

河川堤防の浸透に対する安全性照査に用いる堤体土の 三軸試験方法に関する考察

A Study on the Method of Triaxial Test for Embankment Soils Applied
to Safety Check for Seepage of the Levee

中山 修 (なかやま おさむ)

国土技術研究センター調査第一部 次長

阿部 知之 (あべ ともゆき)

応用地質(株)東京本社技術センター 副センター長

持田 文弘 (もちだ ふみひろ)

応用地質(株)コアラボ試験センター グループリーダー

佐古 俊介 (さこ しゅんすけ)

国土技術研究センター調査第一部 主任研究員

島山 正則 (はたけやま まさのり)

応用地質(株)コアラボ試験センター センター長

宇野 尚雄 (うの たかお)

岐阜大学名誉教授

1. はじめに

河川堤防の浸透に対する安全性の照査方法については、「河川堤防の構造検討の手引き」(H14.7, 国土技術研究センター)¹⁾に示されており、土質調査において土の強度定数を求める場合には、飽和状態の試料を用いて、三軸圧縮試験もしくは等体積一面せん断試験により、粘性土については非圧密非排水(UU)条件、礫質土あるいは砂質土については圧密非排水(CU)条件で実施することを原則としている。また、堤体そのものは土被りが小さいので極力低拘束圧のもとで試験を実施する必要性が述べられている。

一方、筆者らは、実際の堤体材料は不均質な場合が多く、既往の堤防調査においては、細粒分を多く含む砂質土に対してCU三軸試験を適用すると、内部摩擦角 ϕ が 20° に達しないような過小な値が得られることや、一部の砂質土や礫質土に対してCD三軸試験を適用すると、 ϕ が 40° を超えるような過大と考えられる値が得られることを経験している。

宇野は、不飽和土の強度評価の方法に関して、「土質試験の方法の解説」³⁾に規定する一面せん断試験(CU試験)により、「定圧試験」と「定体積試験」による強度定数を比較した結果、緩い砂質土を浸水させた試料については両者に差がないこと、サクシジョンの小さい砂質土では、CU試験による強度定数は浸水時の増減を考慮すれば、有効応力で記したすべり面計算に用いても当面は許されそうである、などの見解を述べている²⁾。

また、CU三軸試験結果から c_{cu} , ϕ_{cu} を求める方法については、「土質試験の方法と解説」においていくつか提案がなされているが、いずれの方法を採用するかについては難しい判断を必要とする。

本稿は、以上の背景のもと、河川堤防の浸透(すべり破壊)に対する安全性照査に用いる土の強度定数を求めるための三軸試験方法について、実際の堤体材料を用いて基礎的な検討を行ったものである。

2. 試験方法

2.1 土試料

試験に用いた土試料は、利根川大堰下流右岸の高水敷から採取した粒径の異なる5試料(No. A~No. E)とした。各試料の粒度分布を図-1に、粒度特性を表-1に示した。ただし、No. B, No. Cは、No. AとNo. Eを混合して粒度調整したものである。

2.2 供試体の作製条件

三軸試験に用いた供試体は、締固め試験(JIS A 1210: A, c法)で得られた最大乾燥密度 ρ_{dmax} を基準とする締固め度を種々変化させて作製した。締固め度は、礫質土(No. A, No. B, No. C)のケースで $D_c = 80 \sim 100\%$ 、砂質土(No. D, No. E)のケースでは $D_c = 70 \sim 100\%$ とした。ただし、後述する試験結果は三軸セル内で飽和化した後の値で示している。供試体は、自然含水

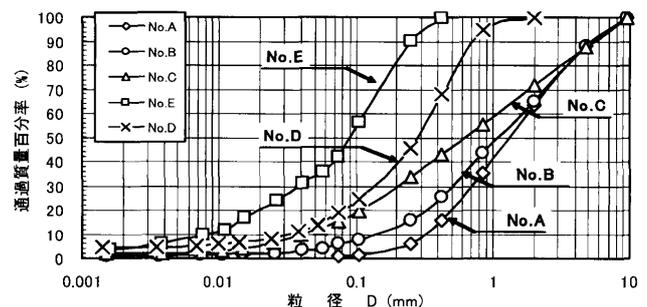


図-1 試験に用いた試料の粒度分布図

表-1 各試料の粒度特性

試料 No.	土質分類	平均粒径 D_{50} (mm)	均等係数 U_c	細粒分 含有率 $F_c(\%)$
A	礫質土	1.3	5.7	1.2
B	礫質土	1.1	11.1	6.0
C	礫質土	0.63	26.8	15.2
D	砂質土	0.28	10.8	19.1
E	砂質土	0.09	13.6	42.2

