

2013年淡路島付近の地震による観測記録を利用した 1995年兵庫県南部地震における仁川地すべり地での地震動の推定

Seismic Waveform Estimation at the Nikawa Landslide Site during the 1995 Kobe Earthquake
by Use of Observation Records due to the 2013 Awaji Island Earthquake

秦 吉弥	Yoshiya HATA	(大阪大学大学院工学研究科)
鋏田泰子	Yasuko KUWATA	(神戸大学大学院工学研究科)
王 功輝	Gonghui WANG	(京都大学防災研究所)
釜井俊孝	Toshitaka KAMAI	(京都大学防災研究所)

1995年兵庫県南部地震では、宅地造成斜面などを中心に地すべりが数多く発生した。震源域の西宮市仁川町では、大規模な地すべりが発生するなどの甚大な被害が報告されており、仁川地すべり地に作用した強震動を、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。本稿では、サイト特性を考慮した強震動評価手法を用いて、仁川地すべり地での強震動を推定した結果について報告する。その際、2013年淡路島付近の地震による観測記録などに基づいて、仁川地すべり地でのサイト特性を評価することで、JR宝塚駅(既存観測点)とのサイト特性の差異を明確にした。

キーワード：強震動，サイト特性，1995年兵庫県南部地震，2013年淡路島付近の地震（IGC：E08）

1. はじめに

平成7年(1995年)兵庫県南部地震(Mj7.3)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¹⁾。その中でも西宮市仁川百合野町・仁川町6丁目で発生した地すべり(以後、仁川地すべりと呼ぶ)は、地すべりの規模が幅約100m、長さ約100m、最大深さ15m、移動土塊は約100,000m³に達し、崩壊土砂は仁川(二級河川)を埋塞するとともに、家屋13戸を倒壊させ、34名の人命を奪う甚大な災害をもたらした²⁾。この仁川地すべりの発生機構を評価する試みが佐々らによる一連の研究^{1),2),3),4)}においてなされており、地すべりに作用した地震動として周辺の既存強震観測点であるJR宝塚駅での本震観測記録が補正利用されている^{3),4)}。しかしながら、仁川地すべり地とJR宝塚駅の間は、4.2kmと比較的距離が離れていること、当該地点周辺は地形・地質構造が複雑であることなどを考慮すれば、仁川地すべり地とJR宝塚駅では、地盤震動特性、すなわちサイト増幅・位相特性が異なっている可能性が高い。仁川地すべりの発生メカニズムの更なる解明などのためにも地すべり地における地盤震動特性や強震動の評価は、非常に重要である⁵⁾。そこで本稿では、強震波形計算手法として、1995年兵庫県南部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、仁川地すべり地における1995年兵庫県南部地震時の地震動を推定した。

具体的には、仁川地すべり跡地(現在は公園に整備)直近

の甲山調整池(阪神水道企業団管理)およびJR宝塚駅(JR西日本管理)での中小地震観測記録に基づいて仁川地すべり地およびJR宝塚駅におけるサイト増幅特性を評価した。一方で、サイト位相特性については、2013年4月13日に発生した淡路島付近を震源とするMj6.3の地震(以後、2013年淡路島付近の地震と呼ぶ)による甲山調整池およびJR宝塚駅での観測記録を採用した。次に、1995年兵庫県南部地震におけるJR宝塚駅での観測地震動を再現することで、強震波形計算手法の仁川地すべり地への適用性について確認を行った。最後に、評価した仁川地すべり地におけるサイト増幅・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、1995年兵庫県南部地震時に仁川地すべり地に作用した強震波形を推定した。

2. サイト特性の評価

2.1 周辺の既存強震観測点

図-1に仁川地すべり地周辺における強震観測点の分布を示す。図-1に示すように、仁川地すべり地、K-NET西宮、宝塚市役所では、1995年兵庫県南部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JR宝塚駅である。図-2は、産総研による地質図に仁川地すべり地と周辺の既存強震観測点の分布(図-1参照)をプロットしたものであるが、対象4地

点ごとの地質種別はまちまちとなっており、仁川地すべり地と周辺観測点では、1995年兵庫県南部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、1995年兵庫県南部地震における仁川地すべり地に作用した強震動は、仁川地すべり地での地盤震動特性(サイト特性)を評価した上で推定することが肝要である。

2.2 サイト増幅特性の評価

現在、公園として整備されている仁川地すべり跡地(図-3において▲で表示された1995年兵庫県南部地震前の地形図²⁾と現在の地形図(同図右上参照)では、1995年兵庫県南部地震後に阪神水道企業団管理のもとで甲山調整池(図-3において●で表示された地震計設置位置)において地震観測が実施されている。そこで本稿では、仁川地すべり跡地直近の甲山調整池(地震計設置深度-19.5m)の工学的基盤:以後、仁川地すべり地(甲山調整池)と呼ぶ)で得られた観測記録に基づいてサイト特性の評価を行った。

図-4に仁川地すべり地(甲山調整池)におけるサイト増幅特性(地震基盤~工学的基盤)と、その周辺の強震観測点におけるサイト増幅特性(地震基盤~地表)を示す。ここで、せん断波速度 $V_s=3,000\text{m/s}$ 以上の岩盤を地震基盤⁸⁾、およびせん断波速度 $V_s=300\text{m/s}$ 以上もしくはN値50以上が連続する地盤を工学的基盤とした。なお、本稿では、仁川地すべり地(甲山調整池)の表記では工学的基盤のことを指し、仁川地すべり地の表記では地震動のことを指す。

