

## 凝灰岩よりの砂と粘土の締固め混合土の剪断特性

鳥 山 暁 司\*

---

The Shearing Properties of Compacted Mixed Soil with  
Tuffaceous Sand and Clay  
Koushi TORIYAMA

---

### Synopsis

The consolidated undrained compression tests were performed for the experiment of shearing properties of compacted mixed soil with tuffaceous sand and clay under non-adsorbed and adsorbed condition. The following results are obtained from these tests.

- (1) The pore pressure coefficient  $A_f$  of the mixed soil is relatively greater than normal compacted clayey soils.
- (2) The shearing strength is decreased by adsorption over 10% wet side of optimum moisture content  $w_{opt}$ .
- (3) The shearing parameter for effective stress  $c'$  and  $\phi'$  is constant for wet side of  $w_{opt}$  eventhough the compacted moisture content and adsorbed condition are changed.

### 1. ま え が き

近年はフィルダムの建設地点が少なくなり、材料も周辺から良質なものが得られない場合が多くなってきた。このような場合、遮水材料は2種の土を混合して遮水性を確保するとともに、力学的性質を改良する混合工法が採用される。中国四国農政局で建設中のNダムは角礫凝灰岩と火山灰性粘土のみが周辺から得られる材料である。このうち、角礫凝灰岩は腐れ礫を20~30%程度含んでいるが、この礫の大部分はハンマーの打撃で砕けて砂になってしまうもので、他は採取時に完全に砂質土になっており、実際は礫混り砂質土である。また、火山灰性粘土は自然含水比70~80%のもので、このままの状態では施工性が非常に悪い。このような火山起原の砂と粘土を混合して遮水材料としたフィルダムは非常に少ないと思われる。また、このような混合土の力学的性質についてはほとんど実験されていない。そこで砂と粘土を乾燥重量で1:1の混合土を用い、自然含水比近くの含水比での締固め土の圧密、透水、剪断特性の実験を行った。こ

のうち、圧密、透水特性については別報<sup>(1)</sup>に示すように、不飽和の影響が圧密特性に顕著に影響している。透水性については透水試験から求めた透水係数と圧密から求めた透水係数はほぼ等しいことを明らかにした。

ここでは締固め混合土の剪断特性について示すが、一般の締固め土に比べて、混合土の特異な性質は剪断中の間隙圧の発生量が大きいこと、最適含水比  $w_{opt}$  の10%程度湿潤側まで、水浸による軟化が生じることを明らかにした。

### 2. 試料土と実験方法

実験に用いた試料土は角礫凝灰岩の4.76 mm 以下の通過分と火山灰性粘土である。角礫凝灰岩は実験室に搬入された状態では完全に砂質土になっており、20~30%の礫を含んでいる。この礫の大部分は腐れ礫で、ハンマーの打撃で砂になってしまうものである。このような礫は転圧時に破碎されること、20~30%の礫率では礫は砂以下の土中に点在する形で存在し、礫相互の骨格構造は形成しないから剪断特性に影響をほとんど与えないもの

\* 農村工学講座

と考えられる。したがって、4.76 mm 以上の礫を除いた試料土が全試料土の力学的性質を代表していると考えられる。次に粘土は自然含水比70~80%であり、団塊状になっており、礫はほとんど含んでいない。

火山灰性粘土は乾燥により土性が変化するとされていること<sup>(2)</sup>、実際の施工では自然含水比で撒き出すため、実験でも自然含水比を基準に試料土の含水比を調整した。凝灰岩よりの砂は自然含水比で 4.76 mm ふるい通過分が容易に得られたが、粘土は団塊状であるため、手で 1 cm 以下に碎き、礫も除却した。

試料土は砂と粘土の乾燥重量が5:5となるように計量し、人力で十分に混合した。自然含水比は約40%となったため、これ以上の高含水比の試料土は混合土に水を加えて、さらに混合した。また自然含水比以下の試料土は混合土を鉄板にひろげ、室内で乾燥させた。混合土は二重のビニール袋に入れて1週間以上置いた後に実験に用いた。混合土と砂、粘土の物理的性質を表-1に示す。

