



横浜市高密度強震計ネットワークの記録に基づく 地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度との関係

翠川三郎¹⁾、駒澤真人²⁾、三浦弘之³⁾

- 1) 正会員 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 人間環境システム専攻、教授 工博
e-mail : smidorik@enveng.titech.ac.jp
- 2) 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 人間環境システム専攻、元大学院生
- 3) 正会員 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 人間環境システム専攻、助教 博士(工学)
e-mail : hmiura@enveng.titech.ac.jp

要 約

横浜市高密度強震計ネットワークで観測された地震記録と地盤データを用いて、最大加速度、最大速度、計測震度および応答スペクトルに対する増幅度と地盤の平均S波速度との関係を検討した。最大加速度、最大速度および計測震度に対する増幅度と平均S波速度との関係については、Mが小さな地震の記録とMがより大きな地震の記録による結果は異なり、これはMの大小で卓越する周期成分が異なるためと考えられる。Mの比較的大きな地震の記録から、最大加速度、最大速度および計測震度に対する増幅度はそれぞれ深さ10m、30mおよび20~30mまでの平均S波速度とよい対応がみられる。応答スペクトルに対する増幅度は、周期0.6秒程度までは深さ10mまでの平均S波速度、周期0.6秒~0.8秒程度では深さ20mまでの平均S波速度、周期0.8秒程度以上では深さ30mまでの平均S波速度とよい対応がみられ、周期0.3秒程度までの短周期に比べてより長い周期で地盤の増幅度が地盤の平均S波速度の相関が高い傾向にある。

キーワード： 地盤増幅度、平均S波速度、最大加速度、最大速度、計測震度、
応答スペクトル

1. はじめに

地震動の強さは、地盤の増幅特性の影響により場所毎に大きく変化することが知られている。地盤の増幅特性を把握するにはS波速度構造データを用いて解析的に計算できるが、広域での評価を行うには既存データの収集・整理や新たな地盤調査などに膨大な作業が必要となる。そのため、比較的簡便に得られる地盤種別等の定性的な指標を用いて、表層地盤の増幅特性が評価されてきた。近年では、より定量的な指標として、表層地盤の平均S波速度を用いて地盤の増幅特性を概略的に評価することが行われている。

地盤の平均S波速度と地盤増幅度の関係については、米国で1970年代にBorcherdt et al.(1978)¹⁾により検討がなされ、1989年ロマプリエタ地震の強震記録に基づいて、より定量的な関係が提案されている²⁾。わが国でも、翠川・他(1992)³⁾が1987年千葉県東方沖地震の強震記録に基づいて、地盤増幅度と平均S

波速度との関係式を提案している。その後、地盤増幅度と平均S波速度の関係に関する研究は多くの研究者により行われている⁴⁾⁻¹¹⁾。これらの研究では、ある深さ d までの地盤の平均S波速度 $AVS(d)$ と地盤増幅度の間に対数で線形関係があるものとして関係式が提案されている。多くの場合、深さ 30m までの平均S波速度 $AVS(30)$ が用いられているが、 $AVS(10)$ の方が相関が高いという指摘⁹⁾もある。また、地盤増幅度の平均S波速度に対する依存性も研究毎にやや異なり統一的な結果は得られていないことや、スペクトル振幅や計測震度に対する地盤増幅度の検討例が限られていること、などの課題もある。

これらの課題を踏まえ、地盤増幅度と平均S波速度の関係についてさらに検討を加えるために、本研究では、横浜市高密度強震計ネットワークで観測された地震記録と地盤データを用いて、最大加速度、最大速度、計測震度および応答スペクトルに対する増幅度と地盤の平均S波速度との関係を検討した。

2. 地震記録と地盤データ

2.1 対象とした地震と地震記録

本研究では、横浜市高密度強震計ネットワークで得られた地震記録を用いた。地震観測点を図1に示す。横浜市高密度強震計ネットワークは、市内に150台の強震計が設置されており、非常に密な観測網となっている。そのため、観測点間距離が短く、2地点での記録の比には、伝播特性の影響は現れにくく、地盤特性の差が抽出しやすいものと考えられる。対象とした地震は、1997年9月から2007年1月までに発生したもので、横浜市の観測点での最大震度が2.5以上かつ140ヶ所以上で記録が得られた計

表1 使用した地震

No.	Date	Time	Depth (km)	Mj	震源地
1	1997.09.08	08:40	109	5.1	東京湾
2	1998.01.14	02:17	78	5.0	千葉県北西部
3	1998.01.16	10:57	53	4.7	千葉県南部
4	1998.05.03	11:09	5	5.9	伊豆半島東方沖
5	1998.05.16	03:45	73	4.8	千葉県南部
6	1998.06.14	22:17	46	5.7	千葉県東方沖
7	1998.08.29	08:46	65	5.3	東京湾
8	1998.11.08	21:40	80	4.7	東京湾
9	1998.11.28	00:22	65	4.5	千葉県北西部
10	1999.05.22	09:48	21	4.3	神奈川県西部
11	1999.09.13	07:56	76	5.1	千葉県北西部
12	2000.02.11	20:57	17	4.4	神奈川県西部
13	2000.06.03	17:54	48	6.1	千葉県東方沖
14	2000.07.01	16:01	16	6.5	新島・神津島近海
15	2000.07.15	10:30	10	6.3	新島・神津島近海
16	2000.07.21	03:39	49	6.4	茨城県沖
17	2000.07.30	21:25	17	6.5	三宅島近海
18	2000.08.29	08:56	86	4.6	神奈川県東部
19	2001.09.18	04:23	42	4.4	東京湾
20	2002.05.19	05:00	72	4.6	千葉県北西部
21	2002.06.14	11:42	57	5.1	茨城県南部
22	2002.07.13	21:45	65	4.8	茨城県南部
23	2003.05.12	00:57	47	5.3	千葉県北西部
24	2003.05.17	23:33	47	5.3	千葉県北東部
25	2003.05.26	18:24	72	7.1	宮城県沖
26	2003.08.18	18:59	69	4.8	千葉県北西部
27	2003.09.20	12:54	70	5.8	千葉県南部
28	2003.10.15	16:30	74	5.1	東京湾
29	2003.11.12	17:26	395	6.5	三重県南東沖
30	2004.07.17	15:10	69	5.5	千葉県南東沖
31	2004.08.06	03:23	75	4.6	東京湾
32	2004.09.05	23:57	44	7.4	三重県南東沖
33	2004.10.06	23:40	66	5.7	茨城県南部
34	2004.10.23	17:56	13	6.8	新潟県中越地方
35	2004.10.23	18:34	14	6.5	新潟県中越地方
36	2005.02.16	04:46	46	5.3	茨城県南部
37	2005.04.11	07:22	52	6.1	千葉県北東部
38	2005.04.11	15:34	73	4.4	千葉県北西部
39	2005.06.20	01:15	51	5.6	千葉県北東部
40	2005.07.23	16:34	73	6.0	千葉県北西部
41	2005.07.28	19:15	51	5.0	茨城県南部
42	2005.08.07	01:05	73	4.7	千葉県北西部
43	2005.08.16	11:46	42	7.2	宮城県沖
44	2005.10.16	16:05	47	5.1	茨城県南部
45	2005.10.19	20:44	48	6.3	茨城県沖
46	2006.02.01	20:35	101	5.1	千葉県北西部
47	2006.04.21	02:50	7	5.8	伊豆半島東方沖
48	2006.05.02	18:24	15	5.1	伊豆半島東方沖
49	2006.06.20	06:47	66	4.6	千葉県北西部
50	2006.08.31	17:18	76	4.8	東京湾
51	2006.09.07	10:57	69	4.6	千葉県北西部
52	2006.10.14	06:38	64	5.1	千葉県南東沖
53	2007.01.16	03:17	175	5.8	静岡県伊豆地方

