

孤立波によって橋梁へ作用する鉛直作用力特性の評価

濱井翔太郎¹・幸左賢二²・佐々木達生³・佐藤崇⁴

¹学生会員 九州工業大学大学院 建設社会工学専攻 （〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1）

²正会員 Ph.D. 九州工業大学 建設社会学科（〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1）

³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）

⁴正会員 工修（株）長大 構造技術部（〒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）

1. はじめに

津波の研究は、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性状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、津波形状に応じた橋梁への作用力の定式化には至っていない。

一方、東北地方太平洋沖地震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橋梁は、流出等の被害を受けた。緊急輸送路上に位置する橋梁の流出によって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る。そのためには、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ことが再確認された。

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形状に応じた作用力の定式化を目指し、津波によって橋梁に発生する作用力のメカニズムを明らかにする。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。本論文では、鉛直作用力に着目し、作用力と圧力、流速の相関性を分析し、鉛直作用力の定式化に向けて、鉛直作用力を支配する代表物理量を明らかにする。

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

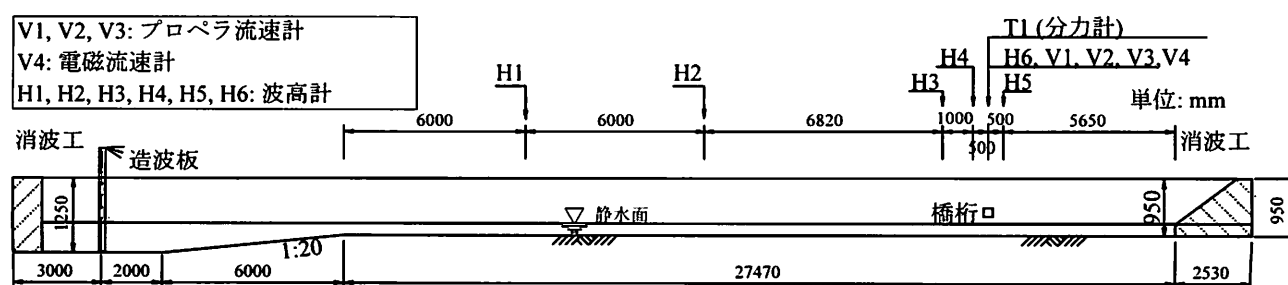
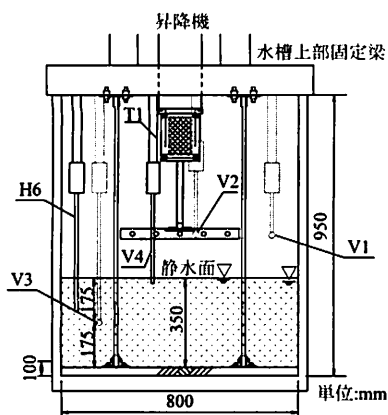
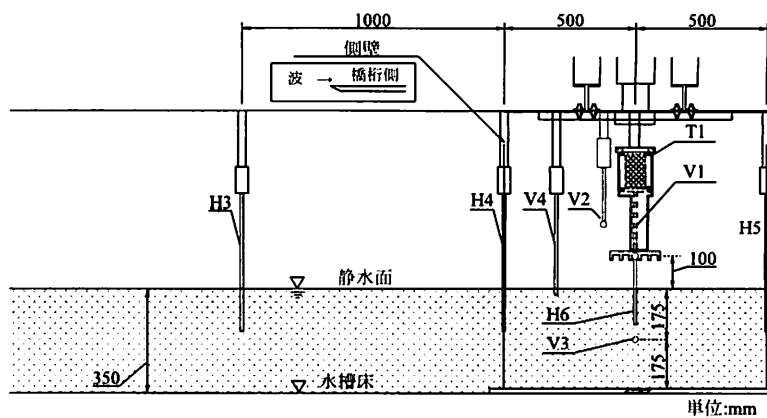


