

不連続面をもつ締固め土の剪断特性

鳥 山 眺 司

Shearing Properties of Compacted Soils with Discontinuous Plane

Koushi TORIYAMA

For the model of soil layers with weak pane or zone, the triaxial tests were performed with the specimen which had a discontinuous plane by cutting.

From these experiments, the following results are obtained.

- (1) For sandy soil, the cohesion c' must be zero in case which the discontinuous plane overlaps one another with shearing plane (sliding plane). But even in this case, internal angle of friction ϕ' can be used the value of standard test results.
- (2) In case of cohesive soil, the discontinuous plane is adhered easily by consolidation. So, the influence of the discontinuous plane is only recognized on the secant modulus E_{50} .
- (3) The influence of the discontinuous plane grows great as the consolidation pressure is lower.

1. ま え が き

近年の農地造成では圃場の一区画面積を大きく、勾配を緩にするため、谷部の盛土高さが 20~30m におよぶ場合が生じている。また、農道の建設も丘陵部を通過する場合が多く、盛土高さが大きくなる。これらの盛土は地山の植生を除却した上に直接に施工するか、段切りした上に施工されるが、全体としてみると地山と盛土の境界面は傾斜しており、ここが降雨などの浸透水や地下水の流れ道となり、盛土の安定性に影響すると考えられる。さらに盛土内にも転圧を行なった場合、転圧面はかなり滑らかであり、この上に盛土を撒き出すと、上下の境界面が盛土内の弱面となる可能性がある。

これまでの盛土斜面の安定解析においては、これらの弱面の剪断特性は特に考慮せず、経験的に c, ϕ を決めるか、締固め土の三軸圧縮試験で求めた c, ϕ を適当に割り引いて設計に用いている。これではいかに安定解析を行なっても、合理的とはいえない。そのためには安定解析に対しては、実験で求めた c, ϕ をどの程度、割り引くかを明らかにする必要がある。

設計には安全側の数値をとる必要がある。締固め盛土

において最も危険な弱面は上下の土層のかみ合せが無い状態、即ち、地山上にそのまま盛土をした場合や滑らかな転圧面上に盛土した場合である。そこで、これらの状態に対応させるため、締固め供試体に不連続面(切断面)を入れて三軸圧縮試験を行ない、不連続面の角度による c, ϕ の変化を求めた。そして、この結果より、締固め供試体で求めた c, ϕ の値をどのように割り引けば安全かつ合理的な c, ϕ を設計に用いることができるかを検討した。

なお、供試体に不連続面を入れた場合の剪断特性の実験は粘性土の残留強度 c_r, ϕ_r を求めるための実験⁽¹⁾や割れ目のある粘土の割れ目についての剪断試験を行なって c_r, ϕ_r を求め⁽²⁾、これより地すべり地の安定性の検討を行なった例がある。しかし、一般の締固め土の剪断試験では不連続面を入れた報告はない。これは従来の剪断試験が一樣な土の剪断強度を求めることを目的としているためであり、土中の弱面の剪断特性を考えていないためである。

2. 実 験 方 法

実験に用いた試料土は砂質土のまさ土(M)と粘性土の

* 農業施設工学研究室

藤ノ森粘土(F)である。まさ土は松江市忌部町の土取場からの購入、藤ノ森粘土は京都市伏見区産である。これらの物理的性質を表-1に示す。

締固め土の力学的性質は最適含水比 w_{opt} の乾燥側(D)と湿潤側(W)で異なるため、実験ではこの2種の含水比の試料土を用いた。即ち、 w_{opt} の乾燥側のまさ土を MD、藤ノ森粘土を FD、 w_{opt} の湿潤側のまさ土を MW、藤ノ森粘土を FW とした。実験には 2mm ふるい通過分のみを用い、所定の含水比となるように水を加えて、1週間以上密閉した後、実験に用いた。

試料土の締固めは標準締固め法の第1法によった。締固め土より、直径 5.0cm、高さ 12.7cm の供試体を切り出した後、不連続面としての切断面を入れた。このために幅 5.3cm、長さ 15cm、高さ 6.0cm の溝形枠をつくり、これを用いて図-1に示すように傾斜角 $\theta=0^\circ, 22.5^\circ, 45.0^\circ, 67.5^\circ$ の切断面を入れた。90°の切断面は半割りモデルを用いて片面ずつ削って供試体を作製した。また比較のため、切断面を入れない供試体(N)も実験した。