表一 三軸試験の条件

試験条件	CU	CU(CUB)	CD
供試体寸法	ϕ 50mm × H 100mm		
圧密応力 σ'_c (kN/m ²)	50, 100, 200		
背圧 U_b (kN/m ²)	200, 400		
ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ (%/min)	1	0.05	0.1
求めた強度定数	c_{cu}, ϕ_{cu} (ϕ')	c_{cu}, ϕ_{cu} c', ϕ'	c_{cd}, ϕ_{cd}

比において静的締固め法によって作製した。

2.3 三軸試験の条件

三軸試験は、排水条件による強度特性の違いを評価するため、表一 2 に示す 3 種類の試験条件で実施した。

CU 試験は、ひずみ速度 1%/min で急速にせん断を行う試験であり、標準法では間隙水圧の測定は行わないが、ここでは敢えて間隙水圧の測定を行って、有効応力での評価も試みた。一方、CUB 試験は、ひずみ速度 0.1~0.05%/min で緩速にせん断を行い、せん断中の間隙水圧の測定を行って有効応力表示の強度定数を求める試験である。CD 試験は圧密後、排水状態でせん断する試験であり、ひずみ速度は供試体の透水性に応じて適宜設定されるが、ここでは 0.1%/min とした。

3. 試験結果

3.1 各試験条件によって求められた締固め度とせん断抵抗角 ϕ の関係

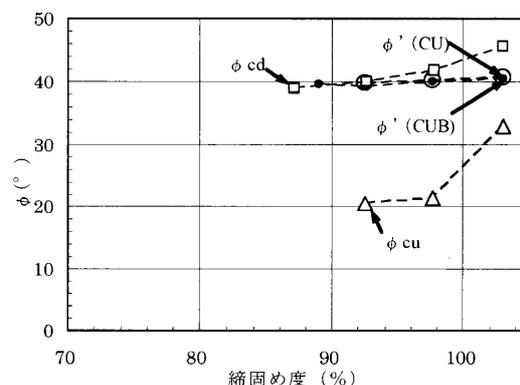
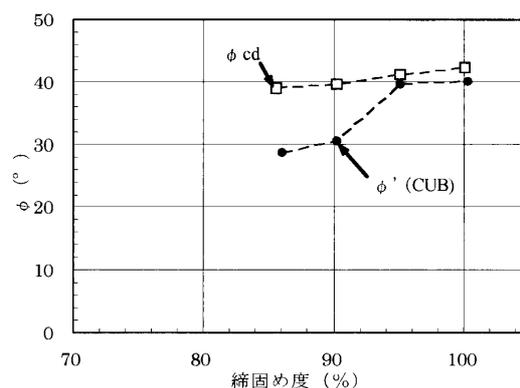
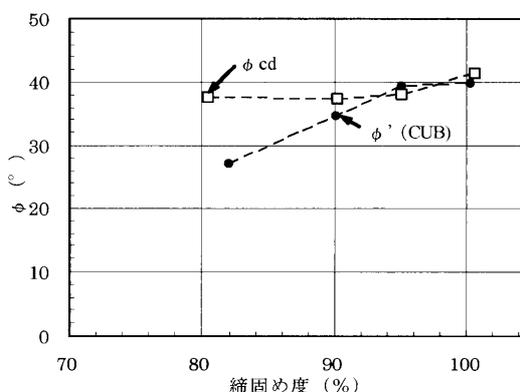
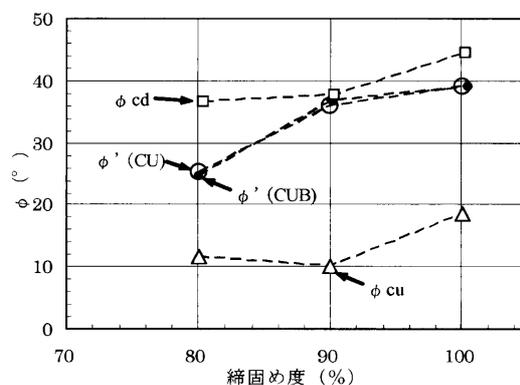
試料別に、各試験条件によって求められたせん断抵抗角 ϕ を締固め度との関係で整理した結果を、図一 2 ~ 図一 6 に示した。以下では、CU 試験で得られた全応力表示のせん断抵抗角を ϕ_{cu} 、CU 試験において間隙水圧を測定して得られた有効応力表示のせん断抵抗角を ϕ' (CU)、CUB 試験によって得られた有効応力表示のせん断抵抗角を ϕ' (CUB)、CD 試験によって得られたせん断抵抗角を ϕ_{cd} と表記する。なお、CU 試験では、粘着力 c_{cu} の値も同時に得られているが、ここでは ϕ_{cu} のみに着目した。

