

## 孤立波の桁への水平作用力式の提案

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 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）

<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（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）

<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）

<sup>4</sup>正会員 工修（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）

### 1. はじめに

2004年12月のスマトラ沖地震の発生以降、段波形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、中尾ら<sup>1)</sup>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、流況と圧力特性より各支点到に生じる反力を計測して、その同時性を考慮した合力から津波作用力を評価したが、津波の波高、流速との関係性については述べられていない。中村ら<sup>2)</sup>は、非固定の桁模型と固定した桁模型を横並びで設置し、波の波長と波高をパラメータとした碎波を伴わない波を作用させ、非固定の桁模型が移動する際の作用力を、補正した抗力係数を用いてモリソン式の抗力項で評価しているが、抗力係数が変化することに対して考察が十分ではない。有川ら<sup>3)</sup>は、桁模型に対して水位、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、発生する圧力の特性から作用力を評価しているが、その圧力の発生理由については触れていない。以上のように、これらの実験から作用力発生メカニズムは明らかにされつつあるものの、橋梁を設計するにあたり、波の形状ごとの波高と流速に対する作用力との関係を明らかにするこ

とが重要であるが、橋梁を対象とした水理実験に基いてそれらを深く分析した研究は少ない。

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作用する作用力と波高、流速、圧力の関係について明らかにすることを目的とする。具体的には、津波先端部に見られる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桁模型に作用させた。2009年の筆者ら<sup>4)</sup>の津波実験においては、ある一定の波高に対して桁位置を変化させた実験結果から、波高と桁位置の関係をを用いた桁に作用する作用力の算出式を提案した。一方、来襲する津波の波高は架橋地点で大きく異なり、波高が変化する場合においても上記の実験結果から得られた算出式の妥当性を確認する必要がある。従って、孤立波の波高をパラメータとして、水平作用力、鉛直作用力、波高、水平流速、圧力の測定を行い、それぞれの計測値の関係性を作用力を支配する物理量の観点から分析した。なお、本論文では水平方向の作用力特性に焦点をあてて分析と考察を行っている。

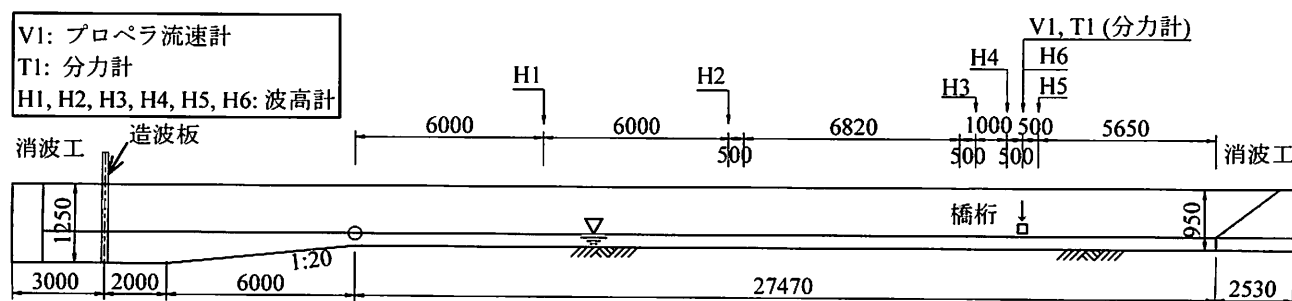


図-1 実験装置概略図

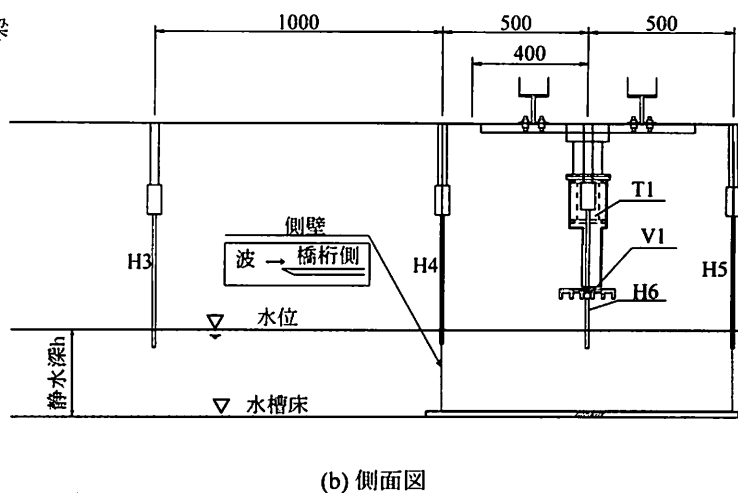
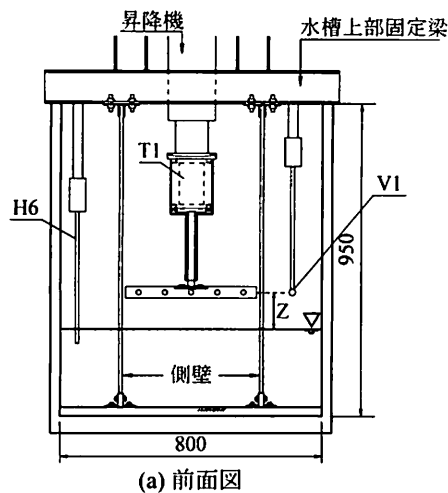


