

基盤面と地表面の加速度応答スペクトル比の簡易推定方法について

A Simple Method of Estimating the Acceleration Response Spectral Ratio between Basement and Surface Ground

塩 崎 信 久 石 田 寛 永 田 茂
大 保 直 人 堀 越 清 視

要 約

地表面地震動を推定する際には表層の地盤特性が大きく影響するため、表層地盤の増幅を適切にする評価しなければならない。しかし広範囲にわたる地表面地震動を対象とする場合、表層地盤の増幅を詳細な解析により求めるのは困難であるため簡易推定手法の構築が急務である。本研究では被害推定等に用いる地表面地震動を加速度応答スペクトルとし、また、表層の地盤増幅として加速度応答スペクトル比を適用する。まず表層地盤モデルについて SHAKE を用いて微地形分類、地震タイプ、地震動レベル毎の基盤面に対する地表面の伝達関数と加速度応答スペクトル比の間の関連性について検討し、次に加速度応答スペクトル比を簡易的に推定する方法について検討した。

提案した簡易推定方法を用いて、2 サイトの地表面加速度応答スペクトルを推定した結果、概ね観測地震波より求まるものと一致することが確認できた。

目 次

- I. はじめに
- II. 地表面加速度応答スペクトルの簡易推定方法
- III. 事例検討
- IV. まとめ

I. はじめに

面的な広がりをもつライフライン等の地震被害予測では、地表面地震動を広域にわたり評価する必要がある。基盤面で定義された地震動を用いて地表面地震動分布を推定する場合には表層の地盤特性が地表面の地震動に大きく影響するため、表層地盤の増幅特性を適切に評価しなければならない。地盤増幅の詳細な設定法としては各基盤面における推定地震波を用いた地震応答解析の適用が考えられるが、広域を対象とする場合には全域にわたって地震応答解析を実施するのは困難である。

例えば、愛知県¹⁾や川崎市²⁾の地震被害予測における地表面の広域地震動分布の予測では表層地盤の増幅特性を考慮した地表面の速度応答スペクトルを推定する簡易方法が採用されている。愛知県では基盤の速度応答スペクトル ($h=5\%$) に代表的地震波毎の地盤増幅特性を考慮したものを乗じることで地表面の速度応答スペクトル ($h=5\%$) を求める方法がとられている。また、川崎市では基盤の速度応答スペクトル ($h=5\%$) に直接、想定した地震に対する非線形応答の伝達関数を乗じる方法がとられており、伝達関数が地盤増幅としての速度応答スペクトル比に相当するものとして評価している。

伝達関数と速度応答スペクトル増幅特性の関連性について研究したものに Yamazaki et al. のもの³⁾がある。Yamazaki et al. は水平・鉛直の速度応答スペクトル比の増幅特性は水平・鉛直の伝達関数比

より推定できることを地震記録を用いて示している。

本研究の地表面加速度応答スペクトルの簡易推定方法は基盤の応答スペクトルに表層地盤の増幅特性を考慮したものを乗じるという点では愛知県、川崎市と同様の手法であるが、基盤面の地震動として加速度応答スペクトルを設定しており、表層地盤の地盤増幅として加速度応答スペクトル比を推定する点が異なる。また、その推定手法については微地形分類、地震タイプ、地震動レベル毎に加速度応答スペクトル比を設定する簡易モデルを提案した。

II. 地表面加速度応答スペクトルの簡易推定方法

簡易推定方法の手順を Fig.1 に示す。広域な地震動の簡易推定には基盤面の加速度応答スペクトルの距離減衰式と基盤面、地表面間の加速度応答スペクトル比を用いる。まず、局所的なサイト特性の影響が小さい基盤面で距離減衰式により加速度応答スペクトルを評価する。基盤面における加速度応答スペクトルの距離減衰式は数多く提案されているが、ここでは Ohno et al. により提案されている距離減衰式⁴⁾ (基盤面: $V_s > 600$ m/s 層上面) を採用する。表層地盤の地盤増幅としての加速度応答スペクトル比については、微地形分類、地震動タイプ、地震動レベル毎に設定した加速度応答スペクトル比周期特性と該当地盤の線形応答の伝達関数より推定する簡易モデルを提案した。なお、本研究に用いている伝達関数は文献5) のプログラムを適用して重み付き平均を行っている (以下、平滑化伝達関数と称する)。

1. 地盤増幅の簡易推定モデル

地盤増幅の簡易推定モデルの概念図を Fig.2 に示す。地表面の加速度応答スペクトルは基盤面の加速度応答スペクトルと上述の微地形分類、地震動タイプ、地震動レベル毎に設定した非線形応答の加速度応答スペクトル比を用いて式(1)のように表される。

