

# 論文 孤立波性状の津波によって橋梁へ作用する水平波力の検討

田中 将登<sup>\*1</sup>・幸左 賢二<sup>\*2</sup>・佐藤 崇<sup>\*3</sup>・佐々木達生<sup>\*4</sup>

**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、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。水平波力に着目すると、最大水平波力時の桁側面に設置した波圧計の積分値が分力計から得られた水平波力と概ね等しい値であり、最大値の発生時刻も同時であることから、水平波力は桁側面に受ける圧力が支配的である。また、波高を変化させた実験結果より、波高の増加に伴い水平波力も比例し、水平波力や波圧に影響を及ぼす流速も同様に波高に比例していることから、水平波力は津波の波高と相関性が高い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, 水平波力

## 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、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<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>や荒木ら<sup>3)</sup>をはじめとする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、水平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、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。実験の全体図を図-1に示す。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、模型位置での波高計計測値は、再現性が良く指令値通り

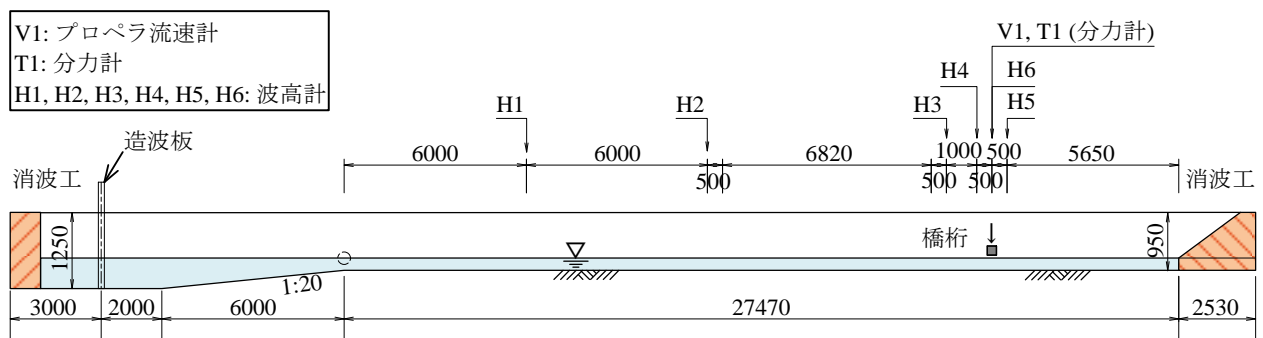


図-1 実験装置概略図

\*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(株) 長大 福岡構造技術部 (正会員)

\*4 大日本コンサルタント(株) 技術統括部 (正会員)

