

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

佐々木 達生¹・幸左 賢二²・濱井 翔太郎³・佐藤 崇⁴

¹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

²正会員 Ph.D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

E-mail:kosa@civil.kyutech.ac.jp

³学生会員 九州工業大学大学院 工学部建設社会工学専攻 (同上)

E-mail:lxfxu7@gmail.com

⁴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

津波によって橋梁に作用する波力の発生メカニズムを明らかにし、津波作用力の定式化を目的として陸域を遡上する津波先端にみられる砕波段波状の波を想定して、橋梁の橋桁を模擬した孤立波実験を実施した。この実験から得られた桁模型に発生する鉛直作用力に着目し、津波の作用状況と桁の上下面の圧力分布から、鉛直作用力の関数となる諸量を分析した。この結果、孤立波性状の波が桁に衝突して発生する鉛直作用力は、桁下面全域を被圧面積とした圧力の積分値で説明が可能であることに加え、波高を変化させた実験結果から、波高の増加に伴って鉛直作用力も増加することが明らかとなった。このことから、鉛直作用力は波高と桁下の被圧面積の関数であることが明らかとなった。

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、東北地方の太平洋沿岸部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。緊急輸送路上に位置する橋梁の流出等で道路が寸断されると、救援物資の輸送等に遅れが生じるなどの影響を与えるおそれがある。従って、津波による橋梁の流出対策の実施が望まれ、その実施のためには、津波が橋梁に作用する際の作用力特性を解明することが重要である。

一方、津波が橋梁に作用した際に生じる津波作用力の研究は、2004年12月のスマトラ沖地震を契機に片岡ら¹⁾や荒木ら²⁾をはじめとする砕波段波を模擬した桁模型実験に基づく種々の検討が行われているものの、砕波段波が橋桁に作用した際に生じる鉛直作用力に影響を及ぼすと考えられる波形状や桁形状の関係が明らかにされていない。

そこで本研究では、上部構造の流出評価や対策工を講じる上で必要と考えられる津波作用力について、津波形状や桁形状の変化に応じた鉛直作用力への影響を明らか

にすることを目的とする。具体的には陸域を遡上する際に津波先端部に見られる砕波段波状の波が橋梁に作用することを想定し、これを模擬した孤立波を作用させた。この実験では孤立波の波高に加え桁形状をパラメータとしており、鉛直作用力、水平作用力、波高、流速、圧力の測定を行い、得られた計測結果から津波外力の橋桁に対する作用力特性について検討を行った。

このうち、本論文では鉛直作用力に着目して作用力と波圧の相関性を分析し、鉛直作用力と波高、さらには桁下面の面積との関係を明らかにする。

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スライド式造波装置である。パソコン制御で、指令波高値と実験時の初期水深(水槽底から静水面までの高さ)を入力する。

水槽内に水を貯め、事前の造波検証を行った結果、桁

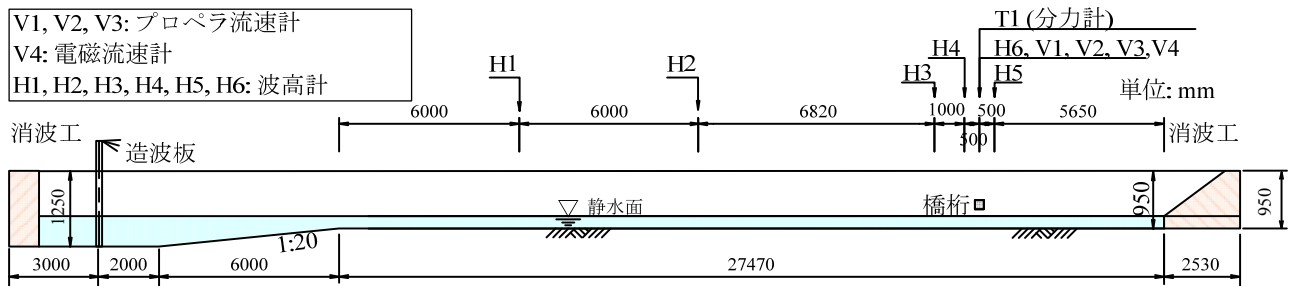
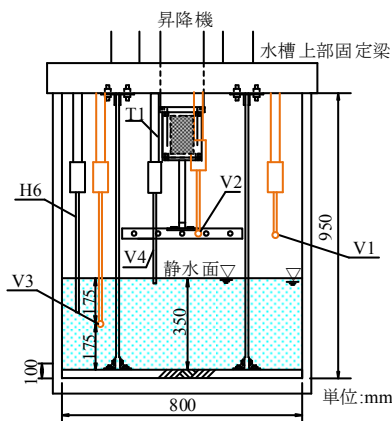
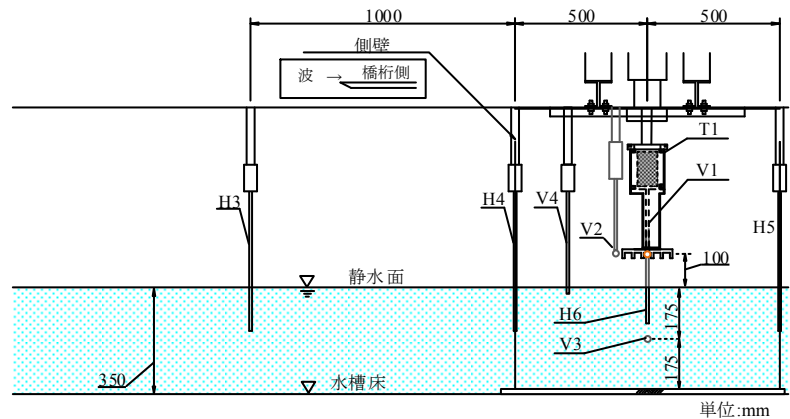


図-1 実験装置概略図



(a) 実験装置断面図



(b) 実験装置側面図

図-2 計測機器設置位置図

模型位置での波高計の計測値は再現性が良く、概ね指令値通りの波高が得られることを確認した。

桁模型の対象は、2004年スマトラ沖地震津波で実被害を受けたコンクリート桁である。縮尺は1/50で、図-3に示す通り、模型の橋長は40cm、幅員19cm、構造高3.4cm（実橋換算で橋長19.1m、幅員10.2m、構造高1.7m）である。橋長、幅員、構造高は、我が国でも多く存在する単純径間の橋梁に類似する形状であり、過去に行った孤立波性状の津波に対する桁への作用力実験³⁾で用いた模型と同じ形状とすることで、波形状のディテールの違いによって生じる作用力特性の比較を可能としている。

