

# 土の引張りせん断特性\*

柴原 信雄\*\*

## 1. 緒 言

土の引張り強度については最近認識が高まってきつつある。舗装、アースダムその他の土構造物において、土中に引張りによるクラックが見出されることが多く、これらの大部分は土中の引張り応力による破壊が原因である。これらの例としては、舗装では交通荷重応力、温度変化による収縮や乾燥収縮、アースダムでは不等沈下やそれによって生ずる引張り応力が考えられる。これらのクラックが土構造物の安定性に大きな影響を与える。

引張り強度の測定については、その絶対値が一般に小さいほか、引張り応力のわずかな変化によって引張りクラックが生じ、このために引張り応力面の面積が減少して応力集中が生じ、これらの相乗作用によって見かけ上瞬時に破壊にいたるといった特質をもっている。また強度自体が小さく、安全側をとることから土の引張り強度は土構造物の設計では無視されることが多い。したがって土の引張り強度の測定結果や研究報告の数は少ない。これらの報告には取扱う土の条件と測定の目的を考慮した独自の測定方法の結果を発表しているものが多い。

土の引張り強度の測定法としては、直接引張り試験<sup>(1)</sup>、圧裂試験<sup>(2)(3)</sup>、割裂試験<sup>(4)</sup>などがあり、締固めた土など脆性を示す土に適用されている。また粘性土の最適含水比より湿潤側に対する測定法としては、コップ形容器と針を用いる方法<sup>(5)</sup>、遠心力法<sup>(6)</sup>、楕円リング状の供試体による方法<sup>(7)</sup>などがある。以上はいずれも全応力による強度測定法であり、単に破壊強度を求めるものである。これらに対し、中心部附近の断面をくびれにより小さくした円柱型供試体について三軸試験機を用い、円柱の上、下部と中心部との断面積の差から引張り応力を作り出す測定法<sup>(8)(9)</sup>も行われてきており、これによれば排水条件の設定や間げき圧の測定により有効応力解析が可能となる。

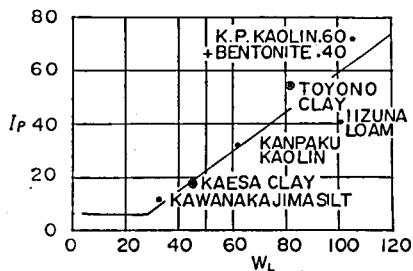
著者は垂直応力が負（引張り）の場合の土のせん断強度（引張りせん断強度）を実験的に調べている。既報<sup>(10)</sup>では粘性土の最適含水比より湿潤側を対象とし、また引張りせん断の機構上、全応力解析のみを行っている。本報告では、測定装置の改良により、供試体の垂直方向およびせん断方向の移動が正確かつ平滑に行えるようにし、2種類の粘性土について引張りせん断強度の測定を行い、検討を加えている。

## 2. 試料および供試体作成方法

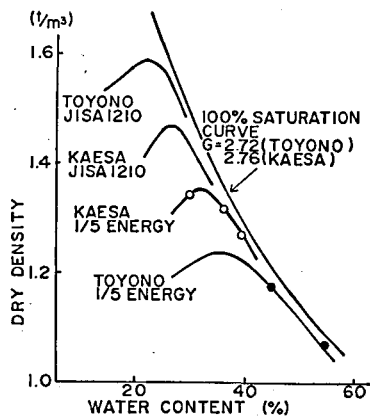
試料として上水内郡豊野町の豊野砂岩泥岩層が風化した粘土（豊野粘土）と、下水内郡豊

