

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

Recipe for Determination of Input Ground Motion for Seismic Performance Evaluation
of Expressway Embankments

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)
林 健二	Kenji HAYASHI	((株)フォレストエンジニアリング)
林 訓裕	Kunihiro HAYASHI	(阪神高速道路(株)大阪管理部)

近年発生した大規模地震では、強震動の作用により盛土斜面が被災し、高速道路が閉鎖され緊急対応や復旧の障害となるケースなどが相次いでいる。地震防災上、このようなレベル 2 地震クラスの想定地震による道路盛土の耐震性能照査を実施することが重要である。そのためには、対象とする盛土地点における入力地震動を適切に設定する必要がある。そこで本稿では、個別の高速道路盛土を対象にした場合の、地域特性(サイト特性)を考慮したレベル 2 地震動の設定手法を検討し、さらにそれを国内に実在する高速道路盛土に適用した事例を紹介した。

キーワード：盛土，強震動，常時微動計測，サイト特性，断層モデル (IGC : E08)

1. はじめに

近年発生した大規模地震では、強震動の作用による盛土斜面の崩壊が発生し、高速道路が閉鎖され緊急対応や復旧の障害となるケースなどが相次いでいる。例えば、2004 年新潟県中越地震では関越自動車道¹⁾、2007 年能登半島地震では能登有料道路²⁾、2009 年駿河湾を震源とする地震では東名高速道路³⁾、2011 年東北地方太平洋沖地震では常磐自動車道⁴⁾においてそれぞれ盛土斜面が被災し、道路機能の不全が生じた。地震防災上の観点からは、高速道路盛土の耐震性をマクロ的に評価⁵⁾し、耐震性が低いと判断された盛土においては、レベル 2 地震クラスの想定地震に対する詳細な耐震性能照査を実施することが重要となる。これまで著者らは、大規模地震によって被災した盛土地点での本震時の強震波形を事後推定¹⁾⁴⁾しており、これらの推定地震動を耐震性能照査に転用する方法も考えられるが、耐震性能照査が必要となる道路盛土は、現在のところ無被災である盛土が一般的であり、今後発生が予想される大規模地震(想定地震)による盛土地点での強震動(いわゆるレベル 2 地震動)を適切に設定する必要がある。

しかしながら、高速道路における耐震性評価のためのレベル 2 地震動を合理的に設定する際の困難性の 1 つとして、高速道路の延長が長大であることが挙げられる。つまり、地盤震動の特性(サイト増幅・位相特性)や地震危険度の特性(盛土地点に対する活断層や歴史地震との位置関係)がそれぞれ異なってくる事が挙げられる。一般の耐震設計であれば、標準スペクトルや標準波形を用いるという考え

方もありえるが、耐震性能照査を合理的に行うためには、これらの個別の特性を考えることが肝要である。すなわち、盛土地点が有している特性を考慮した入力地震動(レベル 2 地震動)を設定することが必要である。ここで、レベル 2 地震動は、応答スペクトルおよび時刻歴地震波形のどちらか、もしくは両方で表現する方針が示されている⁶⁾。しかしながら、盛土は、橋梁などの上部構造物と違い減衰定数等の設定が困難⁷⁾であるため、時刻歴地震波形を設定するのが現実的であると考えられる。この点に関して著者ら⁸⁾は、広島県内の山間部に位置する高速道路のインターチェンジ間の盛土を一例として、サイト特性を考慮したレベル 2 地震動を設定する手法を提案している。しかしながら、この提案手法は、常時微動 H/V スペクトルの特性に基づいて、インターチェンジ間をゾーニングする方法であり、各ゾーン内での地盤震動の特性や地震危険度の特性を一律と仮定しているため、個別の盛土を対象とする場合には、最適であるとは言い難い。さらに、時刻歴地震波形を評価する際に、主に米国カリフォルニアのデータに基づいた経験式⁹⁾を断層モデルのパラメータ設定に用いているため、近年、我が国で多発している内陸地殻内地震の実績が十分に反映されていないという問題点も有している。

そこで本稿では、個別の高速道路盛土を対象に、別稿で紹介した常時微動 H/V スペクトルに基づくサイト増幅特性の評価方法¹⁰⁾を適用し、盛土周辺に位置する活断層に起因した内陸地殻内地震による強震波形を推定することで、レベル 2 地震動を設定した結果の一例について報告する。

その際、我が国での内陸地殻内地震によるやや短周期地震動¹¹⁾の再現に適した震源断層のモデル化手法¹²⁾を採用することで、盛土の被災に影響を及ぼす地震動の周波数帯域¹³⁾(やや短周期帯域)を考慮した盛土の耐震性能照査に適したレベル2地震動とした。

2. レベル2地震動の設定フロー

図-1 に本稿で新たに提案する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フローを示す。ここで、検討対象となる道路盛土は、地震危険度マクロ評価法⁹⁾を利用した緊急点検の結果、詳細調査が必要と判断された盛土などである。図-1 に示すように、検討フローは4つに大別することができる。

まず、対象盛土と周辺の既存強震観測点においてそれぞれ単点の常時微動計測を同時刻に実施する。対象盛土に地震計を設置し、地震観測を開始する方法も考えられるが、観測が長期間に及ぶことで実務上煩雑となる可能性もあることから、後述するサイト特性の推定精度が低下するもの、ここでは、常時微動計測を採用している。盛土地点での微動計測位置は、近傍のボーリング実施地点や表面波探査実施地点など、工学的基盤～地表付近の地盤構造が明らかでない地点を選定するのが望ましい。周辺の既存強震観測点としては、(独)防災科学技術研究所 K-NET・KiK-net¹⁴⁾、気象庁 JMA¹⁵⁾、国土交通省河川・道路等施設の地震計ネットワーク MLIT¹⁶⁾、港湾地域強震観測 PARI¹⁷⁾などが挙げられ、地震観測波形データがこれまで多く得られており、観測点でのサイト増幅特性が設定済¹⁸⁾もしくは設定可能である強震観測点を選定するのが望ましい。

次に、盛土地点と周辺の既存強震観測点での常時微動 H/V スペクトルの比較に基づいてサイト増幅特性を評価する。サイト増幅特性の評価方法としては、長尾ほかによる方法¹⁹⁾や別稿で紹介した著者らによる方法¹⁰⁾などが挙げられるが、中山間地域の道路盛土における常時微動 H/V スペクトルは、明瞭なピーク周波数が確認できないケース⁸⁾も多いため、ここでは著者らによる方法¹⁰⁾を採用する。

