

(25) 逗子地点の表層地盤の地震動特性

東京都立大学 正 岩橋敏広 神奈川大学 正 荏本孝久
○ 東京都立大学 学 大岡 晃 東電設計(株) 正 安藤幸治

1. まえがき

筆者らは、逗子市地域防災計画の一環として、地震被害想定に必要な基礎的な地震データを取得するため、市内全域の約200地点で常時微動観測を実施するとともに、1994年6月より地盤構造の異なった市内の5地点(地表)において、平面アレー地震観測を実施している。今までに、千葉県南部地震($M=5.2$ 、 $6/29$)、北海道東方沖地震($M=8.1$ 、 $10/4$)、三陸はるか沖地震($M=7.5$ 、 $12/28$)等、18地震約54成分の地震記録が得られた。本報告は、常時微動観測データ、地震観測データに基づいて表層地盤の振動特性について検討するとともに、筆者らが提案した物性値同定解析手法を本地震観測データに適用しその有効性について検証したものである(文献1)。

2. 観測の概要

逗子市は、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、その流域は、比較的軟弱な沖積低地となっている(図1)。

常時微動観測は、市内全域を $100\text{m} \times 100\text{m}$ メッシュに分割し原則として $200\text{m} \times 200\text{m}$ メッシュの交点を観測点として、一点を固定の基準点とし、残りを移動点として約200地点で行った。一方、地震観測は、1994年6月より地盤特性の異なった田越川流域の地表3点(K1:逗子小学校、K4:沼間小学校、K5:沼間公民館)と、小坪川流域の地表1点(K2:小坪小学校)、および南側丘陵地の岩盤上1点(K3:青少年野外活動センター)に地震計を設置し、平面アレー観測を実施している。

3. 常時微動観測データ

(1) 図2に常時微動観測で得られた表層地盤の卓越振動数(1Hz以上)を示す。また図3に各観測点のフーリエスペクトルと基準点のスペクトルとの比の最大値(最大スペクトル比)にその点における卓越周期を乗じた値の分布を示す。この値は表層地盤の揺れやすさを相対的に表すものと考え、ここでは、増幅率評価値と呼ぶことにする。表層地盤の卓越振動数、増幅率評価値も表層地盤の厚さに応じて変化しており表層地盤の地震動特性を良好に表していると考えられる。

4. 地震観測データ

(1) 1994年6月より1995年1月まで得た18地震($M=4.3 \sim 8.1$)約54成分の地震記録の中で最大の加速度記録は、千葉県南部地震($M=5.2$)によるもので、沖積低地地表(K4点)で45gal、岩盤上(K3地点)で8galを記録した(表1)。

(2) 図4に、千葉県南部地震の時刻歴波形およびフーリエスペクトルの1例を示す。田越川流域および小坪川流域の低地では、水平方向の卓越振動数は、それぞれ2.1Hz~4.7Hzとなっており、表層地盤の特性が顕著に表れた。また、岩盤上の記録では、顕著な卓越振動数は見られなかった。これらの地盤の振動特性は、他の地震の場合もほぼ同様の傾向であった。

(3) 今回地震観測点で地震観測直後に3回常時微動観測(1回2日間)を実施したが、常時微動観測から得られた地盤の振動特性は、地震記録から得られた結果と良い一致を示した。

5. 地表面観測記録による地盤物性値の同定

5.1 同定手法の概要

2地点の地表面観測地点が共通の岩盤上にある場合、それら地点の地表面から表層地盤の影響が無視し得る程に十分深い岩盤（共通基盤）においては、両地点への加速度入射波（上昇波）はほぼ同じ波形になると考えられる。今、2地点の地表面で観測された地震加速度波形があり、それら地点の地盤構造が概略知られているならば、共通基盤における入射波は重複反射理論によって求められる。そして、これら2つの共通基盤における入射波が同じである条件より2地点の地盤を構成する最適な物性値の同定が可能となる。

5.2 理論式の展開

2地点の地表面加速度波形を y_1 、 y_2 （既知量）、デコンボリューションによって計算された加速度入射波を z_1 、 z_2 とすれば、これらは地盤物性値、即ち密度 ρ_{lk} 、せん断波速度 V_{slk} 、減衰係数 h_{lk} 、層厚 H_{lk} （ $l=1, 2$:地盤番号、 k :層番号）、および時間 t の関数として次のように表される。

$$z_L(t) = z_L(\rho_{lk}, V_{slk}, h_{lk}, H_{lk}, y_L, t) \quad \text{----- (1)}$$

z_1 、 z_2 が同一の波形になるように最小二乗法に従って両者の差の二乗和を評価する。目的関数は次のようになる。ただし、入射波 z_L は物性値 p_{lk} に対して非線形の関係にあるので物性値の微小変化量 Δp_{lk} についてテーラーの定理に従って展開をし、その一次まで採って線形化を行い、目的関数を定義する。

$$\varepsilon = \sum_j (z_{10j} - z_{20j})^2 = \sum_j [z_{10j} + \sum_k \frac{\partial z_{1j}}{\partial p_{1k}} \Delta p_{1k} - z_{20j} - \sum_k \frac{\partial z_{2j}}{\partial p_{2k}} \Delta p_{2k}]^2 \quad \text{----- (2)}$$

