The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	雨量と土中水分量を用いた高速道路における斜面防災対策の高度化に関する研究
Author(s)	櫻谷, 慶治
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/70789
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

雨量と土中水分量を用いた高速道路における斜面防災対策の高度化に関する研究

櫻　谷　慶　治

２０１８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　研究の背景 …… 1
1.2　現行の高速道路通行規制基準の概要 …… 4
1.3　研究の目的 …… 7
1.4　論文の構成 …… 8
参考文献 …… 11

第 2 章　高速道路通行規制基準に対する解析雨量の適用性 …… 12
2.1　はじめに …… 12
2.2　本章に関連する既往の研究 …… 12
2.3　適用性の評価手法と対象データ …… 13
2.4　解析雨量の適用性 …… 14
2.4.1　時間雨量の相関関係 …… 14
2.4.2　同時刻における時間雨量の差 …… 18
2.4.3　時間雨量の累積値での相関関係 …… 21
2.4.4　通行規制実施・解除判断に対する適用性 …… 23
2.5　まとめ …… 25
参考文献 …… 26

第 3 章　斜面災害リスクの定量化と高速道路通行規制基準設定方法の高度化 …… 27
3.1　はじめに …… 27
3.2　本章の基本的な考え方 …… 28
3.2.1　斜面災害リスクと規制基準値 …… 28
3.2.2　本章に関連する既往の研究 …… 28
3.2.3　現行の規制基準値の設定方法との相違 …… 30
3.3　斜面災害発生モデル …… 33
3.3.1　モデル化の前提条件 …… 33
3.3.2　斜面災害発生モデル …… 33
3.3.3　尤度関数 …… 34
3.3.4　推定方法 …… 35
3.4　最適規制基準値設定モデル …… 37
3.4.1　規制基準値 …… 37
3.4.2　安全面でのリスク管理指標 …… 37
3.4.3　社会損失面でのリスク管理指標 …… 38

3.4.4　最適規制基準値設定モデル ……38
3.4.5　費用設定と経済主体 ……40
3.5　適用事例……40
3.5.1　適用データの概要 ……40
3.5.2　斜面災害発生モデルの推定結果 ……42
3.5.3　最適規制基準値設定モデルを用いた分析結果 ……48
3.6　まとめ……52
参考文献……53

第 4 章　変位発生に至る土中水分量の解明 ……54
4.1　はじめに ……54
4.2　本章に関連する既往の研究 ……55
4.3　擬似飽和体積含水率を用いた表層崩壊プロセスのモデル化 ……57
4.3.1　簡易模型斜面実験の概要 ……57
4.3.2　擬似飽和体積含水率と変位発生のモデル化 ……59
4.4　カラム試験による擬似飽和状態の再現と擬似飽和体積含水率 ……60
4.4.1　カラム試験の概要 ……60
4.4.2　擬似飽和状態の発現と擬似飽和体積含水率 ……61
4.5　擬似飽和体積含水率と斜面崩壊の関係 ……63
4.5.1　模型斜面実験の概要 ……63
4.5.2　擬似飽和体積含水率と斜面崩壊の関係 ……64
4.6　体積含水率の上昇過程と変位の関係 ……67
4.6.1　模型斜面実験の概要 ……67
4.6.2　体積含水率の上昇と変位発生の関係 ……68
4.7　まとめ ……72
参考文献……73

第 5 章　SOM 解析を活用した土中水分量計測斜面の優先順位付き抽出手法の提案 ……75
5.1　はじめに……75
5.2　本章に関連する既往の研究 ……75
5.3　適用データの作成 ……76
5.3.1　対象データの概要 ……76
5.3.2　データの絞り込み ……78
5.3.3　適用データの作成 ……79
5.4　SOM 解析とクラスタ分析を用いた斜面の特徴評価 ……80
5.4.1　SOM 解析の概要 ……80
5.4.2　SOM 解析の結果とクラスタ数の決定 ……81

5.4.3　クラスタ分析 ……82
5.4.4　各クラスタの特徴 ……83
5.5　優先順位付けの考え方 ……85
5.6　土中水分量計測斜面の優先順位付き抽出手法の提案 ……87
5.7　まとめ……88
参考文献……89

第 6 章　土中水分量のモニタリングデータを用いた高速道路通行規制基準……90
6.1　はじめに……90
6.2　モニタリングシステムに関連する既往の研究 ……90
6.3　モニタリングシステムの開発 ……91
6.3.1　システム全体概要 ……91
6.3.2　無線通信機能 ……92
6.3.3　子機 ……93
6.3.4　基地局 ……94
6.3.5　監視システム ……95
6.3.6　NEXCO 西日本業務用無線 LAN との通信確認 ……97
6.4　モニタリングシステムの適用事例 ……98
6.4.1　体積含水率のモニタリング事例 ……98
6.4.2　グラウンドアンカー荷重のモニタリング事例 …… 100
6.5　現地計測結果に基づく雨水浸透シミュレーションモデルの同定 …… 101
6.5.1　雨水浸透シミュレーションモデルの同定手法 …… 101
6.5.2　解析対象斜面における現地計測結果 …… 103
6.6　降雨強度と擬似飽和体積含水率の関係 …… 105
6.6.1　解析手法と対象データ …… 105
6.6.2　擬似飽和体積含水率の推定方法 …… 106
6.7　擬似飽和体積含水率を指標とする高速道路通行規制基準の考え方 ……111
6.8　まとめ…… 113
参考文献…… 114

第 7 章　高速道路通行規制基準の高度化手法の提案…… 116
7.1　はじめに…… 116
7.2　斜面防災対策の高度化に資する通行規制基準の運用方法の提案 …… 116
7.3　リスクマネジメント手法を用いて設定した通行規制基準の検証 …… 118
7.3.1　使用したデータと検証方法 …… 118
7.3.2　検証結果と課題整理 …… 118

7.4　土中水分量を指標とした通行規制基準の検証 …… 119
7.4.1　使用したデータと検証方法 …… 119
7.4.2　検証結果と課題整理 …… 121
7.4.3　課題解決に向けた一提案 …… 123
7.5　まとめ…… 125

第 8 章　結論…… 126
8.1　本研究の結論 …… 126
8.2　今後の課題と展望 …… 128

謝辞　…… 129

第 1 章　序論

1.1 研究の背景

日本は国土の約 70%が山地であり，その多くが急峻な地形であるため，豪雨による土砂災害が繰り返し発生している．最近では，平成 26 年 8 月豪雨による広島市の災害[1]が記憶に新しい．「数百年に 1 回程度より遥かに少ない確率」で発生した記録的集中豪雨で，70 名以上の命が失われた大規模な災害であった．図 1.1 に示すように，国土交通省から豪雨や土砂災害の増加・激甚化傾向が報告[2]されており，今後もこのような土砂災害が日本各地で発生する可能性は高く，土砂災害への対策は急務である．

中でも，都市間交通を支える高速道路においては，管理区域内に多数の斜面を有しており，斜面災害による被害が利用者へ及ばないよう適切に管理することが求められる．図 1.2 に，高速道路事業における斜面防災対策の現状を示す．斜面防災対策はハードウェア面での対策（以下ハード対策）とソフトウェア面での対策（以下ソフト対策）に大別される．物理的な予防対策を施すハード対策は重要な役割を担っているが，必要な事業費が大きいため，その制約内における最適な施策が道路管理者に求められる．またその性質上，「点」として高速道路の防災対策に資するものとなっている．一方ソフト対策は，一般的にハード対策に比べ少ない事業費で，「線」的に成果が期待できるものの，設定する災害の規模や種別によって，その効果が大きく影響されるため，十分な検討が必要である．

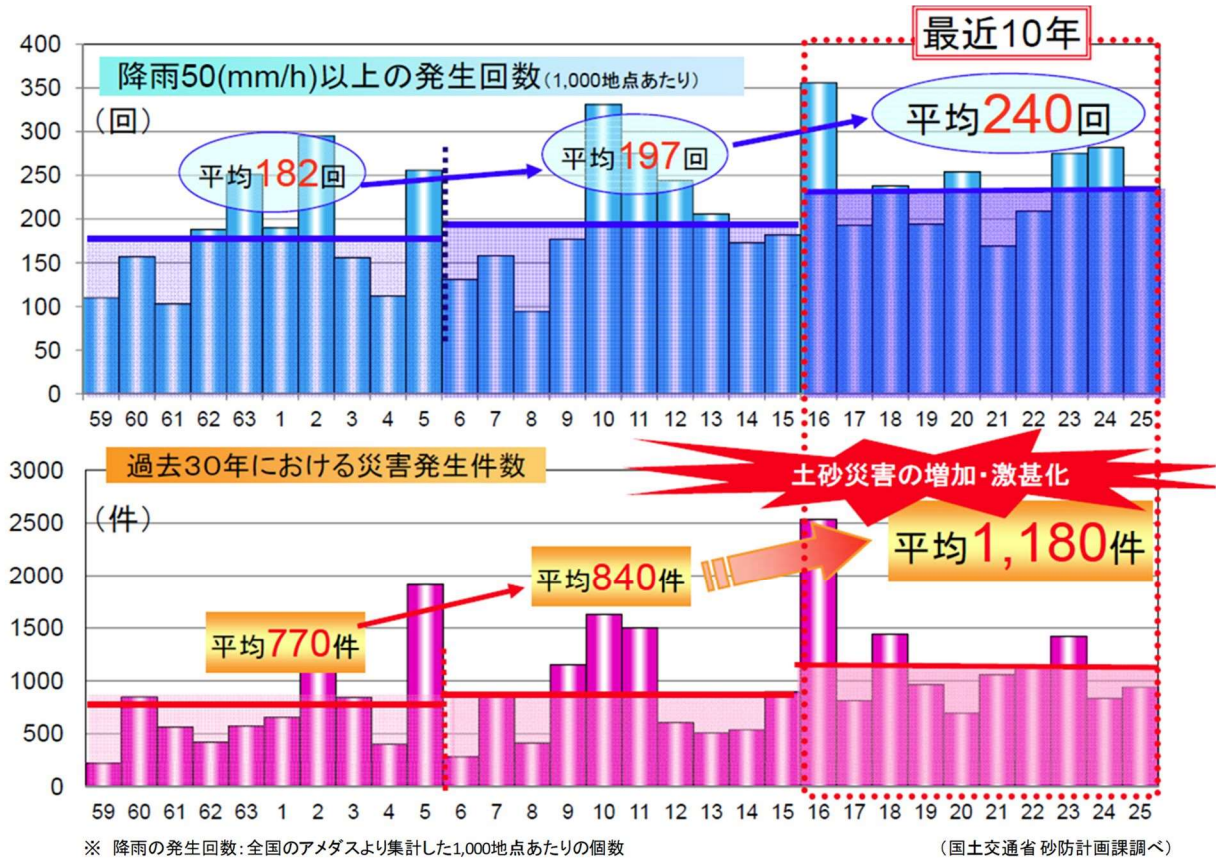


図 1.1　豪雨及び土砂災害の増加・激甚化傾向[2]

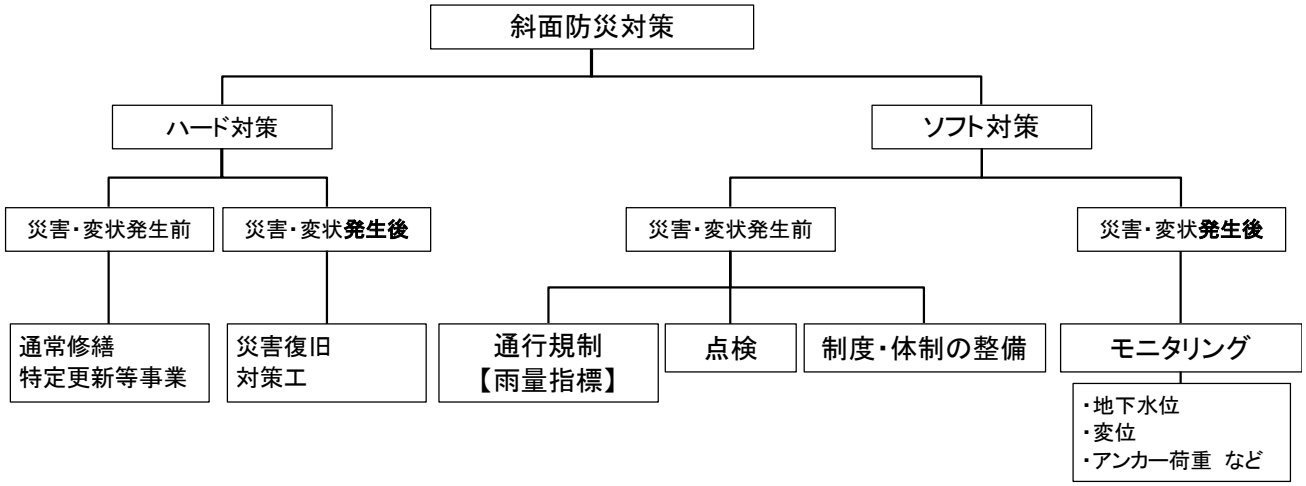


図 1.2　高速道路事業における斜面防災対策の現状

ソフト対策の中で主要な役割を担っているのが，通行規制である．その歴史は，昭和 43 年の飛騨川バス転落事故[3),4)]までさかのぼる．同事故は，一般国道を通行中のツアーバスの一部が，集中豪雨に伴う土石流に巻き込まれて飛騨川に転落し，乗員・乗客 104 名の命が失われた，国内では史上最悪のバス事故である．この事故を契機に，道路管理施策は大きく見直された．その大きな理由として，この事故で初めて「当該自然現象の発生の危険が蓋然的に認められる場合であれば，これを通常予測し得るものといって妨げないから，その危険より道路の安全を確保する措置が講じられていなければ，道路管理に瑕疵があったものといえる」[4)]という道路管理者の管理瑕疵が問われたことが挙げられる．道路管理者であった建設省は，事故翌月には全国の道路で総点検を行い，これが今日の道路防災点検として制度化されている．また建設省は，各道路管理者へ「通行規制基準に関する通達」[5)]を出し，道路の危険が予測される際の通行規制に関する制度化の促進を図った．これを受け，日本道路公団においても昭和 48 年に始めて通行規制基準が設定されることとなった．導入当初，地域ごとに基準や解除方法のバラつきへの対応が課題となっていたが，平成 13 年までに基準に対する全国統一的な基本方針が策定され，基準指標として連続雨量と組合せ雨量（連続雨量と時間雨量の組合せ）[6)]が定められ，現在に至っている．ただし，現行の通行規制も完全なものではなく，いくつかの課題がある．

図 1.3 に，西日本高速道路株式会社（以下 NEXCO 西日本）が管理する高速道路内で発生した降雨斜面災害における，通行規制基準超過前後の内訳を示す．同図は，平成 18 年 4 月から平成 26 年 7 月までを対象とし，流出土砂等の影響が外側線を超え，走行車線上まで達した災害の件数を集計したものである．同図から 40%以上の災害が，現行の通行規制基準超過前に発生，すなわち現行基準で捉えられなかった，いわゆる“見逃し”であることが分かる．この“見逃し”を無くすことが，通行規制基準に求められており，本研究の目的でもある．ここで，現行の通行規制で“見逃し”が発生している原因を考察する．

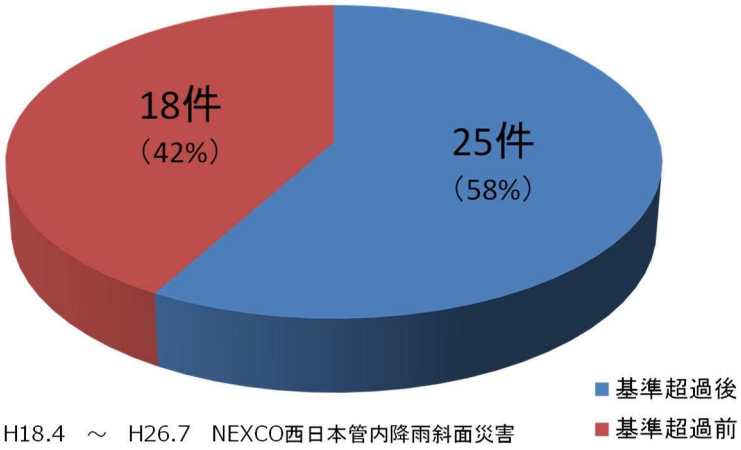


図 1.3　NEXCO 西日本管内の降雨斜面災害に対する基準超過前後の内訳

第一に，基準値が適切でないことが考えられる．すなわち“見逃し”が発生するということは，本来あるべき値より基準値が高く設定されているということが考えられる．現行の通行規制基準には雨量指標が用いられていることから，“見逃し”を無くすためには，基準となる雨量を小さく設定すればよい．ただしそうすると“見逃し”は減るものの，規制実施後も災害が発生しない，いわゆる通行規制の“空振り”が増えてしまうことにもなる．高速道路管理者の立場では，“見逃し”，“空振り”いずれの低減も考慮する必要がある．ただし，現行の基準設定方法には“見逃し”，“空振り”両事象を定量的に評価するプロセスが含まれていない．“見逃し”を減らすためにも，“空振り”も考慮した通行規制基準設定プロセスを構築する必要がある．

第二に，基準とする指標が雨量のみであることが考えられる．降雨時の斜面崩壊の一般的な崩壊メカニズムを考えると，雨量よりも土中の水分量の方がより直接的な要因であるといえるが，現行基準では考慮されていない．図 1.4 と図 1.5 に，ある降雨時のそれぞれ異なる場所における雨量と土中水分量（体積含水率）の計測結果を示す．いずれも，NEXCO 西日本が管理する高速道路の切土のり面で計測されたものである．期間中，いずれも大きな降雨を 2 回経験している．図 1.4 では，降雨を観測すると体積含水率が上昇するものの，降雨終了後にすぐに減少しており，2 回目の降雨開始までに大きく減少していることが分かる．一方，図 1.5 では，降雨の観測とともに土中水分量が上昇していることは先ほどと同じであるが，上昇した体積含水率は，1 回目の降雨終了後も減少せず高い状態のまま 2 回目の降雨を迎え，さらに上昇している．この時の雨量を当該箇所の通行規制基準と合わせて示したものが表 1.1 である．同表から，雨量を指標とする現行基準では，図 1.4 の方がより危険と判断されることが分かるが，図 1.4，図 1.5 の体積含水率の情報も加味すると，図 1.4 の観測箇所の方が危険な状態であるということは一概に言えない．このように，雨量のみの指標では，斜面崩壊に対する危険度を適切に判断することが難しい場合があり，その判断結果が，災害の“見逃し”につながることが懸念される．このことから，土中水分量を通行規制基準の指標として考慮すべきであるといえる．

ここに述べた 2 つの“見逃し”の原因への対応が現行通行規制基準の課題であり，その課題解決のための方法論を示すことが本研究の目的である．

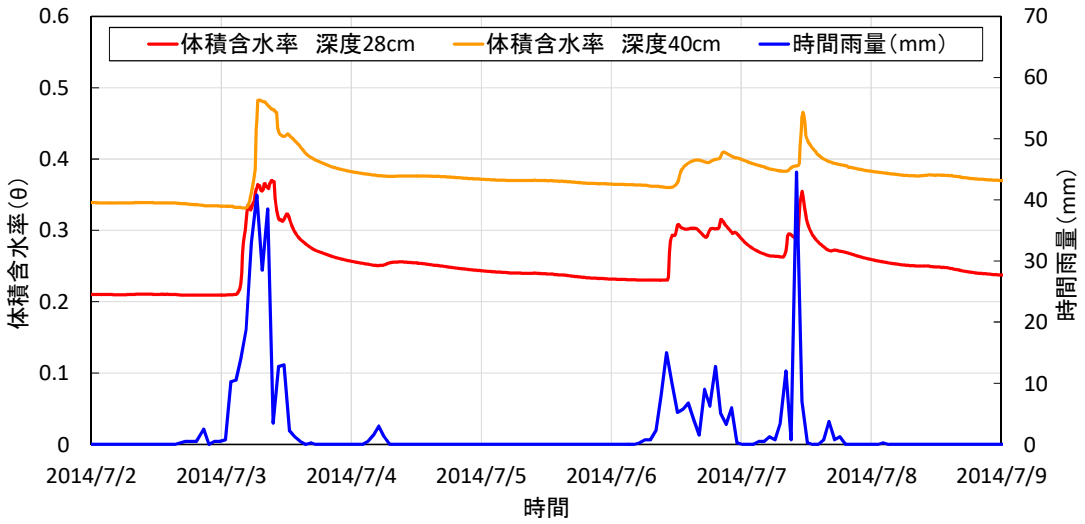


図 1.4　体積含水率と雨量の時系列変化（Y のり面）

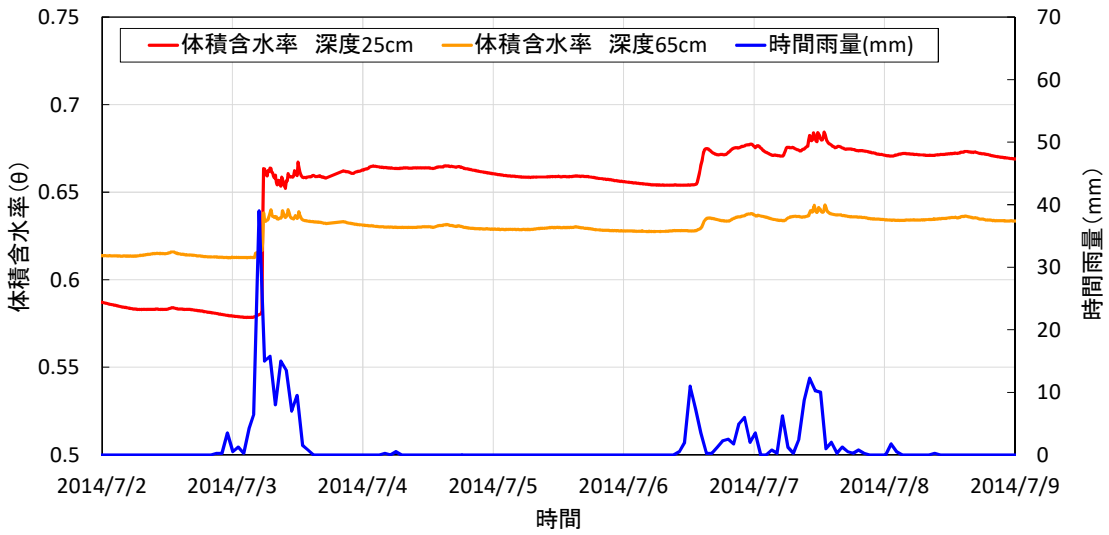


図 1.5　体積含水率と雨量の時系列変化（O のり面）

表 1.1　実測雨量と通行規制基準との関係

現場名	実測雨量（連続雨量）		通行規制基準（連続雨量）
	1回目降雨	2回目降雨	
Yのり面	233mm	180mm	250mm
Oのり面	141mm	110mm	250mm

1.2　現行の高速道路通行規制基準の概要

NEXCO 西日本では，高速道路沿線に自社管理の雨量計（以下，説明のないものは，単に雨量計と記しているものは自社管理の雨量計を指す）を設置し，5 分間隔で雨量を観測している．雨量計の数は約 430

に上り，NEXCO 西日本が管理している高速道路延長の約 3,500 ㎞で除すと，概ね 8 ㎞に一箇所という設置密度になる．NEXCO 西日本では，雨量計で観測される雨量の基準値超過の有無で，通行規制の実施と解除の判断を行っている．道路パトロールにおける異常発見などにより，雨量によらない通行規制を実施する場合もあるが，ここでは，降雨時の一般的な通行規制を対象として，NEXCO 西日本が実施している通行規制基準の種別，運用方法，そして基準の算出方法の概要を示す．

NEXCO 西日本の通行規制基準には，「連続雨量基準」と「組合せ雨量基準」がある．いずれも，雨量計で観測される雨量が基準値を超過した場合に通行規制を実施し，降雨終了と通行の安全が確認されれば解除するという運用がなされている．5 分毎に観測される雨量を基に，その 60 分積算値を「時間雨量」と定義している．すなわち時間雨量とは，5 分毎に更新される直前 60 分間雨量である．その時間雨量の累積値を「連続雨量」と定義している．累積する条件として，2 mm/h 以下が 6 時間継続しない場合としており，2 mm/h 以下が 6 時間継続したタイミングで累積を終了し，次の時点の連続雨量を 0 mm に戻すという運用を行っている．この連続雨量を 0 mm に戻すことを「リセット」と呼んでおり，一つの降雨の終了を意味する．降雨を観測し始める連続雨量 0 mm から，リセットされて連続雨量 0 mm となるまでの一連の降雨を，「降雨イベント」と呼ぶ．

「連続雨量基準」は，その言葉通り連続雨量のみで設定される基準であり，「組合せ雨量基準」は，連続雨量と時間雨量を組合せて設定される基準である．基準の超過の判断は雨量計で観測される雨量を用いて行われるため，5 分毎に，基準超過の有無，通行規制の実施，解除の判断がなされることになる．ただし，実際の通行規制の実施，解除に際しては，必要人員，資器材の確保，人員配置などの準備に時間が必要なため，予測情報を活用しながらそれらに備えている．その際に，図 1.6 に示す横軸に連続雨量，縦軸に時間雨量を示す降雨履歴図を用いて，基準超過の判断や基準超過に対してどの程度時間的余裕があ

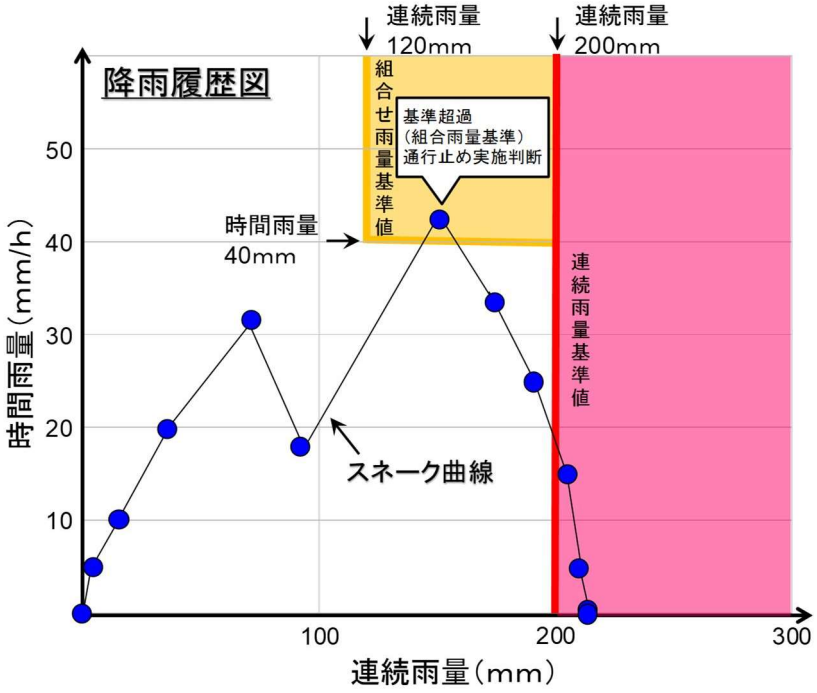


図 1.6　降雨履歴図

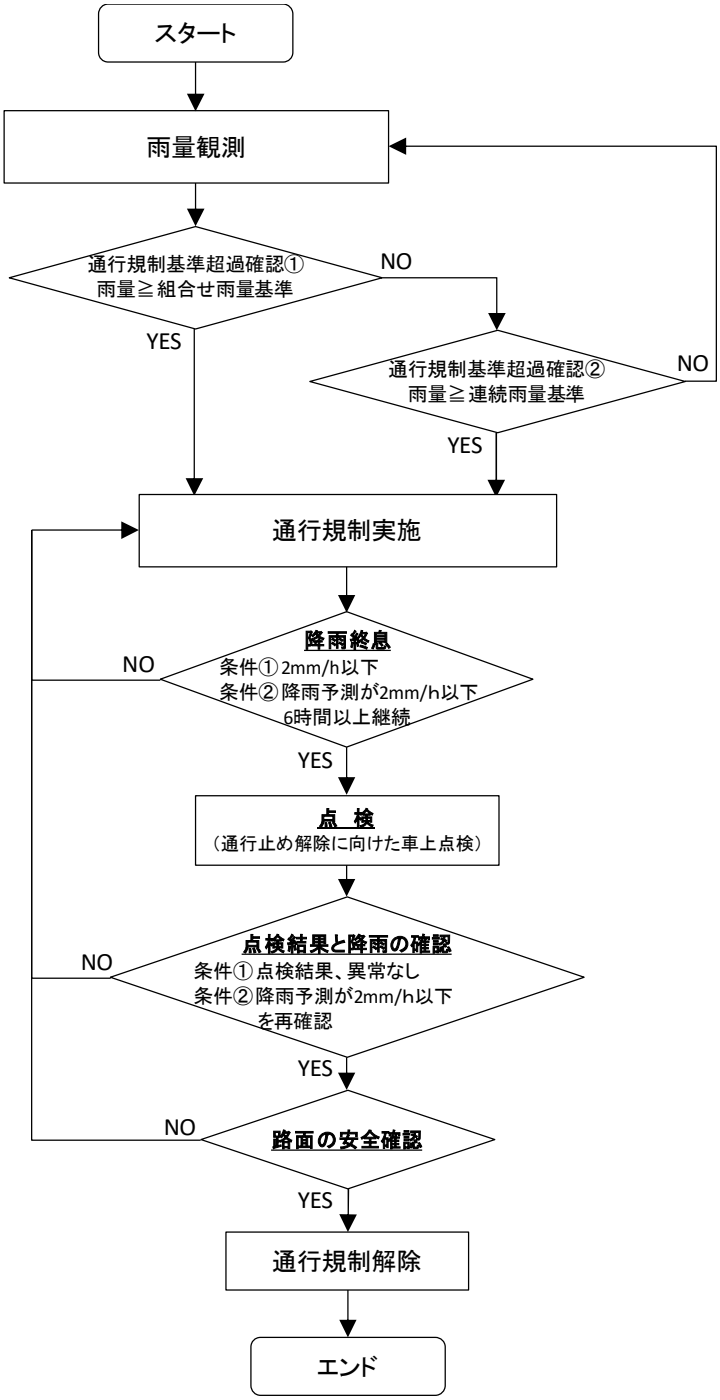


図 1.7　通行規制運用フロー図

るかなどを管理している．この降雨履歴図上の降雨の軌跡を「スネーク曲線」と呼ぶ．図 1.6 には，スネーク曲線の一例と，連続雨量基準値，組合せ雨量基準値の例も併記している．また，図 1.7 には，通行規制基準の運用フローを示している．観測される雨量を基に通行規制実施の判断を行い，解除に当たっては，降雨が終息に向かっていること，点検の結果安全が確認されることなどを条件として，判断している．

基準値は，過去に雨量計で計測された雨量の記録と，災害の記録を基に設定される．雨量は，過去 20

年分のデータを用いることとしているが，当該区間が供用後間もなく，20 年分のデータが蓄積されてない場合には，近傍のアメダス（AMeDAS : Automated Meteorological Data Acquisition System）のデータを使用する．同雨量データを対象に，確率手法の一つである岩井法[7]を用いて，ある間隔の年数に一度発生する「確率雨量」を算出する．現行の基準値設定に際しては，概ね 5 から 6 年の確率雨量が目安とされている．これは，過去 20 年間のアメダスデータにより，観測史上最大規模の雨量があった場合，土砂災害の発生確率が高くなっているという経験から，少し安全側に考えて，過去 20 年間で 3 から 4 番目の雨量相当ということで目安としているものである．その確率雨量を基本とし，当該区間の供用年数，道路構造などを基にする地域特性を考慮して，最終的な基準値を決定している．決定した基準値は，大きい雨量を経験した場合や，小さい雨量で災害が発生した場合など，適宜見直すこととしている．なお，基準値の決定方法に関しては，第 3 章でも詳述する．

1.3 研究の目的

本研究の最終的なゴール，目的は，高速道路事業における斜面防災対策の高度化である．その達成に向けた具体的な研究内容は，1.1 節で述べたように通行規制における課題解決のための方法論を示すことであり，そのために 2 つの検討を行っている．

本研究では，以下に示す 2 つの手法の検討を行い，最後に両手法を組み合わせた斜面防災対策の高度化のための方法論を示す．

(1) 通行規制基準に対するリスクマネジメント手法の確立

通行規制による災害捕捉率を向上させるためには，“見逃し”だけではなく“空振り”に関しても同時に考慮する必要があるが，現行の通行規制基準設定手法では，その評価が定量的になされていない．そこで，降雨の発生確率，過去の災害履歴を用いて決定される現行の通行規制基準設定手法を見直し，現行の手法では十分に考慮されていない，のり面の面積などの素因情報を定量的に加味した災害発生確率を考慮した上で，“見逃し”，“空振り”それぞれのリスクを定義し，確率論を用いた最適な通行規制基準設定手法を提案する．さらに，提案手法に基づく基準値の試算，検証を行い，その手法を確立する．

(2) 通行規制基準に資する新たな指標としての土中水分量の活用方法の検討

現行の通行規制基準における指標は雨量である．雨量のみを指標としていることが，“見逃し”の一つの要因と考え，雨量に代わる，もしくは雨量に加える新たな指標を確立することを検討する．本研究では，斜面崩壊発生メカニズムにおいて，雨量と比べより支配的な指標である土中水分量に着目する．カラム試験，模型斜面実験，現地計測結果，数値解析を用いて，土中水分量を用いた指標を提案，検証し，通行規制に対する活用方法をとりまとめる．

本研究の目的と，目的達成のために本論文にとりまとめた研究内容を，図 1.2 で示した斜面防災対策の現状に追記する形で，図 1.8 に示した．

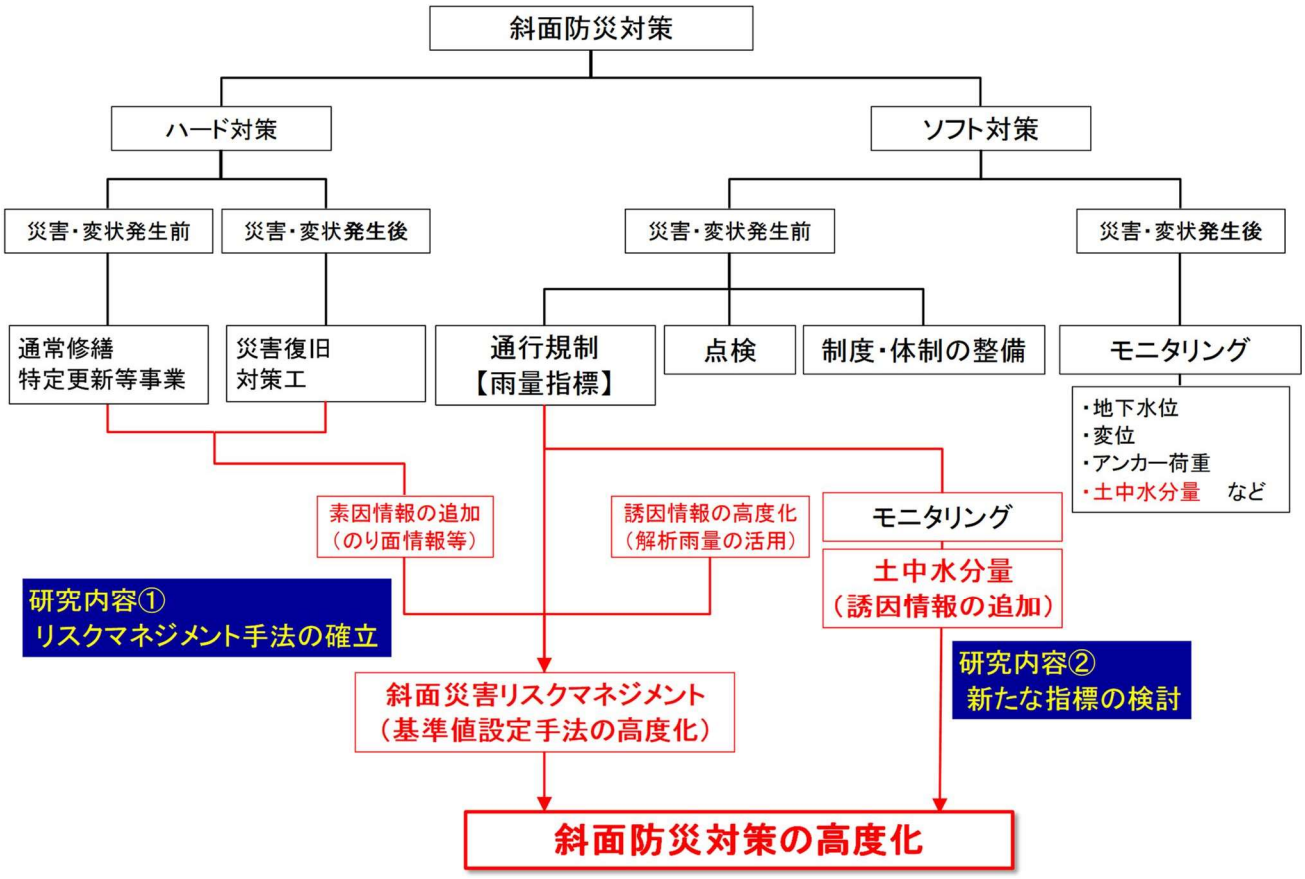


図 1.8　本研究の目的と内容

1.4 論文の構成

図 1.9 に本論文の構成を示す．第 1 章では，序論として研究の背景，研究の目的を延べ，本論文の構成を示す．第 2 章では，局所的な降雨による土砂災害の見逃しを軽減するため，約 1km 四方の単位で国土交通省より提供されている解析雨量（以下「解析雨量」とする）を活用することを念頭に，通行規制に対してその適用性を確認する．解析雨量が提供されている時間雨量のみではなく，その累積値の比較や，連続雨量での比較を行い，適用性を明らかにする．第 3 章では，“見逃し”，“空振り”それぞれに対するリスク指標を定義，定量化する．また，道路構造などの素因情報と誘因情報を用いて斜面災害発生確率を定量化する．さらに，リスク指標と斜面災害発生確率を用いて，新たな通行規制基準値設定方法を提案する．第 4 章では，現行の通行規制基準値が雨量のみを指標としていることを問題として捉え，斜面災害の発生と，より直接的に関連の深い土中水分量に着目し，これと斜面崩壊との関係を模型斜面実験により調べ，実験結果から，通行規制基準に資する新たな指標を提案する．第 5 章では，土中水分量を通行規制基準の新たな指標として適用する上で必要となる，土中水分量のモニタリング箇所の抽出方法について検討する．ここでは，崩壊時に高速道路への影響が大きい切土のり面に着目し，既存の資料を活用し，SOM(Self-Organizing Map)解析とクラスタ分析を併用することにより，優先度の高いモニタリング対象のり面を客観的に抽出する手法を提案する．第 6 章では，土中水分量を通行規制基準の新たな指標とし

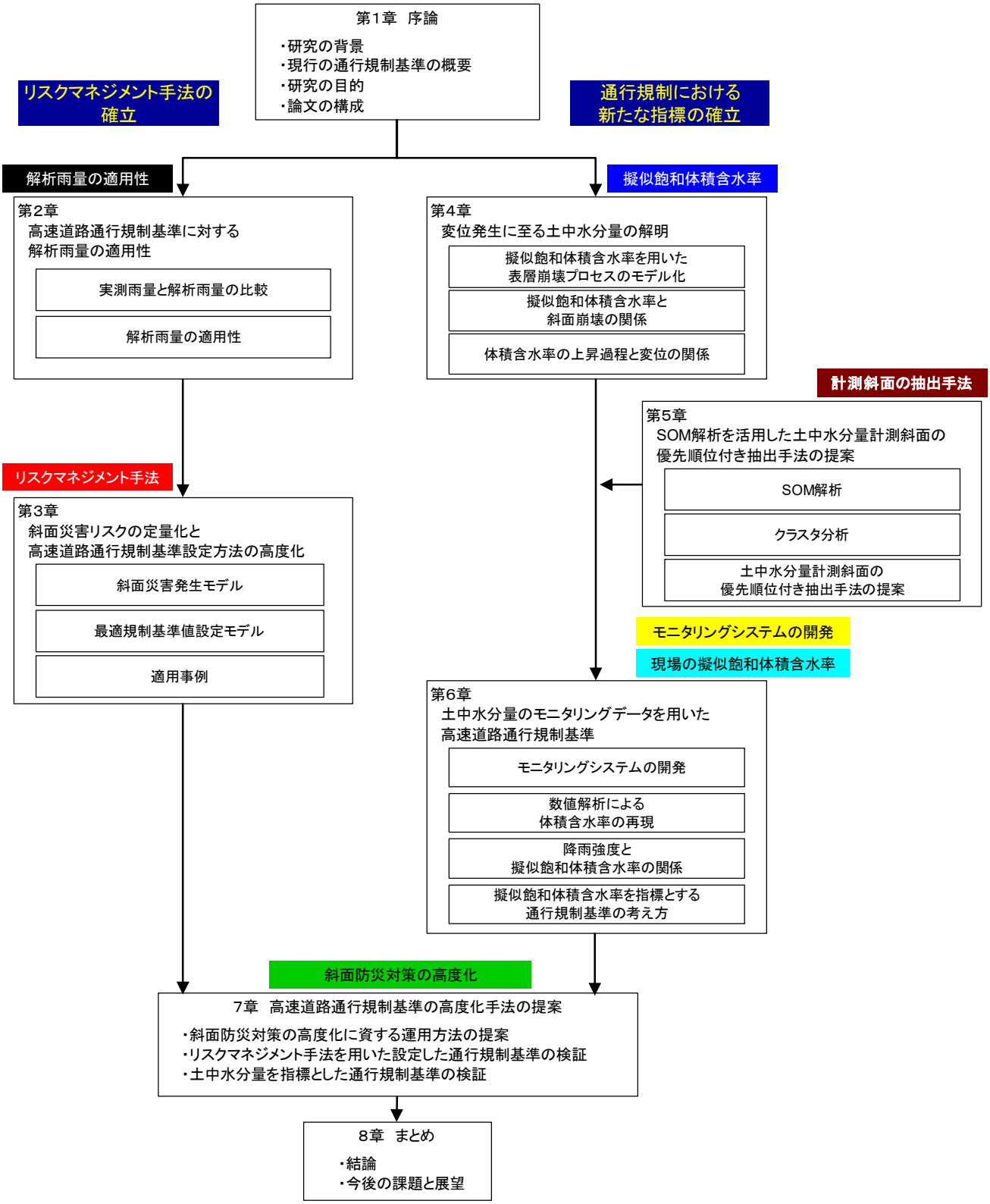

第1章　序論
・研究の背景
・現行の通行規制基準の概要
・研究の目的
・論文の構成
リスクマネジメント手法の確立
通行規制における新たな指標の確立
解析雨量の適用性
擬似飽和体積含水率
第2章
高速道路通行規制基準に対する
解析雨量の適用性
実測雨量と解析雨量の比較
解析雨量の適用性
第4章
変位発生に至る土中水分量の解明
擬似飽和体積含水率を用いた
表層崩壊プロセスのモデル化
擬似飽和体積含水率と
斜面崩壊の関係
体積含水率の上昇過程と変位の関係
計測斜面の抽出手法
第5章
SOM解析を活用した土中水分量計測斜面の
優先順位付き抽出手法の提案
SOM解析
クラスタ分析
土中水分量計測斜面の
優先順位付き抽出手法の提案
リスクマネジメント手法
第3章
斜面災害リスクの定量化と
高速道路通行規制基準設定方法の高度化
斜面災害発生モデル
最適規制基準値設定モデル
適用事例
モニタリングシステムの開発
現場の擬似飽和体積含水率
第6章
土中水分量のモニタリングデータを用いた
高速道路通行規制基準
モニタリングシステムの開発
数値解析による
体積含水率の再現
降雨強度と
擬似飽和体積含水率の関係
擬似飽和体積含水率を指標とする
通行規制基準の考え方
斜面防災対策の高度化
7章　高速道路通行規制基準の高度化手法の提案
・斜面防災対策の高度化に資する運用方法の提案
・リスクマネジメント手法を用いた設定した通行規制基準の検証
・土中水分量を指標とした通行規制基準の検証
8章　まとめ
・結論
・今後の課題と展望

図 1.9　論文の構成

て適用するために必要な，高速道路に適したモニタリングシステムを開発する．さらに，開発したシステムから得られる雨量と土中水分量のモニタリングデータを用い，土中水分量による新たな指標を用いた通行規制運用フローを提案する．第 7 章では，第３章で提案する通行規制基準値設定方法，第６章で提案する土中水分量を新たな指標とする通行規制，両者を組み合わせた高速道路斜面防災対策の高度化に資する新たな通行規制運用フローを提案する．第８章では，本研究で得られた成果を結論として総括し，今後の課題を示す．

参考文献

1）国土交通省 HP　平成 26 年 8 月豪雨による広島県で発生した土砂災害への対応状況（国土交通省砂防部）：http://www.mlit.go.jp/river/sabo/H26_hiroshima/141031_hiroshimadosekiryu.pdf
(2018.7.4 現在)

2）国土交通省 HP　今後さらに取り組むべき適応策（土砂災害）について資料 1-2：https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouiinkai/kikouhendou/18/pdf/s1-2.pdf
(2018.7.4 現在)

3）岐阜県公式ホームページ　飛騨川バス転落事故（8 月 17 日豪雨災害）（1968 年昭和 43 年）：http://www.pref.gifu.lg.jp/kurashi/bosai/shizen-saigai/11115/siryou/hidagawabasu.html
(2018.7.4 現在)

4）裁判所ウェブサイト　事件番号　調和 48(ネ)204　高裁判例集登載巻・号・頁　第 27 巻 6 号 395 頁：http://www.courts.go.jp/app/hanrei_jp/detail3?id=22963
(2018.7.4 現在)

5）建設省道政発第一六号　昭和四四年四月一日道路局長通達　異常気象時における道路通行規制について：http://wwwkt.mlit.go.jp/notice/details
(2018.7.4 現在)

6）地盤工学会 豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測編集委員会：豪雨時における斜面崩壊メカニズムおよび危険度予測，地盤工学・実務シリーズ 23，　pp.43-58，2006.7.

7）岩井重久，石黒政儀：応用水文統計学，森北出版，1970.

第２章　高速道路通行規制基準に対する解析雨量の適用性

2.1 はじめに

NEXCO 西日本では降雨による斜面災害に通行車両が巻き込まれないよう，高速道路沿線に設置した雨量計で観測される雨量に基づき，速度規制や通行止めといった通行規制を実施している．しかし，近年その増加傾向が指摘されている局地的豪雨に対して，既存の雨量計による観測だけでは，災害を引き起こすような降雨を見逃してしまうなどの懸念がある．雨量計の大幅増設が単純な対応方法ではあるが，そこに要するコスト，労力を鑑みると現実的ではない．そこで，国土交通省から提供されているレーダー・アメダス解析雨量[1)~4)]（以下解析雨量）を，既存雨量計で観測される雨量と同様に通行規制基準値の算出，通行規制基準実施・解除の判断に活用することを検討する．本章では，それらに対する解析雨量の適用性を確認することを目的に，過去に雨量計で観測された雨量と，同エリア同時刻における解析雨量とを比較し定量的な評価を行う[5)]．

2.2 本章に関連する既往の研究

NEXCO 西日本では，高速道路沿線の気象状況を把握するために高速道路沿線に気象観測施設を有している．そのうち雨量計は，区間による違いはあるものの概ね 8km に 1 箇所設置されている．一般的な積乱雲の水平方向の広がりが数 km から十数 km と言われている[6)]ことから，十分な密度で配置されているとはいい難い．一方，気象庁は，全国に 1,300 箇所余りのアメダス観測所と 20 箇所の気象レーダーを整備し，気象観測を行っている．防災に資する雨量を把握するためには，アメダスによる実測雨量データのみでは全容把握が困難なため，レーダー雨量をアメダス雨量で補正して雨量を算出する解析雨量の運用が 1991 年に開始された．運用開始当初，5km×5km の格子で提供されていた解析雨量は，その後，面的，時間的に分解能が高められ，2006 年から 1km×1km の格子で提供されるようになった．2008 年 3 月からは，全国に 26 サイトある全ての国交省レーダー雨量データの解析への利用が開始され，さらに

表 2.1　解析雨量の代表値とその代表値が意味する雨量の下限と上限の値，およびその幅

（単位：mm/h）

代表値	雨量値	幅
-1		（不明）
0	0≦　≦0.1	（無降水）
0.4	0.2≦　≦0.8	
1	0.9≦　≦1.4	1.0
2	1.5≦　≦2.4	
:	:	
77	76.5≦　≦77.4	
80	77.5≦　≦82.4	5.0
85	82.5≦　≦87.4	
:	:	
125	122.5≦　≦127.4	
130	127.5≦　≦134.9	7.5
140	135.0≦　≦144.9	10.0
:	:	
200	195.0≦　≦204.9	
255	205.0≦	—

精度向上が図られている．解析雨量は，30 分毎に直前の 60 分間累積雨量が算出され，提供される．またその値は，表 2.1 に示すように幅を持った代表値として提供されている．

解析雨量の精度について，これまでにも実測雨量との比較がなされている．玉川ら [7] は，解析雨量と気象庁アメダス降水量との比較を行い，無降水時を除いても 80%以上のデータが 1mm 以内の誤差に収まっていることを明らかにした．ただしこれは，愛知県と岐阜県の山岳部の時間雨量データを比較したものであり，NEXCO 西日本管内のものではない．また，高速道路通行規制基準への適用性を確認する上では，時間雨量の比較のみではなく，高速道路の通行規制で運用している連続雨量の比較も必要であり，既往の評価結果のみでは十分な知見があるとはいえない．

2.3 適用性の評価手法と対象データ

高速道路の通行規制基準に対して，解析雨量の適用性を明らかにする．ここでは，NEXCO 西日本の雨量計で観測された雨量と，同エリア，同時刻における解析雨量とを比較し，その差を考察することで適用性を評価する．雨量計では 5 分毎に雨量が計測されるが，収集可能であった 10 分毎の計測雨量記録を用い，正時における直前 60 分間の累積雨量を実測雨量データ（以下実測雨量）とし，正時の解析雨量と比較した．比較期間は，2008 年 1 月 1 日 0 時から 2014 年 12 月 31 日 23 時までの 7 年間とし，また，比較対象箇所は，海岸に近い箇所及び山間部を含む約 120km の一つの路線を選定し，同路線内で NEXCO 雨量計が設置されている全 15 箇所とした．なお，10 分毎の NEXCO 雨量計の実測値が一つでも欠損している実測雨量は比較対象外とした．比較対象データ数は，延べ 727,756 データであった．図 2.1 に対象とした路線と比較対象箇所（雨量計の位置）を示す．

まず，同時刻における時間雨量の相関を確認し，場所による違い，年度による違いを考察する．次に，同時刻における雨量差について，差の大きさとそのデータ数について整理し，両者の差を確認する．さらに，累積雨量に関する相関の確認を行うとともに，通行規制基準を超過する降雨イベントに対して，基準超過時刻の違いなどを確認し，通行規制基準に対する解析雨量の適用性を評価する．

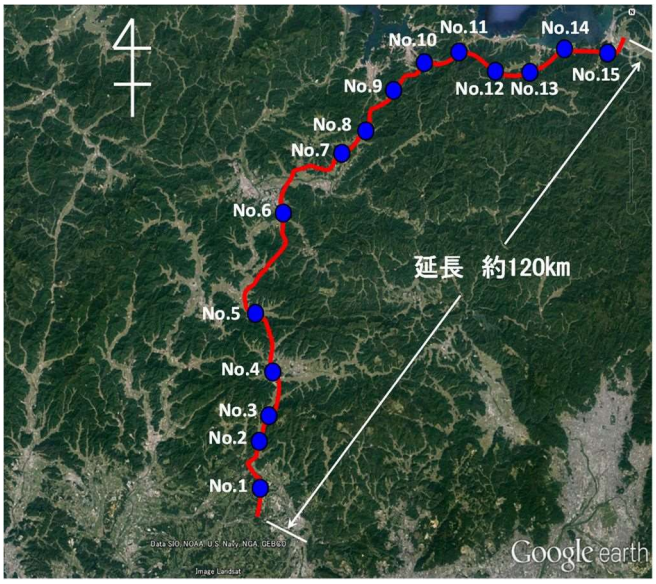


図 2.1　対象とした路線と雨量計位置

2.4 解析雨量の適用性

2.4.1 時間雨量の相関関係

実測雨量と解析雨量との関係を図 2.2, 図 2.3 および図 2.4 に示す. 図 2.2 は全データを一つの凡例で, 図 2.3 は年別に, 図 2.4 は降雨強度別に凡例を変えて表示している. さらに各箇所における実測雨量と解析雨量の相関係数を, 年ごとに図 2.5 及び表 2.2 に, そして降雨強度ごとに図 2.6 及び表 2.3 に示す. 図 2.2 の近似直線の傾きが約 0.9 であることから, 全体として解析雨量が実測雨量より小さくなっていることが分かる. その傾向について, 図 2.3 より年による違いはあまり見られず, また図 2.4 より, 降雨強度が大きいほどその傾向が強くなることが分かる. また図 2.5, 表 2.2 より, 相関係数の年による違い, 箇所による違いも大きくなく, また, 全年を対象とした最小値は, No.12 の 0.86 であり, 両者に高い相関があるといえる. しかし, 図 2.6 及び表 2.3 からは, いずれの箇所においても 10mm/h 以上の降雨強度では相関が高くないことが分かる. すなわち, 実測雨量と解析雨量は, 全体的に高い相関があるものの, 10mm/h 以上における時間雨量の誤差が小さくない. ここで, 両者のヒストグラムを図 2.7 に示す. 同図から, 約 730,000 の全データ数と比較すると, それぞれのデータ区間でのデータ数の差は, 全体に占める率としては 0.01%以下の差であり大きくないことが分かる. これらから, 解析雨量の発生頻度は実測雨量と同等であると評価でき, ある雨量に対する発生頻度を算出することに対して, 解析雨量は適用性があると判断できる.

