

鉛直地震動の位相特性の経験的モデル化

川西智浩¹・室野剛隆²

¹(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:kawa@rtri.or.jp

²(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部, 博士(工学)
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:murono@rtri.or.jp

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試みる。地震動は非定常性を有しているため、位相特性は各周波数帯域ごとに異なる。地震動の位相特性を適切に把握するために、本研究ではウェーブレット変換と群遅延時間の概念を用いる。まず、ウェーブレット変換を用いて実地震動を各周波数帯域ごとの成分波に分け、各成分波の群遅延時間を求める。次に、鉛直地震動の群遅延時間の平均値と標準偏差を求め、マグニチュードと震央距離を説明変数として重回帰分析を行う。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い、合成した模擬地震動を用いて、1自由度系の応答を求める。

Key Words : vertical ground motion, group delay time, phase characteristics, wavelet analysis

1. はじめに

地震動をシミュレーションするためには、振幅特性と位相特性を把握する必要がある。従来は振幅特性のモデル化に重点がおかれていたが、近年では位相特性の研究も盛んに行われるようになり、地震動の非定常性に大きな影響を及ぼしているのは位相特性であることが明らかになりつつある¹⁾²⁾。また、地震動の位相特性を、多くの強震記録を用いてモデル化する研究³⁾⁴⁾も行われている。

著者らもこれまでに理論的手法⁵⁾や経験的手法⁶⁾により、群遅延時間を用いて位相特性のモデル化を行ってきた。後者の経験的手法⁶⁾では、地震波の群遅延時間の平均値と標準偏差の回帰モデルを、マグニチュードと震央距離を説明変数として作成している。実際に、この手法により作成した位相モデルを用いてスペクトル適合波の合成を行い、その波形が鉄道構造物の耐震設計に用いられている⁷⁾。また近年、断層近傍で多くの地震波形が記録されていることに注目し、断層近傍地震動に関しても、位相特性のモデル化を行っている⁸⁾。

これらの研究においては、地震動の水平成分を用いて、位相特性のモデル化を行っている。これは、水平地震動が一般的な構造物の挙動の支配的な要因になっているためである。これに対し、鉛直地震動の位相特性のモデル化はまだ行われておらず、鉄道構造物の耐震設計⁷⁾においても、鉛直地震動は水平

地震動の1/2としている。しかし、支承部や逆L字型の高架橋の解析を行う場合などには、鉛直地震動がその挙動に大きな影響を及ぼすことが考えられる。したがって、鉛直地震動に関しても、実地震波の位相特性を適切に把握し、その位相特性を満足するような設計用鉛直地震動を合成する必要がある。本研究では、水平地震動の位相特性のモデル化⁶⁾と同様の手法により、実地震波の鉛直成分を用いて、鉛直地震動の位相特性のモデル化について試算した。

2. 解析に用いたデータ

本研究では、気象庁87型、関西地震観測連絡協議会及びK-net⁹⁾の記録(合計57地点)を用いて、鉛直地震動の位相特性のモデル化を行った。対象とする地震は、水平地震動の位相特性のモデル化⁶⁾に用いたものと同ーとした。解析に用いた地震記録数を表-1に示す。

3. 群遅延時間の平均値と標準偏差

本研究では、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¹⁰⁾ $t_{gr}(\omega)$ に着目して、位相特性のモデル化を行う。これは、群遅延時間の平均値が地震動の重心位置と、また群遅延時間の標

表-1 解析に用いた地震記録数

地震	M	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)

準偏差が地震動の継続時間と、それぞれ大きく関係しており、波形の特性が把握しやすいためである。

地震波は、時間の経過とともに周期特性が変化する波であるため、群遅延時間特性も各周波数帯域ごとに異なる。その特性を把握するため、水平地震動の位相特性のモデル化と同様に、離散ウェーブレット変換・逆変換¹¹⁾を用いる。アナライジングウェーブレット $\psi(t)$ としては、Meyerのウェーブレット¹²⁾を用いた。

本研究では、全ての観測波の時間刻みを $\Delta t = 0.01(\text{sec})$ とし、後続の0を付けてデータ数を $N = 131072 (= 2^{17})$ 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(以下、“ j 次”と呼ぶことにする)。この $x^j(t)$ について群遅延時間 $t_{gr}^{(j)}(\omega)$ を算定し、これを用いて各 j 次ごとの群遅延時間の平均値 $\mu_{igr}^{(j)}$ と標準偏差 $\sigma_{igr}^{(j)}$ を、以下の式に従って算定した。

$$\mu_{igr}^{(j)} = \frac{\sum_{i=1}^{N^{(j)}} t_{gr}^{(j)}(\omega_i)}{N^{(j)}} \quad (1)$$

