統計的手法に基づく地震動の位相特性のモデル化の改良

鉄道総合技術研究所　正会員　○川西　智浩
鉄道総合技術研究所　正会員　室野　剛隆
神戸学院大学　正会員　佐藤　忠信

１．はじめに

地震動の時刻歴波形を合成するためには，振幅特性と位相特性を規定する必要があるが，このうち，地震動の非定常性をコントロールしているのは位相特性である．大きな地震が発生した場合には，構造物の応答が非線形領域にまで及ぶため，非定常性を考慮した地震動を合成するために位相特性をモデル化しておくことは非常に重要である．これまでに著者らは，観測波の群遅延時間を用いた位相特性のモデル化を行っている[1)]が，位相特性の回帰式が物理的背景に基づくものではなかった．そこで本研究では，位相特性の回帰式を修正し，近年日本で発生した地震の観測記録を反映させて，再度位相特性のモデル化を実施した．

２．解析に用いたデータと群遅延時間の平均値・標準偏差の算定

解析に用いたデータとしては，1)多数の観測点で波形が得られていること，2)最大加速度が 30(gal)以上であること，3)記録の継続時間が十分に長いこと，という条件にあてはまるデータを用いた．本解析に用いた地震を**表 1** に示す．ただし，観測点が平地，盆地，カルデラに位置する場合は，表層地盤の重複反射や盆地の端部で生成される表面波の影響により，継続時間が伸びる傾向があるため，解析対象から除外した．

表 1　解析に用いたデータ

地震	M	解析に用いた地震記録数
北海道東方沖地震(1994)	8.2	水平 40 成分（気象庁 87 型）
三陸はるか沖地震(1994)	7.6	水平 22 成分（気象庁 87 型）
兵庫県南部地震(1995)	7.3	水平 28 成分（気象庁 87 型, 関震協）
鹿児島県北西部地震(1997)	6.5	水平 42 成分（K-NET）
鳥取県西部地震(2000)	7.3	水平 514 成分（K-NET，KiK-NET）
芸予地震(2001)	6.7	水平 404 成分（K-NET，KiK-NET）
三陸南地震(2003)	7.1	水平 432 成分（K-NET，KiK-NET）
宮城県北部地震(1) (2003/07/26　00:13)	5.6	水平 46 成分（K-NET，KiK-NET）
宮城県北部地震(2) (2003/07/26　07:13)	6.4	水平 150 成分（K-NET，KiK-NET）
十勝沖地震最大余震(2003)	7.1	水平 160 成分（K-NET，KiK-NET）

本研究においては，地震動の位相スペクトル$\phi(\omega)$を角振動数ωで微分した群遅延時間に着目して，位相特性のモデル化を行うこととする．既往の研究[1)]と同様の方法で群遅延時間を算定し，スケールファクター j ごとに，フーリエ振幅 $A^{(j)}(\omega)$ を考慮した群遅延時間の平均値$\mu_{tgr}^{(j)}$および分散$(\sigma_{tgr}^{(j)})^2$を，式(1)にしたがって算定する．

$$\mu_{tgr}^{(j)} = \sum_{i=1}^{N^{(j)}} A^{(j)}(\omega)\cdot t_{gr}^{(j)}(\omega_i) \Big/ \sum_{i=1}^{N^{(j)}} A^{(j)}(\omega) \quad , \quad (\sigma_{tgr}^{(j)})^2 = \sum_{i=1}^{N^{(j)}} A^{(j)^2}\cdot\left(t_{gr}^{(j)}(\omega_i) - \mu_{tgr}^{(j)}\right)^2 \Big/ \sum_{i=1}^{N^{(j)}} A^{(j)^2} \tag{1}$$

ここに，$N^{(j)}$はスケールファクター j におけるデータ数で，$N^{(j)} = 2^j$ で定義される．

３．群遅延時間特性のモデル化

表 1 で示した全記録について，式(1)により，群遅延時間の平均値$\mu_{tgr}^{(j)}$と分散$(\sigma_{tgr}^{(j)})^2$を算定した．ただし，鉄道構造物の耐震設計上重要な周期帯域は約 0.1～5 秒であることを考えて，この周期範囲が十分含まれるように，j=8～15 についてモデル化することにした．今回用いた強震記録にはトリガータイムも記録されているので，発震時間を原点として絶対時間で時刻を表すものとする．

