

# 地震時のすべり崩壊に対する 道路盛土の性能評価法

魚谷 真基<sup>1</sup>・常田 賢一<sup>1</sup>

<sup>1</sup>大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871大阪府吹田市山田丘2-1)

近年発生した大規模地震により、多くの道路盛土においてすべり崩壊等の深刻な被害が発生している。そのような中で、道路土工構造物は、新たに性能評価の設計法に移行することになった。しかし、道路土工分野では、性能評価の設計法が未だ一般的ではなく、その具体的な方法は今後の課題とされている。本稿は、実盛土を対象として、道路盛土の性能評価に必要なすべり変位量・すべり面位置を簡易に推定できる“ニューマーク法”による算出方法を示すとともに、同算出結果に基づいた性能評価の視点からの道路盛土の耐震性の評価方法を提示する。

キーワード 性能設計, 道路盛土, 地震, ニューマーク法

## 1. はじめに

2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震、2009年駿河湾を震源とする地震等、近年の地震では、道路盛土のすべり崩壊等の被害が顕著になっている。そのような中で、道路土工構造物においては、2009年(平成21年)に道路土工要綱<sup>1)</sup>、2010年(平成22年)には盛土工指針等<sup>2)</sup>が改定され、新たに性能評価の設計法に移行することになった。しかし、道路土工分野では、性能評価の設計法が未だ一般的ではなく、その具体的な方法は今後の課題とされており、実務において性能評価を普及するためには、具体的な性能評価の方法が求められている。

そのような背景のもと、本稿は、阪神高速道路(株)が管理する高速道路盛土を事例として、盛土工指針にも例示されている性能評価に必要なすべり変位量・すべり面位置を簡易に推定できる“ニューマーク法”により算出する。さらに、得られた結果に基づいて、性能評価の視点、言い換えれば、道路交通機能の確保の視点から、どのように取り扱うか、評価するかの方法を提案する。

本稿の内容は、以下の通りである。

- 1) 道路盛土の性能設計の考え方を示す。
- 2) 道路盛土の性能に関わる変状(すべり変位量、すべり面位置)を推定するニューマーク法の概要を示す。
- 3) 既往地震による被害の有無・程度を考慮した、実盛土における合理的な盛土モデルの設定法を示す。
- 4) 実盛土に対するニューマーク法の解析結果を示す。
- 5) 解析結果に対して、道路交通機能の管理・運用の視点から、取り扱い方法を示す。

## 2. 道路盛土における性能設計

線状構造物である道路は、一箇所での崩壊が道路ネットワークシステム全体の機能低下につながるため、地震による道路盛土の崩壊は社会的・経済的に大きな被害を与える。しかし、長距離に及ぶ道路盛土全てにおいて耐震設計を行うことは経済的負担が大きい。そのため、経済的かつ道路機能を満足する合理的な耐震対策が必要である。その場合、一定の被害・変形を許容しつつ、要求性能の低下は抑制するという設計概念、つまり性能設計の概念が有効である。ここで、盛土に対する要求性能とは、道路を通行する車両の走行性・安全性であり、それに対する要求レベルあるいは設定レベルが盛土の設計の目標となる。

道路盛土の性能設計の概念図を図-1に示す。大規模な地震動に対して盛土の安全率確保が困難な場合、図-1に示すように、路肩等にすべり変形が留まるような被害は許容し、車道部にまで及ぶすべり破壊発生抑制が重要である。したがって、すべり面が車道部に至る場合は、すべり面位置を制御・移動させる対策が必要がある。

