

緩衝材ブロック継ぎ目部の力学および浸潤特性

1998年4月

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 (Tokai Works)

技術開発推進部 技術管理室

(Technology Management Section)

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to : Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4-33, Muramatsu, Ooaza, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, 319-1194, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)
1998

緩衝材ブロック継ぎ目部の力学および浸潤特性

実施責任者：石川博久^{*1}、油井三和^{*1}

報 告 者：千々松正和^{*1}、杉田裕^{*1}、松本一浩^{*2}、
菊池広人^{*2}、村田澄彦^{*3}、斎藤敏明^{*3}

要 旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリアシステムでは、廃棄体周辺を緩衝材によって覆うことが考えられている。緩衝材の候補材料の一つであるベントナイトには、止水性、自己シール性、核種吸着性、熱伝導性、化学的緩衝性、オーバーパック支持性、応力緩衝性等が期待されており、これらの機能を評価することを目的として、数々の室内試験が実施されている。また、緩衝材の施工方法としては、原位置締固め方式とブロック積み重ね方式が考えられている。原位置締固め方式の場合、打ち継ぎ目はあるものの、その部分に隙間は生じず、緩衝材は一体となるため耐久強度も期待できるが、施工の機械化が困難であったり、施工期間が長期化することが予想される。一方、ブロック積み重ね方式は、あらかじめ作成したブロックを積み重ねていくため、施工上はるかに簡便なものとなる。しかし、この場合、ブロックの継ぎ目部分が弱面となったり、隙間が生じて卓越した水分浸潤の経路となる可能性がある。原位置締固め方式により施工された緩衝材の場合は、ベントナイトが一体となっており、現在取得中のデータを用い評価を行なうことが可能であると考えられるが、ブロック積み重ね方式の場合、緩衝材内の物理的挙動を評価する上で、この継ぎ目部分の力学および浸潤特性を評価することが重要であると考えられる。したがって、本論では、ブロック積み重ね方式を対象にブロック一体部分およびブロックの継ぎ目部分の力学特性および浸潤特性について検討を行なった。力学特性に関しては、一面せん断試験を実施し検討した。試験の対象としたのは、ブロック一体部分、ブロック継ぎ目部分およびブロック継ぎ目部分がベントナイトの膨潤により圧着した部分である。また、浸潤特性に関しては、水分拡散試験によりブロック一体部分とブロック継ぎ目部分との比較を、飽和透水試験によりブロック一体部分とブロック継ぎ目部分がベントナイトの膨潤により圧着した部分との比較を行なった。また、経済性、熱伝導性を高めるためにベントナイトにケイ砂を混合した材料（ケイ砂混合ベントナイト試料）についても、そのせん断特性に関してベントナイト単体材料と比較検討した。その結果、次のようなことが分かった。

- ・水分の飽和度が高くなるにつれ緩衝材の強度は低下する。
- ・水分の飽和度が低い場合はブロック部に比べブロック継ぎ目部のせん断強度はかなり小さくなり、弱部となると考えられる。一方、緩衝材が飽和した場合はブロック部の強度は飽和度が低い場合に比べて小さくなるが、ブロック部と継ぎ目部の差は無くなっていく。すなわち、緩衝材が飽和することにより全体的に強度は小さくなるが、弱部となる部分は無くなっていくものと考えられる。
- ・ケイ砂混合ベントナイト試料は、コスト面や熱伝導性の面で有利であるとされているが、強度的にはベントナイト単体試料に比べて小さくなる。
- ・継ぎ目部分を含む供試体内の水分の浸潤速度はブロック部に比べ早くなる。継ぎ目部分に大きな隙間がある場合や外部の水圧が高い場合は、この部分が卓越した浸潤経路となるものと考えられる。
- ・緩衝材が水分飽和した場合、浸透に与える継ぎ目部分の影響は緩衝材の膨潤により小さくなる。

*1 東海事業所 環境技術開発部 地層処分開発室

*2 検査開発（株）

*3 京都大学工学研究科資源工学教室

目 次

1. はじめに	1
2. ブロック継ぎ目部のせん断特性	2
2.1 実験方法	2
2.1.1 試料作成	2
2.1.2 せん断試験装置	5
2.2 実験結果および考察	6
2.2.1 試料形状とせん断力学特性	6
2.2.2 飽和度とせん断力学特性	17
2.2.3 ケイ砂混合ベントナイト試料のせん断力学特性	22
3. ブロック継ぎ目部の浸潤特性	25
3.1 水分拡散試験	25
3.1.1 実験条件	25
3.1.2 実験方法	27
3.1.3 実験結果	28
3.2 飽和透水試験	30
3.2.1 実験条件	30
3.2.2 実験方法	30
3.2.3 実験結果	31
4. まとめ	31
参考文献	32

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリアシステムでは、廃棄体周辺を緩衝材によって覆うことが考えられている。緩衝材の候補材料の一つであるベントナイトには、止水性、自己シール性、核種吸着性、熱伝導性、化学的緩衝性、オーバパック支持性、応力緩衝性等が期待されており、これらの機能を評価することを目的として、数々の室内試験が実施されている。それらの内、ベントナイト中の水分浸潤（以下、浸潤と記す）および透水挙動を評価するためには水分拡散係数、水分ポテンシャル¹⁾ および水分飽和（以下、飽和と記す）状態の透水係数の測定が²⁾、力学的安定性を評価するために圧密特性、せん断特性等が測定されている^{3) 4)}。また、緩衝材の施工方法としては、原位置締固め方式とブロック積み重ね方式が考えられている⁵⁾。原位置締固め方式の場合、打ち継ぎ目はあるものの、その部分に隙間は生じず、緩衝材は一体となるため耐久強度も期待できるが、施工の機械化が困難であったり、施工期間が長期化することが予想される。一方、ブロック積み重ね方式は、あらかじめ作成したブロックを積み重ねていくため、施工上はるかに簡便なものとなる。しかし、この場合、図1-1に示すようなブロックの継ぎ目部分が弱面となったり、隙間が生じて卓越した浸潤経路となる可能性がある。原位置締固め方式により施工された緩衝材の場合は、ベントナイトが一体となっており、現在取得中のデータを用い評価を行なうことが可能であると考えられるが、ブロック積み重ね方式の場合、緩衝材内の物理的挙動を評価する上で、この継ぎ目部分の力学および浸潤特性を評価することが重要であると考えられる。

したがって、本論では、ブロック積み重ね方式を対象にブロック一体部分およびブロックの継ぎ目部分の力学特性および浸潤特性について検討を行なった。力学特性に関しては、一面せん断試験を実施し検討した。試験の対象としたのは、ブロック一体部分、ブロック継ぎ目部分およびブロック継ぎ目部分がベントナイトの膨潤により圧着した部分である。また、浸潤特性に関しては、水分拡散試験によりブロック一体部分とブロック継ぎ目部分との比較を、飽和透水試験によりブロック一体部分とブロック継ぎ目部分がベントナイトの膨潤により圧着した部分との比較を行なった。

また、経済性、熱伝導性を高めるためにベントナイトにケイ砂を混合した材料（ケイ砂混合ベントナイト試料）についても、そのせん断特性に関してベントナイト単体材料と比較検討した。

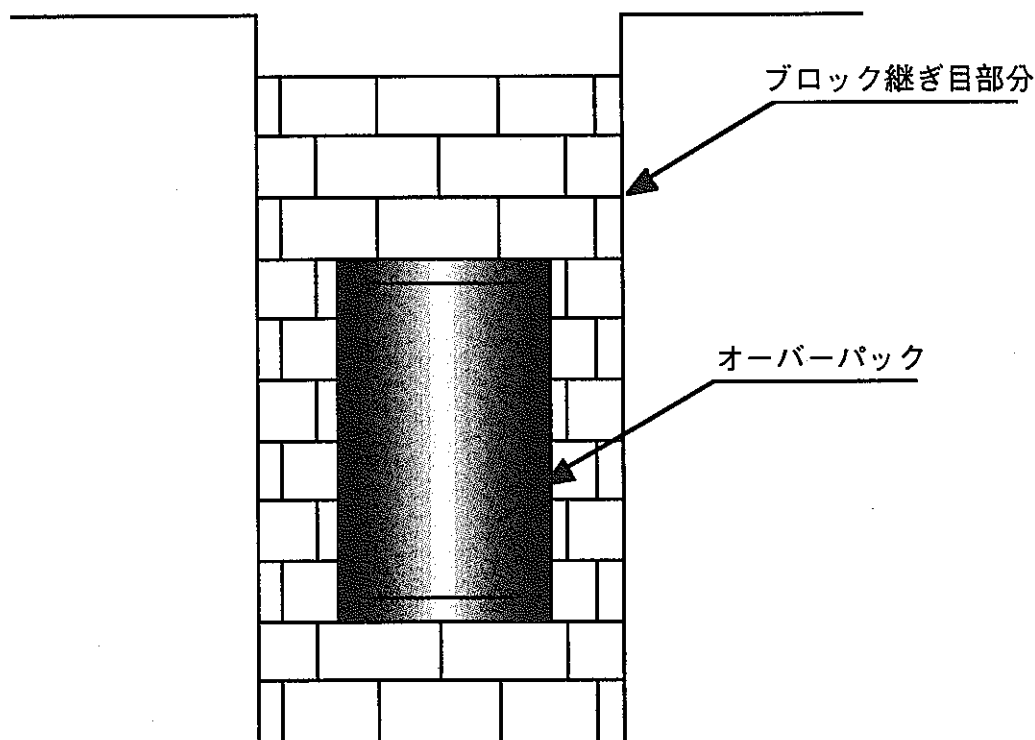


図1-1 ブロック積み重ね方式により施工された緩衝材の模式図

2. ブロック継ぎ目部のせん断特性

2.1 実験方法

2.1.1 試料作成

試験に用いた試料は、図2-1に示すように、直径5 cm、厚さ2 cmの一体型試料 (Integrated Body, I Type)、直径5 cm、厚さ1 cmの試料を重ねた分離型試料 (Separated Body, S Type)、分離型試料を飽和セル内で膨潤圧により圧着させて一体化した圧着型試料 (Adhered Body, A Type) の三種類である。これらの試料はそれぞれ、ブロックのせん断力学特性、ブロック継ぎ目のせん断力学特性、ベントナイトの膨潤による圧着効果を調べるために準備したものである。また、それぞれの種類の試料に対して、飽和度50%および100%の試料、ケイ砂を含む試料および含まない試料を準備し、表2-1に示す合計10種類の試料に対してせん断試験を行なった。以下、ケイ砂を含まない試料をベントナイト単体試料 (Bentonite)、含む試料をケイ砂混合ベントナイト試料 (Bentonite-Sand mixture) と呼び区別することとする。なお、圧着型試料については、膨潤により圧着されるため飽和度100%の試料のみである。飽和度50%は緩衝材が設置された時点の状態を、100%は緩衝材が再冠水した状態を表している。

飽和度50%の試料は、材料を乾燥密度が 1.8g/cm^3 となるように材料試験機を用いて圧縮成型した。一方、飽和度100%の試料は、飽和度50%の試料を飽和セル

に入れ、真空吸引を行いセル内の残留空気を除去した後、水を約1か月間一定圧で注入し飽和させて作成した。飽和セルの模式図を図2-2に示す。飽和セルは幅が2cmと1cmになるようにフィルターで仕切られている。一体型試料は幅が2cmの部分に設置され、分離型試料は幅が1cmの部分に設置される。圧着型試料は厚さ1cmの試料を2つ合わせ、幅が2cmの部分に設置される。また、ケイ砂混合ベントナイト試料は、ベントナイトとケイ砂を質量比で7:3の割合で混合したもので、試料の作成方法はベントナイト単体試料と同様である。使用したケイ砂は、5号ケイ砂と3号ケイ砂を質量比で、1:1の割合で混合したものである。ベントナイト（クニゲルV1）およびケイ砂の粒径加積曲線を図2-3に示す。

ベントナイト単体試料の飽和度別の物性値を表2-2に示す。表2-2よりベントナイト試料は飽和度が高くなるにつれて強度が低下することが分かる。

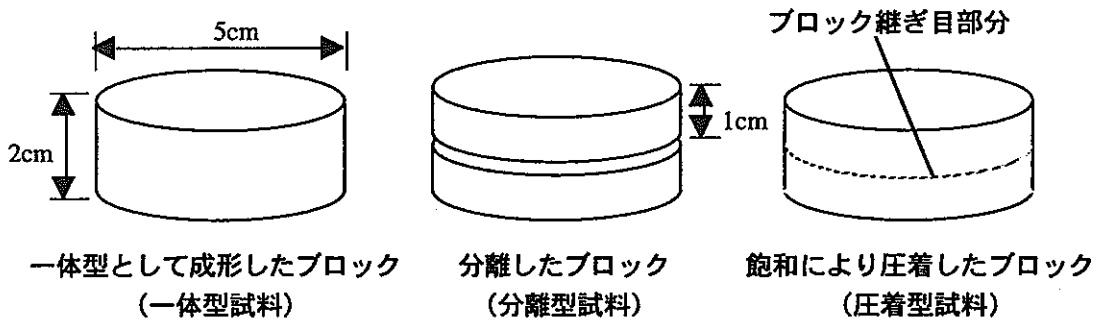


図2-1 試料模式図

表2-1 試料一覧

飽和度	材料	一体型	分離型	圧着型
50%	ベントナイト単体試料	○	○	—
	ケイ砂混合ベントナイト	○	○	—
100%	ベントナイト単体試料	○	○	○
	ケイ砂混合ベントナイト	○	○	○

