

粘性土の引張りせん断特性 (圧密の影響)*

柴 原 信 雄**

緒 言

斜面崩壊のきっかけを作る引張り亀裂や、風積土であるレス (Loess) の垂直壁の剝離崩壊等、土の引張り応力による破壊は種々考えられる。しかし土の引張り強さに関する研究は、その強さ自体が小さいことと、設計では多くの場合引張り強さが無視されること等のため、その研究の数は少なく、各研究者の目的に則した試験方法が種々考案されてきてはいるが、試験方法の標準化が検討されるまでには至っていない。

筆者は、土の破壊機構の解明のためには、垂直応力が負 (引張り) のもとでのせん断強さが、正 (圧縮) の垂直応力のもとでのせん断強さと同様に求められなければならないと考える。このため、引張り垂直応力を加えた状態でせん断試験を行うことができる「引張りせん断」試験装置を試作し、粘性土について、全応力法によってせん断特性を明らかにしようと実験を行ってきた。すでに、垂直応力が圧縮から引張りにわたる場合を通じての破壊形態の分類方法の提案や、土の塑性と引張り強さとの関係等については報告した¹⁾。今回は一粘性土について、圧密応力の相違がせん断特性に及ぼす影響についての実験を行い、乱さない堆積粘土の場合との比較および考察を行ったので報告する。

2. 圧密試料・実験装置および実験方法

圧密試料として長野県上水内郡豊野町の豊野砂岩泥岩層の風化した粘土 (豊野粘土) を用いた。その物理的性質は表-1の通りである。

実験装置は、供試体の乱れを小さくおさえる目的で、圧密された供試体が容器から移し替えられることなくそのまま引張りせん断試験されるような圧密容器を試作した。その構造は図-1の通りである。二つ割りの容器を締具で結合しておき、ここに液性指数約50で練り返した試料を詰め、P方向 (鉛直方向) に1日毎に段階的に前日の2倍に圧密応力を増加させ、5日目に所要の圧密応力に達せしめ、24時間圧密してこれを供試体とした。供試体寸法は50×50×10mmとした。

圧密終了後、除荷し、供試体の入っている容器をせん断試験装置²⁾のリニアボールベアリング付台車に連結し、試料と容器との間の滑動を防ぐため、鉛直方向に約10kPaの空気圧による押え荷重を加え、締具による結合を解除した後引張りせん断試験を行った。図-1のT方向

表-1 豊野粘土の物理的性質

液性限界	81	粒度組成	砂 分(%)	7
塑性限界	27		シルト分(%)	58
塑性指数	54		粘土 分(%)	35
土粒子比重	2.723	日本統一土質分類 (CH)		