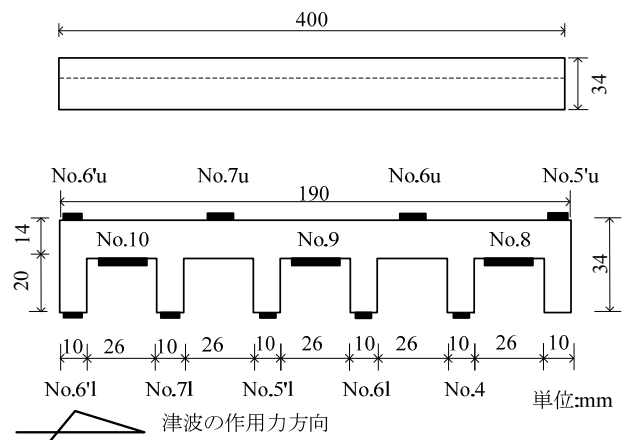


図-3 桁模型図と圧力計の設置状況

(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。

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。同図に示す通り、水槽の上部に梁を固定し、そこに分力計を設置し、治具を介して桁模型の作用力を計測する。治具に津波が作用しないように、鞘管構造で分力計と治具を覆い、模型のみに作用する力の抽出に配慮した。

流速計は、図中のV1、V2、V3に水平方向の流速を測定でき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、それぞれ桁模型位置、静水面以下の高さに設置した。V2は桁に衝突する直前の流速を計測するために桁前面に設置し、更に、水平方向と鉛直方向の流速を計測するために、V4として電磁流速計を追加している。

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は上述のV1、V3と同様の理由で側壁の隣に設置した。なお、鉛直作用力の分析用として、図-3に示すように桁の上面と下面に合計12個の圧力計を設置している。これらの計測器は全てパソコンで制御することで計測開始時間が同期されている。計測サンプリング周期は全て1/1000[sec]である。

(3) 実験ケースと計測波高

図4 に実験状況の模式図に加え、一覧表で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 とした i は波高ケースの No.を示し、j は床版幅ケースの No.を示す。Case1-1 の波高と床版幅を実橋に換算するとそれぞれ 10[m]、10.2[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。

続いて図5 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。同図に示す波高の時刻歴波形は、電気ノイズがほとんど生じていないため、サンプリング周期のまま用いている。

同図によれば、指令波高 20[cm]で造波した一山孤立波について、H1、H2、H6 のそれぞれの波高計の間の距離と時間の関係から求められる伝播平均速度は、H1 から H2 では 232[cm/sec]、さらに H2 から H6 では 231[cm/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、先に述べた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。

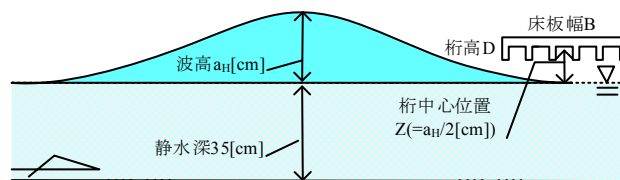
3. 代表的なケースの実験結果

本章では、標準のCase1-1の結果を用いて、鉛直作用力と圧力の関係、さらに鉛直作用力が発生する状況を波形状と桁の上下面の圧力分布を用いて分析する。

(1) 計測結果

図6 は、横軸に造波開始時刻 0 秒とする時刻をとることで、波高、並びに水平方向と鉛直方向の作用力の時刻歴図を示している。同図の鉛直作用力と水平作用力は、既往実験と同様に桁と分力計を繋ぐ治具の固有振動数 30Hz をカットするために 1/10[sec]間の移動平均法で平滑化した時刻歴図を示している。

同図によれば、図中[1]の時点で鉛直作用力、水平作



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

図4 実験状況模式図と実験パラメータ

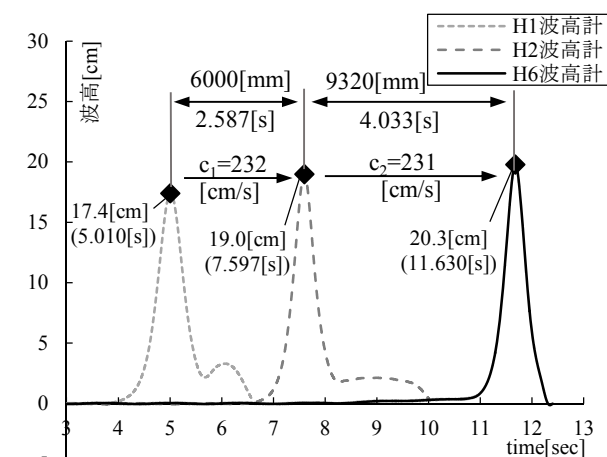


図5 波高変化の時刻歴図

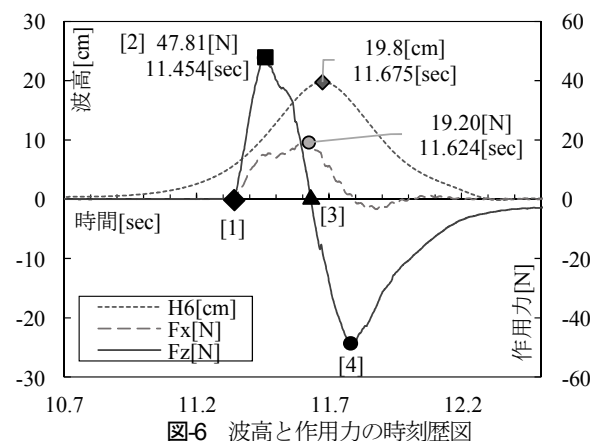


図6 波高と作用力の時刻歴図

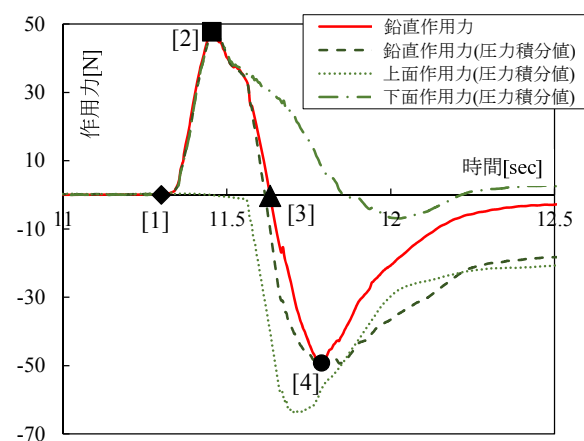


図7 圧力計から求めた鉛直作用力

用力が同時に発生し始め、先ず最大波高が発生する0.176 [sec]前の[2]の時点で最大鉛直作用力47.8[N]が発生する。その後、鉛直作用力は減少傾向に転じるが、波高と水平作用力は上昇を続け、ほぼ同時刻に最大値となり、最大波高と最大水平作用力はそれぞれ120.3[cm]、9.2[N]となる。同時刻の[3]で鉛直作用力は0[N]となり、その後減少を続けて[4]の時点で最小値の-49.2[N]を示す。

