

(62) サイトでの増幅特性及び位相特性を考慮した
統計的グリーン関数法による1995年兵庫県南部地震の波形合成

○田居 優 (財)大阪土質試験所
岩崎好規 (財)大阪土質試験所
入倉孝次郎 (京都大学防災研究所)

1.はじめに： 大地震動の予測には経験的グリーン関数法による波形合成法が極めて有効な手法である。大地震の震源域で観測された余震などの記録がある場合、その記録には伝播経路と局所的なサイト特性が含まれているために震源上でスケーリング則に基づきその余震記録を重ね合わせることによって大地震動を合成することができる。しかし将来起こりうる地震断層による設計地震動を策定する場合、その震源域で中小地震の記録が得られない場合が多い。その時には震源特性、伝播特性およびサイト特性を合理的に評価した中小地震動を人工的に求めておく必要がある。ここでは震源特性を ω -2乗モデル、伝播特性をQ値モデルで設定し、さらにサイトでの増幅特性および位相特性を経験的に推定し、当該サイトでの中小地震動記録を合成する手法について検討する。大地震記録の例として1995年兵庫県南部地震記録を用いて2つのグリーン関数、ひとつは余震記録、ひとつは人工的に合成した中小地震動を用いて、入倉手法による重ね合わせを行いその妥当性を検討する。

2.観測地震： ここで用いた観測記録は関西地震観測研究協議会による地震記録でKBU(神戸大学、岩盤)、FKS(福島)観測点で観測されたものである。図-1に観測記録の震央位置と観測点位置を示した。兵庫県南部地震(M=7.2)を除くとマグニチュード4.0から4.9までの地震記録である。

3.余震記録を用いた本震記録の合成： 図-2に1995年兵庫県南部地震の余震分布を示した。断層長さ約60km、幅約20kmに分布しているのがわかる。本震時の破壊領域は既往の研究(釜江(1995))では余震分布域の中央部の断層長さ=25km、幅=12.5kmに設定し、図-1中に併記した。断層モデルとしてストライク方向=N232°E、ディップ角=85°、レイク角=165°を設定した。経験的グリーン関数として図-1に示したM=4.7の余震を用いた。解析するサイトはFKS観測点だけを考慮した。本震記録と余震記録のスペクトル比より断層分割数=12×12×12とした。図-3は用いた余震記録である。図-4は本震記録の観測波形と合成波形の比較を示し、また図-5にはグリーン関数、本震記録、合成記録のそれぞれの速度応答スペクトルを示したものである。合成結果は波形、スペクトル共満足の結果となっているのがわかる。今回の合成は速報的なもので断層面上でのアスペリティなどの詳細な検討は後日行いたいと考える。また他の研究者の研究成果に待ちたいと考える。

4.震源・伝播モデル： 震源スペクトル及び伝播経路をモデル化して震源距離Rでの基盤スペクトルを次式で表す。(Boore(1983))

$$A(f) = C M S(f, f_c) P(f, f_m) \exp(-\pi f R / Q V_s) / R$$

$$C = \frac{R_{bp} \cdot F S P R T I T}{4 \pi \rho V_s^3}$$

$$S(f, f_c) = \frac{(2\pi f)^2}{1 + (f / f_c)^2}$$

$$P(f, f_m) = (1 + (f / f_m)^{2.5})^{-1/4}$$

$$f_c = 4.9 \times 10^6 V_s (\Delta \sigma / M_0)^{1/3}$$

ここでC：岩盤のS波速度 V_s 、密度 ρ 、自由面効果FS、水平方向の分配率PRITIN、およびラジエーション R_{θ} で決まる係数、 M_0 ：地震モーメント、 $S(f, f_c) : \omega^{-2}$ 則による震源スペクトル、 f_c ：コーナー周波数、 $P(f, f_m) : f_m$ による遮断フィルター、 Q ：Q値である。Q値については近畿地方でえられている田居ほか（1995）を用いた。

