橋桁に作用する津波波力と津波流速の関係

Relationship between Tsunami Fluid Force and Tsunami Velocity Acting on a Bridge Deck

清水裕文¹・庄司 学²

Hirofumi SHIMIZU and Gaku SHOJI

Authors carried out hydraulic experiments to clarify the relationship between tsunami fluid force and tsunami velocity acting on a bridge deck subjected to surging breaker bores, plunging breaker bores, waves whose surface inclination is mild slope, and breaker bores with a bridge deck sets up under the still water level. Experimental results show the mechanism that the height of a bridge deck to a tsunami height with meanings of variation of surface inclination of waves causes a significant difference of wave velocity. In addition, it causes variation of Froude number, and leads differences of horizontal and vertical fluid forces acting on a bridge deck.

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震津波においては港湾、道路等の社会基盤構造物に甚大な被害が発生した。それらの中でも、道路を構成する橋梁の津波被害による機能支障は救助救援及び復旧活動に大きな影響を与えた。

2004年インド洋大津波を契機として橋梁に対する津波作用のメカニズムに関する研究は数多くなされている。孤立波や碎波段波の津波作用を想定し、水位ベースでの水平波力及び鉛直力の特性やそれらとの合田(1973)や朝倉ら(2000)による式との関係が水理実験並びに数値解析を通じて明らかにされている(片岡ら, 2006; 荒木ら, 2008; 二井ら, 2009; 中尾ら, 2009; 嶋原ら, 2009; 荒木ら, 2010; 平木ら, 2011; 庄司ら, 2012)。津波流速が構造物に与える影響の観点からは、家屋を対象に松富・飯塚(1998)が現地調査、実験及び理論に基づいた陸上流速の特性を明らかにしており、松富ら(2008)は実際の氾濫流速の推定式を提案している。庄司・森(2006)は桁移動及び計測流速の松富・飯塚(1998)による式への適応を検討し、五十里・後藤(2007)は粒子法により流速と桁移動の関係性を明らかにした。しかし、橋桁に作用する津波波力に大きな影響を及ぼす波面勾配及びそれに付随する津波流速に関するメカニズムについては十分に明らかになっていない。

本研究では、碎波段波、波面勾配の緩やかな波及び橋桁が水没した状態での碎波段波を模擬した水理実験に基づいて、橋桁に作用する津波の波面勾配及びそれに付随する津波流速が津波波力に与える影響を明らかにする。

2. 実験方法

橋桁への津波作用としては、砕け寄せ波型碎波段波、巻

き波型碎波段波、波面勾配が緩やかな波及び橋桁が水没した状態での巻き波型碎波段波を対象とした。砕け寄せ波型は河口付近近傍において津波が河川を遡上後に橋桁に作用する状態、巻き波型は河口部の極近傍で津波が作用する状態を模擬している。波面勾配が緩やかな波は津波が遡上するような河川位置において河川水面の低い状態で津波が橋桁に作用する状態を模擬しており、橋桁が水没した状態での巻き波型は河口部の極近傍において第1波の津波により橋桁が水没し、湛水状態にある橋桁に対して第2波の津波が作用する状態を模擬している。

実験条件及び実験水路を表-1、図-1に示す。橋桁模型は、インド洋大津波で被災したインドネシアの単径間RC桁橋 Lueng Ie Bridgeを幾何学的に1/79.2に縮尺した。橋桁模型の構造諸元及び対象とする波面形状の模式図を図-2、図-3に示す。ただし、橋桁模型下部への空気混入が津波波力に与える影響については後述する計測方法において切り離すことができないため以下では論じない。

碎波段波の実験ケースでは、桁下から河床までの高さを50mmに固定し、静水深 h_0 を8ケースに変化させた。また、造波を多数回試行し、図-1中0地点から1500mmの位置における碎波段波を巻き波型、5500mmの位置における碎波段波を砕け寄せ波型と定義した。波面勾配が緩やかな波の実験ケースでは、橋桁模型を0地点から1500mmの位置に設置し、ドライベッドの状態下で桁下高 h_c を4ケースに変化させた。橋桁が水没した状態での巻き波型の実験ケースでは、橋桁模型を0地点から1500mmの位置に設置し、桁上高 $h_a=10\text{mm}$ と固定した上で桁下高 h_c を2ケースに変化させた。全てのケースで貯水部水位を3段階変化させることにより津波波高 a を3段階変化させ、ゲート急開方式により波を発生させた。