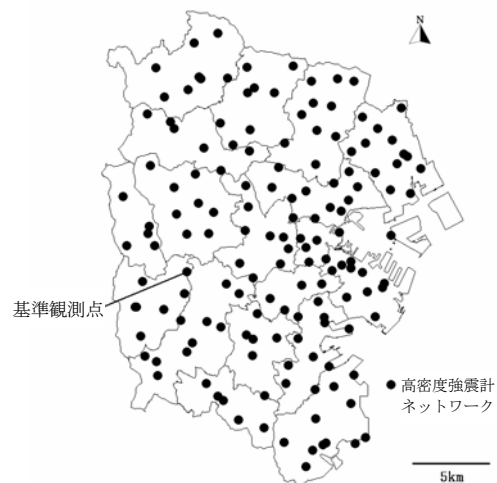


図1 横浜市の地震観測点



図2 使用した地震の震央分布

53 地震(M4.3~7.4)である。これらの地震のリストを表 1 に、地震の震央分布を図 2 に示す。震源距離は 100~200km のものが多く、最大で 400km 程度である。用いた記録のほとんどは最大加速度で 100cm/s² 以下であり、地盤の非線形性の影響はほぼ無視できるものと考えられる。

2.2 地盤の平均S波速度

各観測点のPS検層結果¹²⁾に基づき以下の式により地盤の平均S波速度 $AVS(d)$ を算出した。

$$AVS(d) = \frac{d}{\sum t(i)/V_s(i)} \quad (1)$$

ここで、 d は地表からの深さ(m)、 $AVS(d)$ は地表から深さ d (m)までの地盤の平均 S 波速度(m/s)、 $t(i)$ および $V_s(i)$ は第 i 層での層厚(m)および S 波速度(m/s)である。

本研究では、 $d=10, 20, 30$ m の 3 つのケースを検討した。地盤調査は土丹層まで行われ、45 地点で調査深度が 30m 以上となっている。調査深度が 30m 未満のデータについては、司・翠川(1999)¹³⁾を参考にして、最下層の S 波速度が表 2 に示す値以上の場合に、最下層の S 波速度が深さ 30m まで続くとした。この条件を満足しないものは除外して、結局 $AVS(10)$ が得られた地点は 137 地点、 $AVS(20)$ 及び $AVS(30)$ が得られた地点は 110 地点となった。これらのヒストグラムを図 3 に示す。 $AVS(30)$ の値は 100~600m/s に分布している。本研究では、S 波速度で約 600m/s の層がほぼ地表に現れている地点(iz02)を基準観測点とした(図 1 参照)。

3. 地盤増幅度と地盤の平均S波速度との関係

3.1 最大加速度・最大速度に対する地盤増幅度と地盤の平均S波速度との関係

本研究で用いた最大加速度・最大速度は、水平 2 成分の時刻歴の 2 乗和の平方根の最大値とした。なお、用いた地震記録は加速度記録であるため、周波数領域で数値積分を施し速度波形を計算した。その際、図 4 に示すような周期 0.1 秒から周期 T_3 秒まで平坦な台形フィルターを使用した。図 4 の周期 T_3, T_4 の値は、各地震のフーリエスペクトルから、長周期側でスペクトル形状が単調増加を始める周期を読み取り、地震毎に設定した。用いた T_3 の値は 4~15 秒の範囲にある。

最大加速度に対する増幅度(AEA)および最大速度に対する増幅度(AEV)は、基準観測点での最大振幅に対する各観測点での最大振幅の比とした。基準観測点と他の観測点は、最大で 15km 程度離れているため距離の補正を行った。本研究では、記録は実体波からなるものと考え、各地震毎に基準観測点までの震源距離に対する各観測点までの震源距離の比を地盤の増幅度に掛け合わせることで実体波の幾何減衰の補正を行った。以下に定義式を示す。

表 2 調査深度 30m 未満のデータに対する使用基準

最下層までの深さ(m)	9.0	15.0	17.5	20.0	22.5	25.0	27.5
最下層のS波速度(m/s)	600	500	400	350	250	200	100

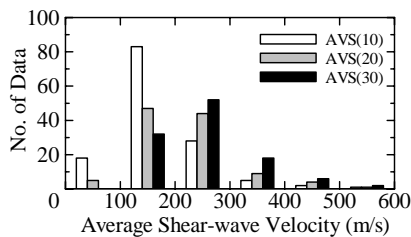


図 3 地盤の平均 S 波速度の頻度分布

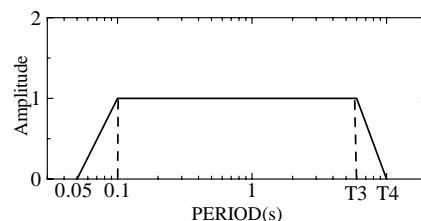


図 4 使用したバンドパスフィルター

$$AFA = \frac{PGA_s}{PGA_r} \cdot \frac{X_s}{X_r} \quad (2)$$

$$AFV = \frac{PGV_s}{PGV_r} \cdot \frac{X_s}{X_r} \quad (3)$$

ここで、 PGA および PGV はそれぞれ最大加速度および最大速度で、 X は震源距離である。添え字の r は基準観測点、 s は各観測点を示している。次に、最大加速度および最大速度に対する増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係を下式のように表し、切片 a 、勾配 b および相関係数 r の値を算出した。

$$\log AFA = a + b \cdot \log AVS(d) \quad (4)$$

$$\log AFV = a + b \cdot \log AVS(d) \quad (5)$$

図5および6は、それぞれ最大加速度および最大速度に対する増幅度と平均 S 波速度との関係をプロットしたものである。図の上段が表1のNo.10の神奈川県西部の地震(M4.3)に、下段がNo.16の茨城県