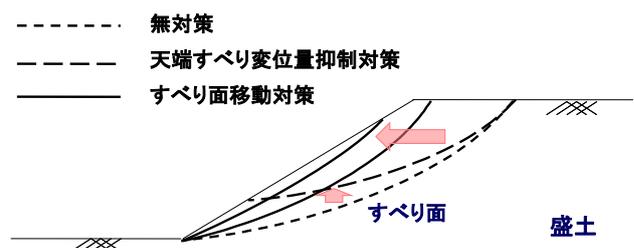


図-1 道路盛土における性能設計の概念

さらに、常田らによる道路盛土の段差実験の結果に基づく、段差に対する道路盛土の耐震性能の評価基準例<sup>3)</sup>を表-1に示す。表-1は、地震時の道路盛土で発生する路面段差の被害レベルと車両の走行性を、段差実験により定量的に評価したものである。表-1によれば、車道部にまですべり面が達する場合においても、その変形による段差高が軽微であれば、車両の通行が可能となる、あるいは比較的短時間での交通機能確保が容易となるため、軽微な変形は許容することができると考えられる。つまり、すべり変位量が大きくなる場合には変位量を抑制する対策が必要となる。

以上のように、盛土の性能設計のためには、安全率のみではなく、すべり面位置・すべり変位量等のすべり変形特性を定量的に予測することが重要である。

### 3. ニューマーク法

すべり変形特性の評価のための代表的な方法としてニューマーク法<sup>4) 5)</sup>がある。ニューマーク法に関しては、2010年(平成22年)に改訂された盛土工指針<sup>2)</sup>では性能評価の考え方が導入され、変形量の算出方法としてニューマーク法が例示された。さらに、鉄道構造物設計標準・同解説<sup>6)</sup>ではニューマーク法による評価が規定されている等、変形量の予測が実務的に考慮されつつある。

ニューマーク法は、すべり土塊が剛体かつすべり面における応力ひずみ関係が剛塑性と仮定して、地震時のすべり土塊のすべり変位量を計算する方法である。実際の土の挙動を考えるとニューマーク法は厳密な方法ではない。しかし、入力パラメータの設定が円弧すべり解析と同等であること、理論の簡明さに対して比較的妥当な結果を与えること、結果の解釈が容易であること等の特徴から設計に用いられる<sup>6)</sup>。また、得られるすべり変位量は、特にレベル2地震動に対する盛土の耐震性評価指標として扱う場合には有効である。

### 4. 実盛土のモデル化

実盛土へニューマーク法を適用するために、本章では、阪神高速道路(株)が管理する道路盛土を事例として、モデル化の方法を示す。

#### (1) 対象盛土

対象とする盛土は、神戸市に位置する阪神高速道路・7号北神戸線の高速道路盛土である。位置情報および断面図を図-2、図-3にそれぞれ示す。図-3に示すように、対象盛土は高さ約20mで3つの小段を有する片盛土となっている。また、図-4に対象盛土と活断層の位置関

表-1 段差に対する道路盛土の耐震性能の評価基準例 (一部抜粋)

ランク	車道路面の段差高	被災直後における交通機能の確保の難易
1	2～3cm以下	交通機能は確保される
2	2～3cmを超えて、25cm以下	交通は低下するが、その確保は容易であり、比較的短時間に実施できる
3	25cmを超えて、50cm以下	交通機能が低下し、その確保はやや困難であり、やや期間を要する
4	50cmを超える	通行機能が低下し、その確保は困難であり、長期間を要する

