

1993年釧路沖地震における釧路市緑ヶ岡地区地すべり地での強震動の評価

Seismic Waveform Estimation at Midorigaoka 6-Chome Landslide Site during the 1993 Tokachi-Oki Earthquake

秦 吉弥	Yoshiya HATA	(大阪大学大学院工学研究科)
釜井俊孝	Toshitaka KAMAI	(京都大学防災研究所)
王 功輝	Gonghui WANG	(京都大学防災研究所)
佐藤 京	Takashi SATO	((国研)寒地土木研究所)

1993年釧路沖地震では、釧路市内の造成宅地を中心に深刻な被害が発生した。本震時に造成宅地に作用した地震動を推定することは、造成宅地の耐震性評価手法の精度向上などを図る上で大変有意義である。そこで本稿では、釧路市緑ヶ岡6丁目が発生した地すべりを対象に、地すべり地において臨時の地震観測を実施し、得られた記録などに基づいて、本震時に作用した強震波形を評価した。その結果、地すべり地における推定地震動は、周辺で得られた観測地震動と比較して地震動指標値に有意な差異があること、本震観測記録の工学的な転用が困難であること、やや短周期帯域において応答スペクトルが卓越する特徴を有することなどが明らかとなった。

キーワード：谷埋め盛土、強震動、断層モデル、サイト特性、スラブ内地震 (IGC : E-8)

1. はじめに

1993年釧路沖地震($M7.8$)では、震源域の宅地造成地を中心に数多くの地すべりが発生した。その中でも釧路市緑ヶ岡6丁目が発生した地すべり(以後、緑ヶ岡6丁目地すべりと呼ぶ)¹⁾は、地すべりの規模が幅約70m・奥行約30mに達し、住家の転落や損傷を伴う深刻な被害をもたらした(図-1参照)。緑ヶ岡6丁目地すべりの発生機構を評価する試み²⁾や緑ヶ岡地区の地盤震動特性を評価する試み³⁾がこれまで実施されているが、地すべり地に作用した本震時の地震動については、十分な検討がなされていない。更にこれまで著者は、既往の大規模地震によって造成宅地に作用した地震動を数多く評価しているが^{4),5)}、内陸地殻内地震もしくは海溝型地震を対象としており、1993年釧路沖地震に代表されるスラブ内地震を対象とはしていない。

そこで本稿では、強震波形計算手法として、1993年釧路沖地震の特性化震源モデル⁶⁾と経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法⁷⁾を組合せることで、緑ヶ岡6丁目地すべり地における1993年釧路沖地震時の地震動を推定した。具体的には、まず、緑ヶ岡6丁目地すべり地およびBRI釧路(跡地)において臨時地震観測を実施し、得られた記録に基づいてサイト増幅・位相特性を評価した。次に、1993年釧路沖地震におけるBRI釧路での観測地震動を再現することで、強震波形計算手法の適用性を検証した。最後に、評価した地すべり地のサイト増幅・位相特性と適用性を確認した強震波形計算手法を用いて、1993年釧路沖地震時に地すべり地に作用した強震動を推定した。

2. サイト特性の評価

2.1 周辺の既存強震観測点

図-2に緑ヶ岡6丁目地すべり地周辺における強震観測点の分布を示す。図-2において、緑ヶ岡6丁目地すべり地、K-NET釧路⁸⁾、JMA釧路⁹⁾、WISE釧網三線橋¹⁰⁾では、1993年釧路沖地震発生時に地震観測が行われておらず、本震観測記録が得られている最も近い強震観測点はBRI釧路¹¹⁾である。ここに、既存強震観測点を管轄する機関が異なるが、観測環境や採用計器などの地震観測システムの詳細については、文献8)-11)を参照されたい。図-3は、産業技術総合研究所による地質図¹²⁾に緑ヶ岡6丁目地すべり地とその周辺の強震観測点の分布(図-2参照)をプロットしたものであるが、緑ヶ岡6丁目地すべり地とWISE釧

