

耐震設計における地盤の変形特性試験に関する一考察

井澤 淳¹・室野剛隆¹

¹正会員 博士（工学） （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

1. はじめに

橋梁等の耐震設計においては、表層地盤の挙動を算定し、橋梁に作用する慣性力および地盤変位を設定する必要がある。この際、表層地盤が示す強い非線形性を適切に評価して応答を算定する必要がある。鉄道構造物等設計標準 耐震設計¹⁾（以降、耐震標準）では、非線形動的解析による地盤応答解析の適用が推奨されている。地盤応答解析に用いるパラメータ設定のための地盤材料試験²⁾は、三軸試験機を用いたいわゆるステージ載荷による繰返しせん断試験が一般的である。これは、各載荷ステージにおいて応力制御の11回繰返し載荷を実施して10回目のループにおける剛性と減衰を算出、その後圧密を実施して次の振幅ステージに進む手法である。この試験方法は、等価線形化法による地盤応答解析が主流であった時代に、中ひずみレベル（概ね $10^{-5} < \gamma < 10^{-3}$ ）を対象としたG- γ 、h- γ 関係を算出することを目的として確立された試験法であると考えられる。一方、1995年兵庫県南部地震以降、レベル2地震を対象とした耐震設計が行われるようになり、表層地盤についても大ひずみレベル（概ね $10^{-3} < \gamma < 10^{-2}$ ）までを考慮する必要性が生じてきた。鉄道構造物においては、平成11年に発刊された耐震標準においてL2地震を対象とした耐震設計が正式に導入され、平成24年に改訂された耐震標準では、表層地盤の挙動を時刻歴非線形応答解析で行うことを原則としている。そのため、幅広いひずみレベルの領域までを精度良く再現できる地盤モデル（GHE-Sモデル³⁾）を開発するとともに、パラメータの設定法³⁾を整備することで比較的容易に大ひずみレベルまでを考慮した地盤の逐次非線形動的解析を実施出来るようになってきている。しかしながら、上述のステージ載荷による現在の変形特性試験方法には様々な問題があり、大ひずみレベルを対象として地盤応答解析を実施するための適切なパラメータを得ることが難しいといった指摘⁴⁾があり、新たな試験法も提案され始めている⁵⁾。また、この問題に対しては地盤工学会でも「大ひずみ領域を考慮した土の繰返しせん断特性に関する

研究委員会」が立ち上げられ、様々な検討が実施されている⁷⁾。筆者らも、鉄道構造物の耐震設計において適切に表層地盤の挙動を評価出来るよう、逐次非線形動的解析による地盤応答解析を行う観点から、適切な地盤の変形特性試験法を表層地盤の挙動評価法と併せて提案したいと考えている。そこで本稿では、変形特性試験方法と液状化も含めた表層地盤の挙動評価法の概念を提案する。また、豊浦砂を用いて実際に試験を行い、従来試験の結果と比較することで、提案手法の有効性と今後の課題について基礎的な検討を行った。

2. 現在の問題点および提案手法

(1) 現行手法の問題点

上述のように、現在の変形特性試験はいわゆるステージ載荷試験で、各ステージ 11 回繰返しを行い、10 回目の繰返しループからせん断剛性、履歴減衰を算定する。その後、圧密を実施してから次の振幅ステージへ進む手法を取っている。また、三軸試験機を用いて応力制御で実施されるのが一般的である。これは試験装置や制御装置の性能が脆弱だった時代に、安定した履歴ループを得るために採用された手法と考えられるが、すでに様々な問題が指摘されている^{例として4), 5), 6)}。以下に、L2地震を想定した場合に考慮する大ひずみレベルまでの変形特性を求める際に問題となる主な点をまとめる。

① 11 回繰返しの影響

小ひずみ領域では繰返し載荷による水圧上昇はほとんど生じないが、中ひずみ～大ひずみレベルでは大きな間隙水圧が発生し、1 ステージ中での繰返し中に剛性や減衰の変化が顕著になる。

② ステージ間排水の影響

小ひずみレベルを対象としたステージでの間隙水圧上昇量は小さいため影響は少ないが、中ひずみ～大ひずみレベルでは大きな間隙水圧が発生するため、繰返し載荷終了後の排水で圧密さ

れ、試験中に密度が大きく変化し、物性が異なる可能性がある。

③ 三軸試験を用いる影響

三軸試験機を用いた場合、供試体軸方向の圧縮・伸張による载荷となるため、厳密な単純せん断変形を再現出来ない。また、圧縮側と伸張側で応比が異なるため、伸張側で大きな変形が生じ、精度の高いヒステリシスを得られない場合がある。

④ 応力制御の影響

土の変形特性は一般的にせん断ひずみを横軸とするため、ある程度、等間隔のひずみレベルでの剛性や減衰を求める事が望ましい。しかし、応力制御で繰返し試験を実施する場合、中ひずみレベル以降のステージでは繰返しによりせん断ひずみが増大するため、適切な測定間隔に制御することが困難で、解析において特に知りたい領域の変形特性が得られない場合がある。

