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

木村 雄貴¹・下園 武範²・佐藤 慎司³

¹非会員 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8654 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail: kimura@coastal.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 工博 東京大学大学院工学系研究科講師 (〒113-8654 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail: shimoazono@coastal.t.u-tokyo.ac.jp

³フェロー会員 工博 東京大学大学院工学系研究科教授 (〒113-8654 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail: sato@coastal.t.u-tokyo.ac.jp

東北地方太平洋沖地震津波による被害を契機に粘り強い海岸堤防の整備が推進されているが、その減災効果を評価するためには破堤による後背地への影響を明らかにする必要がある。本研究では、後背地の地形特性が異なる二つの地域（大槌町および仙台南部地域）を対象として高解像度氾濫モデルに基づき破堤の影響分析を行った。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、堤防後背地の狭い大槌町では破堤による影響は限定的であった。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。また、高解像度モデルの結果をもとに堤防背後の洗掘についても分析を行った結果、局所流速に基づく簡便な指標によって実際の洗掘状況を説明できることが分かった。

Key Words : dike failure, high-resolution, coastal dike, disaster prevention,

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波によって、東北地方を中心とする多くの地域で甚大な被害が生じた。津波が堤防を大きく越流し、堤防が崩壊している地域も数多く見られた。このような事例を教訓として、震災後の津波防災計画では粘り強い海岸堤防の設置が推進されている。堤防がその高さを上回る津波に対して粘り強さを発揮し、破堤にいたるまでの時間を遅らせることで、後背地の浸水被害を軽減させる他、住民の避難のための時間を長くする等の効果が期待されている。しかしながら、粘り強い堤防の効果は後背地の地形や集落構造によって異なるため、導入にあたってはその効果を定量的に把握することが重要である。

粘り強い堤防の効果を議論にするためには、破堤による後背地の被害増大を評価する必要があるが、堤防が破堤に至るまでの過程には不明な点が多い。これまでに堤防の有無による後背地での減災効果に関する研究事例はあるものの、粘り強い堤防にすることによって期待される破堤の遅延や部分的な破壊にとどめることによる減災効果を評価する手法は確立されていない。この様に粘り強い堤防による減災効果を把握することは、今後起こり

うる大規模な津波に対する防護体制の検討に重要になると考えられる。

本研究では、実際に破堤による被害が生じた二つの地域を対象にケーススタディーを行った。対象地域には、後背地の広い地域として宮城県亶理町～名取市、狭い地域として岩手県大槌町の海岸部を選択した。堤防の効果を明らかにするために、高解像度氾濫シミュレーションを実施し、破堤原因を探るとともに、破堤タイミングによる後背地の被害の変化を調べた。二つの対象地域の結果を比較することにより、破堤の影響と後背地特性の関係について議論を行った。

2. 高解像度津波氾濫モデル計算

(1) 対象地域と被災概要

a) 宮城県亶理町～名取市の海岸

宮城県亶理町～名取市（以後仙台南部地域と呼ぶ）は仙台市の南に位置し、その海岸部には広大な低平地が広がっている。東北地方太平洋沖地震に伴う津波は、海岸に沿って設置された傾斜堤防を越流し、仙台東部道路との間の後背地に甚大な浸水被害をもたらした。海岸近くに丘陵地や、避難可能な建物も少なく人的被災も甚大で

図-1 仙台南部地域の浸水範囲(左)および破堤箇所(右)の航空写真(国土地理院 100000 分の 1 浸水範囲概況図 No13,14, 東北地方太平洋沖地震正射画像より作成)

あった。津波は海岸から最大5 km内陸まで侵入し、仙台東部道路でせきとめられたが、交差道路から西進して道路の西側まで達した(図-1)。海岸堤防は津波の越流によってA～Fの計6地点で大きな破堤を生じた(E, F地点は砂丘による自然堤防)。図-1には破堤箇所(A, C地点)の航空写真を例として示しているが、A地点では堤防裏が大きく洗掘されているが、C地点は破堤箇所付近のみ洗掘が確認できる。このような堤防背後の洗掘は、破堤の主要な要因として考えられている。

b) 大槌町

岩手県上閉伊郡大槌町は、三陸海岸中央の大槌湾奥部に位置し、大槌川と小槌川によって形成された小規模な沖積平野上にある。東北地方太平洋沖地震に際して、津波に備えて設置された防潮堤(傾斜堤)をはるかに超える高さ12 m程度の津波の来襲を受け、海岸近くの低地は壊滅状態となった。津波は、二つの河川に沿って設置された堤防を越流し、図-2に示す範囲に浸水被害をもたらした。特に海岸部の堤防背後は大きな洗掘を受けており、図-2の赤丸箇所破堤が生じたことが確認されている。