さらに、盛土地点周辺の想定地震を抽出し、想定地震毎に断層モデル(特性化震源モデル)のパラメータを設定する。そして、統計的グリーン関数法などによるサイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算^{20),21)}を実施し、盛土地点における強震波形を想定地震毎にそれぞれ推定する。その際、米国カリフォルニアのデータに基づいた経験式⁹⁾ではなく、我が国のデータに基づいた経験式¹²⁾を採用することで、盛土の耐震性能照査で目安となる残留変形量

に影響を及ぼすやや短周期帯域¹³⁾を適切に含んだ地震動の推定が可能となる。

最後に、想定地震毎に推定した地震動を比較検討することで、盛土地点に最も大きな影響を及ぼす地震動をレベル2地震動として選定する。その際、必要に応じて PGA, PGV, SI 値²²⁾、速度 PSI 値²³⁾、気象庁計測震度¹⁵⁾、加速度パワー²⁴⁾などの地震動の破壊力指標を用いてレベル2地震動の選定を行う。なお、上記フローの大枠は、既に港湾地域の地震動設定²⁵⁾、および著者らによる常時微動計測に基づく高速道路盛土の入力地震動設定⁸⁾において用いられているものとほぼ同様であり、特定の高速道路盛土を対象に、盛土の耐震性能(地震後の残留変形量)に影響を及ぼす地震動を適切にするために、更なる修正を加えたものである。

3. 検討対象とした盛土

図-2 および図-3 に、本稿で一例として紹介する盛土(以

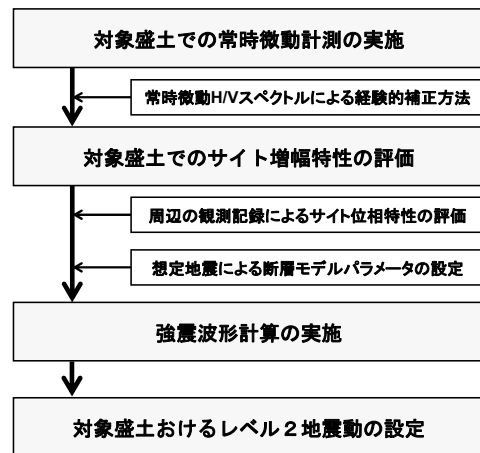


図-1 レベル2地震動の設定フロー

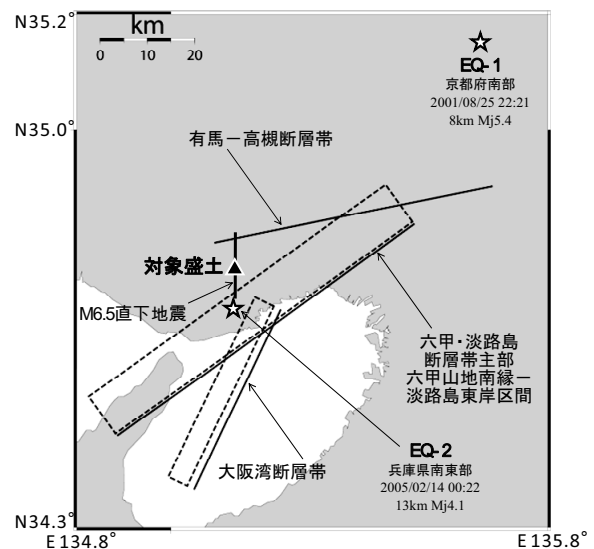


図-2 対象盛土周辺に位置する活断層の分布

後、対象盛土と呼ぶ)の位置情報を示す。さらに、図-4には、対象盛土の平面図(上空写真に一部加筆)に表面波探査結果を追加したものを示す。図-2に示すように、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のがわかる。また、図-3に示すように、対象盛土から最も近い強震観測点は、JMA神戸市北区(ただし、2007年3月11日をもって観測終了)である。さらに、図-4に示すように、対象盛土は、斜面高さ約20mで3つの小段を有する片盛土となっている。なお、対象盛土は、緊急調査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

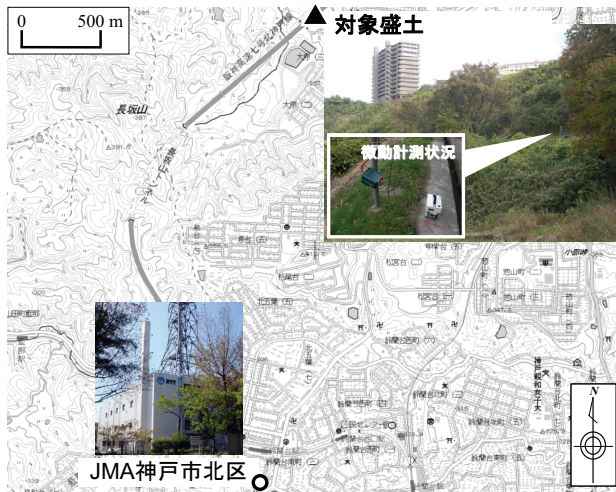


図-3 対象盛土と JMA 神戸市北区の位置関係

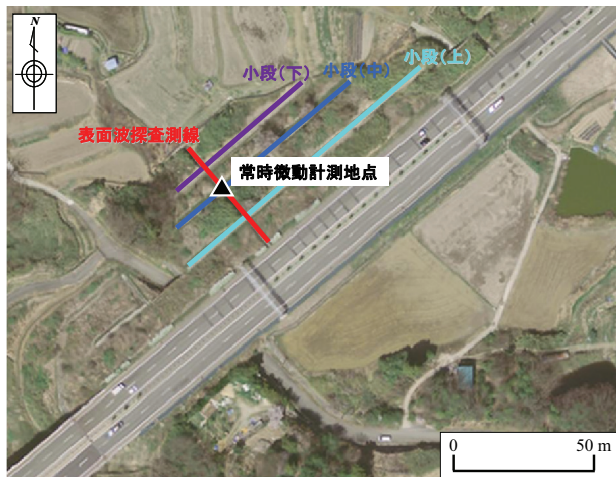


図-4(a) 小段での常時微動計測と表面波探査測線

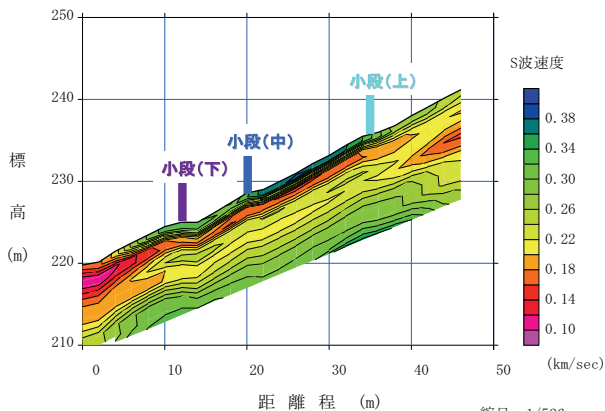


図-4(b) 表面波探査による S 波速度の分布

された盛土の1つ²⁶⁾である。すなわち本稿では、対象盛土において今後、耐震性能照査を実施する際に必要となる入力強震波形を設定した結果について報告する。

4. 微動アレー計測によるサイト増幅特性の評価

本検討では、対象盛土の小段付近(図-3 および図-4 参照)および K-NET 神戸において常時微動計測を実施した。計測時間は、2012年11月20日の午前9時から午後5時までの約8時間であり、K-NET 神戸(基準点)と対象盛土による2点間の微動アレー計測を実施した。計測機器は、2計測点ともに白山工業(株)製の一体型微動探査兼地震計機器²⁷⁾を採用した。計測方向は水平2成分と鉛直成分の計3成分であり、後述する常時微動 H/V スペクトルの計算で

