

改良版個別要素法を用いた鉄道無筋コンクリート橋脚の 地震時安全性評価に関する研究

京都大学大学院地球環境学堂 古川愛子
鉄道建設・運輸施設整備支援機構 水上 輝
京都大学大学院地球環境学堂 清野 純史

要旨：近年の地震において、在来鉄道の無筋コンクリート橋脚に被害が発生しており、耐震対策の検討が急務となっている。典型的な被害形態は、打ち継ぎ目における水平ずれである。本研究では、2004年新潟県中越地震で被災した魚野川橋梁 14P 橋脚を対象とし、改良版個別要素法を用いて地震時挙動の再現解析を行った。また、対象橋梁が和歌山県に位置すると想定し、来る南海トラフの巨大地震に対する地震時安全性を評価した。さらに、打ち継ぎ目における水平ずれを防止する対策として、鋼板巻き立て工法を採用した場合の地震時安全性についても検討を行い、適用性について考察を行った。

キーワード：無筋コンクリート橋脚，地震，打継目，水平ずれ，耐震対策，改良版個別要素法

1. はじめに

無筋コンクリート橋脚は、1914年に鉄道において初めて鉄筋コンクリートの設計施工基準が規定され、鉄筋コンクリート橋脚が全国に普及し始めるまで多く建造された。現在でも、全国には無筋コンクリート橋脚を有する在来鉄道が多数存在し、地震時に被害が発生している。典型的な被害形態は、打ち継ぎ目における水平ずれと、打ち継ぎ目下側端部のコンクリートの剥離である。切迫度が高まる南海トラフの巨大海溝型地震や、その前後に頻発する内陸地震に備えて、インフラ施設の耐震安全性の確保は喫緊の課題である。2011年の東北地方太平洋沖地震を契機に地震動予測が見直され、起こりうる最大級の地震動予測へとシフトしていることから、耐震安全性照査においては、破壊後の挙動までを再現できる数値解析手法を用いた検討が必要であると考えられる。

構造物の耐震安全性は有限要素法¹⁾を用いて広く検討されてきた。有限要素法は連続体の力学に基づく数値解析手法であり、連続な形状関数を用いるため、破壊・崩壊現象の表現は困難である。これに対し、不連続な形状関数を用いることで破壊現象を表現可能とする FEM- β ²⁾ が提案された。要素間の接触状態が大きく変化しない破壊現象の解析に適している。

これらに対し、離散体の力学に基づく個別要素法³⁾は、構造物を剛体要素の集合体としてモデル化し、要素同士が接触したときは要素間にばねとダッシュポットを設置して相互作用力を表現する。要素間の破壊はばねの切断で簡易にモデル化でき、破壊や崩壊現象の解析に適した手法である。解析ではばね定数とダッシュポットの減衰係数の値を適切に設定する必要がある。従来の個別要素法には、ばね定数を理論的に決定できないという問題があったが、改良版個別要素法⁴⁾では、要素の表面を多数のセグメントに離散化して、セグメント毎にばねを設置することで、材料特性からばね定数を決定できるようになった。

そこで本研究では、改良版個別要素法を用いて無筋コンクリート橋脚の地震時挙動の解析および耐震対策の効果の検討を行うことを目的とする。

まず、2004年新潟県中越地震で被災した写真1の魚野川橋梁の14P橋脚をモデル化し、地震時挙動の再現解析を実施した。実際の被害形態である打ち継ぎ目における水平ずれと、打ち継ぎ目下側端部のコンクリートの剥離を再現できるか確認した。次に、発生が懸念されている、南海トラフを震源域とする



写真1 新潟県中越地震で被災した魚野川橋梁⁵⁾

巨大地震に対する鉄道無筋コンクリート橋脚の安全性を評価するため、対象橋脚が和歌山県に位置すると仮定し、紀勢線の近傍の想定地震動を入力し、南海トラフの巨大地震に対する地震時安全性の評価を行った。最後に、耐震対策の効果について検討を行った。魚野川橋梁の14P橋脚のように、河川内に位置する橋脚の場合は、河積阻害率の観点から、橋脚断面を増加させない耐震対策を採用することが多いことから、橋脚断面を大きく増加させない鋼板巻き立て工法を採用することを考えた。耐震対策を施した橋脚のモデル化を行い、地震時安全性を評価することで、耐震対策の有効性を検証した。

2. 改良版個別要素法

2.1 概要

改良版個別要素法⁴⁾は、従来の個別要素法と同様に構造物を剛体要素の集合体としてモデル化する。改良点としては、要素表面をセグメントに離散化して(図1(a))、それぞれのセグメントの代表点にばね・ダッシュポットを設置(図1(b))したことである。要素表面を離散化することによって、ばね定数が理論的に理論的に導出される。弾性挙動は要素間に設置する復元ばね(図1(c))によって表現する。復元ばねの切断によって破壊現象はモデル化され、要素間が再接触または新たな要素と接触する際は、接触要素間に接触ばね・ダッシュポット(図1(d))が発生する。接触ダッシュポットは衝突によるエネルギーを消散させるためのもので接触ばねと並列に設置される。

2.2 解析パラメータ

(1) 要素のばね定数

次項で述べる要素間のばねは、本項で述べる要素のばねが直列につながったとして導出する。

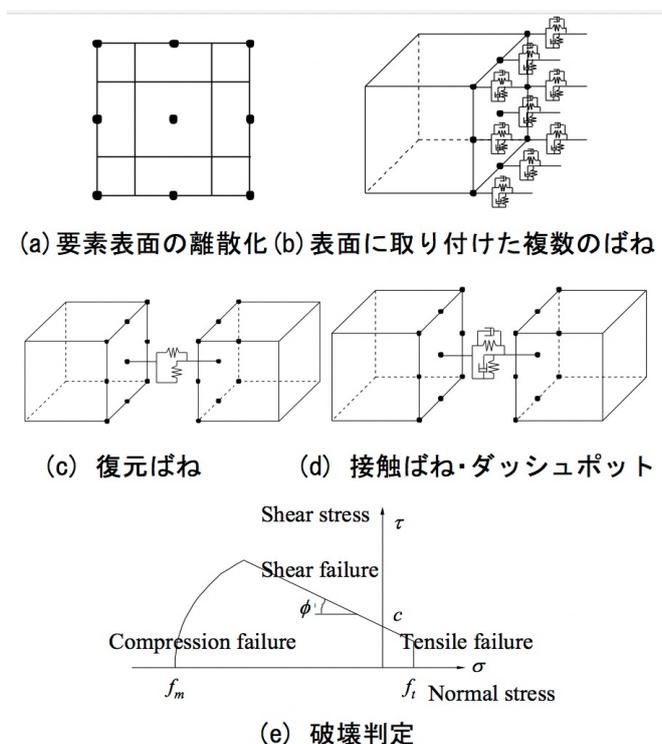


図1 改良版個別要素法の概要

復元ばねと接触ばねの2タイプが存在するが同じばね定数とする。ばねは要素表面に対して、法線方向 (n) と接線方向 (s) の両方に取り付けられる。法線、接線方向の単位面積あたりのばね定数は次式で表される。

$$\bar{k}_n = \frac{E}{(1-\nu^2)l} \quad \bar{k}_s = \frac{E}{2(1+\nu)l} \quad (1)$$

