

研究成果報告書

研究開発課題名	スマートガビオンを用いたため池堤体の耐越水補強工の開発
研究総括者	小林秀一
研究開発組合	株式会社水倉組 東網工業株式会社
試験研究機関	国立大学法人 新潟大学 農学部

1 事業の実施内容

1. 1 事業の背景および目的

豪雨に伴う大規模出水により、ため池堤体に越水破壊が頻繁に起きるようになっていく(写真-1)。地球温暖化の予兆とされる異常降雨により出水量の急増が外的要因として、築造が古い堤体が多く洪水吐施設が整備されていない、あるいはその吐出能力が不十分であることが内的要因として指摘されている。豪雨によるため池の決壊の原因は、主として堤体に浸透破壊、すべり破壊、越水破壊が単独に、あるいは複合的に生じることににより最終的に決壊に至る場合が多くある。本事業により開発した耐越水補強工は、このうち越水破壊が生じないようため池堤体を保護することを目的とする。粘性土を主体とする土質堤体の場合、堤体の決壊はヘッドカットの進行により生じる(図-1)。通常、下流斜面先近傍に小規模なヘッドカットが形成され、これが次第に上流側に進行していきクレストに達すると決壊に至る。



写真-2 2022年8月 福島・山形・新潟豪雨災害によるため池の越水状況
ため池の越水状況(撮影:山形県川西町)

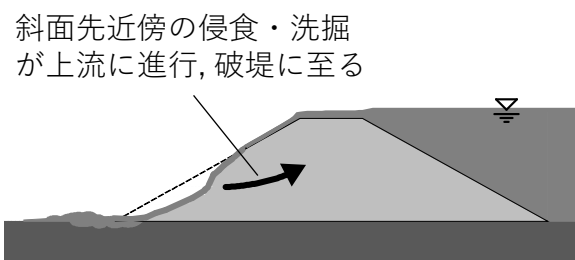


図-1 土質堤体の下流斜面先近傍に形成されるヘッドカットとその上流側への進行

これまでの対策は、越水そのものが起きないように吐出能力のアップを図る堤体・施設改修が挙げられるが、大規模工事となり経費が増加する。加えて、年々増加する洪水量には際限がないようにも見受けられ、おのずと吐出能力に着目した越水防止策は必ずしも得策であるとはいえない。越水は許容するとして、流水下で下流斜面先近傍に生じる堤体斜面の侵食を抑制し堤体損傷を引き起こさないよう、現在の堤体に耐越水機能を持たせる対応、つまり耐越水補強のアプローチが現実的であると考えられる。

これまでため池堤体は、そもそも越水を絶対に起こしてはならないとの方針で、設計・築造されてきている。このような観点に立つと、何らかの補強工あるいは技術対策により新たに耐越水機能を創出するとする取り組みは、ため池堤体ひいては広く農業用ダムの保安全管理に価値ある成果をもたらしてくれると考える。

本事業では、効果的に耐越水機能を創出する補強工として、ガビオンマットレス（かごマットタイプの平張り石礫層）をため池堤体の天端および下流斜面に敷設したスマートガビオンによる耐越水補強工（図-2）を提案する。石礫層を流下する越水流れを、水理理論に従って最適に選定した粒径をもつ石礫材を通してコントロールし、流れの速度を抑え堤体の侵食損傷を防ごうとするものである。その実効性を、室内および現地試験を通して、越水の石礫層内における水理挙動と斜面土の侵食抑制効果、堤体斜面と敷設される石礫層の構造安定性、ならびに施工の簡便さと迅速性の視点から検証し、新技術としての研究開発を行うことを事業目的とする。

現在は損傷を受けていないが、将来損傷を受ける可能性が大きいため池堤体に対し、

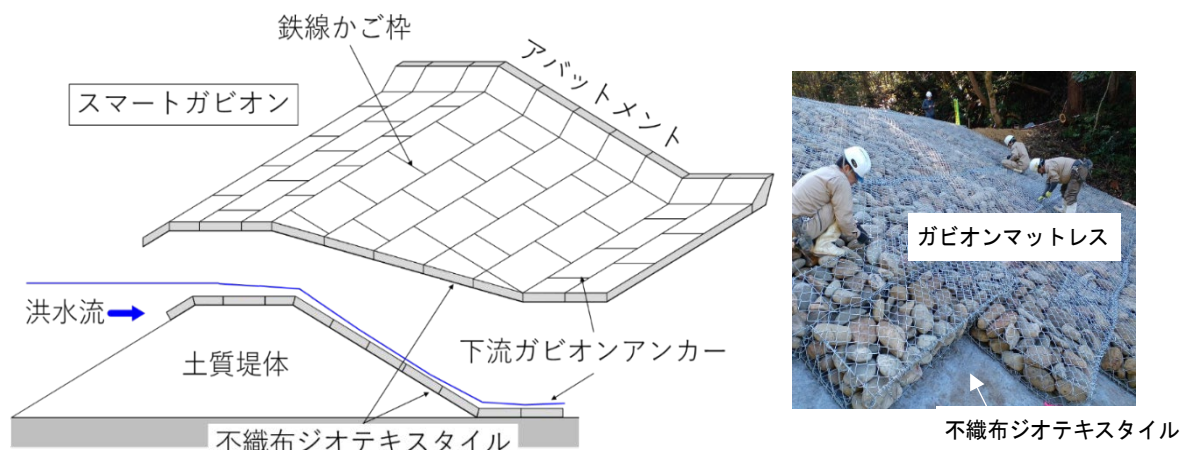


図-2 スマートガビオン（かごマットタイプの平張り石礫層）の構造概要

「後付け」でかつ大規模な掘削工事を伴わない「外付け」の工法となることから、短い工期で、かつ経費を抑えることができる。山地景観の中で礫や石材の露頭に違和感はなく、なにより使う資材が自然材料のみであり環境にやさしい工法となることから、ため池管理者・利用者に対し現代的な説得性をもつといえる。

近年、ため池堤体および農業用ダムに対して取り組まれている耐震補強では、洪水吐の容量を大きくし越水防止を図る対策がなされているが、それらの多くで広い受益地を有するため池が優先され、また大規模事業となり経費がかさむことから、迅速に対策を進めるうえでの課題となっている。本事業により開発したスマートガビオンによる耐越水補強工は、前述の通り、「後付け」と「外付け」の対策であることから、これまで工事

期間や経費の理由で先送りされてきた多くの小規模ため池に効果的に適用することができ、土地改良施設の保全管理に貢献できるものと考ええる。加えて、小規模とはいえ、ため池の下流近傍には住民が居住しており、万一にも越水損傷とそれを契機とした破堤が起きるようであれば、人的・物的被害は計り知れないことから、耐越水機能の創出による耐越水補強工の開発は、防災の視点からも強く求められていると考える。この耐越水補強工は、近年取り組まれている耐震強化等が目指す土地改良施設の「強靱化」や「粘り強い構造」につながっていくものと言える。

