

# 孤立波性状の津波によって橋桁に生じる鉛直作用力特性の評価

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

<sup>1</sup>学生会員 九州工業大学大学院 工学部建設社会工学専攻 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)  
E-mail:masatoooot@gmail.com

<sup>2</sup>正会員 Ph.D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (同上)  
E-mail:kosa@civil.kyutech.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 大日本コンサルタント(株) 技術統括部 (〒170-0003 東京都豊島区駒込3-23-1)  
E-mail:tatsuo@ne-con.co.jp

<sup>4</sup>正会員 工修 (株)長大 九州支店 (〒810-0014 福岡県福岡市中央区渡部通1-1-1サンセルコビル6F)  
E-mail:sato-tks@chodai.co.jp

著者らは過年度に段波の波高や桁形状、桁下高をパラメータとする津波実験を行い、段波の鉛直作用力  $F_z$  は波高  $a_H$ 、桁底面積  $A_v$  を関数とする評価式を提案している。本研究では桁模型を用いた水理実験から、床版幅の変化、および桁下高の変化に伴う鉛直作用力の変化のメカニズムを解明するために桁下面の圧力分布や波形状を分析した。この結果、床版幅が増加しても桁下面に発生する圧力の平均値や圧力の分布形状は変化せず、鉛直作用力は桁幅の増加に伴って線形的に増加する。さらに、波高と桁位置の関係を検討した結果、桁に作用する鉛直作用力は桁が波の底面付近に位置する場合に最も大きい値となる。

**Key Words :** tsunami, solitary wave, bridge, vertical wave force, wave pressure

## 1. はじめに

東日本大震災で発生した津波により、浸水域に位置する多数の橋梁に上部構造の流出等の被害が確認されている。中でも歌津大橋<sup>1)</sup>などにみられるように、上向きの津波作用力で上部構造が持ち上がって流出したと推定される被害状況も確認される。

東日本大震災以降、多数の画像記録の分析を実施しており、例えば気仙大橋<sup>2)</sup>では徐々に水位が上昇して水没した後に流れの中で流出したことを明らかにしたものの、定常流実験から流れの中で生じる鉛直作用力は下向きとなることも明らかにしている<sup>3)</sup>。これらのことから、上向きの津波作用力の発生要因として何らかの波の作用があったと考えるのは、ごく自然な流れであるといえる。

著者らは過去に、段波の波高や桁形状、桁下高をパラメータとする津波実験を行い、段波の鉛直作用力  $F_z$  は波高  $a_H$ 、桁底面積  $A_v$  の関数で表すことができることを明らかにしている<sup>4)</sup>ものの、その理由までは十分に説明出来ていないのが現状である。

そこで本研究では、床版幅の変化や桁下高の変化に伴う鉛直作用力の変化のメカニズムを解明するために、桁下面の圧力分布や波形状を分析する。

## 2. 実験概要

### (1) 実験装置と桁模型

使用する長水路は、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る。同図の左端の造波装置はパソコン制御のスライド式造波装置である。

### (2) 計測方法

桁模型位置付近の計測器設置状況を図-2に示す。設置した計測器は、孤立波性状の波によって桁模型に発生する作用力を計測する分力計、水路内の桁模型周辺の流速を計測する流速計、波形状をとらえる波高計である。

