

耐震設計における適切な表層地盤応答評価法の構築

鈴木 聡* 井澤 淳**
豊岡 亮洋*** 小島 謙一**

Construction of an Appropriate Response Evaluation Method for the Surface Ground in Seismic Design

Akira SUZUKI Jun IZAWA
Akihiro TOYOOKA Kenichi KOJIMA

In the seismic design of railway structures, it is necessary to properly evaluate the behavior of the surface ground by time history nonlinear dynamic analysis. However, in the case of a special soil layer including the liquefaction ground, it is a problem that the behavior of the surface ground cannot be evaluated appropriately even if the conventional evaluation method based on the deformation characteristics is applied. Therefore, we proposed a method for testing the deformation characteristics of soil and conducted the analysis of the ground response using the master curve calculated by the test method proposed. Next, we devised a hybrid ground response test by which we can evaluate precise response to special soil layers including the liquefaction ground. Finally, we examined the validity of the proposed testing method by comparing the results obtained from it with those of the hybrid ground response test.

キーワード：繰返しせん断試験，地震応答解析，液状化

1. はじめに

鉄道構造物等設計標準 耐震設計（以降，耐震標準）¹⁾では、「耐震設計上注意を要する地盤」として，液状化地盤や特殊土を有する地盤を挙げ，特に注意して表層地盤の挙動を評価するものとしている。特にL2地震のような大地震を想定した場合，強い非線形性を示す地盤の変形特性の影響が大きくなる。このため，時刻歴非線形解析を用いた地盤応答解析により表層地盤の挙動評価を行うことが原則とされており，幅広いひずみレベルの土の変形特性を精度よく表現可能なGHE-Sモデルが提案されている²⁾。しかしながら，モデル化の対象となる土の変形特性について，従来の地盤材料試験では適切に算定できないなどの問題点が指摘^{例えば3)}されており，GHE-Sモデルのような精緻なモデルを用いたとしても，大地震時の挙動を適切に評価できない可能性がある。そこで，地盤の動的解析に用いられる土の変形特性の算出方法における問題点を整理して，それらの問題点を出来るだけ排除した土の変形特性試験方法と，表層地盤評価法を提案した。一方で，破砕性地盤のような特殊土の場合，GHE-Sモデルなどの数値モデルでの表現が困難な場合がある。そこで，対象土層の変形特性の数値モデル化が不要な方法として，ハイブリッド地盤応答試験手法

を構築した。最後に，提案した評価法による結果とハイブリッド地盤応答試験の結果を比較することにより，提案した試験手法の妥当性を検証した。本稿では，これらについて報告する。

2. 従来の土の変形特性試験

2.1 試験方法の概要

地盤応答解析に用いる土の変形特性算出のための従来のステージ載荷試験（以降，従来法）では，一定の応力振幅で11回繰返し載荷を実施し，10サイクル目のせん断応力 τ とせん断ひずみ γ の関係（以降， τ - γ 関係）からせん断剛性と履歴減衰を算出することを1載荷ステージとする。この載荷ステージを小さな応力振幅レベルからスタートさせ，大きなひずみレベルまでの変形特性を求めるまで10ステージ程度実施する。なお，各ステージ後は繰返し載荷により増加した過剰間隙水圧を消散させた（圧密排水させた）後，次の応力振幅ステージに進むこととされている。

2.2 問題点

従来法による土の変形特性試験結果の一例として，豊浦砂を相対密度（以降 D_r ）60%に調整した供試体の G/G_{max} - γ ， h - γ 関係を各ステージせん断前の相対密度と共に図1に示す。また，ステージ6，10における τ - γ 関係と過剰間隙水圧比とせん断ひずみの関係を $(\Delta u/\sigma'_c)$ - γ 関係を載荷履歴とともに図2に示す。これらの結果に

* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室
(現 株式会社複合技術研究所)

