

震源断層モデルによる地震動の位相スペクトルを 用いた推定波形の検証

佐藤忠信¹・山下典彦²・室野剛隆³

¹正会員 工博 京都大学教授 防災研究所地震災害部門 (〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

²正会員 博(工) 京都大学助手 工学研究科土木工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

³正会員 工修 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 (〒185 東京都国分寺市光町2-8-38)

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フーリエ振幅特性と位相特性が必要であるが、前者については、今までに定量的に検討されたものは少ないが、後者については震源断層の破壊過程及び伝播経路特性の位相スペクトルをモデル化することにより、地震動の地震動らしさを表現できるようになってきた¹⁾。ここでは、この方法を耐震設計の観点から兵庫県南部地震に適用し、関口らの断層破壊過程²⁾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。さらに、その結果を観測地震記録、釜江・入倉による断層破壊過程³⁾より求めた推定波形と比較した。

2. 解析手法

(1) インパルス列の位相特性のモデル化

大地震の断層面を $n \times n$ 個の小断層に分割し、断層面上の小区域に小地震を対応させれば、断層の破壊過程にしたがって小地震を重ね合わせることで大地震を合成することができる⁴⁾。いま、大地震の地震動を $g_{oL}(t)$ とすれば、これは断層面上に発生する小地震の地震動 $g_{os}(t)$ の時間的ずれ t_{ij} , t_{ijk} を考慮した重ね合わせを用いて次式のように表現できる。

$$g_{oL}(t) = \sum_{i=1}^{n_L} \sum_{j=1}^{n_W} g_{os}(t - t_{ij}) + \sum_{i=1}^{n_L} \sum_{j=1}^{n_W} \sum_{k=1}^{(n_D-1)n'} \frac{1}{n} g_{os}(t - t_{ijk}) \quad (1)$$

ただし、 t_{ij} と t_{ijk} の各々は地震動の伝播による時間遅れ、断層面上を破壊が伝播するのに要する時間遅

れ、ならびに断層のくいちがいの進行に基づく時間遅れによって次式のように表される。

$$t_{ij} = \frac{(R_{ij} - R_0)}{v_s} + \frac{\xi_{ij}}{v_r}, \quad t_{ijk} = t_{ij} + \frac{k\tau}{(n_D - 1)n'} \quad (2)$$

ここに、 R_0 と R_{ij} は各々観測点と震源ならびに小区域(ij)の破壊点の間の距離、 v_s は媒質のせん断波速度、 ξ_{ij} は断層面上での震源から小区域(ij)の破壊点までの距離である。(1)式を重ね合わせの大きさとタイミングを表すインパルス列 $p(t)$ と小地震との合積の形に変換すると、インパルス列は次式のようになる。

$$p(t) = \sum_{i=1}^{n_L} \sum_{j=1}^{n_W} a \delta(t - t_{ij}) + \sum_{i=1}^{n_L} \sum_{j=1}^{n_W} \sum_{k=1}^{(n_D-1)n'} \frac{1}{n} a \delta(t - t_{ijk}) \quad (3)$$

ここでは、さらに(3)式を(4)式のように簡略化して表現する。

$$p(t) = \sum_{i=1}^N a_i \delta(t - t_i) \quad (4)$$

このフーリエ振幅と位相スペクトルは次式で与えられる。

$$A_p(\omega) = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega t_i) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N a_i \sin(\omega t_i) \right)^2} \quad (5)$$

$$\phi_p(\omega) = \tan^{-1} \left(- \frac{\sum_{i=1}^N a_i \sin(\omega t_i)}{\sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega t_i)} \right) \quad (6)$$

さらに、群遅延時間は次式で与えられる。

$$\frac{d\phi_p(\omega)}{d\omega} = \frac{- \sum_{i=1}^N a_i^2 t_i - \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N a_i a_j (t_j + t_i) \cos\{\omega(t_j - t_i)\}}{\sum_{i=1}^N a_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N a_i a_j \cos\{\omega(t_j - t_i)\}} \quad (7)$$