仁川地すべり地(甲山調整池)におけるサイト増幅特性は、仁川地すべり地とK-NET西宮で同時に得られた中小



図-1 仁川地すべり周辺の強震観測点の分布

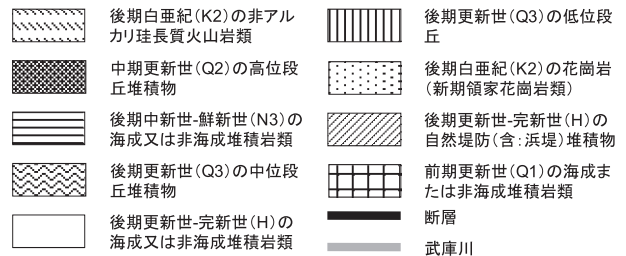
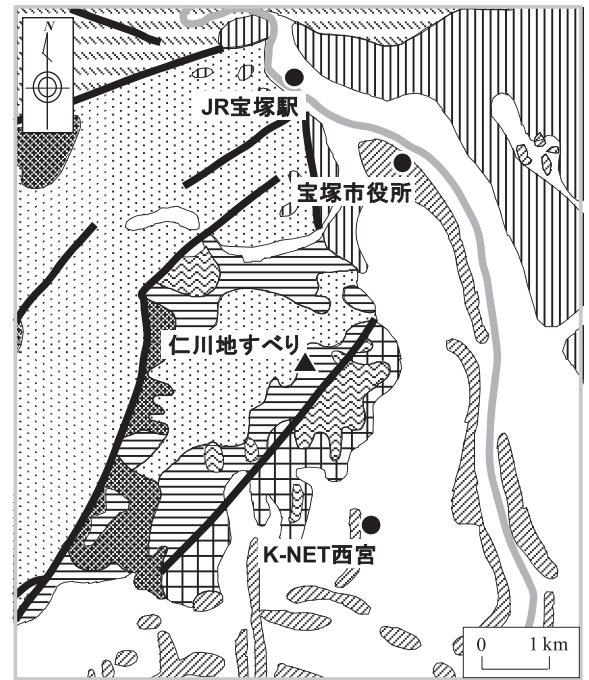


