

橋台の有無による桁への津波作用力特性の実験的検討

秋吉秀一¹・幸左賢二²・二井伸一³・庄司学⁴

¹学生会員 九州工業大学 工学部建設社会工学科（〒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 株式会社ウエスコ 岡山支社設計部構造設計課（〒700-0033 岡山市北区島田本町2-5-35）

⁴正会員 筑波大学大学院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）

1. はじめに

我が国において、東海・東南海地震による津波被害が懸念されており、それに伴う橋梁の被害が想定される。現在まで実験により建築構造物などの直壁構造への津波作用力については検討が進められている¹⁾。これに対して、路下空間を有し、線状構造である橋梁については、その特殊な形状に着目した検討はこれまで十分には検討が実施されていない。

そこで、筆者らはスマトラ島の橋梁で津波より上部工が流出した事例に着目し、実験によって桁への作用力の評価を行っている²⁾。過年度の実験では、図-1の(a)に示すように橋台の影響の無い桁中央部の作用力に着目している。本年度はこれに加え、桁の両端に橋台を設置し、橋台の波に対する影響を踏まえた作用力の測定を行った。本論文では、橋台の有無による水平波力、上揚力の特性について検討を行うものである。

2. 実験概要

(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-2 に示す²⁾。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。橋梁模型の対象は、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 10.2 cm、構造高 1.7 cm）とした。

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）の水平区間を陸域で構成した。

本実験の過年度実験との相違はパラメータが橋台有無の点にある。その違いを図-3 に記す。図-3 は橋台が無い条件の桁の設置状況を示しており、左はその正面図、右は側面図である。橋台が無い場合は、桁模型の両端に側壁を設け、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を行った。側壁の先端は鋭角にカットし、側壁に波が衝突することによる波の乱れに配慮した。