図-2 計測機器設置位置図

## 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。図中左は前面図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 ( $M_y$ ) の3分力が計測でき、規格は980Nである。同図に示す通り、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。

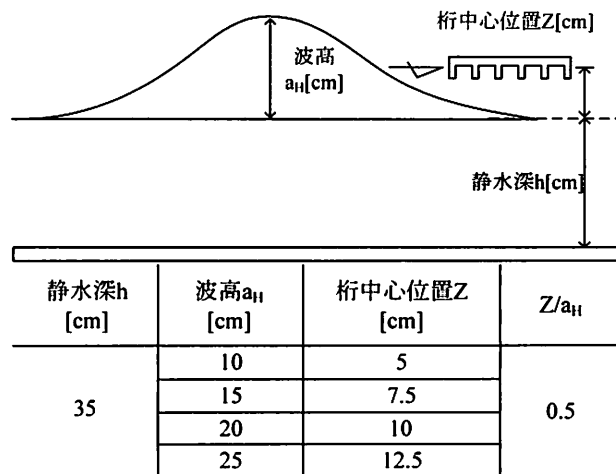


図-3 実験パラメータ

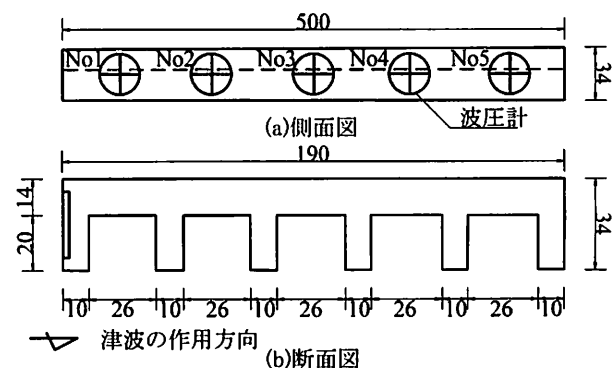


図-4 桁模型図

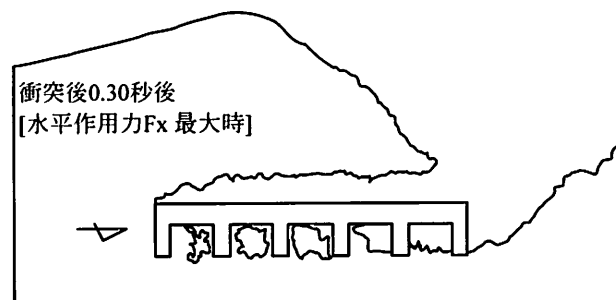


図-5 津波作用模式図[水平作用力最大時]

### (3) 実験パラメータと桁模型

図-3 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(4)の水理実験において、 $Z/a_H=0.5$  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。

橋梁模型の対象は、参考文献(4)の津波に対する桁への作用力実験で用いた模型と同様とし、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で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、水平作用力の分析用として、図中に示すように桁の側面に圧力計を 5 つ設置した。この圧力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。

### 3. 波高変化に伴う水平作用力変化

#### (1) 代表ケースにおける作用力と波高の関係

ここでは、静水深 20[cm]、桁中心位置を水面から 10[cm]とした計測結果を代表例として示す。

図-5 に津波が桁模型に衝突することによって生じる水平作用力最大時の波形状を示す。同図より、孤立波が桁模型に衝突すると波が大きく越流する。その後、進行する孤立波の概ね中央付近で水平作用力は最大値を生じる。

図-6 は、造波開始を 0 秒として、分力計から測定された水平作用力と鉛直作用力に加え、H6 波高計の時刻歴波形を示す。図中の水平作用力と鉛直作用力の時刻歴波形は、参考文献(4)と同様の目的で、1/10 秒間の移動平均処理を行っている。また、同図(a), (b)で示した 2 点に着目した。(a)は水平作用力の波形において最大値発生直前の 1 つ目の山が生じる地点、(b)は水平作用力が最大を生じる地点である。

まず、同図より、水平作用力は(a)まで上昇を続け、その後若干減少するものの、再度上昇して(b)で最大を迎える。水平作用力の最大値は津波が桁模型に作用し始めてから約 0.30 秒後に発生しており、その値は 19.1[N]である。その後、水平作用力は減少して 0 に戻る。H6 波高は 12.298[sec]で最大となり、ほぼ同時刻で水平作用力も最大となる。上向きの鉛直作用力は、波高と水平作用力が上昇する過程で最大値を迎えており、

