

震源情報と地盤の非線形増幅特性を考慮した 観測地点間の地震動推定方法

石井晃¹・石田寛²・大保直人³・永田茂³・塩崎信久¹

¹正会員 工修 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

²工修 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

³正会員 工博 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

近年の地震観測網の発達により、日本国内では高密度に地震計が設置されつつあるが、観測地点と周囲地盤の地震動強度は、地盤状況によっては大きな違いが発生する場合がある。これは、地盤状況が異なると地震動の周波数特性と地震動強さ、地盤強度などによって、表層地盤の非線形挙動が大きく異なる場合があることに起因する。本研究では、地震タイプと地震動強さ、地盤の固有周期をパラメータとした地震応答解析を実施し、各パラメータと表層地盤の非線形増幅特性との関係を整理した。この結果を用い、広域かつリアルタイムな地震動推定を想定して、震源情報と表層地盤の固有周期とから、観測地点間の地表面地震動(最大加速度、SI値、加速度応答スペクトル)を精度良く推定する方法について検討を加えた。

Key Words : ground motion amplification, seismic wave propagation, regression analysis

1. はじめに

近年の地震観測網の発達により、日本国内では多くの地震計が設置されつつある。これに伴い、高精度に広域の地震動分布を推定することが望まれるようになってきた。しかし、大規模地震による地盤の非線形挙動は複雑で、観測地点近傍でも地盤状態によっては観測地点と大きく異なる地震動が発生する場合がある。そこで、表層地盤の地盤状態と震源情報を考慮して、より正確に観測地点間の地震動を評価する方法について検討を加える。評価地震動は、最大加速度、SI値、加速度応答スペクトル(5%減衰)である。

観測記録を利用して地震動分布を推定する方法については、特に公共性の強いライフライン施設の被害評価で検討が進められており、システムとして実用化されている例もある。そこでは、まず観測地震動から表層地盤の影響を剥ぎ取って基盤面の地震動を求め、震源情報から推定される基盤面の地震動分布を補正する。その後、地盤増幅を考慮して観測地点間の地表面の地震動分布を評価するという手順を踏むことが多い。

本論文では、観測記録から地震動分布を推定する

ための具体的な方法を示すとともに、表層地盤の非線形増幅特性を短時間で評価するために、地盤状態を固有周期によって分類し、地震タイプ(内陸地震、プレート境界地震)と地震動レベルに応じて地盤増幅率を設定する。

これにより、震源情報による基盤面地震動の補正と表層地盤の非線形増幅特性の評価を効率的に実施し、観測地点間の地震動分布を短時間に比較的精度良く推定することができる。

2. 観測地点間の地震動分布の推定方法

観測地点間の地震動推定は、図-1に示すように次の3つの手順により実施する。

①観測地点において、地表面の地震記録から表層地盤の影響を剥ぎ取り、基盤面の地震動を推定する。②地震動の距離減衰特性を利用して、震源情報から基盤面の地震動分布を設定し、これを観測地点の基盤面で推定された地震動レベルによって補正する。③基盤面の地震動分布に観測地点間の地盤増幅を考慮して、地表面の地震動分布を推定する。

