

平成 21 年 5 月 28 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）  
 研究期間：2008 年 ～ 2009 年  
 課題番号：20880009  
 研究課題名（和文） 水利施設基礎地盤における浸透破壊メカニズムの解明と数値計算による  
 予測手法の開発  
 研究課題名（英文） Development of Prediction Method with Numerical Calculation and  
 Clarification of Mechanism of Failure in Foundation of the Hydraulic Structure

研究代表者  
 岡島 賢治 (OKAJIMA KENJI)  
 研究者番号：90466805

## 研究成果の概要（和文）：

堰基礎地盤の浸透破壊に対する安定性の検討には浸透路長を用いたクリープ理論が用いられるが、この方法は経験的に導かれた簡便な手法であり、上下流水頭差の増大に伴う地盤の変形状況の推定などはできない。そこで、堰基礎地盤浸透破壊の模型実験を行って実験結果に弾塑性有限要素解析を適用し、浸透破壊問題の再検討を行った。実験結果から、浸透路長を用いた従来の方法では破壊水頭差を適切に推定できないことが明らかとなった。また、解析結果から、止水矢板の場合に用いられる Terzaghi の方法の有効性が示唆された。

## 研究成果の概要（英文）：

The stability analysis for seepage failure of pervious foundations under a weir has been conducted by means of the creep length derived from the creep theory. As this is a simple method developed empirically, it does not show the deformation process of the foundations along with the increase of the water head between upstream and downstream of the weir. In the present study, series of model tests of seepage failure were carried out and the test results were applied to elasto-plastic finite element analysis to reconsider the seepage failure problems. The obtained model test results showed that the critical water head for seepage failure could not be correctly evaluated by the creep length in the previous theory. The analysis results suggested the applicability of Terzaghi's method to evaluate the critical water head for seepage failure of foundations under a weir.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,290,000	387,000	1,677,000
2009 年度	1,180,000	354,000	1,534,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,470,000	741,000	3,211,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業土木学・農村計画学

キーワード：浸透破壊，ボーリング，弾塑性有限要素法，頭首工基礎，砂質土

## 1. 研究開始当初の背景

本研究では、頭首工・ダム・ため池堤体などの水利施設基礎地盤における浸透破壊メカニズムの解明と数値計算による予測手法の開発を研究の目的とした。

現在ダム堤体や頭首工の基礎地盤における浸透破壊の安定計算法としては、1910年にBlighによって提案されたBligh式や1935年にLaneによって提案されたLane式が主に使われている。これらの式はクリープ比と呼ばれる浸透路長と堤体上下流間の水頭の差の比から浸透破壊を推定する経験式であり、これらの研究報告以後ほぼ盲目的にこれらの経験式が用いられている。安全性の面からみると、実際にこれらの経験式を適用した事例では、浸透破壊による事故はほとんど報告されていないが、これらの経験式は現象を過大に安全側に見込んでいる可能性があり、施工性、経済性からみると今後十分に検討されるべき課題といえる。

## 2. 研究の目的

本研究は、浸透破壊を予測しうる数値解析手法の開発および浸透破壊メカニズムの解明、またダムや頭首工の基礎地盤を想定した模型実験法の確立、さらにこれまで体系的に検討されてこなかった頭首工やダムの基礎地盤浸透破壊における既往の評価手法の再検討を目的とした。

まず、堰基礎地盤における浸透破壊を予測しうる有限要素法を用いた数値解析手法の開発を行う。応募者がこれまで取り組んできた土の特性を考慮した有限要素法を用いた破壊解析を発展させることで解析手法の開発は可能であると考えられる。有限要素法を用いた破壊解析では、ダムや頭首工の基礎地盤の微小変形から破壊に至るまでの浸透破壊現象のメカニズムの解明が可能となると考えられる。

次にダムや頭首工の基礎地盤を想定した模型実験法の確立を述べる。頭首工やダム堤体の基礎地盤を想定した再現性の良い小規模の模型実験法を開発することで、今後この分野の研究における実験手法への貢献を考えた。また、模型実験結果を用いて開発した数値解析手法の有効性を検証する。

以上の数値解析手法と模型実験方法の開発により、Bligh式、Lane式、その他計画設計基準「頭首工」や既往の研究に記載されている浸透破壊の安全性評価手法について体