キーワード：加速度応答スペクトル, 伝達関数,
地盤増幅

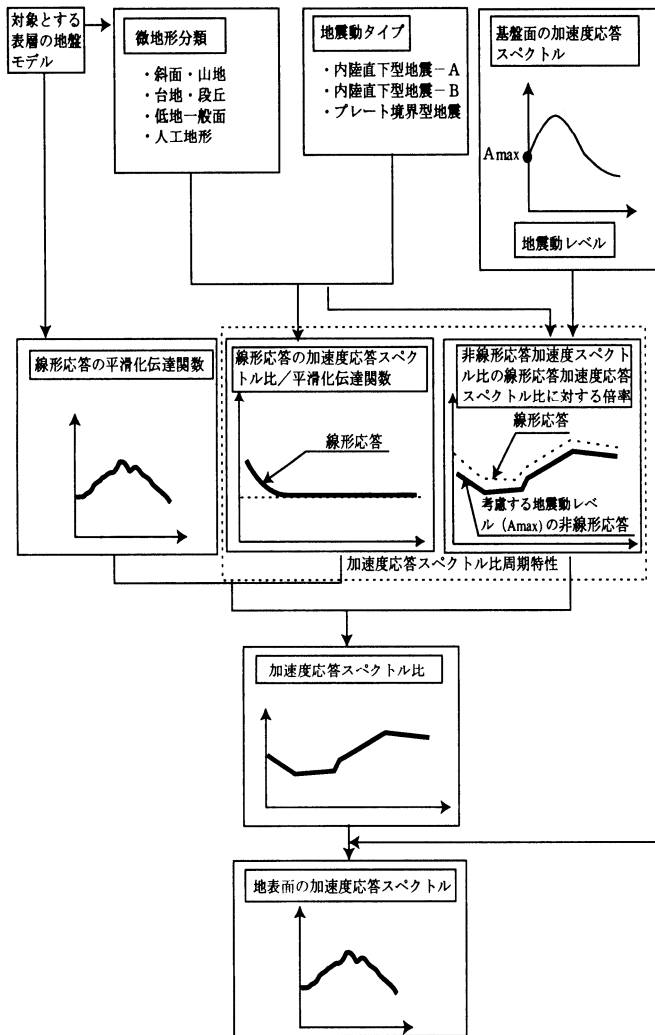


Fig. 1 地表面加速度応答スペクトルの簡易推定方法
(Simple Method of Estimating Surface Acceleration Response Spectra)

$$S_{AsN}(T, h, G_C, E_C, A_C) = S_{Ab}(T, h) \times R_N(T, h, G_C, E_C, A_C) \dots \dots \dots (1)$$

$S_{AsN}(T, h, G_C, E_C, A_C)$: 非線形応答の地表面の加速度応答スペクトル

$S_{Ab}(T, h)$: 基盤面の加速度応答スペクトル

$R_N(T, h, G_C, E_C, A_C)$: 非線形応答の加速度応答スペクトル比

T : 周期, h : 減衰定数, G_C : 微地形分類

E_C : 地震動タイプ, A_C : 地震動レベル

非線形応答の加速度応答スペクトル比の簡易推定モデルは線形応答の平滑化伝達関数と微地形分類, 地震動タイプ, 地震動レベル毎に設定する係数を用いて式(2)のように表される。

$$R_N(T, h, G_C, E_C, A_C) = \hat{H}_L(T) \times q(T, h, G_C, E_C, A_C) \dots \dots \dots (2)$$

$\hat{H}_L(T)$: 線形応答の平滑化伝達関数

$q(T, h, G_C, E_C, A_C)$: 微地形分類, 地震動タイプ, 地震動レベル毎に設定する係数

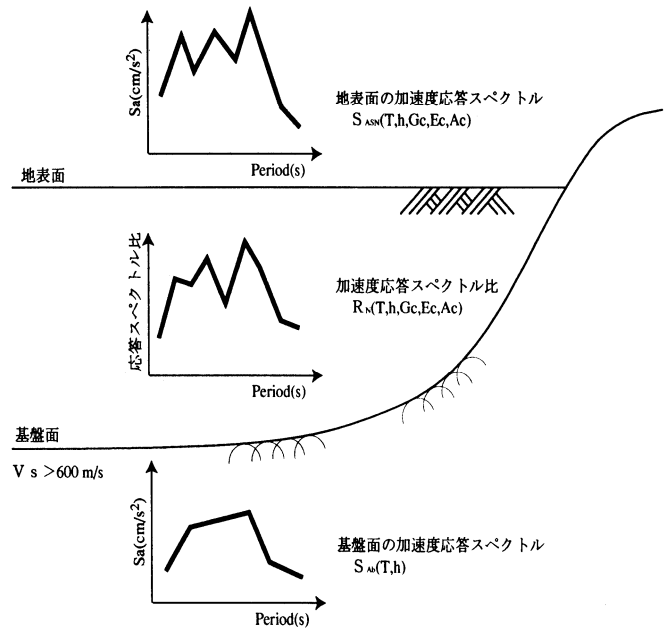


Fig. 2 地盤増幅の簡易推定モデル
(Simple Model of Estimating Ground Motion Amplification)

