

橋梁に作用する孤立波の水平作用力評価

Evaluation of horizontal force on bridge girder due to soliton

田中将登*, 幸左賢二**, 佐々木達生***, 佐藤崇****
Masato Tanaka, Kenji Kosa, Tatsuo Sasaki and Takashi Sato

*九州工業大学大学院, 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)

** 工博, 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)
kosa@civil.kyutech.ac.jp

*** 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)

**** (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)

In order to find out the mechanism of tsunami soliton on bridge girder, the soliton experiment was carried out with a bridge girder model. As a result, the measured maximum horizontal force on bridge girder by force transducer was found close to the calculated maximum force by the integration from the wave pressures on girder side area and the maximum forces happened at the same time. Thus, it is concluded that the horizontal force is dominant to the wave pressure on girder side area. Besides, from the parametric study of wave height, it is noted that both horizontal force and wave velocity are proportional to wave height. Thus, it is concluded that bore wave horizontal force has a high correlation with wave height.

Key Words: Tsunami, bore wave, characteristic of force, wave pressure, velocity

キーワード: 津波, 孤立波, 作用力, 圧力, 流速

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圧力を計測し, 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, 圧力特性を明らかにした。有川ら²⁾は, 橋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, 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圧力計より計測した圧力を用いて評価した。

以上のように, 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, 橋梁の耐津波設計においては, 外力として津波作用力を評価する手法の確立が望まれており, 津波作用力に影響を

及ぼすと考えられる波高と桁形状の関係を明らかにする必要がある。

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, 波高や桁形状の変化に応じた水平作用力への影響を明らかにすることを目的とする。具体的には河川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, 孤立波の波高と桁形状をパラメータとしており, 作用力, 波高, 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。

このうち, 本論文では水平作用力に着目して作用力と圧力の相関性を分析し, 水平作用力と波高, 更には桁側面の面積との関係を明らかにする。

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41[m], 幅

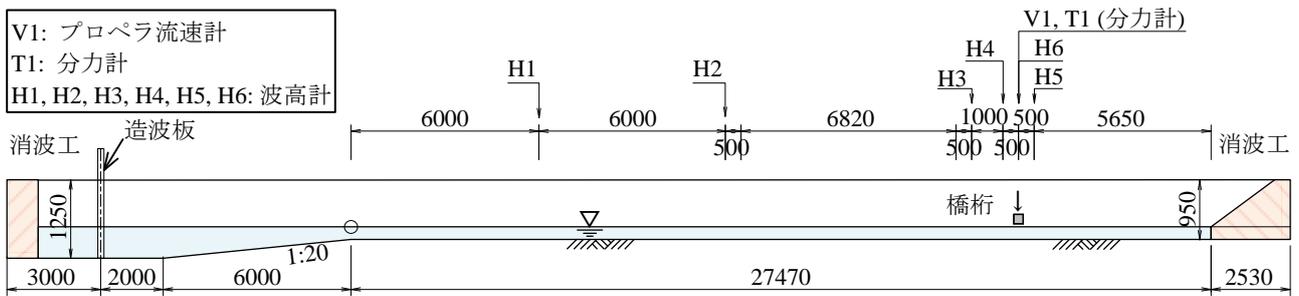


図-1 実験装置概略図

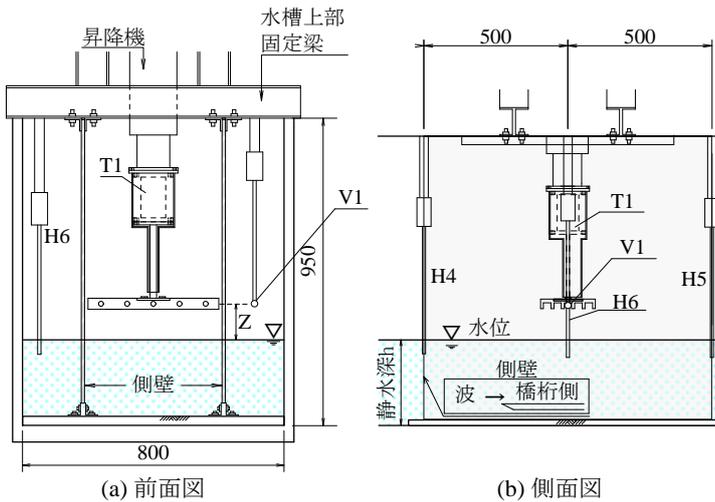


図-2 計測機器設置位置図

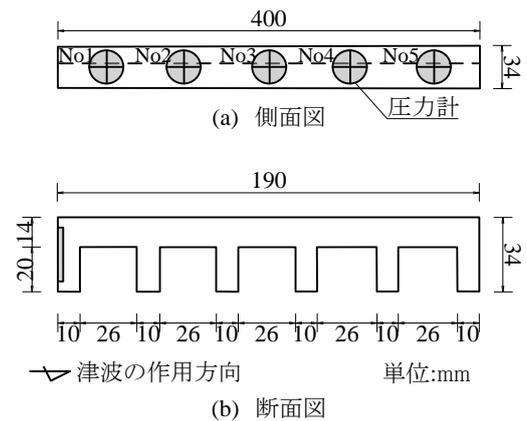


図-3 桁模型図

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。

橋梁模型の対象は、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]）である。橋長、幅員、構造高は、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り、過去に行った津波による橋梁への水平作用力に関する実験的検討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る作用力特性の変化の比較を可能とする。なお、計測を容易にするため、実橋にある地覆、歩道部、床版張り出し部の詳細なモデル化は行っていない。

2.2 計測方法

図-2は、計測機器の設置位置を示す。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

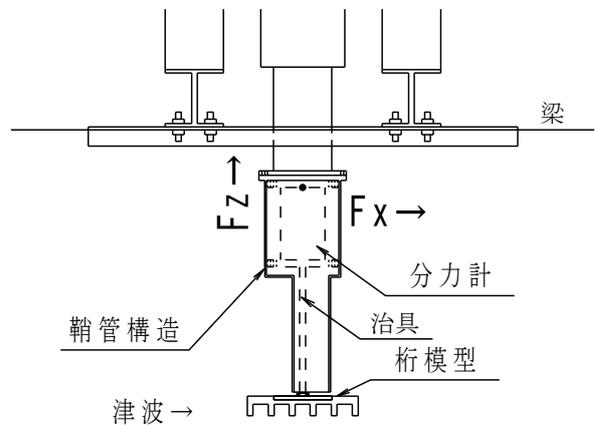


図-4 分力計設置図

た。側壁は、高さ95[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。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(V)、波形状をとらえる波高計(H)を図-1, 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(Fx)、鉛直作用力(Fz)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-4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。