図-1 実験装置概略図



(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

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。

(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。

分力計は水平作用力(F_x)、鉛直作用力(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

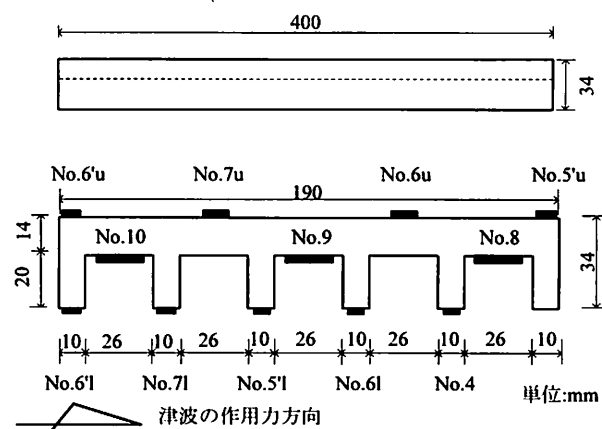


図-3 桁模型図と圧力計の設置状況

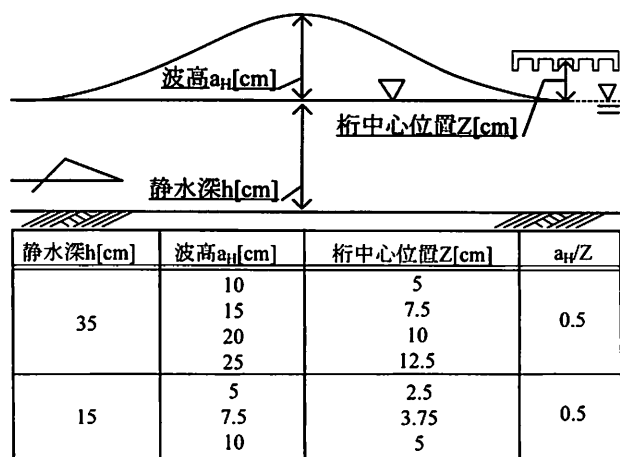


図-4 実験状況模式図と実験パラメータ

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) 実験パラメータ

図-4 に本実験の実験状況の模式図と実施したパラメータを示す。静水深を 15[cm]とし、指令波高をそれぞれ 5[cm]から 10[cm]までの 3 ケースと、静水深を 35[cm]とし、指令波高を 10[cm]から 25[cm]

までの4ケースを実施した。桁の中心位置は指令波高の1/2の位置とした。

3. 代表ケースの分析

(1) 作用力特性

図-5に、横軸を造波開始時刻0秒とする波高、並びに水平方向と鉛直方向の作用力の時刻歴図を示す。同図の鉛直作用力と水平作用力の時刻歴図は、既往実験と同様の考え³⁾に基づき1/10[sec]間の移動平均法を用いている。

同図によれば、図中[1]から鉛直作用力、水平作用力が発生し始め、最大波高が発生する0.176[sec]前に最大鉛直作用力[2]が発生する。その値は47.8[N]である。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、ほぼ同時刻にそれぞれ最大値20.3[cm]、19.2[N]を呈する。この時点[3]で鉛直作用力は0[N]となり、その後、鉛直作用力は減少を続けて[4]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。

(2) 圧力と鉛直作用力の相関性

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-6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に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) 鉛直作用力発生時の作用状況と圧力分布

図-7に示すのは、鉛直と水平の作用力が発生し始める時点[1]の津波の作用状況であり、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つ

