津波越流時の堤防周辺における流体運動の分析

Fluid Motion around Coastal Dyke due to Overflowing Tsunami

三上貴仁¹・松葉俊哉²・柴山知也³

Takahito MIKAMI, Shunya MATSUBA and Tomoya SHIBAYAMA

Fluid motion around a coastal dyke due to overflowing tsunamis was investigated by conducting hydraulic experiments and analyzing videos recorded during the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami. The results of the hydraulic experiments showed that overflowing tsunamis could be classified into three types, and velocity field around coastal dykes and pressure acting on coastal dykes were different in these three types. This classification can be helpful to consider the mitigation of damage on coastal dykes. The videos showed that the type of overflowing tsunamis around coastal dykes varied with the location, and this type was considered to have an influence on how overflowing tsunamis affected coastal dykes in the 2011 tsunami.

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震津波（以下、2011年東北津波という）では、被災地沿岸で多くの堤防や防潮堤（以下、両者をあわせて堤防という）が被害を受けた。災害後に実施された現地調査（例えば、加藤ら、2012）では、堤防背後での大規模な洗掘や被覆工および堤体内の土砂の流出などが見られ、長時間にわたる津波の越流が被害を与えた要因のひとつであると考えられる。

堤防に作用する津波については、水理実験と数値計算の両面から研究が続けられてきた。2011年東北津波以前には、津波衝突時に堤防前面に作用する波力（例えば、Hamzahら、2000；加藤ら、2005；富永ら、2007）や、津波遡上後に生じる戻り流れによる法先の洗掘（例えば、西村・堀川、1979；野口ら、1997；後藤ら、2002）に着目した研究が進められてきた。首藤（1999）は、1933年昭和三陸津波から1960年チリ津波までの堤防被害に関する事例を整理し、越流による被害を指摘したが、これに関する研究の進展はその後あまり見られなかった。

2011年東北津波以降、越流による被害状況が明らかとなり、越流する津波の堤防への影響についても論じられるようになった。大井ら（2012）は越流時の堤防裏法の被覆工の挙動に、鳩貝ら（2012）は堤防背後に生じる洗掘に、中尾ら（2012）と小竹・磯部（2012）は越流時に被覆工の内外に作用する圧力に、それぞれ着目して論じている。しかし、堤防を越流する津波に関する研究は始められたばかりであり、より多くの視点から研究が進められることが重要であると考えられる。

そこで本研究では、津波による堤防の被災機構を解明する一助となるべく、津波越流時に堤防周辺で生じ得る流体運動について、水理実験結果と2011年東北津波の際に撮影された映像をもとに分析し、その特徴を把握することを目的とする。

2. 水理実験による流体運動の分析

津波越流時の堤防周辺で生じる流体運動は、越流水深や越流量によりその特徴が変化すると考えられる。そこで、二次元水路を用いた水理実験により、越流水深と越流量を変化させたときの流体運動の特徴の把握を試みた。

(1) 実験条件と方法

水理実験は、早稲田大学の二次元水路（長さ約12m、幅40cm、高さ60cm）を用いて実施した。図-1に、実験水路断面と堤防模型の模式図を示す（(a)のみ鉛直方向

(a) 実験水路断面

(b) 堤防模型

図-1 実験水路断面と堤防模型の模式図

1 学生会員 修(工) 早稲田大学大学院創造理工学研究科
建設工学専攻博士後期課程
2 学(工) 早稲田大学大学院創造理工学研究科
建設工学専攻修士課程
3 フェロー 工博 早稲田大学教授 理工学術院

の縮尺比を水平方向より小さくした)。大井ら (2012) と同様に、水路に取り付けた環流装置により一方向流れを水路内に発生させることで、越流する津波を再現した。環流装置の上流側の出入口から約4m離れた位置より、長さ2m、勾配1/10の斜面を設置し、それに続けて長さ2mの水平床を設置した。斜面の終端部から10cmの位置に、高さ10cm、天端幅10cm、両法面勾配1:2の堤防模型を設置した。斜面、水平床および堤防模型は、すべてステンレス製である。これらと水路側壁面との間は、水が浸入しないようにすべて密閉した。実験スケールは約1/50とした。

十分な越流水深を確保するために、水路内を水で満たしてから流れを発生させた。水を満たした際の水平床から静水面までの距離を水深 h とし、 h を10cmから20cmまで変化させた。流量は環流装置に取り付けられているパ

ルプで調節し、それぞれの水深について4段階に変化させた。

以上の条件のもと、堤防模型を水平床上に固定して流れを発生させ、堤防周辺の流れの可視化と堤防に作用する圧力の計測を行った。また、環流装置に取り付けられた流量計を用いて、流量の計測を行った。

