

河川堤防試料の室内せん断試験における礫分粒度調整の効果

名城大学 国際会員 小高猛司 板橋一雄
名城大学大学院 学生会員 中島康介・岸 賢吾
㈱建設技術研究所 国際会員 李 圭太
中部土質試験協同組合 正会員 坪田邦治・加藤雅也

1. はじめに

河川堤防は現地発生土で築造されている場合が多く、礫分から細粒分までの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ままの土の強度定数を求めるには、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て粒度調整した試料を用いて室内試験を実施し、強度定数を求めることになる。本論文では、現地堤防で採取した礫混じり砂に対して原粒度のまま大型三軸試験を実施した上で、大きな礫分を除外して実施した小型ならびに中型三軸試験との比較を行い、礫を除外する粒度調整が礫混じり砂の力学挙動に及ぼす影響について検討を行う。さらに、小型供試体によって適正に強度評価を行う手法について、粒度調整の観点から検討を行う。

2. 供試体の作製手順および試験手順

実験で用いた試料は某河川で採取したものである。河川調査の原則から、ひとつの地点から採取できる量には限度があり、大型三軸試験を実施するだけの量を一箇所の採取試料で確保することは困難であった。本論文での大型三軸試験では、比較的採取地点も近く、また構成も類似している採取土を混合して用いた。それでも大型三軸試験1回分の試料を確保することが精一杯であったことから、一連の大型三軸試験は、この試料を繰返し用いて実施した。

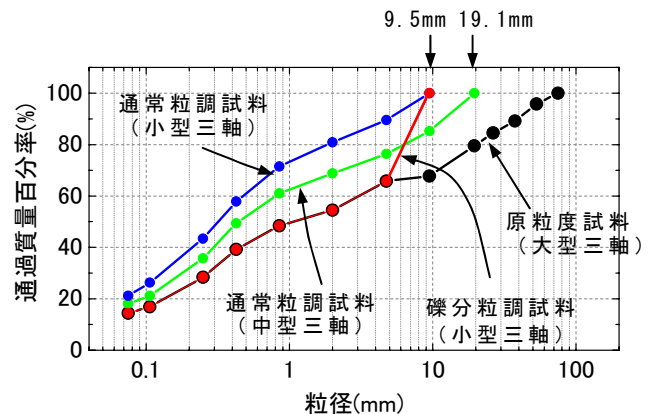


図-1 実験試料の粒度分布

図-1 に実験試料の粒度分布を示す。堤防で採取した原粒度試料を見ると、直径 9.5mm 以上の礫を質量比で 32% 含んでおり、原粒度のままでは通常の三軸試験を実施するのは困難である。本論文では、小型三軸試験（直径 5cm，高さ 10cm）と中型三軸試験（直径 10cm，高さ 20cm）を行い、大型三軸試験結果との比較を行うが、小型三軸試験の場合には 9.5mm 超の粒径の礫を取り除き、中型三軸試験の場合には 19.1mm 超の礫を取り除いた。特に、小型三軸の場合には、原粒度の試料から単に 9.5mm 以上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同じ質量分だけ、4.75mm～9.5mm の礫を人為的に混入した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 種類で実験を行った。なお、礫分粒調試料は図-1 の粒度分布からわかるように、4.75mm 以下の粒径に関しては原粒度試料と全く同じ粒度分布となっていることが特徴である。

Effects of mechanical stabilization considering gravel content on the strength properties of a river dike sand: T. Kodaka, K. Itabashi, K. Nakashima, K. Kishi (Meijo Univ.), K.-T. Lee (CTI Engg. Co., Ltd.), K. Tsubota and M. Kato (Geo-Labo Chubu)

表-1 各ケースの試験条件

粒度調整法 供試体寸法	通常粒調試料									礫分粒調試料		
	小型三軸試験			中型三軸試験			大型三軸試験			小型三軸試験		
実験 Case	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
直径 (cm)	5			10			30			5		
高さ (cm)	10			20			60			10		
有効拘束圧 (kPa)	50	100	200	50	100	200	50	100	200	50	100	200
乾燥密度 (Mg/m ³)	1.57											

表-1 に各ケースの試験条件を示す。試料採取時の現場湿潤密度は 1.7Mg/m³ であり、その際の含水比が約 8.3%であったことから、今回の試験供試体は、いずれのケースでも乾燥密度 1.57Mg/m³ になるように再構成した。具体的には、含水比 1.3%程度まで自然乾燥させたのち、規定の乾燥密度となるように 5 層ずつ密度管理をしながら作製した。なお、今回の乾燥密度では、ほとんど突き固めることなく供試体を作製することができ、比較的ゆる詰め供試体となった。大型三軸試験では供試体をセルに設置した後、二酸化炭素を用いて供試体の飽和化を行い、その後、所定の有効拘束圧で 18 時間程度圧密してから、ひずみ速度 0.1%/min で CU 試験を行った。小型三軸試験、中型三軸試験では大型三軸試験と同じように自然乾燥状態の試料を現場と同じ乾燥密度となるように、5 層に分けて空中落下法により供試体を作製し、二重負圧法にて飽和化を行った後に、所定の有効拘束圧で 1 時間圧密し、背圧 200kPa で軸ひずみ速度 0.1%/min で CU 試験を行った。

3. 供試体寸法の違いによる三軸試験結果の比較

図-2 に大型（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まとめて示す。粒度調整によって各寸法の供試体に含まれる礫の最大粒径は異なるものの、密度は同一として各供試体を再構成したが、それぞれの供試体寸法で傾向が異なる結果となった。

図-2 (b) の有効応力経路を見ると、どの試験も塑性圧縮した後に変相し、正のダイレイタンスにより軸差応力が增大する挙動は同じであるが、その度合いはそれぞれの供試体寸法ごとに異なっている。具体的には、中型の方が小型に比べて過剰間隙水圧の上昇が大きく、それに伴う有効応力の減少度合いが大きい。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の試験結果に近く、初期有効拘束圧 100kPa ならびに 200kPa の大型の有効応力経路は、途中まで小型の有効応力経路に近い。しかしながら、大型は小型に比べて変相がはやく起こり、また正のダイレイタンスに伴う軸差応力の増加量も小さい。

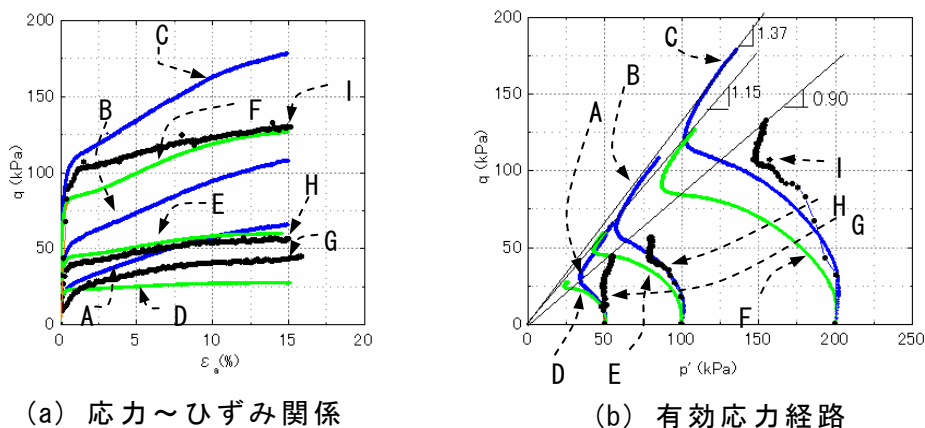


図-2 各試験ケースの三軸試験結果（大型：原粒度試料，中型・小型：通常粒調試料）

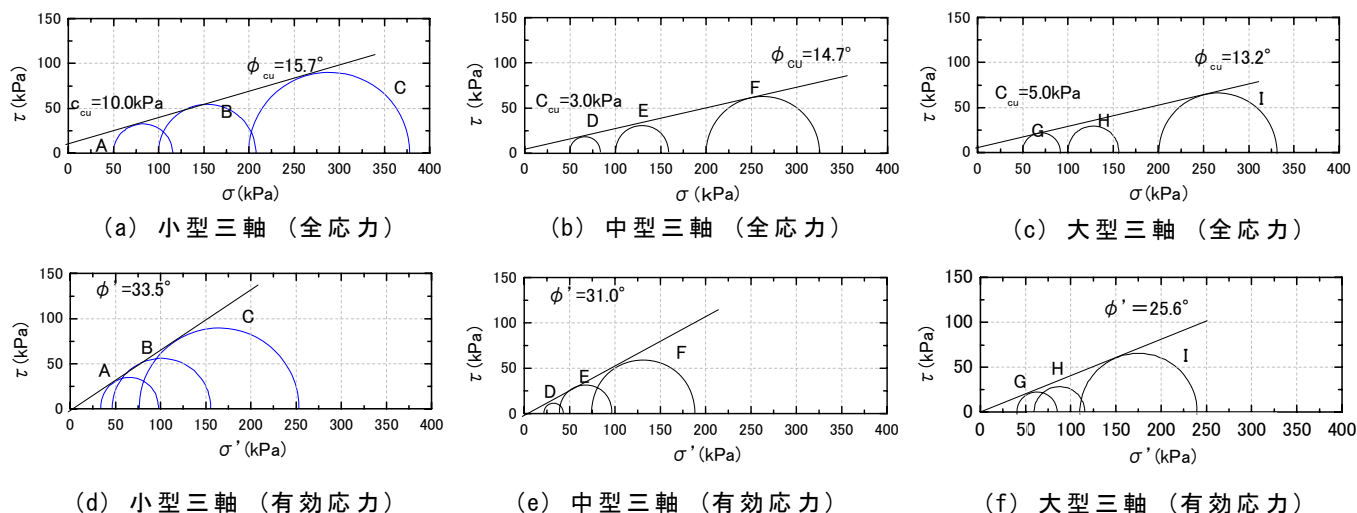


図-3 全応力と有効応力のモールの応力円（大型：原粒度試料，小型・中型：通常粒調試料）

図-3 は大型，中型および小型三軸試験での破壊時のモールの応力円ならびに強度定数を示したものである。全応力で整理した内部摩擦角はいずれもかなり小さく，比較的ゆる詰め砂であることがわかる。内部摩擦角 ϕ_{cu} の値は大型，中型および小型ではほとんど差がない。現状の河川堤防の安定性検討の実務においては，砂質土に対してはCU試験を実施し，それで求められる内部摩擦角 ϕ_{cu} のみを強度定数として用いることとされている¹⁾。その観点においては，今回の試験結果は，供試体寸法の影響は小さく，小型三軸試験で現地堤防砂の強度を評価しても差し支えないことになる。しかしながら，図-2 で見たように，各供試体寸法でせん断挙動は大きく異なっており，その差は図-3の有効応力で整理した内部摩擦角 ϕ' の差としても明確に表れており，CU試験では土のせん断特性まで把握できないことに注意する必要がある。

礫混じり材料の相対密度を計測することは非常に難しく試験規格も統一されていないが，今回，小型および中型三軸に用いた通常粒調試料について，直径10cm，高さ20cmのモールドを用いて，乾燥状態での最大密度，最小密度を計測した。その結果，今回の乾燥密度 1.57Mg/m^3 の供試体の相対密度は，小型供試体で36%，中型供試体で4%となり，この差が，小型三軸と中型三軸の試験結果の差となって表れたと考えられる。一方，大型供試体の相対密度については，供試体と同サイズの大型モールドで計測するだけの試料を確保していなかったために，直径15cm，高さ15cmのモールドで最大密度，最小密度を計測して相対密度を計算したところ-26%となり，極めてゆる詰めであることが確認できた。相対密度が負の値になるのは，モールドのサイズが小さく，大きな礫が混入した状態での正確な最小密度の計測ができなかったことによるものと考えられる。いずれにしても大型三軸の供試体は，中型供試体よりもゆる詰めであると考えられるが，変相するまでの塑性圧縮の程度は中型三軸よりも小さく，一概に相対密度だけで論じることは難しい。

4. 礫分含有率を同一とした粒度調整法による小型三軸試験結果

図-4 は図-2の各試験ケースの結果に礫分粒調試料による小型三軸試験結果を追加して示したものである。有効応力経路を見ると，有効拘束圧200kPaの礫分粒調試料の試験結果に若干難があると思われるが，総じて小型三軸の通常粒調試料の試験結果と比べてゆる詰め砂の傾向が大きくなる。特に変相後の軸差応力の増加は非常に小さくなり，正のダイレイタンスの発揮

が抑制されていることがわかる。また、有効拘束圧 50kPa ならびに 100kPa において、礫分粒調試料の有効応力経路は中型三軸の経路と近く、塑性圧縮の傾向が類似することがわかる。その一方で、変相角は大型三軸の変相角と極めて近く、変相後の軸差応力の増加量も大型三軸の試験結果に非常に近い。

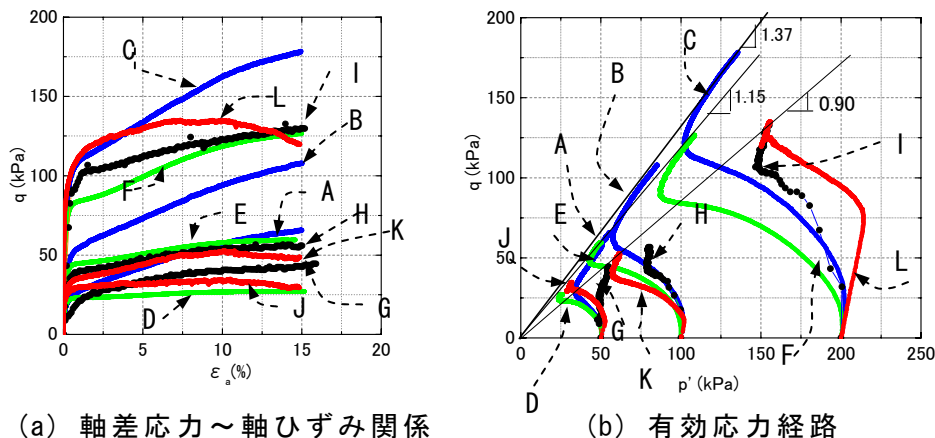


図-4 礫分粒調試料の小型三軸試験結果（図-2 に追記）

5. まとめ

河川堤防の実務では砂質土の評価には CU 試験が標準であり、それを想定して今回の一連の試験を全応力のみで整理すれば、大型三軸、中型三軸、小型三軸で得られる内部摩擦角 ϕ_{cu} には大きな差はなかった。しかしながら、せん断時の変形特性まで評価するために有効応力経路まで見れば、大型三軸、中型三軸、小型三軸の試験結果にはせん断挙動に大きな違いが観察された。その結果を受けて、本論文では大型三軸試験の試験結果が原粒度の土の変形・強度特性を最も正確に表していると仮定し、供試体に混入できる最大粒径に限度がある小型三軸を用いて、大型三軸に近似した変形・強度特性を得るための粒度調整法について検討も行った。その結果、単に大きな礫分を除外するのではなく、礫含有率を揃えて粒度調整することにより、小型三軸試験であっても、大型三軸試験の変形強度特性に近づけられることがわかった。

現在の堤防の法面すべりに対する安定性評価は、全応力に基づく円弧すべりを基本としている¹⁾が、昨今ではより詳細に安定性評価を行うための有効応力解析も提案されてきており^{2),3),4)}、今後はより一層地盤材料の特性を正確に把握することが河川堤防の技術者に求められている。

参考文献

- 1) (財)国土技術研究センター：河川構造の構造検討の手引き，2002.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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力－浸透連成解析，地盤工学ジャーナル，2008.