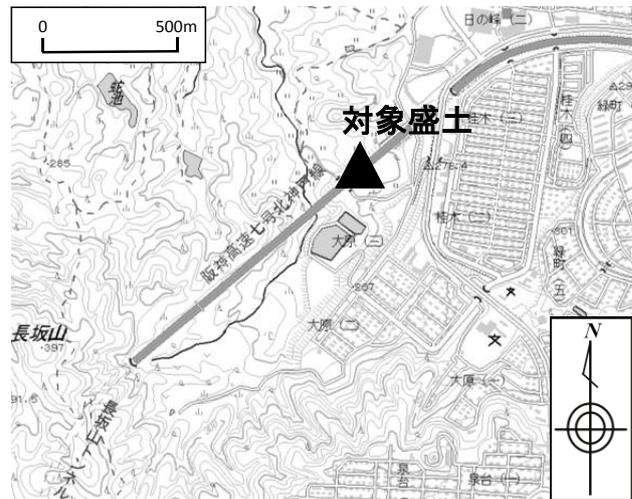


図-2 対象盛土の位置

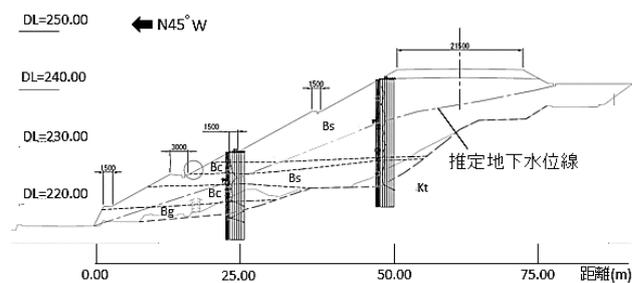


図-3 対象盛土の断面図

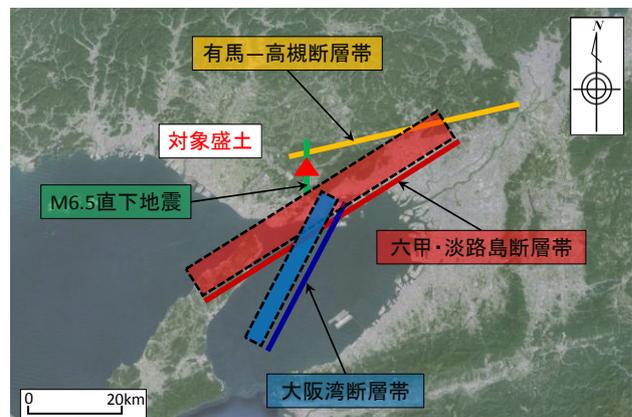


図-4 対象盛土と地震動設定のための活断層

係を示すが、対象盛土周辺には、比較的規模の大きな活断層が密集している。なお、対象盛土は緊急点検およびマクロ評価による地震危険度評価の結果、補強・調査が必要と判断された盛土の1つ<sup>7)</sup>である。

(2) 対象盛土のモデル化

対象盛土において、法肩・法面の2カ所でボーリング調査(図-3 参照)が実施されているが、詳細な試験は行われていない。そこで、対象盛土のモデル化に際し留意する点として、既往の大規模地震による変状の有無に着目した。すなわち、既往の大規模地震による被害の有無・程度を考慮することにより、現時点の実盛土のより合理的な盛土モデルを設定することができる。

対象盛土は過去に1995年兵庫県南部地震(以下、既往地震と呼ぶ)による強震動の影響を受けているが、既往地震による被害は軽微なクラックの発生に留まり、すべり変形等の被害は確認されていない。したがって、本稿では、既往地震の地震動波形をニューマーク法の外力として入力した際に、有意な変状・すべり変形が発生しないようモデルの土質定数を決定する。

地下水位は、既往地震の発生が1995年1月であるため、2箇所のボーリング調査における水位観測結果の2013年1月の平均データをもとに設定した。土質定数はボーリング調査によるN値および土質種別による設計要領第一集土工編<sup>8)</sup>に基づき決定した。モデルを図-5に、モデルの土質定数を表-2にそれぞれ示す。図-5に示すように、臨界すべり面は車道部にまで及んでいるが、常時の安全率は1.86である。

まず、設定した盛土モデルの適正を検証するため、1995年兵庫県南部地震による対象盛土のすべり変形の被害が報告されていないことに基づき、同地震による盛土の安定性を検証した。ここで、ニューマーク法に入力する既往地震による地震動は、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震波形評価手法<sup>9)</sup>により推定した1995年兵庫県南部地震の対象盛土法尻相当の地震波形(図-6)である。

ニューマーク法による既往地震時の解析は、すべり変位量が0.04mとなった。この変位レベルは、上記地震によりすべり変形が発生しなかった実績と同等と見なせることから、設定した当初のモデルを修正することなく、地震被害履歴を考慮したモデル化ができたと言える。

