

2. 試料と各種物性値

試料は、高純度ベントナイトとして広く知られるクニピアF(クニミネ工業)と市販のカオリンKH(カナヤ興産)である。クニピアFは、膨潤性を有する *Smectite* を主成分とし不純物は1%未満である。カオリンKHはX線回折分析より積層不正 *kaolinite* に同定され、石英などの他鉱物は検出されなかった。E PMAによる定量化学分析では、カオリナイトの構成元素である SiO_2 、 Al_2O_3 以外の元素はほとんど検出されず、僅かに FeO が0.2%検出されたにすぎない。カオリンKHの質量割合は $\text{SiO}_2=55.16\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3=44.84\%$ で理想化学組成($\text{SiO}_2=54.10\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3=45.90\%$)とほぼ同じであることから、X線回折分析結果とあわせてカオリンKHが不純物をほとんど含まない高純度 *kaolinite* であることが確認された。表1に両試料の各種物性値を示す。クニピアFは塑性指数 I_p が極めて大きく、カオリンKHはほぼゼロである。写真1は塑性限界 w_p (=液性限界 w_L) 状態のカオリンKHであるが半固体状と液状が共存していることがわかる。次に電気化学的性質の指標となる陽イオン交換容量 *CEC* については、クニピアFは大きくカオリンKHは小さい。ちなみに *CEC* の最大値は 150cmol/kg 程度である。せん断強度についてはカオリンKHの $\tan \phi'$ は大きく、クニピアFは小さい。とくにクニピアFの湿潤状態における $\tan \phi'$ は極端に小さい。ここで乾燥試料とは粉末試料をそのまません断箱に詰めて大変位一面せん断試験を行った結果である。各種物性値よりクニピアFとカオリンKHが物理的・化学的性質において対極にあることがわかる。

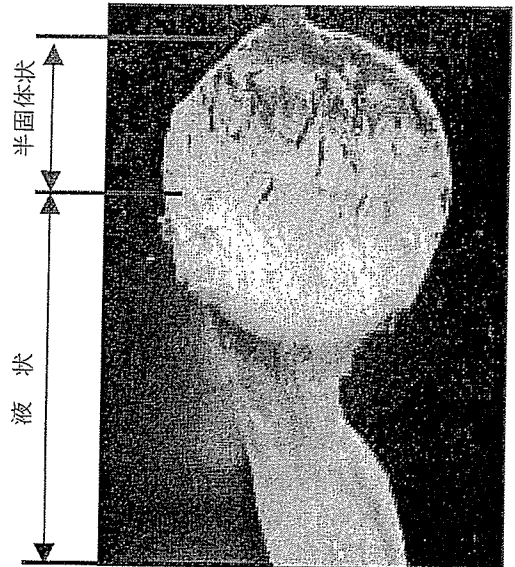


写真1 塑性限界(=液性限界)状態のカオリンKH

3. せん断試験によるアモントン・クーロン則の適用性の検証

3. 1 アモントン・クーロンの法則

アモントン・クーロンの法則は、一般的には比較的汚れの少ない固体表面に対して成立する経験則⁵⁾で、摩擦の極めて広い範囲で成り立つことから別名「摩擦の法則」と呼ばれる。

Amonton(1699)・Coulomb(1785)の法則

- ①摩擦力は、接触面に加えられる垂直荷重に比例する。
- ②摩擦力は見かけの接触面積には無関係である。
- ③摩擦力は、すべり速度には無関係である。
- ④静摩擦力は動摩擦力より大きい。

この法則によれば摩擦力は見かけの接触面積には無関係で「直方を縦にしても横にしても摩擦力は同じ」⁴⁾という実験事実によって裏付けられている。この実験は真実接触面の存在を証明する実験として大変重要である。

3. 2 真実接触面の検証実験

真実接触面の有無を確認するため、垂直力一定のまません断面の大きさだけを変えてせん断試験を行った。実験では通常の湿潤供試体のほかに固体表面同士の摩擦現象が期待される乾燥試料での実験を行った。

(1) 試験方法

せん断試験は、残留状態に至るまでの大変位を一方方向で与えることのできる大変位一面せん断試験装置⁶⁾により行った。本装置は上せん断箱固定、下せん断箱が可動するタイプで、せん断箱寸法は長さ60cm、幅3cm、高さ4.5cmと細長い。試験ではせん断箱内部に角板を置くことでせん断面積(見かけの接触面積)を適宜変更した。見かけの接触面積は 180cm^2 (長さ60cm×奥行き3cm)、 60cm^2 (長さ20cm×奥行き3cm)の2種類である。試験条件は圧密定圧条件とし、圧密打ち切りを3t法により判断しせん断を開始した。せん断変位は、見かけの接触面積 180cm^2 のとき最大水平変位=200mmまでとし、見かけの接触面積 60cm^2 のとき最大水平変位=60mmまでとした。せん断速度は0.5mm/minである。垂直力はカオリKHが乾燥試料・湿潤試料ともに3kN(見かけの接触面積 180cm^2 のとき $\sigma_v=167\text{kPa}$ 、見かけの接触面積 60cm^2 のとき $\sigma_v=500\text{kPa}$)、クニピアFが乾燥試料が3kN、湿潤試料が0.54kN(見

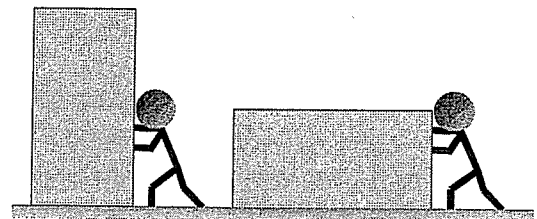


図2 見かけの接触面と摩擦との関係

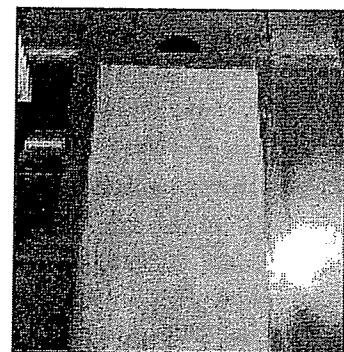


写真2 カオリンKH(乾燥)の残留状態せん断面

かけの接触面積 180cm^2 のとき $\sigma_v=30\text{kPa}$ 、見かけの接触面積 60cm^2 のとき $\sigma_v=90\text{kPa}$ である。クニピア F の湿潤試料において垂直力が小さいのは、大きな垂直力のもとでは圧密時にせん断面から多量の試料漏出が生じるためである。乾燥試料を用いた実験では、粉末をそのまません断箱に入れ供試体とした。湿潤試料は粉末試料に脱気蒸留水を加えて練り混ぜた後、試料をセルに入れて 30 分間ほど脱気し、 150kPa の圧密圧力で 7 日間予圧密したものを供試体サイズにカットしせん断箱に挿入した。

(2) 試験結果

乾燥試料の試験後のせん断面を写真 2 に示す。粉末をそのまま入れただけの供試体であるが鏡肌を呈する平滑なせん断面が形成されている。図 3～6 は、各試料のせん断力-水平変位関係である。図より乾燥試料、湿潤試料ともに残留状態に至っていることがわかる。表 2 は各試験より得られた残留強度で、湿潤試料の残留値が面積の大きさによらずほぼ同じ値を示している。乾燥試料については、カオリン KH、クニピア F ともに接触面積の大きい方 (180cm^2) の残留値が若干大きい結果となった。両者の差はカオリン KH、クニピア F とも 35.3N で、粉末試料を用いたことで接触面積の大きい (垂直応力の小さい) 供試体が全体の締まり具合が悪かったとみられる。しかし、この差は得られた残留強度の僅か 2% にとどまり、粉末試料を用いたことを考えればほぼ同じ残留値が得られたと判断される。

表 2 大変位一面せん断試験結果

		せん断面積 (見かけの接触面積)	
		60cm^2	180cm^2
乾燥	カオリン KH	1590.6 N	1625.9 N
	クニピア F	1509.2 N	1558.1 N
湿潤	カオリン KH	986.6 N	989.9 N
	クニピア F	57.8 N	57.1 N

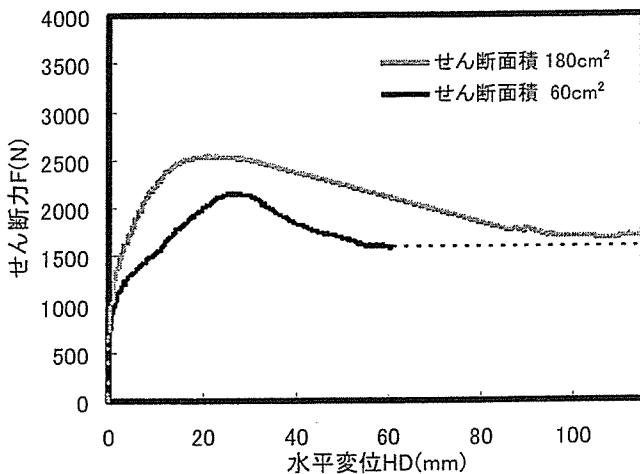


図 3 カオリン KH (乾燥) のせん断力 F - 水平変位 HD 関係

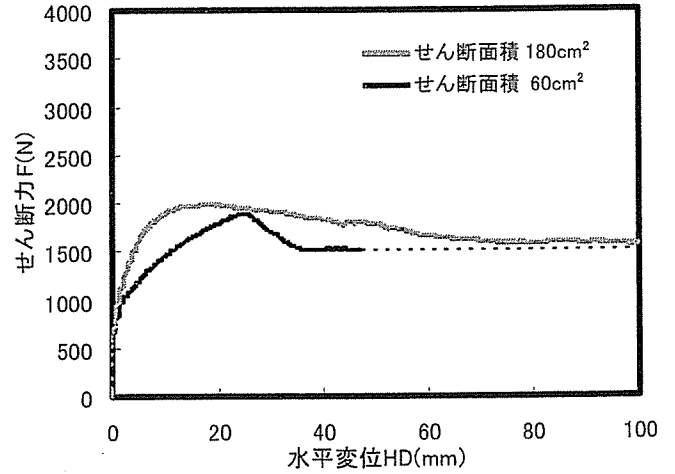


図 4 クニピア F (乾燥) のせん断力 F - 水平変位 HD 関係

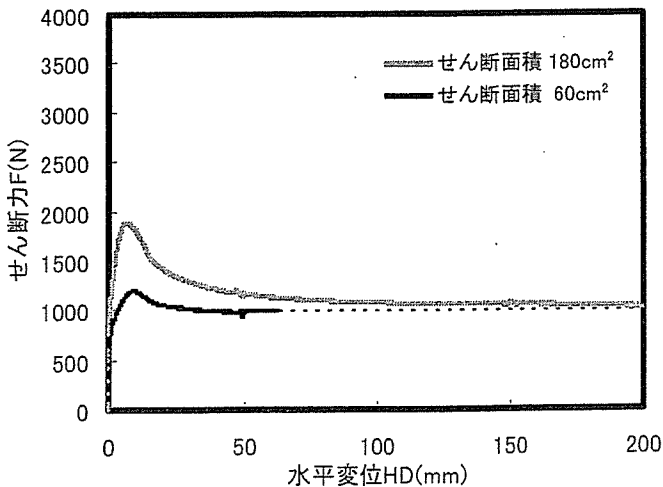


図 5 カオリン KH (湿潤) のせん断力 F - 水平変位 HD 関係

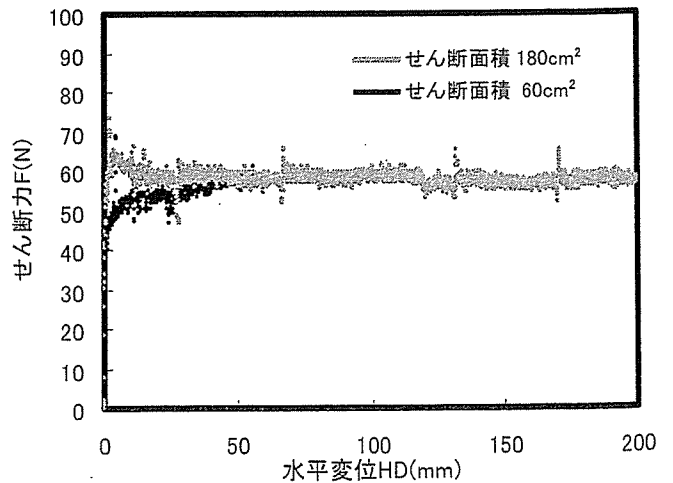


図 6 クニピア F (湿潤) のせん断力 F - 水平変位 HD 関係

4. 共焦点レーザー顕微鏡による真実接触面の直接観察

真実接触面の存在ならびに垂直応力と真実接触面積との関係を明らかにするため、共焦点レーザー顕微鏡によるせん断面の観察を行った。

4.1 真実接触面の観察

(1) 観察方法

大変位一面せん断試験装置の下せん断箱にスライドグラスを取り付けて、大変位せん断中のせん断面がそのまま載るようにした。供試体がスライドグラス上に載ったところでせん断箱から外し、共焦点レーザー顕微鏡（バイオラッド社、MRC-1024）による観察を行った（図7）。共焦点レーザー顕微鏡（Confocal Laser Scan Microscope, 写真3）とは、レーザーを対物レンズから走査し試料から反射した光ないし放出された蛍光を検出してコンピュータで画像化する顕微鏡である。CLSMの特徴は、ピンホールと呼ばれる絞りを利用して同一焦点（共焦点という）面だけの反射光、蛍光を検出することで任意の面の光学平面・断面像を得ることである（図8）。実験では、CLSMの焦点をスライドグラスとせん断面との接触部付近に合わせた。観察には反射光を利用し、観察条件はピンホール直径1.0mm、ゲイン値1000V、レーザー強度3%、画像スキャン平均化処理を5回とした。なお、乾燥試料は湿潤試料のようにスライドグラスにせん断面が張り付かなかつたため、せん断試験中のスライドグラス載せを断念し観察する際に試料を手で載せた。また、大変位せん断試験の試験条件は、圧密定圧条件とし、垂直応力150kPa、せん断変位量200mm、せん断速度0.5mm/minである。

