

Title	上面増厚を施した道路橋RC床版における非破壊検査に よる損傷評価とその活用に関する研究
Author(s)	鈴木, 真
Citation	大阪大学, 2019, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/73575
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

# 博士学位論文

上面増厚を施した道路橋 RC 床版における 非破壊検査による損傷評価とその活用に関する研究

# 鈴木 真

# 2019年7月

大阪大学大学院工学研究科

# 目次

第1章 序論1
1.1 本研究の背景1
1.1.1 道路構造物をとりまく環境1
1.1.2 RC 床版の補強工法2
1.1.2.1 上面増厚工法
1.1.2.2 下面増厚工法 2
1.1.2.3 断面修復工法 3
1.1.2.4 鋼板接着工法
1.1.2.5 縦桁増設工法
1.1.2.6 連続繊維シート接着工法3
1.1.3 上面増厚工法の歴史と問題点4
1.1.4 上面増厚後の RC 床版の再劣化とその対策5
1.2 本研究の目的
1.3 本論文の構成
参考文献9
第2章 RC 床版の損傷メカニズムと現状における非破壊検査の課題の抽出10
2.1 RC 床版の損傷事例 10
2.2 RC 床版の損傷原因 11
2.2.1 中性化11
2.2.2 塩害
2.2.3 アルカリシリカ反応12
2.2.4 凍害
2.2.5 疲労
2.3 水平ひび割れの発生メカニズム15

2.4 従来	その非破壊検査手法とその課題2	0
2.4.1	超音波法2	0
2.4.2	AE 法2	0
2.4.3	電磁波レーダ法2	1
2.4.4	赤外線法2	2
2.4.5	衝擊弾性波法2	3
2.4.6	電磁パルス法2	4
2.5 まと	පත්	6
参考文献		7
第3章 基	-礎評価実験による非破壊検査の適用性に関する検討2	.8
3.1 はじ	こめに	8
3.2 衝擊	8弾性波法の適用性に関する基礎評価実験2	8
3.2.1	実験の概要2	8
3.2.2	供試体の概要2	8
3.2.2	2.1 供試体 A-1 の概要 2	9
3.2.2	2.2 供試体 A-2 の概要	0
3.2.2	2.3 供試体 A-3 の概要	1
3.2.3	計測概要	2
3.2.4	実験結果	3
3.2.4	.1 供試体 A-1 に対する実験結果3	3
3.2.4	.2 供試体 A-2 に対する実験結果3	7
3.2.4	.3 供試体 A-3 に対する実験結果(その1)3	7
3.2.4	.4 供試体 A-3 に対する計測結果(その 2)3	9
3.2.5	考察4	2
3.2.5	5.1 腐食ひび割れの検出に対する可能性4	.2

3.2.5.2 水平ひび割れ内にコンクリート粉体が滞積した場合の弾性波伝播特性43
3.2.5.3 滞水を伴う水平ひび割れの検出の可能性44
3.3 電磁パルス法の適用性に関する基礎評価実験45
3.3.1 実験の概要
3.3.2 供試体の概要
3.3.3 計測概要
3.3.4 実験結果および考察49
3.4 まとめ
参考文献

第4章	☆ 衝撃弾性波法の水平ひび割れ検出精度の向上に関する検討54
4.1	はじめに
4.2	衝撃弾性波法による水平ひび割れ検出の原理54
4.3	実験の概要
4.4	供試体の概要
4.5	計測概要
4.6	実験結果および考察64
4.	6.1 入力位置とセンサ間距離の影響64
4.	6.2 鋼球の自由落下高さの影響
4.7	まとめ
参考	文献70

第5章	電磁パルス法の水平ひび割れ検出に関する基礎的検討	71
5.1	はじめに	71
5.2	電磁パルス法の原理	71
5.3	計測条件が鉄筋に作用する磁場に及ぼす影響の検討	72

5	.3.1	実験の概要,	72
5	.3.2	計測条件が磁場および鉄筋の振動挙動に及ぼす影響	72
	5.3.2	2.1 供試体の概要および計測条件	72
	5.3.2	2.2 磁場および鉄筋の振動挙動の計測方法	73
	5.3.2	2.3 かぶりの違いが磁場および鉄筋の振動に与える影響	76
	5.3.2	2.4 鉄筋径の違いが磁場および鉄筋の振動に与える影響	77
	5.3.2	2.5 コンデンサ容量の違いが磁場および鉄筋の振動に与える影響	79
	5.3.2	2.6 励磁コイルの巻き数の違いが磁場および鉄筋の振動に与える影響	80
5	.3.3	鉄筋に作用する磁場の特性が弾性波に与える影響	81
	5.3.3	3.1 供試体および計測概要	81
	5.3.3	3.2 入力される弾性波の大きさおよび周波数成分に及ぼす影響	83
5.4	水平	平ひび割れが RC 床版の振動挙動に与える影響	85
5	.4.1	実験の概要	85
5	.4.2	供試体の概要	85
5	.4.3	計測概要	88
5	.4.4	実験結果	89
5	.4.5	たわみ共振の確認	92
5.5	水平	平ひび割れの有無に関する判定指標の提案	93
5.6	水平	平ひび割れの検出に適した計測条件に関する検討	94
5	.6.1	供試体概要および計測概要	94
5	.6.2	波形エネルギー比	94
5	.6.3	実験結果	95
5.7	衝	撃応答解析による水平ひび割れが及ぼす影響のメカニズムに関する検討	95
5	.7.1	解析の概要	95
5	.7.2	解析条件	96
5	.7.3	解析結果	98

参	考文	��		104
第6	章	実橋日	RC 床版に対する水平ひび割れの検出に関する検討	105
6.	1 は	じめ	に	105
6.	2 供	試体	の概要	108
6.	3 衝	擊弾	性波法による計測	110
	6.3.1	計測	測概要	110
	6.3.2	実駒	験結果および考察	111
	6.3	.2.1	水平ひび割れがない場合	111
	6.3	.2.2	剥離ひび割れがある場合	113
	6.3	.2.3	剥離費ひび割れおよび腐食ひび割れがある場合	115
	6.3.3	現地	地調査方法の提案	117
6.	4 電	磁パ	ルス法による計測	119
	6.4.1	計測	測概要	119
	6.4.2	実駒	験結果および考察	120
6.	5 複数	汝の非	非破壊検査手法を組み合わせた損傷評価手法の提案	123
	6.5.1	計測	測概要	123
	6.5	.1.1	供試体の概要	123
	6.5	.1.2	衝撃弾性波法による計測	126
	6.5	.1.3	電磁パルス法による計測	127
	6.5.2	実駒	験結果	127
	6.5	.2.1	衝撃弾性波法の計測結果	127
	6.5	.2.2	電磁パルス法の計測結果	129
	6.5.3	考察	察	131
	6.5	.3.1	判定結果が一致した計測点	131

		6.5.3	3.2 判定結果が一致しなかった計測点13	51
		6.5.3	3.3 判定不能となった計測点13	3
	6.6	まと	とめ	4
	参考	<b>⋚</b> 文献	<i>t</i> 13	5
第	7章	ī 录	離ひび割れに対する補修工法の開発13	6
	7.1	はし	こめに	6
	7.2	補低	冬工法の選定および検討方針13	7
	7.3	新加	たな上面増厚床版の補修工法の検討13	9
	7.	3.1	上面増厚後の RC 床版の損傷実態13	9
	7.	3.2	従来の補強工法13	9
	7.	3.3	新たな補修工法の提案13	9
	7.4	供評	式体による模擬実験14	1
	7.	4.1	実験概要14	1
	7.	4.2	洗浄方法の検討14	1
	7.	4.3	剥離ひび割れ内への充填材注入方法に関する検討14	3
	7.	4.4	充填材のせん断付着実験14	4
	7.5	撤∃	去床版による実験と評価14	6
	7.	5.1	実験概要14	6
	7.	5.2	剥離ひび割れの検出14	8
	7.	5.3	削孔14	9
	7.	5.4	洗浄実験14	9
	7.	5.5	充填材注入実験15	;0
	7.	5.6	静的せん断実験15	;1
	7.6	すり	0 磨き粉が残留した状態でのせん断付着実験15	;4
	7.	6.1	実験概要15	;4

7.6.2	実験結果156
7.7 す	り磨き粉および充填材の境界部近傍におけるせん断応力度157
7.7.1	解析条件157
7.7.2	解析結果159
7.8 す	り磨き粉が残留した状態での耐疲労性の検討161
7.8.1	実験要領161
7.8.2	実験結果161
7.8.3	等価繰返し回数の算定163
7.8.4	疲労寿命の算定163
7.9 t	とめ165
参考文	鈬166
参考文	默
参考文 第8章	歌166 非破壊検査を適用した補修後の品質管理に関する提案
参考文 <b>第8章</b> 8.1 は	歌166 非破壊検査を適用した補修後の品質管理に関する提案167 じめに167
参考文 第8章 8.1 は 8.2 橋	<ul> <li></li></ul>
参考文 第8章 8.1 は 8.2 橋 8.3 施	<ul> <li>         tw:</li></ul>
参考文 第8章 8.1 は 8.2 橋 8.3 施 8.4 計	<ul> <li>献</li></ul>
参考文 第8章 8.1 は 8.2 橋 8.3 施 8.4 計 8.5 計	<ul> <li>  新</li></ul>
参考文 第8章 8.1 は 8.2 橋 8.3 施 8.4 計 8.5 計 8.6 ま	新
参考文 第8章 8.1 は 8.2 橋 8.3 施 8.4 計 8.5 計 8.6 ま 参考文	<ul> <li>献</li></ul>

# 第1章 序論

### 1.1 本研究の背景

### 1.1.1 道路構造物を取り巻く環境

昭和38年に我が国初の高速自動車国道(名神高速道路(栗東IC~尼崎IC)が開通して以 来,約55年が経過した現在では,約9000kmの高速道路が供用している。しかし,供用延 長9,00kmのうち,供用から30年以上経過した延長が約4割(3,700km)となり,橋梁やト ンネルなどの構造物についても,供用年数に比例して30年以上経過している延長が橋梁で 約4割,トンネルで約2割と老朽化が進展している。道路構造物を取り巻く環境は,通行車 両の大型化とともに車両制限令の規制緩和により車両総重量の増加や積雪寒冷地の供用延 長の増加やスパイクタイヤ廃止の影響による凍結防止剤使用量が増加する一途をたどり, 道路構造物は厳しい環境の中で老朽化し,変状の顕在化が問題視されている。

道路構造物の中でも,道路橋 RC 床版は,通行車両の輪荷重を直接支持し,また常に風雨 に曝される環境にあるにも関わらず,部材厚が比較的小さく,比較的損傷しやすい鉄筋コン クリート部材であると言える。RC 床版の損傷が顕在化した場合,図-1.1.1<sup>1)</sup>に示すような 押し抜きせん断破壊等の損傷に至ってしまう危険性がある。このような抜け落ちは,通行車 両の交通事故につながる大きな問題へと発展してしまう可能性がある深刻な損傷である。



図-1.1.1 RC 床版の抜押し抜きせん断破壊の一例

このような状況を迎え,国土交通省では,道路施設の老朽化対策として,地方公共団体の 行う大規模な修繕や更新の事業に対し複数年にわたり集中的に支援することを目的に,平 成27年度より「大規模修繕・更新補助制度」を創設し,道路構造物の補修,補強や橋梁の 架け替え等の対策が大規模に進められている。

ここで、東日本高速道路㈱、中日本高速道路㈱および西日本高速道路㈱が管理する高速道路における大規模更新・大規模修繕計画について、表-1.1.1 に示す。特筆すべきことは、 大規模更新において、床版取替の費用が全事業費の約94%を占めていることである。この ことから分かるように、RC 床版の損傷の顕在化は、深刻な状況にあると言える。

分類	区分	項目	主な対策	対策箇所	延長**1	事業費※2
去	橋梁	床版	床版取替	中央自動車道 小早川橋 など	224km	16,429億円
規模更新		桁	桁の架替	阪和自動車道 松島高架橋 など	13km	1,039億円
新			小計		237km	17,468億円
	橋梁	床版	高性能床版防水 など	東北自動車道 宮麓橋 など	359km	1,601億円
츴		桁	桁補強 など	東名高速道路 朝比奈川橋 など	151km	2,628億円
<b>祝模修</b>	土構造物	盛土·切土	グラウンドアンカー 水抜きボーリング など	中国自動車道 美祢IC〜美祢西IC間 など	1,231km	4,775億円
<b>乔</b> 哲	トンネル	本体·覆工	インバート など	北陸自動車道 米山トンネル など	131km	3,593億円
	小計				1,872km	12,597億円
	合 計					30,064億円

表-1.1.1 大規模更新・大規模修繕計画(NEXCO3 社)

※1:上下線別および連絡等施設を含んだ延べ延長

※2:端数処理の関係で合計が合わないことがある

### 1.1.2 RC 床版の補強工法

損傷した RC 床版の補修・補強工法には、上面増厚工法、下面増厚工法、断面修復工法、 鋼板接着工法、縦桁増設工法、連続繊維シート接着工法等がある。一般的な RC 床版の補修・ 補強工法を以下に記す。

## 1.1.2.1 上面增厚工法

上面増厚工法<sup>2)</sup>は、既設床版部の上面に新たにコンクリートを打設して一体化させ、曲 げ耐力および押し抜きせん断耐力の向上を図る工法である。主として鋼橋 RC 床版の補強方 法として数多くの実績があり、増厚床版部に鉄筋コンクリートを適用する場合や鉄筋を配 置せず鋼繊維補強超速硬コンクリートを施工する場合がある。

## 1.1.2.2 下面增厚工法

下面増厚工法<sup>3)</sup>は、コンクリート床版の下面(引張)側に鉄筋等の補強材を配置し、モル タルもしくはコンクリートにて増厚することにより既設床版と一体化し、既設鉄筋応力・た わみ量を低減させ、曲げ耐力・疲労耐久性の向上を図る補強工法である。主に道路橋の RC 床版を対象に採用されている。下面増厚材料はポリマーセメントモルタルおよび鋼繊維補 強超速効モルタルが使用され、床版下面からコテ塗りや吹付けにより施工する。

### 1.1.2.3 断面修復工法

断面修復工法<sup>4)</sup>は、鉄筋の発錆などにより劣化したコンクリートを除去した後に、断面 欠損部などを、断面修復用のセメントモルタルや樹脂モルタルなどで元の形状寸法に修復 する補修工法をいう。復旧部の大きさに応じて、左官仕上げ工法、吹付け工法、プレパック ド工法等の中から修復する断面の規模や施工性、経済性等を考慮して選定する。左官仕上げ 工法は欠損部にモルタルを塗り断面を復旧する工法であり、吹付け工法はポリマーセメン トモルタルなどを吹付けて既存の構造物と一体化する工法である。また、プレパックド工法 は、欠損部に型枠を組み立ててモルタルを打ち込んで断面を修復する。本工法において、脆 弱化したコンクリートを取り除き鉄筋をはつりだして健全なコンクリートと一体化するこ とおよび鉄筋のケレンと防錆処理を行なうことが重要となる。必要に応じて、顕著に腐食し た鉄筋の交換や増設を行ない、アンカーを用いて一体性を強めて施工する場合もある。本工 法は、当初の性能・形状に戻す工法のため、劣化因子を適切に取り除かなければ、再度劣化 を誘発する危険性がある。

### 1.1.2.4 鋼板接着工法

鋼板接着工法は、厚さ4.5~6mmの鋼板をコンクリート構造物の表面に樹脂硬化剤等で接着して一体化させることにより、耐荷性能を向上させることが可能となる。RC 床版の下面に鋼板を接着する場合は、比較的広幅の板を接着する方法および短柵状の板を並列する方法がある。コンクリートおよび鋼板の接着には、アンカーボルトおよび樹脂材料が用いられ、樹脂材料はコンクリートおよび鋼板の隙間部に圧入する方法が広く採用されている。

### 1.1.2.5 縦桁増設工法

増桁架設工法は、RC 床版を支持する既存の主桁の間に、新たに桁を増設して床版の支間 を短縮することにより、活荷重等により RC 床版に作用する断面力を減少させ、RC 床版の 耐荷性能の向上を図る工法である。

### 1.1.2.6 連続繊維シート接着工法

連続繊維シート接着工法は、炭素繊維シートやアラミド繊維シート、ガラス繊維シートな どをコンクリート構造物の表面に樹脂硬化剤等で接着することにより、既往コンクリート 構造物の曲げ耐力やせん断耐力を向上させることが可能となる。補強レベルに応じて、繊維 シートの配置する方向や積層数を適切に選択することができる。

上記の補強工法の中でも,耐荷性能を回復することができるだけでなく,施工性が良く, 他の工法と比較して安価で,防水効果を期待することができる上面増厚工法が採用される ケースが比較的多い。一般的な上面増厚工法は,既設床版の上面を切削しブラスト研掃をし て鋼繊維補強コンクリートを打設し,コンクリートを一体化させることによって,RC床版 を補強するものである。当補強工法の施工状況を図-1.1.2 に,施工断面の一例<sup>5)</sup>を図-1.1.3 に示す。



図-1.1.2 施工状況の一例



### 1.1.3 上面増厚工法の歴史と問題点

旧日本道路公団(現NEXCO)において,上面増厚工法は昭和63年に東名高速道路(東京 第一管理局管轄)の床版補修工事に初めて適用され,その後施工実績を積み重ねられてきた。 平成元年には施工要領案が策定され,平成7年には「上面増厚工法設計施工マニュアル() 高速道路調査会」<sup>6)</sup>が発刊されるに至っている。

関西支社管内の鋼橋を対象として、約3,250径間のRC床版を分析し、上面増厚施工(増厚 厚さ=35~90mm)が適用された597径間(全体の18.3%)を対象に、供用開始からの第1回増 厚施工までの供用年数(○印)と再施工(以下、第2回増厚施工という)までの供用年数(● 印)の累積頻度分布を図-1.1.4に示す。図-1.1.4より、供用開始20年経過以降の橋梁に上面 増厚が適用されてきたこと、また、上面増厚施工区間の約16%において、およそ10年後から 再施工が行われてきたことがわかる。



図-1.1.4 上面増厚の適用供用年数と径間数の関係

上面増厚施工後5~15年後に床版の再劣化が顕在化し、再施工に至った経緯としては、上 面増厚工法を施したとしても、路面から雨水等が増厚床版コンクリート部の施工目地や地 覆・伸縮装置との境界を介して、既設床版コンクリート部と増厚コンクリートとの境界部に 浸入し、車両荷重によるすり磨き現象が助長され、両者間のひびわれが進展したためと考え られる。上面増厚施工後5年程度で水平ひびわれ部への接着剤注入などの再補修が行われた 施工事例もあるものの、再(上面)増厚された事例も報告されている。

## 1.1.4 上面増厚後の RC 床版の再劣化とその対策

上記のように、上面増厚工法を行ったにも関わらず、交通車両による輪荷重の繰返し載荷 により、既設床版部と増厚コンクリートとの境界面に水平ひび割れが発生し、そこに雨水等 が浸入して、再劣化し損傷が拡大した事例が多数報告されている<sup>7)</sup>。その一例を図-1.1.5 に 示す。



図-1.1.5 上面増厚工法施工後に再劣化した RC 床版の一例

このような損傷の進行を、未然に抑制することができれば、道路橋 RC 床版の寿命は飛躍 的に拡大し、維持管理性の向上を図ることができる。しかし、基本的に RC 床版内部に発生 した損傷を、外観目視により検出することは極めて難しい。言い換えると、何らかの変状が 外観目視により確認することができるような状態にあれば、損傷は顕在化してしまってい る可能性が大きいということになる。よって、非破壊検査手法を適用し、RC 床版内に発生 した損傷を検出することは、有効な手段に成りえると考える。

これまでの RC 床版の損傷に対する非破壊検査手法は,一定の条件下における損傷に対し て,その探査の是非を問うものであった。例えば,図-1.1.6 に示すように,衝撃弾性波法 により RC 床版内に発生した損傷(空隙)を検出することができるとの報告がなされている <sup>8)</sup>。しかし,実際に RC 床版内に発生している損傷は,図-1.1.6 に示すように一定の深さに あるとは限らない。また,空隙内は滞水している可能性がある。このように,RC 床版に発 生する損傷は一定の傾向を示すものではなく,一定条件から逸脱した損傷に対しては,推奨 される非破壊検査手法を適用したとしても,その検出精度が左右されてしまうという課題 が残る。



図-1.1.6 衝撃弾性波法のメカニズム

### 1.2 本研究の目的

以上のような背景を踏まえて、本研究は、適用性の高い非破壊検査手法を積極的に採用し、 上面増厚後に損傷が発生した RC 床版を対象として、損傷に対する評価をさらに高精度かつ 的確に行う手法の開発を目指すこととした。具体的には、以下のように本研究の目的を設定 した。

「上面増厚を施した RC 床版を対象として,その代表的な内部損傷として増厚コンクリートと既設床版との境界に生じる水平ひび割れを「剥離ひび割れ」,また,上下段鉄筋に沿って面的な広がりを持つ水平ひび割れを「腐食ひび割れ」と定義し,これらを適確に検出するための非破壊検査手法を検討した。さらに,以後の対策への損傷評価結果の活用方法について検討を加えた。」

### 1.3 本論文の構成

本論文は全9章から構成されている。本論文の構成を図-1.3.1に示す。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的、論文の構成を述べるとともに、本研究の位置 付けを記した。

第2章では、事例を踏まえて RC 床版の損傷と原因について整理するとともに、床版特有 の損傷形態としての水平ひび割れの発生メカニズムについて述べた。続いて、本研究におい て対象とする上面増厚後に再劣化した RC 床版内部に発生した水平ひび割れを、床版上下面 から検出するための非破壊検査手法として、既往の研究に基づき衝撃弾性波法および電磁 パルス法を選定した。

第3章では、水平ひび割れの評価方法として、第2章において抽出した衝撃弾性波法および電磁パルス法の適用性の確認を目的として、上面増厚後に再劣化した RC 床版内部に発生した水平ひび割れを模擬的に設定したコンクリート板供試体に対して基礎的な実験を行った。原理的には、衝撃弾性波法により水平ひび割れ内の状態に関わらず、最外縁に位置する水平ひび割れまでの深さの把握が可能であり、さらに電磁パルス法を併用すれば、水平ひび割れの有無だけでなく、「剥離ひび割れ」あるいは「腐食ひび割れ」の識別が可能であることを明らかにした。

第4章では、衝撃弾性波法による水平ひび割れのさらなる評価精度の向上を目的とし、弾 性波入力条件に着目した供試体実験を行なった。具体的には、コンクリート表面における鋼 球による打撃力、および打撃点とセンサとの間隔をパラメータとして変化させた計測を行 い、スペクトルピークが明瞭になる条件を明確にした。

第5章では、電磁パルス法での水平ひび割れの種類の識別精度の向上に資する情報を得る目的で、電磁力により鉄筋が加振された床版の振動メカニズムを解明するための供試体 実験および衝撃応答解析を行なった。ここでは、電磁力によって床版表面と水平ひび割れと の間の板部材にたわみ共振が励起されることを確認するとともに、かぶりの大きさ、鉄筋径、 あるいは電磁力の大きさが床版の振動挙動に与える影響を明らかにした。また、電磁パルス 法による水平ひび割れの検出には、評価指標として波形エネルギー値が有効であることを 示した。

第6章では、第4章および第5章で得られた成果を踏まえて、各非破壊検査手法の実構 造物に対する適用性を把握するため実験的検討を行なった。具体的には、実橋から切り出し た損傷を有する上面増厚補強 RC 床版を供試体として使用し、損傷状態の異なる箇所に計測 点を設定して、衝撃弾性波法および電磁パルス法による計測を実施した。その結果、水平ひ び割れの発生状況と非破壊評価の結果とは良い対応を示し、各手法の現場適用性が確認で きた。また、実際の床版での計測を想定し、衝撃弾性波法および電磁パルス法について、供 試体のほぼ全面に渡って、それぞれ床版上面または下面から、あるいは可能であれば床版の 上下両面から計測を行った結果を効果的に組み合わせることによって、水平ひび割れの有 無や種類の判定を精度良く行うための非破壊調査システムを提案した。 第7章では、非破壊検査により「剥離ひび割れ」が検出された RC 床版への補修対策として、「剥離ひび割れ」部をウォータージェット工法により洗浄したのちに、充填材(接着性のある樹脂硬化材)を注入して、増厚部と既設コンクリート床版の一体化を図る方法について検討を行った。具体的には基礎実験供試体および実橋からの切出し床版において施工性の確認を行うと共に、供試体での静的および動的せん断実験により、補強箇所の接着性能および疲労耐久性を明らかにした。

第8章では,第7章において提案した補修工法を実施工に採用した場合において,非破 壊検査手法による有効な品質管理手法の提案を行った。

第9章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の課題を提示し、本研究の 結論とした。



図-1.3.1 本研究の構成

## 参考文献

- 1) 財団法人橋梁調査会, J-BEC レポート 2014 Vol.10
- 2) 財団法人高速道路調査会,上面増厚工法設計施工マニュアル, p10, 1995
- 3) ㈱産業調査会、コンクリート補修・補強マニュアル、平成15年5月
- 4) ㈱産業調査会、コンクリート補修・補強マニュアル、平成15年5月
- 5) 財団法人高速道路調査会,上面増厚工法設計施工マニュアル, p10, 1995
- 6) 財団法人高速道路調査会,上面増厚工法設計施工マニュアル,1995
- 7) 長谷俊彦,和田圭仙,後藤明彦:上面増厚床版における劣化要因の検証と耐久性向上対策の 検討,日本コンクリート工学会年次論文集, Vol.50,No.3,2012.3
- 8) 鎌田敏郎,松井繁之,金裕哲,久保司郎,阪上隆英,塩谷智基,田川哲哉,崎野良比呂, 廣畑幹人,内田慎哉,大西弘志:各種道路橋床版における疲労損傷の非破壊検査システ ムに関する研究開発,国土交通省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研 究開発」成果報告レポート,No.19-3,2010.6

# 第2章 RC 床版の損傷メカニズムと現状における非破壊検査の課題

# の抽出

## 2.1 RC 床版の損傷事例

損傷した RC 床版の一例を,図-2.1.1 に示す。RC 床版の損傷には,ひび割れ,かぶり部の浮き・はく落,鉄筋腐食,土砂化等があげられる。このような損傷の発生原因として,橋面に滞水した雨水等が RC 床版内部に供給されたことがあげられる。供給された水分に凍結防止剤が含有されていれば,塩害による劣化が進行することになる。



(a) 床版下面のエフロレッセンスを伴うひび割れ

(b) 床版下面の下段鉄筋の腐食



(c) 床版上面かぶり部のはく落

(d) 床版上面の上段鉄筋の腐食

図-2.1.1 RC 床版の損傷事例

### 2.2 RC 床版の損傷原因

2.2.1 中性化 <sup>1)</sup>

中性化は、大気中の二酸化炭素がコンクリート内に侵入し、炭酸化反応を起こすことによって細孔溶液の pH が低下する現象をいう。これにより、コンクリート内部の鋼材が腐食する。鋼材の腐食により、ひび割れの発生、かぶりの剥落、鋼材の断面欠損によるコンクリート部材の耐荷性能の低下が生じる。また、中性化は、水和物の変質と細孔構造の変化を伴うため、鋼材の腐食だけでなくコンクリートの強度変化も引き起こす可能性がある。

コンクリートの中性化とそれに伴う構造物の劣化は、以下のようなメカニズムにより進行する。

- ① 細孔中の水分が逸散した空隙に、二酸化炭素が侵入する。
- ② 細孔内に侵入した二酸化炭素が細孔溶液中に溶解し、炭酸イオン(炭素水素イオン) になる。
- ③ 炭酸イオンと水酸化イオンから供給されるカルシウムイオンが反応し、炭酸カルシウムが生成される。また、他の水和物や未水和セメントも炭酸化する。
- ④ 炭酸化により、細孔溶液の pH 低下および細孔構造の変化が起きる。
- ⑤ pH の低下に伴い,鉄筋表面の不動態皮膜が消失し,水分と酸素の供給により腐食が 生じる。
- ⑥ 腐食が進行すると、コンクリートにひび割れが生じる。ひび割れが生じる腐食量は、 コンクリートの強度、かぶり、鉄筋径等に依存する。
- ⑦ ひび割れを通して酸素等の供給量が増加し、更なる腐食の進展により、ひび割れの拡大やかぶりの剥離が発生する。また、鉄筋の断面欠損により耐荷性能の低下が発生する。

