

Bull.Fac. Life Env. Sci. Shimane Univ., 6 : 31 - 40, December 20 2001

## 締固めロームの剪断特性への締固め含水比と密度の影響

鳥山 暁司

The influence of compacted water contents and dry density on the shearing properties of compacted loam

Koushi Toriyama

**Abstract** The comparison of shearing properties between compacted soil and normally or over-consolidated soil and the influences of compacted water content and dry density on the shearing properties of compacted loam are investigated with triaxial compression test, constant vertical stress direct shear test and constant volume one.

Internal friction angle  $\phi$  of normally consolidated soil is larger than that of compacted soil ( D value < 95% ). The stress decrement on stress path of compacted soil ( D value = 85% ) are greater than that of normally consolidated soil, so the strength of that is less than this.

As pore pressure coefficient  $A_f$  of compacted at dry side is larger than that of compacted at wet side, so the shear strength of compacted soil at wet side is greater than that of dry side.

Key word: triaxial test, direct shear test, loam, D value, shear strength

### 1 まえがき

近年、水浸した締固め土と正規圧密、過圧密土の剪断特性を藤の森粘土<sup>1,2)</sup>とまさ土<sup>3)</sup>と比較してきた。この結果、内部摩擦角  $\phi'$  は正規圧密土が D 値 = 95% の締固め土より大きくなること、全応力では正規圧密と過圧密の破壊包絡線は先行圧密応力で折曲がる直線で近似されるが、締固め土では D 値に関係なく 1 本の直線で近似でき、締固めの効果は主として粘着力  $c_{cu}$  の増加に現れることを示した。

実験に用いた土は液性限界  $w_l = 30 \sim 40\%$  で、最適含水比が 14 ~ 25% の砂質土ないし砂質粘土である。これらの土での結果が高含水比の粘性土に対しても成立つかは疑問である。そこで、鳥取県西部から島根県東部に広く分布する大山ロームを用いて、締固め密度、締固め含水比による剪断特性の変化、ペーストからの正規圧密、過圧密土と締固め土の剪断特性の比較試験を行い、これまでの実験結果と比較して、締固めと正規圧密との差を実験によって明らかにした。

### 2 試料土と実験方法

実験に用いた試料土は島根大学構内から採取したロームである。自然含水比は降雨の数日後で 65% 以上、夏期

の乾燥した時期で 55% 程度であり、最適含水比より常に高含水比の状態にある。実験には試料土を採取後、風乾し、2.00mm ふるい通過分を用いた。試料土の物理的性質を表 - 1 に示す。試料土の締固め試験結果は一般の粘性土に比べてばらつきがあり、48 ~ 52% 程度の範囲にあると思われるが、表には 51.4% とした。

締固め含水比としてほぼ最適含水比  $w_{opt}$  の  $w = 49 \sim 50\%$  とその湿潤側の  $w = 55 \sim 56\%$  および乾燥側の  $w = 42 \sim 43\%$  に含水比を調整し、1 週間以上置いたのち実験に用いた。 $w$  を 55 ~ 56% 以上にすると土は団子状態になって、取扱いが困難となった。

締固め供試体の乾燥密度  $\rho_d$  は  $w_{opt}$  では  $D \text{ 値} = \rho_d / \rho_{dmax} = 100, 95, 90, 85, 80, 75, 70\%$  , 乾燥側と湿潤側は盛土の締固めで多く用いられる D 値 = 95, 90, 85% とした。

剪断試験は圧密非排水三軸圧縮試験と定圧、定体積一面剪断試験をおこなった。

三軸圧縮試験の締固め供試体は内径 5.00cm , 高さ 12.5 cm のモールドに土を 10 層に分けて入れ、所定の密度になるように締固めた。一面剪断試験の供試体は内径 6.00cm , 高さ 2.00cm のリングに土を入れて所定の密度になるように締固めた。三軸供試体の質量は目標値に  $\pm 3.0g$  ( 供試体質量の  $\pm 0.8\%$  ) に以内とした。三軸圧縮試験の正規圧密供試体は含水比約 100% のペーストをモールドに入れて凍結し、凍結供試体を素早く三軸セルにセット後、 $\sigma'_{3c} = 49kPa$  で圧密し、さらに所定の圧密応力  $\sigma'_{3c}$  で圧密した。

過圧密供試体はペーストを先行圧密応力  $p_c = 294$  または  $588\text{kPa}$  で圧密後、所定の  $\sigma'_{3c}$  まで除荷した。

一面剪断試験の締め固め供試体は内径  $6.00\text{cm}$ 、高さ  $2.00\text{cm}$  のリングに試料土を入れて、所定の密度になるように締め固めた。供試体の質量は目標値の  $\pm 0.3\text{g}$  ( 供試体質量の  $\pm 0.4\%$  ) 以内である。正規圧密供試体は  $w = 100\%$  のペーストを標準圧密リングとカラー ( 高さ  $3.0\text{cm}$  ) に入れ、 $\sigma = 20\text{kPa}$  の場合は  $\sigma = 15\text{kPa}$  で、 $\sigma = 50\text{kPa}$  の場合は  $34\text{kPa}$  で予圧密して作成した。過圧密供試体は予圧密供試体を  $\sigma = 300\text{kPa}$  で圧密後、所定の圧密応力  $\sigma_0$  まで除荷して作成した。

実験は全て水浸条件で行った。三軸圧縮試験では供試体を1日間圧密、3日間動水勾配  $7\sim 8$  で透水後、1日間背圧  $u_b = 98\text{kPa}$  を加えて、圧密非排水条件で、ひずみ速度  $0.1\%/\text{min}$  で圧縮した。定圧一面剪断試験は供試体を30分間圧密し、動水勾配  $5\sim 10$  で約8時間透水し、透水状態で  $0.01\text{mm}/\text{min}$  で剪断した。定体積一面剪断試験は30分間の圧密後、約20時間透水し、透水状態で  $0.1\text{mm}/\text{min}$  で剪断した。正規圧密、過圧密供試体も実験条件を揃えるため、それぞれ同じ方法を用いた。

三軸圧縮試験は  $w_{opt}$  では  $\sigma'_{3c} = 49, 98, 196, 294, 392, 589\text{kPa}$  の6本、乾燥側と湿潤側は  $490\text{kPa}$  を加えた7本を1組とした。一面剪断試験は  $\sigma = 20, 50, 100, 150, 200, 250, 300\text{kPa}$  の7本を1組とした。なお、各組の記号は最適含水比をO、乾燥側をD、湿潤側をW、正規圧密をNC、過圧密をOCで、三軸圧縮試験をT、定圧一面剪断試験をP、定体積一面剪断試験をVで、目標のD値を数値で与えている。

