

高速道路の自然災害事例分析に基づいた
土構造物の危険度評価手法の提案

A Study on Risk Evaluation of Highway
Earth Structures Based on Case Study of
Natural Disaster Data

2014年2月

大窪 克己
Katsumi OKUBO

高速道路の自然災害事例分析に基づいた
土構造物の危険度評価手法の提案

A Study on Risk Evaluation of Highway
Earth Structures Based on Case Study of
Natural Disaster Data

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

2014年2月

大窪 克己

Katsumi OKUBO

目 次

第 1 章 研究の目的	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 既往の研究成果と本研究の位置づけ	4
1.3 研究の進め方	5
1.4 本論文の構成と研究フロー	6
第 2 章 高速道路における土構造物の自然災害事例分析	8
2.1 降雨災害事例と分析	8
2.1.1 事例調査の方法	8
2.1.2 全国の降雨災害の実態	8
2.1.3 盛土部の降雨災害の発生要因	17
2.2 地震災害事例と分析	21
2.2.1 M6 以上の大規模地震災害	21
2.2.2 盛土被害の分析	25
2.2.3 高速道路の地震災害からの考察	30
第 3 章 管理注目度を用いた盛土部の危険度評価手法の提案	31
3.1 盛土部の管理注目度の提案	31
3.1.1 管理注目度について	31
3.1.2 自然災害事例分析からの知見	31
3.1.3 管理注目度を求めるための評価項目の選定	32
3.2 管理注目度の中央自動車道への適用	34
3.2.1 評価項目に対する点数付け	34
3.2.2 中央自動車道 上野原～勝沼間の概要	34
3.2.3 降雨による被災の評価項目に対する配点	37
3.2.4 地震による被災の評価項目に対する配点	40
3.2.5 重み付けのための係数	42
3.3 中央自動車道 上野原～勝沼間の管理注目度	43
3.3.1 航空レーザ計測の実施	43
3.3.2 盛土部における管理注目度の評価結果	46
第 4 章 数値解析による力学的観点からの管理注目度の検証	50
4.1 力学的観点からの管理注目度の検証	50
4.1.1 検証の目的	50
4.1.2 数値解析に用いる断面の選定	51
4.1.3 検討断面の作成	52
4.2 静的安定解析	57
4.2.1 静的安定解析の目的	57

4.2.2	円弧すべりの計算手法	57
4.2.3	土質定数の設定	58
4.2.4	盛土内水位の設定	59
4.2.5	静的安定解析結果の考察	60
4.2.6	静的安定解析結果と管理注目度の検証	64
4.3	動的安定解析	65
4.3.1	動的安定解析の目的	65
4.3.2	要素分割と境界条件	65
4.3.3	物性値	66
4.3.4	入力地震動	68
4.3.5	動的安定解析結果の考察	69
4.3.6	動的安定解析結果と管理注目度の検証	75
4.3.7	見直し後の管理注目度	80
4.4	管理注目度の事業継続計画への活用例	82
4.4.1	高速道路事業における事業継続計画	82
4.4.2	復旧シミュレーション手法	83
4.4.3	復旧時間の検討	85
4.4.4	事業継続計画と事業継続マネジメント	89
第 5 章	管理注目度の異常降雨に対する適用性の検証	91
5.1	管理注目度の異常降雨に対する適用性	91
5.2	既往の手法による盛土への影響評価	92
5.2.1	管理注目度の高い場所での検討	92
5.2.2	傾斜での分析	93
5.2.3	集水面積解析での評価	94
5.3	流線追跡解析の開発	97
5.3.1	異常降雨時の影響評価の課題	97
5.3.2	流線追跡解析の手法	97
5.4	管理注目度と異常降雨の影響度との整合性	101
5.4.1	管理注目度の高い場所での解析結果	101
5.4.2	管理注目度の低い場所での解析結果	104
5.5	トンネル坑口付近の評価への応用	106
第 6 章	結論	110
	謝 辞	115
	参考文献	116
	研究業績書	118

第 1 章 研究の目的

1.1 研究の背景と目的

我が国の高速道路は、1963（昭和 38）年 7 月 16 日に名神高速道路（延長 71.1km）が国内で初めて開通し、現在では総延長約 8,700km、全国の高速道路の日平均利用台数は 27,000 台¹⁾に達している。特に、首都圏近郊部での利用台数は約 90,000 台にも及び、高速道路は社会基盤施設の重要な一翼を担っている。

高速道路は人の移動ばかりではなく、通常の国内貨物輸送量の約 5 割を担っており、2004（平成 16）年 10 月 23 日の新潟県中越地震や 2011（平成 23）年 3 月 11 日の東日本大震災でも明らかになったように、災害時の物流や緊急車両の搬送などにおいても重要な役割を果たしている。従って、降雨や地震などの自然災害が発生した場合でも高速道路の交通機能の早期復旧を果たすことは社会的使命である。

一方、我が国の道路、橋、トンネルおよび上下水道などの社会基盤施設は 1960 年代、東京オリンピックに象徴される日本の高度経済成長期に一齐に整備され始めた。現在は、当時建設された多くが耐用年数とされる 50 年を越え、補修・更新の時期を迎えている。国土交通省によれば、建設後 50 年以上経過した公共施設の割合は、2011 年度と 2031 年度を比較すると、例えば、道路橋は 9%から 53%へ、河川管理施設（水門等）は 24%から 62%に急増すると推計され²⁾、社会基盤施設が一齐に老朽化し、それに伴う事故が懸念される現実に直面するとしている。高速道路も例外ではなく、老朽化に伴い降雨や地震災害に対する耐久性が失われつつあることが懸念されている。

このような背景から、我が国の防災を担当する内閣府は、企業等の災害時における事業継続計画及び運用改善を促進するため、2005（平成 17）年 8 月「事業継続ガイドライン」を公表した。また、その後の事業継続計画（Business Continuity Plan: BCP）の普及状況、東日本大震災などを踏まえ、「事業継続ガイドライン ―あらゆる危機的事象を乗り越えるための戦略と対応―」を、改訂版として 2013（平成 25）年 8 月 30 日に公表した。

さらに、政府においては、防災・減災などに資する国土強靱化基本法案が 2013（平成 25）年 5 月に国会に提出された。国土強靱化基本法案は、長期間にわたって持続可能な国家機能・日本社会の構築を図るために国土強靱化を行うことを目的としたものであり、基本理念には次のような目標が掲げられている。

- ① 経済等における過度の効率性の追求の結果としての一極集中、国土の脆弱性の是正
- ② 地域間交流・連携の促進、特性を生かした地域振興、地域社会の活性化、定住の促進
- ③ 大規模災害の未然防止、発生時の被害拡大の防止、国家社会機能の代替性の確保

①では、戦後の国土政策・経済政策の総合的検証の結果に基づく多極分散型の国土の形成が目標とされ、②では、我が国の諸課題の解決、国土の保全、国土の均衡ある発展（複数国土軸の形成）を目指すとしている。また、③で示されているとおり、大規模災害発生時に

における我が国の政治・経済・社会活動の持続可能性の確保の重要性が指摘されている。

大規模災害時における国家活動の持続可能性に関しては、電力やエネルギー、通信手段、食糧などの確保に加え、交通・物流の確保が必要となる。中でも、国家の物流を担う社会基盤施設である高速道路の、大規模災害の未然防止や発生時の被害拡大防止は、国土強靱化の柱の一つであり、また、被災時の事業継続計画策定は喫緊の課題である。

被災した高速道路において早期の交通機能の回復を目指す、事業継続計画策定に際して留意すべき点は、高速道路が盛土・切土部などの土構造物や自然斜面、トンネル、橋梁など多種多様な構造物で構成された、線状構造物であることである。土構造物の設計施工の基本方針では、交通荷重や降雨などの外的作用に対して、「入念な締固め、適切な排水を実施すること」で、安定性のある土構造物を構築することになっている³⁾。しかし、近年「集中豪雨」「局地的大雨」「ゲリラ豪雨」などの言葉で報じられている降雨災害が多発しており、一方では、発生の危険性が高まっているとされる、首都直下型地震や東海、東南海・南海地震による被災も懸念されている。このような外的作用に対して、線状構造物のどこで、どのような被災が発生するかを予測することは困難な作業であり、事業継続計画策定を難しくしている要因である。

内閣府の事業継続ガイドラインの趣旨に立ち返ると、高速道路事業者にとって重要業務とは、社会基盤施設である高速道路の早期復旧であり、事業継続計画に求められるものとして、

- 1) 災害時の対応組織の整備
- 2) 災害時の具体的行動に必要な情報の収集・分析体制の整備

に加えて、交通ネットワークの早期復旧を計画するための、

- 3) 減災のための防災計画

を挙げられている。

このうち、1)、2) については、マニュアルの整備、復旧支援に関わる関連組織・企業との災害協定の締結、情報収集システムの整備拡充などを行い、防災訓練によりその実効性を確認することで事業継続計画に反映することができる。しかし、3) については、高速道路の約7割を占める土構造物に対して、被災箇所を精度良く推定することが困難であることや、事前に補強することによる減災効果が明確ではないこと、土構造物の防災に関して十分な検討が図られていない。特に盛土部に関しては、仮に被災しても橋梁やトンネルと言った構造物と比較して復旧に要する時間が短いことなどから、検討が行き届いていないのが現状である。

すなわち、高速道路事業者に課せられている、災害時における交通ネットワークの早期復旧を実現するためには、線状構造物の何処が被災し交通機能の早期回復に支障となるかを特定し、これに基づいた的確な事業継続計画を策定することが不可欠である。

筆者は、1973（昭和 48）年から 39 年間に亘り日本道路公団（現中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京株式会社）に勤務し、高速道路の建設や維持管理業務に従事した。その間、建設技術の向上や高速道路の機能向上に関する研究開発を行った。在職期間中の 2008（平成 20）年からは、中日本高速道路株式会社八王子支社大月保全・サービスセンターに勤務し、中央自動車道の維持管理に従事する中で、中央自動車道の事業継続計画を策定する業務を実施した。その中で課題になったのが交通ネットワークの早期復旧計画の策定であった。

交通ネットワークの早期復旧を目指すためには、線状構造物の何処が被災を受ける箇所であるかを事前に把握し、これらの箇所が被災したと仮定することで交通機能の回復に要する時間シミュレーションを行う。この結果に基づき、早期復旧に障害となる個所の抽出を行い、必要があれば補強などの措置を講ずる。このためには、最初にどの箇所が被災を受け易い箇所かを抽出する手法が必要である。特に、大月管内の中央自動車道は、山岳地帯の狭隘な谷間を東西に通過しており、降雨や地震による災害が発生した場合、並走する国道 20 号や JR 中央線並びに近接する公共施設、民家に甚大な被害が及ぶ区間である。したがって、「被災し易い箇所」の抽出には、高速道路の被災が周辺に及ぼす影響についても十分配慮する必要がある。

以上述べたように「被災し易い箇所」を抽出し、その被災規模を想定する手法の確立は急務である。しかし、被災の可能性を個々の構造物、特に土構造物について解析的手法などにより行うことは、現実的ではない。ここに新たな観点からの取組みが求められる。本研究はこのような問題認識の下、高速道路事業者が日々実施している点検作業からの情報やこれまでに蓄積されている膨大な過去の災害履歴情報に着目し、それらを分析することによって多数の土構造物の中から「被災し易い箇所」をスクリーニングする手法の確立を図ることを目的とする。本研究の成果は、復旧のための時間シミュレーションなどを通して、事業継続計画策定に寄与するものである。

1.2 既往の研究成果と本研究の位置づけ

高速道路に限らず、盛土や切土および自然斜面などの土構造物の降雨や地震などによる被災の危険度評価については、これまでに多くの研究が成されている。

危険度評価の代表的な手法は採点法によるものであり、道路では点検結果⁴⁾をもとに、鉄道ではのり面形状や降雨量^{5)~7)}などをもとに、危険度が点数により表現される。また、統計学的手法を用いる方法についても早くから研究が進められており^{8),9)}、崩壊発生の要因にカテゴリ分類と呼ばれるランク付けを行い、数量化理論を用いて危険度を評価する方法が多く用いられている^{10)~13)}。近年では、円弧すべりや球面すべりの解析を用いて、安全率の低いのり面をスクリーニングする方法^{14),15)}や、浸透流解析やタンクモデルと安定解析を組み合わせ、降雨時の力学的安定性を求めた上で危険度を評価する方法^{16)~19)}など、力学的解析を用いる手法も検討されている。これらの背景には、レーザスキャニングやGIS（地理情報システム：Geographic Information System）の発展があり、統計学的手法や力学的解析を用いる手法を適用した、危険なりの面の迅速なスクリーニングが可能となっている。

統計学的手法によるものでは、個々ののり面の安全率などの情報は得られないものの、任意の特性を持つグループの崩壊リスクなどが得られる。しかし、その前提となる斜面の地質や施工状況が考慮されていない、あるいは日常の点検作業により得られた経験的知見が反映されていない等の問題がある。一方、数値解析的手法を用いた検討では、モデル作成に用いる地形や地質、あるいは物性値（変形性、強度など）の設定に時間を要し、解析結果はその設定次第で大きく左右されるといった問題がある。

すなわち、これらの手法では、幅広い特性を持つ土構造物の様々な外的条件下での安定性に対して、限られた定数の下でのり面の安定性を評価するものであり、その結果によっては日常の点検における目視観察結果と整合しない結果に陥る可能性がある。

また、これまでの危険度評価の手法は、のり面の安定性に関する評価が中心となっている。高速道路の事業継続計画では、交通ネットワークの早期復旧計画の策定が重要な柱であり、これのためには、「被災し易い箇所」の特定や「高速道路の被災が隣接地への社会的影響度合い」あるいは「復旧の難易度」などを総合的に評価に組み込むべきである。

更に、既往の研究では、切土のり面や自然斜面の危険度評価に関する研究が多く見られるものの、高速道路の土構造物である「盛土」に関しては研究が少ない。とりわけ、被災を受け易い箇所を抽出するといった検討は行われていない。これは、盛土の安定性は、適切な排水や入念な締固めを実施することで、ある程度の外力に対しての安定を有している構造物という前提があるためと考える。しかし、現実には後述するように盛土部でも多くの災害が発生しており、事業継続計画を策定する上でも、盛土部の安定性を評価することは重要な検討項目である。

このような観点から、本研究では、高速道路の土構造物、特に盛土部に注目し、日々の点検情報や経験的な知見に基づいた、「被災し易い箇所」を抽出するための新しい手法を提案した。

1.3 研究の進め方

本研究では、最初に全国の高速道路の土構造物（盛土、切土）における過去の自然災害事例を分析することで災害発生に繋がる要因を調べた。分析には、日本道路公団が12年間に取りまとめた「降雨災害履歴調書」（以下、「調書」と言う。）に記述された2,373件の災害事例と日本道路公団が管理していた時代のM6以上の地震災害の7例を対象とした。

自然災害事例の分析により得られた災害に繋がる要因を基に、「被災し易い箇所」をスクリーニングするために必要な「評価項目」を設定した。危険度を把握するための評価項目の設定対象を「降雨によるもの」と「地震によるもの」に分類した。各々の被災を前提とした危険度評価は「災害発生確率によるもの」と「被災の大きさによるもの」に分けて評価項目を設定した。

次に、設定した「評価項目」を用いて中央自動車道 上野原IC～勝沼IC間約40kmを検討区間とし盛土箇所に点数付けを行った。得られた点数を、当該区間の「管理注目度」と呼ぶことにした。点数付けのための配点を定めるにあたっては、自然災害事例分析により得られた知見を念頭に置き、実務経験者のヒアリングなども参考に、筆者のこれまでの経験を織り込んだ。また、地形情報や土地利用状況の判読には、航空レーザ計測で得られるDEM（数値標高モデル：Digital Elevation Model）を活用した。

管理注目度の点数化により表された「被災し易い箇所」は、定性的に評価されたものであることから、力学的安定性の観点からも危険度評価として同様の判断となるかを検証した。検証は、管理注目度の点数と、円弧すべり計算および地震応答解析で得られる値との相関分析により行った。また、管理注目度の評価で得られた被災を受け易い箇所の点数が高い場所が被災したと仮定することで復旧に要する時間をシミュレーションする手法について提案した。

最後に、盛土が受ける異常降雨の影響を、管理注目度が適切に評価していることを検証した。検証には、雨滴の流路を積極的に可視化する流線解析手法を考案し用いた。解析結果をもとに、降雨に対する管理注目度の大小が、異常降雨が盛土に及ぼす影響を適切に表現しているかを検討した。

1.4 本論文の構成と研究フロー

本論文の構成を以下に示す。また、研究フローを図 1.1 に示す。

第 1 章では、本研究の背景、目的、構成について述べる。

第 2 章では、全国の高速道路の自然災害事例を分析し、盛土部の災害発生に関連する要因を抽出する。

第 3 章では、災害事例分析から抽出された盛土部の被災に繋がる要因に基づき、「管理注目度」と呼ぶ点数付け手法を提案するとともに、具体的に中央自動車道の上野原 IC～勝沼 IC 間約 40km、全 181 の盛土部に対して適用し、管理注目度の高い場所として被災を受け易い箇所の抽出が可能であることを示す。

第 4 章では、管理注目度による「被災し易い箇所」と評価された場所が、力学的安定性の観点からも同様な評価となるかを検証する。ここでは、管理注目度の点数と数値解析による安定解析結果との相関分析を行う。また、得られた管理注目度をもとにした復旧時間シミュレーション手法を示す。

第 5 章では、盛土が受ける異常降雨の影響を、管理注目度が適切に評価していることを検証した結果を示す。検証には、新たに開発した流線追跡解析を用いた。

第 6 章では、各章において得られた結果を総括し、本論文の結論とする。



図 1.1 研究フロー

第 2 章 高速道路における土構造物の自然災害事例分析

2.1 降雨災害事例と分析

2.1.1 事例調査の方法

高速道路の土構造物は「入念な締固め、適切な排水」および維持管理を実施することで、安定性が維持されるとされている。しかし、現実には降雨による災害は発生している。そこで過去の高速道路における降雨災害事例の分析を行うことで、災害発生に繋がる要因を抽出することにした。分析に用いるデータは、日本道路公団が 1993（平成 5）年～2004（平成 16）年の 12 年間に取りまとられた調書（降雨災害履歴調書）に記載された 2,373 件の災害事例を基に分析を行った。なお、調書に記載されている災害には、土構造物の盛土・切土部の他に、高速道路に隣接する自然斜面災害やトンネルや橋梁との取付け部の土工部などの災害も含まれている。また、調書には、1) 災害日時、場所、位置、土量、発生原因、2) 連続降雨量、時間最大降雨量、3) 地形・地質状況および 4) 通行規制状況など 123 項目にわたって記載されているが分析は、降雨状況と被災状況の關係に重点を置いて行った。

2.1.2 全国の降雨災害の実態

(1) 全体的な傾向

12 年間に収集された 2,373 件の降雨災害データについて、年毎の月別被災件数の実態を図 2.1 に、降雨の種類別の災害件数を図 2.2 に示した。図 2.2 に示す凡例の内容は、分析にあたり筆者が、通常の「降雨」と季節的な降雨を「梅雨」「台風」「秋雨」に分類し、調書に記述されている「異常降雨、集中豪雨、局地的降雨」などの語句を全て「異常降雨」に集計し直して「降雨状況」として再分類を行って災害件数で集計したものである。また、降雨状況の月別災害件数について集計したものを図 2.3 に示す。

調書に記載されている降雨災害件数の 2,373 件を、12 年間の平均で見た場合には 197 件/年となる。図 2.1 の年別災害件数を見ると、平成 10（1998）年、平成 15（2003）年が他の年より飛び抜けて被災件数が多くなっている。しかもこれらは、8 月に集中しており、図 2.3 から 8 月の降雨はほとんどが台風によるものであり、その災害であることがわかる。

一方、年および月毎の降雨状況と災害件数を示した図 2.2 と図 2.3 を見ると、梅雨、台風、秋雨などの季節的な降雨によるもの以外の異常降雨による災害が各年・各月で発生していることがわかる。異常降雨による災害件数は、平成 8（1996）年の最少 5 件から平成 11（1999）年の最大 104 件と、発生回数にはバラツキはあるものの年平均約 30 件程度発生していたことは、防災を考える上で重要な情報である。

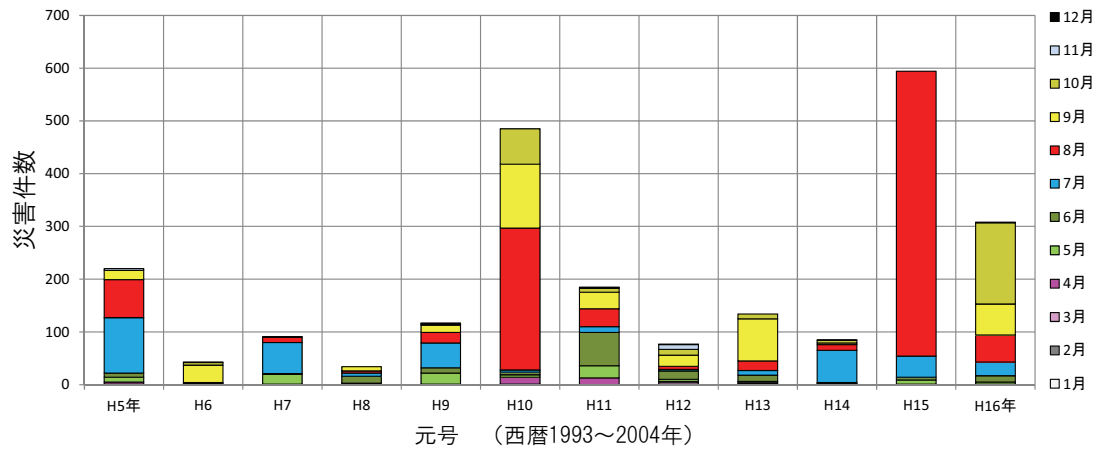


図 2.1 年別の月毎の災害件数

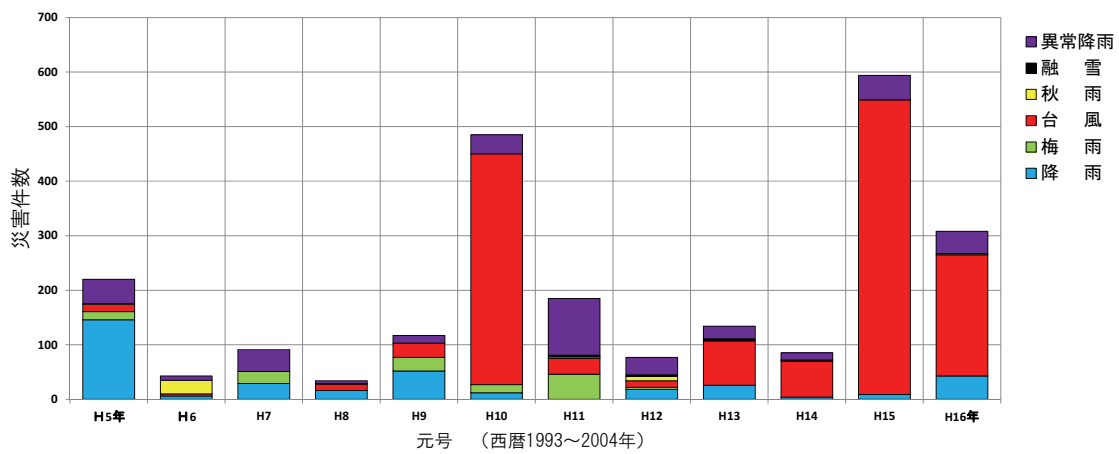


図 2.2 年別の降雨状況毎の災害件数

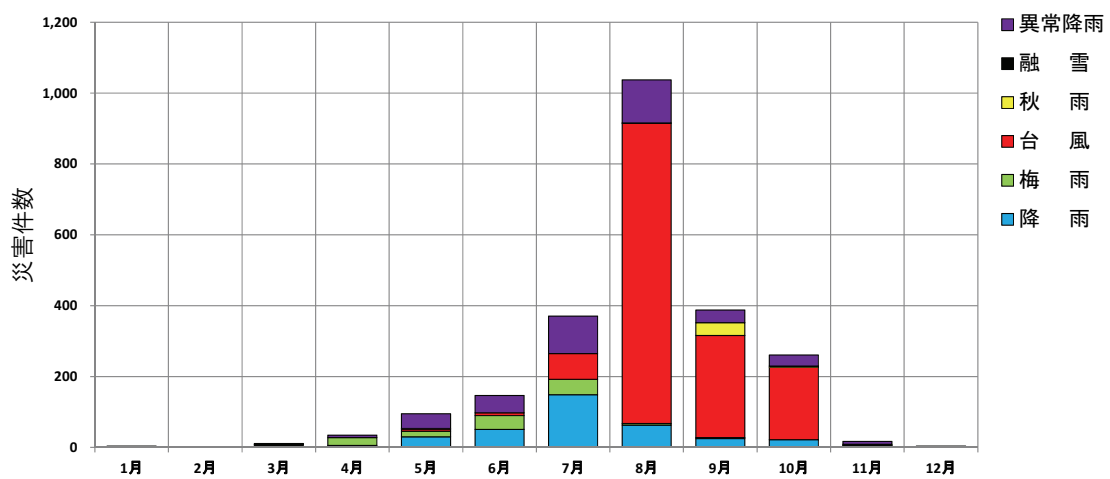


図 2.3 月別の降雨状況毎の災害件数

(2) 災害規模と降雨量の関係

調書の降雨災害記録には、軽微なり面浸食や表層崩壊から、社会的に影響の大きい大規模崩壊までが含まれている。災害規模は復旧時間に影響を及ぼすことから、崩壊土量が記録されている災害を規模別に分類した上で分析することにした。

高速道路の設計要領では、雨水の速やかな排水とりのり面の安定性を考慮して、盛土・切土部で標準的に7~10m毎に小段を設けている。これまでの災害現場の調査結果では、各のり面1段分の被災(約100m³)が多かったことから、これを基準に災害規模の分類を行うこととした。表2.1に、崩壊規模別に定義した災害規模の分類を示す。

表 2.1 災害規模の分類

分類	崩壊規模
超大規模	5,000m ³ 以上
大規模	1,000~5,000m ³
中規模	100~1,000m ³
小規模	100m ³ 未満

調書に記載されている、盛土部1,129件、切土部1,128件の災害件数を、表2.1に示した崩壊規模で分類した結果を、全数に対する割合として図2.4に示す。筆者は当初、降雨災害は切土部と盛土部で発生件数や災害規模に差が生じると考えていた。何故ならば、切土部の安定性に対しては、切土に伴う地山の応力解放や地質構造などの外的要因が影響を及ぼすのに対して、盛土部は人工的に品質管理が行われ、安定した構造物であると考えられるためである。しかし、盛土部、切土部ともに、降雨災害に関して同等の災害件数や災害規模の割合となっており、盛土部に対する危険度評価の必要性が改めて認識されるものとなった。

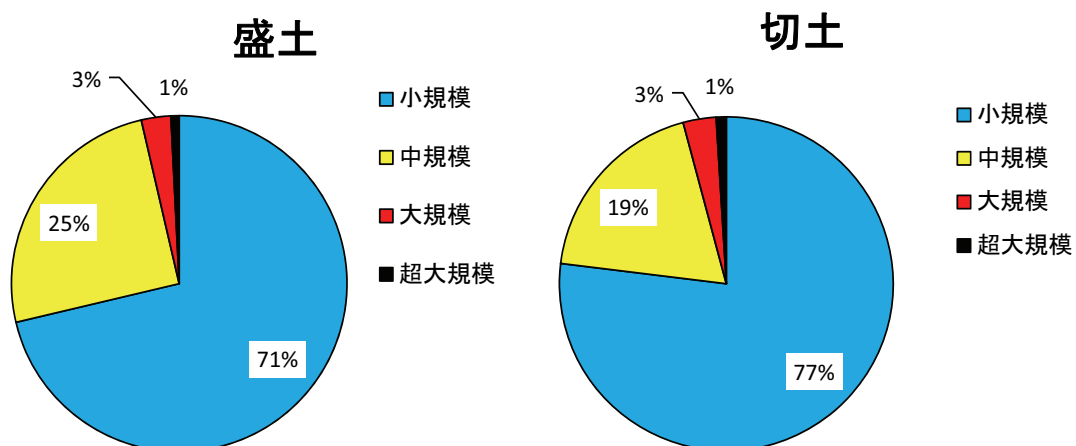


図 2.4 災害規模別発生割合

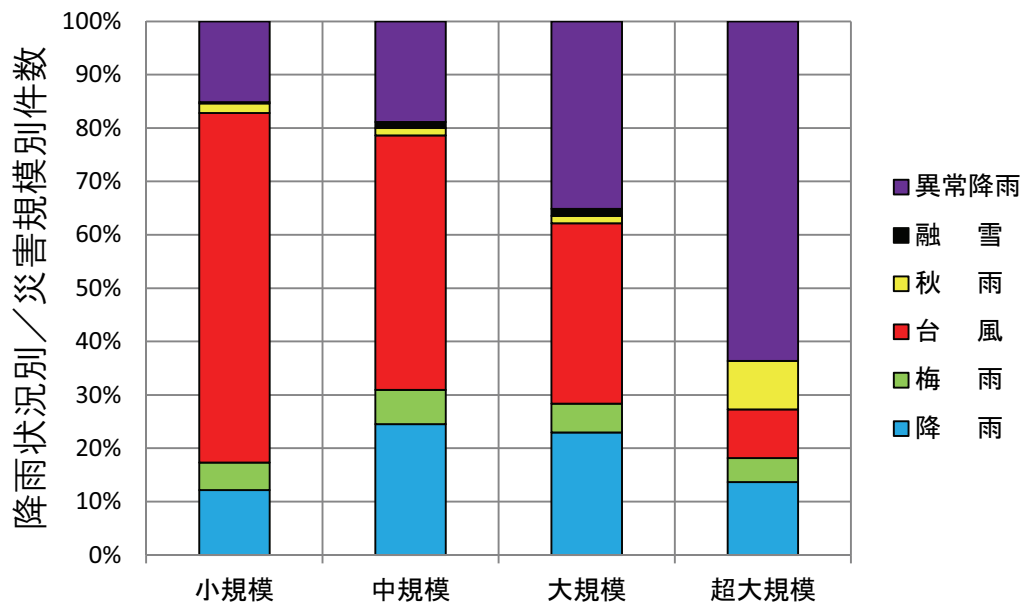


図 2.5 災害規模別の降雨状況毎の災害発生割合

図 2.5 には、災害規模別に各々の降雨状況における災害件数の割合を集計した結果を示す。災害規模が大きくなるに従って、異常降雨の被災割合が高くなることがわかる。一方で、台風は必ずしも大規模災害に繋がるものではなく、災害規模が大きくなるとともに台風による被災割合が減少している。逆に、「異常降雨」による災害の割合は災害規模が大きくなると増加している。

図 2.4 より大規模、超大規模災害は全体の災害件数の数%の発生割合であることが示されている。しかし、この規模の災害は社会的影響も大きく、危険度評価を行うにあたっては、大規模災害を引き起こす異常降雨の影響を十分考慮する必要があることがわかる。

図 2.6 は、災害発生時の連続降雨量 (mm) と降雨状況の関係を示したものである。ここで言う連続降雨量の定義は、災害が発生した時の雨の降り始めから降り終わりまでの降雨の総量であり、6 時間降雨が無い場合には降り終わりとしている。図から台風、異常降雨などの降雨状況によらず、連続降雨量が 100 mm を超えると災害発生件数が急増することがわかる。なお、連続降雨量が 300 mm 以上の災害件数が少なくなっているが、連続降雨量が大きくなると災害件数が減少する訳ではなく、連続降雨量の大きい場合が少ないことによるものである。

図 2.7 には、災害規模別の災害件数を、連続降雨量毎の災害件数の割合で示した。図からは、連続降雨量が 200 mm を超えると、災害発生件数に占める大規模や超大規模の災害発生の割合が高くなることがわかる。図 2.5 の集計結果と併せて考察すれば、連続降雨量が増大することで、災害の規模が大きくなる傾向にあることがわかり、ここでも災害に対する異常降雨の影響評価が重要であることが示されている。

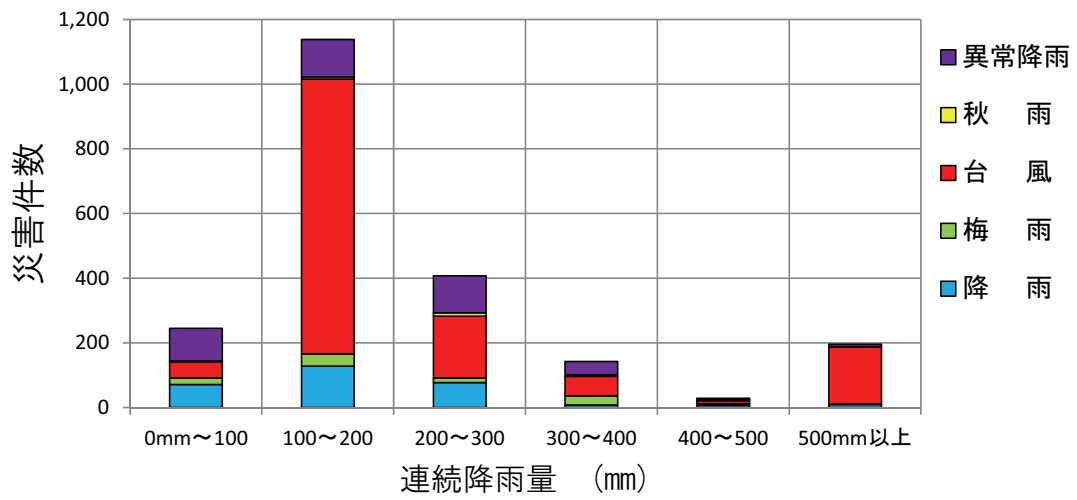


図 2.6 連続降雨量と降雨状況毎の災害件数

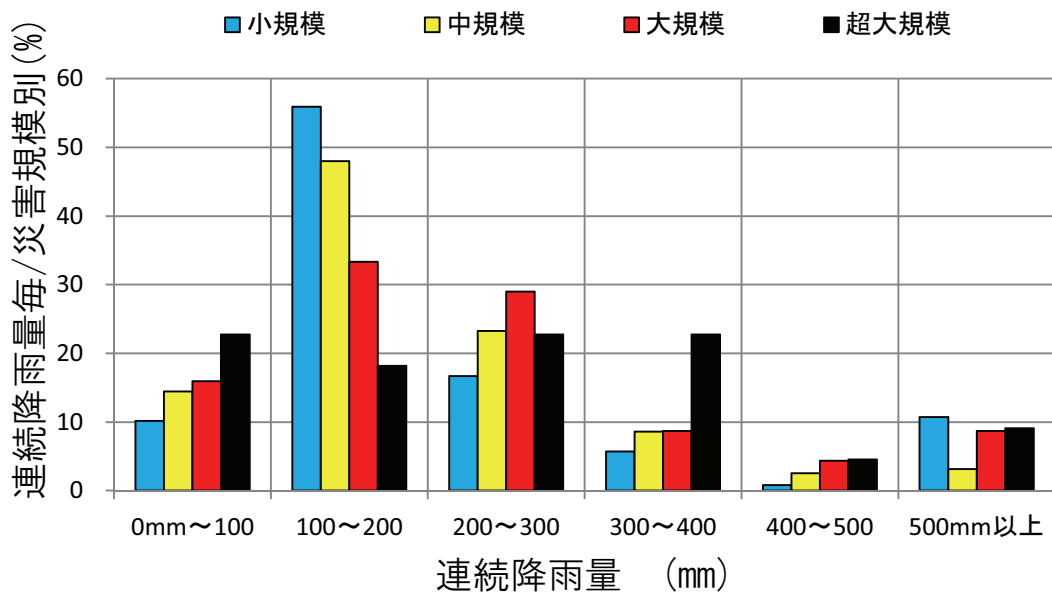


図 2.7 災害規模毎の連続降雨量別の災害発生割合

盛土・切土部について、連続降雨量（mm）と災害規模の関係を求めることができたデータは、盛土部 1,045 件、切土部で 1,018 件である。そのうち、盛土部の大規模災害は 28 件で全体の約 3%、超大規模災害は 9 件で全体の約 1%。切土部の大規模災害は 34 件で全体の約 3%、超大規模災害は 11 件で全体の約 1%であった。これらの災害件数に注目し、これらを連続降雨量毎に集計した結果を図 2.8 図 2.9 に示す。大規模以上の災害発生件数は、盛土、切土部とも災害発生件数全体の 3~4%ではあるが、区分けした連続降雨量の全てで大規模以上の災害が発生していることがわかる。特に、盛土部は連続降雨量が 300 mm 以上となると、大規模以上の災害が切土部よりも多く発生していることが特徴的である。高速道路における大規模以上の災害は社会的影響が大きいことから、防災計画では、災害規模の軽減について検討する必要がある。

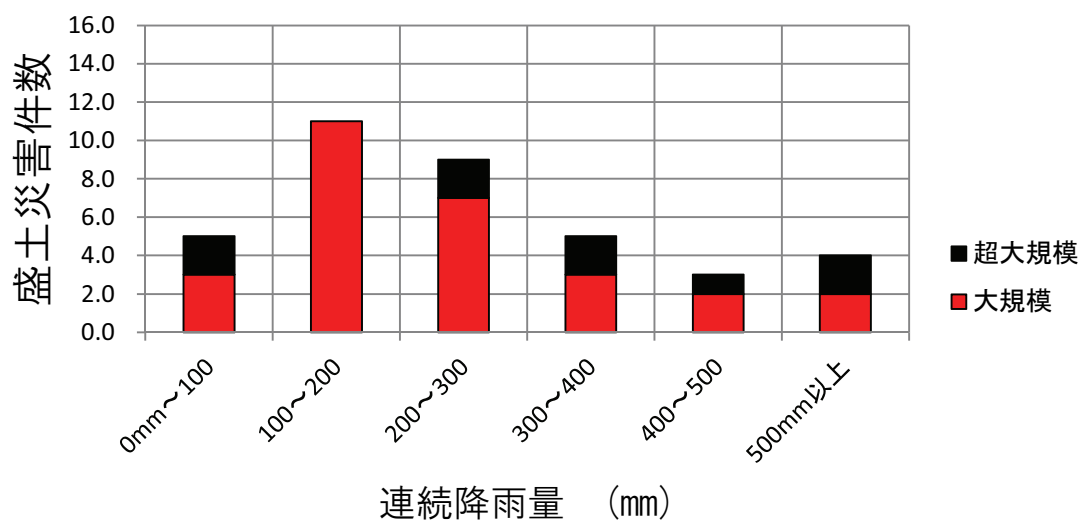


図 2.8 盛土部の連続降雨量と大規模以上の災害件数

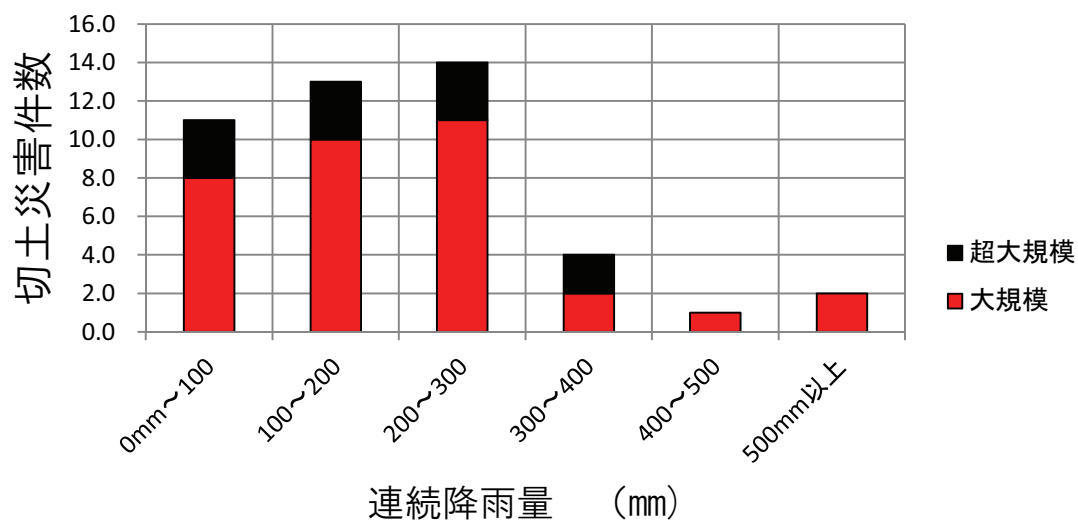


図 2.9 切土部の連続降雨量と大規模以上の災害件数

(3) 降雨災害の地域性

高速道路の土構造物は、地域の特性にあった設計を行うこととされているが、全国で降雨災害が発生している。そこで、降雨災害における地域性の有無を調べるために、降雨災害 2,373 件のデータを地域別に分類し、降雨状況毎の災害件数の割合を調べた(図 2.10)。また、災害規模が記載されているデータ 2,359 件の内、大規模災害 74 件、超大規模災害 22 件について、地域毎に災害件数で集計を行った結果を図 2.11 に示す

図 2.10 からは、降雨災害の地方別の特徴として、北海道は台風と融雪、東北地方は融雪、関東地方は秋雨、中国地方は降雨、九州地区は梅雨による災害の発生頻度が高いことが読み取れる。降雨状況別の災害発生には地域の特徴が現れているものの、図 2.11 に示すとおり、大規模以上の災害は北海道を除く全国で発生している。

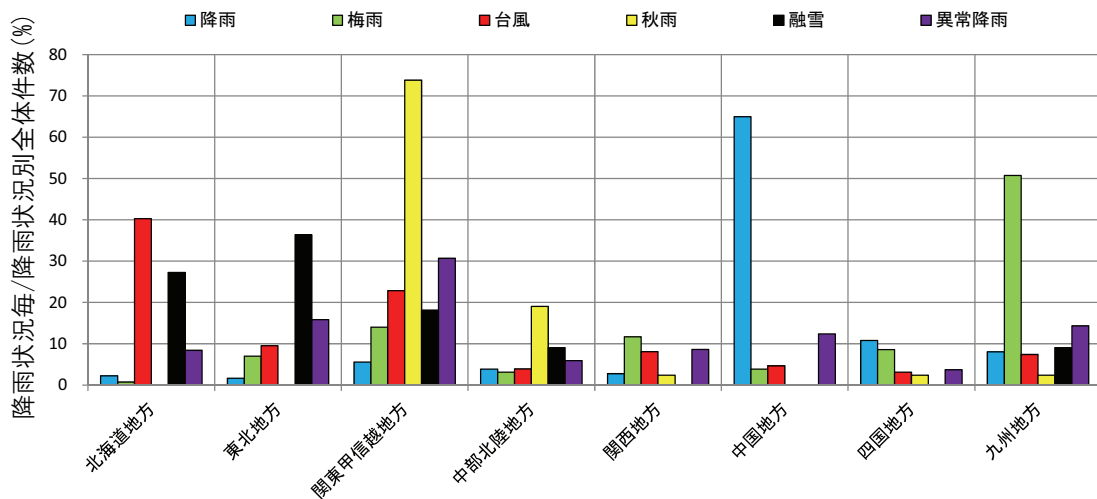


図 2.10 降雨状況別に地方毎の災害発生割合

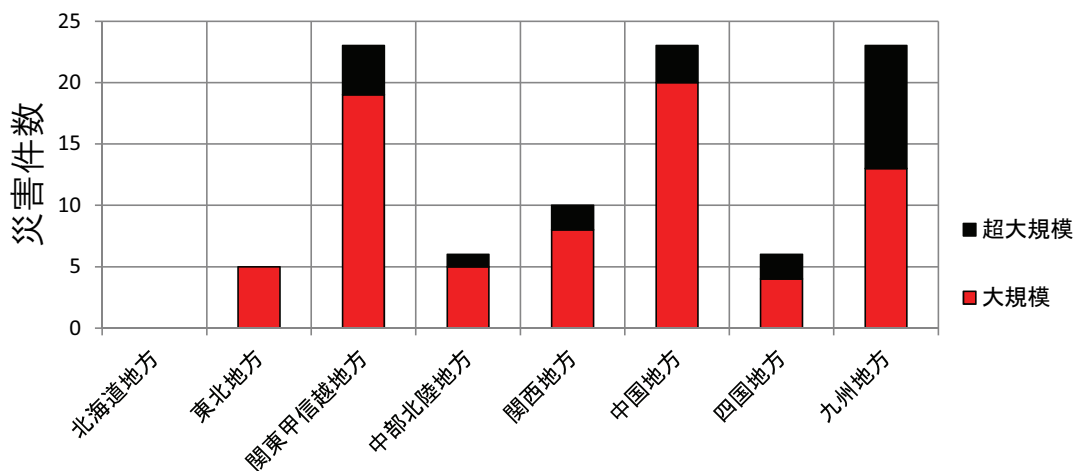


図 2.11 地方別に災害規模別の災害件数

(4) 開通後の経過年数と災害件数

高速道路が初めて開通してから今日までの開通延長の推移を図 2.12 に示す。また、1993（平成 5）年～2004（平成 16）年のデータから盛土・切土部別の開通後の経過年数と災害件数の推移を図 2.13 に示す。