2. 加速度応答スペクトル比と平滑化伝達関数の検討

(1) 検討概要

加速度応答スペクトルの地盤増幅の簡易推定モデルの構築に際し, 微地形分類, 地震動タイプ, 地震動レベル毎に平滑化伝達関数と加速度応答スペクトル比を算定し加速度応答スペクトル比特性および両者の関連性について検討する。Fig.3に概要を示す。

地盤については微地形分類毎に地盤モデルを設定した。地震動

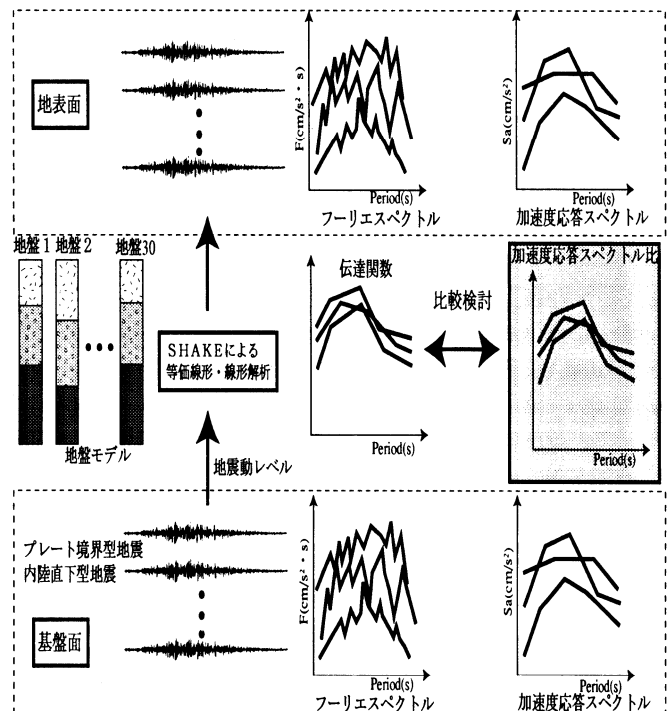


Fig. 3 加速度応答スペクトル比の算定
(Estimation of Acceleration Response Spectral Ratio)

は内陸直下型地震とプレート境界型地震を想定し、地震動レベルを50～500Galに調整し2E入力とした。また、加速度応答スペクトル比($h = 5\%$)と伝達関数の算定にあたってはSHAKE(等価線形・線形解析)を用いた。

(2) 地盤データ

解析対象地盤については愛知県の地盤データ⁶⁾を基に代表的な微地形4分類(①斜面・山地、②台地・段丘、③低地一般面:三角州・海岸平野、谷底平野・氾濫平野等、④人工地形:盛土地、干拓地等)毎に5～10種類程度の地盤モデルを設定した。

(3) 地震波データ

地震波は基盤と見なされる地盤で観測された地震波形を用いるものとし、そうでないものは補正を行った(観測地点出水)。地震波の周期特性の影響について検討するため、内陸直下型地震を8波、プレート境界型地震を4波を選定した。内陸直下型地震については地震波の周期特性により、兵庫県南部地震の観測波とそれ以外の観測波の2グループに分け合計3分類とした。Table 1に本検討に用いる地震観測記録を示す。Table 1の地震動波形をFig.4に、地震動の加速度応答スペクトル($h = 5\%$)をFig.5に示す。

等価線形解析を実施する際の入力地震動レベルは最大振幅を50, 100, 200, 300, 400, 500 galの6ケースに調整し、線形解析(Linear)を合わせて合計7分類とした。

解析に用いた微地形分類、地震タイプ、地震動レベルの分類内容をまとめてTable 2に示す。

Table 1 入力地震動として用いた観測記録
(Earthquake Records)

地震タイプ	地震名	観測年月	マグニチュード(M)	観測地点	観測方向	最大加速度(gal)
内陸直下型地震-A	愛知県東部地震	1997.3.16	5.8	長篠	NS	112.52
					EW	115.49
	鹿児島県北部地震	1997.3.26	6.3	出水	NS	535.79
					EW	410.79
内陸直下型地震-B	兵庫県南部地震	1995.1.17	7.2	神戸大学	NS	271.94
					EW	304.65
				神戸海洋気象台	NS	818.02
					EW	617.29
プレート境界型地震	北海道南西沖地震	1993.7.12	7.8	寿都	NS	216.02
					EW	202.23
	チリ地震	1985.3.3	7.8	Las Tortolas	N26W	139.42
	メキシコ地震	1985.9.19	8.1	Zihuatanejo	NS	102.99

Table 2 分類内容
(Grouping Contents)

