

論文 孤立波性状の津波によって橋梁へ作用する鉛直波力の検討

濱井 翔太郎*1・幸左 賢二*2・佐々木 達生*3・佐藤 崇*4

要旨：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することを目的に、陸域を遡上する津波先端部に見られる砕波段波状の波を想定し、コンクリート桁を模擬した桁模型実験を実施した。この実験から得た桁模型に発生する鉛直波力に着目し、津波の作用状況と桁模型の上下面の圧力分布から検討した。孤立波性状の波が桁に衝突して発生する鉛直波力は、桁下面全域を被圧面積とした圧力の積分値と一致する。さらに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波力も比例して増加することから、鉛直波力は桁下面積と、静水面から波の頂点までで定義される波高の関数であることが明らかとなった。

キーワード：津波、孤立波、橋梁、作用力特性、鉛直波力

1. はじめに

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では壊滅的な被害を受けた。著者らは東北地方沿岸部の橋梁の流出状況等の被害調査を実施し、桁流出等の多数の橋梁被害を確認しているが、緊急輸送路上に位置する橋梁は、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、津波流出対策の実施が望まれるが、そのためには津波が橋梁に作用した際の作用力特性を把握することが必要となる。

著者らは今次津波で数多く撮影された津波襲来時の映像分析を行っており、陸域を遡上する津波形状の多くは、先ず波高 2~3m 程度の段波状の先端部を持つ波形状が遡上し、その後は段波状の波に続く準定常的な持続流が継続する¹⁾ことを明らかにしつつある。一方で、岩手県久慈市などの三陸沿岸の北部では、特に沖合から陸域に向かって進行する津波先端部に 5m 程度の波高を持つ砕波段波状の波も確認されるため、橋梁の架橋位置によっては段波状の津波が作用することも想定される。

2004 年 12 月のスマトラ沖地震を契機に、片岡ら²⁾や荒木ら³⁾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。

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、水平波力、鉛直波力、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、鉛直方向の作用力特性の整理とその考察を行った。

2. 実験概要

2.1 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

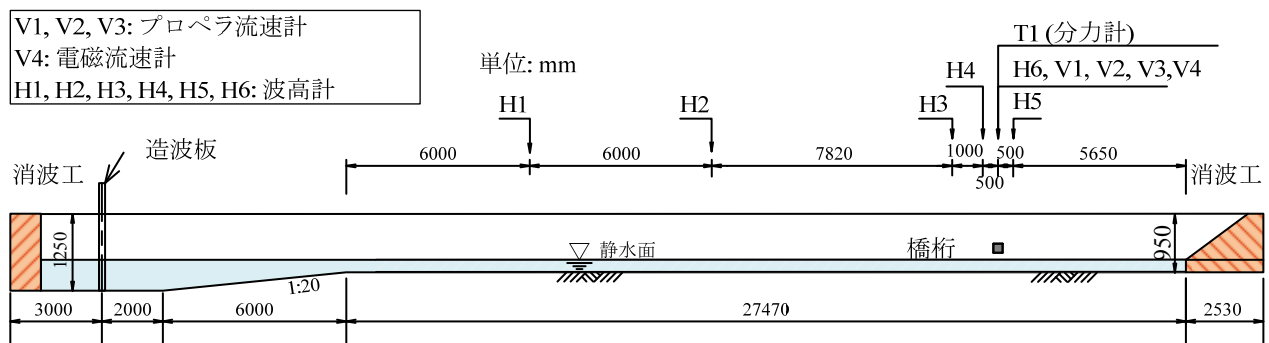


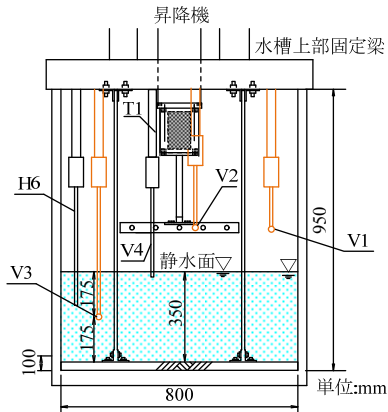
図-1 実験装置概略図

*1 九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻 (正会員)

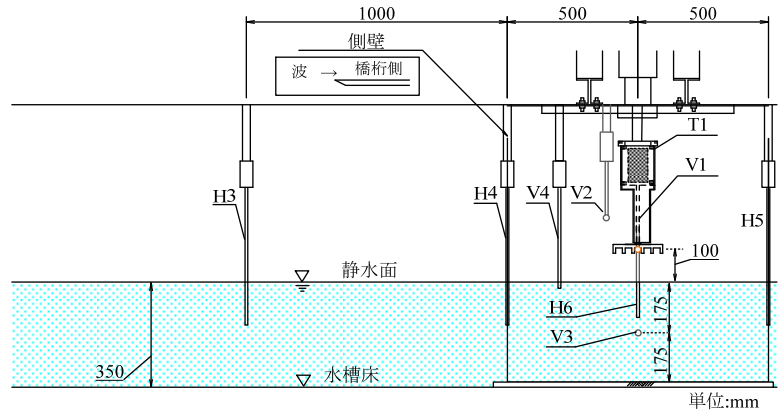
*2 九州工業大学 工学部建設社会工学科 教授 Ph.D. (正会員)

*3 大日本コンサルタント(株) 技術統括部 (正会員)

*4(株)長大 福岡構造技術部 (正会員)



(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

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⁴⁾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。

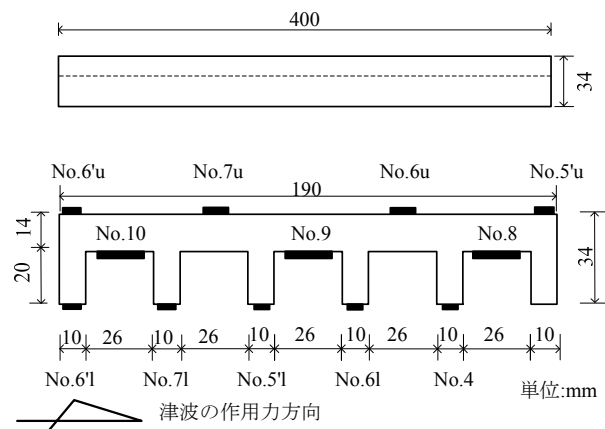


図-3 桁模型図と圧力計の設置状況

2.2 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

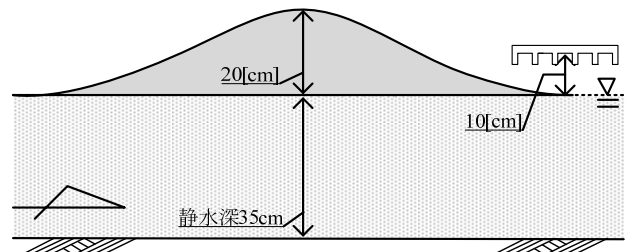


図-4 実験状況模式図

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. 代表的なケースの実験結果

3.1 津波の作用状況と計測波高

図-4に実験状況の模式図を示す。波高10[m]の津波を想定し、静水深を35[cm]、指令波高20[cm]に対して桁中心位置は波高の1/2の位置(静水面から10[cm])とした。

図-5に、H1からH6までの波高計の時刻歴図を示す。

波高の計測結果は電気ノイズがほとんど生じていないため、計測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は H1 から H2, H2 から H6 までおおよそ同じ速度 $c_i = 232$ [cm/s]で伝搬する。この伝播速度は非常に速く津波水位の効果を含んだ式(1)より求まる 232[cm/s]と等しい。

$$c = \sqrt{g(h + \eta)} \quad (1)$$

ここに、波速 C , 重力加速度 g , 静水深 h , 指令波高 η である。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]を記録した。この結果から、指令波高で設定した波高が桁模型位置で再現されることが確認できる。

以降、本波高ケースを代表例に計測結果を示す。

3.2 作用力特性

図-6 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波力の時刻歴図を示す。同図の鉛直波力と水平波力の時刻歴図は、既往実験と同様の考えに基づき 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]から鉛直波力、水平波力が発生し始め、最大波高が発生する 0.176 [sec]前に最大鉛直波力[2]が発生する。その値は 47.8[N]である。その後、鉛直波力は減少傾向に転じるが、波高と水平波力は上昇を続け、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]で鉛直波力は 0[N]となり、その後、鉛直波力は減少を続けて[4]最小値の-49.2[N]を示す。

最大鉛直波力は最大水平波力に対して約2.5倍であり、孤立波が桁に作用する場合は鉛直波力の影響が非常に大きいことがわかる。なお、波高と水平波力は概ね同時刻で最大値となるが、鉛直波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。