流速計は、図中の V1 に水平方向の流速を計測できるプロペラ式流速計を使用し、波が桁模型に作用する際の影響を受けないように側壁を介して桁横に設置し、桁位置での水平流速を計測した。

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 波高計は前述の流速計と同様の理由で側壁を介して桁模型横に設置した。

なお、水平作用力の分析用として、図-3(a)に示すように桁模型の側面に圧力計を等間隔で 5 つ設置している。

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。

2.3 実験ケースと相似則

図-5 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 として、標準は波高 $a_H=20$ [cm]、桁高 3.4[cm]と設定する。これを Case3-1 とする。ここで、CaseNo.の説明を加えると、Case*i*-*j* と示した *i* は波高ケースの No.を示し、*j* は桁高ケースの No.を示す。Case3-1 の波高と桁高を実橋に換算するとそれぞれ 10[m]、1.7[m]となる。

さらに本実験では、波高と桁高をパラメータとしている。まず、Case3-1 に対し、桁高を変えずに波高を 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 Case1-1、Case2-1、Case4-1 とする。次に、Case3-1 に対し、波高を変えずに桁高を 5.1[cm](1.5 倍)、6.8[cm](2.0 倍)としたケースをそれぞれ Case3-2、Case3-3 とした。なお、Case1-1、Case2-1、Case3-1、Case4-1 の波長はそれぞれ 440[cm]、440[cm]、400[cm]、360[cm]である。

本実験の相似則の考え方を以下に示す。波浪等では、通常は水の表面張力や固体面との間の摩擦抵抗などの影響が小さいので、フルード相似則を満足させることが出来る⁹⁾。これは、波浪の粘性力が慣性力に比べて、非常に小さいため、無視できるという意味である。従って、一般的に波浪より周期が長い津波の慣性力の方が大きいことから、同様に粘性力は無視できるものとし、重力と慣性力の相似を重要視してフルードの相似則を用いた。下記にフルードの相似則を示す。

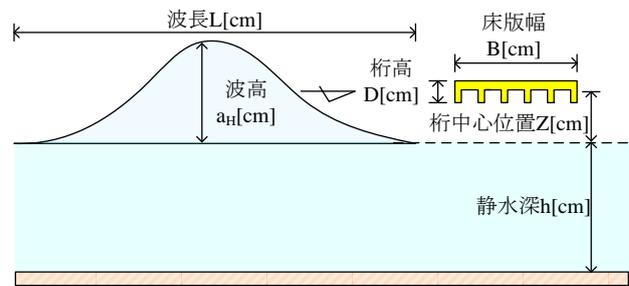
$$\frac{V_m}{V_p} = \frac{\sqrt{gH_m}}{\sqrt{gH_p}} = \sqrt{\frac{L_m}{L_p}} \quad (1)$$

ここで、 V ：流速、 g ：重力加速度、 H ：水深、 L_m/L_p ：相似比である。

添字の m は模型、 p は実橋に対する諸量である。本実験での桁模型は実橋の 1/50 スケールを想定しており、相似比 L_m/L_p は 1/50 である。

3. 水平作用力の分析

本章では、孤立波が桁模型に作用する際に生じる水平



Case	静水深h [cm]	波高 a_H [cm]	桁中心位置Z [cm]	Z/a_H	桁高D [cm]	床版幅B [cm]
1-1	35	10	5	0.5	3.4	19.0
2-1		15	7.5		3.4	19.0
3-1		20	10		3.4	19.0
3-2					5.1	19.0
3-3					6.8	19.0
4-1		25	12.5		3.4	19.0

...代表ケース

図-5 実験パラメータ

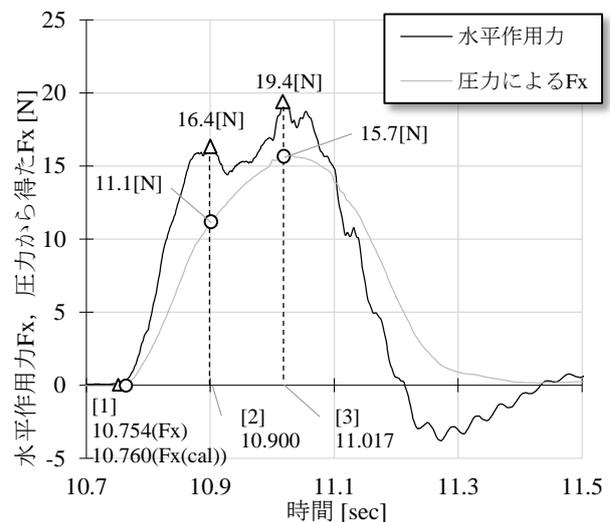


図-6 水平作用力と圧力より得た水平作用力

作用力と圧力の関係を明らかにした上で、波高をパラメータとした実験結果を用いて考察する。

3.1 代表ケースの実験結果と考察

本節では、標準の Case3-1 の結果を用いて、水平作用力と圧力、流速の関係を述べる。

(1) 実験結果

図-6 は、横軸に造波開始を 0 秒とする計測時間とすることで、分力計で計測した桁に作用する水平作用力をプロットした水平作用力時刻歴図である。同図には、図-7 に示すような桁側面に設置した 5 つの圧力計の平均圧力に側面積 $A(136[cm^2])$ を乗じて算出した水平作用力の時刻歴波形を併せ示すことで各着目点における両者の計測値を比較している。なお、図中の水平作用力と圧力

の時刻歴は著者ら⁴⁾の実験の通り、治具の共振影響を排除するため1/10秒の移動平均処理を用いている。

まず、分力計から得られた水平作用力は、[1]10.754[sec]から発生し始め、一度[2]10.900[sec]で16.4[N]を生じて、山なりの波形を呈するが、[3]11.017[sec]で最大19.4[N]となって、その後減少する。一方、圧力から求めた水平作用力は、[1]10.760[sec]から発生し始め、[2]10.900[sec]で11.1[N]を生じ、[3]11.017[sec]で15.7[N]を発生する。

これらの着目点をそれぞれ比較する。まず着目点[1]では両者はほぼ同時刻で発生していることが確認できる。次に、[2]では水平作用力16.4[N]に対して、圧力から得た水平作用力は11.1[N]と約70%を占める。最後に、[3]では最大水平作用力19.4[N]に対し、圧力から得た水平作用力は15.7[N]と約80%を占める。なお、水平作用力と桁側面の圧力積分値の差異20~30%の理由は、(2)で説明を加える。

図-7は、水平作用力が最大となる時点の桁側面に設置した圧力分布を模式的に示す。同図から、No.1からNo.5の順で、圧力値はそれぞれ1.00[kPa]、1.14[kPa]、1.20[kPa]、1.17[kPa]、1.13[kPa]であり、最大で13%(min/max)の差異が見られるが概ね等分布となり、平均1.13[kPa]である。