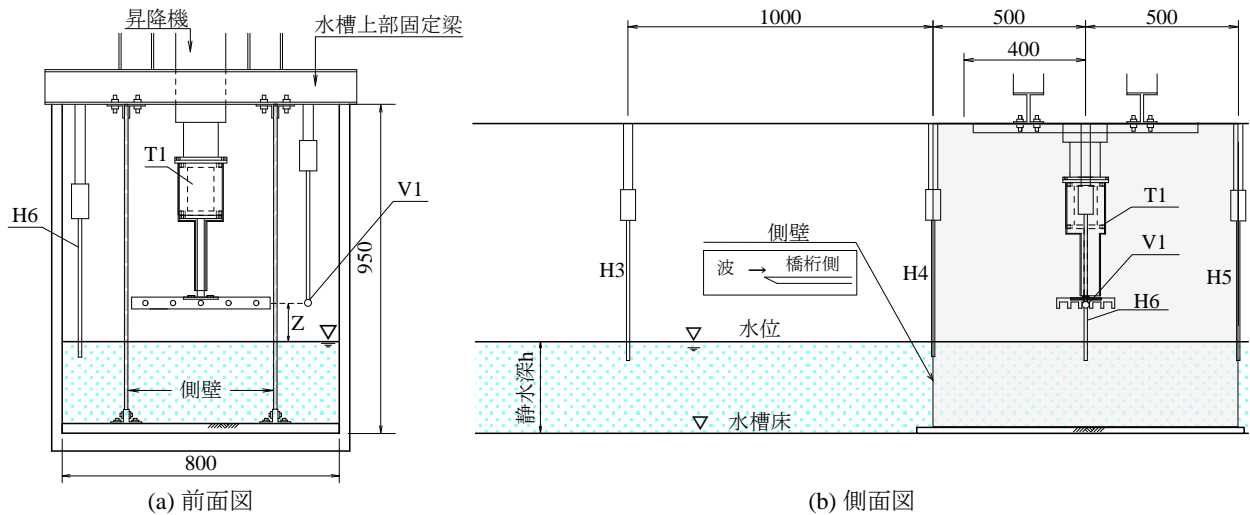


図-2 計測機器設置位置図

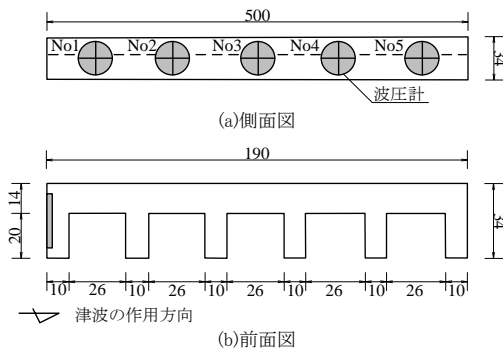


図-3 桁模型形状

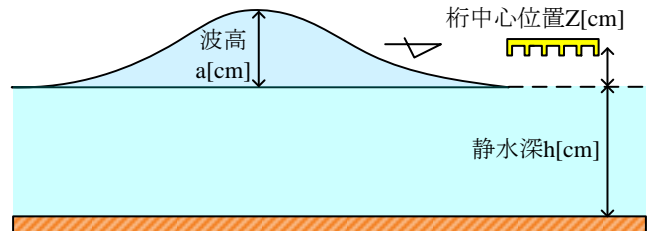


図-4 実験パラメータ

の波高が得られることを確認した。

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60cm、幅100cmであり、橋桁模型が側壁の中心となるように設置した。

橋梁模型の対象は、著者らが行った孤立波性状の津波に対する桁への作用力実験<sup>4)</sup>で用いた模型と同様とし、実被害を受けたインドネシアの橋梁とした。桁模型図を図-3に示す。縮尺は1/50で、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）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が可能なためである。

## 2.2 計測方法

計測器は孤立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、津波の流速を計測する流速計、波形状をとらえる波高計を図-2に示す位置に設置した。

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980N

表-1 実験パラメータ一覧

静水深h [cm]	波高a [cm]	桁中心位置Z [cm]	Z/a
35	10	5	0.5
	15	7.5	
	20	10	
	25	12.5	

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。

図中のV1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、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、側壁の隣の橋桁模型位置に設置した。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波高計は上述のV1と同様の理由で側壁の隣に設置した。

水平作用力の分析用として、図-3に示すように桁の側面に波圧計を5つ設置した。

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1/1000sとした。

### 2.3 実験パラメータ

図-4に本実験のパラメータの模式図、表-1に実験パラメータ一覧を示す。表中に示すように、静水深が35cmで、波高10, 15, 20, 25cmとした。いずれの波においても、桁中心位置Zは、波高aの半分の高さ( $Z/a=0.5$ )に設定した。これは、過年度の著者らの水理実験<sup>4)</sup>において、 $Z/a=0.5$ の位置で水平波力が最大となることが確認されたためである。

## 3. 代表的なケースの実験結果

### 3.1 津波作用状況

ここでは、静水深35cm、波高20cm、桁中心位置を水面から10cmとした計測結果を代表例として示す。

図-5は、H1, H2, H6波高計の時刻歴波形である。波高の計測結果は、流速計および分力計の波形に比べて電気ノイズがほとんど生じていないため、1/1000秒間隔で測定されたデータをそのまま用いている。

