河川堤防砂礫の変形・強度特性の評価手法に関する考察

小高 猛司¹,板橋 一雄²,中島 康介³,牧田 祐輝⁴, 李 圭太⁵,上村 俊英⁶,坪田 邦治⁷,加藤 雅也⁷

- 1 名城大学・理工学部建設システム工学科
- 2 名城大学・常勤理事
- 3 中日本建設コンサルタント株式会社(元名城大学大学院生)
- 4 名城大学大学院・理工学研究科建設システム工学専攻
- 5 株式会社建設技術研究所・大阪本社地盤構造室
- 6 株式会社建設技術研究所・九州支社水工部
- 7 中部土質試験協同組合(ジオ・ラボ中部)

概 要

大きな礫から細粒分まで含む河川堤防土について,原粒度のままの変形・強度特性を求めるには大型三 軸試験を行うのが理想であるが,現実には、大きな礫を除外した粒度調整試料を用いて室内試験を実施す ることになる。本研究では、河川堤防で採取した礫混じり砂を用いて原粒度試料の大型三軸試験を実施す ることにより、供試体乾燥密度と排水条件が試験結果に及ぼす影響について検討した。さらに、粒度調整 した小型三軸試験も実施し、供試体寸法の効果についても検討した。大型および小型三軸試験の結果を比 較すると、同じ供試体乾燥密度であっても、供試体の寸法効果によって、小型三軸試験で得られる試験結 果は密詰め傾向の変形・強度特性を示すことがわかった。また、大型三軸、小型三軸ともに、CD 試験で得 られる�d と CU 試験で得られる�it,供試体乾燥密度が大きい場合にはほぼ同じになるものの、供試体乾 燥密度が小さい場合には差が生じることが示された。さらに、礫分含有率を変えない粒度調整を行うこと で、小型三軸で得られる変形・強度特性は、大型三軸の結果に近づくことも示された。

キーワード:河川堤防,砂礫,大型三軸試験,供試体乾燥密度,排水条件

1. はじめに

平成 16 年に日本各地で頻発した豪雨・洪水による堤防 被害^(例えば 1)2)を受け,全国の国土交通省直轄河川の堤防に おいて詳細点検が実施されてきた。詳細点検では,浸透時 のすべり破壊に対する安全性評価として全応力法の円弧 すべり解析が実施されるが,使用する強度定数は主に三軸 試験によって求められる。その際,堤防構成土が粘性土で あれば UU 試験,砂質土であれば CU 試験を適用すること とされている³⁾。

一方,河川堤防は現地発生土で築造されている場合がほ とんどであり,礫分から細粒分まで広範な粒度の土で構成 されていることが多い。大きな礫を含有している原粒度の 土の強度定数を求めるためには,原粒度試料の力学特性を 直接評価できるだけの供試体寸法を備えた大型三軸試験 を実施することが理想であるが,現実には大きなコストが かかることと大量の実験試料を確保する必要があるため, 実務への適用は難しい。そのため,粒度調整試料による室 内試験が実施されるが,供試体寸法や供試体密度が,現地 の河川堤防の力学特性を適正に評価するものかどうかの 検証はほとんどなされていない。さらに、室内試験時の排 水条件が現場の判断で適宜変更されることもあり、排水条 件と強度定数との関係についての評価も曖昧である⁴⁾。以 上の現状より、河川堤防砂礫の変形・強度特性を適正に評 価するためには、室内試験の結果に影響を及ぼす因子を整 理しておくことが急務である。

本論文では、比較的大きな礫が混在しながらも、砂質系 材料でマトリックスを形成している比較的良配合の河川 堤防砂礫を対象とし、その力学特性の評価手法について考 察を行う。具体的には、現地堤防で採取した砂礫を用いて、 原粒度試料本来の力学特性を取得できる大型三軸試験を 実施し、ベンチマークとなる変形・強度特性を求める。そ の上で、大きな礫を除外した粒度調整試料を用いた小型お よび中型三軸試験を実施し、大型三軸試験結果と比較検討 するとともに、その差を縮めるための粒度調整法について 言及する。また、再構成供試体作製時の供試体密度と試験 時の排水条件が、砂礫の変形・強度特性に及ぼす影響につ いても、大型および小型三軸試験を通して検討する。



図1 高津川試料の粒度分布

図2 小鴨川および江の川試料の粒度分布

試料名	高津川						
粒度調整法	通常粒調 原粒度 礫分粒調						
供試体	小型	中型	大型	小型			
直径(cm)	5	10	30	5			
高さ(cm)	10 20 60 10						
乾燥密度(g/cm ³)	1.57(ゆる詰め)						
試験条件	$\overline{\mathrm{CU}}$						

封驗冬仲(言連川)

表 2 試験条件(小鴨川および江の川)

試料名	小鴨川					江の川								
供試体	大型 小型(通常粒調))	小型(通常粒調)								
乾燥密度(g/cm ³)	1.	80	1.	70	1.	80	1.	70	1.	78	1.0	66	1.:	56
締固め度(%)	9	0	85		90		8	5	9	0	8	5	8	0
試験条件	CU	CD	CU	CD	CU	CD	CU	CD	CU	CD	CU	CD	CU	CD

