

地震応答解析における等価線形法の適用性

株式会社マインド 正会員 ○藤原 良博
株式会社マインド 正会員 塩見 忠彦

1. はじめに

等価線形法では最大応答加速度が過大評価されることがと応答加速度の高振動数成分が過小評価されることが問題となっている。これらの問題点に対し、振動数ごとに材料定数を依存させることにより精度を向上させる方法が提案されている^{1) 2) 3)}。しかしこれらの方法は等価線形法の近似解の精度と、振動数に依存する物理的な現象が混同されて普及していない。本稿では、物理現象の振動数依存を明らかにするため等価線形法の近似精度を数理面から明らかにする。

2. 振動数依存剛性・減衰による精度の向上

高振動数領域の応答が小さいのは、大ひずみ時には剛性低下とともに減衰が大きくなり、それに対する有効ひずみで求めた剛性・減衰を高振動数領域の小さなひずみに対して適用しているためである。この高振動領域での精度を向上させるため、振動数ごとに(1)式で有効ひずみを求め、これに対応する剛性と減衰を用いる等価線形法が提案されている¹⁾。同様に振動数毎の有効ひずみを(2)式で求め、振動数毎に等価線形法の収束計算をする方法も提案されている³⁾。

$$\gamma_{eff}(f) = C\gamma_{max} \frac{\gamma(f)}{\gamma(f)_{max}} \quad (1)$$

$$\gamma_{eff}(f) = \gamma(f) \quad (2)$$

ここに、 $\gamma(f)$ ：振動数に分解したひずみ、 C ：係数、 $\gamma(f)_{max}$ ： $\gamma(f)$ の最大値、 γ_{max} ：ひずみ時刻歴最大値

本稿ではこれらの手法を近似式の誤差について数理面から精度を検討する。

3. 振動数毎等価線形法の問題点

振動数に分解されたそれぞれの等価線形法による応答は非線形解析の応答と良い対応をする⁴⁾。しかし

個々の振動数の応答が正しくても、分解された振動数の振幅が物理的な意味を持っていない。ところが振動数に分解された正弦波の振幅 C_k は、ある特定区間の波形の振幅を示すのではなく、時刻歴の様々な区間の振動数の積分値となっている(3式)。

$$C_k = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-ik\omega t} dt \quad (3)$$

図 1(a),(b) は高振動数の波が主要動の前後にある場合と主要動中にある場合の時刻歴とフーリエスペクトルである。フーリエスペクトルからは両者とも 1Hz と 4Hz の波の重ね合わせであることが分かるが、どの時刻で重ね合わされているのかは判別出来ない。主要動中に高振動数成分が含まれる場合は(図 1(b))、時刻歴波形では 1 つの波がフーリエスペクトルでは複数の振動数成分に分かれ正確に振動数と振幅の評価を行うことはできない。

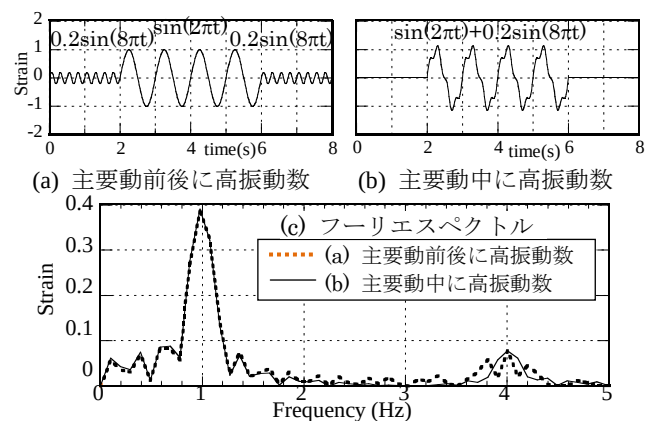


図 1 高振動数を含む波形の例

したがってランダムな波形のフーリエスペクトル振幅は振動数成分のひずみ振幅に対応させられない。

また、振動数ごとに G/G_0 と h を変えて計算を行うと、時刻歴波形が崩れてしまい、ゼロであるはずの時刻で振幅が生じることもある。

キーワード 等価線形法, 周波数依存, 地震応答解析

連絡先 〒274-0825 千葉県船橋市前原西 7-17-19-402 (株)マインド E-mail: fujiwara.yoshihiro@3d-lab.jp

4. なめらかな振動数依存関数を用いる方法

振動数毎に有効ひずみから剛性・減衰を求めるのは適切でないが、粘性減衰や地盤のインピーダンスのように物理的背景のあるなめらかな関数では時刻歴波形に戻した際の乱れは小さいと考えられる。このことから、高振動数領域で有効ひずみ減少を表すなめらかな関数の存在が想定される。

