

## 道路盛土の耐震性評価における設計水平震度と入力地震動の関係に関する基礎的検討

## Preliminary Study on Seismic Coefficient Determination for Performance Evaluation of a Road Embankment

秦 吉弥	Yoshiya HATA	(大阪大学大学院工学研究科)
常田 賢一	Ken-ichi TOKIDA	(大阪大学大学院工学研究科)
片岡正次郎	Shojiro KATAOKA	(国土交通省国土技術政策総合研究所)
門田 浩一	Hirokazu KADOTA	(パシフィックコンサルタンツ(株))
一井 康二	Koji ICHII	(広島大学大学院工学研究院)

道路盛土の耐震性を評価する手法として、震度法や Newmark 法などが挙げられる。両評価手法のアウトプットとなるすべり安全率と残留変形量の関係については先行研究が存在するが、両評価手法のインプットとなる水平震度と入力地震波の関係については、十分な検討が行われていない。本研究では、近年発生した大規模地震によって得られた数多くの強震観測記録を対象に、道路盛土における設計水平震度と最大加速度の関係に関する基礎的な検討を行った。さらに、盛土工指針(H22)に基づく設計水平震度と道路橋示方書(H24)に基づくレベル2地震動の関係性についても言及した。

キーワード：震度法，Newmark 法，最大加速度，降伏加速度，道路盛土 (IGC : E-8)

## 1. はじめに

近年、我が国では大規模地震による道路盛土の被災が相次いでいる。例えば、2004年新潟県中越地震では関越自動車道<sup>1)</sup>、2007年能登半島地震では能登有料道路<sup>2)</sup>、2007年新潟県中越沖地震では北陸自動車道<sup>3)</sup>、2009年駿河湾の地震では東名高速道路<sup>4)</sup>、2011年東北地方太平洋沖地震では常磐自動車道<sup>5)</sup>・国道6号線<sup>6)</sup>などにおいてそれぞれ道路盛土の被災が報告されている。

このようなレベル2クラスの強震動に対する道路盛土の性能評価の手法として、盛土工指針(H22)<sup>7)</sup>では、震度法<sup>8)</sup>による斜面安定解析手法および地震時残留変形解析手法(Newmark法・ニューマーク法<sup>9),10)</sup>、静的自重変形解析手法<sup>11)</sup>、弾塑性有限要素解析法<sup>12)</sup>、動的遠心模型実験<sup>13)</sup>などに基づく合理的な手法が明示されている。斜面安定解析手法では、1995年兵庫県南部地震の強震動の作用によって被災した道路土構造物の事例解析<sup>14)</sup>の結果などに基づいた所定の水平震度(表-1参照)<sup>7)</sup>を考慮した斜面安定計算を行い、すべり安全率を用いて性能評価を行う手法である。一方で、静的自重変形解析手法<sup>11)</sup>を除く地震時残留変形解析手法では、所定の強震動(道路橋示方書(H24)<sup>15)</sup>に例示されているレベル2地震動の採用<sup>16)</sup>など)を入力波とした滑動変形の計算を行い、地震後の残留変形量を用いて道路盛土の性能評価を行う手法である。

両解析手法の相関性に着目した先行研究として、常田ほか<sup>17)</sup>は、評価手法のアウトプットとなるすべり安全率と残留変形量の関係に着目し、許容変位量を考慮した許容安全

表-1 盛土工指針<sup>7)</sup>によるレベル2地震動の設計水平震度

	I種地盤	II種地盤	III種地盤
レベル2地震動	0.16	0.20	0.24

率の概念を提案している。一方で、評価手法のインプットである水平震度と強震波形の関係については、これまで十分な検討が行われていない。すなわち、道路盛土の耐震性評価を行う際に、想定地震外力として水平震度もしくは入力地震波のどちらか一方を採用して耐震性能の照査を行った場合、他方を採用した場合においても同様に耐震性能を満足しているか否かに関して一定の知見を得ておく必要性があり、この知見は設計・実務の分野において特に有用であると考えられる。

関連研究として、野田ほか<sup>18)</sup>は、重力式岸壁における地震被災・無被災の実績に基づいて最大加速度(PGA)と水平震度の関係(以後、野田式と呼ぶ)を定式化している。これまで野田式は、その取扱いが比較的容易であることなどから、盛土構造物等の耐震性評価に数多く採用<sup>19)~26)</sup>されているものの、その適用性については十分な議論が行われているとは言い難い。また、盛土工指針(H22)<sup>7)</sup>において、斜面安定解析のために必要な水平震度(表-1参照)と、残留変形解析のために必要な入力地震動(道路橋示方書(H24)<sup>15)</sup>によるレベル2地震動)の関係についても十分な検討がなされているとは言い難い。さらに、道路盛土とは異なるが、鉄道盛土の耐震性評価では、円弧すべりと内地地殻内地震を想定<sup>27)</sup>したニューマーク法<sup>28)</sup>による鉄道盛土の残留変形量の算定に用いる設計地震動が地盤種別ご

とに設定<sup>29)</sup>・施行<sup>30)</sup>されている。そこで本研究では、以下に示す事項について基礎的な検討を行った。

(イ) 道路盛土を対象とした設計水平震度と最大加速度の関係に関する基礎的な検討を実施した。具体的には、まず、我が国で近年発生した海溝型地震によって得られた数多くの強震観測記録および道路橋示方書(H24)<sup>15)</sup>によるタイプI地震動を対象に、Newmark法<sup>9)</sup>を用いて所定の残留変形量となる降伏加速度を算定した。次に、算定した降伏加速度を重力加速度で除することによって、これを設計水平震度とした。最後に、強震観測記録の最大加速度PGAに対する設計水平震度の関係を求めるとともに、得られた結果<sup>31)</sup>について考察を行った。

(ロ) 我が国で近年発生した内陸地殻内地震によって得られた数多くの強震観測記録(道路橋示方書(H24)<sup>15)</sup>によるタイプII地震動)を対象に、上記(イ)と同様の検討を行った。その際、入力地震波として、上述した鉄道構造物等設計標準・同解説[耐震設計](H24)<sup>30)</sup>に掲載されている鉄道盛土の残留変形量の算定に用いる設計地震動についても同時に採用し、得られた結果<sup>32)</sup>について考察を行った。