(2) 提案手法

a) 提案手法の適用範囲

一般的に地盤のせん断剛性 G の変化は式(1)のように表され、ひずみと間隙水圧に依存している。

$$dG = \frac{\partial G}{\partial \gamma} d\gamma + \frac{\partial G}{\partial u} du \quad (1)$$

これらはそれぞれに非線形性を有するため完全に切り分けることは困難であり、両者を厳密に考慮して表層地盤の挙動を求めるためには2相系の支配方程式に基づく有効応力解析を実施する必要がある。しかしながら、鉄道施設の耐震設計において必要となる表層地盤の挙動を評価する場合、全応力解析で十

分な結果を得ることが可能である。したがって、本検討では全応力による逐次非線形動的解析のための変形特性の算出方法を対象とした。

一方、構造物の耐震設計においては、表層地盤の液状化も問題となる。そこで、変形特性試験結果を用いて液状化に対する検討を実施することも念頭に置いて、試験方法を検討することとした。

b) 実施する試験の概要

上述の通り、地盤の変形特性はひずみレベルと間隙水圧に依存し、それらを完全に切り分けることは困難である。そこで、できる限り間隙水圧の影響を排除し、ひずみ依存のみを考慮した変形特性（以降、マスターカーブ）を求めた上で、別途間隙水圧の変動による変形特性の変化を考慮できる試験結果を求めることを目標とした。

提案手法と評価手法の概念図を図-1に示す。本手法では「ひずみ制御型1回繰返し段階载荷試験（以降、段階载荷試験）」と「一定ひずみ振幅繰返し载荷試験（以降、定ひずみ振幅繰返し载荷試験）」を実施する。なお、これらの試験は単純せん断変形モードを考慮した一次元の地盤応答解析に用いる変形特性を求めるため、単純せん断モードを再現可能な試験装置（中空ねじり試験機、単純せん断試験装置など）により実施することを基本とする。以下のそれぞれの試験の詳細を示す。

ひずみ制御型1回繰返し段階载荷試験

繰返しによる水圧変動の影響を出来る限り排除し、幅広いひずみ領域でのせん断応力～せん断ひずみ関係を得るため、段階的にひずみレベルを増加させな

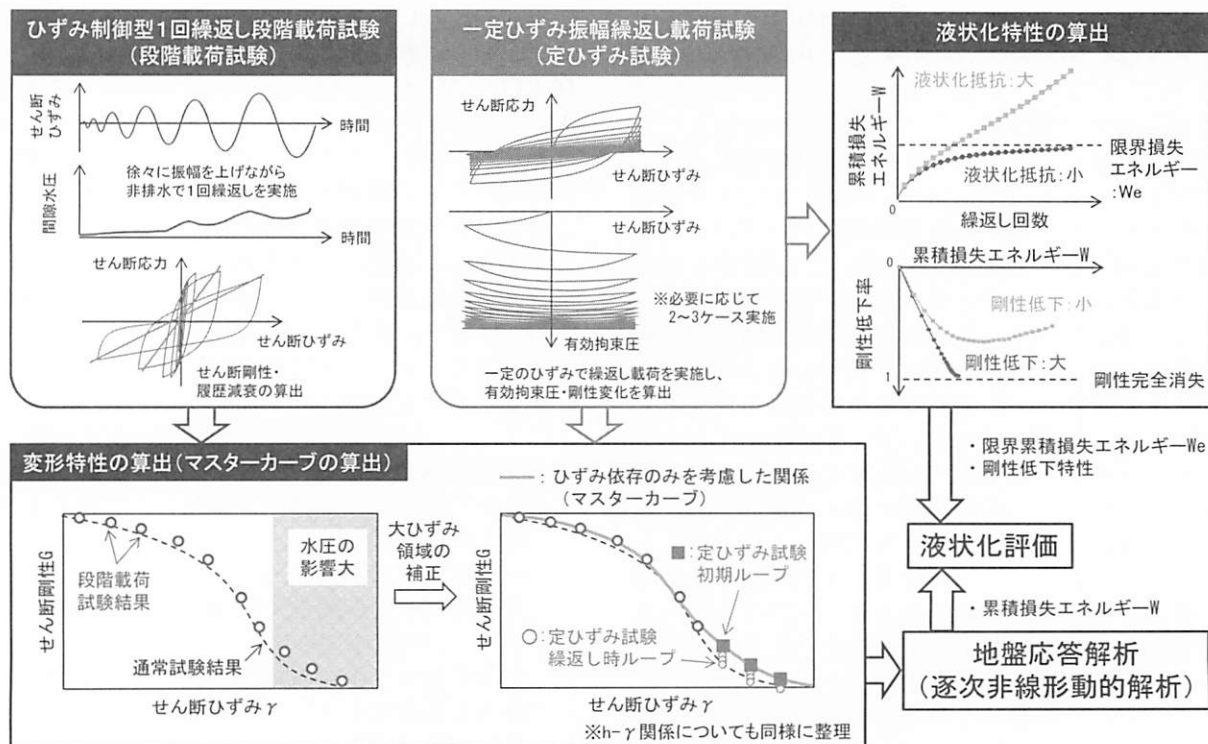


図-1 提案手法と表層地盤の応答評価の概念図

がら、ひずみ制御の1回繰返し試験を実施する。ここで、各ステージ間での排水は行わない。なお、せん断剛性のみを求めるのであれば繰返し試験を実施する必要は無く、単調載荷試験結果から割線剛性を求めればよい。したがって、履歴減衰がほとんど生じないと考えられるひずみレベルでは、単調載荷試験でも構わないと考えられる。