締固め土の剪断特性は水浸によって大きく変化するため、非水浸と水浸条件で実験を行なった。三軸圧縮試験は $\sigma_{3c}'=1.0, 2.0, 3.0, 4.0\text{kgf/cm}^2$ で1日間圧密後、非排水剪断した。水浸供試体では、約2時間、供試体下部より給水し、上部より排水、排気した後、背圧 $u_b=$

表-1：試料土の物理的性質

試料土	まさ土(M)	藤ノ森粘土(F)
液性限界(%)	NP	49.5
塑性限界(%)	NP	24.6
塑性指数(%)	—	24.9
砂分(%)	80.3	15.5
シルト分(%)	12.2	70.5
粘土分(%)	7.5	14.0
最適含水比(%)	12.8	24.6
最大乾燥密度(g/cm ³)	1.864	1.543

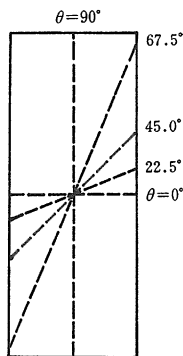


図-1：不連続面の傾斜角 θ

表-2：供試体諸元

試料土	切断面角 θ°	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)	実験後含水比 (%)	
まさ土 ($w < w_{opt}$)	N	9.38	1.680	15.94	
	0	9.27	1.705	15.56	
	MD	22.5	9.27	1.694	15.84
	45.0	9.31	1.729	15.38	
	67.5	9.24	1.648	16.04	
90	9.26	1.630	16.91		
まさ土 ($w > w_{opt}$)	N	13.97	1.752	14.99	
	0	16.17	1.776	14.51	
	MD	22.5	15.02	1.767	14.55
	45.0	14.93	1.773	14.71	
	67.5	14.61	1.754	14.42	
90	14.71	1.728	15.64		
藤ノ森粘土 ($w < w_{opt}$)	N	16.48	1.498	27.12	
	0	15.93	1.469	26.35	
	FD	22.5	15.94	1.466	27.77
	45.0	16.46	1.466	26.69	
	67.5	16.60	1.486	26.52	
90	16.54	1.461	27.71		
藤ノ森粘土 ($w > w_{opt}$)	N	32.08	1.365	28.01	
	0	32.01	1.386	27.17	
	FD	22.5	32.50	1.381	28.07
	45.0	31.26	1.405	27.75	
	67.5	31.08	1.412	27.03	
90	31.40	1.421	27.29		

1.0kgf/cm² を作用させて圧密を行なった。

表-2に実験前の供試体8本の平均含水比、乾燥密度、水浸供試体の実験後の平均含水比を示す。供試体総数は192本である。

3. 実験結果

まさ土と藤ノ森粘土の応力-ひずみおよび間隙水圧-ひずみ関係への不連続面の影響の一例を図-2、3に示す。非水浸供試体では間隙水圧の発生量が小さいため、水浸供試体の場合を図示した。まさ土の応力-ひずみ関係では不連続面のないNおよび $\theta=0^\circ$ の場合、 $\sigma_1-\sigma_3$ にはっきりしたピークが生じたが、理論剪断面 $45^\circ + \phi'/2$ に近い $\theta=67.5^\circ$ の場合、変形はほとんど不連続面のすべりとなり、ピーク強度は生じなかった。また圧縮強度 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ での間隙水圧 Δu_f もNおよび $\theta=0^\circ$ の供試体では $\sigma_{3c}'=1.0\text{kgf/cm}^2$ では負圧となり、 $\sigma_{3c}'=2.0\text{kgf/cm}^2$ ではほぼ0となったものが、 θ の増加とともに正圧となり、 $\theta=67.5^\circ$ の供試体では大きな正圧となった。これに対して藤ノ森粘土では、不連続面の有無および角 θ の応力-ひずみ関係や間隙水圧-ひずみ関係への影響ははっきりしない。

角 θ と $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ および Δu_f の関係を図-4、5に示す。まさ土では $w < w_{opt}$ の MD では $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ は θ の増加とともに減少し、水浸供試体の Δu_f は θ の増加とともに増加傾向にある。これに対して、 $w > w_{opt}$