なお、本論文では断層の破壊が一様であると仮定してパルス強度 $a_i = 1$ とした。

(2) 伝播経路特性の位相特性のモデル化

伝播経路特性や地盤の増幅特性に関する振幅特性が何らかの形でモデル化されていると仮定し、この特性を $A_h(\omega)$ とする。さらに、この位相特性 $\phi_h(\omega)$ を求めるには、伝播経路特性が最小位相推移関数で表現されると仮定する。この場合、位相スペクトルと振幅スペクトルの間にはヒルベルト変換の関係⁵⁾があり、次式で位相スペクトルが得られる。

$$\phi_h(\omega) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\ln(A_h(y))}{\omega - y} dy \tag{8}$$

(8)式を微分すればその群遅延時間が求まる。

3. 波形のシミュレーション

本検討では、兵庫県南部地震の葺合で観測された波形を上記の手法でシミュレーションし、その妥当性を検証した。

(1) 解析モデル

地震断層モデルとしては、図-1 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

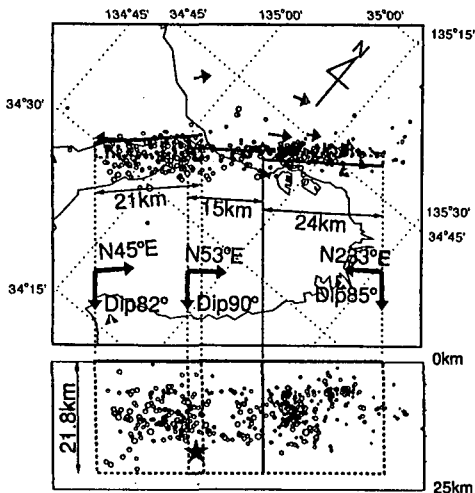


図-1 関口らの解により求めた震源断層モデル

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解（不均質断層モデル）を使用した。ここでは、その結果を利用し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（モーメントレート関数）を導入する。関口らの解により得られた各小領域のモーメントレート関数を示したものが図-2である。これを、破壊伝播を考慮して足し合わせたものが図-3に示す大地震のモーメントレート関数である。

深層地盤については、岩盤深度を中川ら⁶⁾による重力探査結果を基に算定し、基盤面 ($V_s = 3.4\text{km/sec}$) から工学的基盤面までの層構造は入倉⁷⁾による深層地盤モデルを用いた。さらに、表層地盤については土質柱状図から地盤モデルを決定し、基盤から地表面までの伝達関数 $A_h(\omega)$ を線形重複反射理論により求めた。

(2) シミュレーション

ここでは、位相スペクトルのモデル化のみについて議論するために地震動の振幅特性 $A(\omega)$ は、実際に観測されたものを用いた。したがって、観測波の振幅特性と理論的に決定した位相特性を用いて、実際の地震波に近い波がシミュレートできるかどうか検討した。