### 3 三軸圧縮試験結果

供試体の平均諸元と実験後の平均含水比  $w'$  を表 - 2 に示す。含水比のばらつきと緩詰め供試体ではモールドからの押し出し時に締まるため、目標のD値とやや差が生じた。最適含水比の供試体をOTで、乾燥側をDTで、湿潤側をWTで表示する。水浸のため、 $w_{opt}$  のD値100%では  $w' = 53\%$  で締め固め含水比より約2%大きいのみであるが、D値が80~70%では  $w' = 59\sim 61\%$  となり、水浸により8~9%含水比が大きくなっている。乾燥側と湿潤側の諸元も表 - 2 に示す。乾燥側(DT)では水浸により含水比が13~16%増加しているが、湿潤側(WT)では1~5%の含水比の増加である。D値=95~85%では実験後の含水比  $w'$  はOT,DT,WTともほぼ等しく、1~2%の差である。

表 - 1 : 試料土の物理的性質

土粒子の比重	2.733 g/cm <sup>3</sup>
砂分	26 ~ 44 %
シルト分	24 ~ 42 %
粘土分	25 ~ 32 %
液性限界	82.7 %
塑性限界	35.5 %
塑性指数	47.2 %
最適含水比	51.4 %
最大乾燥密度	1.091 g/cm <sup>3</sup>

表 - 2 三軸圧縮試験供試体の平均諸元

	実験前					実験後
	w %	$\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>	e	$S_r$ %	D 値 %	$w'$ %
OT100	50.77	1.088	1.511	91.8	99.8	52.98
OT 95	51.38	1.016	1.689	83.1	92.7	56.62
OT 90	49.78	0.980	1.789	76.1	90.3	57.11
OT 85	50.52	0.943	1.899	72.7	86.4	57.82
OT 80	50.53	0.901	2.034	67.9	82.6	59.25
OT 75	50.22	0.830	2.296	59.9	76.1	60.74
OT 70	50.34	0.792	2.451	56.2	72.6	61.01
DT 95	41.67	1.028	1.660	68.6	94.2	57.44
DT 90	42.61	0.973	1.809	64.4	89.2	59.78
DT 85	42.63	0.914	1.990	58.6	83.8	60.87
WT 95	55.77	1.036	1.636	93.1	95.0	55.96
WT 90	55.95	0.982	1.784	85.7	90.0	59.03
WT 85	56.51	0.936	1.919	80.5	85.8	61.15
NCT	100.21	0.700	2.911	94.1	64.2	62.41
OCT 6	99.31	0.699	2.909	93.3	64.8	56.90
OCT 3	93.49	0.733	2.729	93.6	68.5	61.51

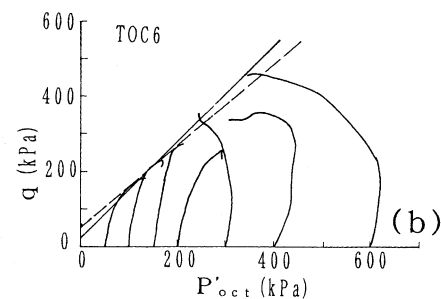
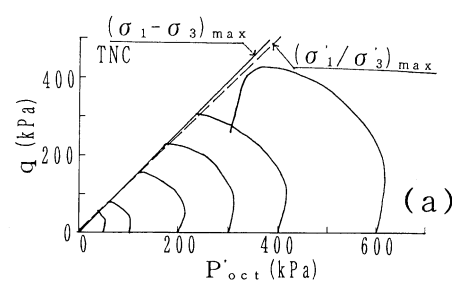


図 - 1 正規圧密と過圧密土の三軸圧縮試験での応力経路

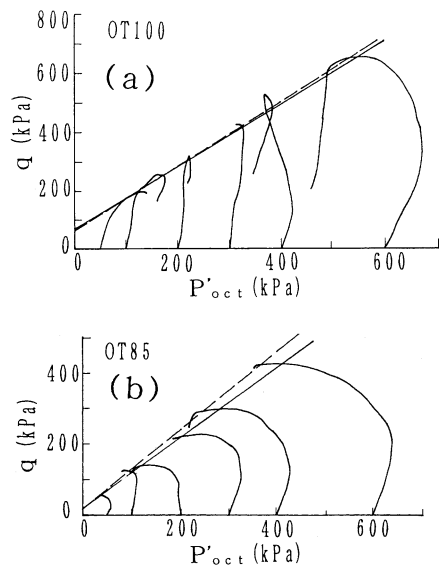


図-2 D値100%と85%の締固め土の三軸圧縮試験での応力経路

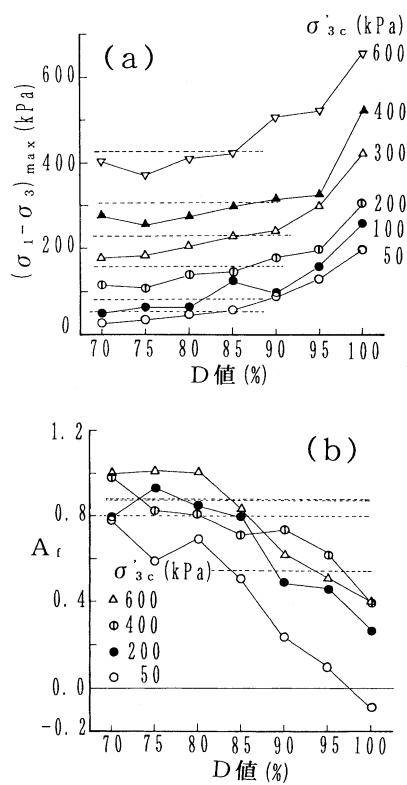


図-3 D値によるピーク強度と破壊時の間隙係数の変化 (図中の点線は正規圧密の値)

正規圧密 (TNC) と  $p_c = 589\text{kPa}$  の過圧密 (TOC6) の応力経路を図-1に示す。TNCはペーストから圧密しているため、全応力で  $p'_{oct}$  が減少する正規圧密の特徴があり、破壊基準を  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$  と  $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{max}$  のいずれでもほぼ等しい破壊包絡線になっている。TOC6では  $\sigma'_{3c}$  の増加とともに過圧密比OCRが小さくなるため、過圧密から正規圧密へと応力経路が変化している。締固め土のOT100とOT85の応力経路を図-2に示す。密なOT100では  $\sigma'_{3c}$