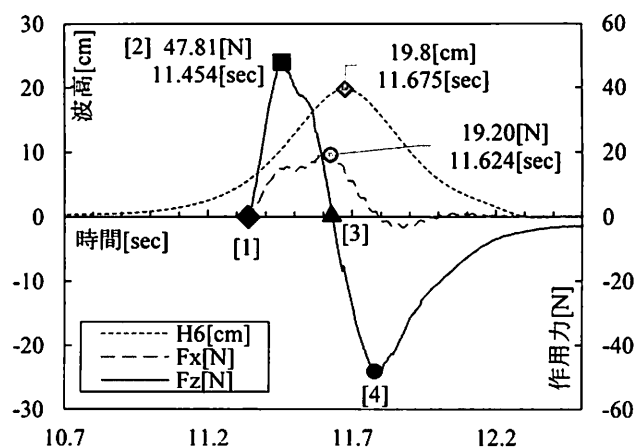


図-5 波高と作用力の比較時刻歴図

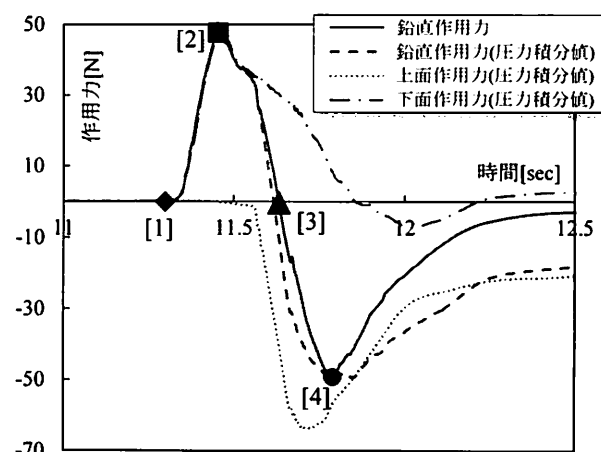


図-6 圧力計から求めた鉛直作用力

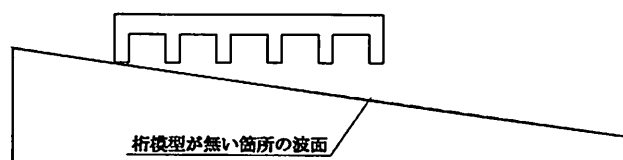
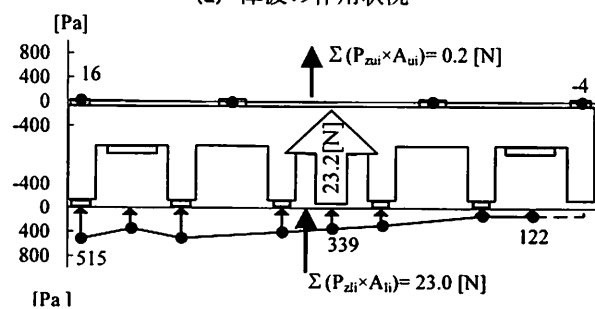


図-7 津波作用時の作用状況

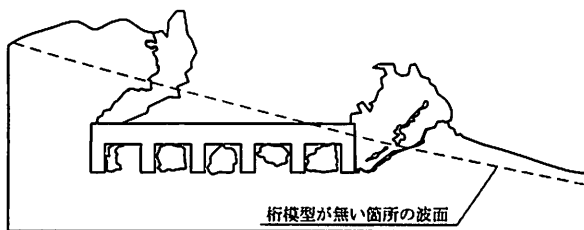


(a) 津波の作用状況

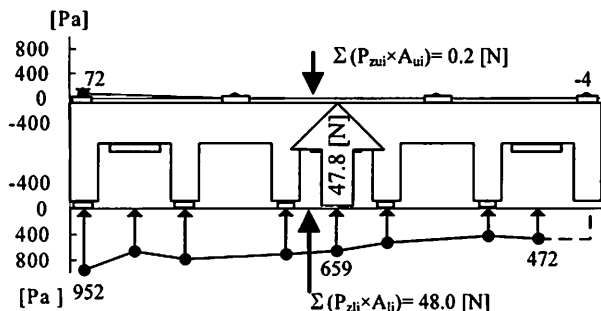


(b) 圧力分布図

図-8 桁下面が浸水した時点の津波の作用状況と圧力分布

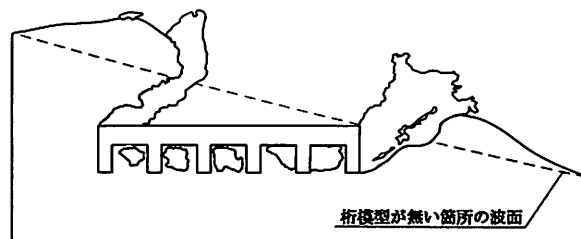


(a) 津波の作用状況

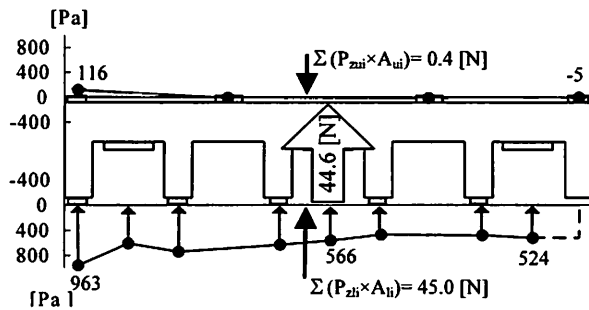


(b) 圧力分布図

図-9 鉛直作用力最大時点の津波の作用形状と圧力分布



(a) 津波の作用状況



(b) 圧力分布図

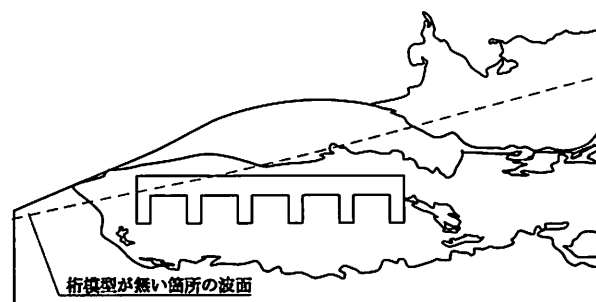
図-10 桁上面まで浸水した時点の津波の作用形状と圧力分布

ているのがわかる。

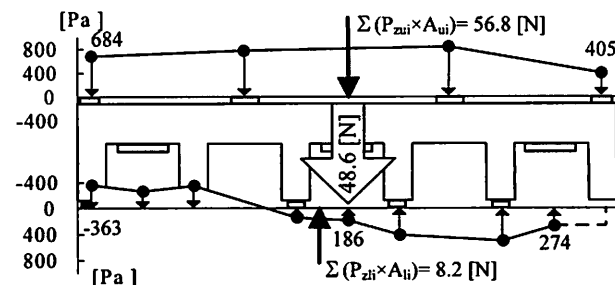
図-8 から図-11 では、(a)に津波の作用状況図を、(b)に同時刻の圧力分布図を示す。(b)の圧力分布は正圧を+値とし、負圧は-値を示す。