このような関数として(4)式が提案されている²⁾。

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{eff}}(f) &= \gamma_{\text{max}} \quad \text{for } f < f_p \\ &= \gamma_{\text{max}} - \gamma_{\text{max}} \left(\frac{\log f - \log f_p}{\log f_e - \log f_p} \right)^m \quad \text{for } f_p \leq f \leq f_e \\ &= 0 \quad \text{for } f > f_e \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 f_p : ゼロクロス法による最大ひずみ (γ_{max}) のときの振動数, f_e : 経験値 (推奨値 $f_e=10$, $m=2$)

これに対して、より理論的な背景を求め、応答ひずみが入力加速度に対して $1/\omega^2$ に比例するという事を利用して(5)式の適用性を検討した。

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{eff}}(f) &= \gamma_{\text{max}} \quad \text{for } f < f_p \\ &= \gamma_{\text{max}} \frac{1}{(2\pi(f - f_p + 1))^2} \quad \text{for } f \geq f_p \end{aligned} \quad (5)$$

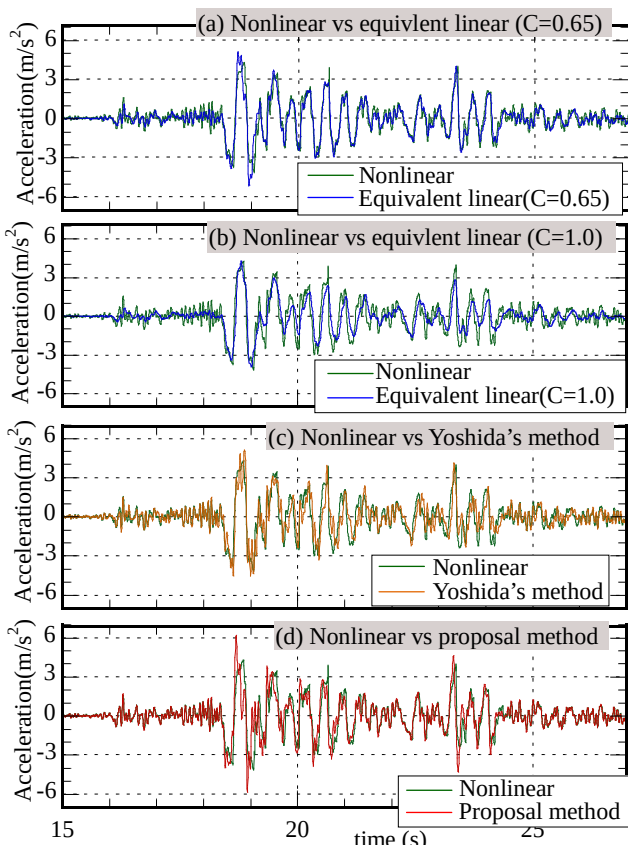


図 2 地表面加速度時刻歴の比較

これらの方法の適用性を従来の等価線形法（有効ひずみ一定, $C=0.65$ ）とともに、逐次非線形解析による地震応答解析結果を正解として比較した。検討に用いた地盤は、KiK-net 観測地点である鳥取県日野町地盤の G.L.-0m～-20m である。入力地震波は G.L.-100m の観測波から設定した。動的変形特性は $\gamma_{0.5}=0.1\%$ とした双曲線モデルを用いた。

地表面加速度時刻歴を比較する (図 2)。(1) $C=0.65$ とした等価線形法は、主要振動部分の波形の精度が悪い。(2) $C=1.0$ の場合は、主要振動部分は精度が良いが、その他の波形の精度が悪い。(3) 吉田らの方法は高振動数成分をとらえているが、(1) よりも全体的に精度がいいとはいえない。(4) $1/\omega^2$ に比例する方法は小～中振幅の波形の精度が良いが、主要振動の波形の精度が悪い。

5. まとめ

地盤の非線形性が強くなる場合、等価線形法による応答加速度の高振動数成分が過小評価される問題があり、解決法として振動数に依存した剛性・減衰を用いる方法が提案されている。これらのうち振動数毎の有効ひずみに対する剛性・減衰による方法は、時刻歴応答を不自然にひずませる。これに対して振動数に対してなめらかな関数で有効ひずみを低減させた剛性・減衰による方法は、時刻歴の不自然さを押さえ、高振動数領域の精度も向上させることができる。本稿ではなめらかな関数による応答の精度を検討した。

参考文献

- 1) 杉戸真太, 合田尚義, 増田民夫: 振動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/III-27, pp.49-58, 1994.6
- 2) 吉田望, 小林悟史, 三浦均也: 有効ひずみの周波数依存性を考慮した等価線形解析手法の改良, 第 34 回地盤工学研究発表会, pp.19-20, 1999.
- 3) 伊藤貴晴, 東畑郁生: 周波数特性を考慮した等価線形解析手法の提案と検討, 土木学会第 65 回年次学術講演会, III-353, pp.705-706, 2010.
- 4) 塩見, 藤原: 振動数ごと等価線形法に関する考察, 地盤工学会誌 Vol60 No1 Ser648, pp.34-35, 2012.