

経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 2004 年新潟県中越地震における関越自動車道竜光地区での地震動の推定

Seismic Waveform Estimation at the Slope Failure Site in Ryuko Area along Kan-etsu Expressway induced by the 2004 Mid Niigata Prefecture Earthquake based on Empirical Site Amplification and Phase Effects

秦 吉弥	Yoshiya HATA	(大阪大学大学院工学研究科)
門田浩一	Hirokazu KADOTA	(パシフィックコンサルタンツ(株))
湊 文博	Fumihito MINATO	(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)

2004 年新潟県中越地震では、地盤災害が数多く発生した。震源域の竜光地区では、関越自動車道の道路盛土において大規模な斜面崩壊が広域にわたり発生するなどの深刻な地震被害が発生しており、関越自動車道竜光地区における強震動を、地盤震動特性を考慮して精度良く推定することは非常に重要である。そこで本稿では、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法を用いて、関越自動車道竜光地区における強震動を推定した結果について報告する。その際、関越自動車道竜光地区とその周辺の既存強震観測点との地盤震動特性の差異を明確にした。

キーワード：強震動，断層モデル，地盤震動特性，道路盛土，斜面崩壊 (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¹⁾、2007 年能登半島地震では能登有料道路²⁾、2007 年新潟県中越沖地震では北陸自動車道³⁾、2009 年駿河湾の地震では東名高速道路⁴⁾、2011 年東北地方太平洋沖地震では常磐自動車道⁵⁾・国道 6 号線⁶⁾においてそれぞれ道路盛土の被災が報告されている。この点に関して著者ほかは、2007 年能登半島地震による能登有料道路⁷⁾、2009 年駿河湾の地震による東名高速道路⁸⁾、2011 年東北地方太平洋沖地震による常磐自動車道⁹⁾・国道 6 号線¹⁰⁾に作用した強震動をそれぞれ推定している。しかしながら、2004 年新潟県中越地震による関越自動車道を対象とした検討はこれまで実施されていない。

そこで本稿では、特性化震源モデル¹¹⁾と経験的サイト増幅・位相特性を考慮した手法¹²⁾を用いて関越自動車道における本震時の地震動を推定した。具体的には、まず、高速道路盛土の大規模な斜面崩壊が多発した旧・堀之内町竜光地区¹³⁾の関越自動車道沿いを対象に、常時微動計測および臨時地震観測を実施することでサイト特性を評価した。次に、2004 年新潟県中越地震の特性化震源モデル¹¹⁾を用いて関越自動車道竜光地区周辺の既存強震観測点で得られた本震観測記録を再現することで、特性化震源モデルの妥当性を検証し、関越自動車道竜光地区への適用性の確認を行った。最後に、評価した関越自動車道竜光地区における

サイト特性と、妥当性を確認した特性化震源断層モデルを用いて強震波形計算を行い、2004 年新潟県中越地震での関越自動車道竜光地区における強震波形を推定した。

2. 地盤震動特性の評価

2.1 本震観測記録の整理

図-1 に関越自動車道竜光地区周辺における既存強震観測点の分布を示す。関越自動車道竜光地区では、本震時に強震観測が実施されておらず、最も近い強震観測点は堀之内庁舎(新潟県震度情報ネットワークシステム)である。なお、図-1 には、関越自動車道竜光地区周辺の既存強震観測点で本震時に観測された最大加速度値 PGA (三成分合成)、最大速度値 PGV (三成分合成)、気象庁計測震度¹⁴⁾の

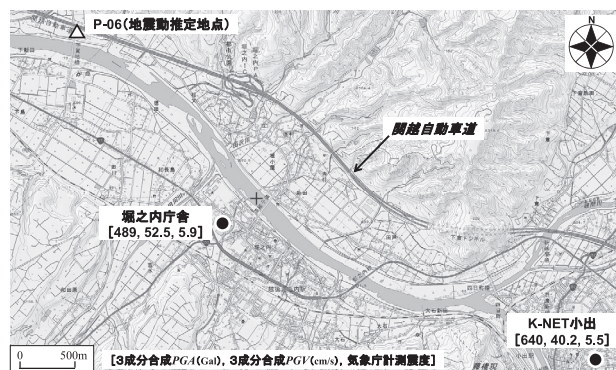


図-1 関越自動車道竜光地区周辺の既存強震観測点の分布

分布も同時に示す。図-1 に示すように、K-NET 小出と堀之内庁舎は、比較的近い位置関係にあるにもかかわらず観測地震動の指標値が比較的大きな差異が見受けられる。これは、各強震観測点におけるサイト特性が大きく影響しているためと考えられる。ここに、K-NET 小出と堀之内庁舎の震源距離の影響が小さいことを確認している。

図-2 は、関越自動車道竜光地区とその周辺の既存強震観測点を含めた範囲(図-1 と同じ範囲)における(国研)産業技術総合研究所に基づく地質図¹⁵⁾である。図-2 に示すように、対象地点である関越自動車道竜光地区は、堀之内庁舎に対して地質区分が一致しているものの、K-NET 小出に対しては地質区分が異なっている。そこで、堀之内庁舎で得られた本震観測記録の関越自動車道竜光地区への工学的転用の可能性も踏まえて、地盤震動特性に関するより詳細な検討を行った。