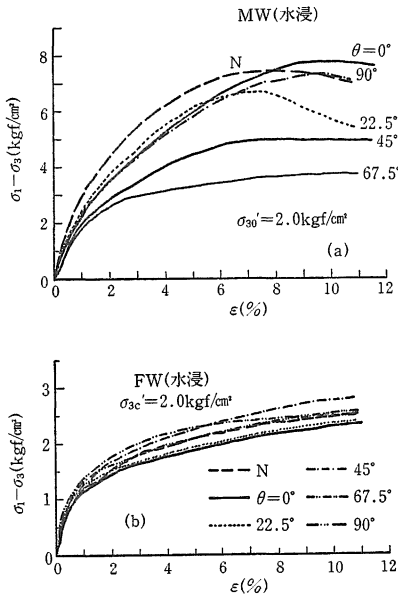


図-2：応力-ひずみ曲線への不連続面の影響

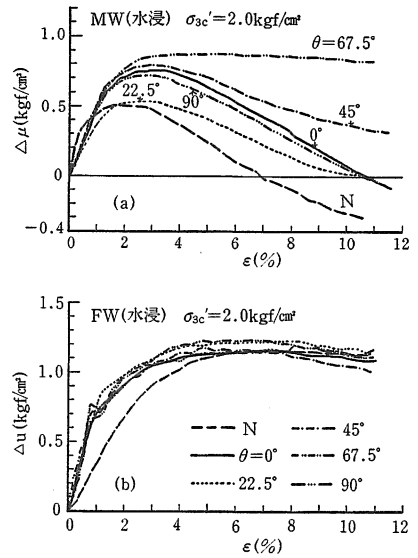


図-3：間隙水圧-ひずみ曲線への不連続面の影響

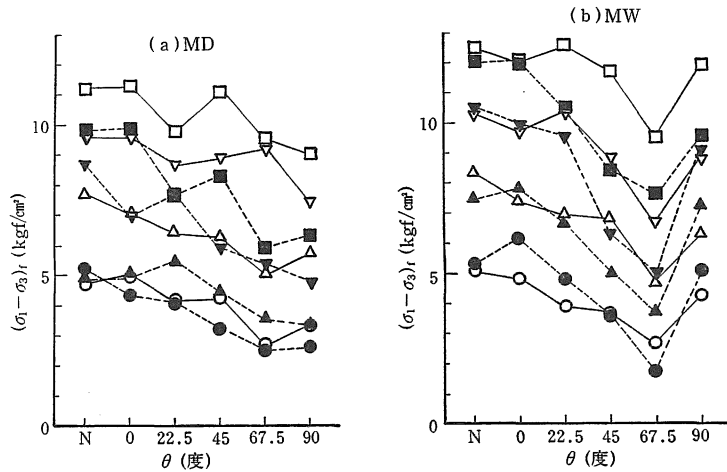


図-4：(a), (b)

の MW では $\theta=67.5^\circ$ の供試体での $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ の減少と Δu_f の増加が顕著である。これに対して藤ノ森粘土では不連続面の存在の $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ および Δu_f への影響はほとんど認められない。

応力-ひずみ関係への角 θ の影響を圧縮強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ の50%応力に対する変形係数 E_{50} で表わすと図-6となる。まさ土では不連続面の存在によって $\sigma_{3c}' = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合には E_{50} は1/2以下に低下している。しかし、 σ_{3c}' の増加とともに E_{50} の低下割合は小さくなっている。これは σ_{3c}' が小さい場合には不連続面が圧密によっても十分に圧着されないため、変形しや

すくなったものである。これに対して藤ノ森粘土では $w < w_{opt}$ の FD では E_{50} は不連続面の存在によって減少しているが、 $w > w_{opt}$ の FW では E_{50} への角 θ の影響は認められない。これより藤ノ森粘土でも $w < w_{opt}$ では圧密によって不連続面は十分に圧着しないが、 $w > w_{opt}$ になると圧密によって不連続面が圧着し、このため変形特性に角 θ の影響が生じなくなったものと考えられる。これらの圧着状態は剪断試験後、まさ土では供試体が不連続面で分離することが多いのに対して、藤ノ森粘土では供試体が分離することがなかったことから推定される。