一定ひずみ振幅繰返し載荷試験

上記の段階載荷試験から、ある程度、繰返しによる水圧上昇を排除した $G-\gamma$ 、 $h-\gamma$ 関係が得られると期待されるが、中ひずみレベル以上では無視できないレベルの影響が生じると懸念される。したがって、段階載荷試験結果を確認した上で、水圧の影響が無視できない領域については、定ひずみ試験を実施して、初期ループから変形特性を算出する（すなわち、ひずみ制御のフレッシュテストを実施する）。また、一定ひずみ振幅で繰返し載荷試験を実施することで、繰返しの影響を排除したせん断剛性と履歴減衰を算出できるだけでなく、対象とするひずみレベルにおいて間隙水圧の影響のみを考慮した変形特性の変化を知ることが可能となる。さらに、風間ら^{例えは 8)}の提案する累積損失エネルギーの概念を用いた液状化評価の実施も可能となる。

c) 変形特性および液状化特性の算出

b) に示した2種類の試験を以下のステップで実施し、耐震設計のための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、および液状化特性の評価を行う。

Step1：マスターカーブの算出

段階載荷試験の結果から各ひずみレベルのせん断応力～せん断ひずみ関係からせん断剛性と履歴減衰を求める。ここで、間隙水圧の上昇による剛性変化の影響を評価し、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（以降、マスターカーブ）として評価出来る。

一方、水圧上昇が大きい場合は、変形特性に大きく影響を与え始めるひずみレベルを把握しておく。このとき、強度特性を把握するための単調載荷試験を別途実施して骨格曲線を求めておくと、段階載荷試験から求まるせん断応力～せん断ひずみ関係が骨格曲線から外れるひずみレベルを特定できるため、有効と考えられる。

Step2：マスターカーブの補正・水圧の影響把握

Step1 で把握した間隙水圧の影響が大きくなる領域以降のひずみレベルで2～3点のひずみ振幅を選択し、定ひずみ載荷試験を実施する。定ひずみ試験から求まる初期ループの変形特性を段階載荷試験から得られた $G-\gamma$ 、 $h-\gamma$ 関係に反映し、マスターカーブを補正する。一方で、定ひずみで繰返し載荷することで、同じひずみレベルでの間隙水圧の影響のみを考慮した変形特性を求めておく。

なお、Step1 において水圧変動の影響が見られない場合には、段階載荷試験のみからマスターカーブを求めて、本試験は省略してよい。また、このような地盤は液状化に至る懸念が小さいと判断でき、定ひずみ試験は省略してよいと考えられる。

Step3：液状化特性の評価

定ひずみ試験結果を用いて式(2)から累積損失エネルギー： W を算出する。

$$\text{累積損失エネルギー：} W = \int \tau(\gamma) d\gamma \quad (2)$$

繰返し回数に対して累積損失エネルギーをプロットし、頭打ちとなる点、すなわち限界累積損失エネルギー： W_L を求める。地震中に地盤に蓄積される累積損失エネルギーが、限界累積損失エネルギー以上に達すれば液状化に至ると考えられる。対象地盤に蓄積される累積損失エネルギーは、地盤の動的解析結果を用いて算出可能である。なお、定ひずみ試験から求まる累積損失エネルギー～繰返し回数関係が頭打ちを示さず、単調増加する傾向にあれば液状化抵抗の大きい、すなわち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可能であり、液状化に至った場合にどの程度の剛性低下が生じるかも評価出来る。

3. 提案手法による変形特性試験の実施

(1) 試験概要

a) 試験内容

2. で述べた提案手法の適用性を検討するため、中空ねじりせん断試験装置を用いて提案する試験を実施した。なお、比較のため従来の変形特性試験（土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法：JGS 054-2009. 以降、通常試験）と圧密非排水単調載荷試験（以降、単調 CUB 試験）も実施した。供試体サイズは外径 70mm×内径 30mm×高さ 70mm とし、すべての試験で 100kPa の等方応力状態（背圧 200kPa）で実施した。以下に試験条件の詳細を示す。

提案手法

- ・ ひずみ制御型 1 回繰返し段階載荷試験（段階載荷試験）
ひずみ速度 0.1%/min（三角波）
- ・ 一定ひずみ振幅繰返し載荷試験（定ひずみ載荷試験）
ひずみ振幅 0.1, 0.4, 1.0% の 3 ケース
十分に剛性が低下するまでひずみ速度 0.1%/min で載荷（三角波）

従来手法

- ・ 通常の繰返し載荷試験（通常試験）
応力制御で 0.1Hz で実施（正弦波）
ただし、水圧の増加が顕著なレベル以降は変位制御（ひずみ速度 0.1%/min の三角波）で載荷