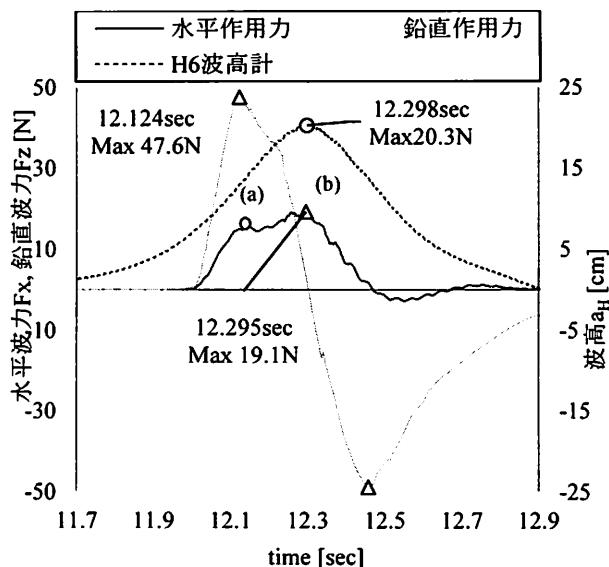


図-6 作用力と波高

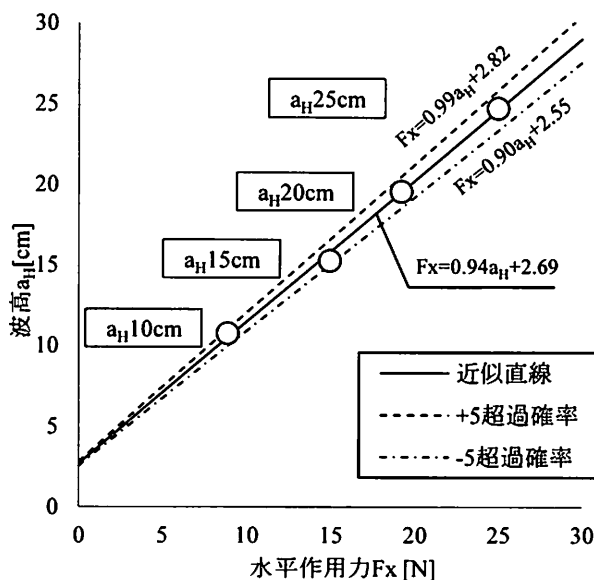


図-7 水平作用力と波高の関係

同時刻から水平作用力の増加量は減少する。このことから鉛直作用力が減少に転じても水平方向の流れは継続して桁に作用していることがわかる。さらに、波高が最大となる時点で水平作用力も最大値を迎えるため、波高と水平作用力は密接な関係にあると考えられる。

#### (2) 波高と水平作用力、水平流速の関係

図-7は、各ケースの桁横に設置したH6波高計の波高に対する桁に作用する分力計から得られた水平作用力をプロットした図である。同図は、横軸に分力計から得られた桁に作用する水平作用力を、縦軸に桁横に設置したH6波高計より得られた実波高をケース毎に3回分の平均値をプロットした図である。併せて、最小二乗法で算出した近似直線( $Fx=0.94a_H+2.69$ )と水平作用力

の5%超過確率線( $F_x=0.99a_H+2.82$ ,  $F_x=0.90a_H+2.55$ )を示す。同図より、波高の増加に伴って、水平作用力は概ね比例して増加し、5%超過確率線に収まることが分かる。

図-8は、各ケースの最大波高に対する桁模型の横に設置した V1 流速計から得られた最大水平流速の二乗の3回分の平均値をプロットした図である。併せて、最小二乗法で算出した近似直線( $V^2=11.47a_H+8.09$ )と流速二乗の5%超過確率線( $V^2=12.05a_H+8.49$ ,  $V^2=10.90a_H+7.68$ )を示す。なお、波高20cmのケース以外のケースについても、波高と水平流速の最大値の発生時刻は概ね同時刻であることを確認している。図中に示すように、上記と同様に波高が高くなれば、それに比例して水平流速も大きくなっており、波高10cmのケースを除く3つの波高ケースで5%超過確率線に収まる。

これらの結果より、波高を変えた4ケースの孤立波を作用させた桁模型実験の結果から、波高の増加に伴って水平作用力は比例して増加する。これは波高が増加すると桁位置の水平流速も増加するためである。

### (3) 作用力と圧力、水平流速の関係

ここでは、代表ケース(静水深20[cm]、桁中心位置を水面から10[cm])に着目をして、水平作用力の発生メカニズムに着目をして考察を行う。

図-9に、水平作用力最大地点の桁側面における圧力分布を示す。同図より、左右の橋長方向の津波の圧力の平均値は1.13[kPa]であり、最も値が離れているNo.1圧力計と比較するとせいぜい12[%]程度の差異であった。従って、本実験では2次元性が確保できていると判断し、5つの圧力計を時間ごとに平均した値を使用した。

図-10は、桁に作用する水平作用力と桁模型の横に設置した V1 流速計から得られた水平流速、上述した桁側面の平均圧力に側面積  $A(136[\text{cm}^2])$  を乗じて算出した水平作用力の時刻歴波形である。