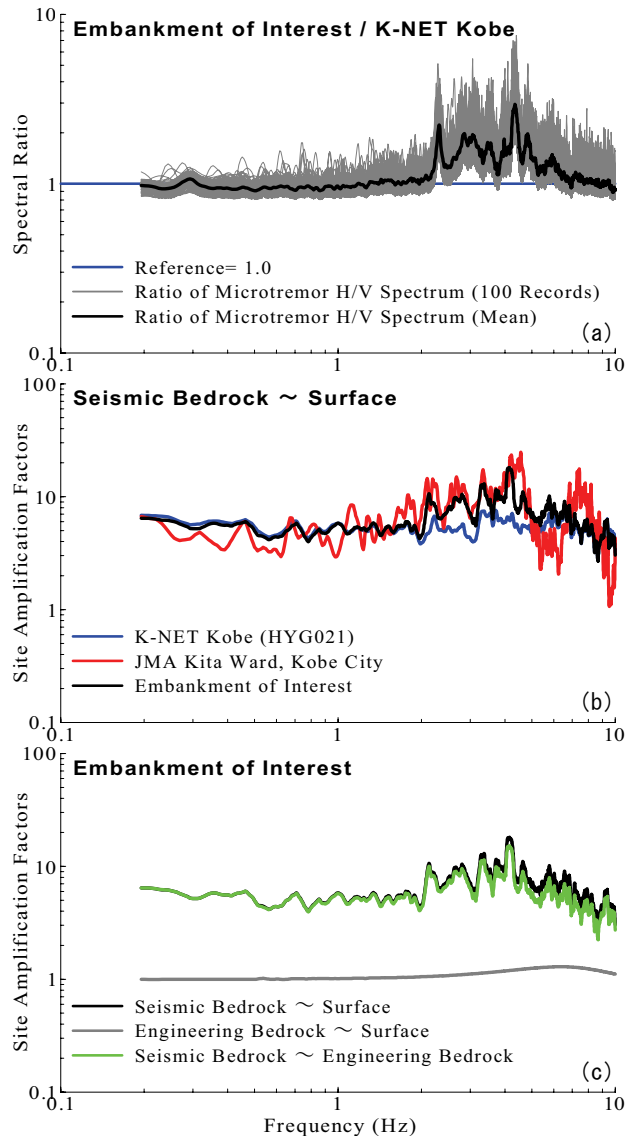


図-5 常時微動 H/V スペクトルの比率(a)、地震基盤～地表相当のサイト増幅特性の比較(b)、地震基盤～工学的基盤相当のサイト増幅特性の比較(c)

は、水平2成分の平均をとった。

本稿では、別稿で紹介した微動アレー計測記録に基づくサイト増幅特性評価手法¹⁰⁾を用いて、対象盛土(小段(中))におけるサイト増幅特性(地震基盤～地表)を評価した。

具体的には、まず、K-NET 神戸(基準点)ならびに対象盛土(小段(中))での雑振動がともに小さい163.84秒間(同時刻)の微動の加速度時刻歴に対して、常時微動H/Vスペクトルを計算した。H/Vスペクトルの計算方法としては、0.1Hzのハイ・パスフィルターを施した後に、フーリエスペクトルの計算(バンド幅0.05HzのParzen Windowで平滑化)を行うことで、H/Vスペクトルを算出した。評価振動数の範囲としては、使用した微動計測器の性能²⁷⁾や盛土の被災に影響を及ぼす地震動の周波数帯域¹³⁾などを考慮して0.2～10Hzとした。次に、同時刻による微動の加速度時刻歴によって得られたK-NET 神戸(基準点)と対象盛土(小段(中))の2点間における常時微動H/Vスペクトルの比率(対象盛土/K-NET 神戸)を100区間ごとに計算した(図-5(a)参照)。最後に、この常時微動H/Vスペクトルの比率の100区間平均(図-5(a)参照)を周波数帯域について計算し、このスペクトル比の平均をK-NET 神戸(基準点)における既存のサイト増幅特性(地震基盤～地表)¹⁸⁾に掛け合わせることによって、対象盛土(小段(中))における水平方向のサイト増幅特性(地震基盤～地表：図-5(b)参照)を評価した。図-5(b)には、K-NET 神戸とJMA 神戸市北区のサイト増幅特性(ともに地震観測記録に基づいて設定された地震基盤～地表相当のサイト増幅特性)についても同時に示しているが、対象盛土とJMA 神戸市北区におけるサイト増幅特性の類似性が確認できる。

図-5(c)には、対象盛土(小段(中))における地震基盤～工学的基盤相当のサイト増幅特性を示す。地震基盤～工学的基盤相当のサイト増幅特性は、地震基盤～地表相当のサイト増幅特性(図-5(b)参照)を、工学的基盤～地表の伝達関数で除することによって算定²⁸⁾した。ここに、工学的基盤～地表の伝達関数は、図-4で示した対象盛土の微動計測地点(小段(中))での表面波探査結果に基づいて評価したS波速度 V_S の1次元速度構造モデル($V_S=280\text{m/s}$ (1.4m以浅)、 $V_S=190\text{m/s}$ (～3.3m)、 $V_S=220\text{m/s}$ (～6.9m)、 $V_S=270\text{m/s}$ (6～10.0m)、 $V_S=300\text{m/s}$ (10.0m以深))を用いて計算した。

