

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

Experimental examination concerning the tsunami wave force to bridge by difference of the wave shape

二井伸一*, 幸左賢二**, 庄司学***, 木村吉郎****

Shinichi Nii, Kenji Kosa, Gaku Shoji, Kichiro Kimura

*株式会社ウエスコ 岡山支社設計部構造設計課 (〒700-0033 岡山市島田本町 2-5-35)

**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)

***工博 筑波大学大学院講師 システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

****Ph.D. 九州工業大学准教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

To evaluate the wave force to the bridge by the tsunami wave, the experiment was conducted. We paid attention to the shape of the wave and measured the wave force in the experiment. There were two kinds of shape of the wave, and the tendencies to the wave force could be divided into two. In the case of broken wave, the horizontal wave force was bigger than the uplift force. In the case of unbroken wave, the horizontal wave force was smaller than the uplift force. And the horizontal wave force was 2.6 times as large as the hydrostatic pressure, and the uplift force was 0.5 times as large as the hydrostatic pressure in the maximum.

Key Words: tsunami, bridge, horizontal wave force, uplift force

キーワード：津波，橋梁，水平波力，上揚力

1. はじめに

2004 年 12 月 26 日，インドネシアスマトラ島の北西部を襲った津波により，建物だけでなく，道路盛土，橋梁等も被害に遭った．そのなかで，同島北西海岸の道路 250km の区間に存在する橋梁 168 基中 81 基の橋梁上部工(以後，桁と呼ぶ．)が流出し，甚大な被害を受けた¹⁾．

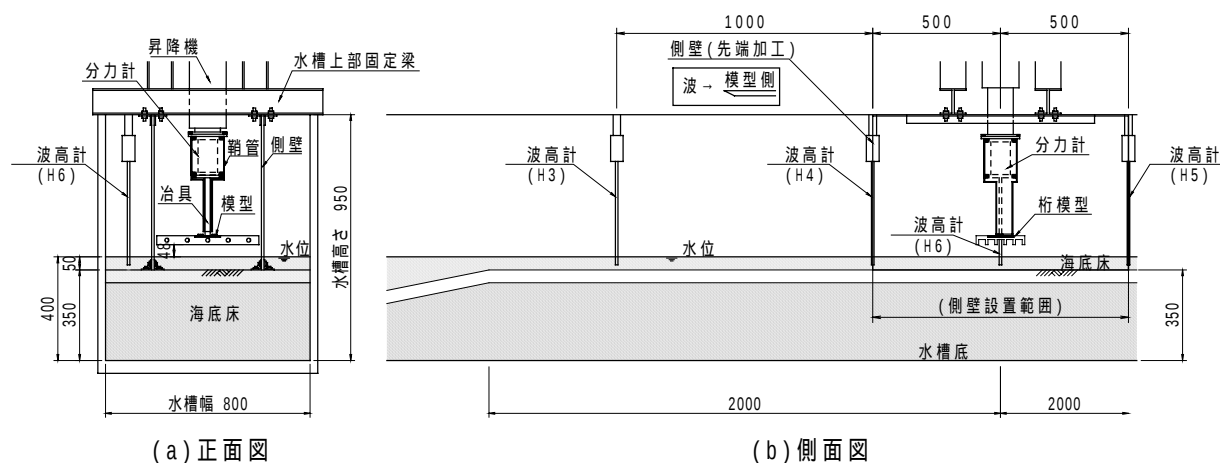
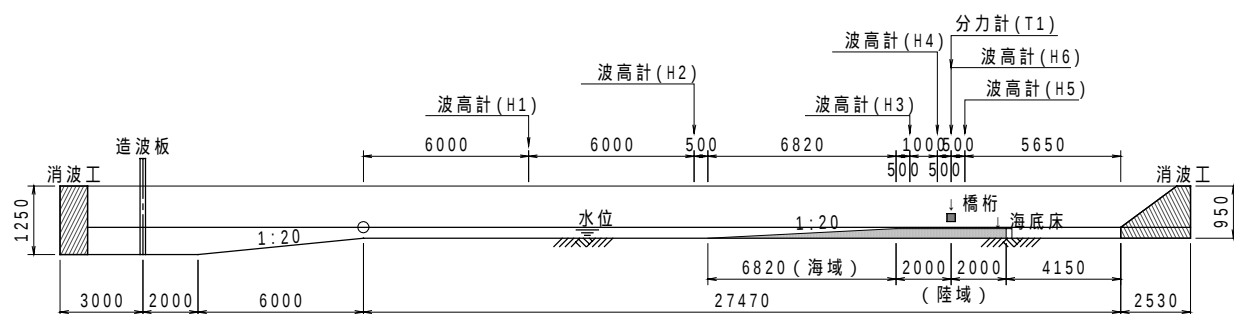
このような経緯により，東海・東南海地震による津波被害が懸念される我が国において，道路構造物の被害に関する，実験，数値シミュレーション解析等の研究が進行しつつある．このうち筆者らは，スマトラ島の橋梁の被害分析より，桁の流出被害が多いことに着目し，桁への津波作用力を検証する模型実験を実施している²⁾．

津波実験の場合，造波する波の性質が留意点の一つになる．津波は伝播速度や地形の形状等で色々な形に変化し，その形状や特性を定義することは非常に困難である．そのため，様々な性質を持つ津波を想定する必要がある．構造物にとっては津波の形状についての判断も必要となる．既往の実験検証によると，波形状としては段波形状の波を造波したもの^{3), 4)}，長周期の正弦波的な波を造波したもの^{5), 6)}がある．このうち，筆者らが着目したのは，津波作用力が最も大きくなる可能性のある津波の

波目であり，それを模擬した一山孤立波と呼ぶ正弦波に近い波を用いて実験を行った．詳しい内容は後述するが，本実験では，砕波せずに一山形状を保ったまま桁に作用するケース，砕波して水しぶきを伴いながら桁に作用するケースの 2 種類の波形状を変化させた実験を実施した．

これらの波形状を踏まえ，桁模型に作用する水平力(以後，水平波力と呼ぶ．)と鉛直力(以後，揚力と呼ぶ．)を分力計により計測を行った．揚力で着目したのは，桁を浮かせる方向に作用する上揚力である．直壁構造物の場合，水平波力に対して照査をすれば良いと考えられる．しかし，桁の場合は上下に空間があるため，両方に水が浸入し，水平波力に加え揚力の影響も考える必要がある．桁の上面に水が載る場合，桁は下向きに押され，上部工は流出し難いものと考えられるが，その逆である上揚力は，桁の流出に寄与すると考えられ，十分な検討が必要である．

以上より，本研究では，波の形状に着目した作用力特性の整理とその考察を行った．実験パラメータは，静水面から桁下面の距離(以後，桁下高と呼ぶ．)と砕波の有無で区分した波の形状である．



2. 実験概要

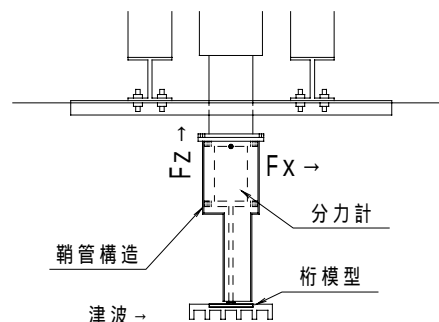
2.1 水路，模型及び計測方法

使用する長水路は、長さ 41m、幅 80cm、模型設置位置での水路深さ 120cm 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。図中左端の造波装置は、スライド式造波板である。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。水槽内に水のみを貯め、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の波高が得られることを確認した。

橋梁模型の対象は、実被害を受けたインドネシアの橋梁とした。縮尺は1/50で、模型の橋長は40cm、幅員19cm、構造高3.4cm（実橋の橋長は19.1m、幅員10.2m、構造高1.7m）とした。幅員、橋長等は、日本にも多く点在する単径間の橋梁に類似する形状である。

模型の設置位置近傍に、海底地形を模擬した海底床を設置した。海底床は、沖側に 1/20 勾配の斜面を有する海域と、水槽底からの高さ 35cm で全長 4m (模型設置中心位置より前後 2m) の水平区間の陸域で構成した。

模型位置付近の設置状況を図-2 に示す．図中左は正面図で右は側面図である．本実験の特徴として，橋梁模型の両端に側壁を設けたことが挙げられる．設置の意図は，本対象橋梁は単純橋で本来なら両端に橋台を構築すべきであるが，橋台の影響による3次元的な波の乱れを排除し，桁のみに作用する力の抽出に留意したためである．また，側壁先端部分は鋭角にカットし，波と側壁



