1943 年鳥取地震の学校被害地点における 微動探査を用いた地盤構造推定と地震動評価

吉田 昌平¹・野口 竜也²・香川 敬生³

¹ 学生会員 鳥取大学大学院工学研究科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南四丁目 101 番地)

E-mail:aicnq.n.0905@gmail.com

² 正会員 工博 鳥取大学大学院工学研究科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南四丁目 101 番地)

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

³ 正会員 理博 鳥取大学大学院工学研究科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南四丁目 101 番地)

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

1943 年 9 月 10 日, 鳥取県東部を震源として鳥取地震(M7.2)が発生した. 現存する地震関連資料から, 鳥取市街地またはその周辺に存在した学校建物は場所により被害程度に差が出たことがわかっている. 本研究では, 学校建物被害が異なる原因を究明することを目的として, 地盤構造モデルの構築及び地震動評価を実施した. 学校被害サイトを対象に常時微動観測を実施し, 3 成分単点観測に基づく H/V スペクトルとアレイ観測に基づく位相速度分散曲線を用いて地盤構造モデルを構築した. 推定した構造モデルを用いて統計的グリーン関数法による地震動評価を実施することで, 各サイトの地震動特性の違いを評価した. その結果, 甚大な被害が生じたサイトでは建物固有周期帯域(0.2-0.4sec)及び中間周期帯域(1.0-2.0sec)の両方で応答値が大きくなる傾向が見られた.

Key Words: *The 1943 Tottori Earthquake, damage of school, microtremor, velocity structure, strong motion estimatione*

1. はじめに

鳥取県東部に位置する鳥取市街地は鳥取平野に形成されており, 山陰地方の中核的な役割を果たしている. 鳥取市の被害地震として 1943 年 9 月 10 日に発生した鳥取地震(M7.2)が挙げられる. この地震の影響で鳥取市を中心に死者 1210 人, 倒壊家屋 7164 棟¹⁾の甚大な被害が生じたが, 当時の被害状況を記す現存資料が少ないことが原因で, 現在も詳細な被害分布の把握には至っていない. しかし, 鳥取市街地及びその周辺の学校建物被害に関しては写真や各学校沿革史, 現地調査²⁾等の関連資料が残されており, その情報を基に数校の学校建物被害を把握できた. その結果, 学校建物は場所により被害程度が異なっており, 被害無しから倒壊まで様々な様態であることがわかった. 鳥取市街地では学校間隔が近距離でも被害程度が異なることから, サイト増幅特性が影響した可能性が考えられる. 鳥取平野ではこれまでに微動探査や重力探査を用いた地盤構造の推定³⁻⁵⁾がなされているが, 当時の学校被害地点を対象とした観測データは少ない. 当時学校が存在した場所は現在も学校が存在しているケ

ースが多く, 学校被害地点の地盤構造モデルの把握は地震防災の観点から非常に重要な情報になる. 本研究では, 詳細な地盤構造の把握と被害の原因を検討することを目的として, 当時の位置及び建物被害分布が把握できた学校を対象とした常時微動探査による地盤構造モデルの推定と統計的グリーン関数法を用いた地震動評価を実施した.

2. 対象サイトの概要

本研究では, 現存資料²⁾を参考に当時の学校建物位置および被害状況を把握できた学校 8 校を対象とした. 各学校名称, 建築年数及び被害程度を表-1, 各学校の位置関係を図-1, KYM を除く敷地内の建物被害分布を図-2 にそれぞれ示す. KYM は建物の被害分布を記す資料を確認できなかったが, 数枚の写真⁶⁾から建物の傾斜及び瓦の落下など軽微な被害であることが把握できた. 本研究では今後の比較を容易にするために, 図-2 を基に各学校の被害程度に応じて 3 つのレベルに分類した. (1)被害

図-1 対象サイトと被害状況 (震源メカニズムと推定地震断層層(赤線)は Kanamori⁷⁾の推定値を使用)