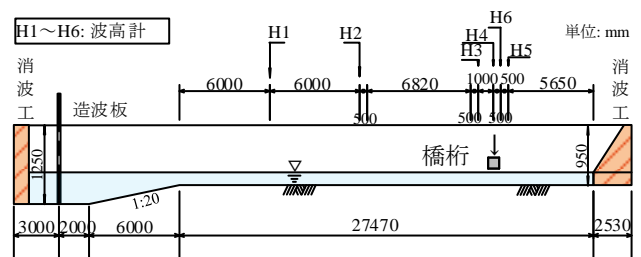


図-1 実験装置概略図

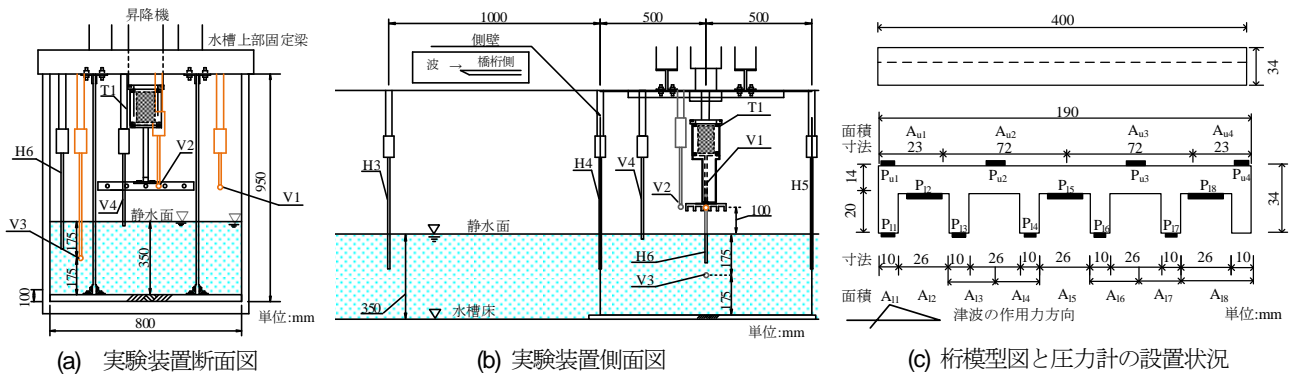


図-2 桁模型図と圧力計の設置状況

分力計は水平波力( $F_x$ )、鉛直波力( $F_z$ )と回転モーメント( $M_y$ )が計測できる3分力計で、仕様規格は980[N]である。

流速計は、図中のV1, V2, V3に水平方向の流速を測定するプロペラ式流速計を使用し、V1とV3は模型への衝突による乱れのない流速の計測を行うために側壁の隣とした。V2は桁前面に設置し、水平方向と鉛直方向の流速を計測するために、V4に電磁流速計を追加した。

波高計は6基使用し、主に指令波高との差異の検証用である。H6は前述の流速計、V1やV3と同様の理由で側壁の隣に設置している。

図-2(c)は、桁模型図と圧力計の設置状況を示している。桁の上面、下面に設置した圧力計をそれぞれ $P_{ui}$ ,  $P_{di}$ として、図中の寸法に桁の奥行き方向の長さ400[mm]を乗じた面積 $A_{ui}$ ,  $A_{di}$ を圧力計に対応した比圧面積として示している。なお、添字のiは番号を示す。

### 3. 孤立波を作用させた桁に生じる鉛直作用力の分析

図-3に実験状況を、表-1に実施パラメータを示す。静水深を35[cm]、桁中心位置は波高の1/2の位置として、標準ケースは波高 $a_H=20$ [cm]、床版幅 $B=19$ [cm]と設定する。これをCase1-1とする。ここでCase No.の説明を加えると、Case i-jと示したiは波高のケースNo.を示し、jは床版幅のケースNo.を示す。Case1-1の波高と床版幅を実橋(1/50縮尺相当)に換算するとそれぞれ10[m], 9.5[m]となる。

さらに本実験では、波高と床版幅をパラメータとしている。まず、Case1-1に対し、床版幅を変えずに波高を5[cm]毎に変化させ、10[cm], 15[cm], 25[cm]としたケースをそれぞれCase2-1, Case3-1, Case4-1とする。次に、Case1-1に対し、波高を変えずに床版幅を26.2[cm](1.38倍), 33.4[cm](1.76倍), 40.6[cm](2.14倍)としたケースをそれぞれCase1-2, Case1-3, Case1-4とした。床版幅の倍率が整数倍とならないのは、桁1本あたりの幅や桁間隔を標準桁に併せたためである。なお、これらの床版幅ケースのB/Dは表-1に示すように標準桁のCase1-1では5.6, Case1-2, Case1-3, Case1-4でそれぞれ7.7, 9.8, 11.9である。

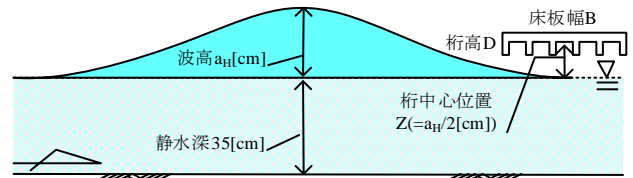


図-3 実験状況模式図

表-1 実験パラメータ

Case No.	静水深h [cm]	波高 $a_H$ [cm]	桁位置Z [cm]	床版幅B [cm]	桁高D [cm]	B/D	ケース説明
Case1-1	35	20	10	19	3.4	5.6	標準
Case2-1	35	10	5	19	3.4	5.6	波高パラメータ
Case3-1		15	7.5				
Case4-1		25	12.5				
Case1-2	35	20	10	26.2	3.4	7.7	床版幅パラメータ
Case1-3				33.4		9.8	
Case1-4				40.6		11.9	