の衝突による波の乱れを緩和する処置を行った。

計測器は、波高計を 6 基使用した。H1 (図 - 1 中の) 及び H2 (図 - 1 中の) 波高計は、指令波高との差異の検証用である。H3 (図 - 2 中の)、H4 (図 - 2 中の) の波高計は、海底床の影響で変化する波高の検証に使用した。H5 (図 - 2 中の) 波高計は、衝突直後の波高変化の検証用に使用した。H6 波高計 (図 - 2 中の) は、側壁の隣で、図 - 2 中の側面図に示すように橋梁模型の中心位置に設置した。側壁の隣に設置することで、模型への衝突による乱れのない、桁中心位置を通過する波高を得ることができる。後述の実験結果では、この波高による整理を行った。また、分力計は、水平波力 (F_x)、揚力 (F_z) と水平波力に対するモーメント (M_y) が計測できる 3 分力計で、仕様規格は 980N である。図 - 3 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。なお、事前に治具と分力計の剛性検証を行い、固有周期が 30Hz 程度であることを確認した。計測のサンプリング周期は全て 1/1000s とした。

2.2 実験パラメータ

図 - 4 に本実験パラメータの模式図を示す。パラメータは、静水面から桁下までの距離を示す桁下高、海底床上面から静水面までの高さを示す静水深である。また、事前の造波試験の結果、指令波高と静水面の関係で砕波する波としない波が得られた。これを波形状の違いとして区分し実験条件に加えた。

上記 2 つのパラメータを設定した意図を記す。本実験に使用する波は孤立波と呼ばれ、基本的な形状は凸型である。波の頂点部分に桁が衝突する場合と、峰の部分が衝突する場合では、水平波力、上揚力の各大きさとその比が異なると考えられる。そこで、造波する波高に応じ、上部工が静水面以下で水中にある状態から波の頂点付近にある状態まで 1cm ピッチで設定した。

次に、波の形状について記す。事前の造波試験より、砕波して桁位置を通過するものと砕波せずに通過する 2 種類の実験が可能であることを確認した。造波試験状況によれば、砕波がある波は海底床通過時に凸型形状が前傾になって崩れて、水しぶきと水泡が混在した波となり、砕波が無い場合は若干凸型形状が前傾するものの崩れることはなく、ほぼ形状を維持したまま模型設置箇所を通過した。前者は遡上する津波に対応し、内陸部にある橋梁の作用状況に近いと考えられる。また、後者は海岸際に作用する津波に対応し、海岸部の橋梁は、このような形状の波が作用する可能性がある。作用する津波形状を特定して対策を図ることは困難なことから、砕波の有無という 2 種類の波形状の違いを踏まえ、作用力特性を整理することとした。

静水深は造波試験から設定した。本実験の造波はパソコン制御であり、造波板への指令値は波高と初期水深である。指令値は自動計算され、造波板のスライドする速さが決定する。静水深を 5cm とした造波試験によると、全ての波が海底床上で砕波する結果となった。そこで、静水深を 15cm とし、指令波高値を抑えて造波すると砕波しない波が得られた。

以上を踏まえ、設定した実験条件を図 - 5 に示す。実験の標準ケースは、モデル橋梁の架橋条件を参考に設定した。モデル橋梁の河床から静水面までの距離は 2.5m で、その静水面から桁下までの距離は 2.4m であり、これを 1/50 スケールで換算すると、5cm、4.8cm となる。静水深 5cm の実験条件は現地の水深相当であり、この条件下で津波高を現地の推測値である 10m、実験スケールで 20cm の造波を目標とした。

前述の通り、静水深 5cm の実験条件では波が全て砕波

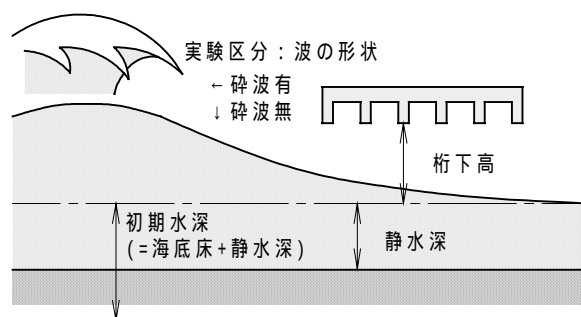


図 - 4 実験パラメータ

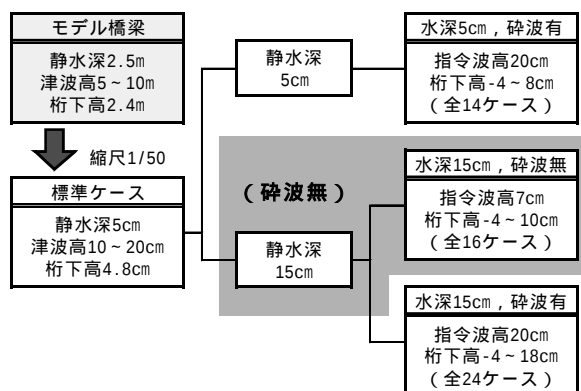


図 - 5 実験条件のフロー

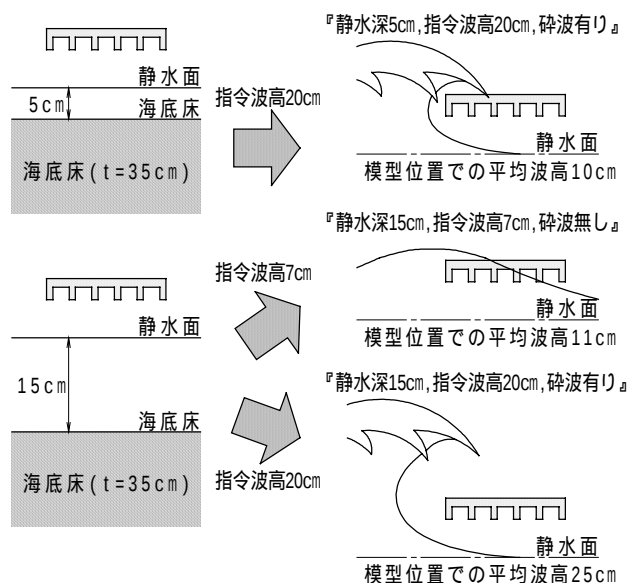


図 - 6 各実験条件の造波特性

する。そこで、静水深 15cm の実験条件を設定した。静水深 15cm の実験条件では砕波が有る場合と無い場合の 2 種類の造波が可能であり、これを実験条件上、区分した。この結果、静水深と津波条件の観点から実験条件を分類すると、図 - 5 中の右側に示す 3 条件となる。以後、各条件を『水深 5cm、指令波高 20cm、砕波有り』、『水深 15cm、指令波高 7cm、砕波無し』、『水深 15cm、指令波高 20cm、砕波有り』と呼び、各波高に応じて桁下高を変化させ、また、桁下高 4.8cm の実験ケースを加えた。

各条件の造波特性について、図 - 6 の模式図を用いて記す。『水深 5cm, 指令波高 20cm, 砕波有り』の実験条件は、現地の静水深相当で静水深 5cm, 指令波高を 20cm とする。造波した波は、海底床上で波の勢いが減衰し砕波が生じる。波が桁に到達するころには波高が 10cm 程度となる。『水深 15cm, 指令波高 7cm, 砕波無し』の実験条件は、静水深は 15cm で、指令波高は 7cm である。波は海底床上で崩れることなく、波高 11cm で凸型の一山孤立波形状を保った波が桁位置を通過する。『水深 15cm, 指令波高 20cm, 砕波有り』は、静水深は 15cm で、指令波高値は 20cm である。海底床上で若干波高が増加し、海底床を登りきったところで一山孤立波形状は崩れ、桁を巻き込むように砕波する。桁位置での平均波高は 25cm 程度である。

2.3 実験結果の評価方法

本実験は、津波が桁へ作用する瞬間的な力を把握することを目的に、計測サンプリング周期を 1/1000 秒とした。図 - 7 は、計測結果の一例である。横軸は計測開始からの時刻を示し、縦軸は水平波力を示す。図 - 7 によると、水平波力がピークを迎え、その後の 12 秒以降で周期 0.041 秒（振動数 24Hz）程度の振幅が確認できる。事前検討で、桁と分力計を繋ぐ治具の固有周期は 30Hz 程度であることを確認しており、1/1000 秒の計測値には治具の共振影響が含まれている可能性がある。そこで、データ処理を行い、共振影響を控除した。データ処理方法は、1/10 秒移動平均法を用いた。図 - 8 は、図 - 7 の実験ケースの水平波力を、1/10 秒で移動平均化し、横軸を計測時間としてプロットした図である。図 - 9 は同実験ケースの揚力を同様に処理したもので、水平波力及び上揚力の最大値は、無処理の実験計測値からほぼ半減した。以後、処理したデータにより考察を行う。

3. 水深 5cm で砕波する津波の実験

3.1 津波の作用状況（水深 5cm, 砕波有り）

実験概要の模式図を図 - 10 に示す。本実験条件は、静水深を 5cm, 指令波高を 20cm とした。造波した波は海底床上で砕波し、桁の位置での波高は約 10cm に減少する。孤立波の形状は完全に失っており、段波のような砕けた波が桁へ作用する。実験パラメータは桁下高であり、静水面から桁下までの距離を -4cm ~ 8cm まで 1cm ピッチで変化させた。本実験の造波はパソコン制御で行うものの、津波の状態は実験毎に微妙に異なる。そこで、実験結果を平均的に評価するため、1 つの桁下高に対し 3 ~ 5 回の計測を行った。本実験ケースの平均波高は 10.3cm で、実橋換算にすると 5.2m 程度の津波が作用したことになる。