同図から一山孤立波が造波から桁模型位置まで波高が若干の増幅が見られるものの、乱れることなく進んでいる様子が分かり、指令波高20cmに対し、桁模型位置のH6波高計で波高20.3cmを記録した。再現性を確認するため、同一条件での造波を3回行い、最大波高は造波1回目20.3cm、2回目20.3cm、3回目20.2cmと再現性の良いことを確認した。また、H1, H2, H6波高計のピークの発生時刻とそれぞれの波高計の位置の間隔より、波速を算出した。H1, H2波高計から算出した波速 $c_1$ は、232cm/sであり、H2, H6波高計から算出した波速 $c_2$ は、228cm/sであった。このことより、波速は造波してから、ほぼ変化することなく桁模型に到達している。

### 3.2 作用力と波高の関係

図-6は、横軸を、造波開始を0秒とする計測時間とし、桁模型に設置している分力計から測定された水平波力と鉛直波力、H6波高計の時刻歴波形を示す。図中の水平波力と鉛直波力の時刻歴波形は、既往実験と同様の考え<sup>4)</sup>に基づき1/10秒間の移動平均処理を行っている。まず、分力計から得られた水平波力の最大値は津波が桁模型に作用してから約0.30s後に19.1Nの値を示した。その後、徐々に0地点に戻っている。H6波高は12.300sで最大となり、若干のずれがあるが、ほぼ同時刻で水平波力も最大となる。上向きの鉛直波力は、波高と水平波力が上昇する過程で最大値を迎えるが、同時刻から水平波力の増加量は減少する。このことから鉛直波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波力も最大値を迎えるため、波高と水平波力は密接な関係にあると考えられる。

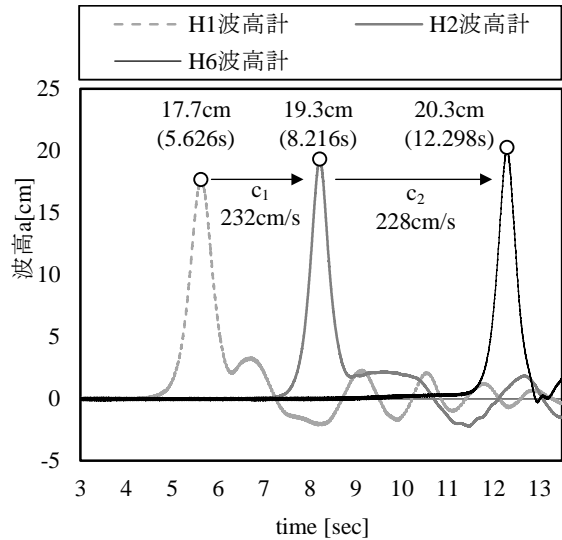


図-5 波高時刻歴

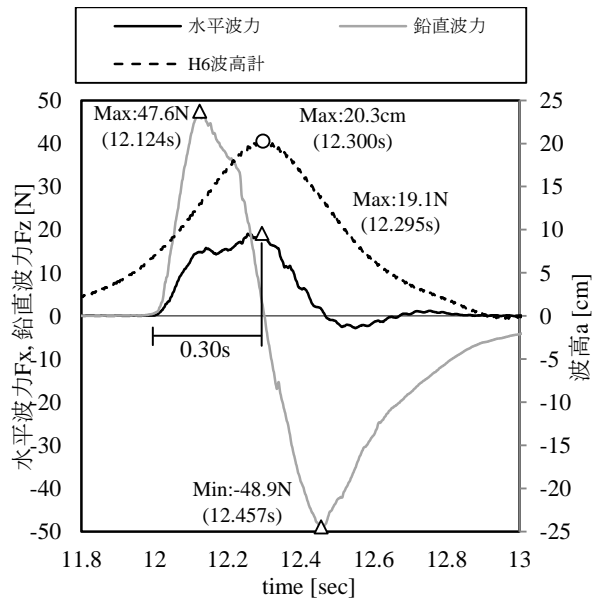


図-6 作用力と波高の関係

### 3.3 作用力と波圧、水平流速の関係

図-7は、桁模型側面に設置した5つの波圧計の平均値が最大となる時刻の橋長方向の波圧分布である。図中の波圧分布より、橋長方向に波圧はほぼ等しく作用しており、おおよそ3次元的な乱れが生じていない。このことから、本論文では、波圧計は5つの波圧の平均を用いた。

