

S 波速度が連続的に変化する地盤の地震動増幅特性

ニュージェック 正会員 ○八木 悟 正会員 山田 雅行 非会員 羽田 浩二
港空研 正会員 野津 厚 国総研 正会員 福永 勇介 港空研 正会員 長坂 陽介

1. はじめに

地表面の地震動を詳細に予測する方法としては、工学的基盤で設定された地震動に対し、検討地点の地盤情報を入力条件とした重複反射法(等価線形化法)¹⁾による地震応答解析が行われる。一般的に、地震応答解析では、地層を幾つかの不連続な地層として、階段状に分割してモデル化されているが、沖積地盤の S 波速度は、拘束圧に依存し、深さ方向に連続的に変化する事が知られている²⁾。せん断弾性係数 G としても、拘束圧依存を考慮した換算式が示されている³⁾⁴⁾⁵⁾。N 値に関しても液状化判定に関する指針類^{例えば6)}には拘束圧依存を考慮した補正 N 値が示されている。地震動が工学的基盤から入射した場合を想定すると、S 波速度が階段状に変化するコントラストのある地盤では、そこで重複反射が起きて特定の周波数の地震動が増幅されるが、コントラストのない地盤では特定の周波数で地震動が増幅されるような現象は起きにくいのではないかと考えられる。そこで、著者らは、S 波速度が連続的に変化する地盤と階段状に変化する地盤における地表面での地震動増幅特性の違いを把握するため、線形弾性体としてモデル化した地盤をもとに重複反射法¹⁾による検討を行った。その際、解析解では考慮しにくい減衰定数の影響も考慮した。

2. S 波速度が連続的に変化する地盤の伝達関数

(1)解析解の紹介

S 波速度が連続的に変化する地盤の伝達関数については、東畑他の委員会報告⁷⁾において、せん断弾性係数 G が次式のように深さ z の連続関数である場合の伝達関数の解析解が示されている。

$$G = A(z + z_0)^n \quad (1)$$

ここで、 Az_0^n が、地表 $z=0$ でのせん断弾性係数 G を与える。深さ z 方向のせん断弾性係数 G の増加を指数 n が表しているが、式(1)は、有効上載圧による拘束圧依存性のほかに、土質の変化、年代、シキソトロピーの影響も含まれたものとなっている。なお、解析解の誘導に関しては地盤の減衰定数 h は考慮されていない。

(2)数値解による解析解の再現と検証

著者らは、実務で用いられる地盤を階段状に分割した重複反射法¹⁾によって、解析解の再現を行った。深さ z を変数とする連続関数のせん断弾性係数 G は、層厚 dh を十分に細かく設定することで再現している。ここで、層厚 dh は $dh=0.01\text{m}$ とし、約 3000 層(30m)をモデル化した。数値解による検証結果の一例を図-1 に示す。解析解の図示は省略するが、層厚 dh を細かくした数値解によって、解析解を再現できることを確認した。

(3)本研究の計算例

港湾技術研究所報告³⁾⁴⁾によると、S 波速度の拘束圧依存として、次式が示されている。

$$V_s = V_{s0}(\sigma'_v / \sigma'_{v0})^B \quad (2)$$

ここで、 V_{s0} と V_s は施工前後の S 波速度、 σ'_v と σ'_{v0} は施工前後の有効上載圧、 B は指数で、砂質土で 0.25、粘性土で 0.50 である。S 波速度とせん断弾性係数 G の関係は、 $G = \rho V_s^2$ で表されるため、せん断弾性係数 G は、砂質土では有効上載圧の 0.5 乗に比例し、粘性土では 1 乗に比例することになる。よって、基本的な計算条件は委員会報告⁷⁾と同様に設定するが、指数 n は、砂質土を想定した

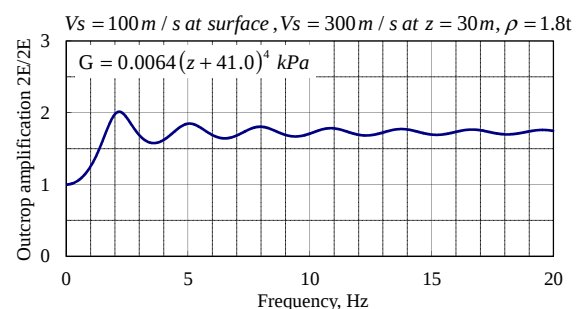


図-1 数値解による解析解⁷⁾の再現計算の一例

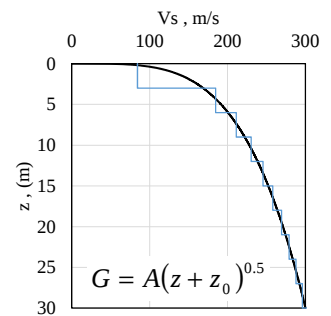
キーワード S 波速度が連続的に変化する地盤、地震応答解析、重複反射法、伝達関数、増幅特性、地震動
連絡先 〒531-0074 大阪市北区本庄東 2 丁目 3 番 20 号 (株)ニュージェック 技術研究チーム TEL 06-6374-4744