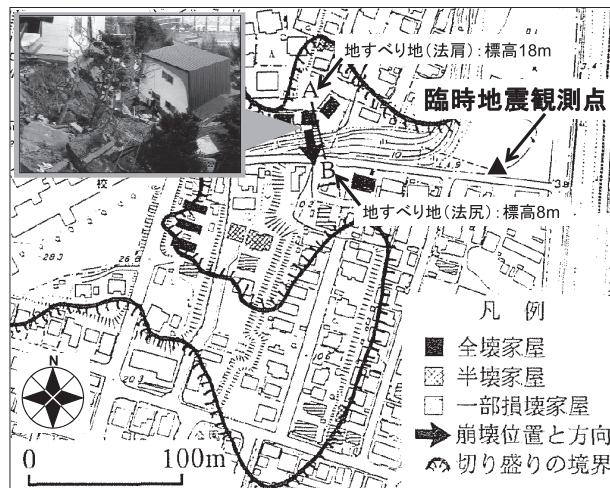


図-1 対象地すべりと臨時地震観測点(文献2)に一部加筆

網こ線橋での地質種別は類似しているものの、BRI 釧路を含むその他の観測点における地質種別はそれぞれ異なっており、緑ヶ岡 6 丁目地すべり地と BRI 釧路では、1993 年釧路沖地震による地震動の特性に差異が生じていた可能性は否定できない。したがって、1993 年釧路沖地震における緑ヶ岡 6 丁目地すべり地に作用した強震動は、当該地すべり地における地盤震動特性(サイト増幅・位相特性)を地震観測記録に基づいて評価した上で推定することが肝要である。ここに、緑ヶ岡 6 丁目地すべり地とその周辺の地盤情報については、ジオ・ステーション¹³⁾や地震ハザードステーション¹⁴⁾などによる公開情報を参照されたい。

2.2 臨時地震観測

2.1 で得られた知見を踏まえ、本研究では、緑ヶ岡 6 丁目地すべり地の極近傍(図-1 参照)および BRI 釧路(跡地)において、地震観測システムをそれぞれ設置し、臨時地震観測を実施した。地震計はボアホール型加速度計を採用し、地表面に設置した。なお、サンプリング周波数は 100Hz とし、トリガー加速度レベルを設けず連続収録方式で観測した。地震計はボアホール型加速度計を採用し、地表面付近(掘削深度 50cm 程度)に埋設した。観測方向・成分は、S10°E 方向(緑ヶ岡 6 丁目地すべり地近傍)および N-S と E-W 成分(BRI 釧路跡地)である。地震観測システムの詳細については、既往の研究¹⁵⁾を参照されたい。観測期間は、2012 年 3 月 11 日～5 月 13 日までの約 2 か月間である。ここに、BRI 釧路では、現在、地震観測が実施されておらず、緑ヶ岡 6 丁目地すべり地と同じ条件下で強震動評価を行うために(後述)、BRI 釧路の跡地においても緑ヶ岡 6 丁目地すべり地と同様のシステムを採用した臨時地震観測を行った。また、緑ヶ岡 6 丁目地すべり地近傍に設けた臨時地震観測点は、当該地すべり地の崖下に位置しており、切り盛りによる地形改変が比較的少ない地点となっている。

2.3 サイト増幅特性の評価

図-4 に緑ヶ岡 6 丁目地すべり地におけるサイト増幅特

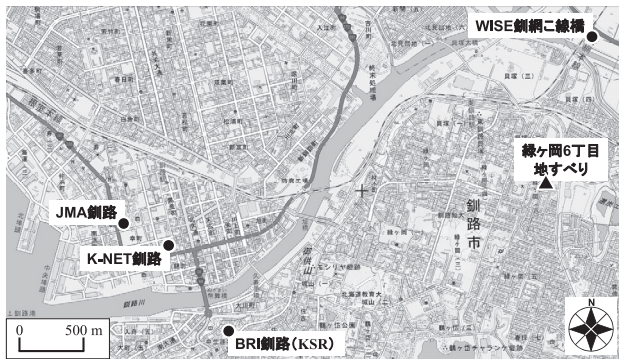


図-2 緑ヶ岡 6 丁目地すべり周辺の強震観測点

性と、その周辺の強震観測点におけるサイト増幅特性^{16),17)}を示す。緑ヶ岡 6 丁目地すべり地(地震観測地点)におけるサイト増幅特性は、緑ヶ岡 6 丁目地すべり地と K-NET 釧路で同時に得られた地震観測記録を対象に、伝播経路特性^{18),19)}の違いを考慮したフーリエスペクトルの比率(緑ヶ岡 6 丁目地すべり地/K-NET 釧路)を計算し、この比率を K-NET 釧路における既存のサイト増幅特性¹⁶⁾に掛け合わ

