

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820199

研究課題名(和文) 津波・高潮の堤防越流による後背地の氾濫・洗掘評価モデルの開発

研究課題名(英文) Modeling tsunami-induced overflow and local scouring behind coastal levees

研究代表者

下園 武範 (Shimozono, Takenori)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70452042

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、巨大な津波や高潮が海岸堤防を越流した場合に後背低平地に生じる高速流とそれに伴う洗掘を評価できるモデルの開発を行った。開発したモデルは従来よりも高解像度な計算グリッドを用いて堤防を急勾配地形として表現することにより、シームレスかつ高精度に越流・氾濫を再現することができる。また、東北地方太平洋沖地震津波による被災事例の分析をもとに、高解像度計算による局所流速から堤防背後の洗掘量を表す指標を構築した。この指標を用いることで、堤防によって構成される防護システムの越流に対する脆弱性評価を行うことができ、海岸低平地において洗掘破堤を生じやすい箇所を推定することが可能になる。

研究成果の概要(英文)：This study developed a high-resolution model which reproduced super-critical flows and local scouring behind coastal levees induced by large tsunami overflows. Unlike in conventional models, levees were represented as steep landforms, and thus flood flows over them could be seamlessly simulated. A scour indicator was constructed from local flow velocities through correlational analysis of the 2011 Tohoku tsunami cases. It enables us to perform vulnerability assessment of the coastal levee system against tsunami overflows.

研究分野：海岸工学

キーワード：津波 越流 堤防 海岸 洗掘

1. 研究開始当初の背景

2011年に起きた東日本大震災では巨大な津波の来襲により、東北地方太平洋岸を中心に海岸堤防が越流に伴って破壊される事態となった。このような低頻度の巨大大事象から完全に後背地を防護すべく堤防を設置することは様々な観点から現実的でない。震災以降、堤防越流を前提に可能な限り後背地の被害軽減を行う減災の方向が示されている。

先の事例において津波により堤防が破壊に至った過程は複雑かつ多様であるが、その多くに堤防周辺地盤の洗掘が関わっていることが示されている。堤防周辺で発生する高速流による洗掘によって堤体支持力が損なわれたことが、多様なモードでの破堤の引き金となったと考えられる。このような洗掘現象には周辺地形の起伏や堤防形状および線形による平面効果が大きく局所性が非常に強い。

低頻度な巨大大事象に対して、有効な対策を講じるためには堤防で構成される防護システム全体を見てその脆弱点を克服すべきである。局所性の強い越流・氾濫およびそれに伴う洗掘・破堤のリスクを評価するためには、高い空間解像度で現象を再現する必要がある。従来の津波氾濫計算の空間解像度は10mのオーダーであり、これは堤防のスケールより大きく局所性の強い現象を表現できない。一方、越流・氾濫の計算に3次元モデルを適用する例が見られるが、未だ計算負荷の観点から広域の氾濫計算に実用的に適用できる段階にない。航空レーザー測定の普及によって地形データの解像度は急速に高まっており、鉛直積分型モデルで1mオーダーの高解像度氾濫計算が可能になれば、より高度な防災対策につながるものと期待される。

2. 研究の目的

以上に述べた背景を踏まえて、本研究では堤防によって防護された後背低平地への平面二次元的な越流・氾濫および洗掘を評価できる高解像度モデルの開発を行う。モデルは浅水方程式に基づく実用性と堅牢性に重点を置いた構成とし、堤防によって防護された数kmスケールの海岸地域に適用できるものとする。研究期間に達成する具体的な目標を以下のように設定した。

(1) 堤防を含む海岸低平地の越流・氾濫を再現できる高解像度モデルの開発

(2) 越流に伴う堤防裏法の洗掘評価手法の開発

(3) 破堤による後背低平地への影響分析法の構築

3. 研究の方法

(1) 高解像度氾濫モデルの構築

従来、津波氾濫計算において堤防の効果は

経験的な越流公式を用いた評価がなされてきた。しかしながら、越流公式は特定の堤防形状や一定範囲の水利条件で得られたものであり、実際の複雑な地形および堤防線形で生じる越流を正確に表現することができない。ここでは、申請者がこれまでに開発を行ってきたモデル構成要素をもとに、高解像度のグリッドにより堤防を急勾配地形として考慮した上で越流・氾濫を再現する高精度な鉛直積分型氾濫モデルの開発を行う。その際に課題となるのが越流に伴って堤防前後に生じる不連続な常流・射流の遷移点や陸水境界を含む複雑な場を安定に計算することである。本研究では浅水方程式に衝撃捕捉法を適用することによって複雑な状況に対応できる堅牢なモデルの構築を行う。