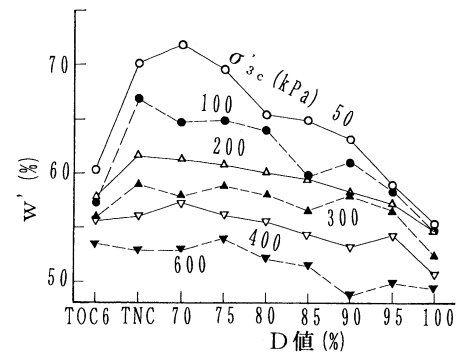


図-4 三軸圧縮試験供試体の実験後の含水比とD値の関係

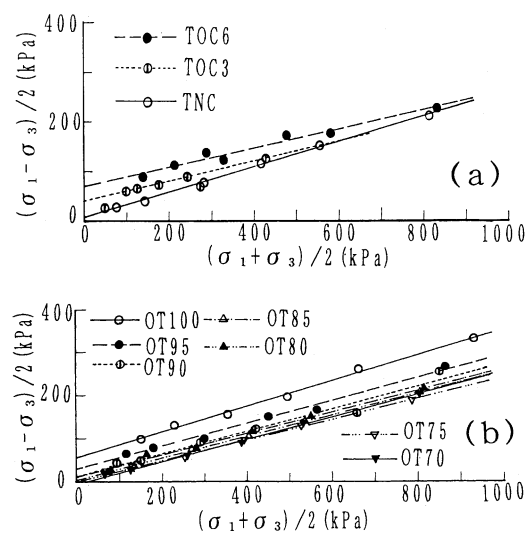


図-5 全応力での正規圧密、過圧密土と最適含水比での締固め土の強度特性

表-3: 三軸圧縮試験の強度定数

	全応力		有効応力1		有効応力2	
	$c_u$ kPa	$\phi_u$	$c'$ kPa	$\phi'$	$c'$ kPa	$\phi'$
OPT100	57.3	17.20	32.3	27.28	31.4	27.70
OT 95	29.1	15.24	19.8	24.47	18.7	27.83
OT 90	12.9	15.07	7.4	27.29	9.7	29.95
OT 85	13.0	14.28	7.5	25.63	7.0	28.32
OT 80	2.6	14.52	3.5	25.46	-4.2	29.84
OT 75	-0.9	13.82	-10.3	26.71	-1.0	27.46
OT 70	-7.3	15.17	-8.3	25.86	-5.1	31.28
DT 95	43.6	13.43	27.4	23.74	20.4	29.93
DT 90	25.3	13.77	19.5	24.27	17.6	27.40
DT 85	3.3	14.83	5.9	27.01	8.1	28.71
WT 95	77.6	15.08	66.1	21.88	51.5	25.27
WT 90	42.6	14.40	24.3	25.89	17.6	29.22
WT 85	16.3	14.49	4.9	27.33	10.1	29.06
NCT	5.4	15.28	1.8	31.70	4.0	31.04
OCT6	70.4	11.26	8.3	31.87	22.7	27.86
OCT3	30.1	13.87	1.5	32.88	2.9	32.43

有効応力1:  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$  での強度定数  
 有効応力2:  $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{max}$  での強度定数