系的に検討を行う。現在の計画設計基準「頭首工」に記載されている安全性評価手法はBligh式、Lane式のクリープ比による方法がある。これらの式の有効性を示すとともに、その他の実用的な手法の開発を検討することを目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) 浸透破壊解析手法の開発

通常浸透破壊解析手法として有限要素法が用いられる場合は、水と土の相互作用という観点から水の動きと土の動きをカップリングさせた問題である連成問題として全応力解析が行われる。しかし、本研究ではあえて連成問題を考慮しない有効応力解析での地盤の浸透破壊解析という手法を用いて検討した。

本研究の浸透破壊解析は、水と土の連成問題を考慮していない有効応力解析手法であるため、浸透流解析の結果得られた浸透力を外力として弾塑性解析へ入力することの妥当性について十分検討した。この点に関しては、模型実験により頭首工をモデル化した堰の上流と下流の水頭の差を徐々につけていくときに、浸透量をできるだけ細かく計測していくことで浸透流が線形に増加していくことで確認した。浸透量が水頭差に比例して増加していくということは、地盤内の構造が維持され、浸透流がポテンシャル流を保持している、つまり水と土の連成問題を考慮する必要性が低く有効応力解析でも十分な浸透破壊解析ができることを示していると考えられる。

### (2) 模型実験法の開発

模型実験は、小型の実験槽は幅1,000mm、深さ500mm、奥行き200mmの箱形の実験槽で行った。模型実験はシンプルな堰断面から次第に現実に即した堰断面へと拡張していくことを予定している。

このとき問題と考えられるのは、均一で高密度な実験地盤を再現良く作成することであると考えられる。空中落下法、もしくは水中落下法により非接触で均一な実験地盤を作ることが考えられるが高密度の飽和地盤を非接触で作成する方法として新たな空中落下法による地盤作成法を考案する。さらに、飽和地盤の作成のためには、供給する水は通常の水道水ではなく脱気水であることが望まれる。水道水では長時間の実験では溶存空気が酸化し、飽和地盤中に空気塊が含まれる

ことになり実験精度を落とす可能性が考えられる。これは、脱気槽を用意することでその解決を図った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 浸透破壊解析手法の開発

本研究では、以下の浸透破壊解析手法を開発した。止水矢板でその有効性が検証されている岡島ら(2009)の弾塑性有限要素解析法を堰基礎地盤に適用した。この解析法の手順は大きく2段階に分けられる。まず、有限要素法を用いラプラス方程式を解く浸透流解析を行った。これによって求められた浸透力を弾塑性有限要素解析に外力として入力した。この際、浸透力は物体力であるため、浸透力を等価節点力に変換して代入した。

弾塑性有限要素解析には、浸透破壊解析においてその有効性の確認されている Explicit 型の動的緩和法とリターンマッピング法を組み合わせ用い、ひずみ硬化・軟化、せん断帯、異方性を考慮した構成モデルを適用した(田中・川本, 1987)。以下にその概要を説明する。

2次元解析の有限要素には、地盤には1点積分を適用した4節点アイソパラメトリック要素を適用した。降伏関数には Mohr-Coulomb 型モデルを、塑性ポテンシャルには Drucker-Prager 型モデルを用い、平面ひずみ条件における降伏関数、塑性ポテンシャルには以下の式を用いた。

$$f = \sqrt{J_2} / g(\theta) - 3\alpha(\kappa)\sigma_m - \gamma(\kappa) = 0$$

$$\Phi = \sqrt{J_2} - 3\alpha'(\kappa)\sigma_m - \gamma(\kappa) = 0$$

ここで、 $J_2$  は偏差応力の二次不変量、 $\sigma_m$  は平均応力、 $\theta$  は Lode 角、 $\kappa$  は累積塑性ひずみパラメータである。また、応力-ひずみ関係について、要素試験の結果をできるだけ忠実に取り入れた構成モデルとするため、 $\alpha(\kappa)$  には、累積塑性ひずみパラメータ  $\varepsilon_f$  を閾値として、次の硬化関数と軟化関数を適用した。

硬化関数

$$\alpha(\kappa) = \begin{cases} 2 \frac{\sqrt{\kappa \varepsilon_f}}{\kappa + \varepsilon_f} \alpha_p & (\kappa \leq \varepsilon_f) \end{cases}$$