\* 昭和58年2月 土木学会中部支部昭和57年度研究発表会において発表

\*\* 土木工学科助教授  
原稿受付 昭和58年9月30日



図一 試料土の塑性図上の位置



図二 試料土の締固め結果

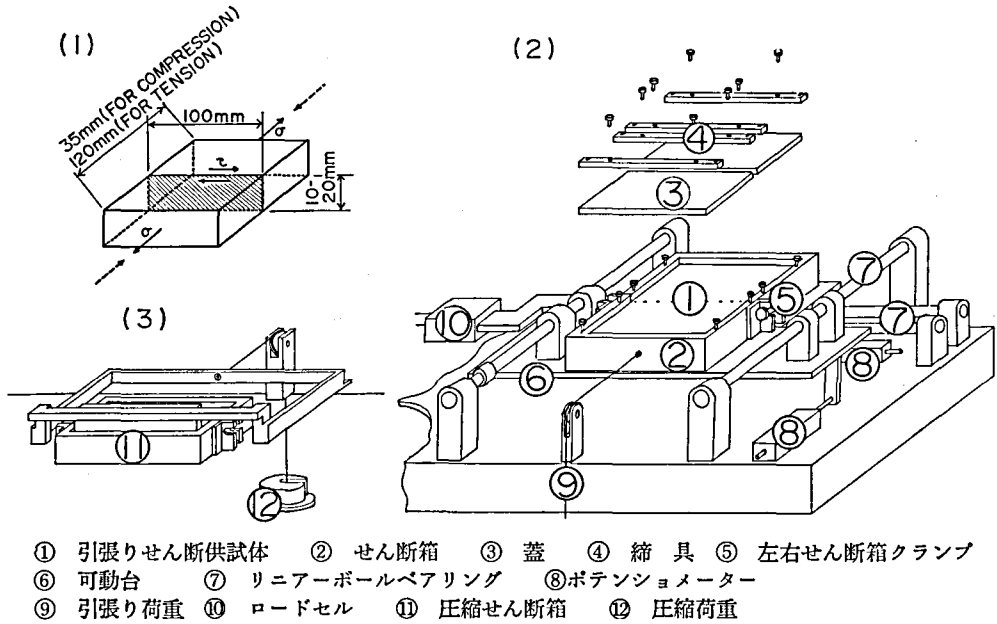
田村替佐の飯綱火山灰層粘土（替佐粘土）の2種類を用いた。これらの塑性図上の位置を図一に示す。図中にはこのほか既往の報告<sup>(9)(10)</sup>に使用した試料土の土性も併記している。

豊野粘土と替佐粘土についてそれぞれ、締固め、およびスラリーからの圧密、成形の2種類の供試体を作成している。締固め供試体は、一般に含水比が高いために、手によってできるだけ空隙が生じないように均一に締固めた。その供試体の密度は、図二の丸印で示すように、JISA1210の標準締固めの1/5のエネルギーによる締固めによって得られた密度とほぼ同じである。圧密による供試体は、液性限界の約2倍の含水比の試料土を4.9kPaで圧密した後、ワイヤソーで形成した。

### 3. 実験装置および実験方法

実験装置を図一三に示す。(1)は供試体の形状、寸法およびせん断断面を示す。せん断断面はハッチングで示すように鉛直面であり、供試体作成時の締固め面または圧密の加圧面（水平面）に直交している。この点は通常的一面せん断試験機と異なっている。供試体寸法はせん断方向の長さを100mm、せん断面の幅を10~20mmと供試体の状態によって調節可能とし、厚さ（せん断面に直交する方向の長さ）を、垂直応力が引張りの場合は120mm、圧縮の場合は35mmとしている。

機構は(2)に示すように2枚の可動台のうち1枚はせん断方向に、他の1枚はせん断面に対して垂直方向に移動方向が規制されている。供試体が入った2つ割りのせん断箱を2枚の可動台の上に跨がせて置き、それぞれの可動台と連結した後、せん断箱のクランプをはずしてせん断を開始する。(3)は垂直応力が圧縮の場合のせん断箱であり、引張り用、圧縮用の2種類のせん断箱を交換して可動台に取付けることによって、垂直応力が正、負のいずれの試験も行うことができる。可動台にはリニアボールベアリングを取付け、移動方向を正確に規制すると共に、摩擦の軽減をはかっている。垂直応力は重錘によって与え、せん断は変位速度2.0mm/mimの歪制御とした。垂直変位とせん断変位はいずれもポテンショメーター（緑測器LP50F）により検出し、せん断応力はロードセル（東京測器TCLZ10kgf）により



