

2000年鳥取県西部地震における震源域内の墓地での強震動評価

秦 吉弥¹・古川 愛子²・野口 竜也³・香川 敬生⁴

¹正会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: hata@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²正会員 京都大学 大学院地球環境学堂 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail: furukawa.aiko.3w@kyoto-u.ac.jp

³正会員 鳥取大学 大学院工学研究科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: noguchit@cv.tottori-u.ac.jp

⁴正会員 鳥取大学 大学院工学研究科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: kagawa@cv.tottori-u.ac.jp

既往の大規模地震による強震動の作用により被災もしくは無被災であった地点の地震動を事後評価する際、地震動評価手法の適用性を確認するために、観測地震動と推定地震動の比較がしばしば行われる。しかしながら、対象地点と周辺観測点の位置関係などに依存して、地震動の比較に基づく適用性確認だけでは十分であるとは言い難いケースも想定される。そこで本稿では、既存強震観測点よりもその数が圧倒的に多い墓地に着目し、墓石の転倒解析を地震動評価手法の適用性確認に利活用することを提案する。具体的には、2000年鳥取県西部地震の震源域内の墓地を一例として、墓地に作用した地震動を推定し、墓石の転倒解析を実施した結果、墓石の転倒率に関して実績値と推定値が比較的良好一致を示すことを示した。

Key Words : Strong motion, site amplification factor, temporary earthquake observation, observation station in local governments, tombstone fall-down rate

1. はじめに

近年、1995年兵庫県南部地震や2011年東北地方太平洋沖地震などの大規模地震による強震動の作用によって、深刻な建造物の被災(阪神・淡路大震災や東日本大震災など)が相次いで発生しており^{1,2)}、建造物の耐震性評価手法の精度を上げていくことが必要不可欠となっている。図-1は、建造物の耐震性評価の信頼性向上を図る上で、入力地震動の設定が果たす役割の重要性³⁾を示したものである。図-1に示すように、大規模地震などにおいて実際に災害を受けた建造物に対して、現時点で採用可能な被害予測手法(例えば、動的FEMなど)を適用し、得られた推定被害と実被害を比較し、被害予測手法の適用性を確認する。適用性が十分でない場合には、その原因を究明し、被害予測手法の改良につなげる。こうしたプロセスを繰り返すことで、同種の建造物の耐震性評価の信頼性が向上すると考えられるが、このプロセスにおいて、被害が起きた地点での入力地震動が精度良く推定できていることは決定的に重要^{4,5,6)}である。

一般的に、地震動評価では、対象地点の地震動の特性

が、震源特性・伝播経路特性・サイト特性の三つの要素からなると考える。この三つの要素の中で、サイト特性は、地震の諸量に依存せず、対象地点に固有の地盤震動特性であると考えられ、十分な調査・観測などを行うことで、地震動評価の精度向上が期待できる重要な要素⁷⁾である。これまで著者ら^{8,9,10)}は、大規模地震による地震動の作用によって被災(もしくは無被災)であった建造物の近傍(対象地点)において、臨時余震観測(もしくは常時微動計測)を行い、対象地点のサイト特性を評価する

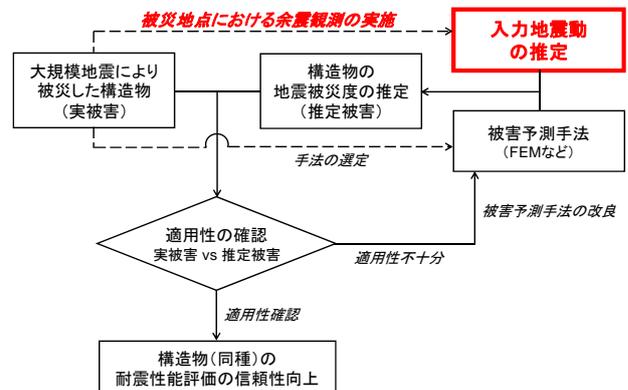


図-1 建造物の被災分析における入力地震動の設定の重要性³⁾

ことで、大規模地震時に構造物に作用した地震動を事後評価する一連の研究を実施している。その際、対象地点周辺で得られた観測地震動に対して推定地震動を比較することによって、地震動評価手法の対象地点への適用性を確認⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾している。しかしながら、対象地点とその周辺の強震観測点間において、①比較的距離がある場合、②サイト特性の差異が比較的大きい場合、③評価手法に用いる入力パラメータが同条件で設定できなかった場合などは、上述した観測地震動と推定地震動の比較のみでは、地震動評価手法の適用性確認が十分に行われたとは言い難いケースも想定される。

この点に関して著者ら¹¹⁾は、2009年駿河湾を震源とする地震によって崩落した東名高速道路の盛土地点における強震動の事後評価において、地震動評価手法の適用性を確認するために、観測地震動と推定地震動の比較だけでなく、崩落地点近傍に位置する墓地に着目し、推定地震動を入力波とした墓石の転倒解析を行い、実際の転倒率(未転倒)を再現することで、地震動評価手法の適用性を更に高めることに成功している。すなわち、①墓地は既存強震観測点に比べその数が圧倒的に多く対象地点の近くに位置している可能性が高いこと、②大規模地震発生後には墓石の転倒率に着目した現地調査が近年でも多く報告¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾されていること、③墓石の転倒(特に転倒の有無)に関して十分な再現性を有する数値解析手法が提案¹⁶⁾されていることなどを考慮すれば、地震動評価手法の適用性確認を更に高めるための新たな手段として、大規模地震による墓石の転倒実績を利活用できる可能性が高い。

上述した背景を踏まえ、本稿では、既往の大規模地震による墓地での地震動を推定し、そして、推定地震動を入力波とした墓石の転倒解析を実施した。そして、墓石の転倒率に関して実績値と解析値について比較検討を行うことで、地震動推定手法(観測地震動と推定地震動による比較検討については実施済)の適用性について追加

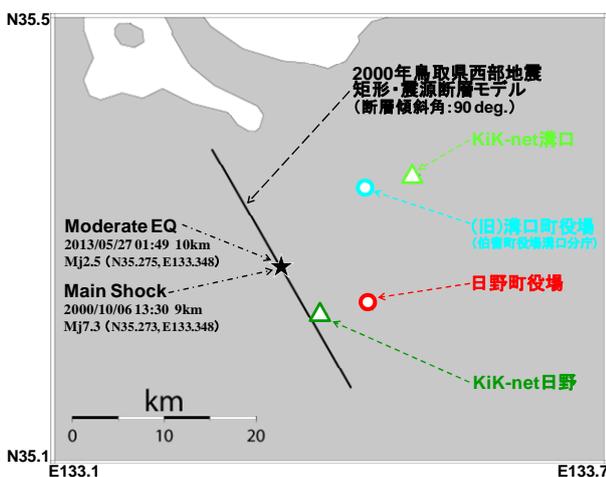


図-2 2000年鳥取県西部地震の震源域における強震観測点

の確認を行った事例を紹介する。

具体的には、まず、2000年鳥取県西部地震の震源域内における日野郡日野町および(旧)溝口町の3つの墓地を対象とした。次に、現地において常時微動計測や地震観測を行い、得られた記録に基づき対象墓地におけるサイト特性を評価した。さらに、既往の特性化震源モデル¹⁷⁾を用いた強震波形計算¹⁸⁾を行うことで、本震時に対象墓地に作用した地震動を推定した。最後に、推定地震動を入力波とした墓石の転倒解析¹⁶⁾を実施し、墓石の転倒率を計算することで、実績値に対して比較検討を行った。