微地形分類	地震タイプ	地震動レベル
斜面・山地	内陸直下型地震-A	Linear 50 gal
台地・段丘		100 gal
低地一般面	内陸直下型地震-B (兵庫県南部地震)	200 gal 300 gal 400 gal
人工地形	プレート境界型地震	500 gal

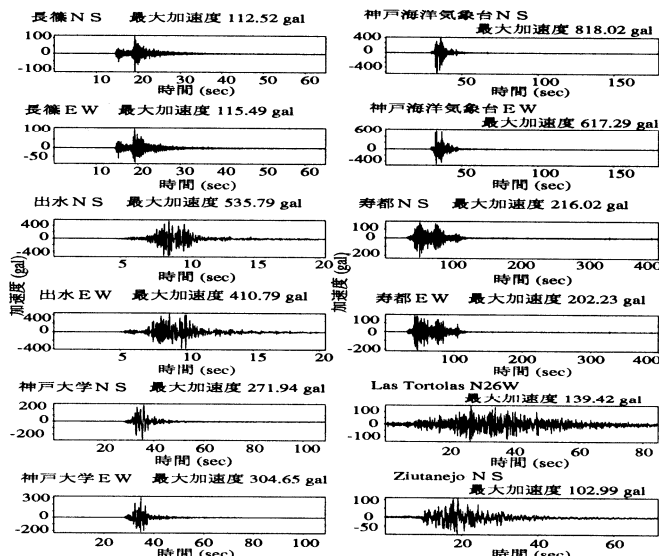
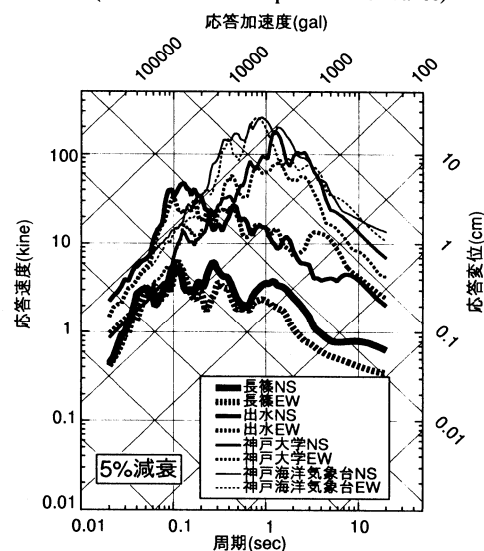
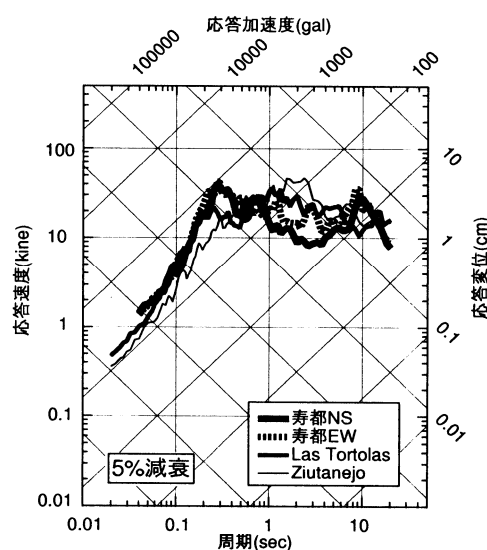


Fig. 4 入力地震動波形
(Time Histories of Input Seismic Waves)



(1) 内陸直下型地震



(2) プレート境界型地震

Fig. 5 入力地震動の加速度応答スペクトル
(Acceleration Response Spectra of Input Seismic Waves)

(4) 加速度応答スペクトル比の算定

Table 2 に従い、各微地形分類、各地震タイプ毎に加速度応答スペクトル比を計算し、各地震動レベル毎の平均値を重ね書きしたものを Fig.6 に示す。

Fig.6 より以下のことが確認できる。

- ・いずれの地震タイプの場合も斜面・山地、台地・段丘に対する加速度応答スペクトル比は低地一般面、人工地形に比べて地震動レベルによる差はない。低地一般面、人工地形については地震動レベルが大きくなるに従い短周期帯域で加速度応答スペクトル比が減少し、特に人工地形は減少率大きい。
- ・内陸直下型地震－Aの場合の低地一般面、人工地形に対する加速度応答スペクトル比の減少率の大きい周期帯域は約0.05秒である。内陸直下型地震－Bについては約0.5秒、プレート境界型地震の場合は約0.2秒である。
- ・いずれの地震タイプの場合も加速度応答スペクトル比がピークとなる周期は斜面・山地、台地・段丘については約0.1～0.3秒、低地一般面については約0.5～1秒、人工地形については約1～2秒である。

ばらつきについては Fig.6 の結果に対する各地震レベル毎の標準偏差を求めた結果、以下のことが確認できた。

- ・いずれの地震タイプの場合も斜面・山地、台地・段丘については約0.1～0.3秒、低地一般面については約0.5秒、人工地形については約1秒以上でばらつきが大きくなっている。これらは

