

東日本大震災による逗子地域の 表層地盤の地震応答特性

岩楯 徹広¹・内藤 伸幸²・安藤 幸治³・小田 義也⁴

¹フェロー会員 首都大学東京 名誉教授・地質計測株式会社(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail:rock-tak@tmu.ac.jp

²正会員 (株)アーク情報システム(〒222-0033 神奈川県横浜市港北区新横浜3-22-173)

E-mail:nnaito@ark-info-sys.co.jp

³正会員 (株)パイプラントシステム開発(〒207-0014 大和市南街5-39-16)

E-mail:andoughnut@s3.dion.ne.jp

⁴正会員 首都大学東京(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail:oda-yoshiya@c.metro-u.ac.jp

首都大学東京では、逗子の不整形地盤の地表と基盤(-30m)で地震観測を実施し、東日本大震災時に過去最大の加速度記録を得た。観測記録を用いて、大地震時の不整形地盤の地震応答特性を検討するとともに、地盤構造を同定し、さらに、同定モデルと観測波を用いて、三次元地震応答解析を実施し、表層地盤の挙動を検討・評価した。解析結果と観測結果は良く対応し一致しており、解析法(モデル)の妥当性が確認された。また、基盤構造の不整形な盆地状の勾配の急な部分では、地表においては水平地震動入力の場合で、水平動の増幅だけで無く、かなり大きな上下動が発生する等、不整形地盤特有の応答特性が解析的に明らかとなった。

Key Words : The 2011 East Japan Great Earthquake, Seismic response analysis, Earthquake Observation, Identification analysis, Zushi-site

1. はじめに

首都大学東京では、1994年より逗子の不整形地盤の地表5地点(k1~k5)、地中の基盤(k6:深さ-30m)に地震計を設置して水平アレー・鉛直アレー地震観測(図1)を実施し、今まで200以上の地震記録を得てきた^{1), 4)}。

2011年3月11日に発生した東日本大震災(M=9.0)では、はじめて継続時間が極めて長い地震動を経験し、過去最大の加速度記録を観測した。本研究は、観測された東日本大震災の地震記録、今まで観測された代表的な中小地震の記録および東日本大震災以後に観測された余震記録を用いて表層地盤の応答特性を比較検討すると共にこれらの観測データを用いて、モード解析および同定解析を実施し表層地盤の地盤構造を同定し、さらに同定結果に基づいて作成した地盤モデルと基盤の地震記録を用いて3次元地震応答解析を実施し、逗子地域の表層地盤の地震時挙動について検討したものである。

2. 逗子地震観測地点

(1)地震観測地点の概要

逗子地域は、三浦半島の付け根に位置し、南北は丘陵地、西側には相模湾、市内を東西に横切る形で田越川が流れ、流域は比較的軟弱な沖積低地となっており、ほぼ

東西に延びている。逗子市は、田越川の流域にある。田越川の北には、逗子市北西端部に流域を持つ小坪川がある。地形は全体として、東西方向には、緩やかな傾斜となり、南北方向には谷地形が形成され、不整形な地盤構造を呈している。逗子地域には、三浦層群の中の逗子層と池子層が分布している。逗子の基盤をなす逗子層は、主にシルト岩から成り、基底部には田越川砂礫岩部層と呼ばれる砂礫岩層を伴う。池子層は、逗子層を整合に覆い、鷹取山火砕岩層とそれを覆う凝灰質シルト岩と火災岩の互層となっている。流域低地は、最終氷河期(1.8万年~2万年前)以降に堆積した軟弱な地層である。

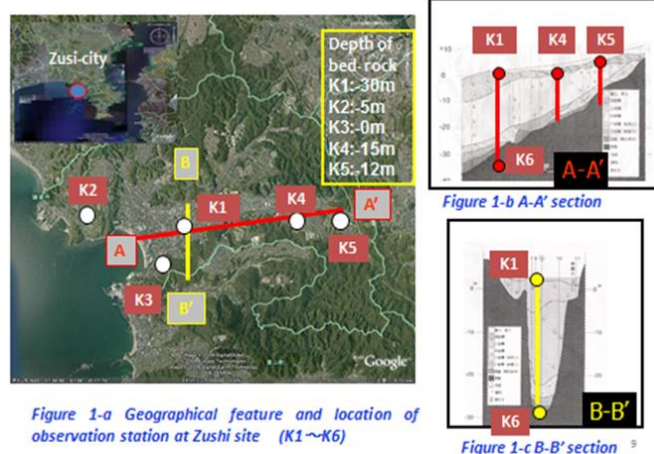


図1 逗子の地震観測点(k1~k6)

(2)地盤構造モデル¹⁾

既往のボーリング試験結果(N値)や各種土質試験結果および別途実施したPS試験結果に基づいて、各観測点の地盤構造をモデル化(1次元成層構造)した。各観測点の表層厚は、k1(30m), k2(12m), k3(露頭基盤), k4(15m), および、k5(7m)で異なっている。これらの地盤構造モデルを初期値として、各点の地表の地震観測データ(k1~)と基盤のデータ(k6)を用いて、後述(6章)のモード解析により伝達関数を算定し、さらに同定解析により、地盤構造を同定し、3次元地震応答解析用地盤構造モデル(最終値)を作成した。同定した地盤構造の例(k1地点: B-B' 断面)を図2に示す。

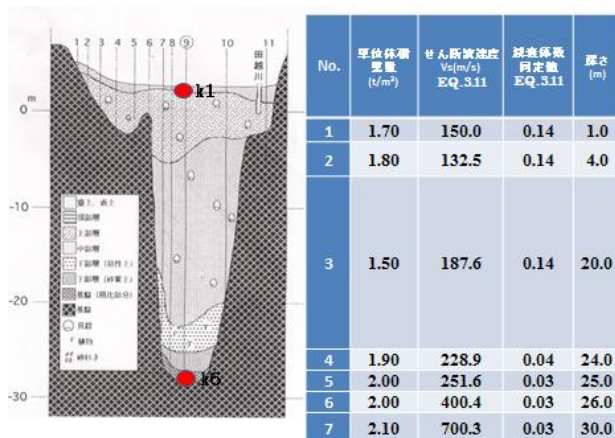


図2 逗子市の地盤構造と同定された物性値 (B-B' 断面)