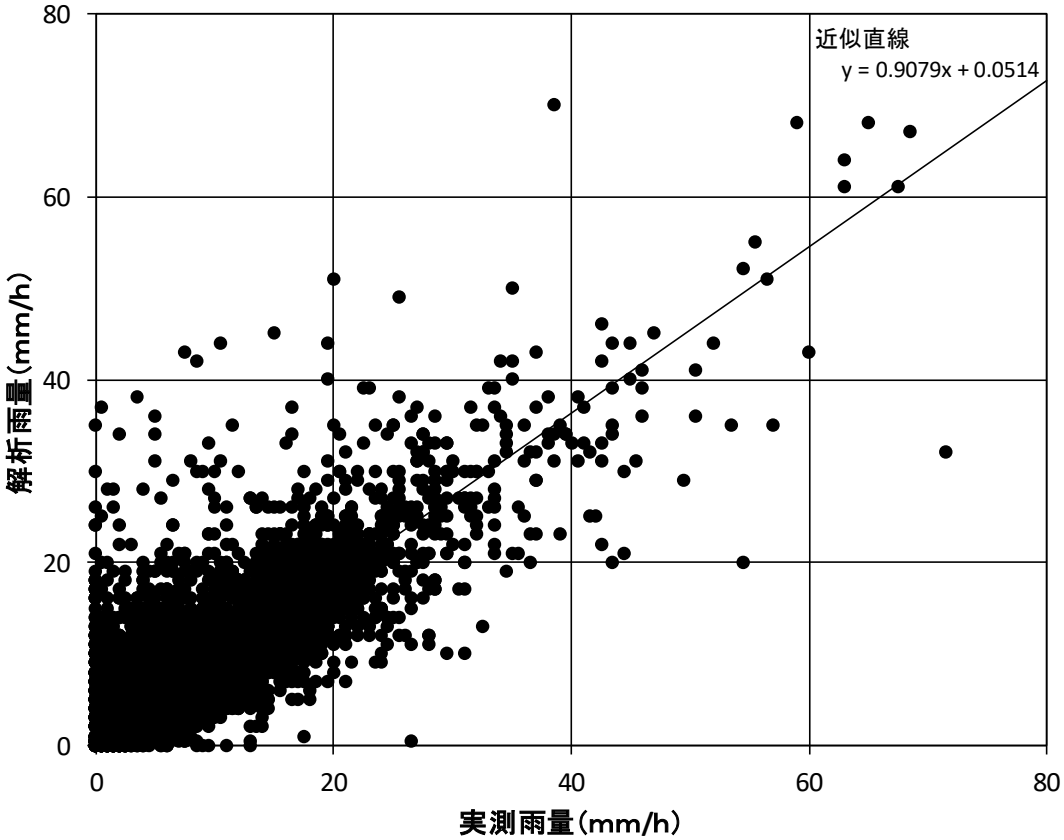


図 2.2　実測雨量と解析雨量の関係（全データ）

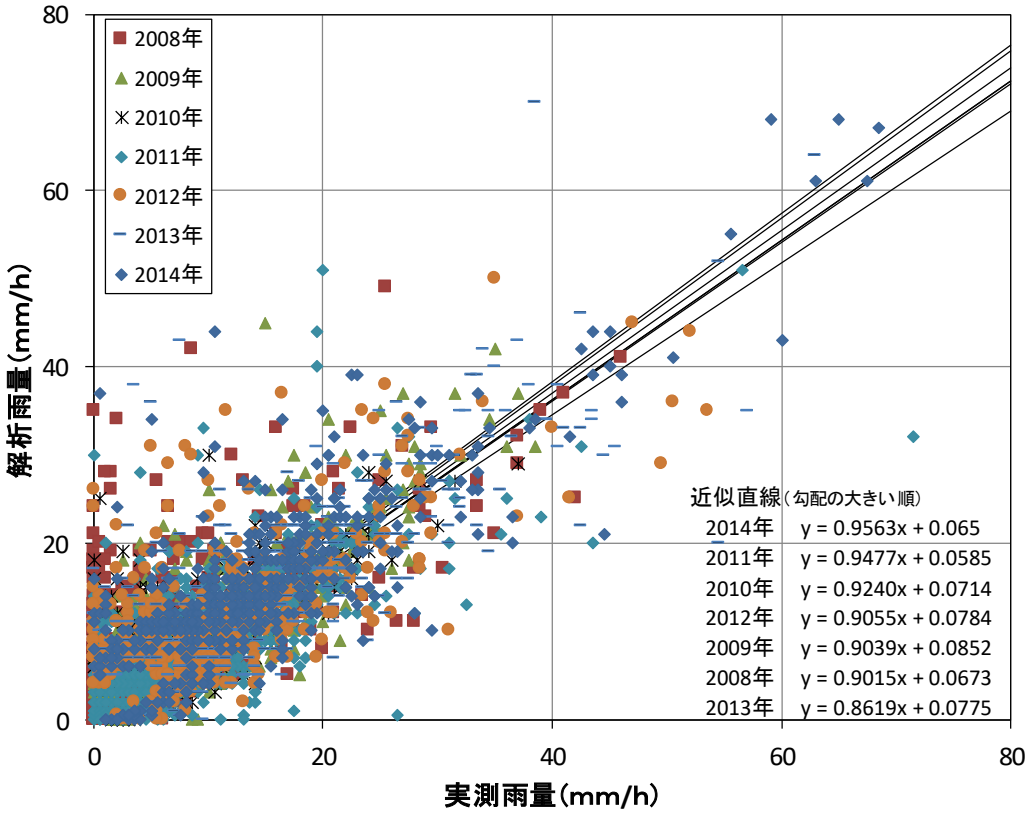


図 2.3　実測雨量と解析雨量の関係（年別）

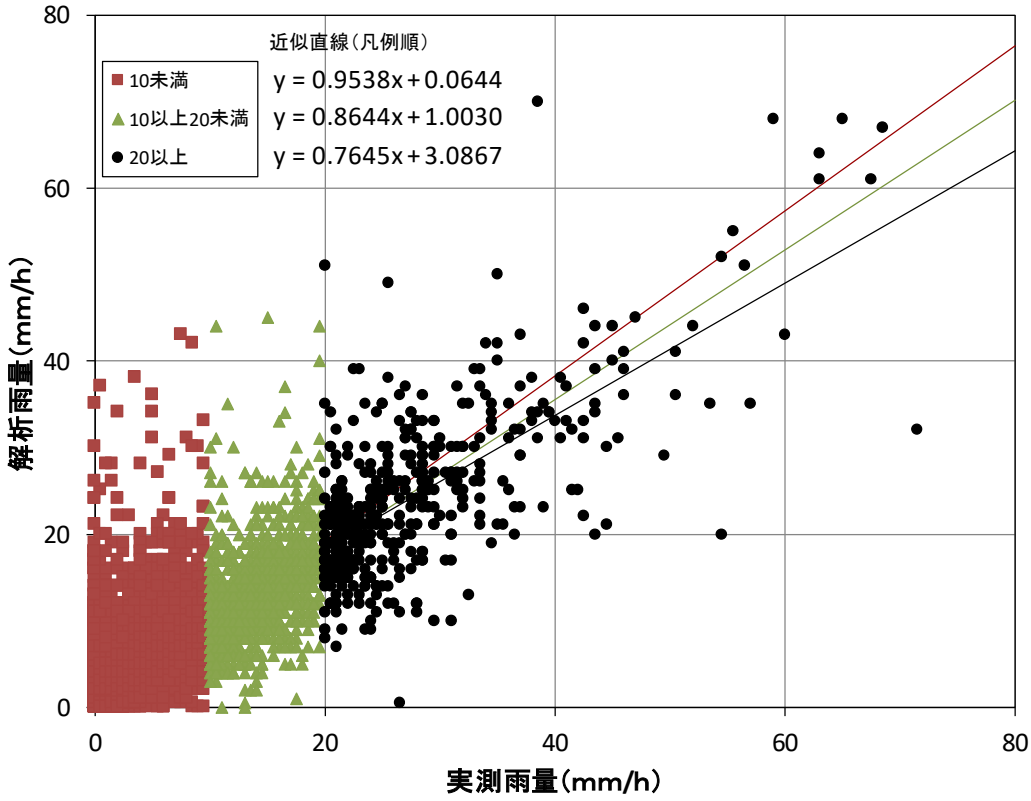


図 2.4　実測雨量と解析雨量の関係（降雨強度別）

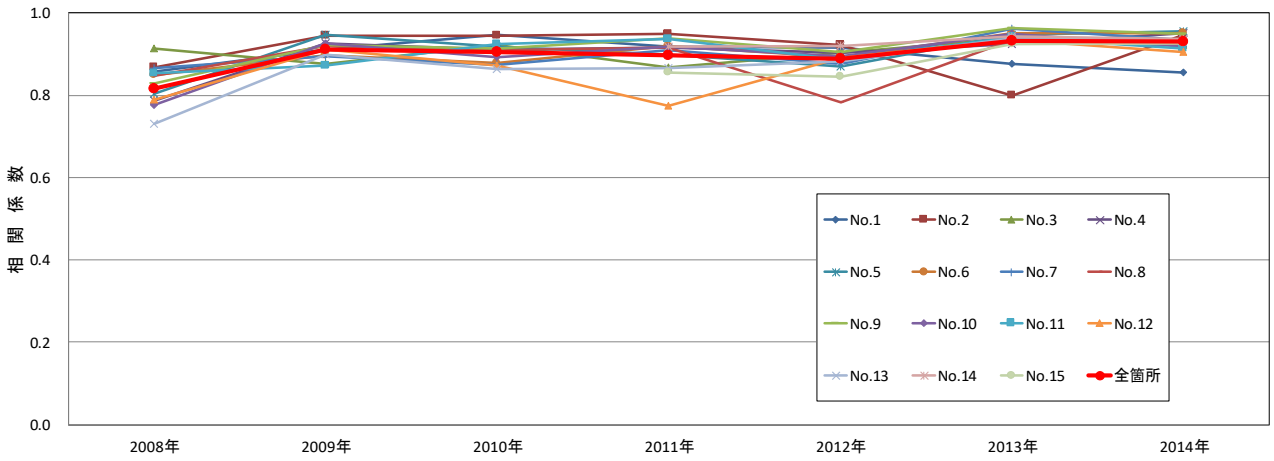


図 2.5　実測雨量と解析雨量の関係（箇所別年別相関係数）

表 2.2　箇所別年別相関係数

	No.1		No.2		No.3		No.4	
	相関係数	データ数	相関係数	データ数	相関係数	データ数	相関係数	データ数
2008年	0.86	8,743	0.87	6,107	0.91	8,743	0.79	8,742
2009年	0.91	8,719	0.94	8,717	0.88	8,718	0.93	8,718
2010年	0.95	8,751	0.94	8,749	0.92	8,752	0.91	8,750
2011年	0.92	8,732	0.95	8,736	0.87	8,733	0.91	8,733
2012年	0.92	4,393	0.92	5,113	0.90	5,112	0.90	5,113
2013年	0.88	5,122	0.80	3,144	0.94	5,120	0.92	5,125
2014年	0.85	5,122	0.95	3,144	0.92	5,120	0.95	5,125
全年	0.89	52,597	0.93	49,291	0.91	53,902	0.91	53,905
	No.5		No.6		No.7		No.8	
	相関係数	データ数	相関係数	データ数	相関係数	データ数	相関係数	データ数
2008年	0.80	8,741	0.85	6,008	0.86	8,741	0.85	8,741
2009年	0.95	8,719	0.90	8,719	0.89	8,719	0.92	8,719
2010年	0.92	8,752	0.88	8,750	0.87	8,750	0.91	8,749
2011年	0.90	5,885	0.92	8,732	0.91	8,731	0.92	8,732
2012年	0.87	5,114	0.89	5,114	0.88	5,113	0.78	3,289
2013年	0.95	5,120	0.95	5,124	0.96	5,126	0.94	2,973
2014年	0.95	5,120	0.95	5,124	0.94	5,126	0.92	2,973
全年	0.92	51,056	0.92	51,172	0.91	53,903	0.90	49,927
	No.9		No.10		No.11		No.12	
	相関係数	データ数	相関係数	データ数	相関係数	データ数	相関係数	データ数
2008年	0.83	8,741	0.78	8,740	0.85	8,741	0.79	8,740
2009年	0.92	8,714	0.92	8,716	0.87	7,427	0.91	8,719
2010年	0.91	7,125	0.89	8,751	0.92	8,751	0.87	8,751
2011年	0.94	6,577	0.92	8,732	0.94	8,732	0.77	8,732
2012年	0.91	5,113	0.89	5,113	0.89	5,113	0.89	5,113
2013年	0.96	5,118	0.95	5,121	0.94	5,121	0.93	5,121
2014年	0.95	5,118	0.92	5,121	0.91	5,121	0.91	5,121
全年	0.92	50,109	0.90	53,879	0.90	52,601	0.86	53,900
	No.13		No.14		No.15		全箇所	
	相関係数	データ数	相関係数	データ数	相関係数	データ数	相関係数	データ数
2008年	0.73	8,740	—	0	—	0	0.82	108,268
2009年	0.90	8,649	—	0	—	0	0.91	111,973
2010年	0.86	8,751	—	0	—	0	0.90	112,132
2011年	0.87	8,733	0.92	4,618	0.86	4,623	0.90	117,761
2012年	0.88	5,114	0.92	5,098	0.85	5,112	0.89	74,137
2013年	0.94	5,124	0.94	5,115	0.92	5,122	0.93	72,696
2014年	0.94	5,124	0.94	5,115	0.92	5,122	0.93	130,789
全年	0.88	53,833	0.93	23,530	0.90	23,565	0.90	727,756

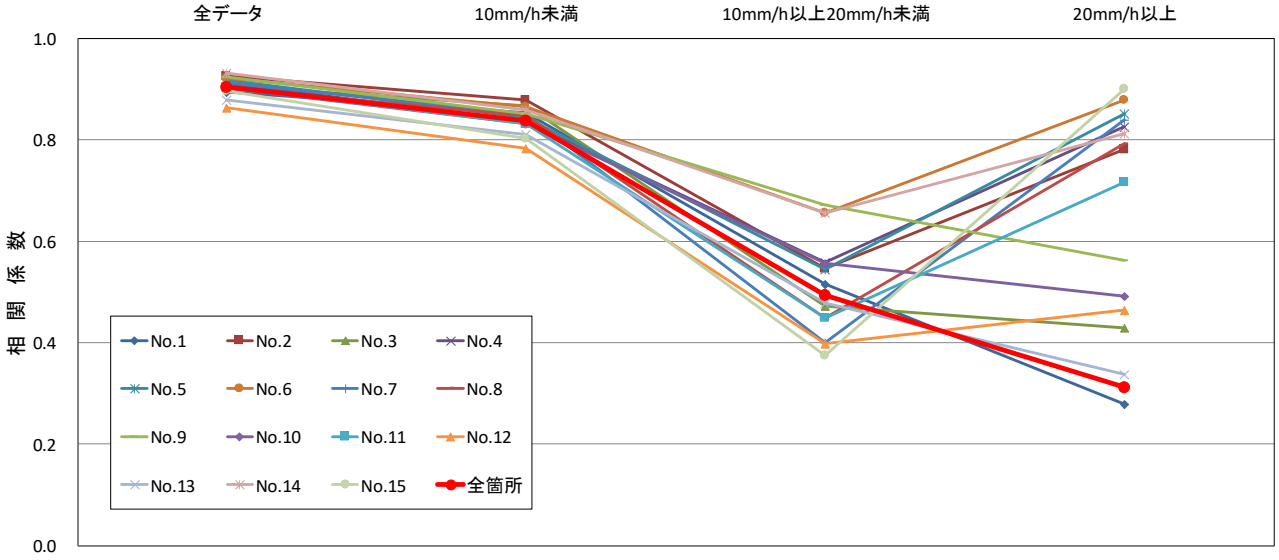


図 2.6　実測雨量と解析雨量の関係（箇所別降雨強度別相関係数）

表 2.3　箇所別降雨強度別相関係数

	No.1		No.2		No.3		No.4	
（単位）mm/h	相関係数	データ数	相関係数	データ数	相関係数	データ数	相関係数	データ数
10未満	0.85	53,045	0.88	49,166	0.87	53,751	0.84	53,718
10以上20未満	0.52	114	0.55	92	0.47	124	0.56	146
20以上	0.28	24	0.78	33	0.43	27	0.83	41
全強度	0.89	53,183	0.93	49,291	0.91	53,902	0.91	53,905
	No.5		No.6		No.7		No.8	
（単位）mm/h	相関係数	データ数	相関係数	データ数	相関係数	データ数	相関係数	データ数
10未満	0.84	50,915	0.86	51,034	0.85	53,720	0.85	49,805
10以上20未満	0.54	107	0.65	113	0.40	158	0.45	98
20以上	0.85	34	0.88	25	0.84	25	0.79	24
全強度	0.92	51,056	0.92	51,172	0.91	53,903	0.90	49,927
	No.9		No.10		No.11		No.12	
（単位）mm/h	相関係数	データ数	相関係数	データ数	相関係数	データ数	相関係数	データ数
10未満	0.85	49,910	0.83	53,697	0.83	52,437	0.78	53,702
10以上20未満	0.67	156	0.56	147	0.45	134	0.40	159
20以上	0.56	43	0.49	35	0.72	30	0.46	39
全強度	0.92	50,109	0.90	53,879	0.90	52,601	0.86	53,900
	No.13		No.14		No.15		全箇所	
（単位）mm/h	相関係数	データ数	相関係数	データ数	相関係数	データ数	相関係数	データ数
10未満	0.81	53,681	0.86	23,422	0.80	23,458	0.84	725,461
10以上20未満	0.48	127	0.66	90	0.38	81	0.49	1,846
20以上	0.34	25	0.81	18	0.90	26	0.70	449
全強度	0.88	53,833	0.93	23,530	0.90	23,565	0.90	727,756

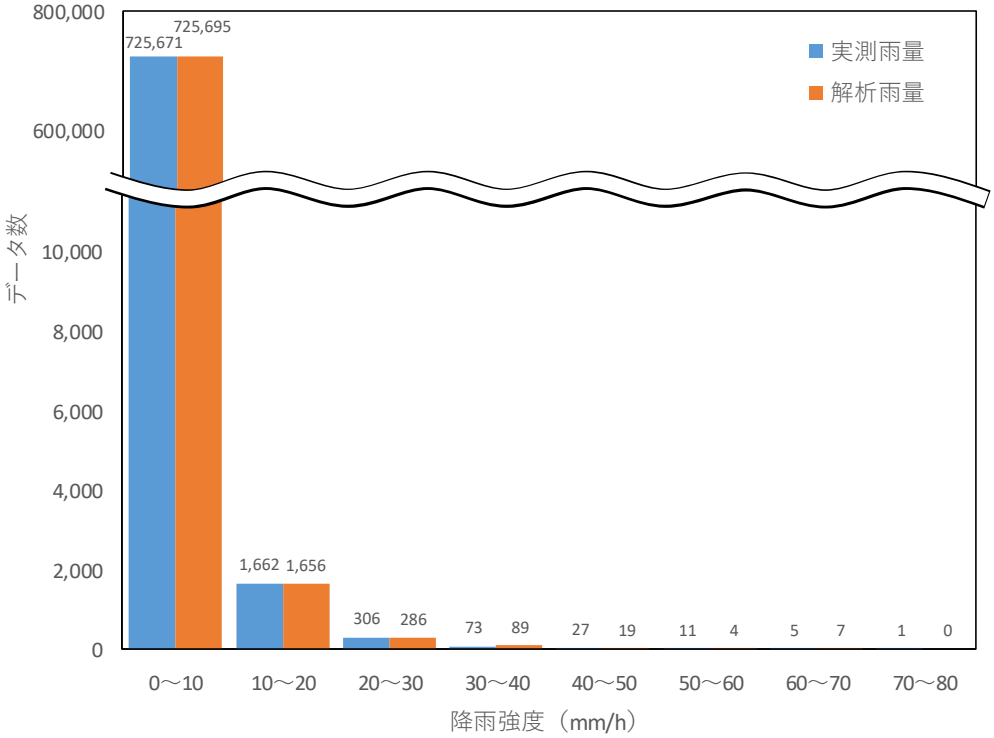


図 2.7　実測雨量と解析雨量のヒストグラム

2.4.2 同時刻における時間雨量の差

高速道路通行規制基準への解析雨量の適用性を確認するため，実測雨量と解析雨量の差について詳細に把握する．同時刻における両者の差を明らかにする．表 2.4 に示すように箇所毎に比較対象の全データを並べ，実測雨量と解析雨量の差を集計する．ここでの差は，解析雨量から実測雨量を引いたものであり，差がプラスとなるのは解析雨量が実測雨量より大きいことを意味する．一つの雨量計（No.1）の集計結果を表 2.5 に示す．差が±1.0mm/h 以内のデータ数を，全データ数で除した±1mm/h 以内データ数率を同表右下に示しているが，98.77%と非常に高い数値である．同様に集計し，箇所毎に累積雨量差と±1mm 以内のデータ数率を集約し表 2.6 に示す．ほとんど全ての箇所，すべての年において 96%以上のデータが± 1 mm/h 以内の差に入っており，全箇所全年の平均が 98.11%であり，誤差が非常に小さいことを示している．ただしこれは全データを対象としており，無降雨時のデータをカウントすることによって過大評価していることが懸念される．また，通行規制指標としての適用性を評価する上では，降雨時の誤差が重要である．そこで，実測雨量が 0mm/h であった時刻を除いた比較を行った．結果を表 2.7 に示す．先ほどより低下するものの，全箇所全年平均値の±1mm/h 以内の差が 83.67%であり，誤差が少ないことが分かる．

同時刻の実測雨量と解析雨量を比較した結果，無降雨の状態を除いても 8 割以上が±1mm/h 以内の差に収まるという高い精度を確認した．また前項では，両者の高い相関係数と，ヒストグラムからその発生頻度が類似していることを確認した．ただし，これまでの確認結果において，頻度は少ないものの，大きな誤差がある箇所，時刻があることも確認された．解析雨量の通行規制基準としての適用性を評価する

ためには，このような発生頻度は少ないが誤差の大きい解析雨量の影響を明らかにする必要がある．次項では，時間雨量で誤差の大きい解析雨量が，通行規制指標へ与える影響を評価するため，時間雨量単独ではなく，時間雨量の累積値で両者を比較する．

表 2.4　時刻別実測雨量と解析雨量の差（No.1）

箇所	年/月/日	時刻	実測雨量(a)		解析雨量(b)		(b) − (a)	
			時間雨量	累積雨量	時間雨量	累積雨量	時間雨量差	累積雨量差
No.1	2008/1/1	10:00	0	0.0	0	0.0	0.0	0.0
No.1	2008/1/1	11:00	0	0.0	0	0.0	0.0	0.0
No.1	2008/1/1	12:00	0	0.0	0	0.0	0.0	0.0
No.1	2008/1/1	13:00	0	0.0	0	0.0	0.0	0.0
No.1	2008/1/1	14:00	0	0.0	0	0.0	0.0	0.0
No.1	2008/1/1	15:00	0	0.0	0	0.0	0.0	0.0
No.1	2008/1/1	16:00	0	0.0	0	0.0	0.0	0.0
No.1	2008/1/1	17:00	0	0.0	0	0.4	0.4	0.4
No.1	2008/1/1	18:00	0	0.0	0	0.4	0.0	0.4
No.1	2008/1/1	19:00	0	0.0	0	0.4	0.0	0.4
No.1	2008/1/1	20:00	0	0.0	0	0.4	0.0	0.4
No.1	2008/1/1	21:00	0	0.0	0	0.4	0.0	0.4
No.1	2008/1/1	22:00	0	0.0	0	0.4	0.0	0.4
No.1	2008/1/1	23:00	0	0.0	0	0.4	0.0	0.4
No.1	2008/1/2	0:00	0	0.0	0	0.4	0.0	0.4
No.1	2008/1/2	1:00	0	0.0	0	0.4	0.0	0.4
No.1	2014/12/31	18:00	4	9,849.5	4	11,627.6	0.0	1,778.1
No.1	2014/12/31	19:00	0.5	9,850.0	0	11,627.6	−0.5	1,777.6
No.1	2014/12/31	20:00	0	9,850.0	0	11,627.6	0.0	1,777.6
No.1	2014/12/31	21:00	0	9,850.0	0.4	11,628.0	0.4	1,778.0
No.1	2014/12/31	22:00	0	9,850.0	0	11,628.0	0.0	1,778.0
No.1	2014/12/31	23:00	0	9,850.0	0	11,628.0	0.0	1,778.0

表 2.5　時刻別雨量差集計結果（No.1）

差 (D)	データ数 (N)	(D) × (N)	差 (D)	データ数 (N)	(D) × (N)
−34.5	1	−34.5	1.5	124	186.0
−17.0	1	−17.0	2.0	93	186.0
−14.5	1	−14.5	2.5	31	77.5
−14.0	2	−28.0	3.0	27	81.0
−11.5	1	−11.5	3.5	13	45.5
−10.0	1	−10.0	4.0	18	72.0
−9.5	1	−9.5	4.5	4	18.0
−9.0	1	−9.0	5.0	5	25.0
−8.5	1	−8.5	5.5	7	38.5
−7.5	2	−15.0	6.0	6	36.0
−7.0	2	−14.0	6.5	6	39.0
−6.5	1	−6.5	7.0	1	7.0
−6.0	4	−24.0	7.5	2	15.0
−5.5	4	−22.0	8.0	2	16.0
−5.0	4	−20.0	8.5	4	34.0
−4.6	1	−4.6	9.0	1	9.0
−4.5	7	−31.5	9.5	1	9.5
−4.0	14	−56.0	10.0	1	10.0
−3.5	14	−49.0	10.5	2	21.0
−3.0	20	−60.0	11.0	1	11.0
−2.6	1	−2.6	11.5	1	11.5
−2.5	29	−72.5	12.0	1	12.0
−2.1	4	−8.4	13.5	1	13.5
−2.0	65	−130.0	15.5	1	15.5
−1.6	6	−9.6	16.0	1	16.0
−1.5	85	−127.5	19.0	1	19.0
−1.1	23	−25.3	20.5	1	20.5
−1.0	218	−218.0	21.5	1	21.5
−0.6	188	−112.8	23.5	1	23.5
−0.5	1,096	−548.0	36.5	1	36.5
−0.1	889	−88.9			
0.0	44,811	0.0			
0.4	4,253	1,701.2			
0.5	668	334.0	計	53,183	1,778.0
1.0	405	405.0	±1%以内データ数率		98.77%

表 2.6　時刻別雨量差年別箇所別集計

箇所 / 年	No.1			No.2			No.3			No.4		
(単位)mm/h	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率
2008年	8,743	407.9	98.87%	6,107	174.0	98.85%	8,743	372.3	98.97%	8,742	362.5	98.63%
2009年	8,719	335.2	99.04%	8,717	254.2	99.14%	8,718	395.6	98.75%	8,718	353.3	98.94%
2010年	8,751	298.8	98.87%	8,749	89.8	98.63%	8,752	318.6	98.63%	8,750	238.2	98.80%
2011年	8,732	14.4	98.71%	8,736	186.5	98.52%	8,733	266.1	98.61%	8,733	298.3	98.67%
2012年	4,393	166.7	98.16%	5,113	240.4	98.26%	5,112	260.7	98.73%	5,113	204.9	98.42%
2013年	5,122	176.2	98.36%	3,144	201.2	98.73%	5,120	254.0	97.95%	5,125	152.7	97.78%
2014年	8,723	378.8	98.91%	8,725	223.4	98.54%	8,724	335.4	98.74%	8,724	230.0	98.83%
全年計	53,183	1,778.0	98.77%	49,291	1,369.5	98.68%	53,902	2,202.7	98.66%	53,905	1,839.9	98.65%
箇所 / 年	No.5			No.6			No.7			No.8		
(単位)mm/h	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率
2008年	8,741	483.9	98.78%	6,008	369.8	98.82%	8,741	395.3	98.34%	8,741	456.2	98.38%
2009年	8,719	444.1	98.92%	8,719	492.8	98.49%	8,719	327.3	98.11%	8,719	464.3	98.36%
2010年	8,752	444.7	98.79%	8,750	443.4	98.81%	8,750	212.4	97.99%	8,749	317.6	98.49%
2011年	5,885	461.0	98.32%	8,732	338.2	98.17%	8,731	−5.9	96.94%	8,732	217.3	97.72%
2012年	5,114	263.9	98.59%	5,114	331.0	98.47%	5,113	284.0	98.26%	3,289	137.0	98.75%
2013年	5,120	197.8	98.24%	5,124	228.9	98.28%	5,126	136.2	97.83%	2,973	69.6	96.87%
2014年	8,725	312.9	98.52%	8,725	466.7	98.52%	8,723	158.2	97.63%	8,724	432.9	98.23%
全年計	51,056	2,608.3	98.63%	51,172	2,670.8	98.51%	53,903	1,507.5	97.85%	49,927	2,094.9	98.19%
箇所 / 年	No.9			No.10			No.11			No.12		
(単位)mm/h	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率
2008年	8,741	1,350.0	97.09%	8,740	809.7	97.20%	8,741	480.8	97.94%	8,740	654.6	96.68%
2009年	8,714	810.8	97.92%	8,716	564.4	97.61%	7,427	586.1	98.24%	8,719	477.5	96.93%
2010年	7,125	699.5	98.36%	8,751	523.6	97.70%	8,751	463.8	98.46%	8,751	517.6	97.47%
2011年	6,577	610.5	97.70%	8,732	441.6	97.58%	8,732	396.6	97.90%	8,732	−50.6	95.59%
2012年	5,113	438.6	98.32%	5,113	365.7	97.40%	5,113	245.5	98.40%	5,113	241.9	98.10%
2013年	5,118	365.5	97.91%	5,121	311.4	97.07%	5,121	130.9	97.70%	5,121	81.6	96.70%
2014年	8,721	487.6	98.34%	8,706	451.1	97.60%	8,716	535.3	98.22%	8,724	253.7	97.20%
全年計	50,109	4,762.5	97.92%	53,879	3,467.5	97.48%	52,601	2,839.0	98.13%	53,900	2,176.3	96.89%
箇所 / 年	No.13			No.14			No.15			平均		
(単位)mm/h	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率
2008年	8,740	1,053.7	96.99%	—	—	—	—	—	—	8,328	567.0	98.12%
2009年	8,649	821.1	97.35%	—	—	—	—	—	—	8,613	486.7	98.29%
2010年	8,751	772.6	97.61%	—	—	—	—	—	—	8,626	410.8	98.35%
2011年	8,733	828.4	96.62%	4,618	489.0	96.58%	4,623	451.4	96.08%	8,348	307.9	97.77%
2012年	5,114	517.6	97.54%	5,098	360.2	97.80%	5,112	379.8	97.63%	4,917	284.5	98.26%
2013年	5,124	443.6	97.40%	5,115	429.4	97.93%	5,122	317.7	97.81%	4,805	211.5	97.76%
2014年	8,722	782.6	97.67%	8,699	679.5	97.95%	8,708	420.8	97.93%	8,722	388.4	98.23%
全年計	53,833	5,219.6	97.29%	23,530	1,958.1	97.65%	23,565	1,569.7	97.48%	7,480	379.5	98.11%

表 2.7　時刻別雨量差年別箇所別集計（実測 0 を除く）

箇所 / 年	No.1			No.2			No.3			No.4		
(単位)mm/h	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率
2008年	636	−6.1	86.95%	538	−132.4	90.71%	707	−15.1	88.68%	762	−79.5	86.22%
2009年	664	−25.6	89.01%	741	−84.4	90.42%	730	13.8	86.03%	783	−47.7	89.66%
2010年	726	−22.8	87.33%	787	−236.6	85.26%	785	−58.6	86.11%	819	−123.2	88.40%
2011年	1,179	−267.8	91.01%	749	−131.7	83.71%	729	−54.9	84.64%	795	−45.3	85.79%
2012年	348	−35.7	78.16%	387	4.0	78.81%	364	18.9	84.89%	392	−34.5	82.40%
2013年	446	−54.8	84.08%	241	31.2	86.72%	505	39.0	81.39%	522	−45.3	79.69%
2014年	602	74.6	85.55%	741	−73.2	84.48%	703	4.8	85.92%	772	−33.6	87.56%
全年計	4,601	−338.2	87.22%	4,184	−623.1	85.95%	4,523	−52.1	85.61%	4,845	−409.1	86.27%
箇所 / 年	No.5			No.6			No.7			No.8		
(単位)mm/h	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率
2008年	786	−12.3	87.91%	700	−81.2	92.71%	1,099	−111.7	88.63%	1,087	−64.6	88.13%
2009年	777	−22.3	89.19%	865	37.2	85.55%	968	−206.3	85.02%	1,002	−1.7	86.13%
2010年	783	7.5	88.25%	945	16.0	89.95%	1,087	−212.0	84.91%	1,093	−145.2	88.47%
2011年	557	140.6	84.20%	978	−97.8	85.17%	1,088	−446.1	77.02%	1,172	−195.9	83.70%
2012年	354	11.5	82.20%	381	65.2	82.94%	396	29.8	81.31%	226	3.2	83.63%
2013年	495	−16.4	83.23%	487	15.9	83.37%	536	−71.4	80.78%	379	−41.8	75.99%
2014年	749	6.3	83.85%	904	125.1	86.73%	1,065	−176.2	81.50%	1,042	24.5	86.85%
全年計	4,501	114.9	86.09%	5,260	80.4	87.03%	6,239	−1,193.9	83.04%	6,001	−421.5	85.84%
箇所 / 年	No.9			No.10			No.11			No.12		
(単位)mm/h	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率
2008年	827	461.6	77.15%	1,152	86.9	82.73%	1,030	−140.6	84.76%	1,151	−69.6	78.71%
2009年	914	199.0	82.49%	1,042	16.0	81.77%	736	−5.9	87.09%	1,084	−87.3	77.77%
2010年	812	182.5	88.67%	1,217	−8.2	84.72%	1,061	−87.8	88.31%	1,184	−62.8	83.53%
2011年	746	196.1	81.90%	1,301	−99.4	85.32%	1,108	−127.0	84.57%	1,298	−587.0	72.57%
2012年	387	168.2	80.62%	452	87.7	75.22%	344	−44.5	79.65%	409	−7.3	78.24%
2013年	546	129.5	82.78%	572	51.0	77.10%	514	−121.3	79.38%	570	−147.2	72.81%
2014年	1,089	8.8	88.15%	1,056	−118.9	82.86%	937	28.7	84.74%	1,070	−215.3	79.07%
全年計	5,321	1,345.7	83.57%	6,792	15.1	82.48%	5,730	−498.4	84.89%	6,766	−1,176.5	77.76%
箇所 / 年	No.13			No.14			No.15			平均		
(単位)mm/h	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率	データ数	累積雨量差	±1%以内率
2008年	1,071	220.7	80.49%	—	—	—	—	—	—	888	4.3	85.68%
2009年	968	238.9	79.44%	—	—	—	—	—	—	867	1.8	85.35%
2010年	1,132	107.0	84.45%	—	—	—	—	—	—	956	−49.6	86.80%
2011年	1,185	151.4	78.40%	622	204.4	79.10%	617	81.8	77.47%	991	−120.4	82.92%
2012年	409	223.6	72.37%	423	86.6	77.30%	436	81.8	76.83%	373	37.7	80.03%
2013年	518	164.2	77.61%	540	186.4	83.15%	562	45.5	83.99%	487	−5.2	80.38%
2014年	975	233.8	81.64%	994	161.9	83.50%	1,048	−96.8	84.73%	900	−8.5	84.53%
全年計	6,258	1,339.6	80.06%	2,579	639.3	81.35%	2,663	112.3	81.60%	780	−20.0	83.67%

2.4.3 時間雨量の累積値での相関関係

これまで，実測雨量と解析雨量について，個々の時間雨量で比較を行い，高い相関があること，その多くが±1mm/h 以内の誤差に収まっていることを確認したが，頻度は多くないものの，誤差の大きい時刻があることも確認した．NEXCO 西日本が実施する通行規制基準は連続雨量基準と組合せ雨量基準の二種類である．連続雨量基準は，雨量の累積値に対して設定される基準で，組合せ雨量基準は，連続雨量の基準と，その時に観測される時間雨量を組み合わせて設定される基準である．今回比較の対象としている区間においては，連続雨量で概ね 200mm，組合せ雨量基準の連続雨量が 120mm，時間雨量が 40mm 程度である．そこでここでは，通行規制基準に対する解析雨量の適用性を評価するため，時間雨量の累積値としてまとまった雨量に対する相関を確認する．通行規制基準への適用性評価が目的であるため，ある程度大きな雨量に着目することとし，ここでは実測雨量が 100mm 以上の連続雨量のみを抽出し，同降雨が観測された時間帯と同じ時間帯の解析雨量の累積値を比較した．対象区間内 15 箇所 7 年間の実測雨量の中で，100mm 以上を観測した降雨は延べ 136 回あった．

比較結果を図 2.8 に示す．あわせて，両者の相関係数を表 2.8 に示す．表 2.8 には，7 年間の全時間雨量に対する相関係数もあわせて示した．表 2.8 より，ほとんど全ての箇所で，累積雨量の相関係数が高くなっており，全データ対象の相関係数は，全時間雨量の比較から得られるものより連続雨量で得られるものの方が高いことが分かった．このことより，時間雨量単独より，時間雨量を累積することによって相関が高くなることが分かった．また，ここで比較した累積雨量の降雨強度別のヒストグラムを図 2.9 に，実測雨量と解析雨量の差のヒストグラムを図 2.10 に示す．両図より，両者に大きな差がある連続雨量があることが分かるが，その数は少なく，また両者の発生頻度は類似しており，時間雨量同様，発生頻度，すなわち発生確率を求めることに対して適用性があると判断できる．

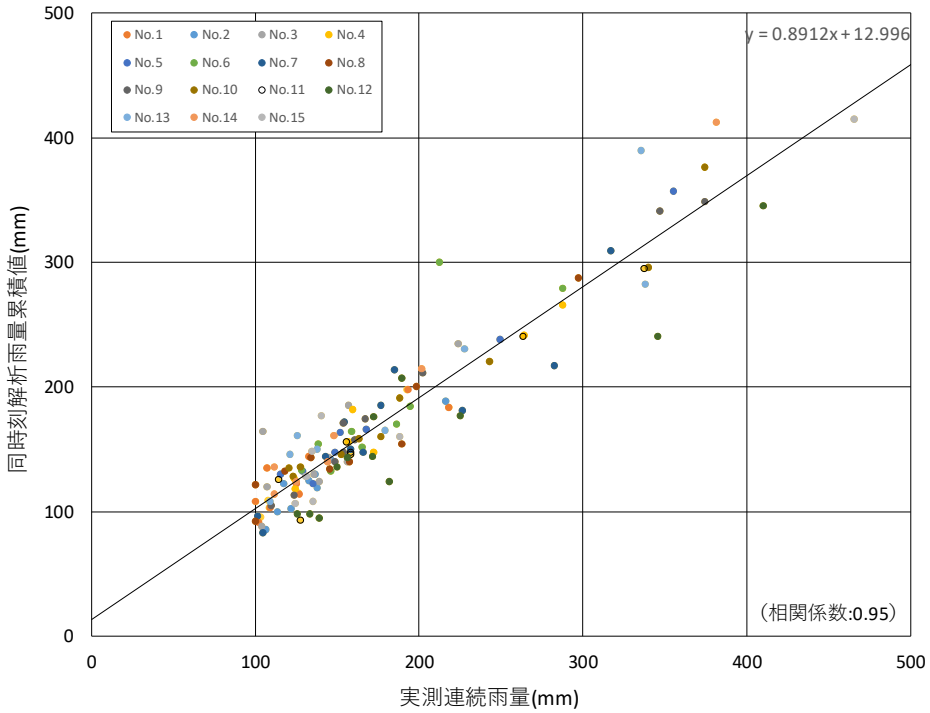


図 2.8　累積雨量の相関関係

表 2.8　累積雨量の相関係数

	累積雨量での比較		時間雨量での比較	
	データ数	相関係数	データ数	相関係数
No.1	9	0.91	52,597	0.89
No.2	9	0.95	49,291	0.93
No.3	11	0.85	53,902	0.91
No.4	7	0.98	53,905	0.91
No.5	8	0.97	51,056	0.92
No.6	10	0.87	51,172	0.92
No.7	11	0.93	53,903	0.91
No.8	9	0.94	49,927	0.90
No.9	10	0.99	50,109	0.92
No.10	10	0.98	53,879	0.90
No.11	7	0.98	52,601	0.90
No.12	12	0.94	53,900	0.86
No.13	8	0.95	53,833	0.88
No.14	7	0.99	23,530	0.93
No.15	8	0.98	23,565	0.90
全データ	136	0.95	727,756	0.90

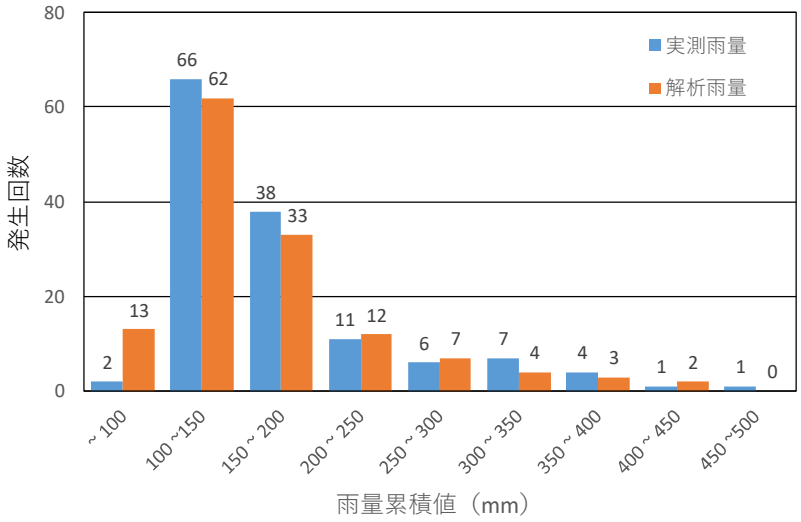


図 2.9　累積雨量の発生回数のヒストグラム

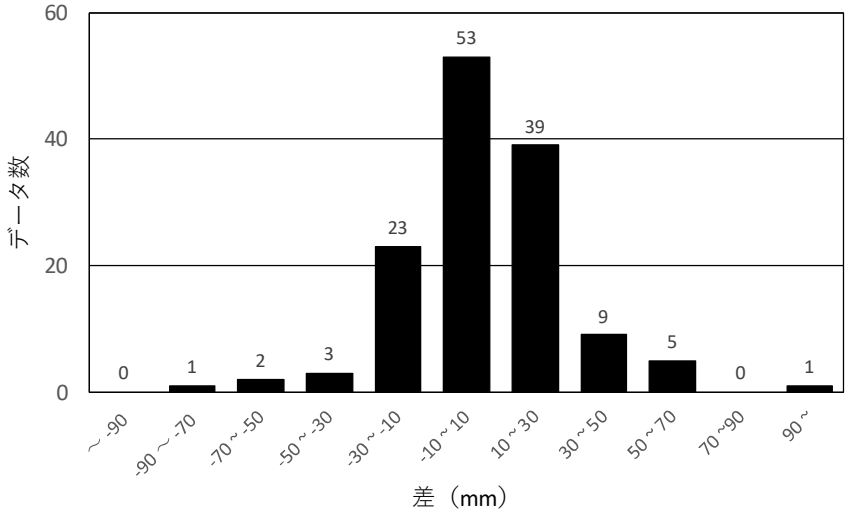


図 2.10　累積雨量の差のヒストグラム

2.4.4 通行規制実施・解除判断に対する適用性

前項まで解析雨量の，時間雨量及び累積雨量について，実測雨量との比較により，通行規制基準としての適用性を確認したが，ここでは降雨イベントとして比較を行うことにより，解析雨量の通行規制実施・解除判断への適用性を評価する．現行の通行規制基準値を超過する降雨イベントに着目し，同イベントにおける基準超過時刻やリセット時刻について比較を行った．対象区間内 15 箇所 7 年分のデータの中で，実測雨量，もしくは解析雨量が基準を超過したイベントは 34 イベントであった．これら 34 イベントに対する実測雨量，解析雨量の差について考察する．

34 イベント中，実測，解析ともに通行規制基準を超過していたのは 27 イベントであった．図 2.11 に，その代表的な降雨履歴をスネーク曲線で示す．同図より，実測雨量と解析雨量が，ほぼ同じような降雨履歴を経て通行規制基準を超過していることが分かる．なお，27 イベントの基準超過時刻を表 2.9 にまとめた．約半数（12/27≒44%）が同じ時刻に基準を超過しており，平均すると，実測雨量に対して解析雨量の超過時刻が約 40 分遅れていることが分かった．また，リセット時刻については多くのイベント（23/27≒85%）で同時刻であり，平均すると実測雨量よりも解析雨量の方が約 5 分早くリセットされることが分かった．

34 イベント中 5 イベントは，実測雨量で通行規制基準を超過したものの，解析雨量では超過しなかった．代表的なスネーク曲線を図 2.12 に示す．この場合，仮に解析雨量で通行規制実施判断をするとした場合，危険な降雨を見逃すことになる．5 イベント中 4 イベントは，降雨履歴形状は類似しているものの全体的に解析雨量値が小さかったものであった．当該降雨イベントの連続雨量を時系列で示した図 2.13 から，その様子が明瞭に分かる．残りの 1 イベントについては，解析雨量で途中連続雨量がリセットされたことにより，基準を超過しなかったことを確認した．

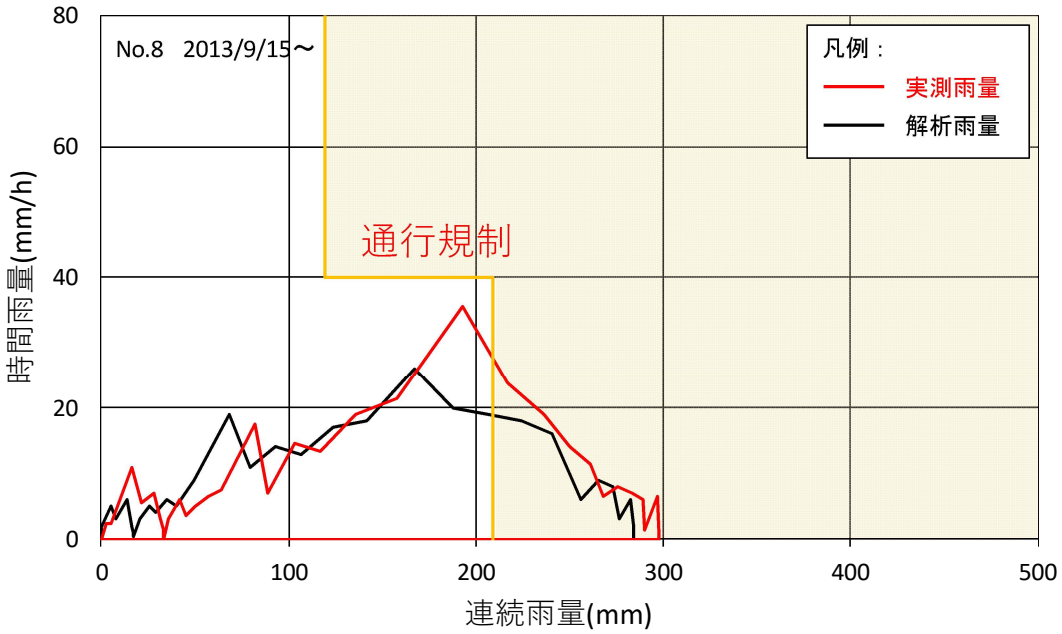


図 2.11　実測雨量と解析雨量のスネーク曲線

表 2.9　基準超過時刻の比較

事例	箇所No	基準超過日時			時間差	降雨リセット日時			時間差
		年/月/日	実測雨量(A)	解析雨量(B)	(B)－(A)	年/月/日	実測雨量(A)	解析雨量(B)	(B)－(A)
1	No.1	2010/5/24	10時	10時	0時間	2010/5/24	15時	15時	0時間
2	No.3	2013/9/16	4時	4時	0時間	2013/9/16	14時	13時	−1時間
3	No.4	2011/9/21	2時	3時	1時間	2011/9/21	22時	19時	−3時間
4		2013/9/16	4時	3時	−1時間	2013/9/16	14時	14時	0時間
5	No.5	2013/9/16	3時	3時	0時間	2013/9/16	14時	14時	0時間
6		2014/8/17	2時	1時	−1時間	2014/8/17	12時	12時	0時間
7	No.6	2013/9/16	2時	2時	0時間	2013/9/16	17時	17時	0時間
8		2014/8/17	5時	1時	−4時間	2014/8/17	13時	13時	0時間
9		2014/9/5	3時	3時	0時間	2014/9/5	13時	13時	0時間
10	No.7	2011/5/30	2時	5時	3時間	2011/5/30	13時	13時	0時間
11		2013/9/16	2時	2時	0時間	2013/9/16	17時	17時	0時間
12		2014/9/5	3時	3時	0時間	2014/9/5	13時	13時	0時間
13	No.8	2013/9/16	1時	2時	1時間	2013/9/16	17時	17時	0時間
14	No.9	2011/5/29	23時	24時	1時間	2011/5/30	13時	14時	1時間
15		2013/9/16	1時	1時	0時間	2013/9/16	18時	18時	0時間
16	No.10	2011/5/30	1時	3時	2時間	2011/5/30	14時	14時	0時間
17		2011/9/22	4時	11時	7時間	2011/9/22	20時	20時	0時間
18		2013/9/16	0時	1時	1時間	2013/9/16	18時	18時	0時間
19	No.11	2011/5/30	2時	3時	1時間	2011/5/30	13時	13時	0時間
20		2013/9/16	1時	2時	1時間	2013/9/16	17時	17時	0時間
21	No.12	2011/5/29	22時	28時※	6時間	2011/5/30	13時	14時	1時間
22		2013/9/16	1時	2時	1時間	2013/9/16	18時	18時	0時間
23	No.13	2011/5/30	2時	3時	1時間	2011/5/30	14時	14時	0時間
24		2011/9/22	11時	11時	0時間	2011/9/22	20時	20時	0時間
25		2013/9/16	1時	1時	0時間	2013/9/16	18時	18時	0時間
26	No.14	2013/9/16	1時	1時	0時間	2013/9/16	18時	18時	0時間
27	No.15	2013/9/16	1時	1時	0時間	2013/9/16	18時	18時	0時間
				平均	0.74時間			平均	−0.07時間

※ 翌日4時

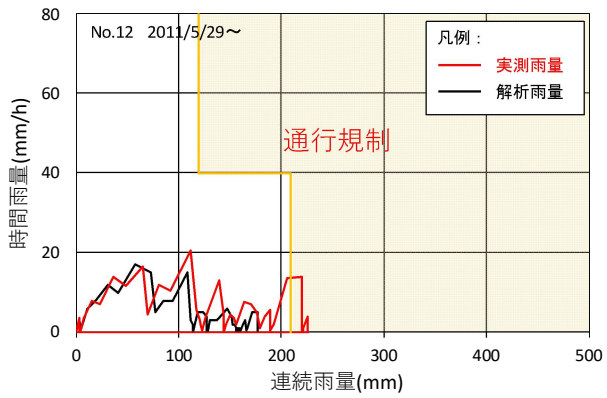


図 2.12　スネーク曲線（実測のみ基準超過の例）

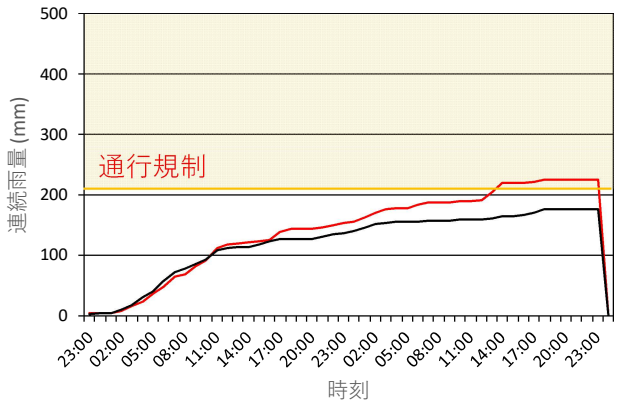


図 2.13　図 2.12 と同じイベントの時系列変化

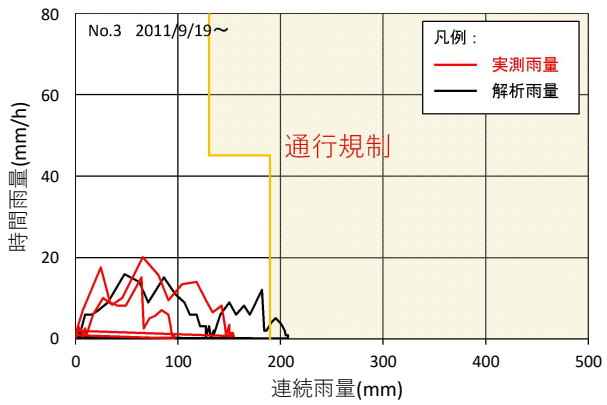


図 2.14　スネーク曲線（解析のみ基準超過の例）

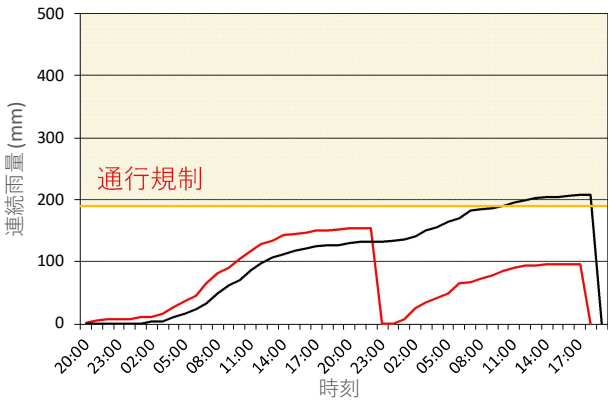


図 2.15　図 2.14 と同じイベントの時系列変化

34 イベント中残りの 2 イベントは，解析雨量でのみ通行規制基準を超過したものである．代表的なスネーク曲線を図 2.14 に示す．2 イベントのうち 1 イベントは，図 2.15 に示すように，実測雨量が途中でリセットされているにも関わらず，解析雨量ではリセットされず，基準超過に至った事例であることが分かった. 残る 1 イベントは, 降雨履歴形状は似ているものの全体的に解析雨量値が大きいものであり，解析雨量のみが基準を超過したものであった.

ここでの 34 イベントの比較結果から，全体の約 80%に相当する 27 イベントで，解析雨量を用いてもほぼ等しい通行規制実施・解除を判断できることが確認できたものの，残る約 20%については，見逃し，もしくは空振りの結果につながることが示唆された．約 20%という数字は決して小さくない．よって，現時点では，通行規制実施・解除の判断に対して解析雨量を適用することは難しい.

2.5 まとめ

高速道路通行規制基準に対する解析雨量の適用性を確認するため，解析雨量と実測雨量との比較を行った．ここで得られた知見を下記にまとめる.

1）全データを対象とした時間雨量における実測雨量と解析雨量との相関係数は 0.90 であり，また，約 98%以上の時間雨量は 1mm/h 以内の差であり，解析雨量の精度は高い.
2）時間雨量単独よりも，累積雨量の方が，より相関係数が高くなる.
3）解析雨量の発生頻度は実測雨量と同等であり，時間雨量，連続雨量に対する発生頻度，すなわち発生確率を算出することに対して，解析雨量は適用性がある.
4）通行規制基準超過降雨イベントの比較を通じ，そのリセットのタイミングが大きく異なる場合もあることから，現時点では，通行規制基準超過・解除の判断に対して解析雨量を適用することは難しいことを明らかにした.

参考文献

1）新保明彦：レーダー・アメダス解析雨量（1），日本気象学会機関誌天気 48 巻 8 号，pp.59-63，2001.8.

2）新保明彦：レーダー・アメダス解析雨量（2），日本気象学会機関誌天気 48 巻 10 号，pp.57-64，2001.10.

3）宮城仁史・入口武史・佐藤大輔・熊谷小緒里・白石瞬・木川誠一郎：解析雨量・降水短時間予報・降水ナウキャストの改善，気象庁量的予報技術資料第 18 巻第 3 章，平成 24 年度

4）地盤工学会 豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測編集委員会：豪雨時における斜面崩壊メカニズムおよび危険度予測，地盤工学・実務シリーズ 23，pp.131，2006.7.

5）櫻谷 慶治・窪田 上太郎・小泉 圭吾・小田 和広：レーダー・アメダス解析雨量の高速道路通行規制基準への適用性に関する基礎研究，第 8 回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.67-72，2016.9.

