

締固めた凝灰岩と火山灰性粘土の混合土の 剪断特性の異方性について

鳥 山 暁 司*

On Anisotropy of Shearing Properties of Compacted Soil Mixed
with Tuff and Volcanic Clay
Koushi TORIYAMA

Synopsis

The consolidated undrained triaxial compression tests were performed for the specimen cut from vertical (V), parallel (H) and diagonal (D) by compacted plane. From these experiments, there is no variance in stress-strain relations, pore pressure coefficient, compressive strength and strength parameters c' and ϕ' or c_{cu} and ϕ_{cu} among V , H and D specimen. From these results, there is no anisotropy in the shearing properties of compacted soil mixed with tuff and volcanic clay. But, c' and ϕ_{cu} are decreased considerably in the case of adsorption of specimen.

1. まえがき

フィルダム遮水ゾーンの材料は設計透水係数を確保するとともに、剪断強度の大きな材料が望ましい。このため、最近では粘性土と砂質土を混合して遮水材料とする場合が多くなっている。この様な混合土の剪断試験を行う場合、室内で砂質土と粘性土を混合するが、これらが完全に混合できるとは限らず、砂質土中に小さな粘土塊が分散しているような混合土ができる場合がある。これを突き固めによって締固めた場合、粘土塊が締固め面に平行に扁平に押し拡げられて、小さな粘土シームを形成することがある。この締固め土を三軸圧縮試験する場合、一般に供試体の軸は締固め面に垂直である。しかるに理論的剪断面は締固め面、すなわち、水平面と $45^\circ + \phi'/2$ をなすことになる。このため、 V 供試体では剪断面は水平面を切って混合土の剪断強度を表すものと考えられるが、すべり面が締固め面に平行に近い場合には、剪断面は理論すべり面ではなく、締固め面に平行な粘土シームにそって生じる可能性があり、この場合に得られる強度定数 c' 、 ϕ' は混合土ではなく、粘土シームの値

となり、小さくなる可能性がある。

遮水ゾーン内のすべり面は円弧と仮定して安定解析を行うから、すべり面と締固め水平面のなす角はすべり面の位置によって異なることになる。したがって、締固め混合土における剪断特性の異方性の有無を明らかにすることはフィルダムの安定解析を行う上に必要となる。

(1) 軟弱粘土層の異方性については Edén and Law,⁽²⁾ Yong and Silvestri,⁽³⁾ 鬼塚・林・平田・村田などが実験し、鉛直と水平方向で剪断強度に差のあることを示している。また Ladd, Foott, Ishihara, Schlosser and Poulos⁽⁴⁾ は砂の異方性とこの剪断特性への影響を実験し、Miura and Toki⁽⁵⁾ は乱さない砂の鉛直 (V) と水平 (H) 方向供試体の剪断特性の差はかなり大きく、また締固め砂でも V と H で差のあること、これは砂の構造異方性⁽⁶⁾ によることを示している。龍岡・プラダン・林・堀井は砂の堆積方向からの角度により ϕ' に大きな差の生じることを示している。締固め粘土については、鬼塚・林・吉武・大石⁽⁷⁾ は締固め含水比が低く、締固め仕事量が大いほど剪断特性の異方性が大きいことを示している。⁽⁸⁾ これに対して鳥山は2種の粘性土を標準締固め、各種角

* 農村工学講座

度で切り出した供試体の三軸圧縮試験を行い、剪断特性にはっきりした差のないことを示している。また鬼塚・吉武は砂と粉末状粘土の混合比を変えた締固め土の一面剪断試験を行い、 V, H 試料で強度異方性の存在することを示している。

現場の混合では、砂質土と粘性土を層状に撒き出し、これを切り取り、敷きならし転圧する。したがって、砂質土と粘土塊の混合土の状態となる。この様な混合土の異方性の有無については全く実験されていない。そこでここでは現場含水比の砂質土と粘土塊を混合し、これを

表一 1：混合土の物理的性質

液性限界	NP
塑性限界	NP
砂 分	58%
シルト分	20%
粘土分	22%
最適含水比	24.0%
最大乾燥密度	1.545g/cm ³
土粒子比重	2.668