4. 鉛直作用力の分析

4.1 波圧と波力の相関性

圧力計を用いた鉛直波力の分析を行うために、圧力計の波圧値と分力計の波力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に被圧面積で積分して求めた鉛直波力と、分力計で計測した鉛直波力を比較した時刻歴図である。同図より、鉛直波力が発生し始めた[1]から下向き最小鉛直波力[4]となるまで、圧力から求めた鉛直波力と分力計から得た鉛直波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波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。このずれは桁上面に設置した圧力計に生じており、桁上面

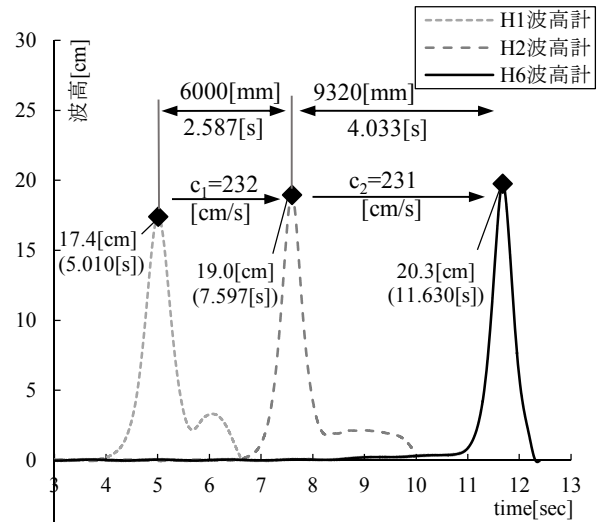


図-5 波高計時刻歴図

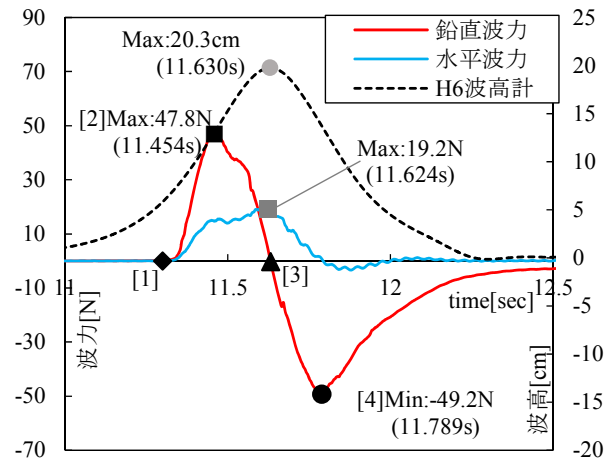


図-6 波高と波力の比較時刻歴図

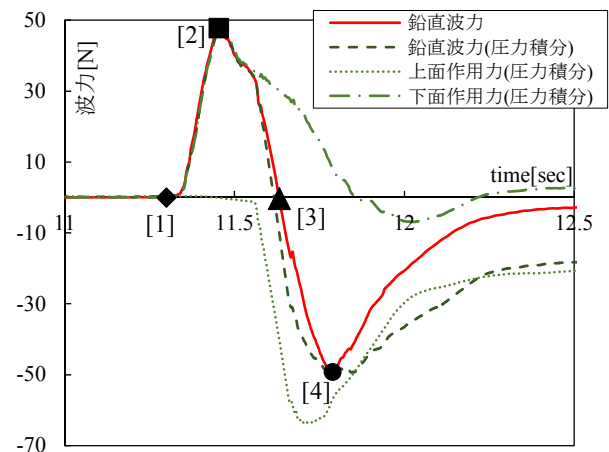


図-7 圧力計から求めた鉛直波力

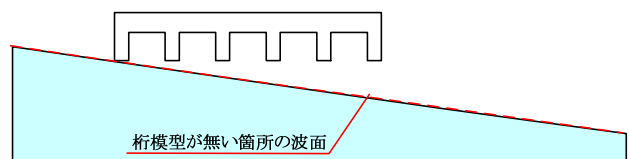
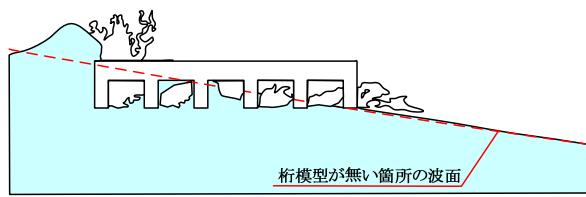
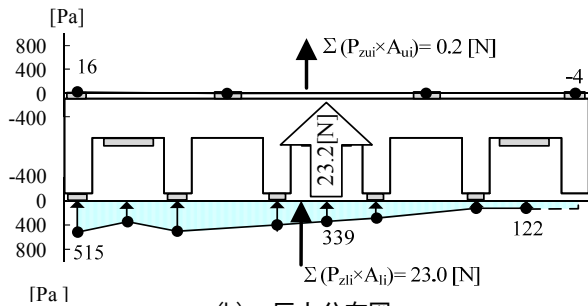


