

遊水地による津波の河川遡上低減効果 に関する水理実験

A HYDRAULIC EXPERIMENT ON EFFECTS ON RIVER RUN-UP A TSUNAMI REDUCTION BY A RETARDING BASIN

矢野 雅昭¹・吉川 泰弘²・平井 康幸³・田中 茂信⁴

Masaaki YANO, Yasuhiro YOSHIKAWA, Yasuyuki HIRAI and Shigenobu TANAKA

¹正会員 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム (〒062-7602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 工修 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-7602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

³正会員 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-7602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

⁴正会員 博 (工) (独) 土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター 水災害研究グループ長
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

This study proposes a retarding basin to be constructed at a downstream site of a river to allow tsunamis to flow through side-spill weirs into the retarding basin, lowering the wave height and energy as a measure of preventing river run-up during a tsunami. In order to demonstrate an effect of a retarding basin, a hydraulic model experiment was conducted. The river chosen for the experiment runs through Banda Aceh, an area devastated by the earthquake in the Indian Ocean of Sumatra. A model of the river was created on a vertical scale of 1:50 and a horizontal scale of 1:600. As a result, the retarding basin reduced the height of the tsunami by 1.5 cm (0.75 m full scale) at the point of 1.2 m upstream from the retarding basin (720 m full scale). It could also delay the arrival time of the tsunami by up to 0.35 seconds (30 seconds full scale). The duration of the tsunami's high water level was reduced by up to 1.6 seconds (136 seconds full scale). And these reduction effects are proportional to amount of water flowed into the retarding basin.

Key Words : tsunami run up ; retarding basin ; hydraulic experiment

1. はじめに

2011年3月11日に三陸沖を震源とするマグニチュード9.0の東北地方太平洋沖地震と、これに伴う津波が発生し、東北地方の太平洋沿岸に、死者・行方不明者2万4千人以上、建物全壊・半壊被害12万4千軒以上など甚大な被害をもたらした¹⁾。この津波の規模は、痕跡調査により、浸水高が最大18mになる非常に大きなものであったと考えられている²⁾。また、ここ数年では、太平洋、インド洋に面する国々でも津波の被害があった。2004年スマトラ島沖地震では、アジア、アフリカ地域12カ国に被害を及ぼし、20万人以上が死者、行方不明者となり、230万人が被害を受けたといわれている³⁾。特にインドネシアのスマトラ島北部に位置する都市のバンダ・アチェでは、11万人の命が犠牲となり、70万人が家を失う甚大な被害であった⁴⁾。これらの津波被害では、ライフラインとして重要な橋梁が多数破壊されている^{5,6)}。

津波対策の一つとして、防波堤を海岸に設置することが考えられる。河川を遡上する津波においては、一つの波峰が多数の波に分裂する分散波列（あるいはソリトン分裂）により波高が増大することや^{7) 8)}、波高と漂流物の速度に相関のあることが指摘されている⁹⁾。そのため、波高が増大した津波が落橋被害や漂流物による橋の損傷を助長することも考えられる。また、陸上を遡上する津波よりも伝播が速く、河川堤防が脆弱な場合、河道を遡上した津波が先行して被害を及ぼす可能性がある。このような河川を遡上する津波対策として、落橋防止措置を施す他に、より効果的な対策として、津波自体の波高を減少させることが考えられる。波高を低減できれば、津波の遡上速度も遅延できることが考えられ、より多くの避難時間を得ることができる。しかし、このような対策を検討した研究は十分には行われていない。

本研究の目的は、河川を遡上する津波対策として、河道下流部に遊水地を設け、遡上する津波を横越流させ、波高とエネルギーを減少させる対策を提案し、水理実験

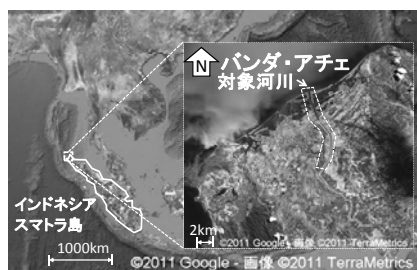


図-1 対象河川箇所図 (Google Mapに加筆)