(ハ) 道路橋示方書(H24)<sup>15)</sup>には記載されていない上述した2009年駿河湾の地震などのスラブ内地震による数多くの観測記録を対象に、上記(イ)と同様の検討を実施し、得られた結果<sup>33)</sup>について考察を行った。

(ニ) 道路橋示方書(H24)<sup>15)</sup>に例示されているレベル2地震動を入力波として採用したケースについて、上記(イ)と同様の検討を実施し、得られた結果<sup>34)</sup>について考察を行った。

ここに、地震時残留変形解析手法の一手法としてのNewmark法・ニューマーク法は、オリジナルの手法(本稿では、Newmark法<sup>9)</sup>と呼ぶ)以外にも、現在、様々な改良が施された手法(本稿では、ニューマーク法<sup>9),10),28),35)-46)</sup>と呼ぶ)が提案されているが、本研究では、Newmark法(2.参照)<sup>9)</sup>を採用した。すなわち、上述したように本検討では、Newmark法に基づいて所定の残留変形量(後述)を示す降伏加速度の値を探索することを目的としているため、従来の耐震性評価において降伏加速度(降伏震度)<sup>47),48),49)</sup>の算定に用いられている道路盛土の諸元(盛土高、法勾配、すべり面形状等)や地盤特性(単位体積重量、せん断強度定数等)は、本検討の実施において必要とならない。

## 2. 強震観測記録の選定

### 2.1 選定方法

土木学会<sup>50)</sup>では、盛土などの土構造物の耐震性評価に用いるレベル2地震動の最大加速度(PGA)の目安が600~800Gal程度であることが述べられている。本稿では、この知見を参考に、後述する強震観測記録の中から、まず、

最大加速度(PGA)の値(3成分合成値)が500Gal以上のものを選定した。そして、選定した強震観測記録を入力波(1観測点当たり水平2成分に対する正転方向もしくは反転方向の計4波形を入力波)としたNewmark法による残留変位量の計算を行い、結果的に残留変位量が最も大きくなる波形とその成分を観測点ごとに抽出した。ここに、Newmark法による残留変形量の計算では、降伏加速度(200Gal)を上回る時間帯域の加速度波形を対象に数値積分を2回繰返し実施することで、滑動変形量の時刻歴を計算し、累積値となる残留変形量を求めた。ここに、Newmark法に基づくある時間断面において、地震加速度が降伏加速度を上回れば滑動変位が発生し、地震加速度が降伏加速度を下回れば滑動変位は発生しない。すなわち、降伏加速度の値は滑動変位の発生の有無に関するしきい値であると言い換えることができる。

### 2.2 海溝型地震

我が国で近年発生した比較的大規模な海溝型地震として、以下に示す地震を選定した。

- ・2003年十勝沖地震 (2003/09/26 04:50)
- ・2011年東北地方太平洋沖地震 (2011/03/11 14:46)

ここに、国立研究開発法人防災科学技術研究所K-NET/KiK-net<sup>51)</sup>、国土交通省(国土技術政策総合研究所)<sup>52)</sup>、気象庁<sup>53)</sup>、NEXCO東日本<sup>54)</sup>、JR東日本<sup>55)</sup>、東北工業大学Small-Titan<sup>56)</sup>、地方自治体<sup>57)</sup>、日本原子力発電(株)<sup>58)</sup>による既存強震観測点を対象とし、281波形を選定した。さらに本稿では、1.で述べたとおり、道路橋示方書(H24)<sup>15)</sup>によるレベル2地震動(タイプI地震(海溝型地震)を想定した地盤種別毎の9波形)についても、上記の281波形と合わせて選定した(したがって、選定波は結果的に計290波となった)。

### 2.3 内陸地殻内地震

1995年兵庫県南部地震以降に国内で発生した比較的大規模の大きな地震として、以下に示す地震を選定した。

- ・1995年兵庫県南部地震 (1995/01/17 05:46)
- ・2000年鳥取県西部地震 (2000/10/06 13:30)
- ・2003年宮城県北部の地震 (2003/07/26 07:13)
- ・2004年新潟県中越地震 (2004/10/23 17:56)
- ・2007年能登半島地震 (2007/03/25 09:41)
- ・2007年新潟県中越沖地震 (2007/07/16 10:13)
- ・2008年岩手・宮城内陸地震 (2008/06/14 08:43)
- ・2011年長野県北部の地震 (2011/03/12 03:59)
- ・2011年静岡県東部の地震 (2011/03/15 22:31)
- ・2011年福島県浜通りの地震 (2011/04/11 17:16)
- ・2011年福島県中通りの地震 (2011/04/12 14:07)
- ・2013年淡路島付近の地震 (2013/04/13 05:33)
- ・2014年長野県北部の地震 (2014/11/22 22:08)

ここに、選定候補としては、国立研究開発法人防災科学技

術研究所K-NET/KiK-net<sup>51)</sup>、国土交通省(国土技術政策総合研究所)<sup>52)</sup>、気象庁<sup>53)</sup>、NEXCO東日本<sup>54)</sup>、JR東日本・JR西日本<sup>55)</sup>、関西地震観測研究協議会<sup>59)</sup>、港湾地域強震観測<sup>60)</sup>、地方自治体<sup>57)</sup>、宮城県<sup>61)</sup>、関西電力(株)、東京電力(株)による既存強震観測点を対象とし、115波形を選定した。さらに本稿では、1.で述べたとおり、道路橋示方書(H24)<sup>15)</sup>によるレベル2地震動(タイプII地震(内陸地殻内地震)を想定した地盤種別毎の9波形)および鉄道構造物等設計標準・同解説[耐震設計](H24)<sup>15)</sup>による土構造物の応答値算定用の地震動(内陸地殻内地震を想定した地盤種別毎の6波形)についても、上記の115波形と合わせて選定した。したがって、選定波は結果的に計130波となった。

## 2.4 スラブ内地震

我が国で近年発生した比較的規模に大きなスラブ内地震として、以下に示す地震を選定した。

- ・1993年釧路沖地震 (1993/01/15 20:06)
- ・2001年芸予地震 (2001/03/24 15:27)
- ・2008年岩手県沿岸北部の地震 (2008/07/24 00:26)
- ・2009年駿河湾の地震 (2009/08/11 05:07)
- ・2011年宮城県沖の地震 (2011/04/07 23:32)

