

## 津波を対象とした基礎的実験に基づく流速の評価

竹田 周平<sup>\*1</sup>, 伊津野 和行<sup>\*2</sup>, 中尾 尚史<sup>\*3</sup>

### Valuation of Fluid Velocity Based on the Experiment Focused on Tsunami

Syuhei TAKEDA<sup>\*1</sup> Kazuyuki IZUNO<sup>\*2</sup> and Hisashi NAKAO<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup> Faculty of Engineering, Department of Architecture and Civil Engineering

At 14:46 local time on March 11, 2011, a magnitude 9.0 earthquake occurred off the coast of northeast Japan. This earthquake caused a tsunami which attacked Japan as well as a wide range of localities around the Pacific Ocean. The degree and extent of damage caused by the earthquake and resulting tsunami were enormous, with most of the damage being caused by the Tsunami. After that, hydrodynamic force of Tsunami acting on bridge studied both numerically and experimentally. However, design codes are not established. In this report, we focus on relationship between Tsunami force and flotsam. At first, the canal for experiment was surveyed by level and vertical measurement. Next, we conducted fluid velocity by experiment using some flotsams, and considered relationship between retreated value and water level.

**Key Words :** Tsunami, Floods, Fluid Velocity, Experiment

### 1. 緒 言

2011年に発生した東日本大震災により、岩手から福島県の沿岸部を中心に大津波が来襲し、橋梁の橋桁の流出、地盤の洗掘や沈下、沿岸の防波堤や防潮堤の損傷及び転倒など沿岸部に甚大な被害をもたらした。また、近年増加傾向にあるゲリラ的な集中豪雨により、河川の急激な水位上昇やこれらと共に流下する瓦礫に等により上部構造の流出や下部構造の損傷も発生している。この様に橋梁が被害を受けて道路・鉄道が寸断されると、災害直後の人命救助や復旧作業、またその後の復興にも支障を及ぼすこと、我が国では南海トラフをはじめとする海洋性地震に伴う津波発生の切迫性が指摘されていることから、橋梁の対津波対策が急務であると言える。このような背景により、近年では橋梁に作用する流体力を明らかにする研究が進められるようになり、特に抗力や上揚力については多くの知見<sup>1)</sup>が得られつつある。例えば、幸左<sup>2)</sup>は、スマトラ沖地震以降にこの地震で被害を受けた橋梁被害に着目し、橋桁への津波作用力を検証する実験的検証と、津波外力算定式の提案を行った。その後東日本大震災が発生したことを受け、著者と共に公式調査団として東北の沿岸部の調査を実施、特徴的な被害を受けた国道橋を始め、多数の橋梁の被害分析を試みた。その後の代表的なものとしては、佐々木<sup>3)</sup>は本吉地区に位置する小泉大橋に着目し、記録された動画に基づき津波の波速や水位の時刻歴変化を分析、また津波の伝播遡上解析を試み、解析と実被害との結果を検証、橋梁に作用した津波作用力(抗力や波速の変化)を明らかにしている。これ以外にも、中尾<sup>4)</sup>は実被害を受けた橋梁を分析し橋梁周辺の津波の振る舞いを明らかにしている。また田邊<sup>5)</sup>は、粒子法により橋桁に作用する津波外力の評価を試み、更には川崎<sup>6)</sup>による津波による流体力の軽減

\* 原稿受付 2016年2月29日

<sup>\*1</sup> 工学部 建築土木工学科

<sup>\*2</sup> 立命館大学理工学部 (〒525-0058 滋賀県草津市野路東1丁目1-1)

<sup>\*3</sup> 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

E-mail: s-takeda@fukui-ut.ac.jp

を目指した整流板に対する実験的な検証を行いこの形状による効果を明らかにした。この様に津波の流体力に関する研究は盛んに実施されている。

また津波の来襲に伴って遡上した際、漂流物が橋梁に作用して上部構造が流出した被害も認められる。これは宮城県の定川大橋<sup>1)</sup>が代表的な被害であるが、この橋梁は港付近に位置していたため、貨物船複数回衝突することで上部構造が流出している。また漂流物と類似するものとして北海道付近では、アイスジャム等による橋梁部の閉塞により局所的な水位上昇が認められた。この様に津波による橋梁の被害の要因は、遡上や引き波による津波作用力、漂流物による衝撃的な被害や漂流物による閉塞が要因のものが多い。しかしながら、多くの研究は、対津波設計を行う上で優先順位が高い流体力（津波による水平力と上揚力）のみを対象とした実験や解析が進められ、実際の瓦礫等の漂流物と共に遡上する津波の流体力については、まだ十分に明らかにされていない。今後の津波から橋梁等の構造物を守るための対策を加速させるためには、これらの漂流物を含む流体力や、漂流物が橋梁等の構造物に衝突する場合、閉塞して水圧が増加する様なケースを想定した現象を明らかにすることが重要であると言える。