(2) 観察結果

図9にカオリンKH、クニピアFの乾燥試料、湿潤試料の反射像を示す。白い部分は粘土粒子、黒い部分は空隙（乾燥試料）もしくは水（湿潤試料）である。

カオリンKH、クニピアFともにスライドグラスとせん断面との接触部に白い斑点状の模様が観察された。全面接触であれば真っ白な画像になるが、反射の異なる明暗の模様が分布していることから部分接触である。試料ごとにみると、カオリンKHは湿潤試料において平面的に接触している様子が認められる。一方、クニピアFは乾燥試料で白い斑点状の模様が観察されるのに対し湿潤試料では全体が真っ黒である。湿潤状態のクニピアFの断面像にはガラスとせん断面との間に水が存在している様子が映し出されている。図10は、これら反射像を輝度から三次元化したものである。粘土粒子が存在すると輝度が高くなることから画像は表面凹凸を近似している。図よりカオリンKHの表面は全体に粗く、その粗さは乾燥状態で顕著である。クニピアFは乾燥状態で凹凸が認められるものの湿潤状態ではほとんど認められず全体になめらかになっている。図11は、湿潤状態のカオリンKHのせん断面を手で動かしたときの様子であるが、黒い部分が形を変えることなく移動した。運動停止中の接触面が運動中も形態をさほど変化させないことを示している点で重要である。

共焦点レーザー顕微鏡観察より、乾燥試料、湿潤試料と

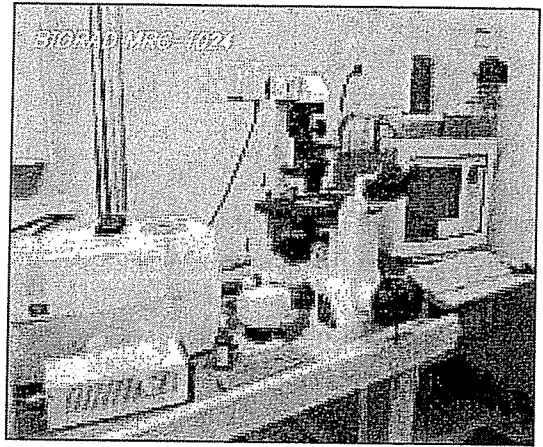


写真3 共焦点レーザー顕微鏡

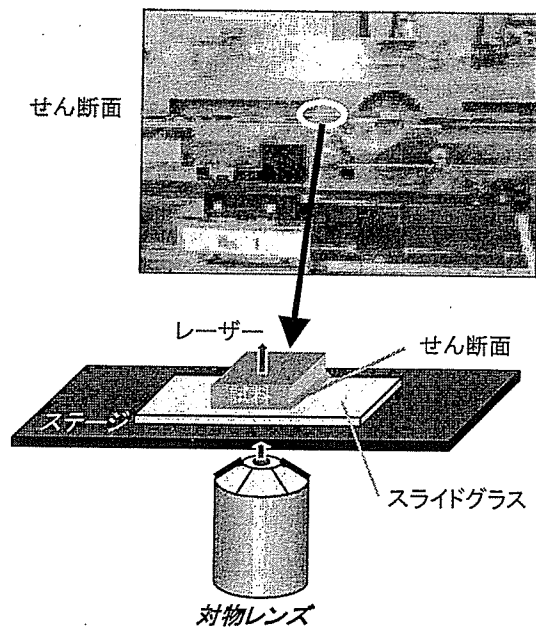


図7 共焦点レーザー顕微鏡による接触部の観察方法

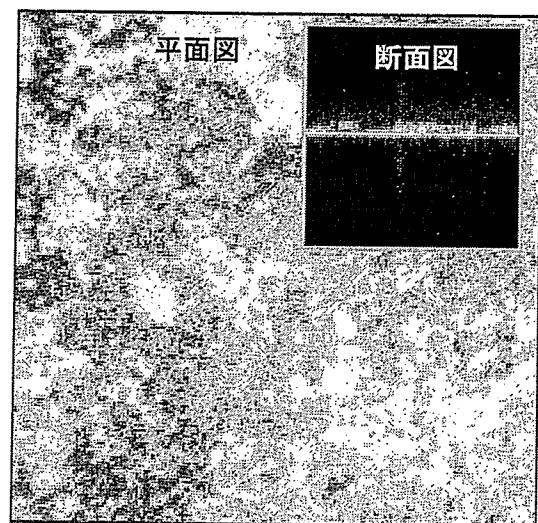


図8 反射像の例（NSF粘土のせん断面）

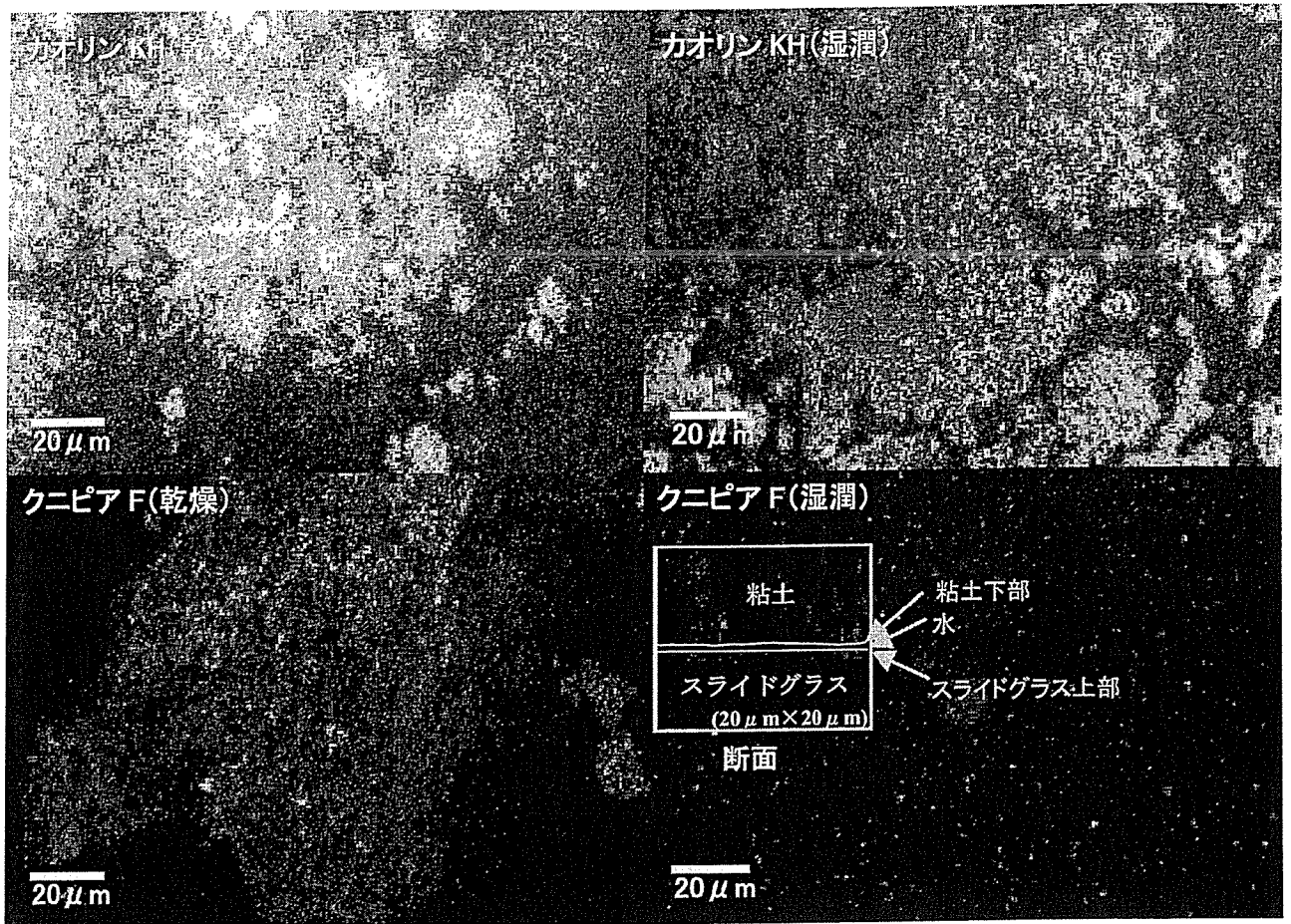


図9 カオリン KH, クニピア F の接触部付近の反射像

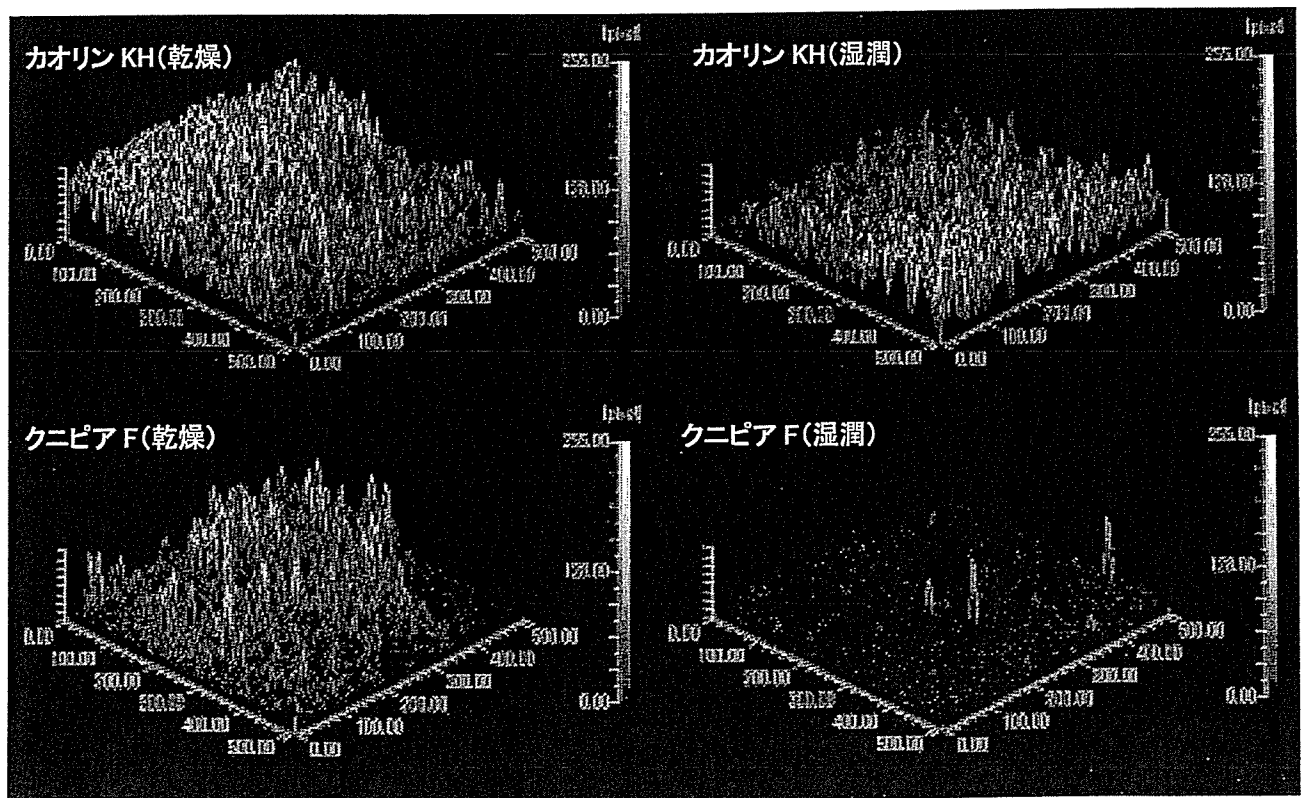


図10 カオリン KH, クニピア F の三次元輝度グラフ

もにスライドガラスとせん断面とは部分接触であり、いわゆる真実接触面の存在が確認された。

4. 2 真実接触面積と垂直応力との関係

(1) 実験方法

強化ガラスで試作したスライドガラスの上にせん断面を載せて垂直応力を載荷した(図12)。垂直応力の載荷には錘を用い、さらにガラスと供試体の接触部から排水できるようにせん断面の周囲に濾紙を敷いた。載荷された垂直応力は50kPa, 100kPaで、共焦点レーザー顕微鏡によりせん断面とスライドガラスとの接触部付近を直接観察した。