ここに、国立研究開発法人防災科学技術研究所K-NET/KiK-net<sup>51)</sup>、国土交通省(国土技術政策総合研究所)<sup>52)</sup>、国立研究開発法人建築研究所<sup>62)</sup>、気象庁<sup>53)</sup>、NEXCO東日本<sup>54)</sup>、JR東日本<sup>55)</sup>、港湾地域強震観測<sup>60)</sup>、広島県震度情報ネットワーク<sup>63)</sup>、地方自治体<sup>57)</sup>、東北電力(株)による既存強震観測点を対象とし、142波形を選定した。

選定した波形(海溝型地震：計281波、内陸地殻内地震：計115波、スラブ内地震：計142波)の観測点名等の詳細については、文献64)の付録表を参照されたい。

## 3. 降伏加速度の算定

### 3.1 許容残留変形量の設定

大規模地震後に道路盛土において許容される残留変形量の設定方法については、これまで様々な許容残留変形量の値が提案<sup>65),66),67)</sup>されているが、本稿では、車両による段差走行実験<sup>68)</sup>の結果に基づいて設定された値<sup>69)</sup>を採用した。具体的には、表-2に示すように、耐震性能ランク3(交通が低下し、その確保はやや困難であり、やや期間を要する)の目安となる段差量25cmおよび50cmを採用した。すなわち、残留変形量(段差量)が25cmおよび50cmとなる場合の降伏加速度をNewmark法に基づいて試行錯誤により探索・算定した。

なお、海溝型・内陸地殻内・スラブ内地震による選定波形に基づいて探索・算定された25cmおよび50cmの各許容残留変形量に対する降伏加速度の一覧については、文献64)の付録表を参照されたい。

表-2 段差走行実験<sup>68)</sup>に基づく道路盛土の性能評価基準<sup>69)</sup>

ランク	被災直後における 常時の交通機能の確保の難易	被害の評価項目
		車道路面の段差高
1	交通機能は確保される	段差規模が2~3cm以下
2	交通は低下するが、その確保は容易であり、比較的短時間で実施できる	段差規模が2~3cmを超えて、25cm以下
3	交通が低下し、その確保はやや困難であり、やや期間を要する	段差規模が25cmを超えて、50cm以下
4	通行交通が喪失し、その確保は困難であり、長期間を要する	段差規模が50cmを超える

### 3.2 海溝型地震

図-1(a)および図-2(a)は、残留変形量を25cmおよび50cmとした場合の降伏加速度に基づく設計水平震度(降伏加速度を重力加速度(980Gal)で除することによって算定)を、2.2で選定した波形・水平成分の最大加速度(PGA)の値に対してプロットしたものである。両図には、野田式による最大加速度と水平震度の関係についても示している。残留変形量が25cmのケースでは野田式を大幅に上回る水平震度を示しているのが281波形の中で11波形(図-1(a)参照)、残留変形量が50cmのケースでは野田式を大幅に上回る水平震度を示しているのが281波形の中で3波形(図-2(a)参照)とそれぞれなっており、Newmark法に基づく残留変形量の評価は若干過大になる傾向<sup>70)</sup>があるため、当該3波形による設計水平震度が若干大きめに評価されている可能性が高いことなどを勘案すれば、野田式は設計水平震度の算定値を概ね包絡しており、岸壁などの港湾構造物<sup>71)</sup>だけでなく道路盛土に対しても一定の適用性を有しているものと推察される。

図-1(b),(c),(d)および図-2(b),(c),(d)は、図-1(a)および図-2(a)と同様に、残留変形量を25cmおよび50cmとした場合の最大加速度(PGA)と設計水平震度の関係を、2.2で選定した強震観測点の地盤種別(道路橋示方書(H24)を参考にI種・II種・III種地盤)ごとに分類したものである。ここに、地盤種別は、強震観測点の位置相当におけるボーリング調査結果(Geo-Station<sup>72)</sup>など)、強震観測点の設置管理者へのヒアリング結果、観測点での強震記録によるサイト増幅特性<sup>73),74),75)</sup>のピーク周期、強震観測点で実施した常時微動計測によるH/Vスペクトル<sup>76)</sup>のピーク周波数などに基づいて判定した。図-1(d)、図-2(d)に示すように、III種地盤のケースではデータ数が比較的少ないために再考の余地が残されているが、図-1(b),(c)、図-2(b),(c)に示すように、I種およびII種地盤のケースでは地盤種別による大きな差異は確認できない。また、図-1(b),(c)と図-2(b),(c)を比較すると、残留変形量の設定値が25cmから50cmに大きくなることで、野田式に基づく設計水平震度がNewmark法に基づく設計水平震度をほぼ包絡している。

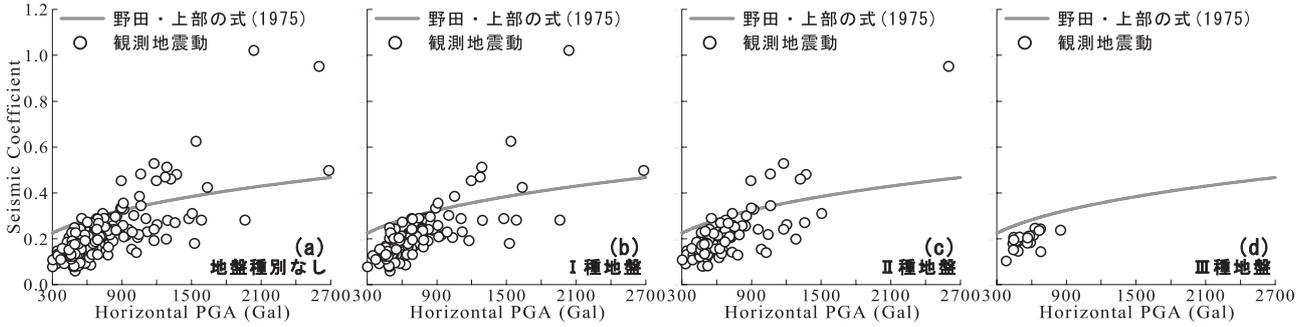


図-1 最大加速度と設計水平震度の関係(海溝型地震・残留変形量：25cm)