表-1 各試験における試験前後の密度状態

(a) 豊浦砂 相対密度 60%

試験項目	段階載荷	一定ひずみ振幅載荷			通常試験	単調CUB
		振幅 0.1%	振幅 0.4%	振幅 1.0%		
載荷前						
乾燥密度(g/cm ³)	1.517	1.517	1.506	1.504	1.509	1.509
間隙比	0.749	0.749	0.762	0.764	0.759	0.758
相対密度(%)	65.4	65.4	62.2	61.6	62.9	63.1
載荷後						
乾燥密度(g/cm ³)	1.512	1.512	1.510	1.509	1.573	—
間隙比	0.755	0.755	0.757	0.758	0.686	—
相対密度(%)	64.0	64.0	63.4	63.2	80.9	—

(b) 豊浦砂 相対密度 80%

試験項目	段階載荷	一定ひずみ振幅載荷			通常試験	単調CUB
		振幅 0.1%	振幅 0.4%	振幅 1.0%		
載荷前						
乾燥密度(g/cm ³)	1.560	1.567	1.559	1.559	1.563	1.560
間隙比	0.701	0.693	0.702	0.702	0.697	0.701
相対密度(%)	77.3	79.2	77.0	77.0	78.1	77.3
載荷後						
乾燥密度(g/cm ³)	1.560	1.566	1.568	1.570	1.605	—
間隙比	0.701	0.694	0.691	0.690	0.653	—
相対密度(%)	77.2	78.9	79.6	79.9	89.0	—

※3 通常試験の載荷後の値は最終ステップ直前の値

- ・ 圧密非排水単調せん断載荷試験（単調CUB試験）ひずみ速度 0.1%/min で実施

b) 試験試料

本実験では豊浦砂 ($G_s=2.645$, $D_{50}=0.190(\text{mm})$, $e_{\text{max}}=0.973$, $e_{\text{min}}=0.609$, $U_c=0.682$) を用い、相対密度 60%と 80%の 2 ケースを実施した。供試体は空中落下法で作成し、密度調整のために多少側方を打撃して作成した。

(2) 試験結果

a) 試験前後の供試体の条件

表-1 に各試験における載荷前（圧密終了後）と載荷試験後（通常試験については、最終ステージ直前の値）の密度の状態を示す。全てのケースについて圧密後、すなわち載荷直前の状態で、目標相対密度に対して概ね±5%程度の誤差で試験が実施出来ている。一方で、通常試験の載荷後（最終ステージ直前の値）の相対密度に着目すると、 $Dr=60\%$ では初期載荷時に $Dr=62.9\%$ だった相対密度が、最終段階載荷の時点で $Dr=80.9\%$ と 20%程度も増加していることが分かる。また、 $Dr=80\%$ のケースについても、最終段階載荷の時点で $Dr=89\%$ と、10%程度の相対密度の増加が見られる。したがって、現在の試験法では大ひずみ領域の載荷ステージの段階では、すでに目標とする密度状態にない可能性があると言える。

b) 変形特性に与える影響

図-2 に段階載荷試験におけるせん断ひずみと過剰間隙水圧の時刻歴を示す。いずれの相対密度のケースにおいても、比較的小さなひずみレベルから水圧の増加が見られた。また、図-3 に段階載荷試験と単調載荷試験から得られたせん断応力-せん断ひずみ関係を共に示すが、0.1%の程度のひずみレベルから両者の骨格曲線に乖離が見られた。そこで、定

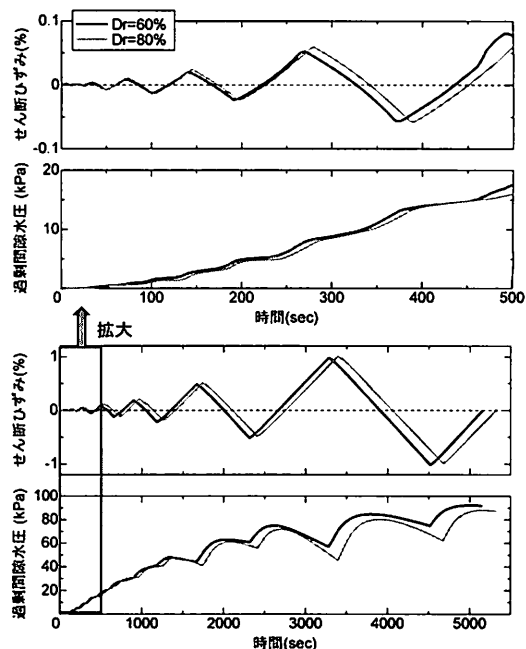
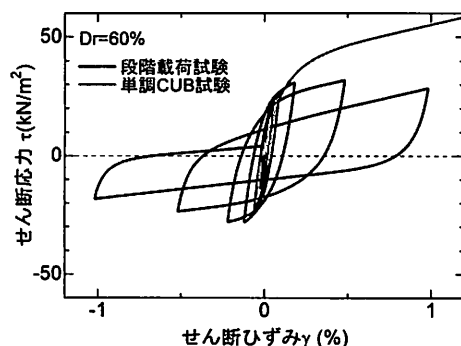
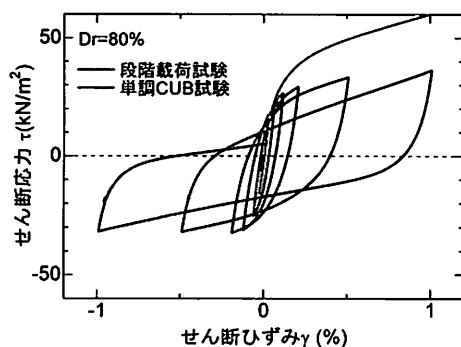