2. 試験試料と試験方法

本論文では、実際に詳細点検がなされた高津川、小鴨川、 江の川の3河川で採取した試料を用いて試験を実施した。 いずれの河川でも堤防天端近辺の試料であるが、堤体全域 がほぼ同材料である。また、1ヶ所の現場から大型三軸試 験で必要な量(100kg弱)の試料を確保することが困難で あったため、粒度特性が類似した近傍の堤防のいくつかの 地点で採取した試料を混合して用いた。

図1および図2にそれぞれの実験試料の粒度分布を示す。 原粒度の高津川試料は、 D_{max} =75mm、 D_{50} =1.04mm であり、 細粒分 13%を含む砂礫(GS)である。細粒分の物理試験 や沈降分析は実施していないが、仮に D_{10} =0.05mm とすれ ば、均等係数 U_c =60 となる。原粒度の小鴨川試料は、 D_{max} =75mm、 D_{50} =2.72mm、 U_c =144 の砂礫(GS)であり、 原粒度の江の川試料は、 D_{max} =53mm、 D_{50} =1.40mm、 U_c =15 の礫質砂(SG)である。なお、どの試験試料も比較的小 さな礫は角礫が多いものの、大きな礫は角が取れて丸みの あるものが主であった。

表1および表2に,それぞれの試料における試験の諸元 を示す。いずれの現地堤防試料も比較的大きな礫が混在し ながらも,砂質系材料でマトリックスを形成している比較 的良配合の河川堤防砂礫であることから,直径30cmの大 型三軸試験で,現地堤防砂礫の本来の力学特性が把握でき ると考えている。

高津川試料においては大型,中型および小型三軸試験を 実施し、大型三軸試験には原粒度試料を用いた。小型三軸 試験には粒径が 9.5mm 超の礫を取り除き,中型三軸試験 には19.1mm 超の礫を取り除いた試料を用いた。特に、小 型三軸試験では、単に 9.5mm 超の礫を除外する通常の粒 度調整をした試料(以下,通常粒調試料と呼ぶ)と9.5mm 超の礫分を取り除いたのと同じ質量分だけ、4.75mm~ 9.5mm の礫を人為的に混入することにより礫含有率を原 粒度試料と同一とした試料(以下, 礫分粒調試料と呼ぶ) の2種類を用いた。ここで通常の粒度調整としているのは 一般にせん頭粒度調整と呼ばれるものである。また, 上記 の礫分を補正する粒度調整の考え方は,ロックフィル材料 等の締固め密度管理でも提案されている 5)6)7)。小鴨川試料 においても原粒度試料による大型三軸試験と 9.5mm 超の 礫分を取り除いた通常粒調試料による小型三軸試験を実 施し、江の川試料においては 9.5mm 超の礫分を取り除い た通常粒調試料の小型三軸試験のみ実施した。

高津川試料の試験では、供試体乾燥密度は大型、中型および小型ともに現地堤防で計測した乾燥密度と同じ 1.57g/cm³とした。高津川試料では突固め試験を実施していないが、後述するように比較的ゆる詰め供試体となった。小鴨川および江の川試料については、突固めによる土の締固め試験(JIS A 1210)を実施し、特に河川堤防の実務で用いられる A 法による試験結果を参考にして、供試体の乾燥密度(以降、単に供試体密度と呼ぶ)を決定した。す



図4 全応力と有効応力のモールの応力円(高津川・通常粒調)

なわち,小鴨川試料においては締固め度 90%,85%に対応 するように供試体密度を 1.80,1.70g/cm³ とし,江の川試 料においては締固め度 90,85,80%に対応するように,供 試体密度を 1.78,1.66,1.56g/cm³ とした。高津川試料の大 型と中型,ならびに小鴨川試料の大型三軸試験では,自然 乾燥試料をモールド内で 5 層ずつ密度管理をしながら,軽 く締固めて供試体を作製した。一方,小型三軸試験では, 試験機器の都合上,セル外で自立する供試体を準備する必 要があったため,含水比 14%の不飽和供試体を 5 層で静 的に締固めて作製した。

供試体の飽和化は、大型三軸試験では二酸化炭素置換法、 小型および中型三軸試験では二重負圧法を用い、圧密過程 後のB値はすべてのケースで0.95以上となり、完全飽和 供試体とみなしている。大型三軸試験では18時間、中型 および小型三軸試験ではそれぞれ1.5および1時間、所定 の有効拘束圧で等方圧密した後、載荷速度0.1%/minでせ ん断を実施した。

なお、本研究では、大型三軸試験のみ異なる試験装置を 用いているため、試験装置の特性が試験データに反映され ている可能性もある。本来、同一粒度の試料による事前検 証をすべきであるが、本研究では実施していない。