検出して増幅し、せん断変位に対するせん断応力および垂直変位をX-Yレコーダーに記録した。

垂直引張り応力のみを加えることにより、直接引張り試験も実施しているが、この場合は応力制御とし、引張り応力を15秒ごとにはぼ1.0kPaの割合で段階的に増加させ、破断時の引張り応力をもって引張り強度とした。

#### 4. 試験結果および考察

##### 4-1 変形特性

2種類の土について、含水比および供試体作成方法別にせん断応力、せん断変位図の代表的な例を図-4(1)~(7)に示す。図中に圧縮を正とした垂直応力を付記する。

せん断応力・せん断変位曲線からせん断破壊の形態が3種類に分類できることはすでに報告した<sup>4)</sup>。すなわち

- (a) 引張り垂直応力が主体的に働く破壊形態
- (b) 引張り垂直応力とせん断応力が共に働く破壊形態
- (c) せん断応力が主体的に働く破壊形態

である。図-4中(a), (b), (c)は各曲線を上記破壊形態に分類して付したものである。なお、赤井<sup>5)</sup>は引張り側のモールの応力円より破壊形態を説明している。これによれば(a)はへき開破壊、(b)はへき開をともなうせん断破壊、(c)はせん断破壊に相当するものと考えられる。これについては節を改めて論ずる。

