

河川堤防の安全性評価に向けた地盤工学の課題

Some Geotechnical Tasks for Safety Evaluation of River Embankments

小 高 猛 司 (こだか たけし)

名城大学 教授 理工学部

李 圭 太 (り けいた)

梯建設技術研究所 大阪本社水工部 部長

1. はじめに

平成24年7月の九州北部豪雨によって、矢部川堤防がパイピングをきっかけとして破堤した¹⁾。計画高水位を長時間超えていたとはいえ、近年なかった越流なき堤防決壊のインパクトは絶大であった。筆者も含めて、樋門などの堤防の弱部となる構造物が無ければ、盛土堤体部だけではたとえ少々のパイピングがあっても破堤まで至ることはないだろうというのが暗黙の共通認識だったのではなかろうか。しかし、矢部川の破堤は、その認識を改めるに余りある災害事例であり、我が国の堤防管理の大きな転換点になりかねない事象となっている。

我が国では永きに亘り断面形状に重きを置いた河川堤防の整備が進められてきており、今後もその基本姿勢は変わらないであろう。ただし、平成9年の河川砂防技術基準設計編の改正において、堤防の設計細目として、浸食と浸透に対する安全性の照査の実施と地震に対する安全性の確保が明示され、断面形状に加えて、堤防にも質の保証が求められる時代となった。その流れの具体的な大きな動きとして、平成14年に河川堤防設計指針が策定され、国土交通省が直轄する全国の河川堤防において浸透に対する安全性の詳細点検が実施された。平成21年までの7年間に亘るその点検の結果は、全国の堤防の3割強において浸透に対する安全性が不足しているというショッキングな内容であった。点検が実施され始めてまもなくの平成16年には台風が10個も上陸したが、福井豪雨、新潟・福島豪雨そして台風23号によって全国各地の河川堤防が次々と決壊した。それらを含めて堤防決壊の直接的な原因のほとんどは越流であったとしても、3割強の堤防の浸透に対する安全性が不足しているという国の調査結果は、堤防決壊の危険性を身近なものと認識し始めた一般市民には大きな衝撃であった。

平成14年から実施された浸透に対する安全性の点検の手法は、同年発行された「河川堤防の構造検討の手引き」²⁾（以下、「手引き」と略す）にて詳細にマニュアル化されている。そこでは、浸透は大きく分けて、局所動水勾配や被圧水圧を考慮したパイピング破壊と、浸透に伴うすべり破壊との両者について検討することとされており、前者は飽和―不飽和非定常浸透流解析を用いて、後者はさらに円弧すべり解析を加えて実行される。浸透流解析には、透水係数の他、水分特性がモデル化も含めて必要であり、さらに、円弧すべり解析には、強度特性

が必要不可欠である。そこで、河川堤防の分野への地盤工学の本格的な参入がいよいよ必要となった。

詳細点検がひと通り終わると、耐浸透対策が必要と判定された3割強の堤防を、今後どのように絞り込み、どのような優先順位を付けて対策を進めていくのかが重要な課題となった。その流れの中で、安全率の算定に大きな影響を及ぼす強度定数について、それを得るための室内試験法も含めての見直しが行われた。それらの検討結果も取り入れて平成24年に「手引き」が改訂³⁾されているが、今後も色々な検討事項に関しての改良が継続的に加えられていくものと考えられる。

浸透に対する安定性の検討が一段落しつつあるかと思われた矢先に、冒頭の矢部川破堤が発生し、堤防の浸透問題が一気に複雑化した。すなわち、詳細点検でNGとなったどの一連区間から対策を講じていくかという話から、一連区間の中でも、さらにどの部分が最も破堤する危険性が高いか、場合によっては、詳細点検でOKとなった一連区間の中でも、局所的には破堤危険度が高い箇所もあるのではないかと懸念までが明確に芽生えたのである。そのため、極めて局所的な堤防弱部を発見しなければならないと言う風潮が生まれつつある。

以上のように、河川堤防の浸透に関する地盤工学的な検討はまさに緒についたと言っても良い状況であり、検討すべき課題は山積している。本稿では、河川堤防の地盤工学における課題の整理を試みながら、筆者らが現在取り組んでいる浸透に関する研究の紹介もする。なお、河川堤防の耐震性の検討については、過去2度の大きな震災を経て、数値解析を用いて変形量の予測まですることが基準化されるなど、かなり先進的な取り組みが進められている。本稿では紙面の都合上、浸透の話題に絞って筆を進めることをお許しいただきたい。