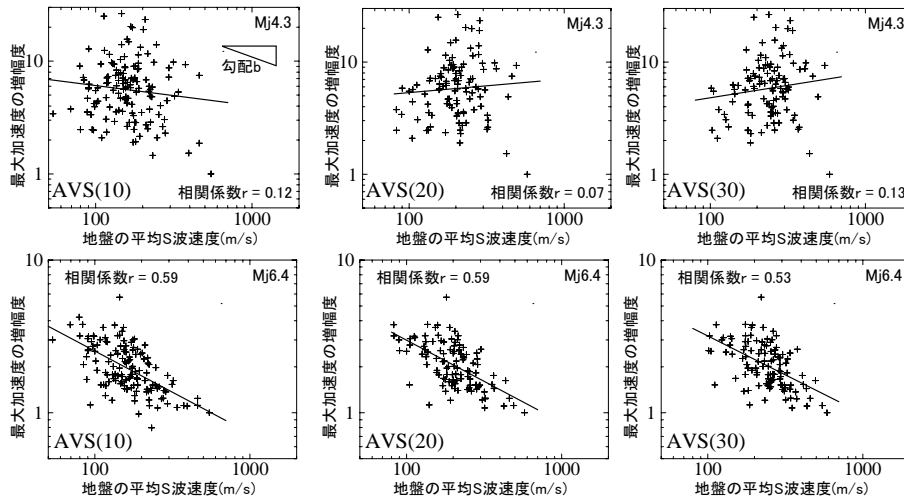


図5 最大加速度の増幅度と平均S波速度との関係 (M4.3とM6.4)

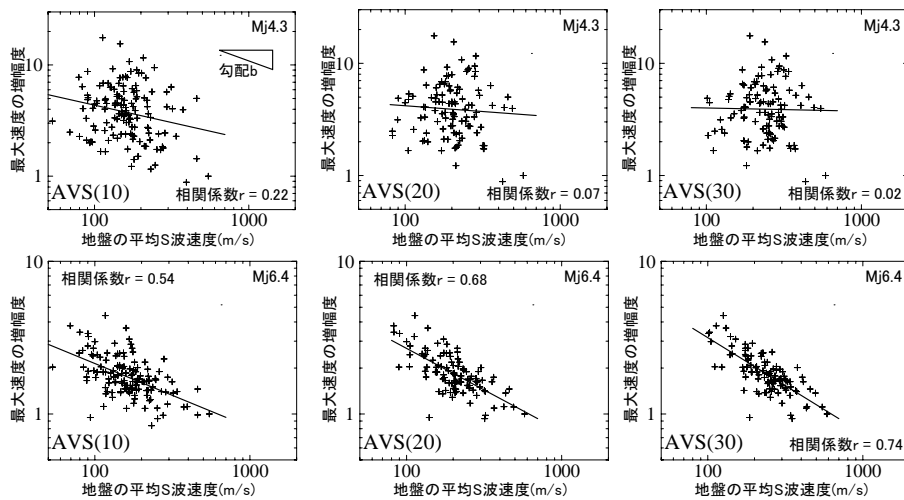


図6 最大速度の増幅度と平均S波速度との関係 (M4.3とM6.4)

沖の地震(M6.4)に対する結果である。図の左側は AVS(10), 中央は AVS(20), 右側は AVS(30)に対応している。M が小さな地震ではばらつきが大きいので相関が低く、傾きも小さい。一方、M がより大きな地震ではばらつきが小さいため相関が高く、傾きも大きい。図 7 および 8 はそれぞれ最大加速度および最大速度に対する増幅度に対して、各地震で得られた勾配 b および相関係数 r の値と M との関係を示している。ここでは AVS(30)のケースを示している。このように、M が大きくなるにつれ勾配 b の絶対値および相関係数 r の値が大きくなる傾向がみられる。なお、図の白丸は後述する解析から除いた地震に対する結果で、最大速度に対する増幅度の場合には全体の傾向からはずれている。

そこで、対象とする 53 地震を M でグループ化し、各グループでのデータから最大加速度および最大速度に対する増幅度と平均 S 波速度との関係を検討することにした。ただし、M が 6.0 以上の地震のうち、No.14, 15, 17 の新島・神津島および三宅島近海での地震と No.34, 35 の新潟県中越地震および No.32 の三重県南東沖の地震では S 波部分に後続して現れる表面波の影響が最大加速度や最大速度にみられたため、これら 6 地震は解析から除いた。

地震規模により①M4.9 以下(17 地震)、②M5.0~5.4(14 地震)、③M5.5~5.9(8 地震)、④M6.0~7.2(8 地震)の 4 つのグループに分類し、グループ毎に得られた回帰係数 a , b および相関係数 r の値を表 3 に示す。また、図 9 および 10 に、それぞれ最大加速度および最大速度に対する増幅率に対する勾配 b と相関係数 r を示す。これらより、最大加速度および最大速度のいずれの場合でも、M が大きな地震ほど勾配 b の絶対値および相関係数 r の値が大きくなる傾向がみられ、M6.0~7.2 のグループで最大となる。

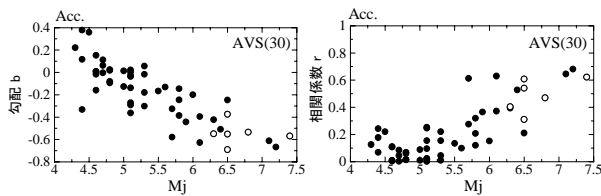


図 7 勾配 b および相関係数 r と Mj との関係 (最大加速度)

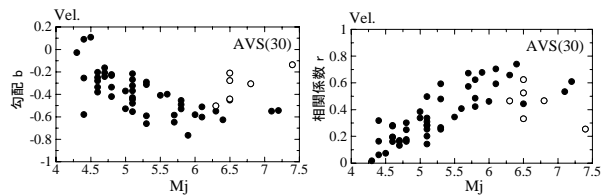


図 8 勾配 b および相関係数 r と Mj との関係 (最大速度)

表 3 回帰係数 a , b および相関係数 r の値 (最大加速度および最大速度)