2. 墓地での地震被害と周辺の観測記録

図-2は、2000年鳥取県西部地震の震源断層に対する日野町および(旧)溝口町の既存強震観測点(基盤強震観測網KiK-net¹⁹⁾と自治体震度観測点(鳥取県)の分布を示す。ここに、KiK-net溝口では本震記録が欠測しており、日野町役場および(旧)溝口町役場の震度計では本震時の観測波形データは残されていない²⁰⁾。

図-3に日野町における墓地の位置関係を示す。図-3(枠内写真)に示すように、日野町役場の震度計の極近傍に墓地があり、日野町役場の震度計で得られた記録相当の地震動が本震時に当該墓地に作用したものと推察される。さらに、日野町役場近傍の墓地(以後、墓地Aと呼ぶ)では、墓石の転倒率が45%(15/33)¹²⁾であったのに対し、墓地Aから南方へ約1km離れた墓地(以後、墓地Bと呼ぶ)では、墓石の転倒率が0%(0/6)¹²⁾であった。両墓地における震源特性・伝播経路特性は、ほぼ共通であり、さ

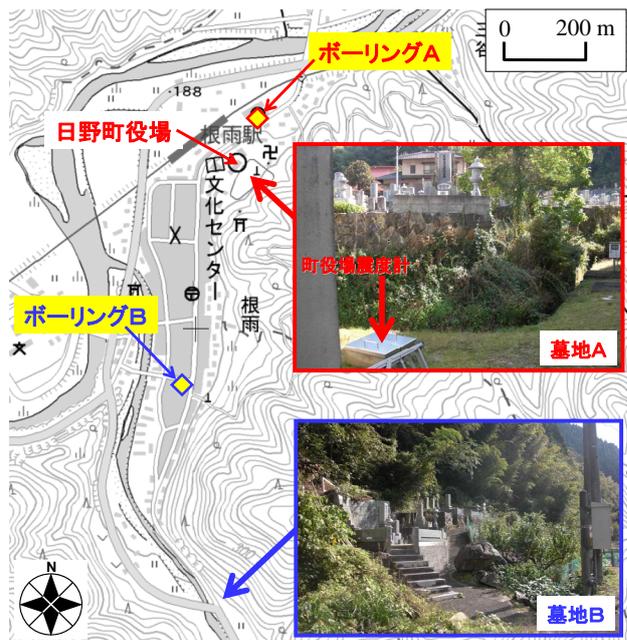


図-3 日野町における墓地とボーリングサイトの分布

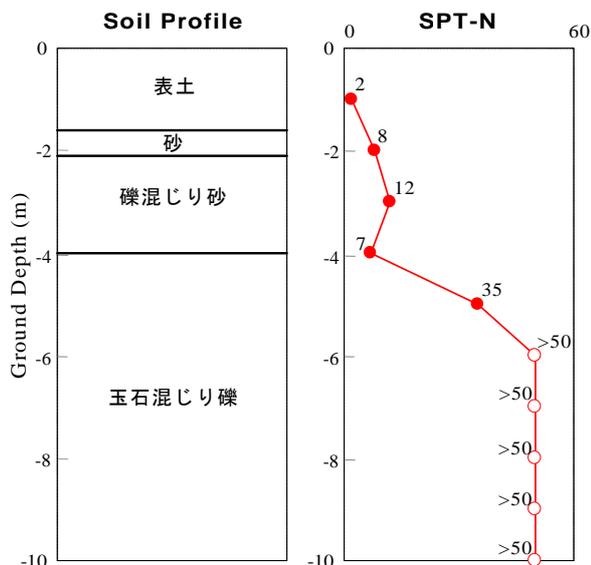


図4 墓地A周辺におけるボーリング調査結果(ボーリングA)

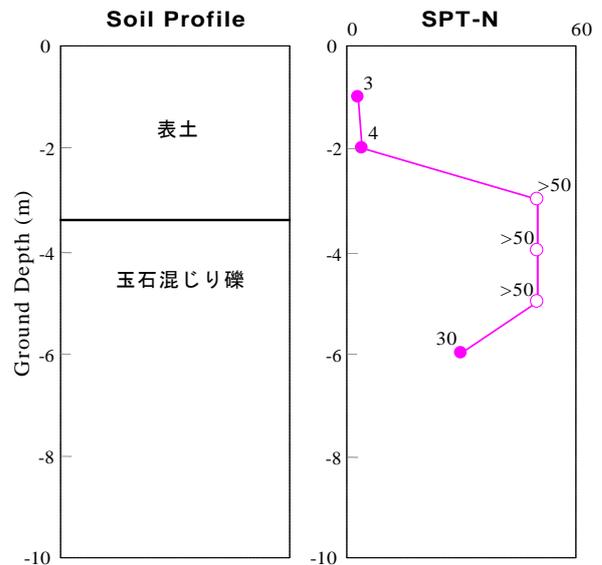


図7 墓地C周辺におけるボーリング調査結果(ボーリングC)

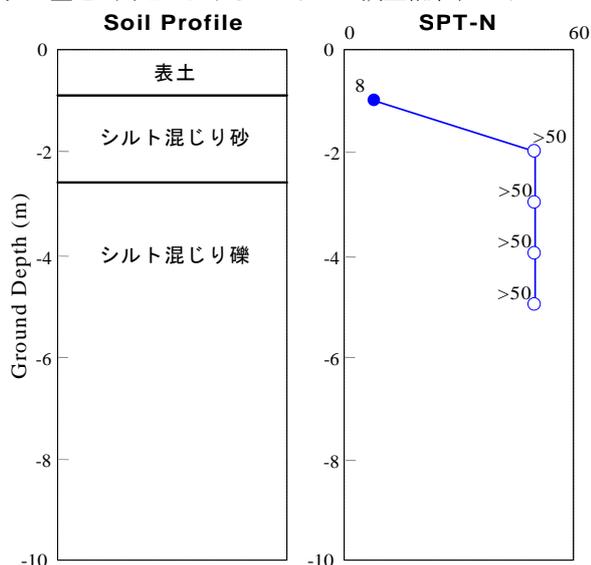


図5 墓地B周辺におけるボーリング調査結果(ボーリングB)

