

細粒分が卓越した九頭竜川堤防の原位置試験と室内試験による力学特性の評価 Evaluation of Mechanical Properties of Kuzuryu River embankment with Rich Fine Contents by In-situ and Laboratory Tests

児玉直哉¹，小高猛司²，李圭太³，久保裕一⁴，廣田俊輝¹

- 1 名城大学大学院・理工学研究科社会基盤デザイン工学専攻
- 2 名城大学・理工学部社会基盤デザイン工学科・kodaka@meijo-u.ac.jp
- 3 日本工営・コンサルティング事業統括部 / 名城大学特任教授
- 4 中部土質試験協同組合・技術部

概 要

本論文では、福井県の九頭竜川右岸 12.0k 付近における樋門の新築に伴う堤防開削調査にて実施した現場透水試験等の原位置試験、並びにそこで採取した試料を用いて実施した三軸試験等の室内試験の結果について示した。三軸試験は \overline{CU} 試験と吸水軟化試験を実施した。採取試料はすべて $F_c=70\sim 90\%$ 程度と細粒分が卓越していたが、開削断面の上流側と下流側で物理特性が異なっていた。 \overline{CU} 試験では、全地点でひずみ硬化挙動を示し、比較的高いせん断強度を示す堤体材料であると評価された。しかし吸水軟化試験では、下流側は低有効応力条件下で高いせん断強度を示す浸透時に強固な堤体材料であるのに対して、上流側は浸透時に脆弱な堤体材料であると評価された。

キーワード：河川堤防，吸水軟化試験，三軸試験，細粒土

1. はじめに

河川堤防の質的検討にあたり、透水係数およびせん断強度などの力学特性の評価は非常に重要である。我々研究グループでは、これまで様々な河川堤防の堤体盛土について現場調査や室内試験に関する研究を通して、堤体の現場透水係数や堤体土の力学特性を適切に評価する手法の検討を行ってきた(例えば1)~4)。本論文では、福井県の九頭竜川右岸 12.0k 付近(図1)における樋門の新築にあわせて実施した堤防の開削調査ならびにその後の室内試験の結果について示す。開削調査においては、堤体土質の観察の他、現場密度試験、現場透水試験、室内力学試験用の試料採取を行った。室内力学試験では、採取試料を用いた締固め試験による堤体の締固め度の把握、室内透水試験、三軸試験により、堤体土の力学特性を把握した。今回、堤体土の力学特性の評価に伴い、現場透水試験と室内透水試験の比較、我々研究グループが提案する吸水軟化試験⁵⁾による堤防の浸透時のすべり破壊に対する耐性についての検討も実施した。このように、試験法による力学特性の違いにも着目しながら、九頭竜川堤防土の透水性およびせん断強度などの力学特性の評価を実施した。

2. 現場透水試験と室内透水試験



図1 開削調査箇所(地理院地図参照)

2.1 透水試験概要

現場透水試験は開削地点の上流側と下流側の二つの開削断面にて実施した(写真1, 2)。下流側断面はA地点(川表の法先)、B地点(川裏法面)、C地点(川裏法先)、上流側断面はD地点(川表法肩)、E地点(川裏法肩)の計5地点に分け、各地点について変水位法で現場透水試験を実施した。最初、マリオットサイフォンを用いた方法(JGS-1316)と水道メーターにより注水量を計測する方法を試みたが、低透水で計測が困難であったため、試験孔のケーシング部分を用いた変水位法により実施した。試験孔は、特性の鋼製ガイドリング(深さ15cm、直径30cm)を使用して直径30cm、深さ40cmに整形し、底部に市販のバラス砕石を敷き詰めた。室内透水試験は、現場透水試験を行った

