

正規圧密・過圧密と密度を変えた締固めた藤の森粘土の剪断特性の比較

鳥山 暁 司

Comparison of shearing properties of normally consolidated/over consolidated and compacted Fujinomori soil with variation of density

Koushi TORIYAMA

Abstract The shearing properties of compacted Fujinomori soil (D-value = ρ_d / ρ_{dmax} is between 100 % and 85 %) are compared with that of NC and OC one (OCR is from 1.0 to 12) with consolidated undrained triaxial compression tests.

The failure envelopes for total stress of NC and OC soil are approximated with respective straight lines like other ordinary soils. On the failure envelopes of NC and OC soils, the stress to be doubled is precompression pressure.

The failure envelopes of compacted soils are approximated with one straight line irrespective of D-value. Cohesion c_{cu} and internal friction angle ϕ_{cu} are increased with D-value. This trend of compacted soils is different from that of NC and OC soils.

The shearing strength of compacted soils over D-value 95% is larger than NC soil, but that of compacted soil under 90 % is equal to or smaller than NC soil. From this fact, a wide-spread view-point that compacted soils over D-value 85 % are stable is seemed to be error.

Key word: failure envelope, shearing strength, compacted soil, normally consolidated soil, D-value

1. ま え が き

飽和土は乱さない場合も練り返した場合も正規圧密と過圧密に大別して考えられる。乱さない土は堆積過程で形成された土粒子の骨格構造を有している。ペーストからの練返し土ではこの骨格構造を持たないため、同じ圧密応力では間隙比が小さい。また正規圧密あるいは過圧密土を練り返した場合、乱さない土の構造を破壊するため、同一の含水比では剪断強度が減少し、同じ圧密応力では間隙比が小さく、正規圧密・過圧密の剪断特性とは異なった剪断特性を持つ。

正規圧密の有効応力での剪断強度はモール・クーロン式で $c' = 0$ で ϕ' のみを持つ。過圧密土では $c' > 0$ であるがその値は比較的小さく、 ϕ' は正規圧密の値よりわずかに小さい。しかし、全応力では正規圧密の $c_{cu} = 0$ であるが、過圧密の c_{cu} は圧密降伏応力の増加とともに大きくなり、 ϕ_{cu} は正規圧密よりかなり小さくなる。故に正規圧密と過圧密を含む範囲の剪断強度の全応力で

の破壊包絡線は2本の直線で近似される。

締固め土の乾燥密度 ρ_d は土質、締固め含水比、締固め仕事量、盛土の目的などによってかなりの差がある。すなわち、フィルダムではD値 $= \rho_d / \rho_{dmax} \geq 95\%$ 、道路盛土ではD値 $\geq 85\%$ 、宅地造成ではD値 $\geq 80\%$ が施工目標とされ、これで安全な盛土がなされるものと見なされ、かつ軟弱な正規圧密の状態よりも大きな剪断強度を持つものと思われる。このため、締固め土の剪断特性は低圧部では過圧密土の、高圧部では正規圧密土の剪断特性で近似できるものとされ、全応力では2本の直線で破壊包絡線を近似できるとされている¹⁾。しかし、同じ土を用いて締固め土と正規圧密・過圧密土での剪断特性を比較した例はない。

ここでは藤の森粘土を用いて、密 (D値 = 100%) から緩い (D値 = 85%) までの締固め土とペーストから予圧密した正規圧密・過圧密土の三軸圧縮試験を行い、両者を比較し、締固め土の剪断特性は正規圧密・過圧密の剪断特性の組合せとは異なることを示す。

2. 実験方法

実験に用いた土はセメント混和材として市販されている藤の森粘土である。これは乾燥後の2 mm ふるい通過分が袋詰めにしたものである。実験は平成7年と9年に行った。両年での物理的性質に若干の差が生じたため、両年の試料土の物理的性質を表-1に示す。

実験に用いた締固め土の含水比調整は試料土が所定の含水比になるよう加水してよく混合したのち、袋に密閉して1週間以上置いた。締固め供試体の作成は内径5.00 cm、高さ12.5 cmのモールドに試料土を分けて入れ、各層毎に直径4.6 cmの木の棒を介して、標準締固め用のランマーで所定の密度に締固めた。