図-8は、横軸を造波開始を0秒とする計測時間とし、縦軸に圧力から得た水平作用力、及び桁模型の横に設置したプロペラ式のV1流速計から得られた水平流速の時刻歴波形をとることで両者の計測値と波形を比較している。同図に示す[2]、[3]は図-7で前述した時刻と同様である。

まず、水平流速は[1]10.775[sec]から発生し始め、[2]の10.900[sec]で75.5[cm/s]、[3]の11.017[sec]で96.5[cm/s]となる。一方、圧力より得た水平作用力は前述した通りである。まず、着目点[1]において両者を比較すると、それぞれほぼ同時刻で発生していることが確認できる。次に、[2]から[3]にかけての増加倍率を比較すると、水平流速では、[2]75.5[cm/s]から[3]96.5[cm/s]と、1.3倍に増加するのに対し、圧力より得た水平作用力の場合、[2]11.1[N]から[3]15.7[N]と1.4倍に増加と概ね等しい。このことより、桁模型側面に生じる圧力は桁模型横の水平流速に多少の関係があると考えられる。

これらの結果より、桁側面の圧力が、水平作用力の8割程度を占めることに加え、概ね同時刻に水平作用力と圧力積分値のいずれも最大値を迎えることから、水平作用力は桁模型側面に作用する正圧で決まり、背面の圧力は小さいと考えられる。

(2) 水平作用力と圧力積分値の整合性に関する考察

ここでは、前述したように分力計から得られた水平作用力に対して側面圧力より算出した水平作用力が約7~8割方を占めているが2~3割程度差異が生じる理由について考察する。具体的には、中尾ら³⁾の実験結果を用いて、橋桁模型周りの水平圧力の特性を整理した。

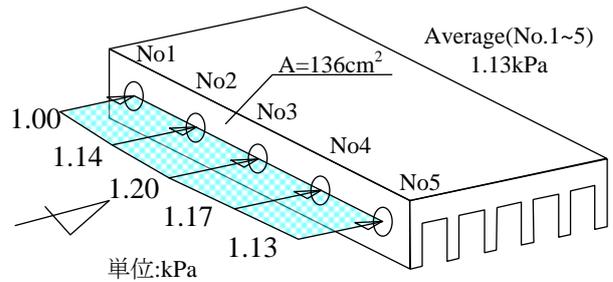


図-7 圧力分布(Fx最大時)

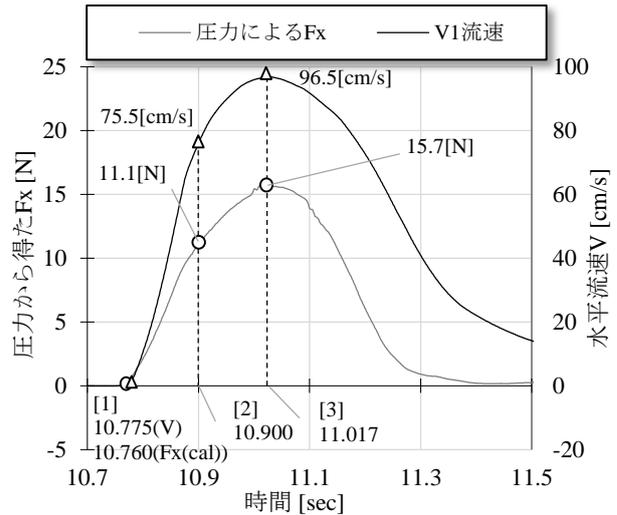
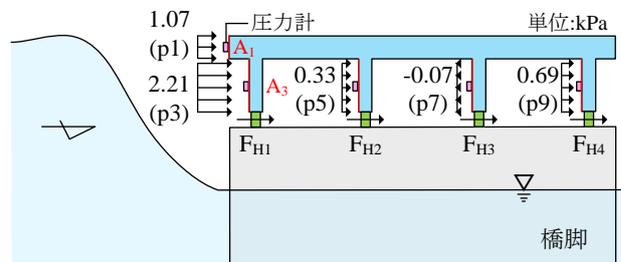
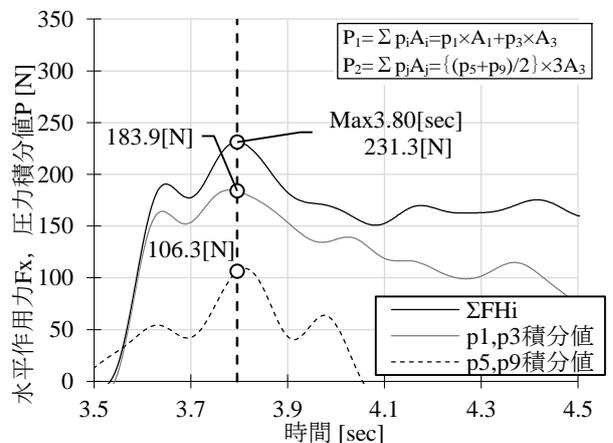


図-8 圧力より得た水平作用力と水平流速



(a) 実験概要図



(b) 水平作用力と圧力積分値の関係

図-9 中尾ら³⁾津波実験

図-9(a)は、中尾ら³⁾の実験概要図を示す。実験の計測方法としては、張り出しのある4主桁のそれぞれの桁と橋脚を連結材で連結し、その連結材に小型分力計を設置することで支点反力(水平 F_H および鉛直 F_V)を計測した。また、橋桁模型の周りには圧力計を12個設置しており、桁に津波が作用した際に生じる圧力の計測を行っている。ここでは、水平圧力を計測する圧力計(p1, 3, 5, 7, 9)の設置位置のみを示す。橋桁模型にはゲート急開式造波装置によって段波を作用させた。

図-9(b)は、横軸を計測時間とし、4つの分力計の合力 ΣF_H (ここでは水平作用力と呼ぶ)と、前述した評価方法と同様に算出した積分値の時刻歴波形を比較している。

まず、水平作用力と p1, 3 圧力に被圧面積 A_1, A_3 をそれぞれ乗じて足し合わせた時刻歴(p1, 3 積分値)を比較する。同図より、水平作用力最大値は 231.3[N]に対して、同時刻の p1, 3 積分値は 183.9[N]と 8 割程度を占め、前述した実験と同様の結果となる。

次いで、p5, 9 圧力の平均値に被圧面積 A_3 の3箇所分 $3A_3$ を乗じて足し合わせた時刻歴(p5, 9 積分値)に着目する。ここで、p7 圧力計は、他と比べ、負の圧力を示しており傾向が異なる。そのため計測が良くできていないと考え、評価には用いていない。同図より、水平作用力最大時の p5, 9 積分値は 106.3[N]となり、内桁の側面にも圧力の発生による津波作用方向の水平作用力が発生していることがわかる。

