

# 高レベル放射性廃棄物の地層処分における ベントナイト緩衝材継目部の 力学および浸潤特性

今村雅弘<sup>1</sup>・千々松正和<sup>2</sup>・杉田裕<sup>3</sup>・菊池広人<sup>4</sup>  
村田澄彦<sup>5</sup>・雨宮清<sup>6</sup>・斎藤敏明<sup>7</sup>

- <sup>1</sup>工修 中央開発株式会社 東京支社 地盤技術部 (〒332-0035 埼玉県川口市西青木3-4-2)  
<sup>2</sup>正会員 工修 株式会社間組 原子力部 (〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)  
<sup>3</sup>正会員 工修 核燃料サイクル開発機構 (〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33)  
<sup>4</sup>正会員 核燃料サイクル開発機構 (〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33)  
<sup>5</sup>工修 京都大学助手 工学研究科資源工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)  
<sup>6</sup>正会員 学術博 株式会社間組 原子力部 (〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)  
<sup>7</sup>正会員 工博 京都大学教授 工学研究科資源工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

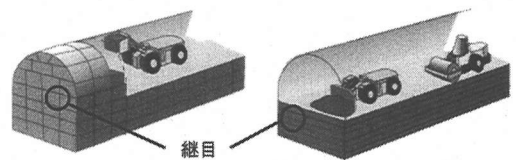
高レベル放射性廃棄物の地層処分において用いられるベントナイト緩衝材の継目部分のせん断力学特性および浸潤特性を明らかにするため、その充填方法の違いを反映した圧縮成型供試体と現場施工供試体を準備し、一面せん断試験および透水試験を実施した。その結果、ベントナイト緩衝材の継目部分はせん断強度が小さく、また、卓越した透水経路となることを確認できた。しかし、ベントナイト緩衝材が飽和、膨潤することで、継目部分が強度や透水性に与える影響は低減することが明らかになった。

**Key Words :** *shear properties, permeability, swelling, bentonite buffer, geological disposal of high-level radioactive waste*

## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の処分方法として様々なものが考えられているが、地下数 100m の岩盤中に廃棄物を埋設する地層処分が最も現実的であり、現在、研究が進められている<sup>1), 2)</sup>。この地層処分では、廃棄物を収納したオーバーパックと周辺岩盤の間に緩衝材を充填するが、緩衝材には、オーバーパック支持性の他に、地震等からオーバーパックを保護し、放射性核種の拡散を遅延することが要求される。このため、低透水性で、膨潤による自己シール性や核種吸着性を有するベントナイトが緩衝材の第一候補として挙げられている<sup>1), 2)</sup>。

ベントナイト緩衝材の充填方法としては、図-1 に示すようにブロック定置方式と現場締め固め方式の2つが主要工法として考えられている<sup>3)</sup>。前者は、あらかじめ地上施設で作製されたベントナイトブロックを処分場で積み重ねていくもので、後者は、ベントナイトを所定の厚さごとに現場で締め固めるものである。それぞれの充填方法に対して長所、短



(a) ブロック定置方式

(b) 現場締め固め方式

図-1 ベントナイト緩衝材の充填方法

所が存在するが、どちらの方法で充填した場合にも緩衝材には継目が存在する。地下水の浸潤に伴い、この継目は緩衝材の膨潤性能により一体化すると考えられるが、飽和に至るまでの期間や一体化不備により、弱面となることが予想される。したがって、ベントナイト緩衝材の安定性を評価する場合、その一体部分だけでなく、継目部分の力学特性および浸潤特性についても把握することが重要である。

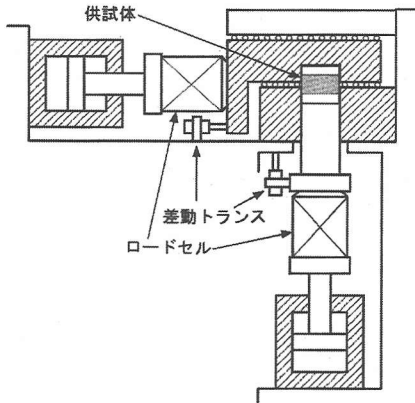


図-2 せん断試験機

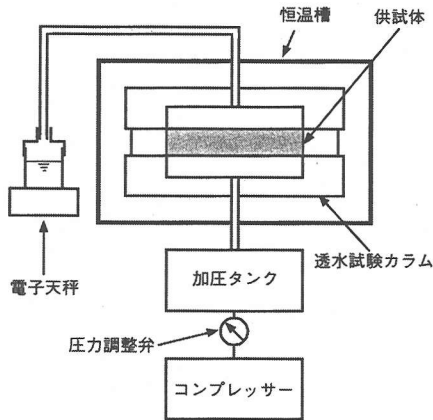


図-3 透水試験機

本研究では、ベントナイト緩衝材の継目部分のせん断力学特性および浸潤特性に着目し、両充填方法を対象とした供試体に対し、一面せん断試験および透水試験を実施した。また、それぞれのせん断力学特性および浸潤特性について検討するとともに、供試体の継目の有無や充填方法の違いによる特性について比較検討し、考察を行った。なお、ブロック定置方式を対象とした供試体は成型セル内で加圧固化させて作製したもので、現場締め固め方式を対象とした供試体は釜石鉱山において実施された「粘土充填・熱負荷試験」<sup>4)</sup>の際に充填されたベントナイト緩衝材<sup>5)</sup>を回収し、整形したものである。また、本論文では、ブロック定置方式を対象とした供試体を圧縮成型供試体、現場締め固め方式を対象とした供試体を現場施工供試体とよぶこととする。