5. サイトでの増幅特性と位相特性モデル： サイトでの増幅特性 $G(f)$ については岩盤に対応するKBU地点のスペクトルを分母としたFKSでのスペクトル比（ただし距離補正を行っている）の平均的なものを計算し、図-6に示した。このスペクトル比は地盤構造から重複反射理論による伝達関数に対応することが示されている。（岡崎ほか（1995））

サイトでの位相特性 $\phi(f)$ はそれ自体統計的なモデル化は困難であるが次式で示される位相差分を用いる事でそのモデル化を行った。位相差分の物理的な意味はある周波数の波群の最大値が生ずる時間と考えられ群遅延時間と呼ぶ事にする。既往の研究では観測波の非定常性（包絡線、継続時間等）と関係付けられている。

$$t_g(f) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{df}$$

また $t_g(f)$ はそのサイトの地盤構造に依存する表面波の分散特性に対応するものである。そこで $t_g(f)$ を震源と局所的なサイト特性に分離すると簡単に次式で示される。

$$t_g(f) = \frac{r}{U} + \frac{r_L}{U_L} = t_s + \frac{r_L}{U_L}$$

ここでU：岩盤のS波速度、 r ：震源距離、 U_L ：局所的な群速度、 r_L ：2次的に励起する表面波の励起される距離、例えば平野の外縁部までの距離である。そこで図-1に示した地震記録から群遅延時間 $t_g(f)$ を計算し t_s で基準化し、その平均値を求めたものを図-7に示した。この群遅延時間特性を地盤の位相特性と比較する。地盤構造を表-1のものを用い、群遅延時間の分布を求めたものを図-6に併記した。低周波数領域で理論値と整合しているのがわかる。図-6をサイトでの経験的増幅特性モデル、図-7をサイトでの経験的位相モデルとする。

6. 人工地震動を用いた本震記録の合成： 4章5章の関係式を用いると次式の逆フーリエ変換により中小地震動を合成することができる。

$$X(f) = A(f) \cdot G(f) \cdot \exp(-i\phi(f))$$

$$\phi(f) = 2\pi \int_0^f t_g(f) df$$

以上の操作により図-1に示した中小地震動の合成を行い波形を比較したものが図-8である。加速度フーリエスペクトルで比較したものが図-9である。合成波の特性が観測記録を良く再現しているのがわかる。また2章で示した断層モデルに基づき図-8の人工地震動をグリーン関数とした重ね合わせを実施した結果、スペクトルを比較したのが図-10である。いずれの図からも観測波と合成波の一致度は満足するものであった。

7. まとめ： 結論を箇条書きにすると次の様な結果が得られた。

(1) 一次解析ではあるが余震記録を用いて兵庫県南部地震の本震加速度波形を合成し観測波を上手く再現できる断層モデルを推定した。

(2) 人工的な中小地震記録を合成するために震源では ω^{-2} 乗則を仮定し、また伝播経路については近畿地方のQ値の周波数依存性を用いた。

(3) サイトはFKS観測点でその増幅特性は岩盤に対するスペクトル比からモデル化した。また群遅延時間はS波到着時より基準化しモデル化を行った。

(4) (1)と同様の重ね合わせを人工地震動を用いて合成したところ本震波形を上手く再現できることが判明した。中小地震記録が震源域に無い場合この方法の有効性が確かめられた。

8.謝辞： 本研究では関西地震観測研究協議会（座長：京都大学教授）により提供されている地震記録を用い関係諸氏に深く感謝する。

参考文献

- 1)Irikura, K., Semi-empirical estimation of strong motion during large earthquake. Bull. Disas. Prev. Res. Inst. 2)釜江ほか(1995), 1995年兵庫県南部地震の断層破壊域と強震動, 日本建築学会大会学術講演会, 3)田居ほか(1995), 大阪地方における地震動アレー観測による震源・伝播・サイト特性の分離, 地球惑星科学関連学会予稿集, 4)岡崎ほか(1995), 兵庫県南部地震における観測点のサイト特性の検討, 日本建築学会学術講演会