** 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室

*** 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

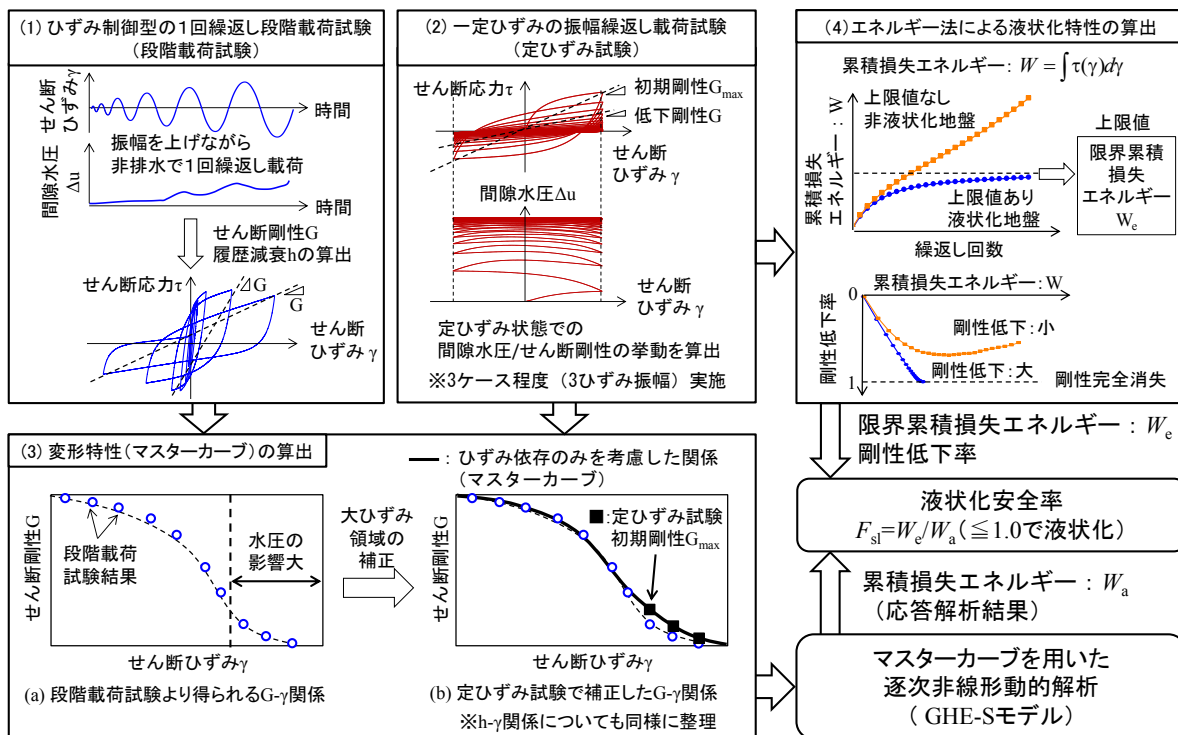


図3 表層地盤の応答評価の手順

3.2.3 変形特性（マスターカーブ）の算出と補正

3.2.1 項, 3.2.2 項の試験結果を用いて, 逐次非線形動的解析のための表層地盤の変形特性の算出と補正を以下に示すとおり行う。

(1) マスターカーブの算出

段階荷重試験の各ひずみレベルの $\tau \sim \gamma$ 関係から $G \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係を求める。ここで, 水圧上昇の影響が小さいと判断できれば, ひずみ依存のみを考慮した変形特性（マスターカーブ）とする。また, このような地盤は液状化に至る可能性も低いと判断できるため, 次の(2)で実施するマスターカーブの補正は省略できる。

(2) マスターカーブの補正

間隙水圧の影響が大きくなるひずみレベル以降で2～3点のひずみ振幅 ($\Delta\gamma$) を選択し, 定ひずみ試験を実施する。定ひずみ試験から求まる初期ループの変形特性を段階荷重試験から得られた $G \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係に反映し, マスターカーブを補正する。

3.2.4 エネルギー法による液状化特性の算出

定ひずみ試験の結果を用いて, 式(1)から累積損失エネルギー (W) を算出する。

$$W = \oint \tau(\gamma) d\gamma \quad (1)$$

繰り返し回数に対して累積損失エネルギーをプロットし, 頭打ちとなる値, すなわち限界累積損失エネルギー (W_e) を求める。一方, 累積損失エネルギーと繰り返し

回数の関係が頭打ちせず単調増加する傾向であれば, 液状化抵抗が大きく液状化に至る可能性が低い地盤と判断できる。また, 剛性低下率と累積損失エネルギーの関係も算出し, 水圧上昇による地盤の剛性低下率を把握しておく。