2.2 常時微動計測の実施

臨時地震観測の実施にあたり、関越自動車道竜光地区内での地震計設置地点を選定するため、図-3 に示すように、関越自動車道竜光地区の側道沿いにおいて常時微動計測(計 12 地点の単点計測)を実施した。計測時間は、1 計測点あたり 1 時間とし、サンプリング周波数は 100Hz とした。計測機器は、白山工業(株)製の一体型微動探査兼地震計機器¹⁶⁾を共通採用した。計測方向は、水平二成分と鉛直成分の計三成分であり、後述する H/V スペクトルの計算では、水平二成分合成の算術平均をとった。

図-4 に常時微動 H/V スペクトルの比較を示す。H/V スペクトルの計算処理方法は、先行研究¹⁷⁾と同様である。具体的には、微動の加速度時刻歴に対して、0.1Hz のハイ・パスフィルターを施し、雑振動が小さい 163.84 秒の区間を 10 区間抽出し、フーリエスペクトルの計算を行った。そして、バンド幅 0.05Hz の Parzen Window で平滑化したのちに、H/V スペクトルを算出し、その平均をとった。評価振動数の範囲としては、使用した微動計測器の性能¹⁶⁾などを考慮して 0.2~10Hz とした。

図-4 に示すとおり、計測した 12 地点における H/V スペクトルを比較すると、関越自動車道竜光地区の側道沿いでは、H/V スペクトルがほぼ一致しており、本震時に作用した地震動の特性が類似していた可能性が高いことが示唆される。さらに、P-06 地点(後述する臨時地震観測地点)は、関越自動車道竜光地区の地盤震動特性を概ね代表する地点であることが読み取れる。なお、竜光地区内での H/V スペクトルのばらつきの度合は、周辺で得られた本震観測記録の地震動指標値のばらつき度合に対して非常に小さいものであると推察できる。

2.3 臨時地震観測の実施

本研究では、P-06 地点(図-3 参照)において地震計を臨時設置し、地震観測を実施した。地震計は、加速度計(一体型微動探査兼地震計機器¹⁶⁾)を採用し、サンプリング周波数は 100Hz とした。トリガー加速度レベルは設定せず、常時観測を継続するシステムとした。観測期間は、2010 年 5 月 1 日~6 月 16 日までの約一か月間半である。その結果、以下に示す地震による記録を P-06 地点と K-NET 小出において同時に得ることができた。