剪断試験は全て三軸圧縮装置で圧密非排水試験として行った。供試体は直径 5 cm のモールドで、標準締固め仕事量に等しい仕事量で締固めた。これを三軸セルにセット後、 $\sigma_{3c}' = 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 \text{ kgf/cm}^2$  で1日間圧密した。上面より排水、下面で間隙圧を測定した。1日間で間隙圧は消散している。したがって、上下両面からの排水では1日間で十分に圧密が生じている。

フィルダム遮水ゾーンは湛水後、貯水や地山地下水の浸透などにより、水浸状態となる。そこで、非水浸状態とともに、1日間、供試体底面から給水、上面から排水し、さらに背圧  $u_b = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$  を作用させた水浸状態の供試体についても剪断試験を行った。剪断速度  $\dot{\epsilon} = 0.2\%/min$  とした。粘土が高含水比のため、剪断中にピークの生じない供試体がある。この場合、フィルダムの変形は大きな値を許されないため、 $\epsilon = 10\%$  の点の偏差応力を圧縮強度  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  とした。なお、供試体諸元の平均値を表-2に示す。

### 3. 実験結果と考察

三軸圧縮試験での応力-ひずみ関係の例を図-1に示す。図-1(a)は非水浸状態を、(b)は水浸状態である。実験に用いた試料土の含水比はいずれも  $w_{opt}$  の湿潤側であるが、図-1のNEは含水比の最も低い試料土であるため、水浸による強度低下がはっきりとあらわれている。この強度低下は圧密圧力  $\sigma_{3c}'$  が大きくなるほど顕著である。この原因は剪断中に生じる間隙圧  $\Delta u$  による。図-2にNEの  $\Delta u$  とひずみの関係を示す。非水浸供試体では  $\sigma_{3c}' \leq 3.0 \text{ kgf/cm}^2$  では  $\Delta u \leq 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_{3c}' = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$  で  $\Delta u \leq 1.3 \text{ kgf/cm}^2$  であるが、水浸供試体では  $\sigma_{3c}'$  の増加とともに  $\Delta u$  が大きく増加している。なお、非水浸  $\sigma_{3c}' = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$  の供試体は図-1(a)に示すように、ピーク強度に達した後、 $\sigma_1 - \sigma_3$  が急減し、図-2(a)より、このあたりから、間隙圧が増加しているが、この原因ははっきりしない。

破壊時の間隙圧係数  $A_f = \Delta u_f / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$  と  $\sigma_{3c}'$  の関係を図-3に示す。非水浸、水浸供試体とも、 $\sigma_{3c}'$  の増加とともに  $A_f$  が増加する。 $\sigma_{3c}' = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$  では  $A_f = 0.2 \sim 0.6$  であり、含水比の高い場合は鋭敏比<sup>(3)</sup>の小さな正規圧密粘土に近い間隙圧係数となる。一般の

表-1 試料土の物理的性質

試料土	混合土	砂	粘土
$w_L$ (%)	63.9	NP	90.0
$w_P$ (%)	28.1	NP	53.1
$I_P$	35.8		36.9
$G_s$	2.690	2.653	2.695
2 mm以上 (%)	7.6	13.6	1.5
砂分 (%)	40.7	60.6	20.8
シルト分 (%)	23.4	14.9	31.9
粘土分 (%)	28.3	10.9	45.8
$w_{opt}$ (%)	31.4	—	—
$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.379	—	—

表-2 供試体諸元

供試体	$w$ (%)	$\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$e$	$S_r$ (%)	実験後 $w$ (%)	
						非水浸	水浸
NA	40.56	1.779	1.272	1.116	96.21	37.12	37.94
NB	45.62	1.746	1.199	1.244	98.69	38.39	38.40
NC	43.42	1.754	1.223	1.200	97.31	37.47	37.95
ND	39.34	1.765	1.267	1.125	94.11	37.78	38.61
NE	36.21	1.748	1.283	1.097	88.80	37.63	40.39
NF	41.32	1.777	1.257	1.140	97.53	37.57	38.88