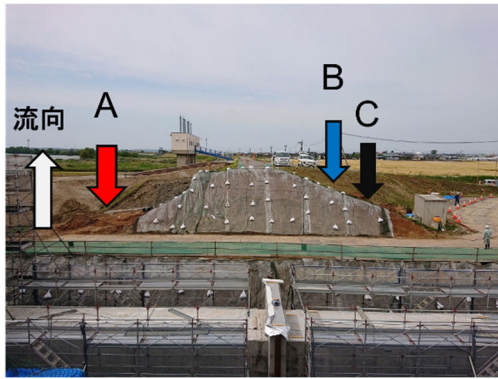


写真1 堤防開削断面（下流側）

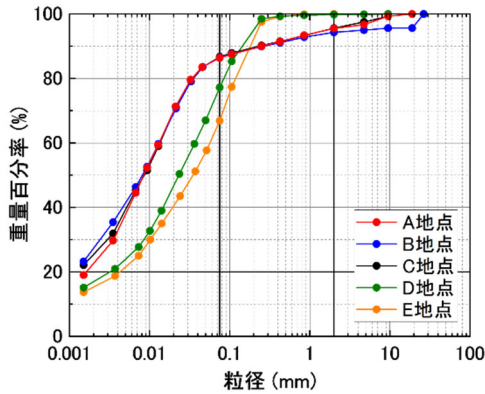


図2 粒度分布（現場透水試験）

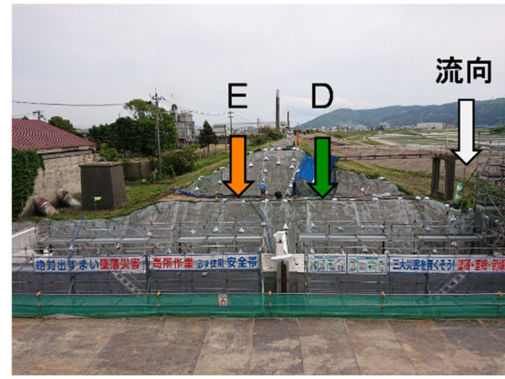


写真2 防開削断面（上流側）

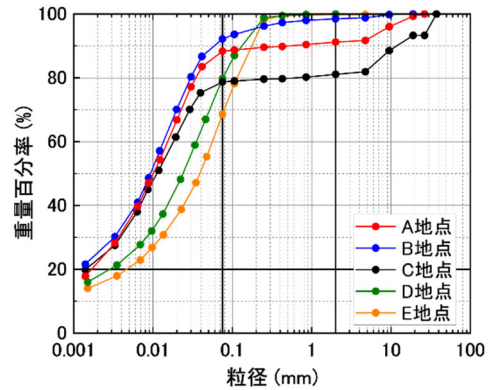


図3 粒度分布（室内透水試験）

試験箇所近傍それぞれ 2 箇所ずつから採取した不攪乱試料を用いて実施した（A-1, A-2 のように表記）。具体的には、内径約 10cm の市販の塩ビ管を高さ約 19cm に切断した上で、片側先端を刃先に加工して簡易サンプラーとし、丁寧に地面に押し込んで採取した⁶⁾。採取試料は一旦凍結させてからモールドから脱型し、内径 15cm の透水試験用のモールドと供試体外周の間をベントナイトで充填して透水試験を実施した。すべて変水位法で透水試験を実施した。

2.2 物理特性

図 2 は現場透水試験を実施した各試験孔での採取試料の粒度分布、図 3 は室内透水試験の実施後試料の粒度分布を示す。全地点で $F_c=70\sim 90\%$ 程度と細粒分が卓越しており、シルトを 50% 程度含んでいる。ただし、下流側の A, B, C 地点と上流側の D, E 地点で異なる物理特性の傾向がみられ、それは視覚的にも表れている。下流側は粘土分が多く 40% 程度含んでおり、液性限界 $w_L=60\%$ 程度、塑性指数 $I_p=20$ 程度で高液性限界と分類される。上流側は砂分が多く 20~30% 程度含んでおり、液性限界 $w_L=35\%$ 程度、塑性指数 $I_p=10$ 程度で低液性限界と分類される。

現場開削調査にて現場密度試験も実施した。現場密度試験は A~E 地点の現場透水試験と同じ試験孔で実施した。現場密度は A, B, C 地点は 1.60g/cm^3 程度、D, E 地点は 1.80g/cm^3 程度であった。

現場開削調査にて採取した試料を用いて締固め試験を実施した。その結果、A, B, C 地点は最適含水比 33.1~35.1%、

最大乾燥密度 $1.292\sim 1.320\text{g/cm}^3$ 、D, E 地点は最適含水比 19.5~20.1%、最大乾燥密度は $1.577\sim 1.585\text{g/cm}^3$ であった。そこから現地の締固め度を算出すると、A, B, C 地点は $D_c=78.0\sim 85.1\%$ 、D, E 地点は $D_c=89.5\sim 90.4\%$ であった。これらを比較すると、D, E 地点のほうが締固め度が高いことがわかる。