6）国土交通省気象庁ホームページ：積乱雲ってどんな雲？，http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/tenki_chuui/tenki_chuui_p2.html

7）国土交通省「解析雨量」と地上観測雨量との比較，玉川ら，http://www.geoenv.tsukuba.ac.jp/~jalps-atm/reference/tamagawa_jalps2012.pdf

第３章　斜面災害リスクの定量化と高速道路通行規制基準設定方法の高度化

3.1 はじめに

我が国の高速道路は土工区間が供用延長の約 7 割を占めている [1]．そのために，道路管理者は降雨に伴う斜面災害に対する道路利用者の安全確保に努めなければならない．NEXCO 西日本では，昭和 48 年に初めて降雨による通行規制基準（本章における通行規制とは，対象とするインターチェンジ区間（以下，IC 区間）の通行止めを指す）を策定し，平成 12 年より連続雨量，組合せ雨量（時間雨量と連続雨量）の 2 種類の雨量指標を用いた降雨時の通行規制基準を運用している．通行規制基準値は，「高速道路利用者への被害を防止する上で，規制基準値に到達した後の斜面災害の発生確率が高く，かつ，不必要な通行規制の件数が小さくなる」という観点に基づき設定される．道路利用者に安全，安心な高速交通サービスを提供するためには，通行規制の実施前に斜面災害が発生する“見逃し”や通行規制の実施後に斜面災害が発生しない“空振り”の発生件数を低減させることが重要である．そのためには，過去の斜面災害履歴，素因情報（供用年数，道路構造，のり面構造，地盤条件，地質条件など），誘因情報（降雨履歴や降雨経験など）を用いて斜面災害が発生する確率を統計的に分析し，その結果に基づいて規制基準値を設定するような枠組みを構築することが有用であると考えられる．

規制基準値を低く設定すれば「見逃し」件数が減少して，道路利用者の走行安全性が確保される．しかし，過度な通行規制は「空振り」件数の増加と同時に，不必要な通行規制時間の増加も招き，高速交通サービスを低下させる．一方で，規制基準値を高く設定すれば「空振り」が減少し，高速交通サービスが向上する反面，「見逃し」が増加して，道路利用者の被害が甚大化する可能性がある．このように，「見逃し」と「空振り」との間にはトレードオフの関係があり，両件数を同時に最小化する規制基準値は存在しない．適切な規制基準値を設定するためには，「見逃し」と「空振り」が道路利用者に与える影響を定量的に評価する必要がある．

以上の問題意識のもとで，本章では，降雨時の最適な通行規制基準値の設定手法を確立する [2]．具体的には，1）過去の斜面災害履歴，素因情報，誘因情報を用いて降雨状態と斜面災害が発生する確率を表現する斜面災害発生モデルを構築し，2）斜面災害発生確率を用いて，「見逃し」と「空振り」が道路利用者に与える影響を定量的に評価できるようなリスク管理指標をそれぞれ提案し，両リスク管理指標のトレードオフの関係を考慮した最適規制基準値設定モデルを構築する，といった 2 つのプロセスによって構成される方法論を提案する．以下，**3.2** 節で本章の基本的な考え方を説明する．**3.3** 節で斜面災害発生モデルを定式化する．**3.4** 節で規制基準値を設定するためのリスク管理指標を提案し，最適規制基準値設定モデルを定式化する．**3.5** 節で実在の高速道路区間を対象とした適用事例を通じて本章で提案する方法論の有用性を考察する．

3.2 本章の基本的な考え方

3.2.1 斜面災害リスクと規制基準値

本章では，供用年数，道路構造，のり面構造，地盤条件，地質条件などを素因，降雨履歴や降雨経験などを誘因として発生する斜面災害を対象とした高速道路の通行規制によるリスク管理に着目する．通常，斜面災害は土石流，がけ崩れ，地すべり，表層崩壊，深層崩壊等に分類され，それぞれ異なる物理的機構を経て発生すると考えられる．しかしながら，高速道路においては，上記のいかなる事象であっても，高速道路内へ土砂が流入すれば道路利用者の安全性が大きく損なわれ，重大事故の発生に直結し得る．当然のことながら，これらの異なる物理的機構を経て発生する斜面災害それぞれに対して，高速道路ではハード対策はなされているが，本章ではそれでもなお発生が懸念される斜面災害に対するソフト対策面でのリスク管理手法として，降雨時の通行規制を対象とする．このような考え方に従い，本章では，高速道路内に土砂が流入し得るような事象を分類せずに斜面災害として統合的に扱う．

3.1 節で言及したように，規制基準値を低く設定すれば通行規制による斜面災害の捕捉率が増加し，道路利用者への被害を未然に防ぐ（見逃しのリスクを減少させる）ことが可能となる．一方で，規制基準値を高く設定すれば通行規制時間の減少に伴い供用時間が増加する（空振りのリスクを減少させる）ために高速交通サービスは向上する．このように，高速道路の斜面災害に対するリスク管理において，規制基準値に応じて変動する安全性とサービス性との間にはトレードオフの関係が存在する．ここで，高速交通の安全性とサービス性に関するリスクをそれぞれ通行規制実施前に斜面災害が発生するリスク（以下，安全面でのリスク），通行規制実施後に斜面災害が発生しないリスク（以下，社会損失面でのリスク）として定義する．当然のことながら，通行規制実施前に斜面災害が発生する事象（以下，安全面でのリスク事象）と，通行規制実施後に斜面災害が発生しない事象（以下，社会損失面でのリスク事象）では，それらに起因する道路管理者や道路利用者の損失も異なる．そのため，本章では，双方のリスクを対等に評価するのではなく，両リスクの重みを考慮した上で，安全面でのリスクと社会損失面でのリスクの和を最小化するような規制基準値を最適規制基準値として設定する．具体的には，実際の斜面災害履歴から，安全面および社会損失面，それぞれのリスク事象発生確率を定量化し，それらに基づき最適規制基準値設定モデルを定式化する．なお，**3.4.5** 項で述べるように，多様なリスク事象の中からのリスク選択および各リスクに対する費用設定は，想定する経済主体（リスクを負担する当事者）に応じて変わり得る．道路管理者や道路利用者のみならず，周辺地域社会も含めた経済主体を考えれば，高速道路の公共性も踏まえた社会的影響分析などが可能となる．ただし，本章では議論を単純化するために，主に道路管理者を経済主体と考え，上述した安全面でのリスクと社会損失面でのリスクのみに着目することとする．

3.2.2 本章に関連する既往の研究

斜面災害に対して，定量的に規制基準値を設定するための研究は数多く蓄積されている．斜面災害の発生確率を求めるための研究として，高橋等[3)]はタンクモデルを用いて地下水位の変動を算定し，斜面の破壊確率を求めている．川越等[3)]は動水勾配と起伏量を特性変数（当該参考文献内では，説明変数）とした多重ロジスティック回帰分析を行い，地質条件（崩積土，新第三系堆積岩，古第三系堆積岩，花崗岩）

ごとに，動水勾配と起伏量を特性変数として斜面災害の発生確率を算出している．本章においては，様々な素因を持つ斜面を膨大に有する高速道路の管理を想定しているために，タンクモデルのパラメータを推定あるいは設定するための素因（例えば，高橋等[3]の 3 連 1 次元タンクモデルでは，上部タンク，中間部タンク，下部タンクそれぞれに上段タンク，下段タンクが設定されており，個々の上段タンクで初期水位，2 種類の流出孔の流出係数，流出孔の高さ，個々の下段タンクで初期水位，2 種類の流出孔の流出係数，2 種類の流出孔の高さ，有効間隙率を定めるための素因が必要となる）を調査することが容易ではない．そのため，本章では川越等が個々の地質条件に対して用いている多重ロジスティック回帰分析のように，素因に関する詳細な情報が不要となる統計モデルを用いる．一方，川越等の研究[4]では時々刻々と変化する雨量などの誘因情報が考慮されておらず，同一 IC 区間においても降雨条件によって斜面災害の発生確率が変化するといった現象を表現することができない．本章では，雨量などの誘因情報を確率変数と考え，多重ロジスティック回帰分析の特性変数に確率変数である雨量を合成した混合確率モデルとして，斜面災害発生モデルを定式化する．

一方，規制基準値を設定する研究として，山田等[5]は，斜面災害の発生過程のモデル化を経ずに，2 種類の実効雨量を規制基準値として採用し，RBF ネットワーク（Radial Basis Function Network）による機械学習を用いて斜面災害発生の的中率を上げるような規制基準値を設定している．大津等[6]は，斜面の破壊確率を用いて，通行規制の有無と斜面災害の有無の 4 通りの組合せを考え，各組における期待リスク費用を算出し，期待リスク費用を最小とするような規制基準値を設定している．本章においては，大津等[6]と同様に期待リスク費用を最小とするような方法を採用する．その際，道路管理者が通行規制というソフト対策を通じて制御可能な事象は見逃しと空振りの 2 種類であるため，両者が道路利用者に与える影響を評価できるようなリスク管理指標を提案し，最適規制基準値設定モデルを定式化する．同様の考え方に基づく既往研究としては，布川等[7]の研究があげられる．当該研究では，岡田等[8]の提案した盛土の降雨災害危険度評価手法による分析結果と実データを用いた雨量分布の推定結果を用いることにより，上記の 2 種類のリスク，すなわち 1）通行規制実施前に斜面災害が発生する見逃しのリスクと，2）通行規制実施後に斜面災害が発生しない空振りのリスクを，1）「崩壊あり規制なし」の頻度期待値（件/年），2）「崩壊なし規制あり」の頻度期待値（件/年）として定量化している．岡田等[8]が提案した方法論では，崩壊した盛土に関するデータのみを用い，盛土崩壊時の時間雨量と連続雨量で定義される限界雨量を目的変数，盛土勾配，粘着力，内部摩擦角，間隙水圧などを特性変数とした多変量回帰分析を行っている．その上で，布川等[7]の研究では，岡田等[8]の多変量回帰モデルの誤差項に基づき，時間雨量と連続雨量の関数として盛土崩壊確率を定量化し，別途推定した時間雨量と連続雨量の同時確率分布と盛土崩壊確率の積を用いて上記 2 種類のリスクを定量化している．当該方法論は，理論上は本章で想定する状況にも適用可能であるが，本章で対象とするように，斜面災害発生データが十分に獲得されていない場合や素因情報が十分に獲得されていない場合には，多変量回帰モデルの誤差項の分散の推定精度が低く，斜面災害発生確率に推定バイアスが生じる可能性がある．本章では，斜面災害が発生しなかった降雨イベントのデータも用いたロジスティック回帰モデルを用いることにより，このような推定バイアスを可能な限り低減することを目指す．

本章では，過去の斜面災害履歴，素因情報，誘因情報を用いた混合確率モデルとして斜面災害発生モデルを定式化する．これにより，誘因情報を所与とせず斜面災害発生確率がモデル化でき，規制基準値の変動に応じた安全面でのリスクと社会損失面でのリスクの変動を定量化することが可能となる．定式化し

た斜面災害発生モデルと整合性のあるリスク管理指標を提案し，最適規制基準値設定モデルを定式化する．筆者の知る限り，斜面災害発生確率を混合確率モデルとして定式化した研究は，布川等[7]の研究を除いて過去には見当たらず，混合確率モデルを用いて規制基準値を設定するような枠組みを定式化した事例も存在しない．さらに，これら 2 つのモデルを用いて適切な規制基準値を設定するといった一連の過程を体系的に整理する点に新規性，有用性がある．

3.2.3 現行の規制基準値の設定方法との相違

3.2.2 項では，本章で提案する方法論の学術的な特徴を既往研究のレビューとともに説明した．一方で，本章で提案する方法論は，現在 NEXCO 西日本で運用されている連続雨量基準と組合せ雨量基準の 2 つの基準を用いるということを前提条件として，それらの基準値設定精度の向上とその際のリスクの定量化を目指すという点において，実務的な有用性を有する．以下では，NEXCO 西日本における現行の規制基準値の設定方法を詳述し，続いて提案する方法論の特徴を現行の規制基準値の設定方法と対比しながら説明する．

a） 現行の規制基準値の設定方法

NEXCO 西日本では，連続雨量基準と組合せ雨量基準における基準値を，蓄積された降雨データと高速道路供用開始後の斜面災害記録をもとに，以下の手順に従い設定している．なお，**図 3.1** の左側にはその手順の流れを示したので，併せて参照されたい．

(a) 過去 20 年間程度の降雨データから**図 3.2** に示すようなスネーク曲線を描く．使用する降雨データは，NEXCO 西日本が高速道路沿線に設置した雨量計で観測されたデータを用いることを原則とする．

(b) (a)と同じ降雨データを用いて，高速道路の排水施設等の設計で使用されている確率手法である岩井法[9]により降雨確率年を算出する．岩井法では，降雨データから 20 年分の年最大連続雨量と年最大時間雨量（この後の **3.2.3.b)**以降で用いる最大連続雨量，最大時間雨量とは異なる点に留意されたい）を抽出し，抽出されたデータを用いて，年最大連続雨量と年最大時間雨量の降雨確率分布を推定する．そのため，降雨確率年は，着目する雨量をもたらす降雨イベントが平均的に何年に 1 回の確率で発生するかを表す．降雨確率年の算出後，各 IC 区間の重要性や，構造条件などの道路特性に 応じた規制基準値の設定のために降雨確率年を修正する．これまでの高速道路管理の経験から，連続雨量基準は降雨確率年を 6 年とした連続雨量，組合せ雨量基準は降雨確率年を 3 年とした時間雨量と降雨確率年を 2 年とした連続雨量が，それぞれ目安とされている．ここで定めた降雨確率年に対応する雨量は，**図 3.2** の赤色実線と青色破線のように降雨履歴図上に線分で描くことができる．

(c) 降雨履歴図上に斜面災害記録をプロットする（以下，災害プロット）．すなわち，斜面災害が発生した時点に対応した降雨データに印を付ける．

(d) 降雨確率年に対応する雨量の線分と災害プロットとを比較し，災害プロットが基準値以上の領域となるように線分を上下左右に移動させ，最終的な規制基準値を設定する．ただし，その場合に，システム的に全ての災害プロットを基準値以上とするのではなく，それぞれの斜面災害の規模や原因，発生後の対策状況や降雨経験を十分に考慮し，規制基準値を設定する．

(e) 設定された規制基準値は，降雨経験や斜面災害事例に応じて適宜見直す．

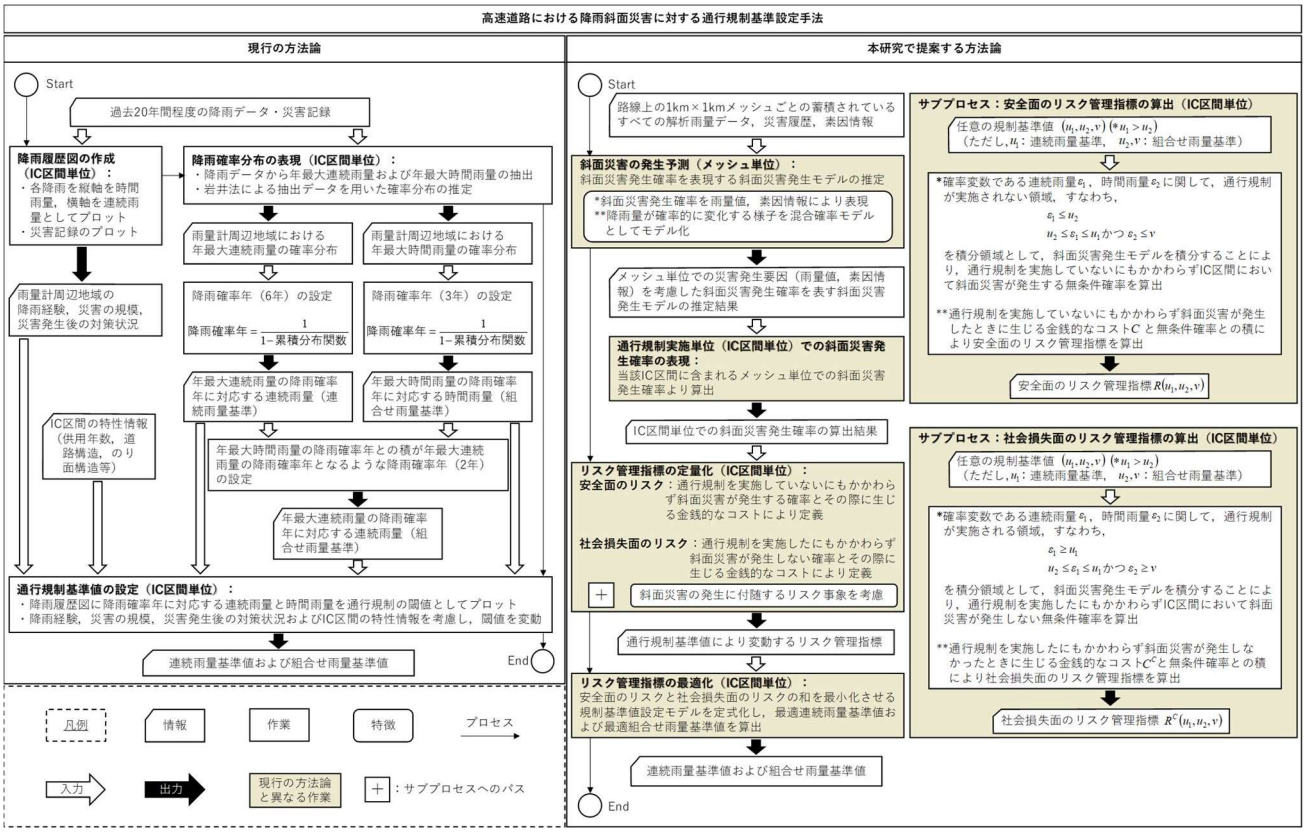


図 3.1　規制基準値設定に対する現行の方法論と提案する方法論

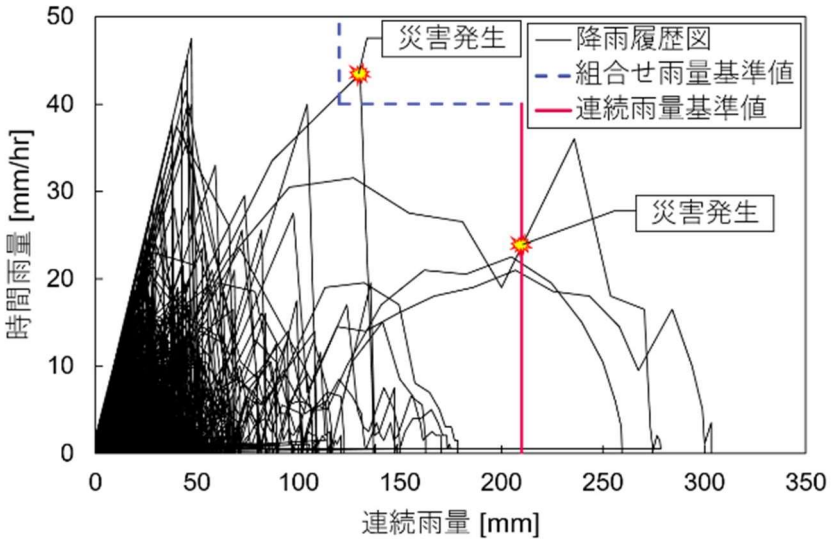


図 3.2　降雨履歴図と規制基準値

このような方法により設定される規制基準値を運用する中で，3.1 節でも言及したように見逃しや空振りの事例が発生している．両事例の発生件数を減らすことが道路管理者に求められるが，そのために解決すべき現行の規制基準値設定方法に対する問題点として，下記の事項があげられる．

(a) 規制基準値の設定に用いられる降雨データは，実測雨量である．しかし，気象庁などの報告[10]によれば，近年，降雨の局地化，集中化，激甚化が指摘されており，従来の経験的な知見により設定した規制基準値では対応できないような斜面災害事例が発生しつつある．実際に，8km に一箇所程度設置されている NEXCO 西日本の雨量計は空間的に高密度に配置されているとは言い難い．状況によって雨量の過小評価が懸念される．また，約 17km 間隔で設置されているアメダスのデータを用いる場合にも同様の懸念が残る．

(b) 降雨確率年および規制基準値が道路管理の経験と斜面災害履歴によって設定され，最終的な規制基準値設定の際には各 IC 区間の道路特性や斜面災害の規模なども考慮することとなっているものの，これらは定量的ではなく定性的な判断を促すに過ぎない．

(c) 現行の方法では，空振りを評価する手順が含まれておらず，空振り，見逃しの両事例の定量的な評価がなされていない．道路管理者としては，空振りの発生はやむを得ないとしても見逃しは許されない，という考え方に基づいているという点では，現行の方法は合理的とも言える．しかし，過度な空振りは高速交通のサービス性を低下させるため，その点を考慮した規制基準値を設定する必要がある．

b) 本章で提案する方法論

本章では，**図 3.1** の右側に示すような規制基準値の設定のための方法論を提案する．具体的には，局地的に発生する降雨に対応するために，規制基準値の設定に用いる降雨データとして，第２章で通行規制基準値算出の適用性を確認した，解析雨量を用いる．過去の解析雨量データと斜面災害履歴および素因情報を用いて，斜面災害発生確率を表す斜面災害発生モデルを推定することにより，IC 区間単位で斜面災害の発生予測を行う．これにより，IC 区間内においてメッシュ毎の斜面災害発生要因（雨量値，素因情報）を明示的に考慮した斜面災害発生確率を表現できる．さらに，素因情報は保護工等のハード対策を実施しない限り変化しないのに対し，雨量は短期的にも，長期的にも変化する．そのため，雨量を確率変数として考え，雨量の従う確率分布も推定する．その際，斜面災害の発生に最も影響を与える要因として最大時間雨量（降雨イベント内で観測される時間雨量の最大値）と最大連続雨量（降雨イベント内で観測される連続雨量の最大値）を考え，それぞれが従う確率分布を推定した上で，双方の雨量指標が従う同時確率分布（以下雨量分布）を導出する．ここで，最大時間雨量，最大連続雨量を用いるということは，時間雨量，連続雨量それぞれの最大値以外の情報，すなわち**図 3.2** の降雨履歴図に関する情報を捨象していることに他ならない．時間雨量，連続雨量それぞれの降雨履歴のうち，どのような統計量を用いて規制基準値を設定するのが望ましいのかを議論する必要があるが，本章では，**3.2.3.a)**で述べたように，現行の規制基準値が年最大時間雨量，年最大連続雨量に基づく降雨確率年を用いて設定されていることと，分析の過度な煩雑化を防ぐという観点から，上記のように最大時間雨量と最大連続雨量を用いて雨量分布を定義することとした．

その上で，斜面災害の発生の有無に付随するリスク管理指標の定量化を行う．本章では，通行規制実施前に斜面災害が発生する事例，いわゆる見逃し事例を安全面でのリスクとして考え，降雨状態と斜面災害が発生する同時確率を表す斜面災害発生モデルを，規制基準値を積分区間として雨量に関して積分することによって定義する．一方で，通行規制実施後に斜面災害が発生しない事例，いわゆる空振り事例を社会損失面でのリスクとして考え，ある降雨状態において斜面災害が発生しない確率を表す斜面災害発生モデルを，規制基準値を積分区間として雨量に関して積分することによって定義する（ただし，前者とは積分区間が異なる）．これらのリスク管理指標を斜面災害発生モデルの推定結果と雨量分布の推定結果

を用いて定量化する．これにより，これらのリスク管理指標の間に存在するトレードオフの関係の議論が可能となる．本章では，規制基準値により変動する双方のリスク管理指標の和を最小化する雨量値を最適規制基準値と考え，最適規制基準値設定モデルを定式化し，最適連続雨量基準値および最適組合せ雨量基準値を算出する．このような方法論を提案することにより，**3.2.3.a)**で列挙した現行の規制基準値設定方法を改善し高度化する．

3.3 斜面災害発生モデル

3.3.1 モデル化の前提条件

K個の IC 区間に対して規制基準値を設定する．個々の IC 区間に対して独立な規制基準値を設定できると仮定する．本来であれば任意の IC 区間での規制実施は隣接する IC 区間の交通流にも影響を与えることから，個々の IC 区間に対する規制実施を独立に判断することは適切ではない．しかし，この点を定量的に評価するためには，交通流のモデル化などが必要となり，本章の範疇を超えると判断し，ここでは議論しないこととする．

IC 区間ごとに素因，誘因は多様に異なる．さらに，同一 IC 区間内においても，素因，誘因は大きく異なる．いま，ある IC 区間 $k(k=1,\cdots,K)$において，素因の情報が得られる最小単位を考え，最小単位であるメッシュ $i_k(i_k=1,\cdots,I_k)$において斜面災害が発生する事象をモデル化する．ただし，誘因である雨量に関しては，現行の規制実施方法との整合性を保つために，IC 区間の代表メッシュで得られる降雨をモデル化する．

3.3.2 斜面災害発生モデル

斜面災害の規模を考慮しない場合，斜面災害は「発生する」，あるいは「発生しない」といった二値状態により記述することができる．また，その状態を決める変数として，素因と誘因が考えられる．ここで，素因と誘因，パラメータを所与とした場合に，IC 区間 kのメッシュ i_kにおいて斜面災害が発生する（$\delta_{k,i_k}=1$）確率をロジスティック関数を用いて，

$$\mathrm{Prob}\left[\delta_{k,i_k}=1\middle|x_{k,i_k},y_{k,i_k},\phi\right]=\frac{1}{1+exp\{-(\alpha+x_{k,i_k}\beta'+y_{k,i_k}\gamma')\}} \tag{3-1}$$

と表す．ただし，$x_{k,i_k}=(x_{k,i_k,1},\cdots,x_{k,i_k,M})$は素因の特性変数ベクトル，$y_{k,i_k}=(y_{k,i_k,1},\cdots,y_{k,i_k,N})$は誘因の特性変数ベクトル，$\alpha$，$\beta=(\beta_1,\cdots,\beta_M)$および$\gamma=(\gamma_1,\cdots,\gamma_N)$はパラメータであり，$\phi=(\alpha,\beta,\gamma)$と表す．また，「'」は転置操作を表す．このとき，斜面災害が発生しない($\delta_{k,i_k}=0$)確率は，

$$\mathrm{Prob}\left[\delta_{k,i_k}=0\middle|x_{k,i_k},y_{k,i_k},\varphi\right]=\frac{exp\{-(\alpha+x_{k,i_k}\beta'+y_{k,i_k}\gamma')\}}{1+exp\{-(\alpha+x_{k,i_k}\beta'+y_{k,i_k}\gamma')\}} \tag{3-2}$$

となる．

IC 区間 k において誘因である雨量は時々刻々と変化する．そこで，任意時点における降雨状態を確率変数により表現する．降雨状態（最大時間雨量や最大連続雨量などといった雨量の統計量）の確率変数ベクトルε_k，パラメータθ_kで規定される，降雨状態の同時確率密度を$f_k(\epsilon|\theta_k)$とする．本章では，誘因y_{k,i_k}を IC 区間 k で一様とし，$y_{k,i_k}=\varepsilon_k$と特定化する．このとき，素因x_{k,i_k}とパラメータϕ，θ_kを所与とした場合の，降雨状態ε_kと斜面災害が発生する($\delta_{k,i_k}=1$)事象の同時生起確率密度$\mathrm{p}(\delta_{k,i_k}=1,\varepsilon_k|x_{k,i_k},\phi,\theta_k)$，さらに降雨状態$\varepsilon_k$と斜面災害が発生しない($\delta_{k,i_k}=0$)事象の同時生起確率密度$\mathrm{p}(\delta_{k,i_k}=0,\varepsilon_k|x_{k,i_k},\phi,\theta_k)$は，

$$p\left(\delta_{k,i_k}=1,\varepsilon_k\middle|x_{k,i_k},\phi,\theta_k\right)$$
$$=\frac{1}{1+exp\left\{-\left(\alpha+x_{k,i_k}\beta'+\varepsilon_k\gamma'\right)\right\}}f_k(\varepsilon_k|\theta_k) \tag{3-3a}$$
$$p\left(\delta_{k,i_k}=0,\varepsilon_k\middle|x_{k,i_k},\phi,\theta_k\right)$$
$$=\frac{exp\left\{-\left(\alpha+x_{k,i_k}\beta'+\varepsilon_k\gamma'\right)\right\}}{1+exp\left\{-\left(\alpha+x_{k,i_k}\beta'+\varepsilon_k\gamma'\right)\right\}}f_k(\varepsilon_k|\theta_k) \tag{3-3b}$$

となる．なお，パラメータθ_kは IC 区間ごとに設定され，IC 区間ごとに異なる降雨状態の同時確率密度を用いている．メッシュ単位での素因を所与とした場合に，誘因である降雨状態が確率的に変化する様子をモデル化した式 3-3a，3-3b を斜面災害発生モデルと呼ぶ.

3.3.3 尤度関数

いま，IC 区間 k のメッシュi_kにおいて，降雨状態の実現値$\bar{\varepsilon}_k^j(\mathrm{i}=1,\cdots,J_k)$と，そのときの斜面災害発生の有無, さらにメッシュi_kにおける素因の特性ベクトル$\bar{x}_{k,i_k}$に関するデータが得られたと考える. 記号「¯」は観測値を表し, J_kは IC 区間kにおいて降雨状態が観測された件数を表す．メッシュi_kでの降雨イベント$j(j=1,\cdots,J_k)$における斜面災害発生の有無をダミー変数

$$\bar{\delta}_{k,i_k}^j=\begin{cases}1 & (\text{斜面災害が発生したとき})\\ 0 & (\text{斜面災害が発生しなかったとき})\end{cases} \tag{3-4}$$

を用いて表す．IC 区間 k のメッシュi_kにおいて，降雨イベントjによって得られる観測値ベクトルは

$\bar{\xi}_{k,i_k}^j=(\bar{\varepsilon}_k^j,\bar{\delta}_{k,i_k}^j,\bar{x}_{k,i_k})$と表せる．このとき，個々の降雨イベント，斜面災害は独立に生起すると仮定して，

観測値ベクトル$\bar{\xi}_{k,i_k}^j$が生起する尤度$\ell(\phi,\theta_k|\bar{\xi}_{k,i_k}^j)$は，

$$\ell\left(\phi,\theta_k\middle|\bar{\xi}_{k,i_k}^j\right)$$
$$=\left[\frac{f_k\left(\bar{\varepsilon}_k^j\middle|\theta_k\right)}{1+exp\left\{-\left(\alpha+\bar{x}_{k,i_k}\beta'+\bar{\varepsilon}_k^j\gamma'\right)\right\}}\right]^{\bar{\delta}_{k,i_k}^j}\cdot\left[\frac{exp\left\{-\left(\alpha+\bar{x}_{k,i_k}\beta'+\bar{\varepsilon}_k^j\gamma'\right)\right\}f_k\left(\bar{\varepsilon}_k^j\middle|\theta_k\right)}{1+exp\left\{-\left(\alpha+\bar{x}_{k,i_k}\beta'+\bar{\varepsilon}_k^j\gamma'\right)\right\}}\right]^{1-\bar{\delta}_{k,i_k}^j} \tag{3-5}$$

と表される. さらに, 全ての IC 区間の全てのメッシュにおいて得られる観測値集合を$\bar{\Xi}=\{\bar{\xi}_{1,1}^1,\cdots,\bar{\xi}_{K,I_K}^J\}$.

降雨状態の同時確率密度に関するパラメータ集合を$\theta=(\theta_1,\cdots,\theta_K)$とする．観測値集合$\bar{\Xi}$が生起する尤度$\mathcal{L}(\phi,\theta|\bar{\Xi})$は

$$\mathcal{L}(\phi,\theta|\bar{\Xi}) = \prod_{k=1}^{K}\prod_{i_k=1}^{I_k}\prod_{j=1}^{J_k}\ell\left(\phi,\theta_k|\bar{\xi}_{k,i_k}^{j}\right) \tag{3-6}$$

と表すことができる．対数尤度関数は

$$\begin{aligned}
&\ln\{\mathcal{L}(\phi,\theta|\bar{\Xi})\} \\
&= \sum_{k=1}^{K}\sum_{i_k=1}^{I_k}\sum_{j=1}^{J_k}\ln\left\{\ell\left(\phi,\theta_k|\bar{\xi}_{k,i_k}^{j}\right)\right\} \\
&= \sum_{k=1}^{K}\sum_{i_k=1}^{I_k}\sum_{j=1}^{J_k}\left[-\left(1-\bar{\delta}_{k,i_k}^{j}\right)\left(\alpha+\bar{x}_{k,i_k}\beta'+\bar{\varepsilon}_k^{j}\gamma'\right)-\ln\left[1+\exp\left\{-\left(\alpha+\bar{x}_{k,i_k}\beta'+\bar{\varepsilon}_k^{j}\gamma'\right)\right\}\right]\right] \\
&\quad+\sum_{k=1}^{K}\sum_{i_k=1}^{I_k}\sum_{j=1}^{J_k}\left[\ln\left\{f_k\left(\bar{\varepsilon}_k^{j}\middle|\theta_k\right)\right\}\right]
\end{aligned} \tag{3-7}$$

と表される．

3.3.4 推定方法

未知パラメータの最尤推定値は，対数尤度関数（3-7）を最大化する値である．対数尤度関数の部分モデルを考える．

$$\begin{aligned}
&\ln\{\mathcal{L}_1(\phi_1|\bar{\Xi})\} \\
&= \sum_{k=1}^{K}\sum_{i_k=1}^{I_k}\sum_{j=1}^{J_k}\left[-\left(1-\bar{\delta}_{k,i_k}^{j}\right)\left(\alpha+\bar{x}_{k,i_k}\beta'+\bar{\varepsilon}_k^{j}\gamma'\right)-\ln\left[1+\exp\left\{-\left(\alpha+\bar{x}_{k,i_k}\beta'+\bar{\varepsilon}_k^{j}\gamma'\right)\right\}\right]\right]
\end{aligned} \tag{3-8a}$$

$$\begin{aligned}
&\ln\{\mathcal{L}_2(\theta_k|\bar{\Xi})\} \\
&= \sum_{j=1}^{J_k}\left[\ln\left\{f_k\left(\bar{\varepsilon}_k^{j}\middle|\theta_k\right)\right\}\right]
\end{aligned} \tag{3-8b}$$

式（3-7）から明らかなように，部分モデルの対数尤度関数（3-8a），（3-8b）を最大化するようなϕ,θは，対数尤度関数（3-7）を最大化し，最尤推定値となる．

3.3.4.a）ϕ の推定

対数尤度関数（3-8a）を最大にするようなパラメータ値ϕの最尤推定量は，

$$\frac{\partial\ln\{\mathcal{L}_1(\phi|\bar{\Xi})\}}{\partial\phi}=0 \tag{3-9}$$

を同時に満足するような$\hat{\phi}=(\hat{\alpha},\hat{\beta},\hat{\gamma})$として与えられる．なお，「^」は推定値を表す．さらに，パラメータの漸近的な共分散行列の推定値$\hat{\Sigma}(\hat{\phi})$は，

$$\hat{\Sigma}(\hat{\phi}) = \left[\frac{\partial^2 \ln\{\mathcal{L}_1(\hat{\phi}|\bar{\Xi})\}}{\partial\phi\partial\phi'}\right]^{-1} \tag{3-10}$$

と表すことができる．ただし，ϕ_sがϕのs番目の要素を表すとして，上式の右辺の逆行列は$\partial^2 \ln\{\mathcal{L}_1(\hat{\phi}|\bar{\Xi})\}/\partial\phi_{s_1}\partial\phi_{s_2}$ $(s_1 = 1, \cdots, M+N+1;\ s_2 = 1, \cdots, M+N+1)$を要素とする$(M+N+1)\times(M+N+1)$次の Fisher 情報行列の逆行列である．パラメータの最尤推定量は，$(M+N+1)$次元の非線形連立方程式（3-9）を解くことにより得られる．本章では，ニュートン・ラフソン法により最尤推定量を求めることとした．最尤推定量$\hat{\phi}$を求めれば，共分散行列の推定量$\hat{\Sigma}(\hat{\phi})$を用いて t 検定統計量を推定できる．

3.3.4.b）θ の推定

対数尤度関数（3-8b）を最大化することは，降雨状態の確率変数ベクトルε_kの同時確率分布$f_k(\varepsilon_k|\theta_k)$ $k = (1, \cdots, K)$を特定化し，パラメータθ_kを推定することに他ならない．したがって，誘因として取り扱う降雨状態に関する特性を特定化し，その上で，各特性の同時確率分布を推定しなければならない．誘因として取り扱うことのできる降雨状態に関する特性は数多く存在するが，以下では，現行の規制基準値に用いられている 2 つの特性（連続雨量と時間雨量）を取り上げる．

本章では，斜面災害の発生に影響を与える誘因として連続雨量，時間雨量を考える．このとき，**3.3.3** 項で述べた観測値ベクトルとして，連続雨量，時間雨量の実現値，さらにそのときの斜面災害発生の有無が可観測でなければならない．斜面災害が発生しない場合においては，連続雨量，時間雨量の観測値と斜面災害が発生しなかったという状態を対応付けることは可能であるが，斜面災害が発生した場合においては，いつ発生したかを知ることが困難であり，斜面災害発生時の連続雨量，時間雨量を知ることも現実的ではない．このような観点からも，本章においては，斜面災害の発生の有無を斜面災害が発見されたときの降雨イベントと関連付け，当該降雨イベントにおける最大連続雨量，最大時間雨量を誘因の特性変数ベクトルとして採用することとした．

いま，IC 区間 k に関して，誘因として 1 回の降雨イベントにおいて 1 回観測される最大連続雨量$\varepsilon_{k,1}$と最大時間雨量$\varepsilon_{k,2}$を用いて同時確率分布$f_k(\varepsilon_{k,1}, \varepsilon_{k,2}|\theta_k)$を特定化する．連続雨量は時間雨量の累積によって定義されることから，

$$\varepsilon_{k,1} \geq \varepsilon_{k,2} \tag{3-11}$$

が常に成立している．式（3-11）を明示的に考慮するために，同時確率密度を

$$\begin{aligned} f_k(\varepsilon_{k,1}, \varepsilon_{k,2}|\theta_k) &= g_k(\varepsilon_{k,1}|\theta_{k,1}) h_k(\varepsilon_{k,2}|\theta_{k,2}) \\ &= g_k(\varepsilon_{k,1}|\theta_{k,1}) \frac{h_k(\varepsilon_{k,2}|\theta_{k,2})}{H_k(\varepsilon_{k,1}|\theta_{k,2}) - H_k(0|\theta_{k,2})} \end{aligned} \tag{3-12}$$

とする．ただし，$g_k(\cdot\,|\boldsymbol{\theta}_{k,1})$は最大連続雨量$\varepsilon_{k,1}$が従う確率密度関数，$h_k(\cdot\,|\boldsymbol{\theta}_{k,2})$，$H_k(\cdot\,|\boldsymbol{\theta}_{k,2})$はそれぞれ最大時間雨量$\varepsilon_{k,2}$が従う確率密度関数，累積分布関数である．また，$\boldsymbol{\theta}_k = (\boldsymbol{\theta}_{k,1}, \boldsymbol{\theta}_{k,2})$の各要素はそれぞれの確率密度関数のパラメータを表している．確率密度関数$g_k(\cdot\,|\boldsymbol{\theta}_{k,1})$，$h_k(\cdot\,|\boldsymbol{\theta}_{k,2})$の候補として，最大連続雨量，最大時間雨量ともに非負であることから，一般化極値分布，ガンマ分布の 2 種類を取り上げ，式（3-8b）を最大化するような$g_k(\cdot\,|\boldsymbol{\theta}_{k,1})$，$h_k(\cdot\,|\boldsymbol{\theta}_{k,2})$を特定化する．

3.4 最適規制基準値設定モデル

3.4.1 規制基準値

通行規制は，連続雨量，時間雨量の観測値に応じて IC 区間ごとに実施の有無が決定される．IC 区間 k における最大連続雨量の規制基準値$u_{k,1}$，組合せ雨量の規制基準値（最大連続雨量，最大時間雨量）$u_{k,2}$，v_kを施策変数（操作変数）と考える．ただし$u_{k,1} > u_{k,2}$，$u_{k,2} > v_k$である．現行の規制基準においては，最大連続雨量と最大時間雨量$\varepsilon_k = (\varepsilon_{k,1}, \varepsilon_{k,2})$に対して，

$$\varepsilon_{k,1} \geq u_{k,1} \tag{3-13a}$$

$$\varepsilon_{k,1} \geq u_{k,2} \text{ かつ } \varepsilon_{k,2} \geq v_k \tag{3-13b}$$

のいずれかを満たすとき通行規制が実施される．

3.4.2 安全面でのリスク管理指標

通行規制の実施前に斜面災害が発生するリスク（安全面でのリスク）を導出する．IC 区間 k での通行規制実施前に IC 区間 k のメッシュi_kにおいて斜面災害が発生する確率は，式(3-3a)を用いて

$$P_{k,i_k}(\varepsilon_k, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k, w_k) = \begin{cases} p(\delta_{k,i_k} = 1, \varepsilon_k | \bar{x}_{k,i_k}, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k) \\ (\text{式}(3-13\text{a}), (3-13\text{b})\text{をともに満たさないとき}) \\ 0 \quad (\text{式}(3-13\text{a}), (3-13\text{b})\text{のいずれかを満たすとき}) \end{cases} \tag{3-14}$$

と表せる．ただし，$w_k = (u_{k,1}, u_{k,2}, v_k)$である．式（3-14）において，確率変数である最大連続雨量$\varepsilon_{k,1}$，最大時間雨量$\varepsilon_{k,2}$に関して積分することにより，IC 区間 k での通行規制実施前にメッシュi_kにおいて斜面災害が発生する無条件確率を以下のように算出できる．

$$\begin{aligned} P_{k,i_k}(\varepsilon_k, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k, w_k) &= \int_0^{\infty}\int_0^{\infty} P_{k,i_k}(\varepsilon_k, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k, \quad {}_k) d\varepsilon_{k,1} d\varepsilon_{k,2} \\ &= \int_0^{u_{k,2}}\int_0^{u_{k,2}} p(\delta_{k,i_k} = 1, \varepsilon_k | \bar{x}_{k,i_k}, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k) d\varepsilon_{k,2} d\varepsilon_{k,1} \\ &\quad + \int_{u_{k,2}}^{u_{k,1}}\int_0^{v_k} p(\delta_{k,i_k} = 1, \varepsilon_k | \bar{x}_{k,i_k}, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k) d\varepsilon_{k,2} d\varepsilon_{k,1} \end{aligned} \tag{3-15}$$

さらに，ある IC 区間 k において通行規制を実施する前にメッシュi_kで斜面災害が発生したときに生じるメッシュあたりの費用を C とすると，メッシュi_kにおける安全面でのリスクを

$$R_{k,i_k}(w_k, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k) = C\tilde{P}_{k,i_k}(w_k, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k) \tag{3-16}$$

IC 区間 k における安全面でのリスクを

$$R_k(w_k, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k) = \sum_{i_k=1}^{I_k} R_{k,i_k}(w_k, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k) \tag{3-17}$$

と，それぞれ定義できる．

3.4.3 社会損失面でのリスク管理指標

通行規制の実施後に斜面災害が発生しないリスク（社会損失面でのリスク）を導出する．IC 区間 k での通行規制実施後にメッシュi_kにおいて斜面災害が発生しない確率は，式（3-3b）を用いて

$$P_{k,i_k}^c(\varepsilon_k,\hat{\phi},\hat{\theta}_k,w_k) = \begin{cases} p(\delta_{k,i_k}=0,\varepsilon_k|\bar{x}_{k,i_k},\hat{\phi},\hat{\theta}_k) \\ (\text{式 } 3-13\text{a}, 3-13\text{b のいずれかを満たすとき}) \\ 0 \quad (\text{式 } 3-13\text{a}, 3-13\text{b をともに満たさないとき}) \end{cases} \tag{3-18}$$

と表せる．個々のメッシュの斜面災害が独立に発生すると仮定して，IC 区間 k での通行規制実施後に IC 区間 k 内の全てのメッシュ$1,\cdots,I_k$で斜面災害が発生しない確率は，式（3-18）を用いて，

$$P_k^c(\varepsilon_k,\hat{\phi},\hat{\theta}_k,w_k) = \prod_{i_k=1}^{I_k} P_{k,i_k}^c(\varepsilon_k,\hat{\phi},\hat{\theta}_k,w_k) \tag{3-19}$$

と表すことができる．式(3-19)において，確率変数である最大連続雨量$\varepsilon_{k,1}$，最大時間雨量$\varepsilon_{k,2}$に関して積分することにより，IC 区間 k での通行規制実施後に IC 区間内の全てのメッシュ$1,\cdots,I_k$において斜面災害が発生しない無条件確率を以下のように算出できる．

$$\begin{aligned} \tilde{P}_k^c(w_k,\hat{\phi},\hat{\theta}_k) &= \int_0^\infty \int_0^\infty P_k^c(\varepsilon_k,\hat{\phi},\hat{\theta}_k,w_k) d\varepsilon_{k,1} d\varepsilon_{k,2} \\ &= \int_{u_{k,1}}^\infty \int_0^{u_{k,1}} \prod_{i_k=1}^{I_k} p(\delta_{k,i_k}=0,\varepsilon_k|\bar{x}_{k,i_k},\hat{\phi},\hat{\theta}_k)\, d\varepsilon_{k,2} d\varepsilon_{k,1} \\ &\quad + \int_{u_{k,2}}^{u_{k,1}} \int_{v_k}^{u_{k,2}} \prod_{i_k=1}^{I_k} p(\delta_{k,i_k}=0,\varepsilon_k|\bar{x}_{k,i_k},\hat{\phi},\hat{\theta}_k)\, d\varepsilon_{k,2} d\varepsilon_{k,1} \end{aligned} \tag{3-20}$$

さらに，通行規制を実施した後に斜面災害が発生しなかったときに IC 区間あたりに生じる費用をC^cとすると，IC 区間 k における社会損失面でのリスクを，当該 IC 区間内の全てのメッシュで斜面災害が発生しない確率を用いて，

$$R_k^c(w_k,\hat{\phi},\hat{\theta}_k) = C^C \bar{P}_k^c(w_k,\hat{\phi},\hat{\theta}_k) \tag{3-21}$$

と金銭的な尺度によって定義することができる．

3.4.4 最適規制基準値設定モデル

安全面でのリスクと社会損失面でのリスクの双方を考慮し，両リスクを最小とするような規制基準値を設定する．安全面でのリスクは式（3-15），（3-16），（3-17）より，

$$R_k(w_k, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k)$$

$$= C\left\{\sum_{i_k=1}^{I_k}\int_0^{u_{k,2}}\int_0^{u_{k,2}} p_{k,i_k,1}(\varepsilon_k)d\varepsilon_{k,2}d\varepsilon_{k,1} + \int_{u_{k,2}}^{u_{k,1}}\int_0^{v_k} p_{k,i_k,1}(\varepsilon_k)d\varepsilon_{k,2}d\varepsilon_{k,1}\right\} \tag{3-22}$$

あるいは,

$$R_k(w_k, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k)$$

$$= C\left\{\sum_{i_k=1}^{I_k}\int_0^{u_{k,1}}\int_0^{u_{k,1}} p_{k,i_k,1}(\varepsilon_k)d\varepsilon_{k,2}d\varepsilon_{k,1} - \int_{u_{k,2}}^{u_{k,1}}\int_{v_k}^{u_{k,1}} p_{k,i_k,1}(\varepsilon_k)d\varepsilon_{k,2}d\varepsilon_{k,1}\right\} \tag{3-23}$$

と表される．ただし，$p_{k,i_k,1}(\varepsilon_k) = p(\delta_{k,i_k} = 1, \varepsilon_k | \bar{x}_{k,i_k}, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k)$である．一方で，社会損失面でのリスクは式（3-20），（3-21）より，

$$R_k^c(w_k, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k)$$

$$= C^C\left\{\int_{u_{k,1}}^{\infty}\int_0^{u_{k,1}}\prod_{i_k=1}^{I_k} p_{k,i_k,0}(\varepsilon_k)d\varepsilon_{k,2}d\varepsilon_{k,1} + \int_{u_{k,2}}^{u_{k,1}}\int_{v_k}^{u_{k,1}}\prod_{i_k=1}^{I_k} p_{k,i_k,0}(\varepsilon_k)d\varepsilon_{k,2}d\varepsilon_{k,1}\right\} \tag{3-24}$$

あるいは,

$$R_k^c(w_k, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k)$$

$$= C^C\left\{\int_{u_{k,2}}^{\infty}\int_0^{u_{k,2}}\prod_{i_k=1}^{I_k} p_{k,i_k,0}(\varepsilon_k)d\varepsilon_{k,2}d\varepsilon_{k,1} - \int_{u_{k,2}}^{u_{k,1}}\int_0^{v_k}\prod_{i_k=1}^{I_k} p_{k,i_k,0}(\varepsilon_k)d\varepsilon_{k,2}d\varepsilon_{k,1}\right\} \tag{3-25}$$

と表される．ただし，$p_{k,i_k,0}(\varepsilon_k) = p(\delta_{k,i_k} = 0, \varepsilon_k | \bar{x}_{k,i_k}, \hat{\phi}, \hat{\theta}_k)$である．

施策変数の増減による両リスクの増減をみていく．$u_{k,1}$を$\Delta u_{k,1}$だけ増加（減少）させると，式（3-22）より安全面でのリスクは増加（減少）し，式（3-25）より社会損失面でのリスクは減少（増加）する．$u_{k,2}$を$\Delta u_{k,2}$だけ増加（減少）させると，式（3-23）より安全面でのリスクは増加（減少）し，式（3-24）より社会損失面でのリスクは減少（増加）する．v_kをΔv_kだけ増加（減少）させると，式（3-23）より安全面でのリスクは増加（減少）し，社会損失面でのリスクは減少（増加）する．すなわち，安全面でのリスクと社会損失面でのリスクは，一方のリスクを下げようと施策変数$u_{k,1}$，$u_{k,2}$，v_kを変動させるともう一方のリスクが必ず増加するといったトレードオフの関係にあることがわかる．よって，両リスクを同時に最小とするような規制基準値は存在しない．そこで，両リスクの和により目的関数を定式化するとともに，最適規制基準値設定モデルを

$$\min_{w_k}\{R_k(w_k, \hat{\emptyset}, \hat{\theta}_k) + R_k^c(w_k, \hat{\emptyset}, \hat{\theta}_k)\} \tag{3-26a}$$

subject to

$$u_{k,1} \geq u_{k,2} \tag{3-26b}$$

$$u_{k,2} \geq v_k \tag{3-26c}$$

と定式化する．同モデルを用いて算出される最適規制基準値ベクトル$\hat{w}_k = (\hat{u}_{k,1}, \hat{u}_{k,2}, \hat{v}_k)$は，IC 区間 k における最適な通行規制基準値である．なお，ここでは，人件費等通行規制の実施に必要な費用は相対的に微小であるとし考慮しない．

3.4.5 費用設定と経済主体

ここまでは，最適規制基準値設定モデルにおける経済主体を特定化せずにモデルを定式化してきた．すでに述べたように，本章で提案する最適規制基準値設定モデルでは，通行規制の実施前に斜面災害が発生する確率，通行規制の実施後に斜面災害が発生しない確率のそれぞれに費用 C, C^c を乗ずることにより目的関数を定義している．費用 C, C^c をそれぞれの事象が発生した際に道路管理者が負担する費用とした場合には，提案する最適規制基準値設定モデルは，道路管理者の利潤最大化モデルの部分モデルである損失最小化モデルと捉えることができる．一方で，費用 C, C^c をそれぞれの事象が発生した際に社会全体が負担する費用とした場合には，同モデルは，社会的総余剰最大化モデルの部分モデルである損失最小化モデルと捉えることができる．このように費用の設定方法に応じて，対象とする経済主体を変化させて分析を行うことが可能である．

以下の適用事例では，道路管理者を経済主体とし，道路管理者が負担する直接的な費用により費用 C, C^c を定義する．費用の定義は分析の目的に依存し，例えば，通行規制の実施前に斜面災害が発生した際，通行規制の実施後に斜面災害が発生しなかった際におけるそれぞれの間接的な費用（具体例は 3.5.3.b) であげる）を用いることも考えられる．

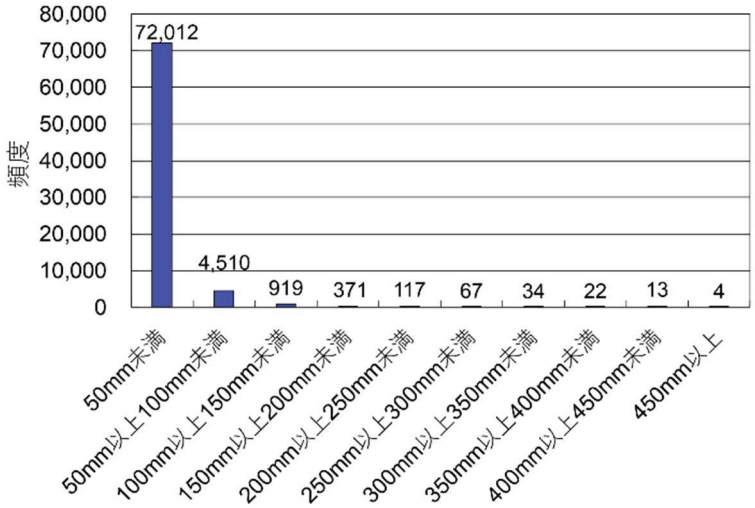
3.5 適用事例

3.5.1 適用データの概要

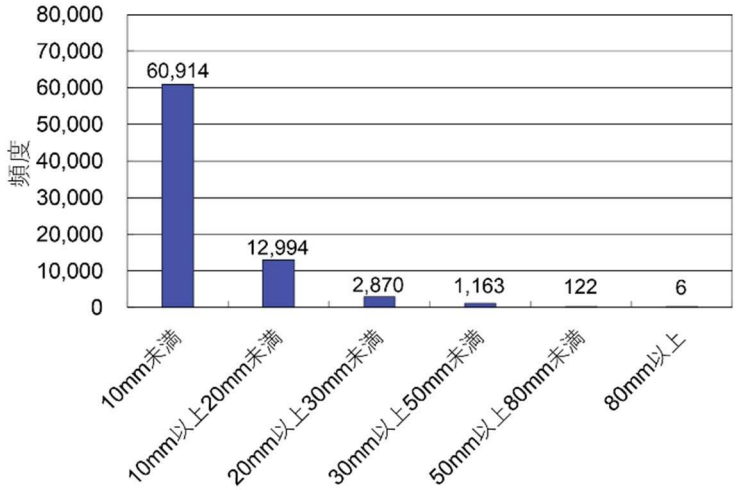
NEXCO 西日本が管理する実際の高速道路を対象として，提案する最適規制基準値設定モデルを適用する．対象とする路線は，供用年数が長い IC 区間と短い IC 区間が混在する路線であり，合計で 10 区間の IC 区間が存在する．路線内の道路構造やのり面構造に関する基礎情報や，斜面災害履歴が記録されている．降雨データは解析雨量を用いることし，2006 年から 2014 年までの 9 年間の正時の解析雨量から，降雨イベントごとに最大連続雨量と最大時間雨量を集計した．また，斜面災害履歴は，その規模や種別に関わらず，2006 年 1 月 1 日 0:00 から 2014 年 12 月 31 日 23:59 までに記録されている全ての履歴を対象とした．対象路線における IC 区間別のデータ諸元を表 3.1 に示す．対象路線は IC 区間ごとに供用年数が大きく異なり，最も供用年数の短い路線は 6 年である一方，最も供用年数の長い路線は 30 年であった．1km×1km のメッシュの総数は 143 個であり，降雨イベントの総数（サンプルサイズ）は 78,069 であった．IC 区間ごとに雨の降りやすさも異なっていることがわかる．また，路線全体における斜面災害の発生件数は 7 件であり，対象期間内に斜面災害の発生記録がない IC 区間も存在する．図 3.3 に，10 区間全ての IC 区間における降雨イベントごとの雨量データ（最大連続雨量，最大時間雨量）の頻度分布を示している．50mm 未満の最大連続雨量の発生頻度が全降雨イベントの 92%，10mm 未満の最大時間雨量の発生頻度が 78%を占めている．また，図 3.4 に，降雨イベントにおける最大連続雨量と最大時間雨量の関係，および斜面災害発生の有無を示している．図中赤色プロットにおいて斜面災害が発生しており，最大連続雨量，最大時間雨量ともに大きくなるに従って，斜面災害が発生しやすくなると読み取ることができる．

表 3.1　対象路線の IC 区間別データ諸元

IC 区間 No.	供用年数	メッシュ数	降雨件数	メッシュ当たりの降雨イベント数	斜面災害発生件数
1	29	4	2,023	505.75	1
2	29	22	11,650	529.55	0
3	30	17	8,921	524.76	0
4	30	20	10,224	511.20	0
5	26	18	9,460	525.56	2
6	26	10	5,580	558.00	0
7	19	13	7,396	568.92	1
8	14	15	10,072	671.47	3
9	14	12	8,584	715.33	0
10	6	12	9,178	764.83	0
合計	-	143	78,069	545.94	7



(a) 最大連続雨量の頻度分布



(b) 最大時間雨量の頻度分布

図 3.3　雨量データの頻度分布

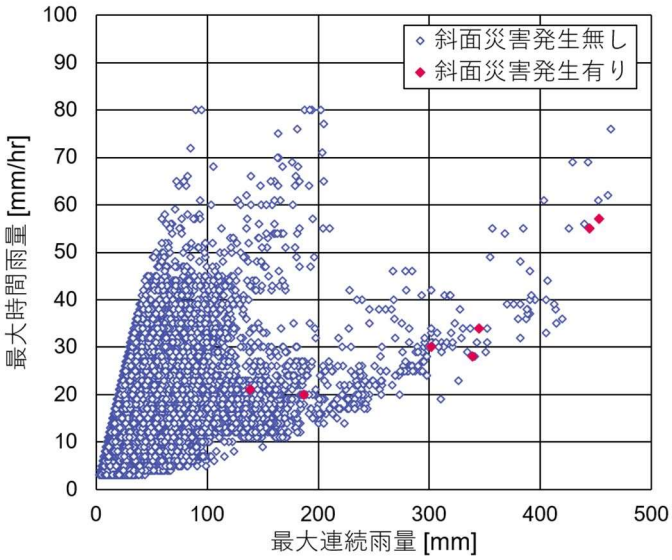


図 3.4　降雨イベントと斜面災害事例の関係

3.5.2 斜面災害発生モデルの推定結果

3.5.1 項で述べたデータベースから斜面災害発生モデルを推定した．斜面災害発生確率に影響を及ぼすような素因の特性変数の候補として，1）土工比率，2）合計流域面積，3）切土数，4）合計切土延長，5）最大切土延長，6）最大切土直高，7）合計切土面積，8）平均切土面積，9）最大切土段数，10）最大平均斜長（切土），11）合計盛土延長，12）最大盛土直高，13）合計盛土面積，14）最大盛土段数，15）最大平均斜長（盛土）の 15 項目をとりあげた．図 3.5 にメッシュ単位の素因情報を算出するための，切土，盛土，橋梁，流域，トンネルの取り扱い方法を概念図として示す．個々の切土，盛土，トンネル，橋梁，流域で獲得された素因情報は表 3.2 のように整理できる．それらの素因情報を用いて表 3.3 に示す定義により，メッシュ単位で特性変数の候補の値を算出する．同表には，それぞれの特性変数の候補の統計量も示す．また，特性変数間の相関は表 3.4 に示すように高い相関関係にある変数が多く，表中の相関係数の値が 0.6 以上となる特性変数は多重共線性の影響を回避するために，同時に用いないこととした．なお，特性変数ベクトルは表 3.3 に示す各項目の最大値が 1 となるように基準化した値を使用している．斜面災害確率に影響を及ぼす誘因として，最大連続雨量と最大時間雨量を用いる．これら 17 個の特性変数の組合せの中から，パラメータの符号条件と t–検定統計量を考慮し，AIC[11]の最小化を達成する特性変数の組合せを持つモデルを，本適用事例でのもっとも望ましい部分モデル（3-8a）として選択した．なお，AIC は推定された部分モデルの対数尤度関数$\ln\hat{\mathcal{L}}_1(\hat{\phi}_1|\hat{\Xi})$と部分モデル（3-8a）の未知パラメータの数 q を用いて，

$$\mathrm{AIC} = -2\ln\hat{\mathcal{L}}_1(\hat{\phi}_1|\hat{\Xi}) + 2q \tag{3-27}$$

と表現できる．モデルのパラメータ推定結果を表 3.5 に示す．なお，ここでは，路線内の全てのデータを用いて 1 つの斜面災害発生モデルを推定した．斜面災害発生モデルの特性変数として，素因は合計切土面積が，誘因は最大連続雨量が採用された．この推定結果を用いて，斜面災害発生確率は図 3.6 のように表現できる．同図からわかるように斜面災害発生確率は合計切土面積と最大連続雨量が大きくなるにつ

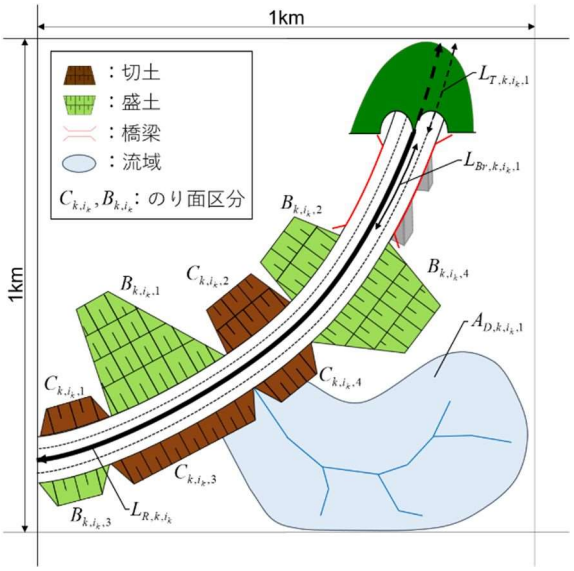


図 3.5　メッシュ i_kにおける素因情報の概念図

表 3.2　メッシュ i_kの素因情報

	切土					盛土				
のり面番号	1	$\cdots$	n_C	$\cdots$	N_C	1	$\cdots$	n_B	$\cdots$	N_B
のり面名称	$C_{k,i_k,1}$	$\cdots$	C_{k,i_k,n_C}	$\cdots$	C_{k,i_k,N_C}	$B_{k,i_k,1}$	$\cdots$	B_{k,i_k,n_B}	$\cdots$	B_{k,i_k,N_B}
のり面延長	$L_{C_{k,i_k},1}$	$\cdots$	L_{C_{k,i_k},n_C}	$\cdots$	L_{C_{k,i_k},N_C}	$L_{B_{k,i_k},1}$	$\cdots$	L_{B_{k,i_k},n_B}	$\cdots$	L_{B_{k,i_k},N_B}
のり面面積	$A_{C_{k,i_k},1}$	$\cdots$	A_{C_{k,i_k},n_C}	$\cdots$	A_{C_{k,i_k},N_C}	$A_{B_{k,i_k},1}$	$\cdots$	A_{B_{k,i_k},n_B}	$\cdots$	A_{B_{k,i_k},N_B}
のり面段数	$S_{C_{k,i_k},1}$	$\cdots$	S_{C_{k,i_k},n_C}	$\cdots$	S_{C_{k,i_k},N_C}	$S_{B_{k,i_k},1}$	$\cdots$	S_{B_{k,i_k},n_B}	$\cdots$	S_{B_{k,i_k},N_B}
のり面直高	$H_{C_{k,i_k},1}$	$\cdots$	H_{C_{k,i_k},n_C}	$\cdots$	H_{C_{k,i_k},N_C}	$H_{B_{k,i_k},1}$	$\cdots$	H_{B_{k,i_k},n_B}	$\cdots$	H_{B_{k,i_k},N_B}
のり面平均斜長	$D_{C_{k,i_k},1}$	$\cdots$	D_{C_{k,i_k},n_C}	$\cdots$	D_{C_{k,i_k},N_C}	$D_{B_{k,i_k},1}$	$\cdots$	D_{B_{k,i_k},n_B}	$\cdots$	D_{B_{k,i_k},N_B}
トンネル番号	1		$\cdots$		n_T		$\cdots$			N_T
トンネル長	$L_{T,k,i_k,1}$		$\cdots$		L_{T,k,i_k,n_T}		$\cdots$			L_{T,k,i_k,N_T}
橋梁番号	1		$\cdots$		n_{Br}		$\cdots$			N_{Br}
橋梁長	$L_{Br,k,i_k,1}$		$\cdots$		$L_{Br,k,i_k,n_{Br}}$		$\cdots$			$L_{Br,k,i_k,N_{Br}}$
流域番号	1		$\cdots$		n_D		$\cdots$			N_D
流域面積	$A_{D,k,i_k,1}$		$\cdots$		A_{D,k,i_k,n_D}		$\cdots$			A_{D,k,i_k,N_D}
路線長	L_{R,k,i_k}									