(2) 実験結果

乾燥状態のカオリンKHとクニピアFに対し垂直応力を載荷した時の反射像を図13, 14に示す。カオリンKHは、垂直応力を50kPaから100kPaへと増加させることで、写真右上に白い幅のある帯状のゾーンが出現している。さらに右下の空隙部分が少なくなっている様子がみられる。クニピアFはカオリンKHほどの顕著な変化は認められないものの、垂直応力の増加に伴い右下の比較的広い空隙部分に白い斑点が出現していることがわかる。

図15, 16に湿潤状態のカオリンKHとクニピアFを示す。カオリンKHは、反射の異なる明暗の模様が観察され、乾燥試料に比べ平面的に接触している様子が見てとれる。垂直応力の増加に伴い左上から右下へかけて斜めに白色の帯状部分が出てくる。クニピアFは全体に真っ黒で垂直応力の増加による変化は認められない。湿潤試料において黒色の部分は水の存在を示していることから、クニピアFは荷重増加による排水がほとんど認められない。

表3に画像データを二値化し白色部分の全体に占める面積割合を算出した結果を示す。白色部分の面積増加は粘土粒子の接触面積すなわち真実接触面積の増加を意味する。表より、クニピアFの湿潤試料を除き全ての試料において垂直応力の増加に伴って白色部分の面積が増加している。

5. 考察

3. アモントン・クーロン則の適用性の検証から、残留強度が見かけの接触面積とは無関係であることが確認された。本実験ではクニピアFとカオリンKHを使用した。NSF粘土(パイロフィライトと石英)においても同じ結果を得ている。アモントン・クーロンの法則は、物質の種類によらず固体のすべり摩擦に対して普遍的に成立

する法則で、残留強度について成立することは(残留強度は垂直荷重に比例、速度依存性をほとんど示さないなど他の法則も成立する)、残留状態におけるせん断現象が本質的には摩擦現象であることを示している。

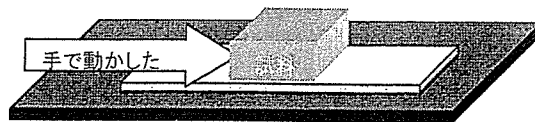


図11 カオリンKHの水平移動前後の反射像

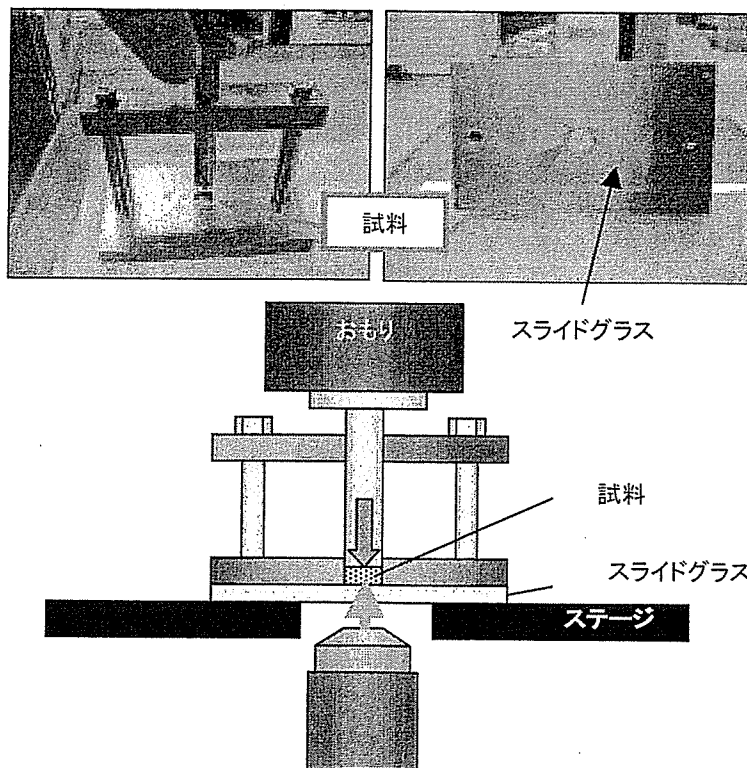


図12 おもりによる垂直応力の載荷方法

摩擦には運動の種類などにより種々の分類があり、残留状態でのせん断現象が摩擦のどの分類に相当するのか整理しておく必要がある。摩擦は、相対運動の有無によって「動摩擦(kinetic friction)」と「静摩擦(static friction)」に、相対運動の種類によって「すべり摩擦(sliding friction)」と「ころがり摩擦(rolling friction)」に、吸着分子の有無など面の清浄度に応じて「乾燥摩擦(dry friction)」と「潤滑摩擦(lubricating friction)」に分類されている。ここで残留強度が運動中に発揮される強度であるから運動の有無では「動摩擦」に、せん断とはすべりを生じさせることなので相対運動の種類では「すべり摩擦」に、さらに残留強度は、通常、湿潤試料を対象とするので面の清浄度については「潤滑摩擦」に分類される。したがって、本研究対象である残留状態でのせん断抵抗係数 $\tan \phi'$ について考察するにあたっては、厳密には“動摩擦+すべり摩擦+潤滑摩擦”に分類される摩擦現象に限定して考察しなければならない。

4. 共焦点レーザー顕微鏡観察から、真実接触面の存在と垂直応力の増加に伴い真実接触面積が大きくなることが確認された。これら実験結果は運動を停止した状態での観察結果であるが、図11に示されているように真実接触面は運動中も形態をほとんど変えないことから本研究において得られた結果はせん断中にも適用可能と考える。

以上より、残留状態におけるせん断抵抗係数 $\tan \phi'$ が存在する理由、すなわちなぜ垂直応力の増加に伴い残留強度が直線的に増加するのか?との問題について、「垂直応力に比例して真実接触面積が増加することがその主因である」と結論づける。では、なぜ真実接触面積が荷重に比例するのかという疑問が生じるが、これについては次のような説明がなされている⁷⁾。すなわち真実接触面積は見かけの接触面積に比べて非常に小さいので、そこでの圧力は非常に高く、弾性限界を越え塑性流動領域に達し、圧力は塑性流動圧力 P_m となっている。これは一定である。したがって、垂直応力 N と真実接触面積 A_r 、塑性流動圧力 P_m との間には $N=A_r P_m$ の関係が成り立ち真実接触面積は荷重に比例し摩擦力も荷重に比例する。

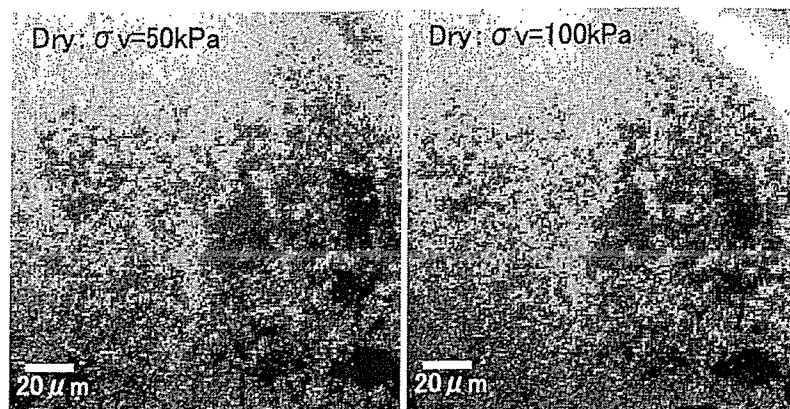


図13 カオリン KH(乾燥)の垂直応力載荷時の反射像

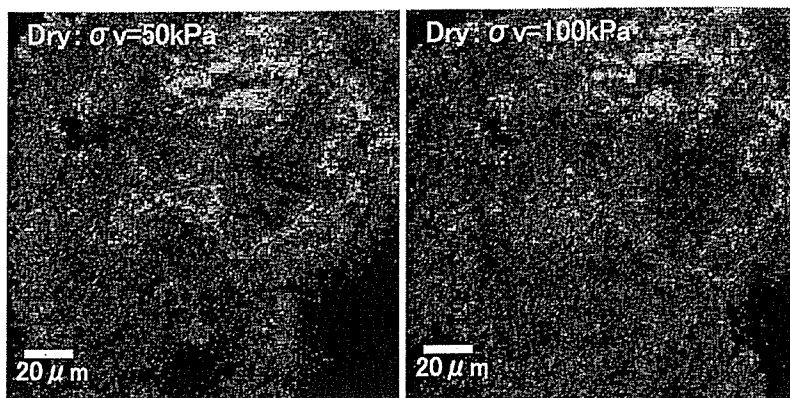


図14 クニピア F(乾燥)の垂直応力載荷時の反射像

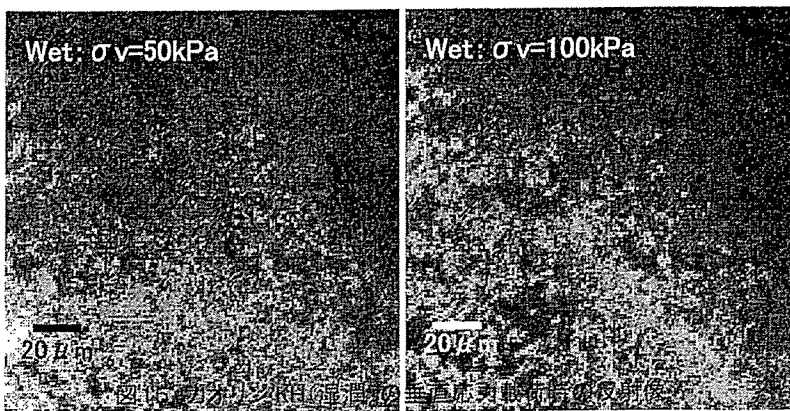


図15 クニピア F(湿潤)の垂直応力載荷時の反射像

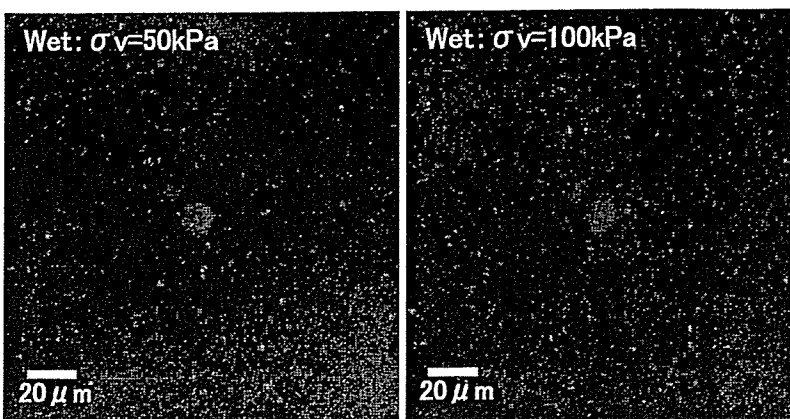


図16 クニピア F(湿潤)の垂直応力載荷時の反射像

6. まとめ

本研究では、残留状態でのせん断抵抗係数 $\tan \phi'$ のメカニズムの解明を目的に、残留強度へのアモントン・クーロンの法則の適用性の検証ならびに真実接触面の存在と垂直荷重との関係について検討した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 粘土の残留強度は垂直荷重に比例し見かけの接触面積とは無関係である（アモントン・クーロンの法則が成立する）。
- (2) 残留状態でのせん断面とガラス界面において真実接触面の存在が確認された。
- (3) 真実接触面積は垂直応力の増加に伴い大きくなる。
- (4) (1), (2), (3) より、 $\tan \phi'$ とは垂直応力の増加（もしくは減少）に伴い真実接触面積が増減することに起因する強度パラメータであると考えられる。
- (5) 湿潤状態のクニピア F ではせん断面とガラスとの界面に水が存在し、この水は垂直応力の増加によってほとんど排水されない。