桁下高を 4.8cm（静水面から桁中心までの高さ 6.5cm）とした標準ケースを例に津波の作用状況を整理する。津

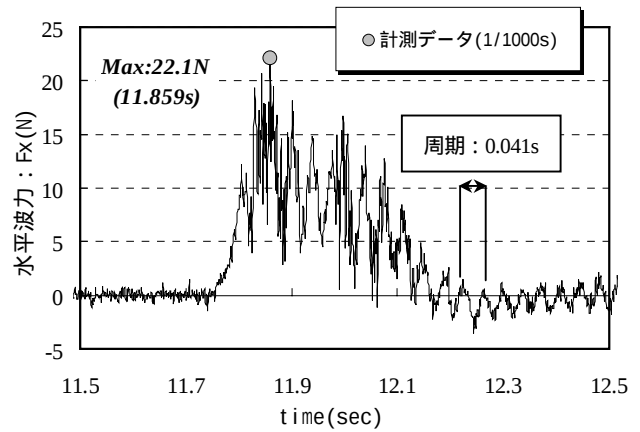


図 - 7 実験計測値の一例「水平波力」

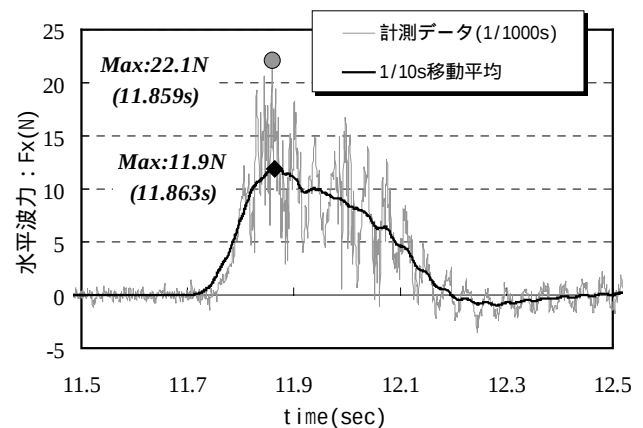


図 - 8 移動平均によるデータ処理後の水平波力

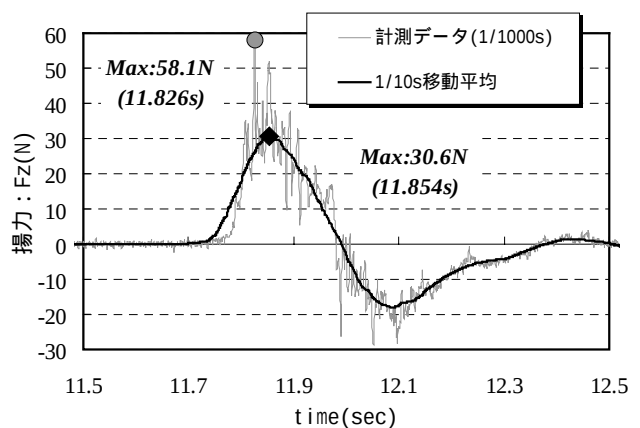


図 - 9 移動平滑化によるデータ処理後の揚力

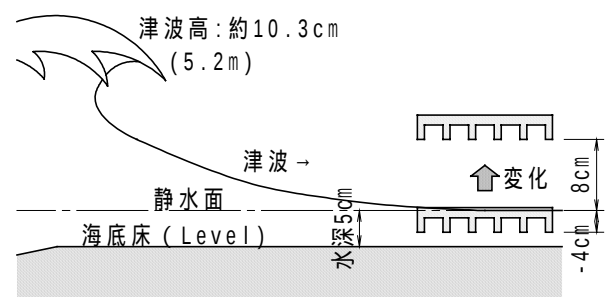


図 - 10 実験模式図（水深 5cm, 砕波有り）

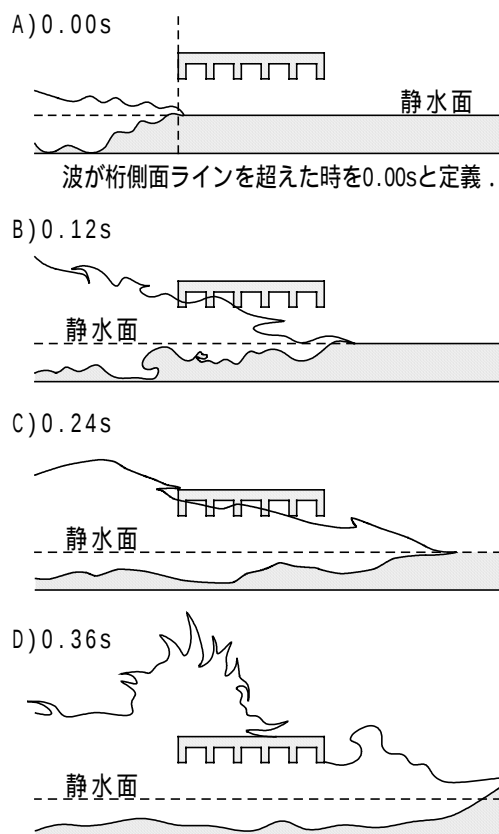


図 - 11 実験状況模式図（水深 5cm，砕波有り）

波が作用する開始時間 0.00 秒を桁下に波が進入した時間とし、以後、0.12 秒間毎の状況変化を図 - 11 の模式図に示す。

0.00 秒時では、波高が桁の位置まで達していないため、桁下を通り抜ける状況が確認できる。その後、0.12 秒後には、波高が少しずつ大きくなり、桁側面の下側から水の接触が始まる。さらに波高は大きくなり、0.24 秒後には、桁側面への波の接触が始まり、0.36 秒後には、桁側面に接触した波が大きく跳ね上がる様子が確認できる。波の作用方向は水平に近い状態であり、大きな上揚力が作用するとは考え難い。砕波した波が桁下へ進入し、桁を通過するまでの時間は 1.20 秒であった。フルードの相似則に従い、波の通過時間 1.20 秒を $\sqrt{50}$ 倍して実橋換算すると、本実験は 8.5 秒間の津波が作用したことになる。

3.2 作用力特性（水深 5cm，砕波有り）

図 - 12 に、図 - 11 の実験ケースの波高と水平波力と揚力の関係図を示す。横軸は、造波開始を 0 秒とする計測時間を示す。造波した波が砕波をしていることも影響し、波高計測値は滑らかな形状ではないが、11.4 ~ 11.6 秒間が波高のピーク時である。水平波力と上揚力の最大値は、波高の最大となる時刻とほぼ合致する。最大水平波力は 19.6N で最大上揚力は 12.0N である。

本実験ケースの場合、水平波力が上揚力を上回って作用することが分かる。揚力のみに着目すると、上揚力が

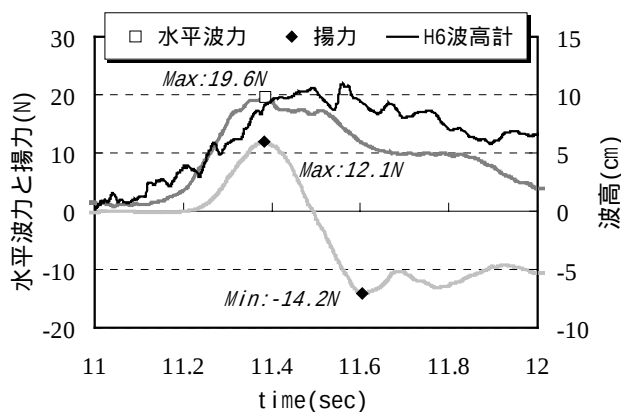


図 - 12 作用力と波高の関係（水深 5cm，砕波有り）

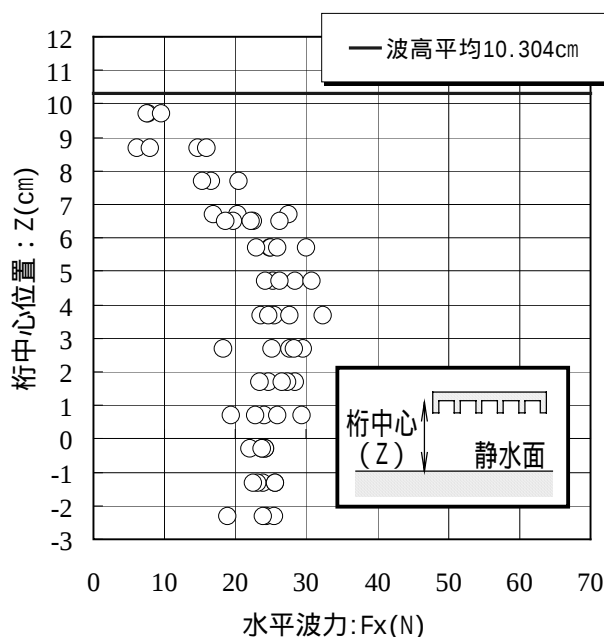


図 - 13 桁中心と波力の関係（水深 5cm，砕波有り）

作用した後に、桁を押さえ込むように作用する負の揚力が発生する。これは、桁側面に衝突した津波がその衝撃により跳ね上がり、その後、桁上面に落ちた衝撃力の作用と考えられる。また、その後継続して、負の揚力が記録されるが、これについては、桁上面を浸水する水の重さが作用していると考えられる。

