

震源断層の破壊過程に基づく入力地震動の 位相スペクトルの推定

山下典彦¹・佐藤忠信²

¹正会員 博(工) 神戸市立工業高等専門学校講師 都市工学科 (〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3)

²正会員 工博 京都大学防災研究所教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

構造物の動的な耐震設計を行う上で、その設置場所で予想される地震動を推定することは重要な課題である。耐震設計用の入力地震動を合成するには振幅特性と位相特性が必要であるが、これまでの研究では振幅特性に重点が置かれ、位相特性についてはあまり研究されていなかった。ここでは、モーメントレート関数に注目し、大地震のモーメントレート関数とその基になった基底関数の比を周波数領域で求めることで震源モデルに基づく基盤入射波の位相スペクトルをモデル化する。さらに、この位相スペクトルと伝播経路特性の位相スペクトルを群遅延時間により合成し、位相特性を求める。振幅特性についても同じ震源断層モデルから得られた理論加速度応答スペクトルを用いてモデル化し、入力地震動の推定を行った。

Key words : *Phase Spectrum, Group Delay time, Input Ground Motion, Fault Rupture Process, Response Spectrum*

1. まえがき

構造物の動的な耐震設計を行う上で、その設置場所で予想される地震動を推定することは重要な課題である。耐震設計用の入力地震動を合成するには振幅特性と位相特性が必要であることは明らかであるが、これまでのシミュレーション手法は、振幅特性に重点が置かれ、位相特性についてはあまり研究されていなかった。実務上では、Jennings et al.¹⁾が定義した時刻歴包絡線を規定して地震動を作成する方法²⁾や、実地震波の位相をそのまま用いる方法³⁾などが用いられていたが、個々の方法は震源破壊過程および伝播経路特性について必ずしも満足されたものではなかった。ここでは、佐藤ら⁴⁾により提案された震源断層の破壊過程および伝播経路特性の群遅延時間のモデル化の概念を兵庫県南部地震に適用し、関口らの断層破壊過程⁵⁾を推定した結果より得られたモーメントレート関数をインパルス列とし、波形を推定した。その際、大地震のモーメントレート関数とその基になった基底関数の比を周波数領域で求めることで震源モデルに基づく基盤入射波の位相ス

ペクトルをモデル化した。そして、その位相スペクトルと伝播経路特性の位相スペクトルを群遅延時間により合成し、位相特性を求めた。さらに、振幅特性についても同じ震源断層モデルから得られた理論加速度応答スペクトルを用いてモデル化し、入力地震動の推定を行った。

2. 解析手法

2.1 震源モデルに基づく理論加速度応答スペクトルの推定

図-1に理論加速度応答スペクトルの計算手法の概念を示す。この手法の特徴は、地震動のパワースペクトルを理論的に求めているため、加速度時刻歴を必要とせずに加速度応答スペクトルを推定できる点である。まず、震源インバージョンによって求められた低周波数帯に精度のある震源断層モデルをもとに高周波数にも拡張した震源断層モデルで地震動を評価した。その際、震源断層モデルとして関口らの断層破壊過程を用い、震源断層面の各小区域のモー

メントレート関数をフーリエ変換することによって求めた小区域のスペクトルを用いた。さらに、これらを時間遅れに従って足し合わせることで大地震時の震源スペクトルを求め、それより地震基盤面における大地震の理論的なフーリエスペクトルを求めた。