1. 2 事業の内容および実施方法

本事業の成果により開発されたスマートガビオンを用いた耐越水補強工は、その設計と施工において次のような具体的手順を持つ。(i) 設計段階では、石礫層内の流れの水理解析に基づき、想定される越水量を安全に流下させることができる石礫材の粒径・粒度ならびに石礫層の厚さを選定する。次に(ii) すべり安定解析により、堤体斜面の滑り安全率と石礫層の表層すべり安全率を評価し、これらを安定解析により堤体斜面のすべり安全率を評価する。これらを総合してスマートガビオンの最適な構造寸法と石礫材粒径(あるいは粒度)を決定する。(iii) 施工段階では、かごマット工法の分野でこれまでに確立されている施工方法に準じて、現地のため池サイトで本体金網パネルの組立と、バックホウを用いた石詰め作業を行い、スマートガビオンを敷設する。スマートガビオンそのものは、これまでに多自然型川づくりなどに用いられてきたかごマットを基本形とするものであり、施工技術はほぼ確立されている。このことから、上記(i)および(ii)で求められる[A]水理解析および[B]すべり安定解析に基づく最適な構造・材料設計法の研究開発が、本事業における重点的な技術検討課題となる。上記(iii)において、おおむね確立されているものの、ため池堤体が立地する狭隘な山間地形では資機材の搬入出やバックホウの稼働について制約が出てくると考えられることから、実証試験を通して、[C]スマートガビオンの敷設工法の研究開発が、3つ目の重要な技術検討課題となる。これらの技術検討課題を踏まえて、研究開発の流れを示すと図-3 になる。ここで、技術検討課題[C]は、現地のため池サイトで実際に工事を行って研究検討を加えることになることから、実質的に実証試験に該当すると位置づけ、同列に記載している。

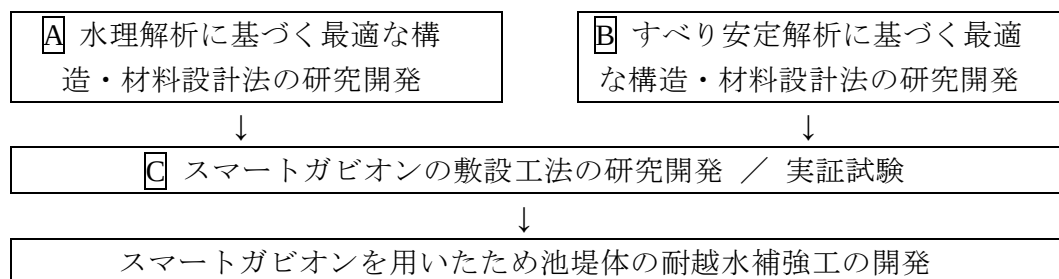


図-3 研究開発の内容（技術検討課題）と流れ

(1) [A]水理解析に基づく最適な構造・材料設計方法の研究開発

水理解析（浸透流解析）により、想定される越水深を流入水頭として、石礫層内を通過する流れの挙動（流速・流入と自由水面位置）を知ることができる（図-4）。この流れは非線形であり、石礫材の間隙を通過する際に水頭エネルギーを大きく損失する結果、下流側では低減し斜面土の侵食が緩和もしくは抑制される（図-4 (b)）。この非線形流れは、理論的・実験的に、粒径、粒形（形状係数）および間隙比の3因子に支配されるとされている。一般に荒粒の石礫材では形状係数と間隙比はそれほど大きく変わらないことから、想定される越水量を安全に下流側に流下させるために必要な粒径（代表粒形）と流下断面（石礫層の厚さ）を一意的に決定でき、スマートガビオンの構造・材料設計が可能となる。決定された粒径が大きいとより多くの越水量を流下させることができるが、それとともに層内の流速が大きくなり侵食が懸念されるようになる。（図-4 (c)）。一方

小さな粒径の場合、層内の流速は小さくなり侵食のリスクは弱まるが、流下量をうまくさばけなくなり、石礫層に表面流が生じ力学的な不安定化が起こる可能性がある。したがって、当該技術検討課題では、越水量（越水深）、石礫材の代表粒径、そして石礫層の構造寸法（主に厚さ）の効果を科学的、合理的に斟酌して、スマートガビオンの構造・材料を最適に決定できる設計法を研究開発していくことになる。

以上、上述の 3 因子を考慮した非線形流れの水理モデルの開発、水理モデルに基づいた、石礫層の流れの水理解析プログラムの開発、ならびに水路実験による水理解析結果の検証が、具体的な検討項目となる。

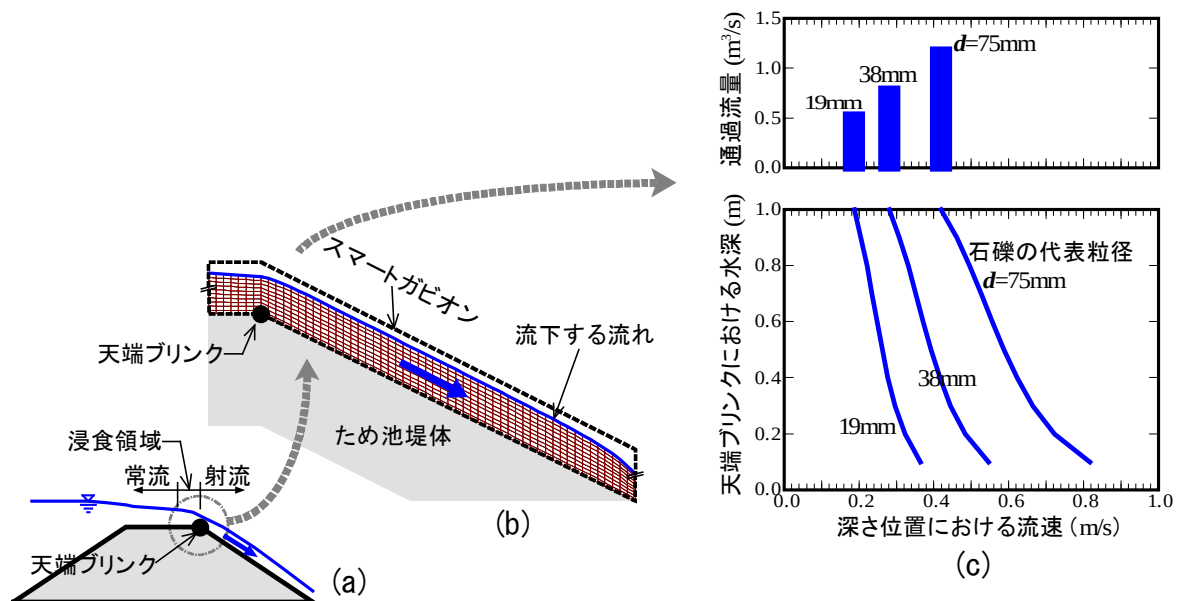


図-4 水理解析で得られたスマートガビオンを通過する流れの挙動ならびに石礫の粒径の違いに伴う通過流量および流速分布の変化

- (a) 越水時に天端ブリンク近傍に現れる浸食領域のイメージ
- (b) スマートガビオン（石礫層）を通過する流れの FEM 水理解析結果
- (c) 石礫材の粒径の違いによる通過流量と流速分布の変化