### 2.2.2 塩害2)

塩害は、コンクリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンの存在により促進され、腐食生成物 の体積膨張がコンクリートにひび割れや剥落を引き起こし、さらには鋼材の断面減少など を伴うことにより構造物の性能が低下し、構造物が所定の機能を果たすことができなくな る現象をいう。

一般的に、コンクリート中の細孔はセメントの水和反応による飽和水酸化カルシウム水 溶液で満たされている。飽和水酸化カルシウム水溶液の pH 値は 12~13 であり、コンクリ ートは強アルカリ性を示す。このような高アルカリ環境の中にある鉄筋表面には酸素が化 学吸着し、緻密な酸化物層が生じることによって厚さ 3nm 程度(1nm は 1m の 10 億分の 1) の不動態被膜(γ-Fe2O3・nH2O)が形成される。その不動態被膜によってコンクリート中の 鉄筋は腐食から守られる(不動態化している)。しかし、コンクリート中に許容濃度以上の 塩化物イオン(Cl-)が存在する場合、鉄筋表面の不動態被膜が破壊される。コンクリート中 には十分な量の酸素と水が存在するため、不動態被膜が破壊されると鉄筋は酸化反応を起 こし腐食が開始する。コンクリート中に塩化物イオンが存在する主な理由を以下に記す。

沿岸部の海水飛沫や冬季間の凍結防止剤散布などによる塩化物の浸透(飛来塩分)

② 海砂や塩化物含有混和剤の使用など、コンクリート材料に由来する塩化物(内在塩分) いずれの場合においても、限界濃度以上の塩化物イオンの存在により不動態皮膜が破壊 され、酸素と水によって鉄筋腐食が進行する。これまで土木学会では腐食発生限界塩化物イ オン濃度を1.2kg/m3と定めていたが、2013年制定の「コンクリート標準示方書[維持管理 編]」ではコンクリートの種類に応じた算定式にて求める手法が提案されるとともに、みな し規定として2.0kg/m3という値も提示されている。

不動態被膜が破壊された箇所では鉄筋腐食が生じるが、このコンクリート中の鉄筋腐食 は電気化学的反応として、図-2.2.1のように表すことができる。アノード反応は、電子2個 を鉄筋母材中に残して鉄がイオンとなって溶出する反応であり、鋼材が腐食することその ものになる。このアノード反応によって生じる電子を消費するのがカソード反応である。こ の2種類の反応が同時に起こるのが鉄筋腐食反応であり、反応の進行に従い水酸化第一鉄、 水酸化第二鉄、赤錆が生成される。鉄筋が腐食すると腐食箇所の体積が2.5倍程度に膨張す るため、その膨張圧によってコンクリートにひび割れが発生する。そのひび割れを通じて水 分、酸素、塩化物イオンなどの劣化因子の供給が容易になることにより、さらに鉄筋腐食が 促進され、コンクリートはく離やはく落、鉄筋の断面減少を生じ、構造物の耐久性能、耐荷 性能が低下する。



### 2.2.3 アルカリシリカ反応<sup>3)</sup>

アルカリ骨材反応は、骨材中のシリカ成分とアルカリが反応するアルカリシリカ反応(以下, ASR と称す)と、ドロマイト質石灰石とアルカリが反応するアルカリ炭酸塩反応との2 種類があると言われているが、アルカリ炭酸塩反応とされてきた反応も実際には石灰石中 の微晶質シリカに起因する ASR であることが明らかになった。

コンクリートは本来,高いアルカリ性を有しているが,そのアルカリ分がコンクリートに 使用された反応性骨材中のある種の反応成分と化学反応を起こし,反応生成物であるアル カリシリカゲルを生成する。アルカリシリカゲルは強力な吸水膨張性を有しており、コンク リート外部からの水分供給により膨張する。このアルカリシリカゲルの膨張によって、コン クリート内の組織に内部応力が発生し、反応性骨材周囲のセメントペーストを破壊する。時 間の経過に伴って ASR が進行すると、反応性骨材の周囲に発生した微細なひび割れが進展 し、やがてコンクリート構造物の表面に巨視的なひび割れが発生する。ASR の劣化メカニ ズムを図-2.2.2 に示す。

ASR 劣化の進行過程は、第1ステージ『骨材中のシリカ鉱物(nSiO2)とコンクリート中のアルカリ金属との化学反応によってアルカリシリカゲル(Na2O・nSiO2)が形成される過程』と、第2ステージ『アルカリシリカゲル(Na2O・nSiO2)が細孔溶液を吸収して膨張する物理化学的な過程』に分離することができる。

ASR の進行過程の反応機構をみると、十分な水、十分なアルカリ金属イオンおよび骨材 中の反応性シリカの存在、という3つの条件が揃ったときにASRによるコンクリートの劣 化が生じる。ここで、アルカリシリカゲルの生成は、全ての種類の骨材において発生するの ではなく、ある種の不安定な鉱物(シリカ鉱物など)を含む反応性骨材が混入されている場 合に発生する可能性がある。わが国で確認されている反応性骨材の主なものとして、火山岩 が起源の骨材(安山岩、流紋岩など)や堆積岩が起源の骨材(チャート、砂岩、頁岩など) などが挙げられる。



2.2.4 凍害 4)

凍害は、気象環境条件に加えて、外部からの水分の浸透によって生じるものであり、経年 的な凍結の繰り返しによって、徐々に劣化する現象である。凍害を受けたコンクリート構造 物は、下記のような変状が発生する傾向がある。

- ① 微細なひび割れ
- ② スケーリング:表面が薄変状に剥離・剥落する。
- ③ ポップアウト:表層下の骨材粒子などの膨張による破壊でできた表面の円錐状の剥離

### 2.2.5 疲労 5)

疲労とは、材料の静的強度に比較して一般に小さいレベルの荷重作用を繰り返し受ける ことにより破壊に至る現象をいう。コンクリート構造物における疲労破壊現象は、その構成 材料である鉄筋や PC 鋼材あるいはコンクリートにひび割れが繰り返し荷重により発生し、 それが進展することにより最終的には常時の荷重下において部材が破壊に至る。

RC 床版の疲労劣化は、下面のひび割れとして観測されることから、一般に、RC 床版下面のひび割れ状態で説明されることが多い。RC 床版下面に状態による RC 床版の劣化進行 過程を以下に記す。

潜伏期

乾燥収縮もしくは載荷による主鉄筋に沿った一方向のひび割れが数本程度確認できる段階である。主桁の拘束条件による橋軸直角方向のひび割れが進行することもある(図-2.2.3(a)参照)。

② 進展期

主鉄筋に沿った曲げひび割れが進展するとともに、配力筋に沿うひび割れも進展し 始め、格子状のひび割れ網が形成される段階である。外観上のひび割れの密度の進行は 著しいが、RC 床版の連続性は失われていない(図-2.2.3(b)参照)。

③ 加速期

ひび割れの網細化が進み,ひび割れ幅の開閉やひび割れ面の掏り合わせが始まる段階である。ひび割れのスリット化や角落ちが生じるとコンクリート断面の抵抗は期待できないので,RC床版の耐力は急激に低下し始める(図-2.2.3(c)参照)。

④ 劣化期

RC 床版断面内にひび割れが貫通すると連続性は失われ,貫通ひび割れで区切られた 梁部材として通行車両の輪荷重に抵抗する段階である。貫通ひび割れの間隔やコンク リート強度,配筋量などが部材としての終局耐力に影響するだけでなく,雨水の浸透や 鉄筋腐食などにも配慮する必要がある(図-2.2.3(d)参照)。



(a) 潜伏期







(b)進展期

(d)劣化期

図-2.2.3 RC 床版の疲労による劣化進行過程

## 2.3 水平ひび割れの発生メカニズム

RC 床版に限らず,鉄筋腐食による膨張圧に起因して発生するひび割れは,図-2.3.1 に示 すように,隣接する鉄筋から派生するひび割れがつながるようにして進展していく。言い換 えると,ひび割れは,鉄筋が配置されている面に対して,同一面に平行に発生する傾向があ る。RC 床版は,交通車両の走行性を考慮してほぼ水平方向に施工されるため,このような ひび割れも水平方向に発生することになる。よって,本論文では当該ひび割れを水平ひび割 れと称す。水平ひび割れの一例を図-2.3.2 に示す

上記の鉄筋腐食に起因する水平ひび割れは、必ずしも一定の深さで一面的に発生すると は限らない。また、水平ひび割れが顕在化することにより、部分的な破壊に派生する可能性 もある。規則性のない水平ひび割れには、下記のようなものが考えられる。

- ・損傷1:深さが変化する水平ひび割れ
- ・損傷2:層状化した水平ひび割れ
- · 損傷3: 土砂化





図-2.3.2 水平ひび割れの一例(撤去された RC 床版の断面)

施工上の不具合等により,鉄筋は必ずしも規則正しく配置されているとは限らない。その 一例を,図-2.3.3に示す。図-2.3.3は,ある特定の鉄筋だけ,かぶりが大きく配置されて しまった場合を示している。ひび割れは,鉄筋の位置に応じて深い位置に発生することにな る。このような状況であれば,損傷1に示すような深さが変化するひび割れが発生する可能 性が考えられる。



図-2.3.3 鉄筋配置が不規則な場合のひび割れ発生メカニズム(その1)

図-2.3.4は、図-2.3.3に対してある一部の鉄筋のかぶりが、さらに大きくなってしまった状態を想定している。図-2.3.4に示すように、隣接する鉄筋間だけでなく、かぶりが大きくなってしまった鉄筋の左右に位置する鉄筋間にも、ひび割れが発生したしまった状態にある。このような状況であれば、損傷2に示すような層状にひび割れが発生する可能性が考えられる。



図-2.3.4 鉄筋配置が不規則な場合のひび割れ発生メカニズム(その2)

図-2.3.3 および図-2.3.4 とは逆に、図-2.3.5 は鉄筋のかぶりが小さく配置されてしまった場合を想定している。鉄筋の上方のかぶりが著しく小さい場合、かぶり部分には小さなひび割れが多数発生する上に、舗装上面を走行する交通車両の繰り返し荷重載荷により、最終的にはかぶり部分が粉砕されモルタル分だけが流出するような状況に至る。このような状況であれば、損傷3に示すような土砂化が発生する可能性が考えられる。



図-2.3.5 土砂化の発生メカニズム(その1)

また、上記とは異なる土砂化の要因として、図-2.3.2~図-2.3.5 に示す損傷が同時に発生し、それらがさらに進行してしまった場合が考えられる。図-2.3.6 に示すように、かぶりが小さい部位だけでなく、層状化したひび割れに挟まれている部位も比較的薄い部材となっていることが想定されるため、交通車両の繰り返し荷重載荷により、粉砕される可能性が十分に考えられる。当該部位が粉砕されることにより、その上方にあるかぶり部に粉砕される範囲が拡大していくと推測される。土砂化の一例を、図-2.3.7 に示す。





図-2.3.7 土砂化の一例

上記の損傷1~3に示す各損傷には、鉄筋腐食を誘発する水の介在が考えられる。特に損 傷3(土砂化)については、水の影響が極めて大きい。一般的に土砂化の発生原因として、 凍害、塩害、ASR等が考えられるが、これらは、舗装上面から雨水等がRC床版内に侵入す ることにより発生するものである。土砂化は、RC床版の抜け落ち事故にもつながる深刻な 損傷の一つである。

劣化が顕在化した既存鋼橋 RC 床版の補修工法として,上面増厚工法が一般的に採用され ている。しかし,その後の交通車両による輪荷重の繰り返し載荷により,既設床版部と増厚 コンクリート部との境界部から水平剥離が生じ,雨水等が浸入することによって,再劣化し てしまった事例が多数報告されている。上面増厚後に再劣化した RC 床版は,図-2.3.8 に 示すように,増厚コンクリートおよび既設床版との境界面(以下,床版境界面と称す)での 剥離による水平ひび割れ(以下,剥離ひび割れと称す)だけでなく,RC 床版内の鉄筋腐食 に起因する水平ひび割れ(以下,腐食ひび割れと称す)が,層状に発生している場合がある。 損傷状況の一例を,図-2.3.9 に示す。

腐食ひび割れは、鉄筋腐食に起因することから、損傷1および損傷2のように、規則性に 乏しい形状になってしまう場合がある。また、剥離ひび割れにおいても、増厚コンクリート の施工時において、(舗装切削後において)既設床版上面のブラスト処理を行うだけでなく、 図-2.3.10に示すように、浮きがあればはつり取りとるため、既設床版上面に不陸がある状 態で、増厚コンクリートが打設されることになる。よって、増厚コンクリートが、必ずしも 一定の厚さで打設されることがないため、床版境界面において損傷2に類似した深さが変 化する水平ひび割れになってしまう可能性がある。

本研究では、上面増厚後に再劣化し、RC 床版内に発生した水平ひび割れを対象とし、非 破壊検査手法を適用して、剥離ひび割れおよび腐食ひび割れを精度よく検出することを目 的とした。



図-2.3.8 上面増厚後に再劣化した RC 床版



図-2.3.9 上面増厚後に再劣化した RC 床版の一例



図-2.3.10 浮き部のはつり状況

### 2.4 従来の非破壊検査手法とその課題

これまで RC 床版に発生した損傷を検出する非破壊検査手法として,電磁波レーダ法や赤 外線サーモグラフィ法等に関する研究が行われてきた。本項では,各非破壊検査手法につい て解説し,本研究を行う上で各非破壊検査手法の課題を整理し,適用可能な非破壊検査手法 の抽出を行った。

### 2.4.1 超音波法 6)

一般的に,超音波は弾性波の周波数領域が可聴域よりも高いものを指すことが多い。一方 で、コンクリート構造物を対象として超音波法を適用する場合は、受信した弾性波を評価す る際に可聴域よりも低い周波数領域の弾性波を含む方が有用である場合がある。したがっ て、ここでは電気的な作用を振動に変換することにより弾性波を発生させ、これと同じく電 気的な信号として受信する形態の手法を、周波数の帯域に関わらず超音波法と定義する。一 般的な非破壊試験における超音波法では、弾性波は主に圧電効果を利用した振動子の機械 的な振動によって発信され、弾性波形を電圧信号に変換する機能をもつ振動子により受信 される。超音波法の一探触子一面配置により水平ひび割れを検出する原理を図-2.4.1 に示 す。探触子から連続波をコンクリートへ発信し、水平ひび割れで反射する波を探触子により 受信する。この時刻にコンクリートの縦波の伝播速度を掛けることにより、床版表面から水 平ひび割れまでの深さを推定するというものである。なお、既往の研究において、損傷を模 擬した供試体に対して超音波法よる計測を行ったところ、損傷面積によらず計測可能な損 傷の深さ130mm までであったとの報告がある。



#### 図-2.4.1 超音波法の原理

### 2.4.2 AE 法<sup>7)</sup>

アコースティック・エミッション(AE)とは、個体が変形あるいは破壊する際に、それ まで蓄えていたひずみエネルギーが解放されて弾性波が生じる現象およびそのようにして 発生する弾性波動と定義されている。AE法はこの現象を利用した手法であり、コンクリー ト内部のひび割れの発生やその進展で生じる弾性波をコンクリート表面に設置した AE セ ンサで検出し、ひび割れの位置や規模、発生メカニズムを評価する非破壊試験である。図-2.4.2 に AE 法の原理を示す。

AE 法により、コンクリート内部に発生した既存の損傷を検出することは難しいと考えら

れる。よって,そのような用途に適用する場合は,長期的なモニタリング計測を行う必要が ある。



### 2.4.3 電磁波レーダ法<sup>8)</sup>

電磁波レーダ法とは、コンクリート内にマイクロ波と呼ばれる電磁波を放射し、その反射 波を受信してコンクリート内の鉄筋や空洞などの有無を確認する手法である。図2.4.3 に 電磁波レーダ法を用いた床版の内部状況調査の概要を示す。電磁波は、コンクリート内部の 電気的特性(主に比誘電率)の異なる物質の境界で反射する性質を有するため、電磁波は鉄 筋や空洞などの電気的特性が異なる物質の境界面において反射する。よって、電磁波の放射 時間と反射波の受信時間を計測することで、検査表面から内部の鉄筋や空隙目での距離を 算定することができる。それと同時に、境界面の反射強度に着目することでその材質を把握 することが可能である。

RC 床版において電磁波レーダ法を用いることにより、舗装表面に表れない床版上面にお ける損傷(土砂化)をアスファルト舗装路面から検出することが可能である。床版に放射さ れた電磁波の周波数はおよそ 400MHz から 800MHz 程度であり、深さが大きな損傷である ほど、低い周波数により調査が行われる。

床版に放出された電磁波は、アスファルト層と床版が密着している場合、すなわち健全部 においては、境界面で反射した電磁波は大きなエネルギーを持つ。一方で、土砂化が発生し ているために境界面が密着していない場合、反射した波形のエネルギーが小さくなる。これ より、床版上面における土砂化を検出することが可能である。

電磁波レーダ法の問題点として,降雨などにより床版内に水分が滞水している場合に異 常信号が得られるため,電磁波レーダ法の調査結果に大きな影響を与える点が挙げられる。 そのため,電磁波レーダ法は雨天の際や床版内部で滞水している場合に適用が困難である。



図-2.4.3 電磁波レーダ法の原理

### 2.4.4 赤外線法 9)

赤外線法とは、物体から放出される赤外線を専用のカメラにより検出し、それらが持つエネルギー量を温度に変換することで、温度の高低を赤外線熱画像として映し出す手法である。図-2.4.4 に赤外線法を用いた欠陥検出の原理について示す。コンクリートがはく離している箇所や空隙がある箇所と健全部とでは、熱伝導率が異なるために、日射や外気温の変化により、表面温度の変化が生じる。その温度変化を把握することにより、床版内部の異常箇所を検出することが可能である。

赤外線法は床版橋梁におけるコンクリートのうきやはく離の調査のほかに、トンネル覆 エコンクリートの浮きや剥離の調査やモルタル吹付けのり面の健全度評価,補修・補強箇所 の健全度調査にも適用される。

赤外線法の問題点として,対象物の温度変化が起こるために,日射量が十分でなければな らい点が挙げられる。そのため,日射量が十分でない状況や強風時には赤外線法の適用は困 難である。また,赤外線の調査対象はコンクリート表面から 50mm の深さまでの空隙であ るため,深部の内部状況を把握することが困難である。



### 2.4.5 衝撃弾性波法<sup>10)11)</sup>

衝撃弾性波法は、鋼球等により RC 床版の表面を打撃することにより RC 床版内部に弾性 波を伝播させ、RC 床版表面および底面間に発生する多重反射、あるいは RC 床版表面およ び水平ひび割れ間に発生する多重反射する波を、RC 床版の表面に設置したセンサにより受 信し、この受信波を周波数分析することにより算出されるピーク周波数に基づき、RC 床版 の版厚や水平ひび割れまでの深さを推定することができる非破壊検査手法である。衝撃弾 性波法により RC 床版内部の水平ひび割れを検出する原理を示した概念図を図-2.4.5 に示 す。



図-2.4.5 に示す RC 床版厚: Tおよび RC 床版表面から水平ひび割れまでの深さ: dに相当する理論上のピーク周波数は,式(2.4.1)および式(2.4.2)により算出することができる。

$$f_T = C_p / 2T$$
 (2.4.1)  
 $f_d = C_p / 2d$  (2.4.2)

ここで, *ft*: RC 床版の厚さに相当する縦波の版 厚共振周波数, *fd*:水平ひび割れの深さに 相当する縦波の欠陥共振周波数, *Cp*:コンクリートの縦波の伝播速度である。これより,コ ンクリートの縦波の伝播速度を測定あるいは一般的な値と仮定すれば,周波数スペクトル 上におけるピークの周波数の値から,水平ひび割れまでの深さを推定することが可能とな る。近年では,鋼板接着を行った RC 床版の内部に発生した損傷<sup>1)~2)</sup> や PC 構造物におけ るグラウト充填不良<sup>3)</sup> を検出するための研究も行われている。

これまでの研究成果において、衝撃弾性波法は損傷深さや面積に対する検出範囲が最も 大きいことが、実験等により確認されており、上面増厚した RC 床版に対しても、剥離ひび 割れの有無およびその位置を検出することができるとの報告がなされている。剥離ひび割 れは、既設床版の劣化を進行させる要因の一つとなる。しかし、実際に RC 床版の耐荷性に 影響を及ぼすのは, 既設床版内に配置されている鉄筋の腐食が顕在化し, 鉄筋位置において 腐食ひび割れが発生した状態であると言える。言い換えると、床版境界面に水平ひび割れが 発生したとしても, RC 床版自体が健全であり, 両者が重ね梁として機能すれば, 十分な耐 荷性能を確保することができると言える。よって, このような RC 床版の健全性を評価する に当たり、剥離ひび割れの有無を把握するだけではなく、鉄筋位置における腐食ひび割れの 有無を把握することは,RC 床版の維持管理を行っていく上でさらに有効な情報となる。上 記のような RC 床版の損傷状態において,腐食ひび割れの有無を衝撃弾性波により検出しよ うとしても、その特性から考えて、RC 床版上面から入力した弾性波は、剥離部ひび割れに 対して多重反射を起こしてしまうため,その下方に位置する腐食ひび割れを検知すること が難しくなる。既往研究成果において、上記のような RC 床版の損傷状態における腐食ひび 割れを検出するための非破壊検査手法に関する研究が行われた経緯はない。しかし、剥離ひ び割れ内には,車両荷重の繰り返し載荷により増厚コンクリートおよび既設床版が相互に 擦り合って発生した粉体が堆積している傾向がある。この紛体が、剥離ひび割れ内に隙間な く堆積していると考えれば、弾性波が剥離ひび割れ部を透過する可能性がある。この特性を 確認することができれば、腐食ひび割れの有無を把握することができる可能性がある。この 検討結果について、後項に述べる。

### 2.4.6 電磁パルス法<sup>12)</sup>

電磁パルス法は、定電圧発生装置により、導線を巻き付けた励磁コイルにパルス状の電流 を印加して動磁場を発生させ、これにより発生する電磁力によりコンクリート部材内部に 配置されている鉄筋を加振させることを原理とする。鉄筋の振動により、かぶり部に発生し た弾性波を、調査対象となるコンクリート部材の表面に設置した振動センサにて捉え、波形 収集装置にデータを蓄積して、それを分析することにより、コンクリート部材内にある損傷 の有無を非破壊的に評価することができる。

図-2.4.6 に示すようなコンクリート部材に対して、電磁パルス法による計測を実施した 場合、損傷があるコンクリート部材は、損傷がないコンクリート部材に対して、かぶり部分 にたわみ共振が発生し、鉄筋の振動幅が大きくなることが想定される。しかし、比較的部材 厚が小さいうえに配置される鉄筋量が大きい RC 床版に対して、電磁パルス法による内部損 傷の検出に関する研究が行われた事例は極めて少ない。よって、水平ひび割れが発生した RC 床版に対して、電磁力を引荷した際の RC 床版の挙動に関するメカニズムを検討し、振 動エネルギーの相違から、水平ひび割れの有無を把握することができるか否か実験による 検討を行った結果を後項に記す。



図-2.4.6 電磁パルス法の原理

### 2.5 まとめ

- 超音波法は、既往の研究より、深さ130mm までの損傷に対する計測に適しているとの 報告がある。本研究において対象とする損傷深さは、舗装まで含めると120mm~130mm の深さになることが想定されるため、適用が困難になることが想定される。
- 2) AE 法は、コンクリート内部にひび割れが発生した際に生じる弾性波を分析することに より、損傷の発生を検出するものである。よって、AE 法では既存の損傷を検出するこ とが難しく、経時的にモニタリングを行う必要がある。
- 3) 電磁波レーダ法は電磁波が電気的特性の異なる物質の境界面において反射する性質を 利用した手法であり, RC 床版上面での損傷の検出が可能である。電磁波は水分に影響 されてしまうため, RC 床版内に水分が滞水している場合,適用が困難である。
- 4) 赤外線法は空隙とコンクリートの熱伝導率の違いを利用した手法であり、RC 床版の内部に存在する空隙や浮きを検出することが可能である。対象とするコンクリート部材の表面温度差が現れるためには、検出に適切な温度変化が発生している必要があり、日射量が不十分である場合には適用が困難になることもある。
- 5) 衝撃弾性波法は、鋼球やハンマーによる打撃で入力した弾性波の伝播挙動からコンク リート内部の状況を把握する手法である。特に、水平ひび割れの検出に関しては、弾性 波の多重反射に着目し、周波数スペクトルから縦波共振周波数のピークを読み取るこ とにより、水平ひび割れの有無を判定することができる。
- 6) 電磁パルス法は、励磁コイルとコンクリート内部に存在する磁性体との間に作用する 電磁力により、磁性体を振動させる手法である。振動に伴って発生する弾性波を振動センサにより受信し、それを分析することで床版内部の状況を把握する手法である。コイルや電源装置により、入力できる弾性波は再現性が高く、安定した計測が可能である。

上記より、上面増厚を施した RC 床版内に発生した水平ひび割れの検出に対して、再現性 および使用性等の面から考慮して、衝撃弾性波法および電磁パルス法の適用性が他の非破 壊検査手法と比較して高いと判断した。よって、衝撃弾性波法および電磁パルス法に着目し て本研究を進める。
# 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会:コンクリート診断技術'19 基礎編,2章, pp.34-39, 2019.
- 2) 日本コンクリート工学会:コンクリート診断技術'19 基礎編,2章, pp.40-44, 2019.
- 3) 日本コンクリート工学会:コンクリート診断技術'19 基礎編,2章, pp.45-46, 2019.
- 4) 日本コンクリート工学会:コンクリート診断技術'19 基礎編, 2章, pp.47-49, 2019.
- 5) 日本コンクリート工学会:コンクリート診断技術'19 基礎編,2章, pp.56-60, 2019.
- 6) 日本コンクリート工学会:コンクリート診断技術'19 基礎編,3章, pp.140-147,2019.
- 7) 重石光弘,伊藤剛,橘吉宏,松井繁之:鋼コンクリート合成床板の輪荷重走行試験におけるアコースティックエミッションの観察,コンクリート工学年次論文集,Vol.27, No.2, pp.1267-1272, 2005
- 8) 永塚竜也,小林大,橋本竜也,田代大樹:電磁波レーダーによる RC 床版上面の状態評価に関する実験的検討および現場適用事例,第9回道路橋床版シンポジウム論文報告集,2016.11
- 9) 林群悟石,橋本和明,明石行雄:赤外線サーモグラフィー法によるコンクリート損傷の 検出精度向上,コンクリート工学年次論文集,Vol.35,No.1, pp.1813-1818, 2003
- 10)鎌田敏郎,松井繁之,金裕哲,久保司郎,坂上隆英,塩谷智基,田川哲也,崎野良比呂, 廣畑幹人,内田慎哉,大西弘志:各種道路橋床版における疲労損傷の非破壊検査システ ムに関する研究開発,道路政策の質の向上に資する技術研究開発 成果報告レポート, No.19-3, 2010.6
- 11) 中山和也,鎌田敏郎,内田慎哉,大西弘志:衝撃弾性波法による道路橋 RC 床版の水平 ひび割れの評価手法に関する基礎的研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, 2009
- 12) 高鍋雅則,橋本光男:鉄筋コンクリート診断のためのパルス電磁力音響法の提案,非破 壊検査, Vol.52, No.11, pp628-632, 2003

# 第3章 基礎評価実験による非破壊手検査の適用性に関する検討

#### 3.1 はじめに

本研究を進めていくために,まず初めに上面増厚後に再劣化した RC 床版の損傷の検出に 対し,衝撃弾性波法および電磁パルス法の適用性に関する検討を行う必要性があった。よっ て,基礎評価実験により,上記の検討を行うとともにその根拠を整理した。