表2-2 ベントナイト単体試料の物性値

飽和度	ヤング率 [MPa]	ポアソン比	一軸圧縮強度 [MPa]
50%	808.0	0.35	5.4
100%	147.4	0.36	2.2

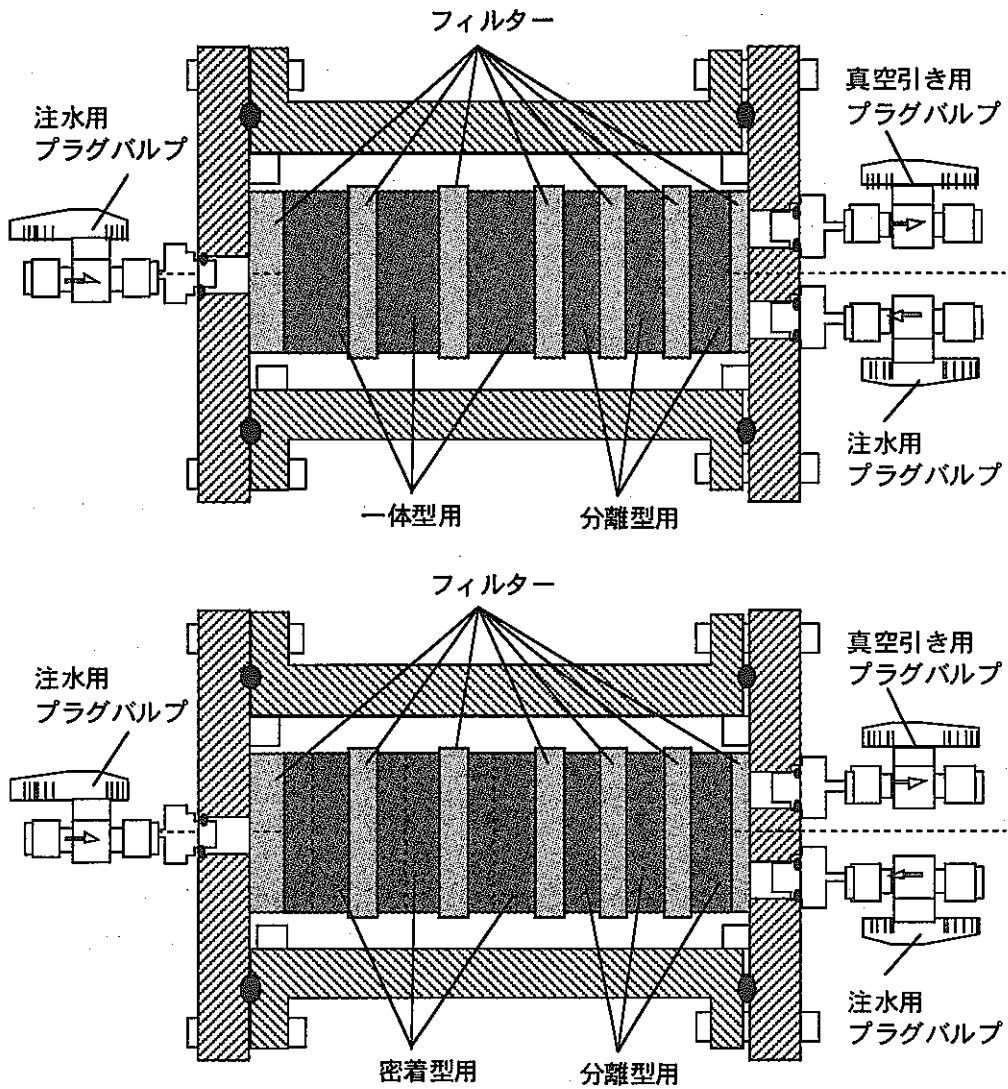


図2-2 飽和セルの模式図

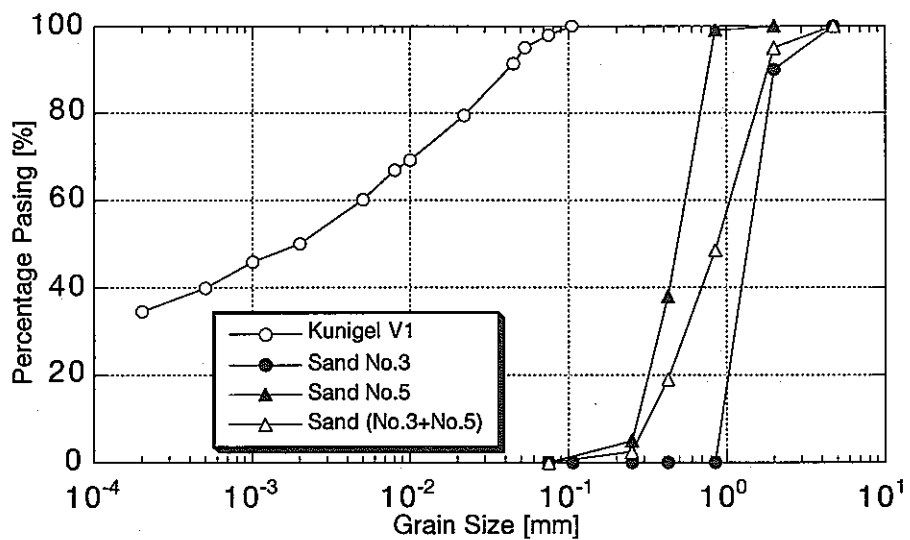


図2-3 ベントナイトおよびケイ砂の粒径加積曲線

2.1.2 せん断試験装置

せん断試験は、図2-4に示すような一面せん断試験装置（圓井製作所製）を用いて、垂直荷重を一定に保ちながら、一定のせん断変位速度（0.05mm/min）でせん断変位2mmまでせん断した。設定した垂直応力は0.2MPa、1.0MPa、2.0MPa、3.0MPaの4種類である。また、せん断試験中、垂直変位（LVDT(1)）、垂直荷重（Load Cell (1)）、せん断変位（LVDT(2)）、せん断荷重（Load Cell (2)）を5秒毎にコンピュータに取り込み記録した。なお、せん断面は、一体型試料については試料の中央断面に、分離型、圧着型試料についてはそれぞれ分離面、圧着面に一致させている。

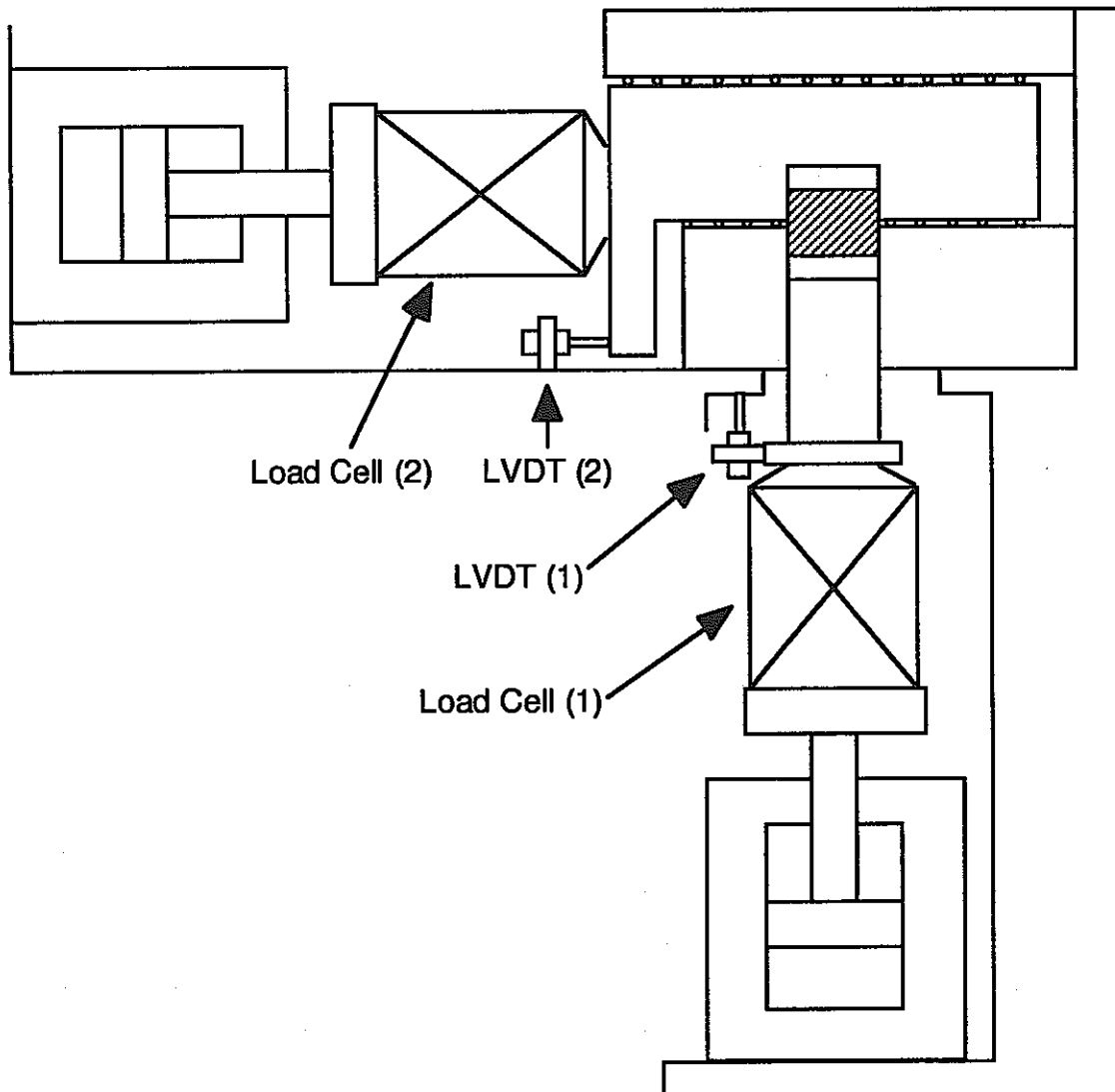


図2-4 せん断試験装置

2.2 実験結果および考察

2.2.1 試料形状とせん断力学特性

(1) 飽和度50%の場合

垂直応力を0.2MPa, 1.0MPa, 2.0MPa, 3.0MPaとした場合の飽和度50%の一体型試料と分離型試料のせん断試験結果を比較したグラフを図2-5から図2-8に示す。また、飽和度50%の一体型試料および分離型試料の各垂直応力に対するせん断試験結果をまとめたものをそれぞれ図2-9および図2-10に示す。

まず、せん断強度に着目すると、図2-5から図2-8より、一体型試料のピークせん断強度、残留せん断強度ともに分離型試料のものより大きいことがわかる。すなわち、ベントナイトブロックのせん断強度はブロックの継ぎ目に比べて十分に大きな強度を持っていることがわかる。また、図2-9、図2-10を比較すると、一体型試料の場合、垂直応力によるせん断強度の差はそれほど大きくないが、分離型試料の場合、垂直応力が小さいとせん断強度はほとんど発揮されていない。緩衝材設置直後は緩衝材にそれほど大きな応力が作用するとは考えられないため、ブロック継ぎ目部分がブロック部に比べ弱部となると言える。次に、垂直変位に着目すると、一体型試料ではダイレイタンスー（土のような粒状体がせん断されることにより体積を変えようとする性質。せん断されて膨張する場合をダイレイタンスーが正、収縮する場合をダイレイタンスーが負であるという）が発生しているのに対し、分離型試料ではダイレイタンスーが見られない。また、一体型試料で見られた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小さくなる傾向がみられる。

以上のことから、ベントナイトの飽和度が50%程度であれば、ベントナイト緩衝材の変形は、ブロックの継ぎ目部分で発生する可能性が大きいと考えられる。また、その変形が純粹に滑り変形であれば、継ぎ目が開口する可能性は小さいものと考えられるが、万一、ベントナイトブロックが破壊するような場合には開口亀裂が発生する可能性が考えられる。

また、一体型、分離型それぞれの試料のせん断強度特性を図2-11に示す。図2-11より、それぞれの試料に対して粘着力（ C ）、摩擦角（ ϕ ）を求めた結果、ピーク強度に対して一体型試料の粘着力は2.61MPa、摩擦角は18.1°、分離型試料の粘着力は0.15MPa、摩擦角は33.8°となった。また、残留強度に対して一体型試料の粘着力は1.46MPa、摩擦角は30.3°、分離型試料の粘着力は0.21MPa、摩擦角は23.4°となった。

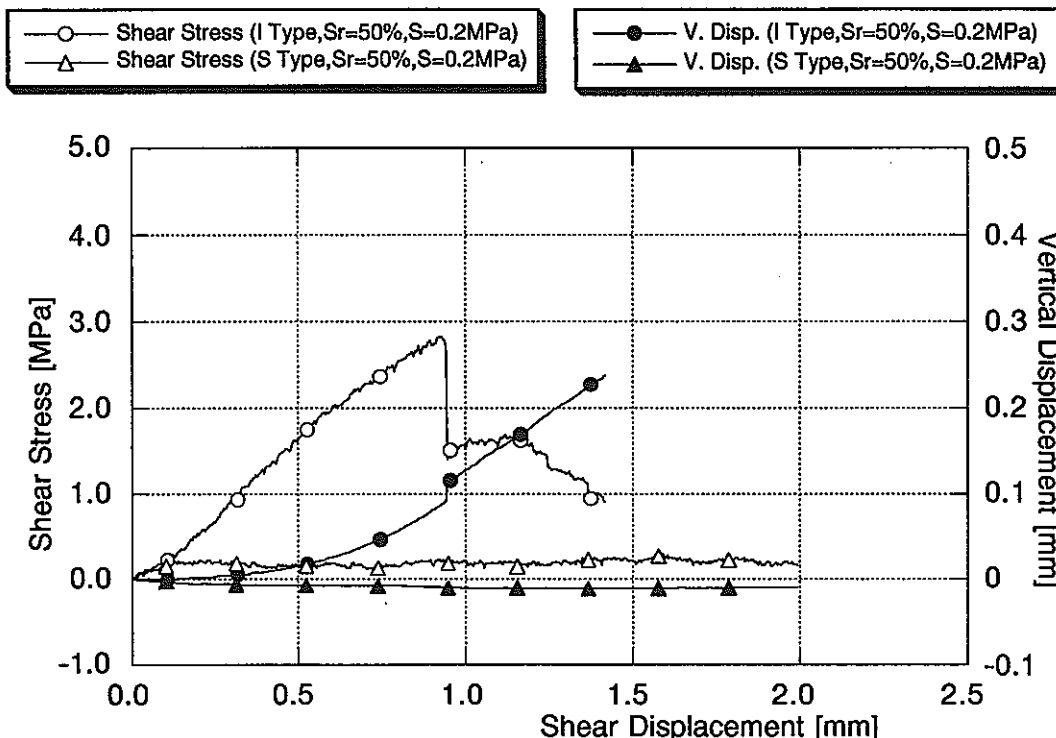


図2-5 一体型試料と分離型試料のせん断試験結果の比較
(飽和度50%, 垂直応力0.2MPa)

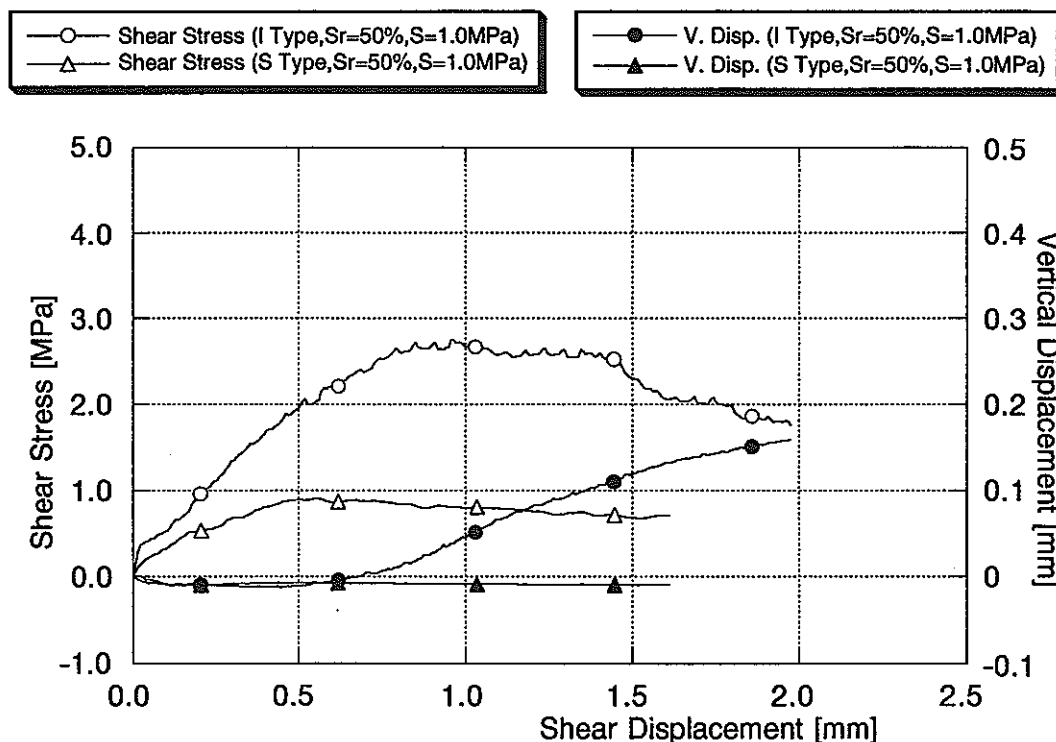


図2-6 一体型試料と分離型試料のせん断試験結果の比較
(飽和度50%, 垂直応力1.0MPa)

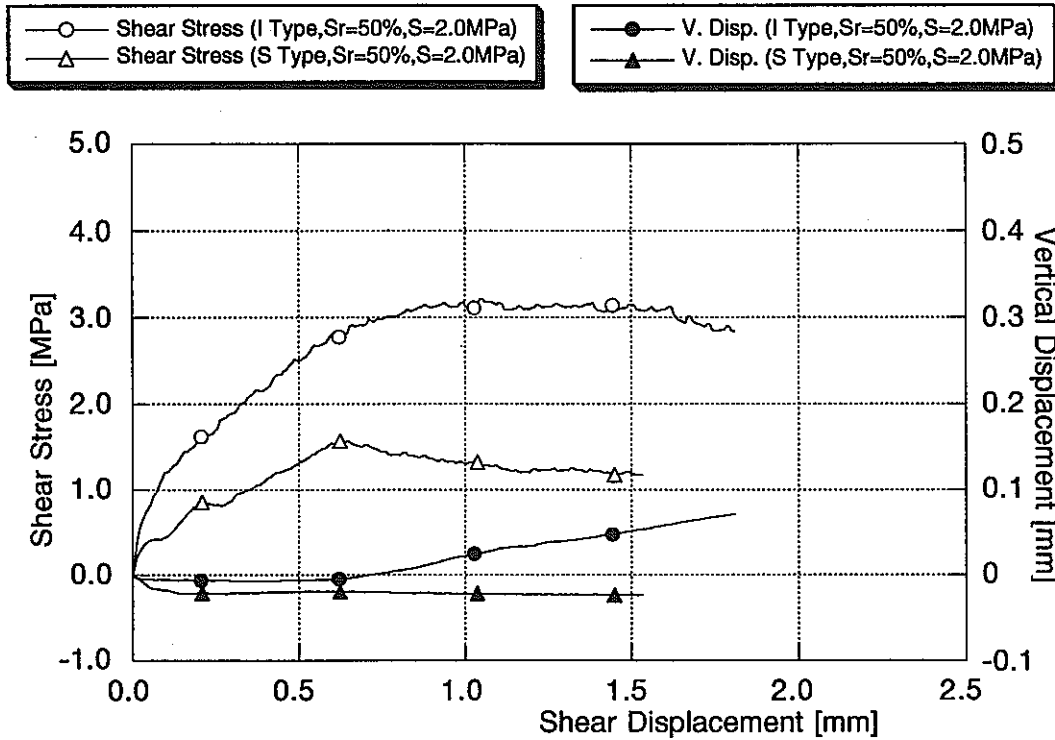


図2-7 一体型試料と分離型試料のせん断試験結果の比較
(飽和度50%, 垂直応力2.0MPa)