地盤における地震動の増幅は重複反射理論により評価し、1自由度系構造物の加速度パワースペクトルを用いて、加速度応答スペクトルを推定した。

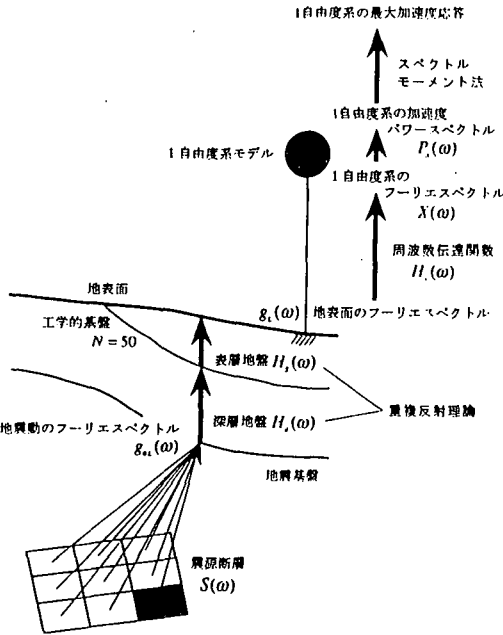


図-1 震源断層モデルによる理論加速度応答スペクトルの計算手法

2.2 震源モデルに基づく地震動の位相特性のモデル化

ここでは、フーリエ位相スペクトル $\phi(\omega)$ を角振動数 ω 軸上で微分した群遅延時間を用いる。群遅延時間は次式で表される。

$$t_{gr}(\omega) = \frac{d\phi(\omega)}{d\omega} \quad (1)$$

この群遅延時間を合理的にモデル化することにより、地震動の非定常性を取り入れた耐震設計用の入力地震動を提案することができる。ここでは、震源過程の時間変化を表す方法として、地震モーメントの時間変化率であるモーメントレート関数を導入する。このモーメントレート関数は、小区域におけるすべりベクトルの分布より基底関数を表し、その基底関数を時間軸方向に8個分重ね合わせることで、震源断層要素の破壊過程を表したものを各区域

と観測点の位置を考慮して足し合わせたものである。その大地震時のモーメントレート関数のパルス列 $M(t)$ および基底関数のパルス列 $g(t)$ を示したものが次式である。

$$M(t) = \sum_{i=1}^{n_l} \sum_{j=1}^{n_w} \sum_{k=1}^8 A_{ij}^k g(t - t_{ij} - t_k) \quad (2)$$

$$g(t) = \frac{1}{t_0} \left[1 - \tanh^2 \left(\frac{2t}{t_0} \right) \right] \quad (3)$$

式(2),(3)の各々をフーリエ変換した $M(\omega)$ と $g(\omega)$ の比 $A(\omega)$ を求めると、

$$A(\omega) = \frac{M(\omega)}{g(\omega)} = \sum_{i=1}^{n_l} \sum_{j=1}^{n_w} \sum_{k=1}^8 A_{ij}^k e^{-i\omega(t_{ij} + t_k)} \phi \quad (4)$$

と表現され、 $A(\omega) = F_R(\omega) + iF_I(\omega)$ であるので震源モデルに基づく基盤入射波の位相 $\phi_p(\omega)$ は、

$$\phi_p = \tan^{-1} \frac{F_I(\omega)}{F_R(\omega)} \quad (5)$$

となる。さらに、伝播経路特性の増幅特性に関する振幅特性が $A_h(\omega)$ でモデル化されていると仮定し、この伝播経路の位相特性 $\phi_h(\omega)$ が最小位相推移関数で表現されていると仮定する。この場合、位相および振幅スペクトル間にはヒルベルト変換の関係があり、位相スペクトルを求めることができる。

$$\phi_h(\omega) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\ln(A_h(y))}{\omega - y} dy \quad (6)$$

したがって、式(6)を ω で微分すれば群遅延時間が求まる。このとき、地震動の位相 $\phi(t)$ は基盤入射波および伝播経路特性の線形和で合成され、地震動の群遅延時間 $t_{gr}(\omega)$ は、

$$t_{gr}(\omega) = t_{gr}^p(\omega) + t_{gr}^h(\omega) \quad (7)$$

で求められることになる。これより位相は、

$$\phi(\omega) = \int_0^{\omega} t_{gr}(\omega) d\omega \quad (8)$$

となる。

3. 入力地震動のシミュレーション

3.1 解析モデル

震源断層モデルとしては、図-2に示す震源域および近地地震記録を用いたマルチタイムウインドウ

線形波形インバージョンを行うことにより得られた関口らの断層破壊過程を使用した。このモデルは、淡路島側から神戸側へそれぞれ7×7, 7×5, 7×8の合計140要素区域で構成されている。図-3は、各震源断層モデルを用い算出における各小区域のモーメントレート関数を各区域と観測点の位置を考慮して足し合わせたもので、大地震のモーメントレート関数である。なお、ラディエーションパターン係数 $R_{\theta\phi}$ は、その全方位について平均した0.4を用いている。