0.5 と、粘性土を想定した 1.0 を設定する．この地盤情報をもとに S 波速度が連続的に変化する場合と階段状に変化する場合の伝達関数を求める．本研究で設定した地盤構造を図-2 に示す．さらに、解析解では考慮することが困難と考えられる地盤の減衰定数 h についても、数値解では容易に設定することが可能であるため、一般的に用いられる地盤の減衰定数 $h=0.02$ を考慮する場合としない場合についても検討を行った．

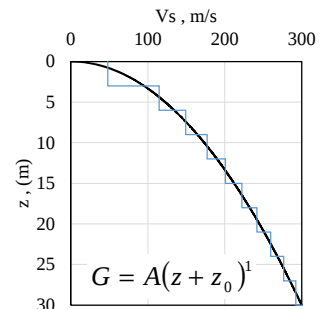
3. 伝達関数の比較

S 波速度が連続的に変化する地盤と階段状に変化する地盤の伝達関数(地表面 $2E/\text{工学的基盤 } 2E$)の比較を図-3 に示す．図-3 より、粘性土(指数 $n=1.0$)の S 波速度が連続的に変化する伝達関数は、周波数 0Hz において増幅率は 1.0 になり、周波数の増加とともに増幅率も滑らかに増加しているが、階段状に変化する地盤は、特定の周波数 3.5Hz 付近において増幅率がピーク値を示した後、8Hz 付近で大きく減少している．砂質土(指数 $n=0.5$)の伝達関数も、粘性土(指数 $n=1.0$)と同様の傾向を示しているが、その傾向は粘性土(指数 $n=1.0$)よりも高周波数側にシフトしている．また、地盤の減衰定数は、周波数に比例した増幅率の低減効果として影響している．

本研究で設定した地盤条件では、工学的に有意義な低周波数帯では S 波速度が連続的に変化する地盤の増幅率よりも、階段状に変化する地盤の増幅率の方が大きいことがわかる．また、S 波速度が連続的に変化する地盤の増幅率の特徴としては、階段状に変化する地盤のピーク周波数に対し、低周波数側では小さくなり、高周波数側では大きくなる傾向を示している．

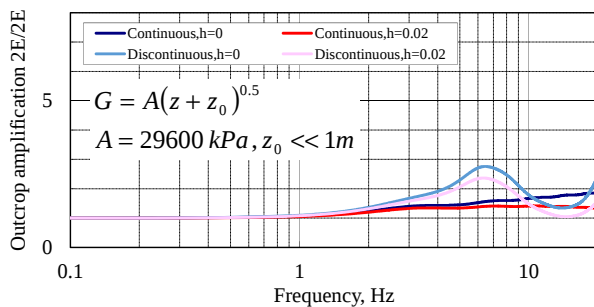


(a) 砂質土(指数 $n=0.5$)

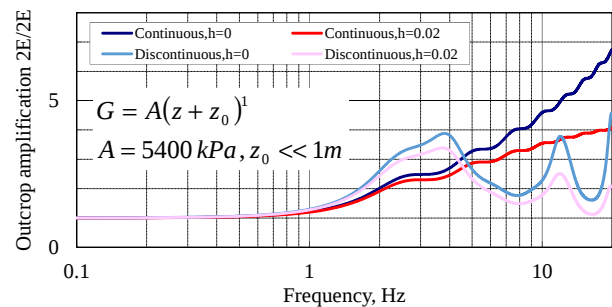


(b) 粘性土(指数 $n=1.0$)

図-2 地盤構造の比較



(a) 砂質土(指数 $n=0.5$)



(b) 粘性土(指数 $n=1.0$)

図-3 S 波速度が連続的に変化する地盤と階段状に変化する地盤の伝達関数(地表面 $2E/\text{工学的基盤 } 2E$)の比較

4. おわりに

本研究の結論が正しいとすれば、最表層の S 波速度が同じでも、S 波速度が不連続に変化する地盤より、S 波速度が連続的に変化する地盤の方が構造物被害に影響する帯域での地震動増幅は小さいことになる．例えば、家を建てる場合、S 波速度が連続的に変化する地盤を探し出し、そこに優先的に建てた方が良いということにもつながっていく．このように、本研究には実用上の価値がかなりあると考えている．

今後は、最表層と工学的基盤の S 波速度を変化させた場合や、地盤が深い場合の伝達関数に関する検討を行い、地表面の地震動増幅特性を評価する上での留意点を整理したいと考えている．

参考文献

- 1) 大崎順彦(1994)：新・地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版会．
- 2) 吉田望(2010)：地盤の地震応答解析、鹿島出版会．
- 3) 善功企, 山崎浩之, 梅原靖文(1987)：地震応答解析のための土の動的特性に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, Vol.26, No.1, pp.71-113.
- 4) 上部達生, 土田肇, 倉田栄一(1983)：大型混成式防波堤の強震記録に基づく水一構造物連成系の地震応答解析, 港湾技術研究所報告, Vol.22, No.2, p.312.
- 5) 地盤の動的解析—基礎理論から応用まで—編集委員会(2007)：地盤工学・基礎理論シリーズ 2, 地盤工学会．
- 6) 日本道路協会(2012)：道路橋示方書, 耐震設計編 V．
- 7) 東畑郁生他(1994)：軟弱地盤における地震動増幅と被害に関する研究委員会, シンポジウム発表論文集．