

土の引張りせん断試験について*

柴原 信雄**

1. ま え が き

土は圧縮強度に比較して引張り強度がかなり小さく、従来土構造物の設計や解析では土の引張り強度は無視して扱われてきている。この原因としては引張り強度の絶対値が一般的に小さいということのほか、わずかなひずみ量によって強度が急激に低下するという脆性破壊を示すため、実際問題の導入にひずみ量の設定が必要なことなど困難な点が多いことがあげられる。しかし曲げ応力を受ける地盤や舗装、モーメントを受ける構造物の基礎周辺の土、斜面崩壊のきっかけを作る引張り亀裂など土が引張り応力を受ける状態は決して少なくはない。ことに垂直切り取り斜面の剝離崩壊のように引張り強度が直接関連してくる問題もある。これらの解決のためには土の引張り強度とひずみとの関係の解明が強く望まれるところである。

これまでに行なわれてきている土の引張り試験には、直接引張り試験⁽¹⁾、割裂試験^{(2),(3)}、およびダブルパンチ試験⁽⁴⁾などがある。これらはいずれも土の極限引張り強度を何らかの試験方法により求めるものであって、引張り強度とひずみの関係、あるいは引張り直応力下のせん断強度はまだ手がけられていない問題である。

筆者は土のせん断特性としての破壊包絡線が負の直応力（引張り応力）のもとではどのようなかという観点から土のせん断試験を行なっている。ここではこの目的のために試作した土の引張りせん断試験機を紹介し、さらにこれを用いて行なった一粘性土の試験結果およびこれによって得られたせん断特性のいくつかについて報告する。

2. 実験装置および試料

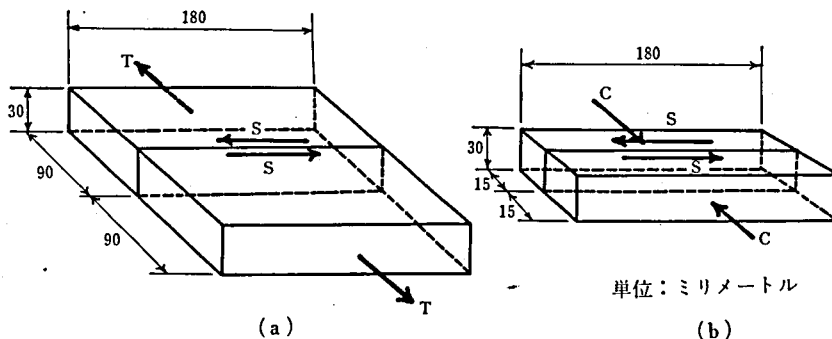


図 1

* 昭和50年1月 土木学会中部支部研究発表会において発表

** 土木工学科助教授

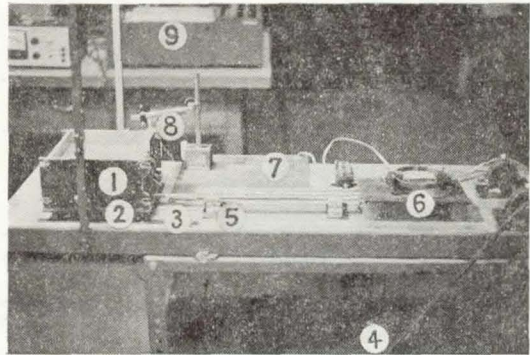
原稿受付 昭和50年10月6日

試作した引張りせん断試験機は図1(a)に示すような機構のもので、直方体の土の供試体に対してT方向に一定の引張り力を載荷した状態で、S方向に等速せん断変位を与え、せん断抵抗力を測定するものである。このとき上・下方向の変位は拘束されている。

引張り力をせん断面に有効に伝えるため、容器は土と接触する上・下の面積を大きくし、かつ粗面とする。また図1(b)に示すように、T方向の寸法を減じた供試体に対し、引張り力の代りにC方向に圧縮力を載荷することにより、一面せん断試験(ここでは圧縮せん断試験という)を行なうこともできる。せん断面の面積

はいずれも $3 \times 18 = 54\text{cm}^2$ である。装置の全景を写真1に示すが、直方体の容器(せん断箱)①に試料を入れ、一定の密度を得よう締固め、上蓋をする。せん断箱①はせん断開始の直前に、せん断面に境に分離できるような状態にする。

写真1において、奥行方向がT方向、左・右方向がS方向に相当する。それぞれの方向に摩擦なく滑らかに、かつ正確にせん断箱①が変位するように箱は台車②に載せ、レール③の



