

変形特性試験法の違いが表層地盤の地震時挙動評価に与える影響に関する基礎的検討

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○井澤 淳, 室野剛隆

1. はじめに

筆者らは、鉄道構造物の耐震設計¹⁾において逐次非線形動的解析による表層地盤の挙動評価を行う観点から、適切な地盤の変形特性試験法と液状化も含めた表層地盤の挙動評価法の構築を検討している²⁾³⁾。本稿では、従来の試験法と筆者らの提案する試験法を用いて得られた地盤の変形特性を用いた地盤応答解析を実施し、試験法の違いが液状化判定も含めた表層地盤の地震時挙動評価に与える影響の検討を行った。

2. 検討概要

筆者らの提案法では、従来の11回繰返しのステージ載荷を廃止し、ひずみ制御の1回繰返し段階載荷試験と一定ひずみ繰返し試験を実施することで、水圧の影響を出来るだけ排除した変形特性(マスターカーブ)を求める。また、一定ひずみ繰返し試験を実施することで、風間ら⁴⁾の提案する累積損失エネルギーを用いた液状化判定も実施可能である。豊浦砂(相対密度60%)を用いた従来法と提案法から得られた変形特性の例を図1に示すが、提案法では従来法と比較してせん断剛性を中ひずみレベルでは低めに、大ひずみレベルでは高めに算定する傾向があること、履歴減衰を大きめに算定する傾向があること等を確認している³⁾。本稿では、図2(a)に示す表層地盤をモデルとし、深度5.3mまでの層に2つの試験結果を適用し、変形特性試験法の違いが地盤応答解析に与える影響について検討した。解析では、地盤の非線形性にGHE-Sモデル⁵⁾を用い、試験値を用いる層については図1に実線で示す変形特性を設定し、その他の層についてはGHE-Sモデルの標準パラメータ⁶⁾を適用した。入力地震動は鉄道構造物の耐震設計¹⁾で用いられるスペクトルII地震動(G1地盤)とし、従来法のG- γ 、h- γ 関係を用いたCase1、h- γ 関係のみ提案法の関係を用いたCase2、提案法のG- γ 、h- γ 関係を用いたCase3を実施した。

3. 検討結果

3.1. 表層地盤の挙動

図2(b)に地盤応答解析から得られた最大応答値の分布を示す。試験値を用いた層に着目すると、下部で1%を超える大ひずみ領域まで応答していることが分かる。Case1とCase2はほぼ同等の結果となり、今回の検討のように地震動レベルの大きな地震動を想定した場合、ひずみレベルが大きくなり、履歴減衰が大きく影響しなかったものと考えられる。従来法と比較して大ひずみレベルでの剛性が大きく算定された提案法の結果を用いたCase3では変形が抑制され、応答加速度が大きく算定されている。地表面の最大値で60gal程度の差ではあったが、