CU 試験は、No. A, No. D, No. E の 3 試料について実施した。 ϕ_{cu} は、No. A (礫質土, $F_c=1\%$) で 20~32°, No. D (砂質土, $F_c=19\%$) および No. E (砂質土, $F_c=42\%$) で 10~20°程度と、いずれも極めて小さな値を示しており、強度定数の設定に当たっては粘着力相当分を考慮するなど、試験値をそのまま用いることができない場合がある。

一方、図一 2、図一 5、図一 6 に示したように、 ϕ' (CU) は、試料や締固め度の違いによらず ϕ' (CUB) と極めてよく一致している。

ϕ' と ϕ_{cd} を比較してみると、No. A を除くいずれの試料においても、 ϕ_{cd} は締固め度あまり依存せず全体に大きな値を示すのに対して、 ϕ' は締固め度に応じて変化し、締固め度が 90% 前後より小さくなると顕著に低下する傾向が認められる。

参考のために、図一 7 には CU 試験における全応力表

図一 2 締固め度と ϕ の関係 (No. A: 礫質土, $F_c=1\%$)図一 3 締固め度と ϕ の関係 (No. B: 礫質土, $F_c=6\%$)図一 4 締固め度と ϕ の関係 (No. C: 礫質土, $F_c=15\%$)図一 5 締固め度と ϕ の関係 (No. D: 砂質土, $F_c=19\%$)

報告

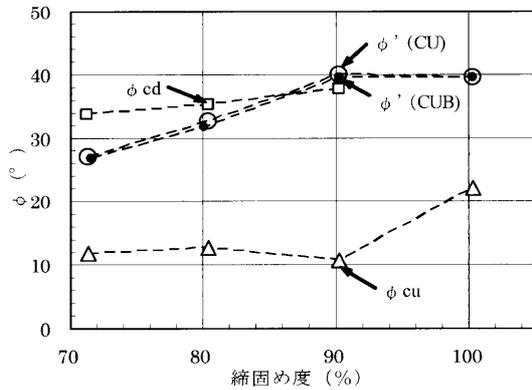


図-6 締固め度とφの関係 (No. E: 砂質土, $F_c = 42\%$)

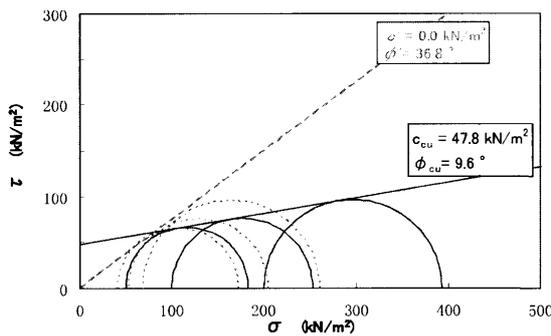


図-7 CU試験によるモールの例 (砂質土, 締固め度 90%)