最大加速度									
Mj	AVS(10)			AVS(20)			AVS(30)		
	a	b	r	a	b	r	a	b	r
4.3~4.9	1.12	-0.27	0.29	0.67	-0.06	0.06	0.43	0.05	0.04
5.0~5.4	1.35	-0.38	0.39	1.02	-0.22	0.22	0.78	-0.11	0.10
5.5~5.9	1.32	-0.39	0.47	1.25	-0.34	0.38	1.05	-0.25	0.26
6.0~7.2	1.45	-0.48	0.59	1.47	-0.46	0.56	1.41	-0.43	0.49

最大速度									
Mj	AVS(10)			AVS(20)			AVS(30)		
	a	b	r	a	b	r	a	b	r
4.3~4.9	1.38	-0.41	0.46	1.13	-0.28	0.31	1.00	-0.22	0.23
5.0~5.4	1.51	-0.49	0.55	1.45	-0.44	0.49	1.38	-0.40	0.41
5.5~5.9	1.22	-0.43	0.60	1.37	-0.47	0.65	1.42	-0.48	0.61
6.0~7.2	1.06	-0.38	0.58	1.32	-0.47	0.68	1.48	-0.53	0.71

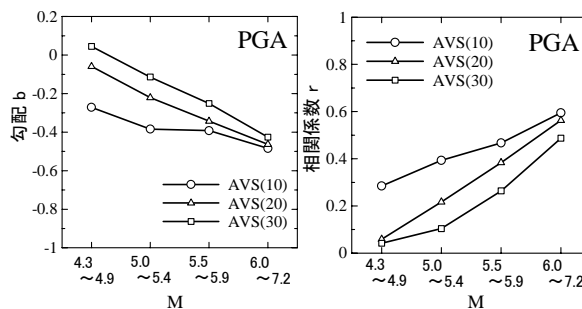


図 9 地震規模毎の勾配 b と相関係数 r の変化 (最大加速度)

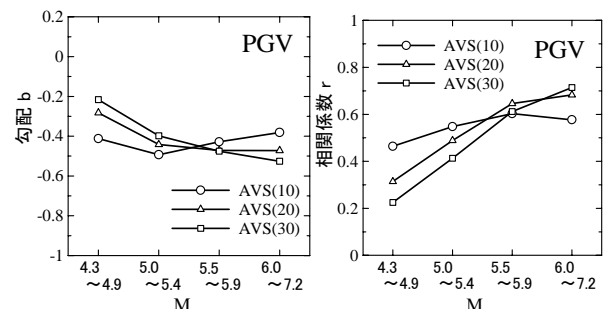


図 10 地震規模毎の勾配 b と相関係数 r の変化 (最大速度)

図 11 に M4.5 と M6.5 の地震における基準観測点でのフーリエ加速度スペクトルを示す。これを見ると、M が小さな地震では周期 0.4 秒程度以下の短周期成分が優勢で、M が大きな地震ではより長い周期成分が優勢であり、スペクトル特性が大きく異なっている。短周期では地盤の減衰などの影響で地盤の軟弱度(平均 S 波速度)が地盤増幅度に及ぼす影響が小さくなることが予想され、このことは既往の分析結果¹⁴⁾や後述する応答スペクトルに対する増幅度の結果にも現れていることから、M の大きさにより勾配 b や相関係数 r の値が変化することは定性的には説明できる。このことは、M の小さな地震記録による検討結果が M の大きな地震の場合に適用できるとは限らないことを示唆している。そこで、M6.0 以上の地震記録を用いた結果を図 12 および 13 に示す。これを見ると、最大加速度に対する増幅度は $AVS(10)$ と対応が良く、最大速度に対する増幅度は $AVS(30)$ と対応が良い傾向がみられる。この場合の(4)式および(5)式の標準偏差はそれぞれ 0.11 および 0.08 となる。

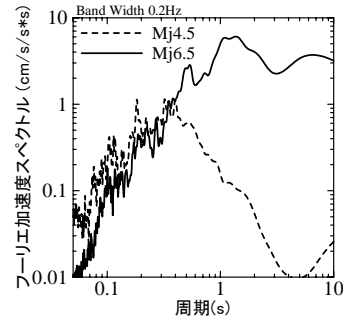


図11 Mの違いによるスペクトル特性の違い

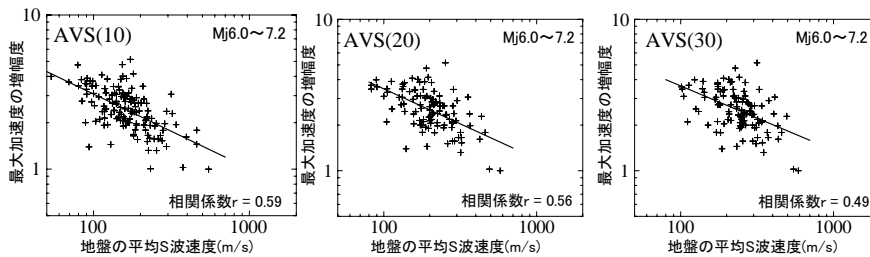


図12 最大加速度に対する増幅度と平均S波速度との関係(M6.0~7.2)

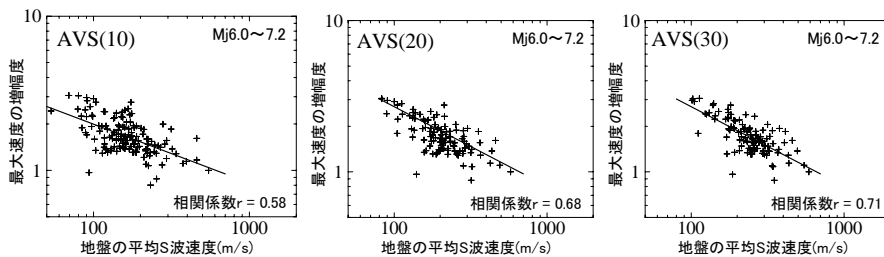


図13 最大速度に対する増幅度と平均S波速度との関係(M6.0~7.2)