表3 二値化処理による白色部分の面積割合

		垂直応力 (kPa)		
		0	50	100
湿潤	クニピアF	<1%	<1%	<1%
	カオリンKH	35.76%	46.56%	53.60%
乾燥	クニピアF	6.02%	22.39%	24.12%
	カオリンKH	50.00%	60.20%	65.16%

謝辞

北海道大学大学院理学研究科の川端和重教授には共焦点レーザー顕微鏡による接触面の観察方法をご教示いただいた。大変位一面せん断試験結果は岩手大学大学院 池田飛鳥君によるものである。心から感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) Mitachi, T., Kuda, T., Okawara, M. and Ishibashi, M., Determination of strength parameters for landslide slope stability analysis by laboratory test inverse calculation engagement, Journal of the Japan Landslide Soc., vol. 40, No. 2, pp. 105-116, 2003.
- 2) 広辞苑[理], 三省堂
- 3) トライボロジー辞典 トライボロジー学会編, 養賢堂, 338p., 1995
- 4) 加藤孝久, 益子正文 共著: トライボロジーの基礎, 191p., 培風館, 2004.
- 5) 山本雄二, 兼田楨宏 共著: トライボロジー, 理工学社, 249p., 1998.
- 6) 辻広成, 大河原正文: 粘土の残留状態再現用大変位一面せん断試験装置の試作, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要, pp. 308-309, 2001.
- 7) 松川宏: 特集「摩擦研究の最先端とその応用」, 表面科学, pp. 1-13, 2003.

北海道大学大学院 ○学生会員 梅谷晋平
(株)ドーコン 正会員 高橋秀彰
北海道大学大学院 国際会員 三田地利之

1. はじめに

地すべり対策工の設計に際し、従来せん断試験結果に基づく強度パラメータが用いられる機会はきわめて限られていた。この原因には、せん断試験結果の信頼性が低いとする誤解に基づく部分が少なからずあると考えられる。しかし、近年の技術進歩と試験基準の整備によって事情は変わっており、室内試験結果を取り入れた地すべり対策工設計用の強度パラメータ決定法も提案されている¹⁾。

本文は、地すべり対策工の施工現場から採取した不攪乱試料および再構成試料を用いて、繰返し一面せん断試験機により求めた強度パラメータの評価方法について述べる。

2. 試料および試験方法

(1) 試料

北海道夕張市富野地区の地すべり現場で施工された集水井内から不攪乱試料を採取した。周辺の地質は古第三紀の幌内層である。幌内層は暗灰色を呈す泥岩で、ほとんど塊状であるがところどころに凝灰岩層を挟む。

現場は地すべりが多発する地域であり、本文ではすべり面のタイプが異なる二つの地すべりブロックについて報告する。Aブロックは長さ約170m、幅約180m、深さ約15mの規模で地すべりが生じており、その土塊には凝灰岩薄層が狭在している。すべり面が発生しているのは泥岩と凝灰岩との境界で、すべり面粘土の厚さは約5mmである。また、Bブロックは長さ約230m、幅約120m、深さ約30mの規模であり、凝灰岩は少なく、すべり面は泥岩層内で生じており、すべり面粘土の厚さは約10mmである。両ブロックともすべり面は鏡肌を呈している。不攪乱試料は、集水井施工時にすべり面以下まで掘り下げてすべり面を確認した後、すべり面を含むようにブロックサンプリングにより採取した。試料は一辺約30cmの立方体ブロックである。再構成試料はすべり面付近の粘土層から採取した不攪乱試料に蒸留水を加えスラリー状にした後、425 μ mフルイを通過した試料を予圧密して作製した。

(2) 繰返し一面せん断試験

試験には本研究室で開発したH-III型繰返し一面せん断試験機を用いた。両面排水条件で圧密後、定圧繰返し一面せん断試験を行った。試験条件は、片振幅6mm、せん断繰返し回数10回、上下せん断箱間隔は0.2mm、せん断速度は繰返し初回および最終回は0.02mm/min、繰返し途中は1.0mm/minとした。なお供試体は直径60mm、高さ20mm(再構成試料はAブロックでは20mm、Bブロックでは30mm)の円盤状のものを用いた。

不攪乱試料を用いる場合には、すべり面が供試体中央高さに位置するように成型し、繰返し一面せん断試験におけるせん断面に一致させるように留意した。また、上記の定圧繰返し一面せん断試験終了後に、多段載荷せん断試験を行っている。多段載荷せん断試験とは、一つの供試体からより多くのデータを得るために、所定の圧密応力で圧密後、定圧条件で繰返しせん断した後、垂直応力を400kPa、300kPa、200kPaと各段階で繰返しせん断を行い、一つの供試体について、垂直応力を除荷する方向で多段階の繰返しせん断を行う試験方法である。

3. 試験結果

Fig.1にAブロック不攪乱試料の残留強度と垂直応力の関係を示す。8個の供試体について試験を行ったが、かなりのばらつきが見られた。この原因として、実際の地すべり面とせん断試験のせん断面が一致していたケースと、ずれてせん断したケースが存在し、このことがせん断強度に大きく影響を及ぼしたと考えられる。そこで、本来の地すべり現場における強度パラメータを求めるにあたっては、地すべり面とせん断試験のせん断面が一致したケースの試験結果を用いるのが妥当である。したがって、せん断面が一致

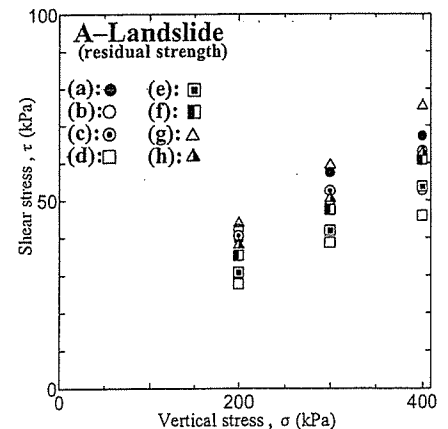


Fig.1 $\tau \sim \sigma$ relationship

Strength parameters for landslide clays researched on reversal direct box shear test

S.Umetani (Hokkaido Univ) and H.Takahashi (Docon Co.,Ltd),T.Mitachi (Hokkaido Univ)

したかどうかを判断する必要がある。

Fig.2 と Fig.3 に水平変位とせん断強度の関係を示す。この二つの試験結果は Fig.1 中の (d)、(g) である。まずは Fig.3 では試験開始直後に急激なせん断応力の増加が見られた後、水平変位が増加するに伴って大幅にせん断応力が減少している。しかし、Fig.2 では試験開始直後にこのようなせん断応力の急激な増加は見られず、せん断応力はそれほど大きく変化しなかった。

実際の地すべりでは、過去に大きなせん断変位を経験しているため粒子構造が破壊され、粒子は再配向がほぼ完了している。そのため不攪乱試料から得られるせん断応力の挙動は Fig.2 のようなタイプと考えられる。したがって、Fig.2 のようなせん断挙動を示す場合がすべり面とせん断試験のせん断面が一致したケースであり、Fig.3 のような場合は、すべり面とは異なった面でせん断をしたものと判断できる。この判断は、試験後の供試体を目視による観察とも一致した。この結果、(d) と (e) がすべり面とせん断面が一致したケースと判断し、A ブロックの強度パラメータをこれらの試料より得られた結果より決定した。B ブロックについても同様の手順で評価した。結果を Table.1 に示す。

上記のようにすべり面とせん断面が一致したケースを選択し、ピーク強度パラメータを A ブロックで求めてみた。この結果、A ブロックの不攪乱試料においてピーク強度パラメータの粘着力 c'_p が負の値を示した。当然粘着力が負になることはありえない。この原因として、決定に用いたデータが二つしかなかったことが考えられる。もう一つの原因は、本試験では最大せん断応力をピーク強度として取り扱ったが、地すべりは過去にせん断を受けているため、試験で得られた結果はピーク状態と残留状態の間の値を示していると考えられる。したがって、ほぼ同じ場所から試料を採取しているものの、試料によってはピーク状態に近い値を示すものや、残留状態に近い値を示すものがあり、このような負の値を示す原因になったのではないかと考えられる。

再構成試料から得られた残留状態強度パラメータは、Table.1 に示すように A、B ブロックともに不攪乱試料の値よりも大きな値となった。このことは供試体の粒径の違いが大きく影響したものと考えられる。地すべりの強度定数を求める場合には不攪乱と再構成試料を用いるのがデータの精度を高めるためにも重要であると考えられる。しかし、不攪乱試料は採取が困難であり、現場によっては再構成試料でしか室内試験ができない場合も考えられる。その場合、今回の試験結果のように不攪乱と再構成試料から得られたデータが大きく異なる時には、設計に用いることはできない。したがって、再構成試料の試験結果から不攪乱試料の値を高い精度で再現できるような、再構成試料の作成方法の確立が必要である。

Table.1 Strength parameters

		ピーク強度		残留強度	
		c'_p (kPa)	ϕ'_p (°)	c'_r (kPa)	ϕ'_r (°)
A-Landslide	不攪乱試料	-14.5	12.2	8.8	5.9
	再構成試料			11.9	8.7
B-landslide	不攪乱試料	7.1	17.6	12.6	7.7
	再構成試料			6.4	22.4

4. まとめ

- 1) 実際のすべり面と一面せん断試験のせん断面が一致しているかの判断は、ピーク強度の発現の様子や、ピーク強度と残留強度の大きさを比べること、また試験後の供試体の観察により行なえる。
- 2) 不攪乱試料から得られる最大せん断強度はピーク強度として強度パラメータの決定に用いているが、過去に起きた地すべりによってせん断を受けているため、ピーク強度が小さめに出ると考えられる。
- 3) A、B 両ブロックの不攪乱試料から得られた試験結果と再構成試料から得られた試験結果に整合性が見られなかった。再現性のある再構成試料の作製方法の確立が必要である。

【参考文献】 1) Mitachi, T et al.: Determination of strength parameter for landslide slope stability analysis by laboratory test and inverse calculation engagement, 地すべり, Vol.40, No.2, 2003.