計測パラメータは橋桁模型前面の津波流速 v 、橋桁前面及び背面の津波波高 a 、橋桁模型に作用する水平波力 F_x 、鉛直力 F_z 及び y 軸回りのモーメント M_y である。津波流速は β

1 学生会員 筑波大学大学院システム情報工学研究科
構造エネルギー工学専攻
2 正会員 博(工) 筑波大学システム情報系

図-1 実験水路及び模型設置状況

図-2 橋桁模型

図-3 波面の形状と各パラメータ

ロペラ式流速計 (KENEK 製 VOT2-100-10)、津波波高は容量式波高計 (正豊工学実験装置製作所 L300) 及び超音波式波高計 (KEYENCE 製)、水平波力及び鉛直力は 3 分力計 (日計電測株式会社 製 Y102) を用いて計測する。流速計は静水面を設定した状態、ドライベッドの状態及び橋桁が水没した状態のいずれにおいても橋桁前面に設置した。分力計は上記のそれぞれの状態においてゼロ点補正を行い、桁模型-分力計で構成される系の最低次の固有振動数は水平方向 2.96Hz、鉛直方向 4.25Hz であり、後述する F_x 及び F_z のピーク値を記録する際の振動数とはかけ離れている。データのサンプリング間隔は 1/200 秒とし、全ての時系列データに対して、ある時刻におけるデータとその前後の 10 データの合計 21 データを用いて移動平均を施す。全てのケースにおいて再現性の高い時系列波形のデータが 3 回得られるまで実験を行った。分析には津波流速及び前面津波波高は橋桁模型なしのデータ、水平波力及び鉛直力については橋桁模型有りのデータを用いる。

3. 前面水位及び津波流速の時系列

図-3 で定義した前面水位 h 及び津波流速 v の時系列の一例を図-4 及び図-5 に示す。前面水位において、砕け寄せ波型、巻き波型及び橋桁が水没した状態での巻き波型は立ち上がり後 1 秒以内にピーク値を示すのに対し、波面勾配が緩やかな波は立ち上がり後、前面波高がピーク値に達するまで平均

表-1 実験条件

砕け寄せ波型碎波段波

CASE 番号	橋桁模型設置位置 (mm)	静水深 h_0 (mm)	桁下高 h_c (mm)	貯水部水位 (mm)	記号
1	1	5,500	50	0	430
	2				440
	3				450
2	1	5,500	45	5	430
	2				440
	3				450
3	1	5,500	40	10	425
	2				435
	3				445
4	1	5,500	35	15	425
	2				435
	3				445
5	1	5,500	30	20	425
	2				435
	3				445
6	1	5,500	25	25	425
	2				435
	3				445
7	1	5,500	20	30	425
	2				435
	3				445
8	1	5,500	10	40	465
	2				470
	3				470

巻き波型碎波段波

CASE 番号	橋桁模型設置位置 (mm)	静水深 h_0 (mm)	桁下高 h_c (mm)	貯水部水位 (mm)	記号
9	1	1,500	50	0	410
	2				420
	3				430
10	1	1,500	45	5	402
	2				412
	3				420
11	1	1,500	40	10	410
	2				420
	3				430
12	1	1,500	35	15	390
	2				400
	3				410
13	1	1,500	30	20	390
	2				400
	3				410
14	1	1,500	25	25	410
	2				415
	3				420
15	1	1,500	20	30	420
	2				425
	3				430
16	1	1,500	10	40	440
	2				445
	3				450

波面勾配が緩やかな波

CASE 番号	橋桁模型設置位置 (mm)	静水深 h_0 (mm)	桁下高 h_c (mm)	貯水部水位 (mm)	記号
17	1	1,500	0	10	420
	2				430
	3				390
18	1	1,500	0	20	410
	2				420
	3				430
19	1	1,500	0	30	425
	2				430
	3				440
20	1	1,500	0	40	445
	2				450
	3				450

橋桁が水没した状態での巻き波型碎波段波

CASE 番号	橋桁模型設置位置 (mm)	桁上高 h_a (mm)	桁下高 h_c (mm)	貯水部水位 (mm)	記号
21	1	1,500	10	10	410
	2				420
	3				430
22	1	1,500	10	20	390
	2				400
	3				410