2.3 透水試験結果

現場透水試験および室内透水試験結果をそれぞれ表 1, 2 に示す。表には、試験後の試料で粒度試験をして得られた 20% 粒径 D_{20} を用いた Creager 法による推定透水係数も示した。ただし、高い細粒分含有率により D_{20} が不明で推定透水係数が算出できない試験試料もあった。

表 1 の現場透水試験結果に着目する。全地点で 7 乗から 8 乗のオーダーの透水係数が得られた。地点ごとで値に大きな差はみられず、全地点で低い透水係数を示した。ただし、現場状況から D, E 地点は既設樋門の埋戻土の可能性や、堤防断面内部であるために上載荷重で土が締め固まっている可能性が考えられる。

表 2 の室内透水試験結果に着目する。A, B, C 地点では 7 乗から 8 乗のオーダー、D, E 地点では 5 乗から 6 乗のオーダーの透水係数が得られた。A, B, C 地点では現場透水試験と比較的近い透水係数を示したが、D, E 地点では現場に比べて高い透水係数を示した。これは前述したように、D, E 地点の現場では上載荷重によって土が締め固まっている可能性が要因として考えられ、実際に現場締固め度は D, E 地点の方が A~C 地点に比べて高くなっている。

表 1, 2 の Creager 法による推定透水係数に着目する。推定値は図 2, 3 の 20% 粒径 D_{20} から算出している。表 1 における推定値では 8 乗から 9 乗のオーダーの透水係数を示した。これは現場透水試験よりも 1~2 オーダーほど低い透水係数の値である。表 2 における推定値でも 8 乗から 9 乗のオーダーの透水係数を示している。これは室内透水試験よりも 1~3 オーダーほど低い透水係数の値である。以上より、今回のような細粒分が卓越した堤体材料では、Creager 法による推定透水係数は試験値に比べて低く算出される傾向にあった。

現場透水係数、室内透水係数、Creager 法による推定透水係数と D_{20} の関係を両対数で整理したものを図 4 に示す。図 4 より、室内透水係数と推定透水係数には粒度との関係がみられるが、現場透水係数には見られない。これは、サンプルが少なく、粒度の範囲が 0.001~0.01mm と非常に狭いためであると考えられる。したがって、現場と室内透水係数の関係の比較をするのは困難である。室内と推定透水係数の関係を比較すると、粒度に関係なく室内透水係数の方が 1~2 オーダー程度高くなるのが分かる。また、現場透水係数は粒度に関係なく推定透水係数に比べて高い値を示している。以上の結果は、著者らが過去に実施した各地での調査結果^(例えば 1)~4)においても類似する点がある。堤体の透水性の過小評価は、浸透に対しては危険側の評価に繋がるため、粒度から推定した透水係数を過信すべきではないことに注意しなければならない。

3. 三軸試験

3.1 試験概要

三軸試験は通常の \overline{CU} 試験と我々研究グループの提案する吸水軟化試験を実施する。使用する試料は、現場透水試験を実施した A~E 地点の試験孔近傍でそれぞれ採取した不攪乱試料である。試料採取は簡易サンプリングを用いた⁷⁾。具体的には、内径 71mm、長さ 500mm の塩ビ管 VU65 を内管とする特性の 2 重管サンプラーを打ち込んで採取した後に凍結させた上で規定寸法(直径 50mm, 高さ 100mm)に成型する方法である。粒度分布は図 2 の現場透水試験のものを参考にする。締固め試験から不攪乱試料の締固め度を評価すると、A, B, C 地点は $D_e=87.5\sim97.7\%$ 、D, E 地点は $D_e=92.6\sim100.8\%$ であり、いずれも比較的高く、特に D, E 地点はより高いことがわかる。これらの値は章 2.2 で示した現地の締固め度に比べて高い。三軸試験について、 \overline{CU} 試験は拘束圧 50, 100, 150kPa の 3 通り、吸水軟化試験は拘束圧 50, 100kPa の 2 通りで実施した。

3.2 吸水軟化試験概要

吸水軟化試験とは、三軸試験装置を用いた試験法である。まず、 \overline{CU} 試験と同様に等方圧密過程を行う。そして、排水条件で所定の軸差応力の異方応力状態にした後、軸差応力を一定に保ちつつ間隙水圧を上昇させて供試体を破壊に至らしめる。間隙水圧は、供試体の軸変位が落ち着くこと