正規圧密・過圧密土は試料土に液性限界以上の水を加えてペースト状にし、真空中で2時間以上脱気した後、予圧密装置で約0.5 kgf/cm²の圧力で2日間予圧密した試料土(直径約20 cm)を6分割し、各分割片から直径約5.0 cm、高さ約12.5 cmの供試体を切り出した。

締固め土の三軸圧縮試験は非水浸の場合は供試体を三軸セルにセットし、1日間圧密後、直ちに剪断した。水

浸の場合は供試体をセットし、1日間圧密後、動水勾配7~8で3日間透水し、背圧 $u_b=1.00$ kgf/cm²を1日間作用して飽和度を高めたのち剪断した。

正規圧密供試体はセット後、1日間圧密し、締固め土の水浸の場合と同じように透水し、背圧を加えた。過圧密供試体は $P=6.0$ または 3.0 kgf/cm²で1日間の圧密

表-1: 藤の森粘土の物理的性質

	平成7年	平成9年
ρ_s (g/cm ³)	2.708	2.694
w_l (%)	40.2	39.9
w_p (%)	31.8	22.4
I_p	8.4	17.5
砂分 (%)	12	24~29
シルト分 (%)	72	55~65
粘土分 (%)	16	11~18
U_c	18	12~15
w_{opt} (%) (標準 E_c)	23.1	24.2
ρ_{dmax} (g/cm ³) (E_c)	1.537	1.562
w_{opt} (%) ($E_c/2$)		26.5
ρ_{dmax} (g/cm ³) ($E_c/2$)		1.450
w_{opt} (%) ($E_c/4$)		29.5
ρ_{dmax} (g/cm ³) ($E_c/4$)		1.382

表-2: 供試体諸元と実験条件

供試体番号	排水条件	水浸条件	実験前					実験後
			w %	ρ_a g/cm ³	e	S_r %	D値 %	w %
7FA	CD	非水浸	24.34	1.558	0.739	89.3	101.4	24.98
7FB	CD	水浸	24.56	1.558	0.739	90.0	101.4	25.70
7FC	CD	非水浸	24.43	1.517	0.784	84.6	98.7	25.41
7FD	CD	水浸	24.50	1.506	0.800	84.0	98.0	27.14
7FG	CU	非水浸	24.59	1.545	0.753	89.0	100.5	24.89
7FH	CU	水浸	24.85	1.550	0.748	90.0	100.8	26.39
7FI	CU	非水浸	24.85	1.509	0.795	84.1	98.2	26.09
7FJ	CU	水浸	24.46	1.502	0.803	83.6	98.0	28.30
9FA	CU	非水浸	24.23	1.351	0.994	65.7	86.5	26.12
9FB	CU	水浸	24.43	1.330	1.026	64.2	85.1	30.89
9FC	CU	非水浸	17.98	1.333	1.022	47.4	85.3	18.96
9FD	CU	水浸	17.91	1.333	1.021	47.2	85.3	31.60
9FE	CU	非水浸	29.56	1.374	0.961	82.9	88.0	27.36
9FF	CU	水浸	31.39	1.333	1.021	82.8	85.3	29.78
9FG	CU	非水浸	24.12	1.403	0.921	70.6	89.8	25.76
9FH	CU	水浸	24.16	1.392	0.935	69.6	89.1	30.96
7NC	CU	正規圧密	37.13	1.372	0.972	103.7	89.3	31.47
7OC6	CU	過圧密	37.32	1.359	0.992	101.9	88.4	29.87
7OC3	CU	過圧密	36.16	1.360	0.991	99.1	88.5	30.56
9NC	CU	正規圧密	36.22	1.388	0.944	104.2	88.9	30.65

後、所定の圧密応力 σ'_{vc} まで減圧して膨潤させた後、透水し、背圧を加えた。

ひずみ速度は圧密非排水試験(CU)では0.1%/min、圧密排水試験(CD)では 8×10^{-4} %/minとした。

圧密応力 σ'_{vc} は締固め土と正規圧密土では0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0 kgf/cm²、過圧密土は先行圧密応力 $p_c=6.0$ と3.0 kgf/cm²とし、過圧密比OCR=1.5~12の範囲とした。

