



圧縮ベントナイトの力学特性

高治 一彦

東海事業所 環境保全・研究開発センター処分研究部

資料番号：2-2

Mechanical Properties of Compacted Bentonite

Kazuhiko TAKAJI

Waste Management and Fuel Cycle Research Center Waste Isolation
Research Division, Tokai Works

我が国において、高レベル放射性廃棄物の処分は、ガラス固化体をオーバーパック、さらに緩衝材で覆い、岩盤中に設置することを基本概念としている。その緩衝材については、現在、ナトリウム型ベントナイトを基本材料として設計検討を進めている。そのため、設計に必要な諸特性について各種試験を実施し取得している。

本稿ではナトリウム型ベントナイト（クニゲルV1）の100%材料及びケイ砂の混合材料について、これまでに実施してきた一次元圧密試験や三軸圧縮試験等の力学特性に関する試験結果を取りまとめたので報告する。

To cover a vitrified waste with an overpack and a buffer material and to install in the rock is the basic concept of the disposal of the high-level radioactive waste, in our country. At present, JNC has developed the design of the buffer material using Na-bentonite as a basic material. Therefore, JNC is acquiring many characteristic data which are necessary to design the buffer material through various experiment.

This report is described about the result of mechanical tests, one-dimensional consolidation tests and triaxial compression tests and so on, which used pure bentonites and bentonite-sand mixtures.

キーワード

ベントナイト、力学特性、圧裂試験、一軸圧縮試験、一次元圧密試験、圧密非排水三軸試験、クリープ試験、動的三軸試験

Bentonite, Mechanical Property, Brazilian Test, Unconfined Compression Test, One-dimensional Consolidation Test, CU Test, Creep Test, Dynamic Triaxial Test

1. はじめに

サイクル機構では、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する研究開発の成果を2000年前までに取りまとめ、第2次取りまとめとして公表する予定である。また、第2次取りまとめにむけた研究開発の現在までの成果の集約を平成10年9月に第1ドラフトとして報告している¹⁾。

地層処分に関する研究開発のうち、人工バリアと処分施設の設計、製作・施工、建設等に関し、第2次取りまとめの研究開発の目標とされていることは、安全性を実現するための信頼性の高い人工バリア並びに処分施設についての設計要件を提示するとともに、これらが現実的な工学技術によ

って合理的に構築できることを示すことである。人工バリアは、放射性廃棄物を長期間安全に人間環境から隔離するための多重バリアシステムの一部であり、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材から構成される。人工バリアの概念図を図1に示す。

緩衝材は、岩盤とオーバーパックの間に設置されるものである。第2次取りまとめの研究開発目標に従い、緩衝材について抽出された設計要件として、放射性核種の移動を抑制する核種移行遅延性を有することや、地下水の移動を抑制する低透水性を有すること、オーバーパックの腐食膨張変形や岩盤のクリープ変形を力学的に緩和できる応

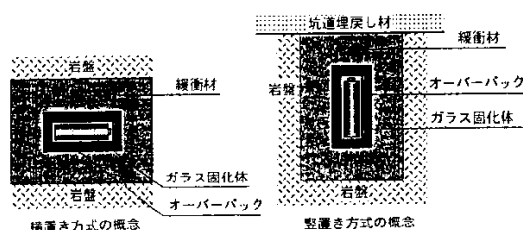


図1 人工バリアの概念

力緩衝性を有すること等、様々な機能や役割を満足することがあげられている¹⁾。緩衝材の設計要件を満足しているかどうかを検討し、合理的な設計を行うためには室内試験や工学規模試験により諸特性を明確にし、得られたデータを用いた数値解析等により様々な角度から評価を行う必要がある。

我が国では、求められている機能や役割を満足しうる緩衝材材料として、膨潤性能や止水性能に優れたナトリウム (Na) 型ペントナイト (モンモリロナイトの層間にナトリウムイオンを有するペントナイト) を基本材料として検討を進めている。第1次取りまとめ²⁾では、特に国産製品の1つであるクニゲルV1-100wt%を乾燥密度 1.8Mg m^{-3} に圧縮成型したものを候補材料とし、特性評価及び性能評価を行い、数多くの知見を得ている。現在では緩衝材の材料について、性能の向上、経済性及び入手の容易さ等を考慮し、ペントナイト (ここでは、参照材料としてクニゲルV1を用いた) にケイ砂を30wt%混合した材料を対象として検討を行っている。

これまでにサイクル機構では、満足すべき緩衝材の設計要件のうち、特に力学的要因が関与する要件について検討するために、種々の条件下でせん断特性や圧密特性、クリープ特性、動的特性データ等の取得を行っている。本報告ではクニゲルV1-100wt%材料 (以下、ペントナイト単体) 及びクニゲルV1とケイ砂の混合材料 (以下、ケイ砂混合体) について、圧裂試験、一軸圧縮試験、一次元圧密試験、圧密非排水三軸試験、圧密非排水三軸クリープ試験、動的三軸試験の現在まで得られている結果及び知見について取りまとめた。また、その反映の方法についても併せて述べることにする。