破壊形態(a)は、脆性を示す土や含水比の少ない土、およびこれら以外の土であっても大

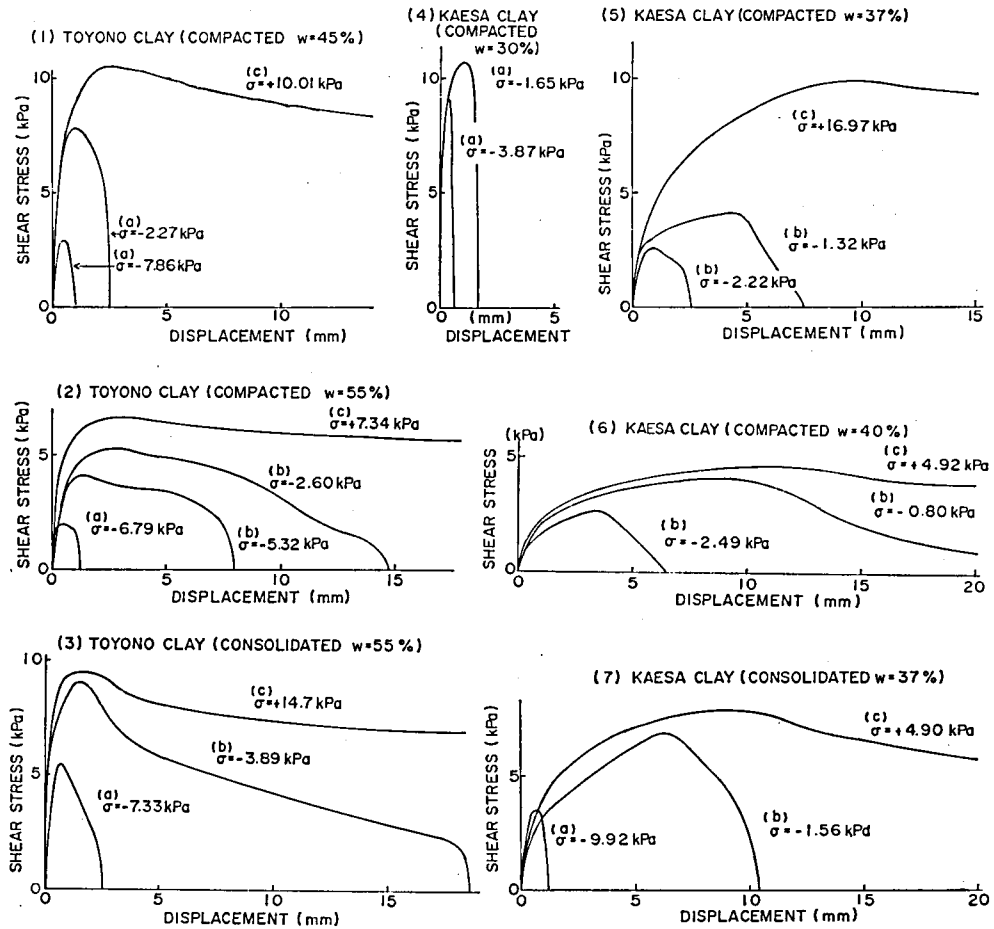


図-4 せん断応力, せん断変位曲線

きい引張り垂直応力のもとでせん断される場合に生ずる。そのせん断応力・せん断変位曲線の形状は、せん断変位量がごくわずかな時点で破断されるため、せん断応力の立ち上がりと下降が急激である。

破壊形態(c)は圧縮せん断(一面せん断)もしくは、粘性土において微小な引張り垂直応力のもとでせん断される場合に生ずる。破壊形態(b)は(a)と(c)の単なる中間的存在に止まらず、曲線の形状は供試体の作成方法と垂直応力の大きさによってかなり相違することがわかる。以下に破壊形態(b)を中心に曲線の形状を考察する。

図-4の(1)~(7)に共通していることは、垂直応力を圧縮から引張りへと変化させると、それともなって最大せん断応力が減少する、これは当然であるが、それともなって破断にいたるせん断変位も減少することである。これは破断部分の増大によってせん断面積が減少し、応力集中が生ずるためと考えられる。

次に豊野粘土と替佐粘土の結果を比較すると、一般的に曲線形状が異なることがわかる。

すなわち豊野粘土では最大せん断応力が生じた後一度は応力が減少するが、その後残留強度によりある程度クリープが続く。これに対し替佐粘土では最大値が生じた後のせん断応力の減少は直線的である。曲線形状の相違の原因は、土粒子の形状およびその結合状態の相違によるものと考えられる。

次に同じ含水比の締固め供試体と圧密供試体とを比較すると、特に豊野粘土の場合には、せん断強度と残留強度とには大きな差がみられる。これは圧密によって作られた土粒子の配向構造がせん断特性に影響を与えているものと考えられ、過圧密比の大きい土での挙動と同様と考えられる。替佐粘土ではこの傾向があまり見られないが、これは圧密による構造の変化が少なかったためと考えられる。

せん断変位がどの程度進むとせん断応力が最大となるかを、含水状態（液性指数）の違いによって調べた結果を図-5に示す。ただし、このせん断変位の値は、各含水状態の土における引張り側のみのせん断試験結果の平均値である。図より液性指数の増加にともなってより大きい変位でせん断応力の最大値が現われることがわかる。この傾向は前報告<sup>4)</sup>でも述べたが、Addanki 他<sup>5)</sup>も割裂試験の結果から図-5と類似の図を得ているほか、引張り試験についてはいくつかの同様の報告がある<sup>6)</sup>。締固めた土と圧密した土との相違はこの図からは不明である。