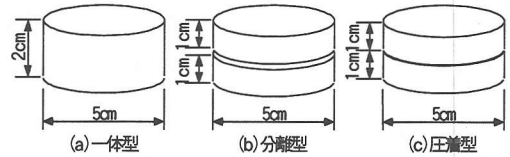


図-4 せん断試験用圧縮成型供試体

表-1 クニゲル V1 の基本特性<sup>1)</sup>

	項目	値
鉱物組成	モンモリロナイト	46~49 (wt%)
	石英	29~38 (wt%)
	ほか	10%以上
物理特性	真比重	2.7
	液性限界	416 (%)
	塑性限界	21 (%)
	陽イオン交換量	52 (meq/100g)

## 2. 試験方法、供試体および試験条件

### (1) 試験方法

一面せん断試験に使用した試験機を図-2に示す。せん断試験では、せん断面を供試体の中央断面に一致させ、垂直応力を一定に保ちながら、毎分0.05mmのせん断変位速度でせん断変位が約2mmに達するまでせん断した。この際、差動トランスでせん断変位、垂直変位を、ロードセルでせん断荷重、垂直荷重を測定した。

透水試験には、図-3に示す定水位型の透水試験装置を使用した。透水試験では、コンプレッサーから0.8MPaの圧縮空気を加圧タンクに送り込み、蒸留水を加圧して、所定温度の恒温槽内におかれた透水試験カラムへ供給した。その後、電子天秤によって単位時間あたりの蒸留水の透過量を測定した。

### (2) 供試体

せん断試験用の圧縮成型供試体は図-4に示した、一体型供試体、分離型供試体、圧着型供試体の3種類で、それぞれ、ベントナイトブロックの一体部分のせん断力学特性、継目部分のせん断力学特性、ベントナイトの膨潤による圧着効果を調べるためのものである。本研究では、表-1に示す国産ベントナイトであるクニゲルV1のみのベントナイト単体の供試体を用いた。一体型供試体および分離型供試体については、飽和度50%、100%状態の2種類の供試体を作製したが、圧着型供試体については、ベント

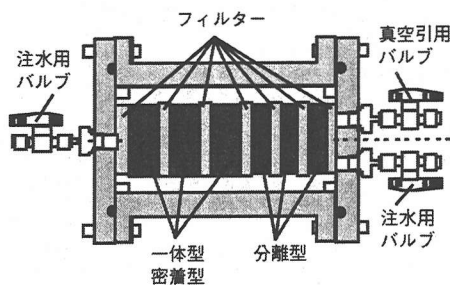


図-5 飽和セル

表-2 一軸圧縮試験結果

供試体	圧縮成型		現場施工	
	飽和度		飽和状態	
	50%	100%*	不飽和	飽和
ヤング率 (MPa)	808.0	147.4	145.0	13.0
ポアソン比	0.35	0.36	—	—
一軸圧縮強度 (MPa)	5.4	2.2	0.85	0.46

※短期飽和供試体

ナイトの膨潤により継目を圧着させるため、飽和度100%状態の供試体のみである。飽和度50%状態の供試体は緩衝材が設置された時点の状態を、飽和度100%状態の供試体は処分場閉鎖後の緩衝材が飽和した状態を模擬している。一体型供試体および分離型供試体に関して、飽和度50%状態の供試体は、乾燥密度 $1.65\text{g/cm}^3$ となるように精密万能試験機（島津製オートグラフAG-10TB型）を用いて、粉末ベントナイトを成型セル内で圧縮固化させて作製したものである。各供試体の寸法は図-4に示すとおりである。一方、飽和度100%状態の供試体は、一体型、分離型、圧着型供試体の全てを対象としている。一体型供試体および分離型供試体については、飽和度50%状態の供試体をそれぞれの供試体の厚さ（一体型供試体は2cm、分離型供試体は1cm）に区切られた飽和セル（図-5参照）内に入れ、また、圧着型供試体については、分離型供試体と同じ厚さ1cmで作製した50%状態の供試体を2枚合わせて厚さ2cmに区切られた飽和セル内に入れ、真空吸引によりセル内の残留空気を除去した後、水を約1ヶ月および8ヶ月間一定圧で注入し、飽和させて作製した。以下では、飽和期間1ヶ月および8ヶ月の供試体をそれぞれ短期飽和供試体および長期飽和供試体とよぶ

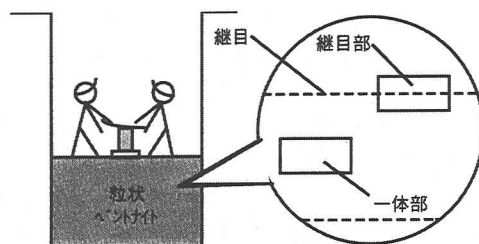


図-6 粘土充填・熱負荷試験における緩衝材の充填および現場施工供試体（2種類）の採取位置関係

こととする。せん断試験では、表-2に示す圧縮成型供試体の飽和度100%状態での一軸圧縮強度およびそのときの膨潤圧力<sup>1)</sup>を考慮し、垂直荷重を負荷しても破壊に至らない条件より、垂直応力を0.2, 1.0, 2.0MPaの3ケースに設定した。なお、各ケースでの試験回数は、飽和度50%状態の供試体については3回、飽和度100%状態の供試体のうち、短期飽和供試体については3回、長期飽和供試体については1回である。

