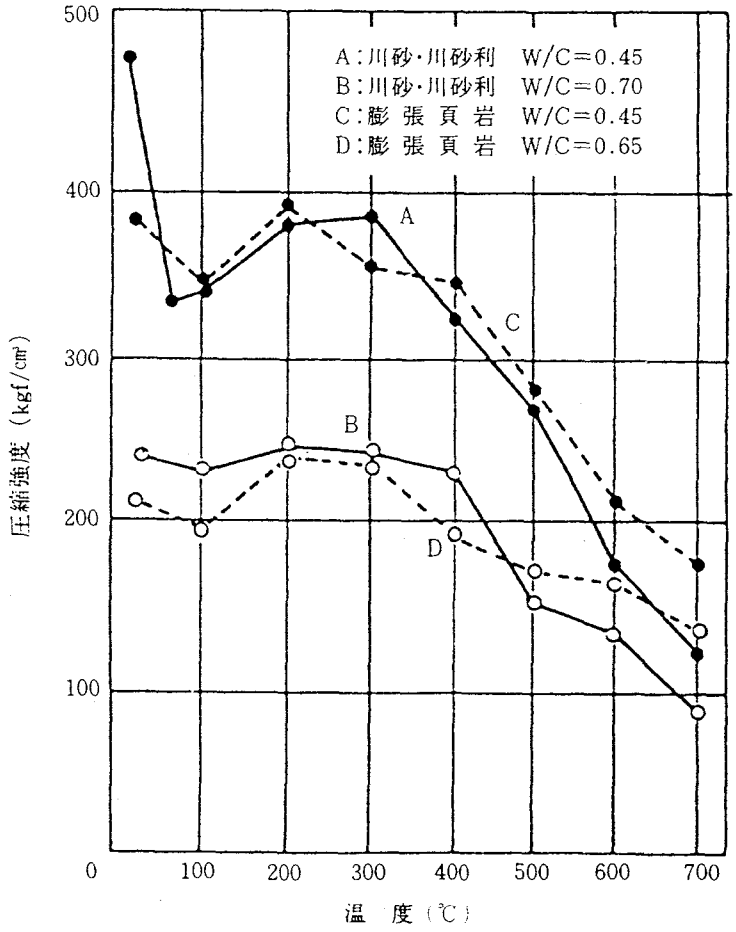
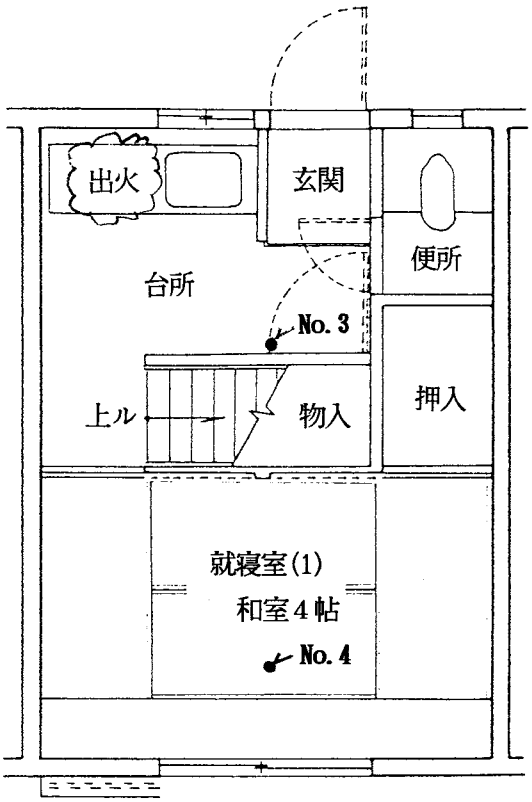


図2.6　普通及び軽量コンクリートの圧縮強度の加熱温度による変化


出火
玄関
便所
台所
No. 3
上ル
物入
押入
就寝室(1)
和室４帖
No. 4
N
(１階)

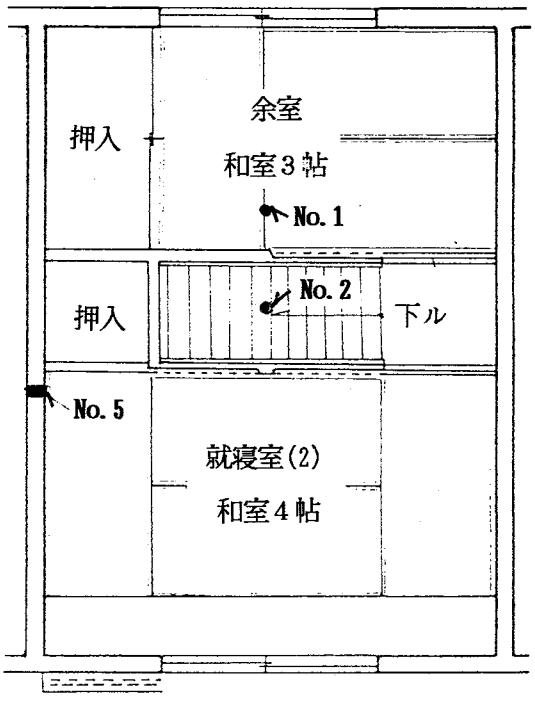

押入
余室
和室３帖
No. 1
No. 2
押入
下ル
No. 5
就寝室(2)
和室４帖
(２階)
No. 6は隣戸

図2.7　火害住戸の平面

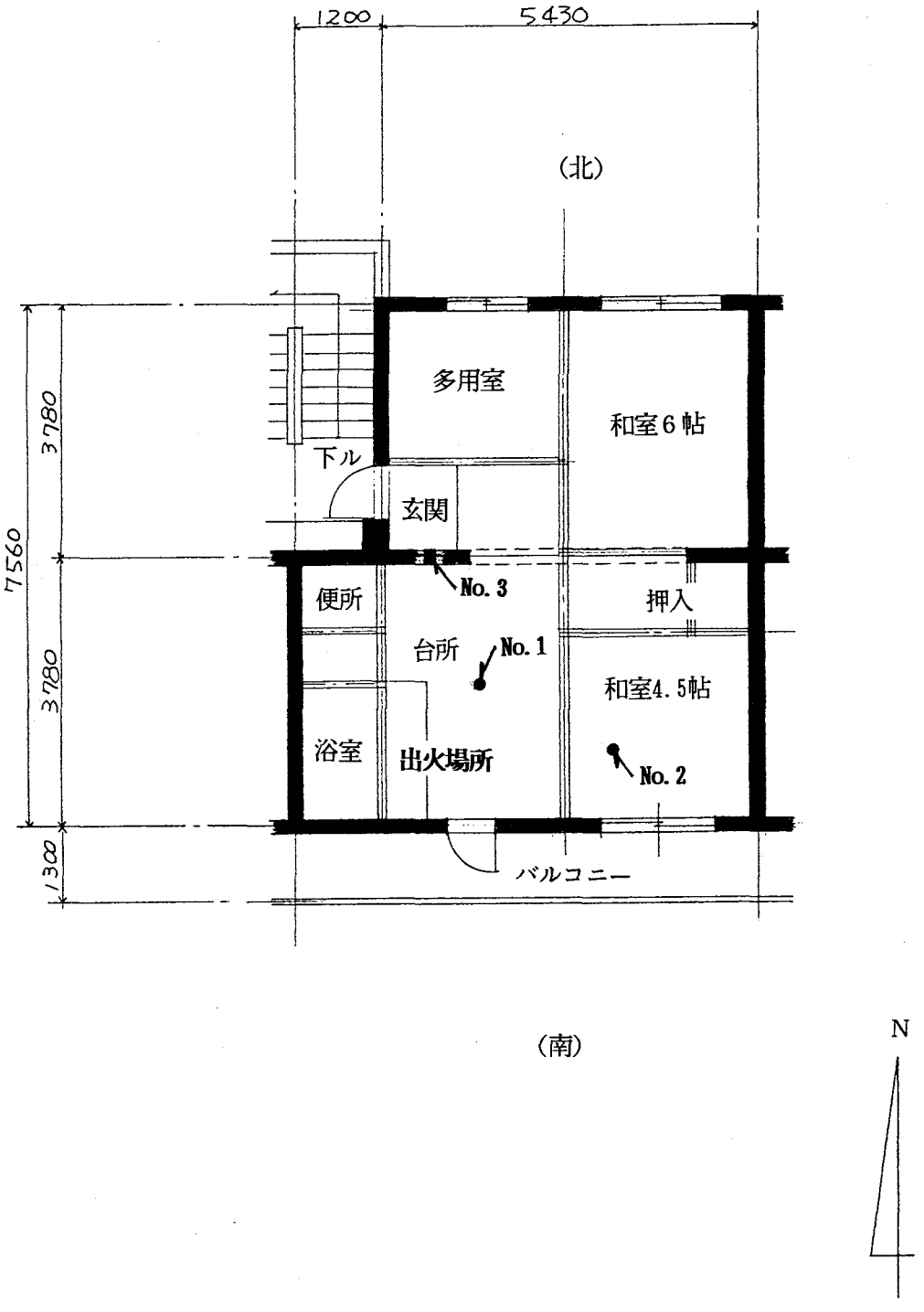


図2.8　火害住戸の平面（寸法単位：mm）

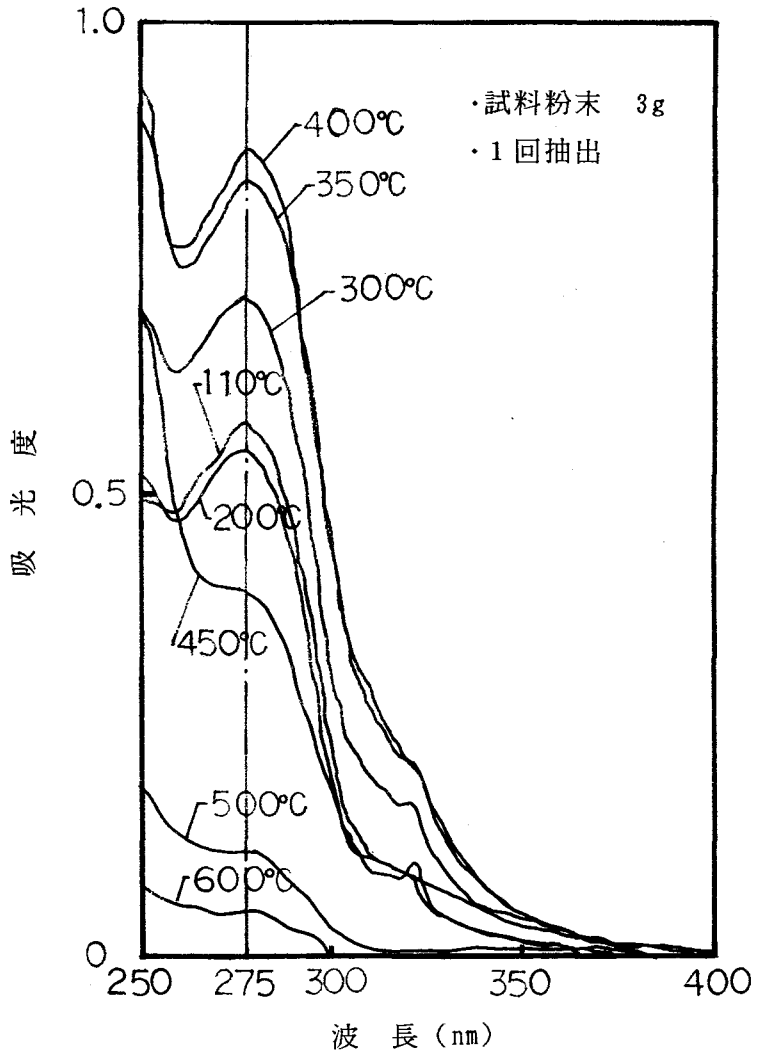


図2.9　ナフタリン系混和剤混入コンクリートの吸収曲線（水煮沸抽出法）

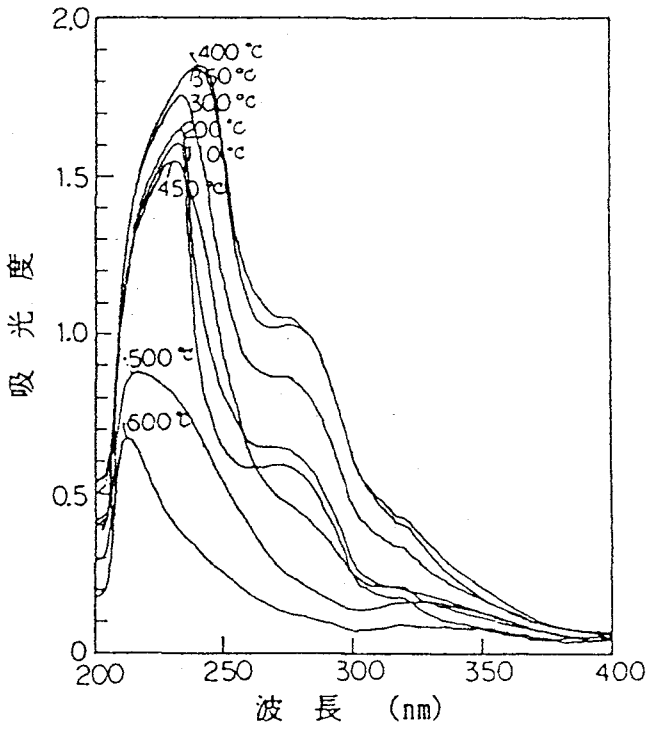


図2.10　ナフタリン系混和剤混入コンクリートの吸収曲線（塩酸分解法）

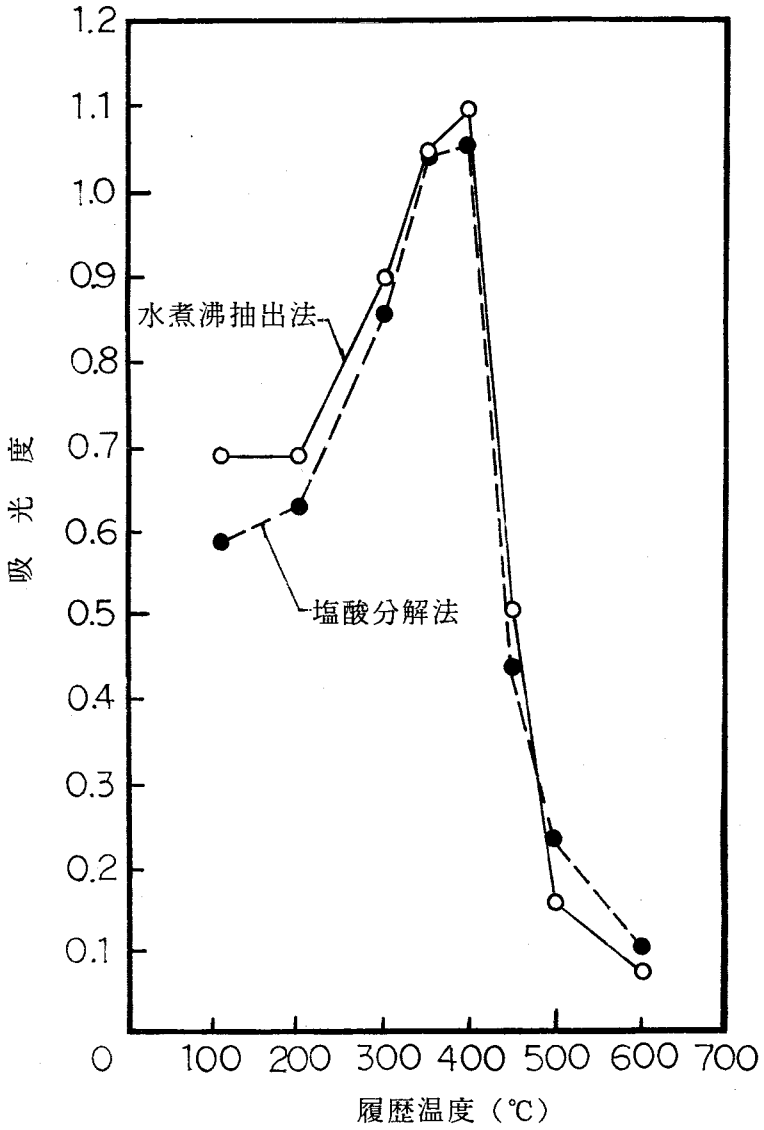


図2.11　履歴温度と吸光度の関係

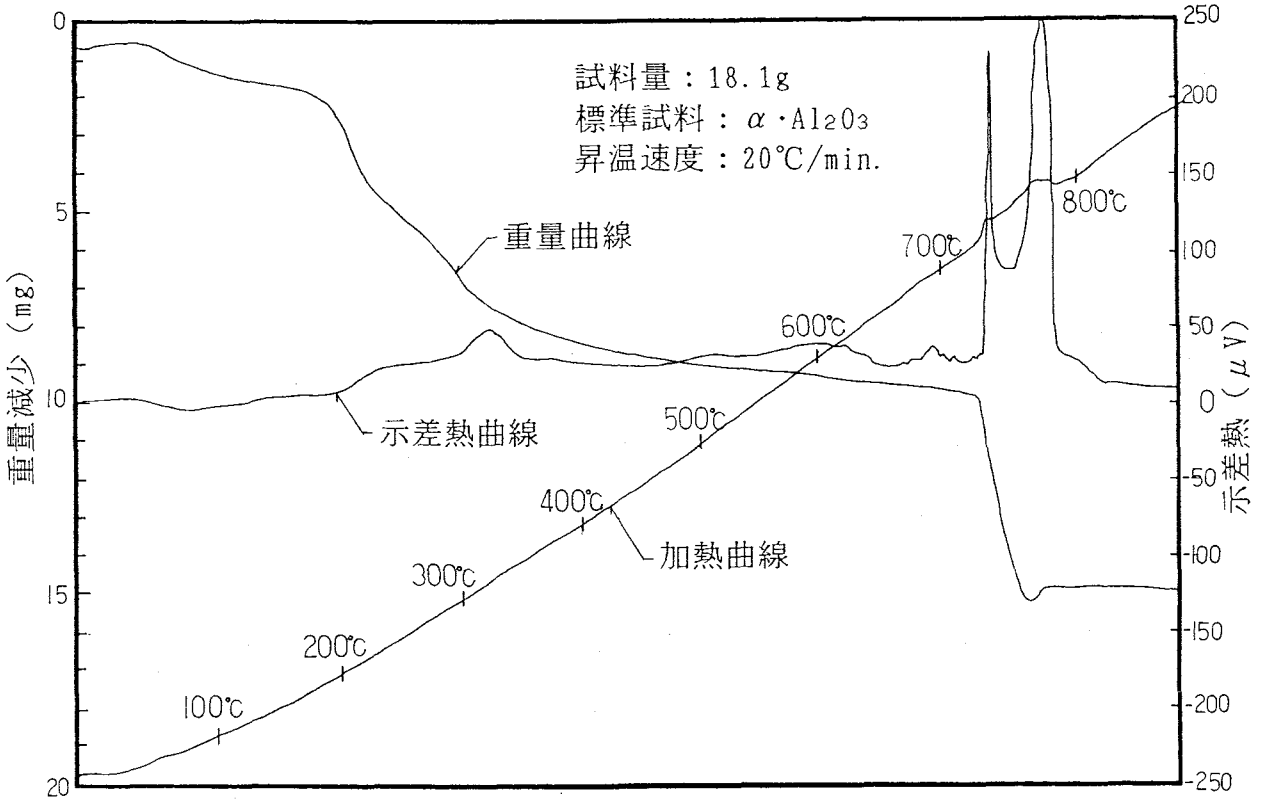


図2.12　リグニン系混和剤の示差熱重量分析結果

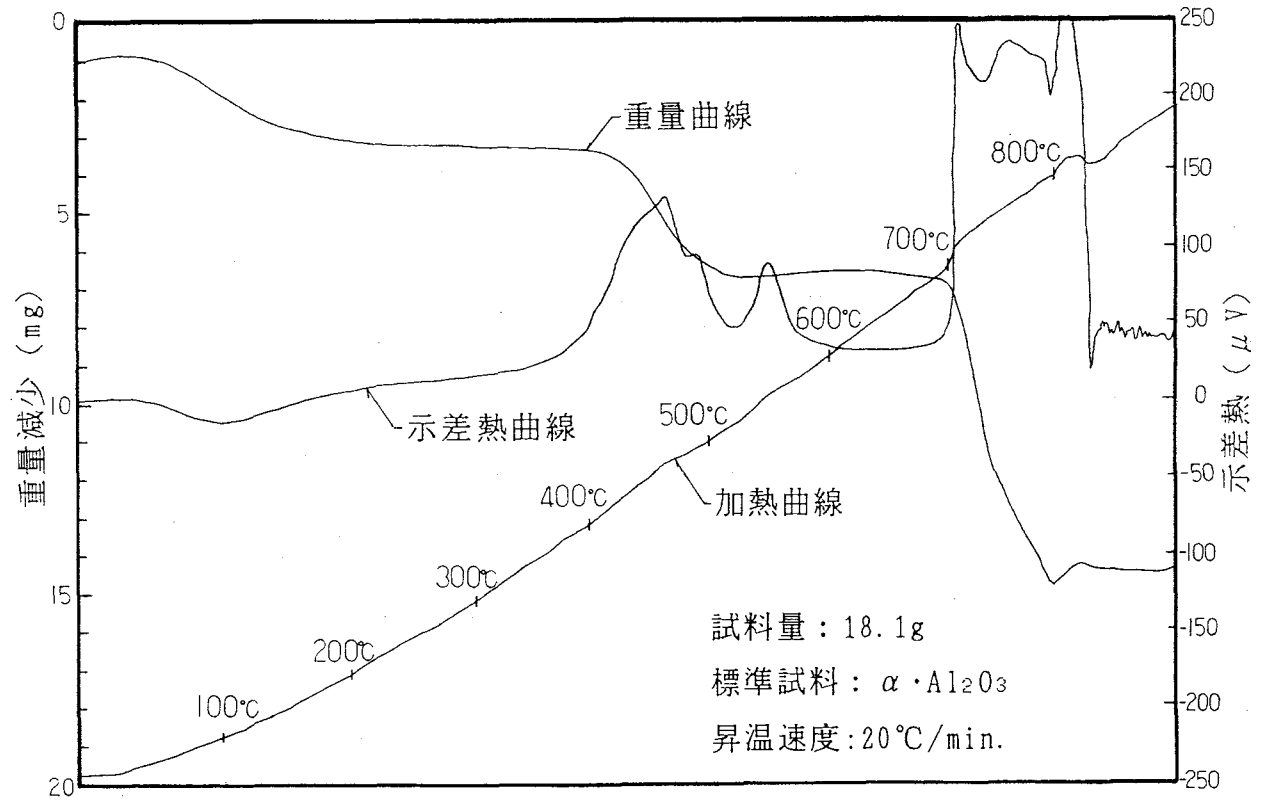


図2.13　ナフタリン系混和剤の示差熱重量分析結果

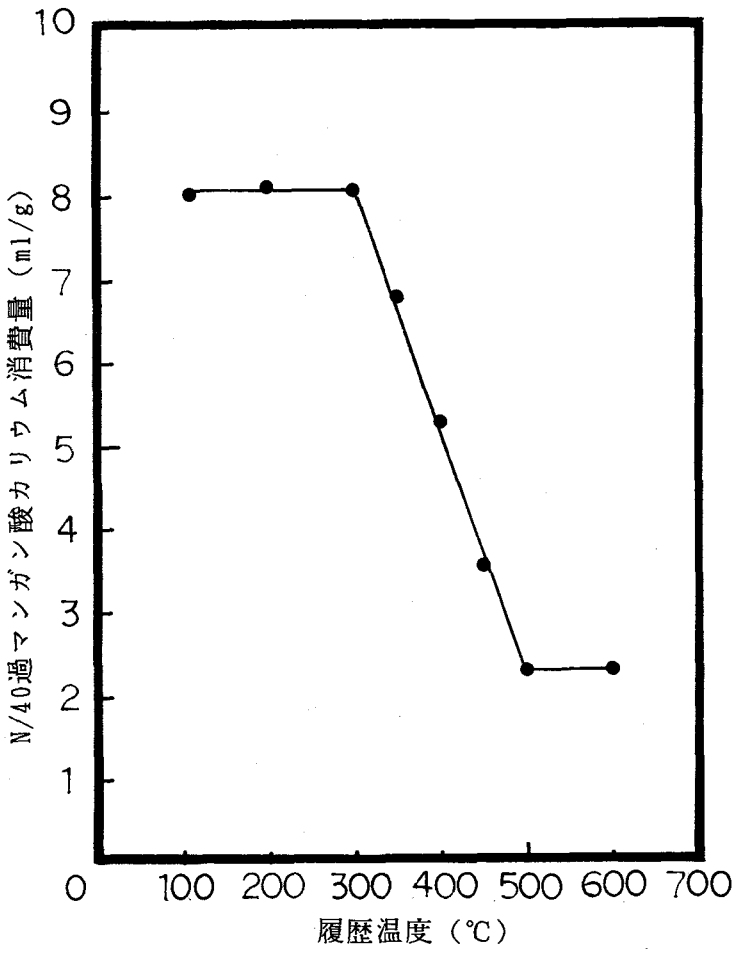


図2.14　履歴温度とN/40過マンガン酸カリウム消費量の関係

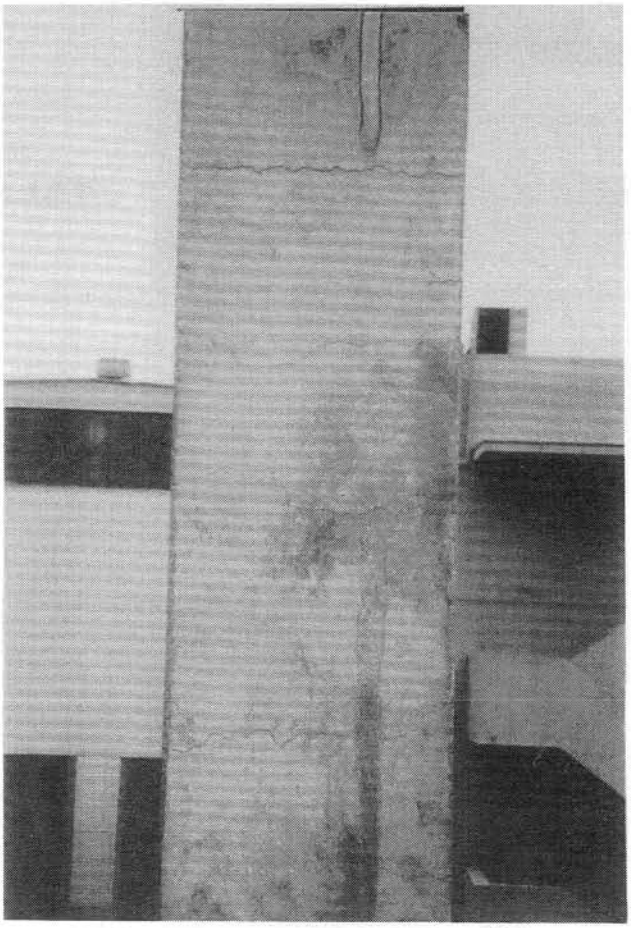


写真2.1　ＳＲＣ柱の加熱後の状況

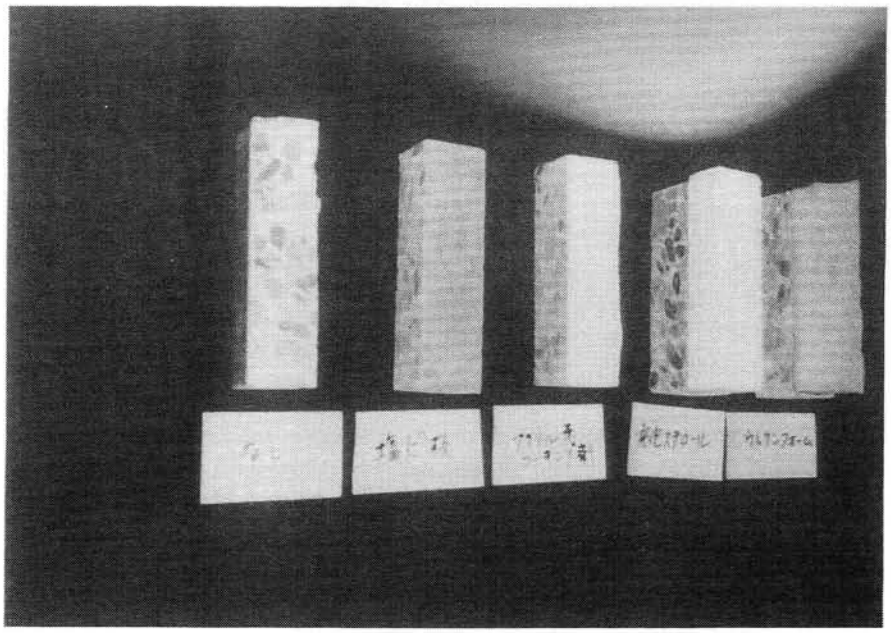


写真2.2　試験体の加熱前の状況

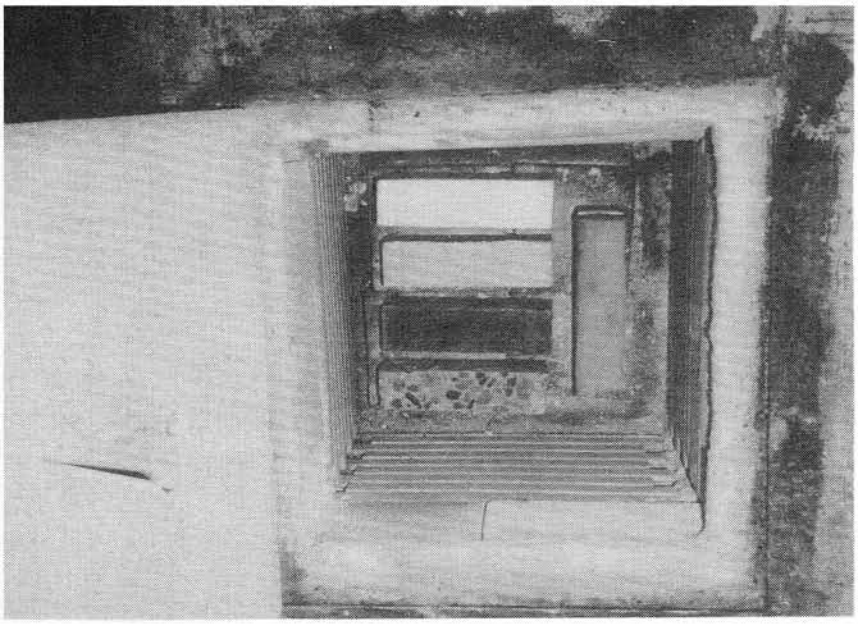


写真2.3　試験体の設置状況

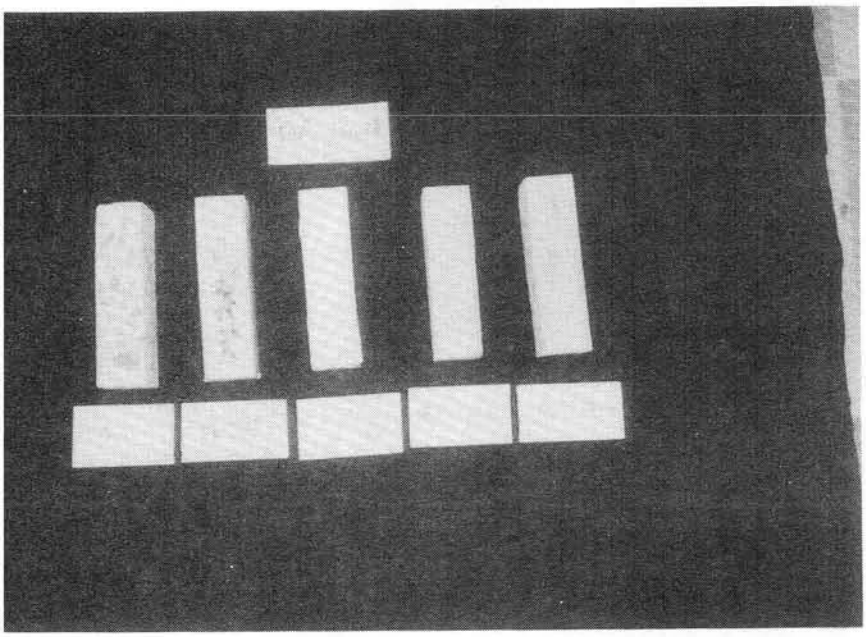


写真2.4　試験体の加熱後の状況



写真2.5　パラペット及び
屋上の火害状況（１）

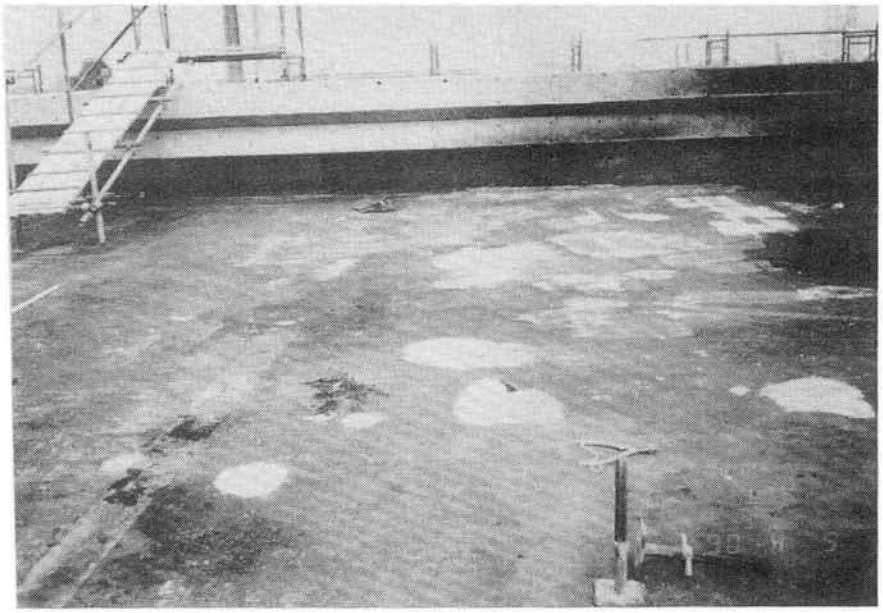


写真2.6　パラペット及び
屋上の火害状況（２）

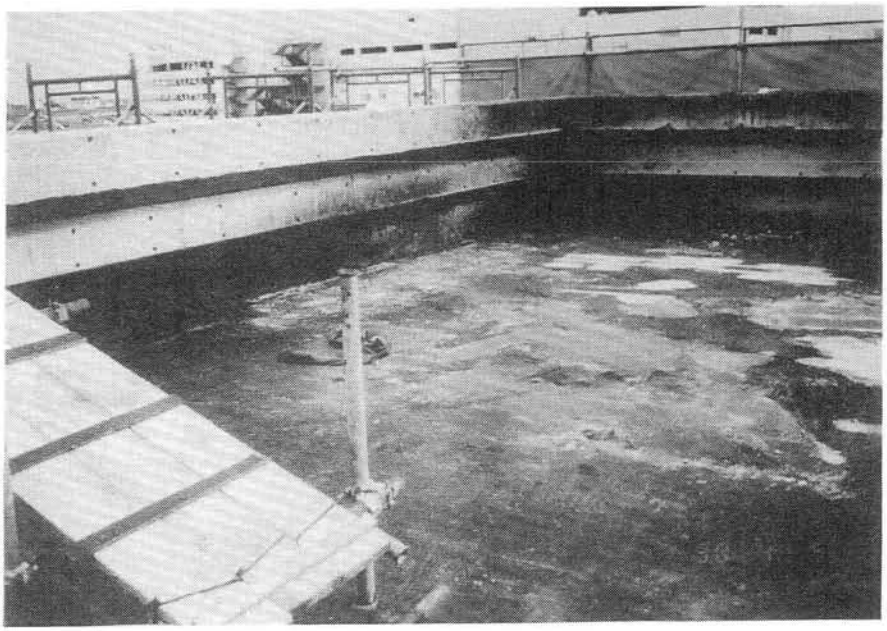


写真2.7　パラペット及び
屋上の火害状況（３）

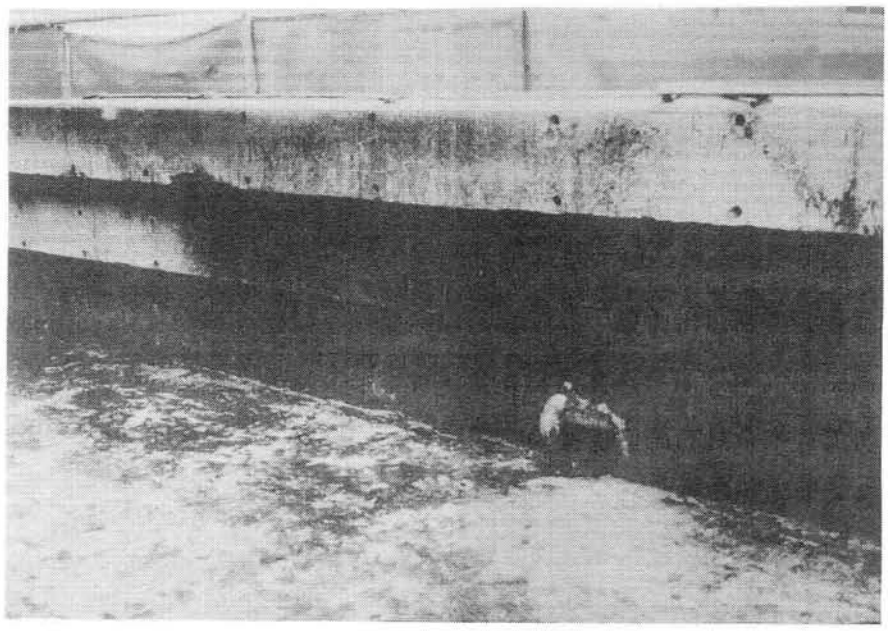


写真2.8　パラペットの
火害状況（１）

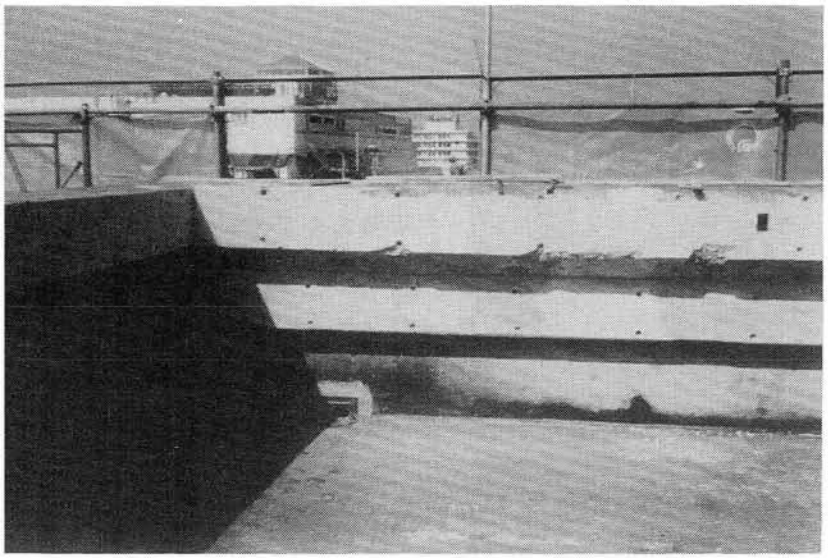


写真2.9　パラペットの
火害状況（２）

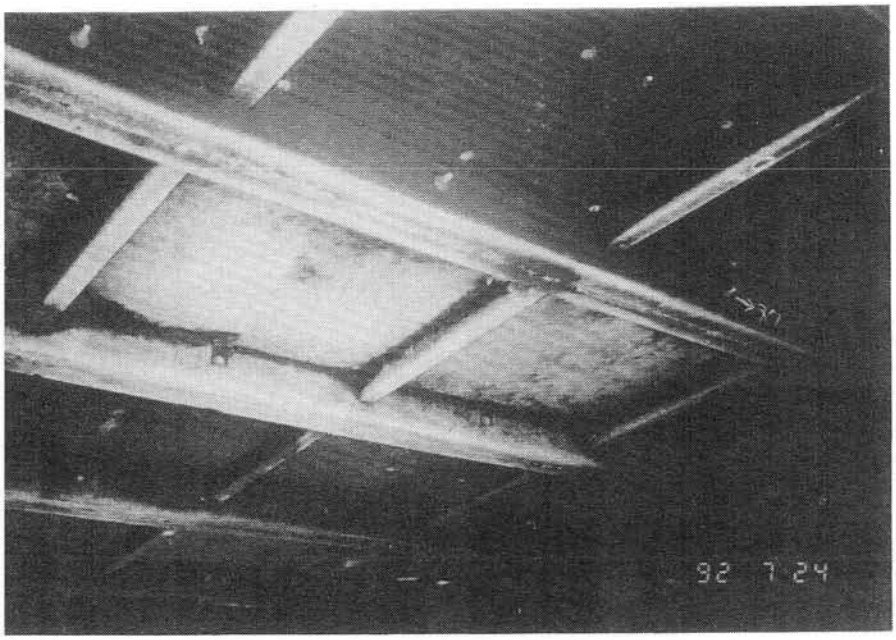


写真2.10　屋根下面（階段室）の
火害状況

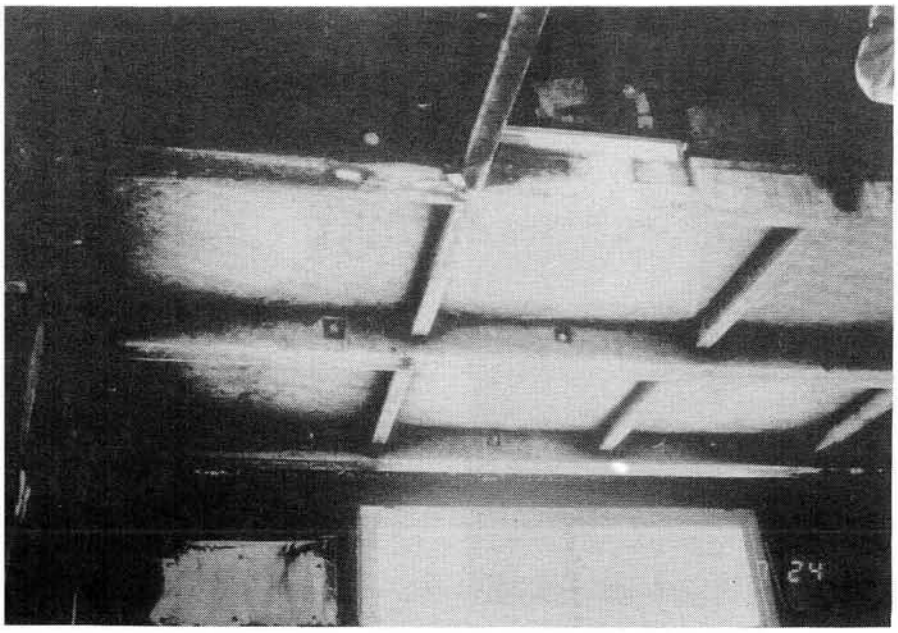


写真2.11　２階床下面（和室）の
火害状況

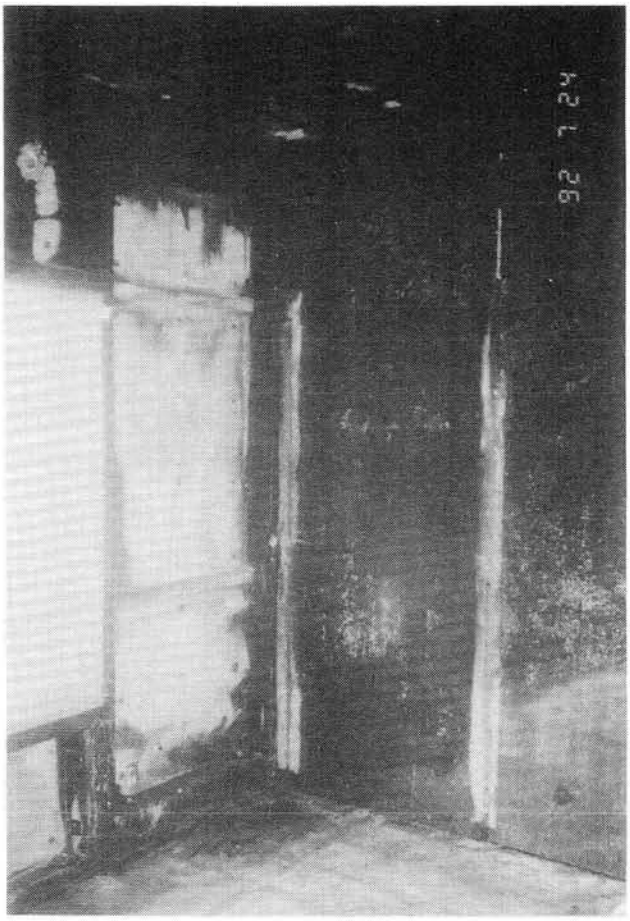


写真2.12　2階和室4帖の火害状況

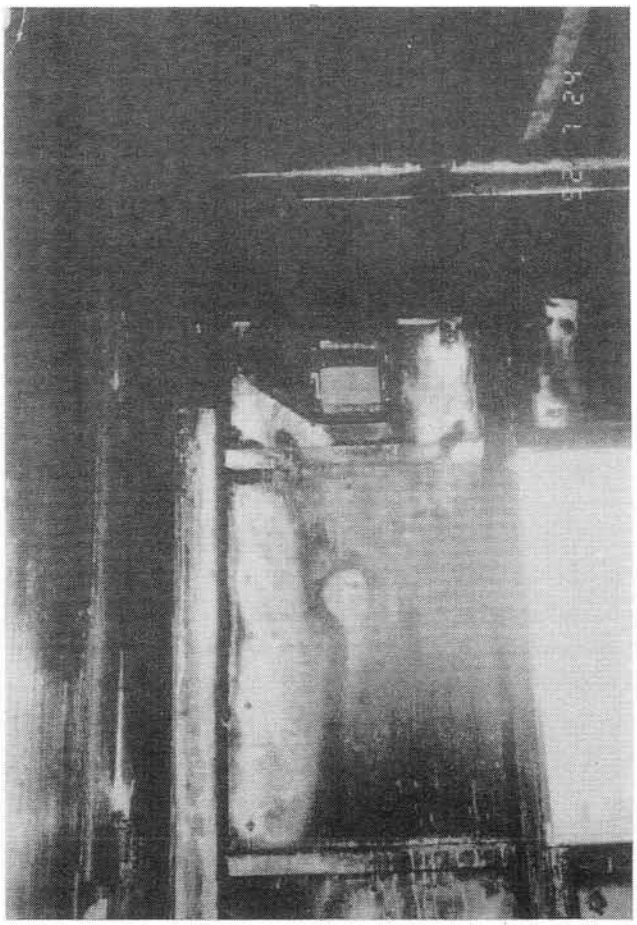


写真2.13　1階台所の火害状況

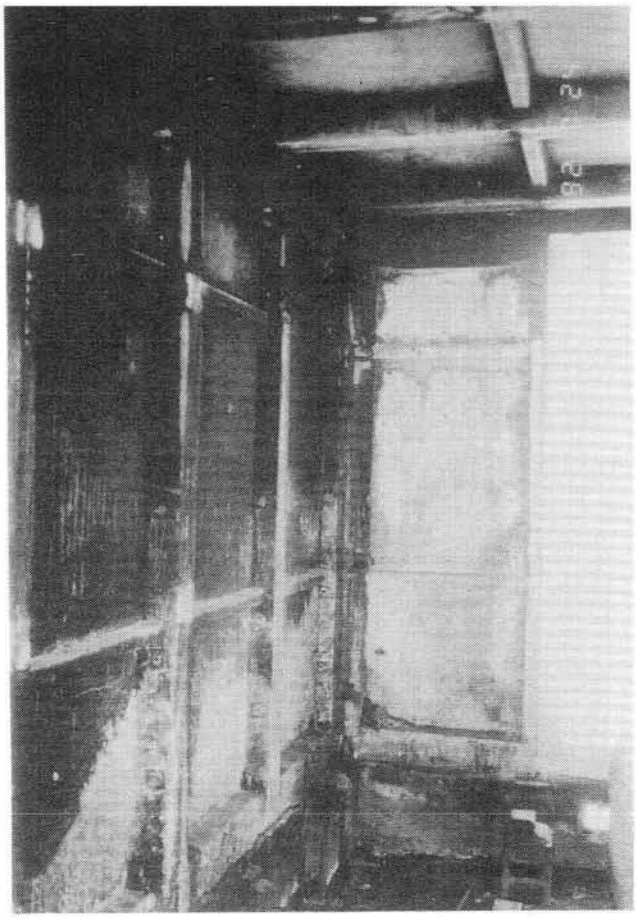


写真2.14　1階和室4帖の火害状況

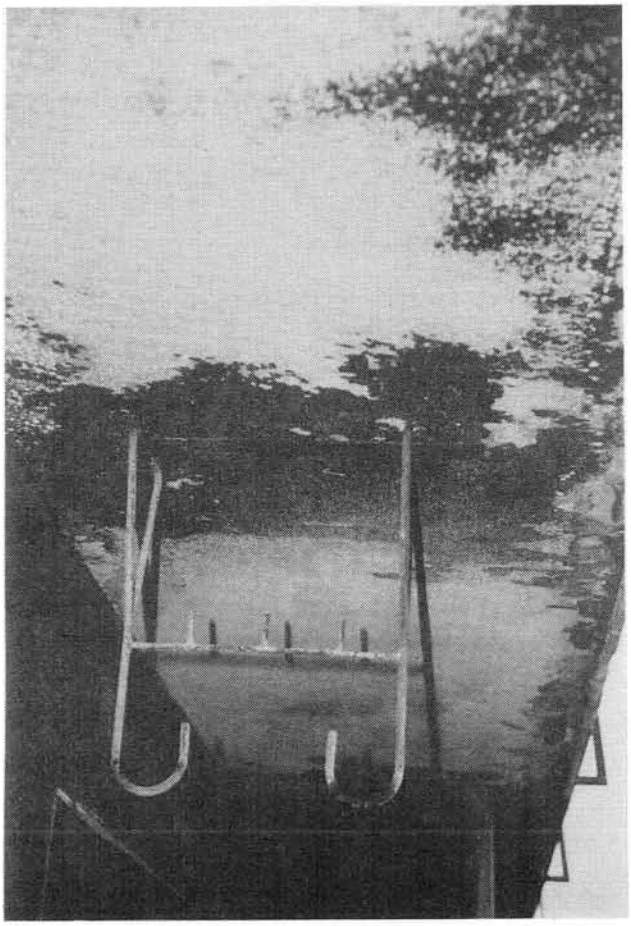


写真2.15　バルコニー部分の火害状況



写真2.16　台所部分の火害状況

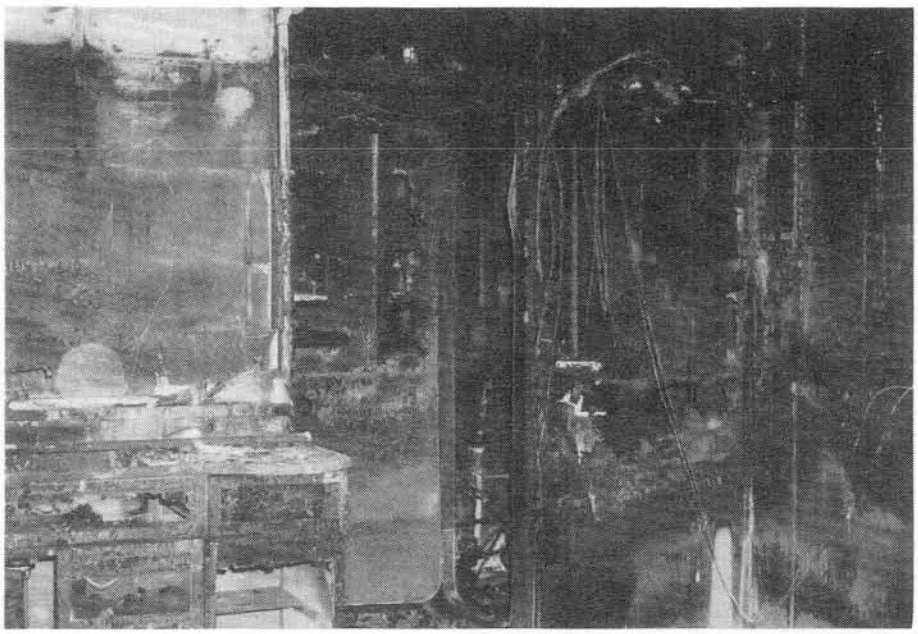


写真2.17　台所西面壁の火害状況

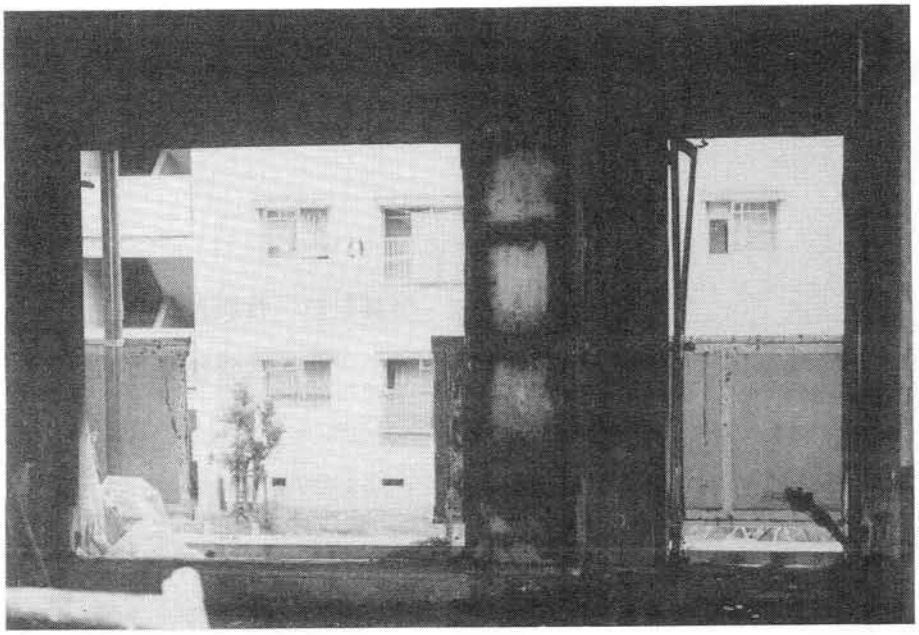


写真2.18　和室4.5帖及び
台所南面壁の火害状況

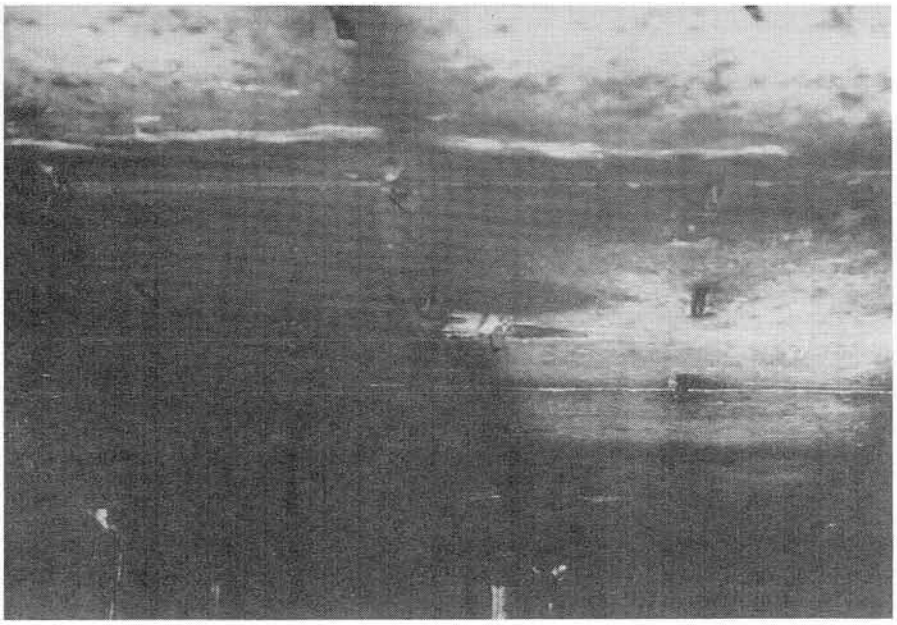


写真2.19　和室4.5帖天井の
火害状況（１）

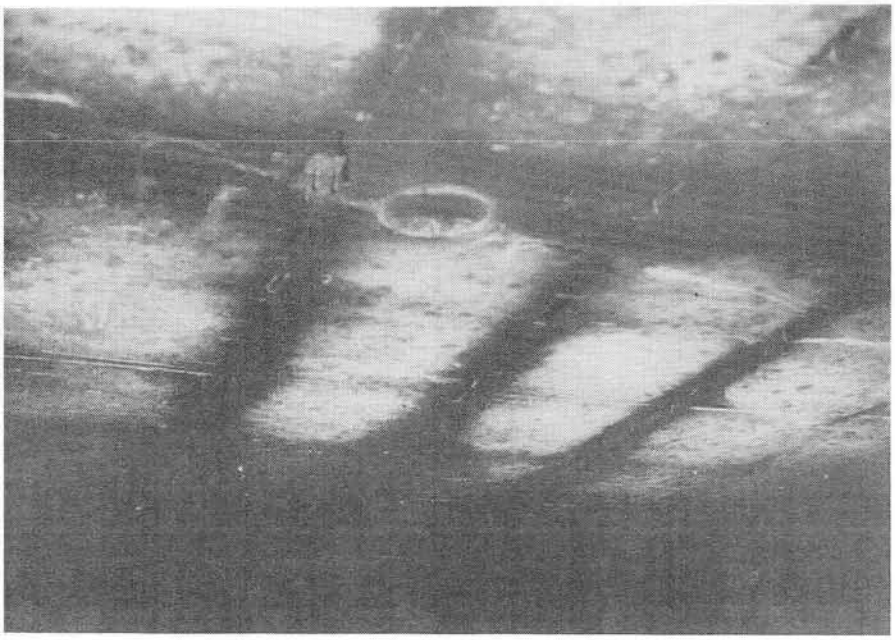


写真2.20　和室4.5帖天井の
火害状況（２）

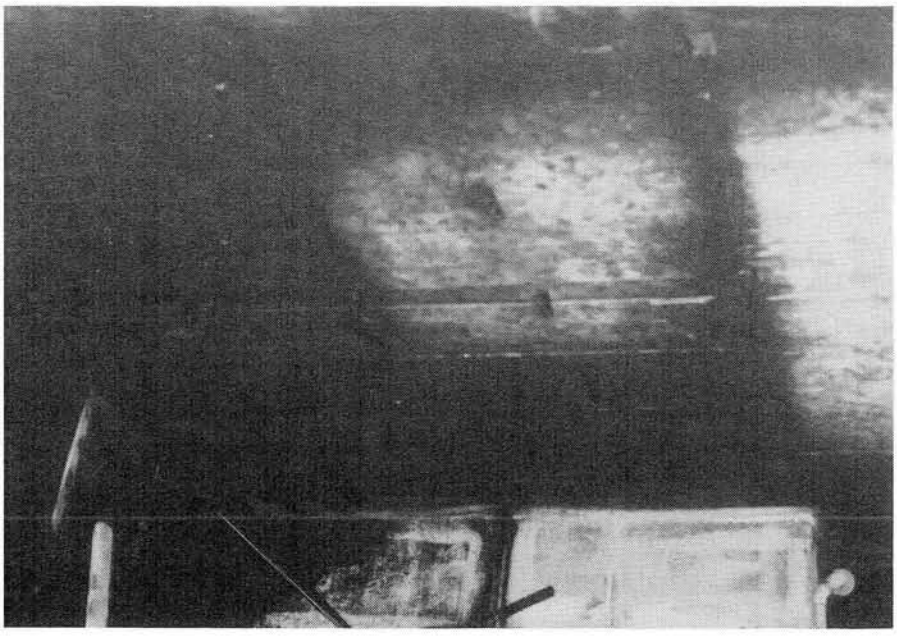


写真2.21　台所天井の
火害状況（１）

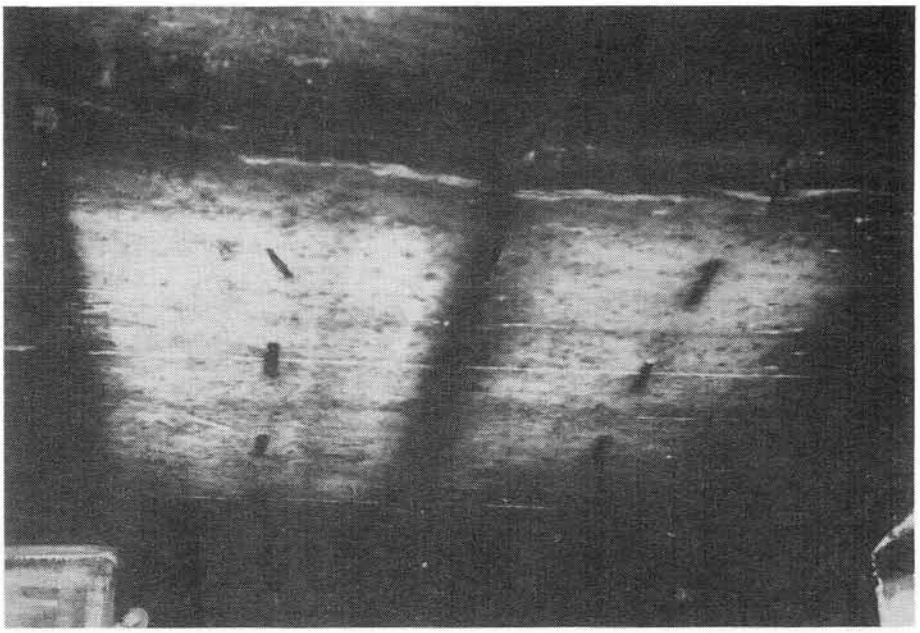


写真2.22　台所天井の火害状況（２）



写真2.23　袖壁部分の火害状況（１）

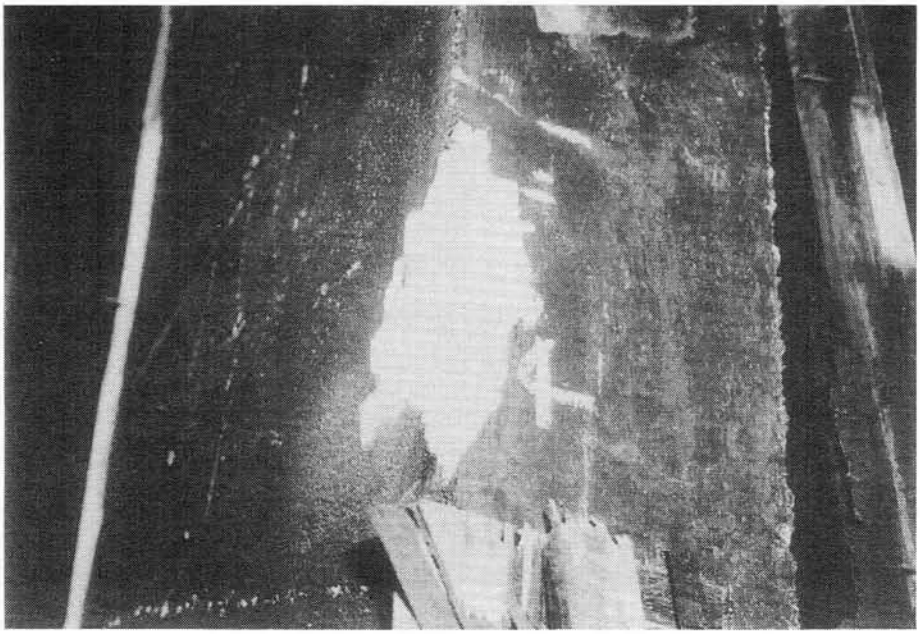


写真2.24　袖壁部分の火害状況（２）

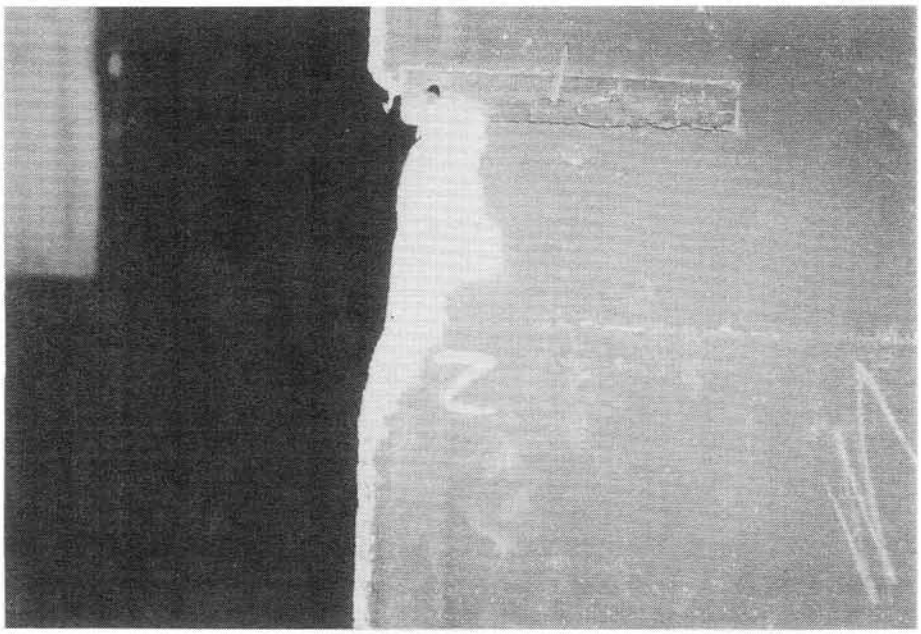


写真2.25　袖壁部分の火害状況（３）

第２編　火災後のコンクリート系部材の受熱温度分布及び残存耐力の推定に関する研究

第１章　火災時におけるコンクリート系部材の内部温度特性

１．１　はじめに
１．２　複合板の内部温度特性
１．３　骨材の種類の違いによるコンクリート内部温度特性
１．４　合成床版における断面形状の違いが内部温度に与える影響
１．５　合成床版におけるコンクリートの種類が内部温度に与える影響
１．６　火災時におけるコンクリート系区画部材の内部最高温度
１．７　まとめ

１．１　はじめに

近年、建物が高層化するにともない、躯体の軽量化、工期の短縮化が図られ、床スラブについても合成床版としてデッキプレート上にコンクリートを打設する工法が広く普及してきた。しかし、この工法による床の耐火性能についてはデッキプレートの断面形状、コンクリートの厚さ及び使用骨材の種類等、種々の組合せが考えられ、計算により内部温度を推定することができれば、火害診断に有用である。なお、予測手法としては既に寺井らの提案式[50]があるが、実験により十分な検証がなされているとは言い難い。コンクリート系部材の火害診断を的確に行うために、火災時におけるコンクリートの内部温度特性を正確に把握する必要がある。本章では、加熱温度、含水率及び周囲温度等種々の実験条件を変化させ、コンクリート内部温度推定に関する基礎的な実験を行い、その内部温度特性がどのように変化するかを調べた。さらに、実大の合成床版の耐火試験より、断面形状、コンクリートの種類の違い等が内部温度に与える影響について調べ、簡易計算による受熱温度分布の推定のための基礎資料とした。最後に、火災時におけるコンクリート系区画部材の内部最高温度分布を回帰分析し、推定式を導いた。

１．２　複合板の内部温度特性

１．２．１　実験概要

火災時における内部温度特性を把握することを目的として、コンクリートの一面に鋼板が付いた板（以下、複合板と呼ぶ）を用いて、基礎的な実験を実施した。コンクリートの内部温度及び裏面温度に影響を与える要素として、加熱温度レベル・加熱側鉄板（以下、底板と呼ぶ）の有無・裏面温度測定用熱電対の支持方法及び加熱温度測定方法を取り上げ、それらの影響について検討を加えた[52],[53]。また、コンクリート部分の水蒸気発生状況の観察、試験体の重量減少およびコンクリート内部圧力の測定を行い、それらの結果についても述べ、考察を加えた[51],[54]。

１．２．２　試験体

試験体は図1.1に示すような矩形板であり、表1.1に試験体の種類を示す。試験体Ａ～Ｆについては、上面を除く５面が鉄板（厚さ：1.6㎜）で囲まれた箱に普通コンクリートを打

設したものであり、試験体Gについては上面及び下面を除く４面が鉄板で囲まれたものである。コンクリートは、呼び強度を180kgf/cm²とし、内部には径6mm、ピッチ150mmの溶接金網が四周の鉄板と深さ50mmの位置で溶接されている。試験体は、コンクリートの打設後、屋内において自然養生し、その養生時期は試験体Ａ～Ｃについては夏期、同Ｄ～Ｇについては冬期とした。コンクリートの調合を表1.2に示す。

１．２．３　試験装置

加熱炉は、図1.2に示す（財）日本建築総合試験所の床用水平加熱炉を用い、熱源としては都市ガスを使用した。

１．２．４　実験方法

（１）温度

加熱温度についてはJISの耐火標準加熱曲線に従い、表1.1に示す加熱条件を採用した。試験体は、図1.1及び図1.2に示すごとく加熱炉の中央部に四周を固定せず、上部より吊り下げ、セラミックフェルトで四周を遮熱し、側面からの熱の流入を抑えた。加熱終了後は、自然冷却とした。

温度測定点は、図1.1に示す１７点とし、加熱温度（１～３、１６、１７）、鉄板表面温度（４）、コンクリート内部温度（５～８）およびコンクリート裏面温度（９～１５）をそれぞれＫ熱電対を用いて、デジタル多点式温度計測装置（㈱東京測器研究所製）により１分間隔で自動測定を行った。上記（　）内数字は測定点位置番号を示す。

（２）重量減少

加熱中の試験体の重量減少量を写真1.1に示す方法で測定した。すなわち、試験体全体をロードセル（容量：500kgf,感度：0.1kgf）を介して釣り下げ、試験体四周を加熱炉に固定せずに重量減少量を自動記録した。なお、試験体の重量減少量は、次の２通りの補正を施した。

１）炉内圧による浮力を考慮した補正：炉内圧測定値より試験体に加わる浮力を算定し、その浮力によって重量減少量（測定値）を補正したもの。以下、これを重量減少量（補正値（１））と呼ぶ。

２）加熱による底板の酸化を考慮した補正：図1.3に基づき底板の酸化による重量増加分を算定し、その増加分によって重量減少量（補正値（１））を補正したもの。以下、これを

重量減少量（補正値（２））と呼ぶ。

（３）試験体内部圧力

加熱中の試験体内部圧力を図1.4および写真1.1に示すような方法により図1.5に示す位置で測定した。すなわち、底面圧力については底板に圧力測定用鋼管（外径：10.5mm、厚さ：3mm、以下鋼管と呼ぶ）と同径の穴を開け鋼管を溶接し、鋼管を非加熱側へ引き出し、その先端に圧力計を取り付け測定した。また、内部圧力についてはコンクリート面に50mmの深さまで鋼管と同径の穴を開け鋼管を挿入した後、鋼管とコンクリート部分の隙間からの漏気を防ぐように配慮し、圧力計を鋼管先端に取り付け測定した。なお、試験体Ｅ、Ｆでは容量100kgf/cm^{2}の圧力計で①、②の位置を、試験体Ｇでは容量10kgf/cm^{2}の圧力計で③、④の位置をそれぞれ測定し、④の位置では同時に温度を自動記録した。なお、②、③の温度は近傍の測定点：７で代表した。

（４）炉内圧

加熱炉内と外部との差圧をマノメーター（感度：0.01mmH_2O）を用いて、図1.5に示す位置で測定した。試験体下面より10cm離れた位置での静圧と試験体周囲のＡＬＣ版下面での全圧をそれぞれ自動記録した。なお、試験体Ｄ～Ｇについては耐火試験の国際規格ISO 834(1975)の炉内圧の制御基準を採用し、炉内圧測定点：１）を1.0±0.2mmH_2Oの正圧となるように調整した。

１．２．５　実験結果及び考察

（１）加熱温度レベルの違いによる温度測定結果への影響

図1.6に示すようにJISの耐火標準加熱曲線に従い、試験体Ｂについては150分加熱を実施し、試験体Ａ・Ｃについては耐火標準加熱温度の0.9、1.1とし、温度時間面積が同じとなる164分、136分まで加熱試験を実施した。結果より、以下のことが判明した。

１）表1.3～1.5及び図1.7に示すごとく、約100℃における停滞現象（以下、横這現象と呼ぶ）は、コンクリートの内部及び裏面の各温度測定点で顕著に現れ、横這継続時間は加熱温度レベル1.1（試験体Ｃ）が他に比較して短くなっている。横這温度はコンクリートの内部において100～135℃、裏面において80～105℃となっている。内部において横這温度が100℃以上となるのは、水蒸気により内部圧力が上昇するためであり、裏面においてほぼ100℃以下となるのは、裏面ににじみ出した液状水の影響である。

２）コンクリート内部における各測定点の最高温度は、加熱温度レベルが最も高い1.1（試

験体C）が早期に高い温度を示している。

3）コンクリートの裏面の最高温度は、表1.3～1.5および図1.7の測定点9に注目すると、加熱温度レベル1.1（試験体C）が最も高く、早期に現れている。

4）加熱温度の制御については、一定温度範囲内で加熱温度時間面積を調整することとされているが、この場合、加熱温度レベルの低い場合が裏面最高温度は低くなる。従って、JISの耐火試験においては、裏面の最高温度で合否の判定がなされているため、加熱温度レベルの低い場合が有利となる。

次に、温度時間面積について考察を加える。表1.6に示すように、コンクリートについては加熱温度時間面積を一致させても各試験体の最高温度は同一とはならず、加熱温度レベル1.1、1、0.9の順に、高い温度を示している。図1.8～1.10に加熱時間（t）におけるコンクリートの温度測定位置の加熱面からの距離（x）と(1.1)式に示す温度時間面積比率（y）の関係を示す。

$$y=\frac{[\text{加熱時間（t）におけるコンクリートの温度時間面積}]}{[\text{加熱時間（t）における加熱温度時間面積}]} \qquad (1.1)$$

各測定点における比率（y）は時間経過とともに増大し、加熱の影響が大きくなる。また、加熱時間が増加するにつれ、すべての試験体において比率（y）と距離（x）とは対数の関係に近づく。

図1.11にすべての試験体における加熱温度時間面積を同一とした場合の比率（y）と距離（x）との関係を示す。加熱温度時間面積を同一とすると、それぞれの測定点では，温度時間面積比率（y）はほぼ一致し、距離（x）との間で一定関係が認められる。加熱温度時間面積の値が大きくなるにつれ、(1.2)式に示す対数関係に収束する。

$$\log y = f + g \cdot x \qquad (1.2)$$

ここで、f：外的要因（加熱等）による定数、

g：材料特性による定数（1/mm）

加熱終了時のf、gを求めると、f：-0.182～-0.145、g：-0.009となる。

（2）底板の有無の違いによる温度測定結果への影響

表1.7、表1.8及び図1.12に示すごとく材令がほぼ等しい試験体F（底板有）、G（底板無）において、150分加熱を実施した。ただし、加熱前の両試験体には含水率に2％の差が生じていた（養生は同一条件）。結果より、以下のことが判明した。

1）試験体Gの横這温度は、試験体Fに比べ測定点6において約20℃、同7において約10

℃低く、同８、９においてはほぼ等しくなっている。また、試験体Ｇの横這開始時間はどの測定点も早く、横這継続時間は短くなっている。

２）底板があることにより水分の逸散は押さえられ、温度上昇は緩やかになり、内部圧力が上昇しやすくなっている。

（３）熱電対の支持方法による裏面温度測定結果への影響

試験体Ｆ・Ｇにおいて、図1.13に示す代表的な３つの熱電対支持方法を選び、裏面温度を測定した。結果より、以下のことが判明した。

１）表1.9、表1.10、図1.14及び図1.15に示すごとく、裸の熱電対とISO法は同じような傾向を示し、JIS法は100℃に至るまでの時間において他の支持方法と比較して温度勾配が急であり、横這開始時間は最も早くなる。また、100℃で横這現象を顕著に示し、横這継続時間は短くなっている。

２）最高温度では、JIS法が他の支持方法より70～80℃高い温度を示し、最高温度到達時間はおよそ15分遅くなっている。

３）裸の熱電対については、他の支持方法に比較し、空気の影響を受けやすく、図1.14に示すごとく温度変動が大きくなる傾向が認められる。

４）各支持法とも測定位置により、ひび割れ・水蒸気の噴出・液状水のにじみ等に差が生じ、測定温度に影響を与えている。

５）この試験において、JIS法を他の支持方法と比較してみると、加熱終了時点では温度測定値に大きな差はなく、加熱終了後に大きな差が生じてくる。JISの試験方法の判定では、加熱終了後も含めた最高温度を対象とするため、試験体Ｆの最高温度測定値は、JIS法において275℃、ISO法において210℃、裸の熱電対において210℃となる。試験体Ｇについても同様の傾向がみられ、JIS法と他の支持方法に明確な差が生じている。

６）熱電対の支持方法は、裏面温度への影響が大きく、判定を左右する。

（４）測定方法の違いによる炉内温度への影響

試験体Ｆ・Ｇにおいて、図1.16に示す３方法で加熱温度を測定した。結果より、以下のことが判明した。

１）表1.11、表1.12、図1.17及び図1.18に示すごとくISO法はJIS法に比較し、測定温度で30～40℃、加熱温度時間面積で約10％高い値を示している。また、JIS法と同じ位置にあるISO法による測定結果はJIS法とISO法との中間の数値を示している。

２）本結果から、ISO法がJIS法に比較し、加熱がゆるやかである。

（５）加熱温度レベルの違いによる重量減少および水蒸気発生状況について

試験体Ａ～Ｃの重量減少及び炉内圧の測定結果を図1.19～図1.21に示す。図中には水蒸気発生状況と内部温度の横這時間も示した。なお、試験体Ｂの測定結果にこれらの説明を付け加えた。また、各試験体の加熱終了後の重量減少を表1.13に、加熱温度レベルの違いによる内部温度と重量減少の比較を図1.26にそれぞれ示す。結果より以下のことが判明した。

１）加熱終了後の重量減少量は加熱曲線の違いによる影響をほとんど受けず、含水率による影響を大きく受けると考えられる。

２）加熱温度レベルが高いほど、加熱初期の重量減少量が大きく現れる。これは内部温度の横這時間が早期に現れていることからも分かるように、内部温度の急激な上昇にともない水分が試験体裏面へ盛んに移動するためである。

３）加熱中の炉内圧の変動は加熱温度勾配が大きいほど激しい。特に、試験体Ｃの加熱初期は著しい。

（６）底板の有無の違いによる重量減少および水蒸気発生状況について

試験体Ｄ～Ｇの重量減少および炉内圧の変化を図1.22～図1.25に、加熱終了後の重量減少を表1.14に、底板の有無の違いによる内部温度と重量減少の比較を図1.27にそれぞれ示す。結果より、コンクリートの含水率が試験体の重量減少量に大きな影響を与えていると考えられる。すなわち、試験体Ｇ（底板無）は試験体Ｆ（底板有）に比べ含水率が低く、加熱中および終了後も重量減少量は少ない。なお、試験体Ｇは養生期間中、上面以外にも下面からもコンクリートの水分が蒸散し、試験体Ｆとほぼ同じ材令にもかかわらず、含水率が低下したものと考えられる。また、試験体Ｇは温度測定結果より、底面の温度上昇時期が早く、内部温度の横這継続時間が短いことからも水分の蒸発が少なかったものと推測される。

（７）試験体内部圧力と温度の関係について

試験体Ｅ～Ｇについて内部圧力の経時変化を調べたが、底面で加熱初期の段階で鉄板とコンクリートが剥離し、試験体Ｆの内部ではコンクリート部分と鋼管の気密性が低下し、それぞれ圧力の上昇が少なく、100kgf/cm^{2}の容量の圧力計では読み取れなかった。試験体Ｅ、Ｇのコンクリート内部圧力と内部温度測定結果を図1.28に示す。また、コンクリート内部圧力と横這温度の関係を表1.15に示す。結果より、以下のことが判明した。

１）内部温度の横這開始直前より内部圧力は急激に上昇し、横這の終了時で内部圧力は低

下し始めている。これは水分が気化し始める時点で蒸気圧が高まり、温度の横這現象が現れ、その後水蒸気が逸散すると圧力が低下し、温度が上昇するものと考えられる。

2）内部圧力に対応する沸点は温度測定結果とほぼ一致する（表1.15参照）。

3）試験体周囲よりも中央部分で内部圧力が高い。これは横這温度が高いことと対応している。目視観察結果からも周囲より水蒸気の逸散が早かったため、周囲の圧力の上昇が少なかったものと推定できる。

（8）コンクリートの爆裂について

試験体Dについては加熱開始41分でコンクリート部分全体で爆裂が生じ、その時点で加熱を中止した。その爆裂現象について考察を加えた。爆裂に至るまでの加熱中の状況を表1.16に、試験体の爆裂後の状況を図1.29及び写真1.2に、また、爆裂後のコンクリートの含水率および空隙率の測定結果を表1.17にそれぞれ示す。加熱中の状況について、試験体Dと試験体A～Cとの間で著しく異なる点はひび割れの発生状況である。すなわち、試験体Dではコンクリート面中央を縦断する形でひび割れが発生しており、これは一連の試験（試験体A～C）では認められない、特異な状態であると考えられる。なお、試験体A～Cではコンクリート面の四隅で周方向にひび割れが発生している。ところで、試験体Dについては周囲の水蒸気の発生を極力抑えるために、試験体側面の鉄板を折り曲げ、非加熱側のコンクリート面に埋め込んだ形となっている。従って、熱膨張したコンクリート部分が周囲の鉄板より過度な拘束を受け、爆裂に起因する応力が発生したと考えられる。このような拘束が原因とも考えられたため、爆裂の発生を未然に防止する目的で、それ以後に試験を実施した試験体E～Gについては周囲の鉄板による拘束を出来る限り解除するように鉄板にスリットを入れるなどの配慮を施した。爆裂に関しては第3編で詳細に述べる。

1．3　骨材の種類の違いによるコンクリート内部温度特性

1．3．1　実験目的

現在、コンクリート用骨材として多種多様な岩質が使用されている。骨材単体としての熱的性質がそれぞれ異なるため、粗骨材の種類によりコンクリートの耐火性能に差異が生じることが予測される。ここでは、3種類の粗骨材を用いたコンクリート製小型供試体について前記**1．2**と同様な加熱実験を行い、粗骨材の種類が火災時のコンクリート内部温度及び裏面温度に及ぼす影響について比較した。

１．３．２　供試体

使用した粗骨材は、表1.18に示すチャート質頁岩（山砂利）、緑簾石質砂岩（砕石）及び玄武岩（砕石）の３種類である。粗骨材の影響を比較するため、コンクリート中の混合材料の容積比が３供試体とも同一となるようにした。

表1.19に示す調合のコンクリートを、図1.30に示す形状、寸法の鉄板製の箱に打設し供試体とした。なお、供試体の養生は、加熱試験時の含水率を５％以下とするため、コンクリート打設後８日目より40℃の乾燥機内で23日間の強制乾燥を行った。

１．３．３　実験方法

加熱試験は、図1.30に示すように都市ガスを熱源とする試作小型加熱炉上部に供試体を設置し、供試体下面より加熱を行った。なお、供試体側面は、外気の影響を避けるため、厚さ12㎜のセラミックファイバー・ブランケットで四周を被覆した。

加熱温度は、JISに規定する耐火標準加熱曲線に従って昇温し、前記１．２と同じ加熱時間（150分）とした。温度は、図1.30に示す位置９点でＫ熱電対を用い、デジタル多点式計測装置により１分間隔で自動測定した。

１．３．４　実験結果及び考察

実験結果を図1.31及び図1.32に示す。結果より、３供試体のコンクリート内部温度及びその裏面温度に顕著な差が現れた。内部温度は、測定位置が加熱面から遠ざかるにつれ、各供試体の温度上昇時間及び100～130℃付近における温度の横這い時間に差がみられ、裏面温度においては、その差がより明確となった。各供試体を比較すると、供試体Ａ（チャート質頁岩）が早期に温度上昇を開始し、約100℃における横這い継続時間が最も短く、最高温度が最も高い値を示す。逆に供試体Ｃ（玄武岩）は、最も遅く温度上昇を開始し、横這い継続時間が最も長く、最高温度も最も低い値となり、供試体Ｂ（緑簾石質砂岩）は、両者の中間の値を示した。また、各供試体の温度上昇、あるいは最高温度到達後の下降は、供試体Ａ－Ｂ－Ｃの順に勾配が緩やかとなり、３種類のコンクリートの熱に対する特徴がよく現れている。

本実験において、上記の差異が生じうる主な原因として、コンクリートの熱伝導率の差が考えられる。常温におけるコンクリートの熱伝導率について、堀[55]は、「同一調合の

コンクリートにおいて、セメントの種類または粗骨材の種類を変化させて熱伝導率を比較した場合、セメントの種類による影響は比較的小さく、粗骨材の種類を同一とし、調合比及び水セメント比を変化させて比較すると、水セメント比一定の場合、粗骨材量と共に増加し、調合比一定の場合には水量の増加に従って減少する傾向にあり、調合比の影響が水セメント比による影響よりもかなり著しく現れる。これは水あるいはセメントに比較して粗骨材の熱伝導率がかなり大きいためである。」と述べている。

本実験に用いた粗骨材をレーザーフラッシュ法により熱伝導率を測定した結果、チャート質頁岩：5.24、緑簾石質砂岩：2.99、玄武岩：1.24（単位：kcal/m•h•℃）であった。その粗骨材を用いた加熱実験用供試体と同一調合としたコンクリートの熱伝導率を熱線法により測定した結果、供試体A（チャート質頁岩）：1.84、供試体B（緑簾石砂岩）：1.57、供試体C（玄武岩）：1.14（単位：kcal/m•h•℃）となり、上記文献と同様、熱伝導率が大きい粗骨材を用いたコンクリートが、熱伝導率が大きくなる結果が得られた。さらに耐火試験の結果においても、熱伝導率の大きい粗骨材を用いたコンクリートの内部及び裏面温度が高くなる傾向が見られ、常温における熱伝導率の差が直接、耐火試験の結果に影響を及ぼしている。

１．４ 合成床版における断面形状の違いが内部温度に与える影響

１．４．１ 概要

１．２及び１．３において、耐火加熱試験時の複合板の耐火性能に影響を与える種々の要因について検討してきた。本節では、合成床版内の山部及び谷部のコンクリート断面の違いが内部温度に与える影響を検討するため、標準施工に基づいて実大の合成床版の供試体を作成し、載荷加熱実験を実施した。

１．４．２ 実験

（１）供試体

供試体は図1.33に示すごとく、下面にデッキプレート（厚さ：1.2mm）を用い、上部に普通コンクリート（呼び強度180kgf/cm²）を打設したスラブとし、内部には、径6mm、ピッチ100mmの溶接金網を非加熱側表面より30mmの位置に設定した。供試体寸法は外寸幅168cm×長さ676cmとし、スパン間隔334cmと327cmの連続２スパンとした。供試体条件を表1.20に、

コンクリートの調合を表1.21にそれぞれ示す。供試体は、コンクリート打設後、オートクレーブ養生を実施した。

（２）実験方法

加熱炉は図1.33に示す（財）日本建築総合試験所の床用水平加熱炉を用い、熱源としては都市ガス（13A）を使用した。加熱はJIS A 1304の耐火標準加熱曲線に従い、載荷加熱実験を実施し、載荷加熱時間は121分間とした。供試体の載荷条件は図1.34に示すごとく、660kgf/m^2（550kgf/m^2×1.2）の等分布荷重がスパン長334cmに加わった場合の最大曲げモーメントと同じ値が作用するように３等分２線載荷とし、１線当り1389kgfの荷重（１スパン当り2778kgf）を両スパンに載荷した。試験状況を写真1.3に示す。図1.34及び図1.35に示すごとく、スパン長334cmにおける測定位置をⅠ、スパン長327cmにおける測定位置をⅡとし、それぞれの位置においてコンクリート厚さの薄い部位（山部）と厚い部位（谷部）の内部温度を測定した。測定位置Ⅰ、Ⅱとも山部において４点、谷部において６点の計１０点の内部温度をＫ熱電対を用い、１分間隔でデジタル多点式温度計測装置（東京測器研究所製）により自動測定した。

１．４．３　実験結果及び考察

加熱側デッキプレートの形状にともなうコンクリートの断面形状（山部及び谷部）の違いが内部温度に与える影響を調べるため、供試体Ａにおける測定位置Ⅰ及びⅡの山部・谷部の内部温度を測定した。その結果を図1.36および図1.37に示す。結果より、以下のことが判明した。

１）コンクリート底部（測定点１、７）の山部・谷部における温度は、加熱開始後４分ぐらいから温度差が生じ、６０分以降、測定位置Ⅰにおいては90℃の差、Ⅱにおいては60℃の差がそれぞれ生じている。このことは、加熱側からの流入熱量が山部と谷部に差があり、温度時間面積で比較すると、測定位置Ⅰでは1.2倍、Ⅱでは1.1倍となっている。

２）非加熱側表面から同一深さにある測定位置においては、明らかに山部の温度が高くなっている。測定位置Ⅰにおける60分時及び121分時の各測定点温度と非加熱側からの距離との関係をそれぞれ図1.38及び図1.39に示す。その結果、山部においては、流入熱量が谷部に比較し少ないものの、同一深さにおいては、山部が高い温度を示している。また、各測定点における最高温度も山部が早期に高い温度を示している。

３）100℃付近の横這現象は谷部のコンクリート底部（測定点１）を除き、各測定点で現れ

ている。横這温度は、100℃～125℃を示し、前記１．２における無載荷の供試体に比較すると、少し低い。これは、ひびわれの発生により、水蒸気圧がさ程上がらないためと思われる。

４）裏面及び鋼材の各温度測定は測定位置Ⅰ、Ⅱでは実施しなかったが、他の位置における裏面及び鋼材の各温度測定結果では、内部温度と同様に山部と谷部では明かに差が現れている。本実験の供試体の断面形状においては山部が谷部に比較し、温度が高くなり、弱点部となる。

１．５ 合成床版におけるコンクリートの種類が内部温度に与える影響

１．５．１ 概要

従来、普通コンクリートと軽量コンクリートでは、空隙率や骨材の熱的性質等の物性値に著しい差があり、耐火性に差が生ずると考えられてきた。筆者らの研究[56]によると、含水率が等しい場合、軽量コンクリートは普通コンクリートに比べ、コンクリート内部・裏面温度ともに低く、耐火試験においては有利である。コンクリートの種類（普通コンクリート及び軽量コンクリート）の違いがコンクリート内部温度に与える影響について、１．４と同様に、実大の合成床版の供試体を作成し、載荷加熱実験を実施した。本節では、その結果について述べる。

１．５．２ 実験

（１）供試体

供試体は１．４と同様、図1.40に示すように、デッキプレートに普通コンクリート（山部厚：90mm）または軽量コンクリート（山部厚：85mm）を打設した合成床版、計２体である。供試体の寸法は幅168cm、長さ695cm、スパン間隔340cmの連続スパンである。供試体の条件、コンクリートの調合及び物性をそれぞれ表1.22及び表1.23に示す。

（２）実験方法

加熱試験の載荷方法は、等分布荷重（660kgf/cm²）による最大曲げモーメントと同じ値が作用するような１スパンにつき３等分２線載荷とし、１スパン当たり2828kgfの載荷で実施した。ただし、加熱開始後113分より荷重を漸増させ、表1.22に示す最終載荷荷重まで載荷し、その時点で加熱を中止した。コンクリート内部温度の測定は１．４と同様に、図1.