軟化関数

$$\alpha(\kappa) = \alpha_r + (\alpha_p - \alpha_r) \exp \left\{ - \left( \frac{\kappa - \varepsilon_f}{\varepsilon_r} \right)^2 \right\} \quad (\kappa > \varepsilon_f)$$

ここに、 $m$  は硬化関数パラメータ、 $\varepsilon_r$  は軟化関数パラメータである。また、 $\alpha_p$ 、 $\alpha_r$

は、残留内部摩擦角  $\phi_r$  または豊浦砂の拘束圧依存性に基づく Bolton の提案式より導かれるピーク内部摩擦角  $\phi_p$  を用いて、次の式から求めた。

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}$$

$\gamma$  は粘着力に関する係数で、本研究では粘着力を無視しているため 0 とした。 $g(\theta)$  は偏差応力の 3 次の不変量  $J_3$  を含む関数であり、次の式で与えた。

$$g(\theta) = \frac{3 - \sin \phi}{2\sqrt{3} \cos \theta - 2 \sin \theta \sin \phi}$$

ここで、 $\phi$  はモービライズされた内部摩擦角、 $\theta$  は Lode のパラメータであり、次の式で与えた。

$$\sin 3\theta = \frac{3\sqrt{3}J_3}{2J_2^{1.5}}$$

ダイレイタンシーを規定する  $\alpha'$  を、次の式で求めた。

$$\alpha' = \frac{\tan \phi}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi}} \quad (5)$$

(6)ここに、 $\phi$  はダイレイタンシー角である。ダイレイタンシー角  $\phi$  は、Rowe のストレスダイレイタンシー関係を修正した式から求めた。

応力-ひずみ関係には、全ひずみ  $d\varepsilon$  にせん断帯幅を考慮した以下の構成式を適用した。

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + s d\varepsilon^p$$

$$s = \frac{F_e}{F_b}$$

ここに、 $d\varepsilon^e$  は弾性ひずみ増分、 $d\varepsilon^p$  は塑性ひずみ増分、 $F_e$  は有限要素の面積、 $F_b$  は有限要素を横切るせん断帯の面積である。本解析手法は、粒子径を考慮したせん断帯幅によるスケール効果に対して、メッシュ依存性を受けにくくなる。

##### (2) 模型実験法の開発

本研究では、以下の模型実験手法を開発した。  
⑧ フローティングタイプの堰を想定し、止水壁の無い、底面が矩形に単純化された堰基礎を

用いて模型実験を行った。アクリル板で作製した堤体を、実験槽中央部に設置して固定した。堤体のずれや移動、砂粒子や水の漏れを防止するため、堤体とガラス側壁面との間にはシリコングリースをしみこませたスポンジをはさみ込み、その上からアルミテープで固定した。堰基礎の下面には金属製の薄いメッシュを張り付け、堰基礎と基礎地盤との境界部分でのみ流速が大きくなるルーフィングを防止した。

地盤材料には豊浦砂（平均粒径  $D_{50}=0.2\text{mm}$ ，土粒子比重 2.64，最大間隙比 0.97，最小間隙比 0.61）を用いた。まず実験槽に 2~3mm 湛水し、次にホッパー（降砂装置）を用いて 10mm の地盤を作製するという工程を繰り返して地盤を盛りたてた。この方法により、相対密度が高く、比較的均一で空気の封入のない地盤を作製することが可能となり、実験槽内に相対密度は 75~92% の地盤を作製した。

### (3) 研究結果のまとめ

以上の数値解析手法と模型実験方法の開発により、Bligh 式、Lane 式、その他計画設計基準「頭直工」や既往の研究に記載されている浸透破壊の安全性評価手法について体系的に検討を行った。

図 1 に浸透路長をそろえた模型実験の破壊水頭差を示す。破壊水頭差は浸透路長によらず異なっており、Bligh 式が実験結果を表現できないことが明らかになった。Lane の浸透路長は、堤体幅が大きくなるにつれて根入れ深さが小さくなるため、破壊水頭差の減少傾向をある程度表現したが、グラフの傾きは実験結果のものとは異なっており、クリープ比が定数でない可能性を示唆した。