図-8は、横軸を計測時間とし、縦軸に桁に作用する水平波力と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流速、上述した桁側面の平均波圧に側面積 $A(136\text{cm}^2)$ を乗じて算出した算出水平波力の時刻歴波形である。

同図から、水平波力最大時と算出水平波力最大時は若干のずれがあるが、ほぼ同時刻で発生していることが確認できる。算出水平波力の最大値は15.1Nであるのに対し

て、最大水平波力は19.1Nと2割程度の差が生じ、算出水平波力が水平波力の時刻歴波形をよく再現できていないが、これは、桁背面の負圧等による影響を側面の波圧計ではとらえていないことが要因として考えられる。また、水平波力と流速の関係は、V1流速計は立ち上がりから、約0.30秒後に最大流速97.0cm/sが発生し、対して、水平波力も立ち上がりから若干のずれがあるが、約0.30秒後に最大水平波力19.1Nが発生する。

これらの結果より、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桁側面の圧力が、水平波力の80%程度を占め、最大値が概ね同時刻であることから、水平波力は桁模型側面に作用する圧力に支配されていると考えられる。また、水平波力、および流速の時間変化は、立ち上がりから最大値発生時刻まで対応している。このことから、水平波力は桁模型横の流速に依存していると考えられる。

### 3.4 津波作用状況

図-9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。津波が桁下に衝突した時刻を0秒とし、(a)衝突0.27秒後の時刻、(b)水平波力が最大となる時刻、(c)衝突0.33秒後の時刻である。

まず、図中(a)は孤立波が橋桁模型に衝突した0.27秒後の波形状である。津波が桁模型側面に衝突することで、波の進行が抑えられ、桁模型の右斜め上に越流するとともに、波の先端の方向が右上方向に上がっている。

次に、図中(b)は孤立波が橋桁模型に衝突した0.30秒後の波形状である。この時刻は、水平波力が最大となる時刻である。津波が桁模型に衝突することで越流した波の先端の方向が、(a)の時刻の波形状と比較すると桁模型真上の位置において水平方向に卓越している。

最後に、図中(c)は孤立波が橋桁模型に衝突した0.33秒後の波形状である。(b)の時刻の波形状と比較して、波の先端が桁模型右下方向に下がっている。この越流した波の先端の移動方向は、水平波力が最大となるときは、桁模型の上を通過する波は水平方向に卓越するとともに、桁模型に衝突することで越流した波の波高が、最高地点に到達していた。桁上側に越流した波が最も大きくなるということは、進行してきた波に最も桁模型が抵抗していたためであり、その際に水平波力が最大となることと整合がとれる。

### 4. 波高の変化に伴う水平波力の変化

2.3節で述べた通り、本実験では10cmから25cmまで5cm毎に変化させた4つの波高ケースを実施している。本章では、孤立波の波高の違いが、水平波力に及ぼす影響について考察する。

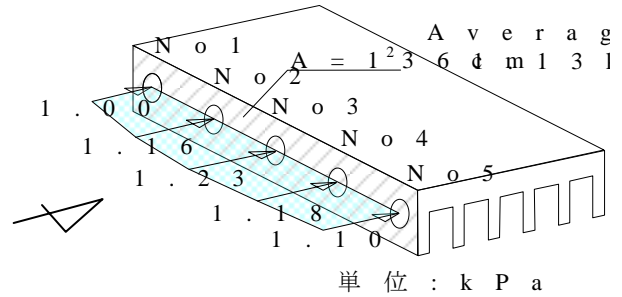


図-7 波圧分布(平均波圧最大時)