5. 想定地震におけるニューマーク法の適用

(1) 想定地震動

地震防災上の観点からレベル2地震クラスの想定地震における道路盛土の耐震性能照査を実施することは重要であるが、そのためには対象とする盛土地点が有している地盤振動特性(サイト特性)を考慮した入力地震動を適切に評価する必要がある。この点に関して秦らは、対象盛土において、常時微動H/Vスペクトルに基づくサイト増幅特性の評価手法<sup>10)</sup>を適用し、当該盛土周辺に位置する活断層(図-4 参照)に起因した内陸地殻内地震による強震波形の推定を行っている<sup>11)</sup>。秦らにより推定された想定地震時における強震波形は、対象盛土に大きな影響を及ぼすことが予想される対象盛土周辺に位置した内陸地殻内の活断層(①有馬-高槻断層帯、②六甲・淡路島断層帯主部六甲山地南縁-淡路島東岸区間(以後、六甲・淡路島断層帯と呼ぶ)、③大阪湾断層帯)による3つの大規模地震に加え、伏在断層として対象盛土直下に仮定の断層を配置した④M6.5直下地震をそれぞれ想定地震として選定した。対象盛土の法尻相当における4つの推定地震波形を図-7に示す。

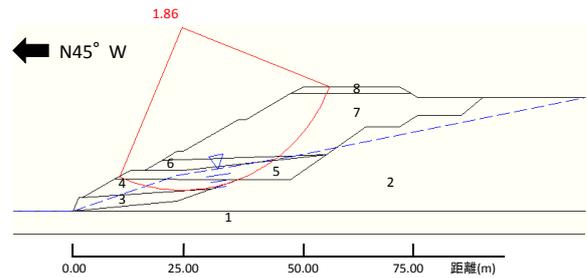


図-5 盛土モデル(地下水位:2013年1月)

表-2 盛土モデルの土質定数

層番号	土層の種類	飽和重量 (kN/m <sup>3</sup> )	湿潤重量 (kN/m <sup>3</sup> )	粘着力 (kPa)	内部摩擦角 (deg.)
1	基礎地盤	20	20	0	50
2	基礎地盤	20	20	0	50
3	礫質土	18	18	10	45
4	粘性土	19	19	50	15
5	砂質土	19	19	30	35
6	粘性土	18	18	50	15
7	砂質土	19	19	30	35
8	舗装部	20	20	0	45

