

# 津波の桁への鉛直作用力評価式の適用性検討

幸左 賢二<sup>1</sup>・佐々木 達生<sup>2</sup>・田中 将登<sup>3</sup>・佐藤 崇<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 九州工業大学名誉教授 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

E-mail: kosakenji@yahoo.co.jp

<sup>2</sup>正会員 大日本コンサルタント(株) (〒541-0058 大阪府大阪市中央区南久宝寺町3-1-8)

E-mail: tasuo@ne-con.co.jp

<sup>3</sup>正会員 阪神高速道路(株) (〒552-0007 大阪市港区弁天1-2-1-1900)

E-mail: masato-tanaka@hanshin-exp.co.jp

<sup>4</sup>正会員 (株)長大 (〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730番地)

E-mail: sato-tks@chodai.co.jp

筆者らは津波高、桁位置をパラメータとした津波実験を実施し、その結果橋梁上部構造に対する段波先端部の作用力が津波の最大波高、桁模型の被圧面積、波高に対する桁位置の関数である水平作用力式および鉛直作用力式を提案している。このうち本研究では鉛直作用力提案式と他機関との実験結果の比較を行った。その結果概ね実験結果を提案式が包含していることが明らかとなった。よって、提案式を用いることによって段波性状の津波の作用力を安全側に評価することが可能となる。

**Key Words :** tsunami force, girder, vertical force, bore wave, Tohoku Earthquake

## 1. はじめに

筆者らは津波実験を実施し、橋梁上部構造に対する段波先端部の作用力が津波の最大波高と桁模型の被圧面積、桁下高の関数である式を提案している。

すなわち、再現性の高い一山孤立波性状の津波を桁模型に作用させる実験から、津波の作用力は波高または桁模型の被圧面積の増加とともに線形的に増加することを明らかにした<sup>1)</sup>。本研究では提案した鉛直方向の段波性状の津波作用力評価式の適用性を明らかにすることを目的として、他機関の実験と九州工大の実験結果の比較を行った<sup>1)~7)</sup>。また各実験値と提案式との相違について併せて検討を加えた。

## 2. 九州工大の既往の研究

ここでは九州工業大学で実施された水理模型実験の概要を示す<sup>1)</sup>。実験では段波先端部による橋梁上部構造への作用力を評価するために水理模型実験を実施した。実験の具体的な内容は津波の波高と桁下高をパラメトリックに変化させ、分力計を用いて水平作用力、鉛直作用力の計測を行い、得られた実験結果から橋梁上部構造に作用する津波作用力評価式の提案を行った。

使用した長水路は図-1に示すように長さ41m、幅80cm、橋桁模型位置での水路深さ 95cm の片面ガラス張りの水路であり、津波の造波には左端のピストン型造波装置

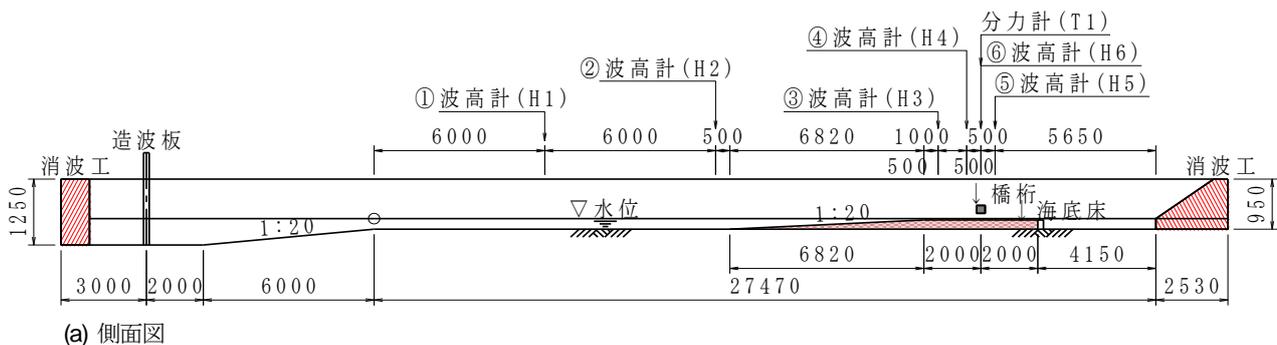
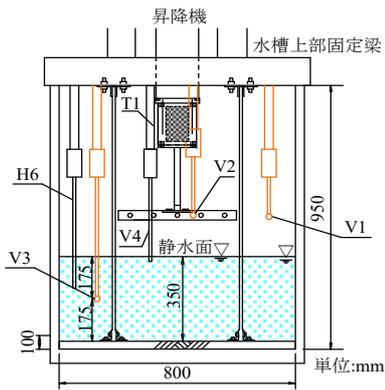
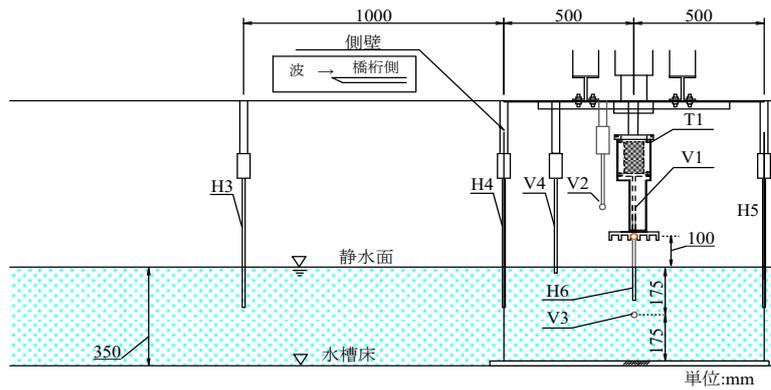