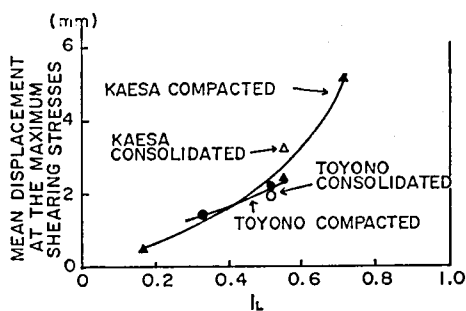


図-5 せん断応力の最大値があらわれたときの変位と液性指数の関係

#### 4-2 せん断強度特性

締固めた土の引張り、圧縮せん断試験より得られた $\sigma-\tau$ 曲線を図-6に示す。まず試作した試験機による結果が通常的一面せん断試験の結果とどの程度相違するかを調べている。図-6(1)における白抜き三角印は直径6.0cm、厚さ1.2cmの通常的一面せん断試験機によってえた結果、黒三角印はそれと同じ含水比、密度をもつ供試体の試作した引張り・圧縮兼用せん断試験機による結果である。後者の方がせん断抵抗 $\tau$ が一般にやや小さいが大體一致

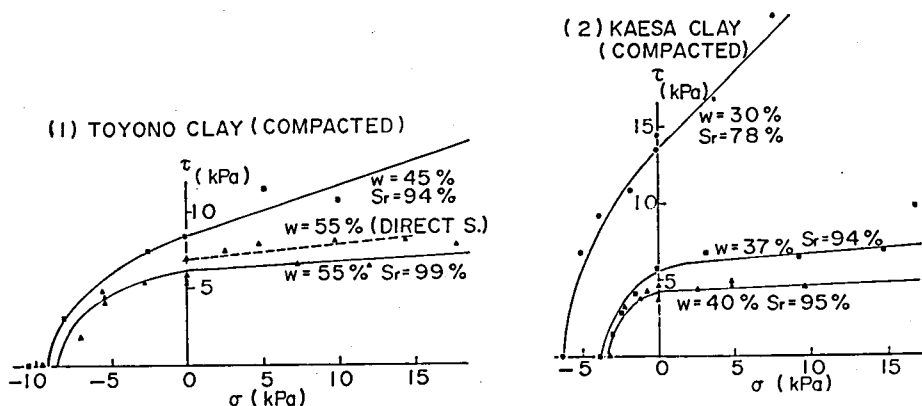


図-6 締固め土の含水比による破壊包絡線の比較

しているとみることができ、両者間の関連性のよいことがわかる。

豊野粘土、替佐粘土ともに含水比が増加するにしたがって内部まさつ角、粘着力および引張り強度が減少していることがわかる。この試験はせん断速度からみて非排水せん断試験と考えられるから、土が飽和に近づくにつれて内部まさつ角はゼロに近づく。また引張り強度は最適含水比附近で最大になるという報告もあり<sup>(4)(7)</sup>、最適含水比より湿潤側では含水比の増大とともに強度が減少することはこれらの報告と一致する。したがって破壊包絡線が垂直応力の圧縮側から引張り側へなめらかに連続するものであれば、粘着力も含水比の増大ともなって減少するのが自然であると考えられる。

次にほぼ等しい含水比、密度を有する締固め土と圧密土との破壊包絡線の比較を行う。図-7より豊野粘土、替佐粘土のいずれも圧密土が引張り強度、粘着力ともに大きい値であることがわかる。特に引張り強度はその差が大きい。これは土粒子の配向構造の相違とチキソトロピーによる影響と考えられる。特に豊野粘土の圧密土の場合に、実験より得られた破壊包絡線の曲率円の直径が、図-9における線分OAより小さくなっている。一軸引張り試験における破壊応力円は、破壊包絡線と点A以外の点Pで接し、せん断破壊を生ずる。せん断試験においては点Pより圧縮側での破壊包絡線上ではすべてせん断破壊が起る。P点より引張り側の破壊包絡線上では、へき開をともなうせん断破壊およびへき開破壊を生じると考えることができる<sup>(8)</sup>。前節でのべた破壊形態(b)がへき開をともなうせん断破壊に相当する。

