

孤立波が橋桁に作用する際に発生する 圧力分布に関する実験的検討

濱井翔太郎¹・幸左賢二²・佐藤崇³・佐々木達生⁴

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

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)

³正会員 (株) 長大 福岡構造技術部 (〒810-0014 福岡市中央区渡辺通1-1-1サンセルコビル6F)

⁴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）

1. はじめに

2004 年 12 月のスマトラ沖地震の発生以降、段波性状の津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。例えば、荒木ら¹⁾は、矩形断面と凹型断面の橋桁模型に、3 種類の段波状の波を作用させ、橋桁模型に作用する作用力と模型周りの波圧を計測し、各模型でそれぞれ比較を行った結果、模型形状による作用力、波圧特性を明らかにした。有川ら²⁾は、橋桁模型に対して初期水位、孤立波の波高、流れの流速をパラメータとし、作用力と抵抗力の比率より橋桁の流出メカニズムを検討する際に、作用力が増加する物理的な要因を明らかにした。中尾ら³⁾は、床版張出のある橋桁模型の形状をパラメータとし、段波状の波を作用させ、各桁の支点に生じる反力の発生理由を、橋桁模型の周りに設置した波圧計より計測した波圧を用いて評価した。これらの実験から橋梁に作用する作用力の発生メカニズムは明らかにされつつあるものの「外力として津波作用力を評価する手法」は未だ確立されていない。

一方、著者らは過年度に実施した水理実験より、入射波高相当の静水圧を指標とした水平作用力と鉛直作用力の実験式を提案しており、水平作用力と鉛直作用力

は波高と桁形状，並びに入射波高に対する桁の位置の関数とした．しかしながら，桁の位置が水平作用力，鉛直作用力に及ぼす影響については十分な考察が行われていない．

そこで、本研究では、水平作用力の実験式の適用性の検証を目的に、津波が桁に作用する際に発生する水平作用力について、津波の波高や桁形状、並びに入射波高に対する桁の位置をパラメータとした水理実験を実施した。具体的には河川を遡上する際に津波先端部に見られる碎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。

このうち、本論文では水平作用力と波圧の相関性を分析し、計測された波圧と津波の作用状況から、桁の位置の変化に伴う津波作用力の作用メカニズムの変化について分析を行い、水平作用力の実験式における無次元化波圧分布の形状について考察を行った。

2. 実験概要

(1) 実験装置

使用する長水路は、図-1に示すように長さ41[m]、幅80[cm]、橋桁模型位置での水路深さ95[cm]の片面ガラ

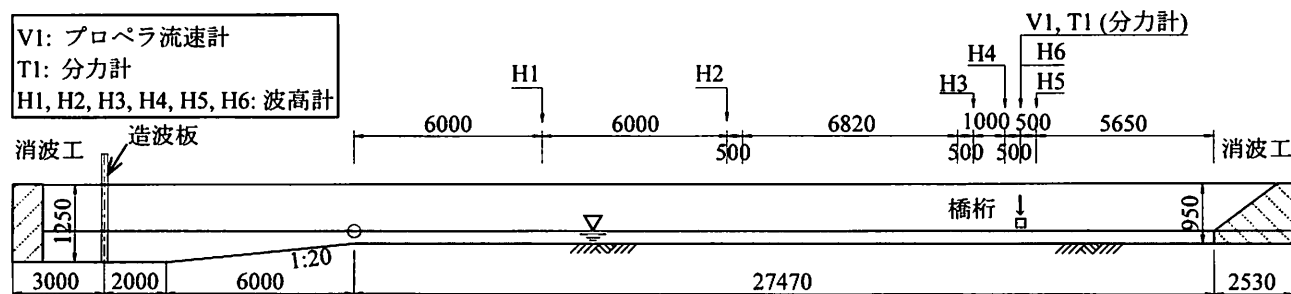


図-1 実験装置概略図

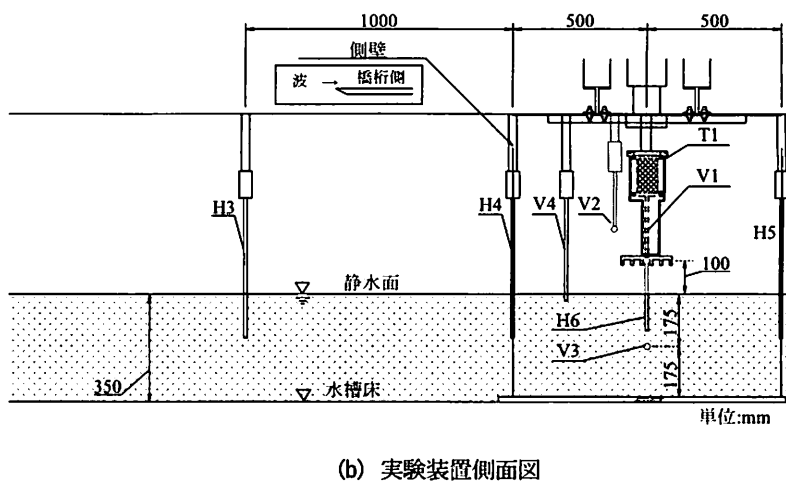
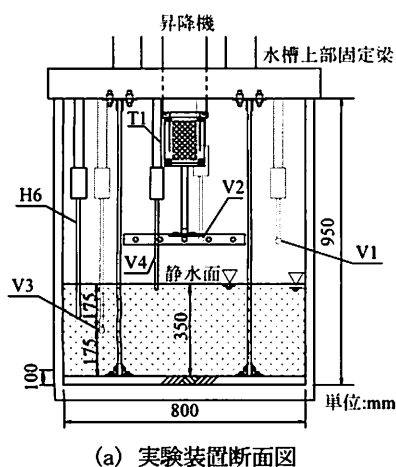


