

機関番号： 13903
 研究種目： 基盤研究(B)
 研究期間： 2008年～2010年
 課題番号： 20360210
 研究課題名(和文) マルチスケールでみる気泡を有する地盤の浸透破壊のメカニズム解明と対策法の提案
 研究課題名(英文) Mechanism of seepage failure of ground with air bubbles in multi-scale and proposal of counter-measure
 研究代表者
 前田健一 (MAEDA KENICHI)
 名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号： 50271648

研究成果の概要(和文)：

最近では山間部だけでなく都市部にも豪雨が増え、ゲリラ集中豪雨によって堤防が破壊し大きな水害が発生します。いままでは、堤防が破壊するというのは河川の水位が上がって水の力によるものと考えられてきました。この研究で明らかになったのは、強い雨がふると堤防の中の空気がどこにも逃げられないように水の蓋ができて、そのあと河川の水が堤防に入ってくることで捉えられた空気が大きく圧縮され圧があがる(ときには堤防から泡が噴き出すことがあります)ことで知らないうちに堤防が弱くなっているということです。このことを実験や計測、コンピュータシミュレーションで明らかにし、いまある堤防をその破壊に対して強くする方法を検討しました。

研究成果の概要(英文)：

Based upon numerical analysis developed by the representative researcher, the damage of a river dike caused by a localized torrential downpour is presumed to be related to the saturation of the dike, due to seepage water from the dike surface and blow off of pore air (air blow) following a rise in the seepage line in the dike. Since a river dike located at the downstream, where urbanization has been in progress, is composed of sandy soil consisting mainly of soft and fine particles, the river dike is considered to be easily damaged by pore air that has been enclosed within the dike body. In this study, by performing experiments using a dike model equipped with a rainfall generation apparatus, the behavior of a pore air mass captured by rainfall seepage and a rise in the river water level was investigated. When seepage prevention measures using a breathable - waterproof sheet had been taken, the effect of preventing rainfall seepage and that of reducing the pore air pressure were revealed. Development of this soil-water coupled continuum analysis using SPH was also succeeded with account for the process of erosion in which fine particles were flowed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
2009年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野： 土木工学

科研費の分科・細目： 地盤工学

キーワード： 地盤防災

1. 研究開始当初の背景

近年の気象変動や都市型の集中豪雨によって地盤の浸透破壊に起因する洪水災害が増加しており、その詳細なメカニズム解明と効率的な対策方法の開発が切望されている。また、津波やハリケーンも地盤の浸透破壊を伴う場合には被害が格段に増大する。

地盤の浸透問題は通常、水と土の2相系の飽和浸透理論やそれを拡張した不飽和浸透として扱われ、地盤内の水位差の増加が破壊の直接的な要因とされる。しかし、実際の地盤では、気相の発達や移動（気相のダイナミクス）に起因する固・液・気相の3相系の相互作用が支配する破壊の事例が報告されている。例えば、地盤の飽和度が高く、間隙水に多くの空気が溶存する過飽和水の場合、限界の水位差よりも低く水位を保ち放置するだけでも時間の経過とともに地盤内に気泡が発生・発達・移動し浸透破壊が進行する。洪水時に堤防の決壊前に堤内側で空気の噴出、法面で土煙の発生などが観察されている。2000年の東海水害の際にはこの現象が目撃され新聞にも掲載されている。こういった現象は「ガマがふく」などとよばれ昔から目撃されているようである。また、ダム湖や貯水池などでも急激な水位降下や上昇によって斜面内部から土・水・圧縮空気が噴出し、通常の斜面崩壊とは異なる紡錘状の大きな穴が生じる。これは、「狸孔」と呼ばれることもある。越流・越波を受けた海浜部・河川部における土構造物は、浸水による浮力の増加だけでなく内在する空気に土が持ち上げられる効果で破壊が助長されることも指摘されている。その複雑性から詳細なメカニズムは解明されておらず、対策法も体系化されていない。