橋台がある場合の実験条件で、設置した橋台寸法を図-4 に示す。水深 15 cm、桁下高 4.8 cm、桁高

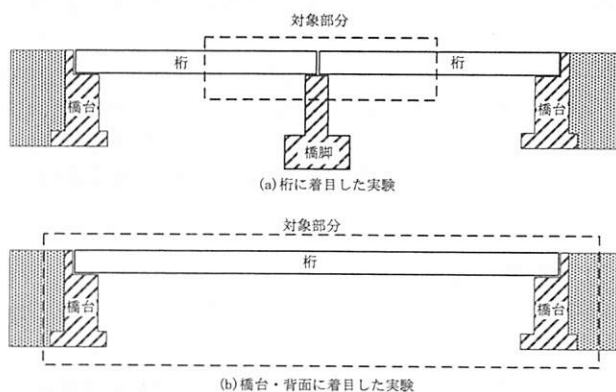


図-1 本実験での橋梁対象部分

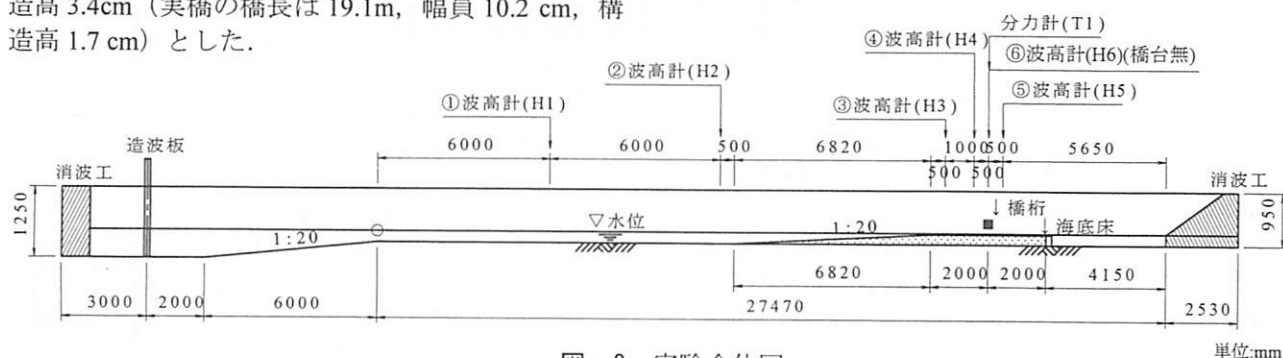


図-2 実験全体図

単位:mm

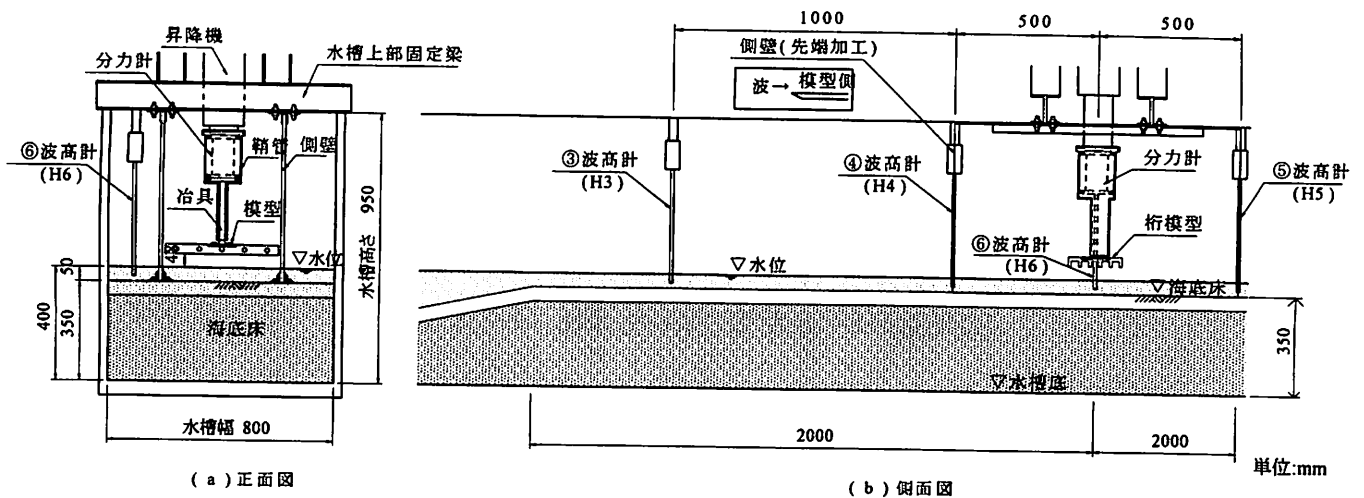


図-3 模型周辺の設置状況図

3.4cm であることから橋台高は 23.2 cm となる。橋台背面は堅固な護岸で構成されていると仮定し、桁の端から水槽の側壁まで直壁構造物が連なる状況とした。また、橋台の奥行長さは桁の幅員と同じで 19cm とした。

次に計測器について記す。計測器は、波高計を 6 基使用した。H1 (図-2 中の①) ~ H4 (図-3 中の④) 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-3 中の⑤) 波高計は、衝突直後の波高変化の検証用に使用した。橋台無しの実験は図-3 の (b) に示すように H6 波高計は側壁の外でかつ、桁中心位置に設置した。このように H6 波高計を側壁の外に設置することで、模型への衝突による乱れの無い、桁中心位置を通過する波高を得ることができる。橋台有の場合は橋台無のように設置すると、橋台と H6 波高計が干渉するため、図-5 に示すように桁の前方 15cm の位置に設置した。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、最大計測値は 980N である。計測のサンプリング周期はすべて 1/1000s とした。本実験ではハイスピードカメラを使用し、その画像の撮影間隔は 1/30s である。

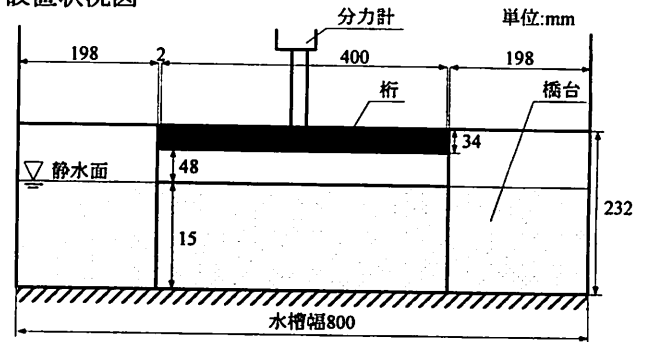


図-4 橋台設置方法

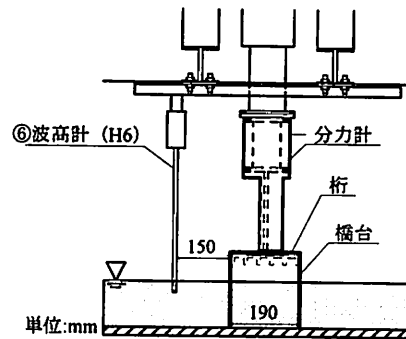


図-5 模型周辺の設置状況図 (橋台有り)