以上のように、中尾ら³⁾の実験結果に基づけば、桁の津波作用側の側面以外にも水平作用力が内桁側面にも発生することから、著者らの実験結果における水平作用力と圧力の積分値の20~30%の差異は内桁側面に発生する水平作用力であると考えられる。

3.2 パラメータ実験の結果と考察

前節までの分析の結果、水平作用力は桁側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。本節では標準のCase3-1に加え、波高をパラメータとするCase1-1, Case2-1, Case4-1の実験結果から、水平作用力と桁側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。

(1) 波高の変化に伴う水平作用力の変化

図-10は、横軸を各ケースの波高計から得た最大波高、縦軸を分力計から得た最大水平作用力として波高と水平作用力の関係を示す。それぞれの波高ケースで3回実施しており、3回分の波高と水平作用力の計測値は、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いる。

ところで、既往の津波作用力の評価式は、例えば合田式⁹⁾と呼ばれる波圧算定式では港湾構造物に進行波が作用した際に生じる水平圧力は津波高の3倍を頂点とする底面が静水圧の2.2倍となる波高の1次関数で表される。港湾構造物に対して被圧面積が小さい橋梁の上部構造においても、前述の分析結果に基づけば、津波作用側の桁

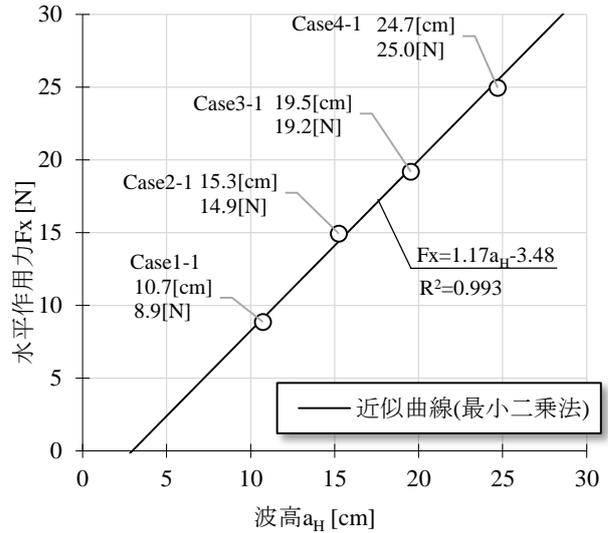


図-10 波高と水平作用力

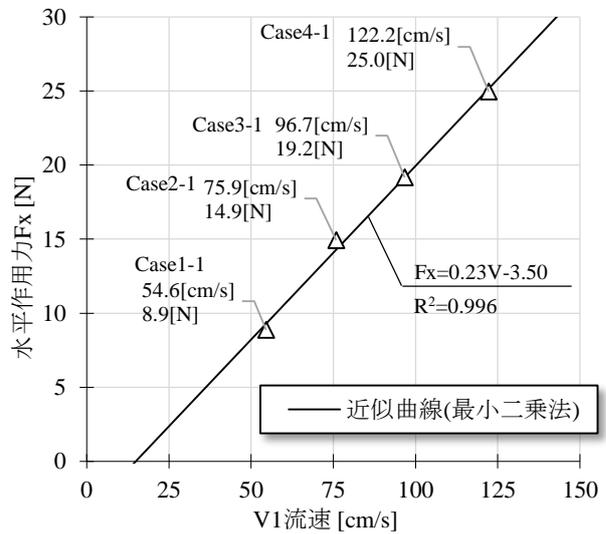


図-11 流速と水平作用力

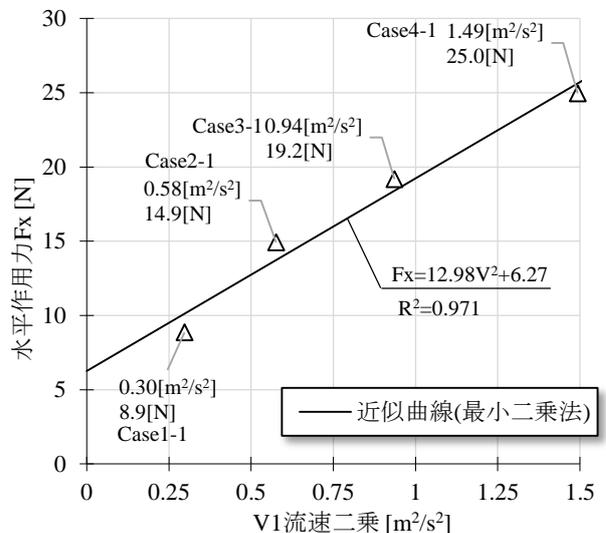


図-12 流速二乗と水平作用力

側面に発生する圧力と被圧面積で評価できる水平作用力は波高の1次関数で表されると仮定した。

この仮定に基づき、各波高と水平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 $F_x = 1.17a_H - 3.48$ であり、決定係数は $R^2 = 0.993$ と求められる。このことから、最大波高と最大水平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。

図-11は、横軸を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、縦軸を最大水平作用力として水平流速と水平作用力の関係を示す。流速も波高と同様に3回分の計測値はほぼ同値である。

同図より、各波高ケースの平均値を示す。これらの関係を最小二乗法を用いて近似すると、決定係数 $R^2 = 0.996$ でもって1次曲線で表すことができる。一方、図-12に示すように、図-11の横軸である最大水平流速を二乗とし、水平流速二乗と水平作用力の関係を示す。これらを最小二乗法を用いて近似すると、決定係数 $R^2 = 0.971$ でもって1次曲線で表すことができる。これらの結果から、最大水平作用力は流速、または流速の二乗のいずれとも高い相関性をもって1次曲線で近似することができるといえる。津波のエネルギーは位置エネルギー (ρgh) と運動エネルギー ($0.5\rho v^2$) で説明されるのが一般的であることから、上述の2つの結果のうち、水平作用力と流速の二乗が線形比例すると捉えるのが適当と考えられる。

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。また、波高が増加すると桁位置の水平流速の二乗も増加する。

(2) 波高と水平作用力の分析

図-13は、Case1-1, Case3-1, 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波高計は第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1.5[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, Case3-1, Case4-1ではそれぞれ10.8[cm], 19.5[cm], 24.7[cm]である。指令波高に対する桁位置での最大波高の比率はそれぞれ1.08, 0.98, 0.99と1割程度未満の差異で指令波高が再現される。また、Case3-1に対するCase1-1とCase4-1の比率はそれぞれ0.55, 1.27と概ね指令波高の比率である。