136.0

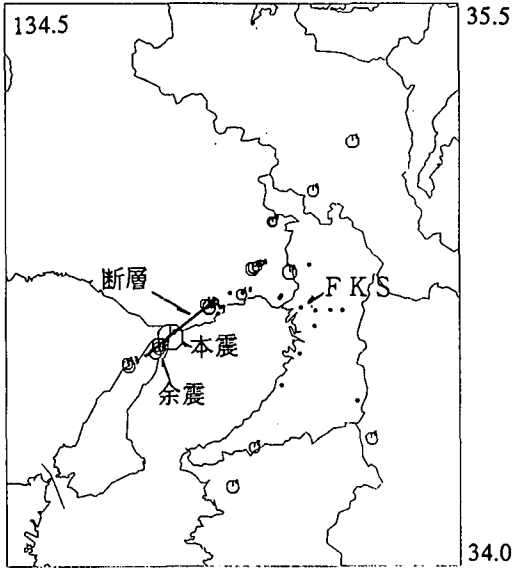


図-1 観測地震の震央位置と観測点位置

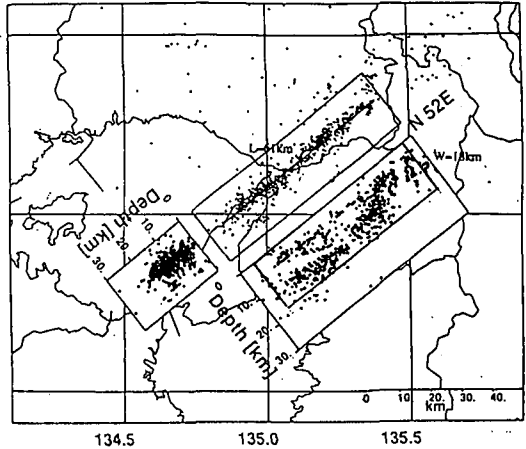


図-2 余震分布

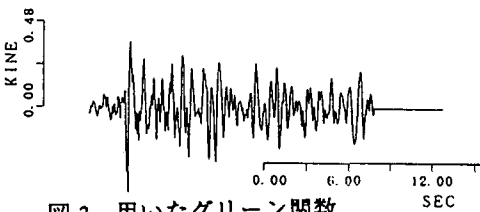


図-3 用いたグリーン関数

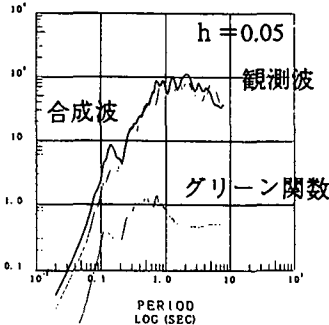


図-5 観測波と合成波の応答スペクトルの比較

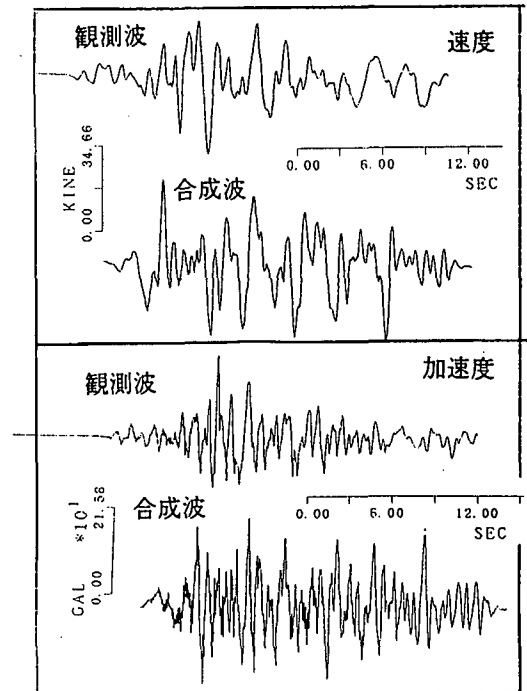


図-4 観測波と合成波の比較