EQ. 3.11 地震

3. 地震観測と常時微動観測^{1),4)}

(1)地震観測

田越川流域の沖積低地の地表に3点(k1, k4, k5)と小坪川流域の沖積低地の地表に1点(k2)及び南側丘陵地の岩盤上に1点(k3)地上地震計を設置し、1994年6月より水平アレー地震観測を実施して来た。その後、1997年8月からは、k1地点直下のボーリング孔内の地中基盤(N値 ≥ 50 , 深さ $\sim 30m$)に埋設型地震計(k6)を増設し、水平・鉛直アレー観測を実施し今日に至っている(図3)。1測点3成分(NS, EW, UD)をサンプリング周波数100Hzで観測し、得られた観測加速度波形を1次処理としてFFT解析を実施し、フーリエスペクトル、更に各地点の伝達関数(地表/基盤)を算出しデータベース化した。

(2)常時微動観測

各地震観測点とその周辺地盤及び主要な地点を選んで、原則的には、50mx50mメッシュに分割し実施した。1測点のデータ数は、0.01秒サンプリングで30000個(5分間)である。解析は、1測点、1ケースにつきノイズの

少ない波形が定常性を保っていると考えられる区間のデータを2048個選び、FFT解析によりフーリエスペクトルおよびH/Vスペクトルを算出し、表層地盤の1次卓越振動数(f_1)を求めた。さらに、物理探査試験結果(V_s)と組み合わせて、1/4波長則(式1)により、表層地盤厚(H)を評価した。

$$H = V_s / 4f_1 \quad (1)$$

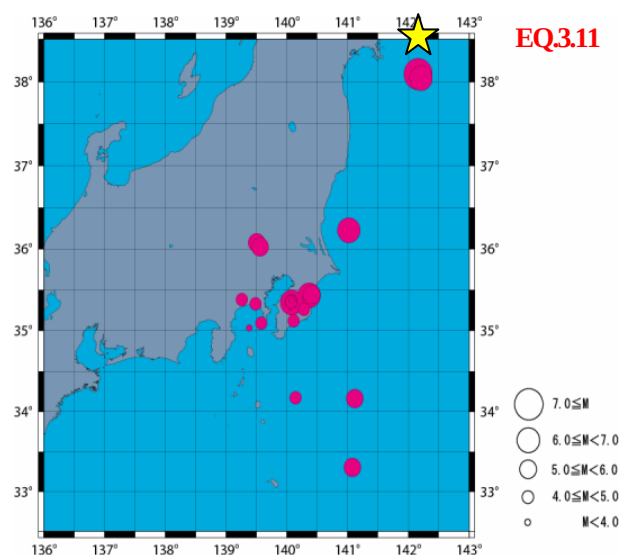


図3 逗子の観測地震データの震央マップの一例

(2006年度)

4. 地震観測データによる表層地盤の応答特性-I (東日本以前の中小地震)^{1) 4)}

(1)地震観測データの概要

東日本大震災以前の約16年間で、200以上の地震が得られた。主な地震は茨城県、南西部や山梨県東部、相模湾、千葉県、茨城県沖などで、震央距離60km程度の中小規模($M \leq 5$)である。また、火山性の群発地震や兵庫県南部地震のような大規模な直下型地震やその余震等多様な地震も含まれる(図3)。この内、地表の最大加速度記録は、1995年7月3日の相模湾地震($M=5.6$)で、75.4gal(水平), 13.4gal(上下)であった。地表面の増幅率は、約3倍(k1地点)となった。また、大部分の地震の継続時間は、60秒以下で短い。

(2)地震観測データから得られた表層地盤の応答特性

表層地盤の応答特性を把握するため各観測点で得られた応答スペクトルを地中基盤(k6)の応答スペクトルで除して伝達関数($k1/k6 \sim k5/k6$)を算出した(図4)。この結果、各観測点の表層地盤の卓越振動数(1次)として、2.0Hz $\sim$ 2.3Hz(k1), 4.0Hz $\sim$ 4.2Hz(k2), 2.8Hz $\sim$ 3.3Hz(k4), 6.5Hz $\sim$ 7.0Hz(k5)が得られ、地盤の不整形特性(表層厚の違いによる変化)が顕著に示された。一方、K3(露頭基盤上)では、顕著なピークは見られず、地中基盤とほぼ同

じ特性を示した

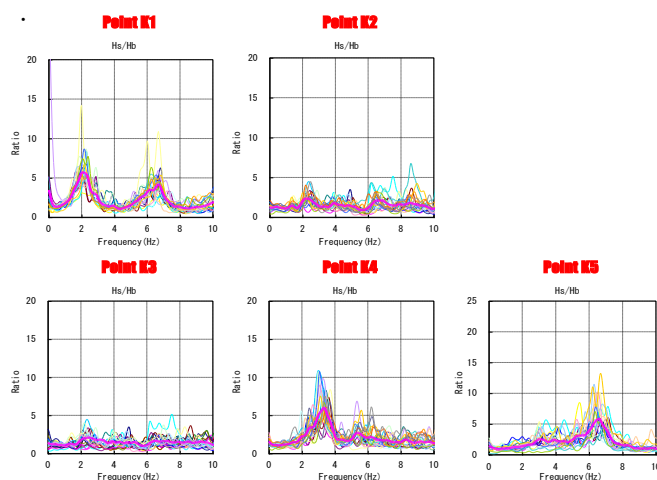


図4 地震観測データによる表層地盤の応答特性
各観測点の伝達関数(地表/基盤)

(3) 常時微動観測による地盤の応答特性

図5に各観測点のH/Vスペクトルを示す。各観測点の表層地盤の卓越振動数として、1.8Hz～2.3Hz(k1)、3.0Hz～4.0Hz(k4)、7.0Hz～7.5Hz(k5)が得られた。また、露頭基盤(k3)、k2地点では、明確に卓越振動数は得られなかった。これらの結果は、今まで得られた中小地震観測記録による結果(4(2))とほぼ対応する。この結果、中小地震では、地盤の応答は、弾性範囲に留まっている事が判った。

