破堤箇所で採取した二ツ森川堤防土の力学特性の評価

名城大学大学院　学生会員　○中山　雄人・田中　貴之・森　智彦
名城大学　正会員　小高　猛司
建設技術研究所　正会員　李　圭太
土木研究所　正会員　石原　雅規
中部土質試験協同組合　正会員　久保　裕一

1. はじめに

近年，高透水性の基礎地盤に起因すると思われる被災事例が報告されている。本研究グループでは浸透模型実験によって堤体変状のメカニズムに関する検討をしてきた。結果として大きく分けて3つの崩壊パターンが存在することが判明した（**図 1**）[1]。**図 1** の左から順に，パターン 1 は低透水性の堤体直下にて水みち形成の形成，進行に起因して崩壊するパターン。パターン 2 は上部砂質基礎地盤の有効応力消失（液状化）とそれに伴う水みち形成に起因して堤体が損傷する崩壊パターン。パターン 3 は基礎地盤からの漏水が見られる場合もあるが堤体崩壊に関与しない崩壊パターンである。なお，パターン 2 で観察される現象は法すべりに限ったものではなく，透水性のギャップが大きい箇所では動水勾配が集中することによって，まずはパターン 1 と同様に噴砂や盤ぶくれが観察される。しかし，堤防を構成する地盤材料が脆弱であれば，過剰間隙水圧の増加に伴い基礎地盤や堤体のせん断強度は低下し，すべり破壊が進行し，やがて破堤に繋がることは模型実験によって明らかとなっている[2]。

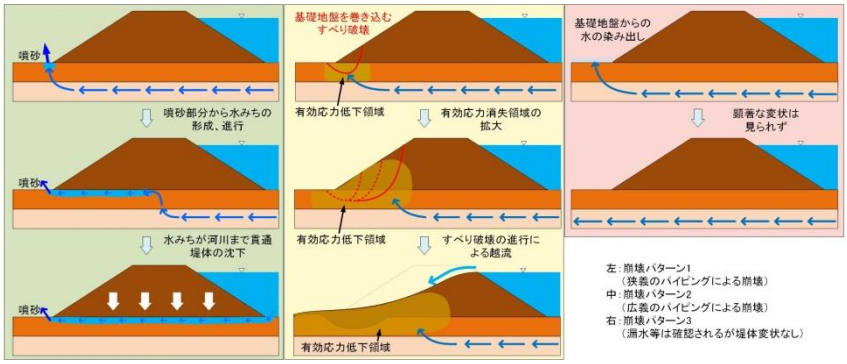


図 1　崩壊パターンの類型化

平成 28 年の台風 10 号によって青森県の高瀬川水系の二ツ森川堤防が越流せずに浸透によって破堤した[3]。東らの開削調査ならびに浸透流解析などの一連の調査の結果，**図 2** に示すように堤体下部の浅層に透水性の高い細砂層及び礫混り粗砂層が分布していたことにより，上下流と比べて堤防断面が小さい被災箇所では，法尻付近に集中した高い動水勾配によって安全性が低下し，破堤被害に大きく影響した[3]としている。すなわち，この被災事例は，まさに上記の崩壊パターン 2 に該当すると考えられるが，最終的に破堤に至るかどうかは堤体材料に大きく依存することは模型実験[2]からも明らかである。本研究では，開削調査時に**図 2** に示す位置で採取した不撹乱堤体土試料を用いて三軸試験を実施し，二ツ森川堤防の被災原因を検討する。

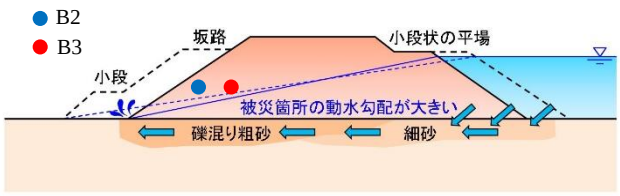


図 2　二ツ森川被災箇所の状況[3]に加筆

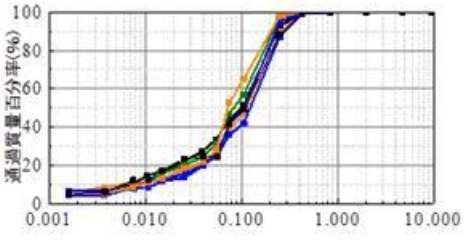


図 3　二ツ森川試料の粒度分布

2. 粒度分布と三軸試験結果

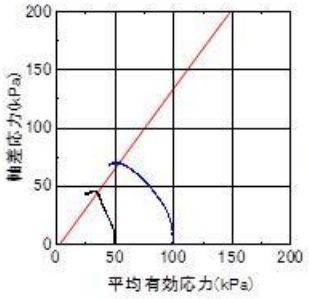
被災箇所周辺は全体的にシルト～砂質土で構成されていた[3]。本研究で使用した現地堤体土試料の粒度分布を**図 3** に示す。細粒分含有率は 30～50%の細粒分質砂である。**図 4** および **5** にそれぞれ，B2 および B3 の CUB 試験の結果を示す。有効応力経路より，本試料はゆる詰め傾向であることがわかる。初期有効拘束圧 50kPa

キーワード　浸透模型実験　河川堤防　浸透破壊　三軸試験　吸水軟化試験
連絡先　〒468-8502　名古屋市天白区塩釜口 1-501　名城大学理工学部　ＴＥＬ052-838-2347

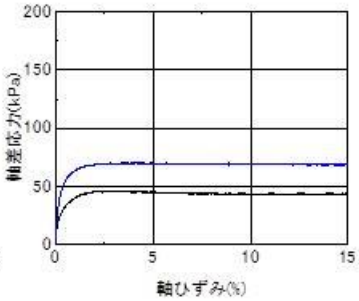
の条件においては，軸差応力がピークに到達した後，やや軟化している。限界応力比 q/p'はそれぞれ 1.3 と 1.5 程度である。有効拘束圧が 2 つでのみ試験を実施していないこともあり，値にばらつきがあるが，有効応力経路は類似していることから，強度定数の大きさの違いほど，せん断特性に大きな差はない。

