

砂を混合したベントナイトの動的変形特性

森 伸一郎¹・岡崎 健²・御子柴 正³

¹愛媛大学工学部環境建設工学科 助教授
(〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

E-mail: mori@dpc.ehime-u.ac.jp

²愛媛大学大学院理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

E-mail: okazakiken@hotmail.com

³独立行政法人 防災科学技術研究所 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

E-mail: miko@bosai.go.jp

高レベル放射性廃棄物の地層処分人工バリアに用いられる緩衝材としてベントナイトに珪砂を混合した材料が考えられている。しかし、珪砂混合ベントナイト材料に対する動的変形特性に関する研究例は少ない。そこで、中空ねじり試験機を用いて繰返し載荷試験を行い、この材料の動的変形特性を明らかにする。不飽和の材料の拘束圧や密度の依存性を明らかにする。また、従来の複数回からなるステージテストと載荷方法として提案する1波の漸増波載荷を比較する。

Key Words : sand-mixed bentonite, cyclic deformation characteristics, cylindrical torsional test

1. はじめに

現在、高レベル放射性廃棄物の処理法として地層処分が考えられている。その際、オーバーパックで密封された廃棄物の周囲に設置する人工バリアの緩衝材として、珪砂を混合したベントナイト材料が考えられている。この珪砂混合ベントナイト材料の地震安全性を評価するためにはこの材料の動的変形特性が必要であるが、研究例は少ない。そこで、そのような材料を用いて繰返し試験を行うことにより動的変形特性の基本的な性質を調べた。

2. 実験方法

2.1 実験装置

図-1に中空ねじり試験機の概略図を示す。油圧によるねじり載荷方式で、応力制御として用いる。ねじり回転角の測定にはギャップセンサーとポテンシオメータを併用した。軸荷重計、トルク計は、セルの中に設置されてある。また、センサーで計測されたデータはA-D変換されパソコンに収録される。

2.2 実験の内容と手順

実験の対象とした材料は、ベントナイト(クニゲルV1)、珪砂3号、珪砂5号をそれぞれ質量比で

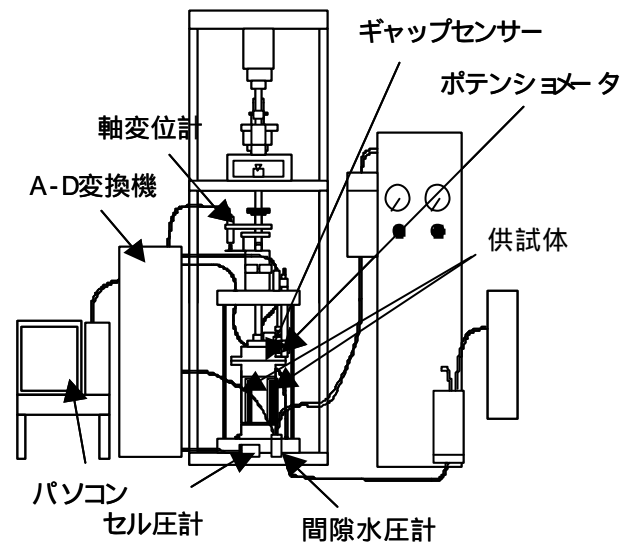


図-1 中空ねじり試験機の概略図

7:1.5:1.5となるように混合した。これに含水比25%を目標にして水を加えて、材料全体が均質になるように金属へらで30分程度練り混ぜた。その後、約2時間で供試体を作成し、排水状態で10分程度拘束圧を載荷した後、せん断試験を開始した。せん断試験には、3~4時間要した。飽和化、圧密には膨大な時間を要すると考えられるため不飽和

表-1 実験条件と実験順序

供試体	1	2	3	4	5
含水比 w (%)	33.4	33.9	26.0	24.3	24.2
d (g/cm ³)	1.55	1.35	1.59	1.65	1.60
拘束圧-载荷波					
50- 漸増波					
50- ステージ					
100- 漸増波					
100- ステージ					
200- 漸増波					
200- ステージ					
400- 漸増波					
400- ステージ					
実験日	6/4	6/6	6/19	7/8	9/27
すべり幅 (mm)	6.4	6.8	6.6	0	13.4