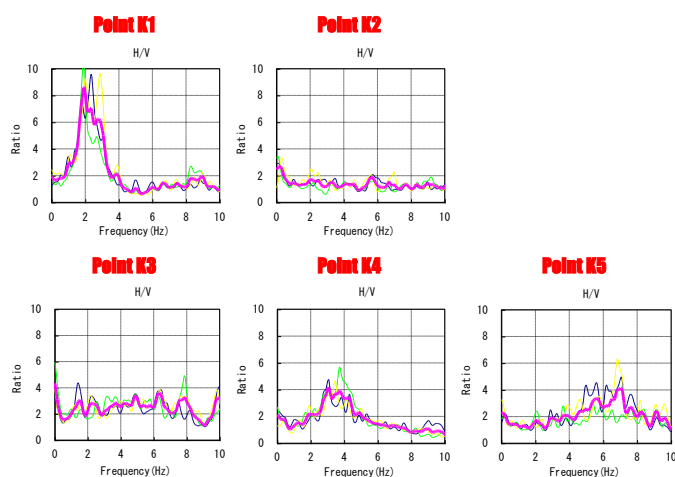


図5 常時微動観測データによる表層地盤の応答特性
(H/Vスペクトル)

5. 地震観測データによる地盤の応答特性-II (東日本大震災)⁷⁾

(1) 地震観測データの概要

図6に、東日本大震災(EQ. 3. 11)における地表(k1)と地中基盤(k6)の加速度波形を示す。最大加速度は、地表で124. 5gal(水平NS成分)、31. 5gal(上下成分)、地中基盤で、

45. 5gal(水平NS成分)、29. 6gal(上下成分)であり、継続時間も約180秒以上で極めて長く、今までで最大の加速度記録である。また、地震後も多くの余震記録を得たが、その多くは、最大10gal程度であり、継続時間も、40秒以下程度で短かった。

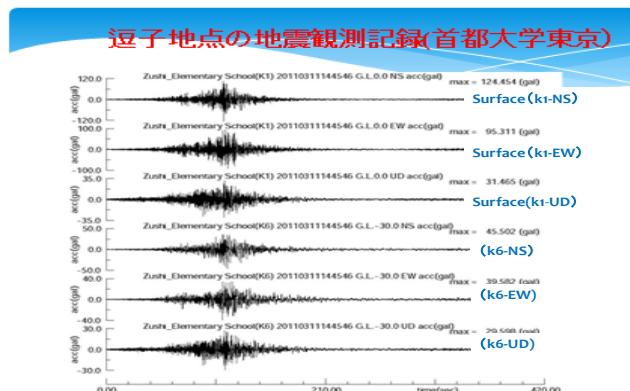


図6 逗子の地震観測データ(k1&k6)(EQ. 3. 11)

(2) 東日本大震災と前後中小地震の比較

東日本大震災以前の中小地震(EQ. 1:2008/10/8)、東日本大震災(EQ. 3. 11)及び余震観測(EQ. 2:2011/12/3)で得られた地表(k1)及び基盤(k6)の加速度波形のフーリエスペクトルと伝達関数(k1/k6)を算定し、これらの比較により表層地盤の応答特性を評価した(図7)。

表層地盤の卓越振動数は、東日本大震災(EQ. 3. 11)では、2. 04Hz(1次)、6. 21Hz(2次)、また、過去の中小地震(EQ. 1)では、2. 31Hz(1次)、6. 70Hz(2次)が得られた。EQ. 3. 11とEQ. 1を比較すると、卓越振動数(1次: 12%、2次: 10%)の減少が見られ、地盤の非線形性が確認された。また余震(EQ. 12. 03)では、2. 31Hz(1次)、6. 87Hz(2次)が得られた。この結果は、EQ. 1とほぼ同じであり、東日本大震災以前の状態(弾性状態)に戻っている事が判った。

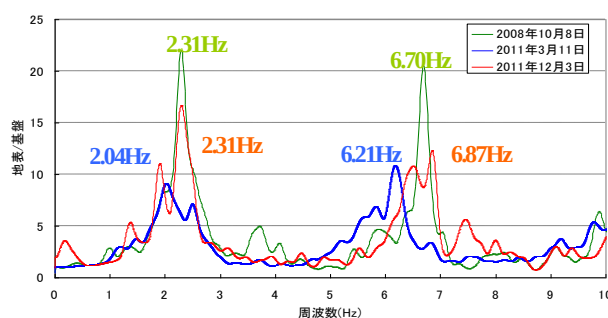


図7 逗子の地震観測データによる伝達関数(k1/k6)
中小地震 (EQ. 1とEQ. 3. 11と余震(EQ. 2)の比較

6. 時間領域のモード解析および数値モデル同定解析^{2), 3), 5)}

(1) 解析手順

モード解析と同定解析の解析手順を図8に示す。

①はじめに、地震観測記録を使用して時間領域で、モー

ド解析を行い、固有値、固有ベクトルと伝達関数(地表/基盤)を求め、表層地盤の周波数特性を把握する。

②次に、モード解析で得られた伝達関数を使用して、地盤の数値モデル同定解析を行い、モデルの地盤物性値(せん断波速度と減衰定数)を同定する。

③最後に同定された地盤モデルを既往の地盤物性値データ等と比較して妥当性を検証し、地盤や構造物の動特性・耐震性を検討し、最適設計に反映する。

(2) 時間領域のモード解析手法²⁾

モード解析は、観測記録を使用して対象系のモード定数(固有値と固有ベクトル)を算出し、系の周波数特性を明らかにすることを目的とする。非比例減衰を有する振動系の運動方程式は次式となるが、系の運動がこの方程式に従うことを前提として考える。