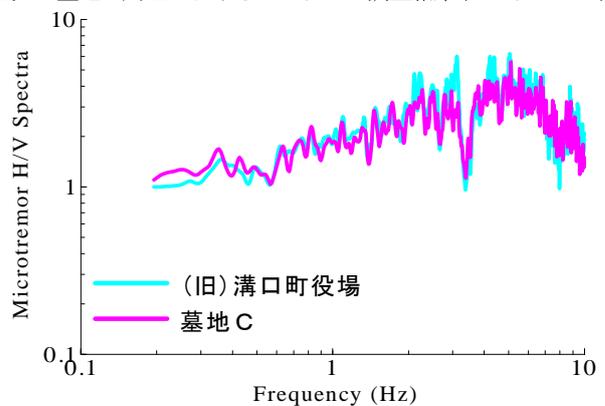


図8 (旧)溝口町での常時微動H/Vスペクトルの比較



図6 (旧)溝口町における墓地とボーリングサイトの分布

らに震源断層から両墓地までの距離もほぼ同等である(図-2および図-3参照)ことから、墓石転倒率の差異は、両墓地におけるサイト特性(地盤震動特性)の差異に大きく依存している可能性²¹⁾が示唆される。

図-4および図-5に、墓地Aおよび墓地B周辺(図-3参照)における既存のボーリング調査結果²²⁾²³⁾を示す。墓地A周辺では工学的基盤以浅の表層地盤の層厚が約6mなのに対し(図-4参照)、墓地B周辺では表層地盤の層厚が約2mとなっており、両地点における地盤震動特性の差異が確認できる(図-5参照)。

図-6に(旧)溝口町における墓地の位置関係を示す。図-6に示すように、(旧)溝口町における墓地(以後、墓地Cと呼ぶ)は、(旧)溝口町役場から約150m離れたところに位置しており、墓石の転倒率が60%(50/83)¹²⁾であった。図-7に、墓地C周辺(図-6参照)における既存のボーリング調査結果²²⁾²³⁾を示す。墓地C周辺では深度3m以深であったんN値50以上を示しているものの、深度6m相当の地盤ではN値が50を大幅に下回っている。

図-8は、(旧)溝口町役場震度計と墓地Cにおける常時微動H/Vスペクトルの比較である。計測時間は約1時間

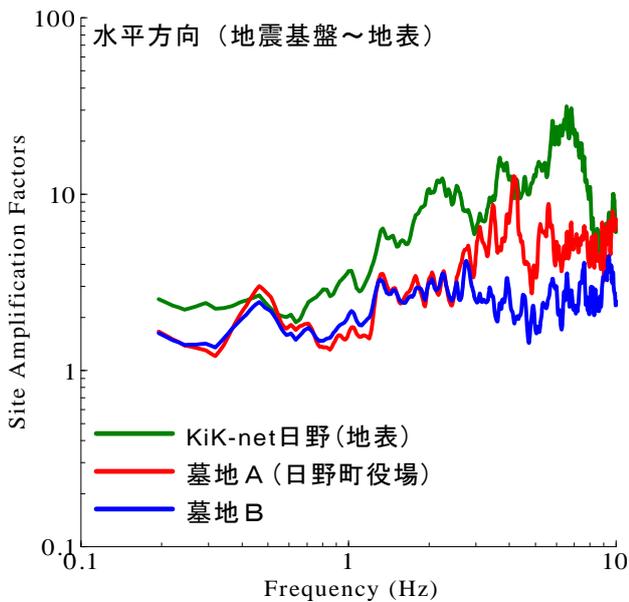


図-9 日野町でのサイト増幅特性の比較(水平方向)

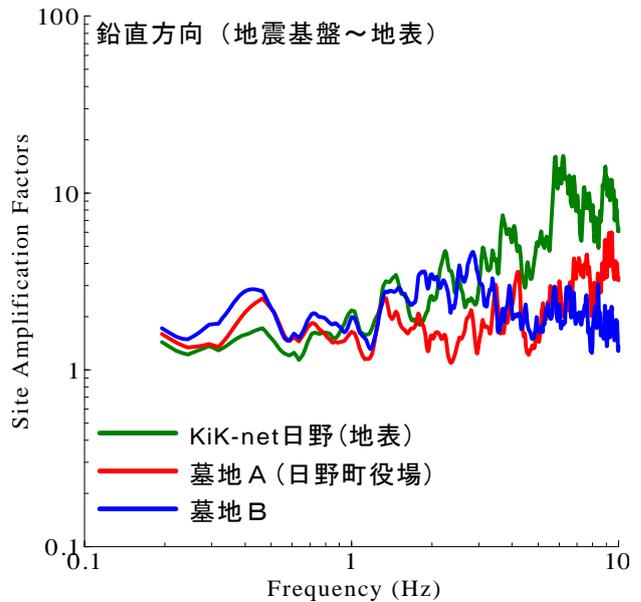


図-10 日野町でのサイト増幅特性の比較(鉛直方向)

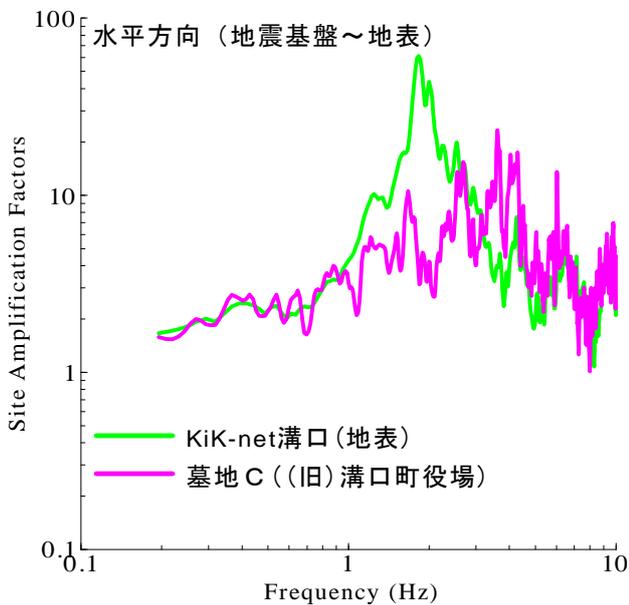


図-11 (旧)溝口町でのサイト増幅特性の比較(水平方向)