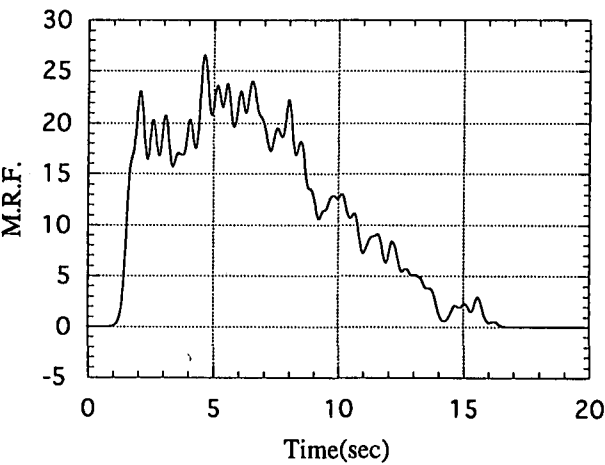


図-3 大地震のモーメントレート関数

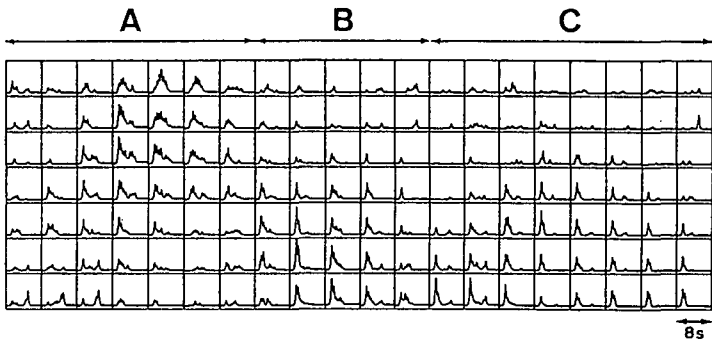


図-2 兵庫県南部地震のモーメントレート関数

図-1に示した断層モデルを用いて、インパルス列を図-3に示す大地震のモーメントレート関数で規定し、その位相特性を(6),(7)式から算定した。また、地盤モデルから算定される基盤面から地表面までの伝達関数 $A_h(\omega)$ を用いて、(8)式より伝播経路特性による位相特性を求めた。地震動が震源特性と伝播経路特性の合積で表せるとすると、(6)式と(8)式から地震動の位相スペクトル $\phi(\omega)$ が求められる。以上の $A(\omega)$ と $\phi(\omega)$ から逆フーリエ変換によって葺合の加速度波形をシミュレートし、それを積分して速度、変位波形を求めた。その結果を観測地震記録および釜江・入倉の解(多重震源モデル)と比較して図-4に示す。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が、主要動部分については、概ね良好に波形を再現している。さらに、図-5には絶対加速度応答スペクトルによる比較を示すが、釜江・入倉の解と比較して関口らの解は震源断層モデルの精度が向上しており、よ

り観測地震記録に近づいていることがわかる。図-6は観測地震記録、釜江・入倉の解、関口の解による水平2成分の変位軌跡を示したものである。同図から揺れの主方向は観測地震記録と同様にほぼ北東-南西方向であることがわかる。

次に、耐震設計上は波形そのものの重要性もさることながら、その波形に対する構造物の応答が注目される。そこで、観測地震記録とシミュレーション波について必要強度スペクトルを算定し、構造物の応答に与える影響について比較した。必要強度スペクトルとは、ある固有周期の構造物に対して降伏強度をパラメータとして、1自由度系の非線形時刻歴応答解析を行い、塑性率 μ がある設定塑性率に収束するように繰り返し計算をし、得られた結果を周期と降伏強度との関係で示したもので、弾塑性耐震設計を検討する際には、非常に有効な手段である。図-7には必要強度スペクトルによる比較を示す。計算に用いた構造物条件は、減衰定数 $h=5\%$ で、復元力特