図-1 実験水路 (側面図)



(b) 正面図



(c) 側面図

図-1 実験水路 (正面・側面図)

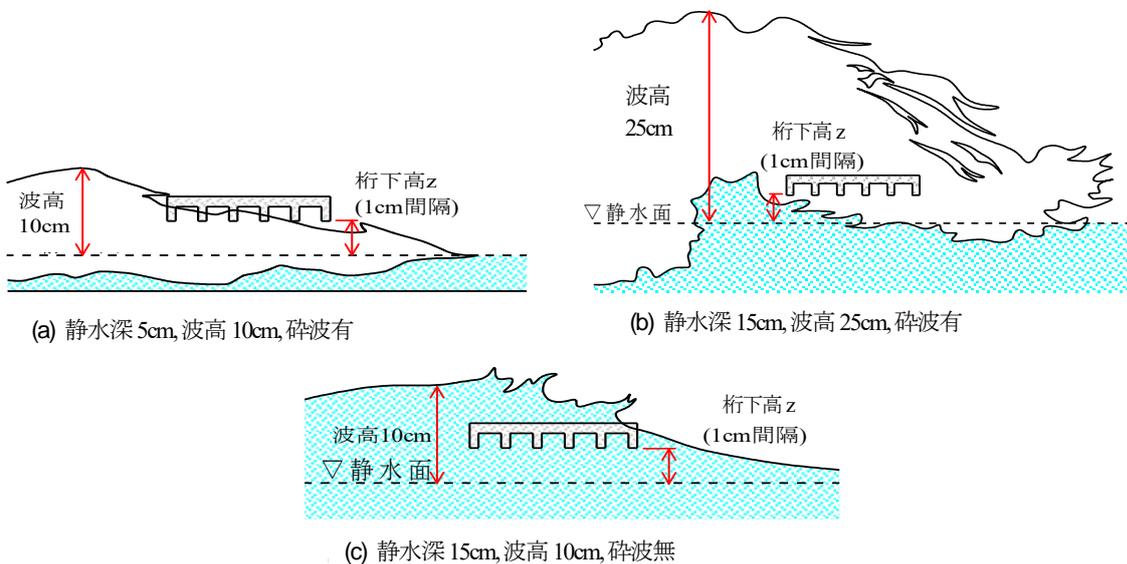


図-2 実験状況模式図と実験パラメータ

を用いている。水路に沿って波高計と流速計，分力計を設置しており，津波の波形や流速，津波が桁模型に作用する際に生じる作用力を計測した。本実験の特徴として，図-1 (b)に示すように橋梁の両端には側壁を設けた。設置の意図は，本対象橋梁は単純橋で本来なら両端に橋台を設置するべきであるが，橋台の影響による三次元的な波の乱れを排除し，桁のみに作用する力の抽出に留意したためである。

図-2 には実験パラメータを示す。同図より実験で考慮したパラメータは，桁下高 $(z)$ ，波高 $(a_H)$ である。また，波高の変化により，「砕波する波」と「砕波しない波」と波形状が変化するため，これを区分して評価した。

図-3 に桁下高 $(z)$ ，波高 $(a_H)$ ，をパラメータとした実験結果を示す。同図によれば鉛直作用力は水深 15cm，波

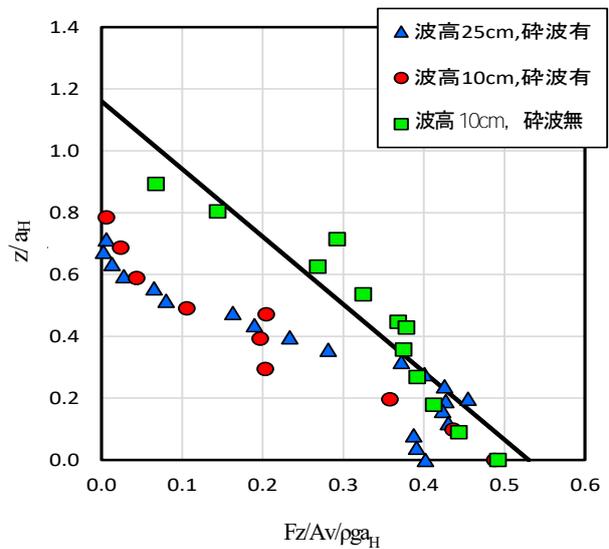


図-3 桁下高，波高をパラメータとした実験結果

高10cm, 碎波無の実験結果 (□プロット) が全実験結果を包括する. そこで, 橋梁の桁に津波によって, 作用する鉛直作用力の算定式を, すべての実験条件を包括する 1 次近似直線で算定した. 図の鉛直波力は波高の 1.16 倍の位置を頂点として三角形の分布形状で静水面まで大きくなる. ここで図の縦軸は桁波高比(桁下高  $z$ /波高  $a_H$ )とする. 横軸では鉛直作用力/桁下面面積を  $m^2$  当たり作用する波圧 ( $q_z$ ) と考え, 静水圧 ( $\rho g a_H$ ) との比とすると横軸は  $q_z/\rho g a_H$  となり, 近似式は式(1)のようになる. 津波波高と桁下高が既知であれば, この

式により津波作用時の波圧分布を算定することが可能となる.

