

地盤動的変形特性の周波数依存を考慮した有限要素法による地震応答解析

中央大学 学生員 中沢 真一
中央大学 正会員 櫻山 和男

1. はじめに

周波数領域での等価線形化法に基づく解析は、時間領域の非線形解析と異なり地盤が軟弱で大きい地震動を受けた場合、地盤の材料特性を適切に評価できないことなどが指摘されている。これに対し中村ら¹⁾は周波数領域での非線形地震応答解析法を提案し、1次元解析において時間領域での非線形解析結果と同程度の推定精度を得ている。

本論文はこの周波数領域での非線形地震応答解析法に有限要素法を導入し(以後、本手法と呼ぶ)、多次元解析への拡張を試みるものである。今回、本手法の妥当性を検討するため、大きな地震動を受ける2次元成層地盤における応答を本手法と従来の等価線形化法に基づく有限要素解析法(以後、FLUSHとする)および観測値とそれぞれ比較を行った。

2. 数値解析手法

(1) 有限要素方程式

周波数領域における有限要素方程式は以下ようになる。

$$([K] + i\omega [C] - \omega^2 [M])\{U(\omega)\} = \{F(\omega)\} \quad (1)$$

ここで、 ω は円振動数、 $[K]$ 、 $[C]$ 、 $[M]$ は、剛性行列、減衰行列、質量行列、 $\{U(\omega)\}$ 、 $\{F(\omega)\}$ は、周波数領域における変位ベクトル、外力ベクトルである。剛性行列には履歴減衰を考慮するため複素剛性を用いている。連立一次方程式の解法には可変的前処理付き一般化共役残差法²⁾を適用した。

(2) 周波数領域での非線形地震応答解析法

周波数領域の等価線形化法では次式が収束判定値を満たすまで反復計算している。

$$\gamma_{eff} = \alpha \gamma_{max} \quad (2)$$

γ_{eff} 、 γ_{max} は有効ひずみ、最大ひずみであり、 α は等価線形化のための係数で0.65がよく用いられる。これに対し、中村ら¹⁾は周波数領域での非線形地震応答解析法として、式(2)の代わりに、次式を提案している。

$$\gamma_{tN}(\omega) = C_{tN}(\omega) \cdot C_{tf} \cdot \gamma_f(\omega) \quad (3)$$

ここで、 $\gamma_f(\omega)$ 、 $\gamma_{tN}(\omega)$ はそれぞれ、円振動数、周波数領域におけるひずみおよび非線形化時間相当ひずみである。また、 C_{tf} は時間領域と周波数領域との最大ひずみの比であり、 $C_{tN}(\omega)$ は円振動数 ω とともに線形的に変化する次の関数で定義される。

$$C_{tN}(\omega) \begin{cases} = 1 + \left(\frac{\gamma_t(\omega_{LN})}{\gamma_t(\omega_{HN})} - 1 \right) \frac{\omega - \omega_{LN}}{\omega_{HN} - \omega_{LN}} & (\omega_{LN} \leq \omega \leq \omega_{HN}) \\ = 1 & (\omega_{LN} \geq \omega, \omega \geq \omega_{HN}) \end{cases} \quad (4)$$

$\gamma_t(\omega)$ は時間相当ひずみである。また、 ω_{HN} 、 ω_{LN} はそれぞれ高周波数限、低周波数減であり、地盤材料の非線形化の

影響を受ける周波数帯を示している。式(3)から分かるように、非線形化時間相当ひずみが周波数の関数となり、各周波数毎に剛性、減衰が与えられるため、地盤材料の動的変形特性の周波数依存を考慮することができる。

式(4)における地盤材料の非線形化の影響を受ける周波数帯は本来、周波数応答関数を対象層のせん断波速度で偏微分することで得られる非線形化影響関数により評価すべきであるが、本論文では簡易的に低周波数減を1次固有周波数、高周波数限を初期地盤の2次固有周波数としている。