表一 2：供試体諸元の平均値

供試体	条 件	$w(\%)$	$\rho_d(\text{g/cm}^3)$
NA-V	非水浸	23.29	1.368
	水浸	22.11	1.388
NA-H	非水浸	19.25	1.375
	水浸	19.58	1.423
NA-D	非水浸	18.95	1.380
	水浸	19.56	1.381
NB-V	非水浸	29.93	1.404
	水浸	31.12	1.381
NB-H	非水浸	29.47	1.422
	水浸	29.73	1.438
NB-D	非水浸	28.97	1.434
	水浸	28.80	1.409
NC-V	非水浸	31.90	1.462
	水浸	31.07	1.454
NC-H	非水浸	31.83	1.342
	水浸	32.50	1.402
NC-D	非水浸	34.54	1.287
ND-V	非水浸	27.13	1.349
	水浸	25.76	1.372
ND-H	非水浸	25.04	1.423
	水浸	25.42	1.364
ND-D	非水浸	25.91	1.400
	水浸	25.12	1.489

標準締固め方法で締固めた試料土の異方性の有無について実験を行い、さらに、この結果への水浸の影響についても実験を行った。

2. 試験土と実験方法

実験に用いた試料土は農林水産省中国四国農政局管内で建設中のNダムの遮水ゾーン材料の角礫凝灰岩と火山性粘土である。現場では施工性を良くするため、凝灰岩：粘土の混合比を8：2としている。また現場では径10cmまでの礫の混入した凝灰岩を利用しているが、実験室では供試体直径が5cmであり、かつ締固め土から水平(H)や斜め(D)方向の供試体を切り出す必要がある。このため、凝灰岩は2mm以下のみを使用することとした。そこで、混合比は凝灰岩：粘土=7：3と、粘土の比率を現場配合よりやや大きくした。前報⁽¹⁰⁾では混合比を5：5とした混合土の剪断特性について実験したが、現場の混合比が当初の6：4から8：2に変化したため、本実験でも混合比を変え、かつ、混合比の変化による剪断特性の差も検討することとした。混合材料土の物理的性質は表一1に示す。

試料土は前報と同様に、自然含水比の凝灰岩を2mmふるいにとり、通過分のみを混合用砂質土とした。また火山性粘土は団塊状でふるいを通さないため、手で1cm以下に砕き、礫は全て除却した。砂質土と粘土の含水比を測定した後、絶乾状態で重量比が砂質土：粘土=7：3となるよう混合割合を求め、それぞれの試料土を計量後、人力で十分に混合した。含水比は自然含水比を基準に湿潤側は加水混合し、乾燥側は室内で徐々に乾燥させて調整した。

締固め混合土の剪断特性の異方性の有無を調べるため、締固め面(水平面)に垂直なV供試体、締固め面に平行なH供試体、締固め面と約45°をなすD供試体を作った。V供試体は内径5cm、高さ12.5cmのモールドに試料土を入れ、標準締固めと同一の締固め仕事量となるように締固めた。H供試体とD供試体は内径15cmのモールドで締固めた後、H供試体は締固め面に平行に、D供試体は斜めに直径約5cm、高さ約12.5cmの供試体を切り出した。

三軸圧縮試験は全て圧密非排水試験とした。非水浸供試体は三軸セルにセット後、所定の周圧 σ_3 を加えて1日間圧密した。水浸供試体はセット後、所定の周圧 σ_3 を加えて圧密を行った後、供試体底面より約0.5kgf/cm²の水圧を加え、上向きに数時間の透水を行った後、上下面から背圧 $u_0 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ を加えて約1日間置いた後、圧縮試験を行った。圧縮試験は全て、ひずみ速