表 1 現場透水試験結果

試験孔	現場透水係数 (m/s)	D_{20} (mm)	Creager 法 (m/s)
A	1.80×10^{-7}	0.0017	1.25×10^{-8}
B	1.85×10^{-7}	-	-
C	5.39×10^{-7}	0.0011	6.86×10^{-9}
D	8.37×10^{-8}	0.0033	3.12×10^{-8}
E	1.08×10^{-7}	0.0044	4.65×10^{-8}

表 2 室内透水試験結果

試験孔	室内透水係数 (m/s)	D_{20} (mm)	Creager 法 (m/s)
A-1	5.38×10^{-7}	0.0018	1.35×10^{-8}
A-2	3.29×10^{-7}		
B-1	2.45×10^{-8}	0.0010	6.01×10^{-9}
B-2	6.70×10^{-8}		
C-1	7.00×10^{-7}	0.0014	9.57×10^{-9}
C-2	9.36×10^{-7}		
D-1	1.29×10^{-5}	0.0030	2.74×10^{-8}
D-2	5.30×10^{-6}		
E-1	1.48×10^{-6}	0.0049	5.39×10^{-8}
E-2	1.04×10^{-6}		

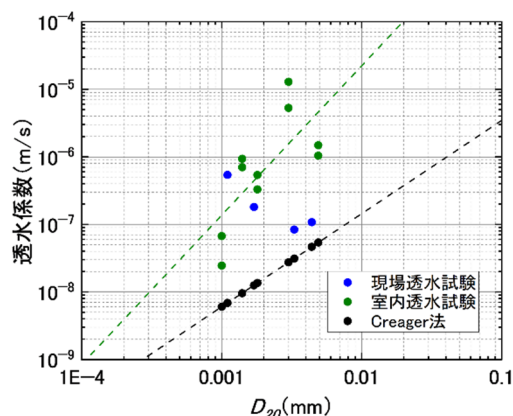


図 4 20% 粒径と透水係数の関係

を確認しながら、1~5kPa ずつ徐々に上昇させる。この試験は、有効応力を精密に制御することによって対象土の骨格構造が急激に変化しはじめる有効応力条件を探索し、浸透条件下での破壊条件を正確に把握できる。なお、破壊に至る直前まで、間隙水圧を上昇させても供試体内へ吸水もせず、軸ひずみもほとんど発生しないが、ある有効応力状態に到達した途端に急激に軸ひずみが発生して破壊に至る。

我々研究グループではこれまでに複数の現地堤体試料を用いて吸水軟化試験を実施し、河川堤体土の浸透滑りに対する耐性の評価を行ってきた。図 5 は吸水軟化試験での有効応力経路を示している。図 5 の黒色の点線は \overline{CU} 試験の変相応力比、赤と青色の点線は吸水軟化試験の破壊応力比を示している。変相応力比は \overline{CU} 試験の変相点(過剰間隙

水圧のピーク値)、破壊応力比は吸水軟化試験の破壊点で整理した応力比である。この変相応力比と破壊応力比の2線を比較することで浸透滑りに対する耐性の評価を行う。パターン1(図5(a))のように、変相応力比と破壊応力比が同程度で比較的小さい応力比を示す場合、浸透条件下での低有効応力では摩擦抵抗角に応じたそれなりのせん断抵抗しか発揮しないので浸透に対しては脆弱な堤体土であると評価できる。これは砂質土に近い性質の堤防土によくあらわれる。次にパターン2(図5(b))のように、破壊応力比が高い値、すなわち引張破壊を表す最大値3に近い値を示すものは、浸透に対しては比較的強固と判断できる。これは浸透時の低有効応力条件下においても粘着力に相当する高いせん断強度を示す堤体材料であるといえる。つまり、破壊応力比が変相応力比に比べて高い値を示すほど、低有効応力条件下で高いせん断強度を示し、高い浸透滑り耐性を有する堤体材料であると評価できる。