表 3.3　素因の特性変数候補の詳細

番号	特性変数名	定義	最大値	最小値	平均値
1	土工比率	$(L_{R,k,i_k} - \sum_{n_T=1}^{N_T} L_{T,k,i_k,n_T} - \sum_{n_{Br}=1}^{N_{Br}} L_{Br,k,i_k,n_{Br}}) \,/\, L_{R,k,i_k}$	1	0	0.7
2	合計流域面積 [ha]	$\sum_{n_D=1}^{N_D} A_{D,k,i_k,n_D}$	187	0	15.2
3	切土数	N_C	26	0	8.6
4	合計切土延長 [m]	$\sum_{n_C=1}^{N_C} L_{C_{k,i_k},n_C}$	3,282	0	948.9
5	最大切土延長 [m]	$\sum_{n_C=1}^{N_C} L_{C_{k,i_k},n_C}$	2,853	0	282.7
6	最大切土直高 [m]	$\max\{H_{C_{k,i_k},n_C}, n_C = 1, 2, \cdots, N_C\}$	130.6	0	40.8
7	合計切土面積 [m^2]	$\sum_{n_C=1}^{N_C} A_{C_{k,i_k},n_C}$	100,353	0	14,362.9
8	平均切土面積 [m^2]	$(\sum_{n_C=1}^{N_C} A_{C_{k,i_k},n_C}) \,/\, N_C$	8,363	0	1,761.8
9	最大切土段数	$\max\{S_{C_{k,i_k},n_C}, n_C = 1, 2, \cdots, N_C\}$	12	0	5.0
10	最大平均斜長（切土）[m]	$\max\{D_{C_{k,i_k},n_C}, n_C = 1, 2, \cdots, N_C\}$	520.0	0	43.9
11	合計盛土延長 [m]	$\sum_{n_B=1}^{N_B} L_{B_{k,i_k},n_B}$	5,304	0	1,410.5
12	最大盛土直高 [m]	$\max\{H_{B_{k,i_k},n_B}, n_B = 1, 2, \cdots, N_B\}$	67	0	17.2
13	合計盛土面積 [m^2]	$\sum_{n_B=1}^{N_B} A_{B_{k,i_k},n_B}$	49,920	0	16,465.5
14	最大盛土段数	$\max\{S_{B_{k,i_k},n_B}, n_B = 1, 2, \cdots, N_B\}$	10	0	2.6
15	最大平均斜長（盛土）[m]	$\max\{D_{B_{k,i_k},n_B}, n_B = 1, 2, \cdots, N_B\}$	165.3	0	30.4

表 3.4　素因の特性変数間の相関関係

相関係数	特性変数番号														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1.00	0.11	0.27	0.37	0.20	0.00	0.19	0.14	0.15	−0.07	0.38	0.02	0.31	−0.07	0.05
2	–	1.00	0.25	0.27	0.19	0.21	0.16	−0.03	0.29	0.03	0.08	0.11	0.06	0.06	−0.07
3	–	–	1.00	0.78	0.06	0.30	0.61	−0.10	0.28	0.08	0.23	0.30	0.27	0.23	0.11
4	–	–	–	1.00	0.60	0.22	0.63	0.20	0.25	−0.02	0.27	0.15	0.23	0.07	0.04
5	–	–	–	–	1.00	−0.04	0.19	0.37	0.03	−0.07	0.02	−0.04	−0.04	−0.07	−0.06
6	–	–	–	–	–	1.00	0.71	0.57	0.84	0.49	0.15	0.27	0.21	0.26	0.17
7	–	–	–	–	–	–	1.00	0.59	0.60	0.35	0.35	0.24	0.34	0.21	0.17
8	–	–	–	–	–	–	–	1.00	0.55	0.33	0.10	0.00	0.07	0.01	0.03
9	–	–	–	–	–	–	–	–	1.00	0.43	0.11	0.18	0.11	0.15	0.05
10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1.00	−0.02	0.11	0.00	0.11	0.00
11	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1.00	0.06	0.83	0.02	0.32
12	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1.00	0.41	0.83	0.41
13	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1.00	0.35	0.58
14	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1.00	0.48
15	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1.00

表 3.5　部分モデル 3-8a の推定結果

特性変数名 パラメータ	定数項 α	合計切土面積 β_7	最大連続雨量 γ_1
推定値	− 13.35	5.37	11.71
($t-$ 値)	(−10.00)	(3.95)	(7.84)
対数尤度	−26.39		
AIC	58.78		

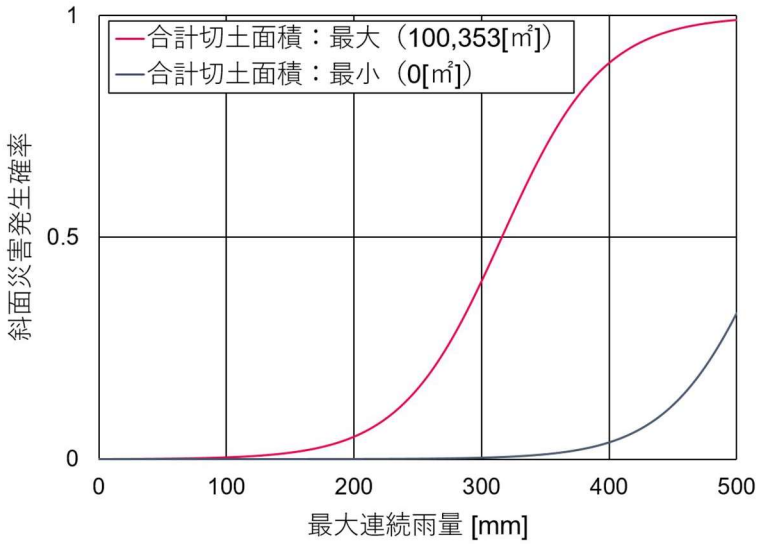


図 3.6　斜面災害発生確率

れ大きくなる．例えば，最大連続雨量が 400mm の場合，合計切土面積が最大（100,353m²）のメッシュと最小（0m²）のメッシュでは，斜面災害発生確率に 85.6%の差異がみられる．本章の適用事例では，斜面災害発生モデルの誘因の特性変数として最大連続雨量に加え，最大時間雨量の採用も試みたが，斜面災害の発生に影響を与えたと考えられる降雨イベントにおける最大時間雨量値は 20mm/h から 57mm/h と比較的小さく，それ以上に大きな最大時間雨量値で斜面災害が発生していないデータが相当数あったため，モデルの未知パラメータの推定結果における符号条件が満足されない結果となった．すなわち，最大時間雨量が小さいほど，斜面災害が発生する確率が大きくなるという結果となった．そのため，斜面災

害発生モデルの誘因の特性変数としては最大連続雨量の採用に留めた．この点に関しては，高速道路において講じられているハード対策が影響していることが推察される．また，この推定結果は現時点で獲得されたデータに基づく結果であり，今後データの蓄積が進むにつれ，推定結果が変化する可能性があることにも留意しなければならない．実際に今回の分析に用いた災害発生履歴は 7 件であり，今後斜面災害が発生すると，推定結果が変化することは想像に難くない．斜面災害のような希少事象を分析対象とする場合には，データの質・量ともに留意する必要がある．

部分モデル（3-8b）の推定にあたっては，現行の通行規制では IC 区間ごとに設置されている雨量計における雨量観測値により通行規制実施の判断を行っていることから，IC 区間を基本単位として同時確率分布を定義し，推定を行うこととした．また，推定に用いる降雨データ（最大連続雨量，最大時間雨量）は，当該 IC 区間内の各メッシュにおいて，観測期間内の最大連続雨量の和が最大となるメッシュを代表メッシュとし，代表メッシュで記録された雨量観測値を用いることとした．なお，代表メッシュを経時的に（例えば，降雨イベントごとに）変化させることや IC 区間内の各メッシュの雨量の統計量を用いて，IC 区間を代表する雨量を定義することも理論的には可能であるが，ここでは，規制基準値設定方法の煩雑化を避けるために，上記のように代表メッシュを固定した上で分析を行う．部分モデル（3-8b）の推定にあたり，$g(\varepsilon_1:\theta_1)$，$h(\varepsilon_2:\theta_2)$の候補としてそれぞれ一般化極値分布，ガンマ分布を考え，IC 区間ごとに各分布のパラメータを推定した．推定結果を表 3.6 に示す．表中の AIC を比較することにより，$g(\varepsilon_1:\theta_1)$をガンマ分布，$h(\varepsilon_2:\theta_2)$もガンマ分布と特定化した．同時確率分布は，IC 区間 No.8 を例にすると，

$$
\begin{aligned}
&f\left(\varepsilon_1,\varepsilon_2:\hat{\theta}\right)\\
&\quad= g\left(\varepsilon_1:\ \hat{\theta}_1\right)\frac{h\left(\varepsilon_2:\hat{\theta}_2\right)}{H\left(\varepsilon_1:\hat{\theta}_2\right)-H\left(0:\hat{\theta}_2\right)}\\
&\quad= \frac{\varepsilon_1^{1.32-1}\cdot\exp\left(-\frac{\varepsilon_1}{15.89}\right)}{\Gamma(1.32)\cdot 15.89^{1.32}}\cdot\frac{\varepsilon_2^{2.40-1}\cdot\exp\left(-\frac{\varepsilon_2}{2.89}\right)}{\Gamma(2.40)\cdot 2.89^{2.40}}\cdot\frac{1}{H\left(\varepsilon_1:\hat{\theta}_2\right)-H\left(0:\hat{\theta}_2\right)}
\end{aligned}
\tag{3-28}
$$

と特定化できる．これらの推定結果を用いて，IC 区間 No.8 における双方の雨量指標の同時確率分布を図 3.7 に示す．なお，図 3.7 中の左上半分の空白部分は確率密度が 0 であり，双方の雨量指標における制約条件式（3-11）を満足している．また，式（3-3a），（3-3b）に示す斜面災害発生モデルは，図 3.8 のように示すことができる．図 3.8(a)は，最大連続雨量，最大時間雨量の値のペアと斜面災害が発生するという事象の同時確率密度を，図 3.8(b)は，最大連続雨量，最大時間雨量の値のペアと斜面災害が発生しないという事象の同時確率密度をそれぞれ表す．図 3.8(a)，図 3.8(b)を比較すると，災害が発生しない確率を表す斜面災害発生モデルの同時確率密度が相対的に大きなオーダーを取っており，降雨イベントが一度発生するという試行を考えた場合に，斜面災害が発生する確率は極めて低いことがわかる．また，図 3.6 に示した斜面災害発生確率は最大連続雨量の増加に伴い増加し，図 3.7 に示した雨量指標の同時確率分布は最大連続雨量が 5mm 以下かつ最大時間雨量が 5mm/h 以下で同時確率密度が大きな値を取っている．これらの事象の同時確率密度を表す図 3.8(a)の斜面災害発生モデルにおいて，最大連続雨量が 5mm 以下かつ最大時間雨量が 5mm/h 以下で同時確率密度が大きな値を取っており，斜面災害発生モデルにおいて雨量指標の同時確率分布の形状の影響が支配的であると推察できる．すなわち，少量の最大連続雨量，最大時間雨量を持つ降雨イベントの発生頻度が相対的に卓越しており，図 3.8(a)の斜面災害発生モデルにおいてその影響が斜面災害発生確率による影響と比較して大きいということが推察できる．このことから，最大連続雨量，最大時間雨量は小さいが頻度が多いような降雨イベントに起因して発生する斜

表 3.6　部分モデル 3-8b の推定結果

		ガンマ分布		一般化極地分布		
		形状パラメータ k	尺度パラメータ σ	形状パラメータ k	尺度パラメータ σ	位置パラメータ μ
IC区間 No.1	推定値(最大連続雨量)	1.46	13.79	0.63	6.74	9.46
	対数尤度	-1,769.91		-2,008.45		
	AIC	3,543.82		4,020.91		
	推定値(最大時間雨量)	2.29	3.26	5.03	0.63	3.13
	対数尤度	-1,470.93		-2,390.01		
	AIC	2,945.86		4,786.02		
IC区間 No.2	推定値(最大連続雨量)	1.34	17.50	0.68	7.72	10.38
	対数尤度	-1,956.63		-2,219.64		
	AIC	3,917.27		4,443.29		
	推定値(最大時間雨量)	2.11	3.88	4.99	1.16	3.23
	対数尤度	-1,634.30		-2,591.36		
	AIC	3,272.60		5,186.71		
IC区間 No.3	推定値(最大連続雨量)	1.22	19.94	0.75	7.67	9.92
	対数尤度	-1,924.15		-2,189.18		
	AIC	3,852.30		4,382.35		
	推定値(最大時間雨量)	1.93	4.34	4.14	0.62	3.15
	対数尤度	-1,626.83		-2,486.62		
	AIC	3,257.67		4,977.24		
IC区間 No.4	推定値(最大連続雨量)	1.25	18.41	0.73	7.17	9.60
	対数尤度	-1,841.14		-2,088.55		
	AIC	3,686.28		4,181.11		
	推定値(最大時間雨量)	1.96	4.18	5.03	0.78	3.15
	対数尤度	-1,561.41		-2,387.71		
	AIC	3,126.82		4,977.24		
IC区間 No.5	推定値(最大連続雨量)	1.25	17.38	0.70	6.66	9.21
	対数尤度	-1,859.82		-2,107.54		
	AIC	3,723.64		4,219.08		
	推定値(最大時間雨量)	2.15	3.60	5.00	1.03	3.21
	対数尤度	-1,561.94		-2,425.03		
	AIC	3,127.88		4,854.06		
IC区間 No.6	推定値(最大連続雨量)	1.33	15.62	0.67	6.58	9.27
	対数尤度	-17,754.30		-20,122.41		
	AIC	35,512.55		40,248.82		
	推定値(最大時間雨量)	2.18	3.39	4.79	0.53	3.11
	対数尤度	-14,773.10		-23,820.95		
	AIC	29,550.22		47,645.91		
IC区間 No.7	推定値(最大連続雨量)	1.37	15.10	0.65	6.50	9.46
	対数尤度	-1,972.53		-2,235.91		
	AIC	3,949.06		4,475.81		
	推定値(最大時間雨量)	2.31	3.13	5.04	0.54	3.11
	対数尤度	-1,619.34		-2,700.35		
	AIC	3,242.69		5,404.71		
IC区間 No.8	推定値(最大連続雨量)	1.32	15.89	0.67	6.69	9.29
	対数尤度	-2,557.87		-2,917.86		
	AIC	5,119.75		5,839.73		
	推定値(最大時間雨量)	2.40	2.89	5.16	1.10	3.21
	対数尤度	-2,058.39		-3,497.28		
	AIC	4,120.78		6,998.57		
IC区間 No.9	推定値(最大連続雨量)	1.26	16.45	0.69	6.40	8.98
	対数尤度	-2,486.75		-2,830.92		
	AIC	4,977.48		5,665.85		
	推定値(最大時間雨量)	2.25	3.07	3.91	0.07	3.02
	対数尤度	-2,028.11		-3,361.80		
	AIC	4,060.22		6,727.60		
IC区間 No.10	推定値(最大連続雨量)	1.41	14.39	0.61	6.80	9.54
	対数尤度	-2,748.80		-3,133.24		
	AIC	5,501.59		6,270.47		
	推定値(最大時間雨量)	2.53	2.60	5.13	1.98	3.39
	対数尤度	-2,171.98		-3,882.03		
	AIC	4,347.96		7,768.07		

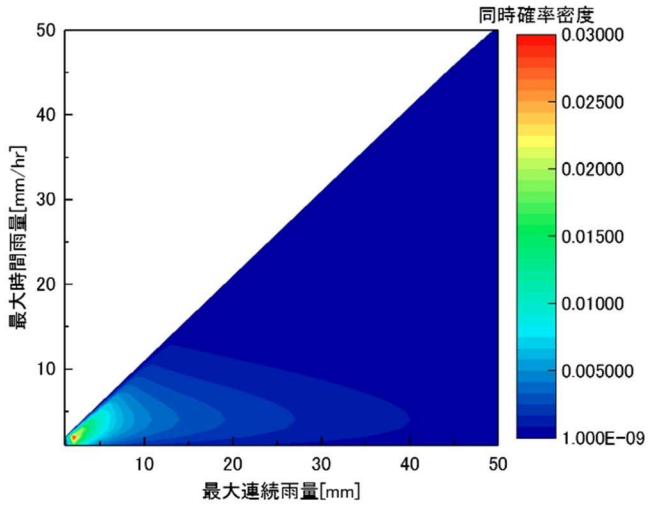
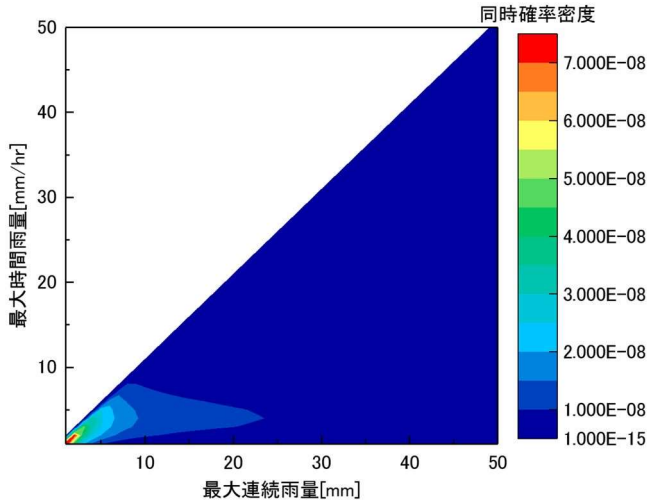
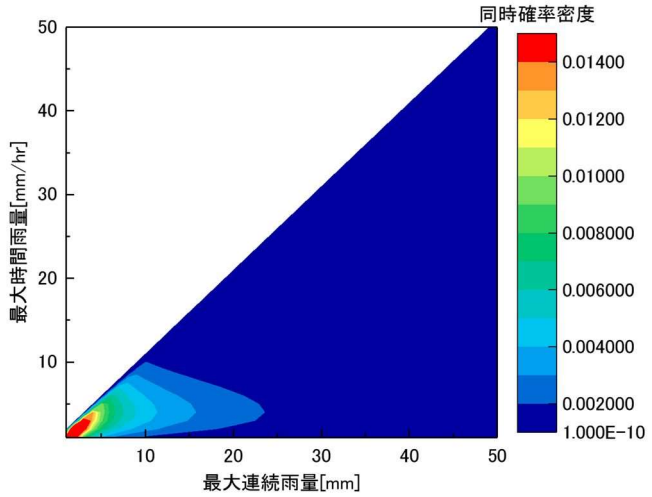


図 3.7　雨量指標の同時確率分布（IC 区間 No.8）



(a)　災害が発生する確率を表す斜面災害発生モデル



(b)　災害が発生しない確率を表す斜面災害発生モデル

図 3.8　斜面災害発生モデル（IC 区間 No.8）

面災害に対して，ハード対策などにより，斜面災害のリスクを大きく低減できる可能性があると言える．一方で，台風や集中豪雨などに伴う，頻度は少ないが最大連続雨量，最大時間雨量が大きい降雨イベントに起因した斜面災害に対しても，斜面災害発生モデルにおける同時確率密度は相対的に小さいものの，図 3.6 に示した通り斜面災害発生確率を大きく上昇させるため，対策が必要であることは言うまでもない．この点に対して，提案する通行規制基準の最適化モデルを用いた基準値の試算を通じて，3.5.3 項でその分析結果を示す．

3.5.3 最適規制基準値設定モデルを用いた分析結果

a) 分析の概要

3.5.2 項において推定された斜面災害発生モデルを用いて，安全面でのリスク$R_k(w_k,\hat{\phi},\hat{\theta}_k)$，社会損失面でのリスク$R_k^c(w_k,\hat{\phi},\hat{\theta}_k)$を算出する．それぞれ$R_k(w_k,\hat{\phi},\hat{\theta}_k)$を式(3-22)あるいは式（3-23），$R_k^c(w_k,\hat{\phi},\hat{\theta}_k)$を式（3-24）あるいは式（3-25）で定義する．

双方のリスクの重み付けを，リスク費用を用いて行う．本適用事例では，安全面でのリスクに関する費用を「発生した 1 件の斜面災害に伴う人身損失額」と仮定する．一方で，社会損失面でのリスクに関する費用を「1 回の通行規制の実施により得られなくなる，本来得られるはずであった料金収入」と仮定する．安全面でのリスクに関する費用 Cは，

$$C=\frac{(M_1+M_2)\times I}{2} \tag{3-29}$$

$$M_1=\frac{(\text{時間交通量})}{1000\times(\text{走行距離})}\times(\text{平均乗客数})\times(\text{崩壊の到達幅}) \tag{3-30}$$

$$M_2=\frac{(\text{時間交通量})}{1000\times(\text{走行距離})}\times(\text{平均乗客数})\times(\text{制動停止距離}) \tag{3-31}$$

と定義する [5]．ここに，M_1 は土砂への埋没による被災人数，M_2 は到達土砂への車両衝突による被災人数，Iは死亡時の 1 人当たりの人身損失額を表す．人身損失額 Iは既往の文献 [12]を参考に 259,000 千円とし，M_1 と M_2 の算出に必要な諸元は，名神高速道路のように重交通路線ではなく，一般的な交通量の路線を想定し以下の通りに設定した．

・平均乗員数：2 人
・走行速度：100km/h
・崩壊の到達幅：10m
・制動停止距離：100m

一方で，社会損失面でのリスク費用 C^cは，

$$C^C=(\text{時間交通量})\times(\text{1 回あたりの通行規制時間})\times(\text{区間料金}) \tag{3-32}$$

を用いて算出する．また，社会損失面でのリスク費用 C^cの算出に必要な諸元は，安全面でのリスクに関するリスク費用 Cと同様に，以下の通りに設定した．

・1 回あたりの通行規制時間：10 時間
・区間料金：500 円

以上の算出式より，安全面でのリスク費用 Cは 356,125 千円，社会損失面でのリスク費用 C^cは 6,250 千

円となり，前者は後者の 57 倍となった．そこで，本章の適用事例では，双方の比をとることにより C_{I}=57，C_{II}=1 と基準化した．これは，安全面でのリスクの重要性を社会損失面でのリスクの重要性の 57 倍と設定したことを意味する．以上のように安全面でのリスクと社会損失面でのリスク費用を設定し，式（3-17）と式（3-21）により IC 区間 k 単位での両リスクの定量化を行った．その際，式（3-15）と式（3-20）における積分計算はモンテカルロ法による数値積分を用いた．また，現行の規制基準値は 5mm 単位で設定されていることから施策変数$w_k = (u_{k,1}, u_{k,2}, v_k)$をそれぞれ 5mm 単位で 50mm≤$u_{k,1}$≤400mm，50mm≤$u_{k,2}$≤200mm，5mm≤$v_k$≤50mm の範囲で変動させ，71×51×10=36,210 通りの候補から総当たり法により最適規制基準値を設定した．

b）最適規制基準値

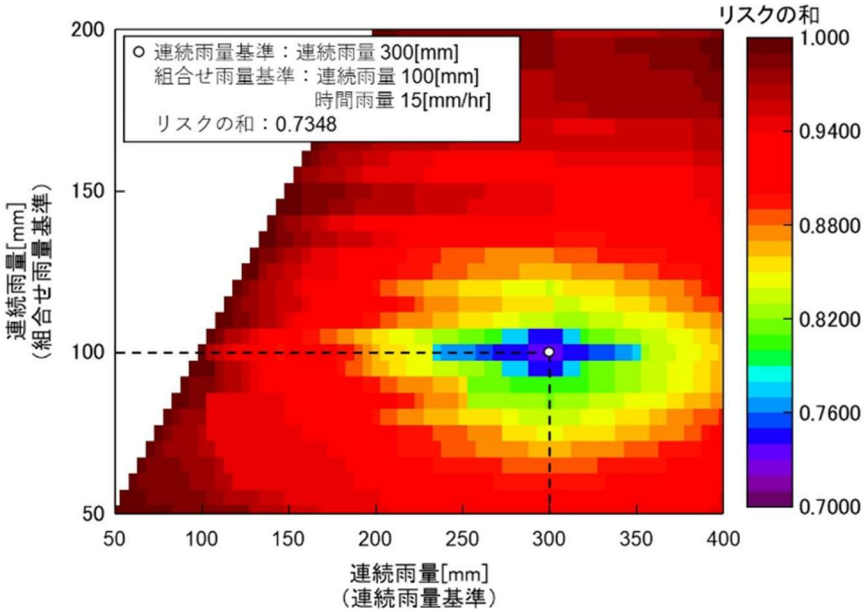
最適規制基準値の算出結果を表 3.7 に示す．連続雨量基準および組合せ雨量基準における最大連続雨量値は各 IC 区間で変動するのに対し，組合せ雨量基準における最大時間雨量値はすべての IC 区間で 15mm/h となった．最大時間雨量値に IC 区間ごとで変動がない点については，以下の理由が考えられる．一つは，斜面災害発生モデルの特性変数として最大時間雨量が採用されなかったことにより，図 3.8(a)，図 3.8(b)における最大時間雨量軸方向の変動に，最大時間雨量値が斜面災害の発生に及ぼす影響が含まれてないこと，もう一つは，各 IC 区間における最大時間雨量の生起確率分布に大差がないこと，である．また，最大時間雨量値が 15mm/h と現行の基準値（約 40～45mm/h）と比べ小さい値となっている点については，適用事例において社会損失面の費用 C_{II}が過小に設定されていることに起因すると考えられる．適用事例においては，社会損失面の費用 C_{II}を 1 回の通行規制の実施により得られなくなる，本来得られるはずであった料金収入と仮定した．しかし，本来得られるはずであった料金収入はあくまでも道路管理者が負担する損失を表しており，高速道路の公共性を考えた場合には，通行規制の空振りにより道路利用者が高速道路の利用を取りやめることによる効用の低下など，本章では扱わなかったが，考慮した方が良い損失も存在する．また，安全面でのリスクに関する費用に関しても，通行規制実施前に発生した斜面災害による道路管理者の社会的な価値の低下なども考慮することが望ましい．本章では，最適規制基準値の設定手法の提案を主眼としているため，個々の費用の決定など細部の検討は，別の研究に委ねることとする．

表 3.7　最適規制基準値算出結果

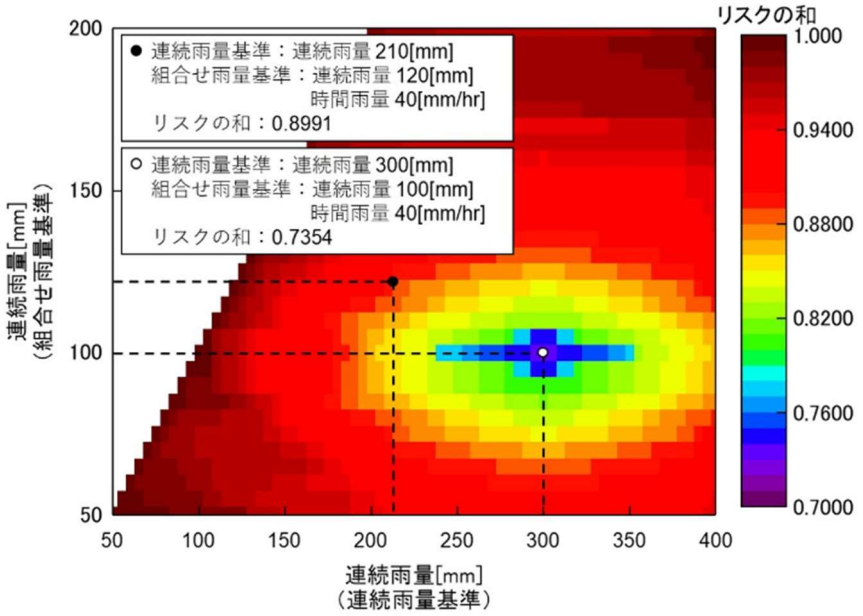
IC 区間 No.	合計切土面積（IC 区間の平均値）	算出結果		
		連続雨量基準	組合せ雨量基準	
		最大連続雨量 [mm]	最大連続雨量 [mm]	最大時間雨量 [mm/hr]
1	15,360.9	305	110	15
2	11,869.2	310	115	15
3	6,651.2	310	120	15
4	12,802.4	305	110	15
5	10,534.5	310	115	15
6	9,891.3	310	115	15
7	18,699.8	305	105	15
8	20,318.8	300	100	15
9	10,669.8	310	115	15
10	13,996.1	305	110	15

c) 感度分析

図 3.9 には IC 区間 No.8 における安全面でのリスク値と社会損失面でのリスク値の和（目的変数）を示している．当該 IC 区間の現行の規制基準値は，連続雨量基準における最大連続雨量値が 210mm，組合せ雨量基準における最大連続雨量値が 120mm，最大時間雨量値が 40mm/h と設定されている．施策変数をv_k=15mm/h と固定し$u_{k,1}$，$u_{k,2}$を変動させる場合（図 3.9(a)）と，施策変数をv_k=40mm/h と固定し$u_{k,1}$，$u_{k,2}$を変動させる場合（図 3.9(b)）を考える．最適規制基準値設定モデルにより獲得される最適規制基準値ベクトルにおける両リスクの和は 0.7348 であるのに対し，現行の規制基準値ベクトルにおける両リスクの和は 0.8991 となる．このことから，最適規制基準値ベクトルを規制基準値とした場合，現



(a)　時間雨量 15mm/h で固定



(b)　時間雨量 40mm/h で固定

図 3.9　両リスクの和（IC 区間 No.8）

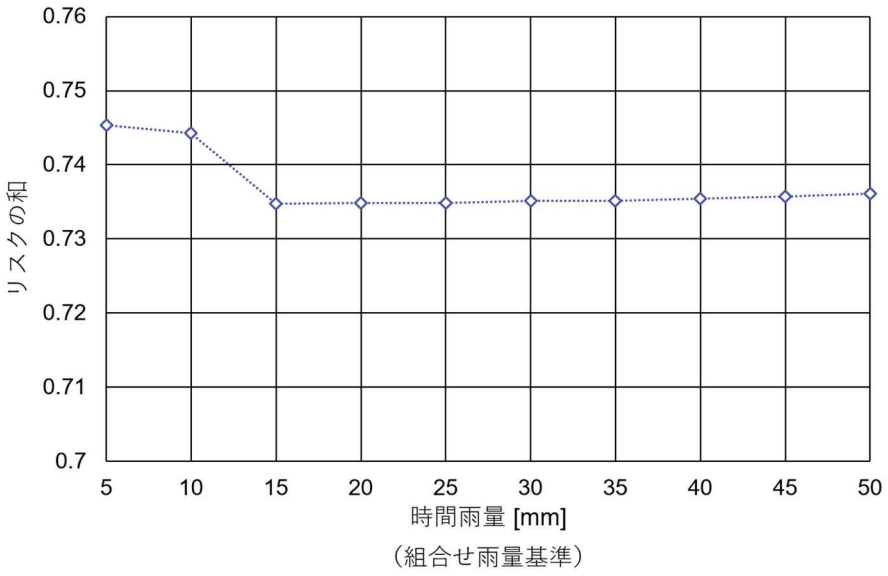


図 3.10　連続雨量基準の連続雨量 300mm，組合せ雨量基準の連続雨量 100mm で固定した場合の組合せ雨量基準の時間雨量に対するリスクの和（IC 区間 No.8）

行の規制基準値よりも低減されるリスクの期待値は 0.1643 となり，費用に換算すると 1,027（千円/降雨イベント）となる．3.5.3.b)で述べたように，最適規制基準値の組合せ雨量基準の最大時間雨量値が過小評価されている可能性がある．そこで，施策変数を現行のv_k=40mm/h と固定し$u_{k,1}$，$u_{k,2}$を最適化した場合（図 3.9(b)）の最適規制基準値ベクトル$\hat{w}_k = (300mm, 100mm, 40mm/h)$と，IC 区間 No.8 における最適規制基準値ベクトル$\hat{w}_k = (300mm, 100mm, 15mm/h)$（図 3.9(a)）における両リスクの和の変動についても考えると，前者の場合は 0.7354，後者の場合は 0.7348 となる．両者の差（0.7354-0.7348=0.0006）は，例えば，現行の規制基準値ベクトルにおける両リスクの和と最適規制基準値ベクトルにおける両リスクの和の差 0.8991-0.7348=0.1643 と比較して相対的に小さい値となり，組合せ雨量基準の最大時間雨量値を変動させても目的関数である両リスクの和は，最適解の近傍に留まり続ける可能性が考えられる．この点に着目するために，図 3.10 には施策変数を$u_{k,1}$=300mm/h，$u_{k,2}$=100mm/h と固定し，v_kを変動させた場合の両リスクの和の変動を示している．同図から最大時間雨量値を変動させた場合のリスクの低減効果は最大連続雨量値を変動させた場合と比較して小さい結果となり，現行の規制基準値における最大連続雨量値を見直すだけでもリスクの低減に大きな効果をもつことがわかる．このように，提案手法を用いることにより，基準値の変動に対するリスクの増減に関する議論が可能となり，提案手法が有用であることが分かる．

3.6 まとめ

本章では，高速道路における斜面災害の発生と降雨時通行規制基準に着目し，素因情報（道路構造情報），誘因情報（雨量），斜面災害情報を用いて斜面災害発生モデルを推定し，推定されたモデルに基づいて 2 種類のリスク管理指標を定量化することにより降雨時の最適通行規制基準値を設定するための方法論を検討した．ここで得られた知見を下記にまとめる．

(1) ロジスティック関数を用いて，1km メッシュ毎の素因情報（道路構造），誘因情報（解析雨量）を説明変数とした斜面災害発生確率を定量化できた．
(2) 斜面災害発生確率を基にした「安全面でのリスク」と「社会損失面でのリスク」を定義し，定量化手法を提案した．
(3) それぞれに重みを乗じた両リスクの和が最小になる時の雨量値を，通行規制基準値とする設定手法を提案した．
(4) 同手法を用いて実際の高速道路区間で基準値を試算した結果，仮定する両リスクの重み付けに応じた最適な規制基準値を定められることが分かった．
(5) 同手法は，基準値に応じたリスクの和を定量的に求めることが可能で，それにより，基準値を変動させることによるリスクの増減に対する議論も可能となるため，その点においても有用な手法である．

参考文献

1) 国土交通省：道路統計年報，2016.

2) Taku Onji, Keiji Sakuradani, Kengo Obama, Daijiro Mizutani and Kiyoyuki Kaito：A Proposal for a Method to Establish Standards to Regulate Traffic in case of Possible Rain Induced Slope Disasters on Expressways , Proceedings of the 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, pp1747-1754, 2016

3) 高橋健二，大津宏康，大西有三：タンクモデル法による斜面の降雨時リスク評価法の研究，建設マネジメント研究論文集，Vol.10，2003.

4) 川越清樹，風間聡，沢本正樹：数値地理情報と降雨極値データを利用した土砂災害発生確率モデルの構築，自然災害科学，Vol.27，No.1，pp69-83，2008.

5) 山田敦浩，竹本大昭，小林央宜，倉本和正，荒川雅生，中山弘隆，古川浩平：豪雨時の道路事前通行規制基準雨量の設定に関する研究，砂防学会誌，Vol.57，No.6，pp.28-39，2005.

6) 大津宏康，梅川祐一朗：社会経済的損失を考慮した豪雨時の事前通行規制に関する検討，建設マネジメント研究論文集，Vol.15，2008.

7) 布川修，杉山友康，太田直之，畑明仁，堀倫裕，亀村勝美，岡田勝也：鉄道の降雨時運転規制を考慮した斜面崩壊の発生頻度期待値算出方法，土木学会論文集 C，Vol.66，No.1，pp.78-88，2010.2.

8) 岡田勝也，杉山友康，村石尚，野口達雄：統計的手法による鉄道盛土の降雨災害危険度の評価手法，土木学会論文集，No.448，Ⅲ-19，pp.25-34，1992.6.

9) 岩井重久，石黒政儀：応用水文統計学，森北出版，1970.

10) 気象庁：新たなステージに対応した防災気象情報と観測・予測技術のあり方，交通政策審議会第 20 回気象分科会，資料 1，2015.

11) 小西貞則，北川源四郎：予測と発見の科学　情報量基準，朝倉書店，2006.

12) 内閣府政策統括官（共生社会政策担当）：交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査研究報告書，2007.

第４章　変位発生に至る土中水分量の解明

4.1 はじめに

台風，梅雨前線の影響に加え，近年の異常気象に伴う突発的かつ局所的な集中豪雨により土砂災害が頻発している．高速道路における斜面防災対策は，第 1 章でも述べたようにハード対策とソフト対策があるが，中でもソフト対策の一つである，災害や変状発生前の通行規制がその重要な役割を担っている．通行規制は，基準値の指標として雨量指標が用いられているが，基準超過前に災害が発生する“見逃し”や基準超過後も災害が発生しない“空振り”が発生していることを述べた．リスクマネジメント手法に基づきそれらを最適にする基準値設定に関する方法論を前章で述べたが，同手法では“見逃し”をなくすことは難しい．そこで本章では，“見逃し”をなくすため，雨量による通行規制を捕捉するために，雨量に代わる，もしくは併用するための通行規制の新たな指標を提案する．具体的には，斜面崩壊メカニズムに対して雨量よりも支配的な土中水分量を指標とすることを提案する．

土砂災害には様々な種別があり，その種別ごとに着目すべき要因がある．図 4.1 に一般的な土砂災害の種別 [1] を示しているが，例えば切土や盛土の規模の大きい崩壊に対しては水位計による地下水位を，地すべりに対しては伸縮計による変位量を，土石流に対しては雨量計による短時間の降雨強度を避難開始判断に用いることが一般的である．一方，図 4.2 に，供用中の高速道路において発生した斜面崩壊の崩壊深さの内訳 [2] を示す．切土部，盛土部ともに深さ 1m以下の割合が約 9 割を占めており，表層崩壊への対応が重要であることが分かる．そこで，表層崩壊を土砂災害の主要な対象とし，内部摩擦角，粘着力，体積含水率，間隙水圧，地下水位といった表層崩壊の物理的機構に影響を与えるもののうち，最も容易にモニタリングが可能な体積含水率に着目する．

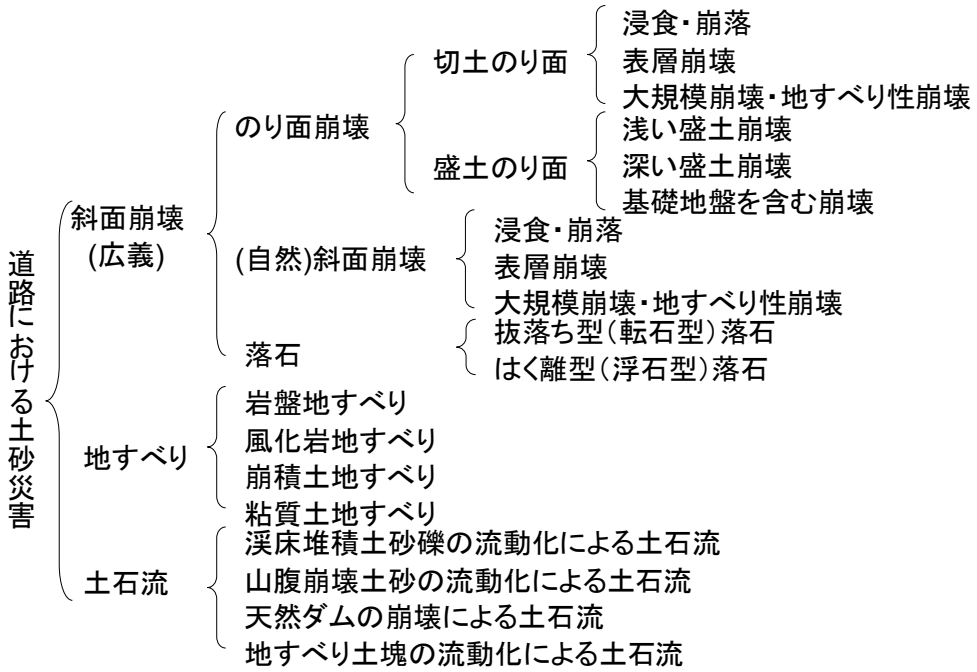


図 4.1　一般的な土砂災害の種別 [1]

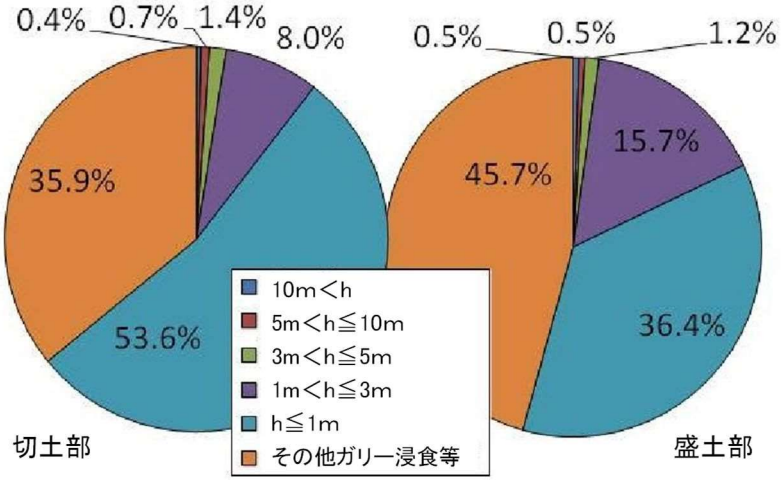


図 4.2　高速道路で発生した斜面崩壊の崩壊深さ [2)]

また，高速道路管理の視点で考えると，降雨によりのり面に変状があった時点で既に通行規制を完了しておく必要がある．通行規制には概ね 2，3 時間程度の準備時間を要すると仮定すれば，変状の発生を検出するより，変状の兆候をある程度の時間的余裕を持って未然に予測できる方が望ましい．

そこで本章では，変位が発生する以前の雨水浸透挙動から変形の兆候を未然に予測し，それを指標とする通行規制を検討する．すなわち本章では，土中水分量を通行規制の指標として活用するために，体積含水率に着目した模型斜面降雨実験およびカラム試験を行い，降雨時における体積含水率の上昇過程と変位発生の関係を明らかにする [1, 4)]．具体的には，4.1 節で本章の構成を述べ，4.2 節で研究背景と既往の研究を整理する．4.3 節では，簡易な模型斜面実験を行い，斜面崩壊プロセスにおける体積含水率の上昇過程において擬似的な飽和状態が発現することを明らかにし，これを擬似飽和体積含水率と定義するとともに，擬似飽和体積含水率を用いた斜面崩壊プロセスのモデル化を行う．4.4 節では，カラム試験を用いて擬似飽和現象を再現し，ある設定条件下における擬似飽和体積含水率の値を決定する．4.5 節では 4.4 節と同じ設定条件下で作製した模型斜面を用いて，擬似飽和体積含水率の再現性を確認し，擬似飽和体積含水率と斜面崩壊の関係を明らかにする．更に 4.6 節で，降雨中の体積含水率の上昇過程と詳細な変形挙動を模型斜面実験から整理し，4.3 節でモデル化した斜面崩壊プロセスの妥当性を明らかにし，土中水分量の通行規制指標としての有効性を述べる．最後に 4.7 節で本章を総括する．

4.2 本章に関連する既往の研究

のり面における表層崩壊メカニズムを概略的に捉えると，図 4.3 のような崩壊プロセスを示すと予想される．降雨によりのり面に水が浸透すると，間隙が水で満たされ飽和度が上昇する．降雨が続いた場合，斜面下方向への浸透流が発生し，地下水位が形成され，飽和度が上昇することで有効応力が減少し，表層がせん断変形することで崩壊が発生する．のり面を形成する表層の物性値や形状，降雨条件などにより，図 4.3 に示すプロセスの時間的スケールは異なるものの，過去の崩壊事例を評価すると概ね上述し

た傾向が見られるものと予想される．

ここで既往の研究と照らし合わせて考察すると，変位に着目した研究として，齋藤ら[5),6)]は，定常ひずみ速度とクリープ破壊時間の関係から崩壊時刻に関する予測式や図式解法を提案している．この関係式については，これまでに齋藤[5)]，山田ら[7)]，渡ら[8)]によって複数の現場で評価，検証がなされてきたが，これらは集中豪雨により短時間で発生する表層崩壊というよりも，数日後に崩壊に至るといった地すべり的挙動に対する予測手法である．これに対し Uchimura ら[9)]は，豪雨時の表層崩壊を対象に，斜面に傾斜計を設置し，傾斜角の変化を測定することで崩壊を未然に予測する手法を提案している．

一方，雨水浸透に着目した既往の研究として，北村ら[10)]は，降雨によるしらす斜面の表層すべり型崩壊予測を目的に，室内土層模型を用いて浸透，崩壊試験を実施した．この結果，間隙水圧を測定することで不飽和土中の浸透挙動を精度よく把握できるとしている．また，浸透水により負の間隙水圧が増加したあと，数 kPa で一定となり，ある程度の時間が経過すると崩壊が生じたと述べている．壇上[11)]らも室内大型土層試験，室内小型土層試験により，テンシオメータを用いた表層崩壊予測に関する可能性について述べている．ここでは，雨水浸透により斜面が飽和に近づくが封入空気により完全に飽和に至らない状態で地表面変位が発生し，その後，降雨の継続により地下水面が上昇し崩壊へ至るとしている．また，室内土層実験と現場計測結果より，飽和度が高い状態で変位が発生することを明らかにしているが，飽和度が高くなった後，どのタイミングで地表面変位が発生したかなどの定量的な記述はない．

これに対し，降雨浸透とせん断変形の関係性に着目した研究として，岩田ら[12)]は，2 年間の自然斜面での実測結果に基づき，不飽和状態の斜面の地表面変位は，サクションおよび体積含水率の変化量や比水分容量と比較的良い相関があるとし，初期水分状態や水分変化が斜面のせん断変形に影響を及ぼしているとしている．一方，ここでのせん断ひずみや地表面変位の値が小さいことから，引き続き計測を重ねると共に，現地降雨実験などを実施する必要があると述べている．また，笹原ら[13)]は，砂質模型斜面を用いて斜面の変形，崩壊までの地下水位と地表面変位の関係を明らかにし，この関係性を用いて降雨による崩壊を未然に予測できる手法を提案している．ただし，この提案手法を実斜面に適用するためには，降雨強度の変化する実際の降雨イベントによる検討が必要であるとしている．

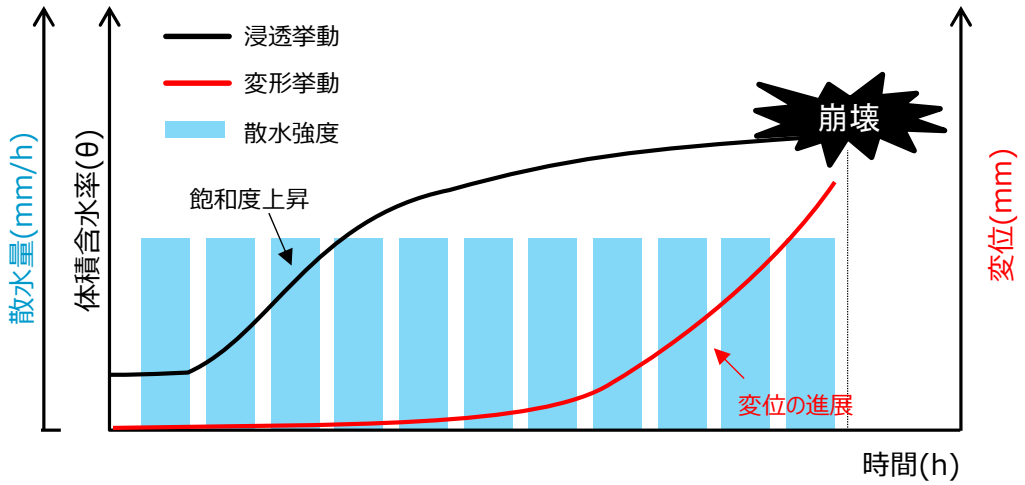


図 4.3　降雨による表層崩壊の概念図

以上を纏めると，集中豪雨により数時間から半日程度の短期間で発生するような表層崩壊を高精度に予測するためには，現場計測技術の高度化，データの蓄積に加えて，降雨の予測精度向上が不可欠であり，現状においてこのような崩壊形態に対して崩壊時刻を正確に予測するには課題がある．よって，本章では，崩壊時刻を正確に予測するのではなく，変形の兆候を未然に予測することに主眼をおくこととし，変位発生に至る土中水分量を明らかにする．

4.3 擬似飽和体積含水率を用いた表層崩壊プロセスのモデル化

4.3.1 簡易模型斜面実験の概要

本節では，斜面が崩壊する際の浸透と変形挙動を把握することを目的に，簡易的に作製した小型模型斜面への散水実験を行った．ここでの着眼点は，変形前の浸透挙動から崩壊の予兆を捉え，図 4.3 に示した浸透と変形の概念的な考え方をより具体化させることである．

図 4.4 に実験装置の概要，表 4.1 に対象試料の物性条件を，表 4.2 に実験条件を示す．対象試料は，現場で採取した土（砂岩泥岩互層崖錐堆積物の風化土）を用いた．本実験では，表層と基盤の境界面を不透水層とし，不透水層よりも上部で斜面下方向への浸透流を発生させることで，表層の浸透と変形の時間変化の関係を評価する．模型斜面は，基盤はシルト系粘性土を締め固めて作製し，その上部に不透水層として，厚さ 1.5cm の粘性土を挟み，その上に表層として含水比調整した厚さ 4cm の現場土を概ね一定の締固め度となるように作製した．表 4.1 は図 4.4 に示す No.1，No.2 付近の物性値を示している．降雨強度は時間 100mm で一定とし，土中の体積含水率の経時変化を把握するために，斜面上部および斜面下部にそれぞれ 1 台ずつ土壌水分センサ EC-5（Decagon 社，測定精度：±3.0%）を埋設し，実験開始時から計測間隔 1 分で計測した．なお，含水比調整した表層の No.1, No.2 の初期体積含水率がそれぞれ 0.258, 0.265 であり，ばらつきが EC-5 の精度内であることから個体差は無視できるものと判断した．一方，ここでの土壌水分センサの出力値には，メーカーが提供している校正式を使用していることから，絶対値の議論は避け，体積含水率の時間変化のみに着目して考察を行うこととした．次に，変形を捉えるために直径 2mm，長さ 90mm 程度の木製串を傾斜センサに見立てて，斜面上部からのり尻へ 4 点設置した．その際，木製串の先端部を表層下部の粘性土に 5mm 程度挿入することで，この端部が支点となって，散水に伴う表層のせん断変形が測定できるように設置した．なお，ここで使用した木製串は土に対して十分自重が小さく，また全長の 50%以上を土に埋設していることから，串の自重や散水に伴う雨滴の影響等による傾きは無いとして実験を行った．この木製串の傾きを計測するために，実験装置の側面に定点カメラを設置し，10 秒間隔で撮影した画像から傾きを検出した．ただし，この傾きの検出には目視判読を用いていることから，ここでの考察では絶対値での議論は避け，崩壊までの全体の傾向についてのみ評価を行うこととする．なお，土質模型実験を行う際の相似則の考え方[14),15)]として，変形を議論する場合には，土の応力ーひずみ関係を考慮する必要があることから，実大実験装置[16)]や遠心力載荷装置[17),18)]による研究が行われているが，遠心力載荷装置を使わない小型模型実験の場合，これらを考慮することができない．また，雨水浸透の定量的な挙動を議論する場合には，流体の粘性を調整することで透水係数の相似則を合わせる必要があるが，逆に土の保水性の相似則を満たすためには，これを低下させる必要

があり，両者の特性は相反するものとなる．これに対し，表層の不飽和地盤内における雨水浸透挙動を定性的な視点で捉えると，浸透に伴う体積含水率の相対変化は相似則に影響を受けずに評価することは可能であり，浸透と変形の関係についても，定性的な挙動の相対変化を議論する場合には同様であると考えられる．従って本章では，この視点に立って以降の実験結果の考察を行うこととする．

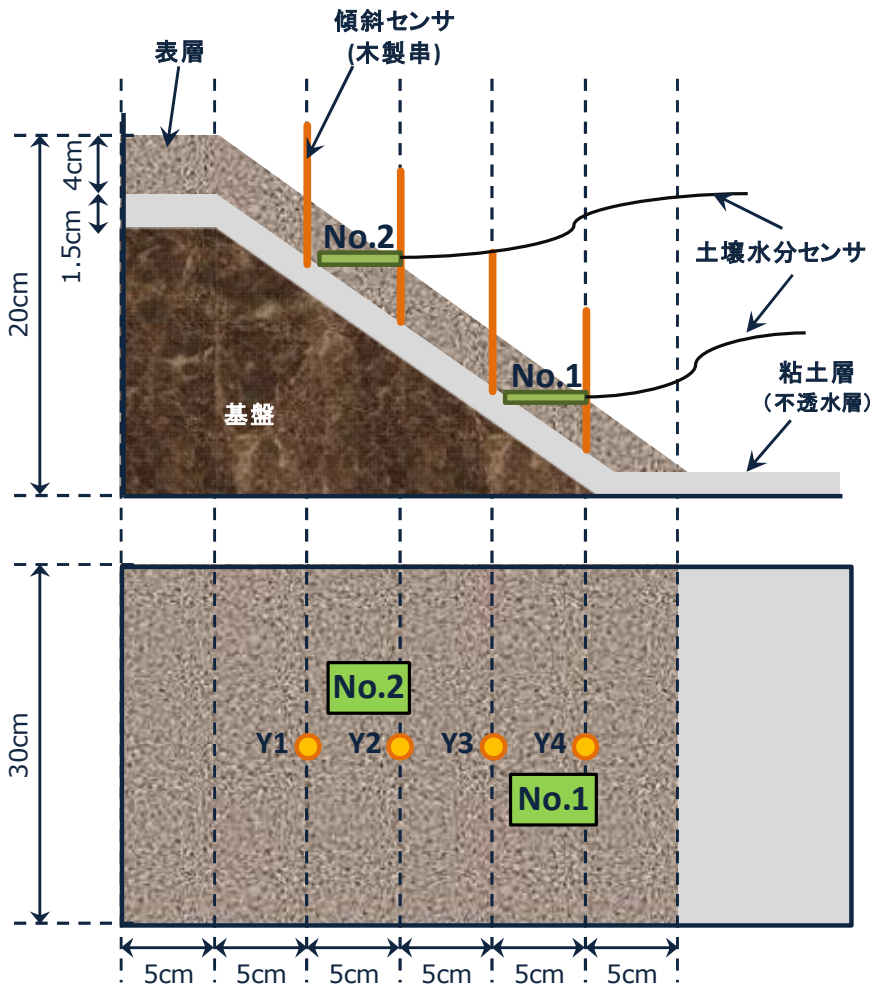


図 4.4　実験に用いた小型模型斜面装置の概要

表 4.1　物性条件

土粒子密度 ρ_s (g/cm³)	初期含水比 w (%)	乾燥密度 ρ_d (g/cm³)
2.780	26.84	No.1地点：0.961 No.2地点：0.987
湿潤密度ρ_t (g/cm³)	間隙比 e	初期体積含水率 (θ)
No.1地点：1.218 No.2地点：1.251	No.1地点：1.892 No.2地点：1.816	No.1地点：0.258 No.2地点：0.265

表 4.2　実験条件

境界条件	上面	排水（散水）
	側面	非排水
	底面	非排水
	背面	非排水
降雨強度		100mm/h

4.3.2 擬似飽和体積含水率と変位発生のモデル化

実験から得られた，崩壊までの体積含水率及び傾斜角度の時系列変化を図 4.5 に示す．降雨開始から 1,200 秒後にのり尻付近で湧水が確認された．この時点ですべり面には斜面下方向への浸透流が発生していたものと推察される．その後，No.1 と No.2 の体積含水率はほぼ平衡状態で推移していたが，1,800 秒には No.1 の体積含水率が再び上昇し始め，それと同時に木製串の傾きが増加し始めた．5,280 秒には，のり尻付近に斜面下向きに直行する方向のき裂が発生し，このき裂より下部が小規模崩壊した．その後，5,610 秒時点でのり肩に同じく斜面下向きに直行する方向のき裂が発生，その直後に斜面全体が崩壊した．

実験開始直後より，No.2，No.1 の順に体積含水率の上昇が確認された．その後，No.2, No.1 はそれぞれ 420 秒，600 秒で体積含水率の上昇率が変化し，1,800 秒付近まではほぼ平衡状態を示していることが分かる．この時点で斜面が完全飽和に至っていれば変形が発生することが予想されるが，木製串の傾きに大きな変化は見られない．つまり，体積含水率の上昇率が変化した 420 秒，600 秒の時点で斜面は完全に飽和しておらず，1,800 秒まではその状態が維持されていたものと推測される．

以上を踏まえて，図 4.5 の No.1 の 600 秒～1,800 秒および No.2 の 420 秒～1,800 秒に着目すると，散水が継続されているにも関わらず，不飽和状態で体積含水率が平衡状態を維持していることがわかる．この現象を解釈すると，土壌水分センサ近傍の間隙にはまだ封入空気が残存された状態で，流入する水分量と排水される水分量がほぼ等しい状態が継続していることになる．そこで本論文では，不飽和状態での水の流入量と流出量がほぼ等しく体積含水率の変動が平衡している状態を擬似飽和状態とし，この現象下における体積含水率を擬似飽和体積含水率（θ_{qs}）と定義する．なお，設定間隙比から求めた飽和体積含水率（θ_s）は 0.65 であることから，No.1 の 420 秒地点，No.2 の 600 秒地点の飽和度はそれぞ