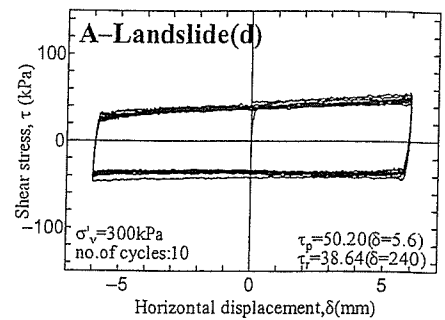


Fig.2 $\tau \sim \delta$ relationship

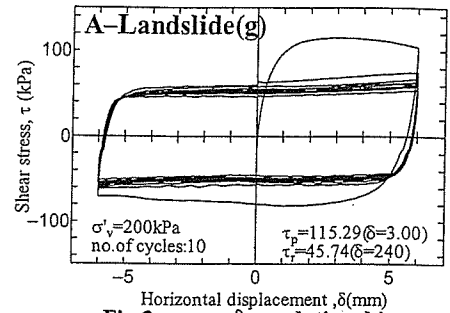


Fig.3 $\tau \sim \delta$ relationship

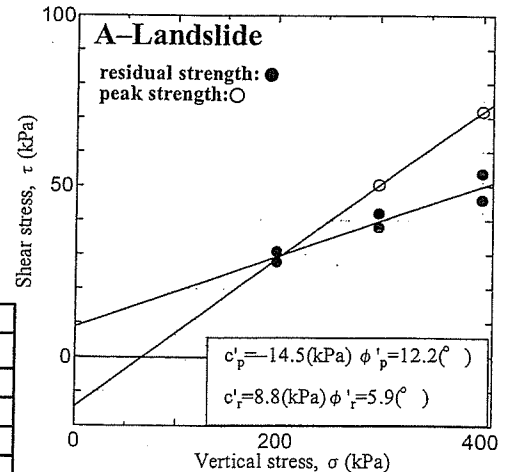


Fig.4 $\tau \sim \sigma$ relationship

1. はじめに

地すべり対策工の選定やその効果判定の根幹をなす安定解析において、採用される強度パラメータ (c, ϕ) の妥当性は、解析の信頼性に関わる大きな要素である。一方、地すべりは、活動し始めの小さな変位から数mに及ぶ大きな変位まで、様々なひずみレベルを有することから、安定解析に適用されるべきせん断強度は、すべり面構成土のひずみ軟化レベルに応じて、ピークから完全軟化を経て残留状態に至るまでの値のどこかに存在すると考えられる。一般に c, ϕ は排水条件等々の試験条件によって異なるものであり、いわゆる“定数”とはいえないことから、筆者は”強度パラメータ”と呼ぶことにしている。

さて、本文では、まず残留状態におけるせん断抵抗角 $\tan \phi'_r$ の意味を考えた上で、ピーク・完全軟化・残留状態に対応する強度パラメータの相互関係について考察し、さらに地すべり対策工設計用強度パラメータの決定方法について議論する。

2. 残留状態でのせん断と摩擦現象

残留状態とは、大きなせん断変位を受けてせん断強度が定常値に収束した状態のことで、せん断面は粒子配向により一般に平滑になっている。したがって残留状態でのせん断現象は、巨視的には平らな面同士の摩擦現象と考えられるため、 $\tan \phi'_r$ のメカニズムの解明には摩擦研究から得られた知見が有効と考えられる。摩擦とは、「接触している二物体が相対的に運動し、または運動し始めるとき、その接触面で運動を妨げようとする向きに力の働く現象、またはその力」と定義され、アモン・クーロンの法則が成立する μ とされている。この法則は、摩擦力を F 、垂直荷重を N とすると $F = \mu N$ と表され、 μ は見かけの接触面積にもすべり速度にも無関係であるというものである。 μ を摩擦係数といい摩擦の度合いを定量的に表すパラメータで、せん断現象が摩擦現象であるとするれば $\tan \phi$

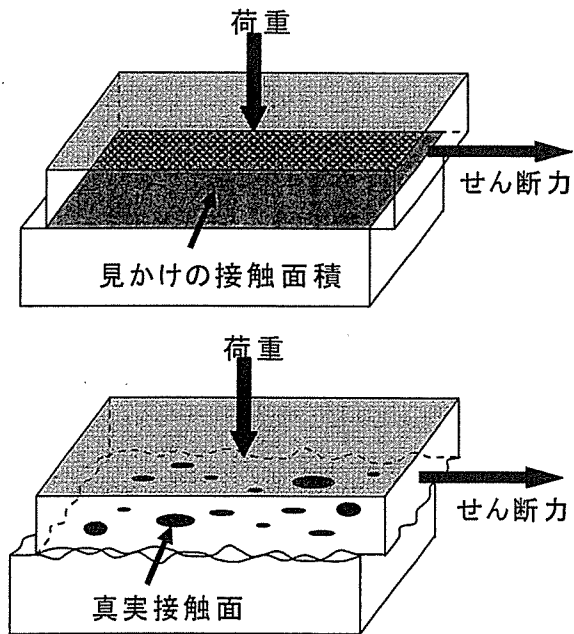


図1 見かけの接触面積と真実接触面

表1 カオリンKHとクニピアFの物性値

		カオリンKH	クニピアF
塑性指数 I_p		≈ 0 ($w_p \approx w_L = 24.4\%$)	774.8 ($w_p \approx 117.2\%, w_L = 892.0\%$)
CEC (cmol/kg)		9.2	105.4
膨潤性		無	有
$\tan \phi'_r$	乾燥	24.9°	19.0°
	湿潤	14.1°	2.3°

は μ の一種ということになる。摩擦を取り扱う学問・技術分野であるトライボロジーでは、摩擦係数 μ が存在する理由、すなわち垂直力に摩擦力が比例する理由を次のように説明している¹⁾。「物体がある平滑な面で接触しているとき、接触している面は一見すると全面接触しているように見える。しかし実際には部分的に接触しているに過ぎず、そのため物体をずらしたときに生じる摩擦力は、この接触部分で発揮される摩擦力の総和となっている。ここで接触部分を「真実接触面（もしくは真実接触点）」といい、真実接触面積が垂直荷重の増加に伴い増えるため全体の摩擦力も大きくなる（図 1）」。残留状態でのせん断現象が摩擦現象であるとすれば、アモントン・クーロンの法則が成立し、かつ摩擦係数 μ についての説明がせん断抵抗係数 $\tan \phi$ にも適用できると考えられる。そこで、残留状態でのせん断抵抗係数 $\tan \phi'_r$ のメカニズムの解明を目的に、真実接触面の存在と垂直荷重との関係について行った検討結果²⁾を以下に示す。

2. 1 試料とその物性

試料は、高純度ベントナイトとして広く知られるクニピア F（クニミネ工業）と市販のカオリン KH（カナヤ興産）である。クニピア F は、膨潤性を有する *Smectite* を主成分とし不純物は 1% 未満である。カオリン KH は X 線回折分析と定量化学分析から、不純物をほとんど含まない高純度 *kaolinite* であることが確認された。表 1 に両試料の物性を示す。クニピア F は塑性指数 I_p が極めて大きく、カオリン KH はほぼゼロである。電気化学的性質の指標となる陽イオン交換容量 *CEC* については、クニピア F は大きくカオリン KH は小さい。せん断強度についてはカオリン KH の $\tan \phi'_r$ は大きく、クニピア F は小さい。とくにクニピア F の湿潤状態における $\tan \phi'_r$ は極端に小さい。

2.2 真実接触面の検証実験

真実接触面の有無を確認するため、垂直力一定のまません断面の大きさだけを変えてせん断試験を行った。実験では通常の湿潤供試体のほかに固体表面同士の摩擦現象が期待される乾燥試料での実験を行った。

(1) 試験方法

せん断試験は、残留状態に至るまでの大変位を一方向で与えることのできる大変位一面せん断試験装置³⁾により行った。せん断箱寸法は長さ 60cm、幅 3cm、高さ 4.5cm で、見かけの接触面積は 180cm²（長さ 60cm×奥行き 3cm）、60cm²（長さ 20cm×奥行き 3cm）の 2 種類である。試験条件は圧密定圧条件とし、見かけの接触面積 180cm² のとき最大水平変位=200mm まで、見かけの接触面積 60cm² のとき最大水平変位=60mm までせん断した。せん断速度は 0.5mm/min である。垂直力はカオリン KH が乾燥試料・湿潤試料ともに 3kN（見かけの接触面積 180cm² のとき $\sigma_v=167$ kPa, 見かけの接触面積 60cm² のとき $\sigma_v=500$ kPa）、クニピア F では乾燥試料が 3kN、湿潤試料が 0.54kN（見かけの接触面積 180cm² のとき $\sigma_v=30$ kPa, 見かけの接触面積 60cm² のとき $\sigma_v=90$ kPa）である。乾燥試料を用いた実験では、粉末をそのまません断箱に入れ供試体とした。湿潤試料は粉末試料に脱気蒸留水を加えて練り混ぜた後、試料をセルに入れて 30 分間ほど脱気し、150kPa の圧密圧力で 7 日間予圧密したものを供試体サイズにカットしせん断箱に挿入した。

(2) 試験結果

図3～6は、各試料のせん断力-水平変位関係である。図より乾燥試料、湿潤試料ともに残留状態に至っていることがわかる。表2は各試験より得られた残留強度で、湿潤試料の残留値が面積の大きさによらずほぼ同じ値を示している。乾燥試料については、カオリンKH、クニピアFともに接触面積の大きい方(180cm²)の残留値が若干大きい結果となった。両者の差はカオリンKHで35N、クニピアFで49Nであり、粉末試料を用いたことで接触面積の大きい(垂直応力の小さい)供試体が全体の締まり具合が悪かったとみられる。しかし、この差は得られた残留強

表2 大変位一面せん断試験結果

		せん断面積 (見かけの接触面積)	
		60cm ²	180cm ²
乾燥	カオリンKH	1590.6 N	1625.9 N
	クニピアF	1509.2 N	1558.1 N
湿潤	カオリンKH	986.6 N	989.9 N
	クニピアF	57.8 N	57.1 N

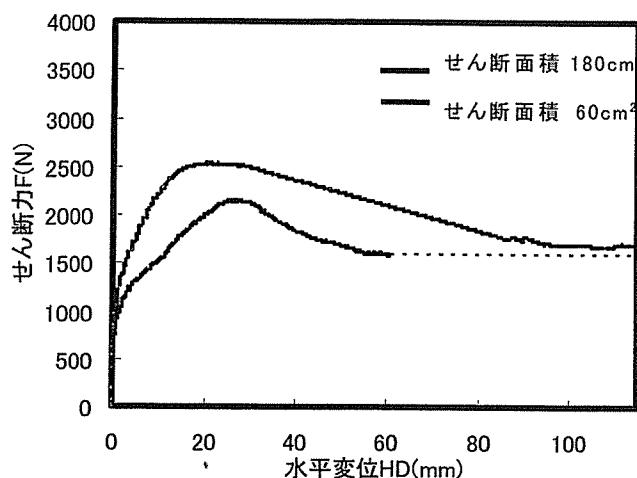


図2 カオリンKH(乾燥)のせん断力 F - 水平変位 HD 関係

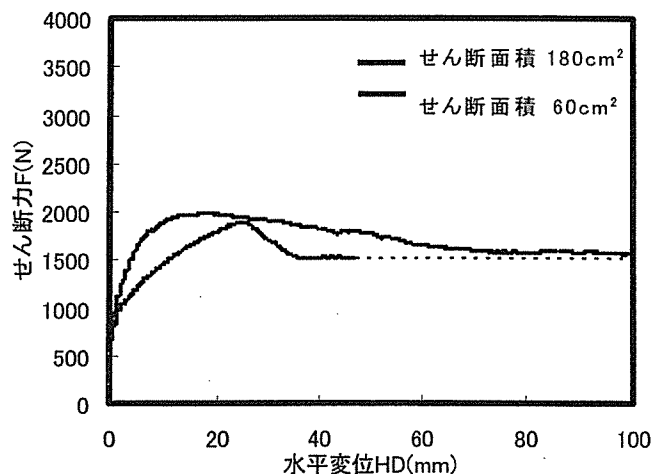


図3 クニピアF(乾燥)のせん断力 F - 水平変位 HD 関係

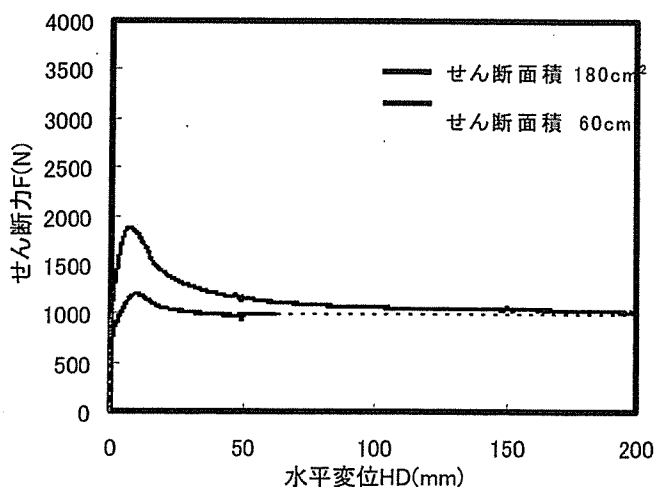


図4 カオリンKH(湿潤)のせん断力 F - 水平変位 HD 関係

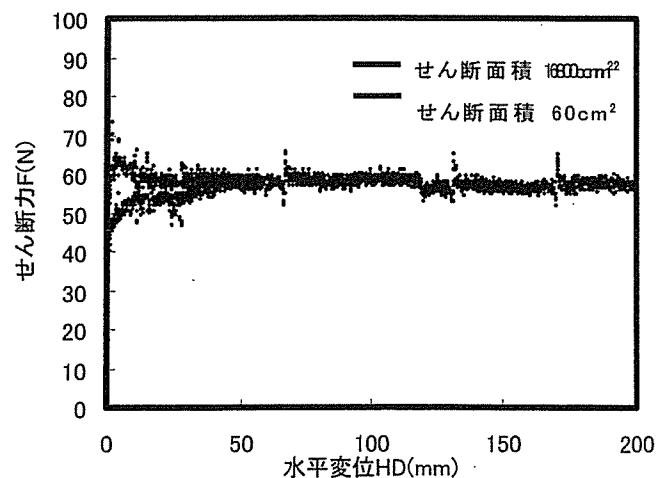


図5 クニピアF(湿潤)のせん断力 F - 水平変位 HD 関係

度の僅か2%にとどまり、粉末試料を用いたことを考えればほぼ同じ残留値が得られたと判断される。

2.3 真実接触面の観察

大変位一面せん断試験装置の下せん断箱にスライドグラスを取り付けて、大変位せ

せん断中のせん断面がそのまま載るようにした。供試体がスライドガラス上に載ったところでせん断箱から外し、共焦点レーザー顕微鏡（バイオラッド社，MRC-1024）による観察を行った。大変位せん断試験の試験条件は，圧密定圧条件とし，垂直応力 150kPa，せん断変位量 200mm，せん断速度 0.5mm/min である。