40に示す位置で１スパンにつき山部３点（測定点：１～３）、谷部５点（測定点：４～８）の計８点とした。

１．５．３　実験結果及び考察

コンクリート内部温度測定結果を図1.41及び図1.42に示す。また、加熱開始後113分時のコンクリート内部温度を表1.24に示す。結果より、以下のことが判明した。

１）内部温度（測定点：１～８）について、加熱開始後113分時で普通コンクリート（供試体Ｎ）と軽量コンクリート（供試体Ｌ）を比較すると、山部で軽量コンクリートが普通コンクリートよりも約20～140℃高く、谷部で約20～90℃高くなっている。軽量コンクリートの場合、断熱効果に期待して普通コンクリートよりも厚みを5㎜薄く設定しているが、断熱効果が充分に発揮されていないと考えられる。これは載荷加熱により、普通コンクリートと同強度で厚みの薄い軽量コンクリートの方が変形しやすく、ひびわれが多数生じたためと考えられる。観察結果からも、軽量コンクリートはひびわれが多数生じており、たわみ量も普通コンクリートに比べ約60％大きくなっている。

２）同位置の山部（測定点：１～３）と谷部（測定点：６～８）の内部温度を加熱開始後113分時で比較すると、山部の方が普通コンクリートで約80～320℃、軽量コンクリートで約80～350℃、それぞれ谷部よりも高い。これは谷部の熱容量が大きいことによる。

３）断面内の温度分布をみると、軽量コンクリートと普通コンクリートでは温度勾配がほぼ同じである。これは断熱性を期待した軽量コンクリートの方に多数のひびわれが生じたため、内部への熱流入が大きくなり、普通コンクリートと温度勾配が同じとなったものと考えられる。

１．６　火災時におけるコンクリート系区画部材の内部最高温度

１．６．１　概要

鉄筋コンクリート造建物の火害診断においては、火災後の各部材の残存耐力を把握することは建物の再使用の可否を知る上で非常に重要である。部材の残存耐力を求めるために、コンクリートの内部温度分布を推定する必要がある。従来、内部温度推定については複雑でしかも精査な図式解及び数値解による非線形熱伝導計算が試みられているが、実用的な簡易推定式は未だ確立されているとは言い難い[41]。従って、実状に沿った簡略式を開発

し、将来、工学者や設計者レベルで容易に火害診断が出来るようなシステムの構築を図るべきであると考えられる。

本節では、床及び壁等の区画部材について過去の耐火試験結果から簡易な推定式を求めることを目的とし、内部最高温度分布を回帰分析した。通常、種々の火災外力が想定されるが、ここでは、火災外力として、JIS A 1304に規定される標準加熱温度曲線に限定した。

1．6．2　床の場合

分析対象とした試験体は、現在、床部材として広く用いられ、過去に多くの耐火試験を実施してきた合成床版である（図1.43参照）。それらの試験体の中からコンクリート内部温度の測定点が5点以上測定されている9件（耐火時間はすべて2時間）を対象とした。コンクリートの物性値の範囲を表1.25に示す。

筆者らは、熱伝導解析を二次式でとらえる[57]ことに着目して、内部最高温度（T（℃））と加熱面からの距離（x（cm））の関係を、多項（二次）回帰による近似を試みた。その結果を表1.26に示す。カーブ・フィッティングの指標となる相関係数が0.976～0.998であり、実験値と分析値とが非常に良い一致を示していることが分かった。ちなみに、1時間時の多項回帰分析を行なった結果は、相関係数が0.959～0.998であった（表1.26参照）。

従って、内部最高温度分布について、(1.3)式に示す二次式で表わされることが分かった。

$$T = a + b \cdot x + c \cdot x^2 \qquad (1.3)$$

ここで、T：温度（℃）、

x：加熱面からの距離（cm）、

a,b,c：係数

軽量コンクリート及び普通コンクリートについて、内部温度の回帰分析値と実験値との比較例を図1.44に示す。なお、軽量コンクリートについては表1.26の番号：3、普通コンクリートは番号：9の試験体を対象とした。図中の凡例の1H及びMaxは1時間時及び最高温度時を、(Exp)及び(Est)は実験値及び分析値をそれぞれ示す。

1．6．3　壁の場合

壁の場合、内部温度を測定している試験体は少なく、多項回帰分析の対象となった試験体はＡＬＣ（厚さ：10cm、絶乾比重：0.52、含水率：15%）で耐火2時間の仕様のもののみであった。最高温度時の回帰分析結果を表1.27に示す。その結果、相関係数が0.998となり、

実験値と分析値とは非常に良い一致を示していることが分かる。ちなみに、1時間時の多項回帰分析結果は、相関係数が0.979であった（表1.27参照）。実験値との比較を図1.45に示す。その結果、特定のものについてではあるが、床と同様に内部最高温度分布について、(1.3)式に示す二次式で表わされることが分かった。

1．7　まとめ

本章は昭和61、62年度に文部省科学研究費として、“耐火試験時のコンクリート床内の熱及び水分同時移動に関する研究”を京都大学と共同で実施し、実験値と計算値との対応を比較した内容の一部を含んでいる。この研究は耐火試験時における合成床版の内部及び裏面温度を推定し、試験を実施せずに、計算により高温時の断熱性能を判断しようとしたものである。実験に関しては（財）日本建築総合試験所が担当した。その結果、実験値よりコンクリート材料の種々のファクター（コンクリートの含水率、コンクリートの種類、コンクリートの熱特性、使用骨材の種類等）がコンクリート内部温度に影響を与えることが判明し、内部温度特性をとらえることが出来た。しかし、この研究では一定の火災条件（与えられた加熱温度曲線）下での内部温度を推定することを目指したものであったため、実火災の場合には、種々の条件（火災室の形状・寸法、火災室内の可燃物の種類・量、仕上げ方法、開口条件、等々）を考慮しなければならないという課題が残った。この点については、次章以降の簡易計算による方法で解決を図った。本章で得られた成果を以下に示す。

（1）加熱中のコンクリート床版の内部温度及び裏面温度を測定し、これらの温度に影響を与える要素として、加熱温度レベルの違い、試験体底板の有無、裏面温度測定用熱電対の支持方法による違いおよび加熱温度測定方法の違いを取り上げ、それらの影響を把握することができた。

（2）コンクリート床版の加熱中の重量減少及び内部圧力の経時変化を定量的にとらえることができ、次のようなことが判明した。①加熱終了後の重量減少は含水率の影響を受ける。②水分の移動に影響する内部圧力は横這温度と相関関係がある。

（3）粗骨材の種類が耐火試験結果に及ぼす影響について調べた。実験結果で示された3供試体の内部温度及び裏面温度における温度差は、コンクリートの耐火性能上軽視できない。コンクリートの大部分を占める骨材の種類あるいは性質が、いかに著しくコンクリー

トの耐火性能を変動させるものであるかを示している。

（４）合成床版内の断面形状（山部及び谷部）及びコンクリートの種類（軽量及び普通）の違いが内部温度特性に与える影響を調べた。その結果、次のようなことが判明した。①山部が谷部に比べ、耐火上弱点となる。②断熱性が期待される軽量コンクリートは載荷加熱では耐火性がさ程発揮されない。

（５）区画部材の内部温度分布特性について考察を行なった。その結果、コンクリート内部温度を回帰分析し、内部最高温度分布の略算式を提案し、一般化した。最高温度分布を二次式で表わせることが判明した。

なお、本章の内１．２及び１．３は昭和61年度文部省科学研究費〔試験研究(1)、No.61 85017　耐火試験時のコンクリート床内の熱及び水分同時移動に関する研究／研究代表者・寺井俊夫〕の補助を受けた。

表1.1　試験体の種類

試験体記号	含水率（%）	材令（日）	試験日	試験日の気温（℃）	加熱温度レベル*	加熱時間（分）	底板
A	5.2	76	1985.10.16	21	0.9	164	有
B	5.7	69	1985.10. 9	22	1	150	有
C	4.7	82	1985.10.22	19	1.1	136	有
D**	6.7	60	1986.12. 6	7	1	41	有
E	6.2	95	1987. 1.10	4	1	150	有
F	6.0	130	1987. 2.14	5	1	150	有
G	4.7	135	1987. 2.19	4	1	150	無

＊　：JISの標準加熱温度曲線を1とする。
＊＊：試験体記号Dについては加熱開始後41分で爆裂したので，試験を中止した。

表1.2　調合

試験体記号	セメントの種類	細骨材の種類	粗骨材の種類	水セメント比（%）	単位重量（kg/m³）				混和剤の使用量（l/m³）	細骨材率（%）	まだ固まらない時の性質			圧縮強度（kgf/cm²）
					水	セメント	細骨材	粗骨材			スランプ（cm）	空気量（%）	単位容積重量（kg/m³）	
A B C	普通ポルトランドセメント	瀬戸内室木島除塩砂	長尾山砕石	63	180	285	830	980	0.713	47.0	5.0	4.4	2210	202
D E F G				64	182	284	822	1010	0.710	46.0	15.5	4.2	2213	197

表1.3　温度測定結果（試験体A，含水率5.2%）

測定位置（温度測定番号）	加熱炉内（1～3）	鉄板表面（4）	ｺﾝｸﾘｰﾄ内部 加熱側表面(5)	ｺﾝｸﾘｰﾄ内部 加熱側より25mm(6)	ｺﾝｸﾘｰﾄ内部 加熱側より50mm(7)	ｺﾝｸﾘｰﾄ内部 加熱側より75mm(8)	ｺﾝｸﾘｰﾄ裏面（9）
横這温度（℃）	—	—	100	110→120	120	120	90
横這開始時間（分）	—	—	7	21	38	45	52
横這継続時間（分）	—	—	2	5	22	45	78
最高温度（℃）	943	907	790	577	398	295	179
最高温度到達時間（分）	164	164	164	166	178	196	202
横這い温度より推定の内部圧力（気圧）*	—	—	1.00	1.41→1.96	1.96	1.96	—

＊：内部圧力を推定する方法として横這い温度を水と蒸気が平衡にある温度として蒸気圧と温度の関係から算出することとした。

表1.4　温度測定結果（試験体B, 含水率5.7%）

測　定　位　置 （温度測定番号）	加熱炉内 （1～3）	鉄板表面 （4）	ｺﾝｸﾘｰﾄ内部 加熱側表面(5)	ｺﾝｸﾘｰﾄ内部 加熱側より25mm(6)	ｺﾝｸﾘｰﾄ内部 加熱側より50mm(7)	ｺﾝｸﾘｰﾄ内部 加熱側より75mm(8)	ｺﾝｸﾘｰﾄ裏面 （9）
横這温度（℃）	—	—	—	105→113	115→129	120	90→100
横這開始時間（分）	—	—	—	13	29	40	55
横這継続時間（分）	—	—	—	8	20	40	58
最高温度（℃）	1040	983	915	640	429	316	205
最高温度到達時間（分）	150	150	150	151	165	183	190
横這い温度より推定 の内部圧力（気圧）*	—	—	—	1.19→1.56	1.67→2.59	1.96	—

＊：内部圧力を推定する方法として横這い温度を水と蒸気が平衡にある温度として蒸気圧と温度の関係から算出することとした。

表1.5　温度測定結果（試験体C, 含水率4.7%）

測　定　位　置 （温度測定番号）	加熱炉内 （1～3）	鉄板表面 （4）	ｺﾝｸﾘｰﾄ内部 加熱側表面(5)	ｺﾝｸﾘｰﾄ内部 加熱側より25mm(6)	ｺﾝｸﾘｰﾄ内部 加熱側より50mm(7)	ｺﾝｸﾘｰﾄ内部 加熱側より75mm(8)	ｺﾝｸﾘｰﾄ裏面 （9）
横這温度（℃）	—	—	—	135	130	120	105
横這開始時間（分）	—	—	—	22	33	45	45
横這継続時間（分）	—	—	—	2	12	33	60
最高温度（℃）	1122	1088	1008	685	455	320	225
最高温度到達時間（分）	136	136	136	140	155	175	180
横這い温度より推定 の内部圧力（気圧）*	—	—	—	3.09	2.67	1.96	—

＊：内部圧力を推定する方法として横這い温度を水と蒸気が平衡にある温度として蒸気圧と温度の関係から算出することとした。

表1.6　温度測定結果（最高温度）

温度測定番号		1～3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
試験体A	最高温度（℃）	943	907	790	577	398	295	179	194	175	195
	時　　間（分）	164	164	164	166	178	196	202	203	204	204
試験体B	最高温度（℃）	1040	983	915	640	429	316	205	208	172	200
	時　　間（分）	150	150	150	151	165	183	190	195	194	195
試験体C	最高温度（℃）	1122	1088	1008	685	455	320	225	205	219	194
	時　　間（分）	136	136	136	140	155	175	180	183	182	187

表1.7　温度測定結果（試験体F, 含水率6.0%）

測　定　位　置 （温度測定番号）	加熱炉内 （1～3）	鉄板表面 （4）	ｺﾝｸﾘｰﾄ内部 加熱側表面(5)	ｺﾝｸﾘｰﾄ内部 加熱側より25mm(6)	ｺﾝｸﾘｰﾄ内部 加熱側より50mm(7)	ｺﾝｸﾘｰﾄ内部 加熱側より75mm(8)	ｺﾝｸﾘｰﾄ裏面 （9）
横這温度（℃）	—	—	—	130→155	150	120	90→100
横這開始時間（分）	—	—	—	27	40	50	80
横這継続時間（分）	—	—	—	18	22	36	60
最高温度（℃）	1030	1012	925	550	395	300	180
最高温度到達時間（分）	150	150	150	156	173	207	225
横這い温度より推定 の内部圧力（気圧）	—	—	—	2.67→5.40	4.70	1.96	—

表1.8　温度測定結果（試験体G, 含水率4.0%）

測　定　位　置 （温度測定番号）	加熱炉内 （1～3）	鉄板表面 （4）	ｺﾝｸﾘｰﾄ内部 加熱側表面(5)	ｺﾝｸﾘｰﾄ内部 加熱側より25mm(6)	ｺﾝｸﾘｰﾄ内部 加熱側より50mm(7)	ｺﾝｸﾘｰﾄ内部 加熱側より75mm(8)	ｺﾝｸﾘｰﾄ裏面 （9）
横這温度（℃）	—	—	—	105→135	141	124	95
横這開始時間（分）	—	—	—	13	35	45	70
横這継続時間（分）	—	—	—	13	12	34	30
最高温度（℃）	1033	—	904	590	430	333	215
最高温度到達時間（分）	150	—	150	156	170	192	200
横這い温度より推定 の内部圧力（気圧）	—	—	—	1.19→3.09	3.57	2.22	—

表1.9　裏面温度測定結果（試験体F, 含水率6.0%）

熱電対支持法	裸				杉板（100×100×150mm）			アスベストパッド（30×30×2mm）		
（温度測定番号）	9	10	11	Ave.	12	13	Ave.	14	15	Ave.
横這温度（℃）	90→100	95	100→120	100	100	100	100	90→105	100→120	100
横這開始時間（分）	80	100	80	87	70	60	65	80	80	80
横這継続時間（分）	60	40	40	47	30	20	25	50	60	55
最高温度（℃）	180	160	210	183	275	270	272	190	210	200
最高温度到達時間（分）	225	225	210	220	230	240	235	220	210	215

表1.10　裏面温度測定結果（試験体G, 含水率4.0%）

熱電対支持法	裸				杉板（100×100×150mm）			アスベストパッド（30×30×2mm）		
（温度測定番号）	9	10	11	Ave.	12	13	Ave.	14	15	Ave.
横這温度（℃）	95	90→105	95→110	100	100	100	100	95→105	80	90
横這開始時間（分）	70	65	65	67	50	55	52	75	50	62
横這継続時間（分）	30	40	50	40	30	30	30	35	35	35
最高温度（℃）	215	213	210	213	315	295	305	205	230	218
最高温度到達時間（分）	200	200	210	203	210	225	218	205	200	202

表1.11　加熱温度測定結果（試験体F）

測定方法 / 時間（分）	試験体面より3cm 2：（JIS，鉄製保護管入）		試験体面より3cm 16：（先端部保護管なし）		試験体面より10cm 17：（ISO，先端部保護管なし）	
	温度（℃）	加熱温度時間面積（℃・分）	温度（℃）	加熱温度時間面積（℃・分）	温度（℃）	加熱温度時間面積（℃・分）
30	819	19862	829	21753	930	24431
60	937	46580	958	49423	1002	53993
90	990	75567	1006	79143	1029	84509
120	1016	105645	1026	109631	1050	115723
150	1030	136332	1036	140576	1060	147386

表1.12　加熱温度測定結果（試験体G）

測定方法 / 時間（分）	試験体面より3cm 2：（JIS，鉄製保護管入）		試験体面より3cm 16：（先端部保護管なし）		試験体面より10cm 17：（ISO，先端部保護管なし）	
	温度（℃）	加熱温度時間面積（℃・分）	温度（℃）	加熱温度時間面積（℃・分）	温度（℃）	加熱温度時間面積（℃・分）
30	870	20889	928	23648	940	24643
60	936	48042	983	52357	974	52801
90	987	76985	1019	82299	1022	82675
120	1023	107173	1049	113360	1052	113859
150	1033	137966	1052	144863	1066	145650

表1.13　重量減少測定結果（試験体A, B, C）

測定項目＼試験体		A	B	C
加熱前の試験体の重量（kg）（（）内はコンクリート部分の重量（kg））		209.2 (190.4)	209.2 (190.4)	208.6 (189.8)
試験体の重量減少量（kg）	加熱開始30分時	2.9	3.1	4.7
	加熱終了時	14.3	14.9	13.5
コンクリート部分の含水率（%）		5.2	5.7	4.7

表1.14　重量減少測定結果（試験体D, E, F, G）

測定項目＼試験体		D	E	F	G
加熱前の試験体の重量（kg）（（）内はコンクリート部分の重量（kg））		221.0 (196.5)	220.7 (196.2)	223.6 (199.1)	212.3 (198.4)
試験体の重量減少量（kg）	加熱開始30分時	4.5	7.4	3.6	1.6
	加熱終了時	—*	18.2	17.3	16.1
コンクリート部分の含水率（%）		6.7	6.2	6.0	4.0

＊：加熱開始41分で爆裂したので，測定不能となった。

表1.15　内部圧力と横這温度の関係

試験体	測定位置	内部圧力の最大値[1)] (kgf/cm²)	1)より求めた横這温度推定値 (℃)	横這温度実測値 (℃)
E	②	3.0	143	158
G	③	2.8	141	141
	④	1.9	132	132

表1.16　加熱中の試験体の状況

時　間 (分：秒)	内　　容
0：00	加熱開始。
6：00 ～ 7：00	底面で小音が2回発生。
7：40	中央部で水蒸気発生。
8：00	四隅で水蒸気発生。
9：30	四隅で水蒸気の発生領域が拡大。
11：10	四周で水蒸気の発生盛ん。
14：00	中央部の水蒸気の発生領域が拡大。
19：00	中央部分にひびわれ発生。→ひびわれ発生部分より水蒸気発生。
22：00	底面でさらに小音が2回発生。
24：00	底面でさらに小音が2～3回発生。
25：30	中央部分のひびわれ幅が最大1㎜に拡大。
27：30	四周の水蒸気の発生が中央へ拡大。
28：00	中央のひびわれ部を中心に幅約10cmの範囲で水蒸気発生。
41：00	全面で爆裂→加熱中止。

表1.17　爆裂後のコンクリートの含水率及び空隙率測定結果

測定項目＼測定部分	下　層 (加熱側)	中間層	上　層 (非加熱側)
含水率 (%)	-0.26	——	6.8
空隙率 (%) *	35	31	24

＊：圧力法による

表1.18　粗骨材の種類及び特性値

記　号	種　　類	吸　水　率 (%)	表 乾 比 重	絶 乾 比 重
A	チャート質頁岩 (山砂利)	0.83	2.60	2.58
B	緑簾石質砂岩 (砕　石)	1.53	2.71	2.67
C	玄　武　岩 (砕　石)	2.61	2.53	2.46

表1.19　コンクリートの調合

記号	セメントの種類	細骨材の種類	粗骨材の種類	水セメント比 (%)	単位重量 (kg／m³)					細骨材率 (%)	打設年月日	まだ固まらないときの性質		実験時の含水率 (%)
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤 (ℓ／m³)			スランプ (cm)	空気量 * (%)	
A	普通ポルトランドセメント	海　砂 (除塩砂)	チャート質頁岩 (山砂利)	64	182	284	822	980	0.71	46.0	62,12,8	20.0	5.6	3.9
B	普通ポルトランドセメント	海　砂 (除塩砂)	緑簾石質砂岩 (砕　石)	64	182	284	822	1020	0.71	46.0	62,12,8	16.3	5.2	3.8
C	普通ポルトランドセメント	海　砂 (除塩砂)	玄武岩 (砕　石)	64	182	284	822	954	0.71	46.0	62,12,8	17.5	4.6	4.0

＊エアメータの指示値を示す。

表1.20　実験条件

記　号	コンクリートの種類	含 水 率	比重（気乾）	材 令	実 験 日	気　温	加熱時間	供 試 体 寸 法
A	普通コンクリート	5.56%	2.22	20日	1987.4.30	20℃	121分	1680mm×6760mm

表1.21　調合

記　号	骨材の種類	水セメント比	スランプ	呼び強度	圧縮強度（試験日）
A	普通	64%	15cm	180kgf/cm^2	245kgf/cm^2

表1.22　供試体の条件

供試体記号	コンクリートの種類	含水率（%）	材令（日）	気温（℃）	最終載荷荷重（kgf）	加熱時間（分）
N	普通	5.3	172	9	6228	133
L	軽量	5.5	188	6	4828	131

表1.23　コンクリートの調合及び物性

供試体記号	骨材の種類	水セメント比 W／C（%）	呼び強度（kgf/cm²）	スランプ（cm）	比重（気乾）	圧縮強度（材令28日）（kgf/cm²）
N	普通	64	180	15.3	2.11	216
L	軽量1種	58	180	15.1	1.62	219

表1.24　コンクリートの内部温度

（加熱開始後113分時、単位：℃）

供試体記号	山部測定点			谷部測定点				
	1	2	3	4	5	6	7	8
N	663	501	186	908	658	371	179	107
L	806	477	208	963	728	460	266	129

表1.25　コンクリートの物性値の範囲

コンクリートの種別	絶乾比重	含水率（%）	調査対象件数
軽量コンクリート	1.53～1.70	5.3～8.15	3
普通コンクリート	2.00～2.12	5.3～6.71	6

表1.26　合成床版の分析結果

調査対象				回帰分析結果					
				多項回帰式（$T=a+b\cdot x+c\cdot x^2$）					1時間時の相関係数
番号	コンクリートの種別	加熱時間（分）	最大厚さ（cm）	標本数	相関係数	回帰式の係数			
						a	b	c	
1	軽　量	120	13.5	5	0.993	1008	-150	6.6	0.959
2		120	16.0	5	0.998	1095	-151	5.5	0.990
3		131	16.0	6	0.996	1002	-57	0.1	0.996
4	普　通	120	14.5	5	0.997	997	-126	4.7	0.980
5		122	15.0	5	0.980	1071	-81	1.7	0.994
6		122	15.0	5	0.976	1054	-74	1.0	0.988
7		120	16.5	5	0.998	1052	-122	4.2	0.989
8		133	16.5	6	0.997	962	-75	1.4	0.986
9		121	17.5	5	0.990	1029	-72	1.6	0.998

表1.27　ＡＬＣ壁の分析結果

多項回帰式（$T=a+b\cdot x+c\cdot x^2$）					1時間時の相関係数
標本数	相関係数	回帰式の係数			
		a	b	c	
6	0.998	1017	-212	11.9	0.979

1～3：加熱温度(ＪＩＳ：試験体面より3cm，鉄製保護管あり)
4　：鉄板表面温度
5～8：コンクリート内部温度(加熱側より表面，25mm，50mm，75mm)
9～11：裏面温度(裸熱電対)
12，13：裏面温度(杉板付熱電対，ＪＩＳ法)
14，15：裏面温度(アスベストパッド付熱電対，ＩＳＯ法)
16　：加熱温度(試験体面より3cm，先端部保護管なし)
17　：加熱温度(ＩＳＯ：試験体面より10cm，先端部保護管なし)
1)，2)：炉内圧

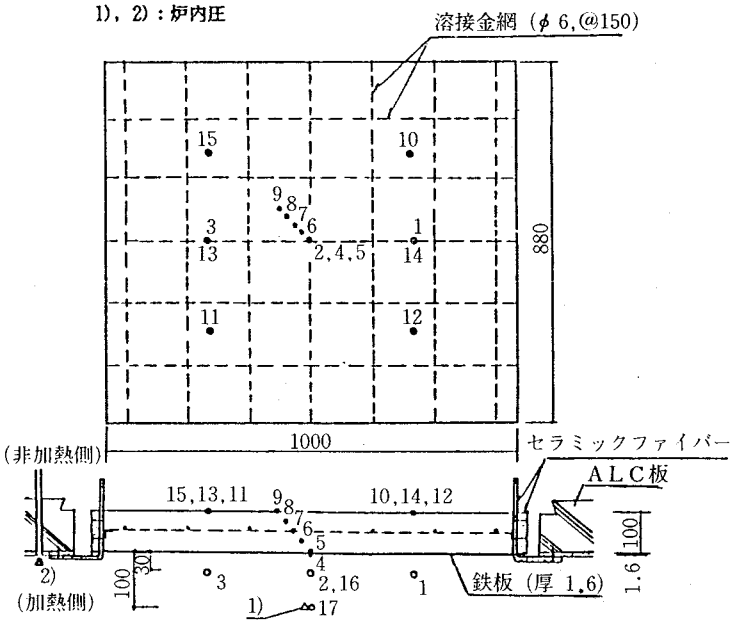


図1.1　試験体の形状及び温度測定位置（寸法単位：mm）

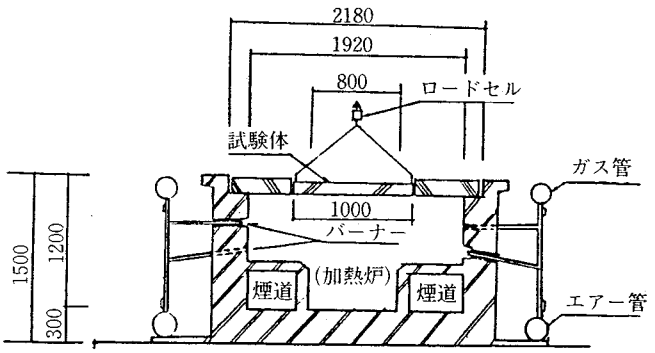


図1.2　試験装置（寸法単位：mm）

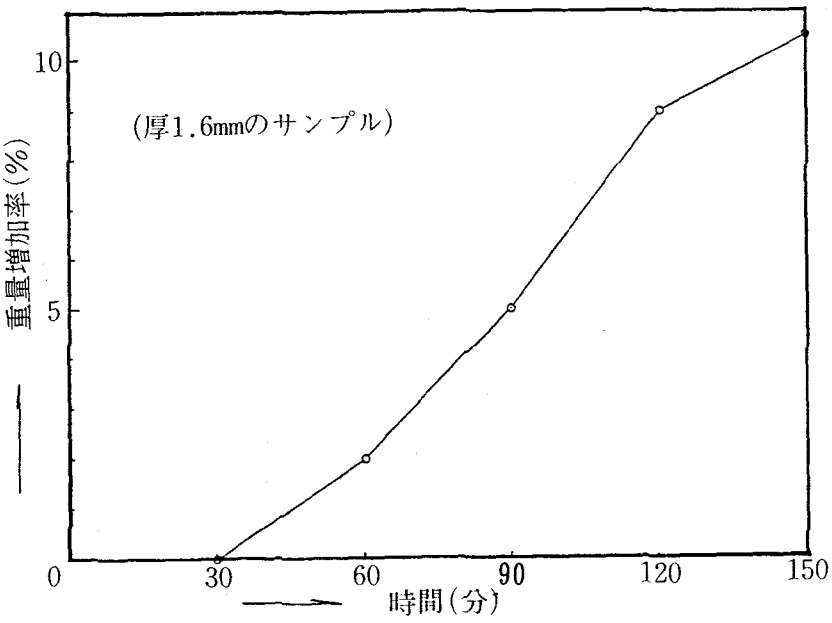


図1.3　加熱試験時の鉄板の酸化による重量増加率

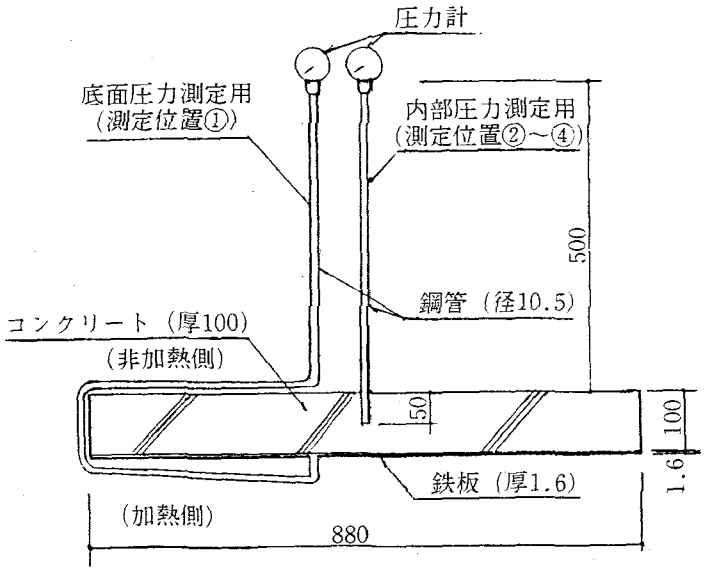
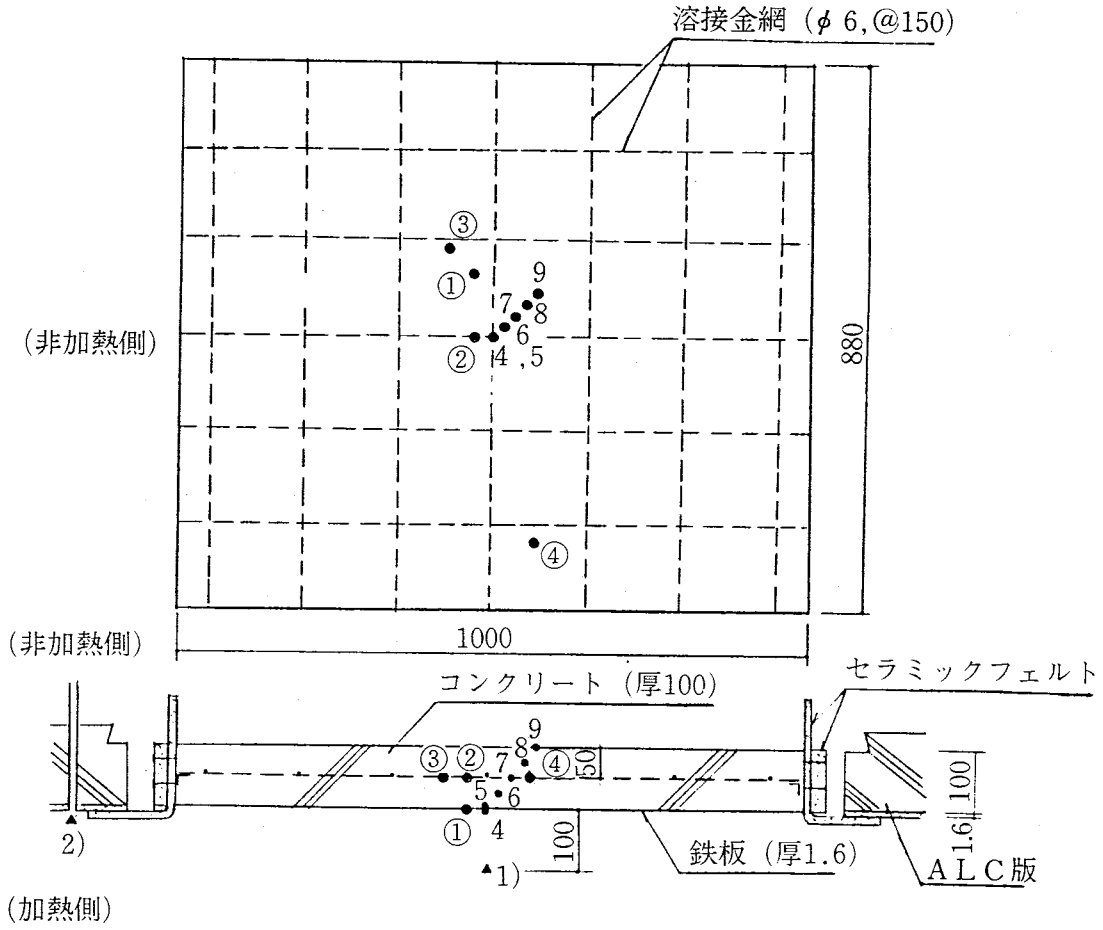


図1.4　試験体の内部圧力の測定方法（寸法単位：mm）



①　：コンクリート底面圧力
②～④：コンクリート内部圧力
　1）炉内圧（静圧）
　2）同　上（全圧）
4　：鉄板表面温度
5～8：コンクリート内部温度
　（加熱側より表面，25mm，50mm，75mm）
9　：裏面温度（裸熱電対）

図1.5　試験体の内部圧力及び炉内圧の測定位置（寸法単位：mm）

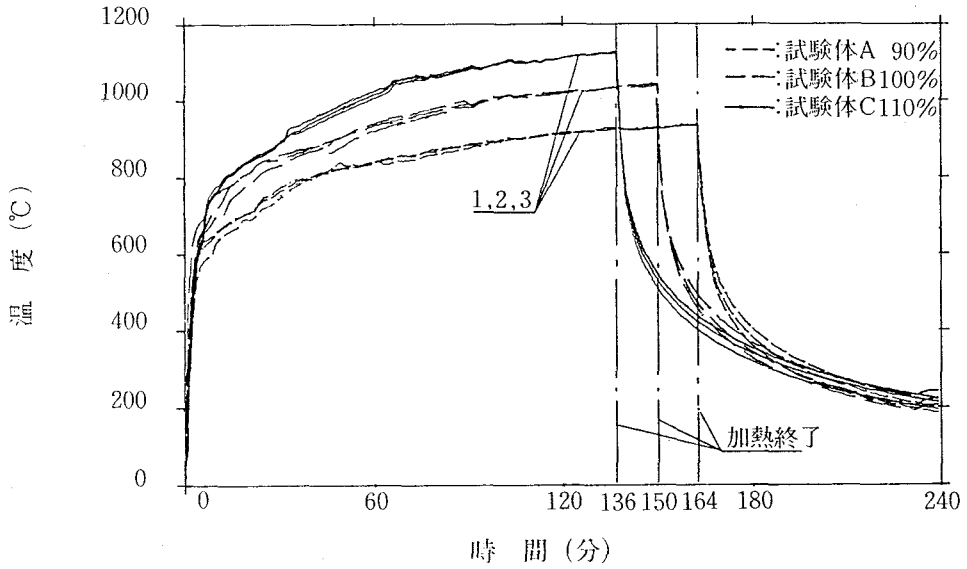


図1.6　加熱温度測定結果

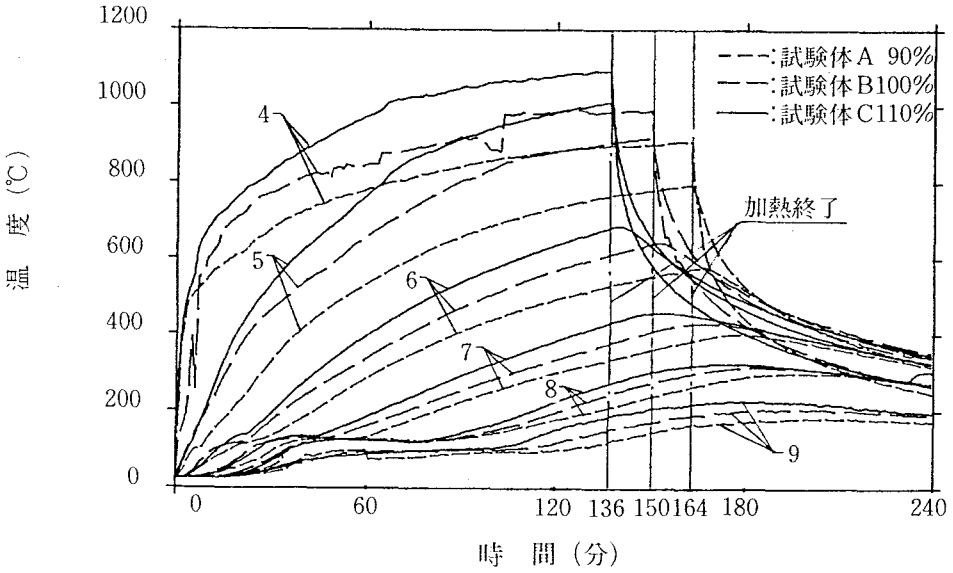


図1.7　表面・内部・裏面温度測定結果

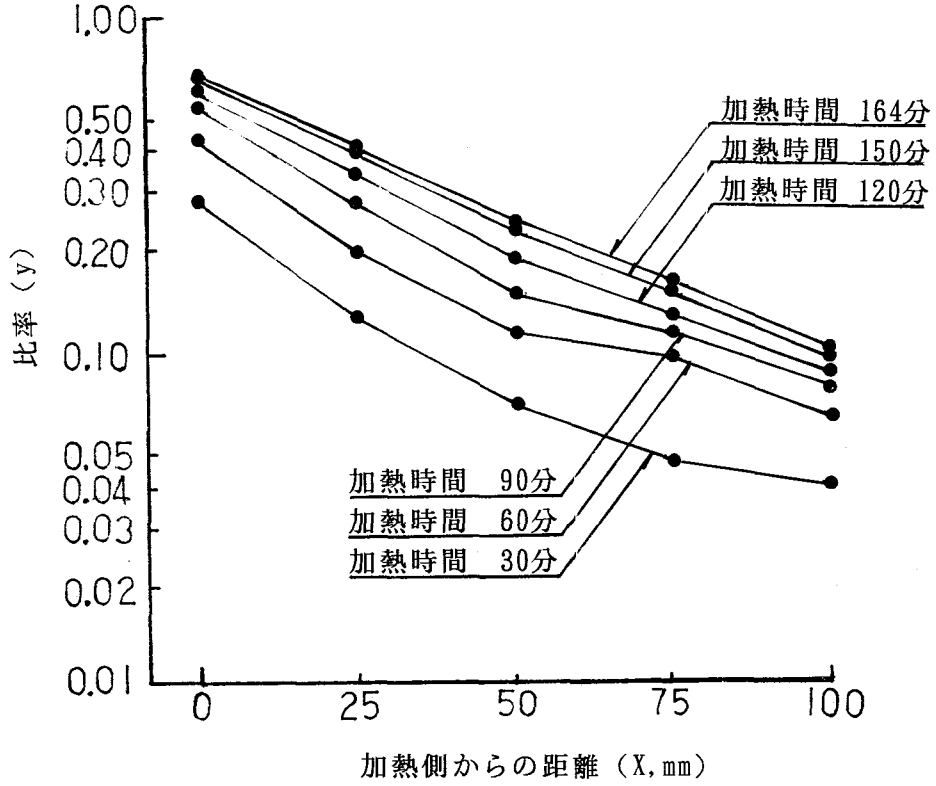


図1.8 比率（y）と距離（x）（試験体A）

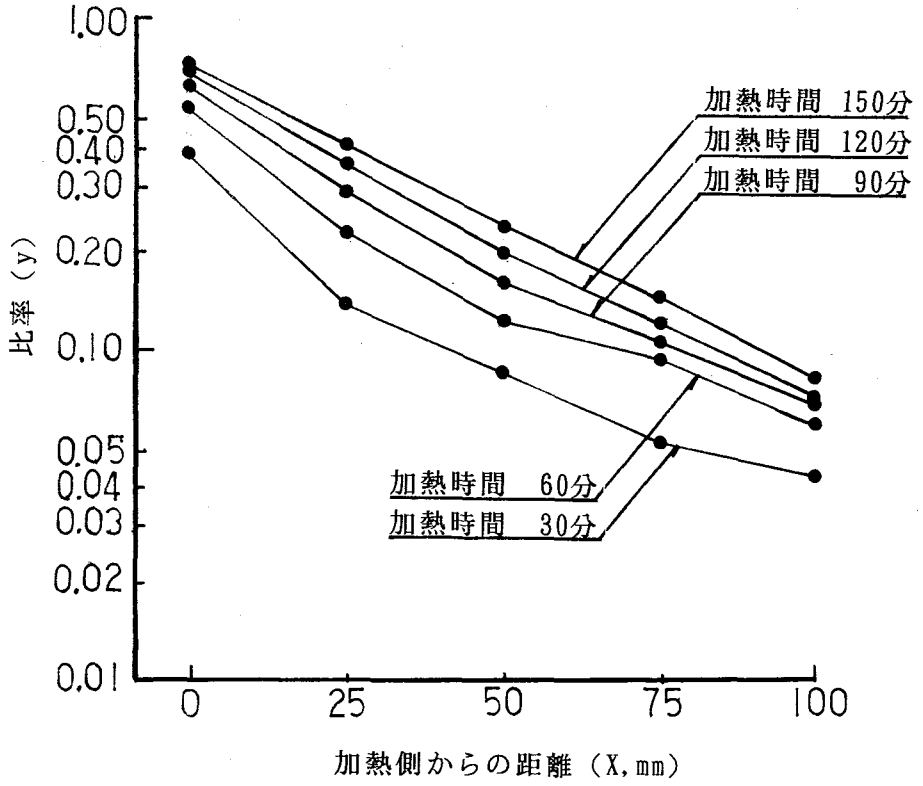


図1.9 比率（y）と距離（x）（試験体B）

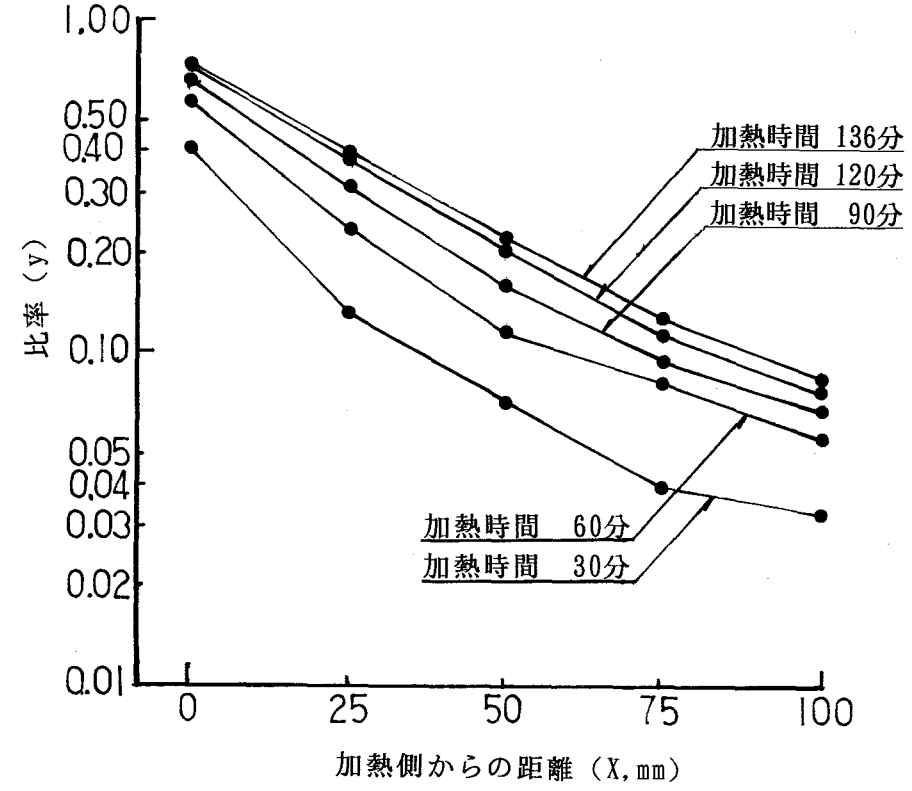


図1.10　比率（y）と距離（x）（試験体C）

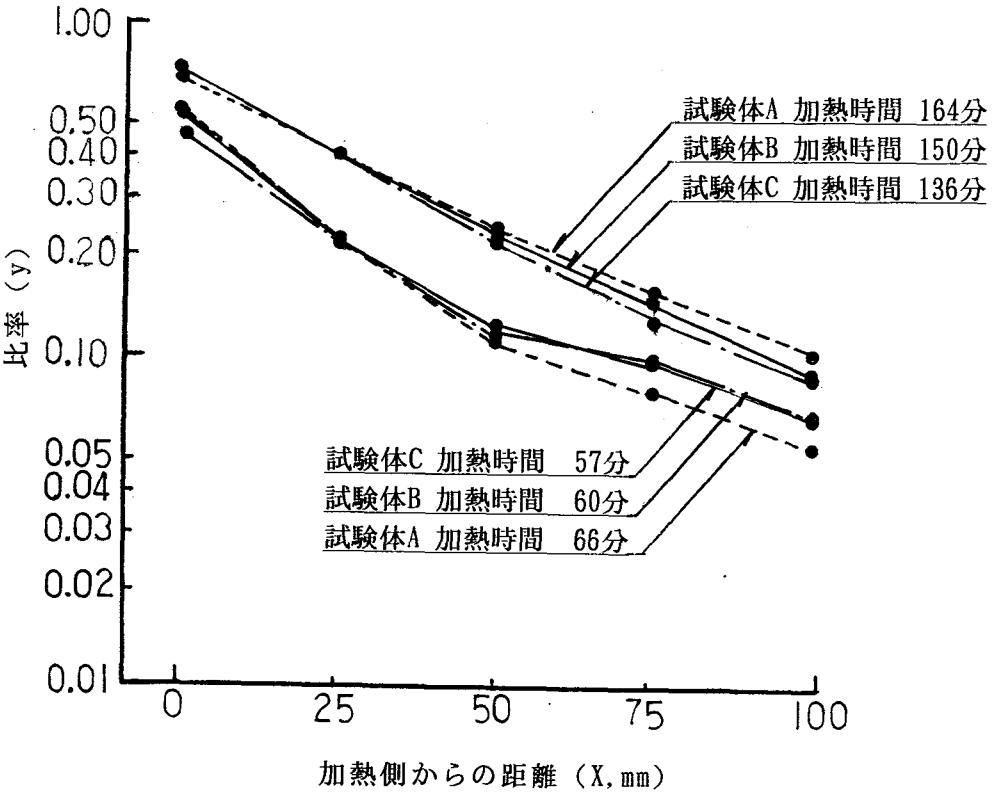


図1.11　加熱温度時間面積を一定とした場合の比率（y）と距離（x）

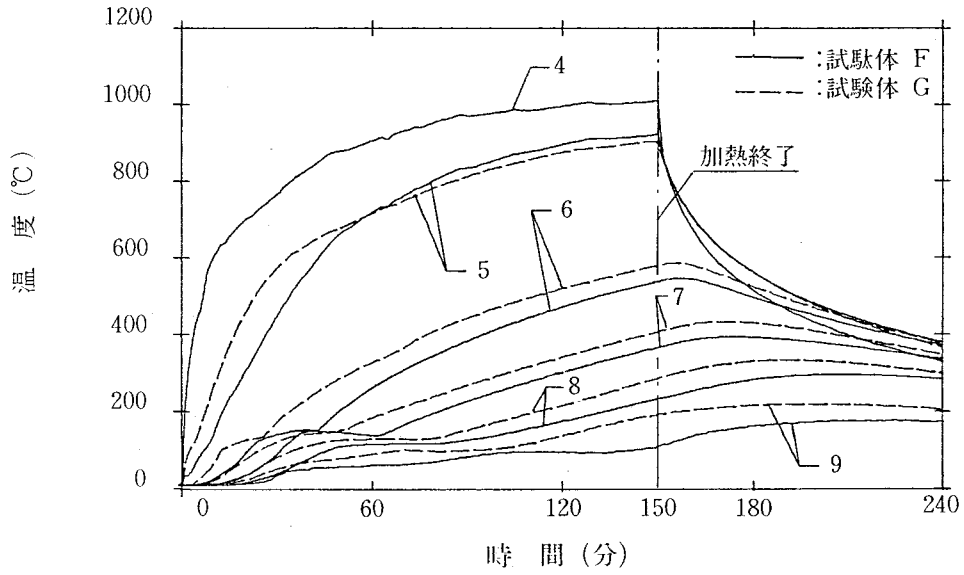
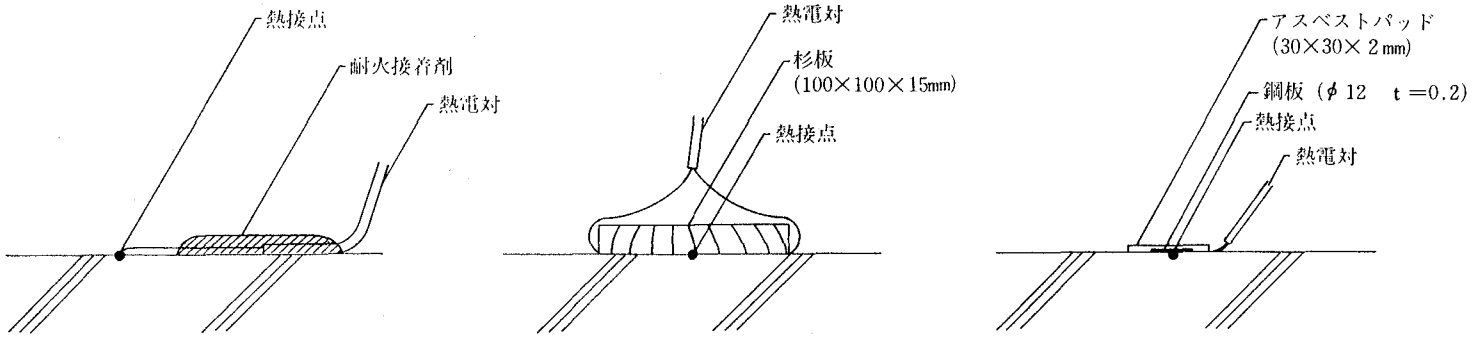


