高速道路盛土の地震災害マネジメント における耐震性評価手法の構築

中村 洋丈¹・横田 聖哉²・吉村 雅宏³

¹正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

E-mail: h.nakamura.ag@ri-nexco.co.jp

²正会員 東日本高速道路株式会社 東北支社秋田管理事務所 (〒010-1404 秋田市上北手古野字大繁沢30-2)

E-mail: s.yokota.aa@e-nexco.co.jp

³正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

E-mail: m.yoshimura.aa@ri-nexco.co.jp

震災時には高速道路は緊急交通路の機能を有し、“線”として早期に道路機能が確保される必要がある。したがって盛土構造も耐震性が求められるが、既設盛土は効率的かつ合理的な照査手法がない。本文の評価手法の骨子は、盛土基本情報の評価点法による一次評価、変形量の簡易予測図による二次評価、復旧土量から算定する許容変形量の設定から成る。この手法を用いて過去の被災区間や実際のモデル路線で適用し、実際の路線においても評価対象箇所での合理的な抽出が可能であること、復旧体制の規模によって目標時間内での復旧可否が判断可能である等の手法の有効性を確認した。これらより対象盛土の選定から残留変形量の算出、許容変形量の設定等を体系化した合理的で実務的な手法を構築した。

Key Words : disaster management, embankment, earthquake, seismic assessment, expressway

1. はじめに

高速道路会社（以下、「NEXCO」という。）が建設・管理する高速道路における盛土の設計は、建設発生土を有効利用し、降雨や交通荷重等の厳しい外的作用に対し、十分な安定性を有し、恒久的かつ経済的なものとするを基本としている。この設計方針で施工された盛土は、これまでの経験をもとにした標準法面勾配や盛土材料の締め固め基準の設定¹⁾を行い、これらを踏まえた適切な排水処理や良好な品質・施工管理を行うことにより安定性が確保できる。

地震の大きな外力に対して盛土は、橋梁等の構造物に比べて修復性が高く、ある程度の地震被災においても早期復旧が可能であるという特長がある。また、平成7年に発生した兵庫県南部地震における盛土の被害²⁾についても、構造物の取付部の段差、切り盛り境部における舗装のクラック、盛土路肩部の陥没等、比較的軽微な被害に止まっているため、地震時の安定性はある程度確保されていると考えられる。

しかしながら、平成16年に発生した新潟県中越地震（図-1）、平成19年に発生した新潟県中越沖地震、高速道路の被害ではないが能登半島地震では、大きな地震力

や降雨の影響があったことも一因ではあるが、他の構造物に比べて盛土の被害が顕著であった³⁾⁴⁾⁵⁾。また、平成21年に静岡県駿河湾沖で発生した地震では、東名高速道路の牧之原SA近くのぜい弱岩を盛土材料に用いた盛土が被災した⁶⁾。当該箇所の復旧には5日間を要し、お盆直前の交通規制が利用者にも与える影響は多大であった。この地震での大きな盛土崩壊は一箇所ではあったが、高速道路は、橋梁や土工を含めて“線”として機能が必要で、それには、盛土においても早期に交通が確保できることの重要性が再認識された。さらに平成23年の東北

図-1 中越地震における高速道路の盛土被災

地方太平洋沖地震では、地震の規模の大きさもあって、高速道路の被害は盛土部が多くかつ広範囲であったが、そのほとんどが軽微な路面のひび割れ、段差程度であった。NEXCOは地震発生約20時間後には利用者の誘導、保護、道路点検、応急の簡易補修を終え緊急車両を通行可能にした。高速道路が被害の甚大な被災地への救助、復旧等の支援路として東日本地区への動脈を確保した⁷⁾。しかしながら、すべての路線が一般車も通行できる高速道路としての利用上の機能を確保するまでは21日間を要した。

このような被害実態に対し盛土の耐震性能の議論は、平成12年に「土木構造物の耐震設計法等に関する第三次提言(土木学会)」⁸⁾では、土構造物についてもこれまで以上に耐震性の確保が必要なこと、大規模地震動(レベル2地震動)を想定した設計を考慮する必要があること等が提言されている。また、鉄道施設では、平成11年に大規模地震動の設計を取り入れた鉄道構造物等設計標準(耐震設計)⁹⁾が策定され、港湾施設¹⁰⁾、河川堤防¹¹⁾、ダム¹²⁾といった施設においても、耐震設計に関する手法が定められている。高速道路あり方検討有識者委員会では「東日本大震災を踏まえた緊急提言¹³⁾」を提言し、より高い盛土の耐震性が課題であるとした。これらとNEXCOの事業継続計画¹⁴⁾の必要性等とあいまって、盛土においても地震時に早期の機能確保が求められている。高速道路事業者のNEXCOにとって、地震災害時の緊急交通路の確保、早期開通は復旧、経済の観点からも社会の要請であり、それに応えることは社会的な責務である。このような災害時の対応は、高速道路事業者における災害マネジメントの一環であるといえる。

災害マネジメントでは災害想定、事前対策、災害後対策、時間軸を持った復旧対策の各段階での対応が必要となる。ソフト面の対応は、防災訓練による情報収集や復旧検討のための組織行動訓練や、関連行政機関等との災害協定の締結、災害時の事業継続計画を策定を行っている。ハード面の対応は、橋梁では耐震補強対策を行って効果をあげている。他方で、高速道路としては“線”としての機能が必要であり、このような耐震性は盛土にも求められる機能である。NEXCOの盛土の耐震性評価については、平成11年度から平成15年度にかけて検討してきた¹⁵⁾。この中で、地震時における土構造物の安定性を変形量で評価する設計体系を提起し、変形量を照査する耐震性評価手法を基本とした。この評価手法の内容は、その後の新東名建設で検証し^{16), 17)}、平成21年に高速道路建設時の高盛土における耐震設計として基準化した¹⁸⁾。

一方、高速道路の既供用路線の盛土の耐震性評価については、管理する盛土延長が路線の約4割(約3,000km)で膨大にあることや、評価手法が明確でなかったこと等から、積極的に検討、対策工はされてこなかった。しか

しながら、前述したように盛土の耐震評価の必要性は高まっており、盛土を何らかの方法で評価するといったことが重要であり、筆者らはこれまでに幾つかの検討を行ってきた^{19), 20)}。

本論文は、高速道路の既設盛土を対象としてその耐震性評価手法について述べるものである。既設盛土の地震災害マネジメントは、復旧目標(復旧レベルや復旧時間等)の設定、盛土の耐震性能の評価、被害に対して復旧に要する人員や資材・機材を想定し復旧目標を達成できるかの評価、達成できない場合はその対策、また、盛土に必要な耐震性を機能保持するための日常的・定期的な点検や排水施設等も含めた補修等から成る。さらに、これに加えて災害時の組織体制や日常的な管理段階での点検体制や維持補修等の災害事前事後の組織対応があるが、これらのうち、本論文では復旧目標の設定から復旧目標を達成できるかの評価までを対象としている。

既設盛土の評価手法を検討するにあたり、全延長にわたって1箇所毎に安定性を計算手法によって評価するのは現実的ではない。宅地造成等では、安定検討を行う箇所を選定するスクリーニングという手法を用いて、対象とする箇所を選択している²¹⁾。道路盛土ではスクリーニングの方法等いくつか提案²²⁾されているが、対象盛土の選定、安定性の評価手法、許容値の設定等を体系的に定めた手法はない。そのため、本論文での手法は下記を基本的な考えとし、それらを実現するための課題に対して検討した。

- 1) 延長約3,000kmもの盛土に適用できる比較的簡易な手法であること。
- 2) 対象盛土の選定、許容値の設定、安定性の評価に至る一連を体系的にまとめた手法であること。
- 3) 評価手法を利用するのは、現場事務所の実務の技術者を想定する。土工に関する一般的な技術を要する者であれば、誰でも実施できる合理的かつ簡便な方法であること。
- 4) 対象盛土の選定では、評価者でのばらつきがないように、既存の盛土の高さや地形条件等の基本条件を基に点数化すること。
- 5) 耐震性照査は変形量での照査を行うこととし、許容残留変形量は、復旧可能作業量を考慮した復旧シナリオに基づくものであること。

以上のように、既に供用している高速道路盛土が、地震発生後にきわめて早期に機能復旧できることを念頭に、実務性を考慮した検討を行ったものである。これらの具体的な検討を行い、既設盛土の耐震性評価手法を構築し、また、この手法を実際の路線をモデルに適用して、その能力を検証した。

2. 地震時における盛土の復旧目標と要求性能

地震時における盛土災害の影響度を評価する上では、第一に災害時の復旧時間及び目標復旧レベルを設定する必要がある。これは事業継続計画を策定していくにあたっての前提を設定することである²³⁾。国土交通省では首都直下地震応急対策業務において、広域支援部隊の進出のための緊急輸送ルートである最低限の緊急輸送基盤の確保を1日間としている²⁴⁾。したがって、本検討においても高速道路の緊急復旧まで期間は、1日以内であると設定した。

