

地震被害想定で用いる広域地震動の簡易的評価

石井 晃¹・永田 茂²・大保直人²

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

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

面的な広がりを持つライフライン施設の地震時被害を推定するためには、入力となる地震動を広域的に評価する必要がある。そこで、基盤面 ($V_s > 600\text{m/s}$ 層上面) の加速度応答スペクトルの距離減衰式と地盤の理論伝達関数により、耐震設計上の解放地盤面での広域地震動分布を簡易的に推定することを試みた。地盤の伝達関数にはひずみレベルに応じた剛性低下率および減衰定数を用いて地盤の非線形特性を考慮した。また、この簡易的推定手法を用いて1997年3月16日に発生した愛知県東部地震の事例解析を行った結果、インターネットで提供される防災科学技術研究所のKyoshin Net(K-NET)の地表面加速度応答スペクトルおよび最大加速度分布を概ね再現することができた。

Key Words : ground motion, seismic damage prediction, non-linear soil amplification, ground strain

1. はじめに

地震被害想定に用いる広域地震動の推定では、表層の地盤特性が地表面の地震動強さに大きく寄与するため、対象地域内の局所的な地盤の違いを考慮する必要がある。評価地点の詳細な地盤物性値を用いれば応答解析により真実に近い地震動強さを再現することができるが、対象地域の全域に亘って詳細な地盤データを構築することは困難な場合が多い。

そこで、震源情報による距離減衰式と地盤の理論伝達関数を用いて、少ない情報から広域の地表面地震動を加速度応答スペクトルと最大加速度として簡易的に推定することを試みた。表層地盤の増幅特性については、大地震時の非線形挙動を地盤のひずみレベルに応じた剛性低下率と減衰比で評価した。また、1997年3月16日に発生した愛知県東部地震について事例解析を行い、地表面の加速度応答スペクトルおよび最大加速度について、推定値と防災科学技術研究所のK-NETによる観測値を比較検討した。

2. 広域地震動の簡易推定手法

広域地震動の簡易推定には、震源情報による距離減衰式と表層地盤を2層にモデル化した場合の伝達関数を用いる。まず、局所的なサイト特性の影響が小さい

基盤面 ($V_s > 600\text{m/s}$ 層上面) で、震源情報に基づく距離減衰式により地震動を評価する。これにサイトの地盤特性に応じた伝達関数を適用することによって耐震設計上の解放地盤面での地震動を推定する。

(1) 基盤面の地震動分布

大野らは米国カリフォルニアで発生した17地震について496の強震記録を分析し、周期2秒以下、等価震源距離100km以下を対象として、5%減衰の加速度応答スペクトルの距離減衰式(1)を提案している¹⁾。

$$\log S(T) = a(T) \cdot M - \log X_{eq} - b(T) \cdot X_{eq} + c(T) + q \cdot \Delta s(T) \quad (1)$$

ここに、 $S(T)$ は加速度応答スペクトル(5%減衰)(cm/s^2)、 X_{eq} は式(2)で表される等価震源距離(km)、 $a(T)$ 、 $b(T)$ 、 $c(T)$ 、 $\Delta s(T)$ は周期の関数となる係数である。式(1)の右辺第4項までは第四紀以前の地盤 ($V_s > 600\text{m/s}$ 相当) を評価するもので、これを基盤面での加速度応答スペクトルとして適用する。

$$X_{eq}^{-2} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{oi}^2 X_i^{-2}}{\sum_{i=1}^n M_{oi}^2} \quad (2)$$

ここに、 M_{oi} は断層の分割要素*i*の地震モーメント、 X_i は要素*i*と評価地点の距離を示す。

(2) 表層地盤の増幅特性

表層地盤の増幅率は、式(3)で表される水平成層地盤

の伝達関数の絶対値で与えられる²⁾。

$$Z_{r/s} = \frac{A_r + B_r}{A_s + B_s} \quad (3)$$

ここに、 Z_{rs} は第 s 層から第 r 層への伝達関数で、任意層間の伝達関数は連続する第 i 層と第 $(i+1)$ 層の関係式(4)を用いて求めることができる。

$$\begin{aligned} A_{i+1} &= \frac{1}{2} \left[(1+R_i)A_i e^{ip_i H_i} + (1-R_i)B_i e^{-ip_i H_i} \right] \\ B_{i+1} &= \frac{1}{2} \left[(1-R_i)A_i e^{ip_i H_i} + (1+R_i)B_i e^{-ip_i H_i} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

