

等価線形化法による逆方向地震応答解析について

(株)アライズソリューション 正会員 吉田 隆千代

1. はじめに

等価線形化による地盤の一次元地震応答解析法(以下, 等価線形化法とよぶ)は, 地盤の材料非線形性を簡便に評価できることから実務面で広く用いられてきた。

この方法による解析プログラムは1972年に発表されたSHAKEが嚆矢であり数多くの実績がある。しかしながら, 実用性に優れたSHAKEにも欠点がある。すなわち, 基盤から上向きに解析を行う際, 地盤のせん断ひずみが大きい場合には高周波成分に大きな減衰が付加され, 高周波域の応答が過小評価される。また, 地表から地中に向って逆方向解析を行うときには高周波成分が過大になり, しばしば発散する。

杉戸ら¹⁾(プログラム名「FDEL」)は, SHAKEの欠点の修正するために, 周波数ごとに有効せん断ひずみを与える方法を提案した。筆者²⁾は, 等価減衰定数を周波数で除すことで等価線形化法の欠点が改善できることを示した(以下, 提案法とよぶ)。本稿では, SHAKE, FDEL, および提案法を用いて逆方向地震応答解析への適用性を検討した。

2. 提案法の概要

いま, 基盤の上に表層地盤が載っている場合を考える。基盤における上昇波の振幅を E_2 とし, 表層地盤内の上昇波の振幅を E_1 とすると, 地表が自由表面であることと, 地層の境界で変位とせん断応力が連続する条件から, E_2 に対する E_1 の比の絶対値(増幅比)は次式のようになる。

$$\left| \frac{E_1}{E_2} \right| = \frac{1}{\left| \cos(k_1 H_1) + i\alpha \sin(k_1 H_1) \right|} \quad (1)$$

ここに, k_1 は表層地盤内の波動の波数, H_1 は表層地盤の厚さ, α はインピーダンス比($\alpha = \rho_1 V_1 / \rho_2 V_2$), ρ_1, ρ_2 は土の密度, V_1, V_2 はせん断波速度である。

k_1 を複素剛性 $G^* = G/(1-2ih)$ を用いて表すと次式になる。

$$k_1 = \frac{\omega \sqrt{1-2ih}}{V_1} \quad (2)$$

ここに, ω は円振動数, h は表層地盤の減衰定数である。

(2)を(1)に代入すると増幅比は次式のように与えられる。

$$\left| \frac{E_1}{E_2} \right| = \frac{1}{\left| \cos \left(\sqrt{1-2ih} \frac{\omega H_1}{V_1} \right) + i\alpha \sin \left(\sqrt{1-2ih} \frac{\omega H_1}{V_1} \right) \right|} \quad (3)$$

$\alpha=0.1$, $H_1=25\text{m}$, $V_1=50\text{m/s}$ として, 減衰定数 h を0から0.5まで変化させたときの増幅比を図1に示す。

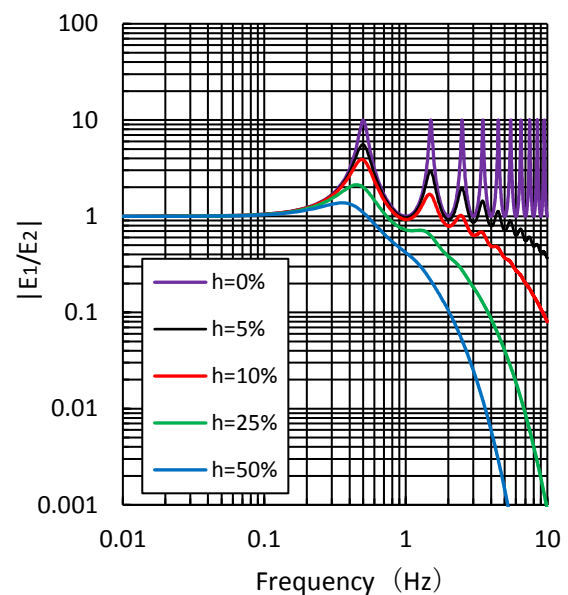


図1 増幅比に及ぼす減衰定数の影響

図1を見ると, 減衰定数が大きくなるにつれて高周波数成分が著しく減少する傾向が認められ, 減衰の周波数依存性が示唆される。ここで, 減衰の周波数依存性を調べるために(3)を虚数が含まれない形に変換すると次式が得られる。

$$\left| \frac{E_1}{E_2} \right| = \frac{1}{\sqrt{\cosh^2 y (\cos^2 x + \alpha^2 \sin^2 x) + \sinh^2 y (\alpha^2 \cos^2 x + \sin^2 x) + \alpha \sinh(2y)}} \quad (4)$$

ここに,

$$x = \sqrt{\frac{1+\sqrt{1+4h^2}}{2}} \frac{\omega H_1}{V_1} \quad y = \sqrt{\frac{-1+\sqrt{1+4h^2}}{2}} \frac{\omega H_1}{V_1} \quad (5)$$

キーワード : 等価線形化 逆方向解析 材料非線形 SHAKE FDEL 周波数比例減衰

連絡先 : 〒730-0833 広島市中区江波本町4番22号 (株)アライズソリューション Tel (082) 293-1231 FAX (082) 292-0752

