

地盤と入力地震動の周期特性を考慮した表層地盤の増幅率の評価

ジェイアール東日本コンサルタンツ 正会員 ○野上 雄太
 鉄道総合技術研究所 正会員 坂井 公俊
 鉄道総合技術研究所 正会員 室野 剛隆

1. はじめに

地震時の表層地盤の挙動を評価することは、耐震工学上非常に重要である。被害予測のように、評価対象範囲が広い場合や地表面の最大加速度(速度)などの最大値が必要な場合¹⁾では、増幅率を用いて地表の地震動強さを評価することも有用な手段である。既往の研究では、地形の分類や地盤の周期に応じた増幅率の評価式が数多く提案されている(例えば²⁾。しかしながら、同じ地盤条件、同じ最大値を持つ地震動であっても、入力地震動の周期特性が異なれば地表面での応答が異なることは明白である。そこで、本研究では、地盤の周期特性だけでなく入力地震動の周期特性も考慮した増幅率の評価を試みることを目的としている。

2. 検討方法

本研究では、地盤の1次元非線形時刻歴応答解析を実施し、地表面の最大応答加速度PGA(または最大応答速度PGV)を基盤の入力地震波の最大加速度PBA(または最大速度PBV)で除した増幅率として定義した。

(1) 入力地震波条件: 様々な周期特性をもつ地震波を、10~2000gal(1~200kine)に振幅調整して工学的基盤相当に2E波として入力した。用いた地震波の諸元を表1に示す。表には被害予測に用いることを念頭に、式(1)より求めた入力波の卓越周期 T_b も併記している¹⁾。

$$T_b = 2\pi \cdot (PBV/PBA) \quad (1)$$

ここに、 T_b は入力波の卓越周期[s]、PBAは入力波の最大加速度[gal]、PBVは入力波の最大速度[kine]である。

(2) 地盤条件: 周期 T_g が0.1~1.7sの幅広い周期を有する60地盤を対象とした³⁾。

(3) 解析条件: 土の構成則には、著者らが提案しているGHE-Sモデル⁴⁾を用いた。粘性減衰は福島ら⁵⁾による平均Q値を参考にしてパラメータを決定したレイリー減衰を用いた。

3. 解析結果

検討結果の例として、PBV=10kineのときの速度増幅率 Z_v -地盤周期 T_g 関係を図1に示す。この図は、代表的な周期比 T_g/T_b 毎に分けてプロットしている。これより、周期 T_g が大きくなると増幅率 Z_v は若干小さくなる傾向にあるが、明確な違いは見られない。一方、周期比 T_g/T_b の違いで増幅率 Z_v は異なることが分かる。よ

表1 入力地震波諸元

地震名	記録数	卓越周期 T_b [s]
釧路沖地震(1993)	1	0.52
兵庫県南部地震(1995)	1	0.71
鳥取県西部地震(2000)	1	0.80
三陸南地震(2003)	1	0.29
十勝沖地震(2003)	1	0.42
新潟県中越地震(2004)	2	0.60, 0.54
能登半島地震(2007)	1	0.29
岩手・宮城内陸地震(2008)	1	0.37
岩手県沿岸北部の地震(2008)	1	0.16