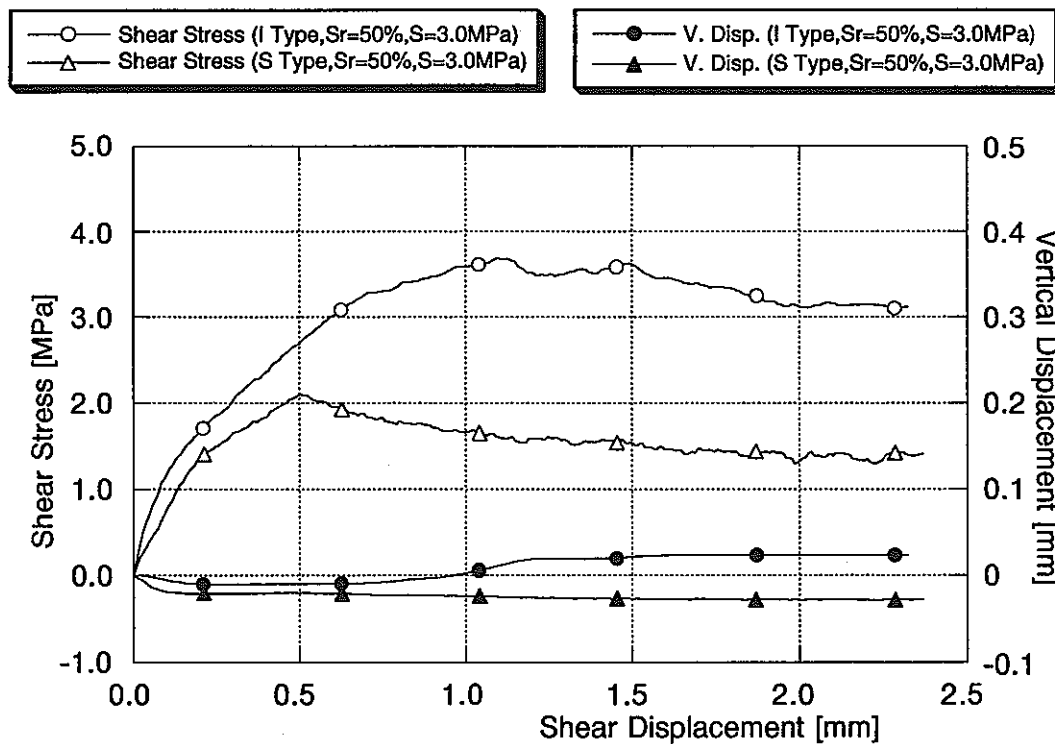


図2-8 一体型試料と分離型試料のせん断試験結果の比較
(飽和度50%, 垂直応力3.0MPa)

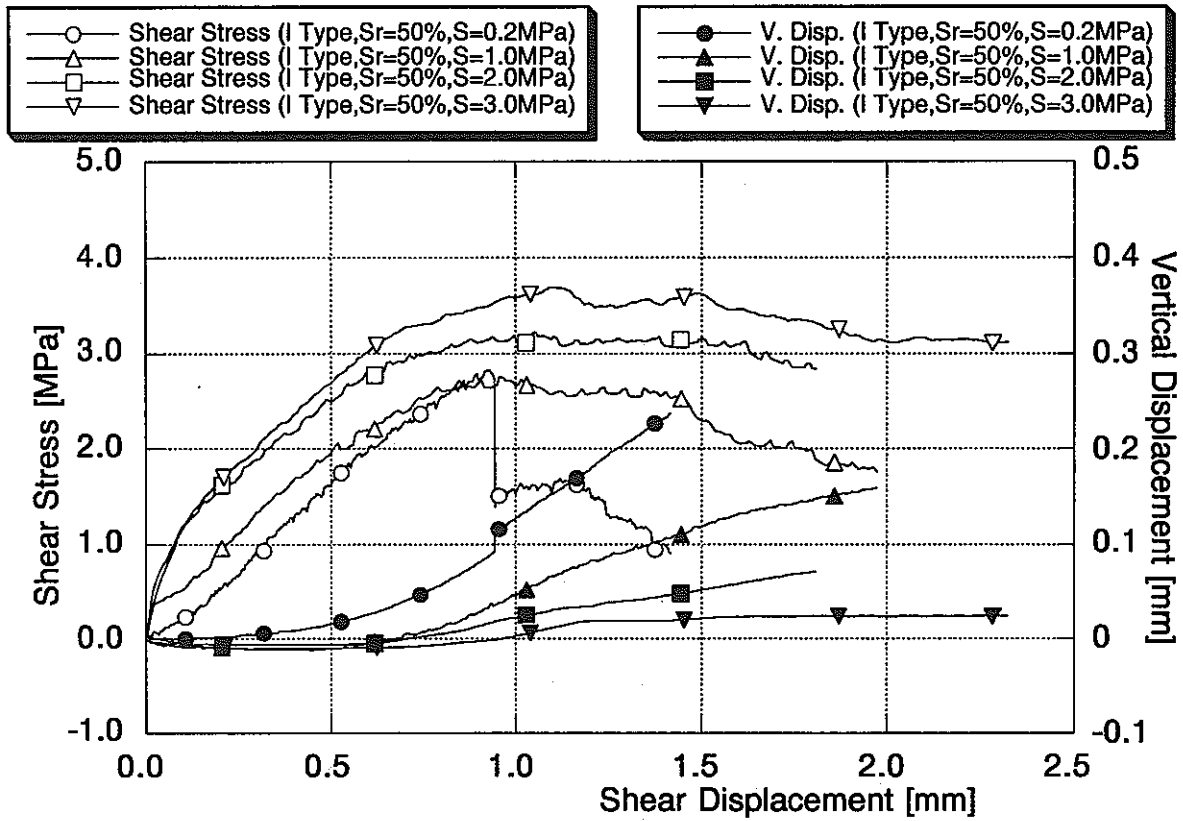


図2-9 一体型試料のせん断試験結果
(飽和度50%, 垂直応力0.2MPa, 1.0MPa, 2.0MPa, 3.0MPa)

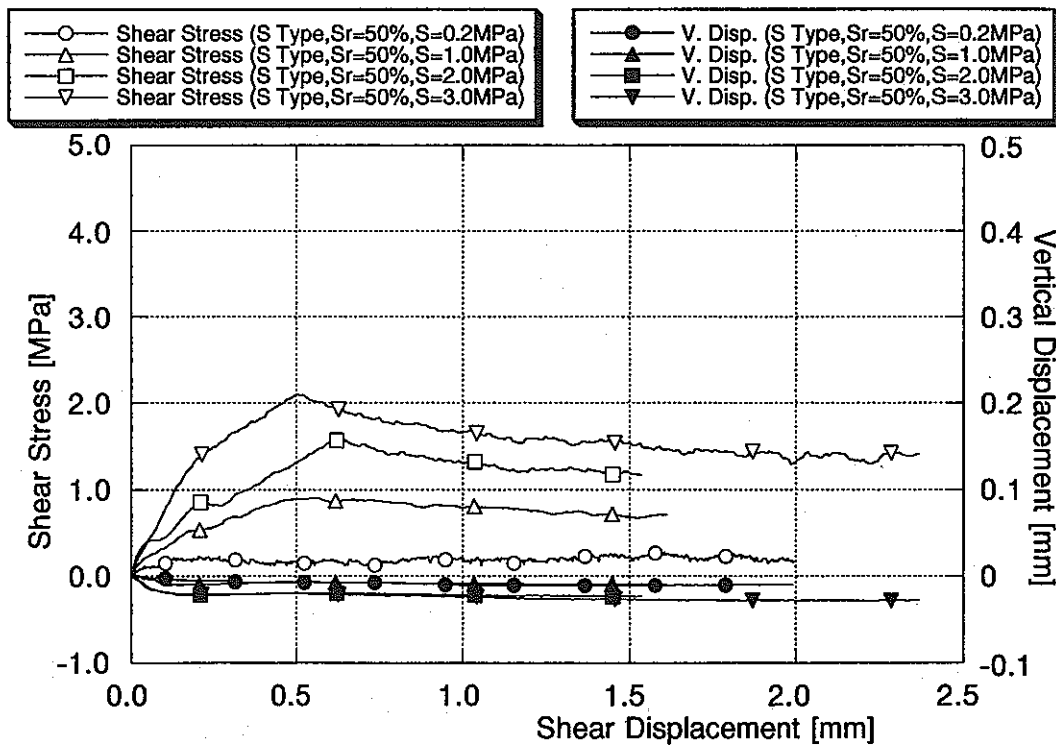


図2-10 分離型試料のせん断試験結果
(飽和度50%, 垂直応力0.2MPa, 1.0MPa, 2.0MPa, 3.0MPa)

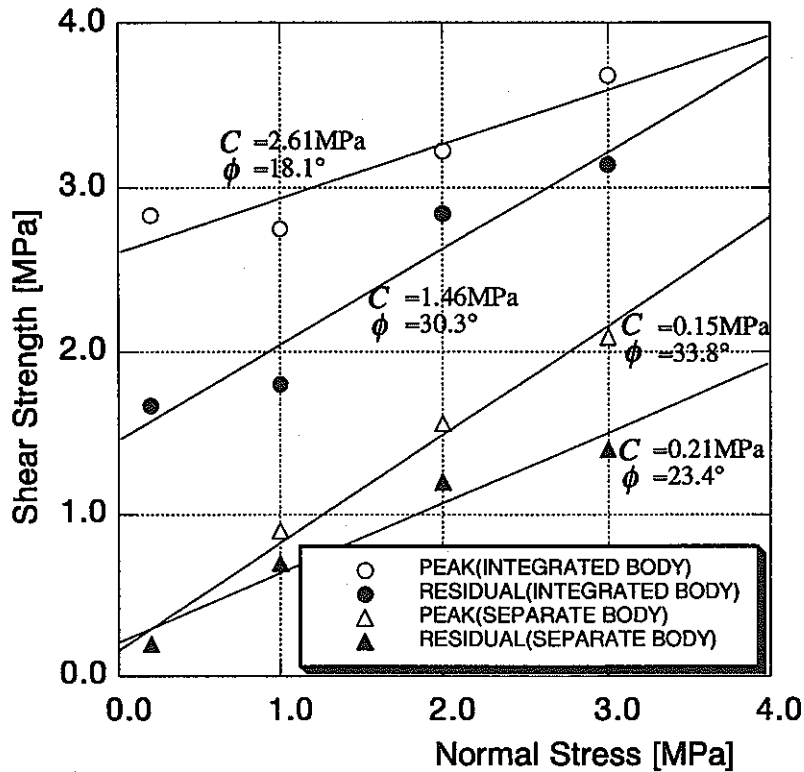


図2-11 飽和度50%試料のせん断強度特性
(ピーク強度, 残留強度)

(2) 飽和度100%の場合

垂直応力を0.2MPa, 1.0MPa, 2.0MPa, 3.0MPaとした場合の飽和度100%の一体型試料, 分離型試料および圧着型試料のせん断試験結果を比較したグラフを図2-12から図2-15に示す。また, 飽和度100%の一体型試料, 分離型試料および圧着型試料の各垂直応力に対するせん断試験結果をまとめたものをそれぞれ図2-16, 図2-17および図2-18に示す。また, 一体型試料, 分離型試料および圧着型試料について各飽和度, 各垂直応力におけるピーク強度および残留強度の値を表2-3に示す。表2-4には一体型試料の各飽和度, 各垂直応力における強度を1.0として分離型試料, 圧着型試料の値の割合を求めたものを示す。

まず, せん断強度に着目すると, 表2-4から, 一体型試料はすべての垂直応力下においてもピークせん断強度および残留せん断強度いずれも分離型試料および圧着型試料より大きいことがわかる。すなわち, 飽和した状態においてもベントナイトブロック自体のせん断強度はブロックの継ぎ目と比較して十分な強度を有していることがわかる。ピークせん断強度について分離型試料および圧着型試料を比較すると, 圧着型試料の強度は分離型試料のものよりすべての垂直応力下で大きくなっている。これは試料が圧着していることの優位性を示していると考えられる。これを一体型試料の強度と比較すると

強度比で0.48から0.63となる。一方、残留せん断強度については、垂直応力が1.0MPa以上の場合は圧着型試料と分離型試料の差は見られなくなる。これは、破壊するまでは圧着した効果により圧着型試料の優位性が見られるが、いったん破壊した（圧着面が滑った）後は分離型試料と同じ状態になるためと考えられる。施工後、浸潤によりベントナイト緩衝材の飽和度が上昇し、それに伴ってベントナイト内に膨潤圧が発生し、継ぎ目が圧着されることになるが、一度圧着したブロックの境界面の強度はベントナイトブロック自体の少なくとも2分の1程度の強度を期待することができる。

次に、垂直変位に着目すると、一体型試料では垂直応力が2.0MPa以下でダイレイタンスーが発生し、垂直応力が3.0MPaになるとダイレイタンスーが発生しなくなった。また、分離型試料ではダイレイタンスーが見られなかった。これに対し、圧着型試料では、圧着の効果が顕著にみられた垂直応力が0.2MPaの場合にダイレイタンスーがみられたが、この場合、残留強度状態に入るとダイレイタンスーの増加が止まるのが確認できた。また、垂直応力が1.0MPa以上の場合にはダイレイタンスーは見られなかった。

また、図2-16、図2-17および図2-18より求めた一体型、分離型、圧着型それぞれの試料のせん断強度特性を図2-19に示す。飽和度100%の場合、ベントナイトの一軸圧縮強度が2.2MPaであることを考えると、垂直応力が2.0MPaおよび3.0MPaのせん断試験結果は、垂直応力による試料内部破壊の影響を受け、純粋なせん断強度を反映していると考えにくいことから、垂直応力0.2MPaおよび1.0MPaのせん断試験結果からそれぞれの試料の粘着力および摩擦角を求めた。その結果、ピーク強度に対して一体型試料の粘着力は0.81MPa、摩擦角は35.9°、分離型試料の粘着力は0.06MPa、摩擦角は24.8°、圧着型試料の粘着力は0.57MPa、摩擦角は9.9°となった。また、残留強度に対して一体型試料の粘着力は0.89MPa、摩擦角は17.4°、分離型試料の粘着力は0.06MPa、摩擦角は23.6°、圧着型試料の粘着力は0.36MPa、摩擦角は12.0°となった。この結果を、飽和度50%の場合と併せて、表2-5に示す。

緩衝材が飽和した時点でも緩衝材設置時と同様に、外部から緩衝材には大きな外力は作用していないと考えられるため、実際の状況は今回の試験の垂直応力が0.2MPaの状態に近いものと考えられる。そういう意味では、飽和度50%の一体型試料と分離型試料、飽和度100%の一体型試料と圧着型試料とを比較することが現実に近いものと考えられる。したがって、表2-3～表2-5においてこれらの関係を見てみると、飽和度50%の場合はブロック部に比べブロック継ぎ目部のせん断強度はかなり小さくなり、弱部となると考えられる。一方、飽和度100%の場合はブロック部の強度は飽和度50%の時点に比べて小さくなるが、ブロック部と継ぎ目部の差は無くなっていく。すなわち、緩衝材が飽和することにより全体的に強度は小さくなるが、弱部となる部分は無くなっていくものと考えられる。