同図から、圧力から得られた水平作用力と水平流速の立ち上がりと最大値は若干のずれはあるが、ほぼ同時刻で生じることが確認できるとともに、両者の波形は良く近似する。このことから桁模型側面に生じる圧力は桁模型横の水平流速に依存していると考えられる。また、水平作用力と圧力から得た水平作用力の立ち上がりと最大値は若干のずれはあるが、ほぼ同時刻で発生していることが確認できる。圧力から得た水平作用力の最大値は15.1[N]であるのに対して、水平作用力の最大値は19.1[N]と2割程度の差が生じ、算出水平作用力が水平作用力の時刻歴波形をよく再現できていない。これは、中尾ら<sup>3)</sup>の実験でもあるように4主桁の桁模

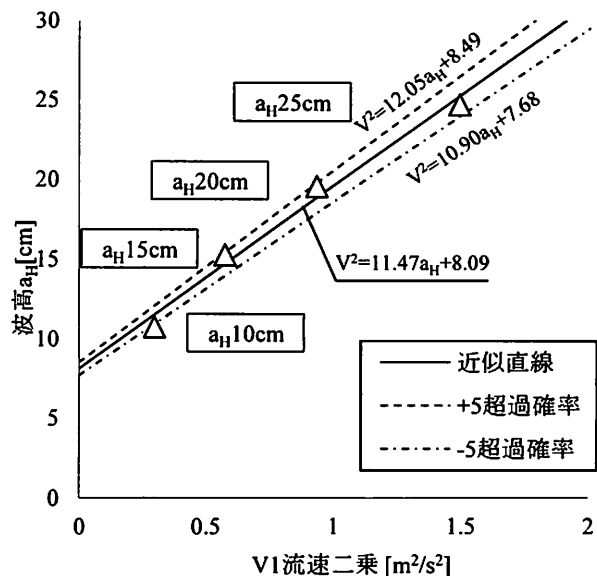


図-8 水平流速と波高の関係

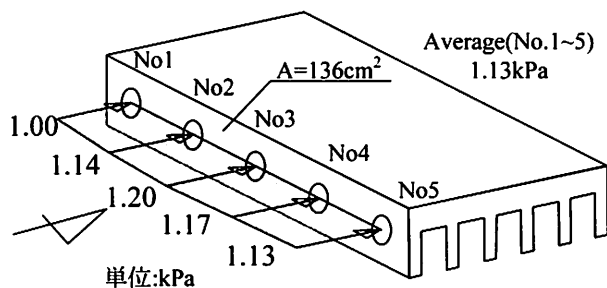


図-9 圧力分布

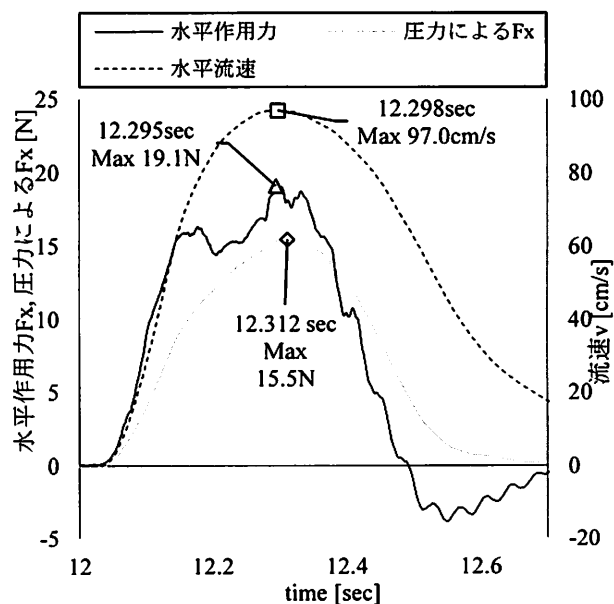


図-10 水平作用力、圧力による  $F_x$ 、水平流速

型に作用する全反力 240[N]に対して下流側の桁以外の各桁側面に設置した圧力計の合力が 80[N]と約 3 割程度を占めているという結果からすれば、桁模型の内桁の側面にも圧力を生じたと考えられるため、今回の桁側面に設置した圧力計だけではとらえていない圧力の存在が要因として考えられる。

これらの結果より、桁側面の圧力が、水平作用力の 80 割程度を占め、最大値が概ね同時刻であることから、水平作用力は桁模型側面に作用する圧力に支配されており、さらには、水平方向に進行する波が、桁模型に衝突することによって発生する圧力は水平流速によって生じると考えられる。

図-11は、波高10[cm]と波高20[cm]それぞれのケースにおける桁模型側面に設置した5つの圧力計を平均した時刻歴波形と、水平作用力の時刻歴波形を示す。なお、比較しやすいように波高10[cm]と20[cm]の時刻を波が桁に作用するときの時刻で一致させている。図中より、波高20[cm]のケースでは、水平作用力と圧力計の時刻歴波形は、立ち上がりと最大値を示す時刻がほぼ等しい。同様に、波高10cmのケースについても、水平作用力と圧力計の時刻歴波形は立ち上がりと最大値を示す時刻がほぼ等しい。