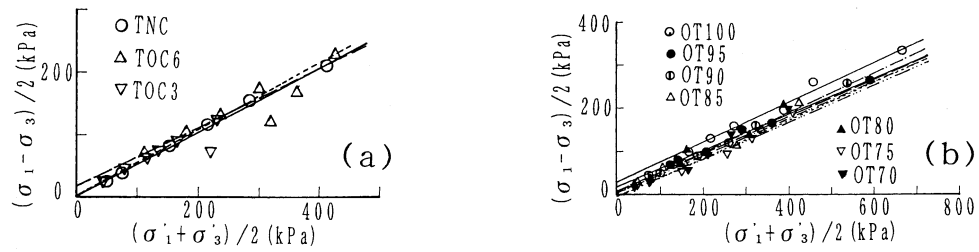


図 - 6 有効応力での正規圧密、過圧密土と最適含水比での締固め土の強度特性

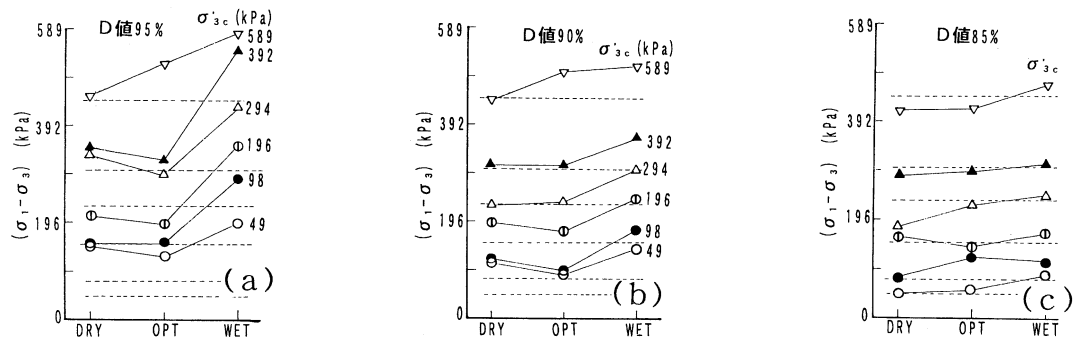


図 - 7 締固め含水比のピーク強度への影響

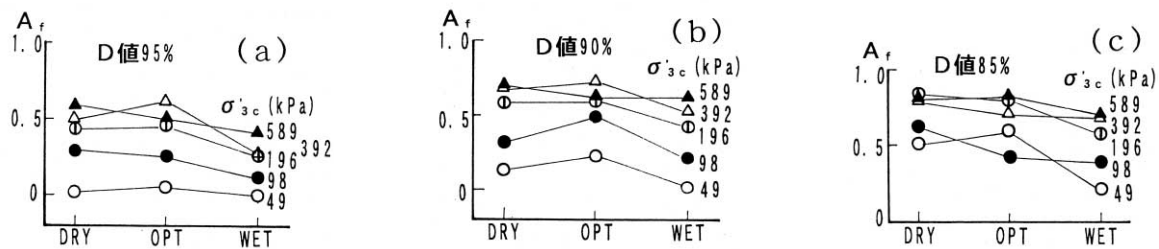


図 - 8 締固め含水比の破壊時の間隙圧係数  $A_f$  への影響

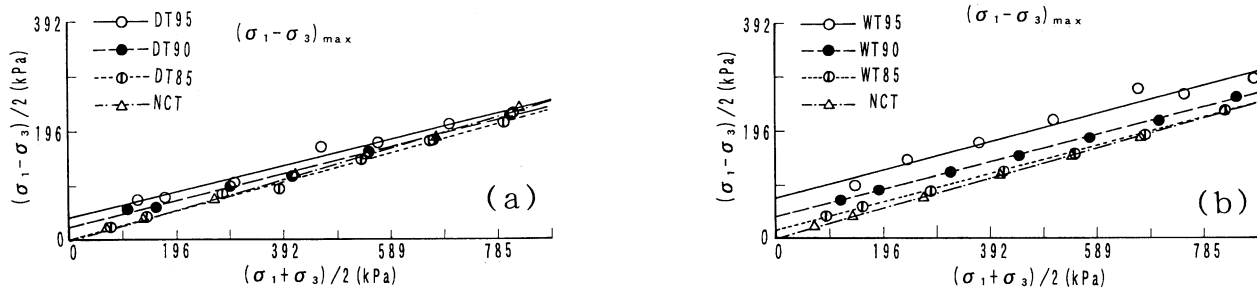


図 - 9 全応力での乾燥側と湿潤側の締固め土の強度特性

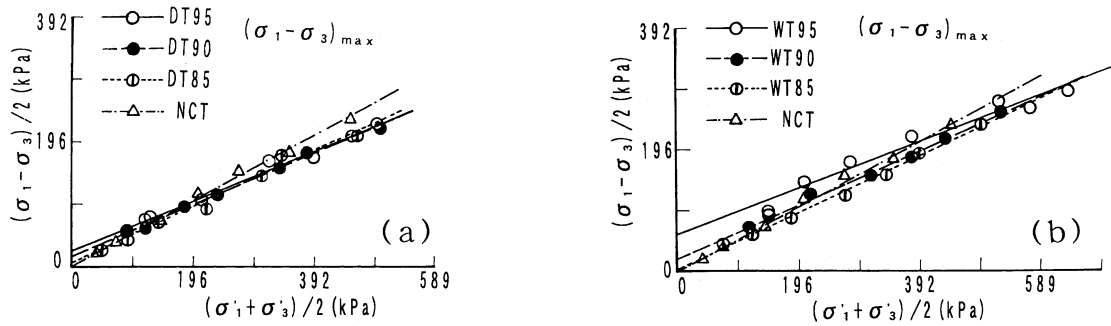


図 - 10 有効応力での乾燥側と湿潤側の締固め土の強度特性

= 589kPa を除いて過圧密の応力経路に類似しているが、D 値 85% の OT85 は正規圧密に類似した応力経路で、破壊包絡線は  $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{max}$  の方が大きな  $\phi'$  となる。同様の

傾向が乾燥側の DT と湿潤側の WT でも成立つ。

最適含水比での D 値とピーク強度  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$  の関係及び D 値と破壊時の間隙圧係数  $A_f = \Delta u_f / (\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$  の関係

を図 - 3 に示す。図 - 3 の点線は正規圧密の値である。図より D 値 85% の締固め土のピーク強度は水浸状態では正規圧密より小さくなる。また、 $A_f$  は D 値が 80% 以下では正規圧密より大きくなり、D 値 80~85% の締固めは水浸時には軟弱な正規圧密状態ないしそれ以上の軟弱な状態になることがわかる。D 値が 80% 以下になると D 値によるピーク強度の低下は僅かとなり、 $A_f$  もほぼ一定になる。これは D 値 80% では締固めの効果が殆どなく、非常に緩い締固め土は圧密と水浸によって大きな体積圧縮を生じて、D 値が 80% 程度になることを意味している。図 - 4 に実験後の含水比  $w'$  と D 値の関係を示すが、D 値が 80% 以下になると  $w'$  は正規圧密 (TNC) にほぼ等しくなる。

正規圧密、過圧密土と締固め土の全応力での破壊包絡線を図 - 5 に、強度定数を表 - 3 に示す。過圧密土は正規圧密の直線から折れ曲がった直線で近似され、先行圧密圧力の増加とともに折れ曲がりの応力が大きくなる。これに対して締固め土では D 値が 70~100% の範囲でいずれも 1 本の直線で近似され、D 値の増加とともに  $c_{cu}, \phi_{cu}$  が大きくなり、正規圧密、過圧密とは異なった傾向を示している。これは締固め土の剪断強度を正規圧密と過圧密の剪断特性の組み合わせでは表せないことを意味している。表 - 3 より D 値が 75%, 70% では粘着力  $c_{cu}, c'$  とともに負の値になっている。これは非常に緩い盛土では  $c=0$  と設計しても危険側になり、締固め不十分な場合は降雨時等に危険性が大きいことを示している。

有効応力での強度を  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$  とした場合の  $(\sigma'_1 + \sigma'_3) / 2$  と  $(\sigma_1 - \sigma_3) / 2$  の関係を図 - 6 に示す。正規圧密、過圧密の有効応力での破壊包絡線の差は小さい。締固め土の場合は D 値が 100~90% では締固めの効果ははっきりしているが、D 値 85% になると締固めの効果は殆どない。これは図 - 3 (a) の D 値と  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$  の関係からも明らかである。

締固め含水比の剪断特性への影響を D 値が 95, 90, 85% の場合について実験した。最適含水比 (OPT), 乾燥側 (DRY), 湿潤側 (WET) での  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$  を図 - 7 に示す。DRY と OPT での強度はほぼ等しいが、WET の強度は DRY と OPT より大きく、同じ D 値の締固めでは水浸時には湿潤側で締固めた方が安定性がよいことが明らかである。破壊時の間隙圧係数  $A_f$  を図 - 8 に示す。WET での  $A_f$  は DRY と OPT の  $A_f$  より小さく、これが WET の強度が大きくなる一原因である。

全応力での乾燥側と湿潤側の強度特性を図 - 9 に、 $w_{opt}$  での関係は図 - 5 (b) に示す。D 値が 95~85% では乾燥

側は湿潤側に比べて D 値による強度の差が小さい。図 - 9 には正規圧密の強度も示すが、乾燥側では  $(\sigma_1 + \sigma_3) / 2$  の増加とともに正規圧密の強度が締固めより大きくなるが、湿潤側では締固めの強度が正規圧密より大きい。締固めの破壊包絡線はいずれも 1 本の直線で近似でき、図 - 5 (a) のような正規圧密と過圧密での先行圧密応力による破壊包絡線の折れ曲がりは生じない。締固め土の応力経路の形は図 - 2 のように  $\sigma'_{3c}$  の増加とともに過圧密から正規圧密に変化し、締固め土の剪断特性は過圧密と正規圧密の組合せで表せるようにみえるが、破壊包絡線の形からはこの考え方は成立たないことが明らかである。

有効応力での乾燥側と湿潤側の  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$  での強度特性を図 - 10 に示す。乾燥側では D 値の効果は殆ど認められず、 $(\sigma'_1 + \sigma'_3) / 2 > 200kpa$  では正規圧密の方が大きな強度になっている。湿潤側では D 値の増加とともに強度が大きくなり、D 値 95% では  $(\sigma'_1 + \sigma'_3) / 2$  が 400kpa まで、D 値 90% では  $(\sigma'_1 + \sigma'_3) / 2$  が 240kpa までは締固めの方が強度が大きく、水浸時には湿潤側で締固めた土の方が安定性がよい。