2. 浸透破壊に関する現行照査法の課題

我が国で実施されてきている浸透破壊に対する安全性の検討には、パイピングによる破壊とすべり破壊の2つがあることは先に述べた。矢部川の破堤以来、どちらかと言えばパイピングに目が向けられがちであるが、すべり破壊の検討も依然として最重要検討課題の1つであることに変わりはない。現行照査法として、「手引き」に詳細に示されている浸透破壊に関する検討について、筆者らが考える課題を順に示す。

総 説

2.1 飽和—不飽和非常浸透流解析

有限要素解析である飽和—不飽和非常浸透流解析(以下、「浸透流解析」と略す)は、赤井ら⁴⁾により不飽和領域まで拡張した解法が整理され長く実務で用いられてきた実績もあるため、詳細点検において堤体内の間隙水圧分布や局所的な動水勾配を予測する手法として導入された。ただし、実務で普及している解析手法であるとしても、ご多分に漏れず知識と経験によって結果が大きく変わる手法であることに注意が必要である。以下、浸透流解析において注意すべき事項を挙げる。

この解析に用いる飽和透水係数は、言うまでもなく主要な土質定数であり、設定値次第で解析結果は大きく変わる。筆者らの既往研究^{5),6)}では堤体盛土は現地発生土によるものが多く河床勾配など各河川により代表粒径、均等係数が多様であることから、室内試験や代表粒径によって飽和透水係数を適切に設定するのは容易ではなく、堤体の不均質性や異方性を適切に考慮できる試験法や設定法の確立が待たれるところである。しかしながら、筆者らは極力現場に近い飽和透水係数の設定を目的として、マリOTTサイフォンを用いた締め固めた地盤の透水試験(JGS 1316-2003)を河川堤防盛土に適用した研究⁷⁾を行っている。

不飽和堤体土の水分特性も解析結果を大きく左右する土質特性の1つである。とは言え、詳細な室内実験を実施して同定したり、高度なモデル化を施したりしさえすれば、実際の浸透挙動をより正確に予測できるというものではないという難しさがある。「手引き」では、標準的な水分特性モデルを用いることを前提とし、堤体土の土質種別ごとに標準的なパラメータを推奨しており、それらを使うことで実現象から大きく外れた解析結果が得られないように工夫している。すなわち、土質特性の中でも設定が難しい水分特性については、経験に基づく推奨値を用いるのが慣例となっている。浸透流解析では各節点における圧力水頭に対して設定した不飽和特性によって飽和度が示され、各要素の透水係数は要素を構成する各節点の要素中心における飽和度により設定した不飽和特性に応じて適用されることから、いくら水分特性モデルを標準的なものにしても、現地の初期飽和度と対応していない場合もあることにも注意すべきである。

また、有限要素法に基づく数値解析であるが故に、土質特性以外にも、降雨や河道内あるいは堤内側の境界条件、不均質地盤のモデル化、あるいは解析メッシュのサイズなど、解析技術者が適切に設定しなければならない事項は少なくない。例えば、パイピング破壊の照査に浸透流解析を用いる場合には、局所動水勾配を適正に評価しなければならないが、有限要素のメッシュサイズや動水勾配を算出するために着目する相対節点の選定によって得られる値が異なるため、解析技術者の適正な判断が必要となる。現行の照査では法尻のみが照査点となっており、パイピング破壊におけるトリガーだけに着目し堤体全体の安定性照査としている。また、法面における降雨浸透にあたって、筆者らは降雨浸透と堤体浸透水の浸

出との相互を考慮する必要性に着目し、この境界条件に対応したモデルを提案している⁸⁾。一方、浸透流解析では降雨の作用は地表面節点において流量固定条件となるため、本来難透水性地盤においては降雨外力を考慮しないこととしなければならない。

一方、堤防の浸透時のすべり破壊の検討においては、円弧すべり解析に先立って浸透流解析を実施し、堤体内の浸潤面と間隙水圧分布が決定される。円弧すべり解析にも、様々な注意事項があるが、それらに負けず劣らず浸潤面の位置が堤体の安全性に大きな影響を及ぼすことが多々ある。そのため、堤体土や基礎地盤の透水性の正確な把握は、パイピングの検討のみならず、すべり破壊の検討においても、非常に重要である。