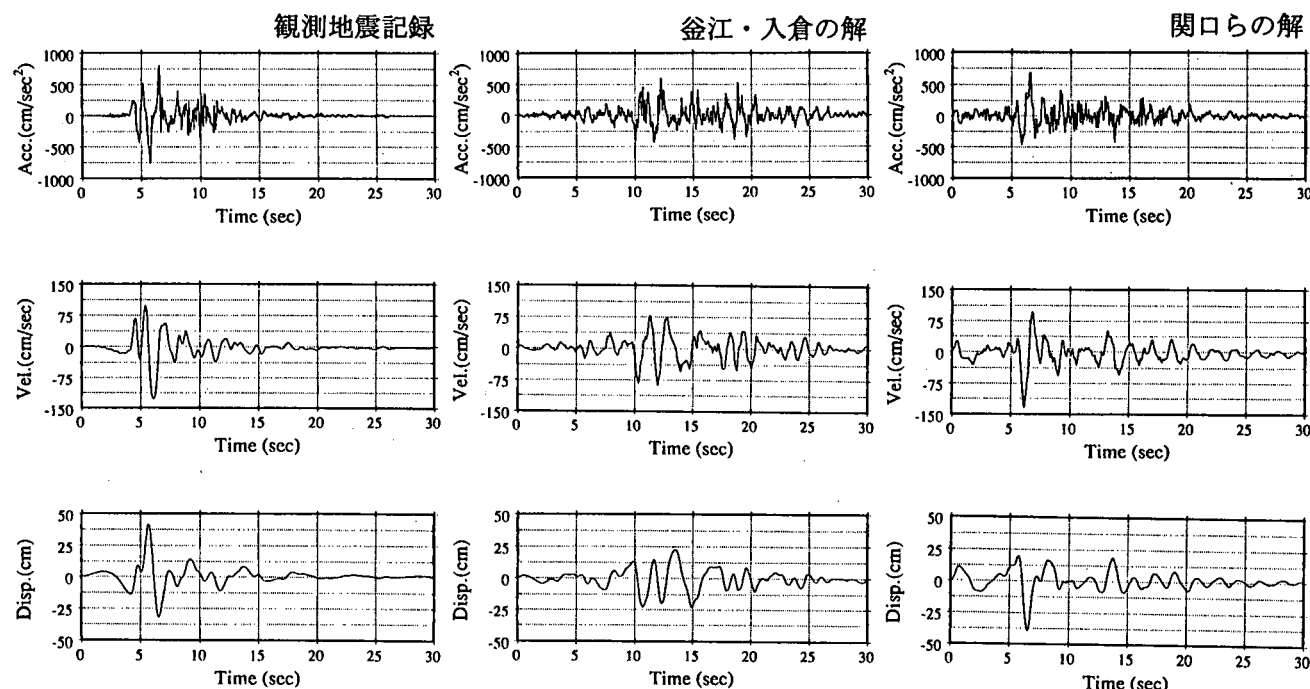


図-4 観測地震記録とシミュレーション波形との比較 (EW成分)

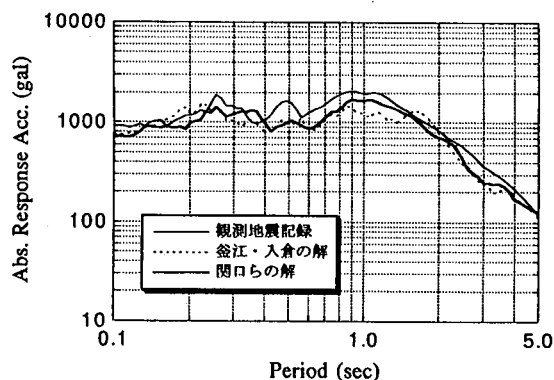


図-5 絶対加速度応答スペクトルの比較 (EW成分)

性はバイリニア型のClough modelで、第2勾配は第1勾配の10%とした。この図からも、構造物の応答が大きく塑性領域に及ぶ場合でも、関口らの解よりシミュレートした波形は観測地震記録とよく一致しており、弾塑性耐震設計上も本手法で位相スペクトルをモデル化する有効性が示された。

4. まとめ

断層破壊過程をインパルス列で表し、その位相スペクトルをモデル化するとともに、伝播経路特性の位相スペクトルを最小位相推移関数の概念を用いることでその振幅特性からモデル化した。さらに、断層破壊過程を詳細にモデル化することにより得られた合成波形は、釜江・入倉の解より求めた震源断層モデルと比較してより実際の現象が表現できるようになった。したがって、理論的に波形を推定する上で破壊過程の詳細なモデル化が重要である。また、今回の解析では振幅特性を観測地震記録から推定したが、これらについても震源断層モデル⁸⁾より推定し、波形の合成を検討しなければならない。

参考文献

1) 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.

2) Sekiguchi, H., Irikura, K., Iwat, T., Kakehi, Y. and Hoshiba, M.: Minute Locating of faulting beneath Kobe and the waveform inversion of the source process during the 1995 Hyogo-ken Nambu, Japan, earthquake using strong ground motion records, J. Phys. Earth, 1996.

3) Kamae, K., Irikura, K.: A fault rupture model of the 1995 Hyogoken-nambu earthquake estimated by the empirical Green's function method, Journal of Natural Disaster Science, Vol.16, No.2, pp.31-40, 1995.

4) Irikura, K.: Semi-empirical estimation of strong ground motions during a large earthquake, Bulletin of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Vol.33, Part2, No.297, pp.63-104, 1983.

5) A. バボリス: 工学のための応用フーリエ積分, オーム社, 1972, pp.243-255.

6) Nakagawa, K., Shiono, K., Inoue, N. and Sano, M.: Geological characteristics and geotechnical problems in around Osaka Basin for a basis to assess the seismic hazards, Soil and Foundations, Special Issue for the 1995 Hyogo-ken Nambu earthquake, pp.15-29, 1996.