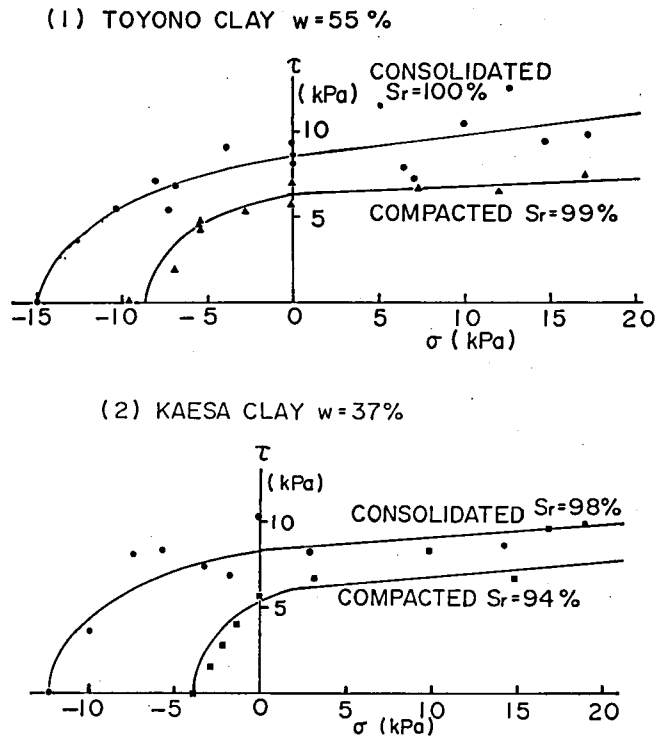


図-7 供試体作成法の違いによる破壊包絡線の比較

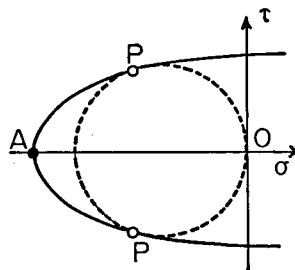
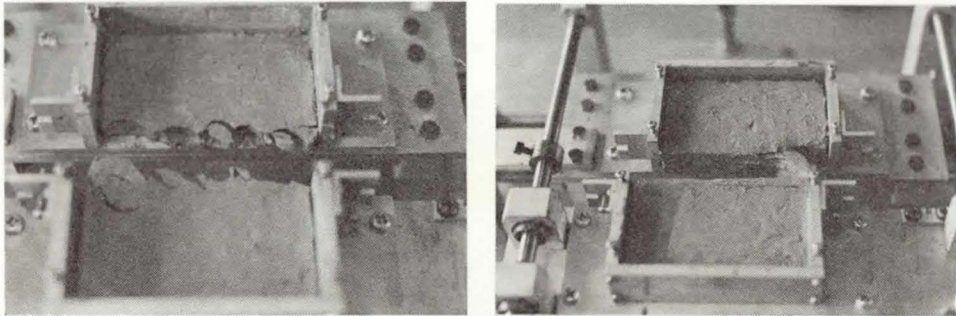


図-8 引張り強度の大きい土の破壊包絡線



(1) へき開をともなうせん断破壊  
(豊野粘土・圧密,  $\sigma = -6.9\text{kPa}$ )  
(2) へき開破壊  
(豊野粘土・圧密,  $\sigma = -10.3\text{kPa}$ )

図-9 引張りせん断試験による破断状況

へき開をともなうせん断破壊と、へき開破壊の状況を図-9に示す。前者はせん断応力と引張り応力によって生じた最小主応力面（単純引張り応力面）に沿ってせん断クラックが生じるため破断面は鋸歯状となっている。これに対し後者はへき開が主体的に生ずるため滑らかな平面状の破断面を示している。

4-3 引張り強度特性

今回の試験によって得られた引張り強度およびこれらと含水比、密度の等しい直径3.5cm、高さ7.0cmの供試体の一軸圧縮強度とを表-1に示す。両者の関係を図-10に示す。図中は飯綱ローム<sup>(1)</sup>の結果も併記している。