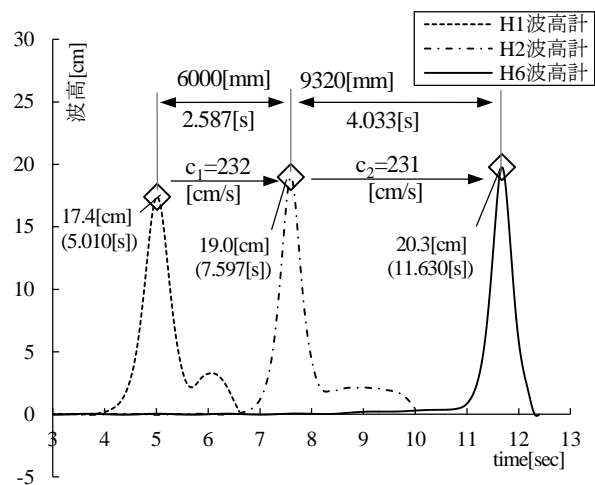


図-4 波高変化の時刻歴図

#### (1) 津波の作用状況と計測波高

図-4に、標準ケースであるCase1-1について、H1, H2, H6波高計の時刻歴図を示す。

H1, H2, H6のそれぞれの距離と時間の関係から求められる指令波高20[cm]の孤立波の伝播平均速度は、H1からH2では232[cm/sec](実橋換算で16.4[m/sec])、さらにH2からH6では231[cm/sec](実橋換算で16.3[m/sec])と若干の減少傾向をみせる。一方で波高はH1, H2でそれぞれ17.4[cm], 19.0[cm]と徐々に増幅し、桁模型位置のH6で指令波高と同等の波高20.3[cm]を記録する。この進行に

伴う波高の増幅傾向は、波速の若干の減少によってもたらされる結果と考えられるが、桁模型位置では指令波高で設定した波高が再現される。

(2) 代表ケースの鉛直作用力と圧力の関係

標準のCase1-1の結果から、鉛直作用力と圧力の関係、さらに波形状と桁の上下面の圧力分布を用いて分析する。

図-5に示すのは、桁模型の上面と下面に設置した各々の圧力計の計測値から被圧面積で積分して求めた鉛直作用力と、分力計で計測した鉛直作用力を比較した時刻歴図である。同図より、鉛直作用力が発生し始めた[1]から最小鉛直作用力[4]となるまで、圧力積分値と分力計から得た鉛直作用力は良く一致する。この結果から、桁の上面と下面で計測した圧力計の信頼性は高いと判断できる。一方、[4]以降は徐々にずれ始め、最終的に差は約20[N]弱となる。これは、波の通過後に桁の上下面に波の作用がない状態でも圧力計がゼロに戻らないことが確認されるため、機械的な誤差が生じたと考えられる。従って、ここで分析は最大鉛直作用力時を対象とした。

図-6は、鉛直作用力が最大となる図-5中[2]の時点を示す。図-6(a)から、桁模型の前面に衝突して砕けた波面が気泡を伴いつつ桁模型の背面に流れる様子が確認される。同図(b)は桁の上面と下面に生じる圧力分布を示す。図中に示す圧力と比圧面積の積分方法は図-2(c)で前述した通りである。桁模型の上面では津波の作用側で72[Pa]となるが、それ以外の圧力計では波が到達していないため圧力は発生せず、下向きとなるものの0.2[N]と微小である。一方、桁下面では津波作用側で最大で952[Pa]となり、桁後方に向かって徐々に減少するものの最後部で472[Pa]となる。桁下面の圧力分布は全て正圧を呈し、概ね台形分布となる。これらの積分値は上向きで48.0[N]と求められ、鉛直作用力は上向きで47.8[N]となる。桁上面側の正圧による下向きの作用力は微小である一方で、桁下面に生じる正圧は非常に大きく、最大鉛直作用力は桁模型の下面に作用する正圧が支配的である。

(3) 波高の変化に伴う鉛直作用力の変化

図-7は最大鉛直作用力と最大波高の関係を示す。それぞれの波高ケースの3回分の波高と鉛直作用力はほぼ同値で再現性は良好であり、同図は3回分の平均値を示す。

既往の津波波力の評価式は、例えば栈橋に進行波が作用した際に生じる揚圧力は波高の1次関数で表され<sup>9)</sup>、桁下空間を有するという意味で栈橋と相似した構造である橋梁も、孤立波が作用することで桁に発生する鉛直作用力は波高の1次関数で表されると仮定した。