註：表中のケース番号に対応した記号は図-6、図-7、図-8、図-9 の図中の記号と全て対応している

4.54 秒となった。これは図-3 に示すように波面勾配が緩やかであり、波の進行方向に水がないため橋桁前面及び桁下空間の水位が徐々に増加するためである。津波流速に関しては、砕け寄せ波型、巻き波型及び波面勾配が緩やかな波では立ち上がり後平均 0.23 秒でピーク値となり、橋桁が水没した状態での巻き波型では相対的にその時間が 0.82 秒と長い。巻き波型と橋桁が水没した状態での巻き波型の流速の最大値

図-4 津波波高の時系列（橋桁模型なしの場合のデータ）

図-5 津波流速の時系列（橋桁模型なしの場合のデータ）

図-6 実験におけるフルード数（図中のプロットは表-1中の記号と対応）

の平均を比較するとそれぞれ98.1cm/sと68.87cm/sとなり、橋桁が水没した状態での巻き波型の流速は遅くなった。

4. 津波波力と津波流速の関係

図-4及び図-5に示した津波波高及び津波流速の時系列に対してピーク値以降の0.5～3.0秒間の準定常的な区間の時間平均 $\bar{a}_{ave}$ 及び $\bar{v}_{ave}$ を求め、実験回数分の平均を $\bar{a}_{ave}$ 、 $\bar{v}_{ave}$ と定義した。さらに、前面水位 $\bar{h}_{ave}=h_0+\bar{a}_{ave}$ とし、フルード数 $F_r=\bar{v}_{ave}/\sqrt{g\bar{h}_{ave}}$ を図-6のように算出した。

碎け寄せ波型におけるフルード数 F_r は桁下高 h_c が高いと値が大きい傾向が見られ、最大値は0.60 (CASE7-3)、最小値は0.36 (CASE6-1)となった。巻き波型においてはその傾向が顕著となり、最大値は0.78 (CASE16-3)、最小値は0.34 (CASE13-1)となった。波面勾配が緩やかな波では、 F_r の最大値は1.17 (CASE17-1)、最小値は0.25 (CASE20-1)となり、 F_r は h_c が低いほど大きくなった。橋桁が水没した状態での巻き波型では、 F_r の最大値は0.58 (CASE21-3)、最小値は0.32 (CASE22-1)となり、 F_r は h_c が低くなると大きくなった。また、静水深が設定された状態下の巻き波型と比べて最大値が0.74倍、最小値が0.93倍となった。碎け寄せ波型では、波の上部が作用すると流速が速く、 F_r が大きい値となり、波の下部が作用すると流速が遅く、 F_r が小さい値となった。巻き波型においては上記の碎け寄せ波型と同様の傾向であり、碎け寄せ波型より最大流速とそれに伴う F_r が大きく、また、最小流速とそれに伴う F_r が小さくなった。波面勾配が緩やかな波では、前述の静水深が設定されている際の砕波段波とは逆の傾向となり、波の下部が橋桁に作用すると流速が速く、 F_r が大きい値となり、波の上部が作用すると流速が

遅く、 F_r が小さくなった。同様に橋桁が水没した状態での巻き波型では、静水面上で波が進行する状態下で桁下高が低いと流速が速くなり、桁下高が高いと流速が遅くなったが流速が相対的に遅い結果、 F_r が小さくなった。

津波波高のピーク値 a を3回の実験回数分で平均し、 $\bar{a}$ を求める。水平波力 F_x 及び鉛直力 F_z は橋桁模型に津波が作用した直後の衝撃的な波力のピーク値である。それらを橋桁側面受圧面積 A_s 及び橋桁底面受圧面積 A_b でそれぞれ除し、 F_x/A_s 及び F_z/A_b を $\bar{a}$ 相当の静水圧 $\rho g \bar{a}$ で無次元化した上で、 $\kappa=(F_x/A_s)/(\rho g \bar{a})$ 及び $\lambda=(F_z/A_b)/(\rho g \bar{a})$ を定義した。ここで、 ρ は水の単位体積質量、 g は重力加速度である。

