

性能設計に対応した 繰返しせん断試験検討小委員会

—平成30年度 活動報告— (活動終了報告)

委員長：渦岡良介（京都大学）

幹事：三上 武子（前田建設工業）

メンバーと活動期間

◆ 活動期間：2015.4～2019.3（4年間）

◆ メンバー：14名

委員長	渦岡 良介	京都大学防災研究所
幹事	三上 武子	前田建設工業（株）
委員	吉田 望	関東学院大学
	飛田 善雄	東北学院大学
	一井 康二	関西大学
	大矢 陽介	（国研）海上・港湾・航空技術研究所
	矢部 正明	（一財）首都高速道路技術センター
	塩見 忠彦	（株）マインド
	上田 恭平	京都大学防災研究所
	仙頭 紀明	日本大学
	市川 卓也	東電設計（株）
	兵頭 順一	東電設計（株）
	金田 一広	（株）竹中工務店
	植村 一瑛	応用地質(株)

設立の背景と目的

- ◆ 現行の「土の繰返しせん断試験」は、最近のニーズに十分に
 応えることができない状況にある。
- ◆ そこで、現在不十分と考えられる試験法を改善する方法を検
 討することを目的として、本研究小委員会が設立された。

	変形特性を求めるための 繰返しせん断試験	液状化強度を求めるための 繰返しせん断試験（液状化試験）
ニ ー ズ	➢ 従来よりも遥かに入力地震動が大き くなったため、大ひずみレベルの挙 動を求めることが要求される	➢ 性能設計の導入によって、液状化す る地盤であっても変位を求めること が要求される
現 状	➢ 適用範囲は0.1%を少し超えたところ	➢ 液状化発生（4%程度のひずみ）の有 無を評価する試験であり、変位を求 める試験ではない
問 題 点	➢ 0.1%程度～液状化以前の挙動を求め る試験法がない	➢ 液状化以後をターゲットにした試験 法がない
活 動 内 容	➢ 液状化以前の変形特性を調べる試験 法の検討 ➢ H27, H28年度に検討 ➢ H29年度に成果を土木学会論文集に 投稿	➢ 液状化強度に加えて、液状化による 変形を求めることのできる試験法の 検討 ➢ H29, H30年度に検討 ➢ H31年度に成果を土木学会論文集に 投稿予定

活動報告

年度	検討項目	活動内容
H27年度	変形特性 を求める ための試験	➢ 3回の委員会を開催 ・2015/7/3 ・2015/10/16 ・2016/2/23 ➢ 現行の変形特性を求めるための繰返しせん断試験法 の問題点を整理
H28年度		➢ 4回の委員会を開催 ・2016/5/19 ・2016/8/5 ・2016/11/24 ・2017/3/2 ➢ 0.1%を超えるひずみ領域の評価にも適用可能な試 験法を提案 ⇒ 成果を土木学会論文集へ投稿
H29年度	液状化試験	➢ 4回の委員会を開催 ・2017/6/13 ・2017/9/4 ・2017/12/22 ・2018/3/12 ➢ 現行の液状化試験法の問題点を整理し、これらを改 善する試験法の方向性を検討
H30年度		➢ 4回の委員会を開催 ・2018/6/18 ・2018/9/3 ・2018/12/18 ・2019/3/13 ➢ 液状化解析のための要素試験に関する国際ワーク ショップ（2019/3/13, 関西大, 37名） ➢ 液状化による変形を評価できる試験法を提案 ⇒ 成果を土木学会論文集に投稿予定

提案法の概要（変形特性を求めるための繰返しせん断試験）

◆ 検討方針

- ・地震応答解析に用いる力学的特性を得るための最低限の試験法
- ・大ひずみ領域（0.1%～3%程度）にも適用できること
- ・現行法から大きく逸脱しないこと
- ・既存データとの整合も可能な限り図ること

項目	現行法	問題点	提案法
載荷回数	11サイクル載荷		3サイクル載荷
ひずみ増分	2倍程度	・履歴曲線の非定常化 ・試料の密実化 ・載荷履歴情報の消失	各桁1, 2, 5 (ひずみ増分2～2.5倍)
排水条件	・載荷中：排水、非排水 ・載荷後：排水		全過程で非排水 (ステージ間の排水なし)
制御方法	応力制御、ひずみ制御	人的誤差	・ひずみ制御 ・小ひずみ領域では応力制御も可 ・切替の目安は $\gamma=0.01\%$, $G/G_0=0.5$ など
結果の報告	・応力、ひずみの波形記録 ・5, 10サイクルの履歴曲線 ・ $G-\gamma$ 関係、 $h-\gamma$ 関係	・間隙水圧の情報なし ・離散的な情報のため非定常化の判断が困難	・過剰間隙水圧の情報を追加 ・出力例： $\Delta u/\sigma'_c-\gamma$ 関係、 波形記録など

地震工学委員会 2019年度 第1回研究会 2019/5/14

5



成果報告（土木学会論文集C, 75(2), 2019)

土木学会論文集C(地震工学), Vol. 75, No. 2, 146-154, 2019.