* 昭和60年6月12日 第20回土質工学研究発表会において発表

** 土木工学科教授

原稿受付 昭和60年9月30日

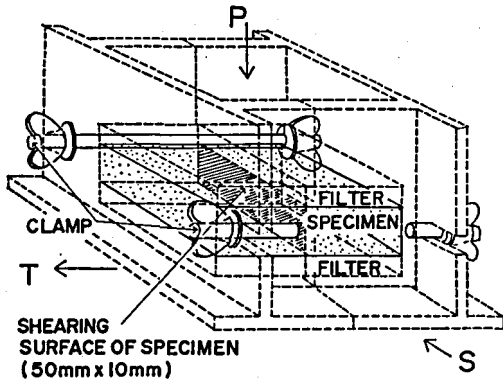


図-1 圧密・引張りせん断容器

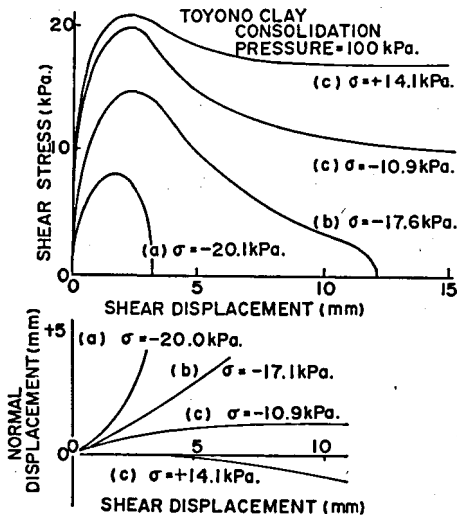


図-2 せん断応力・変位図

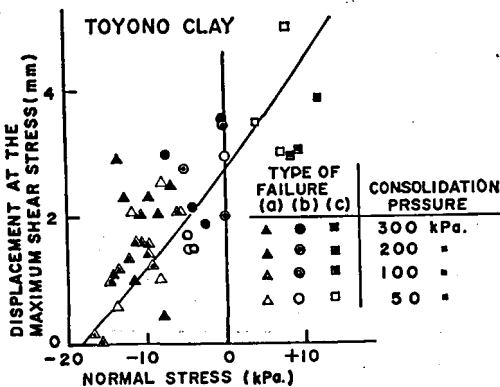


図-3 最大せん断応力時のせん断変位

に重錘によって一定の引張り応力を加えた状態で、S方向に2.0mm/minの定速でせん断変位を与え、これによって生ずるせん断応力をロードセル（東京測器製TCLZ-10kgf）で、垂直変位を差動トランス式変位計（新光電子製ICM-5）で検出してX-Yレコーダーで記録した。

また、垂直引張り応力のみを加えることにより、直接引張り試験も行ったが、応力制御法とし、15秒毎に約1.0kPaの割合で段階的に応力を増加して行き、破断時の応力を引張り強さとした。

3. 圧密試料の

実験結果・考察

3-1 変形

筆者はさきに引張り・圧縮せん断応力に対するせん断変位の図より、せん断破壊の形態を3種類に分類している⁽¹⁾。

すなわち

- 引張り垂直応力が主体的に働く破壊形態（へき開破壊）
- 破壊に及ぼす応力が最初はせん断応力であり、次第に垂直応力に置き替って行く破壊形態（へき開をともなうせん断破壊）
- せん断応力が主体的に働く破壊形態（せん断破壊）

図-2にせん断応力・せん断変位関係の代表的な例を示す。図中(a), (b), (c)は各曲線を上記の破壊形態に分類して付したものである。

せん断応力が最大に達したときのせん断変位を図-3に示す。引張り垂直応力が5kPaを越えたとほとんどがへき開破壊(a)を示し、変位は大体2.5mm以下である。引張り垂直応力が小さくなり、0を過ぎて圧縮垂直応力が増大するに従って破壊形態はへき開をともなうせん断破

壊(b)からせん断破壊(c)へと変り、最大せん断応力時のせん断変位が増大する。なおこの試料に関しては、変位の大きさと圧密応力の大きさとの関係は明らかではない。

3-2 せん断強さ・引張り強さ

引張り・圧縮せん断によって得られた破壊線を図-4に示す。垂直応力が圧縮の場合は、別の容器で圧密した供試体を切出し、圧縮せん断容器⁽¹⁾に入れて本せん断試験装置に連結してせん断試験を行ったが、圧縮応力が5 kPa以上のせん断

試験は通常の一面せん断試験機で行った(図中×印)。両試験法による結果は互いに無理なく曲線が接続できるため、関連性は良いと考えられる。

圧密応力が大きくなるに従って、みかけの粘着力および引張り強さは増大しているが、圧密応力による粘着力の増加割合 c_u/p は0.12であり、この土の塑性指数(54)に対応する値としては既往の報告⁽²⁾と比較して過小な値となっている。

また、圧密応力による引張り強さの増加割合 σ_t/p は0.015と更に1桁小さい値となっている。このことから、土の引張り強さはこの土に限れば圧密応力の大きさにはあまり影響されないといえる。

図-4では実験結果を前節の破壊形態(a), (b), (c)に分類している。図中の2本の破線は各破壊形態を示す領域の大まかな境界線である。この図より、圧密応力が大きくなるに従って破壊形態(b)の領域が狭くなり、垂直応力が負(引張り)になると破壊形態は(a)すなわち引き開破壊、正(圧縮)になると(c)すなわちせん断破壊を示すようになることがわかる。ここで300kPaという圧密応力の値は、過圧密比で考えることはできないが、引張り垂直応力に比較するとかなり大きい値といえる。