これまでの研究[1)]における回帰式では，地震動の位相特性が，震源特性，伝播経路特性，地点特性の積により表されている．しかし，地震動$O(t)$が，震源を表す時間関数$S(t)$，伝播経路を表す時間関数$P(t)$，地点特性を表す時間関数$L(t)$の合成積で表されるものとすると，位相特性は，各々の特性関数の位相の和で表される（微分は線形演算であるから，群遅延時間についても同様のことが言える）．

したがって，群遅延時間の平均値は式(2)で表される．

$$\mu_{tgr}^{(O)} = \mu_{tgr}^{(S)} + \mu_{tgr}^{(P)} + \mu_{tgr}^{(L)} \tag{2}$$

また，震源特性，伝播経路特性，地点特性が独立であると仮定すると，誤差伝播の法則により，群遅延時間の分散は式(3)で表される．

キーワード　地震動，位相特性，群遅延時間，ウェーブレット変換
連絡先　〒185-8540　東京都国分寺市光町 2-8-38　TEL 042-573-7394　FAX 042-573-5326

$$\sigma_{tgr}^{(O)^2} = \sigma_{tgr}^{(S)^2} + \sigma_{tgr}^{(P)^2} + \sigma_{tgr}^{(L)^2} \tag{3}$$

直達波の継続時間は断層長さLに比例し，断層長さLはマグニチュードMと$L \propto 10^{0.5M}$という関係があることが知られている．群遅延時間の標準偏差は継続時間と密接な関係にあることから，震源項については，$\sigma_{tgr}^{(S)} = \alpha \cdot 10^{0.5M}$と表すこととした．次に，伝播経路項については，波動の散乱により，群遅延時間の分散がR^2に比例することが知られている[2]．よって，伝播経路項については$\sigma_{tgr}^{(P)^2} = \beta \cdot R^2$とした．

以上より，群遅延時間の平均値$\mu_{tgr}^{(j)}$および分散$(\sigma_{tgr}^{(j)})^2$に対して，式(4)により回帰分析を行う．

$$\mu_{tgr}^{(j)} = \alpha_1^{(j)} \cdot 10^{0.5M} + \beta_1^{(j)} \cdot R + \gamma_1^{(j)} \quad , \quad (\sigma_{tgr}^{(j)})^2 = \alpha_2^{(j)} \cdot 10^{M} + \beta_2^{(j)} \cdot R^2 + \gamma_2^{(j)} \tag{4}$$

ここで，Mはマグニチュード，Rは震源距離，$\alpha^{(j)}, \beta^{(j)}, \gamma^{(j)}$は回帰係数を表している．

本研究では2段階回帰分析により，式(5)における回帰係数$\alpha^{(j)}, \beta^{(j)}, \gamma^{(j)}$を算定する．まず第1段階として，震源距離$R$を用いて式(5)により，**表1**に示した各地震毎に回帰分析を行う．

$$\mu_{tgr}^{(j)} = \beta_1^{(j)} \cdot R + A_1^{(j)} \quad , \quad (\sigma_{tgr}^{(j)})^2 = \beta_2^{(j)} \cdot R^2 + A_2^{(j)} \tag{5}$$

次に第2段階として，式(5)により得られた各地震毎の回帰係数$A_1^{(j)}, A_2^{(j)}$に対し，マグニチュードMを用いて式(6)により回帰分析を行い，回帰係数$\alpha^{(j)}, \gamma^{(j)}$を求める．

$$A_1^{(j)} = \alpha_1^{(j)} \cdot 10^{0.5M} + \gamma_1^{(j)} \quad , \quad A_2^{(j)} = \alpha_2^{(j)} \cdot 10^{M} + \gamma_2^{(j)} \tag{6}$$