表-1 学校名称と建築年数

各学校名称	建築年数(年)	被害状況
大正国民学校(TIS)	6	大
美保国民学校(MIH)	10	大
湖山国民学校(KYM)	13	小
米里国民学校(YNS)	31	大
久松国民学校(KSH)	54	小
遷喬国民学校(SNK)	10	無
修立国民学校(SRT)	29	大
鳥取工業高等学校(ENG)	3	大

無 (No damage) : 無被害, (2)被害小 (Slight damage) : 建物の傾斜や柱の一部折損など被害が軽微であるもの, (3)被害大 (Large damage) : 建物の倒壊が著しいもの. SNKは地震による被害が無く被害無, KYM及びKSHは被害小, TIS, MIS, YNS, SRT 及び ENG は被害大に各々区分した. 当時の学校建物は全て木造校舎であり, 建築年数の違いに起因する老朽化による耐震性の低下や耐震基準の違いも被害程度に差が生じた原因の一つに挙げられる. しかしながら, 表-1 の TIS や ENG のように比較的建物が新しい場合でも深刻な被害が生じていること, また学校被害が深刻な場所では周辺一般家屋の倒壊率も高く, 学校被害が軽微な場所では周辺一般家屋の倒壊率も低いことが報告されている¹⁾. これらの状況から, サイトにより地震動の大きさや地盤震動特性が異なったことが原因で被害差が生じた可能性がある.

図-2 各学校被害分布

3. 常時微動観測の概要

地盤構造の把握を目的とした既往の研究³⁻⁵⁾で対象とされていない, TIS, MIH 及び KYM の学校敷地内およびその周辺で微動3成分単点観測と微動アレイ観測を実施した. 3成分単点観測には白山工業(株)製の加速度微動計JU-210を使用した. 観測ではサンプリング周波数を100Hz, 増幅倍率を10倍に設定し, 観測時間は1地点10-15分程度とした. アレイ観測には単点観測と同じJU-210を4台用いてGPSクロックで同期させ, 円の中心に1台, 円周上に正三角形になるように3台を配置して観測を行った.

図-3 H/V スペクトルの例

図-4 位相速度分散曲線の例

サンプリング周波数, 増幅倍率は単点観測と同じで, 観測時間は10-15分程度とした. アレイ半径は各サイト 60cm, 5m, 10m, 30m とした.

4. 地盤構造のモデル化

地盤構造の推定には位相速度分散曲線と H/V スペクトルの観測値と理論値を一致させるフォワード解析を用いた. 観測 H/V スペクトルは次式により算定した.

$$\frac{H}{V}(\omega) = \frac{\sqrt{S_{EW}(\omega) \times S_{NS}(\omega)}}{S_{UD}(\omega)} \quad (1)$$

図-5 観測および推定地盤構造による位相速度分散曲線の比較

ここに $H/V(\omega)$ は H/V スペクトル, ω は角振動数, S_{EW} , S_{NS} , S_{UD} は NS 成分, EW 成分及び鉛直成分の平均フーリエスペクトルである. 平均フーリエスペクトルを求める際の平滑化には係数 20 の Log ウィンドウ⁸⁾を用いた. 図-3 に推定した H/V スペクトルの一例を示す. 一般的に H/V スペクトルのピークはインピーダンス比の大きい層境界を反映しており, 短周期のピークは浅い層境界, 長周期のピークほど深い境界層に由来することが知られている. 本研究で得られた H/V スペクトルは全て 1 秒よりも短周期側に明瞭なピークを 1 つ有しており, 浅い層境界面に対応していると考えられる. 微動アレイ上下動観測記録に CCA 法⁹⁾を適用することで Rayleigh 波の位相速度分散曲線を推定した. 得られた分散曲線の例を図-4 に示す. 各サイトともそれぞれのアレイ半径による分散曲線に連続性が見られ, 浅部地盤構造を推定するために十分な情報を得ることができた. KYM は 5Hz 付近で高次モードの影響により複雑な形状を呈しているが, 後述する解析には基本モードを仮定しているため, この影響を取り除いた. 本研究では最下層の S 波速度を 700m/s とし 3-4 層の地盤構造モデルを仮定した. 1 層目は位相速度分散曲線の最小位相速度に設定し, 下位の 2 層目はボーリングデータ¹⁰⁾及び TTR002(K-NET)の PS 検層から $V_s=200-250$ m/s とした. ただし表層厚が薄いことが予想されるサイトでは 2 層目を考慮に入れていない. さらに下位の 3-4