【鉛直力】

$$qz = \rho g(0.53a_H - z/2.18) \quad (1)$$

ここで,

$z$ : 桁下高  $a_H$ : 波高

$\rho g a_H$ : 波高  $a_H$  から得た水圧

$q_z$ : 鉛直作用力/桁下面面積

表-1 実験の一覧

No.	著者	実験概要					計測方法		
		造波装置	波形状	模型形式	縮尺	静水深	計測対象	波高	流速
1	清水・庄司 <sup>7)</sup>	チャンバー式	段波	張出無6主桁	1/79.2	0,10,20,25,30,35,40,45,50cm	波高, 分力, 流速	桁位置において桁が無い状態で計測	
2	中尾ら <sup>2)</sup>	チャンバー式	段波	矩型 張出有2主桁 張出有4主桁	1/20	10cm	波高, 分力, 流速	模型から1m前	模型から1m前
3	荒木ら <sup>3)</sup>	ピストン型	孤立波	矩型	1/40-1/50	17~19cm	波高, 分力, 流速	模型から10cm前	—
4	林ら <sup>4)</sup>	ピストン型	孤立波	PC箱桁	1/50	20,25,40,50,55cm	波高, 分力, 流速	桁位置において桁が無い状態で計測	
5	有川ら <sup>5)</sup>	ピストン型	孤立波	張出有7主桁	1/10	133,143,153,163,173cm	波高, 分力, 流速	不明	—
6	中村ら <sup>6)</sup>	ピストン型	長周期波 ( $T=16s\sim32s$ )	張出有4主桁	1/50	9cm	波高, 分力, 流速	側壁を介して桁横で計測	
7	二井ら <sup>1)</sup>	ピストン型	孤立波	張出無6主桁	1/50	5~35cm	波高, 分力, 圧力, 流速	側壁を介して桁横で計測	