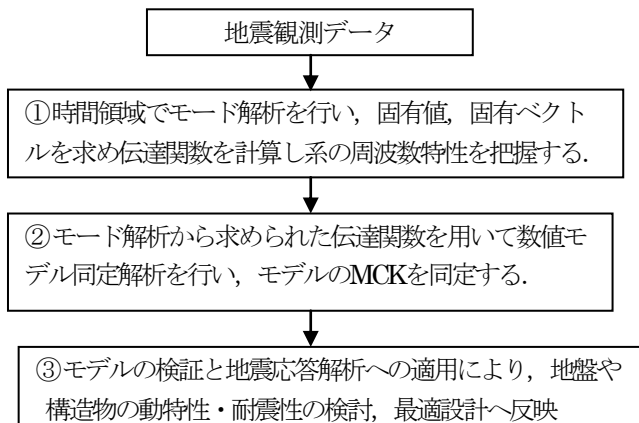


図8 モード解析・同定解析のフローチャート

$$M\ddot{\mathbf{x}}(t) + C\dot{\mathbf{x}}(t) + K\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (2)$$

ここに、 M 、 C 及び K は、それぞれ質量、減衰、剛性の各行列であり、 $\mathbf{x}(t)$ 及び $\mathbf{f}(t)$ は、それぞれ相対変位、外力のベクトルである。入力が加速度の場合は外力 $\mathbf{f}(t)$ は慣性力となる。

モード定数は、次の式(1)の解(回帰式)と観測値間の誤差を評価して求められる。

$$\ddot{\mathbf{x}}(t) = 2\text{Real} \left[\sum_{r=1}^N \left\{ \lambda_r \alpha_r e^{\lambda_r t} + \mathbf{u}_r^T \beta_r(t) \right\} \lambda_r \mathbf{u}_r \right] \quad (3)$$

ここに、 λ_r 、 $\mathbf{u}_r$ はそれぞれ第 r 次の固有値、固有ベクトルである。 $\beta_r(t)$ は $\dot{\beta}_r(t) = \lambda_r \beta_r(t) + \mathbf{f}(t)$ を満たす。

式(3)より、 $\ddot{\mathbf{x}}(t)$ に対して λ_r は非線形の関係に $\mathbf{u}_r$ は線形の関係に各々あるため、解析では個別に扱い誤差の二乗和が所定の値以下になるまで演算を繰り返す。

外力に対する伝達関数 $T(\omega)$ は、解析より求められるモード定数 λ_r 、 $\mathbf{u}_r$ を使用して次式より算出される。

$$T(\omega) = \sum_r \frac{\omega^2 \mathbf{u}_r^T M \mathbf{I}}{i\omega - \lambda_r} \mathbf{u}_r + \mathbf{I} \quad (4)$$

ここに、 $\mathbf{I}$ は単位ベクトルである。

(3) 数値モデル同定解析手法²⁾

同定解析は、評価物理量として伝達関数を扱う。ただし、伝達関数は物性値に関して非線形のため、解析では、その修正量について摂動法により線形化を行い、観測値との間の誤差の最小化を条件に修正量の最確値が算出される。そして演算を繰り返せば物性値の真値の推定値が求められる。ここに、観測値としてモード解析結果(式(3))を使用する。伝達関数 $T(\omega)$ の回帰式は、物性値をベクトル $\mathbf{p}$ として摂動法より次のように表される。

$$T(\omega, \mathbf{p}) \approx T(\omega, \mathbf{p}_0) + \sum_{n=1}^N a_n \frac{\partial T(\omega, \mathbf{p}_0)}{\partial p_n} \Delta p_n \quad (5)$$

ここに、 $\partial T / \partial p_n \cdot \Delta p_n$ は摂動 Δp_n に対する λ_r 、 $\mathbf{u}_r$ の一次摂動の関数である。 N は物性値の個数、 $\mathbf{p}_0$ は初期物性値である。展開係数 a_n は誤差の最小化より求

められ、修正量 $\delta \mathbf{p}_n = a_n \Delta p_n$ が与えられる

7. モード解析・同定解析による表層地盤の地震応答特性と地盤構造特性の評価 - 東日本大震災と過去の中小地震の比較 -

東日本大震災の地震データ(EQ. 3. 11)および過去の中小地震データ(東京湾地震(8/29/98)と千葉県北西部地震(9/13/99) ; EQ. 1))及び余震(EQ12. 03)を用いて、モード解析、数値モデル同定解析を行い、表層地盤の振動特性と構造特性を比較検討した。

(1) モード解析結果

図9、図10は東日本大震災の記録に対してモード解析を適用して求められた伝達関数(k_1/k_6 : 図9)と地表の加速度波形(k_{1NS} 成分: 図10)の比較図である。このように解析結果は良好である。

表1に、東日本大震災(A)、中小地震および余震(B)の各観測記録による解析結果を固有振動数と減衰定数の値で示す。ここに、中小地震は2つの地震を同時に処理して求められた平均値である。東日本大震災と中小地震を比較すると、1次固有振動数の減少($1.95/2.17=0.90$)と減衰定数の増加(1次: $9.38/7.04=1.33$)があり、東日本大震災により、地盤の非線形性が解析によっても確認された。また、その後の余震では、大震災以前の状態に回復していることも判明した。

図11に、東日本大震災、中小地震および余震の伝達関数を比較して示す。これら3本の伝達関数は、入力レベルの違いによる表層地盤の応答特性(固有振動数の変化)を良く捉えている。

(2) 同定解析結果

モード解析より求められた伝達関数を参照して同定した表層地盤の物性値(せん断波速度:Vs(m/s)と減衰定数(h%))を表2に示す。東日本大震災の結果(Case A)は、層厚の最も厚い第3層(層厚16m)で、過去の中小地震(Case B)に比べて、せん断波速度の約15.6%の減少と減衰定数の約27%の増加があり、地盤の非線形性が認められる。また、余震(Case C)では、以前の中小地震の結果と良く一致しており、元の状態に回復している事が示された。

