

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19510187

研究課題名(和文) 越流による侵食過程を考慮した堤体のハイブリッド型安定性評価手法に関する研究

研究課題名(英文) Study on River Bank Stability Estimation Method Taking Account of Erosion Process by Overflow Water

研究代表者

大塚 悟(OHTSUKA SATORU)

長岡技術科学大学 工学部 教授

研究者番号：40194203

研究成果の概要

本研究は堤体の不飽和・飽和せん断強度および堤体内の浸透力を考慮して堤体の侵食プロセス下における安定性評価システムを開発することを目的とする。本研究では研究目的を達成するために、3つのアプローチを実施した。アプローチ(A)は室内模型試験による堤体の越水に伴う侵食破壊実験である。試験では先行降雨・河川水による堤体の湿潤条件によって異なる堤体の侵食破壊過程について示し、堤体の侵食とせん断破壊の代表的プロセスを示した。アプローチ(B)は水理学的手法による堤体の侵食過程の数値解析である。平面標高情報(DEM)に基づいて越水による堤体の侵食破壊過程を再現する手法を開発し、その適用性を事例解析(平成16年新潟・福島豪雨災害の破堤事例)によって示した。アプローチ(C)は地盤工学的手法による堤体の安定性評価手法の開発である。不飽和・飽和浸透解析と地盤の安定解析手法を併用するハイブリッド手法により、せん断強度の変化や浸透力の多次元的作用を考慮した解析手法を開発した。模型試験の数値解析のほか、平成16年度の新潟・福島豪雨災害における堤体の破堤事例の数値解析により、解析手法の適用性を明らかにした。

交付額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：河川災害, 破堤, 模型試験, 数値解析

1. 研究開始当初の背景

河川堤防の安定性評価は河川水の上昇に対して照査されるが、河川水が堤防を越流する状態の堤防安定性については従来殆ど考慮されていない。その一方で、堤防の破堤理由の約90%は越流による侵食が原因と言われており、現実と設計に破堤現象のモデル化に関するギャップが存在する。洪水による被害は堤防の破堤の有無によって大きな差異のあることから、今後の堤防整備は越流に対して破堤耐力を付加する整備が必要である。

一方で、堤体および堤体基礎地盤の浸透水を考慮した堤体の安定性評価手法はシステムを構築する要素技術が個別に開発された経緯があり、定性的評価はできるものの定量的評価が困難な問題がある。本研究は堤体の不飽和・飽和せん断強度および水の浸透力を考慮して、侵食プロセス下における堤体の安定性評価システムを開発することを目的とする。

2. 研究の目的

堤体の不飽和・飽和せん断強度および堤体内に作用する水の浸透力を考慮して侵食プロセス下における堤体の安定性評価システムを開発するには、越流による堤体侵食過程の堤体破壊機構の把握と、その数値解析手法の開発が必要である。以上から、研究目的を達成するために必要な個々の要素技術を次のように設定した。

- (A)室内模型試験を用いた越水時の堤体侵食進展過程の把握
- (B)越水による堤体の侵食過程の数値解析手法の開発
- (C)堤体の水分状況によるせん断強度変化と浸透力を考慮した安定解析手法の開発

本研究では上記の3項目について焦点を絞り、

個々の研究を行うこととした。

3. 研究の方法

前節で述べた3つの目的に対応し、以下にその研究方法を示す。

(A) 越水時の堤体侵食過程の室内模型試験

堤体作成用試料に東北硅砂6号と藤森粘土の乾燥重量比3:1の混合土を用いた。この試料は全国の河川堤防における地盤材料の可能な粒径加積曲線の範囲内に入っている。予備試験では試料の配合について様々な検討をしたが、粘性土分が増えると模型試験機の寸法との兼ね合いで破壊に至らない事例が多い。

本研究では最初に、上流側の水位を上昇させた際の堤体浸透破壊に対する安定について実験を実施した(図1)。実験では浸透破壊が生じない条件を定めたが、下流側の法尻付近では浸出水のために局所的な崩壊(土砂の流出)が一部発生した。しかし、その後水位を維持して試験を継続しても破壊には至らないことから、この状態を初期条件としてその後上流側の水位を上げて越流させる堤体の侵食破壊試験を実施した。越流試験では2つの事例、(1)上流側で高水位を維持して定常状態に達した後に越流試験を実施、(2)上流側の水位



図1 堤体破堤模型試験用土槽

を急速に上昇させて後に越流試験を実施，を計画した．前者では越流前に堤体内に水が十分浸透して堤体強度が低下するのに対して，後者は越流前に浸透のないことから堤体強度を維持した状態で越流による侵食が生じる．