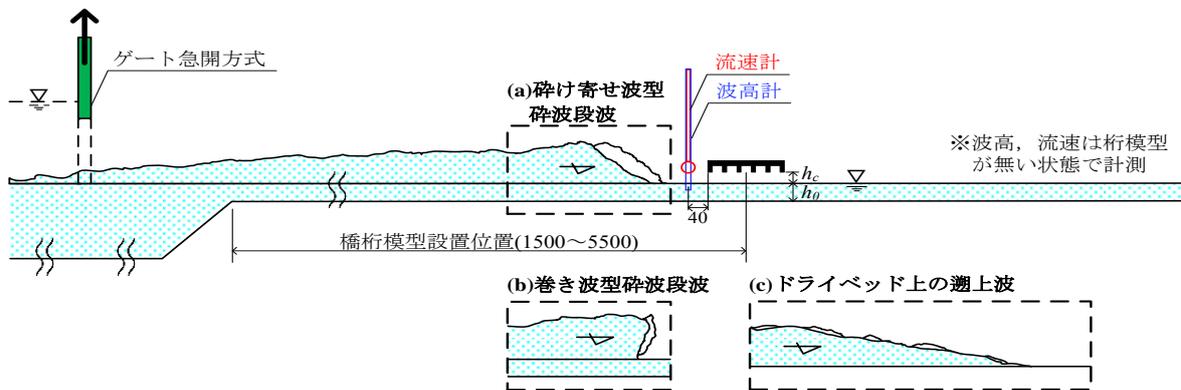


図-4 庄司らの実験波形状

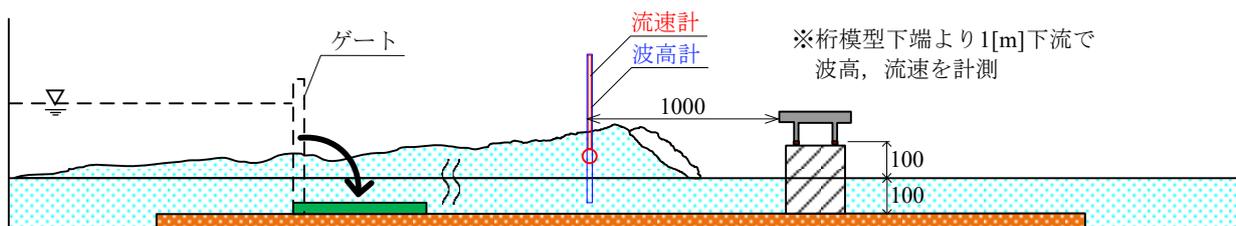


図-5 中尾らの実験波形状

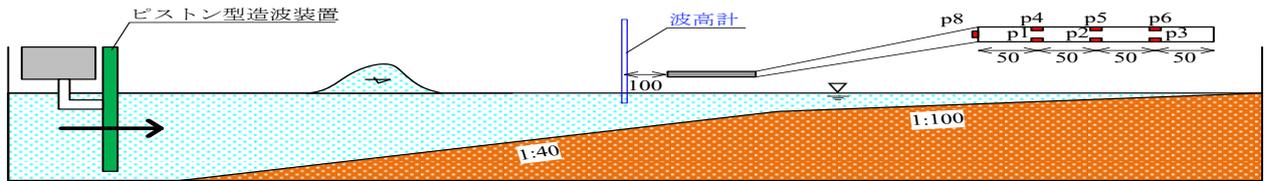


図-6 荒木らの実験波形状

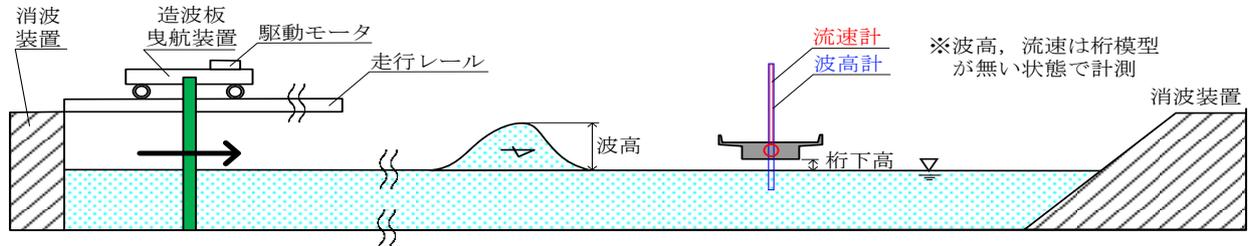


図-7 林らの実験波形状



図-8 有川らの実験波形状

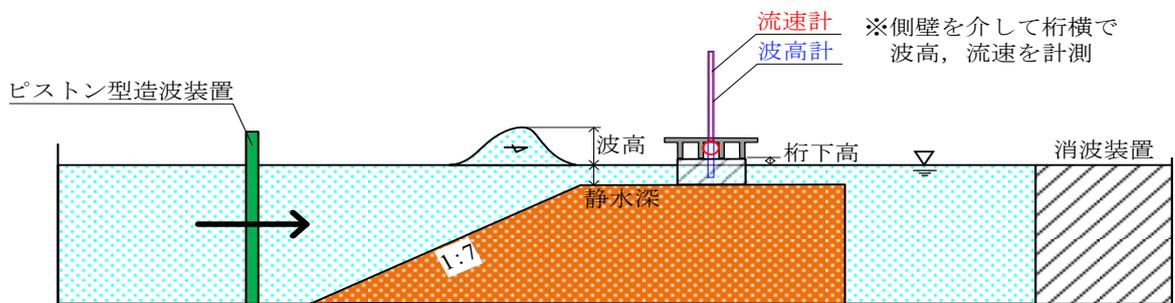


図-9 中村らの実験波形状

### 3. 他機関の実験

#### (1) 庄司らの実験

表-1 に比較に用いた他機関の実験概要を示す。このうち、図-4 に示す庄司らの実験では 1)碎波段波状の波 2)波面勾配の緩やかな波 3)橋桁が水没した状態での進行波の 3 種類の津波を対象として、造波ゲートの急開の速度をコントロールすることで、波の周期、波高および波面鋼材をパラメトリックに変化させ、実験ケースを増やし、橋桁に作用する津波荷重と水位及び流速

との関係を定式化している。

実験は模型位置 (5500, 1500mm), 貯水部水位 (445,430mm), 静水深 (40, 0mm), 波高 (50, 45mm)としている。

#### (2) 中尾らの実験

図-5に中尾らの実験波形状を示す。津波作用時の橋桁支点部に作用する力や橋桁に作用する圧力を実験および数値解析によって確認している。実験は静水深 (100mm), 波高 (15, 20mm), 桁中心位置 (125mm), 桁下高 (100mm) とし、模型形状をパラメータとしている。

### (3) 荒木らの実験

図-6 に荒木らの実験波形形状を示す。単純化した橋桁モデルとして水平版を用い、水平版（橋桁型）に作用する津波波力の基本特性を検討している。

実験は静水深 (170~190mm)、波高 (89,102mm)、桁中心位置 (62,82mm)、桁下高 (50,70mm) の条件で実施している。

### (4) 林らの実験

図-7 に林らの実験波形形状を示す。水路実験による波力の計測および汎用の流体解析コードとVOF法を用いた数値解析を行い、実験と解析の整合性を確認し、高速道路橋に採用されている標準的な上部構造に作用する津波波力を把握することを目的としている。実験は静水深 (200~550mm)、波高 (110~200mm) をパラメータとしている。

### (5) 有川らの実験

図-8 に有川らの実験波形形状を示す。津波に対する橋桁流出のメカニズムを沼田跨線橋を例として 1/10 スケールの水理模型実験および数値解析を実施している。実験は静水深 (1220mm)、波高 (200, 300, 400mm)、桁中心位置 (55mm)、桁下高 (0mm) の条件で実施している。