なお、インピーダンス比： $R_i = G_i^* p_i / G_{i+1}^* p_{i+1}$ 、伝播定数： $p = \omega \sqrt{\rho / G^*}$ 、複素剛性： $G_i^* = G_i (1 + 2ih_i)$ である。

図-1は表層地盤の伝達関数を用いた耐震設計上の解放地盤面での応答スペクトルの評価フローである。非減衰の速度応答スペクトルは加速度フーリエスペクトルと近似的に等しくなるため、基盤面の非減衰速度応答スペクトルに伝達関数を掛け合わせることで解放地盤面の応答スペクトルを推定する。なお、式(1)は $2E$ の加速度応答スペクトル(5%減衰)を評価するため、非減衰の擬似速度応答スペクトルに変換してから、 $(2A_i/2A_j)$ すなわち $(2E_i/2E_j)$ の伝達関数を適用する。

式(3)の理論伝達関数には、せん断弾性係数 G と減衰定数 h が複素剛性 G^* で考慮されている。そこで、表層地盤を $V_s < 300\text{m/s}$ の軟弱層と $V_s \geq 300\text{m/s}$ の硬質層に分けてモデル化し、大地震時の軟弱層の非線形挙動を地盤のせん断ひずみを介して表現することを試みる。具体的には、地盤の初期物性 G, h による伝達関数を用いて軟弱層上下面の擬似速度応答スペクトルを計算し、最大速度、地盤ひずみを順次求めて^{3), 4)}、軟弱層の平均せん断ひずみを推定する。これにより、硬質層の初期物性 G, h による G^* と軟弱層のひずみ依存性から得られる G, h による G^* を式(3)に反映させることによって、地盤の非線形挙動を考慮した解放地盤面の応答スペクトルを評価する。

(3) 観測値と理論解による地盤増幅率の比較

東京湾臨海部江東の鉛直アレー記録 (GL-1m, GL-47m)⁵⁾ および関西地震観測研究協議会より提供された1995年兵庫県南部地震のポートアイランドの鉛直アレー記録 (GL+0m, GL-83.4m) を利用して、地盤増幅率の推定精度を検討した。江東の記録については、波形や最大加速度値等から地盤の非線形性の影響が極めて小さいと考えられるため、地盤ひずみを考慮せずに理論解を求めた。一方、ポートアイランドの記録は、地盤の非線形特性が含まれるため、理論解に地盤ひずみを考慮した。各地点とも観測地点間を1層とした地盤モデルを作成し、平均的な地盤物性を設定した。