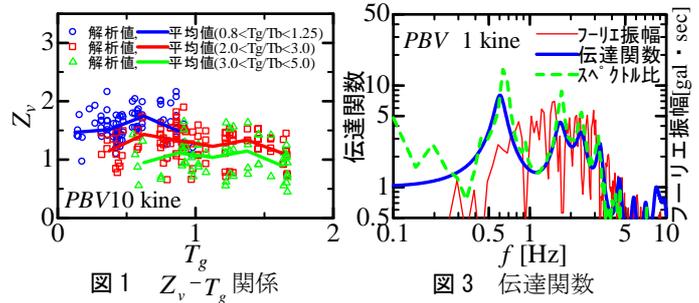


図1 Z_v - T_g 関係

図3 伝達関数

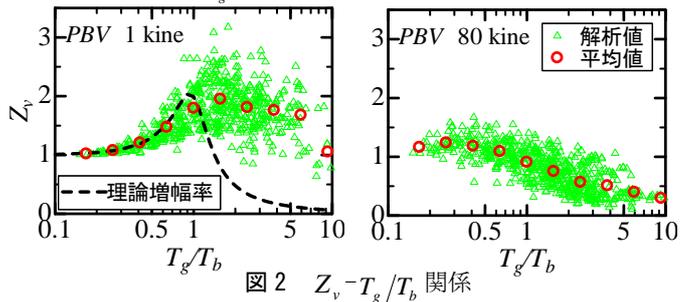


図2 Z_v - T_g/T_b 関係

って、地盤と入力波の両者の周期特性を考慮するとより精度よく増幅率を評価できると考えられる。そこで、速度増幅率 Z_v -周期比 T_g/T_b 関係の例を図2に示す。PBV=1kineの図には、参考として1質点系の調和振動の理論増幅率も併記している。減衰は理論増幅率が解析結果に合うように設定した。様々な地盤、入力地震波に対する解析結果をプロットしているためばらつきはある。平均値に着目すると、入力レベルが小さいPBV=1kineのとき、周期比が0に近づくにつれて増幅率は1.0に収束し、周期比1~2にピークが認められる。PBV=1kineの入力は、ほぼ線形挙動とみなしてよいと考えられるものの、ピークを示す共振周期比が1.0ではない。また、周期比が1.0以上の領域では1質点系の調和振動の理論増幅率よりも値が大きい傾向にある。ここで、周期比1.0以上となるある地盤の理論伝達関数、この地盤にある地震波を入力した際の地表と入力波のフーリエスペクトル比、入力波のフーリエスペクト

キーワード 表層地盤, 増幅率, 周期比

連絡先 〒171-0021 東京都豊島区西池袋 1-11-1 メトロポリタンプラザ 18F TEL 03-5396-7247

ルを重ね描いた例を図3に示す。まず、理論伝達関数とフーリエスペクトル比を見ると概ね4次モードまで一致しており、1kineの入力では、地盤はほぼ線形の挙動をしていることが確認できる。次に、伝達関数と入力波のフーリエ振幅スペクトルを比較すると、地盤の1次固有振動数よりも高い振動数帯域に入力波の卓越振動数帯域があり、その振動数帯域も広い。その結果、 $T_g/T_b > 1$ の広い範囲で増幅率が大きくなったと考えられる。なお、本研究では、地盤の卓越周期は1次固有振動数を用いて整理している。一方、入力レベルが大きい $PBV=80kine$ のとき、増幅率のピークは左下へシフトする。これは、地盤が塑性化することによって、長周期化して共振する周期比が小さくなること、同時に地震動が減衰してピークが下がるためである。

4. 増幅率の推定式の提案

3章より、増幅率と周期比の関係は高次モードの影響を含んでいるものの、全体的な形状は1自由度系の調和振動の理論増幅率に似ている。そこで、1自由度系の調和振動の増幅率の理論式を用いて増幅率の評価を試みることにした。本研究では、式(2)に示すように、周期比 T_g/T_b の項に、高次モードの影響による共振周期比のずれ、地盤の塑性化による周期比の変化を係数 α 、 β として考慮し、等価な減衰 h を設定した。

$$Z_v = \frac{1 + 4h^2 \{\alpha(T_g/T_b)^\beta\}^2}{\sqrt{[1 - \{\alpha(T_g/T_b)^\beta\}^2]^2 + 4h^2 \{\alpha(T_g/T_b)^\beta\}^2}} \quad (2)$$

ここに、 Z_v は速度増幅率、 T_g は地盤の卓越周期[s]、 T_b は入力波の卓越周期[s]、 α 、 β は係数、 h は地盤全体の減衰を示す。解析結果に式(2)をフィッティングした例を図4に示す。良好に平均増幅率を評価できていると考えられる。ここで、係数 α 、 β 及び等価な減衰 h は図5に示すように入力レベル PBV に依存している。そのため、最終的には、各パラメータを PBV に依存するように式(3)によりフィッティングした。

$$\begin{aligned} \alpha &= c_1 \cdot PBV + c_2 \\ \beta &= c_3 \cdot \{1 - \exp(-c_4 \cdot PBV)\} + c_5 \\ h &= c_6 \cdot PBV^{c_7} \end{aligned} \quad (3)$$