### (6) 中村らの実験

図-9 に中村らの実験波形形状を示す。桁移動の有無を確認するための固定していない移動可能な桁に、碎波を伴わない津波を同時に作用させる水理実験を実施し、桁に作用する津波力の特性を検討するとともに、桁の流出限界との関係を検討した。実験は波高 (36.5~40.3mm) をパラメータとしている。

## 4. 鉛直作用力評価式の適用性検討

ここでは鉛直作用力に着目して、九州工大と他機関の実験結果の比較を行う。実験ケースは九州工大52,他機関は24である。九州工大の実験は以下の4パラメータで実施している。

- (1)CaseA: 静水深 5cm, 計測波高 10cm, 桁中心位置 0.7~9.7cm, 碎波有
- (2)CaseB: 静水深 15cm, 計測波高 25cm, 桁中心位置 0.7~19.7cm, 碎波有
- (3)CaseC: 静水深 15cm, 計測波高 10cm, 桁中心位置 0.7~11.7cm, 碎波無
- (4)CaseD: CaseA~Cを基に, 静水深 15cm (波高 5.0, 7.0, 10.0 cm), 静水深 35cm (波高 5.0, 15.0, 20.0, 25.0 cm) をパラメータとした孤立波実験

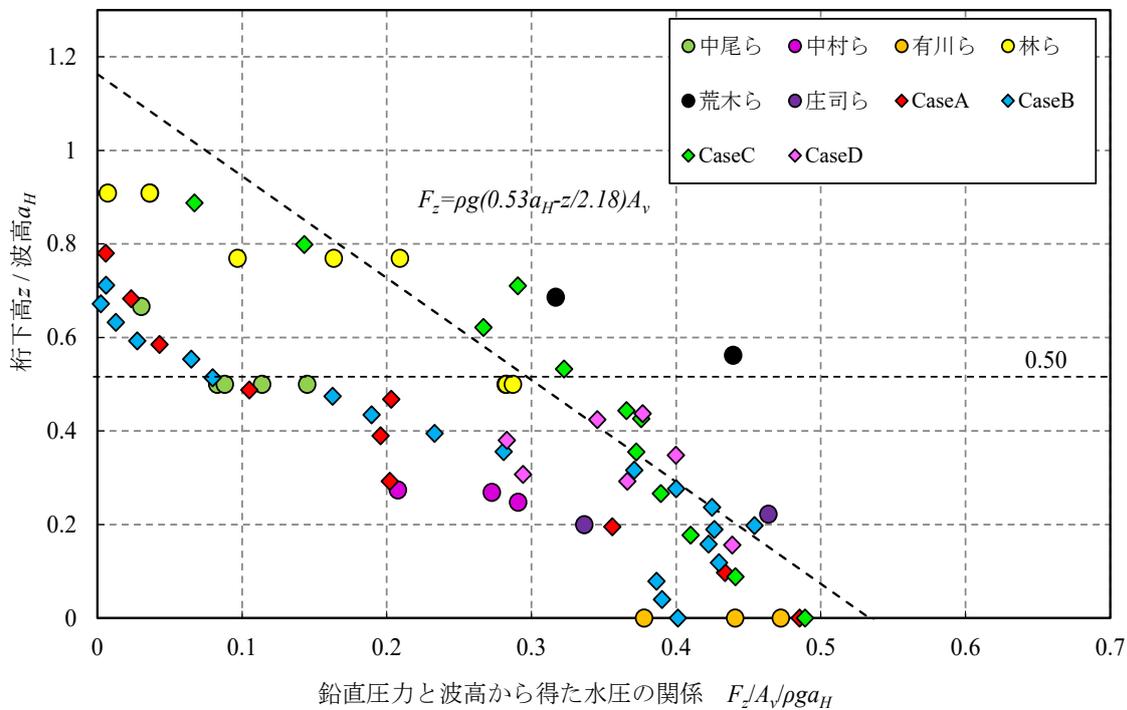


図-10 鉛直波圧と波高から得た水圧の関係

図-10 は横軸を津波が桁模型に作用する際の分力計から得た最大鉛直作用力を桁模型の底面積と波高から得た水圧で無次元化したもの、縦軸を静水面から桁模型下面までの高さを最大波高で無次元化して、九州工大と他機関の実験結果を比較した結果を示す。

同図より 2 点を除いて、CaseC の直線で包括することができる。すなわち、提案した津波の鉛直作用力評価式は概ね段波の鉛直作用力を安全側に見積もることができる。ここで、鉛直作用力評価式で包括されるものの、実験結果は直線から離れるものが多い。このことについて以下に検討を加える。

### 5. フルード数と鉛直作用力の関係

図-11 は横軸を CaseC のフルード数に対するそれぞれのフルード数の比率、縦軸を各  $z/a_H$  値において鉛直作

用力評価式より算出した算出鉛直作用力  $F_z(cal)$  に対する計測鉛直作用力  $F_z(mea)$  の比率として、フルード数と鉛直作用力の関係を示す。