また、波高の変化に伴い、水平作用力の最大値が 2.2 倍増加するのに対して、桁側面に設置されている圧力の値は 2.1 倍増加していることから、水平作用力は桁側面に作用する圧力に応じて増加し、津波の波高に比例して圧力が変化すると考えられる。

#### 4. 波高の変化に伴う抗力係数の傾向

前章の分析の結果、水平作用力は波の形状に応じた波高と桁位置の流速の二乗値のそれぞれに比例関係があることが分かった。さらに、水平作用力は桁側面に生じる圧力が支配的であり、桁側面に作用する波の流速で圧力が生じると考えられる。本章では、波高の変化に伴う抗力係数の傾向を分析した。

##### (1) 実験結果

抗力係数の分析に際して、モリソン式の抗力項で表される水平作用力の式(1)を変形し、式(2)から抗力係数を算出した。また、前章の通り、最大水平作用力を評価する代表的な値として最大流速を用いた。

$$F_x = \frac{1}{2} \rho_w C_d v^2 A \quad (1)$$

$$C_d = \frac{2F_x}{\rho_w v^2 A} \quad (2)$$

ここで $\rho_w$ ：水の密度 (1000[kg/m<sup>3</sup>])， $C_d$ ：抗力係数，

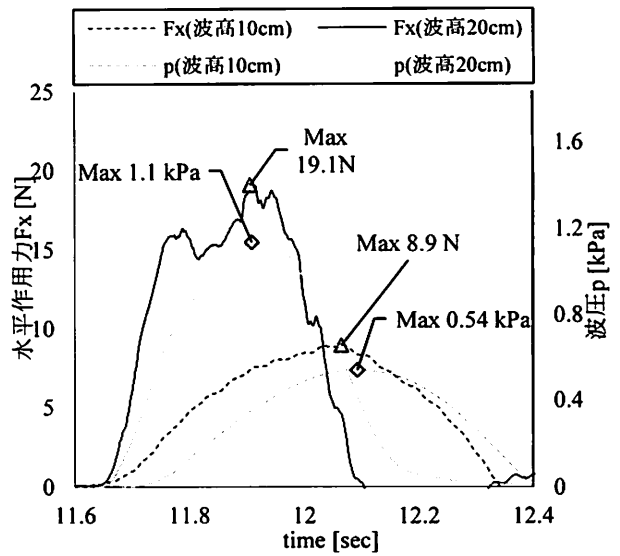


図-11 Fx, 圧力時刻歴波形(a10cm,20cm)

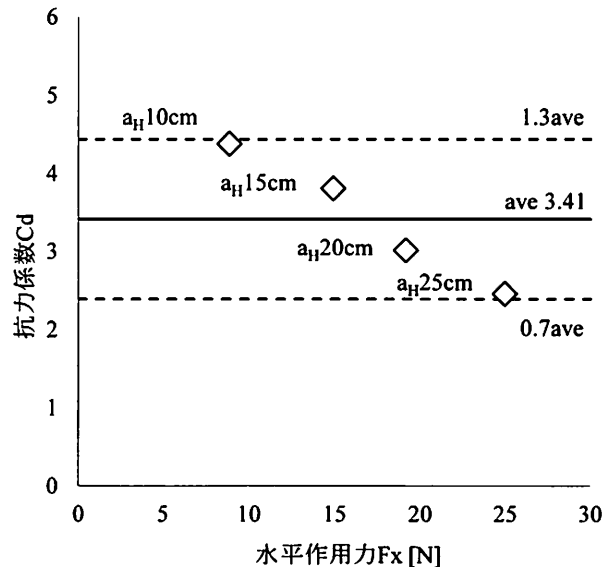


図-12 水平作用力と抗力係数の関係

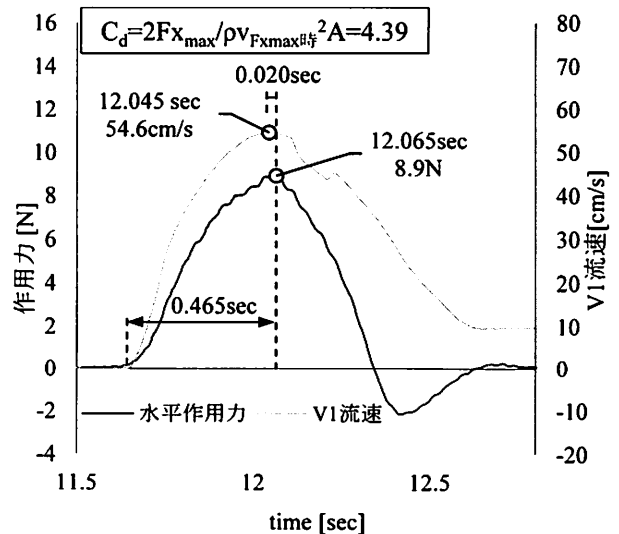


図-13 Fx と V1 時系列(波高 10cm)