ここに、 E は要素の弾性係数、 ν はポアソン比、 l は要素重心から表面までの距離である。

(2) 要素間のばね定数

2つの要素 A, B が連続または接触しているとする。要素 A, B の弾性係数を E_A, E_B , ポアソン比を ν_A, ν_B , 重心から表面までの距離を l_A, l_B で表す。式 (1) で求めたばねが直列につながっていると想定し、要素間の単位面積あたりのばね定数は次式で与えることとする。

$$y = \frac{1}{\frac{l_A}{E_A/(1-\nu_A^2)} + \frac{l_B}{E_B/(1-\nu_B^2)}} \quad (2)$$

$$y = \frac{1}{\frac{l_A}{E_A/2(1+\nu_A)} + \frac{l_B}{E_B/2(1+\nu_B)}} \quad (3)$$

(3) 減衰定数

要素 A と B が接触・再接触した際は、要素間には接触ばねに加えて接触ダッシュポットを設置する。法線、接線方向の減衰定数を h_n, h_s とし、単位接触面積あたりの減衰係数は次のように表わされるとする。

$$c_n = 2h_n\sqrt{m_{ave}k_n}, \quad c_s = 2h_s\sqrt{m_{ave}k_s}, \quad m_{ave} = \rho_A l_A + \rho_B l_B \quad (4)$$

ここに、 m_{ave} は単位接触面積あたりの要素 A, B の質量の和、 ρ_A, ρ_B は要素 A, B の質量密度である。減衰定数が小さいと、接触によるエネルギーが十分に消散されず要素が飛び跳ねる現象が生じる。本研究では、接触時の衝突エネルギーをできるだけ早く発散させ計算の安定化を図るため、臨界減衰 ($h_n = h_s = 1.0$) を用いた。

2.3 破壊判定

復元ばねの法線・接線方向の伸びを (u_n, u_s) とすると、法線・接線方向の応力 (σ, γ) は次式で表される。

$$\sigma = \kappa_n u_n, \quad \gamma = \kappa_s u_s \quad (5)$$

法線方向の応力は引張を正とする。復元ばねに発生する応力が弾性限界に達すると、復元ばねを切斷することで破壊現象を表す。弾性限界は図 1(e) に示す引張破壊、せん断破壊、圧縮破壊により表現する。

(1) 引張破壊

法線方向応力が引張強度 (f_t) を超えたとき、引張破壊が生じる。降伏関数は次式で与えられる。

$$f_1(\sigma) = \sigma - f_1 \quad (6)$$

(2) せん断破壊

せん断破壊の判定はクーロン摩擦の包絡線を用いる。粘着力を c 、内部摩擦角を ϕ 、降伏関数を次式とする。

$$f_2(\sigma) = \gamma + \sigma \tan \phi - c \quad (7)$$

(3) 圧縮破壊

圧縮破壊の判定は、楕円形モデル⁶⁾を用いる。 f_m を圧縮強度とし、降伏関数を次式で与える。

$$f_3(\sigma) = \sigma^2 + C_s \gamma^2 - f_m^2 \quad (8)$$

過去の研究より $C_s = 9$ を用いた⁶⁾。圧縮破壊が発生すれば、式(8)が0となるように復元力に制約を与えた。

2.4 摩擦限界

復元ばねは破壊が発生すれば消失する。接触・再接触の際は、接触ばねと接触ダッシュポットが発生する。接触ばねは、接触しているときだけ発生するものであるため、圧縮力のみ受け持つ。また、接線方向の接触力は、摩擦限界によって制限されているとする。内部摩擦角を ϕ とすると次式のようになる。

2.5 運動方程式

1) 要素重心の並進運動の運動方程式

要素重心に作用する力は、ばねとダッシュポットによる力と、重力と地震慣性力を足し合わせたものである。重心の並進運動の方程式は次式で表される。

ここに、 $x_g(t)$ は時間 t における要素重心の変位ベクトルである。 m は要素の質量、 c は要素の粘性減衰の減衰係数、 g は重力加速度ベクトル、 $Z(t)$ は時刻 t における地動加速度ベクトル、そして $F(t)$ は要素間のばねとダッシュポットによって作用する力の総和である。減衰係数 c は構造振動によるエネルギー減衰を粘性減衰として表すときの減衰係数であり、本研究では、質量比例減衰を仮定した。式(10)を解き加速度を求め、速度、変位と積分することによって、重心の座標を追跡することができる。

(2) 要素重心まわりの回転の運動方程式

要素重心が原点で、要素の慣性主軸を主軸とする剛体に固定した座標系を慣性座標系とする。慣性座標系における角速度ベクトル $\omega(t)$ は、次の Euler の運動方程式解くことによって求めることができる。

ここに、 I は慣性座標系における慣性モーメントテンソル、 $r(t)$ は要素重心から外力 $F(t)$ が作用する点へと向かうベクトル (絶対座標系)、 $R(t)$ は絶対座標系から慣性座標系への座標変換行列である。

2.6 個別要素法の解の安定条件

単純な線形の振動問題を対象に、解の安定条件を検討する。

式(12)において、 y は変位、 m は質量、 h は減衰定数、 Kn はばね定数である。加速度項の離散化に Leap-frog 法を、速度項の離散化に Euler 法を使用すると、解の安定条件は次のようになる。

並進運動については、式(2),(5),(13)より次のようになる。

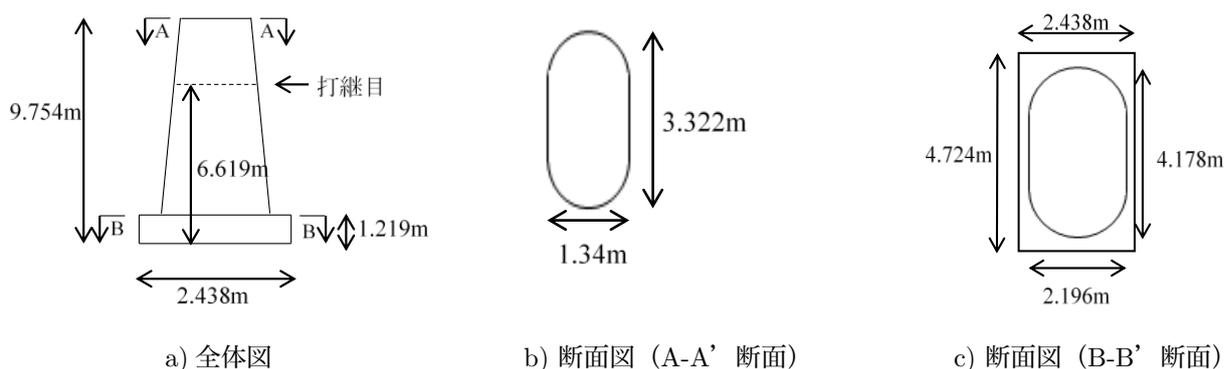


図2 魚野川橋梁 14P 橋脚 (左が北東, 右が南西方向)

3. 無筋コンクリート橋脚および耐震対策のモデル化

3.1 対象構造物

本研究では, 2004 年新潟県中越地震の際に, 打ち継ぎ目において橋軸直角方向に 40cm 程度の水平ずれが生じた新潟県長岡市の魚野川橋梁の 14P 橋脚 (写真 1 右) を対象とする. フーチング底面から 6.619m の高さに打ち継ぎ目を有する. 本橋梁は河川内に位置しており, 先細りの形状となっている. 全体図と, A-A と B-B における断面図を図 2 に示す.