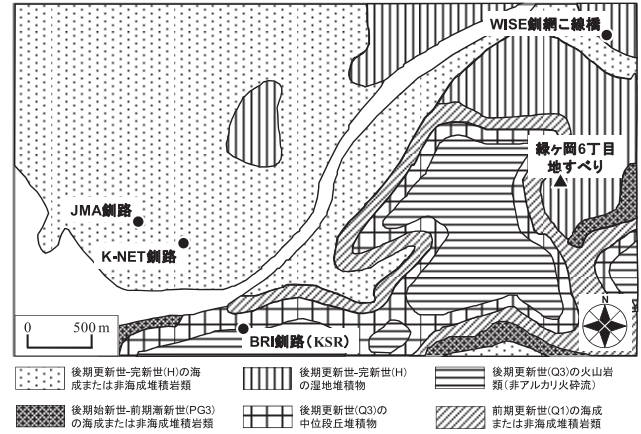


図-3 対象地すべり周辺の地質特性(文献 12)に一部加筆

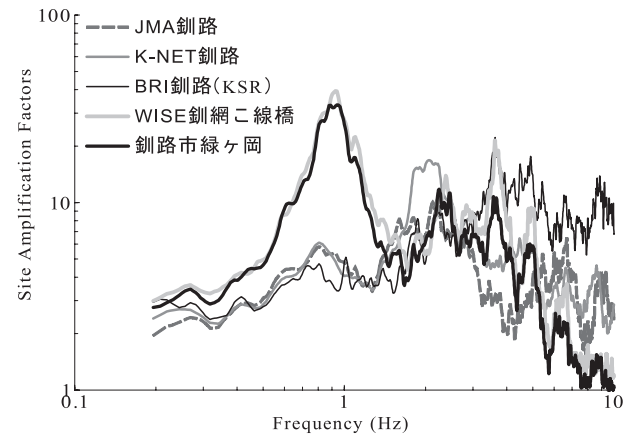


図-4 サイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較

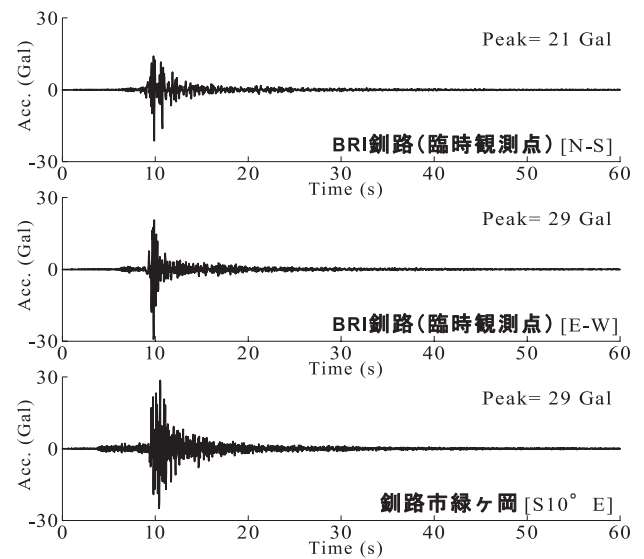


図-5 2012 年釧路沖地震による観測波形の比較

せることによって、地震基盤～地表相当のサイト増幅特性を設定²⁰⁾した。一方で、JMA 釧路および WISE 釧網こ線橋におけるサイト増幅特性についても同様の方法を用いて評価¹⁷⁾した。

図-4 に示すとおり、地質種別が類似している緑ヶ岡 6 丁目地すべり地と WISE 釧網こ線橋(図-3 参照)では、サイト増幅特性が比較的良い一致を示しているものの、緑ヶ岡 6 丁目地すべり地とその他の強震観測点におけるサイト増幅特性を比較すると、ピーク周波数やスペクトル形状などの特徴が異なっている。これは、BRI 釧路(既往観測点)で得られている本震観測記録を、緑ヶ岡 6 丁目地すべり地に作用した本震時の地震動と見なすことが困難であることを示唆するものである。