図-2 段階載荷試験の載荷履歴



(a) 豊浦砂 相対密度 60%



(b) 豊浦砂 相対密度 80%

図-3 段階載荷試験と単調載荷試験のせん断応力-せん断ひずみ関係

ひずみ試験ではせん断ひずみ振幅 $\Delta\gamma=0.1, 0.4, 1.0\%$ の 3 ケースを実施することとした。

図-4 に相対密度 60%と 80%のケースについて、各試験から得られたせん断剛性～せん断ひずみ関係 ($G-\gamma$ 関係) とせん断剛性～履歴減衰関係 ($h-\gamma$ 関係) を、通常試験における各ステップ載荷前の相対密度と共に示す。また、図-5 には、すべての試験方法

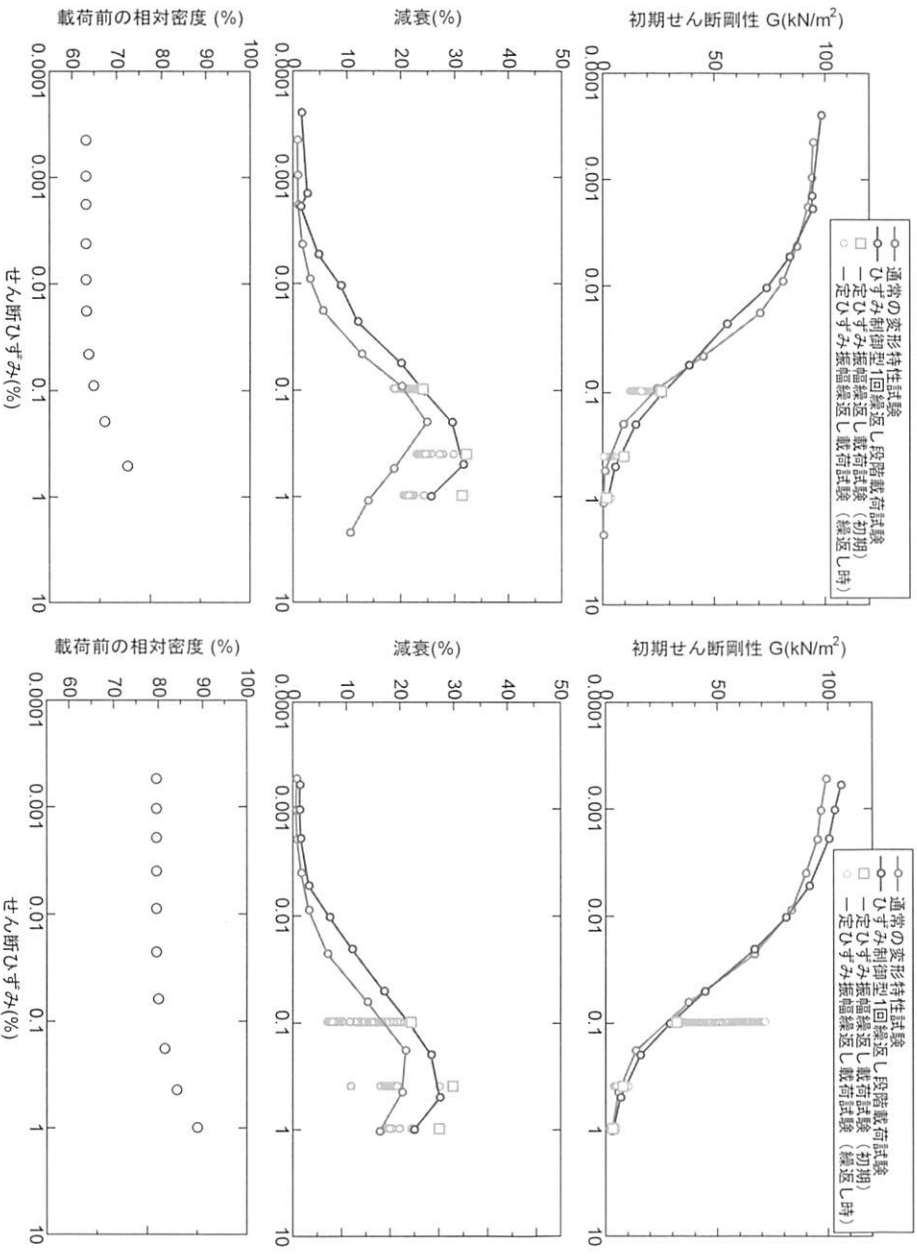


図-4 各試験から得られる $G-\gamma_h$ 関係と現行試験法における載荷時の相対密度の関係

から得られたせん断応力 $\sim$ せん断ひずみ関係 ($\tau-\gamma$ 関係) を示す。

まず、定ひずみ載荷試験の初期ループから得られたせん断剛性は、段階載荷試験から得られる $G-\gamma$ 関係上に概ねプロットされており、ひずみ依存のみを考慮した変形特性 (マスターカーブ) を求める観点から段階載荷試験の有効性を確認することが出来る。ただし、ひずみ振幅 $\Delta\gamma=1.0\%$ での定ひずみ試験の初期ループと段階載荷試験での同等のひずみレベルのループの比較では、図-6 に示すようにせん断応力 $\sim$ せん断ひずみ関係に差異が見られる。これらの影響の考え方については、今後検討を深めていきたい。