表 3 内部摩擦角	と粘着力(高津川)
-----------	-----------

実験の種類	$\phi_{cu}(^{\circ})$	c _{cu} (kPa)	φ'(°)
小型三軸試験	15.7	10.0	33.5
中型三軸試験	14.7	3.0	31.0
大型三軸試験	13.2	5.0	25.6

3. 供試体寸法の違いによる三軸試験結果の比較

高津川試料を用いた大型(原粒度試料),中型,小型(い ずれも通常粒調試料)の三軸試験の結果を図3に示す。い ずれの供試体寸法でも供試体密度は同一である。図3(a) の応力~ひずみ関係より,いずれの供試体寸法においても, せん断初期に軸差応力が大幅に増加し,その後単調に増加 し続ける傾向が見られるが,小型は大型や中型に比べてそ の増加の度合いが大きい。また,有効拘束圧100および 200kPaの大型と中型を比較すると,軸差応力の最大値は ほぼ同じとなっている。

図 3(b)の有効応力経路より,どの試験も塑性圧縮後に変相し,正のダイレイタンシーによって軸差応力が増大する 挙動が見られるが,その度合いは供試体寸法によって異



なっている。具体的には、中型の方が小型に比べて過剰間 隙水圧が上昇しており、それに伴い有効応力が大きく減少 している。変相角も中型の方が小さく、変相後の軸差応力 の増加も小さい。大型では、変相角や破壊線の傾きは中型 よりもさらに小さくなるが、過剰間隙水圧の発生傾向は中 型よりもむしろ小型に近く、有効拘束圧 100 と 200kPa の 大型の有効応力経路は、途中までは小型の経路に近い。し かし、大型は早く変相するとともに、正のダイレイタンシ ーに伴う軸差応力の増加も小さい。

図4に破壊時のモールの応力円と破壊規準を示し、表3 にそれらから求められる強度定数を示す。 CU試験である が、全応力でも整理することにより CU 試験に相当する強 度定数も求めた。通常の試験基準では、CU試験とCU試 験の載荷速度は異なるが,本研究ではその影響は小さいと 判断した。全応力で整理した内部摩擦角 加 はかなり小さ く,供試体寸法による差はほとんどない。このことからも 高津川試料の供試体密度は比較的ゆる詰めであることが わかる。現状の河川堤防の実務においては,砂質土に対し ては CU 試験を実施し、それから得られる og のみを用い る³⁾。その観点では、本試験結果においては、 ϕ_{cu} に供試 体寸法による差が現れていないことから,小型三軸試験で 現地堤防砂礫の強度定数を評価しても差し支えないこと になる。しかしながら、図3に示したように、有効応力経 路を見れば、供試体寸法によってダイレイタンシー特性を はじめとするせん断挙動は大きく異なっており,その差は 図 4 の有効応力で整理した内部摩擦角∮'の差としても明 確に表れている。

4. 粒度調整手法による三軸試験結果の比較

本論文で提案する粒度調整法による礫分粒調試料の三 軸試験結果を示す。図5は礫分粒調試料の小型三軸試験結 果を,図3の結果と併せて示したものである。有効応力経 路を見ると,通常粒調試料の小型三軸試験結果と比べて, ゆる詰め砂の傾向が大きい。特に変相後の軸差応力の増加 が小さく,正のダイレイタンシーの発揮が抑制されている。 また,有効拘束圧50と100kPaにおいて,礫分粒調試料の 有効応力経路は中型の経路と近く,塑性圧縮の傾向が類似 している。その一方,変相角は大型と極めて近く,変相後 の軸差応力の増加量も大型の試験結果に近い。図6は礫分 粒調試料の全応力と有効応力で整理したモールの応力円 と破壊規準を示す。 ϕ_{cu} は通常粒調試料と同様に小さく, ϕ' は大型の試験結果に近い。

5.供試体密度と排水条件の違いによる大型三軸試 験結果の比較

3章では、単一の供試体密度、CU条件のみの大型三軸 試験の結果を示したが、本章では、2種類の供試体密度の 小鴨川試料を用いて、CUとCDの2条件で実施した大型 三軸試験の結果を示す。図7の応力~ひずみ関係より、 CD試験では供試体密度(締固め度)や有効拘束圧によっ て多少の差が見られるものの、軸ひずみ7~8%付近で軸差 応力の増加が止まる傾向は共通していることがわかる。一 方、CU試験においては、締固め度90%では軸差応力はせ ん断終了まで単調増加し続けるのに対し、締固め度85%



図10 全応力と有効応力のモールの応力円(締固め度85%)(小鴨川・大型三軸)

197

実験の種類

表4 内部摩擦角と粘着力(小鴨川・大型三軸)

c_{cu}(kPa)

φ' (°)