実験に用いた供試体のCDとCU、非水浸と水浸、供試体諸元の平均値、実験後の平均含水比を表-2に示す。

3. 正規圧密、過圧密での剪断特性

正規圧密(7NC)と過圧密(7OC6)の圧密非排水試験での応力-ひずみ関係は昨年度の報文²⁾の図-5, 6に示した。正規圧密(NC)では $(\sigma_1 - \sigma_3)$ と Δu は増加後、ほぼ一定値を保ち、過圧密(OC)では過圧密比(OCR) ≥ 6 では $\Delta u < 0$ となり、間隙圧係数 $A_r < 0$ となるが、OCR ≤ 3 では $\Delta u > 0$ であり、一般的なNCとOCの剪断特性を示している。

7NC, 9NCと7OC6, 7OC3を合わせた全応力と有効

応力での強度特性を図-1に示す。NCの c_{cu} , c' ともほぼ0で、全応力での破壊包絡線はNCとOCで折れ曲がる2本の直線で近似でき、一般的な強度特性である。7OC6ではOCR=1~12であるため、破壊包絡線は上に凸の曲線の方がよりよくなるが、これも一般的な傾向である。有効応力ではNCとOCはほぼ同じ直線上にある。全体の $c'=0.139$ kgf/cm², $\phi'=31.20^\circ$ で $r=0.995$ である。それぞれに c' , ϕ' を求めると、表-3のようにNCでは $\phi'=32^\circ$ に対して7OC6の $\phi'=28.7^\circ$, 7OC3の $\phi'=21.3^\circ$ とOCの ϕ' は小さく、 c' が大きくなっている。7OC6の ϕ' が7OC3より大きい、7OC6はOCR=1~12に対して7OC3のOCR=1~6のためである。この結果からも繰返した飽和土のNCとOCの破壊包絡線は別々の直線で近似でき、NCの ϕ' はOCの ϕ' より大きく、 c' は小さい。

4. 締固め密度の剪断強度への影響

フィルダムはD値95%以上の締固めを施工管理値としているが、道路盛土ではD値 $\geq 85\%$ を施工管理値としているため、表-2のように9FA~9FFをD値 ≈ 85

表-3：藤の森粘土の強度定数

供試体 番号	排水 条件	水浸 条件	実 験 前			
			c_{cu} kg/cm ²	ϕ_{cu}	c' kg/cm ²	ϕ'
7FA	CD	非水浸			0.375	30.22
7FB	CD	水浸			0.418	29.94
7FC	CD	非水浸			0.424	26.80
7FD	CD	水浸			0.166	29.59
7FG	CU	非水浸	0.880	25.40	0.877	26.08
7FH	CU	水浸	1.053	20.98	0.411	28.80
7FI	CU	非水浸	0.811	22.02	0.658	25.44
7FJ	CU	水浸	0.455	20.16	0.153	29.72
9FA	CU	非水浸	0.311	20.99	0.327	24.49
9FB	CU	水浸	0.103	12.69	0.074	24.11
9FC	CU	非水浸	0.543	25.24	0.539	26.41
9FD	CU	水浸	0.064	13.21	0.082	24.31
9FE	CU	非水浸	0.232	18.64	0.219	25.06
9FF	CU	水浸	-0.057	17.20	-0.004	30.40
9FG	CU	非水浸	0.569	20.96	0.426	25.16
9FH	CU	水浸	0.144	14.80	0.006	29.93
7NC	CU	正規圧密	0.122	21.30	0.092	32.65
7OC6	CU	過圧密	0.990	15.88	0.334	28.66
7OC3	CU	過圧密	0.978	7.69	0.494	21.28
9NC	CU	正規圧密	0.241	16.24	0.071	31.83
7NC+9NC	CU	正規圧密	0.164	19.15	0.115	32.02