κ と F_r の関係を図-7に示す。碎け寄せ波型では、 $F_r=0.37\sim0.60$ 、 $\kappa=0.85\sim1.79$ となり、桁下高が高く、切り立った波の上部が橋桁に作用すると流速が速くなり、 F_r が大きくなるため κ が大きくなる。桁下高が低く、波の下部が橋桁に作用すると流速が遅くなり、 F_r が小さくなるため κ が小さくなる。巻き波型では、上記の碎け寄せ波型と同一の傾向が見られるが、同一の静水深における κ は相対的に大きくなった。波面勾配が緩やかな波では、 $F_r=0.25\sim1.17$ 、 $\kappa=1.08\sim2.37$ となった。 $h_c=20\sim40\text{mm}$ では、 $F_r=0.25\sim1.07$ 、 $\kappa=1.08\sim1.59$ となり桁下高が低くなると F_r が大きくなり、 κ は緩やかに増加する。桁下高が最小となる $h_c=10\text{mm}$ では、 $F_r=1.12\sim1.17$ 、 $\kappa=1.98\sim2.37$ となり、それより桁下高が高い場合と比較して κ が急激に大きくなった。これは、波面勾配が緩やかな波の場合には、桁下高が低く波の下部が橋桁に作用すると流速が速くなり、 F_r が大きくなるため κ が大きくなることを示している。橋桁が水没した状態での巻き波型では、桁下高が最小となる $h_c=10\text{mm}$ の場合に、 $F_r=0.54\sim0.58$ 、 $\kappa=0.89\sim0.99$ と

図-7 κ と F_r の関係 (図中のプロットは表-1中の記号と対応) 図-8 λ と F_r の関係 (図中のプロットは表-1中の記号と対応)

図-9 津波波高と津波流速の関係 (図中のプロットは表-1中の記号と対応)

註: 各図における点線は
松富ら(2008)の式
 $u/\sqrt{gR}=0.6\sqrt{h_f/R}$,
 $u/\sqrt{gR}=1.1\sqrt{h_f/R}$

なった。静水面上の波の進行に伴う水没した領域での波の作用により、桁下高の低い流速が速くなり F_r が大きくなるため、 κ は大きくなった。桁下高が高い $h_c=20\text{mm}$ の場合には、 $F_r=0.32\sim0.41$ 、 $\kappa=0.55\sim0.58$ となる。これは上記の桁下高が低い場合とは逆に、桁下高が高く、流速が遅くなり、 F_r が小さくなるため κ は小さくなった。また、 κ の最大値は他の境界条件の場合と比較すると相対的に小さい。

λ と F_r の関係を図-8に示す。砕け寄せ波型では、桁下高が最大となる $h_c=40\text{mm}$ の時、 $F_r=0.55\sim0.57$ 、 $\lambda=-0.23\sim-0.57$ で下向きの鉛直波圧となり、それより桁下高が低い $h_c=30\text{mm}$ の場合には、 $F_r=0.53\sim0.60$ 、 $\lambda=-0.40\sim0.05$ となり、中でも津波波高が高い場合に上向きの鉛直波圧が発生し始める。桁下高がさらに低い場合には、 $F_r=0.36\sim0.58$ 、 $\lambda=0.06\sim0.41$ となり全て上向きの鉛直波圧となった。巻き波型でも上記の砕け寄せ波型と同様の傾向となる。すなわち、桁下高が高く、切り立った波面勾配の波の上部が橋桁に作用すると流速が速くなり F_r が大きくなる結果、下向きの鉛直波圧が作用する。逆に桁下高が低く、波の下部が作用すると流速が遅く F_r が小さくなる結果、上向きの鉛直波圧が作用する。波面勾配が緩やかな波では、桁下高が低い $h_c=10\text{mm}$ の場合に、 $F_r=1.12\sim1.17$ 、 $\lambda=0.07\sim0.09$ となり、上向きの小さな鉛直波圧となる。 h_c が高くなると $F_r=0.25\sim1.07$ 、 $\lambda=0.28\sim0.54$ となり、 F_r の値が小さくなり、ほぼ一定の上向きの鉛直波圧となる。これは、波面勾配が緩やかな波の場