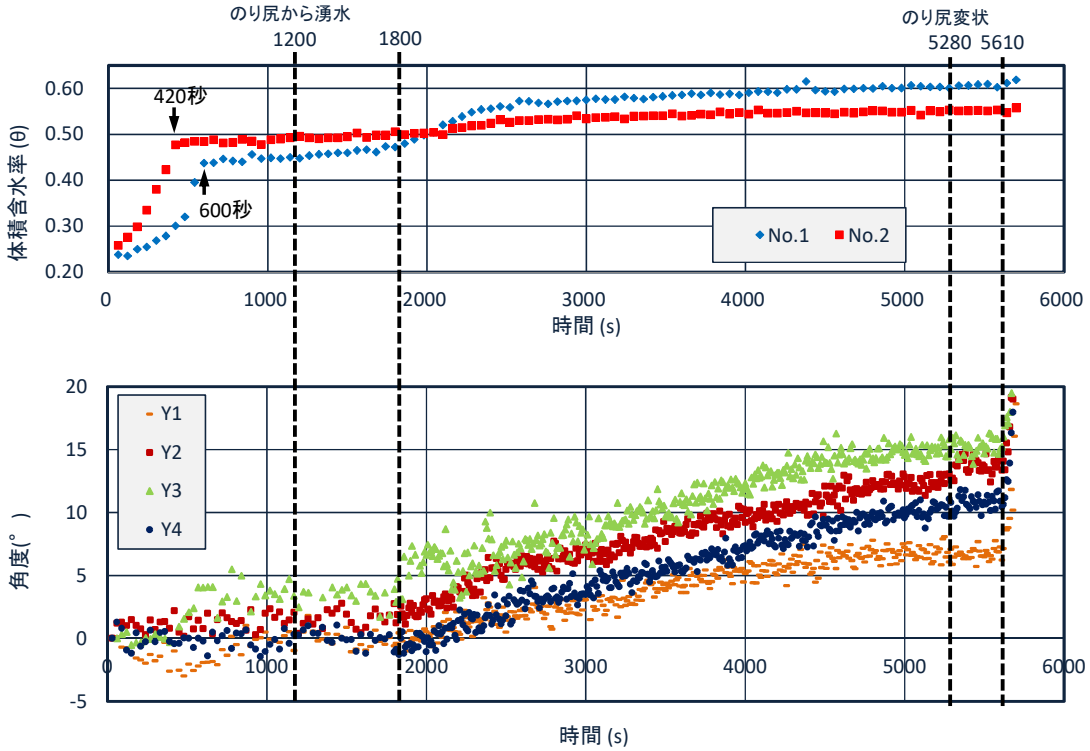


図 4.5　散水による小型模型斜面の体積含水率と傾斜角度の時系列変化

れ 73%，67%である．ただし，斜面全体が崩壊した 5,610 秒地点における体積含水率はいずれも 0.65 を下回っていることから，実験開始後，散水により斜面の体積収縮が発生した可能性が考えられる．そのため，ここで示す飽和度はあくまで一つの目安であり，実際はもう少し高い飽和度を示していた可能性がある．この体積含水率が平衡した状態を基に，1,800 秒からの変化に着目すると，木製串の傾きの増加と共に，No.1 の体積含水率が擬似飽和状態から再び上昇に転じていることが確認できる．また，No.2 においても 2,000 秒付近から僅かずつではあるが体積含水率が上昇している傾向が確認できる．No.2 よりも先に No.1 の体積含水率が再上昇し始めた理由として，のり尻から斜面上部に向けて飽和帯が形成されていったためであると推察される．

以上の結果をもとに，表層崩壊発生プロセスをモデル化したものが図 4.6 である．すなわち，降雨時における土中水分量と変形の関係に着目すると，ここで定義した擬似飽和体積含水率を一つの目安とし，体積含水率が擬似飽和体積含水率以下では変形が発生せず，擬似飽和体積含水率を越えた後に変形が始まるというプロセスを導くことができる．

そこで次節では，カラム試験によって，本節で定義した擬似飽和状態を再現し，以降の模型斜面実験で考察するための擬似飽和体積含水率の値を求める．

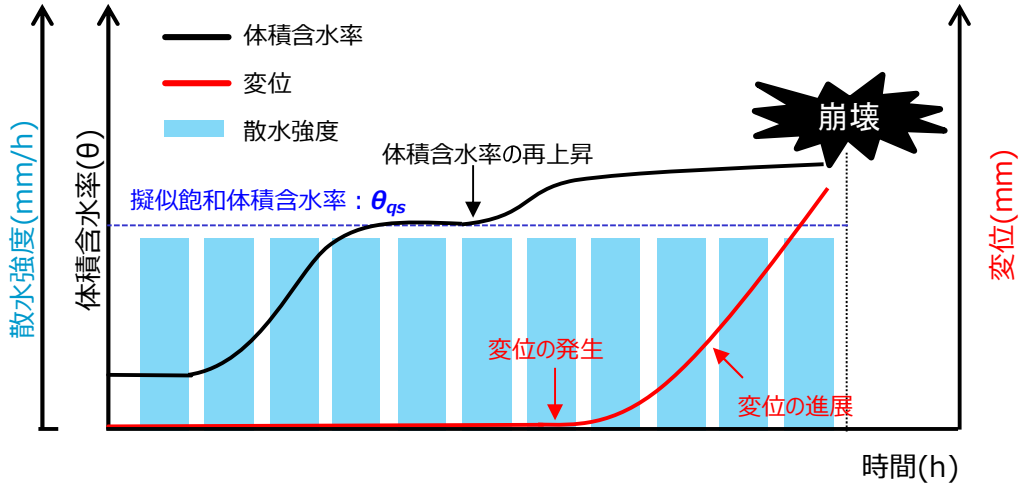


図 4.6　擬似飽和体積含水率を用いた表層崩壊プロセスのモデル化

4.4 カラム試験による擬似飽和状態の再現と擬似飽和体積含水率

4.4.1 カラム試験の概要

本節では，前節で定義した擬似飽和状態を再現し，次節以降で実施する模型斜面実験で考察するための擬似飽和体積含水率の値を求めることを目的としてカラム試験を実施する．

本実験での試料には，奈良県産のまさ土を使用した．表 4.3 に対象試料の物性条件，表 4.4 に実験条件，図 4.7 にカラムの概要を示す．カラムは 1 辺 10cm のアクリルボックスを使用した．供試体の境界条件は，底面はアクリル板による非排水，側面はアクリル板により拘束し非排水としているが，供試体内の間

隙空気圧の発生を抑制するために，カラムの各側面の下部 1 箇所に直径 2mm 程度の空気孔を，また，供試体上部の滞水により水圧がかからないよう，カラムの各側面の上部 3 箇所に直径 2mm 程度の空気孔を設けている．上面は散水のため開放し，排水条件としている．供試体は，用意したアクリルボックスに所定の含水比で試料を充填し，設定した間隙比となるように締固め作製した．

供試体上部に体積含水率を測定するための土壌水分センサ(Delta-T 社製 SM-150, 測定精度:±3.0%)を設置し散水を行った．散水条件は表 4.4 の通りである．供試体への水分浸透状況を把握するために，カラム正面に定点カメラを設置し，30 秒間隔で撮影を行った．体積含水率が平衡するまで散水を行い，体積含水率が平衡状態を一定時間保ったことを確認した後，散水を停止し実験を終了した．なお，使用した土壌水分センサは土試料に対して校正を行っており，本節以降の結果は全て校正済みの体積含水率の値として議論する．

表 4.3　物性条件

土粒子密度 ρ_s (g/cm³)	初期含水比 w (%)	設定乾燥密度 ρ_d (g/cm³)
2.756	5.0	1.384
設定乾燥密度 ρ_d (g/cm³)	**設定間隙比 e**	**透水係数 k (cm/s)**
1.453	0.992	6.0×10^{-3}

表 4.4　実験条件

境界条件	上面	排水（散水）
	側面	非排水(アクリル板・空気孔あり)
	底面	非排水(アクリル板)
降雨強度		100mm/h

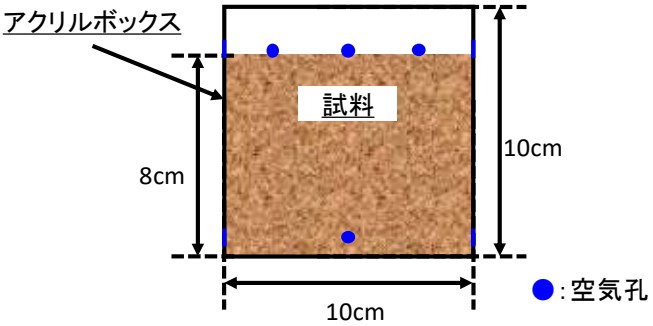


図 4.7　カラム概要

4.4.2 擬似飽和状態の発現と擬似飽和体積含水率

散水開始後の体積含水率の 1 分ごとの計測結果を図 4.8 に，側面から撮影した供試体内の浸透状況を図 4.9(a)～(d)に示す．これらの結果を基に供試体内の浸透状況を観察する．散水開始後 8 分で図 4.9(b)赤線部分に浸潤面が確認され，散水開始後 14 分には底面付近に浸潤面が到達している．散水開始後 12 分頃から体積含水率の上昇率が低下していることから，この時点で側面の空気孔から水が排水され始め，流入量と流出量が均衡しながら浸潤面が下がっていったものと考えられる．また，散水開始後 16 分を境に，体積含水率が再び上昇に転じている．図 4.9(d)より，16 分で浸潤面が底面に達していることから，体積含水率が再び上昇に転じたのは，浸潤面が底面に到達した後に，水位が上昇し，間隙中の封入空気が消失するとともに徐々に水で満たされることによって生じた現象であると考えられる．なお，図 4.9(b),

(c)で見られる浸潤面が水平でない理由として，カラム偶角部において，降雨強度のばらつきがカラム中央付近に比べて大きくなった可能性，カラム側面の底部中央のみに空気孔を設けたことによる影響等が考えられる．ただし，センサの埋設位置はカラム中央付近であることから，ここでの計測結果に影響はないものと判断した．一方，計測精度を確保するためにはカラムサイズの大型化，形状を円筒にするなどの必要性があり，これらは今後の課題とする．

以上の結果より，ここでの擬似飽和状態は 4.3 節と同様，体積含水率の上昇率が変化した散水開始後 16 分頃に発現したものと考え，その時点の体積含水率 0.34 を擬似飽和体積含水率とした．

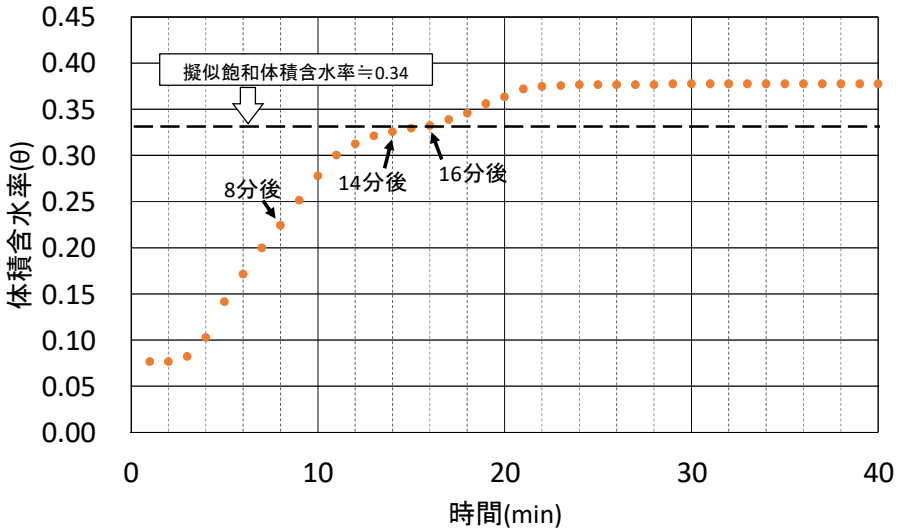
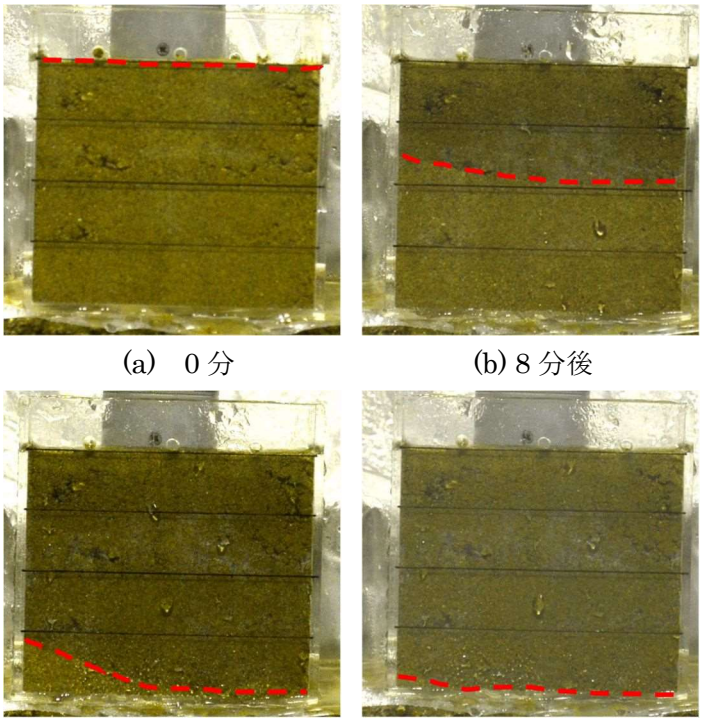


図 4.8　体積含水率計測結果



(a)　0 分　(b) 8 分後

(c) 14 分後　(d) 16 分後

図 4.9　散水による水分浸透状況

4.5 擬似飽和体積含水率と斜面崩壊の関係

4.5.1 模型斜面実験の概要

本節では，4.3 節の簡易模型斜面実験で定義し，4.4 節のカラム試験によって得られた擬似飽和状態の再現性を確認すると共に，散水による体積含水率の時系列変化を計測することで崩壊に至るまでの浸透過程を明らかにする．なお，本節の目的を遂行するために 4.3 節で使用した実験の見直しを行った．まず，表層に用いる試料は複数回実験を行う場合でも均質性が保たれるよう同一地点から採取された 1.5t の土試料を入手し，その一部を用いることとした．また，土壌水分センサの設置方法，表層厚，物性条件などについても同一条件で複数回の実験が行えるように改良を加えた．ここで用いる小型模型斜面は，実斜面や大型の土層を用いた実大斜面実験と比べて，斜面規模や雨滴条件などの点で大きな違いがある．従って，本節で述べられる実験結果はあくまで小型模型斜面のスケールで発生した事象に関する考察となる．一方，実大斜面実験は斜面作製に時間と費用がかかり，表層の締固めについても時間を掛けて人力で行うため，同一条件で斜面を作製したとしても同じ実験結果を再現させることが困難な場合がある．そこで本節では，4.3 節で定義した擬似飽和状態の再現性の検証を目的として，同条件下での実験を短期間に複数回実施できる小型模型斜面による実験を選択した．

小型模型斜面の概要を図 4.10，実験条件を表 4.5 に示す．なお，物性条件は 4.4 節と同じ表 4.3 とする．本実験では，W300mm×L700mm×H450mm の模型土槽を用いた．表層厚は 100mm，斜面勾配は 35 度としている．試料の境界条件として，表層の底部を滑り面と仮定し，基盤土層の表面に粘性土を用いた不透水層を設け，非排水条件とした．模型斜面の枠組みおよび底部，斜面向かって左側面は鋼板が使用されており，斜面向かって右側面は斜面を観察するためアクリル板が使用されている．従って，表層の側面および底面は非排水となる．また，散水時，表層内の間隙空気圧の発生を抑制するために表層背面の鋼板に直径 2mm 程度の空気孔を 3 箇所設けた．表層上面は散水を受けるため，排水条件となっている．対象試料は，4.4 節と同じ奈良県産のまさ土を用いた．実験に用いる際は，一度実験を行った試料は，細粒分の流出などにより粒度分布など土質特性が変化する可能性があるため，各実験において試料の土質特性が変化しないように，再利用せずに毎回新鮮な状態での試料を用いて実験を行った．模型斜面は，含水比 5.0%の試料を 50mm の層ごとに，湿潤密度が 1.453g/cm3 になるようにのり尻から順に木製のランマーで締固めて作製した．模型斜面は人力で締固めていることから，部分的に密度誤差が生じる可能性があると考えられる．しかし，本実験では，模型斜面作製の際に，既知の体積に充填する試料の重量を計測して斜面作製を行っているため，斜面全体では密度が一定になっていると考える．これらの条件を統一して 3 回実験を行った．

散水による水分浸透を計測するために，土壌水分センサ SM-150（Delta-T 社製，測定精度：±3.0%）を図 4.10 のように 6 箇所設置し，各センサのプローブ（φ2.5mm×50mm が 2 本）のみが基盤から突き出るような設置方法にした．このセンサを選定した理由は，第 6 章で述べる高速道路沿いのり面での計測で使用している土壌水分センサ SM-150 と仕様を統一させたかったことと，本体は基盤土層に固定し，プローブのみを表層に埋設することで，4.3 節で使用した EC-5 に比べ土との接触面積を小さくするためである．

また，散水中に発生する浸透流を観察するために，アクリル板に直径 2mm 程度の注入孔を設け，側面

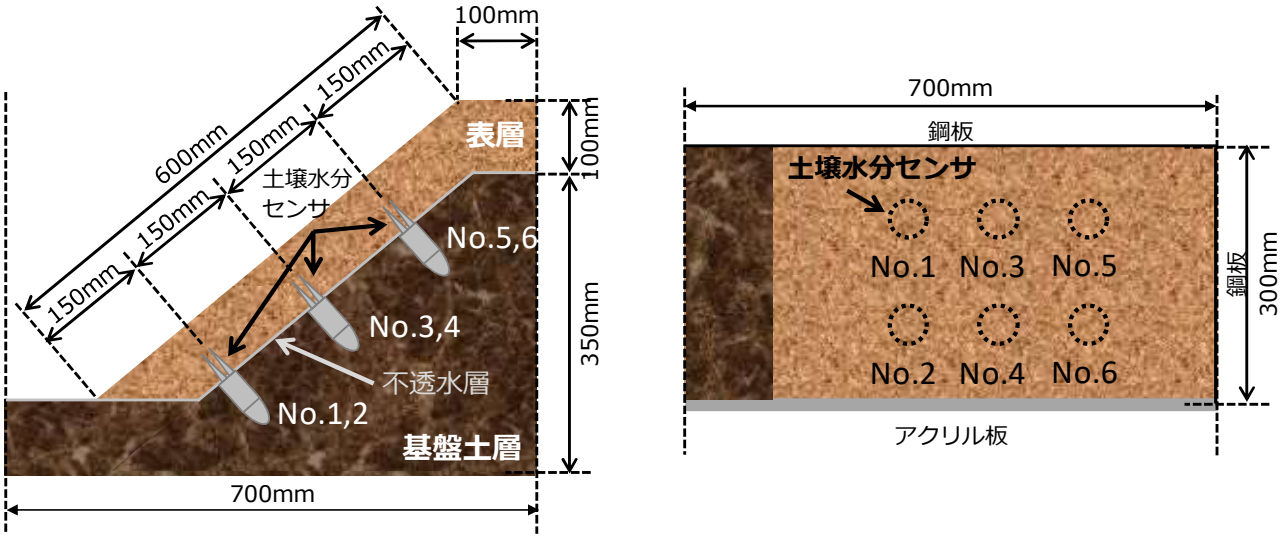


図 4.10　模型斜面の概要

表 4.5　実験条件

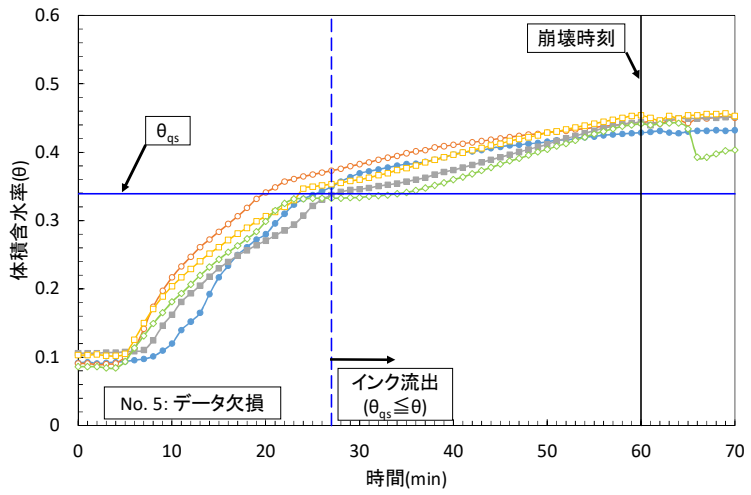
境界条件	上面	排水（散水）
	側面（左）	非排水（鋼板）
	側面（右）	非排水（アクリル板）
	背面	非排水（鋼板・空気孔あり）
	底面	非排水（不透水層）
斜面勾配		35度
降雨強度		100mm/h

からインクを注入した．注入箇所は，表層上面より 3cm の深度に赤色インクをのり肩，中腹，のり尻それぞれに注入し，表層上面より 7cm の深度に青色インクを同様に注入した．インクは，浸透流を観察するとともに，斜面が飽和に至るとインク注入孔からインクが流出するため，斜面が飽和したかどうか判断することができる．なお，インクによる浸透流および斜面飽和の観察は，側面に設置した定点カメラにより行った．降雨強度は 100mm/h で一定とした．

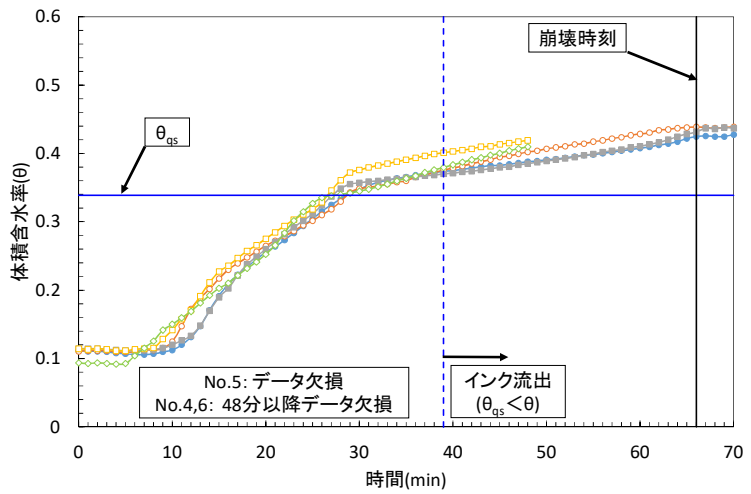
4.5.2 擬似飽和体積含水率と斜面崩壊の関係

本実験における体積含水率の経時変化と，インク流出および崩壊時刻を示したグラフを図 4.11(a)～(c)に示す．グラフの横軸は時間，縦軸は体積含水率を表している．体積含水率については一部機器接触不具合によりデータ欠損が見られたため，欠損分を除いた結果を示している．グラフ中に示しているセンサ番号は図 4.10 に示している土壌水分センサの配置番号に対応している．また，青色破線はインク注入孔からインクが流出し始めた時点を示している．黒の実線は，ビデオカメラを通して目視により，斜面がせん断変形し，その後土塊が斜面下方向へ移動していく直前の時刻を崩壊時刻として示している．また，図 4.12(a)～(d)は図 4.11(a)の実験における散水後 1 分，24 分，34 分，60 分経過した時点の斜面側面の様子を示している．

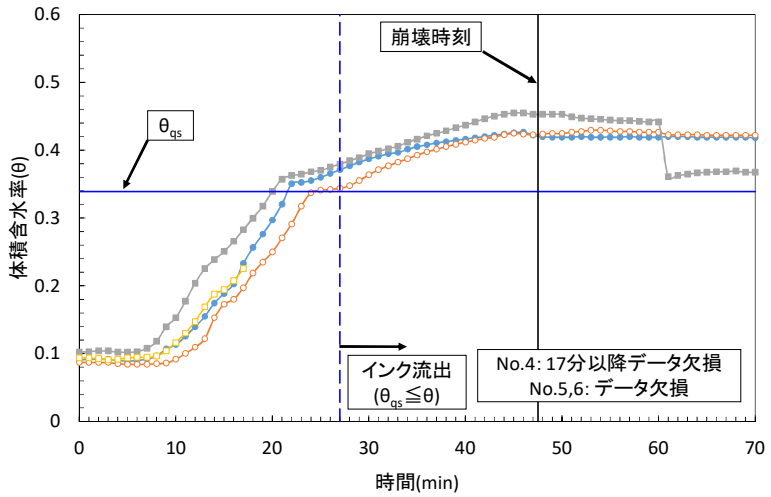
図 4.11(a)と図 4.12 に着目すると，まず散水開始 5 分後から順に各センサの体積含水率の上昇がみら



(a)



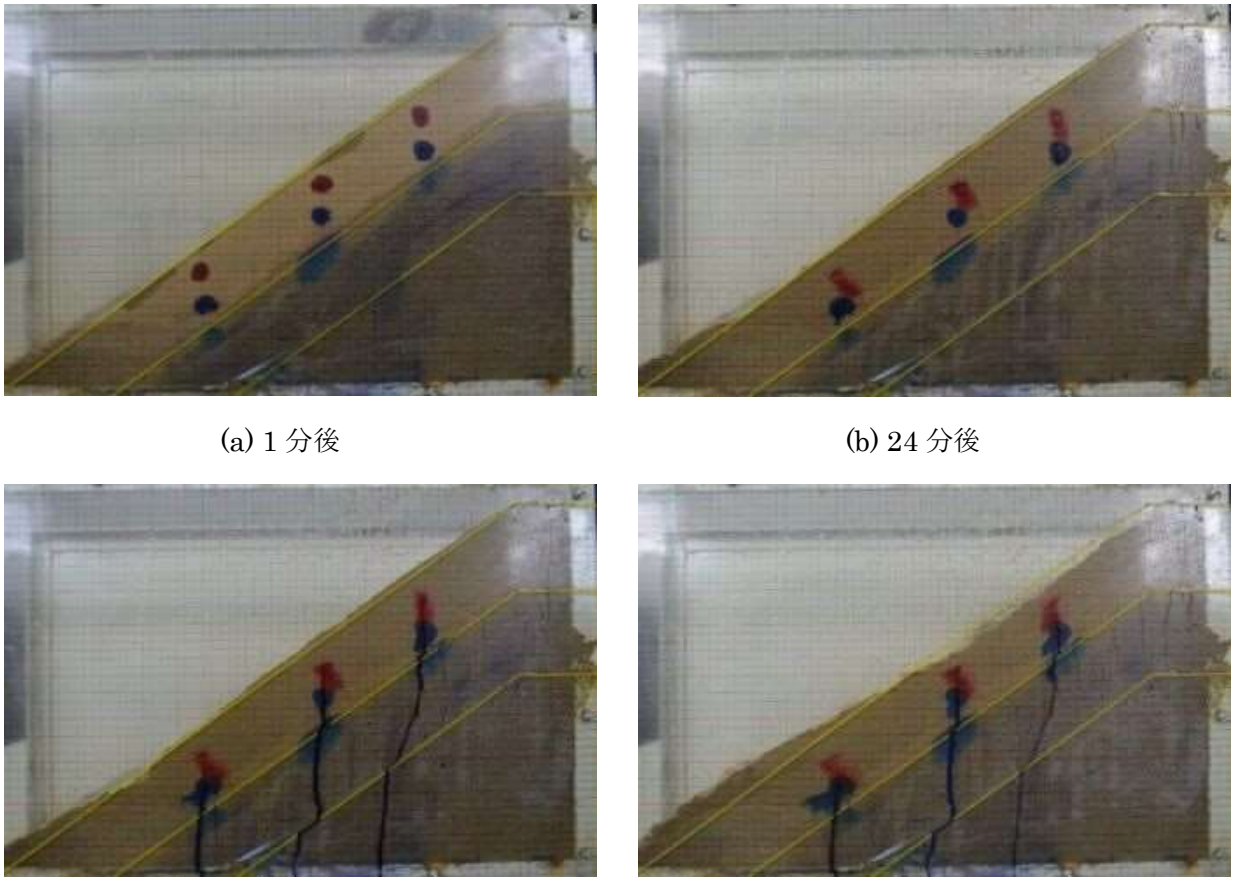
(b)



(c)

センサNo.1 センサNo.2 センサNo.3 センサNo.4 センサNo.5 センサNo.6

図 4.11　体積含水率の経時変化



(a) 1 分後　　(b) 24 分後

(c) 34 分後　　(d) 60 分後

図 4.12　斜面側面の様子

れた．その後，22～24 分付近で体積含水率の上昇率が変化し，27～34 分にかけて 6 箇所に充填したインクが注入孔から流出することが確認され，60 分で斜面が崩壊した．ここで 4.3 節の結果に基づき，体積含水率の上昇率が変化している 22～24 分付近の各センサの体積含水率（θ_{qs}≒0.34）を擬似飽和体積含水率とする．図 4.11(a)では，擬似飽和体積含水率に到達した後にインクが注入孔から流出し，その後崩壊に至ることが確認された．

次に，図 4.11(b)に着目すると，散水開始 5 分後から順に各センサの体積含水率の上昇が見られた．その後，28～30 分付近で体積含水率の上昇率が変化し，39～47 分にかけて 6 箇所に充填したインクが注入孔から流出することが確認され，66 分で斜面が崩壊した．この実験での擬似飽和体積含水率は図 4.11(a)と同様，θ_{qs} ≒0.34 であることが確認された．

図 4.11(c)では，散水開始 7 分後から順に各センサの体積含水率の上昇が見られた．その後，21～24 分付近で体積含水率の上昇率が変化し，27～32 分にかけて 6 箇所に充填したインクが注入孔から流出することが確認され，48 分で斜面が崩壊した．この実験での擬似飽和体積含水率は図 4.11(a)，(b)と同様，θ_{qs} ≒0.34 であることが確認された．

図 4.11 (a)，(b)および(c)より，何れの実験結果においても概ね同じ体積含水率において上昇率の変化が確認された．また，4.4 節のカラム試験の結果から推定した擬似飽和体積含水率と，ここでの 3 回の実験における擬似飽和体積含水率は何れも θ_{qs} ≒0.34 であることから，本実験条件下における擬似飽和状

態には再現性があることが確認できたと考えられる．

散水から崩壊までのプロセスを比較すると，それぞれ擬似飽和体積含水率に到達する時刻は異なるが，全ケースにおいて，擬似飽和状態を意味する体積含水率の上昇率の変化，インク注入孔からのインク流出，崩壊という過程を経ることが確認された．インクの流出は斜面内部に飽和帯が形成されていることを意味しているが，その発生時刻は全て擬似飽和状態が発現した後であることがわかる．このことは，斜面が崩壊に至る前に飽和帯が形成されており，飽和帯が形成される前に必ず擬似飽和状態が発現することを意味しており，不飽和状態である擬似飽和の発現を捉えることで，飽和帯の形成による模型斜面の不安定化を，さらには斜面崩壊を未然に予測できることが確認された．

次に，擬似飽和状態から体積含水率の上昇率が変化する要因として，4.4 節の実験結果を加味して考察すると，散水により浸潤面が透水性の低い層（すべり層）に到達すると，水位が上昇し，間隙中の封入空気が消失することで間隙が水で満たされ，再び体積含水率が上昇するものと考えられる．この現象は，擬似飽和状態到達後，インク流出が発生する時間関係から見ても妥当な考察であると判断できる．一方，斜面という点が 4.4 節でのカラム試験と異なり，浸潤面がすべり面に到達した後，土中水は水位の上昇に寄与するだけでなく，図 4.12(c)，(d)に示す通り，すべり面に沿って斜面下方への浸透流を発生させることがわかる．また，この時点で細粒分は浸透流と共に下方へ流れ出し，のり尻付近での細粒分の流出が目視で確認された．このことは，擬似飽和状態以降，浸透力によって模型斜面の土の骨格構造が時々刻々と変化していることを示している．この結果のみからは判断できないが，図 4.7 の体積含水率のピーク値と比べて図 4.11 の崩壊時刻の体積含水率の値が大きい理由として，この骨格構造の変化により微小な変形が発生し，間隙が拡大することで擬似飽和状態以降の体積含水率の上昇率が相対的に大きくなったことが推察される．

さらに，本実験で得られた擬似飽和体積含水率が，前節のカラム試験で得られた擬似飽和体積含水率と一致した．これは，試料の物性値と，降雨強度が決まれば，擬似飽和体積含水率が一意に定まることを示唆する結果である．

4.6 体積含水率の上昇過程と変位の関係

4.6.1 模型斜面実験の概要

本節では 4.5 節の結果を基に，同条件の小型模型斜面実験により，散水に伴う体積含水率の上昇と斜面変形の関係について，画像センシング技術を用いて詳細に評価する．

本実験で用いた試料の物性条件，実験条件は 4.5 節と同様，表 4.3 及び表 4.5 とする．一方，使用する計測機器の設置位置は前節から一部変更し図 4.13 のようにした．ここでは，散水による水分浸透を計測するために，4.5 節と同じ土壌水分センサを図 4.13 のように 3 箇所設置し，プローブのみが基盤から突き出るように配置した．また，斜面の変位計測には画像センシングの 1 つである Orientation Code Matching を利用した画像変位計測手法[19), 20)]を本研究用に改良して用いた．観測位置はアクリル板側の土壌水分センサの No.1 と No.2 の中間付近に絞り，図 4.13 に示すように 7mm×7mm の格子（以下，テ

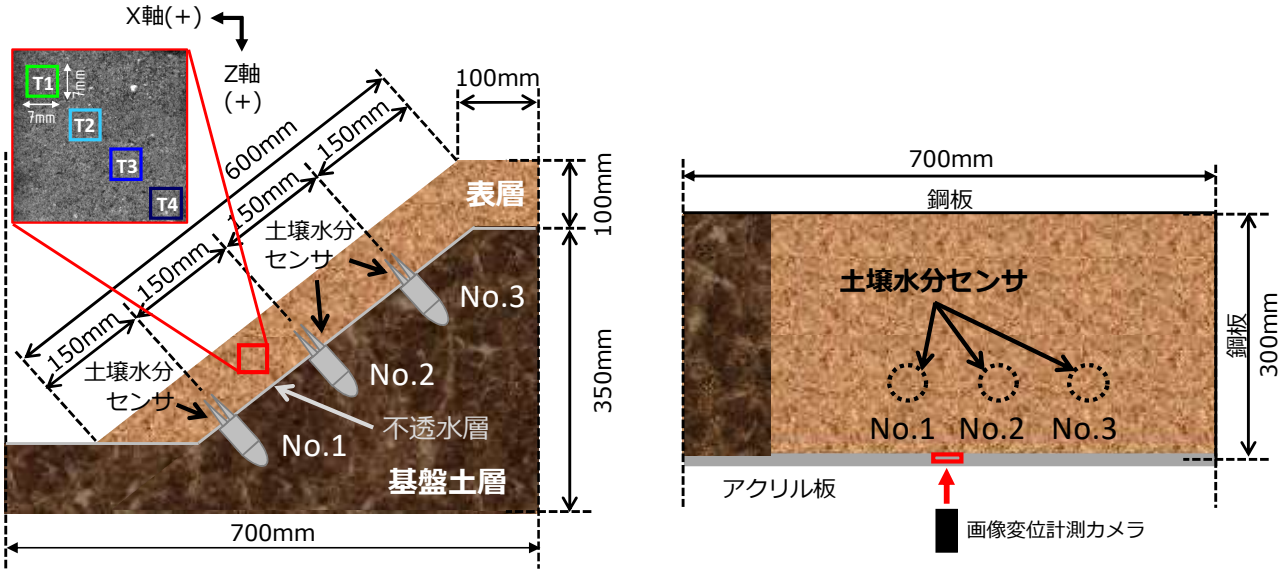


図 4.13　模型斜面と計測機器の設置位置

ンプレートとする）を深度方向に 4 点（T1～T4）設定し，各テンプレートの変位を求めることで，散水時の斜面の水平および鉛直変位を測定した．使用したカメラは USB3.0 インターフェースカメラ（1280×1024pixcel），フレームレートは 5fps とし，1 ピクセル約 0.11mm×0.11mm，測定精度±0.02mm の条件で計測を行った．なお，ここでの変位計測についてはアクリル板越しに確認できる表層側面の 2 次元的な移動が対象となる．従って，測定される変位量および変位速度はアクリル板の摩擦係数にも影響されることから，絶対値としての解釈は難しく，テンプレート間および体積含水率との相対的な関係性のみの評価を目的とする．また，No.3 の土壌水分センサはテンプレートから離れて いることから，ここでは No.1 および No.2 のみの実験結果を示す．

4.6.2 体積含水率の上昇と変位発生の関係

図 4.14，図 4.15 はテンプレートを挟む位置にある No.1 および No.2 の散水開始から崩壊に至るまでの体積含水率の変化とテンプレートの水平変位および鉛直変位を示したグラフである．これらのグラフより，No.1 は体積含水率が 0.34 を超えた付近で上昇率が変化し，No.2 は体積含水率が 0.34 を超えた付近でいったん平衡した後，再び上昇する現象がみられたことから，本実験においてもこの時点で擬似飽和が発現したと考えられる．またその時間は，のり尻に近い No.1 では散水開始から 20 分頃，斜面中腹，上部の No.2 では 24 分頃であると推察される．これに対し，斜面の変形挙動に着目すると，各テンプレートの水平変位，鉛直変位ともに明瞭な変位が確認できるのは散水開始から 27 分頃である．また，その変位は表層上面に近い T1 から T4 の順に発生していることが分かる．そこで，散水開始から変位が始まる時間までの水平変位，鉛直変位と体積含水率の関係を拡大して図 4.16，図 4.17 に示す．

水平変位を示す図 4.16 より，20 分頃から T1 の水平変位が X(+)方向に僅かに増加を始めていることが確認できる．一方，T1～T4 の動きが明瞭となるのはその約 7 分後の 27 分頃からであることから，No.1

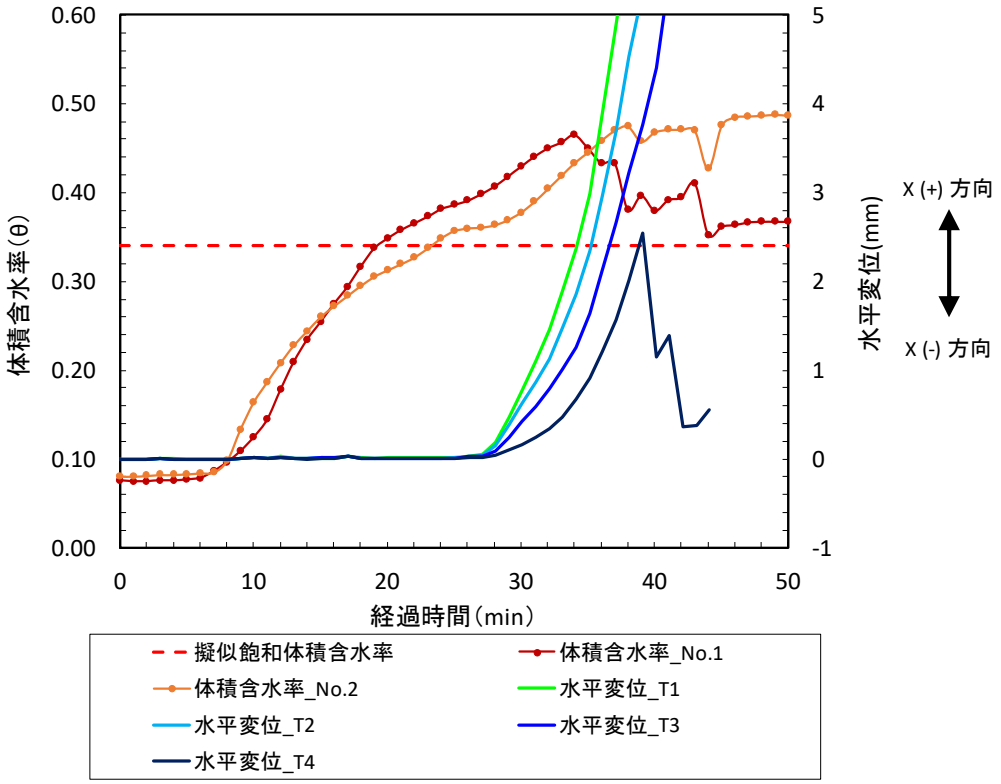


図 4.14　体積含水率と水平変位の時系列変化

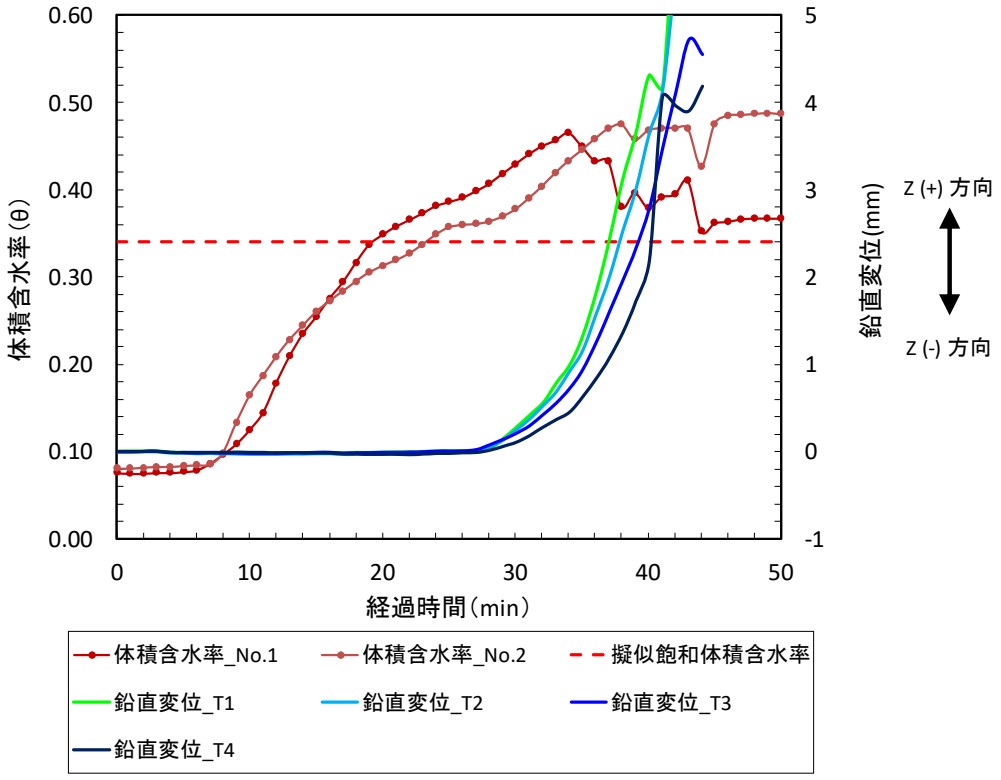


図 4.15　体積含水率と鉛直変位の時系列変化

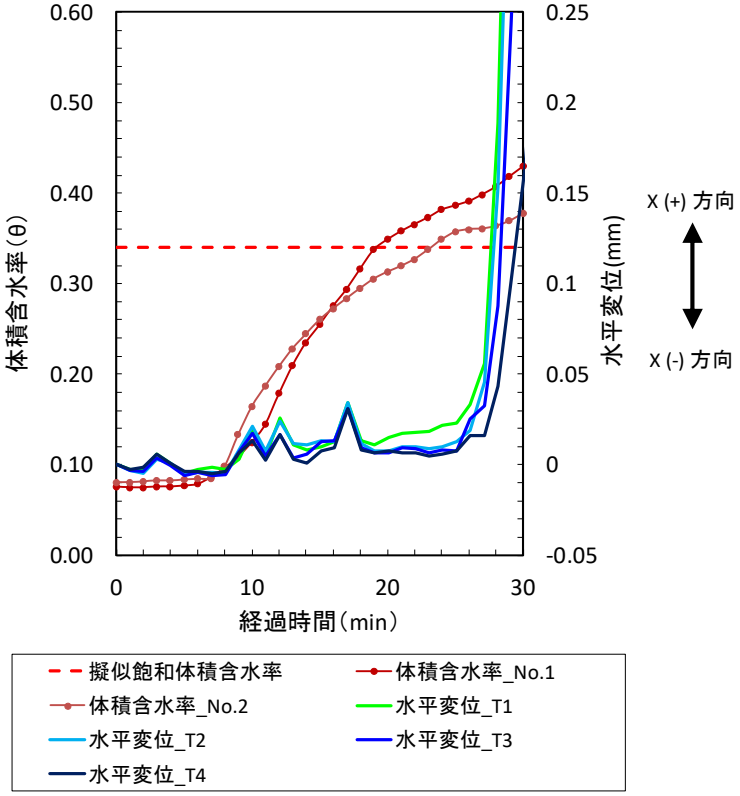


図 4.16　擬似飽和状態付近の体積含水率と水平変位

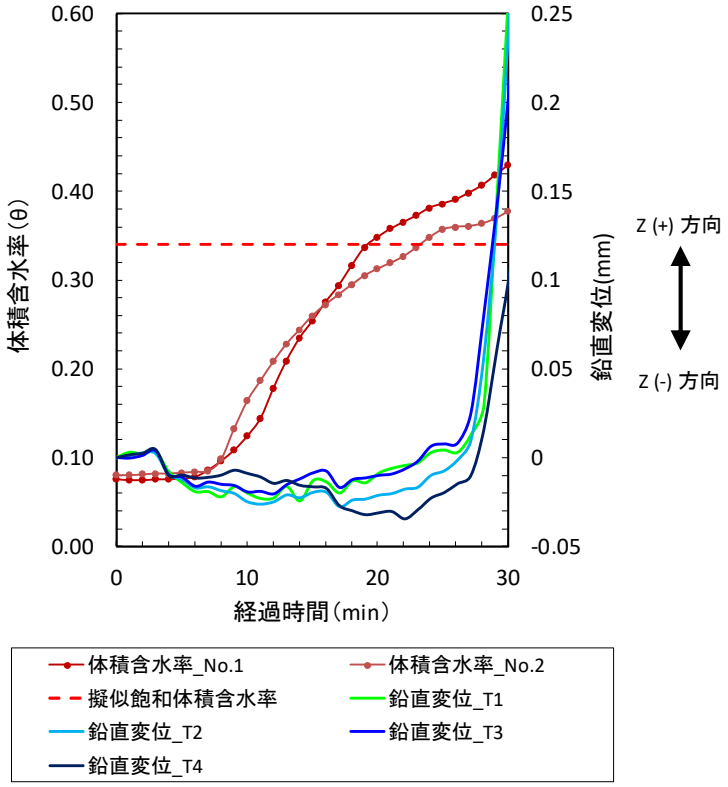


図 4.17　擬似飽和状態付近の体積含水率と鉛直変位

および No.2 が擬似飽和体積含水率を超えた後に変形が始まっていることが確認できる．一方，散水開始から 10 分，12 分，17 分付近に各テンプレートが一様に X(+)方向へ変位し，その後元に戻るという計測結果が得られた．この計測結果については時間的な連続性が見られないことからテンプレートの跳躍現象であると推察されるが，解釈については今後の課題とする．次に鉛直変位を示す図 4.17 より，散水開始 4 分頃から 0.01mm 程度ではあるが，テンプレートが Z(-)方向である鉛直上向きに変位している傾向が確認できる．この傾向は 20 分付近まで見られ，その間，T4 では上向きの変位が約 0.03mm まで増加しているが, それ以外のテンプレートは微増か平衡状態を示している. 一方, 散水から 20 分を超えると，変位のベクトルは Z(-)方向から Z(+)方向へと変化し始め，27 分以降，時間とともに Z(+)方向の変位が増加していることがわかる．

本実験における崩壊時刻を推定すると, 27 分以降の変位の増大とともに 35 分頃にのり尻付近（No.1）の体積含水率が低下し始めていることから，この時点から No.1 付近の土塊が移動を開始したものと推察される．その後，38 分から 42 分頃にかけて，中腹（No.2）の体積含水率が低下し，それと同時に各テンプレートの動きに異常が見られることから，斜面全体が大きく変状したのは散水開始から 38 分付近であると推察される．

本実験結果を踏まえて，擬似飽和体積含水率と変位の関係について考察を行う．まず，今回の実験で得られた擬似飽和体積含水率も, これまで同じ試料, 同じ降雨強度で得られていた値と同じ 0.34 であった．次に，0.1mm 以上の明瞭な水平変位および鉛直変位が確認されたのは散水開始から 27 分以降であることから，せん断変形による変位は擬似飽和状態が発現した後に発生していることが分かる．また，その変位は表層上面に近い場所から順に発生しており，変位速度も同様の傾向が見られる．このことは，斜面が剛体として移動しているのではなく，ダイレイタンシーにより土の骨格構造が変化しながら変位が進展していることを示している. 計測開始 4 分後から 20 分頃までの鉛直上向きの変位がこの間の水平変位に比べてやや卓越していることから，この区間ではどちらかというと斜面下向きのせん断変形というよりも，散水による土の体積膨張を示していることが考えられる．その後，No.1 が擬似飽和体積含水率を超える 20 分頃から各テンプレートの鉛直変位が Z(-)方向から Z(+)方向に逆転し，No.2 が擬似飽和体積含水率を超える 24 分以降には斜面全体が Z(+)方向へ変形し始めたことがわかる．

以上のことから，擬似飽和体積含水率を超える付近から斜面下向きの浸透流が発生し，ダイレイタンシーにより土の骨格構造が変化することで変位速度が上昇していったものと考えられる．また，擬似飽和体積含水率からの体積含水率の再上昇の要因として，4.5.2 で述べた，間隙中の封入空気の消失だけでなく，上述した土の骨格構造の変化が土粒子間の間隙を拡大させ，この間隙の拡大が体積含水率の再上昇に寄与したものと推察される．ここで重要なことは，まず，擬似飽和体積含水は，試料の物性値と降雨強度に依存した一意な値であるということである．また，せん断変形による変位は，擬似飽和体積含水率を超えた後に発生していることも重要である．これは 4.3 節でモデル化した，変位発生は擬似飽和体積含水率超過後，という表層崩壊プロセスと合致し，また，4.5 節の実験結果，崩壊が擬似飽和状態発現後であったこととも合致する．

4.7 まとめ

本章では，土中水分量を通行規制の指標として活用するために，降雨時における体積含水率の上昇過程と変位発生の関係を明らかにすることを目的に，カラム試験，模型斜面実験を実施した．ここで得られた知見を下記にまとめる．

(1) カラム試験，模型斜面実験，いずれにおいても一定降雨強度条件の下での体積含水率の上昇過程において，擬似的な飽和状態が発現することを確認し，その状態を「擬似飽和状態」，その時の体積含水率の値を「擬似飽和体積含水率（θ_{qs}）」と定義した．
(2) 擬似飽和状態は，カラム試験および模型斜面実験の結果から再現性があることを確認した．
(3) 擬似飽和体積含水率は，試料の物性値と降雨強度に依存した一意な値であることが示唆された．
(4) 模型斜面実験から，せん断変形に伴う変位の発生は，擬似飽和体積含水率を超過した後に発生することを確認し，本章でモデル化した擬似飽和体積含水率を用いた表層崩壊のプロセスの妥当性を確認した．
(5) 擬似飽和体積含水率の超過により，斜面変形の兆候を未然に予測できることが示唆され，擬似飽和体積含水率が通行規制の指標として有用であることが分かった．

参考文献

1) 日本道路協会：道路土工－切土工・斜面安定工指針　平成 21 年度版

2) 西日本高速道路株式会社：保全点検要領（構造物編）補足資料（案），平成 29 年 4 月

3) 小泉圭吾，櫻谷慶治，小田和広，伊藤真一，福田芳雄，Maria Q. FENG，竹本将：降雨時の表層崩壊に対する高速道路通行規制基準の高度化に向けた基礎的研究，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol.73，No. 1，pp. 93-105，2017.

4) 櫻谷慶治，小泉圭吾，小田和広，伊藤真一，小松満：模型斜面を用いた擬似飽和体積含水率と斜面変形に関する研究，地盤工学ジャーナル，Vol.13，No. 3，2018.

5) 斎藤迪孝，上沢弘：斜面崩壊時期の予知，地すべり, Vol.2, No.2, pp.7-12, 1966.

6) 斎藤迪孝：第 3 次クリープによる斜面崩壊時期の予知，地すべり, Vol.4, No.3, pp.1-8, 1968.

7) 山田剛二, 小橋澄治, 草野国重：高場山トンネルの地すべりによる崩壊，地すべり, Vol.8, No.1, pp.11-24, 1971.

8) 渡正亮, 竹林征三, 松田六男：真名川ダムの原石山切取法面崩壊の特性，地すべり, Vol.13, No.4, pp.1-10, 1977.

9) Taro Uchimura, , Ikuo Towhata, Lin Wang, Shunsaku Nishie, Hiroshi Yamaguchi, Ichiro Seko, Jianping Qiao: Precaution and early warning of surface failure of slopes using tilt sensors, Soils and Foundations, Vol.55, No.5, pp.1086–1099, 2015.

10) 北村 良介, 酒匂 一成, 加藤 俊二, 水島 俊基, 今西 肇: 降雨時のしらす斜面の浸透・崩壊に関する室内土槽試験，地盤工学ジャーナル, Vol. 2, No.3, pp.149-168, 2007.

11) 檀上 徹，酒匂 一成，深川 良一，酒井 直樹，岩佐 直人，Nghiem Minh Quang: 降雨量，不飽和浸透挙動，変位量の観測結果に基づく降雨時表層すべり型崩壊過程の検証，土木学会論文集 C（地圏工学） Vol.68, No.3, pp.508-525, 2012.

12) 岩田 直樹, 荒木 義則, 笹原 克夫: 現地計測に基づく降雨に伴うまさ土斜面のせん断変形挙動の評価，地盤工学ジャーナル, Vol. 9, No.2, pp.141-151, 2014.

13) 笹原 克夫, 酒井 直樹: 地表面変位と地下水位のモニタリングに基づく斜面崩壊発生予測，地盤工学ジャーナル, Vol. 9, No.4, pp.671-685, 2014.

14) 柴田徹，太田秀樹：土質模型実験における相似則，土と基礎，Vol. 18, No. 5, pp. 9-14, 1980.

15) 赤井浩一，宇野尚雄：土中の准一次元非定常浸透流に関する研究，土木学会論文集，No. 127, pp. 14-22, 1966.

16) 玉手聡，堀智仁，三國智温，伊藤和也，吉川直孝，末政直晃：斜面の浅い部分のせん断ひずみ計測による崩壊予兆の把握に関する大型模型実験，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol. 69, No. 3, pp. 326-336, 2013.

17) 伊藤和也，日下部澄音，小阪板拓馬，豊澤康男，末政直晃：斜面下部の掘削による斜面崩壊の崩壊形態および前兆現象に関する遠心模型実験，土木学会論文集 C, Vol. 66, No. 2, pp. 250-263, 2010.

18) 玉手聡，伊藤和也，SURENDARA B. Tamrakar：表層ひずみ計測による施工時斜面の崩壊監視に関する実験的研究，土木学会論文集 C, Vol. 65, No. 1, pp. 1-18, 2009.

19) Yoshio Fukuda, Maria Q. Feng, Yuto Narita, Shun'ichi Kaneko, and Takayuki Tanaka :Vision-Based Displacement Sensor for Monitoring Dynamic Response Using Robust Object Search

Algorithm, IEEE Sensors Journal, Vol.13, No.12 , pp.4725-4732, 2013.
20) 福田芳雄，小泉圭吾，山本健史，小橋俊也，小田和広，櫻谷慶治，Maria Feng：画像センシング技術を用いた斜面変形計測に関する実験的研究，Proceedings of the Kansai Geo-Symposium 2016, pp.243-248，2016.

第５章　SOM 解析を活用した土中水分量計測斜面の優先順位付き抽出手法の提案

5.1 はじめに

前章では，降雨時における表層崩壊プロセスにおいて，擬似飽和体積含水率超過後に変位が発生することを確認し，土中水分量の計測が防災対策上有効であり，通行規制基準の新たな指標として有効であることを示した．しかし，この技術の実用化に向けて，高速道路のような線上構造物に対して，管理する全ての斜面で土中水分量を計測することは現実的ではなく，計測すべき斜面を抽出するという課題がある．

そこで本章では，新たな調査を実施せず，既存の資料を用いて土中水分量を計測すべき斜面の抽出手法を提案する[1)]. 具体的には, 5.1 節で本章の目的を述べ, 5.2 節で既往の研究をレビューし, 5.3 節では, 使用した切土のり面データについて詳述する．5.4 節で，SOM 解析とクラスタ分析を用いて切土のり面をクラスタリングし，5.5 節では，5.4 節のクラスタリング結果を用いて土中水分量のモニタリング候補地の優先順位付けを行う．5.6 節では，5.4 節及び 5.5 節の結果に基づき，対象斜面の抽出手法をとりまとめる．最後に，5.7 節で本章を総括し得られた知見をまとめる．

5.2 本章に関連する既往の研究

抽出手法を検討する上で, 土中水分量の計測斜面に着目した研究は, 著者の知る限り行われていない. そこで，類似の手法として危険斜面を抽出する手法を参考とした.

既往の危険斜面抽出手法としては，まず，採点方式によるものが挙げられる[2)]．この手法は，a）崩壊発生に影響する要因（斜面評価指標），b）各要因の内容（カテゴリー），c）カテゴリーに与える崩壊発生への評点（カテゴリースコア），d）評点の和から崩壊か，非崩壊かを判断する基準点（判別的中点）の 4 種類の内容をあらかじめ専門家が決めておき，これらの情報を活用して，危険度を判定する手法である．この手法は，調査すべき項目があらかじめ決定されているため，利便性が高いものの，カテゴリースコアや判別的中点の決定は専門家の経験的な知識に依るものであり，客観性に欠けるという問題点も有している．ただし，NEXCO 西日本では，採点方式で取りまとめたのり面のデータを既に保有しており，本章においても，そのデータを活用することとした.

