

津波の河川遡上における河道水理条件による応答と 遊水地による津波低減効果に関する基礎的研究

Response to River Channel Hydraulic Conditions in River Run-up during a Tsunami, and a Basic Research on the Effects on Tsunami Reduction by a Retarding Basin

矢野 雅昭* 吉川 泰弘** 平井 康幸*** 田中 茂信****

Masaaki YANO, Yasuhiro YOSHIKAWA, Yasuyuki HIRAI and Shigenobu TANAKA

本研究では、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、津波を横越流させ、波高とエネルギーを低減する対策について提案し、水理実験を行った。対象河川は、スマトラ沖地震で被災した都市バンダ・アチェとし、縦方向縮尺1/50、水平方向縮尺1/600の歪み模型とした。実験の結果、高水敷の有無や、流れの有無の河道水理条件により、河川を遡上する津波の最高水位が変化した。また、遊水地の効果として、遊水地から0.10m（実物縮尺60m）上流で最高水位が最大1.1cm（実物縮尺0.55m、遊水地なし条件での最高水位の9%）低減された。また、津波の到達時間が最大で0.3秒（実物縮尺25秒、遊水地なし条件での到達時間の2%）遅れ、津波の高水位の継続時間が最大1.6秒（実物縮尺136秒、遊水地なし条件の継続時間の43%）低減した。

《キーワード：津波遡上；遊水地；水理実験》

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 flood plain, 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 maximum heights of the tsunami run-up varied according to river conditions, including the existence of flood plain and flows. The retarding basin reduced the height of the tsunami by 1.1 cm (0.55 m full scale and 9 % of the maximum height of the tsunami in the case without a retarding basin) at the point of 60 m upstream from the retarding basin. It could also delay the arrival time of the tsunami by up to 0.3 seconds (25 seconds full scale and 2 % of the arrival time in the case without a retarding basin) . The duration of the tsunami's high water level was reduced by up to 1.6 seconds (136 seconds full scale and 43 % of the duration in the case without a retarding basin) .

《Keywords : tsunami run up ; retarding basin ; hydraulic experiment》

1. はじめに

近年、太平洋、インド洋において、地震による津波の被害が確認されている。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¹⁾。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²⁾。また、この津波により、ライフラインとして重要な橋梁が多数破壊されている³⁾。

津波対策として、大規模な被害が予想される沿岸部に、防波堤を設置するなど考えられるが、河口部では河川流水や土砂が流下するため、防波堤の設置は困難と考えられる。また、津波は河川を遡上するが、波数分裂することにより、波高が増大することが既往研究で指摘されている⁴⁾。また、波高と漂流物の速度に相関のあることが指摘されており⁵⁾、波数分裂により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、河川を遡上する津波は、陸上を遡上する津波よりも伝播が速い。そのため、河川堤防が脆弱な場合、河道を遡上した津波が、陸上を遡上する津波よりも先に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、より根本的な対策として、津波自体の波高、エネルギーを減少させることが考えられる。波高を低減できれば、津波の遡上速度を遅延できることも考えられ、より多くの避難時間を得ることもできる。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、水理実験により、その効果の検討を行うことである。

2. 水理実験

2. 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

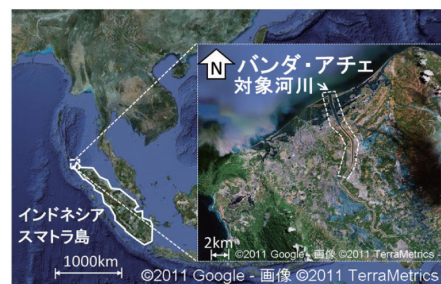


図-1 対象河川箇所図(Google Mapに加筆)



図-2 実験水路概要

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、保全対象の橋梁位置を、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(図-2)。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⁶⁾。このため、本実験では、対象河川のKP3.9付近の橋梁位置において、最大5mの津波が襲来した場合を想定した。

※平成23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が発生し、この地震にともなう大津波により、東北地方の太平洋沿岸は甚大な被害を受けた。この震災により、犠牲になった方々のご冥福と、被災者の方々のいち早い再起を願います。本稿の水理実験は、同地震が起こる前の、平成23年1、2月に行ったものです。当研究所では、北海道太平洋側において、同地震にともなう津波の河川遡上状況の調査を行いました。今後、その調査結果を研究に反映させ、津波防災対策の発展に寄与させていく所存です。

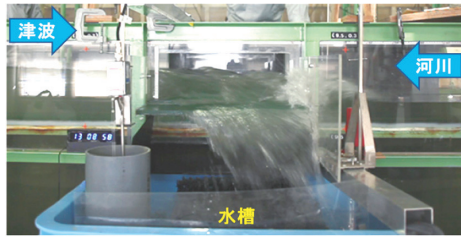


写真-1 水路を遡上する津波の開口部からの横越流状況

2. 2 実験水路

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みを回避し、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、実験水路外の水槽に貯留し、水槽内の波高計でその量を計測した。

2. 3 実験水路の縮尺

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、 $\lambda_L = 0.5\text{m} \div 300\text{m} = 1/600$ 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 $\lambda_H = 0.1 \div 5.0\text{m} \div 1/50$ となる。なお、流速縮尺は、 $\lambda_V = \lambda_H^{1/2} = (1/50)^{1/2} \div 1/7.07$ となり、時間縮尺は $\lambda_T = \lambda_H^{-1/2} \times \lambda_L = (1/50)^{-1/2} \times 1/600 \div 1/84.9$ となる。

模型実験で得られた測定値を実物の値に換算する場合は、式(1)～(4)による。

$$H_P = H_M \times 1/\lambda_H \quad (1)$$

$$L_P = L_M \times 1/\lambda_L \quad (2)$$

$$V_P = V_M \times 1/\lambda_V \quad (3)$$

$$T_P = T_M \times 1/\lambda_T \quad (4)$$

H_P, L_P, V_P, T_P : 実物に換算した、鉛直・水平方向の長さ、速度、時間

H_M, L_M, V_M, T_M : 模型実験で得られた、鉛直・水平方向の長さ、速度、時間

$\lambda_H, \lambda_L, \lambda_V, \lambda_T$: 鉛直縮尺、水平縮尺、速度縮尺、時間縮尺(本実験においては、それぞれ1/50、1/600、1/7.07、1/84.9)