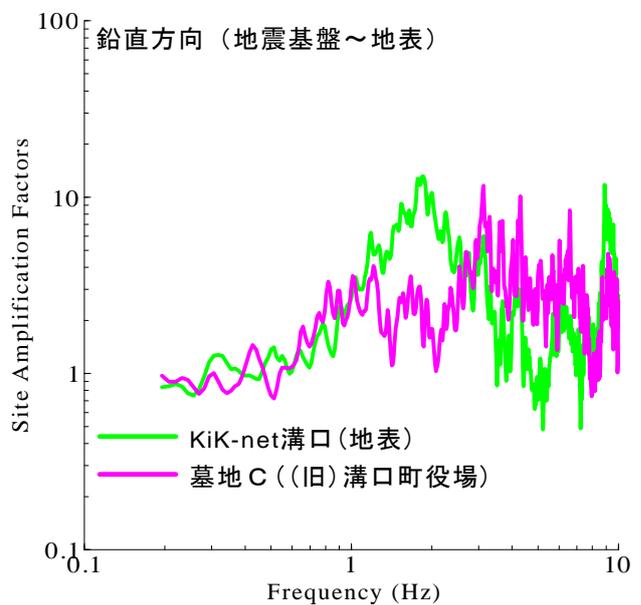


図-12 (旧)溝口町でのサイト増幅特性の比較(鉛直方向)

であり、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²⁴⁾を採用した。計測機器の詳細については文献^{24),25)}を参照されたい。計測方向は水平2成分と鉛直成分の計3成分であり、H/Vスペクトルの計算では、水平2成分の平均をとった。常時微動H/Vスペクトルの計算処理方法²⁶⁾としては、まず、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、163.84秒の区間(雑振動が比較的小さい163.84秒間)を10区間抽出し、フーリエ振幅スペクトルの計算を行い、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、10区間の平均をとった。評価振動数の範囲としては、使用した微動計測器の性能^{24),25)}などを考慮して0.2~10Hzとした。

図-8に示すように、(旧)溝口町役場震度計と墓地Cに

おける常時微動H/Vスペクトルの特徴(ピーク周波数やスペクトル形状など)が非常に類似しているのが読み取れる。したがって、両地点における震源特性・伝播経路特性はほぼ共通であること、および震源断層から両地点までの距離もほぼ同等である(図-2および図-6参照)ことも考慮すれば、(旧)溝口町役場の震度計で得られた記録相当の地震動が本震時に墓地Cに作用したものと推察される。

3. サイト増幅特性の評価

図-9および図-10は、水平方向および鉛直方向のサイト増幅特性(ともに地震基盤~地表)を、墓地A、墓地B、

KiK-net日野について比較したものである。一方で、図-11および図-12は、水平方向および鉛直方向のサイト増幅特性(ともに地震基盤～地表)を、墓地CとKiK-net溝口について比較したものである。ここに、墓地Aおよび墓地Cのサイト増幅特性は、波形データの収録が可能となった2011年以降に自治体震度観測点(日野町役場震度計もしくは(旧)溝口町役場震度計)で得られた記録²⁰⁾に基づいて評価した。

それに対し、墓地Bのサイト増幅特性は、現地において臨時の地震観測を実施し(2012年11月～2013年6月)、得られた記録に基づいて評価²¹⁾²⁷⁾した。墓地Bに設置した地震計としてはボアホール型広帯域加速度計を採用した。地震観測システムの詳細については、文献28)を参照されたい。観測条件として、サンプリング周波数は100Hz、観測方向は3成分(N-S方向、E-W方向、U-D方向)とし、トリガー加速度レベルは設定せずに常時観測を継続するシステムを採用した。

以下に、サイト増幅特性の具体的な算定方法について述べる。対象墓地(日野町役場震度計(墓地A)、臨時地震観測点(墓地B)、(旧)溝口町役場震度計(墓地C))と基準観測点(KiK-net日野(墓地Aおよび墓地Bに対応)もしくはKiK-net溝口(墓地Cに対応))で同時に観測された記録(ともに地表での記録)を対象に、2地点間の距離の違いによる補正²⁹⁾³⁰⁾を考慮したフーリエスペクトルの比率を計算し、この比率を基準観測点における既存のサイト増幅特性³¹⁾に掛け合わせることによって、水平方向のサイト増幅特性(図-9および図-11参照)を評価した。その際、距離の違いによる補正としては、幾何減衰に関する補正と非弾性減衰²⁹⁾に関する補正を行い、非弾性減衰を表すQ値は、Petukhinほか³⁰⁾によるQ値を適用した。

一方で、鉛直方向のサイト増幅特性(図-10および図-12参照)は、中小地震観測記録による水平方向と鉛直方向のフーリエスペクトルの比率(鉛直方向/水平方向)を対象観測点・対象墓地ごとに各々計算し、この比率(観測された中小地震の数に応じて平均化)を水平方向のサイト増幅特性(図-9および図-11参照)にそれぞれ掛け合わせるによって評価³²⁾した。

図-9および図-10に示すように、水平方向ならびに鉛直方向ともに墓地Aと墓地Bではサイト増幅特性に有意な差異が生じており、特に水平方向においては、3Hz以上の周波数帯域で墓地Aのサイト増幅特性が墓地Bのサイト増幅特性を連続的に上回っている。一方で、図-11および図-12に示すように、水平方向ならびに鉛直方向ともに、KiK-net溝口では2Hz付近に明瞭なピーク周波数を有しているのに対し、墓地Cのピーク周波数は4Hz付近にあり、両地点におけるサイト増幅特性の差異が顕著に表れている。

4. 強震動の評価

2000年鳥取県西部地震の特性化震源モデル¹⁷⁾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¹⁸⁾の組み合わせにより、墓地A、墓地B、墓地Cに作用した強震動を評価した。図-13にアスペリティの分布、表-1にモデルパラメータの一覧をそれぞれ示す。この特性化震源モデルは、KiK-net日野を含む震源域内におけるK-NET/KiK-netで得られた観測地震動を一定の精度で評価可能なモデル¹⁷⁾である。すなわち、1.で述べた観測地震動と推定地震動による比較により適用性が既に確認されている地震動推定手法に対して、本稿では、墓石の転倒実績を利活用することで、地震動推定手法の適用性を更に高めるための検討を行った。

強震動評価手法では、まず、式(1)により統計的グリーン関数を生成した。

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

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、 $S(f)$ は中小地震の震源特性²⁹⁾、 $P(f)$ は伝播経路特性²⁹⁾、 $G(f)$ はサイト増幅特性(図-9～図-12参照)、 $O(f)$ は対象墓地での中小地震観測記録(本震震源近傍で発生した中小地震(2013/05/27 01:49 Mj2.5 10km (図-1参照)、以後、サイト位相地震と呼ぶ)による観測地震動)のフーリエ変

表-1 断層モデルパラメータ¹⁷⁾の一覧

断層パラメータ	Asperity 1	Asperity 2
走向 (deg.)	N150° E	N150° E
傾斜 (deg.)	90	90
長さ (km)	6.0	8.0
幅 (km)	3.0	4.0
地震モーメント(Nm)	2.0×10^{18}	1.6×10^{18}
ライズタイム (s)	0.29	0.38
相対破壊開始時刻 (s)	0	1.1
破壊開始点深さ (km)	8.0	4.0
分割数	8×8×8	8×8×8
破壊伝播速度 (km/s)	2.6	2.6