3.3 最大作用力の抽出結果（水深 5cm，砕波有り）

図 - 12 に示す要領で、各実験ケースの水平波力と上揚力の最大値の抽出を行った。

抽出した結果と桁下高の関係を、図 - 13 と図 - 14 に示す。図 - 13 に示す水平波力分布の縦軸は、桁の側面に作用する力が水平波力の主要因と考え、静水面から桁の中心までの高さで評価した。以後、この高さを桁中心位置 (Z) と呼び、水平波力についてはこの高さとの関係で評価する。図 - 14 の上揚力分布図は、桁の下面が上揚力の作用位置と考え、桁下高を縦軸とした。以後、この高さを桁下高 (z) と呼び、上揚力についてはこの高さ

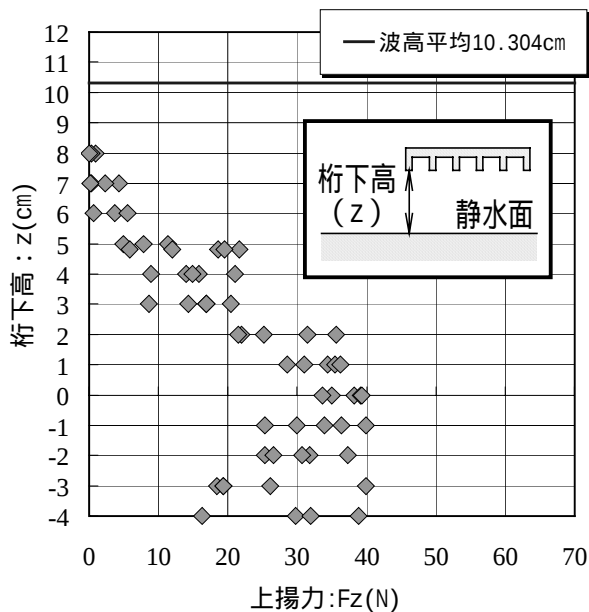


図 - 14 桁下高と上揚力の関係（水深 5cm，砕波有り）

の関係で評価する。また，縦軸で負の領域は桁が静水面以下であることを示し，実在しない条件の橋梁であるが，作用力分布を把握するためプロットしている。

図 - 13 によれば，波が砕波しているにも関わらず，各実験ケースの値のバラツキが少ない。水平波力の大きさは，波の頂点部分で小さく静水面に近いほど大きくなる傾向にある。

一方，図 - 14 に示す上揚力についてはバラツキが大きいものの，水平波力と同様の傾向を示している。本実験条件の造波津波の進行は上から下へ流れ込むような特性を持っており，波の頂点部分に近づくにつれて桁下をかすめて通り過ぎる傾向が強くなる。その影響もあり，波の頂点部分ではほぼ 0N となる。

次に，上揚力と水平波力の比について検証する。図 - 15 の横軸は上揚力を水平波力で除した値であり，以後これを作用力比と呼び評価指標とする。縦軸は図 - 13 と同じ指標である桁中心位置とした。水平波力が上揚力よりも大きくなるのは，桁中心位置が 4cm を超える場合であり，それ以下の場合では，上揚力が水平波力を上回る結果となった。また，その比は静水面に近づくにつれて大きくなり，1.5 倍を超える実験ケースもあった。

4. 水深 15cm で砕波する津波の実験

4.1 津波の作用状況（水深 15cm，砕波有り）

本実験条件は，静水深を 15cm と，指令波高を 20cm とし，砕波して桁へ衝突する実験ケースである。実験状況の模式図を図 - 16 に示す。実験パラメータは桁下高であり，静水面から桁下までの距離を -4cm ~ 18cm まで 1cm ピッチで変化させた。計測回数は，1 つの桁下高に対し 3 ~ 5 回である。本実験ケースの平均波高は 25.7cm で，

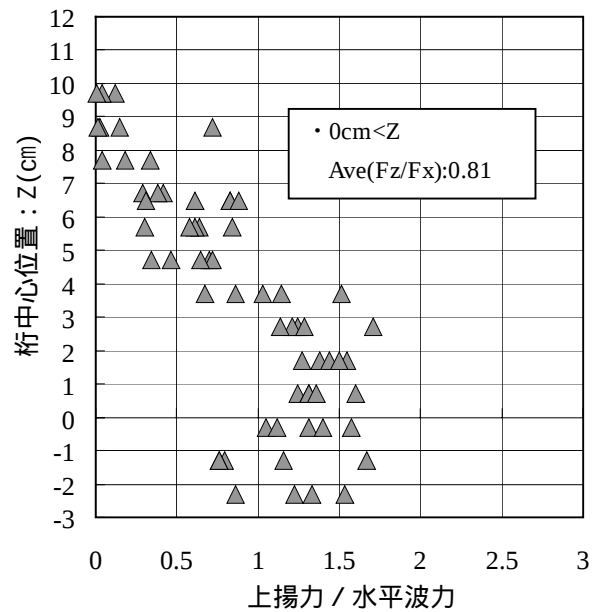


図 - 15 桁中心と作用力比（水深 5cm，砕波有り）

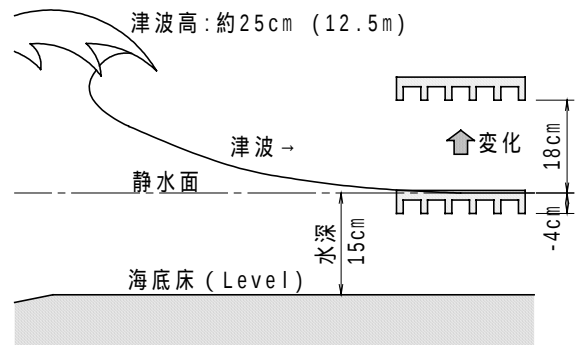


図 - 16 実験模式図（水深 15cm，砕波有り）

実橋換算すると 12.5m 程度の津波が作用したことになる。

桁下高を 4.8cm とした標準ケースに近い実験ケースを代表例に津波の作用状況の模式図を図 - 17 に示す。桁へ最初に接触するのは，砕波により生じた水しぶきである。その時刻を 0.00 秒とし，0.09 秒間毎の状況変化を検証する。0.00 秒時の状況は，桁上面に少しずつ水しぶきがかかる状態であり，この時点では，桁に大きな力が作用していないと考えられる。0.09 秒時には，桁の上面を飛び跳ねる水しぶきが確認でき，その後，0.18 秒時には，水しぶき等が無く白く濁らない水の塊が桁の左下方向から進行し，0.27 秒時に，水しぶきの塊が桁の上方に覆い被さりながら，濁らない水の塊が進行する。0.27 秒時の水しぶきの方向に着目すると，桁を中心に時計周りの渦が巻いているような状況である。水しぶきが桁へ接触し通過するまでの時間は 1.44 秒であった。実橋換算すると，10.2 秒間の現象を想定することになる。

4.2 作用力特性（水深 15cm，砕波有り）

図 - 18 に，図 - 17 の実験ケースの波高と水平波力と上揚力の関係図を示す。横軸は，計測時間を示す。波が砕

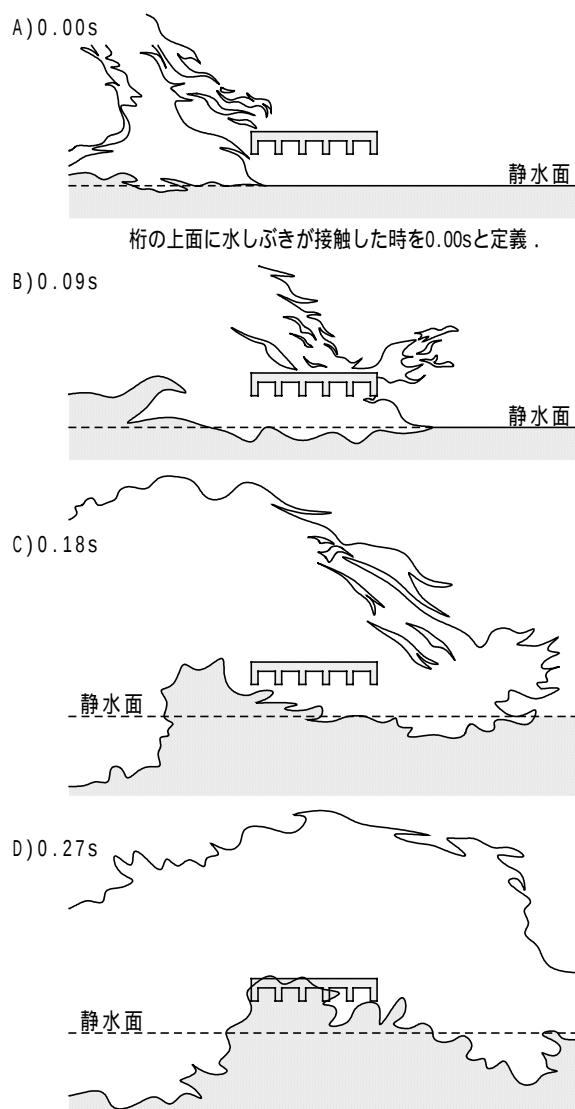


図 - 17 実験状況（水深 15cm，砕波有り）

波しているため，本実験ケースの波高も滑らかな形状ではない．波高のピークは，10.8～11.9 秒間であり，水しぶきが混じる波高は約 25cm を記録する．水平波力と上揚力の最大値はほぼ同時刻に発生しており，発生時刻は波高がほぼ最大値に達する時刻である．最大水平波力は 49.0N で最大上揚力は 79.0N である．水深 5cm の砕波する波が作用した場合の実験ケースとは異なり，上揚力が非常に大きいといった特徴がある．また，作用する津波高が大きいため，水平波力，揚力の絶対量が大きい，負の揚力については微増という結果となった．