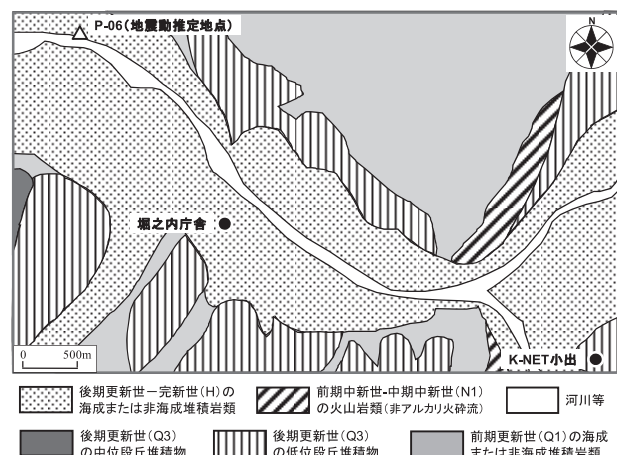


図-2 関越自動車道竜光地区周辺における地質分布¹⁵⁾

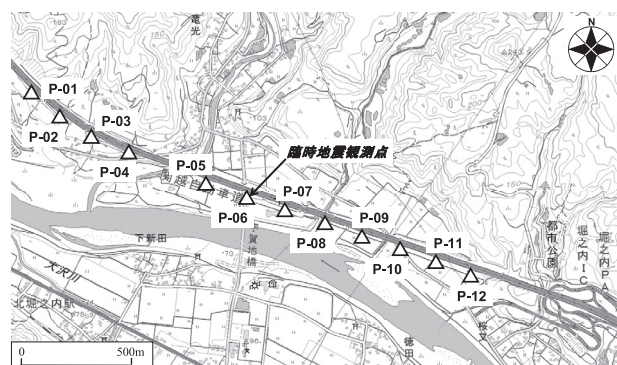


図-3 関越自動車道竜光地区における常時微動計測地点

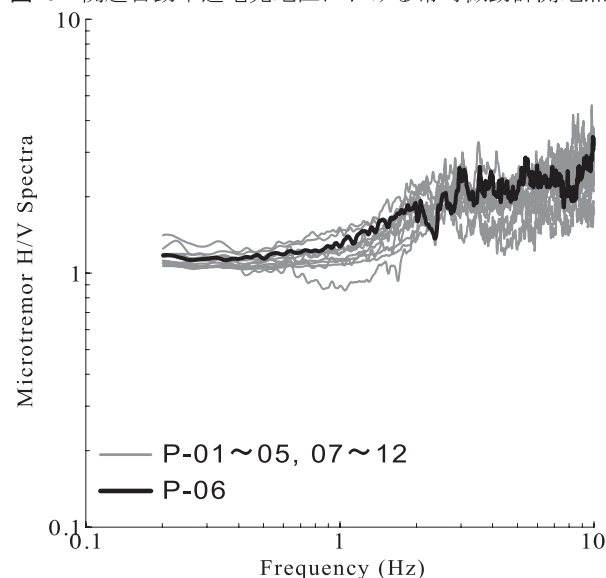


図-4 竜光地区内での常時微動 H/V スペクトルの比較

- ・ **EQ-1** : 2010/05/01 18:20 新潟県中越 $M_{\text{J}}4.9$
- ・ **EQ-2** : 2010/05/11 17:12 新潟県中越 $M_{\text{J}}3.6$
- ・ **EQ-3** : 2010/06/13 00:35 福島県沖 $M_{\text{J}}6.2$

ここに、関越自動車道竜光地区(**P-06** 地点)を対象とした、後述するサイト増幅特性の評価(2.4 参照)では **EQ-1** および **EQ-3** を、後述するサイト位相特性の評価(2.5 参照)では **EQ-2** をそれぞれ採用した。

2.4 サイト増幅特性の評価

図-5 に関越自動車道竜光地区(**P-06** 地点)におけるサイト増幅特性(地震基盤～地表)と、堀之内庁舎および K-NET 小出におけるサイト増幅特性(地震基盤～地表)を示す。関越自動車道竜光地区(**P-06** 地点)におけるサイト増幅特性は、**P-06** 地点と K-NET 小出で同時に得られた地震観測記

録(**EQ-1** および **EQ-3**)を対象に、両地点の距離の違いに関する補正を考慮したフーリエスペクトルの比率(**P-06** 地点/K-NET 小出)を計算し、この比率を K-NET 小出における既存のサイト増幅特性¹⁸⁾に掛け合わせることで地震基盤～地表相当のサイト増幅特性を設定¹⁹⁾した。なお、堀之内庁舎のサイト増幅特性についても、2004 年新潟県中越地震の余震観測記録や 2007 年新潟県中越沖地震の本震観測記録などに基づいて同様の方法¹⁹⁾を用いて評価した。

図-5 に示すとおり、関越自動車道竜光地区(**P-06** 地点)と周辺の既存強震観測点(堀之内庁舎と K-NET 小出)では、サイト増幅特性(ピーク周波数やスペクトル形状など)に明確な差異が確認できる。これは、関越自動車道竜光地区に本震時に作用した地震動として、堀之内庁舎や K-NET