【委員会報告】

性能設計のための土の繰返しせん断試験の標準化
その1 解析側から見た問題点
STANDARD CYCLIC SHEAR TEST FOR PERFORMANCE BASED DESIGN
PART 1 DISADVANTAGES FROM ANALYSIS VIEW POINT

地震工学委員会・性能設計に対応した繰返しせん断試験検討小委員会
Subcommittee on Cyclic Shear Test for Performance Based Design, JSCE Earthquake Engineering Committee

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、当時の設計で考慮していた地震動より大きな地震動が作用したことから、土木関係の多くの設計指針で設計用入力地震動が大きくなった。この際、多くの設計指針では、構造物のライフサイクル中にくる可能性が高い、いわゆるレベル1地震動については被害が発生しないこと、まれにしか起こらないが、起こると非常に大きな地震動となる、いわゆるレベル2地震動については、ある程度の被害は許容するという、二段階設計が取り入れられるようになり、性能設計という考えが取り入れられるようになった。

これに伴って、構造物への入力地震動や、性能設計で重要な地震や土構造物の変位を精度よく求めるための、地震の地震応答解析も多々行われるようになってきた。地震応答解析に用いる地震の力学的特性は、繰返しせん断特性と呼ばれる。その方法は、文献[1]に基づいて行われるのが一般的である。しかし、詳細な数値以下に示すが、現在一般的に行われている試験では、同じ試料に対する試験結果が技術者や試験条件の違いにより異なることがある。最新の解析法に対応する試験になっていない、大ひずみ（おおむね0.1%～3%程度のひずみ）時の挙動の把握が十分ではない、などの問題がある。

一方で詳細に説明するが、繰返しせん断試験は1970年代に基本的な方法が作られ、その後ほとんど変わっていない。また、最新の論文ではこれ以外の条件も使われている。これをまとめる必要は以下の通りである。このうち、下線を付けたものは現在一般的に使われている方法である。

行うというものの一つの問題である。ただし、そのような試験だけでは、将来に向けての汎用性のデータの蓄積という観点で問題があるほか、一般的な性質の比較も困難である。

したがって、試験法は、多くの構成モデルで用いることのできる基本的な試験と、個別の構成モデルに必要な特殊な試験に分けるのが妥当と考えられる。本論では、このうち基本的な試験法を提案しようとするものである。その1となる本稿では現行の方法の問題点を指摘し、その2となる後編で新しい方法を提案する。

2. 繰返しせん断試験の概要

繰返しせん断特性は繰返しせん断試験で求められる。試験結果は、せん断ひずみに依存する割断線性 G と減衰定数 h で表現され、 G, h の関係として表現される。このような試験は、1970年代の初期に Seed と Idriss^[1], Hardin と Drnevich^[2] などによって基本的な方法が示され、大きく変わることなく、現在まで使われている。現在行われている試験は文献[1]に準拠して行われている。また過去の論文ではこれ以外の条件も使われている。これをまとめる必要は以下の通りである。このうち、下線を付けたものは現在一般的に使われている方法である。

1) 載荷方法：一つの試料ですべての試験を行うステージングシステムと、振動台ごとに新しい試料を用いるフレッシュシステム。なお、フレッシュシステムは多くの試料が必要なので通常は用いられない。

2) 排水・非排水：繰返し載荷中の間隙水圧の消散の有無。

3) 応力制御・ひずみ制御：荷重の制御法および振動の制御法。

4) 載荷の繰返し数： G, h の関係は出力する繰返し数、およびステージ内での繰返し数。

5) 初期応力：等方圧力状態、異方圧力状態。

【委員会報告】

性能設計のための土の繰返しせん断試験の標準化
その2 標準試験法の提案
STANDARD CYCLIC SHEAR TEST FOR PERFORMANCE BASED DESIGN
PART 2 PROPOSAL OF STANDARD TEST METHOD