%で、9FGと9FHをD値=90%でCU試験を行った。最適含水比でのD値=85%での非水浸と水浸での応力-ひずみ関係を図-2, 3に示す。非水浸では剪断による間隙圧の変化量 Δu は小さいが、水浸供試体では破壊時の間隙圧係数 A_r はD値の減少とともに大きく増加する。図-4に水浸供試体の $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 、 A_r とD値の関係を示す。図中の点線は正規圧密(NC)供試体の $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 、 A_r であるが、D値95%以上では締固め土の $(\sigma_1 - \sigma_3)$ はNCより大きく、 A_r はNCより小さいが、D値

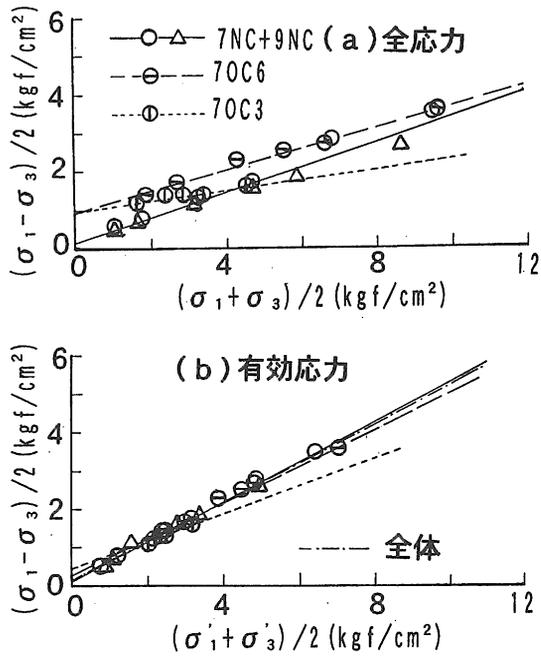


図-1：正規圧密、過圧密土の剪断強度特性

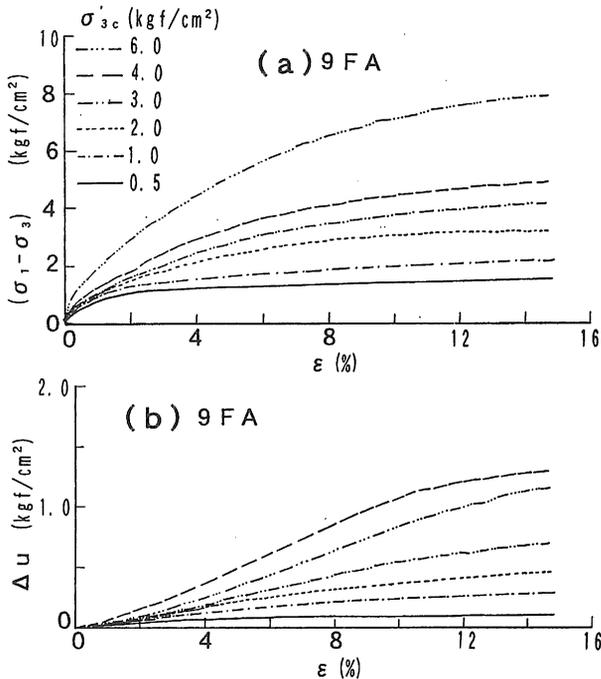


図-2：最適含水比、D値85%での非水浸供試体の応力、間隙圧と軸ひずみの関係

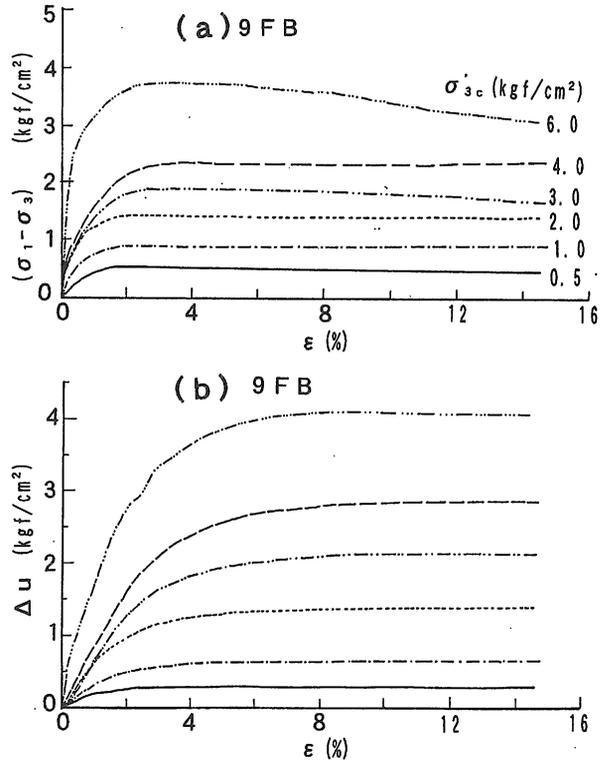


図-3：最適含水比、D値85%での水浸供試体の応力、間隙圧と軸ひずみの関係

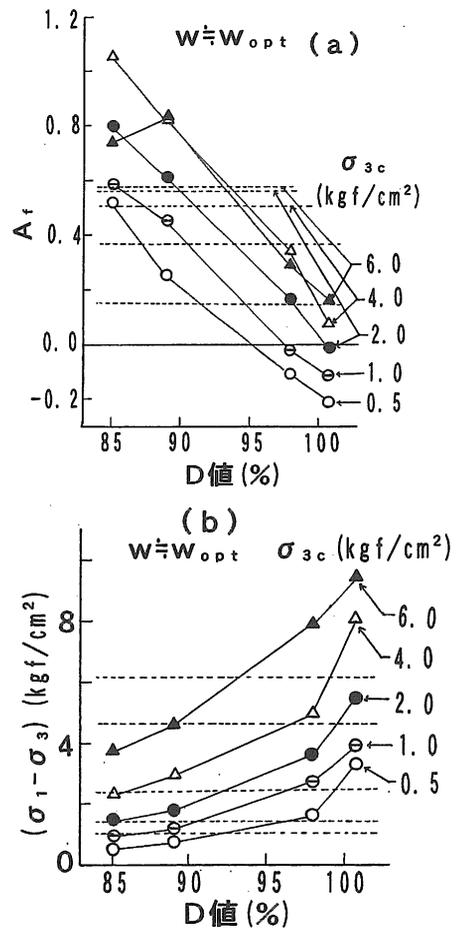


図-4：水浸供試体のD値と間隙圧係数 A_r 、圧縮強度の関係

