

実験結果に基づく津波による橋梁への作用力算定方法と 安全照査法に関する一提案

二井伸一¹・幸左賢二²・宮原健太³・庄司学⁴

¹正会員 株式会社ウェスコ 岡山支社設計部構造設計課（〒700-0033 岡山市島田本町2-5-35）

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）

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

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、橋梁の上部工が流出するという被害が遭った。この被害は同島北西海岸の道路250kmの区間に存在する橋梁168基中81基であった¹⁾。

我が国においては、東海・東南海地震による津波被害が懸念されており、道路構造物の被害に関する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で、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⁾。実験で用いた造波した波は、一山孤立波と呼ぶ正弦波に近い波である。これは、津波作用力が最も大きくなる可能性のある津波の1波目に着目し、それを模擬したものである。実験前の造波試験の結果、砕波せずに一山形状を保ったまま桁に作用するケースと、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種類の波形状の実験が可能であった。

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い、実験結果から作用力算定手法と安全照査の提案を行う。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

(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パソコン制御で操作する。所要の波高値と初期水深（水槽底から静水面までの高さ）を入力し、パソコン内で自動計算され造波板の水を押す力が決定する。

橋梁模型は、実被害を受けたインドネシアの橋梁である。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）である。さらに、図中に示すように、造波板側に1/20勾配の斜面を有する海底地形を模擬した海底床を設置した。

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、橋梁模型の両端には側壁を設けた。これは、橋台をモデル化することによる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。なお、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。