#### 4 定圧一面剪断試験結果

供試体平均諸元と実験後の含水比  $w'$  を表 - 4 に示す。含水比のばらつきのため目標 D 値と僅かに差がある。実験後の含水比  $w'$  は D 値 = 100~90% で三軸の  $w'$  よりかなり大きい。これは圧密応力が三軸の  $\sigma'_{3c} = 49 \sim 589kPa$  に対して定圧一面剪断では  $\sigma_0 = 20 \sim 300kPa$  と低く、かつ低圧では剪断中に体積膨張が生じて含水比が増加したことによる。

最適含水比での定圧一面剪断試験による D 値 100%, 85% と正規圧密土の水平変位  $\Delta L$  と剪断応力  $\tau$  の関係を図 - 11 に示す。D 値 100% では  $\tau$  はピークに達したのち急減し、ほぼ一定値になる。 $\sigma = 100kpa$  の実験後の供試体は剪断面が分離し、鏡肌の状態になっている。D 値 85% の供試体では明瞭なピークは生ぜず、実験後も剪断面での分離は生じない。このため、 $\Delta L = 4.0mm$  では D 値 85% の方が大きな剪断抵抗力を示す。正規圧密では  $\sigma = 20 \sim 100kpa$  ではピークははっきりしないが、 $\sigma = 150kpa$  になるとピークが現れ、 $\sigma$  の増加とともにピークがはっきりしてくる。

D 値が 100~70% と正規圧密、過圧密での剪断強度を図 - 12 に示す。図中の点線は正規圧密の強度であるが、 $\sigma$  の増加とともに締固めより正規圧密の強度が大きくなっている。破壊包絡線を図 - 13 に、強度定数を表 - 5 に示

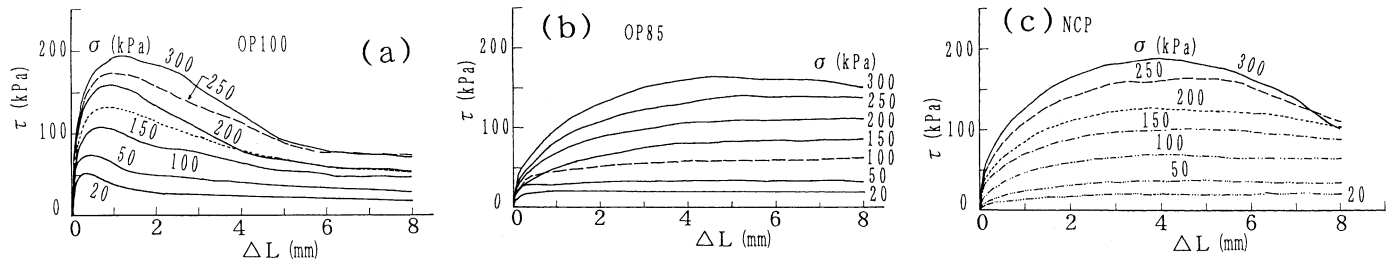


図 - 11 定圧一面剪断試験での締固め土と正規圧密土の水平変位と剪断抵抗力の関係

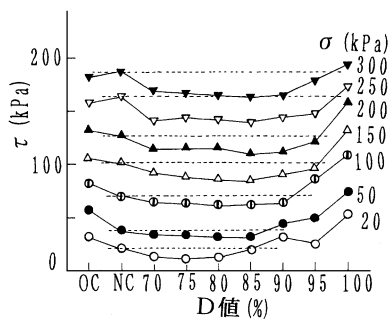


図 - 12 定圧一面剪断試験でのD値とピーク強度の関係  
(図中の点線は正規圧密の値)

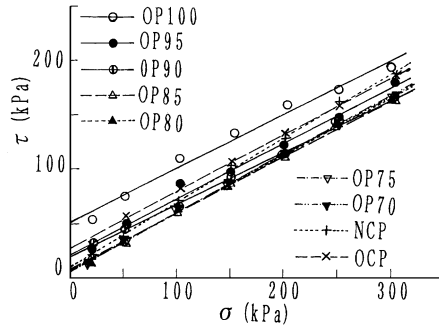


図 - 13 定圧一面剪断試験での強度特性

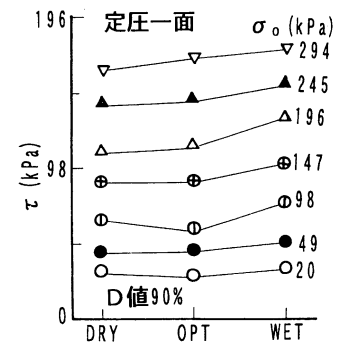


図 - 14 定圧一面剪断試験での締固め含水比による剪断強度の変化

表 - 4 定圧一面剪断試験供試体の平均諸元

	実験前					実験後 w'
	w %	$\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>	e %	S <sub>r</sub> %	D 値 %	
OP100	49.62	1.098	1.490	91.0	100.6	57.08
OP 95	50.37	1.038	1.634	84.2	95.1	58.13
OP 90	49.42	0.991	1.757	76.9	90.8	59.65
OP 85	48.91	0.938	1.915	69.8	86.0	60.20
OP 80	49.21	0.877	2.112	63.6	80.4	60.93
OP 75	49.24	0.820	2.321	58.0	75.2	61.20
OP 70	49.96	0.891	2.558	53.4	70.4	60.64
DP 95	42.14	1.042	1.624	70.9	95.5	55.84
DP 90	42.27	0.985	1.775	65.1	90.3	57.18
DP 85	42.13	0.933	1.930	59.6	85.5	58.04
WP 95	55.63	1.035	1.639	92.7	94.9	56.80
WP 90	55.34	0.989	1.763	85.8	90.7	58.63
WP 85	55.85	0.931	1.935	78.9	85.4	60.61
NCP	70.47	0.891	2.073	93.1	81.7	56.23
OCP	72.67	0.906	2.015	98.6	83.0	59.15

表 - 5 : 定圧一面剪断試験の強度定数

	c kPa	$\phi$
OP100	50.2	26.48
OP 95	21.7	27.04
OP 90	19.0	25.74
OP 85	7.7	27.63
OP 80	5.6	28.27
OP 75	6.3	28.49
OP 70	7.9	27.99
DP 95	28.3	24.60
DP 90	15.5	27.02
DP 85	11.8	27.99
WP 95	27.4	29.28
WP 90	24.9	27.16
WP 85	12.7	27.93
NCP	9.8	30.67
OCP	26.3	27.59