図-2 計測機器設置位置図

ス張りの水路である。同図の左端の造波装置は、ピストン型造波装置である。パソコン制御で、指令波高と実験時の初期水深(水槽の底から静水面までの高さ)を入力する。水槽に水を貯め、事前に造波の検証を行った結果、指令波高と桁模型付近の波高は概ね等しくなることが確認された。

模型位置付近の状況を図-2 に示す。図中左はで右は側面図である。橋梁模型の両端には橋台の影響による3次元的な波の乱れを排除するために側壁を設けた。側壁は、高さ 60[cm]、幅 100[cm]であり、橋桁模型が側壁の中心となるように設置した。

(2) 計測方法

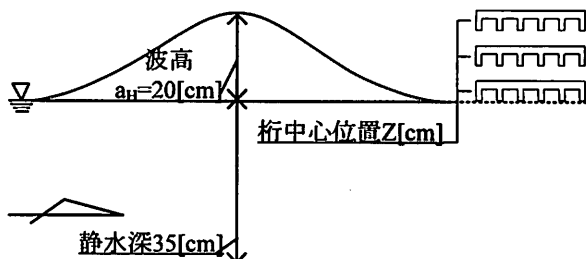
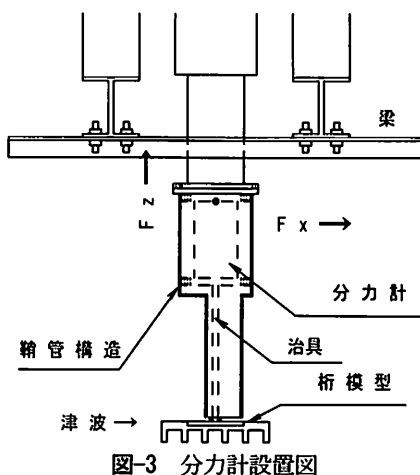
計測器は孤立波によって桁模型に発生する作用力を計測する分力計(T)、津波の水平流速を計測するプロペラ式流速計(Vi)、波形状をとらえる波高計(Hi)を図-2 に示すように水路に沿って設置した。

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 (My) の3分力が計測でき、規格は 980N である。図-3 に示す通り、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、模型にのみ作用する力の抽出に配慮した。V1 と H6 波高計は桁位置での桁の影響を受けないように側壁を介して桁の隣に設置した。

これらの計測器はすべ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。計測のサンプリング周期はすべての計測において 1/1000[sec]とした。

(3) 実験パラメータと桁模型

図-4 に本実験のパラメータの模式図と一覧を示す。表中に示すように、静水深を 35[cm]とし、波高は 10, 15, 20, 25[cm]とした。いずれの波においても、桁中心位置Zは、波高 a_H の半分の高さ ($Z/a_H=0.5$) に設定した。これは、過年度の参考文献⁹⁾の水理実験において、



case	静水深h[cm]	波高 a_H [cm]	桁中心位置Z[cm]	Z/a_H
A1-1	35	10	5	0.5
A2-1		15	7.5	0.5
A3-1		20	1.7	0.1
A3-2			10	0.5
A3-3			18.7	0.9
A4-1		25	12.5	0.5

図-4 実験パラメータ

表-1 波圧計の設置個所の名称

波圧計No.	1-5	6-10	12,14,16,18,20	11,13,15,17,19
設置個所の名称	桁の前面	桁の背面	内桁の前面	内桁の背面

$Z/a_H=0.5$ の位置で水平作用力が最大となることが確認されたためである。桁模型図を図-4 に示す。縮尺は

1/50 で、模型の橋長は 40[cm]、幅員 19[cm]、構造高 3.4[cm]（実橋換算で橋長 19.1[m]、幅員 10.2[m]、構造高 1.7[m]）とした。これは、我が国でも多く存在する単径間の橋梁に類似する形状であることに加え、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用いた模型と同様とすることで、波形状のディテールの違いによる作用力特性の変化の比較を可能とする。また、水平作用力力の分析用として、図-5 に示すように、桁の側面に波圧計を 20 個設置した。この波圧計に関しても前述したように、パソコン制御され、計測の周期は 1/1000[sec] である。表-1 には、本論文中に記載する波圧計の設置個所の名称について示す。

3. 各桁の位置における水平作用力特性の分析

本章では、A3-2を標準ケースとして作用力と波圧、並びに作用状況の観点から分析を行い、入射波高に対する桁の位置を変化させたA3-1とA3-3との比較を行った。

(1) A3-2(桁中心位置10[cm])

波圧計を用いて水平作用力の分析を行うために、先ず波圧計の計測値と分力計の作用力計測値の整合性を検証する。

図-6 に、横軸を造波開始時刻 0 秒とする波高、水平作用力、並びに前述の図-3 に示した桁模型の前面と背面、並びに内桁の前面と背面に設置した各々の波圧計の計測値を被圧面積で積分して算出した水平作用力と分力計で計測した水平作用力を比較した時刻歴波形を示す。同図の水平作用力の時刻歴波形は、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、水平作用力が発生し始めた [1](11.350[sec]) から最大水平作用力となる [3](12.652[sec]) となるまで、波圧計の計測値を積分して算出した水平作用力と分力計で計測した水平作用力は良く一致するのがわかる。分力計の計測値の最大値が 20.2[N] に対して、波圧積分値は 18.8[N] とその差は 7% である。この結果から、桁模型の前面と背面、並びに内桁の前面と背面で計測した波圧計の信頼性は非常に高いと判断できる。また、[2]の時点は水平作用力が最大を迎える前に波形が突出する現象が見られる。