 $\phi_d(^\circ)$

 $\phi_{cu}(^{\circ})$

締固め度 90% 22.5 39.1 35.3 42.1 締固め度 85% 12.1 0 24.7 40.9 では軸差応力はせん断初期に増加した後はほぼ一定とな り、供試体密度による差が大きい。図8の有効応力経路よ り、締固め度90%のCU試験では、せん断初期にわずかに 塑性圧縮し、その後正のダイレイタンシーの発現によって 軸差応力が大きく増加していることがわかる。CUおよび CD 試験の破壊応力比は、それぞれ 1.46 および 1.74 であ り, 排水条件による差が大きい。締固め度 85%の CU 試験 においては、せん断初期から大きく塑性圧縮し続け、破壊 応力比は 1.02 と極めて小さい。一方, CD 試験では, CU 試 験とは対照的に、 締固め度 90%の CD 試験の破壊応力比と ほぼ同じの1.73となる。これは、せん断中の排水の効果 によるものである。また、図8(c)に示すように、2つの 供試体密度をCU試験結果のみで比較すると、変相までの

図9および図10は、破壊時のモールの応力円と破壊規

有効応力経路は近いことがわかる。

準であり,表4に強度定数をまとめて示す。3 章と同様に, \overline{CU} 試験では全応力でも整理し, CU 条件の強度定数も示 している。また, \overline{CU} と CD 試験の粘着力 c'と c_dはいずれ もゼロであったため,表に示していない。いずれの供試体 密度でも,試験条件別の内部摩擦角は $\phi_{cu} < \phi' < \phi_d$ の順とな る。全応力の CU 条件で整理した場合,密詰め傾向の強い 締固め度 90%の供試体では,大きな粘着力が現れるが,締 固め度 85%では粘着力は現れない。いずれ試験でも ϕ_{cu} は 小さな値となるが,緩詰めの締固め度 85%の ϕ_{cu} は特に小 さい。また,締固め度 90%において, \overline{CU} 試験による ϕ' と CD 試験による ϕ_d を比べると, ϕ_d の方が若干大きい。ただ し,有効拘束圧 100kPa の \overline{CU} 試験の結果のみで ϕ' を評価す れば, ϕ' と ϕ_d には大きな差はない。しかし,緩詰めの締固 め度 85%においては、明らかに ϕ' と ϕ_d には大きな差がある。

6. 供試体密度と排水条件の影響を考慮した上での 供試体寸法の違いによる三軸試験結果の比較

3 章では、ゆる詰め供試体のCU試験結果のみを示した が、本章では、小鴨川試料の小型三軸試験結果を示し、供



図13 応力~ひずみ関係(締固め度85%)



図18 全応力と有効応力のモールの応力円(締固め度85%)(小鴨川・小型三軸)

試体密度と排水条件の影響を考慮した上で,5章で示した 大型三軸試験結果との比較を行う。

図11および図12に締固め度90%の供試体における応力 ~ひずみ関係および有効応力経路をそれぞれ示す。図には 5章の大型三軸試験結果を併せて示している。図12の有 効応力経路に着目すると、CU試験では、小型の方が変相 後の軸差応力の増加が大きく、破壊応力比も大きい。一方、 CD 試験では,破壊応力比に,供試体寸法による大きな差 は見られない。図 13 および図 14 に締固め度 85%の供試体 における応力~ひずみ関係および有効応力経路をそれぞ れ示す。図 14 の有効応力経路に着目すると, CU試験の場 合,大型では,せん断初期から大きく塑性圧縮したままで あるのに対して,小型では,せん断後半に塑性膨張に転じ ている。また,大型の破壊応力比は小型よりもかなり小さ

締固め度	試験	ф _{cu}	c _{cu} (kPa)	φ'	ϕ_d
90%	大型	22.5°	39.1	35.3°	42.1°
	小型	24.5°	115.0	41.1°	41.7°
85%	大型	12.1°	0	24.7°	40.9°
	小型	30.6°	0	40.6°	39.0°

表 5 内部摩擦角と粘着力(小鴨川・大型小型三軸)

く、大型ではゆる詰め砂の挙動を示している。一方、CD 試験による破壊応力比は、大型の方が若干大きいが、CU試 験ほど供試体寸法による差は大きくない。

図15および図16はCD試験における軸ひずみ~体積ひ ずみ関係である。図15の締固め度90%の結果を見ると、 いずれもせん断初期に圧縮した後に膨張側に転じている が、小型の方がより早く膨張側に転じている。図16の締 固め度85%では、大型ではどの有効拘束圧でも圧縮したま ま試験が終了しているのに対して、小型では有効拘束圧 200kPaの試験を除き、膨張側に転じていることがわかる。

図17および図18は小型三軸試験における破壊時のモー ルの応力円と破壊規準であり、表5に小鴨川試料の全試験 ケースの強度定数を示す。締固め度90%では大型,小型と もに見かけの粘着力 c_{cu}が現れるのに対し,締固め度85% では粘着力は現れない。また,締固め度90%の場合,粘着 力 c_{cu}は大型よりも小型の方が大きい。一方,内部摩擦角 ϕ_{cu} に着目すると,締固め度90%では大型と小型ではほと んど差はないのに対し,締固め度85%では大型の ϕ_{cu} は小 型の値よりも小さい。次に,有効応力で整理し,大型と小 型の ϕ 'を比較すると,締固め度90%では ϕ 'にそれほど差は ないが, 締固め度 85%では大型の(は小型の値よりもかな り小さい。また,供試体密度(締固め度)の違いで比較す ると,小型は供試体密度によって(がたきく異なる。最後に, CD 試験による(4)に着目すると,いずれの実験ケースにお いてもほとんど差は見られない。そのため、(4)と(4)を比較 すると,大型では両者の差が大きく、特に供試体密度が小 さいケースではその差は顕著に現れる。

