

砂質堤体土の簡便サンプリング法の提案と採取試料の強度特性の評価

Proposal of simple sampling method for sandy river embankment soils and evaluation of strength properties of the sampled soils

小高猛司¹, 李圭太², 石原雅規³, 崔 瑛⁴, 田村太郎⁵, 高木竜二⁵, 尤 源⁵

1 名城大学・理工学部・社会基盤デザイン工学科・kodaka@meijo-u.ac.jp

2 株式会社建設技術研究所・大阪本社・水工部・lee@ctie.co.jp

3 国立研究開発法人土木研究所・つくば中央研究所・地質・地盤研究グループ・isihara@pwri.go.jp

4 名城大学・理工学部・社会基盤デザイン工学科

5 名城大学大学院・理工学研究科

概 要

堤防の開削工事や開削調査などの際は、堤体内部の堤体土を採取する絶好の機会であるが、短時間に効率よく、かつ高品質なサンプリングを実施することが望まれる。本研究では、打ち込み式簡易サンプラーを開発し、実際の堤防にて開発した簡易サンプラーを用いる方法と塩ビ管を直接打ち込む方法の2種類の手法で、乱れの少ない堤体土を採取し、三軸試験によりその採取土の力学特性を評価した結果を示す。試験の結果、両者のサンプラーで採取した試験試料の力学挙動に差が生じたが、変相状態で強度特性を評価すれば、両者に大きな差がないことが示された。

キーワード：砂質堤防土，サンプリング，三軸試験，簡易サンプラー

1. はじめに

堤防の開削工事や開削調査などの際は、堤体内部の堤体土を採取する絶好の機会であるが、短時間に効率よく、かつ高品質なサンプリングを実施することが望まれる。著者らは、国内の多数の河川堤防の開削工事や開削調査の際に、ボーリングによるチューブサンプリングや手掘りによる簡易的なサンプリング手法を用いて堤体試料の採取を行い、それら試料を用いて三軸試験を実施することにより堤体土の力学特性の評価を試みてきた^{1)~3)}。本論文では、新たに試作した打ち込み式簡易サンプラーを加えて、乱れの少ない堤体土の採取を試みるとともに、三軸試験を実施して力学特性の観点から異なるサンプリング手法の試料の品質について検討した結果を示す。

2. サンプリングの概要

サンプリングを実施したのは、上流に花崗岩帯を擁するために、比較的均質なマサ土で築堤された砂質堤防である。樋管改築のための開削工事(図1)の機会に、堤体内部の堤体土のサンプリングを実施した。サンプリング方法は次の2種類である。方法A：短管太径の塩ビ管をそのまま堤体に打ち込む方法、方法B：長管細径の塩ビ管を内管とす

る特製の2重管サンプラーを打ち込む方法。

図2は方法A実施の様子である。内径100mmの塩ビ管(VP100)を長さ190mmに切断し、片側の端面をグラインダーで鋭利に削って刃先に加工している。この塩ビ管を、極力土を乱さないように丁寧に打ち込み、その後、手掘りで周囲の土を取り除いて取り出す(図3)。1本の塩ビ管につき、三軸試験の1本の供試体になるために、同一箇所から多数のサンプリングをする必要がある。図4は方法Bに使用した新たに作製した2重管サンプラーである。内径71mm、長さ500mmの薄肉塩ビ管(VU65)を内管としてセットでき、土質に応じて変更可能な脱落防止具も用意した。サンプリングの手順は、ハンマーを用いて打ち込み(図5)、打ち込んだサンプラーを引き抜き(図7)、解体して内管の採取試料を養生する(図7)。また、このサンプラーを用いて、堤体法面での採取を想定した斜め打ち込みによる採取(以下方法B-iと標記)も行った。図8が打ち込み中であり、図9は引き抜いた様子である。なお、このサンプラーは他の開削現場においても使用してきたが、当初は1mの塩ビ管を用いる仕様にしていたものの、使用性ならびに室内試験時の供試体の必要本数などを勘案しながらの試行錯誤の末に50cmの仕様とした。方法A、Bいずれの試料も、採取後に実験室に搬入してから凍結し、直径50mm、高さ100mmの円柱供試体に成型した。