地盤の増幅特性については、神戸市内において収集されたボーリングデータを用いてN値が50以上となる工学的基盤面の深度と土質の種類に応じて、層構成をモデル化する。次に、各点の岩盤深度を図-4に示す中川らによる重力探査結果を基に読み取り、岩盤におけるせん断波速度を3.4km/sとする。さらに、地震基盤面から工学的基盤面までの層構造は、図-5に示される大阪市地域防災計画参考資料(深層地盤モデル1)および入倉(深層地盤モデル2)のモデルを用いて設定した。この地盤モデルを用いて、地震基盤面から地表面までを重複反射理論によりモデル化した振幅スペクトルから位相スペクトルを求めた。

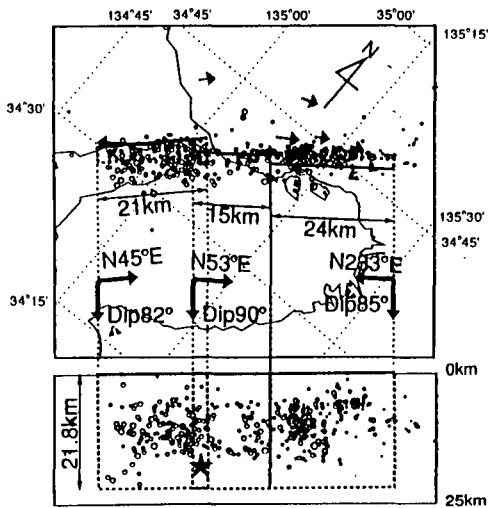


図-2 強震動データから推定された断層破壊過程

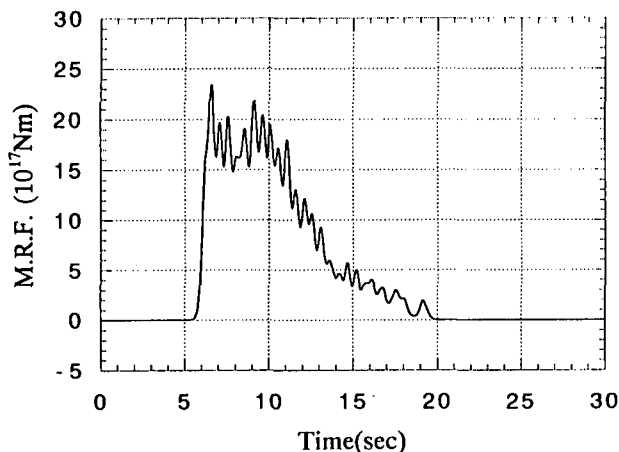


図-3 算出での大地震のモーメントレート関数

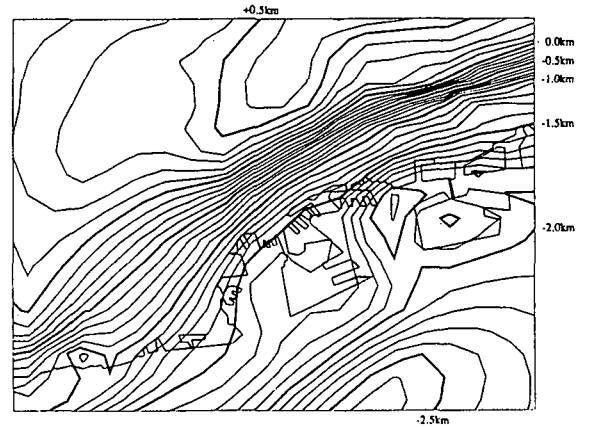


図-4 中川らによる重力探査結果を基にした神戸市の岩盤深度

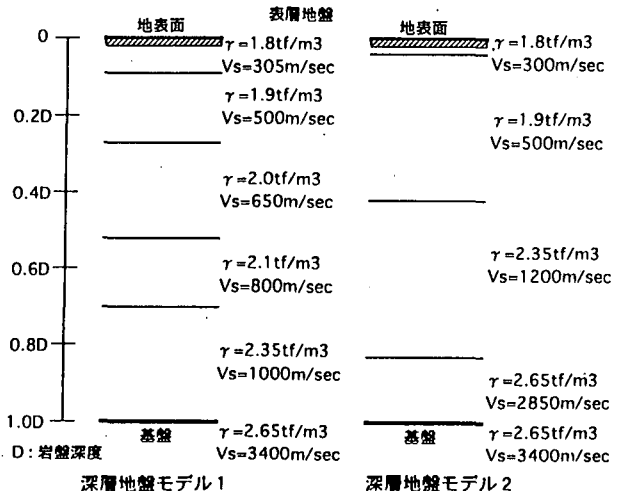


図-5 深層地盤モデル

3.2 シミュレーション波形の作成法