現場施工供試体は、「粘土充填・熱負荷試験」の際に充填された緩衝材を回収し<sup>6)</sup>、整形したものである。「粘土充填・熱負荷試験」は、実岩盤中に充填された低透水性粘土の熱-水-応力連成現象のデータ取得を目的に釜石鉱山550m坑道において実施したものである<sup>4)</sup>。この試験では、緩衝材として粒状ベントナイトOT-9607<sup>7)</sup>（クニゲルV1の生産工程途中で取り出した最大粒径4.75mm、平均モンモリロナイト含有率45.5%のベントナイト。粒径以外の基本特性はクニゲルV1とほぼ同じ）を用い、これを含水比15%に調節し、図-6に示すように10cmの厚さごとに締め固めた。ここで、粒状ベントナイトを用いたのは、クニゲルV1と比較して粒径が広範囲にわたって分布していることから、現場で供給できる限られた締め固めエネルギーでも、より高密度で粘土を充填できるためである<sup>3)</sup>。また、層同士の密着度を高めるため、新しい層を充填する段階で前の層の表面にリップングを実施している<sup>5)</sup>。供試体は継目のない一体部分と各層間の継目が中央断面となるように整形した継目部分の2種類（図-6参照）で、それぞれ一体部供試体、継目部供試体とよぶこととする。供試体の寸法および形状はそれぞれ図-4(a), (c)と同様である。また、それぞれの供試体に対して、不飽和状態および飽和状態の2種類の供試体を作製した。不飽和状態の供試体は、「粘土充填・熱負荷試験」終了後に回収したベントナイトを所定の形状、大きさに整形したもので、平均

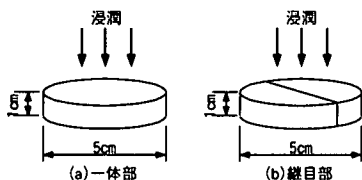


図-7 透水試験用供試体

乾燥密度は  $1.7 \text{ g/cm}^3$  ( $1.64 \sim 1.86 \text{ g/cm}^3$ ), 平均飽和度は 60% (47.7~71.1%) であった。一方, 飽和状態の供試体は, 圧縮成型供試体と同様に, 不飽和状態の供試体を飽和セル内で約 1 ヶ月間, 飽和させて作製したもので, 平均乾燥密度は  $1.7 \text{ g/cm}^3$  ( $1.51 \sim 1.82 \text{ g/cm}^3$ ), 平均飽和度は 98.5% (95.5~100%) であった。このように現場施工供試体の乾燥密度は一様でなく, なかには圧縮成型供試体の乾燥密度に比べて小さいものもあった。このような乾燥密度の小さい現場施工供試体の一軸圧縮強度は圧縮成型供試体の一軸圧縮強度よりも小さいものと考えられる。そこで, 現場施工供試体のせん断試験では, 先の理由からこのような一軸圧縮強度の小さい供試体についても有意な試験結果が得られるように垂直応力をより小さくした 0.2, 0.5, 1.0 MPa の 3 ケースに設定した。なお, 各ケースでの試験回数は 3 回である。

透水試験用の供試体は, 圧縮成型供試体および現場施工供試体ともに図-7に示した2種類で, それぞれの材料および作製方法はせん断試験用の供試体のものと同じである。なお, 各ケースでの試験回数は, 3~4回である。

### (3) 試験条件

一面せん断試験および透水試験の試験条件を表-3にまとめて示す。

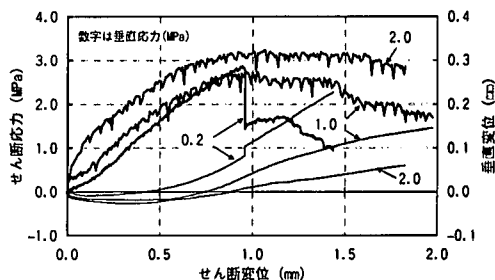
## 3. せん断試験結果

### (1) 圧縮成型供試体の試験結果

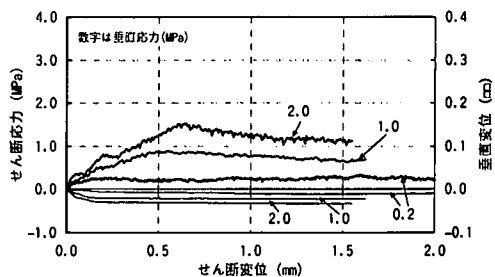
飽和度 50% 状態の一体型供試体および分離型供試体の試験結果をそれぞれ図-8(a), (b)に, 短期飽和供試体の試験結果を垂直応力ごとにまとめたものをそれぞれ図-9(a), (b), (c)に示す。図には, 各ケースでの代表的な試験結果について, せん断変位とせん断応力の関係, および, せん断変位と垂直変位の関係を同時に示している。垂直変位は垂直応力の載荷を終えた時点の値を零として, 膨張を正の

表-3 一面せん断試験および透水試験の試験条件

一面せん断試験 (垂直応力)	
圧縮成型供試体	0.2, 1.0, 2.0 (MPa)
現場施工供試体	0.2, 0.5, 1.0 (MPa)
透水試験	
蒸留水供給圧力	0.8 (MPa)