5. 地震動の評価

5.1 特性化震源モデル

図-2に対象盛土と想定地震による震源断層の位置関係、図-6に震源断層内におけるアスペリティならびに破壊開

始点の配置と対象盛土との位置関係、表-1に震源断層モデルのモデルパラメータの一覧を示す。レベル2対象地震としては、対象盛土周辺に位置しており、対象盛土に比較的大きな影響を及ぼすことが予想される内陸地殻内の活断層(有馬-高槻断層帯、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)、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M6.5直下地震⁹⁾をそれぞれ選定した。M6.5直下地震を考慮する理由^{9),29)}は、活断層とは過去の大地震の際に地表に出現した地震断層の痕跡であるが、比較的小規模な地震の場合、地表に地震断層は出現しないので、活断層のない場所でも比較的小規模な地震が発生する可能性があるためである。具体的には、活断層がないとされる地点で想定する直下地震の規模はM6.5程度とするのが適当であるとされている。

以下に、表-1での記載順序に習い、モデルパラメータの設定根拠について述べる。

まず、巨視的断層パラメータである断層長さ、断層幅、上端深さ、走向、傾斜角、地震モーメントについては、(独)防災科学技術研究所地震ハザードステーションJ-SHIS³⁰⁾による設定値を採用した。一方で、伏在断層(仮想断層)によるM6.5直下地震のモデルパラメータについては、港湾の施設の技術上の基準・同解説2007年版³¹⁾(以後、港湾基準(2007)と呼ぶ)に基づいて設定した。

次に、アスペリティの個数については、港湾基準(2007)での記載事項や野津との私信³²⁾に基づいて評価した。震源断層が比較的長い有馬-高槻断層帯および六甲・淡路島断層帯については、アスペリティを3つ配置した。大阪湾断層帯およびM6.5直下地震については、港湾基準(2007)を参考に2つおよび1つとした。第1・第2アスペリティの地震モーメントおよび面積については、野津による内陸地殻内地震によるやや短周期地震動の再現に適した震源のモデル化手法¹²⁾(以後、野津による経験式と呼ぶ)に基づいて算定した。アスペリティの形状は、港湾基準(2007)を参考に正方形とし、そのライズタイムは片岡によるアスペリティ幅と破壊伝播速度の経験式³³⁾に基づいて計算した。

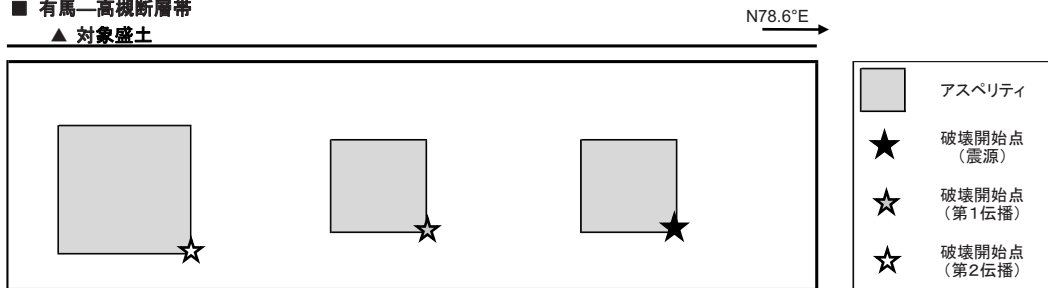
さらに、アスペリティの配置は、後述する破壊開始点との関係で、第1アスペリティの破壊が対象盛土に向かって進展するような配置とした。これは指向性の影響により、アスペリティの破壊が進展する方向に向かって特に強い地震波が生成されること、また、このようにして生成された強い地震波が1995年兵庫県南部地震の大被害に結び付いたこと³⁴⁾を考慮したものである。具体的には、港湾基準(2007)を参考に図-7に示すような配置を基本とし、その配置結果を図-6に示している。アスペリティの中心点深

表-1 震源断層のモデルパラメータの一覧

断層名称 (想定地震)		有馬-高槻断層帯	六甲・淡路島断層帯 主部六甲山地南縁—淡路島東岸区間	大阪湾断層帯	M6.5の直下地震 による伏在断層	参考資料	
巨視的断層パラメータ	断層長さ(km)	55	71	39	13	土木学会(2000)	
	断層幅(km)	16	18	12	13	土木学会(2000)	
	断層面積(km ²)	880	1278	468	169	幾何学的計算	
	上端深さ(km)	1.0	1.15	4.26	3.0	防災科学技術研究所(2012)	
	走向(deg.)	N78.6° E	N234.5° E	N205.6° E	N0.0E	日本港湾協会(2007), 防災科学技術研究所(2012)	
	傾斜(deg.)	90.0	60.0	70.0	90.0	日本港湾協会(2007), 防災科学技術研究所(2012)	
	気象庁マグニチュード	7.7	7.9	7.5	6.5	日本港湾協会(2007), 防災科学技術研究所(2012)	
地震モーメント(dyne·cm)	5.87×10 ²⁶	9.67×10 ²⁶	3.00×10 ²⁶	2.09×10 ²⁵	Someville <i>et al.</i> (1999), 防災科学技術研究所(2012)		
微視的断層パラメータ	アスペリティの個数	3	3	2	1	日本港湾協会(2007), 野津との私信	
	第1アスペリティ	地震モーメント(dyne·cm)	8.57×10 ²⁵	1.41×10 ²⁶	4.38×10 ²⁵	3.05×10 ²⁴	野津(2011)
		面積(km ²)	85.0	118.6	54.4	9.2	幾何学的計算
		長さ(km)	9.2	10.9	7.4	3.0	Someville <i>et al.</i> (1999), 片岡ほか(2003)
		幅(km)	9.2	10.9	7.4	3.0	Someville <i>et al.</i> (1999), 片岡ほか(2003)
		断層総面積に対する比率	0.09	0.09	0.12	0.05	幾何学的計算
		ライズタイム(sec)	0.82	0.97	0.66	0.27	片岡ほか(2003)
	第2・3アスペリティ	地震モーメント(dyne·cm)	5.52×10 ²⁵	9.09×10 ²⁵	2.82×10 ²⁵	—	野津(2011)
		面積(km ²)	44.1	61.5	28.2	—	幾何学的計算
		長さ(km)	6.6	7.8	5.3	—	Someville <i>et al.</i> (1999), 片岡ほか(2003)
		幅(km)	6.6	7.8	5.3	—	Someville <i>et al.</i> (1999), 片岡ほか(2003)
		断層総面積に対する比率	0.05	0.05	0.06	—	幾何学的計算
		ライズタイム(sec)	0.59	0.70	0.47	—	片岡ほか(2003)
	その他の断層パラメータ	破壊開始点位置	N34.883 E135.581	N34.510 E134.970	N34.472 E135.110	N34.778 E135.139	日本港湾協会(2007) 日本港湾協会(2007)
破壊開始点深さ(km)		13.3	13.9	12.7	11.5	日本港湾協会(2007)	
Q値		$Q=180 f^{(0.7)}$				Petukhin <i>et al.</i> (2003)	
密度(g/cm ³)		2.8				中央防災会議(2007)	
せん断波速度(km/sec)		3.5				中央防災会議(2007)	
破壊伝播速度(km/sec)		2.8				片岡ほか(2003)	