図1.12　表面・内部・裏面温度測定結果



（寸法単位：mm）

図1.13　熱電対支持方法

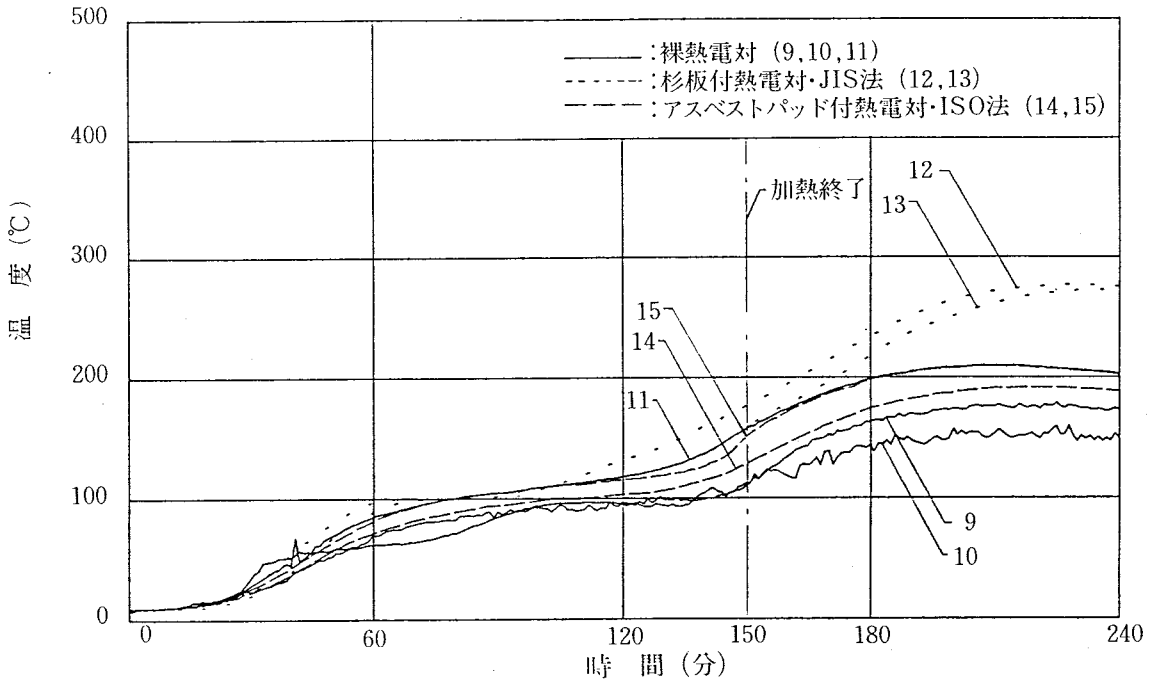


図1.14　裏面温度測定結果（試験体F）

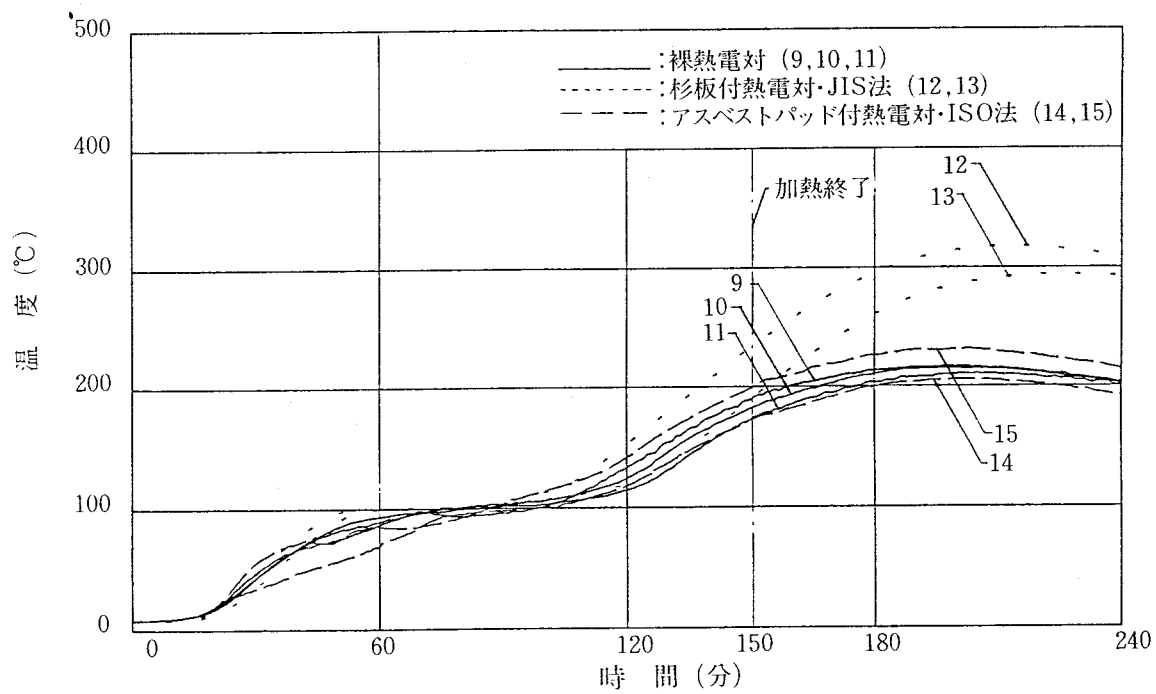


図1.15　裏面温度測定結果（試験体G）

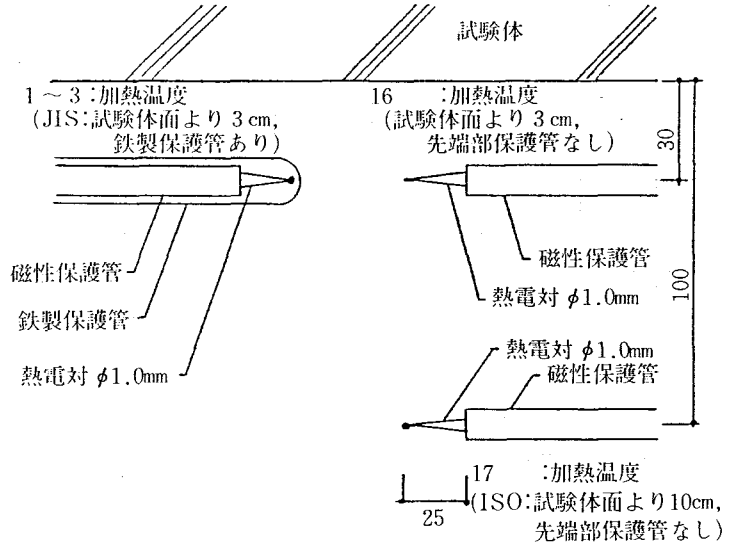


図1.16　加熱温度測定方法・測定位置（寸法単位：㎜）

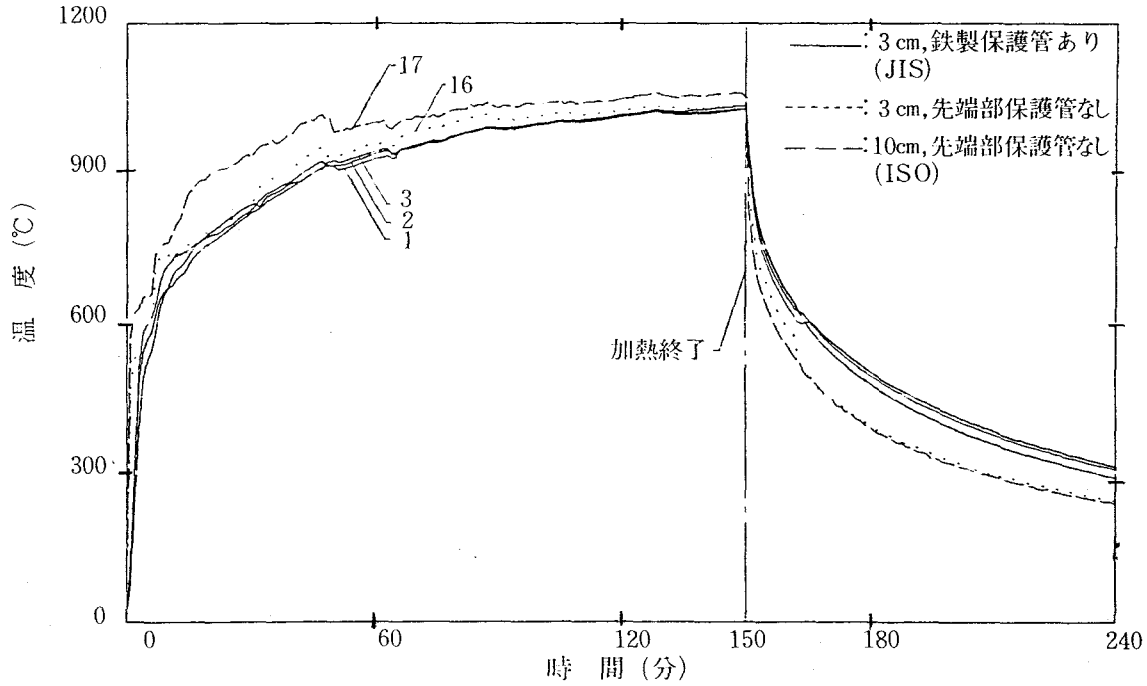


図1.17　加熱温度測定結果（試験体F）

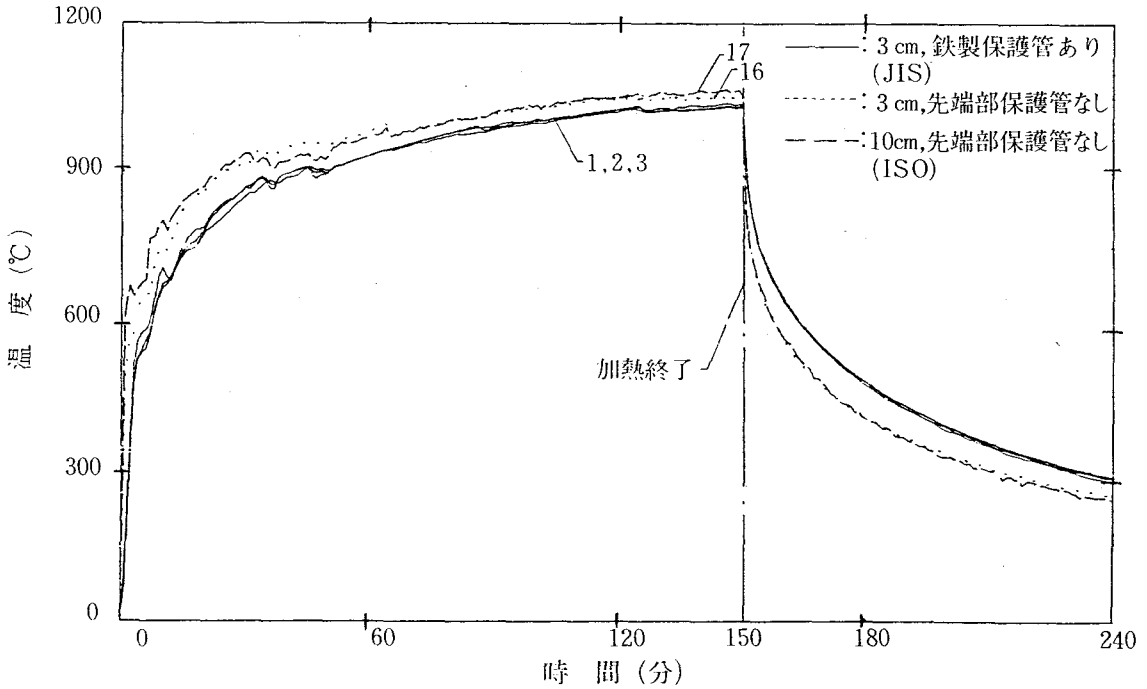


図1.18　加熱温度測定結果（試験体G）

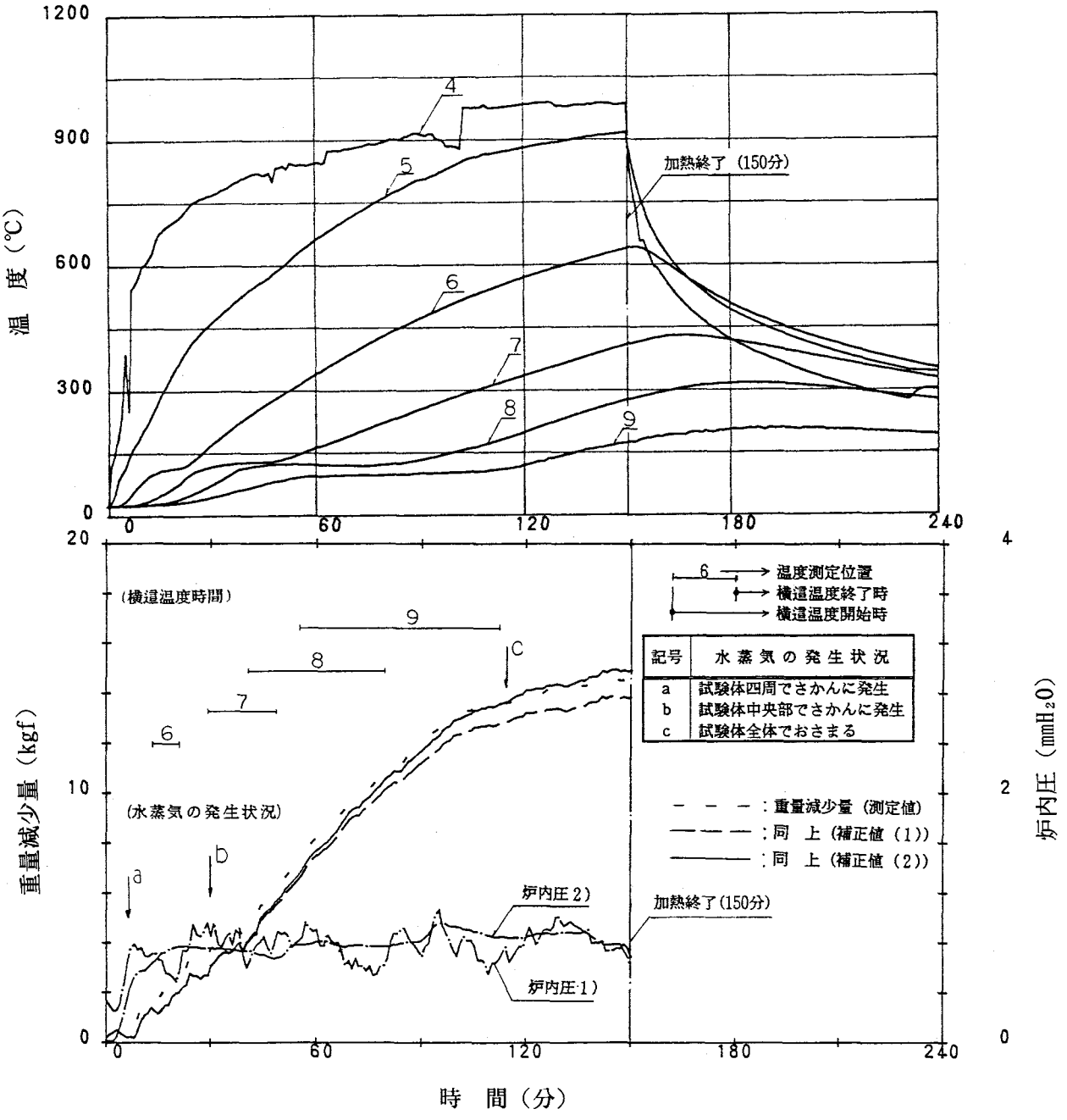


図1.19 試験体の重量減少及び炉内圧の測定結果（試験体B）

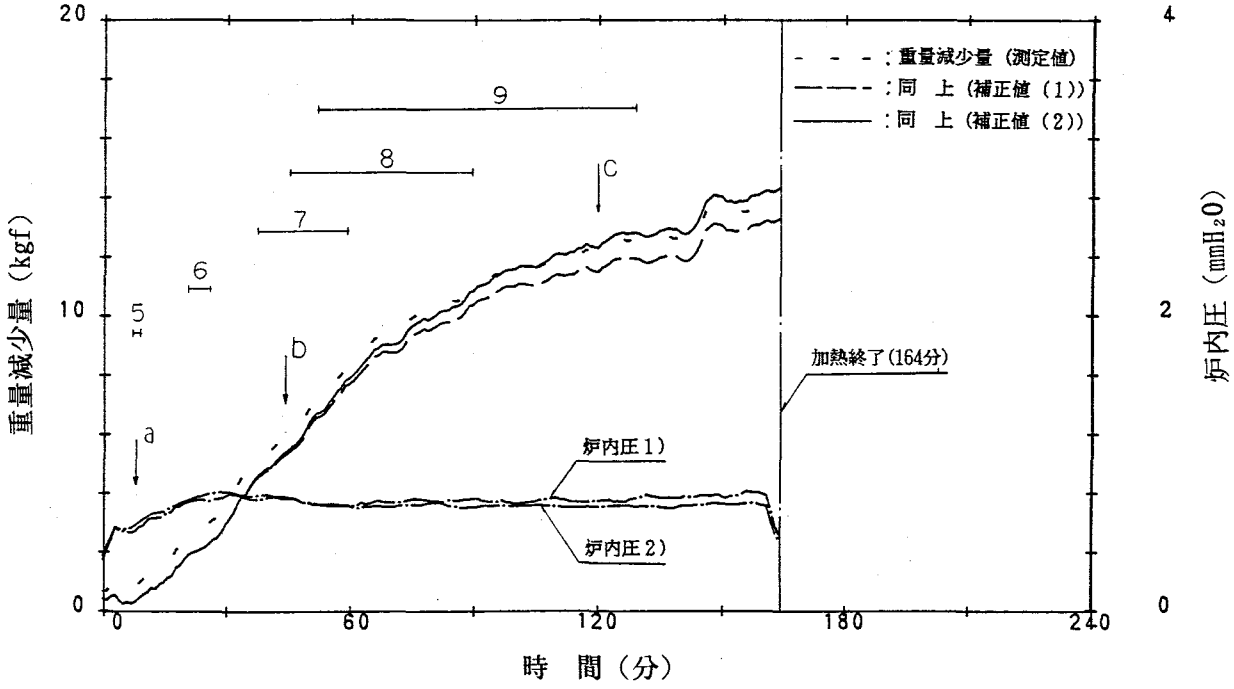


図1.20　試験体の重量減少及び炉内圧の測定結果（試験体A）

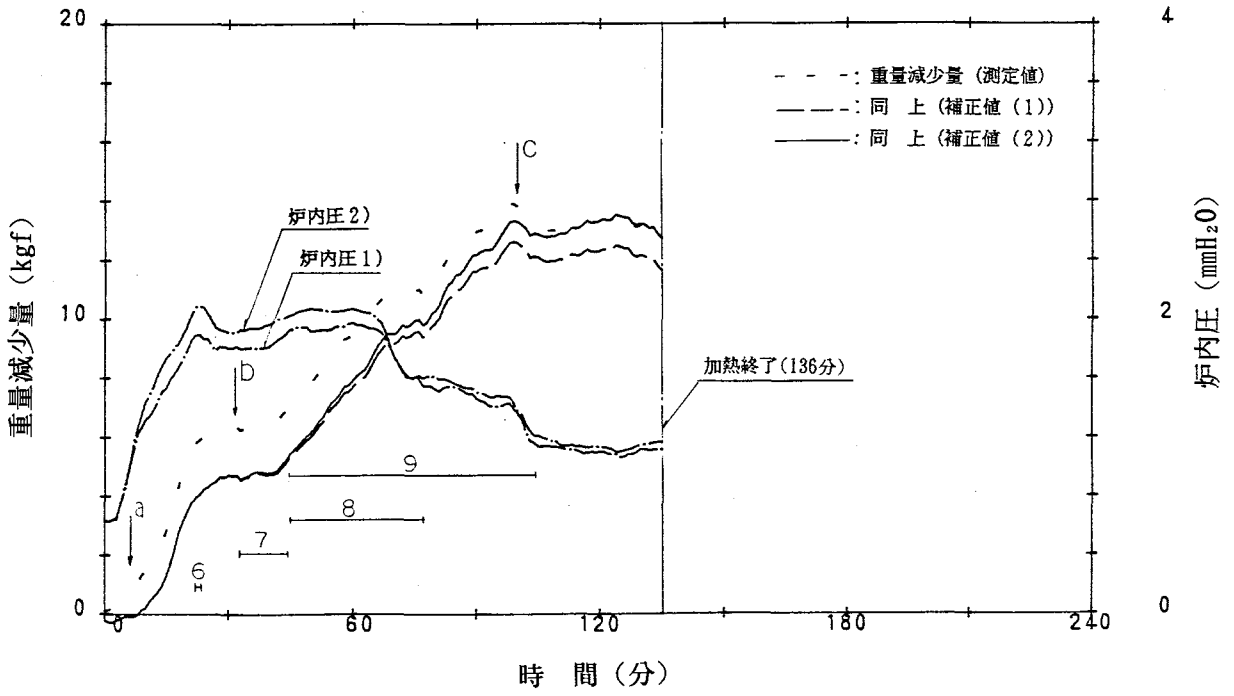


図1.21　試験体の重量減少及び炉内圧の測定結果（試験体C）

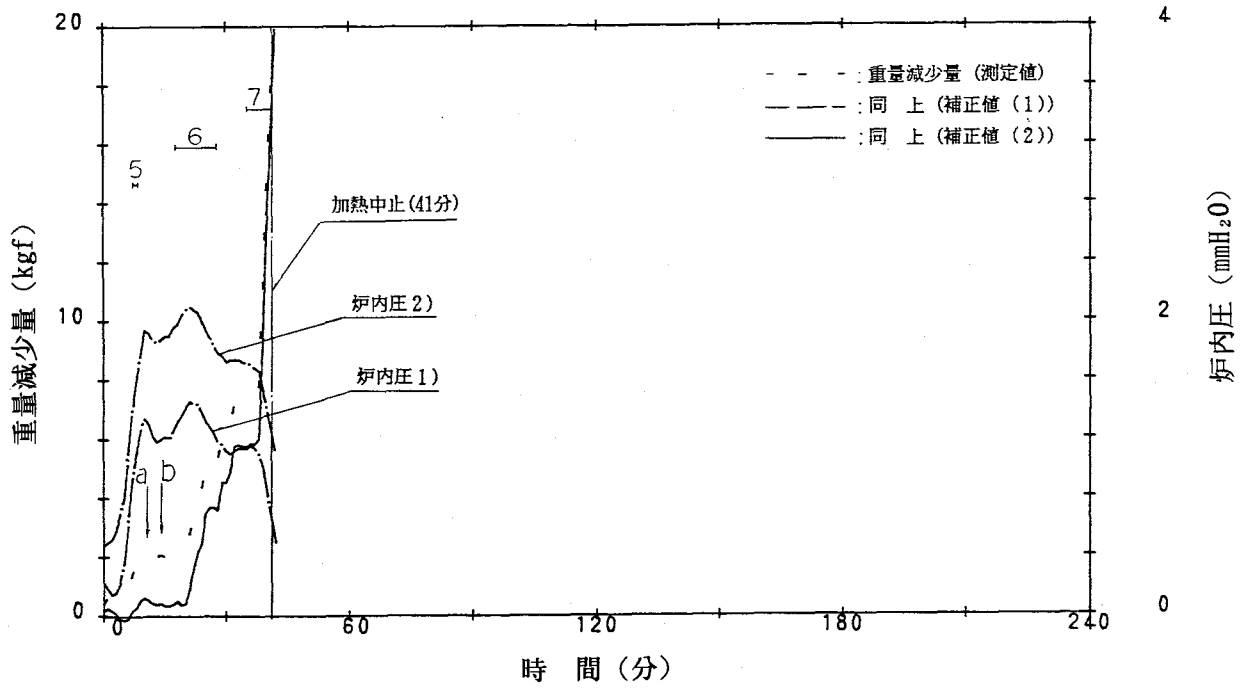


図1.22　試験体の重量減少及び炉内圧の測定結果（試験体D）

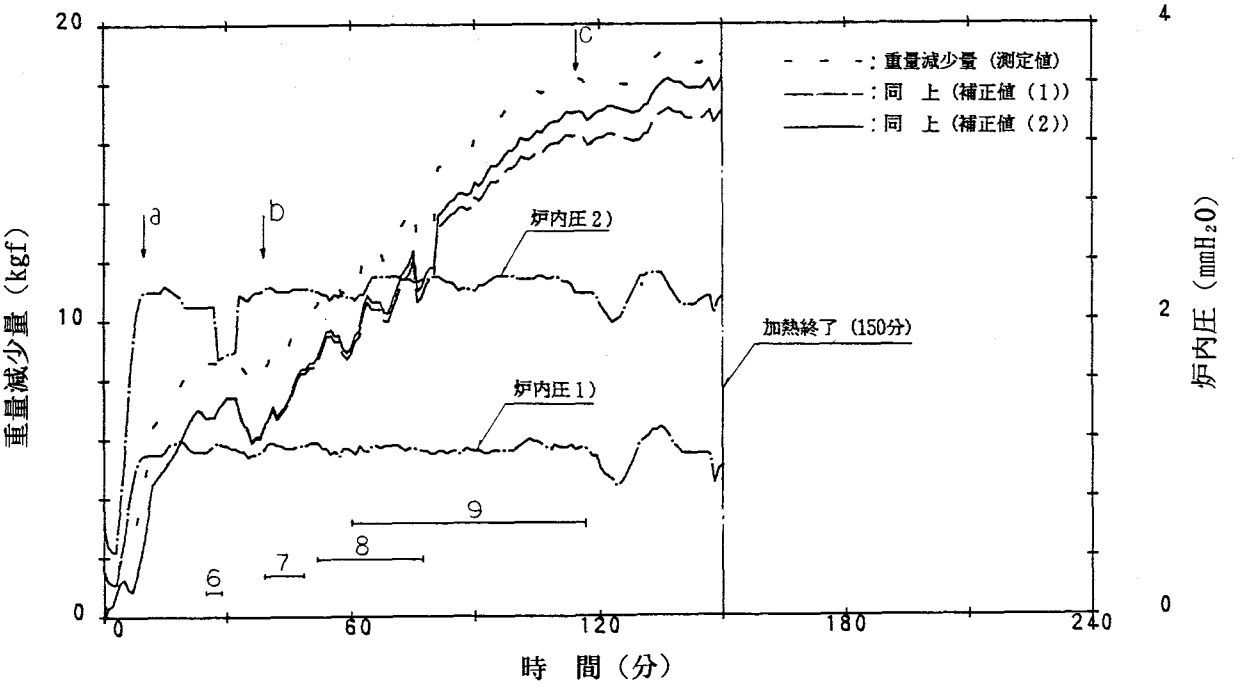


図1.23　試験体の重量減少及び炉内圧の測定結果（試験体E）

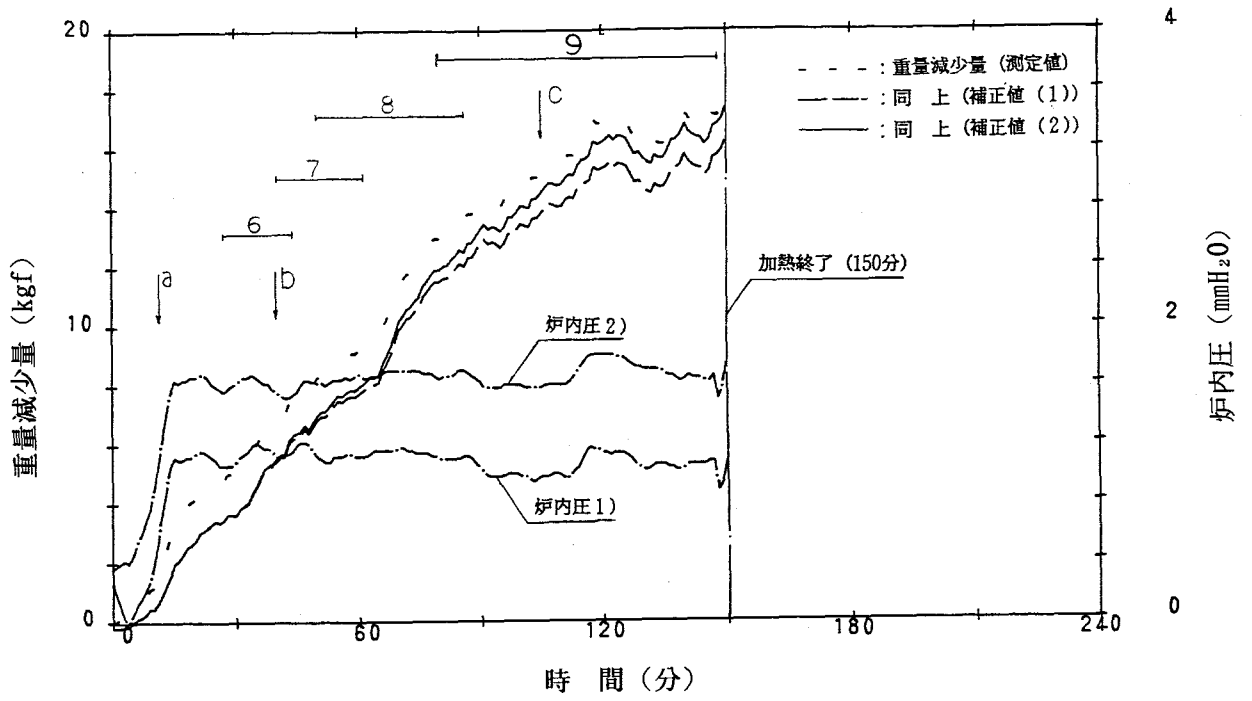


図1.24　試験体の重量減少及び炉内圧の測定結果（試験体F）

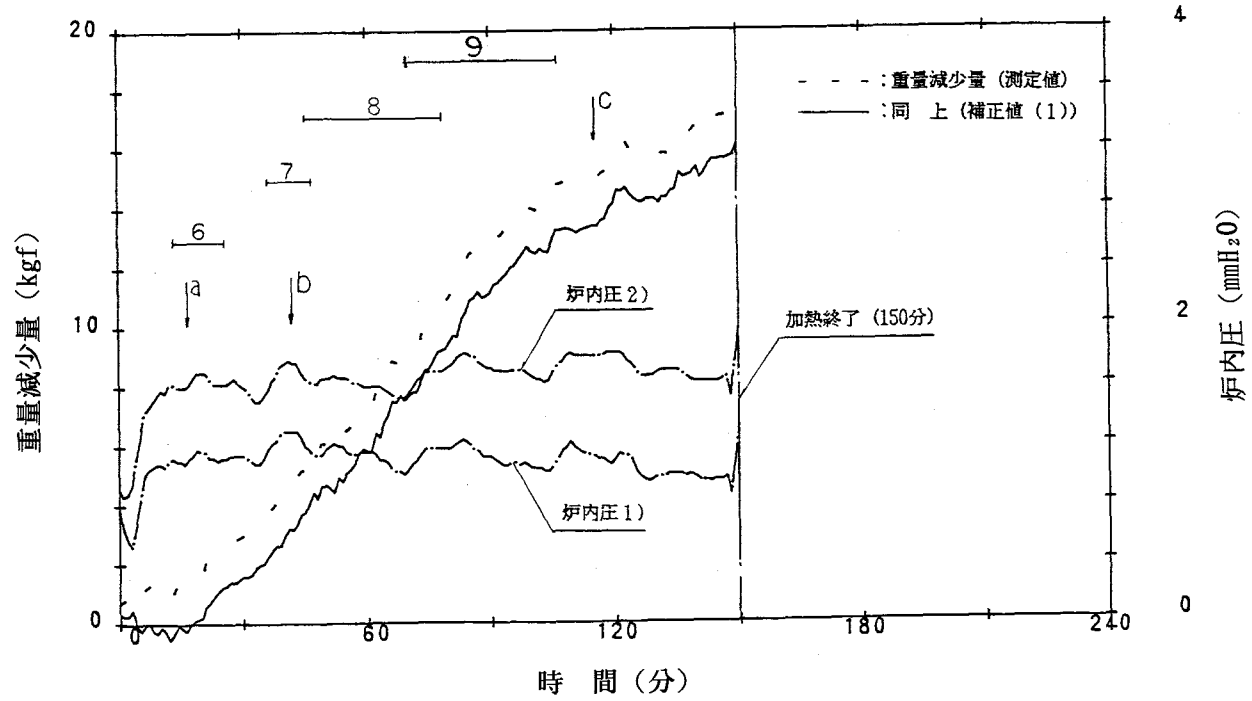


図1.25　試験体の重量減少及び炉内圧の測定結果（試験体G）

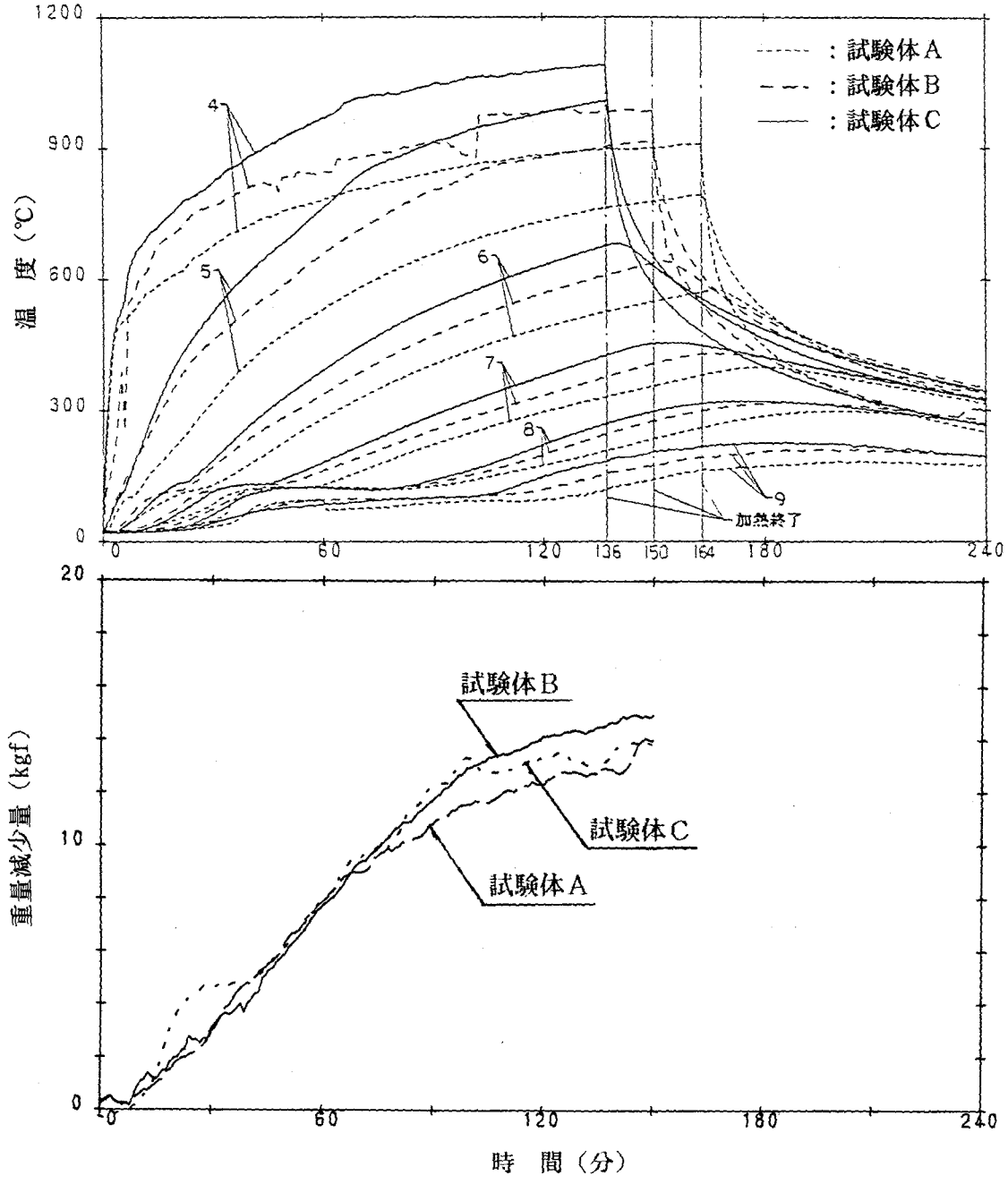


図1.26　加熱温度曲線の違いによる内部温度と重量減少測定結果

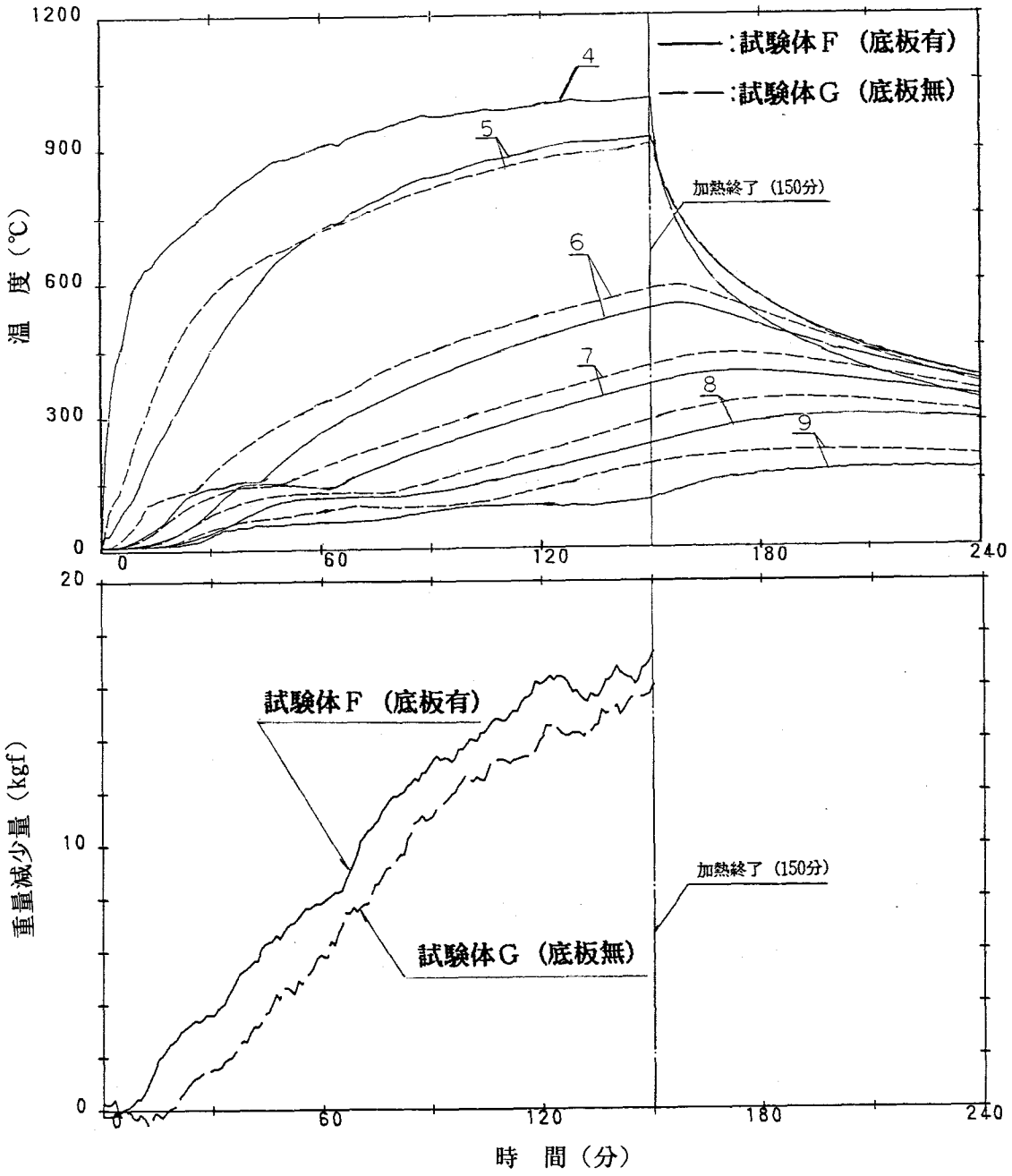


図1.27　底板の有無の違いによる内部温度と重量減少測定結果

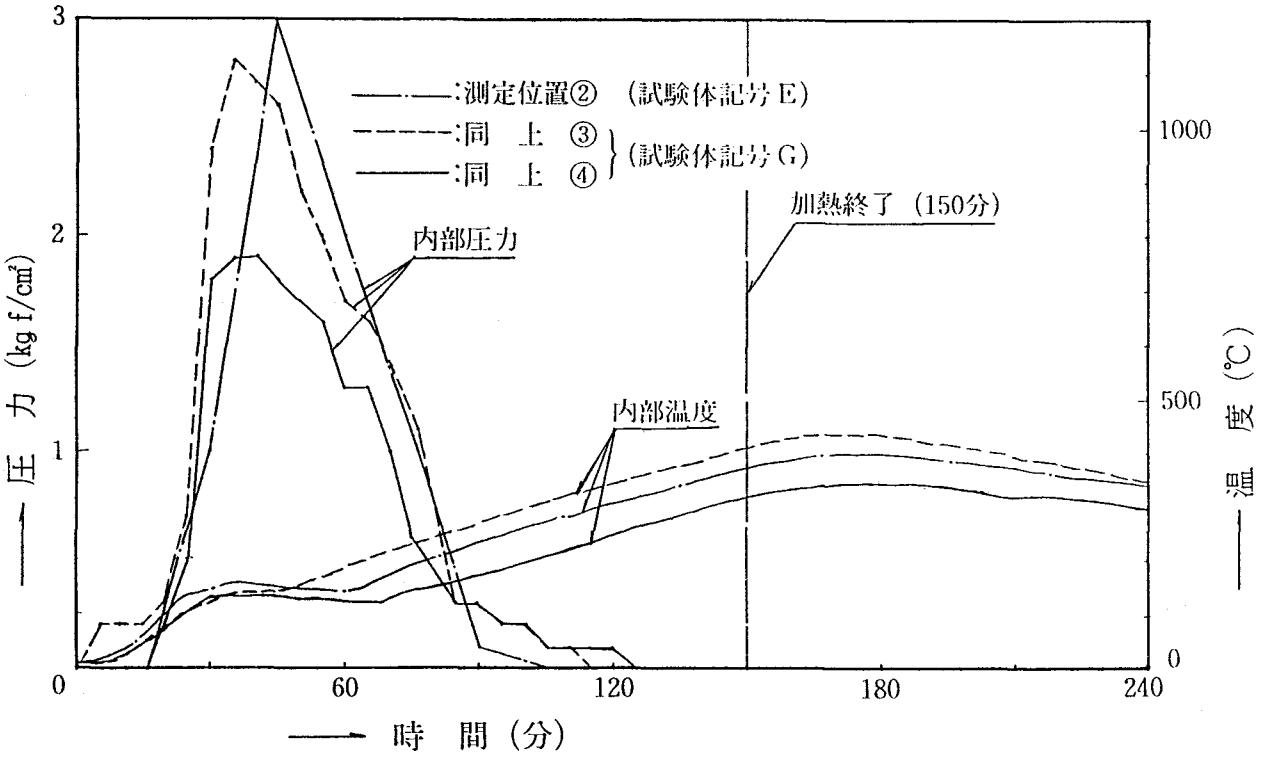


図1.28 試験体の内部圧力と内部温度測定結果

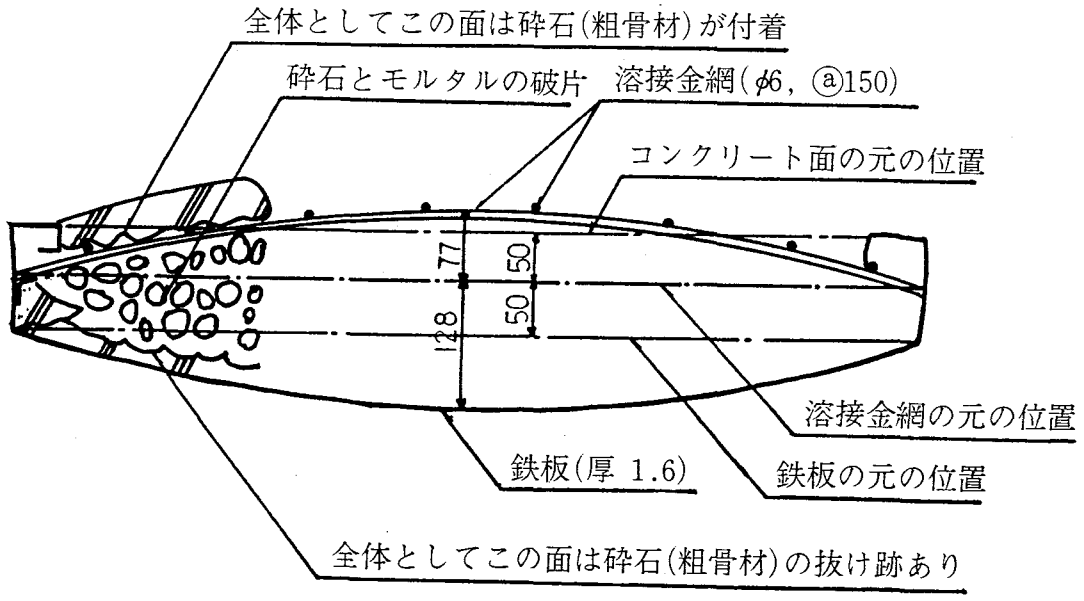
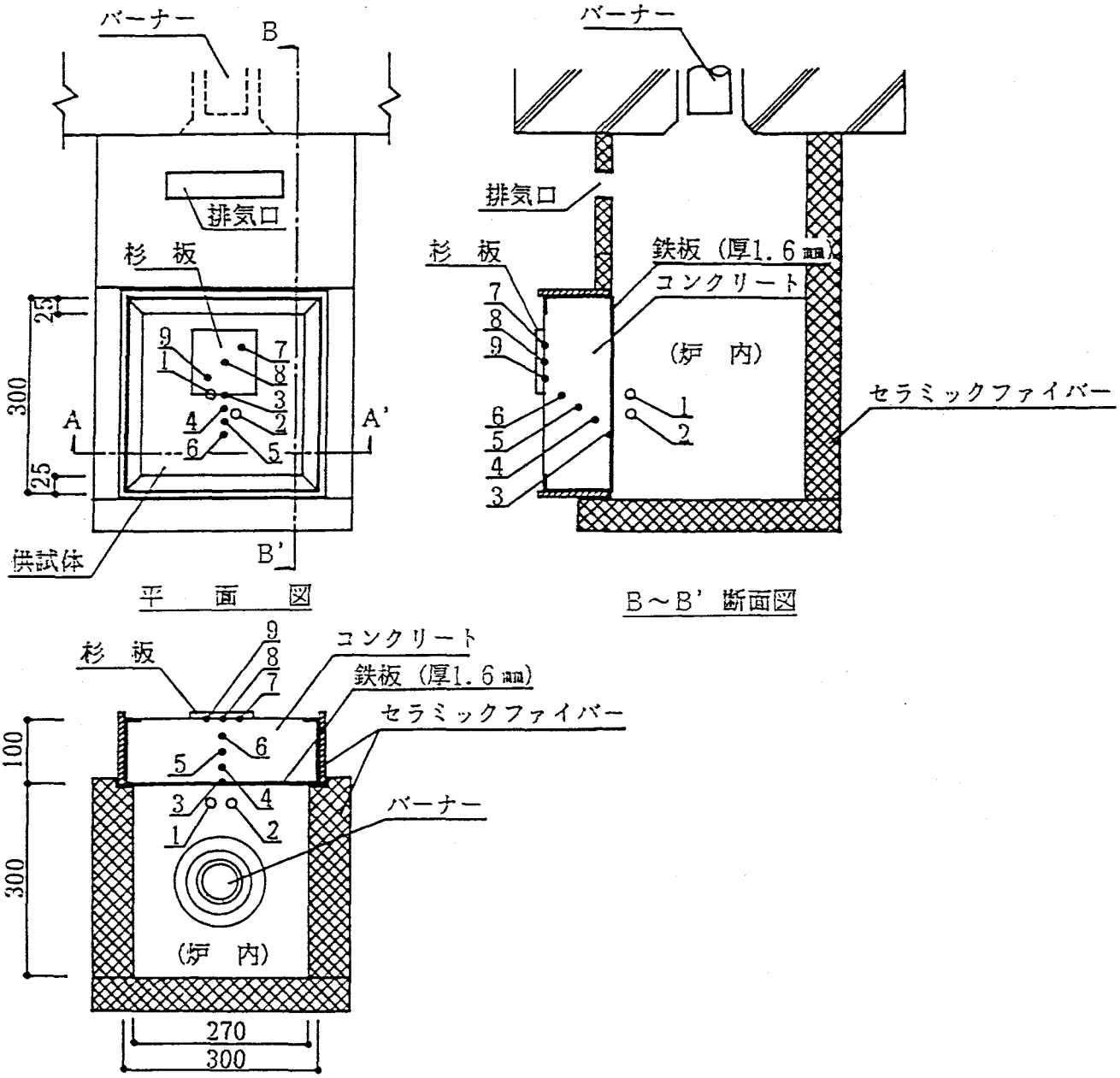


図1.29 爆裂後の試験体断面の状況（寸法単位：mm）



1～2：加熱温度（供試体面より3㎝，鉄製保護管付）

3　：鉄板裏面温度

4～6：コンクリート内部温度（加熱面より25㎜，50㎜，75㎜）

7～9：コンクリート裏面温度（杉板付熱電対）

図1.30　供試体の形状及び温度測定位置（寸法単位：㎜）

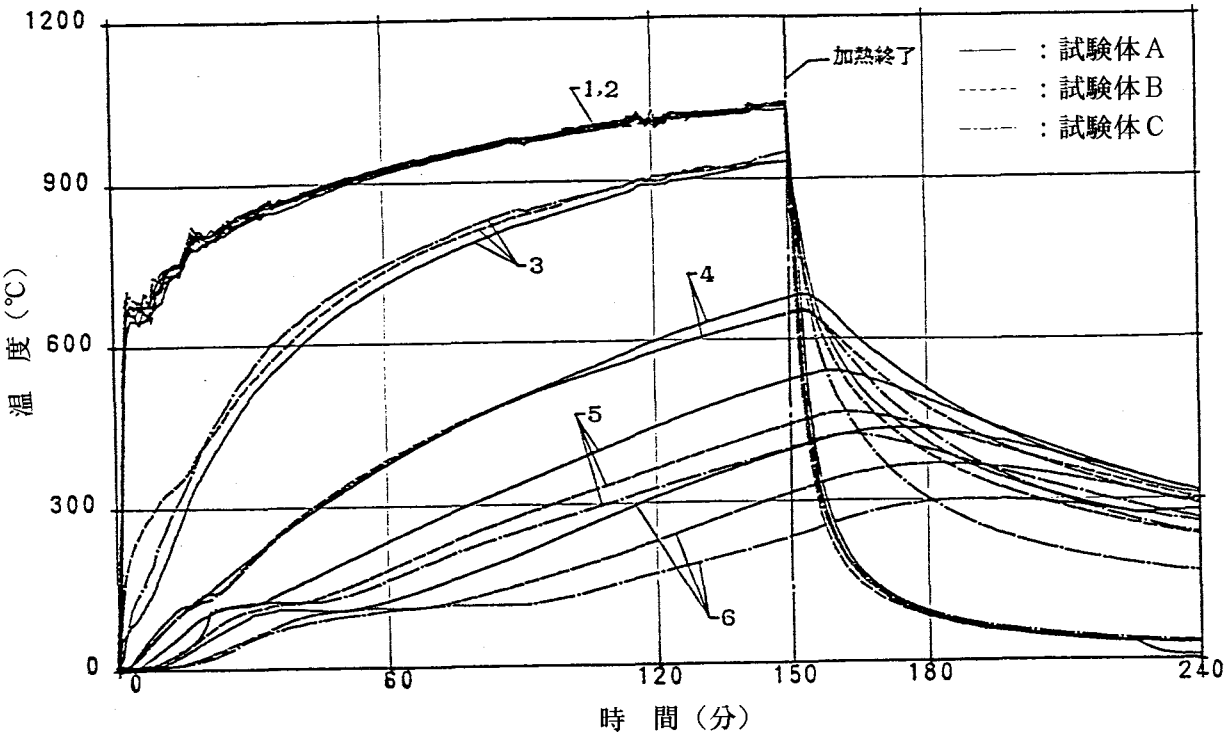


図1.31　加熱温度及びコンクリート内部温度測定結果

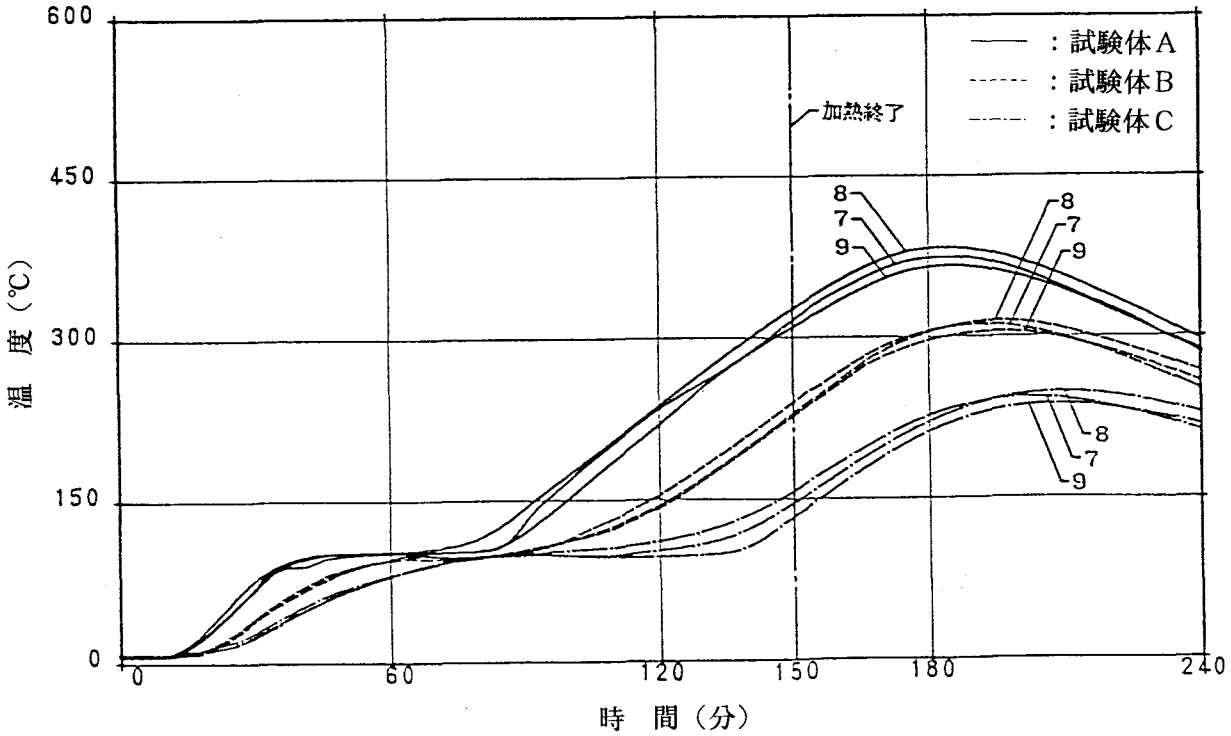


図1.32　裏面温度測定結果

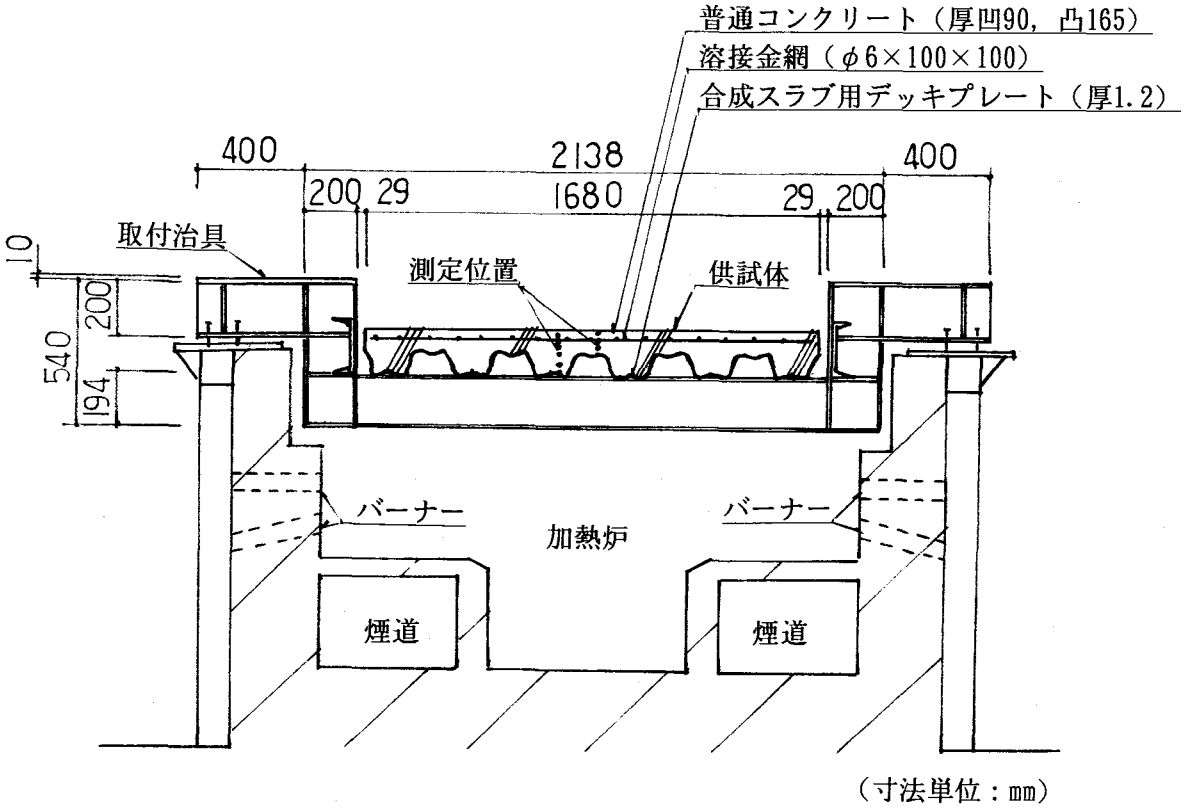
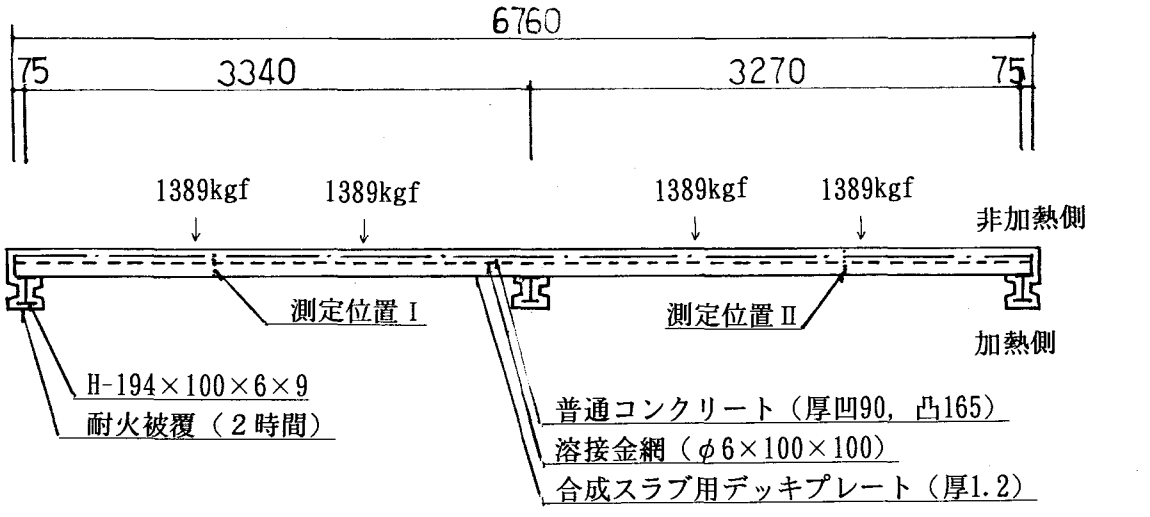


図1.33　加熱装置及び供試体取付状況



（寸法単位：mm）

図1.34　供試体載荷状況

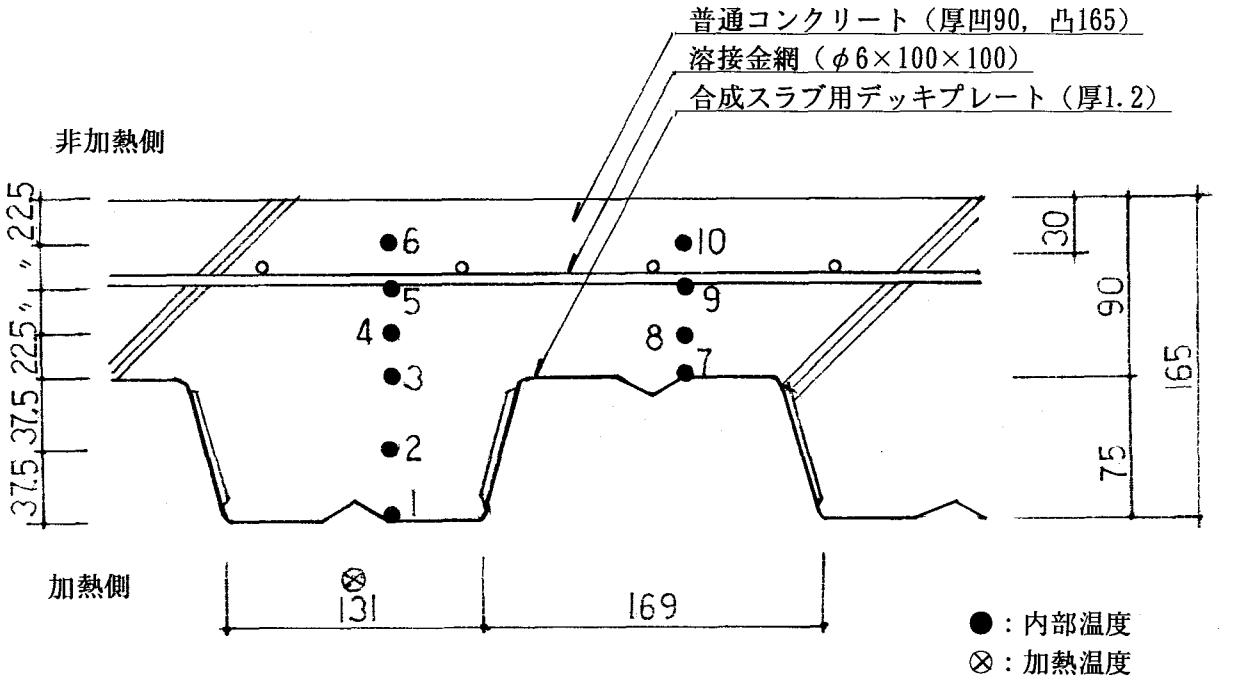

普通コンクリート（厚凹90，凸165）
溶接金網（φ6×100×100）
合成スラブ用デッキプレート（厚1.2）
非加熱側
37.5 37.5 225 〃 225
6
10
5
9
4
8
7
3
2
1
30
90
75
165
加熱側
131
169
●：内部温度
⊗：加熱温度
（寸法単位：mm）

図1.35　温度測定位置

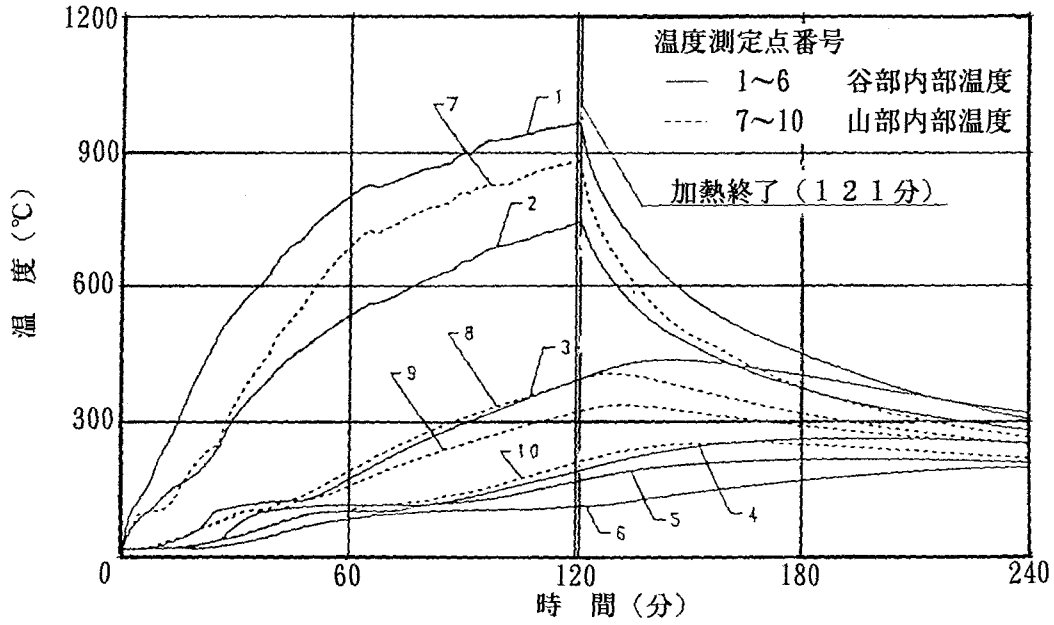


図1.36 内部温度測定結果（測定位置Ⅰ）

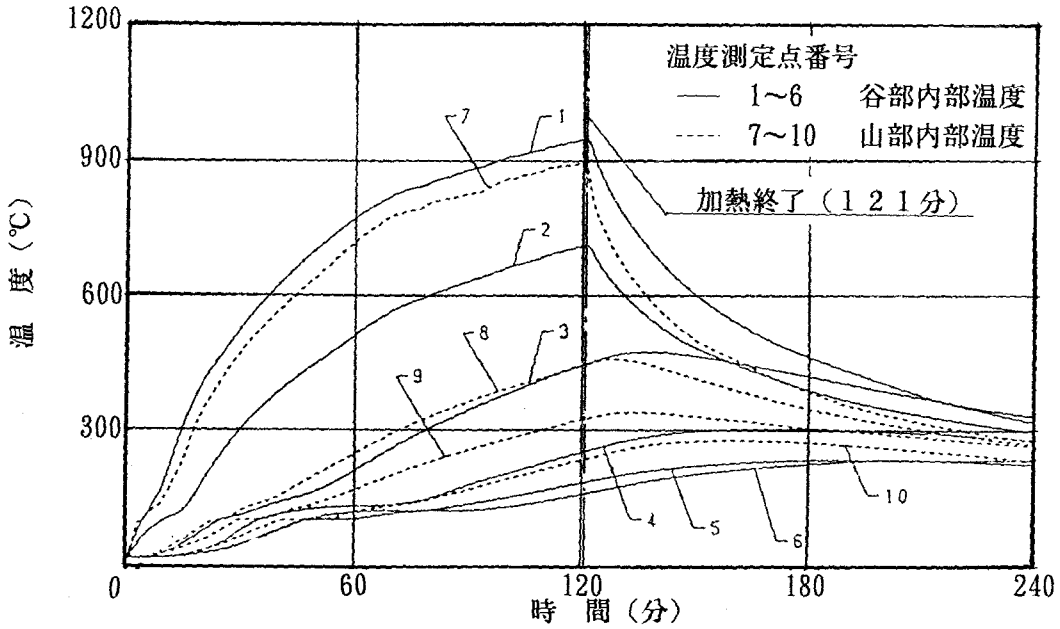


図1.37 内部温度測定結果（測定位置Ⅱ）

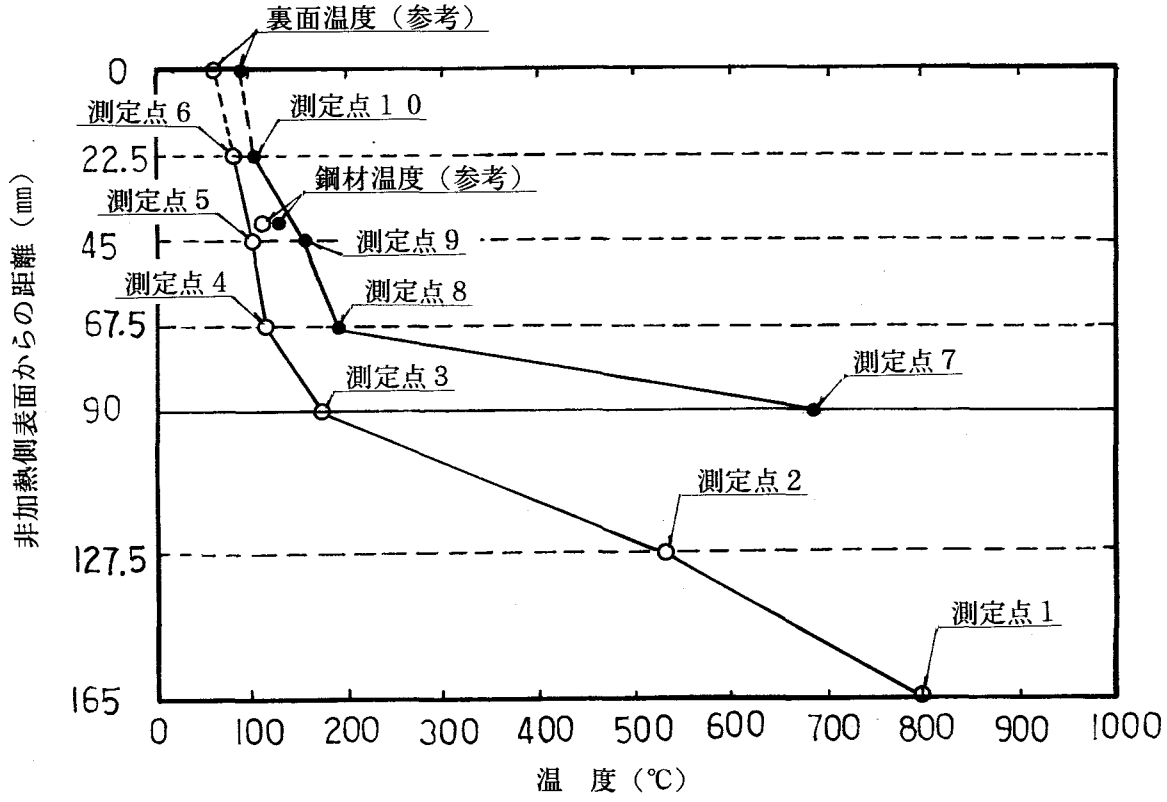


図1.38　測定位置と温度（加熱開始60分時）

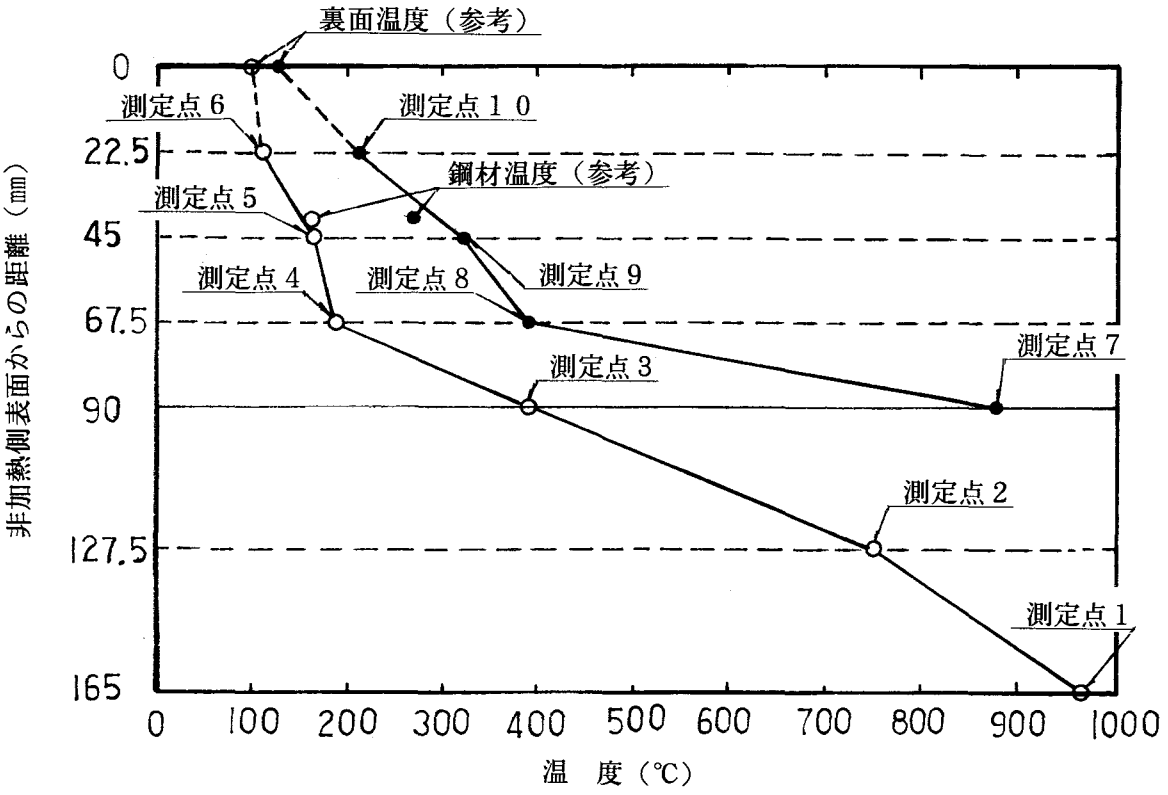
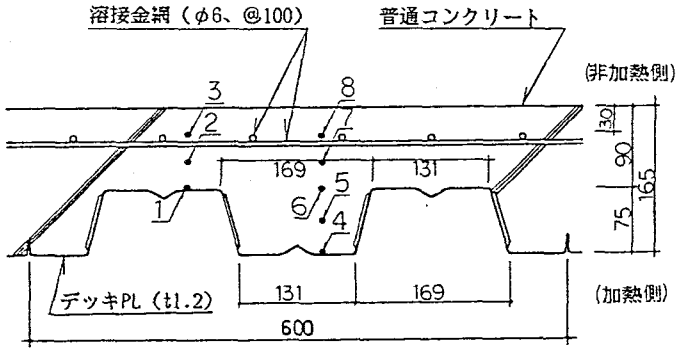


図1.39　測定位置と温度（加熱開始121分時）

供試体N



供試体L

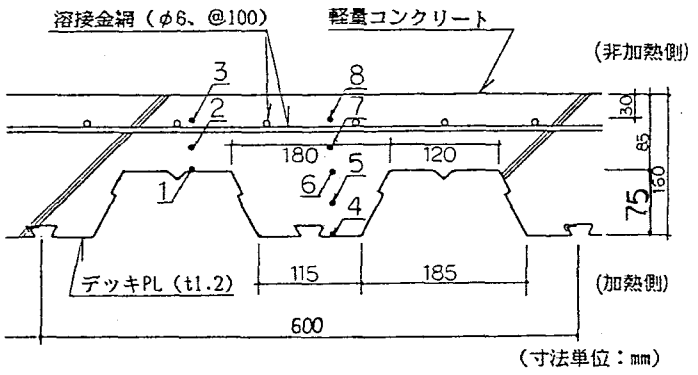
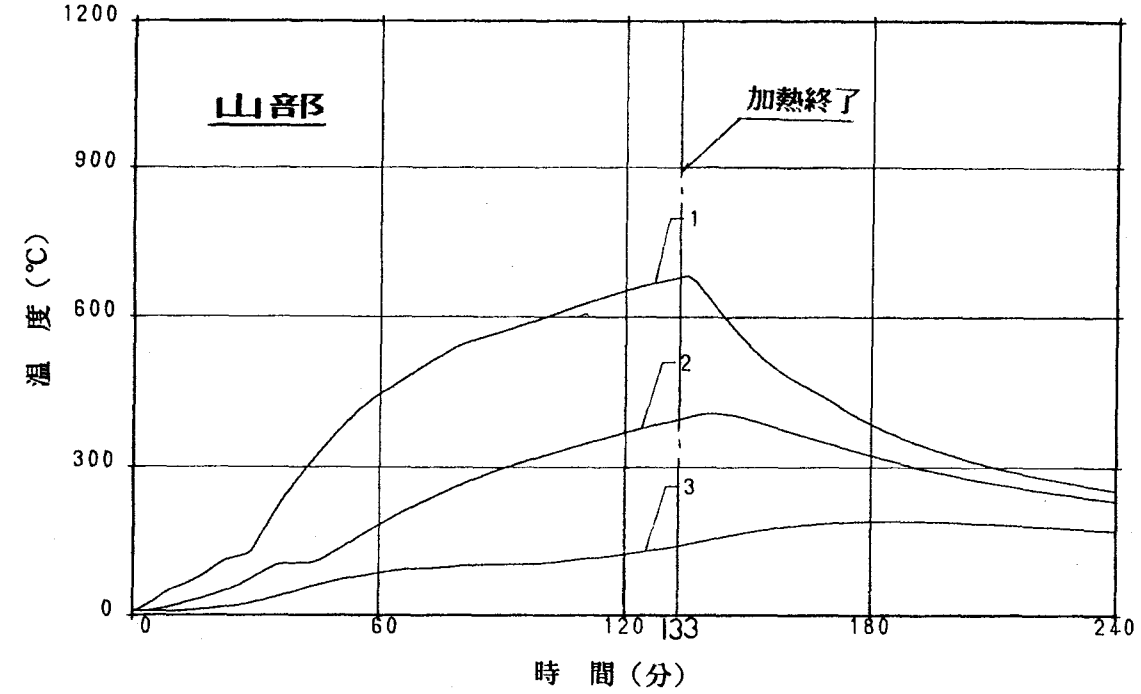


図1.40　供試体の断面及び温度測定位置



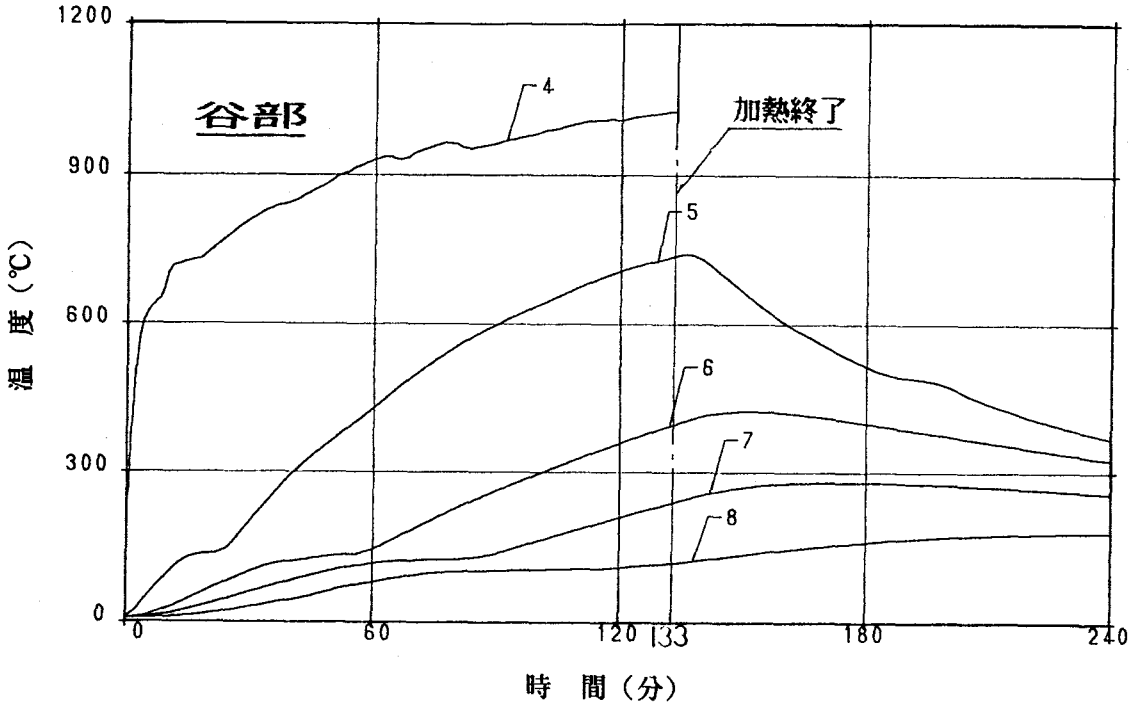
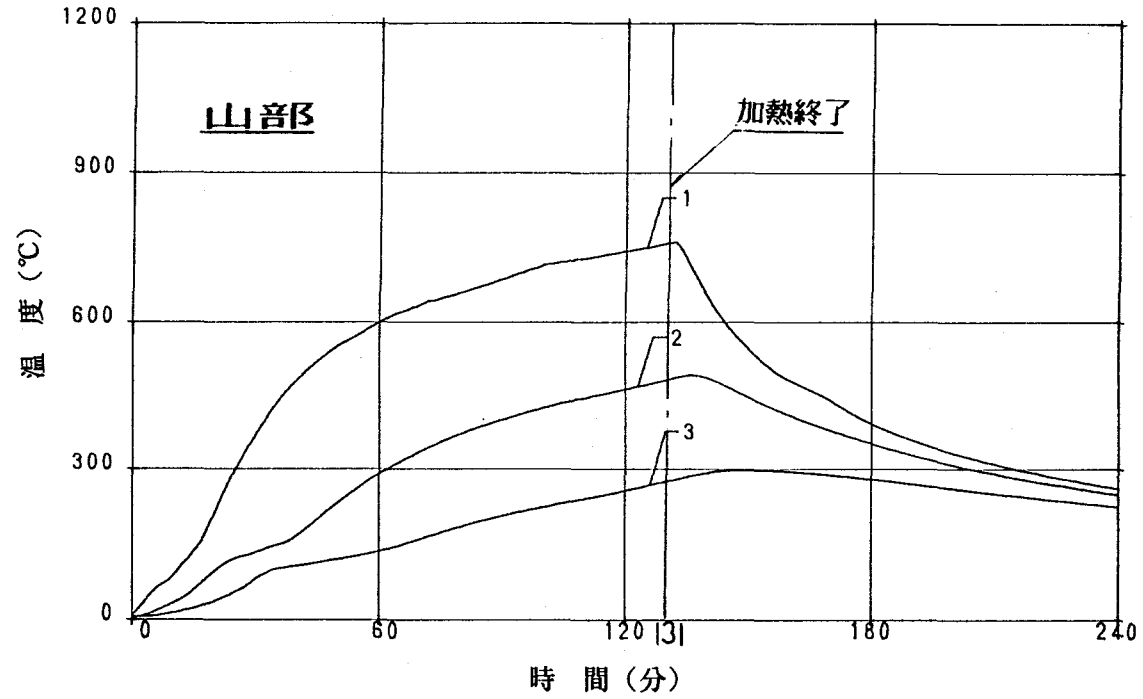


図1.41　内部温度測定結果（供試体N）



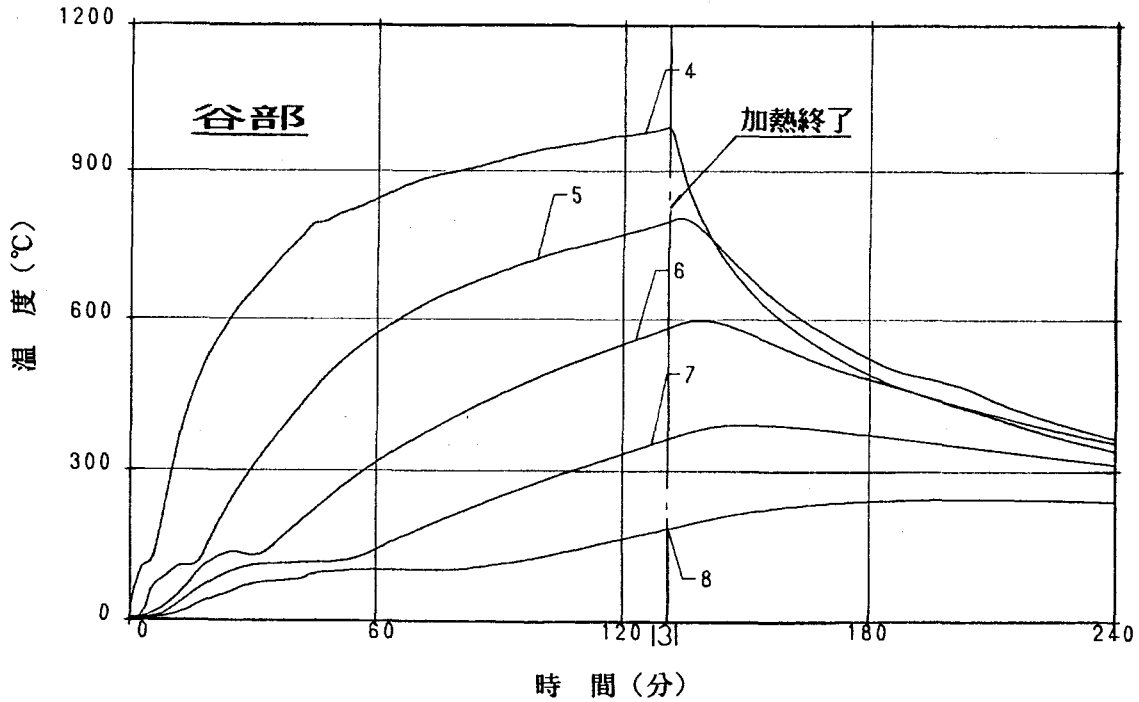


図1.42　内部温度測定結果（供試体L）

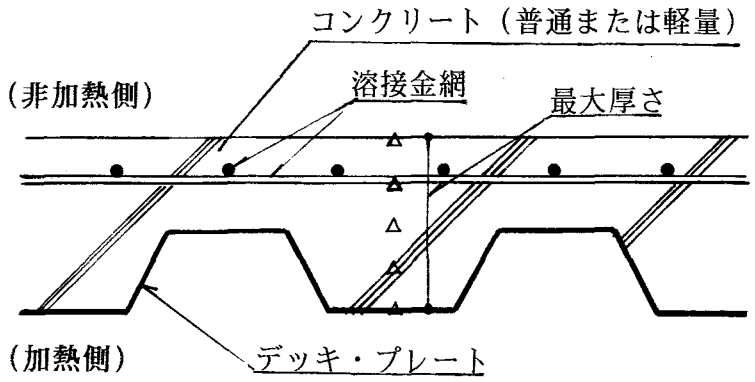


図1.43　合成床版の模式図

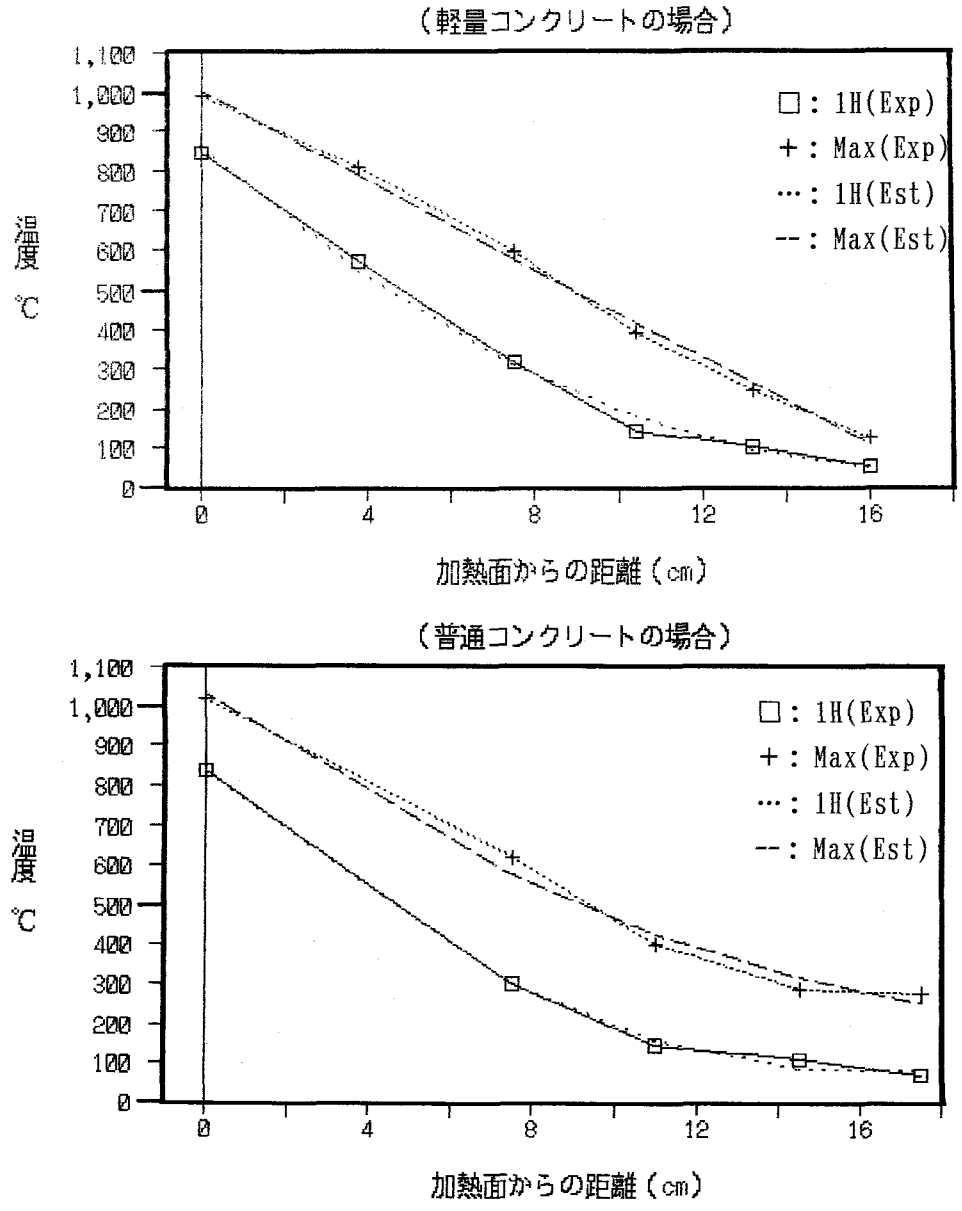


図1.44　合成床版の内部温度分布

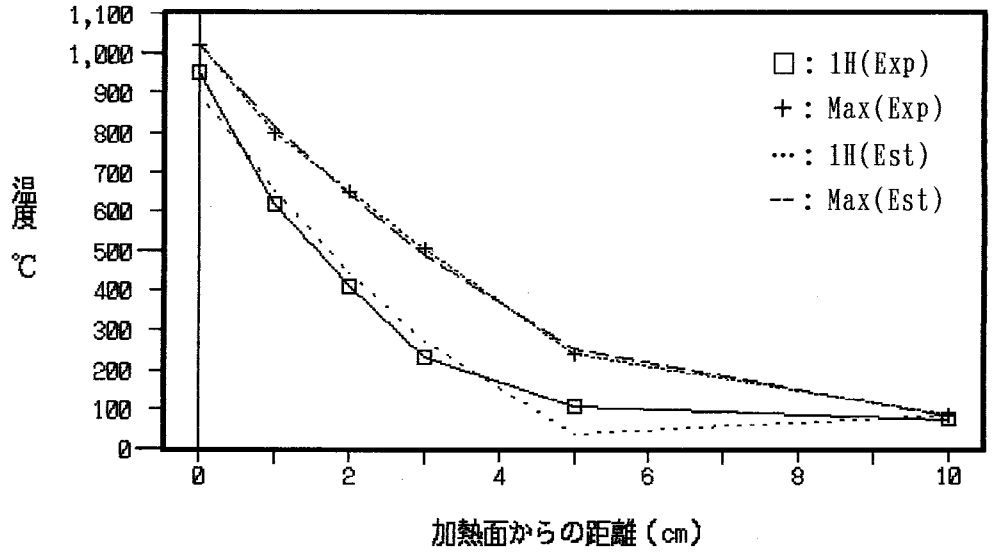


図1.45　ＡＬＣ外壁の内部温度分布

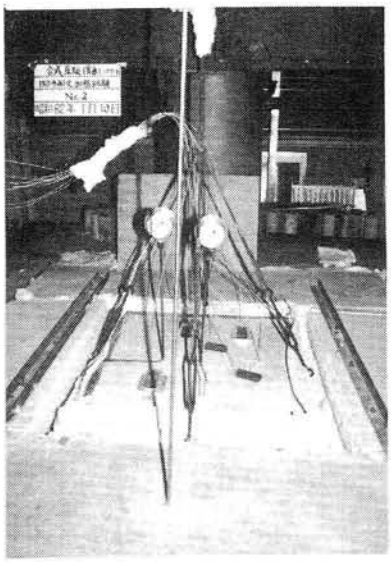


写真1.1　測定方法

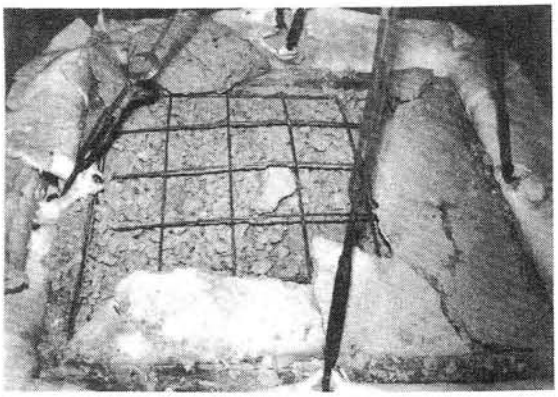


写真1.2　爆裂後の試験体

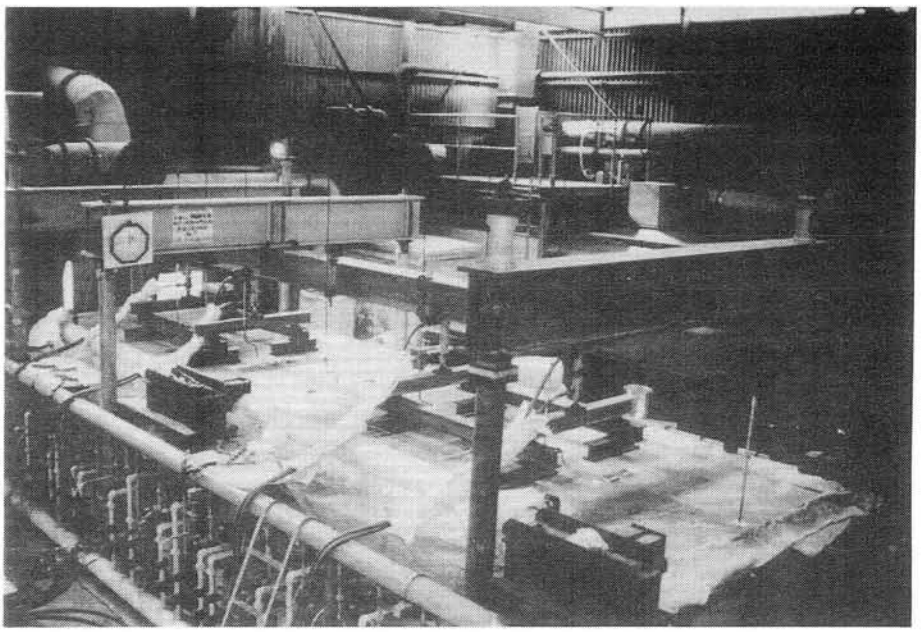


写真1.3　合成床版の載荷加熱試験状況

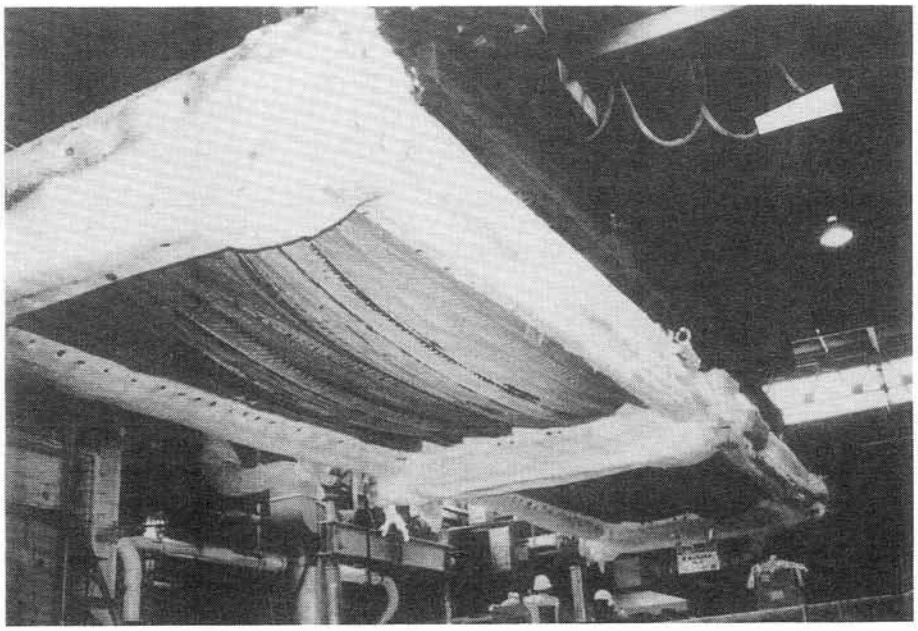


写真1.4　載荷加熱試験後の合成床版

第２章　火災後における鋼管コンクリート柱の残存耐力

２．１　はじめに
２．２　実験方法
２．３　計算方法
２．４　計算結果及び考察
２．５　実大部材へのシミュレーション
２．６　まとめ

２．１　はじめに

火害を受けた場合、建物を再使用できるかどうかということは重要な問題であることを既に述べた。そのためには部材の被害度を正確に診断し、その残存耐力を把握する必要がある。Ｓ造構造物では加熱後の冷却により鋼材の強度はほぼ元の状態に回復するため、鋼材の強度劣化よりも変形が問題となる。従って、「序論」でも述べたように、Ｓ造の場合、再使用の判定が変形の面から下せるため、Ｓ造の火害診断は比較的容易である。しかし、コンクリート系構造物においては、目視では表面の劣化状態しか把握できず、内部状態（残存耐力の基礎となる受熱温度分布）の把握は非常に困難を極める。

従来、火災時間（加熱時間）内における部材の耐力を求める研究[58]は種々実施され、火災中に部材が崩壊する火災時間は通常、崩壊時間と呼ばれている。しかし、火害後の補修を考えれば、火災後どの程度の残存耐力を有するかが問われる。すなわち、火災後内部温度が遅延上昇し、火災終了後に、崩壊することがありうる。著者らは火災中は崩壊せず、火災後も破壊しない限界時の火災時間を再使用限界時間と呼ぶ。通常は、この時間は上記で定義されている崩壊時間より短く、部材の断面が大きくなるほどその差は大きくなる。火害後の補修対策を考える場合には、部材の再使用限界時間に着目しなければならない。火災時間内で部材が設計荷重を保持していたとしても火災時間を過ぎて、コンクリート内部温度が遅延上昇するため、内部各点については、それぞれの点が履歴した最高温度に相応する強度まで低下し、従って、部材の残存耐力は火災終了時よりも低下する。コンクリートの場合、火災後1ヶ月までは強度回復はないため[59]、部材の残存耐力の回復は認められないと考えるのが妥当であろう。

筆者らは、コンクリート系構造物の火害診断手法を確立するための第一歩として、コンクリート中の混和剤に着目し、化学的手法によるコンクリートの受熱温度推定方法（GBRC法）を第１編で提案した。その結果、内部のコンクリートの受熱温度をＵＶスペクトルを用いて推定できることが判明し、内部最高温度の推定方法を確立した。

ところで、最近、鋼とコンクリートの合成による構造部材を用いた建築物が増加しており、特に鋼管の内部にコンクリートを充填し、鋼とコンクリートの合成効果により耐力及び変形性能を向上させる合成柱、すなわち、鋼管コンクリート柱が注目されている。また、耐火性能についても鋼管コンクリート柱は最近見直されている。無耐火被覆、無形枠工法により工法の省力化が図られることは大きなメリットである。そこで、本章では、耐力部

材として、CFT柱を取り上げた。本章の研究目的は火災後、CFT柱部材がどの程度の残存耐力を有しているかを求めることにある。上記のGBRC法により受熱温度を推定するには、コンクリートを取り出さねばならず、そのためには、周囲の鋼管をはぎ取る必要があり、多大な手間を要する。従って、CFT柱については、GBRC法を用いて内部温度を推定することが困難である。内部温度を予測する方法は過去に多くの熱伝導解析がなされてはいるが（例えば、[26],[27]）、大変複雑である。そこで、簡易な計算シミュレーションを用い、非破壊による内部最高温度を予測する方法を新たに提案した。本章では、筆者らの提案した計算方法を実験値と比較・検証した上で、火災後のCFT柱部材の残存耐力を推定し、実大部材についてシミュレーションを行なった結果について述べる。

2．2　実験方法

2．2．1　試験体

試験体は、図2.1に示す角形鋼管（SM490A,□-300×9）及び円形鋼管（STKR,○-318.5×10.3）に普通コンクリートを充填したものである。試験体長さは、3,500mmであり、有効加熱長さは全体座屈の影響を避けるため、2,100mmとした。鋼管には、コンクリートの爆裂防止用に蒸気抜き孔を設けている。

2．2．2　試験方法

試験装置は（財）日本建築総合試験所の柱用耐火加熱炉を用いた（図2.2参照）。載荷装置は、アムスラー式圧縮試験機（容量：300tonf・定荷重装置付き）及び反力フレームにより構成されている。載荷は中心圧縮載荷とし、載荷荷重は試験前に試験体に加えた。加熱はJISの耐火標準加熱曲線に従った。試験中の試験体の伸びと鋼管の局部座屈による急激な収縮を把握するため、試験体全体の伸び量を柱脚部のベース・プレートの４隅に変位計を取り付け測定した。また、鋼管温度（表面及び裏面）及びコンクリート温度をＫ熱電対で測定した。載荷の終了は、試験体が荷重支持能力を失った時点、すなわち、軸方向変形速度が急激に増加した時点とした。その時点で加熱も終了した。

2．3　計算方法

２．３．１　概要

取扱いの簡便さを重視して、簡易な計算方法を開発した。より精査な計算を行えば、正確な内部温度及び残存耐力が得られるのであるが、ここでは、計算時間の短縮に努め、実験結果より省略できる部分または簡素化できる部分については、極力省略または簡素化した。従って、部材内部最高温度を各点について求め、その温度に対応する圧縮応力度の合計から残存耐力を算定した。以下にその手順の概略を示し、詳細を２．３．２以降で述べる。

（１）火災外力の仮定

a. 標準曲線（JIS、ISO）

b. 等価時間（川越モデル）

c. 実火災からの最高温度・継続時間の推定

d. その他として、冷却曲線

（２）上記（１）より最適な条件を選択し、火災性状の設定

（３）部材断面、使用材料の決定

断面形状・寸法、材料の比重・含水率、熱的性質の決定

（４）非線形熱伝導計算

a. 初期温度（部材内部及び周囲）の設定

b. 使用コンクリートの初期含水量の設定、蒸発潜熱の計算

c. 時間t及び層厚x、yそれぞれに対する刻みΔt及びΔx、Δyの設定（モデルの設定）

d. 流入熱量を計算し、各部（加熱側及び内部）の温度算定

・T＜100℃の時、温度上昇

・T≧100℃の時

・流入熱量が蒸発潜熱より小さい場合、T＝100℃（温度停滞）、

・流入熱量が蒸発潜熱より大きくなった場合、T＞100℃（温度上昇）

（５）最高温度分布の把握

火災時間終了後も含めた各部の最高温度を抽出し、部材内部の最高温度分布を求める。

（６）熱応力計算

高温時の材料の応力－ひずみ度関係より各部の応力計算

（７）残存耐力の算定

部材としての火災後の残存耐力の計算

２．３．２　計算条件

（１）火災性状の設定

火災外力及び冷却曲線を仮定し、火災性状を設定した。

１）火災外力の仮定

火災外力には①耐火標準加熱曲線（JIS、ISO 834）、②等価時間（川越モデル）[60]及び③実火災からの推定（最高温度及び継続時間）等が考えられる。便宜的には、②の等価時間が用いられる。③については、火害調査で実施している火災性状の把握からより正確な火災外力の推定を行なうことができる。すなわち、木材の炭化深さ、材料の燃焼状況、消防の資料及びコンクリートの表面の変色状況より火災継続時間と最高温度が求められる。実火災では、火災荷重、開口条件等により燃料支配型火災と換気支配型火災に分けられ、ＲＣ造の場合には、換気支配型の火災と考えられる。また、JISの標準曲線を基準として、実際の火災条件を勘案する方法もある。すなわち、開口の大小によって火災温度を圧縮・拡大し、火災荷重によって火災継続時間を延長・短縮し、実火災の情報も加え、加熱曲線を想定すれば、実火災により近い解が求められる。