同図より、全体的に大きくばらつき、最小二乗法で算出した直線の傾きが負になるなどフルード数と鉛直作用力の相関は極めて低い。

図-12 は各ケースのフルード数を合わせることを目的として、図-10 の横軸を式(2)に示す式で補正を加えたものであり、同図より、非碎波の CaseD、中村ら、有川ら、林らの実験結果は近似直線付近に位置するものの、碎波を伴う CaseA、CaseB は近似直線から大きく離れることが確認できる。

$$(F_z / A_v / \rho g a_H)' = \frac{Fr(CaseC)}{Fr} F_z / A_v / \rho g a_H \quad (2)$$

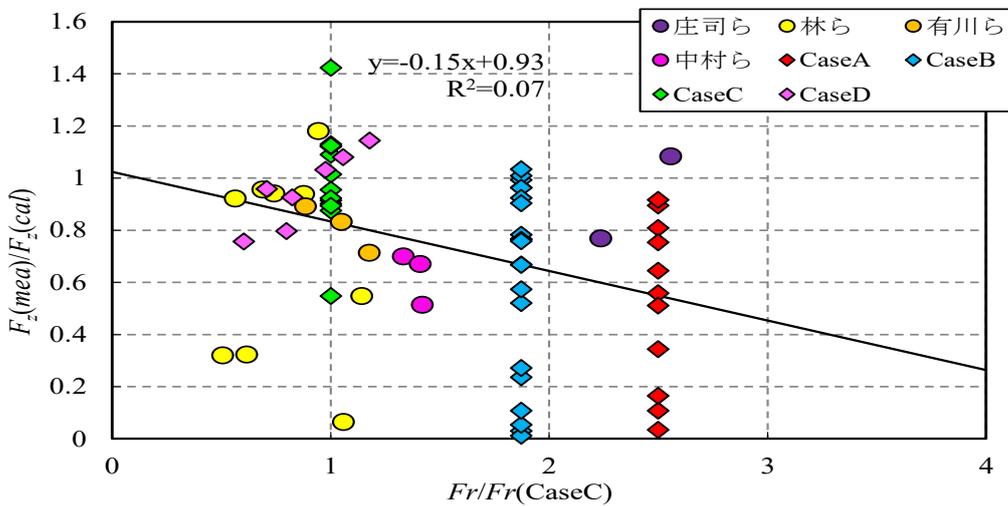


図-11 フルード比と計測算出鉛直作用力比

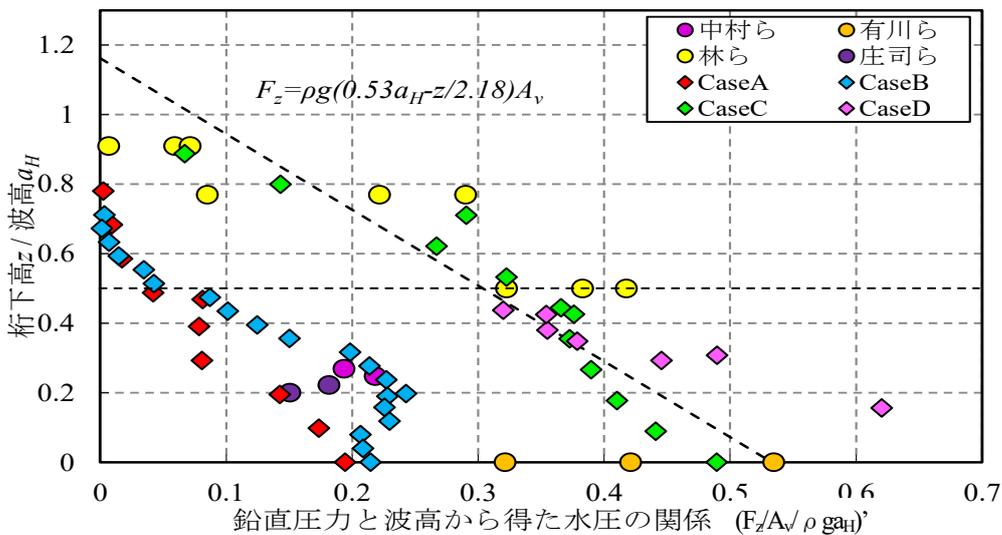


図-12 鉛直波圧と波高から得た水圧の関係(碎波)