また、図中右端の破線はRamanathan<sup>(2)</sup>が6種類の土について割裂試験によって求めた結果である。著者の試験では、土の種類により、また供試体作成方法の相違によってこの関係は異なり、圧密土は一般に  $St/qu$  が大きい。また  $St/qu$  の勾配は土の種類にかかわらずほぼ0.1と一定しており、Ramanathan による0.48よりかなり小さい。これは Ramanathan が最適含水比および乾燥側の土を対象としているのに対し著者は湿潤側のそれを対象としているために相違するものと考えられる。いずれにしても引張り強度は圧縮強度に比例して増大する。

次に土の種類および含水状態によって粘着力に対する引張り強度がどのように変化するかを図-11に示す。豊野粘土、替佐粘土以外の直線は、過去に図中の名称の土について改良前

表-1 引張り強度と一軸縮強度

試料名	供試体作成法	含水比 (%)	引張り強度 (kPa)	一軸圧縮強度 (kPa)
豊野粘土	締固め	45	9.2	19.5
	〃	55	8.6	17.0
	圧密	55	15.0	27.0
替佐粘土	締固め	30	6.2	16.0
	〃	37	3.8	12.1
	〃	40	3.4	7.3
	圧密	37	12.2	19.7

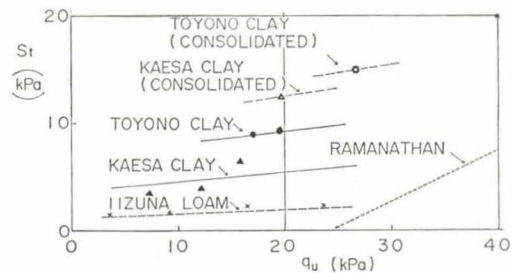


図-10 引張り強度と一軸圧縮強度との関係

の試作機によって試験してえたもので、いずれも締固め土である。

図より一般に含水比（液性指数）の増大にともない $St/c$ が増大する、つまり破壊包絡線が引張り側に偏平に伸びることがわかる。また黒塗りの印は締固め土、白抜きの印は圧密土を示すが、同じ含水比であっても、圧密土は明らかに $St/c$ が大きき。

次に図-1を参照すれば、一般に高塑性の土ほど $St/c$ が大きき、また液性指数の増大にともなう $St/c$ の増加も著しいといえる。

#### 4-4 斜面安定解析における引張りせん断強度の取扱い

4-1で述べたように、垂直応力が引張り側に増大するとともに、破断にいたる変位は減少する。このことは斜面安定解析において引張り強度を無視することの裏付けとなるものである。更に引張りせん断応力を受ける部分でも、土の強度は無視されるべきであると考え。図-12はクラックを有する斜面におけるすべり面の長さのとり方を示すものである。土塊が滑動を開始すれば、引張りクラックに接続するすべり面のある長さにおいて引張りせん断応力が生ずると考えられる。その長さの推定法は未解決であるが、この部分は圧縮せん断応力が生ずる底部附近に比較して残留強度を保持し得ず、かつ小さい変位で破断されるため、引張りせん断抵抗力は期待することができない。このことから、頂部附近の土が引張り応力または引張りせん断応力に十分抵抗しうるものであれば、斜面の滑動はかなり生じにくくなる。路肩部分の舗装は土体への雨水の浸水を防ぐ以外に、このように強度的にも重要な役割をはたすものといえよう。