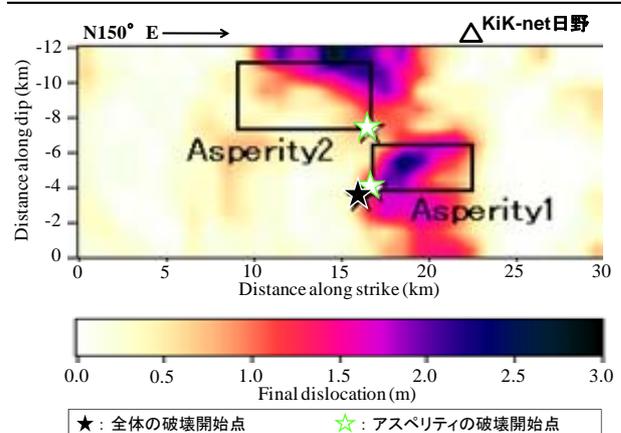


図-13 2000年鳥取県西部地震の震源モデル(文献17)に加筆

換, $|O(f)_p$ 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。

サイト位相地震は、日野町震度計(墓地A)および(旧)溝口町震度計(墓地C)では観測されておらず、墓地Bの臨時観測点でのみ得られているため、墓地Bでの観測記録を墓地Aおよび墓地Cにもそれぞれ転用した。なお、サイト増幅特性とサイト位相特性の間には、一定の相関性があることが報告³³⁾されていることから、両地点間でのサイト増幅特性の差異が大きい場合、サイト位相特性の差異も大きくなることも予想される。後述する墓地Aおよび墓地Cにおける推定地震動の波形形状(上記の転用の可能性)については、今後の検討課題としたい。

式(1)からわかるように、採用手法では、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、一方で、統計的グリーン関数のフーリエ位相としては、対象墓地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³⁴⁾を行うことで、本震波形が得られる。なお、Parzen Window(添字 p)は因果性を満足する地震波の生成目的で用いられている¹⁸⁾。

すなわち、本稿で採用した手法において、対象墓地における推定地震動の水平2成分(N-SおよびE-W成分)は、フーリエ振幅は共通であり、フーリエ位相のみが異なっていることになる。しかしながら、内陸地殻内地震の震源近傍では、ラディエーションやディレクティビティの影響を少なからず受けることになるため、フーリエ振幅の評価には検討の余地が残されていることに留意されたい。また、墓地A、墓地B、墓地C近傍における工学的基盤以浅の表層地盤の層厚がともに比較的小さいことを勘案して(図-1、図-2、図-4参照)、本稿では、本震時における地盤非線形の影響を考慮していないが、今後議論の余地があるであろう。

図-14、図-15、図-16は、墓地A、墓地B、墓地Cにおける推定地震動の加速度時刻歴である。墓地Aと墓地Bでは推定地震動の波形形状が比較的類似しているものの、墓石の転倒率が高い墓地Aのほうが加速度振幅値が大きい値を示している(図-14および図-15参照)。一方で、墓地Aおよび墓地Bは震源南側にあり断層の破壊進展の方向に位置しているのに対して、墓地Cは震源北側にあり破壊進展方向に概ね直交する方向に位置していることから(表-1、図-2、図-13参照)、サイト位相特性が対象墓地において共通と仮定しているにも関わらず、墓地Cでは、墓地Aおよび墓地Bと比較して、推定地震動の継続時間が長く、波形形状も異なっている(図-16参照)。

図-17は、墓地A、墓地B、墓地Cにおける推定地震動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%)である。図-17に示すとおり、墓地Aと墓地Bでは0.15sおよび0.6s付近において