3.2.5 地盤応答解析および液状化判定の実施

3.2.3 項で得られたマスターカーブを用いて逐次非線形動的解析による地盤応答解析を実施し, 耐震設計に必要な表層地盤の応答値を算出する。一方, 対象層の $\tau \sim \gamma$ 関係から地震中に地盤に蓄積される累積損失エネルギー (W_e) を求め, W_e 以上に達した場合は液状化の可能性のある地盤と判定する。

3.2.6 本提案手法に必要な試験数

従来法では, ステージ荷重の変形特性試験を1ケース (拘束圧依存性を評価する場合は, 異なる拘束圧で数ケース), 液状化強度試験を実施する場合は4ケース (4つのせん断応力比) の計5ケースを実施するのが一般的である。提案法では, 段階荷重試験1ケースと非排水単調荷重試験1ケース (ただし, 強度特性試験で実施する場合は不要) に加えて, 水圧の影響が大きく, 液状化の可能性のある土についてのみ, 定ひずみ試験を3ケース程度実施すればよい。したがって, 必要な試験数としては従来法と同等以下である。

なお, 5章に示す検討により, 本手法から得られる変形特性, 液状化特性を用いた地盤応答解析結果はハイブリッド地盤応答試験結果と整合することが確認できてお

特集：地震対策技術

り、本手法の有効性が検証できている。

4. ハイブリッド地盤応答試験手法

3章で示した土の変形特性試験方法を用いることで液状化地盤を含む軟弱地盤の大地震時の変形特性を適切に評価可能である。一方で、高有機質土や火山灰質土、風化残積土などの特殊土と呼ばれる土は、地盤工学的特性が一般的な土とは明らかに異なるため、GHE-Sモデルによるモデル化が困難な場合が多い。このような地盤は構造物の設計上注意を要する場合が多いため、適切に地震時挙動を評価する必要がある。そこで、対象層をせん断試験に置き換えて直接的に応答を評価可能なハイブリッド地盤応答試験手法を構築した。

4.1 拘束圧荷型単純せん断試験装置

水平成層地盤の地震時の挙動を再現するためには、地盤材料試験で単純せん断変形を模擬する必要がある。ここで構築するハイブリッド地盤応答試験装置は、取り扱いの困難な特殊土層を有する地盤も対象とし、設計実務で用いることを念頭に置いた装置とするため、できる限り容易に供試体作成を行いたい。そこで、供試体をセル内に設置することで水圧を介して拘束圧を载荷可能とした拘束圧荷型単純せん断試験装置を開発(図4)し、図5に示すハイブリッド地盤応答試験装置に適用した。

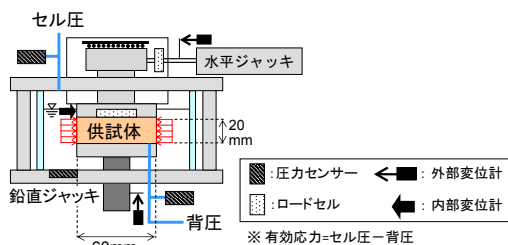


図4 拘束圧荷型単純せん断試験装置

4.2 ハイブリッド地盤応答試験

構築したハイブリッド試験の概念図を図6に示す。本試験では、1.0~2.0m程度に分割した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、他の層にはGHE-Sモデルによる数値解析を適用する。すなわち、単純せん断試験の結果から得られる供試体からの反力 F_s を数値解析モデルに取り込んで応答解析を行い、応答解析から求めた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。その手順を次に示す。

層番号 i の土層の質量、剛性を式(2),(3)より算定する。

$$m_i = \rho_i H_{si} / 2 \quad (2)$$

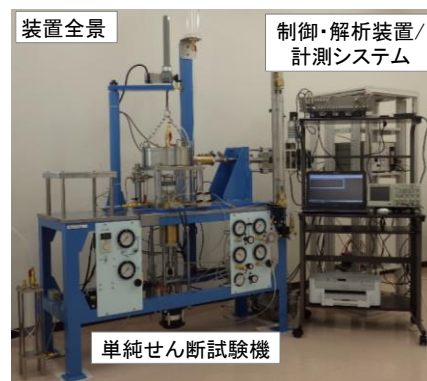
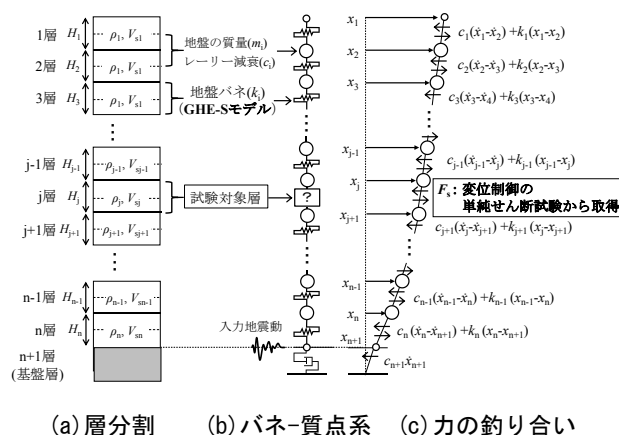