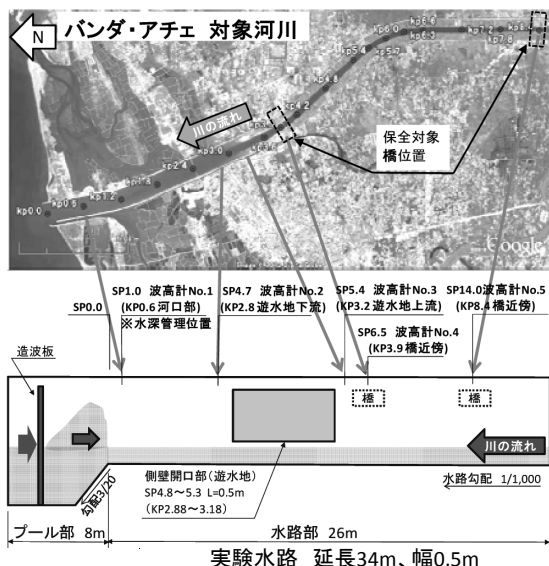


図-2 実験水路概要

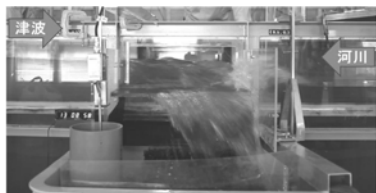


写真-1 水路を遡上する津波の開口部からの横越流状況

により、その効果の検討を行うことである。なお本研究の水理実験は、東北地方太平洋沖地震が起きる以前の2011年1、2月に実施したものである。

2. 水理実験

(1) 対象河川

本実験では、図-1に記すスマトラ島北部の都市バンダ・アチェ東部に位置する河川を対象とし、実際の橋梁位置を基に、実験水路上での遊水地位置、水位測定地点の設定を行った。対象河川の河道幅、保全対象とする橋梁位置を、Google Mapにより概略で把握した。その結果、堤防間の距離は約300mであり、低水路幅、片岸の高水敷幅は約100mであった。また、保全対象の橋梁は、河川兩岸の市街地を結ぶKP3.9付近の橋梁と、その一つ上流のKP8.4付近の橋梁とした。なおKP（キロポスト）とは、河口からの距離で単位はkmである。

2004年スマトラ島沖地震において、バンダ・アチェに

襲来した津波高は海岸で6～12mであり、海岸から1.0～1.5km内陸の市街地で4～5m程度であったことが確認されている¹⁰⁾。このため本実験では、対象河川のKP3.9付近の橋梁位置に、最大5mの津波が襲来する場合を想定した。

(2) 実験水路と縮尺

実験に用いた水路を図-2に示す。水路は、全長34m、水路幅0.5mであり、水路部26m、下流端のプール部8mで構成され、水路勾配は1/1,000とした。実験水路における縦断方向の基準点は、プール部と水路部の境界とし、この基準点から上流方向の距離をSP（単位：m）とした。

実験水路における遊水地は、水路を遡上する津波が、水路側壁に開口部がある区間（以下、遊水地）を通過し、横越流させることで再現した（写真-1）。遊水地の位置は、実験水路上での保全対象の橋梁位置SP6.5（KP3.9）の下流とし、実験水路の鋼製骨組を回避し、設置区間SP4.8（KP2.88）～SP5.3（KP3.18）の延長0.5m（実物延長300m）とした。実験水路における津波の造波は、プール部で造波板を押し出すことで行った（図-2）。また、遊水地への越流水は、実験水路外の水槽（内寸 幅0.78×奥行0.54×高0.48m）に貯留し、水槽内の波高計でその量を計測した。なお、実験水路の側壁高は、遡上する津波が越流しない高さである。