2.4 サイト位相特性の評価

本稿では、1993年釧路沖地震による緑ヶ岡 6 丁目地すべり地および BRI 釧路での強震動の推定(後述する強震波形計算の実施)では、2012年5月10日に発生した釧路沖を震源とする $M_{4.3}$ の地震(以後、2012年釧路沖地震と呼ぶ)による緑ヶ岡 6 丁目地すべり地および BRI 釧路(臨時観測点)での観測地震動(図-5 参照)の位相特性を採用した。なお、2012年釧路沖地震は、1993年釧路沖地震の震源域内で近年発生した、サイト位相特性の評価を行う上で貴重な中小地震であり(図-6 参照)、2012年釧路沖地震による観測地震動の位相特性の採用が妥当であるかについては、1993年釧路沖地震による BRI 釧路での観測地震動と推定地震動の比較(3.2 参照)を行うことにより検証する。

図-5 に示すように、緑ヶ岡 6 丁目地すべり地と BRI 釧路(臨時観測点)では、観測地震動の加速度時刻歴の波形形状が明らかに異なっている。したがって、サイト増幅特性(図-4 参照)のみならず、サイト位相特性(地震波形の形状)についても、緑ヶ岡 6 丁目地すべり地と BRI 釧路において特徴が異なっていると言える。これは、緑ヶ岡 6 丁目地すべり地での強震動評価には、1993年釧路沖地震による BRI 釧路での観測記録の転用や補正利用は最適であるとは言えないことを改めて示唆するものであり、現行の技術により強震動を精度良く推定することは重要である。

3. 地震動の推定

3.1 推定手法

本稿では、1993年釧路沖地震の特性化震源モデル⁶⁾を採用した。図-6 に示すとおり、採用した特性化震源モデルは、震源断層内に3つのアスペリティを配したモデルであ

表-1 1993年釧路沖地震の断層モデルパラメータ⁶⁾の一覧

断層パラメータ	Asperity-1	Asperity-2	Asperity-3
走向(deg.)	133	133	133
傾斜(deg.)	6	6	6
長さ(km)	10	12	10
幅(km)	10	12	7
地震モーメント(Nm)	2.0×10^{19}	1.0×10^{20}	7.0×10^{19}
ライズタイム(s)	0.7	0.8	0.5
破壊伝播速度(km/s)	3.6	3.6	3.6

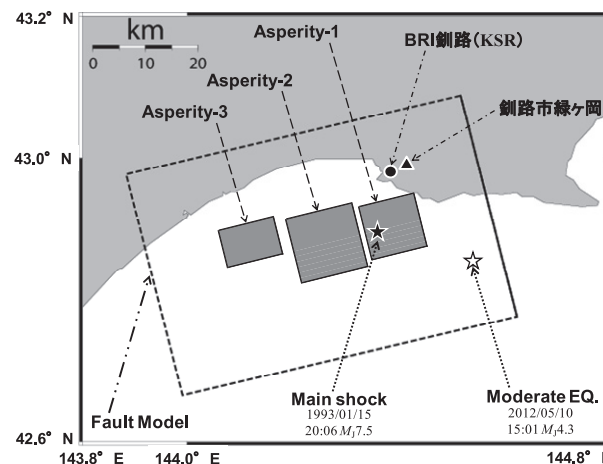


図-6 1993年釧路沖地震の矩形断層モデル⁶⁾

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。図-6 および表-1 に示すように、破壊開始点は、矩形断層モデル内の第一アスペリティの西端中央付近に位置しており、同心円状に破壊が伝播する断層モデルである。強震波形計算に必要なその他のパラメータとして、震源付近の S 波速度は 4.6 km/s 、密度は 3.1 g/cm^3 ⁶⁾を採用した。

強震波形計算手法としては、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法⁷⁾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¹⁸⁾で実数、 $P(f)$ は伝播経路特性¹⁸⁾で実数、 $G(f)$ はサイト増幅特性(図-4 参照)で実数、 $O(f)$ は緑ヶ岡 6 丁目地すべり地および BRI 釧路(臨時観測点)で得られた 2012年釧路沖地震による観測記録(図-5 参照)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 0.05 Hz の Parzen Window を適用したものである(添え字 p は Parzen Window を表す)。