3.2 解析モデル

無筋コンクリート橋脚の解析モデルを図 3 に示す. x 軸 (橋軸方向) の正方向を北東, y 軸 (軸直角方向) の正方向を北西とする. 本橋脚の先細りの形状を表現するため, 図 3 に示すように鉛直方向 0.2m 毎に断面積を減少させる.

解析に用いたコンクリートの材料特性を表 1 に示す. これらは, 西日本旅客鉄道 (株) による, 圧縮試験および一面せん断試験の結果を基に決定した⁷⁾. 試験は, 和歌山県の紀勢本線の無筋コンクリート橋脚から採取されたコアを用いたものであり, 魚野川橋梁から採取されたものではないが, 同時期に同様の形状で建造された橋脚であることから参考にした.

打ち継ぎ目の強度は, 打ち継ぎ目から採取したコアの試験から決定された値を用いた. コンクリート自身の強度は, 打ち継ぎ目以外から採取されたコアの圧縮強度と, 圧縮強度をもとに鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物)⁸⁾ で定められている算定式を用いて引張強度, せん断強度を推定した.

実橋脚には桁荷重 124.8kN が載荷されるため, 桁を直方体でモデル化して重量が 124.8kN となるよう密度を調整した. 桁は鋼製で, 密度 $5.28 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, ヤング率 $2.0 \times 10^{11} \text{N/m}^2$, ポアソン比 0.30 とした.

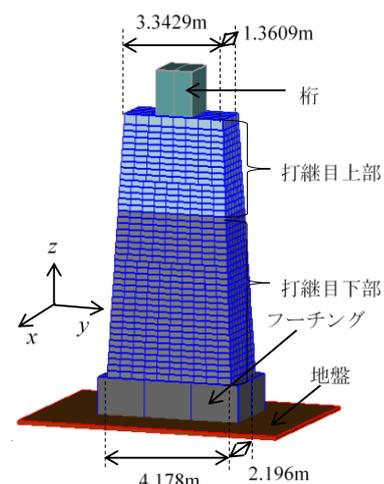


図3 無筋コンクリート橋脚の解析モデル

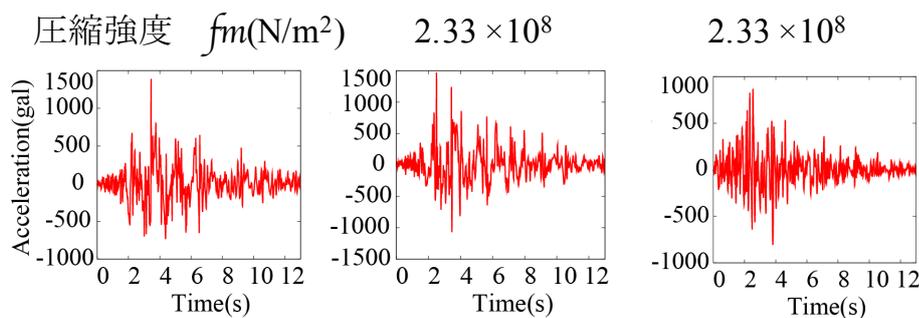
4. 無筋コンクリート橋脚の地震時安全性評価

4.1 入力地震動

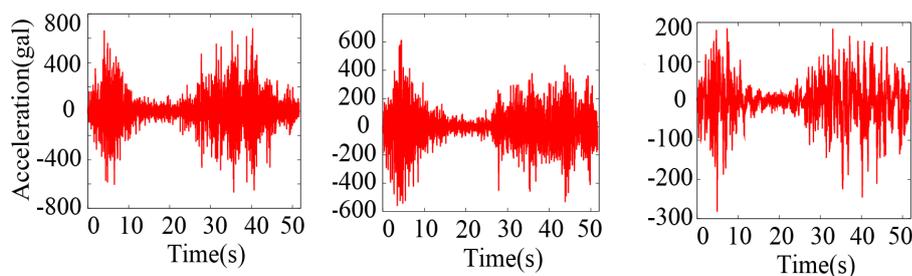
入力地震動は、2004年新潟県中越地震において、魚野川橋梁近傍の長岡市役所川口支所で計測された波形と、当該橋梁が和歌山県に位置すると仮定したときの、南海トラフの巨大地震の推定波形2波の、計3波とした。図6に時刻歴を示す。振幅の大きな時間帯のみ取り出した。橋梁が北東方向に延びることから、座標変換して、橋軸(x)方向、橋軸直角(y)方向、上下(z)方向に入力した。南海トラフの巨大地震を対象については、中央防災会議によって検討された断層モデルのうち、最も地震動の大きい「陸側ケース」の工学的基盤の地震動を、1次元重複反射理論によって変換された地表面地震動を入力した。対象地点としては、紀勢本線近傍の2地点(和歌山県すさみ町、和歌山県印南町)とた。地盤の物性値はK-netおよびKik-netのボーリングデータを使用した。

表2 鋼板の材料特性

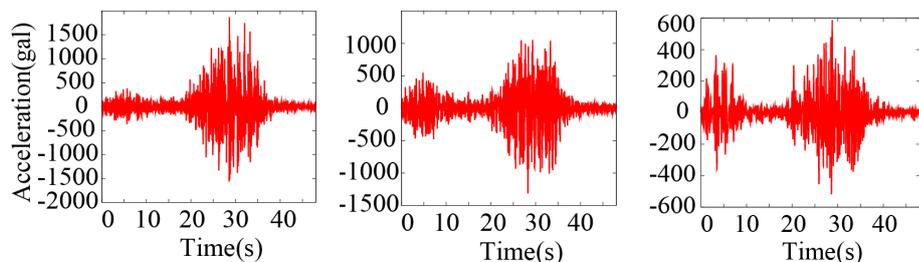
	鋼板	鋼板(換算後)
密度(kg/m ³)	7.85×10 ³	4.4×10 ²
ヤング率(N/m ²)	2.0×10 ¹¹	1.2×10 ¹⁰
ポアソン比	0.30	0.30
引張強度 f_t (N/m ²)	2.33×10 ⁸	2.33×10 ⁸
粘着力 c (N/m ²)	1.35×10 ⁸	1.35×10 ⁸
摩擦角 ϕ (rad)	0	0



a) 2004年新潟県中越地震の計測波形



b) 南海トラフ巨大地震の想定地震動(すさみ町)



c) 南海トラフ巨大地震の想定地震動(印南町)

図6 入力地震動 (左：橋軸, 中：橋軸直角, 右：上下)