よって、後述する波高計の観測間隔0.05秒は、式(4)より実物の値に換算すると、約4.2秒となる。

津波のフルード数は式(5)⁷⁾、(6)に示すとおり、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。

$$v = \frac{c\eta}{h} = \eta \sqrt{\frac{g}{h}} \quad , \quad C = \sqrt{gh} \quad (5)$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} = \frac{\eta \sqrt{\frac{g}{h}}}{\sqrt{gh}} = \frac{\eta}{h} \quad (6)$$

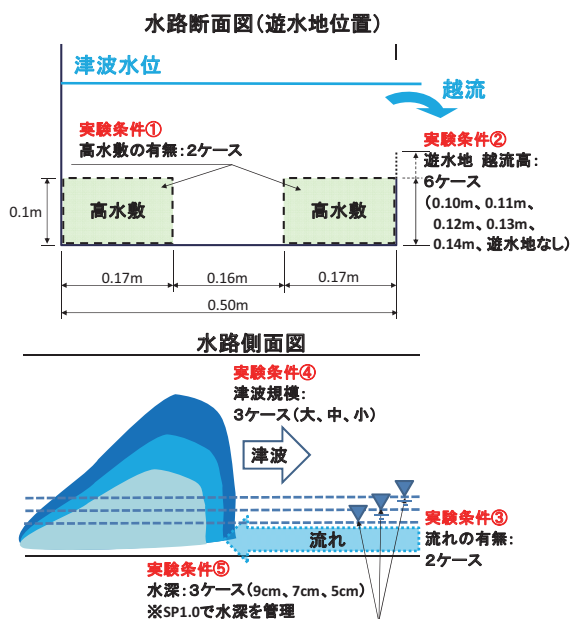
v : 流速、 C : 波速、 g : 重力加速度、 η : 平常潮位基準での津波による海面変動、 h : 水深、 Fr : フルード数

2. 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 $\pm 3.5\text{mm}$)により測定した。測定時間の間隔は、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)、遊水地上下流のSP4.7(KP2.82)、SP5.4(KP3.24)、そして越流水を貯留する水槽内の合計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。

2. 5 実験条件

実験条件は、①高水敷の有無の2ケース、②水路床からの越流高が異なる6ケース(10cm、11cm、12cm、13cm、14cm、越流なし)、③流れの有無2ケース、④津波規模3ケース(大、中、小)、⑤水路の水深3ケース(5cm、7cm、9cm)とし、これらを組み合わせ、合計216ケースの実験を行った(図-3、表-1)。①の高水敷の形状は、水路床からの高さ10cm、幅17cm



図－3 実験条件

表－1 実験ケース一覧

高水敷 有無	越流高 ※1	流れの 有無 ※2	水深 ※3	津波の 大きさ ※4	合計
有り	10cm	有り	5cm	大	
無し	11cm	無し	7cm	中	
	12cm		9cm	小	
	13cm				
	14cm				
	越流無し				
2パターン	6パターン	2パターン	3パターン	3パターン	216パターン

※1.越流高は水路床からの高さ。
 ※2.流れの有るケースでは、水路の最下流を除き等流とした。
 ※3.水深は実験水路のSP1.00地点で管理した。
 ※4.津波の大きさは、造波板を一定時間内(6秒)に動かす距離を
 変えることにより、変化させた。

とした(図－3上)。②の越流高の条件は、遊水地への越流量を変化させ、越流量による遊水地の効果の変化を把握するため6ケース設定した。なお、式(1)より模型での越流高1cmの変化を、実物に換算すると50cmとなる。③の流れがある条件では、プール部と水路部の境界を除き等流とした。なお、高水敷なし、水深9cm、流れありの条件での平均流速は、式(3)より模型縮尺及び実物縮尺で、それぞれ0.27m/s、1.91m/s、水深7cmの同条件で0.22m/s、1.56m/s、水深5cmの同条件で0.18m/s、1.27m/sであり、高水敷がある条件についても同程度の流速であった(表－2)。④の津波規模の条件は、研究の基礎段階として、波高を変数とすることとし、造波板を一定時間内に動かす距離を変化させ、大、中、小の3ケースとした。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

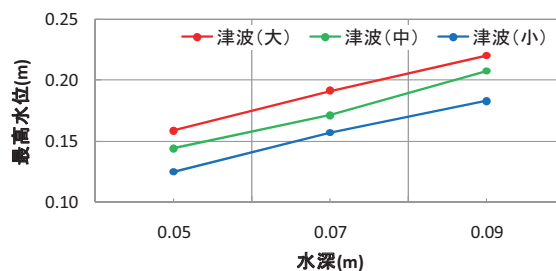
表－2 流れがある実験条件における各水深での流速

水深	高水敷なし			高水敷あり		
	流量 (m^3/s)	流下面積 $W=0.5\text{m}$ (m^2)	平均流速 (m/s)	流量 (m^3/s)	流下面積 $W=0.16\text{m}$ (m^2)	平均流速 (m/s)
9cm	0.0120	0.0450	0.27	0.0037	0.0144	0.26
4.5m	2.546	1.350	1.91	785	432	1.82
7cm	0.0077	0.0350	0.22	0.0025	0.0112	0.22
3.5m	1.633	1.050	1.56	530	336	1.58
5cm	0.0044	0.0250	0.18	0.0016	0.0080	0.20
2.5m	933	750	1.27	339	240	1.41

表－3 実験における津波の造波設定

津波規模	造波板前 水深 (m)	造波板 押し出し距離 (m)	造波板 移動時間 (秒)	目標波高 (m)※
大	0.7	1.476	6	0.125
中	0.7	1.199	6	0.100
小	0.7	0.918	6	0.075