3.2 計測震度に対する地盤増幅度と地盤の平均S波速度との関係

計測震度はフィルターされた地震動の振幅の対数に比例するように定義されていること¹⁵⁾から、計測震度に対する増幅度を各観測点での計測震度と基準観測点での計測震度の差 ΔI で定義する。距離補正を行った計測震度に対する増幅度の定義式を以下に示す。

$$\Delta I = (I_s - I_r) + 2 \log \left(\frac{X_s}{X_r} \right) \quad (6)$$

ここで、 I は計測震度、 X は震源距離である。添え字の r は基準観測点、 s は各観測点を示している。次に、得られた計測震度の増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係を式(7)のような回帰式で表し、切片 a 、勾配 b および相関係数 r の値を算出した。

$$\Delta I = a + b \cdot \log AVS(d) \quad (7)$$

図 14 は、計測震度に対する増幅度と平均 S 波速度との関係をプロットしたもので、図の上段が表 1 に示した No.10 の神奈川県西部の地震(M4.3)に、下段が No.16 の茨城県沖の地震(M6.4)に対する結果である。最大加速度および最大速度に対する増幅度の場合と同様に、M が大きな地震の方が相関係数 r および勾配 b の絶対値が大きくなる傾向がみられる。そこで、前節の検討と同様に、対象とした 53 地震を ①M4.3~4.9(17 地震)、②M5.0~5.4(14 地震)、③M5.5~5.9(8 地震)、④M6.0~7.4(14 地震)と 4 つのグループに分類して検討した。なお、計測震度は、周期 2 秒以上を低減させるフィルターを用いて算出されるために表面波の影響は小さく、前節で解析対象外とした 6 地震も含めている。

表 4 に、各グループに対して得られた回帰係数 a, b および相関係数 r の値を示す。図 15 に、グループ毎の勾配 b と相関係数 r を示す。最大加速度および最大速度に対する増幅度の場合と同様に、M が大きな地震ほど勾配 b の絶対値および相関係数 r の値が大きくなる傾向にある。M6.0 以上の地震記録を用いた場合の結果を図 16 に示す。計測震度に対する増幅度は AVS(20)ないし AVS(30)と対応が良く、これらの場合の(7)式の標準偏差は 0.18 となる。AVS(20)ないし AVS(30)と対応が良いことは、最大加速度および最大速度に対する増幅度の場合の中間的な結果で、計測震度が加速度と速度の中間的な量から決められること¹⁵⁾と符合している。

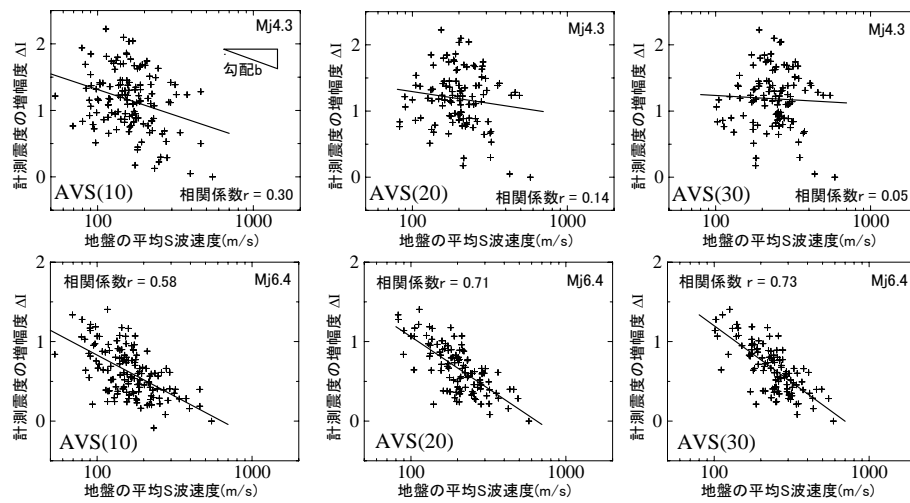


図14 計測震度の増幅度と平均S波速度との関係(M4.3とM6.4)

表4 回帰係数 a, b および相関係数 r の値(計測震度)

Mj	AVS(10)			AVS(20)			AVS(30)		
	a	b	r	a	b	r	a	b	r
4.3~4.9	2.94	-0.92	0.46	2.31	-0.60	0.30	1.87	-0.39	0.18
5.0~5.4	3.28	-1.10	0.57	3.00	-0.93	0.47	2.72	-0.78	0.37
5.5~5.9	3.12	-1.13	0.66	3.38	-1.18	0.68	3.33	-1.13	0.60
6.0~7.4	2.64	-0.96	0.62	3.39	-1.23	0.75	3.74	-1.34	0.76

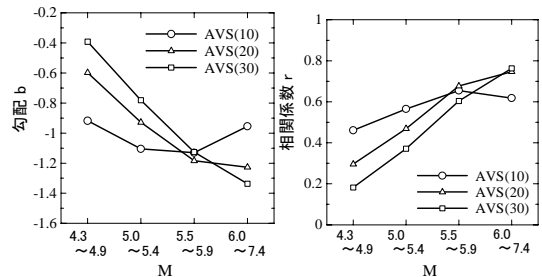


図15 地震規模毎の勾配 b と相関係数 r の変化(計測震度)

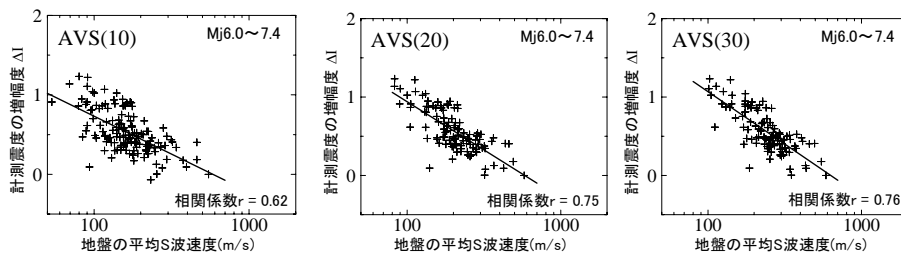


図16 計測震度の増幅度と平均S波速度との関係(M6.0~7.4)

3.3 応答スペクトルに対する地盤増幅度と地盤の平均S波速度との関係

ここでは、最大加速度および最大速度の場合と同様に、水平2成分を合成した2次元応答スペクトル ($h=0.05$)を用いて、応答スペクトルに対する増幅度を検討した。応答スペクトルの増幅度は表5に示す周期0.1~3秒の範囲にある10周期帯での基準観測点の応答スペクトルの平均値に対する各観測点での応答スペクトルの平均値の比とした。幾何減衰の補正をした応答スペクトルに対する増幅度 $AFR(T)$ は下式で表される。

$$AFR(T) = \frac{RES(T)_s}{RES(T)_r} \cdot \frac{X_s}{X_r} \quad (8)$$

ここで、 $RES(T)$ は各周期帯(T)での応答スペクトルの平均値で、 X は震源距離である。添え字の r は基準観測点、 s は各観測点を示している。式(8)で得られた応答スペクトルに対する増幅度 $AFR(T)$ と地盤の平均S波速度の関係を表式(9)のように表し、切片 $a(T)$ 、勾配 $b(T)$ および相関係数 r の値を算出した。

$$\log AFR(T) = a(T) + b(T) \cdot \log AVS(d) \quad (9)$$

ただし、 M の小さな地震ではパワーが小さく長周期側でのスペクトルの信頼性が乏しいと考えられるため、長周期側までスペクトルが安定している $M5.5$ 以上の22地震を使用した。表面波の影響は検討周期範囲が3秒までなので小さいと考え、3.1で除外した6地震も含めている。表6に、得られた回帰係数と相関係数を示す。図17に、 $AVS(d)$ 毎の勾配 b と相関係数 r の値を示す。これらより、周期0.6秒以下では $AVS(10)$ 、周期0.6秒~0.8秒では $AVS(20)$ 、周期0.8秒以上では $AVS(30)$ と対応が良い傾向がみられる。なお、前節と同様に、 M により地震をグループ化した検討も行ったが、結果に M による大きな違いはみられなかった。