(2) [B]すべり安定解析に基づく最適な構造・材料設計法の研究開発

石礫層の厚さは、本来、技術検討課題 [A] の水理解析に基づいて幅広く決定されるべきであるが、かごマットとして量産されすでに使用実績が多く、かつ新規の厚さ寸法を理由に資材経費の負担増が生じないようにすることを優先させると、現実的には標準仕様の 50cm または 30cm 厚さのどちらかから、石礫材の代表粒形を考慮しながら最適に採択していくことになる。いずれにしても、石詰めされた石礫層は 1m^2 あたり 0.5~1.0t ほどの重量になり、少なからず堤体斜面の円弧すべり安定性に影響を与える可能性が出てくる（図-5）。また斜面に敷設されることから、傾斜に沿った石礫層の表層すべり（ずり落ち）の懸念もあり、検討が求められる。

したがって、当該技術検討課題では、石礫層の敷設に伴う重量増加を考慮した斜面すべり安定解析法と表層すべり解析法を導入し、[A] の構造・材料設計法に合理的に組み入れていくことが研究開発の中心となる。ここで、斜面すべり安定解析法、表層すべり解

析法のいずれかもすでに土質力学分野において確立されていることから、単に導入するとの表現にしているが、前者については、一般に用いられるスライス法において石礫重量を分割した上乗荷重として取り扱ってよいか、その妥当性を評価されている既往研究の調査などを通して検証する必要がある。後者の表層すべり解析法では、計算法そのものは一層単純なものであるが、重要な計算パラメータである石礫層底面と斜面土との間のせん断抵抗係数（摩擦係数）について、今のところ十分なデータがなく公表値も見当たらない。用いる石礫材の粒形によってこの係数値が大きく異なってくるとも考えられることから、新技術の今後の展開を図っていくためにも、標準的あるいは代表的なせん断抵抗係数値を求めておくことが必要となる。このため、実施工に先だって、実際にため池の土質を模した地盤上にスマートガビオンを設置したうえ、バックホウを反力としてブロック引張試験を行うこととした。

以上、上記の既往研究調査などに基づくスマートガビオンに適した斜面すべり安定解析法の開発、ならびにせん断抵抗係数の現地測定試験が、当該技術検討課題における主要な検討項目となる。

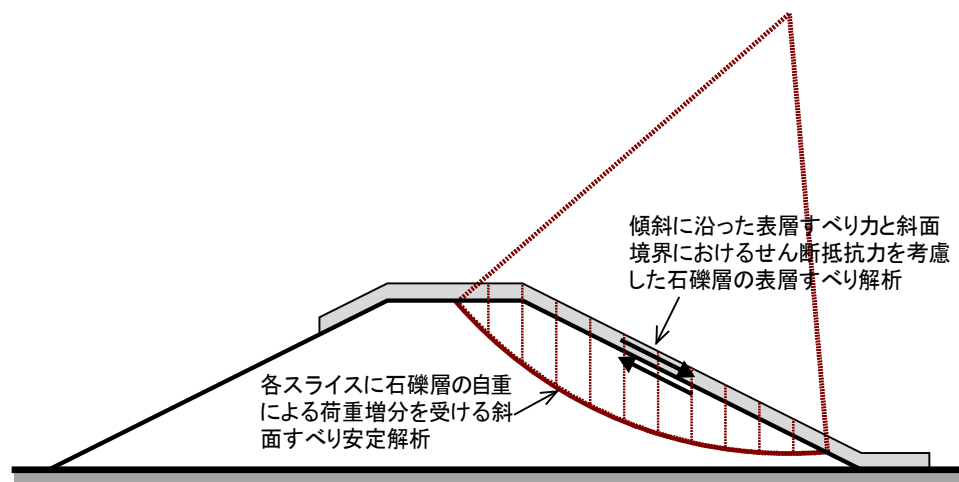


図-5 すべり安定解析による斜面のすべり安定と石礫層の表層すべり安定の評価

（３）C実証試験（スマートガビオン敷設工法の研究開発）

スマートガビオンそのものは、これまでに多自然型川づくりなどに用いられているかごマットを基本形とするものであり、施工技術はおおむね確立されている。とはいえ、ため池堤体が立地する狭隘な山間地形では資機材の搬出入やバックホウ稼働についてそれなりの制約が出てくると考えられることから、実証試験を通して、スマートガビオンにふさわしい敷設工法を検証する必要がある。現在、全国の自治体でため池整備・保全管理の取組が進められており、その一環あるいは一助となりうることから、本実証試験は、研究開発組合の主要な業務エリアである新潟県に立地するため池サイトで実施することとし、所管する新潟県の担当部署と協議しながら進めた。

スマートガビオンは、本体金網パネルとその中に敷き詰められた石礫材で構成される（図-6）。敷設は、現地で、①底網、側網および仕切網をコイルで連結し本体金網パネルを組立て、②粒径を調整して搬出した石礫材を金網パネルに投入し石詰めを行い、③上

蓋網を掛け、コイルで固定するといった手順で行う（写真-2）。かご詰めされた個々の石礫材粒子が供用期間にわたって長く安定を保つようにするため、石詰め作業の過程で、バックホウを使った転圧作業が必要になる。その際に、底面下の堤体土質斜面に損傷を与える懸念があることから、当該実証試験を通じて調査し、適切な技術評価を行うこととする。また従来の主な適用先である河川護岸とは異なり、狹隘で堤体と斜面長が大きくなる立地条件が多いことから、バックホウを用いた金網パネルへの石詰めが困難となる。このため、法尻敷地からアプローチ盛土を造成したうえ、斜面上部から下部にむけて逐次敷設していくことも考えられる。これについては標準的なあるいは事例的な工法がないため、当該実証試験を通して、最適な敷設方法を新たに検討することになる。

以上、石詰め作業に伴う堤体斜面の損傷の回避方法の検討、ならびに堤高・斜面長に応じた分割敷設の実効性の検討の 2 点が、本実証試験における具体的な技術検討項目となる。技術検討課題 **B** を通してスマートガビオンとしての平張り石礫層の構造安定性能は定常的に担保されると考える。

本実証試験を実施する新潟地域、あるいは広く農業用ため池が多く立地する山間の地域では、冬期・春期において、積雪に伴う上載重量の増加、ならびに長期にわたる連続的な融雪水の浸入に伴うせん断抵抗力の低下により、石礫層に表層すべり上の不安定化が起きる可能性がある。このため、スマートガビオンの敷設工事終了後、これらを定期的にモニタリングして、スマートガビオンの供用時の構造安定性能を検証する。本実証試験におけるスマートガビオンの敷設工事は研究開発期間 2 年目の下期に実施し、下期後半と第 3 年度をこの構造安定性能の検証期間にあてることとし、これを持って機能監視とする。