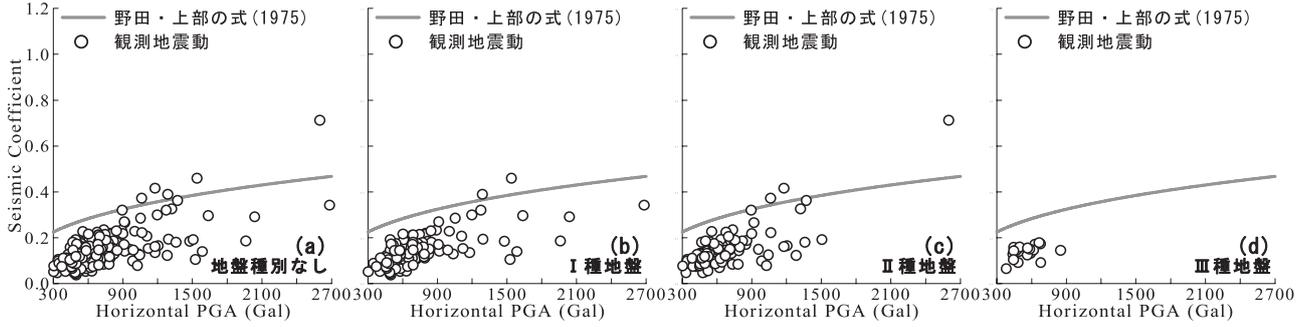


図-2 最大加速度と設計水平震度の関係(海溝型地震・残留変形量：50cm)

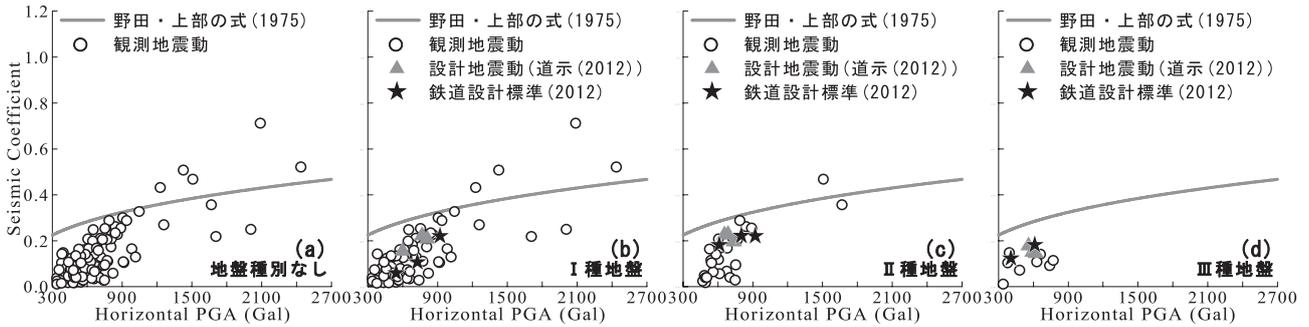


図-3 最大加速度と設計水平震度の関係(内陸地殻内地震・残留変形量：25cm)

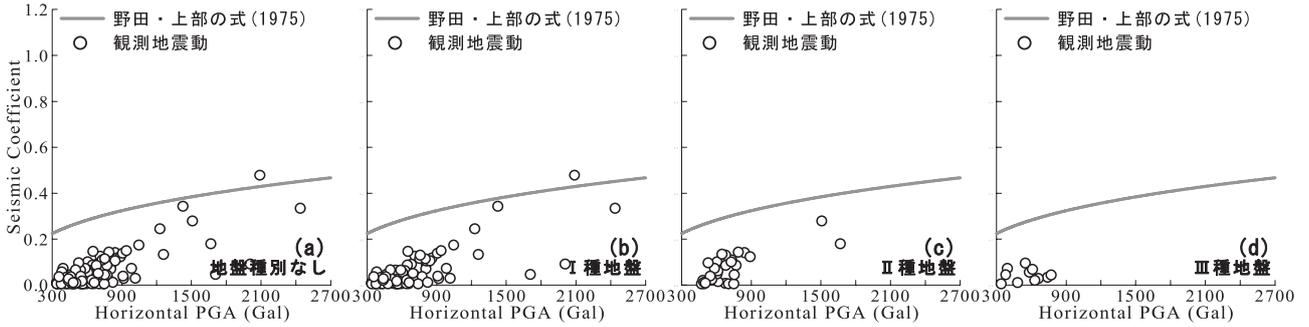


図-4 最大加速度と設計水平震度の関係(内陸地殻内地震・残留変形量：50cm)