図-4(a) に示す $D_r=60\%$ の結果を見ると、 $G-\gamma$ 関係において通常試験と段階載荷から得られた結果 (おおむねマスターカーブと考えられる) に乖離が見られる。 $D_r=80\%$ のケースについては、 $D_r=60\%$ のケースと比較して両試験法間での乖離は小さい。したがって、現行の試験法の問題は比較的地盤な地盤において顕著になると考えられる。

なお、 $D_r=60\%$ のケースの $\gamma=0.005\sim0.05\%$ 程度のひずみ領域では、繰返し回数が多い通常試験のせん断剛性の方が段階載荷試験のせん断剛性よりも大きな値を示している。このひずみレベルでは通常試験および段階載荷試験ともに大きな間隙水圧は発生しておらず、原因についての検討を今後深めていく

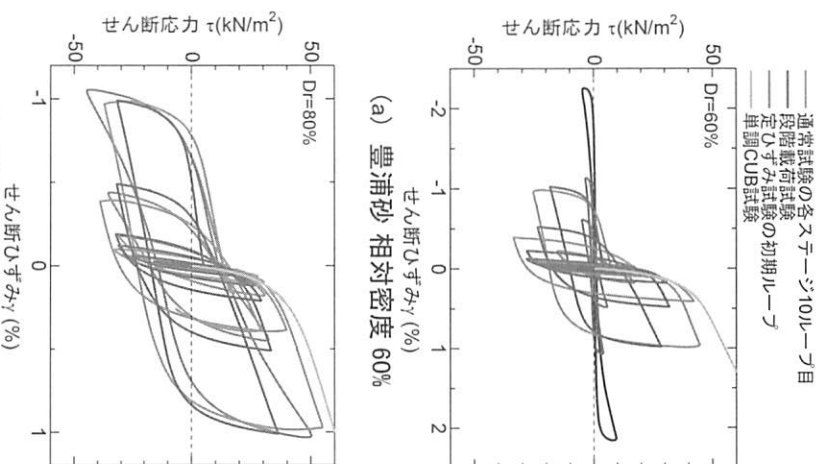
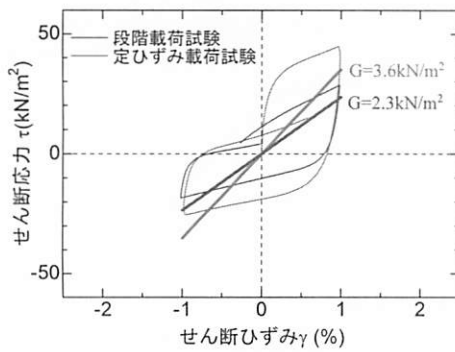
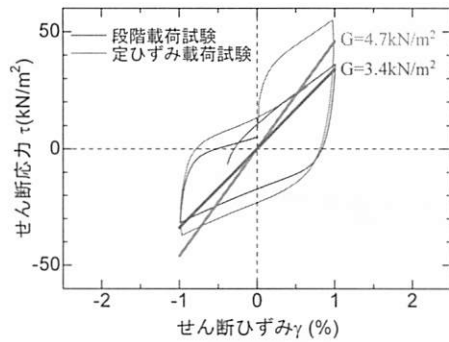


図-5 すべての試験から得られる $\tau-\gamma$ 関係



(a) 豊浦砂 相対密度 60%



(b) 豊浦砂 相対密度 80%

図-6 段階載荷試験と定ひずみ試験の τ - γ 関係の比較 ($\Delta\gamma=1.0\%$)

い。また、通常試験では 0.1% 程度のひずみを超える領域での荷重時の相対密度が増加しているにもかかわらず、得られるせん断剛性は段階載荷試験や定ひずみ載荷試験の初期ループの値よりも若干小さな値を示している。図-7 に豊浦砂 60% のせん断ひずみ振幅 $\Delta\gamma=0.2\%$ の結果を示すが、11 回の繰返しを実施するため、間隙水圧の増加による剛性低下が顕著に表れたものと考えられる。

一方、 h - γ 関係については $\gamma=0.001\%$ のレベルから、通常試験の場合は減衰を過小評価していることが分かる。これについても図-8 に示すように 11 回の繰返しを実施するため、中ひずみ領域において間隙水圧の増加により剛性低下は小さいものの、 τ - γ 関係が細く扁平になることが原因と考えられる。

以上のように、段階載荷試験によって過剰間隙水圧の累積の影響を極力排除した変形特性、すなわちマスターカーブが得られる可能性があることを確認した。しかしながら、図-5 や図-6 に示したように、段階載荷試験から得られるせん断応力～せん断ひずみ関係が定ひずみ載荷試験の初期のものと必ずしも整合しているとは限らず、ある程度の差が見られた。これは地盤材料によって傾向が異なると考えられるため、今後更なる確認が必要である。

c) 液状化特性の把握

図-9 に定ひずみ繰返し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（累積損失エネルギーを有効拘束圧で除した値）の関係を示す。Dr=60% のケースでは正規化累積損失エネルギー=0.01 付近で頭打ちが見られるのに対して、Dr=80%