図-3.1.1 に上面増厚後に再劣化した RC 床版のイメージ図を示す。図-3.1.1 は、増厚コ ンクリートと既設床版の境界部に発生した剥離ひび割れの下方にある鉄筋位置において、 鉄筋腐食により水平ひび割れが発生した状態にあり、滞水している可能性も考えられる。第 2 章において述べたように、衝撃弾性波法および電磁パルス法により、図-3.1.1 に示す状態 にある水平ひび割れの検出に関して、過去に検討が行われた事例はない。よって、本研究に おいて、図-3.1.1 に示す損傷状態を模擬した供試体を製作し、各非破壊件手法の適用性を 確認するための検討を行った。



#### 3.2 衝撃弾性波法の適用性に関する基礎評価実験

#### 3.2.1 実験の概要

衝撃弾性波法により,上面増厚後に再劣化した RC 床版内部に発生した水平ひび割れの検 出に関する適用性について,供試体を使用した基礎評価実験を行った。また,水平ひび割れ 内には,走行車両による輪荷重の繰り返し載荷により増厚コンクリートおよび既設床版が 擦れ合って発生したコンクリート粉体が堆積している可能性や,滞水している可能性も考 えられるため,水平ひび割れの状態を供試体による再現した実験を行った。

## 3.2.2 供試体の概要

供試体は、図-3.2.1 に示す複数のコンクリート片を、図-3.2.2 に示すように、鉛直方向 に2段に積み重ねたものとし、供試体 A シリーズと称した。また、供試体 A シリーズは、 図-3.2.2 に示す隙間の状態に応じて、供試体 A-1~3の3パターンとした。



図-3.2.2 供試体 A シリーズの概要

#### 3.2.2.1 供試体 A-1の概要

図-3.2.3 に示すように、コンクリート片((上)および(下))間の接触面には、コンクリ ート片表面の不陸によって微小な隙間が生じる。これを剥離ひび割れと想定した。また、供 試体を設置した型枠上面とコンクリート片(下)下面との接触面においても、微小な隙間が 生じている。これを腐食ひび割れと想定した。このように供試体の表面から深さ150mmの 位置にある剥離ひび割れおよび深さ300mmの位置にある腐食ひび割れに対し、衝撃弾性波 法による検出の可能性について実験的検討を行った。当供試体を供試体 A-1 と称し、設置 状況を図-3.2.4 に示す。既往研究結果において、衝撃弾性波法により深さ300mm 程度にあ る水平ひび割れを検出することが可能であるとの報告がなされているが、水平ひび割れが 層状化した場合に対する適用性についても検討を行った。



図-3.2.3 供試体 A-1の概要



図-3.2.4 供試体 A-1 の状況

# 3.2.2.2 供試体 A-2の概要

剥離ひび割れ内に、コンクリート粉体が堆積した状態を想定して、ウォータージェット によるコンクリートはつり作業時に採取した微細な粒子のスラッジを隙間内全面に敷き詰 めて供試体 A-1 と同様の計測を行い、供試体 A-1 の計測結果との相違を確認した。供試体 A-2 の概要を図-3.2.5 に、スラッジの敷設状況を図-3.2.6 に示す。スラッジの厚さは、t =0.5mm 程度とした<sup>1)</sup>。



図-3.2.5 供試体 A-2の概要



図-3.2.6 スラッジの敷設状況

## 3.2.2.3 供試体 A-3の概要

図-3.2.7に示すように、水平ひび割れ内が滞水した状態を想定した。なお、表-3.2.1に 示すように、剥離ひび割れを想定した隙間の幅を 1mm, 3mm, 5mm, 7mm, 10mm と変化 させて計測を行い、供試体 A-1 および各隙間部の厚さに対して行った計測結果との比較検 討を行った。コンクリート片間の隙間の確保には、図-3.2.8 に示すようにスペーサーを接 触の四隅に配置した。接触面において、所定の空間を確保した状態で供試体 A を水槽の中 に据え付け、隙間部が浸水するように水槽内に注水した。供試体 A-3 の設置状況を図-3.2.9 に示す。また、一部の実験においては、打撃を加える鉄筋の大きさを変化させて行った。



図-3.2.7 供試体 A-3の概要

	隙間幅	鋼球(直径)の種類	備考
供試体 A-3	1 mm	6mm	
	3mm	6mm	
	5mm	6mm, 10mm, 16mm	滞水有り
	7mm	6mm, 10mm, 16mm	
	10mm	6mm, 10mm, 16mm	

表-3.2.1 CASE3 の種別



図-3.2.8 スペーサーの設置状況

図-3.2.9 供試体 A-3の状況

## 3.2.3 計測概要

供試体 A の表面の中央部に対して, 鋼製のグリップバーを取り付けた直径 6mm の鋼球を 使用し, 手動で振り下ろすようにして, 供試体に打撃を加えて弾性波を発生させた。受信は, 打撃点から 30mm ほど離れた位置に 3Hz~30kHz においてフラットな応答感度を持つ加速 度計を使用し, 小型高速マルチレコーダ(GR-7000)に弾性波データを記録した。サンプリ ングレートは 1MS/s とした。実験状況を図-3.2.10 に示す。

鋼球による打撃を行ったポイント(以下,計測点と称す)を,図-3.2.11および図-3.2.12

に示す。供試体の表面の中央部を C0 とし, C0 を中心に前後左右の方向をそれぞれ N, S, E, W とし, 50mm 間隔で C0 から離れるように各方向に 2 点ずつ設定した。



図-3.2.10 実験状況



図-3.2.11 計測点

図-3.2.12 計測点の状況

## 3.2.4 実験結果

## 3.2.4.1 供試体 A-1 に対する実験結果

供試体 A-1 の計測点 C0 に対して,3回の計測を行った。計測した時刻歴応答を FFT 変換 した結果を図-3.2.13 に示す。各実験結果とも、15kHz 近傍において周波数スペクトルが卓 越する同様な波形を示す結果となった。この卓越するポイントは、上下コンクリート片間の 隙間部(供試体上面から深さ150mm にある隙間)の位置とほぼ一致する。ただし、コンク リート片(下)と型枠間の隙間は捉えることができなかった(第2ピークは、当該位置とは 一致していない)。なお、水平ひび割れの推定深さは、式(3.2.1)により算定した。

$$f_d = C/2d \tag{3.2.1}$$

ここで, *f*<sub>d</sub>:水平ひび割れまでの深さに相当する縦波共振周波数, *C*:コンクリートの弾性波 伝播速度, *d*:水平ひび割れまでの深さである。

上記より、上面増厚後に再劣化した RC 床版において、衝撃弾性波法により剥離ひび割れ を検出することは可能であるが、剥離ひび割れの下方に位置する腐食ひび割れを検出する ことは難しいと言える。また、上記より同一点において3回の打撃による実験を行ったとし ても、その結果には大きな相違が発生しないことがわかった。この傾向は、計測点 C0 以外 の計測点においても同様であることを確認している。



また,9計測点に対する計測結果を図-3.3.14に示す。計測点 CO(図-3.2.14(a))および 他の8計測点(図-3.2.14(b)~(i))に対する計測結果を比較してみると,全計測点とも概 ね周波数スペクトルが15kHz 近傍において卓越する傾向が見られたが,必ずしも同様の波 形を示さないことがわかった。以下に比較検討結果を記す。

- ・C0(図-3.2.14(a))の計測結果において、15kHz 近傍で周波数スペクトルが卓越する結果となったが、N1(図-3.2.14(d))を除いて他の計測結果に対して同様な傾向を示さなかった。
- ・E1 (図-3.2.14(b)), N1 (図-3.2.14(d)), S1 (図-3.2.14(f)), W1 (図-3.2.14(h)) に

おいて、15kHz 近傍でスペクトルが卓越する傾向があるが、E2(図-3.2.14(c))、N2(図-3.2.14(e))、S2(図-3.2.14(g))、W2(図-3.2.14(i))においてはその傾向を示さなかった。

- ・E1 (図-3.2.14(b)), E2 (図-3.2.14(c)), S1 (図-3.2.14(f)), S2 (図-3.2.14(g)) に おいてスペクトルの卓越は、15kHz 近傍のみであった。
- ・W1 (図-3.2.14(h)) においては、ピーク周波数を確認ことができなかった。

上記の傾向は、コンクリート片の大きさが 400mm×400mm であることに起因すると考える。E2, N2, S2, W2 は、供試体の片側の縁端から 100mm、反対側の縁端からは 300mm と アンバランスは位置にあり、打撃後にコンクリート片内を伝播する弾性波の大きさに偏り が発生したものと推測する。この傾向は、E1, N1, S1, W1 の計測結果にも影響したと考える。上記より、今後の計測結果における検討は C0 での計測結果を対象とする。



#### 3.2.4.2 供試体 A-2 に対する実験結果

コンクリート片間の隙間を空隙とした供試体 A-1 および隙間内にスラッジを敷き詰めて 供試体 A-2 に対する計測結果を図-3.2.15 に示す。両計測結果とも、周波数スペクトルが 15kHz 近傍で卓越することや波形の形状が類似していることがわかる。このことから、隙間 部内にスラッジを敷き詰めたとしても、衝撃弾性波法による非破壊検査では空隙として検 知してしまうことがわかった。よって、上面増厚後に再劣化した RC 床版において、増厚コ ンクリートと既設床版間に発生した水平ひび割れ内には、通行車両の影響による擦り磨き 減少によりコンクリート粉体が堆積している状況が考えられるが、コンクリート粉体が乾 燥状態であれば衝撃弾性波法による検出が可能であると言える。



## 3.2.4.3 供試体 A-3 に対する実験結果(その1)

供試体 A-1 の実験結果を図-3.2.16(a)に、コンクリート片間の隙間内を滞水させ、隙間 幅を 1mm、3mm、5mm、7mm、10mm と変動させて実験を行った結果を図-3.2.16(b)~(f) に示す。供試体の設置時において、コンクリート片(下)水槽内に据え付け、一旦水槽内を 水で充填させてからコンクリート片(上)を据え付けるようにし、隙間内に空隙が残存しな いように配慮した。隙間幅の確保には、ボルト、ワッシャー等をスペーサーとして使用した。 供試体 A-1 および供試体 A-3 に対する計測結果を比較検討した結果を以下に記す。

- ・全実験結果ともおおむね 15kHz 近傍において周波数スペクトルが卓越する傾向は見られる。
- ・それぞれの実験結果における波形の形状は、すべて異なっている(一様ではない)ことがわかる。
- ・特に隙間幅が 1mm および 5mm の実験結果では、スペクトルのピークが不明瞭になっていることがわかる。

上記より,隙間内が滞水している場合,空隙となっている状態に対して周波数スペクトル のピークが不明瞭化する傾向があることわかった。



## 3.2.4.4 供試体 A-3 に対する実験結果(その2)

供試体 A-3 に対して,隙間内が滞水している状態で,打撃の強さを変化させることにより,周波数スペクトルにどのような影響が生じるか確認するために,鋼球の直径を変化させて計測を行った。供試体の隙間幅を 5mm, 7mm, 10mm とした場合に対して,鋼球の直径を それぞれ 6mm, 10mm, 16mm と変化させて実験を行った結果を以下に記す。

(1) 隙間幅: 5mm の場合

供試体の空隙幅を 5mm とし、鋼球の直径を変化させて実験を行った結果を、図-3.2.17 に示す。図-3.2.17 からわかるように、打撃の強さを変化させることにより、周波数スペクトルは一定の形状を示さなくなる。一概に言うことはできないが、鋼球の直径が 16mm になると、6mm および 10mm の計測結果と比較して、ピーク周波数が不明瞭になることがわかる。



(a)供試体 A-3(隙間:滞水(鋼球:φ6mm))C0

1400



周波数 (Hz)

20

(隙間:滞水(鋼球: φ10mm)) CO

30

40

50



(c)供試体 A-3(隙間:滞水(鋼球: φ16mm)) C0 図-3.2.17 計測結果

(2) 隙間幅:7mmの場合

隙間幅を 7mm とし,鋼球の直径を変化させて実験を行った結果を,図-3.2.18 に示す。 図-3.2.18 からわかるように,鋼球の直径が 6mm および 10mm の実験結果における周波数 スペクトルの形状は比較的似ているが,空隙幅 5mm での計測結果に反して,すべての計測 結果においてピーク周波数が明瞭になっていることがわかる。



図-3.2.18 計測結果

## (3) 隙間幅: 10mm の場合

空隙幅を 10mm とし, 鋼球径を変化させて実験を行った結果を図-3.2.19 に示す。図-3.2.19 からわかるように, 鋼球の直径が 10mm および 16mm の計測結果における周波数ス ペクトルの形状は比較的類似しており, 隙間幅 5mm および隙間幅 7mm での計測結果と異 なり, 鋼球の直径 10mm および 16mm での計測結果において, ピーク周波数が不明瞭にな ることがわかる。



# 3.2.5 考察

## 3.2.5.1 腐食ひび割れの検出に対する可能性

供試体 A-1 に対する計測結果を,図-3.2.20 に示す。図-3.2.20 に示すように,周波数スペクトルにおいてピーク周波数を示したのは,上下のコンクリート片境界部のみであった。





コンクリート片(下)と型枠との隙間については,検出することができなかった。このこ とから,衝撃弾性波法を適用する場合,RC床版内に発生した多層ひび割れに対して,弾性 波を入力した位置から最も近い位置にあるひび割れ(空隙)で反射する弾性波成分がほとん どであり,その下方にあるひび割れにまで到達することが難しくなるということが言える。

ただし、供試体 A-1 の上下の隙間の隔離は 150mm ある。実際に RC 床版に発生する腐食 ひび割れは、鉄筋腐食に起因することから、図-3.2.21 に示すように剥離ひび割れおよび腐 食ひび割れ間の距離は、かぶり分相当(30~40mm 程度)と推測することができる。よって、 本実験結果は、傾向の一例として取り扱う。



図-3.2.22 には RC 床版内の上下段鉄筋の腐食により,水平ひび割れが発生したイメージ 図を示す。このような RC 床版に対して現地調査を行う場合,例えば道路規制を行うことが

できないため、調査を RC 床版下面からしか行うことができない、または RC 床版下面に調

査員が立ち入ることができないため、床版上面からしか計測を行うことができないような 状況において、衝撃弾性波法を適用した場合、計測点から近い位置にある水平ひび割れの検 知は期待することができるが、当該水平ひび割れより下方にあるひび割れの検知は難しく なるという可能性がある。このような状況を想定し、衝撃弾性波法を適用した RC 床版の計 測は、RC 床版の上下面から行うことが望ましいと考える。



## 3.2.5.2 水平ひび割れ内にコンクリート粉体が滞積した場合の弾性波伝播特性

供試体 A-2 に対する計測結果を,水平ひび割れ内にコンクリート粉体が充満されていた としても,弾性波は水平ひび割れ部で反射してしまうと考えることができる。例えば,上面 増厚の施工時において,ブラスト処理を行う段階で,既設床版の浮き部をはつり取った後に 増厚コンクリートを打設した場合,図-3.2.23 に示すように剥離ひび割れ内にはブラスト処 理時だけでなく,施工後の通行車両の繰り返し載荷による擦り磨き現状によりコンクリー ト粉体が滞積する可能性が高くなる。このような状態において,衝撃弾性波法による計測を 行った場合,腐食ひび割れの検出が難しくなることが想定される。しかし,本実験ではスラ ッジを使用したが,実橋 RC 床版に発生している水平ひび割れ内の滞積物とは,粒形や湿潤 状態が異なっていることが想定され,必ずしも実態を再現できているとは限らない。よって, 本実験結果は,傾向の一例として取り扱う。



図-3.2.23 浮き部をはつり取った後に増厚コンクリートが打設された RC 床版のイメージ

# 3.2.5.3 滞水を伴う水平ひび割れの検出の可能性

供試体 A-1 に対する計測結果でも述べたように,供試体の隙間が空隙であれば周波数ス ペクトルが空隙部においてピークを示すことがわかった。これに対し,供試体 A-3 のよう にコンクリート片間の隙間が滞水している状態にあると,周波数スペクトルは供試体 A-1 と 同様に隙間部において卓越する傾向は概ね同様であるが,ピーク周波数が明瞭でなくなる ケースがあった。この傾向は,隙間幅および鋼球径を変化させて計測を行ったが相関関係を 見出すことはできなかった。

#### 3.3 電磁パルス法の適用性に関する基礎評価実験

## 3.3.1 実験の概要

衝撃弾性波法は、衝撃等によるコンクリート内を伝播する弾性波の特性から、コンクリー ト内の空隙等の検出に適用される。しかし、電磁パルス法は、電磁力によってコンクリート 内にある鉄筋に振動を与えて、コンクリート内の情報(損傷の有無等)を取得する原理を有 するため、剥離ひび割れおよび腐食ひび割れが層状に発生していたとしても、剥離ひび割れ の影響を受けずに腐食ひび割れの検出を行うことができることが期待される。よって、鉄筋 を媒体として情報を得ることができる供試体を別途製作した。

#### 3.3.2 供試体の概要

本実験では、供試体 B シリーズと称し、2 種類の供試体を製作した。それぞれ供試体 B-1 および供試体 B-2 と称す。各供試体の構造を図-3.3.1 および図-3.3.2 に示す。また、供試 体の製作状況を図-3.3.3 に示す。

各供試体は, 上面増厚後に損傷が顕在化した RC 床版を想定し, コンクリート部材内にス チレンボード(厚さ 1mm)を埋設して、剥離ひび割れおよび腐食ひび割れが発生した状態 を再現した。図-3.3.1 中のスチレンボード1 は剥離ひび割れ、スチレンボード2 は腐食ひ び割れを想定した。各供試体は、四つの区画に区分けされており、右上は水平ひび割れが無 い健全な状態, 左上は剥離ひび割れのみがある状態, 右下は腐食ひび割れのみがある状態, 左下は剥離ひび割れおよび腐食ひび割れがある状態を想定している。両供試体のスチレン ボード1の配置は、一般的な増厚コンクリートの厚さを参照して 40mm とした。また、供試 体 B-1 のスチレンボード 2 については、増厚コンクリート上面から腐食ひび割れまでの距 離 75mm を再現し、供試体 B-2 のスチレンボード 2 については、舗装上面から腐食ひび割 れまでの距離 150mm を再現した。なお、各供試体はスチレンボードとコンクリートの付着 状態を考慮して、図-3.3.4 に示すように、コンクリートの打設方法を変えてそれぞれ2体 ずつ製作した。スチレンボードを型枠内に鉛直方向に設置してコンクリートを打設したも のを供試体 B-1(v)および供試体 B-2(v)とし、スチレンボードを水平方向に設置してコンクリ ート打設を行ったものを供試体 B-2(h)および供試体 B-2(h)とした。なお,供試体に使用した コンクリートは、実橋 RC 床版を想定し、設計基準強度が fck=240N/mm<sup>2</sup> となるように配合 を行った。





図-3.3.1 供試体 B-1の概要







図-3.3.3 供試体 B の製作状況



## 3.3.3 計測概要

本実験では、定電圧発生装置(最大瞬時電流 3000A)により導線を巻き付けた励磁コイル にパルス状の電流を印加して瞬間的に動磁場を発生させ、これにより発生する電磁力によ りコンクリート部材内部に配置されている鉄筋を加振した<sup>2)</sup>。

本実験に使用した励磁コイルの外形寸法を,図-3.3.5 に示す。電磁鋼板を高さ 100mm, 長さ 200mm,幅 50mmの凹字形に加工したものに,短辺部の下方に導線を巻き付けた。励 磁コイルの導線の巻き数は 20 ターン,定電圧発生装置の電圧は 600V とした。振動センサ は、15kHz~100kHzの間に応答感度を有し、特に 25kHz~80kHzの間では感度特性が比較的 フラットな AE センサを使用した。AE センサで受信した信号は、サンプリング間隔 5µs、 サンプリング数 10,000 点の時刻歴応答波形として波形収集装置に記録した。

図-3.3.6に計測装置外観を、図-3.3.7に計測状況を示す。励磁コイルは、励磁コイルの 長辺部を供試体の側面から鉄筋長手方向と平行に供試体表面から1mm程度離して設置した。 AE センサは、励磁コイルから50mm程度離れた鉄筋の直上に配置した。



図-3.3.5 コイルの外形寸法



図-3.3.6 計測装置の外観

図-3.3.7 計測状況

計測は、図-3.3.8 に示すように、全供試体ともにスチレンボードが鉛直方向を向くよう に据え付け、供試体の側面に励磁コイルを配置して行った。例えば、図-3.3.8 中の「健全」 と記載された位置で計測を行った場合、水平ひび割れがない健全な状態での計測結果を得 ることができる。また、「剥離ひび割れ」と記載された位置で計測を行った場合、深さ40mm の位置に鉄筋と乖離した水平ひび割れがある状態での計測結果、「腐食ひび割れ」と記載さ れた位置で計測を行った場合、鉄筋配置位置と一致する深さ75mm および150mm の位置に 水平ひび割れがある状態での計測結果、「剥離ひび割れおよび腐食ひび割れ」と記載された 位置で計測を行った場合、両ひび割れが同時に発生した状態での計測結果を得ることがで きる。各計測結果を比較することにより、水平ひび割れの有無または水平ひび割れの発生形 態を識別することができるか検討を行なった。



#### 3.3.4 実験結果および考察

受信波形の一例として,供試体 B-1(v)に対する実験結果を図-3.3.9 に示す。受信波形は, 健全において最も振幅が小さく,剥離ひび割れ,腐食ひび割れ,剥離ひび割れおよび腐食ひ び割れの順に振幅が大きくなった。この傾向は,他の3供試体についても同様であった。



図-3.3.9 受信波形 (B-1(v))

本研究では、振動センサにより受信した弾性波の時刻列波形から、0.05 秒までの各時刻に おける振幅値を二乗した値の総和を波形エネルギーと称して算出した。波形エネルギーに ついては、5 章において詳述する。波形エネルギーは、1 計測点ごとに3回ずつ計測を行っ た算出し、その平均値を採用した。各供試体に対する計測結果から、波形エネルギーを算出 した結果を図-3.3.10 に示す。全供試体とも、水平ひび割れがない健全な状態では、波形エ ネルギーが最も小さくなり、剥離ひび割れおよび腐食ひび割れがある状態で最も大きくな った。また、供試体 B-1(h)を除く供試体 B-1(v)、供試体 B-2(v)および供試体 B-2(h)において、 腐食ひび割れと比較して、剥離ひび割れに対する波形エネルギーが大きくなる傾向を示し た。

供試体 B-1 において, 剥離ひび割れおよび腐食ひび割れがある状態では, スチレンボード を水平方向にしてコンクリート打設した供試体 B-1(h)の波形エネルギーに対して, スチレン ボードを鉛直方向にしてコンクリート打設を行った供試体 B-1(v)の波形エネルギーの比率 が 2.1 になった。これに対して,供試体 B-2 では,供試体 B-2(v)および供試体 B-2(h)の波形 エネルギーを比較するとほぼ差異がなかった。このように,コンクリートの打設方向の相違 による波形エネルギーのばらつきは確認されたが,上記のように,水平ひび割れの有無およ び発生状態に応じた波形エネルギーの相関性は同様の傾向を示すことがわかった。



(c)供試体 B-2(v)



図-3.3.10 波形エネルギー

この傾向について考察すると、図-3.3.11 に示すようなコンクリート部材に対して、電磁 パルス法による計測を実施した場合、鉄筋の腐食によるひび割れがあるコンクリート部材 (b)は、ひび割れがないコンクリート部材(a)に対して、かぶり部分にたわみ共振が発生し、 鉄筋の振動幅が大きくなるとともに、波形エネルギーも大きな値を示したものと考えられ る。供試体 B-1 および供試体 B-2 の各計測結果を比較すると、供試体 B-2 の波形エネルギ ーが相対的に小さくなった要因は、供試体 B-2 において鉄筋のかぶりが大きくなったこと から、供試体 B-1 と比較して加振力が小さくなったことが考えられる。しかし、導線の巻き 数を 20 ターン確保すれば、上面増厚を施した RC 床版に対して、電磁パルス法により舗装 上面から既設床版内の鉄筋を加振させることが十分可能になることが示唆された。



上記の実験結果から,損傷が顕在化した RC 床版に対して,電磁パルス法の計測を行う場合,水平ひび割れがない状態,剥離ひび割れ,腐食ひび割れのみ発生している状態,剥離ひび割れのみが発生している状態,両者が発生している状態の順に波形エネルギーが大きくなる傾向があり,なおかつその傾向は,水平ひび割れの深さが大きくなるほど波形エネルギーが小さくなると言える。本実験結果から,波形エネルギーの大きさにより,水平ひび割れの発生状態を判定することがわかった。

# 3.4 まとめ

本実験結果から得られた知見を以下に記す。

- 1) 剥離ひび割れおよび腐食ひび割れが発生している場合, RC 床版の上面から衝撃弾性波 法による計測を行うと,腐食ひび割れの検出が難しくなる可能性がある。
- 水平ひび割れ内に微細なコンクリート粉が充填されていたとしても、衝撃弾性波法で は空隙と判定する可能性がある。
- 3) ひび割れ内が滞水している状態では、空隙の状態と比較して周波数スペクトルのピー ク周波数が若干不明瞭になる傾向がある。
- 4) 上記より、剥離ひび割れおよび腐食ひび割れが発生している場合、衝撃弾性波法による 計測は、RC床版の上下面から計測を行うことが望ましいと考える。
- 5) スチレンボードにより水平ひび割れを模試した供試体に対して、電磁パルス法を適用 した際に得られる波形エネルギーは、水平ひび割れがない状態、腐食ひび割れがある状態、剥離ひび割れがある状態、剥離ひび割れおよび腐食ひび割れがある状態の順に大き くなる。
- 6) 水平ひび割れの深さが大きくなれば波形エネルギーは小さくなる。
- 7) 本基礎評価実験の結果から、電磁パルス法を適用することによって、水平ひび割れの有 無および発生状態を把握できる可能性が示唆された。

# 参考文献

- 松井繁之,床版損傷に対する水の振る舞い,土木学会第43回年次学術講演会概要集,第1 部 PS1-3,pp.6(昭和63年10月)
- 宗像晃太郎,内田慎哉,鎌田敏郎,森和也:電磁パルスにより加振したコンクリート内部鉄筋の振動特性に関する基礎研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.781-786, 2007.7

# 第4章 衝撃弾性波法の水平ひび割れ検出精度の向上に関する検討

#### 4.1 はじめに

従来の衝撃弾性波法においては、コンクリート表面と水平ひび割れとの間で弾性波が多 重反射する現象を基に、周波数スペクトルにおけるピーク位置での周波数から水平ひび割 れまでの深さを評価している。しかしながら衝撃弾性波法による計測を行なう場合、打撃の 強弱やセンサの設置状態等の影響により、計測結果に大きな影響を与える可能性がある。精 度よく計測を行なうためには、この影響を少しでも低減させる必要がある。よって、本検討 において、衝撃弾性波法を応用し、水平ひび割れを模擬したコンクリート供試体を用いて、 鋼球による打撃の強さおよび打撃点とセンサの配置位置との関連性に着目し、計測精度に どのような影響を与えるのか実験データを基に実験的検討を行なった。

#### 4.2 衝撃弾性波法による水平ひび割れ検出の原理

第2章においても述べたが、衝撃弾性波法によりRC床版内部の水平ひび割れを検出する 原理を示した概念図を図-4.2.1 および図-4.2.2 に示す。鋼球によりRC床版の表面を打撃 することで、RC床版内部に弾性波が伝搬する。伝搬した弾性波はRC床版表面と、RC床版 底面あるいは水平ひび割れ面の間で多重反射し、この波を表面に設置したセンサにより受 信し、この受信波を周波数分析することにより算出されるピーク周波数(以下、縦波共振周 波数と称す)に基づき、RC床版の厚さや水平ひび割れまでの深さを推定することができる。 RC床版の厚さや水平ひび割れまでの深さに相当する縦波共振周波数の理論値は、既往の研 究により式(4.2.1)および式(4.2.2)を用いて算出することができる<sup>1</sup>。

$$f_T = C/2T \tag{4.2.1}$$

$$f_d = C/2d \tag{4.2.2}$$

ここで,  $f_T$ : 床版厚さに相当する縦波共振周波数,  $f_d$ : 水平ひび割れまでの深さに相当する縦 波共振周波数, C:コンクリートの縦波の伝搬速度, T: 床版厚さ, d: 水平ひび割れまでの深 さである。