表2-3 飽和度別にみた各試料のせん断強度

飽和度	試料	ピーク強度 [MPa]				残留強度 [MPa]			
		0.2	1.0	2.0	3.0	0.2	1.0	2.0	3.0
垂直応力 [MPa]		0.2	1.0	2.0	3.0	0.2	1.0	2.0	3.0
50%	一体型	2.83	2.75	3.22	3.68	1.67	1.80	2.84	3.14
	分離型	0.20	0.90	1.56	2.09	0.20	0.70	1.20	1.40
100%	一体型	0.95	1.53	1.47	1.48	0.95	1.20	1.20	1.20
	分離型	0.15	0.52	0.64	0.72	0.15	0.50	0.64	0.72
	圧着型	0.60	0.74	0.74	0.90	0.40	0.57	0.57	0.77

表2-4 飽和度別にみた各試料のせん断強度 (正規化)

飽和度	試料	ピーク強度				残留強度			
		0.2	1.0	2.0	3.0	0.2	1.0	2.0	3.0
垂直応力 [MPa]		0.2	1.0	2.0	3.0	0.2	1.0	2.0	3.0
50%	一体型	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	分離型	0.07	0.33	0.48	0.57	0.12	0.39	0.42	0.45
100%	一体型	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	分離型	0.16	0.34	0.44	0.49	0.16	0.42	0.53	0.60
	圧着型	0.63	0.48	0.50	0.61	0.42	0.48	0.48	0.64

表2-5 飽和度別にみた各試料のせん断強度特性

飽和度	試料	ピーク強度		残留強度	
		粘着力 [MPa]	摩擦角 [°]	粘着力 [MPa]	摩擦角 [°]
50%	一体型	2.61	18.1	1.46	30.3
	分離型	0.15	33.8	0.21	23.4
100%	一体型	0.81	35.9	0.89	17.4
	分離型	0.06	24.8	0.06	23.6
	圧着型	0.57	9.9	0.36	12.0

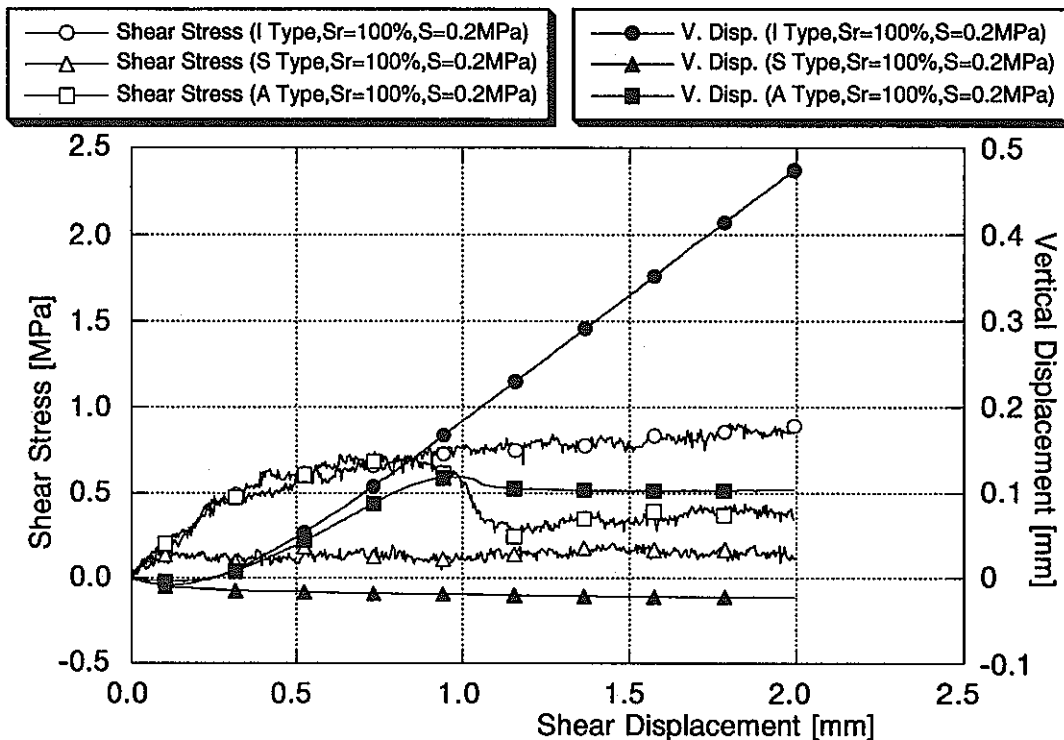


図2-12 一体型試料，分離型試料，圧着型試料のせん断試験結果の比較
(飽和度100%，垂直応力0.2MPa)

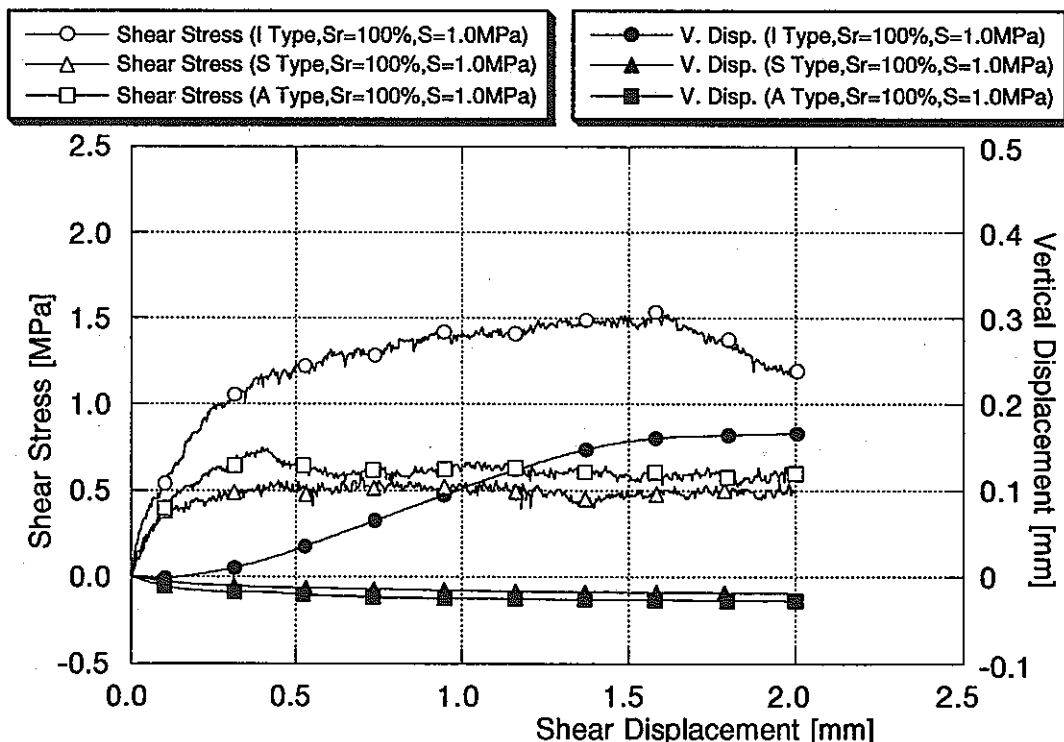


図2-13 一体型試料，分離型試料，圧着型試料のせん断試験結果の比較
(飽和度100%，垂直応力1.0MPa)

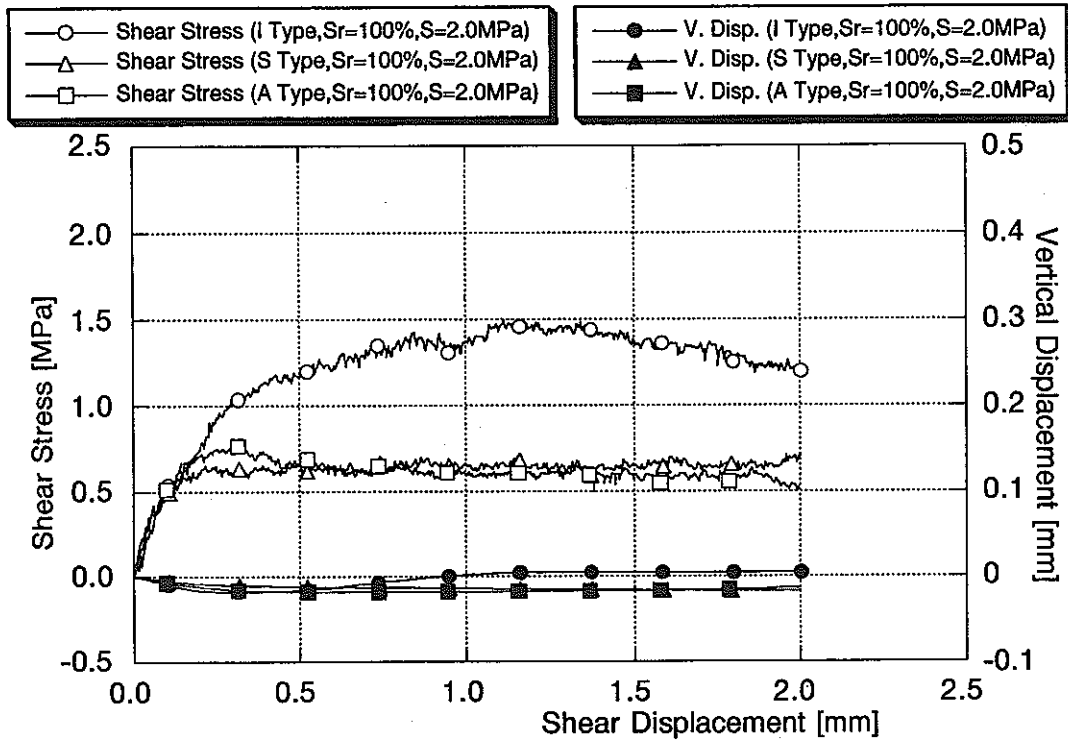


図2-14 一体型試料，分離型試料，圧着型試料のせん断試験結果の比較
(飽和度100%，垂直応力2.0MPa)

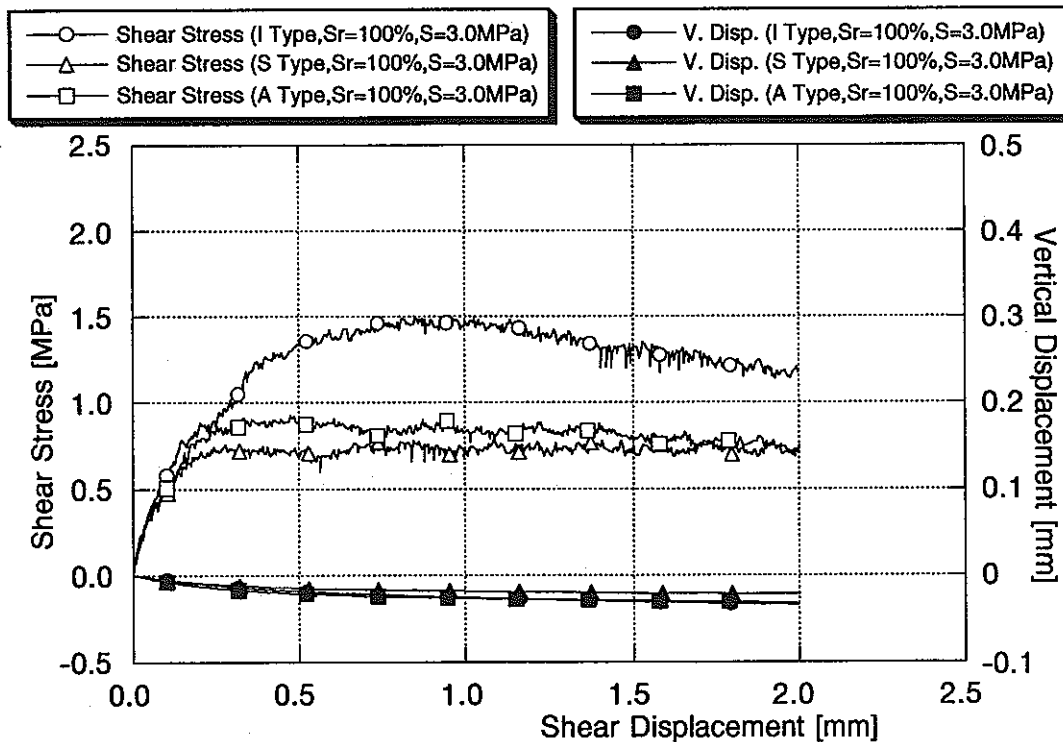


図2-15 一体型試料，分離型試料，圧着型試料のせん断試験結果の比較
(飽和度100%，垂直応力3.0MPa)

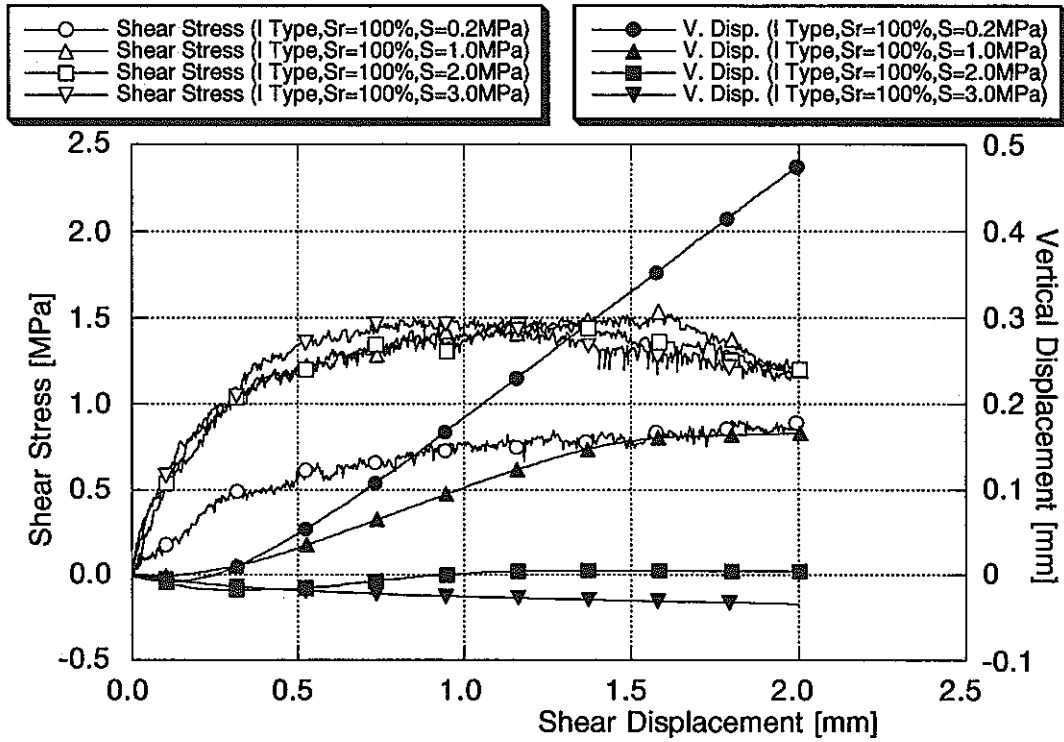


図2-16 一体型試料のせん断試験結果

(飽和度100%, 垂直応力0.2MPa, 1.0MPa, 2.0MPa, 3.0MPa)

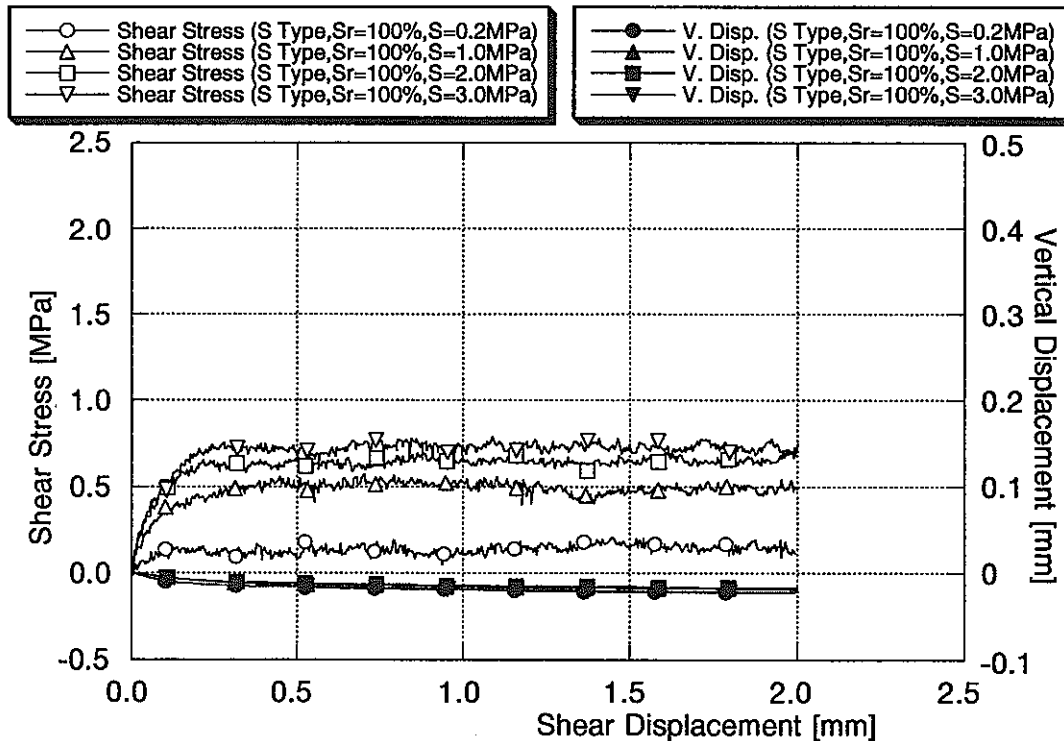


図2-17 分離型試料のせん断試験結果

(飽和度100%, 垂直応力0.2MPa, 1.0MPa, 2.0MPa, 3.0MPa)