図3に示す地表面での加速度応答スペクトルでは、0.5~1.5秒付近で2~3割程度の差が生じる結果となった。

試験値を用いた層の下部(第5層)における加速度、変位、せん断応力、せん断ひずみの時刻歴を図4に示す。大ひ

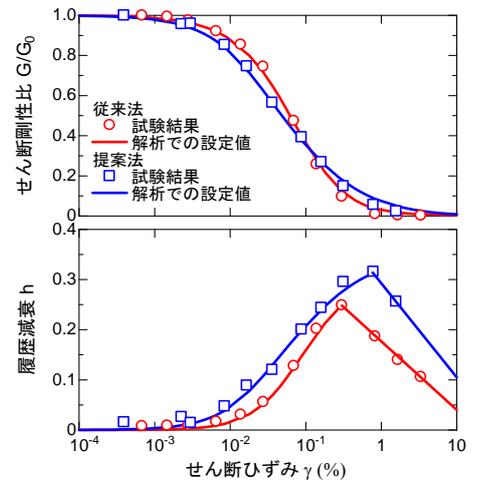
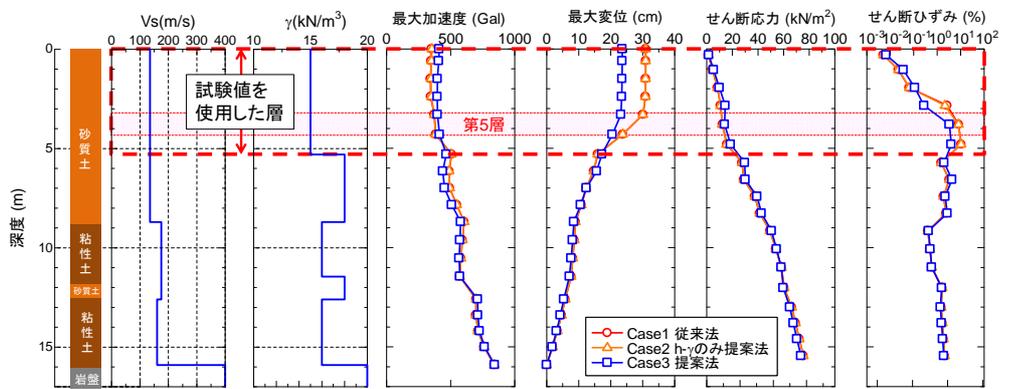


図1 変形特性試験結果



(a) モデル地盤 (b) 最大応答値分布

図2 解析に用いた地盤の概要と最大応答値分布

キーワード 地盤応答解析、変形特性試験、液状化判定
連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 Tel: 042-573-7266

ずみ領域の剛性を小さく評価した従来法の $G-\gamma$ 関係を用いた場合、地震動の主要動が作用する 3.2 秒付近から大きなせん断応力を伝えられていないことが分かる。この時点で発生しているせん断ひずみは 0.08% となっており、ちょうど図 1 に示すように従来法と提案法の $G/G_0-\gamma$ 関係の大小関係が逆転し始める 0.1% 付近に相当する。 $G/G_0-\gamma$ 関係では大ひずみレベルの剛性差は小さく見られるが、例えばせん断ひずみ 0.5% では従来法で $G/G_0=0.0677$ 、提案法で $G/G_0=0.124$ と倍程度異なることから、応答に大きく影響を与える結果となった。一方、中ひずみレベルでは従来法で剛性を大きく評価しているが、今回のような大地震を想定した場合は影響が小さく、L2 地震のような大地震を想定した場合は特に大ひずみレベルの変形特性を適切に評価する必要があることが分かる。

3.2. 液状化判定

図 5 にせん断ひずみ $\gamma=0.1, 0.4, 1.0\%$ で実施した一定ひずみ繰返し試験から得られた正規化累積損失エネルギーと繰返し回数との関係を示す。ひずみレベル依存性が見られるが、今回は安全側に 0.4% の結果を用いて限界正規化累積損失エネルギー $We/\sigma'_c=0.0127$ とし、地盤応答解析から得られた各層のせん断応力-せん断ひずみ関係から得られる正規化累積損失エネルギー W/σ'_c と比較することで液状化判定を実施した。また、地盤応答解析から得られた各層のせん断応力時刻歴を用いて、最大せん断応力比 L と累積損傷度法を適用した液状化強度比 R を算定して従来の液状化判定も実施した。表 1 に結果を示すが、下部 2 層については安全率 0.1 程度で同等の結果となったが、その上部では従来の判定で厳しい判定結果が得られた。両手法とも地盤応答解析結果を用いており、せん断応力、せん断ひずみは上部ほど低減されているが、従来の判定ではせん断応力を有効上載圧で正規化するためせん断応力比 L が低減されていないのに対して、累積損失エネルギーは上部ほど低減されるため、大きな違いが生じる結果となった。

4. まとめ

本稿では、地盤の変形特性試験法の違いが表層地盤の地震時挙動評価に与える影響について、基礎的な検討を実施した。従来法と提案法では地盤応答解析結果に大きな差が見られたが、今後、実際の挙動との整合を検討する必要がある、ハイブリッド地盤応答試験等を実施し、適切な地盤の変形特性試験法を提案していきたい。

