

周波数特性を考慮した等価線形解析手法の提案と検討

東京大学 学生会員 ○伊藤 貴晴
 東京大学 正会員 東畑 郁生

1. はじめに

地盤の地震応答解析において、多数のケースを行う必要がある場合や得られている情報が少ない場合に一次元応答解析は求める入力データも少なく、解析時間も短い為非常に有効である。その中でも土の剛性、減衰特性を線形関係に置き換える等価線形化手法は、逆解析も可能なことから特に実務の面で多様されてきた。この様な等価線形化手法を用いたプログラムとしては1972年に発表されたSHAKE¹⁾が有名であり、現在まで地震工学の分野において多大な貢献をしてきている。しかし、SHAKEは特に軟弱な地盤で地震動のレベルが大きい際に高周波数帯において剛性低減、減衰比の増大が適当に評価されないことが指摘され、改善案が提案されてきた²⁾。そこで、本研究では杉戸法²⁾を参考に高周波数帯の減衰の過大評価は、せん断歪の最大応答値の大きい周波数帯と小さい周波数帯のせん断剛性低減、減衰比の増大が互いに影響を受けてしまう為と考え、各周波数帯について剛性を評価する手法を提案し、解析プログラムRESHAKEを作成した。

2. RESHAKEのアルゴリズム

本研究で開発したRESHAKEとSHAKEの主な違いの概念図を図-1に示す。SHAKEもRESHAKEも基本としているのは重複反射理論であり、まず、FFTにより入力波を各周波数帯のsin波に分解するところまでは同じである。その後SHAKEでは全周波数帯で共通のG, hを仮定して波動方程式を解き、その解により得られた全周波数帯の和の最大せん断歪 γ_{max} に0.65を乗じた値 γ_{eff} で全周波数帯共通のG, hを算出し、G, hが前の計算結果と5%以下の誤差になるまで計算を繰り返す。

これに対しRESHAKEでは初めにG, hを仮定して各周波数帯について波動方程式を解き、各周波数帯の対応する正、負の周波数帯の解の和により得られた最大せん断歪 γ_{max} により各周波数帯でG, hを決定し誤差5%まで計算を繰り返す。これを全周波数帯において行い、最後に得られた和を解とする。

2. 理論解, microSHAKEとの解析結果の比較

表-1, 2, 図-2に解析ケースの概要を示した。まずcase1に示す単一周波数, せん断剛性, 減衰比一定のケースに置いて理論解, RESHAKE, microSHAKE(地震工学研究所)の3つで地表面における応答変位について解を求め、比較した。

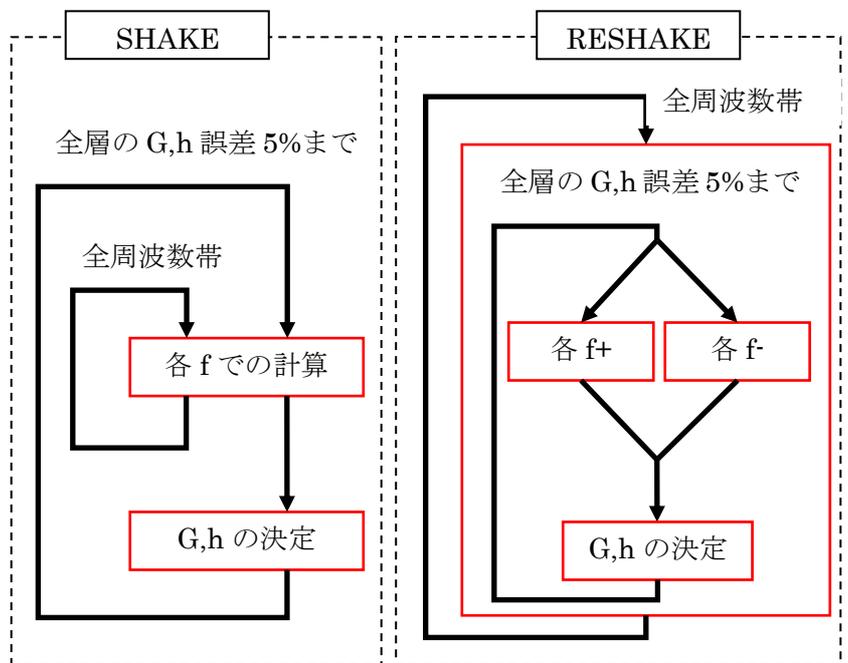


図-1 SHAKEとRESHAKEの違い

表-1 解析ケース

case	入力波	パラメータ	剛性低減
case1	sin波(1Hz)	para1	無
case2	P.I波	para2	有

表-2 解析パラメータ

パラメータ	層数(各20m)	Vs(m/s)	ρ (kN/m ³)
para1	2	(1)100 (2)400	(1)17 (2)17
para2	1	(1)100	(1)17

キーワード 等価線形化法, 地盤応答解析, 剛性低減, 減衰特性

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学大学院工学系研究科 TEL03-5841-6119

図-3 上段は入力波より求めた入力変位時刻歴である。なお、スペクトルを $i\omega$ で除することで積分を行い、定数項は無視した。計算の結果下段の様な地表面の応答時刻歴が得られた。これより、単一周波数、せん断剛性、減衰比一定の条件下では各手法はほぼ同じ解を出すことが確認された。なお、microSHAKE のみやや最大値が異なるのは時刻データに用いることのできる有効数字が少ない為であると考えられる。