す。定圧一面剪断試験は排水するため、結果は有効応力のみである。D 値 90% 以上では締固めの効果があるが、D 値が 85% 以下では締固めの効果が少ない。また三軸のように  $c' < 0$  とはならないが、D 値が 85% 以下では  $c'$  は小さい。図中に正規圧密と過圧密もプロットしたが、 $\sigma$  の増加とともに正規圧密の強度が締固め土の強度より大きくなっている。これは正規圧密土の  $\phi$  が締固め土より大きいためである。

締固め含水比による剪断強度の差を D 値 90% の場合に

ついて図 - 14 に示す。定圧一面剪断試験では垂直応力  $\sigma_v$  は一定で乾燥密度も等しいから、強度の差は締固め含水比による締固め土の構造の差によると考えられる。定圧一面剪断試験でも三軸圧縮試験と同様に水浸時には湿潤側での締固め土の方が安定している。

乾燥側と湿潤側で D 値が 90% の場合の破壊包絡線を図 - 15 に示す。乾燥側の水浸状態では締固めの効果が小さいが、湿潤側では締固めの効果ははっきりしている。

5 定体積一面剪断試験結果

供試体平均諸元と実験後の含水比を表 - 6 に示す。含水比のばらつきにより目標値と D 値に僅かに差がある。実験後の含水比  $w'$  を定圧と比較すると D 値 = 100 と 95% では定圧の方が高く、D 値が 85% 以下では定体積の方が  $w'$  が高く、剪断中の体積膨張と圧縮の影響が  $w'$  に影響している。

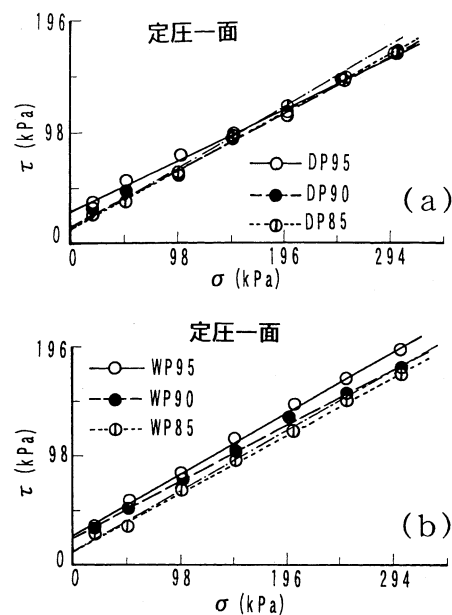


図 - 15 定圧一面剪断試験での乾燥側と湿潤側での強度特性

表 - 6 定体積一面剪断試験供試体の平均諸元

	実験前					実験後
	w %	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	e %	$S_r$ %	D 値 %	
OV100	50.03	1.096	1.494	91.5	100.4	54.14
OV 95	50.04	1.042	1.623	84.3	95.5	56.63
OV 90	49.16	1.000	1.739	77.3	91.5	60.15
OV 85	49.47	0.934	1.925	70.2	85.6	63.27
OV 80	49.35	0.878	2.112	63.8	80.5	63.09
OV 75	48.74	0.830	2.293	58.1	76.1	64.03
OV 70	49.71	0.767	2.589	53.0	70.3	64.77
DV 95	40.78	1.054	1.592	70.0	96.6	55.33
DV 90	41.25	0.993	1.752	64.3	91.0	57.64
DV 85	42.69	0.929	1.943	60.0	85.1	60.23
WV 95	55.24	1.041	1.627	92.8	95.5	55.49
WV 90	55.45	0.988	1.767	85.7	90.5	59.45
WV 85	55.96	0.931	1.935	79.0	85.3	61.86
NCV	72.27	0.910	2.004	98.7	83.4	3.79
OCV	71.71	0.905	2.021	95.9	83.0	59.40

定体積一面剪断試験では剪断中の体積を一定に保つように  $\sigma$  を増減させる。図 - 16 は正規圧密 (NCV) と  $\sigma_0 = 300$  kPa で先行圧密した過圧密 (OCV) の応力経路である。正規圧密と過圧密比 OCR = 2 の場合は剪断中に  $\sigma$  が減少し OCR > 2.0 では  $\sigma$  が増加している。最適含水比で D 値が 95% (OV95) と 80% (OV80) での応力経路を図 - 17 に示す。OV95 の応力経路は OCV に似ているが  $\sigma = 20, 50, 100$  kPa での  $\sigma$  の増加割合が OCV よりかなり小さい。OV80 の応力経路は正規圧密と類似しているが、 $\sigma$  の減少

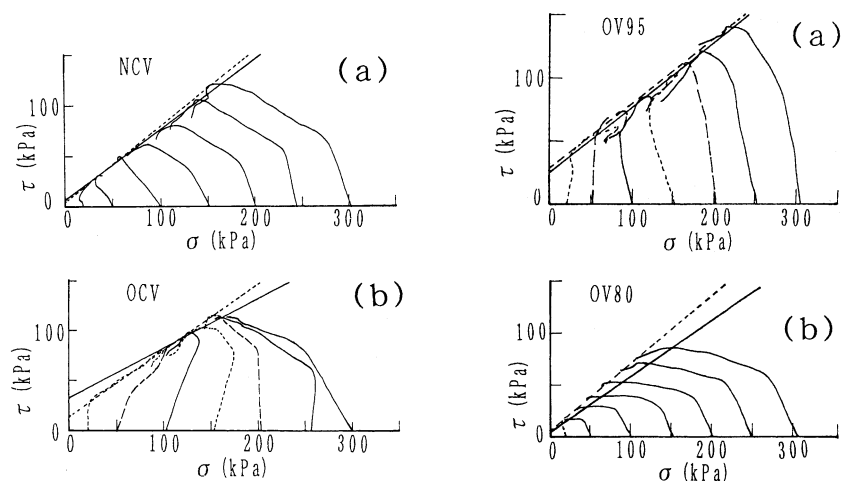


図 - 16 定体積一面剪断試験での正規圧密と過圧密土の応力経路

図 - 17 定体積一面剪断試験での密と緩い締固めでの応力経路の比較 (実線は  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ , 点線は  $(\sigma_1' / \sigma_3')_{max}$  での破壊包絡線)

表 - 7 定体積一面剪断試験の強度定数

	全応力		有効応力 3		有効応力 4	
	$c_{cu}$ kPa	$\phi_{cu}$	$c'$ kPa	$\phi'$	$c'$ kPa	$\phi'$
OV100	74.2	20.70	36.3	29.52	44.7	27.76
OV 95	55.7	15.11	23.8	27.33	27.7	27.11
OV 90	29.0	13.57	13.7	26.46	8.7	31.14
OV 85	15.5	11.78	7.4	24.33	6.3	32.16
OV 80	6.7	13.67	3.5	28.37	5.1	33.18
OV 75	1.8	15.11	0.3	30.05	3.4	33.48
OV 70	0.3	15.43	3.7	29.09	2.7	33.95
DV 95	51.1	16.49	23.5	26.12	24.4	26.95
DV 90	38.1	9.42	17.3	24.28	12.5	29.51
DV 85	16.7	14.23	7.7	30.69	5.2	33.91
WV 95	33.7	23.37	19.6	32.88	20.7	32.70
WV 90	46.3	15.49	18.0	29.74	21.5	28.99
WV 85	25.3	14.47	12.0	28.23	10.3	31.27
NCV	12.6	19.90	6.5	34.73	4.7	36.70
OCV	81.6	6.84	32.0	26.19	13.5	33.65