最大鉛直作用力は最大水平作用力に対して約2.5倍であり、孤立波が桁に作用する場合は鉛直作用力の影響が非常に大きいことがわかる。さらに波高と水平作用力は概ね同時刻で最大値となるが、鉛直作用力はそれよりも早い時刻、すなわち波高が上昇する途中で最大値となる。

(2) 作用力と圧力の関係

圧力計を用いた鉛直作用力の分析を行うために、圧力計と分力計のそれぞれの計測値の相関性を検証する。

図-7 に示すのは、前述の図-3 に示した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]から下向きの最小鉛直作用力[4]となるまで、圧力から求めた鉛直作用力と分力計から得た鉛直作用力は良く一致するのがわかる。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非常に高いと判断できる。一方、[4]以降は分力計から得た鉛直作用力から徐々にずれ始めるのが確認され、その差は約20[N]弱である。従って、最小鉛直作用力以降の圧力計の計測結果は信頼性に欠けると判断し、この区間の圧力は鉛直作用力の分析には使用していない。

(3) 津波の作用状況図と圧力分布

図-8 は、鉛直と水平の作用力が発生し始める時点[1]の津波の作用状況図である。波が桁に衝突する直前であるため桁に作用力は発生していないものの、波面は桁模型に対して緩やかな迎角をもっているのがわかる。

図-9 から図-12 では、(a)に津波の作用状況図を、(b)に同時刻の圧力分布図を示す。(b)の圧力分布は正圧を+値とし、負圧は-値を示す。

先ず、図-9は、桁下面が浸水した11.395[sec]の時点を示す。同図(a)から、波面は桁前面に衝突して盛り上がり、跳ね上がる白波が確認される。桁背面も同様に桁下面に衝突して白波が発生する。同図(b)から、桁上面の津波作用側で16[Pa]と正圧となるが、それ以外では-7[Pa]、-5[Pa]、-4[Pa]と負圧となるのがわかる。これらの積分値は上向きで0.2[N]と非常に微小な値である。桁下面では津波作用側で最大の正圧515[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122[Pa]となり、桁下面は概ね三角形の正圧分布となる。これらの積分値は上

向きで23.0[N]と求められ、鉛直作用力は上向きで23.2[N]となる。

次に示す図-10 は、鉛直作用力が最大となる[2]の時点を示す。同図(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、桁に対して斜め右上方への流れがあることがわかる。同図(b)を確認すると、桁模型の上面では、津波の

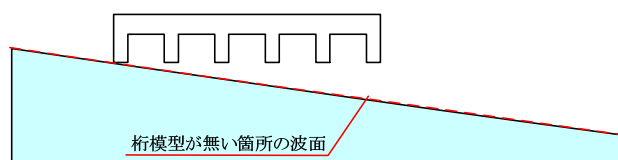
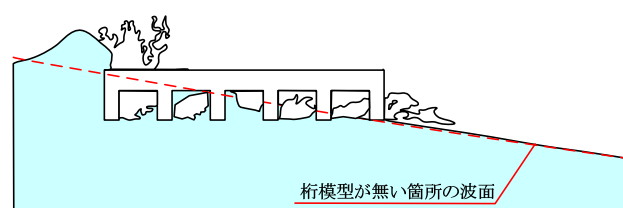
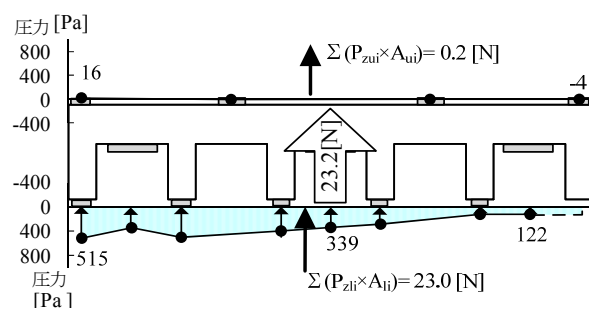


図-8 桁に津波が作用する直前の状況

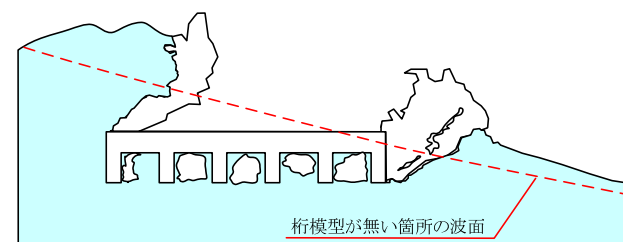


(a) 津波の作用状況

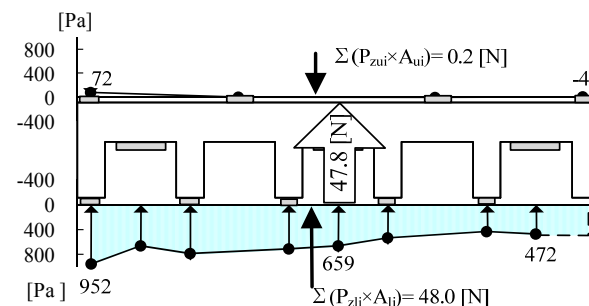


(b) 圧力分布図

図-9 桁下面浸水時



(a) 津波の作用状況



(b) 圧力分布図

図-10 鉛直作用力最大時

作用側で 72[Pa]となるが、それ以外では-8[Pa], -10[Pa], -4[Pa]と負圧が生じ、積分値は下向きとなるが、0.2[N]と微小である。一方、桁下面では津波作用側で最大の正圧 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]となり、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。この時点で桁上面側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が非常に大きく、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ことがわかる。

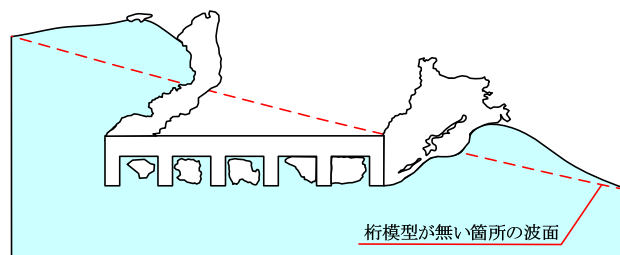
続いて、図-11 に桁上面まで浸水した時点(11.395[sec])の津波の作用状況と圧力分布を示す。同図(a)から津波の作用状況は前述の[2]の時点からさほど変化は見られない。同図(b)を確認すると、桁上面の積分値は下向きで 0.4[N]となり、[2]に比して 2 倍に増加する。桁下面は概ね正圧の台形分布となるのは[2]と同様であり、鉛直作用力は上向きで 44.6[N]と、[2]に比して 7%程度減少する。