※目標波高は、造波板直近での値。



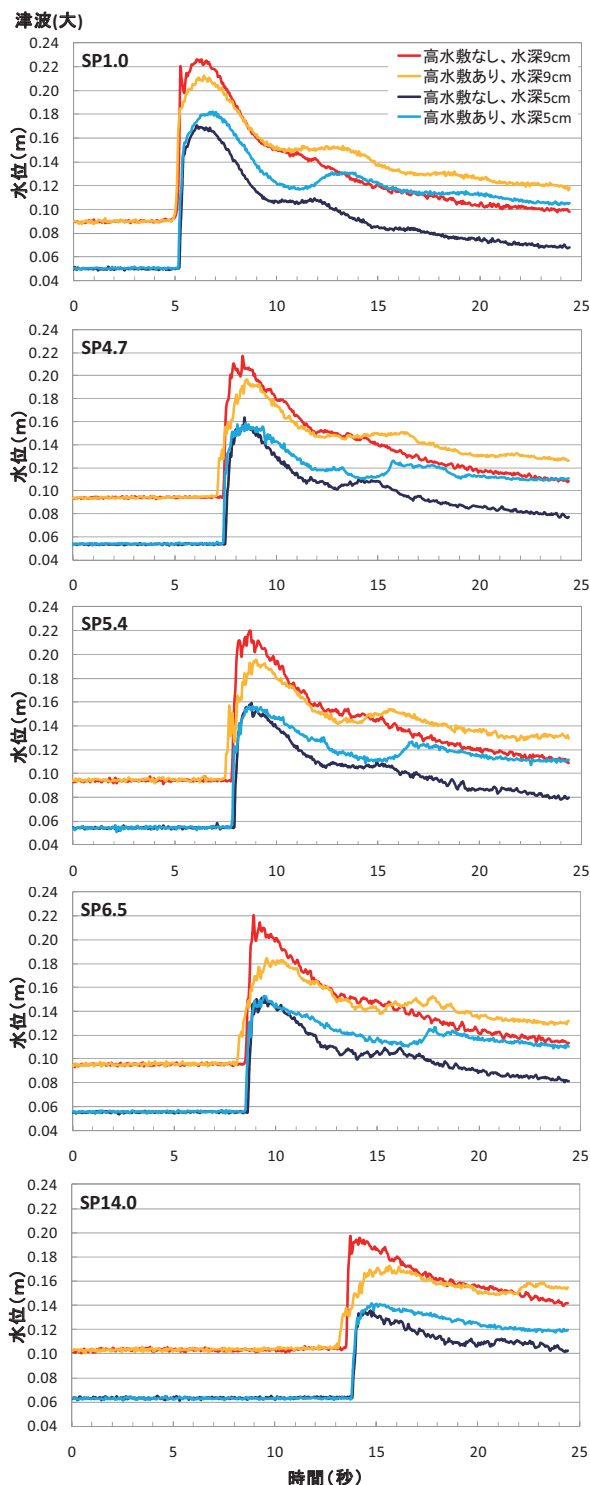
図－4 津波規模、水深による最高水位の比較
(SP5.4、高水敷なし、遊水地なし、流れあり)

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(表－3)。⑤の水深条件は、水深が津波遡上に変化を及ぼす一つの要因であることから、3ケース設定した。水深条件を管理する位置は、流れがある条件で、等流水深が確保される極力下流の位置のSP1.0地点とした。

3. 実験結果

3. 1 津波の河川遡上における河道水理条件による応答

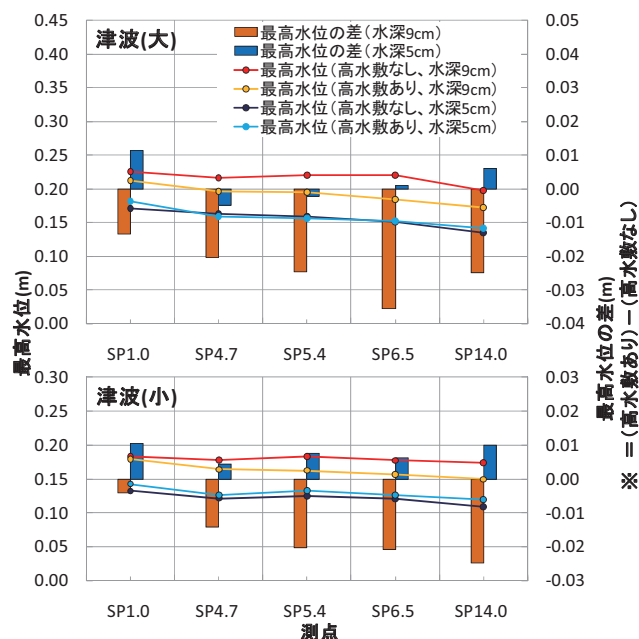
河道水理に関わる水深や、高水敷の有無、流れの有無の実験条件が、津波の河川遡上にどのような影響を及ぼすのか検討した。



図－5 高水敷の有無による時系列波形の比較
(遊水地なし、流れあり)

3. 1. 1 津波規模と水深による最高水位の比較

高水敷なし、遊水地なし、流れありの実験条件について、津波遡上時の最高水位(以降、最高水位)を、津波規模や、水深条件の違いにより比較した。図－4にSP5.4の結果を代表として示す。図－4から、津波規模と水深の条件に比例して、最高水位が高くなること