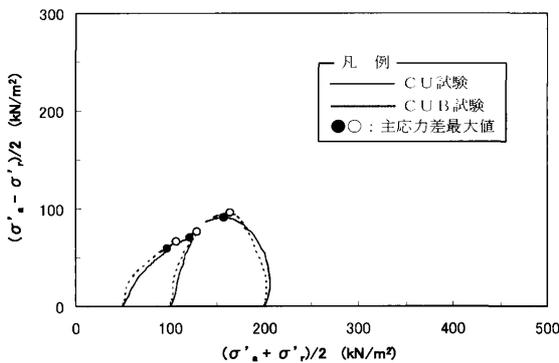


図-8 CU試験とCUB試験によるストレスパスの比較 (砂質土, 締固め度90%)

示と有効応力表示のモールの例を比較した例を示す。また、図-8にはCU試験で間隙水圧を測定して求められたストレスパスと、同一試料に対してCUB試験で求められたストレスパスとを比較した例を示した。ひずみ速度が大きく異なるにもかかわらず、両者はきわめて良く一致している。

3.2 ひずみ速度の違いがφ'に及ぼす影響

前述のとおり、粒度分布が異なる5試料で実施したCUB試験のφ' ($\epsilon = 0.05\%/min$)とCU試験時に過剰間隙水圧測定を行って得たφ' ($\epsilon = 1\%/min$)には極めてよい一致がみられた。

そこで、平均粒径 D_{50} が異なるNo. A, No. D, No. Eの3試料を用い、ひずみ速度を変化させたCUB試験を実施して、φ'に及ぼすひずみ速度の影響について検討した。

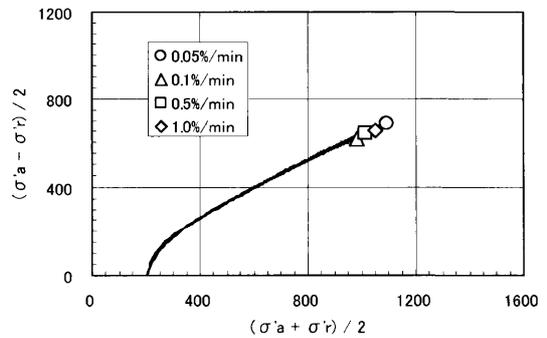


図-9 各ひずみ速度における応力経路比較図 (No. D)

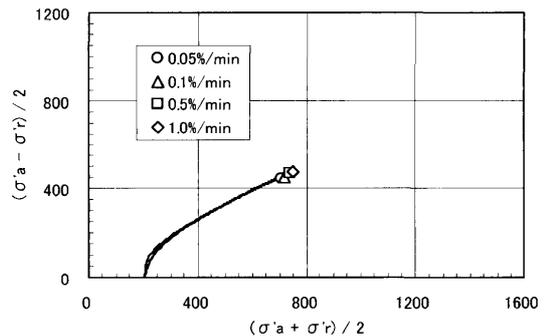


図-10 各ひずみ速度における応力経路比較図 (No. E)

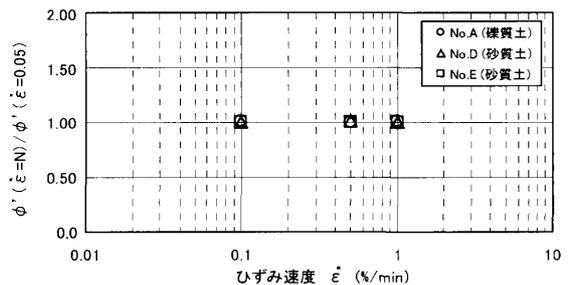


図-11 φ'比～ひずみ速度関係図

試験条件は次のとおりである。

- ひずみ速度：0.05, 0.1, 0.5, 1.0%/min
- 供試体密度：締固め度 100%
- 拘束圧：200 kN/m²

細粒分を含むNo. D, No. Eの応力経路図を図-9, 図-10に示し、φ'比とひずみ速度の関係を図-11に示した。ここで、φ'比は $\epsilon = 0.05\%/min$ 時のφ'と各ひずみ速度で得たφ' (N)との比を表す。各試料ともに、応力経路はひずみ速度によらず、せん断過程全般において非常に一致がみられ、破壊時の非排水せん断強さ τ にも有意な違いが見られない。また、φ'比についてみると、各試料とも、ひずみ速度によらずほぼ1.0を示している。したがって、本試験で対象とした土に対しては、ひずみ速度が0.05~1%/minで得られるφ'は、同等なものとして評価できることが確認された。