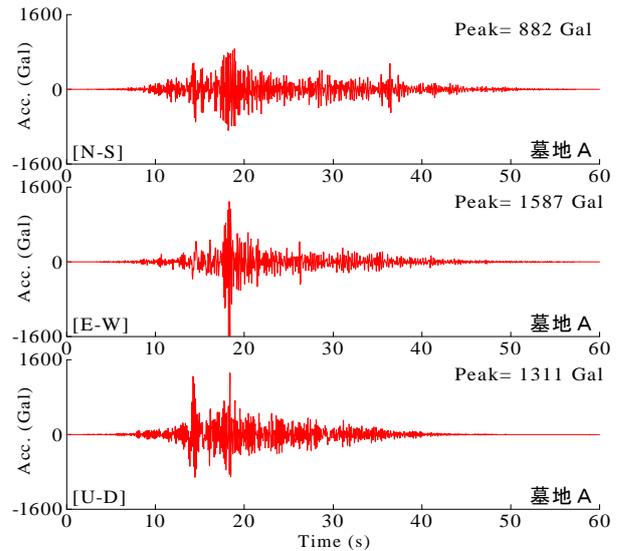


図-14 墓地Aでの推定地震動の加速度時刻歴

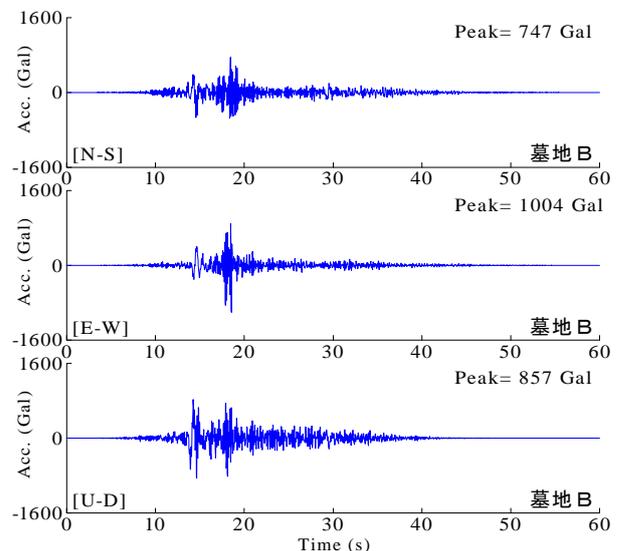


図-15 墓地Bでの推定地震動の加速度時刻歴

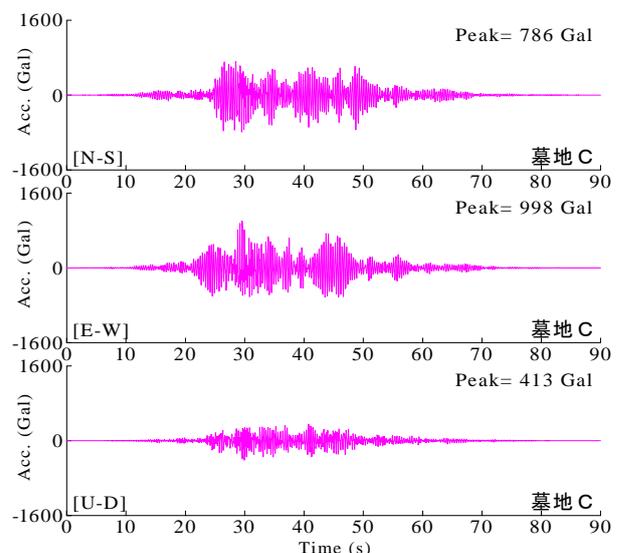


図-16 墓地Cでの推定地震動の加速度時刻歴

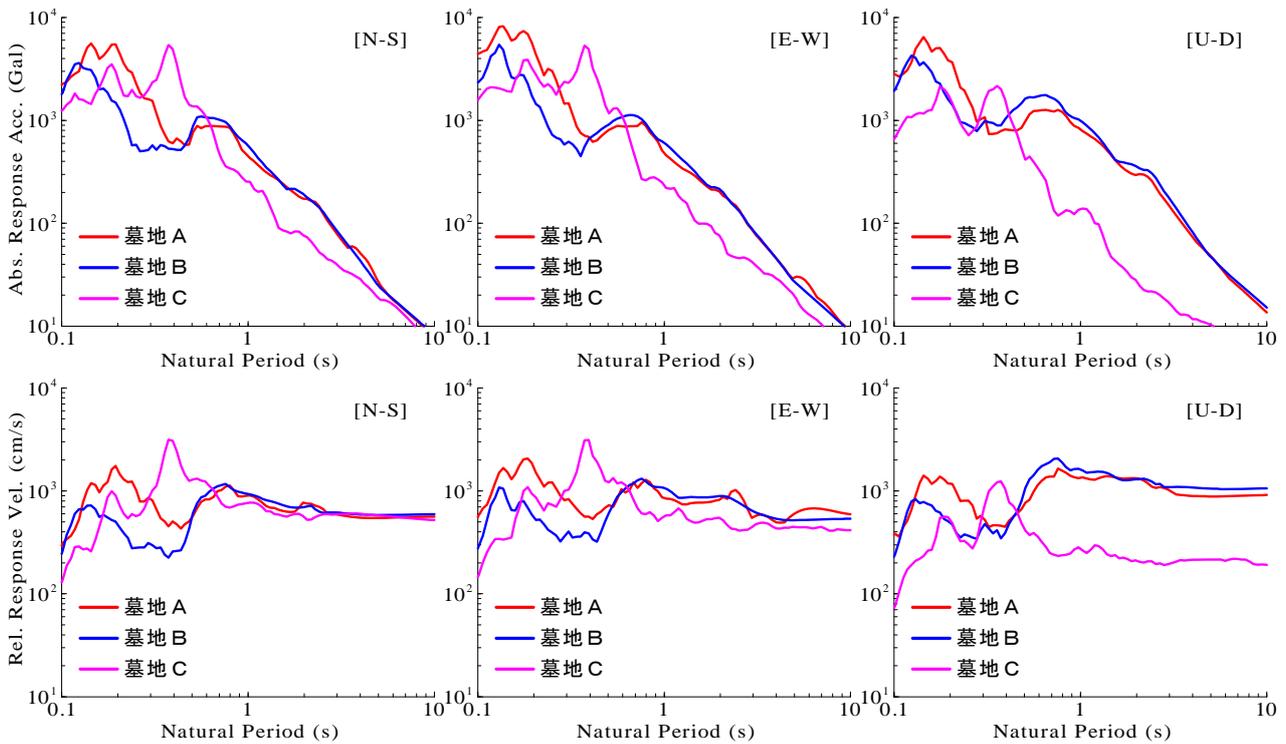


図-17 墓地A, 墓地B, 墓地Cでの推定地震動による絶対加速度応答スペクトルおよび相対速度応答スペクトル

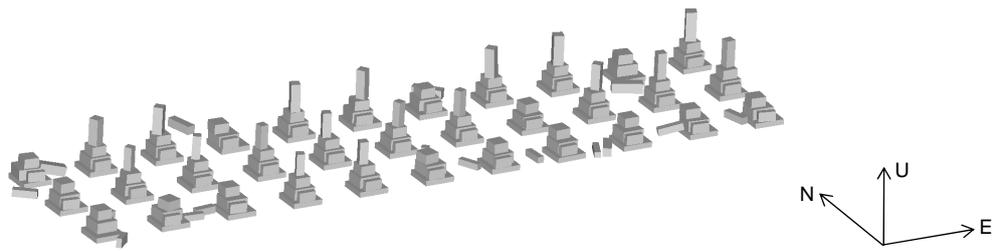


図-18 墓地Aでの推定地震動による墓石の転倒解析結果



図-19 墓地Bでの推定地震動による墓石の転倒解析結果

スペクトルが卓越しているのに対し、墓地Cでは0.4s付近(0.15sと0.6sのほぼ中間となる周期帯)においてスペクトルが卓越しており、日野町の墓地と(旧)溝口町の墓地では、卓越周期帯が大きく異なる地震動がそれぞれ墓地に作用した可能性が示唆される。

5. 墓石の転倒解析

2.で述べたとおり、墓地A, 墓地B, 墓地Cでは、墓石の転倒率に大きな違いがあったことが報告¹²⁾されている。一方で、3.および4.で述べたとおり、本震時において墓地A, 墓地B, 墓地Cに作用した地震動の特性が大

表-2 墓石のDEM解析モデルパラメータの一覧

物性値パラメータ	墓石 (花崗岩)	台座 (コンクリート)
単位体積重量 (tf/m ³)	2.7	2.3
ヤング率 (kPa)	4.0×10 ⁷	2.0×10 ⁷
ポアソン比 (-)	0.25	0.20

きく異なっていた可能性が高い。そこで本稿では、既存の特性化震源モデルに基づく地震動評価手法の適用性を更に高めるために、墓地A, 墓地B, 墓地Cにおける推定地震動(図-14, 図-15, 図-16参照)の3成分(N-S, E-W, U-D)を入力波とした3次元DEMに基づく墓石の転倒解析¹⁶⁾を実施した。