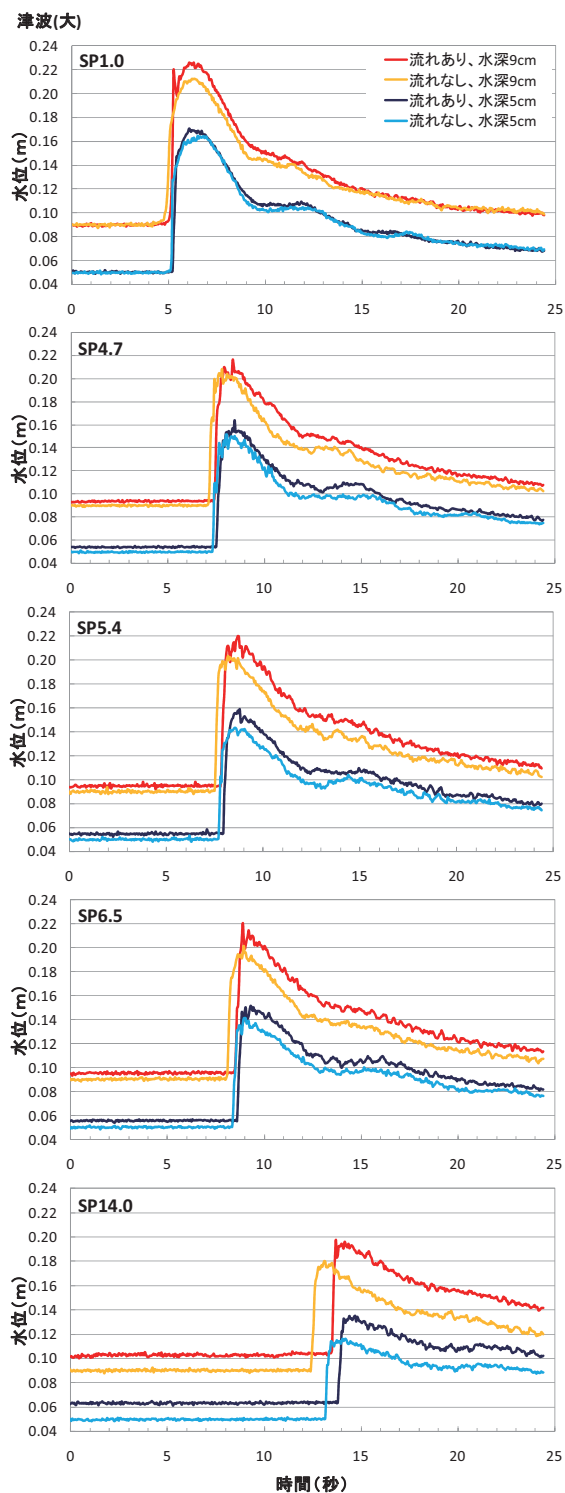
図－6 高水敷の有無による最高水位の縦断変化
(遊水地なし、流れあり)

が確認できる。この傾向は、全地点で同じであった。よって、最高水位は概ね津波規模と水深に比例する傾向にあり、以降の検討では、中間の実験条件の津波中、水深7cmを割愛する。なお、全ての実験条件において、SP1.0～4.7の区間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。

3. 1. 2 高水敷の有無による比較

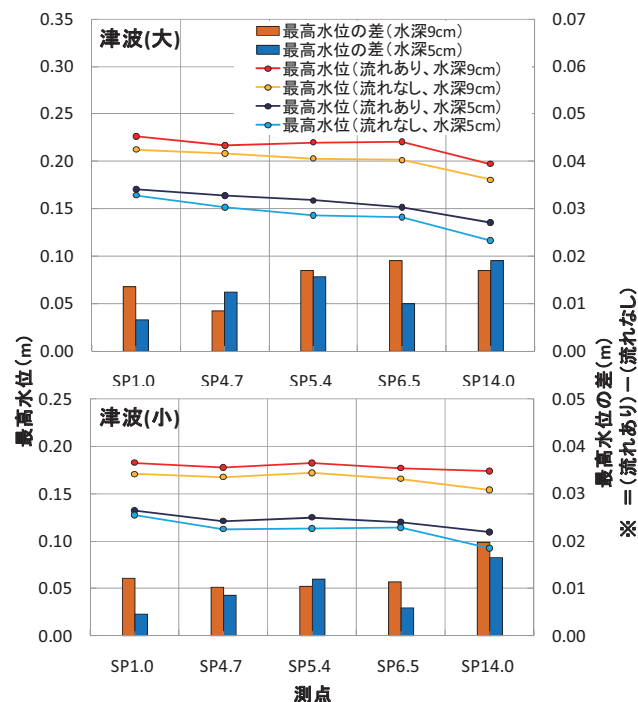
流れあり、津波(大)、水深2ケース(5cm, 9cm)の実験条件について、水位の時系列変化を、高水敷の有無の違いにより比較した(図－5)。図－5より、水深9cmの条件では、高水敷がある条件の方が、最高水位が低いことが確認できる。一方、水深5cmの条件では、高水敷がある条件の方が、最高水位が高い地点が確認された。また、両ケースともに津波が通過後に、ある程度高い水位が長時間継続していることが確認される。以降、最高水位について詳細に検討する。

流れあり、津波規模2ケース(大, 小)、水深2ケース(5cm, 9cm)の実験条件について、最高水位の縦断的な変化を、高水敷の有無により比較した(図－6)。図－6より、水深9cmの条件では、高水敷がある条件の方が、最高水位が低いことが確認され、津波(大)、(小)の水深9cmの条件で、それぞれ1.3～3.5cm、0.3～2.5cm最高水位が低いことが確認された。一方、水深5cmの条件では、高水敷がある条件の方が、最高水位が高いケースが確認され、津波(大)、(小)の水深



図－7 流れの有無による時系列波形の比較
(高水敷なし、遊水地なし)

5 cm の条件で、それぞれ $-0.5 \sim 1.1\text{cm}$ 、 $0.4 \sim 1.0\text{cm}$ 高いことが確認された。本実験で確認された、これらの傾向の原因として、次のことが影響していることが考えられる。高水敷がある条件では、ない条件と比べ、高水敷の分だけ左右岸の地盤が高く、同じ規模の津波が遡上すると、高水敷の上に津波が乗り上げ、水位が