最後に、図-12 に鉛直作用力が最小となる時点の津波の作用状況と圧力分布を示す。同図(a)から、桁上面の覆いかぶさるような波が桁に衝突しながら後方に流れ去るとともに、桁下面に気泡群が多く発生していることがわかる。同図(b)を確認すると、津波の作用側で 684[Pa]、それ以外の圧力計では 780[Pa]、845[Pa]、405[Pa]と、前述の波が桁上面に覆いかぶさる影響で全て正圧分布となり、桁上面には 56.8[N]と非常に大きな下向きの作用力が発生する。一方、桁下面側では津波作用側の 3 点で剥離によって発生したと考えられる負圧が確認される。それ以外は正圧に転じており、積分値は上向きで 8.2[N]となる。鉛直作用力は下向きで 48.6[N]となり、桁上面の覆いかぶさる波が大きく影響して下向きの鉛直作用力となることがわかる。

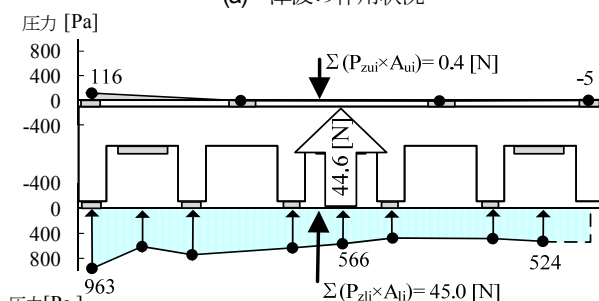
これらの結果から桁に発生する鉛直作用力は、桁上面と桁下面のそれぞれに発生する正、または負の圧力の積分値の合力であるとともに最大鉛直作用力発生時までには桁下面で受ける波の作用に支配される。

4. 波高をパラメータとした実験結果

前章までの分析の結果、鉛直作用力は桁下面に作用する波の圧力で発生することが明らかとなった。本章では標準の Case1-1 に加え、波高をパラメータとする Case2-1, Case3-1, Case4-1 の実験結果から、鉛直作用力と桁の上下面に作用する圧力分布を用いて波高と作用力の関係を考察する。

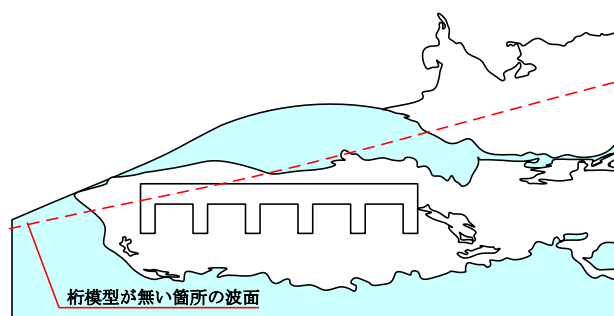


(a) 津波の作用状況

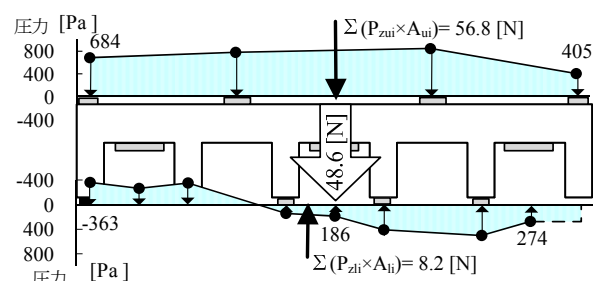


(b) 圧力分布図

図-11 桁上面まで浸水した時点



(a) 津波の作用状況



(b) 圧力分布図

図-12 鉛直作用力最小時

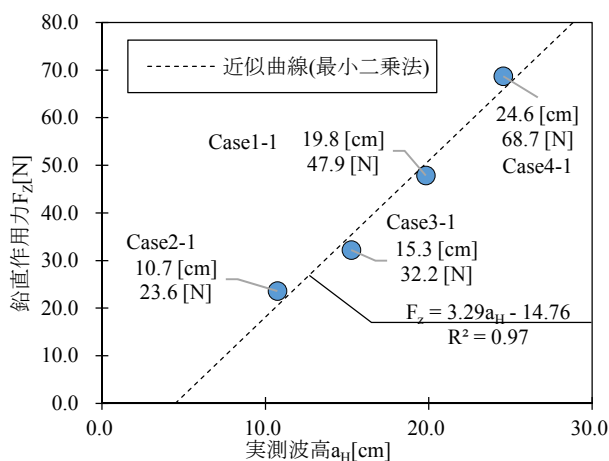


図-13 波高と鉛直作用力の関係

(1) 波高の変化に伴う鉛直作用力の変化

図-13は縦軸を最大鉛直作用力、横軸をH6波高計から得た最大波高として、鉛直作用力と波高の関係を示した。それぞれの波高ケースで同じ条件で3回実施している。3回分の波高と鉛直作用力の計測値は、ほぼ同値であることから再現性が非常に高いことを確認しており、同図は各波高ケースの3回分の平均値を示している。

ところで、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次関数で表される⁴⁾。従って、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、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 $R^2 = 0.97$ と求められる。このことから、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。

(2) 波高と鉛直作用力の分析

図-14に、Case1-1、Case2-1、Case4-1の3ケースそれぞれのH6波高計で計測した波高時刻歴図を示す。ここで、H6波高計は2章で前述したように、側壁を介した桁位置の波高であり、桁に衝突した波の影響が排除される。同図はサンプリング周期を1/1000[sec]として計測した波高時刻歴のうち、最大波高の前後1.4[sec]間を示す。なお、波高時刻歴の比較を容易にするために、波高10[cm]を基準として波高ピーク時で時刻を同期した。

同図から、桁位置での実波高の最大値はCase1-1、Case2-1、Case4-1ではそれぞれ19.8 [cm]、10.7 [cm]、24.5 [cm]である。指令波高に対する桁位置の最大波高の比率はそれぞれ93%、101%、102%と10%程度未満の誤差で指令波高が再現される。また、Case1-1に対するCase2-1とCase4-1の比率は図中に示す通りそれぞれ0.54、1.24と概ね指令波高の倍率である。