次に，統計学的手法による危険斜面抽出手法が挙げられる．代表的なものとして数量化Ⅱ類があり，近年では，競合学習型ニューラルネットワークの一種である自己組織化マップ[3)~6)]（Self-Organizing Map，以下 SOM．詳細は後述）も注目されている．日外ら[7)]は，岩盤斜面の危険度評価に関して，現地調査結果に数量化Ⅱ類を適用し岩盤崩落に対する危険度を推定するシステムを提案している．更に，現地調査結果の異常値を SOM 解析により選定し, 危険度推定には用いないことで精度向上が図られたことを報告している．白木ら[8)]は，斜面崩壊全般を対象に崩壊時の雨量と崩壊規模を推定する既存システムに対し，SOM 解析を用いて推定に用いるデータの絞り込みを行い，推定精度の向上が図れたことを報告している．また小山[9)]は，防災総点検結果に対し SOM 解析を行い，更に過去の被災履歴のデータと重ね合

せることで，クラスタ毎の健全度を評価し健全性の低い斜面を抽出できることを報告している．いずれの場合も，SOM が斜面の特徴を分類することに有効であることを示しており，本研究の目的に対して適用可能であるといえる．ただし，SOM 解析におけるクラスタリングは主観的な判断に任されており，客観的でないという欠点を有している．一方，SOM 以外のクラスタリング手法として，ベクトル集団間の距離や類似度を用いて，客観的にクラスタリングを行うクラスタ分析 [10]がある．ただし，クラスタ分析はクラスタの個数をあらかじめ決定する必要があり，クラスタ数の決定に誤りがあるとクラスタ分析の結果が意味をなさないという欠点を有している．

以上述べてきた既往の危険斜面抽出手法を踏まえ，本論文では既往の手法を併用することでそれらの欠点を補完し，土中水分量を計測すべき斜面を抽出する手法を提案する．具体的には，まず，NEXCO 西日本が保有する評点が与えられている切土のり面データに対し SOM 解析を行いクラスタの個数を決定する．次に，その個数を用いたクラスタ分析を行い，クラスタリングを行う．そしてクラスタ間の優先順位付けとしてクラスタ内の災害発生頻度に着目し，更に同一クラスタ内の優先順位付けとして切土のり面の評点を活用することを新たに提案する．

5.3 適用データの作成

5.3.1 対象データの概要

NEXCO 西日本では，高速道路の供用開始前の初期点検を始め様々な点検が実施されており，それら点検結果や変状，災害の履歴といった膨大なデータが蓄積されている．本節では，これらデータの中から分析の対象としたデータの概要と，更に分析のために行ったデータの絞り込み及びデータ項目の再整理について述べる．

本章では，土中水分量を計測すべき斜面を抽出する手法を提案することが目的であることから，斜面を評価している調書を活用することとした．特に，土中水分量の計測地の選定のためには，当該斜面の保護工情報や，さらに崩壊危険度を評価するような土質情報，地形情報も含まれているものが求められる．このような条件から，本章では切土のり面安定度評価表（以下評価表）を用いることとした．表 5.1 は評価表の評価項目一覧を示している．評価表は点検要領 [11] に基づいて実施される道路防災点検で使用される安定度調査表を基に，いくつかの評価項目を追加し作成した，NEXCO 西日本独自の個々の切土のり面のカルテである．評価表の主たる評価項目は「地形」,「土質・地質・構造・地下水」,「対策工」,「変状」等の 4 つである．以下に追加したそれらの内容と主な評価方法について説明する．

まず,「地形」として，①のり面が位置する箇所の後背地における形状（のり面と後背地），②これまでの高速道路を管理する上で得られている崩壊に起因する後背地の変状（後背地の変状），③のり面高さの 3 項目を設定した．更にそれぞれの項目について要因を設定した．すなわち，①のり面と後背地については，集水地形，地すべり地形，崩壊地形，崖錐地形，尾根斜面の 5 つ，②後背地の変状については，亀裂・段差，凹地，池沼，湿地・親水植物の 4 つを設定した．③のり面高さは 4 段階の高さ区分に分割し要因とした．

表 5.1　切土のり面安定度評価表評価項目

路線名	●●自動車道	●●高速道路事務所	KP（自～至）	
地層名	●●層群	No	のり面高(m)	
項目		要　因	該当の有無（1or0）	項目番号
地形	法面と後背地	集水地形	0	1
		地すべり地形	0	2
		崩壊地形	0	3
		崖錐地形	0	4
		尾根斜面	0	5
	後背地の変状	亀裂、段差	0	6
		凹地	0	7
		池沼、湧水	0	8
		湿地、親水性植物	0	9
	のり面高さ	15m以下	1	10
		15～30m	0	11
		30～50m	0	12
		50m以上	0	13
		小計		
土質・地質・構造・地下水	表層土	厚さ　1m以下	0	14
		厚さ　1～3m	0	15
		厚さ　3m以上	0	16
		厚さ　不明	1	17
	地質	礫岩・砂岩	0	18
		砂岩・泥岩	0	19
		泥岩・凝灰岩主体	0	20
		砂岩・泥岩・凝灰岩・亜炭	0	21
		岩種不明	1	22
	地質構造	流れ盤	0	23
		断層（破砕帯等）、向斜軸付近	0	24
		不明	1	25
	崩壊履歴	表層崩壊履歴あり	0	26
		崩壊履歴あり	0	27
		地すべり履歴あり	0	28
		不明	0	29
	落石	浮石・転石多数	0	30
		浮石・転石あり	0	31
		落石履歴・小落石あり	0	32
		不明	1	33
	地下水	湧水あり	0	34
		しみ出し程度（植生あり）	0	35
		湧水なし（植生なし）	0	36
		不明	1	37
		小計		

対策工	1段目のり面（代表工種1～5を選択）	(1)吹付枠工・切土補強土工	0	38
		(2)吹付けコンクリート	0	39
		(3)ブロック積みコンクリート	0	40
		(4)防火ブロック	0	41
		(5)植生工	1	42
	のり面工（代表工種1～5を選択）	(1)抑止杭・グラウンドアンカー工（のり枠工又は支圧板等含む）	0	43
		(2)吹付枠工・切土補強土工	0	44
		(3)コンクリート及びモルタル吹付け工	0	45
		(4)その他 コンクリートブロック張工・コンクリート張工・擁壁工	0	46
		(5)集水井・水抜きボーリング	0	47
		(6)植生工	1	48
	落石対策工	落石防護網工 ポケット式落石防護網工 落石防護柵工	0	49
	表面の被覆状況	植生工主体	0	50
		のり面保護工の比率30%以下	1	51
		のり面保護工の比率30~70%程度	0	52
		のり面保護工の比率70%以上	0	53
	のり勾配（のり中央部）	(1)標準勾配より緩勾配	0	54
		(2)標準勾配	1	55
		(3)標準勾配より急勾配	0	56
		小計		
変状（プロテクト有）	肌落ち、ガリ浸食、洗掘、パイピング孔、陥没、はらみ出し、亀裂、根曲がり、倒木、その他	著しい変形・亀裂等（早期対応）	0	57
		複数該当・明瞭なものあり(AA,A)	0	58
		1つに該当・不明瞭なものあり(B)	0	59
		該当せず	1	60
変状（プロテクト無）	肌落ち、ガリ浸食、洗掘、パイピング孔、陥没、はらみ出し、根曲がり、倒木、亀裂、その他	著しい変形・亀裂等（早期対応）	0	61
		複数該当・明瞭なものあり(AA,A)	0	62
		1つに該当・不明瞭なものあり(B)	0	63
		該当せず	1	64
排水施設	本体の損傷、接続部不良、その他の損傷・障害	複数該当・顕著なものあり(AA,A)	0	65
		1つに該当・軽微なものあり(B)	0	66
		該当せず	1	67
点検なし	点検記録なし	近傍に崩壊履歴のり面あり	0	68
		近傍に崩壊履歴のり面なし	1	69
供用期間	供用開始から現在までの年数	5年未満	0	70
		5年以上15年未満	0	71
		15年以上	1	72
		評価点		

「土質・地質・構造・地下水」として，①表層土，②地質，③地質構造の 3 項目を追加した．①表層土については，その厚さに関する 3 段階の区分に不明を加えた 4 つの要因，②地質については，砂岩，泥岩など 4 つの区分に不明を加えた 5 つの要因，③地質構造については，流れ盤，断層，不明の 3 つの要因をそれぞれ設けた．

「対策工」は，道路建設時またはその後の補修や対策工の効果を評価し，危険度を下げるために追加した．路面に最も近い 1 段目ののり面保護工の種別，のり面全体の代表的な保護工の種別，落石対策工の有無，表面の被覆状況，のり面勾配の 5 項目を設定した．各項目の中には，それぞれ 3 から 5 つの要因を設けている．

「変状」等は，詳細点検等の結果からのり面損傷の記録を安定度に反映させるために追加した．のり面そのものの変状を，プロテクトがある場合と無い場合とでそれぞれ区分している．また，排水施設の損傷に関して 3 つの要因に区分した．最後に，供用開始後 5 年未満の災害発生件数が多く 15 年以上では少なくなるという既往の災害履歴情報から，供用期間区分も同様に追加した．

ここで表 5.1 は，項目，要因，該当の有無，項目番号のみを示しているが，実際の評価表では要因毎に評点が設定され，更に 4 つの崩壊形態（地すべり，のり面崩壊，表層崩壊，落石）に対して要因の重み係数を設定しており，のり面毎の崩壊形態に応じた評価点が算出されている．本章では，既存のデータ

のあり方に関しては議論しないため，簡単のためその部分を省略した．なお，NEXCO 西日本では約 3,500km の高速道路を関西，中国，四国，九州の 4 地域に分割し管理を行っているが，本評価表は関西管内で試行的に作成されたものであり，3,782 の切土のり面で作成されている．本章では，このうち連続する約 120km の高速道路区間を代表路線として抽出し, 747 の評価表を対象として分析することとした．

5.3.2 データの絞り込み

土中水分量を計測すべきのり面を抽出するため，まず一次スクリーニングを実施した．ここでは「過去に表層崩壊が発生しているのり面と地形・地質的特徴が似ているのり面は危険度が高い」という前提に基づき分析を行う．ただし,対策工の状況や供用期間などにより危険度は異なるものと考えられる．前項で述べたように,評価点はこれらを総合的に考慮して算出されているため，点数の高いのり面を分析対象として絞り込むことは合理的な方法であるといえる．

ここで，分析対象とした 747 の評価表の評価点のヒストグラムを図 5.1 に示す．なお，ここでの評価点は，土中水分量を評価することによって捉えられる災害種別である表層崩壊に対する重み係数を用いて算出されているものである．評価点が 70 以下の階級に多くのデータが集中していることがわかる．そこで，分析の対象を評価点が 71 以上の階級に絞り込むこととし，40 のり面を抽出した．また，同階級には属さないものの，表層崩壊履歴のあるのり面が 10 のり面存在していたが，上述した前提で分析を行うため，これらも分析対象として追加した．以上により分析対象として計 50 のり面を抽出した．

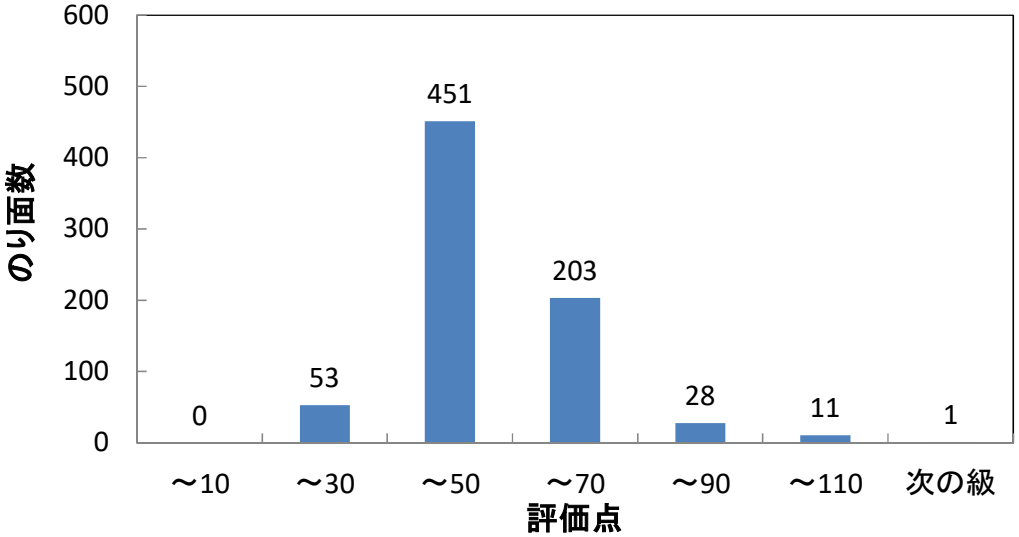


図 5.1　のり面安定度評価表評価点ヒストグラム

5.3.3 適用データの作成

前項で抽出した 50 のり面の評価表について再整理を行う．前項で述べた前提条件に従い，類似した斜面を抽出する上で，そののり面が本来持つ特徴を評価することとした．すなわち対策工や変状などを評価要因から除外し，以降の SOM 解析などを行うこととした．また，土質，地質などの項目の中に「崩壊履歴」が含まれているが，SOM 解析の評価要因に含めると，崩壊履歴のあるのり面と崩壊履歴のないのり面に二分される結果になり，まだ崩壊していないのり面の中から，崩壊しているのり面と似た特徴を持つのり面を抽出することができなくなるため，評価要因から除外した．また，対象のり面のデータを確認すると表層土の厚さは全て「不明」となっていたため，同項目も対象外とした．以上の作業により，分析の対象として再整理した項目と要因を表 5.2 に示す．つまり，個々ののり面は 29 個の評価要因を持つ高次元のベクトルと見なすことができ，分析対象となる 50 個ののり面はその集団である．

表 5.2　整理後の評価項目・要因

路線名	●●自動車道	●●高速道路事務所	KP（自～至）	
地層名	●●層群	No	のり面高(m)	
項目		要　因	該当の有無（1or0）	要因番号
地形	法面と後背地	集水地形	0	1
		地すべり地形	0	2
		崩壊地形	0	3
		崖錐地形	0	4
		尾根斜面	0	5
	後背地の変状	亀裂、段差	0	6
		凹地	0	7
		池沼、湧水	0	8
		湿地、親水性植物	0	9
	のり面高さ	15m以下	1	10
		15～30m	0	11
		30～50m	0	12
		50m以上	0	13
土質・地質・構造・地下水	地質	中古生層堆積岩類	0	14
		火成岩類	0	15
		有馬層群　相生層群	1	16
	地質構造	流れ盤	0	17
		断層（破砕帯等）、向斜軸付近	0	18
		亀裂性岩盤	0	19
		高角度亀裂性岩盤	0	20
		熱水変質帯	0	21
		その他	1	22
	落石	浮石・転石多数	0	23
		浮石・転石あり	0	24
		落石履歴・小落石あり	0	25
		落石・転石なし	1	26
	地下水	湧水あり	0	27
		しみ出し程度（植生あり）	0	28
		湧水なし（植生なし）	0	29

5.4 SOM 解析とクラスタ分析を用いた斜面の特徴評価

5.4.1 SOM 解析の概要

本節では，前節で抽出したのり面と表 5.2 に示す整理後の評価項目・要因から，土中水分量を計測すべきのり面の優先順位を決定する分析手法について述べる．前節で 747 から 50 まで対象のり面の絞り込みを行った．ただし，その情報量は表 5.2 に示す 29 の評価項目であり，分析対象として 29 次元のデータである．このような高次元のデータの特徴評価を，人の手で行うことは現実的ではない．そこで本研究では，高次元データの特徴分析を得意とする，人工知能の一種である SOM 解析を活用することとした．さらに，クラスタリングが主観的となる SOM 解析を補うため，客観的な評価が可能なクラスタ分析を併用し，優先順位を決定することとした．以下，SOM 解析の概要と分析手順，クラスタ分析の概要と分析手順，最後に，分析結果とそれに対する考察を行う．

SOM 解析は，競合学習型ニューラルネットワークの一種で，高次元のベクトル集団を 2 次元マップ上に写像するものである．このとき，特徴が類似しているベクトル集団はマップ上の近い位置に配置され，逆に，特徴が類似していないベクトル集団は遠い位置に配置される．これにより，人間では判断できない高次元ベクトル集団の類似性に対して定性的な判断を促し，クラスタを視覚的に捉えやすいという長所を有している．

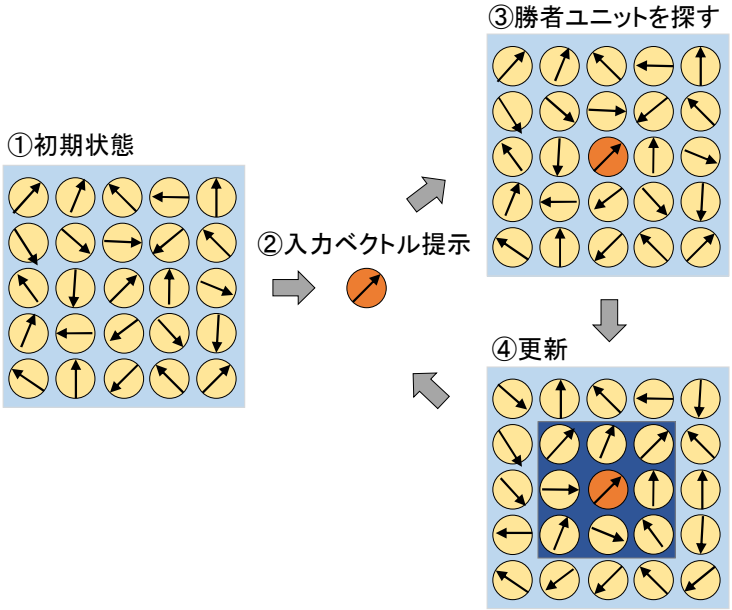


図 5.2　SOM 解析の手順 [6)]

図 5.2 に SOM 解析の手順を示す[6]．同図では，個々の高次元ベクトルを簡易的に 2 次元の矢印で表している．SOM 解析は以下の手順によって行われる．

(1)　2 次元マップ上に高次元ベクトル集団をランダムに配置する．

(2)　入力ベクトルを提示する．

(3)　入力ベクトルと最も類似したマップ上のベクトル集団を勝者ユニットとする．

(4)　勝者ユニット，及びその近傍のベクトル集団が入力ベクトルに近づく．

(5)　(2)から(4)のプロセスを T 回（通常数千回～数万回程度）繰り返す．

以上の手順により，ベクトルの類似性を視覚的に表すマップが形成される．すなわち，本研究では，表 5.2 に示す 29 次元の評価要因で特徴付けられるのり面の類似性が判断可能になる．ただし 5.2 節でも触れたとおり，SOM 解析結果を用いたクラスタリングは，主観的なものであることに注意が必要である．そのため本章では，SOM 解析の結果は，クラスタ分析時のクラスタ数の決定に用いることとした．

5.4.2 SOM 解析の結果とクラスタ数の決定

5.3 節で分析対象として抽出したのり面データを対象として，SOM 解析を実施した．結果から得られた全体マップを図 5.3 に示す．図中の番号は，分析を行ったのり面の番号であり，番号間の距離が近いほど特徴が類似していることを示している．同マップは長方形で示しているが，ベクトル計算上マップ上端と下端，左端と右端は繋がっており，のり面番号の配置は絶対座標としての意味は持たない．また同

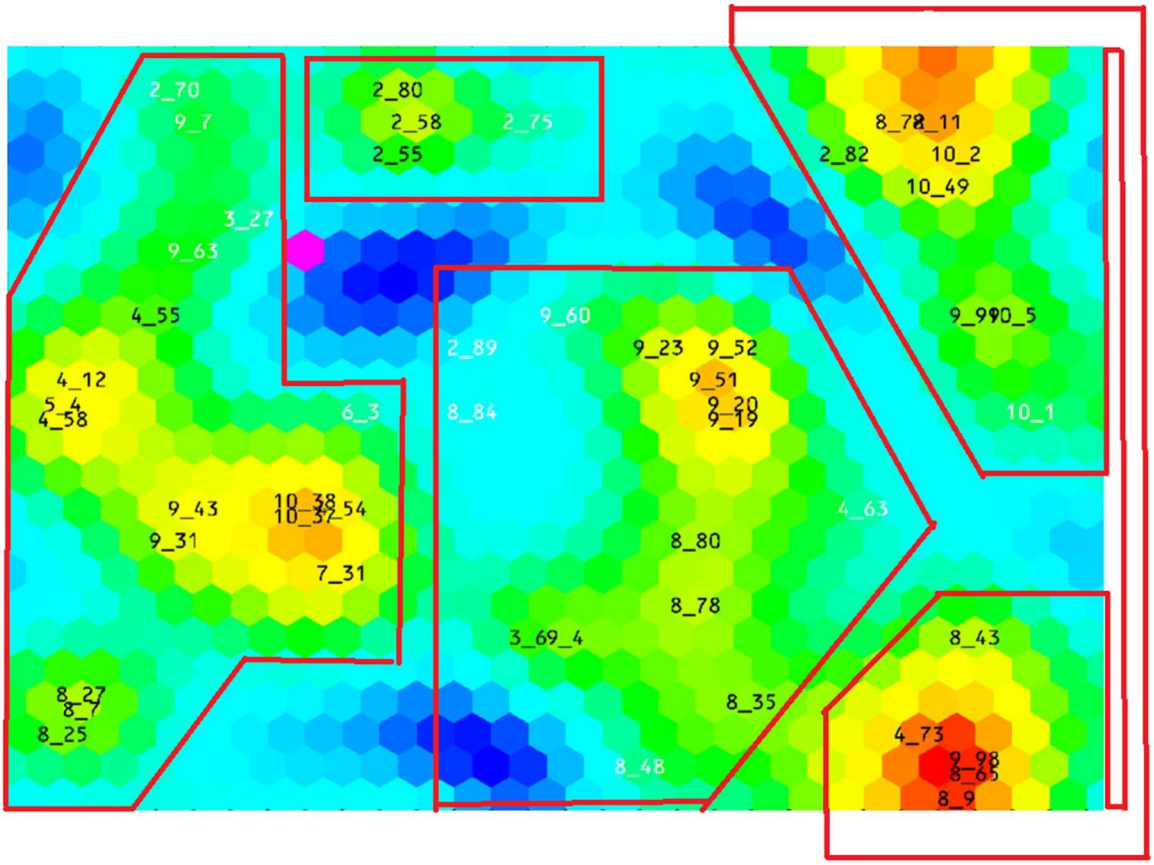


図 5.3　SOM 解析結果

マップ中の色は，対象ベクトルのユークリッド距離が近いものを暖色で，遠いものを寒色で表現している．ここでは，青色部分をクラスタの境界とみなすこととした．その結果，今回対象とした 50 のり面は，図 5.3 中に赤枠で示すように視覚的に 4 つのクラスタに分類することが妥当と判断した．

5.4.3 クラスタ分析

クラスタ分析は，ベクトル集団間の距離や類似度を用いて，クラスタを構成するという統計学的手法の一種である．以下にクラスタ分析の解析手順を示す．

(1) 使用者がクラスタの個数を決定する．
(2) 初期クラスタ中心が選択される．
(3) それぞれのベクトル集団が最も近いクラスタ中心に割り当てられ，クラスタ中心が更新される．
(4) 新しいクラスタ中心と初期クラスタ中心との間の最大変化量が計算される（このとき，最大変化量が指定した最小変化量よりも大きい場合は(3)の段階へ戻る）．
(5) 最大変化量が指定した最小変化量よりも小さい場合や，指定した最大反復回数に達した場合にクラスタは決定される．

以上のようにして，クラスタ分析は，客観的なクラスタリングが可能である．しかし，クラスタ分析は，クラスタの個数をあらかじめ決定する必要があり，このクラスタ数の決定に誤りがあるとクラスタ分析の結果は意味をなさない．したがって，ここでは前項の SOM 解析の結果から，クラスタ数を 4 とすることとした．そのようにして行ったクラスタ分析の結果を，前節の SOM 解析から得られたマップ上に示したものが図 5.4 であり，クラスタリングされた各クラスタを A，B，C，D とした．また，同図中濃紫色

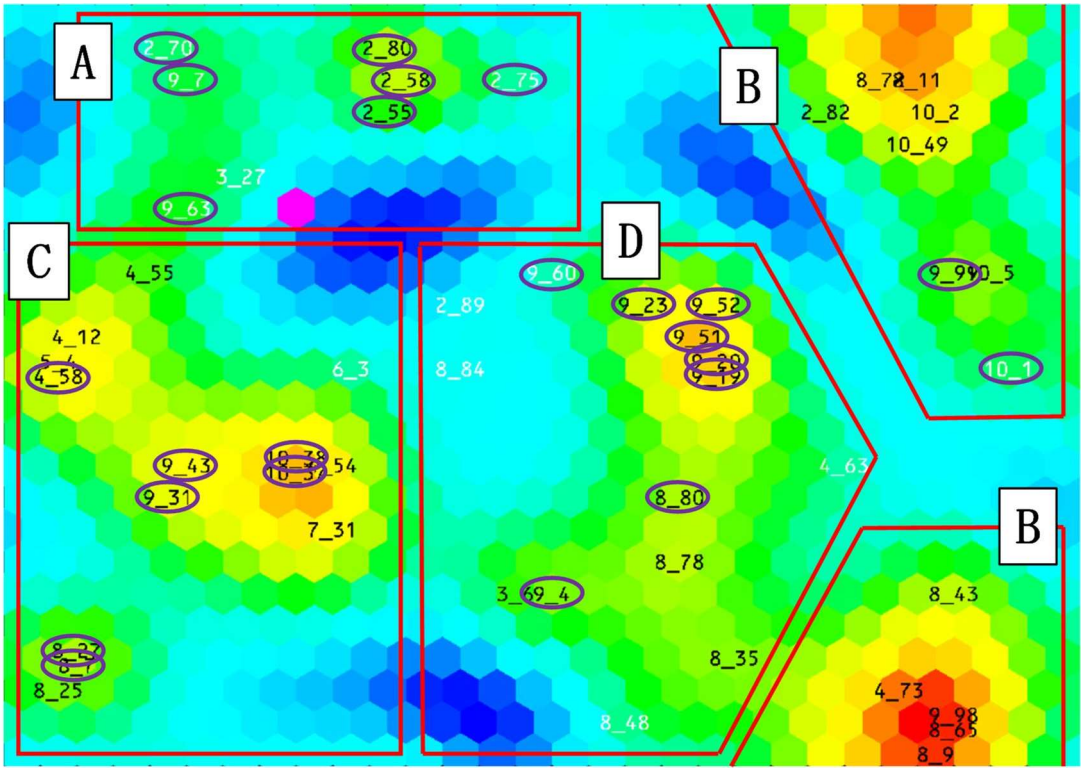


図 5.4　クラスタ分析結果

の丸印で囲っている番号は,「表層崩壊履歴あり」ののり面である.

ここで,図5.4に示すクラスタリング結果は,図5.3の主観的な視覚的判断によるクラスタリングとは,クラスタ A と C の分類が異なっていることが分かる．つまり，SOM 解析のみであれば，図 5.3 のような誤った分類を起こす可能性があるが，クラスタ分析を併用することにより，客観的なクラスタ分類が可能となったことを示している.

5.4.4 各クラスタの特徴

SOM 解析では，学習データの次元数と同じ次元数を持った次元要素を持つため，各変数成分だけを抽出して可視化したマップ（要素マップ）を作成することができる．今回の解析で得られた要素マップのうち，特徴的なものを図 5.5，図 5.6 に示す．図 5.5 の要素マップでは，多くのクラスタで色の分布が一様であることから,「湧水あり」という要素が解析結果に一定の影響を及ぼしていることが分かる. 一方,図 5.6 の要素マップでは，同一クラスタ内にて大きく色の変化が起こっている箇所がある．このことから,「流れ盤」という要素の影響が小さいことが分かる．このように，要素マップと全体マップの比較を通じ，各要素の全体マップへの寄与度を評価することができる．同手法を用いて，クラスタ分析結果から得られた各クラスタの特徴を以下に述べる.

(1) クラスタ A

クラスタ A は, 崖錐地形を含み, しみ出し程度の湧水があるのり面により主に形成されており, 7 のり面が該当している.

(2) クラスタ B

クラスタ B は，中古生層堆積岩類に属し，のり面高さが 50m 以上で湧水のあるのり面により主に形成されており，13 のり面が該当している.

(3) クラスタ C

クラスタ C は，中古生層堆積岩類で転石・浮石がなく，しみ出し程度の湧水を有するのり面により主に形成されている．15 のり面が該当している.

(4) クラスタ D

クラスタ D は高さが 30m～50m で，転石・浮石がないのり面で主に形成されている．15 のり面が該当している.

SOM 解析とクラスタ分析によって，50 のり面が 4 つにクラスタリングされ，全てのクラスタに表層崩壊履歴のあるのり面が振り分けられた．また，SOM 解析の要素マップを用いて各クラスタの特徴を評価したが，ここで得た特徴からのみでは斜面崩壊の危険度や土中水分量の計測のり面の優先度を定量的に決定することは難しい．一方，各クラスタにおいて，クラスタ内の全のり面数に対する表層崩壊履歴のあるのり面数の割合は異なっている．この点に着目したクラスタ間の相対評価や，最終的な土中水分量計測候補のり面の優先順位付けを次節以降で行う.

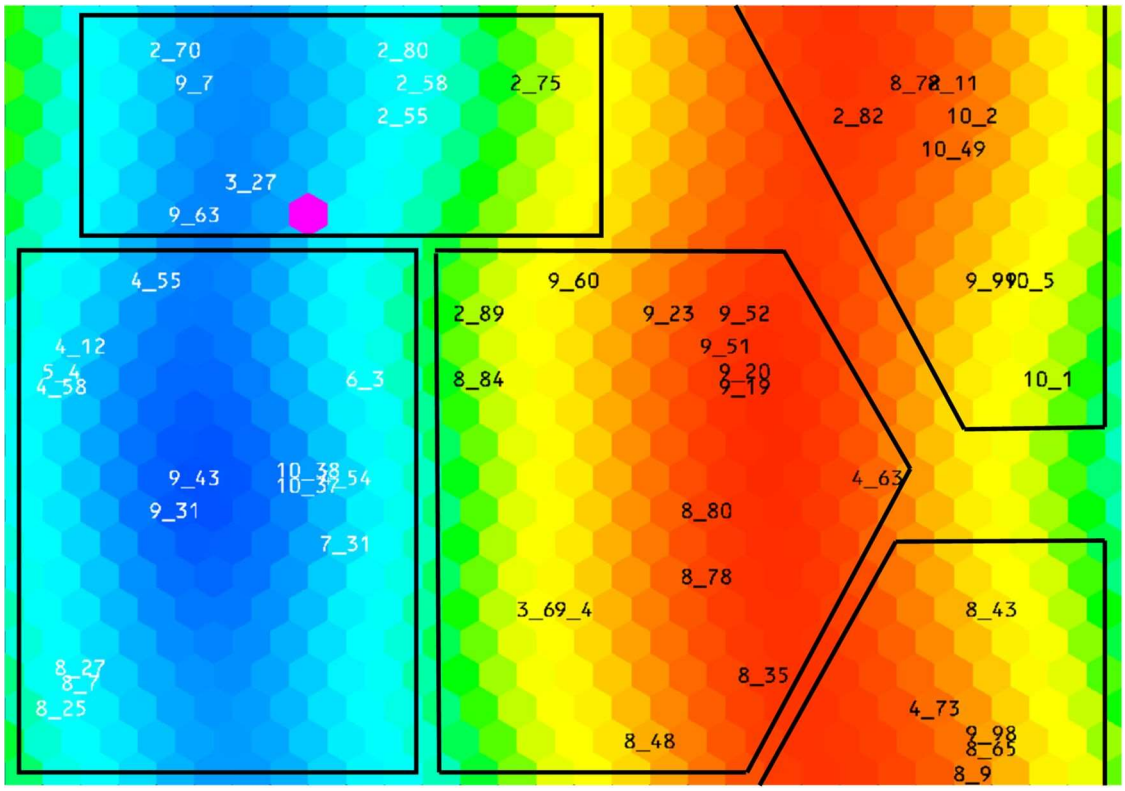


図 5.5　要素マップ（項目「湧水あり」）

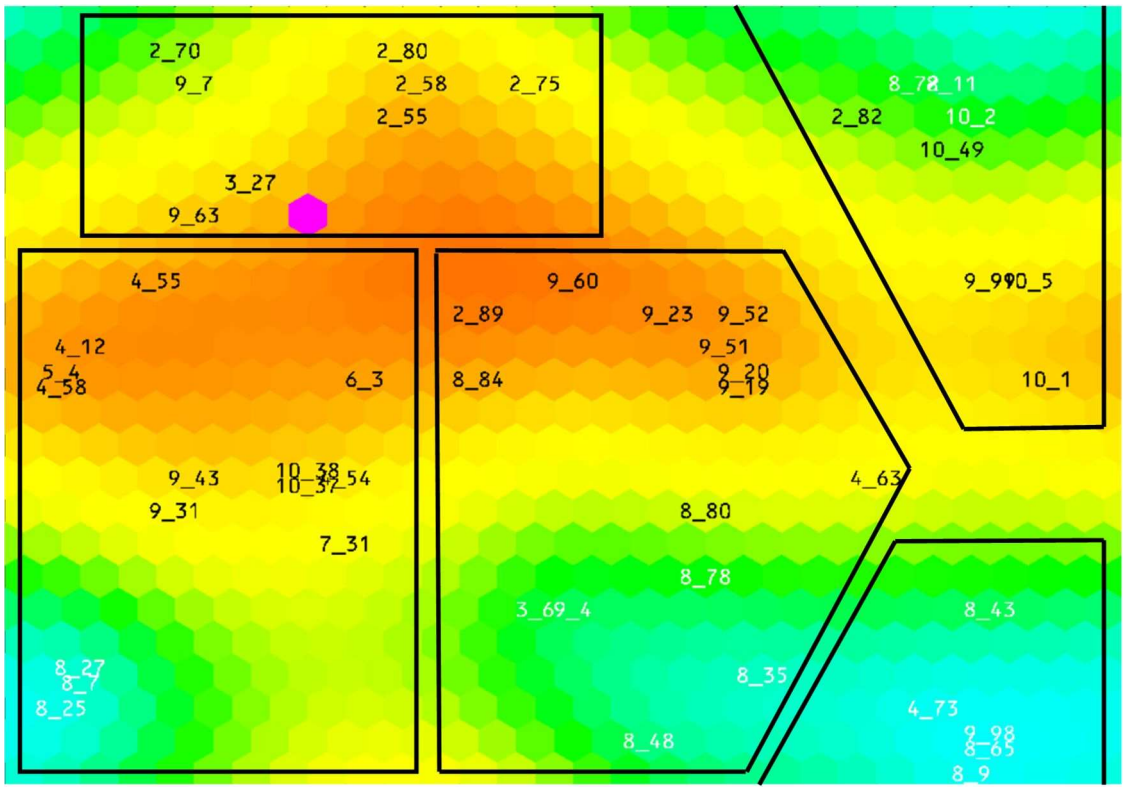


図 5.6　要素マップ（項目「流れ盤」）

5.5 優先順位付けの考え方

5.4 節では, 50 のり面に対して SOM 解析とクラスタ分析を行い, 4 つのクラスタに分類した. ただし, どのクラスタの優先度が高いのか，また，同一クラスタ内のどののり面の優先度が高いのかは判断できていない．そこで本節では，前節の解析結果を用いて土中水分量計測のり面の優先順位付け手法を提案する．ここでは，実際の表層崩壊履歴を危険度の基準として用いることとし，危険度が高いのり面ほど土中水分量の計測候補としての優先順位も高くすることとした．表層崩壊履歴のあるのり面が含まれているクラスタは，崩壊したのり面と類似した特徴を有しているので，それ以外のクラスタより表層崩壊に対する危険度は高いといえる．またそれとは反対に，表層崩壊履歴のあるのり面が含まれないクラスタは，表層崩壊履歴のあるのり面が有する特徴を持っていないので，土中水分量計測候補から除外することとした．ただし，今回対象としたのり面では，表層崩壊履歴があるのり面を含まないクラスタはないため，この理由から土中水分量計測候補の対象外となるのり面はない.

次項以降，クラスタ間の相対評価，同一クラスタ内の評価を行い，土中水分量を計測するのり面の優先順位付けを行う.

5.4 節で抽出したのり面に対して，土中水分量を計測する優先順位を考慮するため，まず各クラスタの災害発生頻度を算出する．災害発生頻度が高いクラスタの方が危険度の高いクラスタといえ，優先順位も高くすべきであるといえる．ここでの災害発生頻度は式(5-1)によって定量的に算出した．すなわち，各クラスタにおいて何年に 1 箇所災害が発生したのかを算出し，相対的な危険度によるクラスタ間の順位付けを行った. 算出された各クラスタの災害発生頻度は表 5.3 に示している. 災害発生頻度はクラスタ D が最も大きい. クラスタ C のそれは D とほぼ等しい. 一方，クラスタ A の災害発生頻度はクラスタ D の約半分，クラスタ B のそれはクラスタ D の 4 分の 1 程度である.

次に，5.3 節表 5.1 で示した評価表の対策工評価点の絶対値が小さいほど対策工が手薄であることに基づき，クラスタ内での優先順位を決定した．なお，表層崩壊履歴のあるのり面は，対策工が完了しており危険度が低下していると考えられるため，優先順位付けの対象からは除外した．更に，本章では土中水分量を計測するのり面を抽出することを目的としているため，例えば全てコンクリート吹付が施工されているのり面のように，土壌水分センサが設置できないのり面は対象外とすべきである．その確認を表 5.3 で示した評価表の対策工被覆割合で行い，被覆割合が 70%以上ののり面に対して，評価表ではなく高速道路の全資産（構造）を管理している別調書で個別確認を行い，対象のり面とすべきかどうかの最終判断を行った．なお，全てコンクリート吹付が施工されているような場合には優先順位付けの対象外とし，植生保護工のように土中水分量が計測可能な面積が大きければ，優先順位はそのままとすることとした．今回分析対象としたのり面の中で 70%以上の被覆割合となった 4-12，4-63，7-31 ののり面で個別確認を行った．いずれののり面も大部分をコンクリート吹付け工，コンクリート吹付け枠工など植生以外の保護工が施工されており，土中水分量の計測には適さないのり面と判断した．よって，これらののり面は最終的な順位付けから除外した．本節における一連の確認結果を表 5.3 に示した.

$$\text{災害発生頻度} = \frac{\text{災害発生履歴のあるのり面数}}{\text{クラスタ内全のり面の平均供用年数}} \qquad (5\text{-}1)$$

表 5.3　土中水分量計測のり面優先順位

	クラスタ	災害発生頻度	のり面番号	対策工評価点	優先順位	対策工被覆率の確認	最終順位
1	D	0.4133	8_84	−4.50	1		**1**
2			3_6	−11.50	2		**2**
3			8_35	−14.50	3		**3**
4			8_48	−27.50	4		**4**
5			2_89	−31.00	5		**5**
6			8_78				
7			4_63	−61.00	7	70%以上	—
8	C	0.3600	6_3	−7.50	8		**7**
9			8_25	−11.25	9		**8**
10			4_12	−15.00	10	70%以上	—
11			4_54	−31.00	11		**9**
12			4_55				
13			5_4				
14			7_31	−40.00	14	70%以上	—
15	A	0.2178	3_27	−14.00	15		**12**
16	B	0.1060	8_65	−10.00	16		**13**
17			9_98				
18			10_2				
19			10_5	−10.75	19		**16**
20			2_82	−24.00	20		**17**
21			4_73	−31.00	21		**18**
22			8_9				
23			8_43				
24			8_72				
25			8_11	−36.25	25		**22**
26			10_49				

5.6 土中水分量計測斜面の優先順位付き抽出手法の提案

ここでは，5.4 節で示した SOM 解析とクラスタ分析によるクラスタリング手法と，5.5 節で示した優先順位付け手法をフローとして再整理し，土中水分量計測斜面の優先順位付け抽出手法としてとりまとめる．さらに，本手法における利点と実務への提言を述べる．

図 5.7 に，本章で提案する手法のフローを示す．同フローによる利点は，既存のデータを最大限活用し，膨大なデータを対象としつつ SOM 解析とクラスタ分析の併用による簡易な作業で，数百ののり面の中から優先順位を付けて対象のり面を定量的に抽出できることである．しかも，評価表にデータがあるものであれば，例えば土石流や地すべりに対しても，同フローにより多くの対象箇所の中から優先順位付きで対象箇所の抽出が可能である．ただし，本研究においては，同フローの最上位にある対象のり面の絞り込みにおいて，絞り込み数の決定が定性的な作業となっている．絞り込み数は，実際に土中水分量を計測するのり面数に依存するべきものであり，最終的には事業者の判断に委ねられる．

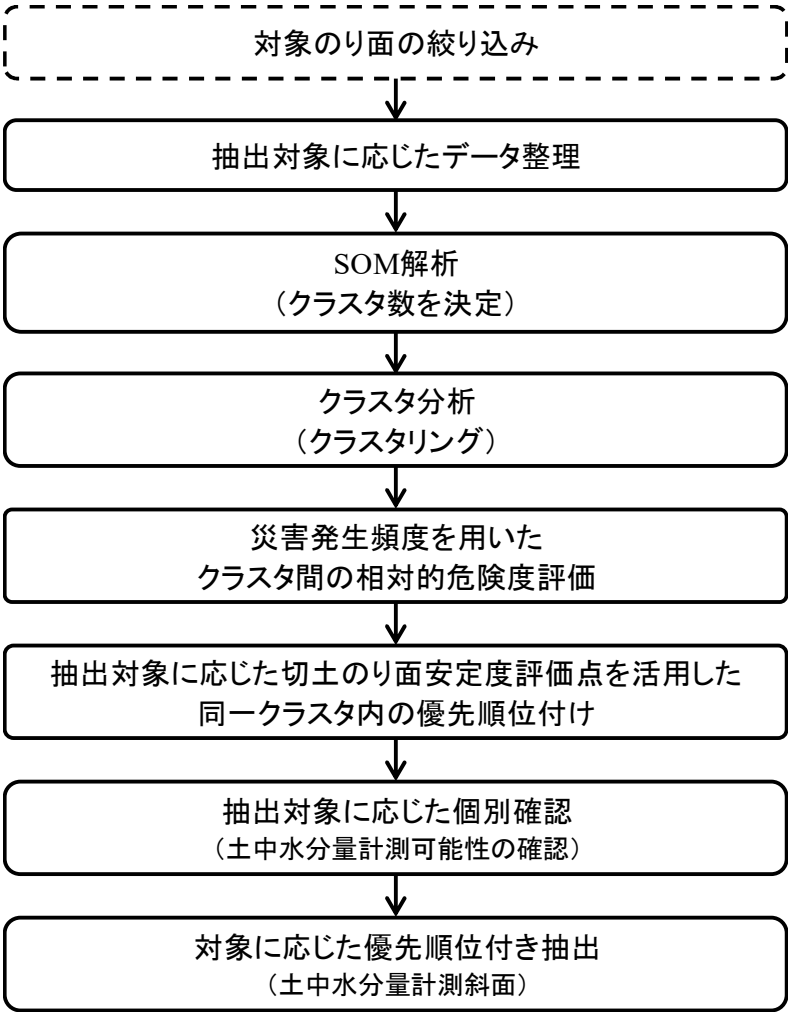


図 5.7　土中水分量計測斜面の優先順位付き抽出フロー

5.7 まとめ

本章では，既存の評価表を用いて，SOM 解析とクラスタ分析を併用した，土中水分量を計測すべき斜面を優先順位付きで抽出する手法を提案した．ここで得られた知見を下記にまとめる．

(1) 既存の切土のり面安定度評価表を対象に SOM 解析とクラスタ分析を併用し，さらに災害発生頻度，切土のり面安定度評価点を活用した，土中水分量計測斜面の優先順位付き抽出手法を提案した．

(2) NEXCO 西日本が保有している既存の切土のり面安定度評価表から，表層崩壊に関わると考えられる 29 個の要因を抽出することができた．そして，29 個の要因を変数とするベクトルとして個々ののり面を特徴付けることができた．

(3) SOM 解析とクラスタ分析を併用する客観的なクラスタリングを行い，対象のり面を 4 つのクラスタに分類し，各クラスタに属するのり面の特徴を明らかにした．

(4) 各クラスタの特徴は，「崖錐地形を含み，しみ出し程度の湧水があるのり面により主に形成（クラスタ A)」，「中古生層堆積岩類に属し，のり面高さが 50m 以上で湧水のあるのり面により主に形成（クラスタ B)」，「中古生層堆積岩類で転石・浮石がなく，しみ出し程度の湧水を有するのり面により主に形成（クラスタ C)」，「高さが 30m～50m で，転石・浮石がないのり面で主に形成（クラスタ D)」である．

(5) 各クラスタ内ののり面における供用年数と災害発生のり面数を用いた「災害発生頻度」を定義し，各クラスタの災害発生頻度を明らかにした．

(6) 提案した手法により，747 のり面の中から，23 のり面を斜面崩壊に対する優先順位を付けて，土中水分量を計測すべきのり面として抽出できた．

参考文献

1) 櫻谷慶治，松本聡碩，伊藤真一，小泉圭吾，小田和広：既存データを活用した自己組織化マップによる優先順位付き土中水分量計測のり面抽出手法の提案，地盤と建設，vol. 35，No. 1，pp.109-116，2017.

2) 社団法人地盤工学会：豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測，丸善，pp.75-77，2006.

3) 大北正昭他：自己組織化マップとそのツール，シュプリンガー・ジャパン，p.1-53，2008.

4) 徳高平蔵，藤北喜久郎，山川烈：自己組織化マップ応用事例集，海文堂出版，p.1-17，2002.

5) マーク M．ヴァン．フッレ：自己組織化マップ―理論・設計・応用，海文堂出版，p.1-85，2001.

6) 徳高平蔵，岸田悟，藤北喜久郎：自己組織化マップの応用　多次元情報の 2 次元可視化，海文堂出版，p.9，1999.

7) 日外勝仁，齋藤敏明，伊東佳彦，橋本祥司：数量化理論Ⅱ類および自己組織化マップによる岩盤斜面危険度評価法に関する研究，土木学会論文集，No.771，Ⅲ-68，pp.51-60，2017.9.

8) 白木渉，長瀬裕俊，宮下英明，伊藤則夫：自己組織化マップ（SOM）による斜面崩壊予測システム，構造工学論文集，Vol.44A，pp.453-459，1988.

9) 小山倫史：自己組織化マップを用いた道路斜面の健全性評価手法に関する提案，社会安全学研究　第 6 号，p.147-155，2016.

10) 村瀬洋一，高田洋，廣瀬毅士：SPSS による多変量解析，オーム社，p.273-298，2012.

11) 国土交通省：点検要領，171p，2006.

第６章　土中水分量のモニタリングデータを用いた高速道路通行規制基準

6.1 はじめに

第 4 章では，高速道路の通行規制に用いる新たな指標を提案することを目的とした一連の模型斜面実験の結果，擬似飽和体積含水率を超過しなければ斜面の変形が発生しないという実験事実から，擬似飽和体積含水率が災害・変状発生前の通行規制基準の新たな指標として適用可能であることを明らかにした．ところで，現地斜面において，擬似飽和体積含水率を決定することは非常に困難である．それは，擬似飽和体積含水率が雨水の地表面からの浸透量に依存すると考えられるからである．つまり，擬似飽和状態では，含水率計測点において，地表面から浸透する雨水の浸透量と排水量が釣り合っている状態であると考えられる．そのため，一定降雨強度条件下での模型実験では，擬似飽和体積含水率を求めることは容易であるが，時々刻々降雨強度が変化する現場において，それを決定することは非常に困難である．したがって，通行規制基準の指標として，擬似飽和体積含水率を適用するためには，擬似飽和体積含水率に及ぼす降雨強度の影響を明らかにし，それを考慮した通行規制基準の考え方を提案する必要がある．そこで本章では，まず，体積含水率をモニタリングするため，高速道路環境に適した新なモニタリングシステムを開発する[1)]．そして，開発したモニタリングシステムの有用性について考察する．次に，モニタリングシステムよって観測される体積含水率の経時変化を活用して，雨水浸透に対する再現性の高いシミュレーションモデルをパラメータも含め決定する．さらに，シミュレーションモデルを利用し，降雨強度を変動パラメータとした一連のパラメトリックスタディーを通じ，擬似飽和体積含水率に及ぼす降雨強度の影響とそれの簡易的な決定方法を提案する．最後に，擬似飽和体積含水率を用いた通行規制基準の考え方を提案する．

6.2 モニタリングシステムに関連する既往の研究

これまでにも述べてきたように，降雨により引き起こされる土砂災害は発災の予測が難しい．そのため，斜面の監視を強化し，発災の予兆を判断し，対策を講じることが重要である．また，NEXCO 西日本が管理する高速道路においては，土工区間が延長の約 7 割を占めることに加え，延長の約 4 割が開通して 30 年以上経過しているため，グラウンドアンカー工など構造物の健全性モニタリングも必要である．一方，上記の課題に対してリアルタイムかつ長期のモニタリングシステムを構築するためには，各モニタリングサイトに複数種類のセンサ，データ収集装置，データ伝送装置が必要となる．また，各現場を管理する執務室毎にリアルタイムな情報提供も求められるシステム要件である．これらの課題解決への取り組みはいくつか報告されている[2)~11)]．Maneesha ら[2)]は，無線センサネットワークを活用した地すべり検知システムの開発を報告している．また，Se ら[5)]は，無線通信を用いたグラウンドアンカー荷重のモニタリングシステムを開発し，モニタリングデータに関する考察も述べている．ただし，これら既往の研究は「地すべり監視」や「グラウンドアンカー緊張力監視」のように監視対象を限定しているものが多く，延長の長い線状構造物を対象とした一元的，かつ複合的なモニタリングシステムの開発はなされていない．

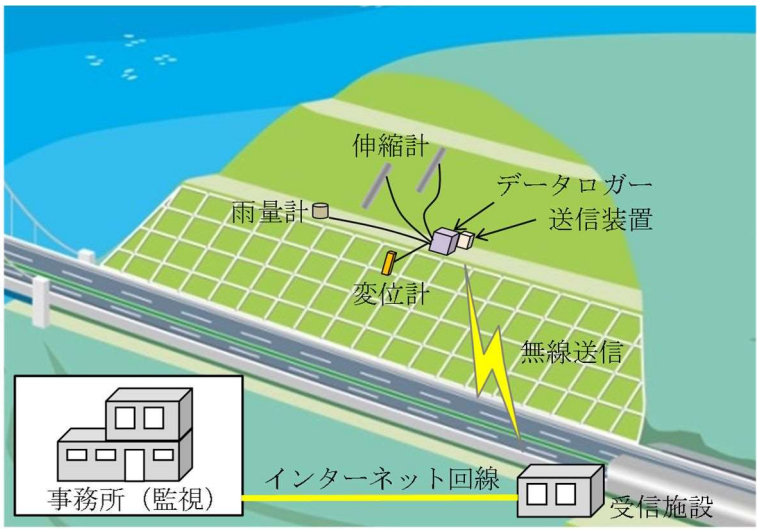


図 6.1　一般的な斜面モニタリングシステムの概要

写真 6.1　伸縮計設置状況

既往の一般的な斜面モニタリングシステムの概要を図 6.1 に，伸縮計の設置状況を写真 6.1 にそれぞれ示す．伸縮計などの計測データはケーブルを介してデータロガーへ送られ，送信装置から近くの受信施設へ無線で送られる．管理者は，インターネットを介し受信施設のデータをモニタリングする．このようなシステムを構築するためには，計測機器とデータロガー間の配線，受信施設の設置，インターネット接続が必要であり，そのために要する時間と労力が負担となっている．

上述した一般的なモニタリングシステムにおける課題を挙げる．一つは，鳥獣被害や雷害による有線ケーブルであることに起因するシステム障害を解決することである．また，ケーブル敷設に係る時間と労力を削減することも課題である．加えて，上述したシステムは，場所毎に独立した別々のシステムであり，また，モニタリング対象毎に異なるシステムが設置・運用されるため，管理者が一元的にモニタリングすることが困難という問題もある．更に，公衆のインターネット回線を使用しているため，甚大な災害が発生した際など，可用性にも懸念が残る．すなわち，一元的な管理の実現と，可用性の向上も，高速道路を対象としたモニタリングシステムに求められる．

6.3 モニタリングシステムの開発

6.3.1 システム全体概要

前節で述べた，一般的なモニタリングシステムにおける課題を解決するため，以下の 4 項目をシステム要件とし，新たなシステムの開発を行った．すなわち，1）無線センサネットワークでデータ通信を行うこと，2）マルチプルなモニタリングに対応可能であること，3）それらを一元管理できること，4）NEXCO 西日本業務用無線 LAN も使用できること，である．開発したシステムの概要を図 6.2 に示す．同システムは，各種センサを接続する無線モジュールである「子機」，複数の子機の通信を制御し子機からのデータをサーバへ転送するコンピュータ内蔵の「基地局」，データを収集し表示画面を作成する「サーバ」から構成されている．同システムの特徴を，以降，順に述べる．

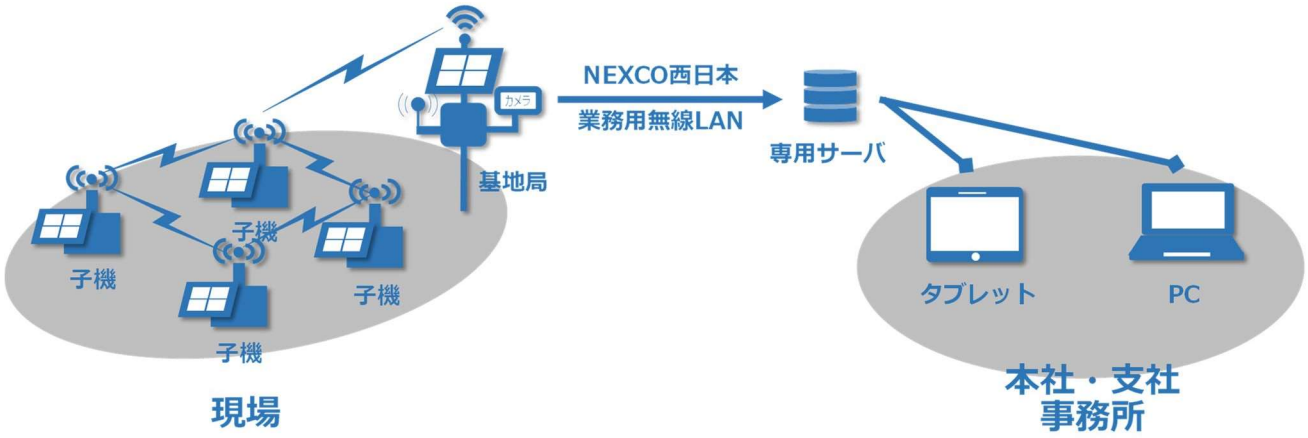


図 6.2　開発したシステムの概要

6.3.2 無線通信機能

開発したシステムは，無線センサネットワーク技術の 1 つであるメッシュネットワークトポロジを採用した．ここでのメッシュネットワークは，基地局と，センシング機能を有する複数の子機とによって形成されたマルチホップ，アドホックネットワークである．

無線通信を用いるシステムでは，データ回収率と通信距離が重要となる．そこで，6 箇所の実際の高速道路のり面で通信試験を行い，本システムにおけるデータ回収率，通信距離の確認を行った．試験サイトの概要を表 6.1 に，通信試験の結果を図 6.3 に示す．通信実験を行った 6 箇所ののり面は，地点，地質およびのり面保護工の組合せが異なっている．また，主要なモニタリング対象も体積含水率，アンカー荷重および変位というように異なっている．さらに，使用した子機の台数については，I のり面だけが 35 台であるが，それ以外は 10 台以内である．つまり，それぞれのサイト毎に状況が異なっている．図 6.3 は，横軸に各通信試験サイトの基地局から最も離れた計測点を，縦軸に，各サイトの試験期間中全データに対するデータ回収率を示している．ここでの全データとは，各サイト基地局と通信しているすべての子機から得られるデータを対象としている．開発したシステムは，基地局から 420m離れた位置のデータも回収可能であること，また，データ回収率が 100%に近い値であることが分かる．以上のことから，開発したシステムは実際の高速道路での使用に問題がないと考えられる．

表 6.1　試験サイト一覧

サイト名	基地局台数	子機台数	主要モニタリング対象	表層地質	のり面保護工
Oのり面	1	10	体積含水率	風化泥岩・砂岩	植栽工
Yのり面	1	8	体積含水率	風化花崗岩	植栽工
Kのり面	1	9	体積含水率	シラス	植栽工
Aのり面	1	6+2（中継器）	アンカー荷重	泥岩	アンカー工
Hのり面	1	4+2（中継器）	アンカー荷重	泥岩	アンカー工
Iのり面	1	30+5（中継器）	変位	砂岩	のり枠工・自然斜面

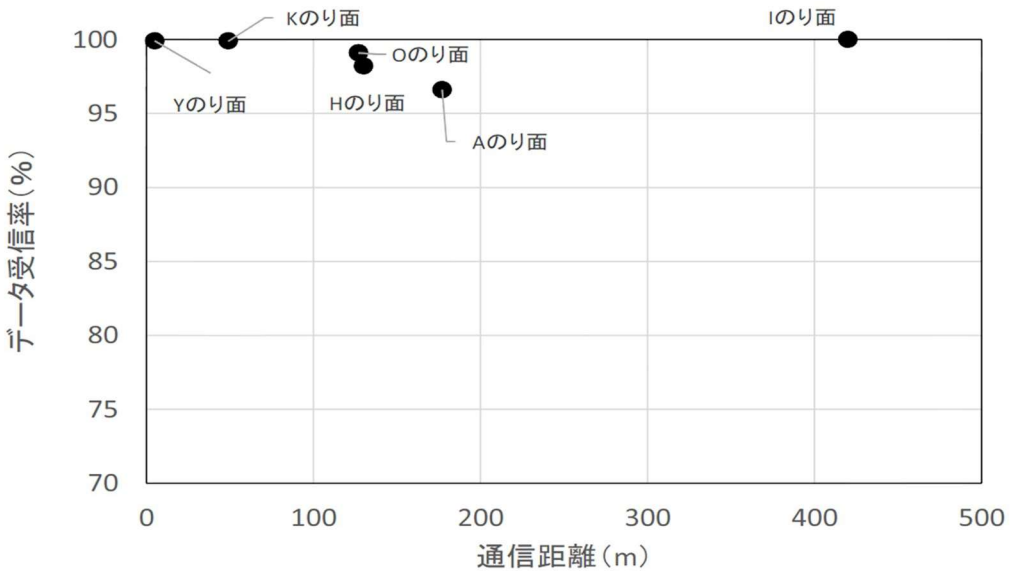
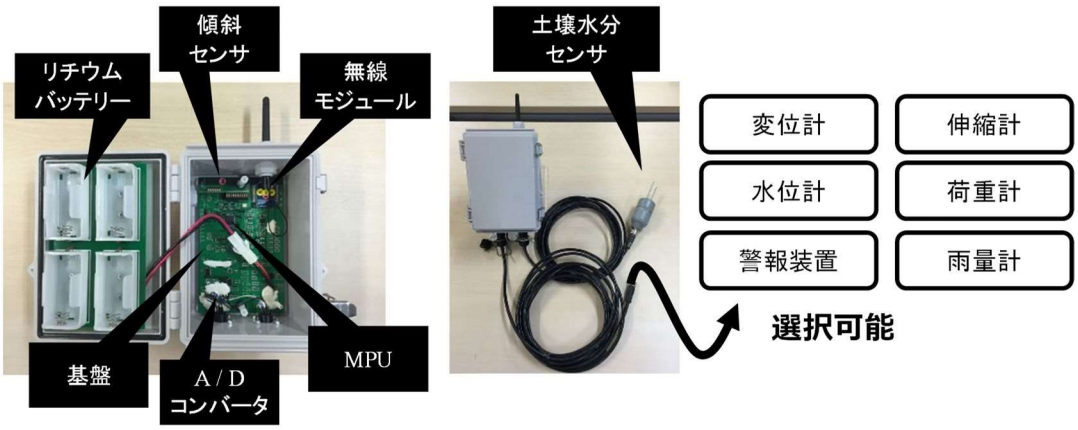


