

鉛直地震動の位相特性のモデル化

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

1. はじめに

非定常性を考慮した設計地震動を合成するためには、地震動の位相特性を把握する必要がある。一般的な構造物の挙動の支配的な要因となっているのは水平地震動であり、水平地震動の位相特性のモデル化はこれまでに行われている¹⁾²⁾。しかし、支承部や逆L字型の高架橋などの構造物では、鉛直地震動がその挙動に大きな影響を及ぼすことも考えられる。本研究では、実地震動の鉛直成分を用いて鉛直地震動の位相特性のモデル化を行う。まず、鉛直地震動の群遅延時間の平均値と標準偏差を求め、次に、マグニチュードと震央距離を回帰係数として重回帰分析を試みる。最後に、得られた位相特性を満足するような鉛直地震動のシミュレーションを行う。

2. 解析データ

対象とする地震は、水平地震動の位相特性のモデル化¹⁾において対象とした地震と同一のものとした。対象とした地震、マグニチュード、および解析に用いた地震記録数を表1に示す。

表1 解析に用いた地震記録

地震	マグニチュードM	解析に用いた地震記録数
北海道南西沖地震(1993)	7.8	鉛直5成分(気象庁87型)
北海道東方沖地震(1994)	8.1	鉛直20成分(気象庁87型)
三陸はるか沖地震(1994)	7.5	鉛直10成分(気象庁87型)
兵庫県南部地震(1995)	7.2	鉛直7成分(関震協)
鹿児島県北西部地震(1997)	6.3	鉛直15成分(K-net)

3. 群遅延時間の平均・標準偏差

本研究では、地震動の位相スペクトル()を角振動数 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。まず、観測波形を時間刻み $t=0.01(\text{sec})$ とし、後続の0を付けデータ数を $N=131072(=2^{17})$ 個に揃える。この波形 $x(t)$ を離散ウェーブレット変換・逆変換³⁾によって各スケールファクター j ($j=0\sim 16$) ごとの成分波 $x^{(j)}(t)$ に分解する。アナライジングウェーブレットの構成法としては、Meyer⁴⁾によるものを用いる。各成分波 $x^{(j)}(t)$ について群遅延時間 $t_{gr}^{(j)}$ ()を算定し、これを用いて各 j ごとの平均値 $\mu_{t_{gr}}^{(j)}$ 及び標準偏差 $\sigma_{t_{gr}}^{(j)}$ を、以下の式に従って算定した。

$$\mu_{t_{gr}}^{(j)} = \frac{\sum_{i=1}^{N^{(j)}} t_{gr}^{(j)}(\omega_i)}{N^{(j)}}, \quad \sigma_{t_{gr}}^{(j)} = \sqrt{\frac{1}{N^{(j)}} \sum_{i=1}^{N^{(j)}} (t_{gr}^{(j)}(\omega_i) - \mu_{t_{gr}}^{(j)})^2} \quad (1)$$

ここで、 $t_{gr}^{(j)}(\omega_i)$ は j 次成分波の角振動数 ω_i (ただし、 $2^{j+1}/3T_d \leq \omega_i \leq 2^{j+3}/3T_d$, T_d : 全継続時間) における群遅延時間である。また、 $N^{(j)}$ は j 次におけるデータ数であり、 $N^{(j)}=2^j$ である。

4. 群遅延時間の回帰モデル

表1の全地震記録について、3.の方法により群遅延時間の平均値 $\mu_{t_{gr}}^{(j)}$ 及び標準偏差 $\sigma_{t_{gr}}^{(j)}$ を算定した。今回用いた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表すことにする。

次に、得られた $\mu_{t_{gr}}^{(j)}$, $\sigma_{t_{gr}}^{(j)}$ について、マグニチュード M と震央距離 Δ を説明変数として、次式により重回帰分析を試みた。

$$\mu_{t_{gr}}^{(j)} = \alpha_1^{(j)} \times 10^{\beta_1^{(j)} M} \times \Delta^{\gamma_1^{(j)}}, \quad \sigma_{t_{gr}}^{(j)} = \alpha_2^{(j)} \times 10^{\beta_2^{(j)} M} \times \Delta^{\gamma_2^{(j)}} \quad (2)$$

ここで、 $\alpha_1^{(j)}$, $\alpha_2^{(j)}$, $\beta_1^{(j)}$, $\beta_2^{(j)}$, $\gamma_1^{(j)}$, $\gamma_2^{(j)}$ は j 次の重回帰係数である。式(2)は、水平地震動の位相特性のモデル化¹⁾に用いた式と同一のものである。土木構造物の耐震設計上重要な周期は約 $0.1\sim 5(\text{sec})$ であることを考慮し、この周期範囲が含まれる $j=7\sim 14$ について重回帰分析を行った。重回帰分析の結果を表2に示す。ただし、 $j=7$ では、 $\alpha_1^{(j)} < 0$

キーワード 地震動, 非定常性, 位相スペクトル, 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 042-573-7261 FAX 042-573-7248

表 2 回帰分析結果

j	$\alpha_1^{(j)}$	$\alpha_2^{(j)}$	$\beta_1^{(j)}$	$\beta_2^{(j)}$	$\gamma_1^{(j)}$	$\gamma_2^{(j)}$	相関係数	
							$\mu_{tgr}^{(j)}$	$\sigma_{tgr}^{(j)}$
7	0.612	8.596	0.031	0.0	0.871	0.440	0.936	0.728
8	0.339	1.215	0.105	0.133	0.748	0.357	0.955	0.800
9	0.582	0.458	0.112	0.232	0.616	0.175	0.956	0.800
10	0.799	1.765	0.085	0.108	0.622	0.255	0.971	0.739
11	1.226	1.450	0.020	0.098	0.723	0.365	0.991	0.815
12	0.745	0.587	0.041	0.125	0.730	0.317	0.991	0.875
13	0.493	0.264	0.055	0.160	0.750	0.350	0.992	0.925
14	0.369	0.152	0.063	0.184	0.769	0.396	0.992	0.892