(2) 越流に伴う洗掘量評価手法の開発

2011年の東北太平洋沖地震津波による堤防被災事例の大部分に堤防周辺の洗掘が関与していることが指摘されている。したがって、越流を前提とした津波対策を進める上で、堤防をはじめとする各種構造物まわりの局所洗掘を評価することが低平地の脆弱性評価において重要である。高解像度越流・氾濫モデルにより局所水理量が得られれば、それらを基に洗掘量を評価することは可能であると考えられる。本研究では以下の二つの方法を検討した。

①局所洗掘量の直接的評価

越流・氾濫モデルと土砂輸送モデルをカップリングすることによって、堤防周辺の局所洗掘を直接評価する鉛直積分型モデルの開発を行う。

②洗掘指標を用いた脆弱性評価

越流・氾濫モデルにより求めた局所水理量を基づく洗掘指標を構築し、低平地において洗掘に対する脆弱箇所を抽出できる手法を構築する。

(3) 破堤による影響評価手法の構築

堤防越流・洗掘によって破堤が生じた場合には後背地の被害増大が想定される。したがって、堤防を計画するにあたっては破堤した場合の影響を予測することが重要である。破堤については決定論的取り扱いが難しい現象であるため、ここでは破堤によって生じる後背地への影響に焦点を絞ってその評価法を構築する。(1)において急勾配地形として取り込んだ堤防をある時点で除去することによって破堤を再現し、流速や浸水深の増大および被害拡大の評価を可能にする。2011年の東北太平洋沖地震津波によって実際に破堤が生じた地域へと手法を適用することで、その妥当性の検証を行う。

4. 研究成果

ここでは、3に示した項目に分けて研究成果

について説明する。

(1) 高解像度越流・氾濫モデルの構築

複雑な線形を有する堤防を高解像度グリッドで急勾配地形として表現することで、シームレスな越流・氾濫計算を可能にする鉛直積分型モデルの開発を行った。モデルの妥当性を検証するため、定常状態の1次元越流問題にモデルを適用したところ、ベルヌーイ定理に基づく広幅堰の越流公式に相当する越流量が得られた。また、モデルと実験結果を比較したところ、越流水深が小さい場合においては実験結果を良好に再現するが、越流水深が大きくなるにしたがってモデルは越流量を過小に評価する傾向が見られた。堤防天端上の流速が大きくなるにしたがって遠心力の効果により圧力分布が静水圧からずれる。モデル方程式は静水圧近似に基づいていることから、このような現象を十分に再現できないために過小評価となることが示された。

モデルを平面二次元へと拡張し、東北太平洋沖地震津波による被災事例の再現計算を行った。対象としたのは、三陸海岸（釜石市鶴住居地区）と仙台南部海岸である。いずれも堤防によって低平地が防護されており、前者は後背地が狭小な場合、後者は後背地が広大な場合の代表例として選定した。波源モデルによって得られた沖の来襲津波波形を境界条件とし、震災前のLPデータ（2mメッシュDEM）を用いて堤防を含む地形を作成した上で、高解像度越流・氾濫計算を実施した。越流によって堤防上で流れの状態は常流から射流へと遷移し、さらに堤防背後では跳水を生じて射流から常流へと遷移する。特に河口周辺部等においては、堤防線形が曲線的な箇所が多くみられるため、後背地ではこのような不連続面が曲線状に形成される流れ場となる。モデルはこのような複雑な流れ場を良好に再現し、流速および水深分布を高い空間分解能で捉えることができた。しかしながら、上述の非静水圧の影響により、越流量が過小評価され浸水範囲が実際よりも小さくなる傾向が現地事例においても確認された。

越流水深が大きい条件での越流量過小評価を改善するため、非静水圧を考慮した非線形分散波式に基づくモデルを構築した。この方程式は浅水方程式に非静水圧の効果を表す高次項を加えたものであり、より高次の差分スキームを適用してモデルを構築した。このモデルによる結果を上述の実験結果と比較したところ、越流の過小評価が解消された。したがって、高次項を加えることにより、鉛直積分型モデルにより高い精度で越流・氾濫計算が可能であることが示された。しかしながら、高次項の導入はモデルの不安定化につながるため、本研究では現地事例に新たなモデルを適用するには至らず、今後の課題として残された。

(2) 堤防越流に伴う洗掘量の評価

津波越流に伴う居所洗掘量の予測を行うため、(1)の越流・氾濫モデルと土砂輸送モデルを組み合わせることにより、地形変化を予測可能なモデルを構築した。土砂の取込みや沈降といった鉛直輸送は既存のモデルを用いて評価した。開発したモデルを福島県勿来海岸の津波による大規模地形変化事例に適用することでその妥当性を検証した。モデルは広域的な地形変化の状況を再現することができたが、局所的な洗掘量について定量的に妥当な結果を得るには至らなかった。これは底質パラメータが不確実なことに加えて、既存の土砂・流体間の各種構成側が堤防周辺の高速度による洗掘を表現するには不十分であると考えられた。また、構造物周辺の洗掘には組織的な渦の効果が寄与することも知られており、鉛直積分型モデルにはこうした効果が組み込まれていない。堤防背後等では著大な流速によって短時間に大きな地形変化を生じ、これが流体計算を不安定にする傾向も見られた。したがって、現状のモデルの枠組で実用上求められる精度を有する洗掘量の直接評価は容易でないことが示唆された。