ここでは、実験と比較するために、ＲＣ造建物内の火災性状を代表しているJISの標準曲線を採用し，加熱温度T(℃)を(2.1)式で近似した(初期温度を20℃とした)[61]。

$$T=1080-340e^{-0.8t}-136e^{-5.15t}-584e^{-21.6t} \qquad (2.1)$$

ここで、t:時間(h)

２）冷却曲線の仮定

冷却曲線については、過去の実験結果より火災外力と逆の曲線を用いた。ここでは、JISの標準曲線のγ倍の曲線で温度が下降するものとした。過去の耐火試験よりγを0.9とした。ただし、温度が室温まで降下したら、室温を維持するものとした。

（２）材料の密度・含水率、熱的性質

ここで対象とした普通コンクリートの材料特性を次のように与えた。

１）密度及び含水率

試験体のサンプルの測定値を採用し、未知の場合には次の値を採用した[62]。

密度　　ρ_c=2,300kg/m^3

含水率　　w_c=8%

２）熱伝導率及び比熱等の熱特性値

熱特性については温度依存性はあるものの、解析が複雑となるため、ここでは、簡易計算の条件として、100～800℃までの平均値を採用した[62]。

熱伝導率　λ_c=1.30kcal/m•h•℃

比熱　　c_c=0.26kcal/kg•℃

（３）モデルの設定

角形CFT柱については断面を正方形とみなし、二次元問題としてとらえ、図2.3に示すグリッドに分割し、1/8の部分について計算を行なった。また、円形CFT柱についても、二次元問題として取り扱うべきであるが、部材断面を単純化し、熱伝導解析には一次元差分法を用いて[63]、一次元問題として解析した[64]。従って、図2.4に示すようにモデル化し、層分割した。グリッド内及び層間内は均一温度とした。また、温度の時間的変動は階段状とし、分割時間内は一定とした。

（４）計算の仮定

過去の実験結果[65]、本実験の温度及び変位量の測定結果[66]、本実験後の試験体の鋼管表面の観察及び鋼管をはぎ取った後のコンクリートの表面観察より（写真2.1～2.4参照）、CFT柱の加熱中の挙動を次のような４段階に仮定し、この仮定を基に計算した。

（ステージ①）……図2.5に示すように、加熱初期に鋼管は熱膨張により、軸方向及び周方向に伸び、周方向については初期からコンクリートと肌離れすると考えられる。

（ステージ②）……軸方向については、コンクリートの温度上昇に比べ、鋼管の温度上昇が大きいため、鋼管のみで荷重を負担している。鋼管のみの負担耐力が全荷重を支えきれなくなった時点で、局部座屈が始まり、縮み始める。

（ステージ③）……軸方向の熱膨張分は周方向に大きく膨らみ、徐々にコンクリートに応力が移行する。

（ステージ④）……コンクリートが負担しきれなくなった時点でコンクリートが圧壊すると同時に鋼管もその部分で局部座屈をおこし（写真2.5参照）、最後にはコンクリートの圧壊及び鋼管の局部座屈により断面の変化が生じ、全体座屈という現象に至る。

２．３．３　内部最高温度分布の把握

（１）加熱側の熱伝達

ここでは、過去の多くの実験結果より試験体加熱側表面温度T_{s_s}を加熱温度Tと等しいと仮定した。すなわち、加熱側表面については、耐火試験時においては加熱温度用熱電対が

保護管内に挿入され、その温度が加熱温度Tとして測定されている。この加熱温度Tは加熱温度測定位置の雰囲気温度T_fよりわずかに低い。従って、熱源から遠ざかった試験体面での表面温度T_{ss}は雰囲気温度T_fより低く、試験体表面温度T_{ss}と加熱温度Tとがほぼ等しいと考えられる。

（２）コンクリート内部の熱移動

コンクリート内部の熱移動は、熱伝導によるものと考えると、(2.2)式で示される偏微分方程式を解くことになる。

$$(\rho_c c_c)\partial T/\partial t=\nabla(\lambda_c \nabla T)-A \qquad (2.2)$$

ここで、$\rho_c c_c$:コンクリートの体積比熱(kcal/m³・℃)、

λ_c:コンクリートの熱伝導率(kcal/m・h・℃)、

T:温度(℃)、

t:時間(h)、

A:生成項(kcal/m³・h)

本解析モデルの円形CFT柱を一次元として解く場合、生成項を無視すれば、一般的には、(2.3)式で表される。

$$(\rho_c c_c)\partial T/\partial t=\lambda_c \partial^2 T/\partial x^2 \qquad (2.3)$$

また、角形CFT柱を二次元として解く場合には、同じく生成項を無視すれば、(2.4)式で表される。

$$(\rho_c c_c)\partial T/\partial t=\lambda_c\{(\partial^2 T/\partial x^2)+(\partial^2 T/\partial y^2)\} \qquad (2.4)$$

上記(2.3)式及び(2.4)式を差分法（中心差分）で解く方法[25]により、非線形熱伝導解析を行なった。各グリッド及び各層毎に内部最高温度を求めた。

ここで、(2.3)式を展開すると、次のようになる。すなわち、i層での温度上昇分ΔT_iは(i-1)層からi層に流入した熱量とi層から(i+1)層へ流入した熱量の差と考えられ、温度上昇分ΔT_iは(2.5)式で表される。

$$\Delta T_i=T_i^{n+1}-T_i^n$$

$$=\lambda_c \Delta t(T_{i+1}^n-2T_i^n+T_{i-1}^n)/\rho_c c_c \Delta x^2 \qquad (2.5)$$

ここで、上付きnは時間nを示す。

従って、内部温度T_i^{n+1}は(2.6)式となる。

$$T_i^{n+1}=T_i^n+\lambda_c \Delta t(T_{i+1}^n-2T_i^n+T_{i-1}^n)/\rho_c c_c \Delta x^2 \qquad (2.6)$$

円形CFT柱の場合、図2.4に示すモデルの一般部分について展開すると、温度上昇分ΔT_i

は(2.7)式で表される。

$$\triangle T_i = T_i^{n+1} - T_i^n$$
$$= \lambda_c \triangle t\{(d-2i\triangle x)(T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) - 2\triangle x(T_i^n - T_{i+1}^n)\}$$
$$/\rho_c c_c\{d-(2i-1)\triangle x\}\triangle x^2 \qquad (2.7)$$

従って、内部温度T_i^{n+1}は(2.8)式となる。

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \lambda_c \triangle t\{(d-2i\triangle x)(T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) - 2\triangle x(T_i^n - T_{i+1}^n)\}$$
$$/\rho_c c_c\{d-(2i-1)\triangle x\}\triangle x^2 \qquad (2.8)$$

また、角形CFT柱の場合、一般部分について展開を行うと、次のようになる。すなわち、図2.6に示すように、グリッド(j,k)での温度上昇分$\triangle T_{j,k}$に消費される熱量は、x方向でグリッド(j-1,k)からグリッド(j,k)に流入した熱量とグリッド(j,k)からグリッド(j+1,k)へ流入した熱量の差、及びy方向でグリッド(j,k-1)からグリッド(j,k)に流入した熱量とグリッド(j,k)からグリッド(j,k+1)へ流入した熱量の差の合計と考えられ、温度上昇分$\triangle T_{j,k}$は(2.9)式で表される。

$$\triangle T_{j,k} = T_{j,k}^{n+1} - T_{j,k}^n$$
$$= \lambda_c \triangle t\{(T_{j+1,k}^n - 2T_{j,k}^n + T_{j-1,k}^n)/\rho_c c_c \triangle x^2$$
$$+(T_{j,k+1}^n - 2T_{j,k}^n + T_{j,k-1}^n)/\rho_c c_c \triangle y^2\} \qquad (2.9)$$

従って、内部温度$T_{j,k}^{n+1}$は(2.10)式となる。

$$T_{j,k}^{n+1} = T_{j,k}^n + \lambda_c \triangle t\{(T_{j+1,k}^n - 2T_{j,k}^n + T_{j-1,k}^n)/\rho_c c_c \triangle x^2$$
$$+(T_{j,k+1}^n - 2T_{j,k}^n + T_{j,k-1}^n)/\rho_c c_c \triangle y^2\} \qquad (2.10)$$

（３）鋼管とコンクリート間の熱移動

CFT柱の場合、常温時には、鋼管とコンクリートは付着しているが、上記２．３．２（４）の加熱中の挙動の仮定より、加熱初期から鋼管が熱膨張のため周方向に膨らみ、鋼管とコンクリートの間には空気層が生じる。従って、中空層の熱容量を無視し、鋼管からコンクリートへの熱伝達機構を対流熱伝達と輻射熱伝達が共存すると仮定し、熱伝達量を求めた。なお、鋼管の表面と裏面の温度は等しいと考えた（図2.7参照）。

コンクリート表面での温度T_{cs}^{n+1}は(2.11)式で表される。

$$T_{cs}^{n+1} = T_{cs}^n$$
$$+\Delta t\{\alpha_f(T_{sr}^n - T_{cs}^n) - \lambda_c(T_{cs}^n - T_{c1}^n)/\Delta x\}/\rho_c c_c \Delta x \qquad (2.11)$$

ここで、α_f：総合熱伝達率$=\alpha_{fr}+\alpha_{fc}$（kcal/m²•h•℃）、

α_{fr}：対流熱伝達率（kcal/m²•h•℃）、

α_{fc}：輻射熱伝達率（kcal/m²•h•℃）、

T_{sr}：鋼管裏面温度（℃）、

T_{cs}：コンクリート表面温度（℃）、

T_{c1}：コンクリート内部１層目の温度（℃）

また、α_fは(2.12)式で表される。

$$\alpha_f=\sigma\cdot\varepsilon_r\{(T_{sr}^n+273)^4-(T_{cs}^n+273)^4\}/\{100^4\cdot(T_{sr}^n-T_{cs}^n)\}+\alpha_{fc} \quad (2.12)$$

ここで、σ：ステファンボルツマン定数（=4.88kcal/m²•h•°K）、

ε_r：合成輻射率$=(\varepsilon_s^{-1}+\varepsilon_c^{-1}-1)^{-1}$（$\varepsilon_s$：鋼管の放射率、$\varepsilon_c$：コンクリートの放射率）

ここで、ε_s=0.79[67]、ε_c=0.9[68]、α_{fc}=20kcal/m²•h•℃[25]とすると、(2.11)式は(2.13)式となる。

$$T_{cs}^{n+1}=T_{cs}^n+\Delta t[4.88\times10^{-8}\times0.73\{(T_{sr}^n+273)^4-(T_{cs}^n+273)^4\}$$
$$+20(T_{sr}^n-T_{cs}^n)-\lambda(T_{cs}^n-T_{c1}^n)]/\rho_c c_c\Delta x \quad (2.13)$$

角形CFT柱の隅角部以外については一次元としてとらえられるので、(2.11)式を用いることができる。隅角部のコンクリート表面温度T_{csc}^{n+1}は(2.14)式で表される。

$$T_{csc}^{n+1}=T_{csc}^n$$
$$+\Delta t\{\alpha_f(T_{src}^n-T_{csc}^n)-\lambda_c(T_{csc}^n-T_{c1}^n)/\Delta x\}/\rho_c c_c\Delta x$$
$$+\Delta t\{\alpha_f(T_{src}^n-T_{csc}^n)-\lambda_c(T_{csc}^n-T_{c1}^n)/\Delta y\}/\rho_c c_c\Delta y \quad (2.14)$$

ここで、T_{c1}：コンクリート内部グリッド(1,1)の温度（℃）、

T_{src}：鋼管の隅角部裏面温度（℃）

また、円形CFT柱については、コンクリート表面温度T_{cs}^{n+1}は(2.15)式で表される。

$$T_{cs}^{n+1}=T_{cs}^n+8\Delta t\{\alpha_f(T_{sr}^n-T_{cs}^n)\cdot(d/2)$$
$$-\lambda_c(T_{cs}^n-T_1^n)(d-\Delta x)/(2\Delta x)\}/\rho_c c_c(2d-\Delta x)\Delta x \quad (2.15)$$

（４）コンクリートの含水の影響

内部温度に大きな影響を与える水分を計算に考慮した。内部の自由水の沸点を100℃とし、沸点に達する以前の蒸発量は無視した。内部で蒸発した水分は、その場では完全に蒸発せずに、各層間の圧力差と透気抵抗によって移動するのであるが、ここでは、熱移動と共に水分移動も考慮し、移動分を予め初期値として各層に与えておくこととした。図2.8に示すように、加熱側表面層（N=1）の初期含水量W(1)はその層に存在する水量として与えた。第２層以降は順次第１層の含水量の一部αW(1)が移動した状態を想定した[28]。ここで、α

を水分移動係数と呼び、αは実験より求めた。各層の温度が100℃に達した後、侵入熱量に応じた蒸発が起こり、そこに水分が存在する間は、その層の温度は上昇しないものとする。流入熱量が蒸発潜熱量より大きくなったら、再び流入熱量がその点の温度を上昇させる。すなわち、i層の温度T_i^{n+1}（℃）が次に示す条件によって、温度停滞・温度上昇に分類される。

$T_i^{n+1} \geqq 100$℃の時、T_i^{n+1}の温度上昇に使われる熱量をQ(kcal)とすると、

$\Sigma Q \leqq [\Delta x^3 \cdot \chi \cdot \xi]$の間は、$T_i^{n+1}=100$℃、

$\Sigma Q > [\Delta x^3 \cdot \chi \cdot \xi]$となった時に初めて温度上昇を開始する。

ここで、Δx：層厚（m）、

χ：含水量（kg/m^3）、

ξ：蒸発潜熱量（=539kcal/kg）

２．３．４　残存耐力の算定

（１）コンクリート及び鋼管の機械的性質

コンクリートについては、上記**２．１**より加熱終了後、強度回復を始めるのは約1ヶ月後と考えられるので、ここでは、火災直後は受熱温度に応じた応力－ひずみ度関係を維持しているものとした。常温及び高温時のコンクリートの応力－ひずみ度関係を図2.9に示すバイリニアーモデルに仮定した。最大ひずみ度ε_uは最大応力度σ_Bに達したときのひずみ度ε_Bの2倍とし、常温時の見かけの弾性係数$E_{n,c}$をＲＣ基準の弾性係数E_c[69]の1/2と仮定した。強度及び弾性係数の低下率は図2.10に示すごとく仮定した[47]。

すなわち、ここで対象とした普通コンクリートについては、高温時の強度比（熱間状態）を(2.16)式～(2.18)式で表した。

１）0℃＜T≦300℃

$$\sigma_{Nc,T}/\sigma_{Nc,n}=1 \qquad (2.16)$$

２）300℃＜T≦700℃

$$\sigma_{Nc,T}/\sigma_{Nc,n}=-1/6\times10^{-2}T+3/2 \qquad (2.17)$$

３）700℃＜T

$$\sigma_{Nc,T}/\sigma_{Nc,n}=0 \qquad (2.18)$$

ここで、T：温度（℃）、

$\sigma_{Nc,T}$：温度T時の普通コンクリートの強度（kgf/cm^2）、

$\sigma_{Nc,n}$：常温時の普通コンクリートの強度（kgf/cm²）

また、高温時の弾性係数比（熱間状態）は(2.19)式～(2.22)式で表した。

1）0℃＜T≦25℃

$$E_{Nc,T}/E_{Nc,n}=1 \qquad (2.19)$$

2）25℃＜T≦300℃

$$E_{Nc,T}/E_{Nc,n}=-2/11\times10^{-2}T+23/22 \qquad (2.20)$$

3）300℃＜T≦700℃

$$E_{Nc,T}/E_{Nc,n}=-0.0875\times10^{-2}T+0.7625 \qquad (2.21)$$

4）700℃＜T

$$E_{Nc,T}/E_{Nc,n}=0 \qquad (2.22)$$

ここで、$E_{Nc,T}$：温度T時の普通コンクリートの弾性係数（kgf/cm²）、

$E_{Nc,n}$：常温時の普通コンクリートの弾性係数（kgf/cm²）

鋼管については、比較的早い時期（（財）日本建築総合試験所で実施した過去の実験結果[70],[71]及び本実験結果より、軸力比にかかわらず、約20分前後）に局部座屈が発生し始め、耐力を保持できないと仮定し、最終の残存耐力算定には考慮しなかった。

（2）コンクリートに対する強度の低減

高温時に鋼管が熱膨張により周方向に膨らむため、高温時での鋼管の拘束効果によるコンクリートの強度の増加は期待できない。通常使用されているコンクリートの圧縮供試体に比べ実験で用いられた柱試験体は径長さ比（h/a、h:部材長さ、a:断面径）が相当大きくなっている。従って、柱試験体内のコンクリート強度は標準圧縮強度より低下すると考えられる。径長さ比によるコンクリート強度の低減係数L_1の計算式(2.23)[72]より、本実験の鋼管内部のコンクリート強度は、標準強度の85%に低下するものと考えた。

$$L_1=0.85+0.15(h/a)^2 \qquad (2.23)$$

本実験より、最弱断面（上部）でコンクリートの圧壊により破壊が決っている。これは、部材の打ち込み高さにより強度が低下し、本試験体の打ち込み面（上部）ではその強度は通常の標準強度に比べ、約80%に低下する[73]。打ち込み高さによるコンクリート強度の低減係数L_2として0.8を用いた。従って、本試験体のコンクリートの強度は低減係数L_1及びL_2を考慮し、(2.24)式で示される低減強度$\sigma_{L,B}$を採用した。

$$\sigma_{L,B}=L_1\cdot L_2\cdot\sigma_B \qquad (2.24)$$

ここで、σ_B：コンクリート強度(kgf/cm²)

（３）残存耐力の計算

各要素iの内部最高温度に対応する応力－ひずみ度関係よりひずみ度を増分させながら、各要素の応力度σ_iを求め、それらの合算が最大となる値P_{max}を残存耐力とした。すなわち、ひずみ度がε_lの時の耐力P_lは(2.25)式で表した。

$$P_l=\Sigma\,\sigma_{i,T,l}\cdot A_i \qquad (5.25)$$

ここで、$\sigma_{i,T,l}$：温度Tとなった時の要素iにおけるひずみ度ε_lでの応力度（kgf/cm²）、

A_i：要素iの断面積（cm²）

ひずみ度増分量$\Delta\varepsilon$を漸次増分させ、Pの最大値P_{max}を求めた。

なお、応力に関するひずみ度ε_sは(2.26)式で与えられる。

$$\varepsilon_s=\varepsilon_{T,axis}-\varepsilon_{thermal} \qquad (2.26)$$

ここで、$\varepsilon_{T,axis}$:全ひずみ度、

$\varepsilon_{thermal}$:熱特性に関するひずみ度

実験より、最終的な破壊はコンクリートの圧壊により決まるので、残存耐力の算定には、全体座屈の影響は考慮しなかった。

２．４　計算結果及び考察

図2.11に、(2.27)式で示される軸力比n_cと崩壊時間の関係について、実験値と本方法による計算値の比較を示す。

$$n_c=10^3\times N/({}_cA\cdot\sigma_B) \qquad (2.27)$$

ここで、N:軸力(tonf)、

${}_cA$:コンクリート断面積(cm²)、

σ_B:コンクリート強度(kgf/cm²)

図2.11には、コンクリートの低減強度$\sigma_{L,B}$を考慮した結果も示した。計算値と実験値は、火災時間が短い場合には差が生じているが、低減強度$\sigma_{L,B}$を考慮すれば、ほぼ良い一致を示しており、この方法を用いて火災後の残存耐力を求めることとした。

図2.12はJISの火災外力を受けた時の火災終了時と火災後の残存耐力の低下の変化を調べた結果である。火災時間と(2.28)式で示される残存耐力比pの関係で表した。

$$p=P_t/P_o \qquad (2.28)$$

ここで、P_t:残存耐力(tonf)、

P_o:コンクリート部分の常温時耐力(tonf)

火災終了後、内部コンクリートの温度上昇により残存耐力は火災終了時よりも低下し、火災時間が長いほど低下は大きいことが分かる。

2．5　実大部材へのシミュレーション

実火災及び実仕様においては、試験で実施した状態と火災外力、部材の断面・径長さ比及び打ち込み方法等が異なるため、残存耐力比ｐも相当変化するものと考えられる。本計算方法を用いれば、残存耐力比ｐがどの様に変化するかが分かる。ここでは、実大の断面について残存耐力の推定を行なった。図2.13及び図2.14はJISの火災外力を受けた時の角形及び円形の各鋼管について断面の違いによる残存耐力比の変化を調べた結果である。断面の大きい部材ほど、残存耐力比ｐは大きくなり、火災時間が長くなるほど、断面の大きい部材が耐火上有利となることが分かる。すなわち、熱容量の効果が現れていると考えられる。

通常の火災では、正味60分程度の火災継続時間と考えられ、一般に用いられる断面（角形および円形鋼管とも外径500mm以上の断面）の残存耐力比は、図2.13及び図2.14より約9割となる。従って、補修に際しては、部材を取り壊すまでには至らず、部分的な鋼管の補強程度で済むものと考えられる。

2．6　まとめ

本章では耐力部材としてCFT柱を取り上げ、CFT柱について、火災後の残存耐力の推定方法を提案した。以下に本章で得られた成果を示す。

（１）本推定方法による残存耐力の計算値と実験値とがほぼ良い一致を示した。

（２）本方法を用いて実大部材についてシミュレーションを行なった。その結果、火災時間が長くなるほど、断面の大きい部材が耐火上有利となることが分かった。

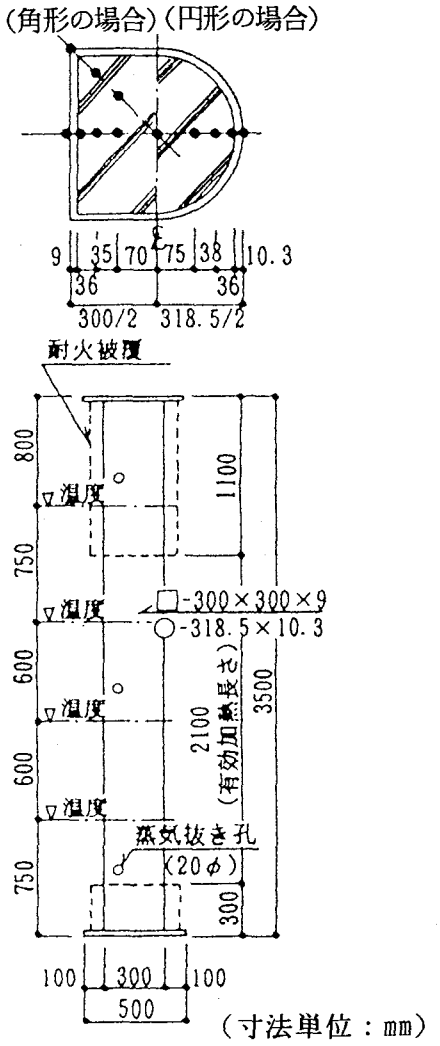


図2.1　試験体形状・温度測定位置

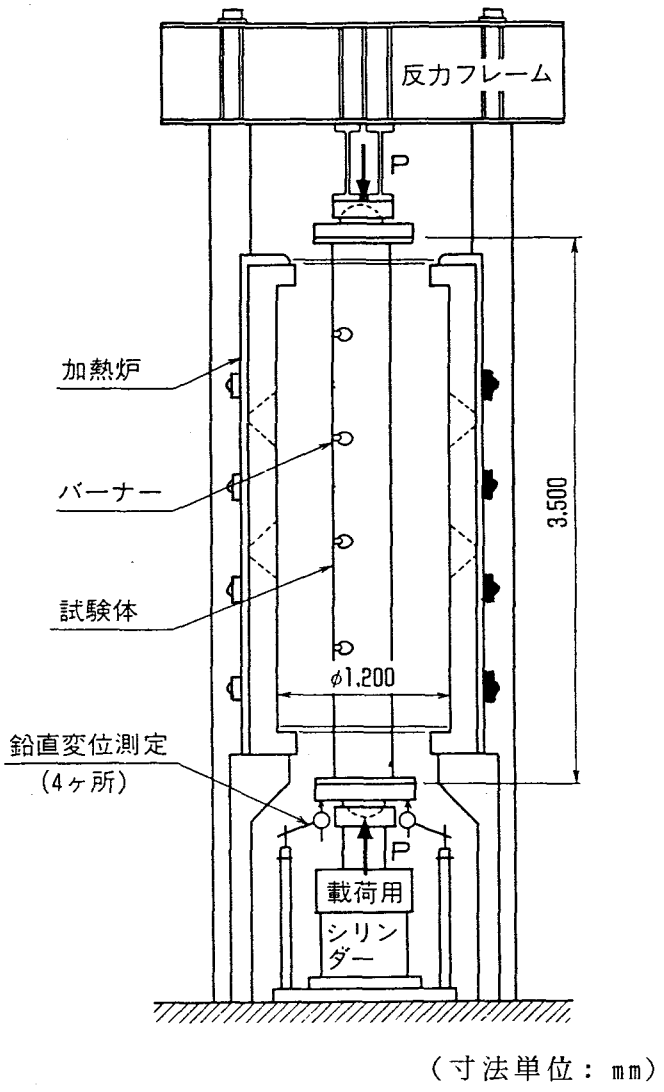


図2.2　試験装置

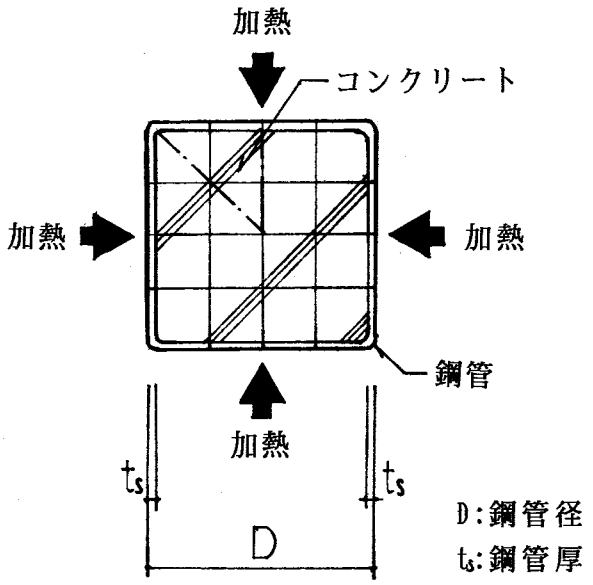


図2.3　角形CFT柱のモデル化

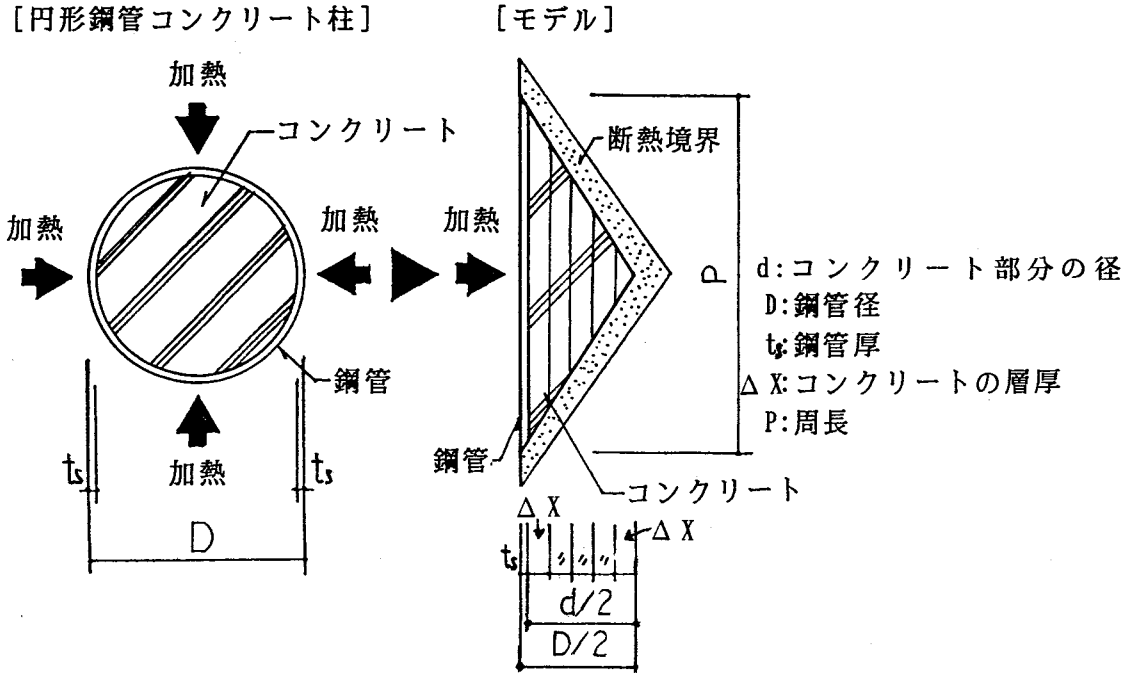


図2.4　円形CFT柱のモデル化

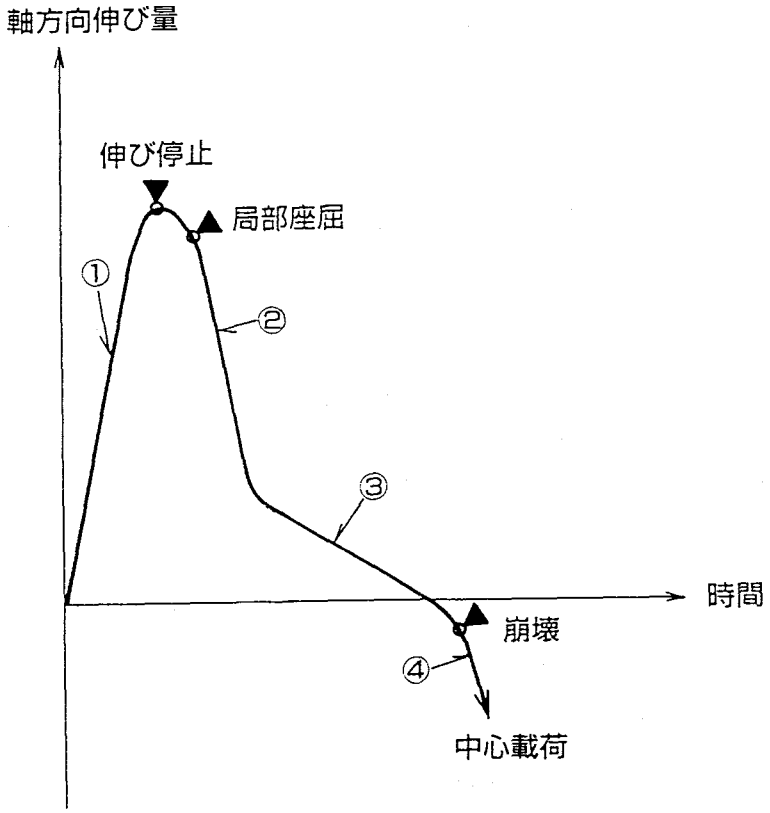


図2.5　変形性状の模式図

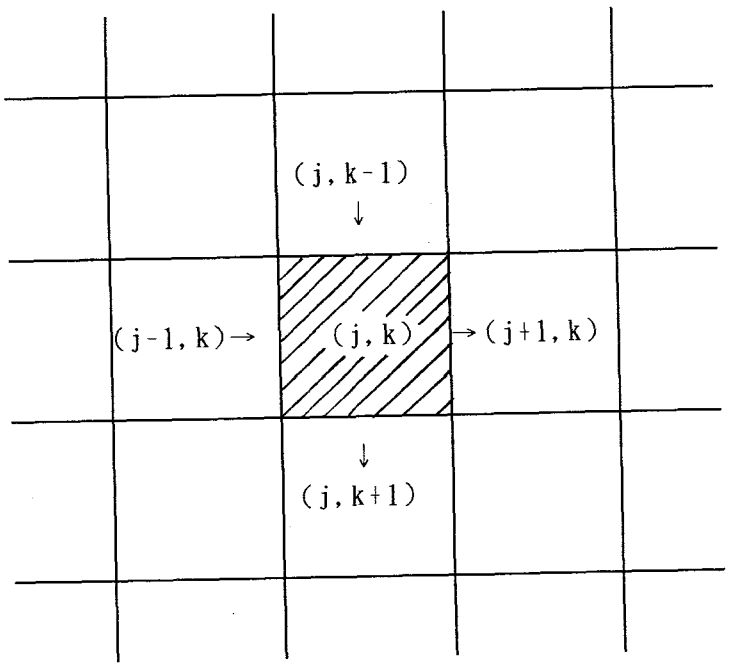


図2.6　コンクリート内部の熱移動（角形鋼管の場合）

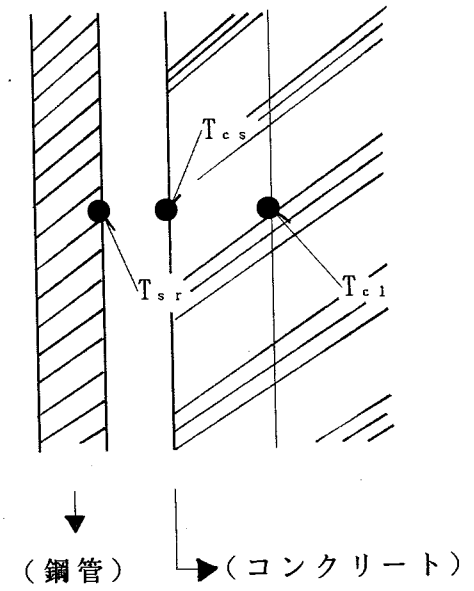


図2.7　鋼管とコンクリート間の熱移動

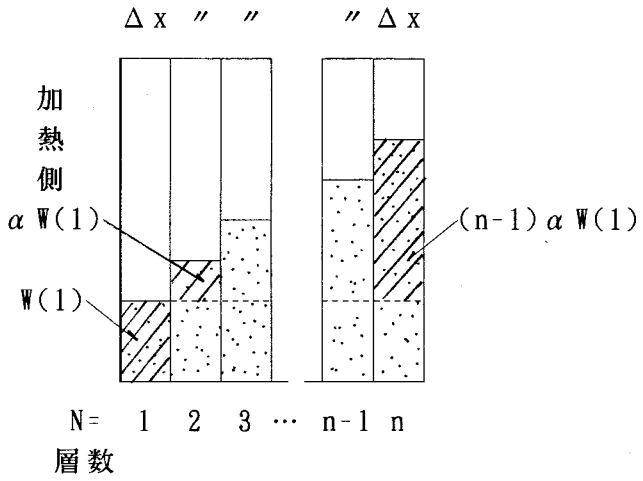


図2.8　初期含水量の与え方

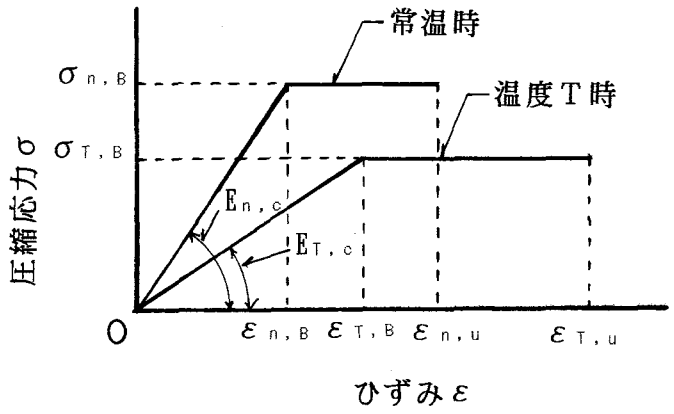


図2.9　コンクリートの応力－ひずみ関係

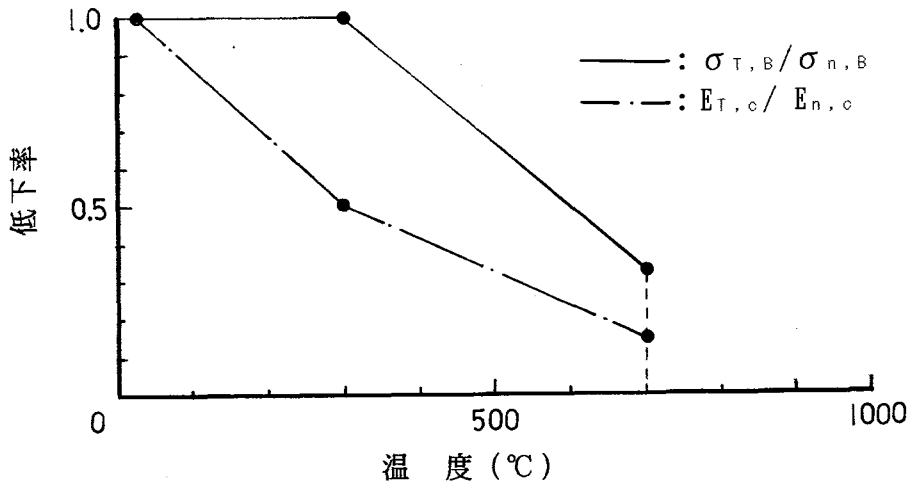


図2.10　コンクリートの強度及び弾性係数の低下率

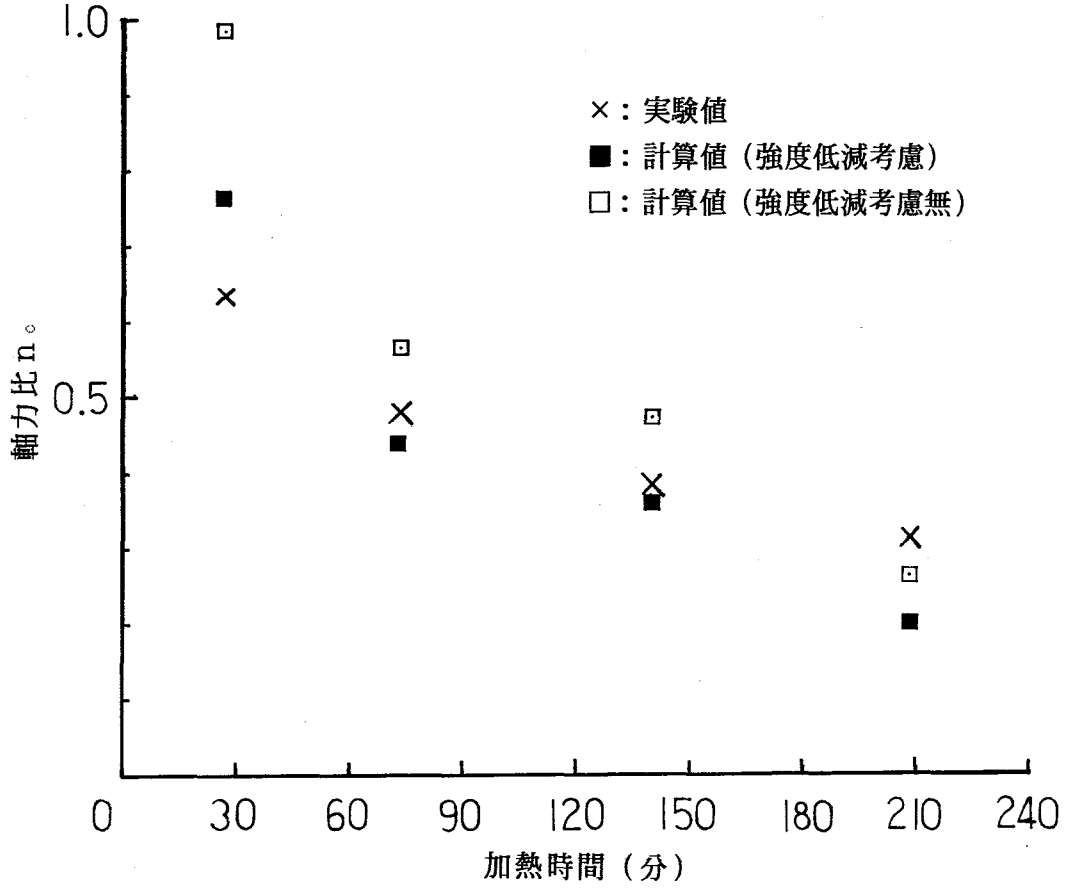


図2.11　崩壊時間－軸力比n_cの関係（角形CFT柱）

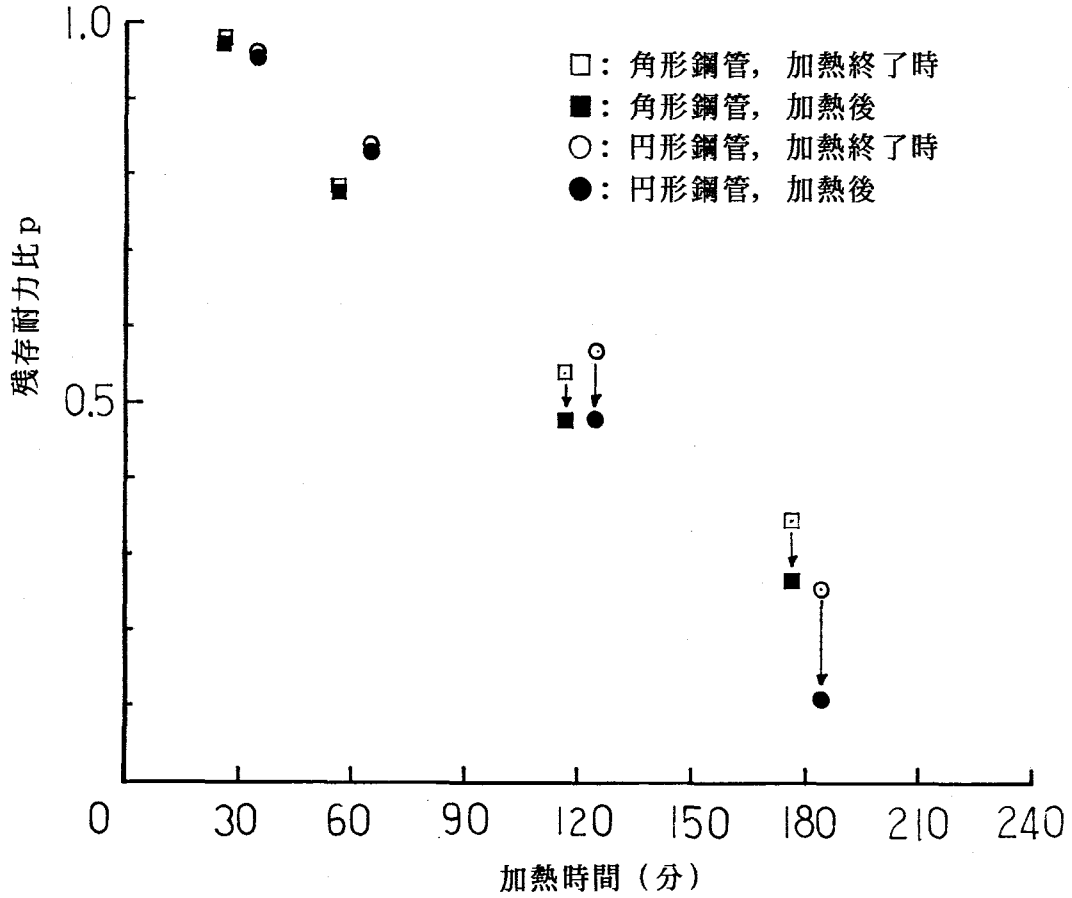


図2.12　火災後の残存耐力（CFT柱）

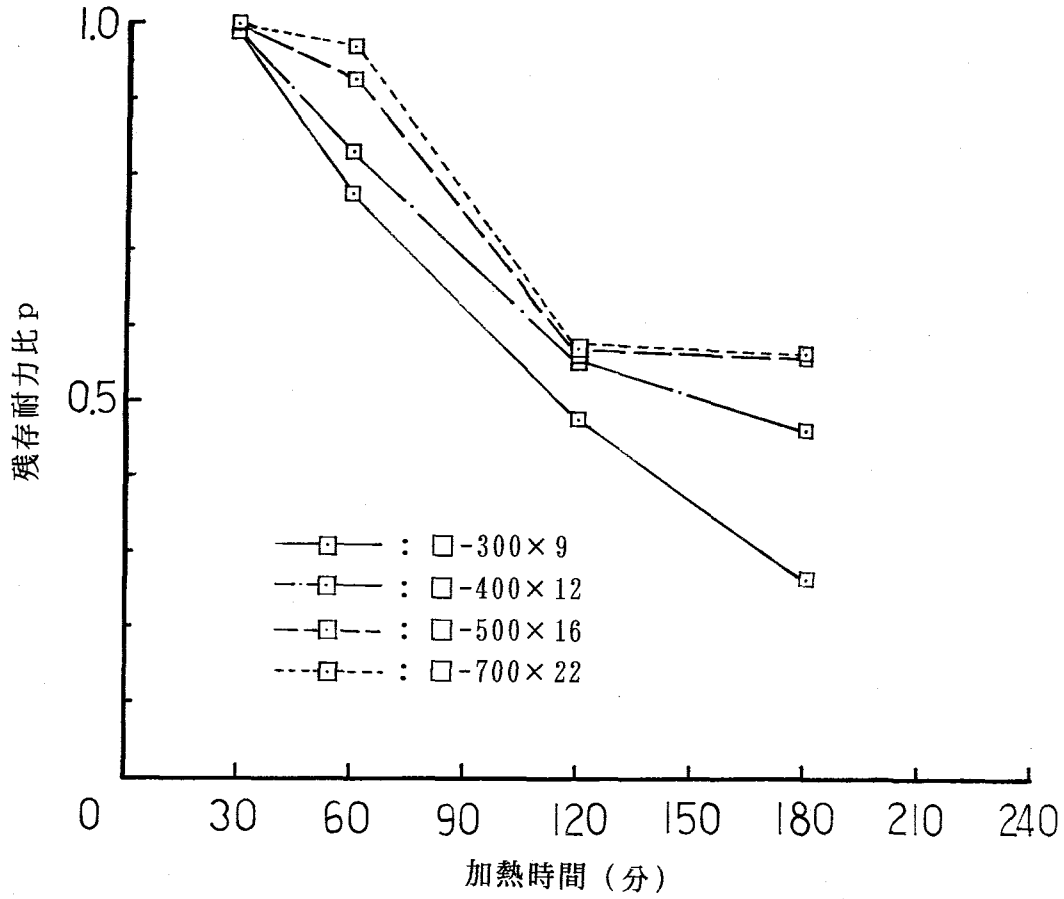


図2.13　断面の違いによる残存耐力の変化（角形CFT柱）

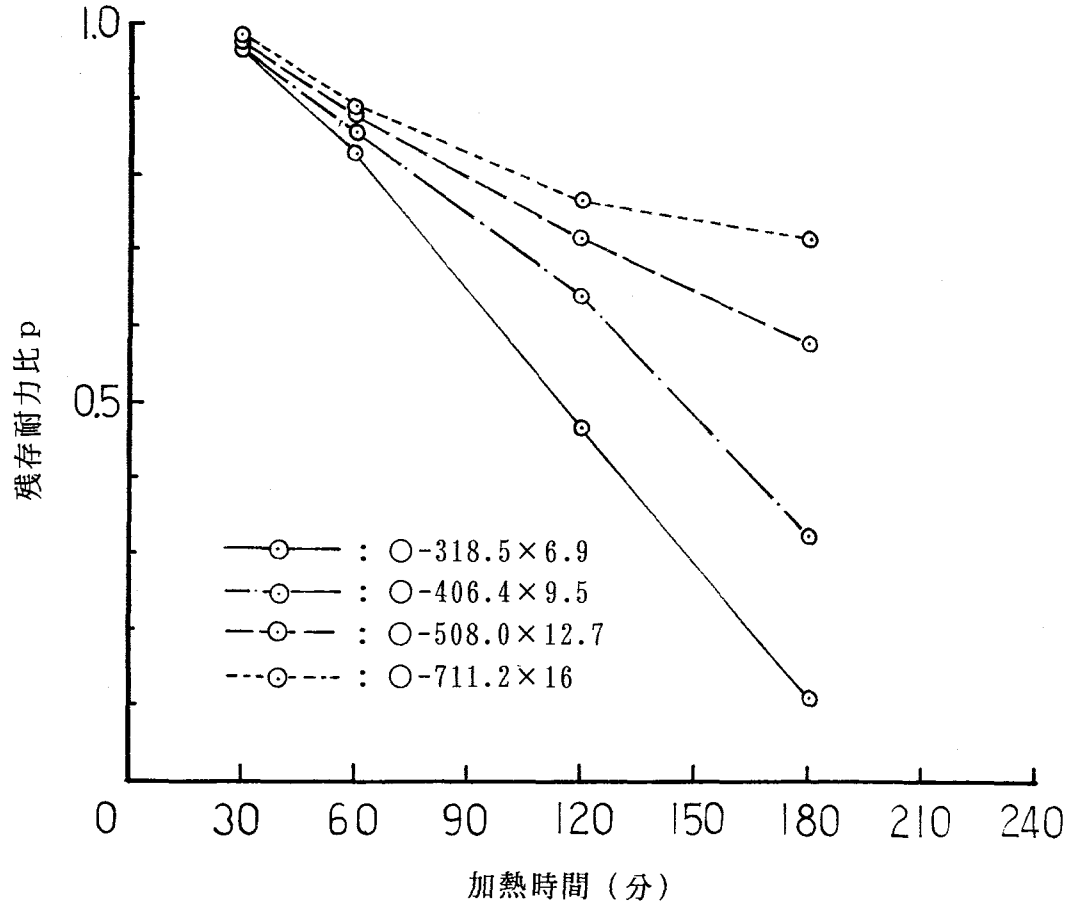


図2.14　断面の違いによる残存耐力の変化（円形CFT柱）

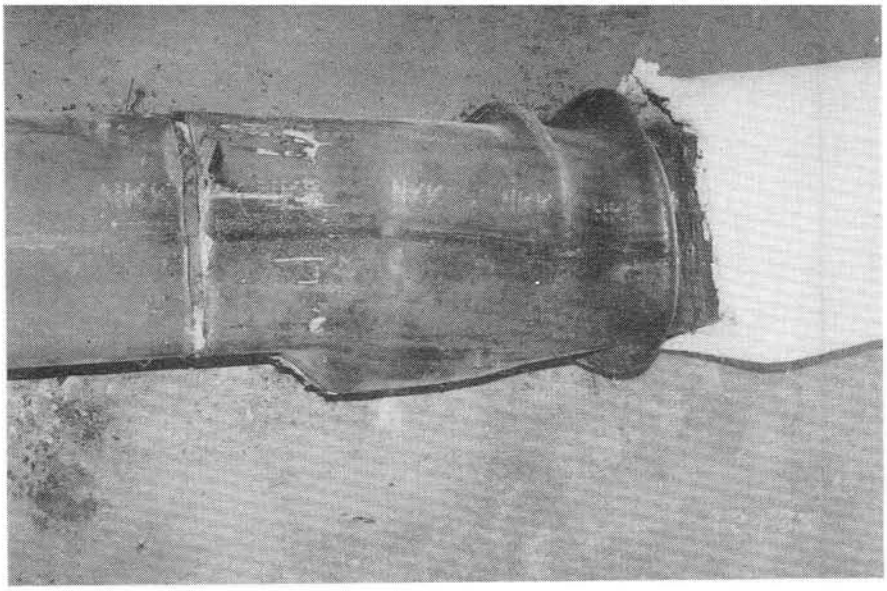


写真2.1　崩壊状況（角形CFT柱）

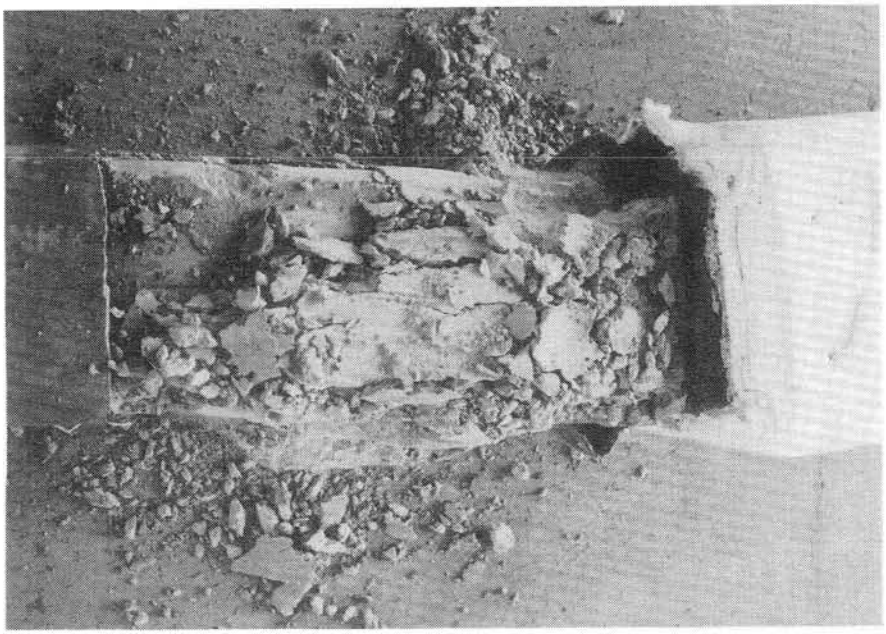


写真2.2　写真2.1のコンクリート内部状況

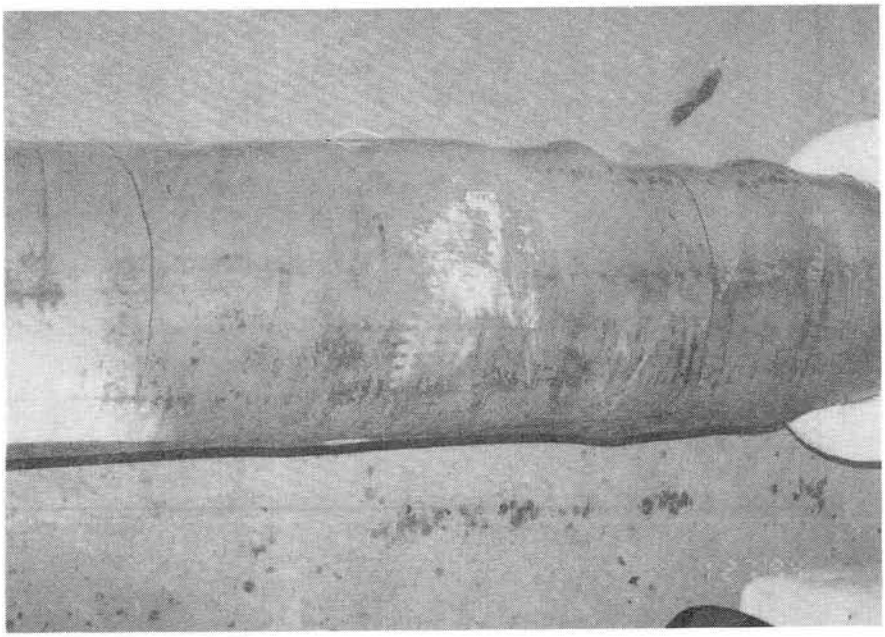


写真2.3　崩壊状況（円形CFT柱）

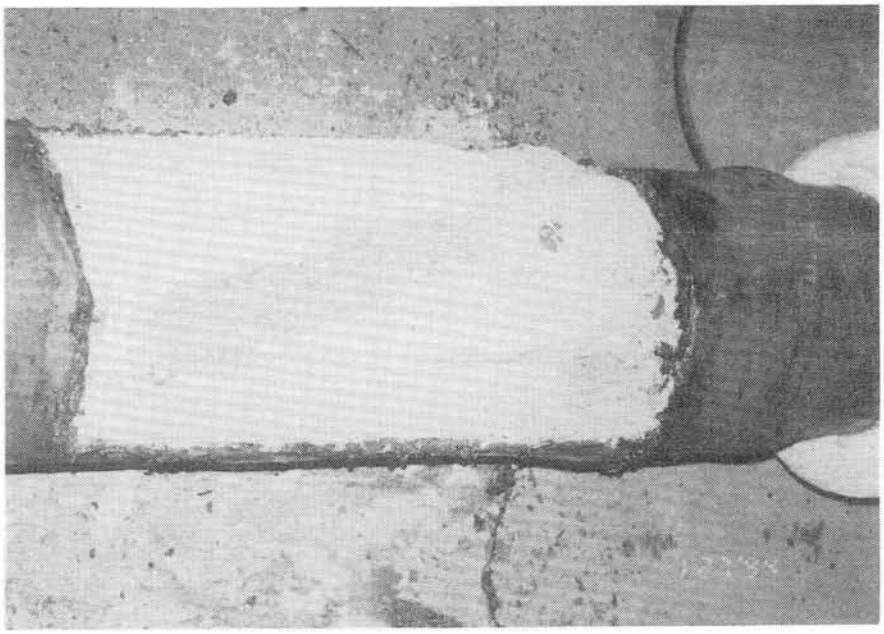


写真2.4　写真2.3のコンクリート内部状況

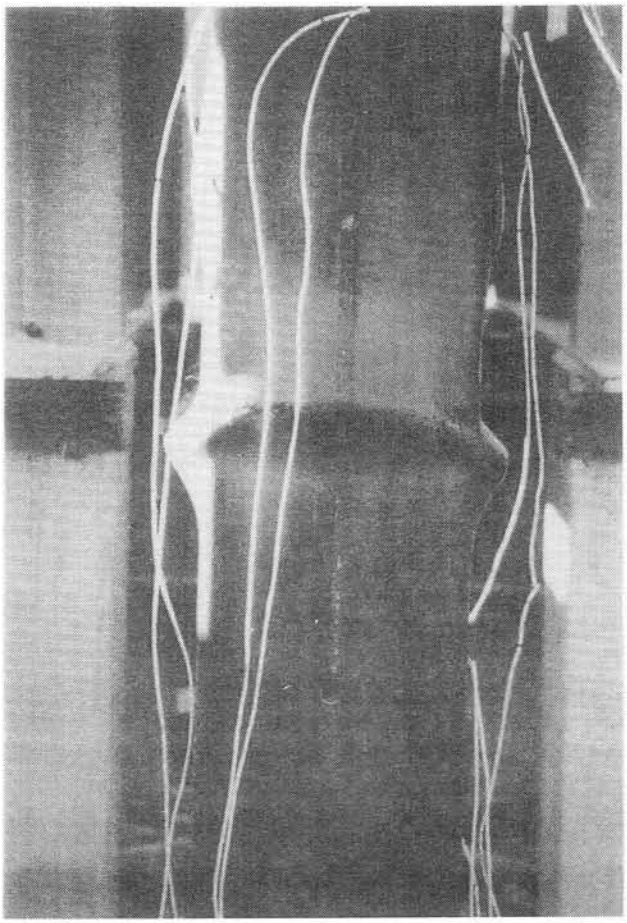


写真2.5　局部座屈の状況

第３章　火災後におけるコンクリート系区画部材の受熱温度及び残存耐力の推定に関する研究

３．１　はじめに
３．２　受熱温度の算定
３．３　壁及び床部材の受熱温度分布
３．４　受熱温度分布推定式の誘導
３．５　残存耐力の推定
３．６　まとめ

３．１　はじめに

前章（第２章）で既に述べたように、火害を受けたＲＣ造建物を再使用できるかどうかは重要な問題である。そのためにはコンクリート系部材の被害度をより正確に診断し、その残存耐力を把握する必要がある。

筆者らはコンクリート系構造物の火害診断手法を確立するための第一歩として、コンクリート中の混和剤に着目し、ＵＶスペクトル分析法を用いて、破壊によるコンクリート内部の受熱温度推定方法（GBRC法）を第１編で提案した。さらに、前章（第２章）では、非破壊による受熱温度推定方法（計算手法）を提案した。内部温度を予測する方法に関しては、過去に熱伝導解析によるさまざまな方法[26],[27]が用いられている。それらは大変複雑なものが多いが、本計算手法の主旨は簡素化できる部分は簡素化し、パーソナル・コンピューター・レベルで容易に現象を把握できることにある。本方法では、水分の挙動、材料の熱定数等の取扱いに関して、簡素化が図られている。従って、本計算手法とGBRC法との併用により正確な残存耐力を求めることが可能となる。ここでは、従来考えられている火災中における残存耐力を取り扱うのではなく、火災後の再使用を考慮した火災終了後の残存耐力を取り扱うのものである。

また、前章（第２章）において、筆者らは、部材がある火災時間内は崩壊せずに、火災後に崩壊してしまう時のその火災時間を再使用限界時間と定義した。CFT柱の計算結果より、この時間は崩壊時間より短く、断面が大きくなるほど両者の差は大きくなった。従って、コンクリート系部材の火害後の補修対策を考える場合には、再使用限界時間に着目しなければならないことを前述した。

筆者が所属している公的試験機関は官庁（地方公共団体）及び民間業者（設計事務所、施主、建設会社等）から、火害調査の依頼を受けるケースが非常に多い。第３者機関としての判断を要求される。その場合、依頼者から最も要望される判断がＲＣ造の区画部材の再使用可否の決定である。特に、床部材の再使用可能性という問題に対して、最も頭を悩まされる。壁に関しては、仕上げ材料で覆われている場合が多く、比較的被害は小さくて済む。また、加熱を受ける位置（垂直面）から判断して、壁部材の火害の影響は少ない。しかし、床部材については、階高を節約させるために、仕上げが施されていない場合があり、下面が火災の炎に直接さらされ、被害も大きくなる。特に、床部材は耐力部材であるため、その再使用の適否が重要である。

本章においては、コンクリート系区画部材を対象として、筆者らが第２章で提案した計算方法を応用し、受熱温度分布を計算した。その計算値と実験値と比較し、計算方法の妥当性を検証した。さらに、部材の受熱温度分布の簡易推定式を開発するために、計算から求めた部材の断面方向の受熱温度分布を非線形回帰分析した。また、回帰分析から求めた受熱温度の推定式より火災後の部材の残存耐力を推定した。

本章では、主にＲＣ造部材を対象とした。本研究では、合成構造として合成床版も取り扱ってきた。合成床版は一面に鋼板が付いているため、破壊をともなうGBRC法を用いて受熱温度を推定することができない。そこで、合成床版の中でも最近、その耐火性能が注目されているフラット・デッキタイプの合成床版を想定し、本章ではコンクリートの一面に鋼板が付いた板（第１章では複合板と呼んだ）も対象とした。

３．２　受熱温度の算定

３．２．１　概要

偏微分を差分で解く方法[26],[27]により、非線形熱伝導解析を行い、受熱温度を求めた。その手法については、前章（第２章）で記述した方法を用い、計算時間を短縮するため、耐火試験の結果より簡素化出来る箇所は簡略化した。なお、コンクリートの水分については、①水分の蒸発による吸熱、②加熱による水分の移動、を考慮して解析を行った。以下にその手順の概略を示し、詳細を３．２．２以降に述べる。

（１）火災外力の仮定

a. 標準曲線（JIS、ISO）

b. 等価時間（川越モデル）

c. 実火災からの最高温度・継続時間の推定

d. その他として、冷却曲線

（２）上記（１）より最適な条件を選択し、火災性状の設定

（３）部材断面、使用材料の決定

断面形状・寸法、材料の比重・含水率、熱的性質の決定

（４）非線形熱伝導計算

a. 初期温度（部材内部及び周囲）の設定

b. 使用コンクリートの初期含水量の設定、蒸発潜熱の計算

c. 時間t及び層厚xに対する刻みΔt及びΔxの設定（モデルの設定）

d. 流入熱量を計算し、各部（加熱側、内部及び非加熱側）の温度算定

・T＜100℃の時、温度上昇

・T≧100℃の時

・流入熱量が蒸発潜熱より小さい場合、T＝100℃（温度停滞）、

・流入熱量が蒸発潜熱より大きくなった場合、T＞100℃（温度上昇）

（５）最高温度分布の把握

火災時間終了後も含めた各部の最高温度を抽出し、部材内部の最高温度分布を求める。

（６）熱応力計算

高温時の材料の強度特性より各部の応力計算

（７）残存耐力の算定

床及び壁の各部材について火災後の残存耐力の計算

３．２．２　計算条件

（１）火災性状の設定

火災外力及び冷却曲線を仮定し、火災性状を設定した。

１）火災外力の仮定

ここでは、実験と比較するために、前章（第２章）の２．３．２（１）に記載した方法と同様に、ＲＣ造建物内の火災性状を代表しているJISの標準曲線を採用した。加熱温度T(℃)は初期温度を20℃として、式(3.1)で近似される[61]。

$$T=1080-340e^{-0.8t}-136e^{-5.15t}-584e^{-21.6t} \qquad (3.1)$$

ここで、t:時間(h)

２）冷却曲線の仮定

冷却曲線については、過去の実験結果より火災外力と逆勾配の曲線を用いた。すなわち、加熱後、最高温度より時間の経過とともに加熱温度T（(3.1)式）のγ倍で温度が低下していくものとした。過去の（財）日本建築総合試験所の各炉での耐火試験より、γを壁：1、床：0.8とした。ただし、下降温度が室温になった時点で、室温を維持するものとした。

（２）材料の密度・含水率、熱的性質

ここで対象とした材料は普通コンクリート、軽量コンクリート及びＡＬＣであり、これらの材料及び鋼材の特性を以下のように与えた。

1）比重及び含水率

試験体サンプルの実測値を採用し、未知の場合には表3.1の値を採用した[62]。

2）熱伝導率及び比熱等の熱特性値

熱特性については、前章（第２章）と同様に、100～800℃までの平均値を採用した[62]。その値を表3.1に示す。なお、表中の温度伝導率Kは$\lambda / \rho c$で表される。

（３）モデルの設定

図3.1に複合板のモデルを示す。コンクリート断面を層分割し、計算した。層間内は均一温度とし、温度の時間的変動は階段状とし、分割時間内は一定とした。

３．２．３　受熱温度分布の計算

前記３．２．２の計算条件をもとに、以下に示す手順により内部温度を算定し、最高温度を受熱温度とし、断面方向の受熱温度を求めた。

（１）加熱側の熱伝達

試験体加熱側表面温度T_{ss}と加熱温度Tとは、前章（第２章）の２．３．３（１）と同様に、等しいと仮定し、簡略化した。

（２）コンクリート内部の熱移動

コンクリート内部の熱移動を熱伝導によるものと考えると、式(3.2)で示される偏微分方程式を解くこととなる。

$$(\rho_c c_c)\partial T/\partial t=\nabla(\lambda_c \nabla T)-A \qquad (3.2)$$

ここで、$\rho_c c_c$:コンクリートの体積比熱(kcal/m³•℃)、

λ_c:コンクリートの熱伝導率(kcal/m•h•℃)、

T:温度(℃)、

t:時間(h)、

A:生成項(kcal/m³•h)

一次元として解く場合、生成項を無視すれば、式(3.3)で表される。

$$(\rho_c c_c)\partial T/\partial t=\lambda_c \partial^2 T/\partial x^2 \qquad (3.3)$$

式(3.3)を差分法（中心差分）で解く方法[25]により、非線形熱伝導解析を行い、コンクリート内部における各層毎の受熱温度を求めた。

式(3.3)を展開すると、i層での温度上昇分ΔT_iは(i-1)層からi層に流入した熱量とi層から(i+1)層へ流入した熱量の差と考えられ、温度上昇分ΔT_iは式(3.4)で表される。

$$\triangle T_i = T_i^{n+1} - T_i^n$$

$$= \lambda_c \triangle t (T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) / \rho_c c_c \triangle x^2 \qquad (3.4)$$

ここで、上付きnは時刻nを示す。

従って、内部温度T_i^{n+1}は式(3.5)となる。

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \lambda_c \triangle t (T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) / \rho_c c_c \triangle x^2 \qquad (3.5)$$

（３）鋼板とコンクリート間の熱移動

複合板の場合、常温時には鋼板とコンクリートは付着しているが、過去の実験より、鋼板が薄いため加熱初期から熱変形を起こし、コンクリートと剥離し、鋼板とコンクリートの間には空気層が生じる。従って、中空層の熱容量を無視し、鋼板からコンクリートへの熱伝達機構を対流熱伝達と輻射熱伝達が共存すると仮定し、熱伝達量を求めた。なお、鋼板の表面と裏面の温度は等しいと考えた。

コンクリート表面での温度T_{cs}^{n+1}は(3.6)式で表される。

$$T_{cs}^{n+1} = T_{cs}^n + \Delta t \{ \alpha_f (T_{sr}^n - T_{cs}^n) - \lambda_c (T_{cs}^n - T_{c1}^n) / \Delta x \} / \rho_c c_c \Delta x \qquad (3.6)$$

ここで、α_f：総合熱伝達率$= \alpha_{fr} + \alpha_{fc}$（kcal/m²•h•℃）、

α_{fr}：対流熱伝達率（kcal/m²•h•℃）、

α_{fc}：輻射熱伝達率（kcal/m²•h•℃）、

T_{sr}：鋼板裏面温度（℃）、

T_{cs}：コンクリート表面温度（℃）、

T_{c1}：コンクリート内部１層目の温度（℃）

また、α_fは(3.7)式で表される。

$$\alpha_f = \sigma \cdot \varepsilon_r \{ (T_{sr}^n + 273)^4 - (T_{cs}^n + 273)^4 \} / \{ 100^4 \cdot (T_{sr}^n - T_{cs}^n) \} + \alpha_{fc} \qquad (3.7)$$

ここで、σ：ステファンボルツマン定数（=4.88kcal/m²•h•°K）、

ε_r：合成輻射率$= (\varepsilon_s^{-1} + \varepsilon_c^{-1} - 1)^{-1}$（$\varepsilon_s$：鋼管の放射率、$\varepsilon_c$：コンクリートの放射率）

ここで、ε_s=0.79[67]、ε_c=0.9[68]、α_{fc}=20kcal/m²•h•℃[25]とすると、(3.6)式は(3.8)式となる。

$$T_{cs}^{n+1} = T_{cs}^n + \Delta t [4.88 \times 10^{-8} \times 0.73 \{ (T_{sr}^n + 273)^4 - (T_{cs}^n + 273)^4 \} + 20 (T_{sr}^n - T_{cs}^n) - \lambda_c (T_{cs}^n - T_{c1}^n)] / \rho_c c_c \Delta x \qquad (3.8)$$

（４）非加熱側の熱伝達

実験では、杉板で覆われた状態で非加熱側コンクリート表面温度が測定されているので、杉板の材料特性を表3.2[25]のように与え、コンクリートと杉板との境界層を持つ熱伝導を考慮した。さらに、杉板の非加熱側の対流による熱伝達率を20kcal/m²•h•℃[25]と仮定し、熱伝達による熱移動を求めて、非加熱側コンクリート表面温度を計算した。すなわち、非加熱側表面温度T_{cu}^{n+1}は式(3.9)で表される（図3.2参照）。

$$T_{cu}^{n+1}=T_{cu}^{n}+2\Delta t\{\lambda_c(T_{ci}^{n}-T_{cu}^{n})/\Delta x-\lambda_w(T_{cu}^{n}-T_w^{n})/\Delta W\}/(\rho_c c_c\Delta x+\rho_w c_w\Delta W) \quad (3.9)$$

ここで、T_{ci}：コンクリートのi層目の温度（℃）、

T_w：杉板の非加熱側表面温度（℃）、

ΔW：杉板の厚さ（m）、

λ_w：杉板の熱伝導率（kcal/m•h•℃）、

$\rho_w c_w$：杉板の体積比熱（kcal/m³•℃）

また、杉板の非加熱側表面温度T_w^{n+1}は式(3.10)で表される。

$$T_w^{n+1}=T_w^{n}+2\Delta t\{\lambda_w(T_{cu}^{n}-T_w^{n})/\Delta W-\alpha_{fr}(T_w^{n}-T_r^{n})\}/\rho_w c_w\Delta W \quad (3.10)$$

ここで、T_r：室内雰囲気温度（℃）、

α_{fr}：対流熱伝達率（=20kcal/m²•h•℃[25]）

（５）コンクリートの含水の影響

内部温度に大きな影響を与える水分を前章（第２章）と同様に、計算に考慮した。コンクリートの自由水の沸点を100℃とし、沸点に達する以前の蒸発量は無視した。内部で蒸発した水分は、その場では完全に蒸発せずに、各層間の圧力差と透気抵抗によって移動するのであるが、ここでは、熱移動と共に水分移動も考慮した。加熱時に断面内部の水分は順次、非加熱側へ移動するものと考えられるが、ここでは、元来含まれる水分量を一定分布と仮定し、更にその移動分を予め初期値として各層に与えておくこととした。図3.3に示すように、加熱側表面層（N=1）の初期含水量W(1)はその層に存在する水量として与えた。第２層以降は順次第１層の含水量の一部αW(1)が移動した状態を想定した[28]。ここで、αを水分移動係数と呼び、αは実験より求めた。αを加熱の場合は1とし、載荷加熱の場合は、ひび割れ等の影響によりその層での蒸発が大きく、0.2とした。各層の温度が100℃に達した後、流入熱量に応じた蒸発が起こり、そこに水分が存在する間は、その層の温度は上昇

しないものとした。流入熱量が蒸発潜熱量より大きくなった時点で、再び流入熱量がその点の温度を上昇させるものとした。すなわち、i層の温度T_i^{n+1}（℃）が次に示す条件によって、温度停滞・温度上昇に分類される。

$T_i^{n+1} \geqq 100$℃の時、T_i^{n+1}の温度上昇に使われる熱量をQ(kcal)とすると、

$\Sigma Q \leqq [\Delta x^3 \cdot \chi \cdot \xi]$の間は、$T_i^{n+1}=100$℃、

$\Sigma Q > [\Delta x^3 \cdot \chi \cdot \xi]$となった時に初めて温度上昇を開始する。

ここで、Δx：層厚（m）、

χ：含水量（kg/m^3）、

ξ：蒸発潜熱量（=539kcal/kg）

3．3　壁及び床部材の受熱温度分布

3．3．1　概要

前記3．2で用いた計算方法により受熱温度分布を求め、区画部材として（財）日本建築総合試験所で実施した壁及び床の耐火試験結果と比較し、本方法の妥当性を検証した。

3．3．2　計算結果との比較

図3.4に内部温度曲線の解析結果の例（普通コンクリート版、厚さ:10cm、加熱時間:30分）を示す。図3.4の内部温度の最高値（図中にプロットした点(○)）を受熱温度として抽出し、加熱側表面から非加熱側までの各層における受熱温度を求めた。壁についてはＡＬＣ版、床についてはＡＬＣ版及び複合板（鋼板としてフラットデッキ・プレート及び平板の２種、コンクリートとして軽量及び普通の２種）をそれぞれ例に取り上げた。実験状況を写真3.1～3.3に示す。解析例に用いた部材の諸元を表3.3に示す。受熱温度（最高温度）の解析値と実験値（上限及び下限）の比較を図3.5～図3.7に示す。なお、図中の加熱側からの距離はコンクリート表面からの距離を示す。また、図3.7の平板を用いた複合板の実験資料は文献[74]及び[75]より採用した。

3．3．3　考察

壁については実験値と解析値は良く一致し、ＡＬＣ版の断熱性が発揮されていることがよく分かる。また、床については、以下のことが判明した。

1）ＡＬＣ版に関しては、実験値の点数は少ないものの、良く一致していることが分かる。
2）フラットデッキ・プレートを用いた複合板に関しては、普通コンクリートに比べ断熱性を期待して、軽量コンクリートの厚みを薄くしており、両者の内部温度はほぼ等しい。また、実験値と解析値は良く一致している。
3）平板を用いた複合板に関しては、非加熱側に近づくにつれ、軽量コンクリートの断熱性が発揮されていることが分かる。また、実験値と解析値は良く一致していることが分かる。

3．4　受熱温度分布推定式の誘導

3．4．1　概要

本解析方法の妥当性が検証されたので、次に、本解析条件（JISを用いた火災外力、本章で限定されたコンクリート系材料の特性値）における簡易な受熱温度分布の推定式を求めることを試みた。受熱温度分布の定式化が可能となれば、受熱温度より応力分布を求め、さらには、残存耐力を求めることができる。（財）日本建築総合試験所で耐火試験を行なった面材の受熱温度分布を二次式で非常に良く表せることが判明したので[76]、ここでは、二次式で定式化することを試みた。

3．4．2　計算方法

本解析方法による受熱温度T(℃)と加熱側からの距離x(cm)の関係を式(3.11)に示す多項（二次）回帰による近似を試みた。

$$T=a+b\cdot x+c\cdot x^2 \qquad (3.11)$$

ここで、a、b、c：係数

対象とした部材は鋼板無が普通コンクリート、軽量コンクリート及びＡＬＣ、鋼板有が普通コンクリート及び軽量コンクリートの計５種類である。その諸元を表3.4及び表3.5に示す。火災外力は、ここではJISの標準曲線を採用し、30～120分までの加熱時間について各部材の受熱温度分布を回帰分析した。材料の物性値は表3.1の値を用いた。

3．4．3　計算結果及び考察

多項（二次）回帰による分析結果を表3.4及び表3.5に示す。本解析値を二次回帰した計

算結果より、以下のことが判明した。

1）カーブ・フィティングの指標となる相関係数は一部を除いて、0.9以上であり、解析値と分析値とは非常に良く一致している。従って、受熱温度分布は式(3.11)に示す二次式で表される。

2）受熱温度分布の勾配を主に支配すると考えられるxの一次の係数bの絶対値は厚さの増大とともに小さくなる。

3）コンクリートの材質による違いに関しては、内部温度推定に使われる指標[77]、すなわち、温度伝導率Kで比較すると、Kの増大とともに、bの絶対値が小さくなる。これは、Kの小さい材料の断熱性が発揮されているためと考えられる。

4）鋼板が付加されていると、鋼板とコンクリート間に出来る空気層の断熱効果によりコンクリート表面温度aの値が小さくなる。また、上記3）と同様、Kが大きい材料ほどbの絶対値が小さくなる。

わが国における耐火構造は、基準法第2条七で、「鉄筋コンクリート造、れんが造等の構造で政令で定める耐火性能を有するもの」と定義されている。ここでいう政令とは、施行令第107条のことである。施行令第107条では、また、「建設大臣が通常の火災時の加熱に耐える性能を有すると認め、指定するものが耐火構造」と定義し、建設省告示第2999号（昭和44年5月31日）“施行令第107条第1号の規定に基づく耐火構造の指定に関し、耐火構造の指定の方法を定める件”に耐火構造の指定の方法が定められている。“耐火構造の試験方法”（建設省告示第2999号）[78]によると、RC造の構造部材では、崩壊の恐れを考慮して、構造上主要な鋼材温度を規定値（床及び壁部材では550℃）以下に押さえることが要求される。表3.4より上記規定温度を満足する必要なかぶり厚さは図3.8のように断面厚さtにより変化する。図3.8より、以下のことが判明した。

1）断面の厚さが厚くなるほど、火災後まで考慮すると、かぶり厚さを大きく取る必要がある。すなわち、断面が厚いほど、熱容量が大きくなり、温度上昇は押さえられるが、逆に加熱後は放熱しにくく、遅延温度上昇分が大きくなるためと考えられる。

2）コンクリートの材質による違いは、温度伝導率Kが小さいほど、必要なかぶり厚さが小さくて済む。

3）施行令第79条によるRC造の鉄筋の最小かぶり厚さは床及び非耐力壁で2cm（図3.8中に示した線(－－)）、耐力壁で3cm（図3.8中に示した線(-•-)）と定められている。しかし、上記のかぶり厚さを採用すると、ALCを除いて、床及び非耐力壁で1時間以上、耐力壁で

2時間以上の耐火性能をそれぞれ確保することは困難である。従って、必要な最小かぶり厚さは1時間では3cm、2時間では4cmが望ましいと考えられる。

3．5　残存耐力の推定

3．5．1　概要

RC造の床及び壁の各部材について、火災後の残存耐力を推定した。

3．5．2　コンクリート及び鋼材の機械的性質

コンクリートの場合、火災直後は受熱温度に応じた強度を保持しているものとし、コンクリートの高温時の強度比（熱間状態）を式(3.12)～式(3.17)で仮定した[47]。すなわち、普通コンクリートについては、

1）0℃<T≦300℃

$$\sigma_{Nc,T}/\sigma_{Nc,n}=1 \qquad (3.12)$$

2）300℃<T≦700℃

$$\sigma_{Nc,T}/\sigma_{Nc,n}=-1/6\times10^{-2}T+3/2 \qquad (3.13)$$

3）700℃<T

$$\sigma_{Nc,T}/\sigma_{Nc,n}=0 \qquad (3.14)$$

ここで、T:温度（℃）、

$\sigma_{Nc,T}$:温度T時の普通コンクリートの強度（kgf/cm²）、

$\sigma_{Nc,n}$:常温時の普通コンクリートの強度（kgf/cm²）

軽量コンクリートについては、

1）0℃<T≦300℃

$$\sigma_{Lc,T}/\sigma_{Lc,n}=1 \qquad (3.15)$$

2）300℃<T≦700℃

$$\sigma_{Lc,T}/\sigma_{Lc,n}=-1/8\times10^{-2}T+11/8 \qquad (3.16)$$

3）700℃<T

$$\sigma_{Lc,T}/\sigma_{Lc,n}=0 \qquad (3.17)$$

ここで、$\sigma_{Lc,T}$:温度T時の軽量コンクリートの強度（kgf/cm²）、

$\sigma_{Lc,n}$:常温時の軽量コンクリートの強度（kgf/cm²）

鋼材の場合、冷却後の強度の回復は大きく、600℃まで加熱したものはほぼ常温の強度まで回復する。ここでは、実状に合わすため、熱間状態における鋼材の高温時の降伏点比は提案式(3.18)[79]を用いた。

$$\sigma_{Y,T}/\sigma_{Y,n}=1.01-5.8\times10^{-7}T^2-7.4\times10^{-4}T \qquad (3.18)$$

