

締固め度が礫混じり砂の力学特性に及ぼす影響

名城大学大学院 学生会員 ○中島康介
名城大学 正会員 小高猛司・板橋一雄
㈱建設技術研究所 正会員 李 圭太

1. はじめに

河川堤防の詳細点検における浸透時のすべり破壊に対する安全性検討においては、砂や砂礫材料であれば全応力法を前提とした CU 三軸試験で得られた強度定数が用いられる。その際の供試体は、現地堤防の乾燥密度に合わせて作製されることが一般的であるが、その密度のわずかな違いで変形・強度特性が大きく異なることはあまり知られていない。本報では、供試体密度が力学特性に及ぼす感度を調べるべく、実在する河川堤防から採取した礫混じり砂を用いて、締固め度 90%, 85%, 80% の種類の供試体で三軸試験を実施した。試験条件は、 $\overline{\text{CU}}$ および CD の 2 種とし、排水条件の違いによる力学特性の差異についても検討を行った。

2. 試験手順

図 1 に現地堤防で採取した礫混じり砂の原粒度分布を示す。この土から粒径 9.5mm を超える礫を除外し、含水比 14% に水分調整した後に、2 つ割モールドを用いて 5 層に突き固めて供試体を作製した。突固め試験の結果より、締固め度 90%, 85%, 80% の供試体乾燥密度をそれぞれ 1.78g/cm^3 , 1.66g/cm^3 , 1.56g/cm^3 とした。供試体を三軸セルに設置して二重負圧法により飽和化を行った後に、載荷速度 $0.1\%/\text{min}$ で $\overline{\text{CU}}$, CD 三軸試験を実施した。初期の有効拘束圧は 50, 100, 200kPa とした。

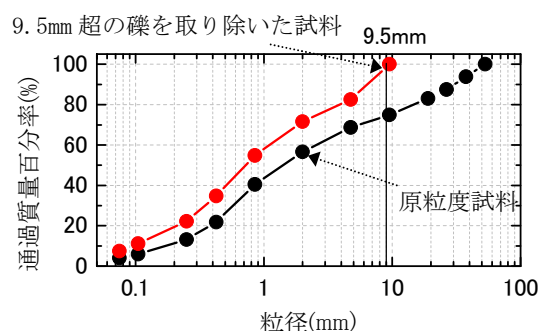


図 1 実験試料の粒度分布

3. 試験結果

図 2 および図 3 はそれぞれ、全試験の応力～ひずみ関係および有効応力経路を示す。図 2 からわかるように、締固め度 90% の供試体においては、CD 試験ではピーク強度を示しているのに対し、 $\overline{\text{CU}}$ 試験では軸差応力はだだらと単調に増加しつづける。一方、締固め度 85% および 80% の供試体においては、CD 試験ではせん断初期の軸差応力の増加傾向は異なるものの、だだらと軸差応力が増加するのに対して、 $\overline{\text{CU}}$ 試験では軸差応力は小さいながらもピーク強度を示している。図 3 の有効応力経路に着目すると、(a) に示す締固め度 90% の供試体の $\overline{\text{CU}}$ 試験においては、正のダイレイタンスに起因し、せん断の半ばから塑性膨張を伴うひずみ硬化を示し、典型的な密詰めの砂の挙動を呈していることがわかる。また、どの初期有効拘束圧の試験においても、最終的な軸差応力の差はほとんどない。初期有効拘束圧 50kPa および 100kPa の $\overline{\text{CU}}$ 試験では、CD 試験で得られる破壊線（破壊応力比 1.58）に漸近してゆくが、初期有効拘束圧 200kPa の試験ではその破壊線に漸近しないまま最終状態となった。図 3(b) に示す締固め度 85% の試験結果をみると、初期有効拘束圧が小さい試験では塑性膨張を示し、初期有効拘束圧が大きい試験では塑性圧縮していることがわかる。図 3(c) の締固め度 80% の試験結果を見ると、 $\overline{\text{CU}}$ 試験においては、ピーク強度を示した後、塑性圧縮を伴うひずみ軟化を示しており、典型的なゆる詰め砂の挙動を呈していることがわかる。破壊応力比をしてみると、締固め度が小さくなるにつれて、CD 試験および $\overline{\text{CU}}$ 試験で得られた破壊応力比に差が生じていることがわかる。また締固め度 80% においては、 $\overline{\text{CU}}$ 試験での破壊応力比は CD 試験に比べてさらに小さくなり 1.04 となった。これは後述するように、ゆる詰め砂になると $\overline{\text{CU}}$ 試験での ϕ' と CD 試験での ϕ_d が、同じ有効応力で整理した内部摩擦角であっても大きく異なることを示唆している。

キーワード 強度定数 礫まじり砂 締固め度

名城大学理工学部建設システム工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501 Tel 052-838-2347)