となっていたものを、 $\mu_{tgr}^{(j)} = 0$ とした。相関係数は、 $\mu_{tgr}^{(j)}$ については、どの j に関しても 0.9 以上であり、高い相関がある。また、 $\sigma_{tgr}^{(j)}$ の相関係数は 0.72~0.93 であり、 $\mu_{tgr}^{(j)}$ に比べると低いが、相関性が高いと言える。重回帰係数に関しては、 $\beta_1^{(j)}$ がほぼ 0.1 以下、 $\beta_2^{(j)}$ が概ね 0.6~0.8 となっており、水平地震動¹⁾と同様に、平均値 $\mu_{tgr}^{(j)}$ についてはマグニチュード M よりも震央距離 Δ の影響が大きいことがわかる。標準偏差 $\sigma_{tgr}^{(j)}$ の回帰係数 $\alpha_2^{(j)}$ 、 $\beta_2^{(j)}$ についても、j が大きくなるにつれて $\alpha_2^{(j)}$ の値が増加するなど、水平地震動と同様の傾向が見られるが、高振動数成分 (j: 大) においても、 $\alpha_2^{(j)}$ よりも $\beta_2^{(j)}$ の方が値が大きく、震央距離 Δ の影響が大きいことがわかる。

5. 鉛直地震動のシミュレーション

4. で作成した回帰モデルを用いて、鉛直地震動のシミュレーションを行うことにより、提案モデルの妥当性を示す。鉛直地震動の合成方法を図 1 に示す。

一例として、マグニチュード M=7 の場合について、震央距離を 30(km)、50(km)、100(km) と変えてシミュレーションしたスペクトル適合波を図 2 に示す。ここでは、目標スペクトルとして、川島ら⁵⁾の提案スペクトルを用いた。地震波の到達直後には高振動数成分が卓越し、時間が経過すると逆に低振動数成分が卓越しており、地震動の非定常性を適切に捉えた波形が合成できている。また、震央距離が長くなるにつれて、地震波の到達時刻が遅れ、継続時間も伸びていることがわかる。

6. おわりに

実地震動の鉛直成分を用いて、鉛直動の位相特性のモデル化を試みた。得られた回帰モデルを用いて合成した鉛直地震動が、構造物の挙動にどのような影響を及ぼすかを調べるのが、今後の課題である。

<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) 室野剛隆, 村上昌彦, 佐藤忠信: 断層近傍地震動の位相特性の経験的なモデル化, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集 CD-ROM, 2002. 3) 佐々木文夫, 前田達哉, 山田道夫: ウェーブレット変換を用いた時系列データの解析, 構造工学論文集, Vol.38B, 1992. 4) Meyer, Y: *Orthonormal Wavelets, in Wavelets*, Springer, pp.21-27, 1989. 5) 川島一彦, 相沢興, 高橋和之: 最大地震動および地震応答スペクトルの距離減衰式, 土木研究所報告, No.166, 1985.

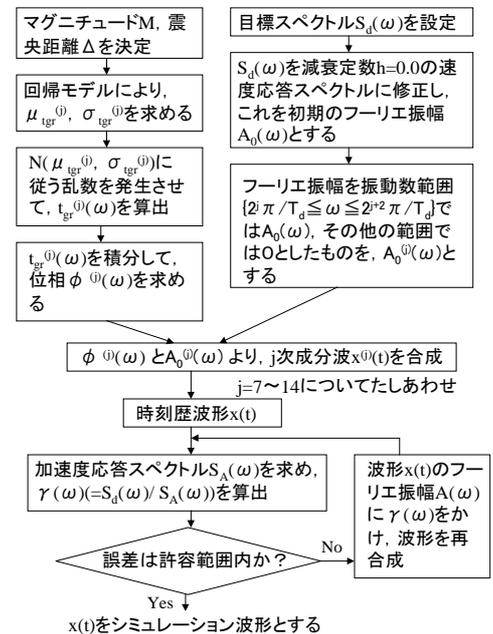


図 1 地震動の合成フローチャート

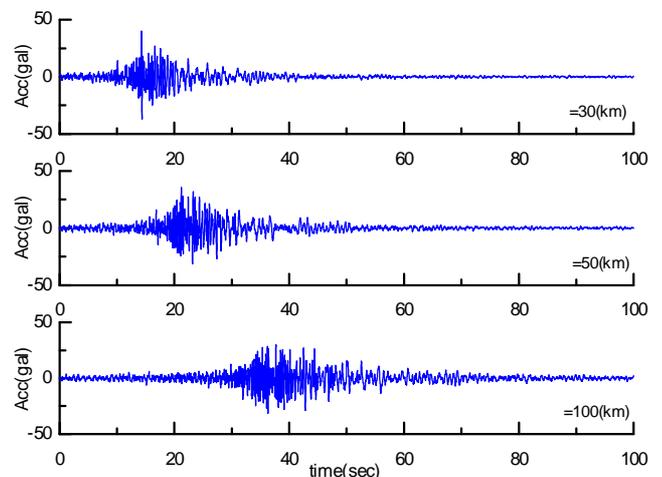


図 2 スペクトル適合波のシミュレーション結果 (種地盤, M=7)