図-2 仁川地すべり周辺の地質の分布

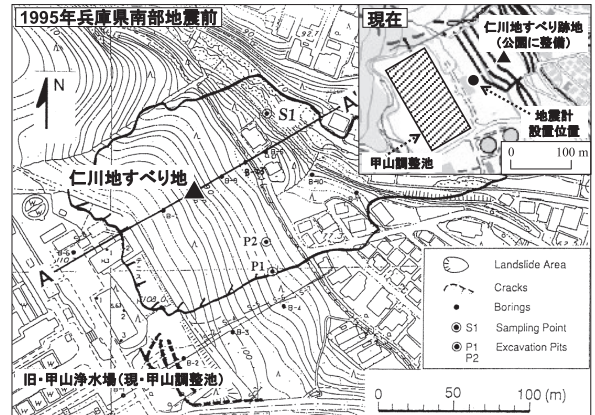


図-3 仁川地すべり地での地形状況

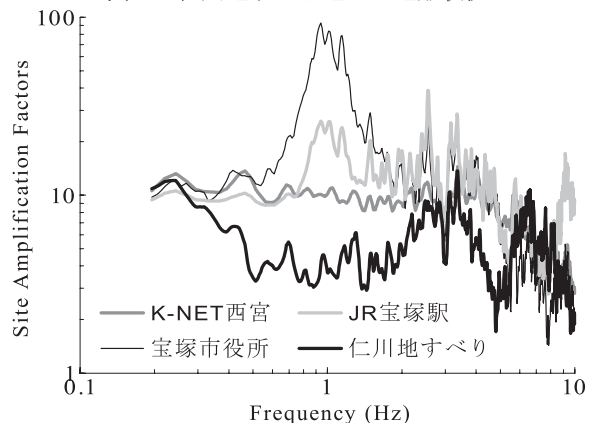


図-4 サイト増幅特性の比較

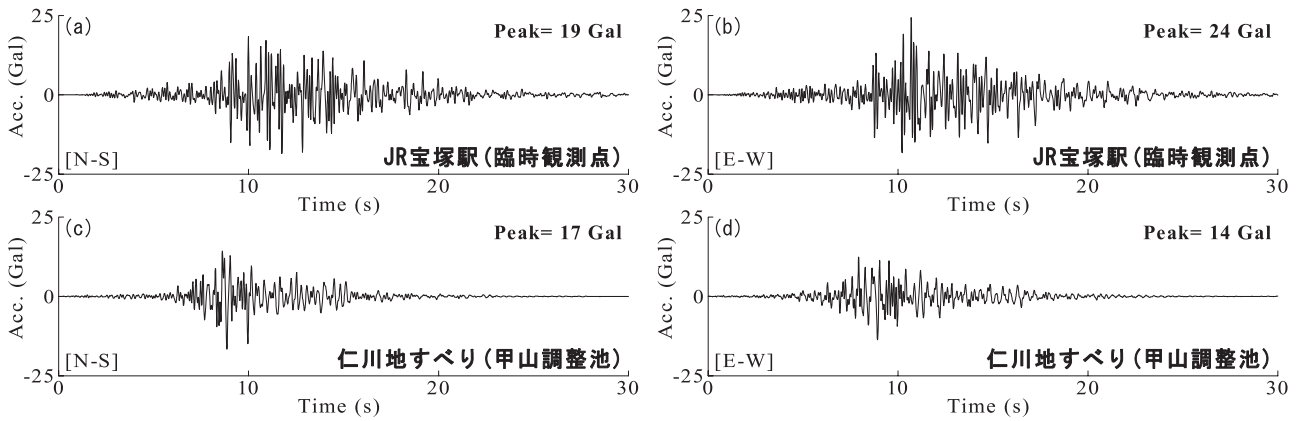


図-5 2013年淡路島付近の地震による観測地震動の加速度時刻歴

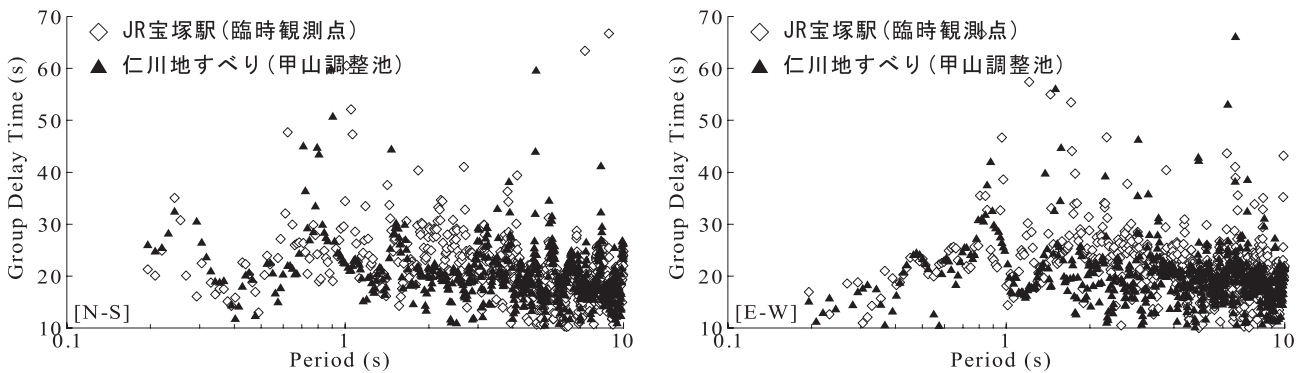


図-6 2013年淡路島付近の地震による観測地震動による群遅延時間スペクトル(標準時間 20s)の比較

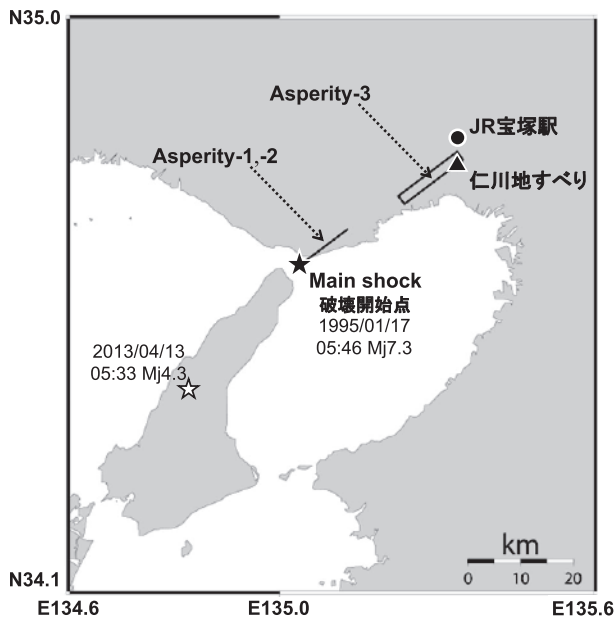


図-7 1995年兵庫県南部地震のアスペリティモデル

地震観測記録を対象に、伝播経路特性^{9),10)}の違いを考慮したフーリエスペクトルの比率(仁川地すべり地/K-NET西宮)を各地震記録に対して計算し、この比率(各地震における比率の平均値)をK-NET西宮における既存のサイト増幅特性¹¹⁾に掛け合わせることで地震基盤～工学的基盤相当のサイト増幅特性を設定⁸⁾した。ここに、サイト増幅特性は水平方向1成分の表示となっているが、N-S成分とE-W成分の平均であることに留意されたい。図-4に

示すとおり、仁川地すべり地とその周辺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。

2.3 サイト位相特性の評価

本稿では、1995年兵庫県南部地震による仁川地すべり地ならびにJR宝塚駅での強震動の推定(後述する強震波形計算の実施)では、2013年淡路島付近の地震による仁川地すべり地(甲山調整池)およびJR宝塚駅での観測地震動(図-5参照)の位相特性を採用した。図-6には、仁川地すべり地およびJR宝塚駅での観測地震動に基づく群遅延時間スペクトル(標準時間 20s)の比較についても示す。

なお、2013年淡路島付近の地震は、1995年兵庫県南部地震の震源域周辺で近年発生した貴重な中規模地震であり(図-7参照)、2013年淡路島付近の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、1995年兵庫県南部地震によるJR宝塚駅での観測地震動と推定地震動の比較(3.3参照)を行うことで検証する。