シミュレーション波形の作成手順を、図-6に示す。まず、減衰定数を5%として求めた理論加速度応答スペクトルを近似的に擬似速度応答スペクトルに変換する。次に、そのスペクトルに補正係数を乗じることにより減衰定数を0%とした擬似速度応答スペクトルとし、それがフーリエスペクトルと等値であると仮定することにより振幅特性を求める。さらに、地震動の群遅延時間より式(8)に従って求めた位相スペクトルを位相特性として振幅特性と合成することにより、波形の作成を行う。そうして求めた波形の応答スペクトルを理論加速度応答スペクトル準拠とし、振幅調整を行った上でシミュレーション波形の推定を行う。

3.3 入力地震動の推定と妥当性の検証

ここでは、兵庫県南部地震の算出で観測された波形を上記の手法を用いてシミュレーションし、その妥当性を検証した。

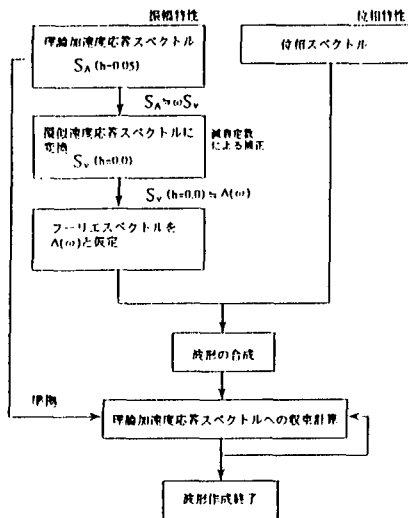


図-6 入力地震動のシミュレーション手法

図-7に振幅特性として絶対加速度応答スペクトルの比較を示すが、理論加速度応答スペクトルおよび深層地盤モデル2が0.5sec付近で最大3gを示している。さらに、図-8に位相特性として位相スペクトルの比較を示すが、両者あまり良い一致はみられない。図-9は観測地震記録とシミュレーション波形の比較を示す。この方法では、因果性が満たされていないので、パルス発生以前にも波が存在している。加速度の最大値としては、観測地震記録が802.0gal、シミュレーション波形の深層地盤モデル1

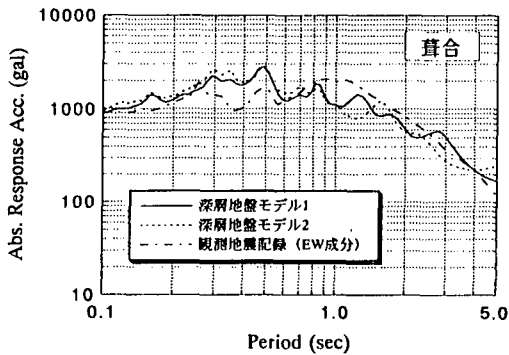


図-7 重合での応答スペクトルの比較 (h=0.05)