図-6 観測および推定地盤構造による H/V スペクトルの比較

層目は、既往の研究³⁻⁵⁾を参考に $V_s=500\text{m/s}$ と $V_s=700\text{m/s}$ とした。34 層目の S 波速度については、対象地域に PS 検層等の S 波速度を説明できる資料が存在しないが、既往の研究³⁻⁵⁾では $V_s=500\text{m/s}$, 700m/s に設定して、同地域の観測 H/V スペクトル及び位相速度分散曲線に整合するモデルが作成されている。層厚及び密度は既往の研究⁴⁵⁾及びボーリングデータ¹⁰⁾を参考とし、P 波速度は以下の回帰式¹¹⁾を用いて推定した。

$$V_p(\text{m/s}) = 1.11 \times V_s(\text{m/s}) + 1290 \quad (2)$$

これらに基づき作成したモデルを速度構造の初期モデルとして、Rayleigh 波基本モードで得られる理論位相速度分散曲線及び理論 H/V スペクトルが観測値と一致するように層厚を調整することで S 波速度構造モデルを決定した。既往の研究で得られた結果も同様の手順で再解析した。位相速度分散曲線の観測値と理論値の比較を図-5、Rayleigh 波基本モードで得られた H/V スペクトルの理論値と観測値の比較を図-6、推定した S 波速度構造モデルを図-7、被害区分毎の浅部構造モデルの上端深さ分布を図-8に示す。図-5の位相速度分散曲線の観測値と理論値は概ね一致する結果となった。また、図-6の H/V スペクトルの観測値と理論値はピーク及びトラフ周期で概ね対応する結果となった。YNS のみ位相速度分散曲線及び H/V スペクトルの観測値を同時に整合させる理論値が得られず、位相速度分散曲線のフィッティングを優先して行った。この原因に関しては改めて究明が必要である。

地盤構造モデルに関しては以下の通りで、 $V_s=500\text{m/s}$

図-7 推定地盤構造モデル

図-8 浅部構造モデルの上端深さ分布と被害程度

以浅の浅部地盤構造に着目すると、図-8 より TIS, MIH および SNK では S 波速度の低速度層の層厚が 30m 程度であることがわかった。これは各サイトが河川周辺に位置しており、河川堆積物により低速度層が厚く堆積していると考えられる。それに対して YNS では表層厚が 7m と最も薄い、これは YNS が山地付近に位置しているため基盤が浅いと考えられる。内陸部に位置する KSH, SRT, ENG, KYM は表層厚が 20m 程度であった。付近のボーリング¹⁰⁾より、各層の地質は、S 波速度 100-150m/s が KYM

図-9 特性化震源モデル

表-2 特性化震源モデルの断層パラメーター

巨視的断層パラメーター		
断層長さ(km)	33	
断層幅(km)	13	
上端深さ(km)	2	
地震モーメント(Nm)	1.02×10^{19}	
走向(deg.)	80	
傾斜(deg.)	90	
S波速度(km/s)	3.5	
密度(t/m ³)	2.8	
破壊伝播速度(km/s)	2.52	
アスペリティ領域	Asp.1	Asp.2
地震モーメント(Nm)	2.9×10^{18}	1.0×10^{18}
面積(km ²)	54.67	27.33
応力降下量(Mpa)	14.6	14.6
背景領域		
地震モーメント(Nm)	6.3×10^{18}	
面積(km ²)	347	
応力降下量(Mpa)	2.75	

で砂, その他のサイトで粘土, S波速度 200-250m/s の層が SRT 及び SNK で粘土, その他のサイトは砂もしくは砂礫と対応することがわかった. 被害区分毎の比較では, 図-8に示すように被害程度と浅部地盤構造に明確な特徴の違いは見られず, サイト増幅特性だけでなく伝播経路特性及び震源特性も考慮して検討する必要がある.