ここに、2013年淡路島付近の地震によるJR宝塚駅での観測地震動は、JR宝塚駅近傍に著者が設置した臨時観測点で得られたものである。これは、我が国の旅客鉄道会社が所有する地震観測点で得られた地震動データの公開は、甚大な被災を伴う大規模地震などに限られている¹²⁾こと

を勘案したものである。地震観測条件やシステムの詳細については、既往の研究¹³⁾と同様であり、観測期間は、2013年4月から5月にかけての約50日間であり、2013年淡路島付近の地震による地震動の観測に成功した。図-5および図-6に示すように、仁川地すべり地とJR宝塚駅(近傍)では、観測地震動の加速度時刻歴の波形形状(図-5参照)や群遅延時間スペクトルの特性(図-6参照)が明らかに異なっていることから、サイト増幅特性(図-4参照)のみならず、サイト位相特性についても、仁川地すべり地とJR宝塚駅間において特徴が異なっていると言える。これは、仁川地すべり地での強震動評価には、1995年兵庫県南部地震によるJR宝塚駅での観測記録の転用や補正利用は適切ではないことを示唆している。すなわち、例えば、JR宝塚駅での観測地震動に対して等価線形解析などを適用し、工学的基盤相当に引き戻した波形を仁川地すべり地に作用した地震動として転用することは適切ではない。さらに、設計実務等の分野においては多用されているが、JR宝塚駅における観測地震動の最大加速度値を距離減衰式¹⁴⁾に基づいて振幅調整³⁾することについても最適であるとは言えず、強震動を精度良く推定することは重要である。

3. 仁川地すべり周辺の観測点での地震動推定

3.1 特性化震源モデル

本稿では、図-7および図-8に示す1995年兵庫県南部地震の特性化震源モデル⁶⁾を採用した。この特性化震源モデルは、元々淡路側から神戸側にかけて4つのアスペリティを配したモデルであるが、淡路側(最も南側)のアスペリティは、破壊開始点(図-7ならびに図-8において★で表示)から神戸側に対しては破壊伝播方向にないため、神戸市内や西宮市内などの地震動に対してほとんど寄与しない^{15),16)}。そこで、図-8(断層面図)および図-7(図-8に示した断層面を地表面に垂直に投影した図)では、両図ともに、淡路側のアスペリティを記載しておらず、後述する強震波形計算においても考慮していないことに留意されたい。ただし、淡路側のアスペリティを考慮していないにも関わらず、後述する統計的グリーン関数のフーリエ位相としては、現地地で得られた限られた地震観測記録の中から、1995年兵庫県南部地震の震源域付近(淡路島付近)で発生した2013年淡路島付近の地震による観測記録を採用しており、両者の関連性については今後の検討課題としたい。

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。表-1、図-7、図-8に示すように、破壊開始点はAsperity-1の南側深部に位置しており、Asperity-1, -2, -3の順序

で南西方向から北東方向にかけて、アスペリティ毎に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^{6),15)}は3.5km/s、密度¹⁶⁾は2.7g/cm³、伝播経路のQ値¹⁰⁾は地震動の周波数 f による関数として $Q=180 \times f^{0.7}$ とした。

山田ほか⁹⁾の特性化震源モデルは、神戸市内などの観測点で得られた1995年兵庫県南部地震による強震動を精度良く再現できることが多数報告されているものの¹⁵⁾、JR宝塚駅(仁川地すべり地周辺：図-1参照)に対する適用性についてはこれまで十分な検討が行われていないため、本稿においてその適用性について詳細検討を行った。

3.2 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⁹⁾で実数、 $P(f)$ は伝播経路特性⁹⁾で実数、 $G(f)$ はサイト増幅特性で実数、 $O(f)$ は仁川地すべり地(甲山調整池)あるいはJR宝塚駅(近傍の臨時観測点)で得られた2013年淡路島付近の地震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ウィンドウを適用したものである(添え字 p はParzenウィンドウを表す)。

表-1 モデルパラメータの一覧

断層パラメータ	Asperity-1	Asperity-2	Asperity-3
走向(deg.)	N53° E	N53° E	N233° E
傾斜(deg.)	90	90	85
長さ(km)	4.8	8.0	12.8
幅(km)	4.8	6.4	8.0
地震モーメント(Nm)	3.4×10^{17}	1.3×10^{18}	2.3×10^{18}
ライズタイム(sec)	0.4	0.5	0.6
破壊開始時刻(s)	0	1.8	6.9
破壊開始点	左下	左下	左下
破壊伝播様式	同心円状	同心円状	同心円状
破壊伝播速度(km/s)	2.8	2.8	2.8