図 6 にカオリン KH，クニピア F の乾燥試料，湿潤試料の反射像を示す。白い部分は粘土粒子，黒い部分は空隙（乾燥試料）もしくは水（湿潤試料）である。カオリン KH，クニピア F とともにスライドガラスとせん断面との接触部に白い斑点状の模様が観察された。全面接触であれば真っ白な画像になるが，反射の異なる明暗の模様が分布していることから部分接触である。試料ごとにみると，カオリン KH は湿潤試料において平面的に接触している様子が認められる。一方，クニピア F は乾燥試料で白い斑点状の模様が観察されるのに対し湿潤試料では全体が真っ黒である。湿潤状態のクニピア F の断面像にはガラスとせん断面との間に水が存在している様子が映し出されている。

2.4 真実接触面積と垂直応力との関係

強化ガラスで試作したスライドガラスの上にせん断面を載せて垂直応力を載荷した。垂直応力の載荷には錘を用い，さらにガラスと供試体の接触部から排水できるようにせん断面の周囲に濾紙を敷いた。載荷された垂直応力は 50kPa，100kPa で，共焦点レーザー顕微鏡によりせん断面とスライドガラスとの接触部付近を直接観察した。

乾燥状態のカオリン KH とクニピア F に対し垂直応力を載荷した時の反射像を図 7，8 に示す。カオリン KH は，垂直応力を 50kPa から 100kPa へと増加させることで，写真

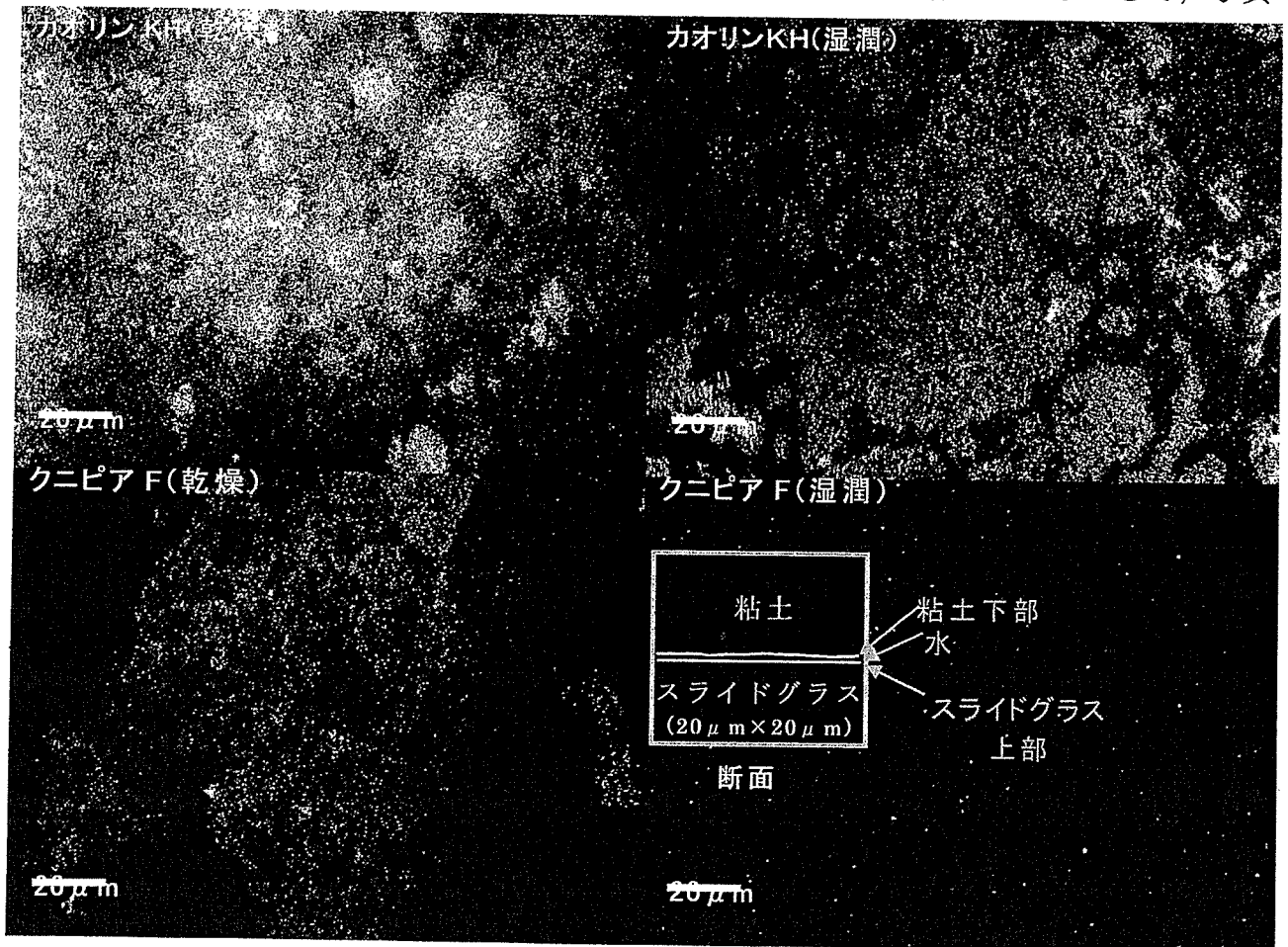


図 6 カオリン KH，クニピア F の接触部付近の反射像

右上に白い幅のある帯状のゾーンが出現している。さらに右下の空隙部分が少なくなっている様子がみられる。クニピアFはカオリン KH ほどの顕著な変化は認められないものの、垂直応力の増加に伴い右下の比較的広い空隙部分に白い斑点が出現していることがわかる。

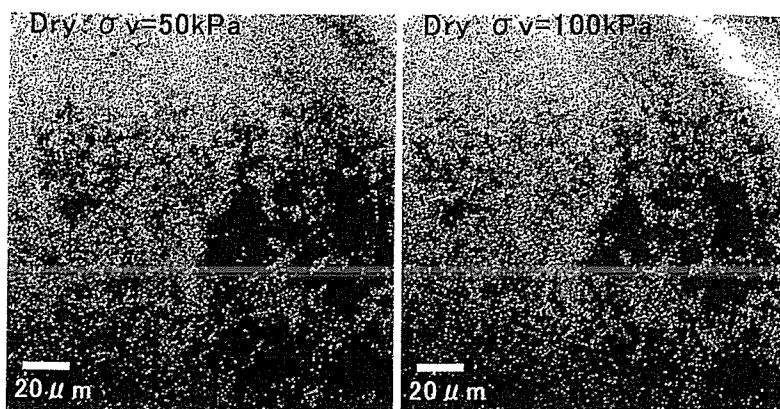


図 7 カオリン KH(乾燥)の垂直応力載荷時の反射像

図 9, 10 に湿潤状態のカオリン KH とクニピア F を示す。カオリン KH は、反射の異なる明暗の模様が観察され、乾燥試料に比べ平面的に接触している様子が見てとれる。垂直応力の増加に伴い左上から右下へかけて斜めに白色の帯状部分が出現している。クニピア F は全体に真っ黒で垂直応力の増加による変化は認められない。湿潤試料において黒色の部分は水の存在を示していることから、クニピア F は荷重増加による排水がほとんど認められない。

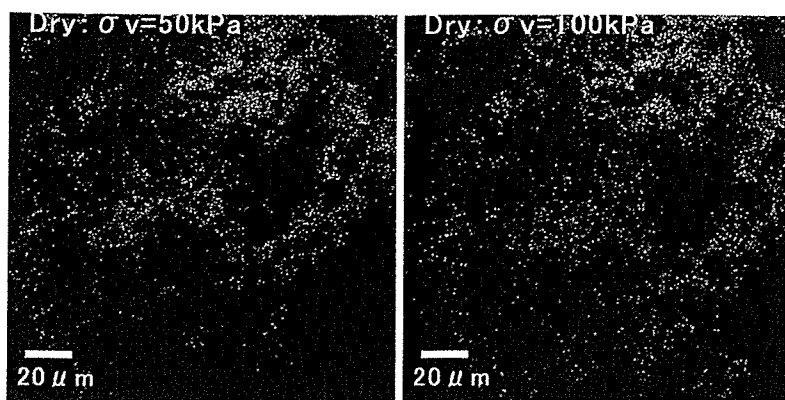


図 8 クニピア F(乾燥)の垂直応力載荷時の反射像

2.5 まとめ

アモン・クーロン則の適用性の検証から、残留強度が見かけの接触面積とは無関係であることが確認された。アモン・クーロンの法則が残留強度について成立することは、残留状態におけるせん断現象が本質的には摩擦現象であることを示している。

一方、真実接触面積と垂直応力との関係から、真実接触面の存在と垂直応力の増加に伴い真実接触面積が大きくなることが確認された。

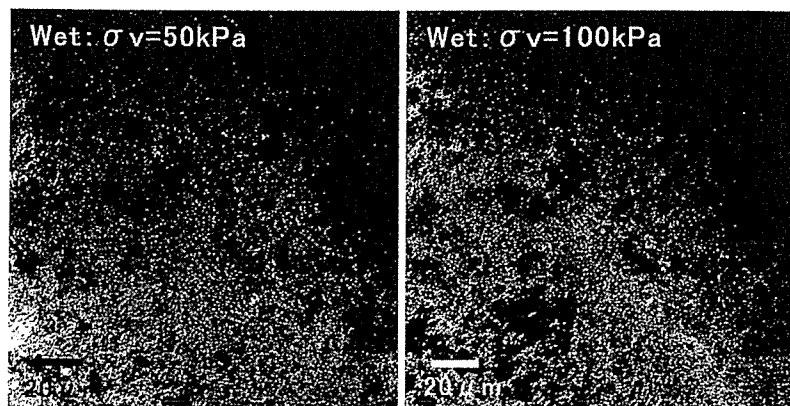


図 9 カオリン KH(湿潤)の垂直応力載荷時の反射像

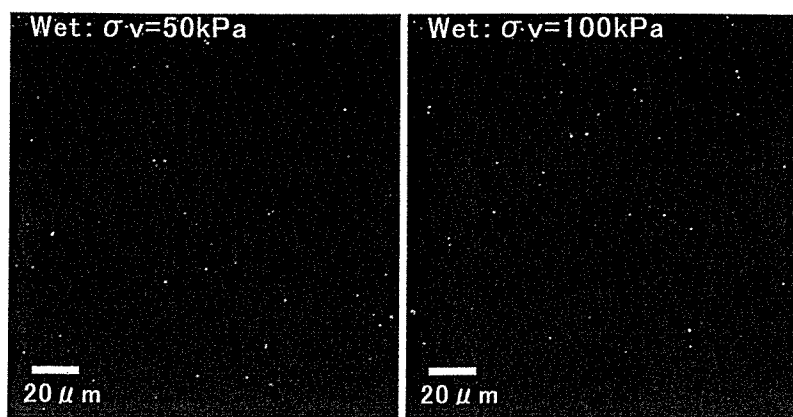


図 10 クニピア F(湿潤)の垂直応力載荷時の反射像

3. ピーク・完全軟化・残留状態に対応する強度パラメータの相互関係

粘土の破壊は一般に Mohr-Coulomb の基準 $\tau = c + \sigma' \tan \phi$ に従うとされている。しかし、この式の (c, ϕ) は排水条件によって大きく変化することから、その値を示す際には試験時の排水条件を明示する意味で (c_{cu}, ϕ_{cu}) , (c', ϕ') のように必ず添字を付ける約束となっている。このことから明らかなように、通常のせん断試験から求まる (c, ϕ) はいわゆる“定数”ではない。これに対し Hvorslev⁴⁾ は排水条件によらない真の強度定数を追究した研究成果をもとに、以下の破壊基準を提案した。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= c_e + \sigma' \tan \phi_e \\ c_e &= \kappa \cdot \sigma'_e \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで c_e, ϕ_e はそれぞれ有効粘着力、有効せん断抵抗角と定義され、 κ は粘着力係数、 σ'_e は等価圧密応力である。式(1)は土の破壊基準として最も基本的なものであり、 (c_e, ϕ_e) が真の土の強度定数と呼ぶにふさわしいと考えられている。しかし、これらの値を決定するための試験方法として容易に実施可能な方法が見つからなかったことから、従来この破壊基準は「実用的でない」として、研究目的以外には評価されることがなかった。