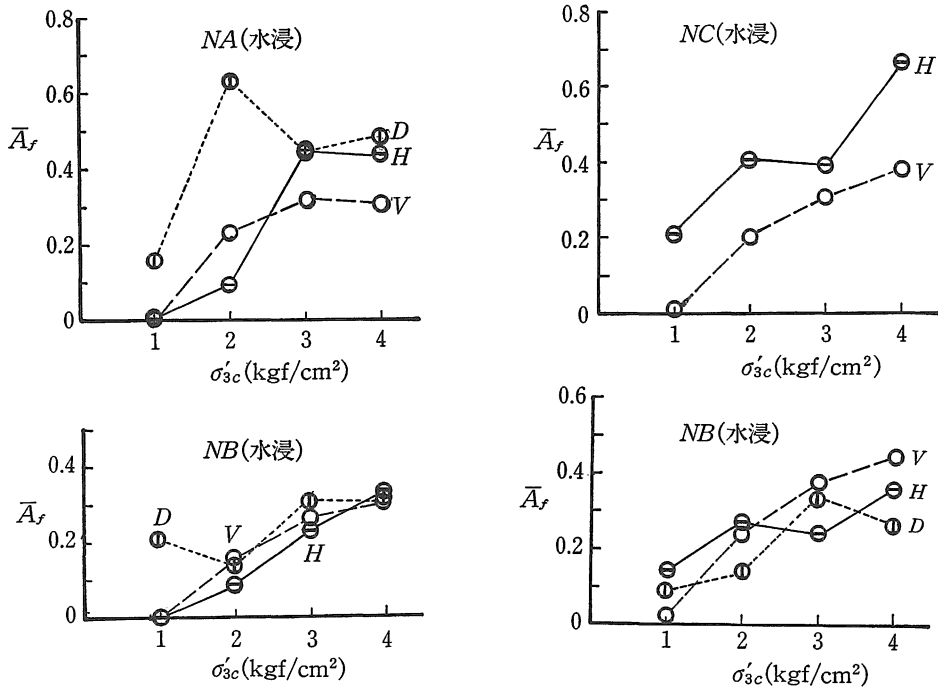


図-1：間隙圧係数と圧密応力の関係

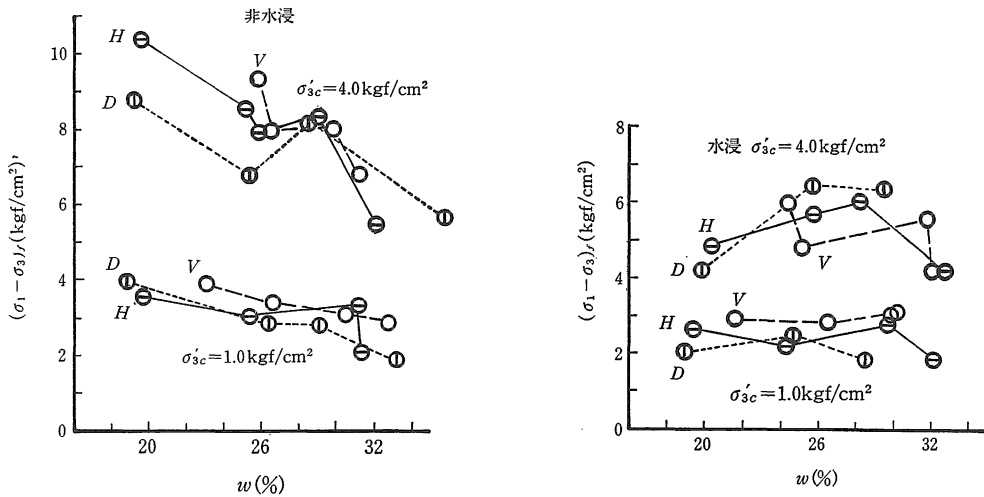


図-2：圧縮密度と締固め含水比の関係

度 0.2%/min とした。また、軸ひずみ ϵ が10%に達しても圧縮応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ に最大値が生じない場合は、 $\epsilon = 10\%$ での $(\sigma_1 - \sigma_3)$ を圧縮強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ とした。

各実験は圧密応力 $\sigma'_{3c} = \sigma_3 - u_b = 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ kgf/cm² の4供試体で行った。各4供試体の初期含水比と乾燥密度の平均値を表-2に示す。

3. 実験結果と考察

三軸圧縮試験は締固め含水比 w を最適含水比 w_{opt} の乾燥側の $w = 19 \sim 20\%$ から、湿潤側の $w = 32 \sim 34\%$ の範囲で行ったが、いずれの含水比の非水浸および水浸供試体とも圧縮応力 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim$ 軸ひずみ ϵ の関係で最大値の生じる場合は少なく、最大値の生じた供試体で