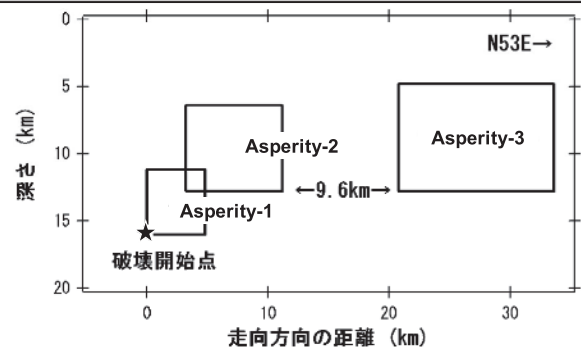


図-8 震源断層内におけるアスペリティの分布

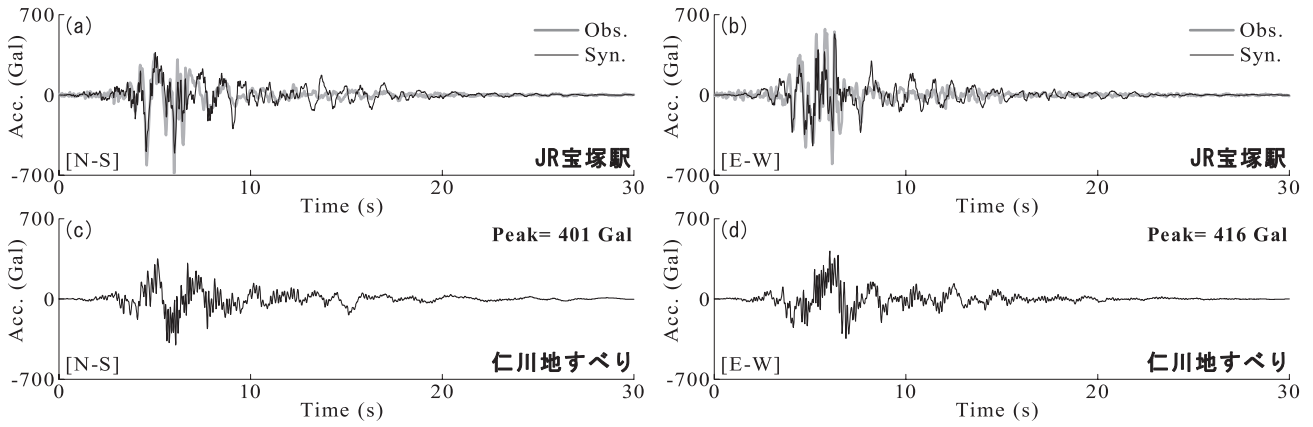


図-9 JR宝塚駅および仁川地すべり地における強震波形の推定

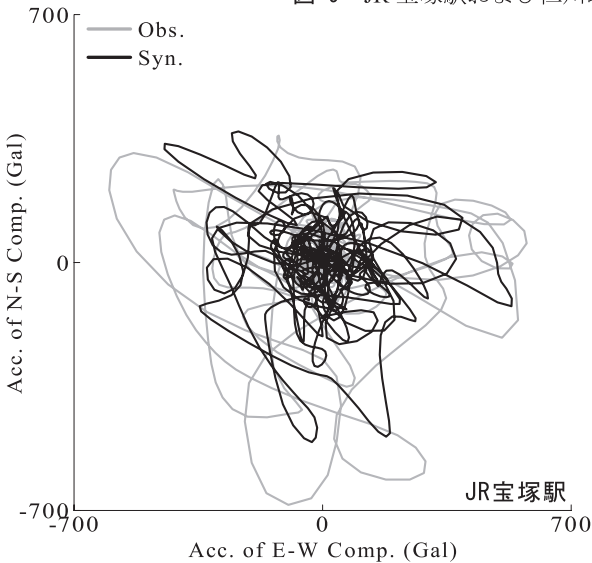


図-10 パーティクル・モーションの比較による適用性確認

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。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地で得られた2013年淡路島付近の地震による記録のフーリエ位相を用いる。なお、Parzen ウィンドウ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⁾。また、式(1)に関して、要素断層毎に Radiation 補正などは考慮していないため、フーリエ振幅は N-S および E-W 成分において共通となり、後述する推定地震動の位相特性(波形形状)に影響を及ぼしているのは、統計的グリーン関数のフーリエ位相のみとなる。さらに、統計的グリーン関数のフーリエ位相として採用した2013年淡路島付近の地震による地震波形は断層破壊進展の影響を多分に含んでいることに加えて、強震波形計算の過程において1995年兵庫県南部地震の断層破壊進展の影響を考慮していることになるため、断層破壊進展に関わる位相をダブル・カウントしている懸念がある。本来ならば、山田ほか⁶⁾による震源モデルの要素断層周辺で発生した中小地震による位相の採用が適当であるが、現地(仁川地すべり地ならびに JR 宝塚駅(臨時観測点))で同時

に得られた唯一の記録が2013年淡路島付近の地震であること、後述するとおり JR 宝塚駅での観測地震動と推定地震動が比較的良い一致を示していること、を勘案して2013年淡路島地震による観測記録を採用した。ただし、上記の議論に関しては、今後再考の余地が残されている。次に、式(1)をフーリエ逆変換し、経験的グリーン関数法¹⁷⁾と同様の重ね合わせを行うことで、大地震による波形を求める。

3.3 地震動推定手法の適用性

図-9(a),(b)に仁川地すべり周辺の既存強震観測点である JR 宝塚駅(図-1 参照)における1995年兵庫県南部地震時の加速度波形(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。また、図-10には、観測波と推定波によるパーティクル・モーションの比較を示す。さらに、図-11(a),(b)には、観測波と推定波による絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%)の比較を示す。図-9(a),(b)、図-10 および図-11(a),(b)に示すとおり、推定波は観測波を良好に再現できており、1995年兵庫県南部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の仁川地すべり地への適用性が確認できる。ただし、波形形状は良好であるが、振幅はやや過小評価する傾向にあり、JR 宝塚駅における本観測点と臨時観測点におけるサイト増幅特性の差異などが原因であると思われる。一方で、強震波形計算では、2013年淡路島付近の地震による観測地震動をサイト位相特性として採用しているが、加速度波形及び応答スペクトルを一定の精度で再現できており、仁川地すべり地でのサイト位相特性の評価の妥当性が明らかとなった。