また、浸透流が作用する場合には粒子の流出といったミクロの現象も重要である。土構造物の下から粒子が流出し、そのダメージが伝播することで天端に大きな孔が開く事例がたくさんある。従来の研究で欠けているのは、粒子の流出で粒度が変化し間隙比が変化するだけでなく、材料自体が変化しその土の特長を決める限界状態も変化するという点である。このミクロスケールでの粒子構造の損傷による不安定化が局所破壊を助長させ、土構造物のマクロな大変形を加速させる。したがって、このミクロとマクロの相互作用を含めたマルチなスケールでの検討が不可欠である。

2. 研究の目的

気泡（気相）の発生・発達が地盤の浸透破

壊に及ぼす影響について実験と解析の両面から調べる。

- (1) 流速場を可視化し水分分布・流れ場・密度の変化に及ぼす気泡の発生・発達の影響を評価する。
- (2) 粒子法 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)である地盤工学に拡張し、流動を表現可能な三相連成の解析手法を開発し検証する。
- (3) DEM(個別要素法)を用いて粒子流出による粒度変化に伴う変形・破壊メカニズムをミクロレベルで追及し、マクロとの関連を示す(粒度変化を考慮した構成モデルの構築も行う)
- (4) 模型実験、数値解析(大変形と粒度変化を考慮)や事例の分析から気泡の影響を考慮した固・液・気相3相連成の破壊メカニズムの解明、破壊予測と対策方法について提案する。

3. 研究の方法

気泡（気相）の発生・発達が地盤の三相連成浸透破壊現象に及ぼす影響とメカニズムについて実験的・解析的に調べるとともに事例の収集と分析を行う。対象として以下の現象に着目する。

- (1) 矢板周りの浸透破壊
- (2) 堤防の浸透破壊：水位上昇・下降時、一定水位保持時、降雨の有無
- (3) 越流・越波を受けた土構造物の浸透破壊
模型実験・数値解析によって、三相連成浸透破壊に及ぼす地盤条件（飽和度・透水性・地表面の被覆条件など）の影響について検討しその変形や破壊の発生条件について詳細に調べる。気泡が発生・発達する際の浸透破壊メカニズムについて検討を継続するとともに、気泡のダイナミクスを考慮した浸透破壊対策、現存の堤防の強化方法について検討する。

4. 研究成果

- ① 間隙水からの気泡のダイナミクスと浸透破壊のメカニズム解明と破壊予測

2000年に発生した東海豪雨では亀裂の入った堤体内から気泡を含む水が噴き出す様子が目撃された。このように堤体から気泡が噴出する現象は「ガマが吹く」と昔から言われている。ここで、堤体に存在する気泡の源は以下の2点が挙げられる。一つは堤体内にもともと存在していた間隙空気が降雨や河川水位の上昇によって気泡として捕捉された

ものである。もう一つは、間隙水中に溶解した気体が気泡として発生する現象（キャビテーション）である。

まずは、キャビテーション現象と浸透破壊の関係に着目した成果について説明する。

一般に地盤の浸透破壊現象では、高水位（上流）側と低水位（下流）側の水位差 ΔH が限界水位差 ΔH_{cr} に達すると破壊が起こるとされている。これを一般的な破壊現象と対比させると、 ΔH が破壊外力に、 ΔH_{cr} が強度にそれぞれ相当する。しかし、実際は地盤内に存在する気泡の発達・移動や噴出（気泡のダイナミクス）によって限界水位差以下で破壊が起きることがある。本研究では小高・浅岡の方法に従い矢板周りの平面ひずみ浸透破壊試験を行うことで、画像解析を用いて気泡レベルのミクロなスケールと地盤全体のマクロなスケールで気泡のダイナミクスと地盤の変形・破壊との関係を考察し、気泡を含んだ地盤の浸透破壊のメカニズム解明を試みた。