$v$ : V1流速[m/s],  $A$ : 被圧面積[m<sup>2</sup>]である。

本実験では再現性の確認のため、各波高につき 3 回実施しているが、いずれも再現性は高くプロットする点については、3 回分の平均値とした。

図-12 は、上述の式(2)に最大水平流速と最大水平作用力を用いて算出した抗力係数  $C_d$  と最大水平作用力  $F_x$  の関係を示す。同図より、得られた抗力係数の平均値は 3.41 と求められるものの、抗力係数は水平作用力の増加に伴って若干右肩下がり傾向となる。ここで、平均値に対する最大値と最小値の誤差は 30[%]以内となる。

## (2) 水平作用力と水平流速の同時性

ここでは、前述した抗力係数が最も離れている波高 10, 25[cm] のケースにおける水平作用力と水平流速時刻歴波形の最大値発生時刻に着目し、抗力係数の考察を行う。

図-13, 14は、図-10と同様に、波高10, 25[cm]の両ケースにおける水平作用力とV1水平流速の波形をそれぞれ比較した図である。

まず、図-13は波高10[cm]のケースについて示す。同図より、流速と水平作用力の最大値発生時刻に 0.020[sec] の時間差が見られる。水平作用力の立ち上がりより水平作用力最大までの時間(0.465[sec])を基準とするとおよそ4[%]の誤差であるため、概ね同時刻に両者は最大を迎えると考えられる。また、両者の波形の相関性は高い。それぞれの最大値と式(2)を用いて抗力係数を算出すると  $C_d=4.39$  であった。

次に、図-14では波高25[cm]のケースにおける水平作用力と水平流速の関係を示す。先ほどと同様に最大値を用いて抗力係数を算出すると  $C_d=2.49$  であった。同図より、水平作用力と水平流速の立ち上がりは同時刻で発生しているが、水平作用力は11.407[sec]に最大を迎えるのに対して水平流速は11.491[sec]に最大を迎え、約0.084[sec]の時間差がある。水平作用力の立ち上がりより水平作用力最大までの時間(0.117[sec])を基準とするとおよそ72[%]の誤差があるため、明らかに両者の最大値の発生するタイミングはずれていると考えられる。これは、水平流速が上昇する過程で、水平作用力が発達しきらず、途中で減少を開始したためである。

従って、最大水平作用力が発生するのと同じ時刻の流速を用いて抗力係数の再評価を試みる。

図-15, 16は、波高10, 25[cm]のケースにおける水平作用力と水平流速の関係を示す。併せて水平作用力最大時の水平流速を用いた場合の抗力係数を図中に示す。

図-15 は、波高 10[cm]のケースにおいて、水平作用力最大を生じる時刻における水平流速の値を示す。水平作用力最大時の水平流速は 54.5[cm/s]であり、水平流

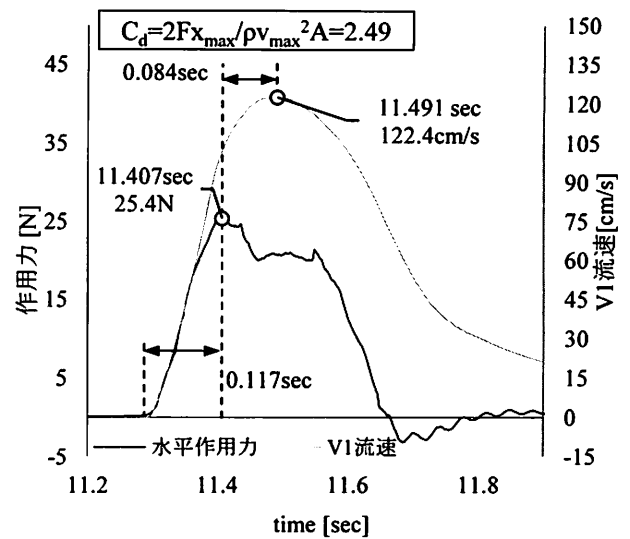


図-14  $F_x$  と  $V1$  時系列(波高 25cm)

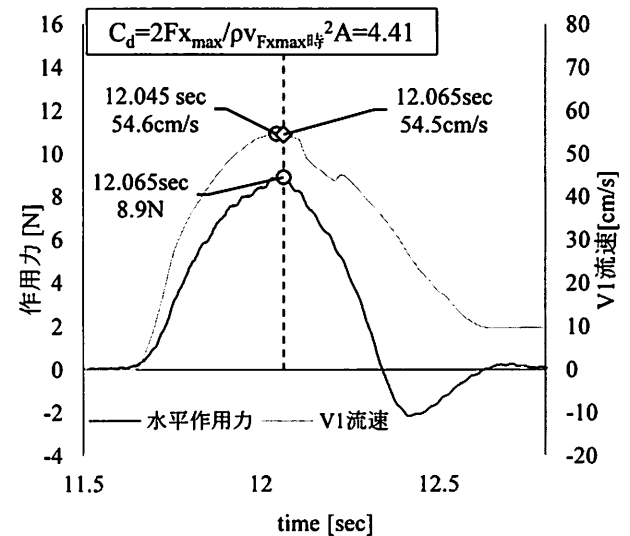


図-15  $F_x$  と  $V1$  時系列(波高 10cm,  $F_x$  最大時)