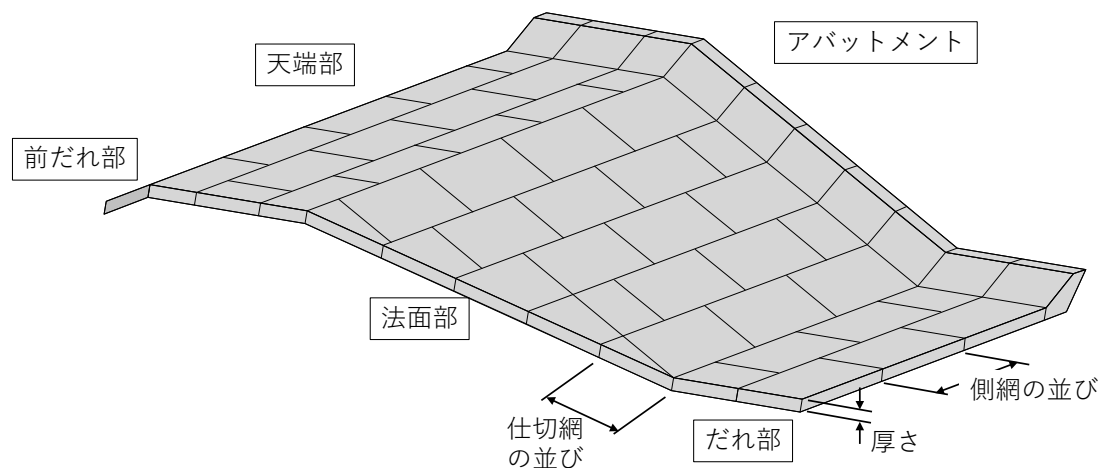


図-6 スマートガビオン姿図



写真-2 スマートガビオン施工手順

1. 3 事業着手時に想定した技術的問題点への対応

技術的問題点	対 応
A 水理解析に基づく最適な構造・材料設計法の研究開発 - 最適な石礫材の粒形と石礫層の構造寸法 - 傾斜面の下部に浸出面が出現し、石礫層の上面を流下する不等流が混在するようになる点	○水理解析モデル・プログラムの開発 スルーフローに対する被圧浸透流解析とオーバーフローに対する不等流計算を組み合わせた繰り返し計算、連結水理解析の実施。
	○水路実験と透水試験による水理モデルの検討 水路実験を通し混在する流れを表現できるように水理解析プログラムの改良
B すべり安定解析に基づく最適な構造・材料設計法の研究開発 石礫層と斜面土との間のせん断抵抗係数（摩擦係数）に関するデータの評価	○斜面すべりと表層すべりの安定解析法の開発 - 円弧すべり面法を活用した斜面すべり安定解析の開発 - 表層すべりの安定解析法の開発
	○せん断抵抗係数の現地測定試験 せん断引張り抵抗試験の実施
C スマートガビオンの敷設工法の研究開発/実証試験 スマートガビオンの敷設方法や構造仕様	○敷設手順・工法の現地検討 - 鉄線かご枠の割付手法の立案 - 現場条件を考慮した施工計画立案
	○積雪や融雪等の影響の有無の観察・監視 ICT 技術を用いたモニタリングの実施

1. 4 事業の実施体制

(1) 研究開発組合内の役割分担

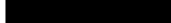
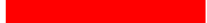
研究開発の項目 (技術検討課題)	研究開発組合	
	(株)水倉組	東網工業(株)
A 水理解析に基づく最適な構造・材料設計法の研究開発	◎	○
B すべり安定解析に基づく最適な構造・材料設計法の研究開発	○	◎
C スマートガビオンの敷設工法の研究開発 / 実証試験	◎	○

(注) ◎は主担当、○は担当

(2) 試験研究機関との役割分担

研究開発の項目 (技術検討課題)	研究開発組合	試験研究機関
		新潟大学
A 水理解析に基づく最適な構造・材料設計法の研究開発	○	○
B すべり安定解析に基づく最適な構造・材料設計法の研究開発	○	○
C スマートガビオンの敷設工法の研究開発 / 実証試験	○	○

1. 5 事業の年度計画と実績

研究開発の項目	R3 年度		R4 年度		R5 年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期
A 水理解析に基づく最適な構造・材料設計法の研究開発 ○水理解析モデル・プログラムの開発 ○水路実験と透水試験による水理モデルの検討	 	 				
B すべり安定解析に基づく最適な構造・材料設計法の研究開発 ○斜面すべりと表層すべりの安定解析法の開発 ○せん断抵抗係数の現地測定試験	 	 	 			
C 実証試験（スマートガビオンの敷設工法の研究開発 ○敷設手順・工法の現地検討 ○積雪や融雪等の影響の有無の観察・監視			 	 		
総括・報告書作成						 

注)  は計画、 は実績。

1. 6 研究開発の概要、結果、課題等

1. 6. 1 A 水理解析に基づく最適な構造・材料設計法の研究開発

(1) 水路実験と透水試験による水理モデルの検討

1) 概要・目的

洪水流は、石礫層の厚さおよび石粒子の粒径に応じた比率でスルーフローおよびオーバーフローとして、流入し下流斜面上を流下していく（図-7）。スルーフローはオーバーフローに比べ相対的に減速されるものの、いずれの流れも大きな流速をもち、その結果、スルーフローは石粒子の移動・変位をもたらし、オーバーフローは掃流力により石詰め層の構造安定性を損なうリスクがある。リスクに対し、越水で生じるスルーフローとオーバーフローの水理を理論的に明らかにすることが目的となる。室内水路実験を実施して越水流れを考慮した水理解析モデル・プログラムの開発を行った。

2) ため堤体堤頂部を再現した室内水路実験方法・結果

洪水流が最初に流入してくる堤頂部を対象に、幅 0.45m の室内実験水路に高さ 0.2~0.3m、長さ 0.8m のロックフィルガビオンを作製し、流入流量を段階的に上げていった際の流況を測定した（写真-3）。粒径 50~100、100~150 および 150~200mm の石粒子を用いた。測定した水面形の一例を図-8 に示す。流量段階 1 と 2 ではスルーフロー（through-flow）が、流量が増えるとロックフィル層上を流れるオーバーフロー（over-flow）が生じた。

3) 堤体天端における越水流れの連結水理解析

石詰め層を通るスルーフローは、層の天端表面に沿ってオーバーフロー水深の負荷を受ける被圧浸透流となり、その結果生じる動水勾配分布に従って、天端表面を通して局所的に流量を出し入れする。オーバーフローは、これを受けて、上流から下流に向かう流れに沿って流量が増減する spatially varied flow（不等流の一つであり、以下 SVF と略称する）と