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²¹⁾を行うことで、大地震(1993年釧路沖地震)による波形を求める。そ

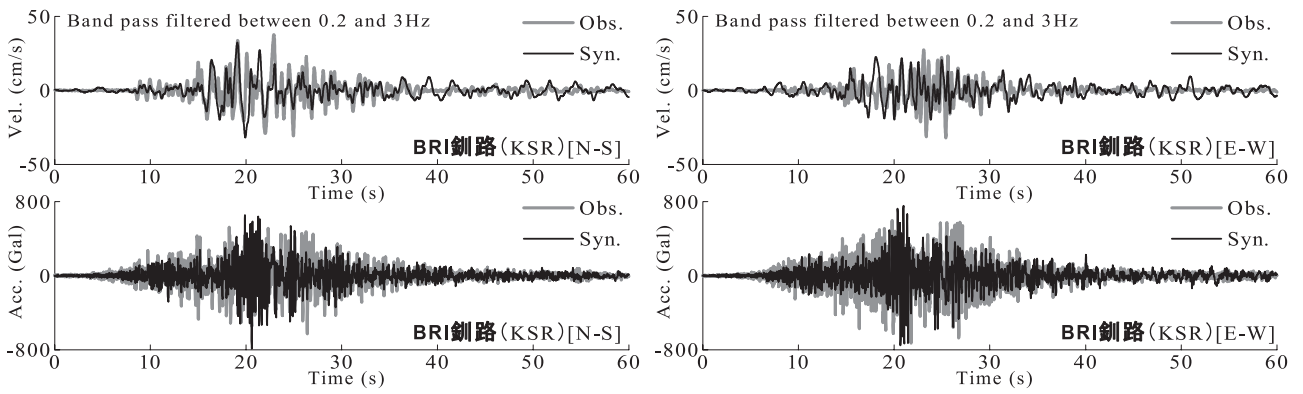


図-7 地震動推定手法の適用性確認 (速度波形および加速度波形の比較)