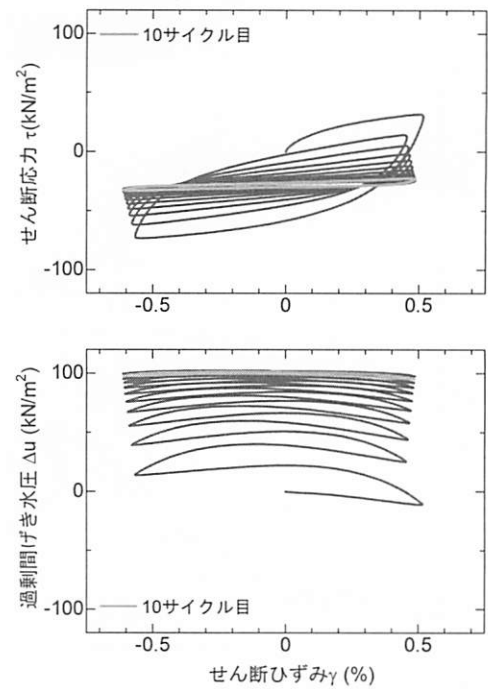


図-7 通常試験のせん断応力～過剰間隙水圧とせん断ひずみの関係の例（豊浦 Dr=60%，ひずみ振幅 0.2%）

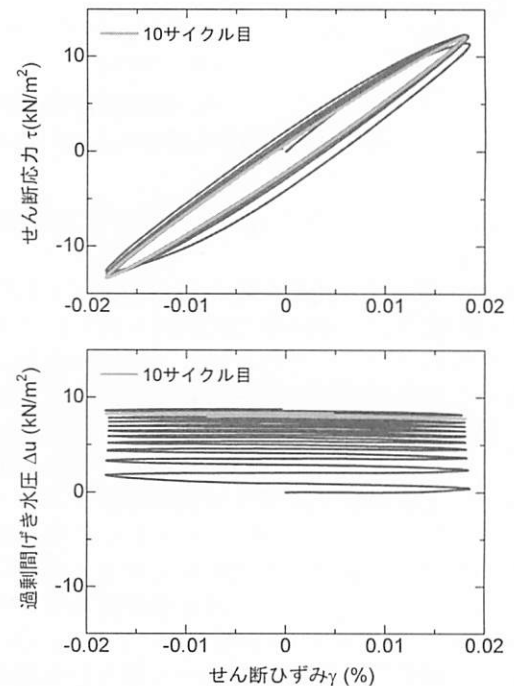


図-8 通常試験における繰返し中の履歴減衰低下の例（豊浦砂 Dr=60%，ひずみ振幅 0.017%）

のケースでは見られない。これは Dr=80% のケースがよりエネルギーを吸収する能力が高く、地震により液状化に至り難いことを示しており、一般的に相対密度の高い地盤の特徴と合致している。

また、図-10 (a) および (b) に有効拘束圧および剛性低下率と正規化累積損失エネルギーの関係をそれぞれ示す。せん断ひずみ振幅が最も小さい $\Delta\gamma=0.1\%$

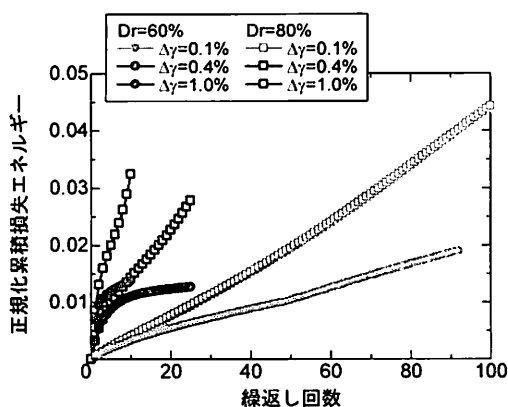
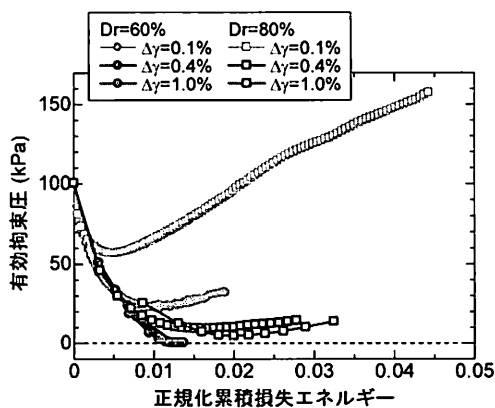
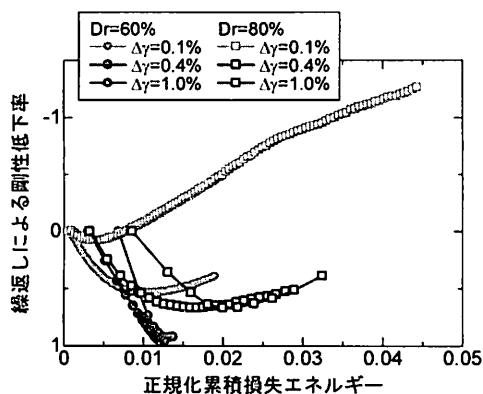