(2) 実験パラメータ

図-6 に、実験条件を示す。実験パターンは、橋台の有無、砕波の有無によりパターン①~④に区分した。実験対象とするインドネシアの橋梁の実諸元は静水深 2.5m, 津波高 5~10m, 桁下高 2.4m である。これを 1/50 の模型寸法にすると、静水深 5cm, 津波高 10~20cm, 桁下高 4.8cm となる。基準モデルは橋台の有無、砕波の有無で各パターンに区分した。砕波の無い場合は橋台有無それぞれにおいて指令波高 7 cm の 2 ケース (パターン①, ③), 砕波の有る場合は橋台有無それぞれにおいて指令波高 10~20cm で合計 4 ケース (パターン②, ④) とした。なお、模型寸法としての静水深は 5cm であるが、砕波の有無に着目するため、基準モデルの条件から静水深を 15cm に変更している。これは、静水深 5cm ではすべての指令波高において砕波となる

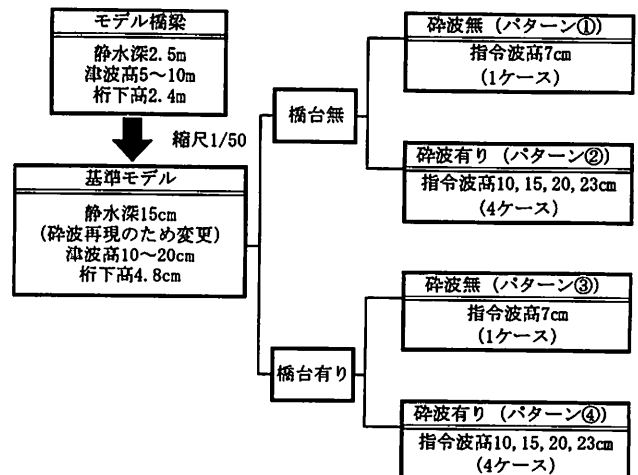


図-6 実験条件フロー

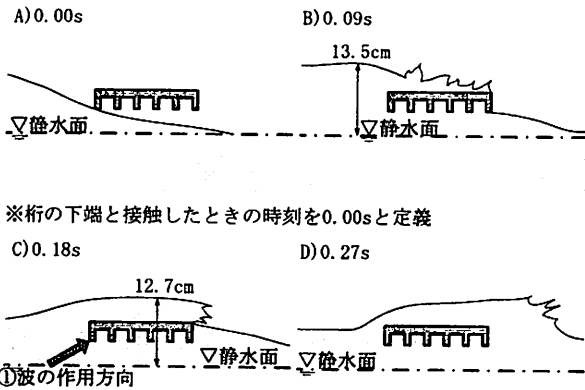


図-7 実験状況図（橋台無, 碎波無, 指令波高 7 cm）

ためであり、静水深 15cm にすることで碎波の有無のパターンを再現した。

3. 碎波の無い津波（パターン①、③）の実験結果

(1) 津波の作用状況

本実験ケースにおける碎波の無い津波において、橋台有無の作用力変化に着目して検討する。図-7 はパターン①『橋台無, 碎波無, 指令波高 7cm』における実験状況図を示す。波が桁と接触した時刻を 0.00s とし、0.09s 毎の形状変化を示す。図-7 に示すように、波は白濁した細かい泡を含んでおらず、碎波が生じていない。0.09s には水しぶきの状況から、泡を含まない波は桁の左斜め下から作用している。0.18s には波の塊が桁を覆う。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（図-7 の矢印①）。0.27s には波の頂点が桁の中央を少し通過した位置にある。図-7 の図上より波高を計測すると 0.09s 後では 13.5 cm、0.18s 後では 12.7cm であった。

図-8 はパターン②『橋台有り, 碎波無, 指令波高 7cm』における実験状況図を示す。0.09s には波は橋台の無い実験条件と同様に、左斜め下から作用している（図-8 の矢印②）。0.18s には波の形状を保ったまま急激に波高が大きくなり桁に載る。0.27s にはさらに波高が大きくなり泡を含まない波が桁に載る。これらの過程で波は碎波せずに通ってきた。同様に図上より波高を求めると 0.18s 後では 19.3 cm、0.27s 後では 20.2cm であった。橋台が有る実験条件の波高が大きくなった要因は、橋台によって波がいったんせき止められ、その後瞬時に越流した波が上方へ押し上げられるためと考えられる。

(2) 作用力特性

図-9 はパターン①『橋台無, 碎波無, 指令波高 7cm』の実験ケースの作用力と波高の関係である。碎波が無いことから、波高は比較的乱れの無い波形状となった。波高のグラフの傾きが上昇を始めた時刻である 12.0s 付近で水平波力の最大値 14.0N と揚力の最大値 28.8N を記録した。その後、上揚力は急激に減少を始め、負の揚力の値 -17.7 (N) が記録