実験水路の水平方向の縮尺は、水路の幅が0.5mであり、対象河川の堤防間の幅が約300mであることから、 $\lambda_{xy} = 0.5m \div 300m = 1/600$ となる。一方、鉛直方向の縮尺は、1/600では水深が小さく、粘性の影響が大きくなり、正確な結果が得られないことが考えられる。そのため、鉛直・水平方向の縮尺が異なる歪み模型とした。実験水路上の保全対象の橋梁位置SP6.5に造波できる最大波高は0.1m程度であり、これを本実験の最大の津波規模条件の波高5mに対応させると、鉛直方向の縮尺は $\lambda_z = 0.1 \div 5.0m = 1/50$ となる。津波のフルード数は式（1）（2）に示すとおり¹¹⁾、平常潮位を基準とした津波による海面変動と水深の比率で表される。つまり、鉛直方向の縮尺を満たせば、津波のフルード数を満たすことになる。

$$v = \frac{c\eta}{h} = \eta \sqrt{\frac{g}{h}}, \quad C = \sqrt{gh} \quad (1), \quad F_r = \frac{v}{\sqrt{gh}} = \frac{\eta \sqrt{\frac{g}{h}}}{\sqrt{gh}} = \frac{\eta}{h} \quad (2)$$

v : 流速, C : 波速, g : 重力加速度, η : 平常潮位基準での津波による海面変動, h : 水深, F_r : フルード数

(4) 測定項目

水理実験における測定項目は水路内及び水槽の時系列水位とし、波高計（KENEK CHT4-60、測定精度 $\pm 3.5mm$ ）により測定した。測定間隔は、波高計の最小測定間隔の0.05秒とした。波高計による水位測定地点は、水深の実験条件を管理する位置SP1.0（KP0.6）、保全対象の橋梁位置SP6.5（KP3.9）、SP14.0（KP8.4）、遊水地上下流SP4.7（KP2.88）、SP5.4（KP3.18）、越流水を貯留する

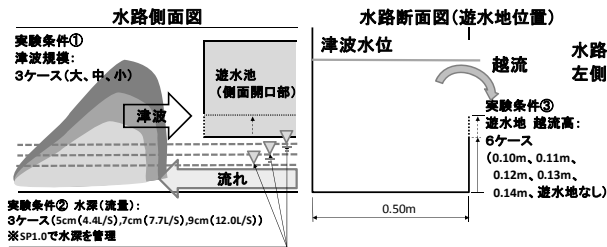


図-3 実験条件

水槽内の合計6箇所とした。なお、全ての波高計の測定値は、SP1.0における水路床を基準点とした値である。

(5) 実験条件

実験条件は、①津波規模3ケース（大、中、小）、②水路の水深3ケース（5cm、7cm、9cm）、③水路床から遊水地の越流高が異なる6ケース（10cm、11cm、12cm、13cm、14cm、越流なし）を組み合わせ、合計54ケースの実験を行った（図-3）。津波規模の条件は、研究の基礎段階として、波高を変化させることとし、造波板を一定時間内に動かす距離により変化させた。試行の結果、SP6.5において、最も波高が高くなる造波設定は、造波板の移動時間6秒、移動距離1.476m、造波板前水深0.7mとなり、これを津波_大の条件とした。津波_小の条件は、越流高10cm、水深5cmの条件で、遊水地へ越流が生じる大きさとし、造波板移動距離のみを変化させ0.918mとした。津波_中の条件は、津波_大、小の中間程度の波高となるよう、造波板移動距離のみを変化させ1.199mとした。水深条件は、上流からの流量を等流となるように変化させることで設定し、水深5cm、7cm、9cmで、流量はそれぞれ4.4L/s、7.7L/s、12.0L/sである。

3. 実験結果

(1) 遊水地による河川を遡上する津波の低減効果の検討

遊水地による河川を遡上する津波の低減効果を、最高水位、到達時間、高水位の継続時間に注目して検討した。図-4に、津波_大、水深2ケース（5cm、9cm）の実験条件について、水位の時系列変化を、遊水地の有無（越流高10cm、遊水地なし）の違いにより比較した。なお、本節における水深及び遊水地越流高の実験条件は、以降同様である。図-4より、遊水地がある条件の方が、遊水地上流のSP5.4～14.0で、最高水位が低いことが確認される。また、SP14.0において、津波の到達時間に遅れが確認され、SP4.7では、津波の高水位の継続時間に低減が確認される。このことについて、以降、詳細に検討する。なお、全ての実験条件で、遊水地下流のSP1.0～4.7で碎波が確認されている。碎波とは津波の頂部が前屈形になり、崩れる状況である。