矢印は実験順序を示す

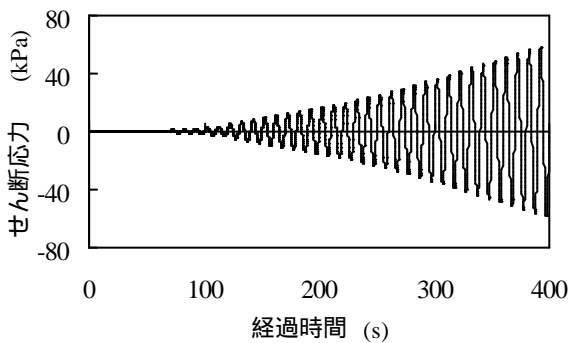


図-2 本実験に用いた漸増波

状態での非排水試験とした。

供試体は、外径10 cm、内径6 cm、高さ12 cmの中空円筒状である。供試体は、高さを7層に分割し、各層を80回突き固めて作成した。表-1に実験条件と実験順序を示す。

漸増波による漸増波载荷試験と段階的に応力振幅を大きくするステージテスト方式を行った。図-2 に本実験に用いた漸増波を示す。表-1 に示した通り、実験は、拘束圧を増加させながら、各

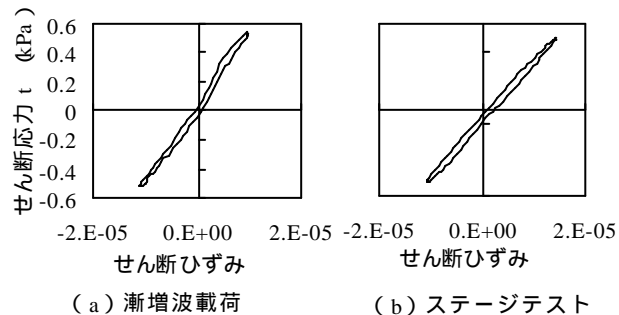


図-3 拘束圧 100 kPaにおける 2種類の载荷方法による履歴ループ

拘束圧の下では漸増波载荷，ステージテストの順に行った。

ステージテストの場合，各ステージで周波数 0.1 Hzの正弦波を 11波载荷した。実験結果は，1¹/₄，2，5，11 サイクル目の履歴ループよりせん断剛性 G ，減衰比 h を求めた。漸増波载荷の場合，ひずみ波形のピークとそれに続くサイクルで直前のピークひずみにほぼ等しくなる点で挟まれる部分に対応する履歴ループに着目して G ， h を求めた。

ここで， G は最大と最小のせん断ひずみ点を結ぶ直線の勾配として求めた。なお，ギャップセンサーのデータはノイズ除去のためカットオフ周波数 10 Hz のローパスフィルターが施されている。サンプリング周波数は 10 Hz である。せん断応力，せん断ひずみの記録された時刻歴データのノイズ処理には，Hanning ウィンドウを使用した。

3. 実験結果と考察

3.1 本実験の精度

実験の精度を知るために，载荷，除荷，再载荷の過程で履歴曲線が交わることなく，閉じたループを呈する最も小さいせん断ひずみのレベルを知ることが重要である。図-3に拘束圧100 kPaにおける2種類の载荷方法による安定した最小ひずみレベル (1×10^{-5} 程度)の履歴ループを示す。ひずみレベルが 1×10^{-5} 程度でも精度よく求めることができる。後掲の図-6に見られるように 1×10^{-5} 以下のひずみ領域では，得られる結果にばらつきが見られる。そのため，本実験結果ではせん断ひずみ 1×10^{-5} に対応する G を最大せん断剛性 G_{max} とした。