地震動の推定状況と地震動レベルの関係を図-2に

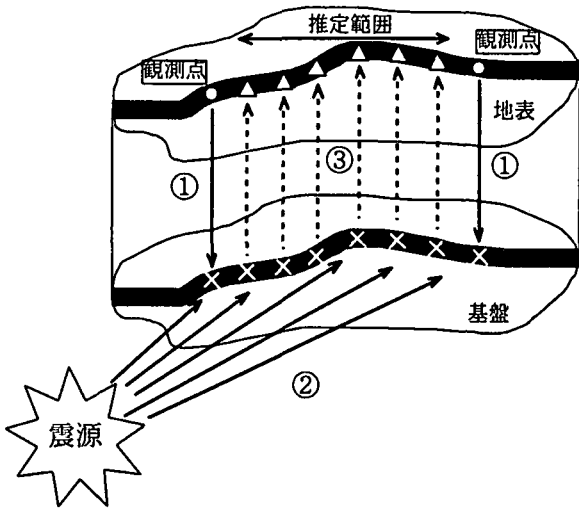


図-1 観測地点間の地震動推定手順

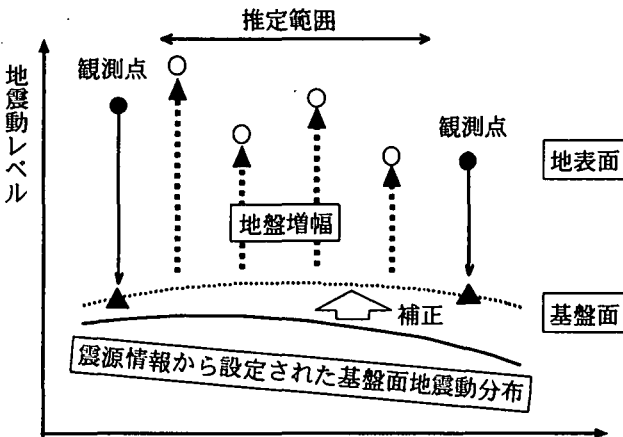


図-2 地震動推定状況と地震動レベルの関係

示す。本方法では、基盤面の地震動は観測記録から表層地盤の影響を剥ぎ取って推定したものと、震源情報から距離減衰特性を考慮して推定したものが得られるが、両者の地震動レベルは異なる場合がある。観測記録から基盤面地震動を推定する場合は、震源情報から推定する場合よりも地盤の正確なパラメータを反映できるため、より現実に近い推定結果を得ることができる。一方、震源情報から基盤面地震動を推定する場合は、観測地点間の基盤面における相対的な地震動レベル関係を推定することができる。そこで、両者の長を取り入れ、観測地点間の基盤面の地震動の相対的な分布は震源情報から推定し、その地震動レベルは観測記録から得られる観測地点の地震動レベルで補正する。これにより、現実に近い基盤面の地震動分布を推定することが可能となる。

3. 表層地盤の非線形増幅特性

観測記録から表層地盤の影響を取り除く場合や観測地点間の基盤面地震動から地表面地震動を推定する場

表-1 地盤モデルリスト

固有周期(s)	柱状図名称
$T \leq 0.2$	LM1, LM10, DS1, DS2, DS3
$0.2 < T \leq 0.4$	AS3, AG2, AG3, AG5, AG6
$0.4 < T \leq 0.6$	AC6, AC8, AC9, AC10, AC16
$0.6 < T \leq 0.8$	AS6, AS13, AS14, AS15, AS17
$0.8 < T \leq 1.0$	AC17, AC18, AC22, AC28, AC35
$1.0 < T$	AS27, AS29, AS31, AS32, AS34

注) 柱状図名称は川崎市報告書³⁾に記載の記号

表-2 解析用地震波形リスト

地震タイプ	地震名	観測年月	観測地点	観測方向
内陸直下地震	愛知県東部地震	1997.3.16	長篠	NS EW
	鹿児島県北西部地震	1997.3.26	出水	NS EW
	兵庫県南部地震	1995.1.17	神戸大学 神戸海洋気象台	NS EW NS EW
プレート境界地震	北海道南西沖地震	1993.7.12	寿都	NS EW
	チリ地震	1985.3.3	Las Tortolas	N26W
	クワカ地震	1985.9.19	Zitanejo	NS

合には、表層地盤の非線形増幅特性が大きな影響を与える。推定地点が少ない場合には、全地点の土層構成や地盤物性を調査し、個々に地震応答解析を実施することによって、地盤の非線形増幅特性を精度良く把握することは可能であろう。しかし、広域を対象とした場合には、限られた地盤情報しか収集できない場合も多い。そこで、表層地盤の固有周期情報のみから、地盤の非線形増幅特性をより精度良く評価することを試みる。

表層地盤の増幅特性を評価するために、地震タイプおよび地震動レベルをパラメータとして、各種地盤の地震応答解析(解析コード:SHAKE²⁾)を実施し、基盤と地表の地震動を出力する。地盤モデルは、川崎市のごく表層地盤の代表モデル柱状図³⁾から表-1に示す固有周期範囲毎に5種類ずつ、計30種類を抽出した。入力位置は基盤面(上総層群上面)とし、地震波形には表-2に示す内陸直下地震8波、プレート境界地震4波を使用する。