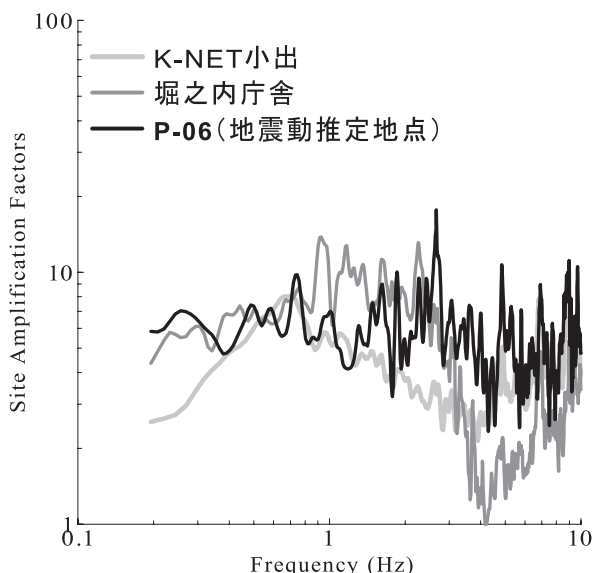


図-5 サイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較

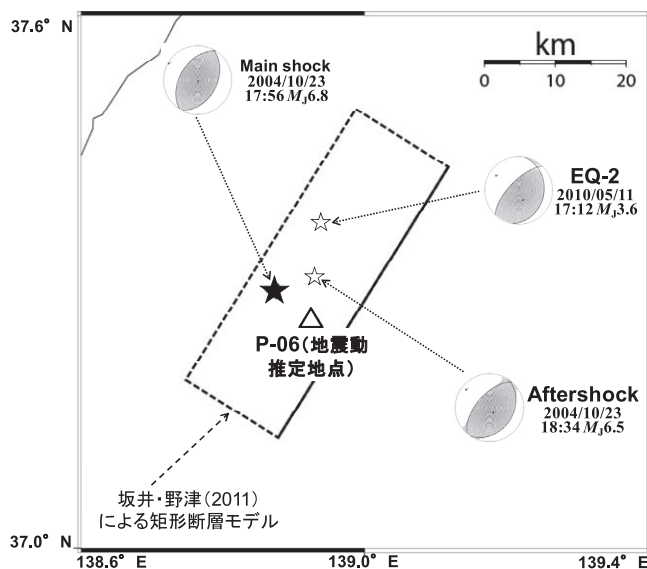


図-6 サイト位相特性として採用した震源域内の地震

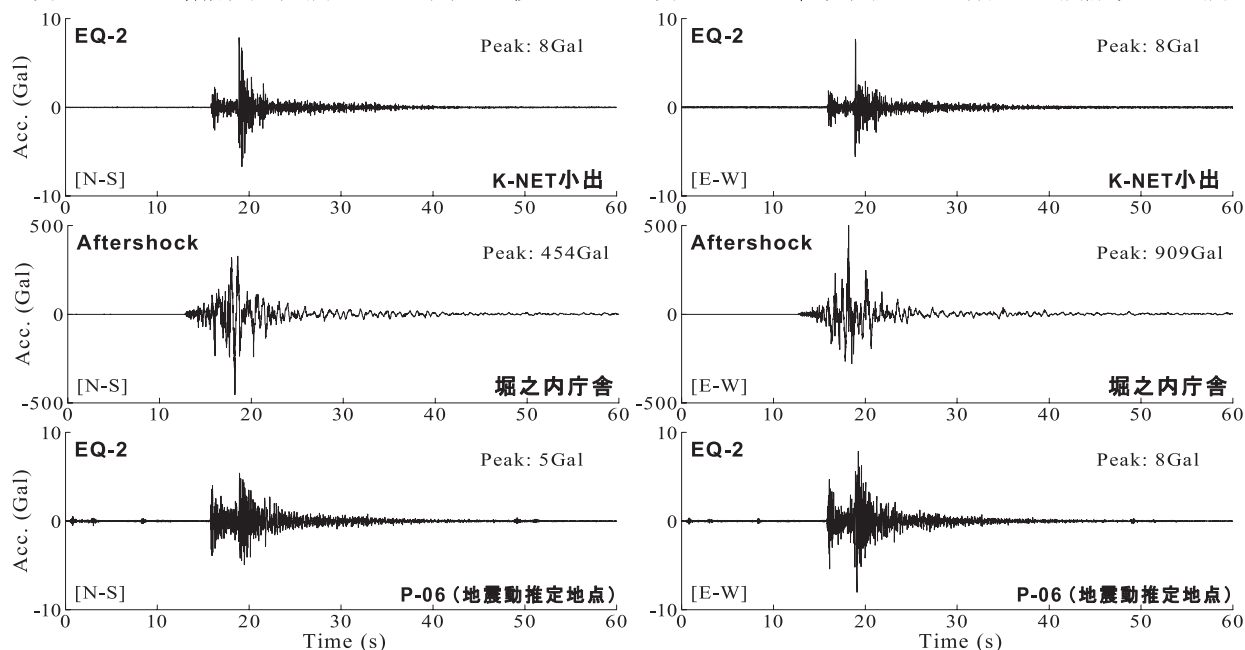


図-7 サイト位相特性として採用した震源域内で発生した中小地震による観測記録の加速度時刻歴

小出で得られた本震観測記録の転用は適切ではないことを示唆するものである。

2.5 サイト位相特性の評価

図-6 に 2004 年新潟県中越地震および本震後に震源断層内¹¹⁾で発生した地震の震央分布を示す。本研究では、関越自動車道竜光地区および K-NET 小出における地震動の推定では、**EQ-2**(図-6 参照)による観測記録(図-7 参照)の位相特性を採用した。一方で、堀之内庁舎では、**EQ-2**による記録が得られていないため、**Aftershock**(図-6 参照)による観測記録(図-7 参照)の位相特性を採用した。なお、堀之内庁舎における **Aftershock** は比較的加速度振幅が大きいことから、位相特性に非線形応答の影響が含まれている可能性が示唆されるが、本震と **Aftershock** の位相スペクトルが概ね類似していることを確認している。

図-7 に示すように、関越自動車道竜光地区と K-NET 小出では、上述したサイト増幅特性の差異と同様に、波形形状に有意な差異が見られることから、サイト位相特性にも比較的大きな違いがあることが明らかである。なお、**EQ-2** (および **Aftershock**)による位相特性の採用が妥当であるかについては、地震動推定手法の適用性確認(3.3 参照)を通じて述べる。

表-1 特性化震源モデルのパラメータ¹¹⁾の一覧

断層パラメータ	Asperity1_1	Asperity1_2	Asperity2	Asperity3
断層長 (km)		40		
断層幅 (km)		20		
走向 (deg.)		212		
傾斜 (deg.)		47		
地震モーメント(Nm)	1.5×10^{17}	7.2×10^{17}	4.0×10^{17}	2.4×10^{17}
アスペリティ長 (km)	2.0	6.5	4.0	3.5
アスペリティ幅 (km)	1.0	3.0	3.0	3.5
ライズタイム (s)	0.09	0.27	0.27	0.31
分割数	3×3×3	5×5×5	5×5×5	3×3×3
破壊開始点位置/深さ	N37.288, E138.840 / 13km			
破壊伝播様式	破壊開始点より放射状			
Q 値	$Q=166f^{0.76}$			
密度 (kg/m ³)	2.7×10^3			
せん断波速度 (km/s)	3.5			
破壊伝播速度 (km/s)	2.8			