- ① せん断箱
- ② 台車
- ③ レール
- ④ モーターおよび変速機
- ⑤ せん断方向変位計
- ⑥ ひずみリング
- ⑦ ワイヤー
- ⑧ 垂直方向変位計
- ⑨ ペン・レコーダー

写真 1

表 1

試料名	比重	液性 限界	塑性 限界	塑性 指数	粒度組成(%)		
					シル 砂分	粘土 分	粘土 分
飯綱ローム	2.755	100	59	41	24	40	36

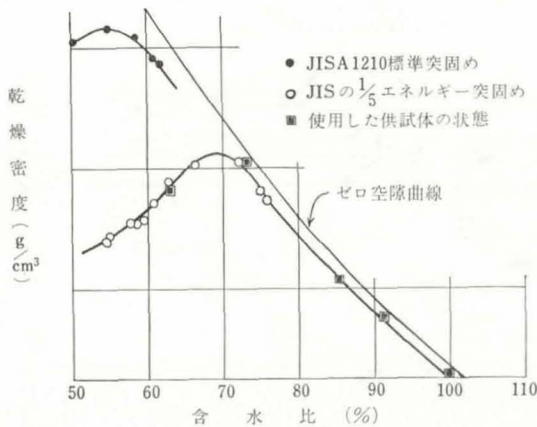


図 2

上を移動させる。垂直応力は、写真ではせん断箱の裏側にあるため見えないが、滑車を介して分銅を下げることにより一定の引張り力を載荷する。せん断変位は、手前側のせん断箱にワイヤー⑦を接続し、これをモーター④で一定速度で巻くことによって与えられる。せん断速度は毎分1ミリメートルを標準とする。ワイヤーの途中にひずみリング⑥を接続し、ここからせん断応力を検出する。せん断方向および垂直方向の変位はそれぞれ差動トランス変位計⑤、⑧によって検出する。引張りせん断試験の場合、破壊は瞬時に起ることが多いため、応力および二方向の変位はいずれも等速ペン・レコーダーに記録する。

試料は粘性土として飯綱ロームを使用している。その物理的性質は表1の

通りである。また、引張り試験の容易さの観点から、含水比が比較的高く、密度のあまり高くない状態を選定している。供試体の締固め条件は、直径100mm、高さ127mmのモールドに、ランマー重量2,650g、落下高50mm、5層、18回を基準とした。これはJISA 1210の標準突固めの約1/5の締固めエネルギーである。標準突固め曲線との比較を図2に示す。使用した供試体の状態は図示の通りで、含水比63%、73%、85%、91%および100%の供試体を得ている。

3. 実験結果および考察

3.1 応力・変位曲線

種々の含水比、引張り直応力状態の代表的なせん断応力・変位曲線を図3に示す。図(a)、(b)、(c)にみられるごとく、せん断応力・変位曲線はこれら3つの形に分類できる。

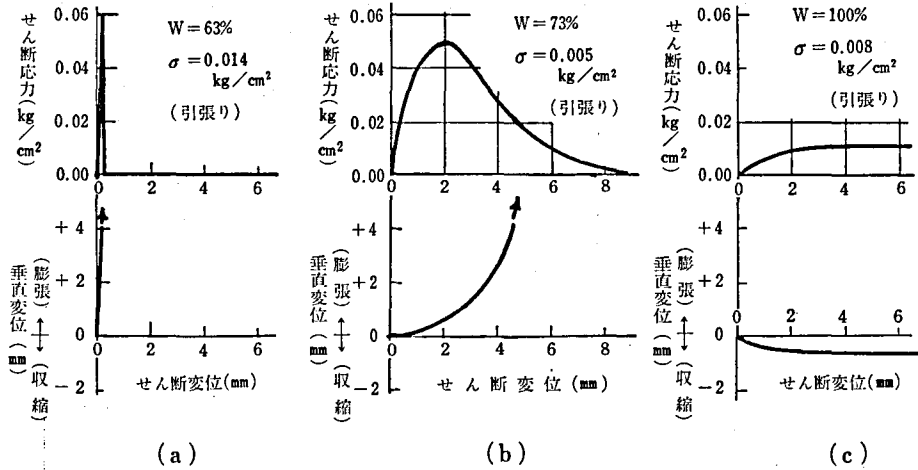


図 3

(a)は含水比が比較的小さい場合、および含水比が高くて引張り直応力が大きい場合に生ずる形で、ひずみが非常に小さい範囲で最大せん断応力が生じ、直ちに破壊する。したがって垂直変位もこの瞬間に0より直ちに急激に増大するもので、いわば引張り直応力が主体的に働く破壊形態である。