2. 各試験の概要及び結果

2.1 圧裂試験

(1) 試験の目的

処分場の操業段階において、緩衝材を処分坑道または処分孔に設置する方法の一案として、プロ

ック化した成型体を製作し、処分坑道または処分孔に積み重ねて設置する方法が検討されている。緩衝材ブロックを設置するハンドリング作業中に、ブロックには自重による引張応力や、ブロックのアーチ部分にたわみによる引張応力がかかることが考えられ、ハンドリングの成立性を検討する際、緩衝材の引張応力の把握が必要である。

そこで、緩衝材圧縮成型体の引張応力を求めるために、乾燥密度及びケイ砂混合率をパラメータとして圧裂引張試験を行った。

(2) 試験概要

直接的な引張試験には、供試体の製作や試験機に高い精度が要求され、試験の実施が困難である。圧裂試験は、簡便に実施できる間接的な引張試験であることから広く普及している試験方法であり、得られる引張応力は精度よく行われた一軸引張試験の結果とほぼ一致することが認められている³⁾。

圧裂試験は、円柱形の供試体を直径方向に上下から圧縮することにより線荷重が載荷され、円柱の中心線に沿って引張応力が生じる原理に基づき行われる試験である。

(3) 試験条件

供試体は、円筒形の鋼製容器内に投入した粉末状のペントナイトを側方拘束条件で上下二方向から圧縮して作製した。供試体の乾燥密度は $1.4 \sim 2.0\text{Mg m}^{-3}$ 、ケイ砂混合率は $0 \sim 30\text{wt\%}$ である。供試体サイズは $1.4 \sim 1.8\text{Mg m}^{-3}$ で直径 $49\text{mm} \times$ 高さ 49mm 、 2.0Mg m^{-3} で直径 $30\text{mm} \times$ 高さ 30mm とした。ケイ砂は粒径の異なる3号と5号の2種類のを質量比で1対1で混合したものをを用いた。なお、以降に示す他の試験においても、特に断らないかぎりケイ砂の混合比はこれと同じである。ペントナイトの含水比は約7% (自然含水比) である。同供試体条件に対して試験繰り返し数は3である。試験機は、変位制御が可能な圧縮試験機を使用した。ひずみ速度は、約 $1\% \text{min}^{-1}$ とした。

(4) 試験結果及び考察

載荷による破断面は、いずれのケースもほぼ円柱の中心線 (直径方向) に沿って真二つに割れており、供試体がほぼ均質であったことがうかがえる。供試体の乾燥密度と引張応力の関係を図2に示す。これより、供試体の乾燥密度が大きいほど、また、ケイ砂混合率が小さいほど、引張応力は大きいことがわかる。