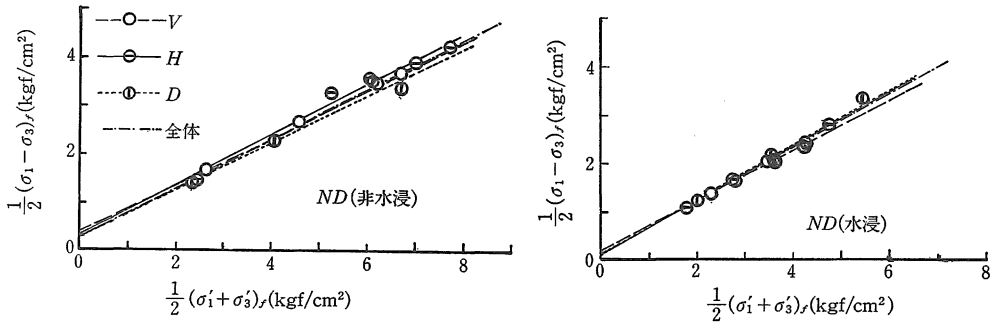


図-3：有効応力での強度特性

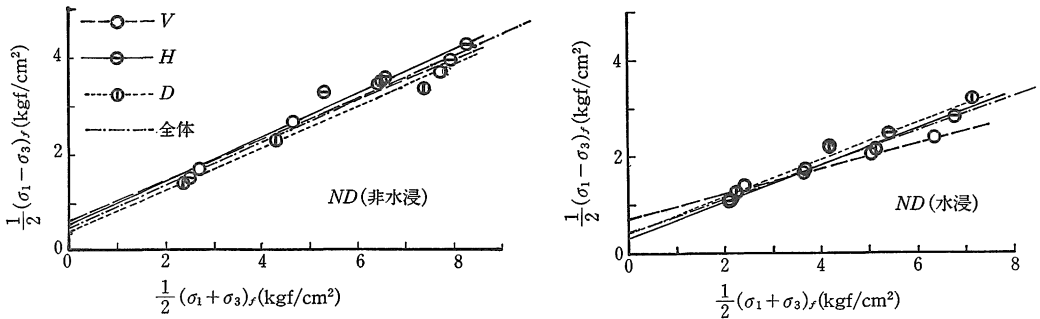


図-4：全応力での強度特性

も、それ以上のひずみによる $(\sigma_1 - \sigma_3)$ の低下は少なかった。

非水浸供試体では $w < w_{opt}$ の場合、剪断中の間隙圧 Δu は小さい。水浸供試体では $\sigma_{3e}' = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合、 Δu は小さく、ダイレタンスーのため $\Delta u < 0$ となる場合もあるが、 σ_{3e}' の増加とともに Δu は大きくなっている。 $w > w_{opt}$ では、 w あるいは σ_{3e}' が大きくなるほど、非水浸での Δu あるいは間隙圧係数 $\bar{A} = \Delta u / \Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$ が大きくなる。図-1に水浸供試体の破壊時の間隙圧係数 $\bar{A}_f = \Delta u_f / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ と σ_{3e}' の関係を示す。NA試料は $w < w_{opt}$ であり、NB, NC 試料は $w > w_{opt}$ であり、ND 試料の w は w_{opt} のやや湿潤側にある。NC 試料では高水比のため、斜めの供試体 (D) を切り出すことができなかったため実験データがない。NA, NB 試料では斜め供試体の \bar{A}_f がやや大きい、ND 試料では斜め供試体の \bar{A}_f がやや小さく、斜め供試体にはっきりした傾向は認められない。別報の混合比 5 : 5 では締固め含水比が高いと、 $\sigma_{3e}' = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ でも $\bar{A}_f = 0.5$ が生じており、混合比を 7 : 3 にしたことにより、間隙圧の発生は減少している。

図-2は非水浸および水浸供試体の圧縮強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ と w の関係を $\sigma_{3e}' = 1.0, 4.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合に

ついて示した。水浸の場合に比べて、非水浸供試体の方が $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ は大きい、V, H, D での強度の差は供試体による強度のばらつきの範囲内にあり、強度の異方性ははっきりと存在しないが、全体的にはやや D 供試体の強度が低い傾向にある。