この仮定に基づき、本実験の波高の範囲で各波高と鉛直作用力の関係を最小二乗法を用いて1次曲線で近似すると、近似曲線は $F_z = 3.29 a_H - 14.76$ であり、決定係数は

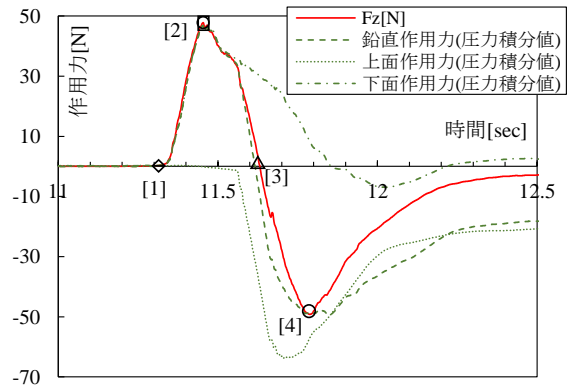
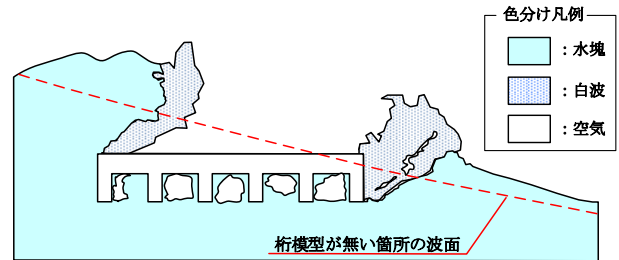
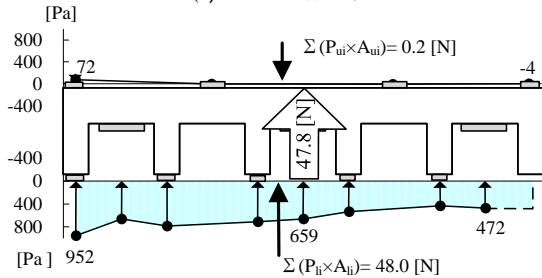


図-5 鉛直作用力 (分力計と圧力計)



(a) 津波の作用状況



(b) 圧力分布図

図-6 鉛直作用力最大時の波形状と圧力分布

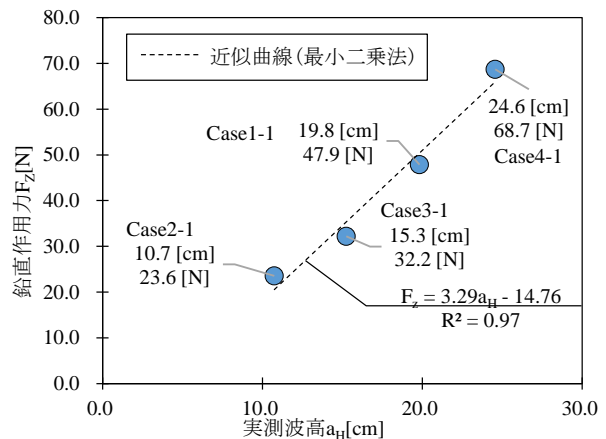


図-7 波高と鉛直作用力の関係

$R^2=0.97$ と求められる。近似曲線式で切片が0とならないのは、本実験では $Z/aH=0.5$ として波高を変化させたため、波高が4.5[cm]以上にならないと桁下が水面から離れず、この条件では有義な鉛直作用力が発生しないと解釈する。このことから、本実験の波高の範囲では最大波高と最大鉛直作用力は高い相関性で線形的な比例関係にあることがわかる。

(4) 床版幅の変化に伴う鉛直作用力の変化

本実験ではCase1-1の床版幅19.0[cm]を1.0Bとして、1.38B(26.2[cm]), 1.76B(33.4[cm]), 2.14B(40.6[cm])と3段階に床版幅を変化させた。これらの床版幅ケースを、Case1-2, Case1-3, Case1-4として各桁に、波高を20[cm]の孤立波を作用させて鉛直作用力を計測している。

本節では、床版幅を変化させた場合の鉛直作用力の変化に加えて、各桁の桁下面に設置した3個の圧力計の計測結果から鉛直作用力と桁下面の圧力の関係を分析する。

図-10は、横軸 (x) に標準桁の床版幅に対して床版幅を変化させた床版幅比を、縦軸 (y) に標準桁の鉛直作用力に対する床版幅を変化させた鉛直作用力比をとることで、床版幅比と鉛直作用力比の関係を表している。同図より、床版幅の増加に伴って鉛直作用力が増加しており、これらは概ね $y=x$ から $y=1.2x$ の関係で表される。