図1 開削工事中の堤防



図2 塩ビ管の打ち込み(方法A)



図3 塩ビ管の掘り出し(方法A)



図4 2重管サンプラー



図5 サンプラーの打ち込み(方法B)



図6 サンプラーの抜き出し(方法B)



図7 採取試料の養生(方法B)



図8 斜め打ち込み(方法B-i)



図9 斜め抜き出し(方法B-i)

3. 室内試験結果

凍結供試体を三軸試験装置に設置し、二重負圧法による飽和化を行った後、15時間程度の静置によって供試体を完全に解凍した。初期有効拘束圧は 50, 100 および 150kPa とし、CU 試験を実施した。載荷速度はいずれの試験でも 0.1%/min とした。図 10, 11 および 12 にそれぞれ、方法 A, 方法 B および方法 B-i で採取した供試体での試験結果を示す。

図 10 より、方法 A で採取したいずれの供試体においても、軸ひずみ 2.5%程度まで軸差応力が増加し、その後ひずみ軟化が見られる。図 11 の方法 B においては、いずれのケースでも有効応力経路を見ればわかるように、せん断初期で若干塑性圧縮した後正のダイレイタンスが発現し、せん断終了まで軸差応力が増加し続けている。図 12 の斜め打ち込みした方法 B-i においては、有効拘束圧 50kPa のケースではせん断終了まで軸差応力が増加し続けているが、有効拘束圧 100kPa と 150kPa のケースでは軸ひずみ 3%程度まで軸差応力が増加し、その後ひずみ軟化挙動が見られる。

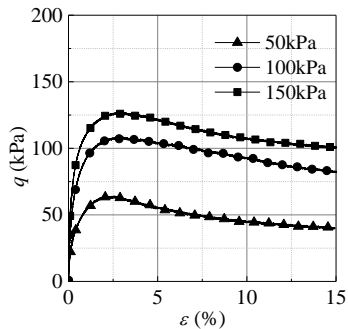
方法 A と方法 B に用いた供試体の試験前の凍結状態での密度は、バラツキはあるものの両者の間に有意な違いは認められなかった。この試験結果のみで一般的な見方

をすれば、方法 A はややゆるめ砂、方法 B はやや密締め砂の傾向が見てとれる。そのため、方法 B が現地の堤防土を忠実に表現しているとするれば、方法 A は何らかの要因による「乱れ」によりゆるんだと解釈できる。逆に、方法 A が現地の堤防土を忠実に表現しているとするれば、方法 B はサンプラー打ち込み時に密実化したと解釈できる。ただし、実際のところの判断は難しい。筆者らの既往の研究¹⁾によれば、骨格構造が低位化した供試体ほど三軸試験のせん断中に正のダイレイタンスを発揮するのに対して、骨格構造が高位な供試体はせん断初期には頑張るものの、ある限度を超した途端にカタストロフィックな脆性破壊を呈することが実験と解析によって確認されている。その一面だけから見ると、方法 A で採取した供試体の方が高位な骨格構造を持つと解釈できないことはない。しかし、図 10 と 11 を比較すると、どの有効拘束圧においても、軸ひずみ 1%程度で方法 A が急激に軟化するまでは、応力ひずみ関係ならびに有効応力経路のいずれも両方法はほぼ一致しており、方法 A と方法 B は同じ試験結果と言える。骨格構造の違いは初期剛性などにも現れる¹⁾は非ずであるが、今回の実験では両方法の間に違いが全く見られないことから、確信を持って骨格構造の高低についての判断、すなわちどちらが実際の堤防土を表現しているのかについての判断は現時

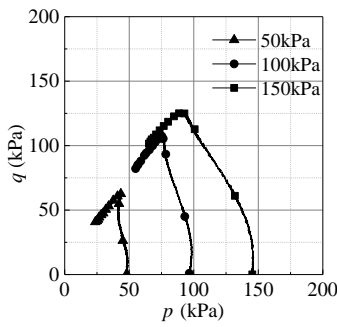
点では難しい。土の乱れが各種の地盤定数へ及ぼす影響について、更なる研究が必要である。