また、各波高ケースの波形の周期は概ね1.5[sec]と同様であるものの、前述の通り桁位置は波高の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。

図-14に示すのは、Case1-1, Case3-1, Case4-1の水平作用力時刻歴である。同図から、最大水平作用力はそれ

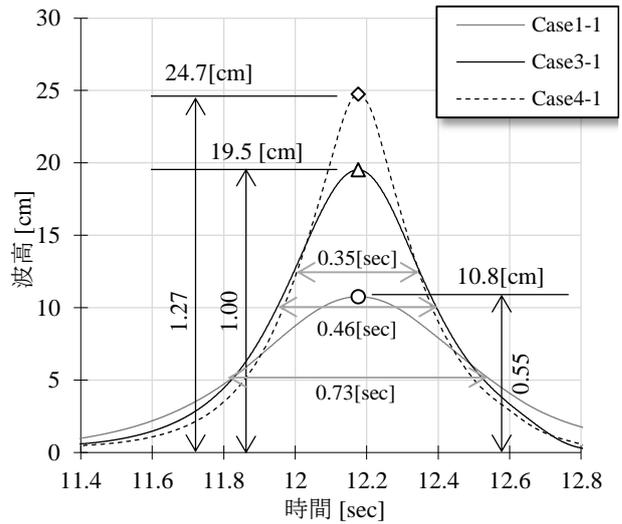


図-13 波高時刻歴と最大値の比率

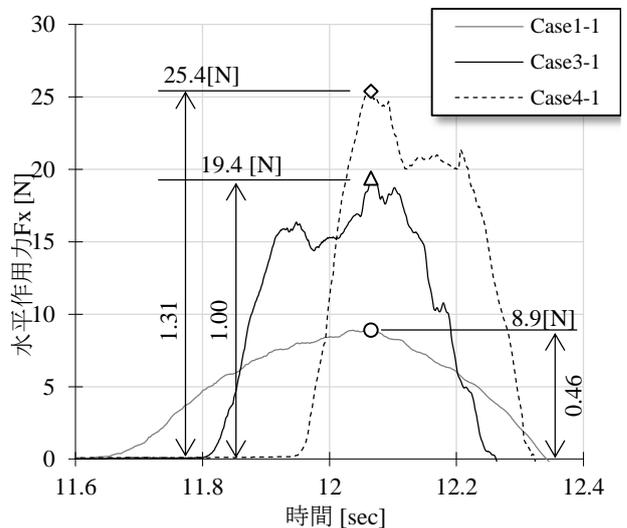


図-14 水平作用力と最大値の比率

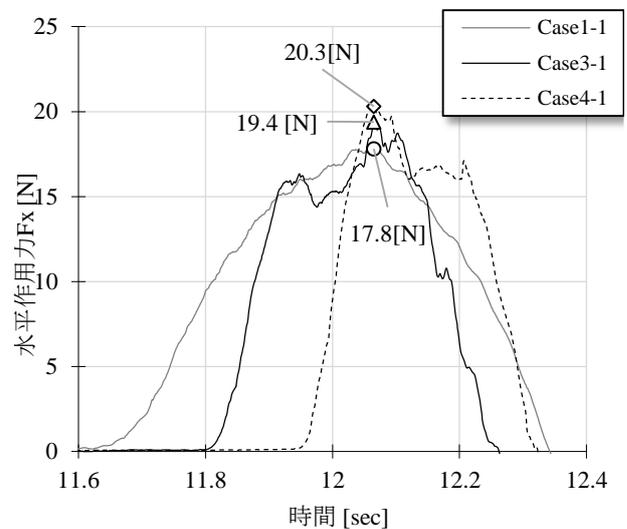


図-15 波高比率で補正した水平作用力時刻歴

それぞれ 8.9[N], 19.4[N], 25.4[N]であり, Case3-1 に対する Case1-1 と Case4-1 の比率はそれぞれ 0.46, 1.31 となり, 概ね指令波高の比率となる.

ここで, 水平作用力が発生する時間は, 波高の増加とともに減少する傾向を呈するが, 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. このことから, 波高の増加に伴って水平作用力は増加し, 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, 急激に増加する.

次に, 図-15 に示すのは, 各波高ケースの水平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 Case3-1($a_H=20[\text{cm}]$)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.

同図より, Case3-1 に対して Case1-1, Case4-1 の補正水平作用力(比率)はそれぞれ 17.8N(0.92), 20.3[N](1.04)となる. それぞれ 1 割未満の差異となり対応が良いが, Case1-1 では水平作用力がなだらかに増加して最大を迎えるのに対し, Case3-1, Case4-1 では最大値の他に幾つかの鋭いピークを示すことが分かる. このことについて次節で考察する.

(3) 考察

図-16 は, 最大水平作用力発生時の桁模型側面の圧力分布について, Case3-1 に対してそれぞれ Case1-1, Case4-1 を比較した図である. それぞれの図は Case3-1 の圧力値を 1.0 として Case1-1, Case4-1 の圧力値を波高比率で補正して破線で示している.

まず, 図-16(a)に示すのは, Case1-1 の圧力分布である. Case3-1 と比較して橋長方向に若干のばらつきが見られるが, $p_1\sim p_5$ 平均値は, Case3-1 は 1152[Pa]に対し, Case1-1 は 1095[Pa]と 5%程度の差異となり, 概ね等しい値となる.

次に図-16(b)に示すのは, Case4-1 の圧力分布である. 圧力分布の形は Case3-1 に比べ, Case4-1 の方が一回り小さい形をしているが, $p_1\sim p_5$ 平均値は, Case3-1 は 1152[Pa]に対し, Case4-1 は 1006[Pa]で 13%程度の差異である.

以上より, Case1-1 と Case3-1 では波高が増加した場合でも側面に作用する圧力は概ね同一である.

図-17 は, Case1-1 と Case3-1 両者の津波が桁模型に作用した際の波形状を示す. 同図は, 水槽側面に設置したハイスピードカメラで撮影した波面をトレースした模式図である.

まず, 同図(a)に示すのは Case1-1 において, 桁模型の床版下が浸水した時点での波形状図である. 同図(c)は図中[A]で示した範囲の拡大図を示す. 津波が桁模型を越流し, 桁側面に塞ぎ板があるため, 桁下を潜った水が床版下の各桁間にまで浸水していることがわかる. さらに[A]部を確認すると, 桁間には気泡等は発生せず, 水が浸水していることがわかる.