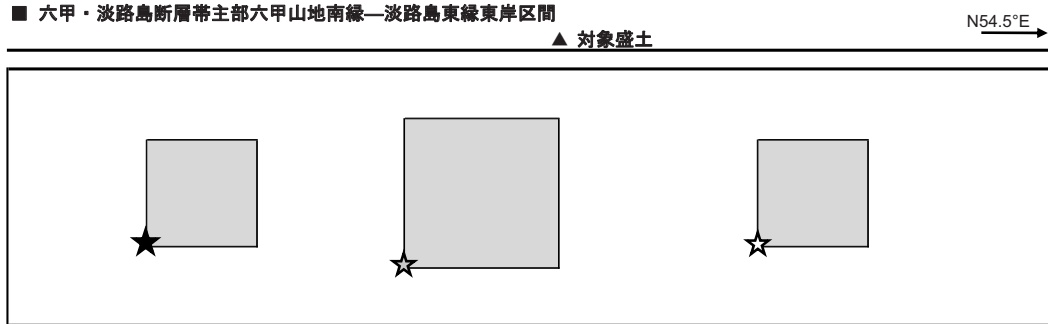
■ 有馬-高槻断層帯

▲ 対象盛土



■ 六甲・淡路島断層帯主部六甲山地南縁—淡路島東縁東岸区間

▲ 対象盛土



■ 大阪湾断層帯

▲ 対象盛土

N25.6°E

■ M6.5直下地震

▲ 対象盛土

N0.0°E

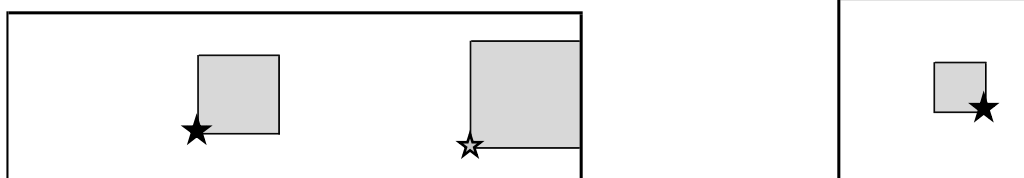


図-6 震源断層内でのアスペリティおよび破壊開始点の配置

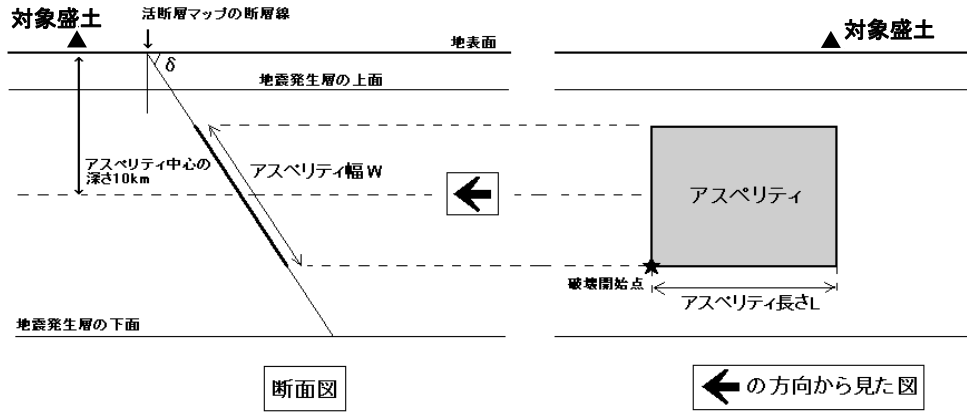


図-7 アスペリティおよび破壊開始点の配置に関する概念 (港湾基準(2007)³¹⁾に一部加筆)