4. 仁川地すべりにおける強震動の推定

図-9(c),(d)および図-11(c)は、1995年兵庫県南部地震

時の仁川地すべり地における時刻歴加速度波形(工学的基盤相当波)とその絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%)を強震波形計算により推定したものである。ここに、①位置情報(図-1 参照)、②サイト増幅特性(図-4 参照)、③サイト位相特性(図-6 参照)以外は、仁川地すべり地とJR宝塚を対象にした強震波形計算において用いた入力パラメータは同じである。図-9(c),(d)と図-9(a),(b)の加速度波形を比較すると、仁川地すべり地とJR宝塚駅では加速度振幅や波形形状などの特徴が異なっているのがわかる。さらに、図-11(c)と図-11(a),(b)の応答スペクトルを比較すると、仁川地すべり地とJR宝塚駅では卓越周期やスペクトル形状等の特徴が異なっているのが確認できる。ただし、JR宝塚駅での観測地震動は地表面相当波、仁川地すべり地での推定地震動は工学的基盤相当波であるため、両者を単純に比較できないことに留意する必要がある。

そこで、JR宝塚駅での観測加速度波形(図-9(a),(b)参照)と仁川地すべり地での推定加速度波形(図-9(c),(d)参照)をそれぞれ最大加速度値で除して無次元・正規化した波形(すなわち、N-S成分もしくはE-W成分のどちらか一方の振幅値は1.0でもう一方はそれ以下になる)のパーティクル・モーションを図-12に示す。図-12には、仁川地すべりの主要滑動方向N55°E³⁾についても示している。

図-12に示すように、JR宝塚駅での正規化観測波形では、主要動部において主要滑動方向に直交する方向に加速度が主に卓越している(例えば、図-12(e)参照)。一方で、仁川地すべり地での正規化推定波形では、主要動部において主要滑動方向(に平行な方向)に加速度が卓越する傾向が読み取れる(例えば、図-12(l),(m)参照)。ここに、図-12(k),(l),(m)(時刻歴波形5秒付近:図-9(c),(d)参照)において、地震動の長周期成分がNW-SE方向への挙動が見受けられるが、推定地震動の周期帯域によってパーティクル・モーションの卓越方向が変化する明確な傾向は確認できない。

図-13は、上記の振幅値1.0で無次元・正規化された観測波(JR宝塚駅)と推定波(仁川地すべり地)をそれぞれ地すべりの主要滑動方向N55°Eに座標変換したものである。

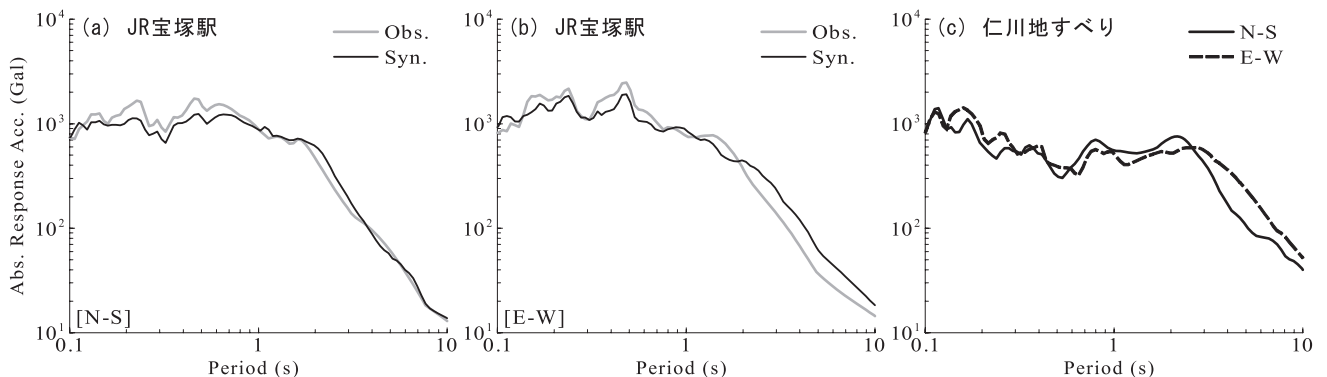


図-11 JR宝塚駅および仁川地すべり地における応答スペクトルの推定

図-13に示すように、JR宝塚駅における観測波ではピーク値が0.69と約3割低減されているのに対し、仁川地すべり地における推定波ではピーク値が0.88と1割程度の低減に留まっており、仁川地すべり地における推定地震動の地すべり方向に対する指向性効果が表れていると言える。

図-14は、1995年兵庫県南部地震による仁川地すべり地に作用した主要滑動方向の推定加速度波形(すなわち、図-11(b)で示した無次元・正規化した波形を最大加速度値366Gal(0.88×416Gal)に振幅調整した波形)に対して、絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%)を計算したものである。図-14には、既往研究¹⁸⁾を参考に、国土交通省告示(建告平第12号)に基づく工学的基盤での設計標準スペクトル(極めて稀に発生する地震動)も併せて比較表示している。図-14に示すように、設計標準スペクトルに対して仁川地すべり地での推定地震動による応答スペクトルが比較的類似しているのが読み取れる。なお、3.で述べたような強震波形計算による入力地震動の設定は、設計・実務者が必ずしも実施できる技術ではないため、図-14により得られた類似性に関する知見は、今後、地すべりの耐震検討を行っていく際の一助となることが期待できる。