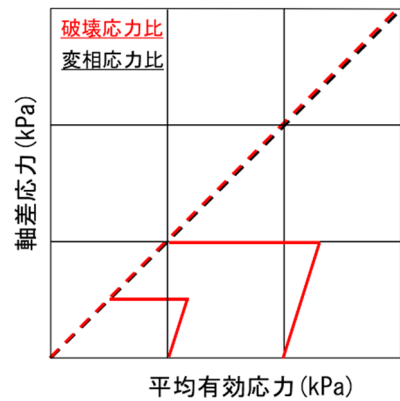
3.3 三軸試験結果

表3と図6~10に \overline{CU} 試験および吸水軟化試験の試験結果を示す。表3において、 \overline{CU} 試験での変相応力比と吸水軟化試験での破壊応力比の値を示す。図6~10において、左側に \overline{CU} 試験の有効応力経路、真ん中に吸水軟化試験の有効応力経路、右側に吸水軟化試験の有効応力比~軸ひずみ関係を示す。赤、青、黒色の3線で \overline{CU} 試験、橙、緑色の2線で吸水軟化試験の有効応力経路を示す。また、黒色の点線で \overline{CU} 試験の変相応力比、橙色と緑色の点線で吸水軟化試験の破壊応力比を示す。

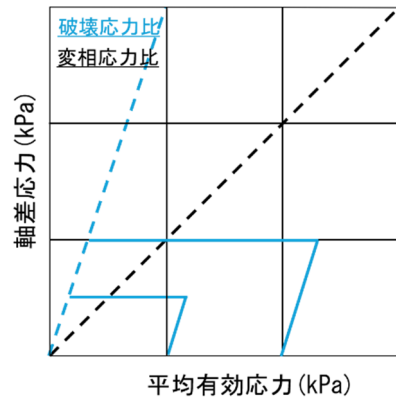
まず \overline{CU} 試験結果について見ていく。図6~8の粘土分を比較的に多く含むA, B, C地点では、変相後に塑性膨張を伴う硬化挙動に転じる典型的な過圧密粘土の挙動を示している。図9, 10の比較的砂分を多く含むD, E地点では、せん断初期の弾性が卓越し、変相後に軸差応力が増加し続ける非常に密詰めな砂の挙動を示している。また、全地点で変相時の軸ひずみは1~2%程度と小さく、変相応力比は1.43~1.55程度と比較的高い値である。紙面の都合上示していないが、 \overline{CU} 試験結果から変相点を参照した有効応力のモールの応力円を作成した。その結果、全地点で内部摩擦角は35.3~38.0°, 粘着力は0kPaを示した。粘着力は見られなかったが、比較的高い内部摩擦角を有していることがわかる。

表3 三軸試験結果

供試体	\overline{CU} 試験			吸水軟化試験	
	モールの応力円		変相応力比	破壊応力比	
	ϕ (°)	c (kPa)	P=50,100,150kPa	P=50kPa	P=100kPa
A地点	36.0	0	1.46	1.39	1.97
B地点	38.0	0	1.55	1.68	1.52
C地点	37.3	0	1.52	1.50	1.43
D地点	36.0	0	1.46	2.15	2.11
E地点	35.3	0	1.43	1.92	2.12