まず、図-8は、桁下面が浸水した時点(11.395[sec])の津波の作用状況と圧力分布である。である。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]と微小な値である。桁下面側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-9は、鉛直作用力が最大となる時点[2]の津波の作用状況と圧力分布である。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]と微小な値である。一方、桁下面側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



(a) 津波の作用状況



(b) 圧力分布図

図-11 鉛直作用力最小時点の津波の作用形状と圧力分布

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の波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-10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。桁下面側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-11 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発生する。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は桁下面で受ける波の作用に支配される。

4. 波高パラメータ実験

(1) 波高の変化に伴う鉛直作用力の変化

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。本章では波高をパラメータとした実験結果から、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。

図-12 は横軸を最大鉛直作用力、縦軸を 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を 3 回実施し、3 回の波高と鉛直作用力の計測値は、3 回ともほぼ同値であり、再現性が非常に高いことを確認している。同図では、各回の計測結果とともに平均値を示す。最大波高と最大鉛直作用力はほぼ一直線上にプロットされており、線形的な比例関係にあることがわかる。図中[a]の $h=35[\text{cm}]$ $a_H=10[\text{cm}]$ のケースの鉛直作用力の平均値は 23.5[N]であるのに比して、実波高が 1.87 倍となる[b]の $h=35[\text{cm}]$ $a_H=20[\text{cm}]$ のケースの鉛直作用力は 50.3[N]と 2.03 倍となることから、波高が 2 倍になると鉛直作用力も 2 倍となることがわかる。これは、一山孤立波の波高の大きさに応じて、桁を持ち上げようとする作用力が大きくなることを示唆する。

図-13 に、[a]と[b]の 2 ケースについて、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

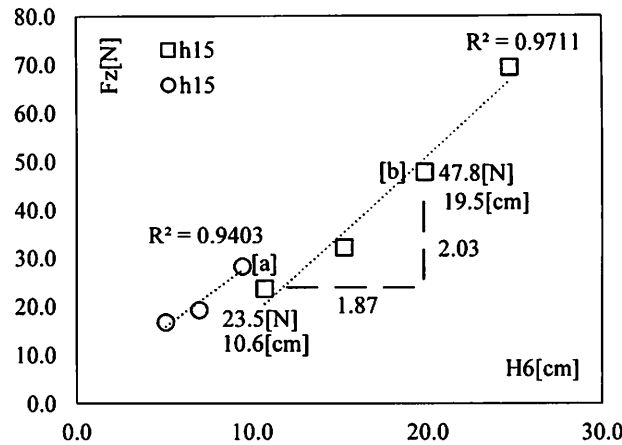
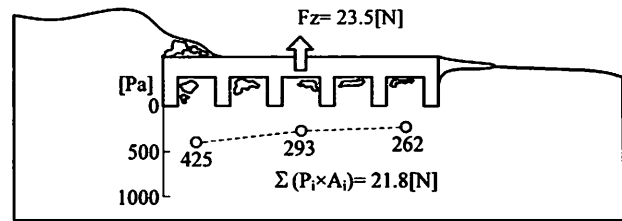
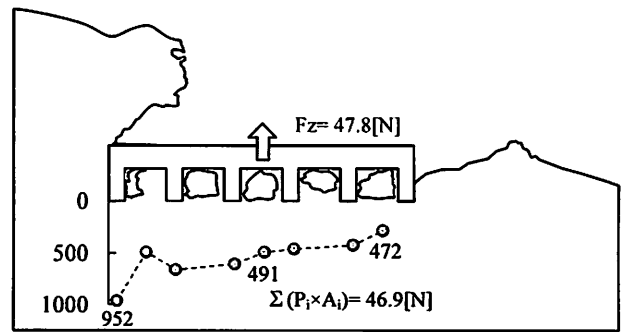


図-12 波高と鉛直作用力の関係



(a) [a]波高 10[cm]



(b) [b]波高 20[cm]