図 2.12 より H5～H16 年の期間では高速道路の開通延長は少なくなっているが、図 2.13 からは、開通後 10 年以内の災害件数は多く、その後は徐々に発生件数が低下していくことが分かる。この原因としては、開通の初期段階で被災部分などの補修を繰り返すことで耐降雨性能が向上していくことが考えられる。

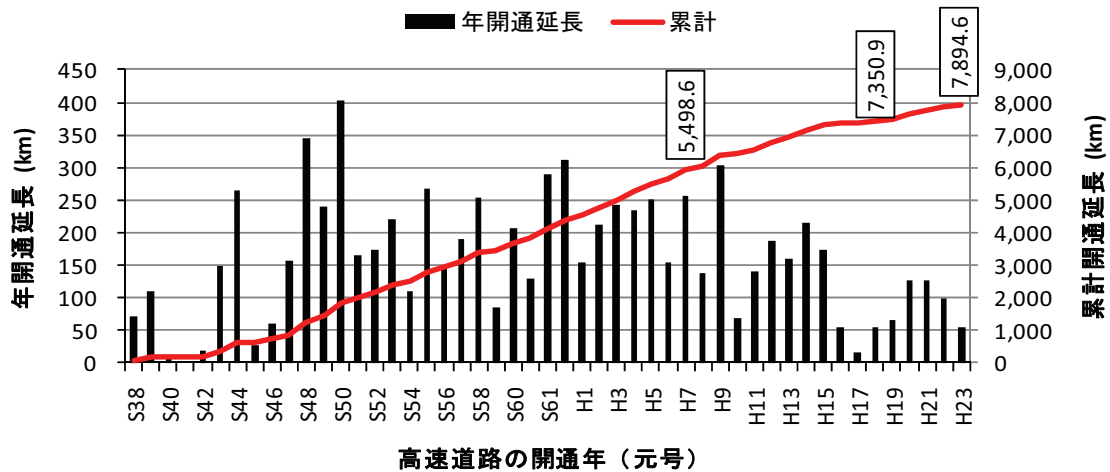


図 2.12 高速道路の開通延長推移

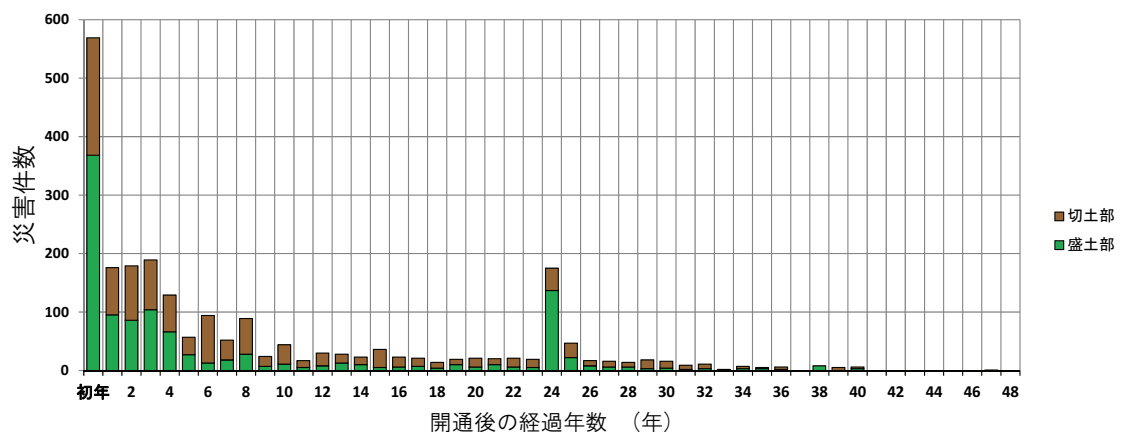


図 2.13 開通後の経過年数と災害件数

筆者は、本研究を進める前までは、切土のり面では時間経過とともに地盤の風化が進み災害が発生し易くなると考えていた。しかし、図 2.13 が示すように、切土部も盛土部と同様に時間経過とともに災害件数は減少していた。一方、開通後 24 年を経過した時点での盛土部の災害発生件数が急増し、200 件弱の災害が発生していた。これは、栃木県内の東北自動車道を襲った 1998 (平成 10) 年 8 月の台風 4 号によるものである。災害は主に盛土部の「のり面の洗掘」「用排水こうの破損」「のり面崩壊」の災害件数で、小規模の災害ではあるものの、災害発生件数が減少傾向にあった盛土部においても、台風や異常降雨により被災する可能性があることがわかる。

以上のことから、高速道路の土構造物は、構築直後は降雨で被災するものの、その都度適切な補強・補修を行うことで耐降雨性能が次第に向上する構造物であることが明確となった。ただし、耐降雨性能が向上しても、台風に伴う降雨の襲来を受けた場合では被災することに留意する必要がある。

(5) 降雨と被災状況からの考察

降雨災害事例の分析結果をまとめると、次のとおりである。

- 1) 異常降雨による災害は、季節の区別なく、最少 5 件/年～最大 105 件/年で年平均約 30 件発生している。(図 2.2)
- 2) 設計基準に基づき品質管理されて構築された盛土部は、地質構造や切土掘削に伴う応力解放の影響を受けると考えられる切土部と、同様な災害発生件数や災害規模であった。(図 2.4)
- 3) 連続降雨量が 100mm を超えると災害発生件数が急増する。また、異常降雨時には災害規模が大きくなる。(図 2.6、図 2.7)
- 4) 降雨状況別の災害発生には地域の特徴が現れているものの、全国で大規模以上の災害が発生している。(図 2.11)
- 5) 開通後 10 年以内は盛土、切土部ともに災害を受け易いが、それ以降は災害箇所の補修や補強を施すことで耐降雨性能が向上し災害発生件数が減少している。ただし、台風などを受けた場合などは被災する。(図 2.13)

2.1.3 盛土部の降雨災害の発生要因

これまでの分析に基づけば、盛土部災害の最大の原因は降雨である。ここでは降雨が災害に繋がる要因を分析した結果を示す。分析では、調書に記述されたデータのうち、発生原因、盛土地盤状況および盛土材料などの項目が記載された約 1,000 件のデータを対象とした。また、記載された項目を「発生原因」「地形状況」および「盛土材料」に再分類した上で分析に供した。

(1) 発生要因と災害状況

降雨災害の発生原因を、災害規模毎にそれぞれの災害件数の割合で示した（図 2.14）。調書の発生原因の項目には、道路管理者が災害現場の調査を行った結果について、「排水施設が問題」「区域外からの影響」「のり面保護工」「含水比の飽和状態」「その他」の分類で記述されている。筆者は、災害事象を分かり易くするために、これらを別の言葉で表現し図 2.14 の凡例に示した。「高速道路隣接地からの影響」とは、「区域外からの影響」の記述を再考したものであり、事象としては高速道路用地以外の斜面などが何らかの原因で崩壊した影響で高速道路が被災を受けたものである。「崩壊部が飽和状態」とは、「含水比が飽和状態」を再考したものであり、事象としては災害時に崩壊部が水で満たされていた状態のことを示す。また、「排水施設の不具合」とは、「排水施設が問題」を再考したもので、事象としては高速道路に降った雨水を近傍の水路に導水するための排水設備の不具合を表す。「のり面保護工」についても「のり面保護工の不具合」に変更し、事象としては盛土のり面を植生が定着するまで雨水による浸食を防止するための施設の不具合を表すこととした。

図から、降雨災害の第一の原因は、盛土部が水で満たされることが挙げられる。すなわち降雨時においては、雨水、地下水の浸透を防止し、浸透しても適切に排水できる構造を維持することが、降雨災害の大部分を減らすか、災害規模の軽減に結びつくことが示されている。

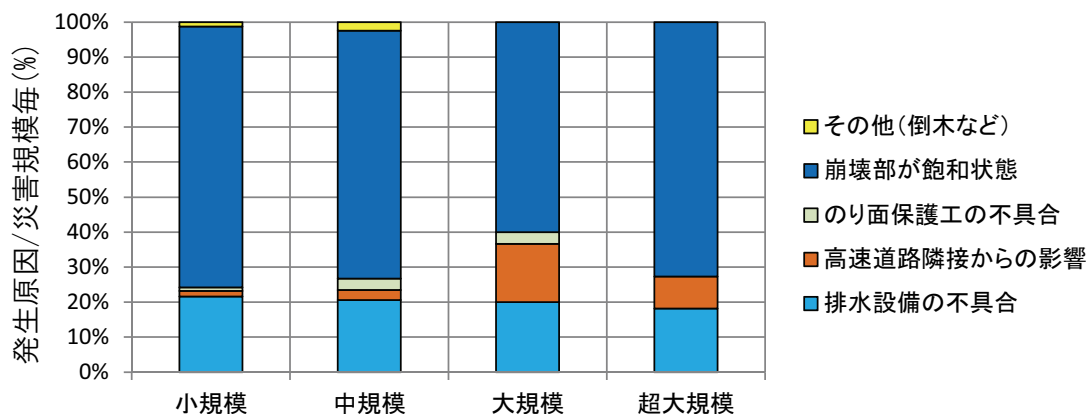


図 2.14 災害規模別の発生原因毎の災害発生割合

(2) 地形状況と災害状況

盛土部の地形状況と災害規模との関連を調べた。調書では、地形情報として「田」「畑」「平坦」「崖錐地形」「丘陵」「集水」「斜面」「傾斜」などの言葉が記述されているものの、明確に定義付けされた内容ではない。このため、筆者は分析にあたって、これらを「平坦地盤」「傾斜地盤」「集水地形」に再分類した。「集水地形」は、調書に記述されている「集水地形や集水斜面」を再分類したものである。なお、傾斜地盤上の盛土部には「片切片盛」「腹付け盛土」の盛土形状や、道路が谷や沢部を横過する場合に上流側に「くぼ地」を呈する盛土形状も含まれる。

集計にあたっては、災害規模と地形状況が明確になっている 669 件の災害データを使用した。図 2.15 には、災害規模別に地形状況毎の災害件数を割合で示す。

図から、小規模災害は平坦地盤で多く発生しているのに対し、災害規模が中規模から大規模となるにしたがい、傾斜地盤や集水地形の割合が大きくなっていることがわかる。また、超大規模災害のほとんどは傾斜地盤で発生している。

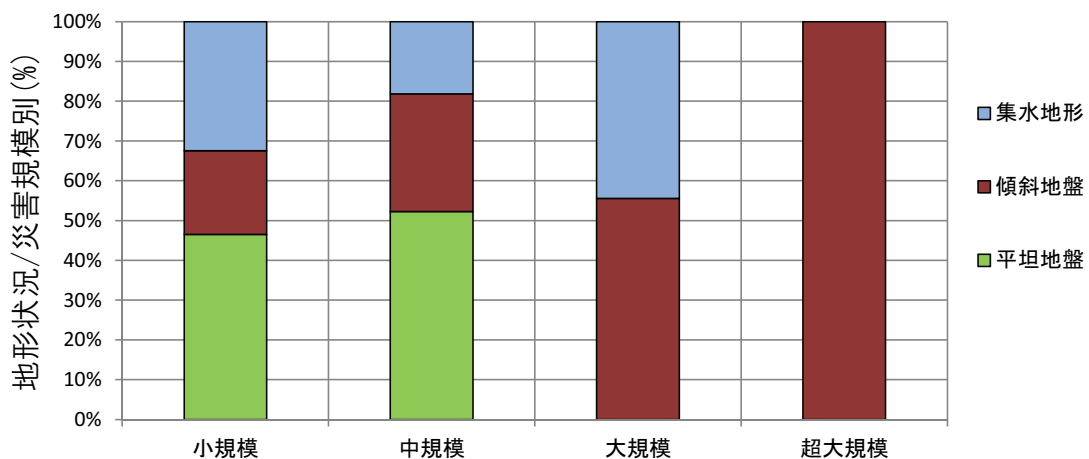


図 2.15 災害規模別に地形状況毎の災害発生割合

(3) 盛土材料と災害状況

盛土部は、通過地域の地質を用いて構築される。盛土材料と災害状況の関連を分析するにあたり、筆者は、調書に記載されている盛土材料に関する内容を日本統一土質分類で定義されている簡易分類名の「砂礫土」「砂質土」「粘性土」「火山灰質粘性土」に再分類した。なお、俗称である「しらす」「まさ土」と岩石名については、そのままとした。

図 2.16 に、地質情報が得られる 1,040 件のデータについて、盛土材料毎の災害件数を示す。また、災害規模毎に盛土材料別の災害件数を割合で示したものが図 2.17 である。盛土部が粘性土、火山灰質粘性土、風化すると粘土質に代わる凝灰岩、泥岩並びに頁岩の材料で、いわゆる粘性土質の材料で施工されている箇所の災害件数は 495 件であり、全体の約 5 割を占める。図 2.17 からは、いわゆるしらすやまさ土の場合には、災害規模が大きくなる傾向にあることがわかる。

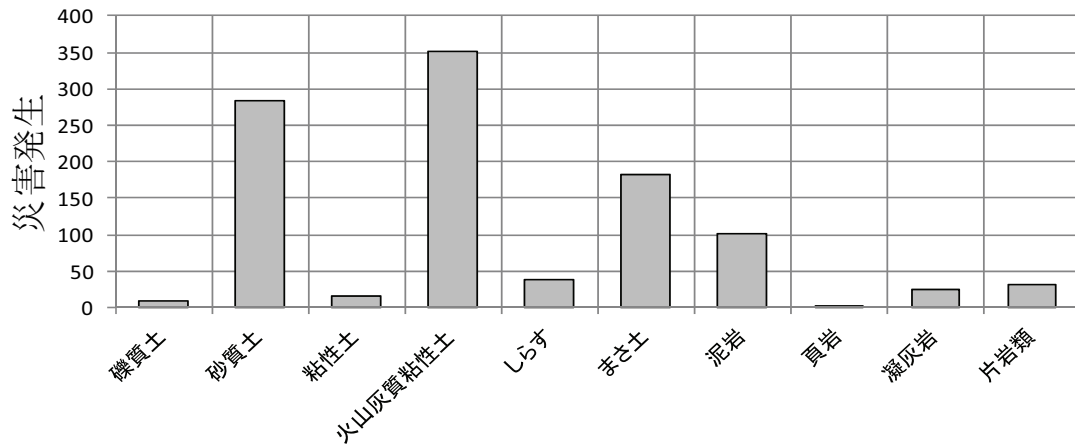


図 2.16 盛土材料と災害件数

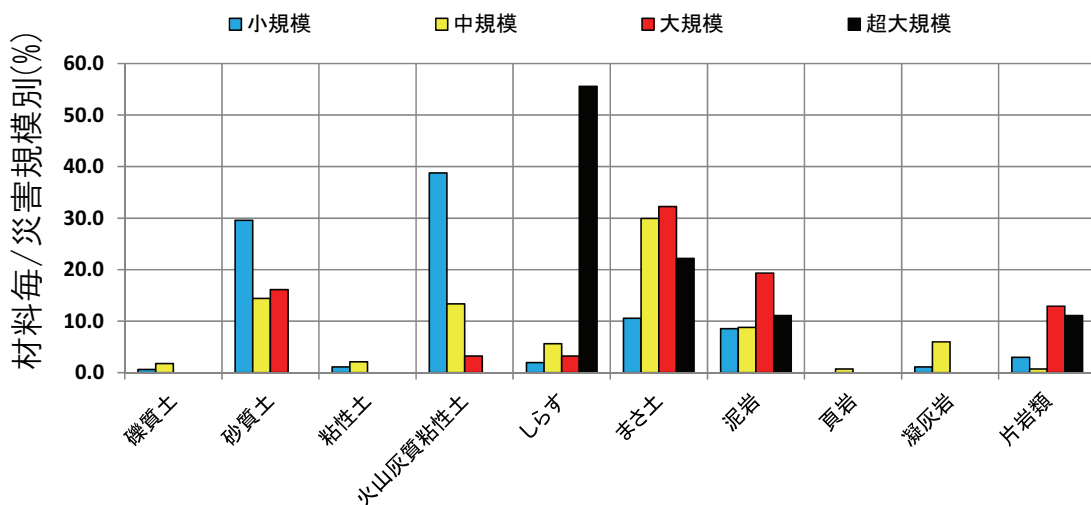


図 2.17 災害規模毎に盛土材料別の災害発生割合

(4) 降雨による災害を受け易い要因のまとめ

降雨災害事例の分析から得られる知見を整理すると、次のとおりである。

- 1) 盛土では、降雨や地下水の浸透により飽和状態となることが災害発生の最も大きな要因である。(図 2.14)
- 2) 傾斜地盤や集水地形の盛土部では、災害規模が大きくなる。(図 2.15)
- 3) 粘性土質の材料で施工された盛土は、災害発生率が高く、しらすやまさ土の場合には災害規模が大きくなる。(図 2.16)

これらの事柄は、すでに一般的に論じられているものであるが、災害事例の分析からも同様な結論が得られたことで、これまでの認識を裏付けることができた。

高速道路における土構造物の設計思想は、盛土の安定を図るため「水を入れない、入っても速やかに排水する」および「確実な締固め」を行うことになっている。しかし、現実に降雨災害が発生していることは、盛土部に対する水の侵入が発生している箇所があることや、降雨に対する抵抗力が施工完了時より徐々に低下している可能性があることを示唆している。

2.2 地震災害事例と分析

2.2.1 M6 以上の大規模地震災害

1963（昭和 38）年に名神高速道路が開通してから約 50 年間について、日本道路公団が管理していた供用路線における、M6 以上の巨大模地震による被災事例を表 2.2 にまとめた。

高速道路における盛土部の地震被害では、別府阿蘇道路において 1975（昭和 50）年の大分県中部地震における大規模な被災が記録されている。別府阿蘇道路は、1964（昭和 39）年に全線供用開通しているが、延長約 52km のうち震源に近い約 2.5km 区間の腹付け盛土部で、写真 2.1 に示す最大 20,000m³ の盛土崩壊が発生した。また、他の 2 箇所の盛土でもそれぞれ 1,200m³、3,000m³ の崩壊が記録されている。大分県中部地震では、5 日前の 4 月 16 日から 20 日までの 5 日間に 87mm の降雨があり、山間部の地盤が緩んでいた状態のところ M6.1 の地震が発生したことが、道路盛土の被害を大きくしたと考えられている。

これ以降、1995（平成 7）年の兵庫県南部地震までは、写真 2.2～写真 2.3 で示すような橋台裏込め部の沈下、橋梁取り付け部の路肩の陥没被害、横断構造物付近の段差、路肩部のクラックなど、局所的な被災に限られており、交通復旧に時間を要する被災ではなかった。1995 年の兵庫県南部地震発生後、土木学会で「土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会」が組織され、2000（平成 12）年 6 月に第三次提言²⁰⁾がなされている。この中で、道路における盛土部の耐震性に関しては、「土に関する構造物」に「(6) 盛土のレベル 2 地震動に対する耐震性能は、地震後の残留する塑性変形により設定する必要がある。」と記載されている。この背景には、盛土部は被災を受けても全面的な崩壊に至らず、修復時間や費用が他の構造物と比べ軽微であったことが挙げられる。

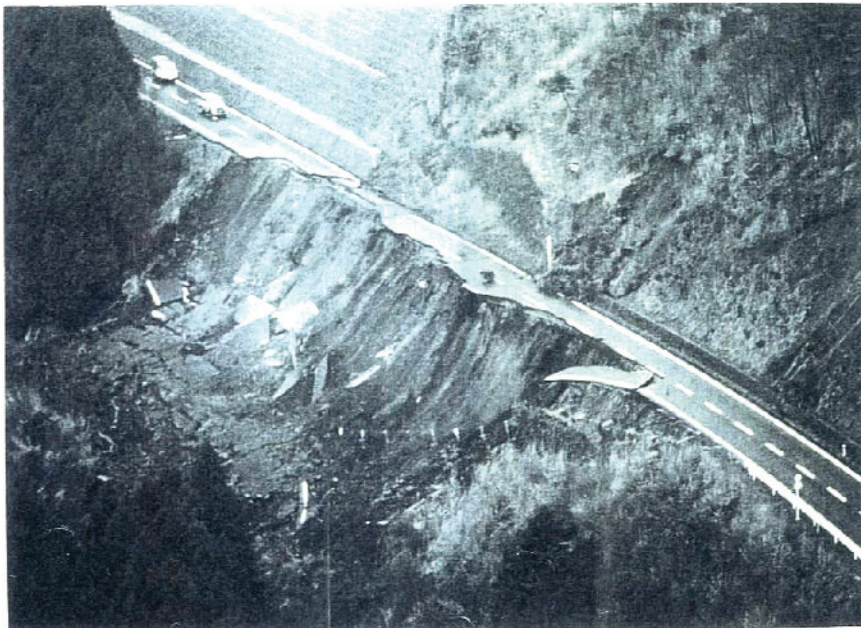


写真 2.1 片切片盛構造の地震被害（大分県中部地震）

表 2.2 日本道路公団が管理していた供用路線の土構造物の地震災害一覧

	伊豆半島沖地震 1974年5月9日 M6.9	大分県中部地震 1975年4月21日 M6.4	伊豆大島近海地震 1978年1月14日 M7.0	宮城県沖地震 1978年6月12日 M7.4	兵庫県南部地震 1995年1月17日 M7.3	新潟県中越地震 2004年10月23日 M6.8	新潟県中越沖地震 2007年7月16日 M6.8
道路名	南伊豆道路	別府阿蘇道路	東伊豆道路	東北海道	関越道、北陸道	関越道、北陸道	北陸道
被害延長	9.0km	11.5km	25.0km	126.3km	名神58.4km 中国道119.2km 第二神明10.7km	関越道59.2km 北陸道50.3km	65km
盛土崩壊	—	3箇所	—	—	1箇所	5箇所	—
路肩陥没	7箇所	—	路面陥没・亀裂	1箇所	—	42箇所	2箇所
亀裂	51箇所	100箇所	14箇所	路面沈下	150箇所	多数	224箇所
段差	17箇所	—	98箇所	98箇所	49箇所	141箇所	—
石積工	凸の石積みの施工 目地部の開口	空石積は殆ど崩壊	笠石積みが変形 目地の開口・クランク	—	—	—	—
ブロック積工	1箇所	3箇所	目地沿いクランク	—	—	巻き込み部で多数	—
井桁擁壁	路面陥没	—	路面陥没	—	—	L型擁壁の倒壊、変形	—
その他	橋台裏込部の沈下 3箇所	傾斜地盤上の高盛土部 の被害甚大	自然斜面の崩壊および 落石(安山岩)	被災延長が長い	第二神明は段差・クランク が多数報告され数量 からは除外	震災前の1カ月間で台風 23号を始めとし、当年は例 年の2倍の降雨量を記録	軟弱地盤他での被災
交通規制	約3ヶ月間	通行止め約100日間	緊急路確保3日目	通行止め 62時間	通行止め約30日間	緊急路確保約19時間	約4時間



写真 2.2 道路の沈下（左：橋台裏込め部の沈下 右：橋台取付け部の路肩沈下）



写真 2.3 構造物の段差や路肩部のクラック

しかし、2004（平成 16）年の新潟県中越地震では、盛土部の被害が顕著に見られた。当該地震は、小千谷市を震源とする直下型の地震であり、関越自動車道の六日町 IC～長岡 JCT 約 60km 区間の全線にわたって、写真 2.4～写真 2.6 に示すような盛土部の被災が見られた。さらに、2007（平成 19）年 3 月 25 日の能登半島地震では、石川県能登有料道路の徳田大津 IC～穴水 IC 約 27km 区間の盛土部が甚大な被害を受けた。

新潟県中越地震においても、大分県中部地震と同様に、震災前の 10 月 19 日から 23 日までの間で 132mm の降雨量が記録²¹⁾されており、この後の地震が山間部を通過する区間に被害を及ぼしている。これらのことは、降雨状況によっては地震による被害が拡大することを示している。

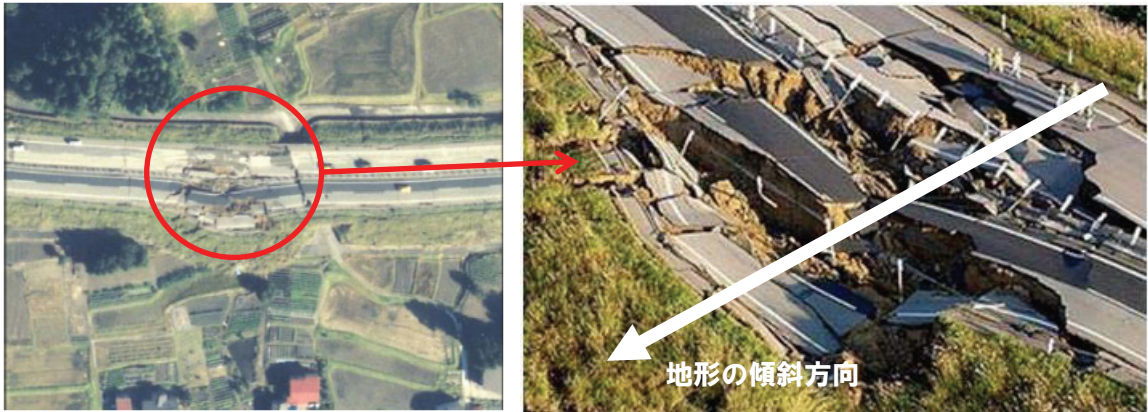


写真 2.4 傾斜地盤上の盛土部被害状況（新潟県中越地震）



写真 2.5 沢部の盛土部被災状況（新潟県中越地震）



写真 2.6 平坦地盤の路肩部と盛土のり尻部の被災状況（新潟県中越地震）

2.2.2 盛土被害の分析

地震時における盛土の被災を受け易い要因を検討するため、日本道路公団で収集された新潟県中越地震の盛土被害データを分析した。

新潟県中越地震の被害区間は、関越自動車道 六日町 IC～長岡 JCT 間 59.2km、北陸自動車道 柏崎 IC～三条燕 IC 間 50.3km である。この区間は、丘陵部から平地部の比較的軟弱な地盤上を、切土や盛土の土構造物で構築されている。

その中で盛土被害が特に顕著であった、小出 IC～小千谷 IC 間 24.4km の被災状況を分析した。なお、図 2.18 に検討対象区間の位置と震源（×印）を示す。



図 2.18 関越自動車道 小出 IC～小千谷 IC 間 位置図と震源

検討区間における、盛土の形態別延長内訳を図 2.19 に示す。本区間では、全体の約 7 割が盛土構造で、その殆どが両側にのり面を有する盛土形状である。なお、腹付け盛土および片切片盛区間は、全体の約 1 割程度であった。盛土形状については第 3 章の図 3.4 に示したとおりである。

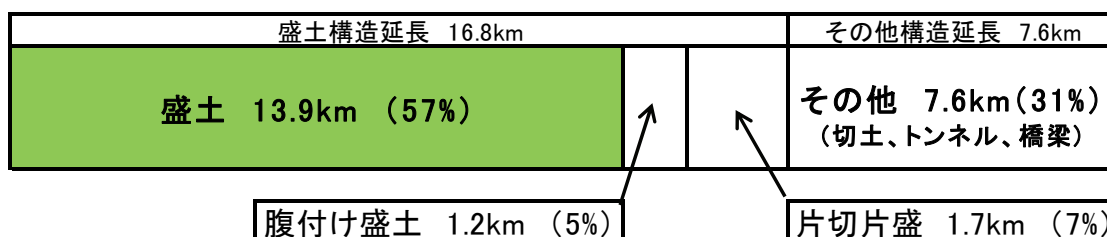


図 2.19 当該区間の構造物延長内訳

最初に、検討区間の盛土部延長約 17km における 20m 毎の横断図、約 840 断面について地形の勾配を求めた。地形の勾配は、両側の盛土法尻を結ぶ線の傾きとした。集計結果を、図 2.20 に示す。地形勾配は高さを 1 とした勾配で表し、勾配なしを含め 8 段階に分類した。検討区間の盛土は、大部分が平坦な地形の上に構築されたものであることがわかる。

図 2.21 は、地形勾配毎に、盛土部の有被災延長（道路距離）と無被災延長の割合を被災率として表したものである。地形勾配 1:1 の急な傾斜面に構築された盛土部では、4 か所が全て被災している。地形勾配が 1:10 までは地形勾配が緩くなるにつれて被災率は低下している。しかし、さらに勾配が緩くなると被災率は再度上昇し、地形勾配が 1:11～勾配なしの延長約 12km の盛土部における被災率は、約 8 割を示すことがわかる。

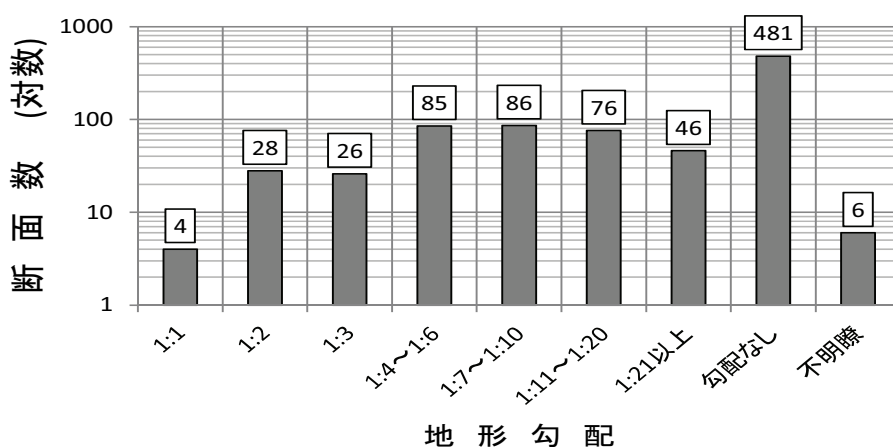


図 2.20 検討区間の地形勾配毎の盛土断面数

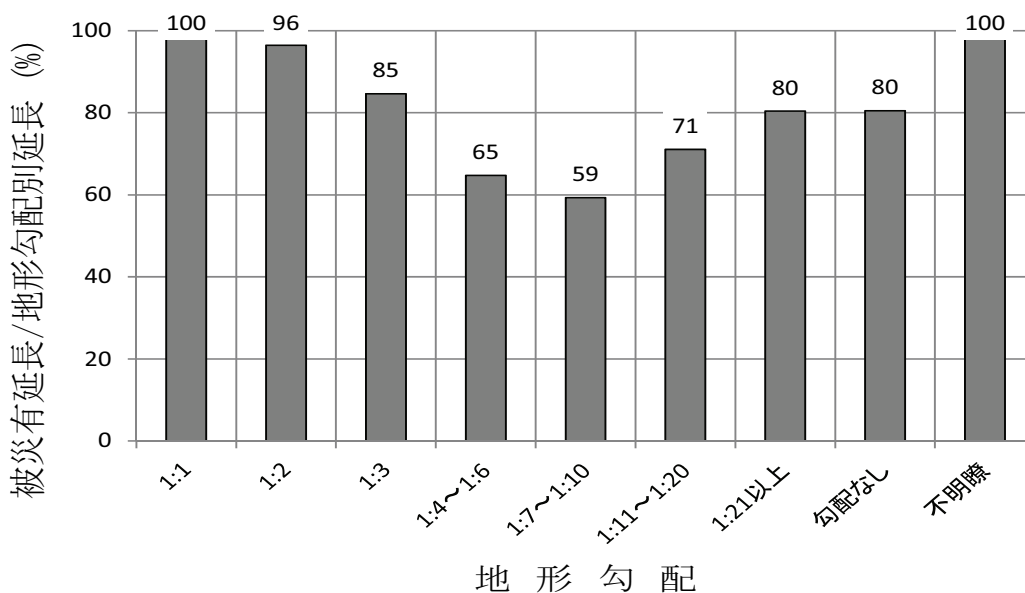










図 2.21 地形勾配毎の被災割合

また、地震被災の特徴を分析するため、道路震災対策便覧（平成19年3月（社）日本道路協会）に示されている被災パターン分類表（表2.3）に基づき、被災盛土を分類したうえで被災盛土数を集計した。（図2.22）。関越自動車道の盛土被災は、新潟県中越地震M6.8直下型の地震災害にも関わらず、被災Ⅰ型や被災Ⅱ型の被災が全てであり、被災Ⅲ型の被災はなかった。ただし、山間部の傾斜地盤上の腹付け盛土で被災度「A」の被害が発生していたが、切土のり面の被災は無かった。

表 2.3 道路震災対策便覧における被災パターン分類表

被災	被災模式図	被害パターン	被災度	被災度の説明	
平地部の盛土	Ⅰ型		B	亀裂幅15cm以上または段差量20cm以上	
			C	亀裂幅15cm未満、かつ段差量20cm未満	
	Ⅱ型		A	亀裂幅30cmを超え、かつ段差量50cmを超えるもの	
			B	亀裂幅30cm以下、または段差量50cm以下	
	Ⅲ型		破壊が基礎地盤まで及ぶ盛土形状が原型をとどめないもの	A	
	Ⅳ型		盛土の様な沈下に伴って、盛土形状をある程度保ちつつ変形したもの	B	沈下量50cm以下
				C	沈下量50cm未満
	Ⅴ型		構造物背面の盛土が沈下および亀裂を起こしたもの	B	沈下量20cm以上
				C	沈下量20cm未満
	傾斜地盤上の盛土	a		両盛土	A
B					盛土の変形に伴い路面亀裂や段差が生じたもの
C					無被害または盛土に変状をきたしていない路面にヘアクラック程度のもの
b			腹付け盛土	A	盛土が完全に滑動し路面および路肩が消失したもの
				B	盛土の変形に伴い路面亀裂や段差が生じたもの
				C	無被害または盛土に変状をきたしていない路面にヘアクラック程度のもの
c			片切片盛	A	盛土が完全に滑動し路面および路肩が消失したもの
				B	盛土の変形に伴い路面亀裂や段差が生じたもの
				C	無被害または盛土に変状をきたしていない路面にヘアクラック程度のもの

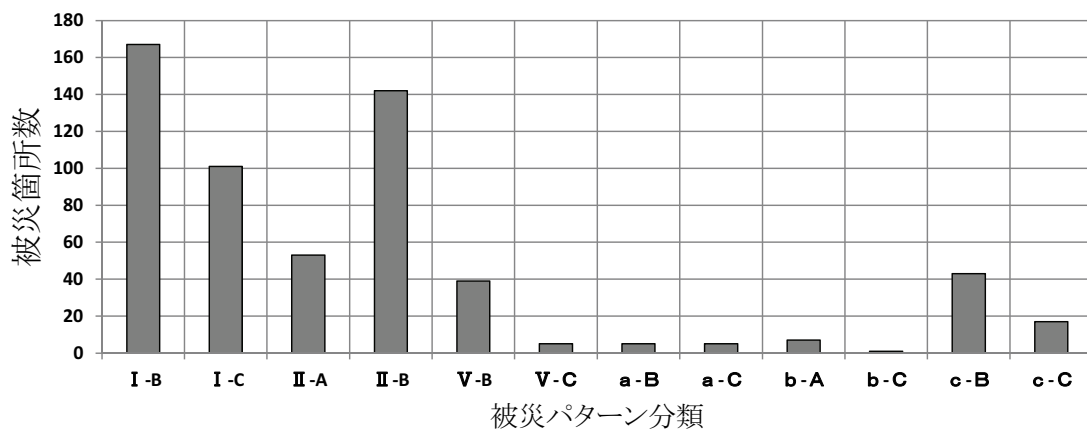


図 2.22 道路震災対策便覧の被災パターン別の被災箇所数

盛土の災害規模は、復旧に要する作業時間の長短に影響するため、盛土の地震による災害を規模に注目して分析することとした。道路震災対策便覧の被災パターンを、表 2.4 に示すように規模別に分類したうえで、585 断面の被災箇所を規模別に集計した(図 2.23)。分類にあたっては、筆者がこれまで行ってきた地震災害の現場調査の経験や、交通機能を確保するために要する復旧時間を判断材料とした。

結果を見ると、盛土部の被災は小被害と中被害が大半を占め、平地部の盛土では被災 III 型や被災度「A」を示す被災は発生していなかった。ただし、傾斜地盤上の腹付け盛土部において被災 b、被災度「A」の被害が 7 箇所発生していた。

さらに、小被害、中被害、大被害に分類された盛土について、地形勾配毎の延長距離を求め、それぞれの被害延長の割合を求めた(図 2.24)。図からは、盛土部の小被害に関しては、地形勾配が緩くなるにしたがい被災割合が高くなるが、これらの被災状況は写真 2.3 に示すような構造物の段差や路肩部のクラックが主である。中被害では、写真 2.4 や写真 2.5 に示すような盛土部の崩壊が主となり、地形勾配が急になるほど被災割合が高くなる傾向があることが読み取れる。

表 2.4 被災パターンを被害状況別に分類

被災度	崩壊・き裂			路面段差	
	小被害	中被害	大被害	中被害	大被害
被災パターン	I-B I-C a-C b-C c-C	II-A II-B a-B c-B	b-A	V-C	V-B

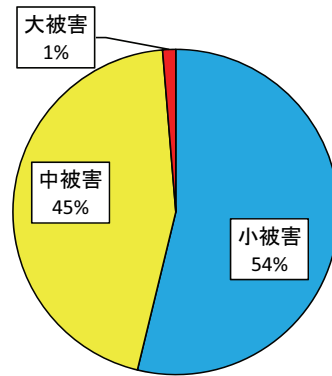


図 2.23 被災状況別の被災割合

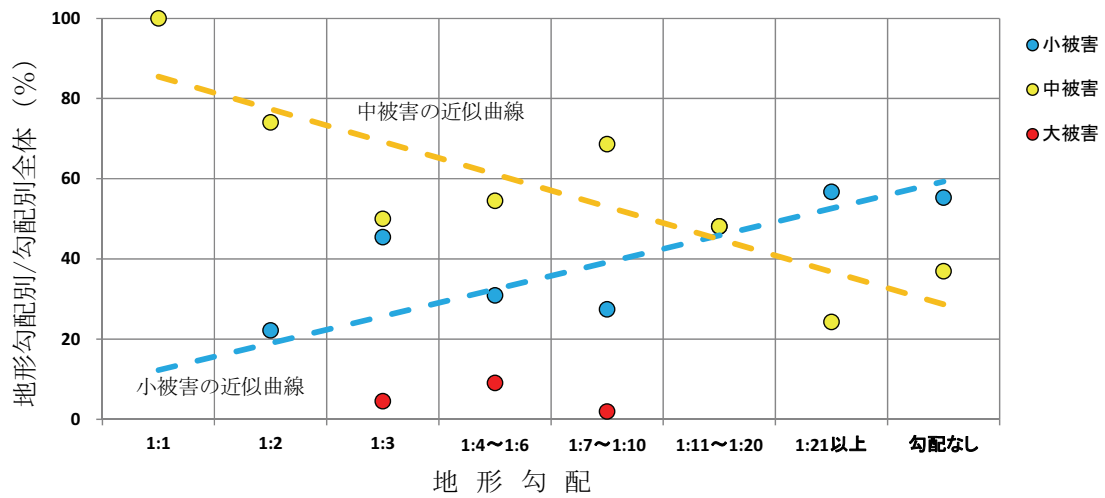


図 2.24 地形勾配毎の被災状況割合

2.2.3 高速道路の地震災害からの考察

これまで 1963（昭和 38）年からの約 50 年間について、日本道路公団が管理していた供用路線における、M6 以上の巨大地震による被災事例を調査するとともに、新潟県中越地震に注目して被災の傾向を分析した。分析した地震には、2004 年の新潟県中越地震や 2007 年能登半島地震などの、盛土構造物が甚大な被害を受けた地震も含まれている。

分析の結果得られた知見を、以下にまとめて示す。

- 1) M6 を超える地震では、主に盛土路肩部や構造物の取付け部での段差が発生する。（写真 2.3）
- 2) M6 を超える地震であっても、道路震災対策便覧の被災パターン分類の被災Ⅲ型に相当する被害が発生していない。しかし、大分県中部地震や新潟県中越地震の被災では傾斜地盤上の腹付け盛土部では被災度「A」の被害が発生している。（写真 2.1、写真 2.4）
- 3) 地形勾配と被災状況には相関がある。（図 2.24）
- 4) 大分県中部地震では発災前に 87 mm、新潟県中越地震では 132 mm の降雨量を記録していた。その他の 5 事例では発災前に降雨の記録がない。このことは、地震被災の軽減を検討する場合の情報として活用できる事例である。

第 3 章 管理注目度を用いた盛土部の危険度評価手法の提案

3.1 盛土部の管理注目度の提案

3.1.1 管理注目度について

盛土部の危険度評価を行う「管理注目度」の提案の目的は、冒頭で述べたとおり、交通ネットワークの早期復旧に支障となる箇所抽出を行うことで、事業継続計画の策定に寄与することである。

管理注目度とは、高速道路の盛土における「被災し易い箇所」を洗い出すための指標である。これは、自然災害事例の分析により得られた知見をもとにして選定した被災の受け易さに関する「評価項目」について、第三者への影響度合いや復旧の難易度など、高速道路の通過地域の土地利用を総合的に勘案して採点することで得られる点数である。

以下に、自然災害事例分析の結果をまとめるとともに、これに基づき選定した「評価項目」を具体的に示す。

3.1.2 自然災害事例分析からの知見

これまで行った盛土部における被災事例の分析により、降雨時や地震時における災害の特徴や被災に繋がる要因を明らかにした。得られた知見を再掲すると、以下のとおりである。

- 1) 異常降雨による災害は、季節の区別なく、最少 5 件/年～最大 105 件/年で年平均約 30 件発生している。(図 2.2)
- 2) 設計基準に基づき品質管理されて構築された盛土部は、地質構造や切土掘削に伴う応力解放の影響を受けると考えられる切土部と、同様な災害発生件数や災害規模であった。(図 2.4)
- 3) 連続降雨量が 100mm を超えると災害発生件数が急増する。また、異常降雨時には災害規模が大きくなる。(図 2.6)
- 4) 降雨状況別の災害発生には地域の特徴が現れているものの、全国的に大規模以上の災害が発生している。(図 2.11)
- 5) 開通後 10 年以内は盛土、切土部ともに被災を受け易いが、それ以降は災害箇所の補修や補強を施すことで耐降雨性能が向上し災害発生件数が減少している。ただし、台風や異常降雨を受けた場合などは被災する。(図 2.13)
- 6) 盛土では、降雨や地下水の浸透により飽和状態となることが災害発生の最も大きな要因である。(図 2.14)
- 7) 傾斜地盤や集水地形の盛土部では、災害規模が大きくなる。(図 2.15)
- 8) 粘性土質の材料で施工された盛土は、災害の発生が高く、しらすやまさ土の場合には災害規模が大きくなる。(図 2.16)
- 9) M6 を超える地震では、主に盛土路肩部や構造物の取付け部での段差が発生する。(写真 2.2、写真 2.3)