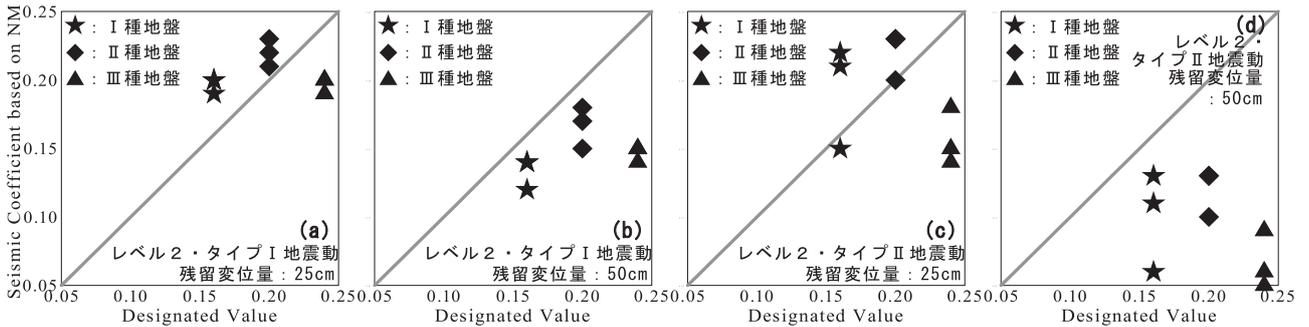


図-5 道路橋示方書(H24)および盛土工指針(H22)に基づくレベル2地震動による耐震性評価を行う際の水平震度の比較

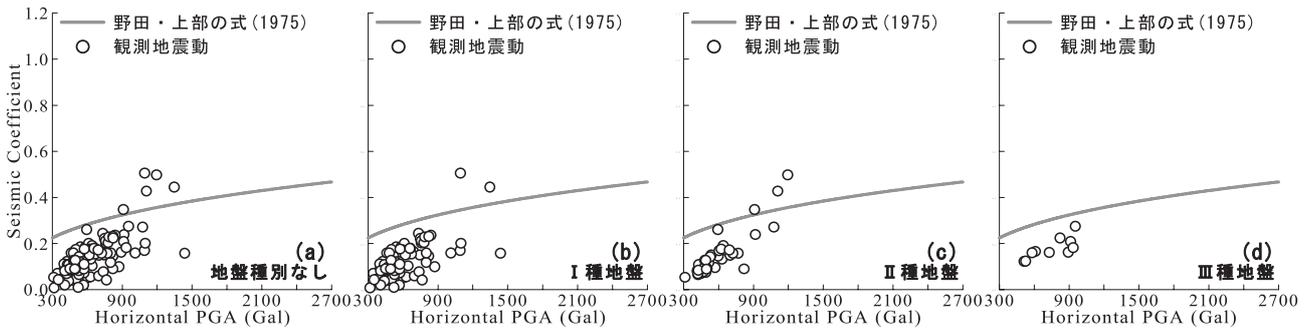


図-6 最大加速度と設計水平震度の関係(スラブ内地震・残留変形量：25cm)

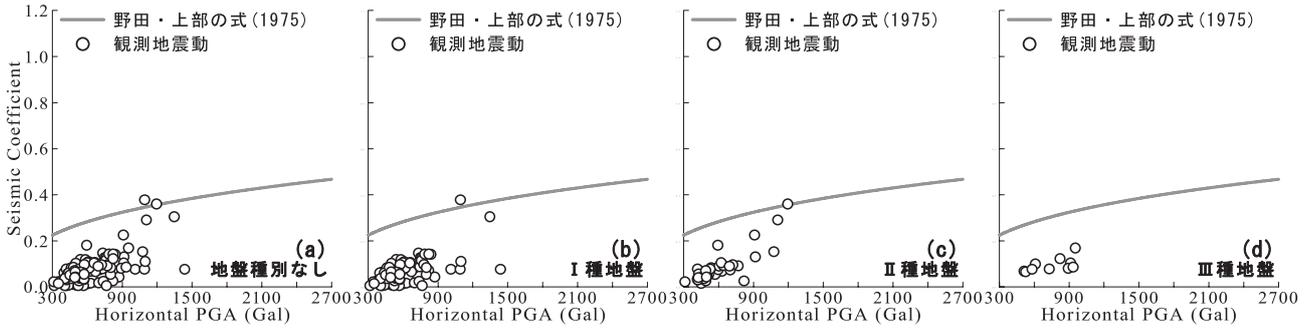


図-7 最大加速度と設計水平震度の関係(スラブ内地震・残留変形量：50cm)

### 3.3 内陸地殻内地震

図-3および図-4は、残留変形量を25cmおよび50cmとした場合の降伏加速度に基づく設計水平震度を、2.3で選定した波形・水平成分の最大加速度(PGA)の値に対してプロットしたものである。すなわち、海溝型地震に対して行った検討(図-1および図-2参照)と同様の検討を内陸地殻内地震に対して適用したものである。

図-3(a)に示すように、残留変形量が25cmのケースでは野田式を大幅に上回る水平震度を示しているのが115波形の中で5波形である。一方で、図-4(a)に示すように、残留変形量が50cmのケースでは野田式を大幅に上回る水平震度を示している観測地震動は確認できない。これらの傾向は、野田式による設計水平震度の算定が道路盛土に対しても一定の信頼性を有していることを示唆するものである。図-3(b),(c)および図-4(b),(c)に示すように、I種およびII種地盤のケースでは地盤種別による大きな差異は確認できない(ただし、図-3(d)および図-4(d)に示すように、III種地盤のケースではデータ数が比較的小ないために再考の余地が残されている)。一方で、図-3(b),(c)と図-4(b),(c)を比較すると、残留変形量を大きく設定することで、野田式の適用性が向上していることが読み取れる。

### 3.4 設計地震動

図-3(b),(c),(d)には、鉄道構造物等設計標準・同解説[耐震設計](H24)<sup>30)</sup>に基づく土構造物の応答値算定用の地震動を入力波とした場合の最大加速度(PGA)と設計水平震度の関係、および道路橋示方書(H24)<sup>15)</sup>に基づくレベル2・タイプII地震動を入力波とした場合の最大加速度(PGA)と設計水平震度の関係をそれぞれプロットしている。図-3

(b),(c),(d)に示すように、両指針(道路橋示方書(H24)と鉄道構造物等設計標準(H24))に基づく最大加速度(PGA)と設計水平震度の関係は、比較的類似していることが読み取れる。両指針では、地震動の設定方法やその思想などはそれぞれ異なる点があるものの、内陸地殻内地震を想定した場合、道路盛土に対する地震外力の大きさとしては同等程度であることが示唆される。

図-5は、震度法に基づく設計水平震度とNewmark法に基づく設計水平震度を、レベル2地震動および許容残留変位量の種別ごとにそれぞれ比較したものである。ここに、震度法に基づく設計水平震度は、盛土工指針(H22)<sup>7)</sup>における水平震度(表-1参照)である。一方で、Newmark法に基づく設計水平震度は、3.1で述べたとおり、所定の許容残留変形量(25cmもしくは50cm)を示す降伏加速度に対する重力加速度の比率である。

図-5(a),(b)に示すように、タイプI地震動を想定した場合には、設定した耐震性能(交通が低下し、その確保はやや困難であり、やや期間を要する：表-2および3.1参照)<sup>68),69)</sup>に対して、震度法とNewmark法に基づく設計水平震度が比較的良好一致を示す傾向にあり、この傾向は地盤種別(I, II, III種地盤)にも依存していない。一方で、図-5(c),(d)に示すように、タイプII地震動を想定した場合には、上述したタイプI地震動のケース(図-5(a),(b)参照)よりも変動が大きいものの、震度法とNewmark法に基づく設計水平震度が比較的一致していることが読み取れる。

図-5(a),(c)に示すように、残留変形量の設定値が25cmのケースでは、震度法に基づく設計水平震度とNewmark法に基づく設計水平震度がほぼ同等、もしくはNewmark法に基づく設計水平震度のほうが若干大きくなる傾向にある。一方で、図-5(b),(d)に示すように、残留変形量の