ここに、 z_{10j} 、 z_{20j} は初期物性値による入射波である。添字 j は時間 $t = (j-1)\Delta t$ を意味する。 Δt は観測記録のサンプリング間隔である。 j の Σ は解析対象時間についての総和であり、 k の Σ は考慮する物性値パラメータに関する総和である。

z_1 と z_2 が同一となるような物性値は、式(2)の値の最小化条件式 $\partial \varepsilon / \partial p_{lk} = 0$ により求められる。即ち、この条件式より正規方程式を作成して Δp_{lk} について解いて物性値を更新し、式(2)の値あるいは Δp_{lk} の変化率の絶対値がある許容値に収束するまで演算、① z_1 、 z_2 の計算、② Δp の計算、③ p の更新、④ ε の評価、を繰り返すことにより、物性値の最確値が得られる。

5.3 観測地点の地盤物性値の同定

逗子地震観測地点5地点の内、隣接するk1、k3、k4の3地点を対象とし、地震観測記録を用いて地盤物性値を同定した。使用した地震記録は千葉県南部地震(EQ1)の加速度EW成分である。解析では地盤調査により求められた物性値(密度 ρ 、せん断波速度 V_s 、減衰係数 h 、層厚 H)を初期値とし、共通基盤（深さ100mを想定）において入射波が同一になることを条件として、はじめに①k1とk4の記録を用いて地盤物性値を同定し、次に②k1とk3の記録から①で同定したk1の物性値を固定してk3の物性値を同定した。そして双方の入射波の同一性を確認するために互いに他の入射波に対する地表面応答を計算して実測波形と比較した。

5.4 解析結果

①の解析から得られた基盤の入力波形を図5（実線はk1の、点線はk4のそれぞれ同定値による波形）に、k1の地表面波形を図6（実線はk4から作成した入射波に対する応答、点線は実測波形）に示す。また地盤物性の同定解析結果を表2、表3に、せん断波速度の深さ分布（同定値：太線、初期値：細線）を図7に示す。2つの基盤の入力波形は、ほぼ一致している。また、同定値を初期値と比較すると地表面付近の物性が若干小さくなる傾向を示したが全体的に差は無かった。②の解析から得られたk3の地盤物性の同定値も初期値と大きな差は無く良い対応を示した（表4）。また、k2、k5地点についても同様な結果を得た。これらの結果から、各点の観測記録は他方の観測記録及び地盤同定値によって良く再現されていると考えられる。以上より、ここに提案した地表面観測記録を利用した同定手法は地盤物性モデルの最適化を図る上で有効であることが検証できた。今後、同定した最適モデルを用いて地震時の地盤応答特性の数値シミュレーションを実施する予定である。