(a) 一体型供試体



(b) 分離型供試体

図-8 飽和度 50% 状態におけるせん断試験結果 (太線…せん断応力, 細線…垂直変位)

値としている。

せん断強度に着目すると, 飽和状態によらず, 一体型供試体のピークせん断強度および残留せん断強度はすべての垂直応力下で分離型供試体や圧着型供試体のものより大きいことが分かる。このことから, ベントナイトブロックの一体部分は継目部分に比べて大きなせん断強度を有していると考えられる。飽和度 50% 状態における一体型供試体では, 垂直応力が上昇してもピークせん断強度はそれほど大きくならないのに対して, 分離型供試体では, 垂直応力の上昇とともに, ピークせん断強度も大きく上昇していることが分かる。また, 短期飽和状態での圧着型供試体のピークせん断強度は, すべての垂直応力下で分離型供試体のものより大きいことから, ベントナイトブロックの継目が圧着することで, 継目部

表-4 圧縮成型供試体のせん断強度

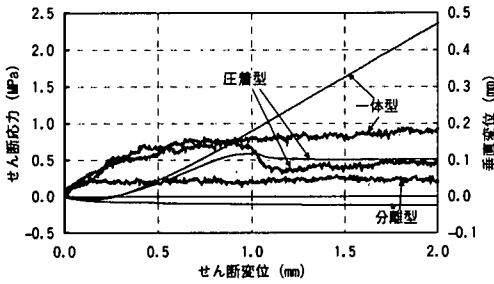
飽和度	供試体	せん断強度 (MPa) <sup>※</sup>		
		垂直応力 (MPa)		
50%	一体型	0.2	1.0	2.0
		2.64	2.75	3.18
	分離型	0.2	1.0	2.0
		1.55	1.79	2.84
100%	一体型	0.2	1.0	2.0
		0.93	1.53	1.49
	分離型	0.2	1.0	2.0
		0.16	0.51	0.64
圧着型	0.2	1.0	2.0	
	0.72	0.73	0.75	
		0.36	0.60	0.60

※上段がピークせん断強度，下段が残留せん断強度

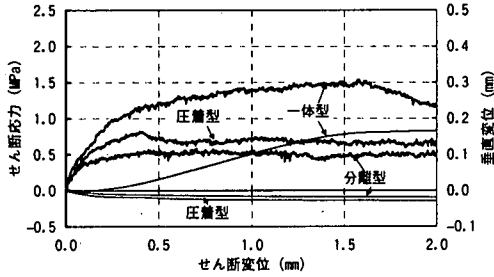
表-5 一体型供試体に対する分離型，圧着型供試体のせん断強度

飽和度	供試体	正規化したせん断強度 <sup>※</sup>		
		垂直応力 (MPa)		
50%	分離型	0.2	1.0	2.0
		0.07	0.32	0.48
100%	分離型	0.2	1.0	2.0
		0.12	0.39	0.43
	圧着型	0.2	1.0	2.0
		0.17	0.33	0.43
		0.17	0.42	0.52
		0.77	0.48	0.50
		0.39	0.49	0.49

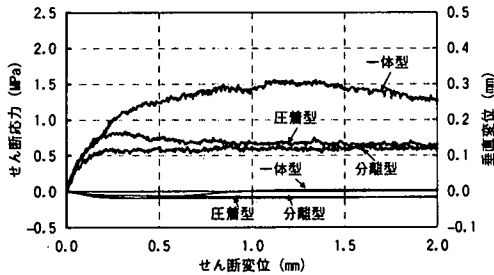
※上段がピークせん断強度，下段が残留せん断強度



(a) 垂直応力 0.2MPa



(b) 垂直応力 1.0MPa



(c) 垂直応力 2.0MPa

図-9 短期飽和供試体のせん断試験結果 (太線…せん断応力，細線…垂直変位)

分のピークせん断強度が上昇するものと期待できる。しかし、ここで圧着の効果が顕著にみられるのは垂直応力 0.2MPa における試験だけで、垂直応力の上昇にしたがって、ピークせん断強度、残留せん断強度ともに分離型供試体のものと差がなくなることが確認できる。

次に、垂直変位に着目すると、一体型供試体では、全ての垂直応力下でダイレイタンスが発生していることが分かる。このダイレイタンス量は垂直応力が大きくなるにしたがって減少しており、垂直応力によってダイレイタンスが抑制されているものと考えられる。これに対し、分離型供試体では、ダイレイタンスがみられないことから、分離型供試

体の変形は継目に沿う滑りが支配的であると考えられる。一方、圧着型供試体では、圧着の効果が顕著にみられた垂直応力 0.2MPa における試験のみでダイレイタンスが確認できる。しかし、せん断強度が低下すると、それ以降ダイレイタンス量が増加せず一定となっていることが分かる。

(2) 考察

a) 飽和度の違いによるせん断強度特性の比較

飽和度 50%状態の供試体および短期飽和供試体のせん断強度の平均値を表-4 に、また、各飽和度、各垂直応力における一体型供試体のせん断強度を 1.00 として正規化した分離型供試体、圧着型供試体のせん断強度を表-5 に示す。一体型供試体についてせん断強度を比較すると、飽和度 50%状態の一体型供試体のピークせん断強度、残留せん断強度ともに飽和度 100%状態の供試体のものと比べて 2 倍程度大きいことが分かる。したがって、処分場閉鎖後、ペントナイトブロックが飽和することで、そ