地震地すべり現象に着目した地震動の特徴をより詳細に把握するために、仁川地すべり地に作用した主要滑動方向の推定加速度波形(最大加速度366Galの振幅調整波形(上記と同様の波形))に対して、片側必要強度スペクトル¹⁹⁾を計算した(図-15参照)。図-15では、仮に残留変位を10cmとした場合の結果について示している。図-15に示すように、周期1~2秒の帯域において設計水平震度が0.3程度の値を示しており、今後の地すべりの耐震検討における地震外力の設定等において参考値となると考えられる。

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、仁川地

すべり地に作用した 1995 年兵庫県南部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) 仁川地すべり地とJR宝塚駅では、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、仁川地すべり地での強震動評価において、JR宝塚駅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) 山田ほか(1999)による特性化震源モデルと、野津ほか(2009)によるサイト特性を考慮した強震動評価手法

を利用すれば、1995年兵庫県南部地震によるJR宝塚駅での地震動を精度良く推定することが可能である。

- (3) JR宝塚駅における観測地震動と仁川地すべり地における推定地震動の比較では、加速度振幅、波形形状、応答スペクトルなどに関して有意な差異が確認でき、仁川地すべり地での推定地震動は、主要滑動方向に卓越する特徴を有しており、指向性の効果が認められる。