図-7 に、水平作用力並びに各波圧計の設置位置における被圧面積を積分して算出した波圧計の各設置位置毎の水平作用力の時刻歴波形を示す。同図によれば、水平作用力最大時点において、桁前面に 18.8[N]、桁背面に 0.0[N]、内桁の前面に 24.6[N]、内桁の背面に -24.1[N] の水平作用力が作用している。このことから、

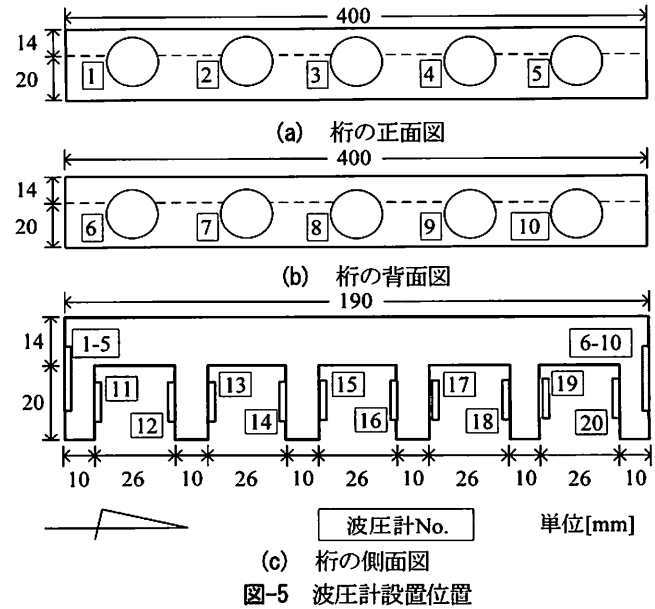


図-5 波圧計設置位置

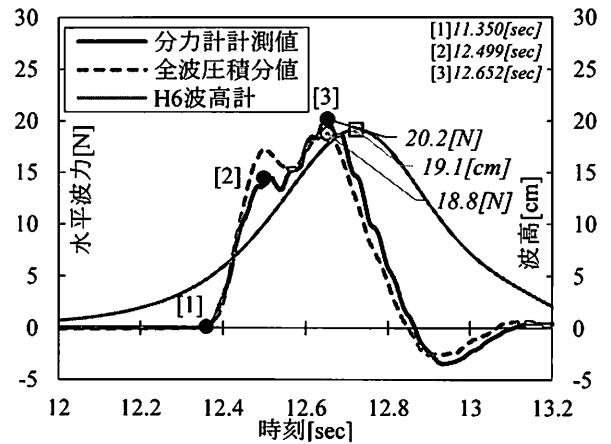


図-6 波高と水平波力の時刻歴波形

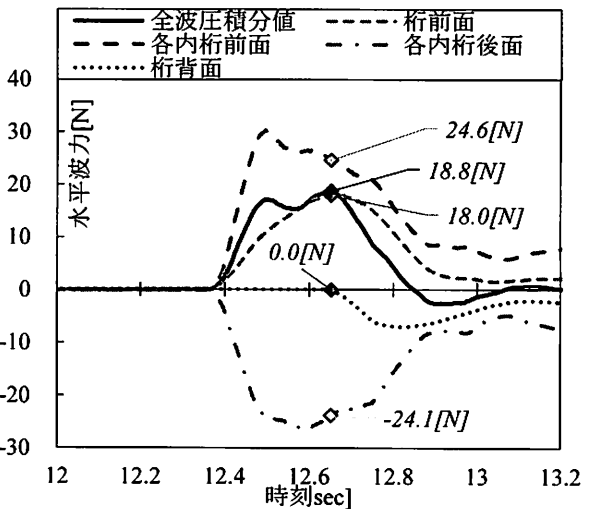
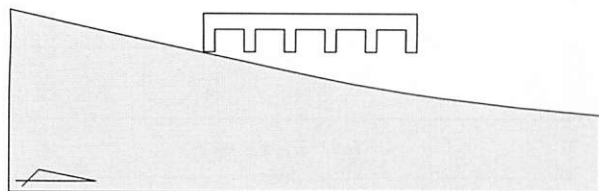


図-7 桁の各位置に作用する波力の時刻歴波形

本ケースでは、水平作用力最大時点において、内桁間には水平作用力が作用しているものの内桁の前面と背面に作用する作用力が等しいため、桁の前面側に作用する作用力が支配的であることがわかる。なお、桁の

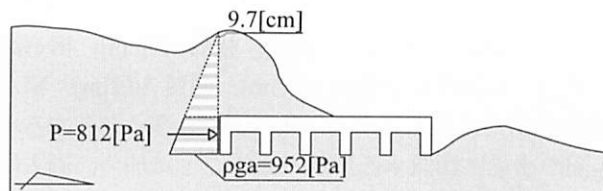


(a) 津波作用直前(11.350[sec])