5. 強震動予測

(1) 深部地盤構造モデルの設定

地震動は表層から地震基盤($V_s=3.0$ km/s 程度)までの地盤構造の影響を受けることから, 強震動予測には地震基盤

表-3 小地震のパラメーター

震源深さ(km)	9.1
Mw	4.5
地震モーメント(Nm)	5.50×10^{15}
応力降下量(Mpa)	8.0
走向(deg.)	197
傾斜(deg.)	90

図-10 地震動の比較(HYGH13)

図-11 加速度応答スペクトルの比較(HYGH13)

まで地盤構造をモデル化する必要がある. 本研究では石田・他¹²⁾による3次元深部地盤構造モデルを用いた. これは鳥取平野を対象にして深部地盤構造を $V_s=700$ m/s, 1500m/s, 2500m/s の3層を仮定してモデル化している. この3次元モデルから対象サイト直下の構造モデルを抜き取り1次元深部地盤構造モデルとした. 推定した浅部地盤構造モデルと深部地盤構造モデルは工学的基盤の境界を $V_s=700$ m/s としており, 前述の浅部地盤構造モデルに深部地盤構造モデルを付け足した形とした. H/V スペクトルに矛盾がないように Rayleigh 波基本モードを仮定した理論 H/V スペクトルと観測値を比較したが, 大きな差異は見られなかった.

(2) 特性化震源モデル

1943年鳥取地震は本震及び余震記録が少ないことから震源インバージョン等の科学的根拠に基づいた解析は十分には行われていない. 鳥取地震を想定した特性化震源モデルは鳥取県が作成したモデル¹³⁾のみである. Kanamori⁷⁾は地殻変動データと京都大学阿武山観測所で得られたNS及びEW成分の観測波形記録を説明できるように巨視的断層パラメーターを決定しており, 鳥取県はその情報を基に鳥取地震を想定した特性化震源モデルを作成してい

図-12 各サイトの推定加速度波形(水平最大方向)

る。しかし、一般的に用いられる強震動予測手法レシピ¹⁴⁾に従うと、鳥取県モデルでは地震モーメントが過大評価になることから、本研究では鳥取県のモデル¹³⁾に強震動予測手法レシピ¹⁴⁾に従った修正を加えた特性化震源モデルを用いた。図-9に特性化震源モデル、表-2に断層パラメータの一覧を示す。鳥取県¹³⁾は金田・岡田¹⁵⁾による地表地震断層の変位量分布から変位量の大きい位置にアスペリティを配置して計算した結果、1943年鳥取地震の震度分布¹⁶⁾との整合性を確認している。そのため、本検討でも鳥取県¹³⁾と同様の位置にアスペリティと破壊開始点を配置した。

(3) 強震動予測手法

1943年鳥取地震の震源域を震源とするような中小地震波形記録は得られておらず、本研究では統計的グリーン関数¹⁷⁾を中小地震波形とする統計的グリーン関数法¹⁸⁾を用いて強震動シミュレーションを実施した。まず次式により加速度フーリエスペクトル $S_A(f)$ を計算する。

$$S_A(f) = \frac{R_{\theta\phi} \cdot FS \cdot P_{rtitn}}{4\pi\rho\beta} \frac{Mo(2\pi f)^2}{1 + (f/f_c)^2} \frac{1}{\sqrt{(1 + f/f_{max})^m}} \quad (3)$$

ここに、 Mo は地震モーメント、 ρ と β は地震発生層の密度と S 波速度、 FS は地表面の影響を表す係数、 P_{rtitn} はエネルギー分配係数である。高周波遮断特性の f_{max} 及び m は鶴来・他¹⁹⁾、コーナー周波数 f_c の設定は Brune²⁰⁾ による式を用いた。ラディエーション係数 $R_{\theta\phi}$ は釜江・他¹⁸⁾の周波数依存性を香川²¹⁾によりモデル化されたものを適用し、遷移領域を 0.5Hz から 5Hz とした。次にフーリエスペクトル $S_A(f)$ に伝播経路特性を考慮に入れると次式が得られる。

$$R_A(f) = S_A(f) \frac{1}{r} \exp \frac{-\pi f r}{Q(f)\beta} \quad (4)$$

$$Q(f) = 57f^{0.95} \quad (5)$$

ここに r は震源距離、 $Q(f)$ は減衰係数であり、内陸地殻内地震に対する $Q(f)$ を評価した天池・他²²⁾による(5)式を用いた。経時特性は Jennings 型²³⁾のモデルを用いてフーリエ振幅スペクトルと経時特性の両方を満たすように収束計算した。このとき香川²¹⁾と同様に長周期帯域の位相が揃った波形を選択した。小地震は SH 波、SV 波を別々に作成し、座標変換により NS、EW 成分の小地震波形と