図-13 鉛直作用力最大時の波形状と圧力分布比較図

用する圧力分布図を示す。

同図(a)から、 $a_H=10[\text{cm}]$ のケースで桁前面に衝突して波面が盛り上がり、波面が跳ね上がって背面側に流れる様子が確認される。桁下面の圧力分布は全て正圧を示すとともに、桁前面側と背面側の圧力はそれぞれ425[Pa]、262[Pa]となる。桁下面全域を被圧面積とする圧力の積分値は、鉛直作用力23.5[N]と一致する。一方、同図(b)は $a_H=20[\text{cm}]$ のケースを示し、桁前面に衝突した波面が桁背面側に流れる様子は同様であるが、白波を伴うことから[a]に比して波の勢いは[b]がより大きいと考えられる。桁下面の圧力分布は[a]と同様に全て正圧となるが、桁前面側と背面側の圧力はそれぞれ952[Pa]、472[Pa]となり、[a]に比して概ね2倍の関係が得られる。前述の通り、被圧面積による積分値は鉛直作用力と一致して47.8[N]である。

これらの結果から、一山孤立波が桁に衝突した際

には、桁下面全域に桁を持ち上げようとする正の圧力が発生して鉛直作用力となる。鉛直作用力は波高の増加に伴い線形的な比例関係にあることが明らかとなった。

5. 鉛直作用力と流速の関係

前章までの分析の結果、波高と鉛直作用力は線形的な比例関係にあることが明らかとなった。本章では、水平方向の流速を用いて、波高と鉛直作用力の関係を明らかにする。

(1) 水平方向の流速を用いた分析

分析に用いる流速は、側壁を介して桁の中央に隣接する水平方向の流速を測定しているV1流速計の測定値(以下： v_1)である。

図-14は横軸を最大波高、縦軸を $v_{1\max}^2$ として、最大波高と $v_{1\max}^2$ の関係を示した。同図によれば、最大波高と $v_{1\max}^2$ は一直線上にプロットされており、線形的な比例関係にあることがわかる。

図-15は横軸を $v_{1\max}^2$ 、縦軸を最大鉛直作用力として、 $v_{1\max}^2$ と鉛直作用力関係を示した。同図によれば、最大波高と $v_{1\max}^2$ は一直線上にプロットされており、線形的な比例関係にあることがわかる。

(2) 揚力係数の算出

前節の分析によって、波高の変化に伴い鉛直作用力と $v_{1\max}^2$ が線形的な比例関係あることから、これらが相関関係であることが明らかとなった。このことから、本節では流体力の式(1)を用いて、揚力係数を式(2)のように算出した。

$$F_z = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_L \quad (1)$$

$$C_L = \frac{2F_z}{\rho A v^2} \quad (2)$$

ここで、 F_z ：最大鉛直作用力、 ρ ：水の密度、 A ：桁の底面積、 v ：最大水平方向流速 $v_{1\max}$ 、 C_L ：揚力係数である。

図-16は横軸を最大鉛直作用力、縦軸を式(2)に計測結果を代入し算出した揚力係数 C_L として、鉛直作用力と揚力係数 C_L の関係を示した。同図によれば、揚力係数は、静水深 $h=15[\text{cm}]$ では波高 $a_H=5[\text{cm}]$ のケースから順に2.92, 1.88, 1.51で、 $h=35[\text{cm}]$ では、 $a_H=10[\text{cm}]$ のケースから順に、2.08, 1.47, 1.35, 1.22を示す。また、図中の平均値は、揚力係数が大