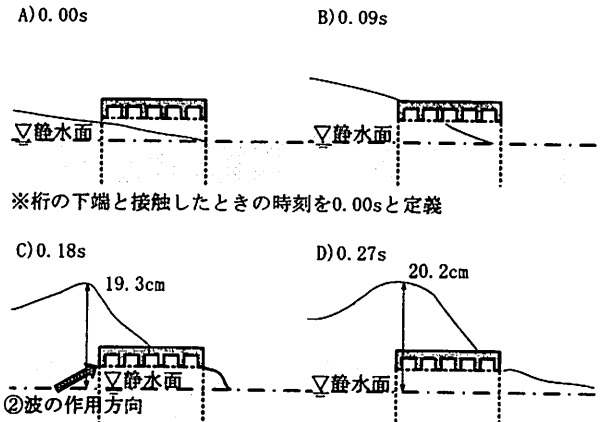


図-8 実験状況図（橋台有り, 碎波無, 指令波高 7 cm）

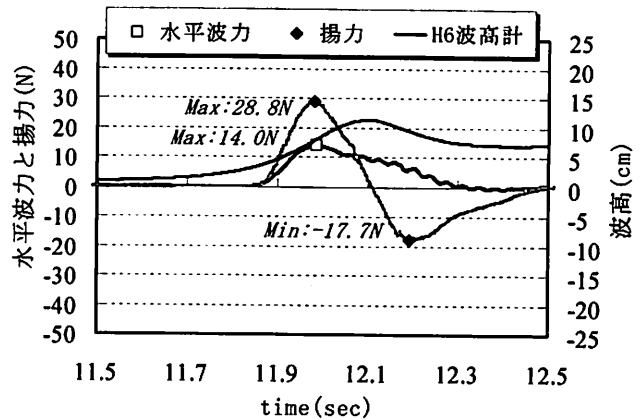


図-9 作用力と波高（橋台無, 碎波無, 指令波高 7 cm）

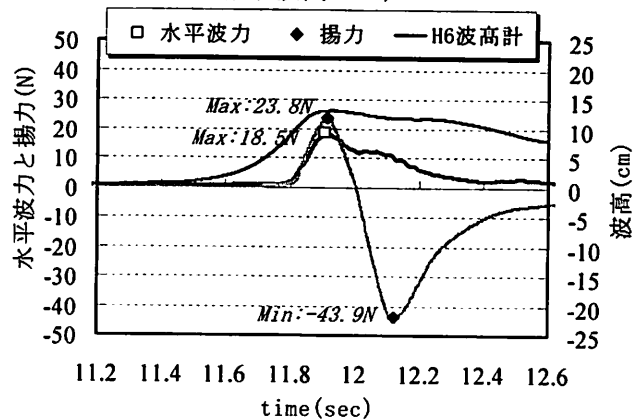


図-10 作用力と波高（橋台有り, 碎波無, 指令波高 7 cm）

された。これは図-7 に示すように碎波しなかった波が桁上部に載ることが原因と考えられる。

図-10 はパターン②『橋台有り, 碎波無, 指令波高 7cm』の実験ケースの作用力と波高の関係である。これも波の碎波が無いため波高計は乱れの無い波形状となった。波高の値が最大値となった時刻である 11.9s 付近で水平波力の最大値 8.5N と上揚力の最大値 23.8N を記録した。その後、上揚力は急激に減少し、揚力の負の値 -43.9N となった。この負の値は、橋台が無い場合と比べ極めて大きな値となった。水平波力は橋台の有る場合が無い場合に比べ 0.8 倍、

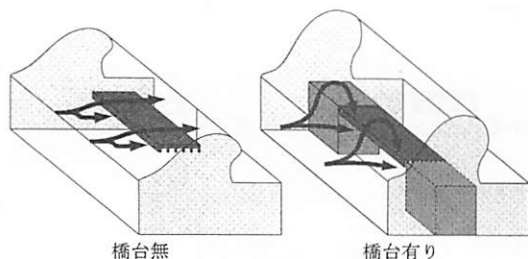


図-11 波の動き

上揚力は 1.3 倍となった。負の揚力について、橋台が無い場合と橋台が有る場合で 2.5 倍となり、橋台が有る場合、負の揚力が極めて大きくなっている。

その要因は図-11 に示すように、波の作用時の形状にある。同図の矢印は波の流れ方向を示す。橋台が無い場合、波は桁の上面と下面に分かれて通過する。このとき、波の急激な波高上昇は見られない。これに対して、橋台が有る場合、橋台に波がせき止められ、桁前面で波高が急激に上昇し、瞬時に桁へ落下する。桁に波が作用するときの波高について、橋台が無い場合の実験条件では 13.5cm、橋台が有るときでは 20.2cm となる。桁上部を基準面にとすると橋台が無い場合 5.3cm、橋台が有る場合 11.9cm となり 2.2 倍の差があった。エネルギー則 ($U=mgh$) を考えると h が 2.2 倍となることから、落下して衝突するエネルギーも 2.2 倍になることに繋がる。そのため結果的に 2.5 倍の差となったと考えられる。