一方, 同図(b)に示すのは(a)と同様に版下に水が浸水した時点での波形状図である. 同図(d)は図中[B]で示した範

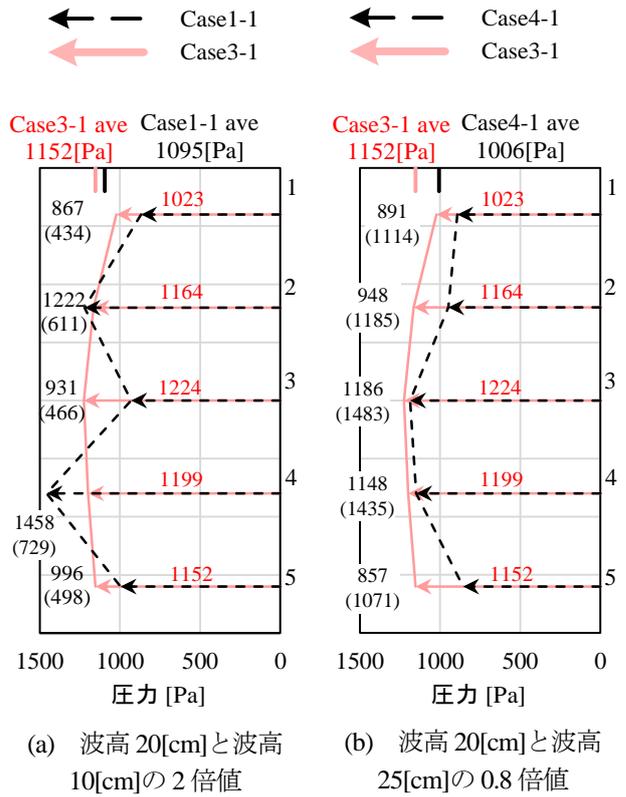


図-16 各ケースの側面圧力積分値

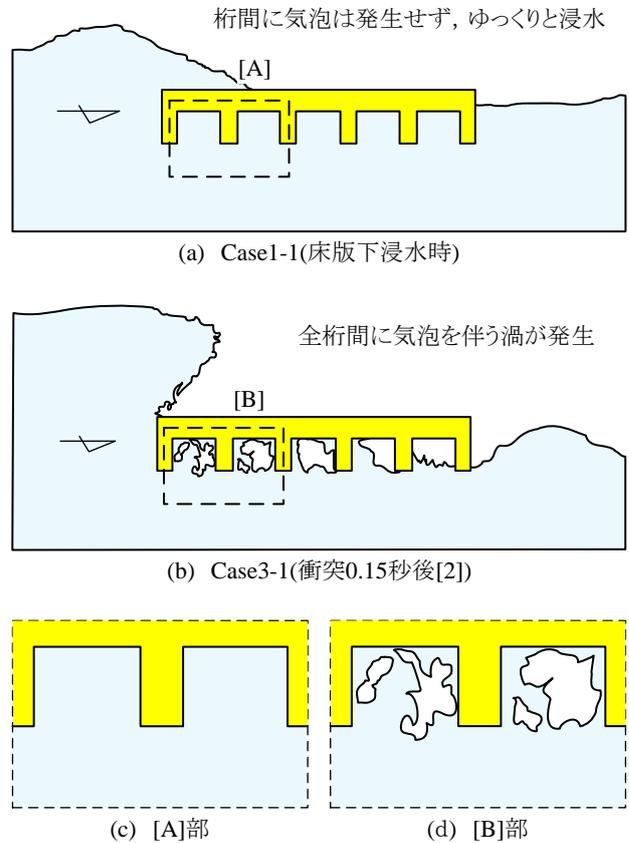


図-17 各波高ケースの津波作用状況

囲の拡大図を示す。津波が桁模型を越流し、床版下の各桁間にまで浸水していることがわかる。さらに[B]部を確認すると、桁間では気泡を伴って渦を巻いている様子が確認できる。

これらを比較すると、Case1-1、Case3-1 では桁模型に波が衝突してから床版下が浸水した時点での桁間が浸水する様子と渦発生の有無が異なる。このことから、渦の発生が顕著に確認された Case3-1 において、桁間の水の乱れの影響によって水平作用力の波形が乱れたと考えられる。

4. 桁形状をパラメータとした際の作用力の分析

本章では、Case3-1 の桁高 3.4[cm]を 1.0D とし、1.5D(5.1[cm]), 2.0D(6.8[cm])と 2 段階に桁高を変化させた。これらの桁高ケースをそれぞれ Case3-2、Case3-3 とし、各桁に、波高 20[cm]の孤立波を作用させて水平作用力を計測している。

本章では、桁高を変化させた場合の水平作用力の変化に加えて、各桁の桁側面に設置した 5 つの圧力計の計測結果から水平作用力と桁側面の圧力の関係を分析する。

4.1 桁高と水平作用力の関係

図-18 は、横軸を標準桁模型の桁高を基準とし各ケースの桁模型の桁高の比を、縦軸を標準桁模型より得られた水平作用力を基準とした場合の各ケースの桁模型に作用する水平作用力の比をとることで、水平作用力比と桁高比の関係を表している。同図より、桁高の増加に伴って線形的に水平作用力が増加することがわかる。水平作用力比(x)と桁高比(y)の関係は概ね $y=0.9x$ から $y=1.0x$ の間で表される。しかしながら、(桁高比 : 水平作用力比)が Case3-2 は(1.5 : 1.4), Case3-3 は(2.0 : 1.8)と水平作用力比が桁高比を下回る傾向が確認できる。この理由については次節で後述する。

4.2 桁高と水平作用力に関する考察

図-19 は、各桁高ケースにおいて時刻歴で水平作用力を示す。同図から、先ず各桁高ケースの水平作用力が発生する時間は、Case3-1 は 11.389[sec]から 11.860[sec]で 0.471[sec]、Case3-2 は 11.360[sec]から 11.844[sec]で 0.484[sec]、Case3-3 は 11.414[sec]から 11.922[sec]で 0.508[sec]となり、概ね同様であることがわかる。最大水平作用力は、Case3-1 の 19.4[N]に対して、Case3-2、Case3-3 はそれぞれ 25.7[N], 33.8[N]であり、これらの標準桁に対する最大水平作用力の比率は 1.32, 1.74 となる。この結果からも前述のように桁高が増加すると、最大水平作用力の比率が若干減少する傾向にあることがわかる。

一方、図-19 に示した時刻歴の波形の違いに着目すれば、Case3-1 は作用力が上昇して[a]に到達し、[b]へと一度減少し、再度上昇して[c]最大水平作用力を迎えるとい