浸潤過程および浸透、破壊過程をセンサーと画像解析で詳細に観察、計測した。浸透とそれに伴う変形現象を撮影し、PIVによる画像解析によって、地盤内の局所的変位を可視化し気泡の発生・発達・移動が生じる場合の地盤変形パターンを明らかにした。DO（水中溶存酸素量）メータで気泡発生・発達状況を測定し水圧変化と平均的な気泡分布特性を把握した。浸透流を受ける地盤の安定性に及ぼす気泡の影響について強度と時間効果の両面で検討し、気泡が生まれてから放出されるまでのいわゆる「気泡の一生」を明らかにした。また、その際の地盤の変形メカニズムを明らかにし、その予測が可能であることを明らかにした。気泡の存在は間隙比の増加による浸透破壊強度の低下に加え、破壊外力である浸透力の増加を招き、破壊を誘発することがわかった。また、以上のような破壊の予測方法についてもしめした。

② 堤防のエアブローを考慮した豪雨・浸透破壊対策の提案

ここでは、地盤の間隙内に閉じ込められた圧縮空気の塊（大きな気泡が発達・移動することで地盤を劣化させる現象に着目した。気泡を有する地盤の浸透破壊メカニズムを模型実験、事例解析、現地実験から解明し、対策方法を検討した。

実験では、乾燥状態の砂を用い、基盤層は水中落下法、堤体部は空中落下法にて模型堤防を作製した。その際、層厚 50mm ごとに 7 回/100cm² の割合で突き固め、相対密度 70% に管理して実験を行った。まず、降雨のみが堤防内に与える影響を調べるために、気象庁により非常に激しい雨と定義されている範

囲の降雨強度 60mm/hr を与え、堤体内の浸潤の様子を観察した。また、気象庁により集中豪雨と定義されている降雨強度 120mm/hr を与え、堤体内の特に間隙空気の挙動に変化が現れるかどうかを検討した。さらに、河川水位を上昇させた場合の堤体内の浸潤挙動を観察する。水位の上昇速度は東海豪雨時における新川堤防決壊地点のハイドログラフをもとに設定し、堤外側に 30 分で天端に到達する速さで給水する。それに加えて、降雨と河川水位上昇の両者が堤体内に与える影響を調べるために、降雨強度 124mm/hr を 45 分与えた後、降雨を継続しながら先のケースと同様に給水した。

堤体の豪雨・浸透に対する補強を考えるため、堤体内に不透気遮水シートを敷設し、一般的な越流対策として考えられるアスファルトフェイシングを模擬した実験を実施した。また、新たな対策方法として、堤体内部に透気遮水シートを設置した場合の実験を行った。また、全ケースにおいて堤体内部に水分計を設置し、堤体内の水分量の変化を観察した。

本実験により、降雨浸透はまず堤体表面に浸潤域を形成し、その後、法先および法尻から堤体内方向へ浸潤が進行し、断面全体としては飽和状態に近づくが、堤体中央付近には大きな不飽和領域が残っている。この最も浸透の遅い領域に間隙空気が閉じ込められていることが考えられる。

また、豪雨によって堤体内に間隙空気がトラップされ、さらに河川水位が上昇することで空気が圧縮され、突発的な崩壊につながる可能性があることがわかった。不透気遮水シートによる浸透防止工法では、越流時に間隙空気が堤防への突発的な損傷を与えることが予想される。また、透気遮水シートを堤防内に敷設すると、堤体内の間隙空気を早期に外部へ放出するとともに、シート内部の形状を守ることで越流による被害が軽減される効果が期待できることがわかった。