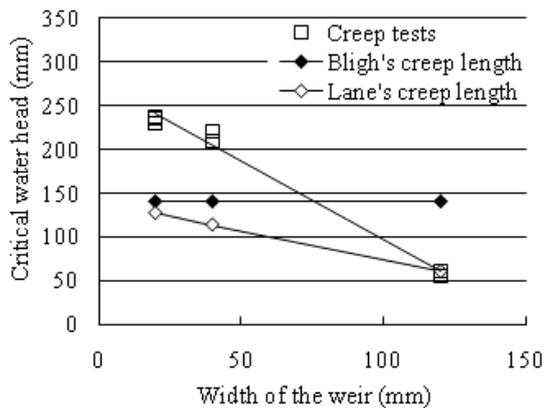


図 1. 模型実験による破壊水頭差と Bligh, Lane の浸透路長

図 2 に上下流水頭差が破壊水頭差となった時（水頭差 225mm）のメッシュの変形と、模型実験での破壊水頭差時（水頭差 250mm）の地盤の変状を示す。有限要素解析の結果は、模型実験の地盤の変状をよく表現できてい

たことが確認された。その他、破壊水頭差、地盤の変位を合わせて、本解析手法は堰基礎における浸透破壊を精度良く解析可能な解析手法であることが検証された。

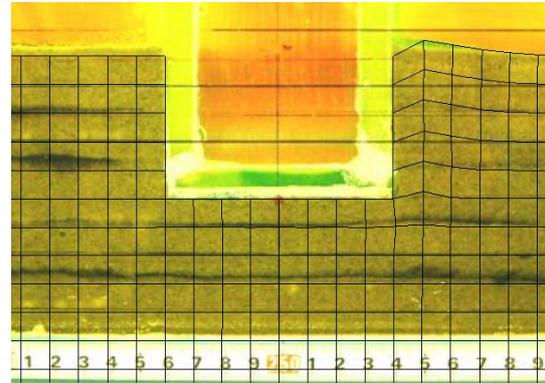


図 2. 破壊水頭差 225mm のメッシュの変形と破壊水頭差 250mm の地盤変状

図 3 に弾塑性有限要素解析による破壊水頭差での最大せん断ひずみコンターラインを示す。有限要素解析の結果、堰基礎においても、矢板と同様にボイリングの発生は土塊の持ち上がりによって生じる可能性が考えられ、堰基礎における浸透破壊において Terzaghi の方法が破壊水頭差の推定に有効な計算手法となる可能性が示された。

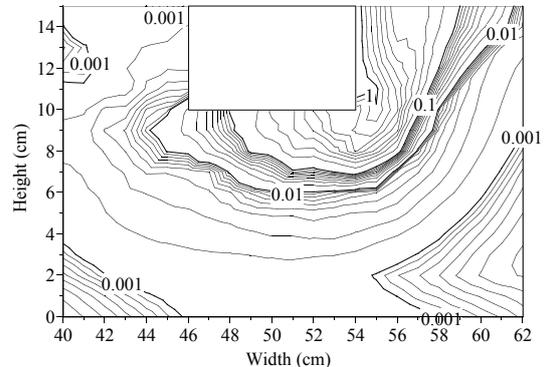


図 3. 弾塑性有限要素解析による破壊水頭差での最大せん断ひずみコンターライン

### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 2 件）

- ① 岡島賢治、田中忠次、張善姫、小松宜紘、砂地盤における固定矢板背面地盤の浸透破壊現象に関する模型実験と弾塑性有限要素解析、農業農村工学会論文集、査読有、77(2)、2009、107-112

- ②岡島賢治、田中忠次、張 善姫、小松宜紘、  
止水矢板の変位を考慮した浸透破壊模型実  
験と弾塑性有限要素解析、農業農村工学会  
論文集、査読有、262、2009、67-73

〔学会発表〕（計 2 件）

- ①K. OKAJIMA , T. TANAKA, Evaluation of  
Analyses of Downstream Piping of Weirs  
by Model Experiments and Elasto-Plastic  
FEM, TC-41 workshop on Geotechnical  
Infrastructures on Mega-cities and New  
Capitals, CD-ROM, Astana, Kazakhstan,  
2008, Oct.15
- ②K. OKAJIMA and T. TANAKA, Evaluation of  
Analyses of Downstream Piping of Weirs  
by Model Experiments and Elasto-Plastic  
FEM, Proceedings of ICSE-4, CD-ROM,  
Tokyo, 2008, Nov.5th-7<sup>th</sup>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岡島賢治 (OKAJIMA KENJI)

東京大学大学院農学生命科学研究科・助教  
研究者番号：90466805