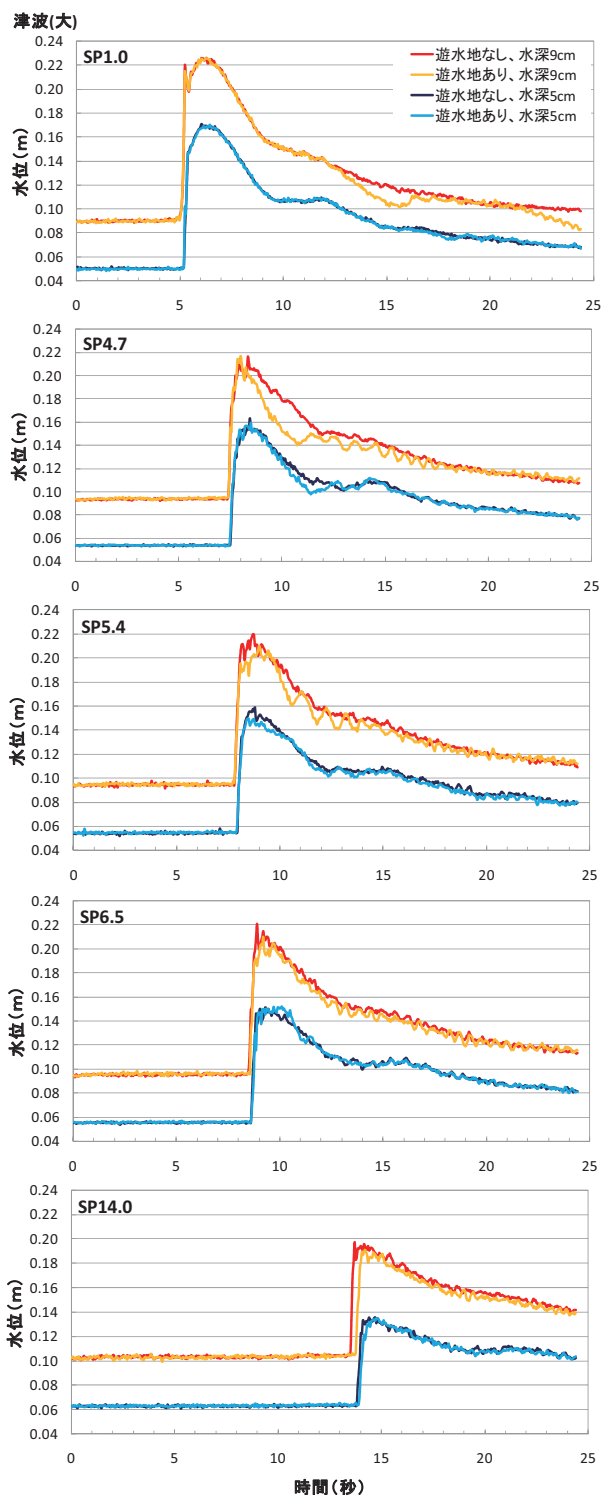
図－8 流れの有無による最高水位の縦断変化
(高水敷なし、遊水地なし)

より高くなることが考えられる。そのため、高水敷高が初期水位の約 2 倍の高さにある水深 5 cm の条件では、水位が高くなったと考えられる。一方、水深 9 cm の条件では、高水敷高は初期水位の約 1.1 倍と大きな差はなく、高水敷乗り上げの効果が小さかったことが考えられる。また、水深 9 cm の条件で最高水位が低下に転じた原因として、河口付近の SP1.0 で、既に最高水位が低いことから、複断面の河道に津波が進入する際、横断的な流れなど生じ、津波の波形に変化が生じたものと考えられる。また、高水敷がある条件の方が、わずかに津波の到達時間が早まっている。これは今回の実験に使用した高水敷の材質が、低水路より粗度が小さく、高水敷上での流速が津波の先頭部で速くなったためだと考えられる。なお、津波(大)、水深 9 cm の条件で確認された最高水位の差を式(1)により実物の値に換算すると $0.65 \sim 1.75\text{m}$ の低下となる。また、津波(大)、水深 5 cm の条件で確認された最高水位の差は、 $-0.25 \sim 0.55\text{m}$ の上昇となる。

高水敷がある条件の流況は、横断方向の流れがあり複雑であるため、本稿ではより基礎的な知見を得るために、以降の検討を高水敷がない条件で行う。

3. 1. 3 流れの有無による比較

津波(大)、水深 2 ケース (5 cm, 9 cm) の実験条件について、水位の時系列変化を、流れの有無の違いにより比較した(図－7)。図－7 より、流れがある条件



図－9 遊水地の有無による時系列波形の比較
(高水敷なし、越流高10cm、流れあり)

の方が、最高水位が高いことが確認され、また、SP14.0において、津波の到達時間が遅いことが確認された。以降、最高水位について、詳細に検討する。

津波規模2ケース(大、小)、水深2ケース(5cm、9cm)の実験条件について、最高水位の縦断変化を、

流れの有無の違いにより比較した(図－8)。図－8より、流れがある条件の方が、最高水位が高いことが確認され、津波(大)の水深5cm、9cmの条件で、それぞれ0.6～1.9cm、0.8～1.9cm高いことが確認できる。また、津波(小)の水深5cm、9cmの条件では、それぞれ0.4～1.8cm、1.0～2.0cm高いことが確認できる。なお、津波(大)の水深5cm、9cmの条件で確認された最高水位の差を、式(1)により実物の値に換算すると、それぞれ0.3～0.95m、0.4～0.95mの上昇となる。

流れがある条件の方が、最高水位が高い原因の一つとして、水深の縦断分布の違いが考えられる。流れがない条件では、上下流で同じ水位であり、河床勾配があるため上流部ほど水深が浅くなるが、流れがある条件では、等流水深のため、上下流で水深が同等である。しかし、流れの有無で初期の水深が変わらないSP1.0(図－7)においても、流れがある条件の方が、最高水位が高くなっているため、これは大きな原因ではないと考えられる。このため、流れの存在が最大水位の上昇に寄与していることが考えられる。以降、津波の河川遡上時に、より危険側となる流れがある条件を対象として検討を行う。