ここで、$\sigma_{Y,T}$:温度T時の鋼材の降伏点（kgf/cm²）、

$\sigma_{Y,n}$:常温時の鋼材の降伏点（kgf/cm²）

なお、高温時におけるコンクリートと鉄筋の付着力の低下については、当然考慮されるべきであるが、ここでは、二次的と考えられるので、計算の簡素化を図る主旨から考慮しなかった。

３．５．３　残存耐力の算定

（１）床部材

床部材に関しては、曲げ降伏耐力を求め、その耐力は引張降伏で決まるものとした。すなわち、前記**３．４**で求めた受熱温度分布の推定式(3.11)を用い、受熱温度に対応する鉄筋の降伏点を求め、曲げ残存耐力を求めた。曲げ残存耐力比ｍは式(3.19)となる。ここでは略算を目的として、曲げ材における圧縮合力と引張合力の各中心間の距離（通常、これは応力中心距離と呼ばれている）ｊを火災後も同一の値とした。コンクリート内にある鉄筋についてはコンクリートと同等の温度履歴を受け、鉄筋断面内は等温度分布と仮定した。

$$m=M_r/M_o$$
$$=a_t\cdot\sigma_{Y,T}\cdot j/a_t\cdot\sigma_{Y,n}\cdot j$$
$$=\sigma_{Y,T}/\sigma_{Y,n} \qquad (3.19)$$

ここで、M_o:常温時曲げ耐力（tonf•cm）、

M_r:火災後の曲げ残存耐力（tonf•cm）、

a_t:引張側鉄筋断面積（cm²）、

ｊ:応力中心距離（cm）

（２）壁部材

壁部材に関しては、圧縮残存耐力を求めた。すなわち、前記**３．４**で求めた受熱温度分布の推定式(3.11)を用い、各層の受熱温度に対応するコンクリート強度及び鉄筋の降伏点を求め、壁厚方向に累加することにより圧縮残存耐力を求めた。圧縮残存耐力比ｐは式(3.20)となる。ここでは、壁内の曲げ応力の影響を無視し、中心圧縮について算定した。

$$p = P_r / P_o$$

$$= \frac{\Sigma \Delta x \cdot \sigma_{i,c,T} + \Sigma a_k \cdot \sigma_{k,Y,T}}{t \cdot \sigma_{c,n} + \Sigma a_k \cdot \sigma_{k,Y,n}} \qquad (3.20)$$

ここで、P_o:壁1cm幅の常温時圧縮耐力（tonf/cm）、

P_r:壁1cm幅の火災後の圧縮残存耐力（tonf/cm）、

Δx:微小厚（cm）、

t:壁厚（cm）、

a_k:加熱側からk番目の壁1cm幅の鉄筋断面積（cm^2/cm）、

$\sigma_{i,c,T}$:i層での温度T時のコンクリートの強度（kgf/cm^2）、

$\sigma_{c,n}$:常温時のコンクリートの強度（kgf/cm^2）、

$\sigma_{k,Y,T}$:加熱側からk番目の温度T時の鉄筋の降伏点（kgf/cm^2）、

$\sigma_{k,Y,n}$:加熱側からk番目の常温時の鉄筋の降伏点（kgf/cm^2）

３．５．４　計算結果及び考察

（１）床部材

実仕様では、床厚及び鉄筋のかぶり厚さ等の断面形状の変化により曲げ残存耐力比ｍも大きく変化するものと考えられる。ここでは、実大の断面について残存耐力を推定した。図3.9に実大断面の床部材（普通コンクリート、軽量コンクリート及びＡＬＣ）の曲げ残存耐力比ｍと再使用限界時間の関係を示す。すなわち、これはJIS標準曲線の火災外力を受けた後の床厚t及び鉄筋のかぶり厚さdによる曲げ残存耐力比ｍが再使用限界時間によってどのように変化するかを調べた結果である。図中の再使用限界時間はこの時間より火災時間が短ければ、火災後に部材は崩壊しないが、長ければ崩壊するという限界の火災時間のことである。ここでは、鋼材の常温時の降伏点$\sigma_{Y,n}$を2400kgf/cm^2とした。その結果、床部材の火災後の曲げ残存耐力については、以下に示すことが判明した。

１）かぶり厚さが小さいほど、耐力の低下は大きく、再使用限界時間が長くなるにつれ、さらに低下する。また、床厚が大きいほど、再使用限界時間が短い範囲では、耐力の低下は大きい。耐力に与える影響は床厚よりもかぶり厚さの方が大きいことが分かる。

２）コンクリートの材質による違いは、床厚t及びかぶり厚さdが同じ断面形状の部材で比較すると、温度伝導率Kが大きいほど、耐力の低下が大きい。すなわち、材料の断熱性の効果が現れていると考えられる。

3）“耐火構造の試験方法”[78]に規定されている載荷加熱試験では、長期許容応力度の1.2倍に相当する応力度が生ずるように載荷し、崩壊しないことが前提条件である。通常、鉄筋の長期応力に対する安全率は1.5であり、上記の載荷荷重は耐力の1.2/1.5=0.8倍となる。この載荷荷重を満足する再使用限界時間はどの材質とも約40分以下とごく短くなり、火災後も考慮した場合、床の耐火性には充分注意を払う必要がある。

4）“耐火構造の指定”（建設省告示第1929号）[80]によると、ＲＣ造の床の耐火2時間の仕様は、最小厚さが10cmと定められている。その厚さを採用した床部材（普通及び軽量コンクリート）では、火災後を考慮すると、耐力が約50％以下に低下する。また、過去の火災事例から、コンクリートの爆裂により床下面が鉄筋位置で脱落するケースが多く見られ、耐力の低下を助長させる恐れがあることを考慮しておかねばならない。ここでは、端部の拘束効果を考慮せずに、耐力を考えているので、実際には、熱膨張による伸びと湾曲の両方が拘束されるため、さらに損傷が激しくなると考えられる。

（２）壁部材

壁部材（普通コンクリート及び軽量コンクリート）については、厚さの違いによる火災後の圧縮残存耐力比ｐの変化を求めた。なお、厚さは“耐火構造の指定”[80]による厚さを採用し、ＡＬＣについては、通常、耐力壁として用いられていないので、取り扱わなかった。圧縮残存耐力比ｐと再使用限界時間の結果を図3.10に示す。なお、常温時の軽量コンクリート及び普通コンクリートのそれぞれの強度$\sigma_{Lc,n}$及び$\sigma_{Nc,n}$を180kgf/cm^2、鋼材の降伏点$\sigma_{Y,n}$を2400kgf/cm^2、鉄筋比（全断面積に対する鉄筋断面積の割合）を0.2％として、計算した。また、鉄筋は単筋とし、断面の中央に配置されているものとした。その結果、壁部材の火災後の圧縮残存耐力について、以下に示すことが判明した。

1）壁厚が小さいほど、耐力の低下は大きく、再使用限界時間が長くなるにつれ、さらに低下する。すなわち、断面の熱容量の影響が現れていると考えられ、壁厚が大きい部材ほど耐火上有利となることが分かる。

2）コンクリートの材質の違いによる耐力の低下の差はほとんど認められないが、壁厚が小さく、再使用限界時間が長い場合には、温度伝導率Kが大きい材料では低下が大きい。

3）“耐火構造の指定”[80]によると、ＲＣ造の壁の耐火1時間及び2時間の仕様の最小厚さはそれぞれ7cm及び10cmと定められている。これらの厚さを採用した壁部材（普通コンクリート及び軽量コンクリート）の耐力は図3.10より約70％に低下する。火災後も考慮した場合には、壁部材は床部材に比べ耐力の低下は小さいことが分かる。

3．6　まとめ

合成構造も含めたコンクリート系区画部材（床部材及び壁部材）を対象とし、火災後の受熱温度分布を求め、それを定式化し、残存耐力を推定した。以下に本章で得られた成果を示す。

（１）床及び壁の各部材の受熱温度分布について、偏微分を用いた簡便な計算方法による解析値と耐火試験から得られた実験値とが良く一致し、本方法の妥当性が検証された。

（２）受熱温度分布の解析値を多項（二次）回帰分析し、推定式を求めた結果、カーブ・フィティングの指標となる相関係数はおおよそ0.9以上であり、解析値と分析値とは非常に良く一致している。

（３）火災後の床部材の曲げ残存耐力はかぶり厚さが小さいほど、低下が大きく、再使用限界時間が長くなるにつれ、さらに低下する。また、耐力に与える影響は床厚よりもかぶり厚さの方が大きい。材料の温度伝導率Kが大きくなるほど、残存耐力の低下は大きい。

（４）火災後の壁部材の圧縮残存耐力は壁厚が小さいほど、低下が大きく、再使用限界時間が長くなるにつれ、低下がさらに大きくなる。

（５）“耐火構造の試験方法”[78]の載荷荷重を満足する床部材の再使用限界時間は約40分以下であり、耐火性には充分に注意を払う必要があると考えられる。

（６）“耐火構造の指定”[80]の厚さを採用すると、壁部材よりも床部材の方が耐火上不利となる。総じて、RC造の床及び壁の各部材は火災後まで考慮した場合には、一般に考えられているほど耐火性は期待できない。最近、多用されている高強度コンクリートは爆裂の危険性が高く、断面欠損により、耐火性はさらに低下するものと考えられる。

表3.1　材料の物性値及び熱特性値

材　　質	比　重ρ	含水率w (%)	熱伝導率λ (kcal/m·h·℃)	比　熱c (kcal/kg·℃)	温度伝導率K ($\times 10^{-4}$·m^2/h)
普通ｺﾝｸﾘｰﾄ	2.3	8	1.3	0.26	22
軽量ｺﾝｸﾘｰﾄ	1.76	7	0.68	0.19	20
Ａ Ｌ Ｃ	0.51	12	0.17	0.32	10
鋼　　材	7.85	-	36	0.145	316

表3.2　杉板の物性値及び熱特性値

厚　さt (cm)	比 重ρ	熱伝導率λ (kcal/m·h·℃)	比　熱c (kcal/kg·℃)	温度伝導率K ($\times 10^{-4}$·m^2/h)
1.5	0.4	0.09	0.4	5.6

表3.3　解析例の諸元

部材	種　　類	材　　質	厚　さ (cm)	含水率 (%)	比　重	加熱時間 (分)	初期温度 (℃)
壁	ALC版外壁	Ａ Ｌ Ｃ	10	15	0.52	120	10
床	ALC版床	Ａ Ｌ Ｃ	10	5.64	0.48	60	25
	複合板	普通ｺﾝｸﾘｰﾄ	12	4.78	2.11	120	20
	(ﾌﾗｯﾄ･ﾃﾞｯｷ)	軽量ｺﾝｸﾘｰﾄ	11.5	4.97	1.67	120	22
	複合板	普通ｺﾝｸﾘｰﾄ	10	5.43	2.19	150	16
	(平板)	軽量ｺﾝｸﾘｰﾄ	10	6.8	1.73	150	19

表3.4　二次回帰分析結果（鋼板無）

諸元			回帰分析結果			
材質	厚さ (cm)	加熱時間 (分)	相関係数	回帰式の係数 a	b	c
普通ｺﾝｸﾘｰﾄ	7	30	0.992	856	-255	20.5
		60	0.996	939	-196	10.6
		120	0.999	1015	-153	7.8
	10	30	0.980	820	-206	13.3
		60	0.995	941	-192	10.6
		120	0.998	1023	-146	5.4
	15	30	0.951	780	-146	6.6
		60	0.978	902	-154	6.7
		120	0.995	1026	-142	5.3
軽量ｺﾝｸﾘｰﾄ	7	30	0.996	847	-258	21.0
		60	0.994	938	-204	11.2
		120	0.999	1014	-145	2.9
	10	30	0.973	822	-217	14.3
		60	0.994	939	-198	11.1
		120	0.994	1026	-154	5.6
	15	30	0.933	766	-146	6.7
		60	0.973	902	-161	7.1
		120	0.995	1021	-147	5.5
ＡＬＣ	7.5	30	0.973	819	-289	25.2
		60	0.997	930	-266	19.8
		120	0.997	1018	-213	10.9
	10	30	0.949	778	-219	14.9
		60	0.975	905	-238	15.5
		120	0.993	1029	-215	11.6
	15	30	0.840	719	-155	7.6
		60	0.946	854	-162	7.4
		120	0.974	987	-176	7.7

表3.5　二次回帰分析結果（鋼板有）

諸元			回帰分析結果			
材質	厚さ (cm)	加熱時間 (分)	相関係数	回帰式の係数 a	b	c
普通ｺﾝｸﾘｰﾄ	7	30	0.958	270	-85	8.9
		60	0.994	552	-157	13.3
		120	0.998	796	-150	11.2
	10	30	0.902	304	-86	6.6
		60	0.978	563	-134	9.9
		120	0.998	811	-147	7.6
	15	30	0.937	303	-61	3.2
		60	0.963	503	-92	4.4
		120	0.996	795	-124	5.3
軽量ｺﾝｸﾘｰﾄ	7	30	0.982	504	-181	18.1
		60	0.997	759	-212	16.8
		120	0.993	1217	-305	24.5
	10	30	0.931	457	-127	9.4
		60	0.993	736	-178	11.6
		120	0.998	914	-163	8.1
	15	30	0.879	482	-103	5.3
		60	0.973	711	-133	6.3
		120	0.998	901	-141	5.9

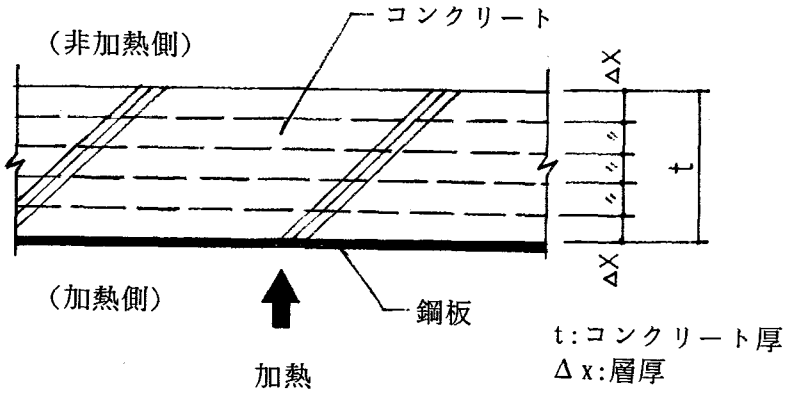


図3.1　複合板のモデル化

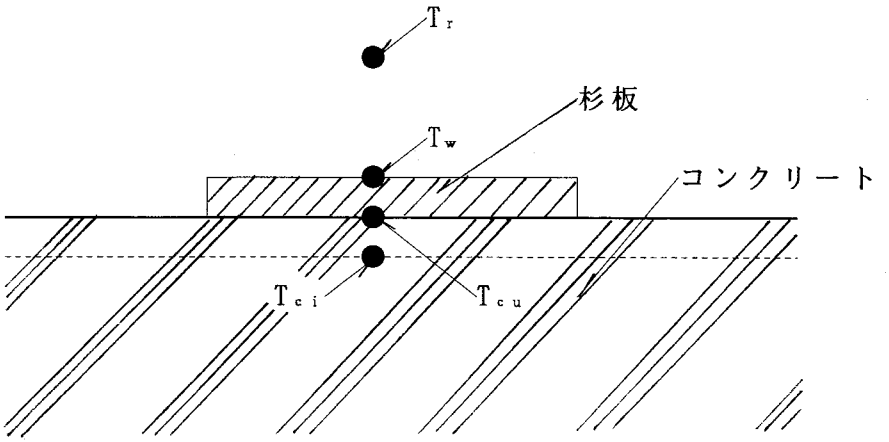


図3.2　非加熱側の熱伝達

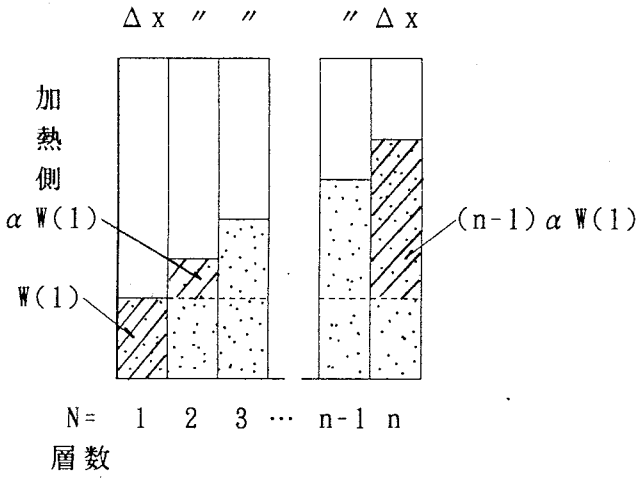


図3.3　初期含水量の与え方

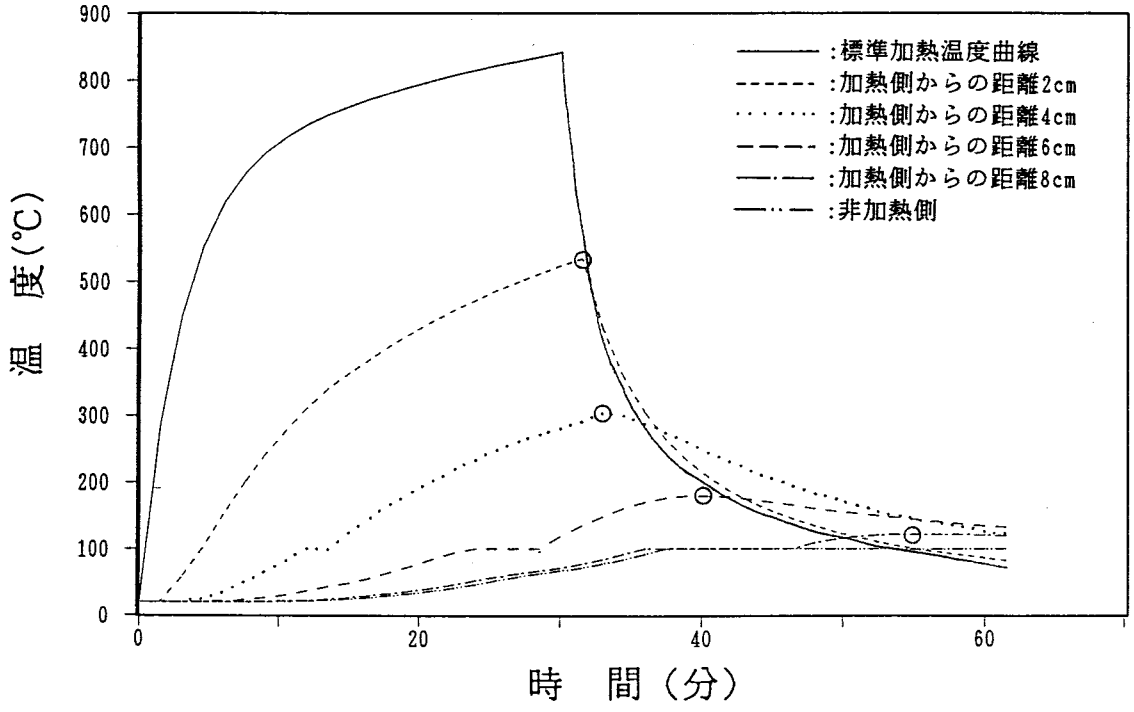
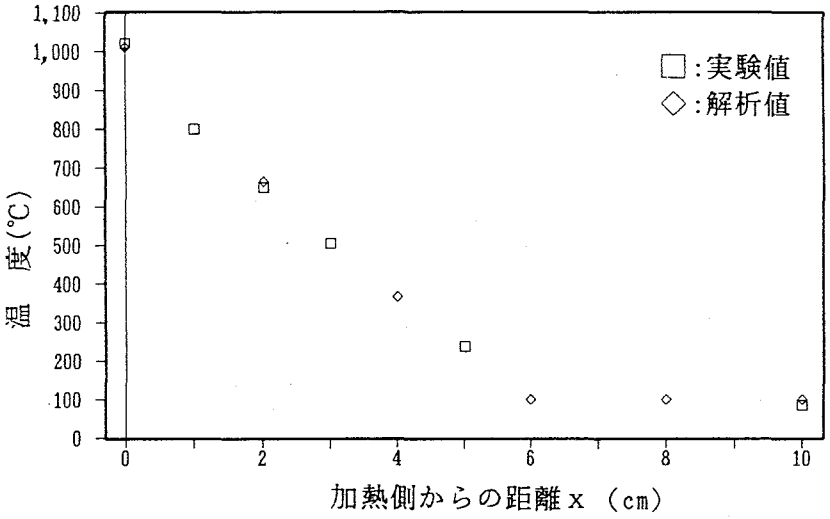


図3.4　普通コンクリート版の温度経過

(a)外壁，厚10cm



(b)床，厚10cm

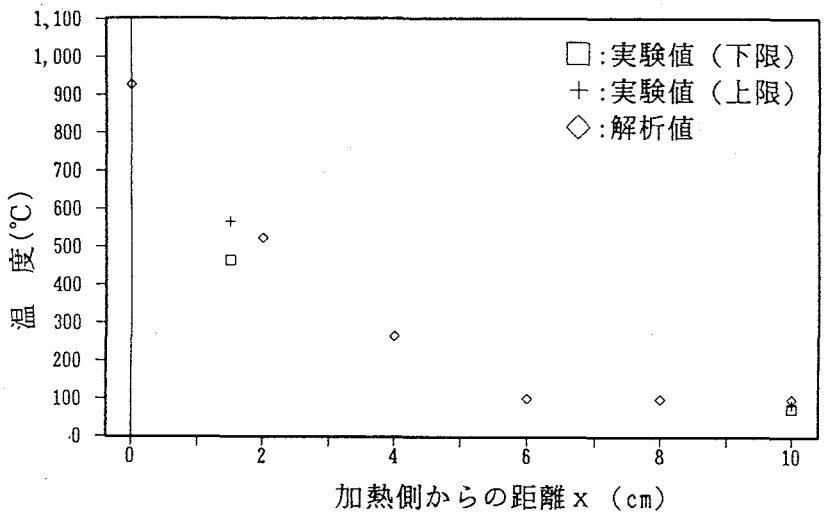
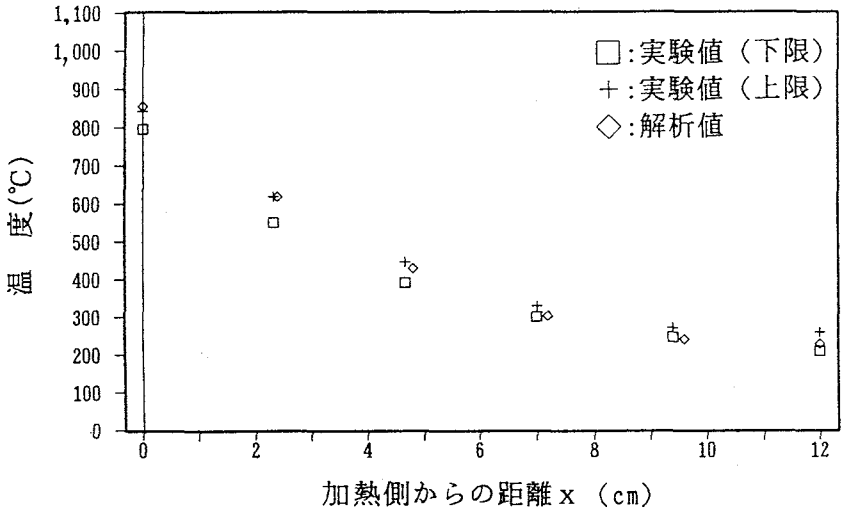


図3.5　ＡＬＣ版の受熱温度分布

(a)普通コンクリート，厚12cm



(b)軽量コンクリート，厚11.5cm

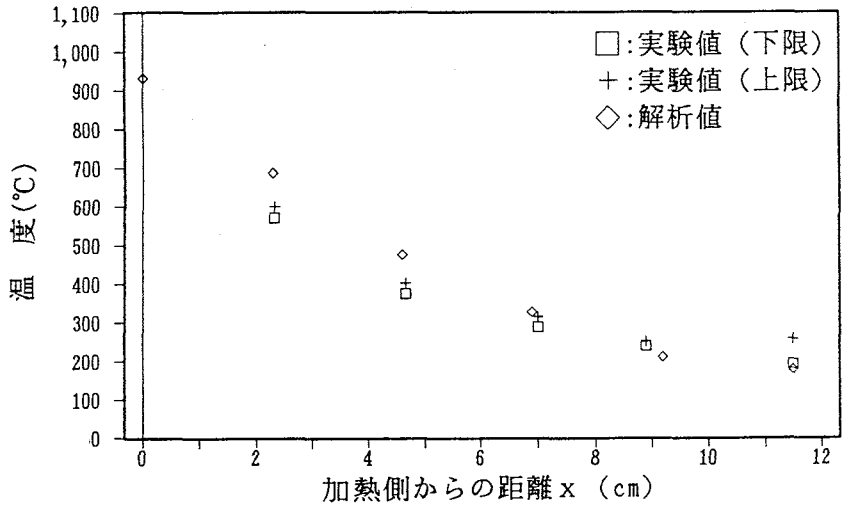
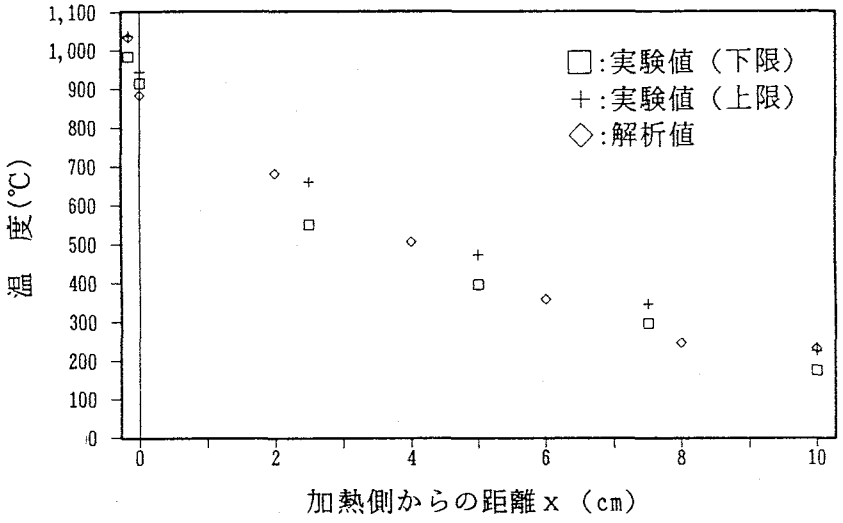


図3.6　複合板の受熱温度分布（フラット・デッキ）

(a)普通コンクリート，厚10cm



(b)軽量コンクリート，厚10cm

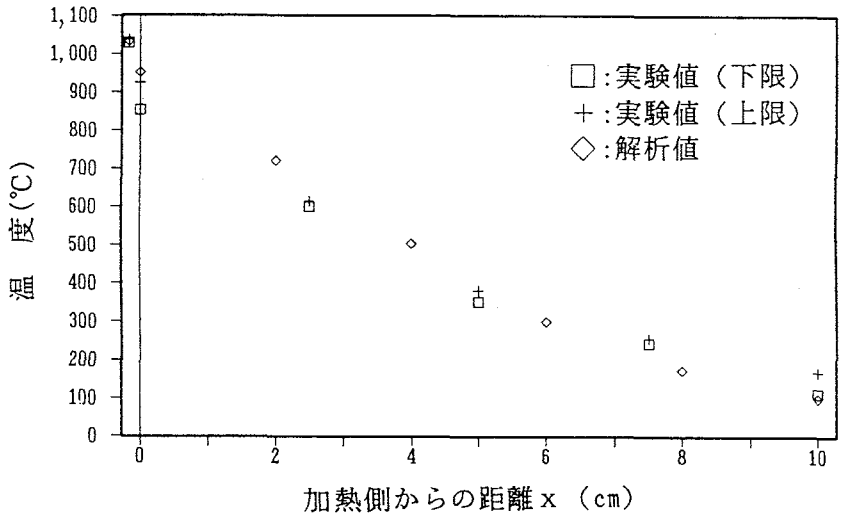
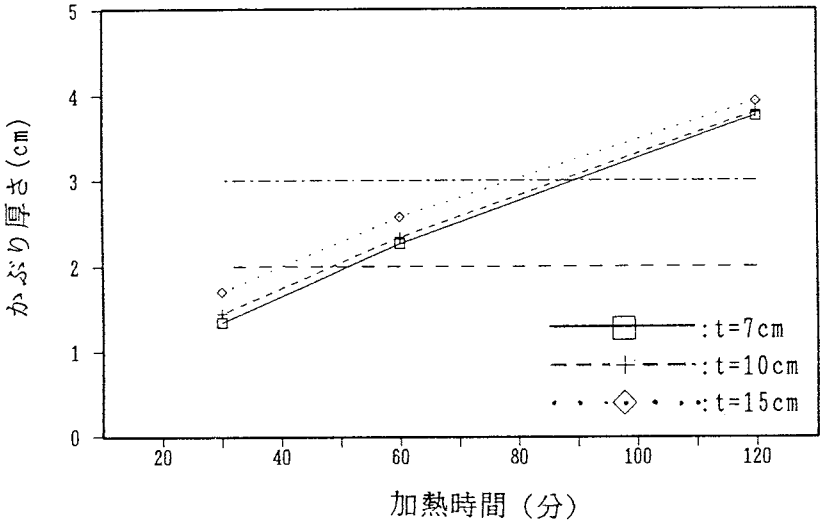
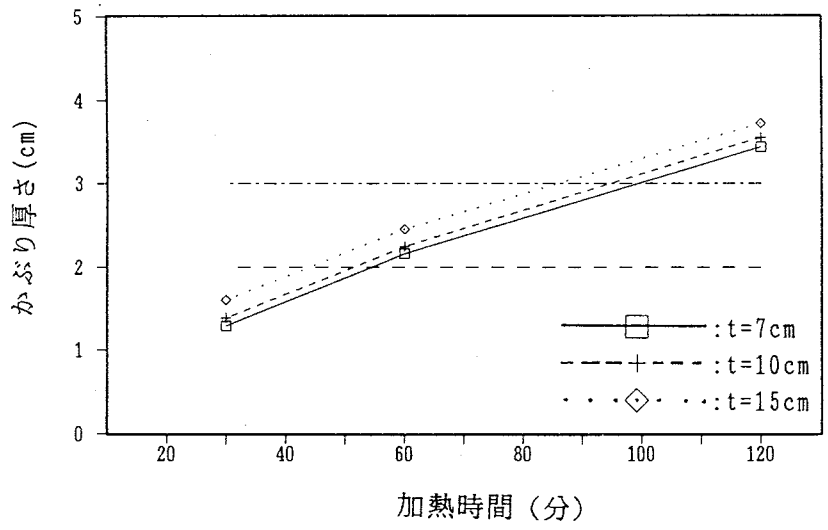


図3.7　複合板の受熱温度分布（平板）

(a)普通コンクリート



(b)軽量コンクリート



(c)ＡＬＣ

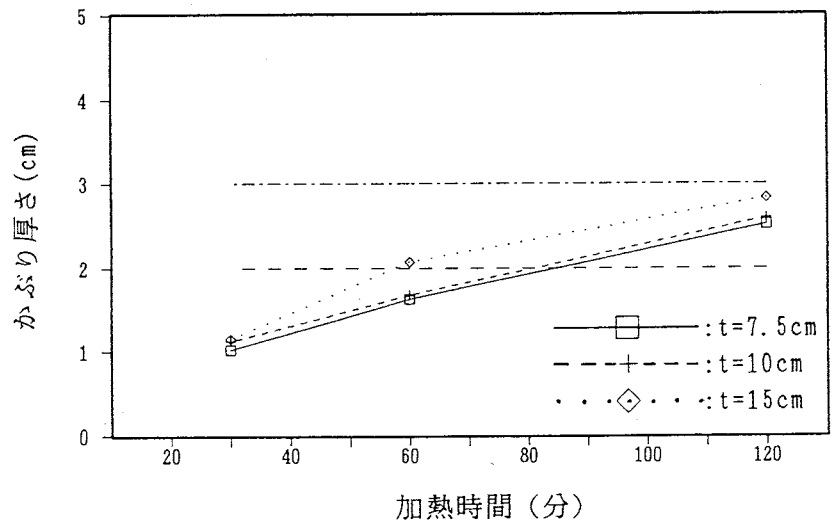
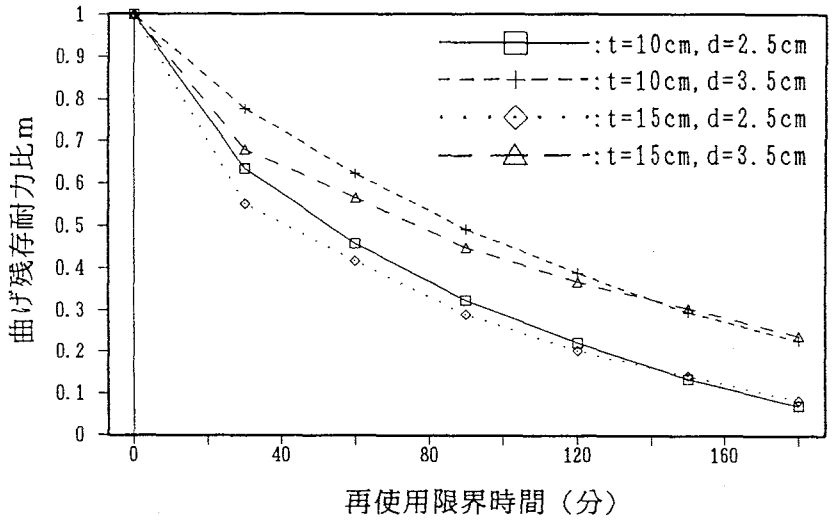
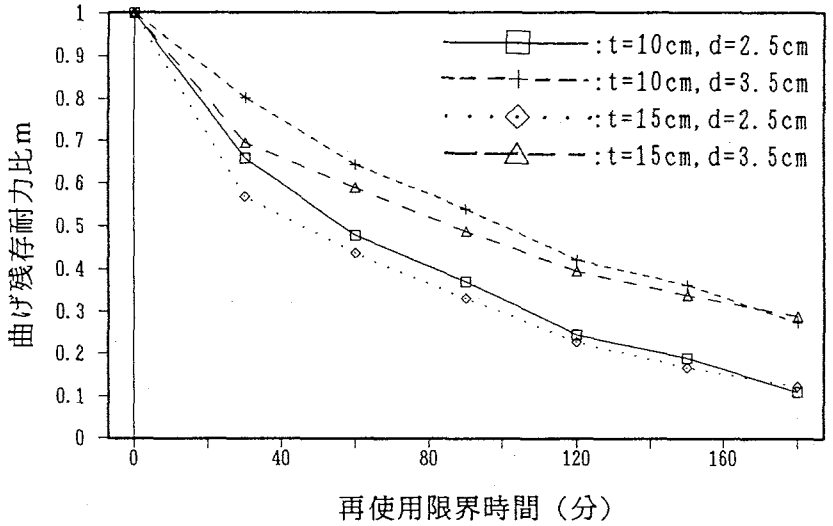


図3.8　必要なかぶり厚さ（鋼板無）

(a)普通コンクリート



(b)軽量コンクリート



(c)ＡＬＣ

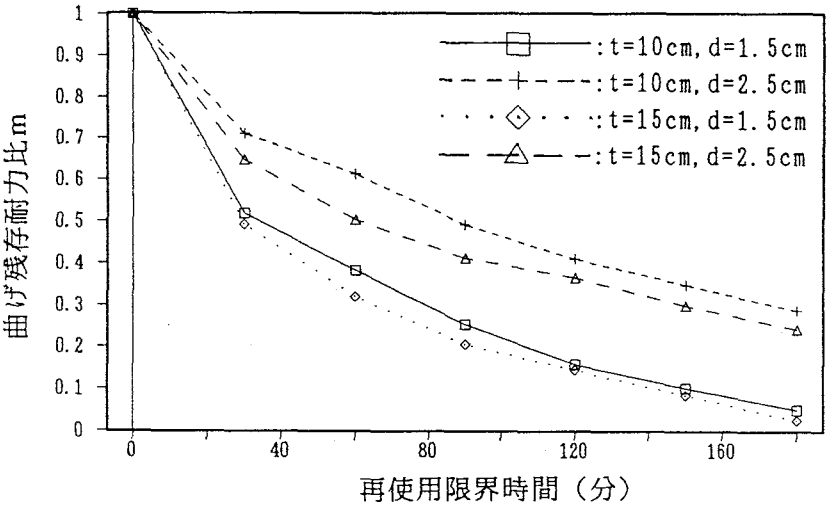
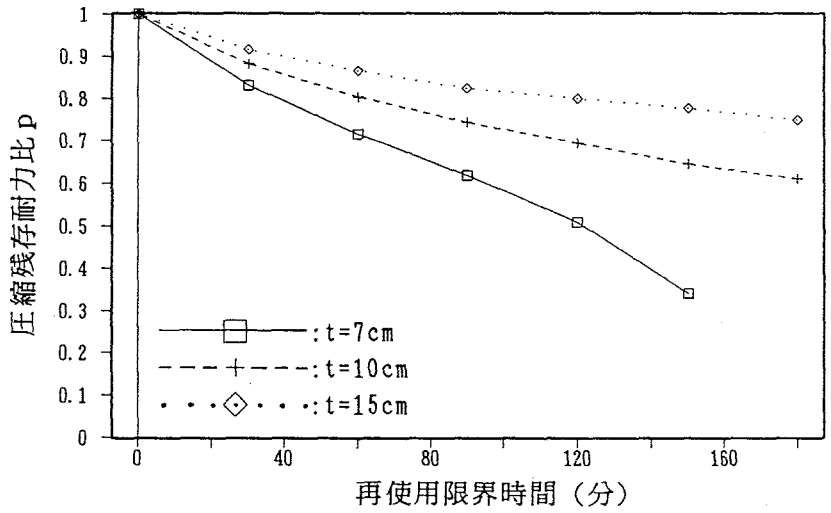


図3.9　床部材の残存耐力

(a)普通コンクリート



(b)軽量コンクリート

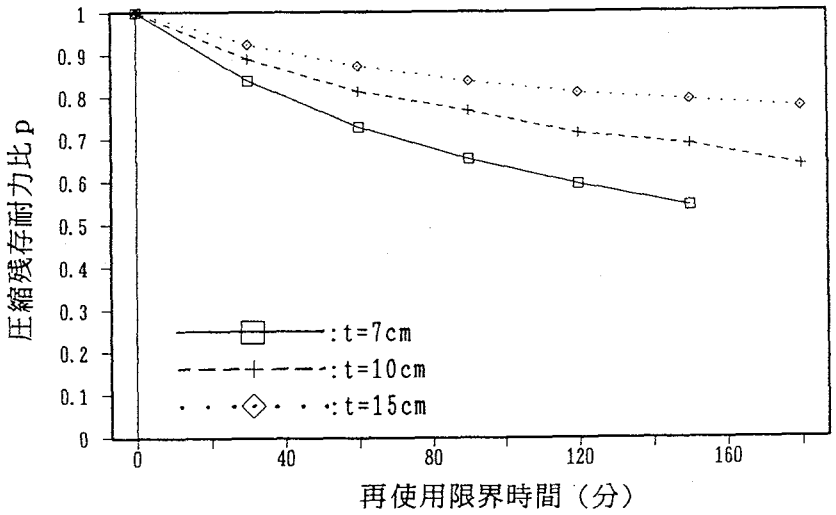


図3.10　壁部材の残存耐力

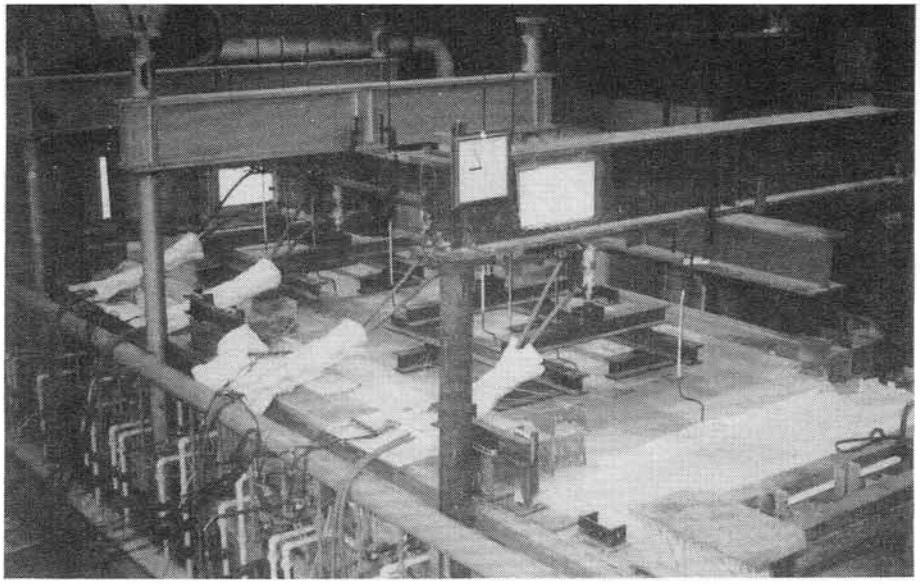


写真3.1　複合板（フラット・デッキ）の実験状況



写真3.2　複合板（フラット・デッキ）の加熱前の状況

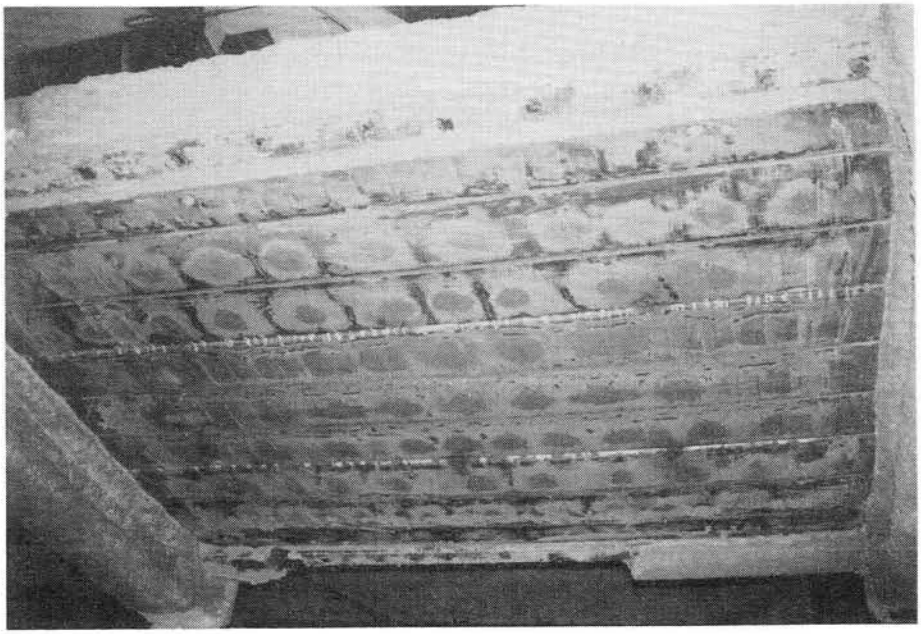


写真3.3　複合板（フラット・デッキ）の加熱後の状況

第３編　コンクリート系部材の火害診断手法の提案

１．　はじめに
２．　予備診断
３．　一次診断
４．　二次診断
５．　診断方法の実施例
６．　補修方法の実施例
７．　火害減少対策
８．　まとめ

1．　はじめに

既に述べてきたように、火害を受けたＲＣ造建物を再使用するかどうかは大きな社会的問題となる。ＲＣ造建物を構成する各部材は区画部材と耐力部材とに分別され、それぞれ次のような性能が要求されている。すなわち、区画部材の役目は建物外部より内部への延焼防止を図るとともに、建物内部より外部への延焼防止をも図ることである。建物内においては火災の拡大を防止するため、その区画内に火災を閉じ込めることにある。この他、避難路を火災から確保するとか、消防隊の消火活動や救急活動の妨げとならないようにすることも重要な役目である。一方、柱、梁等の耐力部材は区画部材を支持するものであり、区画を構成している間は耐力部材は崩壊してはならない。すなわち、火災時の耐力がある水準値以下に減少してはならない。従って、耐力部材は区画部材に比べ、より高い耐火性能が要求される。これらのことを念頭に置いた上で、細心な診断を実施しなければならない。従来の診断は火害の程度の診断であって、何故、そのような事態になり、そのためにどのような処置をせねばならないかという科学的かつ工学的論拠に乏しいものである。診断を誤ると、その後の補修・補強方法または取り壊しにも大きな影響を与え、コスト面で大きな差を生じることを十分に認識しなければならない。筆者は、火害の程度により段階的に調査・診断を進め、より工学的な判断の基に診断を行える方法を採用した。すなわち、火害の規模により、予備診断、一次診断及び二次診断と進めていく方法を提案した。本編では、具体的な火害診断手法の詳細については触れず、第１編及び第２編の成果を基にした手法の道筋について述べ、その実施例を紹介した。さらに火害減少対策についても論及した。

2．　予備診断

予備調査・診断は、火害程度を概括的に評価するための調査であり、今後の詳細調査の方向付けを示すものである。従って、火害建物の損傷、構造躯体の劣化状況の概略を把握し、その後の対策として、詳細調査の要否及びその概要、補修の要否を提示していくものである。その調査内容は、次の通りである。

（１）火害状況の目視調査

被災部分の使用材料の燃焼状態及びコンクリートの劣化状況を観察する。

（２）シュミット・ハンマーによるコンクリートの圧縮強度推定

下記（３）のコンクリート・コアの採取位置を決めるための概括的な調査を実施する。あくまで、詳細の強度は（３）による。

（３）コンクリート・コアによる調査

上記（２）を実施後、火害の程度により、コンクリート・コアの採取位置を決め、３ケ所の位置（非火害、火害が顕著、両者の中間）で各１本計３本のコンクリート・コアを採取して、圧縮強度と中性化深さの測定を実施する。

３．　一次診断

予備診断を実施した後、火災室及び延焼を受けた室の火害状況の概況を把握し、さらに詳細な調査を必要とする（火害の程度がひどく、補修が必要と考えられる）場合、一次診断を実施する。コンクリートの受熱温度の推定を行い、補修範囲の特定等を含めた補修対策を検討する。

第一に、火災室を中心として、コンクリート表面の受熱温度を目視によるコンクリートの変色状況から丹念に調べる。これは次の定量的評価を行うために、調査箇所を絞り込むという目的の作業であると同時に、室全体の受熱温度分布を概括的に把握するものであり、これにより定量的な評価をすることはできない。

第一の調査を実施後、表面の受熱温度による火害等級分けを行い、それぞれの等級分けされた箇所の代表としてコンクリート・コアをサンプリングし、断面深さ方向の受熱温度の推定を第１編で提案したGBRC法（ＵＶスペクトル法）を用いて行う。GBRC法を用いることが不可能な場合には、Ｘ線回折、等他の無機物質の分析方法を用いるが、第１編で述べたように、無機物質をとらえる方法は消火による散水等のため、可逆反応が生じるので、正確な推定が困難であることを考慮しておかねばならない。従って、ＵＶスペクトル法を出来る限り用いるようにする。

広範囲に受熱温度を推定する必要が生じる場合には、サンプル数が多くなるため、断面の内部の個数をできる限り少なくしなければならない。また、コンクリート内部からサンプルを取り出すことが困難な場合もある。それらの場合には、第２編で提案した受熱温度分布の推定式を用い、内部温度分布を推定する。広範囲にきめ細かく調査しなければ補修範囲を的確には限定することはできない。

JISの耐火試験方法におけるＲＣ造の主筋温度の規定値（壁、床等の区画部材：550℃、柱、梁等の耐力部材：500℃）を考慮し、主筋位置のコンクリート温度が規定温度を越えるかどうかにより、補修の要否、主筋の取り替えを決めなければならない。従って、コンクリートの受熱温度500℃を安全限界温度と見なし、この温度をコンクリート及び鉄筋等の使用の可否の目安と考えて、室全体にわたり、補修の必要な部分（範囲と深さ）を決定し、補修計画を立てる。なお、受熱温度が500℃を越えずに、しかも、中性化が進行していなければ、無補修で済む。調査内容の詳細は以下の通りである。

（１）コンクリートの表面状況の詳細調査

予備診断では、目視により火害状況の調査を行ったが、ここでは、コンクリート表面の受熱温度分布の把握を目的として表面の変色、浮き、剥離、ひび割れ、爆裂、変形等について目視により詳細に調査を行う。

変色に関して、表面にすすが付着しているが変色なし（300℃未満）、ピンク色（300～600℃）、灰白色（600～950℃）、淡黄色（950℃以上）の４段階に分けられ[16]、火災室及び火害を受けた箇所を上記の４等級に分け、等級分布を決定する。なお、比較のため、火害を受けていないコンクリートの色を確認しておく必要がある。

（２）コンクリートの受熱温度の推定

コンクリートの断面内の受熱温度を推定するため、前記（１）で決定した等級毎に代表的な箇所についてコンクリート・コアのサンプリングを実施する。また、受熱温度の裏付けの資料とするため、圧縮強度及び中性化深さの測定も行う。GBRC法により非火害部分のコンクリート・コアを用いてＵＶスペクトル分析を行い、吸光度と受熱温度の関係（検量線）を求める。次に、火害を受けたコンクリート試料の吸光度を求め、検量線より受熱温度を決定する。

４．　二次診断

４．１　概要

一次診断を実施後、更に詳細な調査を必要とする（火害の程度が更に顕著であり、補強または取り壊しの要否が考慮される）場合に、二次診断を実施する。二次診断では、詳細な火災性状を予測し、コンクリートの内部温度を推定し、それに対応する強度より、残存耐力を算定し、許容耐力と比較し、補強または取り壊しの判断を行う。

４．２　火災性状の予測

火災性状を予測することはその火災規模を知り、火害程度を知る上で、重要である。構造躯体への火災入力を考える場合には、火災性状を予測する必要がある。現在、種々の実火災性状予測（換気支配型、燃料支配型等）が提案されているが、通常、ＲＣ造建物内の火災は前述したように、「換気支配型火災」と考えられ、川越ら[81]により等価時間が提唱されている。すなわち、火災最高温度と火災継続時間を与え、温度時間面積すなわち等価時間を求める方法である。しかし、内装材料が実際には、設計時と異なった材料が使用されている場合が多く見受けられ、そのために火災性状が大きく変化し、火災性状を適切に予測するのは非常に困難である。また、実際の火災においては消火活動、風等の影響を大いに受け、そのためにも火災性状の予測が困難である。従って、火災性状については、火害を受けた状態の試料から判断するのが最も適切であると考えられる。ここでは、被害実態を基にした内部火災性状（火災継続時間及び火災最高温度）の推定を提案する。すなわち、木材の炭化深さに関する浜田式[82]及び消防の資料より火災性状を推定する。その方法については、５．２で実例を挙げて述べる。

４．３　火害を受けたコンクリート部材の受熱最高温度分布と残存耐力、剛性の推定

第１編で提案したGBRC法だけではなく、より詳細には、簡易計算による推定方法との併用により正確な受熱温度分布を求める必要がある。通常の火災に対しては、上記**４．２**で求めた火災入力を用い、第２編第２章及び第３章で述べた熱伝導解析による内部温度の推定式を導く。区画部材の場合には、両面のコンクリートをはつることが可能であり、GBRC法により、両面の受熱温度が推定される。その場合には、第２編第１章**１．６**で提案した内部最高温度分布式（二次式）を利用して部材内部の最高温度を求めることができる。さらに、内部各点について各温度に応じたコンクリート、鉄筋及び鋼材の力学的特性（弾性係数及び応力）を求め[47],[83]、部材としての残存剛性及び残存耐力を算定する。なお、コンクリートの冷却後の強度回復を考慮して、コンクリート強度を求めることは非常に危険側であり、強度回復は考慮しない。鉄筋についても、冷却後強度は増すが、伸びが低下するため、コンクリートと同様に強度回復は考慮しない方が良い。

４．４　対策

以下に考慮すべき対策を列挙する。

（１）部材の残存耐力が短期及び長期の荷重に対してどの程度余力があるかにより、再使用（無補修、補修有または補強）または取り壊しの判断を行うのであるが、残存耐力が長期設計荷重より小さければ、早晩壊れるので、取り壊しの必要がある。どの程度、耐力に余裕があるかの判断は第２編第２章及び第３章で提案した残存耐力比を求める計算方法等を用い、その耐力が現行の計算基準の評価値を満足するかを判断する。

（２）コンクリートは通常、高温時には強度よりも弾性係数の低下が大きく、変形増大の原因となる。床部材のたわみ・振動性状等が使用性に与える影響を調べるには、受熱温度に応じた材料の弾性係数より残存剛性を求める必要がある。

（３）補強を行って、部材を長期または短期の耐力まで回復させる必要がある。そのためには、材料の取り替え、または他の材料で補強等を行う必要がある。床、壁等の区画部材は取り替えが可能であるが、柱などの耐力部材は取り外す訳にはいかず、そのためには、鋼管、鋼板を巻き付けて補強するのが一番簡易な方法であろう。

（４）比較的重要でない部材に対しては、次のような簡易な対策が考えられる。すなわち、受熱温度が200℃以下（コンクリートの強度低下がほとんどないと考えられる温度範囲）の部分については補修・補強の対象としない。

（５）コンクリート系部材についても木材の燃え代ろ設計的な手法（火災後の断面に関して、耐火上有効な部分を設定する方法）を導入し、安全限界温度500℃以上の受熱温度の部分ははつり取り、樹脂モルタル等で補修するか、鋼板で強度を持たせるような補強を施す。

５．　診断方法の実施例

５．１　概要

ここでは、火害調査例を通じて、具体的な診断の方法について述べる。建設中に火害を受けた某建物のＲＣ造部分の損傷程度及び構造躯体の劣化程度を把握するために、①火災性状の推定調査、②構造部分の火害調査を実施した。以下、その内容を示す。なお、火害はさ程顕著でなかったため、GBRC法及び計算手法による受熱温度の推定は行っていない。

５．２　火災性状の推定調査

被災部分の火害状況を調査し、火災最高温度及び火災継続時間の推定を行なった。

（１）被災部分の火害状況の調査

主に開口部及びコンクリートの損傷状況を目視観察により調査した。コンクリートの損傷状況に関しては、各部材（床スラブ、壁、柱及び梁）を対象とした。

（２）火災最高温度及び火災継続時間の推定

コンクリート表面における火災継続時間については、木材の平均炭化速度（0.6mm／分[84]）及び消防署資料より推定した。また、コンクリート表面における火災最高温度は、(1)式[82]と火害状況（各使用材料（木材、アルミニウム、銅、鉄及びポリエチレン等）の燃焼特性（引火温度、発火温度及び溶融温度）[85],[86]及びコンクリートの変色状況[16]）より推定した。

$$d=K\cdot(\theta/100-2.5)\cdot t^{0.5} \qquad (1)$$

ここで、d:炭化深さ（mm）、

θ:木材面の加熱温度（℃）、

t:加熱時間（分）、

K:材種による常数（杉材は1.0）

その結果、柱及び梁などに取り付けられていた桟木などの木材の最大炭化深さは41mmであったことから、同部での火災継続時間は68分となった。一方、出火から鎮火までの時間（消防署情報）を合わせて考慮すると、火災継続時間は70分前後と推定された。また、火災最高温度は(1)式にd=41mm、t=68分（=d/0.6）、K=１を代入すると、745℃となる。一方、床スラブのコンクリートの一部が灰白色を呈していたことから、火災最高温度は約600～950℃と推定された[16]。

５．３　構造部分の火害調査

（１）シュミット・テスト・ハンマーによるコンクリートの圧縮強度の推定

火災を受けたコンクリートの被害程度を検討するため、火害を受けた床スラブ、柱及び梁と火害を受けていない柱及び梁について、シュミット・テスト・ハンマーにより、コンクリートの圧縮強度を推定し、被災部分全体の強度分布を把握した。その結果、圧縮強度については280～474kgf/cm^{2}の範囲にあり、設計基準強度270kgf/cm^{2}を満足することが推定された。

（２）コンクリート・コアによる圧縮強度の推定

被災部分において、火害が顕著と考えられる部材（床スラブ、柱及び梁）及び火害を受

けていない部材より、コンクリート・コアを採取した後、圧縮試験を行ない、コンクリートの圧縮強度を推定し、強度劣化の程度を調べた。コンクリート・コアの圧縮強度試験方法は、JIS A 1107「コンクリートからのコアおよびはりの切り取り方法及び強度試験方法」に従った。その結果、圧縮強度については295～373kgf/cm²の範囲にあり、設計基準強度270kgf/cm²を満足していた。

（３）コンクリートの中性化深さの測定

圧縮試験後のコンクリート・コアを割裂後、フェノール・フタレイン１％エチル・アルコール溶液を吹付け、赤変反応を利用してコンクリートの中性化深さを測定した。その結果、コンクリートの中性化深さについては、被災側で0～15mmの範囲であった。

（４）　被災部の鉄筋の力学的性質の推定

床スラブにおいて、火害の程度が顕著と考えられる部分の鉄筋を採取し、引張試験を行ない、鉄筋の降伏点及び引張強度を推定した。その結果、鉄筋の降伏点は382～392N/mm²の範囲、引張強度は585～595N/mm²の範囲にそれぞれあり、SD30の公称値（降伏点324N/mm²、引張強度490N/mm²）を充分満足していた。

６．　補修方法の実施例

６．１　概要

５．で診断を行った物件に対して、補修を施した内容を述べる。すなわち、火害調査の結果をもとに、火害による損傷の程度を以下に示す５段階の被害等級に分類し、床スラブ、柱及び梁について、補修・補強を行なった。

（被害等級Ａ）…黒くすすけた程度で損傷が認められなかった範囲（写真1に床スラブの例を示す。）

（被害等級Ｂ）…全体的にすすで覆われ、亀甲模様の微細なひびわれが認められるが、ほとんど火害がないと推定される範囲（写真2に柱の例を示す。）

（被害等級Ｃ）…火災の影響でコンクリートが15～30mm程度剥落した範囲（写真3に柱の例を示す。）

（被害等級Ｄ）…かなり明確な亀甲模様のひび割れが認められる範囲（写真4に梁の例を示す。）

（被害等級Ｅ）…床スラブ下面のコンクリートが爆裂等により剥落し、鉄筋が露出してい

る範囲（写真5に床スラブの例を示す。）

なお、（被害等級Ａ）については補修を必要としなかった。

６．２　補修方法

（被害等級Ｂ）から（被害等級Ｅ）までの補修方法を以下に示す。

（１）（被害等級Ｂ）の場合

イ．ウォーター・ジェットで高圧水洗浄（圧力：80～150kgf/cm²）を行なった。

ロ．中性化を抑止する目的で、下地強化剤をローラーまたは吹付けガンにて全面塗布した。

ハ．吹付け塗装を行なった。

（２）（被害等級Ｃ）の場合

イ．上記（１）のイ．と同一内容の作業を実施した。

ロ．下地強化剤を刷毛もしくはローラーにて塗布した（鉄筋が露出している場合は、事前に防錆剤を塗布した）。

ハ．断面修復材を充填し、形状を修復した。修復する深さが大きい場合は、１回の塗り厚さを10mm程度とし、数回に分けて修復した。

ニ.及びホ．　上記（１）のロ.及びハ.と同一内容の作業を実施した。

（３）（被害等級Ｄ）の場合

イ．コンクリート・コアで火害部分を確認し、火害を受けていない部分までコンクリートをはつり取った。

ロ．上記（１）のイ．と同一内容の作業を実施した。

ハ.及びニ．　上記（２）のロ.及びハ.と同一内容の作業を実施した。

ホ.及びヘ．　上記（１）のロ.及びハ.と同一内容の作業を実施した。

（４）（被害等級Ｅ）の場合

床スラブについて、鉄筋の引張試験の結果、露出鉄筋に耐力低下が認められるかどうかによって、以下の２通りの作業手順に従い、補修を行なった。

〔ａ．露出鉄筋に耐力低下が認められない場合〕

イ．上記（３）のイ．と同一内容の作業を実施した。

ロ．上記（１）のイ．と同一内容の作業を実施した。

ハ．アンカーを300～500mm程度のピッチで打ち、鉄筋を固定した。

ニ．露出している鉄筋に、防錆剤を塗布した。

ホ．上記（２）のロ．と同一内容の作業を実施した。

ヘ．断面修復材を充填して、形状を修復した。修復する深さが大きい場合は、１回の塗り厚さを6㎜程度とし、数回に分けて修復した。修復深さが深い場合は、鉄筋の付着力が喪失していると考えられるので、ステンレス・ネットを入れて、補強した。

ト.及びチ．　上記（１）のロ.及びハ.と同一内容の作業を実施した。

〔ｂ．露出鉄筋に耐力低下が認められた場合〕

イ．上記（３）のイ．と同一内容の作業を実施した。

ロ．上記（１）のイ．と同一内容の作業を実施した。

ハ．健全な鉄筋を所定の位置に添え筋して、スラブ端部にて溶接を行なった。

ニ．～リ．上記　ａ．のハ．～チ．と同一内容の作業を実施した。

７．　火害減少対策

７．１　概要

火害を受けたＲＣ造建物では、被害の程度により補修・補強方法は大きく変わってくるため、事前に火害を最小限にくい止める方策を講じることも重要である。ここでは、コンクリート系部材の火害を減少させる方策について論じた。

７．２　コンクリートの使用材料、種類について

使用する骨材が耐火性に大きく影響することは、第２編第１章１．３で既に述べた。熱伝導率の小さい骨材を用いる方が耐火性には有利である。第２編第１章１．３では、骨材として、山砂利（チャート質頁岩）、砕石（玄武岩）、砕石（緑簾石質砂岩）の３種類でコンクリートの耐火性能を比較したが、玄武岩が最も温度上昇が遅いことが分かった。安山岩質の骨材を用いたコンクリートは、強度も弾性係数も低下が比較的少なく、石灰岩質については、その産地にもよるが、川砂・川砂利あるいは安山岩質の骨材を用いたコンクリートよりも耐火性能が劣ることがあると言われている[87]。

また、第２編第１章１．５では、軽量コンクリートと普通コンクリートを比較したが、断熱性については、軽量コンクリートが優れているが、その効果を生かし、普通コンクリートより厚みを薄くすると、剛性が小さくなり、ひび割れが増加するため、内部への熱流入が増加し、逆に温度上昇が普通コンクリートよりも大きくなる。

調合比が耐火性能に与える影響はあまり大きくない[87]。

7．3　コンクリートの爆裂について

ＲＣ造の火害を考える上で、コンクリートの爆裂は避けて通れない大きな問題である。第２編第１章１．２で実施した実験では、加熱開始２０分から４０分まで継続的な小爆裂が認められ、最後に全面的な大爆裂により実験を中止している。

爆裂の原因としては、水セメント比、含水率、加熱条件などの影響を大きく受けるが、特に、高強度コンクリートの場合には、普通強度のコンクリートよりも含水率が少ないにもかかわらず、爆裂が発生する[88]。高強度とするために、単位セメント量が多い富調合となることが原因と考えられる。水セメント比の低いコンクリートはゆっくりと水和反応を起こすために、緻密な組織が形成され、独立気泡ができ、水分の揮散が抑えられる。この「水蒸気の逃げ」の有無が爆裂規模を支配していると考えられる。従って、高強度のものに限らず、緻密な組織構造を持つコンクリートが、より高い爆裂危険性を持っているのはほぼ確実である[89]。

爆裂の防止対策としては費用がかさむが、付加被覆が非常に効果的であり、耐火性能は増加する。この対策を施せば、他に対策を追加する必要はない[90]。付加被覆としては耐火塗料を塗布することにより、爆裂防止に効果がある[91]。ただ、塗料自体が耐久性などに関して未だ研究段階にある[92]。

7．4　残存耐力について

第２編第３章より、部材の残存耐力に関して、次のようなことが判明した。

（１）法規上耐火時間毎に部材の厚さが決められているが、その厚さを採用した場合には、壁部材よりも床部材の方が耐火上不利となる。床部材のように曲げを受ける場合は、かぶり厚さが小さいほど、残存耐力の低下が大きく、床厚よりもかぶり厚さが耐力に与える影響が大きい。従って、床部材はかぶり厚さを十分に取る必要がある。

（２）コンクリートの種類については、材料の温度伝導率（＝（熱伝導率）／（比重）・（比熱））が大きいほど残存耐力の低下は大きい。従って、温度伝導率の小さいコンクリートを選ぶべきである。

第２編第２章より、CFTなどの柱部材では、断面が大きい場合が残存耐力の低下が少なく、火災時間が長いほど、有利となることが分かった。従って、ＲＣ部材についても、木材の

燃え代ろ設計的な考え方を導入することができ、断面を大きくすることは、耐火性の向上の効果が顕著に現れると考えられる。

8. まとめ

本章では、第1編及び第2編の研究成果を基にした火害診断手法を提案した。ここでは、コンクリート系建物の火害の程度により、予備診断、一次診断、二次診断と火害が顕著になるほど詳細な調査・診断が必要であることを述べた。また、実際の火害診断・補修方法の例を紹介した。さらに、コンクリート系建物の火害を最小限に食い止めるための方策についても論じた。本編では、工学的知見に基づいて、火災性状のシミュレーションにより構造体内部の火害時の力学特性を把握する必要性を説いた。しかし、個々の火災でその条件が異なるため、受熱温度の推定方法として、最も確実と考えられるGBRC法を採用することが望ましい。また、現場での火害状況から火災性状を判断し、内部温度を簡易計算法によりシミュレーションする方法を併用し、診断をさらに確実なものとする必要がある。万全を期するため、コンクリートや鉄筋の物理的・化学的特性を調べ、経済的な補修・補強・取り壊しの判断をすべきである。

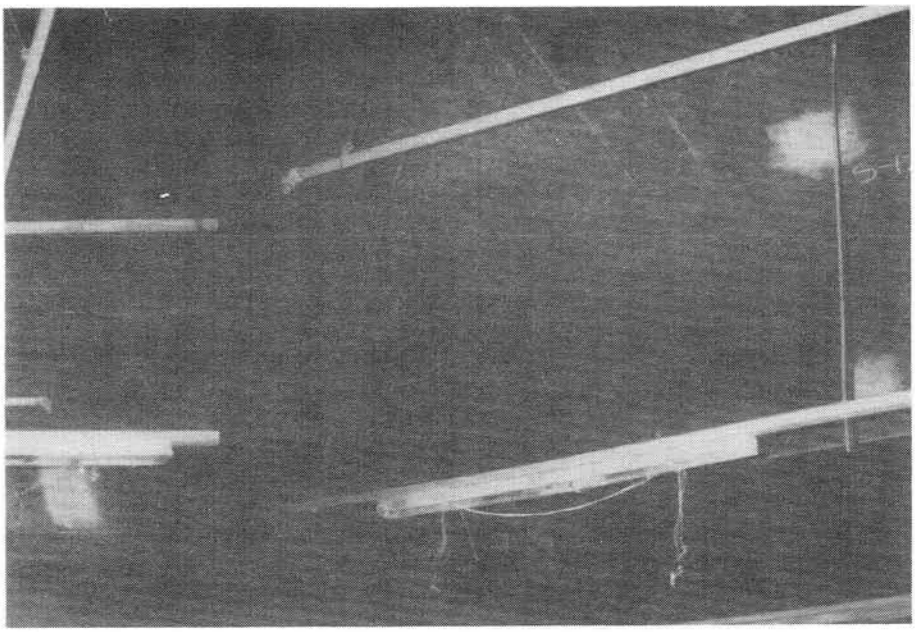


写真1　被害等級Ａの例

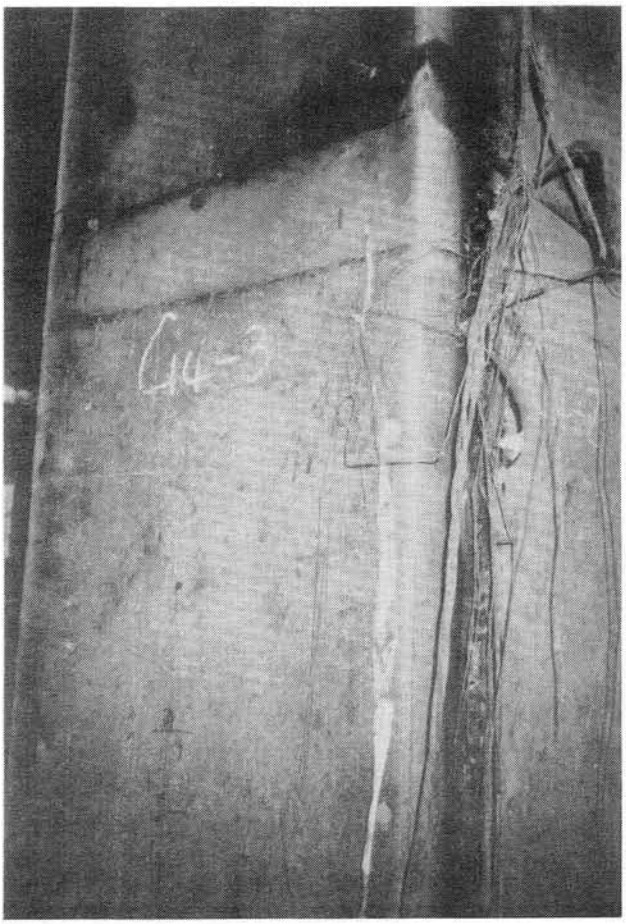


写真2　被害等級Ｂの例

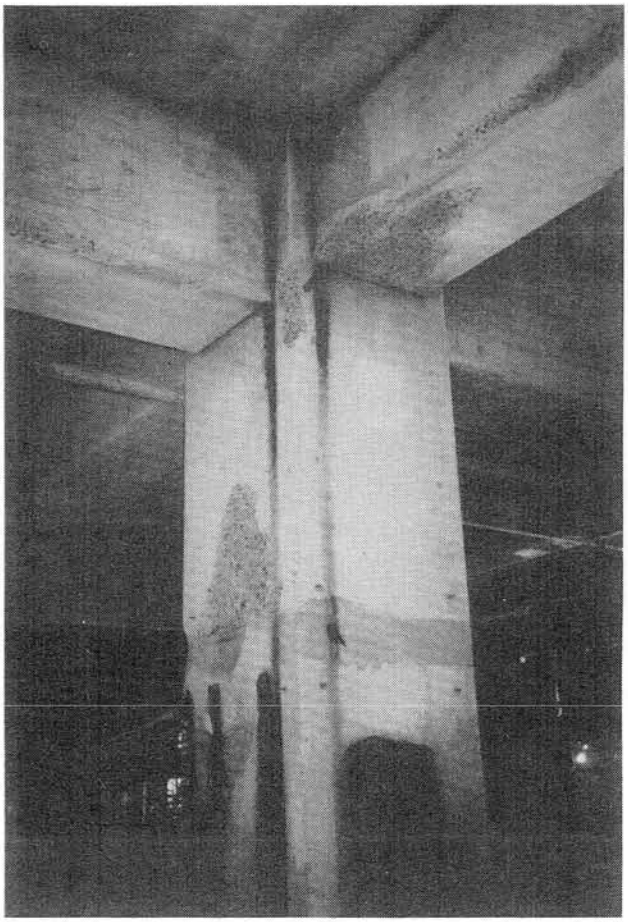


写真3　被害等級Ｃの例

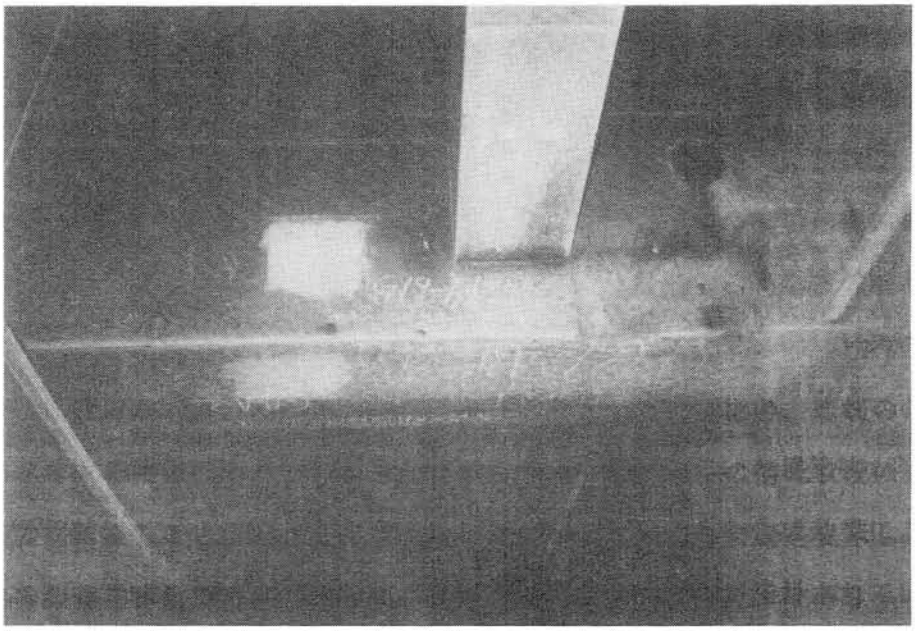


写真4　被害等級Ｄの例

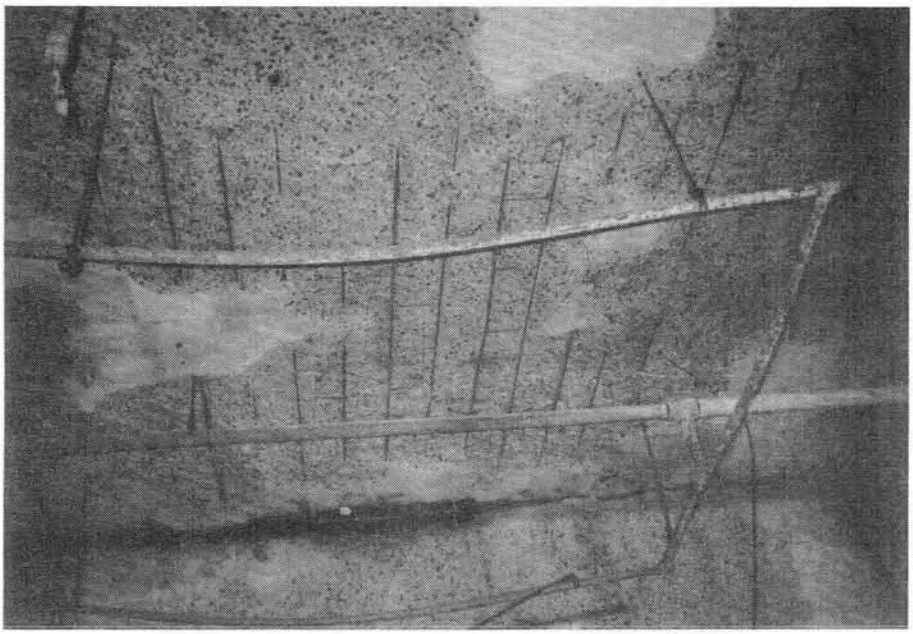


写真5　被害等級Ｅの例

結　論

1．研究結果のまとめ
2．今後の研究課題

1．　研究結果のまとめ

1．1　概要

本研究では、コンクリート系構造部材に関して、的確な火害診断を行うための新たな火害診断手法を提案した。すなわち、コンクリート系混和剤に着目し、火害を受けたコンクリートの受熱温度を推定した。また、簡易計算手法により部材の内部温度分布特性を把握し、残存耐力の推定を行った。さらに、本研究で得られた成果を用いた火害診断手法を提案した。以下に、各編で得られた結論を述べる。

1．2　第1編：火害を受けたコンクリートの受熱温度推定に関する研究

1．2．1　第1章：火害を受けたコンクリートの受熱温度推定方法の提案

本章では、コンクリート系混和剤に着目し、化学的手法により火害を受けたコンクリートの受熱温度の推定を試みた。その結果、リグニン系混和剤については、ＵＶスペクトル法を用いることにより、常温から600℃までの受熱温度を推定できることが判明し、新たなコンクリートの受熱温度推定方法（GBRC法）を提案した。

1．2．2　第2章：火害を受けたコンクリートの受熱温度推定方法の検証

本章では、前章（第1章）で提案されたＵＶスペクトルによるコンクリートの受熱温度推定方法（GBRC法）の有用性を検証した。その結果、以下に示すことが明かとなった。

（1）柱及び床のコンクリート系部材の加熱試験による温度測定値とGBRC法による推定値がほぼ一致し、GBRC法の実証が図られた。

（2）火災室内で発生する燃焼排ガスがGBRC法に与える影響を調べた結果、その影響はほとんどないことが分かった。

（3）火害を受けたＲＣ造建物よりコンクリート・サンプルを採取し、GBRC法により受熱温度を推定し、コンクリートの変色状況、圧縮強度、中性化深さ、等による結果とＧＢＲＣ法による結果はおおむね整合し、GBRC法を火災事例に適用できることが判明した。

（4）ナフタリン系混和剤を用いたコンクリートについてはGBRC法により450℃～600℃までの受熱温度を、定量分析法により常温から600℃までの受熱温度をそれぞれ推定できるこ

とが判明した。

１．３　第２編：火災後のコンクリート系部材の受熱温度分布及び残存耐力の推定に関する研究

１．３．１　第１章：火災時におけるコンクリート系部材の内部温度特性

本章では、コンクリート系区画部材を対象として、火災時におけるコンクリート内部温度特性、重量減少、内部圧力等に関して、基礎的な実験を行い、それらの特性を把握した。パラメーターとしては、コンクリートの含水率、コンクリートの種類及びコンクリートの使用骨材等を取り上げ、それらを種々変化させ、内部温度に与える影響を調べた。さらに、耐火試験のデータより火災後のコンクリート系区画部材の内部最高温度分布を回帰分析し、その分布が二次式で表されることが判明した。

１．３．２　第２章：火災後における鋼管コンクリート柱の残存耐力

本章では、耐力部材として、CFT柱を取り上げた。CFT柱について、簡易計算による火災後の残存耐力の推定方法を提案した。その結果、計算値と耐火試験による実験値とがほぼ一致した。さらに、実大部材へ適用し、シミュレーションを行った結果、火災時間が長い場合には、断面が大きくなるほど、耐火上有利となることが分かった。

１．３．３　第６章：火災後におけるコンクリート系区画部材の受熱温度及び残存耐力の推定

本章では、合成構造も含めたコンクリート系区画部材（床部材及び壁部材）を対象とし、火災後の部材内の受熱温度分布を求め、それを定式化し、残存耐力を推定した。その結果、以下に示すことが明かとなった。

（１）偏微分を用いた簡易計算方法による床及び壁の各部材の受熱温度分布について、計算値と耐火試験から得られた実験値とが良く一致し、本方法の妥当性が検証された。

（２）受熱温度分布の解析値を多項（二次）回帰分析し、推定式を求めた結果、計算による解析値と回帰分析の値とは非常に良く一致した。

（３）火災後の床部材の曲げ残存耐力はかぶり厚さが小さいほど、低下が大きく、再使用限界時間が長くなるにつれ、さらに低下する。また、耐力に与える影響は床厚よりもかぶ

り厚さの方が大きい。材料の温度伝導率Kが大きくなるほど、残存耐力の低下は大きい。
（４）火災後の壁部材の圧縮残存耐力は壁厚が小さいほど、低下が大きく、再使用限界時間が長くなるにつれ、低下がさらに大きくなる。

１．４　第３編：コンクリート系部材の火害診断手法の提案

本編では、第１編及び第２編の成果を基に、コンクリート系建物の火害診断手法を提案した。すなわち、予備診断、一次診断、二次診断と火害の程度により詳細な調査・診断の必要性を説いた。建設中に出火したＲＣ造建物について、診断方法及びそれに基づく補修・補強方法の実施例を示した。さらに、本研究の成果を基に、コンクリート系部材の火害を減少させる方策について論及した。

２．　今後の研究課題

今後の研究課題として、主に以下に示す内容が挙げられる。
（１）火害を受けたコンクリートの受熱温度推定方法として、ＵＶスペクトル分析法を用いたが、より簡易な現場に即した推定方法の開発を行うことが重要であると考えられる。
（２）リグニン系・ナフタリン系以外の使用量が極めて少ない混和剤を用いたコンクリートについても、ＵＶスペクトル法による受熱温度推定方法を検証する必要がある。
（３）本研究では、火災後のコンクリートの受熱温度（到達最高温度）を求めることが主眼であったが、受熱温度の継続時間も重要な要素であると考えられる。すなわち、継続時間の長短によっては火災による劣化程度が異なると考えられ、受熱温度の継続時間が強度低下に及ぼす影響を調べる必要がある。
（４）火災を受けたコンクリートの残存強度を現場で直接推定する方法の可能性を探る。
（５）阪神淡路大震災のような大地震は今後頻繁に起こる可能性は少ないと考えられるが、地震時における火災をも想定した火害診断法を提案することは、防火分野の研究において、今後の重要なテーマであると考えられる。

参考文献

［１］坂静雄：り災鉄筋コンクリート家屋の診断、セメント技術年報Ⅰ、pp.185-198、1947

［２］坂静雄：高温度におけるコンクリートの温度伝導係数と火災教室の構造内部温度の推定、セメント技術年報Ⅱ、pp.239-242、1948

［３］藤田金一郎：室内火災による鉄筋コンクリート構造の強度低下の推定方法、日本火災学会論文集、Vol.1、No.1、pp.18-20、1951

［４］原田有、他：ブリジストン横浜工場の火災時における鉄筋コンクリートラーメンの熱応力の推定、火災学会論文集、Vol.12、No.1、pp.6-24、1962.11