図-8 図鉛直波力発生直前[1]の津波の作用状況

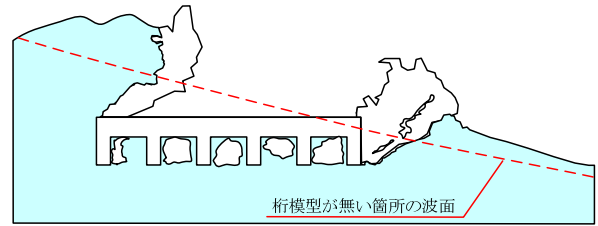


(a) 津波の作用状況

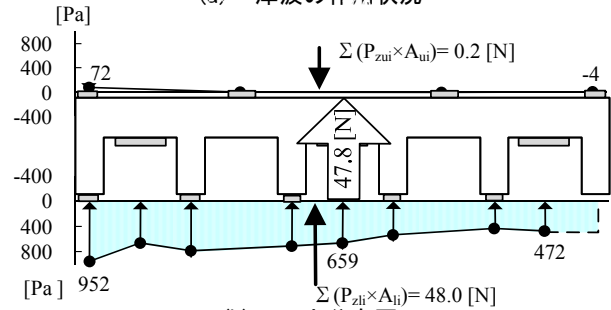


(b) 圧力分布図

図-9 桁下面が浸水した時点 ; 11.395 [sec]

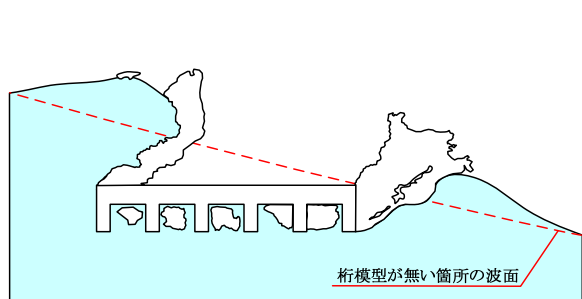


(a) 津波の作用状況

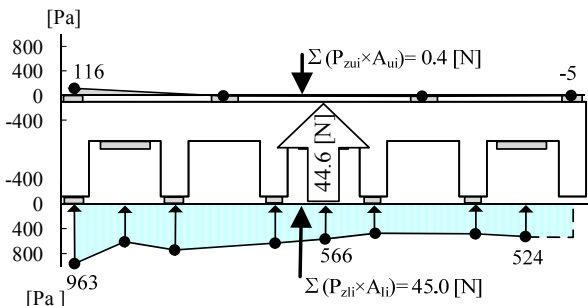


(b) 圧力分布図

図-10 鉛直作用力最大時点[2]

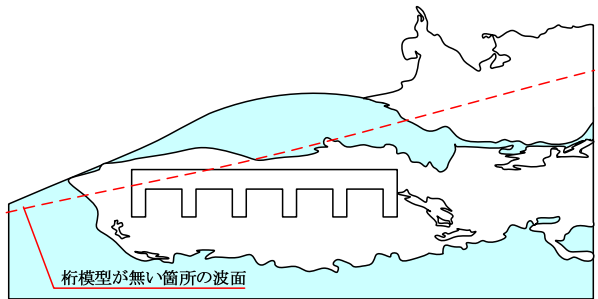


(a) 津波の作用状況

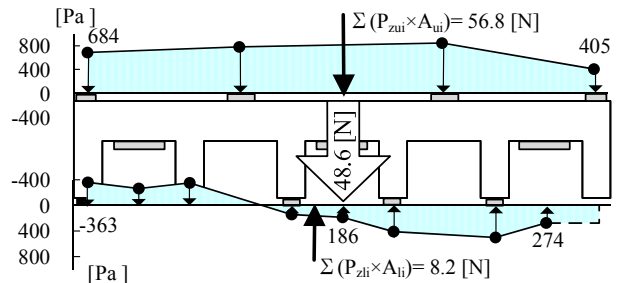


(b) 圧力分布図

図-11 桁上面まで浸水した時点 ; 11.485 [sec]



(a) 津波の作用状況



(b) 圧力分布図

図-12 鉛直作用力最小時点[4]