(2) 実験結果と考察

水深 h と単位幅あたりの流量 q を変化させたところ、堤防模型を越流する流れは、その流速場の特徴から3種類に分類できることが分かった (図-2)。この分類は、本間 (1940) が堰堤の流量係数を求める際に示している完全越流、不完全越流、潜越流にあたる。水深 h と単位幅あたりの流量 q 、および、3種類の流れの関係を図示すると、図-3のようになる。水深が浅く流量が多い場合には完全越流となり、水深が深く流量が少ない場合には潜越流となり、これらの遷移領域で不完全越流となることがわかる。

既往の研究では、上述の3種類の流れのうち、完全越流をとりあげて論じることが多かったが、実際には堤防背後の条件 (構造物や植生の有無、地形の勾配など) によって堤防背後の水位が越流中に上昇し、不完全越流や潜越流の状態になることが考えられる。したがって、それぞれの種類について検討する必要がある。水深 $h = 15\text{cm}$ の場合、流量を調節することで3種類の流れを発生させることができるので (図-3)、以下では水深 $h = 15\text{cm}$ の場合に生じるそれぞれの種類の流れ (完全越流: $q = 0.054\text{m}^2/\text{s}$, 不完全越流: $q = 0.040\text{m}^2/\text{s}$, 潜越流: $q = 0.011\text{m}^2/\text{s}$) の特徴と堤防被害との関係について述べる。

図-2 堤防を越流する流れの分類 (本間, 1940)

図-3 水深と単位幅あたりの流量による流れの分類

図-4 越流時の堤防に作用する圧力と水面形状

a) 堤防周辺の流速場

水路内にトレーサー（ダイヤイオンHP20SS、三菱化学製）を混入し、レーザー光（PIV Laser G100、カトウ光研製）を照射して、3種類の流れについて流れ内部の流速場を可視化し、その定性的な特徴を抽出した。

完全越流では、堤防背後を射流の状態で流下していく。不完全越流では、堤防背後を流下する射流の上に渦が生成される領域が発生する。潜越流では、射流が発生することなく、堤防背後の水面近傍に流速の速い部分が発生する。完全越流や不完全越流の状態では、流速の速い部分が裏法面に沿って存在し、洗掘等を引き起こす可能性があるのに対し、潜り越流では、流速の速い部分が水面近傍に存在するので、堤防への影響は少ないと考えられる。

ここで、流速場の観点から、津波越流が堤防に与える影響を抑える方策について考察したい。首藤（1999）は、堤防のすぐ後方に高さが十分にある土堤があり、堤防後方に海水が比較的早く溜まったことが堤防の被害を防いだという事例を挙げている。谷本ら（2012）は、越流により堤防背後に形成された洗掘（落堀）あるいは水路の存在により、堤防背後の水深が増加することを指摘して

いる。これらのことより、越流開始時に流れが完全越流の状態であっても、堤防背後の水深が高まりやすい条件であれば、流れが不完全越流や潜越流の状態に移行し、流速の速い部分が裏法面を離れ、堤防への洗掘被害等を抑制する効果があると考えられる。

b) 堤防に作用する圧力

堤防模型表面に圧力計（PS-05KC、共和電業製）を設置し、3種類の流れについて越流時に堤防に作用する圧力を計測した。サンプリング周波数は200Hzとした。圧力計のキャリブレーションは、流れを発生させる前の静水中で実施した。流れを発生させてから20秒ほど経過すると、圧力計はほぼ一定の値を示すようになったので、流れ発生後20秒から30秒までの値の平均値を越流時の堤防に作用する圧力とした。図-4に、越流時の堤防に作用する圧力と水面形状を示す。

完全越流と不完全越流では、裏法両端部の流れが湾曲するところで遠心力の影響を受けて圧力が大きく変化する。上に凸の流れになる裏法肩では圧力が下がり、下に凸の流れになる裏法尻では圧力が上がる。潜越流では、水面形に大きな変動はなく、堤防に作用する圧力も静水圧とほぼ等しい。完全越流や不完全越流の状態における

図-5 2011年東北津波において撮影された津波が堤防を越流する映像のキャプチャ画像（<http://www.nicovideo.jp/mylist/24570254>）