地震における盛土に必要な性能は、想定される地震動に対して、高速道路に求められる機能、安全性、供用性、修復性の観点から設定した。したがって、供用期間内に発生する確率が高い地震動（レベル1地震動）に対しては、地震後に軽微な補修程度で速やかに機能回復が可能となるような耐震性能（具体には、路面クラックや段差等速やかに修復可能な軽微な損傷）を設定した。また、供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動（レベル2地震動）においては、盛土を軽微な損傷に留めることは困難な場合もあることから、地震後に残留する塑性変形をある程度許容し、短期間に修復可能となるような耐震性能を設定した。

3. 本耐震性評価手法の手順

道路盛土の調査・点検や対策後の評価等は道路防災総点検等で、実施手順が示されているものの、耐震性も含めた評価を体系化したものはない。そこで本耐震性評価手法では、従来の調査・点検に耐震検討箇所の抽出と変形量の確認を含めて図-2に示す手順で行うこととした。

手順は、道路延長に対して相当量の盛土箇所があることから、盛土形状、現地条件、人家や土地利用等の周辺条件及び、地盤条件を考慮し、重点盛土の抽出（耐震性一次評価）を行った上で、耐震計算等により残留変形量を算定し耐震性能照査（耐震性二次評価）を実施し評価する手順とした。この時、道路周辺施設への影響の有無、目標とする復旧レベル、事前・事後対策の仕分け等について勘案した上で、総合的な耐震性の評価を行うこととした。以下各手順の要旨を示す。

a) 既存資料による机上調査の項目

平面図や横断面図、地形図、地質図等の各図面、各土質調査報告書、施工時の工事品質管理データ等の資料より、机上で対象盛土の抽出に必要なデータの整理を行う。

b) 点検結果等による現地調査の項目

日常点検や定期点検、道路防災点検等、現場の点検結果等の資料より、対象盛土の抽出に必要な情報を得る。

図-2 本耐震性評価法の手順

c) 重点盛土の抽出【耐震性一次評価】

a), b)の既存資料や点検結果から、調査項目を整理し、その項目を評価することによって重点盛土の抽出を行う。

d) 耐震性能照査【耐震性二次評価】

c)で抽出された重点盛土に対して、安定計算等の手法により耐震性能の照査を行う。

e) 残留変形量の確認

地震時における盛土の残留変形量を算出し、設定した許容変形量との比較を行う。総合的な判断により期待する性能を満たしているか確認する。

f) 人員・体制・資機材の評価、対策工

e)で見直しが必要となった場合、対象とする路線での復旧体制（人員・資機材等）の評価を行い、場合によっては体制強化等の対策を講ずる。また、詳細調査の実施、詳細手法による安定性評価、水抜き工等の対策工を実施し、再度d)耐震性能照査を行う。

g) 震後復旧

地震発生時には事前に想定した比較的軽微な損傷の復旧を行う。

なお、図-2には本論文における検討範囲を着色で示している。a)～c)については論文の5章及び6章、d)については7章、e)については8章、a)～e)までの手法の検証を9章に示す。

4. 対象となる重点盛土抽出方法の検討

既設盛土の耐震性を検討する場合、路線全域の個々の

図-3 重点盛土の抽出(耐震性一次評価)の概念

断面に対して検討することは、盛土箇所が膨大な量のため、検討に要する時間や経済性の観点から現実的ではない。したがって、まずは路線の数ある盛土の中から、耐震性評価の対象となる重点盛土の抽出方法を検討した。この重点盛土の抽出をここでは「耐震性一次評価」と位置づけした。

耐震性一次評価は、図-3 に示すように図面等から判断できる机上調査と、現地の点検結果等から判断される現地調査に大別できる。ここでは、耐震性の一次評価は、既往文献等^{25), 26), 27)}の評価項目等を整理し、比較的簡便な手法を検討する上で有効であると判断した項目とし(表-1)、それぞれを評価した上で総合的な評価により抽出する方法とした。以下に本手法の評価項目を示す。

a) 第三者被害に関する項目【評価-I】

災害が発生した場合の第三者への被害可能性の有無で評価する項目。これに該当する箇所は、崩壊の可能性がそれほど高くない箇所でも、被害が発生した時の影響の大きさから、対策検討の優先度が高い箇所と判断し、盛土構造や現地条件に関わらず重点盛土として抽出するように設定した。

b) 盛土の基本条件に関する項目【評価-II】

盛土の構造や地形・地質等の盛土基本条件により分類する項目。これらは、既存の図面等、管理用の資料から抽出整理できる情報(机上の情報から抽出整理できる情報)である。盛土の基本条件から、潜在的に地震の被害を受けやすいと想定される盛土箇所を、“点数化”により抽出する手法とした。

c) 現地条件に関する項目【評価-III】

盛土における湧水、法面・路面の変状及び排水施設の状態により評価する項目。常時の点検等で変状等が見られる箇所は、地震時にも不安定となる可能性が高いものと判断し、評価対象として設定した。現地状況としては、日常点検、定期点検、詳細点検、緊急点検等の各点検結果を活用する。

表-1 各評価手法と本手法における評価項目

評価手法	地形条件	地盤条件	盛土条件	変状履歴	現地条件
道路震災対策便覧(震前対策編) ²⁸⁾	地山の配 集水地形	軟弱性 地下水位	盛土材 のり面配 橋梁取付	被災履歴 改良復旧	
盛土のり面の緊急点検要領(案) ²⁹⁾	集水地形		盛土材 盛土高		湧水 路面変状 のり面変状
国土交通省 新道路技術 会議 ²⁷⁾	地山の形状		土質 施工 盛土構造 盛土高 車線幅	補強構造	排水処理
本手法に おける項目	盛土の基本条件に 関する項目 【評価-II】			現地条件に 関する項目 【評価-III】	災害履歴や 復旧履歴に 関する項目 【評価-IV】

d) 災害履歴や復旧履歴に関する項目【評価-IV】

過去の災害履歴や復旧工の実施有無により評価する項目。過去の災害履歴がある箇所は、今後発生する地震時にも不安定となる可能性が高いものと判断し、災害履歴の有無を評価対象とした。ただし、強化復旧等対策を講じている箇所は除く。

「評価-II 盛土の基本条件」については、現場技術者が効率的、特別な技術的な判断を必要としない、かつ評価者によつてのばらつきが生じないように、評価点を設けて評価する「評価点法」を採用した。この評価点法は、技術者の経験による重み配分ではなく、重み付けの根拠が明確になるように、客観的かつ定量的なデータを用いて、既往の震災経験を統計分析した簡易判定法である。この判定法の詳細は第5章、6章に述べる。

5. 盛土の基本条件による一次評価手法の検討

(1) 検討方法

a) 検討の基本

「盛土の基本条件」の検討にあたっては、高速道路の盛土被害が顕著であった新潟県中越地震の関越自動車道の被災箇所の図面や被災記録を基に行った。この事例をを対象としたのは、これまでの大規模地震で高速道路の盛土が何か所も崩壊するような事例が中越地震のみであったためである。なお、一般道路における盛土被害は他の地震でも報告されているが³⁾、高速道路と盛土品質管理基準や施工機械が異なるので対象としていない。したがって、他地域の場合での適用性や海溝型地震の場合の事例を検討していないが、高速道路の建設当初から初めて大きな盛土被災を受けた地震としては中越地震の事例は重要で、本手法ではこの事例を対象とした検討を進めることとした。検討手順を図-4 に示す。各種図面や被

図-4 盛土の基本条件による一次評価法検討の流れ

災記録から盛土基本情報をデータベース化、また、各評価項目ごとのデータ分析し、数量化理論による分析を行った。

b) 検討の対象

本検討では新潟県中越地震時の関越自動車道の地震被害データを基に、地震被害に関連する要因の程度を定量的に分析するため、数量化理論を用いて各項目(要因)別に評価点の設定を行った。また、この評価点は降雨災害データの分析結果も考慮して設定した。検討対象は、2004年新潟県中越地震において被災した関越自動車道の盛土区間(堀之内IC～長岡IC間延長約32km)とした。本区間において、道路の横断面図が作成されている20m間隔ごとに盛土基本条件(盛土高・地盤傾斜角・構造物の有無等)のデータベースを作成し、このデータベースを用いて被災の程度を記入し各要因の評価点を設定した。ここでいう構造物の有無とは、対象とする横断面にボックスカルバート等の構造物が含まれているかをいう。このように、被災事例の分析には、「数量化理論I類, II類」を用いた数値的な根拠を基に、地震被害に影響を与える各項目の評価点を設定した。

c) 盛土基本情報のデータベース化

20m間隔の盛土の横断面図から図-5に示すように基本条件(盛土高、地盤傾斜角等)及び地形分類、表層地質分類を読み取り、表-2のように路線全体のデータベース化を行った。このとき、地形・表層地質の読み取りには、国土交通省のHPより入手できる1/50,000地形分類図、表層地質分類図²⁸⁾を用いた。対象区間では1,106箇所(断面)の盛土をデータベース化した。