(3) 最大作用力抽出特性

橋台の有無による水平波力と上揚力の関係性を示すため、それぞれの作用力について検証する。図-12 に水平波力と上揚力の関係を示す。同図では図-9, 10 で抽出した水平波力、上揚力の最大値をプロットし、さらに各作用力の平均値を示す。橋台の無い実験条件の水平波力に着目すると 13.9~17.0N に分布しており平均値は 14.6N である。橋台有りの実験条件の水平波力は 14.4~20.6N に分布しており平均値は 16.6N である。水平波力の平均値の差は 1.1 倍となっており、橋台の有無の影響は見られない。

次に上揚力に着目する。橋台無しの実験条件の上揚力に着目すると 28.8~39.9N に分布しており、平均値は 31.5N である。橋台有りの実験条件の上揚力に着目すると 18.2~33.9N に分布しており、平均値は 23.7N である。上揚力の平均値は橋台が有る場合、橋台無い場合と比べ、0.75 倍となっており、水平波力に比べ橋台の有無の影響があるものの、その影響は小さい。ここで水平波力と上揚力の比は橋台が無い実験の場合 1:2.0 となり、橋台が有る場合 1:1.5 程度であった。この比の差は上揚力の値が変化したことによるものである。

4. 砕波のある津波（パターン②、④）の実験結果

(1) 津波の作用状況

図-13 はパターン②『橋台無、砕波有り、指令波高 20cm』における実験状況図を示す。図-13、

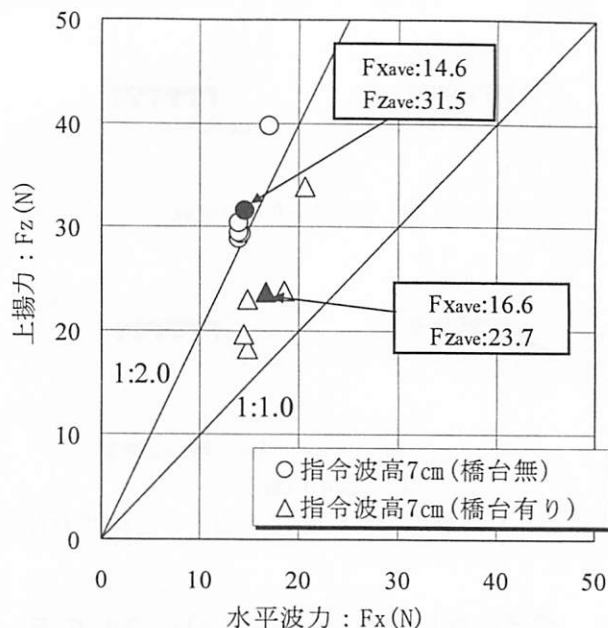


図-12 水平波力と上揚力の関係（砕波無）

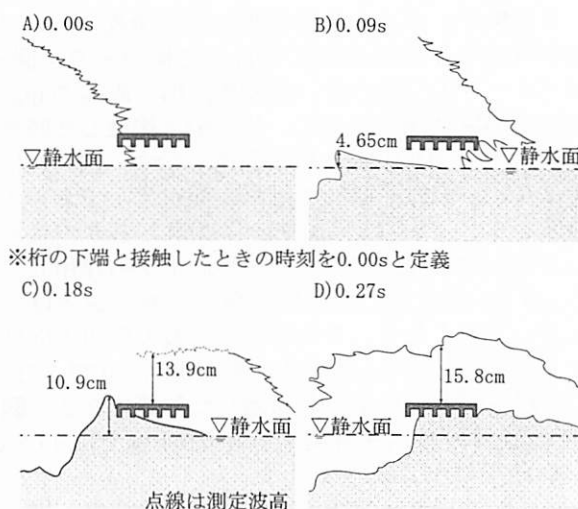


図-13 実験状況図（橋台無、砕波有り、指令波高 20 cm）

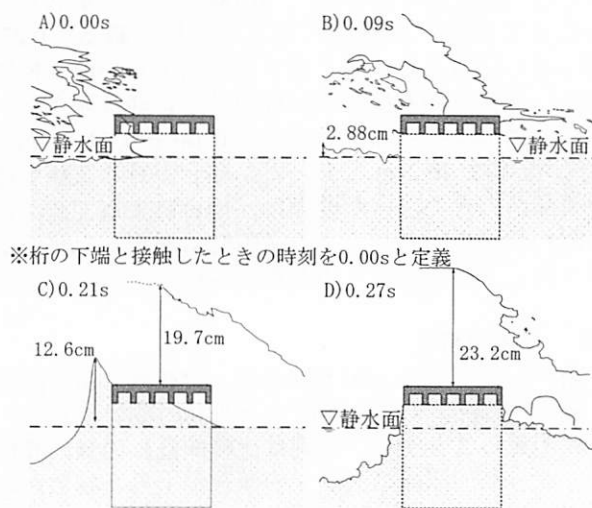


図-14 実験状況図（橋台有り、砕波有り、指令波高 20 cm）

14 に示すように、波は白濁した細かい泡を含むエリア（泡を含む波）と白濁が無いエリア（泡を含まない波）に区分した。0.00s 時の状況は、桁上面に少しずつ泡を含む波がかかる程度である。0.09s 時には、桁の上面を飛び跳ねる泡を含む波が確認でき、その後、0.18s 時には泡を含まない波が桁の左下方から進行し、0.27s 時に、泡を含まない波が桁の上方に覆い被さりながら進行する。図-13 に示すように、泡を含まない波の波高は 0.09s 後では 4.65 cm、0.18s 後では 10.9cm、泡を含まない波について 0.18s 後では 13.9 cm、0.27s 後では 15.8 cm であった。