7.供試体密度と排水条件の違いによる小型三軸試 験結果の比較

5章と6章で示した供試体密度の影響をさらに系統的に 調べるため,供試体密度を3種類として,江の川試料の通 常粒調試料を用いた小型三軸試験を実施した。図19は供 試体密度(締固め度)ごとに,上側にはCUとCD試験に おける軸差応力~軸ひずみ関係,下側にはCD試験におけ る体積ひずみ~軸ひずみ関係を示している。また,図20 は有効応力経路を示す。図19の軸差応力~軸ひずみ関係 においてCD試験に着目すると,締固め度90%ではピーク 強度後にひずみ軟化するのに対し,締固め度85%と80% では軸差応力はなだらかに増加し続ける。CU試験に着目 すると,締固め度90%では軸差応力は単調増加するのに対 して,締固め度90%では軸差応力は単調増加するのに対 して,締固め度85%と80%ではピーク強度にひずみ軟化 を示す。体積ひずみ~軸ひずみ関係では,締固め度90% ではせん断初期に若干圧縮した後,膨張している。締固め 度85%,80%とゆる詰めになるほど,せん断中の体積ひず



図19 供試体密度の違いによる小型三軸試験の結果 (江の川・応力~ひずみ関係および軸ひずみ~体積ひずみの関係)



みの増加は顕著になり、体積圧縮している。

図 20 の CU試験の有効応力経路に着目すると, 締固め度 90%では塑性膨張を伴うひずみ硬化を示す典型的な密詰 めの砂の挙動が見られる。 締固め度 80%では, 塑性圧縮を 伴うひずみ軟化を示す典型的な緩詰め砂の挙動が見られ る。中間となる締固め度 85%では, 有効拘束圧が小さい場 合は塑性膨張を示し, 有効拘束圧が大きい場合は塑性圧縮 を示している。破壊応力比を見ると, 供試体密度(締固め 度)が小さくなるにつれて, CD および CU試験で得られ た破壊応力比に差が生じている。

図 21~図 23 は、江の川試料の小型三軸試験における破壊時のモールの応力円と破壊規準であり、表6に各試験で得られた強度定数をまとめて示す。締固め度 90%および85%では大きな粘着力 c_{cu}が見られ、締固め度 80%では粘着力が見られないという差があるが、どの供試体密度でも全応力で整理した内部摩擦角φ_{cu}は非常に小さい。有効応力で整理したφ'は供試体密度の違いによって大きく異なる。CD 試験によるφ_dは、供試体密度による差がほとんど

実験の種類	$\phi_{cu}(^{\circ})$	c _{cu} (kPa)	φ' (°)	$\phi_d(^\circ)$
締固め度90%	11.4	110	36.4	38.8
締固め度 85%	11.8	50	30.4	35.3
締固め度 80%	14.2	0	23.1	34.3

表6 内部摩擦角と粘着力(江の川・小型三軸)

なく、大きな値である。どの供試体密度でも、試験条件別 の内部摩擦角の大きさは、 $\phi_{eu} < \phi' < \phi_d$ の順となる。粘性土 での経験から、負のダイレイタンシーを示す地盤材料では、 CD 試験の強度定数と CU試験の有効応力の強度定数はほ ぼ同一になると考えられがちであるが、今回の試験結果で は、供試体密度が小さくなるにつれて $\phi' \ge \phi_d$ には大きな差 が生じている。これは、供試体密度が小さいゆる詰め供試 体は、図 19 の体積ひずみの変化からもわかるように、排 水せん断に伴って密詰めに変化してゆくためであり、 ϕ' $\ge \phi_d$ で評価している土は、実は異なる構造の土であると考 えるべきである。

8. 試験結果の考察 ー現状の河川堤防の詳細点検 における留意事項の整理と今後の課題-

河川堤防の詳細点検では,浸透時のすべり破壊に対する 安定性検討をする場合には,砂質系堤防ではCU試験で得 られる強度定数を用いて全応力法の円弧すべり解析が実 施される。そこで用いる強度定数のうち,粘着力に関して は室内試験結果に拘わらず,およそ1kPa程度を考慮する のみ³⁾であるので,実質的には内部摩擦角のみが安定解析 に用いられる。本章では,本論文の試験結果を安定解析に 適用することを想定し,その考察を通して河川堤防の詳細 点検における留意事項を整理する。