一方、斜めに打ち込みをした方法 B-i においては、試験前の供試体密度の段階で明らかに方法 A や B の供試体よりも密度が小さかった。法面に垂直になるように斜めにサンプラーを打ち込む時に、ハンマーの打撃がぶれやすくなり、塩ビ管に採取した土の密度が小さくなった可能性がある。場合によっては、図 8 に見えるように、鉛直打ち込みの位置（写真右の穴）と若干離れていることにより、堤体土質の差があった可能性も否定できない。現在、粒度分析などの検討中である。図 12 に示す試験結果では、有効拘束圧 50kPa のケースではせん断終了まで軸差応力が増加し続けているが、有効拘束圧 100kPa と 150kPa のケースでは軸ひずみ 3% 程度まで軸差応力が増加し、その後ひずみ軟化挙動が見られる。図 11 に示す垂直打ち込みによる方法 B によって採取した供試体よりも、明らかにゆる詰め砂の傾向が見て取れる。

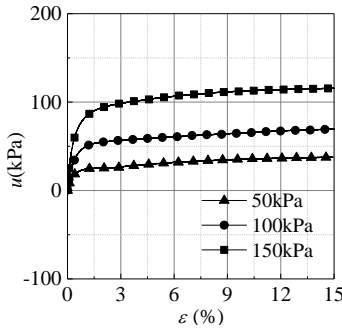
図 13~15 に三軸試験より得られたモールの応力円と破壊規準線を示す。それぞれ上下 2 つの図は、同じ \overline{CU} 試験を全応力と有効応力で整理した結果であり、上側はいわば CU 試験結果と同等と解釈できる。全応力で整理した場合、見かけの粘着力が発生し、内部摩擦角は非常に小さくなる。見かけの粘着力については、図 13 と 14 の方法 A と B の間で差が生じていることがわかる。これは、全応力で評価する場合には、最大軸差応力の値をそのまま「(非排水) せん断強さ」として扱うことに起因している。今回の方法 A と B においては、サンプリングの方法の違いによって両者の試験結果の後半に相違が見られたことから、この粘着力の差に最も大きく現れたと解釈でき。一方、有効応力で整理すると、せん断中のダイレイタンスー特性が反映されるために、いずれの方法の供試体でも砂質土としては適正なモール円が得られている。



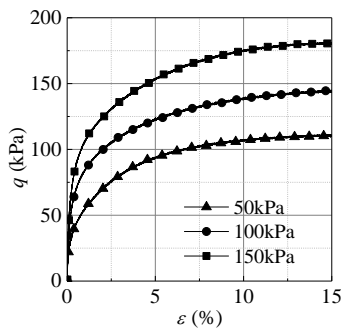
(a) 軸差応力～軸ひずみ関係



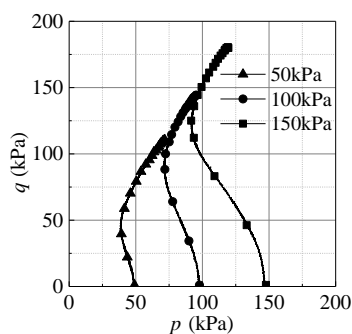
(b) 有効応力経路



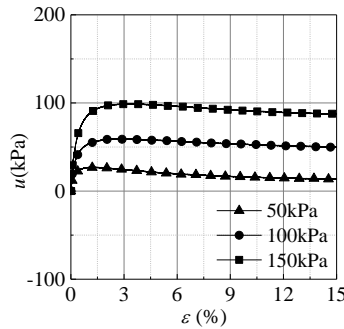
(c) 間隙水圧～軸ひずみ関係
図 10 \overline{CU} 試験結果 (方法 A)