図-14 はパターン④『橋台有り、砕波有り、指令波高 20 cm』における実験状況図を示す。0.18s に波は橋台の無い実験条件と同様に、泡を含まない波が左斜め下から作用している。0.27 s には桁下に泡を含まない波が進行する。同様に波の波高を図示すると泡を含まない波の波高は 0.09s 後では 2.88cm、0.18s 後では 8.50cm、泡を含む波について 0.18s 後では 19.7 cm、0.27s 後では 23.2 cm であった。

(2) 作用力特性

図-15 はパターン②『橋台無し、砕波有、指令波高 20cm』の実験ケースの作用力と波高の関係である。波が砕波しているため、同図の①に示すように本実験ケースの波高は砕波無しに比べ、乱れた形状である。波高のグラフの傾きが上昇を始めた時刻である 10.8s 付近で水平波力 47.0N と上揚力 79.0N の最大値を記録した。その後、上揚力は急激に減少を始め、負の揚力の値-19.2N が記録された。図-13 に示すように、負の値が計測されたのは、10.9cm と 13.9cm の波が桁上部へ載るためである。

図-16 はパターン④『橋台有り、砕波有り、指令波高 20cm』の実験ケースの作用力と波高の関係である。同図の②に示すように、波が砕波しているため、本実験ケースの波高は砕波無しに比べ、乱れた形状である。波高の値が最大値となった時刻である 10.8s 付近で水平波力 42.1N と上揚力 79.7N の最大値を記録した。その後、上揚力は急激に減少し揚力の負の値-63.0N となった。図-14 に示すように、負の値が計測されたのは、12.6cm と 18.3cm の波が桁上部へ載るためである。

このケースにおいて水平波力は橋台の有る場合が無い場合に比べ 0.9 倍、上揚力は 1.0 倍となった。負の揚力について、橋台が無い場合が橋台が有る場合に比べ 3.3 倍となり、橋台が有る場合、負の揚力が極めて大きくなった。その要因は砕波が無い場合と同様に、波の作用時の形状にある。桁に波が作用するときの泡を含まない波の波高について、橋台が無い場合の実験条件は静水面より 10.9cm、橋台が有るときは 12.6cm となる。これらを桁上面を基準面にすると、橋台が無い場合 2.7cm、橋台が有る場合 4.4cm となり 1.6 倍橋台が有るとき大きい。泡を含む波の波高について、橋台が無い場合の実験条件は静水面より 13.9cm、橋台が有るときは 19.7cm となり 1.4 倍橋台が有るとき波高が大きくなる。