(a) 横断面図からのデータ読み取り

(b) 地形分類図からのデータ読み取り

図-5 各図面からの盛土の基本情報の読み取り

表-2 データベース化した盛土基本情報

項目	基本情報
盛土諸元	盛土高, 地盤傾斜(横断方向), 地盤傾斜(縦断方向)
盛土形式	両盛土, 片盛土, 片切片盛土等
地形分類	台地, 段丘崖, 扇状地, 谷底低地等
表層地質	段丘堆積物, 扇状地堆積物, 河床堆積物等

d) 被災状況と被災程度

中越地震の関越自動車道の被害は、図-6に示す区間で3つの形態に分類できる²⁹⁾。タイプ1は山間部における緩やかな傾斜地盤上の盛土崩壊等の被災、タイプ2は比較的良好な地盤上のボックスカルバート部等での段差被害、タイプ3は軟弱な地盤上のボックスカルバート周辺の盛土の被災である。

本検討ではこのような被災状況をさらに詳細に測点ごとに整理し、データベース上では同範囲内での被災箇所の被災程度を大, 中, 小の3つに区分した。被災度[大]は盛土のすべり崩壊が走行車線にまで達している状態で、このような盛土の崩壊が生じた場合は、想定する復旧期間内での緊急交通路の確保が困難と考えられる事象である。被災度[中]はボックスカルバート等の構造物背面の盛土が沈下し、路面の横断方向に段差が生じている状態で、このような段差の場合、段差の大きさと段差発生箇所数や発生箇所、復旧作業における作業量や作業時間が増減し、1日以内という目標時間内に復旧できるかの

図-6 中越地震における関越道の主な被災区間とタイプ

判断に影響する事象である。被災度[小]は損傷箇所が法面又は法肩までに止まり走行車線まで達していないもので、緊急車両の通行には支障のない程度の損傷である。

ここでは、一次評価において抽出すべき盛土は、図-7に示すような車両の通行性に支障をきたすと考えられる被災程度[大]もしくは[中]の箇所であると判断し、これらの被災箇所を分析の対象とした。検討では横断面 20m 間隔にデータベース化をしているので、被災箇所数は被災断面数としている。被災度[大]は 23 箇所（崩壊箇所：6 箇所）、被災度[中]は 68 箇所であった。

なお、図-6 の括弧内の数字は、高速道路 IC に設置された地震計の本震の計測震度である。震源に最も近い越後川口 IC では計測震度 6.4、小出 IC は 5.8、長岡 IC は 5.6 である。被災箇所の地震動は、震源からの距離や地形、地質等により異なり、一般的には地震被害分析においては、地震動の大きさも被害要因になると考えられる。しかしながら、本検討では、計測震度が 5.5 以上の大きな地震動が観測された範囲で特に被害が大きかった範囲を対象としているので、地震動の大小による被害の大きさの影響は小さいと想定されることや、評価する盛土の基本情報（地形分類や表層地質）により、ある程度盛土個々の位置の地震による揺れ易さは評価できていると考え、地震動の大きさの項目は設けていない。

(2) 数量化理論によるデータ分析方法

a) カテゴリー区分のための基本分析

数量化理論での分析を行う前に、数量化に用いるカテゴリーの区分を決定するために、被災状況と盛土高、地盤傾斜角、地形等の各検討項目の関係を整理した。図-8に盛土高さと地盤傾斜角の関係を示す。ここでいう地盤

(a) 被災度大：走行車線まで及ぶ盛土崩壊

(b) 被災度中：走行支障を生じる構造物と土工部との段差

図-7 検討の対象とした被災度

傾斜角とは横断方向の傾斜と縦断方向の傾斜を合計したものである。ここで、地盤傾斜を合計したことにより横断方向のみの関係よりも被災との関係が明確になったため、以後の整理では縦断傾斜との合計で示すこととした。

被災度[大]の箇所は、盛土高さでは 4~18m 付近に分布しており、4m 未満には被災がない。地盤傾斜角は 3~17° 程度に分布して、そのほとんどが 5° 以上に分布している。被災度[中]は盛土高さでは 2~14m 付近に分布し、地盤傾斜角は 0~9° 付近に分布している。被災度[大]と比較して、地盤傾斜角が小さく、そのほとんどは 5° 以下に分布している。なお、盛土高さ 1 段(高さ 7m 程度)とすれば、4 車線道路の盛土幅は約 50m であるので、横断傾斜 5° であれば盛土両端の法尻高低差は約 4m である。この結果より盛土が崩壊するような被災度[大]と段差被害の被災度[中]は、地盤傾斜角 5° を境に区分し、地盤傾斜角 5° を境に、被災形態が異なることから地盤傾斜の分類をして分析を行うこととした。

なお、地盤傾斜角の整理と同様に、地形分類と表層地質分類についても整理したが、被災の程度との相関は小さかったため、要因として区分するが、細かいカテゴリーの分類はせずに、3 程度に分類することとした。盛土高さのカテゴリーについては、高速道路の盛土 1 段高さは標準では 7m であるので、盛土 1 段程度として 10m 未満の区分を設けた。また、図-8 に示すように高さ

図-8 盛土高と地盤傾斜角

15m までのものが大半を占めることや、高速道路の設計基準⁷⁾では盛土高さ 15m 以上を高盛土として分類し、排水処理や安定検討手法を区分していること、さらに 30m 以上は高さによる地震応答の影響が大きくなるとしているため、盛土高さ 15m 及び 30m の区分を設けた。

b) 数量化理論のデータ分析方針

カテゴリー区分のための基本分析によって、地盤傾斜角で区分可能であることが確認できた。したがって、数量化理論に用いる場合、全データを「平坦地盤上の盛土」と「傾斜地盤上の盛土」とに区分した上で、分析を行うこととした。また被災形態が被災度[大]と被災度[中]では異なるため、表-3 のような数量化理論の分類を適用した。被災程度[大]については、車線内に影響がある崩落といった大きな損傷である。そのため、被災の程度ではなく、被災の有無を目的変数とした。被災の有無は質的な基準で示されるものであるから、数量化理論 II 類により分析した。被災程度[中]については、路面段差の被害である。段差の場合、その発生箇所数と段差の大きさが復旧時間に影響を与える要素であることから、量的な基準である段差量を目的変数として数量化理論 I 類を用いて分析した。

(3) 数量化理論によるデータ分析結果

a) 平坦地盤上の盛土の分析

被災程度[中]を対象として、目的変数を路面段差量とした数量化 I 類での分析を行った。その結果を図-9 に示す。変数として使用した要因(アイテム)は、盛土高、地形分類、表層地質、地盤傾斜、構造物の有無である。各アイテムのカテゴリーのスコアが高いほど、被災に関する要因項目であることを示している。各カテゴリーをみると、表層地質では、スコアの絶対数値は他のアイテム

表-3 数量化理論による区分

項目	基本情報
数量化理論 第 I 類	外的基準が“量的”である。相関関係を最大、又は予測誤差の 2 乗平均を最小にする数量化。 被災度[中]は土工と構造物の段差被害である。段差被害の大小により復旧時間も異なるため、量で被害要因を区分する必要がある。したがって、路面段差量を外的基準にできるため、数量化 I 類を用いる。
数量化理論 第 II 類	外的基準が“質的”である。相対比を最大にする数量化。 被災度[大]の場合は、盛土が崩壊するような事例で、盛土被災の有無で区分できる。したがって、外的基準は質的になることから、数量化 II 類を用いる。