図5 ハイブリッド地盤応答試験装置



(a)層分割 (b)バネ-質点系 (c)力の釣り合い

図6 ハイブリッド地盤応答試験の概念図

$$k_i = \rho_i V_{si}^2 / H_{si} \quad (3)$$

ここに、 $m_i(t)$ および k_i (kN/m) は各層の質量および剛性、 ρ_i は質量密度 (t/m^3)、 V_{si} はせん断波速度 (m/s)、 H_{si} (m) は土層厚さである。この各層の質量および剛性を用いて土層全体の質量マトリクス $[M]$ および剛性マトリクス $[K]$ を作成する。減衰マトリクスはレーリー減衰として設定し、別途与える係数 α, β から式(4)により与える。

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (4)$$

解くべき運動方程式は式(5)となる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} + F_{test}(t) = -[M]\{1\}\ddot{z} \quad (5)$$

通常の数値解析と異なる点として、せん断試験から得た荷重を式(6)に示す外力 $F_{test}(t)$ として与えることがある。

$$F_{test}(t) = [0 \dots -1 \ 1 \ 0 \dots 0]^T F_s \quad (6)$$

Layer No : 1, 2, ..., j-1, j, j+1, ..., n

ここに、 j が試験を行う層番号である。以上のように、各ステップで変位を供試体に与え、変位が収束したら荷重を取り込み、式(5)により応答解析を行い、試験層の相対変位を算定し、再びせん断試験を行う。この手順を解析時間にわたって実施する。なお、運動方程式の求解には Operator Splitting 法を用いた。

5. 提案法の妥当性の検証

5.1 ハイブリッド地盤応答試験の実施

構築したハイブリッド試験装置を用い、図7に示す地盤に対する試験を行った。試験対象層には豊浦砂 ($G_s=2.645$, $D_{50}=0.190\text{mm}$, $e_{\max}=0.973$, $e_{\min}=0.609$, $U_c=0.682$) を用い、相対密度60% ($\phi=35.4^\circ$) と80% ($\phi=37.4^\circ$) の2ケースを実施した。ここに、 G_s は土粒子の密度、 D_{50} は有効粒径、 e_{\max} と e_{\min} は最大・最小間隙比、 U_c は均等係数である。対象層以外の GHE-S モデルには標準パラメータ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 $\rho=2.0\text{g/cm}^3$, $V_s=400\text{m/s}$ 相当の粘性境界を設置し、スペクトルII地震動 (G1 地盤) を入力した。

5.2 応答値の比較

従来法と3章で述べた提案法から得られた変形特性を用いた地盤応答解析を実施し、ハイブリッド試験との比較を行った。対象地盤は、ハイブリッド試験を実施した $Dr=60\%$ のケース (図7) とし、諸設定も同様とした。変形特性試験結果を GHE-S モデルを用いてフィッティングした結果を図8に示す。これらは $G/G_{\max} \sim \gamma$ 関係を整合させた後、大ひずみ領域の $\tau \sim \gamma$ 関係をトレースす

るよう設定した。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 $\tau \sim \gamma$ 関係をうまく再現できていないのに対して、提案法については GHE-S モデルにより変形特性を精度よく表現できていることが分かる。

地盤応答解析およびハイブリッド試験から得られた最大値分布の比較を図9に、試験対象層の応答加速度とせん断応力の時刻歴を図10に、地表面の応答加速度スペクトルを図11にそれぞれ示す。まず最大値分布の比較を見てみると、従来法では得られた変形特性を GHE-S モデルで過大評価しているにもかかわらず、対象層の変位はハイブリッド試験より大きな値を示しているのに対して、提案法ではハイブリッド試験の変位分布に概ね整合する結果となっている。しかしながら、加速度の最大値分布についてはハイブリッド試験の最大加速度が解析よりも大きな値を示している。これは、図10の応答時刻歴から分かるように、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、この時刻で最大加速度を示すが、提案法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。ただし、この応答は周期0.4秒程度の短周期となるため、図11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、