4.3 最大作用力の抽出結果（水深 15cm，砕波有り）

図 - 19 に桁中心位置に対する水平波力の分布と桁下高に対する上揚力の分布を示す．水平波力に着目すると，値のバラツキが少なく，水深 5cm で砕波する波が作用した実験ケースと異なる特徴が確認できる．水平波力が大きく作用する桁の位置は，平均波高 25cm に対し，その半分の 12cm 付近であり 静水面近傍の水平波力は 12cm 付近の水平波力の半分程度となっている．次に，上揚力

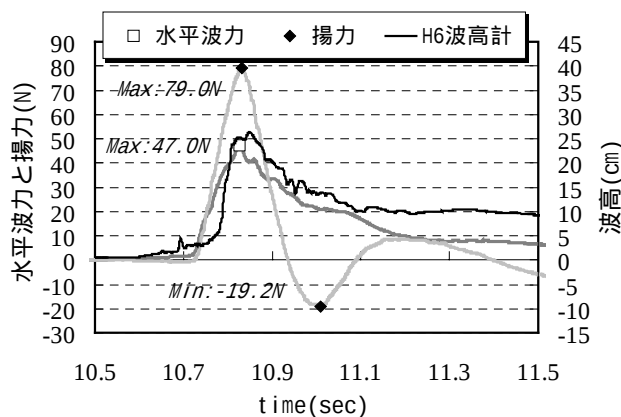


図 - 18 作用力と波高の関係（水深 15cm，砕波有り）

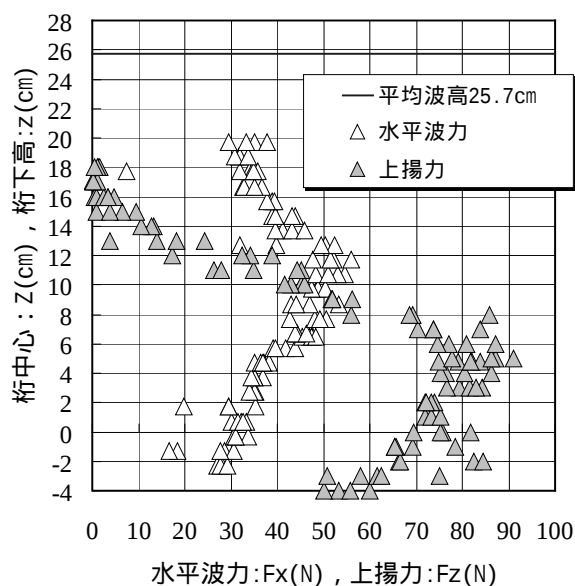


図 - 19 桁位置と作用力（水深 15cm，砕波有り）

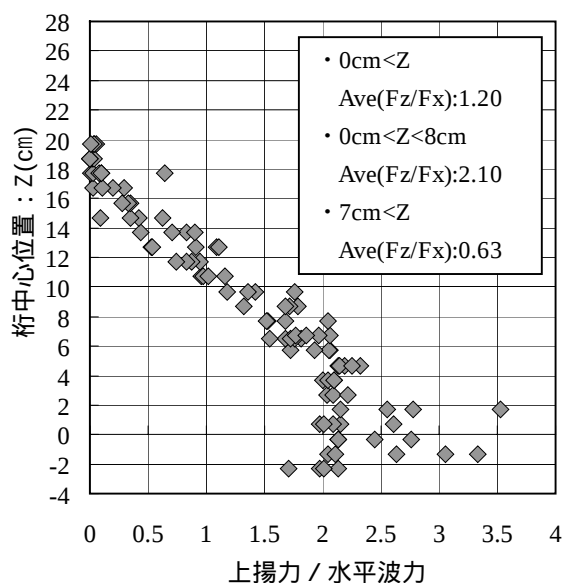


図 - 20 桁中心と作用力比（水深 15cm，砕波有り）

に着目すると，静水面に近い桁下高 0～7cm に桁がある場合に大きな上揚力が発生し，それより上方に桁がある

場合は急激に減少し、桁下高 18cm の位置ではほぼ 0N となる。

図 - 20 に、作用力比と桁中心位置の関係を示す。静水面近傍で 3 倍を超えるケースもあるが、概ね 2.5 倍以下であり、波の頂点部分に近づくとも減少する。1.0 倍以下となるのは、平均波高 25cm の半分的位置である 12cm 近傍からであり、水平波力が大きくなる位置でもある。

本実験条件の波は砕波がある波と定義したが、波の上半分と下半分を分けて考えると、2 種類の形状の波が混在し、両方の特性を有する波と推察される。上半分の波は、水深 5cm で砕波する波の特性に近く、水平波力は上揚力より大きく作用する。一方、下半分は後述する水深 15cm で砕波が無い波の特性に近く、水平波力より上揚力の方が大きい。

5. 水深 15cm で砕波しない津波の実験

5.1 津波の作用状況（水深 15cm，砕波無し）

本実験条件は、静水深 15cm，指令波高を 7cm とした実験である。前述の波形状とは異なり、凸型形状を保ったまま桁に衝突し、砕波が無い実験条件と位置付けて、結果の整理と考察を行った。実験状況の模式図を図 - 21 に示す。実験パラメータは桁下高であり、静水面から桁下までの距離を -4cm ~ 10cm まで 1cm ピッチで変化させた。計測回数は、1 つの桁下高に対し 3 ~ 5 回である。本実験ケースの平均波高は 11.2cm で、実橋換算すると 5.6m 程度の津波を作用させたことになる。また、砕波が無いため、再現性の高い造波が可能で、ばらつきの少ない実験結果が得られた。

桁下高を 4.8cm とした標準ケースに近い実験ケースを代表例に津波の作用状況の模式図を図 - 22 に示す。海底床上で波高が増幅し、約 11cm の一山形状の波となり、その形状を保ったまま桁へ作用する。形状を保った波が桁の右下端に接触した時刻を 0.00 秒とし、0.06 秒間毎の状況変化を示す。0.06 秒時の水しぶきの状況から、波は桁の左斜め下から作用している。その後、0.12 秒時には波が桁を覆う。波の頂点は、ほぼ桁の被圧側面側上方で、波は若干前傾した形状であるが一山形状を保っている。波しぶきは、左上方へ大きくなり、この時点でも波の作用方向は左上方と考えられる。0.18 秒時点では、波の頂点が桁の中央を少し通過した位置にある。波しぶきは、桁へ上載する水重量と、波の進行に抑えられ、右下方向へ変化する。波が桁へ接触し通過するまでの時間は 0.51 秒であった。波の通過時間 0.51 秒は実橋換算すると、3.6 秒間の現象を想定することになる。

5.2 作用力特性（水深 15cm，砕波無し）

図 - 23 に、図 - 22 の実験ケースの波高と水平波力と揚力の関係図を示す。本実験条件の波は、一山形状を保って桁に衝突する。波は砕波しないため、波高計で得ら