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

ここで、 $t_{gr}^{(j)}(\omega_i)$ は j 次成分波の振動数 ω_i (ただし、 $2^{j+1}\pi/3T_d \leq \omega_i \leq 2^{j+3}\pi/3T_d$) での群遅延時間である。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. 回帰モデルの作成

表-1の全地震記録について、3.で示した方法により、各 j 次ごとの群遅延時間の平均値 $\mu_{igr}^{(j)}$ と標準偏差 $\sigma_{igr}^{(j)}$ を求めた。ただし、土木構造物の耐震設計上重要な周期は約0.1～5(sec)であることを考慮し、この周期が含まれる $j=7 \sim 14$ についてモデル化することにした。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、絶対時間で表示することにする。

次に、群遅延時間の平均値 $\mu_{igr}^{(j)}$ 及び標準偏差 $\sigma_{igr}^{(j)}$ をマグニチュード M と震央距離 r を説明変数として、次式により重回帰分析を試みた。

$$\mu_{igr}^{(j)} = \alpha_1^{(j)} \times 10^{\beta_1^{(j)} M} \times \Delta r^{\gamma_1^{(j)}} \quad (3)$$

$$\sigma_{igr}^{(j)} = \alpha_2^{(j)} \times 10^{\beta_2^{(j)} M} \times \Delta r^{\gamma_2^{(j)}} \quad (4)$$

ここで、 $\alpha^{(j)}, \beta^{(j)}, \gamma^{(j)}$ は j 次の重回帰係数である。重回帰分析の結果を表-2に示す。ただし、 $j=7$ では、 $\beta < 0$ となっていたものを $\beta = 0$ とした。このときの相関係数は、群遅延時間の平均値 $\mu_{igr}^{(j)}$ についてはすべての j に対して0.9以上の高い相関が得られた。また、群遅延時間の標準偏差 $\sigma_{igr}^{(j)}$ の相関係数は、 $\mu_{igr}^{(j)}$ のものに比べて小さいが、0.72～0.93となっており、高い相関があると言える。

5. 地震動のシミュレーション

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検証する。シミュレーション波の位相スペクトルは、4.で作成した回帰モデルを用いて発生させ、またフーリエ振幅に関しては、既往の加速度応答スペクトルに適合するように定めるものとする。

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(鉛直成分)を図-1(a)に示す。目標スペクトルとしては、川島ら¹³⁾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、また時間が経過すると低振動数成分が卓越し、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。また、図-1(b)には、水平地震動の位相モデル⁶⁾を用いて、同様の方法で合成した水平地震動を示している。

6. 鉛直地震動が構造物の応答に及ぼす影響

ここでは、1自由度モデルに水平地震動のみを入力した場合と、水平地震動と鉛直地震動の両方を入力した場合の応答を比較することにより、鉛直地震動が構造物の応答に及ぼす影響を考察する。

まず、水平1自由度モデルの運動方程式は、一般に次式で表される。

$$\ddot{x} + 2\xi \left(\frac{2\pi}{T} \right) \dot{x} + \frac{k(x)}{m} = \ddot{X} \quad (5)$$

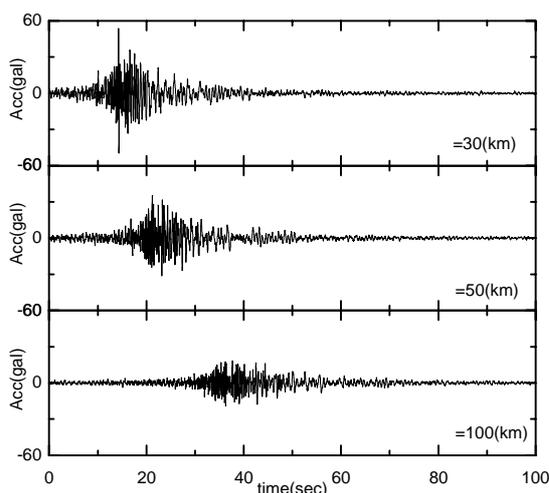
ここで、 m は質点の質量、 ξ は減衰定数、 T は固有周期である。これに対し、山下ら¹⁴⁾はP-効果を考慮した回転1自由度モデルの運動方程式を、次式で定義している。

$$\ddot{\phi} + 2\xi \left(\frac{2\pi}{T} \right) \dot{\phi} + \frac{M(\phi)}{mH^2} = -\frac{\ddot{X}}{H} \cos \phi + \frac{g + \ddot{Y}}{H} \sin \phi \quad (6)$$