3. 数値解析例

本手法の妥当性を検討するため、地中および地表で地震波が観測されている成層地盤を解析対象とし、地表での観測値と本手法およびFLUSHより得られた結果の比較を行う。数値解析で用いる解析地盤モデルおよび有限要素モデルをそれぞれ表-1、図-1に示す。表中のポアソン比は飽和多孔質弾性体の波動伝播理論³⁾より近似的に算定したものである。有限要素モデルにおける境界は底面を固定、側面を粘性境界としている。解析に用いた土の応力-ひずみ関係はR-Oモデルとし、解析パラメータは文献1)と同じもの

表-1 解析地盤モデル¹⁾

No.	土質	層厚 [m]	質量密度 [t/m ³]	せん断波速度 [m/s]	ポアソン比
①	表土	1.4	2.04	110	0.499
②	粘土	1.2	2.04	130	0.499
③	細砂	1.75	1.99	140	0.499
④		2.2	2.04	130	0.499
⑤	砂礫	1.55	2.09	180	0.499
⑥	粘土	2.5	1.84	140	0.499
⑦	砂礫	5.3	2.14	270	0.498
⑧	粘土	2.9	1.68	190	0.499
⑨		4.3	2.04	270	0.498
⑩	砂礫	3.8	2.04	480	0.494

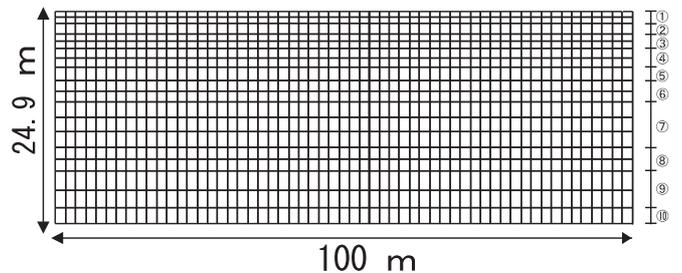


図-1 有限要素モデル

KeyWords: 地震応答解析, 有限要素法, 周波数依存性, 周波数領域

連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 E-mail: nakazawa@civil.chuo-u.ac.jp

を使用した。入力地震動は、兵庫県南部地震において観測された地中の記録とし、その加速度時刻歴を図-2 に示す。

図-3 に本手法および FLUSH の解析より得られた加速度とひずみの最大値深度分布を示す。最大加速度には地中および地表面での観測の最大値も合わせて載せている。まず最大ひずみであるが、両手法とも同程度の値であり、等価線形化法の適応範囲である 0.1% を大きく越えているのが分かる。最大加速度においては、地表面で本手法は観測値に近い値であるのに対し、FLUSH はそれより若干大きな値となっている。次に地表面における両手法の応答加速度時刻歴と観測値の比較をそれぞれ図-4,5 に示す。解析の結果、FLUSH は時刻 16 秒付近で観測値の波形と位相がずれているが、本手法は全体的に観測値とよく一致しており、妥当な解が得られていると言える。図-6 は解析終了時における本手法と FLUSH の周波数応答関数を比較したものである。FLUSH では、従来の等価線形化法に基づく解析法の欠点である高周波数領域での周波数応答関数の減少が見られ、地盤の材料特性が適切に評価できていないことが分かる。しかし、本手法では、高周波数領域で周波数応答関数の減少を起こしていない。これは、本手法では等価線形化法と異なり、地盤の材料特性（剛性、減衰）を周波数に依存するものとして評価しているためである。このことから、本手法は地盤材料の動的変形特性の周波数依存を考慮することで、高周波数領域における地盤の材料特性評価を改善できていると言える。

以上のことから、本手法の妥当性を確認することができた。

4. おわりに

本論文の内容をまとめると以下ようになる。

1. 中村ら¹⁾の提案する周波数領域での非線形地震応答解析法に有限要素法を導入し、多次元解析への拡張を試みた。
2. 本手法は FLUSH と異なり、地盤材料の動的変形特性の周波数依存を考慮することで、高周波数領域における地盤の材料特性を改善できることが確認できた。
3. 本手法の解析結果は地表面での観測値とよく一致し、本手法の妥当性を確認できた。