地震工学委員会・性能設計に対応した繰返しせん断試験検討小委員会
Subcommittee on Cyclic Shear Test for Performance Based Design, JSCE Earthquake Engineering Committee

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、当時の設計で考慮していた地震動より大きな地震動が作用したことから、土木関係の多くの設計指針で設計用入力地震動が大きくなった。この際、多くの設計指針では、構造物のライフサイクル中にくる可能性が高い、いわゆるレベル1地震動については被害が発生しないこと、まれにしか起こらないが、起こると非常に大きな地震動となる、いわゆるレベル2地震動については、ある程度の被害は許容するという、二段階設計が取り入れられるようになり、性能設計という考えが取り入れられるようになった。

これに伴って、構造物への入力地震動や、性能設計で重要な地震や土構造物の変位を精度よく求めるための、地震の地震応答解析も多々行われるようになってきた。地震応答解析に用いる地震の力学的特性は、繰返しせん断特性と呼ばれる。その方法は、文献[1]に基づいて行われるのが一般的である。繰返しせん断試験は1970年代に基本的な方法が作られ、その後ほとんど変わっていない。また、最新の論文ではこれ以外の条件も使われている。これをまとめる必要は以下の通りである。このうち、下線を付けたものは現在一般的に使われている方法である。

1) 載荷方法：一つの試料ですべての試験を行うステージングシステムと、振動台ごとに新しい試料を用いるフレッシュシステム。なお、フレッシュシステムは多くの試料が必要なので通常は用いられない。

2) 排水・非排水：繰返し載荷中の間隙水圧の消散の有無。

3) 応力制御・ひずみ制御：荷重の制御法および振動の制御法。

4) 載荷の繰返し数： G, h の関係は出力する繰返し数、およびステージ内での繰返し数。

5) 初期応力：等方圧力状態、異方圧力状態。

特殊な試験法に分けるのが妥当と考えられる。本論では、このうち基本的な試験法を提案するものである。この様な試験では、例えば、従来と全く異なる試験法を提案しても実務では取り入れられない事が多いと考えられる。そこで、本論では、現行の方法をなるべく生かす基本的な試験法を提案している。

2. 現行の繰返しせん断試験の概要と問題点

現在多く行われている試験法の問題点については、すでに前編^[1]で詳細に論じた。ここでは、それをまとめて示す。

(1) 現行の繰返しせん断試験の概要

土の繰返しせん断特性は繰返しせん断試験で求められる。試験結果は、せん断ひずみに依存する割断線性 G と減衰定数 h で表現され、 G, h の関係として表現される。このような試験は、1970年代の初期に Seed と Idriss^[1], Hardin と Drnevich^[2] などによって基本的な方法が示され、大きく変わることなく、現在まで使われている。文献[1]では色々な載荷方法が示されているが、現在最も一般的に行われている方法は以下のようものである。

a) ステージングシステム

小さい振動の試験から始め、次第に振動を大きくしていき試験法である。一つの試料で小さいひずみ振動から大きいひずみ振動までの試験が行える。

b) 非排水条件

地震の継続時間は短いことから、その間の間隙水の移動はほとんどないと考えられるので、試験は非排水条件で行われる。ただし、非排水条件とはいは、各ステージの間ではそのステージで発生した間隙水圧を消散させている。

c) 応力制御

応力制御とは試験の載荷方法を制御する方法の一種であるが、二つの使われ方がある。一つは、載荷の応力

146

地震工学委員会 2019年度 第1回研究会 2019/5/14

6



提案法の概要（液状化強度を求めるための繰返しせん断試験）

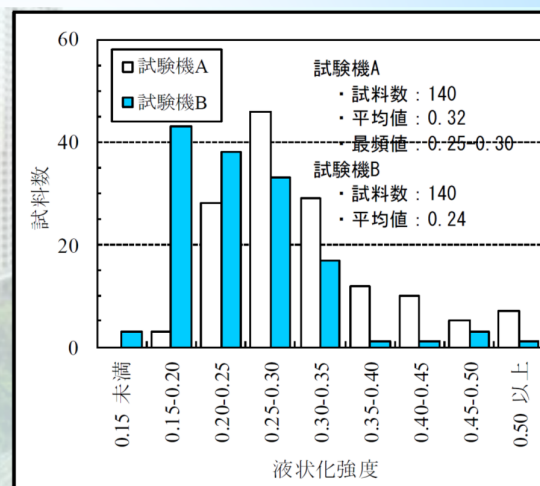
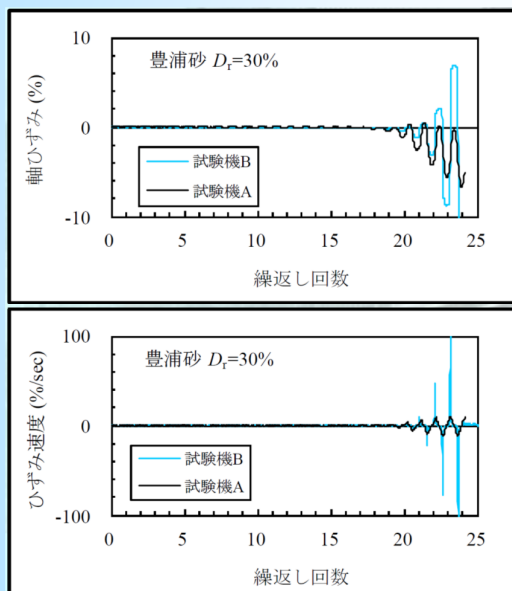
◆ 検討方針