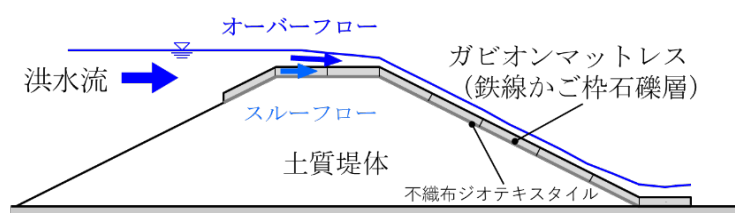


図 7 石礫層内のスルーフローとオーバーフロー

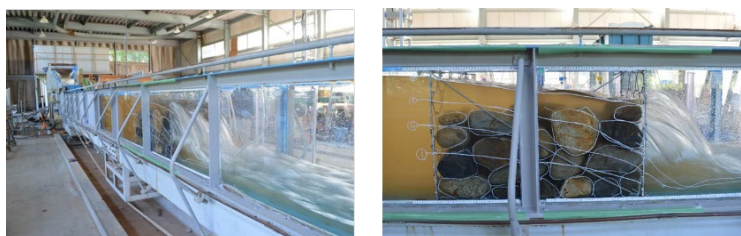


写真-3 室内水路実験状況

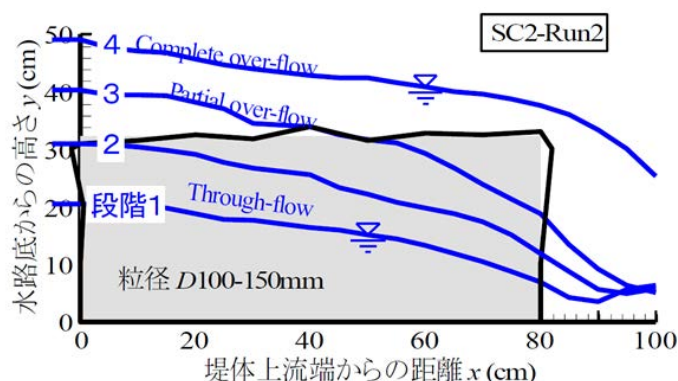


図-8 室内水路実験で測定されたスルーフローとオーバーフローの水位

なり、運動量変化に従って自身の水深を決めていく。このような弱連成的な水理挙動に対し、スルーフローに対する被圧浸透流解析とオーバーフローに対する不等流計算を、石詰め層の天端表面での局所的な流量の出し入れを介して、2つのフローの流況に合理的な整合性が得られるまで繰り返した。これら2つを組み合わせた繰り返し計算を連結水理解析法と定めた。図-9に完全越水時、図-10に部分越水時および図-11に石礫層内の測定値と計算値をそれぞれ示す。連結水理解析法により、完全越水時および部分越水時の両フローの水理挙動を精度よく予測することができるようになった。スマートガビオンを敷設した堤体に越水が生じると、堤体下流側でオーバーフローから堤体内に向かう流れが顕著になり、同時に浸出面に向かいスルーフローが速まり動水こう配が大きくなることも考えられる。この種の構造体の設計にあたっては、堤体下流側の力学的安定性に着目する必要があることも分かった。

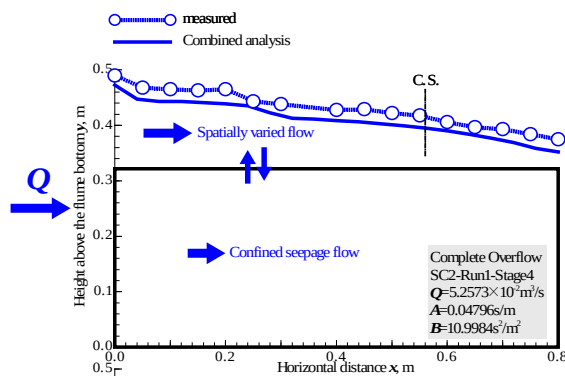


図-9 完全越水時の水理挙動

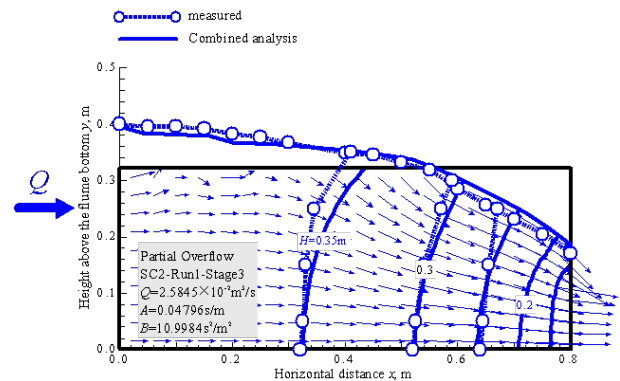


図-10 部分越水時の水理挙動

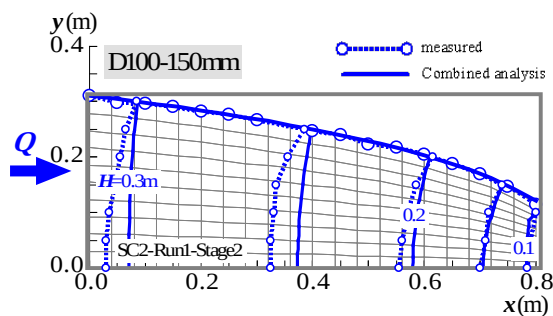


図-11 石礫層内の水理挙動

4) ため池堤体斜面部を再現した室内傾斜水路実験・結果

洪水流は堤頂部を流下した後、傾斜部を流下するため、傾斜をもつ石礫層に対応した流れの幾何条件を考慮した、解析・計算手法の拡張が必要となる。一般に土質堤体の下流斜面勾配は $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 程度であることから、これらの傾斜角度を再現した傾斜水路実験を実施した。図-12 に示すに示す長さ 4m、幅 0.5m の水路に鉄線かご枠を設置し石礫材を石詰めしたのち、一端を持ち上げ傾斜 20° 、続いて 30° の状態で、越水流況下での構造安定性を観察するとともに、スルーフローとオーバーフローの流速分布に基づいて掃流力に対する安全性を定量評価した。最大越水量は、既往フィルダムの設計洪水流量から想定される越水量を十分にカバーしうる $0.35\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ とした。

いずれの実験ケースにおいても越流状況下で石礫層が変形する、あるいは粒子が大きく移動するなどの不安定さはまったく観察されず、十分な構造安定性を確認できた。最も過酷な条件（傾斜 30° 、越水量 $0.355\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ 、継続時間 4 時間）で実施したケースで測定した、越水前後の石礫層表面形状を図-13 に示す。石礫層表面にまったく変形はなく粒子移動も起きていないことが分かる。加えて、越水前後で石礫層表面を写真撮影し、両者の画像比較により粒子の移動の有無を調べたところ、図-14 に示すように、石詰め時にできた隙間に粒子が傾いて生じたと推察されるわずかな粒子変位が確認された程度であった。総じて、石礫層の変形や粒子の移動・転石などは起きず、越水掃流に対し十分な構造安定性を有すると判断した。