表-1 映像中の堤防の概要

	場所	海岸名	堤防背後での 津波痕跡高	被災前 現況堤防高	被災後 復旧堤防高	堤防の被害状況
(a)	青森県上北郡 おいらせ町松原	横道海岸	T.P.+3.2m	T.P.+6.0m (青森県, 2003) T.P.+7.0~7.5m (デーリー東北新聞社, 2011)	—	堤防裏法流出。（東北地方整備局河川部地域河川課, 2011）
(b)	岩手県久慈市 宇部町第20地割	久喜漁港海岸	T.P.+12.2m	T.P.+12.0m (復興庁, 2012)	T.P.+14.0m (復興庁, 2012)	「津波が防潮堤を越流しているが、裏のり面の及び裏の基礎の吸出しは確認されていない。防潮堤の背後は道路となっており、コンクリートやアスファルトで被覆されていたことが、吸い出しを受けなかった理由の一つと考えられる。」（岩手県津波防災技術専門委員会, 2011）
(c)	岩手県宮古市 赤前第11地割	赤前地先海岸	T.P.+6.1m	T.P.+8.5m (復興庁, 2012)	T.P.+10.4m (復興庁, 2012)	「波返工や被覆工は健全。裏被覆工が一部損壊。背面、前面ともに洗掘なし。背面のアスファルト道路が洗掘を防止。」（笠間, 2011）

裏法肩の圧力低下は、被覆工の不安定化の要因になると考えられる。

ここで、堤防に作用する圧力の観点から、津波越流が堤防に与える影響を抑える方策について考察したい。中尾ら(2012)は、二線堤構造によって一線目と二線目の間に水を溜めることで、裏法肩での圧力低下を防げる可能性があることを示している。小竹・磯部(2012)は、裏法面の緩勾配化によって裏法肩での流れの湾曲を抑え、被覆工に作用する上向きの力を抑えられることを実験により確かめている。これらのことよ

り、裏法肩での圧力低下を防ぐためには、堤防背後の水深が高まりやすいようにすること、流れの湾曲を抑えることの2つの方策が挙げられると考えられる。ただし、両者とも堤防背後の土地利用に制約を与え得ることに留意する必要がある。

3. 映像による流体運動の分析

2011年東北津波では、津波来襲時の映像がいくつか撮影されている。その中から津波が堤防を越流している様子を撮影したものを選び、現地調査で判明している堤防の被害状況や津波痕跡高を踏まえて、実際にどのような流体運動が生じたのか論じてみたい。

図-5は、(a) 青森県おいらせ町、(b) 岩手県久慈市、(c) 岩手県宮古市において撮影された堤防を越流する津波の映像のキャプチャ画像である。それぞれの場所における堤防の概要を表-1に、堤防付近の地形と津波痕跡高を図-6に、それぞれ示す。用いた地形データは国土地理院基盤地図情報数値標高モデル(10mメッシュ)、津波痕跡高は東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ(2012)による。

図-5(a)では、越流した津波が加速しながら流下していき、完全越流に近い状態となっていることがわかる。これは堤防背後での痕跡高が堤防高よりも低いことからわかる。ここでは、堤防裏法が流出するという被害が生じており、完全越流により裏法被覆工をはがすように力が働いたことが推察される。

図-5(b)と(c)では、越流後に堤防背後での水位が上昇し、不完全越流あるいは潜越流に近い状態となっていることがわかる。これらの堤防では顕著な被害は見られなかった。図-6を見ると、(b)では堤防のすぐ後方から標高が高くなっており、堤防背後において水位が上昇しやすい条件であったと考えられる。(c)では、堤防背後に標高10m以下の低地が広がっているが、堤防高と同程度の津波痕跡高が広範囲に分布しており、低地の大部分が浸水し、水が溜まっていたと考えられる。現地調査結果では、堤防背後にあるアスファルト等による被覆が洗掘を防止し、破壊に至らなかったとの考察(岩手県津波防災技術専門委員会, 2011; 笠間, 2011)があるが、津波越流中に流れが潜越流に近い状態になり、堤防に対して流速場や作用する圧力の面から不利な状況にならなかったということも推察される。

以上見てきたように、映像資料や現地調査結果を総合することで、堤防越流時に生じていた流れの状態を考察し、個々の堤防の被災機構を詳細に分析できることがわかった。

図-6 映像中の堤防付近の地形と津波痕跡高

4. おわりに

本研究では、津波越流時に堤防周辺で生じる流体運動に着目して、水理実験と2011年東北津波の際に撮影された映像による分析を行った。

水理実験では、堤防を越流する流れの状態は、完全越流、不完全越流、潜越流の3種類に分類でき、それぞれの状態において、堤防周辺の流速場と堤防に作用する圧力の特徴が異なることがわかった。その結果、流速の速い流れによる堤防裏法面や裏法尻での洗掘、および、流れの湾曲が引き起こす堤防に作用する圧力低下による裏法被覆工の不安定化を防ぐ方策のひとつとして、流れの状態を完全越流から潜越流へと移行させるようにすればよいことを示すことができた。