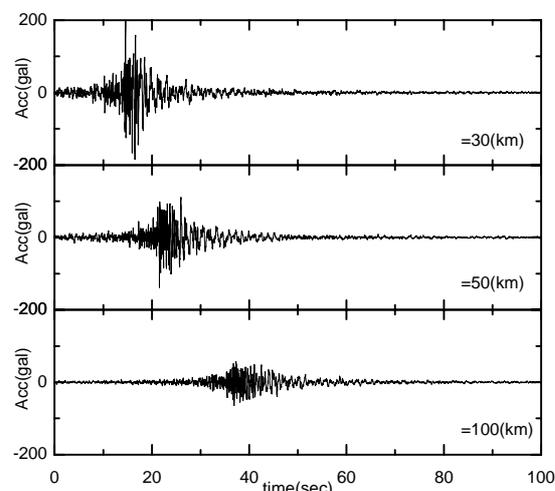
$M(\phi)$ は復元力モーメント、 ϕ は橋脚の回転角、 H は橋脚高さ、 g は重力加速度である。回転モデルを用いると、水平地震動と鉛直地震動の両方を考慮することができる。

表-2 回帰分析結果

j	振動数範囲 (Hz)	$\alpha_1^{(j)}$	$\alpha_2^{(j)}$	$\beta_1^{(j)}$	$\beta_2^{(j)}$	$\gamma_1^{(j)}$	$\gamma_2^{(j)}$	相関係数	
								$\mu_{igr}^{(j)}$	$\sigma_{igr}^{(j)}$
7	0.033 ~ 0.130	0.612	8.596	0.031	0.0	0.871	0.440	0.936	0.728
8	0.065 ~ 0.260	0.339	1.215	0.105	0.133	0.748	0.357	0.955	0.800
9	0.130 ~ 0.521	0.582	0.458	0.112	0.232	0.616	0.175	0.956	0.800
10	0.260 ~ 1.042	0.799	1.765	0.085	0.108	0.622	0.255	0.971	0.739
11	0.521 ~ 2.083	1.226	1.450	0.020	0.098	0.723	0.365	0.991	0.815
12	1.042 ~ 4.167	0.745	0.587	0.041	0.125	0.730	0.317	0.991	0.875
13	2.083 ~ 8.333	0.493	0.264	0.055	0.160	0.750	0.350	0.992	0.925
14	4.167 ~ 16.667	0.369	0.152	0.063	0.184	0.769	0.396	0.992	0.892



(a) 鉛直地震動



(b) 水平地震動

図-1 スペクトル適合波のシミュレーション結果 (種地盤, M=7)

各モデルの復元力(復元力モーメント)特性としては、パイリニア型を仮定する。また、入力地震動としては、図-1に示した模擬地震動において、入力水平地震動の最大加速度を750(gal)に調整した波形を用いる。降伏震度を0.2、橋脚高さを5(m)として、式(5)、(6)を用いて求めた各モデルの水平方向の変位応答を図-2に示す。P- 効果を考慮することで、構造物の残留変位に違いが生じていることがわかる。