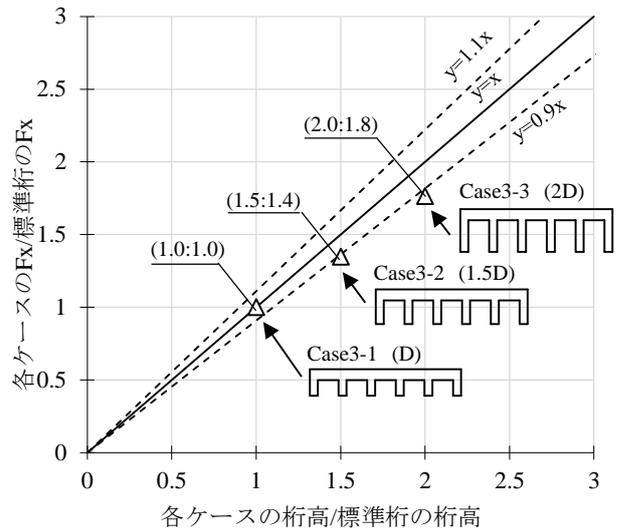


図-18 水平作用力比と桁高比

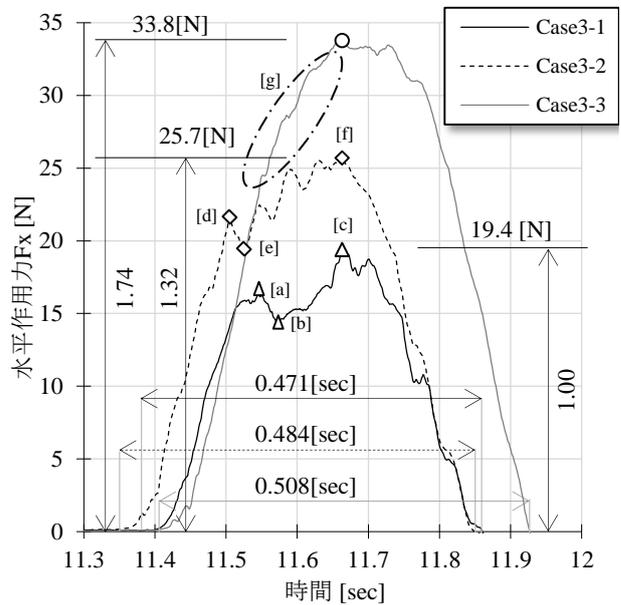


図-19 水平作用力時刻歴図と最大値の比率

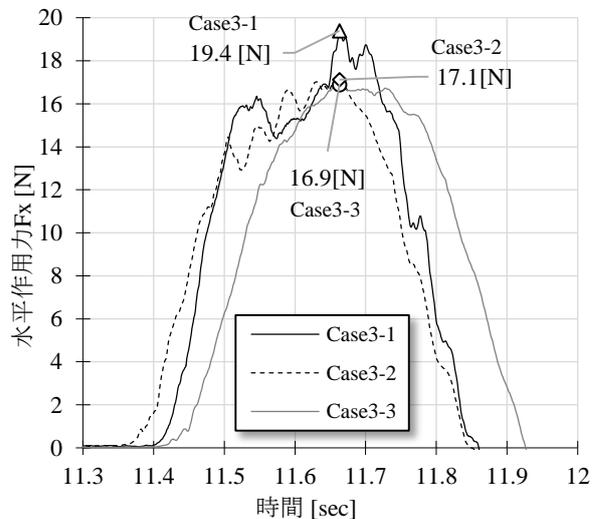


図-20 桁高比率で補正した水平作用力時刻歴

った大きな起伏がみられる。次に、Case3-2 では、一度上昇して[d]に到達後、[e]に減少し、以降、この起伏を3度繰り返して、[f]の最大値を迎えており、Case3-1 の波形に比して起伏を複数伴う乱れた波形を呈する。さらに、Case3-3 は[g]の範囲において、Case3-1、Case3-2 よりも小さな複数の起伏を伴うものの、ケース中では比較的滑らかな弧状の波形を呈する。このように、桁形状によって、水平作用力の波形が異なる現象が確認できる。

図-20 は、図-18 で前述した Case3-2、Case3-3 の水平作用力を桁高比率で補正した時刻歴図であり、両者の波形と最大値を比較している。なお、補正比率は、Case3-1 を1.0としてCase3-2、Case3-3 のそれぞれの水平作用力を1/1.5倍、1/2倍としている。

同図より、Case3-1 の19.4[N]に対して、補正したCase3-2、Case3-3 の最大水平作用力(比率)はそれぞれ17.1[N](0.88)、16.9[N](0.87)となり、前述のように桁高が増加すると、最大水平作用力がやや減少する傾向であるものの、Case3-2 とCase3-3 の最大水平作用力は非常に近い値を示す。この最大水平作用力の差異と前述の時刻歴波形が異なる現象の理由を考察するために桁側面に設置した圧力計の結果と桁横で撮影した動画に基づく波形状を用いた分析を行う。

図-21 は、水平作用力が最大となる時点の桁側面に作用する圧力分布を示す。

まず、図-21(a)に示すのは、Case3-2 の圧力分布である。橋長方向に概ね等しく分布し、p1~5 平均値は、Case3-1 は1152[Pa]に対し、Case3-2 は1187[Pa]と3%大きくなる程度であり、概ね等しい値となる。ここで、Case3-2 における桁側面を被圧面積とする圧力値の積分値は24.2[N]と算出され、分力計で計測された水平作用力25.7[N]と6%の差異でもって一致する。

次に図-21(b)に示すのは、同様にCase3-3 の圧力分布を示す。橋長方向に若干ばらつきが見られるが、p1~5 平均値は、Case3-1 は1152[Pa]に対し、Case3-3 は1116[Pa]と4%程度の差異であり、概ね等しい値となる。ここで、Case3-3 における桁側面を被圧面積とする圧力値の積分値は30.4[N]と算出され、分力計で計測された水平作用力33.8[N]と10%の差異となる。

以上より、桁高が増加した場合でも側面に作用する圧力は同一であることに加え、Case3-2 とCase3-3 における圧力の積分値と水平作用力の差異は、Case3-1 程大きくないことがわかる。

図-22 は、Case3-1 とCase3-3 両者の津波が桁模型に作用した際の波形状を示す。

まず、同図(a)に示すのはCase3-1 の水平作用力最大時の波形状図である。同図(c)は図中[A]の拡大図である。津波が桁模型を越流し、床版下まで浸水している様子がわかる。さらに、[A]部を確認すると、桁間には気泡を伴って渦が発生しているのが確認できる。