図18に、周期帯毎に応答スペクトルの増幅度と平均S波速度との関係をプロットしたものを示す。各周期帯で最も対応が良い平均S波速度の深さに対する結果を用いている。これを見ると、周期0.3秒以下の短周期では相関係数は0.4程度ないしそれ以下で、勾配も-0.3~-0.4程度と小さい。周期0.3秒以上になると相関係数は0.5を越え、周期1秒弱で0.8程度と最大の値を示し、勾配も-0.8程度と大きくなる。周期1.5秒以上では相関係数はやや低下し0.6程度の値を示し、勾配も-0.3~-0.4程度と小さくなる。

表5 応答スペクトルの周期帯

周期帯(s)	0.1~0.15	0.15~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~3.0
--------	----------	----------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

表6 回帰係数 a, b および相関係数 r の値 (応答スペクトル)

周期(s)	AVS(10)			AVS(20)			AVS(30)		
	a	b	r	a	b	r	a	b	r
0.1~0.15	1.08	-0.30	0.35	1.00	-0.24	0.27	0.83	-0.17	0.17
0.15~0.2	1.12	-0.30	0.35	0.91	-0.20	0.21	0.70	-0.10	0.10
0.2~0.3	1.33	-0.40	0.43	1.08	-0.27	0.28	0.82	-0.16	0.15
0.3~0.4	1.70	-0.58	0.55	1.53	-0.48	0.45	1.30	-0.37	0.32
0.4~0.6	1.71	-0.64	0.61	1.85	-0.66	0.60	1.75	-0.60	0.51
0.6~0.8	1.43	-0.55	0.59	1.97	-0.75	0.73	2.11	-0.79	0.72
0.8~1.0	1.16	-0.44	0.47	1.87	-0.73	0.69	2.23	-0.85	0.76
1.0~1.5	0.74	-0.28	0.34	1.32	-0.51	0.55	1.74	-0.68	0.68
1.5~2.0	0.46	-0.17	0.28	0.81	-0.31	0.45	1.14	-0.44	0.60
2.0~3.0	0.35	-0.13	0.31	0.55	-0.21	0.45	0.74	-0.28	0.57

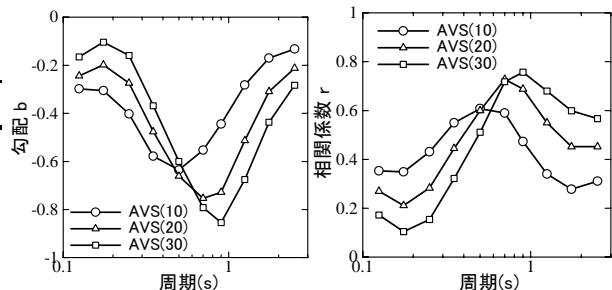


図17 AVS(d)の違いによる勾配 b と相関係数 r の比較(応答スペクトル)

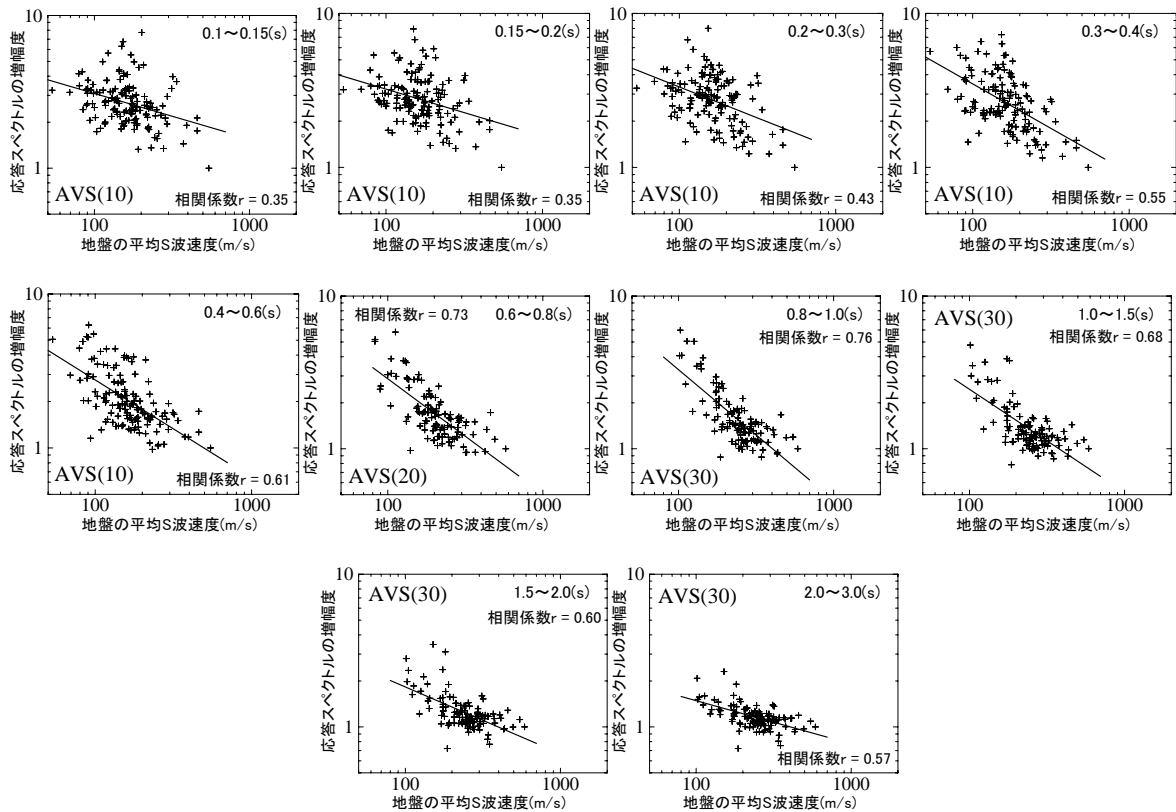


図18 応答スペクトルの増幅度と平均S波速度との関係
(各周期帯で相関の高い平均S波速度の深さを使用)