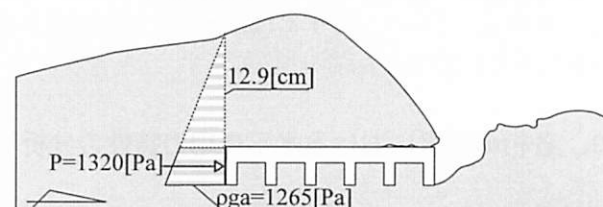
背面には作用力が発生していない。また、[2]の時点に発生する水平作用力の波形は、内桁の前面に発生する波圧が内桁の 図-8 に、(a) 津波作用直前(11.350[sec])、(b) 津波作用から 1.144[sec]後(12.499[sec])、(c) 水平作用力最大時(12.652[sec])の津波の作用状況図と桁に発生する波圧分布を示す。同図(a)は、水平作用力が発生し始める[1](11.350[sec])の時点の津波の作用状況であり、波が桁の背面に発生する波圧よりも大きいために生じるものである。に衝突する直前であるため桁に作用力は発生していないものの、波面は桁模型に対して緩やかな迎角をもっているのがわかる。同図に示す波圧分布は、桁の背面、並びに内桁の背面に設置した波圧計が計測する正圧は、受圧面の位置の関係から、桁に対し左方向の波圧であるが、桁の前面、並びに内桁の前面に発生する波圧と同様に、津波進行方向である右向きを正圧として示している。

同図(b)は津波作用から 1.44[sec]後である[2](12.499[sec])の時点である。同図によれば、桁の前面では波面が桁に作用することで9.7[cm]盛り上がり、桁の背面では津波が作用していないことがわかる。内桁の波圧分布に着目すると、同図に示す内桁①と内桁②における内桁の前面で計測された波圧が、向かい合わせに設置している内桁の背面で計測された波圧に対し大きい波圧を示している。このことが[2]の時刻における水平作用力の波形に影響を及ぼしていると考えられる。また、桁の前面で計測された波圧は812[Pa]である一方、桁の前面における実波高 9.7[cm]相当の静水压 952[Pa]と同程度であることが分かる。

同図(c)は、水平作用力が最大となる[3](16.350[sec])の時点である。同図によれば、津波は桁の上面を覆うように作用しており、[2]の時点で盛り上がった波の頂部は桁の中央付近まで進行している。また、桁の背面には津波が作用していないことがわかる。この時点では、桁の下流側の内桁では内桁の前面側に発生する波圧が大きいものの、上流側ではその逆で内桁の背面側に発生する波圧が大きい傾向であり、内桁間で釣り合う。また、桁の前面で計測された波圧は1320[Pa]である一方、桁の前面における実波高 12.9[cm]相当の静水压 1265[Pa]と同程度であることが分かる。これらのことから、桁の位置が入射波高の中央である場合には、桁の前面に発生する波圧が支配的であることが明らかとなった。



(b) 津波作用開始から 1.144[sec]後(12.499[sec])



(c) Fx 最大時点(16.350[sec])

図-8 Z/ah=0.5 の作用状況図と波圧分布

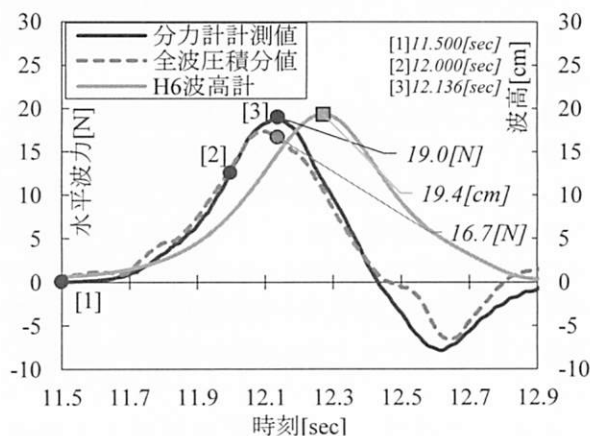


図-9 波高と水平波力の時刻歴波形

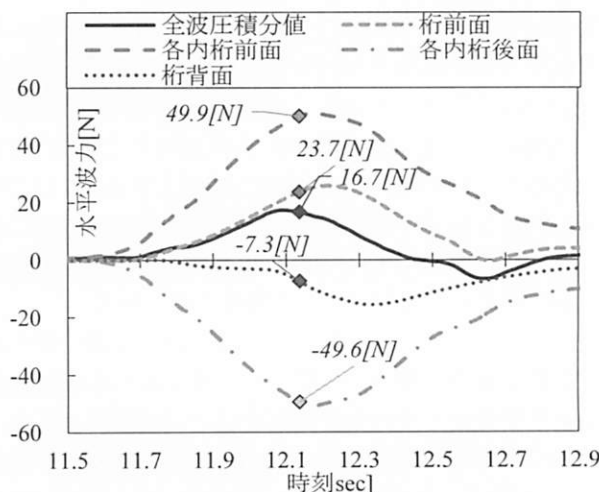


図-10 桁の各位置に作用する波力の時刻歴波形

(2) A3-1(桁中心位置 1.7[cm])

図-9 に、波高、水平作用力、波圧計の計測値を被圧面積で積分して算出した水平作用力と分力計で計測した水平作用力を比較した時刻歴波形を示す。同図によれば、3. (1) 節の図-6(A3-2) ケースと同様に水平作用力が発生し始めた[1](11.500[sec])から最大水平作用力となる[3](12.136[sec])となるまで、波圧計の計測値を積分して算出した水平作用力と分力計で計測した水平作用力は良く一致するのがわかる。分力計の計測値の最大値が 19.0[N]に対して、波圧積分値は 16.7[N]とその差は 12%である。