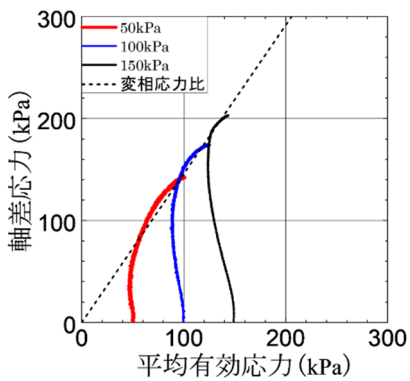
(a) パターン1



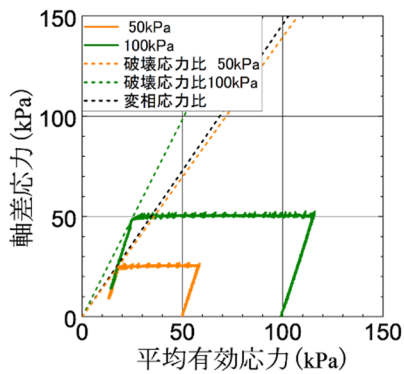
(b) パターン2

図5 吸水軟化試験による浸透滑り耐性の評価

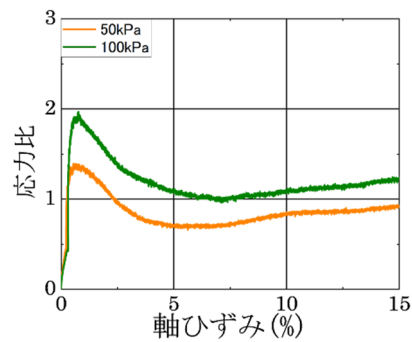
次に吸水軟化試験結果について見ていく。表3および図6~8より、粘土分を比較的多く含むA, B, C地点では、A地点の拘束圧100kPaを除くと、破壊応力比は1.39~1.68程度であり、 \overline{CU} 試験の変相応力比と同程度あることがわかる。本研究グループの分類によれば、低有効応力条件下において変相応力比と破壊応力比が同程度の値を示す堤体材料は、浸透すべり破壊の耐性は低く、浸透時の低有効応力条件下ではせん断強さを発揮できない砂質土に近いせん断特性を有すると判断できる。表3および図9, 10より、砂分を比較的多く含むD, E地点では、破壊応力比は1.92~2.15程度であり、 \overline{CU} 試験の変相応力比に比べて明らかに高い値を示している。したがって、浸透時の低有効応力条件下において高いせん断強度を示す堤体材料であり、浸透に対しては比較的強固であると判断できる。



(a) 有効応力経路 (\overline{CU} 試験)

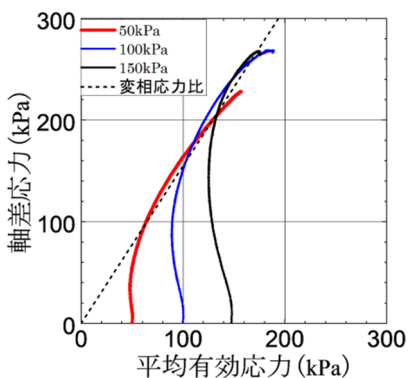


(b) 有効応力経路 (吸水軟化試験)

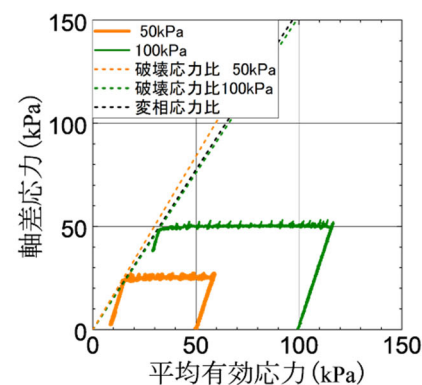


(c) 有効応力比～軸ひずみ (吸水軟化試験)

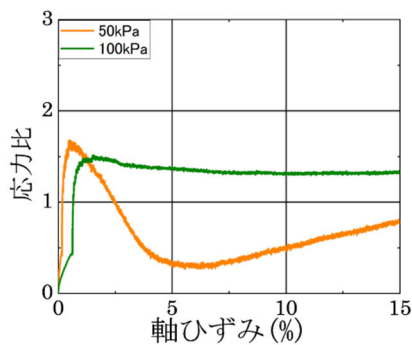
図6 三軸試験結果 (A地点)



(a) 有効応力経路 (\overline{CU} 試験)

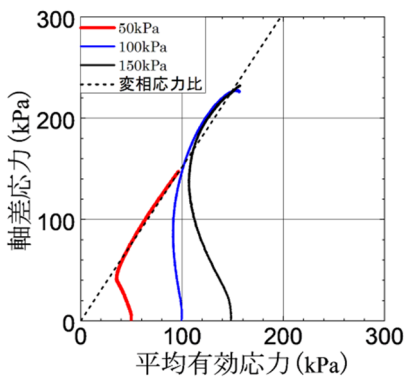


(b) 有効応力経路 (吸水軟化試験)

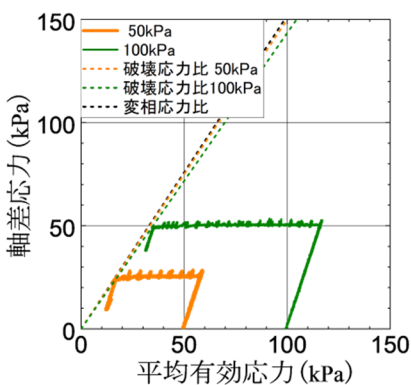


(c) 有効応力比～軸ひずみ (吸水軟化試験)