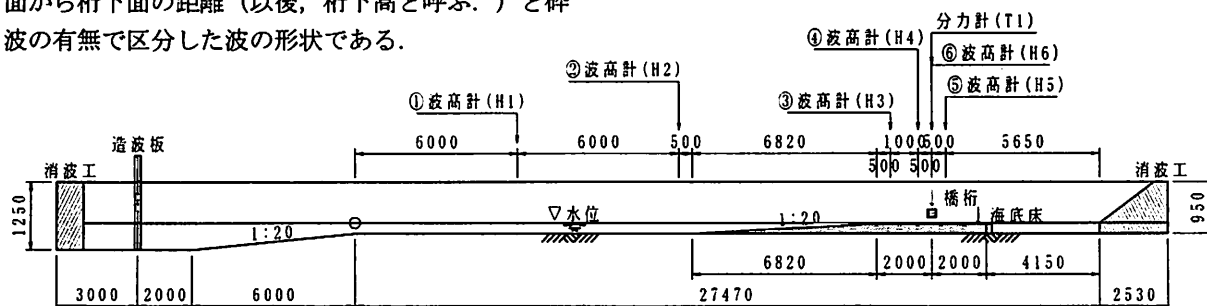


図-1 実験全体図

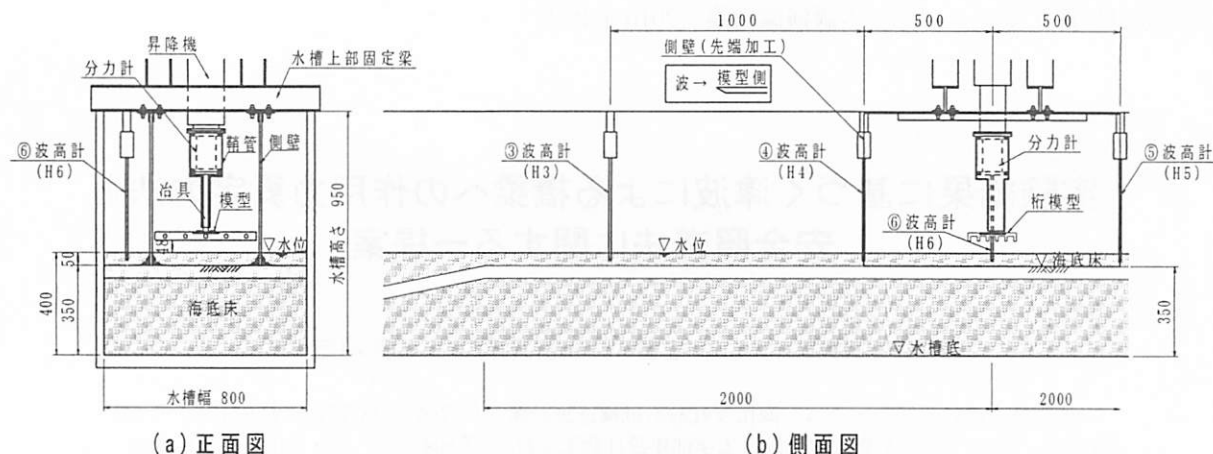


図-2 模型周辺の設置状況図

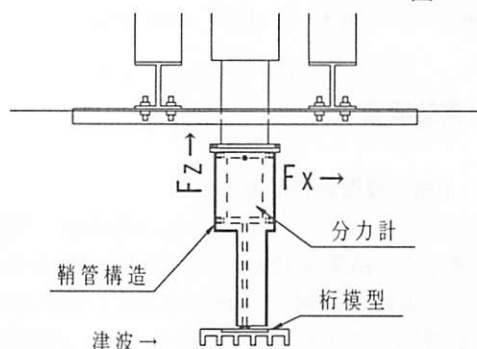


図-3 分力計設置図

計測項目は波高と桁への作用力である。波高計は6基使用した。H1(図-1中の①)～H4(図-2中の④)の波高計は、海底床の影響の有無で変化する波高の検証に使用した。H5(図-2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。H6波高計は、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。側壁の隣を通過する波は、模型への衝突による乱れが無い波である。後述の実験結果では、この通過波の波高による整理を行った。分力計は、水平波力(F_x)、揚力(F_z)が計測でき、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、治具を介して作用力を計測する。治具自体に波が作用しないように、鞘管構造で分力計と治具を覆った。別途行った治具と分力計の剛性検証の結果、固有周期は30Hz程度であった。

(2) 実験パラメータ

実験パラメータは、砕波の有無により区分した波形状、砕波の有無を検証した造波試験により設定した静水深(海底床上面から静水面までの高さ)、静水面から桁下までの距離を示す桁下高である。

図-4に、今回実施した実験条件を示す。標準ケ

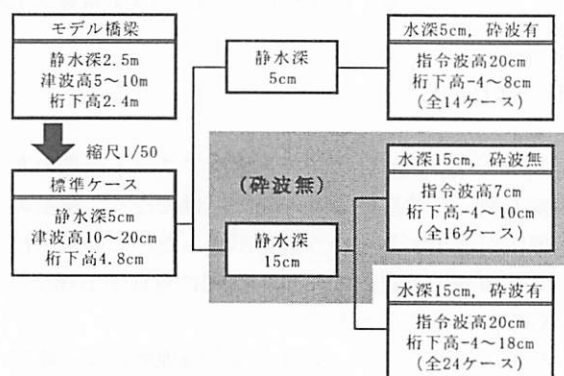


図-4 実験条件のフロー

ースは、モデル橋梁の架橋条件を参考に設定した。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。静水深と指令波高を固定し桁下高を変化させた。

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、入力値(指令値)は波高と初期水深である。静水深を5cmとした造波試験では、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7cmにして造波すると、一山形状を保った砕波しない波が得られた。本実験では、指令波高値と静水深の関係により、2種類の造波が可能であったことから図-5に示す3条件に分類して実験条件を設定した。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』と呼ぶ。

『水深5cm、指令波高20cm、砕波有り』の実験条件は、現地の静水深相当の静水深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。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。波は崩れることなく、凸型の一山孤立波形状を保ち、桁位置での波高は約 11cm の状態で通過する。『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砕波する。桁位置での波高は 25cm 程度で桁を巻き込むように通過する。

(3) 実験結果の評価方法

図-6 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、縦軸は桁に作用する水平波力を示す。本実験は、計測サンプリング周期を 1/1000 秒とした。これは、津波が桁へ作用する瞬間的な力を抽出することを目的にしたためである。図-6 の計測データ (1/1000s) 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。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、1/10 秒移動平均法を用いて共振影響の控除を行った。処理したデータは治具の共振振動数 30Hz の 1/6 である 5Hz 以上の振動をカット (ローパスフィルター) したデータとほぼ同じである。1/10 秒移動平均法で処理したデータを図-6 に併記する。水平波力の最大値は、ほぼ半減する。以後、処理したデータにより考察を行う。