(b)は(a)よりも含水比が大きい場合、および引張り直応力が比較的小さい場合に生ずる形で、せん断変位の増大ともなつてせん断応力はなだらかに増大し、最大値を示した後もなだらかに減小しついには0となる。垂直変位は次第に急激に増大して行き、ついには供試体は完全に二つの部分に分離する。

(c)はさらに含水比が大きい場合や、引張

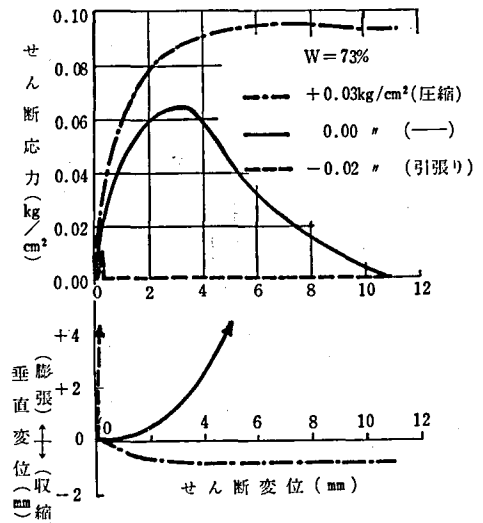


図 4

り直応力がさらに小さい場合もしくは圧縮応力となった場合に生ずる形で、せん断変位が増大してもせん断応力は一定値より減少することはなく、垂直変位も一定値以上に増大しない。これはせん断応力が主体的に働く破壊形態といえる。

図に示すように含水比が増大するにつれて(a)より次第に(c)のような形をとる傾向があるが、含水比が等しく、直応力が変化する場合にも図4のごとく同じような変化がみられる。

3・2 破壊包絡線

せん断試験の結果得られた垂直応力とせん断強度との関係を図5に示す。

まずこの試験機による圧縮せん断試験によって得られるせん断強度が、通常的一面せん断試験によって得られる値とどの程度相違するかを調べている。図中、含水比91%の白丸印は、直径60mm、厚さ12mmの通常的一面せん断試験による結果である。また図中、黒丸印は同じ密度の供試体に対する圧縮せん断試験の結果である。図示のごとく両者の結果はよく近似しており、通常の試験機と試作した試験機との関連性がよいことを示している。

