沿岸湖沼に突入する津波による 地形変化に関する水理実験

三戸部 佑太¹・今井 健太郎²・平川 雄太³・会田 俊介⁴・高橋 智幸⁵

¹正会員 東北大学 大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

E-mail: y_mitobe@kasen.civil.tohoku.ac.jp

²正会員 海洋研究開発機構 (〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25)

E-mail: imaik@jamstec.go.jp

³学生会員 東北大学 大学院工学研究科 (〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

E-mail: hirakawa@tsunami2.civil.tohoku.ac.jp

⁴正会員 東北大学 大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

E-mail: s_aita@m.tohoku.ac.jp

⁵正会員 関西大学 社会安全学部 (〒569-1098 大阪府高槻市白梅町7-1)

E-mail: tomot@kansai-u.ac.jp

津波堆積物からの古津波規模の推定に際し津波外力に対する堆積・浸食パターンについての理解は不可欠であるが、現象の複雑さ・現地流況データ取得の困難さから不明瞭な点が多い。本研究は良好な保存状態の津波堆積物が採取される沿岸湖沼について津波による地形変化特性を明らかにすることを目的とし、移動床の水理実験を行った。

カラーパターン照明を用いた3次元表面形状画像計測法を適用し、湖沼模型に突入する段波によって生じる湖沼内の堆積・浸食分布を定量的に取得し、さらに津波の湖沼への流入部付近の流況・地形変化過程の詳細を側方からの動画撮影により観察した。津波による湖沼内の最大浸食深は越流継続時間に大きく依存し、また湖沼の初期水深によって浸食範囲および浸食域背後の堆積厚に大きな差異が生じることが明らかになった。

Key Words : tsunami, coastal lakes, movable-bed experiment, image measurement, tsunami deposit

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震津波の際に東北地方の沿岸域において大きな地形変化がもたらされたことは多くの調査・研究により明らかになっている。このような陸域を遡上する大規模な津波により運ばれた津波堆積物は、過去の津波の痕跡であり、その規模を推定するための貴重な資料となる¹⁾²⁾。津波堆積物から過去の津波の規模や発生時期を推定するため、津波堆積物の調査・年代測定技術の開発や津波による土砂輸送特性に関する研究など多くの研究活動が行われてきている。

本研究では津波によって生じる沿岸湖沼における地形変化についてその特性を検討するため、移動床の水理実験を行った。沿岸湖沼では良好な津波堆積物が取得されることが知られており、津波堆積物調査に適していると考えられている³⁾⁴⁾。しかしながら、津波により生じる土砂輸送過程については、現象の複雑さおよび実際の現地

での流況や地形変化過程を知ることが困難であるため、不明瞭な点が多く残されている。本研究では沿岸湖沼を対象として津波外力に対する堆積・浸食特性を把握し、その堆積および浸食量と津波外力の定量的な関係を明らかにすることを目的とする。

2. 実験方法

延長約17 m、幅30 cmの水平勾配水路においてゲート急開流れにより津波氾濫流を模擬して実験を行った(図-1)。固定床で作成した高さ15 cmの浜堤模型を水路中ほどに設置し、湖沼部分にあたる浜堤模型背後の水平床部を移動床(豊浦砂、粒径約0.2 mm)とした。本実験では模型縮尺を1/100とし、湖沼水深 D_p を2.5, 5.0 cmの2パターンに変化させて実験を行った。ただし、浜堤前後における水位は水路底面から12 cm(浜堤頂部との高低差: 3 cm)で一定とし、湖沼内部の底面高さを変えるこ

図-1 実験水路および底面画像計測用の機器設置位置

図-2 3次元表面形状画像計測法による底面形状計測の例。(a): 計測対象表面の様子(白色照明下), (b): カラーパターン照射時の撮影画像, (c): 計測した3次元座標。(c)の各点は(b)中の各カラードットの3次元座標であり, 色は高さを示している

表-1 実験条件

case	湖沼水深 D_p (cm)	貯留水深 H_u (cm)
1	2.5	30
2	2.5	35
3	2.5	40
4	5.0	30

とで水深を変更した。また, 上流端の貯留水深 H_u を30, 35, 40 cmとした3パターンで実験を行い, 外力の変化による地形変化過程の変化について検討した(表-1)。なお, 底面の粗度を移動床部と固定床部で一致させるため, 固定床部の表面には移動床と同じ砂を貼り付けている。