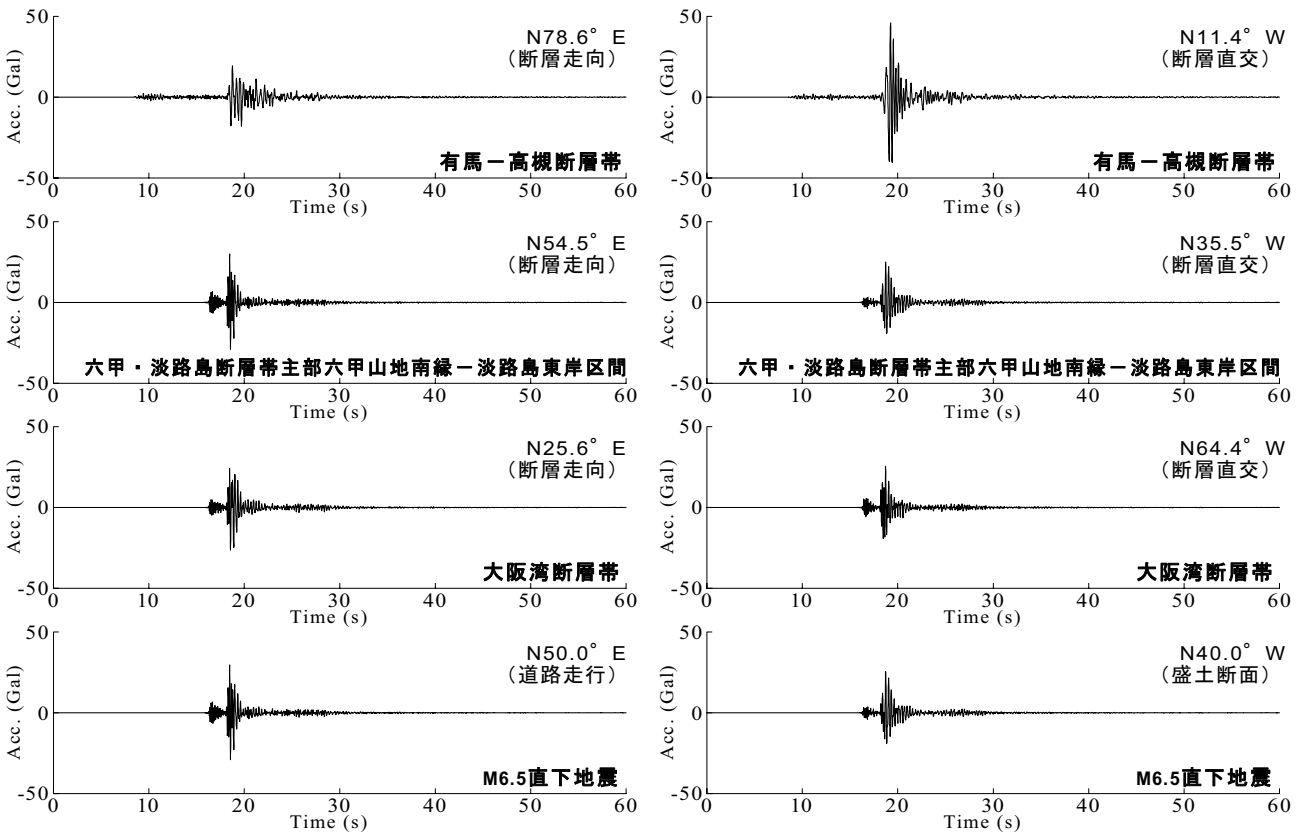


図-8 サイト位相特性の評価に用いた時刻歴加速度波形

さについても港湾基準(2007)を参考に10kmとした。

最後に、その他の断層パラメータのうち破壊開始点は、アスペリティ位置との関連で、図-7に示す位置を基本とした。破壊伝播速度は震源付近のS波速度の80%³³⁾とし、破壊伝播様式は港湾基準(2007)を参考に同心円状とした。震源付近の密度およびS波速度は、内閣府中央防災会議による東南海・南海地震等に関する専門調査会(中部圏・近畿圏直下地震対策)³⁵⁾による既往の検討結果を採用し、伝播経路における媒質のQ値はPetukhinほか³⁶⁾による研究成果を採用し、各想定地震について共通とした。

5.2 強震波形計算手法

本稿では、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震

波形計算手法^{20),21)}を採用した。この方法では、まず式(1)により統計的グリーン関数を生成する。

$$A(f) = S(f) \cdot P(f) \cdot G(f) \cdot \frac{O(f)}{|O(f)|_p} \quad (1)$$

ここに、 $A(f)$ は地表における統計的グリーン関数のフーリエ変換で複素数、 $S(f)$ は中小地震の震源特性³⁷⁾で実数、 $P(f)$ は伝播経路特性³⁷⁾で実数、 $G(f)$ はサイト増幅特性(図-5(c)参照)で実数、 $O(f)$ は中小地震観測記録のフーリエ変換で複素数、 $|O(f)|_p$ はその絶対値に対してバンド幅0.05HzのParzen Windowを適用したものである。式(1)からわかるように、本手法では、統計的グリーン関数のフーリエ振幅は震源特性・伝播経路特性・サイト特性の積として求め、

グリーン関数のフーリエ位相としては現地(ここでは、次節で述べるとおり、対象盛土とサイト増幅特性が類似している JMA 神戸市北区)で得られた中小地震記録のフーリエ位相を用いる。式(1)をフーリエ逆変換し、経験的グリーン関数法と同様の重ね合わせ³⁸⁾を行い、大地震による波形が求まる。なお、Parzen Window(添字 p で表示)は、因果性を満足する地震波を生成する目的で用いられている²¹⁾。

5.3 サイト位相特性の評価

フーリエ位相特性 $O(f)$ (式(1)参照)の取り扱いについては、想定地震の震源断層周辺で発生した中小地震を採用した。具体的には、図-2 に示すように、有馬-高槻断層帯については京都府南部を震源とする地震 EQ-1(2001/08/25 22:21 8km Mj5.4)、その他の想定地震については兵庫県南東部を震源とする地震 EQ-2(2005/02/14 00:22 13km Mj 4.1)によって JMA 神戸市北区(図-3 参照)で得られた観測波形をそれぞれ採用した。ここで、上述したとおり、対象盛土では地震観測が実施されていないため、サイト増幅特性とサイト位相特性の相関性³⁹⁾を考慮して、JMA 神戸市北区で得られた地震観測記録フーリエ位相をそれぞれ転用した。図-8 に EQ-1 および EQ-2 によって得られた JMA 神戸市北区での時刻歴加速度波形を示す。図-8 に示すように、フーリエ位相特性 $O(f)$ は、M6.5 直下地震を除き、断層走向および断層直交の水平 2 方向について評価し、強

震波形計算においてもこれらの水平 2 方向について実施した。これは、活断層で発生する地震の震源近傍で、断層直交成分のフーリエ振幅が断層走向成分の約 1.6 倍⁴⁰⁾になる実績を考慮するためである。具体的には、港湾基準(2007)を参考に、地震動のエネルギーが水平方向の 2 成分に分散する効果 $PRTITN$ を、断層直交成分に対して $PRTITN=0.85$ 、断層走向成分に対して $PRTITN=0.53$ とそれぞれ設定した。一方で、M6.5 直下地震については、地震動のエネルギーが水平 2 成分に等しく分配されると仮定³¹⁾して、断層直交成分ならびに断層走向成分ともに $PRTITN=0.71$ とした。なお、ラディエーション係数 $R_{\theta pl}$ については、全方位への平均値 0.63 を採用³¹⁾した。

5.4 強震動の推定およびレベル 2 地震動の選定

図-9 は、対象盛土における推定地震動の加速度時刻歴を盛土断面方向(N40.0°W: 車両通行直交方向)について示したものである。図-9 に示すとおり、六甲・淡路島断層帯による強震波形(加速度軸スケール 2 倍)は、他断層による強震波形と比較して、加速度振幅が非常に大きく、強震動継続時間も長くなっているのが読み取れる。さらに、図-10 には、推定地震動(図-9 参照)による絶対加速度応答スペクトルおよび相対速度応答スペクトル(ともに減衰定数 5%)の比較を示すが、六甲・淡路島断層帯による応答スペクトルが対象盛土地点での地盤の卓越周期 0.25s(卓越周