③ 間隙空気のダイナミクスを考慮した三相連成・大変形数値解析手法開発とメカニズム解明への解析的検討

近年多発するゲリラ的集中豪雨によって多くの堤体法面が崩壊し、その後の流動現象が観測されている。降雨の堤体への浸透は通常降雨の場合と違い、80mm/hr を超える豪雨の場合、その浸透メカニズムと法面という粒子の集合体に与える影響はまだ未解明である。この現象では、固体粒子と間隙水の二相だけでなく、間隙空気も考慮すべきである。したがって、固-液-気三相の混合体の力学挙動のメカニズム、そのモデリング、数値解析の整備が必要である。そこで、SPH 法

(smoothed particle hydrodynamics) による降雨浸透解析や堤体の崩壊についての解析を試みた。また、浸透破壊時には局所的な水流に伴う細かい粒子の流出が粒度の変化(材料の変化)が生じる。ここでは、この粒度変化が極局所的な変形・破壊(地盤内のミクロな損傷)とそれが累積することで生じる流動的大変形(マクロな破壊の進展)といったように、マルチなスケールの視点から現象を捉え、ミクロ-マクロの相互関係を考慮した。

まず、メッシュフリーで粒子法の一つである SPH 法(Smoothed Particle Hydrodynamics)を用いて三相連成で気泡の発生過程から再現可能なモデル化と手法の整備を行った。数値解析の精度をたかめるとともに、実験で観察された気泡の凝集、結合、変形、噴出までも地盤との相互作用を考慮することも成功した。完全飽和浸透破壊と気泡の発達・移動がある場合とを比較した。豪雨が堤体内の間隙空気を閉じ込め、浸透による空気圧の上昇・空気塊の移動を再現できた。従来は出来なかった解析である。

次に、DEM(個別要素法)を用いて、一定応力下において細粒分を継続的に除去した際の変形プロセスとミクロ構造の変化との関係を調べた。DEMを用いて細粒分流出時の粒度の変化に伴うマクロ挙動である限界状態の変化、変形・破壊挙動とミクロ構造の変化との関係を明らかにし、構成モデルを構築した。それを SPH 解析に取り込むことで、粒度分布変化の影響を考慮した新しい視点の浸透破壊解析が可能となった。

これらの解析によって、浸透破壊に伴う破壊の局所化、指向性進行破壊、破壊の持続性を再現し、細粒分の流出というミクロスケールからマクロな破壊に至るプロセスを明らかにした。これらをより発展させることで、効率的な対策の検討を行うことが可能になる。

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 13 件)

1. 前田健一・柴田賢・馬場干児他 2 名：豪雨と気泡の影響を考慮した河川堤防における透気遮水シートの設置効果，ジオシンセティックス論文集，査読有，25 巻，審査有，2010，pp.261-266
2. 刈田 圭一・前田 健一・羽柴 寛文・牛渡裕二・川瀬 良司：個別要素法を用いた水平堆積層における落石による衝撃力の伝達挙動解析，構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，審査有り，10 巻，2010，pp.195-200.