合、桁下高が低く、波の下部が作用した場合の方が流速が速く、 F_r が大きくなり、小さな上向きの鉛直力を生じるが、桁下高が高く、波の上部が作用すると流速が遅く、 F_r は小さくなるものの一定の上向き鉛直力が作用することを意味する。橋桁が水没した状態での巻き波型では、静水面上で波が進行する状態下で桁下高が低い $h_c=10\text{mm}$ の場合に $F_r=0.54\sim0.58$ 、 $\lambda=0.17\sim0.19$ となり、上向きの鉛直波圧が作用する。その状態下で桁下高が $h_c=20\text{mm}$ と高くなると、 $F_r=0.32\sim0.41$ 、 $\lambda=-0.010\sim-0.011$ となり小さな下向きの鉛直波圧が作用する。これは、静水面上で波が進行する状態下で橋桁が水没していると桁下高の高い場合の方が流速が遅くなり F_r が小さくなるため、下向きの鉛直波圧が作用する。同様の状態下で、桁下高が低いと流速が速くなり F_r が大きくなる結果、上向きの鉛直波圧が作用する。なお、既往研究では水平床版に作用する揚圧力は波面上昇速度や波速に対する感度が高いと論じられている(室田・古土井, 1966; 下迫ら, 2008)。本研究での津波波高のピーク値をその立ち上がり時間で除すことで定義される波面上昇速度は $3.65\sim19.32\text{cm/s}$ であるが、これらに対する F_x 及び F_z の感度に関する検討は行っておらず、今後の課題とする。

5. 前面水位と津波流速の関係

松富・飯塚(1998)における津波打ち上げ高 R 、前面浸水深 h_f 、及び津波流速 u に、本実験データを $R=h_0+\bar{a}_{\text{max}}$ 、

$h_f = h_0 + \overline{a_{ave}^s}$, $u = \overline{v_{ave}}$ ように対応付けた。ここで、 $\overline{a_{ave}^s}$ は橋桁ありの場合の最大波高の実験回数分の平均値、 $\overline{a_{ave}^s}$ は橋桁ありの場合の前面津波波高の実験回数分の平均値である。なお、 h_0 , $\overline{v_{ave}}$ は4章冒頭の定義と同一である。 h_f/R と $u/\sqrt{gR}$ の関係を図-9に示し、松富ら(2008)の結果を図-9中に点線で示す。 $u/\sqrt{gR} \cong \alpha \sqrt{h_f/R}$ とおくと、砕波段波では $\alpha = 0.40 \sim 0.90$ 、波面勾配が緩やかな波では、 $\alpha = 0.19 \sim 0.89$ となり、松富ら(2008)の結果である $\alpha = 0.6 \sim 1.1$ と比べると最大値、最小値ともに小さな値となった。これは、波面勾配の相違があるにも関わらず本実験データにおいては流速に比べ R が高く評価されているためである。

6. 結論

本研究では、砕波段波、波面勾配の緩やかな波及び橋桁が水没した状態での砕波段波を模擬した水理実験に基づき、橋桁に作用する津波の波面勾配及びそれに付随する津波流速が津波波力に与える影響を明らかにした。なお、橋桁に作用する水平波力 F_x 及び鉛直力 F_z を津波波高のピーク値の平均 $\bar{a}$ 相当の静水圧 $\rho g \bar{a}$ で除した水平波圧 κ 及び鉛直波圧 λ を用いて考察した。

- (1) フルード数 F_r は砕け寄せ波型及び巻き波型では、切り立った波の上部が作用すると流速が速く、 F_r が大きい値となり、波の下部が作用すると流速が遅く、 F_r が小さくなった。波面勾配が緩やかな波では、逆に、緩やかな波の下部が橋桁に作用すると流速が速く、 F_r が大きい値となり、波の上部が作用すると流速が遅く、 F_r の値が小さくなった。同様に橋桁が水没した状態での巻き波型では、静水面上で波が進行する状態で桁下高が低いと流速が速くなり、桁下高が高いと流速が遅くなったが流速は相対的に遅く結果、 F_r が小さい。
- (2) 津波流速と水平波圧 κ の関係に関しては、砕け寄せ波型及び巻き波型では切り立った波の上部が橋桁に作用すると流速が速くなり、 κ が大きくなった。波面勾配が緩やかな波では、逆に、波の下部が橋桁に作用すると流速が速くなり κ が大きくなる。橋桁が水没した状態での巻き波型では、静水面上で波が進行する状態で桁下高が低いほど流速が速くなり、 κ が大きくなる。 κ の最大値は他の境界条件に比べて小さくなった。
- (3) 津波流速と鉛直波圧 λ の関係に関しては、砕け寄せ波型及び巻き波型では切り立った波の上部が橋桁に作用すると流速が速くなるものの下向きの λ が作用する。桁下高が低くなり波の下部が作用すると流速が減少し、上向きの λ が作用する。この特徴は砕け寄せ波型に比べて巻き波型の方が顕著となる。波面勾配が緩やかな波では、逆に、波の上部が作用すると流速は遅くなるものの一定の上向きの λ が作用する。波の下部が作用すると流速が速くなるが上向きの小さな λ のみが作用する。橋桁が水没した状態での