(2) 津波氾濫モデル計算の概要

非線形長波方程式に基づく計算モデル³⁾により津波氾濫計算を行った。このモデルは衝撃捕捉法(Shock-capturing scheme)の一つであるTVD-MacCormack法に基づいており、堤防や微地形により発生する跳水や段波のような水理量の不連続面を精度良く捉える事ができる。計算グリッドの大きさは、後背地の広大な仙台南部地域については5 m、後背地の狭い大槌町については2 mとした。

図-2 大槌町の浸水範囲(国土地理院25000分の1浸水範囲概況図No. 54より作成)

高解像度の計算グリッドによって堤防は急勾配地形として考慮されるため、堤防越流はシームレスに計算することができる。しかしながら、モデルは静水圧近似に基づくため、堤防法面での鉛直加速度による非静水圧の効果が考慮されない。非静水圧分は堤防天端の総圧を下げるように作用することから、越流量は若干過小に評価されることになる。底面摩擦の影響は Manning 式によって評価し、両方の地域においても海域の粗度係数は $0.02 \text{ m}^{-1/3}$ 、陸地の粗度係数は、仙台南部地域では $0.04 \text{ m}^{-1/3}$ 、大槌町では $0.05 \text{ m}^{-1/3}$ に設定した。

a) 地形データの作成

大槌町の地形データの作成には国土交通省水管理国土保全局が整備した震災前の航空レーザー測量によるLPデータ(2 mグリッド)を用いた。ただし、このデータの範囲は海岸低平部に限定され、浸水域全域をカバーしていないため、内陸の一部については国土地理院が公開している5 mグリッドのデータを統合した。海域については日本水路協会発行の電子海図を基に作成し、上記の地形データと統合することで計算地形を作成した。

仙台南部地域海岸部においては、堤防を含む一部の領域で、2 mと5 mグリッドによる計算を実施して比較したところ、2 mグリッドの方が氾濫が低減される傾向にあったが、氾濫挙動に大きな変化は見られなかった。仙台南部地域の地形データは基本的に国土地理院の5 mグリッドデータを用いたが、堤防の効果が反映されるように海岸堤防付近の地形データのみ前述のLPデータ(2 mグリッド)を内挿した。図-1に示す楕円状に破線で囲った箇所については、LPデータ整備後にできた海岸堤防が存在するため、震災時の堤防状況を正しく再現できなかった点には留意されたい。

b) 入射波の条件

入射波の条件を求めるため、各対象地域での氾濫計算に先立って二段階の広領域の計算を実施した。第一段階目の計算では、Satakeら⁴⁾による波源モデルを用いて、波

源域から対象地域沖（波源～水深200 m）までの津波伝播計算を線形モデルにより実施した。その結果を基に、非線形モデルで沿岸挙動（水深200 m～陸域）を再現し、各対象地域の沖側の入射条件を決めた。しかしながら、波源の不確実性や先述した非静水圧化を考慮していないなどの問題のため、氾濫計算では浸水範囲を過小に評価する傾向が見られた。本研究の目的は破堤による効果の検討であるから、ここでは浸水範囲を再現できるように入射波を割増すことで対応した。仙台南部地域では15%程度、大槌町では20%程度割増して入射条件とした。

c) 破堤の再現

被災後の空中写真から破堤箇所を特定し、該当する堤防箇所の地形を基盤面まで瞬時に下げることで破堤を表現した。実際の破堤は時間的な幅をもって生じるものと考えられるが、ここではダム崩壊問題の場合と同様に取

り扱った。計算スキームは衝撃捕捉法に基づいていることから、破堤に伴って発生する段波を高い保存性と衝撃捕捉性によって適切に評価することができる。破堤箇所の局所的な流体運動は必ずしも正しく再現されないが、破堤による広域的な質量・運動量の変化は十分に評価できると考えられる。

