

ウェーブレット変換を用いた液状化地盤の地震応答の非定常性の解析

東北大学 学生会員 ○岡田 直仁
 東北大学 正 会 員 風間 基樹
 東北大学 正 会 員 柳沢 栄司

1. はじめに

現在、地震時の地盤応答解析手法として一次元等価線形応答解析が広く用いられており、実際に 0.5% 程度までの中程度のひずみレベルの地震に対しては再現性のある方法であることが実験、その他の観測データから検証されている。しかしながら、液状化を伴うような強震時においては図 1 に見られるように、応答解析の結果が継続時間全般に渡って観測値をうまく説明できているとは言い難い。その要因として、等価線形解析においては地震動の継続時間中一定と考えて解析を行っている地盤物性の非定常性が挙げられる。本研究では強震を受けた地盤の液状化に伴う地盤物性の非定常な変化を示す。解析は、表 1 に示した 1995 年兵庫県南部地震の前後 13 回の地震時に取得された神戸ポートアイランドの鉛直アレーデータを用い、せん断応力-ひずみ履歴からせん断剛性 G 及び減衰定数 h の時間変動を求めるとともに、Wavelet 変換による時間一周波数解析を行い、鉛直方向の地震波伝播特性から地盤地震応答の非定常性を解析した。

2. せん断応力-ひずみ履歴による解析

深さ方向の加速度分布を線形補間することにより、鉛直アレーによる加速度時刻歴から 2 つのアレー地震計の中間点におけるせん断応力-ひずみ履歴を求めることができる¹⁾。得られたせん断応力-ひずみ履歴から求めた剛性の時間変化を図 2 に示す。図 1 から、前震時に $7 \times 10^3 \text{ tf/m}^2$ 程度であったせん断剛性が、本震において $1 \times 10^2 \text{ tf/m}^2$ 近くまで急激に低下した様子が認められる。更に余震 01, 04 の間に過剰間隙水圧の消散に伴う剛性の回復があり、余震 5 ではほぼ本震前の剛性を取り戻している様子がわかる。

3. Wavelet 変換による解析

加速度時刻歴 $\ddot{u}(t)$ と Wavelet 基底関数 $\psi_{a,b}(t)$ の内積として、Wavelet 変換は次のように表される³⁾。

$$W_{a,b} = \langle \ddot{u}(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \ddot{u}(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

加速度時刻歴 $\ddot{u}(t)$ は離散データ $\ddot{u}(n)$ として与えられるので、離散時間信号に対する離散時間 Wavelet 変換は次のように表される³⁾。

$$D_{j,k} = \langle \ddot{u}(n), \psi_{j,k}(n) \rangle = 2^j \sum_n \ddot{u}(n) \psi(2^j n - k) \quad (2)$$

ここに、 j は分解次数、 k は時間シフト係数であり、 $D_{j,k}$ は時間一周波数平面上の点 $(2^j k, 2^j)$ に対応する値である。すなわち、 j の負の次数の増加に従って低振動数の時間変動特性を表し、時間軸上のデータ数は $1/2$ ずつ減少することになる。離散時間 Wavelet 変換の帯域分割特性を

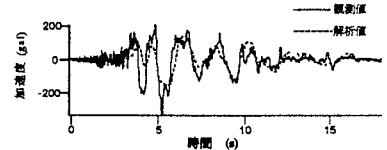


図 1 1995 年兵庫県南部地震における神戸ポートアイランド地表観測波加速度時刻歴と応答計算結果の比較¹⁾

表 1 解析に用いた地震波データ

名称	発震年月日時刻	震源深さ (km)	M	地表最大加速度 (gal)	震源地
前震	94/10/23 11:51	15.0	4	12	東京都中部
本震	95/01/16 05:46	14.0	7	341	淡路島
余震01	95/01/16 05:49	-	-	16	"
余震02	95/01/16 05:49	-	-	23	"
余震03	95/01/16 05:52	13.8	5	35	兵庫県南東部
余震04	95/01/16 05:52	8.4	5	8	"
余震1	95/01/16 08:58	18.8	5	46	淡路島
余震2	95/01/17 05:25	14.6	5	79	兵庫県南東部
余震3	95/01/18 01:00	13.6	4	13	"
余震4	95/02/01 16:04	11.5	4	4	淡路島
余震5	95/02/01 16:19	17.9	4	65	兵庫県南東部
余震6	95/02/17 21:37	17.0	5	18	淡路島
余震7	95/10/13 02:04	17.0	5	60	大阪湾

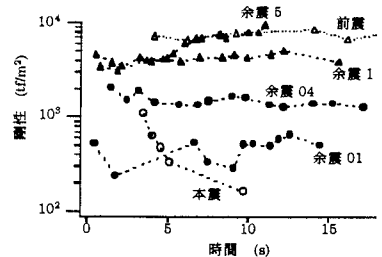


図 2 せん断剛性 G の時間変動 (K.P.-4m)