8.1 供試体寸法の影響

河川堤防の実務では, 粒度調整試料による小型三軸試験 で強度定数を決定する。表3に示す高津川試料の試験結果 を見ると,供試体寸法に応じて粘着力 cen が異なるものの, 内部摩擦角 \$\phi_{cu} にほとんど違いは見られない。すなわち, 小型三軸試験による強度定数を安定解析に用いても,大型 三軸試験で強度定数を求める場合と結果は変わらない。次 に、表5に示す小鴨川試料の試験結果に着目する。 締固め 度 90%では ou に供試体 寸法の影響は見られないが、 締固 め度85%では供試体寸法の影響が顕著に現れる。しかし、 締固め度 90%でも粘着力には供試体寸法の影響が大きく 現われており,粘着力まで含めて非排水せん断強さを評価 すれば、供試体寸法によって当然大きな差が生じる。した がって,粘着力を考慮せずに全応力解析を実施する範囲に おいては、供試体寸法の影響はほとんど現れないが、有効 応力経路(図3と図14)からもわかるように、小型三軸 試験は大型三軸試験よりも常に密詰め傾向を顕著に表し, 供試体寸法によって変形・強度特性は大きく異なる。

8.2 供試体密度(締固め度)の影響

河川堤防の強度定数を室内試験で求める場合,供試体は 原位置堤防の乾燥密度に合わせて再構成される。小鴨川試 料の三軸試験結果の表5を見ると,大型,小型のいずれに おいても,供試体の締固め度(乾燥密度)によって ϕ_{cu} に 差が見られる。すなわち,大型では締固め度 90%の方が ϕ_{cu} は大きいが,小型では締固め度 85%の方が ϕ_{cu} は大きい。 一見,供試体密度に対して ϕ_{cu} の評価が逆転しているが, c_{cu} の値に着目すれば,締固め度 90%では大きな c_{cu} が現れ ている。このことからも、 ϕ_{cu} だけでは正確な非排水せん 断強さの算定は困難であることが明白である。

次に、江の川試料の小型三軸試験結果である表 6 に着目 する。供試体密度に拘わらず ϕ_{cu} はほぼ同じであるが、 c_{cu} は変動している。この例でも、砂礫の非排水せん断強さを 算定する際には、 ϕ_{cu} だけでなく c_{cu} をあわせて考慮する必 要があることがわかる。

以上は強度定数だけの議論であるが,有効応力経路(図 8,図12,図14および図18)を見れば,供試体密度(締 固め度)に応じて変形・強度特性が顕著に変わることが明 白であり,適正な供試体密度で試験を行うことが河川堤防 砂礫の力学特性を評価する上で重要である。

8.3 試験時の排水条件の影響

本論文の一連の試験結果を見る限り,総じて全応力で整 理した ϕ_{cu} は小さな値となった。ただし、先述のように、 供試体密度が大きい場合には,粘着力が大きいために内部 摩擦角が小さくても非排水せん断強さそのものが小さい と言う意味ではない。

河川堤防のすべりに対する安全性検討を行う場合には, 粘着力は考慮せずに全応力円弧すべり安定計算を行う。し たがって,たとえ供試体密度が大きい場合でも,算出され る安全率は小さな値となる。その安全率は安全側であるが, すべりに対して不適格であると過度に判定される堤防が 多発するなどの不都合が生じる。そのような場合には,現 場の技術者の判断により、CD 試験で得られる ød を強度定 数として用いる事例がしばしば見られる。しかし、本論文 の実験結果からも分かるように、供試体密度(締固め度) が大きい場合には問題はないが、供試体密度(締固め度) が小さくなるにつれて () と (には大きな差があるため, た とえ CD 試験の �d が大きくても,構造的に不安定な緩詰め 傾向の場合もあり, 危険側に判断する可能性がある。した がって、全応力解析に CD 試験の結果を用いる場合には、 対象とする堤防砂礫材料が排水条件を仮定して安定解析 して良いほど透水性が高い土であることを判断した上で, 現地堤防の乾燥密度や予想されるダイレイタンシー特性 まで含めて,十分にその地盤材料の力学特性を把握してお く必要がある。力学特性も考えずに, 安易に強度定数の読 み替えをすべきではない。