参考文献: 1) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 2012. 2) 井澤ら: 非線形動的解析のための地盤の変形特性試験に関する一考察 その 1, 第 50 回地盤工学研究発表会, 2015. 3) 山田ら: 非線形動的解析のための地盤の変形特性試験に関する一考察 その 2, 第 50 回地盤工学研究発表会, 2015. 4) 風間ら: 定ひずみ制御繰返し三軸試験による液状化強度評価の可能性, 土と基礎, 1998. 5) 野上ら: S 字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力~ひずみ関係, 第 12 回日本地震工学シンポジウム, 2006. 6) 野上ら: 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 回土木学会地震工学研究発表会論文集, 2009.

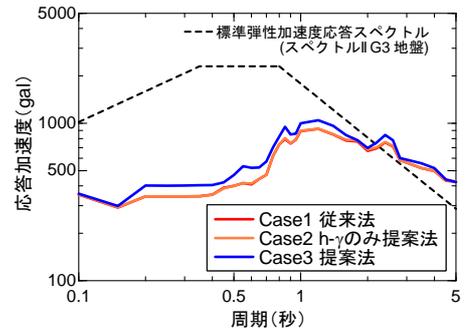


図 3 地表面の弾性加速度応答スペクトル

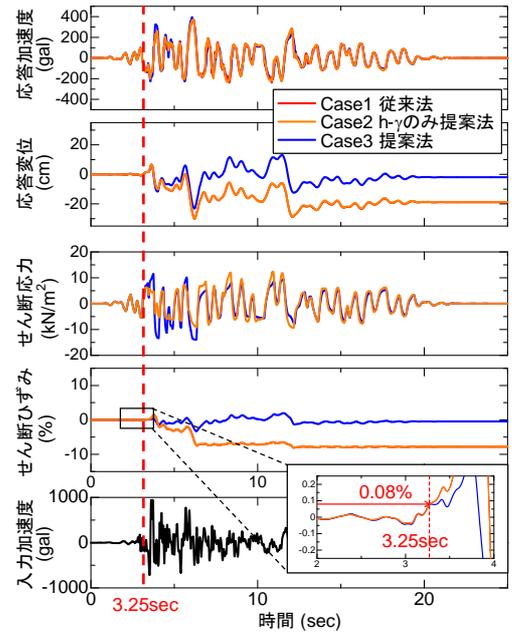


図 4 第 5 層 (深度 4.3-5.3m) の応答時刻歴

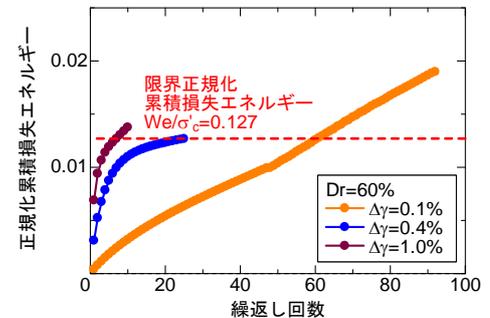


図 5 一定ひずみ繰返しせん断試験から得られた繰返し回数と正規化累積損失エネルギーの関係

表 1 液状化判定結果の比較

下面深度 (m)	有効上載圧 (kPa)	最大せん断応力 (kPa)	最大せん断ひずみ (%)	提案法 (エネルギー法)			従来法 (FL 法)		
				W/σ'_c	$F_s (=We/W)$	R	L	F_L	
0.6	1.50	1.59	0.0067	0.000128	99.2	0.0900	1.06	0.0849	
1.5	5.25	5.55	0.0376	0.000939	13.5	0.0900	1.06	0.0852	
2.4	9.75	10.2	0.114	0.00310	4.09	0.0900	1.05	0.0860	
3.3	14.3	14.7	0.275	0.00809	1.57	0.0900	1.03	0.0872	
4.3	20.5	14.3	3.42	0.118	0.107	0.0890	0.695	0.128	
5.3	28.5	19.0	4.08	0.137	0.0924	0.0890	0.668	0.133	

※ 赤字: 液状化の発生する可能性のある層