図-11は、鉛直作用力が最大となる時点の津波の作用状況図と桁下に作用する圧力分布図を示す。なお、本実験は孤立波を造波しており、ここで示す圧力分布は、桁中心位置での津波の波峰幅が床版幅に比べて小さい場合を示す。また、2.(2)節の標準桁ケースの圧力分布から台形積分が成り立つと仮定している。

同図(a)はCase1-2を示している。波は桁下面全域に作用しており上面は波が作用していない。桁下面の圧力分布は全て正圧を示し、沖側から陸側までの圧力はそれぞれ865 [Pa], 740 [Pa], 270 [Pa]となり、これらの平均値は629 [Pa]である。圧力の分布形状は沖側が最大となる台形に近い。これらの桁下面全域を被圧面積とする圧力値の積分値は66.4[N]と、分力計の鉛直作用力72.2[N]と約9%の誤差で一致する。

次に同図(b)にCase1-4を示す。波の作用状況は同図(a)と同様に桁下面の圧力分布は全て正圧を示すものの、沖側から陸側までの圧力はそれぞれ796 [Pa], 897 [Pa], 440 [Pa]となり、これらの平均値は725 [Pa]である。圧力分布は同図(a)に示した圧力分布と若干異なり、中央が最大となる凸型である。これらの桁下面全域を被圧面積とする圧力値の積分値は117.7[N]と、分力計の鉛直作用力123.4[N]と約5%の誤差で一致する。

標準桁の桁下面の圧力分布の形状は3.(2)節で述べた通り沖側を最大とする台形分布であり、圧力の分布形状は概ね等しいことに加え、圧力の平均値は632 [Pa]と、前述の圧力平均値 (629 [Pa], 725 [Pa]) と概ね等しい。

以上より、床版幅の増大に伴って鉛直作用力の比が床版幅の比よりもやや大きくなるのは、厳密には床版下面の陸側の圧力が増加傾向にあるためと考えられるが、床版幅の増加にかかわらず各桁下面に生じる圧力と圧力の分布形状が概ね等しいため、床版幅比の増加に伴って線形的に鉛直作用力が増加すると考えられる。