図-2は江東、図-3はポートアイランドにおける観測

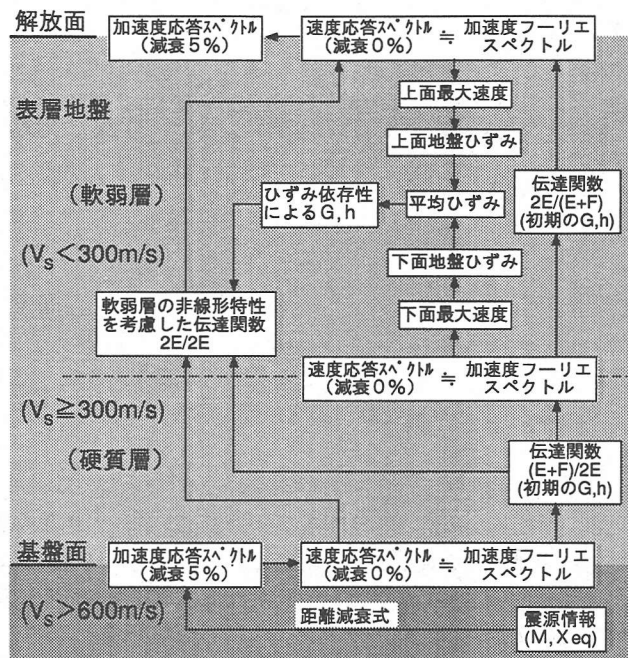


図-1 伝達関数を用いた応答スペクトルの評価フロー

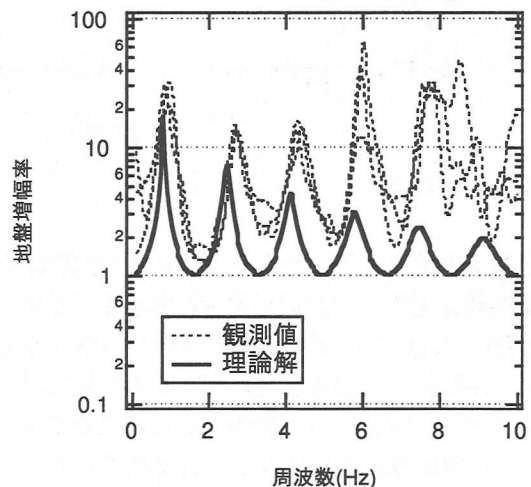


図-2 江東の観測地点間の地盤増幅率 (GL-1m / GL-47m)

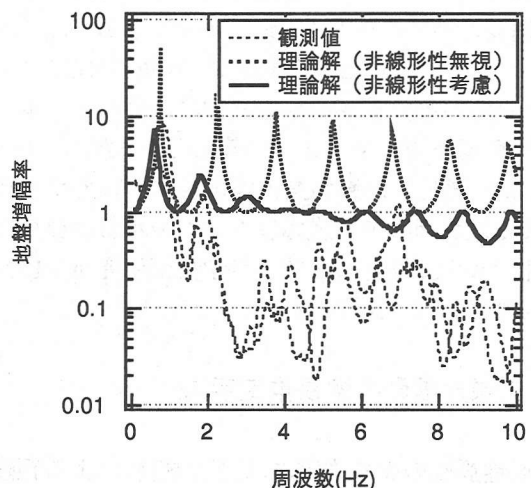


図-3 ポートアイランドの観測地点間の地盤増幅率 (GL+0.0m / GL-83.4m)

表-1 1997年3月16日愛知県東部地震の諸元

発生年月日	1997.03.16	断層長さ	10 km
震源位置	34.9N	断層幅	5 km
	137.5E	走向方向	164°
震源深さ	39 km	傾斜角度	37°
マグニチュード	5.8	地震モーメント	1.8×10^{24} dyn·cm

注) 気象庁地震火山概況および東大地震予知情報センターのEICノート
(http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/EIC_J.html) に基づく

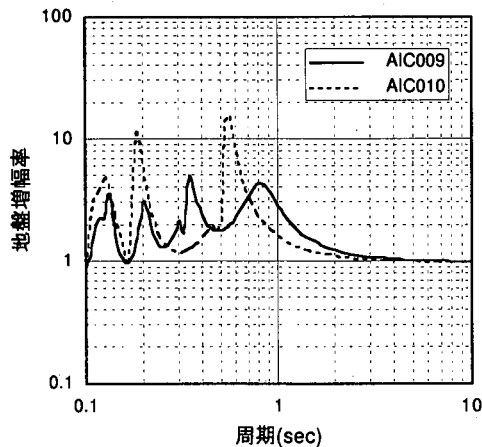


図-4 地盤特性の異なる2地点の地盤増幅率

値と理論解の地盤増幅率を比較した結果である。地盤が線形挙動を示した江東については、観測値と理論解の周期特性はほぼ一致する。ポートアイランドについては、当然のことながら非線形性を考慮しないと観測値との整合が認められないが、非線形性を考慮すると観測値の周期特性に近づく。地盤増幅率はいずれの地点でも構造物の地震被害の主要因となる1次固有周期(1 Hz付近)で観測値と理論解はほぼ一致し、2次固有周期(2~2.5Hz付近)についても比較的良い適合を示す。

3. 事例解析

1997年3月16日に発生した愛知県東部地震について、広域地震動の簡易推定を行い、加速度応答スペクトルと最大加速度を防災科学技術研究所のK-NETによる観測値と比較する。なお、K-NETでは全国1,000箇所に設置された強震計の記録をインターネット上で発信している(<http://www.k-net.bosai.go.jp/>)。