加速度応答スペクトル比がピークとなる周期帯域と概ね一致している。

(5) 加速度応答スペクトル比と平滑化伝達関数の比較

Table 2 に従い、各微地形分類、各地震タイプ毎に加速度応答スペクトル比／平滑化伝達関数（以下、 α とする）を計算し、各地震動レベル毎の平均値を重ね書きしたものを Fig.7 に示す。

Fig.7 より以下のことが確認できる。

- ・いずれの地震タイプの場合も斜面・山地のように地震動レベルが大きくても非線形性を示さない地盤では全周期帯域で地震動レベルに関係なく α は 1 に近い。すなわち非線形応答の伝達関数と非線形応答の加速度応答スペクトル比がよく一致している。
- ・いずれの地震タイプの場合も台地・段丘、人工地形、低地一般面については地震動レベルが大きくなるに従って短周期帯域の α は概ね大きくなる。線形応答の場合は短周期帯域においても比較的 α の値は小さい。
- ・内陸直下型地震－Aの場合は台地・段丘、低地一般面、人工地形については周期帯域が約0.1～10秒の間で地震動レベルに関係なく α は 1 に近い。
- ・内陸直下型地震－B、プレート境界型地震の場合は台地・段丘については周期帯域が約0.2～10秒の間で地震動レベルに関係なく α は 1 に近い。低地一般面、人工地形については周期帯域が約1.0～10秒の間で地震動レベルに関係なく α は 1 に近い。