また、この結果を有効粘土密度と引張応力の関係で整理したものを図3に示す。圧縮ペントナイ

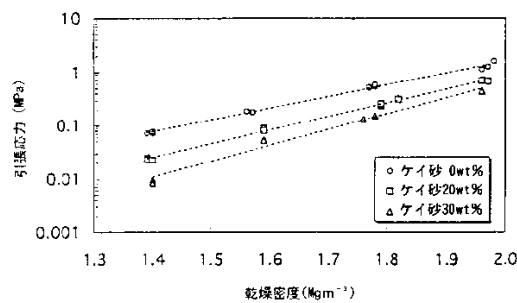


図2 乾燥密度と引張強度の関係

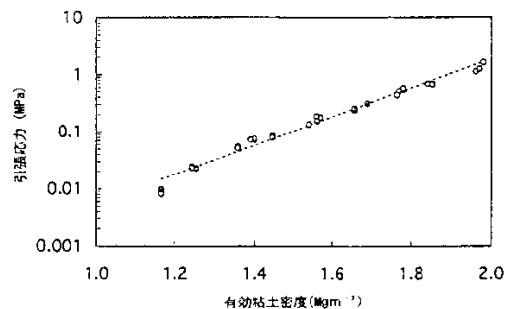


図3 有効粘土密度と引張強度の関係

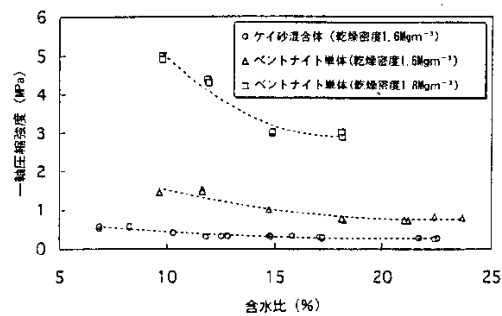


図4 含水比と一軸圧縮強度の関係

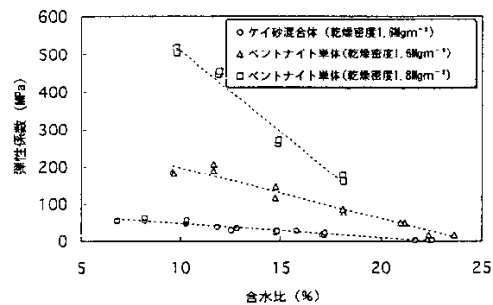


図5 含水比と弾性係数の関係

トの引張応力は、供試体中の粘土密度との関係において指数曲線により一義的に決まる。有効粘土密度とは、ベントナイトの重量を供試体中のケイ砂の体積分を除いた体積で割ったベントナイト分の密度である。

2.2 一軸圧縮試験

(1) 試験の目的

ベントナイトの圧縮特性には、乾燥密度や含水比、ケイ砂の混合率が影響を及ぼすと考えられ、一軸圧縮試験はそれらの影響を考慮した力学的指標となり、また、設計要件を検討するうえでも重要である。よって、乾燥密度や含水比、ケイ砂の混合率をパラメータとした一軸圧縮試験により圧縮特性データを取得した。

(2) 試験条件

試験は、初期乾燥密度、ケイ砂混合の影響を調べるために、現在の基本仕様である乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} のケイ砂混合体（ケイ砂混合率30wt%）及び乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} と 1.8 Mg m^{-3} のベントナイト単体について、供試体の含水比をパラメータとして実施した。含水比は、水分調整装置で調整し、自然含水比に相当する約6%からほぼ飽和に近い25%の間で数ケース用意した。供試体は側方

拘束条件で上下二方向から圧縮して作製した。供試体サイズは直径30mm×高さ60mmである。試験機は、圧裂試験と同じ圧縮試験機を使用した。速度は 0.1 mm min^{-1} （ひずみ速度約 $0.17\% \text{ min}^{-1}$ ）である。

(3) 試験結果及び考察

一軸圧縮強度と含水比の関係を図4に、弾性係数 E_{50} と含水比の関係を図5に示す。同じ含水比では初期乾燥密度が大きい程一軸圧縮強度、弾性係数は大きく、同じ初期乾燥密度ではベントナイト単体に比べ、ケイ砂混合体の一軸圧縮強度、弾性係数は小さい。また、同一の仕様では、一軸圧縮強度は含水比が高い程低下し、その関係は2次曲線で表すことができる。弾性係数も含水比が高い程低下し、その関係は直線で表せる。

2.3 一次元圧密試験

(1) 試験の目的

廃棄体設置後の緩衝材は、岩盤のクリープ変形や再冠水した後のオーバーバックの腐食膨張変形、また、オーバーバックの自重沈下等の静的な外力を長期にわたって受けることが予想される。一般に透水性の低い飽和粘土材料は、外力により瞬時に発生した過剰間隙水圧が徐々に消散するこ

とにより圧縮が進行する圧密現象を示す。

緩衝材の長期力学的安定性を検討する場合やオーバーバックの耐圧設計を行う場合、これらの外力に対する緩衝材の圧密特性を明らかにする必要がある。そこで、一次元圧密試験により圧密特性データの取得を行った。

(2) 試験概要

一次元圧密試験は、側方の変形を拘束した条件下で試料の圧縮—膨潤に対する変形挙動を調べる試験である。側方変位を拘束した飽和供試体に段階的に荷重を載荷し、その変位を計測することにより、間隙比と圧密応力の関係（ e -log P 曲線）等が得られる。装置の概念図を図6に示す。

試験手順、条件等は、地盤工学会の土質試験基準⁴⁾に基づいて行ったが、実際に想定される外力及びペントナイトの特性等をふまえ、載荷応力や載荷時間等に関して若干変更を行っている。

(3) 試験条件

試験は、初期乾燥密度、ケイ砂混合の影響を調べるために、現在の基本仕様である乾燥密度 1.6Mg m^{-3} のケイ砂混合体（ケイ砂混合率30wt%）及び乾燥密度 1.6Mg m^{-3} と 1.8Mg m^{-3} のペントナイト単体⁵⁾について実施した。なお、ケイ砂混合体については現在も試験を継続中である。供試体は側方拘束条件で圧縮成型した後、体積拘束条件で給水し飽和させた。供試体寸法は直径60mm×高さ20mmである。同供試体条件に対して試験繰り返し数は3である。

荷重の載荷は、給水により発生する膨潤応力がほぼ一定になった時点初期条件とし、19.6MPaまで8段階で行い、その後、初期膨潤応力相当まで4段階で除荷し、再び19.6MPaまで4段階で載荷した。各段階の載荷応力は対数軸上で載荷応力の間隔が等しくなるよう設定した。各載荷段階での圧密終了は3t法⁹⁾により判断した。