設定値が50cmのケースでは、震度法に基づく設計水平震度がNewmark法に基づく設計水平震度を包絡していることが読み取れる。ここに、野田式に対して設計水平震度がかなり小さい場合においても一定の適用性を有している（設計水平震度の算定値を野田式が概ね包絡している）と判断した理由の一つとして、安全側の評価結果が得られていることが挙げられる。

### 3.5 スラブ内地震

図-6および図-7は、残留変形量を25cmおよび50cmとした場合の降伏加速度に基づく設計水平震度を、2.4で選定した波形・水平成分の最大加速度(PGA)の値に対してプロットしたものである。すなわち、海溝型地震に対して行った検討(図-1および図-2参照)ならびに内陸地殻内地震に対して行った検討(図-3および図-4参照)と同様の検討をスラブ内地震に対して適用したものである。

図-6(a)および図-7(a)に示すように、許容残留変形量が25cmのケースでは野田式を大幅に上回る水平震度を示しているのが117波形の中で4波形であり、許容残留変形量が50cmのケースでは野田式を超過する水平震度を示している観測地震動はほぼ見受けられない。また、図-6(b),(c)および図-7(b),(c)に示すように、I種およびII種地盤のケースでは地盤種別による大きな差異は確認できない。ただし、データ数が比較的少ないIII種地盤のケース(図-6(d)および図-7(d)参照)を除く。

上記のスラブ内地震に対する検討結果は、上述した海溝型地震および内陸地殻内地震に対する検討結果(3.2および3.3参照)と類似していることから、海溝型地震や内陸地殻内地震(ともに道路橋示方書(H24)<sup>15)</sup>に記載済)に対して得られた知見が、スラブ内地震(道路橋示方書(H24)<sup>15)</sup>に未記載)に対して適用できる可能性を示唆するものである。

## 4. まとめ

本稿では、国内で近年発生した大規模地震によって得られた強震観測記録に基づいて、道路盛土を対象とした最大加速度(PGA)と設計水平震度の関係について基礎的な検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 重力式岸壁等の港湾構造物を対象として提案・実用化されてきた既往の野田式が道路盛土の耐震設計・耐震性評価などにおいても、一定の適用性を有する可能性が高い。特に、地震後の残留変形量の設定値を比較的大きく見積ることで、その適用性は向上する傾向にある。(ただし、野田式に対する適合を目的とした許容残留変形量の設定を意図するものではない)
- (2) 上記(1)の知見は、道路橋示方書(H24)の対象となっている海溝型地震や内陸地殻内地震だけでなく、道路橋示方書(H24)の対象となっていないスラブ内地震に対しても有効である。
- (3) 道路橋示方書(H24)によるレベル2地震動に基づく設

計水平震度と、盛土工指針(H22)に基づく設計水平震度の間には、大きな乖離は生じていない。

- (4) 上記(3)の知見は、海溝型地震および内陸地殻内地震に対してともに有効である。
- (5) 最大加速度と設計水平震度の関係によれば、道路橋示方書(H24)と鉄道構造物等設計標準(H24)に例示されている内陸地殻内地震による設計地震動は、道路盛土への地震外力の大きさとしては同等程度である。

今後は、既往の大規模地震による道路盛土の被災・無被災事例に対しても本稿と同様の検討を行っていきたい。

## 謝辞

国立研究開発法人防災科学技術研究所 K-NET/KiK-net, 国土交通省(国土技術政策総合研究所), 国立研究開発法人建築研究所, 気象庁, NEXCO 東日本, JR 東日本・JR 西日本, 関西地震観測研究協議会, 港湾地域強震観測, 地方自治体, 宮城県, 広島県震度情報ネットワーク, 東北工業大学 Small-Titan, 関西電力(株), 東京電力(株), 東北電力(株), 日本原子力発電(株)による強震観測波形データを使用しました。国立研究開発法人防災科学技術研究所 Geo-Station による統合化地下構造データベースを使用しました。地方自治体の担当者の方々には、強震観測点の地盤情報に関するヒアリング等に回答していただきました。(一財)災害科学研究所土工構造物の性能向上技術普及研究会の委員の皆様には、本研究の遂行に関して有意義なご意見をいただきました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) (公社)地盤工学会:新潟県中越地震災害調査委員会報告書, pp.187-203, 2007.
- 2) (公社)地盤工学会:2007年能登半島地震道路災害データ集, 74p., 2007.
- 3) (公社)地盤工学会:2007年新潟県中越沖地震災害調査報告書, 5.4節, pp.46-54, 2009.
- 4) 齊藤康博:駿河湾を震源とする地震による東名高速道路被災箇所への応急復旧—東名の崩落箇所を115時間で復旧—, 土木学会誌, Vol.94, No.11, pp.10-11, 2009.
- 5) 矢崎敏之:東日本大震災におけるNEXCO東日本の対応, 高速道路の被害と復旧状況, 土木学会誌, Vol.96, No.7, pp.20-21, 2011.
- 6) 国土交通省仙台河川国道事務所:2011年東北地方太平洋沖地震—被災状況(道路), 14p., 2011.
- 7) (公社)日本道路協会:道路土工—盛土工指針(平成22年度版), 丸善, 310p., 2010.
- 8) (公社)日本道路協会:道路土工—のり面工・斜面安定工指針, 丸善, 470p., 1999.
- 9) Newmark, N. M.: Effects of earthquakes on dams and embankments, *Geotechnique*, Vol.15, No.2, pp.139-160, 1965.
- 10) 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, 2009.
- 11) 安田進, 吉田望, 安達健司, 規矩大義, 五瀬伸吾, 増田民夫:液状化に伴う流動の簡易評価法, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp.71-89, 1999.
- 12) 例えば, 秦吉弥, 一井康二, 野津厚, 酒井久和:高盛土の残留変形に影響を及ぼす入力地震動の周波数帯