2.2 円弧すべり解析

洪水時に刻々と変化する堤体内の有効応力状態を浸透流解析で決定した上で、その有効応力状態で発揮する堤体土のせん断強さを用いて円弧すべり解析が実施される。具体的には、修正フェレニウス法が用いられるが、浸透流解析で求めた各スライス底面での間隙水圧を、同位置の土塊の全応力から差し引くことによって、すべり面上の有効応力を決定し、それを用いて堤体全体の安全率が決定される。ただし、円弧すべり解析はもちろん全応力解析であるため、すべり面上での有効応力はあくまで、浸潤時の堤体土の「すべり破壊時のせん断強度」を予測するために必要な情報の1つに過ぎない。その「すべり破壊時のせん断強度」と「壊れ方(崩壊メカニズム)」さえ分かれば、途中の情報を必要とせずに安全率が決定できることが円弧すべり解析の最大の特長であり、実務に受け入れ続けられる主な要因でもある。これは、円弧すべり解析が、塑性学における極限定理に基づく上界法の一つであることに起因している。

そもそも円弧すべり解析で求める安全率とは、現存している法面のある時点における余裕度である。したがって、現存法面(堤防のすべり破壊においては、洪水時の浸潤面を設定した斜面)と最終的にすべり破壊する時点の法面とでは、有効応力状態は異なる。三軸試験に例えると、圧密終了時とせん断破壊時の差に相当する。破壊時のすべり面において発生する過剰間隙水圧(ここでは、初期間隙水圧との差分の意味)をあらかじめ予測することは難しいため、破壊時の有効応力状態を知ることも一般に難しい。結果として、円弧すべり解析で有効応力解析を行うことは困難であるという当然の結論に帰着する。

さて、円弧すべり解析もまた、実施する技術者に知識と経験が要求される解析手法である。先にも述べたように、円弧すべり解析は上界計算であるために、崩壊メカニズム(ここではすべり円弧)と安全率は同等である。そのため、解析結果として安全率が得られても、同時に求められているすべり円弧が妥当な崩壊メカニズムを表すものでなければ、その安全率にも意味は無い。法肩や法面表層だけを掠めているような浅いすべり面は、堤体全体の破堤に繋がるような崩壊とは考えられないため、除外すべきであるが、そのような判断には堤防技術者と

しての知識と経験が必要となる。

2.3 円弧すべり解析に用いる強度定数

平成14年発行の初版の「手引き」²⁾では、堤防の浸透時のすべり破壊を照査する際の円弧すべり解析に用いる強度定数を、砂質土や礫質土であれば三軸圧縮試験の圧密非排水（以下CU）試験で求めることとしてきたが、平成24年の改訂に伴い、間隙水圧の計測を伴う圧密非排水（以下 $\overline{CU}$ ）試験や圧密排水（以下CD）試験が推奨されるように変更された³⁾。前節で述べたように、円弧すべり解析は、破壊時のせん断強度を用いて安全率を算定する全応力解析法である。浸透流解析で得られる堤体内の間隙水圧分布から浸潤時における堤体内の有効応力分布を決定できれば、CU試験で得られた強度定数を用いることによって、その堤体内の非排水せん断強さの分布が求められる。CU試験では、初期有効拘束圧による圧密過程が実堤防での浸潤時の状態を表しており、軸圧縮によるせん断過程が実堤防でのすべり破壊を表す。そのため、CU試験は、浸潤時の有効応力状態から、すべり破壊時の非排水せん断強さを決定するための理に適った試験法であり、改訂前までの「手引き」においてCU試験が標準試験として指定されていた理由もここにある。ただし、それは粘性土のように、実堤防においても室内実験室と同様に完全非排水せん断条件が成り立つ地盤材料であることが前提となる。

国土木研究所が編集した「河川堤防の浸透に対する照査・設計のポイント」⁹⁾に貴重な試験データが掲載されている。詳細点検時に実施された全国の河川堤防における三軸試験のデータが、強度定数毎に分析・整理されたものである。先述のように、改訂前の「手引き」では、砂質堤防にはCU試験が指定されていたにも拘わらず、実際の試験データでは、CU試験と同等程度の数量の $\overline{CU}$ 試験とCD試験のデータが示されている。これらの試験データは、国総研HPでも公開されているデータ¹⁰⁾であり、そこでは、地方整備局毎の生の試験データが入手できるとともに、地方整備局毎に採用していた試験条件に偏りがあるという興味深い事実も知ることができる。例えば、中部地方整備局管内においての砂質堤防土の土質試験のほとんどは $\overline{CU}$ 試験で実施されている。マニュアルの指定外で、かつ、相当なコスト高になる $\overline{CU}$ 試験をあえて採用したのは、それなりの理由があったと考えるべきであろう。筆者らも全国各地の多数の堤防土を用いて $\overline{CU}$ 及びCD試験を実施している（例えば11)～14)）が、その一連の試験研究の知見として、砂質堤防土の強度定数を求める試験としてCU試験が適さない理由を以下のように考えている。

