

(28) 半経験的手法による長周期地震応答スペクトルの推定

京都大学工学部 山田 善一 家村 浩和
 関西電力 岡市 明大

1. まえがき 巨大地震の発生が稀であること、観測態勢が不十分であることから、長周期構造物の設計地震入力の設定材料となる記録の収集は、大変困難である。本研究では、地震学の知見を用いて、将来発生が予想される大地震の際の地震動の予測を試み、長周期構造物の設計地震力について検討する。長周期構造物は一般に減衰が小さく長時間継続して振動する。予測される大地震動は、主要部からコーダ部に至るまで巧みに合成されることが望まれる。そこで、大地震は、小地震の観測記録から半経験的手法における入倉の方法を用いて合成した。解析例として明石海峡大橋架設地点を取り上げ、本四耐震設計基準との比較を行った。

2. 合成用小地震動の作成 半経験的手法を用いた既往の研究では、過去の大地震の本震の地震動を、それと同じ震源域でおこった余震の観測記録を合成することにより再現している。観測波には、伝播経路の影響が含まれているが、特に、当該地盤の影響が大きく含まれる。そこで、半経験的手法で合成するに際して、必ずしも過去の大地震の震源域の記録に限らず、Table 1のように広範囲な地震の神戸における観測記録をサンプル(合成用小地震)にする。

Table 1中、①②は、当時の比較的古い低倍率強震計で記録されたもので、その地震計の精度はあまり期待できない。③は、気象庁1倍強震計で、④⑤⑥は、電磁地震計で記録されたものである。収集した記録には、解析可能なデータにするため数値化を行い、次の順序で各種の補正を施す。

1. 零線補正 2. 円弧補正 3. 時間座標補正 4. 倍率 5. 等時間間隔 6. 基線補正 7. 計器補正。記録から、周期 0.5~15秒の成分を抽出するため周波数領域で台形フィルターをかける。作成したサンプルについて、観測地点神戸特有のスペクトル特性があるかを別途に検討した。

3. 想定する断層モデル Fig. 1のように、南海道地震本震(1946)の断層モデル(パラメーターは主に安藤が決定)を南海道地震本震の震源位置に、また、十勝沖地震本震(1968)の断層モデル(パラメーターは主に金森が決定)を南海道地震本震の震源位置に移動させて設定する。両断層モデルの断層パラメーターをTable 2に示す。これらのモデルを用いることにより、明石海峡大橋架設地点において想定し得る最大級の地震動を推定する。

4. 大地震動の合成法 断層パラメーターのなかで、断層面の走行、傾斜角といった幾何学的な量や、破壊の出発点、進行方向などは、その地点の地質的な条件で決まるものであり、地震の規模に依存するものではない。したがって、これらについては、大地震の断層モデルの値をそのまま小地震の断層モデルの値とする。小地震と大地震の他の断層パラメーターの関係は次式で表される。

Table 1 合成に用いた地震記録

	Day	Magnitude M _s
①Nankaido Aftershock	1948, 4.28	7.2
②Mikawa	1945, 1.13	7.1
③Hyuganada	1968, 4.1	7.5
④Near Nijima	1988, 11.22	6.0
⑤Near Torishima	1987, 12.12	6.4
⑥S. off Honshu	1982, 7.4	7.0 (M _w)

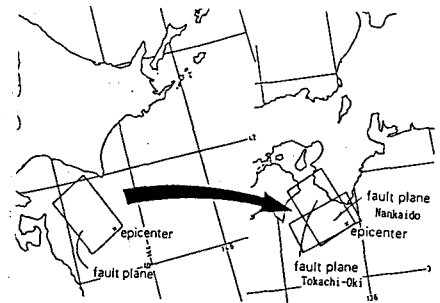


Fig. 1 想定した断層モデル

Table 2 南海道および十勝沖地震の震源パラメーター

Assumed fault model		Nankaido earthquake	Tokachi-Oki earthquake
Macro fault parameters			
Strike ϕ	(deg)	250	246
Dip Angle θ	(deg)	25	20
Fault Length L	(km)	150	100
Fault Width W	(km)	70	150
Depth of Upper Edge Fault	(km)	4	0
Slip Angle λ	(deg)	116.57	128
Seismic Moment M	(dyne-cm)	1.5×10^{22}	2.8×10^{22}
Magnitude M _s		8.2	8.0
Rise Time τ	(sec)	9.3	11.2
Rupture Velocity V _r	(km/sec)	3.2	3.5

$$\frac{L}{L_0} = \frac{W}{W_0} = \frac{\tau}{\tau_0} = \left(\frac{M_0}{M_{00}}\right)^{\frac{1}{3}} = \text{const.} \approx N$$