各波高ケースの波形の周期は概ね1.4[sec]と同様であるものの、前述のとおり桁位置は波高の1/2の位置であるため、各波高ケースが桁に作用する時間は0.73[sec]、0.46[sec]、0.35[sec]と、波高の増加に伴って短くなる。

次いで、図-15に示すのはCase1-1、Case2-1、Case4-1の鉛直作用力時刻歴図である。同図から、最大鉛直作用力はそれぞれ47.8[N]、23.6[N]、68.7[N]であり、Case1-1に対する最大鉛直作用力比率はCase2-1、Case4-1でそれぞれ0.49、1.44となる。この結果は波高の増加に伴う鉛直作用力の増加傾向を捉えているが比率は異なる。

また、鉛直作用力が発生する時間は、波高の増加とともに減少するが、これは前述の通り桁位置において波高の増加とともに波の作用時間が短くなるためである。

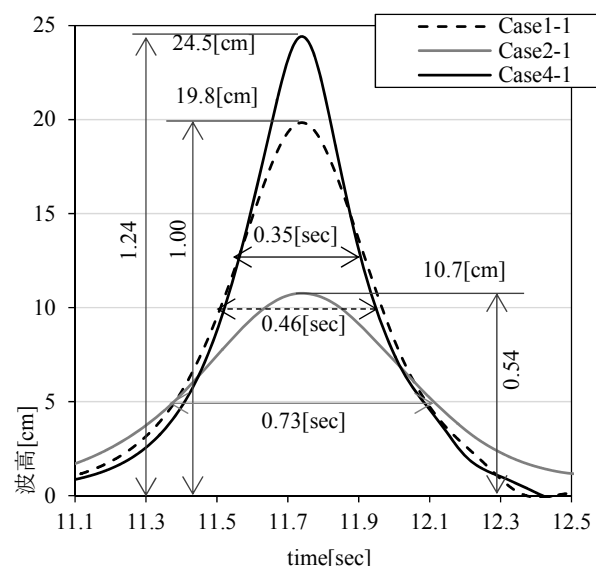


図-14 波高時刻歴図と最大値の比率

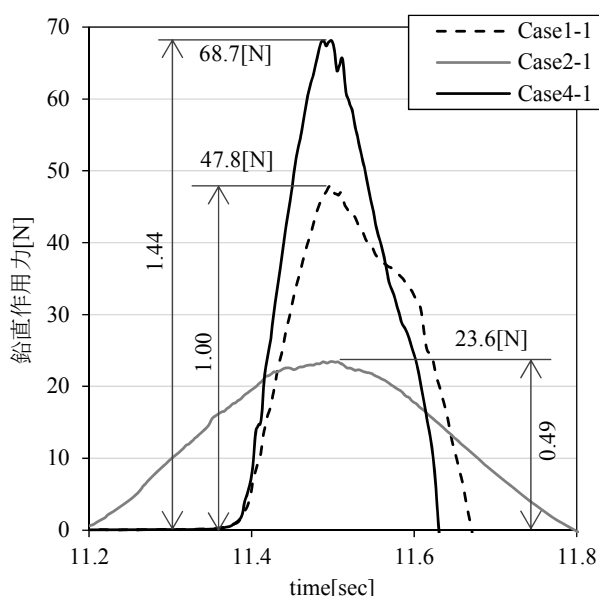


図-15 鉛直作用力時刻歴図と最大値の比率

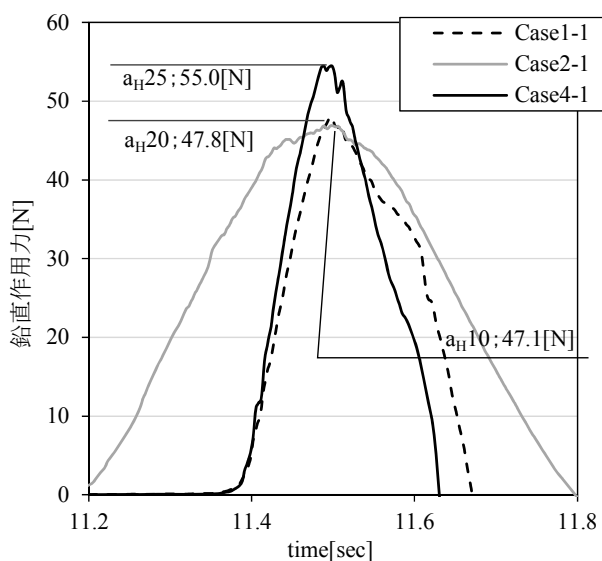


図-16 波高比率で補正した鉛直作用力時刻歴

このことから、波高の増加に伴って鉛直作用力は増加し、かつ、その発生状況は桁への津波作用時間が短くなるため、スパイク状に変化する。

図-16に示すのは、各波高ケースの鉛直作用力を波高比率で補正した時刻歴図である。補正に用いた比率は標準ケースであるCase1-1 ($a_H=20[\text{cm}]$) の指令波高値に対するそれぞれの指令波高値の比である。

同図を確認すると、Case1-1 ($a_H=20[\text{cm}]$) に対して波高がCase2-1 ($a_H=10[\text{cm}]$)、Case4-1 ($a_H=40[\text{cm}]$) の補正鉛直作用力(比率)はそれぞれ、47.1[N] (0.99)、55.0[N] (1.15) となる。Case1-1とCase2-1は差異が1%と非常に対応が良いものの、Case1-1とCase4-1は15%と差異がやや大きめとなる。このことについて次節で圧力分布と波形状を用いて考察する。

(3) 考察

図-17と図-18は、最大鉛直作用力発生時の圧力分布について、Case1-1に対してそれぞれCase2-1、Case4-1を比較した図である。それぞれの図はCase1-1の圧力値を1.0として、Case2-1、Case4-1の圧力値を波高比率で補正して破線で示している。ここで、標準のCase1-1では、前述のように鉛直作用力と桁下面に生じる圧力の関係を明らかにするために詳細な圧力計測をしているが、その他のケースでは簡略化のために圧力計を3箇所としている。

まず、図-17に示すのは、最大鉛直作用力の波高比率で比較した際に誤差が小さいCase2-1の圧力分布である。最大鉛直作用力発生時の沖側、中央、陸側の圧力の値(補正前の値)はそれぞれ906 (453) [Pa]、514 (257) [Pa]、447 (223) [Pa]と、沖側の圧力が大きく、中央で沖側の概ね50%程度に減少して等分布となるのがわかる。一方、波高20[cm]の圧力分布とは、中央の圧力値に若干の違いがみられる。具体的には、Case2-1では波高比率で補正した値は514[Pa]であるのに対し、Case1-1では660[Pa]と約28%大きくなり、より台形分布に近い。