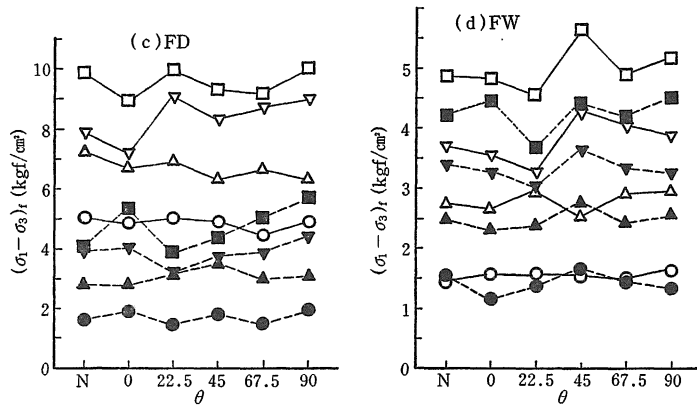


図-4：圧縮強度への不連続面の傾斜角 θ の影響 (記号は図-5と同じ)

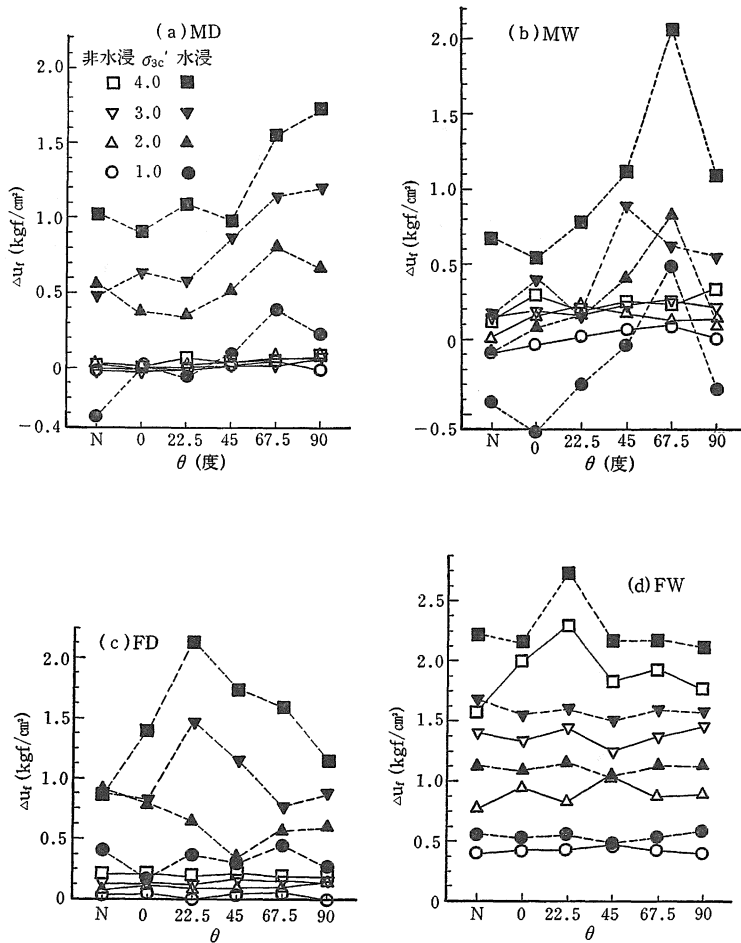


図-5：破壊時の間隙水圧への不連続面の傾斜角の影響

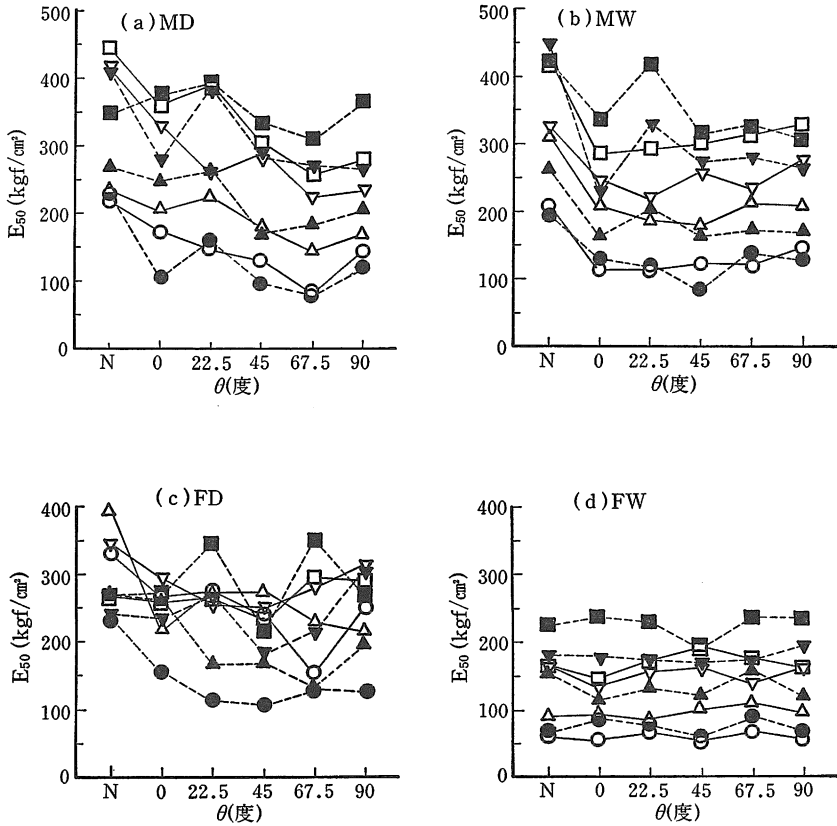


図-6：変形係数 E_{50} への不連続面傾斜角 θ の影響

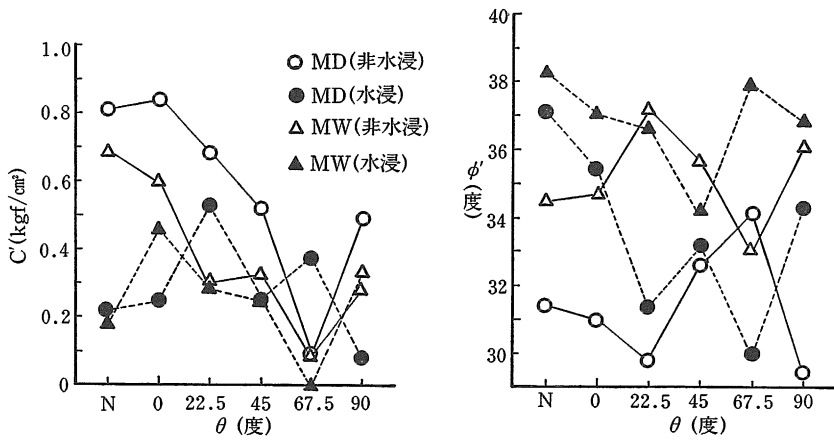


図-7：まさ土の有効応力での強度定数と角 θ の関係

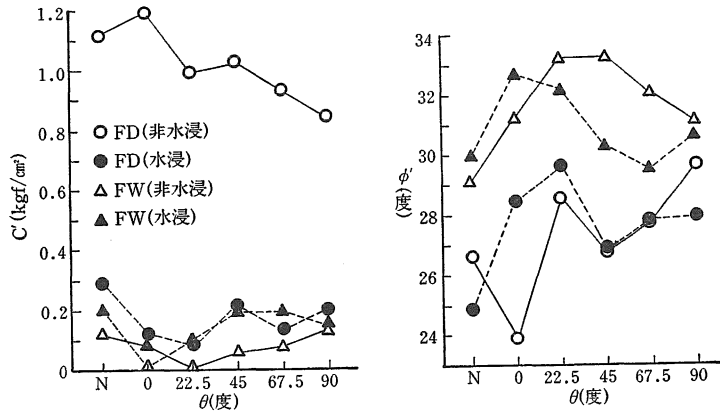


図-8：藤ノ森粘土の有効応力での強度定数と角 θ の関係

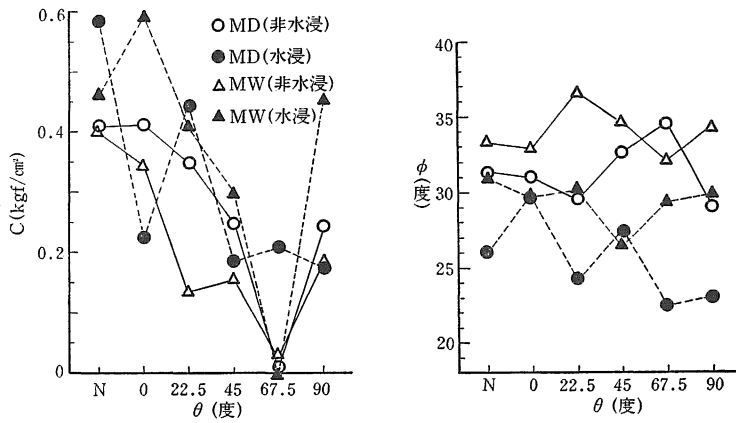


図-9：まさ土の全応力での強度定数と角 θ の関係

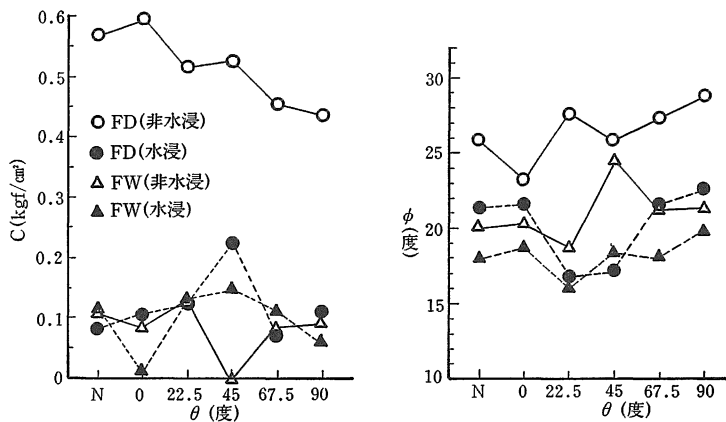


図-10：藤ノ森粘土の全応力での強度定数と角 θ の関係

有効応力での強度定数 c' , ϕ' と角 θ の関係を図-7, 8に示す. 土の剪断強度は有効応力と応力履歴で決るから c' , ϕ' を用いるべきであるが, 安定解析においては剪断中に生じる間隙水圧の推定が困難なため, 全応力解析が用いられる場合も多い. そこで図-9, 10には全応力での強度定数 c , ϕ と角 θ の関係を示す. 