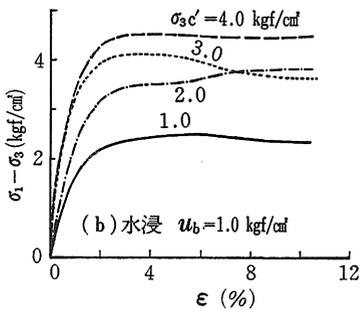
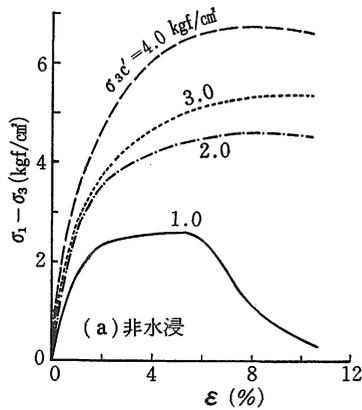


図-1：応力-ひずみ関係 (NE)

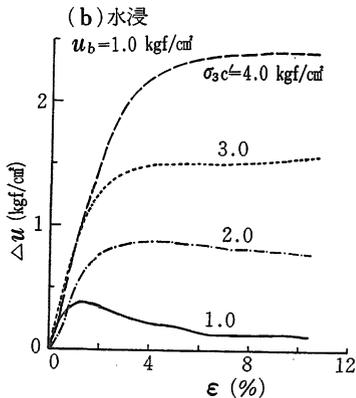
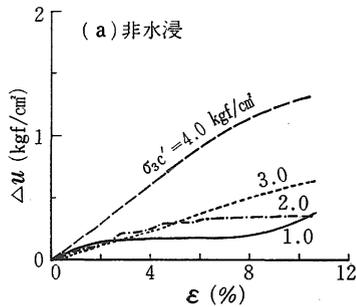


図-2：間隙圧-ひずみ関係 (NE)

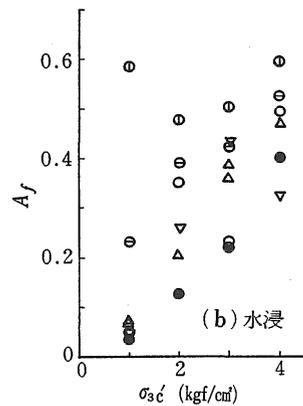
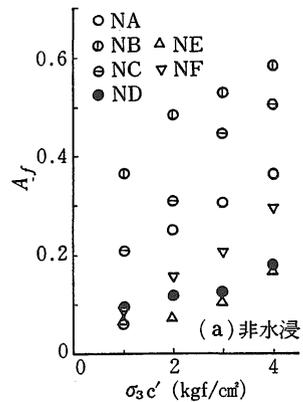


図-3：間隙圧係数  $A_f$  と圧密圧力の関係

締固め土では  $A_f \leq 0$  ないし 0.1 程度であって、実験に用いた混合土が剪断中に間隙圧が生じやすいことを示している。

平均締固め含水比  $w$  と  $A_f$  の関係を図-4 に示す。非水浸供試体では、 $w$  が大きくなると  $A_f$  も大きくなっている。これに対して、水浸供試体では  $\sigma_{3c'} = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$  では  $A_f$  は  $w$  にほとんど関係なく、 $\sigma_{3c'} = 1 \sim 3 \text{ kgf/cm}^2$  では  $w \approx 40\%$  附近に  $A_f$  の最小値が存在するような傾向を示す。図-5(b) に水浸供試体の圧縮強度  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  と  $w$  の関係を示すが、水浸供試体では  $w \approx 40\%$  で  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  が最大値を示しており、 $A_f$  の最小値と対応している。非水浸供試体では、図-5(a) に示すように、 $w$  の増加とともに  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  は減少している。表-2 の供試体諸元で、実験後の含水比より、非水浸供試体はいずれも  $w = 37 \sim 38.5\%$  である。しかるに水浸供試体では NE が初期の  $w = 36.2\%$  から水浸実験後、 $w = 40.4\%$  となり、他の水浸供試体の  $w = 37.5 \sim 39\%$  より含水比が高くなっている。このことから、初期  $w = 36.2\%$  の NE 供試体は水浸により吸水して