次に、入力水平地震動の最大加速度を50galから1000galまで変化させた場合の最大応答変位の比較

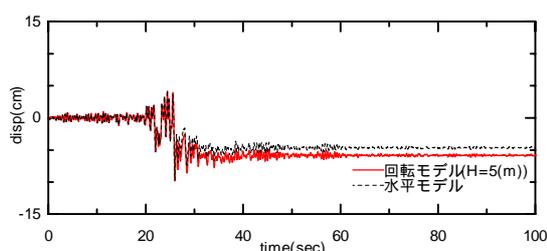


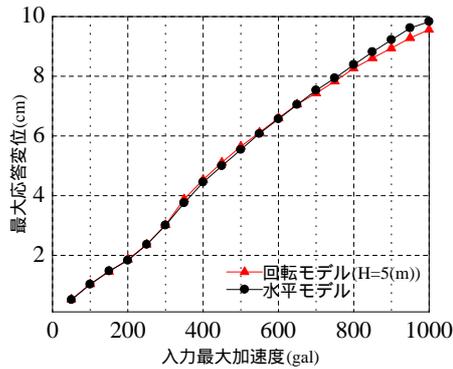
図-2 変位応答の比較

を図-3に示す。(a)は図-1に示した模擬地震動を入力地震動とした場合、(b)は鳥取県西部地震において日野で観測された波形を入力地震動とした場合である。模擬地震動を入力した場合には、両モデル間の最大応答変位にそれほど違いが見られないのに対し、実地震動を入力した場合には、入力最大加速度が大きくなるにつれて、回転1自由度モデルの方が最大応答変位が大きくなる傾向がある。これは、実地震動では水平動がピーク値をとると同時に鉛直動もピーク値をとるため、P- 効果が大きく表れるのに対し、合成した模擬地震動では、水平動と鉛直動がピーク値をとる時刻をそれぞれ独立に設定しているため、P- 効果がほとんど表れていないことを示している。したがって、構造物の応答におけるP- 効果を適切に評価するためには、水平動と鉛直動の相関性を考慮することが不可欠であると言える。

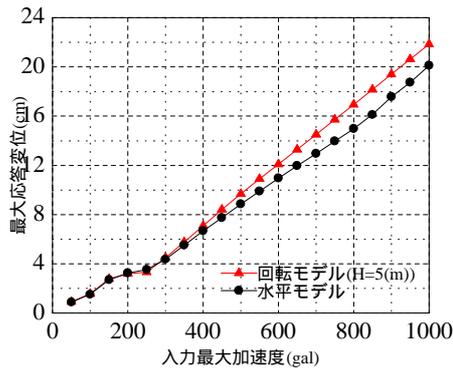
7. まとめ

本研究では、ウェーブレット変換と群遅延時間の概念を用い、実地震波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試みた。得られた結論を以下に示す。

- ・鉛直地震動に関しても、マグニチュードと震央距離を説明変数として回帰式を作成することにより、実地震波の位相特性を適切に捉えることができる。
- ・得られた回帰式を用いて、スペクトル適合波をシミュレーションした。
- ・合成した波形を用いて、1自由度モデルの変位応答を求めた。鉛直地震動を考慮しても、最大応答変位はあまり変化しなかった。これは、合成した水平動と鉛直動を無相関としたことが一因であると思われる。



(a) 模擬地震動



(b) 日野(鳥取県西部地震)の波形

図-3 最大応答変位の比較

水平動と鉛直動の相関性については、今後考察する予定である。

謝辞

本研究では、気象庁、関西地震観測連絡協議会、防災科学技術研究所K-netの強震記録を利用させていただきました。各関係機関に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大崎順彦, 岩崎良二, 大川出, 雅尾亨: 地震波の位相特性とその応用に関する研究, 第5回日本地震工学シンポジウム, pp.201-208, 1978.
- 2) 和泉正哲, 勝倉裕: 地震動の位相情報に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第327号, pp.20-26, 1983.
- 3) 石井透, 渡辺孝英: 地震動の位相特性と地震のマグニチュード・震源距離・深さの関係, 日本建築学会学術講演会梗概集, pp.385-386, 1987.
- 4) 佐藤智美, 植竹富一, 菅原良次: 群遅延時間を用いた長周期地震動の経験的経時特性モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第493号, pp.31-39, 1997.
- 5) 佐藤忠信, 室野剛隆, 西村昭彦: 震源・伝播・地点特性を考慮した地震動の位相特性のモデル化, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.201-213, 1999.
- 6) 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.
- 7) (財)鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 1999.
- 8) 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.
- 9) 防災科学技術研究所強震ネットワーク K-net: <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>
- 10) パポリス: 工学のための応用フーリエ積分, オーム社, pp.243-255, 1972.
- 11) 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.
- 12) Meyer, Y.: *Orthonormal Wavelets, in Wavelets*, Springer, pp.21-27, 1989.
- 13) 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.
- 14) 山下典彦, 秦吉弥, 原田隆典, 竹内翔, 田中博文: P-効果による大変形を考慮した1自由度モデルの非線形応答解析に関する研究, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集(CD-ROM), 2002.

(2003.10.10 受付)

EXPERIMENTAL MODELING OF PHASE CHARACTERISTICS OF VERTICAL GROUND MOTION

Tomohiro KAWANISHI and Yoshitaka MURONO

It is well known that a phase spectrum of earthquake motion controls its non-stationary characteristics. In this study, we model the phase characteristics of vertical ground motion. Using observed vertical ground motions and Meyer's wavelet we calculate the average group delay time and its standard deviation. We obtain the attenuation relationships of these values as the function of earthquake magnitude and epicentral distance by regression analysis. We generate a sample group delay time using the regression equations and simulate a sample vertical ground motion using the group delay time. Finally, we calculate the response of a single freedom system using the ground motion.