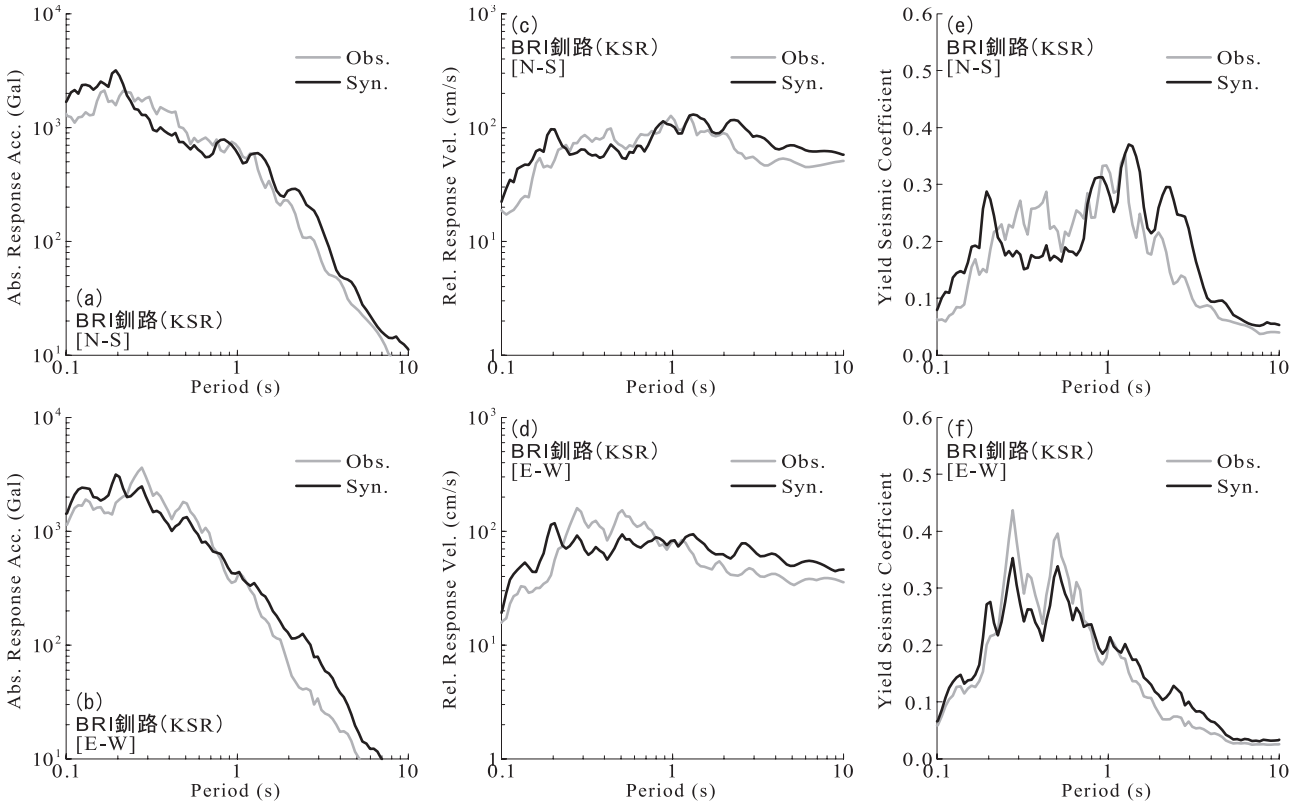


図-8 地震動推定手法の適用性確認 (応答スペクトルおよび片側必要強度スペクトルの比較)

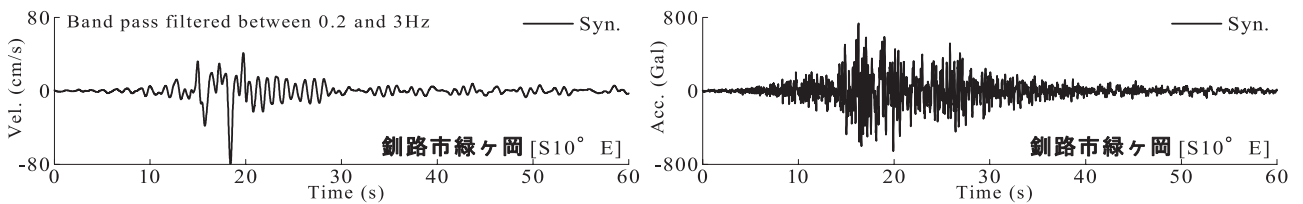


図-9 緑ヶ岡6丁目地すべり地での推定地震動 (速度波形および加速度波形)

の際、統計的グリーン関数のフーリエ位相としては現地(緑ヶ岡6丁目地すべり地とBRI 釧路(臨時観測点))で得られた2012年釧路沖地震による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で用いられている⁷⁾。

3.2 適用性の確認

図-7にBRI 釧路における1993年釧路沖地震時の速度・加

速度波形(観測波)と強震動計算の結果(推定波)を比較したものを示す。ここに、速度波形については、宅地造成斜面などの盛土構造物の被災に影響を及ぼす地震動の周波数帯域²²⁾などを考慮して、0.2~3Hzのバンド・パスフィルタを施している。さらに、図-8には、観測波と推定波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%)および片側必要強度スペクトル²³⁾の比較を示す。ここに、片側必要強度スペクトルは、斜面