- 10) M6 を超える地震であっても、道路震災対策便覧の被災パターン分類の被災Ⅲ型に相当する被害が発生していない。しかし、大分県中部地震や新潟県中越地震の被災では傾斜地盤上の腹付け盛土部では被災度「A」の被害が発生している。(写真 2.1、写真 2.4、写真 2.5)
- 11) 地形勾配と被災状況な相関がある(図 2.24)
- 12) 大分県中部地震では発災前に 87 mm、新潟県中越地震では 132 mmの降雨量を記録していた。その他の 5 事例では発災前に降雨の記録はないが地震被災の軽減を検討する場合の情報として活用できる事例である。

3.1.3 管理注目度を求めるための評価項目の選定

高速道路の盛土に対して、「被災し易い箇所」を洗い出すための評価項目を選定した。選定にあたっては、危険度評価の対象を「降雨による被災を前提としたもの」と「地震による被災を前提としたもの」に分類した。また、これらを「災害発生確率による事象」と「被災規模に関する事象」に分けて評価を行うことにした。すなわち、被災の受け易さと災害の社会的影響を個別に評価することが、新たに提案する手法の特徴である。

降雨時の災害発生確率による事象の評価項目としては、自然災害事例の分析で得られた 5)の知見に示す開通後災害発生件数の変化から「(1) 供用年数」、7)の知見に示された傾斜地盤の影響に基づき「(2) 盛土形状」、8)の知見に示された盛土材料の影響を考慮し「(3) 盛土材料」、および 7)の知見に基づき「(4) 集水地形」を設定した。また、筆者の経験から重要と考える「(5) 変状の有無」を加え、全 5 項目を設定した。

次に被災の大きさに関する事象の評価項目は、災害現場調査の経験より影響が大きいと考えられる「(1)盛土高さ」、「(2)原地形の勾配」に加え、隣接地の「(3)第三者被害の有無」を評価項目とした。これは、高速道路に隣接する施設には、一般道や鉄道が併走する場合や、公共施設、人家が点在していることが多く、高速道路の災害がこれらの施設に危害を及ぼすことは社会的影響が大きいためである。また、高速道路の出入りはインターチェンジで制限されており、被災場所や災害規模により復旧時間などに影響を受けることを考慮して、「(4) 復旧の難易度」を加え、全 4 項目とした。

地震による被災を前提とした評価については、まず、地震時の災害発生確率の評価項目として「(1) 盛土材料」、「(2) 原地形の勾配」、「(3) 変状の有無」、「(4) 擁壁工の有無」の 4 項目を選定した。これは、地震被害や新潟県中越地震の分析で、図 2.24 に示すとおり傾斜地盤上の盛土で被災状況が大きくなることなどに基づいている。「(4) 擁壁工の有無」は、これまでの経験的から、地震時には盛土のり尻部に設置された擁壁の有無が被害の大きさを左右することがわかっており、評価項目として選定した。

また、地震時における被災の大きさに関する事象の評価項目には、降雨の場合と同様の観点から、「(1) 第三者被害の有無」、「(2) 復旧の難易度」の 2 項目を設定した。

表 3.1 から表 3.4 に、「被災し易い箇所」を洗い出すための評価項目と、その選定理由を一覧表で示す。

表 3.1 降雨による「災害発生確率による事象」を評価する項目

評価項目	理 由
(1)供用年数	供用後の経過年数により耐降雨性能は向上しているが、降雨状況によっては耐降雨性能が向上しているとは言えない。(図 2.13)
(2)盛土形状	片切・片盛部、腹付け盛土部、レベルバンクなどの盛土形状によっては災害の受け方が異なる。(図 2.15)
(3)盛土材料	材料の種類によっては、降雨などの外力に対する抵抗性に違いがある。(図 2.16、図 2.17)
(4)集水地形	盛土部背面の原地形が集水地形となっている箇所の災害事例が多い。(図 2.15)
(5)変状の有無	片切・片盛部、腹付け盛土部の境界部では、路面にクラックなどが発生し易いため、日常点検の点検結果を反映させる。

表 3.2 降雨による「被災規模に関する事象」を評価する項目

評価項目	理 由
(1)盛土高さ	盛土部の規模により、災害が発生した場合の災害規模が異なる。
(2)原地形の勾配	水による崩壊であるため、原地形勾配により、影響範囲が異なる。
(3)第三者被害の有無	盛土部が崩壊した場合、高速道路区域外への影響が必ず発生するため、近傍の土地利用を把握しておかなければならない。
(4)復旧の難易度	復旧の作業環境を把握することが、復旧時間の長短を左右する。

表 3.3 地震による「災害発生確率による事象」を評価する項目

評価項目	理 由
(1)盛土材料	材料の種類によって、地震外力に対する強度に変化がある。
(2)原地形の勾配	原地形の勾配の違いは、地震外力による変状に影響を与える。(図 2.24)
(3)変状の有無	片切・片盛部、腹付け盛土部の境界部では、路面にクラックなどが発生し易いため、日常点検の点検結果を反映させるため。
(4)擁壁工の有無	擁壁工は、高速道路に隣接した土地利用の関係から設置されているため、盛土の地震外力の崩壊により擁壁工に影響を与える。

表 3.4 地震による「被災規模に関する事象」を評価する項目

評価項目	理 由
(1)第三者被害の有無	盛土部が崩壊した場合、高速道路区域外への影響が必ず発生するため、近傍の土地利用を把握しておかなければならない。
(2)復旧の難易度	復旧の作業環境を把握することが、復旧時間の長短を左右する。

3.2 管理注目度の中央自動車道への適用

3.2.1 評価項目に対する点数付け

これまでに、盛土部における「被災し易い箇所」の抽出を行うための評価項目を設定した。次に、管理注目度として評価するための評価項目に配点する。配点にあたっては、高速道路が通過する地域の災害履歴や地形、地質、土地利用および隣接地などの特性を考慮した上で対象区間の盛土部について点数付けを行う。得られた点数は、管理注目度として危険度を評価する指標となる。

検討の対象は、中央自動車道の区間で上野原 IC～勝沼 IC 間約 40km とした。図 3.1 の高速道路網図に当該区間を示す。

3.2.2 中央自動車道 上野原～勝沼間の概要

(1) 路線概要

中央自動車道 上野原 IC～勝沼 IC 間は、山梨県の東部の首都圏から約 70km の大月市に位置する大月 JCT を挟んで、開通時期は二分される。上野原 IC ～大月 JCT 間約 20km は 1969 (昭和 44) 年 3 月に暫定二車線で開通し、その後 1973 (昭和 48) 年 12 月に完成四車線が開通した。大月 JCT～勝沼 IC 間約 20km は、1977 (昭和 52) 年 12 月に四車線が開通し、更に渋滞緩和のために 2003 (平成 15) 年に六車線化が完了し現在、日交通量が約 5～7 万台の重交通区間である。



図 3.1 関東・中部地区の高速道路網図と検討区間位置図

(2) 地形・地質概要

検討区間のうち、上野原IC～大月JCT間では、標高1,000m強の山脈の南側を桂川が東西に流れている。中央自動車道は、桂川の北側を川に沿って山腹を通過する。この狭い谷合部には、国道20号、JR中央本線が並走している。地質は、第三紀中新世の御坂層群に属する安山岩質凝灰岩、礫岩および各種火山岩類、粗粒玄武岩、輝緑岩、安山岩からなり、それを不整合でローム層や段丘堆積物が覆っている。また、建設工事記録では破砕帯を伴わない雁行した多くのズレが随所に存在していたとされるが、断層は確認されていない。

大月JCT～勝沼IC間では、笹子峠を分水嶺として大月市側で笹子川の北側の山麓部を中央自動車道は東西に通過する。勝沼側では、笛吹川の支流の日川が北西に流れており、その南側の山腹部を通過している。地質は、第三紀中新世の御坂層群もしくは富士川統の垂炭層、泥岩、安山岩、凝灰角礫岩が主体であり、その他に砂岩、頁岩、粘板岩からなる中生層白亜紀から新生代古三紀にいたる四万十統が分布している。地質構造的には、層理、節理が著しく、また、断層が多く確認され断層幅も30～100mと広い。岩質は粘土化している場所が多く、その付近は水が確認されていることから帯水層となっていると推測できる。図3.2に「山梨県防災地質図 20万分に1 西宮勝彦・木村真一 1991」に加筆を行った検討区間の地質平面図を示す。

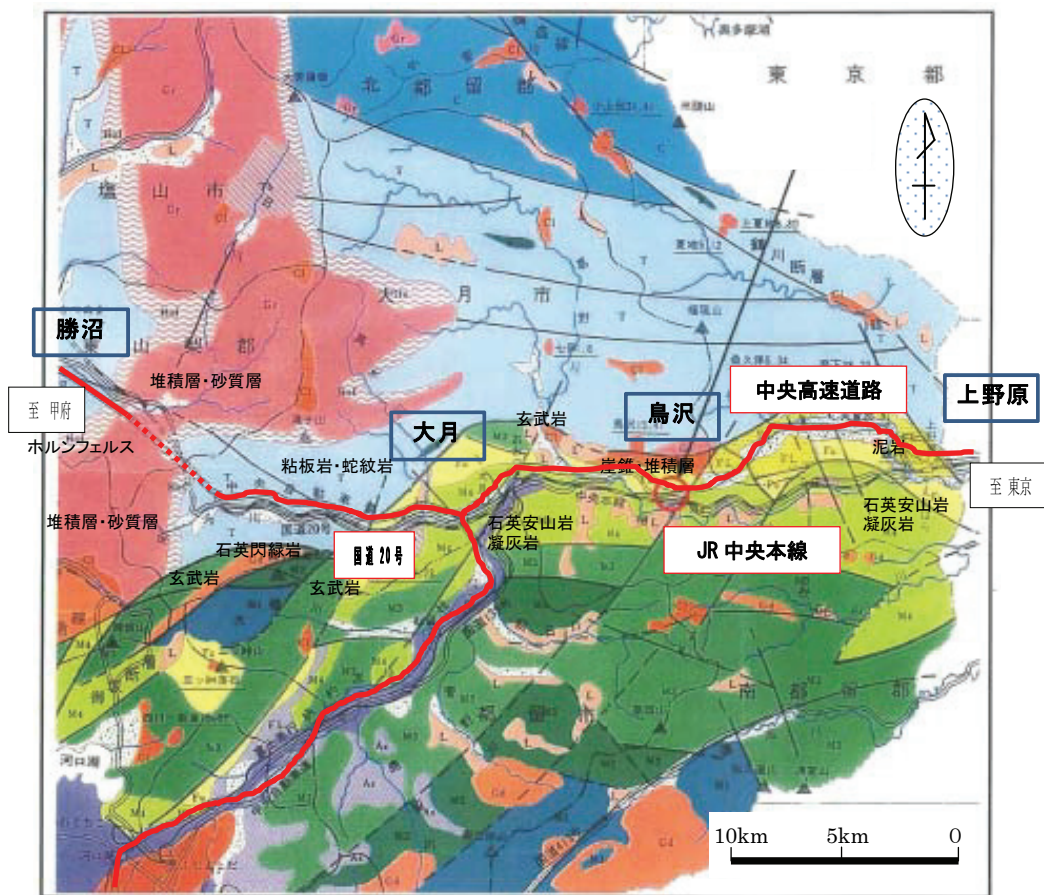


図 3.2 中央自動車道通過区域に分布する地質図

(3) 検討区間の災害履歴

検討区間の災害履歴の中で通行止めを伴う災害は、1969年の開通後から表 3.5 に示す 5 回あり、被災箇所は全て切土部の災害であった。1973（昭和 47）年 3 月に発生した岩殿地区の災害は、記録的な降雪を記録した年の雪解け時に発生し、それ以外の災害記録は豪雨により発生したものである。

検討区間の災害した事例（工事中災害も含む）について、1966（昭和 41）年～2003（平成 15）年までの切・盛土部の約 200 件の災害データについて、第 2 章で行った方法と同じ手法で整理を行い、災害規模で分類した。結果を図 3.3 に示す。図からは、盛土部、切土部ともに、図 2.4 で示す全国平均の災害規模割別の発生割合に比べ中規模から超大規模災害の割合が高くなっていることがわかる。検討区間は山麓部を通過することから、集計結果からも地形の影響から一旦災害が発生すると規模が大きくなることを示している。

表 3.5 上野原 IC～勝沼 IC 間の通行止めを伴う災害履歴

地区	年月日	規模および降雨状況等	工期	通行止
岩殿	1973(昭和 47)年 3 月	高さ約 80m、幅約 80m、深さ 15～20m 岩殿地区で積雪 60cm	約 6 ヶ月	約 3 ヶ月
鶴川	1982(昭和 57)年 8 月	幅約 60m、8 月 1 日から日降雨量 332mm 時間最大 71mm	約 6 ヶ月	
大野	1982(昭和 57)年 9 月	厚さ 10～15m の岩盤が 7m ずり落ち、9 月 10 日～12 日の連続雨量 362～339mm	約 4 ヶ月	5 日間
初狩	1983(昭和 58)年 7 月	幅 20m、長さ 25m、すべり土塊約 1,500m ³	約 5 ヶ月	
岩崎	1991(平成 3)年 10 月	すべり土量約 56,000m ³ 、7 個の台風遭遇 その間の連続雨量 1,000mm	約 1 年	約 4 日間

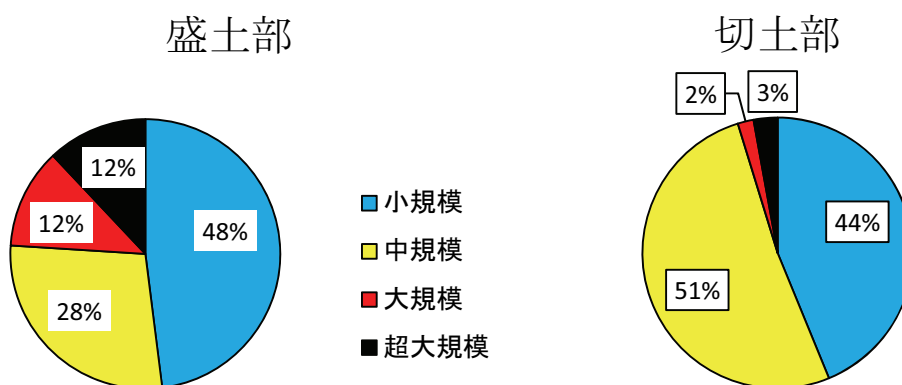


図 3.3 災害規模別発生割合

3.2.3 降雨による被災の評価項目に対する配点

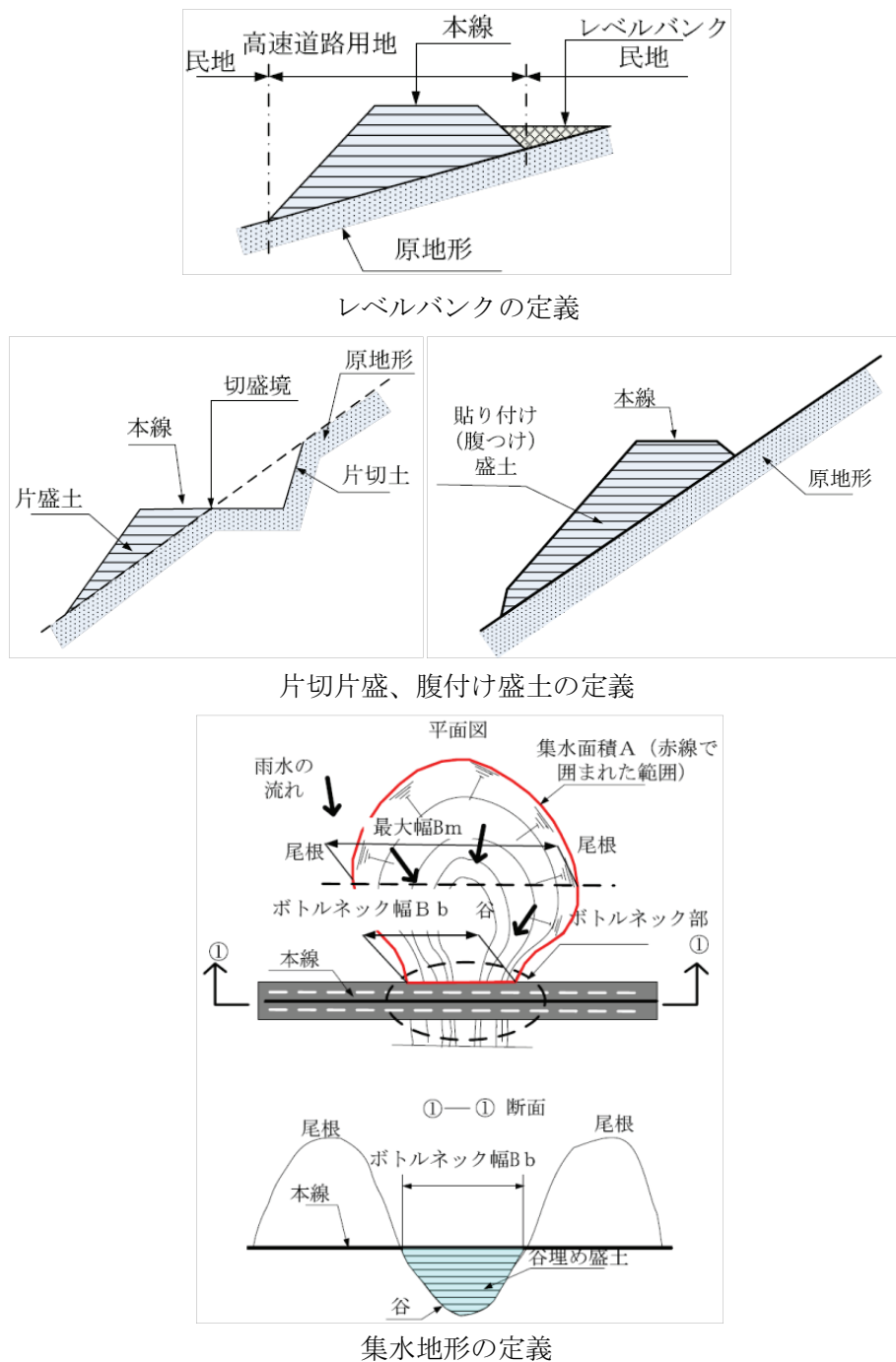
(1) 災害発生確率に対する配点

災害発生確率に対する配点は、点検状況や被災事例に基づき、配点を行う区分を定め、0点から5点までの6段階で配点を行った。表3.6に、災害発生確率を評価する区分と配点、並びにその理由を示す。なお、配点の6段階はこれ以降の評価項目に対して同様とした。

表 3.6 降雨による「災害発生確率による事象」の配点と理由

評価項目	区 分	配点	理 由
(1)供用年数	10年未満	3	安定した状態であり、降雨災害はのり面表面部の限定的な災害に留まっている。
	10年以上から 35年未満	5	盛土部に設置されている地下排水工などの排水設備が、目詰まりなどの排水機能の低下により盛土本体が不安定となる確率が高い。
	35年以上	1	維持管理により、排水機能の改善が図られ、盛土本体の著しい損傷は発生しない。
(2)盛土形状	レベルバンク	5	盛土後背地の排水機能が十分に管理されていない。
	片切片盛	4	切盛境界部は弱点と成り易い。
	腹付け盛土	3	排水機能不全により盛土と地山の境界部での変状が発生し易い。
(3)盛土材料	粘性土	5	水を含んだ場合抜け難い。
	砂質土	2	水は抜け易いが水に対する耐久性が劣る。
	礫質土	1	転圧されていれば、最も安定する。
	不明	3	安全を考慮した。
(4)集水地形 本線上流沢部の最 大幅(Bm)／本線横 過幅(Bb)	10以上	5	$500\text{m}/50\text{m}=10$ を上限とした。
	10未満4以上	3	$200\text{m}/50\text{m}=4$ を下限とした。
	4未満	1	$200\text{m}/50\text{m}$ 以下の場合。
	不明	3	明確にできない沢部は安全を考慮した。
(5)変状の有無	切盛境で変状 がある	5	境界部に変状を起こしている箇所は豪雨時に変状が拡大する可能性が大きい。
	その他の変状 がある	3	経過観察中の箇所は豪雨時に変状が拡大する。
	変状なし	0	

なお、図 2.13 に示した開通後の経過時間と災害発生件数の関係では、供用開始後 10 年以内は災害が多く発生し、その後発生件数は減少している。ただし、その後台風による被害も報告されていることから、(1)供用年数に関する配点では、10 年以上から 35 年未満の配点を大きくすることとした。また、表中の盛土形状、集水地形に関する定義を図 3.4 に示す。



(当該地区の地形上から $B=200\text{m}\sim 500\text{m}$ 、 $Bb=50\text{m}$ を対象とした)

図 3.4 盛土形状と集水地形の定義

(2) 被災規模に対する配点

被災規模に対する配点は、社会的影響の大きい第三者被害の有無を重要項目とした。検討区間の特徴として、狭隘な地形に国道 20 号、JR 中央線が並走していることや、公共施設、人家が点在しているため、中央自動車道の災害がこれらの施設に危害を及ぼすことが想定されるためである。また、検討区間では、地形的な条件から被災区間へ復旧のためのアプローチが困難となることも考えられることから、現地調査に基づき(4)復旧の難易度の配点を定めた。各項目の区分、配点とその理由を、表 3.7 に示す。

表 3.7 降雨による「被災規模に関する事象」の配点と理由

評価項目	区分	配点	理由
(1)盛土高さ	7 段以上	5	崩壊時の影響が大きい。
	4～6 段	3	崩壊時の影響が大きい。
	1～3 段	1	崩壊時小
(2)原地形の勾配	30° 以上	5	1.0:1.7 急勾配で影響を受け易い
	15° ～30°	3	1.0:1.7～1.0:4.0
	15° 以下	1	1.0:4.0
	不明	3	安全を加味して
(3)第三者被害の有無	有	5	東西の谷間に JR 中央本線、国道 20 号、学校などの公共施設、民家が点在し、中央自動車道はその近傍を東西に通過している。
	通行止めによる復旧必要	3	第三者への被害は無いが、災害復旧を行うのに通行止めが必要となる。
	通行止めによる復旧不必要	1	通行止めを必要としないが、交通規制を伴う復旧が必要となる。
(4)復旧の難易度	復旧が困難	5	被災箇所がインターや非常開口部より 1km 以上で一般道からの取り付かない箇所
	復旧がやや困難	3	被災箇所がインターや非常開口部より 500m 以上、1km 未満の箇所
	復旧が容易	1	被災箇所がインターや非常開口部より 500m 未満の箇所

3.2.4 地震による被災の評価項目に対する配点

(1) 災害発生確率に対する配点

災害発生確率に対する配点は、点検状況や被災事例に基づき、配点を行う区分を定めた。区分、配点とその理由を表 3.8 に示す。特に変状の有無に関する配点では、片切片盛は経験上変状を起こしやすく、変状の履歴のある個所では地震時の災害発生確率が高くなると判断した。また、擁壁が存在する場合には、擁壁自体が地震の影響を受けやすいことに加え、擁壁の転倒が発生した場合には、背後の盛土や周辺区域に及ぼす影響が大きいことを考慮した。

表 3.8 地震による「災害発生確率による事象」の配点と理由

評価項目	区 分	配点	理 由
(1)盛土材料	砂質土	5	地震時には変形量が大きい。
	礫質土	4	砂質土と同様に変形量が大きい。
	粘性土	3	地震時には変形量が小さい。
(2)原地形の勾配	30° 以上	5	1.0:1.7 急勾配で影響を受け易い。
	15° ~30°	3	1.0:1.7~1.0:4.0
	15° 以下	1	1.0:4.0
	不明	3	安全を考慮した。
(3)変状の有無	片切・片盛部で 変状履歴あり	5	地震時では切盛境界部に 変状を起こし易いと判断できる。
	その他の変状 あり	3	盛土のり面部に何らかの変状があり、経過観察を行っている箇所は地震外力により何らかの影響を受ける
	変状なし	0	
(4)擁壁の有無	支え・控え壁式 擁壁	5	擁壁高さ8m以上。転倒で盛土部への影響が甚大である
	もたれ・片持ち 梁式擁壁	3	擁壁高さ3m以上。転倒で盛土部への影響が大きい
	高さ3m未満の 擁壁	1	転倒で盛土部への影響は小さい。
	擁壁無し	0	

(2) 被災規模に対する配点

被災規模に対する配点では、検討区間の中央自動車道は、国道 20 号、JR 中央と並走していることや、公共施設、人家が点在しており、災害が発生した場合の第三者と社会的影響が大きいことを考慮した。また、狭隘な地形を通過しているため、場所によっては災害箇所へのアプローチが困難となることも念頭に置き、区分と配点を定めた。

表 3.9 地震による「被災規模に関する事象」の配点と理由

評価項目	区分	配点	理由
(1) 第三者被害の有無	有	5	東西の谷間に JR 中央本線、国道 20 号、学校などの公共施設、民家が点在し、中央自動車道はその近傍を東西に通過している。
	無	0	盛土部が被災しても第三者に影響がない。
(2) 復旧の難易度	復旧が困難	5	被災箇所がインターや非常開口部より 1km 以上で一般道からの取り付かない箇所
	復旧がやや困難	3	被災箇所がインターや非常開口部より 500m 以上、1km 未満の箇所
	復旧が容易	1	被災箇所がインターや非常開口部より 500m 未満の箇所

3.2.5 重み付けのための係数

ここで言う重み付け係数（ β ）とは、通過地域の高速道路の災害履歴や点検結果、および高速道路の沿線状況などの特性を、危険度の評価に反映する目的で設定するものである。これまでの災害履歴や点検をとおして蓄積されている情報の特性に基づき、検討区間に対して設定した重み付け係数（ β ）の一覧を表 3.10 示す。この重み付け係数が乗じられることで、管理注目度はより地域の特性を反映した値になるものとした。最終的に、検討区間の管理注目度は（3-1）式で求められる。

$$\text{管理注目度} = \Sigma (\text{各項目の配点} \times \text{重み付け係数} \beta) \quad \dots \dots (3-1)$$

表 3.10 検討区間に用いた重み付け係数の一覧表

	評価項目	重み付け係数（ β ）	適用理由
降 雨	(1) 供用年数	1	
	(2) 盛土形状	4	図 2.15 より被災要因として影響大
	(3) 盛土材料	1	
	(4) 集水地形	3	図 2.15 より被災要因として影響大
	(5) 変状の有無	3	被災要因として影響大
	(1)' 盛土高さ	1	
	(2)' 原地形の勾配	2	高速道路区域外への影響大
	(3)' 第三者被害の有無	4	区域外の影響大
	(4)' 復旧の難易度	1	
地 震	(1) 盛土材料	4	被災要因として影響大
	(2) 原地形の勾配	4	図 2.24 より被災要因として影響大
	(3) 変状の有無	3	被災要因として影響大
	(4) 擁壁の有無	1	
	(1)' 第三者被害の有無	5	地震災害を考慮
	(2)' 復旧の難易度	3	通行可能時間として影響大

3.3 中央自動車道 上野原～勝沼間の管理注目度

3.3.1 航空レーザ計測の実施

管理注目度を求めるためには、原地形の勾配や集水地形、あるいは土地利用状況などを判断するための詳細な地形図が必要となる。そこで近年、各種防災に活用されている航空レーザ計測を実施²²⁾することでDEM（数値標高モデル）を作成し、これを用いて地形情報や土地利用状況などを読み取ることとした。

航空レーザ計測は図 3.5 に示す区間で実施し、範囲は高速道路北側の稜線から南側の河川の範囲とした。計測範囲の高度変化が約 1,000m とあるため、回転翼プラットフォーム（ヘリコプター）による計測とした。計測時期は、広葉樹や植生が繁茂する直前の 4 月初旬とした。また、詳細な地形の再現を目標として、計測密度は 1m² に 4 点程度を目標とした。計測の仕様を、表 3.11 に示す。

表 3.11 航空レーザ計測の仕様

項目	仕様
計測日	2009 年 4 月初旬
使用機器	ALMAPS-G4
プラットフォーム	回転翼
平均計測密度	3.8 点/m ²
数値標高モデル	Kriging 法
精度	水平：0.3m 垂直：0.15m



図 3.5 航空レーザ計測区間の位置図

航空レーザ計測により得られた点群データから、樹木などの除去処理を行った上で 1m グリッドの DEM を作成した。得られた地形図を図 3.6 に、また一部拡大したものを図 3.7 に示す。図では、地形と光線との角度をもとに照度処理を行い、起伏がわかりやすいように処理を行った。なお、赤から青のグラデーションは、標高の高い箇所を赤で、低くなるにしたがって青くなるように彩色している。図 3.7 の拡大図からは、高速道路、溪流、平野部、土地利用状況などを読み取ることができる。

図3.8は、図3.7に示す○印No.①の箇所をさらに拡大して表示したものである。高速道路沿線の地形情報が、明瞭に判読できることがわかる。図3.9は、DEMを使って正射投影に変換した航空写真を地形図に貼付したものを、図3.7に示す○印No.②の箇所のものである。図からは、高速道路沿線の土地利用や建物などを判読することができる。

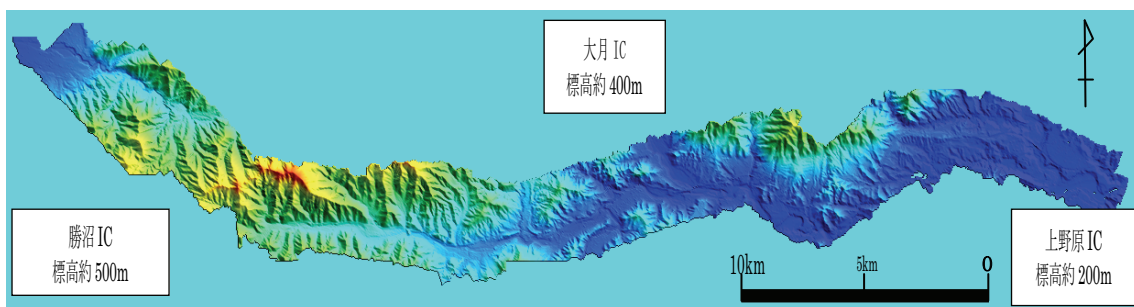


図 3.6 計測範囲の DEM に照度処理を行った地形図

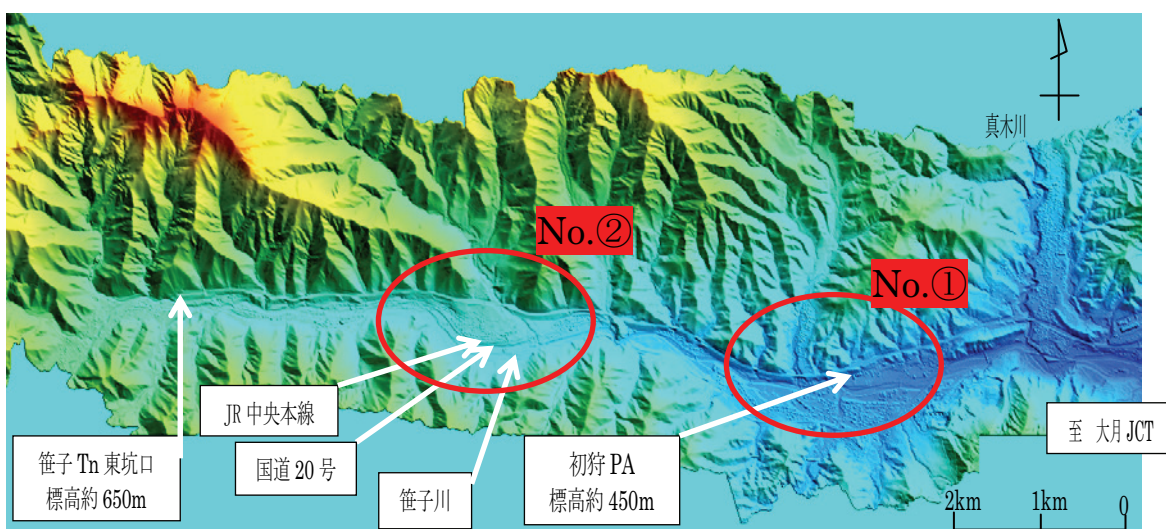
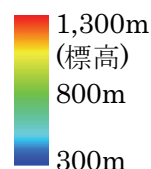


図 3.7 DEM の拡大図面 (概ね大月 JCT～笹子トンネル間)

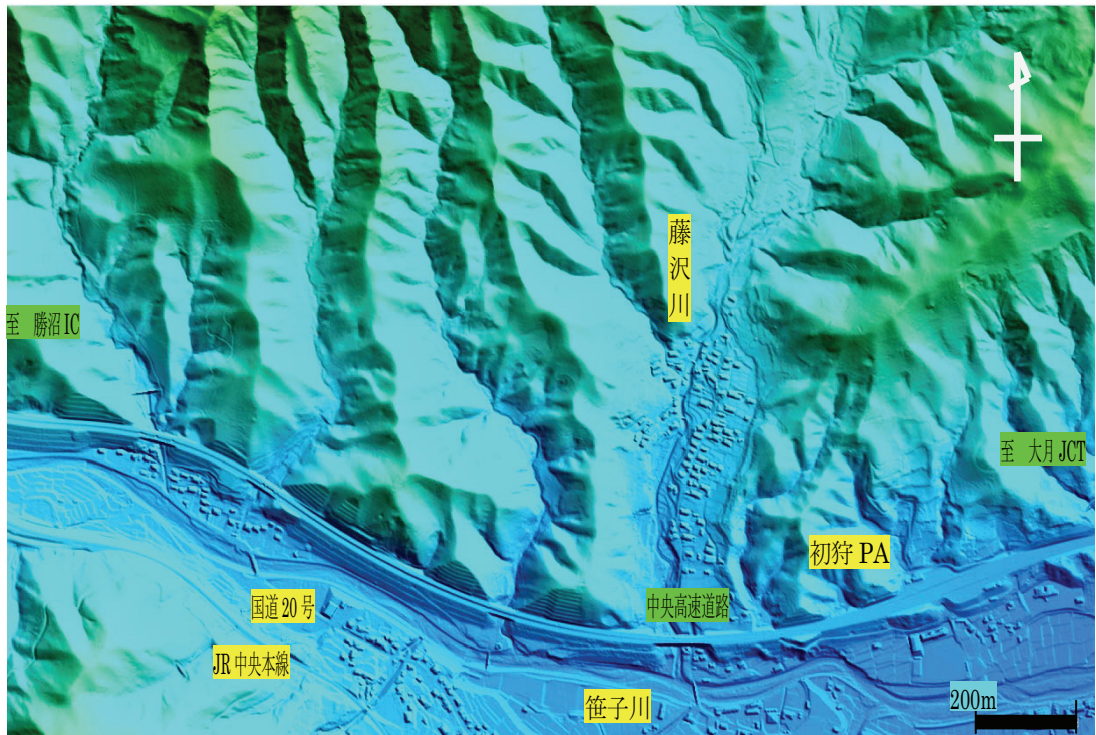


図 3.8 地形状況 (No.①の拡大)

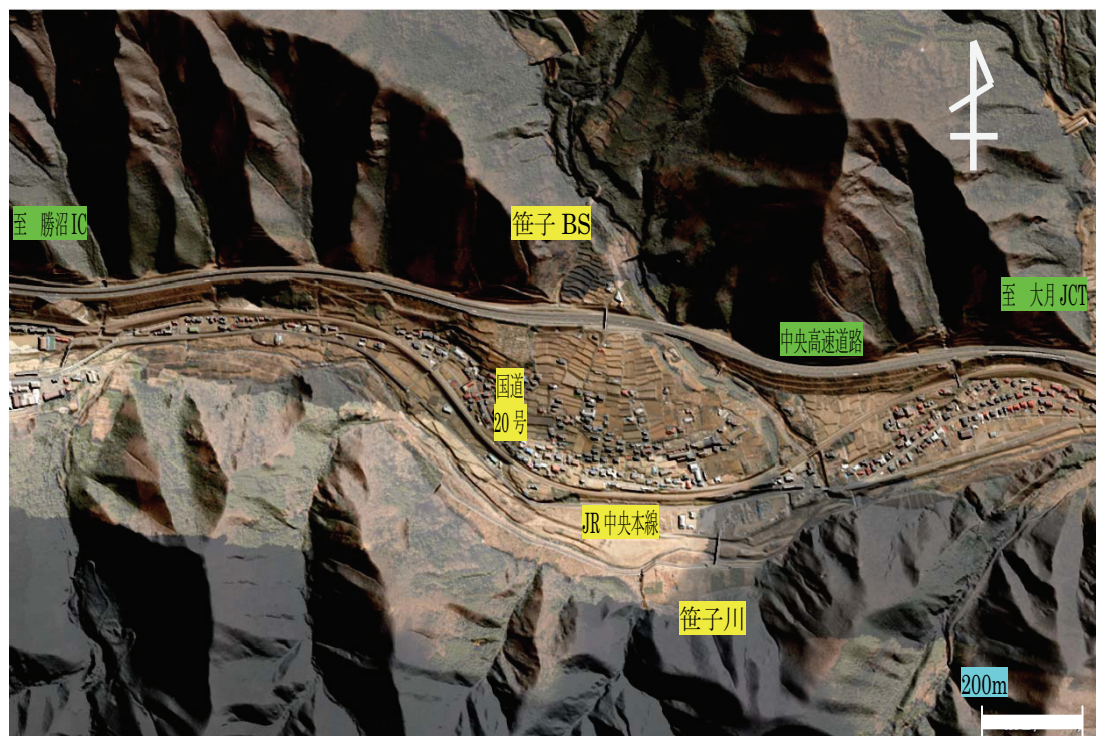


図 3.9 オルソフォト画像による隣接する土地利用状況 (No.②の拡大)

3.3.2 盛土部における管理注目度の評価結果

新たに提案した管理注目度の手法により、中央自動車道 上野原 IC～勝沼 IC 間約 40km を対象に、道路管理されている盛土 181 箇所管理注目度の点数付けを行った。点数付けの結果得られた、降雨による被災を前提とした管理注目度の分布を図 3.10 に示す。なお、横軸は上野原 IC から勝沼 IC に向かって番号を振った盛土番号である。No.165～No.181 は勝沼 IC のランプでの盛土部である。それ以外の番号は本線の盛土部を表す。

図 3.10 の上段は照度処理を行った平面図であり、赤線で中央自動車道の路線を示し、主要な施設を併記した。また、対応する管理注目度の分布図には、特徴的な区間（○印）について点数の違いが生ずる要因を併記した。

管理注目度の分布を見ると、勝沼 IC（盛土番号 No.165～No.181）や大月 JCT、IC（盛土番号 No.72～No.79）では低い点数となっている。これは、当該区間が平坦地形であり、かつ周辺には被災しても影響を与える施設がないことに起因している。また、同じような点数の区間であっても、被災を受け易い項目が異なることがわかる。このことは、管理注目度に基づいて被災を受け易い箇所を抽出した後に、何の危険度に対する防災計画を策定すべきかを検討するにあたり、管理注目度で示す項目が重要な情報を提供するものであることを示すものである。なお、図 3.10 で○印で示した箇所の区間①、②、③、④を抜き出し、管理注目度の分図を示したものが図 3.11 である。「被災し易い箇所」とされている原因が、それぞれ異なることがわかる。

図 3.12 には、上段に降雨と下段に地震による被災を前提とした管理注目度の分布を示す。

巨大地震時には、交通機能の早期回復が何より重要である。このことに影響を及ぼす第三者被害と復旧の難易度について降雨時の重み付けよりも重く評価した（表 3.10 参照）。地震による被災を前提とした管理注目度の分布は、上段に併記した降雨の管理注目度の分布状況と類似する結果となった。

これまで述べたとおり、自然災害事例の分析により得られた知見をもとにして、被災の受け易さに関する「評価項目」を選定し、これに第三者への影響度合いや復旧の難易度など、上野原 IC～勝沼 IC 間の状況を総合的に勘案して採点した。この作業によって当該区間の管理注目度の分布が得られ、管理注目度の高い場所として被災を受け易い箇所の抽出が可能となった。

なお、この評価結果は、これまでの災害現場や道路管理の経験からしても妥当な評価が得られる手法であると考えられる。

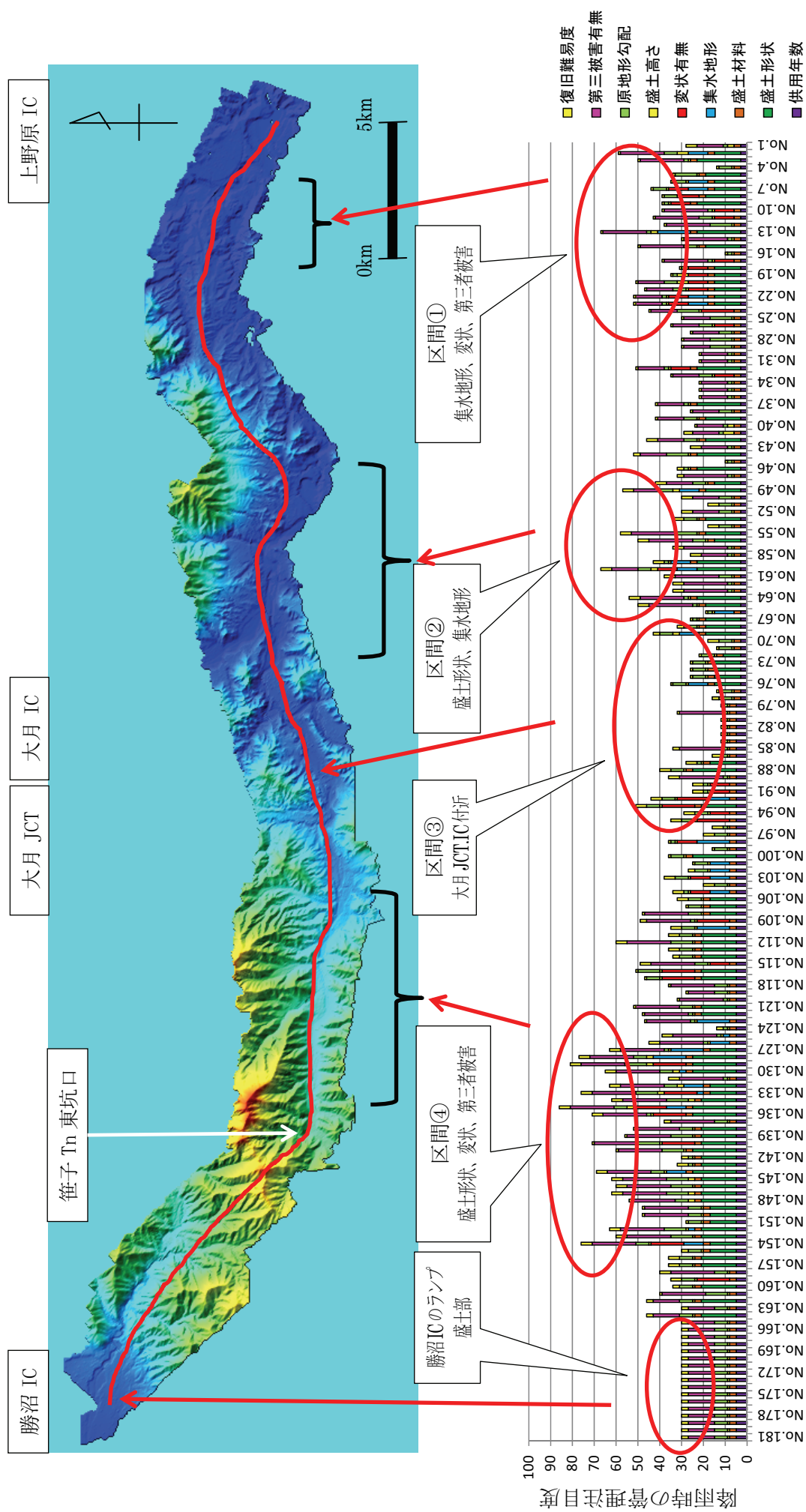
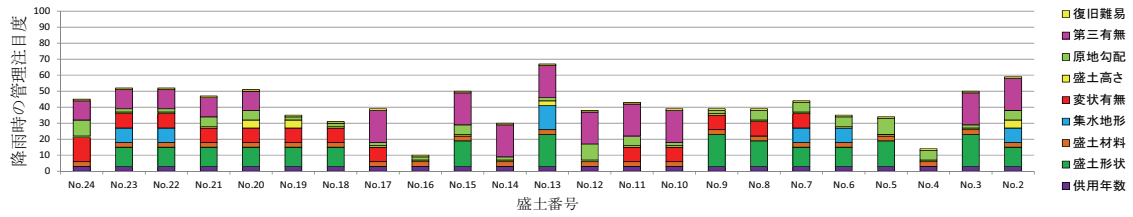