8.4 実務上の強度定数の設定

原位置の河川堤防の乾燥密度を正確に把握したとして も,同一の乾燥密度で再構成した供試体を用いて小型三軸 試験を実施すれば,実際の変形・強度特性よりも密詰め傾 向が強い試験結果を得る。その理由は,供試体中の礫分含 有率に大きく関係している。「礫分が 60%以下では礫粒子 は集合体の中で個々に存在し、細粒分が混合土の主たる構 造を形成している」と指摘されている⁷⁾ように、本研究の 砂礫試料においても、大きな礫粒子は、それ以外の砂やシ ルトを主体としたマトリックス部分の中に浮いた状態で 存在していると考えてよい。その場合の砂礫試料の力学特 性は、マトリックスの力学特性に強く依存する。図 24 は 同一の乾燥密度(間隙比)の原粒度試料の大型供試体と通 常粒調試料の小型供試体を示相図で模式的に比較したも のである。ただし、この図では礫からシルトまでの土粒子 密度をすべて同一と簡略化している。土全体としては同じ 間隙比であるが,大型供試体と小型供試体とでは,比較的 大きな粒径の礫とそれ以外のマトリックスとの構成比が 異なる。マトリックス中に浮遊して砂礫全体の力学特性に 寄与していない大きな粒径の礫を除外した場合の間隙比 (=間隙の体積÷マトリックスの体積)は、通常粒調試料 より原粒度試料の方が大きくなる。そのため、本論文の三 軸試験結果で示したように,原粒度の大型供試体の方がゆ る詰め傾向が強く現れることになる。本論文では, 礫分の 割合を変えない粒度調整方法 (礫分粒調)を導入すること により、マトリックスの間隙構造を変えることなく小型供 試体を再構成することができるため, 三軸試験結果も大型 と同等の変形・強度特性に近づけられることが示された。



以上の室内と現場で乾燥密度の感覚が異なる問題は,堤防の詳細点検のみならず,実は築堤時の施工管理にも密接 に関連する事項である。現状の堤防の締固め管理は,A法 による締固め試験を基準とし,締固め度 90%以上を目標 としている。しかし,小型の締固め験で得た乾燥密度を, 大きな礫を豊富に含む現地に不用意に適用した場合には, 実質的には十分に締固められていない可能性が考えられ る。許容最大粒径よりも粗な土粒子を含む土の締固め管理 については,従来から多くの検討がなされてきているが ⁸⁾⁹⁾¹⁰,河川堤防の築堤にあたっては礫分まで十分に考慮さ れた検討がなされていないのが現状である。実際に,高津 川堤防に見られるように,ゆる詰め傾向が現れる河川堤防 はあり,他にも締固め不足の堤防が多く存在することも指摘されている¹¹⁾。

8.5 今後の課題

現状の堤防の安定性評価では全応力に基づく円弧すべ り解析を基本としている³⁾が,最近ではより詳細に安定 性評価を行うために,浸透と変形を連成した有効応力解析 も提案され,実堤防にも適用されてきている¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾。本 研究では,慣用的な河川堤防の安定性評価を念頭に議論し てきたが,最先端の有効応力解析であるほど,実は本論文 での指摘事項がより重要となる。すなわち,解析に必要な 土質パラメータを決定する際には,それらが得られた実験 条件(供試体密度,供試体寸法,排水条件等)を十分考慮 した上で,その地盤材料の実堤防での力学特性を正当に評 価する必要がある。さもなければ,精密なモデルを用いる ほど,実挙動から離れた解析結果を導くことになりかねな い。今後は,小型三軸試験の結果を用いて,原地盤の挙動 を予測できるように粒度特性,供試体寸法効果を組み入れ た構成モデルの構築も必要である。

9. 結 論

本論文では、河川堤防で採取した砂礫を用いて各種の三 軸試験を実施したことにより、以下の知見を得た。

- 高津川試料により同一の乾燥密度の供試体で大型,中型および小型三軸試験を実施した結果,供試体寸法が小さくなるほど,密詰め傾向が大きく現れる変形・強度特性を示すことが明らかになった。
- 2) 礫分含有率を変えない粒度調整方法で試料を準備し 小型三軸試験を実施した結果,原粒度の大型三軸試験 結果に近い変形・強度特性が得られることが示された。
- 3) 小鴨川試料により2種類の締固め度の供試体を用いて、CU試験およびCD試験で大型三軸試験を実施した結果、CU試験では供試体の締固め度によって変形・強度特性に顕著な差が観察されたのに対し、CD試験では、締固め度による差は顕著ではなかった。
- 4) 小鴨川試料による小型三軸試験を,大型三軸試験と同様な条件で実施して両者を比較した結果,締固め度が小さい供試体では、CU試験の結果に供試体寸法の影響が大きく現れ,小型三軸試験の方が密詰め傾向が強い変形・強度特性を示した。
- 5) 江の川試料により 3 種類の締固め度の供試体を用いて、CU試験および CD 試験で小型三軸試験を実施した結果、CU試験では供試体の締固め度によって徐々に変化する変形・強度特性を系統的に観察することができた。また、CD 試験においては、締固め度が小さい供試体ほど、せん断中の体積ひずみが大きく観察され、乾燥密度が増加しながら破壊に近づいてゆく様子が示された。
- 6) CU試験結果を全応力で整理して得られる内部摩擦角

♦cu は、どの条件の供試体であっても小さい値であった。ただし、供試体の締固め度に応じて相当量の粘着力 ccu が発生しているため、締固め度に応じて非排水せん断強さは大きくなっている。

7) CU試験結果を全応力および有効応力で整理して得られる内部摩擦角φ_{cu}およびφ',さらに CD 試験結果から得られるφ_dを比較すると、φ_{cu}<φ'<φ_dの関係が得られる。特に、締固め度が小さいゆる詰め供試体ほど、φ'とφ_dの差が大きく現れる。その理由は、ゆる詰め供試体の場合、CD 試験では排水せん断中に体積圧縮するために密詰め構造に変化するが、CU試験ではゆる詰め構造のまま変化しないためである。