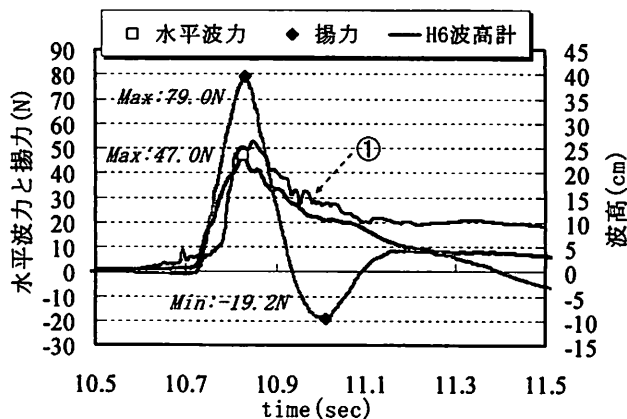


図-15 作用力と波高（橋台無し、砕波有り、指令波高 20 cm）

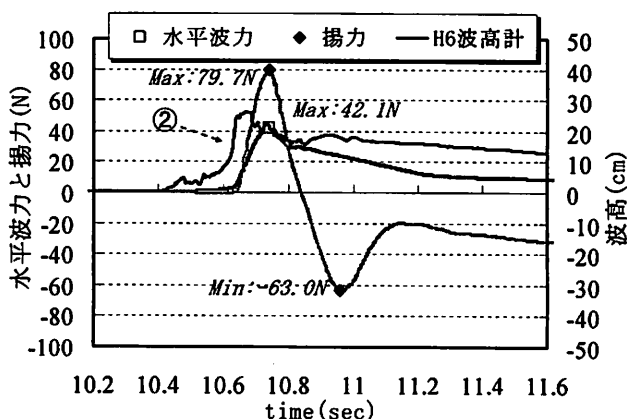


図-16 作用力と波高（橋台有り、砕波有り、指令波高 20 cm）

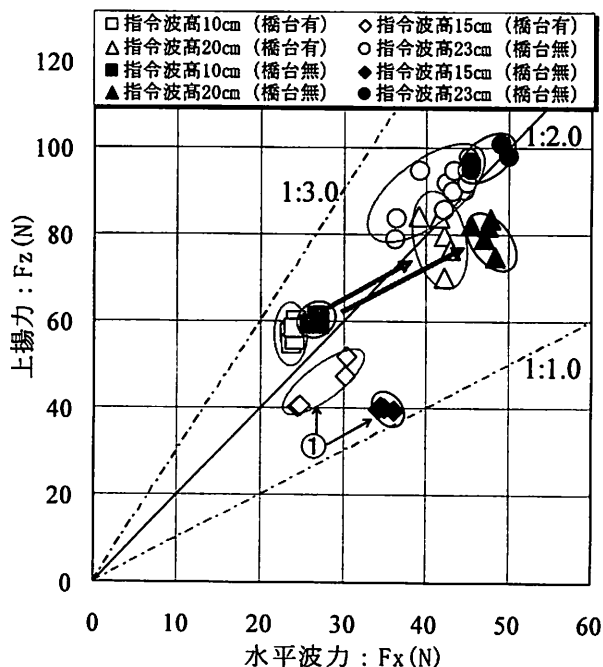
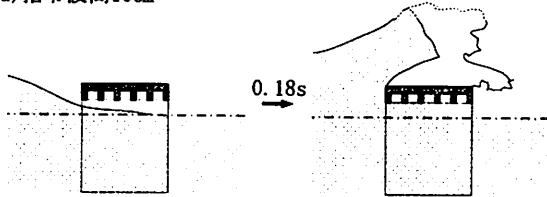


図-17 水平波力と上揚力の関係（砕波有り）

なった。砕波が無い場合と同様に、落下して衝突するエネルギーも橋台が無い場合と有る場合において泡を含む波、含まない波について、それぞれ 1.6、1.4 倍になる。こうした要因により、結果的に 3.2 倍の差となったと考えられる。

(a) 指令波高10cm



(b) 指令波高15cm

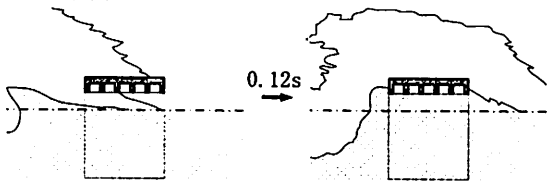


図-18 実験状況図

(3) 最大作用力抽出特性

水平波力と上揚力の関係性を示すためそれぞれの作用力について検証する。図-17 に水平波力と上揚力の関係を示す。同図は図-15, 16 で抽出した水平波力、上揚力の最大値をプロットした。橋台が無い実験条件の水平波力に着目すると、指令波高 10, 15, 20, 23cm について、それぞれ 26.0~27.2N, 34.2~36.1N, 45.4~48.4N, 45.4~49.9N に分布しており、ほぼ比例関係にある。橋台有りの実験条件の水平波力は 23.5~24.3N, 24.4~30.4N, 39.1~43.0N, 36.3~45.1N に分布しており同様にほぼ比例関係にある。水平波力について、指令波高が大きくなるに従い水平波力も大きくなる。橋台が無い実験条件の上揚力に着目すると、指令波高 10, 15, 20, 23cm について、それぞれ 58.2~61.1N, 39.4~40.2N, 74.8~83.8N, 94.9~100.9N に分布している。橋台有りの実験条件の上揚力は 54.7~60.0N, 40.3~51.7N, 70.1~84.2N, 78.8~97.7N に分布している。上揚力も比例関係にあるが、図-17 の①に示すように、指令波高 15cm における上揚力の値が、指令波高 10cm に比べ減少する傾向となった。

