

(39) 経験的グリーン関数法と地盤の地震応答解析による軟弱地盤上の強震動予測

運輸省港湾技術研究所 正員 野津 厚

運輸省港湾技術研究所 正員 森田年一

運輸省港湾技術研究所 正員 上部達生

(財)大阪土質試験所 正員 田居 優

1. まえがき

構造物を建設しようとするサイトの地震動を決定する要因としては震源機構・伝播経路・局所的な地盤条件があるが、これらの影響を適切に取り入れた設計用入力地震動の設定方法として、経験的グリーン関数法は工学的立場からも有力視されている。しかしこの方法は伝播経路および地盤の線形性を前提としているため、非線形性の強い軟弱地盤上では合成波形と観測波形は一致しないのが普通である。この難点を回避する一つの方法として、非線形性の影響の少ない基盤で得られた小地震記録をグリーン関数として波形の重ね合わせを行い、これを入力地震動として地盤の地震応答解析を行い、地表での合成波形を得ることが考えられる。本研究では、1995年兵庫県南部地震の余震から得られた基盤の加速度記録にこの方法を適用し、得られた基盤および地表での合成波を本震の観測波と比較することによりその適用性を検討した。

2. 強震記録

兵庫県南部地震およびその余震では、神戸市のポートアイランドの地表および地中で貴重な加速度記録が得られている。強震計は深度別に4箇所設置されており、それぞれの標高は+4.5m(地表)、-12m、-28m、-79mである。このうち標高-79mのものはN値50以上の下部洪積砂礫層(工学的には基盤とみなせる)に位置しており、ここでの記録は地盤の非線形性の影響を受けていないと考えた。以下、本論文では-79mの記録を基盤の記録と呼ぶ。基盤および地表での本震の加速度記録(EW)を図4・図7に示す。また1月17日8:58に発生した余震(震源:淡路島北部、マグニチュード4.7)の加速度記録(EW)を図3・図6に示す。以下、この余震記録を「グリーン関数」として本震の波形を合成し、観測波形との比較検討を行う。

3. 地震波の重ね合わせ

波形の重ね合わせは入倉の方法^{1)、2)、3)}に基づいて行った。断層運動の不規則性については考慮せず、将来の設計に適用できる可能性のある一様断層モデルを採用した。本震の断層面の位置および大きさは、図1(a)に示す兵庫県南部地震の余震分布などに基づき、図1(b)のとおり決定した。破壊伝播は、気象庁の発表した震源から断層面上の各方向に一樣な速度ですすむものとしている。用いた本震の断層パラメータを図1に示す。

本震と余震は地震の相似則^{4)、5)}

$$L/L_e = W/W_e = \tau/\tau_e = (M/M_e)^{1/3}$$

に従うものとし、余震の断層パラメータはこの関係から定めた。ここにLは断層の長さ、Wは断層の幅、 τ はライズタイム、Mは地震のモーメント、添字のeは余震を示す。本震と余震のスペクトル比(図2)の低周波数域における平坦レベルの値から、右辺のモーメント比を 12^3 とした。本震と余震の断層面積比から本震の断層面を 12×12 個の小領域に分割し、それぞれの小領域から12個の小地震が大地震のライズタイム内に生成されるとした。

以上の方法により合成した基盤および地表の加速度波形(EW)を図5・図8に示す。またそれらのフーリエスペクトルを観測波のフーリエスペクトルとともに図10・図11に示す。基盤の波形については合成波と観測波は最大値・継続時間・包絡波形等の点で比較的良好に一致している。またスペクトルで見ても、0.6Hz付近で過大評価となっている外はよく一致している。

一方、地表における波形を比較すると、合成波は明らかに過大評価となっている。フーリエスペクトルの比較からも、0.6Hz以上の周波数帯域で合成波は観測波よりかなり大きな値を示している。この原因は地盤の非線形性にあると考えた。本震では地盤のひずみレベルは大きな値となるため、地表での地震動は地盤の軟化の影響を受け、高い周波数成分の比較的小さい波形となる。一方余震ではひずみレベルは小さ

な値にとどまるため、地盤の非線形性はあらわれず、地表での波形は高い周波数成分も多く含む。このため、地表での余震記録を用いて重ね合わせを行えば、高周波数帯域で過大評価となる。