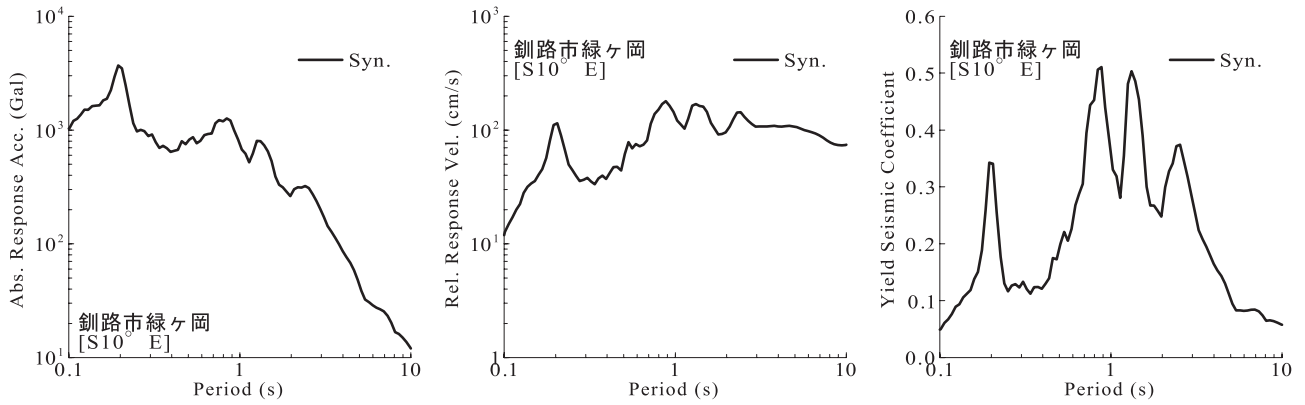


図-10 緑ヶ岡6丁目地すべり地での推定地震動（応答スペクトルおよび片側必要強度スペクトル）

上(傾斜基盤上)にすべり土塊(弾完全塑性一質点系モデル)を仮定し、土塊-斜面間の相対変位を許容値(残留変位10cm)に抑えるために必要な最大摩擦力(任意の残留変位に留めるために必要な設計水平震度)を土塊の固有周期毎に計算したものである。

図-7 および図-8 に示すとおり、時間断面や周期帯域によっては観測波と推定波に一定の差異が見受けられるものの、推定波は観測波を概ね良好に再現できており、1993年釧路沖地震の特性化震源モデル⁶⁾と経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法⁷⁾の組合せによる強震波形計算手法の適用性が確認できる。ここで、短周期帯域で若干過小評価する傾向、長周期帯域では若干過大評価する傾向がそれぞれ見受けられるものの、地すべりや造成宅地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である0.5~2Hz(周期帯域である0.5~2s)²⁴⁾においては、推定精度が比較的高いことから、一定の適用性を有していると考えている。よって次章では、同じ組合せを緑ヶ岡6丁目地すべり地に適用し、推定地震動を算定する。

4. 緑ヶ岡6丁目地すべり地における推定地震動

図-9 および図-10 は、1993年釧路沖地震時の緑ヶ岡6丁目地すべり地における速度・加速度波形と、その加速度応答スペクトル・速度応答スペクトル・片側必要強度スペクトルを強震波形計算により地すべりの主要滑動方向(S10°E:図-1参照)について推定したものである。ここに、①位置情報(図-2および図-6参照)、②サイト増幅特性(図-4参照)、③サイト位相特性(図-5参照)以外は、緑ヶ岡6丁目地すべり地とBRI釧路を対象にした強震波形計算において採用した入力パラメータと同じである。

図-9と図-7の速度・加速度波形を比較すると、緑ヶ岡6丁目地すべり地とBRI釧路では、波形の形状や振幅最大

値の出現時間などの地震動に関する特徴が異なっている。一方で、最大加速度PGAに関しては両地点の差異は比較的小さいものの、最大速度PGVに関しては両地点の差異が顕著に表れており、緑ヶ岡6丁目地すべり地ではBRI釧路に対して2倍程度の値を示している。ただし、時間断面20秒付近においてパルス状の最大速度PGVを生じた後の後続位相は、緑ヶ岡6丁目地すべり地とBRI釧路において概ね類似している。

さらに、図-10と図-8の加速度応答スペクトル・速度応答スペクトル・片側必要強度スペクトルを比較すると、緑ヶ岡6丁目地すべり地ではやや短周期帯域(周期1秒前後)において、スペクトルが顕著な卓越を示している。この周期帯域は、緑ヶ岡6丁目地すべり地におけるサイト増幅特性(図-4参照)のピーク周波数と良い一致を示すだけでなく、上述した地すべりや造成宅地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である0.5~2Hz(周期帯域である0.5~2s)²⁴⁾とも類似していることが読み取れる。

5. まとめ

本稿では、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評価手法を組合せることで、緑ヶ岡6丁目地すべり地に作用した1993年釧路沖地震時の強震動を推定した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 緑ヶ岡6丁目地すべり地とBRI釧路では、サイト増幅特性およびサイト位相特性に有意な差異が確認でき、緑ヶ岡6丁目地すべり地での強震動評価において、BRI釧路(既往観測点)における本震観測記録の転用が最適であるとは言い難い。
- (2) Morikawa & Sasatani(2004)による特性化震源モデルと、野津ほか(2009)による経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法を利用すれば、1993年釧路沖地震によるBRI釧路(既往観測点)での観測地震動