(1) 最大加速度とSI値の地盤増幅特性

既に筆者らは同じ解析条件の下、基盤面の入力地震動レベル(2E)を $5\text{cm/s}^2 \sim 500\text{cm/s}^2$ の範囲で変動させた地震応答解析を実施し、地表面と基盤面の最大加速度およびSI値の関係を回帰式(1)、(2)で与えている⁴⁾。

$$A_{\max,S} = a \cdot A_{\max,R}^b \quad (1)$$

$$SI_S = c \cdot SI_R \quad (2)$$

ここに、 $A_{\max,S}$ は地表面最大加速度、 $A_{\max,R}$ は基盤面最

表-3 基盤地震動を目的変数とした場合の回帰係数

地震タイプ	固有周期 (s)	a	b	c
内陸直下地震	$T \leq 0.2$	2.25	0.92	1.32
	$0.2 < T \leq 0.4$	2.91	0.86	1.42
	$0.4 < T \leq 0.6$	5.33	0.76	1.65
	$0.6 < T \leq 0.8$	6.02	0.68	1.52
	$0.8 < T \leq 1.0$	7.61	0.62	1.33
	$1.0 < T$	4.65	0.63	0.85
プレート境界地震	$T \leq 0.2$	3.83	0.86	1.33
	$0.2 < T \leq 0.4$	3.55	0.85	1.39
	$0.4 < T \leq 0.6$	6.49	0.74	1.56
	$0.6 < T \leq 0.8$	5.51	0.71	1.65
	$0.8 < T \leq 1.0$	8.40	0.63	1.46
	$1.0 < T$	7.68	0.57	0.91

大加速度、 SI_s は地表面SI値、 SI_r は基盤面SI値、 a, b, c は回帰係数を示す。表-3に回帰係数 a, b, c を示す。各回帰係数は、地表面地震動を目的変数、基盤面地震動を説明変数として非線形回帰を行い得られたものである。

式(1)の最大加速度に関する回帰式は、固有周期の小さい地盤で、基盤面最大加速度と地表面最大加速度がほぼ線形関係を示す。固有周期が大きい地盤では、地震動レベルの大きな範囲で、基盤面最大加速度の増加に対して、地表面最大加速度の増加がほとんどなくなる。一方、式(2)のSI値に関する回帰式は、基盤面地震動レベルと地表面地震動レベルがほぼ線形関係を示し、地盤の固有周期が大きくなるにつれ、基盤面SI値の増加量より地表面SI値の増加量が小さくなる傾向を示す。

(2) 加速度応答スペクトルの地盤増幅特性

地表面の加速度応答スペクトル(減衰5%)を基盤面の加速度応答スペクトル(減衰5%)で除した比率(以降、応答スペクトル比と呼ぶ)を縦軸にとり、周期と応答スペクトル比の関係を内陸直下地震について図-3に、プレート境界地震について図-4に示す。各応答スペクトル比は表-1に示した固有周期範囲毎に、5種類の地盤モデルによる解析結果を、基盤面への入力最大加速度別に平均して示している。

固有周期が0.4秒以下の比較的固い地盤では、地震動レベルあるいは地震タイプの違いによって、応答スペクトル比の周期特性に大きな違いは認められない。一方、固有周期が0.4秒を超える比較的軟らかい地盤では、2秒程度以下の周期領域で地震動レベルの増加による応答スペクトル比の低下が顕著に表れる。特に、プレート境界地震では、0.2~1秒程度の範囲で応答スペクトル比の低下が大きくなっている。

図-3および図-4に示した結果は、川崎市の地盤モ

デルを用いた結果であるが、塩崎らは愛知県の地盤データを用いて同様の検討を実施している⁵⁾。塩崎らの研究では地盤を微地形分類(斜面・山地、台地・段丘、低地一般面、人工地形)で分類し、各地盤毎に応答スペクトル比を集計している。比較的硬い地盤と考えられる斜面・山地や台地・段丘の結果は、本研究の固有周期0.4秒以下の結果とほぼ一致する。一方、比較的軟らかい地盤と考えられる低地一般面や人工地形の結果を本研究の固有周期が0.6秒を超える地盤と比較すると、短周期領域で低地一般面や人工地形の結果の方が地震動レベルの増加による応答スペクトル比の低減量大きい。これは、川崎市の地盤よりも愛知県の地盤の方が、一般的に表層の堆積層が厚いため、低地一般面や人工地形はより大きな固有周期の地盤に対応するものと考察される。