津波による漂流物と流体力の関係を検討にする際、洪水と共に流下する漂流物との関係が非常に類似している。この様な対策として、国内の一部の橋梁には、橋梁の上流部に流木止めや流木よけと称される構造物が設置されている。代表的な橋梁を Fig.1 に示す。図中に示す(a)は京都市内の桂川の渡月橋、(b)は同じく京都市内の宇治川の宇治橋、(c)は伊勢市の五十鈴川の宇治橋である。共に比較的規模の大きな橋梁である。過去の近年の洪水において、この流木止め・流木よけにより、橋梁の被害が免れた可能性もある。よって、このような流木止め・流木よけの設置が橋梁にどのような影響が認められるのか評価を試みることも重要と言える。しかし、一般的な室内実験用の水路では、水路幅が 30-40cm と狭くその幅内に Fig.1 に示すような流木止め等を設置して、流木等を流すと、側壁に接触や衝突して適切な評価を行うことが困難となる。これが津波と漂流物の関係に着目した実験的な研究の課題でもある。すなわち、側壁用の境界に影響されない条件下による、漂流物と共に遡上する津波の流速を実験により明らかにすることが重要である。

以上より本研究では、水路幅が広い野外の用水路を対象に、①用水路の選定と水位に対する理論流速値の評価、②いくつかの観測水位による実流速の測定、③理論値に対する実流速との相関関係を明らかにする基礎的な実験を行うこととした。

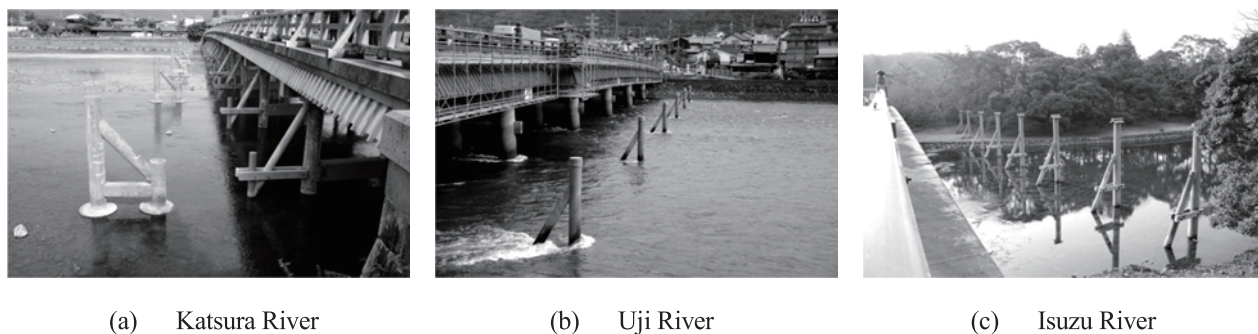


Fig.1 The column of flotsam protection

## 2. 実験の概要

### 2.1 対象用水路の概要

本来、室内実験により検証を試みることが多いが、今回の実験の最終目標は木材に代表される瓦礫等の漂流物を流下させて、橋梁付近を通過する振る舞いや、流木止め・流木よけの効果を確認することである。しかしながら、木材等の瓦礫を想定した漂流物を流下し、Fig.1 に示すような構造にて実験をする場合、ある程度の横幅が求められる。この理由は、一般的な水理実験装置の水路幅は 30-40cm であるが、このような実験条件では、漂流物が側壁等に衝突または接触する可能性が高くなるためである。以上を踏まえ、今回の実験では、実用水路を選定した。実用水路の場合、護岸の形状や河床の堆積物による影響があるか否か、安定した流量・流速の確保が重要と