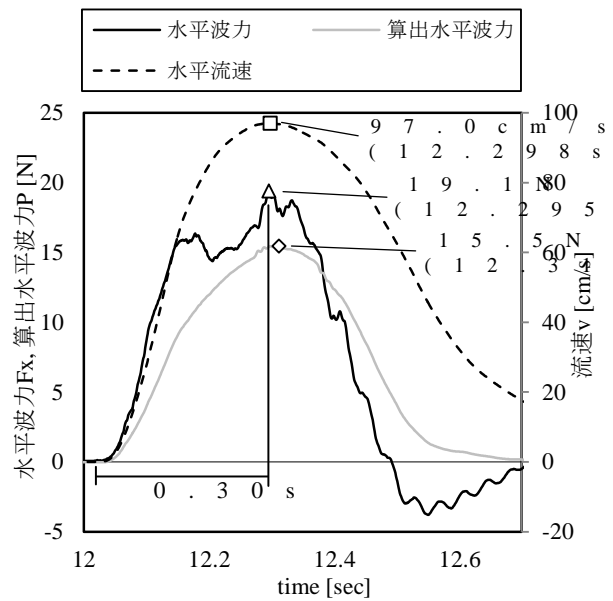


図-8 Fx, 算出 Fx, V1 流速計の時刻歴波形

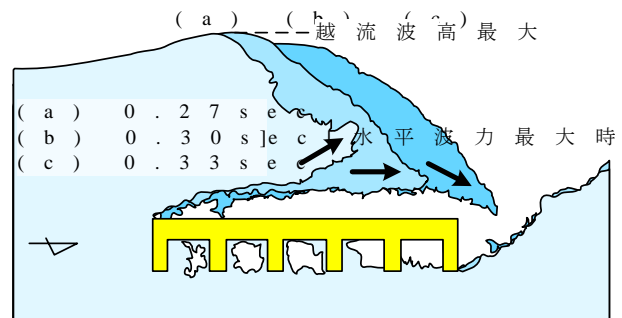


図-9 水平波力作用模式図

### 4.1 水平波力と波高の関係

図-10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波力をプロットした図である。図は、横軸に分力計から得られた桁に作用する水平波力を、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、その近似直線を示す。同図より、波高の増加に伴って、水平波力は概ね比例して

増加することが分かる。ここで、代表例として、波高10cmと20cmのケースに着目して考察する。

まず、図-10において、波高10cmと20cmでは波高の増分が1.9倍であるのに対して、水平波力の増分は2.2倍となる。図-11には、波高10cmと波高20cmそれぞれのケースにおける桁模型側面に設置した5つの波圧計を平均した時刻歴波形と、水平波力の時刻歴波形を示す。なお、比較しやすいように波高10cmと20cm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20cmのケースでは、水平波力と波圧計の時刻歴波形は、立ち上がりから、最大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、水平波力と波圧計の時刻歴波形は立ち上がりから最大を示す時刻がほぼ等しい。

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

#### 4.2 流速と波高の関係

図-12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流速の3回分の平均値をプロットした図である。併せて、その近似直線を示す。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、それに比例して流速も大きくなっていることがわかる。

#### 4.3 水平波力作用模式図

図-13に、波高10cmと20cmそれぞれのケースにおける津波作用模式図を示す。まず、図-13(1)に、波高10cmのケースにおける、(a)桁下衝突後0.35秒後の時刻、(b)水平波力が最大となる0.47秒後の時刻の波形状を示した。(a)の時刻は、津波が桁模型側面に衝突することで、波の進行が抑えられ、桁模型側面の真上に波が越流している。(b)の時刻では、更に波が進行し、水平波力が最大となり、桁模型に衝突することで越流した側壁内の波の波高が、最大となる時刻と一致する。