4.2 無筋コンクリート橋脚の地震後の状況

(1) 新潟県中越地震の計測波形

地震後の状況を図 7(a) に示す。左から 2 つ目の図において、青色は要素の輪郭、水色は引張破壊、赤色は圧縮破壊が発生した箇所を示す。せん断破壊は生じなかった。打ち継ぎ目の引張強度が 0 であるため、加振直後から打ち継ぎ目上部がロッキングして下部と衝突を繰り返しながら滑動し、打ち継ぎ目に水平ずれと打ち継ぎ目下側端部のコンクリートに破壊が生じた。左から 3 つ目の図において、打ち継ぎ目上部は左側に滑動した。橋軸直角方向の水平ずれは 8cm となり、実際の 40cm より小さな値となった。和歌山県の橋脚の物性値を入力したことなども原因であると考えられる。水平ずれは過小評価となったが、被害形態は再現することができた。

(2) 南海トラフ巨大地震の想定地震動（すさみ町）

地震後の状況を図 7(b) に示す。継続時間は長い、加速度は小さいため、破壊の生じた領域は図 7(a) に比べて狭い。打ち継ぎ目で橋軸直角方向に約 4.5cm の水平ずれが生じ、打ち継ぎ目の下側端部のコンクリートに破壊が生じた。被害形態は図 7(a) と同じであった。

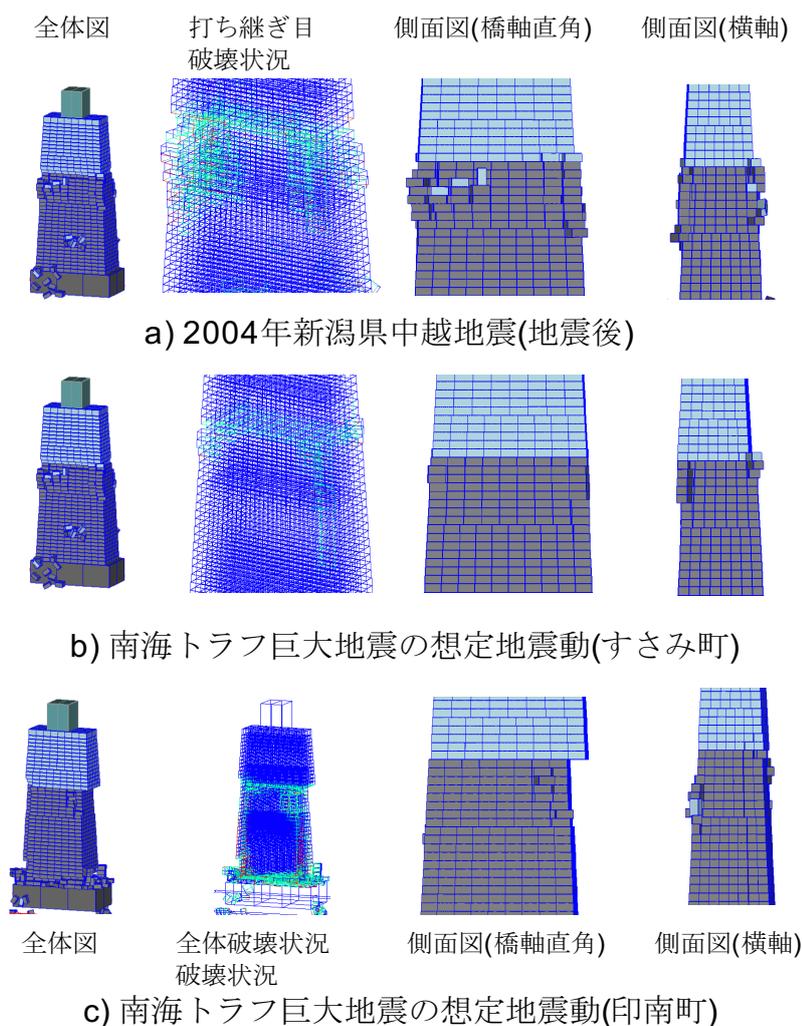


図 7 無筋コンクリート橋脚の地震後の状況

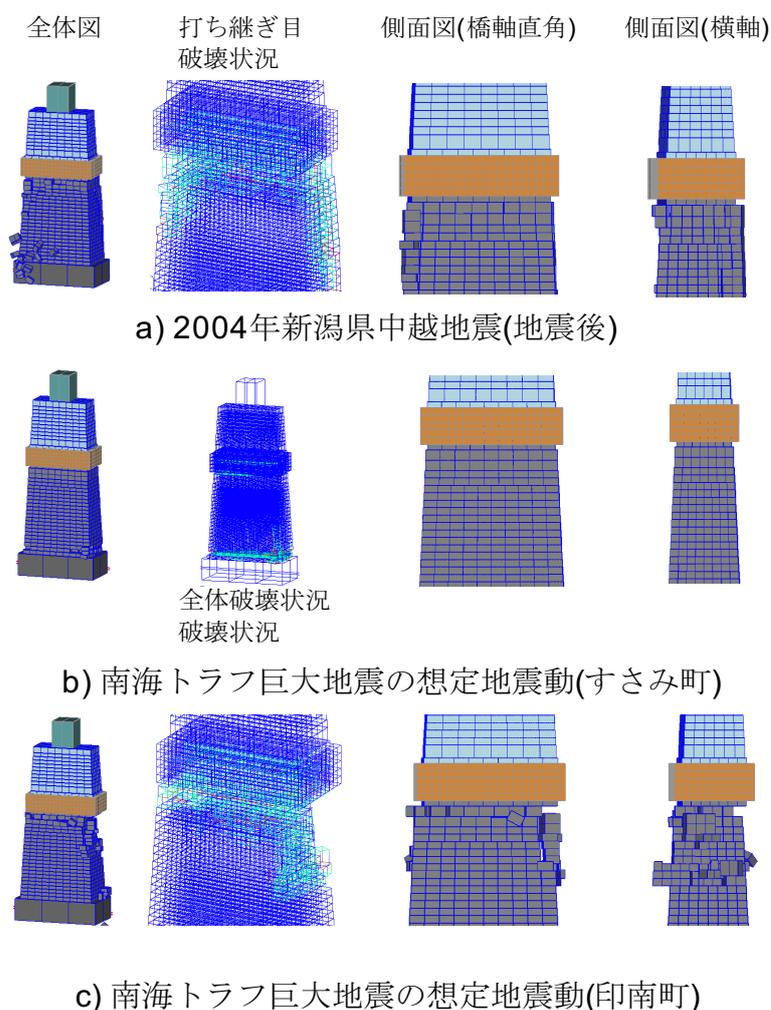


図8 鋼板巻き立てを施した場合の地震後の状況

(3) 南海トラフ巨大地震の想定地震動 (印南町)

地震後の状況を図7(c)に示す。加速度も大きく継続時間も長いため、3つの地震動の中で、破壊の発生した領域が最大となった。打ち継ぎ目における橋軸直角方向の水平ずれは5cm程度と小さいが、打ち継ぎ目下側のコンクリートの端部の広い領域に破壊が生じた。また、他の2つの地震動と違い、橋脚基部においても引張破壊が生じた。打ち継ぎ目上部に作用する地震慣性力が、摩擦によって下側に伝わり、橋脚基部に大きな曲げモーメントが作用したものと考えられる。

4.3 鋼板巻き立て工法を施した場合の地震後の状況

(1) 新潟県中越地震の計測波形

地震後の状況を図8(a)に示す。鋼板基部のコンクリートが破壊した。無対策時に比べて、水平ずれは防止でき、破壊領域がやや減少したものの、コンクリートの破壊する位置が下側に移動しただけで、顕著な改善は見られなかった。