4. まとめ

本研究では、震源情報と表層地盤の非線形増幅特性を用い、短時間に比較的精度良く観測地点間の地震動を推定する方法について検討を加えた。その際に必要となる地盤増幅特性に関し、地盤の固有周期毎に地表と基盤における最大加速度、SI値および加速度応答スペクトルの関係を検討し、最大加速度およびSI値については地表と基盤の関係を表す回帰式、加速度応答スペクトルについては地表と基盤の応答スペクトル比を提示した。

地盤増幅特性の評価にあたっては、地盤の固有周期を用いて地盤を分類したが、地盤分類に微地形分類を用いた既往研究成果⁶⁾もあり、情報の精度や使用目的に応じて適用方法を選択していくのが望ましいと考えられる。

参考文献

- 1) 高坂政道, 小島清嗣, 大保直人: 都市ガス導管の地震被害推定システム, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, 第3分冊, pp.3507-3512, 1998.
- 2) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. : SHAKE-A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, EERC 72-12, 1972.
- 3) 川崎市: 川崎市地震被害想定調査報告書, 1988.
- 4) 石井晃, 塩崎信久, 永田茂, 大保直人: 地表観測地点間の地震動推定における地盤増幅特性の検討, 土木学会第54回年次学術講演会, 1999.9. (投稿中)
- 5) 塩崎信久, 石田寛, 永田茂, 大保直人: 加速度応答スペクトルの地盤増幅特性に関する検討, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, 第1分冊, pp.1053-1058, 1998.