図-4に供試体No.5のステージテストでの各拘束圧における応力-ひずみの関係を示す。ここで示すものはせん断応力が0.45 kPaのデータである。表-1

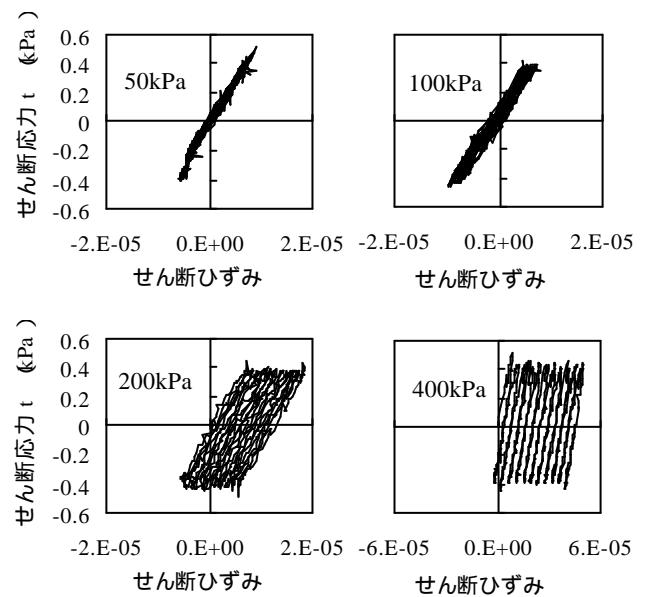


図-4 供試体 No.5のステージテストでの各拘束圧における応力-ひずみの関係

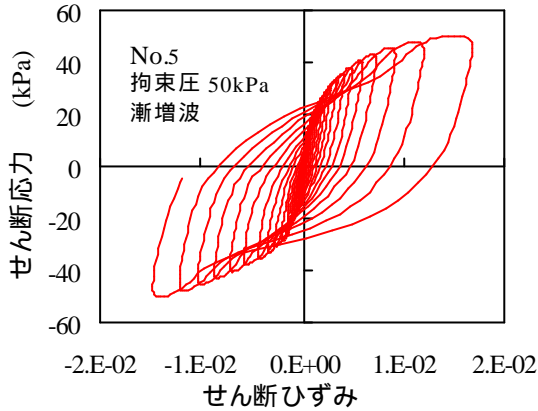


図-5 供試体 No.5 の拘束圧 50 kPa の漸増波荷における応力ひずみ関係

に示すように荷履歴を重ねていくにつれ残留せん断ひずみと同じ方向に蓄積することが特徴である。

次に、図-5に供試体No.5の拘束圧50kPaの漸増波荷における応力ひずみ関係を示す。せん断応力で約25 kPa以上になると勾配が急激に低下することがわかる。この時点で供試体の下面と下部ペダスタルの間ですべることを目視により確認しており、そのため見かけ上剛性が低下していると理解できる。したがって、このような特徴を有する場合、このすべり開始せん断応力より大きいせん断応力レベルにおける実験結果は採用することができない。したがって、すべりの量や有無は表-1に示すように供試体によって異なるが、すべり開始せん断応力以上の範囲のデータは信頼性に乏しい可能性がある。一方、すべりの全く確認されなかったNo.4の供試体は全データに対して信頼性が高いと言える。なお、下部ペダスタルに設置しているすべり防止のための8枚のせん断刃の突出量は2 mmである。

3.2 漸増波荷の実験結果

図-6に供試体No.4の漸増波荷での各拘束圧における $G \sim h \sim$ の関係を例として示す。他のケースにおいても同様に拘束圧による違いがあるが、荷波の違いのみで結果に違いが出ることを合理的に説明できる理由を見出すことが困難であり、今後の課題としたい。

3.3 漸増波荷とステージ荷の比較

図-7に供試体No. 2, 4, 5のステージテストと漸増波の $G \sim$ の関係を示す。No.2, 5は荷波による差異は小さいが、No.4は違いが大きいことがわかる。このような違いが出る理由はわからない。豊浦砂の場合には、荷波方法の違いによる差異は小さいことがわかっている¹⁾。