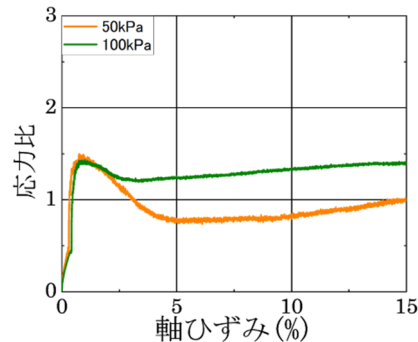
図7 三軸試験結果 (B地点)



(a) 有効応力経路 (\overline{CU} 試験)

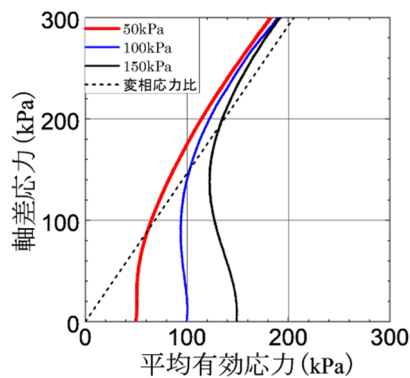


(b) 有効応力経路 (吸水軟化試験)

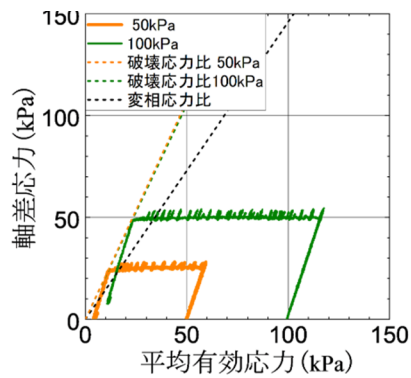


(c) 有効応力比～軸ひずみ (吸水軟化試験)

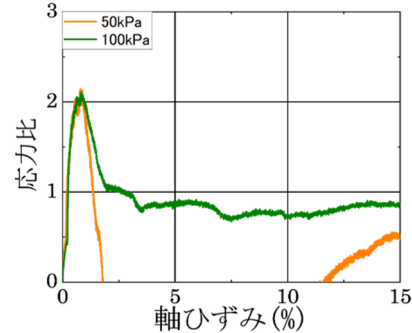
図8 三軸試験結果 (C地点)



(a) 有効応力経路 (\overline{CU} 試験)



(b) 有効応力経路 (吸水軟化試験)



(c) 有効応力比～軸ひずみ (吸水軟化試験)

図9 三軸試験結果 (D地点)

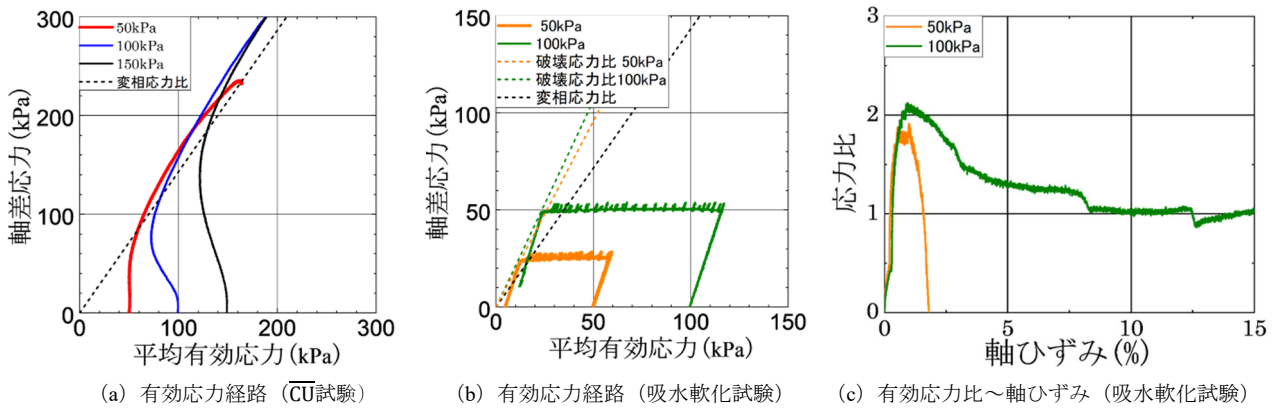


図 10 三軸試験結果 (E 地点)