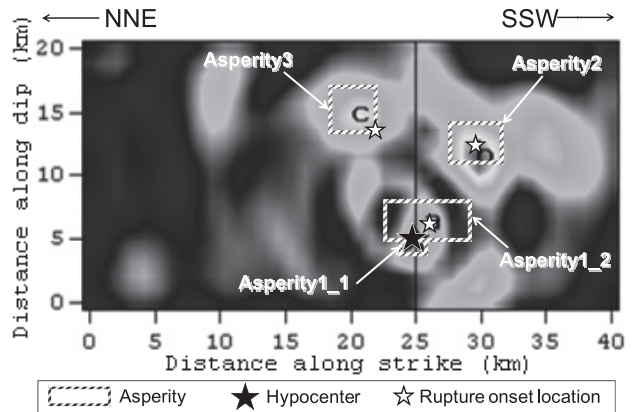


図-8 坂井・野津¹¹⁾による特性化震源モデル

3. 周辺観測点での地震動推定

3.1 特性化震源モデル

本研究では、図-8 に示す 2004 年新潟県中越地震の特性化震源モデル¹¹⁾を採用した。このモデルは、波形インバージョンによる最終すべり量分布²⁰⁾において、比較的すべり量の大きい領域および震源付近に矩形のアスペリティを配した特性化震源モデルである。なお、図-6 において断層モデルとして示した矩形領域は、図-8 に示した断層面を地表面に垂直に投影したものである。

表-1 に特性化震源モデルの断層パラメータの一覧を示す。破壊開始点は、この地震特有の問題である断層面位置の不確実性²⁰⁾を考慮して、気象庁による震源から 0.03°だけ西に移動した点¹¹⁾となっている。ライズタイムについては片岡ほか²¹⁾に基づいて設定し、Q 値については、佐藤・巽による東日本の内陸部での推定値²²⁾を採用した。

3.2 計算手法

本研究では、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法(古和田の方法)^{12),23),24)}を適用した。この方法では、まず、次式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、 $A(f)$ は工学的基盤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²⁵⁾で実数、 $P(f)$ は伝播経路特性²⁵⁾で実数、 $G(f)$ は地震基盤～地表のサイト増幅特性(図-5 参照)で実数、 $O(f)$ は各対象地点で得られた中小地震(**Aftershock** もしくは **EQ-2**: 図-6 参照)による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(添え字 p は Parzen Window を表す)。震源特性 $S(f)$ を計算する際のラディエーション係数²⁵⁾としては、全方位への平均値である 0.63 を用いた。また、地震動エネルギーの水平二成分への分散を表す係数 $PRTITN$ ²⁵⁾は、水平二成分ともに 0.71 とした。

式(1)に示すとおり、本手法では、まず、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る。次に、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²⁶⁾を行うことで、大地震による波形を求める。式(1)から分かるように、統計的グリーン関数のフーリエ位相としては現地で得られた中小地震記録のフーリエ位相を用いる。なお、Parzen Window は因果性を満足する地震波を生成する目的¹²⁾で用

いられている。

上記のプロセスで得られた地表面相当の推定地震波は、
本震時における地盤の非線形挙動の影響が考慮されてい

ない。そのため、当該推定波に対して各対象地点でのボー
リング調査結果・土質試験結果^{27),28),29)}に基づいた線形／
非線形の重複反射理論^{30),31)}を適用^{32),33)}することによって、