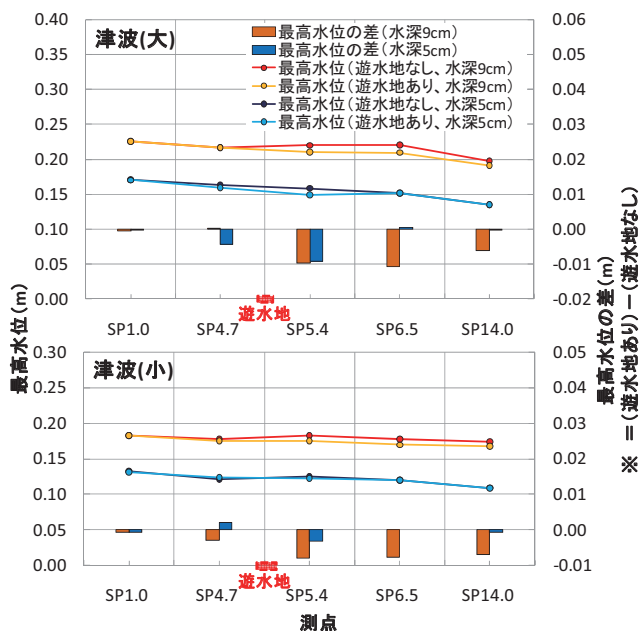
3. 2 遊水地による河川を遡上する津波の低減効果

遊水地による、河川を遡上する津波の低減効果を、津波遡上時の最高水位、到達時間、高水位の継続時間に着目して検討した。なお、3. 1. 1～3で述べたとおり、高水敷あり、流れなし、津波(中)、水深7cmの各条件は、検討に含めていない。

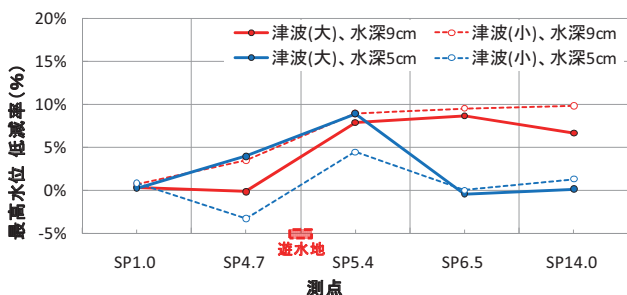
3. 2. 1 最高水位の低減効果

津波(大)の水深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(図－9)。図－9より、遊水地がある条件の方が、遊水地上流のSP5.4～14.0で、最高水位が低いものが多く確認される。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。

津波規模2ケース(大、小)、水深2ケース(5cm、9cm)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(越流高10cm、遊水地なし)の違いにより比較した(図－10)。図－10より、主に遊水地の上流で最高水位が低減されたことが確認でき、津波(大)の水深5cm、9cmの条件で、それぞれ0.0～0.9cm、0.0～1.1cm低減された。また、津波(小)の水深5cm、9cmの条件では、それぞれ－0.2～0.3cm、0.1



図－10 遊水地の有無による最高水位の比較
(高水敷なし，越流高10cm，流れあり)



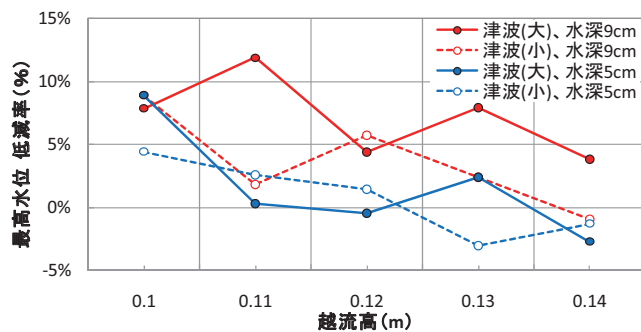
図－11 遊水地の有無による最高水位の低減率の縦断変化
(高水敷なし，越流高10cm，流れあり)

～0.8cm 低減された。なお、津波(大)の水深5cm，9cmの条件の、SP5.4～14.0における最高水位の低減を、式(1)、(2)により実物の値に換算すると、遊水地の60m～約5.2km上流で、それぞれ0.0～0.45m、0.0～0.55mの低減となる。

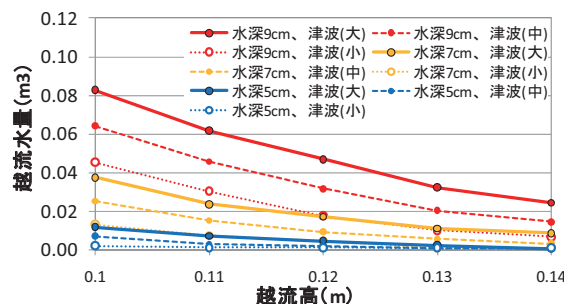
遊水地の効果により、どれだけ最高水位が低減されたかを、遊水地がない条件での測定値に対する低減された量(遊水地がない条件の測定値から、ある条件の測定値を差し引いた値)を低減率(式(7))とし検討した(図－11)。

$$R = \frac{N_1 - N_2}{N_1} \quad (7)$$

R：低減率、 N_1 ：遊水地がない条件での測定値、 N_2 ：遊水地がある条件での測定値。図－11より、水深9cmの条件での最高水位の低減率は、遊水地上流SP5.4で大きく上昇し、津波(大)，(小)の水深9cmの条件で、それぞれ8%、9%となった。また、その上



図－12 遊水地の越流高による最高水位の低減率の変化
(遊水地直上流 SP5.4、高水敷なし，越流高10cm，流れあり)



図－13 遊水地の越流高による越流水量の変化
(高水敷なし，流れあり)

流の地点においても同程度の値であることが確認される。水深5cmの条件での最高水位の低減率も遊水地直上流 SP5.4で大きく上昇し、津波(大)，(小)の水深5cmの条件でそれぞれ、9%、4%となった。しかし、SP6.5で大きく減少し、ともに約0%となり、SP14.0においても同程度の値となった。よって、最高水位の低減率は、遊水地直上流で大きく上昇するが、条件によっては、上流地点で再び減少することが考えられる。