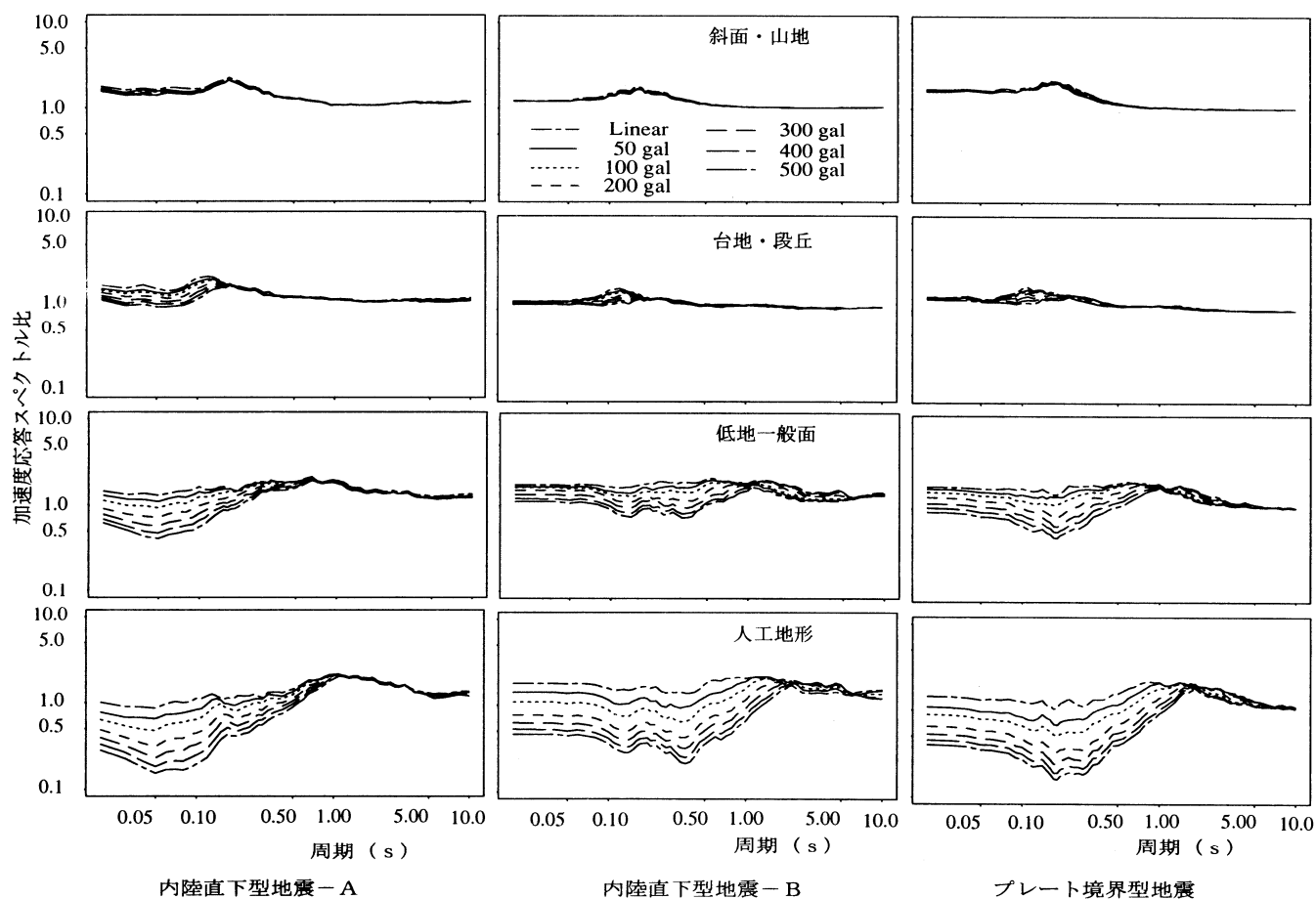


Fig. 6 加速度応答スペクトル比
(Acceleration Response Spectral Ratio)

以上の結果より加速度応答スペクトル比としてそのまま平滑化伝達関数を適用することは困難である。特に短周期帯域で非線形性が強く平滑化伝達関数が0に近い値となる場合、 α は非常に大きな値となり平滑化伝達関数と加速度応答スペクトル比の違いは顕著である。線形応答の場合はかなり広い周期範囲で比較的 α の値は1に近く、加速度応答スペクトル比は平滑化伝達関数を用いて近似的に表現できることが示唆される。

ばらつきについては線形応答の α に対する標準偏差を求めた結果、以下のことが確認できた。

- ・内陸直下型地震－Aの場合はどの微地形分類においても全周期帯域においてばらつきは小さい。
- ・内陸直下型地震－B、プレート境界型地震の場合は斜面・山地、台地・段丘、低地一般面については全周期帯域においてばらつきは小さいが、人工地形については0.02秒程度以下の低周期帯域でばらつきが大きくなっている。

3. 地盤増幅の簡易推定モデルの構築

2(4)の加速度応答スペクトル比の結果と2(5)の線形応答の加速度応答スペクトル比／平滑化伝達関数の結果より 式(2)の $a(T, h, G_c, E_c, A_c)$ の設定方法を検討した。以下に簡易推定モデルの構築方法について述べる。

まず、対象地盤の線形応答の平滑化伝達関数と2(5)で求めた線形応答の加速度応答スペクトル比／平滑化伝達関数(α_1)より、線形応答の加速度応答スペクトル比を推定する (Fig.8(1)参照)。

$$R_L(T, h, G_c, E_c, A_c) = \alpha_1 \cdot \hat{H}_L(T) \dots \dots \dots (3)$$

$R_L(T, h, G_c, E_c, A_c)$: 線形応答の加速度応答スペクトル比
 $\hat{H}_L(T)$: 対象地盤の線形応答の平滑化伝達関数

次に、考慮する地震動レベルの非線形応答の加速度応答スペクトル比(β_1)と線形応答の加速度応答スペクトル比(β_2)より、線形応答に対する倍率を求める (Fig.8(2)参照)。

$$\frac{R_N(T, h, G_c, E_c, A_c)}{R_L(T, h, G_c, E_c, A_c)} = \frac{\beta_1}{\beta_2} = \alpha_2 \dots \dots \dots (4)$$

$R_N(T, h, G_c, E_c, A_c)$: 非線形応答の加速度応答スペクトル比

式(3)、式(4)より非線形応答の加速度応答スペクトル比は以下のよう求められる。

$$R_N(T, h, G_c, E_c, A_c) = \alpha_2 \cdot R_L(T, h, G_c, E_c, A_c) = \alpha_2 \alpha_1 \cdot \hat{H}_L(T) \dots \dots (5)$$

従って式(2)に仮定した微地形分類、地震タイプ、地震動レベル毎の係数 $a(T, h, G_c, E_c, A_c)$ は式(6)のとおりとなる。

$$a(T, h, G_c, E_c, A_c) = \alpha_2 \alpha_1 \dots \dots \dots (6)$$

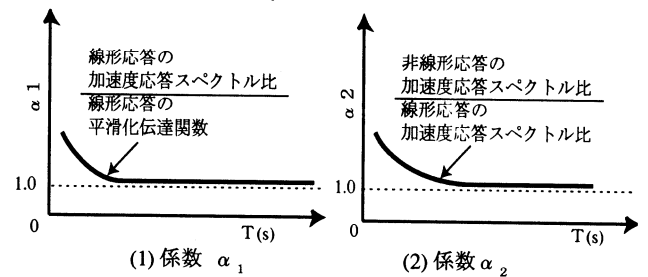


Fig. 8 簡易推定モデルの係数
(Coefficient of Simple Model)