4. 地盤の地震応答解析

軟弱地盤上での地震動を経験的グリーン関数法で評価するためには、地盤の非線形性を考慮することが課題となる。このための一つの方法として、基盤での合成波を入力地震動として地盤の地震応答解析を行い、地表での合成波形を得ることが考えられる。ここではこの手法の妥当性を検討するため、2.で得られた基盤での合成波を入力地震動として、重複反射理論と等価線形手法による地盤の地震応答解析⁹⁾を行った。

応答計算の結果得られた地表での加速度時刻歴(EW)を図9に、そのフーリエスペクトルを図11に示す。応答計算の結果、0.8Hz以上の周波数帯域での過大評価はなくなり、最大加速度の過大評価も小さなレベルにとどまっている。ただし、0.6Hz付近および0.3Hz付近に観測波にはないピークが見られる。0.6Hz付近のピークは入力地震動として用いた基盤での合成波と共通のものであるが、0.3Hz付近のピークは、応答計算の結果新たに現れたものである。これは等価線形手法の限界を示していると考ええる。さらに適切な地震動評価を行うためには、地盤定数を時時刻々変化した解析を行う必要があると考える。

5. 結論

経験的グリーン関数法を軟弱地盤上での地震動評価に応用するための手法として、基盤での合成波を入力地震動として地盤の地震応答解析を行う方法を試み、比較的良好な結果を得た。波形の重ね合わせと地震応答解析は、将来の設計に適用可能なものとしてシンプルな手法を用いた。したがって得られた結果はそれぞれのプロセスでの単純化による誤差を含んでいるが、今後の研究により解決できる部分もあると考える。

なお本研究に用いたポートアイランドの本震および余震の加速度記録は神戸市開発局から提供していただいたものです。ここに記して感謝の意を表します。

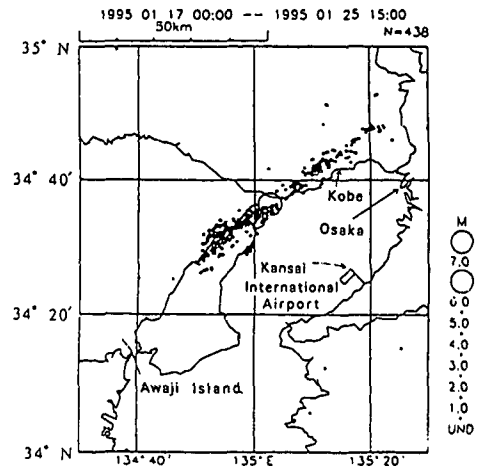


図1 (a) 兵庫県南部地震の余震分布

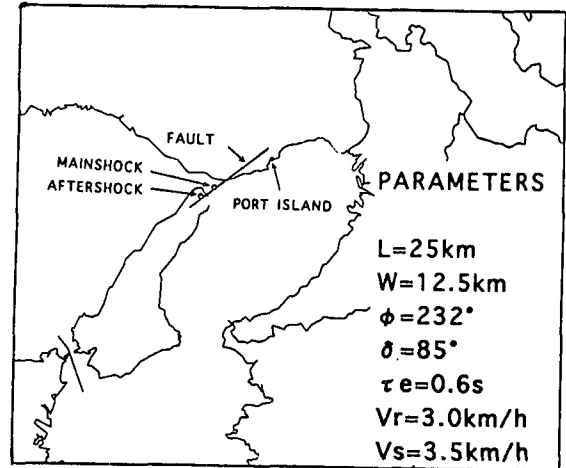


図1 (b) 波形合成に用いた断層面

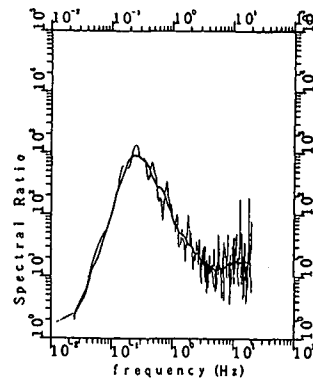


図2 本震と余震のスペクトル比
(太線は平滑化後のもの)