［５］原田有：コンクリートおよび鉄筋コンクリート構造の火害とその耐火力、セメントコンクリート雑誌、No.269、pp.6-14、1969.7

［６］高野孝次：水戸市中央ビル構造火害調査報告（内報）、1971.1

［７］岸谷孝一、森実：火災を受けた鉄筋コンクリート造建物の火害度と受熱温度の推定、火災、85号、pp.8-19、1972

［８］藤木洋一：打梨（発）建物コンクリートの火災による被害調査、中国電力㈱技研時報、No.48、pp.119-124、1975

［９］増沢鯱男、小橋一民、田中健治郎、加藤武彦：火害を受けた鉄筋コンクリート造建物の被害調査とその補修対策、熊谷技報、No.20、pp.1-14、1977

［１０］中村賢一：被災構造物の構造性能回復技術　加熱された材料の超音波伝ぱ速度、建築研究所年報、pp.504-509、1978

［１１］山田和夫、土屋宏明、小阪義夫、他：超音波スペクトロスコピーによるコンクリートの劣化度評価に関する基礎的研究、材料、Vol.38、No.431、pp.959-965、1989

［１２］太田福男：マイクロ波による火害コンクリートの劣化診断法に関する実験的研究、セメント技術大会講演集、No.43、pp.546-551、1989

［１３］午来俊晴、太田福男：高強度火害コンクリートの残存強度について（高強度火害コンクリートのマイクロ波による劣化診断方法に関する研究その１）、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、pp.397-398、1992.8

［１４］午来俊晴、太田福男：高強度火害コンクリートの残存圧縮強度とマイクロ波特性との相関性について（高強度火害コンクリートのマイクロ波による劣化診断方法に関する研究その２）、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、pp.399-400、1992.8

［１５］松井嘉孝、矢田彰彦、他：構築物の耐用性診断とその対策、新建築技術叢書-7、耐用性研究会、㈱彰国社、pp.150-154、1976.5

［１６］長友宗重、木村敬三、大森信次、他：既存建物の耐力診断とその対策、鹿島出版

会、pp.81-109、1978.6

[１７] 荒井光興：火災を受けた鉄筋コンクリート造建物の補修、建築技術、No.351、pp.75-87、1980.11

[１８] Placido, Francis: Thermoluminescence Test for Fire-Damaged Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.32, No.111, Cement and Concrete Association, pp.112-116, 1980.6

[１９] Tovey, A. K.: Assesment and Repair of Fire-Damaged Concrete Structures -an Update, ACI, SP 92-4, pp.47-62, 1986

[２０] Muenow, Richard A. and Abrams, Melvin S.: Nondestructive Testing Methods for Evaluating Damage and Repair of Concrete Exposed to Fire, ACI, SP 92-4, pp.63-86, 1986

[２１] Kordina, K., Wydra, W. and Ehm, C.: Analysis of The Developing Damage of Concrete due to Heating and Cooling, ACI, SP 92-4, pp.87-114, 1986

[２２] Schneider, U. etc.:Reliability of Fire Damaged Structures, CIB W 14 Report, Fire Safety Jornal, Vol.16, No.4, pp.251-336, 1990

[２３] 藤井正一：柱または梁の耐火試験における鉄骨温度上昇の理論計算、日本火災学会論文報告集、Vol.13、No.1、pp.13-21、1963

[２４] 若松孝旺：鉄骨部材の耐火性に関する計算法、災害の研究、Ⅶ、1970、損害保険料算定災害科学研究会

[２５] 川越邦雄：高温下熱伝導の電子計算機による数値計算－（非定常二層壁の非線形熱伝導）－、日本火災学会論文報告集、Vol.13、No.2、pp.29-35、1965.8

[２６] 若松孝旺：火災時における建物部材の内部温度算定に関する研究　（第一報）－算定式の誘導、算定条件および算定要素－、日本建築学会論文報告集、第109号、pp.73-79、1965.3

[２７] 若松孝旺：火災時における建物部材の内部温度算定に関する研究　（第二報）－算定式の解法－、日本建築学会論文報告集、第111号、pp.31-36、1965.5

[２８] 大内富夫、牟田紀一郎、佐藤博臣：火災時における中空多層壁の内部温度計算、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、pp.2147-2148、1978.9

[２９] 小原俊平：火災時における建築構造部材の温度上昇計算法について、鹿島建設技術研究所年報、第14号、pp.307-312、1965

[３０] Pettersson, O.:Reliability Based of Fire Exposed Concrete Structures, Report LUTVDG/(TVBB-3004),Devision of Building Fire Safety and Technology, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1981

[３１] （財）日本建築センター：建築物の総合防火設計法（第４巻　耐火設計法）、

pp.48-63、1989

［３２］原田和典：耐火試験時におけるコンクリートの温度上昇の予測に関する研究，博士論文，1993.12

［３３］Lin,Chien-Hung, Chen,Shun-Tyan and Hwang,Tze-Lee：Residual strength of reinforced concrete ccolumns exposed to fire, Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol.12, No.5, 1989

［３４］黒岩秀介、西垣太郎、黒羽健嗣、他：高強度（Fc=1000kgf/cm²）ＲＣ柱の耐火性能に関する研究（その３：被災後の残存耐力）、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、pp.77-78、1995.8

［３５］高幣喜文、村井信義：鉄筋コンクリート造集合住宅（５階建）の実大火災実験（その４：床スラブの材料試験と載荷試験結果）、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、pp.2765-2766、1983.9

［３６］田中礼治、他：火害を受けた鉄筋コンクリート建物の耐震性能に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集（北陸）、pp.2769-2770、1983.9

［３７］池田憲一、他：プレストレストコンクリートばりの加熱後の曲げ耐力、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、pp.2401-2402、1981.9

［３８］池田憲一、他：アンボンド型充填鋼管コンクリート構造に関する研究　その１３載荷加熱後の中心圧縮性状、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、pp.1379-1380、1988.10

［３９］Nasser, K. & Al-Manaseer, A.：Comparison of Nondestructive Testers of Hardened Concrete, ACI Material Journal, pp.374-380, 1987.9

［４０］付　思、井出正男、佐藤　寛：超音波によるコンクリートの加熱劣化の測定に関する研究、日本火災学会研究発表会概要集、pp.54-57、1992.5

［４１］鹿島建設技術研究所編：既存建物の耐力診断と対策、鹿島出版会、pp.105-107, 1978.6

［４２］日本分析化学会近畿支部編：第５改稿　機器分析実験法（上）、化学同人、p.246, 1974.7

［４３］森川　洸：最新の分析技術　－増補版－　“すぐに役立つ実験法講座”　紫外、可視吸光分析法、（社）大阪工研協会、pp.77-128、1968

［４４］（社）日本材料学会編：コンクリート用化学混和剤、（株）朝倉書店、pp.105-117、1972.5

［４５］丸安隆和、水野俊一：コンクリート工学、標準土木工学講座 16、コロナ社、pp.124-127、1970.8

［４６］鹿島建設技術研究所編：既存建物の耐力診断と対策、鹿島出版会、pp.80-90、

1978.6

［４７］古村福次郎：コンクリートと熱(2)、コンクリート工学、Vol.17、No.9、pp.53-61、1979.9

［４８］丸田俊久、加藤和巳：セメント硬化体中の有機質混和剤の定量、セメント技術年報、No.31、pp.101-104、1977

［４９］英　一太：プラスッチクの難燃化、日刊工業新聞社、pp.50-61、1978.6

［５０］原田和典、寺井俊夫：火災を受けるコンクリートスラブ中の温度及び水分の分布について、日本火災学会研究発表会概要集、pp.39-42、1985.5

［５１］吉田正友、田坂茂樹：火災時における合成床版のコンクリート内部温度推定に関する基礎的実験、（その１）実験方法および概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.829-830、1986.8

［５２］田坂茂樹、吉田正友：火災時における合成床版のコンクリート内部温度推定に関する基礎的実験、（その２）温度測定結果とその考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.831-832、1986.8

［５３］田坂茂樹、寺井俊夫、正法院陽三、藤川　慧、三田村茂雄、吉田正友、原田和典：火災時における合成床版のコンクリート内部温度推定に関する研究、（その１）温度測定結果、日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.49-52、1987.5

［５４］吉田正友、寺井俊夫、正法院陽三、藤川　慧、三田村茂雄、原田和典：火災時における合成床版のコンクリート内部温度推定に関する研究、（その２）重量減少および内部圧力の測定結果、日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.53-56、1987.5

［５５］堀素夫：コンクリートの熱伝導率測定、セメント技術年報、IX、pp.258-263、1955

［５６］寺井俊夫、他：耐火試験時のコンクリート床内の熱及び水分同時移動に関する研究、昭和62年度文部省科学研究費報告書、1988.3

［５７］原田有：建築耐火構法、工業調査会、pp.35-47、1963.8

［５８］例えば、Hosser, D., Dorn, T. and Richter, E. :Evaluation of Simplified Calculation Methods for Structural Fire Design, Fire Safety Jounal, Vol. 22, No.3,pp.249-304, 1994

［５９］鹿島建設技術研究所編：既存建物の耐力診断と対策、鹿島出版会、pp.88-90、1978.6

［６０］川越邦雄：コンクリート造建物の室内火災温度（その３　推定方法の実用化）、日本建築学会論文報告集、第140号、pp.63-70、1967.10

［６１］藤井正一：柱または梁の耐火試験における鉄骨温度上昇の理論計算、日本火災学

会論文集、Vol.13、No.1、pp.13-21、1963.10

［６２］（財）日本建築センター：建築物の総合防火設計法　第４巻　耐火設計法、pp.129-140、1992.4

［６３］（財）日本建築センター：建築物の総合防火設計法　第４巻　耐火設計法、pp.83-87、1992.4

［６４］若松孝旺：耐火被覆と耐火設計、建築技術、No.242、1965.4

［６５］作本好文、山口種美、岡田忠義、吉田正友、田坂茂樹：建築構造用耐火鋼を使用した鋼管コンクリート柱の耐火性能に関する実験的研究、日本建築学会論文報告集、第447号、pp.159-168、1993.5

［６６］吉野茂、畑戸龍夫、多賀　章、今村輝武：無耐火被覆鋼管コンクリート柱の耐火性能　－中心載荷加熱実験－、日本建築学会学術講演梗概集（東海）（防火）、pp.1425-1426、1994.9

［６７］竹内正雄：新版　熱計算入門Ⅱ、－伝熱・流体の流れ－、（財）省エネルギーセンター、pp.73-76、1992.7

［６８］若松孝旺：耐火試験時における諸熱伝達について、日本火災学会論文集、Vol.17、No.1、pp.43-55、1967.9

［６９］日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、pp.47-51、1982.9

［７０］佐久間仁、松村弘道、吉田正友：無耐火被覆鋼管コンクリート柱の耐火性能実験、GBRC、（財）日本建築総合試験所、No.48、pp.12-24、1987.10

［７１］岡田忠義、計良光一郎、作本好文、山口種美：建築構造用耐火鋼を使用したコンクリート充填鋼管実大柱の載荷加熱試験、日本建築学会学術講演梗概集、pp.1041-1042、1990.10

［７２］近藤泰夫、坂静雄：コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、pp.376-377、1981.11

［７３］（社）日本建築学会編：構造体コンクリート強度に関する研究の動向と問題点、pp.81-90、1989.9

［７４］田坂茂樹・正法院陽三・藤川　慧・吉田正友：火災時における合成床版のコンクリート内部温度に関する研究（その１）実験概要および測定結果、日本火災学会研究発表会概要集、pp.85-88、1988.5

［７５］吉田正友・正法院陽三・藤川　慧・田坂茂樹：火災時における合成床版のコンクリート内部温度に関する研究（その２）測定結果、日本火災学会研究発表会概要集、pp.89-92、1988.5

［７６］吉田正友・岡村義徳・田坂茂樹：耐火試験時におけるコンクリート部材の内部最高温度、日本建築学会学術講演梗概集、pp.1355-1356、1993.9

［７７］坂　静雄：高温度におけるコンクリートの温度伝導係数と火災教室の構造内部温度の推定、セメント技術年報Ⅱ、pp.239-242、1948

［７８］建設省告示第2999号：建築基準法施行令第107条第1号及び第2号の規定に基づく耐火構造の指定に関し、耐火構造の指定の方法を定める件　別記第一　耐火性能試験方法、1969.5

［７９］高野孝次：鉄骨構造の部材の耐火性能に関する研究、学位論文、pp.139-158、1982

［８０］建設省告示第1929号：建築基準法施行令第107条第1号及び第2号の規定に基づき、耐火構造を指定する件、1987.11

［８１］Kawagoe, K. and Sekine, T.:Estimation of Temperature-Time Curve in Rooms, 建築研究所　BRI Occasional Paper, No.11, 1963

［８２］浜田稔：木材の燃焼速度、火災、Vol.2、No.3、pp.11-12、1953.2

［８３］日本火災学会編：新版　建築防火教材、㈱工業調査会、pp.76-78、1980.9

［８４］鈴木一正：公庫融資住宅における構造区分の見直しについて、－簡易耐火構造の住宅の定義変更－、GBRC、Vol.8、No.1、pp.56-64、1983.1

［８５］日本火災学会編：火災便覧，共立出版株式会社，1984.3

［８６］S.L.Madorsky：J.Polymer Science, 1949.4

［８７］原田有：建築耐火構法、工業調査会、pp.181-183、1973.8

［８８］井上明人、飛坂基夫、枡田佳寛：高強度コンクリートの耐火性の評価に関する研究（第２報：骨材の岩種及び含水率の影響）、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）（材料施工）、pp.739-740、1991.9

［８９］本間礼人、菅原進一、高　治遠：コンクリートの爆裂性状に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）（防火）、pp.1393-1394、1992.8

［９０］H.L.Malhotra（斉藤　光、石沢琢磨訳）：火災時のコンクリートの爆裂〔建築業研究協会（CIRIA）技術ノート 118, 1984〕、災害科学研究会建物部会、pp.22-25、1985.7

［９１］大角昇、飛坂基夫、清水昭之、真野孝次：高強度コンクリートの耐火性の評価に関する研究（第４報：耐火塗料による爆裂防止に関する実験）、日本建築学会学術講演梗概集（北陸）（材料施工）、pp.403-404、1992.8

［９２］菅原進一、本間礼人：コンクリートの爆裂について　研究の現状とその補修対策、建築防災、pp.13-19、1992.11

発表論文

A．審査付き
B．口頭発表
C．解説
D．著書
E．その他

A．審査付き

（論文）

［１］宮本（吉田）正友，坂井正美：転炉スラグのコンクリート用細骨材への適用性について，第１回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.185-188，1979.5

［２］田村博，吉田正友：コンクリート中の鋼材の非破壊腐食探査方法，第６回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.205-208，1984.7

［３］H.Tamura and M.Yoshida:Nondestructive Method of Detecting Steel Corrosion in Concrete, In Situ/Nondestructive Testing of Concrete V.M.Malhotra/Editor, American Concrete Institute SP-82, Detroit, pp.689-702,1984.

［４］田村博，吉田正友：コンクリート中の鋼材の非破壊腐食評価方法について，第７回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.109-112，1985.6

［５］作本好文，山口種美，岡田忠義，吉田正友，田坂茂樹，斎藤光：建築構造用耐火鋼柱の耐火性能に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文報告集，第４３４号，pp.149-158，1992.4

［６］作本好文，山口種美，岡田忠義，吉田正友，田坂茂樹：建築構造用耐火鋼を使用した鋼管コンクリート柱の耐火性能に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文報告集，第４４７号，pp.159-168，1993.5

［７］作本好文，山口種美，岡田忠義，吉田正友，田坂茂樹：耐火塗料の耐火性能に及ぼす鉄骨部材の熱容量の効果，日本建築学会構造系論文報告集，第４５３号，pp.189-196，1993.11

［８］Y.Sakumoto, T.Yamaguchi, T.Okada, M.Yoshida, S.Tasaka, and H.Saito:Fire Resistance of Fire-Resistant Steel Columns, Journal of Structural Engineering, Vol.120, No.4, American Society of Civil Engieers Structural Division, pp.1103-1121, 1994.4

［９］Y.Sakumoto, T.Okada, M.Yoshida, and S.Tasaka:Fire Resistance of Concrete-Filled, Fire-Resistant Steel-Tube Columns, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.6, No.2, American Society of Civil Engieers, pp.169-184, 1994.5

［１０］M.Yoshida, Y.Okamura, S.Tasaka and T.Shimode:A Study on Temperature

Estimation in concrete Members Suffered from Fire, Proceedings of the Fourth International Symposium on Fire Safety Science, Ottawa, Ontario, Canada, pp.1183-1194, 1994.6

［１１］吉田正友，岡村義徳，田坂茂樹：コンクリートの受熱温度推定方法の提案，コンクリート系構造物の火害診断手法に関する研究（その１），日本建築学会構造系論文集，第４６５号，pp.155-162，1994.11

［１２］吉田正友，岡村義徳，田坂茂樹：コンクリートの受熱温度推定方法の展開，コンクリート系構造物の火害診断手法に関する研究（その２），日本建築学会構造系論文集，第４７２号，pp.177-184，1995.6

［１３］吉田正友，岡村義徳，田坂茂樹：火災後における一次元コンクリート系部材の受熱温度及び残存耐力の推定に関する研究，コンクリート工学論文集，pp.117-126，Vol.6,No.2,1995.7

［１４］吉田正友，岡村義徳，田坂茂樹，下手敏勝：ＵＶスペクトル法による火害を受けたコンクリートの受熱温度推定に関する研究，日本火災学会論文集，pp.11-20，Vol.43,No.1･2,1995.9

（解説）

［１］吉田正友：合成構造の耐火性能，コンクリート工学，pp.5-14，Vol.33，No.12，1995.12

Ｂ．口頭発表

〔日本建築学会関係（大会及び近畿支部）〕

［１］栗山実則，鈴木計夫，宮本（吉田）正友：繰返し荷重を受けるプレストレスト鉄筋コンクリート柱の弾塑性変形性状に関する研究，近畿支部研究報告集（構造系），pp.37-40，1975.5

［２］栗山実則，鈴木計夫，宮本（吉田）正友：繰返し荷重を受けるプレストレスト鉄筋コンクリート柱の弾塑性変形性状に関する研究，大会学術講演梗概集（関東）（構造），pp.1309-1310，1975.10

［３］宮本（吉田）正友，坂井正美，黒川憲次郎，中村信行：鉄骨コンクリート柱と鉄

筋コンクリート梁による接合部の実験的研究，大会学術講演梗概集（北海道）（構造），pp.1931-1932，1978.9

［４］宮本（吉田）正友，坂井正美，中村信行：鉄鉱石を用いた重量コンクリートについて，大会学術講演梗概集（関東）（構造），pp.49-50，1979.9

［５］中村信行，坂井正美，宮本（吉田）正友：ＰＦＣを用いたＳＲＣ柱のせん断破壊性状に関する実験的研究（その４），大会学術講演梗概集（関東）（構造），pp.1643-1644，1979.9

［６］田村博，吉田正友：コンクリート中の鋼材の非破壊腐食探査に関する実験的研究（その１：既存鉄筋コンクリート床版の鉄筋について），近畿支部研究報告集（第２３号・構造系），pp.13-16，1983.6

［７］吉田正友，田村博，坂井正美，中村信行：コンクリート中の鋼材の非破壊腐食探査に関する実験的研究（その２：海洋暴露したモルタル被覆鉄筋について），近畿支部研究報告集（第２３号・構造系），pp.17-20，1983.6

［８］田村博，吉田正友：コンクリート中の鋼材の非破壊腐食探査に関する実験的研究（その１：既存鉄筋コンクリート柱の鉄筋について），大会学術講演梗概集（北陸）（材料施工），pp.43-44，1983.9

［９］吉田正友，田村博，坂井正美，中村信行：コンクリート中の鋼材の非破壊腐食探査に関する実験的研究（その２：海洋暴露したモルタル被覆鉄筋について），大会学術講演梗概集（北陸）（材料施工），pp.45-46，1983.9

［１０］吉田正友，田坂茂樹：火災時における合成床版のコンクリート内部温度推定に関する基礎的実験（その１）実験方法および結果の概要，大会学術講演梗概集（北海道）（防火），pp.829-830，1986.8

［１１］田坂茂樹，吉田正友：火災時における合成床版のコンクリート内部温度推定に関する基礎的実験（その２）温度測定結果とその考察，大会学術講演梗概集（北海道）（防火），pp.831-832，1986.8

［１２］田坂茂樹，寺井俊夫，原田和典，正法院陽三，藤川慧，三田村茂雄，吉田正友：火災時における合成床版のコンクリート内部温度に関する研究（その１）温度測定結果，近畿支部研究報告集（第２７号・計画系），pp.49-52，1987.5

［１３］吉田正友，寺井俊夫，原田和典，正法院陽三，藤川慧，三田村茂雄，田坂茂樹：火災時における合成床版のコンクリート内部温度に関する研究（その２）重量減少および内部圧力の測定結果，近畿支部研究報告集（第２７号・計画系），pp.53-56，1987.5

［１４］原田和典，寺井俊夫，正法院陽三，藤川慧，三田村茂雄，吉田正友，田坂茂樹：火災時における合成床版のコンクリート内部温度に関する研究（その３）理論式による計算と実験値の比較，近畿支部研究報告集（第２７号・計画系），pp.57-60，1987.5

［１５］藤川慧，寺井俊夫，原田和典，正法院陽三，三田村茂雄，吉田正友，田坂茂樹：既往耐火試験におけるコンクリート床の温度測定結果について（その１）裏面温度の相違の実態について，近畿支部研究報告集（第２７号・計画系），pp.61-64，1987.5

［１６］三田村茂雄，寺井俊夫，原田和典，正法院陽三，藤川慧，吉田正友，田坂茂樹：既往耐火試験におけるコンクリート床の温度測定結果について（その２）裏面温度に及ぼす要因について，近畿支部研究報告集（第２７号・計画系），pp.65-68，1987.5

［１７］田坂茂樹，寺井俊夫，原田和典，正法院陽三，藤川慧，三田村茂雄，吉田正友：火災時における合成床版のコンクリート内部温度に関する研究（その１）温度測定結果，大会学術講演梗概集（近畿）（防火），pp.761-762，1987.10

［１８］吉田正友，寺井俊夫，原田和典，正法院陽三，藤川慧，三田村茂雄，田坂茂樹：火災時における合成床版のコンクリート内部温度に関する研究（その２）重量減少および内部圧力の測定結果，大会学術講演梗概集（近畿）（防火），pp.763-764，1987.10

［１９］原田和典，寺井俊夫，正法院陽三，藤川慧，三田村茂雄，吉田正友，田坂茂樹：火災時における合成床版のコンクリート内部温度に関する研究（その３）理論式による計算と実験値の比較，大会学術講演梗概集（近畿）（防火），pp.765-766，1987.10

［２０］藤川慧，寺井俊夫，原田和典，正法院陽三，三田村茂雄，吉田正友，田坂茂樹：既往耐火試験におけるコンクリート床の温度測定結果について（その１）裏面温度の相違の実態について，大会学術講演梗概集（近畿）（防火），pp.773-774，1987.10

［２１］三田村茂雄，寺井俊夫，原田和典，正法院陽三，藤川慧，吉田正友，田坂茂樹：既往耐火試験におけるコンクリート床の温度測定結果について（その２）裏面温度に及ぼす要因について，大会学術講演梗概集（近畿）（防火），pp.775-776，1987.10

［２２］倉橋岩夫，正法院陽三，十倉毅，吉田正友，田坂茂樹，山本嘉彦，岡村義徳：耐

火試験時における防火戸の漏煙量測定，大会学術講演梗概集（近畿）（防火），pp.783-784，1987.10

［２３］田坂茂樹，寺井俊夫，原田和典，藤川慧，吉田正友，表弘：火災時における合成床版のコンクリート内部温度に関する研究（その１）実験概要と測定結果，大会学術講演梗概集（関東）（防火），pp.771-772，1988.10

［２４］吉田正友，寺井俊夫，原田和典，藤川慧，田坂茂樹，表弘：火災時における合成床版のコンクリート内部温度に関する研究（その２）測定結果，大会学術講演梗概集（関東）（防火），pp.773-774，1988.10

［２５］藤川慧，寺井俊夫，原田和典，吉田正友，田坂茂樹，表弘：火災時における合成床版のコンクリート内部温度に関する研究（その３）異なる骨材を用いた小型供試体の加熱実験結果，大会学術講演梗概集（関東）（防火），pp.775-776，1988.10

［２６］原田和典，寺井俊夫，藤川慧，吉田正友，田坂茂樹，表弘：火災時における合成床版のコンクリート内部温度に関する研究（その４）耐火試験結果に影響を及ぼす各種要因の感度解析，大会学術講演梗概集（関東）（防火），pp.777-778，1988.10

［２７］田坂茂樹，吉田正友：耐火試験時における合成床版のコンクリート内部温度に関する研究（その１）断面形状の違いによる影響，大会学術講演梗概集（九州）（防火），pp.1057-1058，1989.10

［２８］吉田正友，田坂茂樹：耐火試験時における合成床版のコンクリート内部温度に関する研究（その２）コンクリートの種類の違いによる影響，大会学術講演梗概集（九州）（防火），pp.1059-1060，1989.10

［２９］田坂茂樹，吉田正友：耐火試験時の気温差が試験体に及ぼす影響に関する研究，大会学術講演梗概集（中国）（防火），pp.1001-1002，1990.10

［３０］吉田正友，田坂茂樹：火害を受けたコンクリートの受熱温度推定に関する研究，大会学術講演梗概集（中国）（防火），pp.1055-1056，1990.10

［３１］田坂茂樹，吉田正友，岡村義徳：耐火試験時の気温差が試験体に及ぼす影響に関する研究　その２，大会学術講演梗概集（東北）（防火），pp.1049-1050，1991.9

［３２］吉田正友，田坂茂樹，岡村義徳：火害を受けたコンクリートの受熱温度推定に関する研究（その２　リグニンスルフォン酸系混和剤入りコンクリートの場合），大会学術講演梗概集（東北）（防火），pp.1165-1166，1991.9

［３３］岡村義徳，吉田正友，田坂茂樹：火害を受けたコンクリートの受熱温度推定に関する研究（その３　ナフタリンスルフォン酸系混和剤入りコンクリートの場合），大会学術講演梗概集（東北）（防火），pp.1167-1168，1991.9

［３４］岡田忠義，吉田正友，田坂茂樹，計良光一郎，作本好文，山口種美：建築構造用耐火鋼材を使用したコンクリート充填鋼管実大柱の載荷加熱試験（その２．セラミック系耐火被覆材を使用した場合），大会学術講演梗概集（東北）（防火），pp.1171-1172，1991.9

［３５］田坂茂樹，吉田正友，岡村義徳：防耐火試験時における排ガスの分析について，大会学術講演梗概集（北陸）（防火），pp.1271-1272，1992.8

［３６］岡村義徳，吉田正友，田坂茂樹：火害を受けたコンクリートの受熱温度推定に関する研究（その４　ナフタリンスルフォン酸系混和剤入りコンクリートの続報），大会学術講演梗概集（北陸）（防火），pp.1395-1396，1992.8

［３７］吉田正友，田坂茂樹，岡村義徳：火害を受けたコンクリートの受熱温度推定に関する研究（その５　推定方法の検証と燃焼排ガスの影響），大会学術講演梗概集（北陸）（防火），pp.1397-1398，1992.8

［３８］雑候良介，吉田正友，田坂茂樹，作本好文，山口種美，岡田忠義：建築構造用耐火鋼材を使用するコンクリート充填鋼管柱の熱容量特性に関する実験研究，大会学術講演梗概集（北陸）（防火），pp.1403-1404，1992.8

［３９］吉田正友，岡村義徳，田坂茂樹：耐火試験時におけるコンクリート部材の内部最高温度，大会学術講演梗概集（関東）（防火），pp.1355-1356，1993.9

［４０］窪田伸，作本好文，岡田忠義，吉田正友，田坂茂樹：耐火塗料を使用した建築構造用耐火鋼材の熱容量特性に関する実験的研究，大会学術講演梗概集（関東）（防火），pp.1383-1384，1993.9

［４１］下川弘海，中村信行，伊藤茂樹，今野和近，吉田正友：充填型鋼管コンクリート柱の耐火性能に関する研究（その１　加熱実験），大会学術講演梗概集（東海）（防火），pp.1417-1418，1994.9

［４２］中村信行，岡本晴仁，今野和近，下川弘海，吉田正友，中村賢一：充填型鋼管コンクリート柱の耐火性能に関する研究（その２　載荷加熱実験），大会学術講演梗概集（東海）（防火），pp.1419-1420，1994.9

［４３］吉田正友，岡村義徳，田坂茂樹：火災後における鋼管コンクリート柱部材の残存耐力，大会学術講演梗概集（東海）（防火），pp.1423-1424，1994.9

［４４］吉田正友，岡村義徳，田坂茂樹：火害を受けたコンクリートの受熱温度推定に関

する研究（その６　火災事例への適用），大会学術講演梗概集（北海道）（防火），pp.69-70，1995.8

［４５］岡本晴仁，今野和近，下川弘海，伊藤茂樹，吉田正友，倉橋岩夫：鋼・コンクリート合成骨組の耐火性能に関する研究（その１　梁の載荷加熱実験），大会学術講演梗概集（北海道）（防火），pp.81-82，1995.8

［４６］今野和近，伊藤茂樹，下川弘海，中村信行，吉田正友，田中義昭：鋼・コンクリート合成骨組の耐火性能に関する研究（その２　柱・梁接合部の載荷加熱実験），大会学術講演梗概集（北海道）（防火），pp.83-84，1995.8

［４７］岡村義徳，堀内三郎，十倉毅，吉田正友，田坂茂樹，田中義昭：伝統的木造住宅における延焼防止に関する研究　その１　研究の概要および水膜実験，大会学術講演梗概集（北海道）（防火），pp.183-184，1995.8

［４８］田中義昭，堀内三郎，十倉毅，吉田正友，田坂茂樹，岡村義徳：伝統的木造住宅における延焼防止に関する研究　その２　実大模型火炎実験（平側一般部），大会学術講演梗概集（北海道）（防火），pp.185-186，1995.8

［４９］田坂茂樹，堀内三郎，十倉毅，吉田正友，岡村義徳，田中義昭：伝統的木造住宅における延焼防止に関する研究　その３　実大模型火炎実験（妻側および平側出格子部），大会学術講演梗概集（北海道）（防火），pp.187-188，1995.8

［５０］近藤弘，吉田正友，池田和博，山村登志久：トラス筋付合成スラブの耐火性能，大会学術講演梗概集（近畿）（防火），pp.27-28，1996.9

〔火災学会関係〕

［１］田坂茂樹，正法院陽三，藤川慧，吉田正友：火災時における合成床版のコンクリート内部温度に関する研究（その１）実験概要および測定結果，昭和６３年度日本火災学会研究発表会概要集，pp.85-88，1988.5

［２］吉田正友，正法院陽三，藤川慧，田坂茂樹：火災時における合成床版のコンクリート内部温度に関する研究（その２）測定結果，昭和６３年度日本火災学会研究発表会概要集，pp.89-92，1988.5

［３］吉田正友，岡村義徳，田坂茂樹：火害を受けたコンクリートの受熱温度推定に関する研究，平成４年度日本火災学会研究発表会概要集，pp.58-61，1992.5

［４］吉田正友，岡村義徳，田坂茂樹：火災時におけるコンクリート部材の内部温度分布特性について，平成５年度日本火災学会研究発表会概要集，pp.158-159，1993.5

［５］吉田正友，岡村義徳，田坂茂樹：火災後における鋼管コンクリート柱部材の残存耐力，平成６年度日本火災学会研究発表会概要集，pp.162-165，1994.5

［６］吉田正友，岡村義徳，田坂茂樹：火害を受けたコンクリートの受熱温度推定に関する研究　その２　火災事例への適用，平成７年度日本火災学会研究発表会概要集，pp.58-61，1995.5

〔その他〕

［１］坂井正美，宮本（吉田）正友，辻松宏：転炉風砕スラグのコンクリート用細骨材への適用性，日本鉄鋼協会第９９回講演大会講演概要集（“鉄と鋼”，'80-S148，p.148，1980.3），p.148，1980.4

［２］吉田正友：耐火試験時における合成床版のコンクリート内部温度に関する研究，（財）日本建築総合試験所・第３回研究発表会論文集，pp.1-4，1989.12

C．解説

〔建築技術〕

［１］吉田正友：耐火性能に関する法規制，特集・最近の鉄骨耐火構造・鉄骨耐火構造の高温性状，建築技術，No.542，pp.65-67，1995.6

［２］吉田正友：耐火試験法，特集・最近の鉄骨耐火構造・鉄骨耐火構造の高温性状，建築技術，No.542，pp.68-71，1995.6

〔ＧＢＲＣ〕

［１］田村博，吉田正友：海洋曝露したモルタル被覆鉄筋の非破壊腐食調査，ＧＢＲＣ No.33（試験・研究），pp.32-38，1984.1

［２］吉田正友，田坂茂樹，原田和典：火災時における合成床版のコンクリート内部温度に関する研究，ＧＢＲＣ　No.47（試験・研究），pp.36-47，1987.7

［３］佐久間仁，松村弘道，吉田正友：無耐火被覆鋼管コンクリート柱の耐火性能実験，ＧＢＲＣ　No.48（試験・研究），pp.12-24，1987.10

［４］吉田正友，園部敬：防火区画を貫通するエキスパンションジョイントの耐火性能試験，ＧＢＲＣ　No.49（試験・研究），pp.36-51，1988.1

［５］山口種美，吉田正友，田坂茂樹，計良光一郎，作本好文，千々岩力雄，片島昭：

高温強度特性に優れた建築構造用鋼材（ＦＲ鋼）を使用した実大柱の載荷加熱試験，ＧＢＲＣ　No.57（技術解説），pp.9-16，1990.1

［６］吉田正友：外断熱工法の防火性能試験，ＧＢＲＣ　No.62（試験・研究），pp.22-28，1991.4

［７］吉田正友：木製あるいは木質系防火戸の耐火試験について，ＧＢＲＣ　No.64（試験・研究），pp.21-25，1991.10

［８］岡田忠義，吉田正友，田坂茂樹，岡部猛，作本好文，山口種美：建築構造用耐火鋼材を使用したコンクリート充填鋼管柱の耐火性能，ＧＢＲＣ　No.65（試験・研究），pp.18-23，1992.1

［９］雑候良介，作本好文，山口種美，岡田忠義，吉田正友，田坂茂樹：建築構造用耐火鋼材を用いたコンクリート充填鋼管柱の熱容量特性に関する研究，ＧＢＲＣ　No.68（技術解説），pp.16-20，1992.10

［１０］作本好文，山口種美，岡田忠義，吉田正友，田坂茂樹：耐火塗料で被覆した耐火鋼柱の耐火性能，ＧＢＲＣ　No.68（試験・研究），pp.21-26，1992.10

［１１］吉田正友，岡村義徳，田坂茂樹：火災後における鋼管コンクリート柱部材の残存耐力，ＧＢＲＣ　No.75（試験・研究），pp.51-56，1994.7

〔**建築と社会**（（社）日本建築協会）〕

［１］田村　博，吉田正友：海洋暴露したモルタル被覆鉄筋の非破壊腐食調査（ＧＢＲＣニュース），建築と社会　Vol.64 通巻741号，p.31，1983.12

［２］吉田正友：火災時における合成床版のコンクリート内部温度に関する研究（ＧＢＲＣニュース），建築と社会　Vol.68 通巻785号，p.14，1987.8

［３］吉田正友：耐火試験時における合成床版のコンクリート内部温度に関する研究（コンクリートの種類の違いによる影響）（ＧＢＲＣニュース），建築と社会　Vol.70 通巻811号，p.33，1989.10

［４］吉田正友：高温強度特性に優れた建築構造用鋼材を用いた柱の載荷加熱試験（ＧＢＲＣニュース），建築と社会　Vol.71 通巻814号，p.46，1990.1

［５］吉田正友：外断熱工法の防火性能について（ＧＢＲＣニュース），建築と社会　Vol.72 通巻829号，p.22，1991.4

［６］吉田正友：建物の火害診断手法　－火害を受けたコンクリートの受熱温度推定方法－（ＧＢＲＣニュース），建築と社会　Vol.73 通巻849号，pp.14-15，1992.12

［７］吉田正友：建物の火災後の調査・補修　－ＲＣ造建物の火害の調査・補修方法－（特集　建築の再生－構造技術の役割－実施例１０），建築と社会　Vol.74 通巻857号，pp.52-53，1993.8

［８］吉田正友：火災後における鋼管コンクリート柱部材の残存耐力（ＧＢＲＣニュース），建築と社会　Vol.76 通巻875号，p.26，1995.2

〔その他〕

［１］坂井正美，吉田正友，中村信行，池内咬隆，辻松宏，小林延郎：鉄鋼スラグの建設材料への適用－高炉スラグおよび転炉風砕スラグ－，日本鋼管技報　No.94，pp.50-62，1982

［２］吉田正友：外断熱工法の防火性能試験について，外断熱工法研究セミナー・外断熱工法に関する最近の動向（情報開発），pp.1-20，1986.6

［３］吉田正友：大規模建築物と防火区画のあり方（大会防火部門研究協議会），建築雑誌，Vol.104，No.1282，pp.52-53，1989.2

［４］吉田正友：耐火実験について，近畿支部・鉄骨構造部会平成元年度研究会資料集・第２回部会「耐火設計」，pp.55-81，1989.9

D．著書

［１］寺井俊夫（代表者），原田和典，松下敬幸，正法院陽三，十倉毅：耐火試験時のコンクリート床内の熱及び水分同時移動に関する研究，昭和６２年度文部省科学研究費補助金研究成果報告書（試験研究（１）Ｎｏ．６１８５０１０７），pp.1-270，1988.3

（内、吉田正友（担当）：第２章　耐火試験の問題点，pp.47-61）

［２］若松孝旺，牟田紀一郎，熊谷敏男，吉田正友，他：防火区画の設計・施工パンフレット，pp.1-135，1990.12

E．その他

［１］M.Yoshida:Fire-resistant construction,Seminar on Fire Safety in

Buildings cooperated by the National Association of Indonesian Consultants(INKINDO), Bandung and Surabaya in Indonesia, pp.1-32, 1992.10 and 1992.11

謝　辞

私の博士論文作成に当たっては、私の出身大学及び同大学院修士課程の恩師である大阪大学教授・鈴木計夫博士に懇切な御指導・御助言を頂き、誠に感謝の念に絶えません。鈴木博士は人格高まいにして、識見高く、私の論文作成に対して心温まる激励を終始、賜りましたことをさらに感謝申し上げます。また、大阪大学教授・井上豊博士及び同大学教授・橘英三郎博士には、本論文に目を通し、有益な御指摘を頂き、誠に有難うございました。同大学鈴木研究室助教授・大野義照博士、同研究室講師・中塚佶博士には御助言を頂き、大変感謝致します。

私が、日本鋼管（株）を円満に退社し、（財）日本建築総合試験所に勤務する際には（昭和５７年４月）、（財）日本建築総合試験所前顧問・故奥島正一博士（元：（財）日本建築総合試験所所長、大阪大学名誉教授）ならびに（財）日本建築総合試験所理事長・五十嵐定義博士（大阪大学名誉教授）には絶大なる御協力を頂きました。奥島博士は私の大学当時の恩師であり、終始今日に至るまで御指導・助言を頂き、この場で改めて御霊前に感謝申し上げます。また、五十嵐博士は私が日本鋼管（株）に就職する時の主任教授であり、就職に際しては、御面倒をおかけしたことをこの場を借りて改めてお礼申し上げます。

本研究に着手しましたのが、昭和６１年より文部省科学研究費（以下、科研と呼ぶ）のお手伝いを始めた時であります。それまでは、耐火の研究には全く手を着けておらず、科研を通して、近畿大学教授・寺井俊夫博士（京都大学名誉教授）に最初にご指導、御助言を頂きました。その後、寺井博士には、現在に至るまでも有益な御助言を頂いておりますことを心より御礼申し上げます。また、建設省建築研究所第５研究部主任研究員・原田和典博士（前：京都大学助手）が（財）日本建築総合試験所在職時には、実験の実施の御協力を頂きました。原田博士が京都大学へ移られてからは、私の研究に対する御助言を終始頂き、感謝の念に絶えません。

その後、受熱温度推定の研究につきましては、関西保温工業㈱下手敏勝氏、林晴雄氏、今井弘氏らの実験に対する甚大なる御協力を得て、実行できました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

（財）日本建築総合試験所の元理事長・故前田敏男博士を始め、顧問・横尾義貫博士（前理事長）、顧問・若林實博士（前所長）、所長・正法院陽三氏、副所長・俣野善治氏、品質保証センター長・室田達郎氏、建築物理部部長・十倉毅博士、材料試験室室長・田村博博士、品質管理室室長・上田哲夫氏をはじめ多くの方々より有益な御助言及び示唆を頂きました。ここに厚く感謝の意を表します。

また、耐火試験及び火害調査の実施に当たっては、耐火防火試験室の専門役・藤川慧氏、

主査・田坂茂樹氏、主査・岡村義徳氏、田中義昭氏、山本幸一氏をはじめ、環境試験室室長代理・倉橋岩夫氏、大淀試験室・園部敬氏、オモテ製作所・表弘氏らの皆様の甚大なる御協力を頂き、ここに厚く感謝致します。

建築学会、火災学会、各種委員会等の場では、千葉大学名誉教授・斎藤光博士（日本大学教授）、同大学助教授・上杉英樹博士、建設省建築研究所基準認証研究センター長・中村賢一博士、同センター・増田秀昭主任研究員、前同センター長・鈴木弘昭博士をはじめ多くの方々より有益な示唆を頂き、誠に有難うございました。

第２編の実験データの御提供を頂いた前田建設工業（株）、植木鋼管（株）及び（株）ナルックスの各社の方々に深く謝意を表します。

最後に、私の妻・智子及び長男・悠起には論文作成のために休日の家族サービスを満足にしてやれず、多大の迷惑をかけました。それにもかかわらず、智子は私の健康を案じつつ、私の論文に対しても有意義な助言を頂き、そして、暖かく見守って頂いたことに深く感謝致します。

以　上

Appendix　阪神淡路大震災における コンクリート系材料を使用した 建物の火害特性

1．はじめに
2．調査目的
3．調査方法
4．調査結果及び考察
5．まとめ

1．　はじめに

1995年1月17日午前5時46分、未曽有の地震は筆者を震感たらしめた。兵庫県の淡路島北端を震源域（マグニチュード：7.2）とする直下型大地震（兵庫県南部地震）が発生した。神戸市を中心として死者5,500人を越え、家屋の全半壊は20万棟を越えた。火災についても、200件を越える火災が発生し、70万㎡に及ぶ焼失面積と700棟を越える焼失家屋の被害がもたらされ、350人（圧死：約９割、焼死：約１割）を越す焼死者が確認されている。神戸市だけで、焼失面積65万㎡、火災件数176件であった。この火災の半数は地震から１時間以内に集中し、ガス洩れや電気系統からの出火が断続的に続いた。地震に伴う大火災は予想をはるかに越え、都市の脆さを露呈せしめた。火災に対する木造の脆弱さ、Ｓ造の脆さ、これらに比し、ＲＣ造は区画が保持されれば、火災に対して耐えることが証明された。

今回の被害は関東大震災には及ばないものの、それに匹敵する歴史的な災害となった。今回の地震が、防火研究の歴史を書き換えるだけの重みを持ったものであるという認識に立って、関東大震災の教訓から発展してきた防火の見直しを図る必要に迫られていると考えられる。新しい防火の観点を切り開くために、阪神・淡路大震災におけるコンクリート系材料を使用した建物の火害特性について筆者が調査した結果を述べる。大地震時における火害診断方法を考える上で重要な基礎的資料となるものと考えられる。

2．　調査目的

火災に関する本震災の調査は各種実施されているが、ＲＣ造に重点を置いた被害特性の調査はあまり見当たらない。今まで実施されてきた調査は、焼け止まり、延焼速度の調査である。本調査は、阪神淡路大震災で発生した火災によるコンクリート系建物（主にＲＣ造）の火害診断の観点から行った。

3．　調査方法

今回の地震では、密集市街地の火災でＲＣ造を中心とする耐火建築物が容易に類焼を受け、その窓から噴出する火炎がすさまじく、隣接する建物への延焼を助長したという指摘がある。市街地火災を起こした地域は、いずれも防火地域または準防火地域の指定を受け

ており、地域指定される以前に建てられた既存不適格の木造建物が多く密集し、その周囲に耐火または簡易耐火建築物が配置されていた。地震によって、開口部が破損し、開口部より火炎が流入し、耐火建築物を激しく燃焼させたと考えられる。

また、ＲＣ造などの耐火性のある建物でも、長時間の火炎により水平区画部材の床などは耐えられず、上階で自然発火したと考えられるケースもあり、本来、防火区画を構成すべき部材も市街地火災という大規模な火災には、脆弱であることが分かる。このような観点から、市街地火災を代表していると考えられる神戸市に限定し、東灘区（青木駅南、魚崎北５・６丁目）、長田区（御蔵通り５・６丁目、高橋病院周辺、水笠西公園）及び須磨区（千歳小公園、水笠西公園）の各地域について、火害を受けたコンクリート系材料を使用した建物について、その火害特性について調査した。調査は、平成７年１月２８日、２月４日、同月１５日、同月１９日及び４月２日の計５日間（公的１回、私的４回）にわたり実施した。被災建物内に立ち入ることはできなかったため、調査手段はもっぱら建物の外側から、目視観察によりコンクリートの変色状況を主に調べ、ひびわれ、変形等の有無を調べた。従って、コンクリートのサンプルは採取できなかったため、筆者の提案したGBRC法による受熱温度の推定は行わなかった。

４．　調査結果及び考察

４．１　青木駅南（東灘区）

平成７年１月２８日、図1[1]に示す阪神電鉄青木駅南地域を調査した。この地域は地震直後出火し、6991㎡が焼失した[1]。写真1～3は青木駅周辺の火害状況である。この地域は商店街を中心に木造建物が密集していた。東側は道路で燃え止まっている。主なコンクリート系建物の被害状況は以下の通りである。

（１）写真4のＳ造の建物は３、４階が延焼している。この原因は、恐らく、３、４階に開口部が多かったため、延焼したものと考えられる。開口部周囲のＡＬＣ製外壁には炎の噴出跡とみられるすすが付着している。

（２）写真5に示すＳ造建物外側の仕上げモルタルにはひび割れが認められ、ガラスが割れている開口部周囲には炎が噴出したとみられるすすの付着が認められている。１階内部は完全に焼失し、コンクリートブロック造外壁内部の仕上げモルタルが加熱により部分的に剥落が認められた（写真6参照）。表面は部分的にすすが付着していたが、ほとんど灰白色

に変色し、コンクリートの変色状況より、600～950℃の受熱温度を受けたと考えられる[2]。

（３）写真7のＲＣ造建物は内外両面に、すすが付着し、コンクリートの変色状況より、300℃以下の受熱温度と考えられる[2]。

４．２　魚崎北町５・６丁目（東灘区）

平成７年２月４日、魚崎北町５・６丁目地域を調査した（図2[1]参照）。この地域は１月１７日１４時半頃出火し、10,388m²が焼失した[1]。写真8は魚崎北町５・６丁目の火害状況である。この地域も商店街を中心とした、木造が密集している街である。主なコンクリート系建物の被害状況は以下の通りである。

（１）耐火建築物はそれほど多く見受けられず、木造周囲のＳ造、もしくはＲＣ造の建物で燃え止まっており、それらの建物外壁表面にはすすが付着していた。

（２）写真9に示すＲＣ造と思われる建物はピンク色を呈し、変色状況より、300～600℃程度の受熱温度を受けたと考えられる[2]。開口部のガラスは割れ、内部へ延焼したが、２階部分への延焼はひさしで防がれている。

（３）写真10に示すＳ造建物も開口部が破壊し、内部へ延焼した。ＡＬＣ製壁には、すすが付着しており、受熱温度は300℃以下で[2]、比較的低かったと考えられる。

（４）写真11は魚崎北町付近のマンション（７階建て）の２階付近から出火した事例である。ベランダの下部ひさしの仕上げが一部落下し、ひび割れが亀の子状に発生している。一部ピンク色に変色し、約600℃程度の受熱温度と推定された[2]。しかし、上階の壁・ひさしはすすが付着し、約300℃以下と推定され[2]、隣戸への延焼はなかった。

４．３　御蔵通５・６丁目（長田区）

平成７年２月15日、UJNR（日米天然資源に関する日米合同会議）日米合同調査のお手伝いで、アメリカ側Dan Madrzykowski（防火チームリーダー、NIST（国立標準技術研究所））及びEdward Comeau（NFPA（国立防火協会））とともに、御蔵通５・６丁目地域を調査した（図3[1]参照）。この地域は地震直後出火し、22,397m²が焼失した[1]。写真12にこの地域の被害状況を示す。主なコンクリート系建物の被害状況は以下の通りである。

（１）Ｓ造建物が多く、地震によるＳ造の破壊に伴い、ＡＬＣ製外壁が破壊し、その部分から延焼した（写真13参照）。

（２）写真14に示すＲＣ造建物は地震により多少の被害を受けたものの、開口部に網入りガラスが挿入され、火災による延焼が防がれたと考えられる。外部の仕上げモルタルが爆裂等により脱落している箇所が多数見受けられる。

（３）写真15に示すＲＣ造建物は地震により大破し、そのため開口部が破損し、全焼した。コンクリート表面が灰白色を呈している箇所が多く、受熱温度は600℃～950℃と高温であったと考えられる[2]。

（４）写真16に示すＳ造建物はＡＬＣ製外壁隅角部がピンクもしくは灰白色を呈し、300～950℃と広範囲にわたる受熱温度であったと考えられる[2]。

４．４　高橋病院周辺（長田区）

平成７年２月19日、高橋病院周辺地域を調査した（図4[1]参照）。この地域は地震直後出火し、68,850㎡が焼失した[1]。写真17にこの地域の被害状況を示す。主なコンクリート系建物の被害状況は以下の通りである。

（１）この地域では、補修を行い、再使用を始めているＲＣ造の建物が見受けられた（写真18、19参照）。

（２）Ｓ造建物は地震によりＡＬＣ外壁が被害を受け、内部へ延焼が拡大している（写真20、21参照）。

（３）写真22及び23に示すＳ造建物は上階より延焼した。これは大火災特有の現象と考えられる。

（４）写真24に示すＳ造建物は完全に破壊し、写真25に示すＳ造建物は開口部より延焼した。

（５）写真26に示すＳ造建物のＡＬＣ外壁が著しい燃焼により大きな被害を受けた。

（６）写真27では、ＲＣ造建物の隣のＳ造建物が延焼し、ＲＣ造建物は焼け残っている。

（７）写真28に示す遠方のＲＣ造建物は残っている。

（８）写真29に示すＲＣ造建物外壁面はピンク色または灰白色に変色し、300～950℃と広範囲の受熱温度であったと推定される[2]。

（９）写真30に示すＲＣ造マンションは延焼を受けたが、燃え残っている。

（１０）写真31に示すＲＣ造建物は開口部より延焼した。

４．５　千歳小公園（須磨区）及び水笠西公園周辺（長田区・須磨区）

平成７年２月19日、千歳小公園及び水笠西公園周辺地域を調査した（図5[1]参照）。水笠西公園周辺地域は１月17日午前７～９時頃出火し、121,783㎡が焼失した[1]。また、千歳小公園周辺地域は１月18日午前11時頃出火し、1,592㎡が焼失した[1]。他の地域と同様、建物の構造は木造が最も多く、Ｓ造、ＲＣ造と続く。木造建物は倒壊により出火し、ほぼ全焼したと考えられる。開口部が破壊したＲＣ造建物は被害を多くした（写真32及び写真33参照）。Ｓ造建物は地震により外壁のＡＬＣが破壊し、延焼を拡大した（写真34参照）。主なコンクリート系建物の被害状況を以下に示す。

（１）写真34の４番目の写真に示されている右側の建物は１階が延焼したが、すぐ消火されるとともに、内部の区画部材によって延焼が阻止され、唯一健全に残っている。

（２）写真35及び写真36に示すデッキ・プレートを捨て型枠とした合成床版は火災の加熱によるたわみが顕著である。

（３）写真37に示すＲＣ造建物のひさしは亀の子状のひびわれが顕著に認められている。

（４）写真38に示すＲＣ造建物の開口部に挿入されている網入りガラスは延焼を防いだことが分かる。

（５）写真39に示すＲＣ造建物は地震により崩壊し、火災の拡大につながった。

４．６　新長田駅南（長田区）

平成７年４月２日、新長田駅南地域を調査した（図6[1]参照）。この地域は地震直後出火し、39,570㎡が焼失した[1]（写真40参照）。この地域は工場の全焼被害が多い。主なコンクリート系建物の被害状況を以下に示す。

（１）火害が甚だしいＲＣ造建物が多く見受けられ、長時間の火熱により、床が区画部材として性能を十分に発揮できず、上階へ延焼した例も認められる。地震による被害で、さらに火害が大きくなったケースも見受けられる（写真41参照）。

（２）Ｓ造建物に関しては地震によりＡＬＣが被害を受けたため、さらに火災による被害が大きくなっている（写真42及び写真43参照）。

４．７　御蔵通５・６丁目及び菅原変電所周辺（長田区）

菅原変電所周辺及び御蔵通５・６丁目の各地域は平成７年４月２日に調査した（図3[1]参照）。これらの地域は地震直後出火し、54,900㎡（菅原変電所周辺）、22,397㎡（御蔵通５・６丁目）がそれぞれ焼失した[1]。これらの地域の被害状況を写真44及び写真45に示

す。これらの地域も他の地域と同様、S造建物の火災の被害が多く（御蔵通５・６丁目は写真46、菅原変電所周辺は写真47をそれぞれ参照）、ＲＣ造建物についても地震による倒壊で、火災の被害が大きくなったものも見受けられる（写真48参照）。

５．　まとめ

阪神・淡路大震災におけるコンクリート系材料を使用した建物の火害特性について調査したが、その結果を以下に要約する。

（１）地震による被害を受けたＲＣ造建物は耐火性が劣り、火災の被害を助長した。その反面、地震による被害を受けていない場合には耐火性は確保されている。開口部が防火上弱点とならないような網入りガラス（乙種防火戸相当以上）が挿入されている場合には延焼防止効果を十分に発揮したと考えられ、補修により再使用可能なケースもある。

（２）ＲＣ造建物で爆裂によると見られるコンクリートまたはモルタル等の脱落はほとんど認められず、火害によると思われるひびわれがコンクリートまたはモルタル表面に多数見受けられた。

（３）耐火建築物に延焼しても、内部の防火区画によって市街地火災の延焼を阻止したケースも多数あったが、その反面、長時間の火熱により区画部材の耐火性が失われ、隣の区画で自然発火し、延焼したケースもあった。

（４）中高層建物においては１、２階が延焼を受けていないのにもかかわらず、３階以上が延焼している例も見られた。これは、大地震特有の火災現象と考えられる。

（５）外壁にＡＬＣが用いられているＳ造建物については、地震により外壁の破損が著しく、それらの部分からの延焼により、火災を拡大したケースが多く認められた。

（６）適切な隣棟間隔がある場合は、耐火建築物の開口部からの噴出火炎による延焼の危険性はなく、延焼を阻止した。

以上の通り、阪神淡路大震災によるコンクリート系建物の火害特性を端的に述べることは難しい。本震災の場合は、本来のＲＣ造が保有している耐火性能以上に長期の加熱を受けたと考えられる。現行の耐火規定では、地震と火災とが複合した場合の耐火性能については配慮されておらず、今後の耐火規定の課題であると考えられる。

参考文献

［１］北後明彦：兵庫県南部地震時に発生した火災の延焼状況、平成７年度火災学会講演討論会テキスト「地震と火災」、日本火災学会、pp.7-24、1995.5

［２］長友宗重、他：既存建物の耐力診断と対策、鹿島出版会、pp.88-90、1978.6

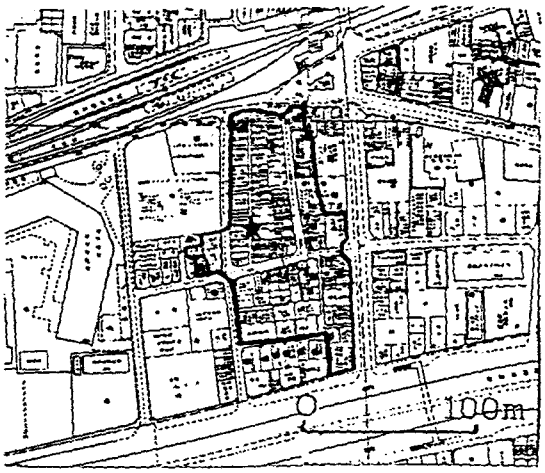


図1　青木駅南（東灘区）

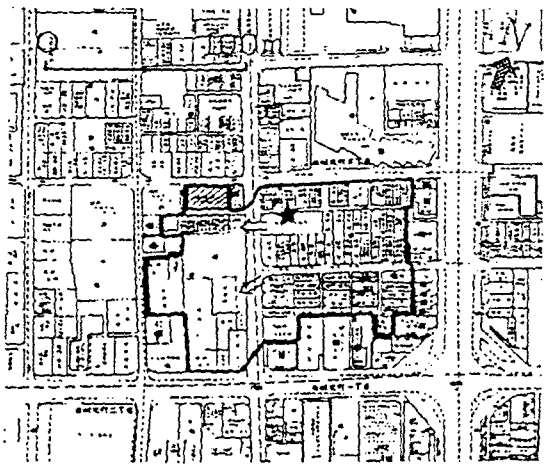
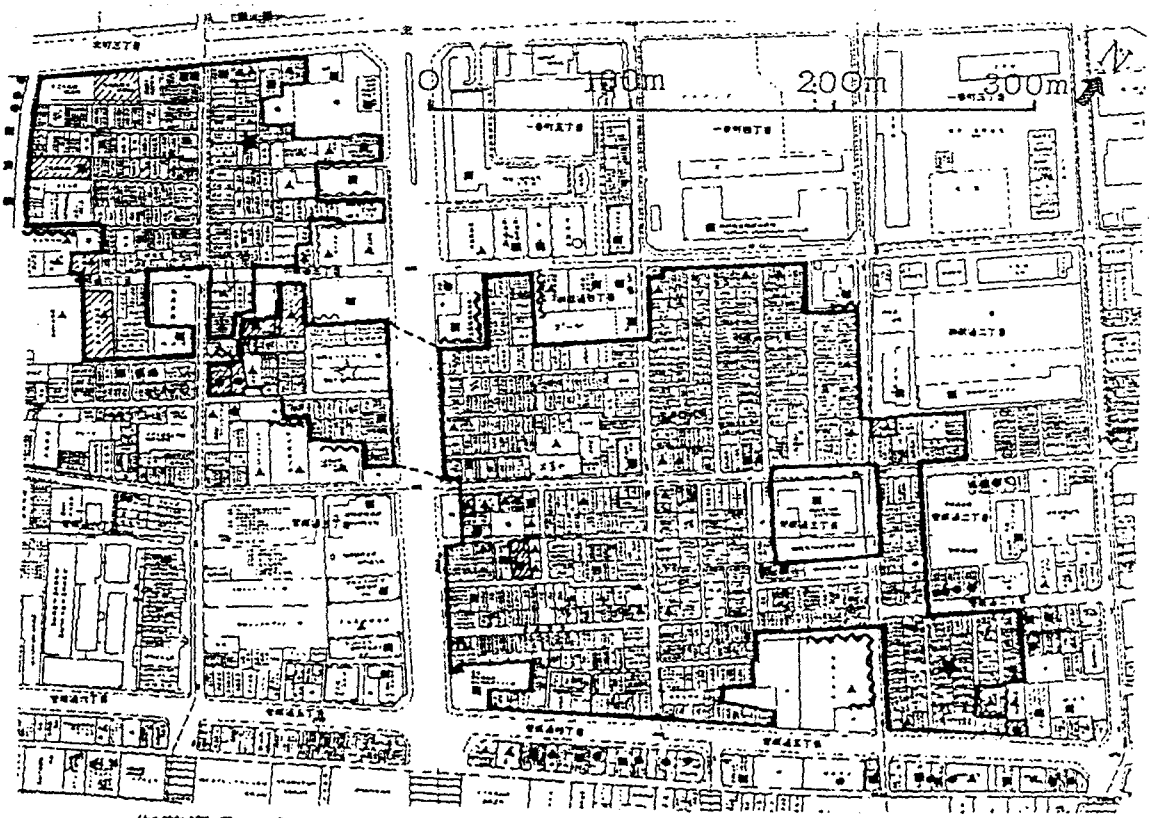


図2　魚崎北町５・６丁目（東灘区）



御蔵通５・６丁目（長田区）　　菅原変電所周辺（長田区）

図3　御蔵通り５・６丁目及び菅原変電所周辺（長田区）

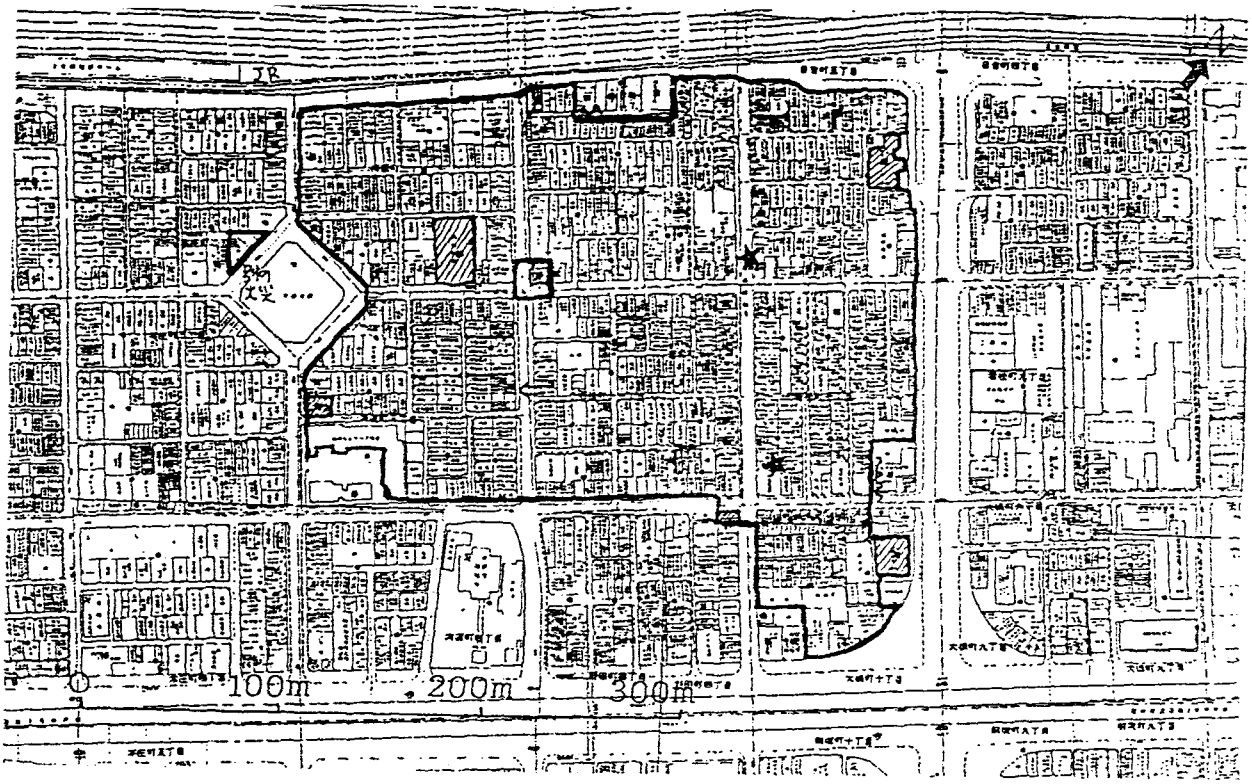
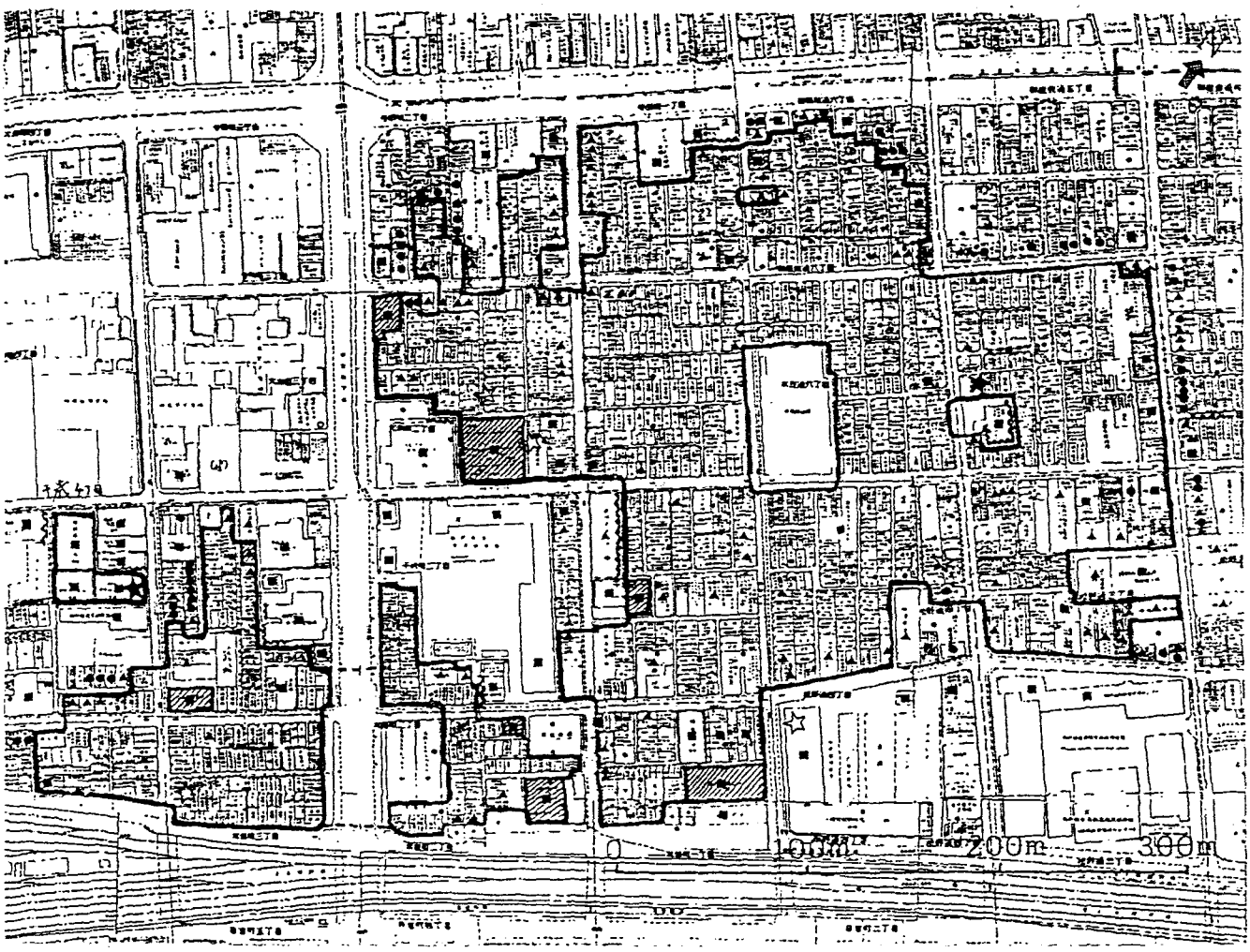


図4　高橋病院周辺（長田区）



千歳４丁目（須磨区）　　水笠西公園周辺（長田区・須磨区）

図5　千歳４丁目及び水笠西公園周辺

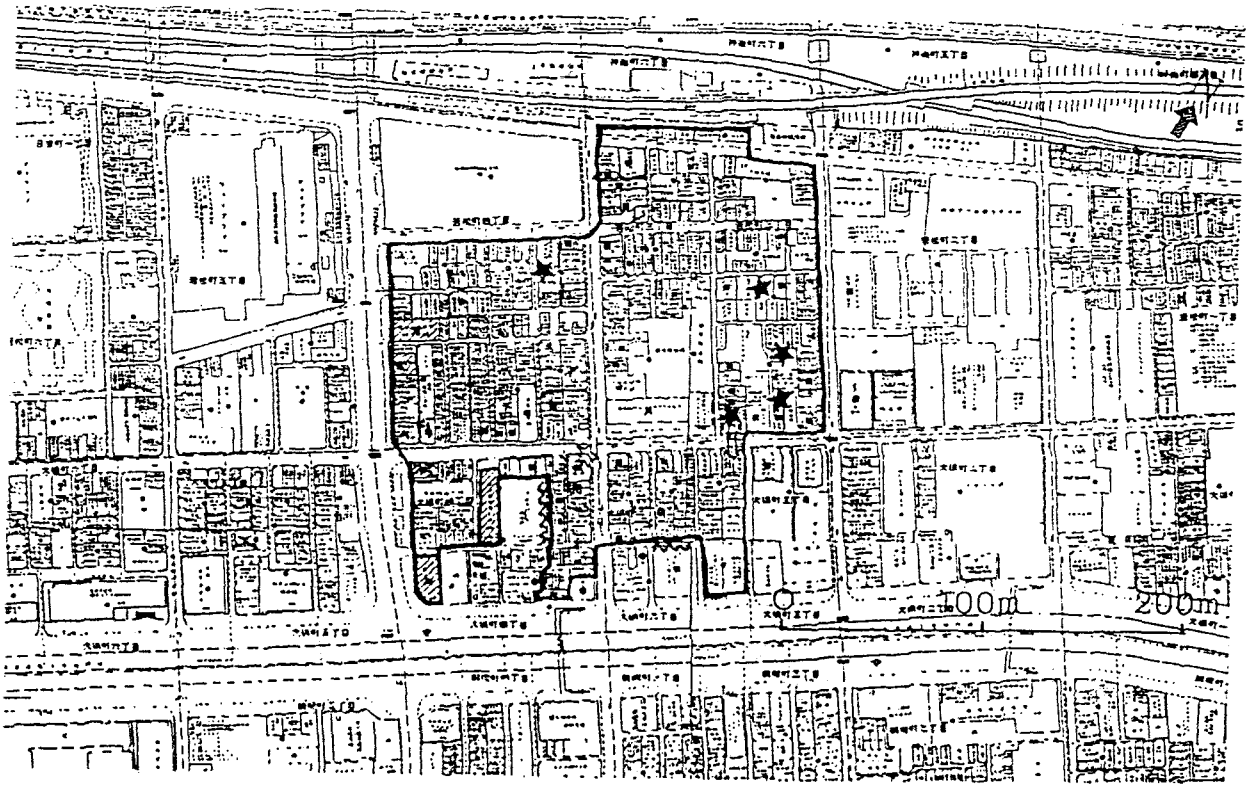


図6　新長田駅南（長田区）



写真1　青木駅南地域（青木駅を背景に南東側方面）

写真2　青木駅南地域（西側方面）



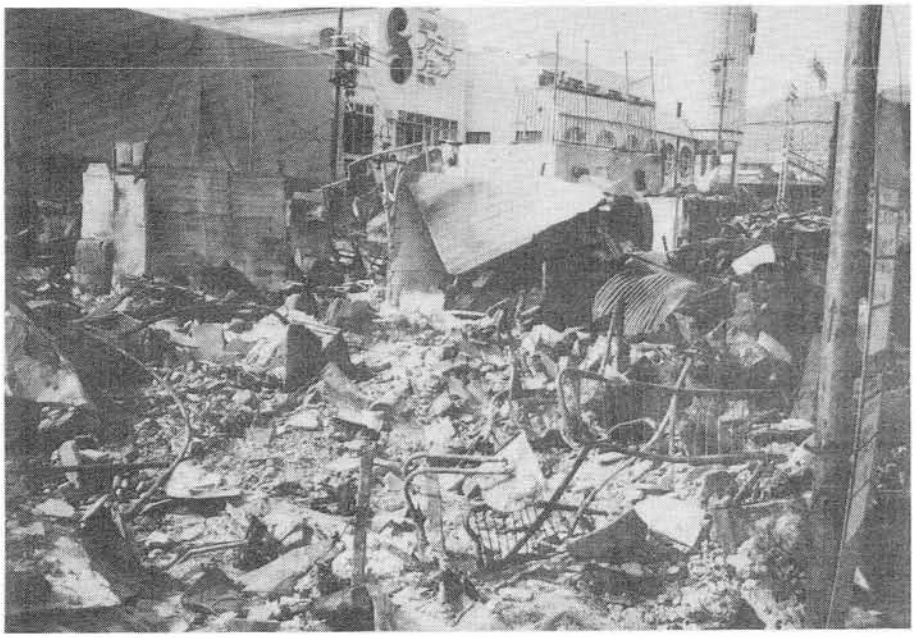
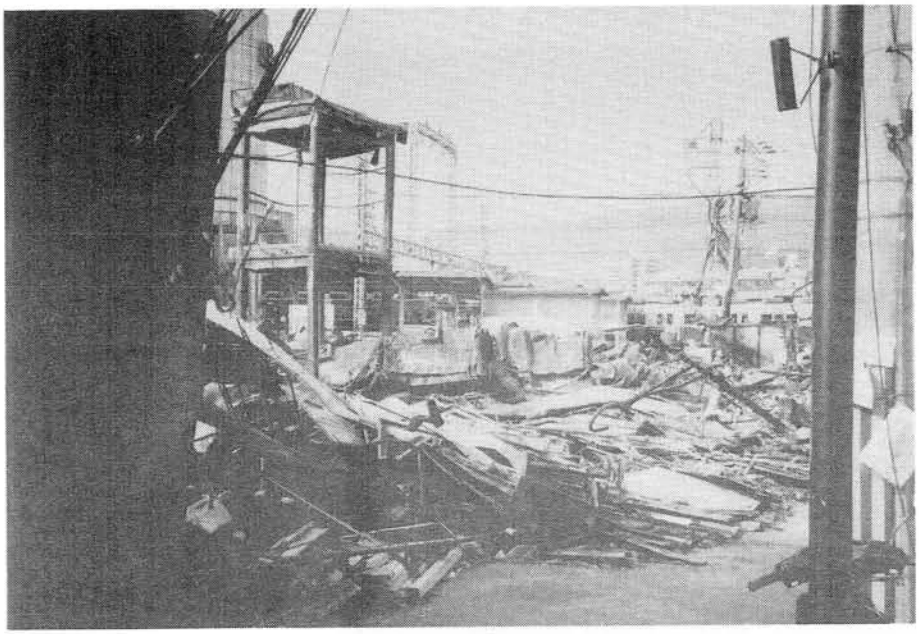
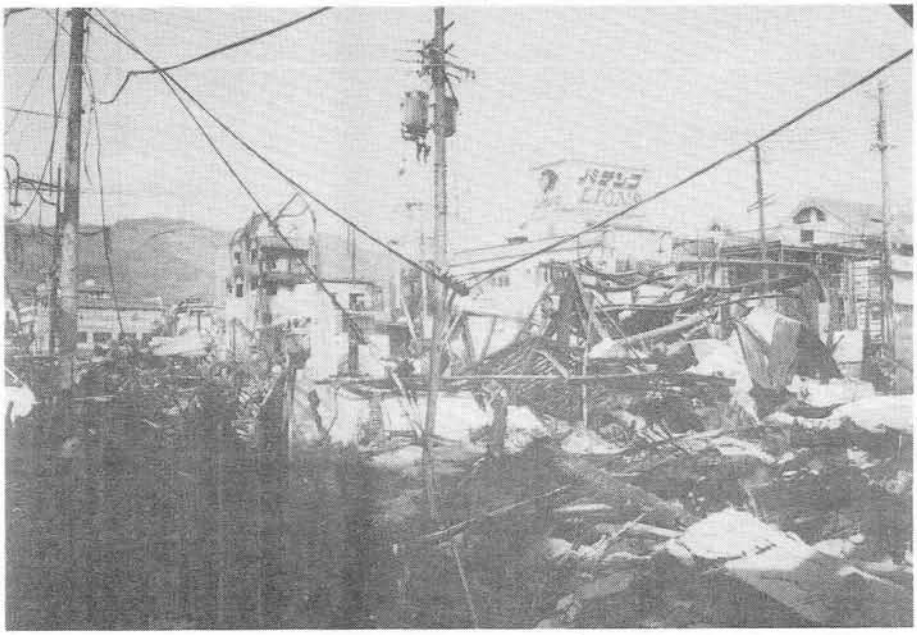




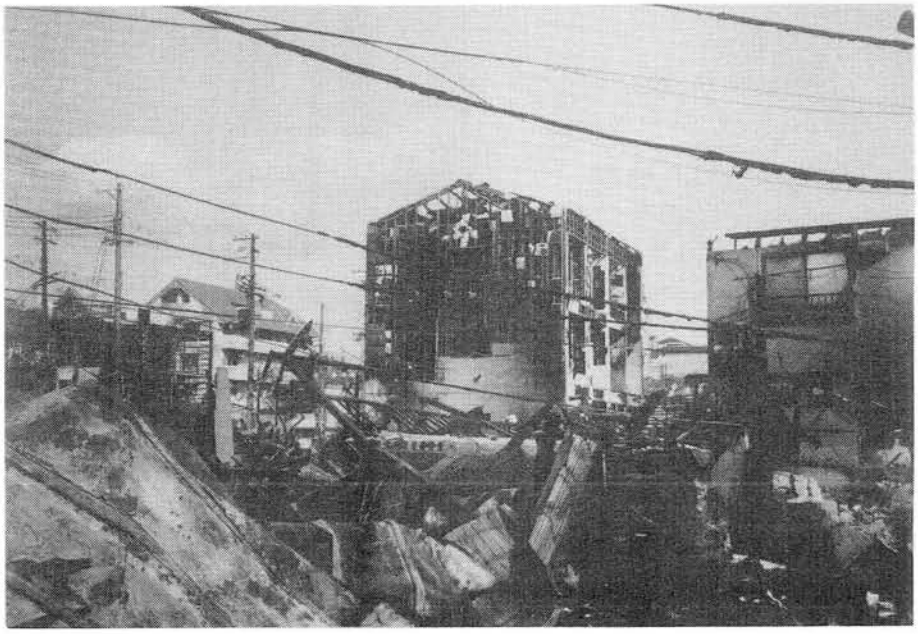
写真3　青木駅南地域（全景）



（駅方面）



（北東方面）



（南側より北東方面）

写真4　青木駅南地域（４階Ｓ造建物）



写真5　青木駅南地域（３階Ｓ造建物）

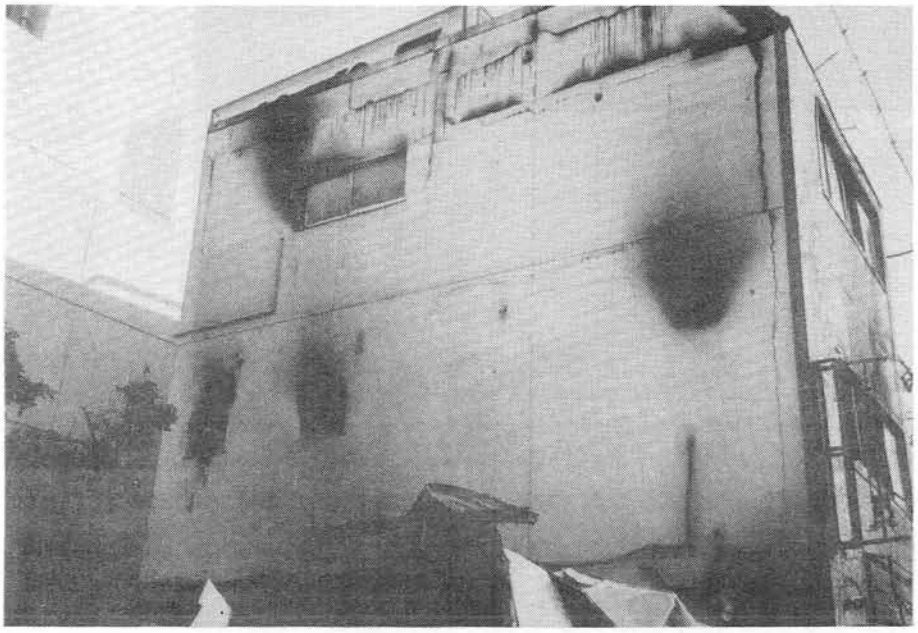
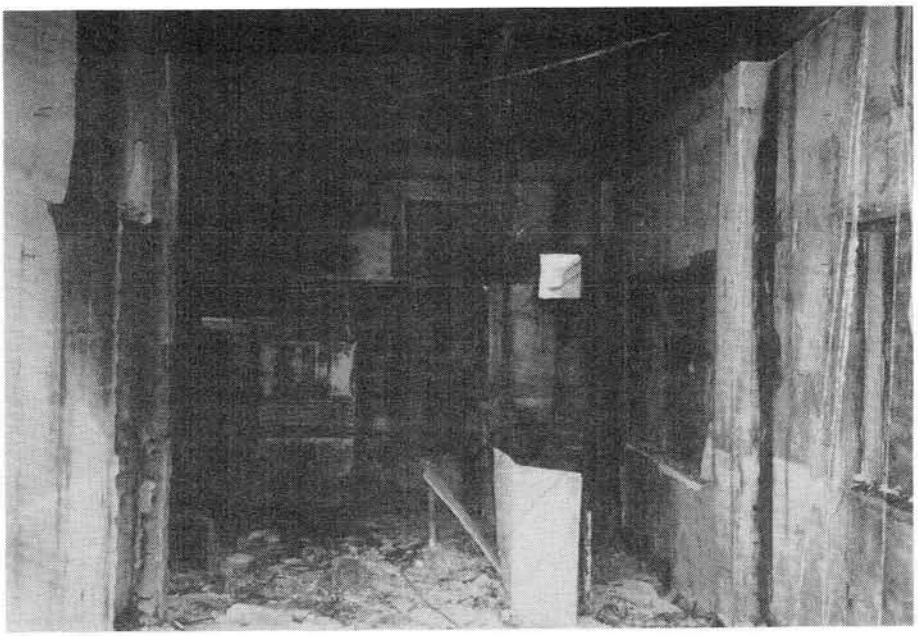
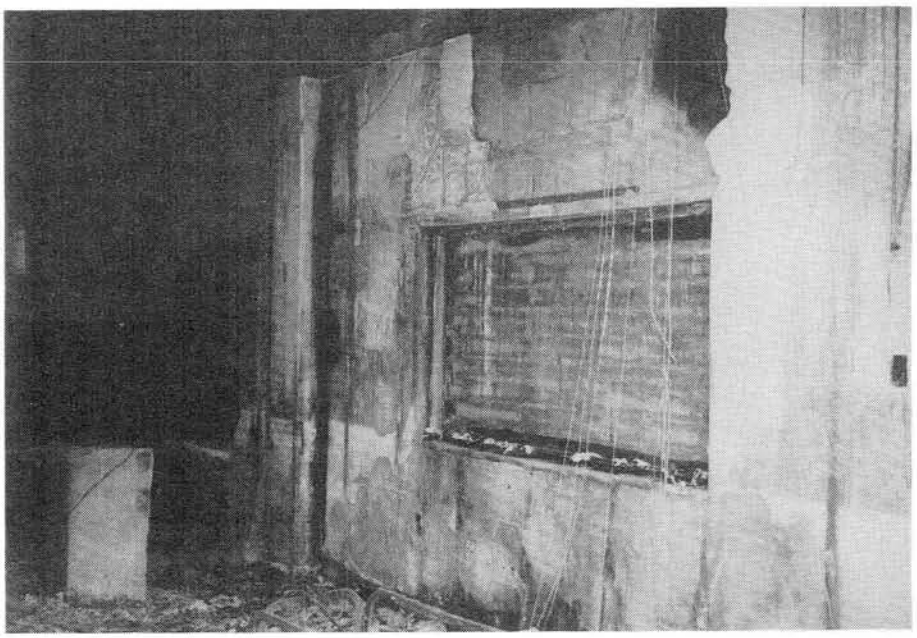