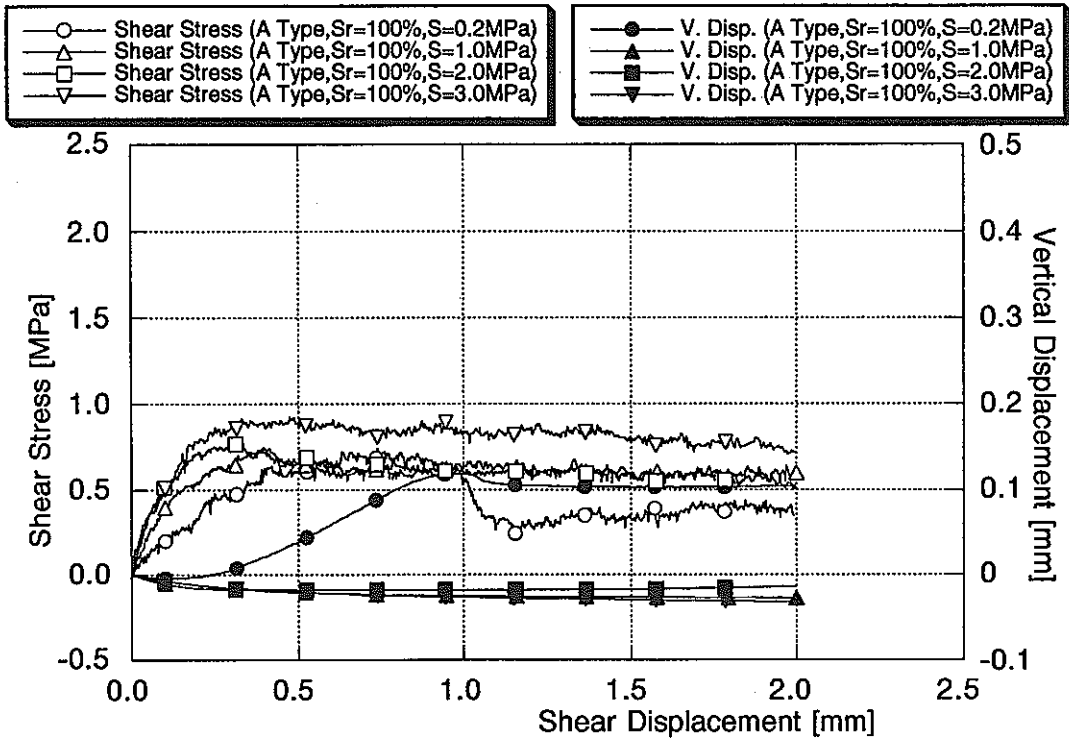


図2-18 圧着型試料のせん断試験結果
(飽和度100%, 垂直応力0.2MPa, 1.0MPa, 2.0MPa, 3.0MPa)

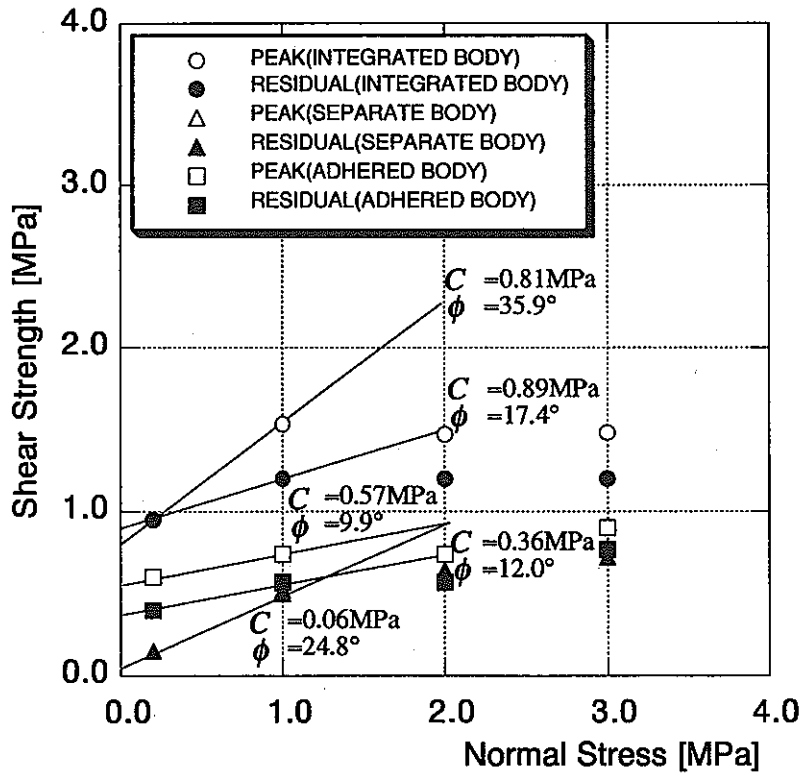


図2-19 飽和度100%試料のせん断強度特性 (ピーク強度, 残留強度)

2.2.2 飽和度とせん断力学特性

一体型試料および分離型試料について、飽和度の違いによるせん断力学特性の違いを検討した。まず、一体型試料について、垂直応力が0.2MPa, 1.0MPa, 2.0MPa, 3.0MPaの各場合について飽和度によるせん断試験結果の比較を図2-20から図2-23に示す。

これらの図より、どの垂直応力の場合も、飽和度50%の場合のピークせん断強度、残留せん断強度はいずれも飽和度100%のもの約2倍であることがわかる。また、ダイレイタンスー量についてみると、垂直応力が0.2MPaおよび1.0MPaと小さい場合、飽和度50%と飽和度100%とではダイレイタンスー量がほぼ同じであるか、むしろ飽和度100%の方が大きいダイレイタンスー量を示すことがわかる。これに対して、垂直応力が2.0MPa, 3.0MPaと大きくなると飽和度50%の方が大きいダイレイタンスー量を示すことがわかる。

次に、分離型試料について、垂直応力が0.2MPa, 1.0MPa, 2.0MPa, 3.0MPaの各場合についての飽和度によるせん断試験結果の比較を図2-24から図2-27に示す。これらの図より、せん断強度はいずれの垂直応力の場合についてもピークせん断強度、残留せん断強度とも飽和度50%のものの方が飽和度100%のものより大きい。垂直応力が大きくなるほど、その差が大きくなることがわかる。また、飽和度50%の試料では、垂直応力が大きくなるほど顕著なピーク強度が観察されるのに対し、飽和度100%の試料では、いずれの垂直応力においても明瞭なピークせん断強度が観察されないことがわかる。さらに、分離型試料ではいずれの場合についてもダイレイタンスーは発生しないことがわかる。

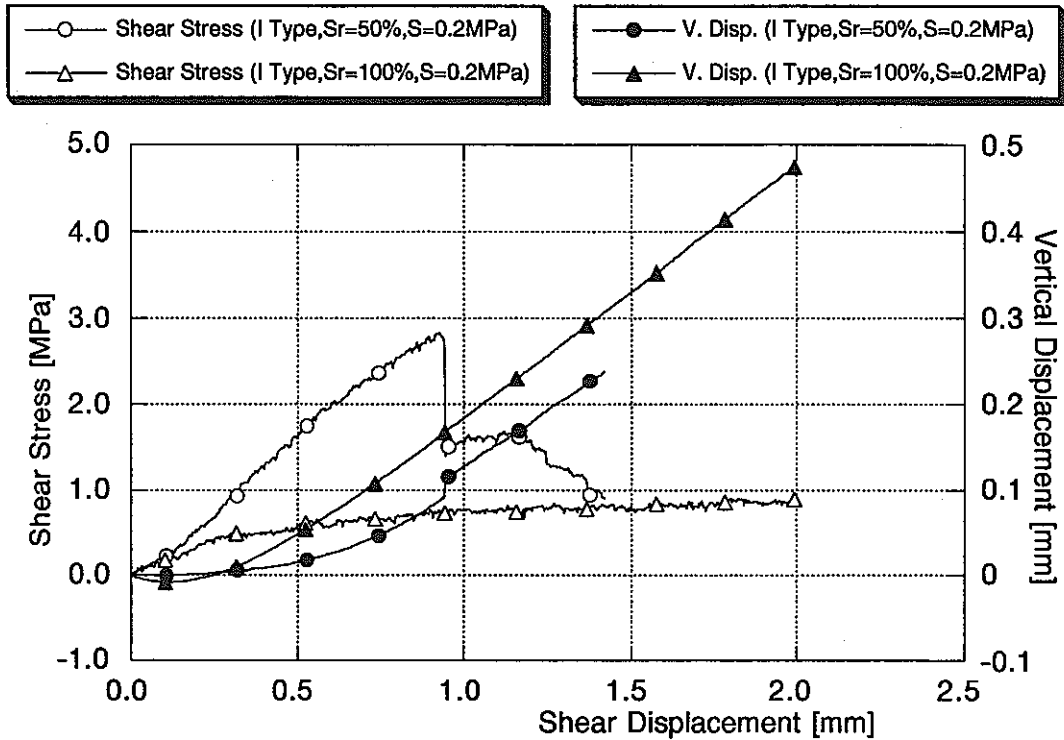


図2-20 一体型試料の飽和度の違いによるせん断試験結果の比較
(垂直応力0.2MPa)

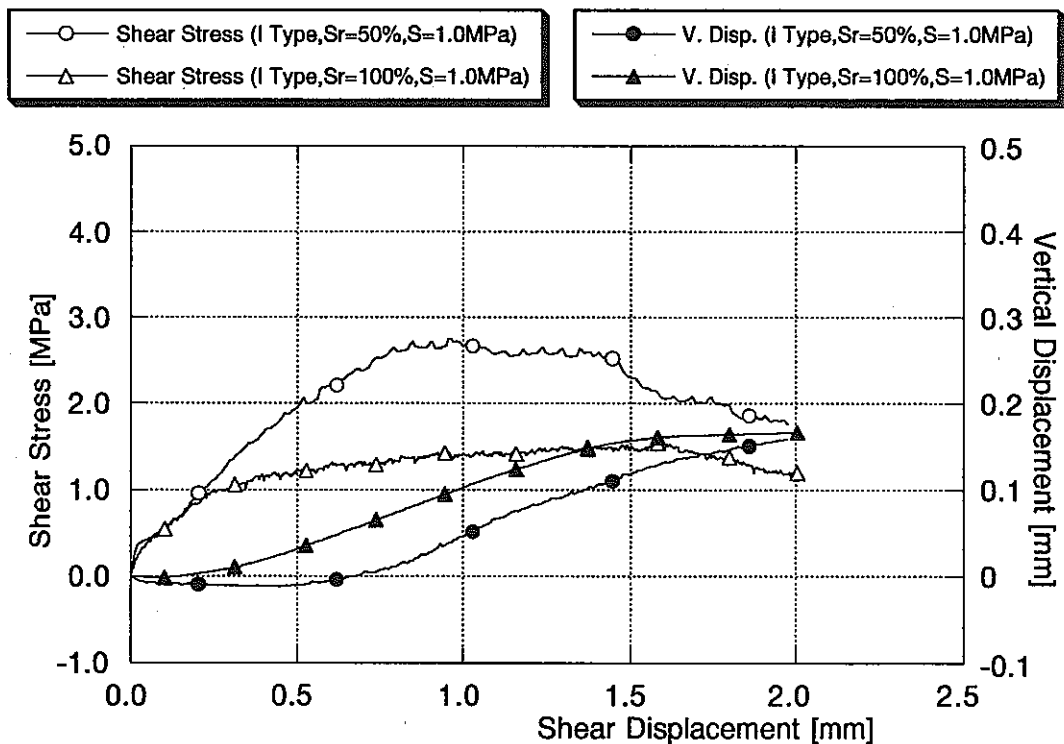


図2-21 一体型試料の飽和度の違いによるせん断試験結果の比較
(垂直応力1.0MPa)

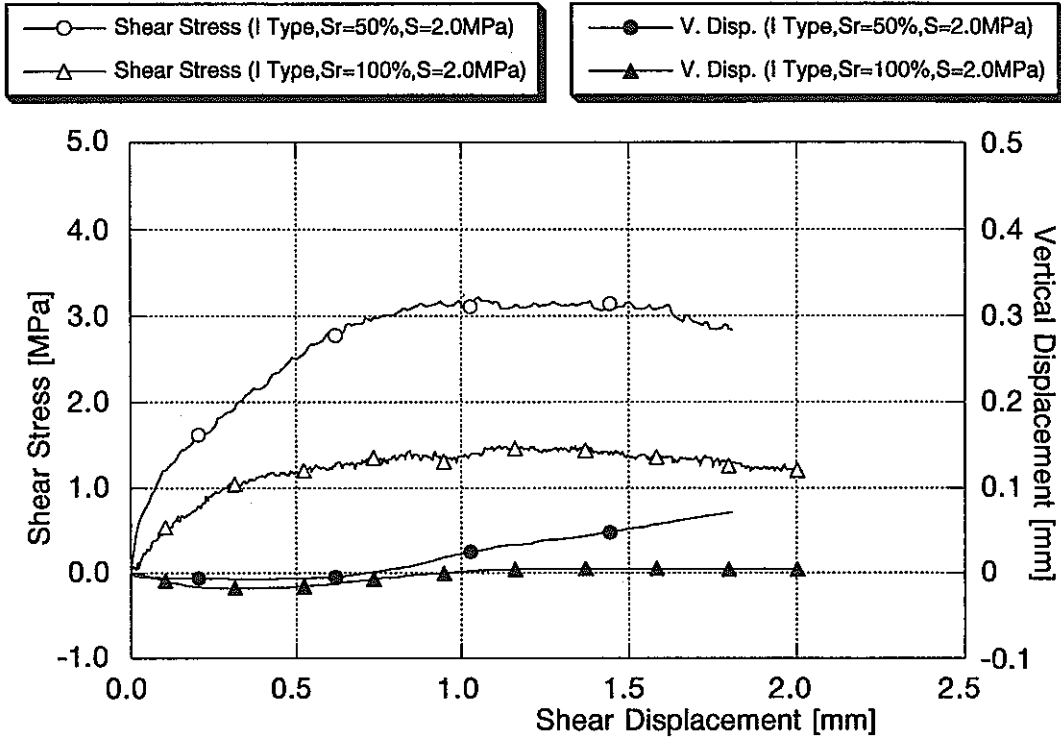


図2-22 一体型試料の飽和度の違いによるせん断試験結果の比較
(垂直応力2.0MPa)