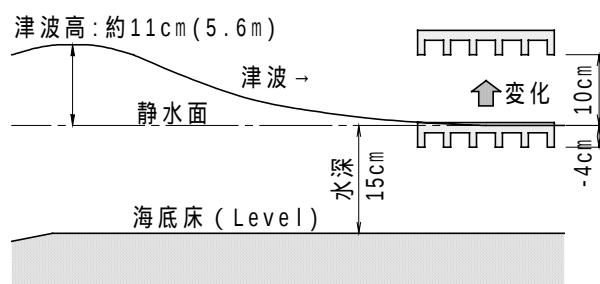


図 - 21 実験模式図（水深 15cm，砕波無し）

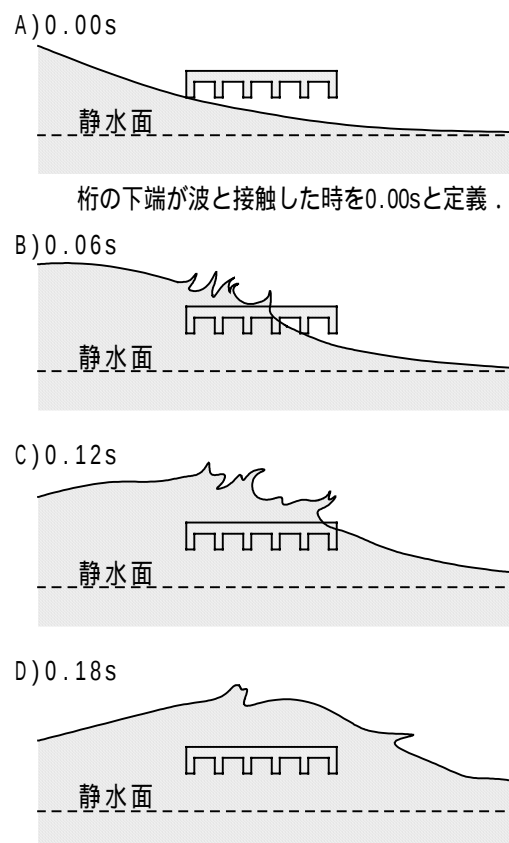


図 - 22 実験状況（水深 15cm，砕波無し）

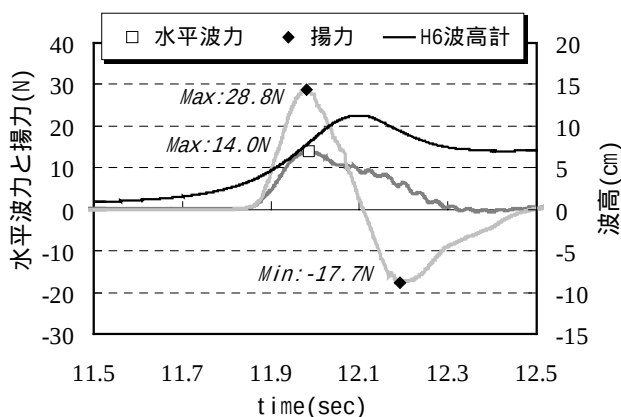


図 - 23 作用力と波高の関係（水深 15cm，砕波無し）

れる形状は滑らかである。波高のピークは 12.1 秒付近で、砕波が生じる波に比べて波の頂点が明確である。水平波力と上揚力の最大値はほぼ同時刻に発生しており、上揚

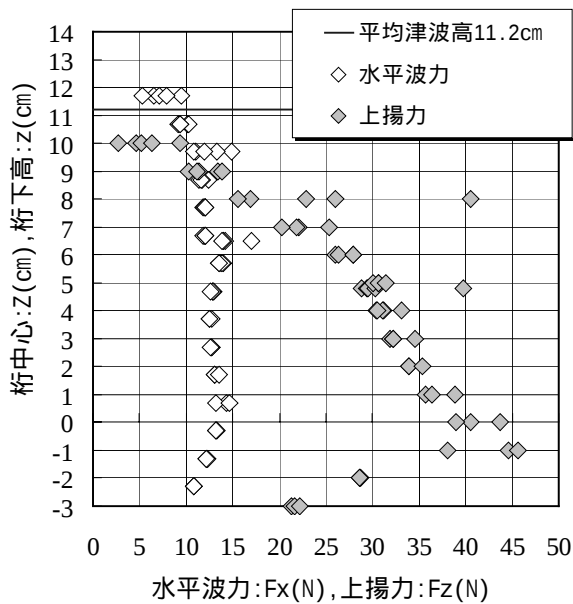


図 - 24 桁位置と作用力（水深 15cm，砕波無し）

力の方が大きい．最大水平波力は 14.0N で最大上揚力は 28.8N である．

本実験条件の結果と前述の『水深 5cm，指令波高 20cm，砕波有り』の実験条件の結果を比較すると，本実験条件の平均波高は 11cm，後者の実験条件の平均波高は 10cm 程度と本実験条件の方が若干波高は大きい．しかし，作用力の傾向は大きく異なっており，砕波しない本実験条件は砕波する後者の実験条件に比べ，水平波力は小さく，上揚力は大きいという特徴がある．

この結果より，砕波が無い波が作用した場合は，水平波力が小さく，上揚力が大きく作用する傾向となり，砕波がある場合は，その逆の傾向を示すと考えられる．

5.3 最大作用力の抽出結果（水深 15cm，砕波無し）

図 - 24 に，桁中心位置に対する水平波力の分布と桁下高に対する上揚力の分布を示す．水平波力は，静水面以下や波の頂点に近づく桁位置 10～12cm の実験ケースで若干の低減が確認できるものの，他はほぼ一定の値であり，桁位置の影響は小さい結果となった．また，上揚力は，桁の位置が波の頂点から静水面に近づくにつれ大きくなり，静水面以下では小さくなる．この特徴については，前述した実験ケースと同じ傾向を示している．

図 - 25 に作用力比と桁中心位置の関係を示す．平均津波高 11.2cm に対し，桁の位置がその 2/3 程度以下である 8cm から静水面にかけ 2～3 倍の揚力が発生することが分かる．比率だけで評価すると本実験条件が最も大きい結果である．ただし，上揚力の絶対量は水深 5cm の砕波する波の実験条件と同程度であり，波高に対する上限値があると考えられる．

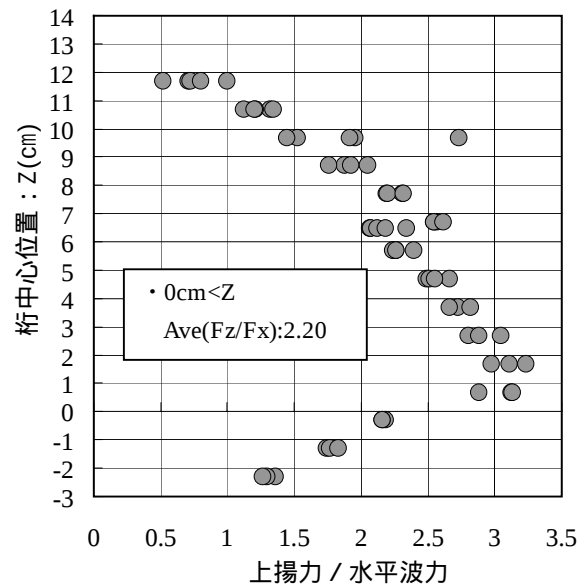


図 - 25 桁中心と作用力比（水深 15cm，砕波無し）

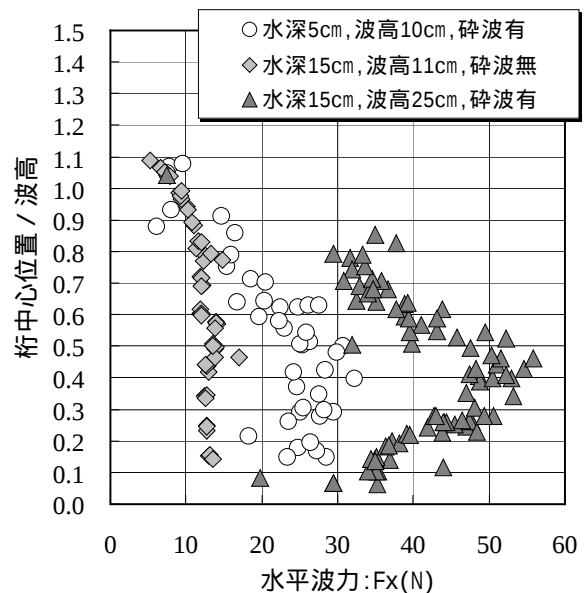


図 - 26 桁波高比と水平波力

6. 作用力特性に関する考察

6.1 水平波力

全ての実験結果の水平波力を比較し考察を行う．造波はパソコン制御で行うため，再現性の良い波が得られるものの，桁に作用する波高は若干のばらつきが生じる．そのばらつきを踏まえるため，桁中心位置を各計測波高で割った無次元量を用いて評価を行う．図 - 26 の縦軸はその無次元量であり波高に対する桁の中心位置であり，以後，桁波高比と呼ぶ．横軸は水平波力である．なお，現状の架橋状態を想定した考察を行うため，桁が水中にある実験ケースを本図より除外した．また，本図より各実験ケースの指令波高を平均波高に言い換えて示す．以後，『水深 5cm，指令波高 20cm，砕波有り』の実験条件を『水深 5cm，波高 10cm，砕波有り』とし，『水深 15cm，