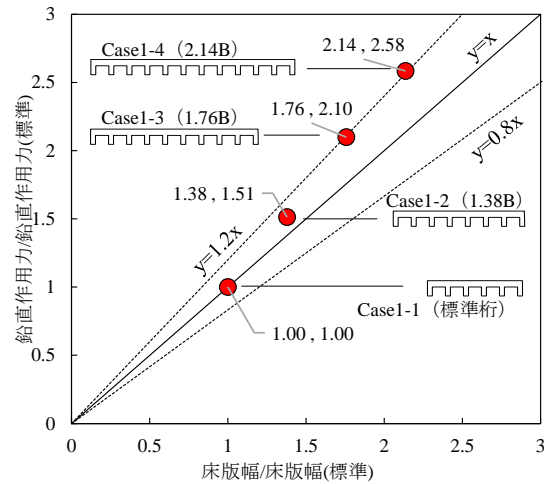


図-10 床版幅比と鉛直作用力比

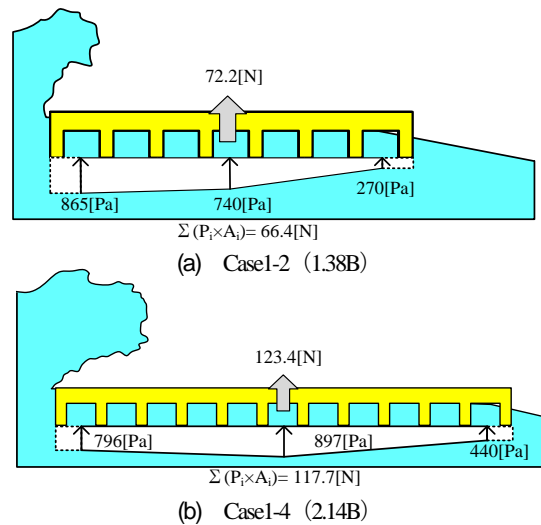


図-11 鉛直作用力最大時の波形状と圧力分布

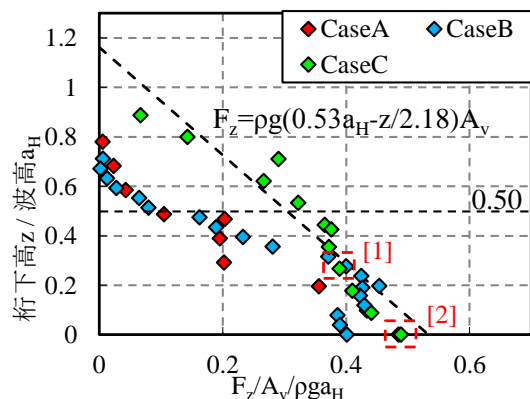


図-12  $F_z / A_v / \rho g a_H$ の分布

4. 桁位置によって変化する鉛直作用力の分析

本章では波高の異なる波のケース毎に桁位置を変化させた実験結果から、桁位置によって鉛直作用力に生じる変化について分析する。

(1) 波高に対する桁位置の無次元化波圧の分布

図-12に示すのは、著者らが実施した実験より得られ



た結果である<sup>9)</sup>。横軸は鉛直作用力 $F_z$ を橋桁の底面積 $A_v$ で割って波圧とした後に波高から得た水圧 $\rho g a_H$ で無次元化したもの、縦軸を桁下高 $z$ と波高 $a_H$ の比率とし、高さ方向の $F_z/A_v/\rho g a_H$ の分布を示している。ここで、Case A, Case B, Case Cは、静水深 $h$ と波高 $a_H$ を変えており、それぞれ $h = 5[\text{cm}]$ と $a_H = 10[\text{cm}]$ ,  $h = 15[\text{cm}]$ と $a_H = 26[\text{cm}]$ ,  $h = 15[\text{cm}]$ と $a_H = 11[\text{cm}]$ である。また、Case A, Case Bは砕波のケースであり、Case Cは、非砕波のケースである。

同図より、Case Cの横軸の値は桁下高の減少に伴って増加し、桁が波の底面付近に位置する場合に最も大きい値となる。このことを、同図に示す[1] ( $z/a_H = 0.3$ ), [2] ( $z/a_H = 0$ ) に着目して分析を行った。

(2) 桁下面に発生する圧力に基づく考察

図-13に前述の[1]と[2]の最大鉛直作用力発生時の波形状と桁下面の圧力分布を示す。

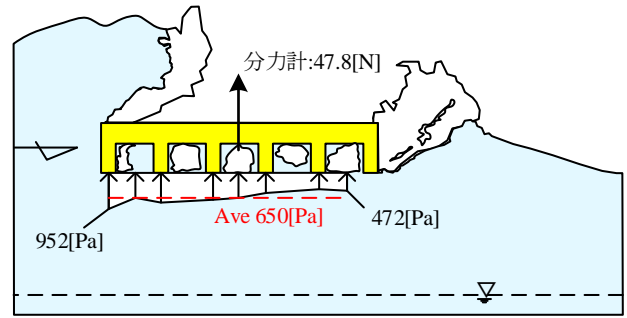
まず、同図(a)は桁下位置 $z = 3.3 [\text{cm}]$  ( $z/a_H = 0.3$ ) のケースである。波形状に着目すれば、沖側(津波作用側)では桁に衝突した波が跳ね上がっており、陸側端部では桁下から後方に流れる様子が確認できる。この際、陸側の桁側面には白波が跳ね上がっており、水塊は接していない。最大鉛直作用力は $47.8[\text{N}]$ であり、桁下面の圧力は、沖側(津波作用側)と陸側で、それぞれ $952[\text{Pa}]$ ,  $472[\text{Pa}]$ 、平均で $650[\text{Pa}]$ と正の圧力となることから、桁下面に発生する圧力によって桁を上を持ち上げる力となる。

一方、同図(b)は桁下位置 $z = 0 [\text{cm}]$  ( $z/a_H = 0$ ) のケースであり、波形状に着目すれば、沖側(津波作用側)では桁に衝突した波が跳ね上がる様子は同図(a)と同様であるものの、陸側端部では桁側面に水塊が接して桁上にまで水位が達する状況となる。最大鉛直作用力は $55.1[\text{N}]$ と、前述のケースの15%増加であるが、桁下面の圧力は、沖側(津波作用側)と陸側で、それぞれ $1398[\text{Pa}]$ ,  $540[\text{Pa}]$ 、平均で $947[\text{Pa}]$ と、正の圧力となることから、同図(a)と同様に桁を上を持ち上げる力となるが、同図(a)と比較すると桁下面の平均圧力は $650[\text{Pa}]$ に対して $947[\text{Pa}]$ と50%の増加となるのがわかる。これは前述のように陸側端部の水塊が桁上まで達することから、静水面に近い位置では桁を上方に押し上げる作用が大きいといえる。