7) 入倉孝次郎: 兵庫県南部地震の地震動特性, 建築技術, 1995.

8) 山下典彦, 佐藤忠信, 関口春子: 兵庫県南部地震で発生した強震域での加速度応答スペクトルの推定, 第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.57-64, 1997.

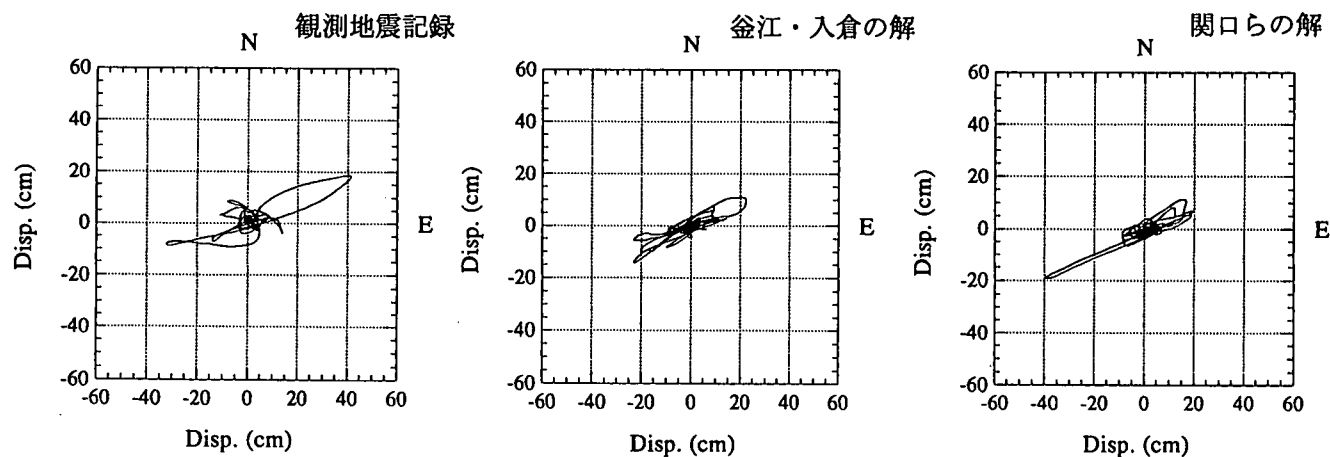


図-6 水平2成分の変位軌跡

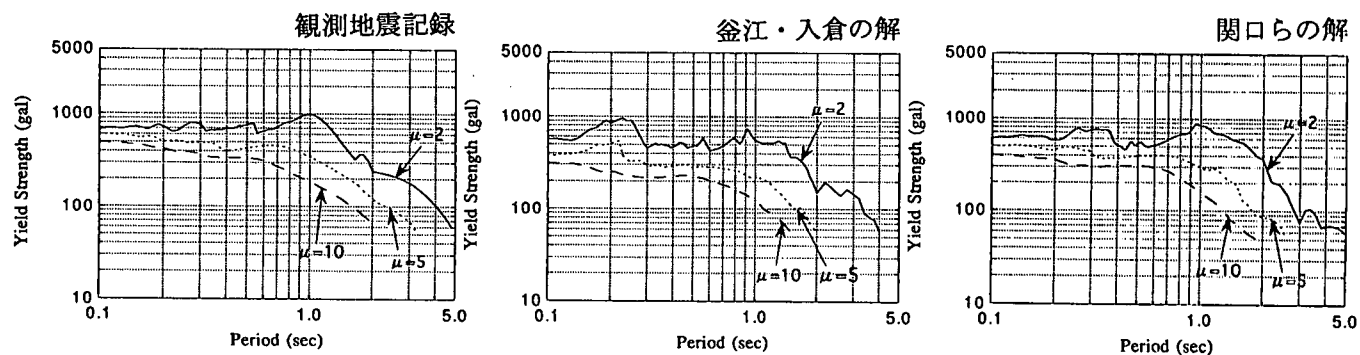


図-7 必要強度スペクトルの比較