次いで、図-18に示すのはCase4-1の桁下面の圧力分布である。最大鉛直作用力発生時の沖側、中央、陸側の圧力の値(補正前の値)はそれぞれ875 (1,094) [Pa]、657 (822) [Pa]、216 (270) [Pa]と、沖側の圧力が大きい傾向は他の波高ケースと同様であるが、中央、陸側それぞれで圧力が75%、25%に減少し、圧力分布はより三角形に近い形となる。Case1-1との圧力分布とは、沖側と中央で概ね同値となるものの、陸側の圧力が216[Pa]と、波高20[cm]の469[Pa]に対して50%未満となる。

これらの結果から、Case1-1、Case2-1、Case4-1の最大鉛直作用力発生時の圧力分布は波高比率で良く近似するものの、圧力分布の形状に若干の差異が認められる。

この差異を考察するために、図-19にCase2-1とCase4-1のケースについて、最大鉛直作用力が発生した時点の波

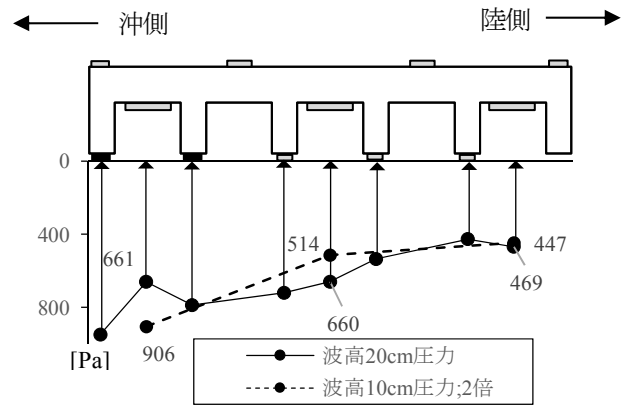


図-17 桁下面の圧力分布の比較
Case1-1(波高 20[cm])と Case2-1(波高 10[cm] (2倍))

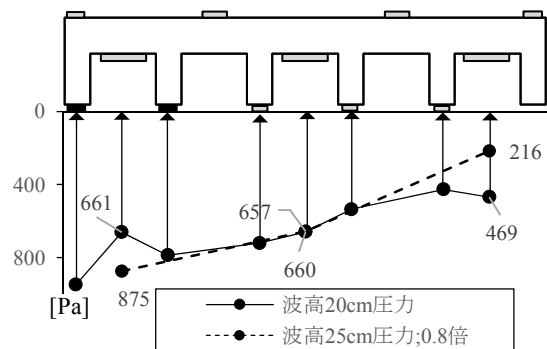
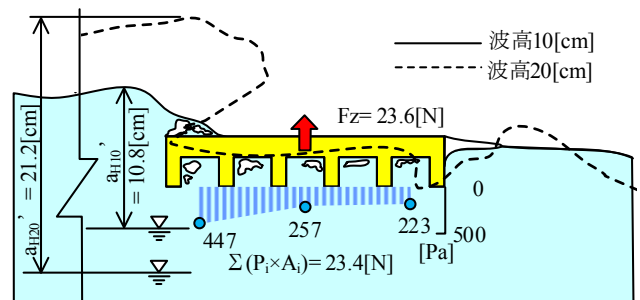
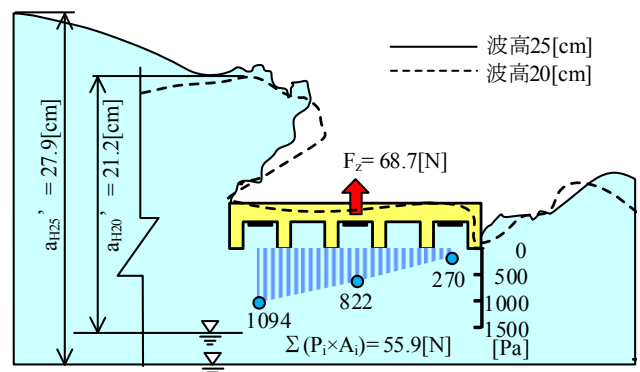


図-18 桁下面の圧力分布の比較
Case1-1(波高 20[cm])と Case4-1(波高 25[cm] (0.8倍))



(a) Case2-1(波高 10[cm])



(b) Case4-1(波高 25[cm])

図-19 波形状と圧力分布

の作用状況と桁下面の圧力分布をCase1-1の波の作用状況とともに示す。なお、これらの波形状図は、桁横に設置したハイスピードカメラで撮影した動画をトレースした図である。

同図(a)を確認すると、桁に衝突して跳ね上がった静水面を0点とする波高は、Case1-1、Case2-1でそれぞれ21.2[cm]、10.8[cm]であることがわかる。両者の波高の比率は1.96 : 1.00である。一方、指令波高の値はそれぞれ $a_H = 20$ [cm]、 $a_H = 10$ [cm]と、その比率は2.00 : 1.00となる。この桁に衝突した際の波高比率と指令波高の比率はほぼ一致する。

次いで、同図(b)を確認すると、桁に衝突して跳ね上がった波高は、Case1-1、Case4-1でそれぞれ21.2[cm]、27.9[cm]であることがわかる。両者の波高の比率は1 : 1.32である。一方、指令波高の値はそれぞれ $a_H = 20$ [cm]、 $a_H = 25$ [cm]と、その比率は1 : 1.25となり、この桁に衝突した際の波高比率と指令波高の比率に差異があることがわかる。これらのことから、Case4-1のケースでは水面を上昇させる作用がCase1-1に対してより大きいといえる。

以上より、Case4-1はCase1-1に比較して、より上方へ押し上げる波の勢いが大きいため、最大鉛直作用力が増幅したと考えられる。

5. 床版幅をパラメータとした実験結果

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。

本章では、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。

(1) 床版幅の変化に伴う鉛直作用力の変化

図-20は、横軸(x)に標準桁の床版幅に対する床版幅を変化させた各桁の床版幅比を、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各桁の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することわかることに加え、床版幅比と鉛直作用力比の関係は概ね $y=x$ から $y=1.2x$ の間で表される。特に、Case1-3とCase1-4で床版幅比を上回る鉛直作用力比となる傾向が顕著となる。この理由について、次節で考察する。