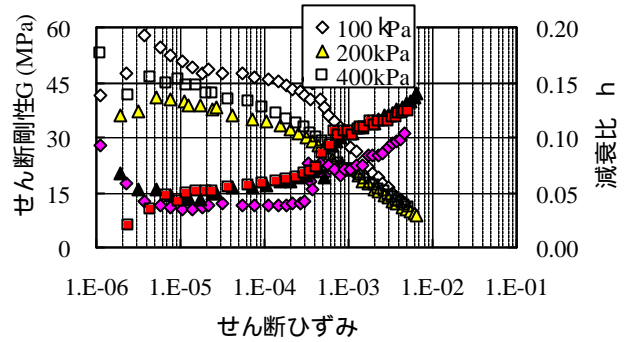


図-6 供試体 No.4 の漸増波荷での各拘束圧における $G \sim h \sim$ の関係

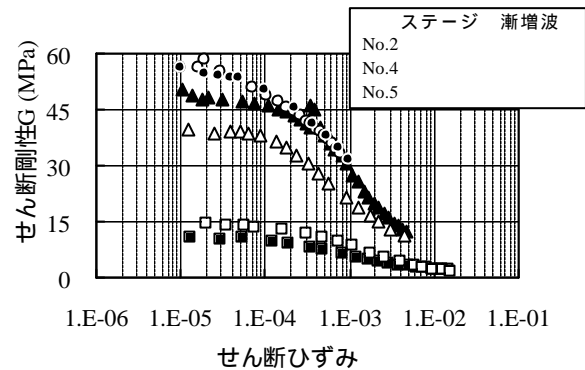


図-7 供試体 No. 2, 4, 5 のステージテストと漸増波の $G \sim$ の関係

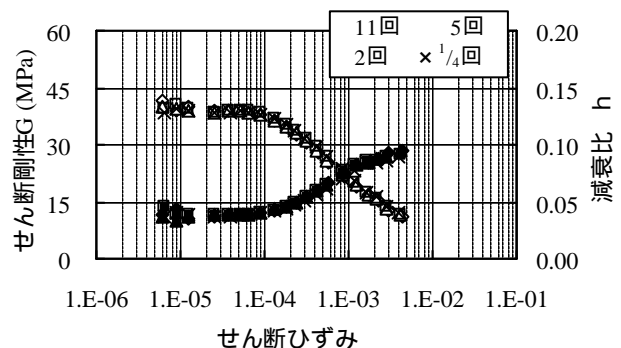


図-8 供試体 No.4 の拘束圧 100kPa の各サイクルに着目した $G \sim h \sim$ の関係

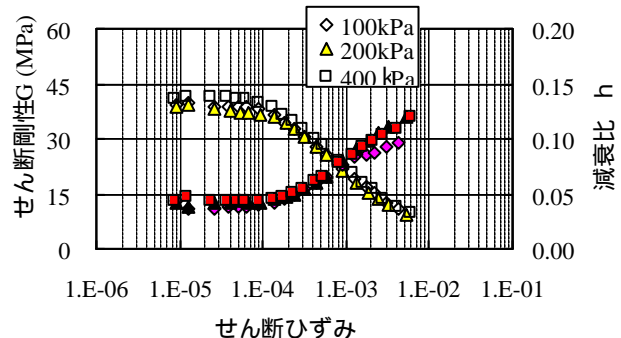


図-9 供試体 No.4 の異なる拘束圧に対する $G \sim h \sim$ の関係

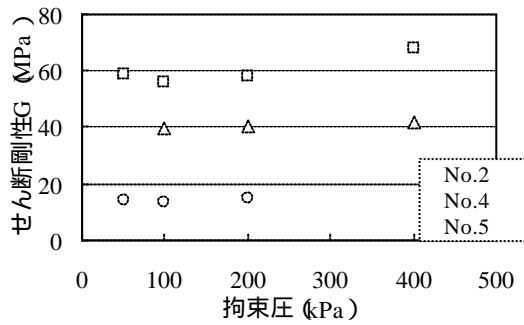


図-10 3つの供試体の最大せん断剛性と拘束圧の関係

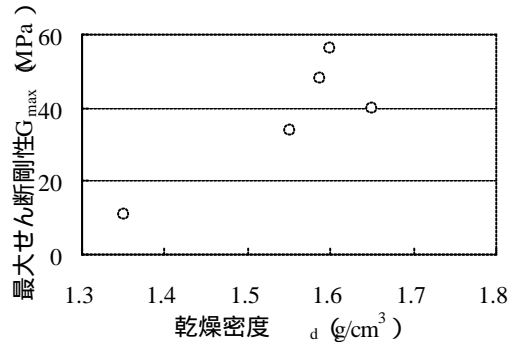


図-11 全ての供試体の乾燥密度と拘束圧 100 kPa における G_{max} の関係

3.4 ステージテストの実験結果

本節では、ステージテストの結果についてのみ考察する。

図-8に供試体 No.4の拘束圧 100 kPaの各サイクルに着目した $G \sim h$ の関係を示す。着目するサイクル数の影響が極めて小さいことがわかる。一方、豊浦砂の場合は、サイクル数の影響があることがわかっており¹⁾、この混合材料は砂とは異なる性質を示すことがわかる。

図-9に供試体 No.4の異なる拘束圧に対する $G \sim h$ の関係を示す。拘束圧の違いによる差異は小さいことがわかる。そこで、せん断剛性の拘束圧依存性を検討するために最大せん断剛性と拘束圧の関係を調べる。図-10に3つの供試体の最大せん

断剛性と拘束圧の関係を示す。密度の異なるいずれの供試体においても拘束圧依存性は小さい。珪砂の最大間隙比が e_{max} が 0.92 であるのに対して供試体の珪砂にのみ着目したとき、例えば供試体 No.4 においては、間隙比が 4.25 であるので、供試体中では珪砂のみで拘束圧を伝達するための骨格が形成されていないと言える。そのため、マトリックスとしてのベントナイト（粘土）の特徴が現れていると考えられる。

次に、乾燥密度依存性を検討する。図-11に全ての供試体の乾燥密度と拘束圧 100 kPa における G_{max} の関係を示す。データが少ないので断言はできないが、この材料は密度依存性があり、正の相関が認められるようである。

4. 結論