(2) 南海トラフ巨大地震の想定地震動 (すさみ町)

地震後の状況を図 8(b) に示す。鋼板基部の高さにおいてコンクリートに引張破壊が発生したが、破壊の領域は限定的であった。橋脚基部の一部にも引張破壊が発生したが、この理由は、打ち継ぎ目および鋼板下端で破壊がほとんど生じなかったために、橋脚が一体となって振動したと見られ、水平方向の地震慣性力によって橋脚基部に引張破壊を生じさせる曲げモーメントが発生したものと考えられる。

(3) 南海トラフ巨大地震の想定地震動（印南町）

地震後の状況を図 8(c) に示す。打ち継ぎ目の水平ずれは抑制できたが、鋼板基部のコンクリートが広い領域で破壊した。無対策のときは、打ち継ぎ目下側の橋軸直交方向の両端（図 7(c) の左右）のコンクリートが破壊したが、鋼板を巻き立てた際は、打ち継ぎ目下側のコンクリートに全周にわたって破壊が生じた。また、橋脚基部は破壊しなかった。無対策に比べ、鋼板巻き立てにより橋脚が一体化し、固有振動数が高くなり、印南町の地震動に対しては共振しにくくなった可能性があると考えられる。

以上をまとめると、いずれの地震動に対しても、鋼板巻き立ては、打ち継ぎ目の水平ずれを抑制する効果はあった。しかし、鋼板は打ち継ぎ目下側のコンクリートには固定されていないため、打ち継ぎ目上部が鋼板と一体となってロッキングをした。その結果、鋼板基部のコンクリートに破壊が発生し、コンクリートの破壊を抑制する効果は確認できなかった。

5. 結論

本研究では、2004 年新潟県中越地震時に被災した魚野川橋梁の 14P 橋脚について、改良版個別要素法を用いて地震時の破壊挙動解析を行った。水平ずれを過小評価したものの、実際の被災形態である打ち継ぎ目での水平ずれの発生と、打ち継ぎ目下側コンクリート端部の破壊を確認できた。また、当該橋梁が和歌山県に位置すると仮定し、南海トラフの巨大地震に対する地震時安全性を評価した。その結果、打ち継ぎ目の水平ずれと下側コンクリート端部の破壊以外に、橋脚基部にも破壊が発生する可能性を確認した。また、打ち継ぎ目での水平ずれを抑制できる耐震対策として、鋼板巻き立ての有効性の検証を行った。全ての地震動に対して、打ち継ぎ目における水平ずれを抑制できたが、鋼板基部のコンクリートが破壊するなど、コンクリートの破壊は防止できないことがわかった。

謝辞 コンクリートの材料特性および耐震対策案は西日本旅客鉄道（株）のご協力を頂きました。K-NET, KiK-net の観測記録およびボーリングデータを使用させて頂きました。

参考文献

1. Zienkiewicz and R.L. Taylor, The finite element method, 5th ed., Vol.1, 2, 3, Butterworth Heinemann, Oxford, U.K., 2000.
2. M. Hori, K. Oguni, H. Sakaguchi, Proposal of FEM implemented with particle discretization for analysis of failure phenomena, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol.53, pp.681-703, 2005
3. P.A. Cundall and O.D.L. Strack, A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, 29, pp.47-65, 1979.
4. A. Furukawa, J. Kiyono, and K. Toki, Proposal of a numerical simulation method for elastic, failure and collapse behaviors of structures and its application to seismic response analysis of masonry walls, Journal of Disaster Research, Vol.6, No.1, pp.51-68, 2011.
5. 九州工業大学災害調査団, 平成 16 年新潟県中越地震一第二次被害調査速報版一, www.civil.kyutech.ac.jp/pub/kosa/ijikenHP/tyuuetujisin20041025.pdf (2015.7.21 閲覧) .
6. P.B. Lourenco, Analysis of masonry structures with interface elements, theory and applications, Delft University of Technology, Faculty of Civil Eng., TU-DELFT report no. 03-21-22-0-01, 1994.
7. 坂岡和寛, 土井達也, 大江崇元: 無筋コンクリート橋脚の打継目性状に関する基礎的検討, 第 70 回土木学会年次学術講演会講演概要集, V-114, 2014.
8. (財) 鉄道総合技術研究所, 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 2004.
9. (財) 鉄道総合技術研究所, 鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物, 2009.

微動・重力探査による鳥取県智頭地域の地盤構造推定および民泊家屋の微動観測

Determination of Subsurface Structure by Microtremor and Gravity Survey, and Microtremor Observation of Vacation Rental Houses in Chizu Area, Tottori Prefecture

野口 竜也 (鳥取大学)・五島 達也 (元鳥取大学)・津吉 祐典 (元鳥取大学)
池上 柊真 (元鳥取大学)・香川 敬生 (鳥取大学)

1. はじめに

本研究の対象とする智頭町とその周辺地域は鳥取県の東南に位置し、中国山地の中山間地域であり、林業が盛んな地域である。この地域の大半は花崗岩もしくは三郡変成岩による山地が占めており、市街地を含む居住地域は狭い谷底平野となっている。また智頭町では、南海トラフの巨大地震の発生時に町外で被災する可能性が高い世帯を対象に被災した場合には一定期間、生活支援を約束する「疎開保険」という事業を行っている。この地域で地震動評価を行うことは、地域住民の地震防災に役立つのと同時に、地震災害の被災者に対する疎開先としての適合性や保険の付加価値を付けることに繋がる可能性がある。

本研究では、地震動評価を行うための地盤構造に関する情報を得るために微動および重力観測を実施し地盤構造を推定した。また、疎開先の民泊家屋について微動観測を実施し各家屋の振動特性を把握した。

2. 微動探査について

2.1 観測および解析

観測については、以下の通りである。まず、3成分加速度計 JU210 を用いて、単点 3 成分観測を実施した。2014 年度には智頭地区市街地では 20m 間隔、同地区市街地近傍の谷筋を 50m 間隔、対象地域全域

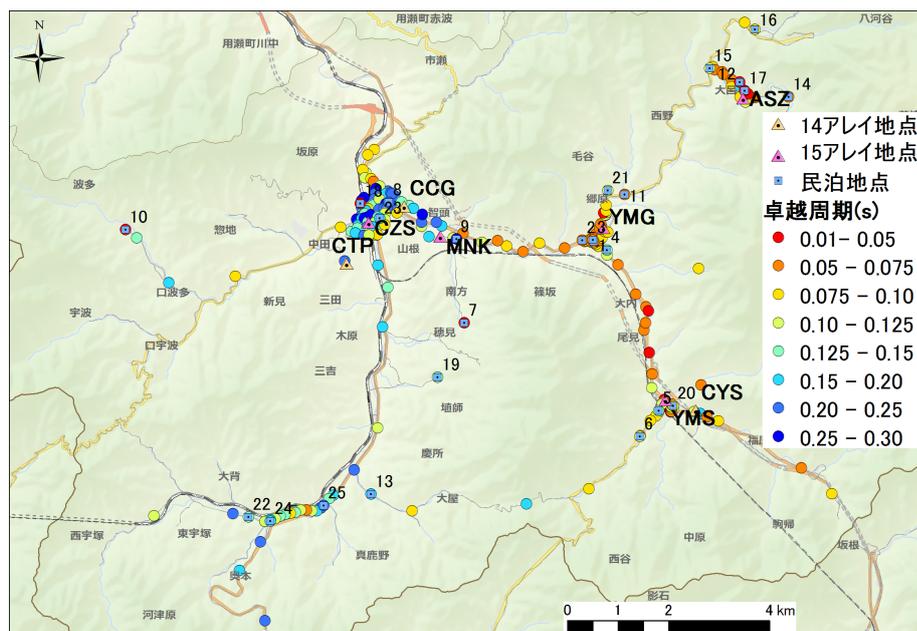


図1 微動 H/V の卓越周期分布 (全域)