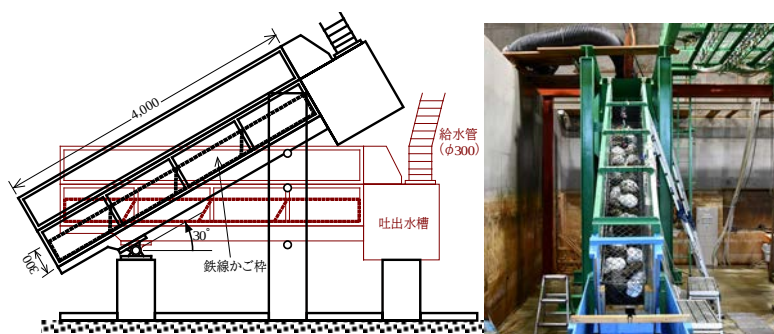


図-12 スマートガビオンの構造安定性を調べるための傾斜

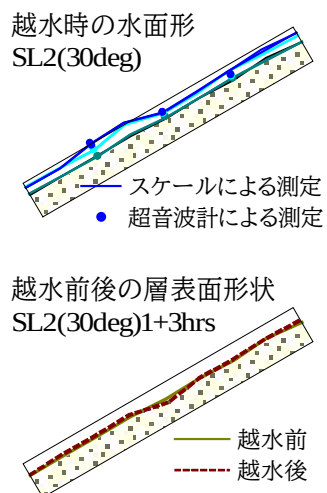


図-13 大流量時の越水流況と越水前後における石礫層の表面形状



図-14 石礫層表面の粒子変位

5) 傾斜水路における越水流れの連結水理解析

水平に敷設された石詰め層に対して連結水理解析法の有効性を確認した。スルーフローに対して有限要素法による非線形浸透流解析を、オーバーフローに対して SVF の数値積分法を適用し、これらを連結して、フロー間の局所的な流量交換ならびに大きな斜面勾配の効果を検討した水理解析法を開発した。図-15 は測定されたオーバーフローの水面計を連結水理解析による計算値と比較したものである。

水理解析モデル・プログラムの開発では、堤体堤頂部から堤体傾斜部までを一体化した石詰め構造に対する水理解析展開行う。これにより、スルーフローとオーバーフローという流れの性質は異なるが運動量の連続性を介して弱連成的につながる 2 つの流れを通して、越水流れの水理状況を定量的に把握できるようになる。また、スマートガビオンを用いたため池堤体の耐越水補強工の構造仕様と構造安定性の設計検討が可能になると考えられる。

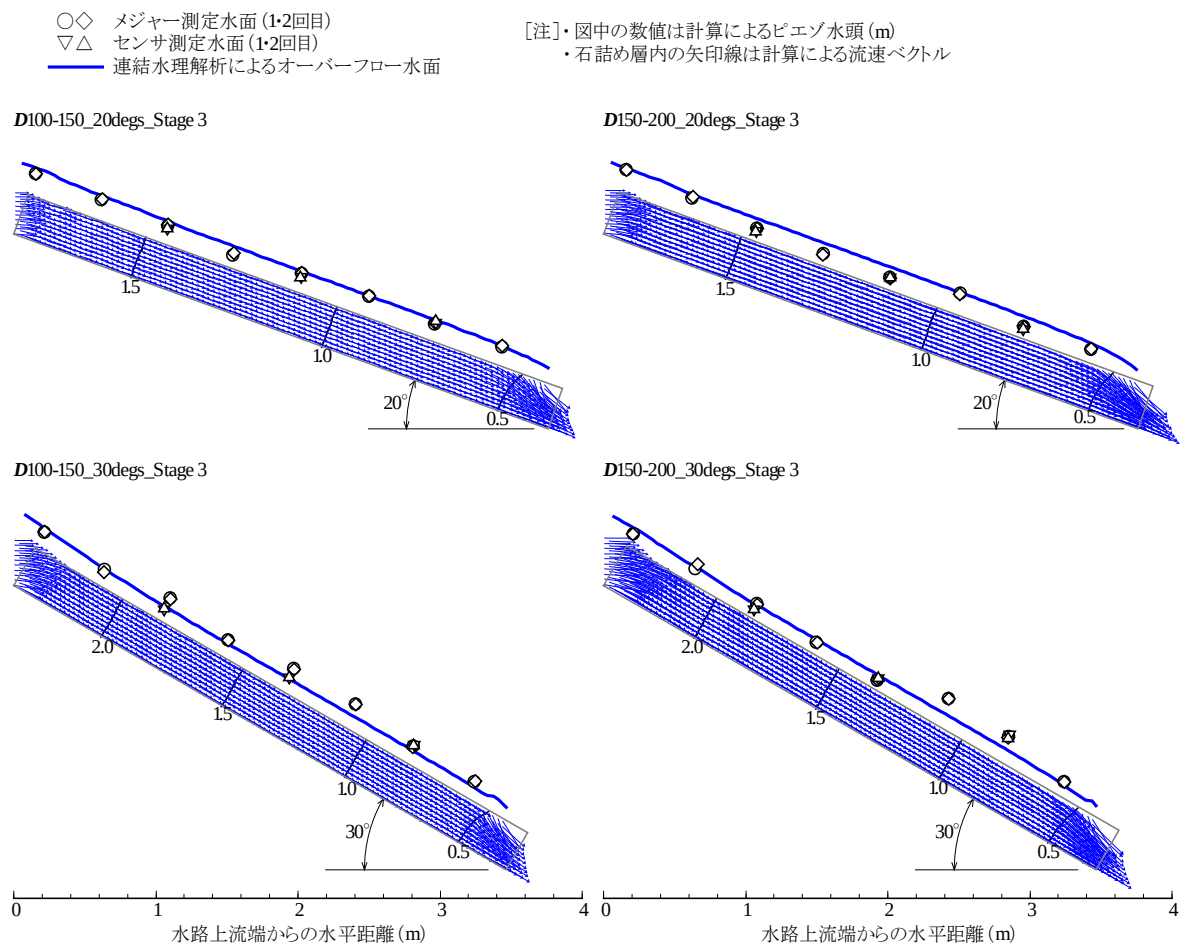


図-15 傾斜水路実験で測定されたオーバーフローの水面計と連結水理解析による計算値との比較

(2) 水理解析モデル・プログラムの開発

1) 概要・目的

水路実験と透水試験による水理モデルの検討で得られた結果をもとに、堤体堤頂部から堤体傾斜部までを一体化した石詰め構造に対する水理解析を行う。具体的には、スルーフローに対する被圧浸透流解析とオーバーフローに対する不等流計算を組み合わせた繰り返し計算、連結水理解析を行う。これにより、スマートガビオンで被覆された堤体に生じる越水流れの水理挙動を明らかにする。