珪砂混合水練りベントナイト材料を用いた不飽和供試体の動的変形特性試験で得られた動的変形特性（剛性と減衰のひずみ依存性特性）に関する結論は以下の通りである。

- (1) ステージテストにおいては剛性と減衰のひずみ依存性特性に及ぼすサイクル数の影響は極めて小さい。
- (2) 50 ~ 400 kPa の拘束圧の範囲では、動的変形特性の拘束圧依存性はほとんどない。
- (3) 動的変形特性に乾燥密度依存性があり、剛性と乾燥密度の間には正の相関がある。
- (4) 漸増波載荷による方法は、供試体により結果がやや異なり課題が残るが、適用できる可能性はある。

参考文献

- 1) 森 伸一郎, 岡崎 健, 門脇 慶典, 御子柴 正: 砂質土の繰り返し変形特性の試験方法, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.677-680, 2002.

(2003.9.30 受付)

CYCLIC DEFORMATION CHARACTERISTICS OF SAND-MIXED BENTONITE

Shinichiro MORI, Ken OKAZAKI and Tadashi MIKOSHIBA

In Japan, it is planned to dispose high-level radioactive waste in deep stable geological formations. Bentonite in which sand is mixed will be used as the material for artificial barrier in the geological isolation. Authors conducted cyclic tests in cylindrical torsional apparatus for specimen with unsaturated sand-mixed bentonite. Its cyclic deformation characteristics is discussed based on the test results in terms of precision, confining stress dependency, and dry density dependency. Moreover, both gradually increasing wave loading we previously proposed and conventional stage-by-stage sinusoidal loading are adopted as shear loading technique, then the results are compared.