なる。また、計測の際の安全性の確保の条件などを考慮する必要がある。これらを踏まえ、現地調査の結果、福井工業大学から約 100m の位置（福井市光陽）である県立養護学校横の約 100m の直線区間を選定した。実験に先立ち、水路の河床勾配および断面を把握するために縦・横断面測量（水準測量）を行い、ここで得られた結果に基づき河床勾配（ $i=1/750$ ）と断面（河床幅  $B=1.19\text{m}$ ，護岸勾配 1:0.3）を求めた。なお用水路の構造はブロック積であり、施工時の誤差や若干の変状の影響もあり、勾配や高さなどに若干の差が認められたが、ここでは得られた計測断面から用水路の標準断面を定めることにした。また同時に、河床付近に凹凸がなく極力平坦な区間であることを確認した。測点について、最下流側に測点 No.1 を設定し 10m の間隔で測点 No.7 までの 60m 区間を実験用水路と設定した。Fig.2 に用水路の平面図を示す。図中の矢印は流下する方向を示す。

現地調査の結果より、概ね用水路勾配と用水断面が一定であり、ブロック積み構造の統一区間で粗度係数が一定で評価できること、また河床の凹凸がなくて用水が定常的に流れていることを踏まえ、実験に適すると判断した。

## 2.2 流速及び水位の測定の方法

流速の計測について、プロペラ式流速計による計測など計測機器により直接流速を計測する手法もあるが、実用水路では砂や微細な堆積物等の漂流物があり、計測器機の性能影響を与えることが考えられる。また急激な増水が認められる際に、用水路の流下性能に影響を及ぼす長期的な計測装置の設置も適さない。以上の理由から、本研究では漂流物の移動距離  $L$  (m) と時間  $t$  (s) により流速  $v$  (m/s) を求め、対象とする漂流物を 10 回流下させ各測点を通過する移動時間を秒単位で記録した。実際の計測では、漂流物を上流より流す担当が 1 名、その漂流物を目視しながら測点を通過する時刻を記録する担当が 1 名、また最下流で漂流物を網で受け取る担当 1 名の合計 3 名で実施した。漂流物を上流で流し始める際、慎重に水面に浮かせないで波紋等の影響で流れが乱れることから、Fig.2 に示す No.7 の測点よりさらに上流の地点（約 20m 程度）の地点で漂流物を用水路に投入した。これにより No.7 を通過する際は、用水と漂流物が同調して流れている状況を設定できた。

## 2.3 漂流物の選定

Table 1 に使用した漂流物について示す。流速を計測するための漂流物は、重さや大きさの異なるものを対象に 5 種類を選定した。なお硬式野球球でも実験を行ったが、途中で含水比が多くなるにつれて河床に沈んだため評価の対象から除外した。なお本実験では、吃水（漂流物が水に浮かんでいる時の水深）に着目しており、角形状のマス様の構造では、吃水が一定でないことから対象から除外した。

ここで、対象とする漂流物の選定において、用水路の水位が浅くなった条件で、河床付近まで沈んだ漂流物だと漂流物により流れ場や流速が変わるなど課題がある。このため、本研究においては、水位  $h=0.35\text{m}$  程度を目安に、ボール型の漂流物と釣りの浮きの漂流物を使い分ける方法とした。なお、釣りの浮きで棒状のものは、吃水深だけから判断すると最も深くなるが、径が細くて軽いことから、用水路を流れる水の流れには影響ない。



Fig.2 View of canal



Table 1 Data of flotsam by using 5 objects

Flotsam	Length ① (mm)	Draft ② (mm)	②÷①×100 (%)
Baseball ball	70.0	51.2	73
Tennis ball	67.0	28.5	43
Table tennis ball	40.3	8.2	20
Float for fishing (globe)	20.0	13.0	65
Float for fishing (stick)	135.0	97.8	73

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 理論値の評価

まず実験について、降雨があると微量ではあるが増加流量が認められることから、降雨時は実験を行わないこととした。また用水路は、農業用の取水等を目的としているものがあり、常時安定して流下していない。このため、比較的安定して水位が確保でき、降雨比較的小なく気候が穏やかである9月中旬から10月中旬を実験の対象とした。今回は、その中でも安定して計測できた表中に示す4日間（共に2015年）の結果を用いることとした。