2) ため池に生じる越水流量（単位越水流量）の想定

図-16 は、国内の 110 か所のフィルダム（農林水産省農村振興局整備部、2018）について、設計洪水流量を堤頂長で除した値を流域面積との関係でまとめたものである。その最大値は $3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ほどであり、たとえば気候変動による 1~2 割とされる増加量を堤頂長全面に越水させるとすると、単位越水流量 q_f は $0.3 \sim 0.6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ となる。現行の設計基準が適用されていない多くの古いため池では、流域面積を最大 $1 \sim 2 \text{ km}^2$ 程度とみると、設計洪水流量の全量を堤頂長全面から越水させるとすれば q_f は $0.1 \sim 0.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 程度、また堤頂高を下げて堤頂長の半分域で部分越水させれば $0.2 \sim 0.4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 程度となる。これらの流量値と本文の対象外ではあるが上記のフィルダムにおける洪水流量増加分を俯瞰的に考慮し、ため池で想定される最大の q_f を $0.35 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ に設定した。

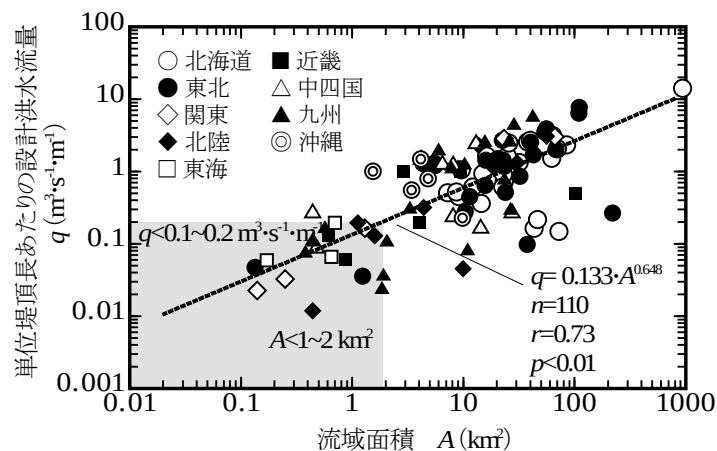


図-16 国内の 110 地点のダムにおける単位堤頂長あたりの設計洪水流量と流域面積との関係

3) 越水流れの水理特性

堤頂幅 3.0 m で、斜面勾配が 20° および 30° のため池堤体を対象とする。連結水理解析で必要となるガビオンマットレスの材料特性は表- 1 の通りである。この条件のもと、 $q_f = 0.35 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ のみを入力値として連結水理解析で算定した越水流れの水理挙動を図-17 に示す。同図の下段から上段に向け、(a) 斜面勾配 20° および (b) 斜面勾配 30° の堤体に生じる越水流れの水面形ならびに石詰め層内のスルーフローの流速分布と動水勾配 i の分布、(c) スルーフローとオーバーフローが受け持つ流量（それぞれ q_f と q_{of} ）、そして (d) オーバーフローのフルード数 Fr を示した。連結水理解析のうちオーバーフロ

一の水面形の計算には、SVF の運動量方程式に対する数値積分法を用い、階差計算の起点つまり支配断面の位置は Hinds の方法により決定した。

図-17 (a)と(b)より、洪水流は、堤頂部に入ると、スルーフローとオーバーフロー間の流量の出入りにともなって複雑に波打つように流れ、そしてブリンク直前で勢いをつけ斜面部に飛び込むようにして流下していく様子をみることができる。斜面部では 2 つのフロー間で流量の出し入れはほとんどなく、スルーフローはおおむね堤体斜面に平行して、斜面部先に向かって次第に流速を大きくしていく。同図(d)のように、斜面部のオーバーフローの Fr は 2.5~3.5 程度となり、その大きなエネルギーに対処するため減勢工設備が必要となる。石詰め層内の動水勾配は、流れが堤体斜面にほぼ平行であるため、斜面勾配に近い 0.4 (斜面勾配 20° の場合) および 0.5 (同 30° の場合) ほどとなり、これにより浸透力が流下方向に作用する。加えて、オーバーフローとスルーフローとの間の流速差によって、石詰め層の天端表面に沿ってせん断応力 (掃流力) が作用し、越水時にスマートガビオンが表層滑動を起こすリスクが生じる。

図-17(c)から、ガビオンマットレスを通過する q_t は堤頂部で q_f の 10 % 以下、斜面部で 20~25 % と少ない。その結果、堤体表面土に接する石詰め層の底面近傍の流速が低減し、土の侵食が抑制される。

表-1 石詰めされたスマートガビオンの物理特性

粒径 D (mm)	100~200
水頭損失係数 a (s/m)	0.0239
水頭損失係数 b (s/m)	0.61292
粗度係数 n	0.049
単位体積重量 γ_t	12.66
水中単位体積重量 γ_{sub}	9.78
*	粗粒多孔質対の石詰め層を流れる浸透流の水頭損失特性を Forchheimer 式 $i = av + bv^2$ で表した場合の係数。ここで i は動水勾配、 v は流量流速 (m/s) である。水温 10°C で算定した。
**	オーバーフローの流路底、つまり石詰め層の天端表面におけるマンニングの粗度係数であり、水路実験における測定値に基づいて設定した。
***	水路実験で作製した石詰め堤体の実測値より、それらの平均として設定した。