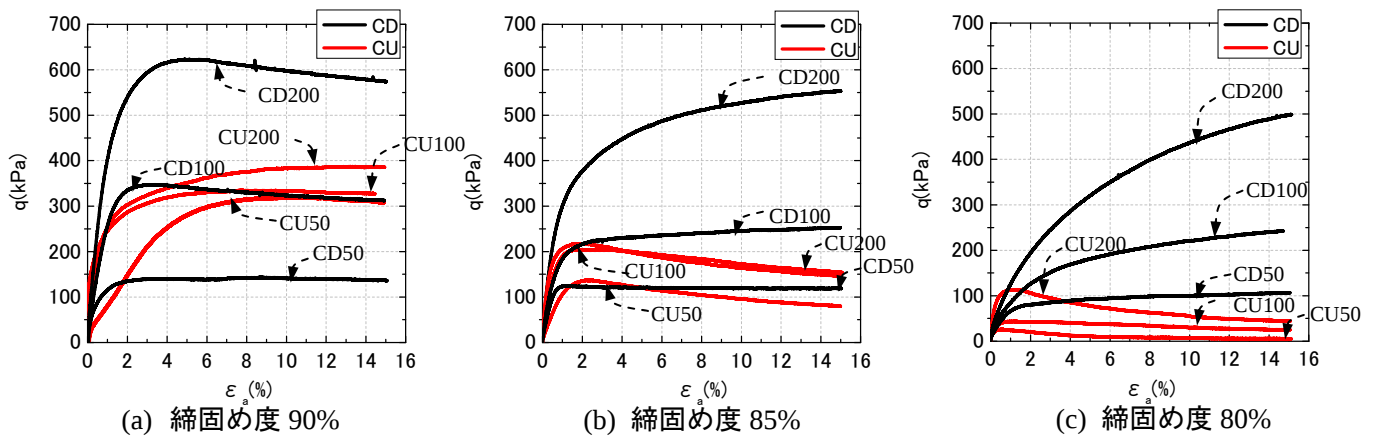


図2 応力～ひずみ関係

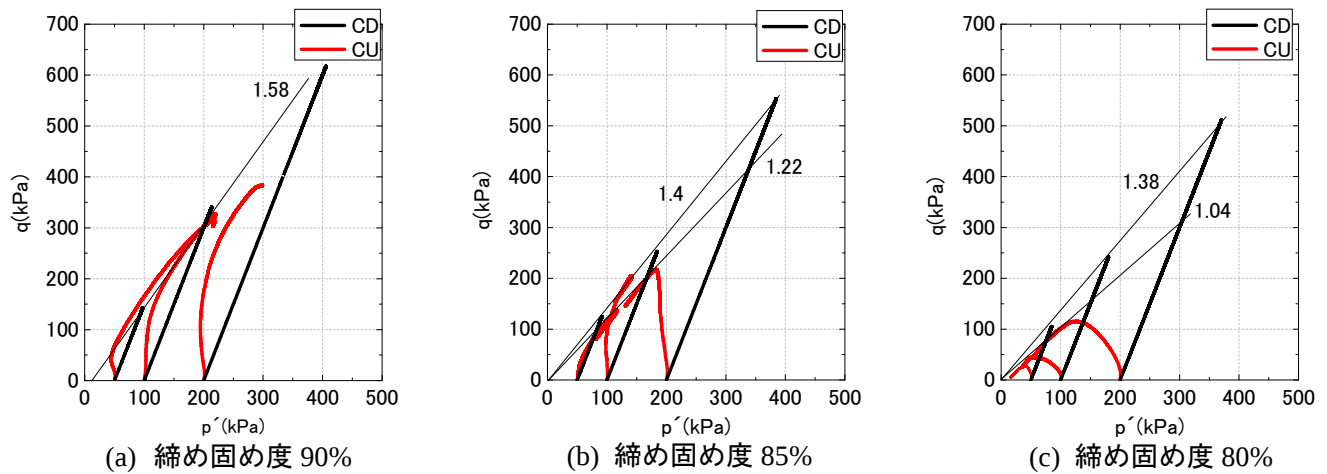


図3 有効応力経路

表1はすべての実験ケースにおいて破壊時のモールの応力円と破壊規準から得られた内部摩擦角と粘着力をまとめたものを示す。締固め度 90%および締固め度 85%では $c_{cu}=110\text{kPa}$, $c_{cu}=50\text{kPa}$ と非常に大きな粘着力が見られ、逆に締固め 80%では粘着力が現れないという差があるものの、いずれも全応力で整理したモールの応力円で得られた内部摩擦角 ϕ_{cu} は非常に小さい値となっている。有効応力で整理したモールの応力円で得られた ϕ' は締固め度の違いにより内部摩擦角も大きく異なる。CD 試験の結果を整理したモールの応力円で得られた ϕ_d は締固め度によって差があるものの、 ϕ' ほどの差は無いことが分かる。いずれの試験結果においても、試験条件別の内部摩擦角の大きさは、 $\phi_{cu} < \phi' < \phi_d$ の順になっている。CD 試験は基本的に有効応力であることから、CD 試験で得られる強度定数は、CU 試験で得られる有効応力の強度定数と近いものとなるように考えられる。しかしながら今回の試験結果では、締固め度が小さくなるにつれて ϕ' と ϕ_d に大きな差が生じている。

表1 内部摩擦角と粘着力

実験の種類	ϕ_{cu}	c_{cu}	ϕ'	ϕ_d
締固め度 90%	11.4°	110kPa	36.4°	38.8°
締固め度 85%	11.8°	50kPa	30.4°	35.3°
締固め度 80%	14.2°	0kPa	23.1°	34.3°

5. まとめ

河川堤防のすべりに対する安全性検討を行う場合には、全応力法を基本とした安定解析を実施することから、強度定数は CU 試験で得られる ϕ_{cu} を用いることになっている。その際、粘着力は考慮せずに円弧すべり安定計算を行うために、算出される安全率は非常に小さな値となる。この安全率は安全側ではあるものの、すべりに対して不適格であると過度に判定される堤防も多く発生してしまうなど不都合も多い。そのような場合には、現場の判断で CD 試験で得られる ϕ_d を強度定数として用いる事例もしばしば見られる。しかしながら、今回の試験結果もわかるように、CD 試験による ϕ_d が大きい場合でも、有効応力経路を見る限り構造的に不安定なゆる詰め傾向が強い地盤材料もあるので、CD 試験結果を用いる場合にはダイレイタンシー特性や透水性まで含めて、十分にその力学特性を把握しておく必要がある。