図-13 推定地震動の絶対加速度応答スペクトル(減衰 5%)の比較(水平最大方向)

図-14 推定地震動の相対速度応答スペクトル(減衰 5%)の比較(水平最大方向)

する。工学的基盤までは線形応答解析(Haskell Matrix 法)²⁴⁾を適用した。特性化震源モデルを用いた小地震波形の合成は Irikura²⁵⁾による経験的グリーン関数法を適用した。工学的基盤から表層までは等価線形応答解析(SHAKE)²⁶⁾の考え方をを用いて地表面地震動を推定した。等価線形応答解析に用いた動的変形曲線は鳥取県¹³⁾と同様に動的変形特性試験の全国データの平均値を用いた。

(4) 適用性の確認

上述の統計的グリーン関数¹⁷⁾による小地震の適用性を確認する。対象は 2001 年に兵庫県北部を震源に発生した地震とする。対象地震は 1943 年鳥取地震と同じ横ずれ断層型であり要素小地震と同程度の規模を有している。表-3 に震源情報をまとめる。応力降下量は、比較的硬質地盤である KiK-net(TTRH05)で観測された地表観測地震記録のフーリエ振幅スペクトルと理論的に計算されるフーリエ振幅スペクトルのフィッティングにより推定した値である。比較サイトは波形記録が得られている KiK-net(HYGH13)を対象とした。震源は点震源を仮定し、地震基盤までの地盤構造モデルは PS 検層の結果を用いた。地震記録及び応答スペクトルの比較を図-10 と図-11 に示す。理論地震波形は観測地震波形および観測応答スペクトルを概ね再現することができ、本研究で用いる統計的グリーン関数は要素小地震として適用可能であることが確認できた。

(5) 各学校の地震動評価

統計的グリーン関数法で推定された地表面の加速度地震波形および応答スペクトルから学校建物被害の原因を検討する。各学校の加速度波形を図-12、減衰 5%の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を

図-13、図-14 に示す。図-12 に着目すると、各学校の最大加速度(PGA)は 370-750gal と幅広い値が得られた。PGA が最も大きいのは ENG で 750gal。逆に SNK は 374gal で最も小さい。その他の学校は 400-700gal 程度で大差は見られず、PGA は被害の大小に直接は関係していないと考える。図-13、図-14 に応答スペクトルを示すが、被害軽微のサイトを破線で示している。図-13 より、被害大サイトに着目すると TIS、SRT、YNS および ENG が 0.2-0.4 秒の周期帯で 3000gal を超える値を示し、MIH でも 2000gal 程度の値を示した。一般的な木造建物の固有周期は 0.2-0.4 秒²⁷⁾(以下、短周期帯域)とされており、ピーク周期帯と建物固有周期帯が対応することから共振した可能性が考えられる。被害小サイトに着目すると、短周期帯域で KYM は被害大と同様の 3000gal を示したが、KSH 及び SNK では 1000gal を下回る結果となった。また 1995 年兵庫県南部地震で生じた震災の帯では周期 1-2 秒帯域(以下、中間周期帯域)の地震動が建物被害に影響したことが報告されている²⁸⁾。図-14 より、被害大の全サイトで周期 1 秒程度で 100cm/s を超える値を示した。被害の軽微なサイトでは、KSH 及び SNK で中間周期帯で概ね 100cm/s であるが、KYM は 60cm/s 程度となり他サイトを下回る結果となった。以上の結果より、甚大な被害が生じたサイトは短周期帯域および中間周期帯域で応答値が大きい傾向にある。一方、被害が軽微なサイトは短周期帯域または中間周期帯域の片方で被害大サイトの応答値を下回っており、被害差が生じた要因になったと考える。