写真6　青木駅南地域（写真4の建物の内部状況）





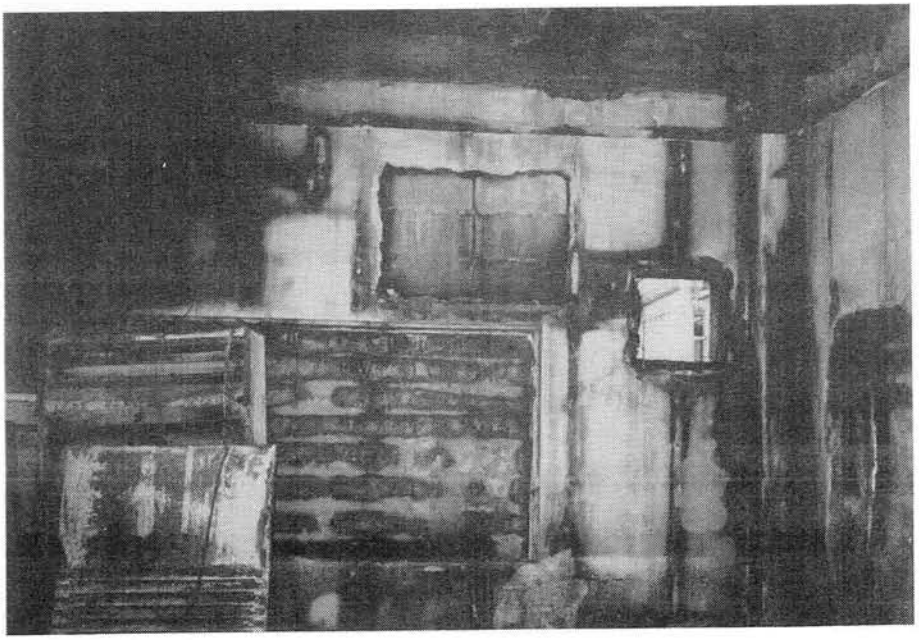
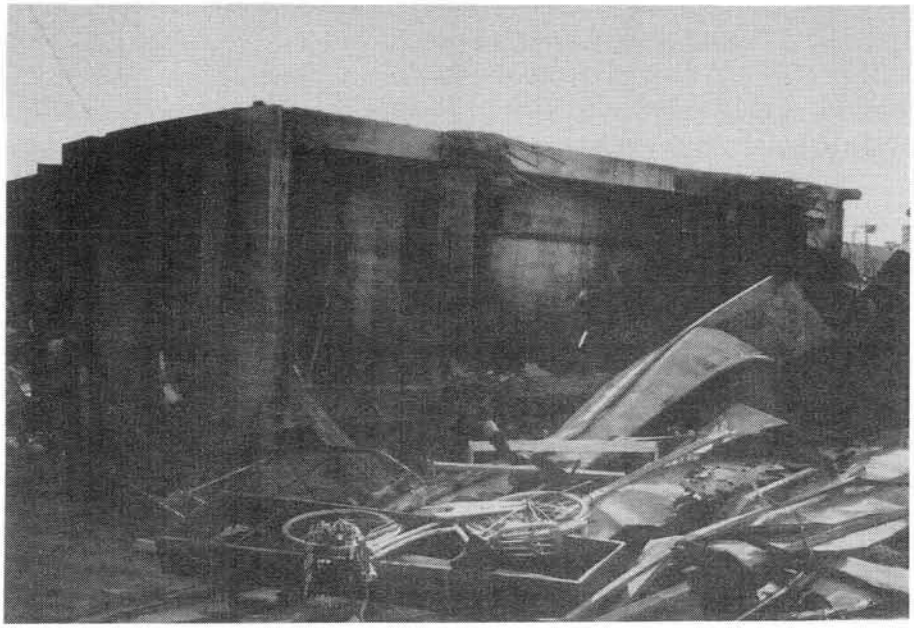
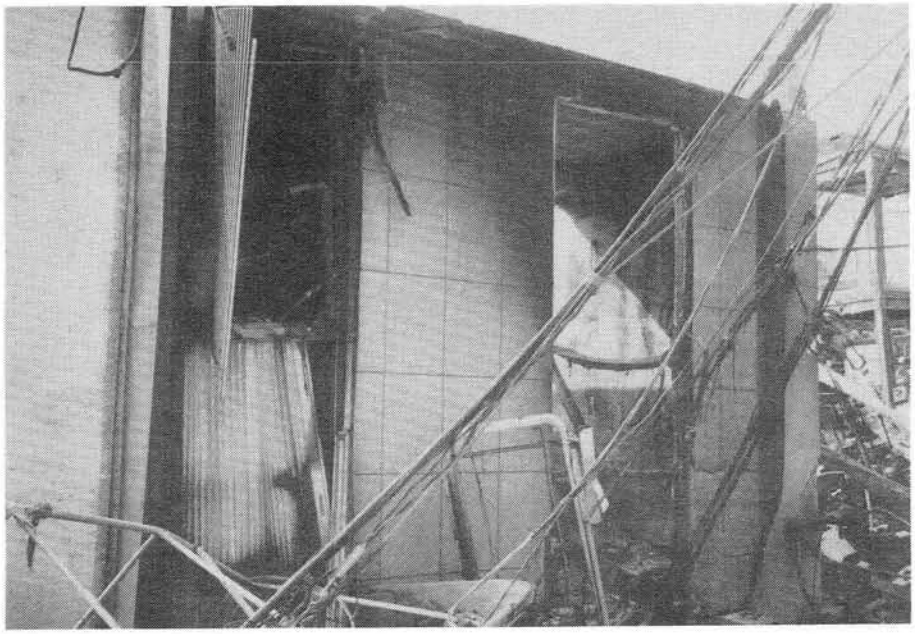


写真7　青木駅南地域（ＲＣ造建物）





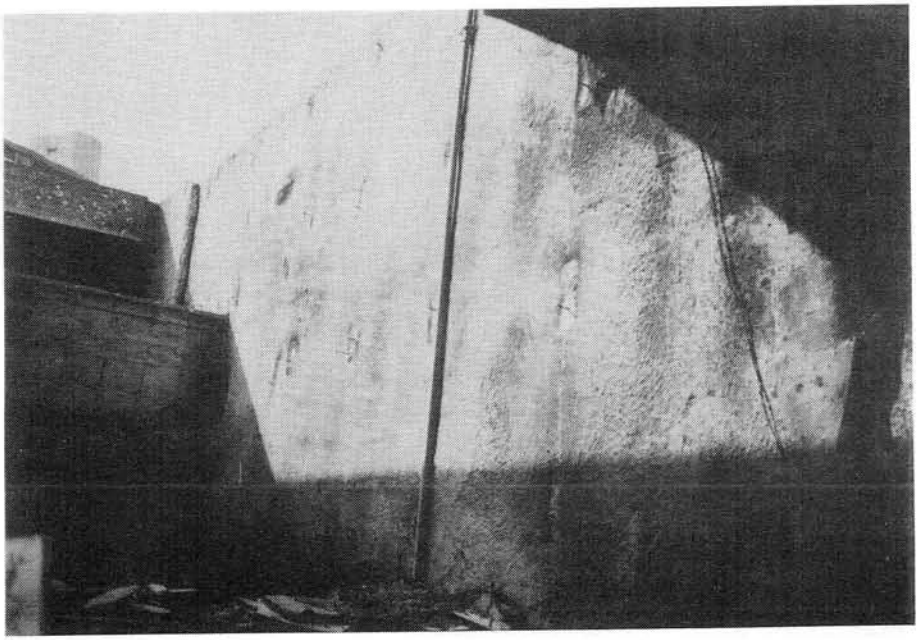


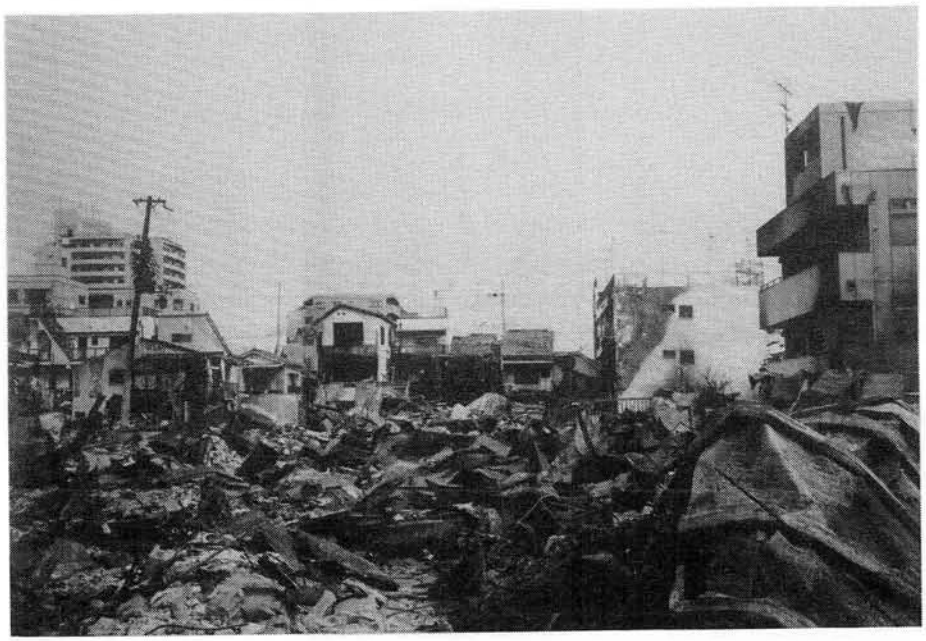
写真8　魚崎北町５・６丁目地域（全景）



（南東側）



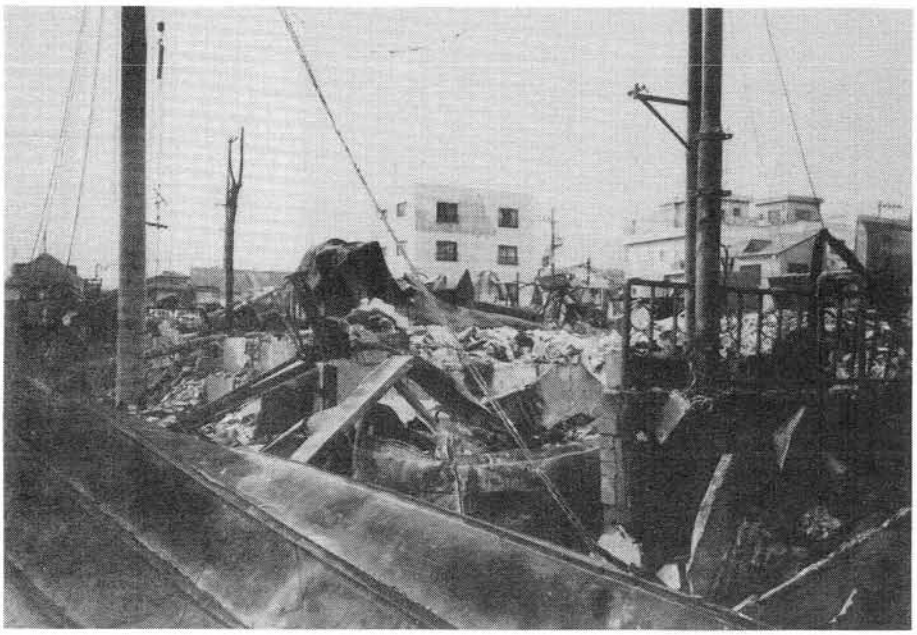
（東側）



（東側）



（北東側）



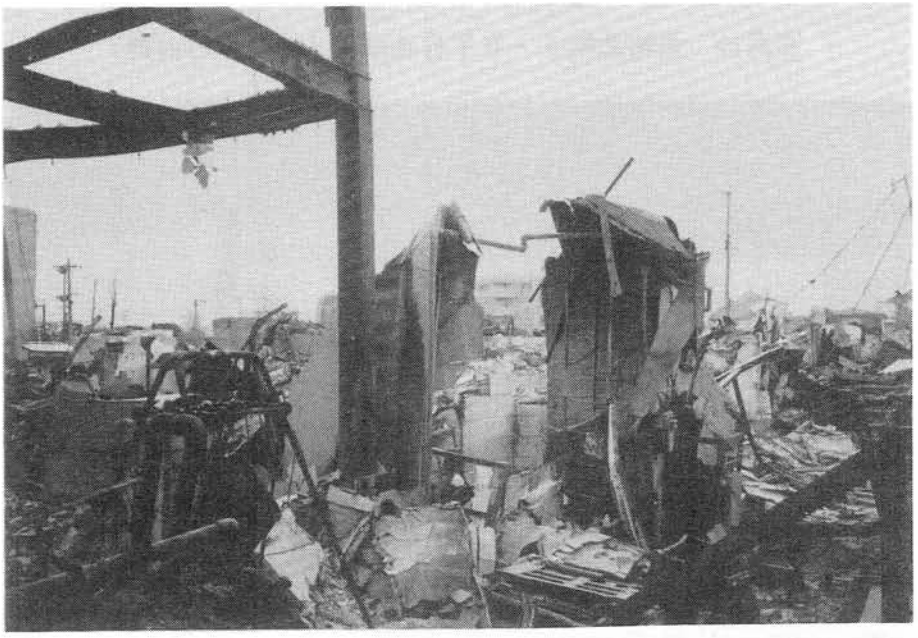
（北東側）



（西側）



（東側）



（東側）

写真9　魚崎北町５・６丁目地域（北側のＲＣ造建物）

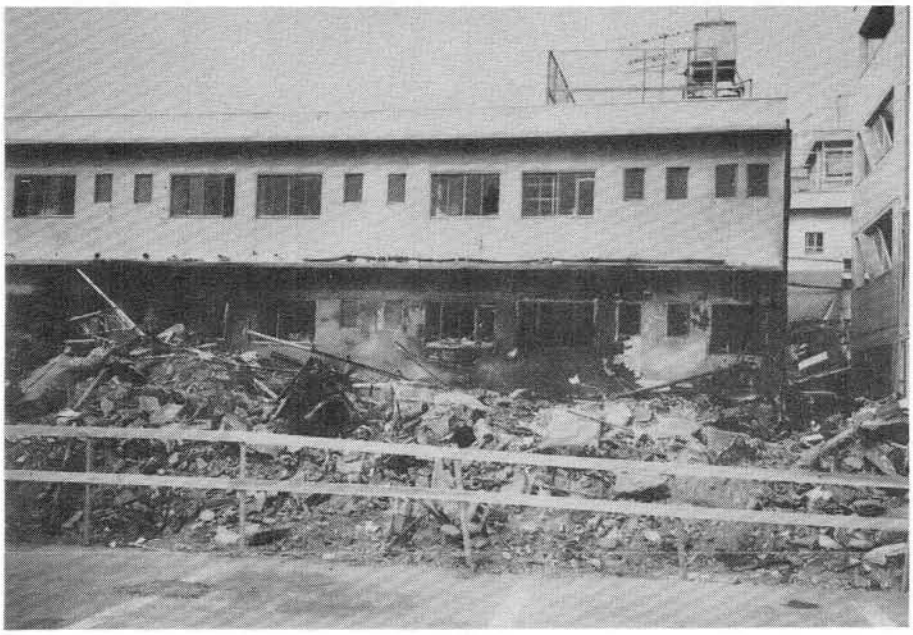
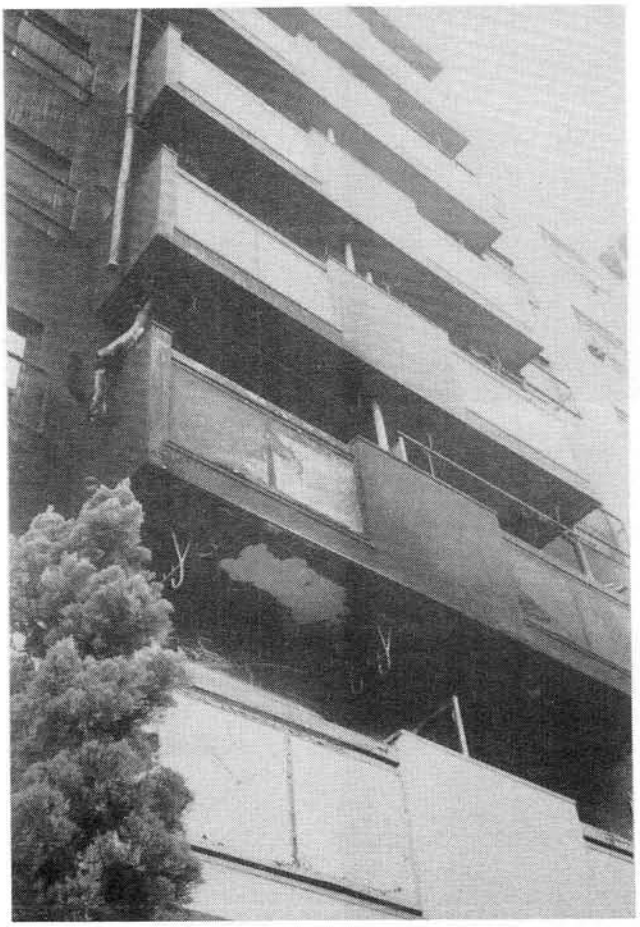


写真10　魚崎北町５・６丁目地域（Ｓ造建物の内部）



写真11　魚崎北町付近のマンション





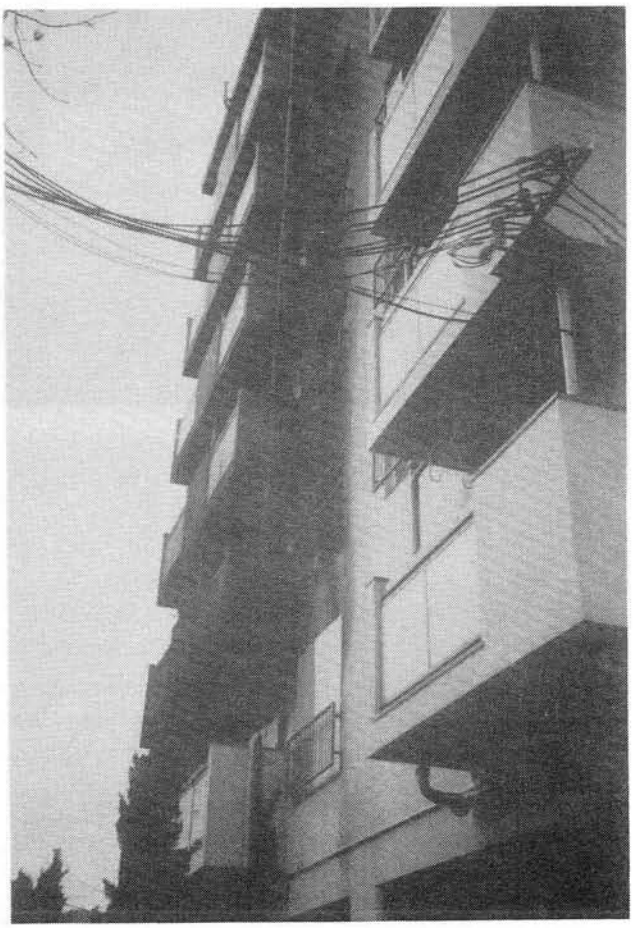
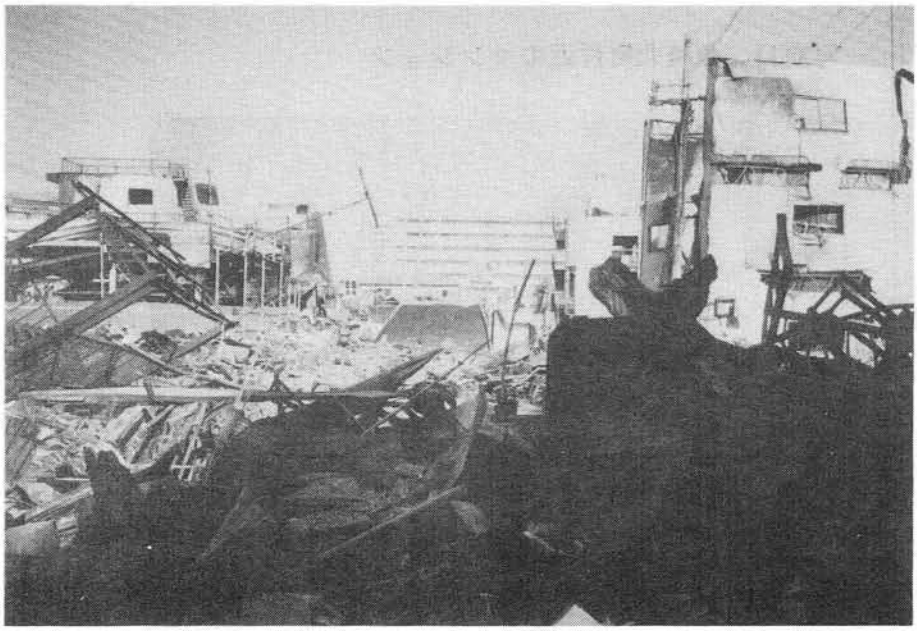
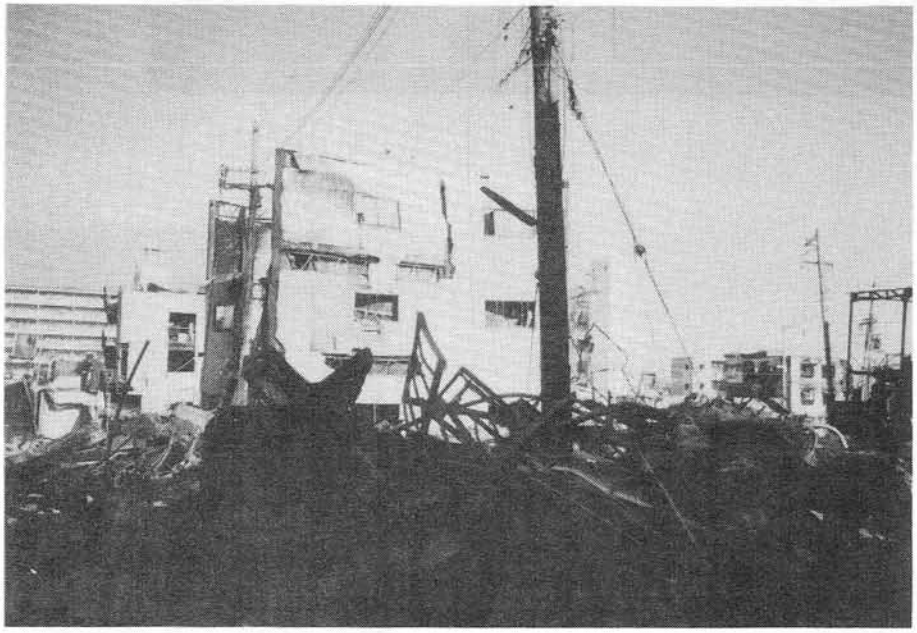


写真12　御蔵通５・６丁目地域（全景）



（東側）



（東側）



（南側）



写真13　御蔵通５・６丁目地域
（Ｓ造建物ののＡＬＣの被害



写真14　御蔵通５・６丁目地域南側
（ＲＣ造建物の被害）



写真15　御蔵通５・６丁目地域南側
（ＲＣ造建物の被害）

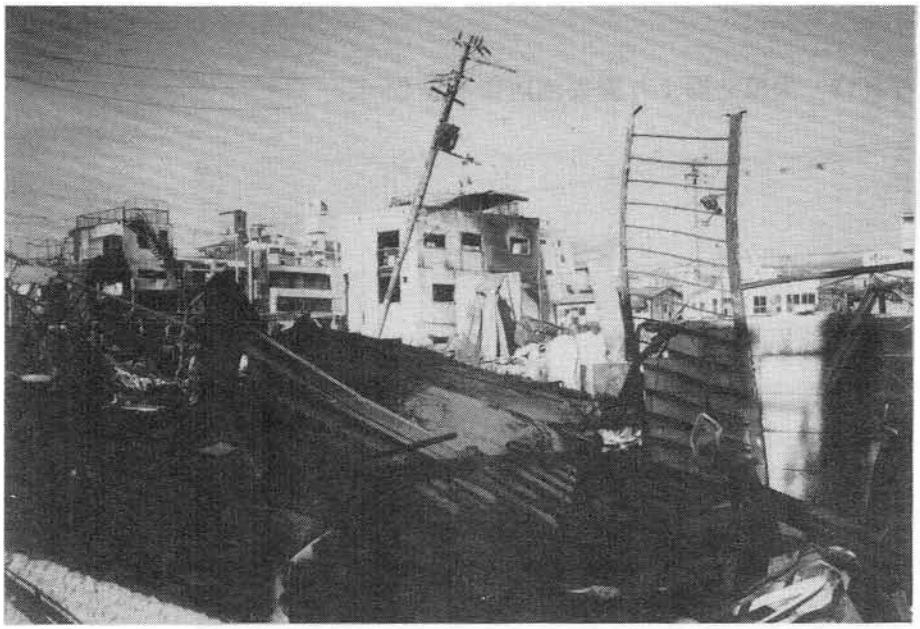
写真16　御蔵通５・６丁目地域南側（Ｓ造建物の被害）



写真17　長田区高橋病院周辺地域（全景）



（カトリック教会より北を望む）



（同地より北西側を望む）



（同地より南側を望む）



（同地より南側を望む）

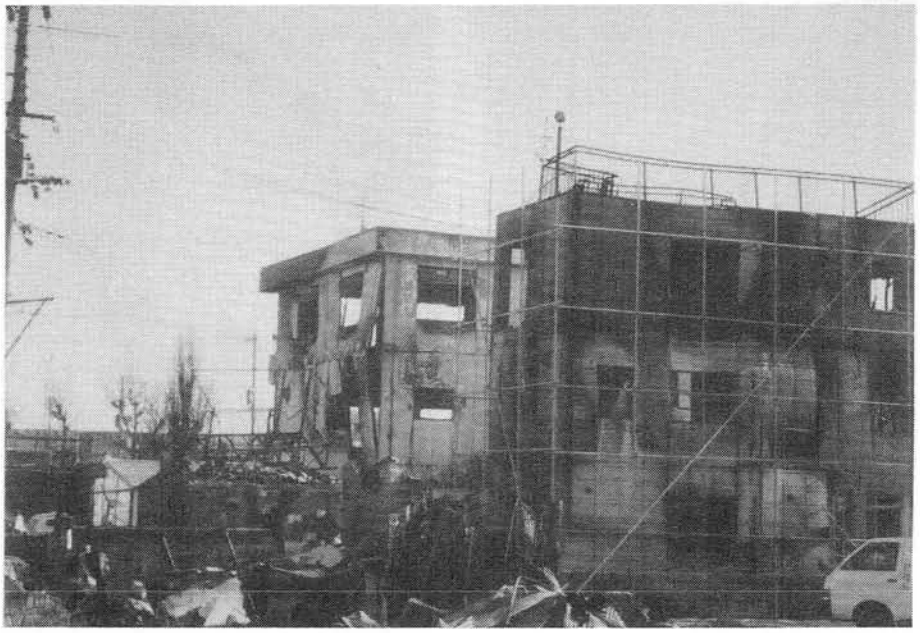
写真18　大国公園より鷹取商店街を望む



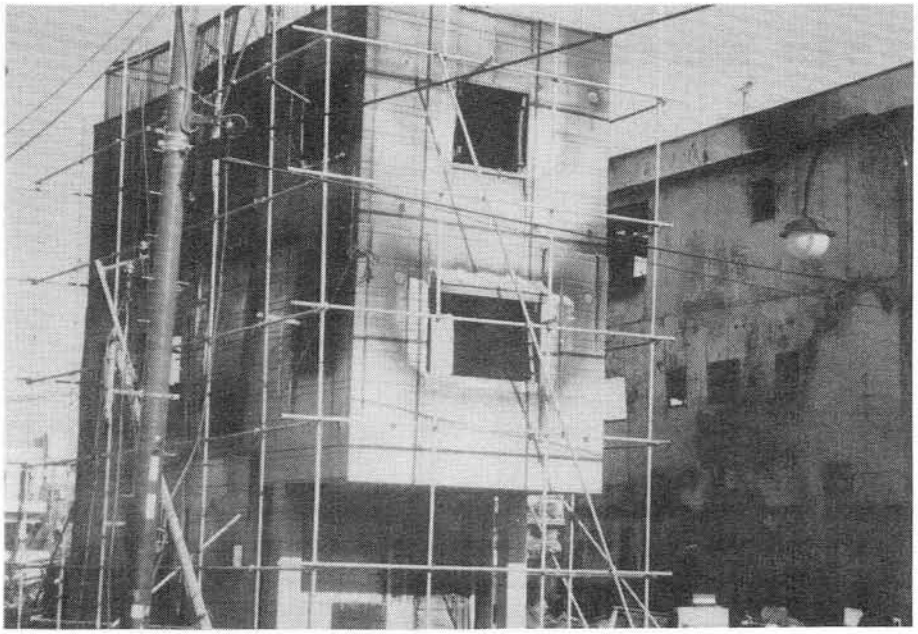
写真19　長田区高橋病院（ＲＣ造）



写真20　長田区高橋病院周辺地域（主にＳ造）



（Ｓ造建物のＡＬＣの被害）



（同上）

写真21　長田区高橋病院周辺地域
（Ｓ造建物のＡＬＣの被害）

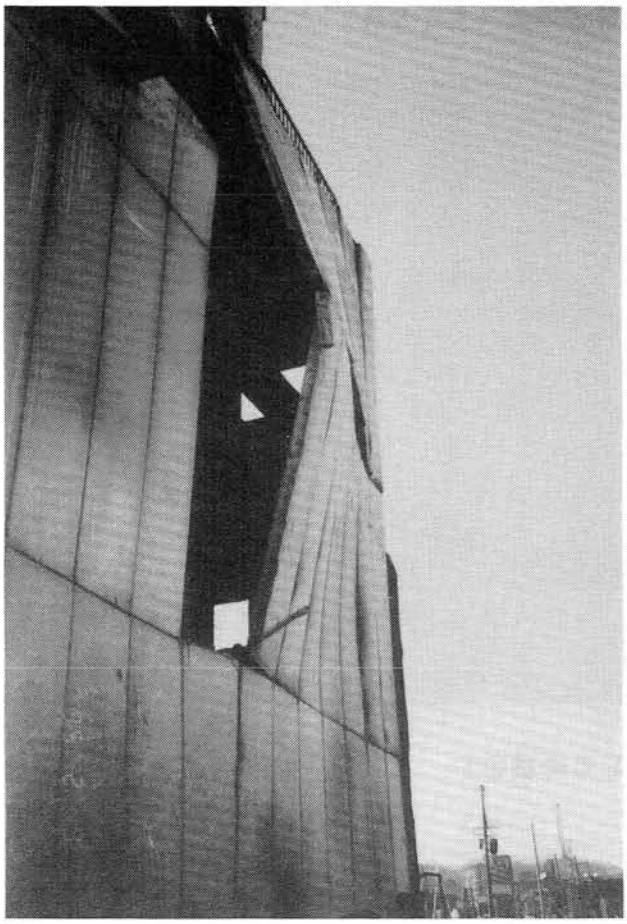


写真22　長田区高橋病院周辺地域
（Ｓ造建物のＡＬＣの被害）



写真23　長田区高橋病院周辺地域（Ｓ造建物のＡＬＣの被害）



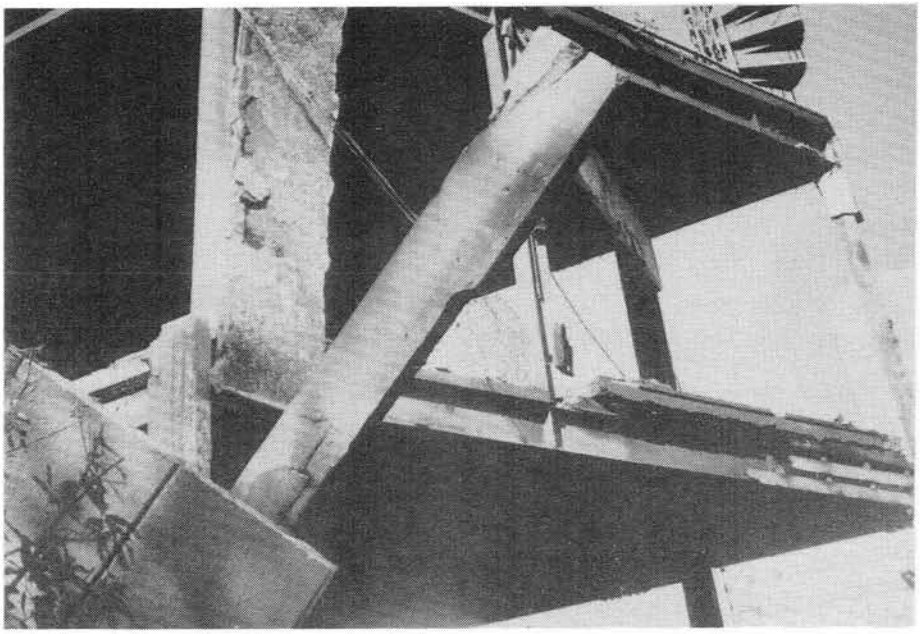


写真24　長田区高橋病院周辺地域
（S造建物の被害）

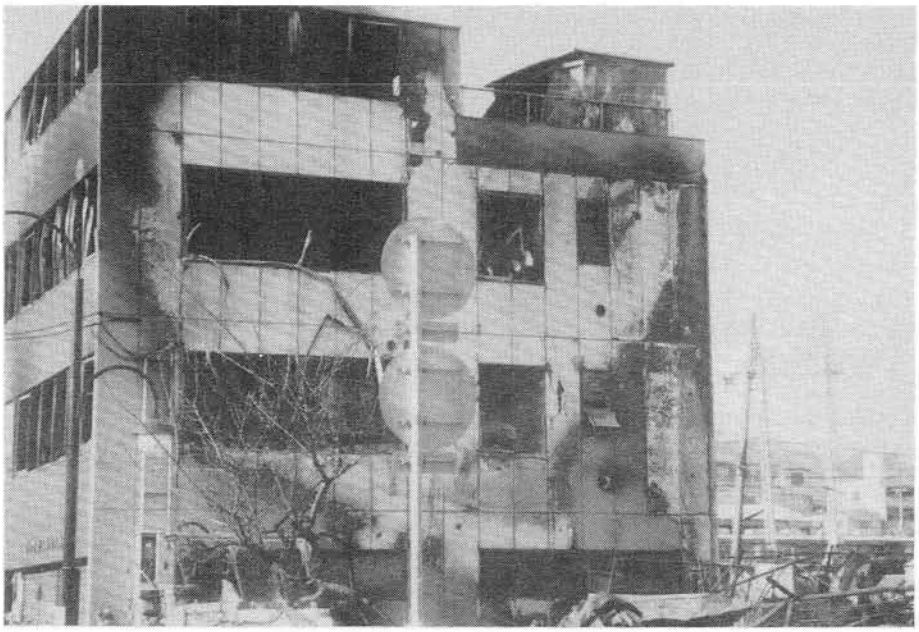


写真25　長田区高橋病院周辺地域
（S造建物の被害）

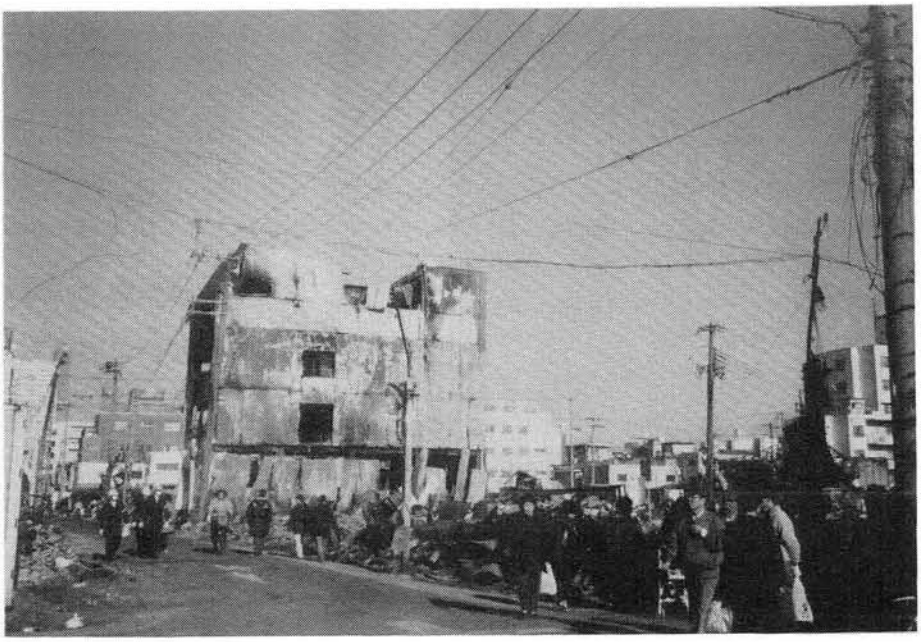


写真26　長田区高橋病院周辺地域
（S造建物の被害）

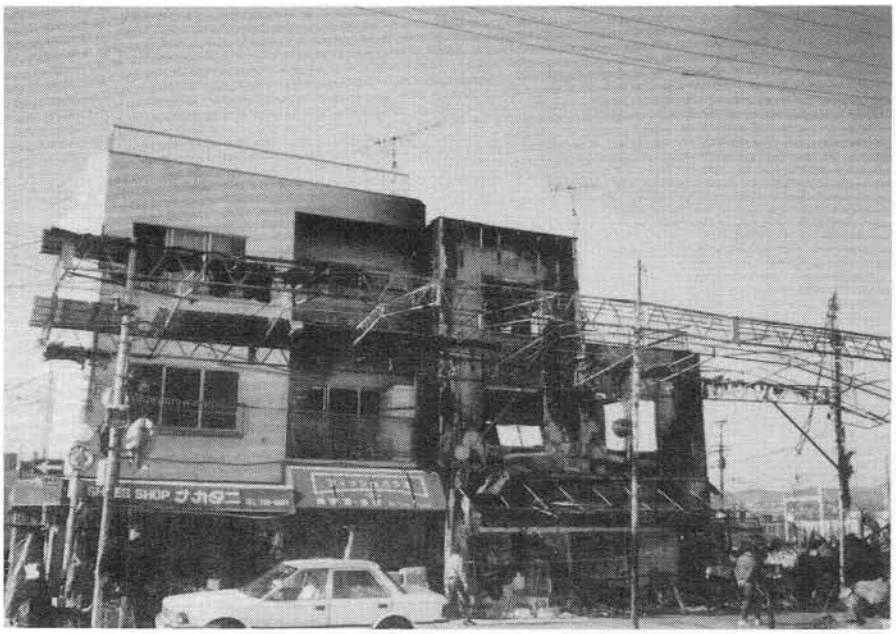


写真27　長田区高橋病院周辺地域
（ＲＣ造建物とＳ造建物の被害）

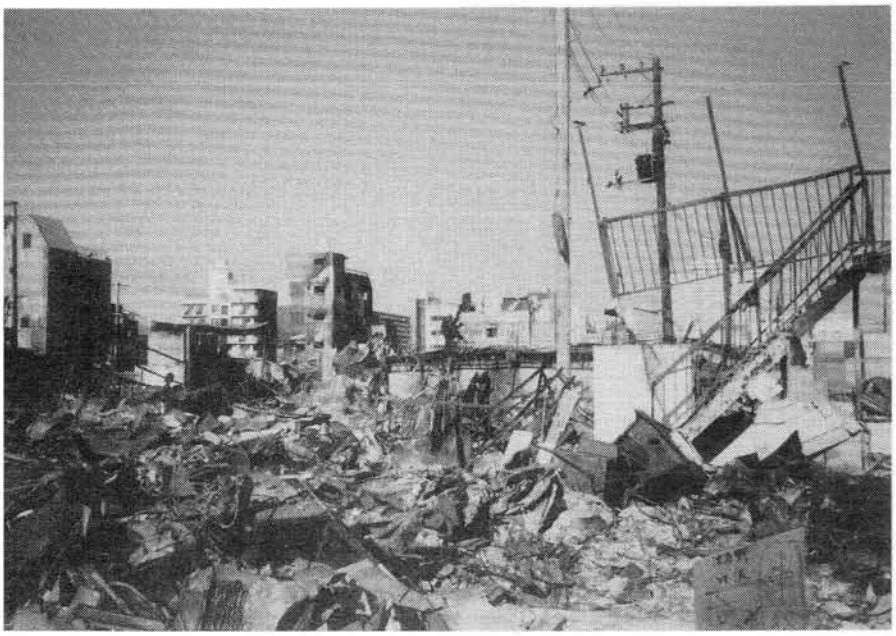


写真28　長田区高橋病院周辺地域
（南西側）

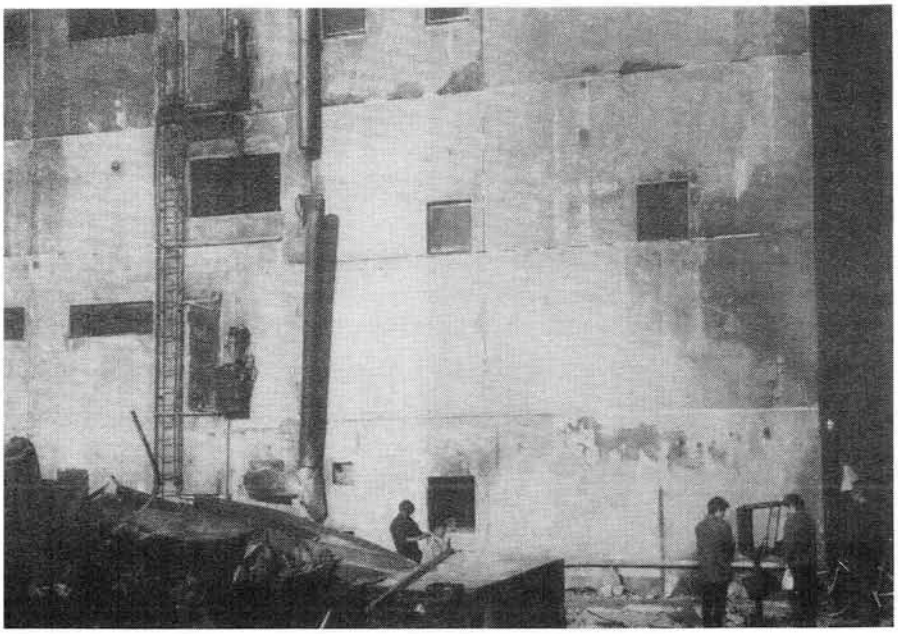


写真29　長田区高橋病院周辺地域
（ＲＣ造建物の被害）

写真30　長田区高橋病院周辺地域（ＲＣ造建物の被害）



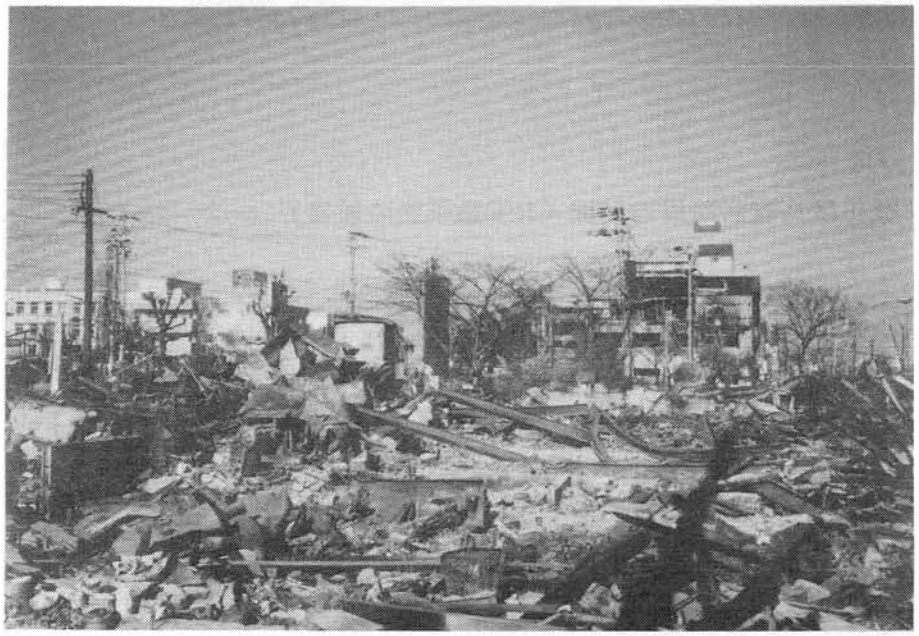
写真31　長田区高橋病院周辺地域（ＲＣ造建物の被害）



写真32　千歳小公園地域（全景）



（北側を望む）

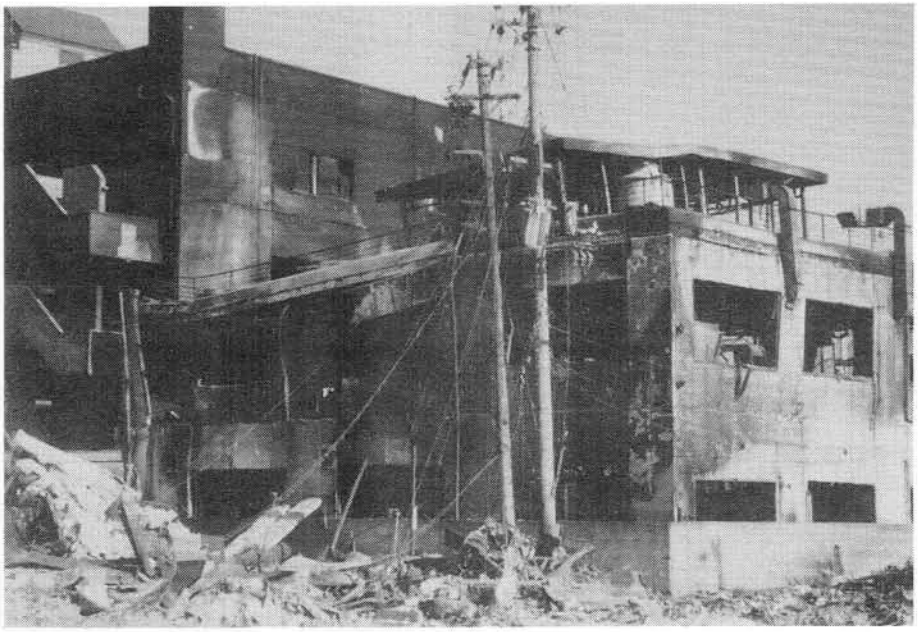


（東側を望む）

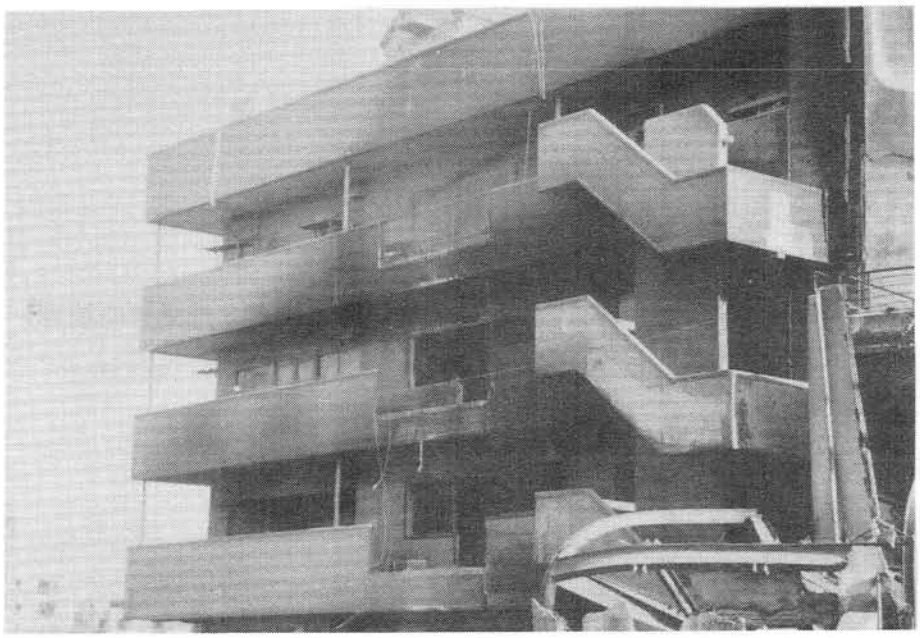


（東側を望む）

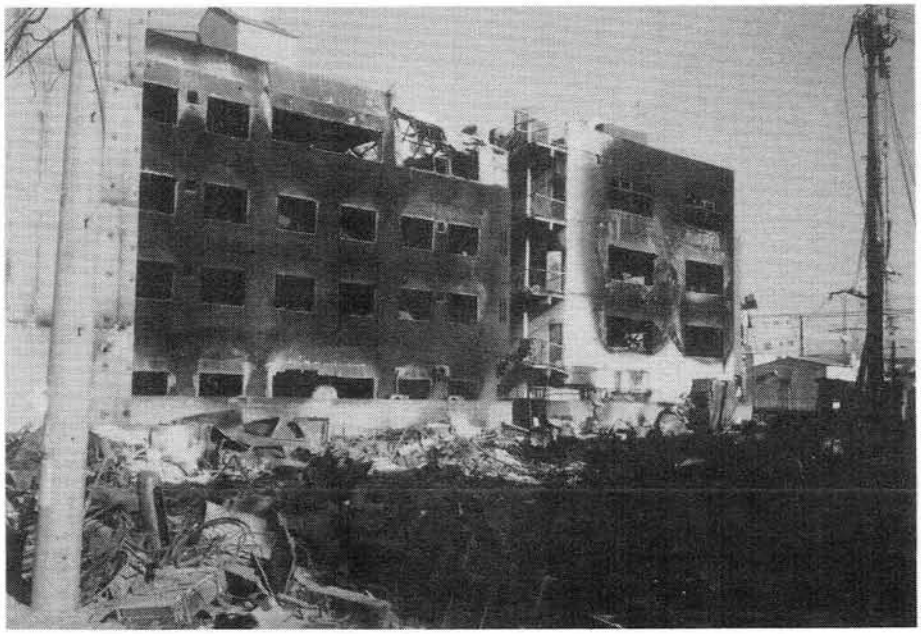
写真33　水笠西公園周辺地域（主にＲＣ造建物）



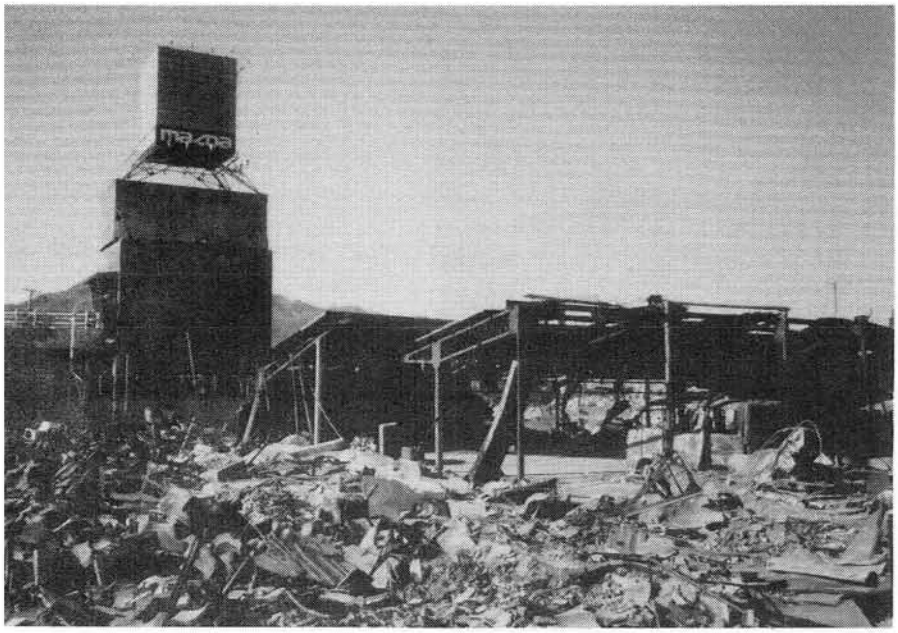
（後：ＲＣ造建物、前：Ｓ造建物）



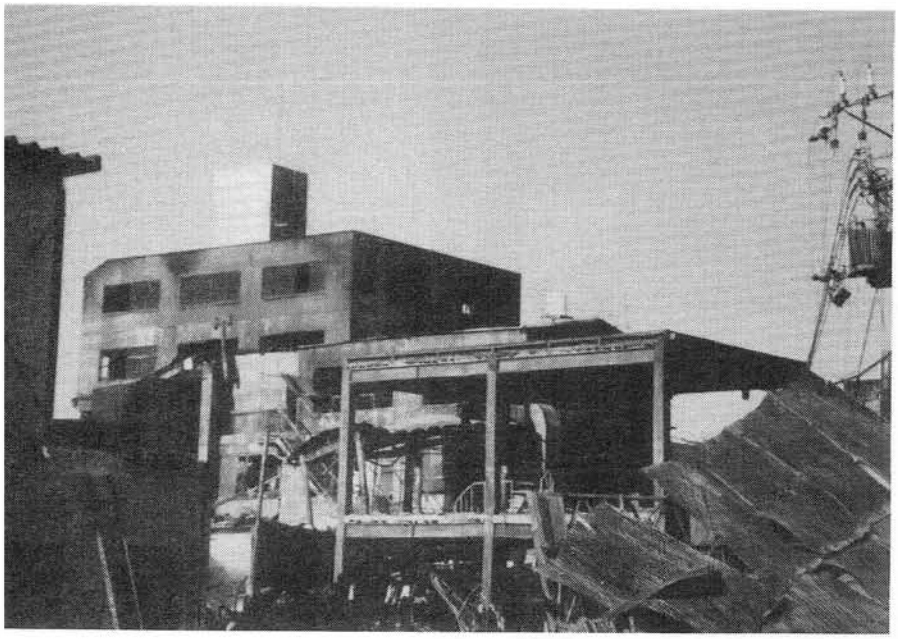
（ＲＣ造建物の被害）



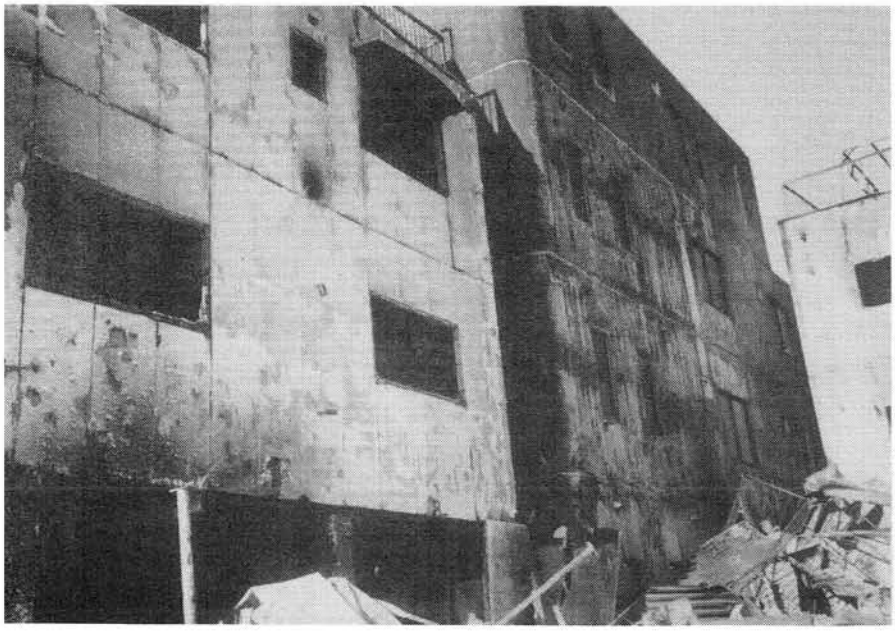
（ＲＣ造建物の被害）



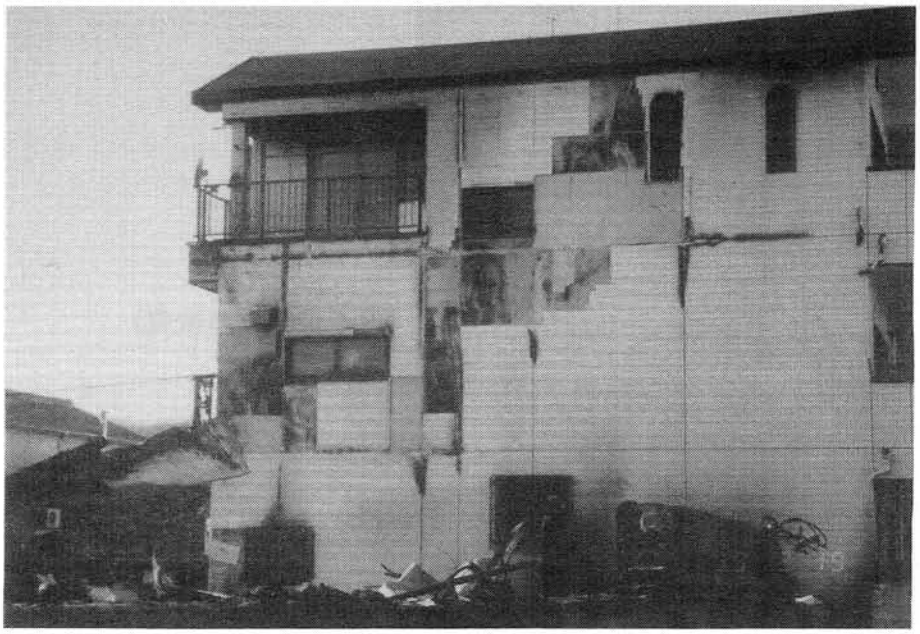
（ＲＣ造建物の被害）



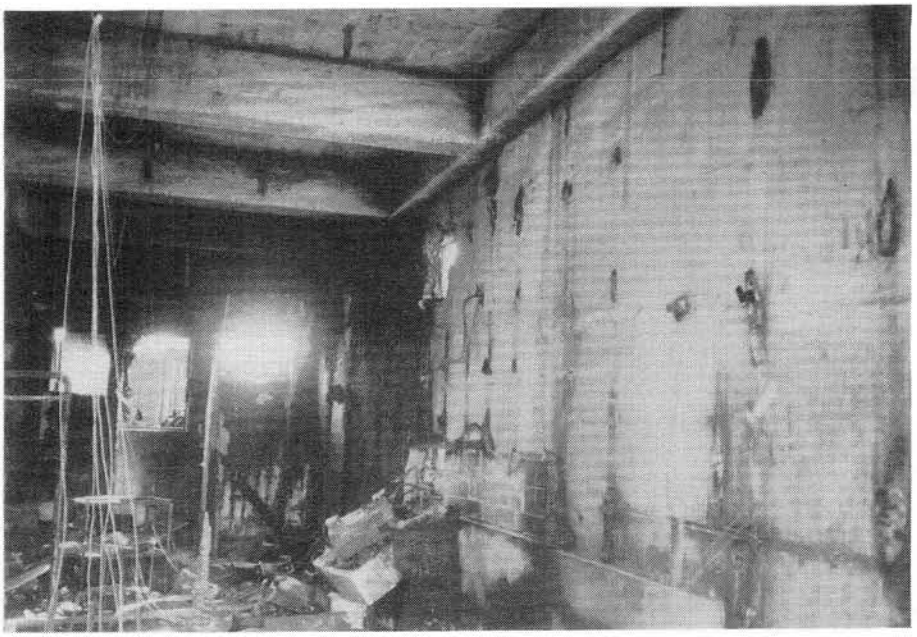
（ＲＣ造建物とＳ造建物の被害）



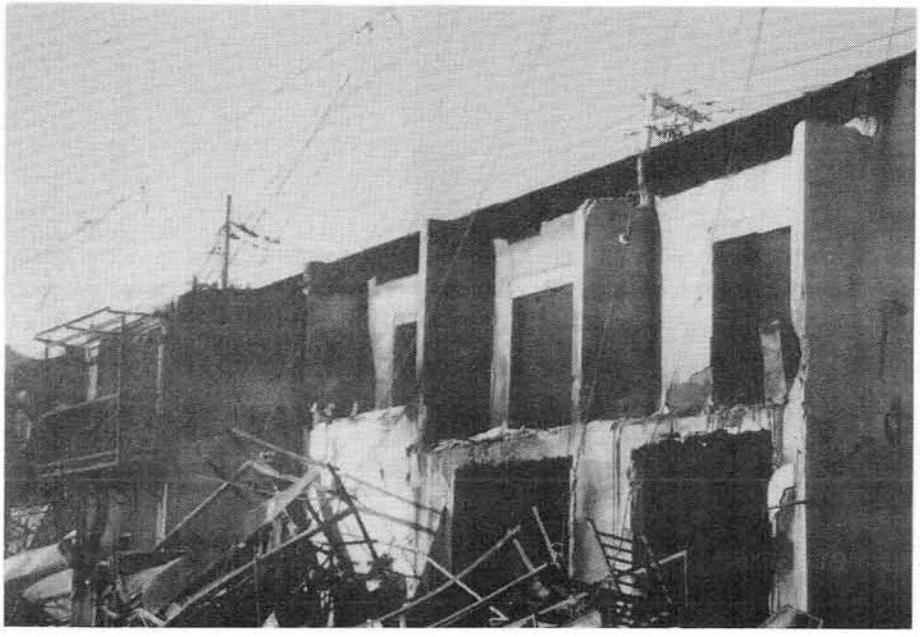
（Ｓ造建物とＲＣ造建物の被害）



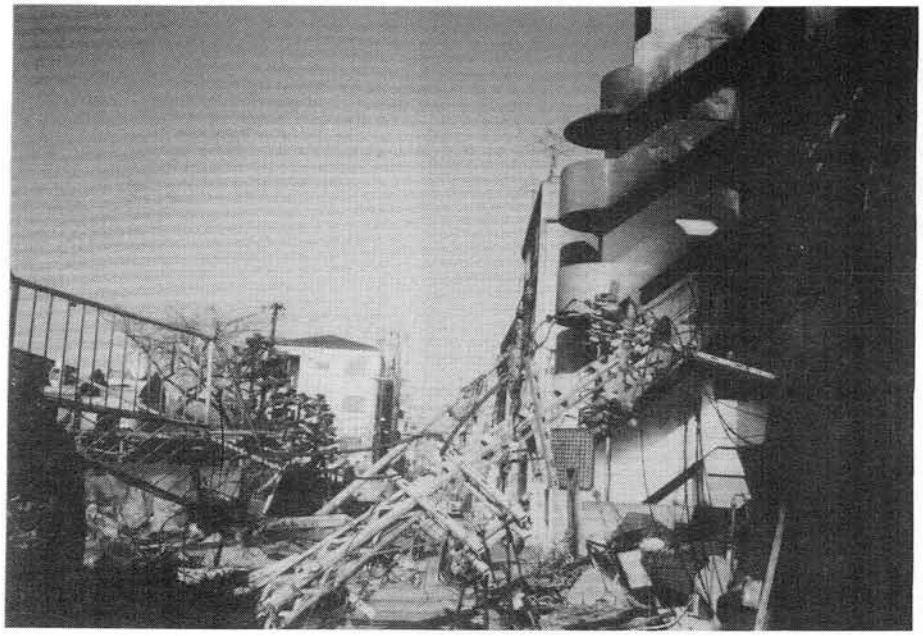
（ＲＣ造建物の被害）



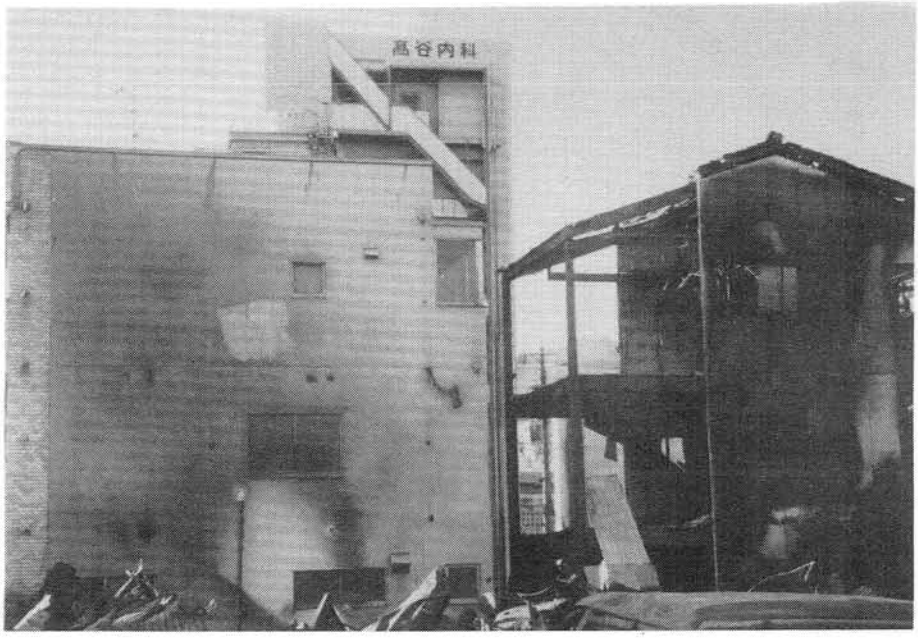
（ＲＣ造建物内部の被害）



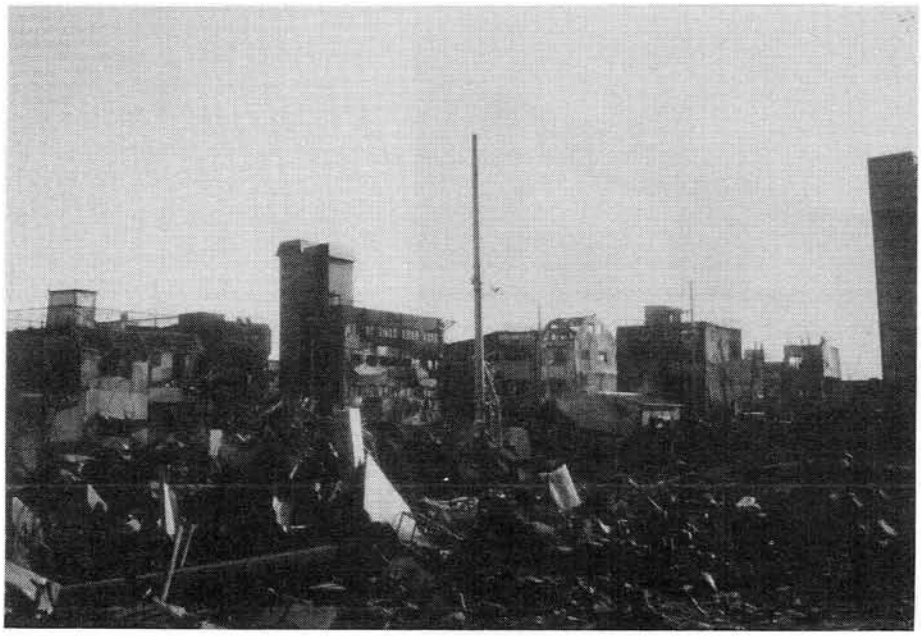
（ＲＣ造建物の被害）



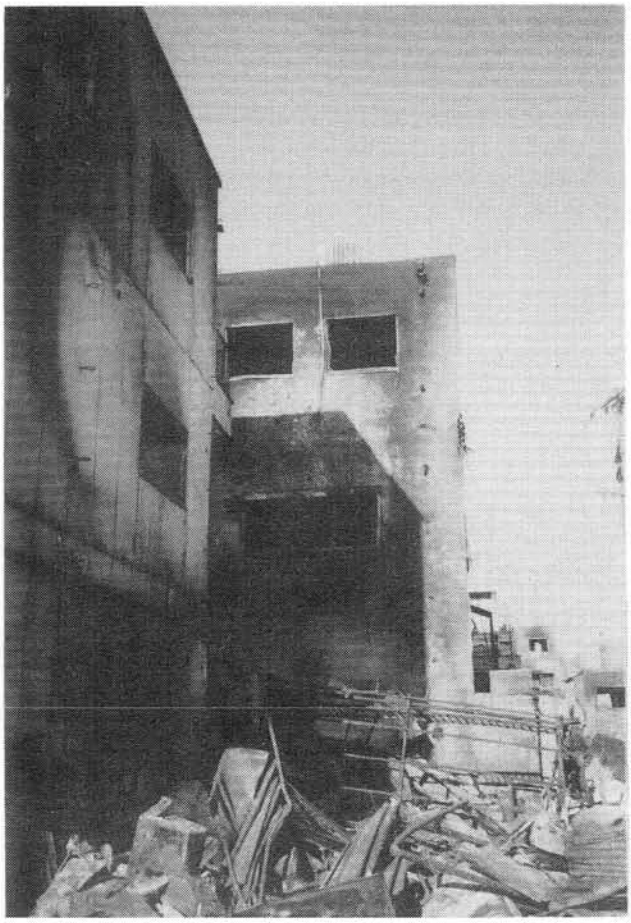
（ＲＣ造建物の被害）



（ＲＣ造建物の被害）



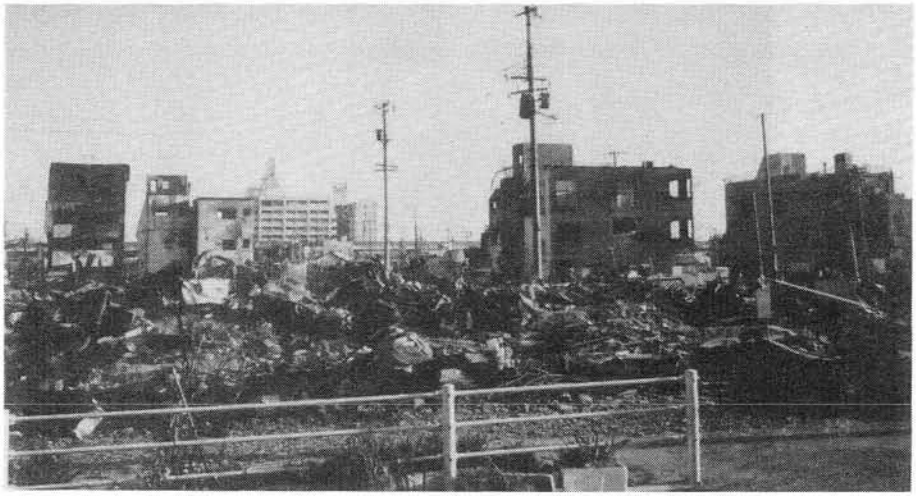
（ＲＣ造建物の被害）



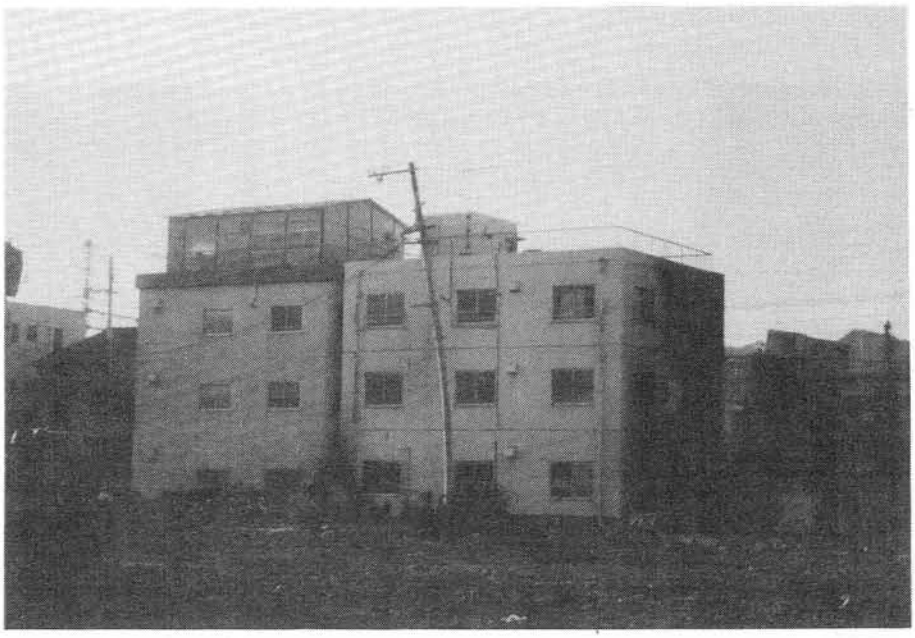
（Ｓ造建物とＲＣ造建物の被害）



（ＲＣ造建物の倒壊後火災の被害）

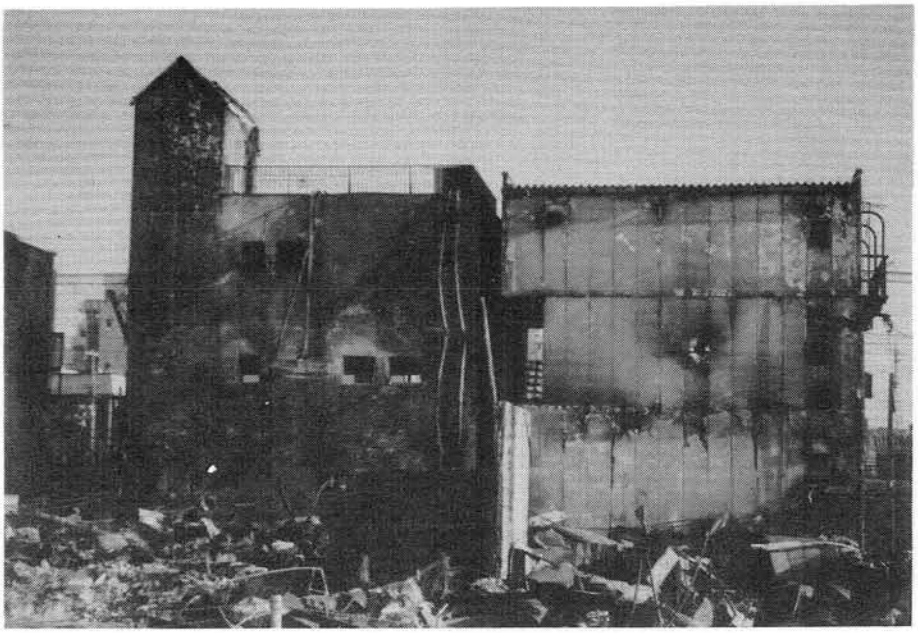


（ＲＣ造建物の被害）

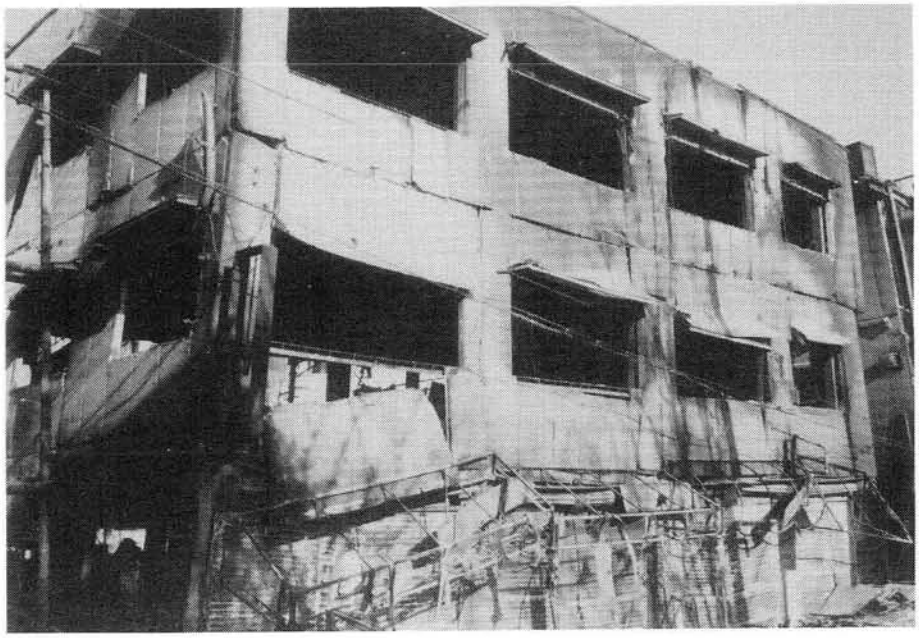


（Ｓ造建物とＲＣ造建物の被害）

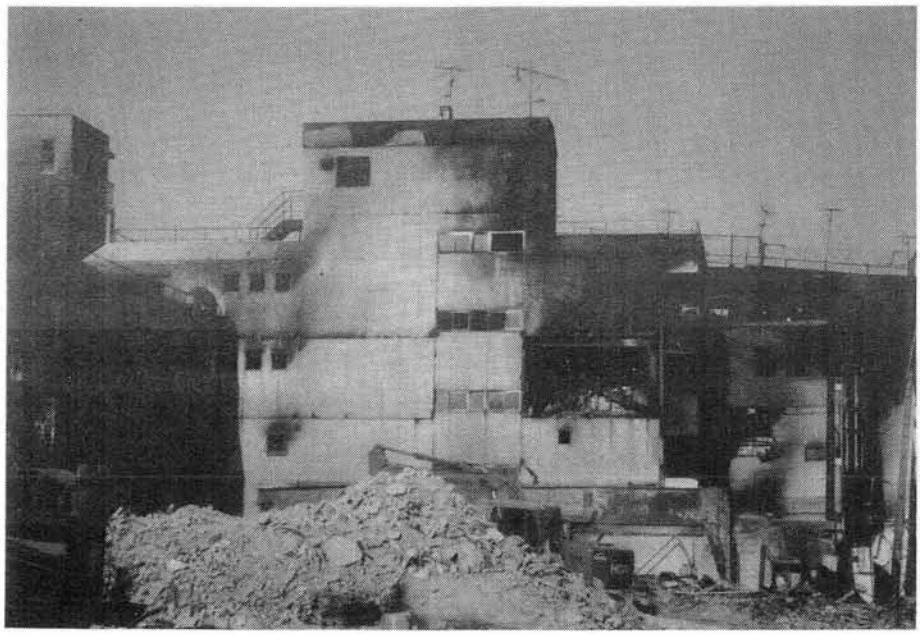
写真34　水笠西公園周辺地域（主にＳ造建物）



（Ｓ造建物の被害）



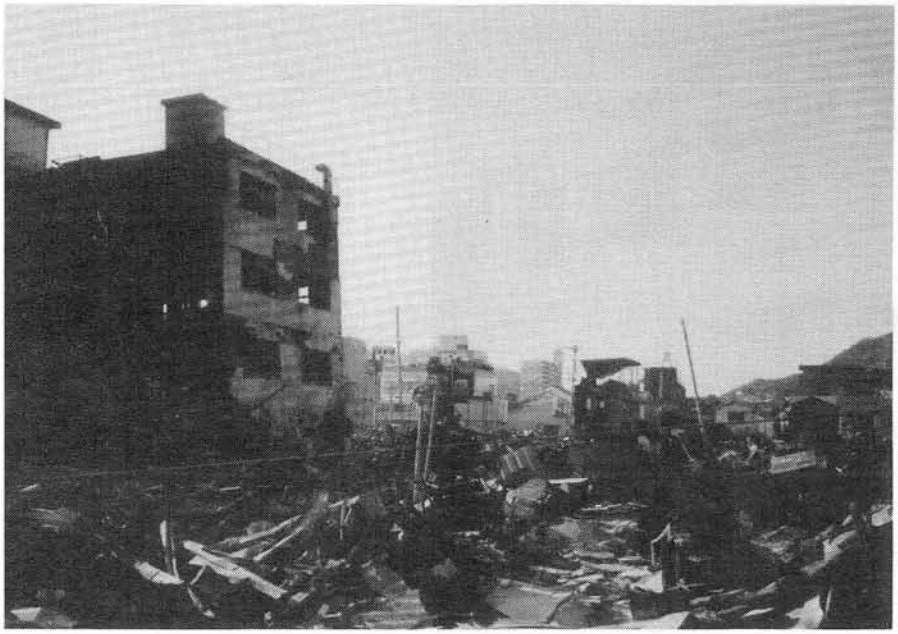
（Ｓ造建物の被害）



（Ｓ造建物の被害）



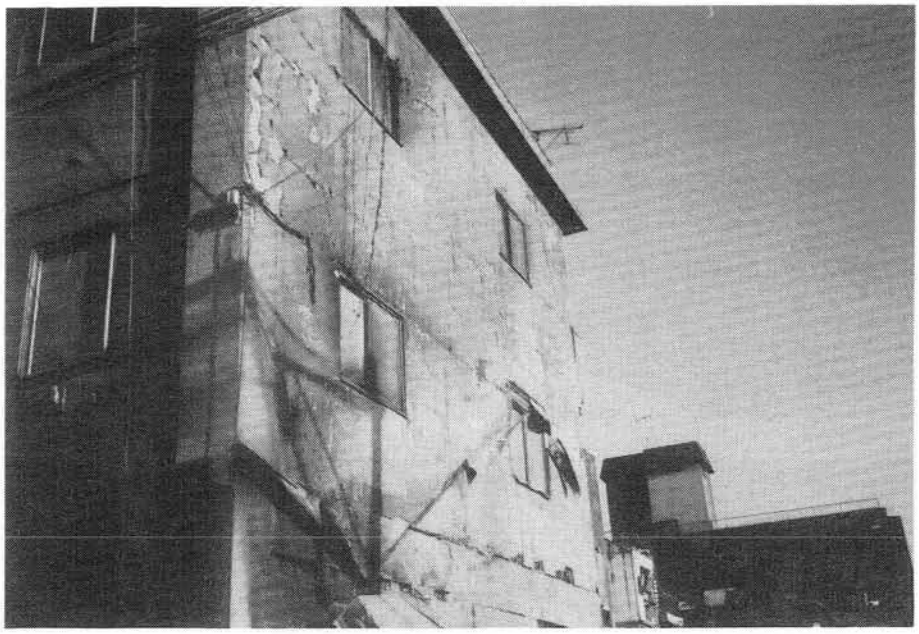
（Ｓ造建物とＲＣ造建物の被害）



（Ｓ造建物の被害）



（Ｓ造建物の被害）



（コンクリートブロック製壁Ｓ造建物の被害）



（Ｓ造建物の被害）

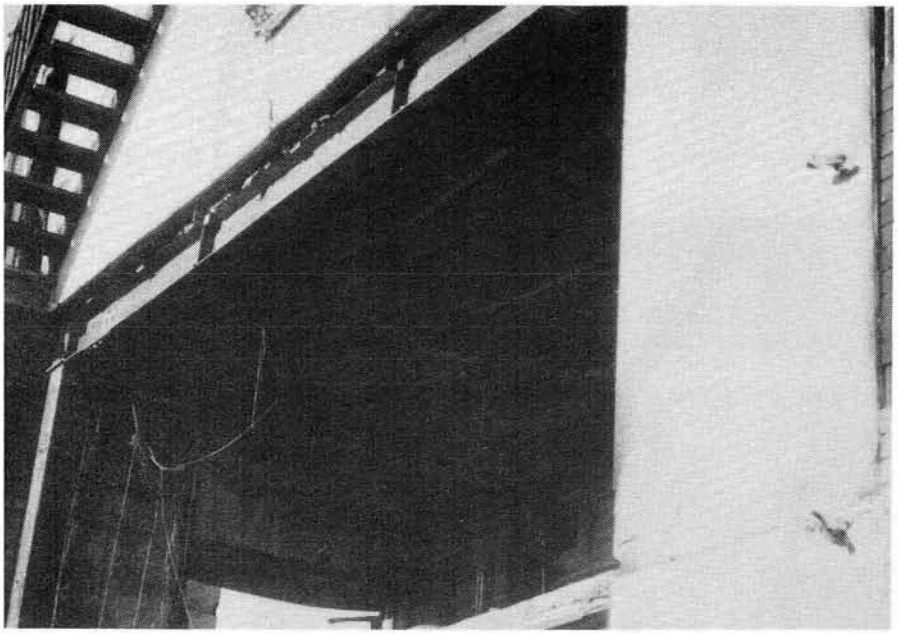


写真35　水笠西公園周辺地域
（S造建物内部）



写真36　水笠西公園周辺地域
（S造建物天井部分）

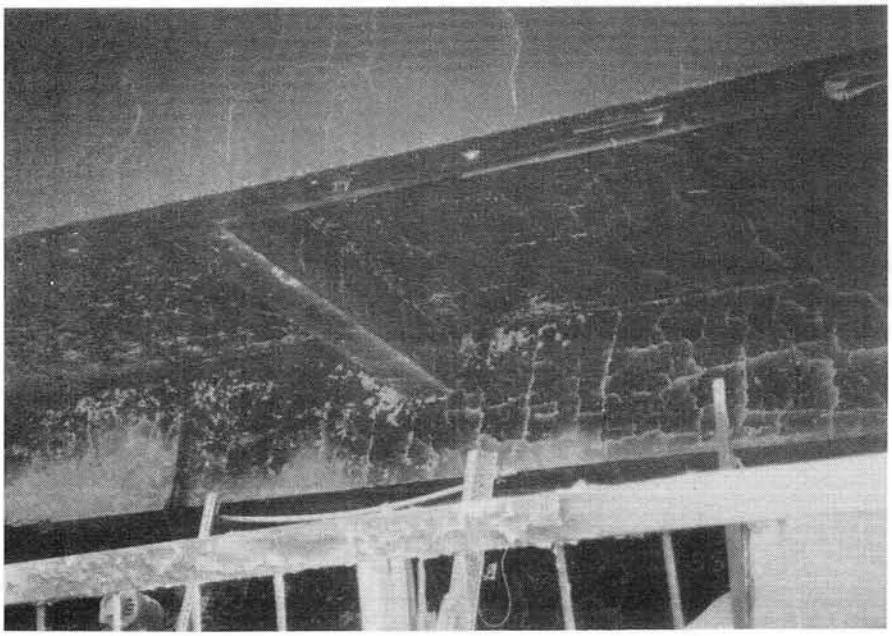


写真37　水笠西公園周辺地域
（RC造建物庇部分）

写真38　水笠西公園周辺地域（ＲＣ造建物開口部）



写真39　水笠西公園周辺地域（ＲＣ造建物倒壊後火災の被害）

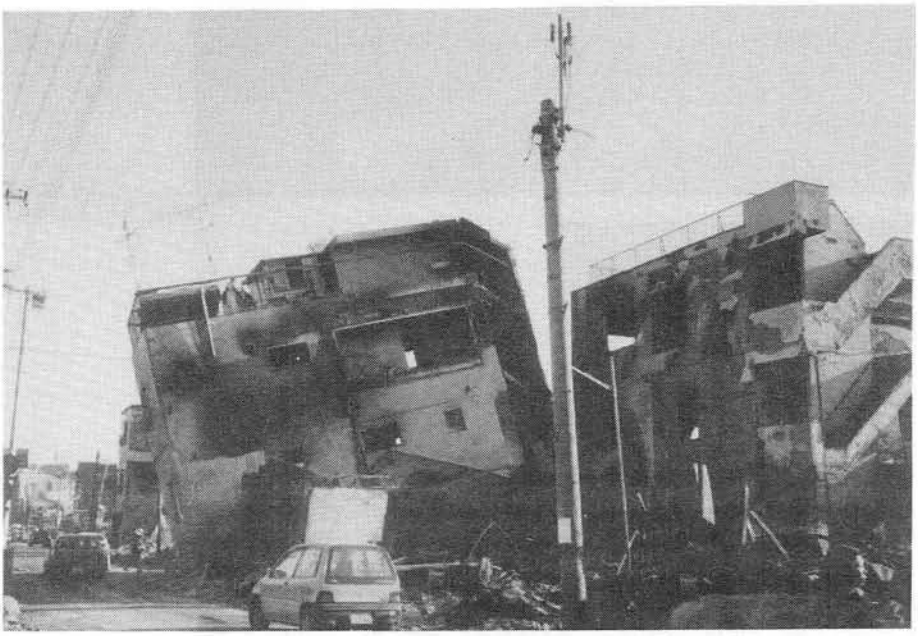
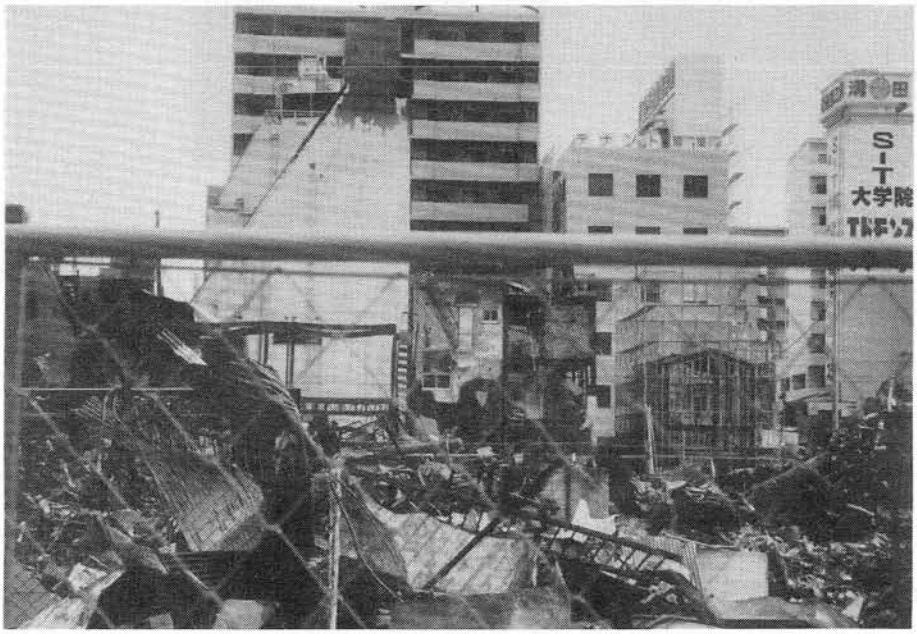