- ① 最大軸差応力にばらつきが多く、拘束圧に整合したモールの応力円が得られないことが比較的多く、結果として強度定数が同定しづらい。
- ② 砂質堤防土は概して密詰め傾向のせん断特性を呈する場合が多いが、その場合は強度定数が同定できても、粘着力 c は大きく、内部摩擦角 ϕ は小さいことが多い。改訂前の「手引き」では、 c は見込まな

いことが定められていたために、小さな ϕ だけでは現実的な安全率が得られないことが多かった。

- ③ $\overline{CU}$ 試験やCD試験では、拘束圧に整合したモールの応力円が得られ、強度定数が容易に同定できる。しかも、 ϕ は大きめの値が得られやすい。

おそらく、上記①～③の理由によって、詳細点検の実務の場において、CU試験が敬遠され、 $\overline{CU}$ 試験やCD試験が選択されたものと思われるが、 $\overline{CU}$ 試験は全応力で整理すればCU試験とほぼ同等であることから、コスト高にはなるものの抵抗なく受け入れられたと思われる。実際に、 $\overline{CU}$ 試験が採用された現場においては、全応力と有効応力の両方で試験結果が整理されているが、強度定数には有効応力で整理した ϕ' がほぼすべての現場で用いられている。一方、CD試験が実施された現場も多くあるが、比較的透水性が高いと判断できる堤体土の場合にCD試験が採用された場合が多い。

以上のような現場とマニュアルとの不整合を解消する意味もあり、先述のように平成24年に「手引き」の改訂が行われ、砂質堤防土にはCU試験ではなく、 $\overline{CU}$ 試験やCD試験の実施が推奨されるようになった³⁾。なお、この変更にあたっては、一般全応力法¹⁵⁾の考え方の影響を強く受けている。すなわち、現場の土質や応力状態を勘案して、適宜、安全側となる試験条件を選択すべしとする考え方である。とは言っても、円弧すべり解析が全応力解析であることに変わりはなく、例えば ϕ' を用いる場合であっても、 ϕ_d の代用との意味合いが強く、あくまで排水せん断強度を算定するための強度定数であることには注意しなければならない。

いずれにしても、この「手引き」の改訂によって、現場の技術者が試験条件を判断する自由度が高まった一方で、不適切な試験条件を選択してしまうリスクもある。例えば、この改訂によって、比較的透水性が高い堤防土ではCD試験が選択される場合が増えると予想されるが、CD試験による ϕ_d は実際の堤防土の内部摩擦角を過大評価することが指摘されている¹¹⁾。 ϕ_d と ϕ' は決して同じものではなく、特に河川堤防の実務においては、それらの取扱いは慎重になされなければならない。

2.4 適切な強度定数設定法の提案

筆者らは、堤防土の強度定数を三軸試験で求める際の試験条件の影響を検討するため、全国の様々な河川堤防土を採取し、種々の試験条件で三軸試験を実施してきた（例えば11)～14)）。その結果、砂質堤防土の強度定数を求めるための試験について、以下の提案を行っている¹⁴⁾。

- ① 強度定数を求めるための試験は、 $\overline{CU}$ 試験とする。
- ② 密詰め傾向の堤防土の場合には、変相状態時の有効応力で内部摩擦角 ϕ_p を決定する。
- ③ ゆる詰め傾向の堤防土の場合には、軸差応力最大時の有効応力で内部摩擦角 $\phi_p (= \phi')$ を決定する。

密詰め傾向の砂質堤防土では、変相状態以降に軸差応力が増加し続ける。これは、三軸試験の完全非排水（非吸水）せん断条件による正のダイレイタンスの拘束に起因しており、実際の堤防においては、非現実的な条件