同様に、図-13(2)に示す波高20cmのケースにおける、(b)水平波力最大時の波形状でも、越流した波は、桁模型上で最大となっている。波高10cmと20cm両ケースともこの越流した波高の最大を示す時刻と水平波力が最大を示す時刻が同じであることから、波高10cmのケースも波高20cmのケースと同様に、桁側面の影響を最も受けていると考えられる。

図-14では、この章における波高の違いに伴う水平波力および波圧、流速の計測結果の一覧を示す。同図には、波高10cmのケースに対する波高20cmのケースの計測値

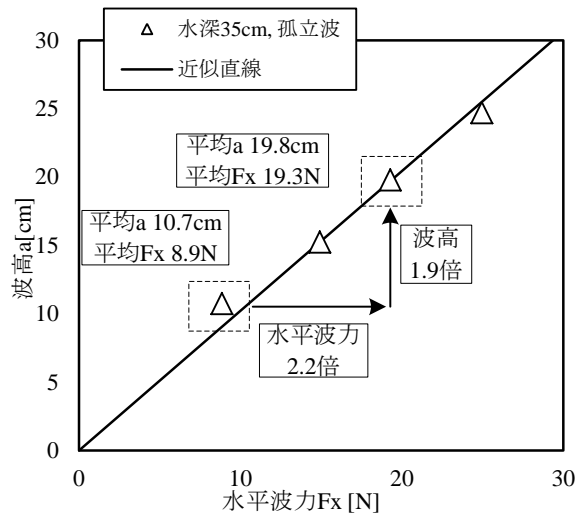


図-10 水平波力と波高の比較図

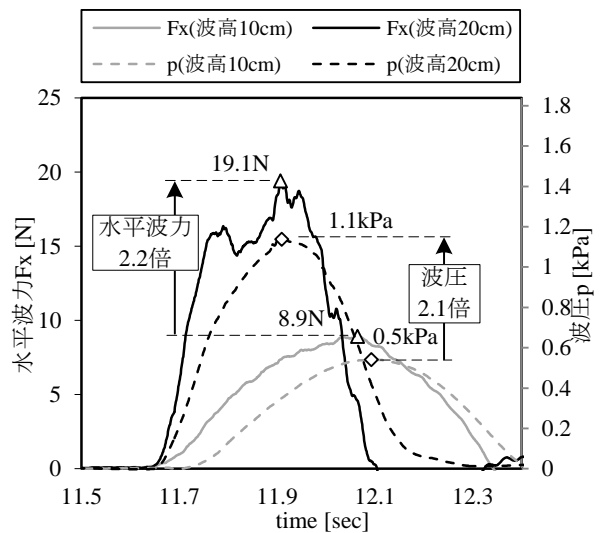


図-11 Fx, 波圧時刻歴波形 (a10cm, 20cm)