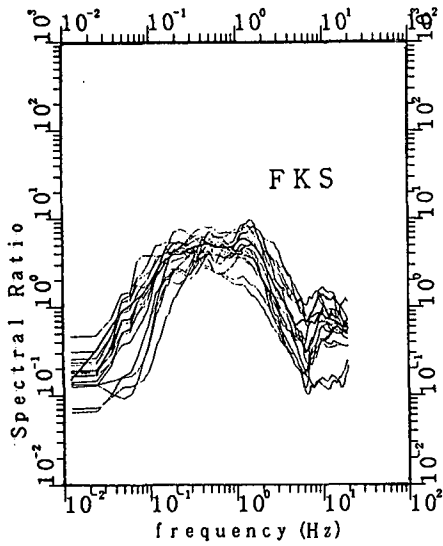


図-6 FKSでの地盤増幅モデル

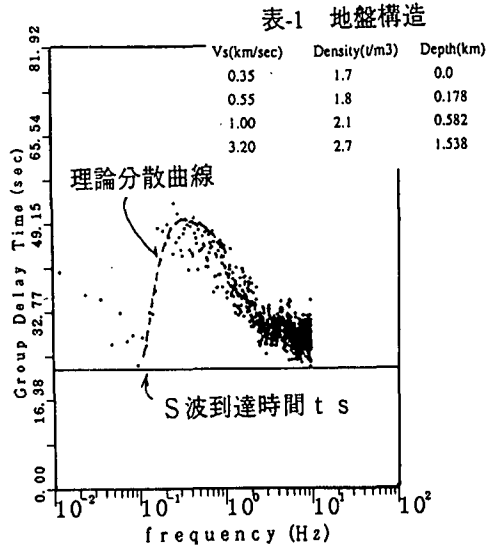


図-7 FKSでの群遅延時間モデル

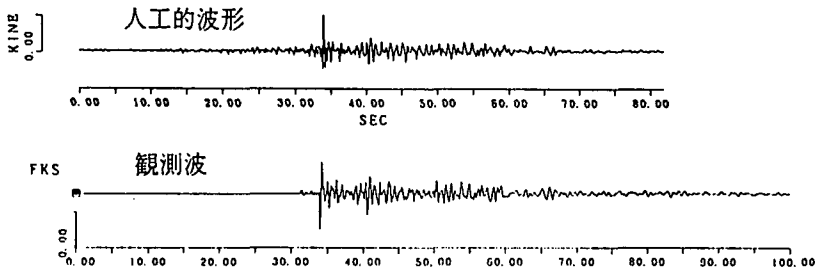


図-8 人工的な小地震動と観測された小地震動

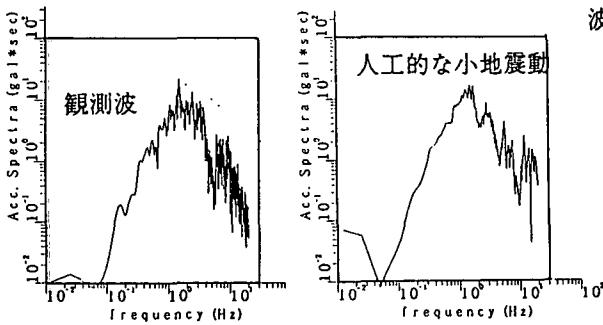


図-9 人工的な小地震動と観測された小地震動の
加速度フーリエスペクトルの比較

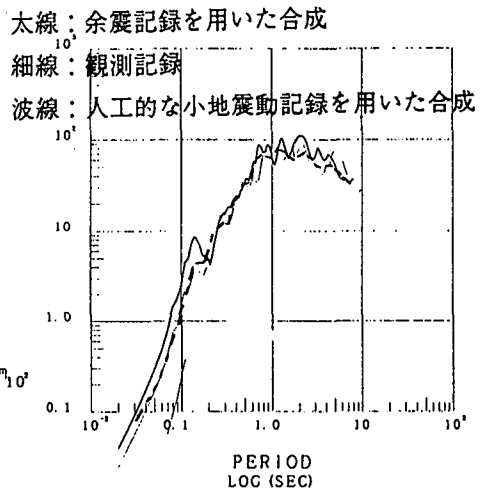


図-10 本震の応答スペクトルの比較