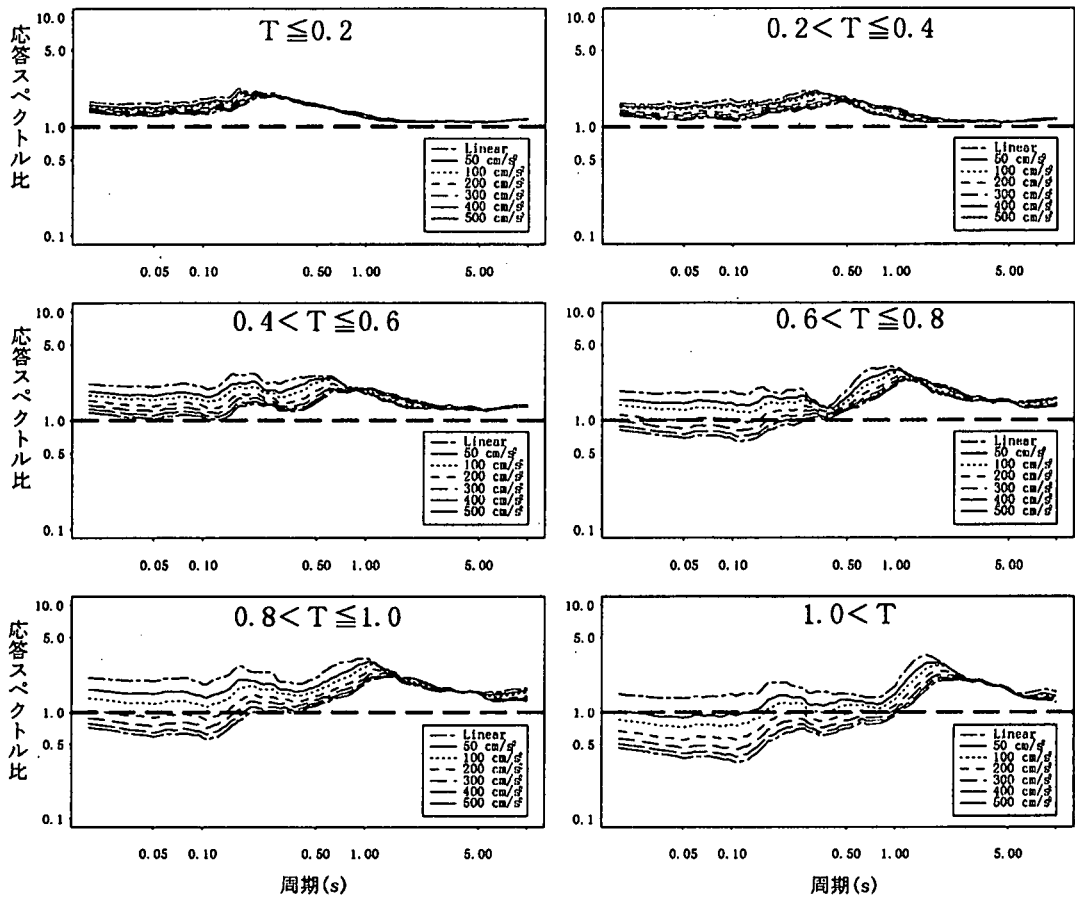


図-3 内陸直下地震の加速度応答スペクトル比 (減衰5%)

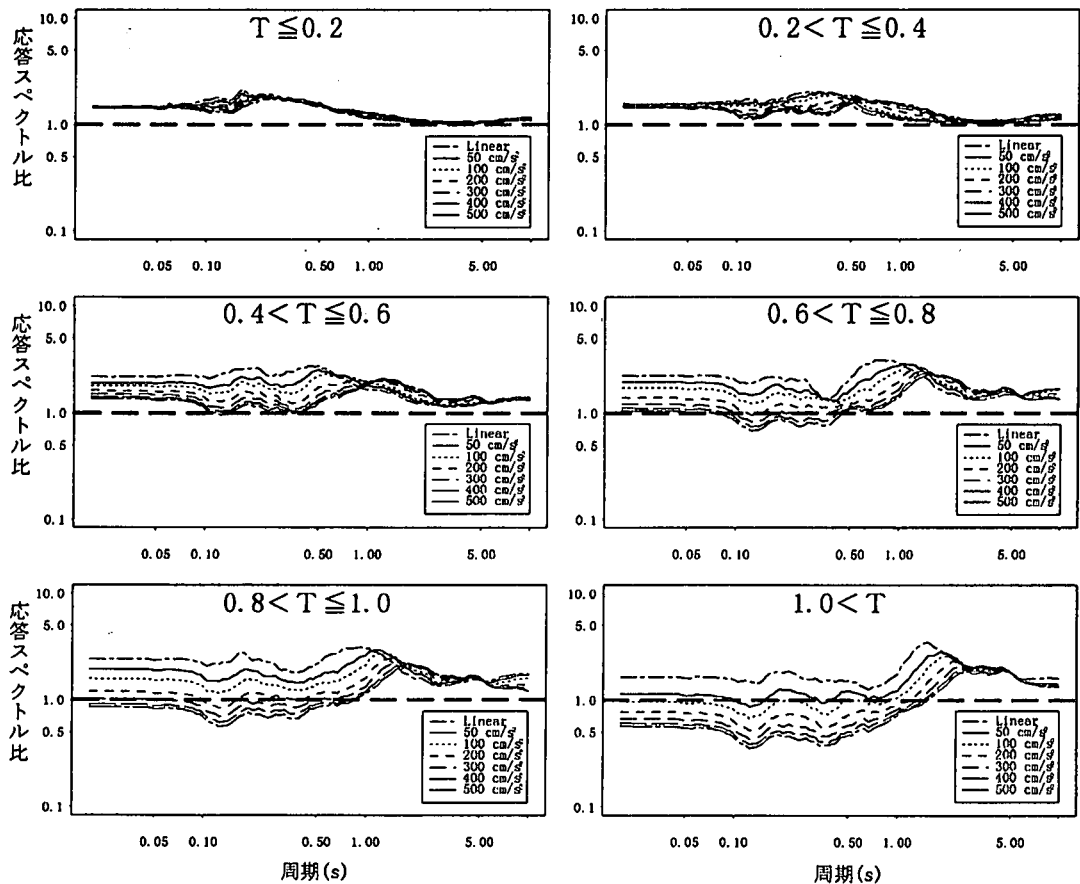


図-4 プレート境界地震の加速度応答スペクトル比 (減衰5%)