「添字 e」は、小地震のパラメーターであることを示す。また、 (M_0/M_{00}) の値が実際には整数値 N にはならないため $\approx N$ という表現になっている。大地震はこの相似則にしたがい、小地震を N^3 個重ねあわせることにより合成される。断層面を N (長さ L 方向) * N (幅 W 方向) 個の要素に分割する。まず、小地震を、Fig. 2 に示すように実際に小地震が発生した位置から各要素に移動させて、各要素で N 個重ね合わせる。次に重ね合わせた地震動を、破壊開始点から各要素

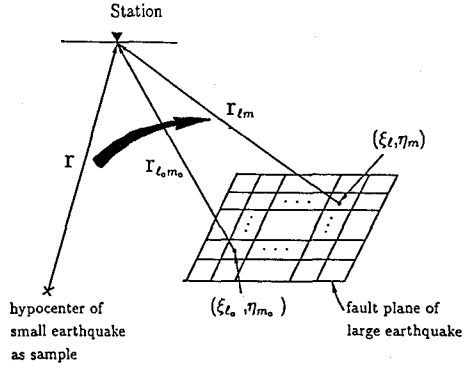


Fig. 2 地震記録と合成法

まで破壊が伝播する時間と各要素から観測点までの走時とによる観測点に伝達する時刻のずれを考慮して N^2 個合成する。ただし、破壊開始点は、南海道地震本震の震源位置とし、破壊は破壊伝播速度 V_R (km/sec) で同心円状に広がるものとする。伝播波は基本的に実体波として処理する。各要素上の小地震の重ね合わせ、伝播波の処理について、さらに詳述する。

食い違い時間関数としてランプ関数を仮定し、時間軸方向に τ を N 個に分割する。各要素上の N 個の小地震の重ね合わせにおいて時間ずれの考慮する際、次の④、⑤の方法を取る。

④震源は一定点 (各長方形要素の対角線の交点) とし、時間軸方向に τ 。秒ずつずらす。

⑤震源を断層面の滑り方向に $V_R \tau$ 。ずつずらして設定することで時間ずれを考慮する。

ただし、④において、分割数 N の取扱いを次の 3 ケース考える。

ケース 1 : $M_0/M_{00} = \alpha N^3$ とする。 α が最も 1 に近い値になるように整数値 N を決定する。

ケース 2 : 分割数 N を断層長さ方向、幅方向、時間軸方向のすべてについてケース 1 より増加させる。 α で調整する。

ケース 3 : 分割数 N を時間軸方向についてのみケース 1 よりも増加させる。

フーリエスペクトルの比較より、④による合成波は、Rise time τ 秒より長周期帯域で観測波 (真値とする) にほぼ一致するが、短周期帯域で観測波より約 50% 小さい値になる、⑤による合成波は、全帯域で観測波とほぼ一致するが、長周期帯域でわずかに観測波より大きな値になる¹⁾。

伝播波は基本的には実体波として処理するが、比較のために一部表面波として処理する。実体波と表面波の処理の異なりは、距離減衰と伝播速度である。実体波は震源距離の 1 乗に反比例して減衰し、表面波は、震源距離の 0.5 乗に反比例して減衰するものとする。伝播速度に関して、明石の地下構造を Fig. 3 のように想定する。実体波は、主に基盤を伝播してくるものと考えて、基盤速度を伝播速度とする。S 波速度と P 波速度の関係は、 $v_s = \sqrt{3} v_p$ とし、観測点での震央方向と震央直角方向は、S 波の伝播の結果であり、上下方向の地震動は、P 波の伝播の結果であるとする。表面波伝播速度は、明石の推定構造より、Love 波と Rayleigh 波の位相速度の基本モードの分散曲線を求め、平均的な値をとって一定値とする。観測点での震央方向と上下方向の地震動は Rayleigh 波の伝播の結果であり、震央直角方向の地震動は、Love 波の伝播の結果であるとする。

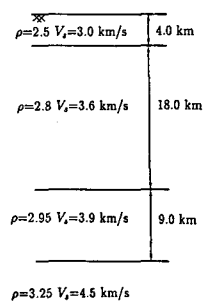


Fig. 3 明石の地盤定数

5. 結果および考察 小地震動から合成した大地震動について、本四耐震設計基準で規定されている値と比較するため、加速度応答スペクトルを求めた。場合によって、合成された変位波形をあわせて考察した。応答スペクトルは、減衰定数を 2% とし、周期帯域は 2~20 秒とする。応答計算は、ウィルソンの θ 法によった。本四基準は、以下の加速度応答スペクトルのグラフ中、実線の折れ線で示した。

5. 1 分割数の差の影響 南海道地震のモデルを用いて、全サンプルに対して④のケース 1 の方法により合成を行った。合成結果の大きい値となった①②③の記録について④のケース 2, 3 と⑤の方法により合成