図-9 定ひずみ繰返し試験から得られた繰返し回数と正規化累積損失エネルギーの関係



(a) 有効拘束圧



(b) 剛性低下率

図-10 有効拘束圧および剛性低下率と正規化累積損失エネルギーの関係

のケースでは、いずれのケースにおいても顕著な有効拘束圧の低下とそれに伴う剛性の消失は見られない。一方、 $\Delta\gamma=0.4\%$ および 1.0% に対しては、 $Dr=60\%$ のケースで有効拘束圧が0となり、剛性もほぼ0まで低下している。 $Dr=80\%$ のケースで有効拘束圧が0近くまで低下するものの多少拘束圧を維持しているため剛性低下率も0.3程度まででとどまっている。

このように段階載荷と併せて定ひずみ載荷試験を行うことで、大ひずみ領域のフレッシュテストを実

施出来るだけでなく、液状化抵抗特性や液状化による地盤剛性の低下特性までを評価出来ることが可能である。ただし、ひずみ振幅レベルに依存する傾向が見られるため、定ひずみ載荷試験で適用するひずみレベルに設定においては、液状化評価を実施する観点からも注意する必要がある。

4. まとめ

本研究では、現在の地盤の変形特性試験の問題点を整理した上で、耐震設計における表層地盤の挙動を評価するための地盤の逐次非線形動的解析を実施する際に必要となる地盤の変形特性を適切に算出可能な試験方法と、それらを用いた評価法について提案した。また、提案した手法を豊浦砂に適用し、その有効性を検討した結果、以下の知見を得た。

1. 豊浦砂を用いた一連の試験の結果、現行の変形特性試験では各載荷ステージの載荷後に排水を実施するため、大ひずみ領域の変形特性を求める時点では、初期よりも数10%程度相対密度が増加する事が確認された。また、各ステージで11回の繰返しを実施するため、変形特性を求める10回目の繰返し時点では間隙水圧の影響で剛性が低下とともに履歴減衰の低下も見られた。これらの傾向はひずみレベルの大きな領域で顕著となるため、現行の変形特性試験法では大地震を受ける土の変形特性を適切に評価出来ないと考えられる。
2. 現行の変形特性試験の問題点を解決するため、ひずみ制御型1回繰返し段階載荷試験（段階載荷試験）と一定ひずみ振幅繰返し載荷試験（定ひずみ載荷試験）を併用した変形特性試験法と表層地盤の挙動評価方法を提案した。豊浦砂を用いた試験の結果、段階載荷試験から得られる大ひずみ領域の $G-\gamma$ 、 $h-\gamma$ 関係が、定ひずみ載荷試験の初期ループから得られる結果と概ね整合しており、豊浦砂のケースに付いては段階載荷試験のみから、ひずみ依存のみを考慮した変形特性（マスターカーブ）を概ね算出可能であることが確認できた。ただし、提案手法においても累積した過剰間隙水圧が比較的大きいこと、せん断応力～せん断ひずみ関係は定ひずみ載荷試験の初期ループと若干異なることが確認された。これらは地盤材料によって異なる性状を示すと考えられ、今後の検討が必要である。
3. 定ひずみ載荷試験の結果を用いて、あるひずみレベルでの間隙水圧の影響のみを考慮した変形特性の変化の傾向を把握できることを確認した。また、累積損失エネルギーを用いて液状化抵抗や残存剛性の評価が実施可能であることも確認した。ただし、ひずみ振幅レベルに依存する傾向が見られるため、定ひずみ載荷試験で適用す

るひずみレベルに設定においては、液状化評価を実施する観点からも注意する必要がある。

謝辞:試験の実施において、基礎地盤コンサルタンツ株式会社の山田眞一氏、池端 譲氏、米岡 威氏に多大なご協力、ご助言を頂きました。記して感謝を表します。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所 (2012) : 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計.
- 2) 地盤工学会 (2009) : 地盤材料試験の方法と解説 第7編 第7章 変形特性を求めるための繰返し試験, pp. 750-789.
- 3) 野上雄太, 室野剛隆 (2009) : 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.
- 4) 吉田望, 三上武子 (2010) : 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.
- 5) 吉田望, 三上武子, 澤田純男, 規矩大義 (2005) : 地盤の地震応答解析のための土の動的変形特性試験の提案, 第40回地盤工学研究発表会, pp. 459-460.
- 6) 吉田望, 三上武子, 澤田純男 (2006) : 地盤の地震応答解析のための土の動的変形特性試験の提案 (その2), 第41回地盤工学研究発表会, pp. 417~418.
- 7) 大ひずみ領域を考慮した土の繰返しせん断特性に関する研究委員会 (2013) : 大ひずみ領域を考慮した土の繰返しせん断特性に関するシンポジウム発表論文集.
- 8) 風間基樹, 柳澤栄司, 増田昌昭 (1998) : 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, Vol. 46, No. 4, pp. 21-24.