a) 最高水位の低減効果

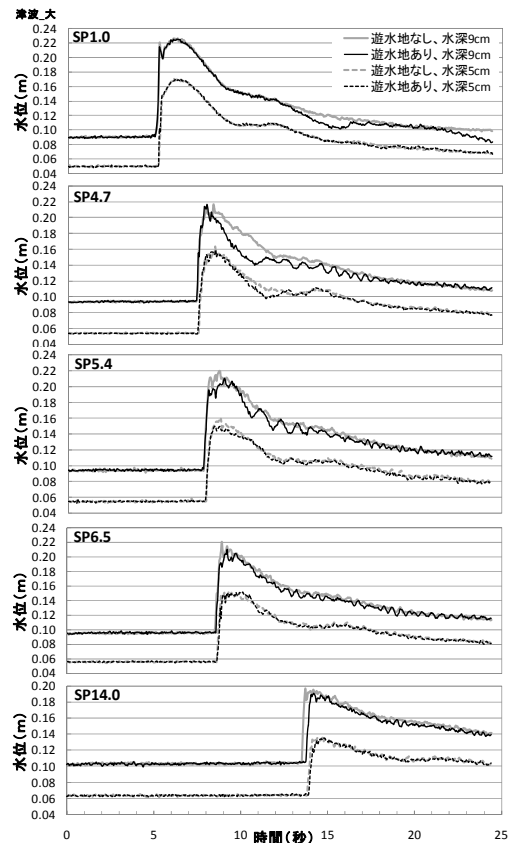


図-4 遊水地の有無による時系列波形の比較（越流高10cm）

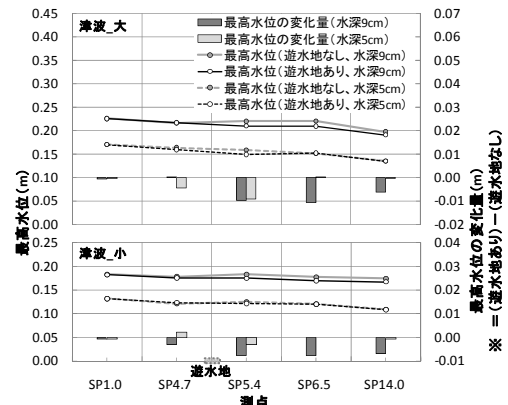


図-5 遊水地の有無による最高水位の比較（越流高10cm）

津波規模2ケース（大、小）の実験条件について、最高水位の縦断変化を、遊水地の有無の違いにより比較した（図-5）。図-5より、主に遊水地上流SP5.4～14.0で低減されたことが確認でき、津波_大、水深5cmの条件で0.0～0.9cm、水深9cmの条件で0.0～1.1cm低減された。また、津波_小、水深5cmの条件で-0.2～0.3cm、水深9cmの条件で0.1～0.8cm低減された。

b) 津波到達時間の遅延効果

津波規模2ケース（大、小）の実験条件について、津波到達時間を、遊水地の有無の違いにより比較した（図-6）。図-6より、遊水地がある条件の方が、津波到達時間の遅延が確認された。SP14.0においては、津波_大、水深9cmの条件で0.25秒、津波_小、水深9cmの条件で0.3秒

遅延された。また、津波_大、小の水深5cmの条件ではともに0.1秒遅延された。

c) 高水位継続時間の低減効果

津波_大の実験条件について、津波の高水位継続時間を、遊水地の有無の違いにより比較した(図-7)。なお、検討は水位14cm, 16cm, 18cm (SP1.0の水路床を基準)について行った(図-8)。また、高水位継続時間は、最大25秒間までの算出とした。図-7より、水深9cmの条件で、最も低減された地点は、遊水地直下流SP4.7であり、水位14cm, 16cmではともに1.6秒低減され、水位18cmでは0.9秒低減された。また、同条件の遊水地上流SP5.4～SP14.0では、水位14cmで0～0.95秒、水位16cmで0.15～1.0秒、水位18cmで0.35～0.75秒低減された。水深5cmの条件では、SP5.4の水位14cmで低減が最大となり、0.4秒低減された。また、同条件では水位が16cmに達した地点はSP4.7までであり、18cmでは水位上昇は観測されていない。