を行った。合成波の加速度応答スペクトルの一例（サンプル：南海道地震余震記録）をFig. 4 に示す。

④の場合、ケース1では、周期 τ 秒の近傍における加速度応答スペクトルの値が他に比べ大きな値になり本四基準を越えていることがある。これは、時間軸方向に不連続に τ 秒ずつずらして合成していることによりおうじている。したがって、このことは全く問題がないと考える。

ケース2において、分割数 N を増加させると τ の値は2秒以下になりケース1で見られた周期 τ 秒の近傍における加速度応答スペクトルの卓越は消える。分割数 N を増加させても倍率 α で調整すれば物理的には問題ないと考えたが、すべての帯域において、明らかに他のケースより過小評価となった。分割数を増加させて重ね合わせるといことは、結果的には波の正負が打ち消しあう機会が増えることになるからであろう。ケース2の方法で合成することは好ましくないと考える。

ケース3では、周期 τ 秒の近傍における加速度応答スペクトルの卓越は消える。長周期帯域ではケース1とほぼ一致した。すなわち、時間軸方向の分割数だけ増加させるケース3の結果は、ケース1を改善したものになっている。合成結果が信頼できる周期10秒より長周期帯域では、全8成分中7成分で本四基準を下回った。唯一本四基準を上回ったのがFig. である。7~8秒の帯域で最高本四基準の20%程度上回っている。

⑤の場合、長周期帯域では④に比べて過大傾向であるが、合成結果が信頼できる短周期帯域では合成した8成分中5成分で本四基準を下回った。しかし、上回った3成分について、周期帯域によっては本四基準の最高3倍にもなる場合がある。

5. 2 サンプル記録の差の影響 ①②③の記録について、⑥の方法により南海道地震本震の断層モデルを用いて合成を行った結果が、Fig. 5 である。図中、上側3本は合成波の加速度応答スペクトル、下側3本はサンプル波の加速度応答スペクトルである。同一の断層モデルで合成しても、用いるサンプル記録が異なると加速度応答スペクトルは全く異なったものとなった。概して、合成波とサンプル波の加速度応答スペクトルは類似しておらず、両スペクトルの値の差は、長周期帯域ほど大きい。断層の拡がりやを考慮した合成により、サンプル記録には存在しなかった長周期成分が出現した。

5. 3 断層モデルの差の影響 南海道地震本震の断層モデルを用いた合成結果と比較する意味で十勝沖地震のモデルを用いて①③の記録について⑥の方法により合成を行った。Fig. 6 に①の南海道地震余震の記録をサンプルにした場合の両断層モデルの合成結果より求めた加速度応答スペクトルを示す。Fig. 8 にサンプル波形と合成波形を示す。合成波形からも加速度応答スペクトルからも十勝モデルの合成結果は、南海モデルの合成結果よりも短周期成分が卓越していることがわかる。原因は、断層の形状、観測点と震央との位置関係であると考えられる。Fig. 1 に示すとおり、十勝モデルは神戸と震央を結ぶ方向に長く、南海モデルは、それと直角方向に長い。破壊の出発点は、両断層とも断層面の南東端近くである。すなわち、十勝モデルの方が南海モデルに比べて、地震波が伝播する方向に破壊が伝播する傾向が強い。このことは、断層面は十勝モデルの方が大きいにもかかわらず、合成波形の継続時間は十勝モデルの方が短いことから確認できる。したがって、ドップラー効果のような現象により、十勝モデルのほうが短周期帯域の卓越する結果になったと考える。破壊開始点の位置を断層面の北端に設定することによって、より一層長周期成分の卓越した波が合