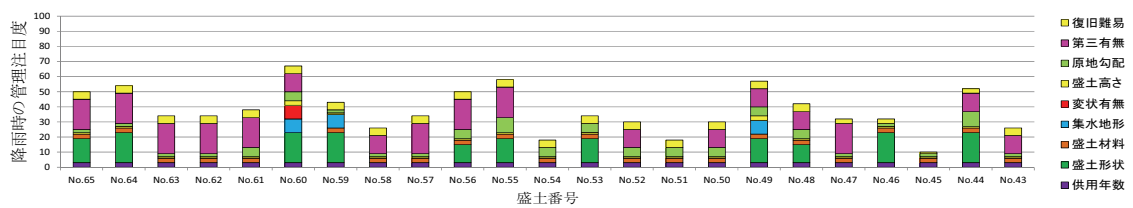
図 3.10 降雨による被災を前提とした管理注目度の分布

(1) 区間①の拡大



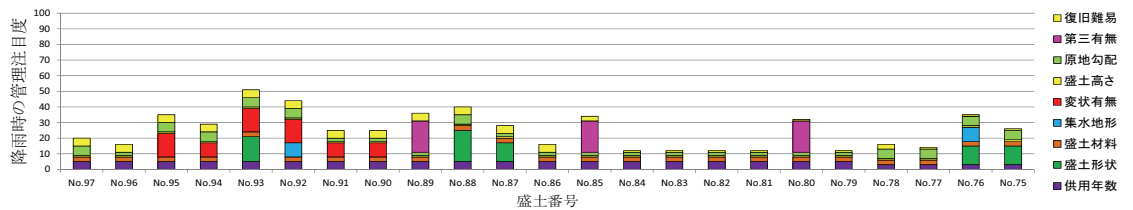
区間①は、盛土形状、変状有無および第三者被害の有無の組合せによるものと、集水地形の評価項目が影響していることがわかる。

(2) 区間②の拡大



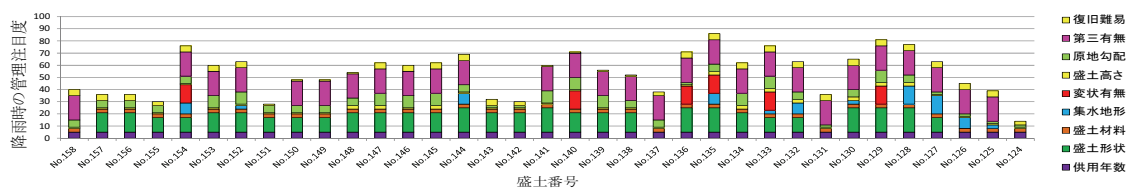
区間②は、第三者被害の評価が全体を占め、それに加えて盛土形状や集水地形の評価項目が影響していることがわかる。

(3) 区間③の拡大



区間③は、変状有無と第三者被害の評価項目が主であるが、検討区間の中で一番低い点数を示す区間である。

(4) 区間④の拡大



区間④は、管理注目度の点数が一番高い箇所が集中している区間である。点数は、盛土形状、第三者被害の評価が大部分を占め、それに加え集水地形と変状有無が影響している。

図 3.11 降雨による被災を前提とした管理注目度分布 区間①～④の拡大図

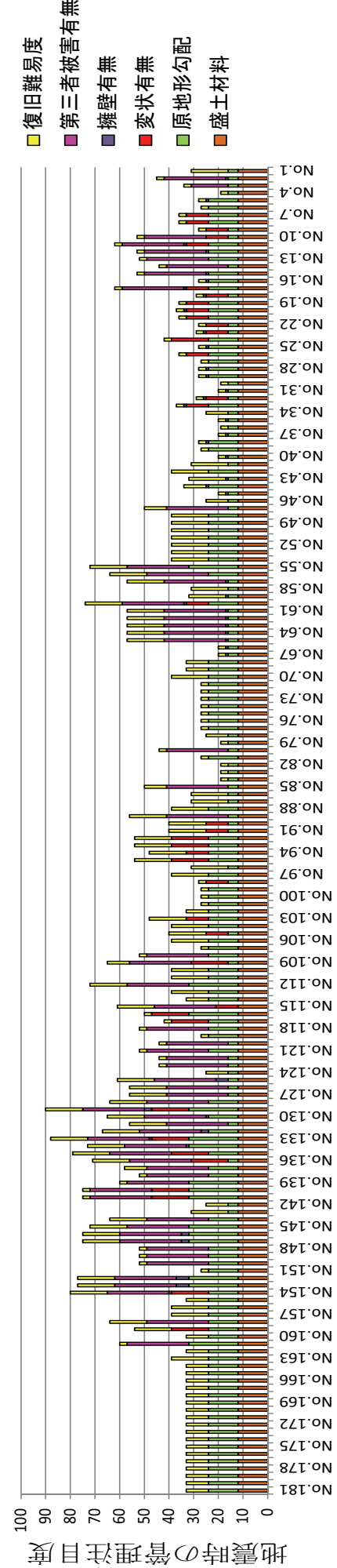
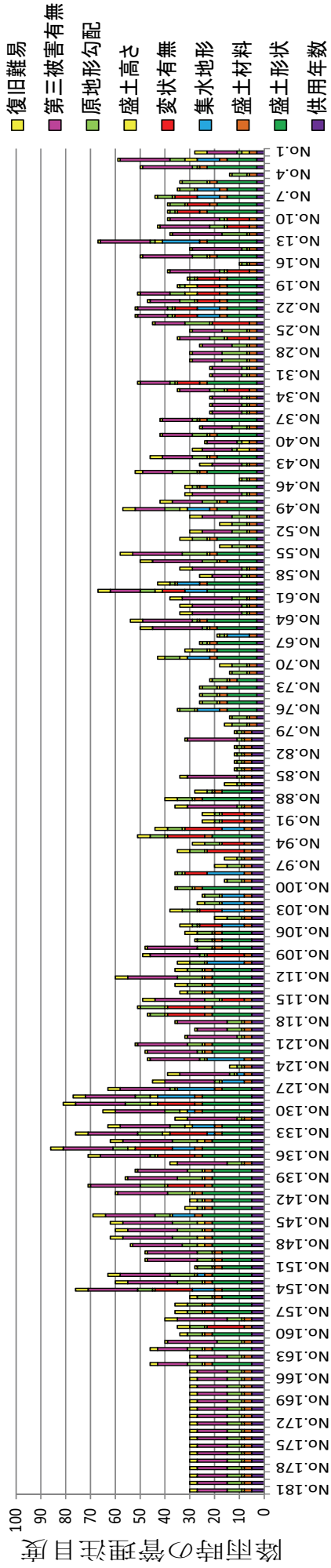


図 3.12 地震による被災を前提とした管理注目度の分布（上段は降雨時）

第 4 章 数値解析による力学的観点からの管理注目度の検証

4.1 力学的観点からの管理注目度の検証

4.1.1 検証の目的

本研究は、線状構造物上に点在する盛土部について、交通ネットワークの早期復旧に支障となる箇所を効果的に抽出する手法の開発を目的としている。これまで、過去の高速道路における災害事例を分析することで、「被災し易い箇所」を抽出のための評価項目を選定してきた。次に、設定された評価項目に、中央自動車道 上野原 IC～勝沼 IC 間約 40km を対象に当該区間の災害履歴や土地地用状況などを考慮して配点を定めた。これを用いて、当該区間にある盛土 181 箇所を対象に点数付けを行うことで、当該区間の管理注目度の分布が得られ、管理注目度の分布状況により「被災し易い箇所」の抽出が可能となった。

管理注目度で表される値は、自然災害の分析や災害現場の調査結果、あるいは実務者の経験に基づき得られた定性的な指標である。そこで、管理注目度が盛土の力学的安定性の視点からも同様の評価となるかを検証することとした。

具体的には、管理注目度の値が高い箇所や代表的な盛土形状を考慮して選定し管理注目度の点数と力学安定解析結果の相関性を調べた。盛土の静的安定性に関しては、円弧すべり計算で得られる安全率と管理注目度の関係に注目した。また、盛土の動的安定性に関しては、地震応答解析で得られる最大水平加速度と管理注目度の関係を調べた。

4.1.2 数値解析に用いる断面の選定

数値解析に用いる盛土部の選定は、点数が比較的高い箇所を中心に、図 3.4 に示す数種類の盛土形状が概ね同数になるよう配慮して選定を行った。

表 4.1 に、選定した盛土部の道路管理用盛土番号、位置、降雨時と地震時の管理注目度並びに盛土形状の一覧表を示す。

表 4.1 数値解析を行う盛土部の一覧表

解析断面 番号	道路管理用 盛土番号	断面位置 (kp) ※	管理注目度		盛土形状
			降雨時	地震時	
1	1100-013	56.15	67	52	傾斜地盤上の盛土
2	1100-049	58.43	57	39	腹付け盛土
3	1100-055-a	61.55	58	72	片切片盛
4	1100-055-b	61.62	71	56	盛土
5	1100-056	61.91	50	64	腹付け盛土
6	1100-060	63.23	67	74	腹付け盛土
7	0042	73.62	39	61	盛土 + 擁壁
8	0043	73.82	45	56	傾斜地盤上の盛土
9	0045-1	74.54	77	64	傾斜地盤上の盛土
10	0046-a	74.79	65	65	傾斜地盤上の盛土
11	0046-b	74.88	36	56	傾斜地盤上の盛土
12	0047	75.24	63	67	盛土 + 擁壁
13	0048-a	75.64	76	88	傾斜地盤上の盛土
14	0048-b	75.72	73	88	腹付け盛土
15	0048-c	75.87	77	88	腹付け盛土
16	0049	76.26	62	73	腹付け盛土
17	0050-a	76.55	86	80	腹付け盛土
18	0050-b	76.73	71	71	傾斜地盤上の盛土
19	0055-1	77.51	71	75	片切片盛
20	0055-2-a	77.65	60	75	片切片盛
21	0055-2-b	77.83	47	59	盛土
22	0058	78.63	69	64	傾斜地盤上の盛土
23	0059	78.71	62	72	片切片盛
24	0060	79.10	60	75	片切片盛
25	0061	79.48	62	75	片切片盛
26	0065-a	80.67	63	77	腹付け盛土
27	0065-b	80.69	66	77	片切片盛
28	0066	81.10	76	80	腹付け盛土
29	0032	88.91	49	61	盛土

※ kp (キロポスト) とは高速道路の基点からの距離を表し、単位は km

4.1.3 検討断面の作成

(1) 横断面の作成

地震応答解析に用いる断面では、盛土部を含めた約 500m の範囲の地形図が必要となる。道路管理用図面には、約 200m の幅の地形平面図と盛土のり尻から 20m 範囲の地形図しかないため、管理注目度の配点を行う際に活用した DEM（数値標高モデル）を活用し、効率的に解析断面の作成を行った。

その作業内容の一部を紹介する。図 4.1 の上段には、DEM の平面図に標高を高い方から赤から青のグラデーションで彩色した上で、検討対象となる断面として A-A'線を示した。下段は、上段の平面図と対象断面を立体的に表示した例である。

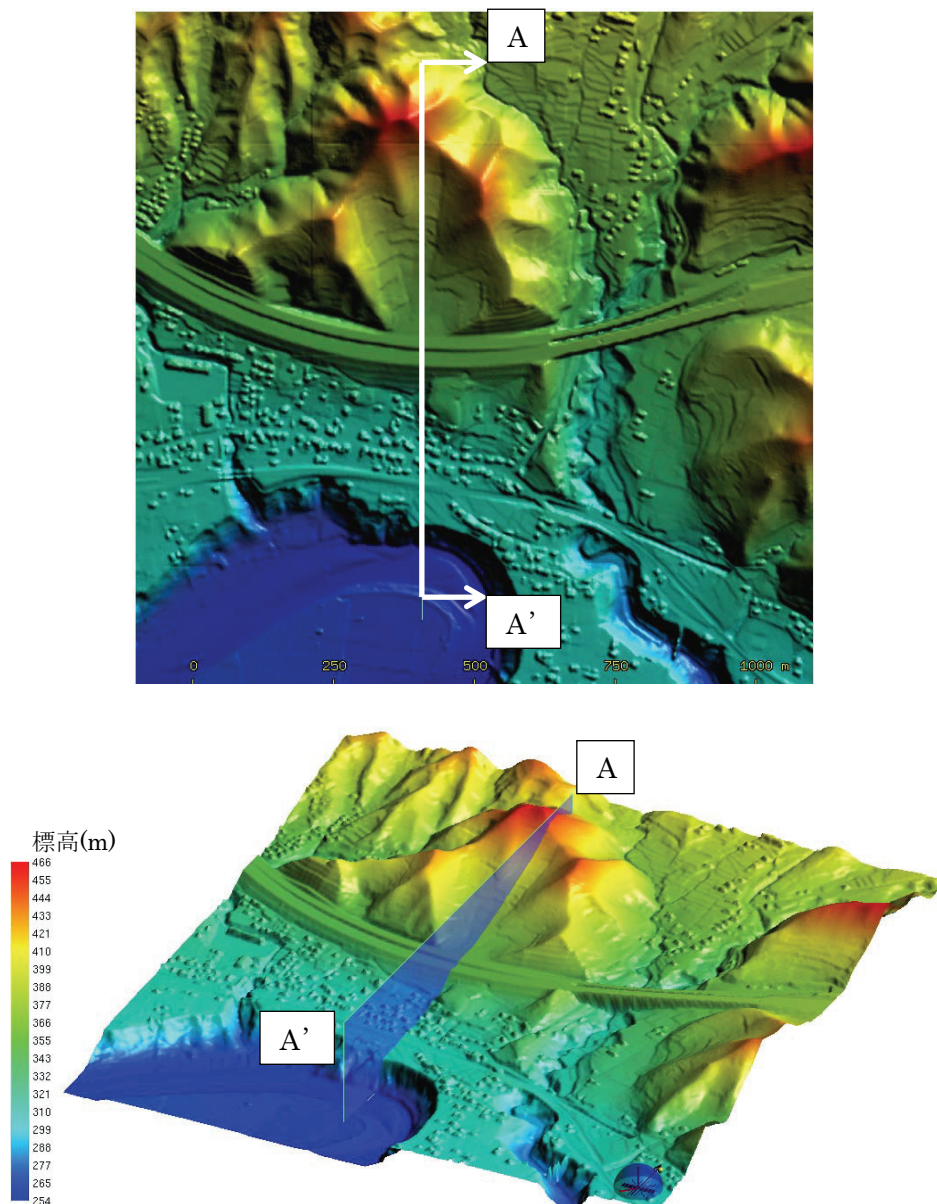
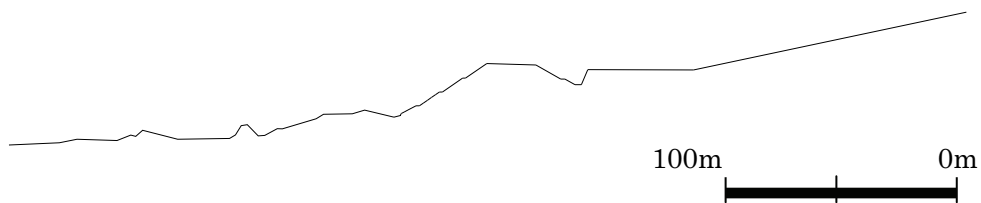


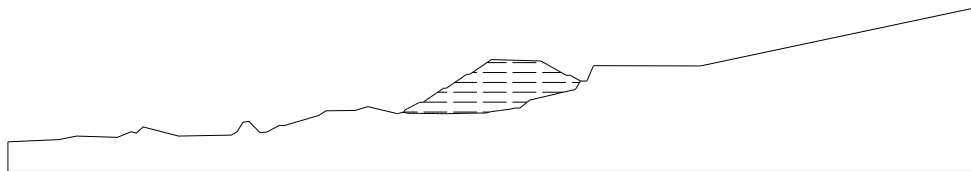
図 4.1 DEM からの解析断面の切り出し

(2) 解析モデルの作成

図 4.1 より切り出された断面を CAD（コンピューターを用いた製図システム：Computer Assisted Drafting）に読み込み、解析対象断面の横断図を作成した。ただし、DEM は地表面だけのデータであるため、道路管理用図面を基に盛土形状を CAD に合成することで静的安定解析と動的安定解析に用いる断面を作成した。図 4.2 に断面作成の流れを示す。同図の上段は DEM の切り出しにより求めた地形表面の横断図を示し、中段は管理用図面から盛土箇所を地山線を追加した横断図で、動的安定解析に用いる断面である。また、下段は全体の横断図から静的安定解析に用いる断面を切り出した図の一例である。

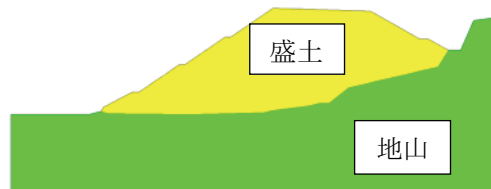


DEM の切り出しにより求めた地形表面の横断図の例



*横線部が盛土部

管理断面図の地山線を追加した横断図（解析モデル）



解析モデルから一部切り取り作成した静的安定解析に用いる解析モデルの例

図 4.2 数値解析に用いる断面作成の流れ図

(3) 解析モデル

表 4.1 に示した解析に用いる断面の中から、「傾斜地盤上の盛土」「片切片盛」および「腹付け盛土」の代表的な平面図と解析断面の位置を示したものが図 4.3 である。また、図 4.4 には、図 4.3 のそれぞれに対応する静的安定解析に用いる解析断面図、図 4.5 には同じく対応する動的安定解析に用いる解析断面図を示す。

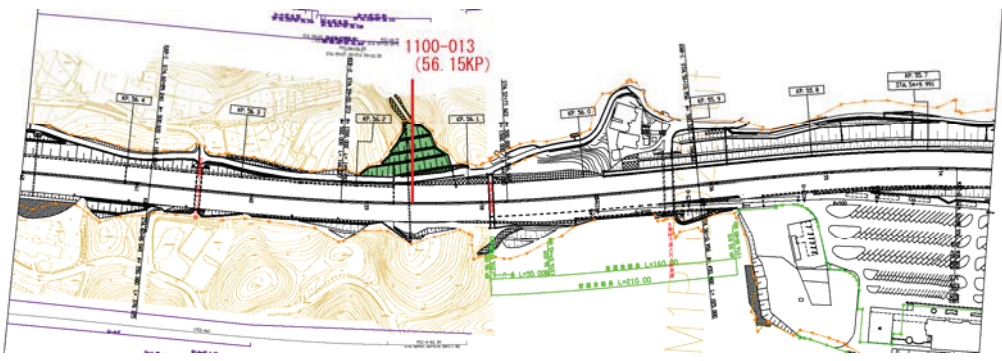
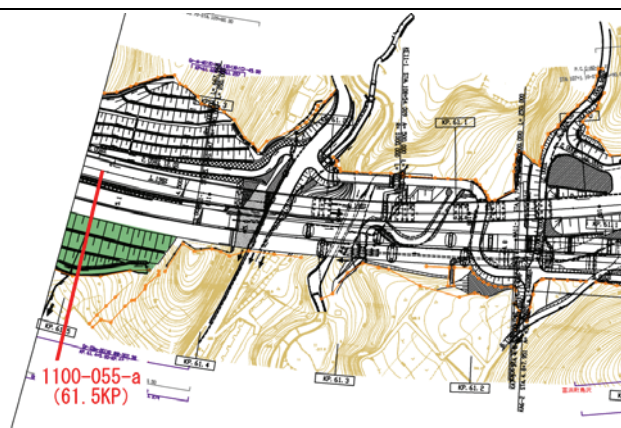

傾斜地盤上の盛土	<p style="text-align: center;">解析断面番号 1 (盛土番号 1100-013) kp56.15</p> 
片切片盛	<p style="text-align: center;">解析断面番号 3 (盛土番号 1100-055-a) kp61.55</p> 
腹付け盛土	<p style="text-align: center;">解析断面番号 16 (盛土番号 0049) kp76.26</p> 

図 4.3 管理用平面図と解析対象断面の設定例

単位：m

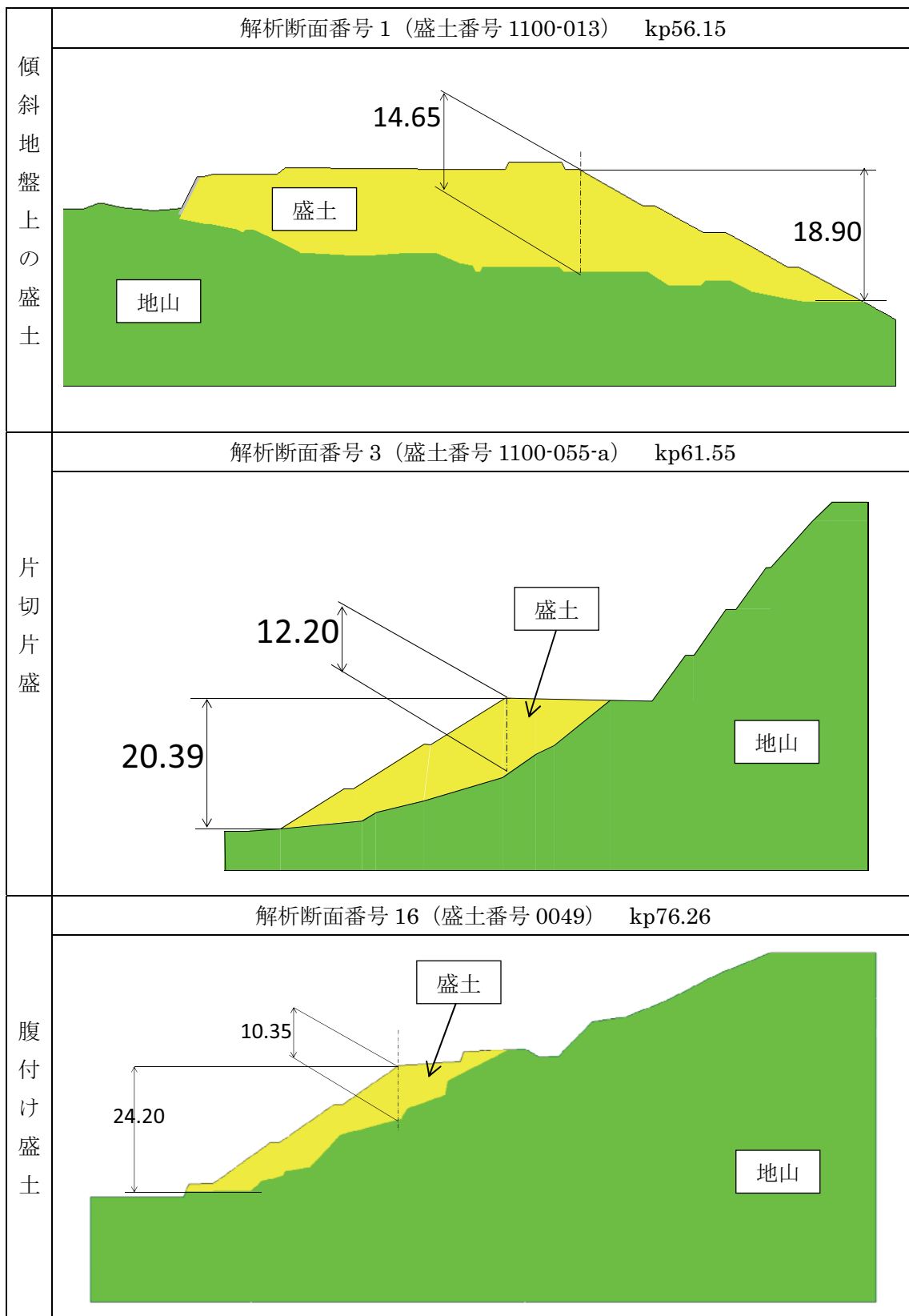


図 4.4 静的安定解析に用いる解析断面

単位：m

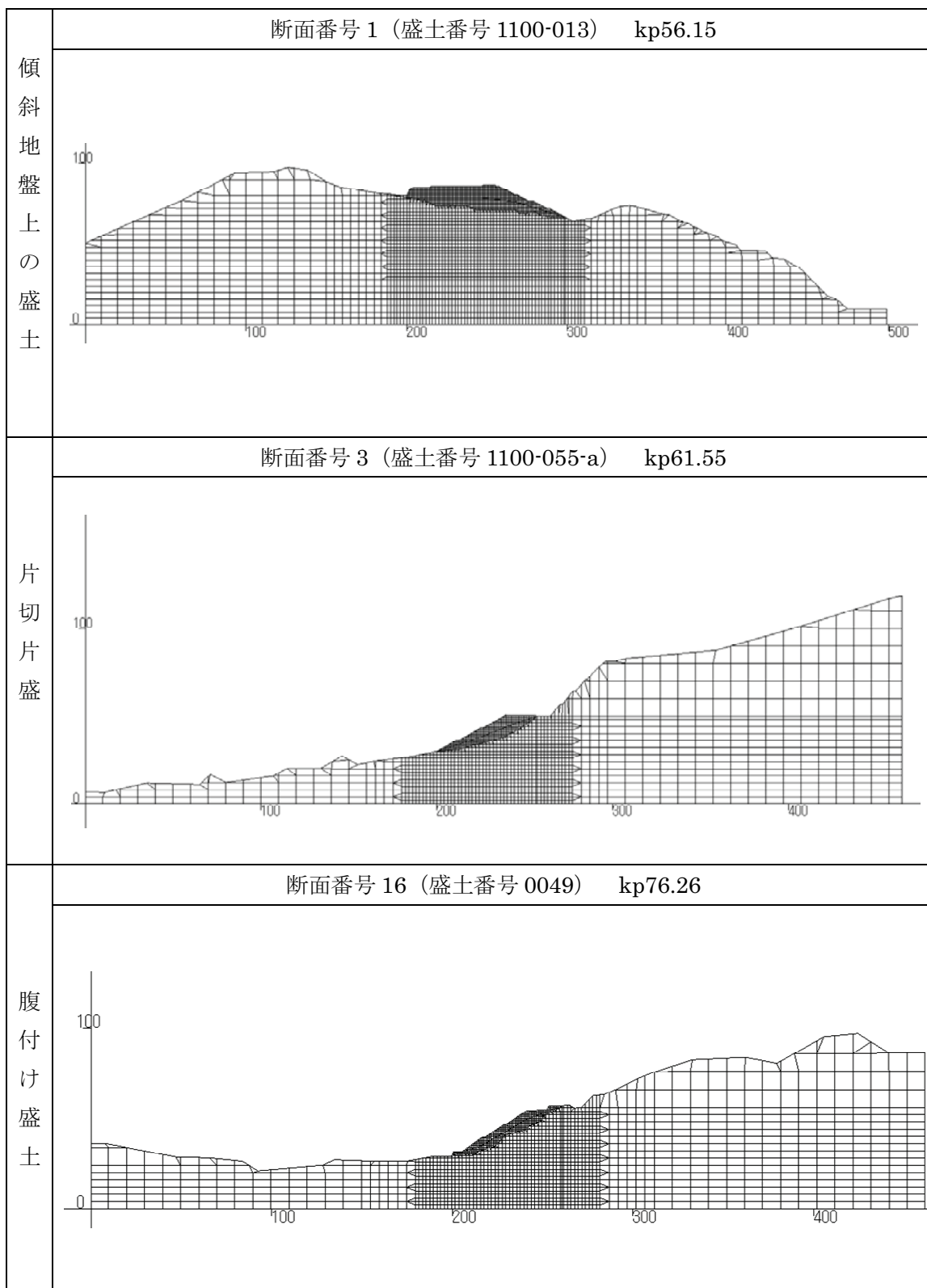


図 4.5 動的安定解析に用いる横断面図の例

4.2 静的安定解析

4.2.1 静的安定解析の目的

盛土部の静的安定解析の目的は、降雨時の盛土の安定性と管理注目度として求められた点数に相関関係があることを検証することである。盛土の静的安定性は、円弧すべり計算で求める安全率で代表することとした。また、降雨時は盛土内部の水位上昇が安定性に影響を及ぼすことから、地下水流や水位の設定が可能な円弧すべり計算手法を用いた。

4.2.2 円弧すべりの計算手法

円弧すべり計算においては、間隙水圧の効果が考慮されている修正フェレニウス法(式 4-1)によりすべり安全率を求めた。

$$F_s = \frac{\sum\{C' l + (W' \cos \alpha - u f l) \tan \varphi'\}}{\sum\{W \sin \alpha\}} \quad \dots \quad (4-1)$$

ここに、

F_s : 安全率

C' : 粘着力 (kN/m²)

φ' : せん断抵抗角 (°)

l : 分割片の底辺の長さ (m)

W' : 単位長あたりの分割片の全重量 (kN/m)

W : 単位長あたりの分割片の有効重量 (kN/m)

α : 分割片底面が水平面となす角 (°)

$u f$: スライス底面に生ずる間隙水圧 (kN/m²)

なお、間隙水圧 $u f$ はすべり面と水位の高さの差より求めた。

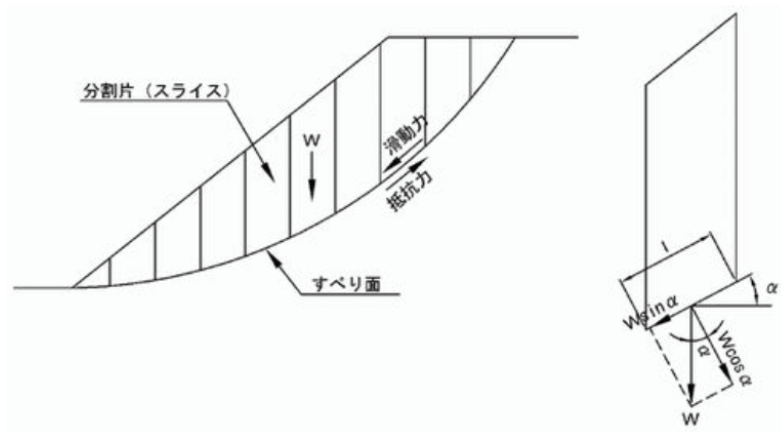


図 4.6 すべり土塊の分割とスライスに働く力

4.2.3 土質定数の設定

円弧すべり計算に用いる土質定数（粘着力（ c ）、せん断抵抗角（ ϕ ）、単位体積重量（ γ ））を定めるにあたっては、高速道路の盛土材料は通過ルート of 切土やトンネルなどで発生する掘削土を利用している。このため、検討区間に分布する地質を調べた（表 4.2）。これに基づき、設計要領などの既往の文献資料を参考にして、盛土の土質定数を表 4.3 に示す値とした。

用いた値は、検討区間には粘土質礫や砂混じりロームが分布する地区であるためそれぞれの一般的な値である。

表 4.2 検討区間に分布する地質

区 間	Kp	地層名	地質	盛土材料（土質評価）
上野原 IC～談合坂 PA	50.0～58.0	愛川層群	石英安山岩、 凝灰岩	粘土質礫
談合坂 PA～大月 JCT	58.0～72.0	秩父累帯	玄武岩、 安山岩	礫混じりローム
大月 JCT～勝沼 IC	72.0～90.0	相模湖層群	粘板岩、 ホルンフェルス	礫混じりローム

表 4.3 円弧すべり計算に用いる土質定数一覧表

	単位体積重量（ γ ） (kN/m ³)	粘着力（ c ） (kN/m ²)	せん断抵抗角（ ϕ ） (°)	備 考
盛土部	18	25	15	
地 山	23	50,000	45	すべり線が内部を通らない
擁壁部	23	50,000	45	すべり線が内部を通らない

4.2.4 盛土内水位の設定

高速道路の傾斜地盤上の盛土部は、図 4.7 に示す構造にすることで地下水などが浸透しないよう配慮されている。また、浸透しても速やかに排水できることで、安定性を確保する構造物となっている。しかし、これらの排水機能に不具合が発生したり排水能力以上の浸透水が盛土内に作用した場合、盛土内部には地下水による水位が形成されることが想定される。これを表現するために、円弧すべり計算に用いる地下水位は、盛土の上流側と下流側ののり尻を通り、谷側路肩部の盛土厚さの中間部を通る位置と仮定した。なお、この状態を「中位状態」と呼ぶことにする。図 4.8 に水位の設定を図化したものを示す。

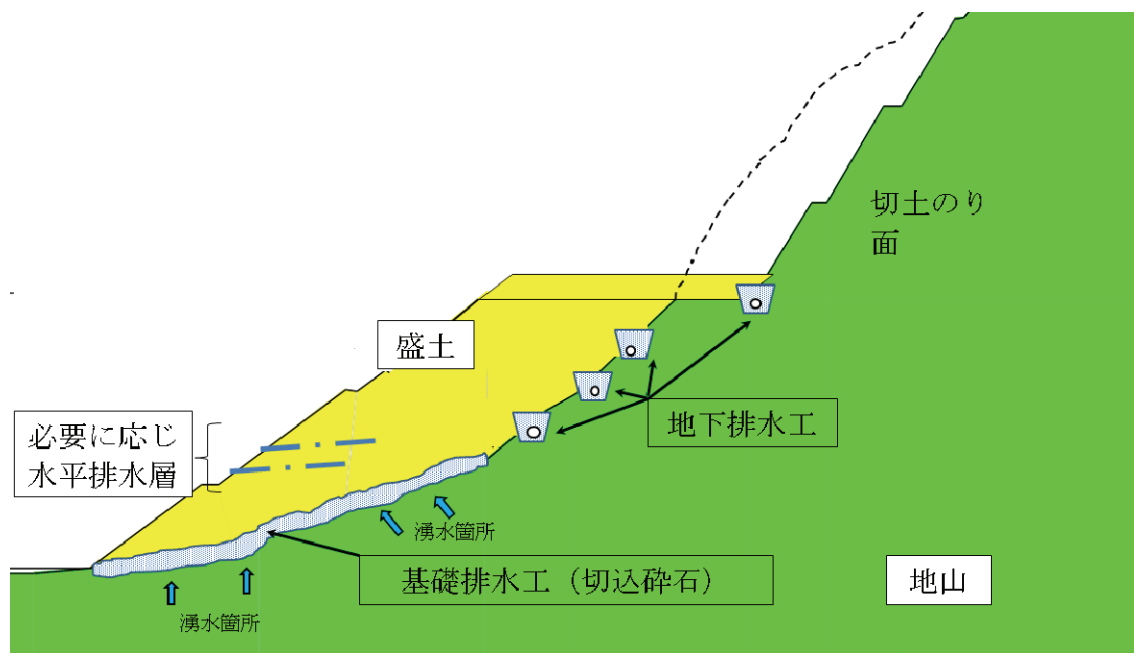


図 4.7 盛土の安定を確保するための排水施設の基本的構造

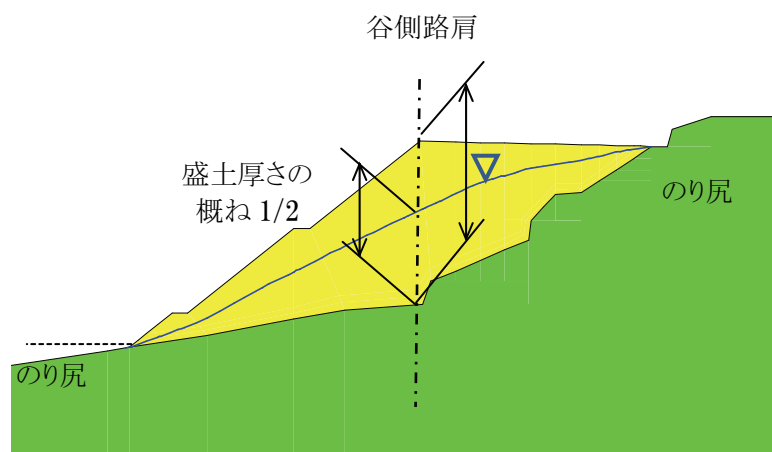


図 4.8 円弧すべり計算に用いる水位の設定方法

4.2.5 静的安定解析結果の考察

(1) 円弧すべり計算結果

盛土内の水位が中位状態にあると仮定し、円弧すべり計算により安全率を求めた。

次に、管理注目度を求めるに際して設定した「評価項目」と、得られた安全率との相関を調べた。以下に検証に用いる盛土部に関する呼称を図 4.9 に示すとおりとした。なお、盛土高さは谷側路肩とのり尻の高さの差、盛土厚さは谷側路肩からの地盤までの深さ、地山勾配は盛土両端部ののり尻と地山との境界を直線で結んだ場合の、直線の角度とした。表 4.4 には、各解析断面の諸元と、計算で得られた安全率の一覧を示す。

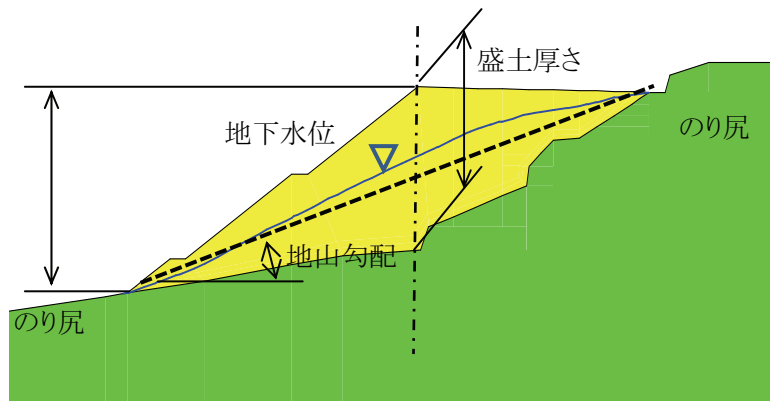


図 4.9 盛土の諸元に関する定義

表 4.4 盛土の諸元と安全率の一覧表

解析断面番号	道路管理用盛土番号	降雨時の管理注目度	盛土高さ (m)	盛土厚さ (m)	盛土断面積 (m ²)	地山勾配 (°)	安全率 (Fs)
1	1100-013	67	18.90	14.65	968.39	7	1.42
2	1100-049	57	26.80	8.17	1,138.03	17	1.30
3	1100-055-a	58	20.39	12.20	380.40	10	1.21
4	1100-055-b	71	26.60	26.30	1,393.89	10	0.85
5	1100-056	50	17.00	13.47	329.89	18	1.17
6	1100-060	67	30.90	14.37	1,026.58	17	0.87
7	0042	39	19.70	14.50	668.20	9	1.19
8	0043	45	12.71	11.89	301.45	10	1.51
9	0045-1	77	19.50	15.06	662.79	10	1.24
10	0046-a	65	30.50	14.98	728.58	13	0.88
11	0046-b	36	9.69	7.78	231.33	6	1.70
12	0047	63	29.90	13.91	867.67	19	1.00
13	0048-a	76	24.90	28.55	1,290.97	19	0.96
14	0048-b	73	24.00	12.64	711.24	26	0.95
15	0048-c	77	23.90	7.15	241.35	22	1.31
16	0049	62	24.20	10.35	345.17	24	1.18
17	0050-a	86	30.45	26.37	1,486.79	18	0.90
18	0050-b	71	18.45	14.53	599.94	9	1.17
19	0055-1	71	22.66	11.06	400.28	21	1.02
20	0055-2-a	60	21.59	10.34	462.80	24	1.14
21	0055-2-b	47	11.70	10.19	506.73	5	1.58
22	0058	69	20.00	9.10	360.58	17	1.26
23	0059	62	29.08	5.27	286.30	25	1.50
24	0060	60	30.17	9.36	370.20	30	1.03
25	0061	62	25.80	9.92	335.19	29	1.00
26	0065-a	63	23.60	13.02	493.60	25	1.09
27	0065-b	66	19.36	9.01	268.94	26	1.23
28	0066	76	16.97	8.81	272.27	17	1.35
29	0032	49	12.00	24.22	1,521.91	5	1.36

(2) 評価項目と安全率の関係

降雨時の管理注目度は、被災の受け易さを求めるための評価項目として「供用年数」「盛土形状」「盛土材料」「集水地形」「変状の有無」および「盛土高さ」「原地形の勾配」「第三者被害の有無」「復旧の難易度」を設定している求めている。この評価項目の妥当性を検証するため、円弧すべり計算に影響を与える盛土諸元の「盛土高さ」「盛土厚さ」および「原地形の勾配」と安全率の関係を調べた。なお、「盛土材料」に関しては、検討通過地区の盛土材料は同一として設定しているため検証は行わない。

図 4.10 には「盛土高さ」と安全率との関係を、図 4.11 には「盛土厚さ」と安全率の関係を示す。盛土高さ、盛土厚さともに、安全率との高い相関が得られた。

盛土高さが高くなるほど、盛土厚さが厚くなるほど安全率が低下する傾向となった。このことは、管理注目度で設定した評価項目が、力学的安定性の評価からも妥当な評価項目であることを示すものである。

図 4.12 には、「原地形の勾配」を解析断面での地形勾配として、安全率との関係を示した。図からは、盛土高さの場合に比べて明瞭な相関は見られていない。地山と盛土の境界部ですべり破壊が発生すると考える場合には、すべり安全率は地山の勾配や盛土厚さに依存する。しかし、円弧すべり計算において最少安全率を示す円弧は、のり肩を切る形となることから、直接地山の勾配を反映した形とはならないことがこの理由である。