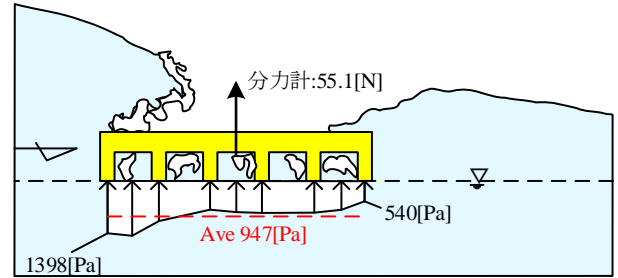
次に、図-14に前述の図-12中の[1]と[2]の鉛直作用力と桁下の圧力の時刻歴の関係を示す。

同図(a)から、桁下位置 $z = 3.3 [\text{cm}]$  ( $z/a_H = 0.3$ ) のケースでは図中[a<sub>1</sub>], [b<sub>1</sub>], [c<sub>1</sub>]に示すように、最大鉛直作用力 $47.8[\text{N}]$ となる時刻 $11.498[\text{sec}]$ とほぼ同時刻にP10とP9の圧力が最大となり、[d<sub>1</sub>]のみが若干遅れて最大となる。

一方、同図(b)から、桁下位置 $z = 0 [\text{cm}]$  ( $z/a_H = 0$ ) のケースでは前述の傾向とは異なり、図中[a<sub>2</sub>]で示す最大鉛直作用力の発生時刻から $0.3[\text{sec}]$ 遅れて図中[b<sub>2</sub>]で示すP10が最大となり、続いて[d<sub>2</sub>], [c<sub>2</sub>]が最大圧力を迎える。こ

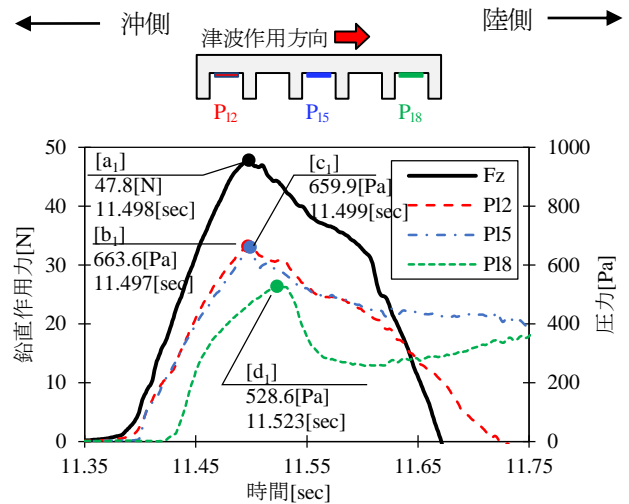


(a)  $z/a_H = 0.3$  (桁下位置  $z = 3.3[\text{cm}]$ )

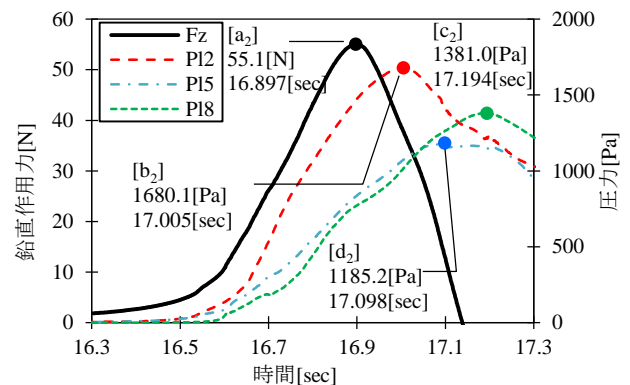


(b)  $z/a_H = 0$  (桁下位置  $z = 0[\text{cm}]$ )

図-13 最大鉛直作用力時の波形状と圧力分布



(a)  $z/a_H = 0.3$  (桁下位置  $z = 3.3[\text{cm}]$ )



(b)  $z/a_H = 0$  (桁下位置  $z = 0[\text{cm}]$ )

図-14 鉛直作用力と桁下面の圧力の時刻歴図

の桁下面の圧力が増加するにもかかわらず、鉛直作用力が減少する現象は、桁上面に跳ね上がった波が覆いかぶさることで桁を下向きに押す作用が生じるためであるものの、前述のケースとは桁への波の作用状況が明らかに異なる。沖側のP10に発生する圧力は最大で1680.1[Pa]となり、同図(a)の同位置[b]の最大圧力663.6[Pa]の2.5倍の圧力が生じており、このことから静水面に近い位置では上向きの圧力は大きくなることがわかる。