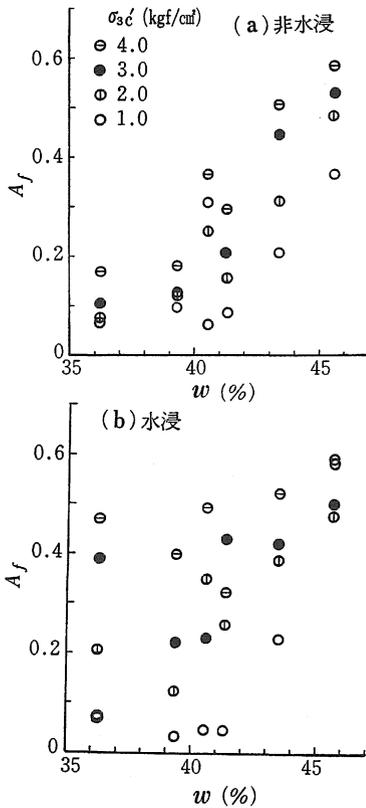


図-4：締固め含水比と間隙圧係数の関係

軟弱化し、剪断強度が大きく減少したことになる。 $w = 39.3 \sim 41.3\%$ の供試体も実験後の含水比が非水浸に比べ、水浸の方が0.8~1.2%大きく、水浸により軟化が生じていることがわかる。試料土は全て最適含水比の湿潤側にあるにもかかわらず、火山灰性の混合土では含水比が低い場合に吸水傾向を示すことは、水浸による強度低下および施工時の降雨による軟弱化の生じやすいことを示しており、これが現場での降雨時のトラフィカビリティーの悪化になってあらわれていると考えられる。

圧縮強度の結果を有効応力について図-6に示す。有効応力での $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ と $\frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_3')_f$ の関係への締固め含水比の影響はほとんど認められない。非水浸供試体では水浸供試体より大きな応力範囲まで実験値が存在するが、 $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ と $\frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_3')_f$ はほとんど同じ関係となっている。各含水比に対して求めた有効応力での強度定数 $c'$ 、 $\phi'$ を表-3に、 $c'$ 、 $\phi'$ と締固め含水比の関係を図-7(a)に示す。この図より、 $w = 41.3\%$ の供試体のみ他と大きな差があるが、これは実験結果のわずかなばらつきが、 $c'$ 、 $\phi'$ に影響しているためである。これを除くと、 $c'$ は $w$ の増加とともに減少し、 $\phi'$ はやや

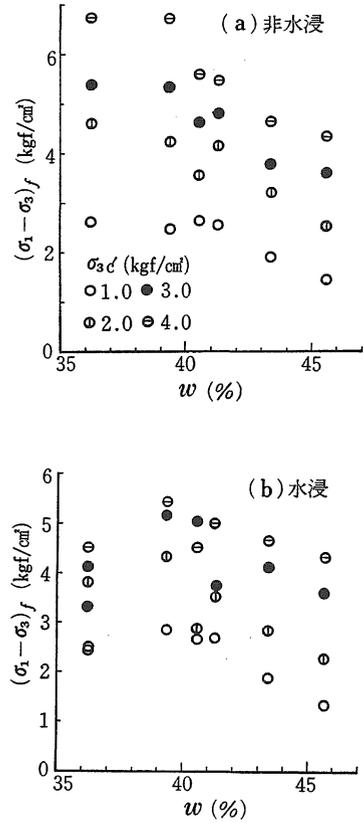


図-5：圧縮強度と締固め含水比の関係

表-3 三軸圧縮試験強度定数

		CU		CU	
		$c'$ kgf/cm <sup>2</sup>	$\phi'$ 度	$c_{cu}$ kgf/cm <sup>2</sup>	$\phi_{cu}$ 度
NA	非水浸	0.157	34.07	0.572	19.37
	水浸	0.172	32.49	0.611	17.36
NB	非水浸	0.066	35.71	0.203	18.87
	水浸	0.129	34.34	0.107	19.95
NC	非水浸	0.071	35.54	0.405	18.30
	水浸	0.071	36.37	0.346	19.01
ND	非水浸	0.288	30.04	0.392	24.22
	水浸	0.131	34.58	0.824	17.74
NE	非水浸	0.317	29.40	0.488	23.60
	水浸	0.276	29.18	0.741	14.44
NF	非水浸	0.404	28.04	0.652	19.01
	水浸	0.534	24.84	0.726	15.55