に比べて小さいが、カテゴリー内の分類では相対的に固結度が低い地質ほどスコアが高くなっている。表層地質がやわらかいと、地震動の影響も受けやすく被災も大きくなると考えられるので、被害傾向を適切に示している。構造物の有無では、構造物有りの場合のカテゴリースコアが大きくなっており、これは他のアイテムに比べても大きい。図-6 に示した被害分類でも平坦地盤は、構造物部の被害が多くなっており、被害傾向を適切に示しているといえる。一方、盛土高さや地盤傾斜は盛土高さが高くなるほど、地盤傾斜が大きくなるほど、盛土被害が大きくなると考えられるが、その傾向とは異なっている。そこで、地震被害データを補足するために、盛土被害としては同種の事象であると考えられる降雨災害データを用いて、同様に数量化理論によって要因影響度の傾向を確認した。降雨災害データによる分析は c) で述べる。

b) 傾斜地盤上の盛土の分析

被災程度[大]を対象として、目的変数を災害の有無とした数量化 II 類での分析を行った。その結果を図-10 に示す。アイテムのカテゴリーのスコアが高いほど、被害に関する要因項目であることを示している。各カテゴリーをみると、数量化 I 類での平坦地盤の分析と同様に、表層地質、構造物の有無は、表層地質がやわらかいほど、構造物が有るほど、カテゴリースコアが大きくなっており、影響が大きい。ただし、盛土高さや地盤傾斜は傾向が考えられる傾向と異なるため、a) と同様に降雨災害データを用いてその傾向を確認した。

c) 降雨災害データによる分析

平坦地盤上の盛土及び傾斜地盤上の盛土で、数量化理論による分析の補完として降雨災害データを用いた分析を行った。地震災害は湧水等が発生しやすい地形条件や盛土内水位等の水に起因するものが災害の一因になっているといわれている。同じく水に起因する災害として降雨災害は、地震災害と同じような盛土の弱点箇所が発生すると考えられる。このため、盛土の弱点という意味で

図-9 数量化理論I類による被災度[中]の分析結果

図-10 数量化理論II類による被災度[大]の分析結果

図-11 数量化理論I類による降雨災害の分析結果

図-12 降雨災害の分析結果を正規化したスコア

は、同様に取り扱えるものと判断し、降雨災害データについて同様の分析（被災土量を目的変数とした数量化理論 I 類）を行い、補足データとして活用することとした。

検討に用いる降雨災害データは、NEXCO が保有する平成 5 年～平成 16 年の高速道路における災害発生時に通行止等の車線規制が伴うもので、そのうち比較的災害規模の大きなものを対象とした。本分析では、今回必要とする地形・地質データや図面が揃っている 31 箇所の

災害データを用いた。なお、降雨災害の場合、降雨量、時期、地域は被災箇所各々で異なるが、地震災害に比べてある一定の区間で多数の被害が生じるというよりは、特定の箇所での被災であると想定される。したがって、ある豪雨による降雨量の条件よりも、降雨や地山からの湧水に対しての盛土構造や地質や地形の影響が大きいと考えたため、降雨強度の区分はしていない。また、被災データは通行規制が伴う交通に影響が大きいものを抽出

図-13 平坦地盤上の盛土の評価点

図-14 傾斜地盤上の盛土の評価点

しており、地震被災のような被災程度の大中の区分はしていない。

降雨災害データの数量化Ⅰ類による分析結果を図-11に示す。カテゴリースコアの大小はあるが、各アイテムとも、盛土高さが高くなる、表層地質がやわらかくなる、地盤傾斜が大きくなると、被災の影響度も大きくなっている。なお、災害データでは盛土高さが30mを超える高盛土が少なかったため、盛土高さ30m未満までの分類とした。しかしながら、山岳部の路線等では30m以上の高盛土も数多く存在するので区分が必要である。そのためデータ数や数量化理論としての検証に課題を残すが、ここでは図-12に示すように30m以上の高盛土は、30m未満のスコアを基に、カテゴリースコアを比例配分することとした。

d) 各項目の評価点の設定

図-9、図-10の結果を各アイテム（盛土高など）ごとに、カテゴリー（10m未満など）を相対的に比較し易いように補正した。補正の方法は各カテゴリースコアの最小値を1.0として、その他の値は、最小値を分母としてスコアの値に応じて正規化した。降雨災害データの結果も考慮して補正した結果が図-13、図-14である。この図の評価点をさらに、各評価項目の最大評価点の合計が100となるように配点し、最終的に表-4のように各評価

点を設定した。評価としては、各項目における評価点を合計し、その合計値が大きい程、被害が予測される盛土で、耐震性を考慮する上での重点盛土となる。

なお、平坦地盤上の盛土における「地盤傾斜角」の項目については、元々地盤傾斜角の小さい箇所のデータに対する分析であるため、評価点の設定はしていない。また、傾斜地盤上の盛土における「構造物の有無」の項目については、ターゲットとした被災を被災度[大]の盛土崩壊としたたので、被災はすべり破壊と考えられ被災モードに対して影響度が小さいものと判断し、評価点は設定していない。

6. 一次評価手法の適用性検証

5で検討した盛土基本条件による一次評価手法の適用性を検証するため、検討した関越道の同区間で、同手法を用いて、盛土区間20mごとの評価点を算出した。評価点の頻度分布をに図-15、図-16に示す。図には被災の有無を分類しているが、平坦地盤上及び傾斜地盤上ともに、60点以上であればほとんどの被災箇所を抽出できる結果となった。したがって、評価点から対象盛土を抽出する閾値は60点と設定した。一部被災箇所であったにも関わ

表-4 最終的に設定した各項目の評価点

項目	区分	区分の目安	平坦地盤	傾斜地盤
盛土高	10m未満		12	10
	10m以上 15m未満		28	18
	15m以上 30m未満		40	24
	30m以上		52	28
地形分類	平地	・自然堤防, 河原, 旧河道, 扇状地, 谷底平野	—	4
	段丘崖	・段丘崖, 傾斜地盤, 沢横断部等	—	30
	丘陵地, 山地, 台地		—	20
表層地質	未固結堆積物	・河床堆積物, 扇状地堆積物也	12	24
	半固結堆積物	・段丘堆積物, 崖錘地, 風化岩, 軟岩D級等	12	20
	固結堆積物	・軟岩～中硬岩, 硬岩等	8	8
横断傾斜+縦断傾斜	5°未満		—	8
	5°以上 15°未満		—	10
	15°以上		—	18
構造物の有無	構造物有		36	—
	構造物無		8	—

図-15 平坦地盤上の盛土の評価点頻度分布

図-16 傾斜地盤上の盛土の評価点頻度分布

図-17 被災箇所と抽出箇所の位置

らず抽出できていない箇所が7箇所あるが、この箇所は崩壊箇所の端部に位置する盛土であったり、揺すり込み沈下により路面に波打ちが生じたが走行に支障のない程度の事例である。したがって、評価点を用いた一次評価は、閾値を60点とすることで地震時に大きな被害が発生する可能性のある盛土を抽出できていると判断できる。なお、図-16の傾斜地盤上の盛土で抽出される盛土は、被災していない箇所も多く抽出される課題を残すが、対象盛土を抽出する一次評価としては見落としのないように、安全側の抽出になっているため、本検討では閾値60点以上とした。

図-17に路線図に抽出された箇所と被災があった箇所を示す。平坦地盤でボックスカルバート等の構造物が連続する小千谷IC付近での抽出と、山間部で傾斜地盤の多い越後川口IC～堀之内IC間の抽出が多くなっている。総断面数が1106断面に対して抽出断面数は252断面となり抽出割合は23%となった。また、検討した評価点によって、概ね全ての被災箇所を抽出できている（被災箇所全91箇所のうち84箇所を抽出するため92%の抽出）ことが確認でき、ほぼ全ての被災箇所が抽出されることが確認できた。

評価 手法	検討段階や現地条件に応じて、評価方法を選択			
	(1)代表簡易 予測図による 変形量算定	(2)簡易予測図 による変形量 算定	(3)ニューマーク 法による変形 量算定	(4)残留変形解析 (FEM等)による 変形量算定
手法の 煩雑さ	簡易 詳細			
算定 変形量	大きめ より厳密			
検討の 手順	簡易法 詳細法			

図-18 耐震性評価手法と適用

図-19 耐震性評価手法の適用の流れ

7. 耐震性能照査法（二次評価手法）の検討

(1) 耐震性能照査法の基本方針

耐震性能照査（耐震性二次評価）は、一次評価で重点盛土として抽出された盛土に対し、適切な手法により変位・変形量（残留変形量）を算定し、被災規模を想定した上で、耐震性の総合評価を行う。耐震計算を実施する上では、一次評価で抽出された重点盛土箇所に対し、すべてを詳細な解析により変形量を求めることは現実的ではない。したがって、得られている盛土の情報（盛土材や地盤状況）や、万一崩壊した場合の周辺施設への影響等、盛土が変形した時の重要性に応じて、適切な手法により変形量を算定することが合理的であると考えられる。図-18に評価手法と、手法の詳細度、変形量算定の厳密さのイメージを示す。ここでいう簡易手法とは、図-20のようにあらかじめ、盛土材料、盛土高さごとにニュー

図-20 平坦地盤上盛土の盛土高に応じた残留変形量

マーク法³⁰⁾で変形量を計算したチャートを作成しておき、この算出条件に当てはまると考えられる場合は、チャート（ここでは、「簡易予測図」という。）で変形量を算出する手法である。簡易予測図による手法等の簡易法で得られた変形量に応じて、より詳細に検討する必要がある場合は、詳細法に移行していく。一次評価で抽出された重点盛土であっても、二次評価で計算による変形量を算出してもそれほど大きくない場合もある。したがって、照査法の手順としては、図-19のようにまず簡易手法を活用して変形量を算出し、大きな変形量であれば、ニューマーク法³⁰⁾による変形量の算出や、残留変形量解析に移行していく。