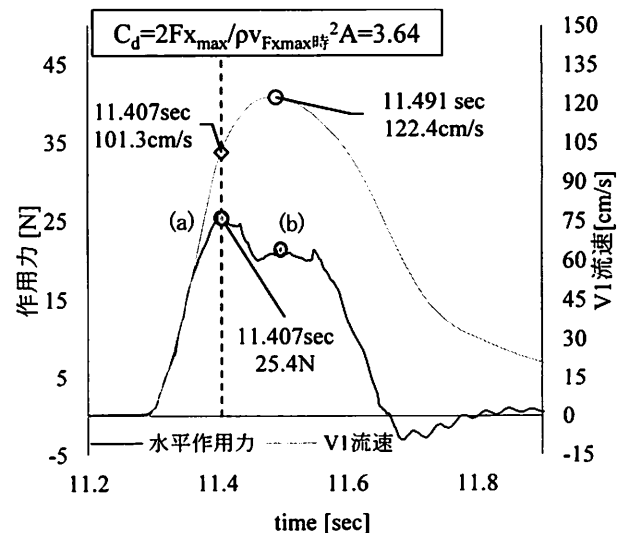


図-16  $F_x$  と  $V1$  時系列(波高 25cm,  $F_x$  最大時)

速最大値が 54.6[cm/s]であるため、ほぼ変化は見られない。この水平流速を用いて抗力係数を算出すると  $C_d=4.41$  であり、前述した水平作用力と水平流速それぞれの最大値を用いて算出した抗力係数が  $C_d=4.39$  であるためほぼ変化はない。

図-16 は、波高 25[cm]のケースにおける水平作用力最大を生じる時刻における水平流速の値を示す。水平作用力最大時の水平流速は 101.3[cm/s]であり、水平流速最大値が 122.4[cm/s]であるため、約 2 割減少した。この水平流速を用いて抗力係数を算出すると  $C_d$  は 3.64 となり、前述した水平作用力と水平流速の最大値を用いて算出した抗力係数が  $C_d=2.49$  であるため、値が約 5 割増加する結果となった。また、両者の波形が異なることに関して、桁模型に作用する孤立波の波形状を用いて後述する図-18 で説明するために、同図 (a)、(b)に着目した。(a)は波形において水平作用力が最大を生じる地点、(b)は水平流速が最大を生じる地点である。

図-17 は、各波高ケースの水平作用力と水平作用力最大時の水平流速を用いて算出した抗力係数の 3 回分の平均値をプロット図である。同図を図-12 と比較すると、波高 25[cm]のケース以外のプロットの位置の変化は小さく、波高 25[cm]のケースは抗力係数が増加する結果となり、平均値 3.70 の 20[%]誤差範囲内に収まり、概ね一定であると考えられる。

3 章で前述したように、水平流速の増加に伴って桁側面の圧力が増加することによって水平作用力が増加する。このことから、図-14 に示す水平作用力と流速の、それぞれの時刻歴波形には因果関係があると考えられる。従って、抗力係数の評価には最大水平作用力と、これが発生したのと同じ時刻の流速を用いるのが良いと考えられる。

### (3) 水平作用力と水平流速の波形が異なる理由

図-16 に示すように、水平流速の上昇する過程で、水平作用力が発達しきらず、途中で減少を開始する。このことに関して、波形状を用いて考察を行う。

図-18 は、津波が桁模型に作用した際の波形状を、水槽側面に設置したハイスピードカメラにより撮影した動画からトレースした模式図である。ここで、津波が桁下に衝突した時刻を 0 秒とする。

まず、同図 (a)は孤立波が橋桁模型に衝突した0.12秒後の波形状である。この時刻は、水平作用力が最大となる時刻である。同図より、水平作用力は、25.4Nを示した。また、津波によって桁模型の床版下や桁下がすべて浸水した時間であり、下流側から2箇所もの桁間に気泡が発生し、渦を巻き始めることが確認された。さらに、桁模型の下部に対して津波の作用方向は、斜