吸水軟化試験[4]は三軸試験装置を用いた試験であるが，所定の異方応力状態から，軸差応力を一定に保ちつつ間隙水圧を徐々に上昇させることによって土を破壊に至らしめる試験である。有効応力経路を精密に制御することにより，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することを目的とする。実際に，供試体は破壊に至る直前まで軸ひずみ，体積ひずみともにほとんど発生しない。

図 6, 7 に吸水軟化試験の結果を示す。破壊応力比 q/p'~軸ひずみ関係に着目すると，初期有効拘束圧 50kPa，一定軸差応力 25kPa の条件において，破壊応力比 q/p'はそれぞれ 1.3，1.6 程度となった。一定軸差応力を高い条件にしても破壊応力比 q/p'はほとんど変化がない。

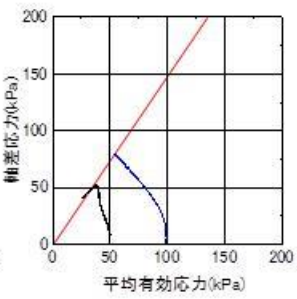


有効応力経路

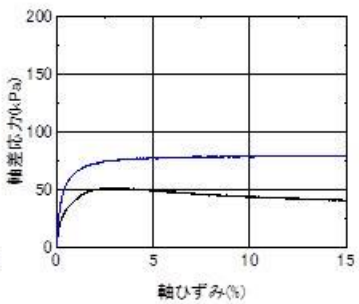


軸差応力～軸ひずみ関係

図 4　二ツ森川 B2 試料の CUB 試験結果

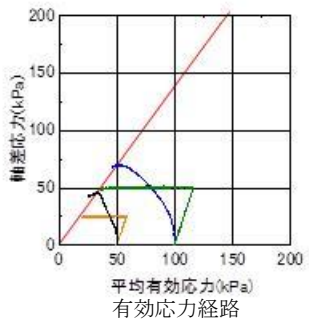


有効応力経路

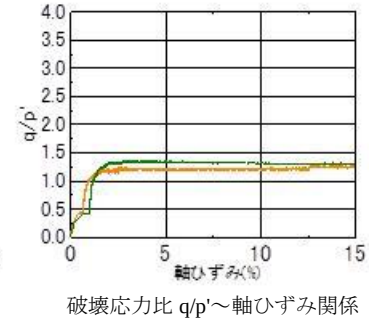


軸差応力～軸ひずみ関係

図 5　二ツ森川 B3 試料の CUB 試験結果

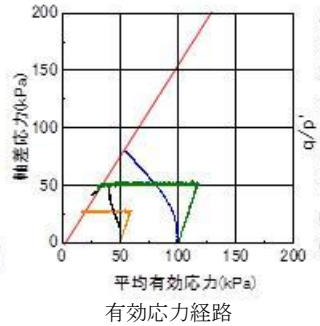


有効応力経路

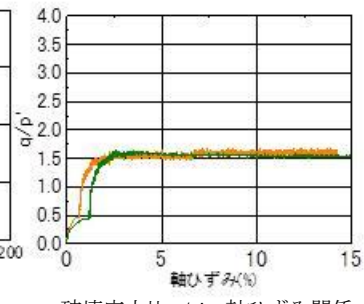


破壊応力比 q/p'～軸ひずみ関係

図 6　二ツ森川 B2 試料の吸水軟化試験結果



有効応力経路



破壊応力比 q/p'～軸ひずみ関係

図 7　二ツ森川 B3 試料の吸水軟化試験結果

本研究グループでは，数多くの不撹乱堤体土を対象に吸水軟化試験を実施し，パターン分類を行い浸透耐性の評価を行っている[5]。浸透耐性の高い堤体土の場合，吸水軟化試験で得られる破壊応力比は最大値 3 となるが，本報の二ツ森川堤防土のように吸水軟化試験における破壊応力比が CUB 試験とほぼ同様の場合には，低拘束圧下においても大きなせん断強度は期待できず，浸透耐性は低いと判断できる。このパターンは，平成 27 年関東・東北豪雨で破堤した渋井川堤防土もほぼ同様であった。

3. まとめ

高透水性基礎地盤に起因して堤体が崩壊するメカニズムについて模型実験を通して検討してきた。平成 28 年に越流なき破堤した二ツ森川堤防においても，堤体下部に存在する高透水層が被災の要因となっていることが推測されていたが，実際に破堤にまで至った要因は堤体土自身が浸透に対して脆弱な試料であったことが今回の三軸試験から明らかとなった。模型実験と同じ現象が実堤防でも発生する可能性が示されるとともに，地盤構成の把握とともに堤体土の力学特性の評価が河川堤防の安全性検討に必須であることも併せて示された。

参考文献：1) 小高ら：浸透に伴う基礎地盤の弱化に起因する堤防法すべり崩壊に関する考察，第 5 回河川堤防技術シンポジウム，2017. 2) 森ら：高透水性基礎地盤を有する河川堤防の地盤材料特性が浸透破壊に及ぼす影響，第 73 回土木学会年次学術講演会，2018. 3）東ら：2016 年台風 10 号による二ツ森川の破堤箇所における開削調査，第 5 回河川堤防技術シンポジウム，2017. 4) 小高ら：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，2015. 5）小高ら：吸水軟化試験による河川堤体土の低拘束圧下のせん断強度の評価，第 5 回河川堤防技術シンポジウム，2017.