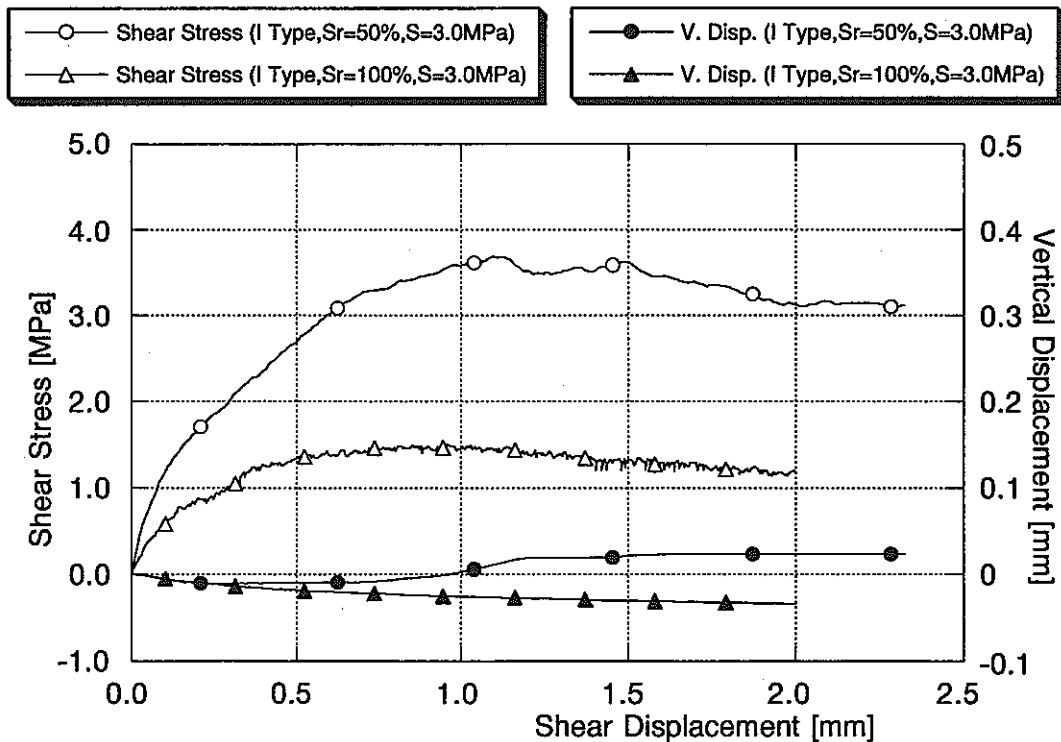


図2-23 一体型試料の飽和度の違いによるせん断試験結果の比較
(垂直応力3.0MPa)

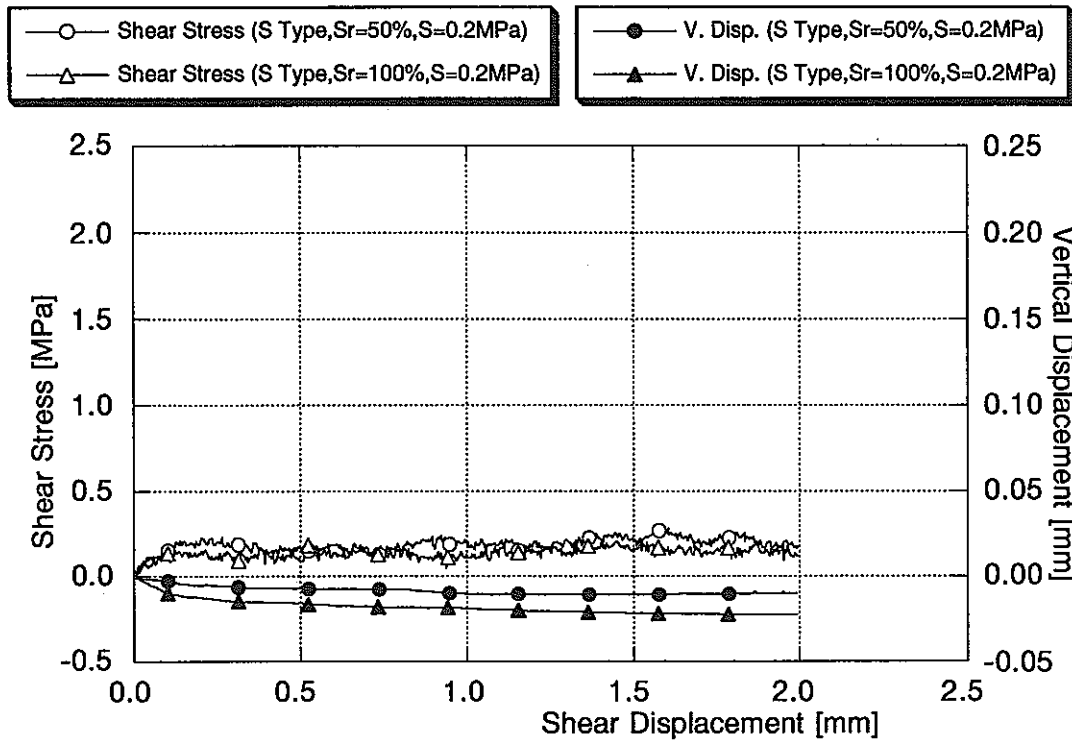


図2-24 分離型試料の飽和度の違いによるせん断試験結果の比較
(垂直応力0.2MPa)

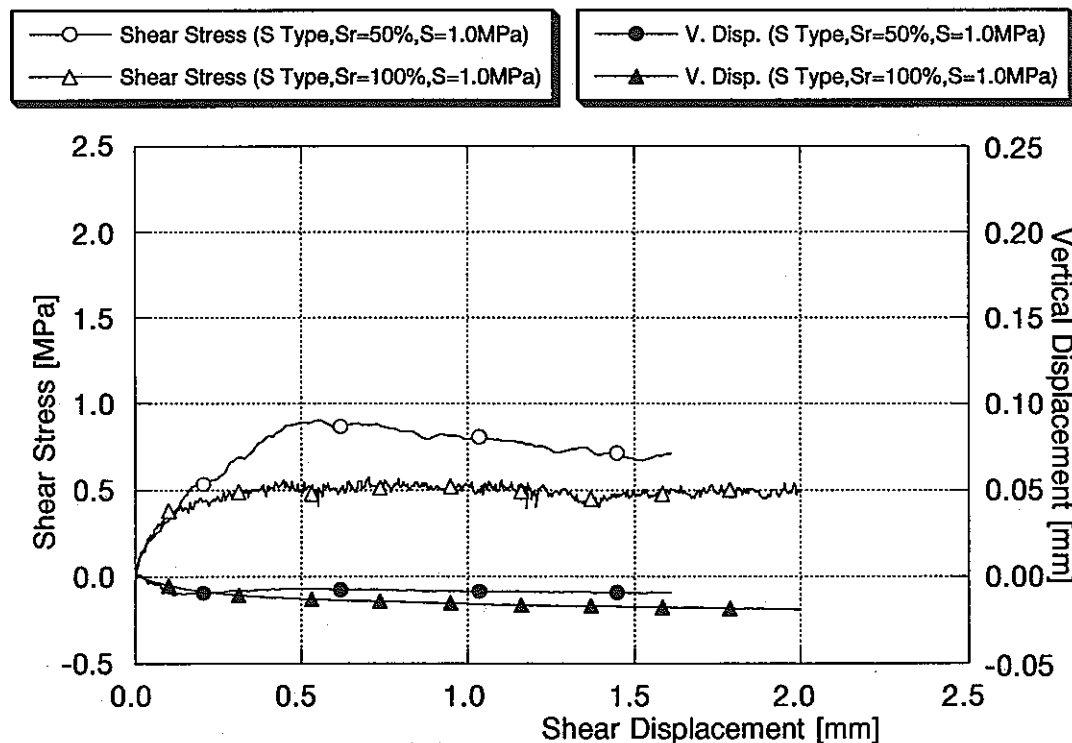


図2-25 分離型試料の飽和度の違いによるせん断試験結果の比較
(垂直応力1.0MPa)

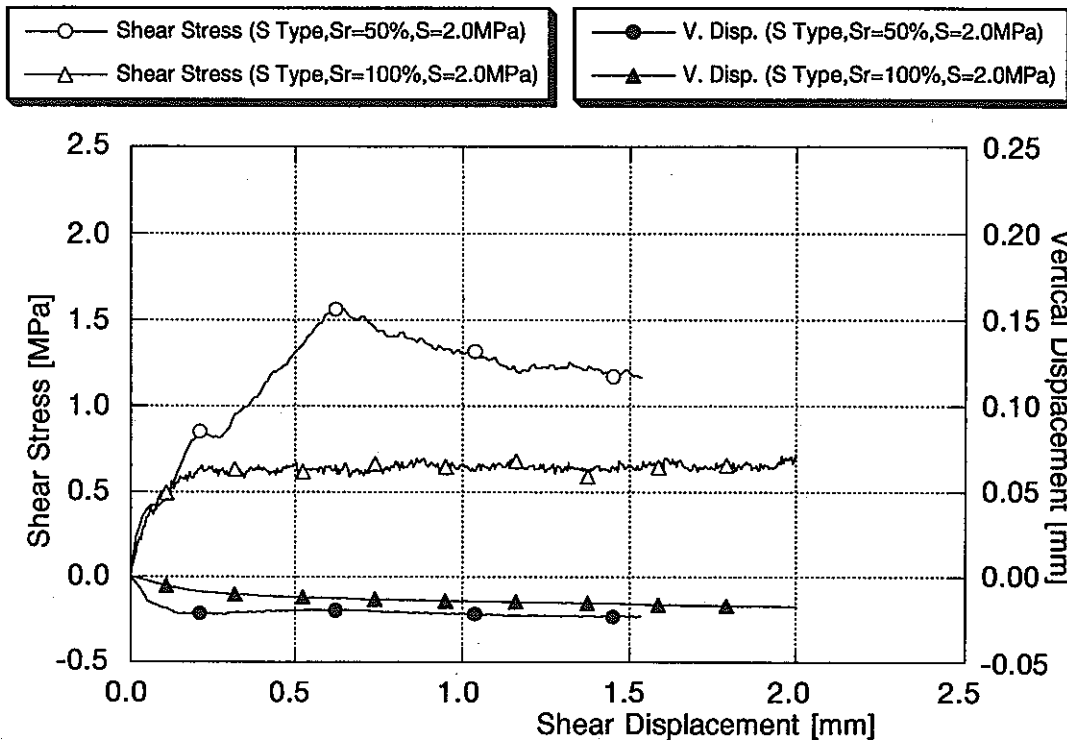


図2-26 分離型試料の飽和度の違いによるせん断試験結果の比較
(垂直応力2.0MPa)

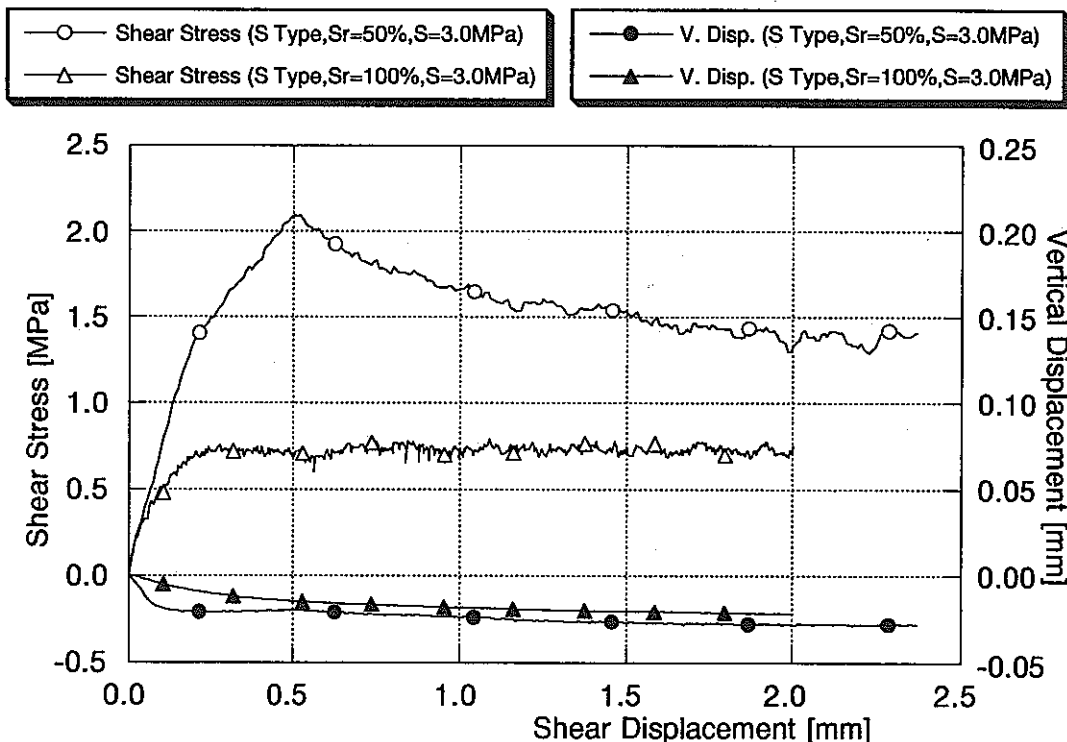


図2-27 分離型試料の飽和度の違いによるせん断試験結果の比較
(垂直応力3.0MPa)

2.2.3 ケイ砂混合ベントナイト試料のせん断力学特性

飽和度50%の一体型試料と分離型試料についてベントナイト単体試料とケイ砂混合ベントナイト試料のせん断試験結果を比較したものを図2-28および図2-29に示す。また、飽和度100%の一体型試料、分離型試料、圧着型試料についてベントナイト単体試料とケイ砂混合ベントナイト試料のせん断試験結果を比較したものを、図2-30、図2-31および図2-32に示す。なお、いずれの場合においても、垂直応力は0.2MPaである。

まず、せん断強度についてみると、飽和度にかかわらず、一体型試料ではケイ砂混合ベントナイト試料のピークせん断強度、残留せん断強度はともにベントナイト単体試料の約2分の1程度であることがわかる。また、分離型試料では、ケイ砂混合ベントナイト試料のピークせん断強度、残留せん断強度はともにベントナイト単体試料のものとほぼ同じ大きさであることがわかる。圧着型試料については、ケイ砂混合ベントナイト試料でも若干の圧着効果が見られるものの、ベントナイト単体試料ほど顕著ではない。また、圧着効果が見られるせん断変位はベントナイト試料の約2分の1となっている。このように、ケイ砂混合ベントナイト試料のせん断強度特性の劣化の原因の一つとして、砂粒子とベントナイトとの変形係数の差が大きいため砂粒子のエッジ部で大きな応力集中が発生するためであると考えられる。また、発生する膨潤圧がベントナイト単体試料に比べて小さいため、圧着効果も小さいものと考えられる。

次に、ダイレイタンシー挙動についてみると、飽和度50%では一体型試料についてダイレイタンシーが見られるが、その大きさはベントナイト単体試料とケイ砂混合ベントナイト試料とでは大差が無い。一方、飽和度100%試料では、一体型試料および圧着型試料にダイレイタンシーが見られるが、ケイ砂混合ベントナイト試料のダイレイタンシー量は、ベントナイト単体試料のダイレイタンシー量の約2分の1となっていることがわかる。