4. まとめ

今回、細粒分を多く含む九頭竜川堤防土を対象として各種の現場調査と室内試験を実施することで、透水性や浸透時のせん断強度等の力学特性の検討を実施した。各種の現場調査と室内試験より、今回採取した九頭竜川堤防土は細粒分が卓越しており、非常に低い透水性と高いせん断強度を有する堤防材料であったといえる。

しかし、各種透水試験法の比較では、同じ粒度であっても室内透水試験の方が現場透水試験に比べて高い透水係数を示すものがみられた。また、Creager 法による推定透水係数は粒度に関係なく、現場および室内透水係数よりも小さくなる傾向がみられた。堤体の透水性の過小評価は、浸透に対しては危険側の評価に繋がるため、Creager 法などの粒度から推定した透水係数を用いる場合は、過信すべきではないことに注意する必要がある。

また、吸水軟化試験では、A, B, C 地点のような粘土分を比較的多く含むものであっても、砂質土のように浸透時にせん断強さを発揮できない特性を有していたことが分かった。それに対して、D, E 地点のような砂分を比較的多く含むものであっても、92.6~100.8%程度の非常に高い締固め度を有していれば浸透に対して強固なせん断特性を有することが分かった。堤体材料を危険側の評価にしないためにも、吸水軟化試験を用いて適正なせん断強さの評価をすることが重要である。

参考文献

- 1) 石原雅規, 東拓生, 秋場俊一, 地藏智樹, 小高猛司, 崔 瑛, 李圭太: 梯川旧堤で実施した現地堤防地盤調査, 第 4 回河川堤防技術シンポジウム, pp.41-44, 2016.
- 2) 李圭太, 小高猛司, 石原雅規, 久保裕一, 御手洗翔太: 河川堤防盛土の原位置透水特性に関する考察, 第 5 回河川堤防技術シンポジウム, pp.59-62, 2017.
- 3) 小高猛司, 李圭太, 久保裕一, 石原雅規, 杉山詠一, 藤田薫: 小田川堤防開削調査時の現場透水試験と室内透水試験による堤体透水性の評価, 第 8 回河川堤防技術シンポジウム, pp.3-6, 2020.
- 4) 小高猛司, 李圭太, 久保裕一, 藤田薫, 湯貫敬, 石原雅規, 青柳悠大: 開削時現場調査と室内試験による狩野川堤防の評価, 第 9 回河川堤防技術シンポジウム, pp.75-78, 2021.
- 5) 小高猛司, 崔瑛, 李圭太: 弾塑性論と吸水軟化試験による砂質土の強度定数に関する考察, 第 70 回土木学会年次学術講演会, III-235, 2015.
- 6) Kodaka, T., Lee, K.-T. and Ishihara, M.: Simplified sampling method for river embankment soils and strength property evaluations of the sampled soils, Proc. ICSMGE, pp.2395-2398, 2017.
- 7) 小高猛司, 李圭太, 石原雅規, 崔瑛, 武楊, 田村太郎: 砂質堤体土の簡易サンプリングとその強度特性の評価, 第 3 回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム, pp.38-41, 2015.

Evaluation of Mechanical Properties of Kuzuryu River embankment with Rich Fine Contents by In-situ and Laboratory Tests

Naoya KODAMA¹, Takeshi KODAKA², Keita LEE³, Yuichi KUBO⁴, Toshiki HIROTA¹

1 Graduate School of Science and Technology, Department of Civil Engineering, Meijo University

2 Department of Civil Engineering, Meijo University

3 Department of Domestic Business, Nippon Koei / Meijo University

4 Department of Engineering, Geolabo-Chubu

Abstract

This paper describes the results of in-situ permeability tests and laboratory triaxial tests conducted at the 12.0 km embankment excavation for the construction of a new sluice gate on the right bank of the Kuzuryu River in Fukui Prefecture, Japan. The triaxial tests were the \overline{CU} test and the water absorption softening test. All the collected samples were predominantly fine-grained with $F_c=70\sim 90\%$, but the physical properties differed between the upstream and downstream sides of the open-cut cross section. The \overline{CU} test showed strain-hardening behavior at all locations, indicating that the embankment material exhibited relatively high shear strength. However, in the water-absorption softening test, the downstream side of the embankment was evaluated to be a strong embankment material during seepage, showing high shear strength under low effective stress conditions, while the upstream side was evaluated to be a weak embankment material during seepage.

Key words: River embankment, water absorption softening test, triaxial test, fine-grained soil