(2) 越流量による各低減量の変化

遊水地に越流した水量による、前節で述べた低減効果の変化について検討する。はじめに実験ケース毎の越流量の検討、遊水地越流部の流量係数の検討を行い、次に越流量による各低減量の変化の検討を行う。

a) 越流量の検討

実験ケースによる越流量の変化を検討した(図-9)。図-9より、越流量は津波規模、水深が大きくなるほど多くなり、また越流高が低くなるほど多くなる。この傾向は遊水地への越流水深の増大に伴うものと考えられる。

b) 流量係数の検討

越流量が本間公式(完全越流の場合)⁷⁾の式(3)によると仮定して越流量の試算を行った(図-10)。越流水深の算出は、SP4.7とSP5.4の水位を平均した値が、遊水地越流部の中間の水位と仮定し、そこから河床高と越流高を差し引くことにより算出した。図-10より、式

(3)により試算した越流量は実測の越流量よりも大きい傾向にあり、式(3)右辺の流量係数 α を0.35から0.26にして再度試算した。その結果、実測の越流量と一致し、本実験では式(3)の流量係数 α は、0.26程度であったと推察される。

$$Q = \alpha \cdot B h \sqrt{2gh} \quad (3)$$

Q : 越流量, α : 流量係数(本間公式では0.35),
 B : 越流幅, g : 重力加速度, h : 越流水深

c) 最高水位の低減

越流量による最高水位の低減の変化について検討した(図-11)。図-11より、遊水地直下流SP4.7では明瞭な関係は確認できないが、遊水地上流SP5.4では模型縮尺の回帰式の傾き0.21、決定係数0.46と概ね越流量との比例関係がみられる。SP6.5でも回帰式の傾き、決

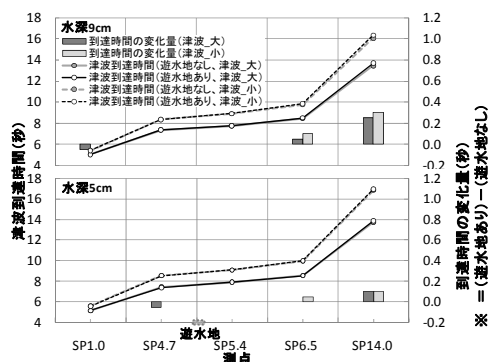


図-6 津波到達時間の遊水地有無による比較(越流高10cm)

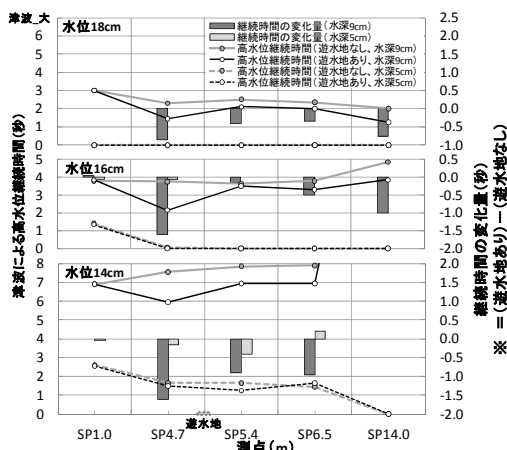


図-7 水位14, 16, 18cmでの高水位継続時間(越流高10cm)

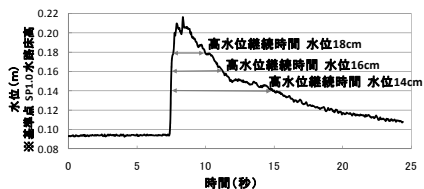


図-8 高水位継続時間の概念図(水位14cm, 16cm, 18cm)