90%以下では締固め土の $(\sigma_1 - \sigma_3)$ はNCより小さく、 A_r はNCより大きい。これよりD値 $\leq 90\%$ の締固め土は水浸時には飽和した正規圧密土より軟弱であることがわかる。

水浸供試体のCU試験での全応力と有効応力での強度特性を図-5に示す。全応力での破壊包絡線はD値100%から85%まで全て1本の直線で近似され、NCとOCの組合せのような2本の折れ線にはならない。かつ、D値の減少とともに c_{cu} 、 ϕ_{cu} ともに小さくなる。密な締固めが過圧密に相当するならば、全応力での c_{cu} はD値の増加とともに大きくなり、 ϕ_{cu} はD値の増加とともに小さくなるはずである。図-5の結果はNC、OCとは異なっている。有効応力での破壊包絡線は1本の直線で表され、水浸により c' は減少し、 ϕ' はほぼ一定である。表-3のように、D値85%の締固め土の強度定数は全応力、有効応力とも正規圧密の値より小さくなっている。

5. 締固め含水比の剪断特性への影響

一般の締固め土の施工管理はD値85%以上の場合が多いため、締固め含水比の影響はD値85%での最適含水比 w_{opt} (9FB)と乾燥側(9FD)と湿潤側(9FF)で実験した。締固め含水比 w と $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 、 A_r の関係を図-6に示す。 $\sigma'_{3c} = 4.0$ と 6.0 kgf/cm^2 では w_{opt} の湿