を比較的精度良く再現することが可能である。

- (3) BRI釧路における観測地震動と緑ヶ岡6丁目地すべり地における推定地震動の比較では、速度振幅、波形形状、応答スペクトル、片側必要強度スペクトルなどに関して有意な差異が確認できる。

今後は、地すべり地に作用した地震動の特徴を分析・整理²⁵⁾していくことで、予想される大規模地震に起因した地すべりの災害軽減などに役立てていきたいと考えている。

謝辞

(国研)建築研究所、国土交通省北海道開発局、(国研)防災科学技術研究所、気象庁による地震観測記録を使用させていただきました。臨時地震観測の実施にあたっては、現地住民の皆様に変なお世話になりました。本研究の遂行にあたっては、科学研究費補助金・基盤研究B「街の揺れ方の観測研究—造成斜面での地震応答観測網の構築と脆弱斜面抽出手法の確立—」(JP26282110)の一部を使用しました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、井口隆：1993年1月の釧路沖地震によって生じた地盤災害とその特徴，防災科学技術研究所報告，第59号，pp.31-56, 1999.
- 2) 柳澤栄司，安田進，吉田望，若松加寿江：住宅地の被害，1993年釧路沖地震・能登半島沖地震災害調査報告書，土質工学会，pp.231-275, 1994.
- 3) 鹿戸俊介，松村紀宏，杉村義広，三辻和弥：表層の地震応答特性が宅地造成地の地震被害予測に及ぼす影響に関する一考察—1993年釧路沖地震における釧路市緑ヶ岡地区の地震応答特性—，日本建築学会学術講演梗概集，pp.113-114, 2000.
- 4) 秦吉弥：地震地すべり地に作用した強震波形の推定とその特徴，平成26年度日本地すべり学会シンポジウム講演概要集，pp.22-25, 2014.
- 5) 秦吉弥，釜井俊孝：2011年東北地方太平洋沖地震で被災した造成宅地における推定地震動に関する概観，第49回地盤工学研究発表会概要集，pp.1665-1666, 2014.
- 6) Morikawa, N. and Sasatani, T.: Source models of two large intraslab earthquakes from broadband strong ground motions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.94, No.3, pp.803-817, 2004.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 佐藤京，池田憲二，山本明夫，篠原秀明，佐々木克憲：地震情報伝達システム(WISE)を用いた地盤の地震動増幅度の検討，第11回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.643-646, 2002.
- 11) Kashima, T.: Strong motion network operated by Building Research Institute, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
- 12) 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)
- 13) 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.
- 14) 藤原広行，河合伸一，青井真，森川信之，先名重樹，工藤暢章，大井昌弘，はお憲生，若松加寿江，石川裕，奥村俊彦，石井透，松島信一，早川謙，遠山信彦，成田章：「全国地震動予測地図」作成手法の検討，防災科学技術研究所研究資料，第336号，2009.
- 15) 秦吉弥，一井康二，常田賢一，柴尾享，山田雅行，満下淳二，小泉圭吾：アレー計測を利用した道路盛土の地震応答特性の評価，地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム2010論文集，地盤工学会，pp.21-26, 2010.
- 16) 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.
- 17) 秦吉弥，駒井尚子，常田賢一，佐藤京：釧路市緑ヶ岡団地における地盤震動特性および強震動の評価，日本地震工学会第10回年次大会梗概集，pp.347-348, 2013.
- 18) 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.
- 19) 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.
- 20) (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.
- 21) 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.
- 22) 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.
- 23) 澤田純男，土岐憲三，村川史朗：片側必要強度スペクトルによる盛土構造物の耐震設計法，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.3033-3038, 1998.
- 24) 秦吉弥，門田浩一，吉田武，常田賢一，一井康二，酒井久和：有効応力解析および微動模擬解析に基づく造成宅地を対象とした被災に大きな影響を及ぼす地震動の周波数帯域と固有周波数の関係，地盤工学会誌，Vol.64, No.10, 2016.
- 25) 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)