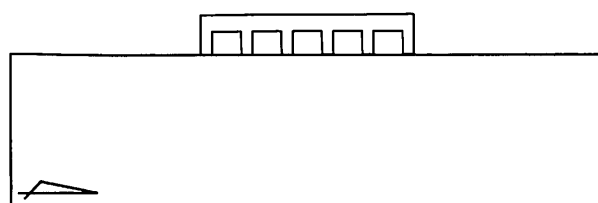
図-10 に、水平作用力並びに各波圧計の設置位置における被圧面積を積分して算出した、波圧計の各設置位置毎の水平作用力の時刻歴波形を示す。同図によれば、水平作用力最大時点において、桁前面に 23.7[N]、桁背面に-7.3[N]、各内桁前面に 49.9[N]、各内桁背面に-49.6[N]の作用力が作用していることがわかる。このことから、本ケースでは前述した 3. (1) 節の図-7(A3-2)と同様に、水平作用力最大時点において、桁の側面全域に波が作用しているものの、内桁間においては力が釣り合っているため、桁の前面に発生する波圧が支配的であることがわかる。

図-11 に、(a) 津波作用直前(11.500[sec])、(b) 津波から 0.500[sec] 後(12.000[sec])、(c) 水平作用力最大時(12.112[sec])の津波の作用状況図を示す。

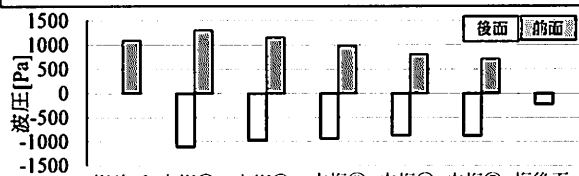
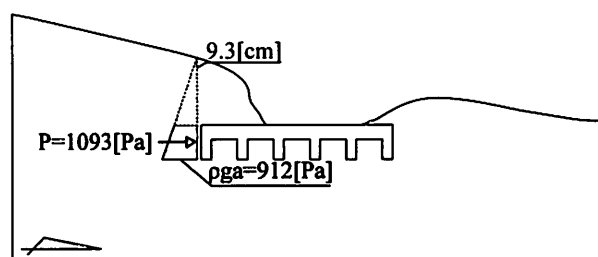
同図 (a) は、水平作用力が発生し始める[1](11.500[sec])の時点の津波の作用状況であり、波が桁に衝突する直前であるため桁に作用力は発生していない。本ケースでは、水面付近に桁を設置しているため、津波の作用直前には迎角がほとんどない状態である。

同図 (b) は津波作用から 0.500[sec] 後である[2](12.000[sec])の時点である。同図によれば、津波作用開始から 0.500[sec] 後には、桁の前面だけでなく桁の背面側においても、波の盛り上がりが見受けられる。波圧分布に着目すると、内桁間で波圧が釣り合っており、桁の背面にも微弱ながら波圧が作用していることが分かる。これは、桁の位置を静水面付近に設置しているため、波が押し寄せると同時に背面側に移動することによって同図に示すように波が盛り上がり、桁の背面に波圧が発生していると考えられる。また、桁の前面で計測された波圧は 1093[Pa]である一方、桁の前面における実波高 9.3[cm]相当の静水圧 912[Pa]と同程度であることが分かる。

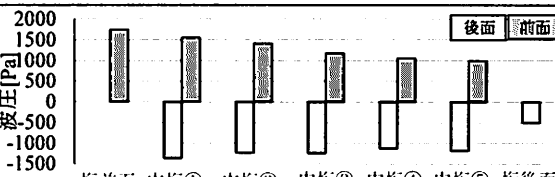
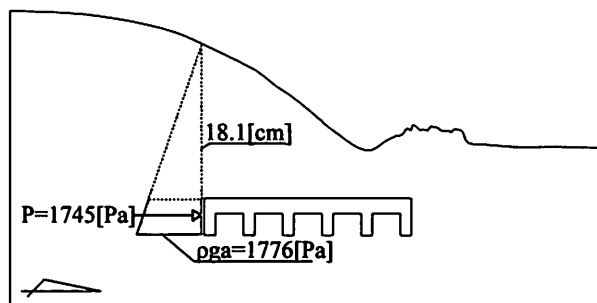
同図 (c) は、水平作用力が最大となる [3](12.112[sec])の時点である。同図によれば、3. (1) 節の図-8 (c) と異なり、桁の背面においても波が盛り上がる様子が確認される。これは、桁の背面で盛り上がる波と桁の前面を越流して背面側に到達した波が重なるためであ



(a) 津波作用直前(11.500[sec])



(b) 津波作用開始から 0.500[sec] 後(12.000[sec])



(c) F_x 最大時点(12.112[sec])

図-11 $Z/a_h=0$ の作用状況図と波圧分布

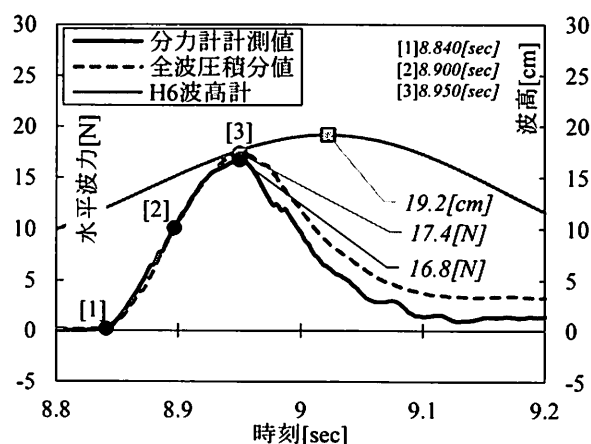


図-12 波高と水平作用力の時刻歴波形

る。このとき、波圧分布に着目すると、3. (1) 節の図-8 (c) と同様に、内桁間の波圧は釣り合い、桁の前面に発生する波圧が支配的であることがわかる。また、桁の前面で計測された波圧は 1745[Pa]である一方、桁の前面における実波高 18.1[cm]相当の静水圧 1776[Pa]と同程度であることが分かる。これらのことから、桁の位置が水面付近である場合には、内桁に発生する波圧が釣り合い、桁の背面にも波圧が発生するものの、桁の前面に発生する波圧が支配的である。