(B) 堤体侵食過程の数値解析手法の開発

洪水氾濫数値計算の高度化により，堤防の崩壊過程を考慮できる計算技法を新しく提案した．このモデルは河川水位が上昇して堤防天端上を越水した場合，それに応じて堤防上から侵食が進行し堤防の破壊に至るモデルである．これを新潟・福島豪雨災害（平成 16 年）の刈谷田川に適用して妥当性を検討した．本研究では平面 2 次元の非定常流の氾濫流計算，土砂輸送計算，底面での沈降・再浮遊過程，地形変化計算を組み合わせることによって越水が先行する場合の堤防の崩壊過程について検討した．あわせて堤内地に広がる土砂の分布についても検討を行った．

これまで河川堤防の破堤地点の予測については過去の記録や伝承によるものが多く，河道管理が行われない自然状態にて河川が自由に河道変動を起こす際の土砂の堆積位置である自然堤防が安全地帯であると見なされている．河川堤防の崩壊について力学モデルを用いて事前に予測することは極めて困難であるが，大別すれば河川堤防の崩壊には以下の 2 つの道筋が考えられる．

①越水が先行し，河道内から堤内地へ流出する洪水流によって堤防の天端・法面などの表面から徐々に崩壊するケース（河川浸食）

②越水が生じる前に堤防の裏と表の法面の圧力差によって堤防内部に破壊が生じ，抵抗力が急激に減少して堤防全体が崩壊するケース（パイピング）

河川浸食に関する数値モデルについては浮

遊砂・掃流砂の挙動を介して河道内部の地形変化の計算に数多く用いられた実績がある．

本研究では河川浸食のパラメータを操作することによって河川堤防の崩壊を表現することとした．

(C) 堤体の水分状況によるせん断強度変化と水の浸透力を考慮した安定解析手法の開発

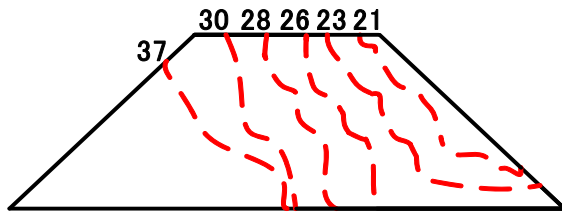
堤体への雨水の浸透や河川水位の上昇により，①堤体を構成する地盤材料の飽和度上昇に伴うせん断強度低下，②地盤材料の飽和化に伴う間隙水圧の発生と有効応力低下に起因するせん断強度低下，③水の浸透力の作用，などにより堤体は不安定化する．本研究では非定常飽和・不飽和浸透解析と剛塑性有限要素安定解析を用いることにより，①～③を考慮した堤体の安定性評価法を開発する．河川堤防の安定性評価はこれまで堤体の安定性と基礎地盤の安定性を個別に評価しているが，本手法によると堤体と基礎地盤の安定性を同時に評価できる特徴があり，発生する崩壊機構が原位置の状況に応じて判別される．

4. 研究成果

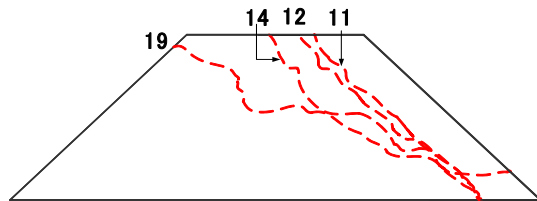
研究成果について，上記の研究目的に関して個別に記述する．

(A) 越水時の堤体侵食過程の室内模型試験

越流以前の堤体への水の浸透の有無によらず，両者ともに越流により侵食破堤に至るが，(1)は侵食が単調に進展するのに対して，(2)は侵食過程において堤体がせん断破壊を生じることが分かった（図 2）．これは堤体内へ水の浸透があると堤体の強度が低下して，越流水による侵食によって堤体形状が変化すると力学的なバランスの変化により堤体がせん断破壊を生じると考えられる．堤体内には水の浸透に伴う浸透力が作用しており，その安定性



(1) 堤体内への事前浸透が少ない事例



(2) 堤体内への事前浸透が多い事例

図2 試験条件による堤体侵食過程の差異

に及ぼす影響も大きいと思われる。堤体のせん断破壊が生じると比較的短時間で破堤するため、水害の防止の観点からせん断破壊の防止が重要な対策目標となる。(1)のように越流による侵食が進展すると、堤防の侵食面は越流水の落差を伴う形状で進展する傾向が顕著である。一方、堤体のせん断破壊が生じると堤体上部の侵食が卓越する崩壊形態となることが分かった。

(B) 堤体侵食過程の数値解析手法の開発

開発した手法は、モデル地区の事例解析より、越水が先行すると仮定した場合の堤防の浸食による決壊過程と破堤点付近の住宅地区への氾濫水と土砂の輸送過程を計算できることを明らかにした。また、堤防の崩壊が越水後に急激に進行することを示した。計算において破堤点を仮定することは行わず、堤防の強度が冠水に応じて現象するというモデルを用いることによって実体と同様の破堤が生じる結果となった。