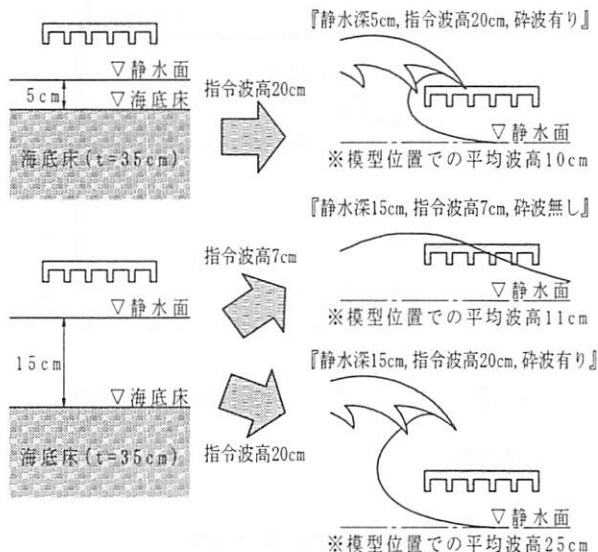


図-5 各実験条件の造波特性

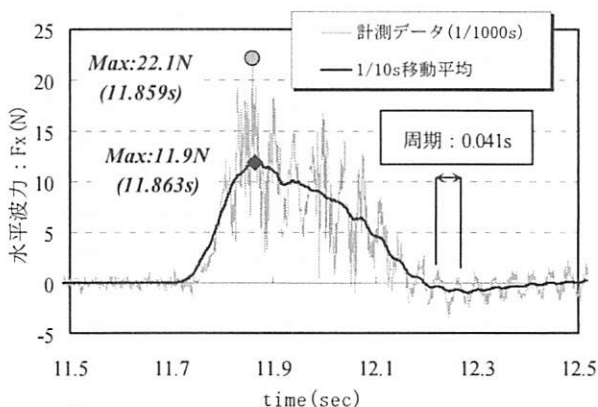


図-6 移動平均によるデータ処理後の水平波力

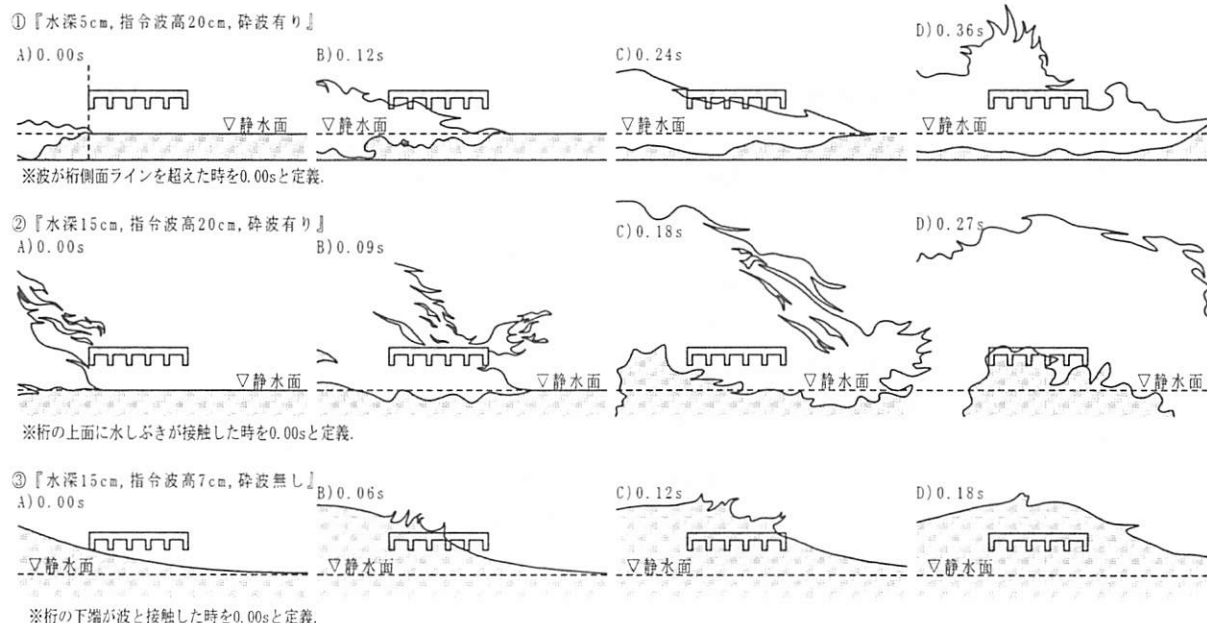


図-7 波の形状の違いによる桁への作用状況

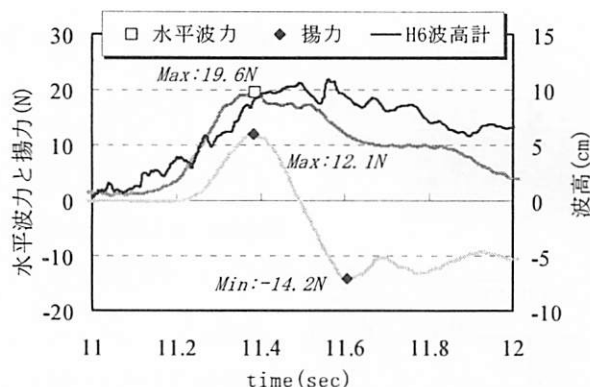


図-8 作用力と波高（水深5cm，砕波有り）

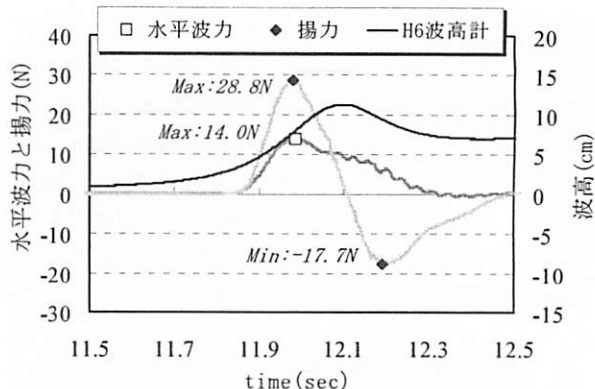


図-9 作用力と波高（水深15cm，砕波無し）

3. 実験結果

(1) 実験ケース毎の作用状況の特徴

図-7は、3つの実験ケースの波の作用状況を示す図であり、桁下高は全て4.8cmである。同図上段の『水深5cm，指令波高20cm，砕波有り』のケースの波は桁の手前で砕波し、水泡が混在する状態で桁下面より作用する。波高は徐々に大きくなり、桁への衝突時に、大きな水しぶきを上げる。同図中段は、『水深15cm，指令波高20cm，砕波有り』のケースであり、波の上半分は砕波し、下半分は砕波していない水の塊で構成される波形状である。桁へは、砕波した部分の水しぶきが桁上面より降り注ぎ、その後、砕波していない水の塊の部分が、桁の左下面より時計回りに巻き上げるように作用する。最後に同図下段は『水深15cm，指令波高7cm，砕波無し』の実験ケースである。波が桁に衝突した後も、波形状が大きく崩れずに、一山形状を保ったまま桁を通過する。