- 域に関する基礎的検討, 地盤工学ジャーナル, 地盤工学会, Vol.9, No.4, pp.747-759, 2014.
- 13) 例えば, Hayashi, H., Nishikawa, J. and Taniguchi, K.: Seismic behavior of road embankments, *Proc. of the International Conference Centrifuge 98*, pp.243-248, Tokyo, Japan, 1998.
  - 14) 松尾修, 塚田幸広, 堤達也, 宮武裕昭, 齊藤由紀子: 兵庫県南部地震により被災した道路土構造物の事例解析, 土木技術資料, Vol.39, No.3, pp.38-43, 1997.
  - 15) (公社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説—V 耐震設計編, 丸善出版, 318p., 2012.
  - 16) 例えば, 三好忠和, 常田賢一: 盛土の地震時残留変位に及ぼす地震動の影響に関する一考察, 土木学会論文集 A1, Vol.70, No.4, pp.I\_1018-1031, 2014.
  - 17) 常田賢一, 秦吉弥, 三好忠和: 性能評価のための道路盛土のすべり安全率とすべり変位量の相関化, 第 33 回土木学会地震工学研究発表会講演論文集, Paper No.1-401, 2013.
  - 18) 野田節男, 上部達生, 千葉忠樹: 重力式岸壁の震度と地盤加速度, 港湾技術研究所報告, Vol.4, No.4, pp.67-111, 1975.
  - 19) 輔信捷三, 柳原和憲, 松井保, 鳥居剛, 黒田修一: 兵庫県南部地震における被災盛土の動的安定性に関する研究, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, pp.941-944, 1997.
  - 20) 鳥居剛, 黒田修一, 松井保: 震度法における盛土の限界水平震度と地盤加速度の関係について, 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1041-1044, 2001.
  - 21) 濱崎英作, 宮城豊彦, 竹内則雄, 大西有三: 簡易 RBSM 三次元試行球面すべり面法を用いた造成地盛土斜面の地震被害評価法, 日本地すべり学会誌, Vol.43, No.5, pp.251-258, 2007.
  - 22) 秦吉弥, 一井康二, 加納誠二, 土田孝: 既存斜面の実用的耐震診断手法の提案, 広島大学大学院工学研究科研究報告, Vol.56, No.1, 2007.
  - 23) 岡村未対, 重松慎哉: 山岳道路盛土のブロック積擁壁の地震時安定性評価法, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.4, pp.770-775, 2008.
  - 24) 林野庁東北森林管理局: 滑落崖の変状と応急排土工の必要性について, 岩手・宮城内陸地震に係る荒砥沢地すべり対策と大規模地すべりにより出現した地形・景観の活用に関する第 3 回検討会公開資料, 2009.
  - 25) Hyodo, M., Orense, R.P., Noda, S., Furukawa, S. and Furui, T.: Slope failures in residential land on valley fills in Yamamoto town, *Soils and Foundations*, Vol.52, No.5, pp.975-986, 2012.
  - 26) 駒井尚子, 秦吉弥, 常田賢一: ケーススタディに基づく大規模地震による宅地造成斜面の崩壊範囲の評価に関する基礎的検討, 土木学会論文集 A1, Vol.70, No.4, pp.I\_304-322, 2014.
  - 27) 坂井公俊, 室野剛隆, 佐藤勉: 近年の地震記録に基づいた L2 地震動の考え方とその設定方法, 鉄道総研報告, Vol.25, No.9, pp.5-12, 2011.
  - 28) 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.
  - 29) 田上和也, 坂井公俊, 室野剛隆, 松丸貴樹, 渡辺健治, 神田正幸: 盛土の滑動変形量算定のための設計地震動に関する検討, 鉄道工学シンポジウム論文集, 土木学会, 第 15 号, pp.170-174, 2011.
  - 30) (公財)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, 丸善出版, 418p., 2012.
  - 31) 秦吉弥, 常田賢一, 片岡正次郎: 2011 年東北地方太平洋沖地震による観測記録に基づく道路盛土における最大加速度と設計水平震度に関する基礎的研究, 第 8 回構造物の安全性および信頼性(JCOSSAR 2015) 論文集, pp.49-52, 2015.
  - 32) 秦吉弥, 常田賢一, 片岡正次郎: 道路盛土における最大加速度と設計水平震度に関する基礎的研究—内陸地殻内地震を例として—, 第 18 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.423-428, 2015.
  - 33) 秦吉弥, 常田賢一, 片岡正次郎, 一井康二: 道路盛土斜面における最大加速度と設計水平震度に関する検討—スラブ内地震を例として—, 第 54 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.194-195, 2015.
  - 34) 秦吉弥, 常田賢一, 片岡正次郎: 道路盛土の耐震性能照査における設計水平震度とレベル 2 地震動の関係, 第 31 回日本道路会議論文集, Paper No.4018, 2015.
  - 35) Ugai, K.: Analysis on rigid block sliding displacements of slopes during earthquakes, *Proc. of 9th World Conference on Earthquake Engineering*, pp.III\_163-167, Tokyo, Japan, 1988.
  - 36) Ling, H.I. and Leshchinsky, D.: Seismic performance of simple slopes, *Soils and Foundations*, Vol.35, No.2, pp.85-94, 1995.
  - 37) Kramer, S.L. and Smith, M.W.: Modified Newmark model for seismic displacements of compliant slopes, *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, ASCE*, Vol.123, No.7, pp.635-644, 1997.
  - 38) Matasovic, N., Kavazanjian, E.Jr. and Giroud, J.P.: Newmark seismic deformation analysis for geosynthetic covers, *Geosynthetics International*, Vol.5, pp.237-264, 1998.
  - 39) Rathje, E.M. and Bray, J.D.: An examination of simplified earthquake-induced displacement procedures for earth structures, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.36, No.1, pp.72-87, 1999.
  - 40) Razaghi, H.R., Yanagisawa, E. and Kazama, M.: An approach to seismic permanent displacement of slopes, *Journal of Geotechnical Engineering, JSCE*, No.659/III-52, pp.1-16, 2000.
  - 41) Bray, J.D. and Travasarou, T.: Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements, *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, ASCE*, Vol.133, No.4, pp.381-392, 2007.
  - 42) 安田進, 安達健司: ニューマーク法を用いた地震時盛土すべり変位量の推定, 地盤工学会誌, Vol.58, No. 12, pp.52-53, 2010.
  - 43) Baziar, M.H., Rezaei-pour, H. and Jafarian, Y.: Decoupled solution for seismic permanent displacement of earth slopes using deformation-dependent yield acceleration, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol.16, No.1, pp.917-936, 2012.
  - 44) Yasuda, S. and Fujioka, K.: Study on the method for the seismic design of expressway embankments, *Special Topics in Earthquake Geotechnical Engineering, Springer*, pp.241-272, 2012.
  - 45) Uotani, M., Tokida, K. and Hata, Y.: Evaluation of residual displacement of highway embankment damaged during