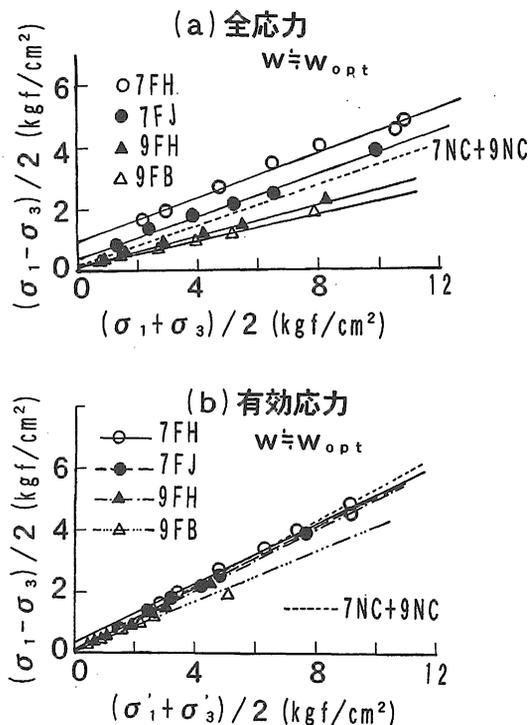


図-5：D値が100~85%での剪断強度特性

潤側の圧縮強度が大きい、他の $(\sigma_1 - \sigma_3)$ はほぼ等しい。 A_r への締固め含水比の影響もはっきりせず、水浸状態では締固め含水比の強度への影響は小さい。表-3より強度定数は9FBと9FDはほぼ等しいが、9FFの ϕ_{cu} 、 ϕ' は大きく、 c_{cu} 、 c' は小さい。これは図-6(a)の $\sigma'_{3c} = 4.0, 6.0 \text{ kgf/cm}^2$ での $(\sigma_1 - \sigma_3)$ が大きいため、モール・クーロン式での傾きが大きくなり、切片が小さくなったためである。NCの $(\sigma_1 - \sigma_3)$ は図中の点線で示すが、どの含水比でもD値85%の圧縮強度はNCより小さい。

6. 締固め土と正規圧密・過圧密土の剪断特性の比較

繰り返した正規圧密土の供試体は液性限界より高含水比のペーストを約 0.5 kgf/cm^2 で予圧密した試料土より切り出した。予圧密状態での供試体は非常に軟弱であった。表-2より含水比は36~37%と高いが、乾燥密度はD値にすると88~89%もあり、D値85%の締固め土より大きな密度である。このことは最適含水比ないその乾燥側のD値85%程度の締固め土は非水浸で不飽和状態を保っておれば、施工は容易で支持力もあるが、降

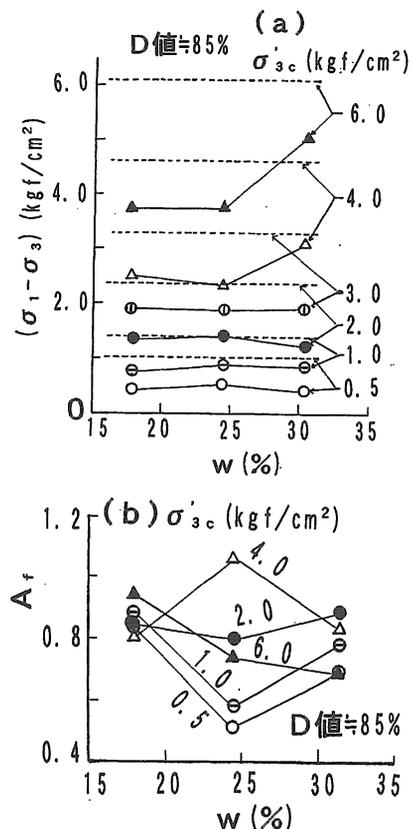


図-6：D値85%での締固め含水比と圧縮強度、間隙圧係数 A_r の関係

雨によって飽和状態になると非常に軟弱になることが理解できる。

全応力での破壊包絡線はNCでは $c_{cu}=0$ で ϕ_{cu} のみ、OCでは $OCR \leq 12$ では c_{cu} をもち、 ϕ_{cu} はNCの値より小さい直線で近似され、NC、OCを併せた破壊包絡線は2本の直線で近似される。これに対して、締固め土の水浸状態ではD値が100~85%の範囲で、全応力の破壊包絡線は1本の直線となりD値が大きいほど c_{cu} 、 ϕ_{cu} とも大きくなり、NC、OCの破壊包絡線との傾向とは異なっている。

有効応力での破壊包絡線はNCとOCでの差は小さいが、NCの ϕ' はOCより大きく、 c' はOCの方が大きい。水浸状態の締固め土ではD値の増加とともに c' 、 ϕ' ともに大きくなり、D値が85%では c' 、 ϕ' ともNCより小さい。