映像の分析では、2011年東北津波で被害を受けた3つの場所において、津波越流時に堤防周辺で生じていた流れの状態を上記の分類に従って考察したところ、場所によって流れの状態が異なっていたことがわかった。映像で判明した流れの状態に加えて、現地調査で判明している堤防の被害状況や津波痕跡高、地形条件を考慮することで、個々の堤防の詳細な被災機構を論じることができた。今後もこれらの事例を増やし、津波越流と堤防被害について理解を深めていく必要がある。

謝辞：本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金・基盤(B) No.22404011(代表者：早稲田大学柴山知也)、特別研究員奨励費No.25・5164(代表者：三上貴仁)、および、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「減災研究の国際展開のための災害研究基盤の形成」(代表者：柴山知也)により行われたことを付記する。

参 考 文 献

青森県(2003): 下北八戸沿岸海岸保全基本計画, p. 55, <http://www.pref.aomori.lg.jp/kotsu/build/aomorikaiganhozen.html>, 参照2013-05-16.

岩手県津波防災技術専門委員会(2011): 漁港海岸の被害状況及び考察等, 第2回専門委員会資料, http://www.pref.iwate.jp/~hp0212/fukkou_net/tsunamibousai_02_01.html, 参照2013-05-16.

大井邦昭・林 建二郎・河野茂樹(2012): 津波越流に対する海岸堤防及び防波堤の強化に関する実験的研究, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 68, No. 2, pp. I_96-I_101.

笠間清伸(2011): 東北地方太平洋沖地震における複合地盤災害について, 第3回福岡市技術研究発表会発表資料, <http://www.city.fukuoka.lg.jp/zaisei/gijutsukanri/business/gijutu>

kanribuHP/jinzaiikusei/happyoukai_2_2.html, 参照2013-05-16.

加藤史訓・稲垣茂樹・福濱方哉(2005): 津波により海岸堤防に作用する波力に関する大型模型実験, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 756-760.

加藤史訓・野口賢二・諏訪義雄・木村 晃・河合雅史・高木利光・小俣雅志(2012): 東北地方太平洋沖地震津波による仙台平野南部での海岸堤防被災・洗掘に関する調査, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_1396-I_1400.

小竹康夫・磯部雅彦(2012): 津波の越流時に海岸堤防の法面に作用する圧力特性に関する実験的研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_891-I_895.

後藤仁志・酒井哲郎・林 稔・織田晃治・五十里洋行(2002): 遡上津波の戻り流れによる護岸法先洗掘のグッドレス解析, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 46-50.

首藤伸夫(1999): 津波による海岸堤防・護岸の被災—昭和8年三陸大津波から昭和35年チリ津波まで—, 津波工学研究報告, 第16号, pp. 1-37.

谷本隆介・常田賢一・北川秀彦・荒木進歩(2012): 津波に対する盛土の耐侵食性および落堀構造の減勢特性の検証, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_316-I_320.

デーリー東北新聞社(2011): 検証・東日本大震災「大津波襲来」(3) 八戸市市川町, おいらせ町川口, http://cgi.daily-tohoku.co.jp/cgi-bin/web_kikaku/m9_shinsai/ootunami/ootunami_03.htm, 参照2013-05-16.

東北地方整備局河川部地域河川課(2011): 青森県の河川・海岸堤防の復旧状況について, 個性の大地, 第36号, p. 10, <http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/b00037/k00290/river-hp/kasen/kosei/log.html>, 参照2013-05-16.

東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ(2012): 統一データセット (release 20121229), <http://www.coastal.jp/tjt/>.

富永数男・中野 晋・天羽誠二(2007): 海岸堤防に作用する段波津波の実験, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 826-830.

中尾秀之・佐藤慎司・Harry YEH(2012): 津波の越流による海岸堤防の破壊メカニズムに関する研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_281-I_285.

西村仁嗣・堀川清司(1979): 遡上津波の戻り流れによる護岸法先の洗掘, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 210-214.

野口賢二・佐藤慎司・田中茂信(1997): 津波遡上による護岸越流および前面洗掘の大規模模型実験, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 296-300.

鳩貝 聡・諏訪義雄・加藤史訓(2012): 津波の越流による海岸堤防の裏法尻の洗掘に関する水理模型実験, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_406-I_410.

復興庁(2012): 公共インフラに係る復興施策, <http://www.reconstruction.go.jp/topics/post-43.html>, 参照2013-05-16.

本間 仁(1940): 低溢流堰堤の流量係数(第一編), 土木学会誌, 第26巻, 第6号, pp. 635-645.

M. A. Hamzah・間瀬 肇・高山知司・藤木繁男(2000): 海岸堤防に作用する津波力の実験と数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 371-375.