- the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake based on the modified Newmark sliding block method, *Proc. of 12th Korea/Japan Joint Seminar on Geotechnical Engineering*, Busan, Korea, pp.183-192, 2013.
- 46) Chatterjee, K. and Choudhury, D.: Seismic analysis of soil slopes using FLAC2D and modified Newmark approach, *Proc. of the Geo-Institute's 2014 annual congress*, ASCE, Atlanta, U.S.A., pp.1196-1205, 2014.
- 47) 岡村嘉之, 酒匂一成, 深川良一: 振動輸送理論を応用した地震時斜面のすべり変位解析, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.1, pp.162-173, 2009.
- 48) 恩田純一, 尾上篤生: 強度低下を考慮した Newmark 法による尼谷地地すべり量の推定, 第 44 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.1569-1570, 2009.
- 49) 龍岡文夫, Duttine, A., 矢崎澄雄, 毛利栄征: 非排水繰返し載荷による強度低下とひずみ軟化を考慮したニューマーク法による地震時斜面残留変位推定, 地盤工学会特別シンポジウム—東日本大震災を乗り越えて—発表論文集, pp.394-402, 2014.
- 50) (公社)土木学会: 土木構造物の耐震設計法に関する第 3 次提言と解説—盛土等土構造物の耐震性能と設計法, 土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会, pp.8\_29-34, 2000.
- 51) Aoi, S., Kunugi, T. and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
- 52) Uehara, H. and Kusakabe, T.: Observation of strong earthquake motion by National Institute for Land and Infrastructure Management, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.90-96, 2004.
- 53) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
- 54) Maruyama, Y., Yamazaki, F., Mizuno, K., Tsuchiya, Y., Yogai, H.: Fragility curves for expressway embankments based on damage datasets after recent earthquakes in Japan, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.30, pp.1158-1167, 2010.
- 55) Ashiya, K.: Earthquake alarm systems in Japan Railways, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.112-117, 2004.
- 56) Kamiyama, M., Matsukawa, T. and Anazawa, M.: Strong ground motions observed by Small-Titan during the 2011 Great East Japan Earthquake, *Joint Conference Proc. of 9th International Conference on Urban Earthquake Eng. / 4th Asia Conference on Earthquake Eng.* (CD-ROM), 10p., Tokyo, Japan, 2012.
- 57) 西前裕司: 気象庁・地方公共団体における震度観測および強震観測について, 日本地震工学会大会—2003 梗概集, pp.特 58-59, 2003.
- 58) 日本原子力発電株式会社: 東海第二発電所における平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震時に取得された地震観測記録の分析および津波の調査結果に係わる報告書(概要), 経済産業省原子力安全・保安院, 平成 23 年 4 月 7 日 News Release, 2011.
- 59) Kagawa, T., Iemura, H., Irikura, K. and Toki, K.: Strong ground motion observation by the committee of earthquake observation and research in the Kansai area (CEORKA), *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.128-133, 2004.
- 60) Nozu, A.: Current status of strong-motion earthquake observation in Japanese ports, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.79-83, 2004.
- 61) Furuya, T.: Seismic observation in irrigation dam, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.104-107, 2004.
- 62) Kashima, T.: Strong motion network operated by Building Research Institute, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
- 63) 例えば, 榎野光, 佐々木康, 野田浩太郎, 藤原義則: 芸予地震記録と広島県における強震観測地点特性の関係, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, I-769, pp.1535-1536, 2004.
- 64) 秦吉弥, 常田賢一, 片岡正次郎, 一井康二, 門田浩一: 道路盛土の耐震性評価における設計水平震度と入力地震動の関係に関する一考察, 第 35 回土木学会地震工学研究発表会講演論文集, Paper No.737, 2015.
- 65) 東畑郁生: 土構造物の地震時許容変形量について, 土構造物の耐震設計に用いるレベル 2 地震動を考えるシンポジウム論文集, 地盤工学会, pp.109-110, 1998.
- 66) 谷茂: 土構造物の地震時における性能設計法の現状と今後の課題, 土と基礎, Vol.54, No.12, pp.23-24, 2006.
- 67) 國生剛治: 首都圏直下地震に備える地盤工学の課題, 土と基礎, Vol.55, No.5, pp.3-6, 2007.
- 68) 依藤光代, 常田賢一: 地震時の段差被害に対する補修と交通開放の管理・運用方法について, 平成 19 年度近畿地方整備局研究発表会論文集, 防災・保全部門 No.16, 2007.
- 69) (一財)災害科学研究所: 盛土の性能評価と強化・補強の実務, 盛土の性能向上技術普及研究会, 228p., 2014.
- 70) 例えば, 室野剛隆, 館山勝, 青木一二三, 堀井克己, 鶴田由希: 盛土の耐震検討に用いる地震動波形に関する一考察, レベル 2 地震に対する土構造物の耐震設計シンポジウムおよび講習会テキスト, 地盤工学会, pp.347-354, 2000.
- 71) 野津厚, 上部達生, 佐藤幸博, 篠澤巧: 距離減衰式から推定した地盤加速度と設計震度の関係, 港湾技研資料, No.893, 1997.
- 72) 大井昌弘, 藤原広行: 地盤情報の統合化と提供—ジオ・ステーション—, 地盤工学会誌, Vol.61, No.6, pp.8-11, 2013.
- 73) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例, 日本地震工学会論文集, Vol.7, No.2, pp.215-234, 2007.
- 74) 西前裕司: 気象庁の計測震度計観測点のサイト特性(東日本), 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, Paper No.S051-P007, 2004.
- 75) Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: Variation of earthquake ground motions within very small distance, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.66, pp.429-442, 2014.
- 76) 例えば, 秦吉弥, 一井康二, 酒井久和, 野津厚: 宮城県・鳴瀬川流域周辺の強震観測点における常時微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性, 広島大学大学院工学研究科研究報告, Vol.60, No.1, 2011.

(2016 年 6 月 10 日 受付)