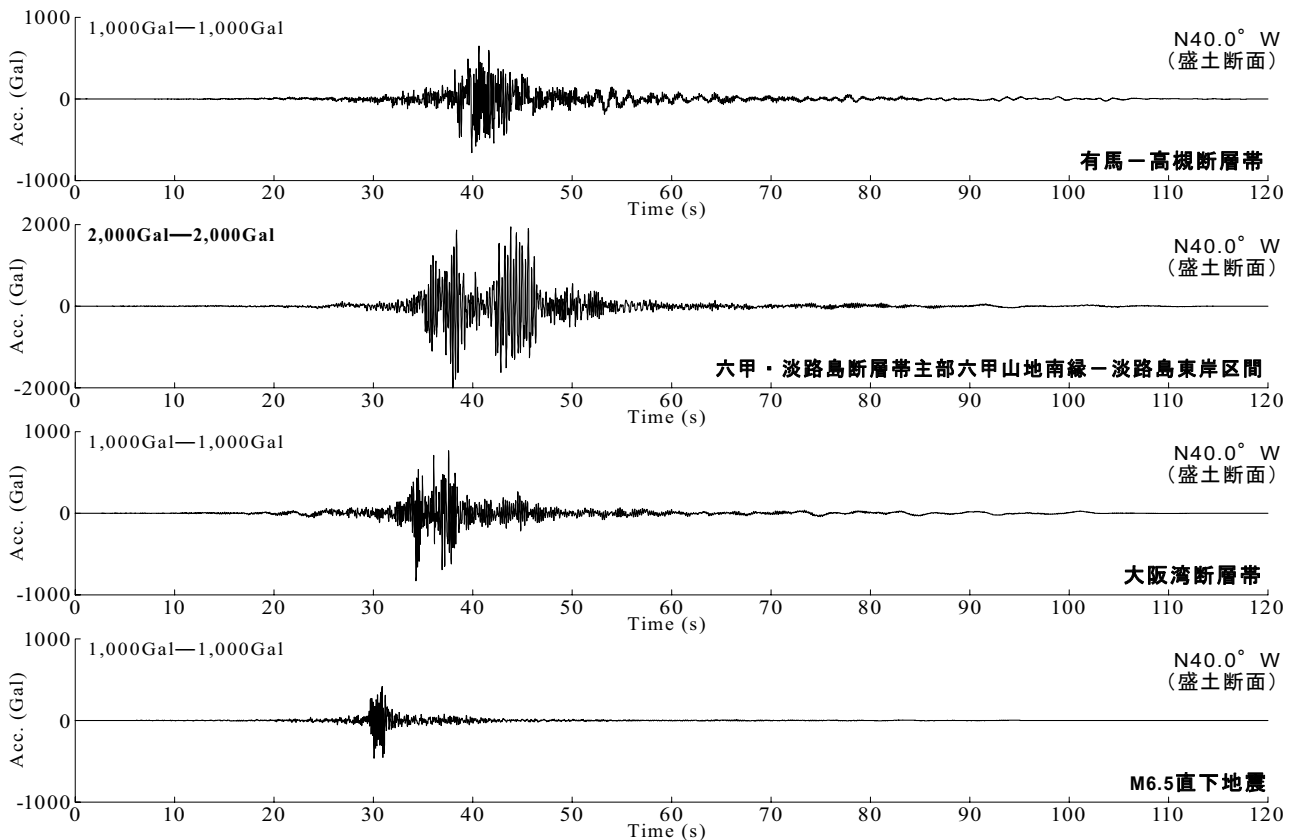


図-9 各想定地震による推定地震動の加速度時刻歴

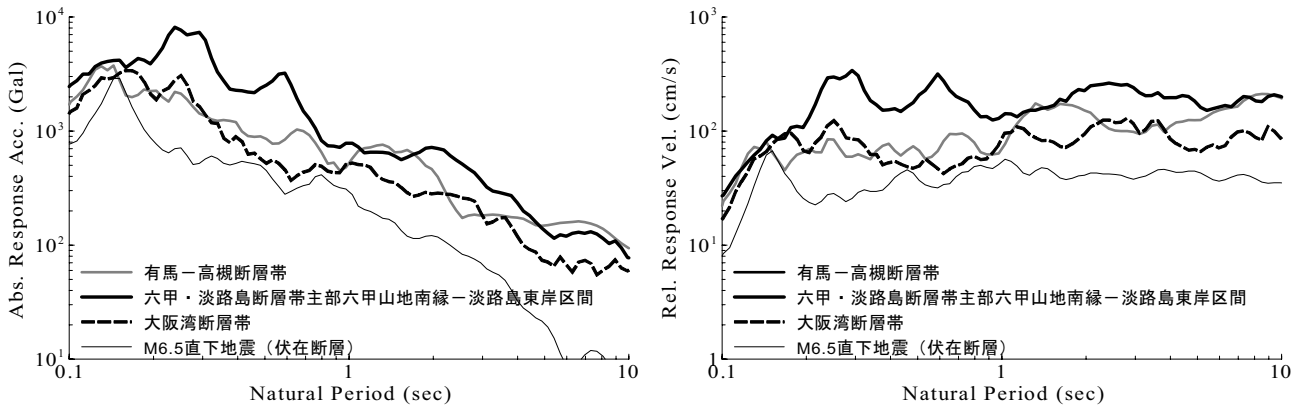


図-10 推定地震動による絶対加速度応答スペクトル・相対速度応答スペクトル(ともに減衰定数 5%)の比較

波数 4Hz: 図-5(a)参照)付近において、他者を大きく上回っている。図-9 および図-10 で示した比較結果、各断層の活動状況(平均発生間隔や最新活動時期)³⁰⁾などを考慮すれば、対象盛土でのレベル 2 地震動として、六甲・淡路島断層帯による推定強震波形が適当であると判断できる。

6. まとめ

本稿では、個別の高速道路盛土を対象にした場合の、地域特性を考慮したレベル 2 地震動の設定手法を検討し、さらにそれを国内に実在する高速道路盛土に適用した事例を紹介した。本稿で得られた知見を以下に示す。

- (1) 本検討では、個別の高速道路盛土を対象にした場合の耐震性能照査用レベル 2 地震動の設定手法を提案した。具体的には、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方法を適用し、さらに我が国での内陸地殻内地震による震源断層のモデル化手法を採用することで、対象盛土周辺の活断層に起因したやや短周期地震動を設定するものである。本手法によって、対象盛土における地盤条件や地震動条件を考慮した想定地震による入力地震動を設定することが可能となった。
- (2) 提案した個別の高速道路盛土に対するレベル 2 地震動の設定手法を、日本国内に実在する高速道路盛土に適用し、実際のフィールドへの適用例を示した。

今後は、他の高速道路盛土(1. で述べた既往の大規模地震で被災した高速道路盛土など)に対しても本稿での提案手法を適用することで、提案手法の適用実績を増やしていきたいと考えている。