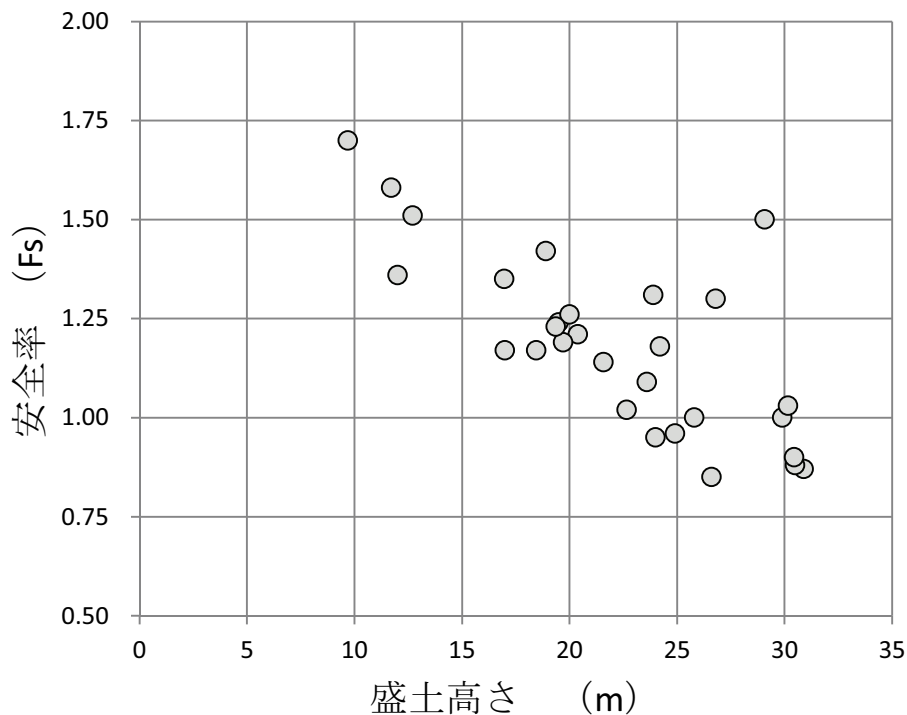


図 4.10 盛土高さと中位状態の安全率の関係

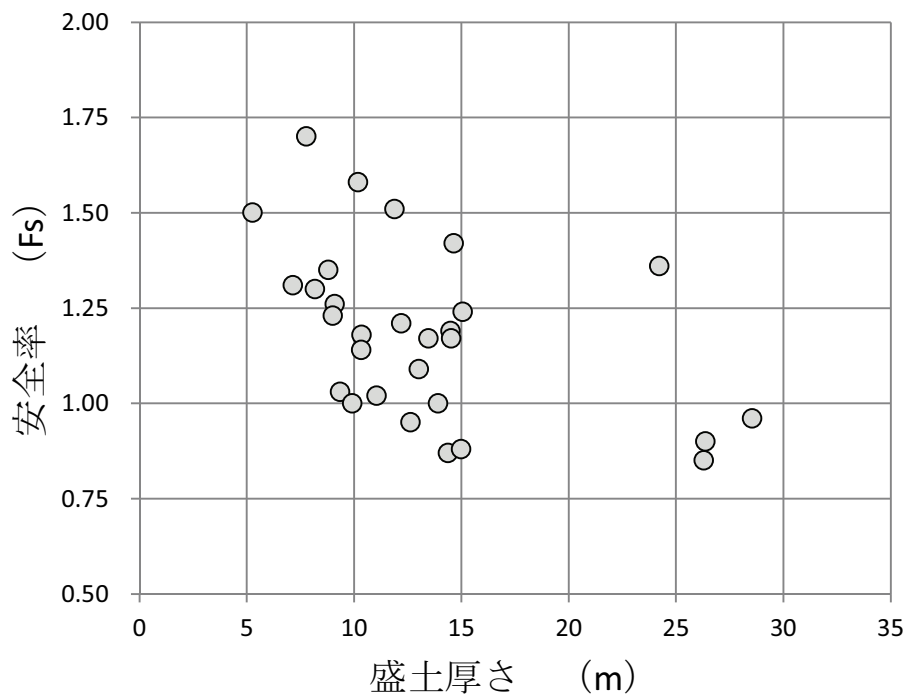


図 4.11 盛土厚さと中位状態における安全率の関係

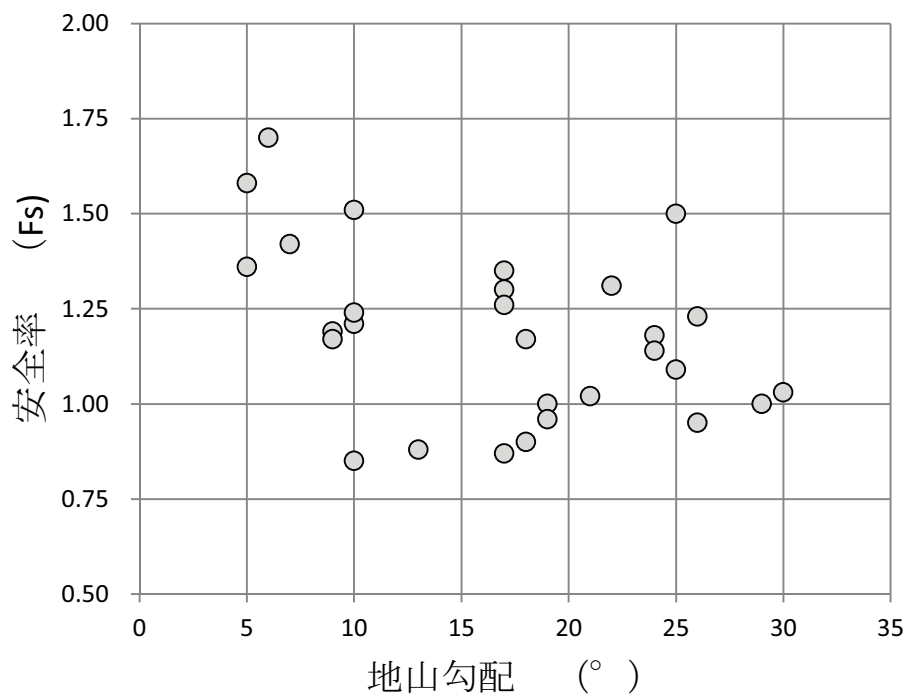


図 4.12 地形勾配と中位状態における安全率の関係

4.2.6 静的安定解析結果と管理注目度の検証

静的安定解析により得られた安全率と管理注目度の相関を図 4.13 に示す。地下水位を中位状態とした円弧すべり計算で得られた安全率と管理注目度との関係には、一定の相関が認められる。すなわち、「降雨による被災を前提としたもの」を評価する管理注目度では、その点数が高くなると盛土の安全率は低くなる傾向にある。このことは、管理注目度で評価された盛土の危険度が、力学的安定性とも整合性があることを示していることで選定した評価項目での危険度評価手法は妥当な内容であることが検証できた。なお、図には参考のために1次の回帰直線を示している。

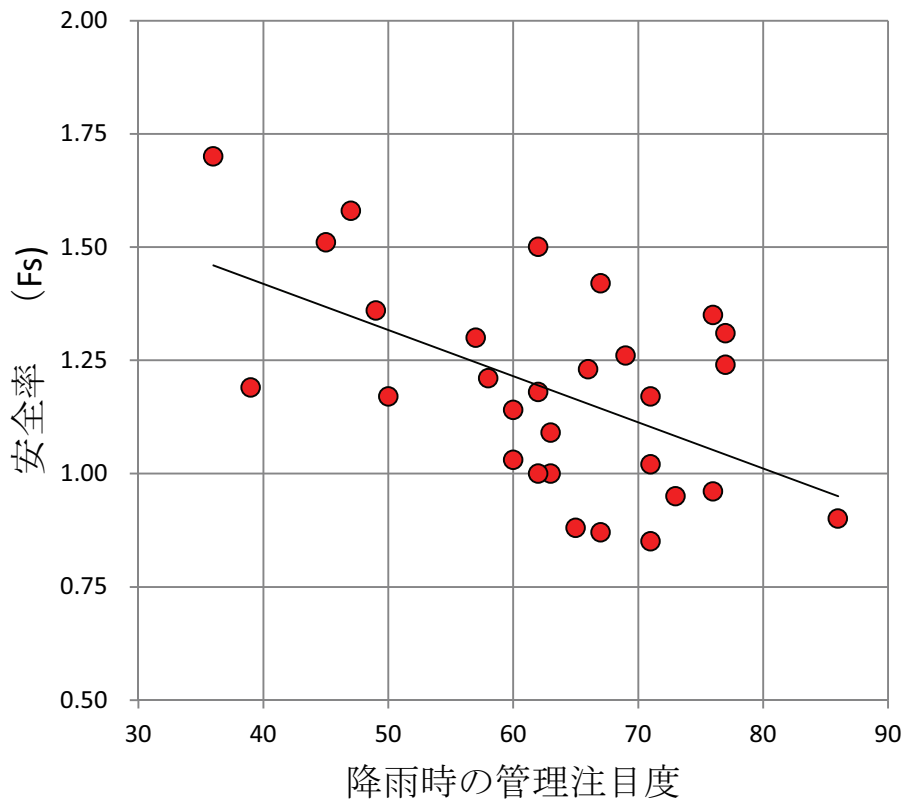


図 4.13 降雨時の管理注目度と中位状態の安全率の関係

4.3 動的安定解析

4.3.1 動的安定解析の目的

動的安定解析は、盛土の「地震による災害を前提としたもの」の評価項目に点数付けすることで得られた管理注目度が、盛土の動的安定性と整合性を有するものであることを検証する目的で実施した。盛土の動的安定性は、地震動を設定して実施した。地震応答解析結果より得られる、盛土部に生ずる最大水平加速度で評価することとした。

4.3.2 要素分割と境界条件

動的安定解析には、有限要素法を用いた。要素分割では、応答解析に用いることを考慮し、盛土では要素の代表長さが 1.0m となるように配慮した。また、自重解析では底面は鉛直変位拘束、側面は水平変位拘束境界とした。地震応答解析では、側面や底面での反射の影響を最小化するために、底面には粘性境界、側面にはエネルギー伝達境界を設定した。

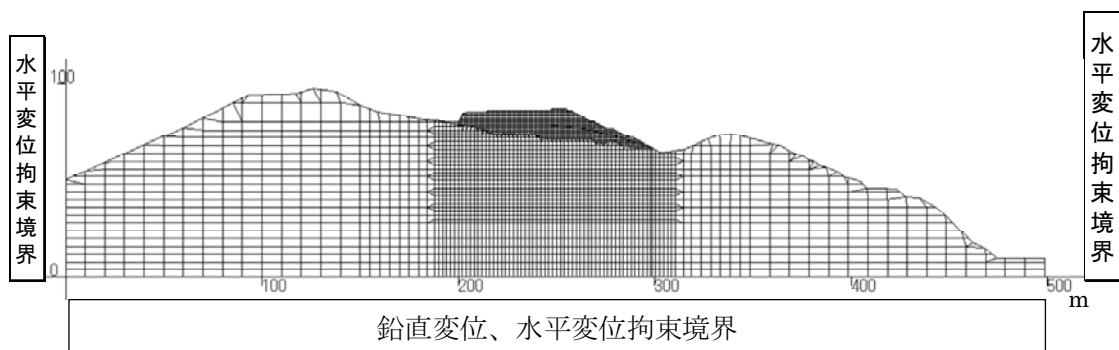


図 4.14 管理盛土番号 1100-013 の要素分割と自重解析の境界条件

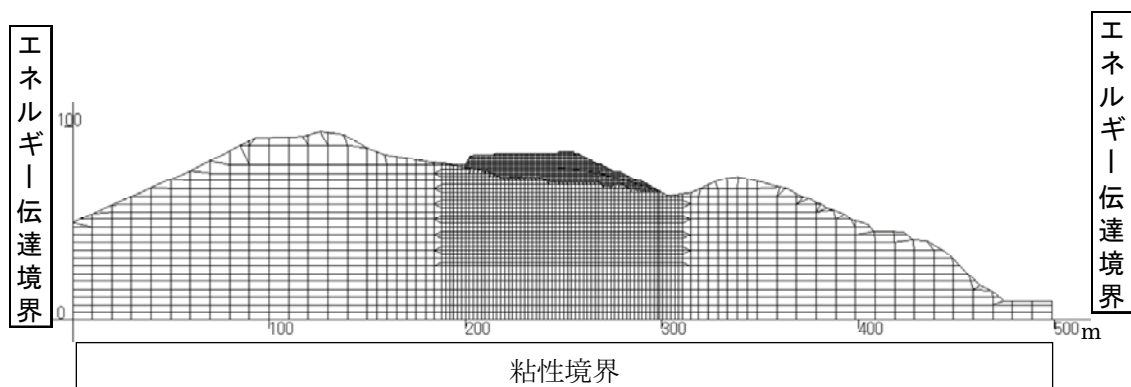


図 4.15 管理盛土番号 1100-013 地震応答解析の境界条件

4.3.3 物性値

(1) 盛土の基本となる物性値

地震応答解析に用いる物性値は、検討区間の動的試験の結果などが得られていないことから、NEXCO 設計要領第一集に記載されている値を用いることとした。物性値としては、盛土は礫混じりの粘性土で構成されていることから、設計要領に記載させている材料のうち、粘性土礫を採用することとした。

(2) 自重解析に用いる物性値

初期応力解析に用いる物性値を下表に示す。

表 4.5 初期応力解析物性値一覧

名 称	弾性係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 v	単位体積重量 (kN/m ³)	静止土圧係数
盛土	平均主応力依存	0.33	18	0.5
地山	3,724,000	0.33	18	0.5

表中の弾性係数 E は、NEXCO 設計要領第一集を参照し次のように定めた。なお、盛土における平均主応力は、各盛土における盛土中心部の深さと静止土圧係数より求めた。

$$\text{粘土質礫} : G_0 = 45800 (p)^{0.45} \quad (\text{kN/m}^2)$$

$$p = \text{平均主応力} \quad (\text{kN/m}^2)$$

$$E = 2 (1+v) G_0 \quad (\text{kN/m}^2)$$

$$\text{地山} : G_0 = \gamma t / g \times V_s^2 \quad (\text{kN/m}^2)$$

$$\gamma t = 18 \text{ (kN/m}^3\text{)}、g = 9.8 \text{ (m/s}^2\text{)}、V_s = 500 \text{ (m/s)} \text{ を仮定}$$

$$E = 2 (1+v) G_0 \quad (\text{kN/m}^2)$$

(3) 応答解析に用いる物性値

地震応答解析に用いる物性値を下表に示す。

表 4.6 地震応答解析物性値一覧

名 称	せん断剛性 G_0 (kN/m^2)	ポアソン比 ν	単位体積重量 (kN/m^3)
盛土	平均主応力依存	0.33	18
地山	1,400,000	0.46	18

表中のせん断剛性 G_0 は、NEXCO 設計要領第一集を参照し次のように定めた。なお、盛土における平均主応力は、自重解析により求められた各要素の値を用いた。

$$\text{粘土質礫} : G_0 = 45800 (p)^{0.45} \quad (\text{kN/m}^2)$$

$$p = \text{平均主応力} \quad (\text{kN/m}^2)$$

$$\text{地山} : G_0 = \gamma t / g \times V_s^2 \quad (\text{kN/m}^2)$$

$$\gamma t = 18 \text{ (kN/m}^3\text{)}、g = 9.8 \text{ (m/s}^2\text{)}、V_s = 500 \text{ (m/s)} \text{ を仮定}$$

なお、地震応答解析に用いるひずみ依存特性は、設計要領で盛土材料のせん断剛性低下率と減衰定数のひずみ依存特性の例に記載されている $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 関係を用いた。

4.3.4 入力地震動

地震波は、盛土が構築されている地表面が傾斜地盤で凹凸地形を呈していることからモデルの基盤面において入力するものとした。解析の対象地盤は、道路橋示方書Ⅴ耐震設計編で規定される第2種地盤である。よって、入力地震動には、レベル2タイプⅡ地震動（1995年兵庫県南部地震 JR 鷹取駅構内地盤上記録 NS方向）を用いた。入力地震動の加速度波形と加速度応答スペクトルを図4.16に示す。なお、盛土の固有周期に関する研究結果²³⁾からは、20m程度の盛土の固有周期はおおよそ0.5秒であり、当該地震動を用いることで盛土に及ぼす地震動の影響が評価できると判断した。

最大加速度 686.831 gal

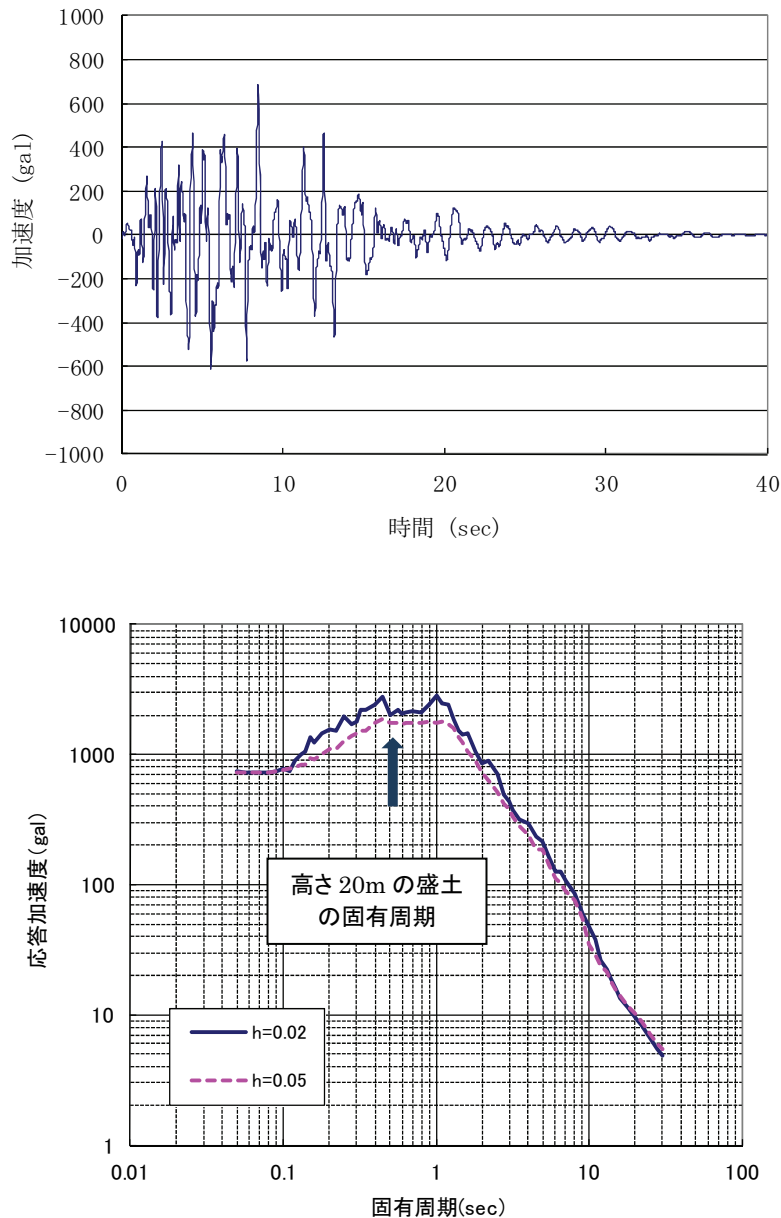


図 4.16 解析に用いた加速度波形（上段）と加速度応答スペクトル（下段）

4.3.5 動的安定解析解析結果の考察

(1) 代表盛土形状の加速度分布

地震応答解析により得られる盛土内部の加速度分布の特徴を示す。

図 4.17 に傾斜地盤上の盛土、片切片盛および腹付け盛土の加速度分布のコンタを描くとともに、最大水平加速度が表れた箇所を矢印で示した。基盤面から入力された地震波に対して、盛土部では周りに比べて加速度が大きくなる傾向にあることがわかる。また、最大水平加速度は谷側の盛土のり肩部に発生する結果となった。

表 4.7 に、盛土諸元と最大水平加速度の結果一覧表を示す。

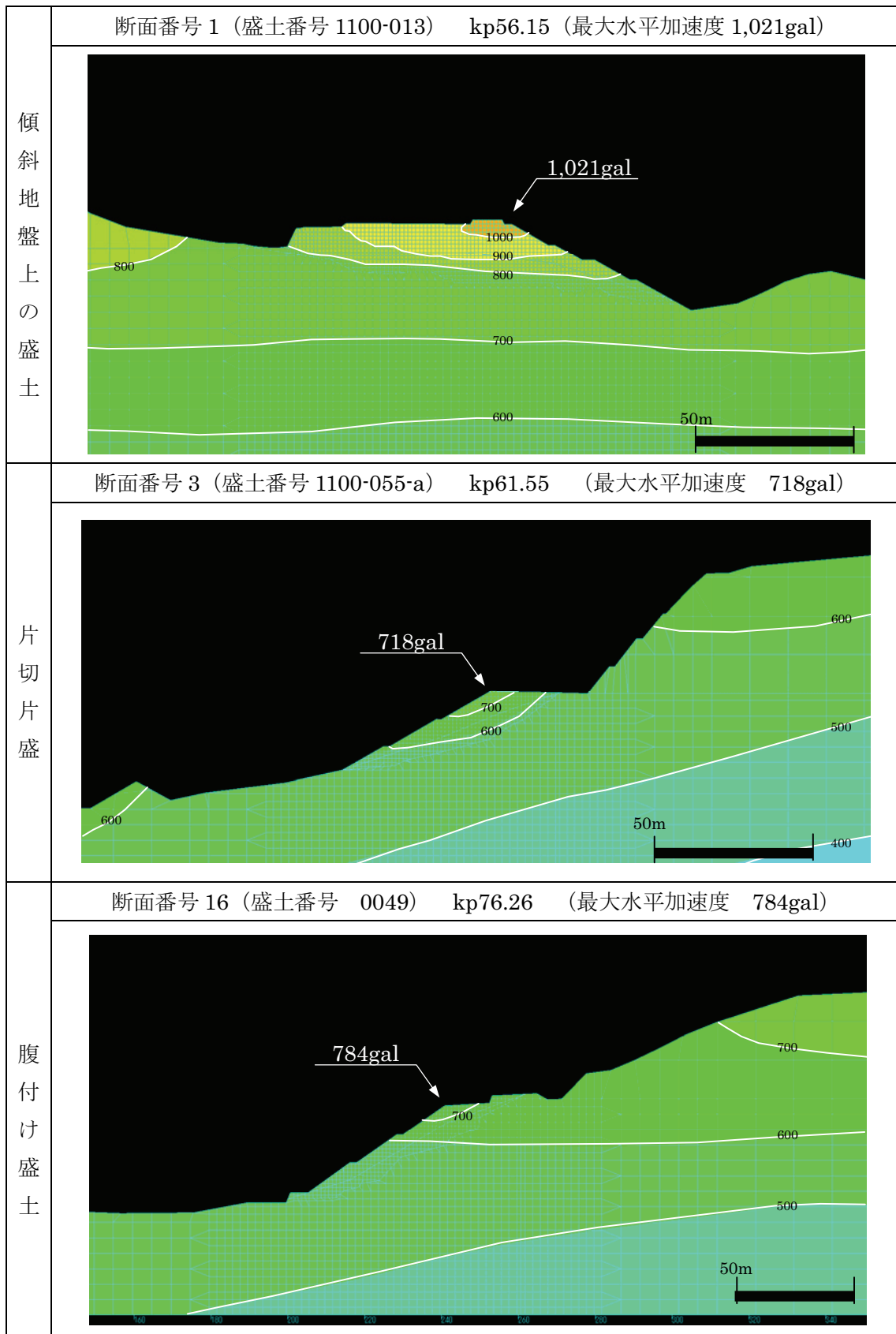


図 4.17 解析により得られた加速度分布の例 (単位 : gal)

表 4.7 盛土諸元と最大水平加速度一覧表

解析断面番号	道路管理用盛土番号	地震時の管理注目度	盛土高さ (m)	盛土厚さ (m)	盛土断面積 (m ²)	地山勾配 (°)	最大水平加速度 (gal)
1	1100-013	52	18.90	14.65	968.39	7	1,021
2	1100-049	39	26.80	8.17	1,138.03	17	1,081
3	1100-055-a	72	20.39	12.20	380.40	10	718
4	1100-055-b	56	26.60	26.30	1,393.89	10	1,114
5	1100-056	64	17.00	13.47	329.89	18	762
6	1100-060	74	30.90	14.37	1,026.58	17	854
7	0042	61	19.70	14.50	668.20	9	878
8	0043	56	12.71	11.89	301.45	10	732
9	0045-1	64	19.50	15.06	662.79	10	852
10	0046-a	65	30.50	14.98	728.58	13	806
11	0046-b	56	9.69	7.78	231.33	6	737
12	0047	67	29.90	13.91	867.67	19	590
13	0048-a	88	24.90	28.55	1,290.97	19	1,102
14	0048-b	88	24.00	12.64	711.24	26	725
15	0048-c	88	23.90	7.15	241.35	22	789
16	0049	73	24.20	10.35	345.17	24	784
17	0050-a	80	30.45	26.37	1,486.79	18	846
18	0050-b	71	18.45	14.53	599.94	9	677
19	0055-1	75	22.66	11.06	400.28	21	678
20	0055-2-a	75	21.59	10.34	462.80	24	911
21	0055-2-b	59	11.70	10.19	506.73	5	759
22	0058	64	20.00	9.10	360.58	17	725
23	0059	72	29.08	5.27	286.30	25	526
24	0060	75	30.17	9.36	370.20	30	669
25	0061	75	25.80	9.92	335.19	29	845
26	0065-a	77	23.60	13.02	493.60	25	786
27	0065-b	77	19.36	9.01	268.94	26	741
28	0066	80	16.97	8.81	272.27	17	744
29	0032	61	12.00	24.22	1,521.91	5	1,339

(2) 最大水平加速度と盛土形状

地震時の管理注目度は、被災の受け易さを求めるための評価項目として「盛土材料」「原地形の勾配」「変状の有無」「擁壁の有無」および「三者被害の有無」「復旧の難易度」を設定している求めている。この評価項目の妥当性を検証するため、地震応答解析に影響を与える盛土諸元の「盛土高さ」「盛土厚さ」および「原地形の勾配」と最大水平加速度の関係を調べた。なお、「盛土材料」に関しては、検討通過地区の盛土材料は同一として設定しているため検証は行わない。

盛土高さは、円弧すべり計算の安全率との相関は高かったものの、図 4.19 に示すとおり最大水平加速度との相関には明確な関係が得られなかった。これは、高い盛土ほど加速度が大きくなるという直感に反するものであるが、図 4.18 で示すように傾斜地盤上の盛土部は地形勾配の影響での盛土高さが高くても盛土厚さは厚くならないことに起因する。

盛土厚さに関しては、円弧すべり計算の安全率との相関は低かったが、図 4.20 に示すように最大水平加速度の大きさと正の相関がある。すなわち、盛土が厚くなればなるほど、盛土に発生する加速度は大きくなる（図 4.17 参照）。盛土断面積に関しても、最大水平加速度と正の相関がある（図 4.21）。図からは、盛土断面積が大きいほど最大水平加速度が大きくなることを明瞭に読み取ることができる。

一方、評価項目として設定した原地形の勾配（盛土両端部での地山との境界を直線で結んだ場合の、直線の角度）と最大水平加速度には、明確な相関が見られなかった（図 4.22）。

筆者は、これまでの地震災害現場の調査経験などから、傾斜地盤上の盛土部は被害が大きくなると想定していたが、解析結果で原地形の勾配と最大水平加速度には相関が見られなかった。これは、原地山の勾配が大きくなると、盛土が腹付け盛土のような薄い形状になることに起因する（図 4.18 参照）。すなわち、最大水平加速度は盛土厚さや盛土断面積に対して正の相関があり、原地形の勾配が急になればなるほど、盛土厚さや断面積が小さくなるために、原地形の勾配と最大水平加速度には相関性がない結果となる。

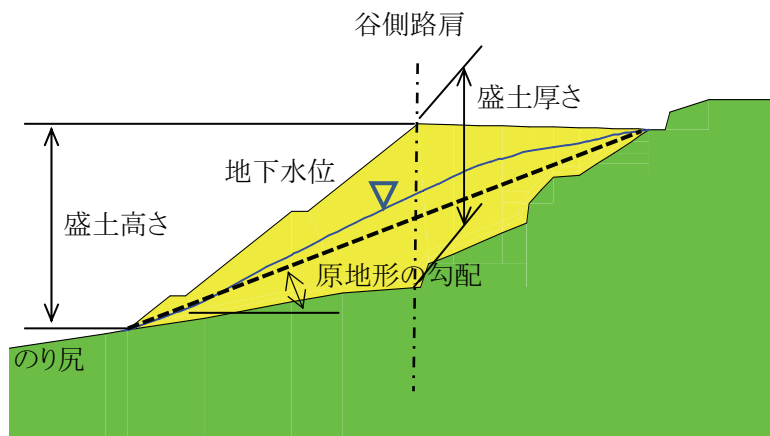


図 4.18 盛土の諸元に関する定義

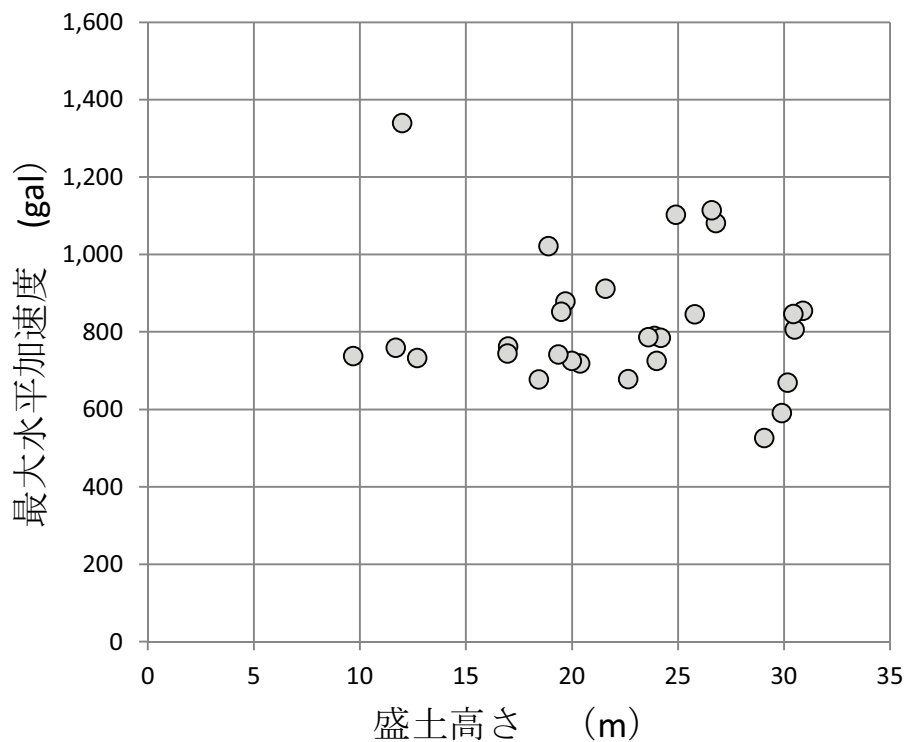


図 4.19 盛土高さと最大水平加速度の関係

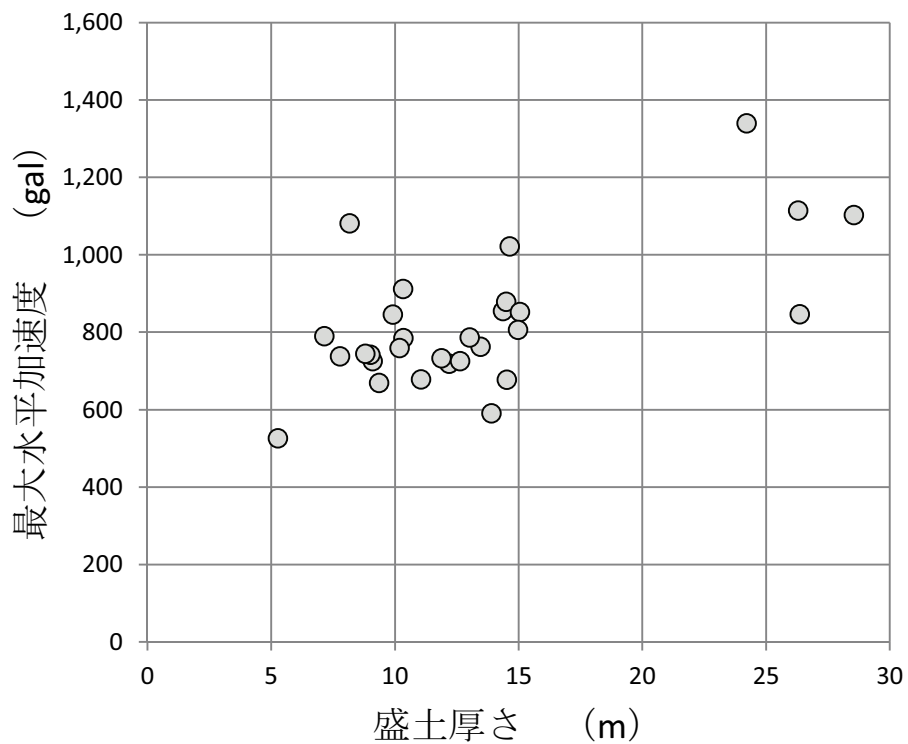


図 4.20 盛土厚さと最大水平加速度の関係

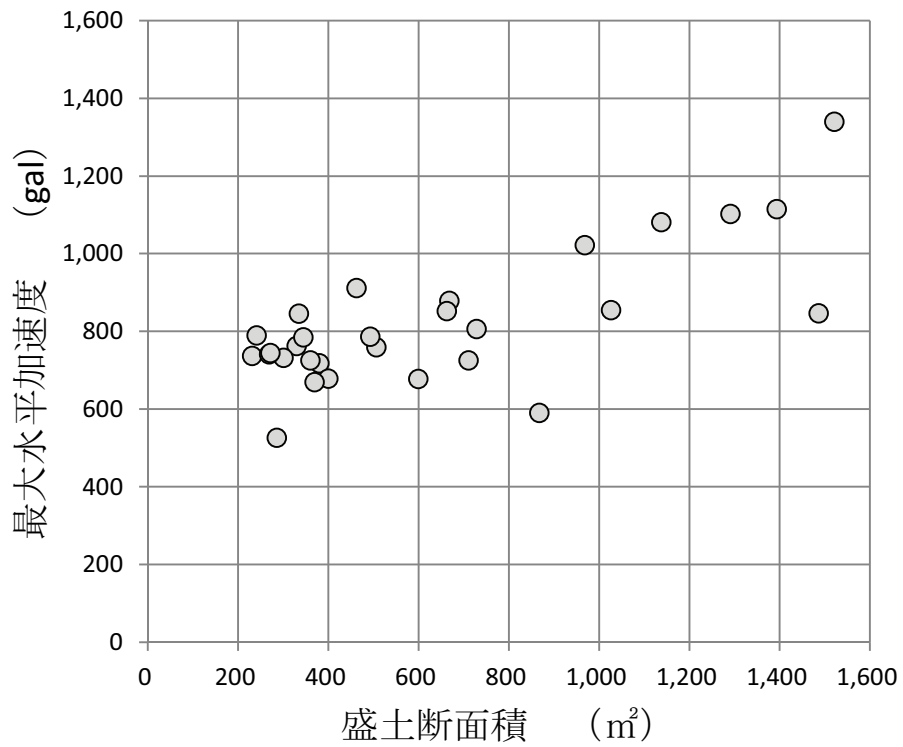


図 4.21 盛土断面積と最大水平加速度の関係

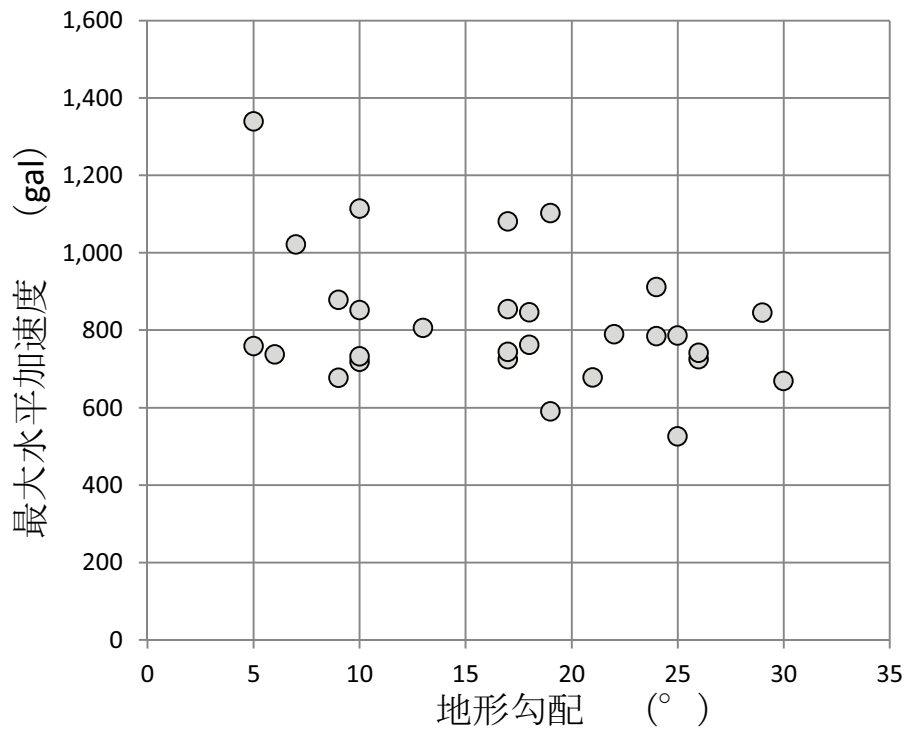


図 4.22 原地形の勾配と最大水平加速度の関係

4.3.6 動的安定解析結果と管理注目度の検証

ここでは、地震時の管理注目度の点数と最大水平加速度の相関を調べた。この結果、図 4.23 に示すとおり、地震時の管理注目度と最大水平加速度に負の相関が見られるものとなった。このことは、管理注目度を用いた危険度評価と動的安定性に相関が無い結果となり評価項目の見直しが必要であることを示すものとなった。

先に述べたとおり、管理注目度の点数付けでは、「原地形の勾配」が高いほど点数が高くなるが、原地形の勾配が高いほど盛土の厚さが小さくなるために盛土部に生ずる加速度が小さくなる結果が分かった。そこで、当初評価項目に設定した「原地形の勾配」を最大水平加速度に相関がある「盛土厚さ」に変更することとした。配点にあたっては、図 4.20 の分析結果より、盛土厚さが 15m を境に最大水平加速度が大きくなること考慮した。併せて、地震時の重み付け係数 (β) の合計が見直し前と同じになるように設定し直した。見直し前後の配点の比較を表 4.8 に、また重み付け係数の見直しを表 4.9 に示す。これを用い、管理注目度の点数付けを行った結果を表 4.10 に示す。

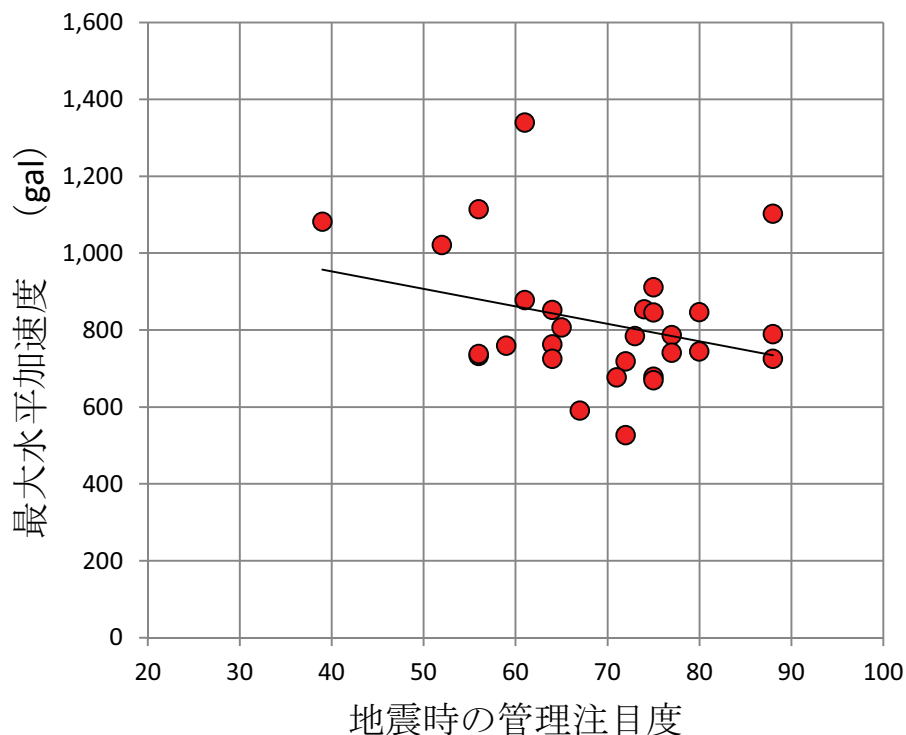


図 4.23 地震時の管理注目度と最大水平加速度の関係

表 4.8 地震時の管理注目度の評価項目見直し一覧

当 初			変 更		
評価項目	区 分	配点	評価項目	区 分	配点
(1)盛土材料	砂質土	5	(1)盛土材料	砂質土	5
	礫質土	4		礫質土	4
	粘性土	3		粘性土	3
(2)原地形の勾配	30° 以上	5	(2)盛土厚さ	15m 以上	5
	15° ~30°	3		10m~15m	3
	15° 以下	1		10m 以下	1
	不明	3		不明	3
(3)変状の有無	切盛境で変状がある	5	(3)変状の有無	切盛境で変状がある	5
	その他の変状がある	3		その他の変状がある	3
	変状なし	0		変状なし	0
(4)擁壁の有無	支え・控え壁式擁壁	5	(4)擁壁の有無	支え・控え壁式擁壁	5
	もたれ・片持ち梁式擁壁	3		もたれ・片持ち梁式擁壁	3
	高さ3m未満の擁壁	1		高さ3m未満の擁壁	1
	擁壁無し	0		擁壁無し	0

表 4.9 地震時の重み付け係数の見直し

当 初		変 更	
評価項目	重み付け係数 β	評価項目	重み付け係数 β
(1) 盛土材料	4	(1) 盛土材料	3
(2) 原地形の勾配	4	(2) 盛土厚さ	5
(3) 変状の有無	3	(3) 変状の有無	5
(4) 擁壁の有無	1	(4) 擁壁の有無	1
(1)' 第三者被害の有無	5	(1)' 第三者被害の有無	4
(2)' 復旧の難易度	3	(2)' 復旧の難易度	2

表 4.10 見直し後の地震時の管理注目度

解析断面番号	管理盛土番号	管理注目度		盛土厚さ(m)	地山勾配(°)	最大水平加速度(gal)
		当初	見直し後			
1	1100-013	52	56	14.65	7	1,021
2	1100-049	39	44	8.17	17	1,081
3	1100-055-a	72	54	12.20	10	718
4	1100-055-b	56	64	26.30	10	1,114
5	1100-056	64	54	13.47	18	762
6	1100-060	74	70	14.37	17	854
7	0042	61	59	14.50	9	878
8	0043	56	54	11.89	10	732
9	0045-1	64	64	15.06	10	852
10	0046-a	65	55	14.98	13	806
11	0046-b	56	44	7.78	6	737
12	0047	67	57	13.91	19	590
13	0048-a	88	90	28.55	19	1,102
14	0048-b	88	80	12.64	26	725
15	0048-c	88	70	7.15	22	789
16	0049	73	55	10.35	24	784
17	0050-a	80	89	26.37	18	846
18	0050-b	71	79	14.53	9	677
19	0055-1	75	71	11.06	21	678
20	0055-2-a	75	71	10.34	24	911
21	0055-2-b	59	71	10.19	5	759
22	0058	64	44	9.10	17	725
23	0059	72	44	5.27	25	526
24	0060	75	47	9.36	30	669
25	0061	75	47	9.92	29	845
26	0065-a	77	59	13.02	25	786
27	0065-b	77	49	9.01	26	741
28	0066	80	70	8.81	17	744
29	0032	61	79	24.22	5	1,339

地震時の管理注目度の評価項目を「原地形の勾配」から「盛土厚さ」に変更し、併せて、重み付け係数（ β ）の見直しを行った結果、図 4.24 に示すように、管理注目度と最大水平加速度に正の相関を示すものとなった。

見直し前後の管理注目度を、解析断面番号ごとに描いたものが図 4.25 である。No.22～27 の 6 断面については、見直しにより管理注目度が 50 点を割る点数となった。6 断面の原地形の勾配は、区分として $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ の範疇にあり、当初「原地形の勾配」として評価していた際の配点では 3 点を付していた。見直しの結果、図 4.25 に右下に代表的な断面で示すとおり、これら断面では「盛土厚さ」が 10m 以下のため、配点としては 1 点で評価されたため、管理注目度は低下した。他方、図 4.25 の左下に示す解析断面番号 No.13 では、原地形の勾配が大きいため、見直し前の管理注目度は高くなっているが、盛土厚さを評価項目とした場合でも、盛土厚さが 28.55m であり配点としては 5 点を付しているため、結果として管理注目度に大きな変化がない結果となった。