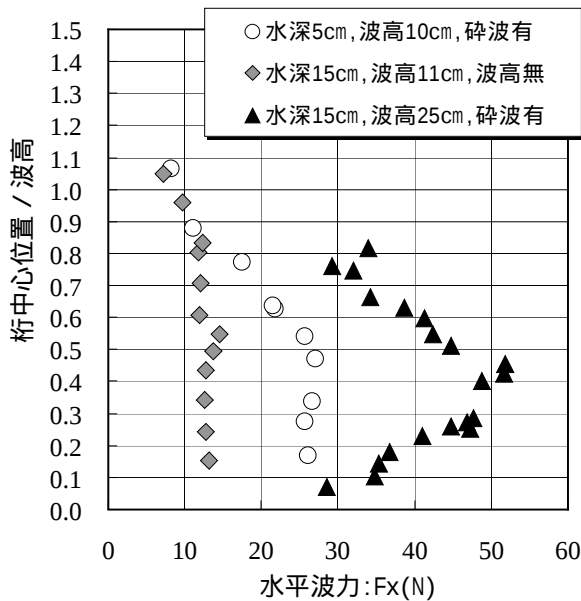


図 - 27 桁波高比と水平波力（平均値）

指令波高 20cm，碎波有り』の実験条件を『水深 15cm，波高 25cm，碎波有り』，『水深 15cm，指令波高 7cm，碎波無し』の実験条件を『水深 15cm，波高 11cm，碎波無し』と表記する。

同図によると，『水深 15cm，波高 25cm，碎波有り』の実験条件は全体的に水平波力が大きいことが分かる．他の条件に比べて平均波高が大きく，その大きさが水平波力の大きさになったと考えられる．次に，『水深 5cm，波高 10cm，碎波有り』と『水深 15cm，波高 11cm，碎波無し』の両条件を比較する．波高の大きさは後者の方が大きいものの，水平波力は前者の方が大きい傾向を示す．この違いは碎波の有無であり，同じ波高であっても碎波が有る場合は，無いものに比べ水平波力が大きくなることが考えられる．

この傾向を把握し易くするため，各桁下高毎の計測値を平均化し図 - 26 と同様の指標で図を作成した．その結果を図 - 27 に示す．『水深 5cm，波高 10cm，碎波有り』の実験条件では，波の頂点部分に近いと水平波力は小さくなり，静水面に近づくとき大きくなるという特徴がある．『水深 15cm，波高 11cm，碎波無し』の実験条件では，波の頂点部分に近いと水平波力が若干小さくなるが，全体的に大きな増減はなく，ほぼ 13N 近傍の値である．『水深 15cm，指令波高 20cm，碎波有り』の実験条件では，桁波高比の 0.5 近傍が境となり，その上下に桁がある状態では，少しずつ減少していく．

6.2 上揚力

図 - 27 の要領で上揚力に関する図を作成した．図 - 28 がその結果である．ここでは，縦軸を桁中心位置ではなく，上揚力の作用位置である桁下面に変更し，以後，桁下高波高比と呼ぶ．

上揚力の絶対量が大きいのは，波高の大きい『水深

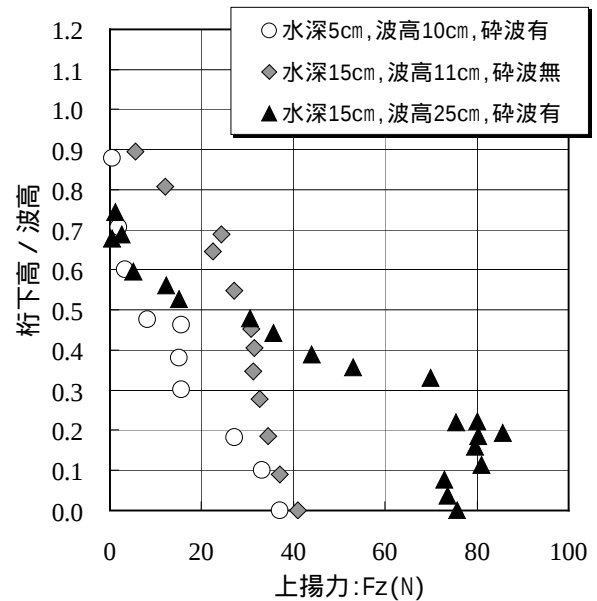


図 - 28 桁下高波高比と上揚力（平均値）

15cm，波高 25cm，碎波有り』の実験条件である．縦軸が 0.1～0.3 の範囲にある状態が最も上揚力が大きく，そこを境とし，桁が波の頂点部分に近づくにつれ減少していく．その減少量は急激であり，縦軸が 0.5 付近の状態になると，『水深 15cm，波高 11cm，碎波無し』の実験条件の上揚力よりも小さくなる．『水深 15cm，波高 11cm，碎波無し』の実験条件の上揚力は，桁下高比が 0 の位置が最大であり，波の頂点部分に桁が近づくとき少しずつ減少する．『水深 15cm，波高 25cm，碎波有り』に比べ，急激に減少しないという特徴がある．『水深 5cm，波高 10cm，碎波有り』の実験条件の場合，桁下高波高比が 0 近傍では『水深 15cm，波高 11cm，碎波無し』の実験条件とほぼ同じ上揚力を示しているが，桁が上方に向かうと，『水深 15cm，波高 11cm，碎波無し』の実験条件に比べ減少量は大きい傾向を示している．

以上より，上揚力は，桁が静水面に近い場合に大きく，桁が波の頂点部分に近づくとき小さくなる．また，碎波の有無によって減少量が異なり，碎波がある場合，桁が静水面から離れると急激に減少するが，碎波が無い場合は緩やかに減少する．

6.3 作用力と波形状

前述の作用力の傾向について，波が桁に作用する状態に留意した考察を行う．

『水深 5cm，波高 10cm，碎波有り』の実験条件の波は，海底床上で碎波し，水しぶきと水泡が混在し，白波のような状態で桁へ衝突する．『水深 15cm，波高 11cm，碎波無し』実験条件の波は，碎波がないため，水しぶきや水泡が発生せず，白く濁っていない水の塊が進行し，そのまま通り過ぎる．『水深 15cm，波高 25cm，碎波有り』の実験条件の波は平均波高 25cm のうち，波高の頂点から 1/2～2/3 の波の上方部分は『水深 5cm，波高 10cm，碎波

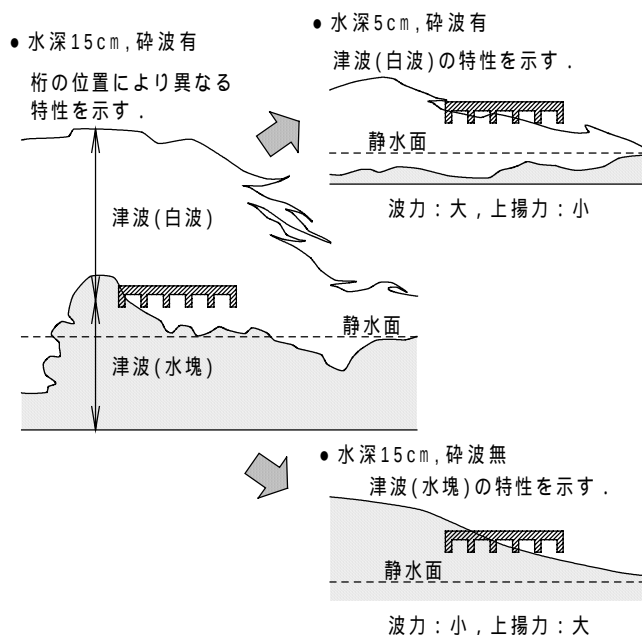


図 - 29 波形状の違いによる作用力の特性

有り』の実験条件に近い波で、水しぶきと水泡が混在した白波のような状態で渦を巻き、桁へ作用する。下方部分は、水泡等で白く濁っていない水の塊が進行し、『水深 15cm、波高 11cm、砕波無し』実験条件の波に近い。

波の状態を、砕波した白波のような状態の部分と砕波せず白く濁っていない水の塊の部分に区分し、図 - 29 に示す模式図を作成した。前述の通り『水深 15cm、波高 25cm、砕波有り』の実験条件の波は見た目の違う 2 種類の波が混在したものであり、桁が平均波高 25cm の中間点より上方にあると白波が作用し、下方にある場合は水の塊が作用する。上方にある場合の波は、『水深 5cm、波高 10cm、砕波有り』の実験条件に近い状態であり、図 - 28 の上揚力の結果で、桁下高波高比が 0.5 以上の位置で急激に減少する傾向は、砕波した波が作用する場合の特徴を示すものと考えられる。

一方、『水深 15cm、波高 25cm、砕波有り』の実験条件で、桁が平均波高 25cm の中間点より下方にあり、水の塊が作用する状況は、『水深 15cm、波高 11cm、砕波無し』実験条件の特性に近い傾向であり、水平波力は小さく、上揚力は大きいという特徴を示している。桁が水面より上方にある実験条件のみで、作用力比の平均値を求めたところ、『水深 15cm、波高 11cm、砕波無し』実験条件では 2.20 であり、『水深 5cm、波高 10cm、砕波有り』の実験条件では 0.81 であった。砕波した波が桁に作用すると上揚力は水平波力の 1 倍以下であり、水平波力が卓越して作用することが分かる。

また、『水深 15cm、波高 25cm、砕波有り』の実験条件の同作用力比の平均値は 1.20 である。図 - 19 より上揚力が急激に低下する縦軸の値 7cm を境界に、桁がその上方にある場合と、下方にある場合で分けて算定する。前者は 0.63 で後者は 2.10 と比に偏りがあり、0.63 は『水深