(2) 砕波の有無による作用力の特徴

計測結果の代表例を2例示す。図-8は『水深5cm，指令波高20cm，砕波有り，桁下高4.8cm』の実験ケースの水平波力，上揚力，桁位置での波高の計測結果である。波が砕波して桁に作用することから，波高は凹凸がある状態で計測される。波高が大きくなり始める11.4秒付近で，水平波力と上揚力は最大値を記録する。その後，揚力は負の値となる。この要因は，桁上面に水が載るためである。

図-9は『水深15cm，指令波高7cm，砕波無し，桁下高4.8cm』の実験ケースの結果である。波高計測値は滑らかであり，波高が大きくなる手前で両作用力が最大値を示す。また，上揚力が水平波力に比べ2倍程度大きくなるという特徴がある。

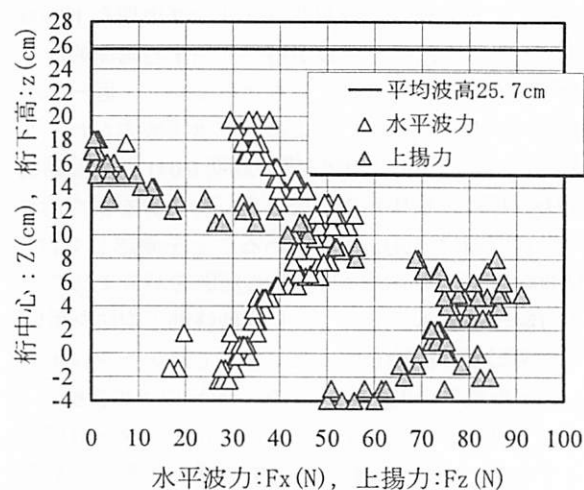


図-10 桁位置と作用力（水深15cm，砕波有り）

(3) 波形状の違いによる作用力の特徴

図-10は『水深15cm，指令波高20cm，砕波有り』の実験条件の結果であり，横軸は作用力の最大値，縦軸は桁位置を表す。本実験条件の波は，砕波した部分と砕波していない部分で構成され，その境界は平均波高25cmのほぼ中間点であった。同図によると，水平波力と上揚力の大きさが逆転する位置は縦軸の12cmの位置であり，平均波高25cmのほぼ中間点であり，前述の境界位置にほぼ一致する。