4. 考察

河川堤防の浸透に対する安全性照査に用いる堤体土(礫質土～砂質土)の三軸試験方法について検討するために、締固め度や粒度組成の異なる土を対象に各種の三

軸試験を実施した。以下では、これらの結果について考察を加える。

CU 試験から得られた ϕ_{cu} についてみると、各試料とも $10^\circ \sim 32^\circ$ と極端に小さな値を示したが、これに対して粘着力 c_{cu} はいずれも大きな値を示し、締固め度90%の試料についてみると、その値は礫質土 (No. A, No. B, No. C) で $c_{cu} = 12 \sim 40 \text{ kN/m}^2$ 程度、砂質土 (No. D, No. E) で $c_{cu} = 40 \sim 95 \text{ kN/m}^2$ 程度であった。

このような場合、上記の手引きでは、砂質土や礫質土について過大な粘着力 c を見込むのは好ましくないとして、土質試験の結果を機械的に適用しないよう求めているものの、実際にこのような結果が得られた際には、強度定数の設定に苦慮することが多い。このため、宇野は c と ϕ の組合せで強度評価すべきこと (異なる組合せで同じすべり安全率が得られる等) を指摘している²⁾。

一方、CD 試験の結果についてみると、比較的緩い試料 (締固め度90%未満) に対するせん断抵抗角 ϕ_{cd} は、礫質土で $37.5^\circ \sim 38.9^\circ$ 、砂質土で $35.3^\circ \sim 36.5^\circ$ となっている。これらの値は、緩い砂に対する一般的な値よりはかなり大きく、せん断中に密度の変化が生じている可能性も考えられる。

CUB 試験の結果についてみると、細粒分の少ない礫質土 (No. A) を除くすべての試料で、締固め度が高くなるにつれてせん断抵抗角 ϕ' が増加する傾向が認められる。砂質土 (No. D, No. E) について得られている値をみても、緩い試料 (締固め度80%程度) に対する ϕ' は $22.8^\circ \sim 31.7^\circ$ 、比較的密な試料 (締固め度90%程度) に対する ϕ' は $36.8^\circ \sim 39.5^\circ$ となっており、一般的な値とも整合する。

一方、これらは試験法で定められている CUB 試験の標準的なひずみ速度 ($0.05\%/min$) で実施した結果であるが、CU 試験 (ひずみ速度 $1\%/min$) において、せん断中の間隙水圧を測定して ϕ' を求めた結果と比較してみると、両者は極めてよく一致することがわかった。

さらに、ひずみ速度と ϕ' の関係を調べた結果、ひずみ速度が $0.05 \sim 1\%/min$ の範囲では、ほとんど ϕ' の変化は認められなかった。これらの結果は、今回試験を実施した礫分含有率40%以下、かつ細粒分含有率40%以下の礫質土および砂質土についてみると、せん断速度が速い CU 試験においてせん断中の間隙水圧を測定し、有効応力表示の強度を求めれば、CUB 試験あるいは定体積一面せん断試験と同等の結果が得られることを示している。

5. おわりに

以上の実験的検討より、河川堤防の浸透に対する安全性照査に用いる堤体土 (礫質土～砂質土) の強度定数を設定する場合の三軸試験方法としては、CU 試験の際に間隙水圧を測定し、全応力表示と有効応力表示の両方の強度定数を求める方法が実用的かつ有効と考えられる。とくに、これによって試験費用や試験日数の大幅な増加を伴わずに、強度定数を設定する際の判断材料を増やすことができることは、実務において大きな利点と考えられる。

今後の課題としては、細粒分をより多く含む中間土や比較的大きな礫を含む材料に対する三軸試験方法や、間隙水圧測定を含む CU 試験により求めたせん断抵抗角 ϕ' を用いた安定性評価方法などが考えられる。これらについても引き続き検討を行い、河川堤防の安全性に関する評価技術の向上につなげたい。

参 考 文 献

- 1) 財国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き，平成14年7月。
- 2) 宇野尚雄：河川堤防の被災と減災への取り組み，土と基礎，Vol. 55, No. 6, pp. 9～11, 2007。
- 3) 地盤工学会：土質試験の方法と解説 (第1回改訂版)，2000。

(原稿受理 2008.3.18)