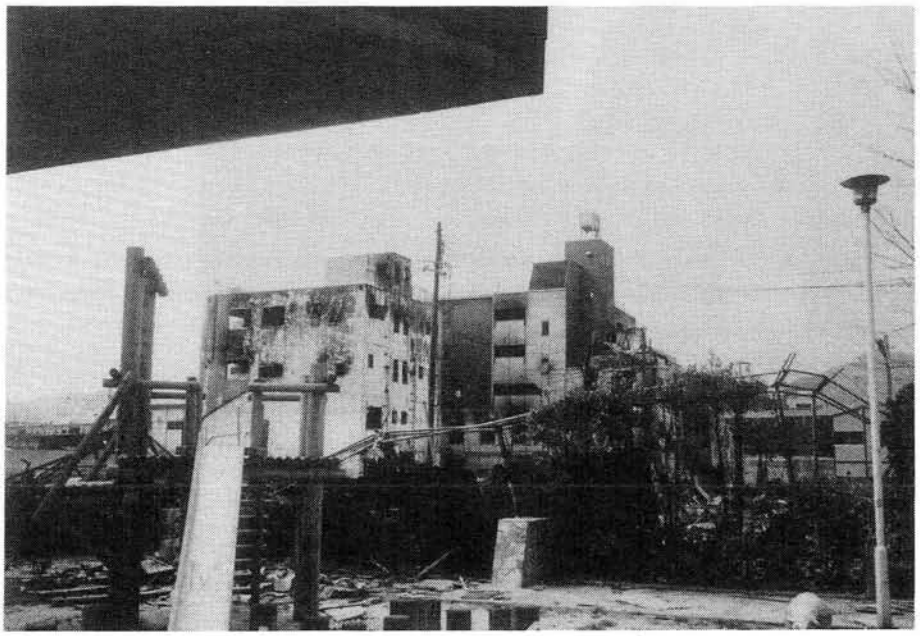
写真40　新長田駅南地域（全景）



（全景）

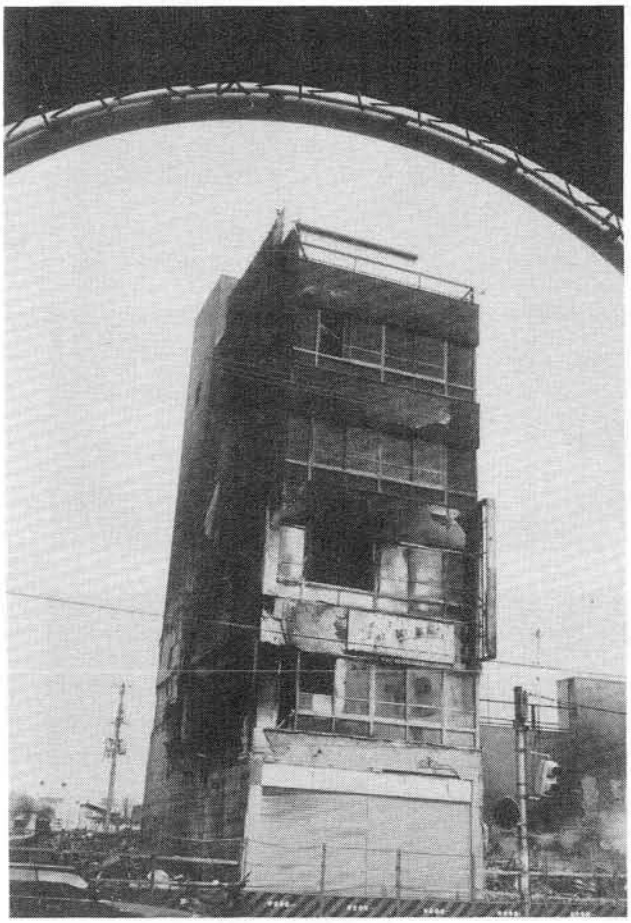


（東側）



（南側公園より）

写真41　新長田駅南地域（主にＲＣ造）



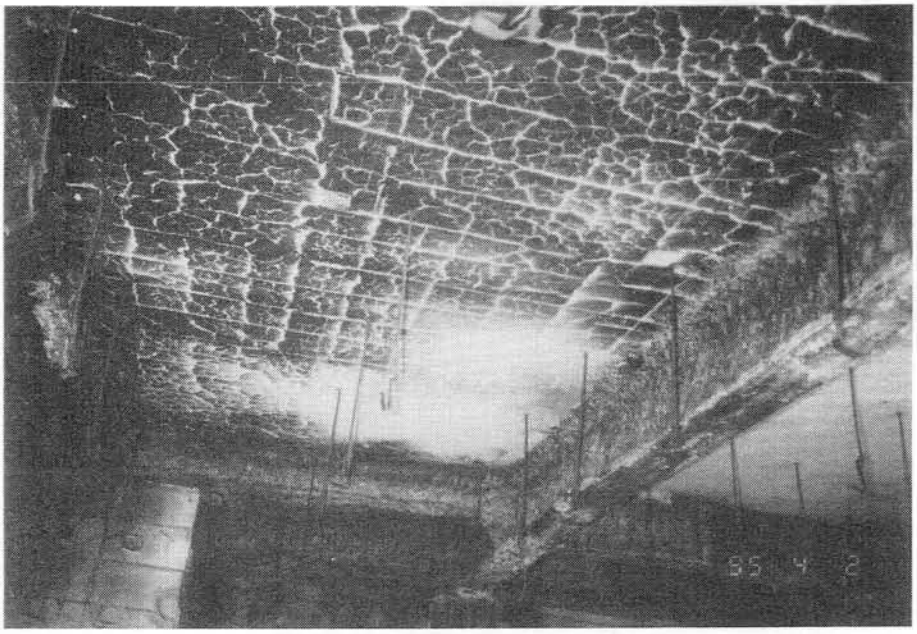
（ＲＣ造建物の被害）



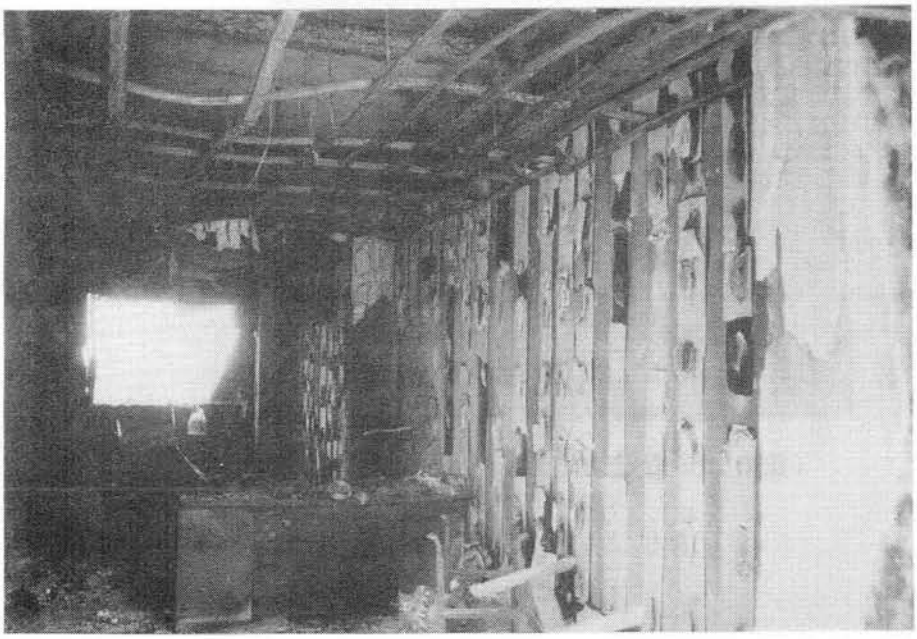
（前のＲＣ造建物の近影）



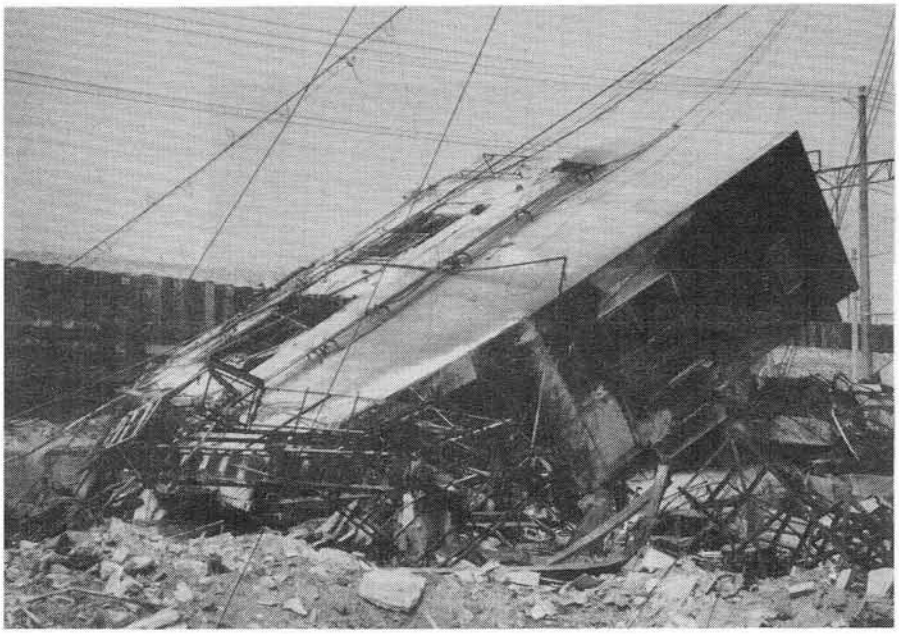
（ＲＣ造建物の内部）



（ＲＣ造建物の内部）



（ＲＣ造建物の内部）



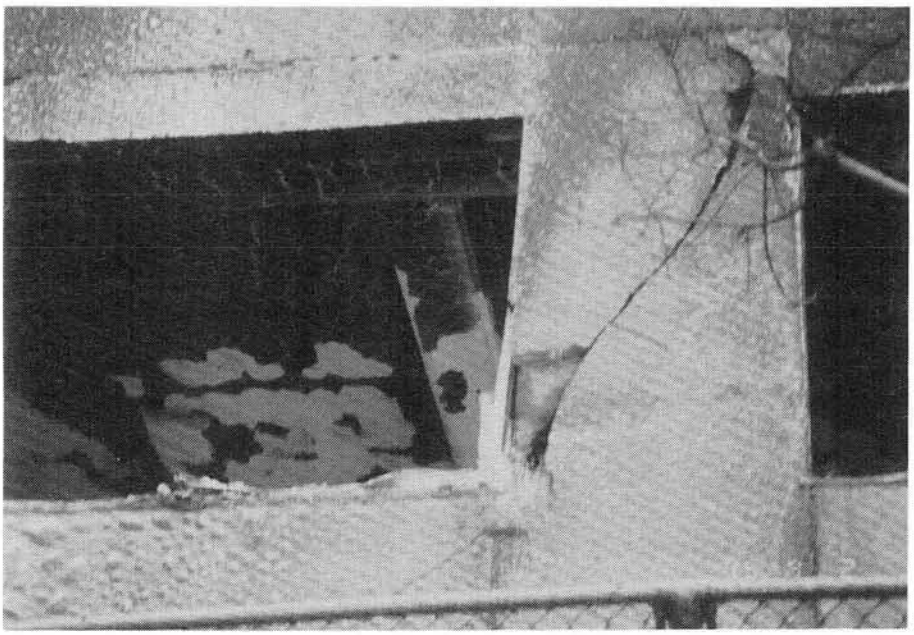
（ＲＣ造建物倒壊後火災の被害）



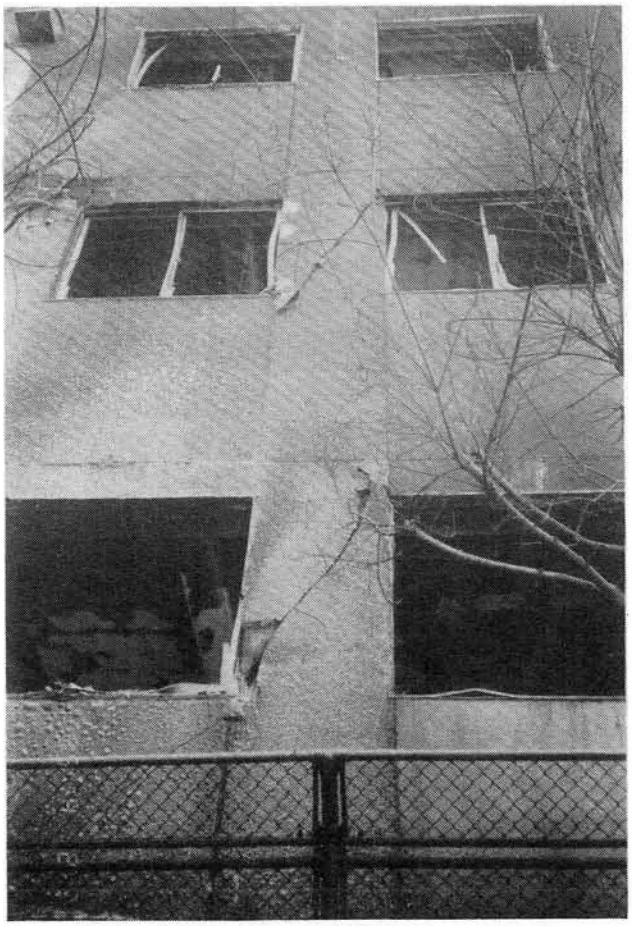
（南側公園周囲のＲＣ造建物の被害）



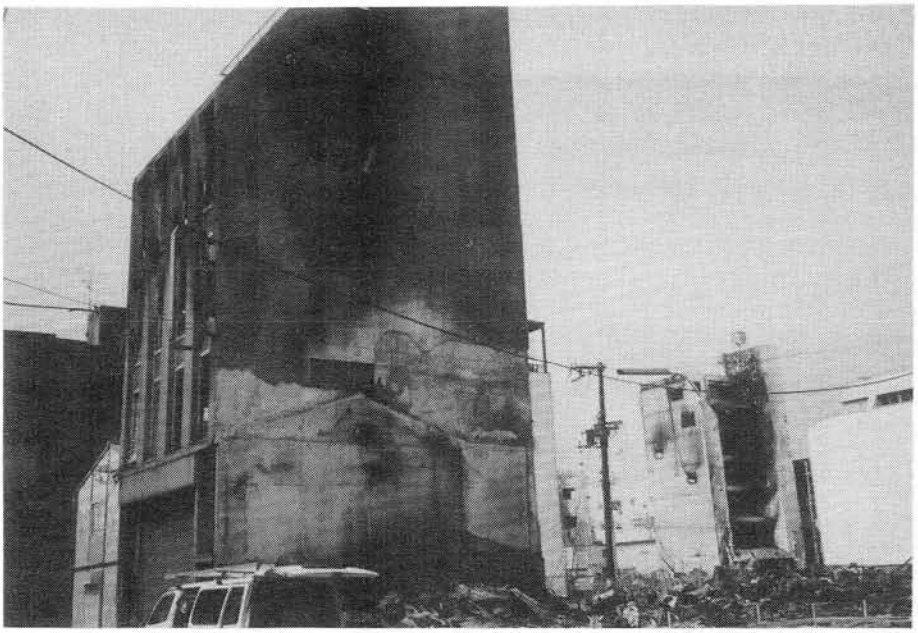
（南側公園周囲のＲＣ造建物の被害）



（南側公園周囲のＲＣ造建物の被害）



（南側公園周囲のＲＣ造建物、地震による被災のため火災の被害拡大）



（ＲＣ造建物の被害）

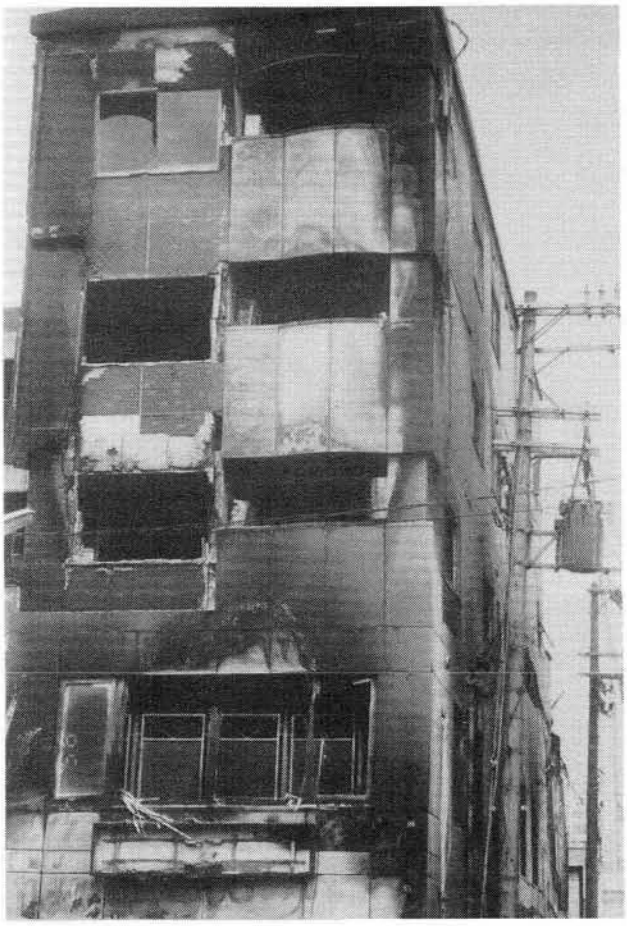


（ＲＣ造建物の被害）

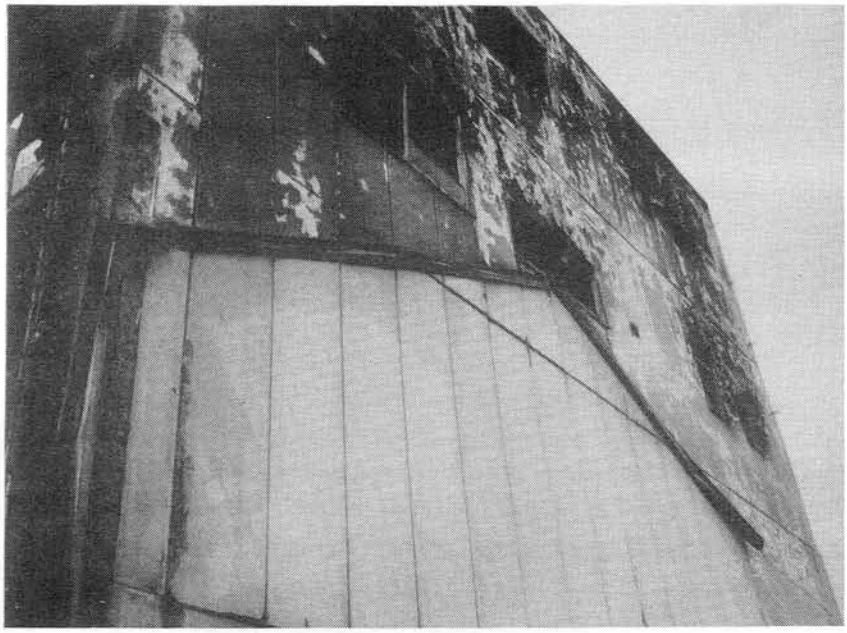


（ＲＣ造建物の被害）

写真42　新長田駅南地域（主にＳ造）



（Ｓ造建物の被害）



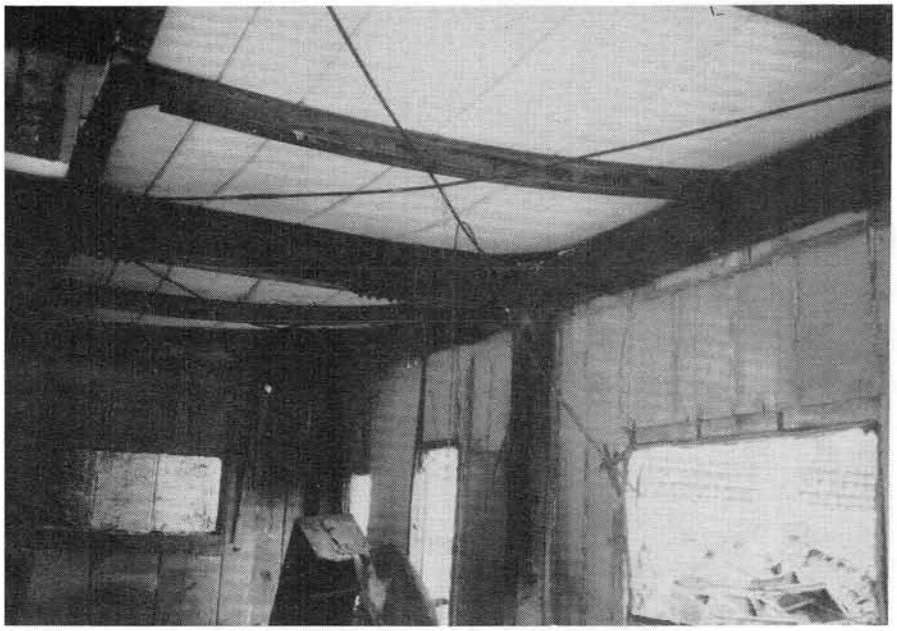
（Ｓ造建物の被害）



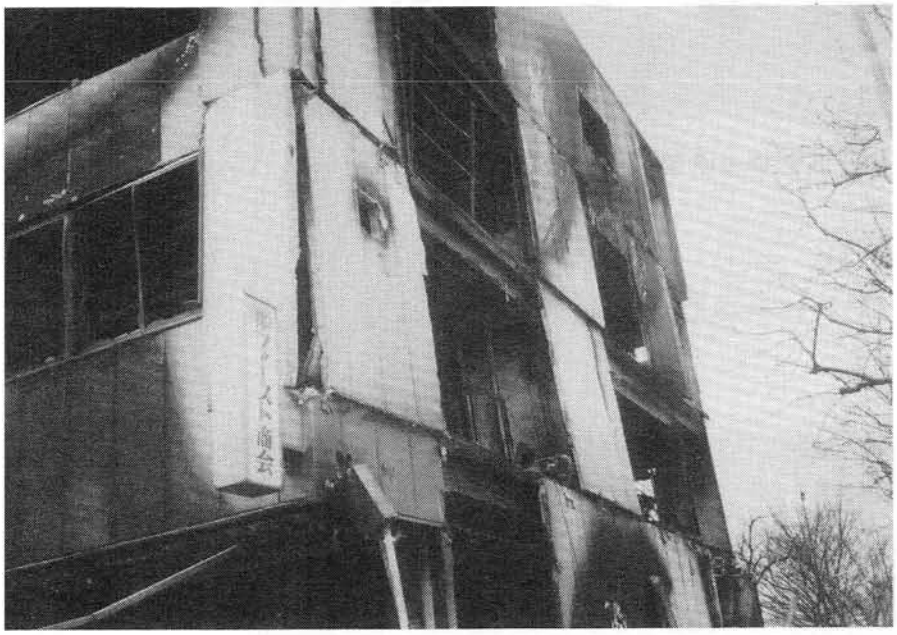
（コンクリートブロック製壁Ｓ造建物の被害）



（Ｓ造建物内部の被害）



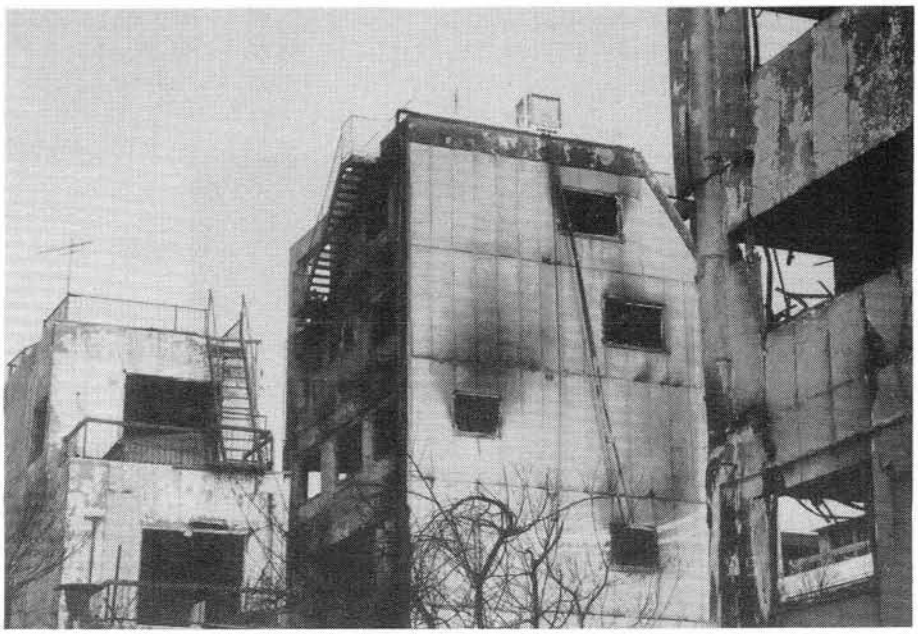
（Ｓ造建物内部の被害）



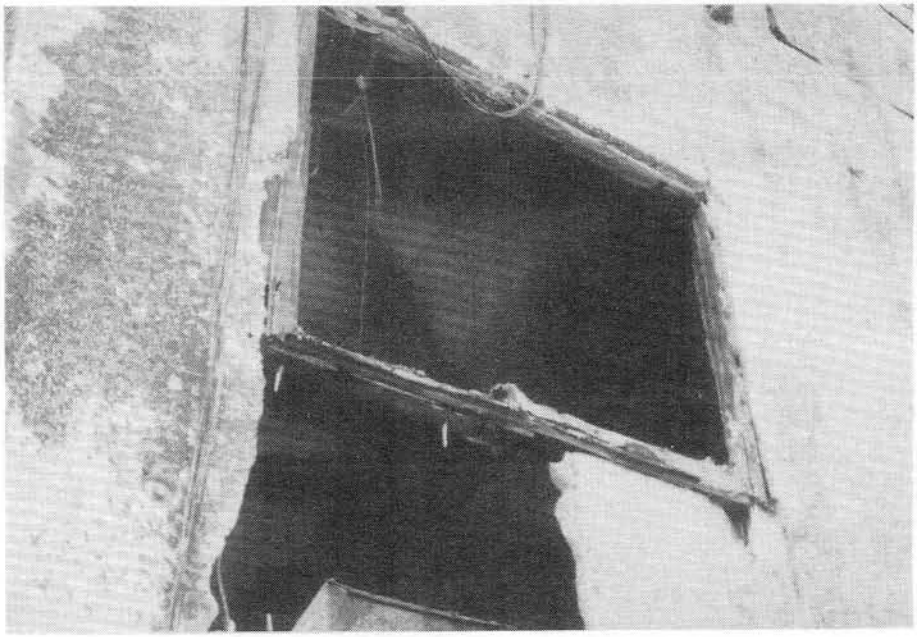
（南側公園周囲のＳ造建物の被害）



（南側公園周囲のＳ造建物の被害）



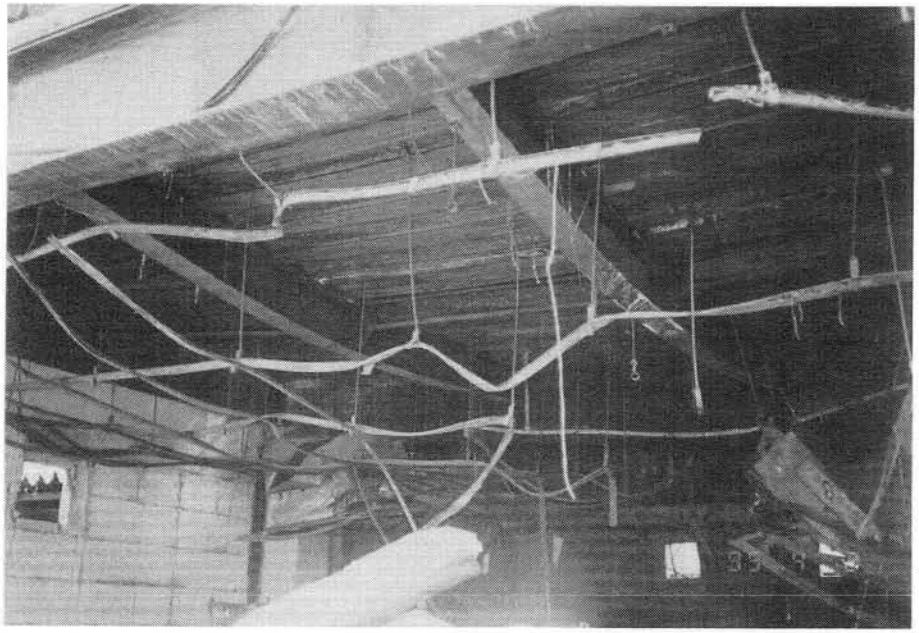
（Ｓ造建物の被害）



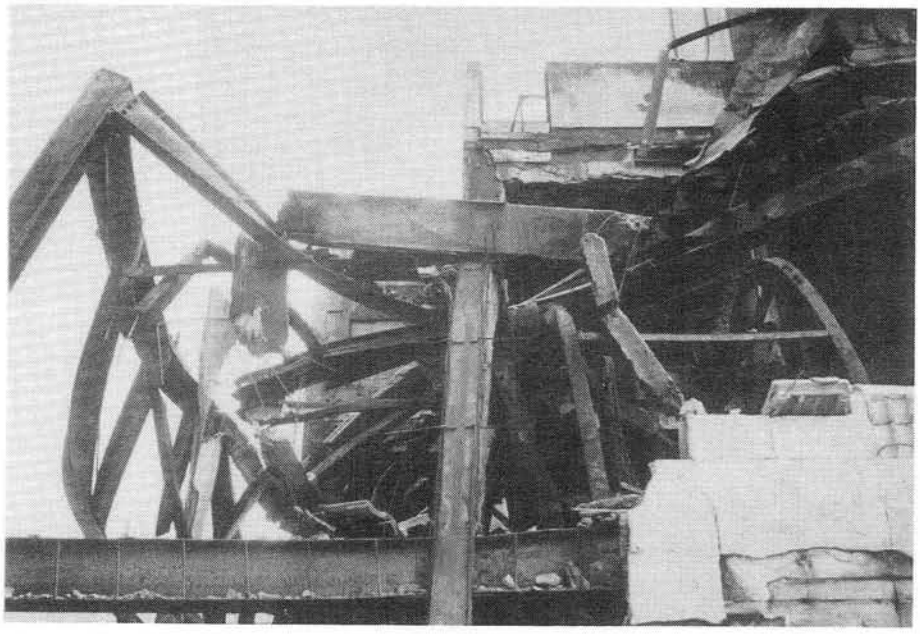
（Ｓ造建物の被害）



（Ｓ造建物とＲＣ造建物の被害）

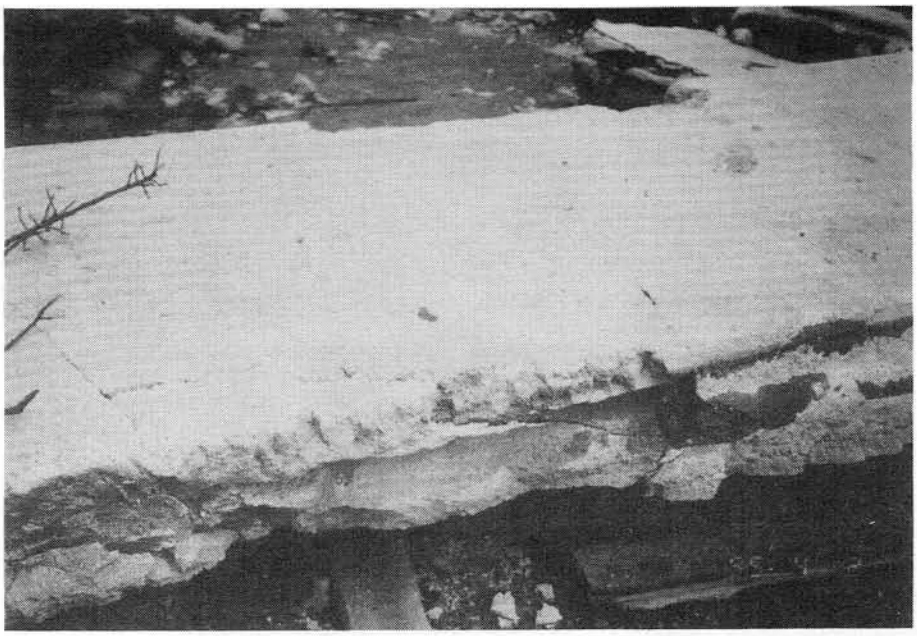


（Ｓ造建物のデッキ床の被害）

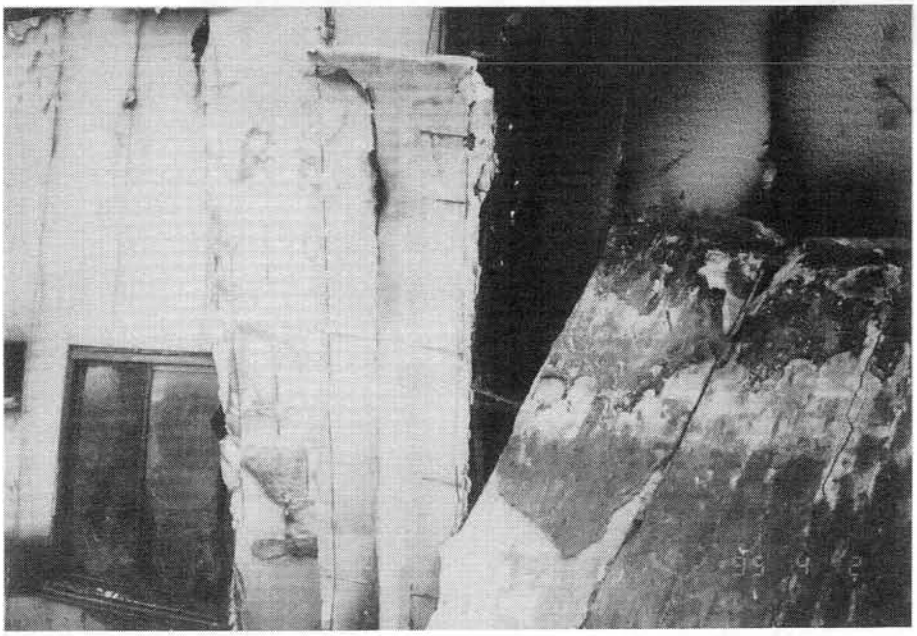


（Ｓ造建物の被害）

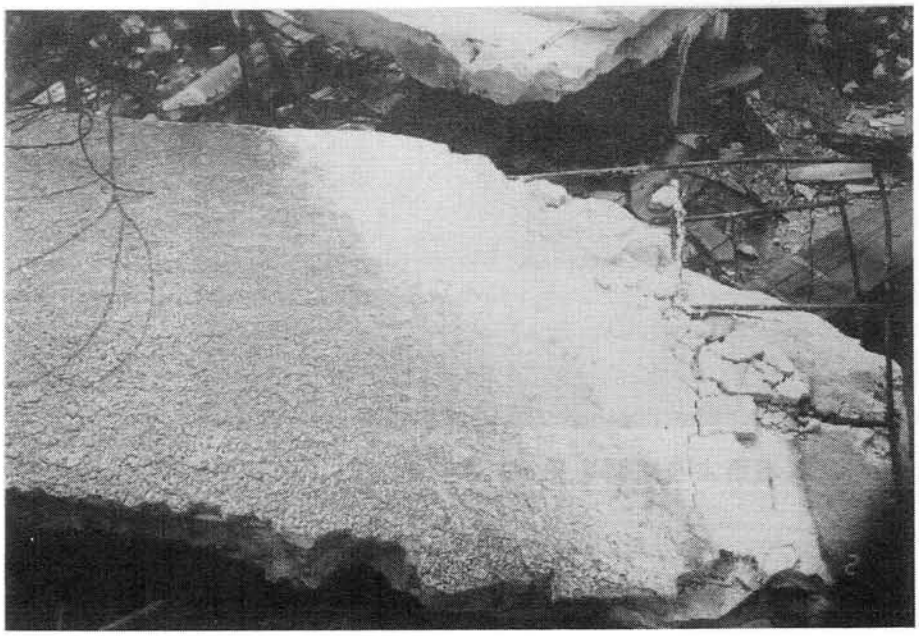
写真43　新長田駅南地域南側公園周囲のＳ造建物



（ＡＬＣの被害状況）



（ＡＬＣの被害状況）



（ＡＬＣの被害状況）

写真44　御蔵通５・６丁目地域（全景）



写真45　菅原変電所周辺地域（全景）



（道路より東側を見る）



（北側を見る）

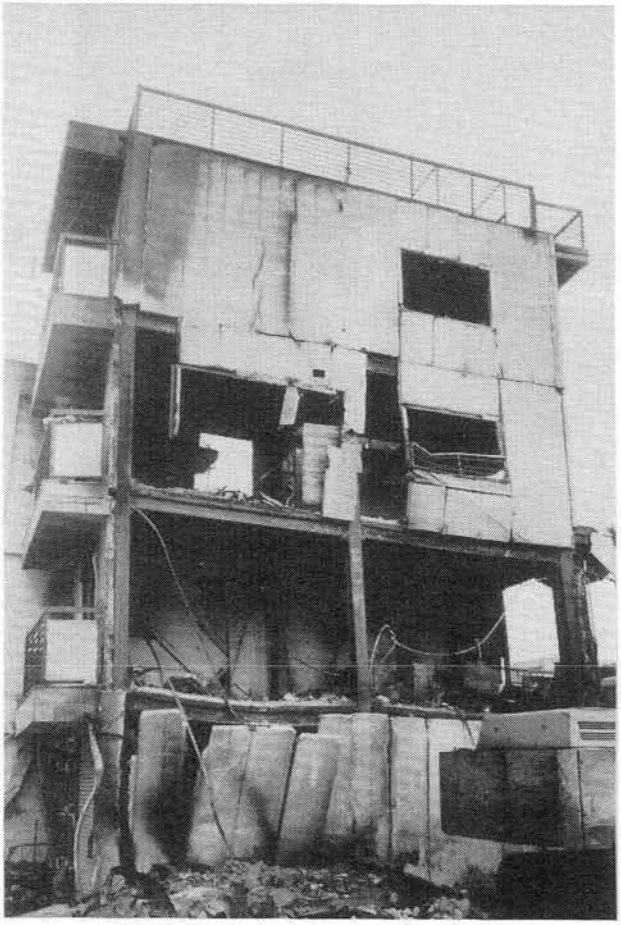


（遠方に燃え残りのＳ造建物が見える）



（北側を見る）

写真46　御蔵通５・６丁目地域（主にＳ造）



（Ｓ造建物の被害）

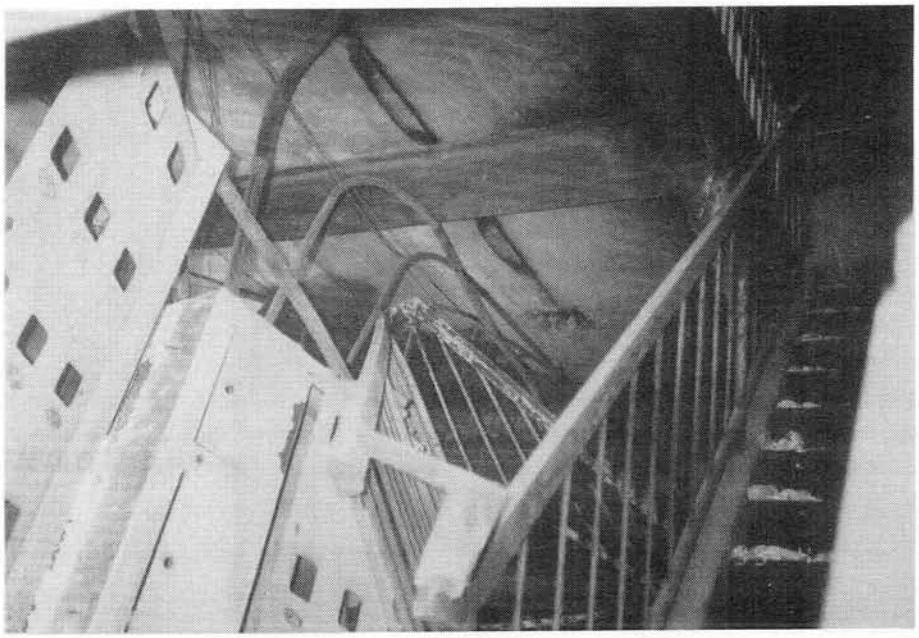


（Ｓ造建物の被害）

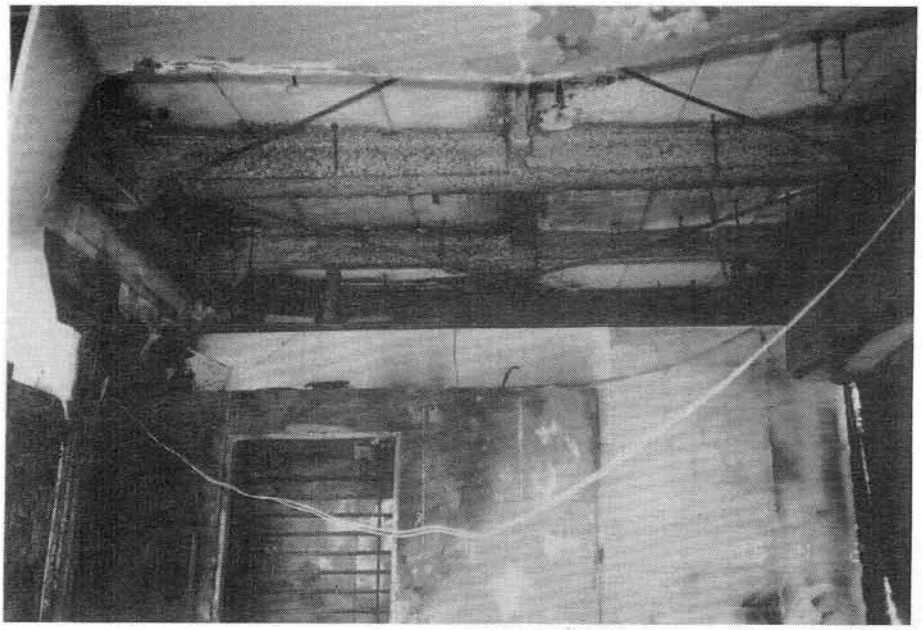
写真47　菅原変電所周辺地域（主にＳ造）



（Ｓ造建物コンクリート・ブロック壁の被害）



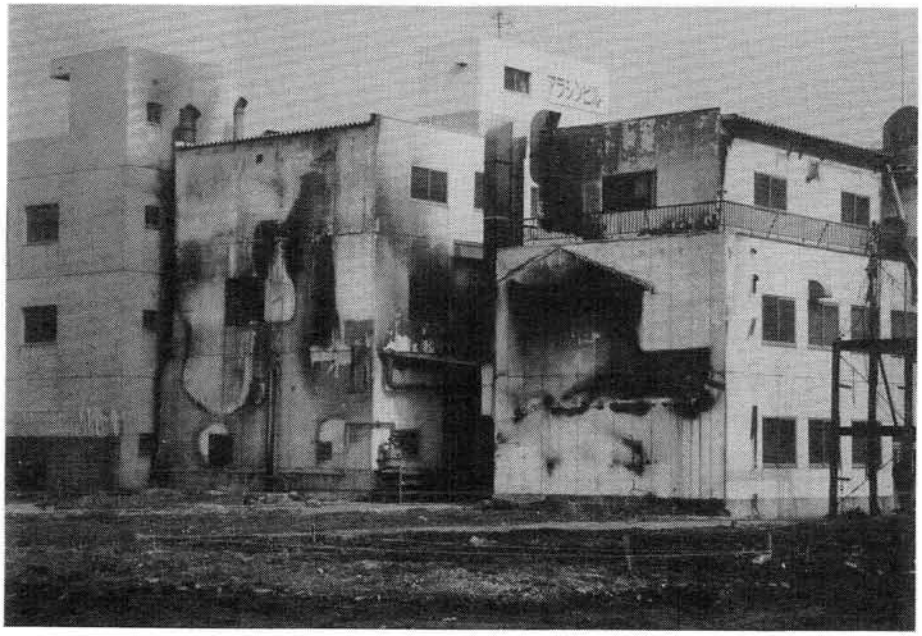
（Ｓ造建物の被害）



（Ｓ造建物内部の状況）

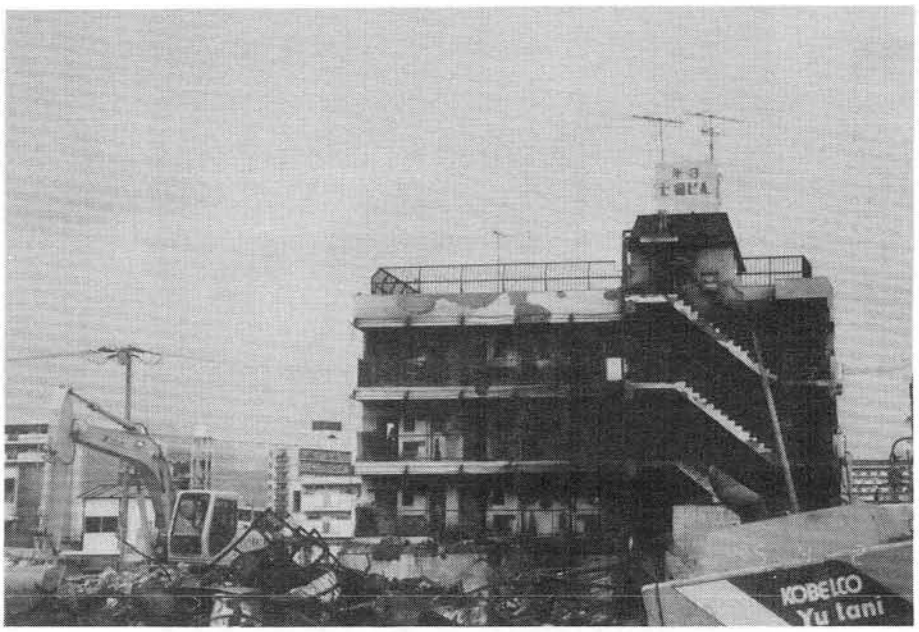


（Ｓ造建物の被害）

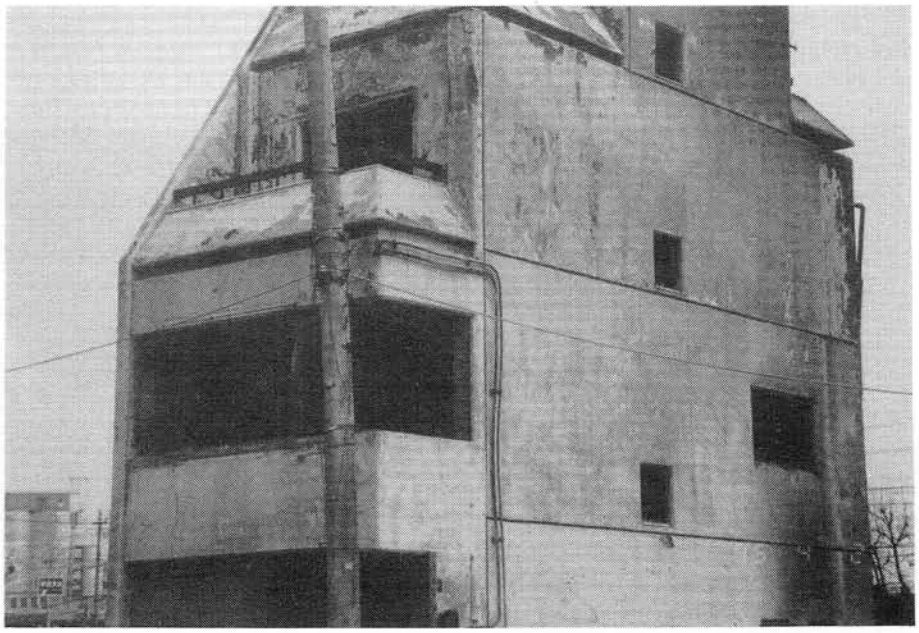


（Ｓ造建物の被害）

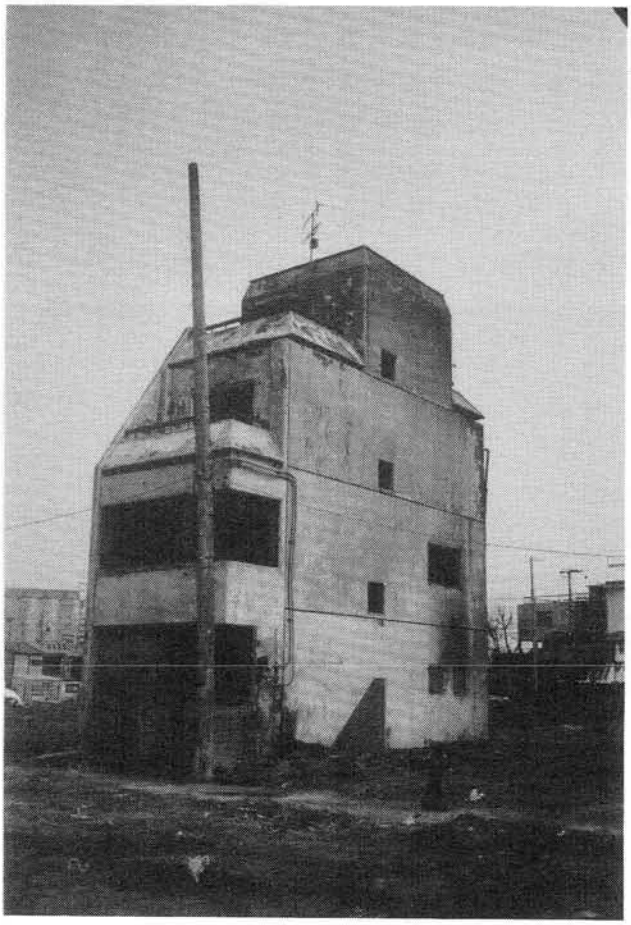
写真48　菅原変電所周辺地域（主にＲＣ造）



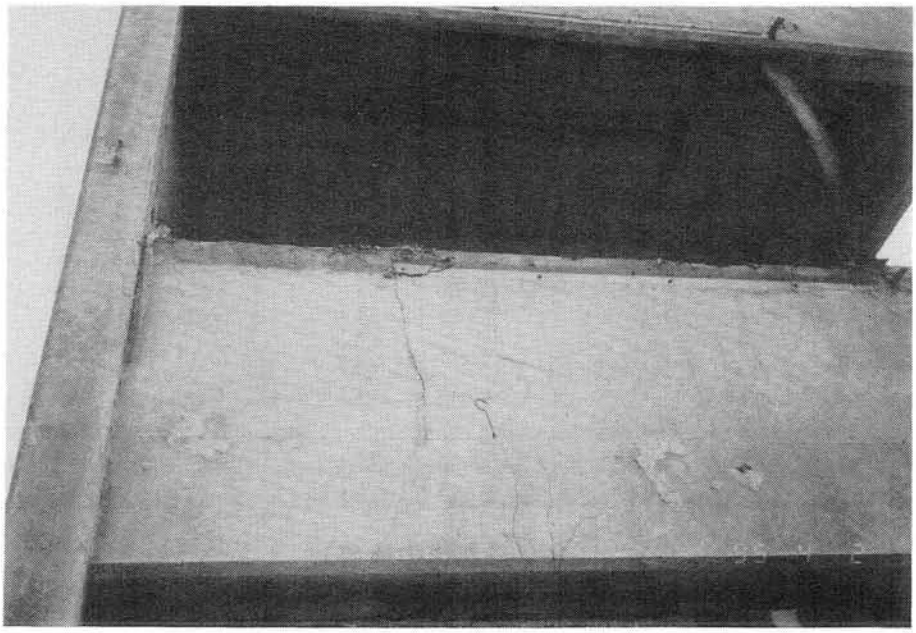
（ＲＣ造建物の被害）



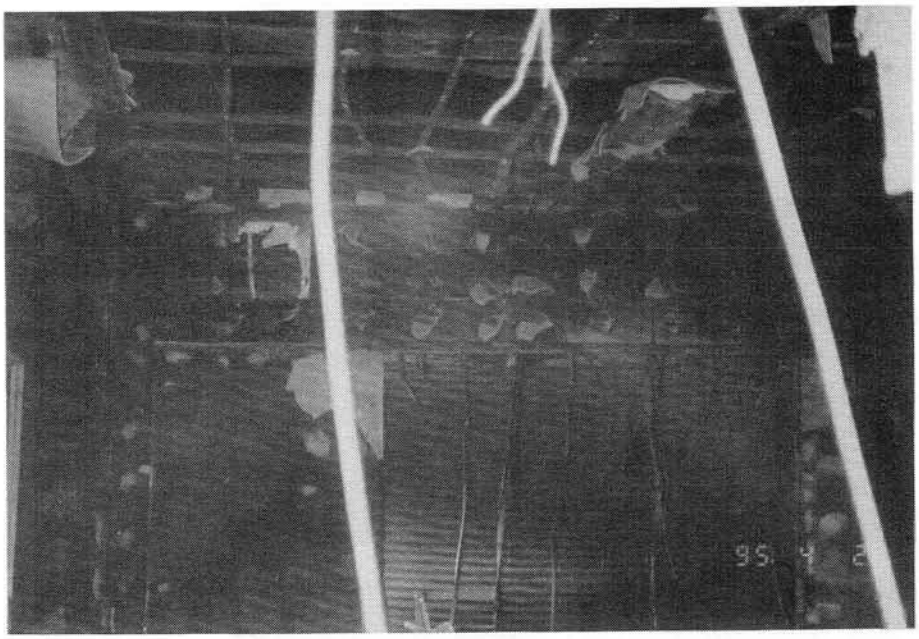
（ＲＣ造建物の被害）



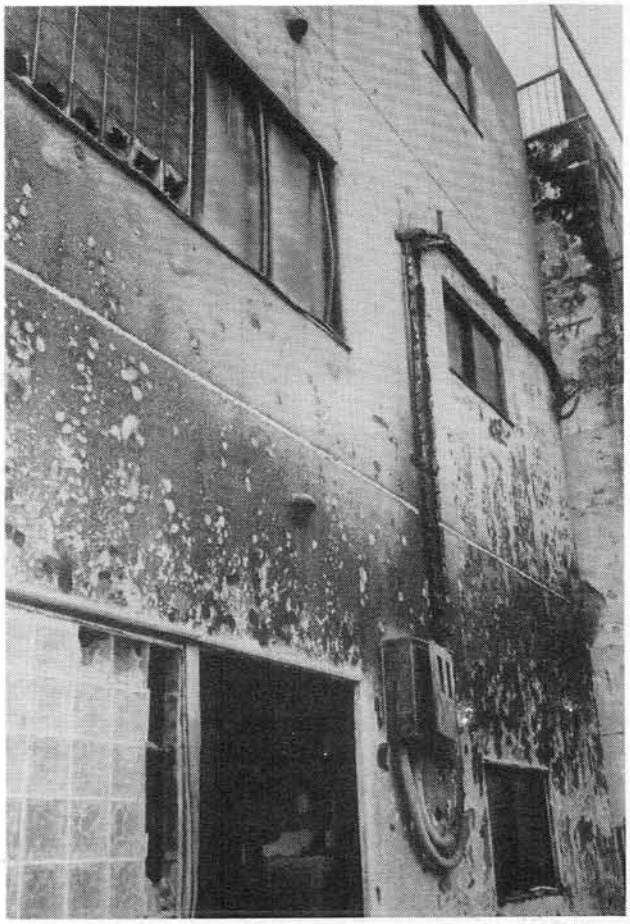
（ＲＣ造建物の被害）



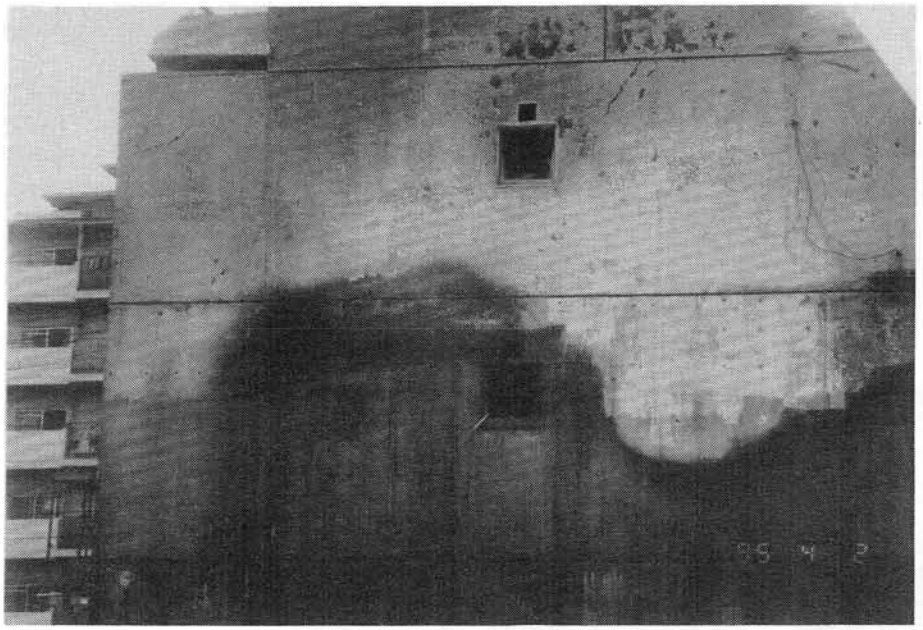
（ＲＣ造建物壁の被害）



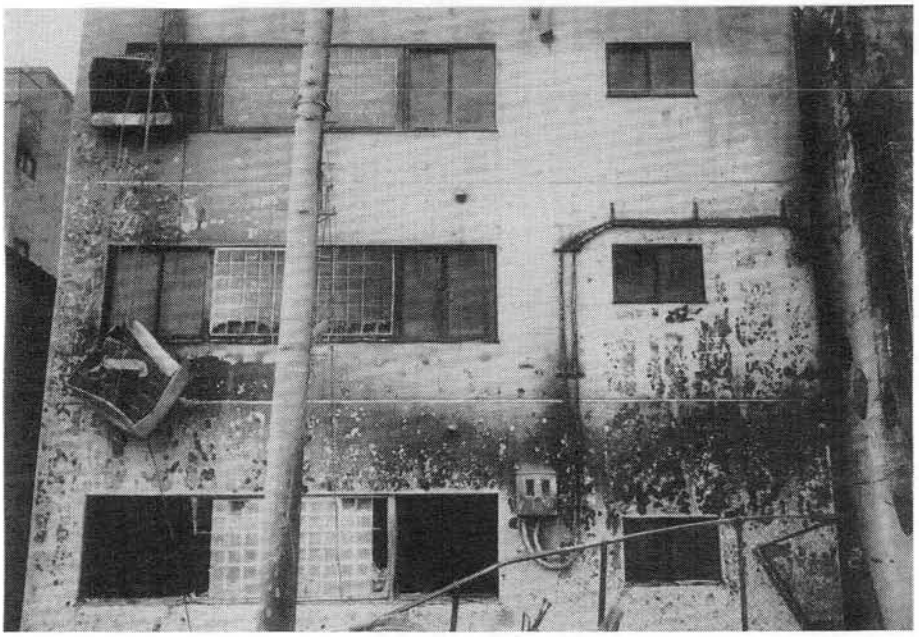
（ＲＣ造建物内部の被害）



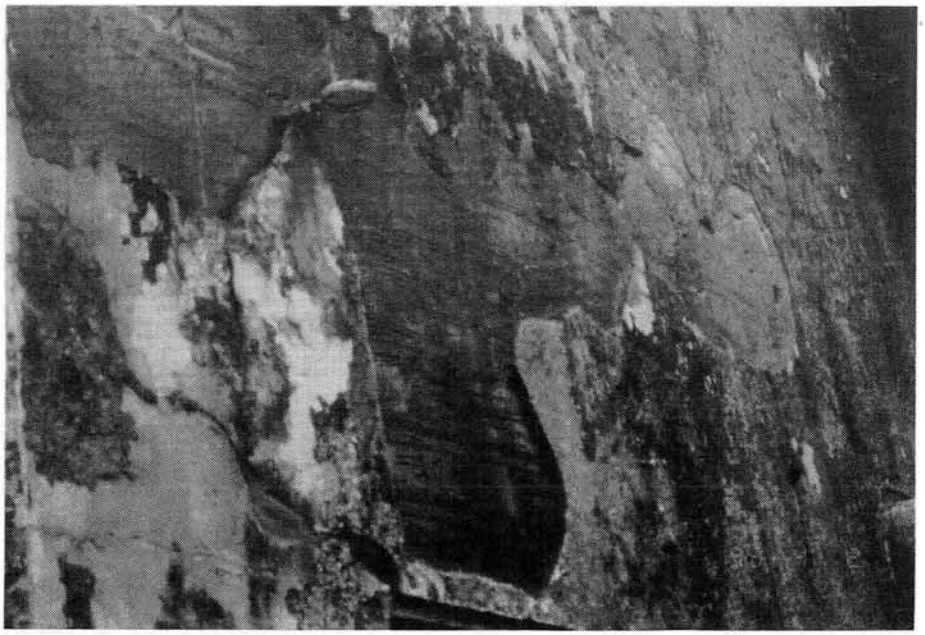
（ＲＣ造建物の被害）



（ＲＣ造建物の被害）



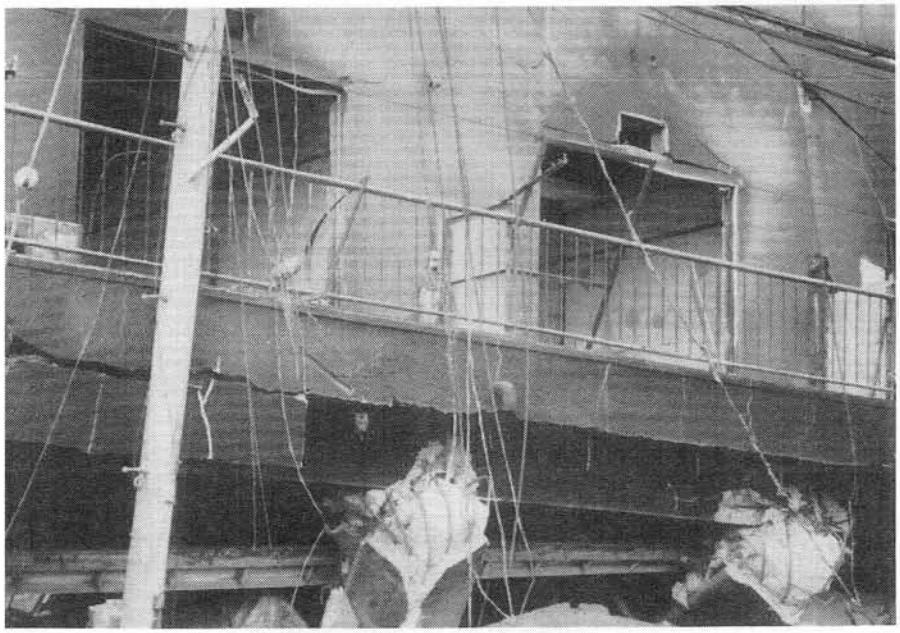
（ＲＣ造建物の被害）



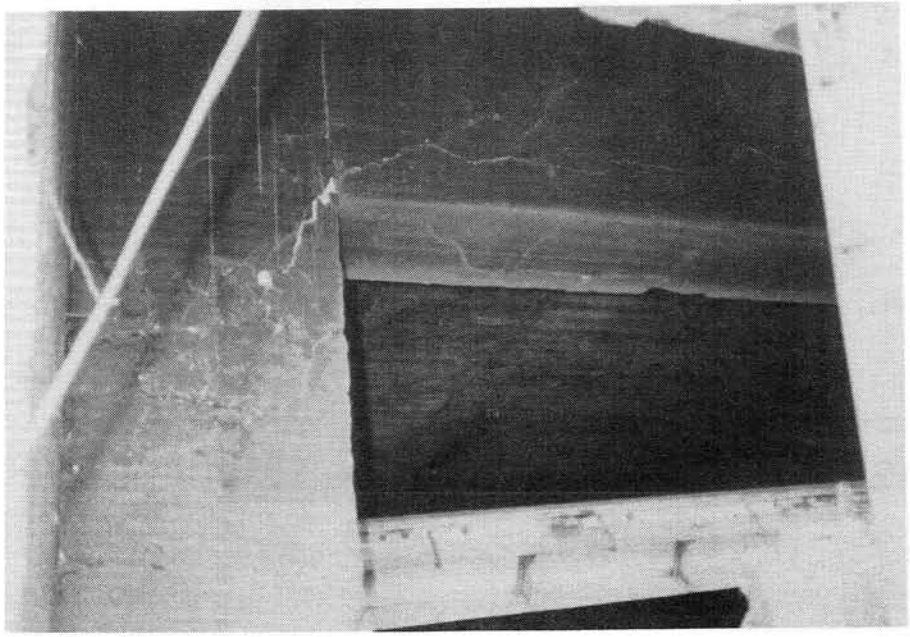
（ＲＣ造建物壁表面の状況）



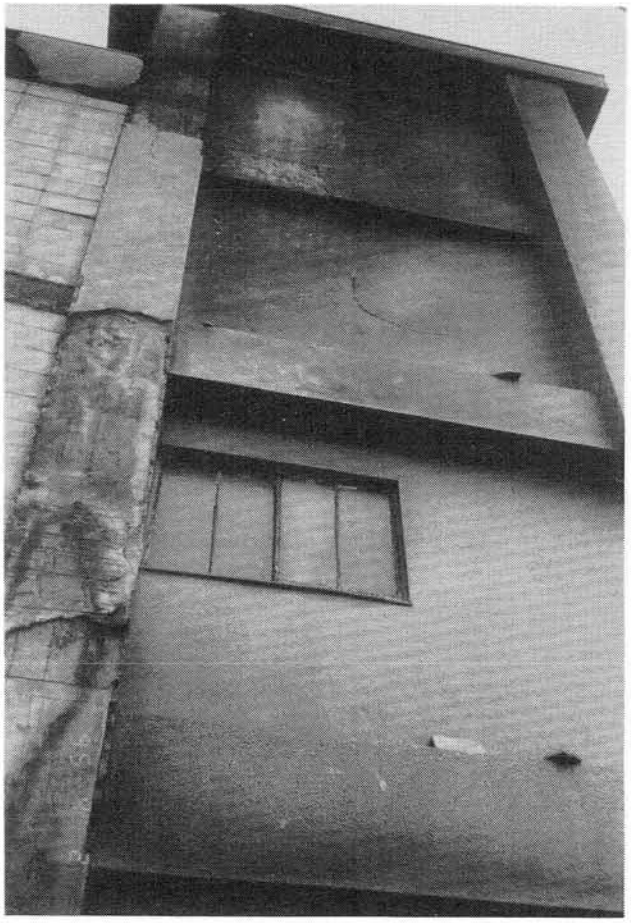
（ＲＣ造建物倒壊後の火災による被害）



（前のＲＣ造建物の近影）



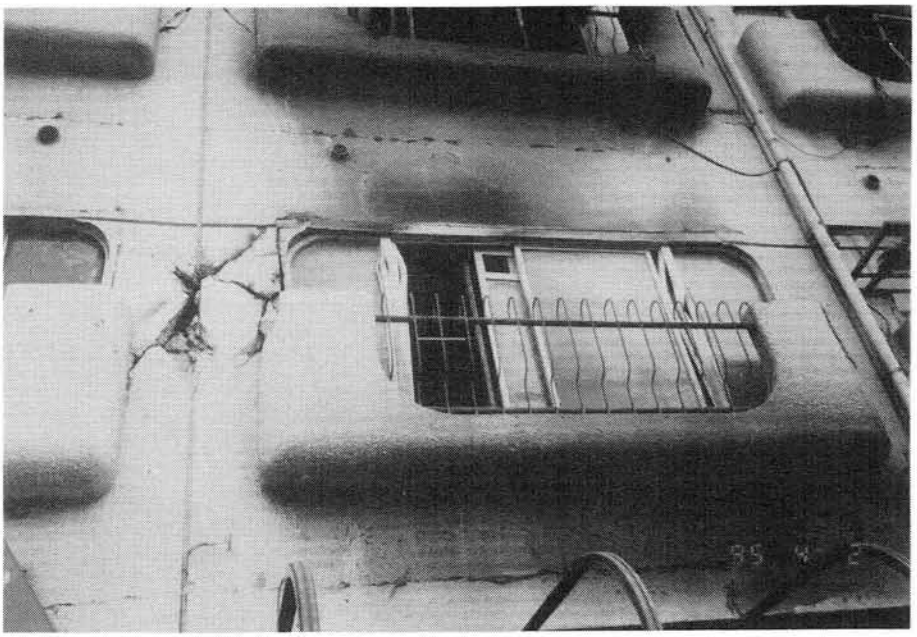
（前のＲＣ造建物の近影）



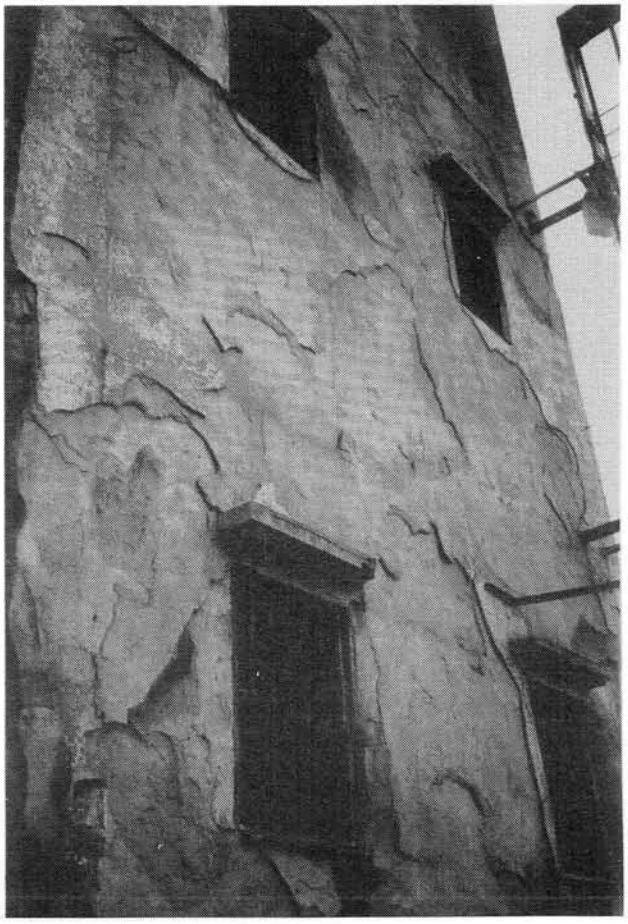
（ＲＣ造建物の被害）



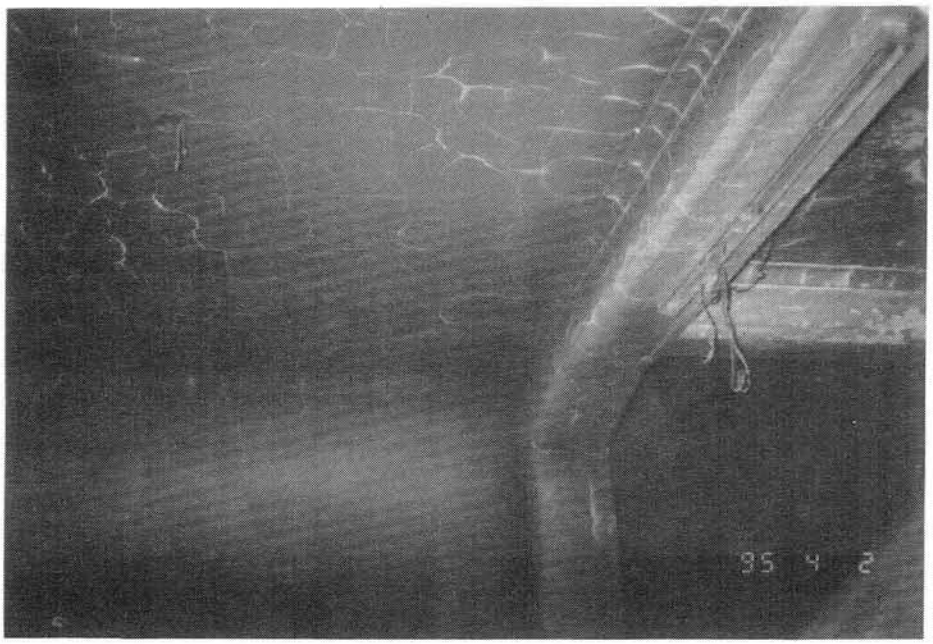
（ＲＣ造建物の被害）



（ＲＣ造建物の被害）



（倉庫と思われるＲＣ造建物の被害）



（前のＲＣ造建物内部の状況）



（ＲＣ造建物の被害）