Table 2 に測定水位の平均値とマニング公式に基づく平均流速の理論値を示す。平均水位はそれぞれの測点の位置における水位を計測し平均化したものであり、 $h=0.24\text{m}\sim 0.45\text{m}$  の範囲である。表中に示す平均流速（理論値）は、マニング公式により計算した結果を対象区間である No.1～No.7 で平均化した結果である。解析において、マニング公式により求める際に設定する粗度係数は  $n=0.029$  とし、計測された水位及び河床勾配から平均流速を求めた。この結果、理論値の平均流速は、 $0.41\sim 0.54\text{m/s}$  の範囲となった。Table 3 に代表的な2015年9月29日の（ $h=0.45\text{m}$ ）の流速の測定結果を示す。表中に示す、例えば7-6は測点区間の No.7～6 までの区間であることを意味し、No.7側が上流側となる。この9月29日の結果より、硬式テニスでの平均流速は $0.58\text{m/s}$ 、軟式野球は $0.60\text{m/s}$ 、またピンポン球が $0.53\text{m/s}$ となった。ピンポン球がその他の2種類に比較し遅い値となっているが、これは吃水が浅くまた質量が軽量であることから風の影響を受けやすく、その結果として速度が遅くなった（ばらつきが多い）ことが要因である。Fig.3に流速の結果をグラフで示す。この図は、縦軸は測定した流速を、横軸は測点区間を示している。6-5の区間が速くなった要因について、その区間の橋梁位置で、用水断面が他の区間と比較し若干狭くなっていること、また用水路に合流がないため流量に変化がないことから、連続式の原理より流速が速くなったものと考えられる。硬式テニスボールと軟式野球ボールについて、5-4 から2-1 までは、理論値と実測値は、値は違うものの同様な傾向の変化であった。

Table 2 Average water level and velocity based on analysis

Date	Average water level $h$ (m)	Average velocity $v$ (m/s)
9/29	0.45	0.54
10/2	0.38	0.51
10/8	0.24	0.41
10/16	0.32	0.46

Table 3 Result of analysis velocity (9/29, Average water level:0.45m )

Flotsam	7-6	6-5	5-4	4-3	3-2	2-1	Ave. velocity
Tennis ball	0.61	0.64	0.58	0.56	0.57	0.54	0.58
Baseball ball	0.58	0.67	0.60	0.58	0.58	0.58	0.60
Table tennis ball	0.55	0.62	0.48	0.51	0.53	0.49	0.53

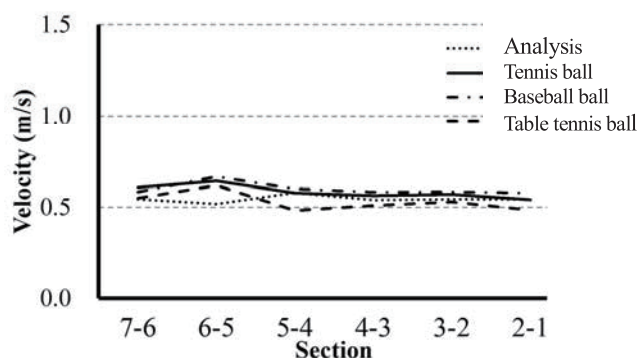


Fig.3 Result of velocity comparison (9/29, Average water level:0.45m )

### 3.2 測定値と理論値の比較

Table 4 に平均流速の理論値と計測で得られた測定値の差を示す．この表に示す値は〔測定値－理論値〕で求めた．なお表に示す値について，0.00 は理論値と測定値が同じであること，正の値は測定値が速く，また負の値は理論値が速いことを意味する．水位が最も深い 9/29 では，硬式テニスと軟式野球の結果が 0.04 と 0.06 で非常に近似した値であるが，ピンポン球のみ測定値と理論値との差が見られない．また次に水位が深い 10/2 では硬式テニスと軟式野球が -0.09 と一致したがピンポン球のみ -0.16 と異なる．なお，10/16 における丸浮きと長浮きでの結果はほぼ同じ値，すなわち断面部を平均化した流速である理論値と，表面部を流れる漂流物部の速度が同じであることを意味することから，吃水の影響を受けていないことが判る．