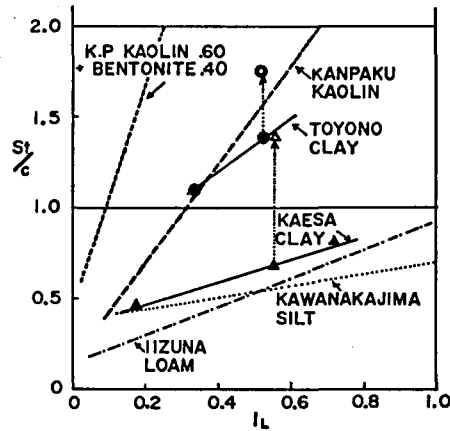


図-11 引張り強度・粘着力比

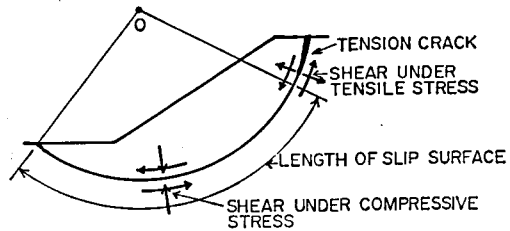


図-12 引張りクラックを有する斜面

## 5. 結 論

引張り垂直応力のもとでのせん断特性をしらべるため、引張り、圧縮いずれの垂直応力をも載荷できるせん断試験機を試作した。この試験機を用いて2種類の土についてそれぞれ締固め供試体と圧密供試体のせん断試験を実施し、次の結論をえた。

- (1) 引張り垂直応力のもとでのせん断応力による破壊形態は、せん断破壊、へき開をとまなうせん断破壊およびへき開破壊の3種類に分類することができる。
- (2) 引張り垂直応力の増大にともない、最大せん断応力、および破断に至るせん断変位が減少する。このことは斜面安定解析において引張りせん断強度を期待できないことを意味する。



- (3) 同じ含水比および密度のもとで、圧密土は締固め土より引張り強度が大きい。
- (4) 一軸圧縮強度の増大にもなって、引張り強度も増大する。
- (5) 含水比の増大にもなって引張り強度と粘着力の比は増大する。また高塑性の土ほど引張り強度と粘着力との比は大きい。

終りに常に御指導を頂いている信州大学工学部 川上浩教授に厚くお礼申上げる。また実験に協力された本校卒業生、山田治氏（横川工事株式会社）と島津多賀夫氏（建設省）に感謝の意を表する。

### 参 考 文 献

- (1) Colin R. Thorne, N. Keith Tovey and Rick Bryant: Recording Unconfined Tension Tester, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 106, No. GT11, 1980, pp.1269-1273.
- (2) B. Ramanathan and V. Raman: Split tensile strength of cohesive soils, Soils and Foundations, Vol. 14, No. 1, 1974, pp.71-76.
- (3) Addanki V. Gopala Krishnappa, Zdenek Eisenstein and Norbert R. Morgenstern: Behavior of compacted soil in tension, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.100, No. GT9, 1974, pp.1051-1061.
- (4) H. Y. Fang and W. F. Chen: New method for determination of tensile strength of soils, Highway Research Record, No. 354, 1971, pp.62-68.
- (5) 梶谷正孝, 済木幸平: 土の引張り強さの測定について, 第10回土質工学研究発表会, 1975, pp.261-264.
- (6) 福江正治, 大草重康, 本宮栄二: 締め固め土の引っ張り強度特性, 第16回土質工学研究発表会, 1981, pp.537-540.
- (7) 大根義男, 成田国朝, 小川喜信: 土の引張り特性に関する実験, 第11回土質工学研究発表会, 1976, pp.303-306.
- (8) A. W. Bishop and V. K. Garga: Drained tension tests on London clay, Geotechnique, Vol. 19, 1969, pp.309-313.
- (9) 清水正喜, 大山和広: 粘性土の三軸引張強度と引張応力下のクリープ特性, 第37回土木学会年次学術講演会, 1982, pp.(Ⅲ) 215-216.
- (10) 柴原信雄: 土の引張りせん断試験について, 長野工業高等専門学校紀要, 第6号, 1976, pp.71-77.
- (11) 柴原信雄: 土の引張りせん断強度について (第2報), 土木学会中部支部昭和51年度研究発表会, 1977, pp.135-136.
- (12) 赤井浩一: 土質力学特論, 森北出版, 1974, p.61.