土の締固めは乾燥密度を増加させるから、見かけは圧密降伏応力 p_v の増加に相当する。しかし、締固めは土に大きな剪断変形を与え、練り返しに近い状態を土に加えて密度を増加させる。これに対して、過圧密は大きな先行圧密応力で剪断ひずみをほとんど与えずに密度を増加させたのち、圧密応力を除荷するのであるから、締固めとNC、OCの作用は全く異なっており、破壊包絡線も異なった形式になるのが当然である。締固め土の強度特性は初期含水比の異なる飽和練り返し土の剪断特性と比較するのが妥当と考えられる。しかし、軟弱粘土の鋭敏比を求めるための練り返し粘土の一軸圧縮試験の他には含水比の異なる飽和練り返し土の三軸圧縮試験は行われていない。したがって、締固め土との比較も現時点ではできない。

不飽和土では間隙水がサクシヨンの状態にあり、有効応力 σ' はBishop³⁾によれば

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

であるから、 $\sigma = 0$ 、 $u_a = 0$ (大気圧) でも

$$\sigma' = \chi(u_a - u_w) \quad (2)$$

の有効応力があり、 $\sigma = 0$ での剪断強度 τ_0 を与える。

$$\tau_0 = c' + \sigma' \tan \phi' = c' + \chi(u_a - u_w) \tan \phi' \quad (3)$$

あるいはFredlund and Rahardjo⁴⁾により

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi_0 \quad (4)$$

に $\sigma = 0$ 、 $u_a = 0$ を代入すると

$$\tau_0 = c' + (u_a - u_w) \tan \phi_0 \quad (5)$$

緩い締固め土では $c' \approx 0$ であるが、(3)または(5)式の右辺第2項の $(u_a - u_w) > 0$ によって剪断強度を持ち、これが不飽和土の非常に緩い構造をもたらす。この緩い構造は圧密と水浸によるコラプスによっても完全には破壊

されず、基本的に緩い構造を保つため、ペーストからの正規圧密土より軟弱な状態になると考えられる。

7. あとがき

藤の森粘土を用いて締固めとペーストからの正規圧密・過圧密での剪断特性の比較を行った。この結果、

(1) 全応力での正規圧密と過圧密の破壊包絡線は一般の粘土と同様に、先行圧密応力で折れ曲がる2本の直線で近似できる。有効応力では正規圧密の ϕ' の方が過圧密の ϕ' より大きい。

(2) 密な締固め土では圧密排水と圧密非排水での破壊包絡線に差は認められない。

(3) D値 $> 95\%$ では水浸した締固め土の方が正規圧密土より大きな圧縮強度を持つが、D値 $< 90\%$ になると、水浸した締固め土の強度は正規圧密土の強度より小さくなり、破壊時の間隙圧係数 A_r は正規圧密より大きい。

(4) 水浸した締固め土の破壊包絡線はD値が100%~85%の範囲で1本の直線で近似され、耐震設計指針(案)で示されている正規圧密と過圧密の破壊包絡線を組み合わせた形とはならない。

締固め土の剪断特性は正規圧密または過圧密土を異なる含水比で練り返した土の剪断特性と比較する方が合理的と考えられるが、これについての論文は全くないため、今後の研究課題である。

なお、本実験を行うにあたっては平成8年3月卒業の井原純也君、上場 剛君、槌野敬文君および平成10年3月卒業の粟野洋介君、稲田健一君に多大なご協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建設省河川局開発課：フィルダムの耐震設計指針(案)，国土開発技術研究センター，49-50，1991。
- 2) 鳥山昶司：締固め土と正規圧密・過圧密土の剪断特性の比較。島根大生物資源科学部研報，3，11-18，1998。
- 3) Bishop, A. W.: The principle of effective stress, Lecture delivered in Oslo, Norway, in 1955; Teknisk Ukeblad, 106-39, 859-863, 1959.
- 4) Fredlund, D. G. and H. Rahardjo: Soil Mechanics for unsaturated soils, John Wiley & Sons, INC, 227-228, 1993.