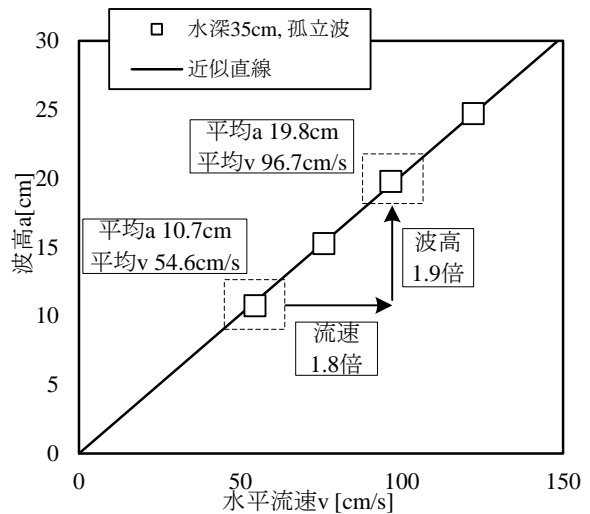


図-12 水平流速と波高の比較図

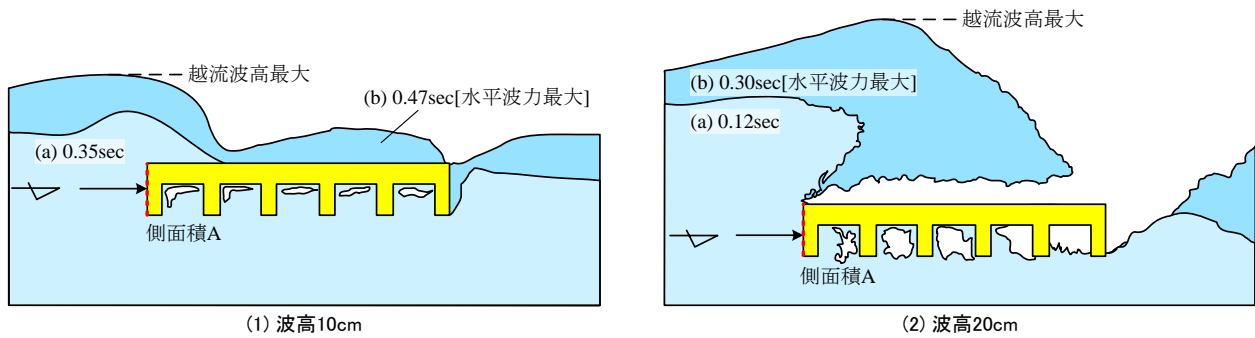


図-13 波高 10, 20cm の水平波力作用模式図

の比率も併せて示す。なお、図中に示すように、この波高は桁側面を通過する乱れのない波高であり、前述した側壁内の桁模型に衝突した波の波高ではない。図に示すように、波高が 1.9 倍になると、水平波力は 2.2 倍、桁側面の波圧は 2.2 倍、流速は 1.8 倍になることが今回の研究で確認され、水平波力や波圧に影響のある流速は、桁に作用する津波の波高に比例していることが確認された。このことから、水平波力は津波の波高と相関性は高いと考えられる。

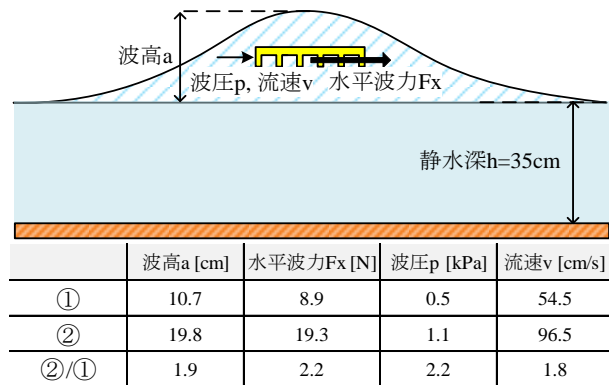


図-14 各波高ケースの計測結果一覧

## 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を評価するために、41m の水槽と造波装置を用いて水理実験を実施し、水平波力および波高、波圧、流速の関係性の整理を行った。その結果、本研究より得られた知見を以下に述べる。

- (1) 波高を 10cm から 25cm に変化させた 4 つの実験結果から、波高の増加に伴い水平波力も比例し、水平波力や波圧に影響を及ぼす流速も同様に波高に比例している。  
静水深 35cm、波高 20cm のケースにおいて、水平波力と、桁模型横に設置した V1 流速計から得られた流速の時間変化を比較した。その結果、水平波力、および流速の時間変化は、立ち上がりから最大値発生時刻まで対応している。このことから、水平波力は桁模型横の流速に依存していると考えられる。
- (2) 静水深 35cm、波高 20cm のケースにおいて、桁模型側面に設置した波圧計に側面積を乗じて算出した水平波力は、分力計から得られた水平波力の 80% 程

度となり、また、最大値発生時刻が同じであることから、水平波力は桁模型側面に作用する圧力に支配されていると考えられる。

## 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特性, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.66, No.1, pp.796-800, 2010.
- 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.