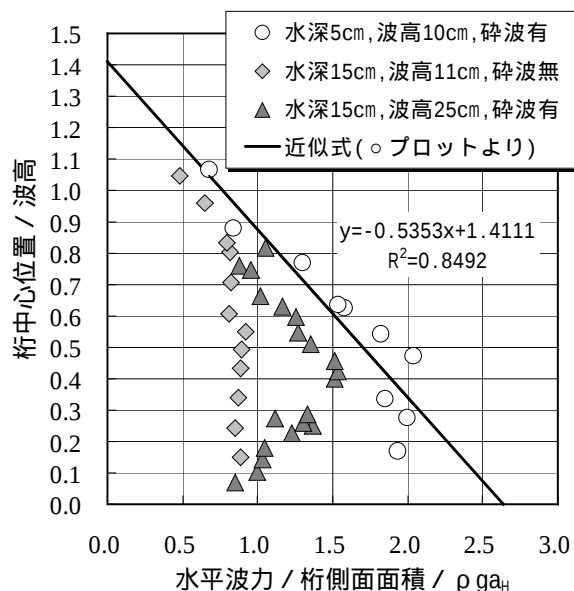


図 - 30 波力から求めた波圧と静水圧の関係

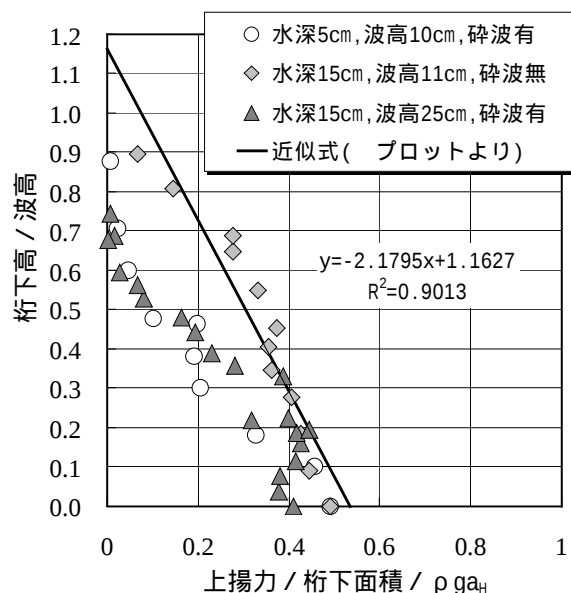


図 - 31 上揚力から求めた波圧と静水圧の関係

$$\text{水平波力} \rightarrow F_x \div A_1 \div \rho g a_H$$

$$\text{上揚力} \rightarrow F_z \div A_2 \div \rho g a_H$$

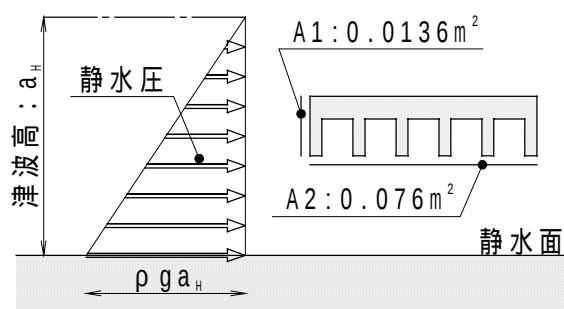


図 - 32 作用力の無次元化方法

5cm 波高 10cm 砕波有り』の実験条件の値 0.81 に近く、2.10 は『水深 15cm、波高 11cm、砕波無し』実験条件

の値 2.20 に近い。

6.4 作用力から求めた波圧と波高から求めた静水圧の関係

図 - 27 , 図 - 28 の水平波力と上揚力を無次元化した図を図 - 30 , 図 - 31 に示す。また, 無次元化の方法を図 - 32 に示す。桁模型の津波被圧面を水平波力の場合は桁側面, 上揚力の場合は桁の下面面積と仮定し, 各実験に対応して計測された津波高の静水圧を算定し, 作用力を被圧面積と静水圧で割った。その値は, 静水状態の水圧との比を表す指標であり, 図 - 30 , 図 - 31 の横軸とした。

図 - 30 の水平波力の結果によると, 静水圧に対して最も大きな波圧となったのは, 『水深 5cm , 波高 10cm , 砕波有り』の実験条件で, 水平波力の絶対量が大きい『水深 15cm , 波高 25cm , 砕波有り』の実験条件の結果を包括する結果となった。また, 図 - 31 に示す上揚力の結果では, 『水深 15cm , 波高 11cm , 砕波無し』の実験条件で包括される結果となった。この結果より, 水平波力については『水深 5cm , 波高 10cm , 砕波有り』の実験条件の結果(○プロット値)を用い, 上揚力は『水深 15cm , 波高 11cm , 砕波無し』の実験条件の実験結果(プロット値)を用いて 1 次近似線を算定した。図 - 30 , 図 - 31 に併記する。ここで, 『水平波力 / 桁側面面積』と『上揚力 / 桁下面積』を m^2 当りに作用する波圧と考え, 各値を q_x と q_z とする。図 - 30 の横軸は $q_x / \rho g a_H$, 図 - 31 の横軸は $q_z / \rho g a_H$ となり近似式は以下となる。

$$Z / a_H = -0.54(q_x / \rho g a_H) + 1.41 \quad (1)$$

$$z / a_H = -2.18(q_z / \rho g a_H) + 1.16 \quad (2)$$

ここで, Z : 桁中心位置, a_H : 波高, z : 桁下高, ρ : 水の密度, g : 重力加速度, q_x : 水平波圧, q_z : 鉛直波圧である。

上記式を変換し q_x, q_z を左辺に移動すると, 以下の式となる。津波波高と桁下高が既知であれば, この式により津波作用時の波圧分布を算定することが可能となる。

$$q_x = \rho g (2.61 a_H - Z / 0.54) \quad (3)$$

$$q_z = \rho g (0.53 a_H - z / 2.18) \quad (4)$$

7. まとめ

橋梁を対象に, 津波による桁への作用力特性を把握するため, 1/50 スケールの模型を用いた実験を行い, 波形状と作用力の整理を行った。実験より得られた知見を以下にまとめる。

1) 全実験条件で作用力の絶対量が大きいのは, 波高が大

きい『水深 15cm , 波高 25cm , 砕波有り』の実験条件であった。また, 『水深 5cm , 波高 10cm , 砕波有り』の実験条件と『水深 15cm , 波高 11cm , 砕波無し』の実験条件では, 前者の方が若干, 波高は小さいものの, 水平波力は大きい結果となり, ほぼ同等の波高であれば, 砕波した波が作用する方が水平波力は大きい結果となった。上揚力は, 桁が静水面に近いと大きく, 波の頂点に近づくにつれ減少する傾向をほぼ全実験条件で示し, 砕波した波が作用する場合は急激に減少し, 砕波が無い波が作用する場合は緩やかに減少した。

2) 本実験で造波した波形状は, 砕波して桁に作用する形状, 砕波しないで作用する形状, 両者が混合して作用する形状であった。これを砕波の有無を区分して, 作用力特性を検証したところ, 砕波して桁に作用する場合は, 水平波力が大きく揚力は小さくなる傾向を示し, 砕波しないで桁に作用する場合は, その逆の傾向を示した。砕波の有無が混在する場合は, 桁の位置によって, 衝突時の波形状が区分されるものの, 作用力特性は上記 2 つに区分して評価できる結果となった。

3) 全実験結果を波高に対する無次元量で評価し, 本実験結果を包括する波圧分布線 (1 次近似線) を算定したところ, 水平波力は静水面付近で静水圧の 2.61 倍を底辺とし, 波高の 1.41 倍を頂点とする分布になり, 上揚力は静水面付近で静水圧の 0.53 倍を底辺とし, 波高の 1.16 倍を頂点とする分布となった。

参考文献

- 1) 運上茂樹：津波による橋梁被害, 日本地震工学会誌, No.6, pp.26-28, 2007.
- 2) 二井伸一, 幸左賢二, 庄司学, 木村吉郎：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.55 A, pp.471-482, 2009.
- 3) 庄司学, 森山哲雄, 藤間功司, 嶋原良典, 笠原健治：単径間橋梁に作用する砕波津波の荷重に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.55 A, pp.460-470, 2009.
- 4) 中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士：断面形状の異なる橋梁に対する津波作用時の流体力に関する基礎的研究, 第 12 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.61-68, 2009.
- 5) 片岡正次郎, 日下部毅明, 長屋和宏：津波衝突時の橋桁に作用する水平波力, 第 12 回日本地震工学シンポジウム, pp.154-157, 2006.
- 6) Hirokazu IEMURA, Mulyo Harris Pradono, Tomohiro YASUDA and Tsubasa TADA, EXPERIMENTS OF TSUNAMI FORCE ACTING BRIDGE MODELS, 地震工学論文集, pp.902-911, 2002.

(2009 年 9 月 24 日受付)