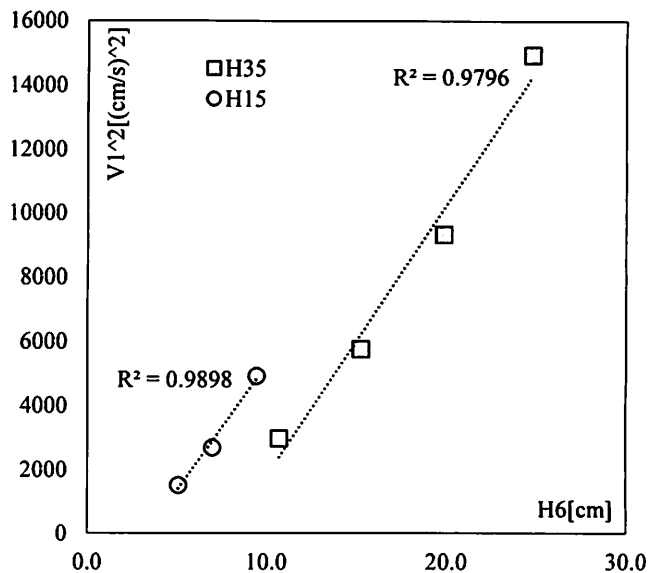


図-14 波高と $v_{1\max}^2$ の関係

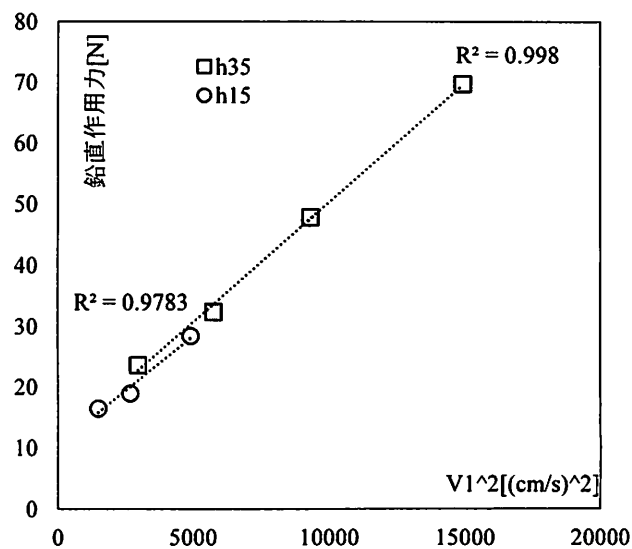


図-15 鉛直作用力と $v_{1\max}^2$ の関係

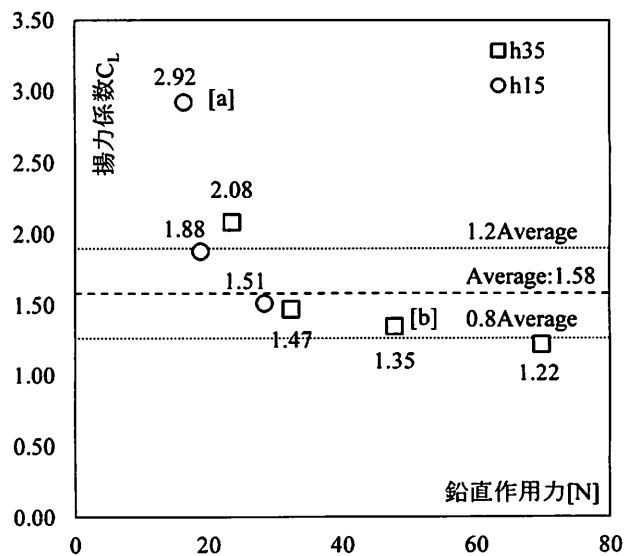


図-16 鉛直作用力と揚力係数の関係

さい $h=15[\text{cm}]$ $a_H=5[\text{cm}]$ のケースを除く6ケースを用いて算出した値で、その値は1.58である。上記のケースを除く6ケースの揚力係数は、平均値から2割以内にプロットされていることが確認される。

(3) 揚力係数の考察

本節では、図-16の $h=15[\text{cm}]$ $a_H=5[\text{cm}]$ において、揚力係数が大きく算出された原因について分析を行う。式(1)より、鉛直作用力 F_z は桁の底面積 A と水平流速 $v_{1\text{max}}^2$ の関数である。このことから、揚力係数 C_L が大きくなる場合、 A もしくは $v_{1\text{max}}^2$ を過小評価している可能性が挙げられる。代表例として、揚力係数が2.92の $h=15[\text{cm}]$ $a_H=5[\text{cm}]$ を[a]とし、揚力係数が1.36の $h=35[\text{cm}]$ $a_H=20[\text{cm}]$ を[b]とし、比較を行う。

図-17に、[a]における、横軸を造波開始時刻0秒とする鉛直作用力、並びに水平方向と鉛直方向の流速の時刻歴図を示す。同図によれば、それぞれの測定値の発生時刻は異なるものの、鉛直作用力と鉛直流速(以下： v_{4z})が最大となる時刻は、それぞれ18.478[sec]と18.442[sec]で概ね同時刻であることが確認される。その後、水平流速が18.622[sec]で最大を迎える。

図-18に、[b]における、横軸を造波開始時刻0秒とする鉛直作用力、並びに水平方向と鉛直方向の流速の時刻歴図を示す。同図によれば、[a]と同様でそれぞれの測定値の発生時刻は異なるものの、鉛直作用力と鉛直流速が最大となる時刻は、それぞれ11.454[sec]と11.513[sec]で概ね同時刻であることが確認される。その後水平流速が11.661[sec]で最大を迎える。

このことから、鉛直作用力と鉛直流速が最大を迎える時刻は概ね同時刻であるため、鉛直作用力は鉛直方向の流速によって、発生すると考えられる。

ここで各波高ケースで計測された v_1 と v_{4z} の関係を説明する。

図-19に $v_{1\text{max}}^2$ と $v_{4z\text{max}}^2$ の関係を示す。図中の $h=35[\text{cm}]$ $a_H=10[\text{cm}]$ のケースでは $v_{1\text{max}}^2=2970$ と、 $v_{4z\text{max}}^2=237$ に対し、指令波高が2.5倍である同静水深 $a=25[\text{cm}]$ のケースでは、 $v_{1\text{max}}^2=14884$ と $v_{4z\text{max}}^2=1037$ と、それぞれ5.01倍と4.38倍である。波高の変化に伴う $v_{1\text{max}}^2$ の増加率対し、 $v_{4z\text{max}}^2$ の増加率が2割程度小さいものの、 $v_{1\text{max}}^2$ と $v_{4z\text{max}}^2$ は線形的な比例関係にあることがわかる。