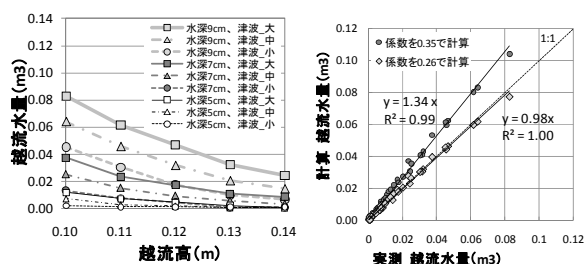


図-9 遊水地越流高と越流量 図-10 流量係数の検討

定係数はSP5.4と同程度であるが、上流のSP14.0では回帰式の傾き0.06、決定係数0.07と低下している。

このことから、遊水地による最高水位の低減効果は、遊水地の直上流で最大となることが考えられる。遊水地の上流ほど効果が低下する原因として、河川を遡上するにつれて、波高の低減が波全体に分配されたことが考えられる(図-4)。上流で決定係数が小さくなった原因については、次節で検討する。

また図-11より、実験ケースの中で、最高水位の低減が最も大きかったものは、SP6.5で1.5cmの低減であり、実物縮尺では、遊水地の720m上流で75cmの低減となる。

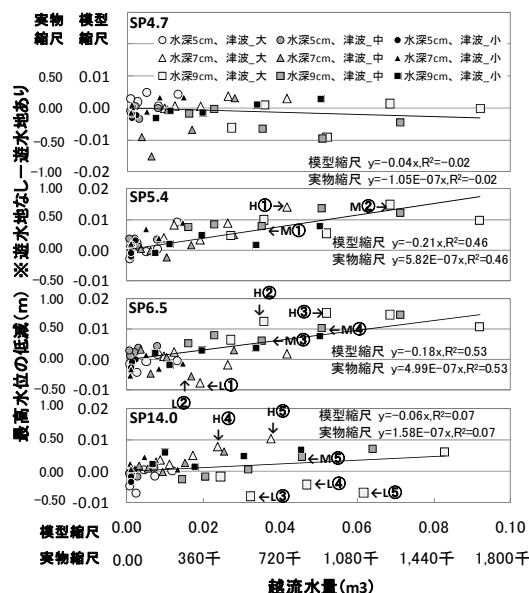


図-11 越流量による最高水位の低減の変化

d) 津波到達時間の遅延

越流量による津波到達時間の遅延の変化について検討した(図-12)．図-12より、遊水地直下流SP4.7、遊水地直上流SP5.4では、明瞭な関係は確認されない．SP6.5では、概ね越流量と比例関係がみられ、最上流のSP14.0では、模型縮尺の回帰式の傾き5.17、決定係数0.62と最も高くなっている．これは、遊水地の効果により波高が低下し、遡上速度が低下したことによるもので、遊水地から上流に離れた位置ほど、到達時間が遅延されることが考えられる．

図-12より、実験ケースの中で、津波到達時間の遅延が最も大きなものは、SP14.0で0.35秒の遅延であり、実物縮尺では、遊水地の5.2km上流で30秒の遅延となる．

e) 津波の高水位継続時間の低減

越流量による津波の高水位継続時間の低減の変化について検討した(図-13)．なお、検討は代表として水位16cmについてのみ行った．図-13により、遊水地直下流SP4.7では、模型縮尺での回帰式の傾き21.50、決定係数0.90と高い値を示し、越流量と比例関係にあることが確認できる．遊水地直上流SP5.4では、回帰式の傾き、決定係数が低下するが、上流に向かうにつれて上昇している．このことから、遊水地による高水位継続時間の低減は、遊水地の直下流で最大となると考えられる．この原因として、遊水地がある条件ではSP4.7で高水位の低下が顕著に早いことから(図-4)、河川を遡上する津波の流れが、上流SP5.4に向かうものと、遊水地に向かうものに分かれたためと考えられる．

図-13より、実験ケースの中で、高水位継続時間の低減が最も大きなものは、SP4.7で1.6秒の遅延であり、実物縮尺では、遊水地の60m下流で136秒の低減となる．