(2) 床版幅と鉛直作用力に関する考察

図-21に示すのは各床版幅ケースの鉛直作用力時刻歴

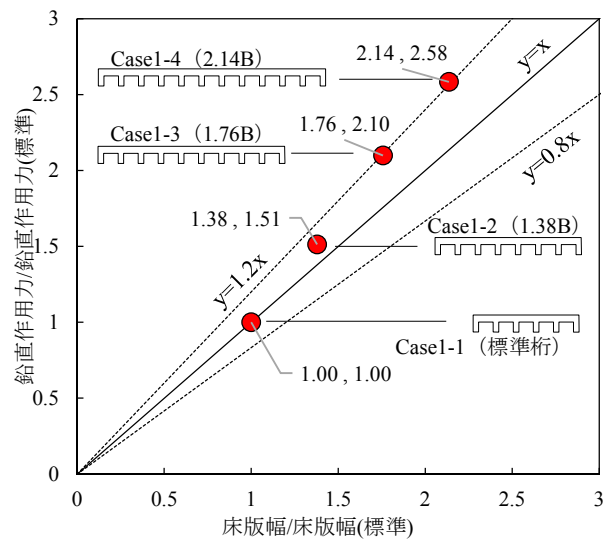


図-20 床版幅比と鉛直作用力比

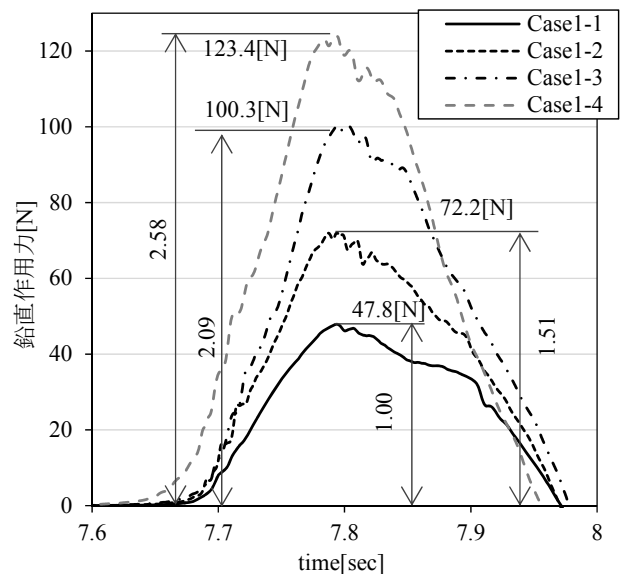


図-21 鉛直作用力時刻歴図と最大値の比率

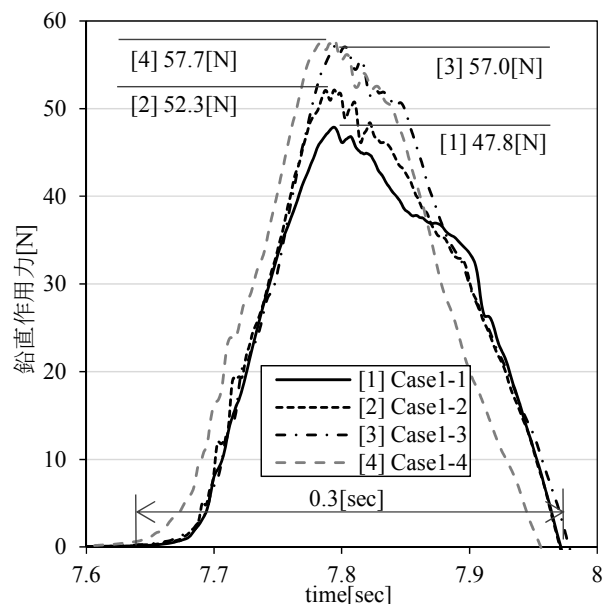


図-22 幅比率で補正した鉛直作用力時刻歴

図である。同図から、各床版幅ケースの鉛直作用力が発生する時間は概ね同様で、床版幅が増加するにつれ、鉛直作用力が増加することが確認できる。Case1-1の最大鉛直作用力47.8[N]に対して、Case1-2、Case1-3、Case1-4の最大鉛直作用力はそれぞれ72.2[N]、100.3[N]、123.4[N]であり、これらの標準桁に対する最大鉛直作用力比率はそれぞれ1.51、2.09、2.58となる。この結果から前述のように床版幅比が増加するにつれ最大鉛直作用力の増加率が若干増幅していく傾向にあることがわかるが、この理由については後述する。

図-22に示すのは、各床版幅ケースの鉛直作用力を床版幅比で補正した時刻歴図である。補正比率は、Case1-1を1としてCase1-2、Case1-3、Case1-4のそれぞれの鉛直作用力を1/1.38倍、1/1.76倍、1/2.14倍としている。図中の[1]はCase1-1を示し、以降の[2]、[3]、[4]はそれぞれCase1-2、Case1-3、Case1-4を示す。

同図を確認すると、[1]の最大鉛直作用力47.8[N]に対して、床版幅比で補正した最大鉛直作用力（比率）は[2]、[3]、[4]の順でそれぞれ、52.3[N]（1.09）、57.0[N]（1.19）、57.7[N]（1.21）となり、前述のように床版幅が増加するにつれ、最大鉛直作用力も増加する傾向が確認できる。最大鉛直作用力は標準桁に対して最大で21%の開きがあるものの、同図から作用力の時刻歴波形は各ケースとも概ね一致する傾向が確認できる。このことから、床版幅が異なる場合に鉛直作用力の増加傾向が床版幅比と一致しない理由は、桁下面に生じる圧力分布に起因することが予測される。

なお、いずれのケースも鉛直作用力の発生時間は0.3[sec]と同様である。従って床版幅が異なっても造波条件が同じで、かつ桁に作用する際の津波の波高が同一であれば、鉛直力の発生時間は同じであることがわかる。

図-23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。

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、上面に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すとともに、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、沖側が最大となる台形に近い圧力分布であることがわかる。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66.4[N]と算出され、分力計で計測された鉛直作用力72.2[N]と約9%の誤差でもって一致する。

次に同図(b)はCase1-3を示している。波の作用状況は同図(a)と同様である。桁下面の圧力分布は全て正圧を示すとともに、沖側から陸側までの圧力はそれぞれ827[Pa]、946[Pa]、489[Pa]となり、圧力分布はCase1-2と異なり中央が最大となる凸型の圧力分布に変化することがわかる。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102.6[N]と算出され、分力計で計測された鉛直