これより、コンクリートの縦波の伝搬速度として一般的な値あるいは測定値を代入する ことで、周波数スペクトル上における縦波共振周波数の値より、RC床版の厚さあるいは水 平ひび割れまでの深さを推定することが可能である。また、鋼球の打撃により生じる弾性波 の周波数は、使用する鋼球径に影響を受けることが知られている。図-4.2.3 に鋼球の打撃 による衝撃力とコンクリートと鋼球との接触時間の関係を示す。この関係式は式(4.2.3)によ り示される<sup>1)</sup>。

$$F_{\max} = \frac{m\sqrt{2gH}}{0.637T_c}$$
(4.2.3)

ここで、 $F_{max}$ :最大荷重(N)、m:鋼球の質量(kg)、g:重力加速度(m/s)、H:鋼球の落下高さ(m)、 $T_c$ :コンクリートに鋼球を落下させたときの接触時間(s)である。式(4.2.3)より、接触時間が短くなると最大荷重は大きくなることがわかる。



図-4.2.1 衝撃弾性波法の概念







図-4.2.3 鋼球の打撃による衝撃力との接触時間の関係

RC 床版上面に鋼球を落下させたときの鋼球とコンクリートの接触時間(以下,接触時間 と称す) $T_c$ の算定方法を示す。 $T_c$ は,Herzの衝突理論から導かれた式(4.2.4)により示される<sup>2)</sup>。

$$T_c = 5.97 [\rho_s(\delta_s + \delta_p)]^{\frac{2}{5}} \frac{R}{h^{0.1}}$$
(4.2.4)

ただし,

$$\delta_p = \frac{1 - v_p^2}{\pi E_p}, \delta_s = \frac{1 - v_s^2}{\pi E_s}$$

ここで、 $\rho_s$ :鋼球の密度 (kg/m<sup>3</sup>)、R:鋼球の半径 (m)、h:鋼球の自由落下高さ (m)、 $v_p$ : コンクリートのポアソン比、 $v_s$ :鋼球のポアソン比、 $E_p$ :コンクリートのヤング率 (Pa)、 $E_s$ : 鋼球のヤング率 (Pa) である。

衝撃弾性波法を用いる際,通常は鋼球を用いて人力で打撃する方法をとるため,式(4.2.4) 中の h の影響を考慮せずに種々の計算を行っているが,本研究では打撃力を一定にするた めに,鋼球の打撃方法として自由落下を利用した機械的入力による方法を採用しているた め,この影響を考慮する必要があった。

式(4.2.4)を用いて算出した各鋼球の自由落下高さに対する接触時間を表-4.2.1に,算定時 に使用した物性値を表-4.2.2に記す.なお,表-4.2.1に示す鋼球の自由落下高さは,後項 に記す実験に使用したものである。

表-4.2.1 各鋼球の自由落下高さに対する鋼球とコンクリートの接触時間

鋼球の自由落下高さ	鋼球とコンクリートの接触時間
<i>h</i> (mm)	$T_c$ (µs)
100	4. 32
250	3. 13
500	2. 92
750	2. 81
1000	2. 73
1500	2. 62
2000	2. 54

表-4.2.2 物性值

鋼球の密度 <i>ρ<sub>s</sub></i> (kg/m <sup>3</sup> )	7800
鋼球のポアソン比 $ u_s$	0.3
コンクリートのポアソン比 $ u_{ ho}$	0. 2
鋼球のヤング率 <i>E</i> 。(Pa)	0. 292
コンクリートのヤング率 <i>E<sub>p</sub></i> (Pa)	0. 281

さらに,図-4.2.4 に衝撃力の時間関数を周波数分析することにより算出した周波数スペクトルを示す。図-4.2.4 には Sansalone ら<sup>1)</sup>が定義した入力される弾性波の上限周波数と鋼球径の関係式を併せて示している.これを以下の式(4.2.5)に示す。

$$f_{\rm max} = 291/D$$
 (4.2.5)

ここで、 $f_{max}$ :入力される弾性波の上限周波数(kHz)、D:鋼球径(mm)である。 また、入力される弾性波の波長の最小値は、上限周波数: $f_{max}$ とコンクリート中を伝搬する 波の速度  $C_p$ から、以下の関係式(4.2.6)により求めることができる<sup>3)</sup>。

$$\lambda = C_p / f_{\text{max}} \tag{4.2.6}$$

ここで、λ:入力される弾性波の上限周波数に対応する波長の最小値である。式(4.2.5)および 式(4.2.6)を用いて、鋼球径から計算される上限周波数および波長の計算結果を表-4.2.3に記 す。なお、表に示す鋼球径は、後項に記す実験に使用したものである。



図-4.2.4 弾性波の上限周波数

表-4.2.3 上限周波数および波長

鋼球径: <i>D</i> (mm)	6.0
上限周波数: <i>f<sub>max</sub></i> (kHz)	48.5
波長: <i>λ</i> (mm)	80. 4

#### 4.3 実験の概要

本実験は、 RC 床版の水平ひび割れの検出方法に関する基礎的研究として、衝撃弾性波 法を用いてひび割れ深さに相当する縦波共振周波数でピークが明瞭になる鋼球の自由落下 高さ(以下,自由落下高さと称す)および入力位置とセンサ間の距離(以下,入出力間隔と 称す)などの入力条件を設定することを目的に実施した。本項では、水平ひび割れが発生し た RC 床版を模擬したコンクリート供試体(供試体 C シリーズ)を用いて,自由落下を利用 した機械的入力による打撃方法で実験を行うことで,自由落下高さおよび入出力間隔が鋼 球での打撃により得られる周波数スペクトルに及ぼす影響を検討した。

#### 4.4 供試体の概要

本研究において,供試体 C シリーズとして 5 体の供試体を製作した。外観を図-4.4.1 に, 一覧を表-4.4.1 に示す。全供試体とも,一般的な RC 床版の配筋を模擬して,鉄筋 (D16) を 125mm 間隔の格子状に配置した。コンクリートは,普通ポルトランドセメントを用い, 設計基準強度を f<sub>ck</sub>=24N/mm<sup>2</sup> とした。

供試体 C-1 および供試体 C-2 は上面増厚を考慮していない RC 床版を想定し, 寸法を 1000mm×1000mm×100mm, かぶりを 35mm とした。また,供試体 C-1 は健全な状態,供試 体 C-2 は水平ひび割れが発生している状態を想定し,供試体 C-2 には鉄筋の腐食によって 発生した水平ひび割れを模擬し,厚さ 1mm のスチレンボードを鉄筋の直上に配置した。ス チレンボードの寸法は,875mm×875mm であり,スチレンボードの中央とコンクリート供試 体の中央が一致するようにコンクリート中に埋設した。 供試体 C-3~C-5 は, 上面増厚を施した RC 床版を想定し, 寸法を 1000mm×1000mm×150mm, かぶりを 72mm とした。また,供試体 C-3 は健全な状態,供試体 C-4 および供試体 C-5 は 水平ひび割れが発生している状態を想定した。供試体 C-4 は,供試体 C-2 と同様に鉄筋の 直上にスチレンボードを配置した。また,供試体 C-5 は,既設床版および増厚コンクリート の境界面において両者が剥離することにより発生する水平ひび割れ (剥離ひび割れ)を想定 し,深さ 40mm の位置にスチレンボードを埋設した。スチレンボードの大きさ,平面的な配 置位置は,供試体 C-2 と同様とした。

各供試体の概要を図-4.4.2に、製作状況を図-4.4.3に示す。



図-4.4.1 供試体 C の外観

	かぶり(mm)	水平ひび割れの有無
供試体 C-1	35	なし
供試体 C-2	00	あり(深さ35mm)
供試体 C-3		なし
供試体 C-4	72	あり(深さ72mm)
供試体 C-5		あり(深さ40mm)

表-4.4.1 供試体 C シリーズの一覧



供試体 C-5

図-4.4.2 供試体 C シリーズの概要



図-4.4.3 供試体 C シリーズの製作状況

本実験には、供試体 C シリーズの中から、供試体 C-1 および供試体 C-4 を使用した。供 試体 C-1 の詳細図を図-4.4.4 に、スチレンボードの配置状況を図-4.4.5 に示す。また、供 試体 C-4 の詳細図を図-4.4.6 に、スチレンボードの配置状況を図-4.4.7 に示す。



図-4.4.4 供試体 C-1の詳細図



図-4.4.5 供試体 C-1 のスチレンボードの配置状況



図-4.4.6 供試体 C-4の詳細図



図-4.4.7 供試体 C-4 のスチレンボードの配置状況

## 4.5 計測概要

計測状況を図-4.5.1 に示す。弾性波の入力には、既往の研究の鋼球直径の選定に関する 実験的検討<sup>4)</sup>を参考に、直径 6mm の鋼球を使用した。また、打撃力を一定にするため、自 由落下を利用した機械的入力による打撃方法を採用し、図-4.5.2 に示すような内径 21mm のアクリルパイプに水平器を沿えるようにして設置して鉛直方向を保持するようにし、鋼 球をアクリルパイプ上端からパイプ内に落下させて、打撃すべきポイントに正確に落下さ せた (図-4.5.3 参照)。

弾性波の受信には、既往の研究<sup>4)</sup>を参考に、加速度センサを採用し、コンクリート供試体 表面の中央部に設置した。センサで受信した信号は、サンプリング間隔 1μs、サンプリング 数 10000 点の時刻歴応答波形として波形収集装置に記録した(図-4.5.4 参照)。

供試体 C-1 および供試体 C-4 に対して行った計測パターンを表-4.5.1 に記す。計測は, 供試体一体に対して計 42 パターンとし, 1 パターンに対して 5 回打撃を行った。記録した 時刻歴応答波形から周波数スペクトルを算出する際は,比較的ノイズの小さい波形データ を抽出し,表面波の影響を取り除くために,弾性波を受信してから 0~90µs をカットして FFT を行った。



図-4.5.1 計測状況


図-4.5.2 アクリルパイプの外観



d:打撃点とセンサ間の距離(入出力間隔)

h:自由落下高さ

# 図-4.5.3 アクリルパイプの外観



図-4.5.4 使用器具

表-4.5.1 計測パー	ター	ン
--------------	----	---

自由落下高さ(mm)	100, 2	250,	500,	750,	10	00,	1500,	2000
入出力間隔 d(mm)		20,	30,	40,	50,	60,	70	

### 4.6 実験結果および考察

### 4.6.1 入力位置とセンサ間距離の影響

供試体 C-1 および供試体 C-4 において得られた入出力間隔 d の違いにより周波数スペクトルを比較した一例を図-4.6.1 および図-4.6.2 に示す。なお、鋼球( $\phi$  6mm)を自由落下させた高さ h は 2000mm とした。両図中の赤丸印は、スチレンボードの深さに相当する縦波共振周波数を示し(以下,表中の赤丸印は全てスチレンボードの深さに相当する縦波共振周波数を示す),ひび割れ深さに相当する縦波共振周波数は、供試体 C-1 において約 44kHz,供試体 C-4 において約 26kHz であった。

供試体 C-1 に対する実験結果より,入出力間隔 d が 20mm~50mm の範囲において, d が 大きくなるに従って低周波域のスペクトル強度が増加し,周波数ピークが明瞭にならなく なる傾向が見られた。これは,入力した弾性波がセンサに伝播するまでの距離が長くなるた め,弾性波が多重反射した成分を検出し難くなったことに起因すると考えられる。

また,供試体 C-4 に対する実験結果においては,入出力間隔 d が 20mm~30mm の場合, 周波数が 0~5kHz の帯域で周波数スペクトルが極端に増加する傾向が見られた。これは, 入出力間隔 d が小さいため,弾性波の多重反射成分だけではなく,表面波の影響をより大き く受けてしまったことに起因すると考えられる。



#### 4.6.2 鋼球の自由落下高さの影響

供試体 C-1 および供試体 C-4 において得られた自由落下高さ h の違いにより周波数スペ クトルを比較した一例を図-4.6.3 および図-4.6.4 に示す。なお、入出力間隔 d は 20mm と し、鋼球径は φ 6mm とした。図-4.6.3 および図-4.6.4 に記す接触時間 T<sub>c</sub>は、式(4.2.4)を適 用して算出した。

供試体 C-1 に対する実験結果より,自由落下高さhが 100~2000mm の範囲において,高 さが最も低い自由落下高さhが 100m における周波数スペクトルのピークが最も不明瞭で あり,hが大きくなるに従ってピーク周波数が明瞭になっていくことがわかる。供試体 C-4 に対する実験結果においても,同様の傾向を確認することができるが,周波数が 0~5kHz の帯域で周波数スペクトルが極端に増加する傾向が見られた。

自由落下高さ h が大きくなると、式(4.2.4)により接触時間 T<sub>c</sub> が短くなる。そのため、式 (4.2.3)により衝撃力が増加し、図-4.6.5に示すように曲線が L2 (接触時間:大) から L1 (接 触時間:小)のように変化する。これに伴い、入力される弾性波の周波数スペクトルも同様 に、図-4.6.5に示すように変化が生じることになる。したがって、接触時間 T<sub>c</sub> が短くなる ことで入力される弾性波の高周波成分が増加するため、高周波域の多重反射成分が大きく なり、ピークが明瞭になったのではと考えられる。しかし、自由落下高さ h が大きくなるこ とで、本実験における接触時間 T<sub>c</sub> が短くなり、それに伴い先述の衝撃力が増加したことに よって、表面波などの不要な低周波成分も増加する可能性も考えられる。







図-4.6.4 周波数スペクトル(供試体 C-4(深さ 80mm))



図-4.6.5 接触時間の変化に伴う周波数スペクトルの変化の概念図

## 4.7 まとめ

本実験により得られた知見を以下に記す。

- 入出力間隔 d が 20~50mm の範囲において、d が大きくなるに従い、ピークが明瞭にならなくなり、また d が小さくなると、0~5kHz 未満の帯域でスペクトル強度が増加する 傾向が見られた。
- 2) 自由落下高さ h が 100mm~2000mm の範囲において, h が大きくなるに従い, ピークが 明瞭になるが, 0~5kHz 未満の帯域でスペクトル強度が増加する傾向が見られた。
- 深さ 40mm~80mmの水平ひび割れを模擬したコンクリート供試体に対し、本研究の適用条件下(鋼球径 φ 6mm)において、ひび割れ深さに相当する縦波共振周波数でピークが明瞭になる入力条件 *d*=20~30mm、*h*=500~2000mm となった。

# 参考文献

- 1) Sansalone, M. and Streett, W. B. : Impact Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., pp.29-46, 1997
- 2) NJ.Carino, M.Sansalone, N.N.Hsu : A Point Source–Point Receiver, Pulse–Echo Technique for Flaw Detection in Concrete, ACI JOURNAL, pp.189-208, March–April 1986
- 3) 安井和也, RC 床版における衝撃弾性波法による土砂化の評価に関する基礎的研究, 卒 業論文, 大阪大学, 2018
- 中山和也,鎌田敏郎,内田慎哉,大西弘志:衝撃弾性波法による道路橋 RC 床版の水平 ひび割れの評価手法に関する基礎的研究,コンクリート工学年次論文集,vol.31, No.1, pp2113-2118, 2009

# 第5章 電磁パルス法の水平ひび割れ検出に関する基礎的検討

### 5.1 はじめに

第2章においても述べたが、電磁パルス法を適用して、RC 床版内部に発生した水平ひび 割れを検出するための研究は、これまで実施された経緯は極めて少ない。

第3章において,基礎評価実験に結果から,電磁パルス法によりRC床版内に発生した水 平ひび割れを検出することができる可能性を示唆することができた。しかし,電磁力により 鉄筋がどのような挙動をするのか,また,鉄筋の振動させることにより,水平ひび割れの有 無に応じて,RC床版(特にかぶり部)がどのように挙動するのか,そのメカニズムが明確 にされていない。そこで,本章では,励磁コイルおよび電源装置の条件が鉄筋に作用する磁 場に与える影響を把握するため,条件の違いが鉄筋付近の磁束密度に与える影響について 検討を行い,床版を模擬した供試体を用いて電磁パルス法による水平ひび割れ検出の適用 性に関する実験的検討を行った。

#### 5.2 電磁パルス法の原理

電磁パルス法は、図-5.2.1 に示すように、定電圧発生装置(最大瞬時電流 3000A)によ り導線を巻き付けた励磁コイルにパルス状の電流を印加して瞬間的に動磁場を発生させ、 これにより発生する電磁力によりコンクリート部材内部に配置されている鉄筋を加振させ ることを原理とする。鉄筋の振動により、かぶり部に発生した弾性波を、調査対象となるコ ンクリート部材の表面に設置した振動センサにて捉え、波形収集装置にデータを蓄積して、 それを分析することにより、コンクリート部材内にある損傷の有無を非破壊的に評価する ことができる。図-5.2.2に主要機器を示す



図-5.2.1 電磁パルス法の原理



振動センサ

図-5.2.2 電磁パルス法の主要機材

### 5.3 計測条件が鉄筋に作用する磁場に及ぼす影響の検討

## 5.3.1 実験の概要

電磁パルス法を用いて RC 床版内部の水平ひび割れを検出するにあたり,鉄筋の振動によ りコンクリートに入力される衝撃を制御する必要がある。鉄筋に作用する電磁力は,鉄筋周 辺の磁場により変化するため、コイルおよび電源装置の計測条件が鉄筋に作用する磁場に 与える影響を把握する必要がある。

本項では、(コンクリート中に埋設されていない)鉄筋を電磁パルス法により振動させた 場合において、鉄筋に作用する磁力および鉄筋の振動挙動と加振条件との関係について検 討を行った結果について述べる。具体的には,鉄筋の両端を木製の台により支持し,電磁パ ルス法を用いて鉄筋を振動させ、かぶり、鉄筋径、コンデンサ容量、コイルの巻き数の違い が磁場および鉄筋の振動挙動に与える影響を検討した。さらに、各計測条件がコンクリート に入力される弾性波に与える影響に関する検討も実施した。

### 5.3.2 計測条件が磁場および鉄筋の振動挙動に及ぼす影響

### 5.3.2.1 供試体の概要および計測条件

実験要領を図-5.3.1 に示す。長さ 1800mm の鉄筋を非磁性体である木製の置台(100mm ×100mm×100mm) により支持する。鉄筋の支持の位置は両端からそれぞれ 350mm から 450mm の地点である。



図-5.3.1 実験要領(平面図)

励磁コイルは凹字型の電磁鋼板を絶縁したのち,積層して製作した鉄心とマグネットワイヤで構成されている。マグネットワイヤは凹字型鉄心の短辺部の下端部に巻き付けており、それぞれの端部での巻き数は同じである。マグネットワイヤは導体面積が3.5mm<sup>2</sup>のビニル絶縁電線を用いた。定電圧電源装置には、コンデンサ容量が500,750,1000μFである3水準のコンデンサが組み込まれており、回路を繋ぎ変えることにより、コンデンサ容量を設定することが可能である。また、電圧の設定は400,500,600Vの3水準とした。

加振状況を図-5.3.2 に示す。本実験では、励磁コイルの長手方向の中心線と鉄筋の軸方向を平行、かつコイルの中心と鉄筋の軸方向中心とを一致させるように配置した。また、励磁コイルと(励磁コイル側の)鉄筋の表面からの距離をかぶりと定義した。



図-5.3.2 加振状況

#### 5.3.2.2 磁場および鉄筋の振動挙動の計測方法

鉄筋に作用する磁場を把握するために,鉄筋軸垂直方向の磁束密度を計測した。ここで磁 束密度と鉄筋に作用する電磁力の関係を式(5.3.1)に示す。

$$F(t) = \frac{B^2(t)}{2\mu}$$
(5.3.1)

ここで, F:電磁力(N/mm<sup>2</sup>), μ:透磁率(H/m), B:磁束密度(T)である。これより鉄筋に作用 する電磁力は磁束密度の2乗に比例することがわかる。

鉄筋表面の励磁コイルに向く方向の磁束密度を、サーチコイルを使用して計測した。サー チコイルは、直径 31mmの円状に電線を 4 回巻いて製作した。図-5.3.3 にサーチコイルの 計測原理を、図-5.3.4 にサーチコイルの外観を、図-5.3.5 に磁場の計測状況を示す。計測 点は、鉄筋中央の位置から 10mm 間隔で 0mm から 200mm までの位置とし、1 計測点につき 3 回計測を行った。サーチコイルは、励磁コイルからサーチコイルを通過するように発生す る磁場の変化に反応するため、それに反発する磁場を発生させる方向に電磁誘導が発生す ることになる。このように電磁誘導により発生した誘導起電力を、波形収集装置にて記録し た。誘導起電力と磁束密度との関係を式(5.3.2)に示す。

$$B(t) = -\int \frac{I(t)}{NS} dt$$
(5.3.2)

ここで、N:サーチコイルの巻き数、S:サーチコイルの断面積(mm<sup>2</sup>)である。式(5.3.2)を用いて、誘導起電力から磁束密度を求めることができる。また、図-5.3.6 に、計測した誘導 起電力および算出した磁束密度の一例を示す。





図-5.3.3 サーチコイルによる計測 図-5.3.4 サーチコイルの外観



## 図-5.3.5 磁場の計測状況



本研究では、磁東密度の特性を示す指標として、最大磁東密度とパルス幅を定義した。そ れぞれの指標について図-5.3.7 に示す。最大磁東密度は、磁東密度の絶対値の最大値と定 義する。また、パルス幅は最大磁東密度の5%の値を振幅が上回っている時間と定義する。 式(5.3.1)より、最大磁東密度およびパルス幅はそれぞれ電磁力の最大値、作用している時間 に対応する。特に、電磁力が作用している時間の大きさは、コンクリートに入力される弾性 波の周波数成分に影響する。そこで、パルス幅と入力される弾性波の周波数スペクトルとの 関係性を図-5.3.8 に示す。図-5.3.8 より、パルス幅が小さい場合、入力される弾性波が有 している低周波数成分が大きくなり、パルス幅が大きくなるに従い、入力される弾性波が有 する低周波数成分は小さくなり、高周波数成分が大きくなる。



図-5.3.7 最大磁束密度とパルス幅



図-5.3.8 パルス幅と入力される周波数成分との関係

次に鉄筋の端部から 900mm の位置において、レーザドップラー振動計により鉄筋の振動 を計測した。レーザドップラー振動計は、鉄筋の表面に貼付けたシールに向けてレーザを照 射し、反射したレーザを受信して、レーザの周波数変化から鉄筋の振動を計測する原理を有 する。また、計測におけるサンプリングレートを 1.0×10<sup>6</sup>/s、サンプリング数を 10000 点と した。レーザドップラー振動計により計測された波形の一例を図-5.3.9 に示す。なお、振動の大きさを示す指標として、最大振幅値を採用した。



図-5.3.9 LDV を用いて計測した波形の一例

### 5.3.2.3 かぶりの違いが磁場および鉄筋の振動に与える影響

図-5.3.1 に示す実験要領にて、かぶりを 30,60,90,120,150mm の 5 水準を設定し、 鉄筋径を D19,電圧を 600V、励磁コイルの巻き数を 30 ターン、コンデンサ容量は 1000 µ F とした。各計測地点において計測された最大磁束密度およびパルス幅とかぶりとの関係を 図-5.3.10、図-5.3.11 に示す。図-5.3.10 より、かぶりが小さくなるに従って最大磁束密度 が大きくなることがわかる。また、最大磁束密度が最も大きくなる地点は 70mm 付近であ り、かぶりに因らないことが分かった。図-5.3.11 より、パルス幅はいずれのかぶりにおい ても同程度であった。また、図-5.3.12 に最大振幅値とかぶりとの関係を示す。これより、 かぶりが大きくなるに従って最大振幅値は小さくなることが分かった。



図-5.3.10 かぶりと最大磁束密度との関係



図-5.3.11 かぶりとパルス幅との関係



## 5.3.2.4 鉄筋径の違いが磁場および鉄筋の振動に与える影響

図-5.3.1 に示す実験要領にて,鉄筋径を D8, D13, D16, D19 の 4 水準を設定し,かぶり を 30mm, 電圧を 600V, 励磁コイルの巻き数を 30 ターン,コンデンサ容量は 500 µ F とし て計測を行った。各計測点において計測された最大磁束密度およびパルス幅とかぶりとの 関係を図-5.3.13, 図-5.3.14 に示す。図-5.3.13 より,最大磁束密度は鉄筋径に依存しない ことがわかる。また,最大磁束密度が最も大きくなる計測点は,いずれの鉄筋径においても 70mm 付近であった。図-5.3.14 より,パルス幅はいずれのかぶりにおいても同程度であっ た。また,図-5.3.15 に最大振幅値と鉄筋径との関係を示す。これより,鉄筋径が大きくな るに従って,最大振幅値は小さくなることが分かった。







図-5.3.14 鉄筋径とパルス幅との関係



### 5.3.2.5 コンデンサ容量の違いが磁場および鉄筋の振動に与える影響

図-5.3.1 に示す実験要領にて、コンデンサ容量を 500、750、1000 µ F の 3 水準を設定し、 かぶりを 30mm、鉄筋径を D19、電圧を 600V、励磁コイルの巻き数を 30 ターンとして計測 を行った。各計測点において計測された最大磁東密度およびパルス幅とかぶりとの関係を 図-5.3.16 および図-5.3.17 に示す。図-5.3.17 より、コンデンサ容量を大きくすることに より、最大磁東密度とパルス幅ともに大きくなることがわかる。また、最大磁東密度が最も 大きくなる計測点は、いずれのコンデンサ容量においても 70mm 付近であった。図-5.3.18 に最大振幅値とコンデンサ容量との関係を示す。これより、コンデンサ容量が大きくなるに 従って最大振幅値は小さくなることが分かった。



図-5.3.16 コンデンサ容量と最大磁束密度との関係



図-5.3.17 コンデンサ容量とパルス幅との関係



### 5.3.2.6 励磁コイルの巻き数の違いが磁場および鉄筋の振動に与える影響

図-5.3.1に示す実験要領にて,励磁コイルの巻き数を10,20,30ターンの3水準を設定し, かぶりを30mm,鉄筋径をD19,電圧を600V,コンデンサ容量を1000µFとして計測を行った。各計測点において計測された最大磁東密度およびパルス幅とかぶりとの関係を図-5.3.19,図-5.3.20に示す。図-5.3.20より,かぶりが小さくなるに従って,最大磁東密度 が大きくなることがわかる。また,最大磁東密度が最も大きくなる計測点は,いずれの巻き 数においても70mmであった。図-5.3.21に巻き数ごとの最大振幅値を示す。図-5.3.21よ り,かぶりが大きくなるに従って最大振幅値は小さくなることが分かった。



図-5.3.19 巻き数と最大磁束密度との関係



図-5.3.20 巻き数とパルス幅との関係



#### 5.3.3 鉄筋に作用する磁場の特性が弾性波に与える影響

### 5.3.3.1 供試体および計測概要

前項において,各計測条件が鉄筋に作用する磁場の最大磁束密度およびパルス幅に与える影響について検討を行った。本項では,磁場の磁束密度,パルス幅がコンクリートに入力 される弾性波に与える影響に関して検討を行った結果を述べる。

供試体の概要を図-5.3.22 に示す。本供試体は,第3章3.3.2 において述べた供試体 A に 使用したコンクリート片を使用した。コンクリート片には,鉄筋径 D16,長さ 500mm の鉄 筋をかぶり 30mm となるように埋設しており,寸法は 400mm×400mm×150mm である。

計測概要を図-5.3.23 に示す。励磁コイルの中央と鉄筋の中央を一致させ、かつ励磁コイルの長手方向と鉄筋軸方向を平行となるように励磁コイルを設置した。弾性波の受信には AE センサを用いた。AE センサはセンサの中央位置が励磁コイルの中央と一致するように 配置し、両面テープによりコンクリート表面に貼り付けた。また、AE センサを用いた計測 と同時に、コンクリート表面における磁場の計測をサーチコイルにより行った。波形収集の

おけるサンプリングレートおよびサンプリング数は1M/s,10000 点とした。

磁場の最大磁東密度およびパルス幅を変化させるために、計測条件は巻き数とコンデン サ容量を変化させた。巻き数を 4,10,20,30 ターンの 5 水準、コンデンサ容量を 500,750, 1000 µ F の 3 水準を設定した。計測した磁場の最大磁東密度およびパルス幅を図-5.3.24 に 示す。