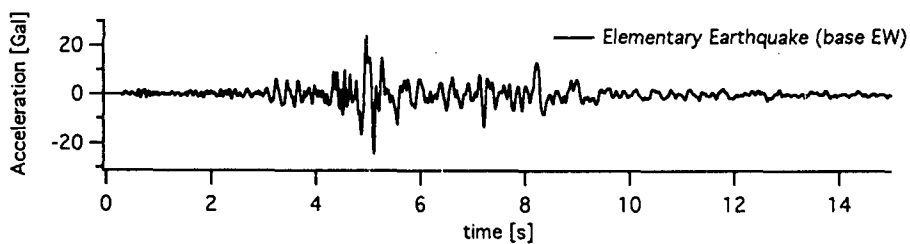


図3
基盤での余震
記録 (EW)

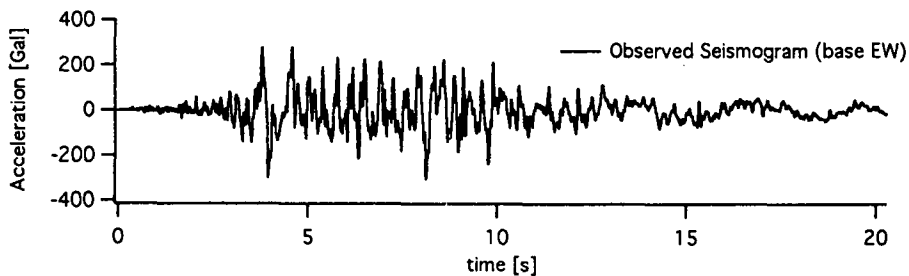


図4
基盤での本震
記録 (EW)

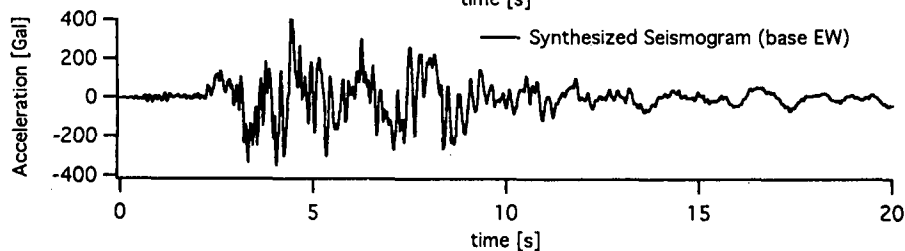


図5
基盤での合成
波形 (EW)

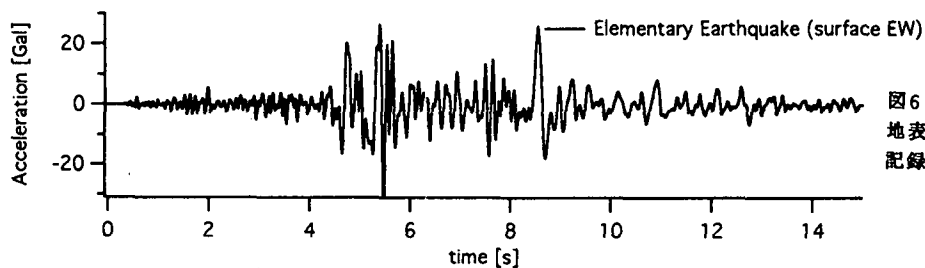


図6
地表での余震
記録 (EW)

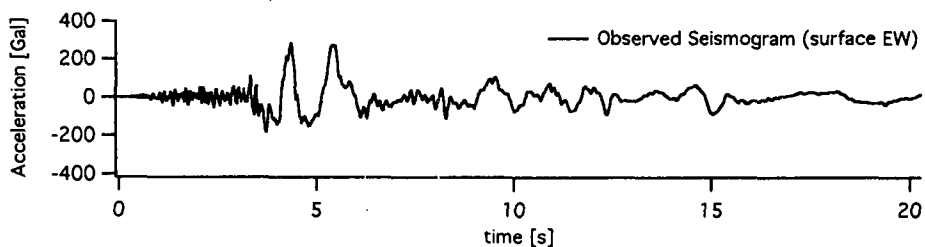


図7
地表での本震
記録 (EW)