破堤のタイミングについては、複数の場合を想定して計算を行った。破堤を考慮しない数値計算の結果から、堤防裏の流速や浸水深などを求め、基本となる破堤時刻を決定した。破堤原因については、裏法尻の洗掘や裏法面ブロックの浮上りなどいくつか想定されるが、いずれも越流開始直後の後背地の水位が上昇する前が最もクリティカルな状態にあると考えられる。破堤なしの数値計算の結果、仙台南部地域と大槌町どちらも、越流開始時刻から400秒間ほど経過すると、越流は終了するか、継続していたとしても越流量は非常に少なくなった。越流時に破堤が生じると想定し、越流開始後40 s (Case 1)、160 s (Case 2)、280 s (Case 3) の3通りについて検討を行った。

3. 破堤原因の考察

津波による傾斜堤の破堤の最も大きな原因は、堤防裏法尻の洗掘によるものである。洗掘によって裏法被覆工や堤体土が流出し、天端や表法の崩壊につながる。仙台南部地域、大槌町の海岸堤防の破堤箇所周辺では、航空写真から堤防背後が大きく洗掘されているのが見て取れる。洗掘現象は流速との相関が高く、洗掘量は流速の二乗に比例すると考えられる⁹⁾。そこで、洗掘の大きさを表す指標として堤防裏の流速の二乗を時間積分した値を求めた。いずれの地域についても、越流開始から400秒までに堤防裏の著大な流速は終息しているため、流速の二乗値をこの間で積分した量を洗掘指標と定義した。

図-3および図-4には、仙台南部地域および大槌町の洗掘指標の分布と同範囲の航空写真を表示しており、左図の黒線および右図の白線は海岸堤防位置を示している。いずれの地域においても洗掘指標と実際の洗掘状況との間に対応関係が見られた。仙台南部地域では、図-1に示した6か所の破堤部で分析を行ったが、ここでは図-1のA～C区間の四角箇所の結果を示している。A地点では堤防背後が大きく洗掘されており、洗掘指標も大きいことから、洗掘による破堤であると推察された。BおよびC地点では洗掘指標の値は小さく、洗掘は破堤箇所を中心に広がっている。そのため、別の要因で破堤した後、開口部となって洗掘を受けた可能性が高い。A地点はB、C地点に比べて堤防高が低く、A地点の方が越流量が大きいため洗掘指標が高い値となったものと考えられる。D地点では、被災前の空中写真で堤防が途切れている箇

図-3 仙台南部地域の震災後の航空写真および洗掘指標の分布（国土地理院による被災地正射画像を基に作成）

図-4 大槌町の震災後の航空写真および洗掘指標の分布（国土地理院による被災地正射画像を基に作成）

所が見られ、そこから津波が侵入したことで広範囲で破堤が生じたと推定される。また、E、F地点については砂丘による自然堤防であったことが大規模な破堤の原因と考えられる。図-3の白い四角で示した箇所は震災時の堤防を正しく再現できていないため、洗掘指標は大きくなっている。

一方、大槌町では図-2に四角で示した箇所と同様の分析を行った。計算された洗掘指標と大規模な洗掘が起きた範囲はよく一致していることが分かる。破堤箇所では洗掘指標が南側に比べて小さいことから、洗掘が破堤の直接的な原因ではないと推定される。破堤箇所は大槌川の鉄橋との境界であり、堤防構造が薄く他の範囲と異なることが確認できた。したがって、ここでの破堤は堤防の弱点に津波が作用したことによるものと考えられる。いずれの地域でも洗掘指標と実際の洗掘状況に対応関係が見られたことから、このような指標によって堤防の越流・洗掘に対する脆弱点を見出せることが示された。

4. 破堤による影響分析

(1) 破堤を考慮した計算結果

破堤の影響を分析するに先立って、前章で述べた破堤の再現方法の妥当性を確認した。ここでは、破堤の規模が大きく、その影響が顕著であった仙台南部地域の結果を示す。仙台南部地域では、図-1に示した6地点を破堤させて氾濫計算を行った。図-5は、特に破堤の影響が顕著であったD、E地点を含む範囲における、(a)破堤直後、(b)破堤後300 s、(c)破堤後600 sの浸水深の分布を表している。また、各時刻において左が破堤無、右が破堤有の結果となっている。破堤のタイミングについては、Case 1（越流開始40 s後に破堤）の条件を採用した。破堤によってD、E地点の背後で浸水深が増大していることが分かる。また、波速が大きくなることで、後背地に侵入する津波先端の速度も上昇していることが分かる。堤防に近い範囲において破堤の影響は局所的であるが、より内陸では開口部から侵入した津波が広がることで、破堤し