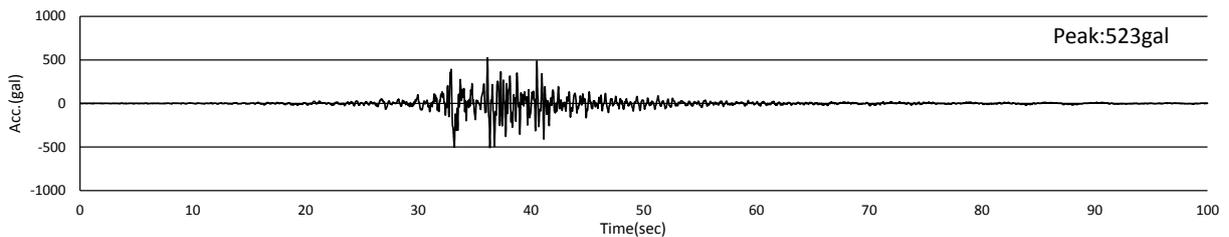


図-6 1995年兵庫県南部地震による法尻当地盤の推定加速度波形

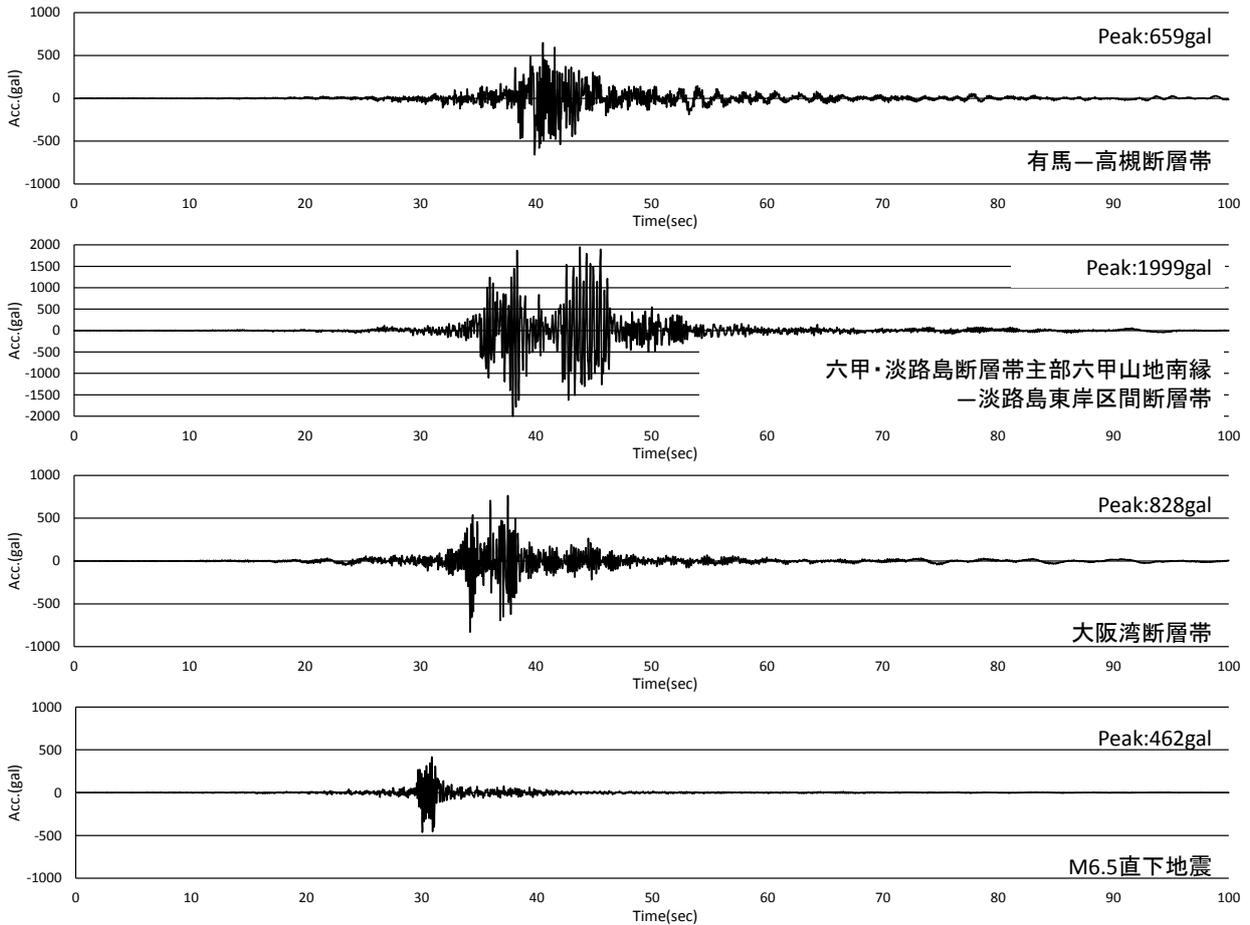


図-7 想定地震による法尻相当地盤における加速度波形

(2) ニューマーク法の適用

前章により検証した盛土モデルを用いて、想定地震時における強震動が対象盛土に作用した際のすべり変位量を評価する。モデルの地下水位は、1月の平均地下水位(図-5 参照)ではなく、安全側の観点から、1月の平均地下水位より比較的水位の高い2012年10月の観測データの平均をもとに設定した。2012年10月における地下水位のモデル図を図-8に示す。図-7に示す地震動を入力波形として、ニューマーク法によるすべり変位量の評価を行った。解析結果を表-3に示す。解析結果によると、算出されたすべり変位量は妥当な規模の範囲にあると思われるが、臨界すべり面は車道部にまで至っているため、すべり崩壊による道路交通機能への影響が危惧される。