有効応力での内部摩擦角 ϕ' はまさ土, 藤ノ森粘土とも $w > w_{opt}$ の方が $w < w_{opt}$ の場合よりも大きくなっており, ϕ' の水浸, 非水浸による差は大きくない. これに対して, 全応力での ϕ は剪断中に大きな間隙水圧を生じる水浸の場合の ϕ の方が非水浸の場合の ϕ に比べて小さな値となっている. なお, 図-9の c , ϕ は圧密非排水試験での値であるので $\phi \neq 0$ となるようなことはない.

4. 実験結果の考察

粘性土と砂質土に不連続面が存在する場合の剪断特性について実験した. 砂質土のまさ土では不連続面の存在により剪断強度は低下し, 間隙水圧の発生量が大きくなる. 特に理論的なすべり面と不連続面がほぼ一致する $\theta = 67.5^\circ$ の場合, 圧密応力 $\sigma_{3c}' = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ や 2.0 kgf/cm^2 でも, 水浸供試体では大きな間隙水圧が生じている. これに対して不連続面のない供試体では負ないし0の間隙水圧である. 不連続面の形成は締め固め供試体を所定の角度でのこぎり等で徐々に切断している. このため, 切断面のごく近傍は切断中にゆるみが生じたものと考えられる. この不連続面が理論的剪断面に近い場合, 供試体の剪断変形は不連続面に集中して生じる. この場合, ゆるんだ部分の剪断変形が生じるから, これが大きな間隙水圧の発生原因と考えられる. 水浸供試体で不連続面のない場合の $\bar{A}_f = \Delta u_f / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ は $-0.08 \sim -0.10$ で σ_{3c}' の増加とともに大きくなるが, $\theta = 67.5^\circ$ の供試体では $\bar{A}_f = 0.15 \sim 0.29$ で σ_{3c}' に無関係である. また破壊時の体積ひずみ e_w も不連続面のない場合に比べて不連続面のある場合の方が大きく, かつ, 不連続面がある場合の e_w への σ_{3c}' の影響が小さくなる. これらの結果, まさ土では不連続面の存在により変形係数 E_{50} が小さくなり, 粘着力 c あるいは c' が減少する. 特に $\theta = 67.5^\circ$ の場合には $c = 0$, $c' = 0$ とみなされる. 砂質土ではダイレタンシーに対する仕事がかげ上の粘着力となるのであるから, $\theta = 67.5^\circ$ の場合, 体積増加が剪断中に生じないため, 粘着力が0となった. これに対して, 内部摩擦角は不連続面の存在の有無や傾斜角に関係なくほぼ一定値をとっている. これより砂質土においては内部摩擦角は常に期待できる強度定数であるが, 粘着力は各種条件によって大きく変動し, 安定上, 期待すべきでないといえよう.