Table 5 に更正係数の算定式より求めた係数の一覧を示す．ここで示す更正係数は，理論値÷測定値で求められる値である．一般的に水深が 0.70m 以下の場合には更正係数が一律 0.85<sup>2)</sup>として取り扱われる．しかしながら，今回の対象とする用水路では水深が浅く川幅も狭いことから，この考えを適用できるのか否かを判断する必要がある．以上より計測で得られた測定値と解析で求めた流速の理論値に基づき更正係数を試算した．本研究では，区間毎の結果より多少のばらつきが認められたため，平均値に着目して更正係数を評価した．硬式テニスと軟式野球との関係は  $h=0.45\text{m}$  (9/29) の結果で 0.03 (0.93-0.90) の差でわずかの違いであり， $h=0.38\text{m}$  (10/2) は同じ結果 (1.21) を得た．また，丸浮きと長浮きについては，吃水が異なるものの，概ね硬式テニスと軟式野球と同程度 (0.03) の差であった．なお，今回の計測において，吃水深さが浅く質量が軽いピンポン球は風の影響を受けており，得られた結果と他の漂流物での結果を比較するには信頼性が低いとの判断をし，比較の対象から除外した．

Table 4 Average velocity differentials between analysis and experiment

Date	Flotsam	7-6	6-5	5-4	4-3	3-2	2-1	Ave.
9/29 $h=0.45\text{m}$	Tennis	0.07	0.12	0.00	0.02	0.03	0.00	0.04
	Baseball	0.04	0.15	0.02	0.04	0.04	0.04	0.06
	Table tennis	0.01	0.10	-0.10	-0.03	-0.01	-0.05	-0.01
10/2 $h=0.38\text{m}$	Tennis	-0.03	-0.03	-0.10	-0.08	-0.13	-0.13	-0.09
	Baseball	-0.04	-0.03	-0.12	-0.07	-0.08	-0.15	-0.09
	Table tennis	-0.06	-0.07	-0.19	-0.17	-0.17	-0.23	-0.16
10/8 $h=0.24\text{m}$	Float for fishing (globe)	-0.05	0.03	-0.08	-0.09	-0.10	-0.10	-0.07
	Float for fishing (stick)	-0.04	-0.01	-0.10	-0.09	-0.11	-0.14	-0.08
10/16 $h=0.32\text{m}$	Float for fishing (globe)	-0.01	0.07	0.00	0.00	-0.03	-0.04	0.00
	Float for fishing (stick)	0.00	0.05	-0.02	-0.04	-0.04	-0.05	-0.01

Table 5 Retreated value

Date	Flotsam	7-6	6-5	5-4	4-3	3-2	2-1	Ave.
9/29 $h=0.45\text{m}$	Tennis	0.89	0.81	1.00	0.96	0.95	1.00	0.93
	Baseball	0.93	0.78	0.97	0.93	0.93	0.93	0.90
	Table tennis	0.98	0.84	1.21	1.06	1.02	1.10	1.02
10/2 $h=0.38\text{m}$	Tennis	1.07	1.06	1.23	1.19	1.34	1.34	1.21
	Baseball	1.09	1.06	1.29	1.16	1.19	1.42	1.21
	Table tennis	1.15	1.16	1.54	1.52	1.50	1.82	1.46
10/8 $h=0.24\text{m}$	Float for fishing (globe)	1.14	0.93	1.23	1.28	1.32	1.32	1.21
	Float for fishing (stick)	1.11	1.03	1.30	1.28	1.37	1.52	1.24
10/16 $h=0.32\text{m}$	Float for fishing (globe)	1.02	0.87	1.00	1.00	1.07	1.10	1.00
	Float for fishing (stick)	1.00	0.90	1.04	1.10	1.10	1.12	1.02

### 3.3 更正係数の評価

実験で得られた結果に基づき、更正係数と水位の評価を行う。Fig.4 に更正係数と水位との相関関係について示す。ここに縦軸は更正係数を横軸は平均水位を示す。この図より水位が浅くなると更正係数が大きくなる負の相関関係があることが判り、近似式で評価すると式 (1) で求められる。ここに示す  $y$  は更正係数、 $X$  は水位(m)である。また累積近似曲線で評価した結果  $R^2=0.8883$  と非常に高い相関があることが判る。なお、図中に示す水位が 0.70m 時のデータは、参考文献<sup>4)</sup>で規定されている最低値である。しかしながら、今回の実験において、水位が  $h=0.38\text{m}$  (10/2) の更正係数が 1.00 以上であり、下記のような相関ではない関係にあるため、今回の相関関係の評価にはこの 10/2 に測定した結果を除く、3 回分 (9/29, 10/8, 10/16) のデータに基づき評価を行った。