図-18, 図-19, 図-20は、墓地A, 墓地B, 墓地Cにお

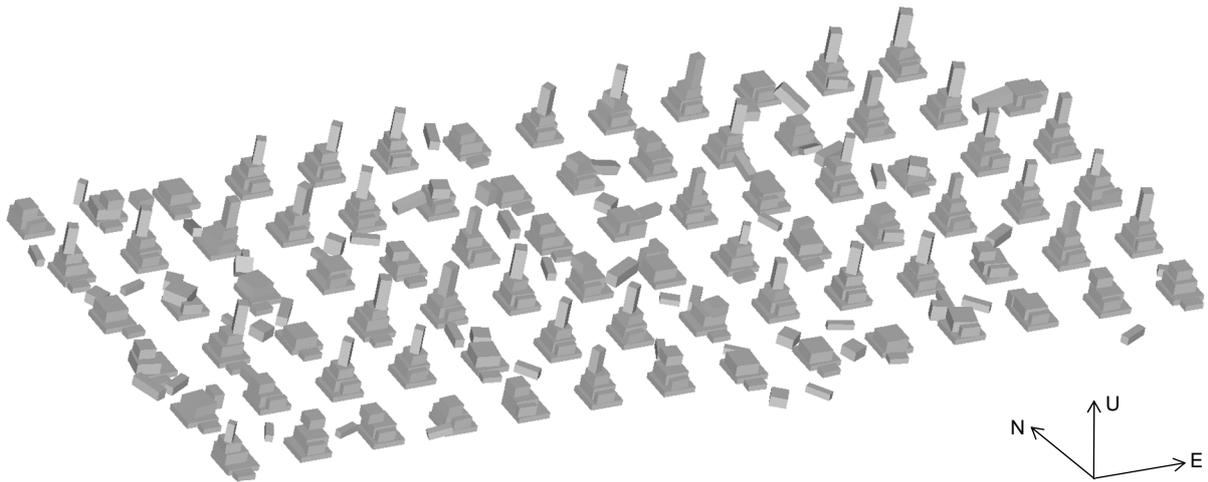


図-20 墓地Cでの推定地震動による墓石の転倒解析結果

ける墓石を直方体要素でモデル化したDEM解析モデルである。墓地Aにおける棹石の寸法(図-18参照)は、調査資料³⁹⁾から35体の棹石の形状を読み取り、寸法の総和が最小のものと最大のもの(計2体)を除いた33体のモデルを作成した。また、墓地B(図-19参照)については、現地での測量結果に基づき6体の棹石の寸法を再現した。さらに、墓地C(計83体：図-20参照)については、調査資料³⁹⁾に基づき70体(35体×2)の棹石の形状を読み取った後、寸法の総和が平均的なものから残りの13体を抽出した。ここに、墓地Aおよび墓地Cについては、現地踏査の結果、本震発生からの年月の経過とともに、墓石の数や寸法に変化が生じている可能性が高いため、現地での測量の実施を見送った。

単位体積質量、ヤング率、ポアソン比は、表-2に示すように、花崗岩(墓石)とコンクリート(台座：固定要素)の一般的な値³⁰⁾を用いた。墓地A、墓地B、墓地Cは、いずれも各石を積み上げただけの無補強和型墓石であるため、墓石間の引張強度と粘着力はゼロとした。摩擦力の上限値を与える動摩擦係数は、既往の実験値³⁷⁾を参考に0.438とし、墓石～台座間についても墓石～墓石間と同じ値を用いた。計算時間間隔は、差分近似する際の解の収束性および安定性などを考慮して 1.0×10^{-5} sを採用³⁸⁾した。

図-18、図-19、図-20には、墓地A、墓地B、墓地Cにおける墓石の転倒解析の結果についても同時に示しており、2.で述べた転倒実績(墓地A：45%、墓地B：0%、墓地C：60%)に対して、図-18に示すように、墓地Aでは33墓石中15体が転倒し、転倒率は $15/33=0.4545$ で実被害を再現できている。さらに、図-19に示すように、墓地Bでは6つの墓石すべてが転倒せず、転倒率は $0/6=0.0$ と実被害に一致する結果となった。一方で、図-20に示すように、墓地Cにおける墓石の転倒率は、 $43/83=0.5181$

となり、実績値を若干過小に評価しているものの、一定の精度で再現できている。すなわち、これらの再現性は、対象地点周辺に位置する墓石の転倒実績が、地震動評価手法の適用性確認に活用できる可能性を示唆するものである。

ここに、墓地Aおよび墓地Bでの転倒率の再現性が非常に高いにも関わらず、墓地Cでの転倒率の再現性が若干低下している理由について以下考察する。墓地Aおよび墓地Bでの推定地震動は、短周期成分が卓越する明瞭なピークを有する波形であるため(図-14、図-15、図-17参照)、転倒のタイミングはほぼ同時であり、ロッキングを伴い一斉に転倒することを確認している。一方で、墓地Cの推定地震動は、墓地Aおよび墓地Bに比べて卓越周期が長く(図-17参照)、さらに継続時間の長い波形形状となっているため(図-16参照)、墓石によって転倒のタイミングに時間差が生じていることを確認している。具体的には、墓地Aおよび墓地Bと同様にロッキングを伴い転倒するケースだけでなく、継続時間の長い地震動の影響で棹石が上台(棹石直下の墓石)の端部までロッキングしながら移動することで上台の端部から落下するケースも確認できている。すなわち、墓地Aおよび墓地Bでは、推定地震動の作用により比較的単純な墓石の転倒を示すのに対し、墓地Cにおける推定地震動を作用させた際には墓石の転倒挙動が複雑になるため、墓地Cでは転倒率の再現性が若干低下しているものと推察される。

6. まとめ

本研究では、鳥取県日野郡日野町および(旧)溝口町における3つの墓地を対象に、現地で得られた地震観測記録などに基づき、2000年鳥取県西部地震において当該墓

地に作用した地震動を推定した。そして、推定地震動を入力波とした墓石の転倒解析を実施し、転倒実績値との比較検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 日野町および(旧)溝口町における3つの対象墓地に作用した2000年鳥取県西部地震による推定地震動の特徴(加速度振幅値、地震動継続時間、地震応答卓越周期帯など)は、墓地毎に大きく異なっている。
- (2) 推定地震動を入力波とした墓石の転倒解析に基づく転倒率は、実績値と比較的良好一致を示す。
- (3) 上記(2)の知見によれば、観測地震動と推定地震動の比較に基づいて適用性が既に確認されている地震動推定手法について、その適用性を更に高めるために、対象地点周辺における墓石の転倒実績を利活用できる可能性がある。