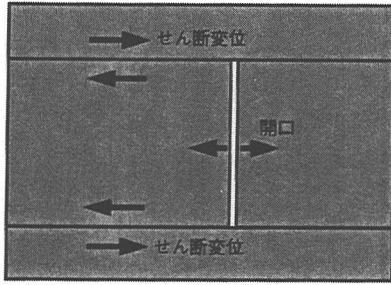


図-10 ブロックの変位による直交継目の開口

のせん断強度は半分程度に低下するものと考えられる。一方、継目部については、ベントナイト緩衝材が飽和すると継目が圧着されるものと考え、飽和度50%状態の分離型供試体と短期飽和状態の圧着型供試体のせん断強度を比較すると、垂直応力が0.2MPaの場合にはピークせん断強度、残留せん断強度ともに短期飽和状態の圧着型供試体の方が大きいことが分かる。このことから、垂直応力が小さい状態では、ベントナイト緩衝材が飽和し、ブロックの継目が圧着されると、この部分のせん断強度が上昇するものと考えられる。また、表-5 から分かるように、飽和度50%状態の分離型供試体のピークせん断強度、残留せん断強度は、それぞれ一体型供試体の7~48%、12~43%であるのに対し、短期飽和状態の圧着型供試体では、それぞれ48~77%、39~49%となっている。このことから、ベントナイト緩衝材が飽和すると、ベントナイトブロックとブロックの継目部分のせん断強度の差は小さくなり、継目の弱面としての影響は小さくなるものと考えられる。

緩衝材設置直後は緩衝材にそれほど大きな応力が作用せず、今回の試験における飽和度50%状態、垂直応力0.2MPaに近い状態が想定される。この場合、ベントナイトブロックに対するブロックの継目部分のせん断強度が極めて小さいため、ベントナイト緩衝材の変形は、ブロックの継目部分で発生する可能性が高いと考えられる。この変形はダイレイタンシーを伴わない滑り変形であると考えられるため、図-10に示すように、滑りを伴う継目で開口する可能性は低い、それに直交する継目で開口する可能性があるといえる。また、緩衝材の飽和後についても同様に、緩衝材の変形は、ブロックの継目部分で発生する可能性が高いと考えられる。この変形は、作用する垂直応力が大きくなるほど、ダイレイタン

表-6 長期飽和供試体のせん断強度

供試体	せん断強度 (MPa)*			
	垂直応力 (MPa)	0.2	1.0	2.0
一体型		1.60	1.55	1.70
		0.96	1.10	1.46
分離型		0.29	0.57	0.75
		0.29	0.57	0.75
圧着型		0.94	1.03	1.20
		0.43	0.72	0.94

※上段がピークせん断強度、下段が残留せん断強度

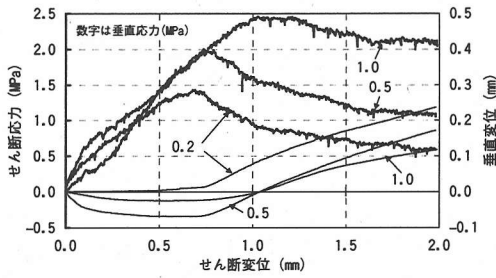
シーを伴わない滑り変形になるものと考えられる。しかし、垂直応力がほとんど作用していない状態では、今回の試験結果から分かるように、継目部分のせん断力学特性はベントナイトブロックのものと同様になるものと考えられ、継目が開口したり、ブロック内部で開口亀裂が発生する可能性があるといえる。

#### b) 飽和期間の違いによるせん断強度特性の比較

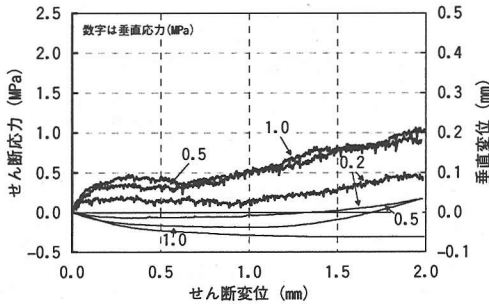
ここでは、ベントナイト緩衝材が飽和後、長期間経過することでせん断強度特性がどのように変化するのかについて検討する。

長期飽和供試体のせん断強度を表-6に示す。短期飽和供試体と長期飽和供試体のピークせん断強度を比較すると、平均乾燥密度がそれぞれ1.72g/cm<sup>3</sup>、1.75g/cm<sup>3</sup>とほぼ等しいにもかかわらず、長期飽和供試体のせん断強度の方が大きいことが分かる。これは、シキソトロピー現象<sup>8)</sup>(含水比一定の状態でも長期間放置されることで、粘土粒子間の結合力が増加する現象)によるものと考えられる。したがって、ベントナイト緩衝材のせん断強度は飽和後、長期間経過することで、上昇するものと考えられる。また、表-6より、長期飽和状態での圧着型供試体のピークせん断強度は一体型供試体に対する強度比で、垂直応力が小さい順に0.59、0.66、0.71となり、垂直応力が大きい場合においても継目の圧着効果を期待することができる。