4. 既往の結果との比較

表7および8に、最大加速度および最大速度に対する地盤増幅度に関する既往の結果と本研究による結果を比較して示す。ここで、最適深さとは、異なる深さまでの地盤の平均S波速度と地盤増幅度との相関を検討した際に、より高い相関を示す平均S波速度に対応する深さのことである。表7に示す最大加速度の場合、川上・他(2004)⁷⁾の結果は最適深さを30mと決めて解析しているので除外すると、多くの研究で最適深さは10m前後であり、本研究の結果と対応している。勾配*b*については、相関係数が0.5を下回るものを除くと、既往の結果は-0.42～-0.58の範囲にある。本研究の結果-0.48は既往の結果と整合している。

最大速度に対する地盤増幅度については、最適深さは30mのものが多いが、川瀬・松尾(2004)⁶⁾では10mとしている。しかし、彼らの結果で、周期毎の地盤増幅度についての最適深さは、周期0.2～0.3秒程度で10m、周期0.3～1秒程度で20m、周期1～3秒程度で100mであり、本研究の結果と大きな相違はない。解析に用いられた記録はM4.5～7.3の地震によるもので、そのうち約85%はM5.5以下の地震である¹⁶⁾。本研究でも、Mが小さい場合には、短周期でスペクトルが卓越するために、図6に示したように最大速度に対する増幅度はAVS(10)とより高い相関を示しており、川瀬・松尾(2004)⁶⁾の結果もこの影響を受けて最適深さが10mとなった可能性が考えられる。

勾配*b*については、本研究の結果は-0.53であるが、既往の研究では-0.71～-0.88の範囲にある。また、3.3で示した応答スペクトルに対する増幅率も、最大速度と相関の高い周期0.4～1秒¹⁷⁾で、-0.6～-0.9程度と絶対値は比較的大きな値を示している。本研究の結果は、M6.0～7.2の8地震の記録によるが、その3/4の6地震はM6.0～6.5のもので、M6.5を越えるものが少ない。このことが本研究で勾配*b*が比較的小さくなった原因のひとつと推測され、Mのより大きな地震の記録に対する勾配*b*の絶対値については今後さらに検討を加える必要がある。

表7 本研究と既往の研究との比較(最大加速度)

文献	地震規模	勾配 b	相関係数 r	最適深さ(m)
本研究	Mi6.0~7.2	-0.48	0.59	10
翠川・他(1992)	Mj6.7	-0.42	0.66	10
片岡・山本(2002)	Mj5.4, 6.2, 5.6	-0.75	0.48	10
田村・他(2000)	Mj5.0~6.6	-0.44	0.36	8
川瀬・松尾(2004)	Mj4.5~7.3	-0.56	0.55	10
川上・他(2004)	Mi4.1~7.9	-0.15	0.15	(30)
藤本・翠川(2006)	Mw6.1~7.9	-0.58~ -0.77	-	15

表8 本研究と既往の研究との比較(最大速度)

文献	地震規模	勾配 b	相関係数 r	最適深さ(m)
本研究	Mi6.0~7.2	-0.53	0.71	30
翠川・他(1992)	Mj6.7	-0.71	0.78	30
田村・他(2000)	Mj5.0~6.6	-0.73	0.61	20
川瀬・松尾(2004)	Mj4.5~7.3	-0.73	0.68	10
川上・他(2004)	Mi4.1~7.9	-0.88	0.73	(30)
藤本・翠川(2006)	Mw6.1~7.9	-0.85	-	30

応答スペクトルに対する地盤増幅度と $AVS(30)$ の関係での勾配 b について、既往の結果と本研究による結果の比較を図19に示す。Boore et al.(1994)⁹⁾は北アメリカ西部で発生した浅い地震記録を用いて、Midorikawa et al.(1994)¹⁰⁾は1987年千葉県東方沖地震での強震記録を用いて、またKanno et al.(2006)¹¹⁾は主にK-NET、KiK-netによる地震記録を用いて、応答スペクトルに対する増幅度と $AVS(30)$ との関係を検討している。既往の研究でも、周期1秒前後で勾配 b の絶対値が最大となる傾向がみられ、本研究と概ね一致した結果となっている。

地盤増幅度と地盤のS波速度との間に相関があることについて、Joyner and Fumal(1984)¹⁸⁾は、簡単な波動論から説明し、地盤の増幅度は概ね表層地盤のS波速度の平方根に逆比例するとしている。これによれば、勾配 b の値は-0.5程度の値をとることになり、本研究の結果はこれと大きな矛盾はない。また、彼らは表層地盤のS波速度として、対象とする周期の1/4波長に相当する深さまでの地盤の平均S波速度を用いるのが適切としている。そこで、表層地盤のS波速度を150m/sと仮定すると、周期0.3秒弱での地盤増幅度は深さ10mまでの平均S波速度 $AVS(10)$ と、周期0.8秒での地盤増幅度は深さ30mまでの平均S波速度 $AVS(30)$ と、それぞれ相関が高くなることが期待される。3.3で示した応答スペクトルに対する地盤増幅度の結果はこれと整合している。また、最大加速度が0.1~0.3秒の周期成分と、最大速度が0.4~1秒の周期成分とそれぞれ相関が高い¹⁶⁾ことを考え合わせると、3.1で示した最大加速度および最大速度に対する地盤増幅度がそれぞれ $AVS(10)$ および $AVS(30)$ と相関が高いという結果もこれと整合する。

5. 結論

横浜市高密度強震計ネットワーク観測点で得られた地震記録とPS検層結果から算出した地盤の平均S波速度を用いて、地盤増幅度と地盤の平均S波速度との関係を検討し、以下の結論を得た。

- (1) 最大地動および計測震度に対する増幅度と平均S波速度との関係について、Mが小さな地震の記録とMがより大きな地震の記録による結果は異なる。これはMの大小で卓越する周期成分が異なるため、Mが小さな地震記録による結果がMの大きな地震の場合に適用できるとは限らないものと考えられる。
- (2) Mの比較的大きな地震での記録の結果から、最大加速度に対する増幅度は深さ10mまでの平均S波速度と対応が良く、最大速度については深さ30mまでの平均S波速度と対応が良い傾向がみられる。また、計測震度に対する増幅度は深さ20mないし30mまでの平均S波速度と対応が良い傾向がみられる。
- (3) 応答スペクトルに対する増幅度は、周期0.6秒程度までは深さ10mまでの平均S波速度、周期0.6秒~0.8秒程度では深さ20mまでの平均S波速度、周期0.8秒程度以上では深さ30mまでの平均S波速度と対応が良い傾向がみられる。また、周期0.3秒程度までの短周期に比べてより長い周期で地盤の増幅度