(2) 簡易予測図による残留変形量の算出

簡易的に盛土の地震時の残留変形量を算出する方法は、図-20に示す簡易予測図により算出する。この簡易予測図は、盛土内水位のない高さ30m以下の平坦地盤上の法面勾配が1:1.8である盛土を対象に、設計基準¹⁸⁾に示される砂質土の土質定数の場合に、レベル2地震動を入力地震動³¹⁾としてニューマーク法³⁰⁾により変形量を算出した結果である。なお、レベル2の地震動としたのは、一次評価手法を構築した中越地震の対象範囲が、図-6に示したようにレベル2と見なせるような大きな計測震度であったことや、第2章に示したように、変形量を許容する盛土の要求性能としてはレベル2地震動の場合であることによる。

(3) 簡易予測図による残留変形量の割増し

簡易予測図は平坦地盤上の水位のない盛土を対象としているため、地盤傾斜がある場合や盛土内水位がある場合で、簡易予測図を用いて評価を行う場合は、それらの影響を考慮した変形量の算出が必要である。したがって、地盤傾斜や盛土内水位がある場合は、別途地震応答解析や水位を考慮した解析を行い、その結果で簡易予測図の変形量を割増しすることとした。

図-21 地盤傾斜の影響検討のモデル図

図-22 地盤傾斜角度と残留変形量

a) 地盤傾斜による補正

傾斜地盤の場合、平坦地盤の盛土に比べて地震動が増幅され、盛土の残留変形量も大きくなることが考えられる。したがって、図-21 に示すモデル地盤で地盤傾斜の影響を確認し、簡易予測図で得られる変形量の割増しを検討した。傾斜地盤では盛土が谷地形や沢地部にあるため高盛土になる場合が多い。そこで盛土高さは盛土小段2段以上を想定して平坦地盤上での高さ20mを基本とした。また、同じ盛土高さで地盤傾斜を可変すると盛土厚が薄くなることによる地震動増幅の影響が大きくなる。そのため、本モデルでは地盤傾斜の影響のみをみるため、盛土厚さは20m、盛土高さは30mに固定して地盤傾斜を 10° 、 20° の2ケース設定した。なお、すべりの対象とする円弧は、道路本線に影響がない盛土法面表層部の小崩壊は対象とせず、加速度の増幅の影響が大きいかつ本線車線部まで影響が及ぶと考えられる盛土上部を対象とし、地盤傾斜の相対的な変化確認が目的であるので、円弧高は法肩から15mの高さで固定して検討した。

残留変形量の算出は、高速道路の設計基準³⁰⁾にあるように、地震動の地表面波(ここでは能登有料道路の盛土をモデルにしたので、能登半島地震のK-NET 富来の観測波を用いた)を基盤に入力し、地盤を含めた盛土の地震応答解析を行って、盛土すべり土塊の等価加速度波形を求め、この加速度波形を用いてニューマーク法で残留変形量を算出した。

解析に用いた地盤定数は能登有料道路で被災した縦-38 盛土³⁰⁾をモデルにした。なお、この盛土は盛土内水位が表層にあり大規模崩落した箇所である。盛土材料をロームとして湿潤単位体積重量 $14(\text{kN/m}^3)$ 、粘着力 $c=12(\text{kN/m}^2)$ 、内部摩擦角 $\varphi=23^{\circ}$ で設定した。また、盛土の変形特性や剛性は設計基準にしたがって設定した。

検討結果を図-22 に示す。平坦地盤の場合、等価加速度波形の最大値は $482(\text{cm/s}^2)$ で残留変形量は60mmとなった。 10° 傾斜地盤の場合は等価加速度の最大値は $535(\text{cm/s}^2)$ で残留変形は140mm、 20° 傾斜の場合は

$581(\text{cm/s}^2)$ で202mmとなった。 10° 傾斜の場合の残留変形は平坦地盤の2.3倍、 20° 傾斜の場合は3.4倍となった。なお、同様のモデルで静的自重解析¹⁵⁾でも検討している。静的自重解析は2次元液状化流動解析プログラム(ALID)を使用した。解析に用いた物性は、 N 値=10として $E=2800N$ の関係からせん断剛性 $G=5200(\text{kN/m}^2)$ を求め、縦-38の盛土材料の繰返し非排水三軸試験の結果から液状化強度比 $R=0.43$ 、地震時応答解析の結果から地震時せん断応力比 $L=0.61$ を求め $F_L=0.6$ とした。その結果においても平坦地盤と傾斜地盤の残留変形量の比率は、 10° 傾斜地盤で2.6倍、 20° 傾斜地盤で3.3倍となることを確認している。この結果の $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ の中間的な値を用いて、本検討では傾斜地盤上の盛土は地盤傾斜の影響に対する割増しとして、平坦地盤上の盛土において算出した残留変形量を3倍することとした。なお、一次評価手法における平坦地盤と傾斜地盤の区分は、傾斜 5° を境にしており、対象盛土の抽出方法も平坦地盤と傾斜地盤の2区分で行っている。上記検討では $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ の結果で変形量を3倍としており、傾斜 5° の区分では傾斜角が $5 \sim 10^{\circ}$ 程度の場合、変形量は大きくなるが、ここでは、変形量は安全側の評価になり、検討も簡便化できるように地盤傾斜による補正の区分も傾斜 5° を境に設定した。

b) 盛土内水位による補正

地盤傾斜と同様に、盛土内水位が有る場合の検討は能登有料道路で被災した縦-38 盛土をモデルにした。図-23 にモデルを示す。法尻部で2.5mと5.0mの2水位を設定し、地盤からの地震応答解析を行った加速度波形を用いて各々の残留変形量を算出した。結果を図-24 に示す。盛土水位がない場合残留変形量は170mm、水位2.5mでは304mm、水位5.0mでは565mmとなり、水位5.0mの残留変形量は、水位なしの場合の3.3倍となった。この結果の中間的な値を用いて、本検討では盛土内に水位がある場合は、水位の影響に対する割増しとして、水位がない盛土において算出した残留変形量を3倍することと

図-23 盛土内水位の影響検討のモデル図

図-24 盛土内水位と残留変形量

表-5 地盤傾斜や水位がある場合の残留変形量割増し

項目	区分	割増し率	摘 要
地盤の傾斜角	5° 未満	1.0	左記の結果は、特定の盛土条件で検討した結果であるので、盛土条件が大きく異なる場合は割増し率を再考する必要がある。
	5° 以上	3.0	
盛土内水位	無し	1.0	
	有り	3.0	

した。a), b)の結果より、簡易予測図の残留変形量の割増しは、表-5 のとおりとした。なお、この表の割増し率は図-21、図-23 の特定な盛土条件の結果であるので、条件が大きく異なる場合は割増し率の再考が必要である。

8. 許容残留変形量の設定方法

(1) 許容残留変形量設定の基本方針

許容残留変形量は、高速道路の高盛土設計基準¹⁸⁾では、“高盛土の現地条件、路線全体を考慮した地震後における復旧体制や車両通行の機能等を総合的に勘案して設定する必要がある”としている。このように、修復性の高い道路盛土は、本来は盛土に必要な交通機能と、それを復旧できる体制等から許容変形量を設定すべきである。

一方、既存の許容変形量に関する考え方が示されている例を表-6 に示す。許容変形量の考え方は、どの例も

表-6 各基準における許容残留変形量

基準類	許容残留変形量	内容
道路土工軟弱地盤対策工指針 ³³⁾	10~30cm	舗装後 3 年間の許容残留沈下量の目標値 橋梁・高架の接続盛土部
鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計 ⁹⁾	沈下量 20cm 以上 50cm 未満	レベル 2 地震時の盛土被害と沈下量の目安で、応急処理で復旧が可能な被害の場合 (変形レベル 2)
土木構造物の震災復旧技術マニュアル(案) ³⁴⁾	亀裂幅 30cm 以下又は 段差量 50cm 以下	被災パターン II 型で、盛土のすべり崩壊又は亀裂、段差の発生が道路車線まで及ぶもの

復旧シナリオを想定 (具体的な対象路線に対して被災程度・被災規模を想定) して設定されたものではなく、復旧体制や復旧時間に基づく許容変形量の考え方は示されていない。

したがって、本検討では耐震性能照査における許容変形量は、盛土の変形が周辺施設に及ぼす影響や、変形に伴う復旧に要する時間等から決定する新たな視点で、現地状況や路線の特徴等から適切な許容変形量の設定法を選択することとした。