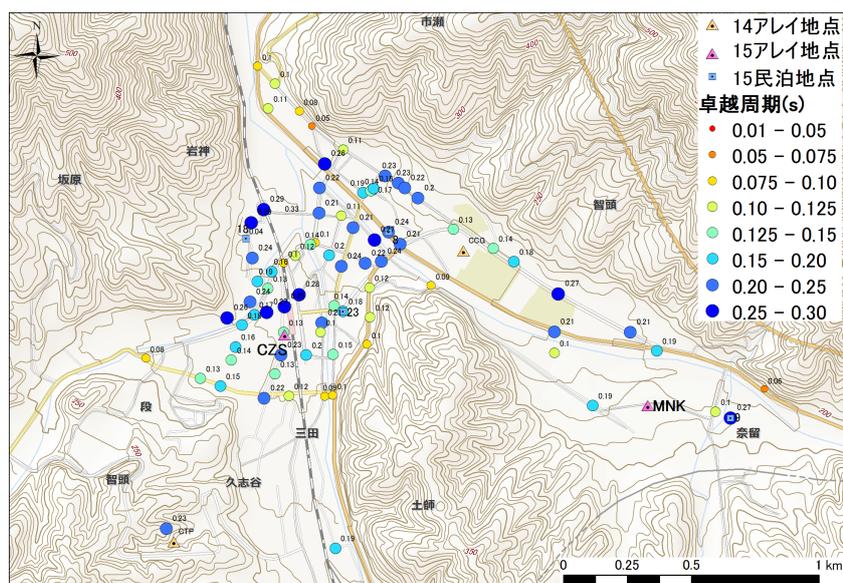


図2 微動 H/V の卓越周期分布 (智頭地区)

を 1km 間隔で 137 点, 2015 年度には山間部の谷筋を 1km 間隔で 137 点, 2015 年度には山間部の谷筋 (山形, 山郷, 芦津, 那岐地区) を 50~100m 間隔の計 72 点で観測を行った。単点観測の測定時間は 7~10 分間とした。

次に, 速度計 4 台を正三角形と重心配置するアレイ観測を実施した。2014 年度には智頭町町民グラウンド (CCG), 智頭テクノパーク (CTP), 山郷小学校跡地 (CYS) の 3 地点, 2015 年度には山形 (YMG), 山郷 (YMS), 智頭 (CZS), 南方 (MNK), 芦津 (ASZ) の 5 地点で実施した。なお, CTP は道路建設の残土による埋め立て地である。

解析について, 3成分単点観測記録からは水平動と上下動のスペクトル比 (H/V) を求め, 卓越周期を読み取った。アレイ観測記録からは, SPAC 法を読み取った。アレイ観測記録からは, SPAC 法¹⁾, CCA 法²⁾, nc-CCA 法²⁾, V 法³⁾ により位相速度分散曲線を求め, フォワードモデリングにより S 波速度構造を推定した。

2.2 微動探査の結果

H/V の卓越周期は, 全域 (図 1) では 0.05~0.4s であり, 市街地 (図 2) が 0.2~0.3s, 山間部では西側

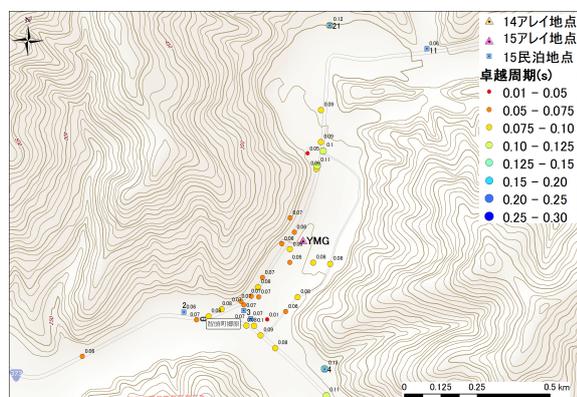


図3 微動 H/V の卓越周期分布 (山形地区)

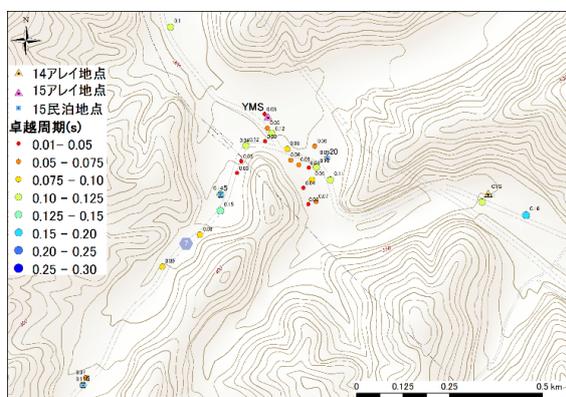


図4 微動 H/V の卓越周期分布 (山郷地区)

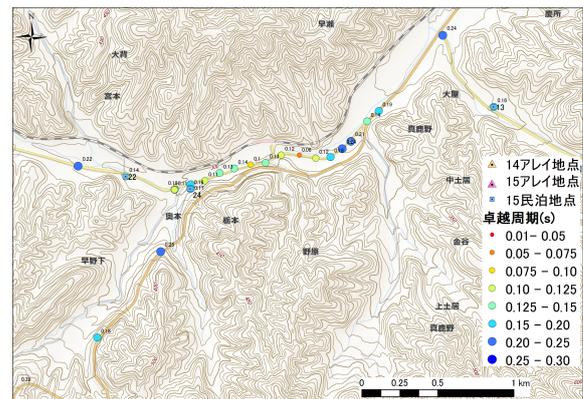
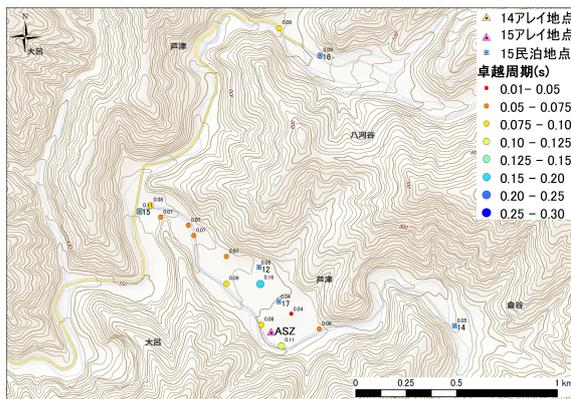