巻き波型では、静水面上で波が進行する状態で桁下高が低いほど流速が速くなるが上向きの λ が作用する。一方、同様の状態で桁下高が高くなると、流速が遅くなり、上向きの λ はほぼ作用しなくなる。

- (4) 津波波高及び前面水位の関係性に関して、松富ら(2008)による式 $u/\sqrt{gR} \cong \alpha \sqrt{h_f/R}$ ($\alpha = 0.6 \sim 1.1$) と比較すると、波面勾配の違いに関わらず流速に比べ R が高く評価され、上式の α の最大値、最小値がともに小さくなった。

謝辞：本研究は、国土交通省平成24年度「津波に強い道路構造物の研究開発」(代表者：幸左賢二・九州工業大学教授)の助成を得て実施致しました。防衛大学校・藤間功司教授、吉田大祐氏及び元筑波大学の江面嘉之氏には実験及びデータ整理に際して多大なご協力を頂きました。

参考文献

- 朝倉良介・岩瀬浩二・池谷 毅・高尾 誠・金戸俊道・藤井直樹・大森政則(2000)：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第47巻，pp. 911-915。
- 荒木進歩・坂下友里・出口一郎(2010)：橋桁に作用する水平および鉛直方向津波波力の特性，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.66, No.1, pp. 796-800。
- 荒木進歩・中島 悠・出口一郎・伊藤慎和(2008)：河口付近の橋梁に作用する津波流体力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第55巻，pp. 866-870。
- 五十里洋行・後藤仁志(2007)：津波氾濫による橋樑被災過程の数値シミュレーション，海岸工学論文集，第54巻，pp. 211-215。
- 片岡正次郎・日下部毅明・長屋和宏(2006)：津波衝突時に橋桁に作用する波力，第12回日本地震工学シンポジウム，pp. 154-157。
- 合田良実(1973)：防波堤の設計波圧に関する研究，港湾技術研究所報告書，Vol.12, No.3, pp. 31-69。
- 鳴原良典・藤間功司・庄司 学(2009)：橋梁構造物に作用する津波波力の数値計算，地震工学論文集，Vol.30, pp. 899-904。
- 下迫健一郎・G. CUOMO・高橋重雄(2008)：臨港道路橋樑に作用する揚圧力とそれに及ぼす空気塊の影響，海岸工学論文集，第55巻，pp. 861-865。
- 庄司 学・森洋一郎(2006)：桁橋の津波被害再現実験，海岸工学論文集，第53巻，pp. 801-805。
- 庄司 学・平木 雄・江面嘉之・飯高 稔・藤間功司・鳴原良典(2012)：橋桁に作用する津波波力の水平成分と鉛直成分の発生メカニズムに関する実験的考察，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.68, No.4 (地震工学論文集第31-b巻)，pp. 1134-1144。
- 中尾尚史・伊津野和行・小林紘士(2009)：津波作用時における橋梁周辺の流れと流体力に関する基礎的研究，構造工学論文集，土木学会，Vol.55, pp. 789-798。
- 二井伸一・幸左賢二・庄司 学・木村吉郎(2009)：橋梁への津波作用力に関する実験的検討，構造工学論文集，土木学会，Vol.55A, pp. 471-482。
- 平木 雄・庄司 学・飯高 稔・藤間功司・鳴原良典(2011)：橋桁へ作用する砕波段波の鉛直力評価，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.67, No.2, pp. 1266-1270。
- 室田 明・古土井光昭(1966)：棧橋床版に作用する揚圧力についての実験的研究，第13回海岸工学講演会講演集，pp. 120-125。
- 松富英夫・飯塚秀則(1998)：津波の陸上流速とその簡易推定法，海岸工学論文集，第45巻，pp. 361-365。
- 松富英夫・岡本憲助・佐藤和典(2008)：浸水痕跡に基づく簡易氾濫流速推定法の基礎的検討，水工学論文集，第52巻，pp. 673-678。