図-5.3.22 供試体概要





図-5.3.24 巻き数と最大磁束密度およびパルス幅との関係

## 5.3.3.2 入力される弾性波の大きさおよび周波数成分に及ぼす影響

図-5.3.25 にコンクリート表面で計測された弾性波の時刻歴波形の例を示す。また、図-5.3.26 には、計測により得られた時刻歴波形を、高速フーリエ変換(FFT)することにより 得られる周波数スペクトルの例を示す。図-5.3.26 より、パルス幅が大きい場合に、0 から 2kHz の周波数成分が大きくなることがわかった。ここで、弾性波の特徴を示す指標として、 最大振幅値と低周波数成分比 R に着目した。低周波数成分比 R の算出式を式(5.3.3)に示す。

$$R = \sum_{f_i=0}^{2000} I_{f_i} / \sum_{f_i=0}^{20000} I_{f_i}$$
(5.3.3)

ここで, *f*:周波数{Hz}, I<sub>f</sub>:周波数*f*におけるスペクトル強度を示す。すなわち,低周波数 成分 R は 20kHz までの周波数成分のうち,0 から 2kHz までの周波数成分が占める割合を示 す。図-5.3.27 および図-5.3.28 に,最大磁束密度と最大振幅値との関係およびパルス幅と 低周波数成分比 R との関係を示す。図-5.3.27 より,最大磁束密度が大きくなるに伴い,最 大振幅値が大きくなる傾向が示された。また、図-5.3.28 よりパルス幅が大きくなると,低 周波数成分比 R が大きくなることが分かった。 すなわち,パルス幅を大きくすることによ り,0 から 2kHz の周波数成分が大きくなることが明らかとなった。



図-5.3.25 時刻歴波形の例



図-5.3.26 周波数スペクトルの例



### 5.4 水平ひび割れが RC 床版の振動挙動に与える影響

#### 5.4.1 実験の概要

本項では,RC床版を模擬した鉄筋コンクリート製の供試体(水平ひび割れの有無を考慮) を使用し、当供試体に対して電磁パルス法による計測を行うことにより、供試体にどのよう な振動挙動が発生するのか、また水平ひび割れの有無に応じて供試体の振動挙動にどのよ うな差が生じるのか検討を行なった。

### 5.4.2 供試体の概要

供試体は,第4章4.4 において記載した供試体Cシリーズ(供試体C-1~C-5)を使用した。供試体の外観を図-5.4.1 に,供試体C-1~C-5の詳細図を,それぞれ図-5.4.2~図-5.4.6 に示す。

供試体 C-1 および供試体 C-2 は上面増厚を考慮していない RC 床版を想定し, 寸法を 1000mm×1000mm×100mm, かぶりを 35mm とした。また,供試体 C-1 は健全な状態,供試 体 C-2 は水平ひび割れが発生している状態を想定し,供試体 C-2 には鉄筋の腐食によって

発生した水平ひび割れを模擬し、厚さ 1mm のスチレンボードを鉄筋の直上に配置した。

供試体 C-3~C-5 は、上面増厚を施した RC 床版を想定し、寸法を 1000mm×1000mm×150mm、 かぶりを 72mm とした。また、供試体 C-3 は健全な状態、供試体 C-4 および供試体 C-5 は 水平ひび割れが発生している状態を想定した。供試体 C-4 は、供試体 C-2 と同様に鉄筋の 直上にスチレンボードを配置した。また、供試体 C-5 は、既設床版および増厚コンクリート の境界面において両者が剥離することにより発生する剥離ひび割れを想定し、深さ 40mm の 位置にスチレンボードを埋設した。



図-5.4.1 供試体 C シリーズの外観





#### 5.4.3 計測概要

図-5.4.7、図-5.4.8に計測状況を示す。励磁コイルの巻き数を20ターンとしてコンクリート内に埋設された鉄筋を加振し、それにより生じた弾性波をコンクリート表面に張り付けた(25kHzから80kHzまでフラットな感度を有する)AEセンサにより計測を行った。 電源装置の電圧は600Vとし、静電容量は1000µFに設定した。励磁コイルは凹字型の電磁 鋼板を絶縁したのち、積層して作製した鉄心とマグネットワイヤで構成されている。マグネットワイヤは凹字型鉄心の短辺部の下端部に巻き付けており、それぞれの下端部での巻き数は同じである。計測は1つのパターンごとに3回行った。



図-5.4.7 計測状況



図-5.4.8 計測状況

励磁コイルは供試体中央に設置し、コイルの長手方向と最外縁に位置する鉄筋の軸方向 とを一致させた。また、AE センサを励磁コイルの距離を 62.5mm にとして、計測を行った。 コンクリート表面に両面テープを用いて貼り付けた AE センサにより弾性波をサンプリン グレート 200k/s で 10000 点を記録した。

### 5.4.4 実験結果

図-5.4.9 に供試体 C-1 および供試体 C-2 に対して,図-5.4.9 に供試体 C-3~C-5 に対し て,供試体中央から 62.5mm の距離にある AE センサで計測された振動の時刻歴波形の一例 を示す。図-5.4.9,図-5.4.10 より,振幅値に着目すると,スチレンボードがない場合と比 較して,スチレンボードがある場合に大きな値を示した。さらに,周波数に着目するとスチ レンボードがある場合に低くなることがわかる。



図-5.4.9 供試体 C-1 および供試体 C-2 における時刻歴波形の一例



図-5.4.10 供試体 C-3~供試体 C-5 における時刻歴波形の一例

次に、図 5.4.11 および図-5.4.12 に励磁コイルから 62.5mm の距離において計測された 時刻歴波形を FFT により得られる周波数スペクトルの一例を示す。図-5.4.11 より、スチレ ンボードがある場合に、スチレンボードがない場合と比較して 680Hz の周波数成分が大き くなったことがわかる。さらに、図-5.4.12 より、供試体 C-4 および供試体 C-5 におけるピ ーク周波数はそれぞれ 2150HZ, 1020Hz であり、スチレンボードがない場合とは異なる周波 数においてピークが現れた。



図-5.4.11 供試体 C-1 および供試体 C-2 における周波数スペクトルの一例



図-5.4.12 供試体 C-3~供試体 C-5 における周波数スペクトルの一例

スチレンボードがある場合,スチレンボードがない場合に比べて時刻歴波形の振幅値が 大きくなり,また低い周波数帯において異なる周波数にピークが現れることから,たわみ共 振が発生していると考えられる。そこで板のたわみ共振周波数を算出した。たわみ共振周波 数の算出式<sup>1)</sup>を式(5.4.1)に示す。

$$f = \lambda \frac{\pi^2 h}{b^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1 - \sigma^2)}}$$
(5.4.1)

ただし, f:たわみ共振周波数(Hz), h:板厚, b:板の短辺の長さ, E:ヤング率, σ:ポアソ ン比であり,板が正方形である場合, λ=3.65 である。スチレンボードより上縁側のコンク リート部分の厚さおよび幅をそれぞれ板厚(h)および板の短辺の長さ(b)としてたわみ共 振周波数を算出した。算出結果を実験結果によって得られたピーク周波数を表-5.4.1 に示 す。また,板厚はスチレンボードより上縁側のコンクリートの厚さとして算出した。表-5.4.1より,実験におけるピーク周波数とたわみ共振周波数が概ね一致していることが分か った。したがって,水平ひび割れを想定したスチレンボードがある場合では,スチレンボー ドより上縁側のコンクリートに,たわみ共振が発生している可能性が示唆された。

供試体	実験におけるピーク周波数(Hz)	たわみ共振周波数(Hz)
供試体 C−3	680	730
供試体 C-4	2150	1960
供試体 C-5	1020	980

表-5.4.1 たわみ共振周波数

## 5.4.5 たわみ共振の確認

5.4.4 において、スチレンボードがある場合において、スチレンボードより上縁側のコン クリート部がたわみ共振している可能性が示唆された。そこで、供試体 C-1 および C-2 を 対象として、供試体中央から上段鉄筋の軸方向に距離が 0mm から 375mm の 62.5mm 間隔 の点において計測した。受信信号のうち、たわみ共振周波数に相当する成分を抽出し、それ らの特徴からたわみ共振が発生していることを確認した。たわみ共振周波数の成分の抽出 にはローパスフィルター(以下、LPF と称す)を用いた。LPF のカットオフ周波数は 1kHz とした。図-5.4.13 に供試体 C-2 において、励磁コイルの中心線からの距離が 125mm およ び 375mm の計測点における LPF 処理後の時刻歴波形を示す。 図-5.4.13 より、供試体中 央からの距離が大きい場合に最大振幅値が小さくなった。概ね位相が一致していることか ら、供試体全体で同じモードで振動していることがわかる。図-5.4.14 に各計測点における LPF 後の最大振幅値を示す、図-5.4.14 においてスチレンボードがある場合に、供試体中央 から近い点においては最大振幅値が大きく、さらに最大振幅値の変化も大きいことがわか る。したがって、水平ひび割れを想定したスチレンボードがある場合、スチレンボードより 上縁部側のコンクリート部にたわみ共振が発生していることが確認された。



図-5.4.13 LPF 処理後の時刻歴波形



#### 5.5 水平ひび割れの有無に関する判定指標の提案

5.4 より,スチレンボードがある場合に,スチレンボードより上縁側のコンクリートがた わみ共振することにより,床版の振動が大きくなることが明らかとなった。ここで,振動の 大きさを示す波形エネルギーを水平ひび割れの判定を行うための新たな指標として提案す る。式(5.5.1)に波形エネルギー<sup>2)</sup>の算出式を示す。

$$E = \sum_{i=1}^{n} a_i^2$$
(5.5.1)

ただし, E: 波形エネルギー, a<sub>i</sub>: 時刻 i における時刻歴波形の振幅値である。すなわち, 波 形エネルギーは時刻歴波形における各時刻の振幅値の2乗和である。図-5.5.1 に算出した 波形エネルギーを示す。図-5.5.1 より, 水平ひび割れを想定したスチレンボードがある場 合, スチレンボードがない場合に比べて波形エネルギーが大きくなっていることがわかる。 このことから, 波形エネルギーを指標として, 水平ひび割れの有無を判定することは妥当で あると考える。



図-5.5.1 波形エネルギー

#### 5.6 水平ひび割れの検出に適した計測条件に関する検討

### 5.6.1 供試体概要および計測概要

5.5 において,波形エネルギーを指標として水平ひび割れを検出できる可能性が示唆された。そこで,本項では,水平ひび割れの有無を示す指標である波形エネルギーの差異がより 顕著になる計測条件に関して検討を行った。

供試体 C-2,供試体 C-3 および供試体 C-5 を用いて,表-5.6.1 にそれぞれの供試体にお けるスチレンボードより上縁側のコンクリートの厚さ(板厚)と,それに対応するたわみ共 振周波数を示す。

本項において、計測条件のうち、入力する衝撃のパルス幅に着目した。そのため、5.3の 実験結果を踏まえ、パルス幅を変化させるためにコイルの巻き数を6、10、20、30Tの4水 準とした。それぞれの巻き数に対応するパルス幅を表-5.6.2 に示す。いずれの計測におい ても励磁コイルは供試体中央に配置し、励磁コイルの長手方向と最外縁の鉄筋軸方向を平 行にした。電磁パルス法により発生した振動を、供試体の中央から 62.5mm にある AE セン サにより計測を行った。また、電源装置の電圧および静電容量は 5.4.3 と同様にした。また、 AE センサによる受信した波形をサンプリングレートおよびサンプリング数を 200k/s, 10000 点として記録した。

供試体	板厚(mm)	たわみ共振周波数(Hz)		
供試体 C−2	35	730		
供試体 C-3	72	1960		
供試体 C-5	40	980		

表-5.6.1 板厚およびたわみ共振周波数

励磁コイルの巻き数	パルス幅(ms)		
6T	0. 34		
10T	0. 44		
20T	0. 94		
30T	1. 17		

表-5.6.2 パルス幅

## 5.6.2 波形エネルギー比

本項では、ひび割れの有無による波形エネルギーの違いを表す指標として、波形エネルギー比を定義する。波形エネルギー比はひび割れがある場合の波形エネルギー比をひび割れ がない場合の波形エネルギーで除することで正規化した値である。式 (5.6.1) により波形エ ネルギー比を定義する。

$$ER = \frac{E_b}{E_a} \tag{5.6.1}$$

ただし, ER:波形エネルギー比, Ea: ひび割れがない場合の波形エネルギー, Eb: ひび割れ がある場合の波形エネルギーである。すなわち,波形エネルギー比が大きくなるに従い,ひ び割れの有無による波形エネルギーの違いが大きいことを示す。一方,波形エネルギー比が 1に近い場合,ひび割れの有無による波形エネルギーへの影響は小さいことを示す。

#### 5.6.3 実験結果

図-5.6.1 に算出した波形エネルギー比を示す。図-5.6.1 より、概ね板厚が小さい場合、 巻き数を大きくすることで波形エネルギー比が大きくなった。一方で、板厚が大きい場合、 巻き数が小さくすることで波形エネルギー比が大きくなった。すなわち、たわみ共振周波数 が大きい場合にパルス幅を小さく、またたわみ共振周波数が小さい場合にはパルス幅を大 きくすることにより、波形エネルギーの差異が大きくなった。これは、たわみ共振周波数に 相当する周波数成分が大きい衝撃を入力することにより、たわみ共振が発生しやすいため であると考えられる。したがって、たわみ共振周波数に応じて、波形エネルギーの差異が大 きくなるパルス幅があることが明らかとなった。



#### 5.7 衝撃応答解析による水平ひび割れが及ぼす影響のメカニズムに関する検討

#### 5.7.1 解析の概要

前項において、電磁パルス法を用いた RC 床版の水平ひび割れの検出手法に関して、供 試体を用いた実験により、水平ひび割れが床版の振動挙動に与える影響に関する検討を行 った。その結果、信号の大きさを示す波形エネルギーを指標とすることで、床版内部に存 在する水平ひび割れを検出できる可能性が示唆された。しかし、水平ひび割れの有無の違 いが及ぼす影響に関するメカニズムについては検討が不十分である。 そこで本項では、水平ひび割れの有無を考慮した衝撃応答解析を行い、RC 床版の振動 挙動に違いが生じるメカニズムを調べた。

## 5.7.2 解析条件

解析モデルの概要を図-5.7.1 に示す。図-5.7.1 は供試体 C を模擬したモデルであり, スチレンボードの有無を考慮した 2 ケースとした。スチレンボードは空隙として評価し, 大きさは 1000×1000×100mm とした。各モデルの断面図を図-5.7.2 に示す。空隙の深さは 35mm とし,端部から 62.5mm より内部の範囲において,幅 1mm とした。また,長さ 1000mm,直径 16mm の鉄筋を上縁からかぶり 43mm および 125mm 間隔で合計 8 本を配置 した。



図-5.7.1 解析モデル



図-5.7.2 解析モデルの断面図

電磁パルス法により作用する力の波形は図-5.7.3に示すパルス波形とし、鉄筋の中心から床版の鉛直上方向に作用させた。荷重強度は、電磁パルス法を用いた実験において、鉄筋表面上で計測した磁束密度の大きさを基に図-5.7.4に示す通りとした。パルス幅は1.0ms(励磁コイルの巻き数20T相当)とした。出力点は床版上面で、鉄筋軸方向に、それぞれ床版の中心の位置から350mmまでの50mm間隔の点とした。出力波形は速度として、出力間隔5µs、出力点数10000点とした。解析に入力した物性値を表-5.7.1に示す。各モデルのモデルはいずれも8節点6面体ソリッドで構成されており、要素の最大寸法は10mmとした。



表-5.7.1 解析モデルの物性値

	密度(g/cm³)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
コンクリート	2. 3	30	0. 2
鎁	7.85	200	0. 3
エポキシ樹脂	1. 2	1.5	0.34

# 5.7.3 解析結果

図-5.7.5 および図-5.7.6 に、供試体中央および中央から鉄筋軸方向に 300mm の位置に おいて計測された時刻歴波形,各モデルの中心における波形エネルギーを示す。図-5.7.5 より、空隙の有無に因らず、波形の位相は概ね一致していることがわかった。しかし、空
隙がある場合に,たわみ共振の減衰が小さく,振幅値が大きいことがわかる。また,図-5.7.6から,5.4および5.5と同様に空隙がある場合において,波形エネルギーが大きくな ることが確認できた。



図-5.7.5 時刻歴波形



図-5.7.6 波形エネルギー

次に図-5.7.7に、空隙があるモデルにおいて計測された波形を、FFT 処理することによ り得られた周波数スペクトルの一例を示す。図-5.7.7より、空隙がある場合に、実験と同 様にたわみ共振周波数に相当する周波数(赤矢印)においてピークを確認することができ た。



図-5.7.7 周波数スペクトル

図-5.7.8に空隙がないモデルにおけるコンター図を示す。図-5.7.8(a)は解析モデル全体を示し、図-5.7.8(b)は鉄筋に対して直角方向に解析モデルの中央部を切断した断面を、図-5.7.8(c)は鉄筋と同方向に解析モデルの中央部を切断した断面を示す。また、図-5.7.9に空隙があるモデルにおけるコンター図を示す。図-5.7.9(a)は解析モデル全体を示し、図-5.7.9(b)~(c)は、図-5.7.8と同様の切断面とした。

図-5.7.8に対して図-5.7.9のようにコンクリート部材内に空隙がある場合において, 空隙より上縁側にあるコンクリート部にたわみ共振が発生していることが確認できた。また,鉄筋軸垂直方向に固有振動モードが3次のたわみ共振であることがわかった。

上記より,空隙がある場合に,たわみ共振が発生することにより,空隙より上縁側のコ ンクリートの振動が大きくなり,波形エネルギーに差が生じることが確認することができた。



(a) コンター図(全体(300 µ s))



# (b) コンター図 (a-a)



(c)コンター図(b-b) 図-5.7.8 コンター図(空隙なし)



(a)コンター図(全体(4790 µ s))



(b) コンター図 (a-a)



(c)コンター図(b-b) 図-5.7.9 コンター図(空隙あり)

### 5.8 まとめ

本実験及び解析から得られた知見を以下に示す。

- かぶり(鉄筋の深さ)が大きくなるに伴い、磁場の最大磁束密度が小さくなる。一方、 磁場のパルス幅はかぶりに因らず一定であった。また、鉄筋の最大振幅値はかぶりが大 きくなると小さくなった。
- 磁場の最大磁束密度およびパルス幅は、振動させる鉄筋径に因らず同程度であった。また、鉄筋径が小さくなるに従って、鉄筋の最大振幅値は大きくなった。
- 3) 励磁コイルの巻き数およびコンデンサ容量が大きくなるに従い、磁場の最大磁束密度 およびパルス幅は大きくなった。また、励磁コイルの巻き数、コンデンサ容量を大きく することで、鉄筋の最大振幅値は大きくなった。
- 4) 磁場の最大磁東密度を大きくすることにより、コンクリート中に入力される弾性波の 最大振幅値が大きくなる。また、パルス幅が大きくなるにともない、入力される弾性波 の低周波数成分が大きくなることが明らかとなった。
- 5) 水平ひび割れがある場合,水平ひび割れより上縁側にあるコンクリート部がたわみ共振が発生することにより,床版の振動が大きくなる。
- 6) 振動の大きさを示す波形エネルギーを指標として、床版の水平ひび割れを検出できる 可能性が示唆された。
- 水平ひび割れの検出において、ひび割れがある場合に発生するたわみ共振の周波数に 適したパルス幅があることが分かった。
- 8) 衝撃応答解析を行った結果,水平ひび割れがある場合にRC床版上面で計測される振動 は大きくなり、それに伴って指標である波形エネルギーが大きくなることを確認する ことができた。
- 9) 実験および解析結果を比較して、振動挙動の周波数スペクトルにおけるピーク周波数 は概ね実験値と一致した。
- 10) 解析結果においても、水平ひび割れの上部において、たわみ共振が発生することにより振動が大きくなることが明らかとなった。

# 参考文献

- 土木学会,弾性波法の非破壊検査研究小委員会報告書および第2回弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関するシンポジウム講演概要集,平成19年2月
- 2) 木村貴圭, 内田慎哉, 宮田弘和, 鎌田敏郎: 電磁パルス法による接着系アンカーあと施 エアンカー固着部の非破壊検査手法に関する実験的検討, 日本コンクリート工学会年 次論文集, Vol. 36, No.1, pp.2116-2121, 2014.7.

# 第6章 実橋 RC 床版に対する水平ひび割れの検出に関する検討

### 6.1 はじめに

第2章において述べたように、上面増厚後に再劣化した RC 床版内に発生している損傷 は、図-6.1.1 に示すように、増厚コンクリートおよび既設床版との境界面での剥離による 剥離ひび割れだけでなく、雨水等の鉄筋を腐食させる因子が侵入し、RC 床版内の鉄筋が腐 食することによって発生する腐食ひび割れも発生している場合がある。



RC 床版の耐荷性能に着目した場合,剥離ひび割れが発生しているとしても,コンクリート部材および鉄筋が健全な状態であれば,増厚コンクリートおよび既設床版が重ね梁として機能することにより,RC 床版上を走行する車両の輪荷重に抵抗すべき耐荷力は十分に有していると考えることができる。しかし,鉄筋の腐食が顕在化すれば,RC 構造物として機能することができなくなる。腐食ひび割れは,鉄筋の腐食によって発生するものであり,腐食ひび割れの存在を検出することができれば,間接的に鉄筋腐食の有無を把握することができる。よって,上面増厚後のRC 床版の維持管理を行っていく上で,確認しなければならない損傷は,腐食ひび割れであると言える。しかし,剥離ひび割れおよび腐食ひび割れは RC 床版内部に発生するために,外観目視により確認することが難しい。

このような層状に発生した水平ひび割れに対して、コンクリート中の鉄筋や粗骨材の影響を比較的受け難い衝撃弾性波法を適用した場合、周波数特性にどのような影響を与えるのか過去に検討された事例は少ない。 そこで本研究では、弾性波に基づく手法に着目し、上面増厚後に再劣化が顕在化したため、床版取替え工事に伴って鋼鈑桁橋から切断撤去された RC 床版(供試体 D と称す)に対して衝撃弾性波法を適用し、床版内部の損傷状況を把握する方法について検討した。具体的には、床版上面および下面の両面において衝撃弾性波法を適用し、床版内部の主たる変状としての水平ひび割れを対象として、上下面それぞれにおける検出性能を評価した。さらに、上下面両面での測定結果を併用することにより、床版

内部の水平ひび割れの状況を適確に推定する方法について検討したり。

また、上記のように現場では必ずしも RC 床版の下面から計測を行うことができるとは限 らない。そこで、励磁コイルを介してパルス状の電磁力によりコンクリート内部の強磁性体 (鉄筋)を非接触で加振する電磁パルス法を適用すれば、水平ひび割れの状態に左右されず、 その有無によって生じるかぶり部の振動特性の差を把握することができると考えられる<sup>2)</sup>。 本章では、上面増厚後に損傷が顕在化し切断撤去された実橋 RC 床版に対する衝撃弾性波法 および電磁パルス法を適用し、両者の計測データを比較検証することにより、剥離ひび割れ および腐食ひび割れの発生状況に対する推定方法について検討を行った。

図-6.1.2 に床版取替え工事が行われた橋梁の現況を、図-6.1.3 に当橋の損傷状況の一例 を、図-6.1.4 に RC 床版の撤去状況を、図-6.1.5 に供試体 D の運搬状況を示す。本橋の床 版取替え工事を行う事前に、(舗装切削後に) RC 床版の上面に対して打音調査を行ったと ころ、浮き音を確認した範囲を図-6.1.6 に示す。この結果から、供試体 D を採取した径間 において、広い範囲に渡り増厚コンクリートと既設床版の境界面に剥離ひび割れが発生し ていることがわかる。



図-6.1.2 床版取替えが行なわれた橋梁

図-6.1.3 損傷状態の一例



図-6.1.4 RC 床版の撤去作業状況



図-6.1.5 供試体の運搬状況





上部工標準断面図

浮き音箇所一覧表









### 6.2 供試体の概要

図-6.2.1 に供試体 D の外観を示す。大きさは 5500mm×2200mm であり、厚さは標準部 で 260mm である。設計図書には既設床版厚が t=210mm、増厚コンクリート厚が t=60mm と 記載されていたが、実測すると増厚コンクリートの厚さは、t=60mm~80mm の範囲で変動 していた。これは、増厚コンクリート打設時において、既設床版上面側の鉄筋腐食に起因す る剥離部を除去した際に、不陸が発生したことに起因すると推測される。なお、供試体 D は、アスファルト舗装が切削された状態であった。

図-6.2.2 に示すように、増厚コンクリートの一部に対して補修を行なった部位(水平ひび割れが発生していなかったため健全部とした)を除き、切断面のほぼ全長に渡って床版境界面に、図-6.2.3 に示すような剥離ひび割れが発生していた。切断面に対する外観目視から推測されるひび割れ幅は、最大でw=1.0mmであった。また、図-6.2.4 に示すような既設床版内の上段側鉄筋位置においても、鉄筋腐食に起因する腐食ひび割れが発生している部位があった。ひび割れ幅は、w=0.1mm~0.5mmであった。本供試体は、前項に記載した全ての損傷特性を有しており、本研究に適する損傷状態であった。



図-6.2.1 供試体 D の外観



図-6.2.2 健全部の状態



図-6.2.3 剥離ひび割れの状態



図-6.2.4 剥離ひび割れおよび腐食ひび割れの状態

本橋の RC 床版の水平ひび割れの発生状態を確認するために,撤去作業を行う事前に RC 床版の下面から削孔調査を実施し,コンクリートコアを採取した。各計測点の近傍において, 床版境界面に剥離ひび割れが発生していることおよび下段鉄筋位置に水平ひび割れが発生 していないことを確認した。

剥離ひび割れおよび腐食ひび割れ内には,図-6.2.5 に示すような堆積物を確認した。堆 積物は黒褐色でやや粘土状のもので,湿気を含んでいた。これは,当該 RC 床版の切断作業 時において,コンクリート粉体が堆積したことや,輪荷重の繰り返し載荷によるすり磨き現 象により発生したコンクリート粉体に,橋面から床版内の損傷部を介して,雨水等が供給さ れて湿潤状態になったことが推測される。また,着色していた要因としては,鉄筋腐食によ り発生した錆汁によるものと推測する。



図-6.2.5 水平ひび割れ内の堆積物の一例

# 6.3 衝撃弾性波法による計測

# 6.3.1 計測概要

計測は、図-6.3.1に示す3つの計測点に対し、図-6.3.2に示すように、供試体Dの上 面および下面から実施した。水平ひび割れが発生していない箇所を計測点1、剥離ひび割 れが発生している箇所を計測点2、剥離ひび割れおよび腐食ひび割れが発生している箇所 を計測点3とした。計測状況を図-6.3.3に示す。弾性波の入力は鋼球での打撃により行っ た。ここで、鋼球の径によって入力される弾性波の上限周波数が異なることから<sup>3)</sup>、鋼球 は直径が φ5.9mm、φ9.5mm、φ12.5mm、φ15.9mm、φ19.6mmの5種類を使用した。受 信は、打撃点から30mm離れた位置に3Hz~30kHzにおいてフラットな応答感度を持つ加 速度計を設置して行なった。打撃点および加速度計を設置する箇所はディスクサンダで研 磨した。加速度計で受信した信号は、サンプリング間隔1µs、サンプリング数10,000点の 時刻歴応答波形として波形収集装置に記録した。計測は1計測点ごとに10回行い、その うち相関係数の高い上位3データを抽出して分析に使用した。また、供試体の比較的損傷 していない部位において打撃および計測し、受信波形から得られた周波数スペクトルの値 と床版厚から速度を算出し、コンクリートの弾性波伝播速度3710m/sを得た。



図-6.3.1 計測点



図-6.3.2 損傷特性の概要と計測概要



図-6.3.3 計測状況

# 6.3.2 実験結果および考察

### 6.3.2.1 水平ひび割れが無い場合

水平ひび割れが無い箇所における計測結果(周波数分布)の一例を図-6.3.4,各鋼球のピ ーク周波数と水平ひび割れ等の推定深さを表-6.3.1に記す。床版上面からの計測において, 上限周波数の大きい鋼球 φ5.9mm でのピーク周波数は22.2kHz(図-6.3.4(a)参照)であっ た。弾性波伝播速度から推定深さを算出すると83.6mm であり,床版境界面近傍を示した。 鋼球 φ9.5mm においても同様の傾向を示した。これは各床版に配合の異なるコンクリート が使用されていたことから,床版境界面において弾性波の多重反射が発生したことに起因 すると考えられる。これに対し,上限周波数が比較的小さい直径 φ12.5mm 以上の鋼球で計 測を行ったところ,全ての鋼球においてピーク周波数は5.2kHz と小径の鋼球によるピーク 周波数に対して小さくなった。これは床版下面において多重反射が発生したと推測する(図 -6.3.4(b)参照)。床版下面からの計測においては,直径 φ5.9mm および φ9.5mm の鋼球で の推定深さと下段鉄筋位置がほぼ一致する結果となった(図-6.3.4(c)参照)。また,鋼球 φ19.6mm での計測では,推定深さが床版厚と近い値となった(図-6.3.4(d)参照)。



図-6.3.4 水平ひび割れが無い箇所での周波数分布の一例

	鋼球径	ピーク周波数	推定深さ	備考
	(mm)	(kHz)	(mm)	
	φ5.9	22. 2	83.6	床版境界面位置近傍
	φ9.5	22.0	84.3	床版境界面位置近傍
上面	φ12.5	5. 2	356.7	床版厚(260mm)以上
	φ15.9	5.2	356.7	床版厚(260mm)以上
	φ19.6	5.2	356.7	床版厚(260mm)以上
	φ5.9	24. 2	76.7	下段鉄筋位置近傍
	φ9.5	24.0	77.3	下段鉄筋位置近傍
下面	φ12.5	12. 2	152.0	判定不可能
	φ15.9	11.4	162.7	判定不可能
	φ19.6	6.6	281.1	床版厚(260mm)以上

表-6.3.1 ピーク周波数および推定深さ(水平ひび割れが無い箇所)

※ 弾性波伝播速度は3710m/s

※ 表中の推定深さは、上面については上面から下面については下面か らの深さを示す.