以上、モード解析と同定解析により、同定された地盤構造の妥当性が検証された。

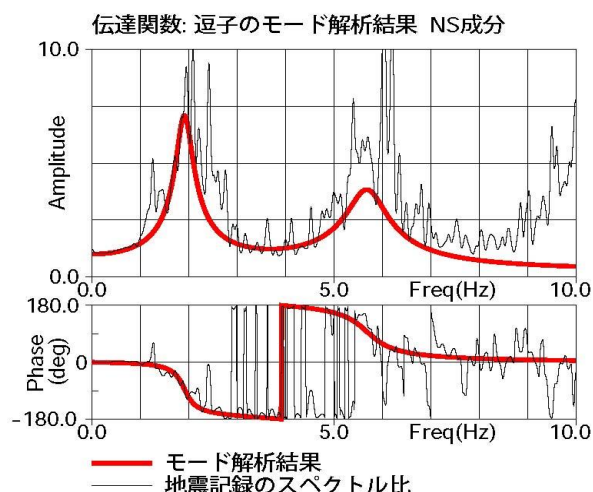


図9 伝達関数(k1/k6) (モード解析と地震観測結果との比較)

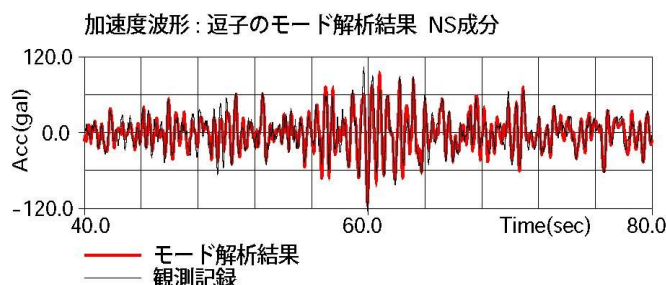


図10 応答加速度波形(k1NS成分)のモード解析と地震観測結果との比較

表1 東日本大震災(A), 中小地震および余震(B)の
(A) 東日本大震災

モードNo.	固有振動数(Hz)	減衰定数(%)
1	1.95	9.38
2	5.80	7.15

(B) 中小地震と余震(括弧内数値)

モードNo.	固有振動数(Hz)	減衰定数(%)
1	2.17(2.23)	7.04(6.60)
2	6.38(6.40)	5.94(5.60)

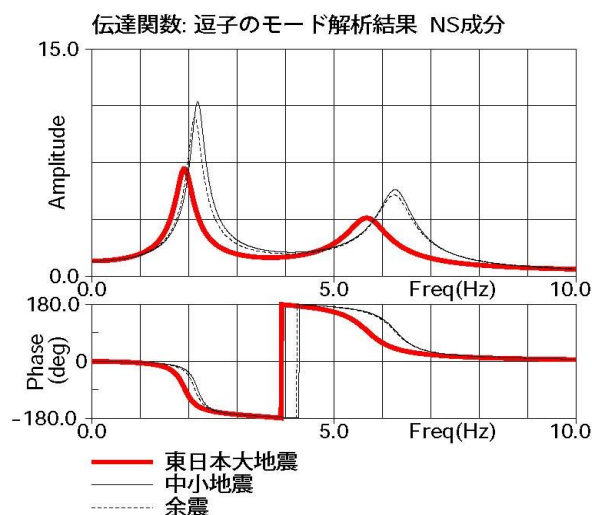


図11伝達関数(k1/k6)の東日本大震災、
中小地震および余震の比較

表2 地盤構造物性値の同定結果(Vsとh)
東日本大震災と中小地震の比較

Layer No.	Unit weight (t/m³)	Shear wave velocity & Damping factor Vs(m/s) & (h)			Depth (m)
		Case B before EQ.3.11	Case A EQ.3.11	Case C after EQ.3.11	
1	1.70	150.1(0.07)	150.0(0.14)	150.0(0.07)	1.0
2	1.80	134.6(0.08)	132.5(0.14)	134.1(0.08)	4.0
3	1.50	222.5(0.11)	187.6(0.14)	216.5(0.12)	20.0
4	1.90	237.6(0.04)	228.9(0.04)	236.0(0.04)	24.0
5	2.00	253.3(0.03)	251.6(0.03)	252.9(0.03)	25.0
6	2.00	400.8(0.03)	400.4(0.03)	400.7(0.03)	26.0
7	2.10	700.6(0.03)	700.3(0.03)	700.3(0.03)	30.0

8. 表層地盤の3次元地震応答解析^{7,8)}

同定された地盤構造をベースとして、逗子地域の3次元地盤モデルを作成し、地震入力として①東日本大震災(EQ. 3.11)と②余震(EQ. 12.03)を用い、3次元地震応答解析を実施し、表層地盤の応答(加速度、変位、ひずみ等)および伝達関数(地表/基盤)を算定し、観測結果との比較や両解析結果との比較を通して解析法の妥当性を検討した。解析条件の詳細は以下の通りである。

(1) 解析条件

- ① 3次元モデル地盤(図12)の寸法は、NS方向(約1.2km)×EW方向(約3.5km)×深さ方向(40m)である。境界条件は、下方境界(基盤-40m)を完全固定、両側方境界は、水平ローラ支承とダンパーを付けた場合を想定した。
- ② モデル地盤の地盤構造(基盤深さや層厚)は、既往のボーリングデータ、同時に実施した物理探査試験結果および常時微動観測結果等を用いて算定し、これらの結果

に基づいて設定した。

③地盤の物性値は、同定解析結果(表2)に基づいて設定した。東日本大震災による同定解析結果は、中小地震の結果より、せん断波速度の減少と減衰定数の増加が見られ地盤の非線形特性の影響が考慮されている。

④解析法は、TDAPⅢ(直積積分法)を用いた⁶⁾。

⑤地震入力波は、地中基盤の地震波(k6)の3成分(NS&EW&UD)を用い、解析上の基盤(-40m)に引き戻してから入力した。

⑥解析ケースは、東日本大震災(Case A)と余震(Case C)の場合とも、各2ケースとし、それぞれ水平2方向入力(case-1)および水平2方向と上下動方向の同時入力(case-2)である。これらの解析より、不整形地盤の応答特性、すなわち、水平地震入力による上下動の発生や上下地震入力による水平動発生等について検討評価した。さらに、側方境界の境界条件(水平ローラーと側方ダンパー)が地盤応答に及ぼす影響について検討・評価した。