以上のことから、ケイ砂混合ベントナイト試料は、コスト面や熱伝導性の面で有利であるとされているが、強度的にはベントナイト試料に比べて不利であることがわかる。

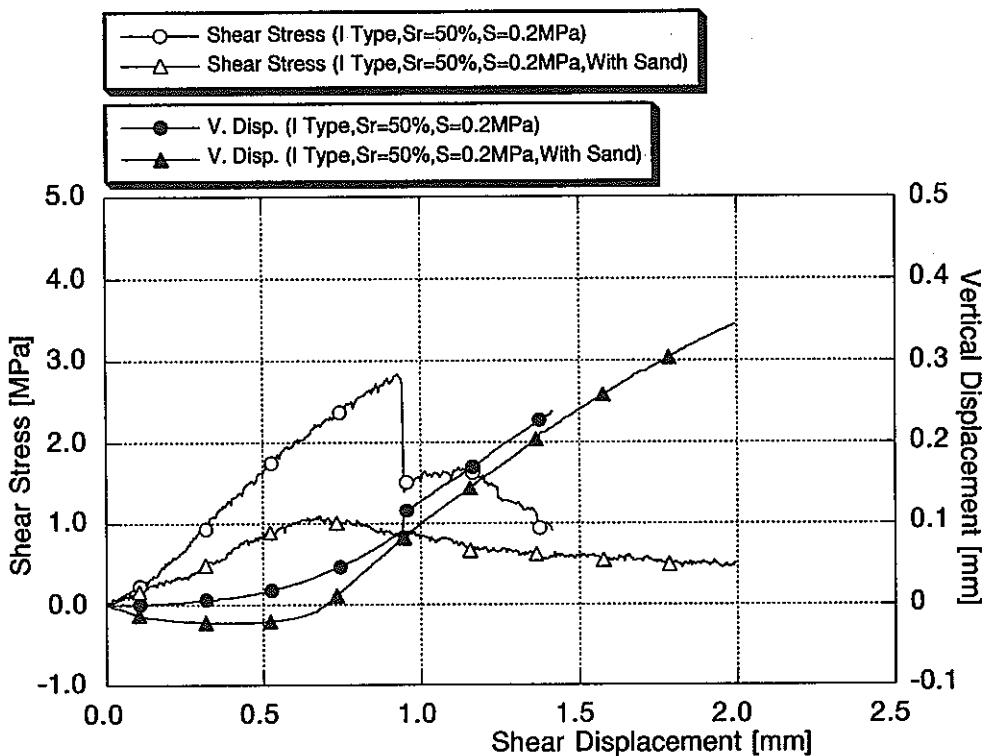


図2-28 ケイ砂混合ベントナイト試料とベントナイト単体試料のせん断試験結果の比較（飽和度50%，一体型，垂直応力0.2MPa）

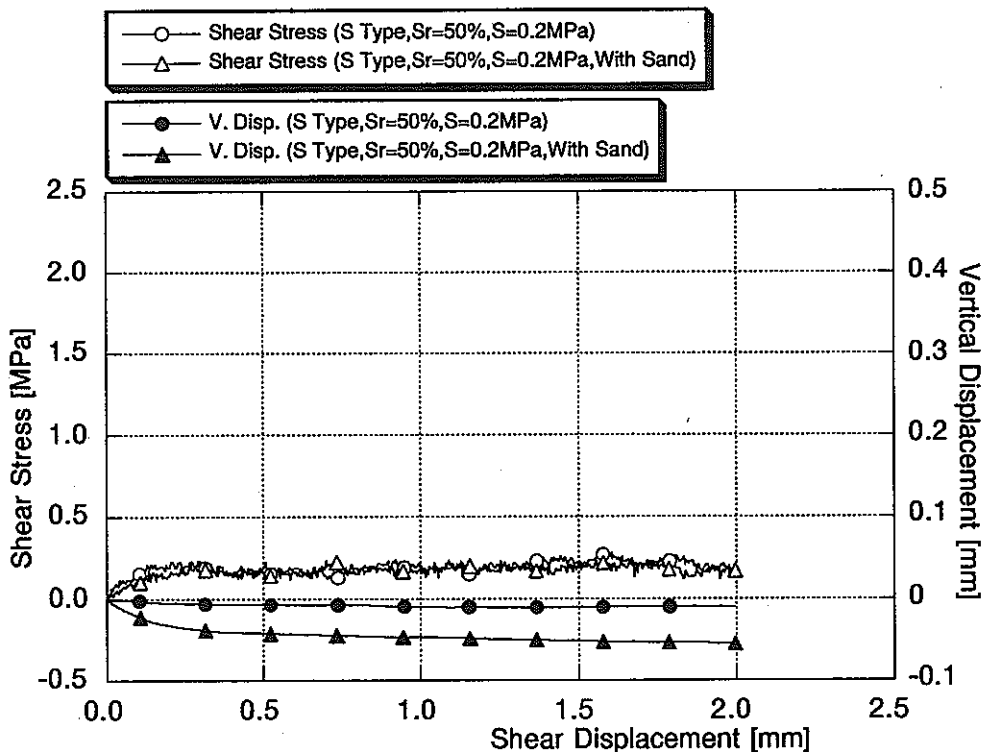


図2-29 ケイ砂混合ベントナイト試料とベントナイト単体試料のせん断試験結果の比較（飽和度50%，分離型，垂直応力0.2MPa）

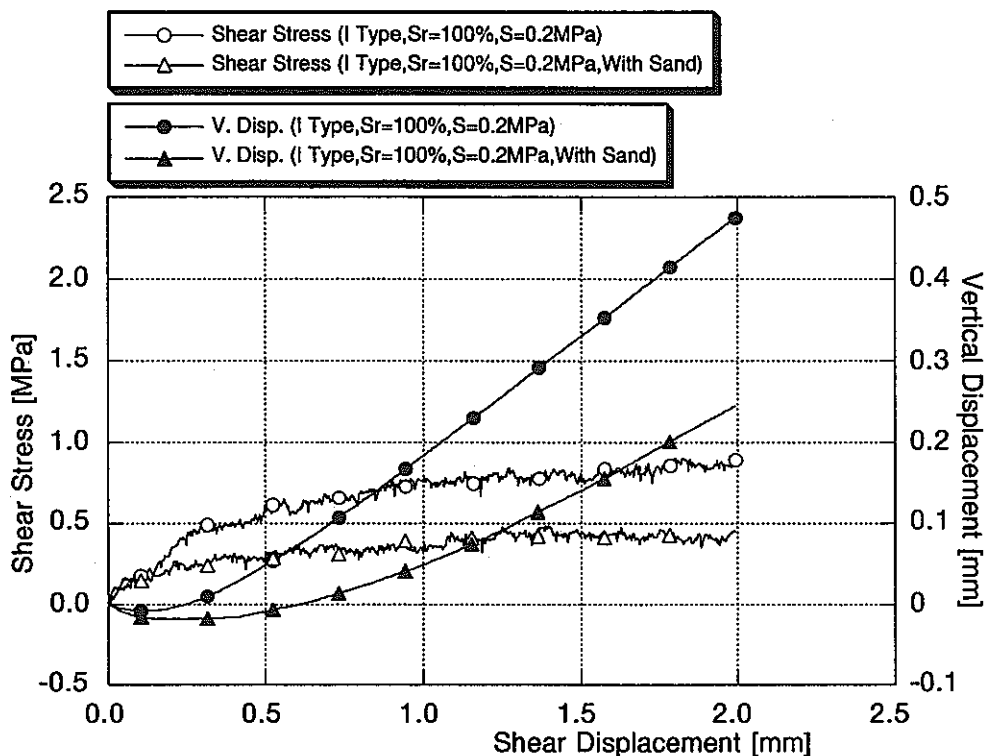


図2-30 ケイ砂混合ベントナイト試料とベントナイト単体試料のせん断試験結果の比較（飽和度100%，一体型，垂直応力0.2MPa）

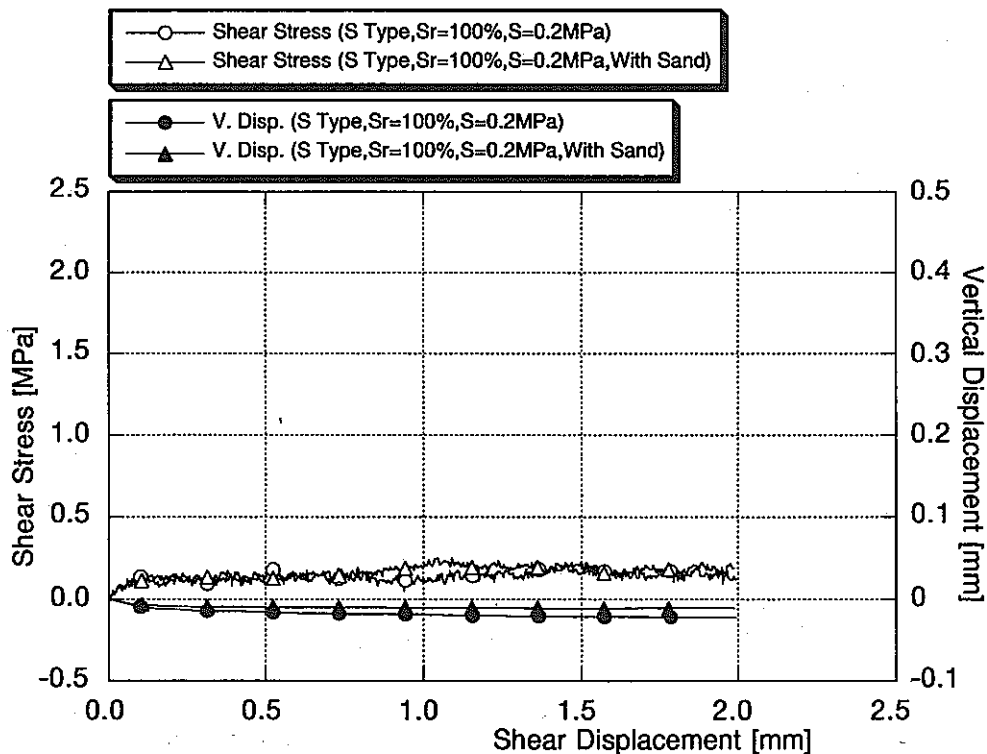


図2-31 ケイ砂混合ベントナイト試料とベントナイト単体試料のせん断試験結果の比較（飽和度100%，分離型，垂直応力0.2MPa）

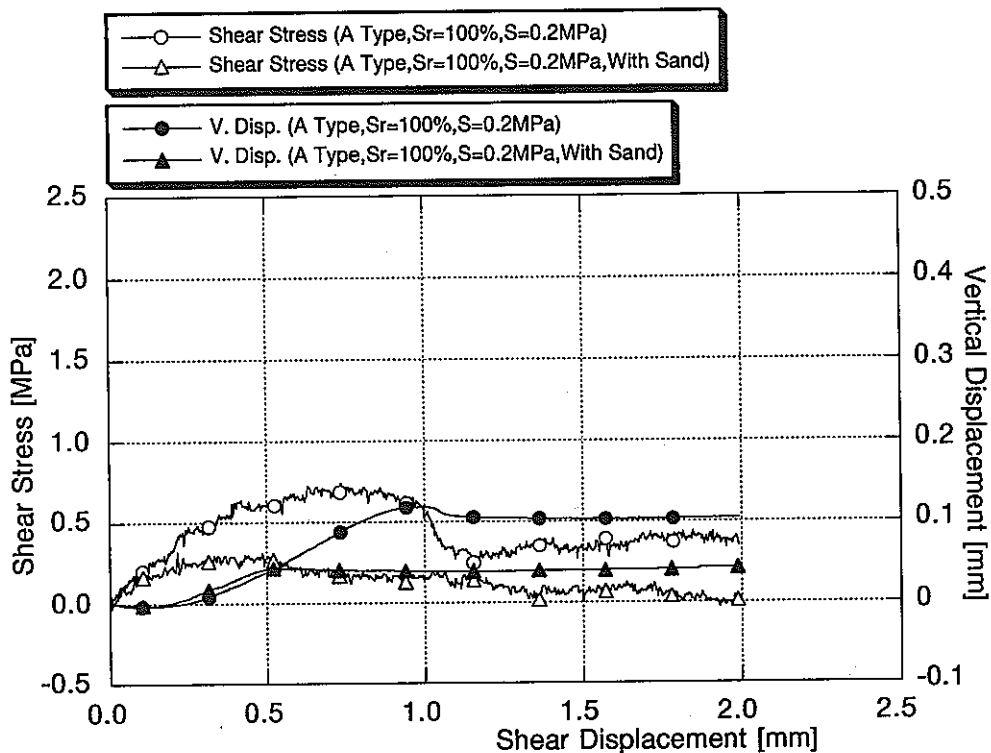


図2-32 ケイ砂混合ベントナイト試料とベントナイト単体試料のせん断試験結果の比較（飽和度100%，圧着型，垂直応力0.2MPa）

3. ブロック継ぎ目部の浸潤特性

3.1 水分拡散試験¹⁾

3.1.1 実験条件

試験は、供試体の乾燥密度を1.8 g/cm³とし、その材料として、クニゲルV1を100%使用した。試験はブロック部およびブロックの継ぎ目部を対象に実施した。ブロック間の継ぎ目を模擬するため、半分ずつ供試体を圧縮成型し、組み合わせたもの（以下、継ぎ目供試体という）を用いた。試験条件を表3-1に示す。

本試験を実施する際の供試体の状態量は、図3-1に示すように、その供試体構成要素⁶⁾に分けて整理される。供試体の含水比 ω [%]，乾燥密度 ρ_d [g/cm³]，体積含水率 θ [cm³/cm³]，間隙率 n [%]，飽和度 S_r [%]の定義は次式のようにになる。

$$\cdot \text{含水比}[\%] \quad \omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (1)$$

$$\cdot \text{乾燥密度}[\text{g}/\text{cm}^3] \quad \rho_d = \frac{W_s}{V} \quad (2)$$

$$\cdot \text{体積含水率}[\text{cm}^3/\text{cm}^3] \quad \theta = \frac{V_w}{V} = \frac{W_w / \rho_w}{W_s / \rho_d} = \frac{0.01\omega \cdot \rho_d}{\rho_w} \quad (3)$$

・ 間隙率[%]
$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right) \times 100 \quad (4)$$

・ 飽和度[%]
$$Sr = \frac{V_w}{V_v} \times 100 = \frac{\omega}{\left(\frac{n}{100-n}\right)} \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (5)$$

ここで、 $\rho_s (= W_s / V_s)$ は土粒子の密度[g/cm³]である。

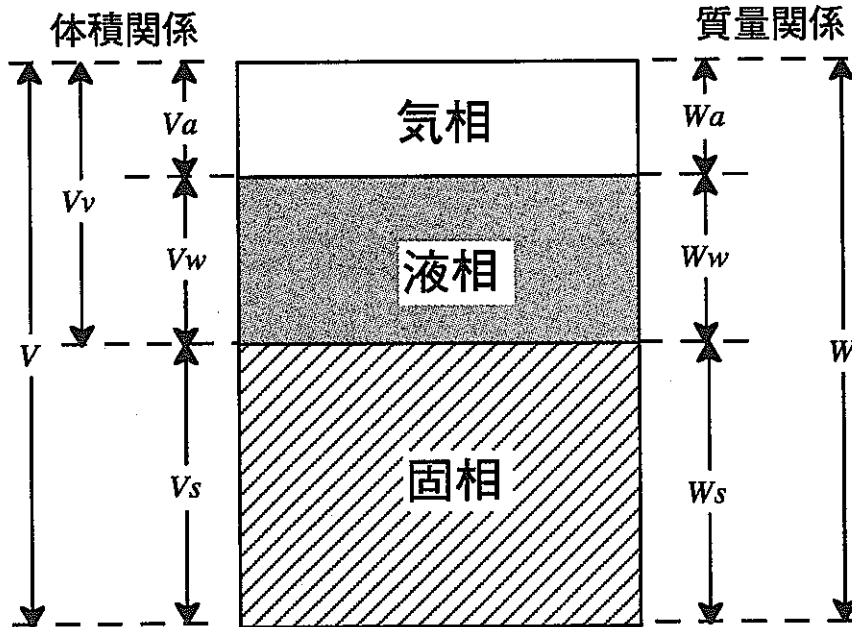


図3-1 供試体を構成する要素

表3-1 試験条件

供試体	ベントナイト単体試料
乾燥密度 [g/cm ³]	1.8
初期含水比[%]	0 (=体積含水率0[cm ³ /cm ³])
供試体寸法[mm]	φ 20×H20
試験温度[°C]	25
浸潤時間[hrs]	8, 16, 24, 48, 72
浸潤液	蒸留水

3.1.2 実験方法

図3-2に示すステンレス製の装置を用いて水の浸潤試験を行なった。試験手順を以下に示す。

- (1) ベントナイト粉末を、110℃の条件で約24時間乾燥させる。
- (2) 乾燥させた試料を試験カラムを用いて乾燥密度が1.8 [g/cm³]となるように充填する。継ぎ目供試体は、図3-3に示す試験カラムを用いて継ぎ目を持たせるため半分ずつ圧縮成型する。圧縮成型した試料を内径φ20mm×高さ20mmで組み合わせる。
- (3) 圧縮成型後、組み合わせた試験カラムを孔径5μmの金属焼結フィルター、および孔径2μmのテフロンフィルターで供試体の両端を挟み試験カラムを図3-2のように組み立てる。
- (4) ホットプレートを使用し、所定の温度に保たれた蒸留水の中に試験カラムを浸け、試験カラムの下端から供試体に蒸留水を浸潤させる。試験上端の空気口は供試体内部の空気を外部に放出するためのものである。なお、供試体内の温度が水温とほぼ同じになることを事前の試験で確認している。一体型試料および継ぎ目試料の形状および浸潤方向を図3-4に示す。
- (5) 所定の時間が経過した後、供試体リング内の供試体をオートグラフを用いて、2mmずつ押し出し、厚さ2mmの薄片に10分割する。
- (6) 10分割した各薄片の水分を炉乾燥（110℃，24時間）にて蒸発させ、乾燥前との質量差により含水比，体積含水率を求める。
- (7) 水分分布曲線を作成する。