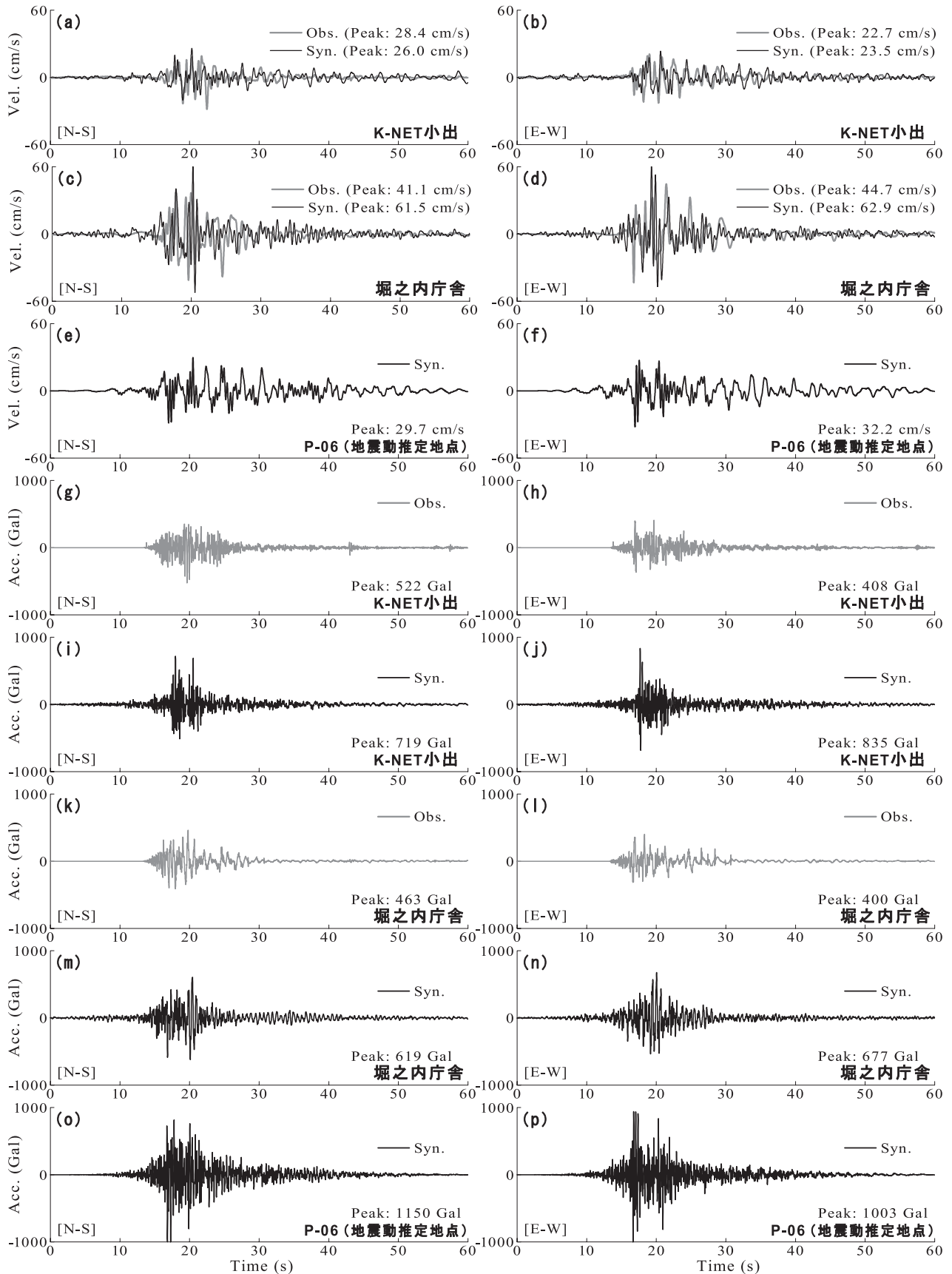


図-9 観測波と推定波と比較による地震動推定手法の適用性確認、および関越自動車道竜光地区における推定地震動

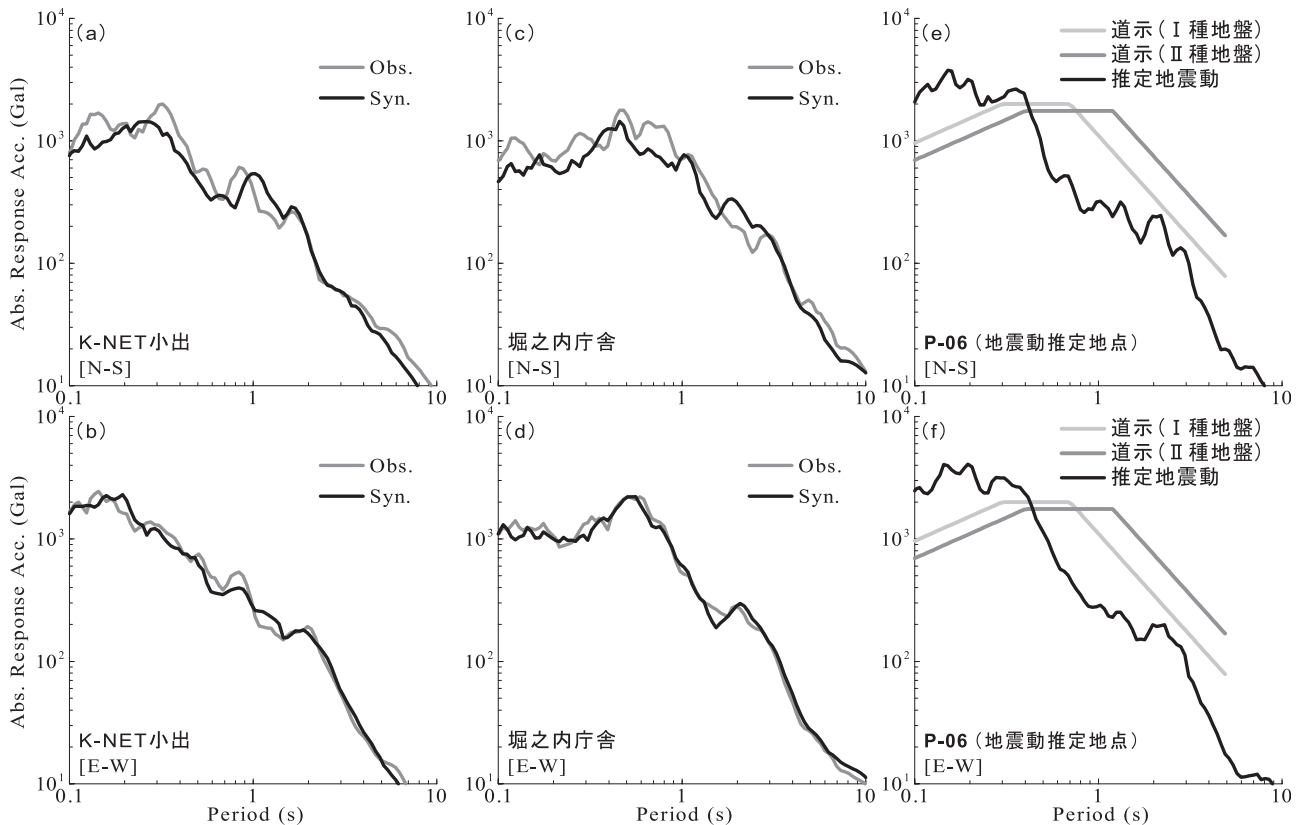


図-10 応答スペクトルによる地震動推定手法の適用性確認, および竜光地区における推定地震動の応答スペクトル

表層地盤による非線形挙動の影響を考慮した。具体的には、古和田の方法によって得られた地表面相当の推定地震波に対して表層地盤(工学的基盤～地表)の一次元線形地震応答解析を適用し、工学的基盤相当波を計算した。そして、この工学的基盤相当波に対して表層地盤の一次元非線形地震応答解析を適用し、地表面相当波(表層地盤の非線形挙動の影響を考慮)を算定した。

3.3 地震動推定手法の適用性確認

図-9(a)～(d)に堀之内庁舎および K-NET 小出における本震時の速度波形(観測波)と強震波形計算の結果(推定波)を比較したものを示す。なお、まずここでは、盛土構造物の地震被災に比較的大きな影響を及ぼす地震動の周波数帯域(0.5～2Hz)³⁴⁾を含む 0.2～3Hz のやや短周期帯域の地震動に着目し、盛土構造物の地震被災と比較的高い相関を有すると考えられる速度波形について比較を行った。次に、上記のようなバンド・パスフィルタを施していない加速度波形について比較を行った(図-9(g)～(n)参照)。最後に、加速度波形(図-9(g)～(n)参照)を入力波とした場合の絶対加速度応答スペクトルを観測波と推定波で比較したものの(ともに減衰定数 5%)を図-10(a)～(d)に示す。

図-9(a)～(d), 図-9(g)～(n), 図-10(a)～(d)に示すとおり、強震観測点ごとのサイト増幅特性やサイト位相特性