このことから、[a]において、水平流速と鉛直流速は相関関係にあるといえる。

計測した鉛直作用力と v_1 、波高が正確に測定していると仮定すると、式(2)に用いている A が異なる可

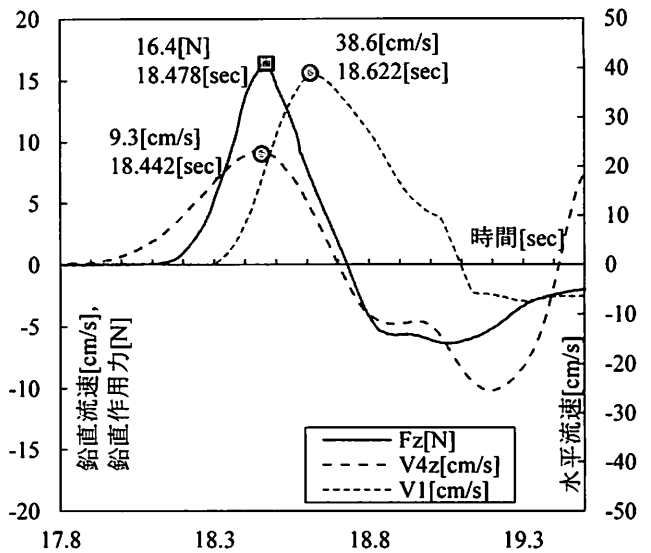


図-17 波高と流速、作用力の時刻歴図
($h=15[\text{cm}]$, $a_H=5[\text{cm}]$)

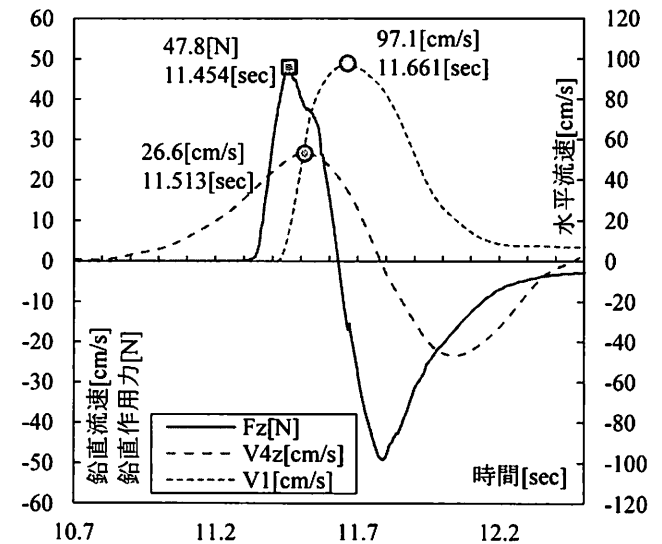


図-18 波高と流速、作用力の時刻歴図
($h=35[\text{cm}]$, $a_H=20[\text{cm}]$)

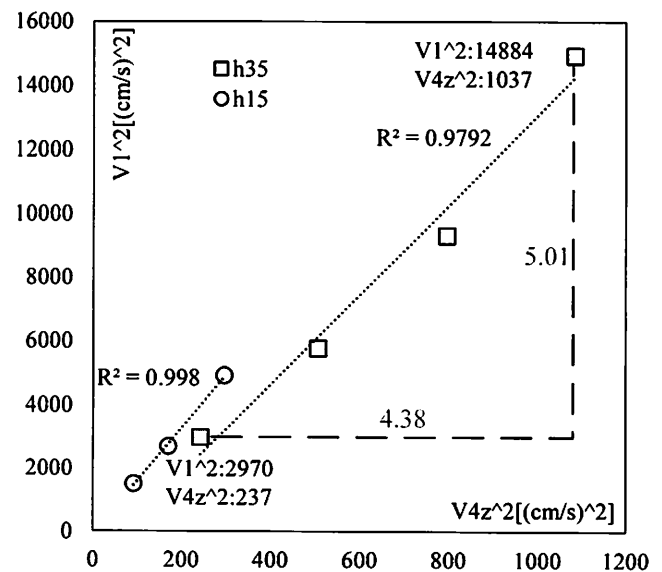


図-19 $v_{1\text{max}}^2$ と $v_{4z\text{max}}^2$ の関係

能性が挙げられる。

そこで、図-20に、[a]と[b]の鉛直作用力最大時点の波形状と圧力分布を示す。同図には、計測した圧力の平均値を $P(\text{ave})$ 、揚力係数 C_L の平均値1.58を用いて v_1 から算出した桁の底面に作用する圧力を $P(\text{cal})$ 、と定義しこれらの値も併記している。