参考文献1 逗子市地域防災計画（地震対策編） 策定事業調査研究報告書 平成6年2月

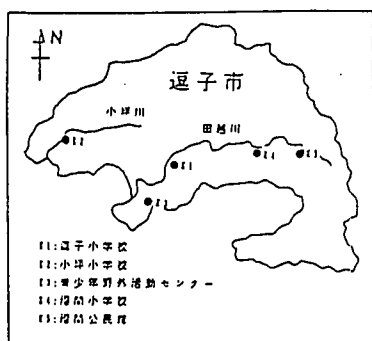


図1 逗子市と観測地点

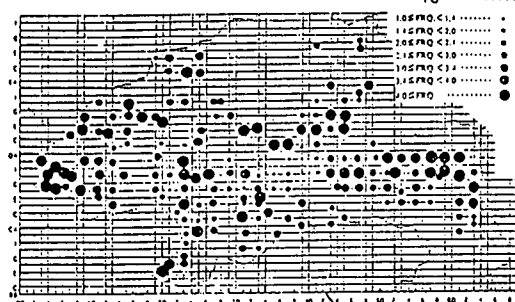
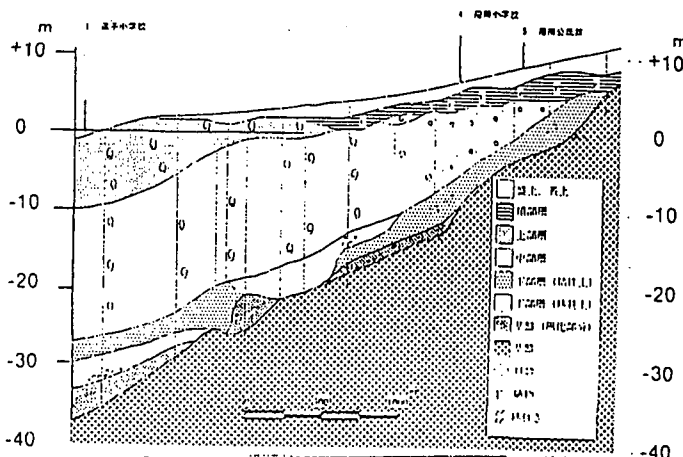


図2 地盤の卓越振動数分布図

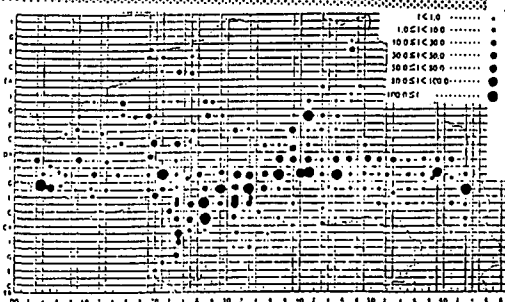


図3 増幅率比評価値分布図

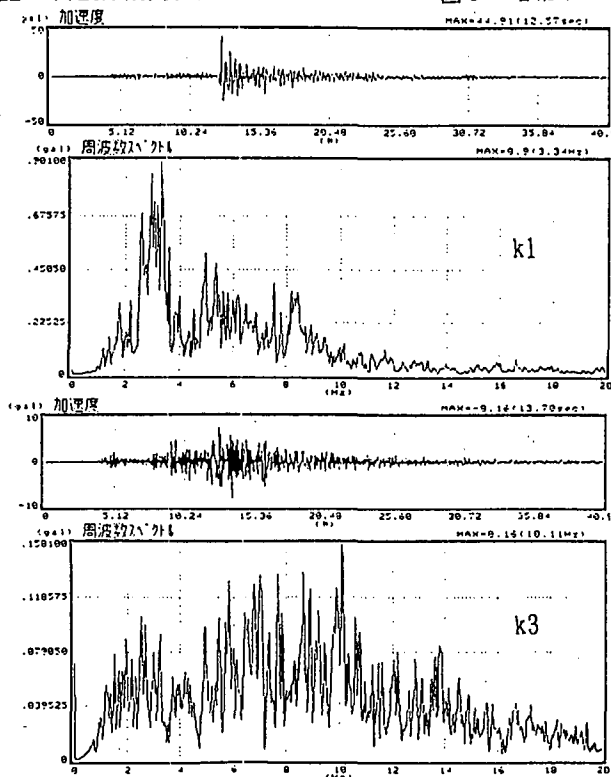


図4 千葉県南部地震の時刻歴波形と応答スペクトル (k1, k3)

表1 逗子地域で観測した地震(94年6月~95年1月)

地震番号	地震名	日時	発生日時刻	緯度	経度	深度(km)	マグニチュード
1	千葉県南部	94/6/29	11:01:58	34° 57'	139° 53'	60	5.2
2	千葉県北部	94/7/20	13:32:	35° 46'	140° 07'	81	4.3
3	ウラジオストック	94/7/22	3:38:00	42° 17'	133° 33'	551	7.6
4	東京湾	94/9/4	10:19:10	35° 47'	140° 08'	83	4.3
5	房総半島沖	94/9/11	17:09:52	34° 35'	140° 33'	77	5.1
6	神奈川県西部	94/10/4	2:56:00	35° 11'	138° 59'	24	4.3
7	北海道東方沖	94/10/4	22:22:57	43° 22'	147° 40'	30	6.1
8	神奈川県西部	94/10/25	15:06:17	35° 11'	138° 59'	4	4.9
9	千葉県東方沖	94/10/29	23:43:06	34° 53'	140° 43'	70	4.9
10	茨城県南西部	94/11/4	19:06:25	36° 04'	139° 55'	59	4.5
11	伊豆半島南方沖	94/11/9	3:47:34	34° 29'	139° 05'	0	4.2
12	三陸はるか沖	94/12/28	21:29:20	40° 27'	143° 43'	ごく浅い	7.5
13	東京湾	95/1/1	5:52:26	35° 37'	140° 06'	76	4.8
14	岩手県沖(12/28余震)	95/1/7	7:37:00	40° 03'	142° 04'	30	6.9
15	茨城県南西部	95/1/7	21:34:39	36° 17'	139° 59'	70	5.4
16	茨城県南西部	95/1/8	4:28:17	36° 19'	138° 58'	72	4.6
17	茨城県沖	95/1/10	3:00	35° 09'	141° 04'	30	6.3
18	兵庫県南部地震	95/1/17	5:46:52	34° 36'	135° 03'	14	7.2