遊水地直上流 SP5.4における、最高水位の低減率の変化を、遊水地の越流高により比較した(図－12)。図－12より、低減率は越流高14cmの条件では－3～4%の範囲であり、越流高10cmの条件では4～8%であった。よって、最高水位の低減率は、概ね越流高が低くなるに伴い、高くなる傾向といえる。

遊水地への越流水量を、越流高の違いにより比較した(図－13)。図－13より、越流高が低くなるに伴い、越流水量が増加する傾向にあった。これは越流高と最高水位の低減率の傾向(図－12)と近く、遊水地への越流水量が増加すると、その上流の低減も大きくなると考えられる。

3. 2. 2 到達時間の遅延効果

津波(大)，水深2ケース(5cm，9cm)の実験条件について、津波の到達時間を、遊水地の有無(越流高

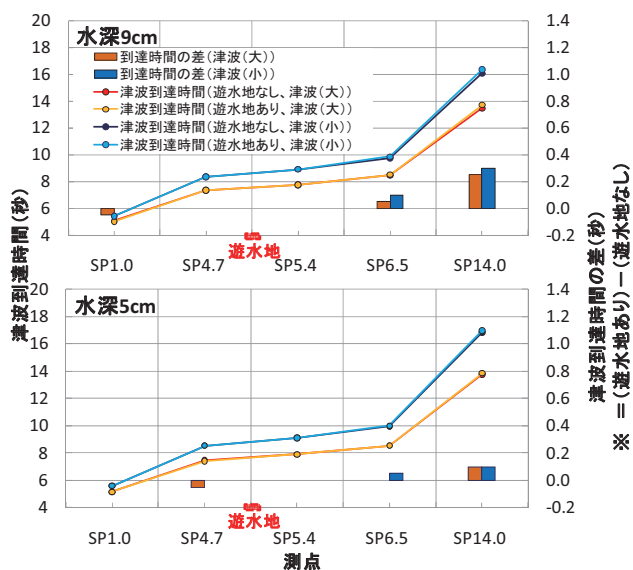


図-14 遊水地有無による津波到達時間
(高水敷なし，越流高10cm，流れあり)

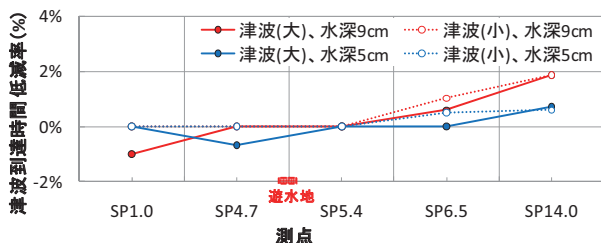


図-15 津波到達時間低減率の縦断変化
(高水敷なし，越流高10cm，流れあり)

10cm，遊水地なし)の違いにより比較した(図-14)。図-14より、遊水地がある条件の方が、津波の到達時間が遅延されることが確認された。SP14.0における遅延は、津波(大)，(小)の水深9cmの条件で、それぞれ0.25秒、0.3秒であった。また、津波(大)，(小)の水深5cmの条件では、ともに0.1秒の遅延であった。なお、津波(大)，(小)の水深9cmの条件のSP14.0における到達時間の遅延を、式(2)、(4)により実物の値に換算すると、遊水地の約5.2km上流において、それぞれ21秒、25秒の遅延となる。

津波の到達時間を、式(7)の低減率により検討した(図-15)。なお、遊水地がある条件の方が、到達時間が遅い(値が大きい)ことから、負の値とならないよう式(7)の正負を入れ替えた。図-15より、津波(大)，(小)の水深9cmの条件のSP14.0における低減率は、ともに約2%であった。また、津波(大)，(小)の水深5cmの条件のSP14.0では、それぞれ0.6%、0.7%であった。

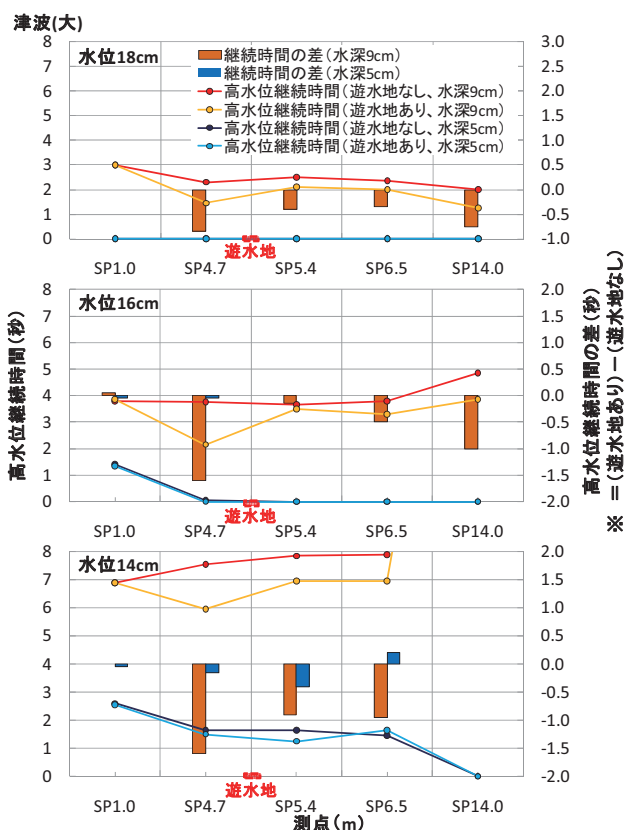


図-16 水位14, 16, 18cmでの高水位継続時間の縦断変化
(高水敷なし，越流高10cm，流れあり)