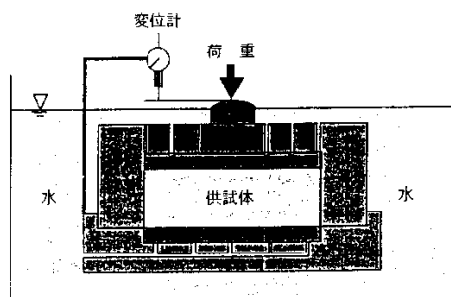


図6 圧密試験装置概念図

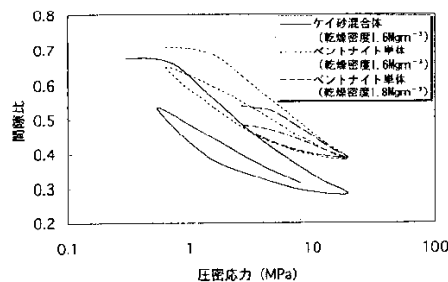


図7 一次元圧密試験結果

(4) 試験結果及び考察

圧密応力 P と間隙比 e の関係（ e -log P 曲線）について各仕様で代表的なものを選び、まとめたものを図7に示す。同条件に対して3回の試験を実施したが、大きなばらつきはなかった。図より、載荷過程における正規圧密領域の e -log P の関係は、ペントナイト単体についてはほぼ直線関係となるが、ケイ砂混合体では若干下に凸の形となった。また、除荷、再載荷過程では大きなヒステリシスループを描く。

また、図より、圧密降伏応力 p_c' （弾性域から塑性域に移行する降伏点）、圧縮指数 C_c （載荷過程における e -log P 曲線の傾き）、膨潤指数 C_s （除荷及び再載荷過程における e -log P 曲線の傾き）を表1のように設定した。なお、圧密降伏応力はCasagrandeの方法⁶⁾により求め、膨潤指数は19.6MPaにおける点と膨潤圧相当まで除荷した点とを結んだ傾きにより求めた。

圧密降伏応力は、それぞれの仕様における膨潤圧より若干大きい値となり、圧密初期の段階では過圧密状態にあることがわかった。また、一般的に飽和粘性土では、圧縮指数や膨潤指数は初期乾燥密度に依存しないが、ペントナイト単体についてみると乾燥密度 1.6Mg m^{-3} と 1.8Mg m^{-3} で若干異なっている。本供試体は乾燥状態の試料を高圧力で圧縮成型する応力履歴を受けた後、吸水飽和するという過程を経て作製されるため、圧縮指数や膨潤指数が初期乾燥密度依存性をもつと考えら

表1 圧密降伏応力、圧縮指数、膨潤指数一覧

	ケイ砂混合 $\rho_d=1.6\text{Mg m}^{-3}$	ペントナイト単体 $\rho_d=1.6\text{Mg m}^{-3}$	ペントナイト単体 $\rho_d=1.8\text{Mg m}^{-3}$
圧密降伏応力 p_c' (MPa)	0.77	1.5	4.7
圧縮指数 C_c	0.27	0.27	0.21
膨潤指数 C_s	0.16	0.18	0.11

れる。

2.4 圧密非排水三軸圧縮試験 (CU試験)

(1) 試験の目的

廃棄体設置後の緩衝材は、長期にわたり受けると思われる静的な外力により、圧密と同時にせん断力が発生する。オーバーパックの腐食膨張により発生するせん断力は隅角部が最も厳しい条件となることが予想され、また、破壊領域が広がると、特性評価や性能評価上有意な影響を及ぼす可能性もある。

これらの外力による緩衝材の長期力学的安定性を検討する場合、せん断特性を明らかにすることが重要である。そこで、圧密非排水三軸圧縮試験（以下、CU試験とする）によりせん断特性データの取得を行った。

(2) 試験の概要

三軸圧縮試験は、軸対称応力境界条件下で、材料の圧縮特性やせん断特性を調べる要素試験である。CU試験では供試体を圧密した後、水の出入りを許さない非排水状態でせん断を行う。せん断前の圧密段階では、供試体に σ_a (軸応力) = σ_r (側方応力) = σ_c (圧密応力) を負荷し等方圧密する。圧密後、 σ_r を一定に保ち σ_a を増加させることにより、供試体にせん断力 $(\sigma_a - \sigma_r)/2$ を作用させ、供試体のせん断特性及び強度を調べる。今回の試験のような非排水条件の場合、せん断中供試体内の体積は一定となるため、体積ひずみは0となる。試験結果としては、軸ひずみと軸差応力の関係や平均有効応力と軸差応力の関係(応力経路)等が得られる。試験機は変位制御、応力制御が可能な三軸せん断試験装置を使用した。装置の概念図を図8に示す。試験手順、条件等は基本的に地盤工学会の土質試験基準⁹⁾に基づいて行った。

(3) 試験条件

試験は、ケイ砂混合の影響を調べるために、現在の基本仕様である乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} のケイ砂混合体 (ケイ砂混合率30wt%) 及び乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} のベントナイト単体⁷⁾ について実施した。供試体は側方拘束条件で上下二方向から圧縮成型した後、体積拘束条件で給水し飽和させた。その後、飽和した供試体を三軸試験装置にセットし、圧密後、非排水条件でせん断試験を行った。供試体寸法は直径50mm×高さ100mm、背圧は約0.5~0.7MPa、有効拘束圧は膨潤圧相当 (ケイ砂混合体は約0.5MPa、ベントナイト単体は約1.0MPa) から0.5MPaごとに約3.0MPaまで、荷重速度は 0.01 mm min^{-1} (ひずみ速度約 $0.01\% \text{ min}^{-1}$)

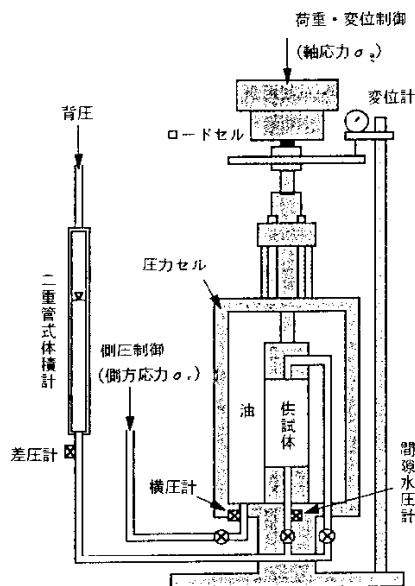


図8 三軸試験装置概念図

で軸ひずみが15%に達するまで荷重した。

(4) 試験結果及び考察

圧密の終了は3t法により判断した。圧密終了時の有効拘束圧と間隙比の関係は、一次元圧密試験結果より得られたベントナイト単体、ケイ砂混合体それぞれのe-logP曲線(図7)に対してほぼ妥当な値であった。また、供試体の飽和の度合いの目安となる間隙係数B値(間隙水圧の増分/拘束圧の増分)をせん断開始前に計測したところ、その結果は0.94以上であった。土質試験の基準である0.95以上という目安を若干下回るケースもあったが、概算で飽和度に換算すると99%以上であり、この状態で試験を実施することとした。

軸差応力と軸ひずみの関係は各試験結果とも非線形関係であり、軸ひずみが5~7%に達したあたりで軸差応力が最大となり、その後はほぼ一定もしくは若干低下している。

ケイ砂混合体についてのせん断時の平均有効応力と軸差応力の関係(応力経路)を図9に示す。正規圧密の範囲では、応力経路は有効拘束圧に関係なくほぼ同じ傾向を示している。また、せん断による負のダイレタンシー(せん断応力による体積圧縮)により過剰間隙水圧が発生し、平均有効応力が減少していることがわかる。また、過圧密状態にある供試体は、せん断による平均有効応力の変化が正規圧密状態のものに比べ小さく、せん断による正負ダイレタンシー挙動をほとんど示さ

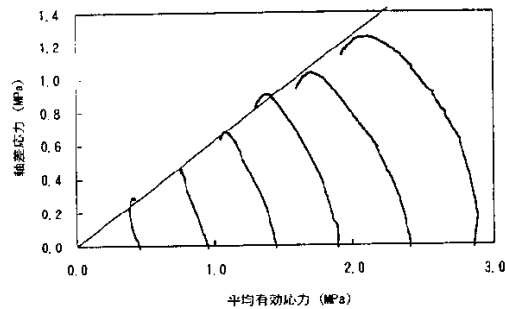


図9 ケイ砂30wt%混合ベントナイトの応力経路

ない。この傾向は、ベントナイト単体についても同様である。

破壊時の平均有効応力と軸差応力の関係を原点を通る直線で結んだ傾き(限界状態パラメータM)は、ベントナイト単体で0.58、ケイ砂混合体で0.63となった。粘着力を0とした場合の内部摩擦角を求めると、ベントナイト単体で15.3°、ケイ砂混合体で16.6°となる。

2.5 圧密非排水三軸クリープ試験

(1) 試験の目的

先にも示したとおり、廃棄体設置後の緩衝材は長期にわたり受けると予想される外力により圧密され、また、同時にせん断力が発生する。2.3で述べた一次元圧密試験の結果は一次圧密による挙動のみに関するものであり、土粒子骨格構造の時間依存性に基づき時間遅れをもって生じる二次圧密(粘性的挙動)を考慮していない。また、せん断挙動に対しても時間依存性を示すが、2.4で述べたCU試験の結果は、ひずみ速度約0.01%min⁻¹の条件下で行われた試験であり、実際の外力はもっと遅い速度で与えられると予想される。例えば、オーバーバックの沈下に対する評価に、粘性的挙動を考慮するか否かで、沈下量に有意な差の生じることが考えられる。

緩衝材の外力に対する長期力学的安定性を検討する場合、時間依存性(クリープ特性)を明確にすることが重要である。そこで、圧密非排水三軸クリープ試験(以下、クリープ試験とする)によりクリープ特性データの取得を行った。

(2) 試験の概要

クリープ試験は軸対称応力境界条件下で、材料のせん断クリープ特性を調べる要素試験である。本試験では供試体を圧密した後、クリープ載荷を行う。せん断前の圧密段階では、三軸せん断試験

同様、供試体に σ_a (軸応力) $=\sigma_r$ (側方応力) $=\sigma_c$ (圧密応力)を負荷し等方圧密する。圧密後、 σ_r を一定に保ち、設定した σ_a を瞬時に与え長期間保持することにより、供試体にせん断力 $(\sigma_a - \sigma_r)/2$ を作用させ、供試体のせん断クリープ特性を調べる。今回の試験のような非排水せん断試験の場合、せん断中供試体内の体積は一定となるため体積ひずみは0となる。

試験結果としては、時間とひずみまたはひずみ速度との関係等が得られる。試験機はCU試験と同じ試験装置を使用した。

(3) 試験条件

試験は、乾燥密度1.6Mg m⁻³のケイ砂混合体(ケイ砂混合率30wt%)について実施した。供試体は側方拘束条件下で上下二方向から圧縮成型した後、体積拘束条件下で給水し飽和させた。その後、飽和した供試体を三軸試験装置にセットし、圧密後非排水条件下でクリープ試験を実施した。供試体寸法は直径50mm×高さ100mm、有効拘束圧は約3.0MPa、載荷応力は2.4で述べたCU試験より得られた破壊応力の30、50、70%の3ケースを設定した。載荷期間は約6カ月間である。

(4) 試験結果及び考察

時間の対数とひずみ及び間隙水圧増分の関係を図10に示す。今回の試験のうち、載荷応力が最も大きい応力度70%(破壊応力の70%)で6カ月間載荷しても、破壊に至らなかった。また、載荷初期においては、載荷応力が大きいほどひずみの増加量も大きい、長期的には載荷応力によらずほぼ一定の増加率となっている。つまり、破壊に至らないクリープ応力条件下では、定常クリープ状態の挙動は載荷応力に依存しない結果となった。

より詳細に検討するためには、破壊に至るさら

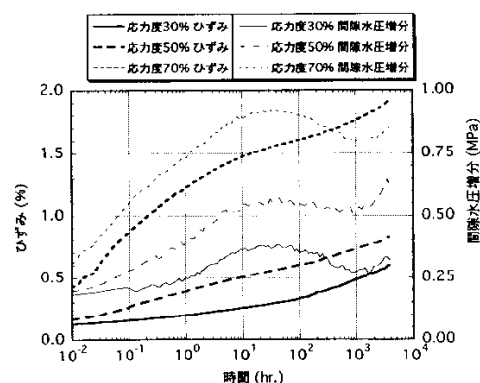


図10 時間とひずみ、間隙水圧増分の関係

に高い応力下での試験による挙動の把握と、CU試験結果との比較による結果の妥当性の検討が必要である。

2.6 粘性土の構成式

上の力学挙動は、応力一ひずみ一時間関係で構成式として定式化することによって、数値解析等による検討が可能となる。

試験結果は、数値解析を行ううえで必要な、構成式のパラメータとして適用される。例えば、粘性土を弾塑性体と考えて構成式化した代表的なモデルにCam-Clayモデル⁸⁾がある。Cam-Clayモデルに必要な材料定数の中に、圧縮指数、膨潤指数、限界状態パラメータがあり、これらは先に示した一次元圧密試験やCU試験により求められる。さらに、クリープ試験結果を用いれば、時間依存性を考慮した粘弾塑性モデルを適用できる。また、解析目的によっては、一軸圧縮試験により求められる弾性係数を用いた線形弾性解析で十分な場合もある。

現在、緩衝材（ベントナイト）の力学的要因が関与する種々の設計課題（静的な問題）に対して、検討すべき内容に見合った手法やモデルを適宜選択し、合理的に解析検討を進めている。

2.7 動的三軸試験

(1) 試験の目的

廃棄体設置後の緩衝材には、静的な外力が長期にわたって作用する他に、我が国のような地震の多い地質環境条件下での地層処分においては、地震外力が発生する可能性がある。地震外力に対する人工バリアシステムの健全性を検討するためには、耐震解析による評価が必要であるが、精度の良い解析を行ううえで、緩衝材の動的変形特性について把握することが不可欠である。

一般に緩衝材のような土質材料の動的特性は、ひずみレベルの影響が顕著である。そこで、幅広いひずみレベルの影響を把握するために動的三軸試験を実施し、動的特性データの取得を行った。

(2) 試験の概要

動的三軸試験は、軸対称応力境界条件下で、材料の動的変形特性を調べる要素試験である。今回行った圧密非排水動的三軸試験は、 σ_a （軸応力） $=\sigma_r$ （側方応力） $=\sigma_c$ （圧密応力）を負荷して等方圧密した後、水の出入りを許さない非排水状態で σ_c を一定に保ち、軸差応力振幅 $\Delta\sigma_a$ を数回与えることにより求まるせん断応力とせん断ひずみの履歴曲線から動的変形特性を調べるものである。

試験機は、軸差応力振幅が与えられる振動三軸試験装置を用いた。装置の概念はほぼCU試験及び三軸クリープ試験に用いた試験装置と同じであるが、軸差応力振幅が与えられることに加え、軸ひずみを局所軸ひずみ計測装置（L.D.T）とギャップセンサーにより計測が可能である。

(3) 試験条件

試験は、種々の乾燥密度、飽和・不飽和条件で行っているが、ここでは乾燥密度 1.6Mg m^{-3} と 1.8Mg m^{-3} のベントナイト単体、乾燥密度 1.6Mg m^{-3} のケイ砂混合体（ケイ砂混合率30wt%）の飽和条件で行った結果についてまとめる。供試体は側方拘束条件で圧縮成型した後、体積拘束条件で給水し飽和させた。その後、飽和した供試体を三軸試験装置にセットし、圧密後非排水条件で動的三軸試験を実施した。供試体寸法は直径50mm×高さ100mmである。また、有効拘束圧は各仕様における膨潤応力相当近傍（乾燥密度 1.6Mg m^{-3} のベントナイト単体は約1.0、2.0、3.0MPa、 1.8Mg m^{-3} のベントナイト単体は約3.0、4.0、4.5MPa、乾燥密度 1.6Mg m^{-3} のケイ砂混合体は約0.3、0.5、0.7MPa）の3ケースについて行った。

軸力の載荷は軸差応力振幅を制御する応力制御により行った。軸差応力振幅は、1 供試体に対してひずみの小さいほうから大きいほうへ10段階程度変化させるステージ方式により載荷した。また、1 段階につき0.2Hz程度の正弦波を10回程度加え、5 波目、10波目のヒステリシスループでデータ処理を行った。

(4) 試験結果及び考察

各応力振幅載荷段階において、動的ポアソン比を計測したが、飽和条件のすべてのケースにおいて、0.5に近い値となった。

得られたせん断ひずみ γ と等価せん断剛性率 G 、履歴減衰定数 h の関係の一例（ケイ砂混合体）を図11に示す。なお、整理に用いた波数は5 波目、軸変位計はL.D.Tによるものであるが、有効拘束圧0.3MPaのものに関しては計測に不備があったため、ギャップセンサーの値を用いている。これより、ベントナイトの動的特性は、土質材料一般の非線形性と同様な傾向を示すことがわかった。また、 G は拘束圧が高いほど大きくなったが、 h は顕著な拘束圧依存性は見られなかった。この傾向は、他の仕様についても同様であった。

地震応答解析法には、実験式に基づく土の応力一ひずみ関係の非線形性を考慮した逐次積分法がある。得られたデータを用いた応力一ひずみ関係の履歴関係を与える力学モデルとしては、

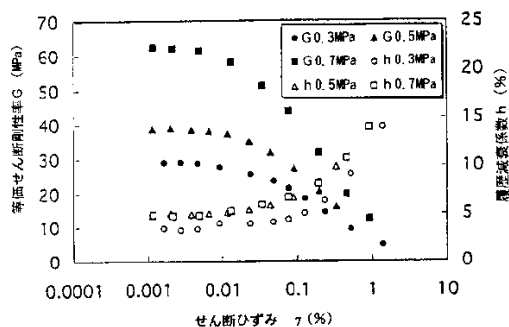


図11 ケイ砂30wt%混合ベントナイトの動的三軸試験結果

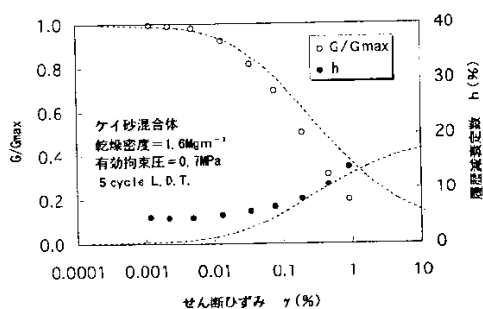


図12 R-Oモデルfitting結果

Ramberg-Osgoodモデル (R-Oモデル)⁹⁾とHardin-Drnevichモデル (H-Dモデル)¹⁰⁾が代表的である。

ここでは、R-Oモデルによるパラメータの設定、フィッティングを行った結果の一例を図12に示す。G/G_{max}はひずみレベルが大きいほど、hについてはひずみレベルが小さいほど若干実測値から外れるが、全体的にはほぼ実験結果をうまく表現しているといえる。ここで、G_{max}はせん断ひずみ $\gamma = 0$ に相当するGである。この傾向は、他の仕様についても同様であった。

3. まとめ

各試験の結果及び考察を以下にまとめる。

(1) 圧裂試験

- ① 供試体の乾燥密度が大きいほど、また、ケイ砂混合率が小さいほど、引張応力は大きい。
- ② 圧縮ベントナイトの引張応力は、供試体中の粘土密度との関係において指数曲線により一義的に決まる。

(2) 一軸圧縮試験

- ① 同じ含水比では初期乾燥密度が大きいほど一軸圧縮強度、弾性係数は大きく、同じ初期

乾燥密度ではケイ砂を混合することにより一軸圧縮強度、弾性係数は小さくなる。

- ② 同一の仕様では、一軸圧縮強度、弾性係数は含水比が高いほど低下し、その関係はそれぞれ2次曲線、直線で表すことができる。

(3) 一次元圧密試験

- ① 各仕様における圧密降伏応力、圧縮指数、膨潤指数は表1のようになる。
- ② 圧密初期の段階では過圧密状態にある。
- ③ 本供試体は製作過程の影響を受け、圧縮指数や膨潤指数が初期乾燥密度依存性をもつ。

(4) 圧密非排水三軸圧縮試験

- ① 軸差応力と軸ひずみの関係は各試験結果とも非線形関係であり、軸ひずみが5～7%に達したあたりで軸差応力が最大となる。
- ② 限界状態パラメータは、ベントナイト単体で0.58、ケイ砂混合体で0.63となった。

(5) 圧密非排水三軸クリープ試験

- ① 載荷初期においては、載荷応力が大きいほどひずみ速度も大きい、長期的には載荷応力によらずほぼ一定のひずみ速度となる。
- ② 応力度70%（破壊応力の70%）で6カ月間載荷しても、破壊に至らなかった。

(6) 動的三軸試験

- ① 飽和条件のすべてのケースにおいて、動的ポアソン比は0.5に近い値となる。
- ② 得られたせん断ひずみと等価せん断剛性率、履歴減衰定数の関係より、ベントナイトの動的特性は、土質材料一般の非線形性と同様な傾向を示す。
- ③ Ramberg-Osgoodモデルによるパラメータの設定、フィッティングを行った結果、全体的にはほぼ実験結果をうまく表現している。

4. おわりに

緩衝材の設計検討を行うにあたって明確にすべき特性のうち、特に力学特性に関する各種試験の概要と結果について、現在まで得られているものについてとりまとめた。現在は、これらの力学特性データを用い、種々の設計検討を実施している。今後は更にデータの充実を図り、より精度の高い検討を行う予定である。例えば、地層処分環境においては、緩衝材は地熱やガラス固化体の崩壊熱により高温状態にあるが、得られたデータはすべて室温条件下での結果である。東畑らは高温環境がベントナイトの力学特性に様々な影響を与えることを実験的に示しており¹⁰⁾、力学特性の温度依存性については重要な検討課題の1つである。

参考文献

- 1) 動力炉・核燃料開発事業団：“地層処分研究開発第2次取りまとめ 第1ドラフト”，PNC TN1412 98-013, (1998).
- 2) 動力炉・核燃料開発事業団：“高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書—平成3年度—”，PNC TN1410 92-081, (1992).
- 3) 土質工学会：“岩の調査と試験”，(1989).
- 4) 地盤工学会：“土質試験の方法と解説”，(1996).
- 5) 並河努，菅野毅 他：“緩衝材の圧密特性”，動力炉・核燃料開発事業団技術資料 PNC TN8410 97-051, (1997).
- 6) Casagrande, A.：“The structure of clay and its importance in foundation engineering, Contributions to Soil Mechanics”, J.BSCE, pp.72-112, (1932).
- 7) 並河努，菅野毅 他：“緩衝材のせん断特性 I”，動力炉・核燃料開発事業団技術資料 PNC TN8410 97-C74, (1997).
- 8) Schofield, A.N., Wroth, C.P.：“Critical State Soil Mechanics”, McGraw-Hill, London, (1968).
- 9) 土質工学会：“土質工学ハンドブック”，(1988).
- 10) 東畑郁生，ビシット ケンティワタナクン 他：“粘土の工学的性質に及ぼされる高温環境の影響”，土と基礎，Vol.46 No.10 Ser. No.489, p.27-30, (1998).