具体的な許容変形量の設定は以下の方法が考えられる。

a) 盛土周辺の施設への影響を考慮した許容値

盛土周辺の施設への影響が想定される場合には、周辺の施設へ影響を及ぼさないよう、盛土が崩壊しない程度の変形にとどめる必要がある。このため、b)のような復旧シナリオを想定した上で残留変形量の許容値を想定するのではなく一律の許容値とする。例えば、過去の震災において崩壊はせず、段差被害に止まっている変形量として 50cm と設定すること等が考えられる。

b) 目標復旧時間を達成可能な変形量の許容値

災害時に復旧に要する目標時間を設定し、路線全体の被害 (変形量) が目標とする時間内に復旧できる変形量を許容値とするやり方 (復旧シナリオを策定し、被害の程度が目標とする時間内に収まるかどうかで設定)。

c) 過去の被災事例から想定する許容値

新潟県中越地震等の過去の地震被災事例から、その時に要した復旧時間と被害状況 (変形量) により、復旧可能な被害程度を想定し許容値とするもの。新潟県中越地震では、地震発生から 19 時間で工事車両や緊急車両が通行可能になっている²⁹⁾。

d) 緊急車両の通行性から設定する許容値

緊急車両が構造物との境界に発生した段差を、物理的に通行可能であるかどうかでその段差量を許容値とする考え方である。橋台背面部に長さ 5m の踏掛版がある場合、車両諸元から低床トレーラの場合の通行可能な段差

図-25 復旧シナリオに基づく耐震性能照査法の流れ

量は約 20cm, 乗用車の場合約 70cm 程度となる¹⁵⁾。

(2) 目標復旧時間を達成可能な変形量の許容値

ここでは, 8.(1) b)で示した目標復旧時間を達成可能な復旧量から算定する許容変形量の設定方法について検討する。

a) 復旧シナリオに基づく許容残留変形量の設定手順

復旧シナリオに基づく許容残留変形量の設定手順を図-25に示す。以下の手順で検討する。

- 1) 許容残留変形量を仮定した上で, 復旧総量を想定
耐震性二次評価において算定された残留変形量を用い, 許容残留変形量を仮定した上で, 復旧に必要な総土量を算定する。このとき, 仮定した許容残留変形量を上回る範囲の盛土は, 震前対策が実施され, 計算値のような大きな変形が発生しないものと仮定する。
- 2) 復旧方法等を仮定, リソースを評価した上で, 復旧速度の算定
緊急措置, 緊急復旧方法を仮定した上で, 復旧に投入できるリソース(労働力, 資材等)を評価し, 復旧速度(復旧土量あたりの必要復旧時間)を算定する。
- 3) 必要となる復旧時間を算定
復旧総量と復旧速度から, 必要となる復旧時間を算定する。

表-7 中越地震における復旧作業体制と作業時間

管理区分	作業会社	作業内容	参集時間 (hr)	到着時間 (hr)		作業時間 (hr)		作業人員等
				参集完了 ～ 現場到着	地震発生 ～ 現場到着	現場到着 ～ 作業完了	地震発生 ～ 作業完了	
A 事務所管内	A社	・土のう作製 ・段差箇所土のう, 砕石で段差すり付け	2	1	3	16	19	職員: 7～12名 作業員: 32名 4tトラック: 3台 2tトラック: 9台
B 事務所管内	B社	・土のう作製 ・段差箇所土のう, 砕石で段差すり付け	9.5	3	12.5	6.5	19	職員4名 作業員15名

表-8 中越地震における応急復旧時間

管理区分	作業会社	10月23日					10月24日				
		17:56 (地震発生)	0:00 (6時間後)	6:00 (12時間後)	12:00 (18時間後)	18:00 (24時間後)	17:56 (地震発生)	0:00 (6時間後)	6:00 (12時間後)	12:00 (18時間後)	18:00 (24時間後)
A 事務所管内	A社	2～3時間 ・参集									
B 事務所管内	B社	・参集 ・施工体制準備 ・舗装プラント準備									

4) 目標とする復旧時間の範囲内であることを確認

算定された必要復旧時間が, 目標とする復旧時間の範囲内であることを確認し, 許容残留変形量を決定する。なお, 目標とする範囲内を超えている場合, 許容残留変形量を再仮定する, もしくは, リソースの再評価を行った上で, 許容残留変形量を決定する。

b) 目標復旧時間の設定

事業継続計画 (BCP: Business Continuity Plan) の考え方は, 災害時に重要業務が中断しない, 万一中断しても目標復旧時間内に再開させ, リスクを最低限に抑えるために平常時に戦略的に準備する計画である。この BCP は高速道路事業等の公共事業者にも必要とされている³⁵⁾。高速道路盛土における地震災害に置き換えると, 盛土が万一損傷しても, 目標とする復旧時間内に, ある程度交通を確保することにある。したがって, 検討の前段で, 事業者が社会的なコンセンサスを得られる範囲で目標とする復旧時間を設定する必要がある。高速道路盛土では, 災害後, 緊急車両に限っては 1 日以内に通行可能な程度の損傷に止めるという考えで行っている¹⁴⁾。

c) 復旧作業に要する作業時間の算出

新潟県中越地震での復旧事例によると, 全体の被災量に対して復旧作業班が作業をして, 緊急車両が通行可能となる緊急交通路の確保は, 19 時間以内に完了している。ここでの検討は緊急車両が通行可能となる地震時の復旧目標時間を 1 日以内とする。

中越地震における関越道全体の被災状況を図-26 に示

図-26 中越地震における関越道の変形量と位置

図-27 段差被害の応急復旧形状

図-28 累積復旧土量と許容残留変形量の概念図

図-29 中越地震における変形量とその割合

表-9 主な地震における盛土被害と応急復旧時間

発災年	地震	路線	IC/JCT 区間	被害概要	復旧に要した時間	
					緊急車両通行可能まで	一般車両通行可能まで
1978	宮城県沖地震	東北道	泉～大和 福島飯坂～国見	盛土の沈下 (30cm 以下程度) 橋台との路面段差 (30cm 程度)	— —	約 62 時間 約 47 時間
2004	新潟県中越地震	関越道	六日町～小出 小出～長岡	最大路面段差 50cm 盛土部分崩壊以上 5 箇所, 最大路面段差 100cm (平均 30cm, 概ね 50cm 以下程度)	約 19 時間 約 19 時間	約 138 時間 約 13 日
		北陸道	柏崎～長岡 J	最大路面段差 60cm (平均 10cm, 概ね 20cm 以下)	約 19 時間	約 76 時間
2007	新潟県中越沖地震	北陸道	長岡 J～柏崎	最大路面段差 50cm (平均 10cm, 概ね 30cm 以下)	4 時間	26 時間
			柏崎～米山 (上り)	最大路面段差 40cm (平均 10cm, 概ね 30cm 以下)	4 時間	26 時間
			柏崎～米山 (下り)	最大路面段差 30cm (平均 10cm, 概ね 30cm 以下)	4 時間	26 時間
			米山～柿崎	最大路面段差 30cm (平均 15cm, 概ね 30cm 以下)	4 時間	26 時間

す。この被災量に対して、実際の応急復旧工事における作業体制、現場到着時間、作業完了時間等の作業状況を表-7、表-8 に示す。表中に示すように、いずれの事務所管内においても応急復旧が終了するまでに、参集時間を含めて 19 時間以内であった。大規模な地震災害時には、復旧作業に取り掛かるまでの、参集連絡時間、現場事務所までの参集時間、現場事務所から被災現場までの移動時間がかなりの時間必要で、実際の復旧作業時間はそれほど長くない。表-8 の B 社のように、作業時間は半日程度ほどで集中的に行われる場合もある。

d) 復旧可能土量の算定

応急復旧段階では、図-27 のように幅 3m、勾配 1:8 程度の復旧形状で段差部の応急的なすりつけがされている。このような復旧形状を仮定して、図-26 の実測段差量を基に全体の復旧土量を算定すると、被災 96 箇所で約 173m³ となった。全体土量から作業 1 班当りの復旧可能土量を算出すると、以下のように算定できる。

1 班当たりの復旧速度 =

$$19 \text{ 時間} / (\text{復旧総土量 } 173 \text{ m}^3 / 3 \text{ 班}) = \text{約 } 20 \text{ 分/m}^3$$

24 時間当たりの復旧可能土量 =

$$24 \text{ 時間} / 20 \text{ 分/m}^3 = \text{約 } 70 \text{ m}^3$$

となる。1 作業班が参集時間も含めて 24 時間に作業できる復旧土量の 70m^3 を復旧作業量（作業歩掛）とした。

e) 許容残留変形量の算出

復旧に要する期間で算出する許容残留変形量は、耐震性二次評価で算出した路線全体の残留変形量と復旧可能作業量の関係で算出する。図-28 にその概念を示す。横軸には残留変形量を小さい順に並び、縦軸は箇所数とその箇所で算出される土量を累積した累積復旧土量とする。d) で算定した復旧可能土量を縦軸にとり、それに対応する残留変形量が許容残留変形量となる。