(3) 最高水位の低減と分散波列の関係

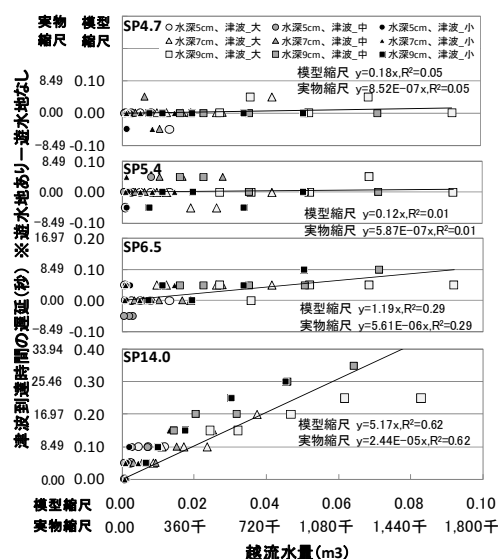


図-12 越流量による津波到達時間の遅延の変化

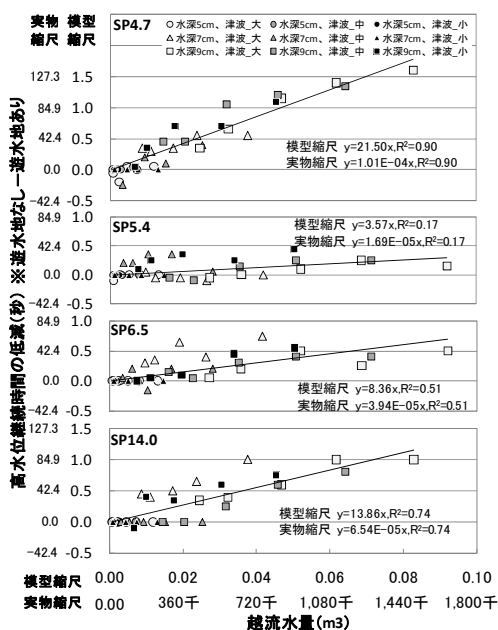


図-13 越流量による高水位継続時間の低減の変化

SP14.0において、越流量と最高水位の低減の決定係数が低下した原因(図-11)について検討を行う．検討にあたっては、図-11のプロットを大きく3グループに分け、各5つ代表を抽出した．3つのグループ分けは、図-11の回帰式の上部に外れているもの(H①～⑤)、概ね回帰式線上に分布しているもの(M①～⑤)、回帰式の下部に外れているもの(L①～⑤)とした(図-11)．図-14により、これらの波形を詳細に観察すると、H①～⑤は、遊水地がない実験ケースで、わずかに分散波列が発生しており、遊水地がある実験ケースでは発生していない．そのため、2つの実験ケースでの最高水位の差である低減量が大きくなったと考えられる．また、M①～⑤では、遊水地がない実験ケースとある実験ケースの両方で分散波列が確認されるか、両方で確認されていない(図-14)．そのため、低減量が極端に大きくならな