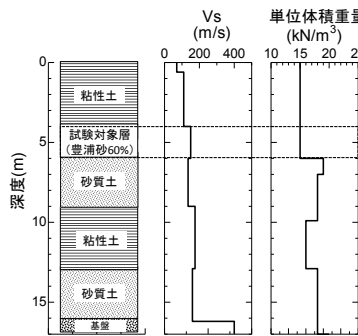


図7 対象地盤

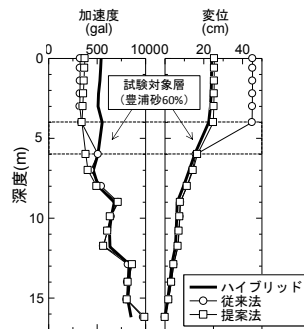
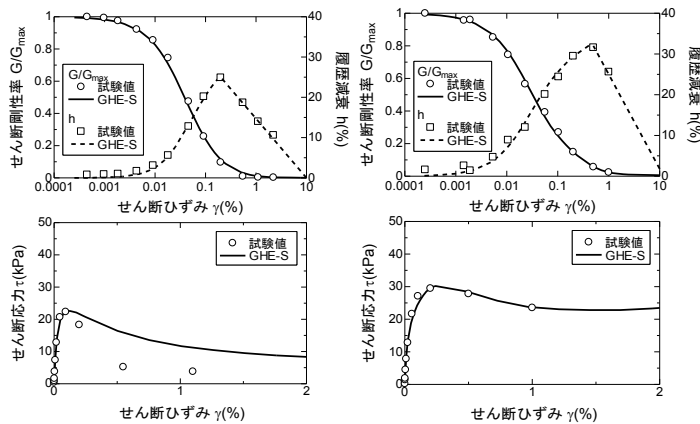


図9 地盤応答解析結果とハイブリッド試験結果の比較



(a) 従来法

(b) 提案法

図8 変形特性の GHE-S モデルでのフィッティング (豊浦砂 $Dr=60\%$)

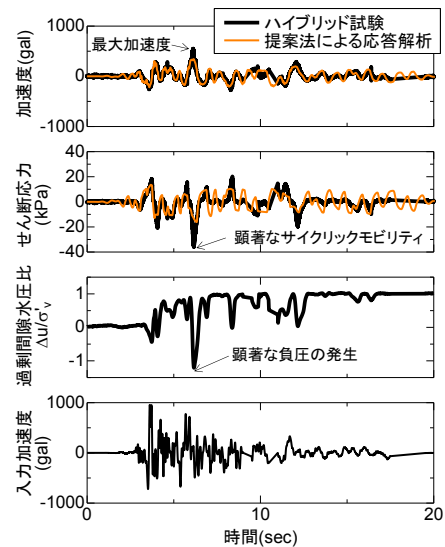


図10 豊浦砂 $Dr=60\%$ 層の応答時刻歴

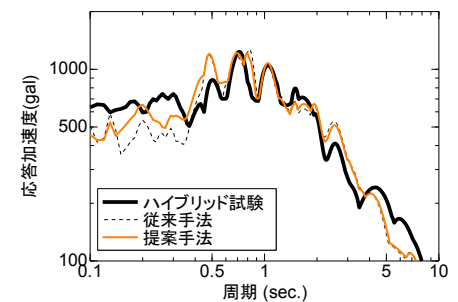


図11 地表面地震動の応答加速度スペクトルの比較 (豊浦砂 $Dr=60\%$)

特集：地震対策技術

一般的な構造物の固有周期帯である 0.5 秒～1.0 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。