本文では、式(1)にならって粘土の破壊基準を次のように仮定する。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= c_g + \sigma' \tan \phi_e \\ c_g &= c_e + c_f = (\mu_e + \mu_f) \sigma'_e \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $\tan \phi_e$ は間隙比一定のもとで、破壊時に破壊面上に作用する有効垂直応力 σ' のみに依存するせん断抵抗を表す材料定数であり、粘土の応力履歴に依存しないもの

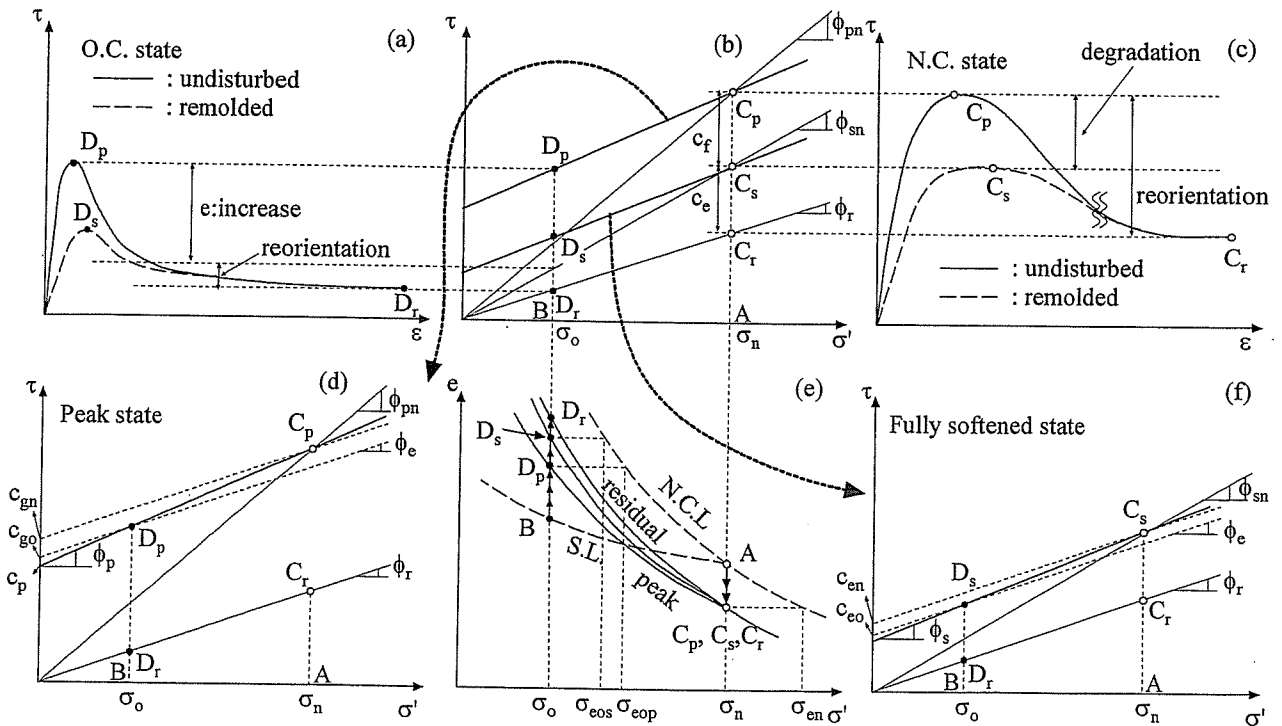


図 11 ピーク・完全軟化・残留状態に対応する強度パラメータの相互関係

と仮定する。 c_e は間隙比の変化に基づく強度成分を表し、等価圧密応力 σ'_e に比例 ($c_e = \mu_e \cdot \sigma'_e$) するものとする。 c_f は間隙比および有効垂直応力一定条件下での、ageing による構造の発達に基づく強度成分である。この成分は圧密降伏応力を越える応力の载荷によって消失することから、これも σ'_e に比例 ($c_f = \mu_f \cdot \sigma'_e$) するものと仮定する。本論文ではさらに単純化のために、 c_e と c_f の和すなわち c_g が σ'_e に比例 ($c_g = \mu \cdot \sigma'_e$; $\mu = \mu_e + \mu_f$) すると仮定している。なお、以下の説明における応力の記号で(*)を省略しているが、すべて有効応力である。

図 11(a)~(f) は、有効垂直応力が σ_n (点 A) から σ_o (点 B) に減少した時の各 σ に対応する排水せん断強度 (定圧一面せん断状態を想定) が点 C および点 D で表されることを示している。ここで ϕ_{pn} , ϕ_{sn} は不攪乱および再構成の正規圧密粘土のピークおよび完全軟化状態に対応する有効せん断抵抗角である。点 C_p および点 D_p を通り $\tau = \sigma' \tan \phi_e$ の直線に平行に引いた直線は、図 11(d) においてそれぞれ切片 c_{gn} および c_{go} を持つ (式(2)参照)。完全軟化状態の場合も同様で図 11(f) のようである。

点 C_p および点 D_p を結ぶ破壊包絡線が直線であると仮定すると、ピーク状態強度に対応する図 11(d) の直線 $C_p D_p$ の傾き $\tan \phi_p$ は図 11 の記号を用いて次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \tan \phi_p &= \frac{(c_{gn} + \sigma_n \tan \phi_e) - (c_{go} + \sigma_o \tan \phi_e)}{\sigma_n - \sigma_o} \\ &= \frac{\mu \left\{ (\sigma_{en} / \sigma_o) - (\sigma_{eop} / \sigma_o) \right\} + (OCR - 1) \tan \phi_e}{(OCR - 1)} \quad (3) \end{aligned}$$

ここで、過圧密比は $OCR = \sigma_n / \sigma_o$ で表され、 σ_n および σ_o に対応する等価圧密応力は σ_{en} および σ_{eop} で表される。

図 12 は σ_n 一定で圧密後排水せん断された時および σ_n で圧密後 σ_o まで除荷した後の排水せん断時の間隙比-有効応力関係をピーク・完全軟化・残留状態について示したものである。残留状態に対応する $e - \log \sigma'$ 線 (実線) が正規圧密線 (破線) に平行と仮定すると、次式が得られる。

$$\sigma_{en} / \sigma_n = (\sigma_{eop} / \sigma_n) OCR^{\lambda_p / \lambda} \quad (4)$$

また、図 12 で $\sigma' = 1$ (kPa) の時の正規圧密線および残留状態線上の間隙比をそれぞれ N および Γ

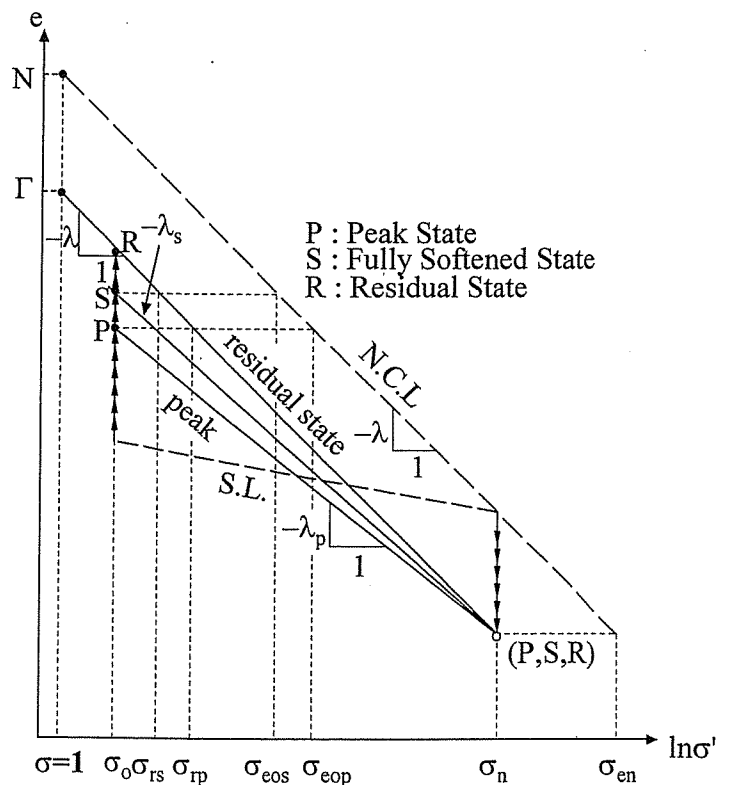


図 12 定圧一面せん断試験中の間隙比-有効応力関係

とすると次式が得られる。

$$\sigma_{en}/\sigma_n = \exp\{(N-\Gamma)/\lambda\} \quad (5)$$

(4), (5)式を (3) 式に代入すると, $\tan \phi_p$ は次式のように表すことができる。

$$\tan \phi_p = m_p \left\{ 1 - \frac{(OCR^{\Lambda_p} - 1)}{(OCR - 1)} \right\} + \tan \phi_e \quad (6)$$

ここで, m_p および Λ_p は以下のように表される。

$$m_p = \mu \cdot \exp\{(N-\Gamma)/\lambda\} \quad (7)$$

$$\Lambda_p = 1 - \lambda_p/\lambda \quad (8)$$

一方, 図 11 (d) で粘着切片 c_p は次式のように表され,

$$c_p = c_{gn} + \sigma_n (\tan \phi_e - \tan \phi_p) \quad (9)$$

これと式(2), (5), (6)を組み合わせると (10) 式が得られる。

$$c_p/\sigma_o = m_p \cdot OCR \cdot \left\{ \frac{(OCR^{\Lambda_p} - 1)}{(OCR - 1)} \right\} \quad (10)$$

誘導過程は省略するが, 完全軟化状態および残留状態に対応する強度パラメータを以下のように表現することができる¹²⁾。

$$\tan \phi_s = m_s \left\{ 1 - \frac{(OCR^{\Lambda_s} - 1)}{(OCR - 1)} \right\} + \tan \phi_e \quad (11)$$

$$c_s/\sigma_o = m_s \cdot OCR \cdot \left\{ \frac{(OCR^{\Lambda_s} - 1)}{(OCR - 1)} \right\} \quad (12)$$

および

$$\tan \phi_r = \tan \phi_e \quad (13)$$

$$c_r = 0 \quad (14)$$

(13)式に示すように, 残留状態のせん断抵抗角 ϕ_r は Hvorslev の有効せん断抵抗角 ϕ_o に一致する。

4. 地すべり対策工設計用強度パラメータの決定法

4.1 概説

地すべり斜面の安定解析に用いる強度パラメータの妥当性は, 斜面の安定性の評価のみならず対策工の選定やその効果に大きな影響を与えるものであり, すべり面上で動員される強度パラメータの適切な設定は基本的かつ重要な問題である。実務におい

ては、後述のような理由から、安定解析に用いる強度パラメータの算定を土質試験によらず、ほとんど逆算法による $c'-\tan\phi'$ 図で決定しているのが現状である。治山技術基準(1987)では安定解析にせん断試験結果を用いない理由として、以下の諸点を挙げている。