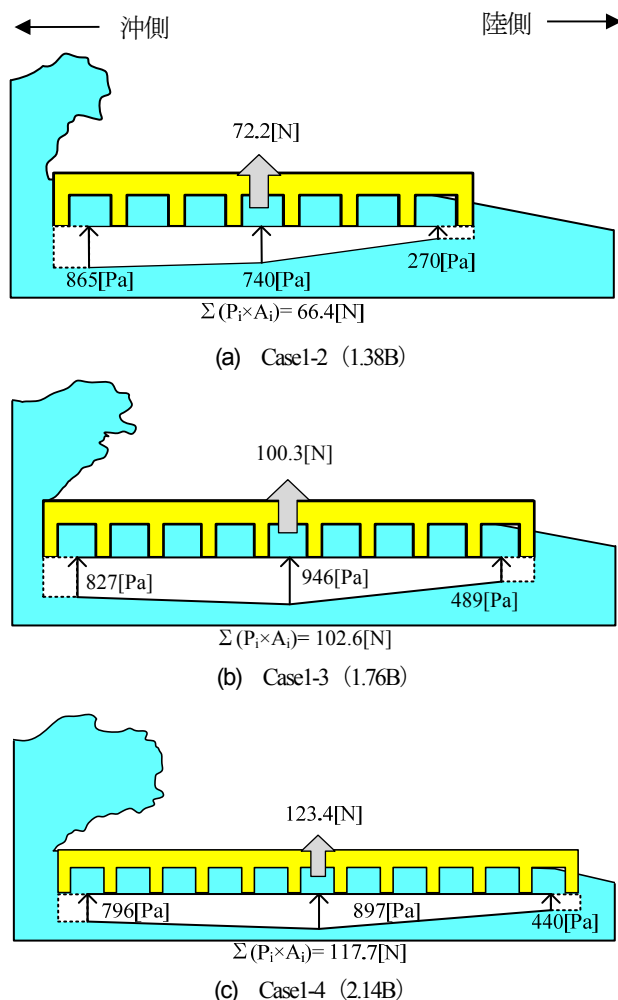


図-23 鉛直作用力最大時の波形状と圧力分布

作用力100.3[N]と約2%の誤差でもって一致する。

最後に同図(c)にCase1-4を示す。波の作用状況は同図(a)、(b)と同様であり、桁下面の圧力分布は全て正圧を示すとともに、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、圧力分布は中央が最大となる凸型の圧力分布である。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]と算出され、分力計で計測された鉛直作用力123.4[N]と約5%の誤差でもって一致する。

標準桁の桁下面の圧力分布の形状は3章で述べた通り、沖側を最大とする台形分布であるが、ここで示した3ケースの床版幅比の圧力分布と比較すると、沖側の圧力は標準桁の952[Pa]に対して、それぞれ865[Pa]、827[Pa]、796[Pa]と床版幅の増加に伴い減少する。これは、標準桁と他のケースで計測位置が異なることに起因する差と考えられるが、標準桁以外の3ケースでは同位置で計測していることから、床版幅の増加に伴って沖側の圧力が減少する傾向があるといえる。

一方、桁中央では標準桁の659[Pa]に対して、それぞれ740[Pa]、946[Pa]、897[Pa]とばらつきが大きくなる。これは、定量的な事実確認は出来ないものの、床版幅の増加

によって桁本数が増加することで、桁下面に作用する波が相互に反射しあい、圧力分布が一様となることが推測される。このために圧力分布の形状が変化したと考えられるが、鉛直作用力比が床版幅比を上回ることについては、今後更なる検討が必要である。

しかしながら、桁下面に生じる圧力を被圧面積で積分した値は、計測した鉛直作用力と10%未満の誤差で一致することから、圧力分布形状は変化するものの、鉛直作用力は桁下面の面積の関数であるといえる。

以上より、鉛直作用力は桁下面の面積の関数であることに加え、床版幅比を変化させることによって桁下面の被圧面積が変化するため、鉛直作用力比が変化する。

6. まとめ

陸上を遡上する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、鉛直作用力に影響を及ぼすと考えられる波高、桁下面の面積の関係を明らかにした。

以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 床版幅190[mm]、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190[mm]の桁模型に波高20[cm]の孤立波が作用させた場合、最大鉛直作用力は、最大波高や最大水平作用力よりも早く発生するとともに、水平作用力19.2[N]に対して鉛直作用力は47.8[N]と約2.5倍となる。この鉛直作用力を桁の上下面に設置した圧力計を用いて分析した結果、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190[mm]の標準桁に波高を10[cm]から25[cm]まで5[cm]毎に変化させた孤立波を作用させた。この結果から、最大波高と最大鉛直作用力は決定係数 $R^2=0.97$ と高い相関性をもって1次曲線で近似できる。各波高ケースの最大鉛直作用力を波高20[cm]に対する波高比率で補正した値は波高20[cm]の最大鉛直作用力47.8[N]と概ね一致するため、鉛直作用力は波高の関数であるといえる。一方で、波高25[cm]のケースのみ差異が15%とやや大きめの値を呈する。この差は、桁に衝突した際の波の跳ね上がりの状況から波高25[cm]では上方へ押し上げる作用が他の波高ケースに比較して大きいことが要因として考えられる。
- (3) 標準桁に対して床版幅を1.38倍、1.76倍、2.14倍と変化させて波高20[cm]の孤立波を作用させた。この結果、全体的に床版幅比と鉛直作用力比は0.8 : 1.0の関係で直線比例となる。このため、鉛直作用力は床版幅と比例関係にあり、桁下面全域の面積の関数であるといえる。鉛直作用力比は床版幅比より大きくなるものの、その差異は20%程度である。圧力分布を分析すると、床版幅が大きくなるにつれ津波作用側を最大とする台形分布から桁中央を最大とする凸型分布へと変化する。この圧力分布の変化が、20%の誤差の理由と考えられる。

参考文献

- 1) 片岡正次郎、日下部毅明、長屋和宏：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、No.0012, pp.154-157, 2006.
- 2) 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津波力の特性、土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.796-800, 2010.
- 3) 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.
- 4) 伊藤喜行、竹田英章：棧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.

Evaluation of Vertical Force and Pressures on Bridge Girder Caused by Solitary Wave

Tatsuo SASAKI, Kenji KOSA, Shotaro HAMAI and Takashi SATO

In order to study the mechanism of wave force on bridge girder and propose the evaluation formula of tsunami wave force, by applying the bridge girder model, the experiment simulating bore wave at surge front of tsunami was conducted. The experimental results of wave vertical force, the pressures on the girder top and bottom surfaces were concentrated. As a consequence, it was found that the measured vertical force agreed with the integration of the vertical forces calculated by multiplying the pressures on the model bottom and compression areas of the model bottom, and from the results of wave height parametric study, it was obvious that the wave vertical force became greater with the increase of wave height. Therefore, it was concluded that the wave vertical force was the function of wave height and compression area of bridge girder bottom.