この見直しにより、管理注目度は地震時の安定性の評価とも整合性を有するものとなった。

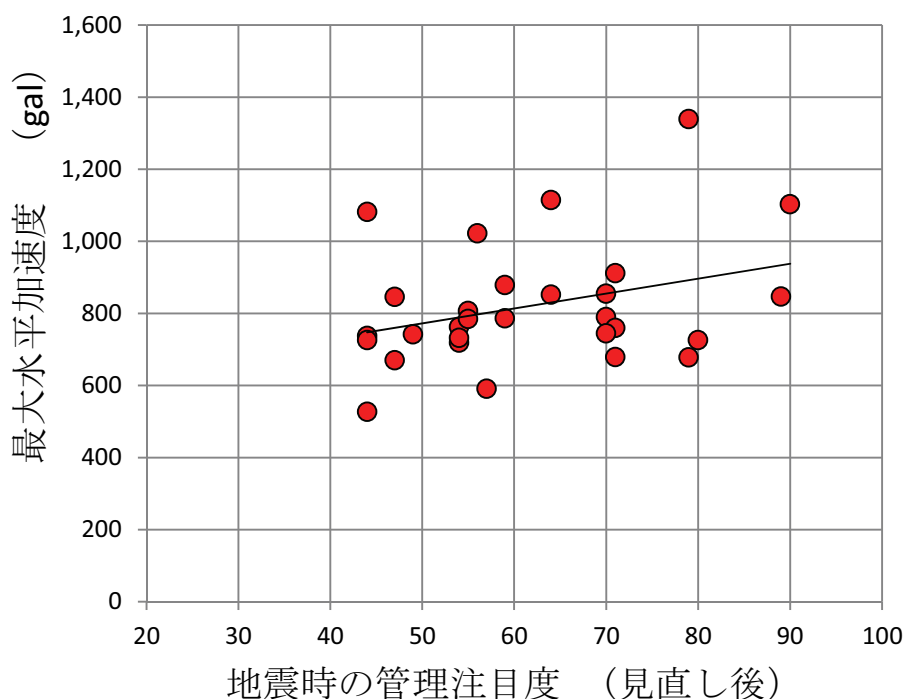


図 4.24 見直しの地震時の管理注目度と最大水平加速度の関係

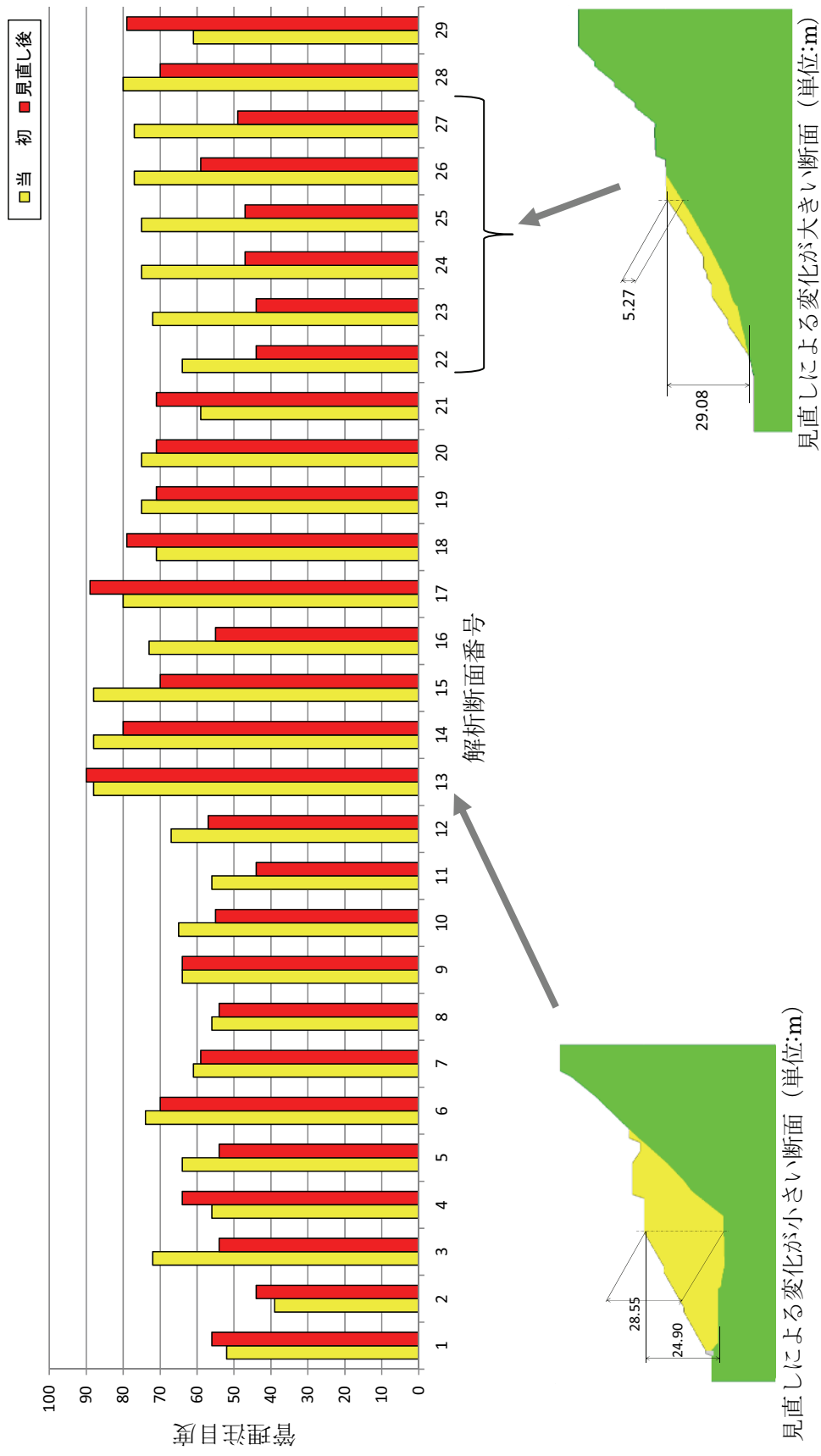


図 4.25 各断面における見直し後の地震の管理注目度

4.3.7 見直し後の管理注目度

見直し前の評価項目「原地形の勾配」を「盛土厚さ」に変更し、関連する重み付け係数(β)の見直しを行うことで、地震時の管理注目度が盛土の力学的安定性と一定の整合性を有することがわかった。そこで、中央自動車道 上野原 IC～勝沼 IC 間の 181 全部の盛土部に対して、地震時の管理注目度の点数付けを見直した。

得られた地震時に対する管理注目度の分布を、図 4.26 に示す。図の上段は見直し前、下段は見直し後の管理注目度の分布を示している。見直し前では、図 4.25 で示すように急な斜面では管理注目度が大きく、比較的平坦な地形の箇所では小さい値となっていたが、見直し後では分布形状は類似しているものの、盛土厚さをより反映した形となっている。

これまで示したとおり、見直し後の管理注目度は、静的安定解析、動的安定解析とも整合性を有するものであり、盛土部における「被災し易い箇所」を的確に抽出する指標であると考えられる。

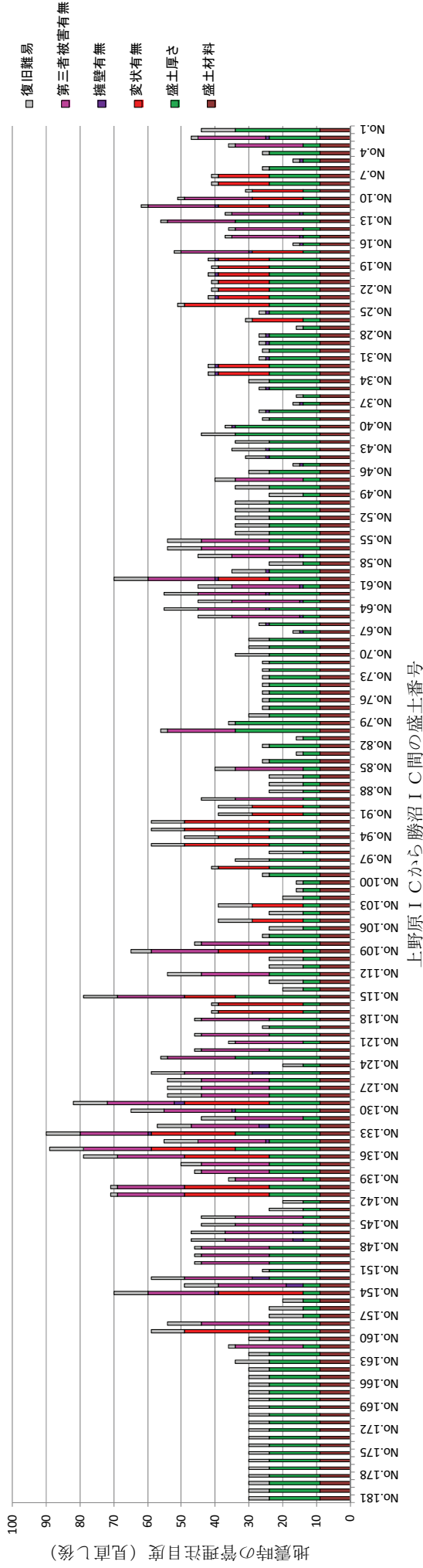
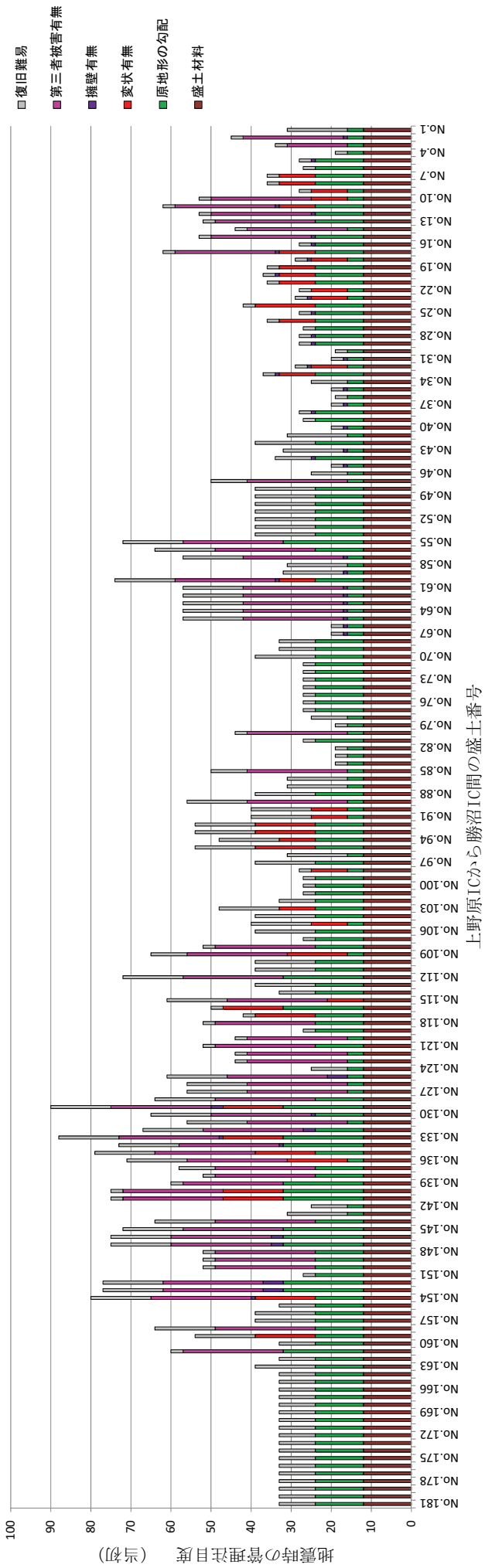


図 4.26 地震に対する管理注目度の分布 上段が当初、下段が見直し後

4.4 管理注目度の事業継続計画への活用例

4.4.1 高速道路事業における事業継続計画

阪神大震災を契機として社会基盤施設を保有する事業者には、万が一の災害時に自社の保有する経営資源（人、物、金、情報）の被害を最小限にしたうえで、自社が社会から果たすことを期待されている重要業務が中断しないこと、仮に中断せざるを得ない場合でも、予め設定した目標時間内に主な機能を回復させ、業務中断によって生じるであろう社会喪失や企業としての信頼性の低下といったリスクを小さくするための計画、事業継続計画（Business Continuity Plan: BCP）を策定し、実行することが求められるようになった。

我が国の防災を担当する内閣府では、企業等の災害時における事業継続計画及び運用改善を促進するため2005（平成17）年8月「事業継続ガイドライン」を公表したが、その後のBCPの普及状況、東日本大震災などを踏まえ「事業継続ガイドライン—あらゆる危機的事象を乗り越えるための戦略と対応—」を改訂版として2013（平成25）年8月公表した。

BCPの概念は図4.27に示す通りである。すなわち何も対策を講じていない場合、大規模な災害が発生すると業務はほとんど停止してしまう。更に復旧するまでに多くの時間を要する。これに対し、災害発生時の被害を少なくし、稼働率の低下を許容値内にするによって復旧時間を短縮することが出来る。また、復旧方法も工夫することによって更に復旧時間を短縮することが出来る。

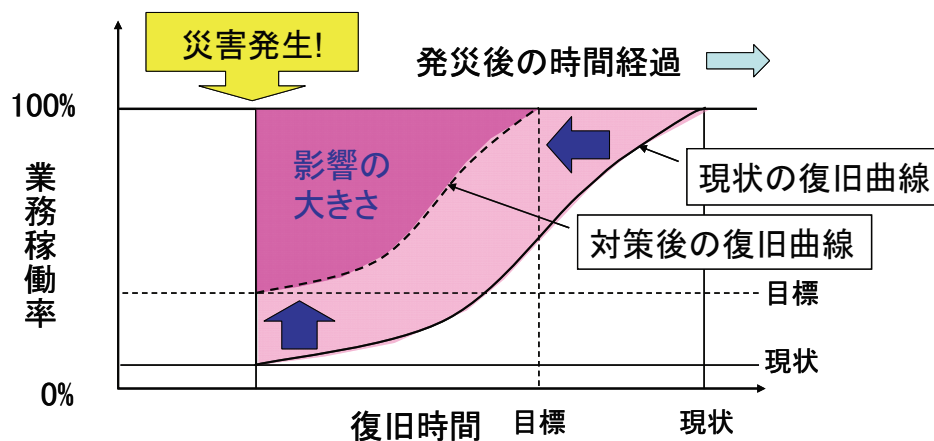


図 4.27 事業継続計画の概念

策定すべき事業継続計画は、従来の防災対策と異なっており、具体的に次のような項目を検討する必要がある。

- 1) 重要業務の決定
- 2) 検討対象とする災害の特定
- 3) 重要業務が受ける被害の想定
- 4) 影響度の評価（停止期間と対応力の見積、目標復旧時間の設定）

高速道路事業者にとって重要業務とは、社会基盤施設である高速道路の早期復旧に他ならない。以下では、検討対象とする災害を地震とした場合の高速道路システムが受ける被害の推定、影響度の評価を行う手法を示すとともに、目標復旧時間が与えられた場合の対策検討事例を示す。

4.4.2 復旧シミュレーション手法

高速道路では、降雨や風などの気象条件の変化に対しては交通規制を設けることで、通行車両が事故を起こす事を避ける体制が採られている。例えば降雨の場合、連続降雨量（雨の降り始めから降り終わりまでの累計雨量。6時間以上の無降雨でリセットされる）と組合せ雨量（連続雨量と時間雨量の組合せで定められる。連続雨量と時間雨量の双方が同時に設定値を超過した場合に通行止めとなる）のそれぞれに地域毎の特性を考慮した規制値が設定されている。しかし、降雨や大規模地震によって高速道路自体が被災した場合には、いかに早くその機能を回復するかが問題となる。

ここではまず始めに中央自動車道大月 IC～勝沼 IC 間の土構造物をモデルとして、地震による盛土被災が発生した時の道路復旧時間の検討方法について説明する。

図 4.24 は、地震による盛土被災の一つのパターンを示したもので、4箇所の盛土斜面が同時に崩壊した状態を仮定している。この状態から復旧するまでの過程と道路通行機能の推移を経時的に示している。図中の●は盛土部であり、●の大きさは復旧に要する時間によって分けている。■は被災箇所である。

発災直後（図 4.28 a）は、上り線と下り線をつなぐルートはなく全面通行止めとなるが、被災規模小の崩壊現場 A は 4 時間後に復旧し（図 4.28 b）、これにより F の開口部を使って上下線を行き来することにより対面通行が可能となる。その後、被災規模中の崩壊現場 B、D が 12 時間後に復旧するが C がまだ復旧作業中のため全面復旧には至らない（図 4.28 c）。そして最後に被災規模大の崩壊現場 C が復旧し、発災から 19 時間後には全面通行可（図 4.28d）となる。すなわち、被災と同時に 4 つの盛土の復旧作業が開始されたとしても 4 時間は全面通行止めとなり、その後 15 時間（ $15=19-4$ ）は対面通行となる。被災箇所へのアプローチが困難な場合などで同時に復旧作業が開始されない場合には、より複雑な検討が必要になる。

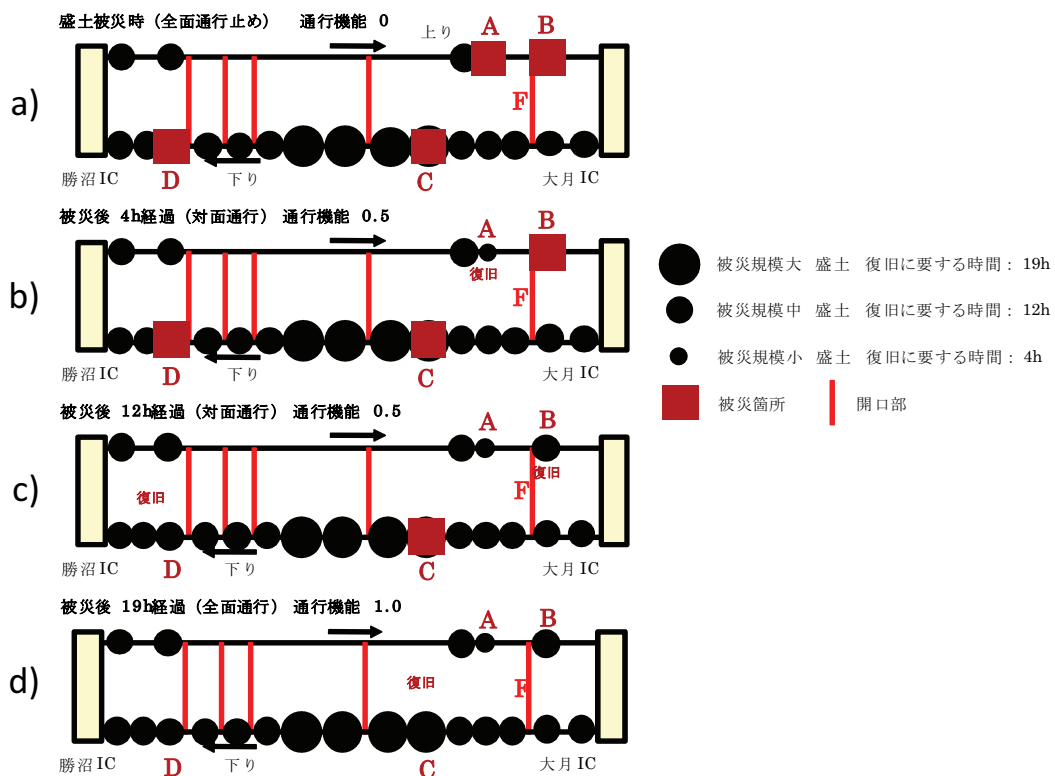


図 4.28 高速道路の復旧過程の考え方

一方、被災のパターンは、高速道路を構成している盛土の地震に対する危険度の相違により図 4.29 に示すように数多く存在する。すなわち全盛土が健全なパターンを含め、様々な復旧時間が求められることになる。

このように可能性のある被災パターンは、それぞれが発生する確率という重みを持つことになる。そのため確率論的なアプローチをベースとした方法では、様々な被災パターンの復旧時間を求めた上で、その被災パターンが発生する確率とそれぞれの復旧時間を掛け合わせ総和をとることで、平均としての復旧時間を求め、これを基本として様々な事前の補強計画、事後の復旧対策の組合せを検討し、その中で最も効果的な対策を選択することになる。しかし、土構造物の地震や降雨による被災の可能性を確率論的に評価することは難しい。

そこで以下では前章までに検討してきた管理注目度を用いて被災の可能性を評価し、より現実的な復旧体制を考慮した上で、復旧時間を検討する。また、復旧時間を短縮するための対策工の効果を評価する。

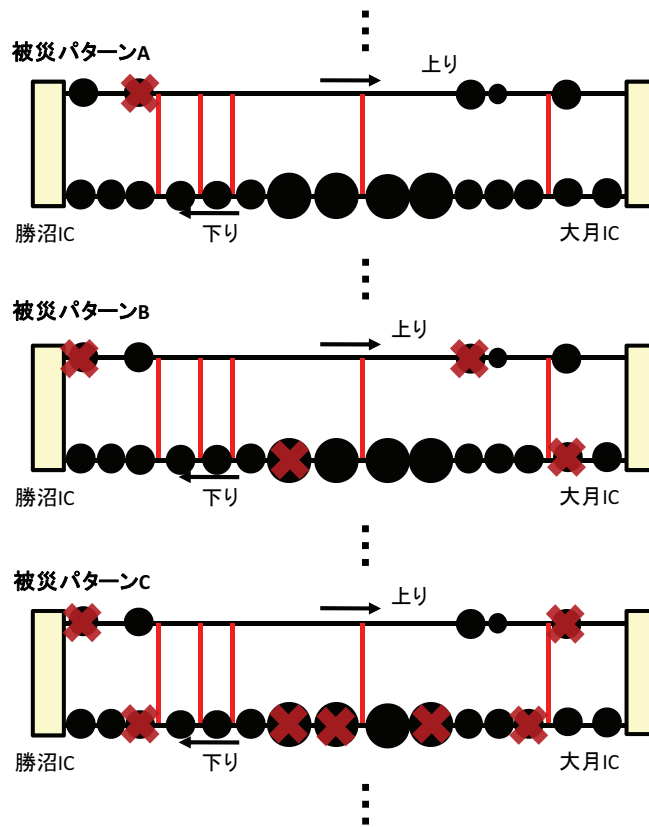


図 4.29 様々な被災パターン

4.4.3 復旧時間の検討

(1) 検討対象

具体的な復旧計画の検討対象とした区間は、管理注目度で評価した評価点が 60 点以上を示す盛土部が多く分布している大月 IC～勝沼 IC 間約 20km で、図 4.30 に示すような道路システムとなっている。表 4.11 には検討区間各盛土部の管理注目度値、被災規模（崩壊土量で区分）、復旧時間（これまでの復旧事例を参考に設定）を示す。

ここでは、表 4.11 に黄色で示した箇所が大規模地震時に被災すると仮定する。選定した箇所は、地震時の管理注目度が 60 点以上のものとしたが、上り線に関しては、複数個所の被災を仮定するために、管理注目度 57 の 0009 盛土も加え 2 箇所とした。なお、被災箇所への進入は、高速道路南側には高低差がある国道 20 号、一級河川笹子川が並走しているため、一般道からの取り付けはできない。また、災害協定を締結している業者のうち、重機を保有している業者が甲府市内にしかないことから、復旧作業は全て勝沼側から行うこととし、上下線を結ぶ開口部を最大限に活用することを前提とした。なお、進入路等作業環境を考慮して、復旧に当たる作業パーティー数は 3 パーティーとした。

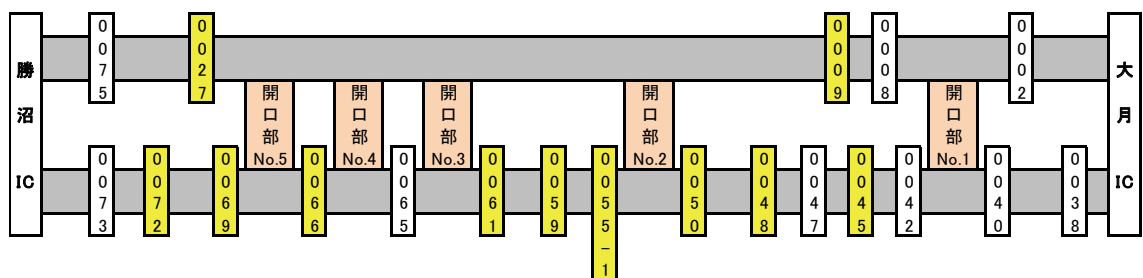


図 4.30 大月 IC~勝沼 IC 間の管理盛土番号図(□内の数字は表 4.11 に対応した盛土番号)

表 4.11 被災箇所の想定

検討区間管理盛土番号	地震時 管理注目度	被災 規模	復旧時間 仮定 (hr)	
上り線 (山側)	0075	51	小	4hr
	0027	66	大	12hr
	0009	57	小	4hr
	0008	45	小	4hr
	0002	45	小	4hr
下り線 (川側)	0073	51	小	4hr
	0072	61	中	6hr
	0069	65	小	4hr
	0066	68	大	12hr
	0065	53	小	4hr
	0061	73	大	12hr
	0059	73	大	12hr
	0055-1	76	超	24hr
	0050	72	大	12hr
	0048	88	大	12hr
	0047	57	大	12hr
	0045	80	超	24hr
	0042	57	中	6hr
	0040	45	小	4hr
	0038	53	小	4hr

(2) シミュレーション結果

シミュレーション結果は以下ようになった。

発災直後、上り線盛土部 No.0027、No.0009、下り線盛土部 No.0045、No.0048、No.0050、No.0055-1、No.0059、No.0061、No.0066、No.0069、No.0072 の計 11 箇所が通行不能となる。(表 4.11 中■で示した盛土)

作業パーティーA は、勝沼側(上り線)から作業を開始し、No.0027 を 12 時間で補修した後、No.0009 を 4 時間で補修する。これにより、上り線(二車線)が対面通行で通行可能となる。引き続き下り線 No.0045 を、開口部 No.1 を使って 24 時間で補修する。したがって、A パーティーは復旧作業に延 40 時間を費やすこととなる。

作業パーティーB は、勝沼側より下り線を逆走し、No.0072 (6hr)、No.0069 (4hr)、No.0066 (12hr)、No.0061 (12hr)、No.0059 (12hr) を補修する。したがって、作業パーティーB は復旧作業に延 46 時間を要する。

作業パーティーC は、上り線 No.0027 が 12 時間後に復旧した時点から、勝沼側より開口部 No.2 を使って、No.0050 (12hr)、No.0048 (12hr)、No.0055-1 (24hr) を補修する。よって、作業パーティーC は復旧作業に延 48 時間を要する。

以上のように、3 パーティーでは全線復旧作業が完了するまでには 64 時間(約 2.7 日)を要することとなる。ただし、ここでは復旧作業に取り掛かるまでの準備時間は考慮していない。

このようなシミュレーションによって得られた経過時間チャート(図 4.31)を使うことで、被災した高速道路の通行可能要請が何時間後になるか、高速道路会社として何時間で通行可能な状況にできるかを「見える化」することができる。

ここでさらに、全線通行可能に必要な時間を発災後 30 時間以内とする目標を設定した場合の対応策を検討した例を図 4.32 に示す。30 時間に名を達成するためには、No.0027 を補強して被災しないようにし、上り線の対面通行を早期に可能とすることと、No.0055-1 を補強して復旧時間を短縮することが効果的であることがわかる。また、No.0027 が被災しないよう補強を行うことで、作業パーティーを 1 つ増やし、上り線から開口部 No.3 を使った No.0061、No.0059 に対する復旧作業が可能となる。

このように、No.0027、No.0055-1 の補強並びに復旧パーティー数の増を行うことで、全線通行可能が発災後 64 時間後から 28 時間後に短縮できることがわかる。こうした対策に要する対策費を検討し、復旧時間の短縮効果と比較することによって、様々な対策工の組合せの中から、適切な事業継続計画の立案ができる。

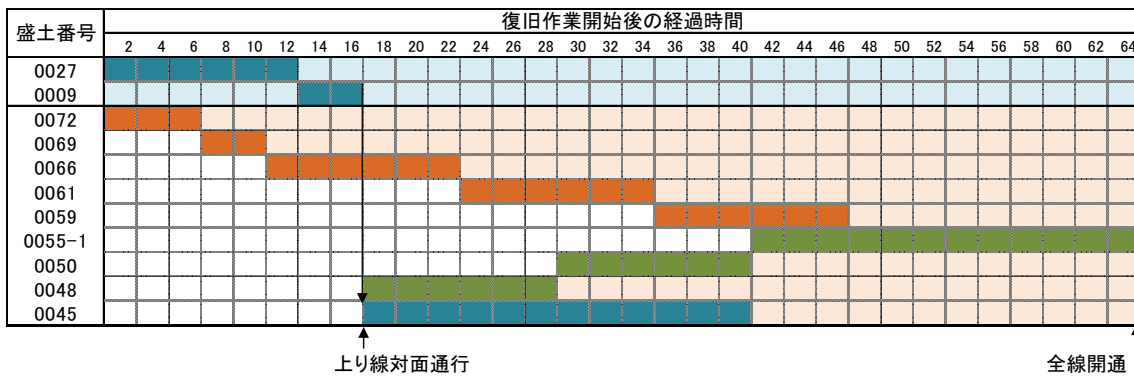
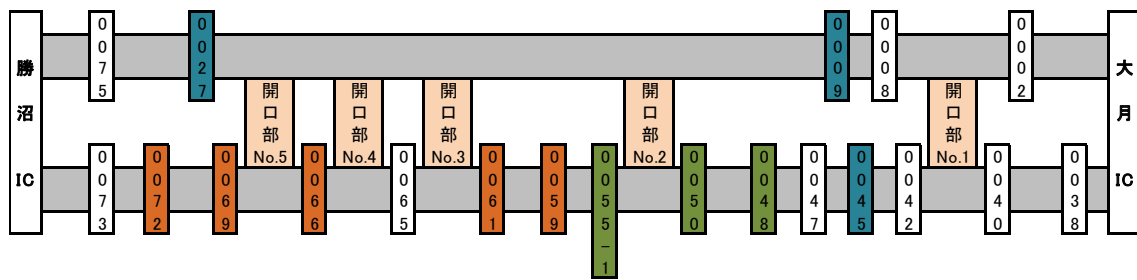


図 4.31 復旧に要する時間経過チャート（現状での作業）

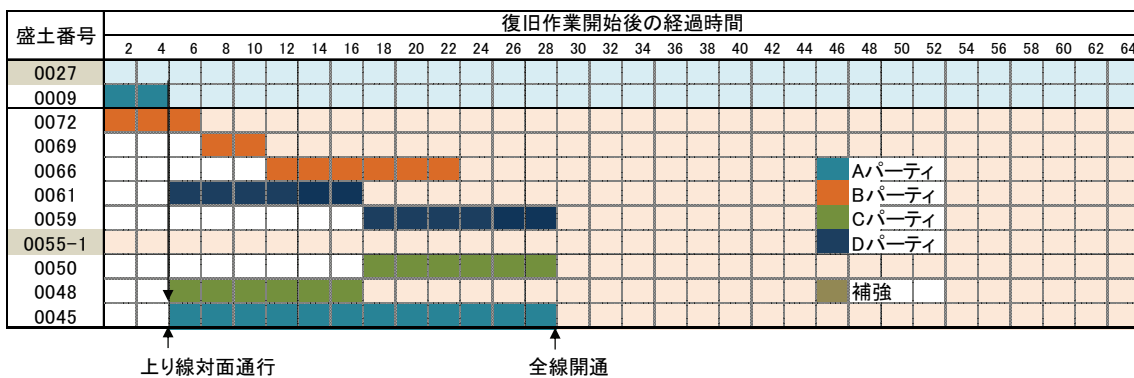
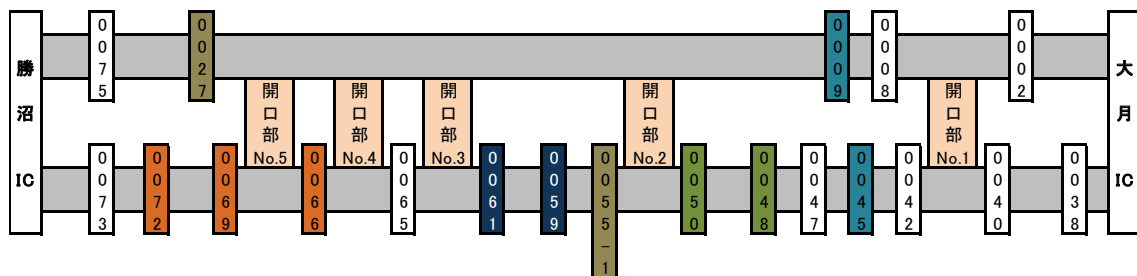


図 4.32 復旧に要する時間経過チャート（時間短縮を考慮した作業）

4.4.4 事業継続計画と事業継続マネジメント

事業継続計画は、策定（Plan）するだけでは効果はない。それを普段から実施（Do）し、自社内は勿論、関係する他社、地域社会にも周知し、足りないものがないのか調べ（Check）、あれば随時改善していく（Action）、すなわち品質管理の根幹を成す PDCA のマネジメントサイクルとして継続的に運用していくことが重要となる。これが事業継続マネジメント（Business Continuity Management）: BCM である²⁴。

図4.33はそのBCMのサイクルを示したものである。図に示されたように様々な自然災害により生じるリスクを明らかにし、その評価結果に基づいてBCPを策定（Plan）した上で、確実に運営、実施（Do）する。そしてその効果、問題点などを明らかに（Check）した上で、改善する（Action）というマネジメントのPDCAサイクルを継続的に運用することが大切なのである。

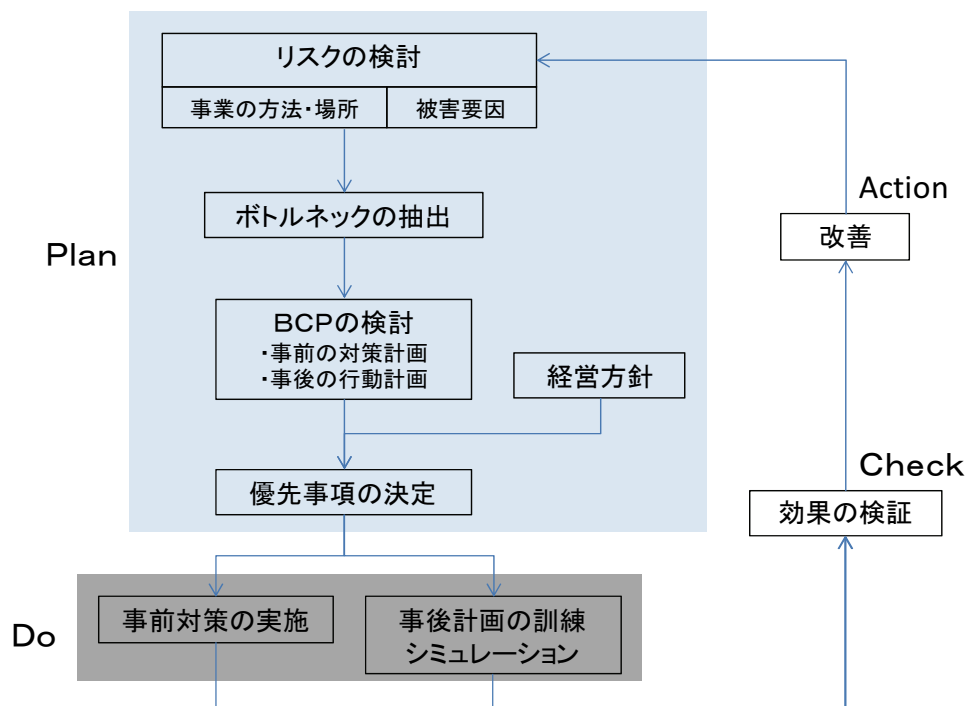


図 4.33 事業継続計画とそのマネジメント(BCM)

このような BCP を策定することにより以下のことが可能となる。

1) 自らの弱点、経営上のボトルネックを知ることが出来る

BCP の策定に当たっては、まず経営に重大な損失を与えるであろう災害を具体的に想定し（例えば中央防災会議が示す東京湾北部地震：M=7.3）、それが発生した場合に自社の経営資源にどのような被害が生じるのかを出来るだけ具体的に分析、評価する。

自社の保有する事務所はどうなるのか？社員は防災対策を講じているのか？当座の運転資金はあるのか？資材の備蓄はどうか、またその調達はどうなのか？等々様々

な状況が検討対象となる。すると現状では何ら問題は無いように思われていた自社の組織やその運用法が潜在的に抱える問題点が浮かび上がってくる。その中でも特に事業全体に大きな影響を与えるような要素がボトルネックである。

2) 自社が社会からどのように評価されているのか？なにを期待されているのか？が判る

BCP を策定する際に、資機材の調達先や情報の収集先（関係する公官庁、顧客など）を明確にし、災害時の対応についてさまざまな取り決めをしておく必要がある。この時にやはり様々な不明確な点や問題点が明らかになってくる。

自社の BCP の中では重要な関係先と思っていた相手先の BCP の中では、自社が明確に位置付けられていない、それほど期待されていない。あるいは相互に BCP での関係が確認されていても、災害時の具体的な行動にレベル差がある。等々、様々なことが考えられる。

こうした問題点に対し順次改善を加えること、すなわち BCP を PDCA サイクルに従って実施することにより、災害時の事業継続の可能性を高めるばかりでなく、

3) 自社の経営能力を向上させるための具体策が設定できる

4) 社会からの信用の向上を図れる

など企業の価値を高めることが可能となる。

これからの事業者には、組織として求められている社会的責任に対して真面目に取り組み、着実に成果を見える形を出していくことが求められる。そして事業者としての社会的責任を果たすためには、BCP の策定と BCM サイクルの継続的实施は不可欠といえる。そしてその中で、経営層から従業員に至る一人ひとりが組織の一員として、そして地域社会の一員としての自覚と誇りを持ち、常時にも非常時にも的確な行動を取れるようになることが重要なのである。

第 5 章 管理注目度の異常降雨に対する適用性の検証

5.1 管理注目度の異常降雨に対する適用性

第2章では全国の降雨災害事例を分析し、異常気象に伴う大雨による災害が毎年発生していることをしめした。特に近年では、2012年の九州北部豪雨で見られるように、時間100mmの降雨が4時間も続くというような異常降雨が頻発しており、こうした異常降雨による災害も多くなってきている。このような異常降雨時には、高速道路周辺斜面の崩壊や土石流の発生ばかりでなく、盛土などの土構造物周辺の地形を反映した局所的な集水により、排水設備の能力を超えた雨水の越流が発生し、路面の水浸や盛土内の水位上昇による盛土の崩壊が発生することが懸念される。このような異常降雨による災害を減らすためには、排水設備の計画容量を大きくし、的確な維持管理を行うことによって機能不全を無くすることが重要である。しかし、線状構造物である高速道路では、全線にわたって設けられている排水設備の見直しや保全方法の改善を行うことは困難であり、異常降雨に対する危険度を評価した上で優先度を定めた上で対策を講じることが望ましい。

第3章では、降雨と地震に対する管理注目度を提案し、第4章では、力学的安定性の観点から、この管理注目度が盛土の危険度と整合性を有することを検証した。この降雨に対する管理注目度が異常降雨に対しても適用できるものであれば、点数の高い場所について重点的に点検や補修を行うことで、異常降雨に対しても土構造物の被災を減らすことができると考えられる。

このような観点から、ここでは盛土が受ける降雨の影響を、管理注目度が適切に評価していることを検証する。

注目した点は、降雨に対する管理注目度が比較的高い区間と比較的低い区間（図5.1）における、降雨の盛土への影響度の比較である。最初に、既往の検討で多く用いられている傾斜と集水面積により、これら2種類の場所における降雨の影響を検討した。

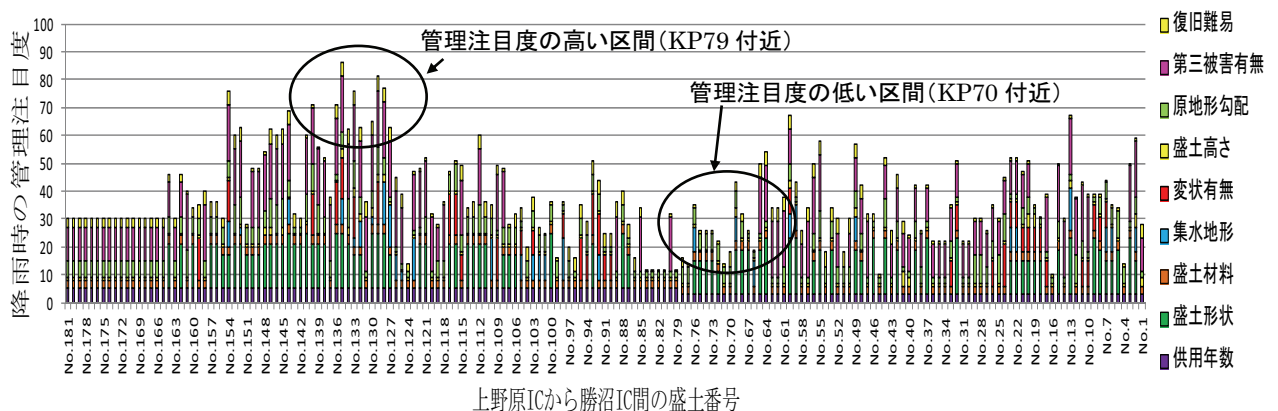


図 5.1 盛土に及ぼす降雨の影響を検討した区間

5.2 既往の手法による盛土への影響評価

5.2.1 管理注目度の高い場所での検討

まず傾斜と集水面積解析を用いて、管理注目度の高い場所における盛土への異常降雨の影響評価を試みた。検討は、集水地形が多く見られる 79.0KP 付近の一連の斜面部を対象とした。図 5.2 に、航空レーザ計測で得られた DEM を用い、検討領域 A と B の地形を示す。

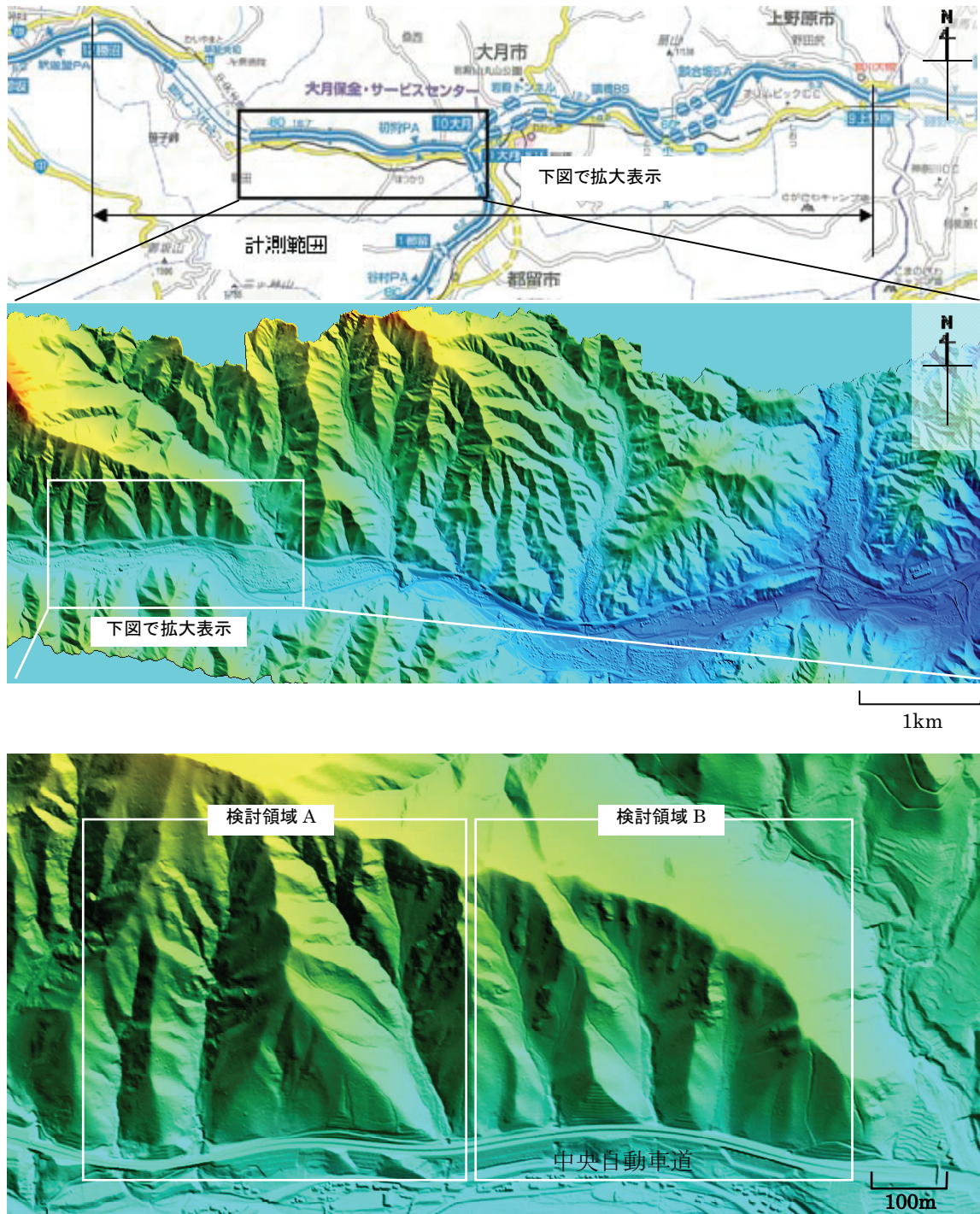


図 5.2 管理注目度が高い区間についての検討領域

5.2.2 傾斜での分析

図 5.3 と図 5.4 は、図 5.2 の 2 つの検討領域について、それぞれ傾斜で彩色した鳥瞰図である。これらからは、注目した領域の大部分が 30° 以上の傾斜を持つ斜面から構成されていることがわかる。また、沢部には傾斜が急変した平坦箇所が認識できるが、この部分は堆積物が多い場所であると推測される。この堆積物の下部は透水性が高い可能性があり、このような箇所では地下水が集中しやすく、異常降雨時には急激な増水により土石流が懸念される。