この結果、累積復旧土量が復旧可能土量を下回る場合は、特に対策を講じなくても 24 時間以内に応急復旧可能な程度の被災であると判断できる。一方、累積復旧土量が復旧可能土量を上回る場合、許容変形量以上の箇所に、震前対策を実施すれば復旧の目標時間を達成することができる。

(3) 過去の被災事例から想定する許容値

新潟県中越地震等の過去の地震被災事例から、その時に要した復旧時間と被害状況（変形量）により、復旧可能な被害程度を想定し許容値とするものである。表-9 に盛土被害の大きかった地震災害と緊急車両が通行可能になるまでの時間をまとめた。新潟県中越地震では地震

発生から 19 時間で、中越沖地震では発生から 4 時間で工事車両や緊急車両が通行可能になっている。図-29 は新潟県中越地震での被害状況の分布と、段差被害等の程度と箇所数をまとめたものである。これによれば、被害全体の 9 割近くが変形量 70cm 程度である。この結果からは、過去の地震と同程度の被災状況や、路線状況を想定した場合、緊急車両が通行可能となる地震時の復旧目標時間を仮に 1 日以内とすると、変形量 70cm 程度であれば、目標を達成可能と想定できる。

9. モデル路線における適用

(1) 対象路線

これまでに検討した盛土の耐震性評価手法を用いて、実際の路線をモデルにして適用した。対象路線は10IC間、延長約71kmである。

(2) 重点盛土の抽出（一次評価手法）

盛土の基本条件による抽出(評価-II)による結果を図-30、図-31に示す。これは平坦部の代表IC間と山岳部の代表IC間の結果である。図の青塗りは平坦地盤上の箇所、青斜線は傾斜地盤上の箇所である。ここでは抽出の評価点

図-30 評価-IIによる平坦地盤上の重点盛土抽出結果（平坦部の代表IC間）

図-31 評価-IIによる傾斜地盤上の重点盛土抽出結果（山岳部の代表IC間）

図-32 評価-IIによる平坦地盤上の評価点分布

図-33 評価-IIによる傾斜地盤上の評価点分布

の閾値は60点以上とした。抽出した箇所の評価点の分布を図-32、図-33に示す。図-32は平坦地盤上の盛土の抽出結果で、対象断面数1765断面に対して、閾値を上回る抽出箇所は146断面(8%)となった。また、図-33は傾斜地盤上の盛土抽出結果で、対象断面数283断面に対して、抽出箇所は138断面(49%)となった。全体では対象2048断面に対して、抽出されたのが284断面で全体の14%となった。傾斜地盤上の抽出割合が多いが、全体としては14%となり、実務で対策を検討する上では現実的な抽出割合と考えられる。

(3) 残留変形量の算出（二次評価手法）

図-34、図-35 に図-20 に例を示した簡易予測図による

残留変形量の算出結果を示す。なお、変形量は図-3 に示した一次評価手法のうち、どの評価で抽出されたか色分けしている。図-34は平坦部の代表IC間の結果である。ほとんどの箇所が20～30cm程度の残留変形量となった。図-35は山岳部の代表IC間の結果である。残留変形量は20～140cm程度で、箇所によっては大きな変形量となっている。100cmを超える変形量が予測される箇所は、傾斜地盤の盛土である箇所がほとんどである。また、本検討では盛土横断20mピッチごとに変形量を算出しているが、図をみると変形量が大きい箇所が連続している。ほとんどの連続している断面は一つの盛土であるため、一つの盛土箇所とみた場合、変形量の大きい盛土箇所はそれほど多くはない。

図-34 簡易予測図による残留変形量の算出結果（平坦部の代表IC間）

図-35 簡易予測図による残留変形量の算出結果（山岳部の代表IC間）

図-36 許容残留変形量の設定（平坦部の代表IC間）

図-37 許容残留変形量の設定（山岳部の代表IC間）

図-38 残留変形量と許容残留変形量（平坦部の代表IC間）

図-39 残留変形量と許容残留変形量（山岳部の代表IC間）

図-36、図-37は残留変形量から復旧土量を算出し、累積復旧土量対して、復旧可能土量を 70m^3 として許容残留変形量を設定した結果である。図-36の平坦部の区間では、累積復旧土量が復旧可能土量を下回っているため、すべての被害に対して復旧可能である。この場合、図-38に示すように、このIC区間の各盛土箇所の耐震性能は確保されており、特に対策を行う必要はないと判断できる。図-37の山岳部の区間では、累積復旧土量による許容残留変形量は 47cm となった。この場合、図-39に示すように、この区間の幾つかの盛土で許容残留変形量を超える箇所がある。路線の全断面2048断面のうち、(2)で抽出された重点盛土は284断面(全断面のうち14%)、さらに耐震性二次評価で、許容残留変形量を上回る盛土は118断面(全断面のうち6%)となった。許容残留変形量を上回る場合は、これら箇所に何らかの対策が必要であると判断できる。なお、今回の検討では図-37の山岳地の区間の復旧作業班を1班として、許容残留変形量を 47cm と算出したが、復旧体制を強化し、仮に2班体制で復旧作業を行うとすれば、復旧作業土量が2倍になり許容残留変形量は 60cm となる。このように復旧体制を強化することによって、許容残留変形量を上回る箇所を少なくすることができ、体制強化も耐震性向上の対策として評価することができた。

(4) 変形量を満足しない場合の対策の考え方

耐震性能照査の結果、想定する復旧の目標時間や変形量を満足しない場合、図-40に示すように、変形量算出の見直しや、復旧体制の見直し、対策工の検討等の対応を検討する。対応の検討にあたっては、現地条件や路線の特徴を踏まえ、合理的な対策を選択する必要がある。以下、対策の考え方を示す。

a) 土質定数の見直し、変形量算出手法の見直し

建設時の土質調査結果や、土質試験結果、工事施工記録から、変形量算出に用いる土質強度定数や、土質構成、原地盤の状況等の再精査を行い、土質条件等の設計条件の精度を向上させる。また、必要に応じて、現場盛土の詳細調査（ボーリングでの土質構成の確認、土質試験での盛土材料の強度定数の確認、盛土内水位の確認等）を行い、設計条件の見直しを行う。

簡易予測図等を用いて、変形量を算出している場合、土質情報等が十分でないという前提から、比較的安全側の算定量となっている。したがって、土質情報等を明確にした上で、変形量算出手法についても、簡易的な手法を用いている場合、より詳細な手法を用いて変形量を精査する。

b) 復旧体制の見直し

変形に伴う復旧に要する期間等により許容値を設定した場合、目標とする復旧時間を満足できない場合におい

図-40 復旧目標を満足できない場合の流れ

て、復旧体制の見直しで対応する考え方である。復旧作業における作業量を復旧方法や作業機械、作業体制等を見直して、単位時間内に復旧できる作業量が多くなるよう体制強化する方法（作業効率を高める方法）と、体制人員や班体制を多くし全体の作業量を多くなるような方法（作業量を高める方法）が考えられる。

c) 対策工の検討

上記のa)、b)で対応できない場合や、盛土から著しい湧水の発生や、盛土内水位が高い場合、安定性に懸念が生じる変状がみられる場合は、対策工の検討を行う。対策工の選定にあたっては、盛土状態を適切に評価することが重要であるので、必要に応じて、詳細点検、詳細調査をもとに検討することが必要である。

10. 結論

既設盛土の耐震性評価は、その対象が膨大であるため比較的簡易な評価手法が必要であった。検討では評価手順として、まず検討対象となる盛土の抽出方法である耐震性一次評価手法を行い、その次に残留変形量を算定する耐震性二次評価手法を行う評価手順を示した。本論文での結論は以下のとおりである。

- 1) 一次評価手法は、対象盛土の選定は評価者でばらつきのでないように、盛土の基本情報を基に点数化して評価することを試みた。一般的に入手可能な平面・横断図や地形・地質図の図面類により、盛土の基本情報をデータベース化し、その盛土条件

と中越地震における盛土被災実態から評価する項目を分析した。評価する項目は、盛土高さ、地形分類、表層地質分類、地盤傾斜角、構造物の有無を設定し、評価する項目ごとの点数の重みは、可能な限り定量的なものから設定するため、数量化理論によって重み分析を行った。その結果、被災状況と地盤傾斜角の関係から、平坦地盤上の盛土と、傾斜地盤上の盛土の評価項目を分けることとした。評価点の設定は、評価項目の合計が100点となるように設定した。その手法を中越地震の被災区間に適用すると、閾値を60点とすると被災箇所91か所のうち、84箇所を抽出できることが確認できた。