堤防の崩壊は、抵抗力を失った地盤が流動

化するという固体力学と流体力学の境界の問題と位置づけられ、解析的な取り扱いが難しい。本研究で示した計算方法はパラメータを氾濫の状況の合わせて動的に変動させるということでそれに対応させた。それによって地盤高の変位や“おち掘れ”のような現象を再現できる可能性を示した(図3)。しかしながら、パラメータの変動のさせ方については実現象に一致させるように試行錯誤した感は否めない。今後はそれらのパラメータの与え方について検討する必要がある。

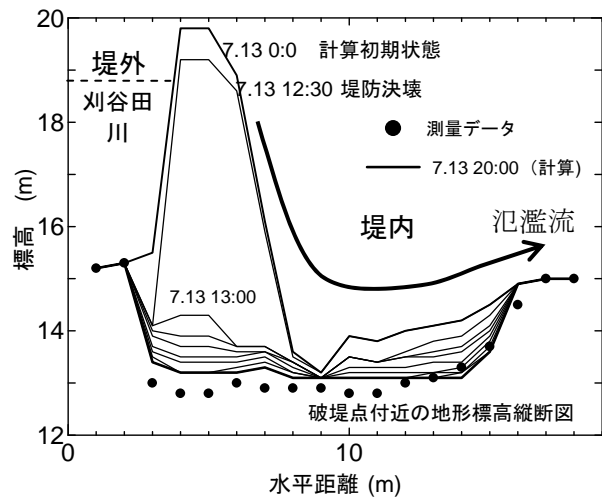


図3 破堤点付近の地形変化

実線：計算値 12:30～20:00, 1時間間隔
●：洪水後の実測値

(C) 堤体の水分状況によるせん断強度変化と水の浸透力を考慮した安定解析手法の開発

堤体の水分状況に応じた安定解析手法は降雨時の自然斜面や人工斜面の解析に適用可能である。本研究では、土木研究所による降雨時の斜面大型崩壊試験の事例解析により、解析手法の妥当性を検証した。試験結果と解析結果の比較を図4に示すが、斜面の崩壊時刻および崩壊形態は高精度で予測可能であり、解析手法の妥当性が証明された(図4)。

開発した解析手法を用いて平成16年の新

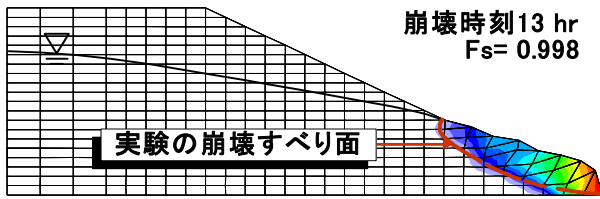


図4 模型試験と数値解析の崩壊形態の比較

潟・福島豪雨災害で破堤した五十嵐川諏訪新田の数値解析を実施した。破定点の地質断面を基に(1)砂層が連続分布する地盤と、(2)砂層が堤体直下で消失する行止まり地盤、を設定した。両者の解析結果を図5に示すが、(1)の場合に堤体法尻で破壊するのに対して、(2)行止まり地盤の場合に堤体基礎地盤がヒービング破壊を起こす結果となった。この解析結果は従来の解析手法では表現することのできない崩壊形態であり、堤体および堤体基礎地盤の破壊が現地条件によって様々に変化する堤体の安定性が、本解析手法によって統一的に評価されることを示す。

5. 今後の課題

本研究では堤体の不飽和・飽和せん断強度および堤体内の浸透力を考慮して堤体の侵食プロセス下における安定性評価システムを開発することを目的に、基礎模型試験及びシステムを構成する各要素解析技術の開発を行った。今後、実際の堤防条件を考慮した模型試験を実施して様々な条件の破壊機構を調査すると共に、解析手法の統合を図る必要がある。

6. 主な発表論文

[雑誌論文] (計3件)

- 1) 海岸地形に依存した離岸流の発生機構の基礎的数値実験, 海岸工学論文集 55 巻, 2008, 細山田得三・大橋俊樹, 査読あり.
- 2) 不規則波によるフィルター層を有する海浜断面の可逆性から見た安全性について, 海岸工学論文集 55 巻, 2008, 辻本剛三・細山田得三・柿木哲哉・宇野宏司, 査読あり.
- 3) 新潟県中越沖地震被災地における表面波探査による地盤構造調査, 地盤工学会誌, Vol.57, No.5, Ser.No.616, 2009, 林宏一・平出