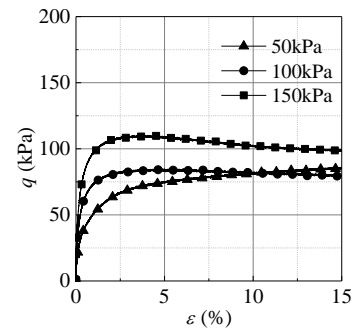
(a) 軸差応力～軸ひずみ関係



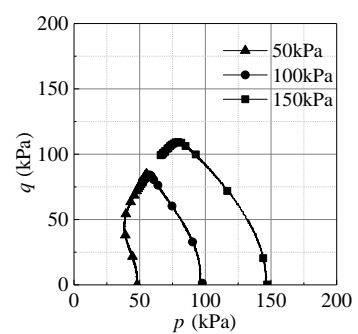
(b) 有効応力経路



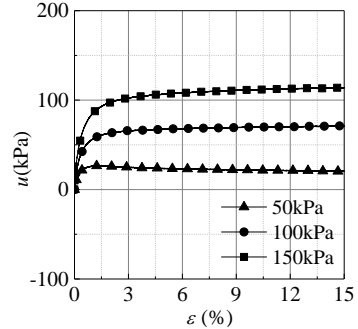
(c) 間隙水圧～軸ひずみ関係
図 11 \overline{CU} 試験結果 (方法 B)



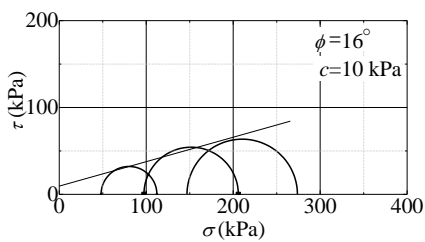
(a) 軸差応力～軸ひずみ関係



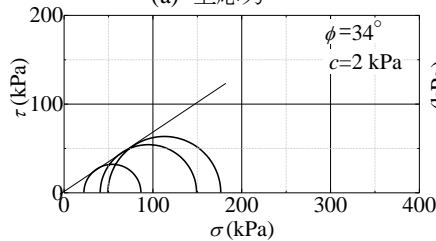
(b) 有効応力経路



(c) 間隙水圧～軸ひずみ関係
図 12 \overline{CU} 試験結果 (方法 B-i)

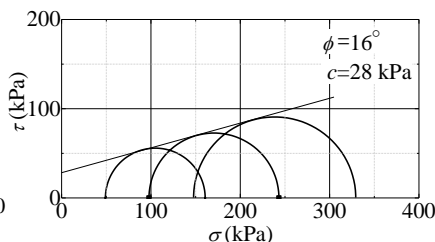


(a) 全応力

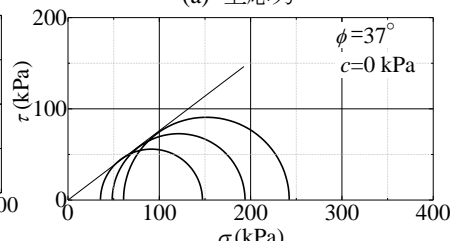


(b) 有効応力

図 13 モールの応力円 (方法 A)

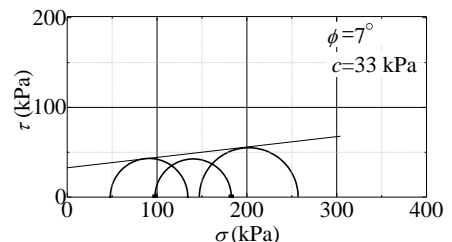


(a) 全応力

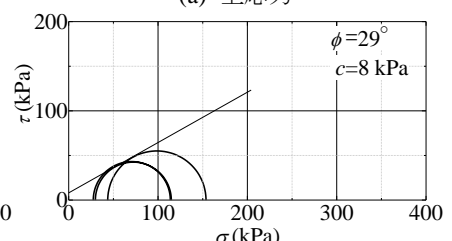


(b) 有効応力

図 14 モールの応力円 (方法 B)



(a) 全応力



(b) 有効応力

図 15 モールの応力円 (方法 B-i)