地盤構造との関係として、短周期帯域は地盤伝達関数より 2 次固有周期に対応していることがわかり。中間周期帯は断層破壊の破壊伝播効果と地盤の非線形挙動で 1 次固有周期が長周期化したことで増幅した可能性が考えられる。

6. まとめ

本研究では、1943年鳥取地震における学校建物被害に差異が生じた原因を検討するために、常時微動探査を用いた地盤構造モデルの構築と統計的グリーン関数法による強震動予測を実施した。その結果、得られた成果を以下に示す。

1. 微動3成分単点観測と微動アレイ観測により3-4層で構成された $V_s=700\text{m/s}$ 層までの1次元S波速度構造モデルを推定した。S波速度構造の低速度層は、最も深い場所で33m、最も浅い場所で7mとなった。被害区分毎の比較では、浅部地盤構造と被害の有無に共通するような特徴は見られなかった。
2. Kanamon⁷⁾により推定された断層パラメータを基にして作成された鳥取県の特性化震源モデル¹³⁾を強震動予測手法レシピ¹⁴⁾に従うように修正して特性化震源モデルを作成した。
3. 本研究で推定した地盤構造モデルと修正した特性化震源モデルを用いて、統計的グリーン関数法¹⁸⁾により1943年鳥取地震を想定した強震動予測を行った。
4. 推定した加速度波形より、PGAは370-750Gal程度であった。また、応答スペクトルより甚大な被害が生じたサイトでは周期0.2-0.4秒の建物固有周期帯域と周期1-2秒の建物被害に最も影響する周期帯の両方で応答値が大きくなる傾向が見られた。

謝辞：本研究では、(独)防災科学技術研究所のF-netで公開されている震源情報とK-NET及びKiK-netの地震波形記録を使用しました。また、一部の図の作成にはGMT²⁹⁾を使用しました。査読者の方には有意義な多数の指摘を頂きました。ここに記して感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 鳥取県：鳥取県震災小誌，1944.
- 2) 日本建築学会：鳥取県震災調査報告，建築雑誌，2-3月合併号，1944.
- 3) 野口 竜也，西田 良平：微動による鳥取平野の地盤構造推定，土木学会論文集，No. 710/I-60，pp. 473-478，2002.
- 4) 野口 竜也，西田 良平，岡本拓也，平澤孝規：人工地震・微動・重力観測による鳥取平野の地盤構造の推定，地震工学研究発表会講演概要，Vol. 27，pp. 1-7，2003.
- 5) 野口 竜也，杉原優太，杉浦慎一，香川敬生：微動および重力観測による鳥取平野南部地盤構造推定，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol. 63，I-151，2008.