得られたパラメータの一覧表を表2に、増幅率 Z_v -周期比 T_g/T_b 関係の推定結果例を図6に示す。いずれも平均的な増幅率を概ね評価できていることが分かる。速度と同様にして加速度についても、増幅率 Z_A のモデル化を行なった。詳細は省略するが、 α 、 β 、 h を式(4)により設定したパラメータ一覧を表3に、増幅率 Z_A -周期比 T_g/T_b 関係の推定結果例を図7に示す。

$$\begin{aligned} \alpha &= c_1 \cdot PBA^2 + c_2 \cdot PBA + c_3 \\ \beta &= c_4 \cdot \{1 - \exp(-c_5 \cdot PBA)\} + c_6 \\ h &= c_7 \cdot PBA + c_8 \end{aligned} \quad (4)$$

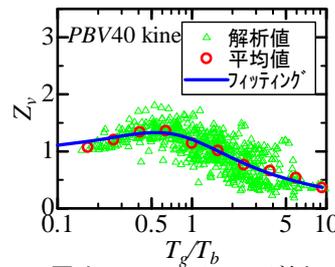


図4 フィッティング例

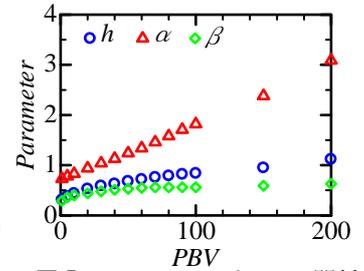


図5 h, alpha, betaとPBV関係

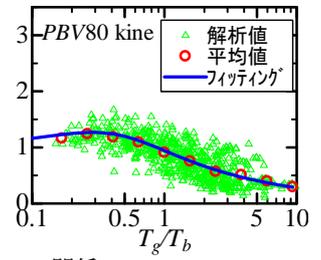
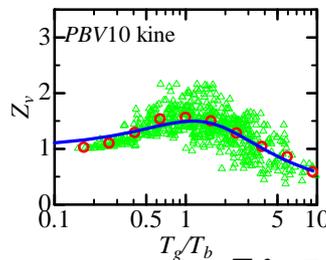


図6 Zv-Tg/Tb関係

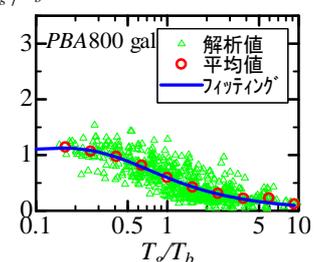
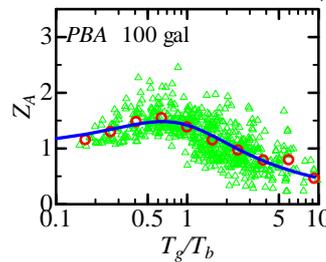


図7 ZA-Tg/Tb関係

表2 式(3)のパラメータ

c1	c2	c3	c4
0.01	0.72	0.26	0.07
c5	c6	c7	
0.27	0.31	0.19	

表3 式(4)のパラメータ

c1	c2	c3	c4
0.0000025	0.0011	0.88	0.74
c5	c6	c7	c8
0.003	0.19	0.0009	0.4

5. まとめ

本研究では、地盤及び入力波の両者の周期特性を考慮した表層地盤の増幅率を評価した。その結果、1自由度系における調和振動の理論増幅率に、高次モードによる共振周期比のずれ、地盤の塑性化の影響を考慮することで良好に増幅率を推定できる式を提案した。今後は、この評価式の妥当性の検討や、土質による違いを検討するなど、深度化を図っていく。

参考文献

1) 野上雄太, 室野剛隆, 宮本岳史: 地震時の構造物および車両走行性に関する広域な被害推定法, 第63回土木学会年次学術講演会, 2008. 2) 末富岩雄: 強震時における地動分布特性の即時推定に関する研究, 佐藤工業技術研究所報, 別冊, No.1, 2000. 3) 坂井公俊, 室野剛隆, 桐生郷史: 地表面での距離減衰式から基盤での地震動を推定する簡易な手法, 第65回土木学会年次学術講演会, 2010. 4) 野上雄太, 室野剛隆: S字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定, 第30回地震工学研究発表会, 2-0014, 2009. 5) 福島美光, 翠川三郎: 周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的なQ⁻¹値とそれに基づく地盤増幅率の評価, 日本建築学会構造系論文集, vol.460, 1994.