本実験では底面形状の計測にWatanabe et al.⁵⁾の提案する画像計測法を適用した。本手法はプロジェクターから照射したカラードットパターン照明の物体表面における反射光をデジタルカメラで撮影し, 各カラードットの物体表面上の3次元座標を取得する⁶⁾(図-1, 図-2参照)。本研究ではこの画像手法により実験前後における底面形状を高精度かつ面的に取得し, その実験前後における差から堆積・浸食量の空間分布を取得する。なお, 本計測法ではカメラおよびプロジェクターと計測対象表面の間に水面がある場合照明光および反射光の屈折により誤差を生じてしまうため, 実験後は水路から水を抜いた後に計測を実施した。また, 本実験でのカラーパターン照明の照射範囲は水路延長方向に40 cmであり, カメラおよ

びプロジェクターの設置位置を約40 cm間隔で上流側(図-1: P0)から下流側(P12)まで移動させることで移動床部分のほぼ全域について計測を行った。

流況の把握のため, 超音波水位計による水位計測(オムロン社製, 計測周波数50 Hz)を行った。また, 大きな地形変化が生じることが予想される浜堤背後における流況および堆積・浸食の時間発展をより詳細に観察するため, 側方から高速カメラ(ナックイメージテクノロジー社製, 撮影周波数100 Hz)により撮影を行った。

本実験では3次元表面形状計測法および超音波水位計による水位計測は各ケース3回ずつ, 高速カメラでの側方からの撮影は1回ずつ行った。

3. 結果

(1) 各貯留水深に対する浜堤の越流状況

まず貯留水深の異なるケースごとの湖沼内への入射外力の変化について把握するため, 浜堤頂部における越流状況の比較を行った。図-3は超音波水位計により取得した水位より求めた浜堤頂部の水深 d_{tp} の時系列であり, 貯留水深の異なる3つのケースの結果を示している。すべてのケースで同様な時間変化を示しており, その越流継続時間はおよそ12秒程度で貯留水深による大きな変化は見られなかった。一方で越流水深は貯留水深に応じて

大きくくなっている。波浪先端部を除き、越流流量は越流水深と浜堤形状によって決定されるため、貯留水深の違う各ケースでは湖沼に入射する流量が変化している。

(2) 堆積・浸食量の空間分布

図-4の上段は貯留水深 $H_u=35$ cm, 湖沼水深 $D_p=2.5$ cmとしたケース (case2) の浜堤直背後 (P0) における表面形状計測結果を示している。この計測結果をもとに1mm間

図-3 超音波水位計により取得した浜堤頂部における水深変化

図-4 case2 ($H_u=35$ cm, $D_p=2.5$ cm, P0) の実験前後における底面形状の画像計測結果 (上) および 1 mm 間隔格子上に線形補間した結果 (下)

隔の格子上に線形補間を行い (図-4下), その実験前後における差をとることで堆積・浸食量の水平分布を取得することができる (図-5)。この堆積・浸食量の空間分布についてP0-P12点までの結果を合成したものを図-6に示す。計測領域全体において水路横断方向にほぼ様な地形変化が生じており、浜堤直背後においてのみ大きく浸食が生じ、その背後では広範囲にわたって堆積傾向にあることがわかる。この堆積・浸食量の水平分布から水路横断方向の平均値を計算し、試行3回分についてプロットしたものを図-7に示す。浜堤直背後の最大浸食深および浸食範囲については試行毎のばらつきがなくほぼ同一の結果となっている。その背後の堆積量のピーク位置については若干のばらつきがみられるものの堆積層厚および概ねの堆積範囲は一致しており、再現性の良い結果が得られていることがわかる。そこで以下では堆積・浸食量の横断方向平均値の試行3回分の平均値をもとに、各ケース間での地形変化に見られる特徴の比較を行った。

図-8は各ケースで得られた堆積・浸食量の横断方向平均値の試行3回分の平均値を示している。実施したすべてのケースで浜堤直背後においてのみ浸食が生じ、その

図-5 底面形状計測結果から取得した堆積・浸食量の水平分布 (case2: $H_u=35$ cm, $D_p=2.5$ cm, P0)。堆積を正, 浸食を負としている

図-6 計測領域全体での堆積・侵食量の水平分布 (case2: $H_u=35$ cm, $D_p=2.5$ cm)。堆積を正, 浸食を負としている

図-7 堆積・浸食量の水路横断方向平均値の試行毎の比較 (case2: $H_u=35$ cm, $D_p=2.5$ cm)

図-8 堆積・侵食量の水路横断方向平均値のケース毎の比較

図-9 浜堤頂部の最大越流水深 d_{max} と侵食範囲の長さ L_e 、最大侵食深 D_e 、最大堆積高 D_d の関係 図-10 側方から撮影した流況及び地形変化の様子. case3: $H_u=40$ cm, $D_p=2.5$ cm

背後においては堆積が生じる同様な堆積・侵食パターンが確認された。湖沼水深 $D_p=2.5$ cm, 貯留水深 $H_u=30, 35, 40$ cm の3ケースで比較すると (図-9: 赤丸), 貯留水深が大きい, 即ち入射津波外力が大きいケースでは最大侵食深や侵食範囲が大きくなるが, その背後の堆積高はやや小さく広範囲に堆積が見られる。また, 湖沼水深 $D_p=5.0$ cm のケースでは最大侵食深はあまり変化しないが, 侵食範囲が小さく, また侵食範囲背後の堆積高が大きい。湖沼水深が大きいケースでは水路延長方向の湖沼底面流速の減衰が大きくなり, これにより侵食範囲が小さく, また侵食範囲直後の堆積高が大きくなるものと考えられる。

(3) 浜堤背後の侵食の時間発展

特に大きな地形変化が生じている浜堤背後についてより詳細に地形変化過程を捉えるため, 側方から撮影した動画像をもとに浜堤直背後における侵食の時間発展についてその詳細を観察した。

a) 浜堤背後の流況及び侵食過程の概要

図-10はcase3 ($H_u=35$ cm, $D_p=2.5$ cm) の浜堤直背後における側方からの撮影画像を示している。浜堤直背後では, 波の先端部が入射するとスプラッシュが生じ, この水塊が砂を巻き上げながら通過した後, 浜堤を流下して

図-11 撮影画像から取得した最大浸食深 D_e の時間変化

表-2 側方からの撮影画像から確認した水面の崩壊時刻. ただし, 時刻は浜堤の越流開始時刻を 0 としている

case	越流開始から水面崩壊までの時間 (s)
1	6.5
2	7.7
3	7.8
4	5.0

きた高速流により徐々に浸食が進展していく (図-10(b)(c)). 浜堤を越流する流量の減少および底面高さの低下により浜堤直背後では大きく水位が低下し, 下流側との水面勾配が大きくなることで上流側に向けて水面が崩落する (図-10(d)). これに伴い大量の砂が巻き上げられ, 水面が落ち着いた後徐々に再堆積し, 湖底形状が再構成される (図-10(e)). その後, 水路下流側端部からの反射波が到達するが, その際には大きな地形変化は生じない (図-10(f)). 本実験で行ったすべてのケースで同様な流況および地形変化過程が確認された. 湖沼における津波による地形変化過程は, 津波先端部の通過から越流流量の時間変化過程, 湖沼端部からの反射波など複雑な流況の変化に応じて時間的に大きく特徴が変化するものであるといえる.

b) 浸食深の時間変化

次に各ケースでの浸食量および浸食速度について比較するため, 側方からの撮影画像から0.5秒ごとの最大浸食深 D_e を抽出し, その時間変化を調べた (図-11). なお前述のように浜堤背後の水位低下により水面が崩落する際に大量の土砂を巻き上げるため, この間は底面の判別が困難であり, データは欠測としている.

すべてのケースで越流開始直後から指数関数的に浸食深が増加し, その後, 欠測箇所, すなわち水面の崩落が生じた後は, 巻き上げられた砂の再堆積により減少もしくは横ばいとなっている. 水面崩壊までの経過時間はケースごとに異なるものの, 水面崩壊前の浸食深の時間変化はすべてのケースでほぼ一致している. したがって, 水面崩壊までの時間の差異が各ケースでの浸食量の違いを生じている.

今井ら⁷⁾は本実験の初期条件と同条件の固定床実験における底面近傍流速の計測を行っている. その結果, 浜

図-12 各ケースの水面崩壊開始時の様子

堤背後においては貯留水深 H_u の増加に応じて高流速の継続時間が長くなる一方で, 流速の大きさにはほとんど差が生じないことを示している. この水理特性は, 越流後初期の浸食深の時間変化過程に貯留水深による差が見られなかった上述の浸食過程の特徴を説明している.

水面崩壊までの時間は湖沼水深が小さいケースでは短く, また貯留水深の大きいケースで長い傾向がある (表-2). ここで前述のように貯留水深の異なる3ケースでの浜堤頂部における水深の時系列 (図-3) から, 貯留水深による越流継続時間にはほぼ差はみられないが, 貯留水深の大きさに応じて越流水深が大きくなることがわかる. したがって強い流勢の継続時間は貯留水深に応じて長くなるため, 貯留水深, すなわち入射外力の大きいケースでは水面の上流側へ向けた崩落が生じにくく, より長時間にわたって浸食が生じることで, 最終的な浸食量が大きくなる. 一方, 貯留水深が等しく湖沼水深が異なるケースでは, 越流過程には差は生じないはずである. 浜堤直背後においてはフロント部の通過後は射流が生じ (図-10(c)参照), その水深は越流流量と浜堤の高さ・形状に依存する. したがって, 湖沼の静水位に対して相対的に底面が低くなる湖沼水深の大きいケースでは, 下流側の水位に対して相対的に浜堤直背後の水位が低く, 大きな水位差が生じる (図-12). このことが, 短い越流後の経過時間で水面崩壊に至り, 最終的な浸食量が小さくなる要因であると考えられる.

(4) まとめ

堆積・浸食量分布の計測結果から、湖沼水深が浅く、入射外力が大きいほど、広範囲に薄い堆積層が形成されることが明らかになった。浅い湖沼水深および大きな入射外力ではより大きな掃流力が生じ、これにより砂が輸送されやすくなることで薄く広範囲に堆積が生じるものであるといえる。

また、前節における検討から、津波により沿岸湖沼に生じる浸食量は浜堤を越流する津波による高流速流れの継続時間に大きく依存することが明らかになった。このことは津波規模と湖沼地形変化量の定量的な関係を議論していく上で、津波の高さだけではなく、津波周期についても十分な検討を行う必要があることを示している。湖沼水深や津波周期と地形変化量の定量的な関係を明らかにしていくことは今後の重要な課題である。

4. おわりに

本研究では津波により沿岸湖沼内に生じる地形変化を対象に水理実験を行った。本実験で適用した3次元表面形状画像計測法により取得した地形変化前後の表面形状を比較することで広範囲の堆積・浸食量の空間分布を取得可能であり、この手法による堆積・浸食量の水平分布と側方から撮影した動画の解析により、入射外力や湖沼水深による地形変化過程への影響を明らかにした。しかしながら、本実験ではケース数も少なく、また入射波浪の周期や湖沼端部での反射率など考慮していない要素が多く存在している。津波規模と沿岸湖沼における地形

変化量の定量的な関係を明らかにするためには、入射波浪の周期や湖沼形状を変えた多様な詳細な実験を今後行っていくことは必要不可欠である。

謝辞：本研究は原子力規制庁委託事業業務（代表：高橋智幸，課題名：津波堆積物に基づく津波波源推定手法の開発）の成果の一部である。ここに記して関係者各位に深甚なる謝意を示します。

参考文献

- 1) 西村裕一：津波堆積物の時空間分布に基づく古地震の調査研究，地震 第2輯，第61巻，特別号，pp.S497-S508，2009.
- 2) 菅原大助：津波堆積物と津波の規模について，地学雑誌，Vol. 123，No.6，pp.797-812，2014.
- 3) 箕浦幸治，中谷周，佐藤裕：湖沼底質堆積物中に記録された地震津波の痕跡—青森県市浦村十三付近の湖沼系の例—，地震 第2輯，第40巻，pp.183-196，1987.
- 4) 澤井祐紀：地層中に存在する古津波堆積物の調査，地質学雑誌，第118巻，第9号，pp.535-558，2012.
- 5) Watanabe, Y., Mitobe, Y., and Oshima, K.: Imaging Technique for Measuring Wave Surface Shapes, *Coastal Engineering Journal*, Vol. 53, No.4, pp.549-565, 2011.
- 6) 渡部靖憲，三戸部佑太：固体・液体表面の3次元表面形状計測法の開発，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.65，No.1，pp.1466-1470，2009.
- 7) 今井健太郎，平川雄太，会田俊介，三戸部佑太，高橋智幸，今村文彦：沿岸湖沼に突入する津波の水理特性に関する実験的検討，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 71，No.2，2015（印刷中）。

(2015.3.18 受付)

EXPERIMENT ON MORPHOLOGICAL CHANGES IN COASTAL LAKES INDUCED BY TSUNAMI INTRUSION

Yuta MITOBE, Kentaro IMAI, Yuta HIRAKAWA, Shunsuke AITA and Tomoyuki
TAKAHASHI

Understanding of characteristics of morphology change induced by tsunamis is necessary for estimation of magnitudes of historical tsunamis. In this study, morphology change in coastal lakes caused by tsunami intrusion is discussed through a hydraulic model experiment. A horizontal open channel with 1/100 model of a coastal lake was used for a movable bed experiment. Temporal variation of bed shapes under dam-break flow is extracted from video images recorded from the side by a high-speed camera. And three dimensional bed shapes before and after the experiment are measured by an image measurement technique to get horizontal distributions of bed level changes. In this technique, object surfaces under color dot illumination from a PC projector are recorded by a digital camera, and three-dimensional coordinates of the color dots reflected on the surfaces are determined with geometrical relationship between the camera and the projector.

Local scour was developed around seaward end of the lake model by the dam-break flow in all cases. While the erosion was limited in the area near the seaward end of the lake, deposition was observed in wider area behind the scour. With higher wave condition, the scour behind the mound was deeper and wider. While the deposition area behind the scour was also wider with the higher waves, maximum thickness of the deposit layer was smaller. It is found that a rate of increase of the scour depth is almost same among the cases with different wave conditions and hence duration of higher velocity is more important factor to increase the scour depth.