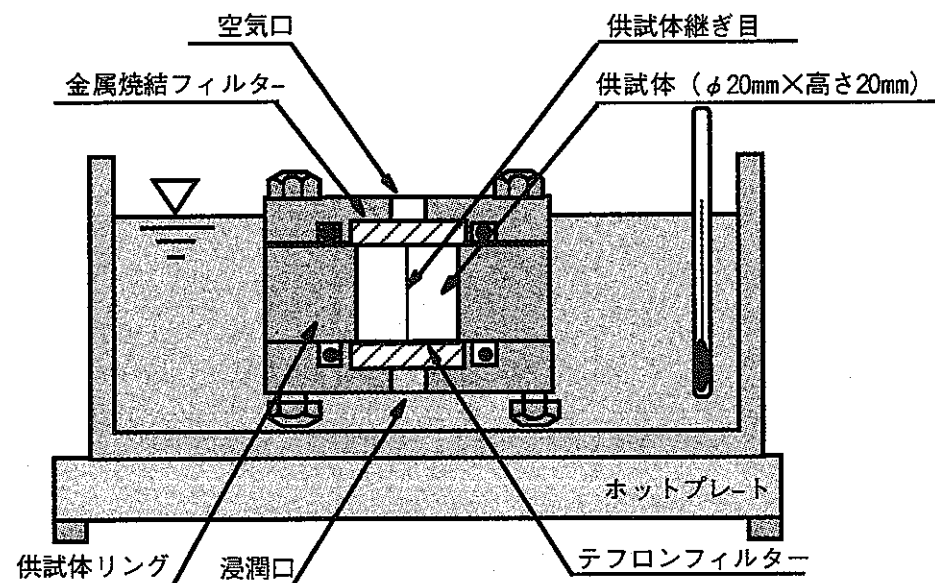


図3-2 継ぎ目供試体浸潤試験装置

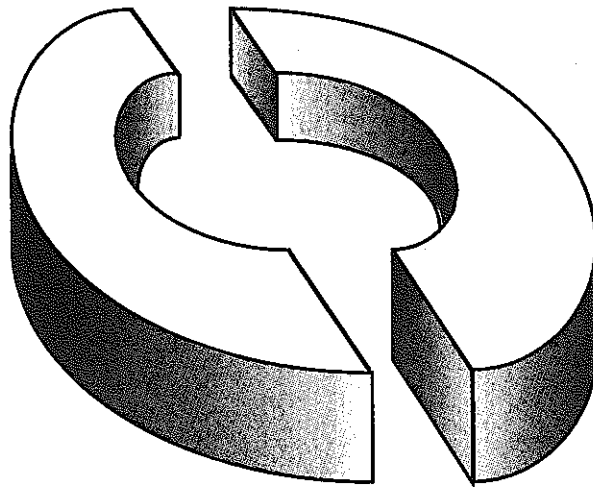


図3-3 継ぎ目供試体用試験カラム

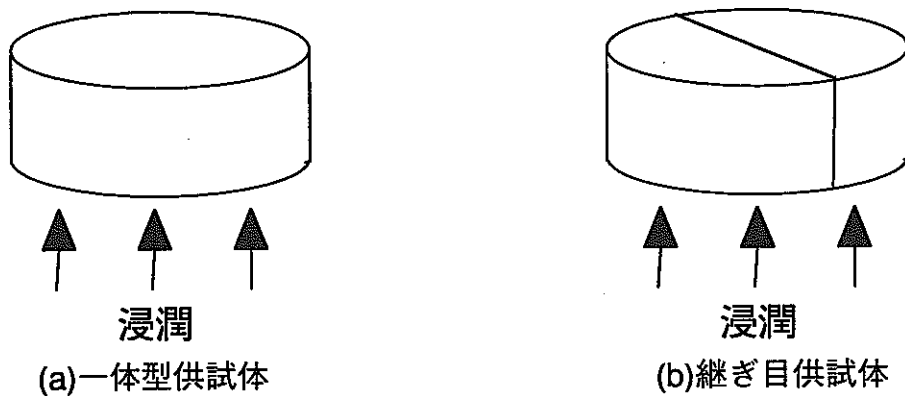


図3-4 一体型供試体と継ぎ目供試体

3.1.3 実験結果

浸潤試験によって得られた供試体浸潤面からの距離と体積含水率との関係を水分分布図として、継ぎ目を持つ供試体のものを図3-5に示し、また、別途、基礎物性試験によって得られた一体型の継ぎ目がない供試体のものを図3-6に示す¹⁾。グラフ縦軸は体積含水率、横軸は浸潤面からの距離である。水分分布図中のプロットは実測値、曲線は実測値に対する近似曲線（以下、水分分布曲線という）である。浸潤面の体積含水率は、浸潤面が供試体作製時の乾燥密度 1.8 g/cm^3 の状態では飽和しているものと仮定し、(3)～(5)式によって得られた理論飽和含水率 ($0.333[\text{cm}^3/\text{cm}^3]$) とした。

いずれの水分分布図を見ても、時間の経過に伴い供試体全体の水分の増加していく様子が読み取れるが、同一浸潤時間の水分分布曲線を比較すると、供試体に継ぎ目を持たせることにより水の浸潤の仕方が早いため、一体型に比べ供試体中の水分量が多いことが分かる。

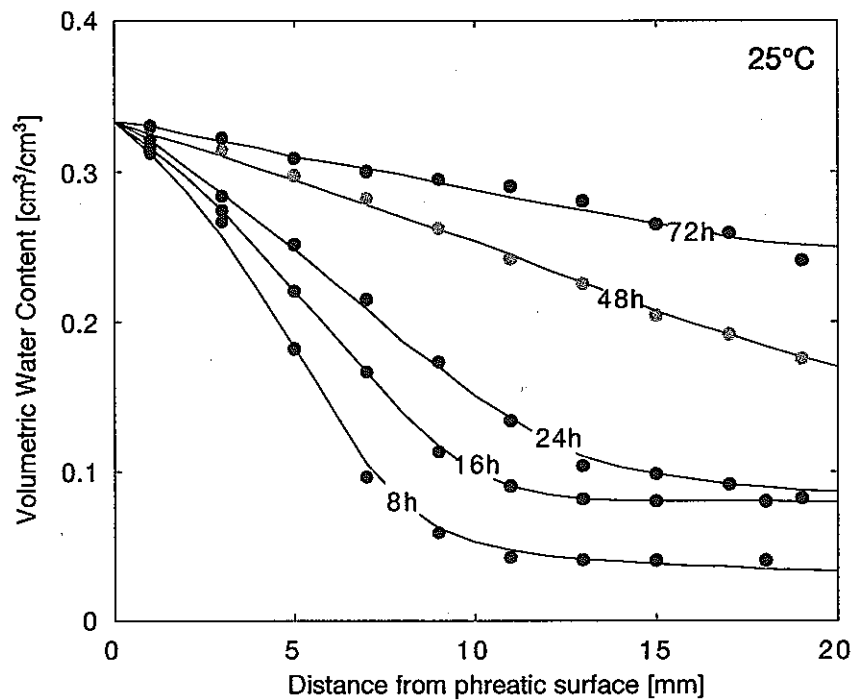


図3-5 継ぎ目供試体の水分分布図

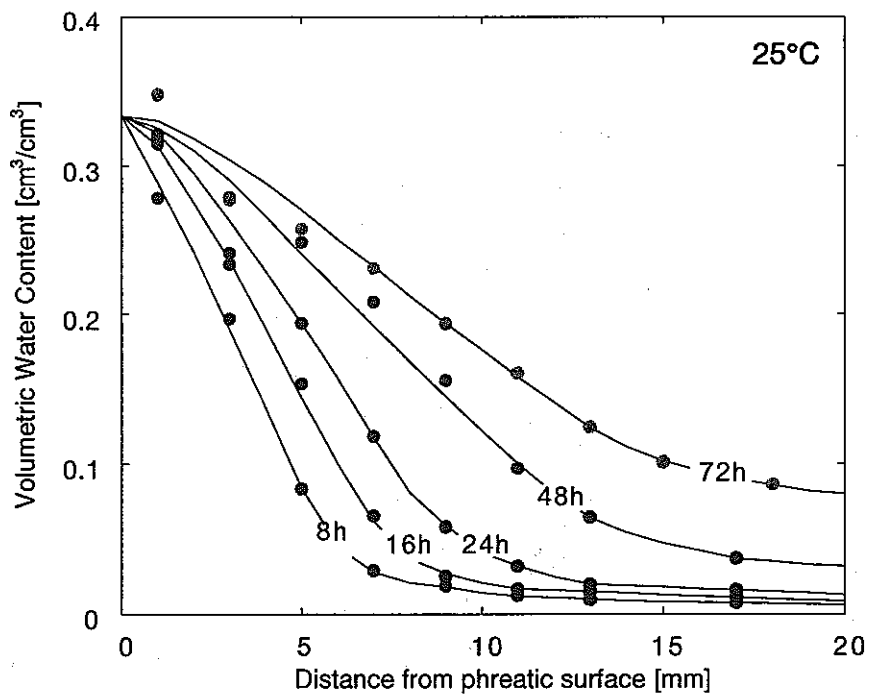


図3-6 一体型供試体による水分分布図

3.2 飽和透水試験²⁾

3.2.1 実験条件

試験は、ベントナイト単体試料およびケイ砂混合ベントナイト試料に関して実施し、乾燥密度はそれぞれ1.8 g/cm³、1.6 g/cm³とした。供試体の大きさは直径5 cm、高さ0.5 cmである。供試体としては浸潤試験と同様に一体型供試体と継ぎ目供試体を作成した。試験条件を表3-2に示す。

表3-2 試験条件

供試体	ベントナイト単体試料	ケイ砂混合ベントナイト試料
乾燥密度 [g/cm ³]	1.8	1.6
供試体寸法 [mm]	φ 50×H5	
試験温度 [°C]	25	
浸潤液	蒸留水	

3.2.2 実験方法

試験手順を以下に示す。

- (1) 所定の乾燥密度に圧縮成型したベントナイト供試体を透水試験カラムで拘束し、恒温槽内に設置する。一体型供試体は一体で成型した。また、継ぎ目供試体は、供試体成型時に供試体内部にスペーサーをかまし、成型後、スペーサーを外し継ぎ目部を作成した。
- (2) 恒温槽を任意の温度に設定し、コンプレッサーから加圧タンクへ0.8MPaの圧縮空気を送り込み、透過液である蒸留水を加圧して透水試験カラムへ水を供給する。継ぎ目部は浸潤に伴うベントナイトの膨潤によりふさがれる。
- (3) 供試体が飽和すると透過した水が測量容器に流れ、電子天秤によって単位時間当たりの透過量を測定する。
- (4) 飽和透水係数 k [m/s] 単位時間当たりの透過量 Q [m³/s] からダルシー則に従い次式により算出する。ここで A [m²] は供試体断面積、 i [-] は動水勾配である。

$$Q = kiA \quad (6)$$

3.2.3 実験結果

図3-7に一体型供試体 (Integrated body) および継ぎ目供試体 (Adhered body) を用いて得られた透水係数の比較を示す。ベントナイト単体試料 (Bentonite clay) もケイ砂混合ベントナイト試料 (Bentonite-sand mixture) も、継ぎ目供試体の方が一体型供試体に比べ大きな値となったものの、オーダー的にはほぼ同等な値を示した。すなわち、透水における継ぎ目部の影響は、ベントナイトの膨潤により継ぎ目が圧着された後、つまり、ベントナイトが飽和した時点で小さくなるものと考えられる。

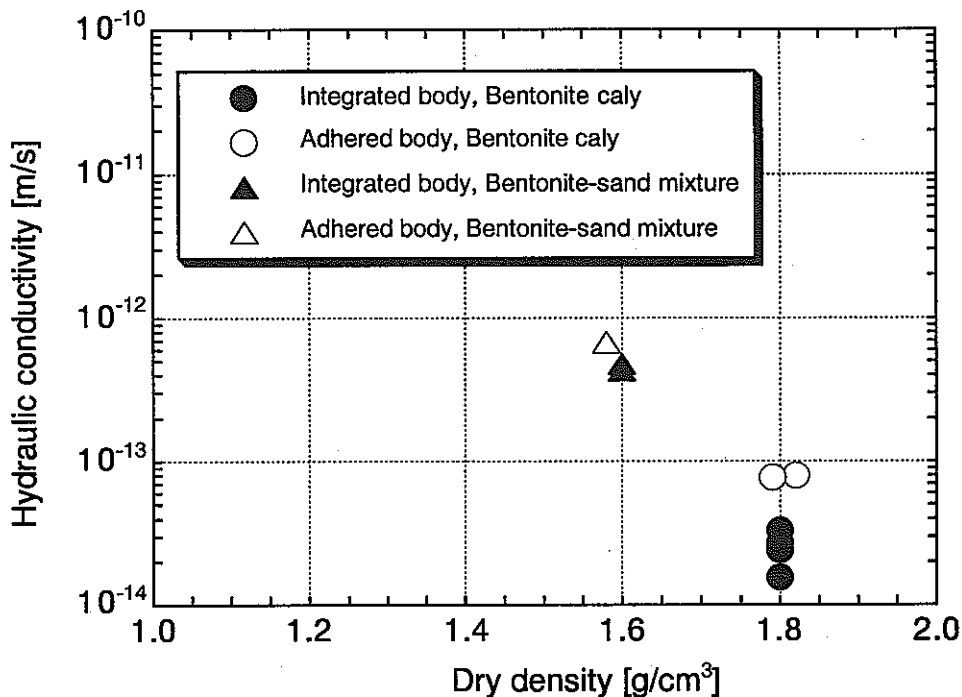


図3-7 一体型供試体と継ぎ目供試体の透水係数の比較

4. まとめ

ここでは、ブロック積み重ね方式を対象にブロックおよびブロックの継ぎ目のせん断力学特性および浸潤特性について調べた。また、ケイ砂混合ベントナイト試料のせん断力学特性とベントナイト試料のせん断力学特性の比較検討を行なった。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 飽和度50%の場合の強度は飽和度100%のものよりも大きい。
- (2) 飽和度50%の場合、一体型試料のせん断強度は分離型試料に比べて大きく、ベントナイト緩衝材の変形は、ブロックの継ぎ目部分で発生する可能性が大きいと考えられる。

- (3) 継ぎ目での変形が純粹に滑り変形であれば、継ぎ目が開口する可能性は小さいものと考えられが、万一、ベントナイトブロックが破壊するような場合には開口亀裂が発生する可能性が考えられる。
- (4) 飽和度50%の場合はブロック部に比べブロック継ぎ目部のせん断強度はかなり小さくなり、弱部となると考えられる。一方、飽和度100%の場合はブロック部の強度は飽和度50%の時点に比べて小さくなるが、ブロック部と継ぎ目部の差は無くなってくる。すなわち、緩衝材が飽和することにより全体的に強度は小さくなるが、弱部となる部分は無くなってくるものと考えられる。
- (5) ケイ砂混合ベントナイト試料は、コスト面や熱伝導性の面で有利であるとされているが、強度的にはベントナイト単体試料に比べて2分の1程度と小さくなる。
- (6) 継ぎ目部分を含む供試体の浸潤速度はブロック部に比べ早くなる。今回の試験は隙間の大きくない継ぎ目であったが、継ぎ目部分に大きな隙間がある場合や外部の水圧が高い場合は、この部分が卓越した浸潤経路となるものと考えられる。
- (7) 緩衝材が飽和した場合、浸透に与える継ぎ目部分の影響は緩衝材の膨潤により小さくなる。

【参考資料】

- 1) 鈴木英明他 (1996) : 緩衝材の水分ポテンシャルと水分拡散係数, 動燃技術資料PNC TN8410 96-117
- 2) 松本一浩他 (1996) : 緩衝材の飽和透水特性, 動燃技術資料PNC TN8410 97-296
- 3) 並河努他 (1997) : 緩衝材の圧密特性, 動燃技術資料PNC TN8410 97-051
- 4) 並河努他 (1997) : 緩衝材のせん断特性 1, 動燃技術資料PNC TN8410 97-074
- 5) 動燃事業団 (1996) : 地層処分研究開発の現状—平成8年度—, PNC TN1410 96-071
- 6) 中野政詩 (1991) : 土の物質移動学「東京大学出版会」

謝辞

本研究を実施するにあたり、雨宮清氏をはじめ株式会社間組の方々から多大な御協力、御指導を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。