参考文献では、 $h=0.70\text{m}$  以下の水位では更正係数を 0.85 と一定値に設定されているが、今回実験を実施した用水路においては、水位が浅くなるにつれて逆に更正係数が大きくなる結果を得た。すなわち、用水路のような河川よりも規模が小さい場合では、水位が 0.70m 以下の条件でも適切な更正係数を適用しないと正しい評価ができない。

$$y = 0.7093X^{-0.351} \quad (1)$$

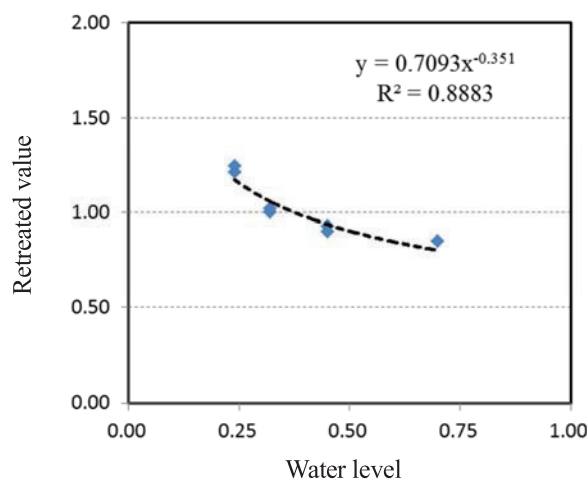


Fig.4 Relationship between retreated value and water level

#### 4. 結 言

本研究では、津波や洪水の際に瓦礫などの漂流物がどのような影響を与えるのか明らかにする実験を試み、またこの用水路の流速に関する実験及び計測水位に基づく理論値との比較を行った。この結果、得られた4つの水位の結果のうち、一日分を除く3回のデータより、累積近似曲線で更正係数と水位との相関関係を求める式を得ることができた。これにより、浅い水位における更正係数の評価を行うことが可能となった。

しかしながら、この評価式は限られたデータに基づいた基礎的な実験結果であることから、今後はこの評価式の検証を行うことが重要である。また、今回の実験で得られた結果の信頼性を高めるために、水位が深くなる条件においても流速の計測と理論値の比較から更正係数の検証とを行い、その後に漂流物を流下させた実験を追加し、流木止め、流木よけの評価を試みる。

#### 謝 辞

本研究は、JSPS 科学研究費・基盤研究(b) (課題番号：26289148, 題目：津波や洪水など橋梁の水害に対する安全性向上対策に関する研究) の助成を受けたものです。また福井工業大学建築生活環境学科4回生(投稿時)の雨野亨哉君、玉井嵩弘君、堂浦いつ恵さんに測量及び実験に関する協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

#### 文 献

- (1) 土木学会地震工学委員会, “東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会最終報告書”, 平成 27 年 8 月.
- (2) 幸左賢二, 秋吉秀一, 二井伸一, 木村吉郎, “津波による橋梁への水平作用力に関する実験的検討” 構造工学論文集 Vol.57A, pp.442-453, 2011.
- (3) 佐々木達生, 幸左賢二, 神宮司博志, 佐藤 崇, “東北地方太平洋沖地震による小泉地区の津波被害分析” 土木学会論文集 B2 (海洋工学) Vol.69No.2, pp.821-825, 2013.
- (4) 中尾尚史, 森屋圭浩, 榎本武雄, 星隈純一, “宮古橋周辺での津波の特性と橋に及ぼした影響の評価” 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol.71, No.4, pp.I\_317-328, 2015.
- (5) 田邊将一, 浅井光輝, 中尾尚史, 伊津野和行, “3次元粒子法による橋桁に作用する津波外力評価とその精度検証” 構造工学論文集, Vol.60A, pp.293-302, 2014.
- (6) 川崎祐摩, 伊津野和行, 生島直輝, 山中拓也, 四井早紀 “津波による流体力軽減に有効な整流板形状に関する実験的研究” 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol.70, No.1, pp.129-136, 2014.
- (7) 国土交通省水管理・国土保全局, “国土交通省河川砂防技術基準”, 平成 26 年 4 月.

(平成 28 年 3 月 31 日受理)