### 6.3.2.2 剥離ひび割れがある場合

剥離ひび割れが発生している箇所における計測結果(周波数分布)の一例を図-6.3.5,各 鋼球のピーク周波数と水平ひび割れの推定深さを表-6.3.2 に記す。水平ひび割れが無い箇 所での計測結果と比較して、床版上面からの計測においては、小径の鋼球(φ5.9mm)での 推定深さは、剥離ひび割れがある床版境界面位置近傍を示し(図-6.3.5(a)参照),直径の大 きい鋼球では(φ19.6mm)での推定深さは床版下面位置と一致する傾向は同様であった(図 -6.3.5(b)参照)。しかし,床版下面からの計測においては,直径 φ15.9mm 以上の鋼球での 推定深さが剥離ひび割れ位置近傍と一致する傾向が強くなった(図-6.3.5(c),(d)参照)。 特に上限周波数が14.8kHzと比較的小さい直径 φ19.6mmの鋼球においても,推定深さが剥 離ひび割れ位置とほぼ一致した。水平ひび割れが無い箇所での計測結果を比較すると, 床版 上面からの計測では、剥離ひび割れの有無に関わらず、小径の鋼球では床版境界面において、 大径の鋼球では床版下面において,弾性波の多重反射が発生する傾向を示した。これは打撃 点および床版境界面の位置が60mm~70mmと比較的接近していたためと考えられる。一方, 床版下面からの計測では、打撃点と剥離ひび割れの位置が 190mm~200mm と比較的離れて いたため、上限周波数の小さい大径の鋼球において、水平ひび割れが無い箇所および剥離ひ び割れが発生している箇所での計測結果において、ピーク周波数に差が見られた。このこと から、床版境界面に発生している剥離ひび割れの有無を判定することができると考えられ る。





	鋼球径	ピーク周波数	推定深さ	備考
	(mm)	(kHz)	(mm)	
	φ5.9	33.8	54.9	剥離ひび割れ位置近傍
	φ9.5	16. 4	113.1	判定不可能
上面	φ12.5	11.8	157.2	判定不可能
	φ15.9	12. 0	154.6	判定不可能
	φ19.6	6.6	281.1	床版厚(260mm)以上
	φ5.9	24. 4	76.0	下段鉄筋位置近傍
	φ9.5	24. 4	76.0	下段鉄筋位置近傍
下面	φ12.5	10. 6	175.0	剥離ひび割れ位置近傍
	φ15.9	10. 8	171.8	剥離ひび割れ位置近傍
	φ19.6	10. 2	181.9	剥離ひび割れ位置近傍

表-6.3.2 ピーク周波数および推定深さ(剥離ひび割れが発生している箇所)

※ 弾性波伝播速度は3710m/s

※ 表中の推定深さは、上面については上面から下面については下面か らの深さを示す。

#### 6.3.2.3 剥離ひび割れおよび腐食ひび割れがある場合

剥離ひび割れおよび腐食ひび割れが発生している箇所における計測結果(周波数分布)の 一例を図-6.3.6,各鋼球のピーク周波数(代表例)と水平ひび割れ等の推定深さを表-6.3.3 に記す。床版上面から直径の小さい鋼球(φ5.9mm およびφ9.5mm)で計測を行った場合, ピーク周波数は,打撃点から最も近い剥離水平ひび割れだけでなく腐食ひび割れ位置にお いても推定深さの近傍を示した(図-6.3.6(a),(b)参照))。これは,水平ひび割れ内に固結 したコンクリート粉体が堆積していることにより,弾性波の透過性が向上したことに起因 すると考える。この傾向は,床版下面からの計測結果についても同様であり,鋼球φ15.9mm および鋼球φ19.6mmによる計測において,推定深さがそれぞれ腐食ひび割れおよび剥離ひ び割れの位置近傍を示した(図-6.3.6(c),(d)参照)。

水平ひび割れが無い箇所および剥離ひび割れが発生している箇所での計測結果と比較す ると、床版上面からの計測では、いずれのケースも小さい径の鋼球で打撃することで、床版 境界面に相当するピーク周波数が得られるが、その鋼球径よりやや大きい鋼球を使用する ことで、腐食ひび割れ面に相当するピーク周波数に近い値が得られることがわかった。また、 床版下面からの計測でも、床版厚に相当するピーク周波数が得られる大径の鋼球よりやや 小さい径の鋼球を使用することで、腐食ひび割れを捉えられる可能性が示された。このこと から、腐食ひび割れが存在する場合、剥離ひび割れが存在したとしても、鋼球の径を適切に 選択することで腐食ひび割れの検出が可能であることが分かった。



	鋼球径	ピーク周波数	推定深さ	備考
	(mm)	(kHz)	(mm)	
	φ5.9	30. 2	61.4	剥離ひび割れ位置近傍
	φ9.5	22. 0	84. 3	腐食ひび割れ位置近傍
上面	φ12.5	5. 2	356.7	床版厚(260mm)以上
	φ15.9	5. 2	356.7	床版厚(260mm)以上
	φ19.6	5. 2	356. 7	床版厚(260mm)以上
	φ5.9	14. 4	128. 8	判定不可能
	φ9.5	14. 4	128. 8	判定不可能
下面	φ12.5	14. 4	128. 8	判定不可能
	φ15.9	11. 0	168.6	腐食ひび割れ位置近傍
	φ19.6	9.8	189. 3	剥離ひび割れ位置近傍

表-6.3.3 ピーク周波数および推定深さ(CASE3)

※ 弾性波伝播速度は3710m/s

※ 表中の推定深さは、上面については上面から下面については下面からの深さを示す.

#### 6.3.3 現地調査方法の提案

本実験において、RC 床版の上面から小径の鋼球(φ5.9mm、φ9.5mm)を用いて、衝撃弾 性波法により計測を行えば、比較的浅い位置にある水平ひび割れの有無を検知することが 可能であることが分かった。ただし、コンクリート配合が異なる新旧床版の境界近傍に対し てもスペクトルピークを示す傾向があることが分かった。しかし、大径の鋼球(φ15.9mm, φ19.6mm)により下面からの計測を行なえば、腐食ひび割れの有無を判定しやすくなる傾 向があることがわかった。RC 床版上面および下面からの計測手順を記したフローチャート を、それぞれ図-6.3.7 および図-6.3.8 に示す。

上記の調査方法を現地で行う場合,前提として床版厚および鉄筋位置を把握しておく必要がある。具体的な手順として,まず始めに床版上面から2~3種類の小径の鋼球による計測を行い,床版境界面および上段鉄筋位置での周波数ピークの有無を把握しておく。この段階で腐食ひび割れの有無を推測することができるが,剥離ひび割れの有無を把握することは困難であると考えられる。次に床版上面と同一の計測点に対して,床版下面から大径の鋼球を使用して計測を行う。当該計測は,主桁等が障害となる計測点があればその近傍で実施する。この計測により,周波数ピークが床版厚さ位置で卓越すれば,当該計測点にひび割れはなく健全であると言える。しかし,床版境界面の位置で周波数ピークを示せば,さらに鋼球の種類を増やして計測を行い,床版境界面において周波数ピークを示せば剥離ひび割れ,上段鉄筋位置で示せば腐食ひび割れが発生していると判定することができる。



図-6.3.7 床版上面からの計測手順



図-6.3.8 床版下面からの計測手順

# 6.4 電磁パルス法による計測

### 6.4.1 計測概要

本実験は、衝撃弾性波法による実験と同様に、水平ひび割れが無い健全な部位(ただし、 既設床版および増厚コンクリートとの境界面に打継ぎ部があり、外観上一体化している)、 床版境界面に剥離ひび割れのみがある部位、剥離ひび割れだけでなく上段鉄筋位置に腐食 ひび割れがある部位の3箇所に対して上面から実施した(図-6.2.2~図-6.2.4と同様の計 測点である)。計測機器は、第3章および第5章に記載した実験と同様に、定電圧発生装置 の電圧は600Vとし、振動センサは、15kHz~100kHzの間に応答感度を有し、特に25kHz~ 80kHzの間では感度特性が比較的フラットなAEセンサを使用した。AEセンサで受信した 信号は、サンプリング間隔5µs、サンプリング数10,000点の時刻歴応答波形として波形収集 装置に記録した。励磁コイルについても、第3章および第5章に記載した実験と同様のも のを使用し、導線の巻き数は6ターンおよび20ターンの2種類とした。受信は、AEセン サを供試体表面に設置して行なった。AEセンサを設置する箇所は、ディスクサンダで研磨 し平坦にした。

供試体 D には, 異形棒鋼 D16 が, 125mm 間隔で橋軸方向および橋軸直角方向に配置されていた。ここで, 励磁コイルは, 橋軸方向鉄筋の直上に励磁コイルの長辺部が並行となるように設置した。また, AE センサは, 励磁コイルから約 50mm 離れた箇所に設置した。図-6.4.1 に計測状況を示す。



図-6.4.1 計測状況

# 6.4.2 実験結果および考察

供試体 D に対して 6 ターンの励磁コイルによる実験を行った結果を図-6.4.2 に, 6 ター ンの励磁コイルによる実験を行った結果を図-6.4.3 に示す。第3章にて記した基礎評価実 験結果と同様に, 6 ターンおよび 20 ターンによる計測結果とも,水平ひび割れが無い健全 な部位での振幅が最も小さく,水平ひび割れが発生している部位ほど振幅が大きくなる傾 向を示した。





波形エネルギー<sup>4)</sup>を算出した結果を,図-6.4.4に示す。6 ターンおよび 20 ターンとも,供 試体による実験と同様に健全な部位,剥離ひびわれのみ発生している部位,剥離ひび割れお よび腐食ひび割れが発生している部位の順に波形エネルギーが大きくなることが分かった。 6 ターンでの計測結果において,剥離ひびわれのみ発生している部位に対する剥離・腐食ひ び割れが発生している部位の波形エネルギーの比率 1.05 に対して,20 ターンでの比率は 1.56 になったことから,この傾向は,20 ターンでの計測結果において顕著になった。これ は、6 ターンと比較して電磁力が大きい 20 ターンでの計測において,たわみ共振が大きく なったことに起因すると推測することができる。このように、基礎評価実験において確認することができた水平ひび割れの状態と波形エネルギーの相関性は、鉄筋が過密に配置されている実橋 RC 床版においても、同様の傾向を示すことを確認することができた。



図-6.4.4 波形エネルギー

本実験結果から、電磁パルス法により、現場の環境によっては衝撃弾性波法では検出が難 しくなると想定される剥離ひび割れおよび腐食ひび割れの有無を検出することができるだ けでなく、 各ひび割れを判別することができる可能性を示唆することができた。

# 6.5 複数の非破壊検査手法を組み合わせた損傷評価手法の提案

# 6.5.1 計測概要

# 6.5.1.1 供試体の概要

供試体は,前項において記載した供試体 D を使用した。供試体 D の表面に対し,図-6.5.1 に示すような格子状のラインを罫書きした。供試体の長手方向と平行に 500mm 間隔で A~ D ラインを,短手方向と平行に同じくほぼ 500mm 間隔で 1~10 ラインを設定した。なお, 1~10 ラインは,切断面を目視により確認した配力鉄筋の位置と一致させている。衝撃弾性 波法および電磁パルス法による計測は,A~D ラインおよび 1~10 ラインの交差するポイン トを計測点として実施した。

供試体のA ライン近傍の切断面における水平ひび割れの状態を図-6.5.2 に,D ライン近傍の切断面における水平ひび割れの状態を図-6.5.3 に示す。水平ひび割れには,図-6.5.4 に示すような剥離ひび割れだけでなく,図-6.5.5 に示すような腐食ひび割れも発生している箇所があった。



1		2	2		3	3		4				5		6	( 1		7				8		9			1	0
0	•	0	•	0	•	0	•	0	•	•	•	•	0		•			•		-	•	•	0	•	0	0	0
•	0	0	0	0	0	0	•		0	0	0	•	•	•	0	0		e En	•	0				0		0	0
		in Kal		3								ALL DE		1	<b>MIRA</b>			ALL ALL	-							-	(TROOM
Ser.	-1					-			-	and the second	-	-	-													-	
	35			NP.				-	e Her	100					展して			-2-1			L.		-	and and		- State	A R
																							-		AN AN		5
	ţ	畐 (mr	n)		深さ	ž (m	m)		波刑	≸E	(mV <sup>2</sup>	2)				幅	(mm)	)		深	さ (m	m)		波飛	≸E	(mV	2)
1		—			3	130			1.	51	×10	4		6		2	10				88			7.	62	× 1(	)4
2		2				62			1.	07	×10	6	] [	7		測定	E不	能		測	定不	能		1.	31 :	× 1(	<b>)</b> 5
3		1				68			2.	41	×10	5	] [	8		測定	E不	能		測	定不	能		6.	40 :	× 1(	<b>)</b> 5
4		-				86			8.	13	×10	4		9		10	), 3	3		57	, 11	2		8.	59 :	× 1(	<b>)</b> 5
5		5				68			8.	87	×10	4		10			-				67			1.	34	× 1(	)4

図-6.5.2 切断面における水平ひび割れの状態(Aライン近傍の切断面)

	1			2		3			4		Ę	5			6		7			8	3	9			1	0
	00	•	0 0	0	0	00	0	•	0 0	0	00	0 0	0	•		•		•	•	0	0 0	0 0	0	0	0	0
																							1.			
[		ſ	嗝 (mm)		深	さ(	mm)		波	形E	(mV	2)				幅 (r	nm)		深さ	(mm)		汤	友形 E	(m	<b>V</b> <sup>2</sup> )	
	1		-			133	}			1.71	× 1(	04		6		7,	6		75,	120			2.1	3 × 1	05	_
	2		0.1			65			2	2.10	)×1(	04		7		7,	7		90,	105			6.1	6 × 1	04	
	3		—			66			3	3. 24	1×1(	<b>D</b> <sup>4</sup>		8		6			6	7			1.8	6×1	05	
	4		0.1			80			8	1.28	3×10	<b>D</b> 2		9		2			6	7			2.1	5×1	05	
	5		8			69			4	4. 27	7 × 1(	<b>)</b> 5		10		0.	1		1	00			8. 7	3 × 1	<b>0</b> 3	

図-6.5.3 切断面における水平ひび割れの状態(Dライン近傍の切断面)

125



図-6.5.4 剥離ひび割れの一例



図-6.5.5 剥離ひび割れおよび腐食ひび割れの一例

# 6.5.1.2 衝撃弾性波法による計測

衝撃弾性波法による計測は、図-6.5.1に示す全計測点対し供試体の上面および下面から 実施した。ただし、本供試体はコンクリート製の架台上に設置されていたため、3、4 およ び9 ライン上の計測点(12 計測点)において、下面からの計測を行うことができなかっ た。

弾性波は、鋼球による打撃を加え発生させた。供試体の側面を目視したところ、水平ひ び割れは供試体の比較的上縁側に発生していたため、鋼球の選定は、Sansalone らが定義 した弾性波の上限周波数と鋼球直径との関係から<sup>5</sup>)、供試体上面からの計測において、浅 い位置にある損傷の検出に適する比較的直径の小さい鋼球(φ5.9mm、φ9.5mm)を、供 試体下面からの計測においては、深い位置にある損傷の検出に適する比較的直径が大き い鋼球(φ15.9mm、φ19.6mm)を使用した。受信は、打撃点から30mm 離れた位置に3Hz ~30kHzにおいてフラットな応答感度を持つ加速度計を設置して行なった。打撃点および 加速度計を設置する箇所は、ディスクサンダで研磨し平坦にした。加速度計で受信した信 号は、サンプリング間隔1µs、サンプリング数10,000点の時刻歴応答波形として波形収集装 置に記録した。計測ごとのばらつきを考慮するため、計測は1計測点ごとに10回程度行 い、そのうち相互相関により3データを抽出して分析に使用した。計測は、全計測点に対 して実施した。

### 6.5.1.3 電磁パルス法による計測

電磁パルス法による計測は、全計測点(40 計測点)に対して供試体上面から行った。使用した実験機器および実験要領は、第6章での実験と同様とし、励磁コイルの導線の巻き数は20ターン、定電圧発生装置の電圧は600Vとした。振動センサは、15kHz~100kHzの間に応答感度を有し、特に25kHz~80kHzの間では感度特性が比較的フラットなAEセンサを使用した。AEセンサで受信した信号は、サンプリング間隔5µs、サンプリング数10,000点の時刻歴応答波形として波形収集装置に記録した。励磁コイルは、長辺部と配力鉄筋が平行かつ配力鉄筋の直上に、供試体表面から短辺部下端を1mm程度上方に離して配置した。AEセンサは、励磁コイルの長辺部中央から、長辺部と直角方向に50mm離れた位置に配置した。

#### 6.5.2 実験結果

#### 6.5.2.1 衝撃弾性波法の計測結果

衝撃弾性波法による計測結果の一例として、剥離ひび割れのみが発生していると推測される計測点 2-A および 5-A、剥離ひび割れおよび腐食ひび割れが発生していると推測される計測点 6-D および 7-A における周波数スペクトルの最大値を1で正規化して、それぞれ図-6.5.6 および図-6.5.7 に示す。コンクリートの弾性波伝播速度は、実測により 3710m/sを得た。また、各グラフには、水平ひび割れの深さを供試体の切断面において実測し、式(6.5.1)に示す周波数と弾性波伝播速度の関係から、剥離ひび割れおよび腐食ひび割れ位置に相当する周波数を破線で示した。なお、計測点 7-A については、切断面に対して水平ひび割れの位置を明確に測定することができなかったため、破線を記載することができなかった。

$$f_d = \frac{C}{2 d} \tag{6.5.1}$$

ここで、*f*<sub>d</sub>:周波数(Hz)、C:弾性波伝播速度(m/s)、d:水平ひび割れの深さ(mm)で ある。図-6.5.6において、供試体上面および下面からの計測結果から、周波数スペクトル が剥離ひび割れ位置でピークを示していることがわかる。また、図-6.5.7から、上面から の計測結果では剥離ひび割れの位置、下面からの計測結果では腐食ひび割れの位置におい てピーク周波数を確認することができる。



表-6.5.1に各計測点に対する計測結果から、ピーク周波数を読み取り、式(6.5.1)を参照 して、水平ひび割れが存在すると推定される深さを算出した結果の一覧を記す。また、表 -6.5.1を参照し、水平ひび割れの有無および種別を判定した結果を表-6.5.2に示す。表-6.5.2に記す判定は、供試体の切断面から水平ひび割れの深さを参照し、ピーク周波数か ら推定した水平ひび割れの深さが、41mmから79mmまでを剥離ひび割れ、80mmから 140mmまでを腐食ひび割れがあるとした。また、上下面どちらかの計測結果において、ピ ーク周波数が供試体上面から深さ40mm以下の位置を示せば、水平ひび割れが無いと判定 した。このことは、既往の研究において、小径の鋼球により上面から計測した場合は、床 版境界面においてピーク周波数を示すが、大径の鋼球により下面からの計測した場合は、 は試体上縁においてピーク周波数を示すことを確認している<sup>の</sup>。また、ピーク周波数が 141mm以上を示せば判定不能とした。

								(11117)		
	1	A	E	3	(	)	D			
	上面	下面	上面 下面		上面	下面	上面	下面		
1	84	40	49	103	50	2	51	74		
2	50	79	50	70	66	76	51	6		
5	60	79	59 79		57 90		55	84		
6	82	101	83	120	86	135	65	138		
7	75	108	51 140		78	95	81	140		
8	163	114	169	100	51	101	51	80		
10	51	139	51	8	33	8	77	53		

表-6.5.1 水平ひび割れの推定深さ

(mm)

※表中の数値は、上面・下面とも供試体上面からの深さを示す。

表-6.5.2 判定結果

	Α	В	С	D
1	水平ひび割れ無し	剥離・腐食ひび割れ	水平ひび割れ無し	剥離ひび割れ
2	剥離ひび割れ	剥離ひび割れ	剥離ひび割れ	水平ひび割れ無し
5	剥離ひび割れ	剥離ひび割れ	剥離・腐食ひび割れ	剥離・腐食ひび割れ
6	腐食ひび割れ	腐食ひび割れ	腐食ひび割れ	剥離・腐食ひび割れ
7	剥離・腐食ひび割れ	剥離・腐食ひび割れ	剥離・腐食ひび割れ	剥離・腐食ひび割れ
8	判定不能	判定不能	剥離・腐食ひび割れ	剥離・腐食ひび割れ
10	剥離・腐食ひび割れ	水平ひび割れ無し	水平ひび割れ無し	剥離ひび割れ

### 6.5.2.2 電磁パルス法の計測結果

前項において、水平ひび割れが無い部位、剥離ひび割れが発生している部位、剥離ひび割 れおよび腐食ひび割れが発生している部位に対して、電磁パルス法による計測を行った。20 ターンによる計測結果から波形エネルギーを算定した結果を抜粋して図-6.5.8 に示す。 水平ひび割れが無い部位での波形エネルギー9.17×10<sup>3</sup>mV<sup>2</sup>に対して,剥離ひび割れが発生 している部位での波形エネルギーは 4.12×10<sup>5</sup>mV<sup>2</sup>と約 45 倍になった。また,剥離ひび割れ および腐食ひび割れが発生している部位での波形エネルギーは 6.43×10<sup>5</sup>mV<sup>2</sup>となり,水平ひ び割れが発生していない部位の 70 倍になる結果となった。この実験から,水平ひび割れが 無い計測点での波形エネルギーは,極端に小さくなり,水平ひび割れがある計測点では波形 エネルギーがより大きくなる傾向を示すことがわかった。



図-6.5.8 基礎評価実験結果(波形エネルギー)

上記の結果を踏まえて,全計測点に対して波形エネルギーを算出した結果を図-6.5.9 に示す。計測方法は,前項に記した条件と同様とした。計測点ごとにばらつきが見られるが,計測点 1-A, 1-B, 2-C, 2-D, 10-A および 10-D において,波形エネルギーは,基礎評価実験の CASE1 と同程度の数値(8.73×10<sup>3</sup>~2.10×10<sup>4</sup>mV<sup>2</sup>)を示したが,その他の全ての計測点では大きくなる結果となった。なお,上記の 6 計測点近傍の切断面を目視で確認したところ,ひび割れが発生していないことを確認している。



図-6.5.9 実験結果(波形エネルギー)

# 6.5.3 考察

表-6.5.2に記す衝撃弾性波法による判定結果をマッピングし、図-6.5.9に記す電磁パルス法による計測結果を示したグラフを記載した図を図-6.5.10に示し、両判定結果が一致した計測点、一致しなかった計測点および判定不能となった計測点に大別して考察を述べる。



図-6.5.10 判定結果 (マッピング)

#### 6.5.3.1 判定結果が一致した計測点

計測点 2-A, 2-B, 5-B, 5-C, 5-D および 8-D 等において, 衝撃弾性波法では水平ひび割 れが検出され, 電磁パルス法においても波形エネルギーが大きくなり, 両判定結果は同様 の傾向を示した。特に, 計測点 2-A, 5-B, 5-C および 5-D における波形エネルギーは, 水 平ひび割れが無いと判定された 1-A に対して, 28 倍から 123 倍と大きくなっており, 剥離 ひび割れおよび腐食ひび割れが発生している可能性が高いと推測する。

# 6.5.3.2 判定結果が一致しなかった計測点

計測点 5-A, 6-A, 1-B, 1-D, 7-D 等において,衝撃弾性波法では水平ひび割れがあると 判定されているにも関わらず,波形エネルギーが小さくなった。ここで,判定結果が一致 した計測点 5-D および判定結果が一致しなかった 7-D において削孔を行い,供試体内部の 状態を目視により確認した。両計測点における水平ひび割れの状態を,ファイバースコー プで撮影した写真を図-6.5.11 に示す。5-D において剥離ひび割れ幅が 2mm 程度であった が,7-D では 8mm に達しているだけでなく,腐食ひび割れも確認された。これは,床版撤 去作業時において,RC 床版を鋼桁から分離する際にジャッキアップを行ったことによ り,水平ひび割れ幅が増大してしまったためと考えられる。電磁パルス法は,鉄筋を振動 させることにより,かぶり部に発生する振動および弾性波を計測する原理を有するため, 例えば図-6.5.12に示すように、水平ひび割れの幅が過度に大きくなると、鉄筋の振動が かぶり部に伝達され難くなり、前項に述べた基礎評価実験結果に反して、水平ひび割れが あるにもかかわらず、波形エネルギーが小さくなってしまう可能性がある(5-D および 7-D の波形エネルギー比は 1:6.9 であった)。言い換えると、衝撃弾性波法において、水平 ひび割れを検出したにもかかわらず、電磁パルス法により算出した波形エネルギーが比較 的小さい値を示せば、損傷が顕在化しているということが言える。また、計測点 1-D にお いては、近傍の切断面を確認したところ、水平ひび割れの先端部直上にあった。このよう な部位に対しては、電磁パルス法による計測により算定された波形エネルギーが、 1.71×10<sup>4</sup>mV<sup>2</sup> と比較的小さい値を示した。



(a) 5-D(b) 7-D図-6. 5. 11水平ひび割れの状態



図-6.5.12 水平ひび割れの幅が弾性挙動に与える影響

上記とは逆に、計測点 1-C では衝撃弾性波法において水平ひび割れが無いと判定された にも関わらず、電磁パルス法では、波形エネルギーが 4.41×10<sup>5</sup>mV<sup>2</sup>と水平ひび割れが無い 計測点に対して、比較的大きな値を示した。そこで、計測点 1-C 近傍の切断面を確認した ところ、幅 3~4mm 程度の剥離ひび割れを確認した。当計測点の下面から衝撃弾性波法に よる計測を行った結果は、供試体上縁おいて周波数スペクトルがピークを示した要因とし て、図-6.5.13 に示すように、剥離ひび割れ内に堆積物が影響を及ぼした可能性が考えら れる。この堆積物は、黒褐色でやや粘土状のもので、湿気を含んでいた。これは、当該 RC 床版の切断作業時において、コンクリート粉体が堆積したことや、輪荷重の繰り返し 載荷によるすり磨き現象により発生したコンクリート粉体に,橋面から床版内部の損傷部 を介して,雨水等が供給されて湿潤状態になったことが推測される。