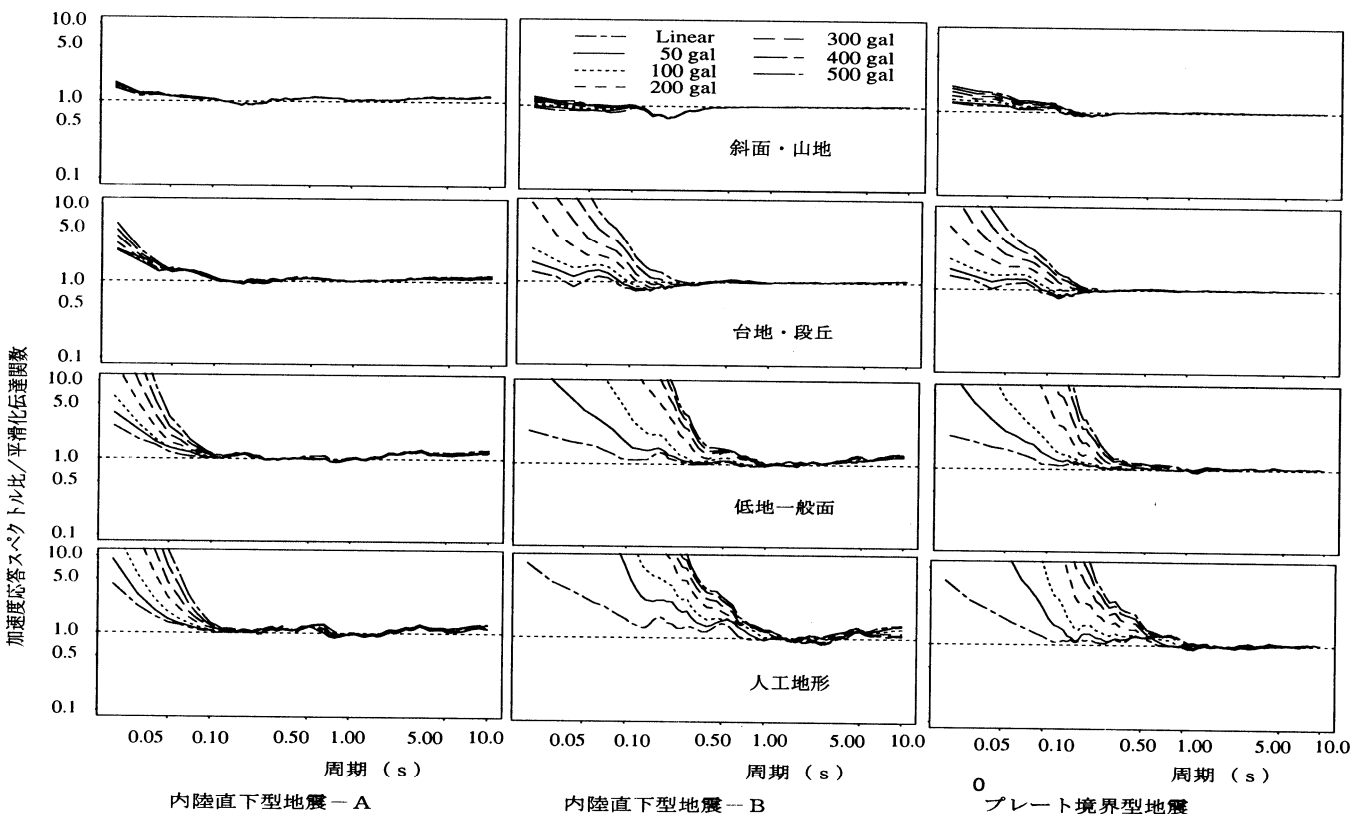


Fig. 7 加速度応答スペクトル比／平滑化伝達関数
(Acceleration Response Spectral Ratio / Smoothed Transfer Function)

III. 事例検討

1997年3月16日に発生した愛知県東部地震の際に観測されたK-NETの地震記録を用いて、今回提案している基盤面と地表面の加速度応答スペクトル比の簡易推定方法の検証を実施した。Table 3は1997年3月16日愛知県東部地震の諸元である。

Table 3 愛知県東部地震の諸元
(Items of Aichi-ken Toubu Earthquake)

発生年月日	1997.3.16
震源位置	34.9N、137.5E
震源深さ	39 km
マグニチュード	5.8
断層長さ	10 km
断層幅	5 km
断層走向	164°
断層傾斜角	37°
地震モーメント	1.8×10^{24} dyn・cm

本検討ではK-NET観測地点であるAIC012地点（以下、A地点）、AIC005地点（以下、B地点）について、加速度応答スペクトル比の簡易推定方法により推定した地表面加速度応答スペクトルと観測波より求まる加速度応答スペクトルについて比較を行った。なお、地盤データについてはK-NET観測地点のボーリングデータ等を参考に設定した。A地点、B地点の地盤モデルをTable 4に示す。

Table 4 地盤モデル
(Soil Profile Modles)

(1) A地点

深度(m)	層厚(m)	Vs(m/s)	$\rho(t/m^3)$
0	10	140	1.8
10	10	230	2.0
20	20	230	2.1
40	0	600	2.1