てない箇所の背後にも浸水深の増大が確認できる。

(2) 破堤による被害評価

高解像度氾濫計算により得られた流速、浸水深をもとに破堤による後背地の被害評価を行った。ここでは、水位上昇時間・最大浸水深・木造建物被害確率の三つを被害指標として議論を行う。水位上昇時間は人が避難困難になる浸水深30 cmに達するまでの時間として定義し⁹⁾、地震発生時を基準にとった。この時間が延びるほど、避難可能時間が長くなり、人的被害が小さくなる。また、建物被害の指標として木造家屋の建物被害確率を林ら(2013)の方法によって、津波による流体力から求めた⁷⁾。Case1～Case3の三通りの破堤タイミングについて分析を行ったが、以下ではCase1の結果のみを示す。

a) 仙台南部地域

図-6に仙台南部地域での各指標の計算結果を、破堤有および無について示す。まず、これらの結果から破堤によって浸水範囲が有意に拡大していることが分かる。図-1に示した実際の浸水範囲と比較すると、破堤を考慮に入れることで、浸水範囲がより実際に近いものになることがわかる。特に図-6aに四角で示した箇所では、破堤の影響が顕著に見られた。さらに、破堤は水位上昇時間・建物被害確率の双方に影響を及ぼすが、破堤による影響が大きくなる場所が異なった。建物被害確率は、破堤が生じた堤防近傍直後で流体力が上昇することから、堤防近傍で破堤による影響が大きかった。一方、水位上昇時間は破堤が生じた堤防背後ではほとんど影響がなく、後背地の内陸部ほど、破堤による影響は大きくなり、最大で1000秒程度縮んでいる地域もあった。

図-6bに四角で示した箇所では、特に破堤の影影が大きくなった。破堤なしの場合は建物被害確率が最大0.5程度で収まっているものの、破堤を考慮すると、最大0.9程度になっている。この箇所に該当する被災前後の航空写真（図-7）を比較すると、ほぼ全ての家屋が全壊しており、破堤無しの場合の建物被害確率が過小評価になっていると判断できる。このように建物被害の観点か

図-5 仙台南部地域における破堤の有無による浸水深の変化過程（左：破堤無、右：破堤有）．(a) 破堤直後、(b) 破堤後300秒経過時、(c) 破堤後600秒経過時

図-6 仙台南部地域における破堤の有無による後背地の氾濫特性の違い（左：破堤無，右：破堤有）．(a)最大浸水深，(b)木造建物被害確率，(c)最大浸水深

図-7 図-6の黒四角地点での建物被害の様子
(Google Earthにより作成)

図-8 大槌町における破堤の有無による最大浸水深の違い

らも破堤を考慮した計算結果が実際の被害状況とより整合していることが確認できた。

破堤タイミングの異なるCase1~Case3間の比較を行ったところ、破堤時刻を遅らせることで破堤による影響を軽減できることが示された。破堤タイミングが遅いCase3の場合、前述の四角で囲んだ箇所の建物被害確率には破堤なしとの違いがほとんどなくなった。これは破堤タイミングが遅い場合には、後背地の水位が上昇し、破堤による流体力の増大が軽減されるからである。すなわち、粘り強い堤防によって破堤を防ぐ、あるいは遅らせることによって一定の被害軽減効果が期待できる。

b) 大槌町

大槌町での実際の破堤範囲は図-2の赤丸のように小さく、破堤による後背地への影響は限定的であった。そこで、仮により広範囲で破堤した場合を想定して、破堤の影響を分析した。広範囲破堤箇所の選定条件は堤防裏の洗掘指標が大きい箇所とし、図-8に四角で示した範囲の堤防を破堤させた。それに関わらず、建物被害確率と水位上昇時間には破堤による有意な被害の増大が確