に残留した水の影響を受けて、センサー部のひずみゲージにひずみが残留したために生じたずれである。この現象は、時間の経過とともに解消する。従って、最小鉛直波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波力の分析には使用していない。

4.2 上揚力発生時の津波の作用状況と波圧分布

図-8 に示すのは、鉛直と水平の波力が発生し始める時点の津波の作用状況[1]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っているのがわかる。

図-9 から図-12 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。桁上面の圧力計はセンサー

部を上向きに設置したため、桁上面の正圧は桁を下向きの作用力となり、桁下面はその逆である。

まず、図-9 は、桁下面が浸水した時点(11.395[sec])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、鉛直波力は上向きで23.2[N]となる。

次に示す図-10は、鉛直波力が最大となる時点[2]の状況である。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]と求められ、鉛直波力は上向きで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、最大鉛直波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。

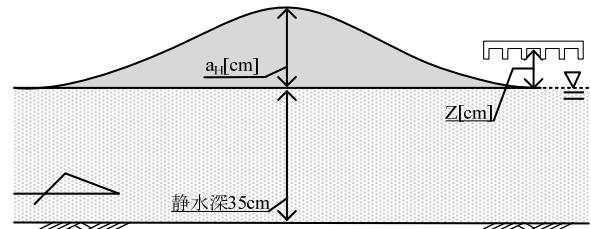
続いて、図-11に桁模型が完全に浸水した時点(11.395[sec])を示す。同図(a)から津波の作用状況は前述の[2]の時点からさほど変化は見られない。同図(b)を確認すると、桁上面の積分値は下向きで0.4[N]となり、[2]に比して2倍に増加する。桁下面側は概ね正圧の台形分布となるのは[2]と同様であり、鉛直波力は上向きで44.6[N]と、[2]に比して7%程度減少する。

最後に、図-12に鉛直波力が最小となる時点の津波の作用状況を示す。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。鉛直波力は下向きで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波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波力は、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力発生時までは桁下面で受ける波の作用に支配される。

5. 波高の変化に伴う鉛直波力の変化

前章までの分析の結果、鉛直波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、波力と桁の上下面に作用する圧力分布を用いて波高と波力の関係を考察する。図-13に示すのは、本研究で実施した波高 a_H のパ



静水深 H[cm]	波高 a_H [cm]	桁中心位置 Z[cm]
35	10	5
	15	7.5
	20	10
	25	12.5

図-13 波高ケース

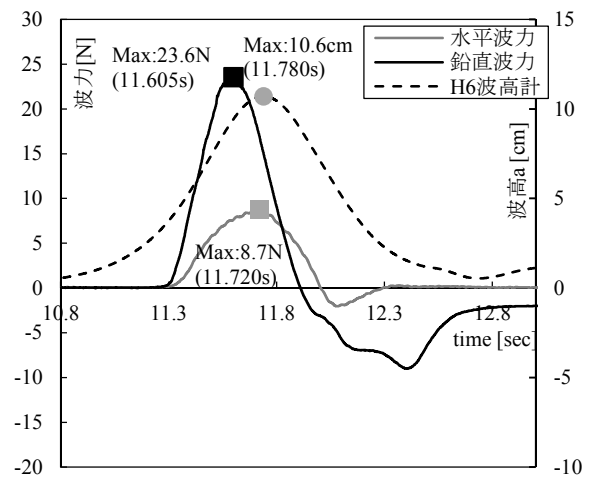


図-14 波高と波力の比較時刻歴図 波高 10[cm]

ラメータである。波高は10[cm]から25[cm]まで5[cm]毎に変化させており、桁模型の高さ方向の中心位置Zは、各波高の1/2となるように設定している。

図-14に、前章で代表例として示した $a_H=20$ [cm]に対して、1/2の波高とした $a_H=10$ [cm]のケースについて、波高と水平方向と鉛直方向の波力の時刻歴を示す。

同図によれば、鉛直波力、水平波力が発生し始め、最大波高が発生する0.175[sec]前に最大鉛直波力が発生する。その値は23.6[N]となる。その後、鉛直波力は減少に転じるが、波高と水平波力は上昇を続け、ほぼ同時刻にそれぞれ最大値10.6[cm]、8.7[N]を呈する。

波高と水平波力は概ね同時刻で最大値となるが、鉛直波力はそれよりも早い時刻で最大値を迎えており、水平波力、並びに鉛直波力の最大値の発生傾向は前述の $a_H=20$ [cm]の代表例と同様である。