- ① 安定解析に用いる c' 、 ϕ' はすべり面に沿う平均的な値でなければならない。
- ② 強度定数は位置によってばらつきが大きいので、1地点からの土質サンプルの試験値をもって全体を代表させることは困難である。
- ③ 強度定数はサンプリングに伴う乱れに強く影響されるが、ボーリング孔を利用して10数mの深度から乱されない土質サンプルを採取することは極めて困難。

上記のうち①は納得できるとして、②、③についてはいささか疑問がある。地すべり問題の多くの場合、対象とするすべり面付近の土は「すでにすべりが生じてせん断変形を受けている」という意味において相当に乱れている。むしろ、大きなせん断変形を受けて形成されたすべり面の土を如何にして採取するかが問題と考える。また、「同じ試料と見なし得ないもの」を一緒に扱っているか、もしくは試験装置・方法に問題がない限り、「強度定数」はばらつくはずがないと筆者は考えている。この基準が設けられた頃の土質試験の技術レベルでは上記のようなことがあり得たかも知れないが、近年の技術の進歩と試験基準の整備⁶⁾によって、事情は大きく変わっている。

逆算法によること自体には問題はなく、むしろ原位置における実大規模の実験ととらえて平均強度を算定する方法として有効と考えられるが、この際見かけの粘着力 c' (kPa)を $c'_0 \cong d$ (d :地すべり土塊の厚さ(m))とする仮定を用いて $\tan\phi'$ を逆算し、これをすべり面上の平均的強度パラメータとしている(図13)。この方法の利点として一般に以下の2点が指摘されている。

- ① すべり面深度の判定が間違っていなければ、技術者によらず同一の粘着力が求められる。
- ② 道路災害等の緊急地すべり対策においては、対策工立案のスピードが問題とされるため、当面の斜面安定度に対する比較検討には便利である。

しかし、 $c'_0 \cong d$ とする仮定に理論的な根拠がないことは従来よりしばしば指摘されてきた(たとえば八木ら⁶⁾)。斉藤⁷⁾や山上ら⁸⁾らの提案はこの方法の難点を克服しようとするものであり、「現状安全率 F_0 を満足すべき強度パラメータが $c-\tan\phi$ 図において $F_s = F_0$ 直線上で変化すべきこと、現状すべり面の安全率 F_0 がその近傍のすべり面の中で最も小さい安全率であること」の2つの制約条件に基づいて c 、 ϕ の取り得る組み合わせ範囲を限定している。

宜保ら⁹⁾はせん断試験より得られるピーク、完全軟化および残留強度に対してSkempton¹⁰⁾の残留係数 R を導入して地すべりの形態に応じた平均強度パラメータを求める方法を提案している。また、小川¹¹⁾は再滑動型地すべりの場合、一度残留状態に達した地すべり面粘土が、間隙水圧の上昇によって過圧密状態へ移行するとし、この時の (c, ϕ) の算定法を提案している。

以上の背景のもと、本文では前述の理論を基礎として、現行の逆算法にせん断試験結果を組み入れた対策工設計用強度パラメータの決定法を示し、実際の地すべり現場に適用した例を示す。

4.2 せん断試験結果と逆算法の組み合わせによる設計用強度パラメータの決定法 (SPLICE 法)

そもそも地すべりに対する安定性の支配要因である土の強度は、地質構造的要素に加えて過去の応力履歴や個々の地点における土要素が受けているひずみの大きさに依存する。したがって、たとえば再滑動型地すべりを想定した場合、降雨などに基づく間隙水圧の上昇が有効応力の減少をもたらし、これがせん断抵抗の低下を招くことを想定すると、安定解析用強度パラメータはピークと残留強度の間で応力やひずみの変化に応じて変化すると考えられる。

第3章で示したように、筆者らはピークから完全軟化状態までの関係がOCR（過圧密比）の関数として表現されることを導いた¹²⁾。図14は前述の(6)および(10)式を用い、例として(8)式の $\bar{\Lambda}_p$ を $\bar{\Lambda}_p = 0.1, 0.2$ に変化させた時の c_p', ϕ_p' の組み合わせの変化を示したものである。さらにこの関係を一般化して表現したのが図15である。破線BCは完全軟化から残留状態までの強度低下で、ひずみの関数となる。

そこで、すべり面付近から採取された不攪乱試料についてのせん断試験からピーク強度パラメータを求め、繰り返し予圧密粘土の繰返し一面せん断試験から完全軟化および残留状態の強度パラメータを得れば、3組の強度パラメータは図15の曲線上にA, B, Cのようにプロットされるはずである。すなわち、曲線をABCの折れ線で近似することができる。したがって、具体的な手順として図16に示すように、試験結果をA, B, Cのようにプロットしてこれら3点を折れ線で結び、さらに現在の安全率 $F_s = F_0$ として安定計算式から得られた解析上の (c', ϕ') の取り得る組み合わせを示すPQ線との交点Eを求めれば、これが再活動に対する対策工設計用強度パラメータを与える。

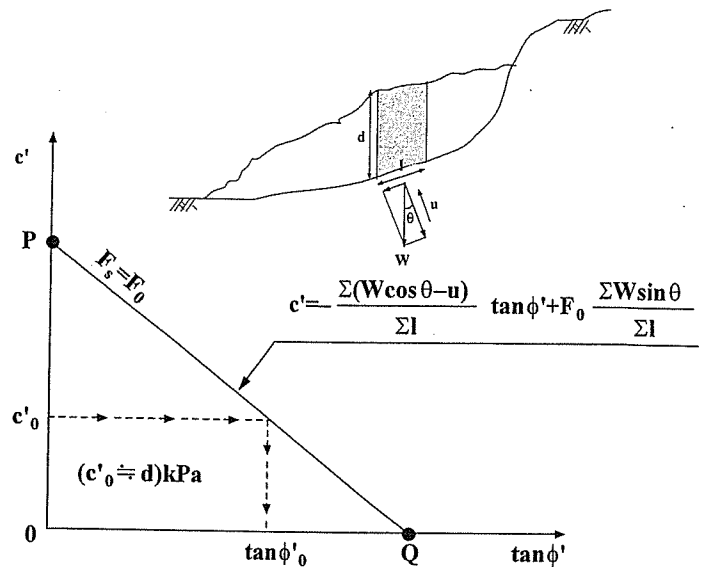


図13 逆算法による強度パラメータの決定法

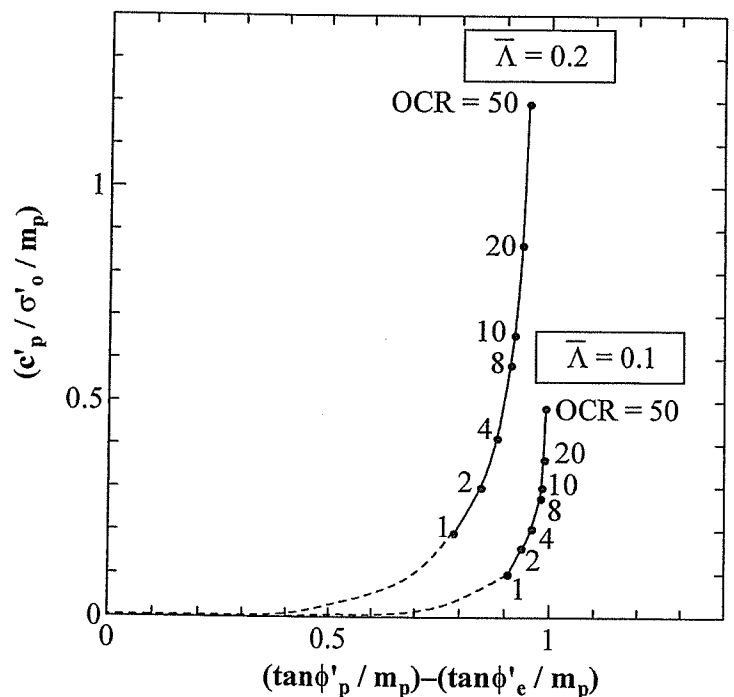


図14 OCRの関数としての強度パラメータの変化

この手順は室内せん断試験の結果と逆算法を結合 (splice) して対策工用の強度定数を決定する方法 (method for determining design *Strength Parameters* by *Laboratory test and Inverse Calculation Engagement* (SPLICE method)) として筆者らが提案してきたもの¹²⁾である。図16において実験値は多少の誤差を含んでいる可能性があるし、必ずしもすべり面上の真の強度を表していない可能性がある。それにしても、真値からの変動幅はたとえば図16中の網掛け部分のように限定され、図中の交点Eとして決定される設計用強度パラメータは明確な根拠に基づくものであり、 $c'_0 \div d$ 法より信頼性の高いものと言える。

5. 全自動繰返し一面せん断試験装置の開発

5.1 全自動繰返し一面せん断試験装置

残留強度を求める試験としては従来リングせん断試験によるのが最善と考えられてきたが、供試体成形の困難さから不攪乱試料についての残留強度の決定は容易でないこと、上下リング間の隙間の設定に関して「試料漏れ」と「摩擦の発生」という、相反する問題を解決せねばならないという宿命を負っていること、さらに試験装置が複雑で操作が容易でないことなどの問題を有している。そこで筆者らは、少ない試料で試験実施が容易かつ高精度の結果を得ることを目指して、せん断力の載荷にデジタルサーボモータを用いた全自動繰返し一面せん断試験装置 (Reversal Direct Box Shear test apparatus 以下、RDBS) を開発した¹³⁾。

RDBS 試験装置の模式図を図17に示す。本試験装置は、試験機本体、パーソナルコンピュータ、モータードライバーボックスおよび各種測定機器から構成され、単調および繰返し一面せん断試験をコンピュータ自動制御の下で行うことができる。したがって、不攪乱試料を用いてピークおよび残留強度を、また繰返し予圧密した試料を用いて完全軟化および残留強度を一台の試験機で求めることができる。

この試験機の特徴は以下のようである。

- 1) 高精度デジタルサーボモータを採用することにより、コンピュータ制御の下で広範囲なせん断変位速度 (0.01~1.5mm/min) での高精度の単調せん断および繰返

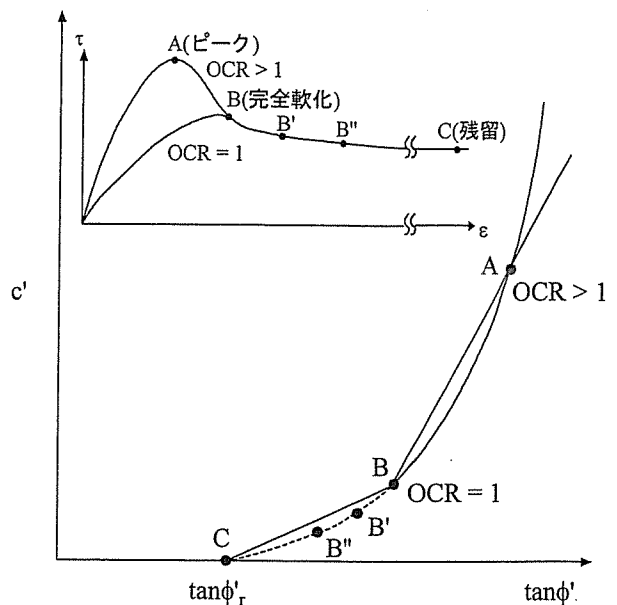


図15 OCRの関数としての強度パラメータの変化

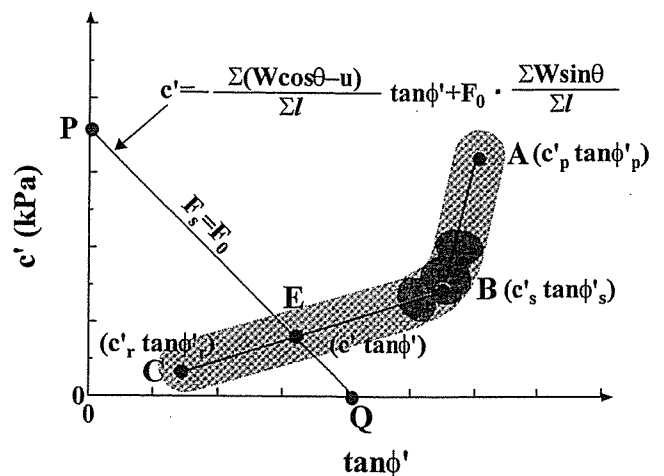


図16 設計用強度パラメータの決定法 (SPLICE法)