地盤の動的解析のための変形特性試験方法の提案と妥当性検証

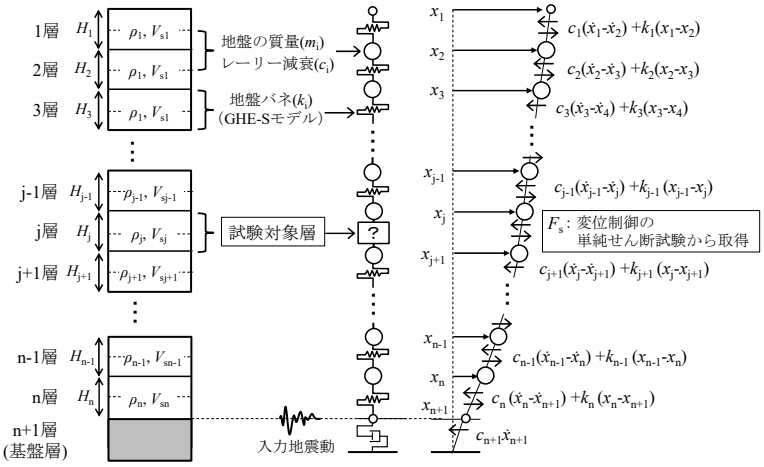
（公財）鉄道総合技術研究所　　正会員　○井澤　淳，豊岡亮洋，鈴木　聡，小島謙一

1. はじめに

筆者らは，鉄道構造物の耐震設計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、提案している[1)]。本稿では，従来法と提案法から得られた変形特性を用いた地盤応答解析結果とハイブリッド地盤応答試験を実施し，提案法の有効性を検討した。

2. 検討概要

ハイブリッド地盤応答試験は、オンライン試験や仮動的実験とも呼ばれ、これまでにもいくつかの適用事例がある[例えば2)]。筆者らは、構造物の耐震設計における地盤挙動評価に使用することを目的としており、主に取り扱いの困難な特殊土や超軟弱地盤、液状化地盤を対象としている。そのため、サンプリング試料をできる限り容易に供試体として作成ができるよう、拘束圧載荷型単純せん断試験装置[3)]を用いたハイブリッド試験装置を構築した。ハイブリッド試験の概念図を図 1 に示す。本試験では、対象地盤をせん断ばね~質点系でモデル化し、対象の試験層に変位制御の単純せん断試験を、他の層を GHE-S モデル[4)]を適用する。すなわち、単純せん断試験から得られる供試体の反力 Fs を数値解析モデルに取り込んで応答解析を行い、応答解析から得られる対象層の変位を次のステップで単純せん断試験供試体に作用させるスキームを解析時間にわたって繰り返し計算する。なお、減衰マトリクスはレーリー減衰で設定し、運動方程式の求解は Operator Splitting 法を用いた。



(a)層分割　　b)バネ-質点系　(c)力の釣り合いｓ

図1 ハイブリッド地盤応答試験の概念図

3. 変形特性試験の妥当性評価

3.1 GHE-S モデルによるモデル化

図 2 に Dr=60%の豊浦砂について、従来法と提案法の変形特性試験から得られた G/G_{max}~γ 関係と h~γ 関係を示す[5)]。従来法では各載荷ステージの 10 回繰り返しにより中ひずみ領域での硬化や大ひずみ領域での剛性の過小評価、履歴減衰の過小評価など傾向が見られる。これらの変形を GHE-S モデルでフィッティングした結果を**図 3** に示す。これらは G/G_{max}~γ 関係を整合させた後、大ひずみ領域の τ~γ 関係をトレースする設定した。従来法から得られた変形特性については、大ひずみ領域でのステージ載荷中に剛性が顕著に低下するため τ~γ 関係をうまく再現できていなが、その他のケースでは GHE-S モデルにより変形特性を精度よく表現できることが分かる。