謝辞

本研究では、気象庁 JMA による地震観測波形データを使用しました。また、現地での常時微動計測の実施の際に

は、山尾泰之氏(阪神高速技術(株))にご支援いただきました。さらに、震源断層モデルパラメータの設定にあたっては、野津厚チームリーダー((独)港湾空港技術研究所地震動研究チーム)から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) 秦吉弥, 一井康二, 丸山喜久, 福島康宏, 酒井久和, 中村晋: 位相を考慮したサイト特性置換手法の震源近傍地点での適用-2004 年新潟県中越地震における検討-, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.57A, pp.340-353, 2011.
- 2) 秦吉弥, 一井康二, 村田晶, 野津厚, 宮島昌克: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した線状構造物における地震動の推定とその応用-2007 年能登半島地震での道路被災を例に-, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.4, pp.799-815, 2010.
- 3) 秦吉弥, 一井康二, 野津厚, 古川愛子, 常田賢一: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 2009 年駿河湾の地震における東名高速道路盛土崩落地点での地震動の推定, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.4, pp.673-690, 2010.
- 4) 秦吉弥, 一井康二, 常田賢一, 野津厚, 横田聖哉, 金田和男: サイト特性置換手法に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震とその最大余震における盛土被災地点での地震動の推定, 土木学会論文集 A1 (地震工学論文集 31-b), Vol.68, No.4, pp.I_315-I_330, 2012.
- 5) 林健二, 常田賢一, 上出定幸: 地震危険度から見た中山間部における道路盛土のスクリーニング手法, 地盤工学会誌, Vol.61, No.1, pp.6-9, 2013.
- 6) (公社)土木学会: 土木構造物の耐震設計法等に関する第 3 次提言と解説, 土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会, 2000.
- 7) たとえば, 秦吉弥, 一井康二, 土田孝, 李黎明, 加納誠二, 山下典彦: 地震時の斜面の変形量評価における解析手法および入力地震動の選定, 日本地すべり学会誌, Vol.45, No.1, pp.64-71, 2008.
- 8) 秦吉弥, 一井康二, 加納誠二, 土田孝, 柴尾享, 今村孝志: 常時微動計測に基づく高速道路盛土の入力地震動設定法の検討, 土木学会論文集 F, Vol.65, No.4, pp.529-541, 2009.
- 9) Someville, P. G., Irikura, K., Gravas, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N.

- and Kowada, A.: Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismological Research Letters*, Vol.70, pp.59-80, 1999.
- 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, 2014 (this issue).
 - 11) 川瀬博: 震源近傍強震動の地下構造による増幅プロセスと構造物破壊能—1995年兵庫県南部地震での震災帯の成因に学ぶ—, 第10回日本地震工学シンポジウムパネルディスカッション資料集, pp.29-34, 1998.
 - 12) 野津厚: 内陸地殻内地震によるやや短周期地震動の再現に適した震源のモデル化手法, 港湾空港技術研究所報告, Vol.50, No.4, pp.133-196, 2011.
 - 13) 秦吉弥, 野津厚, 一井康二, 酒井久和: 盛土構造物の残留変形に影響を及ぼす地震動の周波数帯域に関する基礎的検討, 第32回地震工学研究発表会講演論文集(CD-ROM), 土木学会, Paper No.2-239, 2012.
 - 14) 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.
 - 15) 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.
 - 16) Uehara, H. and Kusakabe, T.: Observation of strong earthquake motion by National Institute for Land and Infrastructure Management, *Jour. Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.90-96, 2004.
 - 17) 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.
 - 18) 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.
 - 19) 長尾毅, 山田雅行, 野津厚: 常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の経験的補正方法に関する研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.56A, pp.324-333, 2010.
 - 20) 古和田明, 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎: 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, No.512, pp.97-104, 1998.
 - 21) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良—因果性を満足する地震波の生成—, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.3, pp.808-813, 2009.
 - 22) Housner, G. W.: Intensity of earthquake ground shaking near the causative fault. *Proc. of 3rd World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, pp.94-115, 1965.
 - 23) 野津厚, 井合進: 岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察, 第28回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.18-19, 2001.
 - 24) 秦吉弥, 一井康二, 加納誠二, 野津厚, 柴尾享, 今村孝志: 常時微動計測を利用した高速道路盛土におけるレベル2地震動の設定, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2009 論文集, 地盤工学会, pp.33-40, 2009.
 - 25) 長尾毅, 平松和也, 曾根照人, 野津厚: 撫養港における入力地震動のゾーニングに関する研究, 海洋開発論文集, 土木学会, Vol.23, pp.805-810, 2007.
 - 26) 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, Paper No.4-294, 2012.
 - 27) 先名重樹, 安達繁樹, 安藤浩, 荒木恒彦, 藤原広行: 微動探査観測システムの開発, 地球惑星連合大会 2006 予稿集(CD-ROM), S111-P002, 2006.
 - 28) 秦吉弥, 野津厚, 一井康二, 丸山喜久, 酒井久和: 我孫子市布佐地区における地盤震動特性の評価, 第9回地盤工学会関東支部発表会(Geo-Kanto 2012)発表講演集, Vol.9, No.A0023, 2012.
 - 29) 武村雅之: 日本列島における地殻内地震のスケーリング則—地震断層の影響および地震被害との関連, 地震, 第2輯, Vol.51, pp.211-228, 1998.
 - 30) 藤原広行, 河合伸一, 青井真, 森川信之, 先名重樹, 東宏樹, 大井昌弘, はお憲生, 長谷川信介, 前田宜浩, 岩城麻子, 若松加寿江, 井元政二郎, 奥村俊彦, 松山尚典, 成田章: 東日本大震災を踏まえた地震ハザード評価の改良に向けた検討, 防災科学技術研究所研究資料, 第379号, 349p., 2012.
 - 31) (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), 国土交通省港湾局監修, pp.336-341, 2007.
 - 32) 野津厚チームリーダー((独)港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 地震動研究チーム)との私信
 - 33) 片岡正次郎, 日下部毅明, 村越潤, 田村敬一: 想定地震に基づくレベル2地震動の設定方法に関する研究, 国土交通省国土技術政策総合研究所研究報告, No.15, 2003.
 - 34) 入倉孝次郎: 阪神大震災を引き起こした強震動, 京都大学防災研究所年報, No.39A, pp.229-245, 1996.
 - 35) 内閣府中央防災会議: 東南海、南海地震等に関する専門調査会公開資料(中部圏・近畿圏直下地震対策), 2007.
 - 36) Petukhin, A., Irikura, K., Ohmi, S. and Kagawa, T.: Estimation of seismogenic and aseismic layers in the Kinki region, Japan, by elimination of the geometrical spreading effect using ray approximation, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.93, No.4, pp.1498-1515, 2003.
 - 37) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
 - 38) 入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子: 経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会秋季大会講演予稿集, No.2, B25, 1997.
 - 39) 澤田純男, 盛川仁, 土岐憲三, 横山圭樹: 地震動の位相スペクトルにおける伝播経路・サイト特性の分離, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.915-920, 1998.
 - 40) 野津厚, 井合進, Iwan, W. D.: 震源近傍の地震動の方向性に関する研究とその応用, 港湾技術研究所報告, Vol.40, No.1, pp.107-167, 2001.

(2013年6月24日 受付)