図-11は，全実験結果の水平波力の最大値を示す。縦軸は桁位置を各波高で割ることによって無次元化し，水平波力を波高に対する桁の位置との割合で評価した。水平波力が絶対的に大きいのは，波高の大きい『水深15cm，指令波高20cm，砕波有り』の実験条件である。図-11の特徴をより把握するため，各実験ケースの平均値を用いて図を作成した。結果を図-12に示す。『水深5cm，指令波高20cm，砕波有り』と『水深15cm，指令波高7cm，砕波無し』を比べると，波高がほぼ同等であっても砕波がある場合の方が水平波力は大きくなることを確認できる。

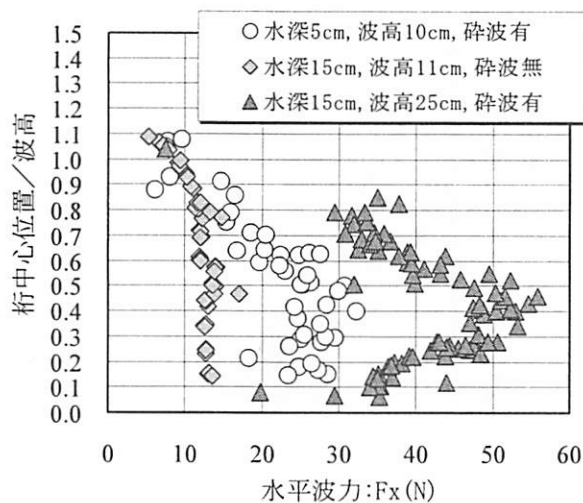


図-11 桁波高比と水平波力

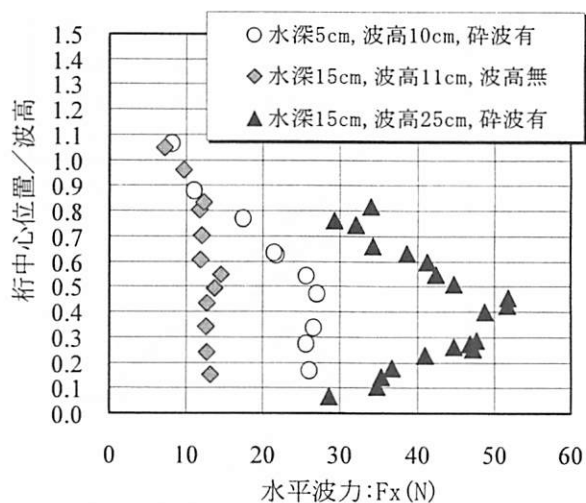


図-12 桁波高比と水平波力（平均値）

また、図-13は同様の処理を行った上揚力の結果である。図-13によれば、『水深15cm、指令波高20cm、砕波有り』の結果は、縦軸0.4付近から急激に小さくなり、『水深15cm、指令波高7cm、砕波無し』の結果より小さくなる。

以上の傾向を図-14にまとめる。砕波無い波が作用する場合は上揚力が水平波力に比べて大きく、砕波した波が作用する場合はその逆の傾向を示す。また、『水深15cm、指令波高20cm、砕波有り』の実験条件は両特性を有する波であり、桁の位置によって作用する波形状が変わるものの、砕波有無による作用力の特性を示す結果が確認できる。

4. 実験結果の評価

図-12、図-13の水平波力と上揚力を無次元化した図を図-15、図-16に示す。横軸は、各作用力を各想定被圧面積（水平波力の場合は桁側面、上揚力の場合は桁の下面）と各実験毎の津波高に対する静水圧で割り無次元化を行った。この値は、波高を水深と仮定した静水圧との比を表す。また、本図より各実験ケースの指令波高を計測値の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』、『水深15cm、指令波高20cm、砕波有り』の実験条件を『水深15cm、波高25cm、砕波有り』、『水深15cm、指令波高7cm、砕波無し』の実験条件を『水深15cm、波高11cm、砕波無し』と表記する。