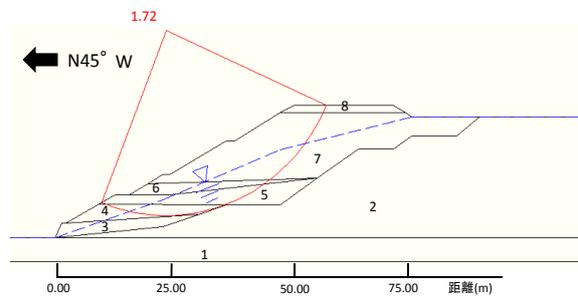


図-8 盛土モデル(地下水位:2012年10月)

表-3 すべり変位量の解析結果(地下水位:2012年10月)

	残留変形量(m)
有馬-高槻断層帯	0.20
六甲・淡路島断層帯	3.21
大阪湾断層帯	0.15
M6.5直下地震	0.01

(3) 被災後の交通機能への影響の検討

すべり変位量の解析結果(表-3 参照)とともに、常田らによる段差実験に基づく段差に対する道路盛土の耐震性能の評価基準例(表-1 参照)を用いて、想定地震による被災後の交通機能への影響を検討する。なお、解析でのすべり変位量はすべり円弧面に沿う変形量であるが、天端付近では円弧と路面の関係から、すべり円弧面の変形量と車道路面の段差高は概ね一致すると考えられる。

表-3において地震毎にすべり変位量を見ると、M6.5

直下地震におけるすべり変位量は概ね無被害となり、被害はランク1である。また、大阪湾断層帯および有馬-高槻断層帯による地震でのすべり変位量は、ランク2に該当し、路面の緊急復旧により、比較的容易かつ短時間で復旧でき、復旧しなくとも規制速度下の走行により交通機能が確保される。しかし、六甲・淡路島断層帯の最大加速度2G程度の強震動によるすべり変位量は3m以

上となり、ランク 4 に該当する大きな被害水準である。これは、応急復旧は困難かつ、本復旧のために長時間が必要とされるため通行止めが必要となる。以上のように、大規模地震による強震動の作用に際して、対象盛土の道路交通機能への影響が示唆される。

さらに、すべり面位置に着目し、想定地震による被災後の交通機能への影響を検討する。すべり面位置を図-9(実線部分)に示す。天端法肩から天端におけるすべり面位置までの距離(一次すべり面位置)は 9.5m となることから、すべり面は片側車線に留まり、他方の車線の交通機能は確保されることになる。

加えて、想定地震の強震動作用における一次すべりの崩壊に起因して、地震後に崩壊が拡大する場合を想定するために、二次すべりを考慮した安定解析<sup>13)</sup>を実施した。具体的には、上述の臨界すべり面による斜面崩壊(一次すべり)に起因したすべり土塊を全て除去した状態で、円弧すべり解析を行うことで、臨界すべり面を抽出した。なお、地盤特性は想定地震時の解析と同様であり、水平震度および地下水位は考慮していない。解析結果を図-9の破線部分に示す。天端法肩から天端におけるすべり面位置までの距離(二次すべり面位置)は 13.5m となった。すなわち、二次すべりが発生した場合には、すべり面は片側車線だけでなく、他方の車線まで達する可能性がある。ただし、二次すべりを考慮した場合であっても、4 車線のうちの山側 1 車線の交通機能は維持され、緊急車両等の通行は確保が可能であることも想定される。

## 6. 道路盛土の要求性能を考慮した耐震対策の基本姿勢

阪神高速道路・7 号北神戸線の高速道路盛土における 4 つの想定地震動によるすべり変形特性の検討を行った。地震動レベルの基本が示されている「開削トンネル耐震設計指針」<sup>14)</sup>に準じて、本章では、当該盛土の要求性能および将来の耐震対策の位置づけを行う。