図 6.3　通信試験の結果

6.3.3 子機

本システムの無線モジュールである子機の概要を図 6.4 に，その仕様を表 6.2 に示す．縦約 20cm の大きさのケースに，複数のセンサが接続できる回路基板，傾斜センサ，無線モジュール，バッテリーが内蔵されている．持ち運びしやすく，現場への設置が容易なものとしている．現場によっては，結露などの影響により機器の故障が予想されるため，IP65 準拠のケースを使用した．また，ひずみゲージタイプの入力端子（水位センサ，ロードセル，伸び計，亀裂開口変位センサ，温度センサなど），電圧及び電流タイプの入力端子（土壌水分センサなど），接点入力チャンネル雨量計と警報信号ランプ用の出力端子も取り付けている．各種センサで計測されたアナログデータは，無線モジュールに送られ，内部の A/D 変換器によりデジタル信号に変換される．そして，MPU の制御により定期的に基地局へ送信される．開発したシステムを用いることにより，体積含水率のモニタリングのみでなく，荷重計によるグラウンドアンカーのり面の監視や，水位計による盛土内部の地下水位モニタリングなどにも有用である．



a)子機の内部構造　　b)子機へのセンサ接続例

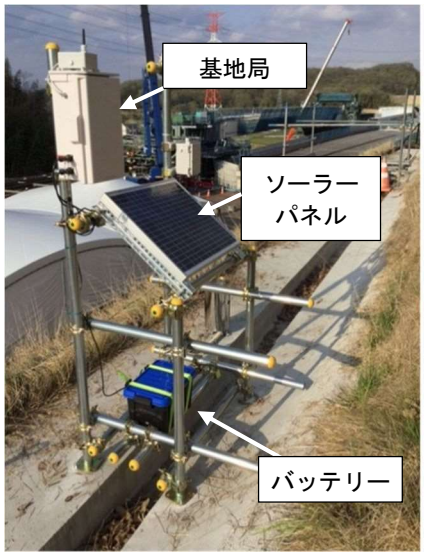
図 6.4　子機の概要

表 6.2　子機の仕様

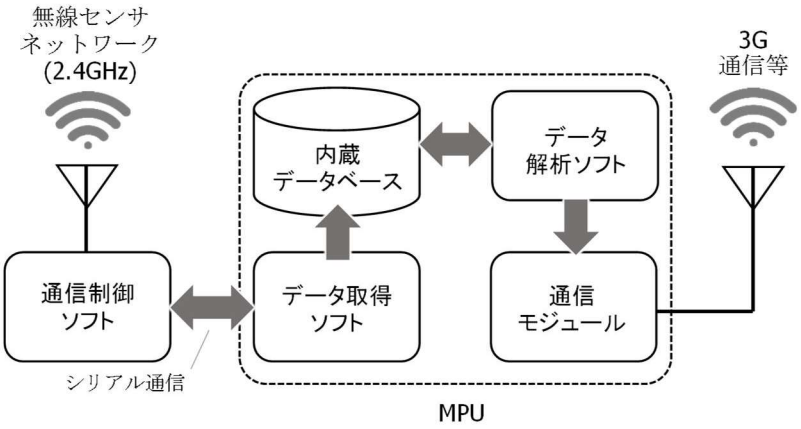
伝送電流	120 mA @ 3.3 VDC
受信電流	31 mA @ 3.3 VDC
POWER-DOWN CURRENT	<1 μA @ 25℃
通信プロトコル	XBee 802.15.4 (Proprietary 802.15.4)
使用帯域	250 Kbps
バッテリー仕様	8Ah～3.6V
追加A/Dコンバータ仕様	16bit resolution × 1

6.3.4 基地局

本システムは，モニタリングサイト一箇所につき一つの基地局を設置することを基本としている．基地局は，サイト内の子機から送られるデータを集約し，データセンター内のサーバに定期的に転送することが主要な役割である．また，事前に設定した閾値を超える値が観測された場合には，登録されている宛先にメール送信する機能も有している．基地局も，ソーラーパネルとバッテリーを搭載し，電源ケーブルの敷設を不要とした．基地局の概要を図 6.5 に，仕様を表 6.3 に，それぞれ示す．ソーラーパネルの大きさは縦 535mm×横 666mm，発電量は 39W である．バッテリー容量は 24Ah であり，5 日間日照量がゼロでも稼働可能なように設計した．実現場でのバッテリー量の変化を図 6.6 に示す．同図より，日照量の少ない冬季においても，十分なバッテリー量が確保されていることが分かる．



a)基地局の外観



b)基地局の構成

図 6.5　基地局の概要

表 6.3　基地局の仕様

CPU	ARM926EJ-S (400 MHz)
RAM	128 MB (LPDDR-266)
ROM	32 MB NOR Flash Memory
通信モジュール	Sierra Wireless HL8548
消費電力	2 W Maximum

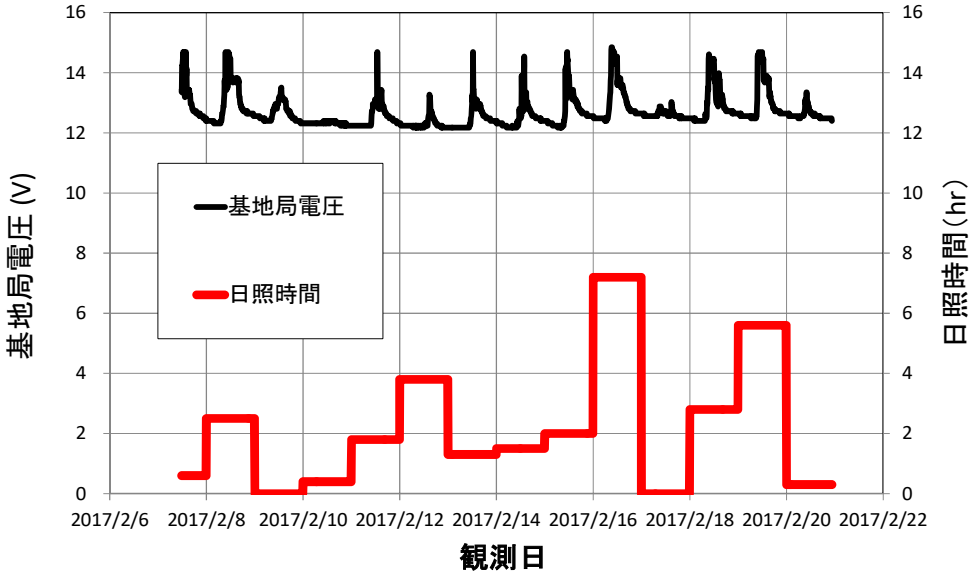
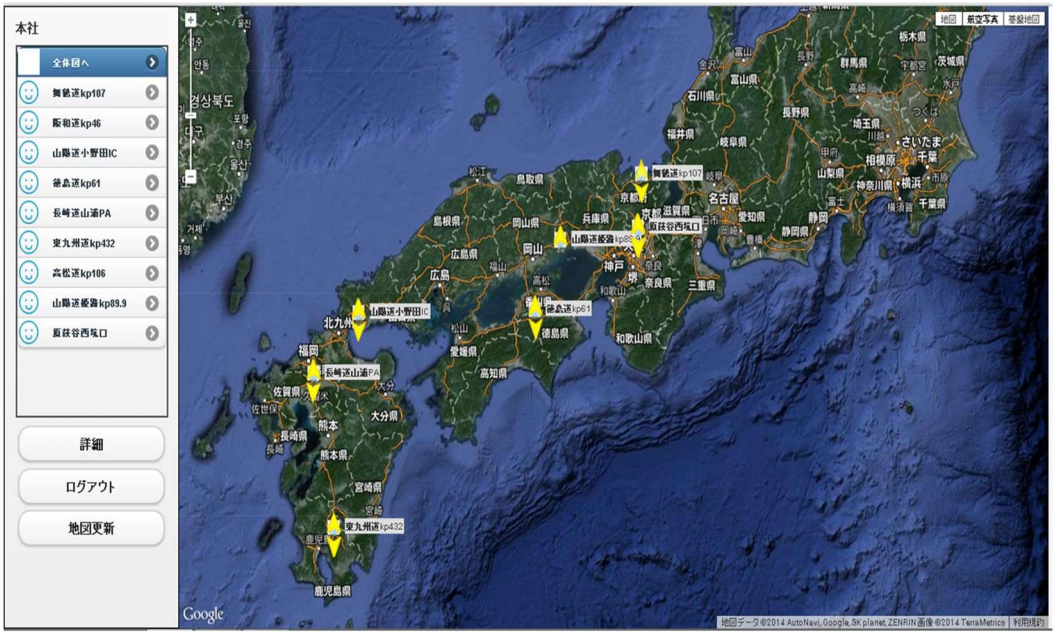


図 6.6　現場でのバッテリー量の変化（冬季）

6.3.5 監視システム

本システムを用いて収集される計測データは，インターネットなどを介していつでもどこからでもリアルタイムで閲覧・監視できるようにした．システム画面を図 6.7 に示す．図 6.7a)に示すように，地図上に計測箇所をプロットし，事前に設定した閾値でアイコンの色を変え，異常な計測値を分かりやすくした．また，計測ポイントを選択すると，図 6.7b)に示すように詳細な計測データをグラフなどで確認できる．データはサーバからいつでもダウンロードすることが可能である．管理者は，インターネットなどを介して，各サイトの状態を一元的に監視することが可能である．



a)モニタリング箇所の地図表示

b)モニタリングデータのグラフ表示

図 6.7　システム画面例

6.3.6 NEXCO 西日本業務用無線 LAN との通信確認

NEXCO 西日本は，情報板や非常電話など道路管理に必要な機器の制御やデータ通信のため，道路管理用通信ケーブルを保有，管理，活用している．更に先進的な高速道路管理環境の構築を目指し，この通信ケーブルに無線アンテナを設置し，高速道路空間全体の道路管理用無線ＬＡＮ環境の整備を進めている．無線ＬＡＮ環境が整備されれば，開発したモニタリングシステムから収集されるデータを，インターネットを介さず安定的に社内に取り込むことが可能となる．そして，機器設置にかかる更なる負担軽減とともに，モニタリングデータの可用性・信頼性の向上が期待できる．

本格的な無線ＬＡＮ環境構築に先だって，一部の高速道路区間で試行環境が構築されている．そこで開発したシステムの通信試験を実施した．写真 6.2 に試験サイトの状況を，そして表 6.4 に試験結果を示す．同表に示すように，試験結果から約 97%のデータ回収率であることを確認した．更なる向上が望ましいが，現時点でも実務上大きな問題のる数値ではないことが確認できた．

写真 6.2　NEXCO 西日本業務用無線 LAN 通信試験サイト

表 6.4　NEXCO 西日本業務用無線 LAN 通信試験結果

計測機器種別	箇所数	APまでの距離	通信量	通信頻度	データ回収率
傾斜計	6箇所	350m	0.2MB/日	1回/10分	96.9%
土壌水分計	12箇所				
雨量計	1箇所				

6.4 モニタリングシステムの適用事例

本節では，表 6.1 に示す 6 箇所のサイトの適用事例の中から代表的な 2 つを選び，開発したモニタリングシステムの有用性について考察する．

6.4.1 体積含水率のモニタリング事例

図 6.8 は表 6.1 における Y のり面の平面図を示している．このサイトでは写真 6.3 に示すような子機を 8 箇所に設置し，それぞれ 2 深度で土壌水分量を計測した．ID1～ID8 の子機それぞれで，内蔵している傾斜計による傾斜データもモニタリングした．また，8 箇所のうち 1 箇所の子機には雨量計を接続し，雨量も計測した．8 箇所のうちの 1 箇所における 2014 年 7 月のモニタリング結果を図 6.9 に示す．総雨量は 236mｍであり，10 分間降雨強度の最大値は 10.5mm/10 分である．現地は砂質地盤であり，降雨時に体積含水率が上昇するものの，降雨終了後，すぐに体積含水率が減少していることが分かる．また，傾斜計の値に変化は見られず，変位が発生していないことが確認できる．

一方，表 6.1 における O のり面における同じ期間の計測結果を図 6.10 に示す．同図において総降水量は 141mｍ，10 分間の最大降雨強度は 9.75mm/10 分である．同サイトは風化した泥岩と砂岩の互層で形成されており，同図における降雨終了後の体積含水率の低下が，図 6.9 のものに比べて比較的遅いことが分かる．また，傾斜計の値も 7 月 3 日に浅部の体積含水率が増加した後に，0 から 0.8 度に増加したことを捉えている．なお，本計測結果のモニタリングは，WEB 上で行われるため，遠く離れた複数の現場であっても，体積含水率の変化や微小な変形を同一モニターで一元的にモニタリング可能である．

図 6.8　Y のり面の平面図

写真 6.3　Y のり面に設置された子機

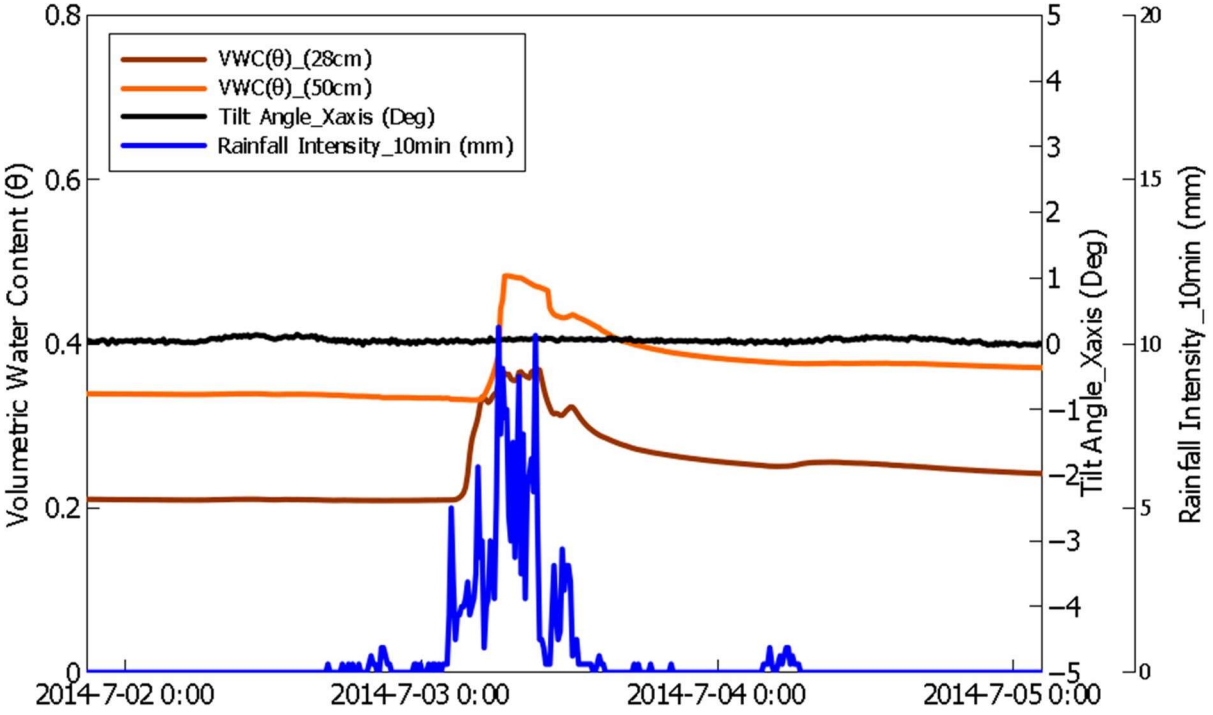


図 6.9　Y のり面におけるモニタリング結果

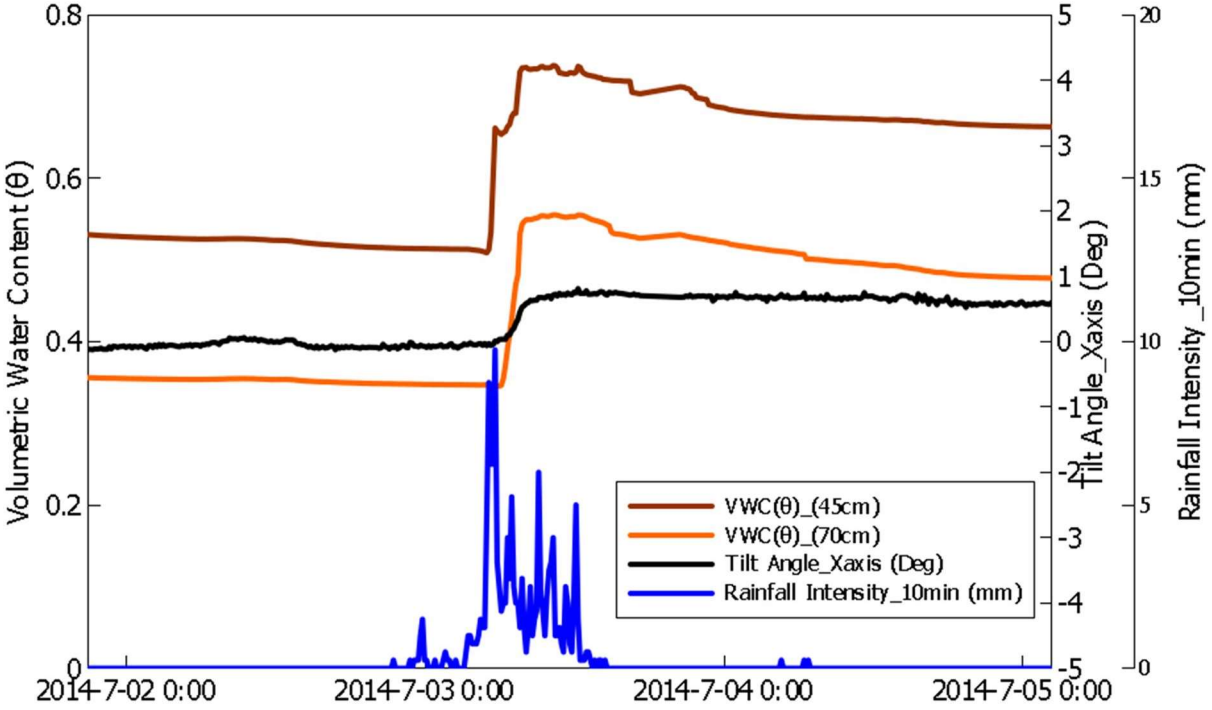


図 6.10　O のり面におけるモニタリング結果

6.4.2 グラウンドアンカー荷重のモニタリング事例

図 6.11 は表 6.1 における A のり面の平面図を示している．当該箇所では，2 箇所の地下水位計，3 箇所のアンカー荷重計，1 つの雨量計データをモニタリングしている．（ID7，ID8 は中継機）アンカー荷重計は，写真 6.4 のように子機に接続されている．約 1 ヵ月間のモニタリング結果を図 6.12 に示す．同図より，降雨後に地下水位が上昇していることが確認できる．一方，アンカー荷重は温度に起因すると思われる 1 日周期の変動はあるものの，降雨による荷重の増加は認められず一定の値を示している．また，同図で明らかなように，アンカー荷重と地下水位の情報を同一グラフで確認することができ，変状があった場合でも複合的な考察をしやすいよう配慮した．ここで示したように，開発したシステムを用いることによりグラウンドアンカー荷重のモニタリングも可能であり，同システムが高速道路の斜面防災を高度化する上で，有用なシステムであるといえる．

図 6.11　モニタリング A のり面平面図

写真 6.4　A のり面に設置された子機

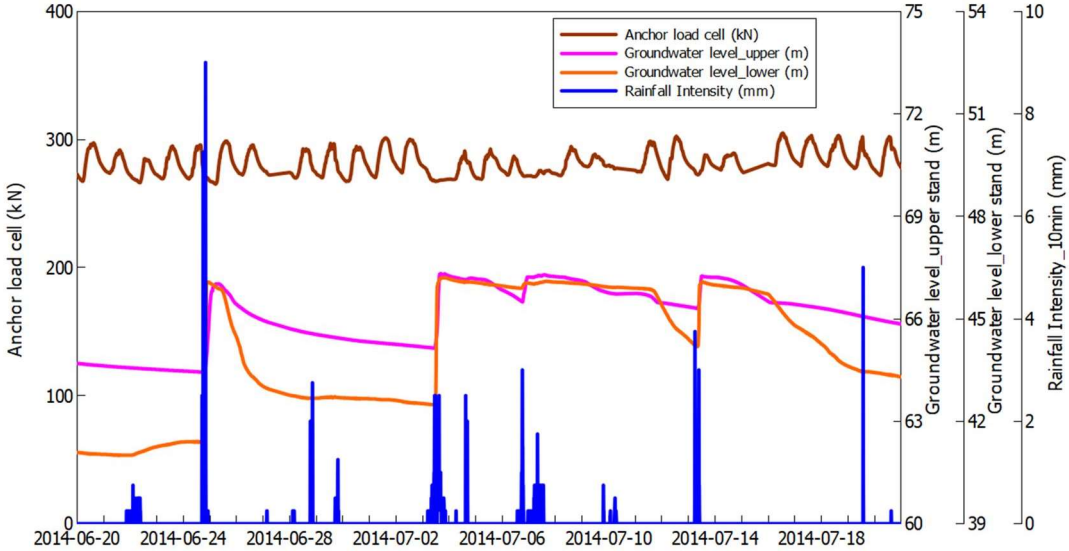


図 6.12　A のり面におけるモニタリング結果

ここでは，高速道路に適した新たなモニタリングシステムを開発した．開発に当たっては，従来のシステムの課題を解消し，複合的，一元的に高速道路をモニタリング可能なものとした．開発したシステムを用いた，高速道路モニタリング環境のイメージ図を図 6.13 に示す．同システムは，無線ネットワーク，バッテリー，ソーラーパネルを活用しており，これにより電源用及びデータ通信用のケーブルを削減した．また，開発したシステムを実際の高速道路のり面に設置し，通信試験，実証試験を行い，開発したシステムの有用性を確認した．また，現在構築が進められている，NEXCO 西日本業務用無線 LAN との通信試験も実施し，外部ブロードバンドサービスを利用することなく，社内に直接データを送信できることを確認している．同環境構築後には，本システムの活用が益々期待される．また，本システムは体積含水率のモニタリングのみではなく，接続するセンサを替えることによって，様々なモニタリングへも適用可能であり，高速道路の斜面防災を高度化する上で有用なシステムである．

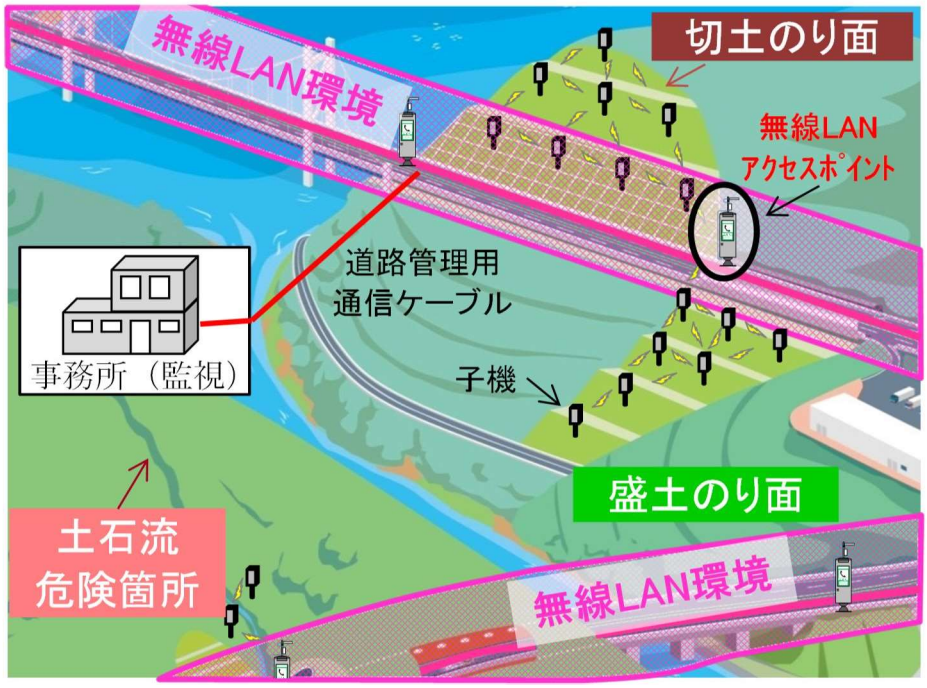


図 6.13　開発したシステムを活用したモニタリング環境イメージ

6.5 現地計測結果に基づく雨水浸透シミュレーションモデルの同定

6.5.1 雨水浸透シミュレーションモデルの同定手法

逆解析による体積含水率の現地計測結果からの土壌水分特性の同定については，既にいくつかの研究が行われている．外狩ら[12]は最尤法を，笹原ら[13]は繰り返し探査法を利用して土壌水分特性パラメータの逆解析を試みた．しかし，これらの研究では，同定されたパラメータを用いたシミュレーションを行って，現地計測結果を適切に再現できない場合が多いとされている．また，臼木らは飽和不飽和浸透流解析コード HYDRUS[14]を用いて，体積含水率の現地計測結果に基づく土壌水分特性パラメータの逆解析を試

みてきた[15]．求められるパラメータは初期値に依存しており，外狩らや笹原らの研究と同様に再現性の高いパラメータを決定出来ないことが明らかにされている．一方，伊藤らは，土壌水分特性パラメータを代表的なデータ同化手法である粒子フィルタ[16-21]によって同定しようとした[22]．彼らによれば，粒子フィルタによって同定された土壌水分特性は，データ同化に用いた実測値を再現できるのはもちろんのこと，データ同化に用いなかった実測値も再現できる，すなわち，任意の降雨の雨水浸透挙動を再現できることを明らかにした．そこで，本研究においてもこの手法を用いることとした．

不飽和状態での雨水浸透は重力方向の流れが卓越する．このため，本研究では，不飽和土中の連続式であるリチャーズ式[23]を式(6-1)に示すように鉛直方向のみの一次元状態に簡易化し，シミュレーションモデルとした．

$$C \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left\{ k\left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right\} \tag{6-1}$$

ここで，C は比水分容量(= $\partial \theta / \partial \Psi$)であり，$\theta$ は体積含水率，Ψ は土壌水分吸引水頭(cmH_2O)を表している．t は時間(min)，z は位置水頭(上向き正(cm))，k は不飽和透水係数(cm/min)である．また，水分特性曲線モデルとしては，以下に示す van Genuchten モデル[24]を用いた．

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left\{ \frac{1}{1 + (-\alpha \cdot \psi)^n} \right\}^{1-\frac{1}{n}} \tag{6-2}$$

$$k = k_s \cdot S_e^{0.5} \cdot \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{\frac{n}{n-1}} \right)^{1-\frac{1}{n}} \right\}^2 \tag{6-3}$$

ここで，S_e は有効飽和度であり，θ_s は飽和体積含水率，θ_r は残留体積含水率である．また，α(1/cm)と n は水分特性曲線の形状を与えるパラメータであり，k_s は飽和透水係数(cm/min)を表している．本研究では，ヒステリシスの影響は考慮せずに，θ_s，θ_r，α，n，k_s を未知パラメータとして同定することとした．

粒子フィルタでは，システムの状態に関する確率分布を粒子と呼ばれる多数の実現値集合で近似的に表現する．それぞれの粒子は，数値解析モデル(初期条件，境界条件，パラメータ)の情報と，それぞれの数値解析モデルにおいてシミュレーションを行って算出される各時刻の物理量を情報として有している．本研究では，数値解析モデルの情報として土壌水分特性パラメータをランダムに与え，各時刻の物理量として体積含水率の値を用いた．粒子フィルタでは，3 つの計算ステップ(1 期先予測，フィルタリング，リサンプリング)を繰り返して，各時刻における粒子の時間推移を評価する．図-1 は粒子フィルタの概念図を示している．1 期先予測では，時刻 t-1 から時刻 t までのシミュレーションを粒子の数だけ実施する．次に，フィルタリングを行い，ベイズの定理を用いて各粒子に与えられる重みを算出する．つまり，現地計測結果と解析結果を比較して，各粒子の観測データに対する適合度を評価する．最後に，リサンプリングを行って，各粒子の重みに基づいた粒子の複製・消滅を行う．この 3 つの計算ステップを逐次繰り返すことで，適切なパラメータを同定する．

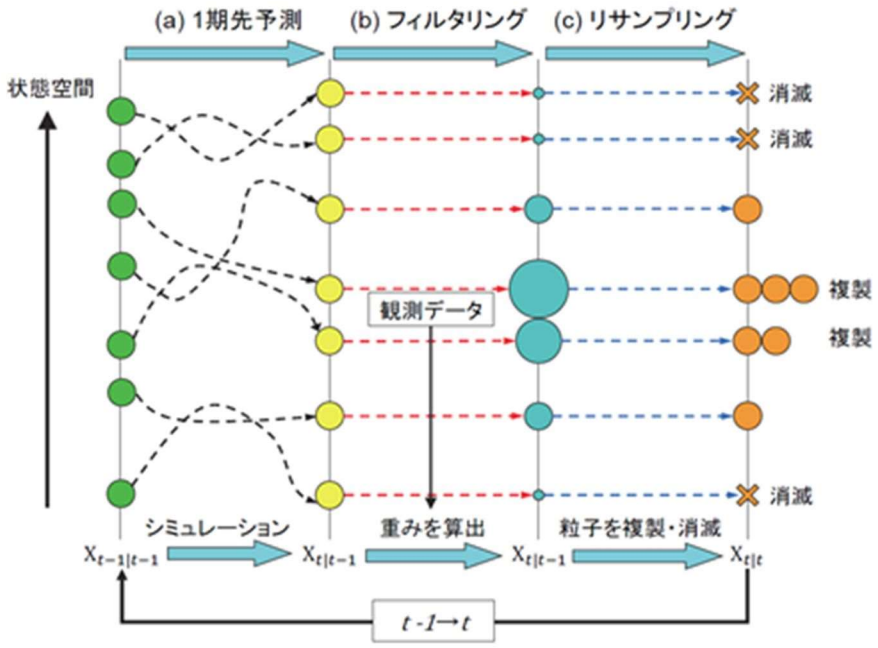


図 6.14　粒子フィルタの概念図 [18)]

6.5.2 解析対象斜面における現地計測結果

a)　対象斜面の概要

本研究の対象斜面は，表 6.1 における Y のり面である．ただし，Y のり面では，2016 年 3 月 17 日にそれまで使用していたセンサを全て撤去し，新たにセンサを設置し直した．図 6.15 は対象斜面の斜面形状を示している. 斜面中腹からのり尻にかけて 2 つの地点で体積含水率を計測している [25)]. 本研究では，中腹の地点(S2-2)を対象として解析を行った．センサの設置に当たっては，深度 110cm まで鉛直にトレンチ掘削を行い，その断面と垂直に土壌水分計(Delta-T 社製 SM-150)を設置した．また，この地点における断面の状態から 3 つの層(上層：0cm～60cm，中間層：60cm～90cm，下層：90cm～110cm)に区分出来ることから設置深度もこれに応じて，深度 30cm，70cm および 100cm とした．土壌水分計による体積含水率の計測は 10 分間隔で行った．また，斜面の小段上には転倒マス型雨量計を設置し，現地の雨量も 10 分間隔で計測した.

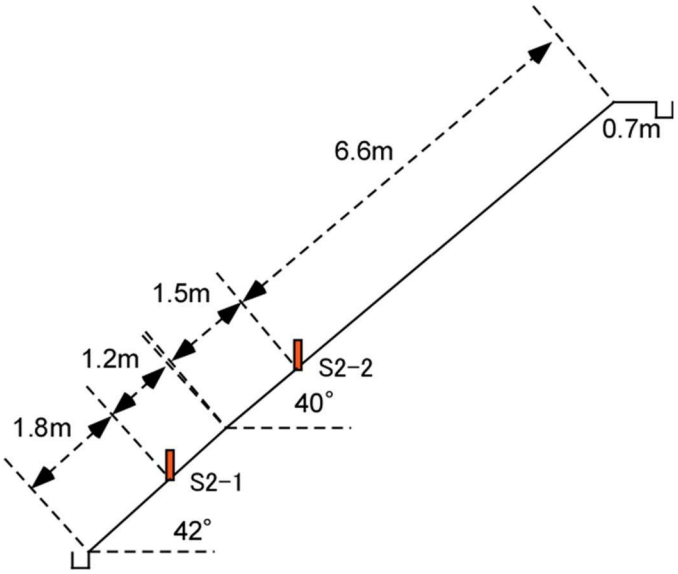


図 6.15　対象斜面の斜面形状

b)　雨量と体積含水率の現地計測結果

本研究では，2016 年 3 月 17 日から 7 月 12 日までに計測された総雨量が多い 2 つの降雨イベントを解析対象として用いた．そのうち，総雨量が少ない方の降雨イベントを降雨①(弱)と呼び，総雨量の多い方の降雨イベントを降雨②(強)と呼ぶ．表 6.5 は各降雨イベントの特徴を示している．どちらの降雨イベントも計測期間は 5 日間であり，最大 10 分間雨量も 10.0(mm/10min)以上と短時間に激しい雨が降っていたことがわかる．しかし，最大時間雨量と総雨量に関しては，降雨②(強)の方が 3 倍程度大きな値を記録している．また，降雨①(弱)は対象斜面に設置した転倒マス型雨量計により計測された雨量であるが，降雨②(強)は近隣のアメダス観測所(直線距離にして 2km 以内)で計測された雨量を用いている．これは，降雨②(強)の計測期間に対象斜面の転倒マス型雨量計が故障していたためである．図 6.16 は降雨①(弱)における雨量と体積含水率の時系列データを示しており，図 6.17 は降雨②(強)におけるそれを示している．この 2 つの図より，体積含水率の最大値も大きな値を記録していることがわかる．

表 6.5　各降雨イベントの特徴

	計測期間	最大10分間雨量 (mm/10min)	最大10分間雨量 (mm/h)	最大10分間雨量 (mm/5day)	雨量計
降雨①(弱)	5日間	10.75	15.75	152.75	現地雨量計
降雨②(強)	5日間	14.5	51.5	425.5	アメダス観測所

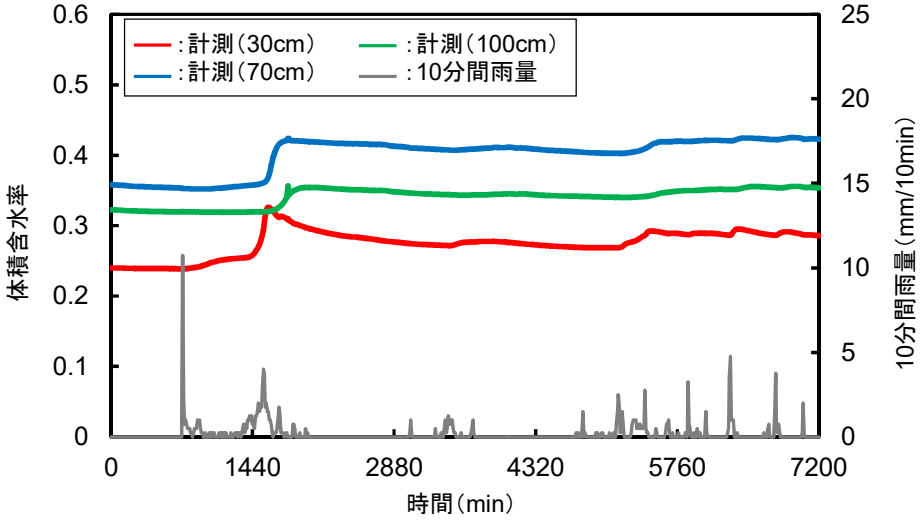


図 6.16　降雨①(弱)における雨量と体積含水率

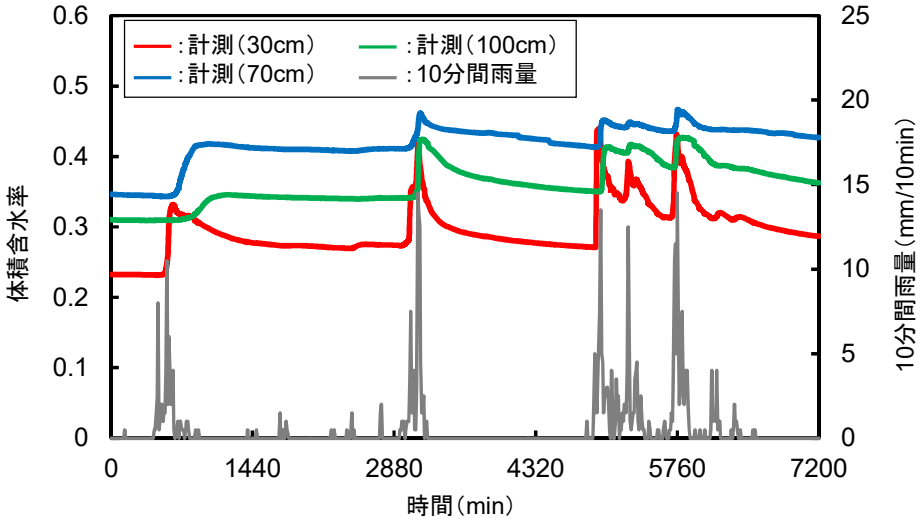


図 6.17　降雨②(強)における雨量と体積含水率

6.6 降雨強度と擬似飽和体積含水率の関係

6.6.1 解析手法と対象データ

第 4 章では，模型斜面実験により擬似飽和体積含水率が，斜面の変位（崩壊）発生を捉える有効な指標となることを述べてきた．ただし，同章での模型斜面実験は一定降雨強度という条件の下であり，降雨強度の違いが擬似飽和体積含水率に与える影響を考慮できていない．一方，現地計測結果からも明らかなように，実際の現場での降雨強度は時々刻々と変化する動的なものである．そこで本節は，擬似飽和体積含水率と降雨強度との関係を，数値解析を用いて明らかにすることを目的とした．

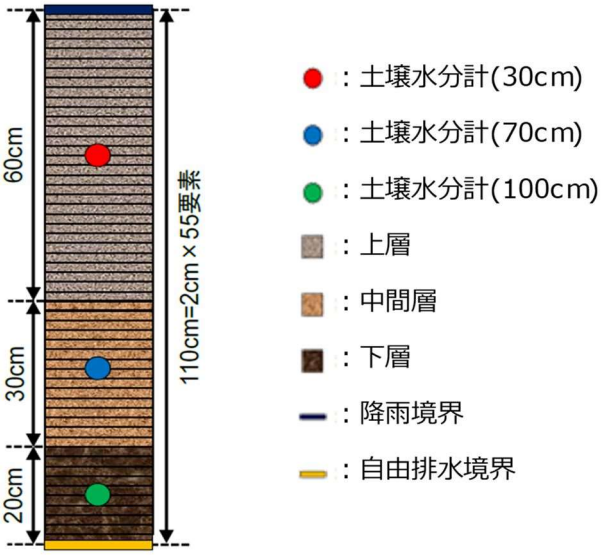


図 6.18　一次元解析モデル

本節では，まず現地の降雨強度と体積含水率の実測結果をもとに粒子フィルタを用いてパラメータを同定する．その後得られたパラメータを用いて，複数の降雨強度条件下で浸透流解析を行い，擬似飽和体積含水率と降雨強度の関係を明らかにする．

対象としたのり面は前節と同じ Y のり面とした．図 6.18 に，ここで用いた一次元解析モデルを示す．パラメータ同定に用いた観測データは，前節，図 6.16 で示した降雨①（弱）である．

6.6.2 擬似飽和体積含水率の推定方法

図 6.16 の計測データをもとに，粒子フィルタにより同定されたパラメータを表 6.6 に示す．また，同パラメータを用いて再現解析を行った結果を図 6.19 に示す．再現解析結果が，深度に関わらず降雨時の体積含水率の上昇，無降雨時の減少ともに実測値とよく合致していることが分かる．さらに，表 6.6 のパラメータを用いて，パラメータ同定に用いていない前節の降雨①（弱）に対して再現解析を行った．その結果を図 6.20 に示す．こちらは，パラメータの同定に用いた降雨より大きな降雨だったが，同図からも，実測値と解析値の合致が確認できる．得られたパラメータが現地の地盤特性を良く再現していると考えられる．

表 6.6　同定されたパラメータ

	Θ_s (-)	Θ_r (-)	α (1/cm)	n (-)	K_s (cm/min)
上層	0.461	0.146	0.066	1.456	3.015
中層	0.532	0.222	0.032	1.360	2.158
下層	0.473	0.205	0.047	1.384	3.289

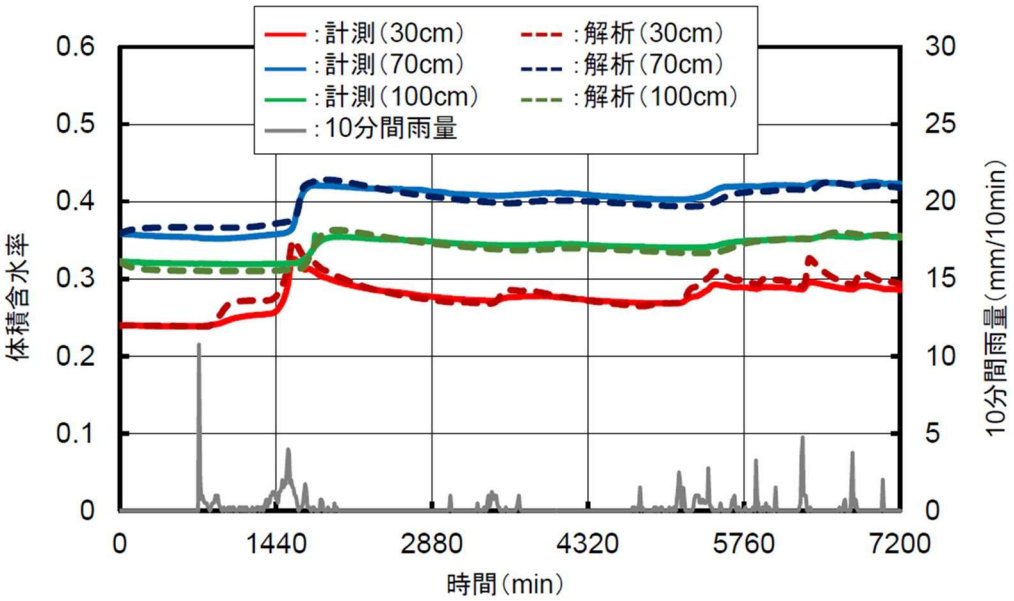


図 6.19　再現解析結果（パラメータ同定に用いた降雨）

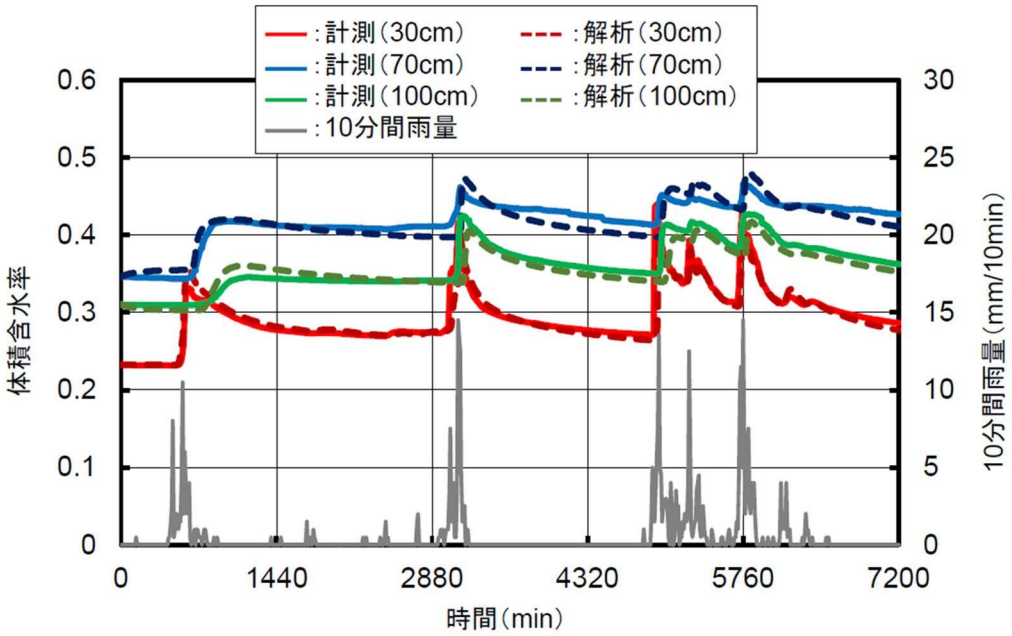


図 6.20　再現解析結果（パラメータ同定に用いていない降雨）

次に，降雨強度と擬似飽和体積含水率との関係を浸透流解析により明らかにする．第 4 章のカラム試験から，一定降雨強度条件下で発現する擬似飽和体積含水率を確認した．本節では，それを数値解析により明らかにする．表 6.7 に示す降雨強度を，表 6.6 のパラメータを持つ図 6.18 で示すモデルに与え，体積含水率の上昇過程，擬似飽和体積含水率の発現，飽和体積含水率への到達を確認する．ここでは，飽和体積含水率まで体積含水率が上昇することを確認するため，図 6.18 のモデルの最下面を自由排水境界のみでなく，非排水境界とした条件でも解析を行った．得られた結果を図 6.21 に示す．

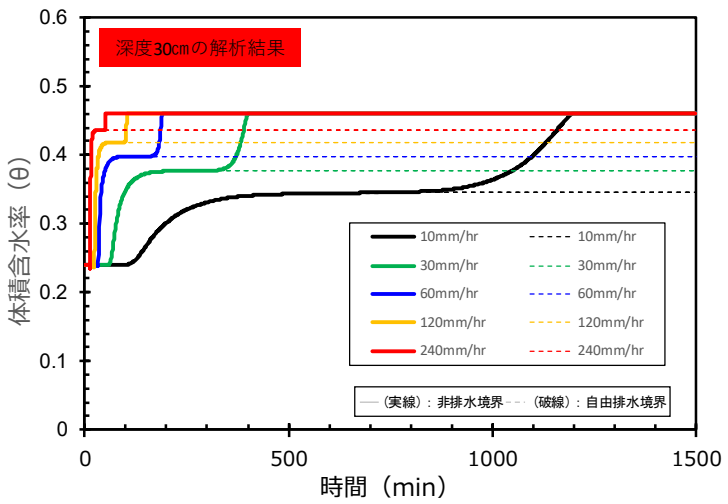
表 6.7　降雨強度パターン

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5
降雨強度	10mm/h	30mm/h	60mm/h	120mm/h	240mm/h

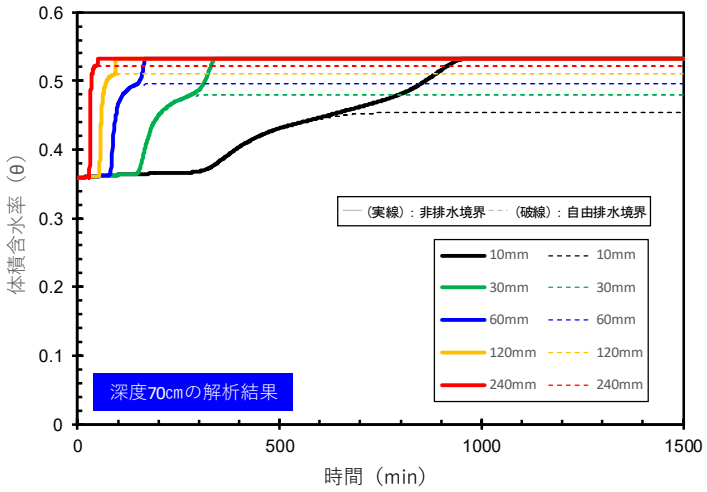
同図より，いずれの深度においても非排水条件，自由排水条件ともに体積含水率の上昇が一定の値で頭打ちになっていることが確認できる．非排水条件のもとでの各深度の体積含水率の上限値は，表 6.6 で示す飽和体積含水率の値と一致している．それに対し，自由排水条件のもとでも上限値が存在している．これは，浸透流解析において，(6-3) 式で示すように，降雨の土中浸透に伴う飽和度の増加に伴って上昇する透水係数が，浸透量と釣り合った状態でその上昇が止まり，平衡状態を示した結果である．すなわち，一定降雨強度条件の下，飽和する前に体積含水率の上昇が平衡状態になると擬似飽和状態が発現する．擬似飽和状態は，各要素において，上から流入してくる流量と下へ流出していく流量とが釣り合っている状態であり，この時の体積含水率が擬似飽和体積含水率である．

一方，図 6.21 からは自由排水境界での体積含水率の上限値，すなわち擬似飽和体積含水率の値が，降雨強度によって異なっていることも読み取れる．通行規制基準の指標として擬似飽和体積含水率を用いる場合に，その値が一意に決められないと運用することができない．そこで，同解析結果を用いて，降雨強度と擬似飽和体積含水率の関係に着目し，降雨強度から擬似飽和体積含水率を算出する近似式を検討する．図 6.21 の結果から得られる擬似飽和体積含水率の値と降雨強度の関係をプロットしたものを図 6.22 に示す．なお，同図にはそれぞれ，線形近似，対数近似，累乗近似によって外挿した近似式を示した．

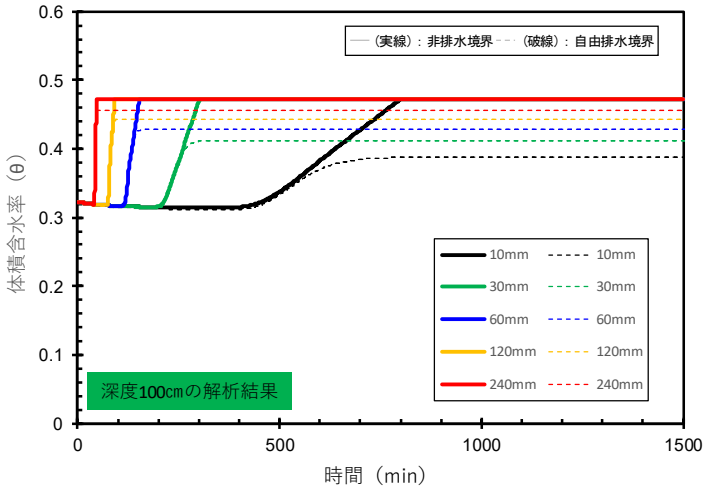
同図は，降雨強度が大きいほど擬似飽和体積含水率が大きな値を取ることを明瞭に示している．また，重ねて示した近似式による近似も，実際の値とよく合致していることが分かる．また，今回の解析結果においては，いずれの深さにおいても 3 つの近似式の中で対数近似から最も高い決定係数（0.99 以上）が得られ，近似式の高い当てはまりの良さも確認した．これは，降雨強度によって擬似飽和体積含水率の値が動的に変化するものの，土壌水分特性パラメータが既知であれば，降雨強度から擬似飽和体積含水率を高い精度で近似できることを示している．



（a）深度 30cm

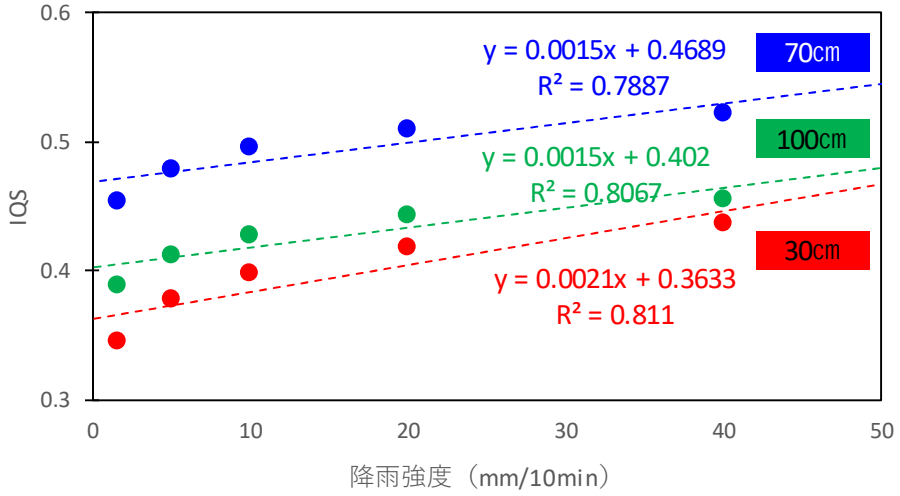


（b）深度 70cm

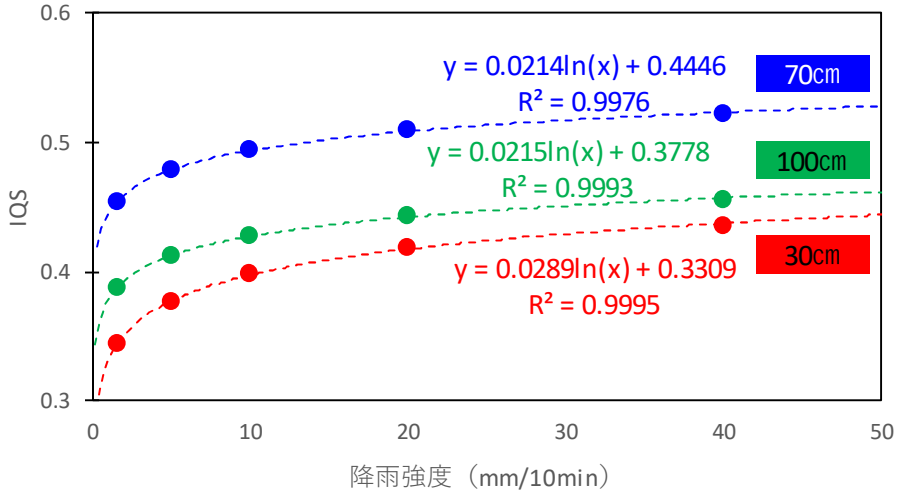


（c）深度 100cm

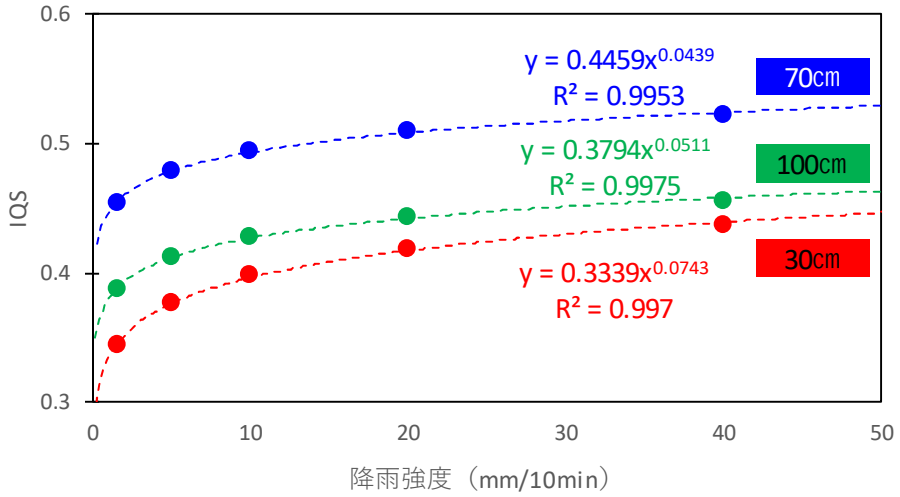
図 6.21　同定されたパラメータを用いた浸透流解析結果



（a）線形近似



（b）対数近似



（c）累乗近似

図 6.22　深度別降雨強度と擬似飽和体積含水率の関係

6.7 擬似飽和体積含水率を指標とする高速道路通行規制基準の考え方

本節では，第 4 章で述べた擬似飽和体積含水率と変形の関係，6.5 節で述べた数値解析による体積含水率の再現，6.6 節で述べた擬似飽和体積含水率と降雨強度との関係をとりまとめ，擬似飽和体積含水率を指標とする，高速道路における通行規制基準の考え方を提案する．

ここでは，降雨時における土中水分量が，擬似飽和体積含水率に達した後で変位が発生する，言い換えると，擬似飽和体積含水率に達していなければ変形（崩壊）が発生しないという考え方に基づき，通行規制に対する措置を実施することを提案する．

具体的には，計測，もしくは数値解析により算出される体積含水率の値が，擬似飽和体積含水率に到達する時点をトリガーとして，通行規制の実施判断をする，というものである．6.5 節で，一定期間の雨量と体積含水率の計測データがあれば，未経験の降雨に対しても体積含水率を推定することが可能であることを述べた．更に 6.6 節では 6.5 節を発展させ，降雨強度から擬似飽和体積含水率を近似することが可能であることを述べた．よって，両節の結果を用いれば，一定期間の雨量と体積含水率の計測結果があれば，現地の体積含水率及び擬似飽和体積含水率を，計測される雨量から解析により求めることが可能となる．すなわち，体積含水率が擬似飽和体積含水率に到達しているか，否かという判断が，計測される雨量を用いた解析により可能になる．