有効応力 3 :  $\tau_{max}$  での強度定数

有効応力 4 :  $(\tau/\sigma)_{max}$  での強度定数

量がNCVより大きく、正規圧密より軟弱である。

D値と $\tau_{max}=\tau$ の関係を図-18に示す。図中には正規圧密(NC)もプロットしたが、D値<90%ではNCより締固め土の方が $\tau$ は小さい。これは剪断中の $\sigma$ の減少量が締固め土の方が大きいことが第1の原因である。図-19に締固め含水比と剪断強度 $\tau$ の関係を示す。湿潤側での締固めの方が大きな剪断強度となっている。

剪断強度を $\tau_{max}$ とした場合の垂直応力 $\sigma$ (有効応力)および圧密応力 $\sigma_0$ (全応力)での破壊包絡線へのD値の影響を図-20に、強度定数を表-7に示す。定体積一面剪断試験は圧密非排水試験に相当するため、有効応力での

強度は $\tau_{max}$ と $(\tau/\sigma)_{max}$ で異なる。ここでは $\tau_{max}$ の強度のみを示す。有効応力の強度ではD値が90%以上で締固めの効果が顕著となる。全応力ではD値が85%以上では締固めの効果が顕著である。

乾燥側と湿潤側の全応力での破壊包絡線を図-21に示す。定体積一面剪断試験では垂直変位 $\Delta H$ を0に保つために剪断中に $\sigma$ を調節するが、 $\Delta H$ を $1\mu m$ 以下に調節しても $\sigma$ の変化にはらつきが生じ、これが全応力の破壊包絡線に影響している。有効応力での破壊包絡線を図-22に示す。乾燥側より湿潤側の方が締固めの効果が大きい、三軸圧縮試験や定圧一面剪断試験に比べて湿潤側の締固

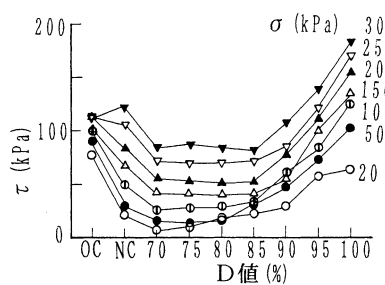


図-18 定体積一面剪断試験でのD値とピーク強度の関係

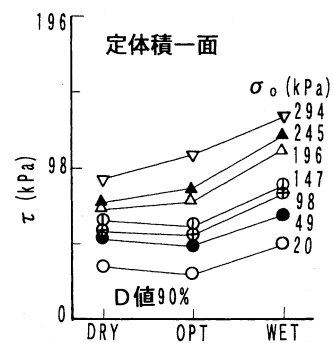


図-19 定体積一面剪断試験での締固め含水比とピーク強度の関係

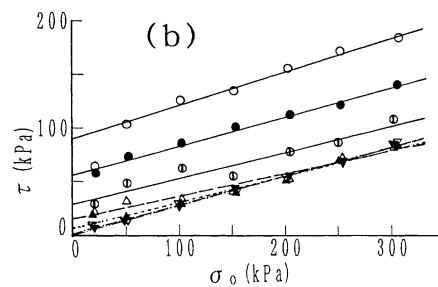
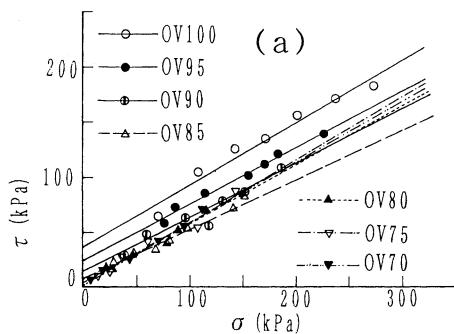


図-20 定体積一面剪断試験での有効応力 $\sigma$ 、全応力 $\sigma_0$ での強度特性

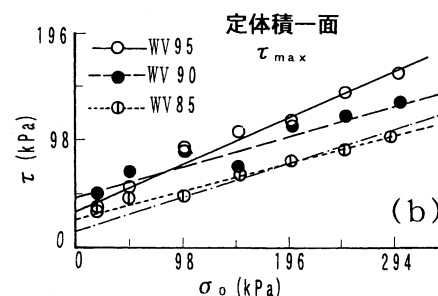
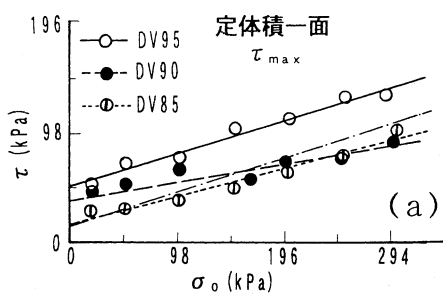


図-21 全応力での定体積一面剪断試験の強度特性への締固め含水比の影響

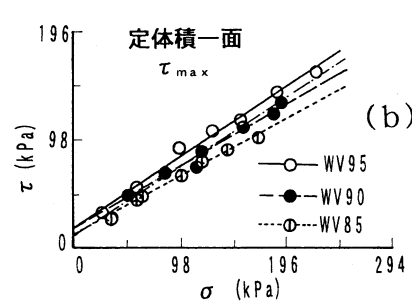
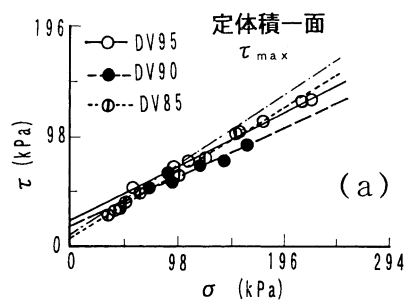


図-22 有効応力での定体積一面剪断試験の強度特性への締固め含水比の影響



めの効果が小さくなっている。図中の鎖線は正規圧密の破壊包絡線である。この場合も乾燥側より湿潤側の方が正規圧密に対して大きな強度になる  $\sigma$  の範囲が大きく、水浸状態では湿潤側の締固め土の方が安定性がよい。