(3) A3-3(桁中心位置 18.7[cm])

図-12 に、波高、水平作用力、波圧計の計測値を被圧面積で積分して算出した水平作用力と分力計で計測した水平作用力を比較した時刻歴波形を示す。同図によれば、前述の 2 ケースと同様に水平作用力が発生し始めた [1](8.840[sec]) から最大水平作用力となる [3](8.950[sec]) となるまで、波圧計の計測値を積分して算出した水平作用力と分力計で計測した水平作用力は良く一致するのがわかる。分力計の計測値の最大値が 16.8[N]に対して、波圧積分値は 17.4[N]とその差は 3% である。

図-13 に、水平作用力並びに各波圧計の設置位置における被圧面積を積分して算出した、波圧計の各設置位置毎の水平作用力の時刻歴波形を示す。同図によれば、水平作用力最大時点において、桁前面に 12.1[N]、桁背面に 0.0[N]、各内桁前面に 9.2[N]、各内桁背面に -4.0[N] の作用力が作用していることがわかる。本ケースでは、最大水平作用力時点では、桁の前面に発生する波圧だけでなく内桁の前面に発生する波圧による影響も受けている。これは、前述の 2 ケースと異なる傾向である。

図-14 に、(a) 津波作直前(8.840[sec])、(b) 津波作用から 0.060[sec] 後(8.900[sec])、(c) 水平作用力最大時(8.950[sec])の津波の作用状況図を示す。

同図(a)は、水平作用力が発生し始める[1](8.840[sec])の時点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。本ケースでは、波の頂部に桁を設置しているため、桁の側面に作用する津波の波面の形状は穏やかな迎角をもっているのがわかる。

同図 (b) は津波作用から 0.514[sec] 後である [2](8.900[sec])の時点である。同図によれば、津波作用開始から 0.514[sec]後には、桁の前面に作用した波の盛り上がりが見受けられるが、前述の 2 ケースに対して盛り上がりの高さは小さく 4.3[cm]である。また、3. (1) 節の図-8 (b) と同様に桁の背面には波が作用していない状況である。内桁の波圧分布に着目すると、3. (1) 節の図-8 (b) と異なり、内桁の背面に発生する波圧は非常に小さい。また、桁の前面で計測された波圧

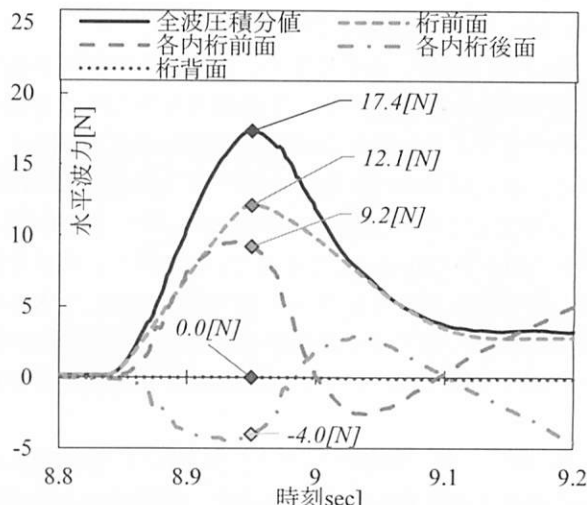
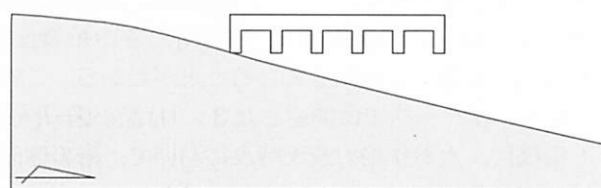
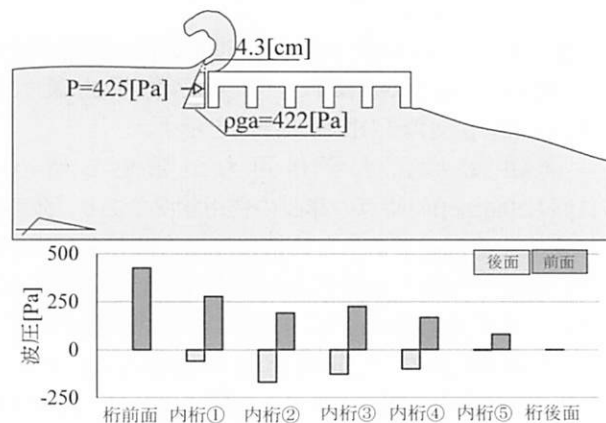


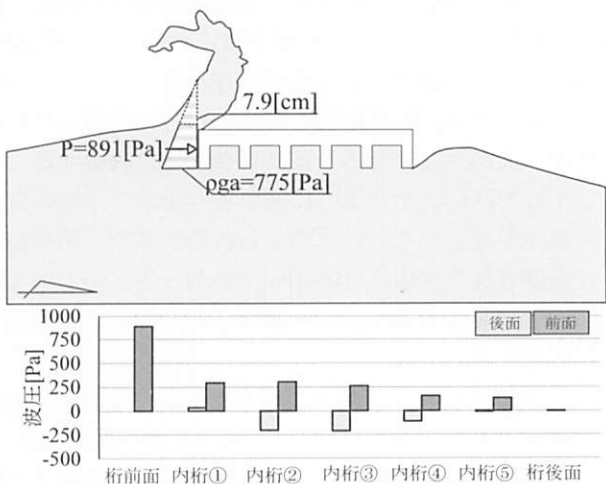
図-13 桁の各位置に作用する作用力の時刻歴波



(a) 津波作用開始直前



(b) 津波作用開始から 0.514sec 後(8.900[sec])