今後は多次元解析が必要となる不整形地盤に対しての有効性を確認していく。

謝辞

本論文に使用した地震波は、日本大学工学部中村晋助教授から提供して頂きました。ここに記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中村晋, 吉田望: 周波数領域での地盤材料の動的変形特性に基づく地盤の非線形地震応答解析法の提案, 土木学会論文集, 第 722 号, pp169-187, 2002.
- 2) 阿部邦美, 張紹良, 長谷川秀彦, 姫野龍太郎: SOR 法を用いた可変的前処理付き一般化共役残差法, 日本応用数理学会論文誌, Vol.11, No.4, pp157-170, 2001.
- 3) 土質力学の基礎, 鹿島出版会, pp1-69, 1976.

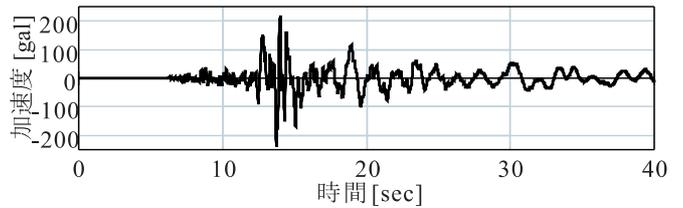


図-2 入力地震動の加速度時刻歴 (GL-24.9m,EW 成分)

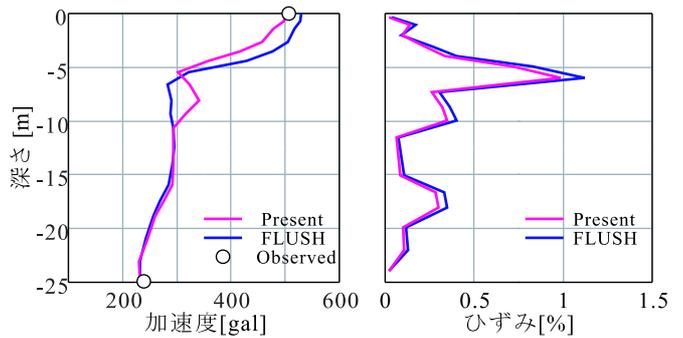


図-3 加速度およびひずみの最大値深度分布の比較

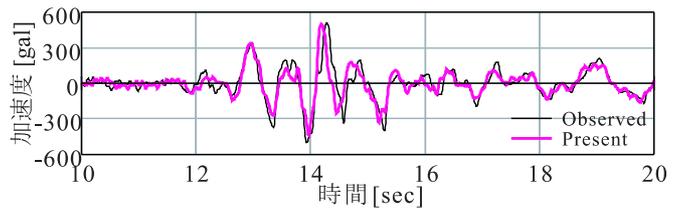


図-4 本手法における地表面での応答加速度時刻歴

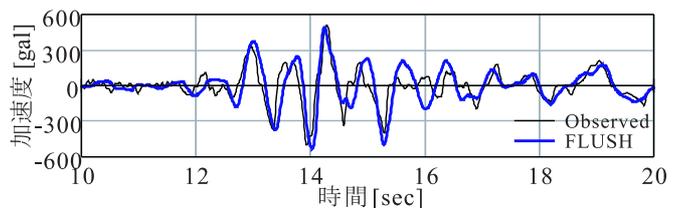


図-5 FLUSH における地表面での応答加速度時刻歴

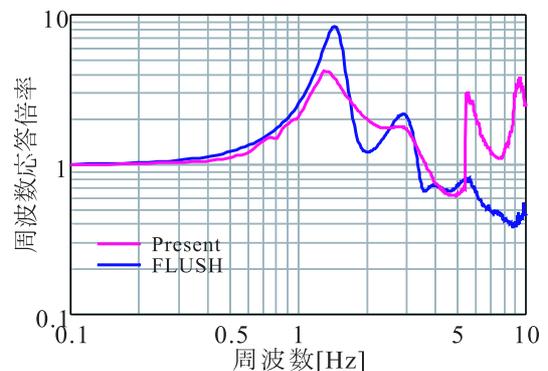


図-6 周波数応答関数の比較