以上の結果を踏まえて、越流・氾濫計算により求まる高空間解像度の水理量（流速、水深）から洗掘指標を構築し、洗掘に対する脆弱箇所を面的に抽出する手法を検討した。

(1)で対象とした三陸海岸および仙台南部海岸について震災前後の高解像度地形データや航空写真等から局所洗掘発生箇所を抽出し、計算により求めた水理量との比較分析を行った。その結果、洗掘幅と流速自乗の時間積分量と間に相関があることが認められ、この量が洗掘指標として利用可能であることが示された。洗掘指標を面的に可視化し、実際の洗掘箇所と比較すると両者はよく対応しており、両海岸で破堤を生じた箇所は洗掘指標が非常に大きいことが確認できた。このような手法により予め指標の空間分布を求めれば、低平地において洗掘に対して脆弱な箇所を同定することができる。したがって、洗掘による破堤の可能性が高い地点をある程度予測することで、越流を想定した低平地の防災において重要な役割を果たすことが期待される。

(3) 破堤による影響評価手法の構築

三陸海岸および仙台南海岸の二地域を対象に破堤による影響分析を行った。両地域では東北地方太平洋沖地震津波により大規模な破堤を生じているが、それがどのように後背地の被害に寄与したかは明らかでない。高解像度越流・氾濫計算において破堤時点を設定し、急勾配地形として表現した堤防を基盤面まで下げることで破堤の効果を再現した。破堤時点や堤防除去にかかる時間を様々に設定して感度分析を行った。いずれの地域でも堤防に対して越流水深が大きく、破堤の影響

は相対的に小さいことが示された。破堤による流速や浸水深の増大を津波被害関数によって人的、建物被害確率へと変換し、破堤による被害増大を定量化した。その結果、広大な低平地を有する仙台南部地域では破堤に伴う人的被害、建物被害の有意な増大が示唆されたが、堤防後背地の狭い三陸海岸地域では破堤による影響はほとんど見られなかった。仙台南部地域においては破堤を考慮することでより現実に近い被災状況が再現できることが示された。

今後の津波防災上の観点からは(2)の洗掘指標の評価により破堤可能性が高いと判断された箇所に対して、このような分析を行うことで破堤に伴う後背地被害をある程度予測することができる。今回対象とした事例よりも越流規模が小さい場合には、破堤の影響は相対的に大きくなり顕著な被害増大が生じると考えられる。したがって、このような破堤の影響分析を組み込むことでより実態に即したリスク評価につながることを期待される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

①大村 森香、下園 武範、佐藤 慎司、福島県勿来海岸における東北地方太平洋沖地震津波による大規模土砂移動と海岸地形変化、土木学会論文集 B2(海岸工学)、査読有、70 巻、2014、1416-1420
DOI: 10.2208/kaigan.70.I_1416

② Wu L., D. Feng, T. Shimozono, A. Okayasu, Sediment Flux Measurement at High Concentration Based on Image Analysis with Combined Illumination, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)、査読有、70、2014、736-740
DOI: 10.2208/kaigan.70.I_736

③木村 雄貴、下園 武範、佐藤 慎司、高解像度津波氾濫モデルに基づく海岸堤防の越流・破堤による後背地の影響評価、土木学会論文集 B2(海岸工学)、査読有、71 巻、2015、289-284
DOI: 10.2208/kaigan.71.I_289

④池澤 広貴、下園 武範、佐藤 慎司、非静水圧を考慮した鉛直積分型堤防越流モデルの開発、土木学会論文集 B2(海岸工学)、査読有、71 巻、2015、7-12
DOI: 10.2208/kaigan.71.I_7

⑤ Wu L., D. Feng, T. Shimozono, A. Okayasu, Laboratory Measurements of Sediment Flux and Bed Level Evolution in the Swash Zone, Coastal Engineering

Journal、査読有、2016、in print
DOI: 10.1142/S0578563416500042

⑥Shimozono T., S. Sato, Coastal vulnerability analysis during tsunami-induced levee overflow and breaching by a high-resolution flood model, Coastal Engineering、査読有、107、2016、116-126
DOI: 10.1016/j.coastaleng.2015.10.007

[学会発表] (計 1 件)

① Wu L., D. Feng, T. Shimozono, A. Okayasu, S., Laboratory measurement of sediment transport under dam-break waves based on image analysis, 2015 年 5 月 13 日 Coastal sediments 2015, San Diego (US)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

下園 武範 (SHIMOZONO Takenori)
東京大学・工学系研究科・准教授
研究者番号：70452042