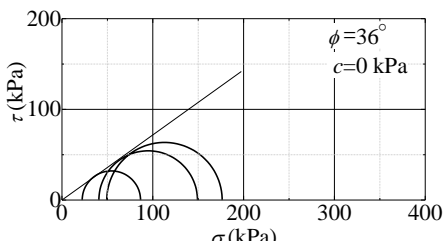


図 16 変相状態での評価 (方法 A)

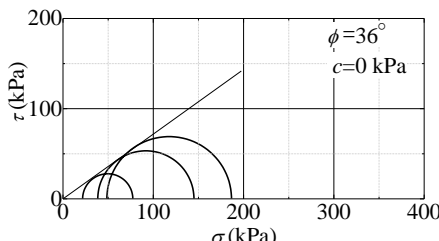


図 17 変相状態での評価 (方法 B)

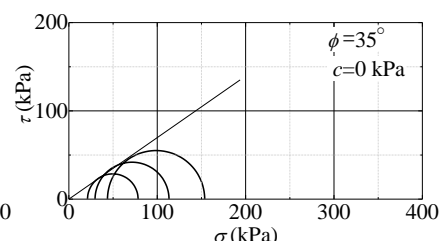


図 18 変相状態での評価 (方法 B-i)

4. 変相状態での強度定数の評価

\overline{CU} 試験における変相状態で整理した結果も示す。変相状態とは、図10に示すように最大軸差応力を示すようなゆる詰め傾向の場合はその軸差応力が最大となる状態と考え、図11のように密詰め傾向の場合には過剰間隙水圧が最大となる状態と考える²⁾。図16~18に変相状態の有効応力で評価したモールの応力円と破壊規準を示す。また、この変相状態で評価する内部摩擦角を ϕ_p と表記することとする。ゆる詰め傾向の方法Aの場合には、 ϕ_p は試験基準に従い決定する ϕ より若干大きくなり、逆に密詰め傾向の方法Bの場合には、 ϕ_p は試験基準に従い決定する ϕ より若干小さくなる。これは、図10と11との比較でも述べたとおり、方法AとBとでは、小ひずみレベルの変相状態までの試験結果がほとんど同じだったことを反映した結果である。現時点では、どちらの手法が実際の堤防を忠実に表しているのか不明瞭であることと、そもそも図11に示す方法Bにおける有効応力経路で現れている変相後の軸差応力の上昇は、完全非排水条件という半ば非現実的な条件下における正のダイレイタンスの拘束によるものであり、実際のすべり破壊時には期待できないことなどから判断すれば、両者の差が生じる前の変相状態で強度定数を評価することも不確実性の高い強度定数を決定するのにあたり、有効な手段である。

5. まとめ

サンプリング方法AとBのどちらが現地堤防を忠実に再現しているのかについては、まだ今後の研究を待たねばならないが、変相状態で土質定数を評価するのであれば、サンプリング方法による違いはそれほど大きなものではない。また、いずれの方法においても、サンプリングの場数を踏むに従って、乱れを少なくすることは可能であり、方法AとBによる供試体の試験結果は、今後より近づく余地は十分にある。ただし、方法AとBにはそれぞれ長短があるため現場による使い分けが可能であるが、短時間でのサンプリングが必要であれば、現場でのハンドリングを考慮すると2重管サンプラーを用いる方法Bの方が有利であると考えている。

謝辞: サンプリングに協力いただきました、近畿地方整備局の皆様、土木研究所の研究員の皆様、武田ジョリサーチの皆様に期して謝意を表します。

参考文献

- 1) 小高猛司, 崔瑛, 李圭太, 森涼香, 兼松祐志: 河川堤防の構造の程度が力学特性の評価に及ぼす影響, 河川技術論文集, 第18巻, pp.339-344, 2012.
- 2) 小高猛司, 崔瑛, 小林芳樹, 武楊, 李圭太: 河川堤防の安定性照査に用いる適切な強度定数の検討, 第59回地盤工学シンポジウム論文集, pp.145-150, 2014.
- 3) 小高猛司, 崔瑛, 李圭太, 兼松祐志, 小林芳樹: 三軸試験の試験条件が河川堤防土の強度定数に及ぼす影響, 河川技術論文集, 第19巻, pp.81-87, 2013.