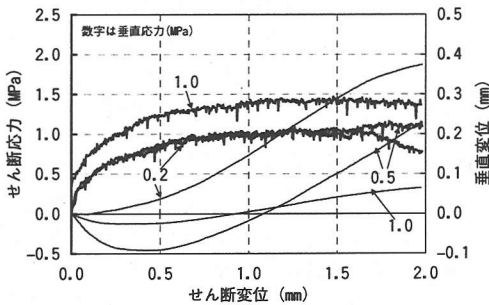
以上のことから、ベントナイト緩衝材が飽和し、長期間経過することで、ベントナイトブロックおよびブロックの継目部分は、ともにせん断強度が上昇するものと考えられる。また、ベントナイト緩衝材において、ブロックの継目部分のせん断強度は、相対的に上昇するものと期待でき、時間の経過に伴い、継目の弱面としての影響は小さくなるものと考えられる。



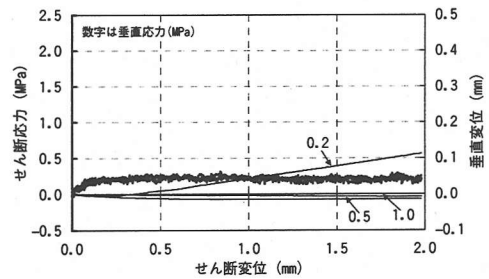
(a) 不飽和状態，一体部供試体



(b) 不飽和状態，継目部供試体



(c) 飽和状態，一体部供試体



(d) 飽和状態，継目部供試体

図-11 現場施工供試体のせん断試験結果  
(太線…せん断応力，細線…垂直変位)

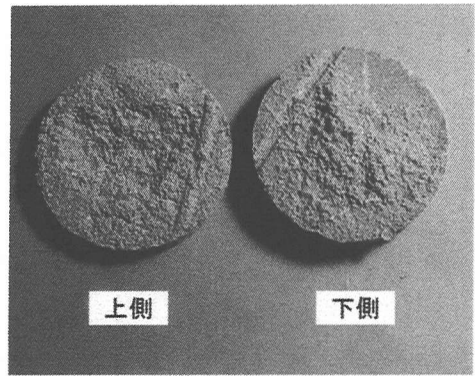


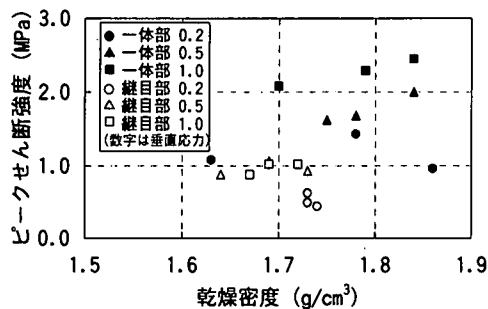
写真-1 継目部供試体のせん断面 (せん断後)

### (3) 現場施工供試体のせん断試験結果および考察

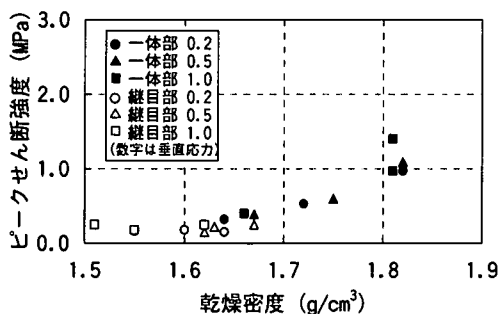
現場施工供試体の試験結果を図-11(a), (b), (c), (d)に示す。それぞれ、不飽和状態における一体部供試体、継目部供試体の試験結果と飽和状態における一体部供試体、継目部供試体の代表的な試験結果である。

不飽和状態では、図-11(a)より、一体部供試体で明瞭なピークせん断強度が現れており、圧縮成型供試体と同様な傾向を示していることが分かる。それに対し、図-11(b)より、継目部供試体ではせん断変位の増加にしたがってせん断強度が緩やかに増加していることが分かる。また、写真-1に示すように試験後の継目部供試体は、継目の上側のベントナイトが大きくえぐられ、リッピングを施した下側の面に付着しているのが観察された。したがって、せん断強度が緩やかに増加している原因の一つとして、このようなせん断面の掘り起こしの発生が考えられる。しかし、これについては、さらなる検討が必要であろう。また、飽和状態では、図-11(c)より、飽和状態での一体部供試体は圧縮成型供試体とほぼ同じ挙動を示していることから、ベントナイト緩衝材の一体部分ではブロック定置方式と現場施工方式の差はないものと考えられる。それに対し、図-11(d)より、継目部供試体ではピークせん断強度はみられず、せん断強度はほとんど発揮されていないことが分かる。次に、垂直変位に着目すると、一体部供試体では全てのケースでダイレイタンスーが発生していることが分かる。一方、継目部供試体では、垂直応力 0.2, 0.5MPa における不飽和状態の試験および垂直応力 0.2MPa における飽和状態の試験の3ケースでダイレイタンスーが確認できる。これらのダイレイタンスー量は垂直応力が大きくなるにしたがって減少する傾向がみられる。