の違いなどにより、強震波形の振幅・継続時間や応答スペクトルの形状などが大きく異なっているものの、推定波は比較的良好に観測波を再現できている。また、EQ-2(図-6 参照)をサイト位相特性として採用した K-NET 小出においても一定の精度で強震波形(特に、波形形状: 図-9(a), (b)参照)を再現できていることから、関越自動車道竜光地区のサイト位相特性の評価に用いた中小地震(EQ-2)の採用の妥当性が明らかとなった。さらに、関越自動車道竜光地区に比較的近い堀之内庁舎における観測波と推定波が比較的良好な類似性を示しており(図-9(c), (d)参照)、強震動計算による結果の妥当性を確認することができる。

4. 竜光地区における強震動の推定

図-9(e), (f)は、本震時の関越自動車道竜光地区(P-06 地点)における時刻歴速度波形を強震動計算により推定したものである。さらに、図-9(o), (p)には、関越自動車道竜光地区における時刻歴加速度波形(工学的基盤相当波: バンド・パスフィルタは考慮していない)を推定したものを示す。図-9(e), (f)に示すとおり、速度波形では、関越自動車道竜光地区は堀之内庁舎に比べて継続時間が長く、速度振幅が比較的小さな地震動特性を有している。一方で、

図-9(o),(p)に示すとおり、加速度波形では、関越自動車道竜光地区は堀之内庁舎に対して比較的大きな加速度振幅を有している。さらに、気象庁計測震度(水平二成分合成)を計算すると、関越自動車道竜光地区では 6.1 と算定され、堀之内庁舎や K-NET 小出での記録(図-1 参照)を上回る結果となった。

図-10(e),(f)は、図-9(o),(p)で示した関越自動車道竜光地区における推定加速度波形による絶対加速度応答スペクトル(減衰定数 5%)を、道路橋示方書による設計標準スペクトル(I 種地盤および II 種地盤)³⁵⁾に対して比較したものである。図-10(e),(f)に示すとおり、固有周期 0.1~0.5 秒付近の帯域では、関越自動車道竜光地区のほうが卓越しているのに対し、0.5 秒以上の帯域では道路橋示方書のほうが上回っているのが読み取れる。上記の知見に対して、先行研究による成果(盛土構造物の地震被災に比較的大きな影響を及ぼす地震動の周波数帯域(0.5~2Hz))³⁴⁾を踏まえれば、道路橋示方書による設計標準スペクトルに基づく地震動を入力波とした最近の道路盛土の耐震性評価^{36),37)}における妥当性が示唆される。