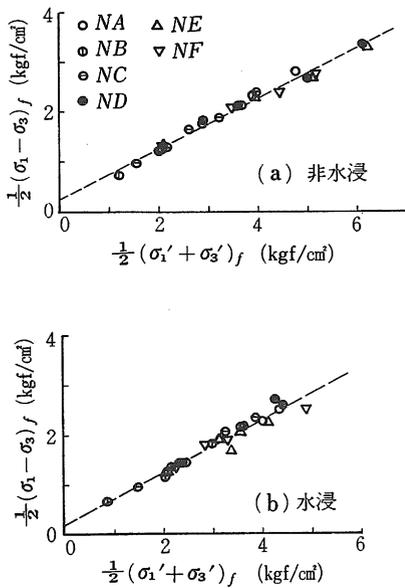


図-6：有効応力での強度特性

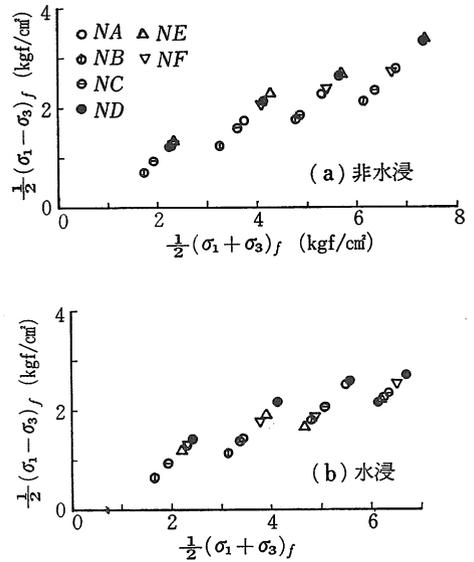


図-8：全応力での強度特性

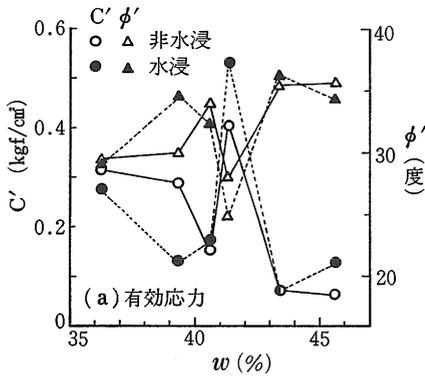


図-7(a)

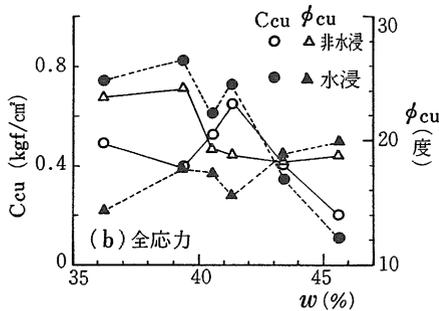


図-7：強度定数と締固め含水比の関係

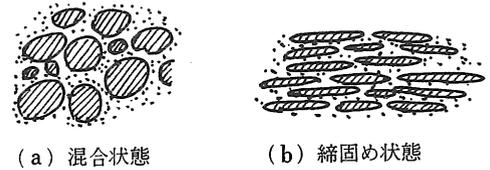


図-9：混合土中の粘土塊の状態

増加する傾向にある。全体での  $c'$ ,  $\phi'$  は

非水浸： $c' = 0.284 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $\phi' = 30.47^\circ$

水浸： $c' = 0.208$ ,  $\phi' = 31.92^\circ$

全試料： $c' = 0.255$ ,  $\phi' = 30.98^\circ$

となり、非水浸と水浸での差はない。

全応力での  $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  と  $\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)_f$  の関係を図-8 に示す。

全応力表示では

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)_f - \sigma_3$$

であるから、圧密圧力  $\sigma_3 = \sigma'_{3c}$  が一定の実験結果はこう配が1で、切片が  $-\sigma_3$  となる直線上に分布している。この実験値の分布は締固め含水比の差によっている。強度定数  $c_{cu}$ ,  $\phi_{cu}$  は表-3に、また  $c_{cu}$ ,  $\phi_{cu}$  と  $w$  の関係は図-7(b)に示す。  $w \leq 41.3\%$  では水浸によって  $\phi_{cu}$  が減少して  $c_{cu}$  が大きくなり、  $w > 41.3\%$  では水浸の影響はほとんどない。  $w_{opt} = 31.4\%$  であり、一般の締固め土では  $w_{opt}$  の2~5%湿潤側になると水浸の影響は