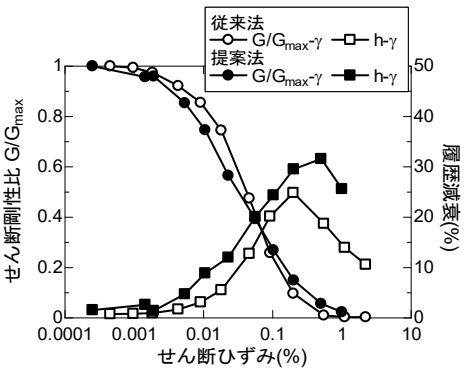


図 2 異なる試験法から得られた変形特性（豊浦砂 Dr=60%）

3.2 応答解析

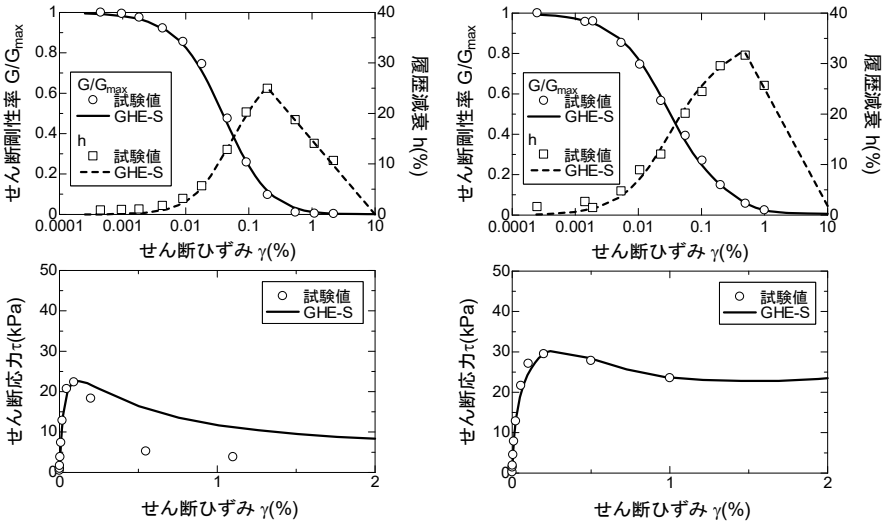
図 4(a) に示す地盤の~4m 層を豊浦砂 Dr=60%とした地盤について、**図 3** に示すそれぞれの変形特性を用いた地盤応答解析と、ハイブリッド試験を実施し比較した。対象以外の層についても GHE-S モデルを用い、標準パラメータ[6)]を適用した。レーリー減衰は福島・翠川[7)]を参考に地盤の固有周期から設定した。基盤には γ=2.0g/cm3、Vs=400m/s 相当の粘

キーワード　脈状改良，液状化対策，施工法
連絡先　　〒185-8540　東京都国分寺市光町 2-8-38（公財)鉄道総合技術研究所　TEL:042-573-7394