- ・ 液状化時の変形特性を求める繰返しせん断試験法
- ・ 液状化強度曲線を求める従来の液状化試験法を補完するもの
- ・ 提案済の変形特性を求めるための繰返しせん断試験に準じた手法（载荷段階数、ひずみ振幅が異なる）

項目	現行法	問題点	提案法
供試体	最低4個の供試体	供試体のばらつき	1個の供試体が理想 （液状化強度曲線の推定は今後の課題）
圧密過程	等方圧密	異方性、初期せん断	多様な応力状態が理想
繰返し非排水载荷過程	応力制御による载荷 応力振幅一定による载荷	試験機の载荷能力の影響を受け、適切な応力ひずみが得られない	ひずみ制御による载荷 ひずみ振幅一定による多段階载荷
結果の報告	液状化強度曲線 各種波形	応力ひずみ関係や有効応力経路が必ずしも報告されていない	応力ひずみ関係 有効応力経路 各種波形

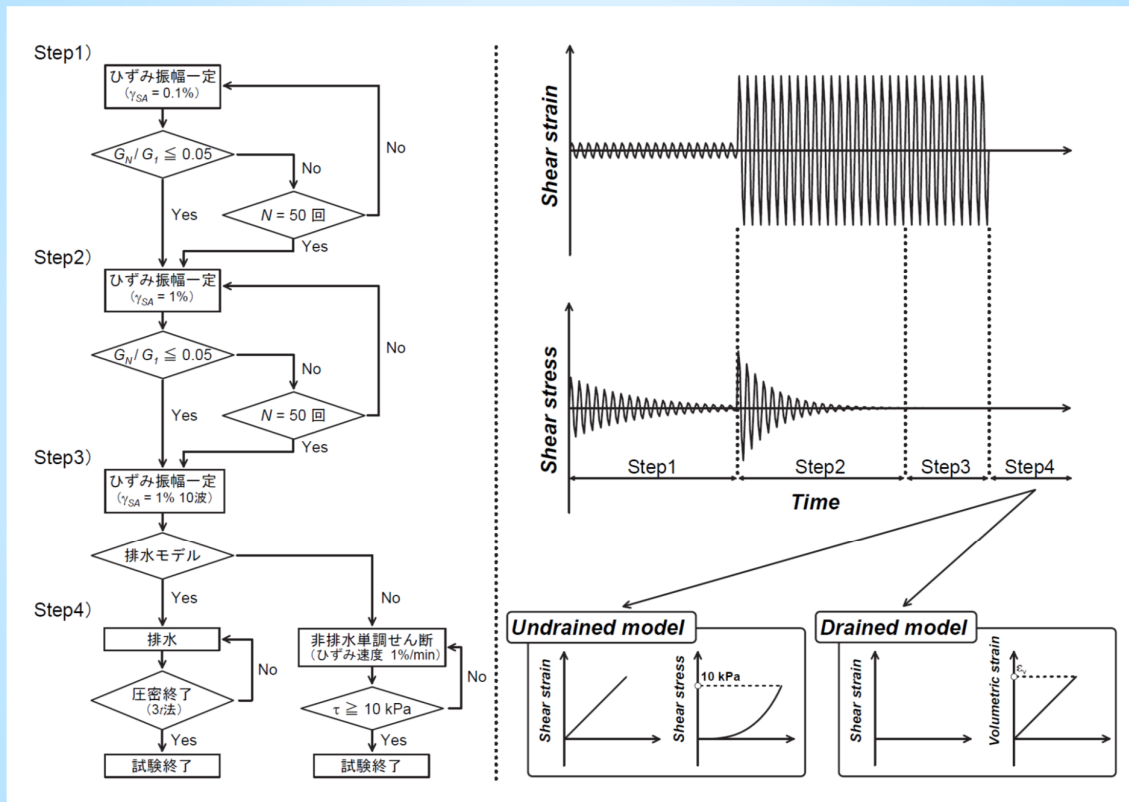
試験機の载荷能力の影響

- ◆ 所定のひずみに到達するまでに、より多くの载荷を必要とする⇒液状化強度の過大評価（応力比で0.08の違い）
- ◆ DA=5%程度で影響が開始する
- ◆ 急激に変形が増大する緩い砂で影響が顕著
- ◆ 応力制御の宿命⇒ひずみ制御にすれば解決



三上：液状化試験の精度と結果の解釈についての一考察，地盤と建設，Vol.29，No.1，pp.115-123，2011.