総 説

である。そのため、この仮想的な軸差応力をそのまま非排水せん断強度として評価してしまう CU 試験のデータ整理法は、この種の地盤材料にとっては不適切である。また、実験試料のわずかな乱れなどの要因が、変相後の軸差応力の大きさに影響を及ぼすことも明らかになっており、CU 試験結果にばらつきが多い理由は、そもそも不合理な変相後の軸差応力を用いてデータ整理しているからである。ただし、 $\overline{CU}$ 試験を有効応力で整理することで、せん断中に発現するダイレイタンス特性がモールの応力円に反映されるために、強度定数の評価においてばらつきの影響はなくなる。しかし、 $\overline{CU}$ 試験結果は、軸差応力最大時で評価した強度定数であるため、大ひずみ領域において土の骨格構造が大きく構造変化をした状態で強度定数を評価していることに相当するため、強度定数を過大評価する可能性がある。そのため、先述のように $\overline{CU}$ 試験における変相状態の有効応力を用いて強度定数を決定する手法を提案した。なお、変相状態は、土の骨格構造が大きく変化し始める状態に相当する。

2.5 三軸試験で何が求められるのか？

三軸試験は $\overline{CU}$ 試験であれば理想的な完全非排水条件で、しかも密詰め傾向を示す堤防土であれば平均有効応力は増加し続ける。一方、実際の浸透破壊時の河川堤防では、浸水に伴い平均有効応力は減少することは明らかであり、ひずみレベル、応力レベルともに三軸試験とは大きく異なる。そのため、三軸試験の条件については、特に低拘束圧条件下での試験の必要性などが議論されることが多い。筆者らは、浸透に伴うすべり破壊を模擬して、初期せん断を与えて軸差応力一定の条件下において三軸供試体に、間隙水圧を上昇させることによって吸水を促し、破壊に至らしめる特殊な三軸試験を実施した¹⁶⁾。そこでは、吸水破壊が発生する応力状態と、通常の $\overline{CU}$ 試験で得られる ϕ_p や ϕ' との関連性を弾塑性力学に基づき考察した。その結果、 ϕ_p や ϕ' は、排水条件や応力レベルに関係なく、有効応力の空間上の破壊領域を特定する境界線の傾きに相当することが示された。すなわち、三軸試験で決定している強度定数は、応力レベルの低い領域でも成り立つ破壊の境界線を規定する。初期せん断状態を保ったまま間隙水圧が上昇し、低拘束圧に向かう砂供試体は、 ϕ_p や ϕ' で規定された境界線を越えてから、急激に骨格変形が発生して一気に破壊する。そのことから、強度定数を低拘束圧で無理に求める必要はなく、実験誤差の少ない通常の三軸試験で求めても問題ないと考えている。

3. 今後の河川堤防の地盤工学の課題

3.1 線状構造物としての河川堤防の安全性検討

前章では、従来のマニュアルに沿った詳細点検を想定した上で、一連区間の代表断面における安定性照査の精度を高めるための課題やその対策について述べた。ここでは、従来の枠組みから一歩踏み出した領域で検討すべき課題について述べる。

1 章で述べたように、安全性の不足が指摘された膨大

な延長にわたる河川堤防について、合理的に優先順位を付けて今後対策を進めていくことが喫緊の課題である。その順位付けに有力な情報と合理性を与えることが期待されているものに信頼性解析がある。地盤構造物として河川堤防が照査・設計され始めてからの日は浅く、前章で述べた点検法についても、他の構造物の設計法と比較しても十分に成熟しているとはいいがたい。そのため、本城・大竹の研究グループでは、選定した河川の約 20 km にわたる延長において、形状を規定する各種のパラメータはもちろん、堤体と基礎地盤の物理特性、強度特性に関する地盤定数にいたるまで綿密に調べ上げ、それぞれの寄与度や不確実性を明確にすることによって、信頼性解析を構築することに成功している^{17),18)}。また、浸透のみならず、液状化に対する信頼性解析¹⁹⁾にも成功し、調査不足箇所抽出などの選定に有用な情報を与えている。今後は、より局所的なパイピング破壊を含む信頼性解析の検討もすすめていくことになるが、そのためにも破堤にまで至る被災メカニズムの解明やそれを取り入れた設計・照査手法の高度化が必要不可欠である。