3. 羽柴 寛文・前田 健一・刈田 圭一・牛渡裕二・川瀬 良司：粒子特性の異なる堆積層の落石エネルギー緩衝効果特性に関する二次元個別要素法，構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，審査有り，10 巻，2010，pp.229-234.
4. 前田健一、松島亘志、森口周二 総説：数値解析技術 -粒状体-，地盤工学会誌，審査有り，58 巻，1 号，pp.68-70,2010.
5. David MUIR WOOD, Kenichi MAEDA and Emi NUKUDANI, Modelling mechanical consequences of erosion, Geotechnique, 審査有, Vol.60, 6, pp.447-457, 2010.
6. Kenichi Maeda and Hirotaka Sakai, Seepage Failure and Erosion of Ground with Air Bubble Dynamics, ASCE, GSP, 審査有, 261-266, 2010.
7. K. Maeda et al. Stress-chain based micromechanics of sand with grain shape effect, Granular Matter, 審査有 12 巻 5 号, pp. 499-505, 2010.
8. 山口・近藤・前田健一・Erdin Ibrain, 粒子回転に着目したファイバー混合土の強度発現メカニズム, 土木学会応用力学論文集, 審査有, 審査有, Vol.13, pp.497-506, 2010.
9. Kenichi MAEDA : Critical State-based Geo-micromechanics on Granular Flow, Powder&Grains, 審査有, Vol.6, pp.17-24, 2010.
10. 温谷恵美, 前田健一, D.M.WOOD : 細粒分流出に起因する粒度変化を伴う粒状体の変形・破壊挙動, 実務利用を目指すマイクロジオメカニクスに関するシンポジウム論文集, 審査有, pp.53-56, 2009.
11. H.SAKAI and K.MAEDA : Seepage and erosion mechanisms of sandy ground due to air bubbles, Fourth International Conference on Scour and Erosion, 審査有, CD-ROM, 2009.
12. 坂井宏隆 前田健一：浸透破壊現象における気泡のダイナミクスの影響，地盤工学会誌，審査有，Vol.57, No.9, 2009, pp.30-33.
13. 平林大輝，福間雅俊，前田健一：粒子構造に着目した粒状体の斜面上の流れ挙動，応用力学論文集，審査有，Vol.11, pp.535-546, 2009.

[学会発表] (計 10 件)

1. 柴田賢，豪雨と気泡のダイナミクスが及ぼす河川堤防の越流強度への影響と対策，第 45 回地盤工学研究発表会，2010 年 8 月 18-20 日，松山・愛媛大学
2. 柴田賢，集中豪雨に起因する気泡の影響を考慮した模型堤防の堤体内における浸潤比較，土木学会第 65 回年次学術講演会，

- 2010年9月1-3日, 札幌・北海道大学
3. 湯浅知英, 堆積層における落石挙動とエネルギー低減効果に関する研究, 第45回地盤工学研究発表会, 2010年8月18-20日, 松山・愛媛大学
 4. 羽柴寛文, 堆積層の衝撃伝播を考慮したDEM落石シミュレーションの高度化, 第45回地盤工学研究発表会, 2010年8月18-20日, 松山・愛媛大学
 5. 刈田圭一, DEMによる堆積層の落石による衝撃力解析, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010年9月1-3日, 札幌・北海道大学
 6. 羽柴寛文, 落石の斜め入射より受ける衝撃力のDEM解析, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010年9月1-3日, 札幌・北海道大学
 7. 柴田賢, 豪雨時の浸透挙動, 不飽和研究会, 2010年9月27日, 仙台・東北大学
 8. Kenichi Maeda Critical State-based Geo-Micromechanics on Granular Flow, Powder&Grains2009, 2009.7.14, アメリカ・コロラド
 9. K. MAEDA, Erosion and seepage failure analysis of ground with evolution of bubbles using SPH, Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation (IS-Kyoto), 2009.5.26, 日本・京都
 10. 前田健一: SEEPAGE AND EROSION MECHANISMS OF OF SANDY GROUND DUE TO AIR BUBBLES, Fourth International Conference on Scour and Erosion, 2008.11.5, 東京.

[図書] (計1件)

1. 前田健一 他: 地盤に関する解析技術 (個別要素法) 講習会, 地盤工学会, pp.1-44, 2010.

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称:
 発明者:
 権利者:
 種類:
 番号:
 出願年月日:
 国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:
 発明者:
 権利者:
 種類:

番号:
 取得年月日:
 国内外の別:

[その他]
 ホームページ等
<http://www.maeda-lab.org/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田健一 (MAEDA KENICHI)
 名古屋工業大学・工学研究科・准教授
 研究者番号: 50271648

(2) 研究分担者

中井照夫 (NAKAI TERUO)
 名古屋工業大学・工学研究科・教授
 研究者番号: 00110263

張 鋒 (CHO HO)
 名古屋工業大学・工学研究科・教授
 研究者番号: 70303691

(3) 連携研究者

()

研究者番号: