

①-5 河川津波に対する河川堤防等の被災軽減に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 24～平 27

担当チーム：水工研究グループ（水理）

研究担当者：箱石憲昭、石神孝之、坂野章

【要旨】

東日本大震災においては、海岸部の被害だけでなく、河川を遡上・流下した津波（河川津波）によって、河川堤防等及び沿川流域で甚大な被害が生じ、今後の河川管理においては、洪水や高潮だけでなく津波を計画的防御の対象として位置づける必要性が指摘された。本研究は、河川津波を設計外力とした場合の河川堤防等の効果的・効率的な対応策について水理的に検討することを目的とし本年度から開始された。本年度は、現地被災状況の分析を行い、津波実験（実験装置製作、予備実験）を開始した。

キーワード：津波、河川遡上、河川堤防、被害、設計外力、対策、段波、水理実験

1. はじめに

先の東日本大震災では、海岸部の被害だけでなく、河川を遡上・流下した津波（河川津波）によって、河川堤防等及び沿川流域で甚大な被害が生じた。河川津波は、高流速・高水位で短時間に急変する特性を有し、河道内では「押し波流れ」だけでなく「引き波流れ」等が生じる。この流れによって漂流物等が河川構造物等に集積して、水位せきあげが増大し氾濫被害を助長したと考えられる。これらに鑑み、今後の河川管理においては、洪水や高潮だけでなく津波を計画的防御の対象として位置づける必要性が指摘されるとともに¹⁾、津波に対応した堰・水門等の設計や操作のあり方等についての基本的な考え方が示された²⁾。

本研究は、河川津波を設計外力とした場合の河川堤防等の効果的・効率的な対応策について水理的に検討することを目的とする。

2. 検討方法

本研究を進めるに当たり、先ず東日本大震災における河川被害に関する情報の収集・分析を行い、また河川津波に関する文献調査等の机上検討を行った。これらの結果を受けて予備実験を行い、河川津波の水理実験における実現象の再現性として重要な要素や、そのための適切な実験装置の諸元や実験条件等について試行錯誤的に検討した。

2.1 河川津波による河川被害

東日本大震災における河川堤防と護岸の被害の特徴として、国土技術政策総合研究所では、新北上川、鳴瀬川、名取川、阿武隈川を対象に

報告している³⁾。これによると、①破堤被災、②土堤部の越水被災、③越水しない箇所での堤防表のり面侵食被災、④護岸被災、⑤流送物の衝突による被災に大きく分類されることが示されている。護岸被災の内高水護岸の被災形態については、水門に接続する護岸ブロックのめくれ上がり・流失であった（写真.1）。また低水護岸については、湾曲外岸部における捨石工等の打ち上げが見られ、湾曲部の津波の挙動については、水位のみでなく、構造物の安定性に関わる流体力の観点からの検討の必要性が指摘された。

写真.2 は、北上川の北上大橋近傍の状況であり、流木集積が顕著であるが、流木の向きが必ずしも一方向ではないことも確認できる。幹の長い流木は根の部分を上流にして流れに平行となることが多い⁵⁾ことを鑑みると、「押し波流れ」だけでなく「引き波流れ」の流体力を受け



写真.1 北上川（2.0k 左岸 月浜第一水門左岸） 写真は参考文献3）より引用）

たことが容易に推定できる。また、写真.3 は、五戸川の 1.5k 左岸付近の堤防が破堤した状況を示したものであり、破堤開口部の洗掘形状が下流に向いていることが確認できる。破堤開口部と洗掘の形状は下流方向に長く伸びることが一般的である⁶⁾ことから、河川の順流と同一方向の「引き波流れ」に伴う流れが卓越した結果と考えられる。

2.2 水理実験の必要性

既存の津波に関する研究については、海岸堤防や防波堤に関するものがほとんどで、津波が河川内に侵入し遡上する現象を対象としたものは少ない。これは海岸部分と河川部分では被害の頻度や規模等の特性に違いがあるだけでなく、これまでの河川管理においては、津波を計画的防御の対象にしていなかったことが大きな理由である。また、津波が河川に流入した場合の局所的な現象は複雑であり、数値解析では再現が困難であるという研究的側面もあると考え

られる。一般に孤立波である津波は、波長が極めて長く規模も大きいので、その波形は普通重力波とは異なり段波的である。その津波が河川を遡上するとよりいっそう段波状となり、条件によっては分裂して波状段波となる⁷⁾。その波状段波が発達しながら河川に遡上して砕波すると衝撃的に大きな砕波圧が発生することが指摘されている⁸⁾。河川部分では、海洋～海岸の部分に比較して、水深、水面幅、平面形、河床面抵抗等が空間的に急変するため、津波状況が著しく複雑さを増してくると考えられる。先の東日本大震災等で津波遡上高が、河川によって大きく異なり、同一河川の同一断面でも左右岸で被害の程度も大きく異なっていたこと、「押し波流れ」だけでなく「引き波流れ」による影響の大きさ等は、まさに津波が河川に侵入した場合の複雑さを如実に示した結果である。

以上の背景の下に、河川津波に関して水理的



写真.2 北上川（3.7k 右岸 北上大橋 写真は参考文献4）より引用）



写真.3 五戸川（1.5k 左岸堤防破堤 写真は参考文献4）より引用

検討の一環として水理実験を実施した。

2.3 実験方法

前述のような津波の全体を模型上で再現することは規模的に不可能であるため、対象とする構造物や現象にとって支配的と考えられる要素に絞った条件で実験することになる。

本検討で対象とする構造物は、堰、水門、護岸、堤防（土堤）等であるが、土堤以外の構造物自体の被災例では構造物周辺での変形（河床洗掘等）はあまり大きくなかったことから、これらの剛的な構造物に対しては、主に津波の衝撃的な力が直接的に作用して被災したものと考えた。一方、構造物周辺の河床や土堤等の柔的な構造物については、作用する衝撃力は剛的な構造物より小さい（柔的な構造物の場合、力積は同一でも作用時間が長いため、作用する衝撃力は剛的な構造物より小さくなる）ことから、主に持続的な力を支配的と考えた。

上記の考え
方に基づくと、
まず津波段波
～分裂（波状
段波）～砕波
までの部分を
対象に再現す
る必要があり、
「ゲート急開
方式」によっ
て津波段波を
発生させ、そ

の波状段波への遷移状況を把握することとした。

検討に用いた実験施設は、図.1 に示す、幅 1.5m、長さ 49mの二次元水路部分とゲートによって仕切られた貯水槽（幅 1.5m、長さ 15m）部分からなるコンクリート製のものである。ゲートはコンプレッサーによって上げられる方式とし、水路縦段勾配はレベル、水路高は 0.8mである。実験方法は、まず貯水槽水深 h_1 と静水深 h_0 を所定条件に設定後、ゲートの急開（引上げ上昇速度 $\approx 0.6\text{m/s}$ ）によって水路内に段波を入射させ、段波の伝播状況を把握した。実験は、 h_0 が 4 種類、 Δh (h_0 と h_1 の差) が 4 種類の組合せの 14 ケースを対象に、段波の分散状況や段波形態（砕波段波 or 波状段波）の観察及び固定点（水路幅中央の 4 箇所）における津波高の時系列変化を測定した（容量式波高計による測定、100Hz でサンプリング）。

3. 検討結果

3.1 段波形態の分類

水路内における段波特性として、水位差 Δh と静水深 h_0 の関係を示したものが図.2 である。同図は、入射した段波が分散せずに段波先端が砕波して伝播する状態を「砕波段波」、入射した段波がいくつもの波に分散して波状になって伝播する状態を「波状段波」、分散した波状段波の第 1 波が砕波した状態を「波状段波+砕波段波」として、各ケースの状況がどの状態に対応しているか目視によって判断したものである。これより、 $\Delta h \approx h_0$ （水位差 Δh が静水深 h_0 相当になる条件）を境に「砕波段波」と「波状段波」の領域に分かれる傾向があり、 $\Delta h \approx h_0$ 近傍では「波状段波+砕波段波」となる。また図.3 は $x=9\text{m}$ 地点（ゲートから 9m の地点）での最大津波高 η と水位差 Δh の関係について示したものである。なお、津波高 η は、図.4 に示すように、波状段波では第 1 波の静水面からの高さとし、その他の状態の段波では静水面からの最大高さとし

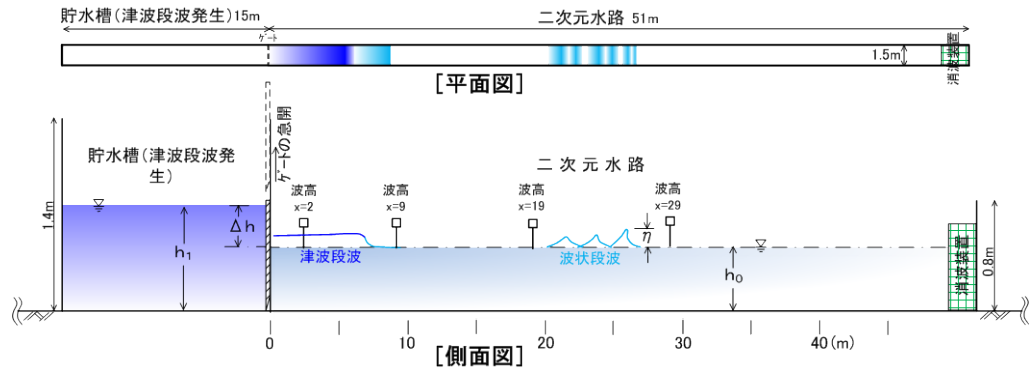


図.1 実験水路概要図

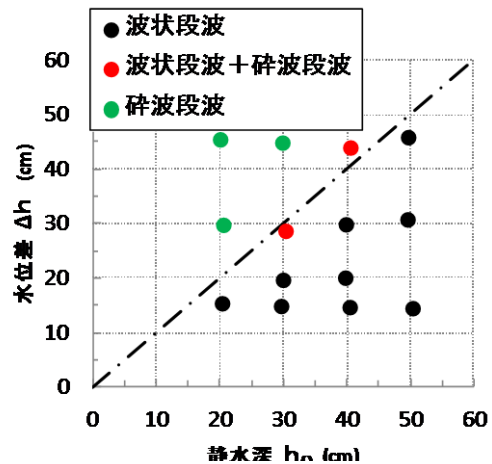


図.2 h_0 と Δh の関係

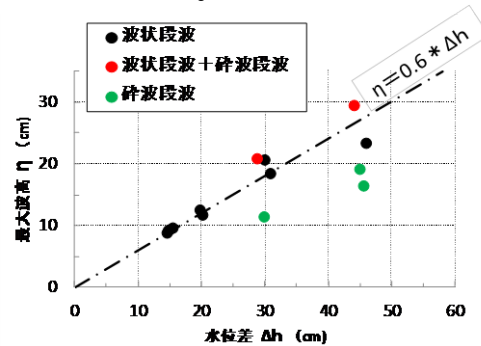


図.3 Δh と η の関係 ($x=9\text{m}$ 地点)

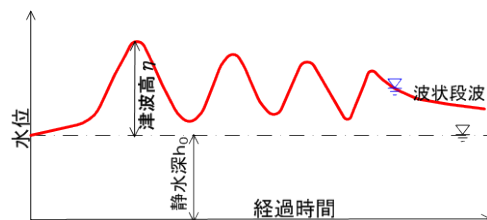


図.4 津波高 η の定義

定義した。図.3 より、いずれの段波形態においても水位差 Δh と津波高 η の相関は高く、波状段波の津波高 η は水位差 Δh の 6 割程度である。

3.2 波高の時空間変化特性

水路内の4箇所（ゲートからの伝播距離 $x=2\text{m}$ 、 9m 、 19m 、 29m ）における水位の時系列変化をケース別に示したものが図.5である。比較したケースは、水位差 $\Delta h=15\text{cm}$ の一定で、静水深 $h_0=30\text{cm}$ 、 40cm 、 50cm の3種類の条件を有する。いずれのケースにおいても、 $x=2\text{m}$ 地点では段波はほとんど分散していないが、

$x=9\text{m}$ 、 19m 、 29m の各箇所では段波がいくつかの波に分散し、分散第1波は入射波より波高が高くなっている。

分散波の波高と周期の時間的变化は、いずれのケース及び箇所においても第1波が最大で第2波以降は徐々に縮小する傾向が見られる。また、分散波の波高と周期の空間的变化については、いずれのケースでも第1波が波高・周期の最大を示し、分散波全てが伝播に伴って徐々に拡大する傾向が見られる。さらに、静水深の浅いケース1の伝播距離が長い $x=29\text{m}$ 地点では、他のケースと比較して、津波高が高く分散波の波数が多い。以上のことから、水深の浅い河川等に津波が侵入し遡上した場合、分散した波は伝播距離に伴ってさらに発達する可能性が高いため、河川構造物近傍での碎波を想定すると、碎波衝撃圧等によって構造物被災の危険性がさらに高まることが容易に推測される。

3.3 河川津波の設計荷重に関する概略検討

今後、堰や水門等についての設計外力として河川津波を想定する必要がある。これまでに河川下流部の防潮水門等の設計に適用した事例を収集し、門扉にかかる津波の算定式について概略比較検討した。

静水深 $h_0=4\text{m}$ 、水門高 $H_1=4.5\text{m}$ 、津波高（静水面からの高さ） $H_0=9\text{m}$ 、 7m 、 5m の条件で、4つの算定式（アルミ合金製水門設計製作指針案、サフル・広井式、合田式、谷本らの式）の結果の比較を図.6に示す。