ここに述べた一連の業務フローを図 6.23，図 6.24 に示す．図 6.23 は，一定期間の計測により，対象とする地点における地盤特性を求め，降雨強度と擬似飽和体積含水率との関係を導出するまでをフロー化したものである．これにより，通行規制を実施するか否か判断するための環境を構築する．一方，図 6.24 は，通行規制実施および解除の判断を判断するフローを示したものである．計測（推定）される体積含水率が，擬似飽和体積含水率を超過していなければ変形が発生していないという知見に基づき，計測（推定）される体積含水率が擬似飽和体積含水率を超過すれば通行規制を実施し，下回れば通行規制を解除する，という運用フローを提案する．なお，実際に経験していない雨量に対しても体積含水率の推定が可能であることから，本フローは予測される雨量に対しても有効であり，通行規制実施の準備に対しても有用であるといえる．

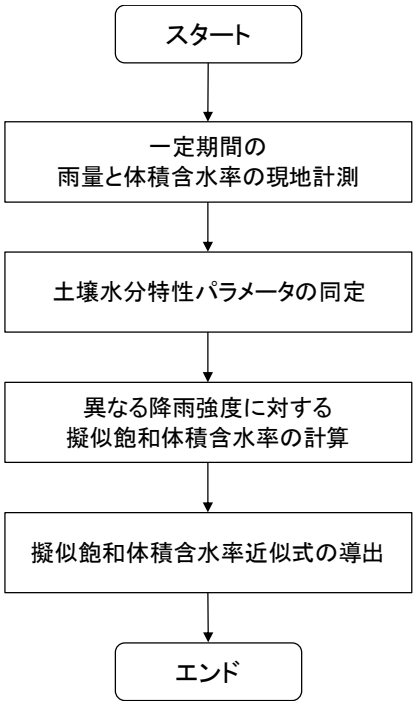


図 6.23　解析環境を構築するためのフロー（準備段階）

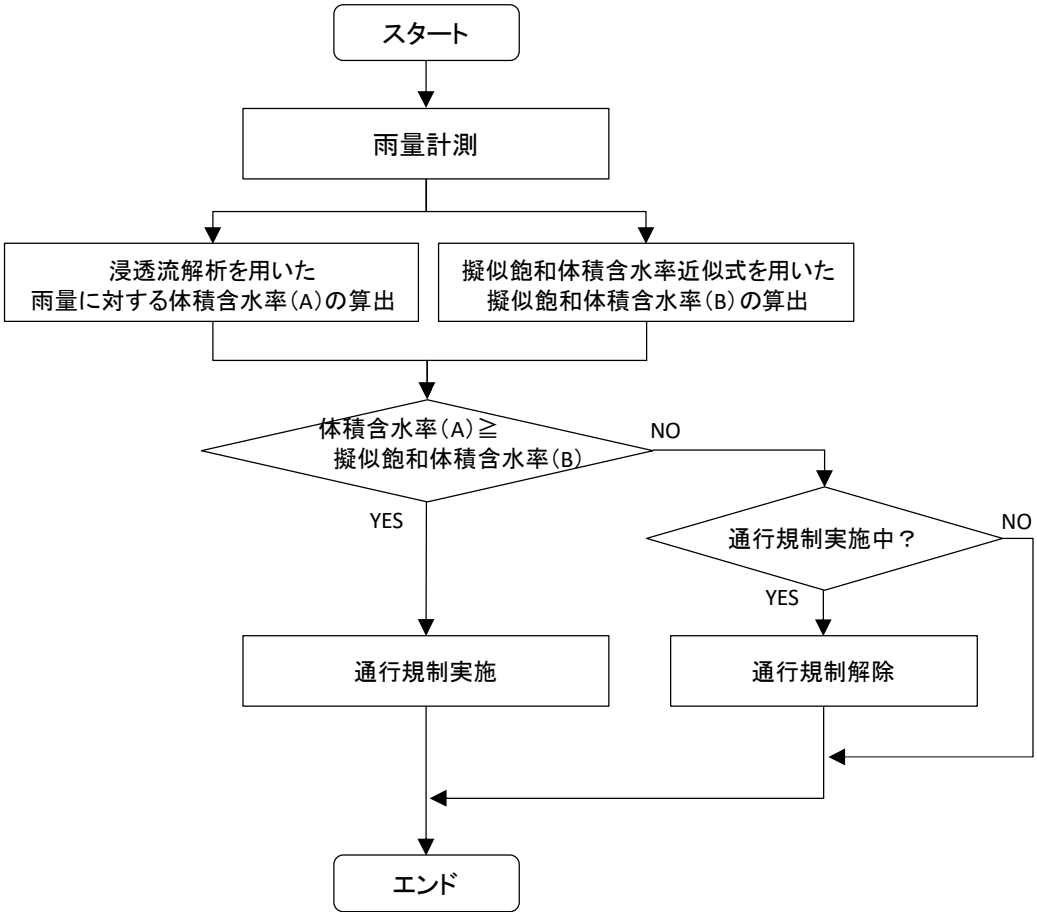


図 6.24　擬似飽和体積含水率を指標とする通行規制実施・解除運用フロー

6.8 まとめ

第 4 章では，模型斜面実験から，擬似飽和体積含水率を超過しなければ変形が生じないという知見を述べた．本章では，同知見をもとに，擬似飽和体積含水率を通行規制基準の指標として用いるため，体積含水率をモニタリングするためのシステム開発，得られるモニタリングデータを用いた土壌水分特性パラメータを推定する数値解析，推定された土壌水分特性特性パラメータを用いた浸透流解析，これらを実施し，通行規制実施・解除判断フローを提案した．以下に，本章を総括する．

(1) 体積含水率を計測するため，高速道路に適した，無線ネットワーク，バッテリー，ソーラーパネルを活用した新たなシステムを開発し，通信試験の結果から，その実用性を確認した．
(2) 上記システムから得られる実測データから，通行規制基準の指標として，体積含水率を用いることの有用性を示した．
(3) 上記システムから得られる実測データを基に，粒子フィルタを用いて現地の土壌水分特性パラメータを精度よく同定することができることを示した．
(4) 浸透流解析により擬似飽和状態を再現することが可能である．
(5) 擬似飽和状態は，地盤内のある断面における水の収支を考えた場合，降雨によって上から浸潤してくる流入量と，下へ浸透していく流出量が釣り合っている状態である．
(6) 同じ地盤でも，降雨強度が大きいほど擬似飽和体積含水率の値は大きくなる．
(7) 様々な一定降雨強度を用いた浸透流解析結果から，降雨強度と擬似飽和体積含水率との関係式を導出可能である．
(8) 擬似飽和体積含水率を超過しなければ変形しないことに着目し，降雨強度と体積含水率の計測結果を用いた，擬似飽和体積含水率を指標とする通行規制実施・解除判断フローを提案した．

参考文献

1) Keiji SAKURADANI, Keigo KOIZUMI, Toyokazu MURAKAMI and Satoshi TAYAMA, AN EXPRESSWAY SLOPE MONITORING SYSTEM UTILIZING WSN AND DATA FUSION TECHNOLOGY, Proceedings of the 15th REAAA CONFERENCE, pp18-24, 2017
2) Maneesha V. Ramesh, Sangeeth Kumar, and P. Venkat Rangan, Wireless Sensor Network for Landslide Detection, Conference Paper ·January 2009
3) K. Smarsly, K. Georgieva, M. König and K. H. Law, MONITORING OF SLOPE MOVEMENTS COUPLING AUTONOMOUS WIRELESS SENSOR NETWORKS AND WEB SERVICES, Conference Paper ·December 2012
4) Kay Smarsly, Kristina Georgieva, and Markus König, An Internet-Enabled Wireless Multi-Sensor System for Continuous Monitoring of Landslide Processes, IACSIT International Journal of Engineering and Technology, Vol. 6, No. 6, December 2014
5) Se Woon Choi, Jihoon Lee, Jong Moon Kim and Hyo Seon Park, Design and Application of a Field Sensing System for Ground Anchors in Slopes, Sensors 2013, 13, 3739-3752; doi:10.3390/s130303739
6) Emanuele Intrieri, Giovanni Gigli, Francesco Mugnai, Riccardo Fanti, Nicola Casagli, Design and implementation of a landslide early warning system, Engineering Geology 147–148 (2012) 124–136
7) Andrea Giorgetti, Matteo Lucchi, Emanuele Tavelli, Marco Barla, Giovanni Gigli, Nicola Casagli, Marco Chiani, Davide Dardari, A Robust Wireless Sensor Network for Landslide Risk Analysis: System Design,Deployment, and Field Testing, IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 16, NO. 16, AUGUST 15, 2016
8) 小泉 圭吾,藤田行茂，平田研二，小田和広，上出定幸，2013 年 2 月：土砂災害監視のための無線センサネットワークの実用化に向けた実験的研究，土木学会論文集 C（地圏工学）,Vol.69，No.1，46–57.
9) 小泉圭吾，村上一馬，小田和広，上出定幸，小西貴士，竹本将，藤原優，2013 年 11 月：豪雨による高速道路のり面の表層崩壊監視を目的とした現場計測結果の評価，地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム論文集, 155–160.
10) Koizumi, K., Hirata, K., Oda, K., Fujita, Y., Kamide, S. and Watanabe, T. (2012): Slope disaster detection system using sensor networks and its field experiment evaluations, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 5(1), 41–47.
11) M. Takemoto, K. Koizumi, Y. Fujiwara, H. Morishita and K. Oda,(2015):Improvement of a slope disaster warning system for practical use, Proceedings of the Asian regional conference on soil mechanics and geotechnical engineering, 515.
12) 外狩麻子，島村誠，大野和己：浸透流解析を応用した盛土内土中水分の推定，第 39 回地盤工学研究発表会，pp. 2117-2118, 2004.
13) 笹原克夫，谷本守道，田村圭司：現地計測データを用いたまさ土斜面の土壌水分特性曲線の同定手法に関する研究，日本地すべり学会誌，Vol. 46, No. 3, pp. 162-174, 2009.

14) Simunek, J. Van Genuchten, M. Th. and Sejna, M.：HYDRUS: Model use, calibration, and validation, Transac-tions of the ASABE, Vol. 55, No. 4, pp. 1261-1274, 2012.
15) 臼木陽平，小田和広，小泉圭吾，徳田早映，伊藤真一，竹本将，藤原優，森下泰：Hydrus による現地計測結果に基づく雨水浸透の逆解析，第 50 回地盤工学研究発表会，pp. 965-966, 2015.
16) 中村和幸，上野玄太，樋口知之：データ同化：その概念とアルゴリズム，統計数理，Vol. 53, No. 2, pp. 221-229, 2005.
17) 樋口知之：予測にいかす統計モデリングの基本，pp. 25-120，講談社，2011.
18) 片山徹：非線形カルマンフィルタ，pp. 121-160，朝倉書店，2012.
19) 北川源四郎：モンテカルロ・フィルタおよび平滑化について，統計数理，第 44 巻，第 1 号，pp. 31-48, 1996.
20) 珠玖隆行，村上章，西村伸一，藤澤和謙，中村和幸：粒子フィルタによる神戸空港沈下挙動のデータ同化，応用力学論文集，Vol. 13, pp. 67-77, 2010.
21) Murakami, A., Shuku, T., Nishimura, S., Fujisawa, K. and Nakamura, K.：Data assimilation using the particle filter for identifying the elasto-plastic material properties of geo-materials, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 37, pp. 1642-1669, 2013.
22) 伊藤 真一・小田 和広・小泉 圭吾・臼木 陽平：現地計測結果に基づく土壌水分特性パラメータ同定に対する粒子フィルタの適用，土木学会論文集 C（地圏工学） Vol.72, No.4, pp.354-367, 2016.
23) Richards, L. A.：Capillary conduction of liquids through porous mediums, Physics, Vol. 1, pp. 318-333, 1931.
24) van Genuchten, M.：Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model, Re-search Report, No. 78-WR-08, Princeton Univ., 1978.
25) 伊藤真一・小田和広・小泉圭吾：現地計測に基づく土壌水分特性パラメータの逆解析における粒子フィルタの有用性，地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム論文集, pp.253-258, 2016.

第 7 章　高速道路通行規制基準の高度化手法の提案

7.1 はじめに

これまでに本論文では，高速道路における降雨時の斜面防災対策を高度化することを目的として，第 3 章でリスクマネジメント手法を用いた新たな通行規制基準値の決定方法を，また，第 6 章では，土中水分量を指標とする通行規制実施・解除判断フローを提案した．本章では，まず 7.2 節で，両提案手法を実務で運用するため，通行規制実施，解除のための運用フローを提案する．次に，7.3 節で，提案した運用フローに基づき，リスクマネジメント手法を用いて設定される通行規制基準値を検証する．さらに，7.4 節で，土中水分量を指標とする通行規制基準を検証する．最後に，7.5 節で本章を総括する．

7.2 斜面防災対策の高度化に資する通行規制基準の運用方法の提案

リスクマネジメント手法に基づく新たな通行規制基準値の設定方法は，基準値の決定方法の提案であり，それを用いた規制実施の判断は従来と変わらない．すなわち，観測される雨量が基準を超過すれば通行規制を実施すればよい．また，土中水分量を指標とする通行規制は，計測（もしくは解析）される体積含水率の値が，擬似飽和体積含水率を超過すれば通行規制を実施すればよい．一方，両者の解除判断には，通行規制実施の判断をした時と別の指標で基準を超過していないか，確認を行う必要がある．双方の指標が，完全に連動しているものではないため，例えば，連続雨量がリセットされたタイミングで，土中水分量指標で通行規制基準を超過する，ということも考えられるためである．これらのことから，雨量を指標とする通行規制を「通行規制(a)」，土中水分量を指標とする通行規制を「通行規制(b)」と区分し，両者を同時に加味した運用フローを提案する．提案フローを図 7.1 に示す．なお，雨量に基づく基準値を運用する「通行規制(a)」により，3 章で示したようにリスクの最小化は図られている．ただし，リスクマネジメント手法を用いて通行規制を運用する上では見逃しをゼロにすることが現実的には難しい．そのため，通行規制に対する雨量と異なる指標を用いた「通行規制(b)」によりその点を補うということが，ここで提案する運用方法の基本的な考え方である．すなわち，雨量による通行規制は高速道路を線的にカバーするものであり，土中水分量を指標とする通行規制は，点として，線的な通行規制の運用を補足するという位置付けである．同フロー中の雨量の観測は，雨量計による実測を想定しており，通行規制の実施，解除の判断に用いる雨量データも実測値を想定している．同フローを運用することにより，本論文で提案してきたリスクマネジメント手法を用いた雨量を指標とする最適な通行規制と，土中水分量を指標とする通行規制を併用した通行規制の高度化が図られることになる．

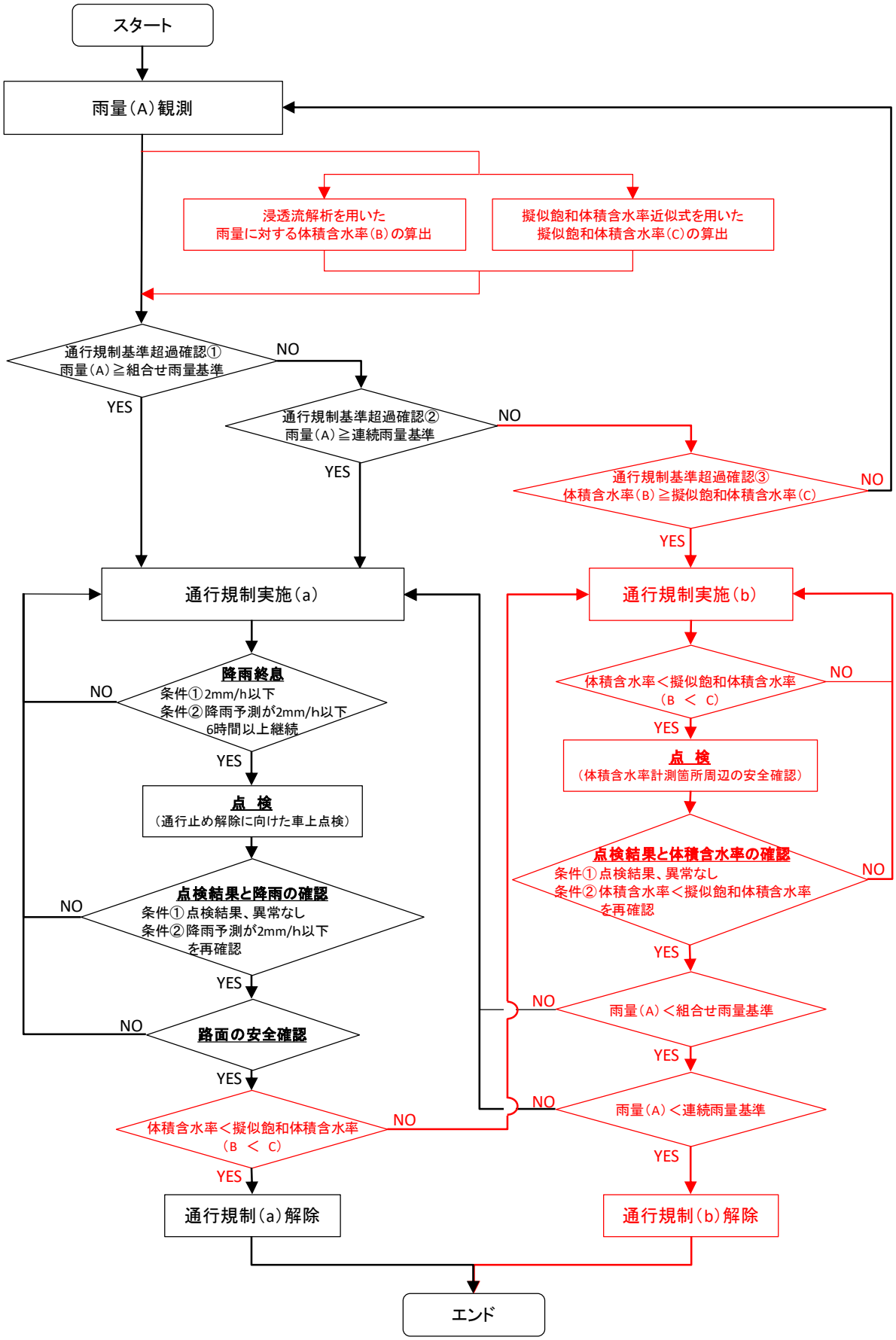


図 7.1　雨量と土中水分量を用いた通行規制運用フロー

7.3 リスクマネジメント手法を用いて設定した通行規制基準の検証

7.3.1 使用したデータと検証方法

ここでは,「通行規制(a)」の検証を行う．具体的には，3.5 節で試算した規制基準と現行の規制基準それぞれに対して，基準超過回数，規制時間，空振り回数，見逃し回数を試算し考察を行う．試算の対象期間は,解析雨量が 1km メッシュで提供されている第 3 章で基準設定に用いた 2006 年 1 月 1 日から 2014 年 12 月 31 日までとする．現行の通行規制実施判断は，各 IC 間で複数設置されている雨量計で計測される雨量に基づき判断しているが，同一条件での比較とするため，基準超過の判断は，第 3 章で各 IC 区間の代表メッシュとした箇所の解析雨量のみを用いて行う．第 3 章で基準値を示した 10 区間に対して，9 年間の解析雨量を用いて基準超過を確認する．

7.3.2 検証結果と課題整理

現行および提案基準を用いた場合の基準超過に対する確認結果を表 7.1，表 7.2 に示す．なお，表 7.2 には，現行基準における確認結果との差についても併記している．両表より，提案基準を運用する場合，基準超過回数が 31 回から 51 回へ，20 回増加することが確認された．また，その内訳として，連続雨量による基準超過が 31 回から 0 回へと減少しているのに対して，組合せ基準の超過回数が 0 回から 51 回へ大幅に増加している．結果として，災害の見逃しが 1 回減り，災害捕捉が増えたものの，逆に，空振りの通行規制が 19 回増えることとなった．それでもなお，提案基準で捉えられない災害が 1 件あることも確認できた．これまで，空振りや見逃しが多い，少ないという議論が定性的にしかできなかったことが，「通行規制(a)」を導入することによって定量的に定義でき，基準を上げる，下げるという判断も定量的に行えるようになった．第 3 章でリスクの最小値を求める際の条件として，安全面でのリスクを，社会損失面でのリスクに対して 57 倍の重みを持たせたが，より安全面でのリスクに大きな重みをもたせることにより見逃しが減り空振りが増えるという結果が得られると考えられる．これまでできなかった議論が，本手法を用いることで定量的に可能となったことは大きな成果といえる．ただし，今回の検証において，リスクを最小とした場合でも，災害を見逃してしまう事例があることが確認された．リスクマネジメント手法で見逃しをなくしていくことは，相当数の空振りの増加が懸念され，現実的には難しいことが容易に想像できる．したがって，このような災害の見逃しに対応するための施策が別途必要である．

表 7.1 基準超過確認結果（現行基準）

IC 区間	現行基準			基準超過				対災害発生		
	連続雨量 (mm)	組合せ雨量(mm)		連続雨量基準(回)	組合せ雨量基準(回)	小計	規制時間 (hr)	空振り (回)	見逃し (回)	災害捕捉 (回)
		連続雨量	時間雨量							
1	210	160	45	0	0	0	0	0	1	0
2	190	130	45	2	0	2	18	2	0	0
3	190	130	45	2	0	2	19	2	0	0
4	190	130	45	3	0	3	24	3	0	0
5	140	130	45	5	0	5	57	3	0	2
6	140	130	45	9	0	9	97	9	0	0
7	210	120	40	3	0	3	30	2	0	1
8	210	120	40	2	0	2	29	0	1	2
9	210	120	40	3	0	3	37	3	0	0
10	210	120	40	2	0	2	26	2	0	0
合計				31	0	31	337	26	2	5

表 7.2 基準超過確認結果（提案基準）

IC 区間	提案基準(時間雨量15)			基準超過				対災害発生		
	連続雨量 (mm)	組合せ雨量(mm)		連続雨量基準(回)	組合せ雨量基準(回)	小計	規制時間 (hr)	空振り (回)	見逃し (回)	災害捕捉 (回)
		連続雨量	時間雨量							
1	305	110	15	0	2	2	21	2	1	0
2	310	115	15	0	6	6	61	6	0	0
3	310	120	15	0	6	6	63	6	0	0
4	305	110	15	0	5	5	53	5	0	0
5	310	115	15	0	4	4	49	2	0	2
6	310	115	15	0	7	7	79	7	0	0
7	305	105	15	0	5	5	62	4	0	1
8	300	100	15	0	8	8	118	5	0	3
9	310	115	15	0	5	5	71	5	0	0
10	305	110	15	0	3	3	39	3	0	0
合計				0	51	51	616	45	1	6
対現行基準比較				-31	51	20	279	19	-1	1

7.4 土中水分量を指標とした通行規制基準の検証

7.4.1 使用したデータと検証方法

ここでは，「通行規制(b)」の検証を行う．具体的には，6.7 節で提案したように，計測もしくは推定される体積含水率が，降雨強度から計算される擬似飽和体積含水率を超過する時間を算出し，提案指標を用いた基準超過時間とする．さらに，同計算に用いた降雨を用いて，現行の通行規制基準値を超過する時間を算出し，現行基準に対する基準超過時間とする．両超過時間の時間数，時刻，回数を比較し，提案手法の妥当性，および残る課題について考察する．

対象としたのは，6.6 節で擬似飽和体積含水率と降雨強度の関係を定式化した表 6.1 の Y のり面である．対象期間は，モニタリングデータのある 2016 年 4 月 1 日から 2017 年 11 月 30 日までとするが，実測された体積含水率と雨量は 6.5 節で示した雨水浸透シミュレーションモデルを同定することのみに用い，通行規制実施及び解除の判断は，汎用プログラム HYDRUS を用いた不飽和浸透流解析により推定

される体積含水率と擬似飽和体積含水率とで行うこととした．用いた解析モデルを図 7.2 に示す．また，表 7.3 に解析に用いたパラメータを示す．雨量データは，モニタリングされた雨量データの中に，雨量計の目詰まり等による不確かなデータも確認されたため，解析雨量を用いた．ここで，雨量から擬似飽和体積含水率を推定する近似式は，前章で示した図 6.22 の中で最も決定係数の高かった対数近似式を用いることとし，式（7-1）～（7-3）として示した．

$$\theta_{qs30} = 0.0289\ln \times (10\text{ 分間雨量}) + 0.3309 \quad \text{（深度 30cm）} \quad \cdots (7\text{-}1)$$

$$\theta_{qs70} = 0.0214\ln \times (10\text{ 分間雨量}) + 0.4446 \quad \text{（深度 70cm）} \quad \cdots (7\text{-}2)$$

$$\theta_{qs100} = 0.0215\ln \times (10\text{ 分間雨量}) + 0.3778 \quad \text{（深度 100cm）} \quad \cdots (7\text{-}3)$$

対数近似に対する処理として，ここでは簡単のため，降雨強度が 1 ㎜/h 未満の場合，1 ㎜/h の降雨強度として算出した擬似飽和体積含水率を採用し検証することとした．また，当該のり面がある区間の現行の通行規制基準値は表 7.4 のとおりである．同基準値に対して，解析雨量による基準超過時間を算出した．算出された時間と，式（7-1）～（7-3）で求められる擬似飽和体積含水率超過時間とを比較し，擬似飽和体積含水率到達時に通行規制を実施するという「通行規制(b)」の検証を行う．

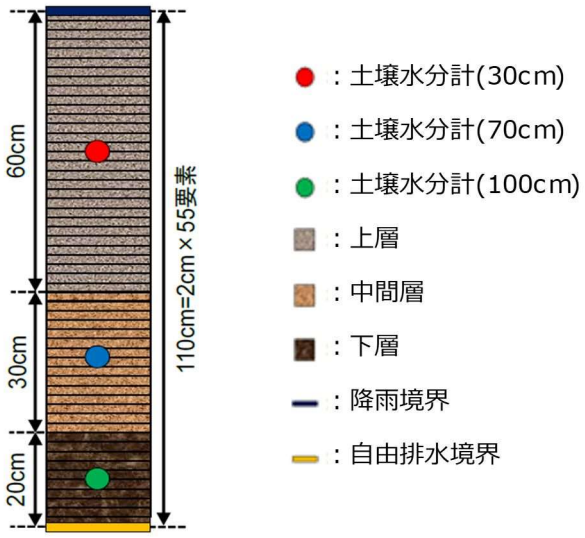


図 7.2　一次元解析モデル

表 7.3　対象地点における土壌水分特性パラメータ

	Θ_s (-)	Θ_r (-)	α (1/cm)	n (-)	K_s (cm/min)
上層	0.461	0.146	0.066	1.456	3.015
中層	0.532	0.222	0.032	1.360	2.158
下層	0.473	0.205	0.047	1.384	3.289

表 7.4　検証地点が含まれる区間の現行通行規制基準値

通行規制基準値		
連続雨量基準	組合せ雨量基準	
	連続雨量	時間雨量
（mm）	（mm）	（mm/h）
250	200	50

7.4.2 検証結果と課題整理

解析雨量，体積含水率と擬似飽和体積含水率の経時変化を図 7.3 に示す．同図では，解析雨量を棒グラフで，体積含水率を破線で，擬似飽和体積含水率の値を実線で示している．なお，対象期間中，当該のり面の崩壊は確認されていない．また，表 7.5 に，同期間における現行通行規制基準超過時間を示しているが，現行の基準超過は，同表に示す 1 度のみであった．図 7.3 より，解析雨量の強度に応じて擬似飽和体積含水率の値が変動していることが分かる．1 時間毎の体積含水率と擬似飽和体積含水率の比較を行い，体積含水率の値が擬似飽和体積含水率以上となった回数をカウントした．その結果を表 7.6 に示す．現行の基準超過が 1 度に対し，同表より，擬似飽和体積含水率を超過している回数が相当数あることが分かる．より超過の状況を分かりやすく表示するため，図 7.3 において現行基準超過を観測した日付近を拡大し，図 7.4 に示した．

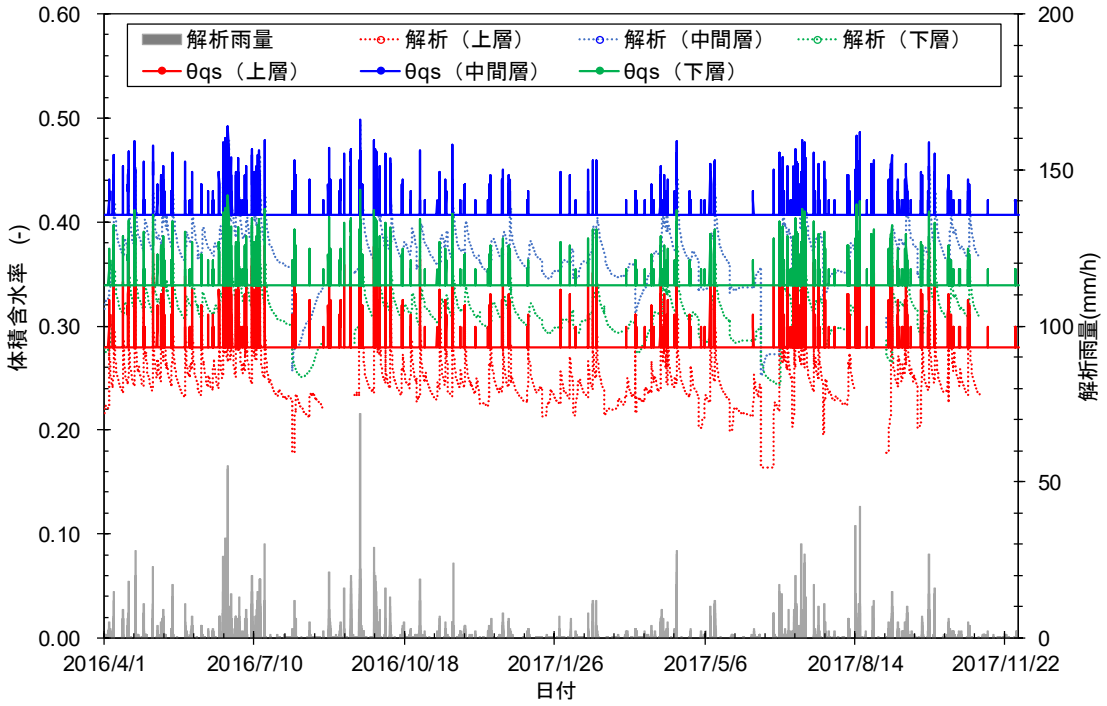


図 7.3 雨量，体積含水率と擬似飽和体積含水率の経時変化

表 7.5　現行通行規制基準超過時間

通行規制基準超過（連続雨量基準）				
	（自）日時	～	（至）日時	最大連続雨量 (mm)	超過時間数 (hr)
1	2016/6/22 19:00	～	2016/6/23 10:00	294.4	15
通行規制基準超過（組合せ雨量基準）				
	（自）日時	～	（至）日時	最大連続雨量 (mm)	超過時間数 (hr)
1	2016/6/22 18:00	～	2016/6/23 10:00	294.4	16

表 7.6　擬似飽和体積含水率超過回数

	θqs超過回数	有効データ数	超過比率
上層	1,008	13,003	7.8%
中間層	785	13,003	6.0%
下層	1,038	13,003	8.0%

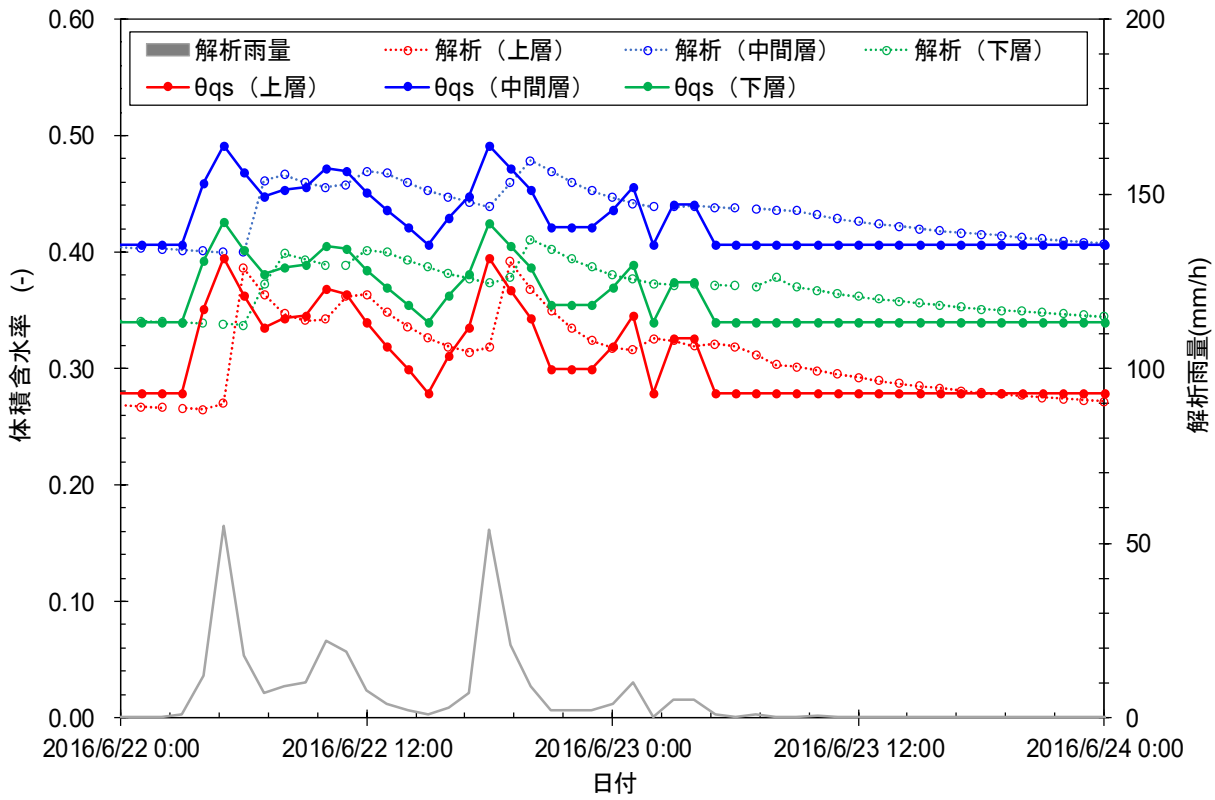


図 7.4　現行基準超過時時点付近における雨量と体積含水率及び擬似飽和体積含水率の経時変化

図 7.4 より，擬似飽和体積含水率を示す実線を，体積含水率の解析値である破線が多くの時間で上回っていることが確認できる．中でも，降雨に伴って体積含水率が上昇している時には，計算される擬似飽和体積含水率の値もそれ以上に上昇しており，擬似飽和体積含水率を超える体積含水率はほとんど見られないが，体積含水率が上昇した状況で降雨強度が小さくなった時に，擬似飽和体積含水率が体積含水率を下回る形で通行規制基準超過が多くみられる．これは，一定量の降雨が観測された後の降雨強度が小さい時間帯において，体積含水率の減少には時間がかかるのに対し，擬似飽和体積含水率はその時点の

降雨強度から算出しているため即座に減少することに起因している．したがって，実際の通行規制実施判断に体積含水率を用いるためには，この降雨強度と，降雨強度から推定される擬似飽和体積含水率のタイムラグの問題を解決する必要がある．

また，図 7.4 中の擬似飽和体積含水率に着目すると，例えば，上層の値は 0.28 から 0.40 の間で推移している．表 7.1 に示すように，同層の飽和体積含水率は 0.461 であり，図 7.4 に示す体積含水率は，飽和度で示すと 60%から 87%で推移していることになる．当然のことながら，擬似飽和体積含水率の発現は，飽和度の大小に関係ないものであるが，斜面崩壊メカニズムを考慮する上では，飽和度の低い状態で擬似飽和体積含水率を超過したことによる通行規制実施の実施は，過度に安全な斜面防災対策となることが懸念される．上述のタイムラグの問題解決と合わせ，擬似飽和体積含水率の適用下限値の設定も課題である．

7.4.3 課題解決に向けた一提案

ここでは，上述した体積含水率を実際の通行規制実施の判断に用いるための課題に対し，一つの課題解決策を提案する．上述の 2 つの課題は，いずれも「体積含水率がそれほど高くない状態での擬似飽和体積含水率を用いた危険度判断をより適切に行うこと」と言い換えることができる．したがって，その簡易的な解決策として，擬似飽和体積含水率の近似式適用時に，これまでの経験降雨や，経験体積含水率を考慮することが提案できる．つまり，ある体積含水率では崩壊しなかったという実績値を基準値の最低値とするという考え方である．また，擬似飽和体積含水率は第 6 章でも述べたように，ある断面における水の収支において，上からの流入量と下への流出量が釣り合う状態であり，一定降雨強度の下における体積含水率の上昇過程において，不飽和透水係数が降雨強度と等しくなることによって発現する現象である．このことを考慮すると，弱い降雨強度においては，降雨前の体積含水率の値にもよるが，擬似飽和体積含水率に到達するまでの時間が，かなりの長時間になることが想像できる．このような観点からも，擬似飽和体積含水率と降雨強度との近似式に対し，一定の降雨強度適用下限値を設けることは，現実的な対応といえる．

当該区間においては，これまでの経験降雨と災害履歴より，通行規制基準の組合せ雨量基準の時間雨量に 50mm/h という値が適用されていることから，一つの試算として，式（7-1）～（7-3）に対して，適用降雨強度の下限値を 50mm/h とし，それ以下の降雨強度に対しては，50mm/h で算出される擬似飽和体積含水率を採用する．式（7-1）～（7-3）に 50mm/h の下限値を適用した場合における降雨強度と擬似飽和体積含水率との近似結果を図 7.5 に示す．図 7.6 には，図 7.3 と同じ期間における解析雨量，体積含水率と図 7.5 の近似関係から得られる擬似飽和体積含水率の経時変化を示す．

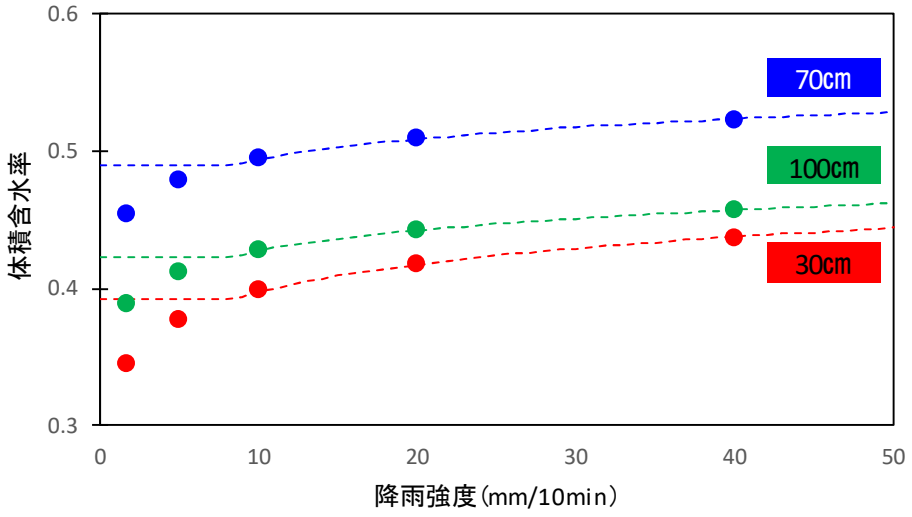


図 7.5　下限値を設けた降雨強度に対する擬似飽和体積含水率の近似値

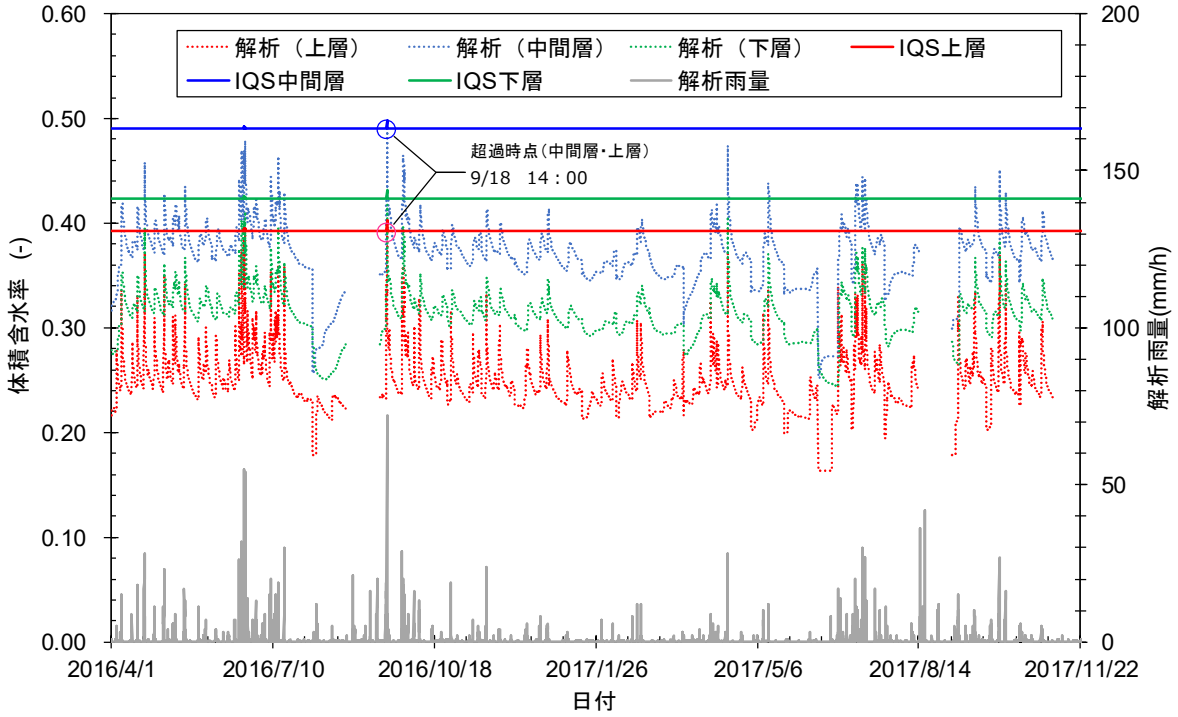


図 7.6　雨量と体積含水率および下限値を設けた擬似飽和体積含水率の経時変化

降雨強度と擬似飽和体積含水率の近似式に 50mm/h の下限値を適用した場合，体積含水率が擬似飽和体積含水率を超過したのは，約 1 年半のシミュレーション期間において 1 度のみであった．これは，現行の通行規制基準超過回数と同じである．また，超過時点においては，現行の通行規制基準を超過しておらず，現行基準では捉えられない斜面災害の危険を検知する可能性を示唆しており，提案した通行規制が有用であると考えられる．

7.5 まとめ

本章では，第 3 章，第 6 章で提案した各手法を実務で運用するためのフローを提案した．また，提案フローの検証と評価を目的とし，これまでの降雨履歴データを用いたシミュレーションを行い，現行との比較を行った．以下に，本章を総括する．

(1) リスクマネジメント手法により決定した通行規制基準「通行規制 a」と，土中水分量を指標とする通行規制基準「通行規制 b」の両者を併用する通行規制運用フローを提案し，現行の高速道路斜面防災対策に対して高度化される点として，リスクの小さい通行規制が運用できる点，さらに雨量と異なる指標を用いた通行規制を用いて災害を捕捉する点であることを考察した．

(2) リスクマネジメント手法を用いて試算される基準値は，シミュレーションの結果，現行基準より空振りが増える結果となったが，現行基準で見逃していた 2 件の災害のうち 1 件を捕捉可能である結果が示唆され，その有用性を明らかにした．

(3) 土中水分量を指標とする通行規制に関して，実運用を想定したシミュレーションを行った結果，擬似飽和体積含水率を推定する降雨強度に下限値を設けなければ，相当数の基準超過が確認されたが，例えば，組合せ雨量基準の時間雨量をその下限値として適用することにより，雨量を指標とする現行の基準超過回数と同等の基準超過であること，また，雨量指標とは異なる時間帯での基準超過であることを確認し，「通行規制 a」を「通行規制 b」で補うという，ここで提案する通行規制基準の運用方法の有用性を明らかにした．

第 8 章　結論

8.1 本研究の結論

降雨時における土砂災害は，国土の約 7 割を山地が占め，その多くが急峻な地形である日本において繰り返し発生しており，また，その増加傾向も報告されている．建設段階に十分な調査，対策を行っている高速道路においても例外ではなく，毎年のように斜面災害が発生している．現状，高速道路管理においては，主要な斜面防災対策として通行規制を運用しているが，現状の通行規制で対応できない事例も報告されており，解決すべき課題を抱えている．そこで本研究では，高速道路における降雨時斜面防災対策を高度化するために，通行規制における課題解決のための方法論を示すことを目的とし，新たな通行規制基準設定方法を提案するための通行規制基準に対するリスクマネジメント手法の確立と，通行規制基準に資する新たな指標としての土中水分量の活用方法に関して研究を行った．

第 1 章では，本研究の背景として高速道路における斜面防災対策の現状を述べ，その中でも主要な対策である通行規制の現状と課題を明らかにした．その課題に対して，まず，通行規制基準値の設定のため，誘因情報と素因情報を加味した災害発生確率モデルを構築し，同モデルを用いたリスクマネジメント手法を確立すること，加えて，現行の通行規制では十分に考慮されていない土中水分量に着目し，通行規制基準に資する新たな指標とその活用方法を提案すること，その両者が本論文における具体の研究課題であることを示した．さらに，両手法を組み合わせた高速道路における斜面防災対策の高度化のための方法論を示すことが，本論文の最終的な目的であることを述べ，最後に本論文の構成を示した．

第 2 章では，局所的な降雨による斜面災害の見逃しを軽減するため，約 1km 四方の単位で提供されている解析雨量を活用することを念頭に，通行規制に対してその適用性を確認した．解析雨量と実測雨量の比較から，両者には高い相関関係があることを確認した．また，時間雨量単独よりも，累積雨量の方が，より相関係数が高くなることも明らかにした．さらに，解析雨量の発生頻度は実測雨量と同等であり，時間雨量，連続雨量に対する発生頻度，すなわち発生確率を算出することに対して，解析雨量は適用性があることを明らかにした．ただし，通行規制基準超過降雨イベントにおける連続雨量の比較を通じ，そのリセットのタイミングが大きく異なる場合もあることから，現時点では，通行規制基準超過・解除の判断に対して解析雨量を適用することは難しいことを明らかにした．

第 3 章では，通行規制実施前に斜面災害が発生する「安全面でのリスク」と，通行規制実施後においても斜面災害が発生しない「社会損失面でのリスク」の２つをリスク指標として定量化し，両リスクの和が最小となるような通行規制基準の設定手法を提案した．ここでは，ロジスティック関数を用いて，1km メッシュ毎の素因情報（道路構造），誘因情報（解析雨量）を説明変数とした斜面災害発生確率を定量化した．定量化した斜面災害発生確率を提案手法に適用して，実際の高速道路区間で基準値を試算した結果，仮定する両リスクの重み付けに応じた最適な規制基準値を定められることが分かった．提案手法を用いることにより，基準値に応じたリスクの和を定量的に求めることが可能となり，それにより，基準値を変

動させることによるリスクの増減に対する議論も可能となる．提案手法は，この点においても有用な手法であることが分かった．

第 4 章では，現行の通行規制基準値が雨量のみを指標としていることを問題として捉え，斜面災害の発生と，より直接的に関連の深い土中水分量に着目し，これと斜面崩壊との関係を模型斜面実験により調べた．その結果，土中の体積含水率は斜面変形が始まる前に，一旦，擬似的な飽和状態が発現することが分かった．本研究では，この値を擬似飽和体積含水率（θ_{qs}）と定義し，θ_{qs}超過後に変位が発生することを明らかにした．またθ_{qs}は，試料の物性値と降雨強度に依存する一意な値であることも示唆され，通行規制基準の新たな指標として有用であることが分かった．

第 5 章では，θ_{qs}を高速道路で通行規制基準の指標として適用する上で必要となる，土中水分量のモニタリング箇所の抽出方法について検討した．ここでは，SOM(Self-Organizing Map)解析とクラスタ分析を併用することにより，優先度の高いモニタリング対象斜面を客観的に抽出する手法を提案した．点検結果を基に作成された「切土のり面安定度評価表」データを用いて，斜面 747 箇所から 23 箇所を優先順位付きで抽出し本手法の有効性を明らかにした．

第 6 章では，まず，θ_{qs}を通行規制基準の指標として適用するために必要な，高速道路に適した，WSN(Wireless Sensor Network)を用いて体積含水率をモニタリングする新たなシステムを開発した．次に，モニタリング結果から粒子フィルタによるデータ同化によって斜面の土壌水分特性を精度よく再現できる不飽和浸透解析モデルを同定した．さらに，同定された不飽和浸透解析モデルによるパラメトリックスタディーにより降雨強度からθ_{qs}を導出する簡易的な方法を提案した．最後に，体積含水率がθ_{qs}に達した時点をトリガーとする通行規制実施・解除の判断フローを提案した．

第 7 章では，第 3 章と第 6 章の結果を組み合わせた通行規制基準，すなわちリスクマネジメント手法により決定した通行規制基準「通行規制 a」と，土中水分量を指標とする通行規制基準「通行規制 b」の両者を併用する通行規制運用フローを提案し，現行の高速道路斜面防災対策に対して高度化される点として，リスクの小さい通行規制が運用できる点，さらに雨量と異なる指標を用いた通行規制を用いて災害を捕捉する点であることを考察した．また，本研究で提案したリスクマネジメント手法を用いて算出した雨量による通行規制基準値が，現行の基準値に対し災害捕捉率が向上することを確認し，同手法の有用性を明らかにした．さらに，土中水分量を指標とする通行規制に関して，実運用を想定したシミュレーションを行った結果，擬似飽和体積含水率を推定する降雨強度に下限値を設けなければ，相当数の基準超過が確認されたが，例えば，組合せ雨量基準の時間雨量をその下限値として適用することにより，雨量を指標とする現行の基準超過回数と同等の基準超過であること，また，雨量指標とは異なる時間帯での基準超過であることを確認し，「通行規制 a」を「通行規制 b」で補うという，ここで提案する通行規制基準の運用方法の有用性を明らかにした．

8.2 今後の課題と展望

本研究では，高速道路の降雨時斜面防災対策におけるリスクマネジメント手法を確立し，また，土中水分量に基づく通行規制のための新たな指標とその活用方法を提案し，両者の有用性を明らかにした．将来的には，後者を前者に含めた議論も可能になると思われる．すなわち，土中水分量を用いたリスクマネジメントも必要であると考えられる．土中水分量という新たな指標に対して，現時点では実測データが十分ではなく，リスクマネジメント手法を用いた確率論的な議論ができる段階ではない．今後，十分なデータの蓄積をもって，土中水分量も考慮するリスクマネジメントへの改善，さらなる斜面防災対策の高度化が望まれる．また，本研究では，擬似飽和体積含水率を超えなければ変位が発生しないという知見を活用した通行規制運用フローを示したが，今後，社会実装を行う上で，解決すべき課題があることも示した．1 つは地表面の降雨強度で算出している擬似飽和体積含水率と，土中で計測される体積含水率との比較におけるタイムラグの問題を解決することであり，もう 1 つは，擬似飽和体積含水率の適用下限値の検討である．本研究では，一例として，経験的に用いられている現行の組合せ雨量基準における時間雨量の降雨強度を適用下限値として採用することにより，現行と同等の通行止め回数となること，現行の基準を超過していないタイミングで基準超過となることを確認し，その有用性を考察したが，その定量的な評価が今後の課題である．

本研究で対象とした降雨時の高速道路における斜面防災対策の高度化に関する今後の課題解決のためには，上述の通り，データの蓄積が不可欠である．幸いにも NEXCO 西日本では，平成 29 年度末に開通した新名神高速道路神戸ジャンクション，高槻ジャンクション間などをはじめ，高速道路沿線に無線 LAN 環境の整備と本研究で開発したモニタリングシステムの設置を推進しており，モニタリング環境の充実は大きく期待できる状況にある．今後，そこから得られるデータを活用した本研究の更なる発展を期待したい．

謝辞

本論文は，著者が，平成 21 年 7 月中国・九州北部豪雨での高速道路の斜面災害を受けて設立された「中国支社管内防災検討委員会」に携わった時に感じていた高速道路の斜面防災対策の課題を，平成 27 年 7 月より大阪大学大学院工学研究科 NEXCO 西日本高速道路学共同研究講座（NEXCO 講座）の招へい研究員として配属されたのを機に，同講座在籍期間中に具体化し，その課題解決のために行った研究成果をとりまとめたものです．本研究を実施するにあたり，多くの先生方，上司，同僚からご指導とご支援をいただきました．

大阪大学教授　鎌田敏郎先生には，研究全般にわたり熱心にご指導いただきました．また，本論文の取りまとめ段階では，自身の研究をいかにして読み手に理解してもらうか，何を伝えるべきか，具体的にご指導いただきました．社会人として研究を進めていく中で，ルーズになりがちなスケジュール管理も含め指導していただき，筆者が悩んだり行き詰ったりしている時には，常に的確な道筋を示していただきました．本論文をまとめることができましたのは，先生のおかげに他なりません．深謝申し上げます．

大阪産業大学教授　小田和広先生には，専門分野の地盤工学はもとより，本論文における課題，課題解決のための手法，結論，その構成について，ご指導いただきました．また，研究期間を通し，工学博士とはどういうものかという点も暗にご指導くださるとともに，論文提出間際には，夜間，休日関係なく，一言一句，丁寧なご指導をいただきました．筆者が至らないために大変なご迷惑とご心配をお掛けし，その度，熱いご助言をいただきました．深謝申し上げます．

大阪大学教授　乾徹先生には，ご自身の勤務先の異動直後という大変お忙しい中にも関わらず，本論文の審査を通じ，拙稿を丹念にお読み頂いたうえ，土中の浸透問題の本質的なご指摘や，また，図表の書き方に関するご指導まで，幅広く具体的なご助言をいただきました．ここに感謝申し上げます．

大阪大学准教授　貝戸清之先生には，学生を対象としたゼミナールなどを通じて確率統計学の基礎からご指導いただきますとともに，論文の全体構成，バランスなど，その取りまとめ方についても多くのご助言をいただきました．心より感謝申し上げます．

大阪大学助教　小泉圭吾先生には，著者が NEXCO 講座に赴任した当初より，論文全体についてのご指導はもちろんですが，特に本論文の主たる構成要素の一つである土中水分量の評価に関して，多くのご助言をいただきました．実験結果や現地計測データの解釈に関して，論文執筆期間中，思考を止めないで常に考え続けるという研究姿勢を学ばせていただきましたこと，また，多くの時間を費やして一緒に議論させていただきましたこと，ともに大きな財産になりました．心より感謝申し上げます．

田山聡招へい教授をはじめとする NEXCO 講座における歴代の教授，准教授，研究員の皆様にも，多大なご支援をいただきました．中でも，田中克則（元）招へい教授，宮田弘和（元）招へい研究員には，NEXCO 講座に赴任して間もない頃，学内で右も左も分からない著者に，研究に対する姿勢や，論文執筆に当たっての基礎をお教えいただきました．また，田山聡招へい教授，殿垣内正人（元）招へい教授，小濱健吾特任准教授におかれましては，研究期間を通じ，地盤工学やリスクマネジメントに関する多くの学術的なご指導をいただくとともに，研究とは何か，学術論文とは何かいうことまでご指導いただきました．ここに感謝申し上げます．

また本研究は，大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻地盤工学領域，社会基盤マネジメント学領域の学生諸兄姉の協力なしでは成り立ちえないものでもありました．特に水谷大二郎氏（現；東北大学助教），伊藤真一氏（現；鹿児島大学助教），徳田（現；宮田）早映氏，小橋俊也氏（現；㈱ナビタイムジャパン），二宮陽平氏，音地拓氏（現；西日本高速道路㈱），藤本綾乃氏（現；西日本高速道路㈱），窪田上太郎氏，山本健史氏，松本聡碩氏（現；鹿島建設㈱），篠崎秀太氏らには，地道なデータ整理，浸透流解析での試行錯誤，リスクの計算など，そのプログラムの作成からパラメータの推定にいたるまで，多大な協力をいただきました．名前を挙げるときりがありませんが，ほかにも多くの学生諸兄姉と現地調査，研究ゼミ，学会発表等一緒の研究時間を共有できたこと，時には一緒にお酒を飲み，世代を超えて多くを語り合ったことは，人生の新たな宝物となりました．ここに感謝の意を表します．

さらに本研究を行うにあたっては，西日本高速道路㈱の理解と支援がなければ，始めることすらできないものでもありました．NEXCO 講座赴任へ背中を押してくださった本社技術本部の竹國一也本部長，福永靖雄技術環境部長，竹本将技術統括課課長代理（現；NEXCO 総合技術研究所），ありがとうございました．多くの研究へのご理解とご支援をいただきました兼澤秀和技術開発担当部長，徳田尚器技術統括課課長代理（現；関西支社保全サービス統括課長）ありがとうございました．石貫和良氏はじめ久留米高速道路事務所の方々，エンジニアリング中国(株)下野宗彦調査設計部長，同社山下隆光山口道路事務所長，エンジニアリング四国(株)伊藤博信調査設計課課長代理には，現場でのモニタリングデータ取得に関して多大なご協力をいただきました．本社危機管理防災課の方々，関西支社保全サービス統括課の方々には，雨量や災害記録など，また，エンジニアリング関西㈱福間敏夫専門役からは，切土のり面安定度評価表の根拠データなど，それぞれ多くの貴重なデータをご提供いただきました．松本崇課長をはじめ関西支社企画調整課の方々には，著者が十分に研究に集中できるよう，会社内での各種調整をいただくなど，特に研究成果として直接見えないけれども重要な部分で，多くのご支援をいただきました．心より感謝いたします．

最後に，研究活動を理解し続け，そして優しく見守ってくれた妻の加代子，休日返上での研究推進に小言を言いながらも我慢してくれた息子の航太郎，遊びたい盛りになかなか相手ができない中，笑顔とハイタッチで毎朝見送ってくれた娘の穂乃香に感謝し，この恩を生涯忘れることなく，より一層の深い愛情で恩返しすることを誓います．

櫻谷　慶治