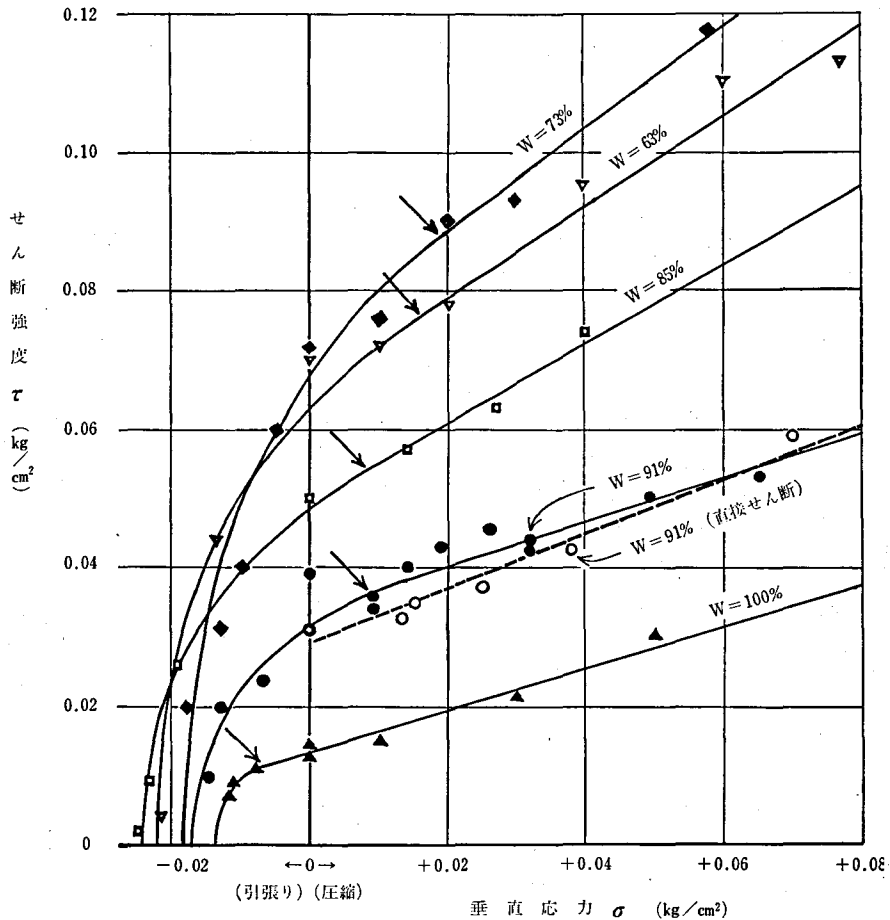


図 5

さて図5の破壊包絡線は、すべての含水比について直応力が圧縮応力で値が大きい間は破壊包絡線は直線を示すが、直応力が小さくなり、もしくは引張り応力になると破壊包絡線は曲線を描いて下降し始め、ついにはσ軸と垂直に交わるようになる。ここで、この直線と曲線との境界の位置(図中の矢印)に注目すれば、含水比の大きい土ほどこの位置が圧縮応力の小さい側へ移動してくることがわかる。特に含水比が100%の場合にはこの直応力が引張り応力の側に位置している。

ここで前節のせん断応力・変位図との対応を調べてみると、破壊包絡線の曲線部分では図3の(a)および(b)、直線部分では(c)の形を生じていることがわかる。これは曲線部分における破壊では正のダイラタンシー(膨張)が著しいため、せん断抵抗が急激に減少するためと考えられる。これに対し、直線部分では負のダイラタンシーを生じ、変位の進行によっても、せん断抵抗がほぼ一定値を保つものと考えられる。

土は含水比が異なれば塑性を示す度合も変化するため、このように直線から曲線に移る点に対応する垂直応力の値も変化するものといえよう。

3・3 引張り強度特性

Ramanathan⁽⁹⁾らは最適含水比以下の、塑性および含水比の異なる幾つかの試料について、割裂試験によって得られた引張り強度 S_t と、一軸圧縮強度 S_u との比較を行ない、両者の間には、塑性および含水比に関係なく次式が成立つことを発表している。

$$S_t = 0.48 (S_u - 0.25) \quad \dots\dots\dots(1)$$

これに対し Fang⁽⁶⁾は、最適含水比で締め固めた種々の試料について、割裂試験およびダブルパンチ試験による引張り試験と、一軸圧縮試験を行ない、図6のごとく塑性指数の大きい土ほど S_u/S_t が小さい値をとることを示している。Jagdish ら⁽⁸⁾も以前に図6と類似の図を発表している。

これらの結論はいずれも割裂試験および一軸圧縮試験を行ないうる状態の土、つまり最適含水比附近およびこれより乾燥側の状態に対するものである。

これに対して筆者が今回行った試験は最適含水比より液性限界までの範囲の含水状態の土であり、割裂試験および一軸圧縮試験が不可能であるため、これらの結果と直接比較することはできない。

表 2

含水比	S_t (kg/cm ²)	S_u^* (kg/cm ²)	c (kg/cm ²)	S_u^*/S_t
100	0.014	0.036	0.013	2.57
91	0.017	0.093	0.026	5.44
85	0.024	0.171	0.048	7.13
73	0.018	0.296	0.068	16.4
63	0.022	0.241	0.063	11.0

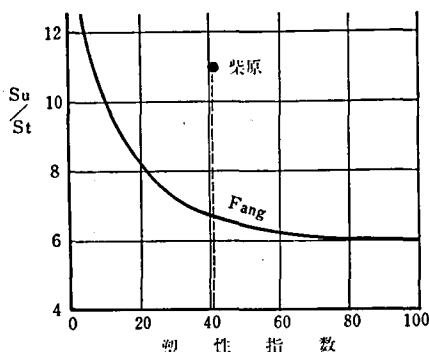


図 6

しかし図5において、破壊包絡線と σ 軸との交点における直応力は引張り強度 S_t に相当し、一方破壊包絡線に接するモールの応力円を描くことにより一軸圧縮強度に相当する強度 S_u^* も得られる。これらの値をみかけの粘着力 c と共に表2に示す。

Ramanathan⁽³⁾による式(1)と表2の値とを比較すると図7の通りとなる。両者の結果は強度の範囲が異なっており比較するには十分とはいえないが、筆者の結果より得られる直線は勾配が非常に緩く、 S_u^* の小さい場合も若干の引張り強度 S_t を有するという点が異なっている。