一方、同図(b)に示すのは、Case3-3 の波形状図であり、

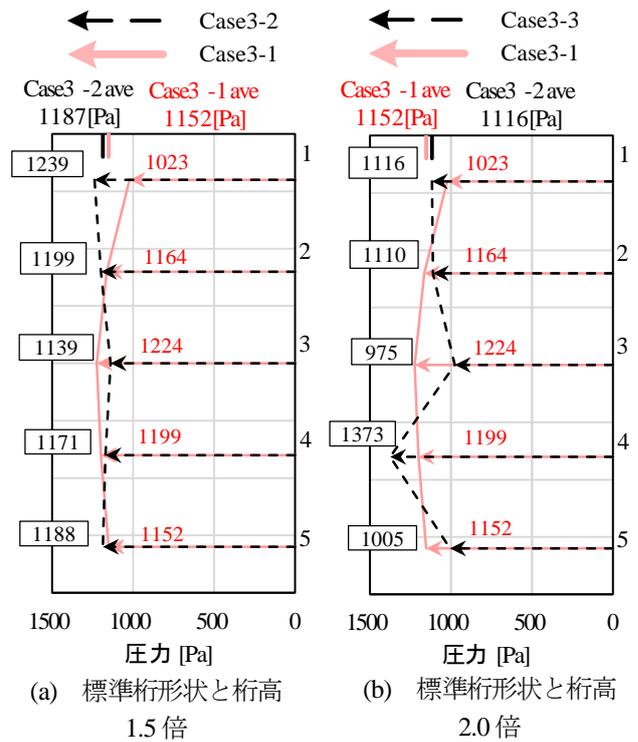


図-21 各ケースの側面圧力積分値

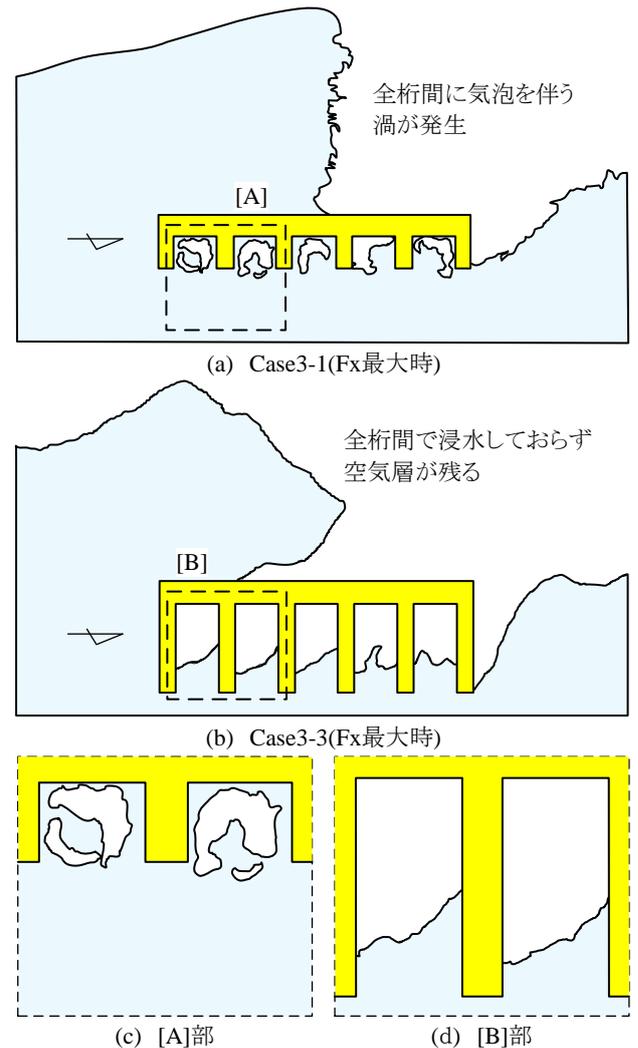


図-22 各桁高ケースの津波作用状況

同図(d)は図中[B]の拡大図である。なお、時間点は、前ケースと同様に水平作用力最大時である。床版下に着目すると、各桁は完全に浸水しておらず、さらに、[B]を確認すると、渦は発生せず、空気層が残る様子が確認できる。

これらを比較すると、Case3-3 では、桁間に入り込む水の量が少ないことが確認された。このことから、内桁側面に作用する作用力が比較的小さくなり、分力計より得られた水平作用力の発生量が桁高の割に若干少なかったと考えられる。

また、Case3-1 ではCase3-3 よりも水平作用力最大時点において、桁間の渦の発生が顕著である。このことから、水平作用力の波形の乱れに関係していると考えられる。

しかしながら、桁側面に生じる圧力を被圧面積で積分した値は、計測した水平作用力と大きくとも2割程度の差異である。

以上より、水平作用力は桁側面の面積の関数であることに加え、桁高を変化させることによって桁側面の被圧面積が変化するため、水平作用力が変化する。

5. まとめ

陸上を遡上する津波先端に見られる段波状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、水平作用力に影響を及ぼすと考えられる波高、桁側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) 桁高 3.4[cm]、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、桁高を変化させた2ケースの合計6ケースのパラメータ実験を実施した。桁高 3.4[cm]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結果から、最大水平流速二乗と最大水平作用力は決定係数 $R^2=0.971$ と高い相関性をもって直線比例する。それに加えて、最大波高と最大水平作用力も決定係数 $R^2=0.993$ と高い相関性をもって直線比例する。各波高ケースの最大水平作用力を波高 20[cm]に対する波高比率で補正した値は波高 20[cm]の最大水平作用力 19.4[N]に概ね一致するため、水平作用力は波高の関数であるといえる。
- 2) 桁高 3.4[cm]の桁模型に波高 20[cm]の孤立波が作用し

た場合、水平作用力を桁側面に設置した圧力計と桁横に設置した流速計を用いて分析した結果、孤立波が作用する桁に生じる水平作用力は、桁側面に生じる圧力で表すことができる。詳述すると、分力計から得た最大水平作用力は 19.4[N]に対し、津波作用側の桁側面に概ね一定で生じる圧力を面積で積分した値は 15.5[N]と約 80%を占める。さらに圧力と桁位置の水平流速の時刻歴比較から、それぞれの最大値の発生時刻は概ね一致する。

- 3) 標準桁に対して桁高を 1.5 倍、2.0 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、全体的に桁高比(x)と水平作用力比(y)は $y=0.9x$ の関係で直線比例となる。このことから、桁高の増加率と概ね同様の比率で水平作用力も増加するものの、その差異は 10%程度である。波形形状図を比較すると、桁高が増加するにつれて桁間に入り込む水の量が少なくなることが確認できる。従って、10%の差異は桁間に入り込む水の量の変化によって内桁側面に作用する力が減少したために生じたと考えられる。

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.
- 5) 合田良實; 耐波工学, 鹿島出版会, 2008.6.
- 6) 合田良實; 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol.12, No.3, pp.31-69, 1973.
(2014年9月24日受付)
(2015年2月1日受理)