表-1は1997年3月16日愛知県東部地震の地震諸元である。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および深層地盤構造から各観測地点の表層の軟弱層および硬質層、基盤層($V_s > 600$ m/s層)の平均的な地盤物性を設定し、地理情報システム上で面に展開することによって、広域地域の地盤モデルを数値情報として作成した。

(1) 加速度応答スペクトルの評価

簡易推定手法を用いて $X_{eq} \leq 100$ kmの範囲の地表面

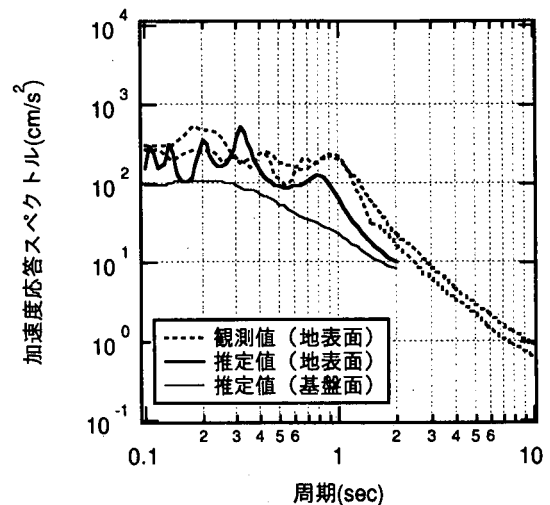


図-5 AIC009の加速度応答スペクトル

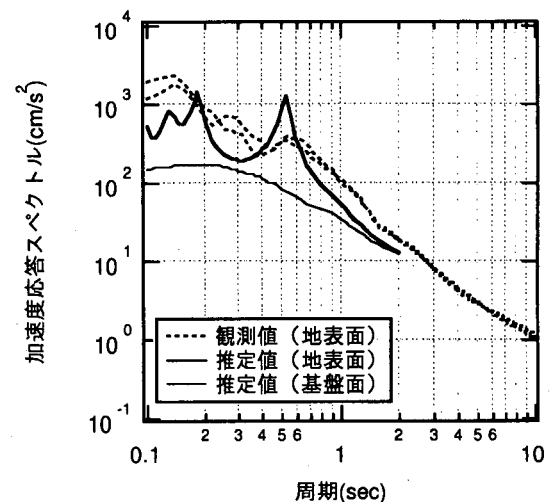


図-6 AIC010の加速度応答スペクトル

加速度応答スペクトルを評価した。その結果、周期帯域0.1秒~2秒の範囲では全域に亘って観測値と推定値で良い対応が得られた。図-4は断層西側の基盤面が深く軟弱層が厚く堆積した地点(AIC009, $X_{eq}=48$ km)と比較的基盤面の浅い断層近傍地点(AIC010, $X_{eq}=33$ km)の表層地盤($V_s > 600$ m/s層上面から地表面まで)の地盤増幅率である。両地点の地盤特性の差が固有周期の違いとして表れ、ピーク値は震源に近いAIC010で大きくなる。

図-5、図-6には2地点の地表面加速度応答スペクトル(5%減衰)を観測値と推定値で比較した。図中には $V_s > 600$ m/s層上面でのスペクトルも併せて示した。表層地盤を2層にモデル化した影響で、推定値は固有周期以外の周期で増幅率の評価が過小となるところもあるが、スペクトル形状やレベル値を概ね再現している。したがって、応答スペクトル法を用いた解析や被害との相関の高いSI値の評価に活用が可能である。