藤ノ森粘土の剪断特性への不連続面の影響は変形係数

E_{50} にやや認められる程度である. $w < w_{opt}$ の FD では不連続面によって E_{50} が減少している. この傾向は σ_{3c}' が小さく, かつ非水浸供試体の方がはっきりしており, $w > w_{opt}$ の FW および $w < w_{opt}$ の FD でも $\sigma_{3c}' = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$ の供試体では不連続面の影響は認められない. 藤ノ森粘土は圧密によって不連続面が十分に付着し, かつ締め固め密度がまさ土に比べて小さいため, 切断による不連続面周辺のゆるみが小さくなる. このため剪断特性への不連続面の影響がほとんどないものと考えられる.

藤ノ森粘土では応力-ひずみ関係にはほとんどの供試体でピークが生ぜず, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ は $\epsilon = 10\%$ の値をとっている. このため, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$, Δu_f への不連続面の影響は認められず, 強度定数 c' , ϕ' や c , ϕ も不連続面の影響が認められなかったとも考えられる.

まさ土の $\theta = 45^\circ, 67.5^\circ$ の供試体の場合, 不連続面で大きな剪断変形が生じている. 強度定数 c , ϕ は標準三軸試験結果と同様に断面補正をして $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ を求め, モール応力円の包絡線より求めている. しかし不連続面に変位が集中する場合には, 剪断は不連続面で生じているから不連続面上に作用している垂直応力 σ と剪断応力 τ をとる方が合理的と考えられる. 角 θ の不連続面上の応力 σ , τ は

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta$$

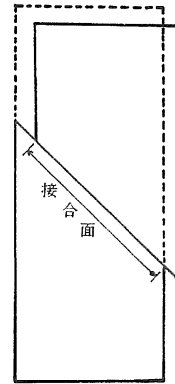


図-11: 供試体の接合面の状態

表-3 : c , ϕ と c_1 , ϕ_1 の比較

θ	ϕ	$\epsilon = 5\%$		$\epsilon = 10\%$	
		c_1/c	ϕ_1	c_1/c	ϕ_1
45°	20°	1.065	21.2°	1.244	25.6°
45°	30°	0.974	29.4°	1.116	32.8°
67.5°	20°	0.923	18.6°	0.965	19.5°
67.5°	30°	0.992	29.8°	1.041	31.0°

この σ , τ の包絡線を

$$\tau = c_0 + \sigma \tan \phi_0 \quad (1)$$

とおくと、強度定数 c , ϕ と c_0 , ϕ_0 の関係は

$$\frac{c_0}{c} = \frac{\tan \phi_0}{\tan \phi} = \frac{\cos \phi \sin 2\theta}{1 + \sin \phi \cos 2\theta} \quad (2)$$

となり、 $\theta=45^\circ$ の場合、 $\phi=20^\circ$ で $c_0/c=0.940$, $\phi=30^\circ$ で $c_0/c=0.866$, $\theta=67.5^\circ$ の場合、 $\phi=20^\circ$ で $c_0/c=0.876$, $\phi=30^\circ$ で $c_0/c=0.947$ となり、不連続面上の応力で求めた c_0 , ϕ_0 は破壊包絡線よりの c , ϕ より小さくなる。しかし不連続面が $\theta=45^\circ$, 67.5° のまき土では変形の大部分は不連続面の滑りとして生じているから、変形の進行とともに不連続面での上下供試体の接合面積が図-11のように減少する。この接合面の形状は円柱を斜めに切断したものであるから楕円であり、上下の楕円の重りが接合面積 A であるから

$$\frac{A}{A_0} = 1 - \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{\varepsilon h}{D} \cot \theta \right) - \frac{2\varepsilon h \cot \theta}{\pi D} \sqrt{1 - \frac{\varepsilon^2 h^2}{D^2} \cot^2 \theta} \quad (3)$$