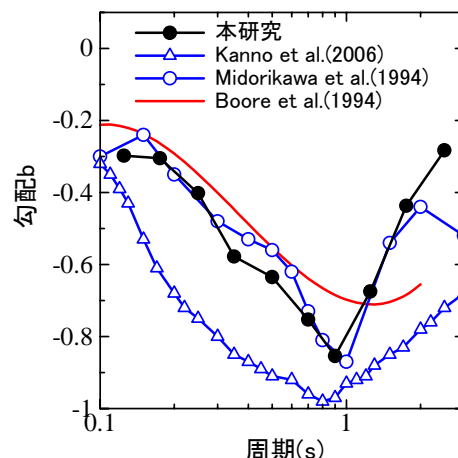


図19 本研究と既往の研究による勾配 b の比較(応答スペクトル)

と地盤の平均S波速度の相関が高い傾向にある。これらの結果は全般に既往の結果とも整合的である。

謝 辞

本研究の一部は、科学技術振興調整費「統合化地下構造データベースの構築」によった。また、本研究で用いた地震記録および地盤資料は横浜市安全管理局危機管理室から提供されたものである。記して謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) Borcherdt, R., J. Gibbs and T. Fumal: Progress on ground motion predictions for the San Francisco Bay region, California, Proceedings of the Second International Conference on Microzonation, Vol.1, pp.241-253, 1978.
- 2) Borcherdt, R. and , G .Glassmoyer: On the characteristics of local geology and their influence on ground motions generated by the Loma Prieta earthquake in the San Francisco Bay region, California, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.82, pp.603-641, 1992.
- 3) 翠川三郎, 松岡昌志, 作川孝一: 1987年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価, 日本建築学会構造系論文報告書, No.442, pp.71-78, 1992.
- 4) 田村 勇, 山崎文雄, K.T. Shabestari: K-NET地震記録を用いた平均S波速度による地盤増幅度の推定, 土木学会第55回年次学術講演会梗概集, pp.714-715, 2000.
- 5) 片岡俊一, 山本博昭: 青森県周辺における地震動指標の距離減衰特性とサイト増幅特性, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.35-38, 2002.
- 6) 川瀬 博, 松尾秀典: K-NET, KiK-net, JMA震度計観測網による強震記録から分離したサイト増幅特性とS波速度構造との対応, 日本地震工学会論文集, Vol.4, No.4, pp.126-145, 2004.
- 7) 川上洋介, 額額一起, 久田嘉章: 地震観測記録より推定した関東平野におけるサイト特性と地形分類との関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 分冊, pp.687-688, 2004.
- 8) 藤本一雄, 翠川三郎: 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係, 日本地震工学会論文集, 第 6 巻, 第 1 号, pp.11-22, 2006.
- 9) Boore, D. M., W. B. Joyner and T. E. Fumal: Estimation of response spectra and peak accelerations from western North American earthquakes: an interim report, Part 2, U.S. Geological Survey Open-File Report 94-127, 40pp., 1994.
- 10) Midorikawa, S., M. Matsuoka, and K. Sakugawa: Site effects on strong-motion records observed during the 1987 Chiba-Ken-Toho-Oki, Japan earthquake, Proceedings of the Ninth Japan Earthquake Engineering Symposium, Vol.3, pp.E085-E090. 1994.
- 11) Kanno, T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara and Y. Fukushima: A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.96, No.3, pp.879-897, 2006.
- 12) 横浜市総務局災害対策室: 横浜市内域内における地盤・地質調査委託結果一覧表, 1997.
- 13) 司 宏俊, 翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, No.523, pp.63-70, 1999.
- 14) Takemura, M., K. Kato, T. Ikeura and E. Shima: Site amplification of S-waves from strong motion records in special relation to surface geology, Journal of Physics of the Earth, Vol.39, pp.537-552, 1991.
- 15) 鉢嶺 猛: 震度の計測化について, 験震時報, Vol.52, pp.43-68, 1989.
- 16) 川瀬 博, 松尾秀典: K-NET, KiK-net, JMA震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サイト各特性の分離解析, 日本地震工学会論文集, Vol.4, No.1, pp.33-52, 2004.
- 17) 長橋純男, 小林啓美: 地震動の強さを評価する簡便な尺度としての地震動最大振幅, 日本建築学会論文報告集, 第181号, pp.15-22, 1971.
- 18) Joyner, W.B. and T.E. Fumal: Use of measured shear-wave velocity for predicting geologic site effects on strong ground motion, Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, Vol.2, pp.777-783, 1984.

(受理：2008年 5月 2日)
(掲載決定：2008年 6月16日)

Relationships between Average Shear-Wave Velocity and Site Amplification Factors Obtained by Records from Yokohama Dense Strong-Motion Network

MIDORIKAWA Saburoh ¹⁾, KOMAZAWA Makoto ²⁾ and MIURA Hiroyuki ³⁾

- 1) Member, Professor, Department of Built Environment, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
- 2) Formerly Graduate Student, Department of Built Environment, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Ms. Eng.
- 3) Member, Assistant Professor, Department of Built Environment, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

ABSTRACT

The relationships between average shear-wave velocity of the ground and the site amplification factor for peak ground acceleration, peak ground velocity, seismic intensity and response spectral amplitudes are examined by using the strong motion records from the Yokohama Dense Strong-Motion Network. Regarding the amplification factors for peak ground acceleration, peak ground velocity and seismic intensity, the results by the records from smaller magnitude earthquakes and from larger magnitude earthquakes are different. This is due to the different spectral contents of the records from smaller and larger earthquakes. The amplification factors for peak ground acceleration, peak ground velocity and seismic intensity show higher correlations with the average shear-wave velocities of the ground down to 10m, 30m and 20 to 30 m, respectively. The amplification factors for response spectral amplitudes for shorter, mid and longer periods show higher correlations with the average shear-wave velocities of the ground down to 10m, 20m and 30 m, respectively. The correlations of the spectral amplitude at longer period range are higher than those at shorter period range.

Key Words: Site Amplification Factor, Average Shear-Wave Velocity, Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, Seismic Intensity, Response Spectra