5.3 エネルギー法による液状化判定

ハイブリッド試験から得られた過剰間隙水圧比 ($\Delta u/\sigma'_c$) の時刻歴とエネルギー法を用いた液状化判定の結果を図 12 に示す。応答解析から得られた W_e/σ'_c は、4 秒付近で定ひずみ試験 ($\Delta\gamma=0.4\%$) から得られた $W_e/\sigma'_c=0.013$ を超える結果となるため (図 12(b)), 液状化に至ると判定される。ハイブリッド試験でも $\Delta u/\sigma'_c$ が 1.0 に達して液状化に至る (図 12(a)) ことから、エネルギー法による液状化判定と整合する結果となった。また、図 13 に $Dr=80\%$ のハイブリッド試験の結果と定ひずみ試験の結果を示す。ハイブリッド試験では過剰間隙水圧が上昇するものの、液状化には至らない結果 ($\Delta u/\sigma'_c < 1.0$) となった。(図 13(a)) 定ひずみ試験でも液状化に至らないと判定されていることから、エネルギー法を用いることでハイブリッド試験と整合する適切な判定が可能である。

6. まとめ

本研究では、液状化地盤を含む特殊地盤について、表層地盤の適切な応答評価手法を構築するために検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 地盤応答解析を実施する際に使用する土の変形特性について、できる限り水圧上昇の影響を除いた変形特性 (マスターカーブ) を算出可能で、エネルギー法を用いた液状化判定の実施も可能な試験方法を提案した。
- (2) 特殊土等を有する地盤に対しても精緻な地盤応答解析を実施することができる拘束圧荷型単純せん断試験装置を用いたハイブリッド地盤応答試験装置を構築した。
- (3) (1) で提案した変形特性試験結果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結果を比較し、提案法による変形特性を用いて適切な地盤の応答値が算定できることを確認した。

文献

- 1) (公財) 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，丸善出版，2012
- 2) 室野剛隆，野上雄太：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論文集，pp. 494-497, 2006
- 3) 吉田望，三上武子：時代の要請に応える土の繰返しせん断特性試験の確立を，地盤工学会誌，Vol. 8, No. 2, pp. 1-5, 2010
- 4) 三森祐貴，國生剛治：エネルギーによる液状化判定法と FL 法との比較—種々の地震動・地盤条件での検討—，地

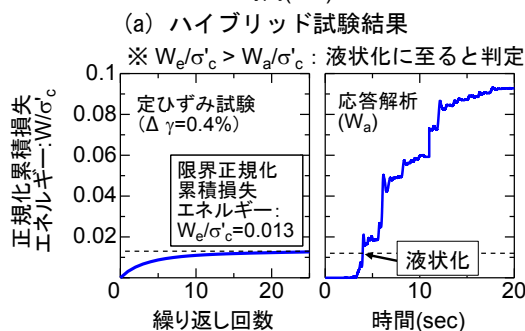
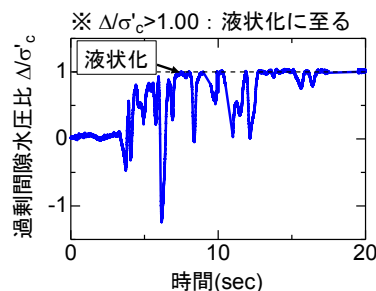


図 12 試験と液状化判定の結果比較 (豊浦砂 $Dr=60\%$ ，スペクトル II 入力)

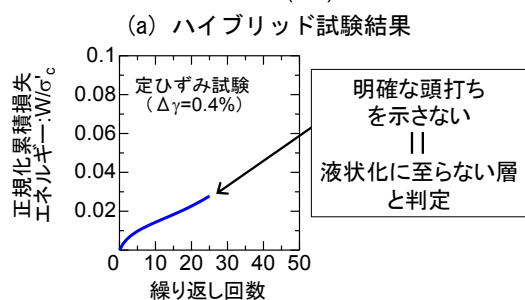
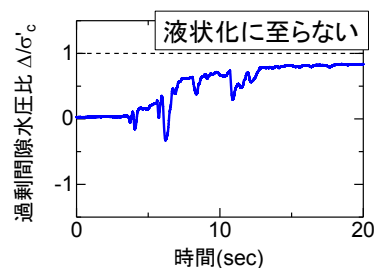


図 13 試験と液状化判定の結果比較 (豊浦砂 $Dr=80\%$ ，スペクトル II 入力)

- 5) 風間基樹，鈴木崇弘，柳沢栄司：地盤に入力された累加損失エネルギーの評価法と液状化予測への適用，土木学会論文誌，Vol. 631, III-48, pp. 161-177, 1999
- 6) 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 回土木学会地震工学研究発表会論文集，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，pp. 37-46, 1994