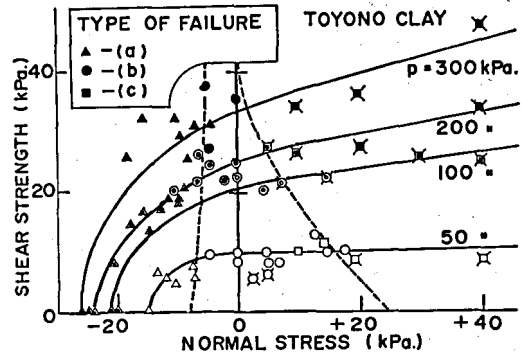


図-4 垂直応力・せん断強さ図

4. 乱さない堆積粘土の試験との比較検討

4-1 試料および試験方法

切土斜面の安定について検討する場合、現場からの乱さない土のせん断試験を行い、強度定数を求めることは有用である。しかし現場にある堆積土は一般に不均質であったり、大きい粒子が含まれていたりするため、乱さない土の試験を行うことは困難である。更に土の引張り強さ試験の場合は、微細なクラックの存在が試験結果に大きい影響を及ぼすため、乱さない土で試験可能な堆積土は限られてくる。豊野粘土層からの乱さない土が採取不可能のため、やむなく飯綱火山灰質粘性土(飯綱ローム)を乱さない状態で採取して引張りせん断試験を行い、前述の試験との比較検討を行った⁽³⁾。飯綱ロームは長野県上水内郡牟礼村高坂で採取した。その諸性質を表-2に示す。なお採取地点における堆積面はほぼ水平であった。引張りせん断試験は試料を水平に切出したものをせん断箱に入れて行った。

4-2 変形

引張りせん断試験における応力と変位との関係を図-5に示す。比較のために300kPaで圧密した豊野粘土の代表的な例を破線によって併記している。

最大せん断応力に達した時のせん断変位は、豊野粘土では約2mmであるのに対し飯綱ロームではせん断変位がほとんど生じないで瞬時に破断した。飯綱ロームは圧密降伏応力が370kPaであり、

図示の豊野粘土の圧密応力(300kPa)とあまり相違していないにもかかわらず、破壊形態が異なる原因は、土の物理的性質によるよりもむしろ土層の生成環境によると考えられる。すなわち豊野粘土は圧密時間が6日間であるのに対し飯綱ロームは2~3万年間地中において圧密以外にセメンテーション作用も影響して、より脆性を示すようになったものと考えられる。

4-3 せん断強さ・引張り強さ

乱さない飯綱ローム試料については、引張りせん断試験の他に割裂試験による引張り強さ試験、一面せん断試験および一軸圧縮試験を行っている。これらの試験の結果得られた破壊線を図-6に示す。ここに割裂試験は14個、一軸圧縮強さは8個の試験結果の平均値である。一軸圧縮試験と一面せん断試験、割裂試験と直接引張り試験の結果はそれぞれほぼ一致している。ただし割裂試験はこのような脆性の土についてのみ真に近い値を示すものと考えられる。内部まさつ角が 35° と大きいのはセメンテーション作用によるまさつ抵抗の増加と、飽和度が71%と低いために間げき水圧があまり作用せず、垂直応力が有効応力として十分働いたためと考えられる。また、破壊形態は、垂直応力が引張りならば(a) (へき開破壊)、圧縮ならば(b) (せん断破壊)

表-2 飯綱ロームの諸性質

物理的性質	液性限界		93	堆積状態 (平均値)	含水比(%)	64
	塑性限界		56		湿潤密度 (t/m³)	1.27
	塑性指数		37		乾燥密度 (t/m³)	0.77
	土粒子比重		2.517		間隙比	2.27
	粒度組成	砂分(%)	26		飽和度(%)	71.0
		シルト分(%)	65		圧縮指数	0.57
		粘土分(%)	9		圧密降伏応力 (kPa)	370
日本統一土質分類 (VH₂)						

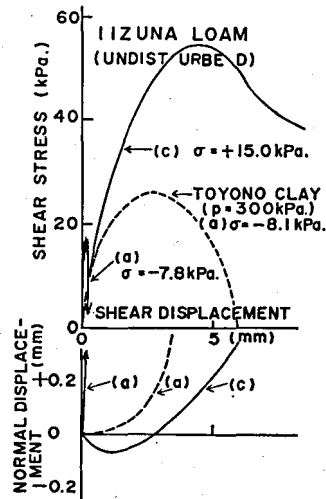


図-5 飯綱ローム・豊野粘土のせん断応力・変位図

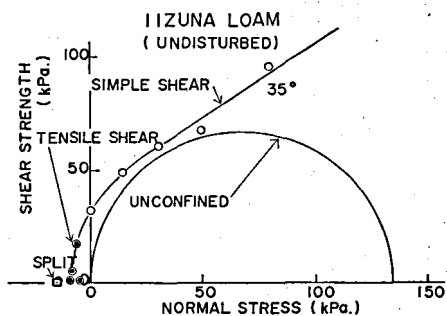


図-6 飯綱ロームの垂直応力・せん断強さ図

とはっきり2分されるが、これは圧密応力が増大した場合の極限の形と考えることができる。

次に圧縮強さと引張り強さとの関係について考察する。表-3に豊野粘土の圧密試料と飯綱ロームの乱さない試料の一軸圧縮強さ q_u および引張り強さ σ_t の測定結果を示す。飯綱ロームの引張り強さは割裂試験によるものである。