今後は、他の大規模地震に対しても同様の検討を行うことによって、地震動推定手法の適用性確認に関する知見をさらに深めていきたいと考えている。

謝辞：(独)防災科学技術研究所K-NETおよび地方自治体(鳥取県)による地震波形データを提供していただきました。日野郡日野町の住民の皆様には、地震観測の実施などにおいて多大なるご支援をいただきました。ここに記して深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本地震学会, 地盤工学会, 土木学会, 日本建築学会, 日本機械学会: 阪神・淡路大震災調査報告—共通編, 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会, 1998.
- 2) 日本地震工学会, 日本地震学会, 土木学会, 日本建築学会, 地盤工学会, 日本機械学会, 日本都市計画学会, 日本原子力学会: 東日本大震災合同調査報告—共通編, 東日本大震災合同調査報告書編集委員会, 2014.
- 3) 秦吉弥, 一井康二, 野津厚, 丸山喜久, 酒井久和: 地盤構造物の性能評価のための余震観測の重要性—2011年東北地方太平洋沖地震における最遠方液化地点での地震動の推定—, 防災・減災のための地盤構造物の設計・施工法に関するシンポジウム論文集, 地盤工学会, pp.149-154, 2012.
- 4) 野津厚, 一井康二: 性能設計の発展型としてのEvidence-Based Designの提案とその実現に向けた課題, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, 日本地震工学会, pp.3073-3080, 2010.
- 5) 秦吉弥, 中村晋, 野津厚: 本震観測記録を利用した地震動推定手法の精度とその向上策—2008年岩手・宮城内陸地震における震源域を対象として—, 土木学会論文集A1, Vol.69, No.2, pp.186-205, 2013.
- 6) 野津厚: 地震動研究とのコラボレーションが地盤耐震工学の一層の発展をもたらす, 地盤工学会誌, Vol.62, No.2, pp.22-23, 2014.
- 7) 後藤浩之, 澤田純男: 地震動予測の現状と課題, 地盤工学会誌, Vol.60, No.3, pp.10-11, 2012.
- 8) 片岡正次郎, 畑明仁, 秦吉弥, 森伸一郎: 被災・無被災地点での地震動の事後評価: 東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会中間報告書, 土木学会地震工学委員会, 2014.
- 9) 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集—大規模地震に備えた地すべり技術の展望—, pp.22-25, 2014.
- 10) Goto, H., Hata, Y., Kuwata, Y., Yamamoto, H., Morikawa, H. and Kataoka, S.: Earthquake source and ground motion characteristics in Eastern Japan during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Journal of JSCE, Special Topic —2011 Great East Japan Earthquake, Division A: Structural Engineering / Earthquake Engineering & Applied Mechanics*, Vol.1, No.1, pp.329-342, 2013.
- 11) 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.
- 12) 小玉芳敬, 矢野孝雄, 岡田昭明, 松山和也, 三村清, 中村宗和, 大塚譲, 外谷洋, 下田順子, 片岡亮太郎, 中本麻美, 山本智子, 胡斯勒因: 2000年鳥取県西部地震による墓石の転倒・回転に関する調査速報, 鳥取大学教育地域科学部紀要, Vol.2, No.2, pp.113-132, 2001.
- 13) 内藤信明, 丹尾貴志, 高濱信行, 新潟大学調査団墓石被害調査チーム: 中越地震の異常振動帯—墓石被害調査—, 新潟県連続災害の検証と復興への視点—2004.7.13水害と中越地震の総合的検証—, 新潟大学, pp.64-71, 2005.
- 14) 山田真澄, 林康裕, 森井雄史, 朴舜千, 大西良広, 清水秀丸: 2007年新潟県中越沖地震における社寺被災度とPGV推定, 日本建築学会技術報告集, Vol.14, No.27 pp.351-356, 2008.
- 15) 石渡明, 小栗尚樹, 原田佳和: 岩手・宮城内陸地震(2008)の墓石転倒率分布とその地質学的考察, 東北アジア研究, 東北大学東北アジア研究センター, Vol.13, pp.1-16, 2009.
- 16) 古川愛子, 三輪滋, 清野純史, 大塚久哲: 基礎の剛性と接着剤の塗布面積が墓石の地震時挙動に及ぼす影響の解析的検討, 応用力学論文集, 土木学会, Vol.12, pp.469-480, 2009.
- 17) 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.133-195, 2011.
- 18) 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.
- 19) Aoi, S., Kunugi, T. and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Jour. Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
- 20) 秦吉弥, 駒井尚子, 野口竜也, 香川敬生, 古川愛子: 2000年鳥取県西部地震における自治体震度観測点での強震波形の評価とその応用, 日本地震工学会第10回年次大会梗概集, pp.345-346, 2013.
- 21) 秦吉弥, 野口竜也, 古川愛子, 香川敬生: 大規模地震を対象とした強震動評価におけるサイト増幅特性

- の評価の重要性, 地盤工学会誌, Vol.61, No.1, pp.12-15, 2014.
- 22) 日本建築学会中国支部基礎地盤委員会, 鳥取県建築士会: 山陰臨海平野地盤図, 中国地方基礎地盤研究会編, 1995.
- 23) 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.
- 24) 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, 日本地球惑星科学連合連合大会 2006 年大会予稿集, Paper No.S111-P002, 2006.
- 25) 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, 地盤工学会, Vol.31, No.1, pp.125-131, 2013.
- 26) 湊文博, 秦吉弥, 山田雅行, 常田賢一, 魚谷真基: 超高密度常時微動計測に基づく和歌山県串本町における津波来襲地域での地盤震動特性の評価, 第 34 回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, 2014. [in this issue]
- 27) (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.
- 28) 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.
- 29) 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.
- 30) Petukhin, A., Irikura, K., Ohmi, S. and Kagawa, T.: Estimation of Q -values in the 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.
- 31) 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.
- 32) 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.
- 33) 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.
- 34) 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.
- 35) 林康裕, 北原昭男, 平山貴之, 鈴木祥之: 2000 年鳥取県西部地震の地震動強さの評価, 日本建築学会構造系論文集, No.548, pp.35-41, 2001.
- 36) 例えば, 岡田清, 小柳洽, 明石外世樹: 土木材料学, 国民科学社(オーム社), 316p., 1998.
- 37) (一社)日本石材産業協会: 地震に強いお墓の報告書, 2006.
- 38) Cundall, P. A.: Rational design of tunnel supports -A computer model for rock mass behavior using interactive graphics for the input and output of geometrical data-, *Technical Report MRD-2-74, Missouri River Division, U.S. Army Corps of Engineers*, 1974.

PRELIMINARY STUDY ON VERIFICATION
OF STRONG MOTION ESTIMATION METHOD
BASED ON OVERTURNING RATIO OF TOMB STONES
— APPLICATION FOR GRAVEYARDS IN THE HYPOCENTRAL REGION
OF THE 2000 WESTERN TOTTORI EARTHQUAKE —

Yoshiya HATA, Aiko FURUKAWA, Tatsuya NOGUCHI and Takao KAGAWA

Verification of strong motion at damage or non-damage site of interest due to a large-scale earthquake is frequently carried out based on comparison of observed and estimated waveforms. However, the strong motion estimation is sensitive because of different site factors between the site of interest and its circumference observation stations. Therefore, we proposed practical use of 3-D DEM calculation of tombstone nearby the sites of interest, in order to confirm the applicability of the estimation method for the strong motion. In this study, overturning analyses of tombstones in the graveyards in hypocentral region for the 2000 Western Tottori Earthquake were performed based on the estimated three component ground motions considering site effects. The calculated overturning rates agree well with the actual data observed after the main shock.