3.2 透水性基礎地盤を有する堤防の安全性検討

本稿の冒頭で述べた平成 24 年の矢部川堤防の決壊は、「越水なき破堤」として絶大なインパクトを与えた。この被災事例では、粘性土の堤体の下に堤外地と直接連通している高透水性の砂層が、しかもその先が行き止まりの状態で存在したという特殊事情が明らかとなった¹⁾。さらに、平成 25 年 7 月に立て続けに発生した子吉川堤防の法すべり²⁰⁾と梯川堤防の法崩れ^{20),21)}は、いずれも破堤には至らなかったものの、高い透水性の基礎地盤の影響が無視できない局所的な被災であったことと、土堤のみの断面において大変状したことなど、矢部川被災箇所との類似点も多く見られたことから、結果として、局所的な浸透破壊を最も警戒すべしとする矢部川以降に生まれた機運を一気に加速させる事例となった。

そのような流れの中、地盤工学と水工学の研究者が一致協力してこの種の問題を議論してきた²²⁾。さらに現在、国総研と土木研究所を中心として透水性基礎地盤に起因する河川堤防の進行性破壊について、模型実験を柱とする研究が実施されている^{例えば23)~25)}。また、大学の各研究グループでもパイピングの被災メカニズムを検討する先進的な研究が精力的に進められている^{例えば26)}。筆者ら²⁷⁾も高い透水性を有する基礎地盤の存在に着目し、透水性が大きく異なる 2 層の基礎地盤を有する堤防の浸透模型実験を行い、基礎漏水が堤体決壊に結びつくメカニズムについて検討を行っている。具体的には、極めて高い透水性基礎地盤の上に、低い透水性の地盤が存在することにより、法尻付近に大きな上向き動水勾配が発生し、基礎地盤が液状化（有効応力を喪失した状態）する。それをトリガーとして、基礎地盤を巻き込むすべり破壊や基礎地盤への堤体陥没を生じさせ、決壊に至る堤体変状が発生する可能性を示した。今後、パイピングに伴う法尻での局所破壊が堤体全体の破堤に結びつくメカニズムを解明し、実堤防での破堤危険度予測に役立てた

いと考えている。既に有限変形弾塑性 FEM で一部成功している透水性基礎地盤のパイピング破壊に関する成果²⁸⁾に、細粒分の移動などに伴う材料劣化の微視的考察を取り入れることが問題を解く鍵となると考えている。

4. おわりに

本稿で紹介した河川堤防に関する最新の研究情勢は、土木学会地盤工学委員会堤防研究小委員会（委員長：岡村未対 愛媛大学教授）における活発な活動の中で収集したものが多く、堤防土の強度特性に関しては、上記委員会の堤防土の強度特性 WG で多くの議論をしていた。岡村委員長並びに委員各位に御礼申し上げます。また、宇野尚雄岐阜大学名誉教授には、様々な局面で多くのご助言を賜りました。厚く御礼申し上げます。

なお、紹介した研究は、国土交通省河川砂防技術研究開発公募課題「地震・洪水およびその複合災害に対する統合型河川堤防評価技術の開発（研究代表者・小高猛司、平成24～26年度）」の成果の一部や「パイピングに伴う堤防劣化を考慮した河川堤防評価技術の開発（研究代表者・小高猛司、平成27～29年度）」で現在進行中のものである。記して謝意を表する。