(2) B地点

深度(m)	層厚(m)	Vs(m/s)	$\rho(t/m^3)$
0	2	130	1.8
2	5	370	2.2
7	0	1000	2.4

本地震タイプは内陸直下型地震-Aとし、また微地形分類はA地点については低地一般面、B地点については斜面・山地とした。また基盤におけるA地点、B地点の加速度応答スペクトルは文献4)より推定し、地震動レベルは周期0.02秒に対する加速度応答スペクトルより設定した。これより式(6)の α_1 、 α_2 が求まるので表層地盤の地盤増幅としての加速度応答スペクトル比が求まる。

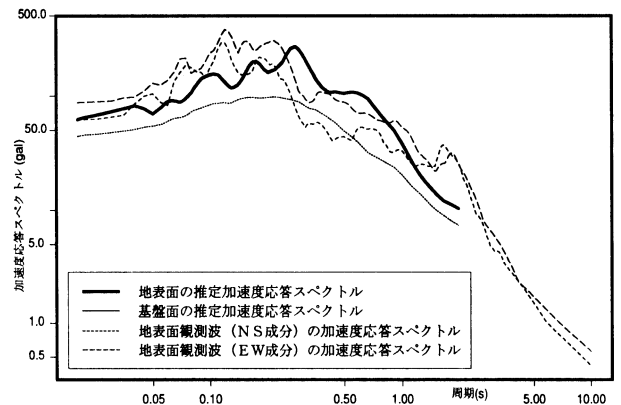
Fig.9はA地点、B地点の地表面加速度応答スペクトル（5%減衰）の観測値と推定値の比較結果である。A地点、B地点ともに周期帯域によっては差があるものの全体的に形状は概ね一致しており、推定値は観測波の加速度応答スペクトルの傾向を再現できている。

IV. まとめ

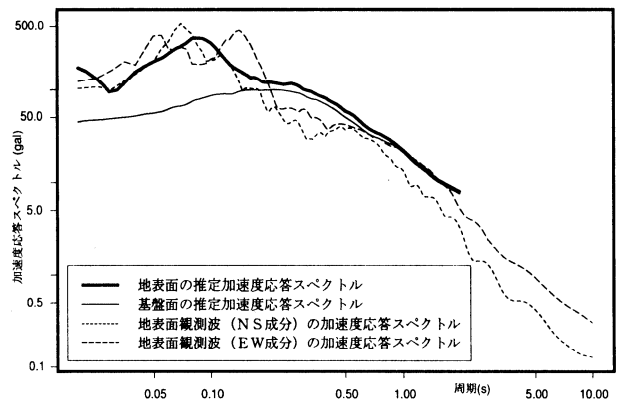
広域地震動の地表面地震動推定に適用するため表層地盤の地盤増幅として線形応答の伝達関数より設定した加速度応答スペクトル比の簡易推定方法を提案した。1997年3月16日愛知県東部地震の事例解析では簡易推定方法を用いて地表面加速度応答スペクトルを概ね再現することができた。

本研究では簡易推定の構築また、その検証に用いた地盤モデルが愛知県における限られたデータであったので一般性をもたせるために、さらに愛知県以外の地域における地盤モデルを追加した検討を行う必要がある。また、地震波については内陸地震波を2分類して合計3分類して検討を行ったが、地震タイプとしては内陸直下型地震とプレート境界型地震の2分類にする方が取り扱い易い。

今後、これらのことを勘案して本手法の高度化を行うとともに、本手法を適用した広域地震動の評価に適用し、構造物被害の予測手法の構築に活用する予定である。



(1) A地点



(2) B地点

Fig. 9 地表面加速度応答スペクトル
(Surface Acceleration Response Spectra)

謝辞：本研究に用いた地震記録については防災科学技術研究所：K-NET（www.k-net.bosai.go.jp/）、関西地震観測研究協議会、気象庁、メキシコ自治大学(UNAM)、Compania Minera Disputada de Las Condesより提供されたものであります。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 愛知県防災会議地震部会、愛知県東海地震被害予測調査、平成4年度中間報告書、(1993.3).
- 2) 川崎市、近距離地震の追加検討、川崎市地震被害想定調査報告書、(1997).
- 3) Yamazaki, F. and M.A. Ansary; On the stability of horizontal-to-vertical spectrum ratio of earthquake ground motion, Bull. ERS, No.30, (1997), pp.27-44.
- 4) Ohno, S., M. Takemura, M. Niwa, and K. Takahashi; Intensity of strong ground motion on pre-Quaternary stratum and surface soil amplifications during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Japan, J. Phys. Earth, 44, (1996), pp.623-648.
- 5) 東京工業大学 強震動研究グループ、「震源域での地震動強さの予測」セミナー資料(1988).
- 6) 愛知県防災会議地震部会、愛知県地震危険度分布調査報告書、(1984.5).