ほとんどなくなるが、火山灰性の砂と粘土の混合土では、 $w_{opt}$  の10%まで水浸の影響が認められる。これは火山灰性の土の特殊な性質と考えられる。

#### 4. あとがき

凝灰岩性の砂と火山灰性粘土の混合土の圧密非排水三軸圧縮試験を行い、その剪断特性を求めた。この結果、

- (1) 締固め土は最適含水比  $w_{opt}$  の湿潤側のため、応力-ひずみ関係にピークの生じない供試体が多い。
- (2) 剪断中に生じる間隙圧は締固め土としては非常に大きく、 $\sigma_{3c}' = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$  では  $A_f = \Delta u_f / (\sigma_1 - \sigma_3)_f = 0.6$  となり、鋭敏比の小さな正規圧密粘土に近い間隙圧が発生している。
- (3) 圧縮強度  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  は非水浸では締固め含水比の増加とともに減少するが、水浸状態では  $w \approx 40\%$  にピークを生じる。この原因としては、 $w_{opt}$  の湿潤側でも水浸により、吸水軟化が生じるためである。
- (4) 有効応力での強度定数  $c'$ 、 $\phi'$  は各締固め含水比ごとにばらつきがあるが、これは実験結果のわずかなばらつきのためである。 $w = 36 \sim 46\%$  の範囲では、全体として非水浸、水浸状態での  $c'$ 、 $\phi'$  に差は認められない。
- (5) 全応力での圧密非排水強度は締固め含水比による強度の差により、同一の  $\sigma_3 = \sigma_{3c}'$  では、 $(\sigma_1 + \sigma_3)_f / 2 - (\sigma_1 - \sigma_3)_f / 2$  面上で、こう配1.0、切片 $-\sigma_3$  の直線上にのる。
- (6) 全応力での圧密非排水強度定数  $c_{cu}$ 、 $\phi_{cu}$  は  $w \leq 41.3\%$  までは水浸、非水浸の差があるが、これ以上の含水比では、水浸、非水浸の差はなくなる。このことより、水浸の影響は  $w_{opt}$  の10%湿潤側まであらわれることになり、火山灰性土の特殊性を示している。

実験に用いた凝灰岩は容易に分解して砂になるが、粘土は団塊状でこれを細かく砕くことは困難である。混合土を室内で締固める場合、混合状態では砂の灰黒色に近

い色をしている。これを締固めると、粘土の赤褐色に変化していく。これは図-9(a)のように混合時には粘土塊に砂が付着していたものが、締固めとともに粘土塊が水平方向に押し伸ばされて、図-9(b)のように薄層となったことが考えられる。この場合には、鉛直方向の透水係数が小さく、水平方向には透水係数が大きい異方性土層となることが考えられる。現場での混合は、一般にストックパイルに砂と粘土を交互に撒き出し、これをバックホー等で全層を掘削し、運搬し、遮水ゾーンを撒き出す方法が用いられる。この方法では砂と粘土塊の混合となる。これを転圧した場合、上述のように鉛直方向の透水係数は小さくても、水平方向の透水係数の大きな遮水ゾーンとなる危険性がある。貯水は遮水ゾーン内を主に水平方向に流れるから、これが大きな漏水の原因となる。このような異方性はさらに剪断特性の異方性の原因ともなりうる。

締固め含水比が非常に高ければ、締固め時に十分な練り返しが行われ、異方性は小さくなるが、現場では転圧困難となり、施工できなくなる。施工可能とするには粘土の含水比を低下することになるが、これは転圧時に十分な練り返しができず、異方性を生じる可能性がある。この異方性の有無と異方性が生じた場合の対策については、今後、実験を行う予定である。

なお、本実験を行うに際しては、昭和63年度農業施設工学研究室専攻生の金山 守君、古藤裕隆君、元永直人君に多くの協力を得ました。記して厚く感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- (1) 鳥山昶司：農土論集投稿中。
- (2) 山口柏樹・大根義男：フィルダムの設計および施工、技報堂、56、1973。
- (3) 赤井浩一：土質力学、朝倉書店、92-94、1966。