圧縮強度より、有効応力についての強度定数 c', ϕ' を求めるために $(\sigma_1' + \sigma_3')_f / 2 \sim (\sigma_1 - \sigma_3)_f / 2$ のプロットの例を図-3に示す。また、圧密非排水試験での全応力での強度定数 c_{cu}, ϕ_{cu} を求めるための $(\sigma_1 + \sigma_3)_f / 2 \sim (\sigma_1 - \sigma_3)_f / 2$ のプロットの例を図-4に示す。これらの関係より求めた c', ϕ' と 4 供試体の平均含水比 w の関係を図-5に示す。 c', ϕ' は V, H, D でばらつきがあるが、 c' の大きい場合は ϕ' が小さい。これは図-3で明らかのように、V, H, D の $(\sigma_1' + \sigma_3')_f / 2 \sim (\sigma_1 - \sigma_3)_f / 2$ はごく狭い範囲に分布しているが、この分布のわずかな差が c', ϕ' の差となっているのであり、非水浸、水浸供試体ともに、はっきりした強度定数の異方性は認められない。V, H, D 全体より求めた c', ϕ' を図-5に Δ 印で示したが、これより、 w の増加とともに ϕ' はやや増加し、 c' は減少している。別報の混合比 5 : 5 と比較すると、 ϕ' はほぼ等しく、 c' は混合比 7 : 3 の方がやや大きくなっている。