(2) 最大加速度の評価

最大加速度についても観測値と推定値で比較した。

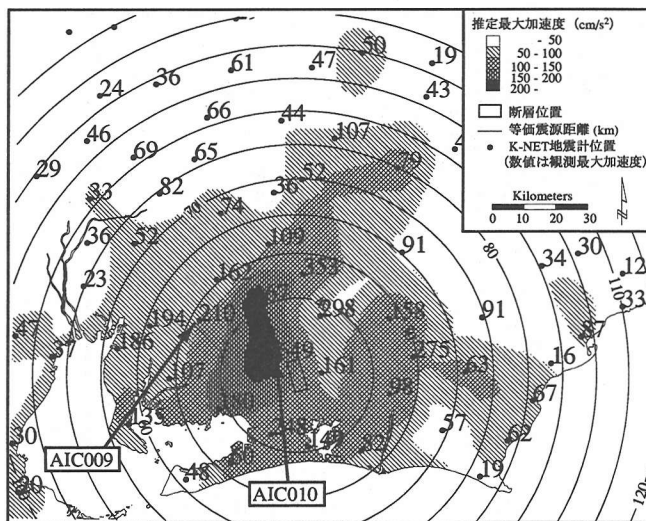


図-7 推定された地表面最大加速度分布と観測値

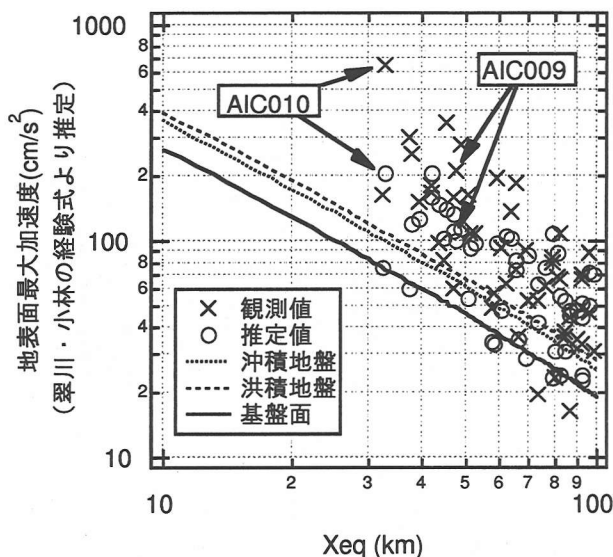


図-8 最大加速度と等価震源距離の関係

観測値は水平2成分の自乗和の平方根を使用し、推定値は加速度応答スペクトルの積分による翠川・小林の経験式³⁾で求めた。

図-7は推定された地表面最大加速度分布である。図中にはK-NET地震計位置と観測最大加速度も併せて示した。推定結果は観測値に比べて200cm/s²を超える地域を狭く評価している。しかし、断層の北西側で最大加速度が大きくなる傾向や、全体の分布形状は比較的良く再現できている。

図-8は地表面最大加速度と等価震源距離の関係を示している。図中には $V_s > 600\text{m/s}$ 層上面での最大加速度を実線で、1997年兵庫県南部地震の際の沖積地盤と洪

積地盤の地盤増幅率の評価結果¹⁾を用いて翠川・小林の経験式で求めた最大加速度を波線で示す。推定値は観測値に比べ震源近傍でやや過小評価となるが、前述したように加速度応答スペクトルについては概ね一致する。なお、今後加速度応答スペクトルから最大加速度への変換方法や地盤データの見直しにより、推定精度の向上が図れると考えられる。

4. まとめ

地震被害想定で用いる広域地震動を評価するために、断層情報と表層地盤の非線形性を考慮して耐震設計上の解放地盤面の地震動分布を簡易地盤モデルを用いて推定することを試みた。1997年3月16日愛知県東部地震の事例解析では、地表面加速度応答スペクトルを概ね再現し、最大加速度についても比較的良好な対応を得ることができた。これにより、本簡易推定手法は応答スペクトル法による解析やSI値の評価に適用することができる。

今後は、液状化などの大ひずみ時への適用性の検討などにより、簡易推定手法の精度向上を図るとともに、本手法を適用した場合の構造物の被害予測について研究を進め、より高度な地震被害想定手法の構築に活用していきたい。

参考文献

- 1) 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, pp.623-648, 1996.
- 2) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994.
- 3) 翠川三郎，小林啓美：地震断層を考慮した地震動スペクトルの推定，日本建築学会論文報告集，第282号，pp.71-79，1979.
- 4) Okubo, T., T. Arakawa, and K. Kawashima : Dense instrument array program of the public works research institute and preliminary analysis of the records, Proc. 8th World Conf. Earthqu. Engng, S. Francisco, California, Vol.II, pp.151-158, 1984.
- 5) 鹿島技術研究所：東京湾臨海部地震動観測網による観測記録集，Vol.1～Vol.2，1993，1994.