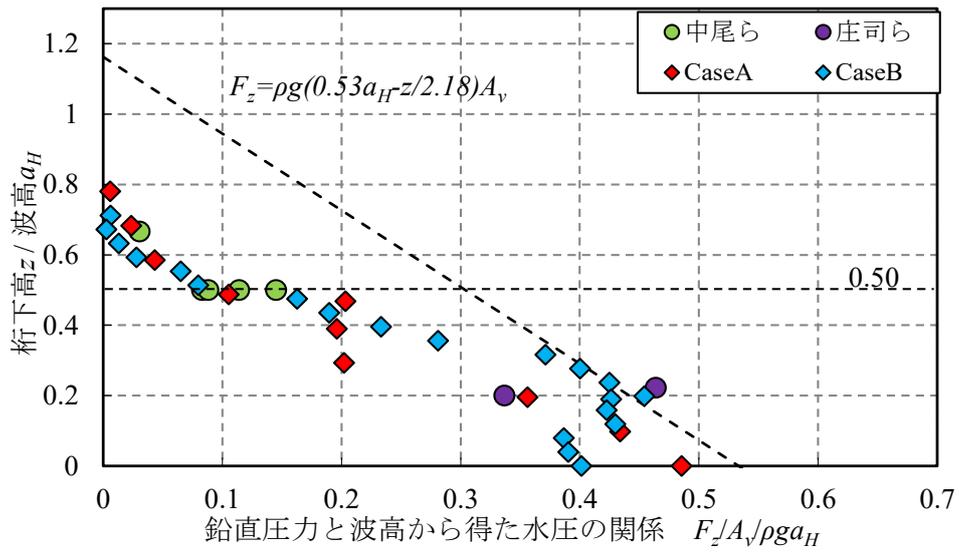


図-13 鉛直波圧と波高から得た水圧の関係 (砕波)

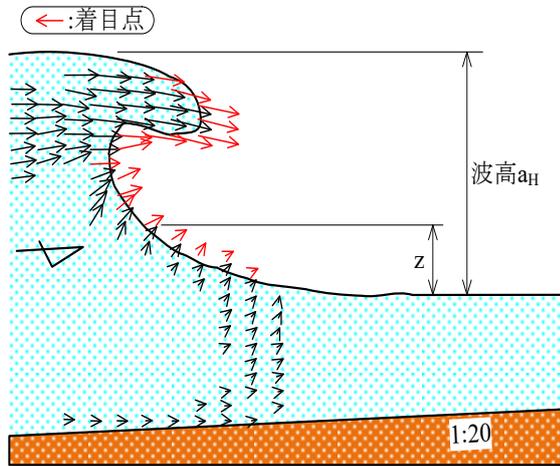


図-14 砕波時の流速分布<sup>9)</sup>

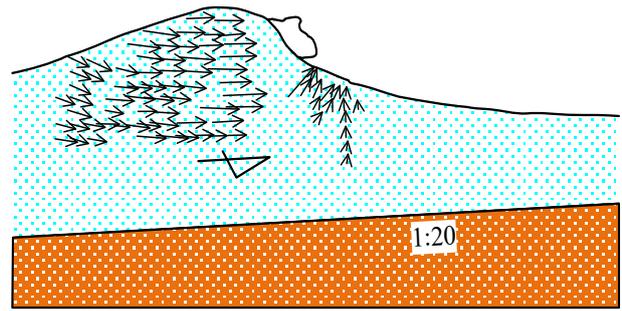


図-15 鉛直波圧と波高から得た水圧の関係<sup>10)</sup>

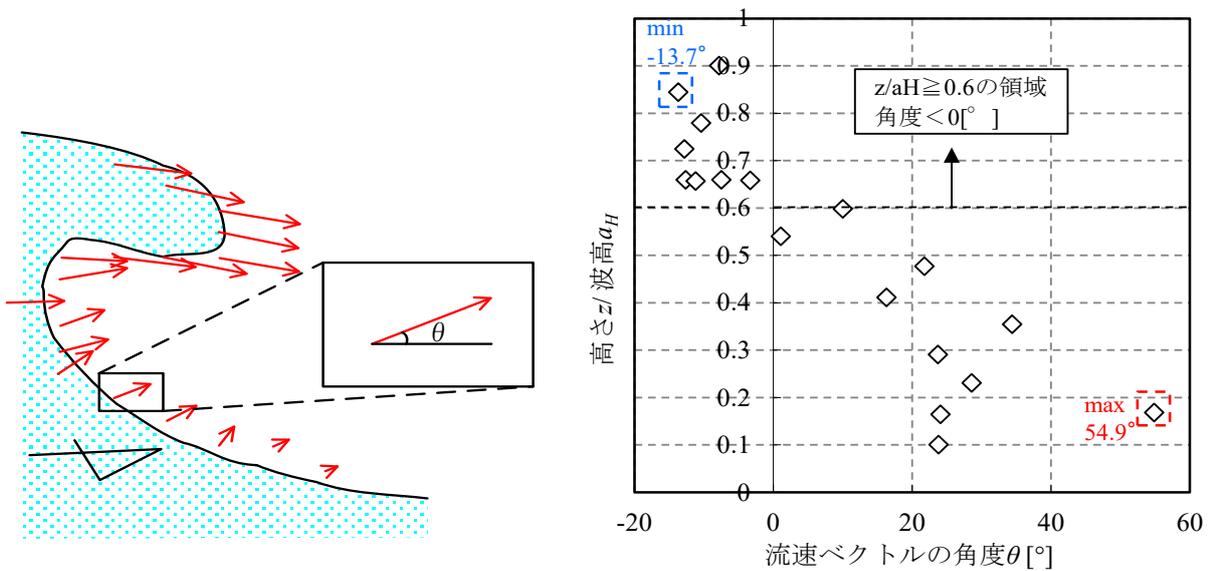


図-16 各桁波高比における流速ベクトルの角度

## 6. 碎波に対する分析

図-13は図-10から碎波のケースのみを抽出したものである。同図より、 $Z/a_H < 0.4$ では両者の値は桁位置が低くなるにつれて概ね等しくなるが、 $Z/a_H \geq 0.4$ において、横軸の波圧/波高から得た水圧は、碎波の場合極めて小さくなっていることが分かる、これについて考察を加える。