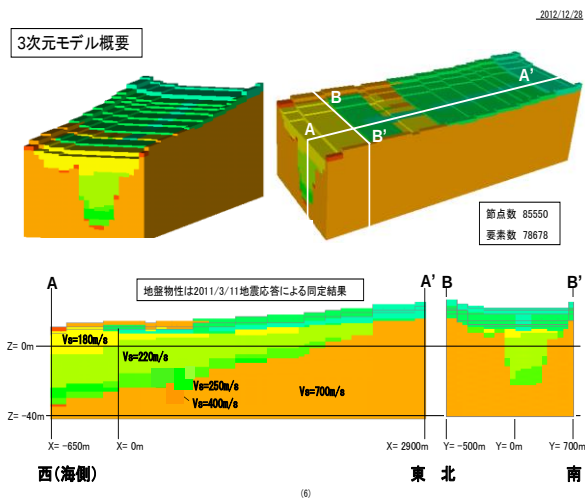


図12 逗子地盤の3次元解析モデル

(2) 解析結果

①図13に、東日本大地震(EQ. 3. 11)(Case A)と余震(EQ. 12. 03)(Case C)によるk1地点(X=0)と伝達関数(地表/基盤)の解析値を観測結果(EQ. 3. 11)と比較して示す。解析結果と観測結果は、良く対応している。また、これら2つの解析結果を比較すると、東日本大震災の場合は、余震結果に比べて一次卓越振動数の減少($f_1=1.98\text{Hz}$ から 1.85Hz)と振幅の低下が見られた。東日本大震災により、地盤物性が非線形化(V_s の減少と減衰定数の増加)したため、解析結果も地盤の非線形応答特性を顕著に再現している。

②一方、図14-aに、東日本大地震(EQ. 3. 11)(Case A)と余震(EQ. 12. 03)(Case C)によるk4地点の伝達関数(k_4/k_6)と解析値を比較して示す。2つの伝達関数の形状には、差がなくほぼ同じである。この原因は、この領域では、同定解析によって非線形が確認された軟質な第3層が

弱な層がほとんどなく大地震の影響を受けていないためと考える。また、図14-bに、余震による伝達関数の観測値を示す。観測結果(図14-a)と解析結果(図14-b)は、1次卓越振動の値や形状が、ほぼ一致している。

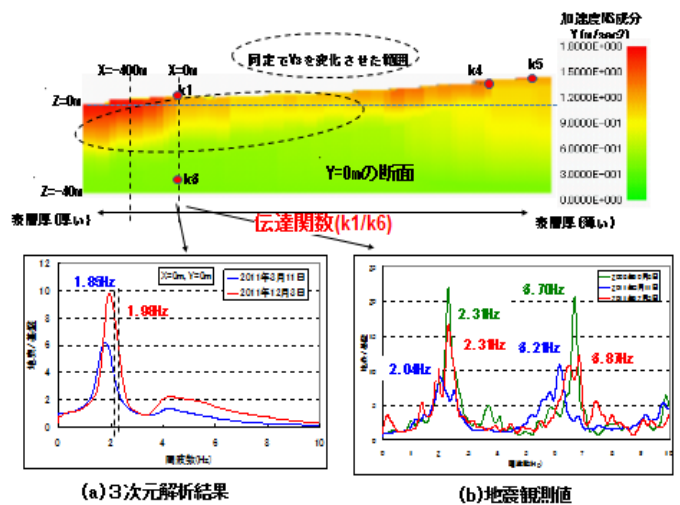


図13 表層地盤の伝達関数(k1地点)
東日本大震災(EQ. 3. 11)と余震(EQ. 12. 03)の比較

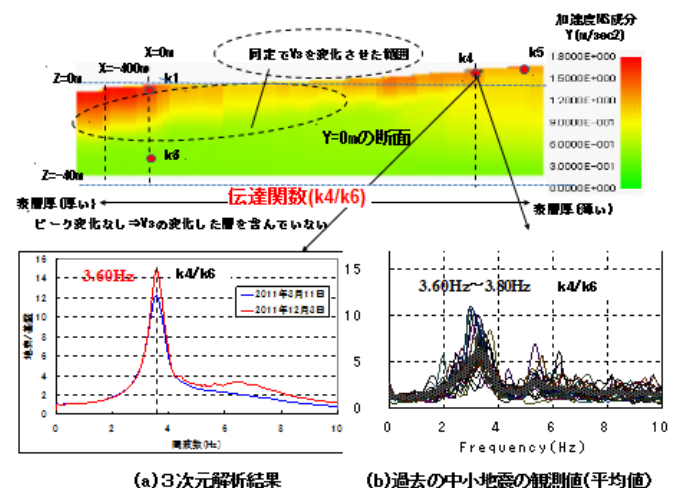


図14 表層地盤の伝達関数(k4地点)
東日本大震災(EQ. 3. 11)と過去の中小地震の比較

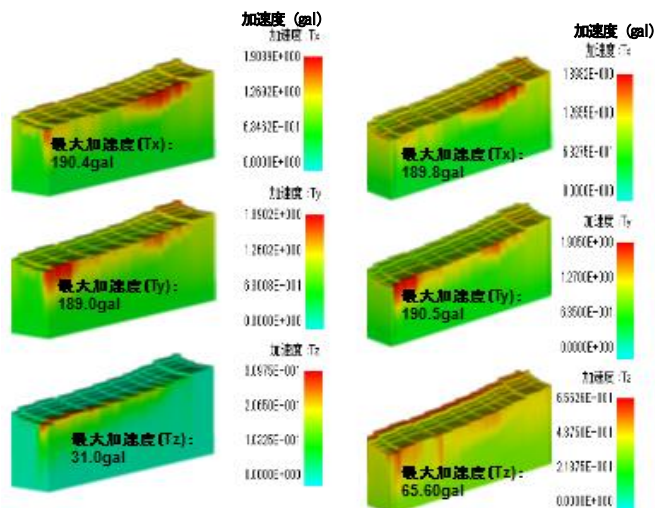
以上の結果、3次元解析結果は、地震観測結果と良く対応しており、同定解析手法、同定モデルおよび3次元解析法の妥当性が確認できた。