認できなかった。したがって、図-8には最大浸水深の結果のみを示している。最大浸水深には破堤による増加が確認できるものの、後背地の被害への影響は小さかった。

破堤によって生じた波は浸水深を増大させながら押し波の先端に伝播していくが、後背地の狭い大槌町では、押し波の先端にその影響が伝わる前に、後背地全体が浸水してしまうので、破堤による水位上昇時間への影響はほとんど見られなかった。また、建物被害については、堤防や後背地のスケールに対して津波の規模が大きく、破堤が生じずとも建物被害確率は大きく、破堤の寄与は相対的に小さかった。

5. 結論

本研究では、津波による堤防の破堤原因を分析するとともに破堤の影響を明らかにするために、高解像度の堤防形状を含む地形データを用いた津波氾濫計算を実施した。計算された氾濫特性と現地の被災状況から、以下の

結論が得られた。

- (1) 高解像度津波氾濫モデルに基づき、破堤を考慮した数値計算を行うことで、浸水範囲や建物被害状況などより現実に近い被害状況を再現できることがわかった。
- (2) 堤防裏法尻の洗掘状況と局所流速に基づいた洗掘指標は良く対応していることから、高解像度氾濫計算により堤防の越流・洗掘破壊に対する脆弱点を見出せることが示された。また、この洗掘指標により押し波越流時の洗掘の度合いを推定することで、対象地域では様々な要因により破堤が生じたことが示唆された。
- (3) 後背地が広い仙台南部地域では、破堤によって浸水範囲が有意に拡大した。さらに水位上昇時間・建物被害の双方に影響を及ぼしたが、破堤による影響が大きい場所が異なった。建物被害確率は、破堤が生じた堤防直後で破堤による影響が大きい一方、水位上昇時間は、浸水範囲の陸側端部になるほど大きく差が出た。一方、大槌町では、後背地が狭いことと津波の規模が大きかったため、水位上昇時間・建物被害両方の観点から評価しても破堤による影響は限定的であった。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 26820199 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Kato, F., Suwa, Y., Watanabe, K., and Hatogai, S.: Mechanisms of coastal dike failure induced by the Great East Japan Earth-quake Tsunami. *Proceedings of ICCE*, 1(33), structures-40, 2012.
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報，国総研資料 646 号 5 章津波と海岸施設，pp.144-146, 2011.
- 3) Shimozone, T., Sato, S., Okayasu, A., Tajima, Y., Fritz, H., Liu, H., and Takagawa, T.: Propagation and inundation characteristics of the 2011 Tohoku tsunami on the central sanriku coast. *Coastal engineering journal* 54,01 (2012): 1250004.
- 4) Satake, K., Fujii, Y., Harada, T., and Namegaya, Y.: Time and space distribution of co-seismic slip of the 2011 Tohoku earthquake as inferred from tsunami waveform data. *Bulletin of the Seismological Society of America* 103(2B): 1473-1492, 2013.
- 5) 遠藤仁彦，木村克俊，菊池聡一，須藤賢哉：越波によるインターロッキングブロック舗装の破壊機構について，開発土木研究所月報，No505, pp.8-15, 1995-06.
- 6) 内閣府政策統括官(防災担当)：建物被害・人的被害の被害想定項目及び手法の概要，報道発表資料一式，資料2-2, 2012-08-29.
- 7) 林里美，成田裕也，越村俊一：東日本大震災における建物被害データと数値解析の統合による津波被害関数，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.69, No2, I_386-I_390, 2013.

(2015.3.18 受付)

IMPACT ASSESSMENT OF COASTAL DIKE FAILURE BY A HIGH-RESOLUTION TSUNAMI FLOOD MODEL

Yuuki KIMURA, Takenori SHIMOZONO and Shinji SATO

Severe devastation by the 2011 Tohoku Tsunami highlighted the importance of a robust and redundant coastal dike against a low-frequency extreme tsunami. To discuss its effectiveness, we need to clarify how coastal dike failure affects damages in its hinterland at the occurrence of significant overflows. The paper presents results of case studies of the 2011 tsunami event in which the impact of dike failure is analysed using a high-resolution flood simulation at two sites with different topographic features. The dike failure significantly increases flood intensity and thereby human and building damages on a vast coastal plain of the southern Sendai coast, while its impact is relatively small in narrow low-lying areas of Otsuchi located on ria coast. The model results describe flood impacts better when the dike failure is accounted for in the southern Sendai coast. We also analyse local scouring behind coastal dikes which may trigger the dike failure and show that it can be related with local flow velocity from the high-resolution flood model.