図-14は新井ら<sup>9)</sup>、図-15は鷺見ら<sup>10)</sup>の津波実験より得られた孤立波が浅水変形し、波上部が碎波する際の波形状をトレースしたものである。併せて、PIVを用いて同時刻に計測された内部の流速分布を示す。同図より、津波の中央より上側では、碎波に伴って流速ベクトルが水平方向に卓越する。一方、中央より下側の碎波に至り切っていない領域では、流速ベクトルが右斜め上方向を向いていることが確認できる。

図-16は横軸を流速ベクトルの角度[°]、縦軸を静水面から流速ベクトルの始点までの高さ $z$ を波高 $a_H$ で無次元化したものとし、図-14における着目点の高さ方向の流速ベクトルの角度を示す。同図より、 $Z/a_H < 0.6$ では全ての点が正の値となり、縦軸の値が小さい程、角度が増加する傾向となり、最大値 $54.9^\circ$ となる。一方、 $Z/a_H \geq 0.6$ では流速ベクトルの角度は全ての点が $0$ に近づき、最小値 $-13.7^\circ$ となる。

これらの結果より図-13に示したように碎波のケースの波圧/波高から得た水圧が縦軸 $Z/a_H=0.5$ を境に急激に減少する理由は、碎波に伴って流速ベクトルが水平方向に卓越し、流速の鉛直成分が減少するためであると考えられる。

## 7. まとめ

本研究では著者らにより提案された段波先端部の鉛直作用力評価式の適用性を明らかにすることを目的として、九州工大の実験と他機関の実験結果との比較を行い、得られた結果を以下にまとめる。

- 1)九州工大における3種類の実験パラメータについて鉛直作用力の計測を実施し、これらを包含する鉛直作用力評価式を提案した。
- 2)提案された鉛直作用力評価式と他機関の実験により得られた作用力を比較した。その結果概ね実験結果

を提案式が包含している。よって、提案式を用いることにより概ね段波性状の津波の作用力を安全側に評価することが可能である。

- 3)九州工大と他機関の作用力が異なる要因について検討を行った。碎波ケースは顕著に碎波発生が確認された桁波高比 $Z/a_H \geq 0.5$ の領域において急激に鉛直作用力の無次元化値が減少する。他機関のPIVより得られた流速分布の結果から、 $Z/a_H \geq 0.6$ において碎波に伴って流速ベクトルの角度が $0$ に近づき、ベクトルが水平方向に卓越することが確認された。このことから、碎波が生じると流速の鉛直成分が減少するため、鉛直作用力が減少したと考えられる。

## 参考文献

- 1) 二井伸一, 幸左賢二, 庄司学, 木村吉郎: 津波形状の違いによる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, Vol. 56A, pp. 474-485, 2010.
- 2) 中尾尚史, 張広鋒, 炭村透, 星隈順一: 上部構造の断面特性が津波によって橋に生じる作用に及ぼす影響, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol. 69, No. 4(地震工学論文集第32巻), pp. I\_42-I\_54, 2013.
- 3) 荒木進歩, 坂下友里, 出口一郎: 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, 2010.
- 4) 林秀和, 青木圭一, 林利久磨, 鈴木利光, 越村俊一: 橋梁上部構造に作用する津波波力特性に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 45-58, 2014
- 5) 有川太郎, 渡邊政博, 窪田幸一郎: 津波による橋梁の安全性に関する検討, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I\_911-I\_915, 2013.
- 6) 中村友昭, 澤祐太郎, 水谷法美: 橋桁への作用津波力と橋桁の流出限界に関する実験的研究, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 69, No. 2, pp. I\_335-I\_340, 2013.
- 7) 清水裕文, 庄司学: 橋桁に作用する津波波力と津波流速の関係: 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I\_941-I\_945, 2013.
- 8) 松富英夫: 津波氾濫流と関連課題, 日本地震工学誌, No. 6, pp. 19-25, 2007.
- 9) 宮本恭交, 長尾昌朋, 新井信一, 上岡充男: 孤立波碎波の水面形と流速分布の可視化計測, 海岸工学論文集, Vol. 46, pp. 131-134, 1999.
- 10) 鷺見浩一, 野崎猛盛, 高江俊之: 碎波に伴う渦の発生条件と流速分布に関する実験的研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 65, No.1, pp. 106-110, 2009

## EVALUATION FOR THE VERTICAL FORCE ACTING ON THE BRIDGE GIRDER

Kenji KOSA, Tatsuo SASAKI, Masato TANAKA and Takashi SATO

The tsunami experiment was conducted by using the parameters as wave height, girder position from the static water level. It was confirmed that the evaluation formula for vertical force  $F_z$  can be proposed as the factors of wave height  $a_H$ , girder position and bottom area of girder. The proposed equation was compared with other same type of bore wave experimental tests. The results showed that the proposed equation for the vertical force can be equal or larger than that of the other experimental tests.