図5 微動 H/V の卓越周期分布 (芦津地区) 図6 微動 H/V の卓越周期分布 (那岐地区)
 の谷筋で最大 0.30s まで、東側の谷筋では 0.15s までで、東側の方が長い傾向がある。特に市街地については、後述の S 波速度 ($V_s=200\text{m/s}$) を参考に 1/4 波長則で表層厚に換算すると最大で約 20m である。
 山形地区 (図 3), 山郷地区 (図 4) では 0.1s 以下, 芦津地区 (図 5), 那岐地区 (図 6) では 0.2s 以下である。S 波速度構造モデル (図 7) より、堆積層の S 速度は $100\text{m/s}\sim 400\text{m/s}$ で、その層厚は市街地の CCG, 埋め立て地の CTP で約 20m, 山間部の CYC で約 5m, CZS が約 20m, ASZ で約 3m である。

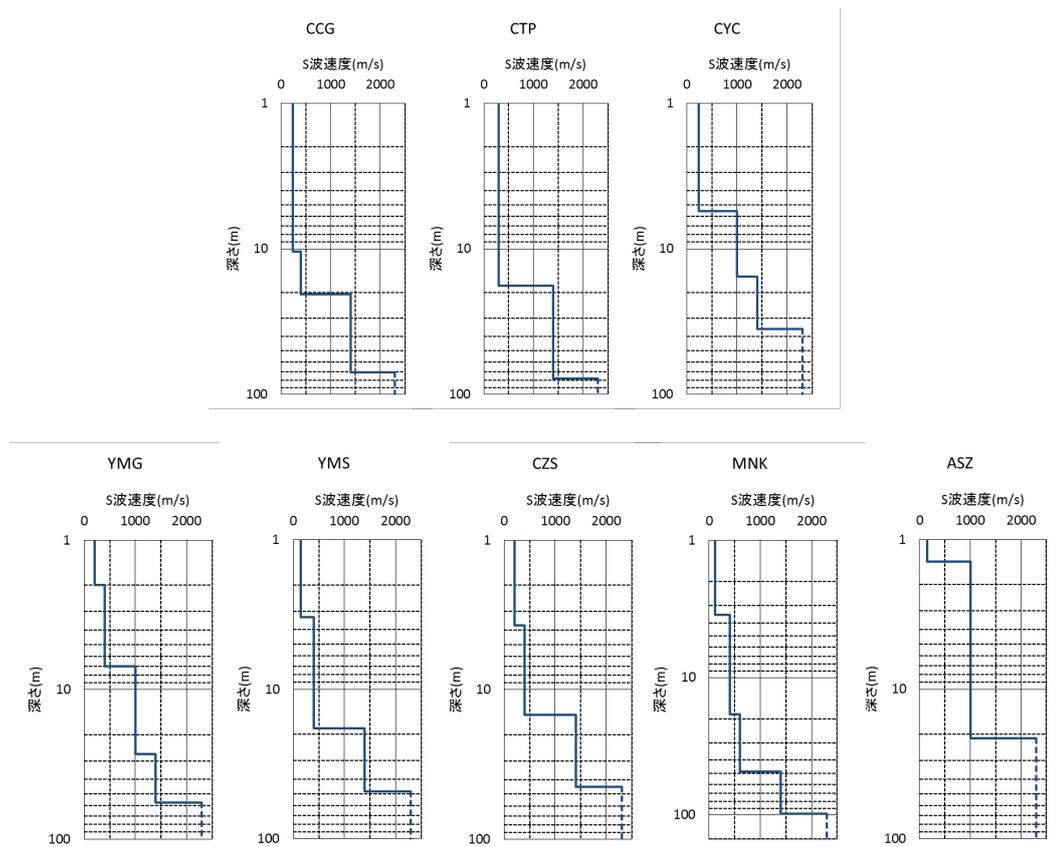


図7 S 波速度構造モデル

3. 重力探査について

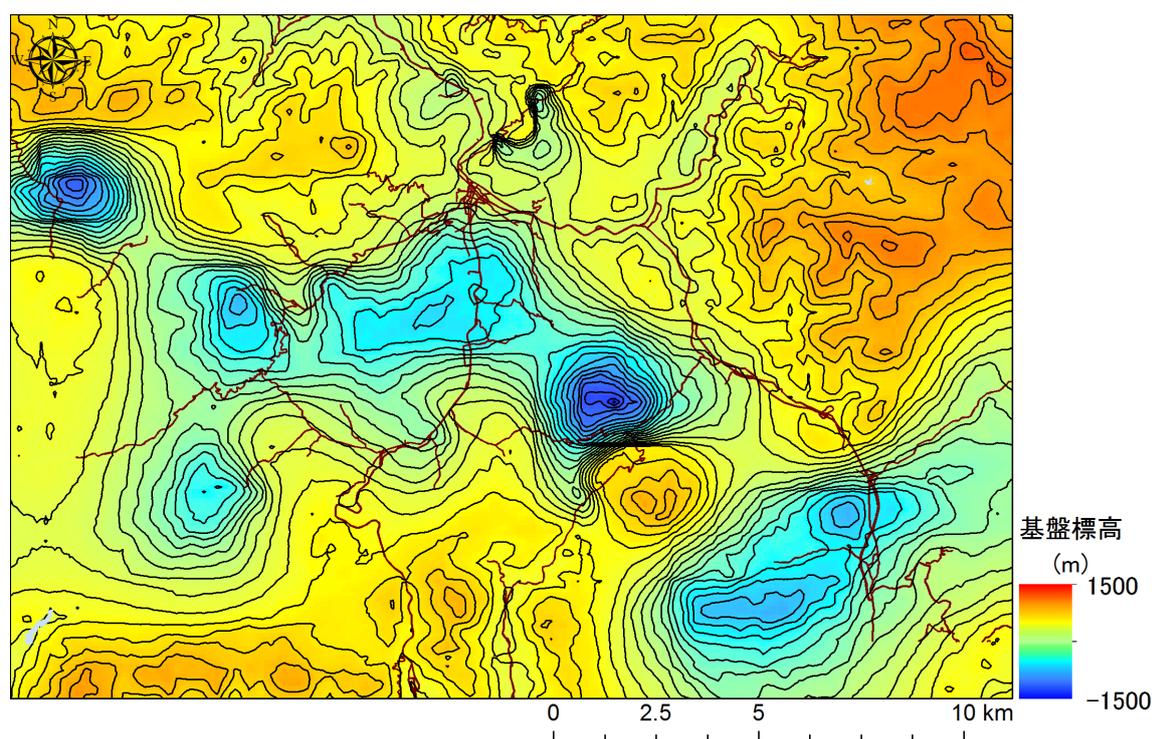


図8 重力解析による基盤標高分布図

3.1 観測および解析

重力観測にはラコスト・ロンバーグ重力計 (G-1034)、観測点の測量には VRS-GPS もしくはディファレンシャル GPS を使用し、76 点の観測を実施した。今回観測したデータと重力データベース^{4,5)} から解析範囲を切り出したデータを含めて解析を行った。各種補正を施した後、地下構造解析に必要なブーゲー (重力) 異常を求めた。