## 6. あとがき

締固め土と正規圧密、過圧密土の剪断特性の比較の一部として、大山ロームを用いて三軸圧縮試験と一面剪断試験を行った。この結果より

1. D 値 90% での締固めでの応力経路は圧密応力  $\sigma'_{3c}$ ,  $\sigma'_0$  の小さい範囲では過圧密の、大きくなると正規圧密と類似しているが、全応力での締固め土の破壊包絡線は D 値が 100% ~ 70% の範囲でそれぞれ 1 本の直線で近似でき、正規圧密と過圧密のように先行圧密応力での折れ曲がりはない。

2. 締固めの効果ははっきりしているのは D 値が 90% 以上の締固め土であり、D 値が 85% 以下の締固め土は水浸状態では正規圧密土より剪断強度が小さくなる。これは三軸圧縮試験では正規圧密土より大きな間隙水圧の生じることが、定体積一面剪断試験では垂直応力  $\sigma$  が大きく減少することが第 1 の原因である。しかし、定圧一面剪断試験でも D 値が 85 ~ 90% 以下では締固め土の方が正規圧密土より剪断強度が小さく、締固め土の構造も剪断強度に影響していると考えられる。

3. 最適含水比、乾燥側、湿潤側での締固め土の剪断強度を比較すると、D 値が等しい場合は、水浸状態では湿潤側が最も大きな剪断強度になる。この原因には間隙圧係数  $A_r$  が小さいことがあるが、定圧一面剪断試験でも湿潤側が大きな剪断強度であり、締固め土の構造の影響も認められる。故に水浸状態では湿潤側の締固め土の方が最適含水比ないし乾燥側より安定している。

4. 内部摩擦角  $\phi'$  は正規圧密土の方が締固め土より大きく、締固めの効果は主に粘着力  $c'$  に現れる。 $c'$  は D 値の減少とともに小さくなり、D 値が 75、70% では  $c' < 0$  となる。これは締固めが不十分な土の表面は  $c' = 0$  とした場合より剪断強度が小さく、締固め不十分な盛土の表層は降雨等によって水浸状態になった場合は安定性が大きく低下することを意味している。また正規圧密の  $\phi'$  の方が大きいため、 $\sigma'_{3c}$ ,  $\sigma'_0$  の増加とともに正規圧密土の強度が締固め土より大きくなる。

5. 三軸圧縮試験と一面剪断試験での  $\phi'$  はばらつきの範囲でほぼ等しく、 $c'$  は一面剪断試験の方がやや大きくなる傾向にある。三軸圧縮試験では 3 日間透水後、1 日間背圧

$u_b = 98\text{kPa}$  を加えて飽和度を高めたが、一面剪断試験では供試体上部から透水したのみであり、水浸状態でも三軸圧縮試験より飽和度が低いため、 $c'$  が大きめになったものと考えられる。

締固め土の圧密での  $e \sim \log p$  曲線は先行圧密応力  $p_c$  以下では過圧密の、それ以上では直線で正規圧密の特性を示す。このため、締固め土の剪断特性も正規圧密と過圧密を組合わせて表わされるとする考え方<sup>5,6)</sup> が一般的である。これに疑問を感じて、藤の森粘土<sup>1,2)</sup>、まさ土<sup>3)</sup>、砂と藤の森粘土の混合土<sup>4)</sup>、今回のロームを用いて比較実験を行ってきた。いずれの土でも締固め土では D 値にかかわらず、全応力の破壊包絡線は 1 本の直線で近似でき、正規圧密と過圧密を組合せたような傾向にはならない。ペーストからの正規圧密、過圧密土は締固め土とは異なる構造を持っており、これが異なる剪断特性を示す原因と考えられる。

締固め土の  $e \sim \log p$  曲線は一見、過圧密と正規圧密の曲線に類似しているが、練返しした飽和粘土の  $e \sim \log p$  曲線の方がより良く締固め土の曲線に類似していると思われる。練返し土は練返しによって構造を破壊される。このため、先行圧密応力の大きさ、即ち練返し時の含水比によって  $e \sim \log p$  曲線の湾曲点の応力（見かけの先行圧密応力）が異なってくる。締固め土を締固めることは土が持っている構造を破壊してより密にすることであるから、土の構造に対する作用としては練返しとほぼ同じである。したがって、締固め土の  $e \sim \log p$  曲線も練返し土に類似するはずである。故に剪断特性は正規圧密と過圧密を組合せたものとは異なっている。多分、練返し含水比（先行圧密応力）を異にする練返し土の剪断特性に類似した強度特性を示すものと考えられる。このためにはペーストからの正規圧密土を練返しした供試体での実験が必要である。残された時間が少ないため、この実験ができるかどうかは今後の気分次第であろう。

盛土の施工は最適含水比ないし乾燥側では締固めが不十分でも硬く、施工性がよいため、剪断強度が大きく、湿潤側の締固めでは土は軟弱になり、施工性が悪いため、剪断強度が小さいものと一般に思われている。しかし乾燥側で締固めた土は降雨や水浸によって沈下を生じたり、表層が非常に軟弱になることもよく知られている。さらに盛土は降雨や地下水の浸透によって飽和するとすべり破壊を生じることもある。この場合、乾燥側での盛土の剪断強度は大きく低下することを設計の段階で考慮しておく必要がある。

乾燥側に比べて湿潤側での施工は施工性が悪いため、

施工能率の低下、工事費の増加を招くが、盛土の完成後の降雨や地下水の浸透時の剪断強度の低下は少なく、水浸時の沈下も少ないから盛土の長期安定からは有利であり、施工可能な範囲で高含水比の盛土の施工も検討する価値があると思われる。

なお本実験を行うに際しては平成11年度と12年度の島根大学生物資源科学部地域開発科学科地域環境工学講座の専攻生の岩本隆美君、榊田美貴子君、渡部千穂君、佐藤真弓君、石原健吾君、鈴木 勉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) 鳥山暁司：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.
- 2) 鳥山暁司：正規圧密・過圧密と密度をかえた締固め藤の森粘土の剪断特性の比較、島根大生物資源科学部研報、4, 59 - 64, 1999.
- 3) 鳥山暁司：締固めたまさ土と正規、過圧密まさ土の剪断特性の比較、島根大生物資源科学部研報、5, 19 - 26, 2001.
- 4) 鳥山暁司：正規圧密・過圧密と締固めた砂質粘土の剪断特性の比較、平成8年度ダム研究委員会報告書、農業土木学会、93 - 109, 1997.
- 5) 太田秀樹、伊藤雅夫、石黒 健、米谷 敏：締固められた粘性土の先行圧縮応力と強度の推定、土木学会論文集、436/Ⅲ - 16, 27 - 36, 1991.
- 6) 成田国朝、山口雅弘：締固めた土の先行圧縮特性と斜面安定評価について、ダム工学、9 - 1, 13 - 20, 1999.