③図15にEQ. 3. 11の地震観測データ(a)水平2方向入力(Case-1)と(b)水平2方向+上下入力(Case-2))による表層地盤の3次元加速度応答分布(図15)を比較して示す(a)Cas-1の解析結果から、水平地震動入力によって、地盤の不整形な地域で、水平動の増幅だけでなく、上下動が発生することが判った。すなわち、不整形が顕著な田越川河口付近(○)では、基盤の水平入力加速度($T_{xb}=39.6\text{gal}$ (EW方向), $T_{yb}=45.5\text{gal}$ (NS方向))に対し、地表面での水平応答加速度が、最大で、 $T_{xs}=190.4\text{gal}$ (EW方向), $T_{ys}=189.0\text{gal}$ (NS方向)となり、EW方向(4.8倍), NS方向(4.1

倍)の増幅が見られた。さらに、水平動の約16%の上下動(T_z $s=31.0$ gal)が生じた事が判った(図15-a)。

(b)一方 Case-2 と Case-1 を比較すると全域に渡り地表面の水平応答値に殆ど差が無く、上下動が地表面の水平応答に及ぼす影響は殆ど見られない(図15-b)。

(c)また、地表面における上下動の応答は、不整形が顕著な田越川河口付近(○)で、上下動入力(29.6gal)に対して65.5galとなり、約2倍の増幅が見られたが、他の不整形性の卓越していない地域では、殆ど増幅していない。



(a) Case-1: 水平2方向入力 (b) Case-2: 水平2方向+上下方向入力

図15 表層地盤の3次元加速度応答分布

④図16に、東日本大震災(EQ.3.11)による地盤のせん断ひずみ(γ_{yz})の第3層(深さ-15m)内の断面、A-A'断面のEW方向の分布およびY=0の3断面(B-B'断面、C-C'断面、D-D'断面)の深さ方向の分布を示す。地盤中のせん断ひずみ(γ_{yz})は、○印で示したように、平面的には軟弱層が厚い田越河口付近、深さ方向では、-15m付近の第3層と第7層と基盤の境界付近で最も大きいことが判った。

⑤図17に、A-A'断面の地表面の水平最大加速度のEW方向(x軸)の分布を示す。表層厚さや物性の違いにより差がみられ、特に、表層厚さの深いB-B'断面付近で大きい値を示した。

⑥図18に、B-B'断面($X=0$ m)の水平最大加速度の深さ方向分布と地表面の水平最大加速度のNS方向(Y軸)の分布を示す。応答加速度は、表層厚さおよび地盤物性により大きく変化しており、特に盆地形状の部分で大きく変化しており地盤の不整形性の影響を強く受けていることが示された。

⑦側方境界(水平ローラーと側方ダンパー等)が、地盤応答に及ぼす影響について検討したが、境界部を除き殆ど影響が無いことが判った。

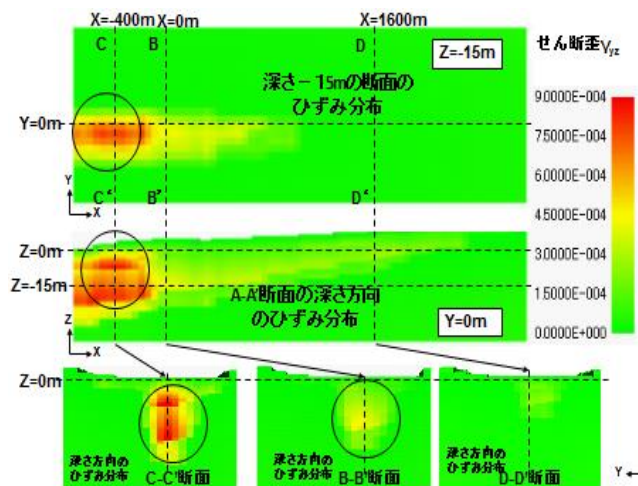


図16 表層地盤のせん断ひずみ分布(γ_{yz})

(EQ3.11 水平2方向同時入力)