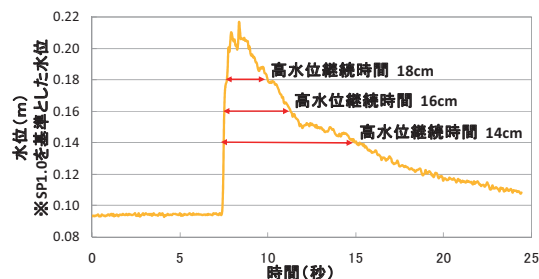
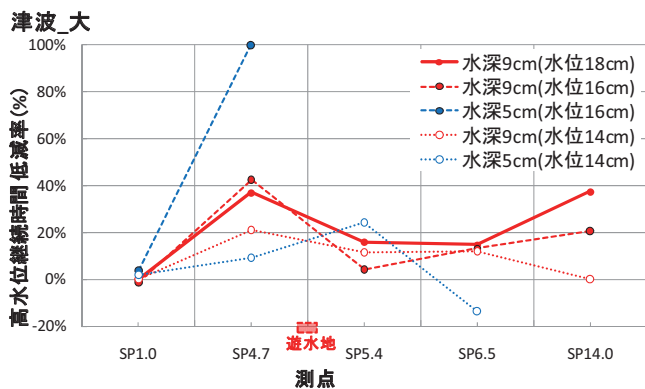


図-17 高水位継続時間の概念図(水位14cm, 16cm, 18cm)

3. 2. 3 高水位継続時間の低減効果

津波(大)，水深2ケース(5cm，9cm)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(越流高10cm，遊水地なし)の違いにより比較した(図-16)。なお、高水位継続時間は、SP1.0の水路床を基準とした水位14cm、16cm、18cmについて検討した(図-17)。また、高水位継続時間の算出は、最大25秒までとした。図-16より、水深9cmの条件で、高水位継続時間が最も低減された地点は、遊水地直下流SP4.7であることが確認され、水位14cm、16cmではともに1.6秒、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での低減は、水位14cm、16cm、18cmで、それぞれ0～0.95秒、0.15～1.0秒、0.35～0.75秒であった。水深5cmの条件で、水位



図－18 高水位継続時間の低減率の縦断変化
(高水敷なし，越流高10cm，流れあり)

14cmにおける低減が最大となる地点はSP5.4であり、0.4秒低減された。なお、低減が最大であった、水深9cmの条件のSP4.7，水位16cmにおける低減を、式(2)、(4)により実物の値に換算すると、遊水地の60m下流で、136秒の低減となる。また、同条件のSP5.4～SP14.0において低減は、遊水地の60m～約5.2km上流で、13～85秒の低減となる。

高水位継続時間の低減を、式(7)の低減率で検討した(図－18)。図－18より、水深9cmの条件ではSP4.7において、低減率が最大となり、水位14cm、16cm、18cmで、それぞれ21%、43%、37%となった。また、同条件のSP5.4～14.0の水位14cm、16cm、18cmでは、それぞれ0～12%、4～21%、13～38%となった。水深5cmの条件のSP4.7，水位16cmでは、低減率が100%となった。これは遊水地の効果により水位が低下し、16cm以下になったためである。

これらのことから、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における水位低下が顕著に早いことから(図－9)、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るためだと考えられる。

4. まとめ

河道水理条件による津波の河川遡上の応答及び津波の低減対策として、遊水地の設置を提案し、水理模型実験によりその効果を検討した。その結果、以下の結果が得られた

(1)津波の河川遡上の河道水理条件に対する応答

①高水敷の有無により、津波遡上時の最高水位に差が生じることが確認された。この原因として、津波の高水敷への乗り上げ作用や、津波が複断面河川に進

入する際、横断的な流れなど生じることによる津波波形の変化が考えられた。また、高水敷高に対する河川水位の位置により、高水敷がない条件に対する最高水位の変化の傾向が異なることが確認された。

②河川の流れがある条件では、ない条件よりも、津波遡上時の最高水位が高いことが確認された。

(2)遊水地による津波の低減効果として、次のことが確認された。

①遊水地上流で、津波遡上時の最高水位に低減が確認され、遊水地の直上流において最も大きくなった。しかし、さらに上流では条件によって低減効果が低下することが確認された。

②遊水地上流で、津波の到達時間に遅延が確認され、遊水地から離れた地点ほど遅延時間が大きくなった。

③津波の高水位継続時間に低減が確認され、遊水地の直下流において、低減効果が最も大きくなった。

今後の課題として、本実験で得られた遊水地による津波の低減効果により、橋梁に作用する波力がどれだけ低減されるか検討する必要がある。また、今回の実験では変数としなかった、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。

5. おわりに

本実験で確認された、遊水地による河川を遡上する津波の低減効果として、波高の低減、津波到達時間の遅延、高水位の継続時間の低減が確認された。今回確認された低減量は劇的に大きなものではないが、緊急時においては、これらの差が被災の有無や人命に影響するケースがあると考えられる。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と考えられる。

参考文献

- 1) International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, Annual Report 2004, p.10, 2005.7
- 2) Indonesia:Preliminary Damage and Loss Assessment The December 26,2004 Natural Disaster,BAPPENAS and The International Donor Community, p.9, 2005.1
- 3) 幸左賢二ら：スマトラ地震の津波による橋梁被害分析，土木学会地震工学論文集，pp.895～901，2007

- 4) 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, pp.2-9, 2006.7
- 5) 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, 土木研究所寒地土木研究所月報, 第695号, pp.2-11, 2011.4

- 6) 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, pp.1366-1370, 2005
- 7) 社団法人 日本港湾協会: 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), p.238, 2007



矢野 雅昭*
Masaaki YANO

寒地土木研究所
寒地水圏研究グループ
水環境保全チーム
研究員



吉川 泰弘**
Yasuhiro YOSHIKAWA

寒地土木研究所
寒地水圏研究グループ
寒地河川チーム
研究員



平井 康幸***
Yasuyuki HIRAI

寒地土木研究所
寒地水圏研究グループ
寒地河川チーム
上席研究員
技術士(建設)



田中 茂信****
Shigenobu TANAKA

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
博士(工学)