最後に，回帰係数$\beta^{(j)}$については，各地震毎の値の平均値を求めることにより，最終的な値を求める．

以上に示した方法により回帰分析を実施した結果を**表2**に示す．まず，$\beta^{(j)}$に着目すると，$\beta_1^{(j)}$の値はjによるばらつきが小さくなっているが，$\beta_2^{(j)}$の値は高振動数領域(j：大)よりも低振動数領域(j：小)の方が大きくなっている．これは，主に1(Hz)以下の低振動数領域(j<11)では表面波の影響が現れるが，表面波は分散性を有するため，実体波の影響が大きい高振動数領域(j>12)に比べて，継続時間が伸びているためと考えられる．

また，$\gamma^{(j)}$に着目すると，$\gamma_1^{(j)}$の値はjによるばらつきが小さくなっているが，$\gamma_2^{(j)}$の値は，低振動数領域になるほど大きくなっている．これは，低振動数領域になるほど減衰の影響が小さくなるため，波の継続時間が伸びているものと考えられる．

表2　回帰分析結果

j	$\mu_{tgr}^{(j)}$			$(\sigma_{tgr}^{(j)})^2$		
	α_1	β_1	γ_1	α_2	β_2	γ_2
8	7.833E-04	0.406	2.456	2.963E-05	7.407E-03	143.388
9	3.262E-04	0.380	9.351	5.853E-06	6.669E-03	133.195
10	1.089E-03	0.314	10.125	5.736E-07	1.648E-03	110.353
11	1.477E-03	0.297	5.456	4.484E-07	1.034E-03	37.245
12	1.845E-03	0.281	4.095	4.693E-07	6.950E-04	18.077
13	1.921E-03	0.270	4.238	6.761E-07	5.499E-04	11.282
14	1.658E-03	0.257	5.898	1.341E-06	5.845E-04	9.716
15	5.675E-04	0.278	8.749	8.119E-06	4.160E-03	1.044

4．波形合成例

ここでは一例として，マグニチュードM=6.0の場合について，震源距離R=10(km)，50(km)，100(km)と変化させた場合の波形合成結果を**図1**に示す．振幅特性については，安中ら[3]が提案している加速度応答スペクトルに適合するように決定した．震源距離Rが大きくなるにつれて波群の到達時刻が遅れ，継続時間も伸びていることがわかる．

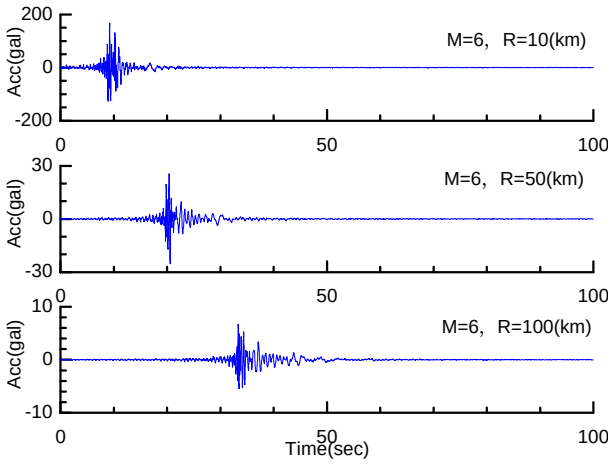

図1　波形合成例

5．おわりに

近年発生した地震の観測記録を用いて，物理的背景に基づく回帰式により，位相特性のモデル化を実施した．回帰式については，今後もデータの蓄積等に応じて改良する予定である．

参考文献　1) 佐藤忠信，室野剛隆，西村昭彦：観測波を用いた地震動の位相スペクトルのモデル化，土木学会論文集，No.640/I-50，pp.119-130，2000．　2) 澤田純男，盛川仁，土岐憲三，横山圭樹：地震動の位相スペクトルにおける伝播経路，サイト特性の分離，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.915-920，1998. 3) 安中　正，山崎文雄，片平冬樹：気象庁87型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp.161-164，1997.7.