(c) 水平作用力最大時点(8.950[sec])

図-14 $Z/a_h=1.0$ の作用状況図と波圧分布

は、425[Pa]である一方、桁の前面における実波高4.3[cm]相当の静水圧 422[Pa]と同程度であることが分かる。

同図(c)は、水平作用力が最大となる時点[3]である。同図によれば、水平作用力最大時点においては、桁前面の波の盛り上がりは[2]時点に対し大きくなり、その高さは 7.9[cm]である。また、この時点においても3. (1)節の図-8 (c) と同様に桁の背面には津波が作用していないことがわかる。このときの波圧分布は、桁の前面で計測された波圧が、891[Pa]と支配的であるものの、3. (1)節の図-8 (c) と異なり内桁の背面に発生する波圧が内桁の前面に発生する波圧に対し小さく、最大水平作用力には内桁の前面に発生する波圧の影響も含まれることがわかる。また、桁の前面で計測された波圧は 891[Pa]であり、桁の前面における実波高7.9[cm]相当の静水圧 775[Pa]と 15%程度の差が生じる。これらのことから、桁の位置が入射波高の頂部である場合には、桁の背面に波圧は発生しないものの、桁の前面だけでなく内桁の前面に発生する波圧により、以上のことから、桁の前面に発生する波圧は、桁の前面における実波高相当の静水圧と同程度である。また、桁の前面に発生する波圧は桁の位置が水面に近づくにつれて大きくなる。同時に、桁の背面に波圧が発生する傾向が明らかとなった。

4. 水平作用力の実験式の形状についての考察

まず、著者らは過年度に実施した実験で得られた結果から水平作用力の実験式を提案している。過年度の実験における水平作用力の実験式は、砕波有の津波が桁に作用した際に、水平作用力が最大となり全体を包括する結果が得られる。この実験式によれば、 $Z/a_H \leq 0.5$ では、桁の位置に関わらず無次元化波圧が一定となる傾向が得られる。砕波無の孤立波性状の津波が桁に作用した際においても、砕波有のケースと同様に無次元化波圧が一定となる傾向が得られている。

そこで、本章では、過年度に実施された孤立波性状の砕波無のケースと本実験の比較を行い、水平作用力の実験式の無次元化波圧分布の形状について分析・考察を行う。

図-15は、横軸は分力計で計測した水平作用力を桁の側面積と入射波高相当の静水圧で無次元化を行い、縦軸は入射波高に対する桁の中心位置として無次元化を行い、プロットした図である。同図によれば、砕波有の孤立波性状の無次元化波圧分布は、 $Z/a_H = 0.5$ までは桁の中心位置の低下に伴い比例して増加するが、 $Z/a_H = 0.5$ より水面までは直線的な分布であることがわかる。また、2013年度に実施した桁の位置を $Z/a_H = 0.5$ に固定し