次に図6において Fang の曲線と著者の実験結果とを比較する。Fang の曲線からは飯綱ロームの塑性指数に相当する S_u/S_t は7となるが筆者の結果では標準突固めの場合の最適含水比に近い $w=63\%$ で S_u^*/S_t は11となり、かなり過大な値を示している。しかし、これは筆者の求めた S_u^* が最適含水比でなく標準突固めでもない試料について間接的に求めた結果であること等の原因でこのような相違が表われたものとも考えられる。

次に、含水比の変化が土の引張り強度に与える影響について検討する。含水比を液性指数に換算し、表2の引張り強度 S_t およびみかけの粘着力 c との関係の求めると図8が得られる。土のみかけの粘着力 c は含水比の変化によって著しく変化するが、これに対し、引張り強度 S_t はあまり変化していないことがわかる。

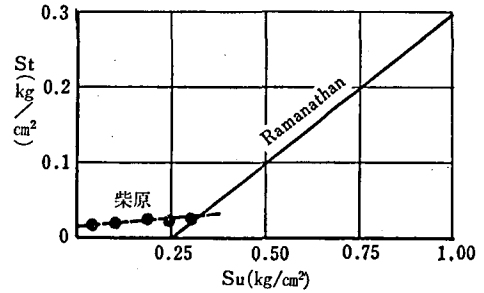


図 7

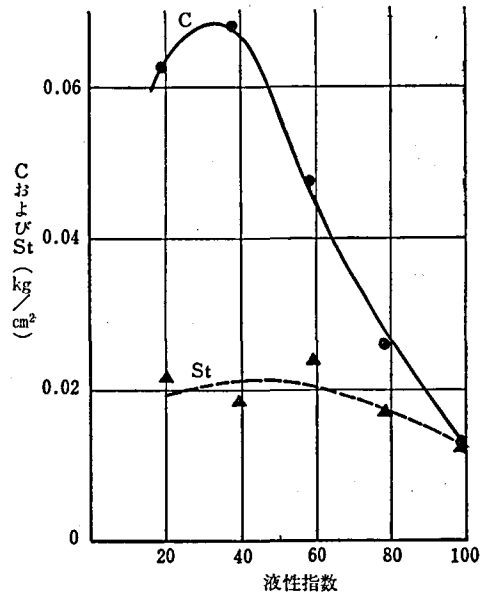


図 8

4. 結 論

負の直応力のもとでの土の破壊包絡線を実験的に求めるため、引張りせん断試験機を試作し、ほぼ目的にかなうものができ上った。

これを用いて一粘性土について、含水比を変え、一定のエネルギーで締固めた供試体のせん断試験を行い、次の結論を得た。

- (1) 直応力が引張り、圧縮の両方である場合を通じて、せん断応力・変位曲線の形を3種類に大別することができる。
- (2) 土の破壊包絡線は直応力がある値より小さくなると直線から下向きの曲線に変るがこの境界に対応する直応力の大きさは土の含水状態によって異なる。
- (3) 破壊包絡線より間接的に一軸圧縮強度を求め、引張り強度との関係を Ramanathan および Fang のそれぞれの報告と比較したが、試験条件の違いにも原因し、異なる値

となった。

- (4) 土のみかけの粘着力は含水比に著しく影響されるが、これに対し引張り強度は影響があらわれない。

今後、試験機の改良により低含水比の試料や、不攪乱試料についても実験を行なうとともに、引張り強度とひずみとの関係を明らかにして、土の壊破機構の解明の一助としたい。

終りに本研究に関し貴重なる御指導、御助言を頂いた信州大学工学部 川上浩教授に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 伊藤雅夫外：土の引張り試験法について，土木学会第29回年次学術講演会，1974.
- (2) Jagdish Narain and Prakash, C. Rawat : Tensile strength of compacted soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division ASCE, Vol. 96, No. SM6, pp. 2185~2190, 1970.
- (3) Ramanathan, B. and Raman, V. : Split tensile strength of cohesive soils, Soils and Foundations, Vol. 14, No. 1, pp. 71~76, 1974.
- (4) Fang, H. Y. and Chen, W. F. : New method for determination of tensile strength of soils, Highway Research Record, No. 354, pp. 62~68, 1971.
- (5) Fang, H. Y. : Discussion to "Split tensile strength of cohesive soils", Soils and Foundations, Vol. 14, No. 3, pp. 81~82, 1974.