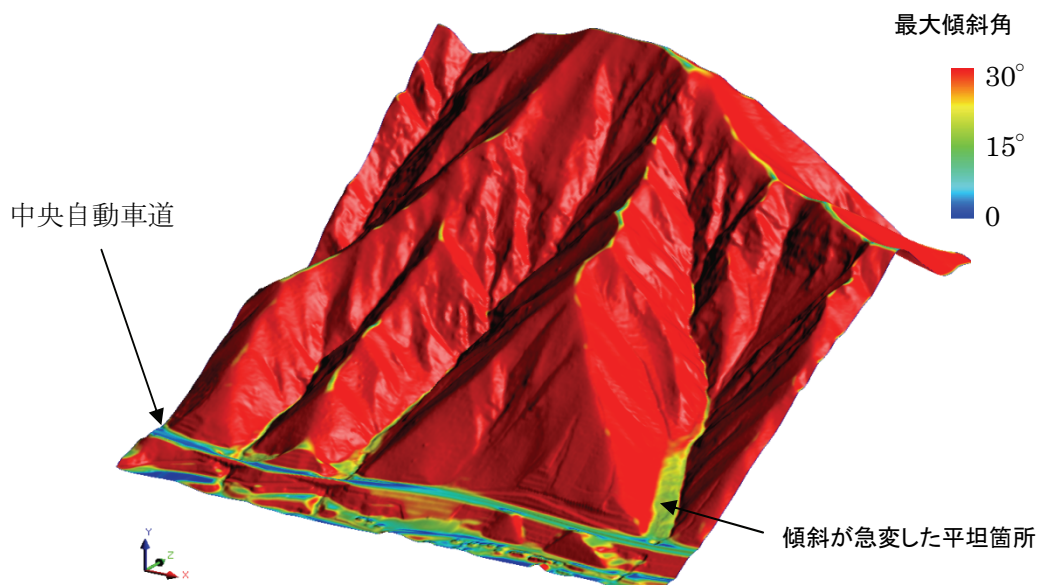


図 5.3 最大傾斜量による面コンタ表示 (検討領域 A)

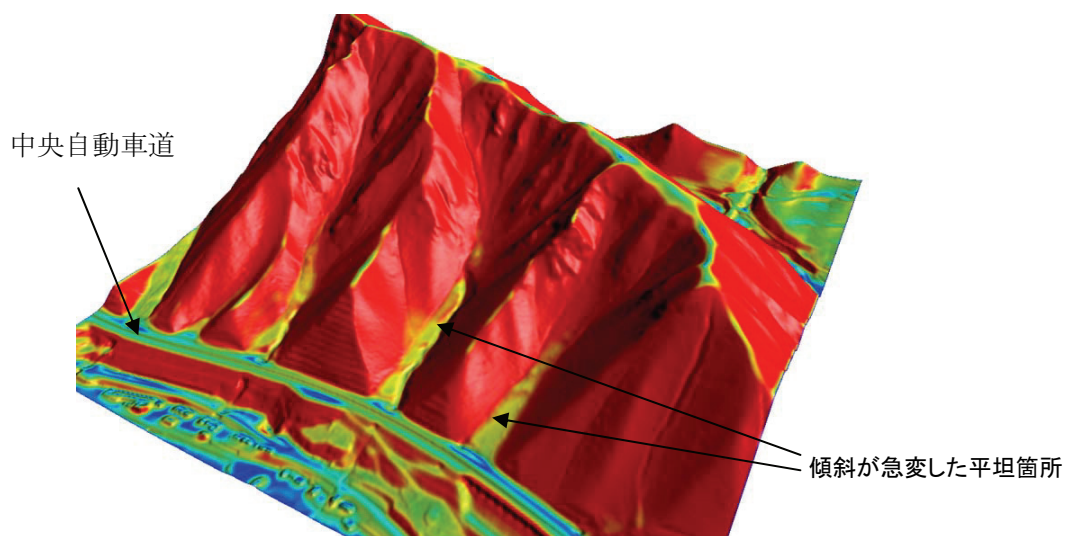


図 5.4 最大傾斜量による面コンタ表示 (検討領域 B)

5.2.3 集水面積解析での評価

次に、集水面積解析を用い、盛土に対する異常降雨の影響を評価した。集水面積解析とは、DEM 上の一つのグリッドについて、そのグリッドより上流側にある全てのグリッドの面積の総和を求めておき、コンタ表示などにより集水面積の大小を可視化するものである。各グリッドの集水面積は、全グリッドの傾斜量をもとに計算することができる。集水面積の大きい場所は河道を形成することから、集水面積解析は流路網の検討などで用いられている。得られた集水面積と単位時間当たりの降雨量の積は、降雨時にその河道を通過する流量の目安となる。

図 5.5 と図 5.6 に、注目した 2 つの領域について集水面積解析の結果を示す。集水面積の大きな場所は細い帯状に分布し、この部分で降雨時に流路が形成されることがわかる。このように、精密に流路を推定できることが、詳細な DEM を用いる利点である。また、同図からは集水ポイントを確認できることがわかる。この領域では、集水ポイントには高速道路の横過構造として、集水を的確に流下する排水設備が設置されていることがわかる。

ただし、集水面積を用いた評価では、流路の形成は表現できるものの、異常降雨が盛土に及ぼす影響は評価できない。このため、降雨の影響を可視化できる新たな手法が必要と考えた。

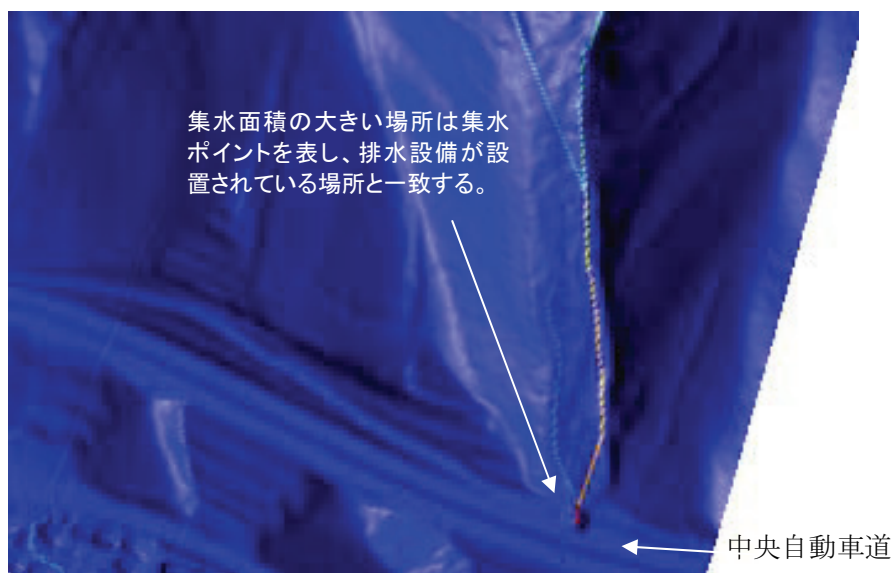
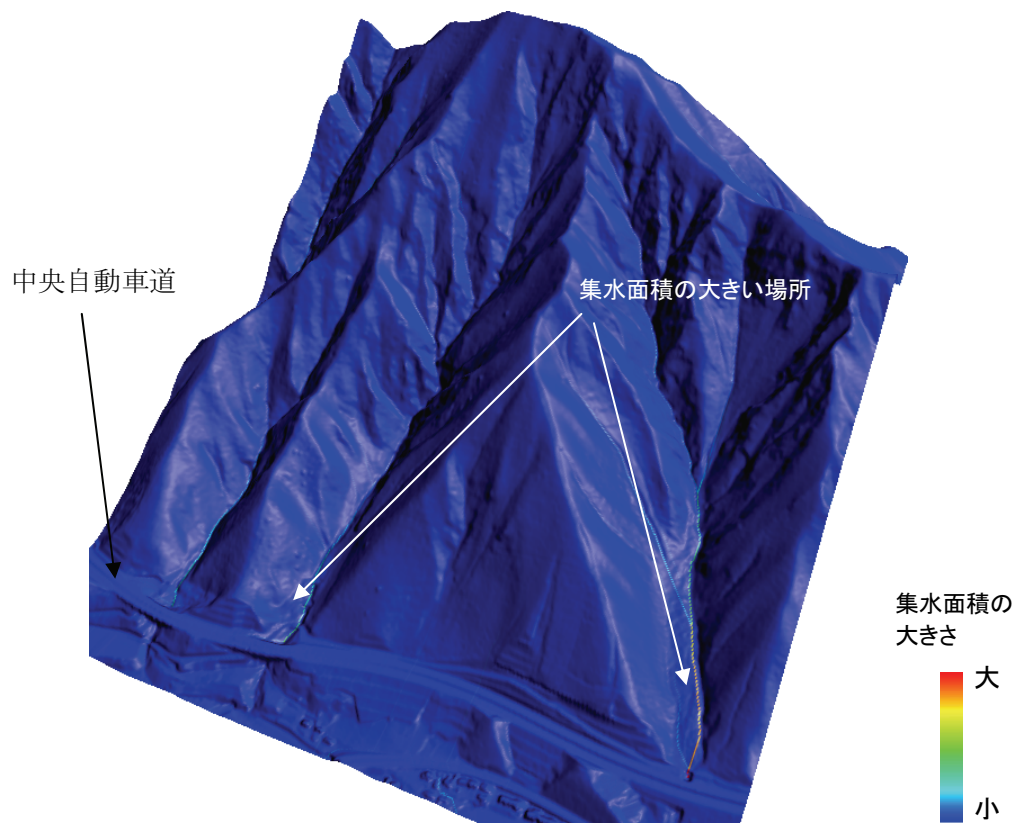


図 5.5 集水面積解析結果の面コンタ表示 (検討領域 A)

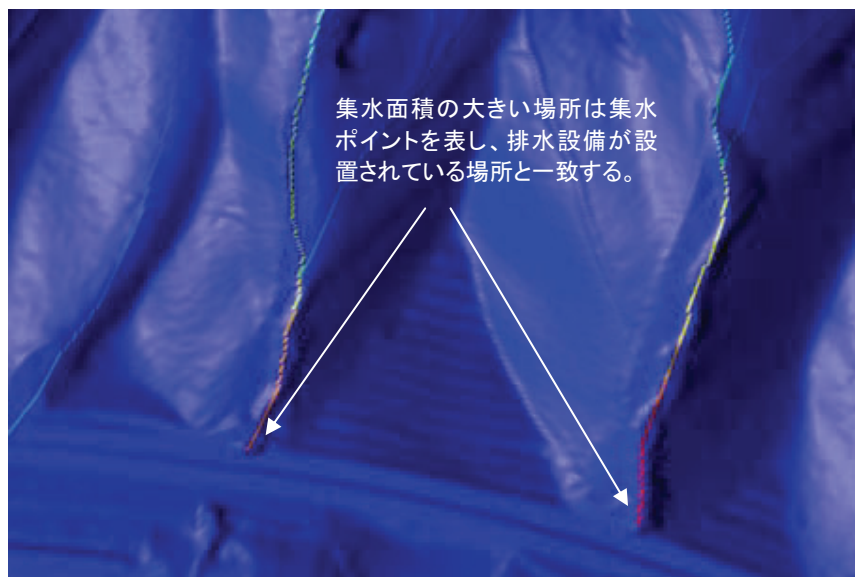


図 5.6 集水面積解析結果の面コンタ表示（検討領域 B）

5.3 流線追跡解析の開発

5.3.1 異常降雨時の影響評価の課題

集水面積解析を用いた検討では、降雨時に形成される流路や集水量などを求めることができるものの、図 5.5 などに示すとおり流路のみが強調され、高速道路周辺の盛土へ雨水が集水されていく様子を視覚的に表現することはできない。

集水面積解析で抽出される、集水面積が大きく道路を横断するような流路に対しては、高速道路には適切な排水設備が既に施されている。異常降雨時に注意すべき場所は、斜面から流れる雨水が、高速道路沿いの排水設備や地下排水設備が施された土構造物へ集まりやすい場所である。筆者らは、これまでの降雨災害の分析結果から、排水機能の不備や地下排水機能の劣化した土構造物が雨水の集水により被災していると考えている。このような場所で排水機能の不全などが発生した場合には、集水面積や集水度が比較的小さい場所であっても、高速道路の浸水や盛土内への雨水の侵入が生じ、盛土の不安定化などが懸念されるためである。また、トンネルの坑口付近などでは、高速道路への越流が生じ交通の障害となることも懸念される。したがって、異常降雨時に注意すべき箇所を抽出するためには、集水面積や集水度が比較的小さくとも、雨水の流れを明瞭に可視化する手法が必要である。そこで、DEM 上に雨滴を配置し、地形に沿って流下する雨滴の流線を描き、雨滴の流路を積極的に可視化する方法を考案した。

5.3.2 流線追跡解析の手法

流線を追跡しながら流れの諸量を計算する手法は、ユタ大学が開発した TauDEM などでも採用されている^{25),26)}。ただし、流線そのものを表示するのではなく、集水面積解析において、精度向上を図る目的で用いられている。本研究では、流線を DEM 上に積極的に表示することで、雨滴の経路を可視化するとともに、流線やその密度より雨水の流れの特徴を評価することとした。筆者の方法では、DEM で表現された地形データの上に、雨水に相当する仮想的な点(雨滴)を置き、これが地表面の最大傾斜方向に運動すると定義して流線を描き、この流線の離散集合より雨水の流れや集水の特徴を評価する(図 5.7)。

この流線追跡解析では、最初に DEM に基づいて作成された地形データ上に雨滴を配置する(図 5.8)。雨滴は、 Manning 式で表される流速で最大傾斜方向に流動していくこととし、微小時間 Δt づつ雨滴を動かし到達点を計算する。これを繰り返すことで、雨滴の流線を描いていく。Manning 式は、式(5-1)のとおりである。

$$v = aI^{0.5}/n \quad \dots \dots \dots (5-1)$$

ここに、 v は流速、 a は流路の特徴を表す定数、 I は動水勾配、 n は粗度係数である。

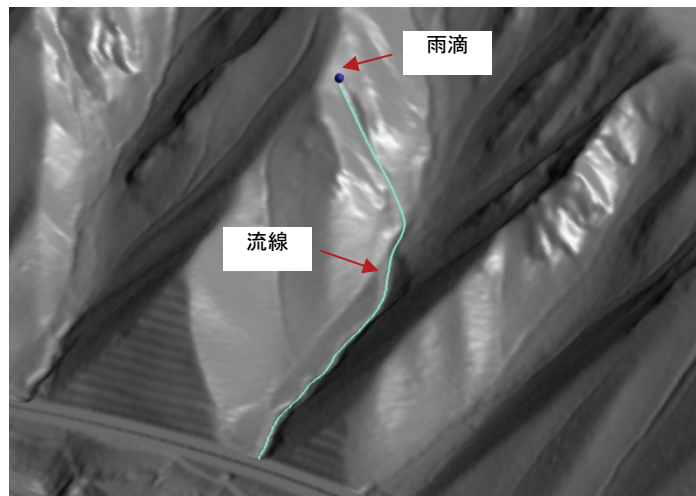


図 5.7 雨滴の流線追跡法の概念

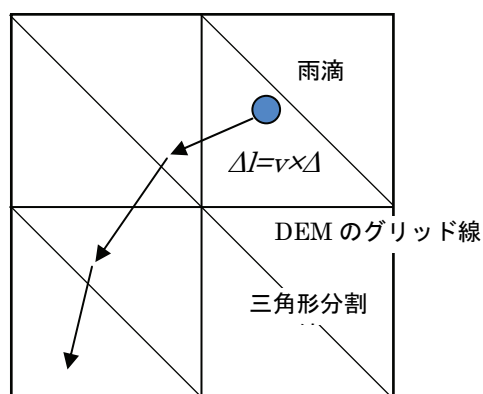


図 5.8 流線追跡解析の方法

なお、本研究では当面流線の可視化のみを目的とするため、全ての場所において $n=1$ 、 $a=1$ とした。このため、流速に関しては相対的な比較のみが可能である。また、動水勾配は DEM の各グリッドから求められる最大傾斜度とした。最大傾斜度を求めるに際しては、図 5.8 に示すようにグリッドを二つの三角形に分割し、三角形内は平面で最大傾斜度は一定とした。三角形の分割では、分割線がグリッド内の尾根や谷となる方向になる分割を選択することで、グリッドが表現している面の特徴を保つように処理を行った。

雨滴は、DEM のグリッドとは別に設定した等間隔メッシュの中心に配置することとした (図 5.9、図 5.10)。各グリッド上に配することも考えられるが、流線の本数が膨大となり、流線の可視化を行う上では逆効果となると考えたためである。雨滴が 1 メッシュ分の面積に降った雨量を代表していると考えれば、流線 1 本はこの雨量を持っていることとなり、任意の 1 メッシュ内を通過する流線の本数をカウントすれば、このメッシュ内を通過する雨量を表すこととなる。ただし、この雨量は地下への浸透や蒸発散などが無い場合の量であり、豪雨の影響度合いを評価する一つの指標である。

また、任意のメッシュを通過する各流線については、メッシュに到達するまでの相対的な時間を求めることができる。注目しているメッシュに最も遅く到達した流線の到達までの時間は、最大流量となるまでの時間を表しており、雨水の到達が早いか遅いかを表す指標となる。

このような処理により求められる流線は、図 5.11 に示すとおり等高線と直行する方向に進んでいくこととなり、雨水の流れを視覚的に表現する。なお、本手法で流路の特徴を表す係数や粗度係数を定めていないため、求められる流量や到達時間それ自体には意味がないものの、集水の度合いや最大流量となるまでの時間などを相対的に比較することは可能となる。後に示すとおり、描かれた流線からは視覚的に雨水の流況を理解することができる。

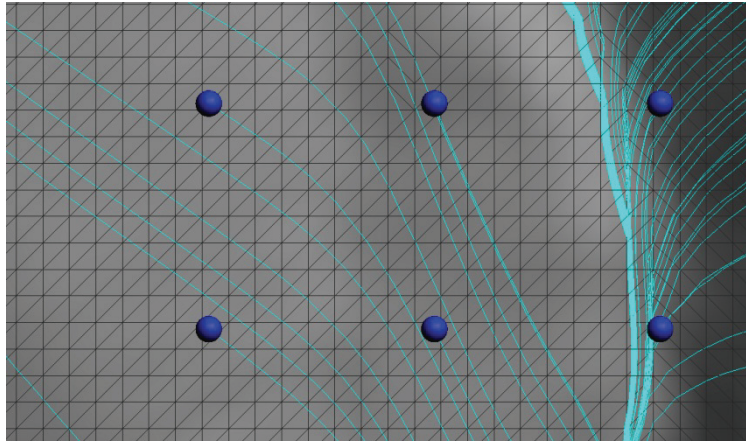


図 5.9 詳細 DEM 上への雨滴の配置

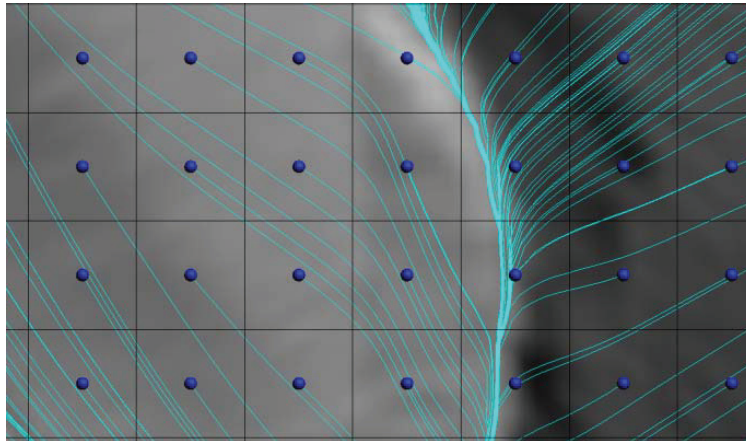


図 5.10 等間隔メッシュの中点への雨滴の配置

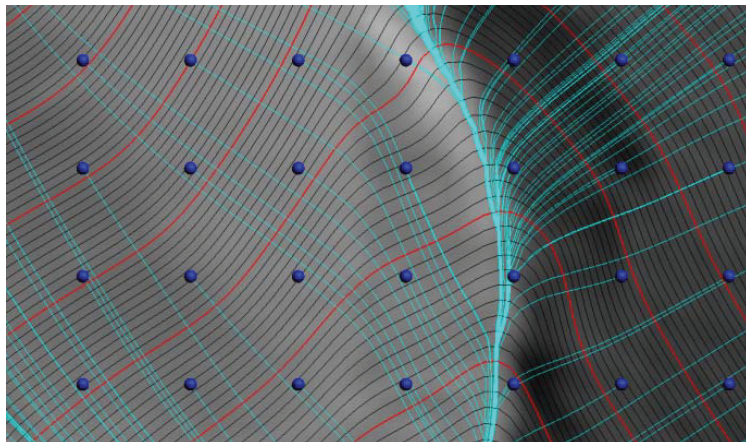


図 5.11 流線の特徴 (等高線に直交)

5.4 管理注目度と異常降雨の影響度との整合性

5.4.1 管理注目度の高い場所での解析結果

図 5.2 に示した 2 つの領域で行った流線追跡解析の結果を、図 5.13 と図 5.14 に示す。解析では、10m メッシュの中心点に雨滴を配置した。まず、本地形における雨水の流況を明瞭に読み取ることができることがわかる。また、集水面積解析では表現しきれなかった、比較的集水度の低い場所での雨水の流れも示されている。解析より明らかとなった、盛土の背後で流線の密度が比較的高い場所を、○丸印で図中に示した。この部分では、高速道路区域外からの雨水は、高速道路沿いの排水設備などにより排水される。しかし、異常降雨時などで排水機能に不備が生じた場合に、盛土内への雨水の浸透が懸念される。また、この部分では、地表面近くの地下水の流れも描かれている流線と似かよった流況となっている可能性もあり、地下水排水機能が劣化した場合には、地下に浸透した雨水により盛土の水分量が増加する可能性もある。このように、流線追跡解析によって異常降雨時に注意を要する箇所を具体的に特定することができ、排水設備の点検箇所や異常降雨に対する予防保全を施す箇所などを効果的に選定できる。

また、解析結果から見られる雨水の盛土や道路面への集中のようすから、本検討領域の盛土が降雨の影響を受けやすいことがわかる。このことは、降雨に対する管理注目度が高いと判断された場所が、降雨の影響が大きい場所であることを示している。

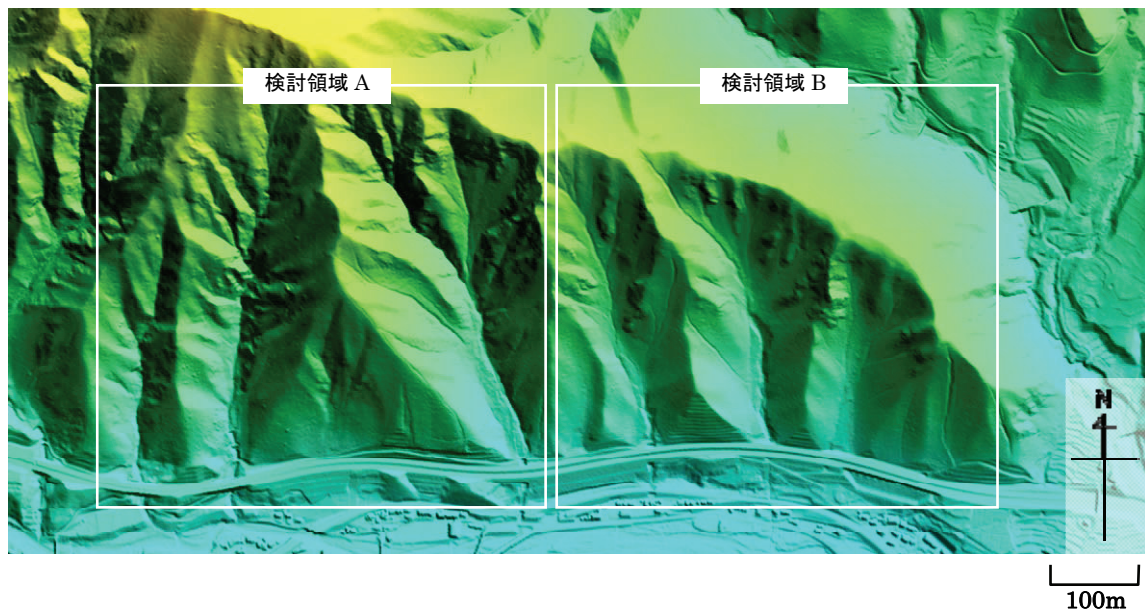


図 5.12 管理注目度が高い区間についての検討領域（再掲）

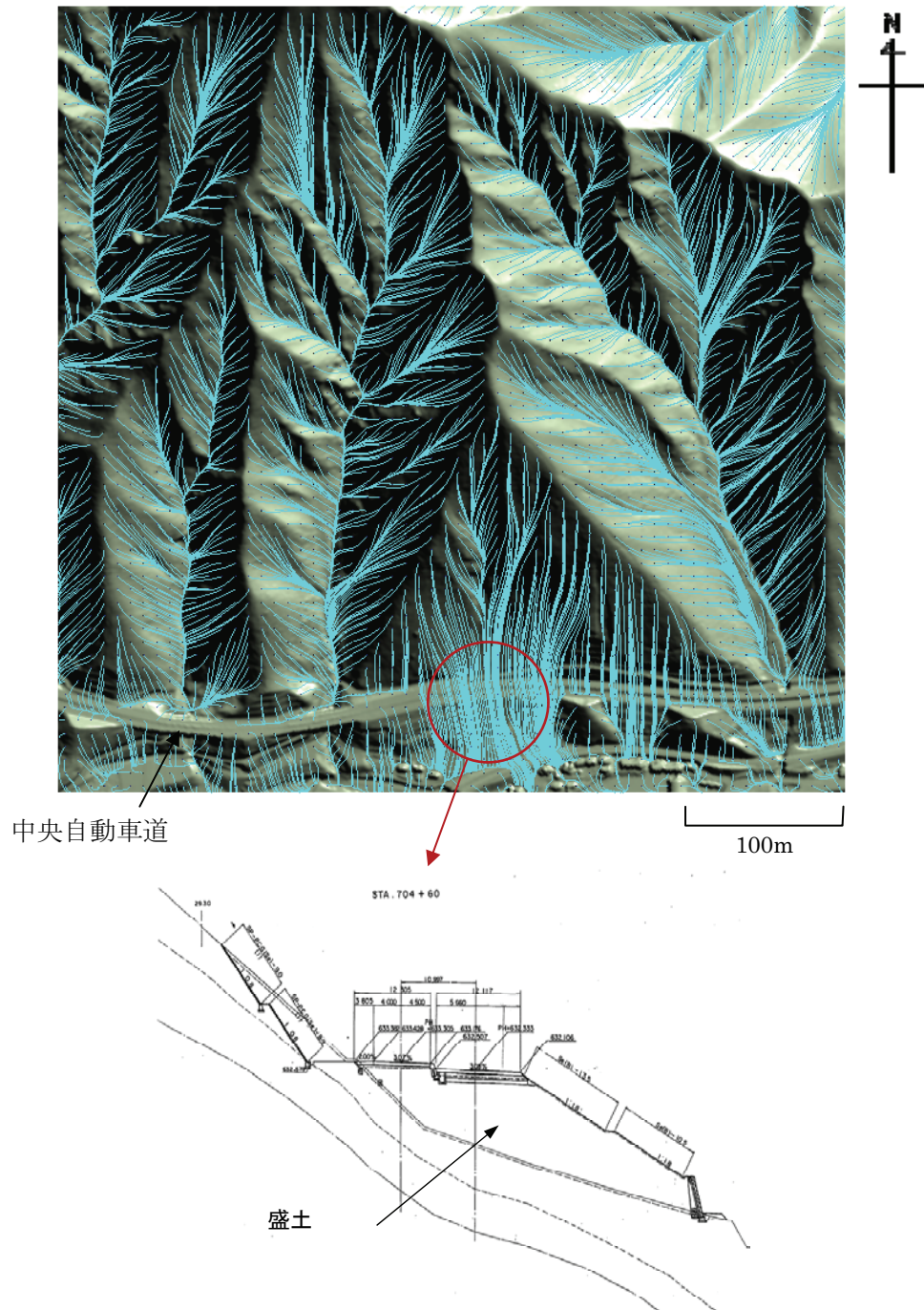


図 5.13 検討領域 A の解析結果と雨水が集水（○印）される箇所の横断図

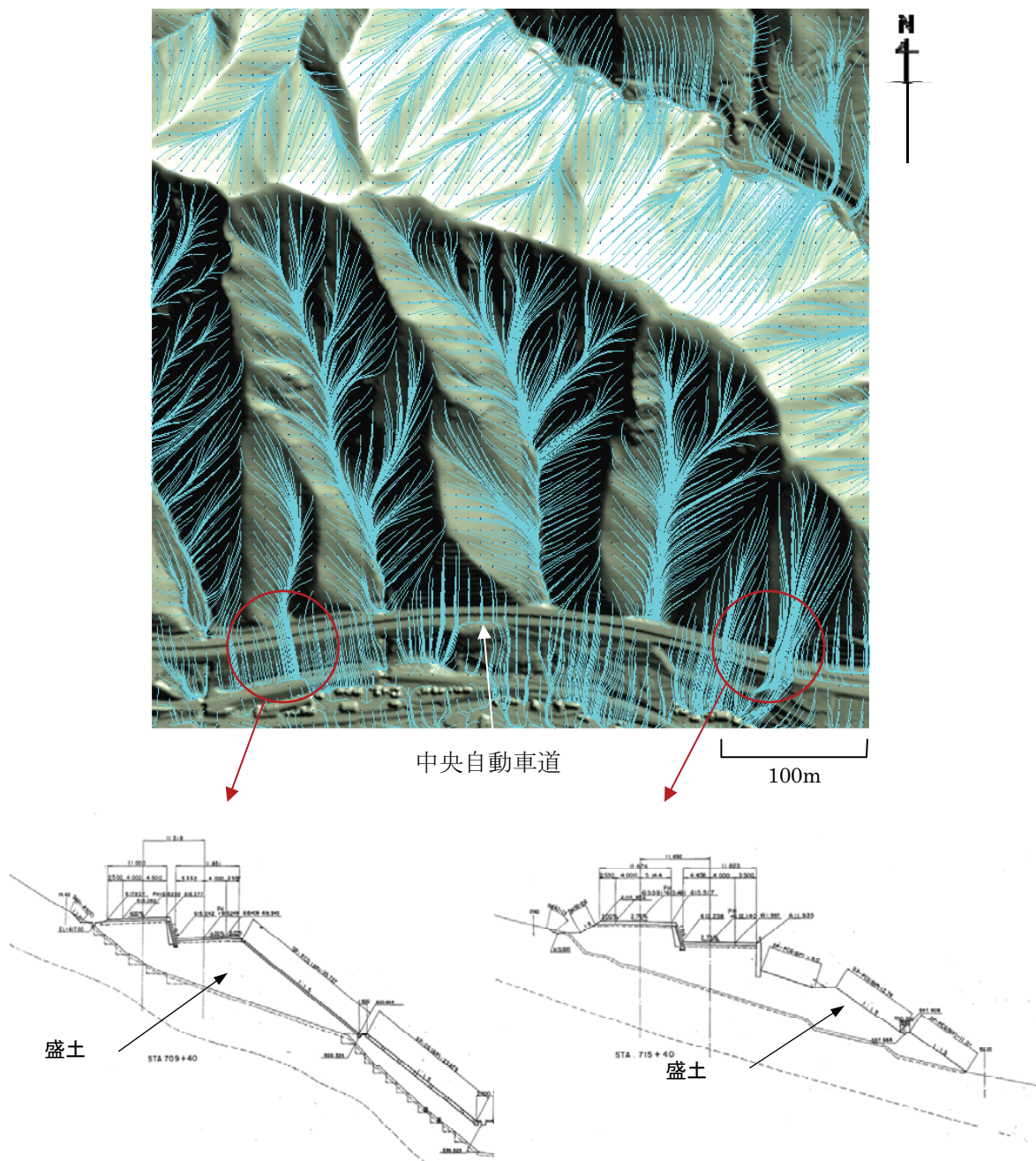


図 5.14 検討領域 B の解析結果と雨水が集水 (○印) される箇所の横断面図

5.4.2 管理注目度の低い場所での解析結果

降雨に対する管理注目度が低い場所で、同様に流線追跡解析を実施し、異常降雨の盛土への影響を評価することを試みた。検討の検討は、管理注目度が比較的低い 70.0KP 付近を対象とした。図 5.15 に、航空レーザ計測で得られた DEM を用い、検討領域の地形を示す。

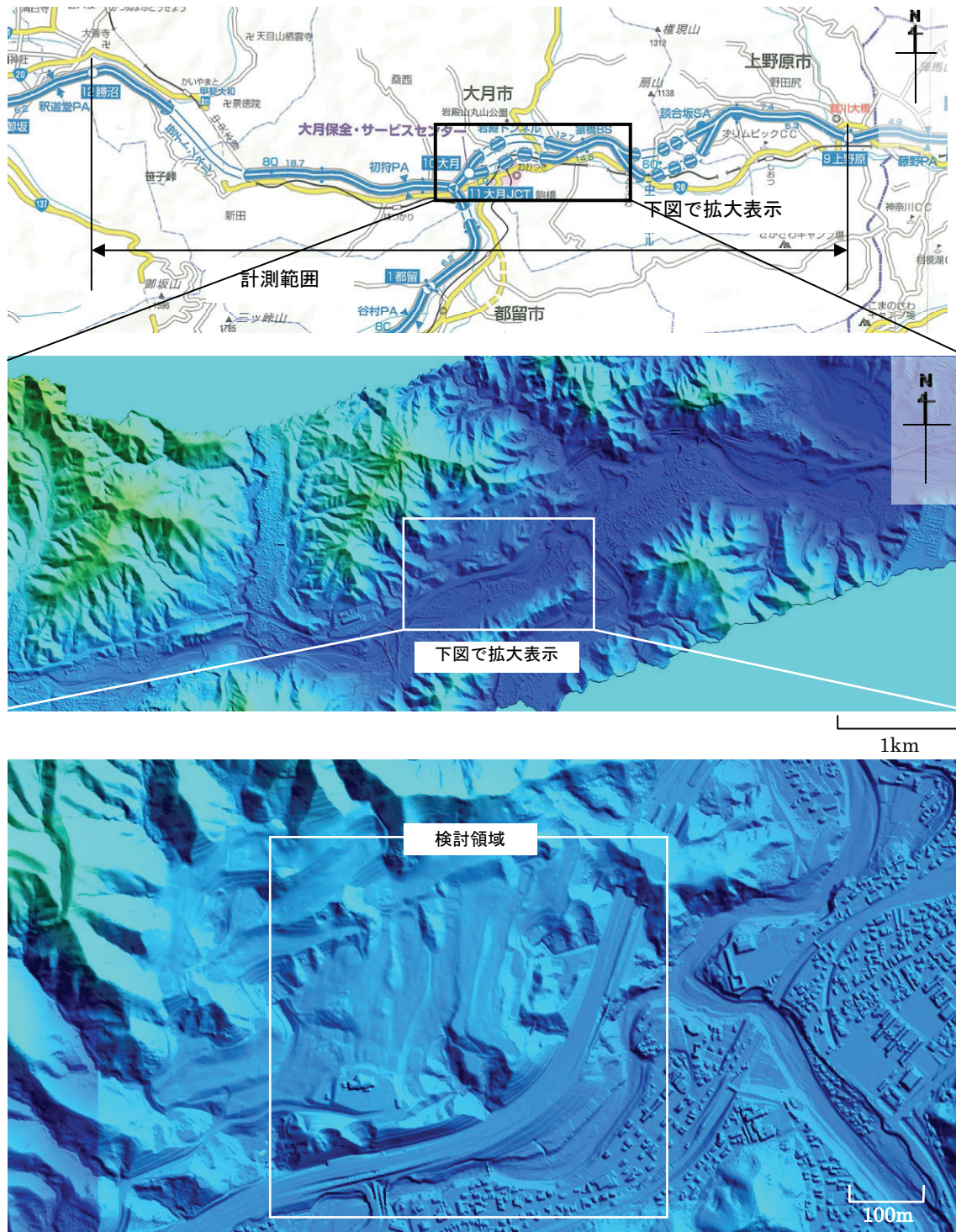


図 5.15 管理注目度の低い区間についての検討領域

図 5.15 の検討領域を対象として、流線追跡解析を実施した結果を図 5.16 に示す。本領域は、比較的平坦な地形をしており、降雨に対する管理注目度においても、「集水地形」や「原地形の勾配」に関する点数が低いために、管理注目度の点数が低くなっている。

流線追跡解析からは、管理注目度の高い区間での解析結果で顕著に見られた、盛土へ向かう雨水の集中は見られず、雨水は地形に沿って拡散する傾向にあることがわかる。切土の区間においても雨水の集中はほとんどなく、道路への逸水が懸念される場所も見当たらない。このことは、流線追跡解析が盛土や道路面に対する雨水の集中度合いを可視化する有力なツールであることを示すと同時に、管理注目度の小さい場所では、降雨が盛土に及ぼす影響も小さいことを示している。

先に示した、管理注目度の高い場所での解析結果を併せ評価すれば、降雨に対する管理注目度の大小は、異常降雨が盛土に及ぼす影響をも適切に表現しているものと考えられる。

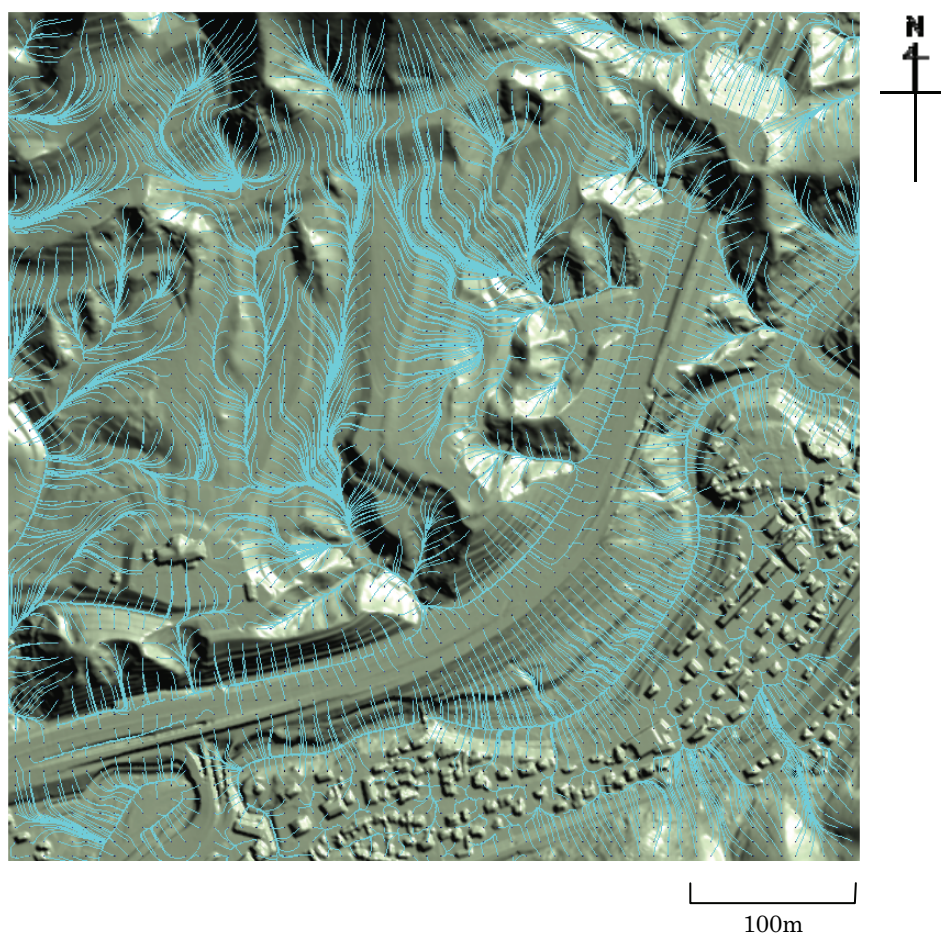


図 5.16 管理注目度が低い区間における解析結果

5.5 トンネル坑口付近の評価への応用

トンネル坑口部は、トンネル施工が斜面の安定性に及ぼす影響や、自然斜面から高速道路に浸入する雨水処理についての検討はなされている。しかし、近年の異常降雨の影響でトンネル坑口部の土砂流出などの災害が発生していることや、当該区間は建設から 40 年以上経過していることで地形の変化も想定されることから、本手法を用いて異常降雨時に注意すべき箇所抽出を試みた。

検討の対象は、岩殿トンネルの東側（上野原側）の坑口と大月トンネルの両坑口である。図 5.17 は、これらが含まれる領域について、得られた DEM 上に地形のゆがみを解消したオルソフォト画像を貼り、さらに光線との角度で照度処理を行ったものである。このような処理によって地形の特徴を理解しやすくなる。図 5.18～図 5.20 に、各トンネル坑口での解析結果を示す。また、同図にはメッシュを通過する流線の密度を、等値線（線コンタ）で表示した。等値線が密集している場所は集水ポイントとなっているが、各図の左に示す管理図面でも排水処理がなされていることがわかる。解析結果では、坑口付近の斜面における雨水の流れが可視化できているため、単に集水ポイントの照査だけではなく、高速道路上に越水しやすい場所なども指摘することができる（図中の赤い円）。このように、流線追跡解析は、現状の排水設備との比較のもとで、異常降雨時に注意すべき箇所や防災を検討すべき箇所の特定を効率的に行うことができる手法である。