- 6) 鳥取市歴史博物館，やまびこ館：鳥取大災害史～水害・震災・大火からの復興～，2012.
- 7) Kanamori, H. : Determination of Effective Tectonic Stress Associated with Earthquake Faulting, the Tottori Earthquake of 1943, *phys. Earth Planet., Interiors* 5, pp. 426-434, 1972.
- 8) 紺野 克昭，大町 達夫：常時微動の水平/上下スペクトル比を用いる増幅倍率の推定に適した平滑化とその適用例，土木学会論文集 No.525，L33，pp. 247-259, 1995.
- 9) Cho, I., T. Tada and Y. Shinozaki : Centerless circular array method : Inferring Phase velocities of Rayleigh waves in broad wavelength ranges using microtremor records, *J. Geophys. Res.*, 111, B09315, 2006.
- 10) 中国地方基礎地盤研究会：山陰臨海平野地盤図95，1995.
- 11) 狐崎 長琅，後藤 典俊，小林 芳正，井川 猛，堀家 正則，斉藤徳美，黒田 徹，山根 一彦，奥住 宏一：地震動予測のための深部地盤P・S波速度の推定，自然災害科学，Vol. 9, No.3, pp. 4-10, 1990.
- 12) 石田 勇介，野口 竜也，香川 敬生：鳥取平野における地震動評価のための3次元地盤構造モデルの構築，土木学会論文集 A1(構造・地盤工学)，Vol.69，No.4，L821-L828，2013.
- 13) 鳥取県：鳥取県地震防災調査研究報告書，pp. 3-71，2004.
- 14) 地震調査研究推進本部：震源断層を特定した地震の強震動予測手法(レシピ)，2001.
- 15) 金田 平太郎，岡田 篤正：1943年鳥取地震の地表地震断層-既存資料の整理とその変動地形学的解釈-，活断層研究，21，pp. 73-91，2002.
- 16) 中央气象台：昭和18年9月10日鳥取地震概要附3月4日6日の地震概要，pp. 19, 1943.
- 17) Boore, D. M. : Stochastic Simulation of High-frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiation Spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, pp. 1865-1894, 1983.
- 18) 釜江 克宏，入倉 孝次郎，福知 保長：地域的な震源スケリング則を用いた大地震(M7級)のための設計用地震動予測，日本建築学会構造系論文集，416，pp. 57-70, 1990.
- 19) 鶴来 雅人，香川 敬生，岡崎 敦，羽田 浩二，入倉 孝次郎：強震動予測のために高域遮断フィルターに関する研究-1995年兵庫県南部地震の観測記録に基づく研究-，日本地震工学会論文集，6(4)，pp. 94-112，2006.
- 20) Brune, J. N. : Tectonic stress and the spectra of seismic shear wave from earthquake, *J. Geophys. Res.*, 75, pp. 4997-5009, 1970.

- 21) 香川 敬生 : ハイブリッド合成法に用いる統計的グリーン関数法の長周期帯域への拡張, 日本地震工学論文集, 第4巻, 第2号, pp. 21-32, 2004.
- 22) 天池 文男, 植竹 富一, 八代 和彦 : 内陸地殻内地震に対する伝播経路 Q_s 値特性の研究, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp. 210-213, 2006.
- 23) Jennings, P. C., G. W. Housner and N. C. Tsai : Simulated earthquake motion for design purposes, Proc. 4th WCEE, pp. 145-160, 1968.
- 24) Haskell, N. A. : The dispersion of surface waves on multi-layered media, Bull. Seism. Soc. Am., 43, pp. 17-34, 1953.
- 25) Irikura, K. : Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, 7th Jpn. Earthq. Eng. Symp., pp. 151-156, 1986.
- 26) Schnabel, P. B., J. Lysmer and H. B. Seed : SHAKE a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley, 1975.
- 27) 大堀 道広 : 強震動予測で対象となる周期範囲, 公益社団法人日本地震学会 HP (<http://www.zisin.jp>) (2015年11月3日閲覧).
- 28) 川瀬 博, 松島 信一, R. W. Graves and P. G. Somerville : 「エッジ効果」に着目した単純な二次元盆地構造の三次元波動解析-兵庫県南部地震の際の震災帯の成因-, 地震第2輯, 第50巻, pp. 431-449, 1998.
- 29) Wessel, P. and W. H. F. Smith : Free software helps map and display data, EOS Trans., Amer. Geophys. U., Vol. 72, No. 41, pp. 441, 1991.

(2015. 11. 6 受付, 2016. 1. 19 修正, 2016. 2. 20 受理)

ESTIMATION OF SUBSURFACE STRUCTURE FROM MICROTREMOR OBSERVATION AND STRONG GROUND MOTION EVALUATION AT SCHOOL DAMAGE SITES DUE TO THE 1943 TOTTORI EARTHQUAKE

Shohei YOSHIDA, Tatsuya NOGUCHI and Takao KAGAWA

On September 10, 1943, the Tottori earthquake occurred in the east of Tottori prefecture, and generated serious damage in Tottori city. We estimated subsurface velocity structure of damaged school sites in Tottori city using microtremor single station observation and array observation. Then we evaluated strong ground motion of the Tottori earthquake using stochastic green's function method at the sites. We found that predominant periods of response spectrum at heavily damaged sites agree with natural period of wooden building, and that estimated ground motions at damaged sites have large amplitude in period range between 1 to 2 sec, than lighter damage sites.