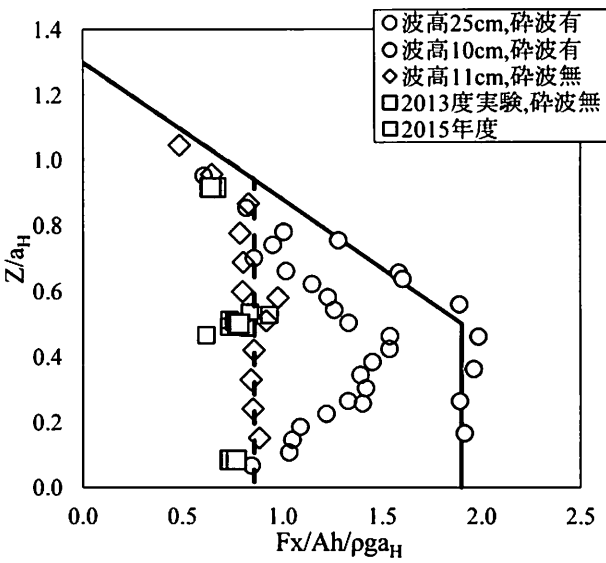


図-15 過年度実験式との比較

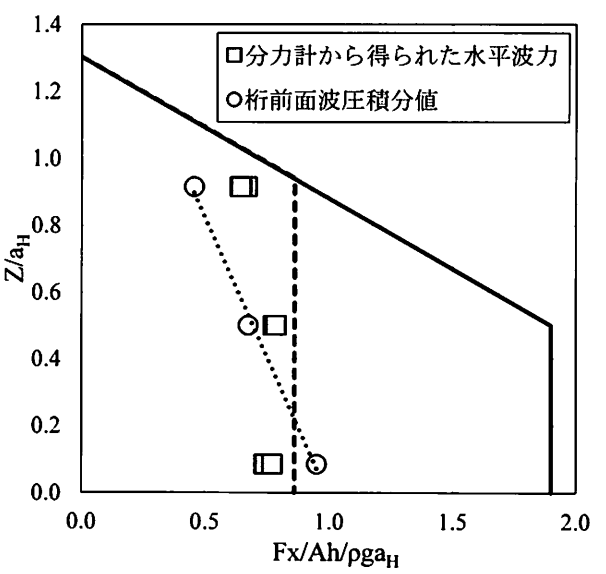


図-16 桁前面波圧と過年度実験式の関係

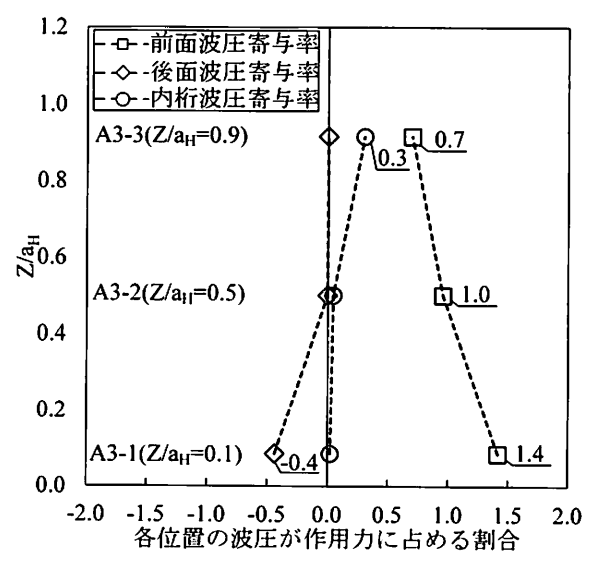


図-17 各桁位置の波圧が作用力に占める割合

て波高をパラメータとした実験結果は、過年度の砕波無の孤立波性状の津波を造波させた結果の直線上に位置していることがわかる。本実験の結果をみると、どの桁位置においても、砕波無のケースと同様の直線上に位置している。このことから、この無次元化波圧分布の形状について詳細に計測した波圧を用いた分析を行う。

図-16に、過年度の実験より得られた実験式の包括する線と本実験の分力計で計測された値を無次元化したプロットと桁前面で計測された波圧を桁前面の側面積で積分した作用力を無次元化したプロット図を示す。同図によれば、桁の前面波圧を積分して得られた無次元化波圧は水面付近に近づくにつれて、比例して大きくなることから、桁が水面付近に近づくにつれて、桁前面の波圧が大きくなることを示す。また、分力計で計測された水平作用力の無次元化波圧分布は、各桁位置で概ね同程度であることから、 $Z/a_H=0.9$ では桁前面以外の波圧の計測位置で正の力が作用しており、 $Z/a_H=0.1$ では負の力が作用していることを意味する。

図-17に、横軸に水平作用力最大時点における全波圧計の積分値に対する各桁位置の波圧の積分値の割合とし、縦軸に波高に対する桁の中心位置としたプロット図を示す。同図によれば、 $Z/a=0.5$ のケースに着目すると、桁水平作用力最大時点では、桁の前面に発生する波圧が1.0割と支配的で、桁の背面と内桁間に発生する波圧の影響は非常に小さいことがわかる。また、 $Z/a=0.9$ のケースでは、桁の前面に発生する波圧が7割で、内桁に発生する波圧が残りの3割となり、桁の背面に発生する波圧は非常に小さいことがわかる。 $Z/a_H=0.1$ のケースでは、桁の前面に発生する波圧が1.4割で、桁の背面に発生する波圧が0.4割となり力として算出され、桁の背面に発生する波圧が水平作用力に影響を及ぼす。なお、内桁の影響は非常に小さいことがわかる。

これらのことから、本実験で実施した入射波高に対する桁の位置をパラメータとした実験結果より、全ての桁の位置において桁の前面に発生する波圧が支配的であるものの、桁の位置が水面付近に近づくにつれて桁の背面側にも波圧が発生するため、 $Z/a_H \leq 0.5$ では水平作用力の実験式は直線的となることが考えられる。

5. まとめ

本研究では、著者らが過年度に算出した水平作用力の実験式の適用性について検討にするために、入射波高に対する桁の位置をパラメータとした水理実験を実

施した。その結果から得られた知見を以下に述べる。

- (1) 桁の位置を入射波高の中央に設置した場合、最大水平作用力が20.2[N]に対し、桁の前面に作用する作用力が18.0[N]である。一方、桁の背面には波が作用していないため、作用力が発生していない。また、内桁間には作用力が発生するものの、内桁の前面と背面側でそれぞれ24.6[N]と-24.1[N]と打ち消されることが明らかとなった。このことから、桁の位置を入射波高に対し中央に設置した場合、桁の前面に発生する波圧による作用力が支配的であることが明らかとなった。
- (2) 同ケースにおいて、水平作用力最大時に発生する桁前面の波圧と、桁前面水位の静水压相当の圧力はそれぞれ1320[Pa]、1260[Pa]で両圧力は同程度であり、桁位置が異なるケースも同様であったことを踏まえると、桁前面に発生する波圧の鉛直分布は三角形状となることから、桁前面に作用する波圧は静水压の影響が大きいと考えられる。
- (3) 桁位置をパラメータとした実験結果より、著者らが過年度に提案した水平作用力から得られた実験式における高さ方向の波圧分布特性について検討した。その結果、桁位置が波高の峰付近に比べ静水面近傍に位置する場合は、桁前面の波圧は増加するものの、桁背面にも波圧が作用し津波進行方向から逆向きの作用力が増加することで、両位置で桁の作用力に大きな変化は生じないことが明らかとなった。このことから、実験式における無次元化波圧分布において、入射波高に対する桁の位置が0.5以下で直線状になるのは、桁の背面に発生する波圧の影響のためと考えられる。

参考文献

- 1) 荒木進歩，北川俊一郎；凹型断面の橋桁に作用する流体力特性，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.69，No.2，I_341-I_346，2013。
- 2) 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.2，2013，I_911-I_915
- 3) 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)，I_42-I_54，2013。
- 4) 幸左賢二，秋吉秀一，二井伸一，木村吉郎；津波による橋梁への水平作用力に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol.57A，pp.442-453，2011.3。