重力異常分布は、高異常域が三郡変成岩、低異常域が花崗岩地域と位置が対応しており、このことを踏まえ、両地域が分布する地点で密度推定を行った。その結果、花崗岩が 2.58g/cm^3 、三郡変成岩が 2.72g/cm^3 と推定できた。そこで、三郡変成岩を基盤とみなし、表層の密度を 2.58g/cm^3 、基盤の密度を 2.72g/cm^3 の 2 層モデルを仮定して 2 次元および 3 次元基盤構造解析⁶⁾ を行った。なお、2 次元解析では断面の両端に基盤が露頭するように拘束条件を与えている。また、3 次元構造解析では 50~3000m のバンドパスフィルタ処理を施し、2 次元解析による基盤露頭点の 6 点を拘束点として与えた。

3.2 重力探査の結果

2 次元および 3 次元解析の結果として基盤断面図 (図 8) を示す。図より 8 地表標高に応じて基盤が深くなっており、山体が低密度であることを示している。3 次元解析の結果として基盤標高分布 (図 9) を示す (図 8 の断面位置も示す)。図 9 より、すり鉢状の基盤の落ち込みが随所で見られ、これらの地域は花崗岩が分布する地域に対応していることから、花崗岩の山体の地層の厚さに対応していると考えられる。微動探査では数 m~20m 程度の堆積層、重力探査ではその下位の基盤岩層の構造を反映した推定結果となっている。

4. 民泊家屋の振動特性

民泊家屋 25 戸について、GPL6A3P を 2 台用いて地盤上と家屋の 1 階か 2 階の床上で建屋方向に水平動を合わせて微動の同時観測を実施した。解析としては、地盤上 HG・床上 HF の短辺・長辺方向の水

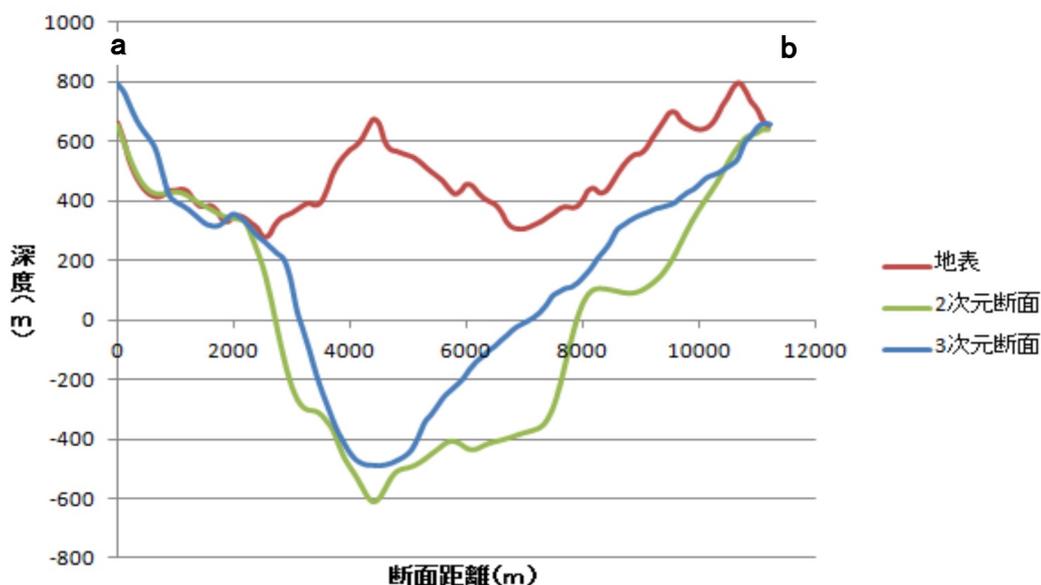


図9 重力解析による基盤断面図

平動のスペクトル比 (HF/ HG) を求め、ピークの卓越周期とその倍率を調べた (表1)。HF/ HG の卓越周期は 0.04~0.37 秒であり、短辺方向と長辺方向で差異がある家屋がいくつかあるが、おおむね方向での差はみられなかった。ピークの倍率については、20 以上 (黄色セル) となる地点が半数に及ぶことがわかった。地盤上の H/V の卓越周期に近い値を示す地点が数点 (赤字) あり、これらの地点では地震時に共振する可能性が高いと考えられる。

表1 民泊家屋の HF/ HG の卓越周期

観測点 No.	短辺方向		長辺方向		地盤 卓越周期 (s)	観測点 No.	短辺方向		長辺方向		地盤 卓越周期 (s)
	卓越周期 (s)	倍率	卓越周期 (s)	倍率			卓越周期 (s)	倍率	卓越周期 (s)	倍率	
1	0.25	45	0.25	30	0.07	14	0.20	18	0.09	18	0.05
2	0.23	10	0.27	11	0.06	15	0.21	5	0.10	3	0.11
3	0.19	29	0.19	19	0.07	16	0.20	24	0.23	18	0.09
4	0.03	11	0.02	12	0.13	17	0.08	15	0.24	7	0.04
5	0.21	38	0.22	52	0.14	18	0.15	5	0.16	6	0.04
6	0.37	68	0.26	44	0.11	19	0.26	15	0.26	10	0.13
7	0.24	67	0.29	67	0.04	20	0.03	2	0.03	2	0.08
8	0.04	11	0.16	19	0.24	21	0.24	23	0.25	16	0.12
9	0.24	34	0.24	51	0.27	22	0.24	10	0.24	6	0.14
10	0.26	7	0.23	9	0.03	23	0.32	38	0.32	22	0.18
11	0.22	20	0.22	12	0.07	24	0.23	17	0.26	9	0.16
12	0.30	9	0.25	6	0.05	25	0.30	40	0.31	52	0.21
13	0.31	75	0.28	35	0.16						

5. まとめ

- 1) 微動 H/V の卓越周期は最大で 0.3 秒 (層厚に換算して最大で約 20m) で市街地、山間部の西側で長く、山間部の東側では短くなる傾向が見られた。
- 2) 微動アレイ観測を実施した 8 地点で S 波速度構造モデルを推定した。堆積層の S 波速度は 240~400m/s であり、その層厚は約 3~20m であった。

- 3) 重力解析により 2 層モデルによる密度構造を推定した。すり鉢状の基盤の落ち込みがみられ、これらは花崗岩の山体の厚さを示していると考えられる。
- 4) 民泊家屋での微動観測により、民泊家屋の固有周期は 0.1~0.3s であり、建屋の方向による差は小さかった。また数地点で地盤の卓越周期に近く地震時に共振する可能性が示唆された。

参考文献

1. Aki, K. : Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, Bull.Earthq.Res.Inst. 35, pp.415-456, 1957.
2. 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.
3. Tada, T., I. Cho, and Y. Shinozaki : Beyond the SPAC method: exploiting the wealth of circular-array methods for microtremor exploration, Bull.Seism.Soc.Am., 97, pp.2080-2095, 2007.
4. 駒澤正夫 : 日本重力異常グリッドデータベース, 日本重力 CD-ROM 第 2 版, 数値地質図 P-2, 地質調査総合センター, 2002.
5. The Gravity Research Group in Southwest Japan: Gravity Database of Southwest Japan (CD-ROM), Bull.Nagoya University Museum, Special Rept. , No.9, 2001.
6. Komazawa, M. : Gravimetric Analysis of Volcano and its Interpretation, J.Geod.Soc.Japan, Vol.41-1, 17-45, 1995.