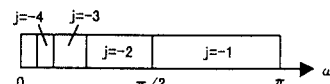


図 3 離散時間 Wavelet 変換の帯域分割特性⁴⁾

図 3 に示す。

本震における地表面(K.P.+4m)での観測加速度時刻歴に対し、短時間 Fourier 変換を行った結果を図 4 に、前震及び本震において観測された地盤面(K.P.-28m)と地表面での加速度時刻歴に(2)式により Wavelet 変換を行った結果を図 5、図 6 に示す。サンプリングレートは 0.01 秒であり、ナイキスト周波数 50Hz から図 3 に従って分解されることになる。周波数軸上の実線は帯域分割の境界であり、ここでは便宜上分割帯域の中心周波数上に結果をプロットし、視覚的に現象の変化が捉え易いよう Density グラフを用いた。

図 4 の短時間 Fourier 変換ではウィンドウを 2 秒、シフト量を 1 秒として変換を行っているが、理論的に 0.5Hz 以下の低周波数成分を捉えることができない上、エリアジングを排除しながら時間分解能をこれ以上増加させることはできない。この問題はウィンドウ及びシフト量を適当に変化させることによりある程度改善することはできるが、周波数、時間両方の分解能を向上させることは困難である。Wavelet 変換の有効性は、基底関数 $\psi(t)$ を上記のように導入することにより、一般に高い時間分解能が要求される高周波成分については時間分解能を高く、低周波成分については周波数分解能を高くすることができるという点にある。更に、効率よく基底関数を変えながら変換を行うため、短時間 Fourier 変換に比べ計算量、データ量を大幅に減少させることができる。

変換後の結果を見ると、図 5 の前震はひずみ最大値が 10^{-5} 程度であるため、図 2 にも示されるように目立った地盤物性の時間的変動は見られず、そのため -28m から +4m まで地震波が伝播していく間に周波数特性の大きな変化は見られない。しかし図 6 の本震においては、+4m での観測波に主要動の生じた起震後 4 秒付近を境にして高周波成分の伝達が見られなくなっている。この様子は図 2 において剛性が大きく低下している時間と対応しており、地盤物性の変化が地震波伝播における周波数特性の変動として捉えられていることがわかる。

4. 結論

本研究では Wavelet 変換を用いた時間一周波数解析により、液状化地盤の非定常的挙動を定性的に示すことができた。今後、Wavelet 逆変換により物性の非定常性を考慮に入れた地震応答解析手法を開発する予定である。

【参考文献】

- 1) 風間基樹・柳沢栄司・中村晋：地震時に地盤中で費やされた累積損失エネルギーによる強震動評価，土構造物の耐震設計に用いるレベル 2 地震動を考えるシンポジウム 発表論文集，pp.47-54，1998.12
- 2) 宮脇幸治郎・土岐憲三：ウェーブレット解析による地震波特性に関する一考察，土木学会論文集 No.525/III-33，pp.261-274，1995.10
- 3) 榊原進：ウェーブレットビギナーズガイド，東京電気大学出版局，1995
- 4) 貴家仁志：マルチレート信号処理，昭晃堂，1995

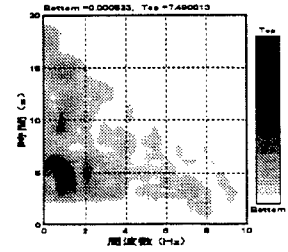


図 4 本震における観測加速度時刻歴の短時間 Fourier 変換 (K.P.+4m)

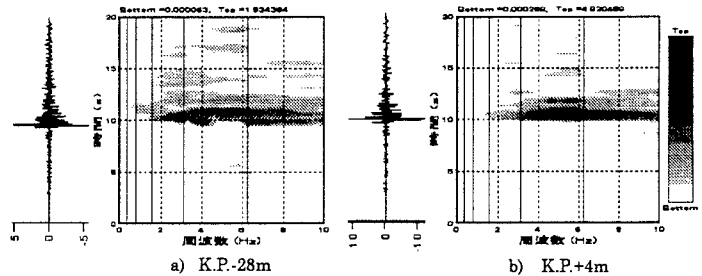


図 5 前震における観測加速度時刻歴とその Wavelet 変換 (EW 成分)

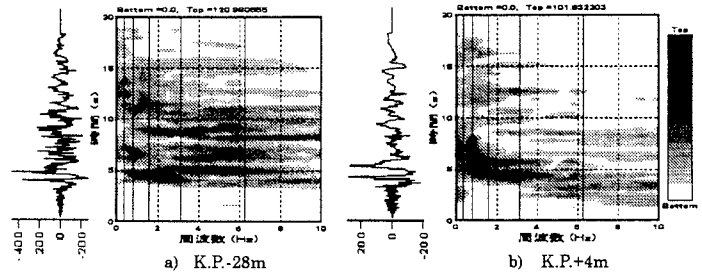


図 6 本震における観測加速度時刻歴とその Wavelet 変換 (EW 成分)