同図より、算定式によるバラツキが非常に大

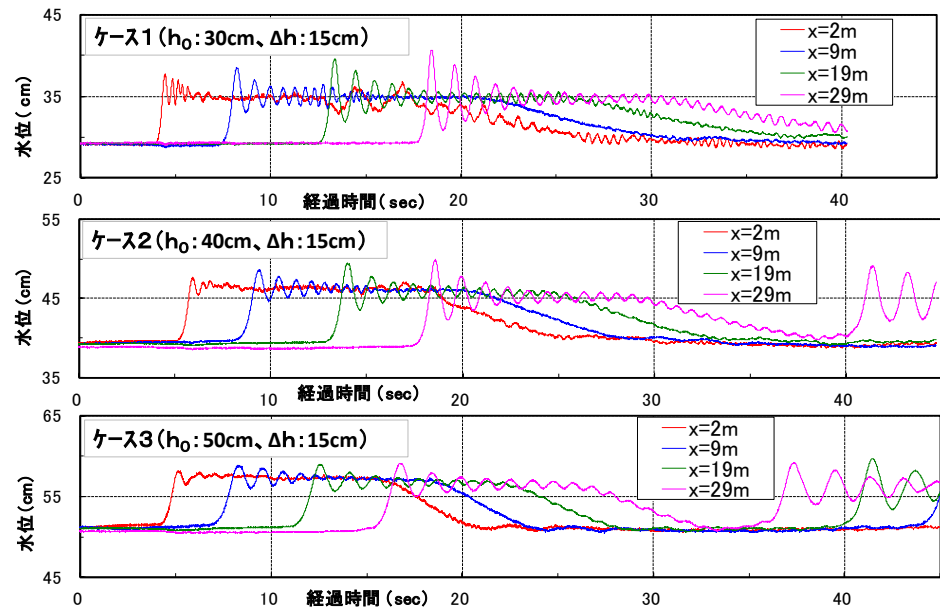


図.5 水位の時間変化（ケース別、場所別）

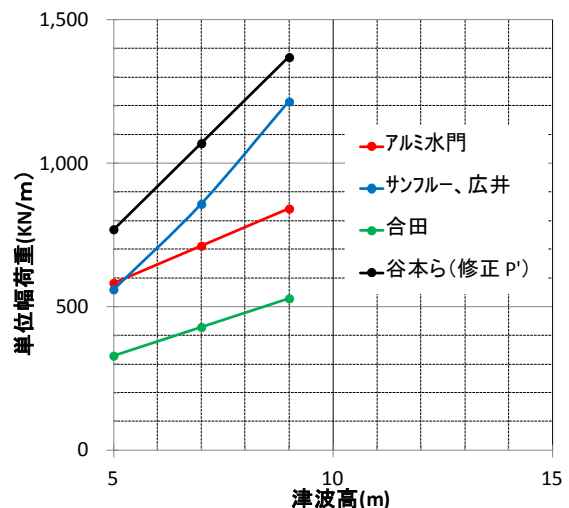


図.6 波圧算定式の比較

きく、谷本らの式は、防波堤等の港湾施設で採用されており他の式より値が大きく、河川津波への適用性については検討する必要があると考えられる。

アルミ水門式（アルミ合金製水門設計製作指針案）については、運動量の保存から求まる力を波力とし、適用事例のほとんど（6事例/9事例）がこの式を採用している。ただしこの式は「流速＝津波の波速」として求めたものであり、河道条件や水門等の条件に対応した流況を充分に考慮したものではないと考えられる。

サフル・広井および合田の式は、通常の波（周期性を有する普通重力波）の波力に基づいたものを、そのまま孤立波である津波へ適用したものであるため、河川津波への適用性については

検討する必要があると考えられる。

以上の各算定式は、水門扉が完全に閉じた条件下でのものであり、水門扉の途中開度時における波圧や周辺河道への影響等についても指摘²⁾されていること等を考慮すると従来の算定式だけでは不十分と考えられる。これらより、種々の条件下（水深、門扉開度、津波条件等）において、波高や波圧等の時間空間分布を把握する水理実験の必要性が高いと考えられる。

4. おわりに

本検討はまだ緒についた段階であるが、津波が河川に侵入遡上すると波の分散が砕波するまで発達する可能性が高いことを実験的に確認した。堤防河岸や堰等の設計外力としての津波は、津波の変形を考慮する必要性が高いと考えられる。

参考文献

- 1) 河川津波対策検討会：河川への遡上津波対策に関する緊急提言(案)、2011. 8.
- 2) 東北地方太平洋沖地震を踏まえた河口堰・水門等技術検討委員会：東日本大震災を踏まえた堰・水門等の設計、操作のあり方について、2011. 9.
- 3) 国土技術政策総合研究所、独立行政法人 土木研究所：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、pp. 305－341、国総研資料第 646 号、土研資料第 4202 号、2011. 7.
- 4) 河川津波対策検討会：河川流域における津波被害状況、第 1 回配付資料 2、2011. 7.
- 5) 国土交通省土木研究所：平成 10 年 8 月末豪雨による福島県・栃木県豪雨災害現地調査報告書、土木研究所資料 3793 号、86p.（2001. 3）.
- 6) 坂野章：樹林帯による破堤後の減災効果に関する検討、国総研河川研究室資料、2002. 3
- 7) 福井ら：津波の研究（Ⅰ）一段波津波の波速について一、海岸工学講演会講演集、第 9 回、pp. 44-49、1962.
- 8) 安田ら：ソリトン分裂津波の変形と波力特性に関する実験的検討、海岸工学論文集、第 53 巻、pp. 256-260、2006.

STUDY ON DISASTER MITIGATION SUCH AS LEVEE AGAINST THE RIVER TUNAMI

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2012-2015

Research Team : River and Dam Hydraulic
Engineering Research Team

Author : HAKOISHI Noriaki

ISHIGAMI Takayuki

SAKANO Akira

Abstract : In response to the previous East-Japan large earthquake disaster, the necessity of positioning a flood or not only the storm surge but tsunami as an object of planned countermeasure was pointed out in future river management. This study is intended to examine the effective damage control such as river structures at having assumed a river tsunami design external force. In case we advanced this research, we performed first collection and analysis of the information about the river damage in an East-Japan large earthquake disaster. Moreover, the reserve experiment was performed in response to these results. The reappearance of an actual phenomenon in hydraulic experiment of river tsunami was examined by these.

Key words : tsunami, river going up, levee, damage, design external force, countermeasure, surge, hydraulic experiment