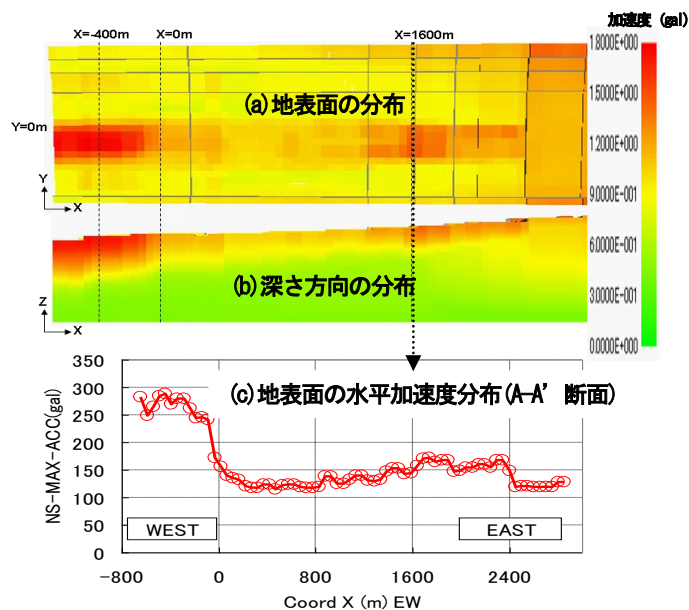


図17 表層地盤の水平応答加速度(NS成分)の分布

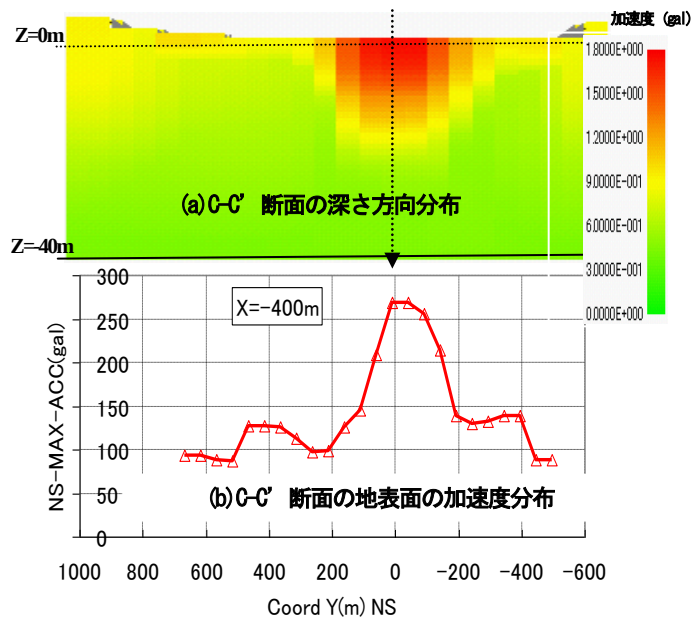


図18 表層地盤(C-C'断面: $X=-400$ m)の
水平最大加速度(NS成分)

9. まとめ

- (1) 首都大学東京では、1994年より逗子の不整形地盤の地表5地点(k1~k5)、地中1地点(k6: 深さ-30m)に地震計を設置して水平アレー・鉛直アレー地震観測を実施し、今まで200以上の地震記録を得てきた。2011年3月11日に発生した東日本大震災(M=9.0)では初めて継続時間が極めて長い地震動を経験し、地表で水平加速度124.5gal、上下加速度: 31.5galの過去最大の記録を得た。
- (2) 観測記録を用いて、フーリエスペクトルや伝達関数(地表/基盤)を算定し、表層地盤の応答特性(卓越振動数や減衰定数)を検討・評価した。
- (3) 東日本大震災と過去の中小地震と比較した結果、軟弱層が深く堆積しているk1地点付近で、地盤の卓越振動数の減少と減衰定数の増加があり、地盤の非線形性を確認された。
- (4) 過去の中小地震の結果は、同時に実施した常時微動観測による結果と良く一致しており表層地盤には、非線形性は示されていない。また、東日本大震災以後の余震による結果は、過去の中小地震による結果とほぼ同じであり、以前の状態に戻っていることを確認した。
- (5) 開発したモード解析手法と同定解析手法を過去の中小地震観測データ、東日本大震災の地震データ及びその後の余震データに適用し、表層地盤の応答特性を算定すると共に地盤構造を同定した。
- (6) 東日本大震災により同定された地盤モデルは、過去の中小地震により同定された物性と比較すると、層厚の最も厚い第3層(層厚16m)で、約15.6%減少し、地盤の非線形性が解析的にも確認できた。また、大震災以後の余震では、以前の中小地震の結果と良く一致しており、元の状態に回復している。
- (7) 同定モデルと地震記録を用いて3次元地震応答解析を実施した。解析結果と観測結果は良く対応し一致しており、解析法(モデル)の妥当性が確認された。また、基盤構造の不整形な盆地状の勾配の急な部分では、地表においては水平地震動入力の場合でも、水平動の増幅だ

けで無く、かなり大きな上下動が発生する等、不整形地盤特有の応答特性が解析的にも明らかとなった。

参考文献

- 1) 岩楯敬広, 小田義也 強地震観測アレーがとらえたローカルサイトエフェクト-地震観測データに基づく逗子の不整形表層地盤の地震応答特性-, 都立大学総合都市研究80 号, 2003, p41-51
- 2) 安藤幸治, 岩楯敬広: 時間領域のモード解析による振動系の動的特性の同定とその適用, 土木学会論文集, No.450/ I -20, pp.151~160, 1992.7
- 3) 安藤幸治, 岩楯敬広「水平アレー観測記録による表層地盤の同定とその適用—逗子市地域の地盤特性—」土木学会論文集 No.732/I-63, pp.213-229, April 2003
- 4) Takahiro IWATATE, Akira OHOKA. 'Surface Ground Motion Characteristics of Zushi-site', Memoirs of Faculty of Engineering Tokyo Metropolitan University No.46 1996
- 5) T.Iwatate, Y.Oda and K.Ando. 'IDENTIFICATION OF SURFACE GROUND CHARACTERISTICS USING HORIZONTAL ARREY EARTHQUAKE OBSERVATION RECORDS AND ITS APPLICATION', 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004
- 6) ARK Information Systems Inc. 'TDAP III (Time domain 3-dimensional Dynamic Analysis Program) Version 3.01, Theoretical Manual' October 2008
- 7) T.Iwatate, N.Naito, K.Ando & Y.Oda 'The seismic characteristics of surface ground of Zushi-Site', 15WCEE, Paper No.0430(Poster), Lisbon, Portugal 2012, 9
- 8) 岩楯敬広, 内藤伸幸, 安藤幸治, 小田義也: 東日本大震災による逗子地域の不整形地盤の地震応答特性の検討・評価, 地域安全学会梗概集, No.32, pp.21-22, 2012.5

(? 受付)

THE SEISMIC CHARACTERISTICS OF SURFACE GROUND OF ZUSHI-SITE DURING THE 2011 EAST JAPAN GREAT EARTHQUAKE

Takahiro IWATATE, Nobuyuki NAITO, Koji ANDO and Yoshiya ODA

The largest surface ground acceleration (124.5gal) was recorded on the surface (k1) and bed rock (-30m depth: k6) of the Tokyo Metropolitan University observation station at Zushi-site during The 2011 East Japan Great Earthquake (M=9.0). From these data, the dynamic characteristics of the surface ground of Zushi-site were examined and the structure model of the surface ground was identified by the developed identification analysis using the observed data(k1&k6). Moreover, the three dimensional seismic response analyses of the Zushi-site were performed using k6 for input motions by TDAP III evaluated the dynamic behaviours of the surface ground.

The calculated results agreed well with the observed ones. These results are useful for the seismic disaster mitigation and seismic designs of the structures and ground in Zushi-site.