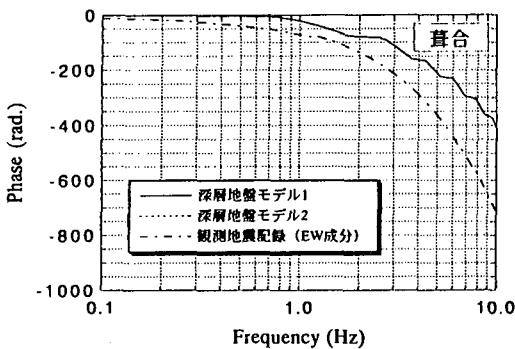


図-8 重合での位相スペクトルの比較

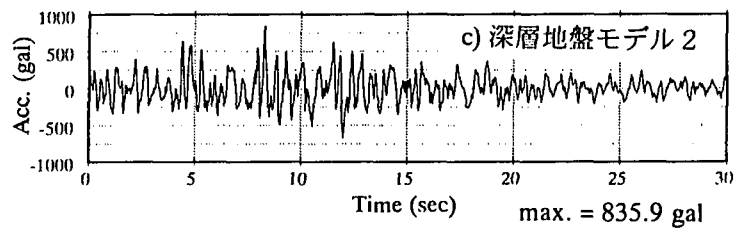
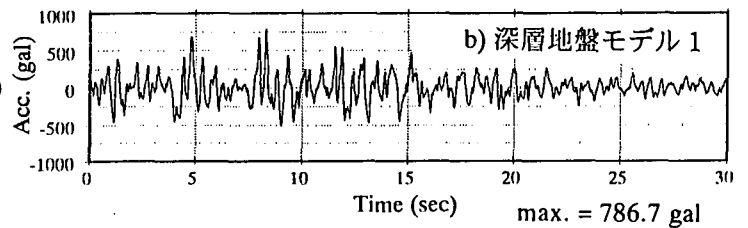
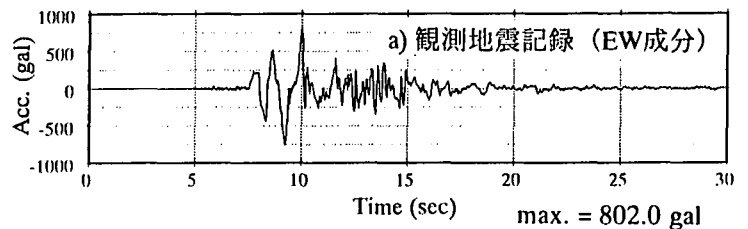


図-9 重合での観測地震記録とシミュレーション波形の比較

が786.7gal、深層地盤モデル2が835.9galとなった。

4. まとめ

大地震のモーメントレート関数を用いて震源モデルに基づく基盤入射波の位相スペクトルをモデル化した。しかし、現段階では位相スペクトルが観測記録と比較して良好に推定できていない。したがって、それらに関して更に検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) Jennings, P. C., G. W. Housner and N. C. Tsai : Simulated earthquake motions, E. E. R. L., Pasadena, 1968.
- 2) 大崎順彦：原子力発電所設計用の基準地震動評価に関するガイドライン 主として大崎スペクトルについて、ORI研究報告 84-01, 1984.
- 3) 荒川直士, 川島一彦, 相沢興：応答スペクトル特性を調整した時刻歴地震応答解析用入力地震動波形, 土木技術資料, 第26巻, 第7号, 昭和59年7月.
- 4) 佐藤忠信, 室野剛隆, 西村昭彦：地震動の位相スペクトルのモデル化, 第2回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp.119-122, 1997.
- 5) Sekiguchi, H., Irikura, K., Iwata, T., Kakchi, Y. and Hoshiba, M.: Minute Locating of faulting beneath Kobe and the waveform inversion of the source process during the 1995 Hyogo-ken Nanbu, Japan, earthquake using strong ground motion records, J. Phys. Earth, 1996.