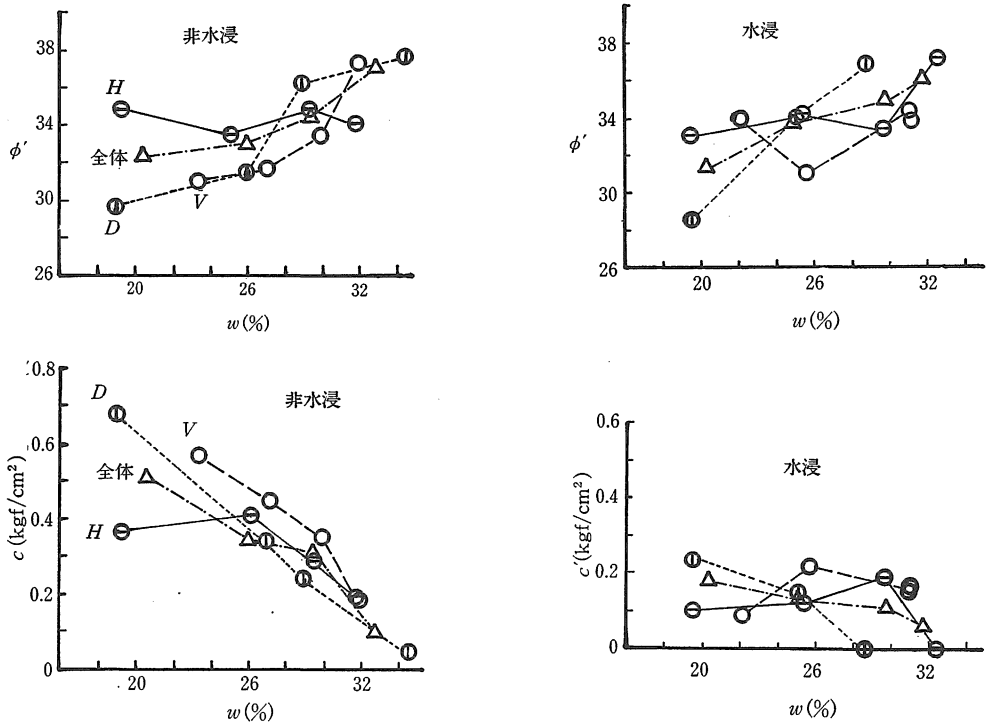


図-5：有効応力での強度定数と締固め含水比の関係

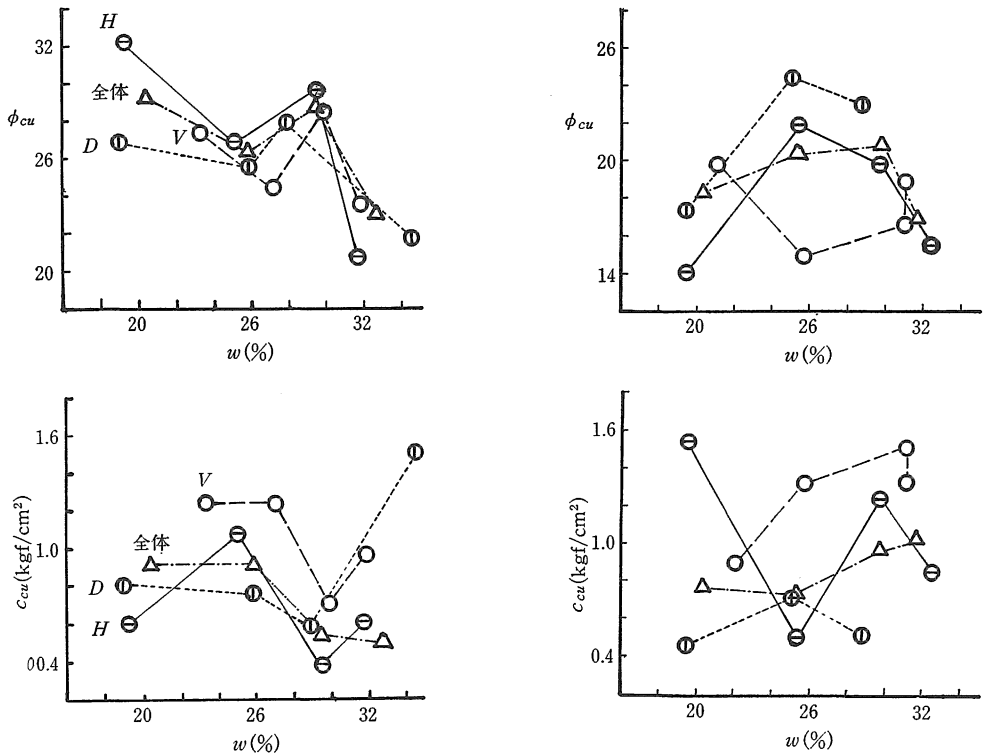


図-6：全応力での強度定数と締固め含水比の関係

次に全応力での c_{cu} , ϕ_{cu} と w の関係を図-6に示す。図-4の $(\sigma_1 + \sigma_3)_f / 2 \sim (\sigma_1 - \sigma_3)_f / 2$ のプロットの V, H, D の差は有効応力での $(\sigma_1' + \sigma_3')_f / 2 \sim (\sigma_1 - \sigma_3)_f / 2$ のプロットの場合に比べてやや大きい。このため、 c_{cu} , ϕ_{cu} の V, H, D の差も大きい。なお、 V, H, D の全体の c_{cu} , ϕ_{cu} を図-6の△印で示したが、 c' , ϕ' のように w に対して一定の傾向は認められない。また別報と比較すると、 c_{cu} は混合比5:5と7:3ではほぼ等しく、 ϕ_{cu} は非水浸では混合比7:3の方が $5^\circ \sim 10^\circ$ 大きく、水浸の場合には ϕ_{cu} は 3° 程度大きくなっている。

有効応力での c' は w の増加とともに減少し、かつ、水浸供試体の c' が非水浸供試体の c' より小さくなり、 ϕ' は水浸により $1^\circ \sim 3^\circ$ 大きくなっている。締固め土は不飽和であるから、締固め時にはいくらかのサクションが生じており、これが有効応力の増加をもたらしているはずである。水浸と背圧の作用により、このサクションの効果が消失したことが、背圧により締固め土が吸水し、軟化したことが、 c' の減少の原因と考えられる。これに対して全応力での c_{cu} は非水浸と水浸での差はほとんどなく、 ϕ_{cu} は水浸供試体の方が $6^\circ \sim 10^\circ$ 非水浸供試体より小さい。この原因は $\sigma_{sc}' = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合、非水浸、水浸供試体とも $\bar{A}_f = 0 \sim 0.2$ と小さく、間隙圧の強度への影響は小さい。しかし $\sigma_{sc}' = 3.0, 4.0 \text{ kgf/cm}^2$ となると非水浸に比べて水浸供試体の \bar{A}_f は大きくなり、これが強度低下をもたらし、結果として、 ϕ_{cu} の低下を生じている。普通の砂質土ないし粘性土の締固め土では、 w_{opt} の5%以上湿潤側の締固め含水比になると、水浸の影響はほとんどなくなるが、本実験で用いた凝灰岩と火山性粘土の混合土の場合には w_{opt} の10%湿潤側においても、水浸により有効応力での c' が減少しており、また、全応力での ϕ_{cu} は約 5° 小さくなっている。このことは火山性土を締固めた場合、その後の水浸の強度特性への影響が普通の土に比べて大きいことを意味しており、火山性の土を盛土材料に利用する場合の強度定数の決定の際に注意が必要である。