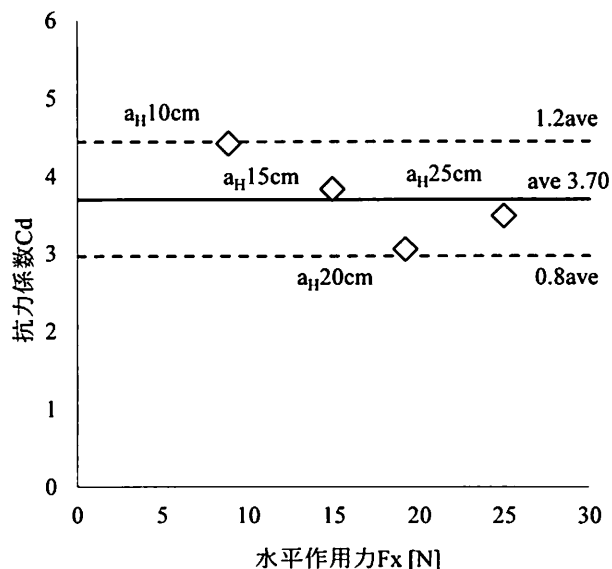
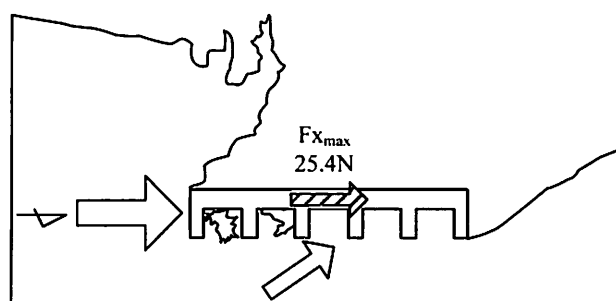
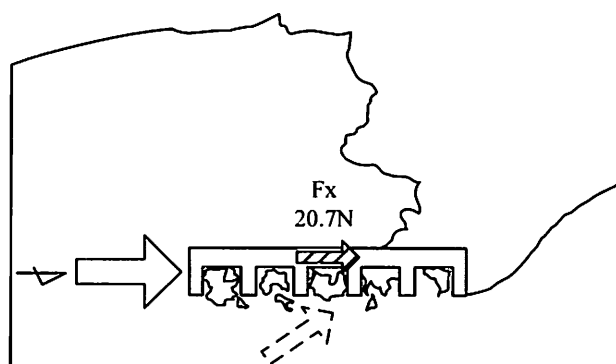


図-17 水平作用力と抗力係数( $F_x$  最大時の  $V$ )



(a) 0.12 秒後



(b) 0.20 秒後

図-18 津波作用状況

め上方向に作用しており、最も下流に近い桁の側面と、その他の桁の側面にも津波が作用していたと考えられる。

次に、同図 (b)は孤立波が橋桁模型に衝突した0.2秒後の波形状である。この時刻は、水平流速が最大となる時刻である。水平作用力は、20.7Nを示し、先ほどと比較して、水平作用力が約2割減少する結果となった。また、(A)の時刻の波形状と比較して、気泡が上

流側の桁間にも発生し、空気と水が複雑に混ざり合う状態となっていることが確認され、津波の進行とともに桁模型の下部に対して津波の作用は失われていると考えられる。

これらのことより、津波が進行するとともに、それまで桁模型の下部に斜め方向に作用していた流速のベクトルが失われることによって、水平作用力が途中で減少を開始したと考えられる。

今後は、最も下流に近い桁側面に作用する圧力のみならず、各桁側面に作用する圧力を実際に津波実験で計測することが課題である。

## 5. まとめ

本研究では、橋梁を対象に孤立波性状の津波による橋桁への作用力特性を評価するために波高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) 孤立波の波高を 10[cm], 15[cm], 20[cm], 25[cm]と変化させて桁模型に作用させた実験結果から、波高の増加に伴って水平作用力はそれぞれ 8.9[N], 14.9[N], 19.2[N], 25.0[N]と比例して増加する。これは波高が増加するとともに桁位置での水平流速の二乗もそれぞれ 0.3[m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>], 0.6[m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>], 0.9[m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>], 1.5[m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]と比例して増加するためである。
- (2) 波が桁に作用する際の水平作用力と桁側面に生じる圧力の整合性を確認するために設置した圧力と桁側面積の積は水平作用力の 80[%]程度を占め、最大値が概ね同時刻であることから、水平作用力は主として桁模型側面に作用する圧力に支配され

ている。

- (3) 流速の二乗は波高と比例関係にあるため、水平作用力は波高の関数であると考えられる。そこで、波高の変化に伴う水平作用力と流速の関係を抗力係数を用いて分析を行った。その結果、最大水平作用力と最大水平作用力を用いて算出した抗力係数の平均値は 3.41 と求められるものの、抗力係数は水平作用力の増加に伴って若干右肩下がりの傾向となる。一方、最大水平作用力が発生する時刻の流速を用いて評価した抗力係数は平均値 3.70 の 20[%]誤差範囲内となり、概ね一定となることが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 中村友昭, 澤祐太郎, Xingyue Ren, 水谷法美; 橋桁への作用津作用力と橋桁の流出限界に関する実験的研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.69, No.2, I\_335-I\_340, 2013.
- 3) 有川太郎, 渡辺政博, 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
- 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.