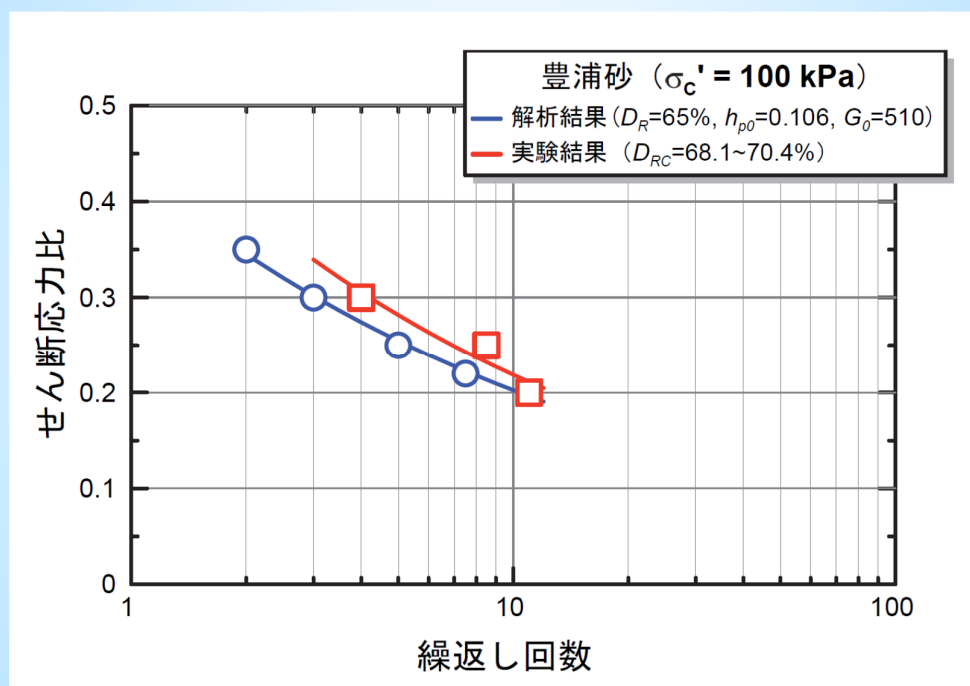
提案するひずみ制御・ひずみ振幅一定試験の一例



(仙頭・斎藤, 第6回委員会資料)

提案するひずみ制御・ひずみ振幅一定試験の一例

- ◆ ひずみ制御・ひずみ振幅一定試験で設定した材料定数を用いて、応力振幅一定試験で得られた液状化強度曲線を再現



(仙頭・斎藤, 第6回委員会資料)

まとめと今後の活動予定

- ◆ 変形特性を求めるための試験法の問題点を整理し、これに代わる試験法を提案し、その成果を土木学会論文集に委員会報告として発表した（H27～H28年度）。
- ◆ 液状化特性を求めるための試験法の問題点を整理し、これを補う試験法を提案し、その成果を土木学会論文集に委員会報告として発表する（H29～H30年度）。
- ◆ 液状化解析のための要素試験に関する国際ワークショップを開催して、国内外の研究者と提案法について議論した。
- ◆ 検討対象を地盤調査にも拡大し、「耐震性能評価のための地盤調査・土質試験の運用方法検討小委員会（委員長：一井康二・関西大学教授）」を後継委員会として設立予定。
- ◆ 最後に

構成モデル，土質試験，解析に関する技術者が集まって試験法および解析法との関係について議論したことが，本研究小委員会活動の意義であると考えます。ここでの成果が，構成モデルや試験結果の利用に関する研究のきっかけになれば幸いです。