5. まとめ

本稿では、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法と特性化震源モデルの組合せを用いて、2004 年新潟県中越地震での関越自動車道竜光地区における強震波形を推定した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 関越自動車道竜光地区とその周辺の既存強震観測点(堀之内庁舎および K-NET 小出)では、サイト増幅特性ならびにサイト位相特性が大きく異なっており、関越自動車道竜光地区での強震動評価において、周辺で得られた本震観測記録の転用は適切ではない。
- (2) 坂井・野津によって提案されている既往の特性化震源断層モデルを利用すれば、2004 年新潟県中越地震での堀之内庁舎および K-NET 小出における観測地震動を比較的精度良く推定することが可能である。
- (3) 堀之内庁舎および K-NET 小出での観測地震動と関越自動車道竜光地区での推定地震動の比較では、強震波形の振幅値や波形形状に明確な差異が確認でき、関越自動車道竜光地区における本震時の気象庁計測震度は 6.1 と推定される。
- (4) 関越自動車道竜光地区での推定地震動による絶対加速度応答スペクトルと、道路橋示方書による設計標準スペクトルの比較結果によれば、設計標準スペクトルに基づく地震動を入力波とした最近の道路盛土の耐震性評価における妥当性を確認することができる。

今後は、大規模地震時に作用した地震動の詳細が知られ

ていない他の道路盛土の被災地点についても、本研究と同様のアプローチ³⁸⁾を採用していくことが急務である。

謝辞

本研究では、(国研)防災科学技術研究所 K-NET および新潟県震度情報ネットワークシステムによる地震観測記録を使用させていただきました。本研究の遂行にあたり、(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、大変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：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震—被災状況(道路)，14p., 2011.
- 7) 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一，土木学会論文集 A，Vol.66, No.4, pp.799-815, 2010.
- 8) 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.
- 9) 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，Vol.68, No.4, pp.1_315-330, 2012.
- 10) 秦吉弥，野津厚，常田賢一：2011 年東北地方太平洋沖地震で被災した盛土での余震観測と地震動の評価，日本地震工学会論文集，Vol.13, No.3, pp.56-59, 2013.
- 11) 坂井公俊，野津厚：2004 年新潟県中越地震の特性化震源モデルと経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動シミュレーション，日本地震工学会論文集，Vol.11, No.3, pp.40-58, 2011.
- 12) 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.
- 13) 大塚悟：盛土の被害，新潟県中越地震災害調査報告会講演資料集，地盤工学会関東支部，pp.29-35, 2005.
- 14) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.

- 15) 産業技術総合研究所：地質図表示システム(地質図 Navi)，地質調査総合センターホームページ，2013. (last accessed: 2016/09/16)
- 16) 先名重樹，安達繁樹，安藤浩，荒木恒彦，飯澤清典，藤原広行：微動探査観測システムの開発，第 115 回物理探査学会学術講演会講演論文集，pp.227-229, 2006.
- 17) 秦吉弥，湊文博，山田雅行，常田賢一，魚谷真基：和歌山県串本町における高密度常時微動計測，物理探査，Vol.68, No.2, pp.83-90, 2015.
- 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) (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.
- 20) 野津厚：2004 年新潟県中越地震の震源モデル—経験的グリーン関数を用いた波形インバージョン—，地震，第 2 輯，第 58 巻，pp.329-343, 2005.
- 21) 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 地震動の設定手法に関する研究，国土技術政策総合研究所研究報告，No.15, 2003.
- 22) 佐藤智美，巽誉樹：全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性，日本建築学会構造系論文集，No.556, pp.15-24, 2002.
- 23) 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.
- 24) 秦吉弥，野津厚，釜井俊孝：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法に基づく 2004 年新潟県中越地震における東竹沢地すべり地での地震動の推定，日本地すべり学会誌，Vol.49, No.2, pp.51-60, 2012.
- 25) 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, No.6A, pp.1865-1894, 1983.
- 26) 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.
- 27) 小長井一男：活褶曲地帯における地震被害データアーカイブスの構築と社会基盤施設の防災対策への活用法の提案，文部科学省科学技術振興調整費による研究プロジェクト，2008.
- 28) Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
- 29) 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.
- 30) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K.: Equivalent linear method considering frequency dependant characteristics of stiffness and damping, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.22, No.3, pp. 205-222, 2002.
- 31) 吉田望，末富岩雄：DYNEQ: 等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム，佐藤工業(株)技術研究所報，pp.61-70, 1996.
- 32) 例えば，秦吉弥，一井康二，村田晶，宮島昌克，野津厚，柴尾享，常田賢一：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法に基づく 2007 年能登半島地震での能登有料道路全域にわたる地震動の推定，第三回近年の国内外で発生した大地震の記録と課題に関するシンポジウム発表講演集，土木学会，Vol.3, No.3, pp.17-24, 2010.
- 33) 秦吉弥，片岡正次郎，野津厚：2011 年東北地方太平洋沖地震による観測記録を用いた他地点での地震動推定に関する精度評価，日本地震工学会論文集，Vol. 16, No.4, pp.195-214, 2016.
- 34) 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，Vol.9, No.4, pp.747-759, 2014.
- 35) (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.
- 36) 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，日本道路協会，Paper No.4018, 2015.
- 37) 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.
- 38) 秦吉弥，野津厚：被害地震の揺れに迫る—地震波形デジタルデータ CD 付き—，大阪大学出版会，ISBN: 978-4-87259-565-9, 2016.

(2016 年 6 月 7 日 受付)