図-6.5.13 剥離ひび割れ内の堆積物

#### 6.5.3.3 判定不能となった計測点

判定不能となった計測点 8-A および 8-B については、供試体上面からの衝撃弾性波法に よる計測において、水平ひび割れの位置を特定できない結果となった。しかし、供試体下 面からの計測では、腐食ひび割れの位置でピーク周波数を示し、電磁パルス法による計測 では、波形エネルギーが計測点 8-A および 8-B において、それぞれ 6.40×10<sup>5</sup>mV<sup>2</sup> および 9.13×10<sup>4</sup>mV<sup>2</sup> と水平ひび割れが無い計測点での判定結果に対して、比較的大きな値を示し た。このことから、上記の堆積物の影響等により、供試体上面からの衝撃弾性波法による 計測では、判定が困難な結果となったが、当該計測点では剥離ひび割れおよび腐食ひび割 れが発生している可能性が高いと推測することができる。なお、計測点 8-A 近傍の切断面 を確認したところ、剥離ひび割れを確認することができた。このように原理の異なる他の 非破壊手法により計測したデータと比較検証することで、衝撃弾性波法のみでは判定が難 しいケースでも電磁パルス法を併用することで水平ひび割れを検出できる可能性が示され た。

RC 床版内部に発生する水平ひび割れの状態は、目視により確認することが難しいため、 選定した計測点によっては、非破壊検査手法を適用したとしても、水平ひび割れ内に堆積物 が充満している、ひび割れ幅が過度に大きくなっている等の状態にある場合、検出精度が低 下する可能性がある。しかし、本研究により、適用可能な複数の非破壊検査手法によるデー タを比較検証することにより、検出精度を向上させることができるだけでなく、水平ひび割 れの状態を推測することが可能になることが示唆された。

### 6.6 まとめ

本実験結果から得られた知見を以下に記す。

- 1) 床版上面からは小径の鋼球,床版下面からは大径の鋼球を用いて,複数の鋼球径で打撃 および計測を行うことで,腐食ひび割れの有無を判定できる可能性が示された。
- 2) 剥離ひび割れおよび腐食ひび割れが発生している可能性のある RC 床版に対して、衝撃 弾性波法による現地調査の手順案を提案した。
- 3) 撤去床版に対して、電磁パルス法を適用した際に得られる波形エネルギーは、水平ひび 割れが無い状態、腐食ひび割れがある状態、剥離ひび割れがある状態、剥離ひび割れお よび腐食ひび割れがある状態の順に大きくなる。
- 4) 水平ひび割れの深さが大きくなれば波形エネルギーは小さくなる。
- 5) 上面増厚工後に損傷が顕在化した RC 床版に対して,電磁パルス法を適用することによって,水平ひび割れの有無および発生状態を把握できる可能性が示唆された。
- 6) 上面増厚後に損傷が顕在化した RC 床版に対して、電磁パルス法を適用して計測を行った結果、水平ひび割れが無い場合に対して、水平ひび割れがある場合は、波形エネルギーが大きくなる傾向を確認することができた。
- 衝撃弾性波法および電磁パルス法による計測を行い、水平ひび割れの有無について、両 者が同じ判定結果になれば、より高い確度での推定が可能と考えられる。
- 8) 一方,衝撃弾性波法および電磁パルス法による判定が異なる場合は、水平ひび割れの幅 が過度に大きくなっているケースなど、特異な状態にあると推測することができる。
- 9) 上記の通り,測定原理の異なる2つの非破壊手法を併用することにより,RC 床版内部 の水平ひび割れに対する検出精度の向上が可能になることが示唆された。
## 参考文献

- 1) 鈴木真, 寺澤広基, 服部晋一, 鎌田敏郎:上面増厚工法施工後に再劣化した RC 床版の 損傷評価に関する基礎的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文 報告集, Vol.18, pp.755-760, 2018.10
- 2) 宗像晃太郎,内田慎哉,鎌田敏郎,森和也:電磁パルスにより加振したコンクリート内 部鉄筋の振動特性に関する基礎研究,日本コンクリート工学会年次論文集,Vol. 29, No.2, pp.781-786, 2007.7
- 3) Sansalone, M. and Streett, W. B. : Impact Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., pp.29-46, 1997
- 4) 木村貴圭, 内田慎哉, 宮田弘和, 鎌田敏郎: 電磁パルス法による接着系アンカーあと施 エアンカー固着部の非破壊検査手法に関する実験的検討, 日本コンクリート工学会年次 論文集, Vol. 36, No.1, pp.2116-2121, 2014.7.
- 5) M.J.Sansalone and W.B.Streett : IMPACT-ECHO, Bullbrier Press, Ithaca, New York, pp.29-46, 1997
- 6) 鈴木真, 寺澤広基, 服部晋一, 鎌田敏郎:上面増厚工法施工後に再劣化したRC床版の損 傷評価に関する基礎的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報 告集, Vol.18, pp.755-760, 2018.10

# 第7章 剥離ひび割れに対する補修工法の開発

7.1 はじめに

第2章で述べたように,RC 床版の補修工法として,平成5 年頃より床版上面増厚工法が 各高速道路で採用されてきた。しかし,その後の交通車両による輪荷重の繰り返し載荷によ り,既設床版および増厚コンクリートとの境界部に剥離ひび割れが生じ,そこに雨水等が浸 入することによって,RC 床版が再劣化してしまった事例が多数報告されている<sup>1)</sup>。図-7.1.1 に,橋面からの漏水により RC 床版下面が損傷した RC 床版の一例を示す。



図-7.1.1 RC 床版の再劣化事例

図-7.1.1 に示すような損傷が進展し、広範囲に渡って鉄筋腐食の顕在化および RC 床版 下面のかぶり部の剥落が発生し、新設床版への取替えに至った RC 床版の一例を図-7.1.2 に示す。



図-7.1.2 損傷が顕在化した RC 床版の一例

剥離ひび割れを介して,雨水等が RC 床版内に埋設された鉄筋に供給され続けば,鉄筋の 腐食がさらに進行することになり,腐食ひび割れの拡大を誘発することになる。このように, 鉄筋の断面欠損が顕在化し,コンクリートとの付着が喪失され,RC 床版断面が一体性を持 って荷重に抵抗することができなくなれば,RC 床版は所要の耐荷性能を有しなくなる。よ って,上記のような損傷が顕在化する前に,適切な対策を講じることが重要な課題となる。

本論文は、第3章から第6章において、図-7.1.1に示すような損傷を非破壊検査手法に より検出するための研究成果を述べた。しかし、水平ひび割れを検出することができたとし ても、適切な対策を講じなければ RC 床版の延命化を図ることにならない。また、橋面防水 工により雨水等の供給を遮断することができたとしても、既に鉄筋腐食が顕在化してしま っていては、RC 床版としても機能を喪失していることになる。よって、本章では、上記の ような再劣化した RC 床版に対して、適切な補修対策工法の構築を目的とした検討を実施し た。

#### 7.2 補修工法の選定および検討方針

図-7.2.1 に、RC 床版に対する補修・補強工法の選定を行うためのフローチャート記す。 また、図-7.2.2 に補修・補強工法の一例を示す。なお、本フローチャートには、RC 床版の 損傷が顕在化した場合に採用する抜本的な対策(床版取り換え、部分打ち替え等)は含んで いない。図-7.1.1 に示すような損傷は、主に水の介在が原因となっているため、鉄筋腐食 を誘発すれば、損傷が拡大し耐久性の低下が加速度的に進行する可能性がある。しかし、図 -7.1.1 に示す損傷の段階で対策を講じれば、耐荷性能が大きく低下することはないと考え る。よって、ここでは、耐荷性能の回復や剥落による断面欠損を対象としない。これらのこ とを踏まえると、本研究において対象としている RC 床版の補修工法として、ひび割れ注入 工法が適していると考える。なお、橋面防水工との併用が望ましい。

本研究において, 剥離ひび割れが生じてしまった RC 床版の再一体化を図る工法を提案す る。剥離ひび割れ内には, 主に車両走行時に生じる「すり磨き現象」<sup>2)</sup>により, コンクリー ト部材どうしが擦れ合って発生した粉体が堆積する傾向がある。よって,本補修工法では, この粉体をウォータージェット工法にて洗浄し,水分が残留していても付着性を確保する ことができる充填材を注入することにより,既設床版および増厚コンクリートの再一体化 を図るものである。本補修工法の研究開発に関して実施した解析および実験的検討を行っ た結果を後項に述べる。



図-7.2.1 RC 床版の補修・補修工法の選定フローチャート



(a)上面增厚工法





(d)鋼桁増厚工法



## 7.3 新たな上面増厚床版の補修工法の検討

#### 7.3.1 上面増厚後の RC 床版の損傷実態

図-7.3.1 に上面増厚後に再劣化が顕在化し、床版取替工事が行われた際に撤去された床版の断面を示す。図-7.3.1 より、床版境界面に剥離ひびわれが発生していることがわかる。 この剥離ひびわれ内に雨水等が浸入すれば、常に水が滞留することになり、図-7.1.1 に示すような、既設床版のひび割れ、鉄筋腐食、下面部のひびわれ・剥落へと進展していく可能性が大きくなる。



図-7.3.1 剥離ひび割れが発生した事例

## 7.3.2 従来の補修工法

このような RC 床版の損傷に対する補修工法として,これまで床版上面から剥離ひび割れ 内を洗浄し,水硬化型樹脂充填材を注入して再一体化を図る工法が実用化されてきた。当工 法を採用する場合,交通規制を行う必要があり,施工期間が限定されてしまうというデメリ ットが生じてしまう。また,剥離ひび割れ内の洗浄には,ウォーターサプライヤーやロータ リーポンプ等のエアと水を交互に押し出す洗浄機器を使用しているが,水平ひびわれ内の 洗浄が確実に行われていたか否か確認することができない欠点を有する。洗浄が確実に行 われないと,すり磨き現象により滞積したコンクリート粉(以下,コンクリート粉体と称す) を残留させることになり,注入した充填材がコンクリート粉体に浸透していかないので,所 要の性能を発揮することができない。

## 7.3.3 新たな補修工法の提案

上記の補修工法に対し、さらなる効果を期待するためには、下記に示す問題を解決する必要がある。

- ① 一連の作業を床版下面から行いたい。
- ② コンクリート粉体を確実に除去する必要がある。
- ③ 複雑な状態で発生しているひび割れにも確実に充填を行う必要がある。

④ 洗浄後において、剥離ひび割れ内の洗浄水が残存する状態においても、充填材は所要の接着性能を発揮しなければならない。

これらの問題を解決すべく,従来の補修工法に対し新たな知見を加えることによって,新 しい補修工法の研究開発を行った。提案する補修工法の概要を下記に示す。

- 床版下面から施工を行うことにより、交通規制を行う必要がなく、時間的制約を受け ずに工程等を計画することができるようになる。
- ② 剥離ひび割れ内の洗浄機器として、図-7.3.2に示すウォータージェットノズルを改良したスピンジェットノズルを新たに開発し、洗浄効果の向上を図っている。洗浄状況の一例を図-7.3.3に示す。



図-7.3.2 水平ひび割れ内の洗浄作業要領



図-7.3.3 洗浄状況の一例

本補修工法の適用性を確認するために、コンクリート板を製作して模擬試験を実施し、基礎データの収集を行った。次に、実際に供用されていたが劣化が顕在化し、取替え工事が行なわれた際に撤去された RC 床版を使用して施工試験を実施し、静的せん断試験による充填材の接着性能確認を行った。この際に洗浄効果が充填材の接着性能に及ぼす影響についても検討を行った。

#### 7.4 供試体による模擬実験<sup>3)</sup>

#### 7.4.1 実験概要

模擬実験は、図-7.4.1に示すフローチャートに基づいてを行った。供試体は、図-7.4.1 に示すように、RC 床版を設計する際に必要とされる強度(ock=24N/mm<sup>2</sup>)を有するコンク リート板(1500mm×2000mm×70mm)を製作し、その上面に透明なアクリル板を重ね合わせ たものとし、洗浄および充填材の注入状況を目視により確認することができるようにした。 空隙内には、車両走行時のすり磨き現象により剥離費ひび割れ内に滞積するコンクリー ト粉体を想定して、粒度分布が類似しているウォータージェットによるコンクリートはつ り工事の際に回収されるスラッジを敷き詰め(以下、仮想存置材と称す)、供試体の四辺に シール材を塗布して密閉した。



図-7.4.1 模擬実験の流れ

#### 7.4.2 洗浄方法の検討

供試体による洗浄試験は、2種類の機器を用いて実施した。最初に一般的に汚泥水の回収 等に使用されるロータリーポンプ(圧力1.3MPa,水量16ℓ/min)を使用して行った。次に超 高圧水発生装置(圧力240MPa,水量38ℓ/min)およびスピンジェットノズルを使用して同 様な試験を実施した。試験は供試体下方から、供試体中央に設けた注水孔から注水を行い、 供試体の四隅に設けた排水孔から排水および仮想存置材の排出を行った。

通常のロータリーポンプを使用する場合、ノズルの先端を供試体下方から注水孔に差し

込んで、一定間隔で洗浄水を供試体に対して上方に向けて圧送することになり、注水方向と は直角方向を成す空隙部の洗浄は効率的ではない。これに対し、スピンジェットノズルを使 用する場合、ノズルの先端が回転しながら洗浄水を水平方向(剥離ひび割れと同じ方向)に 噴出するため、洗浄効果は格段に向上する。供試体に対し、ロータリーポンプおよびスピン ジェットノズルを使用して洗浄試験を行った後の仮想存置材の残存状況をそれぞれ図-7.4.2に示す。

ロータリーポンプを使用した場合,洗浄水は注入孔から排出孔に向かって,いくつかのルート(以下,水道(みずみち)と称す)を作りながら仮想存置材を押し流すように流れ,その後,水道(みち)のみ流れる傾向を示した。よって,仮想存置材が点在するように残存した(洗浄率46%)。洗浄率の算出方法としては,図-7.4.2に示すように半径50cmのサークル内におけるスラッジ部と洗浄部の面積割合から算出した。ロータリーポンプの場合の洗浄率は46%であった。これに対し,スピンジェットノズルを使用した場合,ノズル先端が回転しながらあらゆる方向に洗浄水を噴出するため,上記のような傾向を大きく低減させることができた(洗浄率100%)。この結果より,注入孔から半径約50cmの範囲にある仮想存置材を確実に洗浄することが可能であることがわかった。なお,半径60cmの場合の洗浄率は85%となったため,確実に洗浄可能な半径50cmによる洗浄方法を採用するものとした。よって,洗浄孔の間隔は100cmとした。



142

## 7.4.3 剥離ひび割れ内への充填剤注入方法に関する検討

供試体における充填材注入試験は、仮想存置材を敷き詰めないで注入したケースおよび 仮想存置材を敷き詰めておき、一旦洗浄を行った後に充填材を注入したケースの2つのケ ースにおいて行った。充填材には、表-7.4.1に記す3種類の材料を使用した。

F			
材 料 名	付着強度	粘性度	収縮率
エポキシ系樹脂	6. 5N/mm²	650mpa·s	1.3%
アクリル系樹脂	8. 2N/mm²	300mpa·s	2.7%
セメント系	5.1N/mm²	50mpa∙s	0.2%

表-7.4.1 充填材の種別

仮想存置材を敷き詰めないで注入したケースは、供試体を3体ずつ準備し、表-7.4.1に 記す3種類の材料に対して1体ずつ実験を行った。実験要領として、供試体中央に設けた 注入孔から電動ロータリー注入機により充填材を注入し、供試体の四隅に設けた排出孔か ら排出させた。各材料とも所要時間に差は見られたが、供試体全面に注入することができた。 その状況を図-7.4.3に示す。



図-7.4.3 充填材注入状況

また,上記のアクリル板およびコンクリート板で製作した供試体 3 体を長手方向に並べて,上記と同様の洗浄実験を行った後に充填材注入実験を実施したところ,表-7.4.2 に記すような結果が得られた。

材料名	気泡	粘性	注入速度	注入圧力 (MPa)
エポキシ系樹脂	無	高	14 分 25 秒	0. 8
アクリル系樹脂	少	高	35 分 30 秒	0.5~0.8
セメント系	多	低	10分15秒	0. 1

表-7.4.2 充填材注入実験結果

上記の実験結果を,下記にまとめる。

- ・3 種類の材料とも供試体全面に注入することができた。
- ・仮想存置材が残留している部位に対して,外観上充填材が浸透していくことは認めら れなかった。
- ・仮想存置材が残留している部位の周辺に,空隙等が生じることなく確実に充填するこ とができた。
- ・特にセメント系の充填材の流動性が、他の材料と比べて著しく良好な結果を示した。

充填材の注入においても,洗浄と同様に起伏のある実床版の水平ひびわれ部に対して,本 実験と同様に充填材を注入させることができるか否かが問題となる。そこで,実床版に対す る検証実験を実施した結果について後述する。

## 7.4.4 充填材のせん断付着実験

100cm×100cm×7cm のコンクリート板を4枚製作し、2枚を1組として重ね合わせ、2組 の供試体を製作した。供試体にはあらかじめ仮想存置材を設置しておいた。図-7.4.4 に示 すように、仮想存置材は1体の供試体に対して16の区画分け(1区画:20cm×20cm)を行 い、仮想存置材の残留率ごとに80%、50%、30%、0%の仮想存置材を空隙部に設置した区 画をそれぞれ3区画ずつ設けた(四隅の4つの区画には排出孔を設置したため実験の対象 にはしないこととした)。

充填材の硬化後,供試体を区画したラインに沿ってコンクリートカッターで切断し 200mm×200mmの実験片(12ピース)を採取して,静的せん断実験を実施した。実験の状況 を図-7.4.5 に,実験結果を表-7.4.3 に記す。エポキシ系樹脂およびアクリル系樹脂とも, せん断応力にばらつきが見受けられたが,仮想存置材が 50%存置している状態でも平均 2.0N/mm<sup>2</sup>以上のせん断応力を確認することができた。これに対し、セメント系の充填材は、 空隙内に気泡の残留が著しく、最大で 0.3N/mm<sup>2</sup>程度のせん断応力と低かった。



図-7.4.4 仮想存置材の設置要領



図-7.4.5 静的せん断実験状況

++ *:1 夕	仮想存置材	せん断応力	材令	<b>供</b> 来
171 种石 	存置率	(N/mm2)	(日)	1冊 万
	0%	3. 24		
ーーキャンズ世吧	30%	3. 40	14	
エホキン糸樹脂	50%	2. 77	14	せん断応力の
	80%	1. 79		値は3供試体
	0%	3. 07		の平均値を示
マクリルズ井叱	30%	1.98	14	+
プクリル希徴加	50%	2. 29	14	9
	80%	0. 82		
	0%	0. 27		
セメント系	30%	0. 14	20	
	50%	0. 05	20	
	80%	0. 02	1	

表-7.4.3 静的せん断実験結果

## 7.5 撤去床版による実験と評価

#### 7.5.1 実験概要

前項 7.3 から得られた知見を基に,実橋から撤去された RC 床版を使用して実施工を想定 した実験を行った<sup>4)</sup>。

供試体には、図-7.5.1 に示すように、昭和44年に供用され床版の劣化が顕在化したため 平成4年に床版上面増厚工法が実施され、平成23年に切断・撤去された RC 床版を使用し た。本撤去床版を供試体Eと称す。供試体Eは、実験の目的ごとに表-7.5.1 に示す4体を 使用した。全ての撤去床版において、床版境界面が広範囲にわたって剥離していた。図-7.5.2 に示すように、剥離ひびわれの幅は最大3mmであった。



## 図-7.5.1 撤去床版 (供試体 E)

名称	実験内容	確認事項	備考
供試体 E-1	│ 洗浄実験後,充填材注入実験を実施	・充填材注入状況	撤去床版1体 充填材:エポキシ樹脂
供試体 E-2	確認後、静的せん断実験を実施	・静的せん断実験	撤去床版1体 充填材:アクリル樹脂
供試体 E-3	試撤去床版を切断して剥離ひび割れ 内の状況を確認	剥離ひび割れ内の状況	撤去床版1体
供試体 E-4	洗浄実験のみ実施し,撤去床版を切 断し剥離ひび割れ部の状況を確認	洗浄後の剥離ひび割れ 内の状況	撤去床版1体

表-7.5.1 模擬供試体(その2)の種別



図-7.5.2 撤去床版の水平ひびわれ部の状況

表-7.5.1 中の供試体 E-3 については、劣化した状態にある剥離ひび割れ内の状況(コン クリート粉体の堆積,不陸の程度等)を確認するために、実験を行わないで撤去床版を切断 し剥離ひび割れ部の状態を確認した。供試体 E-4 に対しては、洗浄実験実施後にて撤去床版 を切断し、剥離ひび割れ内の状態を確認した。また、供試体 E-1 および E-2 に対しては、洗 浄実験、充填材注入実験、静的せん断実験を実施した。

実験時の作業の流れは、概ね模擬実験と同様ではあるが、剥離ひび割れが生じている範囲 を特定するために、非破壊検査を実施した。本実験の作業の流れを図-7.5.3に記す。



図-7.5.3 撤去床版による実験の流れ

## 7.5.2 剥離ひび割れの検出

剥離ひび割れの有無および下面からの深さの計測には、衝撃弾性波法を適用し、剥離ひび われの有無を供撤去床版の下面から非破壊的に計測した。剥離ひびわれは撤去床版全面に 生じていないことが想定されたため、当計測により洗浄実験および充填材注入実験を行う 範囲を特定した。計測結果の一例を図-7.5.4 に示す。



※ 図中の●印は計測を行ったポイントを示す。また、赤色のハッチング部は計測結果(剥離ひび割 れ部の範囲)を示す。

図-7.5.4 計測結果

## 7.5.3 削孔

衝撃弾性波法による剥離ひび割れ部の計測結果から,注入孔および排出孔の位置を決定 し,撤去床版下面からハンマードリルにより削孔を行った。削孔径はφ20mmとし,削孔深 さは衝撃弾性波法による計測結果を参照して決定した。削孔間隔は1mを基本とし,洗浄作 業時において,コンクリート粉体の排出を効率的に行うために,剥離ひび割れの縁端に必ず 排出孔を設けるようにした。

## 7.5.4 洗浄実験

洗浄実験は、供試体 E-1, E-2 および E-4 に対し、模擬実験と同様にスピンジェットノズ ルを使用して供試体下面から行った。注水作業は、超高圧発生装置により注水孔を介して洗 浄水を剥離ひび割れ部に圧送し、注水孔に隣接する排出孔から洗浄水が排出され、さらに洗 浄水の濁度がなくなりコンクリート粉体が排出されたことが確認されるまで行った。また、 洗浄作業後にはコンプレッサーにより空気を約 30 秒間圧送した。全ての供試体において、 衝撃弾性波法により剥離ひび割れが発生していると判定された範囲にある全ての孔に対し 洗浄水の排出を確認することができた。

供試体 E-4 については、供試体の増厚コンクリート部をコンクリートカッターで切断し、 洗浄実験後における剥離ひび割れ部の状態を目視確認した。洗浄実験を行わないで同様に 増厚コンクリート部を切断・撤去した供試体 E-3 と比較してみると、供試体 E-3 には図-7.5.5 中の赤枠に示すように、固化したコンクリート粉体が残存している状況が確認できた が,供試体 E-4 については,図-7.5.6 に示すように洗浄実験時において,破砕された細かなコンクリート片が点在していたものの,コンクリート粉体が残存していることはなかった。



図-7.5.5 劣化状況下の剥離ひび割れ部の状態(供試体 E-3)



図-7.5.6 洗浄後の剥離ひび割れ部の状態(供試体 E-4)

## 7.5.5 充填材注入実験

充填材注入実験についても、模擬実験と同様に供試体下面から実施した。充填材にはエポ キシ樹脂およびアクリル樹脂を採用した(セメント系充填材については,所要する付着性能 を確保することができなかったため、本実験は採用しないこととした)。注入作業は、洗浄 水を注入および排出した全ての孔に対し、電動ロータリー注入機により一つの孔ごとに順 次行い、隣接する孔から排出が確認されるまで行った。注入作業時の圧力管理は注入機に設 置されている圧力計を用いて行い、0.3Mpaを上限とした。0.3Mpaを超えるような場合は一 時的に注入機を停止し、圧力が0.2Mpa程度まで低下したことを確認してから再注入を行っ た。本実験の結果,全ての孔から充填材が排出されたことを確認することができた。注入時間については,エポキシ系樹脂(供試体 E-1)は約60分,アクリル系樹脂(供試体 E-2)は約90分を要した。

充填材の注入状況を確認するために供試体を切断し、剥離ひび割れ部を目視確認したところ、空隙等は確認されなかった。充填材は剥離ひび割れ部だけでなく細かいひび割れ部にまで注入されていた(図-7.5.7および図-7.5.8参照)。



図-7.5.7 剥離ひび割れ部の注入状況



図-7.5.8 ひび割れ部の注入状況

## 7.5.6 静的せん断実験

静的せん断実験は、充填材注入実験後に切断した実験片を使用して実施した。実験片は、 供試体 E-1 および E-2 をそれぞれ 20cm×20cm の大きさに切断して 6 体ずつ採取した。荷重 はアムスラー実験機を使用して、接合面に曲げ応力が作用しないように、漸増させながら載 荷した。実験片は、図-7.5.9 に示すような装置を製作し実験機上に固定し、荷重載荷時に 曲げモーメントが作用しないように、固定治具の片側にローラーを設置した。実験状況を図 -7.5.10 に示す。



図-7.5.9 静的せん断実験要領



図-7.5.10 静的せん断実験状況

静的せん断実験結果を表-7.5.2 に記す。供試体 E-2 から採取した実験片1および2 において、剥離ひび割れ部に若干ではあるがすり磨き粉が堆積していたため、充填材が接着する面積が小さくなり、他の実験片に対して小さな値を示した。他の実験片については、概ね2.0~4.0N/mm<sup>2</sup>のせん断応力を確保することができた。ほとんどの実験片において、充填材が破断するのではなくコンクリート部材が破壊する傾向を示した。しかし、平均せん断付着強度に対して2体の実験片のせん断付着強度が約50~60%にまで低下した。

材料名	実験片	水平ひび割れ幅	せん断力	せん断応力	平均せん断	平均せん断	材令
	番号	(mm)	(kN)	(N/mm²)	応力1	応力2	(日)
	1	0.8	59.0	1.49			
	2	1.2	101.8	2. 58	2. 02		
エポキシ樹脂	3	1.5	76. 5	1.99			14
供試体 E-1	4	1.5	158. 5	4.06		2.6/	14
	5	2.0	138. 3	3. 57	3. 32		
	6	2.0	92. 3	2. 31			
	1	2.0	68.9	1.83			
	2	2.0	51.0	1.32	1.88		
アクリル樹脂	3	1.5	97.8	2. 50		0.50	14
供試体 E-2	4	1.5	126. 8	3. 29		2.50	14
	5	1.5	121.8	3. 10	3. 11		
	6	0.8	112. 3	2.95			

表-7.5.2 静的せん断実験の結果

※ 表中の平均せん断応力1は、実験片3体の平均値を示す。

※ 表中の平均せん断応力2は、全実験片の平均値を示す。

当該実験片の床版境界部を目視したところ,図-7.5.11に示すようにすり磨き粉が点在した状態で残留していることがわかった。上記のように、スピンジェットノズルによる洗浄効果は従来工法に対して向上するものの,完全にすり磨き粉を除去することができない場合も考えられる。例えば、剥離ひび割れが発生している箇所と発生していない箇所の近傍では、洗浄水がうまく流入・排水されずにすり磨き粉が局部的に残留する可能性が高くなる。そこで、すり磨き粉が境界層に一部残留した場合を想定し、そのすり磨き粉が残存することによる接着材の付着性能の低下について、せん断付着実験とせん断付着疲労実験を実施した。さらに、実橋の軸重計測データを用いて補修後のRC床版の疲労寿命を検討することにより、本補修工法の適用における基本計画を容易に立案することが可能になると考える。



図-7.5.11 残留したすり磨き粉の状態

## 7.6 すり磨き粉が残留した状態でのせん断付着実験 5)

#### 7.6.1 実験概要

本実験は、剥離ひび割れ内のすり磨き粉が完全に洗浄できずに残存した状態で接着材を 注入した場合、せん断付着強度がどの程度低下し、また、せん断付着強度がすり磨き粉の残 存率とどのような相関を有するのかをせん断付着実験から把握することを目的に実施した。

図-7.6.1 に示すように、200mm×200mm×60mmのコンクリート板を製作し、2 枚のコンク リート板間に、エポキシ樹脂系接着材を注入して両者を一体化することにより供試体を作 製した。コンクリートブロックの圧縮強度は上面増厚工法によく用いられる鋼繊維補修コ ンクリート(SFCR)の圧縮強度と同等程度の 54N/mm2 とした。

コンクリート板を接着材で固着する面(接着面)の表面処理としては、コンクリート板の 片面をウォータージェット工法(WJ工法:水圧150MPa,水量16ℓ/min)により粗面にした Wシリーズと、粗面仕上げを行わないNシリーズを準備し、表-7.6.1に示すように合計18 体の供試体を製作した。Nシリーズは、実橋に発生する水平ひび割れ層の粗度状態が低いこ とを想定して製作した。



図-7.6.1 供試体の作製方法

表-7.6	5.1	供試体の種別
1. 1.		