このことについて図-18 の波形状より、この作用力の差について検討する。図-18 の(a)に橋台有り、指令波高 10cm の波形状を示す。桁に作用する手前において、波はほとんど砕波していない。図-18 の(b)に橋台有り、指令波高 15cm の波形状を示す。桁に衝突する手前で波は砕波している。図-18 より、指令波高 10cm は指令波高 15cm よりも、泡を含まない波が、桁上部へ載ったため、下方向に大きな揚力が作用し、結果的に、上揚力が桁上部に載った波により制限されたと考える。

図-19 に橋台の有無における波力と揚力の関係を示す。このグラフでのプロットは各ケースの平均値である。橋台が無い場合の水平波力に着目すると平均値は指令波高 10, 15, 20, 23cm についてそれぞれ 26.8, 34.9, 47.2, 47.5N である。橋台が有る場合の平均値は 24.0, 27.7, 41.6, 41.8N である。橋台が有るときに水平波力は橋台が無いときの水平波力に比べ、それぞれ 0.9, 0.8, 0.9, 0.9 倍程度であり、橋台の有無による水平波力の差はほとんどなかった。また、水平波力は指令波高が上がるに従い大

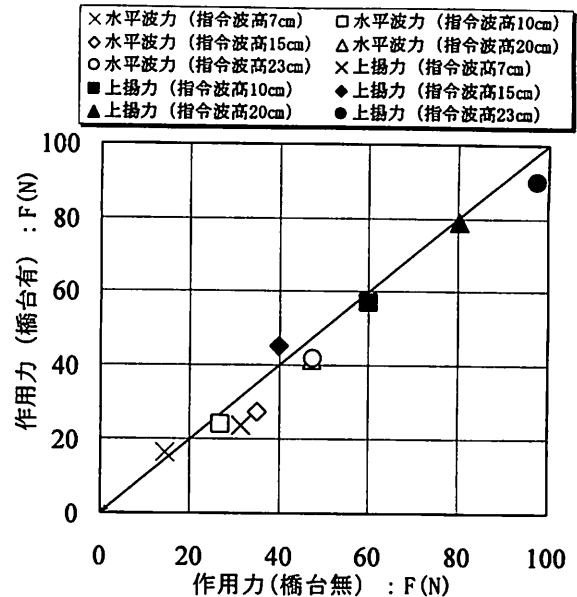


図-19 橋台有無における波力・上揚力の関係

きくなった。一方、上揚力について橋台が無い場合の平均値は 59.9, 39.8, 80.3, 97.6N である。橋台が有る場合の平均値は 57.2, 45.0, 78.9, 89.9 N である。橋台が有るときの上揚力は橋台が無いときの上揚力に比べ、それぞれ 1.0, 1.1, 1.0, 0.9 倍程度であり、橋台の有無で上揚力に差が生じなかった。

5. 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。実験により得られた試験結果を以下にまとめる。

- 1) 砕波の無い実験条件 (パターン①, ③) において、波力は橋台有りの実験条件が橋台無の実験条件に比べ 1.1 倍、上揚力について橋台が有る場合は橋台が無い場合に比べ 0.75 倍となり、橋台の有無による差は小さい。下揚力については、橋台有りでは橋台無と比べ、2.5 倍大きくなったが、これは橋台により押し上げられた波が、桁上部へ落下し、桁へ作用するためであると考えられる。
- 2) 砕波の有る実験条件 (パターン②, ④) において、波力は橋台有りの実験条件が橋台無の実験条件に比べ 0.8~0.9 倍、上揚力について橋台が有る場合は橋台が無い場合に比べ 0.9~1.1 倍程度となり、橋台の有無による差は小さい。下揚力について、橋台の有る実験条件が、橋台の無い実験条件と比べ、3.2 倍大きくなったが、これも砕波無しの場合と同様に、橋台により押し上げられた波が桁上部へ落下し、桁へ作用するためであると考えられる。

参考文献

- 1) 片岡正次郎, 日下部毅明, 長屋和弘: 津波衝突時に橋桁に作用する波力, 第 12 回地震工学シンポジウム, pp.154-157.
- 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.