$h^2 \ll 1.0$ の場合は $\sqrt{1+4h^2} \doteq 1+2h^2$ が成立し(4)は次のようになる。

$$\left| \frac{E_1}{E_2} \right| = \frac{1}{\sqrt{\cosh^2 \frac{h\omega H_1}{V_1} \left(\cos^2 \frac{\sqrt{1+h^2}\omega H_1}{V_1} + \alpha^2 \sin^2 \frac{\sqrt{1+h^2}\omega H_1}{V_1} \right) + \sinh^2 \frac{h\omega H_1}{V_1} \left(\alpha^2 \cos^2 \frac{\sqrt{1+h^2}\omega H_1}{V_1} + \sin^2 \frac{\sqrt{1+h^2}\omega H_1}{V_1} \right) + \alpha \sinh \frac{2h\omega H_1}{V_1}}} \quad (6)$$

(6)中の双曲線関数が減衰に寄与することから，等価線形化法は周波数比例減衰系の解析になっていることがわかる。したがって，従来より指摘されてきた等価線形化法の欠点は等価減衰定数を周波数で除すことによって改善できる。

3. 強震観測データを用いた逆方向地震応答解析比較

KiK-net の観測網は全国約 700 箇所に観測点を有している。各観測施設には観測用の井戸が掘削されており，地表と地中（-100m）の双方に強震計が設置され，鉛直アレーを構成している。ここでは，2003 年十勝沖地震（M8.0）の際に KiK-net 豊頃（TKCH07）で得られた地震波を用いて逆方向解析を行い，各解析手法の精度を比較した。土質データは（国研）防災科学技術研究所 HP に掲載されているものを用い，地盤材料の非線形特性は旧建設省土木研究所の実験式を使用した。

図 2 に，地表観測波（上），地中観測波（中），提案法による解析結果（下）を示す。なお，SHAKE, FDEL による解析は発散し，解が得られなかった。

地中観測波と提案法による解析結果を比較すると，最大加速度，位相ともに良好な対応を示しており，提案法は逆方向地震応答解析に適用できることがわかる。

4. まとめ

等価線形化法の方地震応答解析への適用性を検討した。KiK-net 豊頃（TKCH07）で観測された地震波を用いて逆方向解析を行い，提案法の妥当性を確認した。

謝辞

KiK-net 地震観測記録および土質データについては国立研究開発法人防災科学技術研究所のホームページ（<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>）より入手し，使用させていただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 杉戸真太，合田尚義，増田民夫：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/III-27，pp.49-58，1994.6
- 2) 吉田隆千代：等価線形化による地盤の一次元地震応答解析法の改良，土木学会中国支部第 68 回研究発表会，II-16，pp.97-98，2016

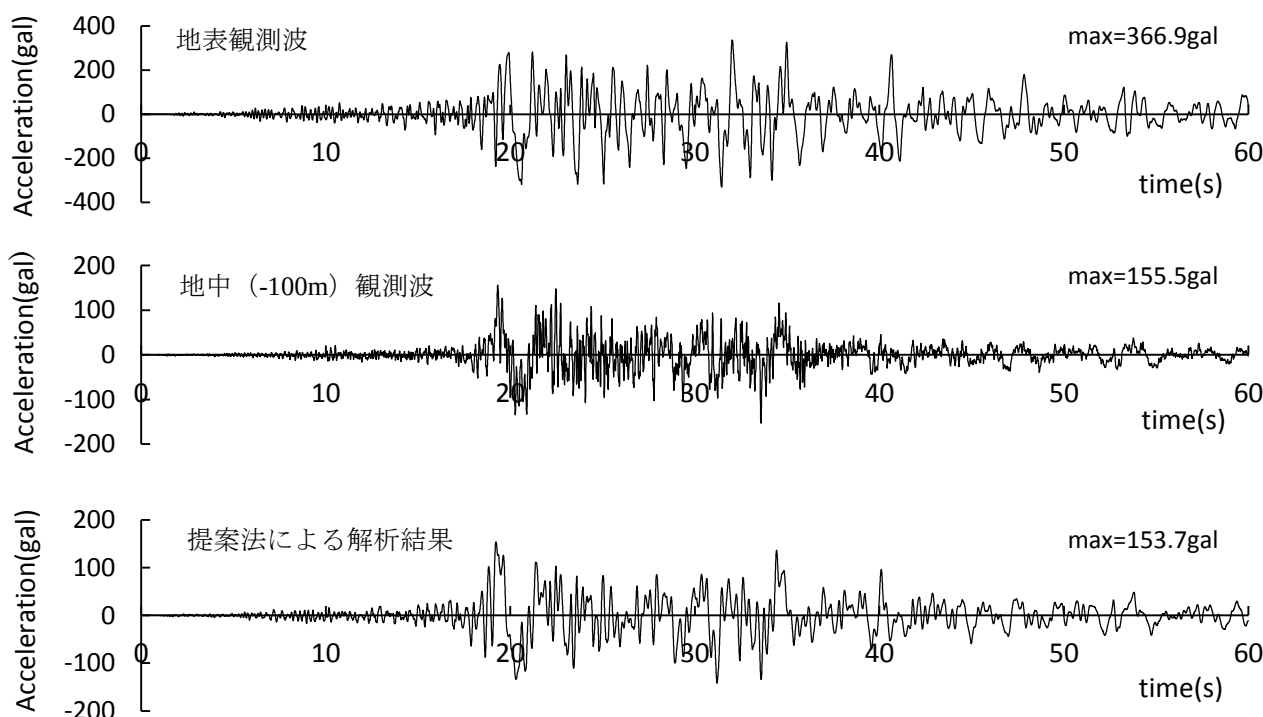


図 2 地震波の比較