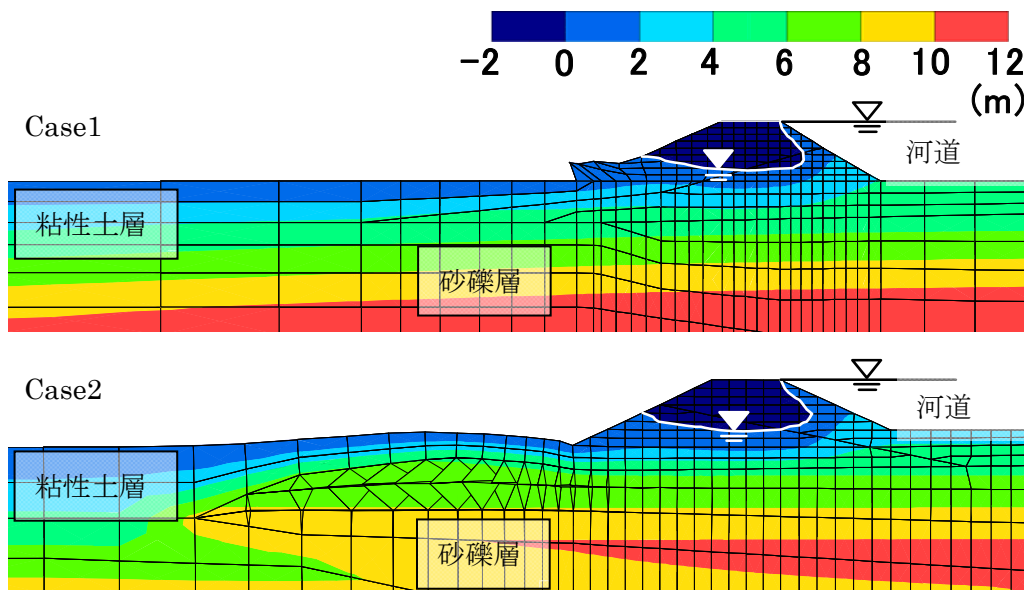


図5 五十嵐川破堤点の地層によって異なる堤体崩壊機構

務・磯部公一・大塚悟, 査読あり.

[会議論文] (計 9 件)

- 1) Shear behavior of clay in slope for pore water pressure increase, China-Japan-Korea Field trip and Workshop on Landslides, pp.103-111, 2007, Ohtsuka, S., 査読なし.
- 2) Rigid plasticity based stability analysis of reinforced slope, 5th International Symposium on Earth Reinforcement, pp.447-450, 2007, Ohtsuka, S., Inoue, Y. & Tanaka, T., 査読あり.
- 3) 7・20 水俣市斜面崩壊の数値解析的考察, 第 4 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.131-136, 2008, 大塚悟・岩部司・磯部公一・堀越俊寛, 査読あり.
- 4) Amplification properties of developed residential land for main shock and three aftershocks, Proc. of 14th World Conference on Earthquake Engineering, 04-02-0056, 2008, Takahara, T., Ohtsuka, S., Isobe, K., Sato, K. and Horiguchi, D., 査読あり.
- 5) Consideration on fill slope failure in Takamachi developed residential land in 2004 Niigata Chuetsu Earthquake, International Offshore and Polar Engineering Conference 2009, accepted, Ohtsuka, S., Isobe, K. and Takahara, T., 査読あり.
- 6) Earthquake damage in Takamachi developed residential land caused by the Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004, International Offshore and Polar Engineering Conference 2009, accepted, Ohtsuka, S., Isobe, K. and Takahara, T., 査読あり.
- 7) Fill Slope Failure of the Takamachi Housing Complex in the 2004 Niigataken Chuetsu Earthquake, International Conference on

Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, accepted, Ohtsuka, S., Isobe, K. and Takahara, T., 査読あり.

- 8) Consideration on fill slope failure in Takamachi developed residential land in 2004 Niigata Chuetsu Earthquake, International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, accepted, Ohtsuka, S., Isobe, K. and Takahara, T., 査読あり.
- 9) Deformation characteristics of clay at slip line in repetitive type landslide, 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, accepted, Ohtsuka, S. & K. Isobe, 査読あり.

[口頭発表] (計 2 件)

- 1) 河川高水位時の堤体安定性評価に関する事例解析, 第 43 回地盤工学研究発表会, 2008, 坂本和仁・大塚悟・磯部公一ほか, 査読なし.
- 2) 氾濫原性地盤における河川堤防の地盤工学的問題点, 第 63 回土木学会年次学術講演会, 2008, 西出保・大塚悟ほか, 査読なし.

7. 研究組織

(1) 研究代表者

大塚 悟(OHTSUKA SATORU)

長岡技術科学大学工学部・教授

研究者番号 : 40194203

(2) 研究分担者

細山田得三 (HOSOYAMADA TOKUZO)

長岡技術科学大学工学部・准教授

研究者番号 : 70262475

磯部公一 (ISOBE KOICHI)

長岡技術科学大学工学部・助教

研究者番号 : 70452084