(a) 不飽和状態

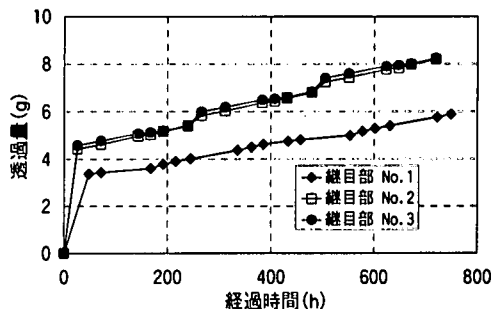


(b) 飽和状態

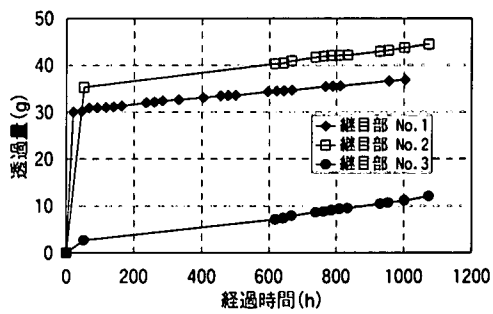
図-12 ピークせん断強度と乾燥密度の関係

次に、現場施工供試体の乾燥密度とピークせん断強度の関係を図-12(a), (b)に示す。それぞれ、不飽和状態、飽和状態で全ての試験結果をまとめたものである。これより、今回使用した供試体では、一体部供試体の密度は大きく、継目部供試体の密度は小さいことが分かる。一体部供試体では、不飽和状態における垂直応力 0.2MPa での試験を除いて、乾燥密度の増加に伴いピークせん断強度が増加しているのに対し、継目部供試体では、乾燥密度とピークせん断強度に明瞭な相関はみられない。

このような結果が得られた原因として、図-12から分かるように現場施工供試体の乾燥密度には大きな幅があり、「粘土充填・熱負荷試験」においてベントナイト緩衝材を充填する際に、締め固めが均一に行われず、層内に密度分布が生じたことが考えられる。このことは、継目部供試体を整形する際に、継目の上部のベントナイトは柔らかく、下部では硬かったことから推察できる。したがって、現場で締め固められたベントナイト緩衝材の一体部分においては、各層の上部ほど乾燥密度が大きく、また、大きなピークせん断強度を有することになると予想される。一方、継目部分について、ベントナイトは乾燥密度が大きいものほど膨潤圧も大きくなること



(a) 圧縮成型供試体



(b) 現場施工供試体

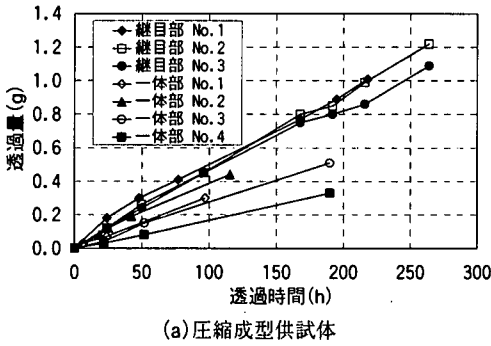
図-13 経過時間と透過量の関係

を考慮すると、飽和状態の継目部供試体で乾燥密度とピークせん断強度に相関がみられなかったのは、今回使用した供試体では乾燥密度が小さいため、膨潤による圧着効果が顕著でなかったためと考えられる。このことは今後、乾燥密度の大きい供試体を用いて確認する必要があると考えられる。

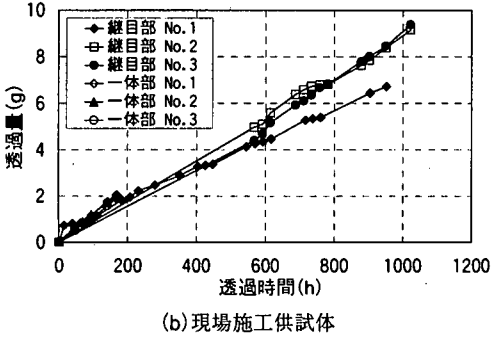
#### 4. 透水試験結果および考察

圧縮成型供試体および現場施工供試体の継目部供試体の加圧注水後の経過時間と透過量の関係をそれぞれ図-13(a), (b)に示す。図-13(a)から圧縮成型供試体については、加圧注水直後の時間当たりの透過量は大きかったが、透過速度はやがて減少し、定常状態に至った。このことから、加圧注水直後、水は主として継目を流れるが、供試体部分に水が浸潤し、膨潤すると継目が閉塞し、それに伴って、供試体全体から水が排出されるようになり、定常状態に至るものと考えられる。現場施工供試体についても、圧縮成型供試体の継目部分と同様に加圧注水後の時間当たりの透過量は大きかったが、図-13(b)に示すように透過量が定常となってからの透過速度





(a) 圧縮成型供試体



(b) 現場施工供試体

図-14 定常状態での経過時間と透過量の関係

はいずれの供試体でもほぼ同じであった。

これに対し、一体部供試体においては、加圧注水開始から浸潤面が飽和するまでは水の透過はみられず、その後、一定の透過速度で透過した。これは、水が供試体の間隙を浸潤し、供試体が飽和することで初めて排水を生じているものと考えられる。ここで、透過量が定常に至った状態以降の結果を零点として透過時間と透過量の関係を圧縮成型供試体、現場施工供試体のそれぞれについて継目部供試体および一体部供試体の両者を併記して図-14(a), (b)に整理した。それぞれのグラフの傾きは、定常状態での水の透過速度を表している。

圧縮成型供試体の試験後の供試体から求めた乾燥密度と定常状態での透過速度から算出した透水係数を表-7に示す。これより、継目部供試体の透水係数の方が一体部供試体のものより若干大きくなっているが、同オーダの値を示していることが分かる。すなわち、ベントナイトの膨潤により継目が閉塞することで、透水性に対する継目の影響は小さくなり、継目部分は一体部分と同様の透水性を示すことになるものと考えられる。

一方、現場施工供試体の試験後の供試体から求めた飽和度と定常状態での透過速度から算出した透水

表-7 透水試験結果(圧縮成型供試体)

供試体	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	飽和度 (%)	透水係数 (10 <sup>-14</sup> m/s)
一体部	1.80	108.16	2.40
	1.79	105.39	3.31
	1.81	106.81	2.40
	1.81	111.09	1.56
継目部	1.82	106.00	8.03
	1.79	113.94	7.70
	1.79	113.99	7.87

表-8 透水試験結果(現場施工供試体)

供試体	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	飽和度 (%)	透水係数 (10 <sup>-14</sup> m/s)		
一体部	1.65	-	21.4		
			21.2		
			19.6		
継目部	1.66	105.10	11.6		
			1.63	109.15	20.4
			1.60	108.29	25.1

係数を表-8に示す。同表には、粒状ベントナイトを室内にて圧縮成型した一体部供試体の透水試験結果も示している。これより、継目部供試体と一体部供試体の透水係数に大きな差はなく、現場施工供試体においても、ベントナイトの膨潤により継目が閉塞することで、透水性に与える継目の影響はなくなるものと考えられる。

以上のことから、どちらの方法でベントナイトを充填した場合でも、浸潤開始直後には継目が卓越した透水経路となる可能性が高いと考えられる。しかし、ベントナイトが飽和、膨潤することで、継目部分での水の透過量は減少し、一体部分のものと差がなくなるものと考えられる。

## 5. おわりに

本研究では、ブロック定置方式および現場施工方式のそれぞれを対象とした供試体に対して、一面せん断試験および透水試験を実施した。ここで得られた結果をそれぞれ充填方法ごとにまとめ、結論とする。

ブロック定置方式においては、緩衝材設置後の不飽和状態で、ベントナイトブロックの継目部分のせ

せん断強度は非常に小さく、また、その隙間は卓越した透水経路となるものと考えられる。しかし、緩衝材飽和後は、せん断強度は低下するものの、ベントナイトブロックとブロックの継目部分でせん断強度特性および浸潤特性の差は小さくなり、緩衝材全体が一体化されたものと捉えることができるようになると考えられる。また、緩衝材の飽和後、長期間経過することで、ベントナイトブロックの継目の圧着効果が高まることから、この傾向はさらに顕著になるものと期待できる。

一方、現場締め固め方式においては、締め固めが均一に行われず、層内に密度分布が生じたり、継目の性状が均一とならない場合、一体部分のせん断強度や、飽和初期における継目部分での水の透過速度に大きなバラツキがみられる可能性がある。しかし、飽和後の継目部分の浸潤特性は一体部分のものと同様となると考えられ、緩衝材全体として一様な止水機能を期待できる。

今回、長期でも8ヶ月という限られた期間であるが、飽和膨潤期間が長くなることで、継目のある緩衝材が力学的および水理学的に一体として機能する可能性を示すことができた。今後、より長期の試験を行うことにより、緩衝材の一体化に関するデータを蓄積していく必要があると考えられる。

## 参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性、地層処分研究開発第2次取りまとめ、総論レポート、1999。
- 2) 電力中央研究所・電気事業連合会：高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術、1999。
- 3) 千々松正和、杉田裕、雨宮清：緩衝材の製作・施工技術に関する検討、サイクル機構技術資料、JNC TN8400 99-035、1999。
- 4) 千々松正和、杉田裕、藤田朝雄、雨宮清：釜石原位置試験場における粘土充填・熱負荷試験結果、サイクル機構技術資料、JNC TN8400 99-024、1999。
- 5) 杉田裕、千々松正和、藤田朝雄：粘土充填・熱負荷試験における緩衝材充填技術の検証、サイクル機構技術資料、TN8430 98-003、1998。
- 6) 杉田裕、藤田朝雄、千々松正和：粘土充填・熱負荷試験におけるベントナイトのサンプリング、サイクル機構技術資料、JNC TN8430 98-002、1998。
- 7) Fujita, T., Chijimatsu, M., Ishikawa, H., Suzuki, H. and Matsumoto, K.: Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Experiment at Kamaishi Mine, Technical Note 11-96-04, Fundamental Properties of Bentonite OT-9607, PNC TN8410 97-071, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 1997。
- 8) 土質工学会：土質工学ハンドブック、pp.47-48、1965。

(2000. 3. 13 受付)

## SHEAR PROPERTIES AND PERMEABILITY OF THE JOINT OF BENTONITE BUFFER FOR GEOLOGICAL DISPOSAL OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTE

Masahiro IMAMURA, Masakazu CHIJIMATSU, Yutaka SUGITA, Hirohito KIKUCHI, Sumihiko MURATA, Kiyoshi AMEMIYA and Toshiaki SAITO

In order to understand the shear and hydraulic properties of the joint of bentonite buffer for geological disposal of high level radioactive waste, single plane shear tests and permeability tests were conducted. Two types of bentonite specimens, compressed in the laboratory and compacted at the test site in Kamaishi Mine, were prepared considering construction methods. From these tests, the joint part of the bentonite buffer is the weakest and the most permeable part. However, its influence on shear strength and permeability decreases, after the bentonite buffer is saturated and the effect of swelling is appeared.