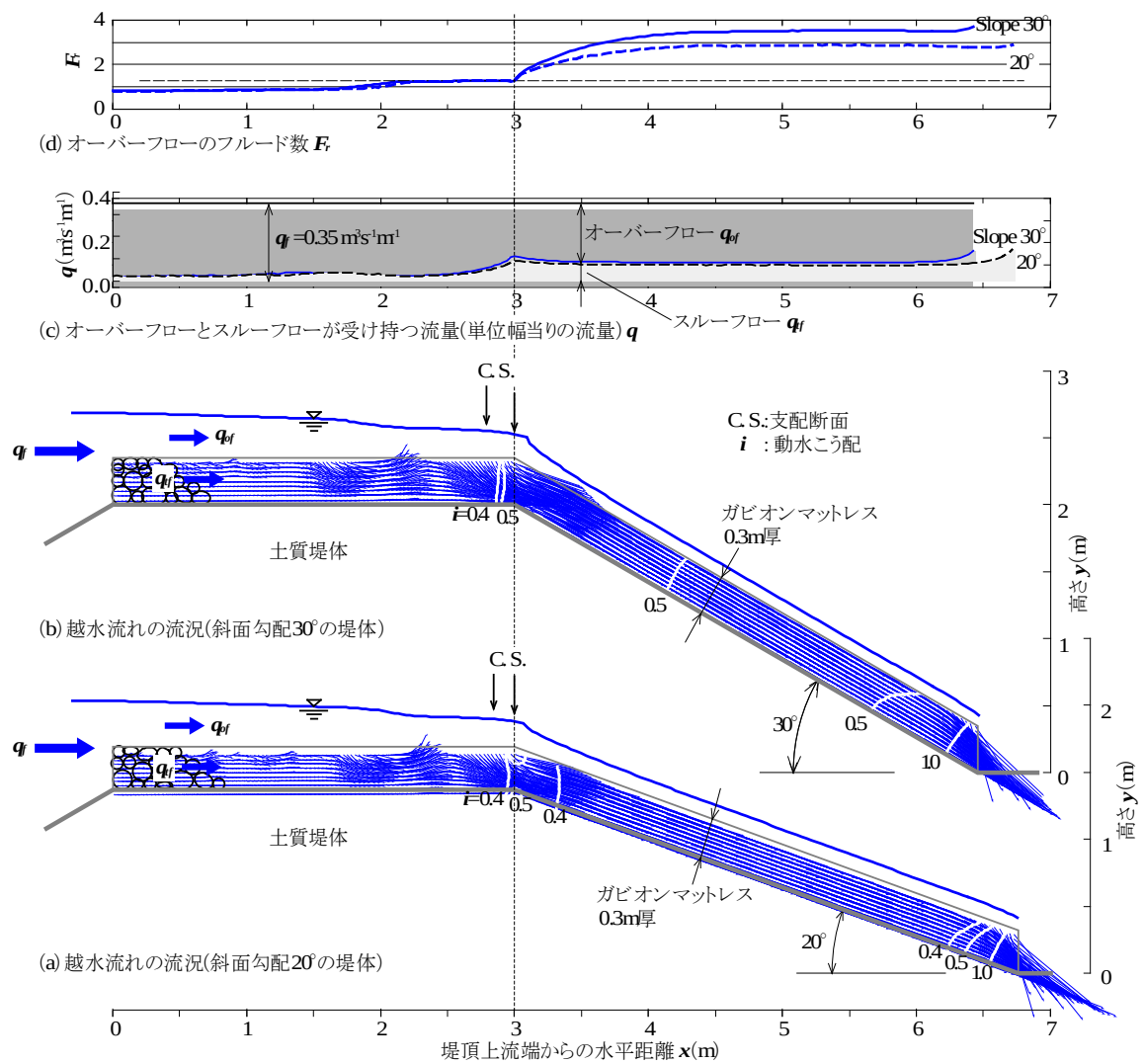


図-17 想定される最大の単位越水流量 $0.35 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ のもとでため池堤体に生じる越水流れの水理挙動 (いずれも連結水理解析による計算値)

1. 6. 2 ㊦ すべり安定解析に基づく最適な構造・材料設計法の研究開発

(1) 斜面すべりと表層すべりの安定解析法の開発

1) 概要

ため池堤の斜面すべりの安定性は、一般に用いられるスライス法において石礫層重量を分割した上載重量として取り扱ってよいか、その妥当性を公表されている既往研究の調査等を通して検討する必要がある。スライス法と平面ひずみ応力変形解析に基づき、スマートガビオン敷設による斜面すべり安定性について検討した結果を示す。

表層すべり解析では、計算法そのものは一層単純なものであるが、重要な計算パラメータである石礫層底面と斜面土との間のせん断抵抗係数(摩擦係数)を求める必要がある。また、前節の石詰め層に対して浮力と浸透力、ならびに石詰め層の天端表面に沿って掃流力が作用しスマートガビオンが堤体表面にそって下流方向に滑動するリスクを考慮した。この活動に対する構造体としての安全性を、石詰め層の自重と上記3つの力を考慮した FEM 弾性応力変形解析により安定解析の手法を開発した結果を示す。

2) ため池堤の斜面安定性におよぼすスマートガビオン敷設の影響

ため池堤の深さ 2~4m 位置における鉛直応力はだいたい 30~60kN/m² であり、ここに 0.3~0.5m 厚のスマートガビオンを敷設すると 5~9kN/m² ほどの応力増分が生じ、堤体斜面の応力状態とすべり安定性に影響を及ぼすことになる。図-18 に示すように、N 値 10 程度の砂質系強風化岩基盤に築造された高さ 8m および 4m の粘性土系堤体 (N 値 3

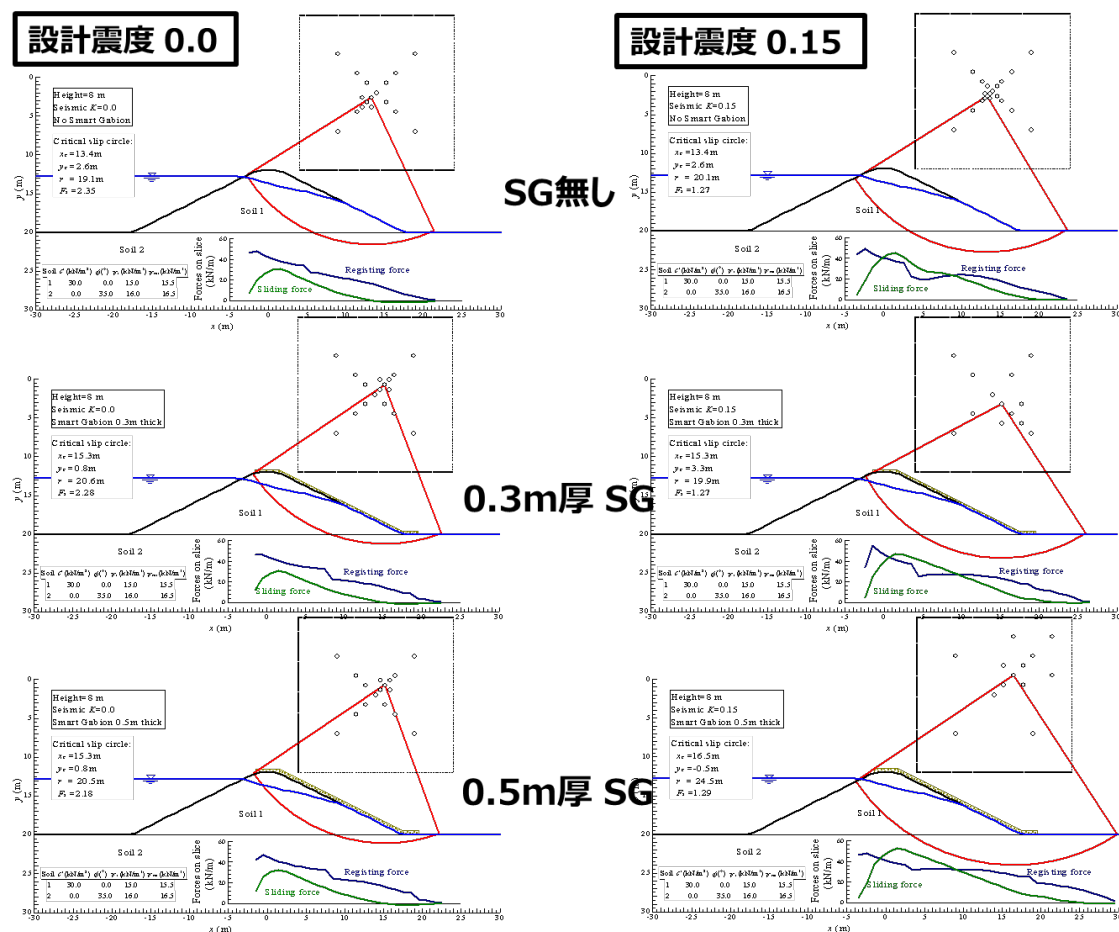


図-18 スマートガビオン敷設時のため池堤の斜面安定性