4. あとがき

角礫凝灰岩の 2 mm 以下と火山性粘土の 7 : 3 混合土を締固め、締固め面に垂直 (V)、平行 (H)、約 45° (D) から切り出した供試体を用いて圧密非排水三軸圧縮試験を行い、混合土の異方性の有無について実験した。この結果、次のことが明らかとなった。

1. 応力-ひずみ関係や間隙圧の発生にはっきりした異

方性は認められない。

2. 圧縮強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ にはっきりした異方性はないが、 D 試料の $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ がやや小さい。
3. 有効応力での強度定数 c' , ϕ' に異方性の影響は認められない。
4. 全応力での強度定数 c_{cu} , ϕ_{cu} に異方性の影響は認められない。

これらの結果より、凝灰岩と火山性粘土の締固め混合土にははっきりした異方性はなく、フィルダム等の設計に際しては、普通の締固め方法で作製した V 供試体を用いて求めた強度定数 c' , ϕ' あるいは c_{cu} , ϕ_{cu} を用いればよいことが明らかになった。ただし、火山性の土では w_{opt} の10%湿潤側においても水浸により、 c' あるいは ϕ_{cu} の減少が生じている。一般に、締固め土の剪断試験では締固めたままの非水浸状態で三軸圧縮試験を行っており、この結果をそのまま用いると、地下水や貯水の浸透によって水浸した場合、強度定数が低下して安全率が減少することになる。このような場合には、有効応力解析では非水浸三軸圧縮試験よりの c' を $1/2 \sim 1/3$ 以下にとり、 ϕ' は実験値を用いるか、全応力解析では c_{cu} はそのまま、 ϕ_{cu} を $5^\circ \sim 10^\circ$ 小さくする必要があろう。

なお、本実験を行うにあたっては、平成元年度、島根大学農業施設工学研究室専攻の飯塚知治、米山英樹・谷尻孝雄の諸君に多大のご協力を賜りました。記して深謝の意を表します。

参考文献

- (1) Eden, W. J. and K. T. Law : Canadian Geotech. Jour., 17(3) : 369-381, 1980.
- (2) Yong, R. N. and V. Silvestri : Canadian Geotech. Jour., 16(2) : 335-350, 1979.
- (3) 鬼塚克忠・林 重徳・平田登基男・村田重之 : 土質工学会論文報告集, 16(3) : 111-121, 1976.
- (4) Ladd, C. C., R. Foott, K. Ishihara, F. Schlosser and H. G. Poulos : Proc. 9th ICSMFE, 2 : 421-433, 1977.
- (5) Miura, S. and S. Toki : Soils and Foundations, 24(3) : 69-84, 1984.
- (6) 龍岡丈夫・ブラダン テージ B. S.・林 煥群・堀井幸幸 : 土と基礎, 35(12) : 55-60, 1987.
- (7) 鬼塚克忠・林 重徳・吉武茂樹・大石英隆 : 土質工学会論文報告集, 19(3) : 113-123, 1979.
- (8) 鳥山昶司 : 島根大農研報, 17 : 113-118, 1983.
- (9) 鬼塚克忠・吉武茂樹 : 土質工学会論文報告集, 23(4) : 149-156, 1983.
- (10) 鳥山昶司 : 島根大農研報, 23 : 126-131, 1989.
- (11) 鳥山昶司 : 農土論集, 85 : 56-62, 1980.