表2 K1地点の地盤物性値の同定値と初期値の比較

層番号	密度(g/cm ³)		せん断波速度(m/s)		減衰定数		層厚(m)	
	初期値	同定値	初期値	同定値	初期値	同定値	初期値	同定値
1	1.70	1.65	150.0	142.8	0.050	0.050	1.00	0.78
2	1.80	1.86	130.0	92.7	0.050	0.043	3.00	2.75
3	1.50	1.46	100.0	213.6	0.050	0.040	16.00	15.94
4	1.90	1.91	220.0	242.1	0.050	0.047	4.00	3.95
5	2.00	2.00	250.0	250.6	0.050	0.049	1.00	0.95
6	2.00	2.00	400.0	399.6	0.050	0.050	1.00	0.98
7	2.10	2.10	700.0	630.0	0.020	0.012	74.00	74.65

表3 K4地点の地盤物性値の同定値と初期値の比較

層番号	密度(g/cm ³)		せん断波速度(m/s)		減衰定数		層厚(m)	
	初期値	同定値	初期値	同定値	初期値	同定値	初期値	同定値
1	1.70	1.66	150.0	148.9	0.050	0.050	1.00	0.99
2	1.50	1.44	100.0	70.0	0.050	0.049	3.00	2.99
3	1.80	1.81	130.0	135.0	0.050	0.050	1.00	1.00
4	1.50	1.58	100.0	232.2	0.050	0.049	7.00	7.01
5	1.60	1.61	190.0	220.1	0.050	0.050	3.00	3.01
6	2.10	2.10	700.0	630.0	0.020	0.012	85.00	85.00

表4 K3地点の地盤物性値の同定値と初期値の比較

層番号	密度(g/cm ³)		せん断波速度(m/s)		減衰定数		層厚(m)	
	初期値	同定値	初期値	同定値	初期値	同定値	初期値	同定値
1	2.00	2.00	400.0	376.9	0.050	0.026	1.00	1.73
2	2.10	2.10	700.0	630.0	0.012	0.012	99.00	98.27

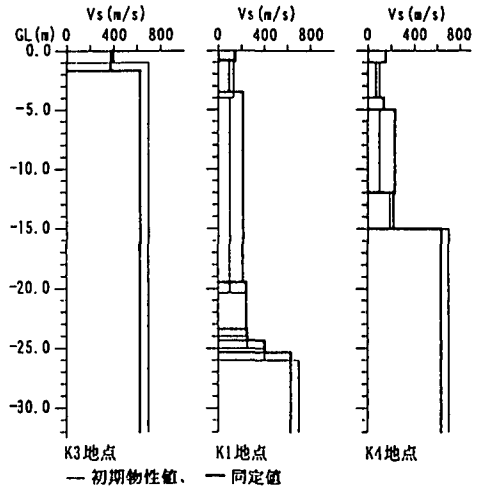


図7 k1、k3、k4地点におけるせん断波速度の初期値と同定値の比較

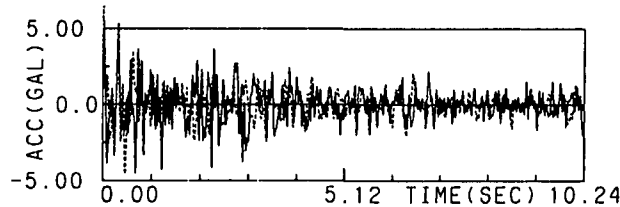


図5 k1及びk4の観測波形から作成した共通地盤の入力波(実線:k1、点線:k4)

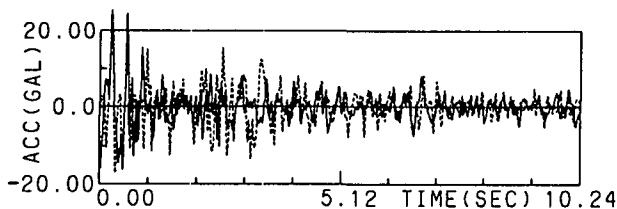


図6 k1の地表面応答(実線:k4の入射波に対する応答、点線:観測波形)