参考文献

- 平成16年7月福井豪雨による地盤災害の緊急調査団:平成16年7 月福井豪雨による地盤災害調査報告書,第2章足羽川堤防の破壊, 地盤工学会関西支部, pp.15-37,2005.
- 平成16年台風23号による関西圏地盤災害緊急調査団:平成16年 台風23号による関西圏地盤災害調査報告書,第4章兵庫県北部地 区の被害事例,地盤工学会関西支部,pp.73-148,2005.
- (財)国土技術研究センター:河川構造の構造検討の手引き,第4 章 浸透に対する堤防の構造検討, pp.42-85,2002.
- 4) 地盤工学会2007年度会長特別委員会:地震と豪雨・洪水による 地盤災害を防ぐために一地盤工学からの提言-,第Ⅱ部現状・ 課題・展望,2.3河川堤防,pp.131-180,2009.
- 5) 松本徳久,渡辺和夫,岩田充弘,小川優:粗粒材料の密度試験

に関する実験的検討,土木研究所資料第2233号,1985.

- 6) 中岡時春,望月秋利,阪口理:粗粒材を含む盛土材料の締固め 密度の推定,土木学会論文集,No.499/Ⅲ-28, pp.177-185, 1994.
- 7) 礫質土の力学特性についての研究委員会:礫質土の力学特性に 関するシンポジウム発表論文集,第5章礫質土の室内試験技術, pp. 60-73, 2001.
- 8) 礫質土の力学特性についての研究委員会:礫質土の力学特性に 関するシンポジウム発表論文集,第3章礫質土の物理的性質,pp. 20-29,2001.
- 福本武明, 増井久: 粗粒土の締固め密度推定法, 土と基礎, Vol.49, No.8, pp.26-28, 2001.
- 10) 地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, 第5編, 第2章 突固め による土の締固め試験, pp.373-383, 2009.
- (財)国土技術研究センター:河川構造の構造検討の手引き,第2 章 構造物としての河川堤防の特徴, pp.5-13, 2002.
- 12) 小高猛司,岡二三生,木元小百合,角南 進,加藤亮輔:不飽和 浸透-変形連成解析による河川堤防の安全性評価,第50 回地盤 工学シンポジウム論文集, pp.347-354,2005.
- 小高猛司:地盤防災に対する数値地盤力学~地盤材料-間隙流 体相互作用のモデリング~,地学雑誌, Vol.115, No.3, pp. 295-308, 2006.
- 14) 李圭太,小山倫史,大西有三,古川秀明,小林猛嗣:越流を考慮した河川堤防の浸透崩壊に対する応カー浸透連成解析,地盤 工学ジャーナル, Vol.4, No.1, pp.1-9, 2009.
- 15)加藤亮輔,岡二三生,木元小百合,小高猛司,角南進:不飽和 浸透-変形連成解析手法と河川堤防への適用,土木学会論文集C, Vol. 65, No. 1, pp.226-240, 2009.

(2010.1.15受付)

Evaluation of deformation and strength characteristics of sandy gravel in river embankments

Takeshi KODAKA¹, Kazuo ITABASHI², Kosuke NAKASIMA³, Yuki MAKITA⁴, Kyu-Tae LEE⁵, Toshihide Uemura⁶, Kuniharu TSUBOTA⁷ and Masaya KATO⁷

- 1 Faculty of Science and Technology, Department of Civil Engineering, Meijo University
- 2 Trustee, Meijo Universiity
- 3 Nakanihon Engineering Consultants Co., Ltd. (Former Graduate Student, Meijo University)
- 4 Graduate school of Science and Technology, Department of Civil Engineering, Meijo University
- 5 CTI Engineering. Co., Ltd., Osaka Main Office.
- 6 CTI Engineering. Co., Ltd., Kyushu Office.
- 7 Geo-Labo Chubu

Abstract

In the present paper, in order to study effects of the dry density of specimen and the drainage conditions on the shear characteristics of sandy gravels in river embankments, various series of large triaxial test were performed using the original grain sandy gravels. The small size triaxial tests using the graded grain soils were also performed to compare the results of the large size triaxial tests using the original grain soils. From the results of the above tests, in the case of the high dry density of specimen, ϕ_d obtained by CD tests is similar to ϕ' by \overline{CU} test. However, in the case of low dry density of specimens, there is big difference between ϕ_d and ϕ' . From the comparison of the results between the large and small size triaxial tests using the same dry density specimens, the shear behavior of graded grain sandy gravel observed by the small size triaxial test has shown the dense tendency. In order to evaluate the shear properties of the original grain soil using by the conventional small size triaxial test, the effective mechanical stabilization method is proposed, which is replacing large grain gravels with small grain gravels.

Key words: River embankments, sandy gravel, large size triaxial test, dry density of specimen, drainage condition