以上より、鉛直作用力の無次元化波圧は静水面に近づくにつれて増加する三角形分布となる。

## 5. まとめ

津波先端にみられる段波上の波が橋梁に作用することを模擬した孤立波実験を行い、桁幅と桁下高を変えて鉛直作用力の変化のメカニズムを圧力分布や波形状を用いて分析した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 床版幅19[cm]、波高20[cm]を標準ケースとして、波高を変化させた3ケースと、床版幅を変化させた3ケースの合計7ケースのパラメータ実験を実施した。代表として床版幅19[cm]の桁模型に波高20[cm]の孤立波が作用させた場合、最大鉛直作用力が発生する時点で桁下面全域に津波作用側で952[Pa]、陸側で472[Pa]と、桁を上を持ち上げる台形分布の正圧が生じる。この圧力を桁下面全域を被圧面積とした積分値は48.0[N]と、最大鉛直作用力47.8[N]と一致する。このことから孤立波が作用することで桁に生じる鉛直作用力は、桁下面全域を被圧面積とした上向きの圧力で評価が可能である。
- (2) 床版幅 $B=19.0$ [cm]を1.0Bとして、1.38B、1.76B、2.14Bと3段階に床版幅を変化させて、波高20[cm]の孤立波を作用させた。この結果、最大鉛直作用力発生時の

- 床版幅1.0Bの桁下面には、上向きで平均632[Pa]の圧力が、沖側を最大とする台形分布で発生する。床版幅が1.38B、2.14Bのケースも最大鉛直作用力発生時の桁下面の圧力は、それぞれ平均629[Pa]、725[Pa]となり、圧力の分布形状も台形であることから、最大鉛直作用力は床版幅の増加に伴って線形的に増加する。
- (3) 異なる波高ケース毎に、桁位置を変化させて実施した実験結果について、砕波が無い波の中腹に桁が位置するケースと静水面に桁下が接するケースの桁下圧力の比較を行った。この結果、桁下が静水面に接するケースの桁下面に生じる平均圧力は947[Pa]と、波の中腹に位置するケースの650 [Pa]に対して50%の増加が認められる。このことから、静水面に近づくに連れて桁下面に生じる圧力、並びに鉛直作用力は増加する。

## 参考文献

- 1) Li Fu, Kenji Kosa, Tatsuo Sasaki : Tsunami damage evaluation of Utatsu Bridge by video and 2-D simulation analyses, Journal of Structural Engineering, Vol.59A, pp.439-449, 2013.3.
- 2) 神宮司博志, 幸左賢二, 佐々木達生, 佐藤崇 : 陸前高田地区の津波被害と堤防効果に関する分析, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.11-22, 2015.3.
- 3) Li Fu, Kenji Kosa, Tatsuo Sasaki, Takashi Sato : Evaluation of tsunami force on concrete girder by experiment simulating steady flow, Journal of Structural Engineering, Vol.61A, pp.224-234, 2015.3.
- 4) 佐々木達生, 幸左賢二, 濱井翔太郎, 佐藤崇 : 孤立波によって橋桁に生じる鉛直作用力と波圧特性の評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.4, 登載決定 (2015.2.21 受理) .
- 5) 伊藤喜行, 竹田英章 : 栈橋に作用する波の揚圧力, 港湾技術研究報告 Vol.6, No.4, 1967.4.
- 6) 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, 2010.3.  
(2015.3.18 受付)

## EVALUATION FOR THE VERTICAL FORCE ACTING ON THE BRIDGE GIRDER DUE TO THE TSUNAMI WITH SOLITARY WAVE

Masato TANAKA, Kenji KOSA, Tatsuo SASAKI and Takashi SATO

The tsunami experiment was conducted in the last year by using the parameters as wave height, girder shape and girder height. It was confirmed that the evaluation formula for vertical force  $F_z$  can be proposed as the factors of wave height  $a_H$  and bottom area  $A_v$  of girder.

From the hydraulic model experiment of this study, to learn the mechanism for variation of vertical force together with the change of girder width and girder height, the pressure distribution in the girder bottom and the impacting wave shape are evaluated. As a result, it is obtained that the average value of produced pressure and the pressure distribution form in the girder bottom are almost invariable even when increasing the girder width. Therefore, it is noted that the vertical force increase in linear with the increment of girder width. Further, from the discussion for the relationship between wave height and girder position, it is understood that the vertical force becomes maximum when the girder locates near the wave bottom.