図-15は横軸を最大鉛直波力、縦軸をH6波高計から得た最大波高として、鉛直波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回の波高と鉛直波力の計測値は、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、波高と鉛直波力は平均値で示す。また、波高と鉛直波力はほぼ一直線

上にプロットされており、比例関係にあることがわかる。図中[a]の $a_H=10[\text{cm}]$ のケースの鉛直波力は23.5[N]であるのに比して、実波高が2.1倍となる[b]の $a_H=20[\text{cm}]$ のケースの鉛直波力は50.3[N]と1.9倍となることから、波高が2倍になると鉛直波力も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-16に、 $a_H=10[\text{cm}]$ と $a_H=20[\text{cm}]$ の2ケースについて、鉛直波力最大となる時点の津波の作用状況図と桁下に働く波圧分布図を示す。

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、鉛直波力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波力と一致して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波力となる。鉛直波力は波高に比例して増加するため、桁下の面積と波高の関数で表すことができる。

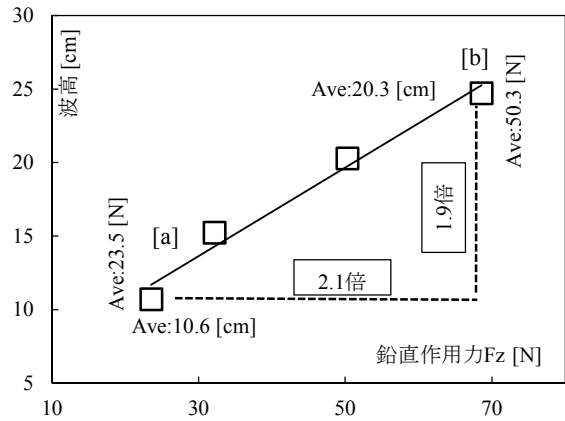
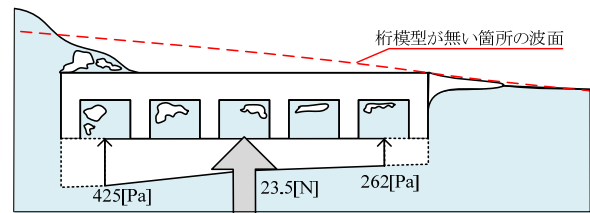
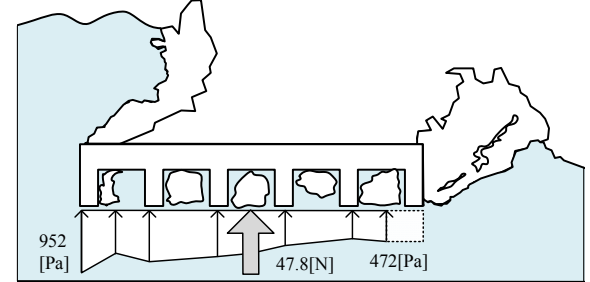


図-15 波高(H6)と鉛直波力



(a) [a] 波高 10[cm]



(b) [b] 波高 20[cm]

図-16 鉛直波力最大時の波形状と波圧分布比較図

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波力を津波の作用状況と桁模型の上下面の圧力分布から分析、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]として静水面から10[cm]の位置とした桁に波高20[cm]の孤立波が作用する場合、最大鉛直波力の発生時刻は、最大波高と同時刻に発生する最大水平波力よりも早く、水平波力19.2[N]に対し鉛直波力は47.8[N]と、約2.5倍となる。
- (2) 同波高ケースの津波の作用状況と圧力分布を確認した結果、桁下面全域に波の作用を受けることで正の圧力が発生する。桁下面全域を被圧面積とした圧力の積分値は47.8[N]と、鉛直波力と一致する。
- (3) 同様に、桁の上下面の圧力分布を確認すると、最大鉛直波力まで桁上面に圧力はほとんど発生せず、桁下面では最大で952[Pa]と大きな正圧が発生する。このことから、迎角をもった波が桁下面に作用することで発生する正圧が上向きの鉛直波力となる。

- (4) 波高を10[cm]から25[cm]までパラメータとした実験結果から、全ケースの鉛直波力と波高はほぼ一直線上に比例することから、鉛直波力は桁下面積と波高の関数であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 佐々木達生, 幸左賢二, 神宮司博志, 佐藤崇: 東北地方太平洋沖地震による小泉地区の津波被害分析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp. I_821-I_825, 2013.11.
- 2) 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.
- 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) 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.