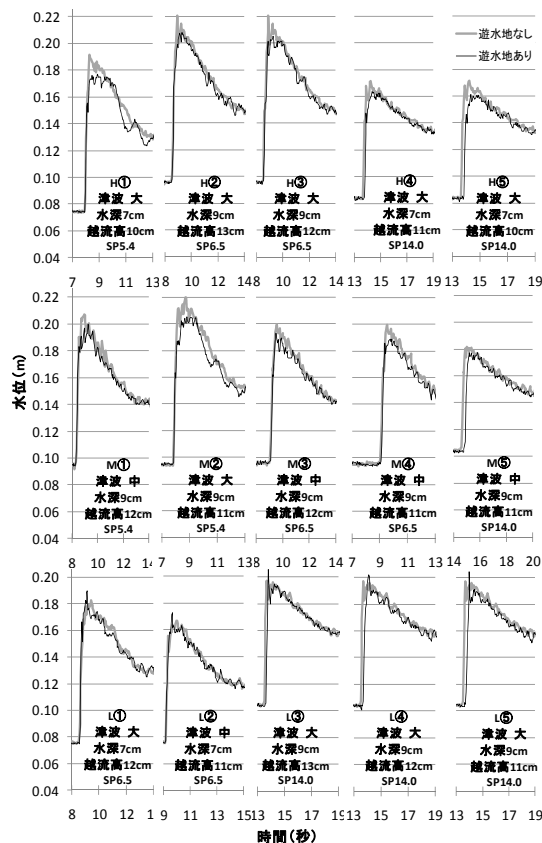


図-14 分散波列の最高水位の低減への影響

かったと考えられる。L①～⑤では、遊水地がない実験ケースでは分散波列が確認されず、遊水地がある実験ケースでは確認されている（図-14）。そのため、低減量が小さくなったと考えられる。このことから、分散波列の影響を受ける箇所ほど、最高水位の低減は、越流量ととの比例関係から外れると考えられる。分散波列は水平な水域を伝播することにより、波高が高くなり、砕波限界になるまで伝播距離に比例して発達することが知られている¹²⁾。そのため遊水地から距離が離れているSP14.0ほど分散波列が発生しやすく、回帰式の決定係数が低下したと考えられる。

4. まとめ

本実験における遊水地の津波低減効果として、次のことが確認された。

- 1) 最高水位の低減効果は、概ね越流量に比例し、遊水地の直上流で最も効果が大きく、上流ほど小さくなった。また、最大の低減水位は、遊水地1.2m上流で1.5cm(実物縮尺：遊水地720m上流で0.75m)であった。
- 2) 津波到達時間の遅延効果は、概ね越流量に比例し、遊水地上流に離れた地点ほど効果が大きかった。また、最大の津波到達時間の遅延は、遊水地の8.7m上流で0.35秒(実物縮尺：遊水地5.2km上流で30秒)であった。

- 3) 津波の高水位継続時間の低減効果は、概ね越流量に比例し、遊水地直下流で効果が最も大きかった。また、最大の高水位継続時間の低減は、遊水地の0.1m下流で1.6秒(実物縮尺：遊水地の60m下流で136秒)であった。
- 4) 最高水位の低減効果は、分散波列が発生することにより、越流量ととの比例関係が低下することが確認された。

本実験では、スマトラ島のバンダ・アチェの河川を想定して、模型上での遊水地位置と波高計測箇所を設定した。本実験で得られた成果から、保全位置にどのような津波の低減効果を望むかにより、遊水地の設置位置を検討する必要があることが示唆された。

今回確認された低減量は劇的に大きなものではないが、従来のソフト、ハードの津波対策とともに、遊水地による対策を組み合わせることで、より一層、津波被害の軽減につながる可能性がある。今後の課題として、今回の実験では変数としなかった、津波の波長や越流部の長さについても、実験条件として検討する必要がある。

参考文献

- 1) 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)について、首相官邸, 2011. 5. 13
- 2) 港湾空港技術研究所資料 2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査報告, 港湾空港技術研究所, pp42-43, 2011. 4
- 3) International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, Annual Report 2004, p. 10
- 4) Indonesia: Preliminary Damage and Loss Assessment The December 26, 2004 Natural Disaster, BAPPENAS and The International Donor Community, 2005.
- 5) 幸左賢二ら：スマトラ沖地震に伴う津波による橋梁の被害分析, 構造工学論文集Vol. 56A, pp454-463, 2010.
- 6) 東日本大震災 第一次総合調査団 中間とりまとめ(案), 土木学会・日本都市計画学会・地盤工学会 東日本大震災 第一次総合調査団, 2011. 4
- 7) 水理公式集, 土木学会, 1999.
- 8) 安田浩保, 渡邊康玄：1次元解析法に基づく河川を遡上する津波の数値計算法, 土木研究所寒地土木研究所月報第638号, pp2-9, 2006.
- 9) 阿部孝章ら：津波の遡上に伴う河道内氷板の輸送過程に関する水理実験, 寒地土木研究所 月報 No. 695, 2011. 4
- 10) 松富英夫ら：Banda Acehと周辺における2004年インド洋津波と被害想定からみた課題, 海岸工学論文集, 第52巻, pp1366-1370, 2005.
- 11) 国土交通省港湾局監修港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), 日本港湾協会, p238, 2007.
- 12) 安田誠宏ら：ソリトン分裂津波の変形と波力特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第53巻, 土木学会, 2006

(2011. 5. 19受付)