	粗面仕上げ	接着面積率	試験体数
N-100		100%	3体
N-70	無	70%	3 体
N-35		35%	3 体
W-100		100%	3 体
W-70	有	70%	3 体
W-35		35%	3 体

次に、すり磨き粉が残存した状態を模擬するため、図-7.6.2 に記すようにコンクリート 板間の接着面積率を 100%、70%、35%とした。接着面積率 70%、35%の供試体には、粘土 (W シリーズ)またはゴム (N シリーズ)を粗面仕上げ面中央に設置し、接着材がコンクリ ート面と接触しないようにした。また、重ね合わせた 2 枚のコンクリート板の 3 側面にエ ポキシ樹脂系のシール材を接着させ、コンクリート板間に幅 3mm の隙間を設けた。シール 材が硬化した後に、接着材であるエポキシ樹脂を上面からコンクリート板間の隙間に注入 した。

せん断付着実験は、万能載荷実験機(容量 500kN)を使用して荷重を漸増させながら行った。載荷にあたり、図-7.6.3に示す固定治具を作製した。本固定治具の特徴としては、4本の鋼棒により供試体を固定し、荷重載荷時において接合面に曲げ応力が作用しないように配慮した。また、固定治具の片側にはローラーを設置し、せん断変形時に固定治具とコンク リート板との間に生じる摩擦抵抗を抑制できるように配慮した。



図-7.6.2 供試体の接着面の状態



図-7.6.3 せん断付着実験

## 7.6.2 実験結果

付着面積率 100%および 70%の供試体は, 接着材が剥離せず, 母材コンクリートでせん 断破壊した(図-7.6.4(a), (b)参照)。付着面積率 35%の供試体については, 接着材の剥 離が一部見られたが(図-7.6.4(c)参照), せん断ひび割れが樹脂層を跨いで交差するよう に発生した供試体が多く見受けられた。

接着部のせん断破壊の多くが母材コンクリートに生じたことから、せん断付着強度はコ ンクリートの圧縮強度に依存すると考え、せん断付着強度をコンクリートの圧縮強度で無 次元化(fv/fc')することにした。その結果、図-7.6.5に示すように、ばらつきは少なく、 表面処理「無」では0.09~0.13の間に、表面処理「有」では0.09~0.15の間に推移した。す なわち、本実験では表面処理の有無はせん断付着強度に大きく影響を及ぼさなかった。これ は供試体作製時におけるコンクリートブロック間に3mmの隙間を設けたため、骨材のかみ 合わせ効果がほとんど無かったことによるものと言える。また、接着面積率35%を除き、圧 縮強度で無次元化したせん断付着強度は、接着面積率に関わらず、ほぼ一定の比率となった。

(a) N-100 の破断面

せん断ひび割れ位置

せん断ひび割れ位置



(b) N-70 の破断面

せん断ひび割れ位置



(c) W-35の破断面 図-7.6.4 供試体の破断面



図-7.6.5 せん断付着強度と接着面積率

## 7.7 すり磨き粉および充填材の境界部近傍におけるせん断応力度

#### 7.7.1 解析条件

すり磨き粉が残留している状態で接着材を注入した場合,輪荷重による床版境界面に作用する水平せん断応力度は,すり磨き粉が残留する範囲の大きさによって変化する。そこで,充填材の接着部とすり磨き粉残留部の近傍に作用する水平せん断応力度を弾性 FEM 解析により求めることにした。本解析は,実際に上面増厚補修後に再劣化した RC 床版をモデルケースとした。当該橋梁は鋼単純鈑桁橋であり,床版厚は200mm である。断面図を図-7.7.1 に示す。

解析モデルは、図-7.7.2 に示すように、橋軸方向に長さ L=5.0m とし、橋軸直角方向は幅 員中央で対称とした。拘束条件は主桁位置で鉛直方向拘束とした。要素はすべてソリッド要 素として切断した床版断面の実測値から断面厚を 280mm とし、既設床版下面から 170mm の位置にひび割れ層を 2mm の厚みで設定した。また、剥離ひび割れ内にすり磨き粉が残留 し、注入された接着材が点在する状態を想定するため、未接着状態を充填不良として、その 部分には鉛直方向の荷重伝達のみを考慮してコンクリートのヤング係数を設定するととも に、水平方向には荷重伝達しないように水平2方向のヤング係数をゼロとした。剥離ひび割 れの発生面積に対する接着材の接着面積率は、100%、80%、60%とした。なお、既設床版 の損傷の程度が明らかではなかったため、本研究ではRC床版コンクリートのひび割れや鉄 筋は、モデル化に考慮していない。





P=100kN

## 7.7.2 解析結果

RC 床版に作用するせん断力は,輪荷重が主桁近傍に作用したときに最大となった。本対 象橋梁における車両の最頻走行位置は中桁ハンチ部の先端付近であり,床版支間中央より も大きなせん断力が作用する状況にあった。そこで,最頻走行位置(幅員中央から 500mm) に載荷面積 500×200mm の輪荷重(100kN)を作用させたときの水平せん断応力度を求める ことにした。ただし,本解析ではすり磨き粉の残留による未接着部を点在させていることか ら,輪荷重を橋軸方向に移動させて水平せん断応力度の最大値を求めた。

接着面積率100%,80%,60%の水平せん断応力度のコンター図および最大水平せん断応力度を図-7.7.3 に示す。図-7.7.3 より,輪荷重近傍において,すり磨き粉と接着材の境界部に,水平方向のせん断応力度が集中的に発生していることがわかる。



図-7.7.3 水平せん断応力度解析結果

## 7.8 すり磨き粉が残留した状態での耐疲労性の検討<sup>6)</sup>

#### 7.8.1 実験要領

本実験は、床版境界面のせん断付着疲労に関する S-N 曲線を得るために実施し、補修後の疲労寿命を推定する際にその結果を用いることを目的として行った。

せん断付着疲労実験に供した供試体は、図-7.6.1 に示した静的せん断付着実験時のWシ リーズと同様の製作方法により、合計12体(各応力水準に対して4体(No.1~No.4))の供 試体を製作した。なお、接着面積率は100%、同一のバッチ練りの打設でコンクリート強度 は54N/mm2である。

本実験では、油圧サーボ疲労実験機を使用して、最小荷重を 10kN に固定し、先述のせん 断付着実験結果を参照して、3 水準に設定した最大荷重を 3Hz のサイン波形で繰返し載荷 した。せん断応力振幅値を表-7.8.1 に示す。また、図-7.8.1 に実験状況を示す。

			(N/MM²)
せん断応力度	CASE1	CASE2	CASE3
最大せん断応力度	3.80	3. 22	2.63
最小せん断応力度	0. 25	0. 25	0. 25
応力振幅	3.55	2.97	2. 38

表-7.8.1 せん断応力振幅



図-7.8.1 せん断付着疲労実験

#### 7.8.2 実験結果

本実験から得られたせん断破壊時の繰返し回数を表-7.8.2に示す。なお、No.4の3回目 のみ約 196 万回まで載荷したが破壊には至らなかったため、実験を終了した時点での繰返 し回数を示している。供試体の破壊は接着部近傍における母材コンクリートのせん断破壊 であり、せん断付着実験時の破壊状態とほぼ同様であった。

載荷水準	1回目(回)	2回目(回)	3回目(回)
No. 1	10, 629	207, 790	122, 295
No. 2	94, 131	937, 740	447, 424
No. 3	71, 875	32, 293	156, 223
No. 4	169, 669	493, 200	1, 963, 281

表-7.8.2 せん断付着疲労実験結果

図-7.8.2 にせん断応力比と繰返し回数の関係を表した S-N 線図を示す。なお、せん断応力比は、図-7.6.5 に示した W シリーズの接着面積率 100%における平均せん断付着強度(5.85N/mm2)で、各せん断応力振幅を除した値である。ここで、疲労実験結果は大きくばらつきを有しており、S-N 曲線を求めるにあたって確率統計処理を行うことにした。ここで、疲労実験結果は対数正規分布に従うと仮定して、生存確率 50%(平均値)と疲労実験結果における下限値に相当する生存確率 80%の S-N 曲線を求めると、式(7.8.1)および式(7.8.2)のようになり、図-7.8.2 に示す関係となる。

$\log N = -3.985(\tau/fv) + 7.2499$	(7.8.1)
$\log N = -3.873(\tau/fv) + 6.4964$	(7.8.2)



ここに、τ : 作用せん断応力度、fv : せん断付着強度、N : 繰返し回数(回)である。

図-7.8.2 疲労実験結果に対する S-N曲線

#### 7.8.3 等価繰返し回数の算定

疲労寿命を推定するにあたり,図-7.5.1 に示す RC 床版を撤去した橋梁と同路線における軸重測定データ(平日3日間の累積)を基に,交通量が多かった上り線の走行車線のデータを用いて等価繰返し回数を算定することにした。全車種の軸重分布を図-7.8.3 に示す。ただし,輪荷重の接地面積は車種や前輪・後輪,さらには積載重量によって変動し,それらについての詳細なデータを持ち合わせていないことから,ここでは,全車種に対して道路橋示方書に規定されている大型車の後輪荷重と同じ接地面積 500×200mm で算出することにした。輪荷重 100kN に換算した等価繰返し回数は,生存確率 50%に対して Neq=38,150 回/年,生存確率 80%に対して Neq=42,180 回/年となった。



#### 7.8.4 疲労寿命の算定

図-7.6.5 に示したせん断付着実験結果から、床版境界面のせん断強度は母材コンクリー ト強度に依存する。ここでは、疲労寿命の算定にあたって W 供試体の接着面積率 100%の 平均値(fv/fc'=0.108)を用いることにした。ただし、本研究で実施したせん断付着実験(静 的・疲労)のコンクリート強度は 54N/mm<sup>2</sup>であり、実橋における RC 床版のコンクリート 強度に対してかなり大きな強度であった。一般に、床版のコンクリートの設計基準強度は fc'= 24N/mm<sup>2</sup>であり、また、対象橋梁の RC 床版から得られた反発度法による推定強度は、 fc'= 33.3N/mm<sup>2</sup>であったことから、これらのコンクリート強度を用いた疲労寿命の算定が妥 当である。これら 2 つのコンクリート強度に対して、FEM 解析から得られた水平せん断応 力度を用い、さらに疲労実験結果のばらつきを考慮した生存確率 50%と 80%における疲労 寿命を算出した。その結果を表-7.8.3 に示す。

f <sub>c</sub> ' (N/mm²)	接着面積率	生存確率	破壊回数 N <sub>f</sub> (回)	疲労寿命 T(年)
	100%	50%	3, 034, 825	79.5
	100/0	80%	560, 682	13. 3
24.0	<b>90</b> %	50%	897, 122	23. 5
24.0	00%	80%	173, 897	4. 1
	60%	50%	605, 433	15.9
		80%	119, 070	2.8
33. 3	100%	50%	4, 983, 503	130.6
		80%	908, 831	21.5
	80%	50%	2, 073, 700	54. 4
		80%	391, 471	9.3
	60%	50%	1, 562, 698	41.0
	60%	80%	298, 097	7.1

表-7.8.3 疲労寿命の算定

対象橋梁と同路線における軸重測定データを用いた疲労寿命の算定結果から,接着面積 率,コンクリート強度が疲労寿命に大きく影響を及ぼすことがわかる。また,生存確率 50% と 80%を比較すると,疲労実験結果のばらつきが大きかったため,疲労寿命の算定に大き な差異が生じている。

以上の結果から、コンクリート強度を実強度レベルとした供試体による疲労実験の再実施を行い、実験結果のばらつきを評価するとともに、S-N曲線を再考したい。

## 7.9 まとめ

静的せん断付着実験では、母材コンクリートまたは樹脂近傍のコンクリートでせん断破 壊したため、せん断強度を圧縮強度で無次元化した値は接着面積率によらずにほぼ一定値 となった。

充填材材とすり磨き粉が残留した未接着部の境界付近に発生する水平せん断応力の解析結果から、応力集中は接着面積率の減少とともに大きくなる。

耐疲労性については,接着面積率や既設床版のコンクリート強度により大きく疲労寿命 が異なるため,水平ひび割れ面の洗浄により,すり磨き粉の除去率の向上が重要になる。

本補修工法は必ずしも恒久的な補修対策とは考えていない。大規模更新事業が推進され ている現状において, RC 床版を含む構造物の効率的な維持管理を行うためには, LCC は考 慮すべき重要な要素の一つになる。当然のことながら全ての劣化した RC 床版に対して一度 に対策を講じることは不可能であるため,下記のような区分が必要と考える。

① RC 床版の劣化進行度に応じて,抜本的な対策を講じるもの

- ② 補修により延命化させるもの
- ③ 経過観察を行うもの

上記のように区分けされた RC 床版の中から,優先順位を決定することが必要になる。本 補修工法は,このような一時的な延命化措置に適用することも可能となる。

## 参考文献

- 1) 長谷俊彦,和田圭仙,後藤明彦:上面増厚床版における劣化要因の検証と耐久性向上対策の検討,コンクリート工学年次論文集, Vol.50, No.3, pp.245-253, 2012.3.
- 2) 松井繁之:床版損傷に対する水の振る舞い,土木学会第43回年次学術講演会概要集, 第1部 PS1-3,pp.6(昭和63年10月)
- 3) 樅山好幸, 鈴木 真, 國川正勝:上面増厚工法を施した RC 床版の補修工法に関する研究と開発, 土木学会第 67 回年次学術講演会, V-283 (平成 24 年 9 月)
- 4) 國川正勝,松井隆之,神田利之,鈴木 真:実構造物を想定した RC 床版の再補修工法に関 する実験的研究,土木学会第67回年次学術講演会,V-284(平成24年9月)
- 5) 鈴木真, 樅山好幸, 神田利之, 東山浩士:上面増厚施工後に界面剥離により劣化した RC 床版の補修工法に関する実験的検討, コンクリート構造物の補修, 補修, アップグレー ドシンポジウム論文報告集, Vol.16, pp.645-650, 2016.11
- 6) 神田利之,鈴木真,樅山好幸,東山浩士:上面増厚工法施工後に劣化した RC 床版に対 する再補修工法の耐疲労性に関する検討,コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1741-1747, 2017.7

## 第8章 非破壊検査を適用した補修後の品質管理に関する提案

#### 8.1 はじめに

第7章において提案した補修工法を,実施工に適用する場合,最も課題となることは,充 填材が水平ひび割れ内への注入状況を外観目視に確認することが極めて難しいことである。 よって,本補修工法を実橋 RC 床版に適用し,充填材の注入作業の前後において衝撃弾性波 法による現地計測を行い,充填材が確実に注入されているか否かを非破壊検査手法により 確認する品質管理方法について提案を行った。

#### 8.2 橋梁概要

現地計測を行った橋梁は,兵庫県神戸市北区に位置する高速道路橋である。構造形式は連 続鋼鈑桁橋である。本橋は,1974年に供用が開始され,現在までに44年が経過している。 本橋の RC 床版に対して,2010年に床版の上面増厚と防水工事,2013年に断面修復等の補 修工事が行われたにも関わらず,劣化(RC 床版下面におけるエフロレッセンスの発生,か ぶり部の浮きおよび剥落,鉄筋腐食等)が顕在化するに至った。

本橋の RC 床版に対して, 抜本的な補修対策を講じる前に, 損傷状態を把握する必要があったため, RC 床版下面から削孔調査を行ったところ, RC 床版内部に水平ひび割れが広範囲に発生していることが分かった。よって, RC 床版の劣化進行を抑制するために, 2019 年に本橋の下り線 A1~P1 径間の一部を対象として, 筆者らが提案する補修工法が採用された。

本橋の現況を図-8.2.1 に, RC 床版の状況を図-8.2.2 に, 損傷状況を図-8.2.3 および図-8.2.4 に記す。なお。図-8.2.1 中の赤丸内は施工対象径間を,図-8.2.2 中の赤四角内は施工対象パネルを示す。



図-8.2.1 対象橋梁の現況(全景)



図-8.2.2 対象橋梁の現況 (RC 床版下面)



図-8.2.3 損傷状況(RC床版下面)

図-8.2.4 損傷状況(削孔調査結果)

#### 8.3 施工概要

施工手順を図-8.3.1 に記す。基本的には、第7章に記した供試体による実験と同様の手順(削孔→洗浄→充填材注入)とした<sup>1)</sup>。洗浄にはウォータージェット工法を適用し、充填材にはエポキシ樹脂を使用した。また、全ての作業は、RC床版の下面に設置した吊り足場上で行った。剥離ひび割れ内の洗浄を行った状況を図-8.3.2 および図-8.3.3 に、充填材の注入状況を図-8.3.4 記す。図-8.3.3 において、濁水は洗浄孔から流出している状況を確認することができる。なお、吊り足場の設置および解体を除く作業は、約2週間で完了させることができた。



図-8.3.1 施工手順



図-8.3.2 洗浄状況 (その1)



図-8.3.3 洗浄状況 (その2)



図-8.3.4 充填材注入状況

## 8.4 計測要領

充填材注入作業の前後において, RC 床版下面から衝撃弾性波法による計測を行った。計 測箇所は,各パネル(パネル1~9)の中央部近傍とした。これは,本補修の事前に,各パネ ルの中央部において削孔調査を行い,剥離ひび割れが発生していることを確認しており,そ の削孔箇所の近傍を計測点として設定したためである。

計測方法は、RC 床版下面に対して、鋼製のグリップバーを取り付けた鋼球を使用し、手動で振り上げるようにして、RC 床版に打撃を加えて弾性波を発生させた。鋼球径は、 $\phi$  5.9mm、 $\phi$ 9.6mm、 $\phi$ 12.8mm、 $\phi$ 16.0mm、 $\phi$ 19.2mmの5 棲類とした。受信は、打撃点から 30mm ほど離れた位置に 3Hz~30kHz においてフラットな応答感度を持つ加速度計を使用し、小型高速マルチレコーダ (GR-7000) に弾性波データを記録した。計測状況を図-8.4.1 記す。



## 図-8.4.1 現地計測状況
#### 8.5 計測結果

補修前における計測結果の一例(パネル2およびパネル6)を表-8.5.1に記す。各パネル に対する計測結果において、ピーク周波数は増厚コンクリートおよび既設床版との境界面 近傍を示した。補修後における計測結果の一例(パネル3およびパネル9)を表-8.5.2に記 す。補修前の計測結果に対して、各パネルに対する計測結果における周波数は、ピークが不 明瞭になっていることが分かった。パネル8における補修前後の計測結果を、表-8.5.3に 記す。この表からも分かるように、補修前の計測結果においては、ピーク周波数を確認する ことができるが、補修後の計測結果においては、各鋼球における周波数のピークが一定して いないことがわかる。

補修前後において周波数スペクトルが相違した要因として,補修後において剥離ひび割 れ内に注入した充填材(エポキシ樹脂)の反射率が,空隙に対して大きく低下したために, 多重反射が起こりにくくなり,高周波成分が増加したように見えることが起因していると 推測する。



表-8.5.1 補修前における計測結果の一例(パネル2および6)

※ 縦軸はスペクトル強度, 横軸:周波数(kHz)を示す。



表-8.5.2 補修後おける計測結果の一例 (パネル3および9)

※ 縦軸はスペクトル強度, 横軸:周波数(kHz)を示す。



表-8.5.3 補修前後における計測結果の比較(パネル8)

### 8.6 まとめ

上記のように,充填材の注入前後において,衝撃弾性波法を適用した計測結果を比較検証 することにより,注入の有無を確認することができる品質管理方法を示唆することができ た。

# 参考文献

 神田利之,鈴木 真,緒方辰男,松井繁之:上面増厚工法施工後に劣化した RC 床版の 補修工法に関する開発,コンクリート工学会年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1225-1230, 2014.7

## 第9章 結論

本研究の目的は、上面増厚後に再劣化した RC 床版を対象とし、維持管理を行っていく上 で大きな課題となる損傷状態を、非破壊検査手法を駆使して的確に把握することであり、コ ンクリート内を伝播する弾性波の特性を応用する衝撃弾性波法および磁気的にコンクリー ト内の鉄筋を振動させる電磁パルス法の計測手段が全く異なる二つの非破壊検査手法を併 用し、両非破壊手法により計測を行ったデータを比較検証することにより、精度よく判定す ることができる非破壊調査手法を提案した。また、効率的な補強方法の提案を行った。本論 文は以下の9章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的、論文の構成を述べるとともに、本研究の位置 付けを記した。

第2章では、事例を踏まえて RC 床版の損傷と原因について整理するとともに、床版特有 の損傷形態としての水平ひび割れの発生メカニズムについて述べた。続いて、本研究におい て対象とする上面増厚後に再劣化した RC 床版内部に発生した水平ひび割れを、床版上下面 から検出するための非破壊検査手法として、既往の研究に基づき衝撃弾性波法および電磁 パルス法を選定した。

第3章では、水平ひび割れの評価方法として、第2章において抽出した衝撃弾性波法および電磁パルス法の適用性の確認を目的として、上面増厚後に再劣化した RC 床版内部に発生した水平ひび割れを模擬的に設定したコンクリート板供試体に対して基礎的な実験を行った。原理的には、衝撃弾性波法により水平ひび割れ内の状態に関わらず、最外縁に位置する水平ひび割れまでの深さの把握が可能であり、さらに電磁パルス法を併用すれば、水平ひび割れの有無だけでなく、「剥離ひび割れ」あるいは「腐食ひび割れ」の識別が可能であることを明らかにした。

第4章では、衝撃弾性波法による水平ひび割れのさらなる評価精度の向上を目的とし、弾 性波入力条件に着目した供試体実験を行なった。具体的には、コンクリート表面における鋼 球による打撃力、および打撃点とセンサとの間隔をパラメータとして変化させた計測を行 い、スペクトルピークが明瞭になる条件を明確にした。

第5章では、電磁パルス法での水平ひび割れの種類の識別精度の向上に資する情報を得る目的で、電磁力により鉄筋が加振された床版の振動メカニズムを解明するための供試体 実験および衝撃応答解析を行なった。ここでは、電磁力によって床版表面と水平ひび割れと の間の板部材にたわみ共振が励起されることを確認するとともに,かぶりの大きさ,鉄筋径, あるいは電磁力の大きさが床版の振動挙動に与える影響を明らかにした。また,電磁パルス 法による水平ひび割れの検出には,評価指標として波形エネルギー値が有効であることを 示した。

第6章では、第4章および第5章で得られた成果を踏まえて、各非破壊検査手法の実構 造物に対する適用性を把握するため実験的検討を行なった。具体的には、実橋から切り出し た損傷を有する上面増厚補強 RC 床版を供試体として使用し、損傷状態の異なる箇所に計測 点を設定して、衝撃弾性波法および電磁パルス法による計測を実施した。その結果、水平ひ び割れの発生状況と非破壊評価の結果とは良い対応を示し、各手法の現場適用性が確認で きた。また、実際の床版での計測を想定し、衝撃弾性波法および電磁パルス法について、供 試体のほぼ全面に渡って、それぞれ床版上面または下面から、あるいは可能であれば床版の 上下両面から計測を行った結果を効果的に組み合わせることによって、水平ひび割れの有 無や種類の判定を精度良く行うための非破壊調査システムを提案した。

第7章では、非破壊検査により「剥離ひび割れ」が検出された RC 床版への補修対策とし て、「剥離ひび割れ」部をウォータージェット工法により洗浄したのちに、充填材(接着性 のある樹脂硬化材)を注入して、増厚部と既設コンクリート床版の一体化を図る方法につい て検討を行った。具体的には基礎実験供試体および実橋からの切出し床版において施工性 の確認を行うと共に、供試体での静的および動的せん断実験により、補強箇所の接着性能お よび疲労耐久性を明らかにした。

第8章では,第7章において提案した補修工法を実施工に採用した場合において,非破 壊検査手法による有効な品質管理手法の提案を行った。

第9章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の課題を提示し、本研究の 結論とした。

# 謝辞

本研究は,筆者が西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社に勤務しながら,大阪大 学大学院工学研究科地球総合工学専攻において,博士後期課程に在籍した 3 年間に行った 研究をとりまとめたものです。

本論文の取りまとめにあたり、コンクリート構造物に対する非破壊検査技術に関して、一 からご指導いただいた大阪大学大学院教授鎌田敏郎先生に深く感謝の意を申し上げます。 鎌田敏郎先生には、本研究におけるご指導のみならず、論文作成やプレゼンテーションの基 本から技術者としての在り方まで、公私に渡って懇切かつ丁寧なご指導ならびに励ましを 賜りました。また、研究活動を通じて多くの研究者の方々と議論し、時には専門雑誌の取材 を受ける機会までいただき、私の人としての幅を広げていただきました。鎌田敏郎先生の下 で学べた3年間は、私の人生において掛け替えのない時間となりました。心より御礼申し上 げます。

大阪大学大学院教授乾徹先生ならび大阪大学接合科学研究所准教授堤成一郎先生には, 本学位論文の審査を快く引き受けていただき,本論文をまとめるにあたり貴重なご指導、ご 指摘・ご助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

大阪大学大学院准教授大倉一郎先生からは,鋼構造設計学の貴重なご講義をいただきま した。また,課程入学当時より暖かく迎えていただき,心より感謝申し上げます。

大阪大学大学院助教寺澤広基先生には、本研究において厳しくも温かいご指導をいただ き、深く感謝いたしております。寺澤先生にご協力いただいた深夜に及ぶ現地試験は、今と なっては楽しい思い出になりました。

大阪大学大学院服部晋一氏には、本研究のみならず非破壊検査の基礎まで丁寧なご指導 をいただきました。研究に行き詰った時は、いつも服部氏の適切な助言をいただきました。 服部氏の存在がなければ、本研究を継続させることは不可能でした。心から感謝申し上げま す。

私のような若輩者と研究チームを組み,実験や解析など常に私をサポートしてくれた藤 原理絵さん(卒業生),東賢明君(卒業生),安井和也君,中野雄斗君,葉栗君,中尾優文君 がおられなければ,この本論文を最後まで書くことができませんでした。また,ゼミや交流 会等において,年配の私を友のように接し議論してくれた学生諸君に心から感謝申し上げ ます。

本研究の一部は,近畿大学理工学部社会環境工学科教授東山浩士先生,株式会社ケミカル 工事神田利之氏のご指導・協力を得たものです。現地施工の採用など,長年にわたる研究に 実を結ばせることができました。喜びを分かち合えたことは私の心の財産となっておりま す。

本研究に使用しました実験および現地計測データの多くは、西日本高速道路株式会社ならびに神戸市みなと総局のご支援により得ることができました。深く感謝申し上げます。

私が大阪大学大学院博士課程後期に入学し研究活動を行うにあたり,鎌田先生と私をお 引き合わせいただき,私の背中を押していただいた樅山好幸氏には,御礼の申し上げようも ございません。

また研究を御支援して頂きました西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社角田直 行社長,中村雅彦常務取締ならびに構造技術部の方々に深く御礼申し上げます。

最後に、今日まで私を支えてくれた母、妻、二人の子供たちに、今ここに謝辞を書き終え たことを報告するとともに、本論文を作成するにあたり、お力添えいただきましたすべての 方々に対して深甚の謝意を表し、ここに謝辞とさせて頂きます。

令和元年9月

鈴木 真