### (1) 地震動レベルと道路盛土の要求性能

「開削トンネル耐震設計指針」における地震動レベルおよびそれらに対応した要求性能に関する主旨は、以下の通りである。

「L<sub>1</sub> レベル：供用中に発生する確率の高い地震動に対しては、健全性が損なわれない。」

L<sub>2</sub> レベル：供用期間中に発生する確率は低い、大きな強度をもつ地震動に対しては、限定された損傷に留める。

最大級シナリオ地震動(L<sub>3</sub> レベル)：上町断層を震源とする最大級シナリオ地震動に対しては、少なくとも構造物全体系が崩壊しない。

なお、L<sub>2</sub> レベルおよび L<sub>3</sub> レベルの地震動に対しては、

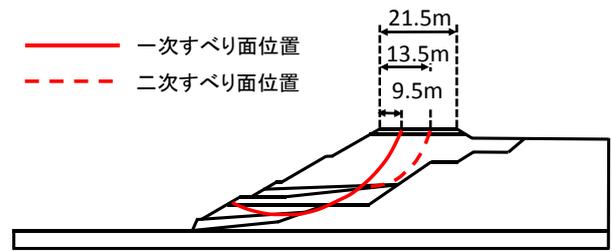


図-9 すべり面位置の解析結果

部材の非線形性を考慮した応答震度法を基本とし、曲げモーメントによる照査により部材が降伏しないこと。」

上記は、上町断層を最大級シナリオ地震とした、主として大阪市内およびその近郊における開削トンネルを想定しているが、六甲山系の 7 号北神戸線の盛土を対象とする場合は、以下のように準じて考えることができる。

「L<sub>1</sub> レベル：供用中に発生する確率の高い地震動に対しては、健全性が損なわれない。」

L<sub>2</sub> レベル：供用期間中に発生する確率は低い、大きな強度をもつ地震動に対しては、限定された損傷に留める。

最大級シナリオ地震動(L<sub>3</sub> レベル)：六甲山系およびその周辺を震源とする最大級シナリオ地震動に対しては、少なくとも盛土の天端全体に渡る崩壊はしない。

なお、L<sub>2</sub> レベルおよび L<sub>3</sub> レベルの地震動に対しては、盛土の動的応答特性を考慮したすべり変位解析を基本とし、すべり変位量およびすべり面位置による照査により、L<sub>2</sub> レベル地震動では緊急的な復旧(土のう、碎石等)が可能な変位に留まり、L<sub>3</sub> レベルの地震動では少なくとも 1 車線の交通機能が損なわれないこと。」

### (2) 耐震性能および耐震対策の評価

前節の要求性能に基づく、対象盛土における地震動レベルに応じた耐震性能および耐震対策は、以下のよう

1) L<sub>2</sub> レベル地震動について、1995 年の兵庫県南部地震により盛土の損傷が軽微であることを考慮し、すべり変位解析のための盛土モデルはすべり変位量が軽微になるように設定した。ここで、兵庫県南部地震は供用期間中に発生する確率は低い、大きな強度をもつ L<sub>2</sub> レベル地震動と位置付けられるので、両盛土は L<sub>2</sub> レベル地震動に対して、緊急的な復旧(土のう、碎石等)が可能な変位(20cm 以下)に留まる。

したがって、L<sub>2</sub> レベル地震動に対する事前の耐震対策は必ずしも必要ではなく、地震発生による変位に対して緊急的な復旧ができる体制とする。

2) L<sub>3</sub> レベル地震動について、対象盛土において、六甲山系周辺で想定した 4 つのシナリオ地震のうち、六甲・淡路断層帯による地震動では 3m 規模のすべり変位量が発生することが想定される。一方、すべ

りが発生する範囲に関して、4車線のうち、山側の2車線は残留する。また、二次すべりを考慮した場合にも、山側の2車線のうち、少なくとも1車線は残留するので、最小限の交通機能は損なわれない。

したがって、L<sub>3</sub>レベル地震動に対する事前の耐震対策は必ずしも必要ではなく、被害発生時の残留する1車線を活用した迂回路確保の復旧やその交通運用を行う体制とする。なお、復旧等に際しては、残留車線における二次すべりの影響に留意する。

以上のように、盛土のすべり変位量だけではなく、交通機能、被害レベル、復旧レベルに関わるすべりの発生範囲を踏まえた耐震性能の評価は、耐震対策計画の立案あるいは被災直後の道路の管理・運用に有用である。