まず、同図の波形状に着目すると、[a]と[b]ともに、桁の底面全域に波が作用していることがわかる。このことから、式(2)に代入すべき A はいずれの波高ケースにおいても一定で、その値は $A=0.076[\text{m}^2]$ である。

圧力分布に着目すると、[a]では計測された平均圧力は $P(\text{ave})=223[\text{Pa}]$ であるのに対し、算出圧力は $P(\text{cal})=110[\text{Pa}]$ である。一方[b]では、計測された平均圧力は $P(\text{ave})=650[\text{Pa}]$ であるのに対し、算出圧力は $P(\text{cal})=694[\text{Pa}]$ である。

このように、[a]では揚力係数の平均値を用いて算出した圧力に比して計測された圧力の平均値は2倍となる。一方、計測された圧力に被圧面積を乗じて算出した鉛直作用力が $17.7[\text{N}]$ に対し、分力計で計測された鉛直作用力は $16.6[\text{N}]$ と、これらの整合性が高い。

このことから、[a]において、桁の底面で計測された圧力が大きく、桁に作用する際の v_{4z} が v_1 に対し大きくなっている可能性が挙げられる。これは、桁の底面に作用する鉛直作用力を評価する際には、桁の底面に作用する鉛直流速を用いるべきであるが、前述の評価に用いた鉛直方向の流速は水面付近で計測しているため、鉛直方向の流速を正確に計測できていなかったと考えられる。

6. まとめ

橋梁を模擬した桁模型に孤立波性状の津波を作用させた実験を行い、桁模型に発生する鉛直作用力を津波の作用状況と桁模型の上下面の圧力分布、流速から分析、考察した。

以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 静水深35[cm]として波高20[cm]の孤立波が作用させて、桁に生じる作用力と圧力分布の関係を整理すると、桁下面全域に波の作用を受けることで上向きの圧力が発生する。桁下面全域を被圧面積とした圧力の積分値 $46.9[\text{N}]$ は、鉛直作用力 $47.8[\text{N}]$ と一致する。
- (2) 波高をパラメータとした実験において、静水深35[cm]の波高10[cm]と20[cm]のケースの比較を

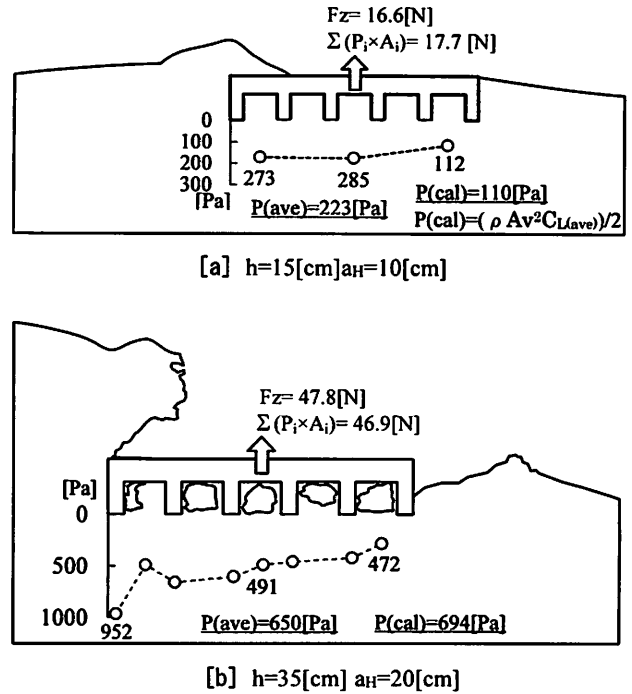


図-20 鉛直作用力最大時点の波形状と圧力分布

行った結果、波高が2倍になることで鉛直作用力が概ね2倍となる。また、鉛直作用力と鉛直流速は概ね同じ時刻で最大を迎える。このことから、鉛直作用力は波高と鉛直流速と相関があることが明らかとなった。

- (3) 計測された鉛直作用力と水平流速を用いて揚力係数を算出した。静水深15[cm]の波高5[cm]のケースでは、揚力係数が2.92と他のケースに比べ大きい。これは桁の底面に作用する鉛直流速が大きいことが原因であると考えられる。このケースを除いて算出した揚力係数の平均値は1.58であり、波高に関わらず概ね一定である。このことから、鉛直作用力は波高と桁の底面積で評価可能であると考えられる。

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