豊野粘土の一軸圧縮強さは一面せん断試験の結果と比較して過大の値となっているが、この理由としては最大せん断応力に達するまでのせん断変位が大きいため、一面せん断試験では破壊時のせん断面積がかなり減少しているが、これを考慮しないで応力を算出しているので一面せん断試験結果が相対的に過小な値になっていると考えられる。これについては別途検討したいと考えている。

さて一軸圧縮試験結果をみると、圧密による強さの増加割合がかなり大きいといえる。一方引張り強さは3-2でも述べたが圧密にあまり影響されない。このため圧密応力の増大による q_u/σ_t の増加は著しい。飯綱ロームの圧密降伏応力は 370kPa であり、これに近い応力 (300kPa) で圧密された豊野粘土と一軸圧縮強さは近い値となったが引張り強さはセメンテーションにより脆性を示す飯綱ロームはかなり小さい値となっている。

飯綱ロームの強さの異方性については、水平面の方が q_u/σ_t が大きく、これは堆積環境により水平面が最も剝離しやすいことによると考えられるが、鉛直面との差異はさほど大きいとはいえない。

図-7に一軸圧縮強さ q_u と引張り強さ σ_t との関係を示す。前報告⁽¹⁾もあわせて示したが、今回の試験結果は前報告の実験直線の延長上にプロットされ、前報告の結論を更に裏付けることができた。すなわち σ_t/q_u の勾配はどの土もほぼ0.1と一定しており、Ramanathan⁽⁴⁾による0.48よりかなり小さい値となっている。

表-3 一軸圧縮強さ・引張り強さ

供試体	項目	一軸圧縮強さ (q_u)		引張り強さ (σ_t)		q_u/σ_t
		測定数	平均値 (kPa)	測定数	平均値 (kPa)	
豊野粘土 (圧密試料)	100*	2	60.6	2	21.0	2.9
	300*	2	168.6	2	26.0	6.5
飯綱ローム (乱さない試料)	水平面	4	155.2	4	14.1 ⁺	11.0
	鉛直面	4	129.4	10	15.7 ⁺	8.2

注)* 圧密応力 (kPa).
+ 割裂試験による。

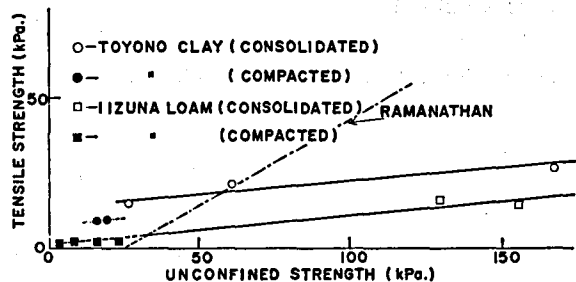


図-7 引張り強さと一軸圧縮強さ

5. ま と め

一粘性土の圧密試料と、一堆積粘土の乱さない試料について、垂直応力が引張りおよび圧縮である場合のせん断試験を行った。新たに得られた結論は次の通りである。

(1) 圧密応力の増大による土の引張り強さの増加割合は0.015と非常に小さい。

- (2) 圧密応力の増大にともない、へき開をともなうせん断破壊という破壊形態は起りにくくなる。
- (3) 堆積粘土は圧密の他にセメンテーション作用を受けているため、より脆性を示す。そのため引張りせん断試験では、せん断変位をほとんど生ずることなく破断する。
- (4) 土の引張り強さと一軸圧縮強さとの関係は一次式であらわされ、その勾配はほぼ0.1である。

参 考 文 献

- (1) 柴原信雄：土の引張りせん断特性，長野工業高等専門学校紀要，第14号，1983，pp.69-77.
- (2) J. Osterman : Notes on the Shearing Resistance of Soft Clays, Acta Polytechnica Scandinavia, Stockholm, 263, 1959, p. 22.
- (3) 柴原信雄，福沢達也，富山直彦：堆積粘土の引張り強度，土木学会中部支部昭和58年度研究発表会，1984，pp.216-217.
- (4) B. Ramanathan and V. Raman : Split Tensile strength of cohesive soils, Soils and Foundations, Vol. 14, No. 1, 1974, pp. 71-76.