## 7. まとめ

本稿は、阪神高速道路(株)の道路盛土を対象に、既往地震による被害の有無・程度を考慮した合理的な盛土モデルの設定を行った。そして、道路土工要綱等が目指す性能評価の具体的かつ実務的な方法について、ニューマーク法によりすべり変位量、すべり面位置が算定可能であることを示した。さらに、耐震対策計画の立案等において、ニューマーク法により得られた結果の取り扱い方法を提示した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 対象盛土が1995年兵庫県南部地震においてすべり変形が発生しなかったことを考慮することにより、盛土モデルの設定を行った。盛土モデルにおける土質定数の適正が重要であるが、既往の大規模地震による被災・無被災に基づいた盛土モデルの検証が有効である。
- 2) 対象盛土において、推定地震による強震動に基づく残留変形量は最大3m以上となり、さらに臨界すべり面は車道部にまで達するため、大規模な崩壊・道路交通機能への影響が予想される。ただし、すべり面位置は片側車線に留まり、他方の車線の交通機能は確保される。また、二次すべりを考慮した場合にも、4車線のうち1車線の交通機能は確保されるため、最小限の交通機能は損なわれない。
- 3) 盛土の耐震対策では、地震動レベルに応じた道路の要求性能の明示が必要であるが、阪神高速7号北神戸線を例として、L<sub>1</sub>レベル地震動、L<sub>2</sub>レベル地震動およびL<sub>3</sub>レベル地震動に対する要求性能を提示した。
- 4) 盛土の耐震性能の評価では、すべり変位量だけではなく、すべり発生範囲も考慮することにより、合理的な耐震対策計画の立案あるいは被災直後の道路の管理・運用が可能になる。

今後は耐震性の評価を行うことが必要な盛土の選定方法および性能評価方法の普及を図り、将来、危惧される南海トラフ巨大地震等による盛土被害の軽減を図り、道路ネットワークの確保、くしの歯作戦の実効性を高めることが必要である。

**謝辞:** 本研究は、阪神高速道路(株)との共同研究によるものであり、ここに記して関係各位に感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路土工要綱，2009.
- 2) 社団法人日本道路協会：盛土土工—盛土工指針，2010.
- 3) 常田賢一・小田和広・中平明憲：道路機能に基づく道路盛土の経済的な耐震補強・補強技術に関する研究開発，道路新技術会議，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.
- 4) Newmark N. M. : Effects of earthquakes on dams and embankment, *Geotechnique*, Vol. 15, No. 2, pp. 139-160, 1965.
- 5) 館山勝・龍岡文夫・古関潤一・堀井克己：盛土の耐震設計法に関する研究，鉄道総研報告，Vol. 12, No.4, pp. 7-12, 1998.
- 6) 財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説—土構造物編，p.68-69，2007.
- 7) 林訓裕・足立幸郎・甲元克明・山尾泰之・常田賢一・林健二：道路盛土の緊急点検および地震危険度マクロ評価に基づく耐震対策，第32回地震工学研究発表会講演論文集(CD-ROM)，土木学会，pdfNo.4-294，2012
- 8) 東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社：設計要領第一集土工編，p. I-44，2012.
- 9) 野津厚・菅野高弘：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法—因果性と多重非線形効果に着目した改良—，港湾空港技術研究所資料，No.1173，2008.
- 10) 秦吉弥・常田賢一・林健二：常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の評価に関する試み，地盤と建設，Vol.31, No.1, p.125-131, 2013.
- 11) 秦吉弥・常田賢一・林健二・林訓裕：高速道路盛土の耐震性能照査に適した入力地震動の設定手法，地盤と建設，Vol.31, No.1, p.185-193, 2013.
- 12) 常田賢一・須山翔太・寺西弘一：道路盛土の二次すべりを考慮した耐震安全性の評価法に関する考察，第55回地盤工学シンポジウム平成22年度論文集，地盤工学会，pp.161-166, 2010.
- 13) 阪神高速道路株式会社：開削トンネル耐震設計指針—横断方向の耐震設計—，2008.