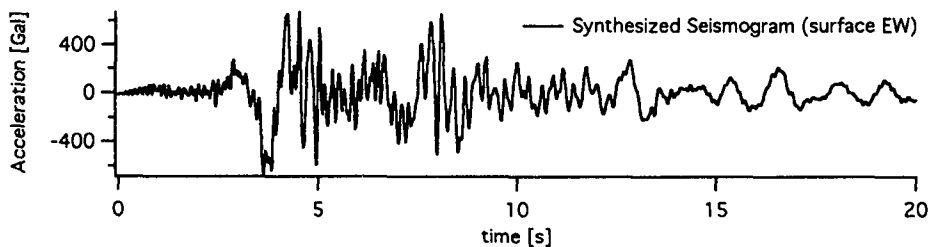


図8
地表での合成
波形 (EW)

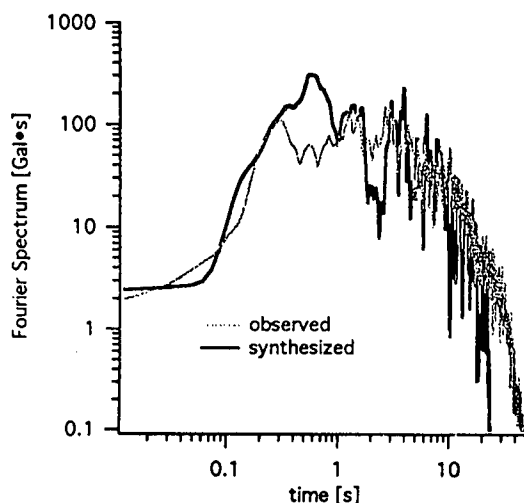
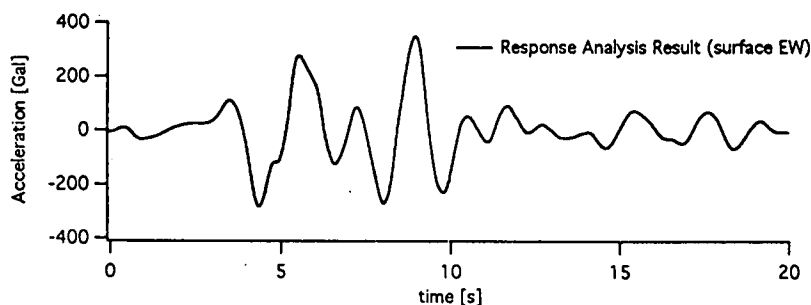


図10
基盤加速度のフーリエスペクトル
(観測波と合成波の対比)

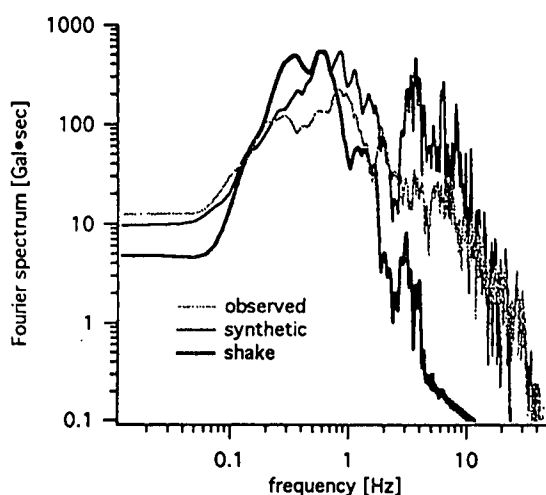


図11
地表加速度のフーリエスペクトル
(観測波・合成波および応答計算結果の対比)

参考文献

- 1) Irikura, K.: Semi-empirical estimation of strong ground motion during large earthquakes, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., 33, 1983, pp. 63-104.
- 2) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp., 1986, pp. 151-156.
- 3) Irikura, K.: Estimation of near field ground motion using empirical Green's function, Proc. 9th World Conf. Earthq. Eng., 8, 1988, pp. 37-42.
- 4) Kanamori, H. and D.L. Anderson: Theoretical Basis of Some Empirical Relations in Seismology, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 65, 1975, pp. 1073-1095.
- 5) Geller, R.J.: Scaling Relations for Earthquake Source Parameters and Magnitudes, Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 66, 1976, pp. 1501-1523.
- 6) Shnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.: SHAKE, A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley, 1972.