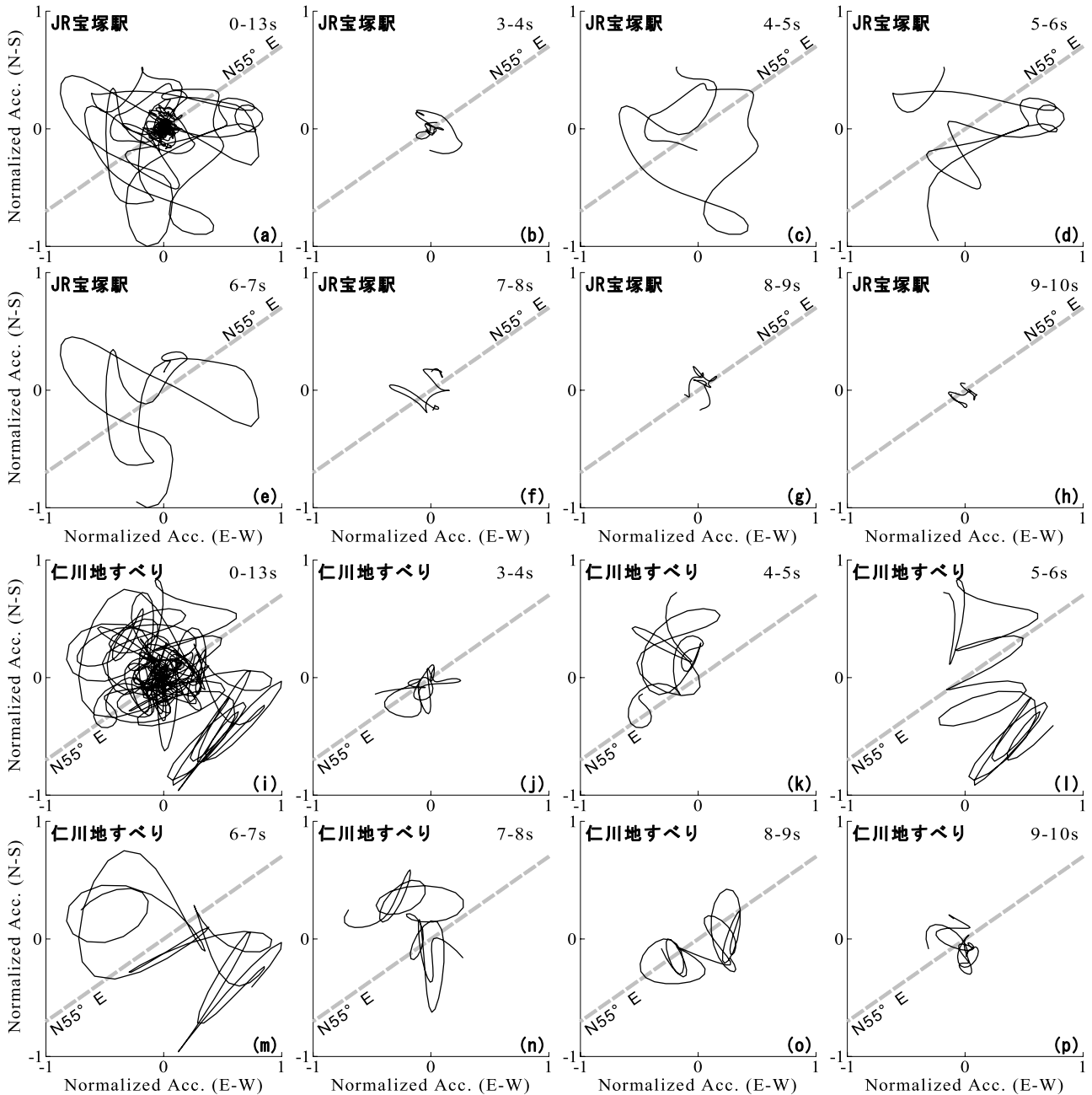


図-12 無次元・正規化波形による地震動の指向性の評価

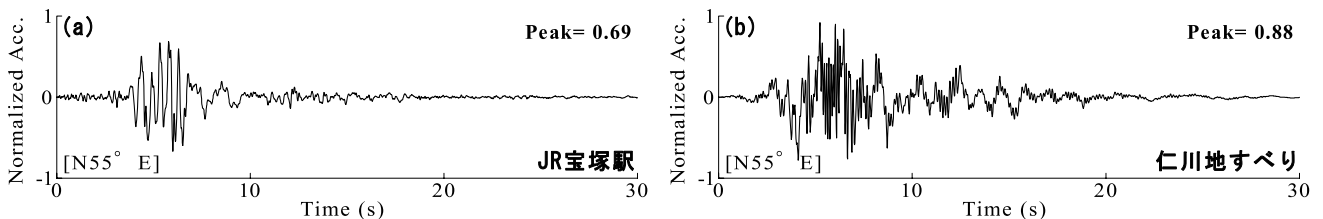


図-13 地すべりの主要滑動方向に着目した無次元・正規化波形の加速度時刻歴

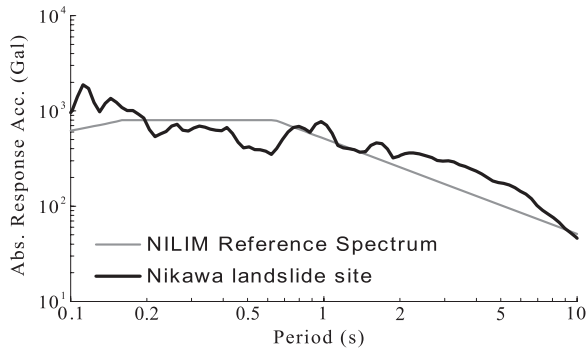


図-14 推定地震動の加速度応答スペクトルの特徴

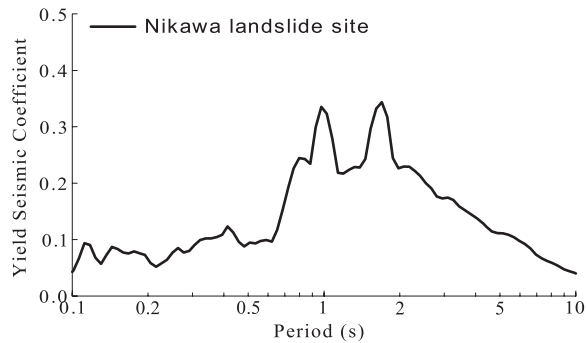


図-15 推定地震動による片側必要強度スペクトル

- (4) 仁川地すべり地での主要滑動方向の推定地震動による加速度応答スペクトルは、国土交通省告示(建告平第12号)に基づく設計標準スペクトル(極めて稀に発生する地震動)と比較的類似している。
- (5) 仁川地すべり地での主要滑動方向の推定地震動による片側必要強度スペクトルによれば、許容残留変位を仮に10cmとした場合、すべり土塊の固有周期が1~2sの帯域において0.3程度の設計水平震度の値を示す。今後は、推定した入力地震動を用いて、仁川地すべり地での動的解析などを実施していきたいと考えている。

謝辞

本研究の遂行にあたり、阪神水道企業団より甲山調整池における地震観測波形データをご提供いただきました。JR西日本、兵庫県、(独)防災科学技術研究所 K-NET による地震観測記録を使用させていただきました。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—」(26282110)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) 佐々恭二：西宮市仁川で発生した地震時高速地すべり，土と基礎，Vol.44, No.2, pp.83-85, 1996.
- 2) 佐々恭二：阪神・淡路大震災—防災研究への取り組み—地震による都市域地盤の崩壊と災害の巨大化，京都大学防災研究所年報，No.39A, pp.1-16, 1996.
- 3) Wang, F.W., Sassa, K. and Fukuoka, H.: Geotechnical simulation test for the Nikawa landslide induced by January 17, 1995 Hyogoken-nambu Earthquake, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.1, pp.35-46, 2000.

- 4) Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, G. and Ishikawa, N.: Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics, *Landslides*, Vol.1, pp.7-19, 2004.
- 5) 釜井俊孝：年間特集 阪神淡路大震災から15年を経て～わかったこと，わからなかったこと～斜面災害編，自然災害科学，Vol.29, No.1, pp.3-15, 2010.
- 6) 山田雅行，平井俊之，岩下友也，釜江克宏，入倉孝次郎：兵庫県南部地震の震源モデルの再検討，日本地震学会講演予稿集，A14, 1999.
- 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) (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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) Ashiya, K.: Earthquake alarm systems in Japan railways. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.112-117, 2004.
- 13) 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，pp.21-26, 2010.
- 14) Fukushima, Y. and Tanaka, T.: A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.80, No.4, pp.757-783, 1990.
- 15) 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.
- 16) 香川敬生，澤田純男，岩崎好規，南荘淳：常時微動アレー観測による大阪堆積盆地深部S波構造のモデル化，地震，第2輯，Vol.51, pp.31-40, 1998.
- 17) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proc. of 7th Japan Earthquake Engineering Symposium*, pp.151-156, 1986.
- 18) 福元俊一，海野寿康，仙頭紀明，渦岡良介，風間基樹：2003年三陸南地震時における築館地すべり地点の地震動推定—強震計・震度計データを利用した波形再現と室内試験による確認—，日本地震工学会論文集，Vol.7, No.2, pp.160-179, 2007.
- 19) 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.

(2014年6月23日 受付)