- 2) 二次評価手法における残留変形量の算出では、あらかじめ残留変形解析であるニューマーク法を用いて、盛土材料ごとに盛土高さと残留変形量の関係をチャート化した簡易予測図を作成した。この図を作成すれば対象箇所個々に詳細な計算をする必要がなく、誰でも簡便に変形量が算出できることを示した。なお、本論文で示した変形量はある特定の盛土構造、材料などの条件で算出したものであるため、すべての条件を網羅したものではない。したがって、盛土条件が異なる場合は、条件にあった簡易予測図を作成すればよい。
- 3) 災害時における緊急交通路の確保は、高速道路事業者にとって、最も重要な社会的な責務である。緊急交通路を確保する上では、時間的な概念が必要で、復旧目標時間という形で具現化されている。この復旧目標時間はNEXCOにおいても1日以内としており、災害マネジメント、或いは災害発生時の災害復旧のプロジェクトマネジメントでは、共通の目標となる復旧方針の柱である。今回、盛土の耐震性を評価する上で、復旧目標時間を考慮した復旧シナリオに基づく許容残留変形量の考え方をまとめた。具体には、中越地震における応急復旧作業を事例に、段差被害の復旧形状を基に作業1班が24時間で可能な復旧可能土量として70m³を算出し、耐震性二次評価で算出される路線各箇所の残留変形量の復旧土量を合計して残留変形量と累積復旧土量から許容残留変形量を算出する方法とした。なお、作業1班の復旧可能土量は対象とする路線における復旧体制（作業基地の位置、班体制、作業機械等）によって異なるので、路線ごとに設定するのが望ましい。この方法によって、従来の画一的な許容変形量の設定ではなく、現場の復旧体制から設定する路線あるいはIC間ごとの許容変形量、すなわち盛土の性能を設定することが可能となった。これは、高速道路における災害時の事業継続

計画の根幹となるものである。また、この検討によって震前対策において、復旧に関わる作業員の確保、現場基地の位置、復旧に必要な備蓄資材等の適切な準備が可能となった。さらに、また路線の重要度や走行車線数等加味する場合の、より現実的な盛土耐震性評価の基礎検討となった。

- 4) 検討した耐震性評価手法を用いて、実際の供用路線をモデル路線とした検証を行った。その結果、重点盛土を抽出する耐震性一次評価では、路線の全断面2048断面のうち284断面(全断面のうち14%)が抽出され、耐震性二次評価では、許容残留変形量を上回る盛土は118断面(全断面のうち6%)となった。許容残留変形量は、山岳地のIC区間の作業班を1班とすると47cmとなった。仮に復旧体制を2班に強化した場合、許容残留変形量を上回る箇所を少なくすることができ、体制強化も耐震性向上の対策として評価することができた。

本論文で構築した盛土耐震性評価手法によって、効率的に耐震対策の必要箇所を抽出することが可能になり、かつ合理的な対策工の優先度をつけられた。このことは一連のシナリオに基づく作業を行うことによって、実務的な盛土耐震対策を行うことを示したものである。

参考文献

- 1) 東日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)、西日本高速道路(株)：設計要領第一集 土工編、2010。
- 2) 水嶋忠雄、牧浦信一：JH・高速自動車道等の被災状況と応急復旧等、道路、652号(平成7年6月号)、pp.27-35,1995。
- 3) 地盤工学会：2004年新潟県中越地震災害調査報告書、2007。
- 4) 地盤工学会：2007年新潟県中越沖地震災害調査報告書、2009。
- 5) 土木学会、地盤工学会：2007年能登半島地震被害調査報告書、2007。
- 6) 高木宗男、横田聖哉、菅浩一、安田進、太田秀樹：東名牧之原地区における盛土のり面災害の実態、第55回地盤工学シンポジウム平成22年度論文集、pp.193-196,2010。
- 7) 安部哲生、横田聖哉、金田和男、長尾和之：東北地方太平洋沖地震における高速道路の被害及び復旧状況について、地盤工学ジャーナル、Vol.7, No.1, pp.117-125,2012。
- 8) 土木学会：土木構造物の耐震設計法等に関する第三次提言、2000。
- 9) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計、1999。
- 10) 港湾空港技術研究所：港湾構造物の耐震性能照査型設計体系について、港湾空港技術研究所資料1018,2002。
- 11) 国土交通省河川局治水課：河川構造物の耐震性能照査指針(案)、2007。
- 12) 国土交通省河川局：大規模地震に対するダム耐震性

- 能照査指針(案)・同解説, 2005.
- 13) 国土交通省高速道路のあり方検討有識者委員会：東日本大震災を踏まえた緊急提言, 2011.
  - 14) 中日本高速道路(株)：CSR 報告書 2011, 2011.
  - 15) 高速道路調査会：平成 15 年度土構造物の耐震設計に関する検討報告書, 2004.
  - 16) 大窪克己, 浜崎智洋, 北村佳則, 稲垣太浩, 佐伯宗大, 濱野雅裕, 龍岡文夫：高速道路盛土の大規模地震時の耐震性検討(その 1)～盛土材のせん断強度の検討～, 第 39 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1759-1760, 2004.
  - 17) 大窪克己, 浜崎智洋, 北村佳則, 稲垣太浩, 濱野雅裕, 佐伯宗大, 龍岡文夫：高速道路盛土の大規模地震時の耐震性検討(その 2)～変位量による耐震性能評価法の検討～, 第 39 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1761-1762, 2004.
  - 18) 東日本高速道路(株), 中日本高速道路(株), 西日本高速道路(株)：設計要領第一集 土工編, pp.6-1-6-57, 2010.
  - 19) 土谷基大, 横田聖哉, 高木宗男, 中村洋丈, 濱野雅裕, 佐伯宗大：高速道路盛土の震災事例による簡易耐震性評価手法の検討, 第 55 回地盤工学シンポジウム平成 22 年度論文集, pp.167-172, 2010.
  - 20) 佐伯宗大, 横田聖哉, 高木宗男, 中村洋丈, 濱野雅裕, 土谷基大：高速道路盛土の震後復旧シナリオを想定した許容残留変形量の検討, 第 55 回地盤工学シンポジウム平成 22 年度論文集, pp.173-178, 2010.
  - 21) 国土交通省都市・地域整備局：大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドライン(案)の解説, 2008.
  - 22) 例えば, 常田賢一, 林健二：道路盛土の地震時危険度のマクロ評価に関する検討, 第 43 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1927-1928, 2008.
  - 23) 事業継続計画策定促進方策に関する検討会・内閣府：事業継続ガイドライン 第二版, 2009.
  - 24) 国土交通省：国土交通省業務継続計画, 2007.
  - 25) 日本道路協会：道路震災対策便覧(震前対策編), 2006.
  - 26) 国土交通省：盛土のり面の緊急点検要領(案), 2008.
  - 27) 国土交通省新道路技術会議：道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート No.17-4, 2008.
  - 28) 国土交通省 HP：<http://www.mlit.go.jp/>
  - 29) 地盤工学会：2004 年新潟県中越地震災害調査報告書, pp.187-204, 2007.
  - 30) 東日本高速道路(株), 中日本高速道路(株), 西日本高速道路(株)：設計要領第一集 土工編, pp.6-19-6-26, 2010.
  - 31) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, pp.304-310, 2002.
  - 32) 佐々木哲也, 杉田秀樹, 大川寛, 水橋正典：2007 年能登半島地震で被災した盛土における地盤調査, 土木学会第 63 回年次学術講演概要集, pp.67-68, 2008.
  - 33) 日本道路協会：道路土工 軟弱地盤対策工指針, 1986.
  - 34) 土木研究センター：土木構造物の震災復旧技術 マニュアル(案), 1986.
  - 35) 内閣府：事業継続ガイドライン 第一版, 2005.

(2012.8.2 受付)

ESTABLISHING A SEISMIC ASSESSMENT METHOD FOR EARTHQUAKE DISASTER MANAGEMENT OF EXPRESSWAY EMBANKMENTS

Hirotake NAKAMURA, Seiya YOKOTA and Masahiro YOSHIMURA

When earthquakes strike, expressways function as emergency traffic routes for disaster relief and, therefore, quickly restoring their functions as “lines to connect points” is a must. In order to answer this need, expressway embankments must be quake-resistant, but currently, there are no effective rational ways to verify the earthquake-resistance of existing embankments. In this document, we will report on the required level of embankment performance from a management point of view and study results of the verification method selected based, in principle, on the following points: that it is comparatively simple to execute, the study procedure is systematic, the embankments for study are selected based on the fundamental conditions of the embankments, and the allowed displacement is decided following the recovery scenario created based on the amount of recovery work needed. Portions of expressways that were damaged by past disasters and actual model routes were selected based on the above criteria to check the effectiveness of the verification method when applied on actual expressway embankments. Through these studies we were able establish a rational and practical method of verification where we can systematically select the embankment for study, determine the residual displacement and set the allowable displacement.