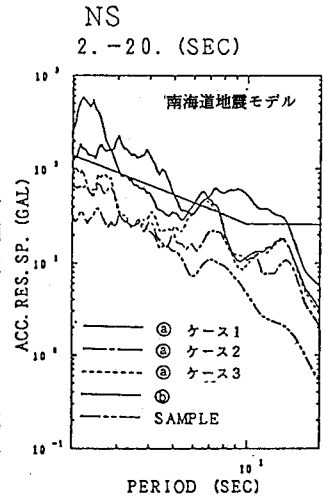


Fig. 4 分割数の差の影響

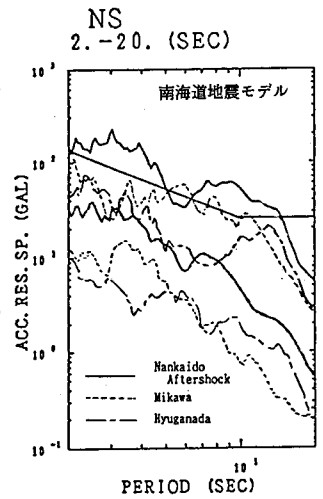


Fig. 5 サンプル記録の差の影響

成されると推測される。

5. 4 伝播波処理の差の影響 南海道地震の断層モデルを用い、①③の記録をサンプルとして、実体波処理および表面波処理で合成した波の加速度応答スペクトルをFig. 7 に、波形をFig. 9 に示す。表面波処理の波形は実体波処理の波形よりサンプル波形に類似している。加速度応答スペクトルに関しても同様のことが言える。また、表面波処理の場合、実体波処理より合成波形の振幅が大きい。表面波処理では、NS成分は主にRayleigh波として、EW成分は主にLove波として処理する。成分ごとに時間のずれが異なるために、波の重ね合わせにおいて山谷の打ち消しあう機会が少なく、サンプル波の特徴が、反映されやすいと考えられる。表面波処理で合成した波の加速度応答スペクトルは、①の南海道地震余震記録をサンプルにした場合、ほぼ全帯域で大幅に本四基準を上回った。

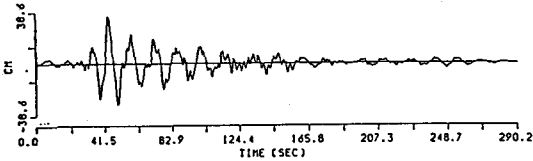
6. おわりに 総じて、南海道地震余震記録と三河地震記録を用いて合成した場合に本四基準を上回ることがかなりあった。しかし、他の4記録を用いるとほとんど本四基準を下回った。上記の2記録は、比較的古い型の地震計によるもので、その精度はあまり期待できない。また、合成に用いた震源パラメータも確定した値ではない。今後、本四基準に対して、より一層厳密で種々の状況を想定した検討が必要であると考える。

[謝辞] 本研究を進めるにあたり、本四公団第一建設局、神戸海洋気象台の皆様、入倉孝次郎先生、杉戸真太先生に大変お世話になりました。深く感謝の意を表します。

[参考文献] 1) Irikura, k. :Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes, Bull. Disas. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ., Vol. 33, Part 2, No. 298, pp. 63-104, June 1983

2) 本州四国連絡橋公団：耐震設計基準・同解説，昭和52年3月

SYNTHESIZED (BODY WAVE)
(FAULT MODEL: NANKAI DO) MAX=35.05



SYNTHESIZED
(FAULT MODEL: TOKACHI-OKI) MAX=28.69

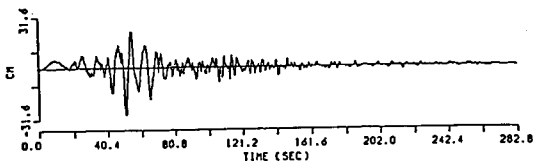
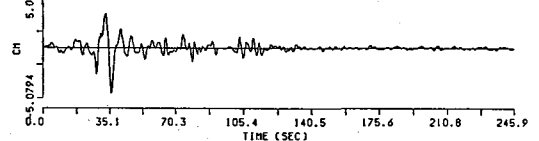


Fig. 8 時刻歴変位波形

SAMPLE MAX=4.6176



SYNTHESIZED (SURFACE WAVE)
(FAULT MODEL: NANKAI DO) MAX=68.02

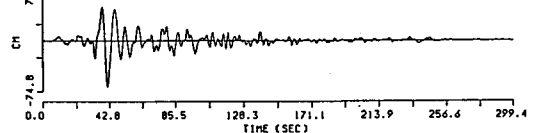


Fig. 9 時刻歴変位波形

NS
2.-20. (SEC)

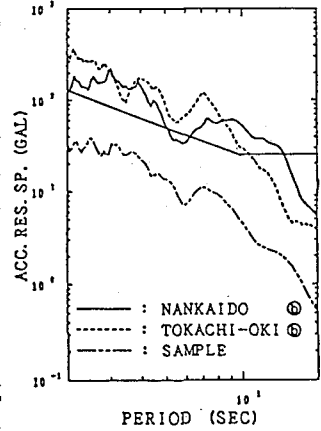


Fig. 6 断層モデルの差の影響

NS
2.-20. (SEC)

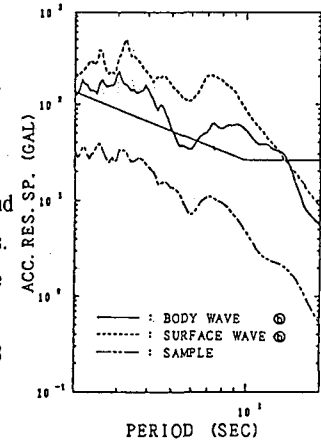


Fig. 7 伝播波処理の差の影響