ここに、 A_0 ：初期の不連続面の面積、 D ：供試体直径、 h ：供試体高さ、 ε ：軸ひずみ。

上式より、 $\theta=45^\circ$ の場合、 $\varepsilon=5\%$ で $A/A_0=0.841$, $\varepsilon=10\%$ で $A/A_0=0.685$, $\theta=67.5^\circ$ の場合、 $\varepsilon=5\%$ で $A/A_0=0.934$, $\varepsilon=10\%$ で $A/A_0=0.868$ となる。この接合面積の減少は不連続面の $(\sigma_1 - \sigma_3)$ の値を一般の計算値より A_0/A 倍の大きさにする。この $(\sigma_1 - \sigma_3)$ の増加は c_0 , ϕ_0 を大きくする。この補正をした内部摩擦角と粘着力を ϕ_1 , c_1 とすると

$$\sin \phi_1 = \sin \phi_0 \frac{1 + \alpha}{1 + \alpha \sin \phi_0} \quad (4)$$

$$c_1 \cos \phi_1 = c_0 \cos \phi_0 \frac{1 + \alpha}{1 + \alpha \sin \phi_0} \quad (5)$$

ここに、 $\alpha = A_0/A - 1$

式(2), (4), (5)より、不連続面で滑りの生じている $\theta=45^\circ$, 67.5° の場合に対して、 $\varepsilon=5\%$ と 10% の c , ϕ と c_1 , ϕ_1 の関係を求めると表-3となる。

まき土の $\theta=45^\circ$, 67.5° の供試体の破壊は $\varepsilon=6.5\sim 10\%$ の範囲で生じている。軸ひずみ ε は不連続面での滑りの他に、不連続面のない場合の供試体での同じ大きさの応力に対応するひずみが供試体全体に生じているはずである。不連続面のない供試体での $\theta=45^\circ$, 67.5° の $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ に対応する ε は $3\sim 5\%$ 程度である。したがって、 c , ϕ と c_1 , ϕ_1 の対比は表-3の $\varepsilon=5\%$ に近い値と考えられる。この場合、標準の方法で求めた c , ϕ と不連続面で断面補正して求めた c_1 , ϕ_1 のと間の差は c_1/c で 0.077 以下、内部摩擦角で 1.4° 以下であり、不連続面のある場合の強度定数 c , ϕ は標準の方法で求めてもよいといえる。

5. あとがき

土層内に弱面をもつ場合のモデルとして、供試体に切断した不連続面を入れて三軸圧縮試験を行った。この結果より

- (1) 砂質土では不連続面と剪断面(すべり面)が一致する場合には粘着力 $c=0$ とすべきである。これに対して、内部摩擦角 ϕ は標準の方法で求めた値を用いてよい。
- (2) 粘性土では圧密によって不連続面が圧着されやすい。これは特に最適含水比の湿潤側で生じ、この場合には水浸供試体の三軸圧縮試験で求めた c , ϕ をそのまま用いることができる。しかし最適含水比の乾燥側では不連続面の影響がやや認められる。
- (3) 不連続面の剪断特性への影響は圧密圧力 σ_{sc}' が小さいほど大きい。

本実験は圧密圧力 σ_{sc}' が 1.0 kgf/cm^2 以上の三軸圧縮試験である。これはすべり土塊の土かぶり厚さが $5\sim 6\text{m}$ 以上に相当する。すべり土塊の厚さが 10m 以上の大規模な斜面崩壊もあるが、多くの斜面のすべり破壊は厚さが 5m 以下である。この場合には、砂質土はもちろん、粘性土でも不連続面の剪断強度への影響が考えられる。この場合には、粘性土でも内部摩擦角 ϕ は有効に働くが、粘着力 c は不連続面にそって低下するものと考えられる。今回は低圧下での剪断試験を行なわなかったで、低圧下で粘着力がどの程度低下するかを明確にすることはできなかった。しかし斜面の安定解析では ϕ は実験結果をそのまま用い、 c を低減すべきであろう。

浅いすべり面では ϕ による剪断抵抗成分は小さく、 c の剪断抵抗成分が安定に大きな効果をもっている。したがって、不連続面の存在は斜面の安定性を大きく低下させる原因となりうる。故に、今後、低圧下での不連続面の剪断特性への影響を解明する必要がある。

なお、本実験には農業施設工学研究室の昭和56年度専攻生の畑 孝治君、糸賀敬吉君、児玉 秀君、57年度専攻生の井下正芳君、上田元也君、服巻 誠君、渡辺浩行君に多大のご協力を賜りました。深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 長尾 哲・黒木莊平・鳥山正則：第19回土質工学研究発表会講演集：513-514, 1984.
- (2) CALABRESI, G. and MANFREDINI, G.: Geotechnique 23(2) : 233-244, 1973.