次に図-4 の上段は入力に用いたポートアイランド記録 (G. L. -32m) の加速度時刻歴である。中段は各プログラムによる地表面の応答加速度時刻歴、下段は中段の周波数解析結果である。加速度時刻歴について、全体的に応答値が RESHAKE の方が大きくなっていることが分かる (RESHAKE Max 13.9 m/s^2 , microSHAKE Max 10.0 m/s^2)。特に主要動以外の応答が microSHAKE に比べて非常に大きくなっている (0-3 sec, 15-30 sec) 事が目立つ。これは RESHAKE について減衰が抑えられていると捉えることができる。また、microSHAKE が極大値を得る時刻で RESHAKE も極大値を得ていることから大きな位相の違いは生じていないと判断することができる。

次に、下段の加速度応答時刻歴の周波数解析結果について見てみると、卓越周波数(約 1.2 Hz)において RESHAKE の方が約 3 倍のスペクトル (2.90 m/s^2 , 0.97 m/s^2) を示すことが分かる。また、3 Hz を超える周波数帯においても複数箇所 RESHAKE の方が大きな値を取ることが確認された (3.8 Hz, 6.3 Hz, 8.8 Hz, etc.)。ただし、それ以外の周波数帯においては両プログラムの解析値はほぼ等しいことが分かる。これは剛性低減や減衰比増大が異なっても支配的でない周波数帯ならばあまり全体の応答値には影響しないことを示している。

3. まとめと考察

以上のように RESHAKE と microSHAKE で大きく違いが見られ、高周波数帯の過剰な減衰の傾向は抑えられたと言える。しかし、剛性低下曲線の形状に依存して両プログラムが類似した応答値を返すことも考えられる為、今後は他の地盤条件や、鉛直アレー記録を用いた解析などを行い RESHAKE の妥当性をさらに検討していく必要がある。

参考文献

- 1) P.B. Schnabel et.al. : SHAKE a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, EERC, 72-12, 1972
- 2) 杉戸真太 et.al. : 周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集, No. 493, pp49-58, 1994
- 3) 田村敬一 et.al : 液状化を考慮した簡易な地震応答解析, 土木学会第 51 回学術講演会, pp. 336-337, 1996

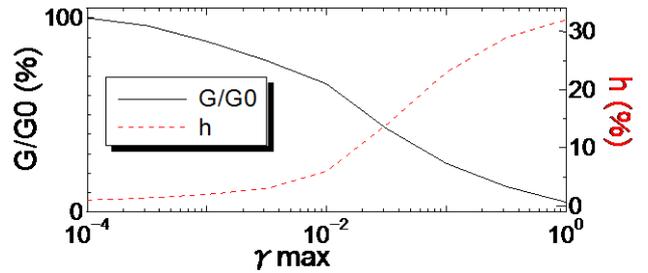


図-2 剛性低下曲線³⁾

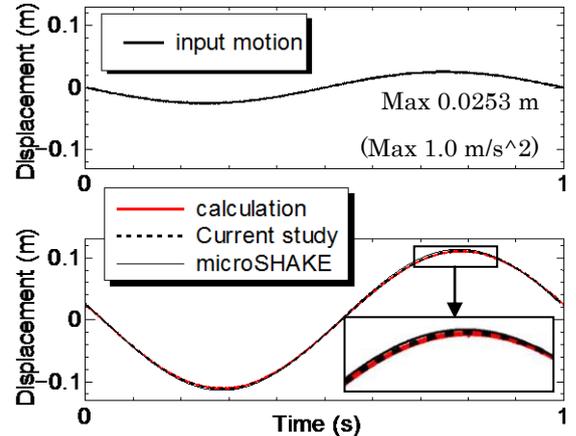


図-3 case1 入力波と解析結果

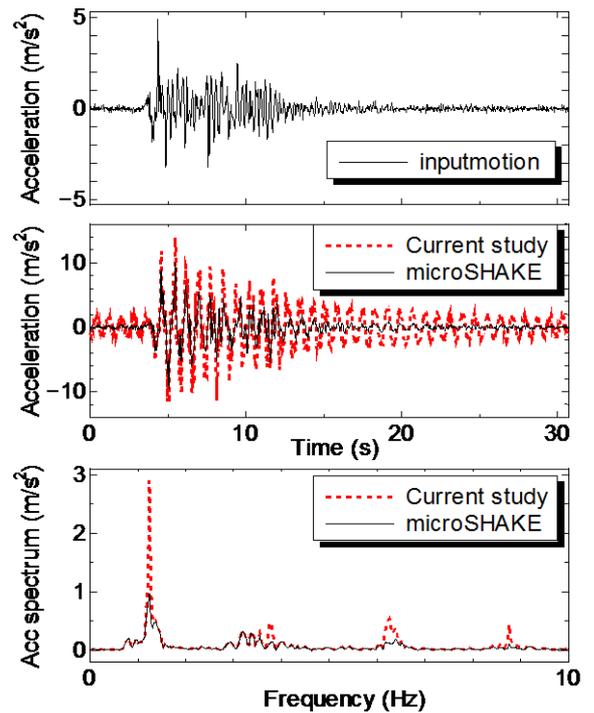


図-4 case2 入力波と解析結果