最後に、地盤工学会より、平成27年度中に「河川堤防の調査・設計・維持管理」を出版予定であり、現在鋭意準備中であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 矢部川堤防調査委員会：報告書，九州地方整備局筑後川河川事務所，2013.
- 2) 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き，2002.
- 3) 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版），2012.
- 4) 赤井浩一・大西有三・西垣 誠：有限要素法による飽和一不飽和浸透流の解析，土木学会論文集，No. 264，pp. 87～96，1977.
- 5) 李 圭太・中上宗之・古屋隆男・竹崎伸司・江川祐輔：高津川における地形・地質的特徴と河川堤防の耐浸透特性に関する考察，第43回地盤工学研究発表会，pp. 1119～1120，2008.
- 6) 李 圭太・中上宗之・大橋泰博・大賀祥一・大田 学：江の川上流における地形・地質的特徴と河川堤防の耐浸透特性に関する考察，第43回地盤工学研究発表会，pp. 1121～1122，2008.
- 7) 李 圭太・岡嶋義行・河東 礼・小山倫史・大西有三・吉川智勝・大橋泰博：不飽和地盤における現場透水試験に関する考察，第41回地盤工学研究発表会，pp. 101～102，2006.
- 8) 大西有三・大津宏康・石川 浩・李 圭太・小林猛嗣：河川堤防を対象とした浸透流解析における降雨境界の設定に関する考察，第36回地盤工学研究発表会，pp. 1395～1396，2001.
- 9) 鉾土木研究所 地質・地盤研究グループ土質・振動チーム：河川堤防の浸透に対する照査・設計のポイント，2014.
- 10) 国土交通省 国土政策技術総合研究所 河川研究室：河川堤防の土質試験結果情報，ダウンロードデータ，2014.
- 11) 小高猛司・板橋一雄・中島康介・牧田祐輝・李 圭太・上村俊英，坪田邦治，加藤雅也：河川堤防砂礫の変形・強度特性の評価手法に関する考察，地盤工学ジャーナル，Vol. 5，No. 2，pp. 193～205，2010.
- 12) 小高猛司・崔 英・李 圭太・森 涼香・兼松祐志：河川堤防砂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.
- 13) 小高猛司・崔 英・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，Vol. 19，pp. 81～87，2013.
- 14) 小高猛司・崔 英・小林芳樹・武 楊・李 圭太：河川堤防の安全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.
- 15) 望月秋利・三笠正人：フィルダムの安定解析法——一般全応力法と有効応力法との比較一，土と基礎，Vol. 32，No. 4，pp. 19～26，1984.
- 16) 小高猛司・崔 英・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，土木学会第70回年次学術講演会講演概要集，2015.
- 17) 平松佑一・本城勇介・大竹 雄・李 圭太・小高猛司：堤体地盤調査データの統計解析に基づく河川堤防の信頼性評価，第1回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム講演概要集，pp. 49～50，2013.
- 18) 平松佑一・本城勇介・大竹 雄・李 圭太・小高猛司：河川堤防の浸透安定性評価のための応答曲面導出に関する基礎的研究，第49回地盤工学研究発表会講演概要集，2014.
- 19) 大竹 雄・本城勇介・平松佑一・吉田郁政・佐古俊介・中山 修・長野拓朗：震災履歴を有する河川堤防20 kmにおける地盤調査地点を考慮した液状化危険度解析とその有効性検証，地盤工学ジャーナル，Vol. 9，No. 2，pp. 203～217，2014.
- 20) 災害報告特別セッション配付資料，第2回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム，土木学会，2014.
- 21) 大角一浩・餅田大輔・今森美穂：梯田古府地先漏水対策について，平成26年度北陸地方整備局事業研究発表会，2014.
- 22) 河川部会 堤防ワーキンググループ（代表：服部 敦）・堤防研究小委員会侵食，浸透破壊，洗掘ワーキンググループ（代表：前田健一）：河川堤防の効率的補強に関する技術的課題とその取り組みの方向性，河川技術論文集，Vol. 21，pp. 367～373，2015.
- 23) 秋場俊一・吉田直人・石原雅規・佐々木哲也：河川堤防の進行性破壊と法尻付近の局所動水勾配の関係に関する解析的検討，第2回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム，pp. 41～44，2014.
- 24) 倉田大輔・福原直樹・森 啓年・服部 敦・吉田直人・石原雅規・佐々木哲也：透水性基礎地盤に起因する河川堤防の進行性破壊に関する模型実験，河川技術論文集，Vol. 21，pp. 361～366，2015.
- 25) 森 啓年・下川大介・倉田大輔・福原直樹・服部 敦：透水性基礎地盤に起因する河川堤防の被災過程と浸透流解析結果の分析，河川技術論文集，Vol. 21，pp. 355～360，2015.
- 26) 齊藤 啓・前田健一・泉 典洋・李 兆卿：基盤の地盤特性が異なる河川堤防の高水位の継続作用による漏水とパイピングの進行特性，河川技術論文集，Vol. 21，pp. 349～354，2015.
- 27) 崔 英・小高猛司・李 圭太：高透水性基礎地盤の基盤漏水に起因する堤体の進行性破壊に関する模型実験，土木学会第70回年次学術講演会講演概要集，2015.
- 28) 加藤健太・吉川高広・野田利弘・小高猛司・高稲敏浩・李 圭太：空気～水～土骨格連成有限変形解析に基づく河川堤防基礎地盤の透水性がパイピング破壊に及ぼす影響評価，第50回地盤工学研究発表会，2015.

（原稿受理 2015.6.25）