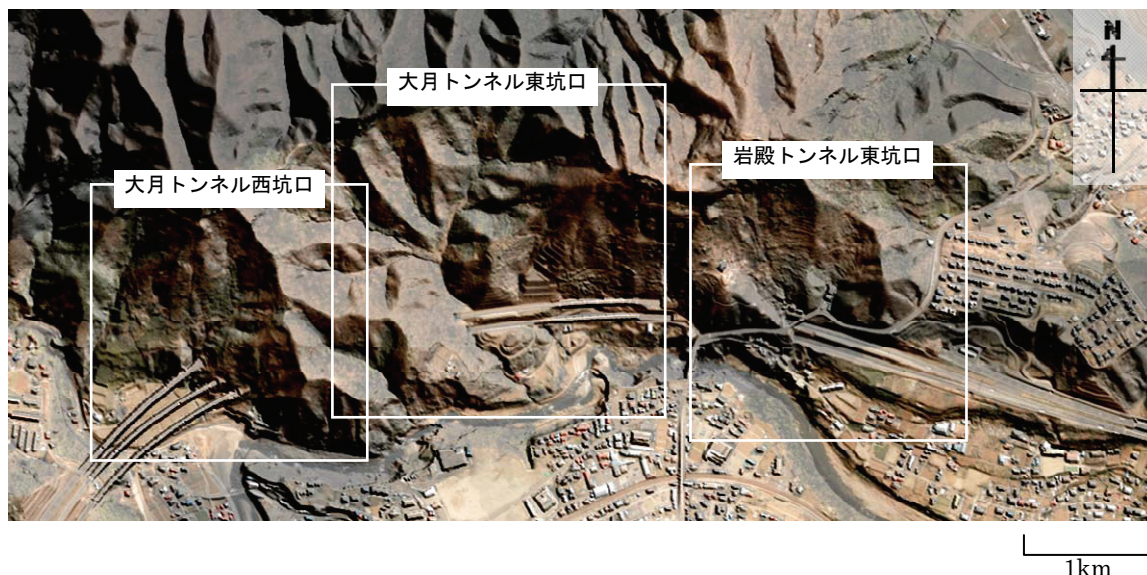


図 5.17 検討の対象としたトンネル坑口（オルソフォト画像に DEM をもとに照度処理）

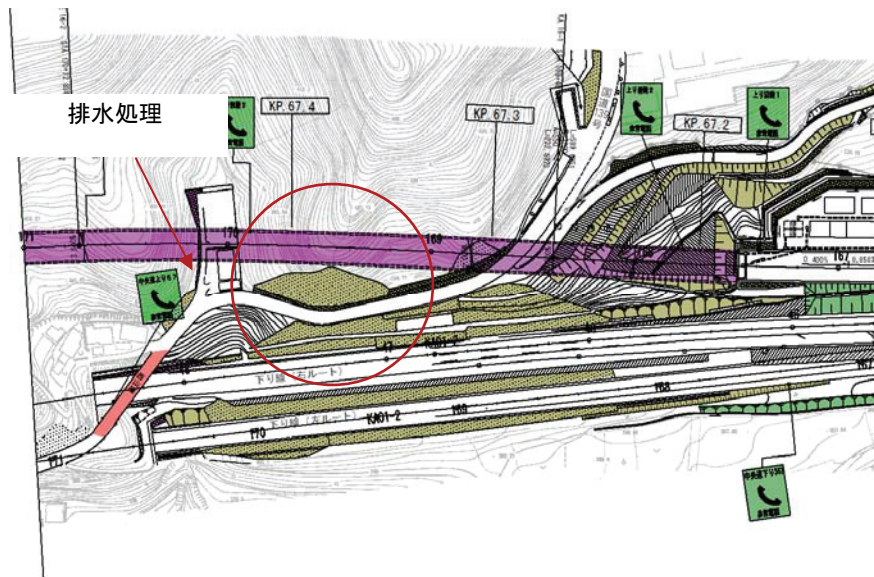
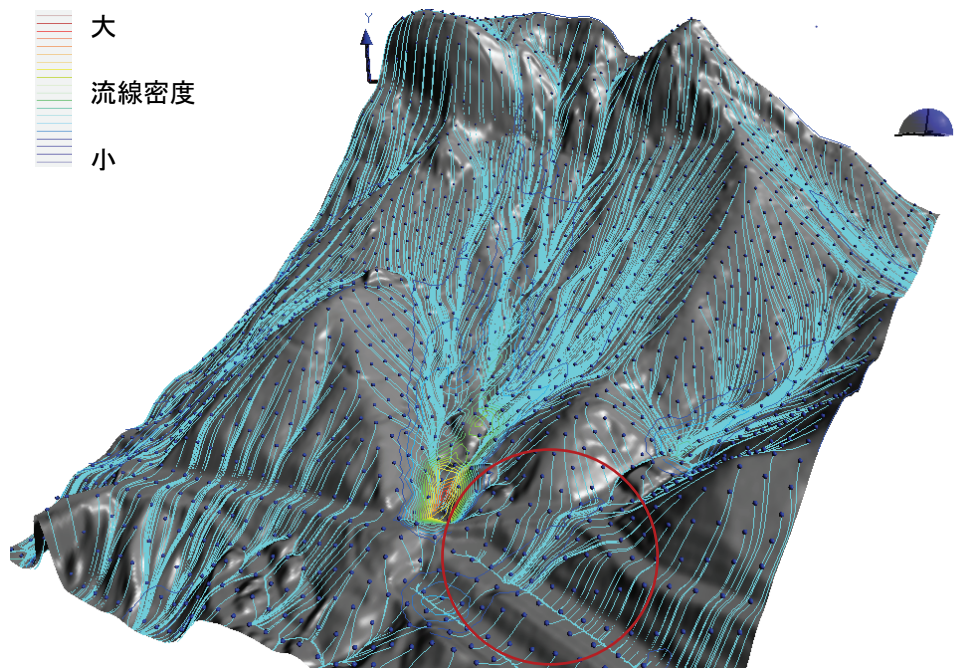


図 5.18 岩殿トンネル東坑口の流水解析結果（上）と管理図面（下）
赤丸は豪雨時注意箇所

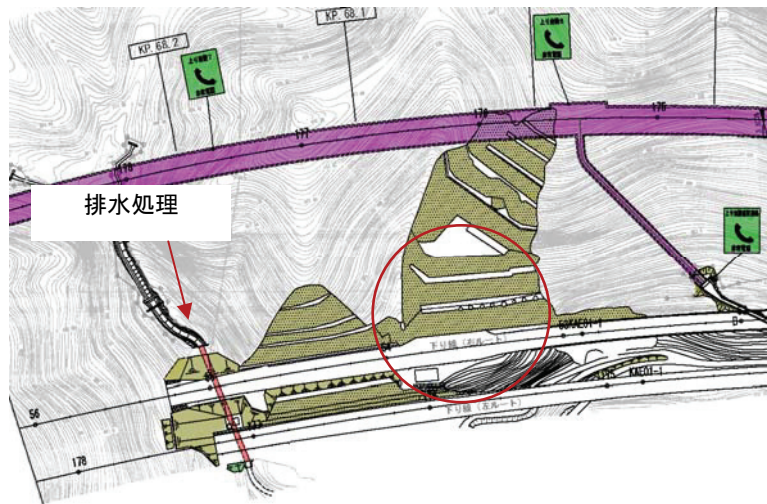
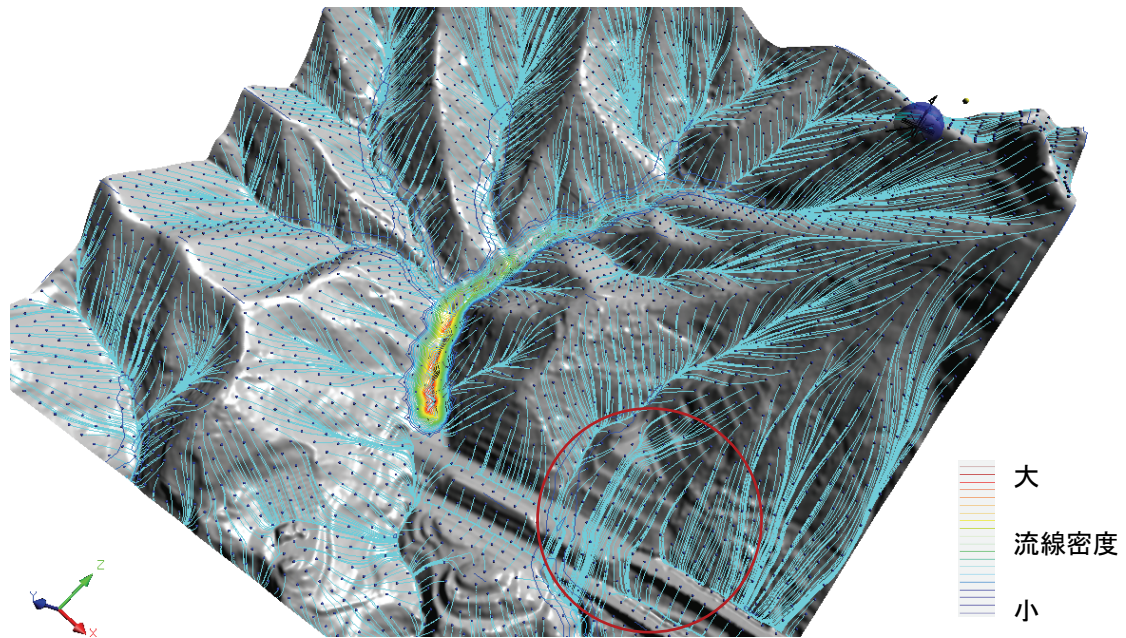


図 5.19 大月トンネル東坑口の流水解析結果（上）と管理図面（下）
赤丸は豪雨時注意箇所

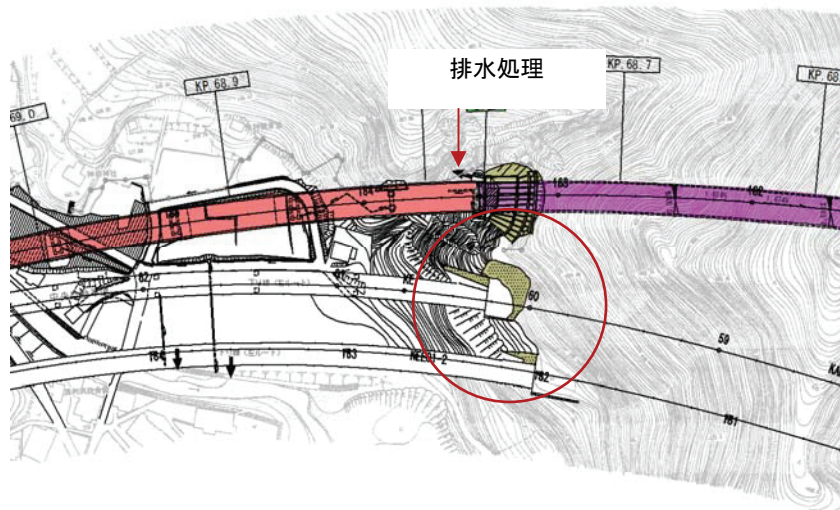
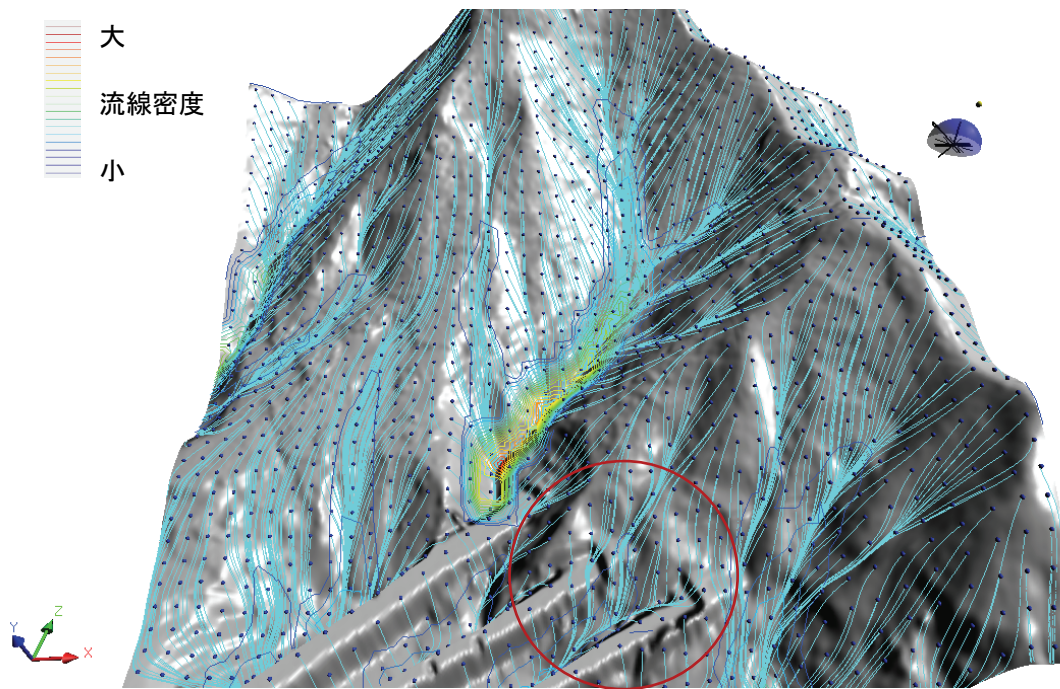


図 5.20 大月トンネル西坑口の流水解析結果（上）と管理図面（下）
赤丸は豪雨時注意箇所

第 6 章 結論

本研究は、高速道路事業者が策定する事業継続計画へ貢献すべく、日々実施されている点検作業からの情報や、これまでに蓄積されている膨大な過去の災害履歴情報に着目し、それらを分析することによって線状構造物にある多数の土構造物（盛土）の中から「被災し易い箇所」を抽出する手法の確立を図ることを目的として実施したものである。

第 2 章では、全国の高速道路の土構造物における過去の自然災害事例を分析し、被災に繋がる要因となる項目を調べた。分析には、12 年間に取りまとめた「降雨災害履歴調書」に記録された 2,373 件の災害事例と、日本道路公団が管理している供用路線での M6 以上の巨大地震による被災事例の 7 例を対象とした。この作業により、以下の知見を得た。

- 1) 異常降雨による災害は、季節の区別なく、最少 5 件／年～最大 105 件／年で年平均約 30 件発生している。(図 2.2)
- 2) 設計基準に基づき品質管理されて構築された盛土部は、地質構造や切土掘削に伴う応力解放の影響を受けると考えられる切土部と、同様な災害発生件数や災害規模であった。(図 2.4)
- 3) 連続降雨量が 100mm を超えると災害発生件数が急増する。また、異常降雨時には災害規模が大きくなる。(図 2.6)
- 4) 降雨状況別の災害発生には地域の特徴が現れているものの、全国で大規模以上の災害が発生している。(図 2.11)
- 5) 開通後 10 年以内は盛土、切土部ともに災害を受け易いが、それ以降は災害箇所の補修や補強を施すことで耐降雨性能が向上し災害発生件数が減少している。ただし、台風や異常降雨を受けた場合などは被災する。(図 2.13)
- 6) 盛土では、降雨や地下水の浸透により飽和状態となることが災害発生の最も大きな要因である。(図 2.14)
- 7) 傾斜地盤や集水地形の盛土部では、災害規模が大きくなる。(図 2.15)
- 8) 粘性土質の材料で施工された盛土は、災害発生率が高く、しらすやまさ土の場合には災害規模が大きくなる。(図 2.16)
- 9) M6 を超える地震では、主に盛土路肩部や構造物の取付け部での段差が発生する。(写真 2.2、写真 2.3)
- 10) M6 を超える地震であっても、道路震災対策便覧の被災パターン分類の被災Ⅲ型に相当する被害が発生していない。しかし、大分県中部地震や新潟県中越地震の被災では傾斜地盤上の腹付け盛土部では被災度「A」の被害が発生している。(写真 2.1、写真 2.4)
- 11) 地形勾配と被災状況な相関がある (図 2.24)
- 12) 大分県中部地震では発災前に 87 mm、新潟県中越地震では 132 mm の降雨量を記録して

いた。その他の 5 事例では発災前に降雨の記録はないが地震被災の軽減を検討する場合の情報として活用できる事例である。

第 3 章では、自然災害事例の分析により得られた知見をもとに、高速道路の盛土における「被災し易い箇所」を洗い出すための、危険度の「評価項目」を選定した。選定にあたっては、危険度評価の対象を「降雨による被災を前提としたもの」と「地震による被災を前提としたもの」に分類した。また、これらをさらに「災害発生確率による事象」と「被災規模に関する事象」に分けることとした。すなわち、被災の受け易さと災害の社会的影響を個別に評価することが、新たに提案した手法の特徴である。

降雨時の災害発生確率による事象の評価項目としては、自然災害事例の分析で得られた結果を反映させて、「供用年数」、「盛土形状」、「盛土材料」、「集水地形」、「変状の有無」を選定した。被災の大きさに関する事象の評価項目は、災害現場調査の経験より影響が大きいと考えられる「盛土高さ」、「原地形の勾配」、隣接地の「第三者被害の有無」、「復旧の難易度」を選定した。地震による被災を前提とした評価については、これまでの地震被害や新潟県中越地震の分析を踏まえ、地震時の災害発生確率の評価項目として、「盛土材料」、「原地形の勾配」、「変状の有無」、「擁壁工の有無」を、また、地震時における被災の大きさに関する事象の評価項目には、「第三者被害の有無」、「復旧の難易度」をそれぞれ選定した。

続いて、設定した評価項目を用いて、中央自動車道 上野原 IC～勝沼 IC 間約 40km を検討区間とし、盛土箇所に危険度に応じた点数付けを行なった。結果として得られる点数を、当該区間の「管理注目度」と呼ぶことにした。点数付けのための配点を定めるにあたっては、自然災害事例分析により得られた知見を念頭に置き、実務経験者のヒアリングなども参考に、筆者のこれまでの経験を織り込んだ。また、点数付けにおいては、地形や土地利用状況の判読に航空レーザ計測で得られる DEM（数値標高モデル Digital Elevation Model）を活用した。この作業によって当該区間の管理注目度の分布が得られ、管理注目度の高い場所として「被災し易い箇所」の抽出が可能となった。

第 4 章では、管理注目度により抽出された「被災し易い箇所」である盛土部が、力学的安定性の視点からも、同様の判断になるかを検証した。具体的には、代表的な盛土について管理注目度の点数と力学安定解析結果の相関性を調べた。盛土の静的安定性に関しては、円弧すべり計算で得られる安全率と管理注目度の関係に注目した。検討の結果からは、これらに正の相関があることがわかった。盛土の動的安定性に関しては、地震応答解析で得られる最大水平加速度と管理注目度の関係を調べた。その結果、これらには負の相関が見られることがわかった。管理注目度の点数付けでは、「原地形の勾配」が高いほど点数が高くなるが、原地形の勾配が高いほど盛土の厚さが小さくなるために、生ずる最大水平加速度が小さくなる。そこで、当初評価項目に設定した「原地形の勾配」を「盛土厚さ」に変更し、点数付けの際の重み付け係数の見直しを行った結果、管理注目度と最大水平加速度とは正の相関を有

するものとなった。これらのことから、本研究で提案した管理注目度は、一部を修正することで盛土の力学的安定性とも整合性を有することがわかり、盛土の危険度を評価する有効な手法であることが検証できた。また、管理注目度を用いた「復旧時間シミュレーション」の手法を示し、高速道路機能の早期復旧計画に活用できる手法の提案も行った。

第5章では、盛土が受ける異常降雨の影響を、管理注目度が適切に評価していることを検証した。筆者は、これまでの降雨災害の分析結果から、排水機能の不備や地下排水機能の劣化した土構造物が、雨水の集水により被災していると考えている。したがって、異常降雨時に注意すべき箇所を抽出するためには、集水面積や集水度が比較的小さくとも、雨水の流れを明瞭に可視化する手法が必要である。そこで、DEM上に雨滴を配置し、地形に沿って流下する雨滴の流線を描き、雨滴の流路を積極的に可視化する流線解析手法を考案した。

流線解析結果からは、管理注目度の高い区間では盛土へ向かう雨水の集中が見られ、いくつかの盛土部で雨水の侵入が懸念されることがわかった。また、管理注目度の低い区間では、このような傾向は見られず、雨水は地形に沿って拡散する傾向にあることがわかった。これらのことは、流線追跡法が盛土や道路面に対する雨水の集中度合いを可視化する有力なツールであることを示すと同時に、降雨に対する管理注目度の大小は、異常降雨が盛土に及ぼす影響をも適切に表現していることを示している。

本研究で定義した「管理注目度」は、盛土部における「被災し易い箇所」を的確に抽出する指標であると考えられる。本研究で示した手法が、事業継続計画の重要な柱である、高速道路機能の早期復旧のための計画立案に貢献することを望むものである。

最後に、本研究で定めた「被災し易い箇所」の評価項目と、最終的に得られた管理注目度に用いる内容を表6.1～表6.4に再掲するとともに、降雨に対する管理注目度の分布を図6.1に、地震に対する管理注目度の分布を図6.2に再掲する。各評価項目における配点方法は、中央自動車道 上野原IC～勝沼IC間の災害履歴、地形や地質、路線環境の特殊性を考慮しつつ定めたものである。本研究を参考に、それぞれの路線の特殊性を把握し高速道路全線の盛土に適用することを望むものである。また、筆者はさらに改良を進めて、日本の高速道路における災害時の事業継続計画を確実なものにしていきたいと考える。

表 6.1 降雨による「災害発生確率」を評価する項目（再掲）

評価項目	理 由
(1)供用年数	供用後の経過年数により耐降雨性能は向上しているが、降雨状況によっては耐降雨性能が向上しているとは言えない。
(2)盛土形状	片切・片盛部、腹付け盛土部、レベルバンクなどの盛土形状によっては災害の受け方が異なる。
(3)盛土材料	材料の種類によっては、降雨などの外力に対する抵抗性に違いがある。
(4)集水地形	盛土部背面の原地形が集水地形となっている箇所の災害事例が多い。
(5)変状の有無	片切・片盛部、腹付け盛土部の境界部では、路面にクラックなどが発生し易いため、日常点検の点検結果を反映させる。

表 6.2 降雨による「災害規模」を評価する項目（再掲）

評価項目	理 由
(1)盛土高さ	盛土部の規模により、災害を発生した場合の災害規模が異なる。
(2)原地形の勾配	水による崩壊であるため、原地形勾配により、影響範囲が異なる。
(3)第三者被害の有無	盛土部が崩壊した場合、高速道路区域外への影響が必ず発生するため、近傍の土地利用を把握しておかなければならない。
(4)復旧の難易度	復旧の作業環境を把握することが、復旧時間の長短を左右する。

表 6.3 地震による「災害発生確率」を評価する項目（再掲）

評価項目	理 由
(1)盛土材料	材料の種類によって、地震外力に対する強度に変化がある。
(2)盛土厚さ	盛土厚さの違いは、地震外力による変状に影響を与える。
(3)変状の有無	片切・片盛部、腹付け盛土部の境界部では、路面にクラックなどが発生し易いため、日常点検の点検結果を反映させるため。
(4)擁壁工の有無	擁壁工は、高速道路に隣接した土地利用の関係から設置されているため、盛土の地震外力の崩壊により擁壁工に影響を与える。

表 6.4 地震による「災害規模」を評価する項目（再掲）

評価項目	理 由
(1)第三者被害の有無	盛土部が崩壊した場合、高速道路区域外への影響が必ず発生するため、近傍の土地利用を把握しておかなければならない。
(2)復旧の難易度	復旧の作業環境を把握することが、復旧時間の長短を左右する。

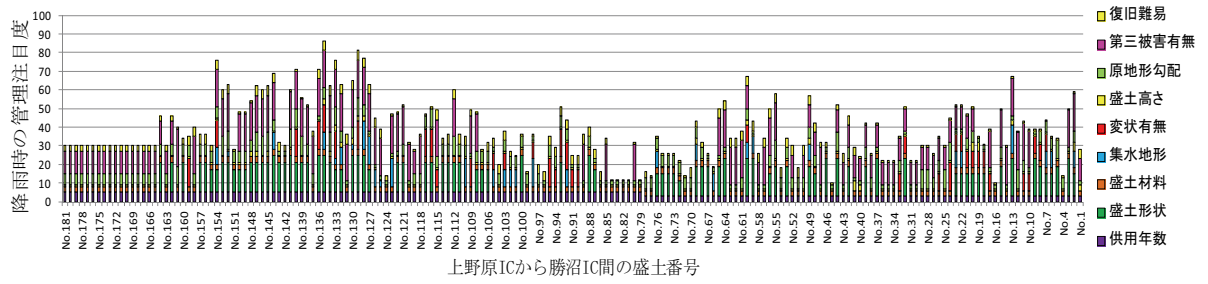


図 6.1 降雨に対する管理注目度の分布 (再掲)

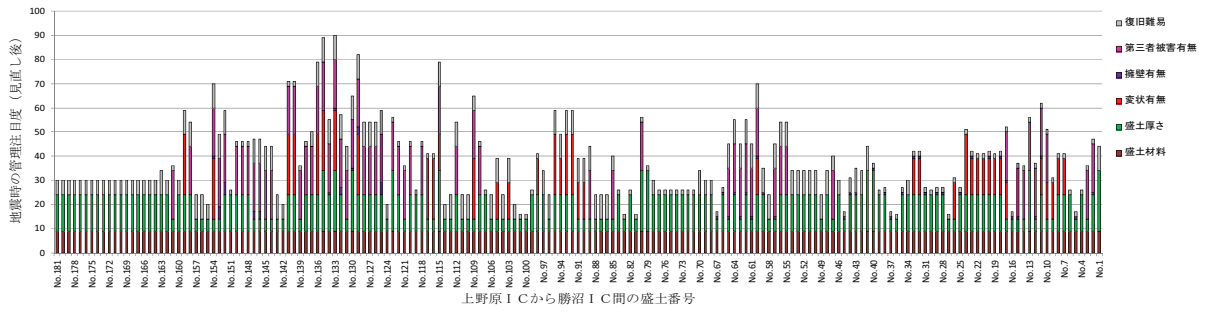


図 6.2 地震に対する管理注目度の分布 (見直し後、再掲)

謝 辞

本研究の実施ならびに本論文をまとめる機会を賜った早稲田大学理工学部社会環境工学科教授 濱田政則先生には、くじけそうになる気持ちを常に励ましていただいたことに謹んで感謝の意を表し、心よりお礼申し上げます。

同教授には、平成 18 年頃より社会基盤のリスク管理についてのご指導を賜り、特に NEXCO 中日本八王子支社大月保全サービスセンター時代には、高速道路の防災についてご教授を受け、高速道路の果たさなければならない使命を強く実感させられました。

この間、隣国中国の四川大地震の現地復旧のための支援に同行させて頂き、国内では岩手宮城内陸地震の発生、毎年起きる台風や豪雨災害、東名高速道路の地震災害、そして、東日本大震災などの自然災害が発生し尊い人命の犠牲に胸を痛め、インフラを生業としている高速道路会社の一社員として自然災害に対する不甲斐なさを感じていました。

本論文のテーマである高速道路の自然災害事例分析に基づいた土構造物の危険度評価手法の提案に関する研究は、まさに時代の要請にこたえなければならない研究であり、筆者が長年、高速道路の建設・管理で経験してきたものを取りまとめることで、災害に強い、或いは、被災しても軽微で迅速な復旧が行えるための防災に対する道しるべとして活用していただくことを祈念するものです。

本研究の遂行にあたり、株式会社高速道路総合技術研究所の吉村雅宏総括研究主幹、土工研究室の藤岡一頼室長、中村洋丈研究員には、過去の災害事例の提供を快く行って頂き心より感謝申し上げます。さらに、公益財団法人深田地質研究所 亀村勝美常務理事、株式会社地層科学研究所 里優社長、田邊和史さんには、本論文をまとめるにあたりご指導並びに数値解析でサポートして下さり心より感謝いたします。

最後に、これまで災害現場への出張準備や本論文の執筆を支え励ましてくれた妻に心より感謝します。

参考文献

- 1) 高速道路便覧 2001 全国高速道路建設協議会
- 2) 国土交通省 社会資本の老朽化対策会議 資料 2013年1月
- 3) 日本道路公団 設計要領 第一集
- 4) 日本道路協会 各指針
- 5) 杉山友康, 岡田勝也, 秋山保行, 村石 尚, 奈良利孝: 鉄道盛土の崩壊限界量に及ぼす対策工の効果, 土木学会論文集, No.644, pp.161-171, 2000.
- 6) 岡田勝也, 杉山友康: 鉄道斜面(盛土, 切取り)の限界雨量による崩壊予測法とその適用, 土と基礎, Vol.49, No.7, pp.22-24, 2000.
- 7) 南部光弘, 軽部大蔵, 浅野雅行: 統計的手法による道路用盛土のり面の安定解析, 土木学会論文報告集, No.241, pp.93-103, 1975.
- 8) 沖村孝, 杉本博: 統計的手法による自然斜面崩壊の研究, 土木学会論文報告集, No.290, pp.89-97, 1979.
- 9) 杉山和一, 後藤恵之輔, 棚橋由彦: 地すべりの危険度評価における数量化理論適用の試み, 地すべり, Vol.23, No.4, pp.24-28, 1987.
- 10) 南部光弘, 武石朗, 沖村孝: 豪雨時における斜面崩壊のメカニズムと危険度予測 4.危険度の高い斜面抽出法(その1), 土と基礎, Vol.51, No.10, pp.53-58, 2003.
- 11) 千葉則行, 大海寺, 八木浩司, 山崎孝成: 数量化 III 類による地すべり危険度評価, 日本地すべり学会研究発表会講演集, Vol.42, pp.213-216, 2003.
- 12) 日外勝仁, 伊東佳彦, 橋本祥司, 斎藤敏明: 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, pp.51-60, 2004.
- 13) ZHOU Guoyun, CHENG Guangqi, 北園芳人, 横矢直道: GIS と数量化理論を用いた土砂災害ハザードマップ作成技術の高度化手法の提案, 土と基礎, Vol.55, No.6 pp.18-20, 2007.
- 14) 上出定幸, 土肥泰之, 小泉圭吾, 中辻啓二, 細木康夫, 殿垣内正人: 降雨を考慮した斜面の崩壊危険度評価に関する考察, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.1, pp.159-168, 2010.
- 15) 森脇寛, 佐々木良宜: 斜面安定解析による地すべり地形斜面の危険度評価, 日本地すべり学会誌, Vol.44, No.1, pp.25-32, 2007.
- 16) 盛伸行: 基岩面地形および土層厚の空間分布を考慮した簡易な表層崩壊危険度評価手法に関する研究, 土木研究所資料, No.4116, pp.101-104, 2008.
- 17) 黒川潮, 大丸裕武, 松浦純生, 阿部和時: 物理則モデルによる表層崩壊危険度評価, 日本地すべり学会誌, Vol.43, No.6, pp.351-355, 2007.
- 18) 高橋健二, 大津宏康, 大西有三: 簡易タンクモデル法による降雨時の斜面リスク評価に関する研究, 地盤工学シンポジウム論文集, Vol.48, pp.301-306, 2003.
- 19) 上出定幸, 大津宏康, 高橋健二: リスクを指標とするのり面安定性の評価モデルの構築, 建設マネ

ジメント研究論文集, Vol.16, pp.197-204, 2009.

- 20) 土木学会 土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会：土木構造物の耐震基準に関する提言「第三次提言」, 2000.6
- 21) 二瓶泰雄：新潟県中越地震前の降雨状況, 基礎工, 2005.10
- 22) 大窪克己：わかって使うレーザ計測 6.事例その1：中央自動車道上野原 IC～勝沼 IC 間の管理,地盤工学会誌,Vol.60 No.2 Ser.No.649,February,2012,p71
- 23) 秦吉弥, 加納誠二, 山下典彦, 横井芳輝, 土田孝：形状を考慮した簡便な盛土の固有周波数算定式, 地盤工学ジャーナル, Vol. 2, No. 3, pp.197-207, 2005.
- 24) 内閣府 事業継続ガイドライン 第一版-わが国企業の減災と災害対応の向上のために 2005 年
- 25) Tarboton, D. G. and M. E. Baker, (2008), : Towards an Algebra for Terrain-Based Flow Analysis, Representing, Modeling and Visualizing the Natural Environment, Innovations in GIS 13.
- 26) 山元一弘, 藤田一郎：DEM を用いた溪流における集水域判定と分布型降雨に対応した流出解析プログラムの開発, 土木学会年次学術講演会, Vol.61, pp.33-34, 2006.

研究業績書

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 大窪 克己 印

(2014年2月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○論文	雨水の流線追跡解析による豪雨時の高速道路への集水状況の可視化に関する研究 土木学会論文集 F5（土木技術者実践） Vol. 69, No. 2, p27-35, 2013 大窪克己、里 優、濱田政則
○論文	高速道路の自然災害事例分析に基づいた事業継続計画の策定に関する研究 土木学会論文集 F5（土木技術者実践） Vol. 69, No. 1, p1-13, 2013 大窪克己、亀村勝美、濱田政則
○その他	わかって使うレーザー計測 6. 事例その1：中央自動車道上野原～勝沼 IC の管理 地盤工学会誌 講座 Vol. 60, No. 2, p71-74, 2012. 2 大窪克己
○講演	高速道路における事業継続計画策定について 土木学会年次学術講演会 Vol. 65, p877-878, 2010 永田政司、大窪克己、渋谷正則
○講演	高速道路における事業継続計画のための土構造物の性能評価（降雨被害） 土木学会年次学術講演会 Vol. 65, p879-880, 2010 伊東 淳、大窪克己、永田政司
○講演	高速道路における事業継続計画のための土構造物の性能評価（地震被害） 土木学会年次学術講演会 Vol. 65, p881-882, 2010 中村洋丈、大窪克己、伊東 淳
特許	軟弱地盤における盛土工法及び盛土工法に使用する施工装置 特許第 4296556 号 2009 年 4 月登録 大窪克己、千国博司、神田一夫、中熊和義
講演	ジオシンセティックスを用いた道路盛土の段差抑制対策工法に関する実大実験 土木学会年次学術講演会 Vol. 63, p533-534, 2008 殿垣内正人、奥隅豊栄、大窪克己、石垣 勉、関口陽高、荒井克彦、太田秀樹
講演	新潟県中越沖地震による高速道路盛土の解析事例 土木学会年次学術講演会 Vol. 63, p69-70, 2008 藤岡一頼、大窪克己
講演	新潟県中越沖地震で沈下した道路盛土の土の強度特性 土木学会年次学術講演会 Vol. 63, p131-132, 2008 白鳥翔太郎、安田 進、藤岡一頼、大窪克己、毛利龍司
講演	地震時の盛土の沈下量に与える地震動などの影響に関する試算 土木学会年次学術講演会 Vol. 63 巻, p73-74, 2008 毛利龍司、安田 進、大窪克己、藤岡一頼、白鳥翔太郎
○講演	高速道路における土構造物の維持管理 土と基礎（小特集：各種構造物の維持管理） Vol. 56, No. 2, p2-3, 2008. 2 大窪克己、藤岡一頼、竹本 将

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
その他	高速道路斜面の維持管理について ー特にグランドアンカーについてー 地質と調査 p13-18, 2008. 3 大窪克己、竹本 将
講演	東名高速軟弱地盤盛土への腹付盛土の影響軽減対策 土木学会年次学術講演会 Vol. 62, p441-442, 2007 大窪克己、川上光雄、佐々木恒也、佐藤 淳、佐野淳一
講演	粘土地盤における長期沈下の要因に関する考察 土木学会年次学術講演会 Vol. 62, p221-222, 2007 大窪克己、板清 弘
講演	安全率による軟弱地盤上の盛土の動態観測手法の提案について 地盤工学研究発表講演集 第 42 回, p1155-1156, 2007. 7 板清 弘、大窪克己、及川 洋
講演	崩壊土石流の到達距離の推定 地盤工学研究発表講演集 第 42 回, p1997-1998, 2007. 7 三浦 裕、大窪克己、日下寛彦、太田秀樹
○その他	道路法面における生態系保全手法と評価 土と基礎（小特集：環境の保全と創生） Vol. 55, No. 7, p4-7, 2007. 7 大窪克己、小澤徹三、柴田知己
その他	GPS を用いた盛土締固めに関する情報化施工 基礎工（特集：観測施工とその情報活用） Vol. 35, p41-43, 2007 大窪克己、藤岡一頼
その他	さがみ縦貫道路海老名北ジャンクションにおける軟弱地盤の観測施工 基礎工（特集：観測施工とその情報活用） Vol. 35, p48-51, 2007 大窪克己、日比野進弘、佐藤 淳
論文	各種ロックボルトの引抜き付着強度実験 土木学会論文集 C 巻： Vol. 62, No. 1, p79-84, 2006 吉塚 守、大窪克己、吉武 勇、中川浩二
講演	斜面モニタリングへの精密写真測量の適用 土木学会年次学術講演会 Vol. 61, p431-432, 2006 長野洋平、大西有三、西山 哲、大窪克己、浜崎智洋、天野浄行
講演	長期沈下の要因となる粘性土地盤の物性に関する考察 地盤工学研究発表講演集 第 41 回, p937-938, 2006. 7 板清 弘、大窪克己、中野正樹、野田利弘
○その他	高速道路における切土構造物の変化・変遷 土と基礎（小特集：土構造物の変化・変遷） Vol. 54, No. 9, p12-15, 2006. 9 天野浄行、浜崎智洋、大窪克己

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
その他	高速道路における軟弱地盤対策と沈下実態 基礎工（特集：圧密沈下の予測・対策の現状）Vol. 34, p34-37, 2006 <u>大窪克己</u> 、板清 弘
その他	地すべり地の地下水排除工の機能保持について 基礎工（特集：基礎工と地下水制御技術）Vol. 34, p60-64, 2006 天野浄行、 <u>大窪克己</u> 、浜崎智洋
○講演	高速道路盛土の大規模地震時の耐震性能検討（その1）－盛土材のせん断強度の検討－ 地盤工学研究発表講演集 第39回, p1759-1760, 2004.7 <u>大窪克己</u> 、浜崎智洋、北村佳則、稲垣太浩、佐伯宗大、濱野雅裕、龍岡文夫
○講演	高速道路盛土の大規模地震時の耐震性能検討（その2）－変位量による耐震性能評価法の検討－ 地盤工学研究発表講演集 第39回, p1761-1762, 2004.7 <u>大窪克己</u> 、浜崎智洋、北村佳則、稲垣太浩、濱野雅裕、佐伯宗大、龍岡文夫
その他	スラリー急結剤を用いた吹付けコンクリートの効果 第二東名高速道路静岡第六トンネル トンネルと地下 Vol. 35, p335-342, 2004 <u>大窪克己</u> 、片寄 学、白畑智幸、藤本克郎
その他	超大断面トンネルと作業坑の直角交差部施工 第二東名高速道路静岡第三トンネル トンネルと地下 Vol. 35, p875-882, 2004 <u>大窪克己</u> 、片寄 学、小川直司、川上博史
講演	吹付けコンクリートの粉じん対策(第二東名高速道路 静岡第三、第六トンネル) 日本道路会議 第25回, 2003, 11 <u>大窪克己</u> 、片寄 学
講演	大断面トンネルの交差部の設計・施工 トンネル工学研究論文 Vol. 13 巻, p169-174, 2003 <u>大窪克己</u> 、片寄 学、小川直司、矢部幸男、高杉英則
講演	発破掘削におけるトンネル周辺岩盤の変位挙動を電位及びAE から見て (第二東名高速道路 静岡第三トンネル工事) トンネル工学研究論文 Vol. 13 巻, p259-262, 2003 <u>大窪克己</u> 、アイダン・オメル、片寄 学
講演	スラリー急結剤を用いた吹付けコンクリートの実施工報告 トンネル工学研究論文 Vol. 13 巻, p321-326, 2003 <u>大窪克己</u> 、片寄 学、根木隆敏、杉山建次、藤本克郎
講演	アルカリフリー液体急結剤の日本での適用について トンネル工学研究論文 Vol. 13 巻, p333-338, 2003 <u>大窪克己</u> 、片寄 学、小川直司、山本和義、野村洋人
講演	スラリー急結剤を用いた吹付けコンクリートの粉じん低減効果の評価 土木学会年次学術講演会 Vol. 57, p411-412, 2002 藤本克郎、平間昭信、 <u>大窪克己</u> 、白畑智幸、岩城圭介

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	3成分HSP切羽前方探査による作業坑・本坑交差部の地質予測 土木学会年次学術講演会 Vol. 57, p455-456, 2002 片寄 学、 <u>大窪克己</u> 、小川直司、山本和義、竹内伸光
講演	アルカリフリー液体急結剤の試験施工について 土木学会年次学術講演会 Vol. 57, p973-974, 2002 小川直司、 <u>大窪克己</u> 、片寄 学、野村洋人
講演	反射法弾性波探査の適正評価に関する考察 トンネル工学研究論文 Vol. 12 巻, p33-38, 2002 <u>大窪克己</u> 、宮脇 工、芦田 譲、山本和義
講演	吹付けコンクリートの粉じん対策 トンネル工学研究論文 Vol. 12 巻, p275-278, 2002 <u>大窪克己</u> 、片寄 学
講演	新第三紀春日山層地すべり地帯におけるトンネル坑口部対策工 土木学会年次学術講演会 Vol. 54 巻, p122-123, 1999 後藤裕一、 <u>大窪克己</u> 、明道俊治、橋爪昭弘、坂口和雅
その他	上信越自動車道の施工概要 中郷 IC～上越 JCT 間 土木技術 Vol. 54, p23-29, 1999 水嶋忠雄、寺澤 孝、 <u>大窪克己</u>
講演	押さえ盛土（改良部）のトンネル施工 土木学会年次学術講演会 Vol. 53, p224-225, 1998 <u>大窪克己</u> 、明道俊治、古戸幸博、山本和義
その他	高強度鋼繊維補強吹付けコンクリートの開発 工学的諸性質に関する一考察 トンネルと地下 Vol. 29, p893-897, 1998 <u>大窪克己</u> 、明道俊治、伊東 淳、川上正史
講演	宮内トンネルにおける坑口部フェイスボルトの施工結果の報告 日本道路会議 第22回, 1997, 12 <u>大窪克己</u> 、大坂 中
その他	長尺フェイスボルトによる坑口部切羽対策 上信越自動車道宮内トンネル トンネルと地下 Vol. 28, p217-223, 1997 高橋秀喜、明道俊治、 <u>大窪克己</u> 、高木勝利
講演	湯田第二トンネルTBMにおけるデータ収集分析システム 土木学会年次学術講演会 Vol. 49, p1156-1157, 1994 <u>大窪克己</u> 、磯野龍昭、居合好信、笠原良男
講演	トンネル計測工Aのデータ分析 土木学会年次学術講演会 Vol. 45 巻, p594-595, 1994 <u>大窪克己</u> 、磯野龍昭

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	石灰の鉱さいの動的変形特性 土木学会年次学術講演会 Vol. 38 巻, p341-342, 1994 長尾 哲、 <u>大窪克己</u> 、安田 進
その他	長野自動車道本城地区法面对策 基礎工（特集：地すべりと対策） Vol. 21, p56-67, 1993 大川征治、 <u>大窪克己</u>
その他	軽量盛土工による地すべり対策工 エアーミルク 土木技術 Vol. 47, p69-76, 1992 大川征治、伊藤 修、 <u>大窪克己</u>
その他	新第三紀泥岩を補助ベンチ付き全断面で掘削 長野自動車道 会田トンネル トンネルと地下 Vol. 23, p291-299, 1992 大川征治、伊藤 修、 <u>大窪克己</u>
講演	亀裂が発達し崩壊剥離が多発するトンネル対策 北陸自動車道 市振トンネル 日本道路会議 第 16 回, p149-150, 1985, 10 <u>大窪克己</u> 、中川常雄
講演	第三紀泥岩（地すべり）に対する土質定数の評価について 日本道路会議 第 15 回, p91-92, 1983, 10 <u>大窪克己</u>
講演	北陸自動車道 名立～糸魚川間における地すべり対策 基礎工（特集：地すべり・切土のり面） Vol. 11, p81-91, 1983 <u>大窪克己</u>