性境界を設置し、鉄道標準のスペクトルII地震動（G1地盤）[8]を入力した。

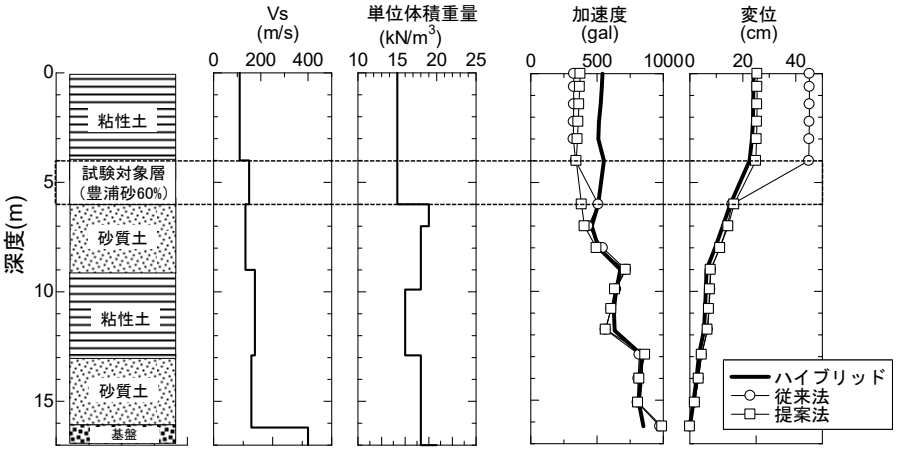
3.3 結果の比較

地盤応答解析とハイブリッド試験から得られた最大値分布の比較を**図4(b)**に、試験対象層の応答時刻歴を**図5**に、地表面の応答加速度スペクトルを**図6**にそれぞれ示す。ハイブリッド試験結果と比較して、従来法のケースで対象層の変位を過大評価していることが分かる。一方で、提案法のケースではハイブリッド試験結果とほぼ一致する変位分布を算定できている。しかし、加速度分布についてはハイブリッド試験の最大加速度応答分布が大きな値を示している。**図5**から分かるように、ハイブリッド試験では6秒付近でサイクリックモビリティによる大きなせん断応力が生じ、この時点で最大加速度を示すが、全応力解析ではこの現象を適切に表現できていないためと考えられる。この応答は短周期となるため、**図6**に示す地表面での加速度応答スペクトルに見られるように、一般的な構造物の固有周期帯である0.5～1.5秒付近の加速度応答には大きな影響を与えないと考えられる。したがって、一般的な構造物の耐震設計においては、提案法を用いて適切な表層地盤挙動を選定可能と考えられる。



(a) 従来法　　(b) 提案法

図3 変形特性の GHE-S モデルでのフィッティング（豊浦砂 Dr=60%）



(a) 対象地盤　　(b) 最大応答値分布

図4 地盤応答解析結果とハイブリッド地盤応答試験結果の比較

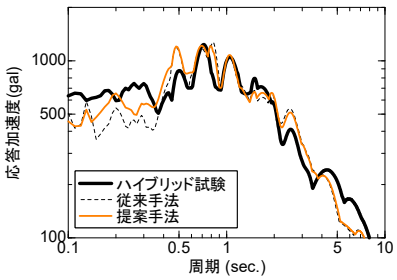


図6 応答加速度スペクトル

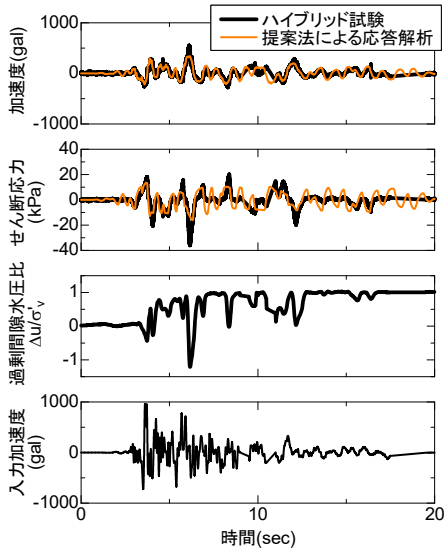


図5 対象層の応答時刻歴の例

4. まとめ

本稿では，ハイブリッド地盤応答試験を実施し，筆者らの提案している変形特性試験法の適用性を検討した。今後、様々な土への適用性や、地震動特性の影響等について検討していく予定である。

謝辞：拘束圧載荷型単純せん断試験装置の作成においては、名城大学の小高教授に多大な助言を頂きました。記して謝意を表します。

文献 1)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. 2)下村ら，エネルギーの釣合に基づく地盤の地震時挙動の評価に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第75巻，第650号，2010. 3)岸ら：単純せん断試験機による再構成豊浦砂の繰返し載荷試験，第62回土木学会年次学術講演会, 2007. 4)室野ら：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. 5)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. 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回地震工学研究発表会, 2009. 7)福島・翠川：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，第460号，1994. 8)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.