図-15の水平波力の結果によると、静水圧に対して最も大きくなったものは、『水深5cm、波高10cm、砕波有り』の実験条件で、水平波力の絶対量

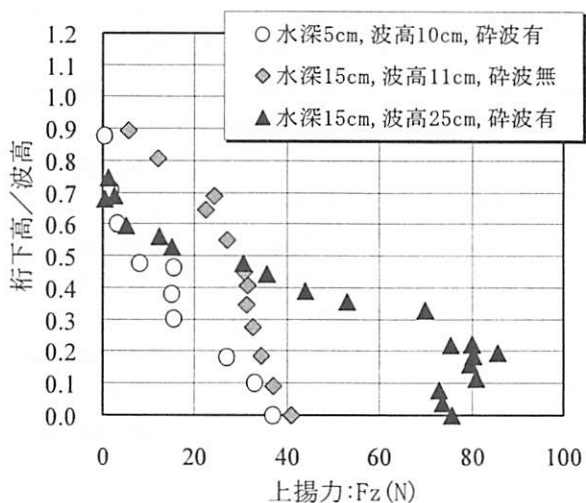


図-13 桁下高波高比と上揚力（平均値）

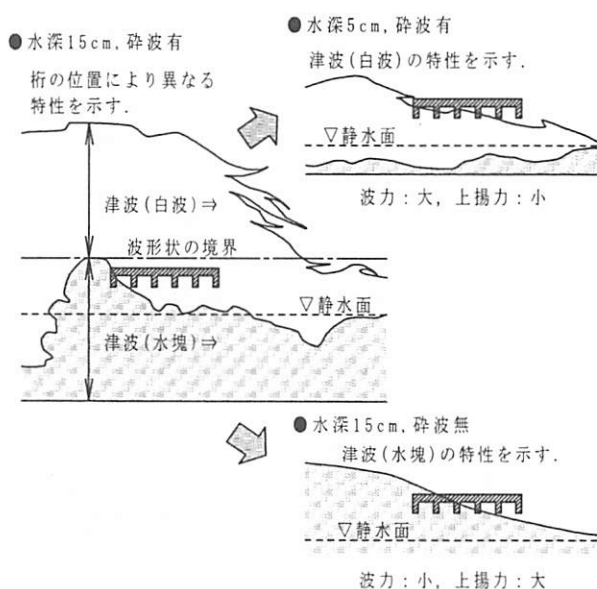


図-14 波形状の違いによる作用力の特性

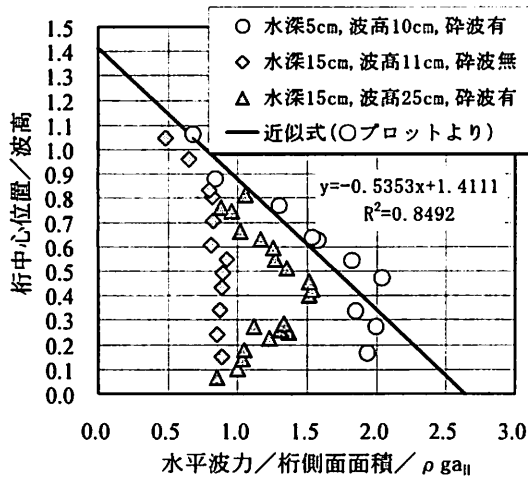


図-15 波力から求めた波圧と静水圧の関係

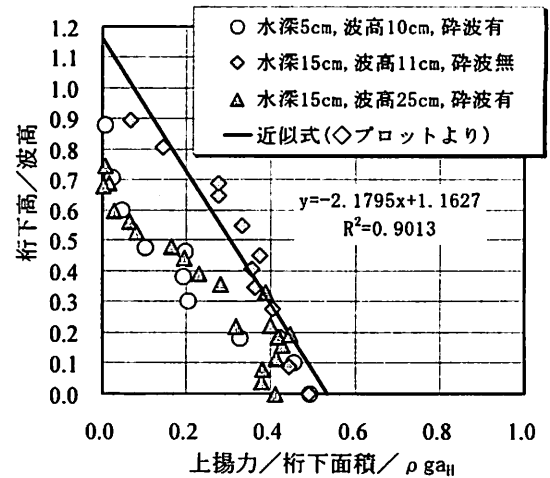


図-16 上揚力から求めた波圧と静水圧の関係

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した。また, 図-16 に示す上揚力の結果では, 『水深 15cm, 波高 11cm, 砕波無し』の実験条件が全ての実験結果を包括した。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, 同図に併記する。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 qx と qz とする。図-15 の横軸は $qx / \rho g a_H$, 図-16 の横軸は $qz / \rho g a_H$ となり近似式は以下となる。

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

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

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, qx : 水平波圧, qz : 鉛直波圧である。

上記式を変換し qx , qz を左辺に移動すると, 以下の式となる。

$$qx = \rho g (2.61 a_H - 1/0.54 Z) \quad (3)$$

$$qz = \rho g (0.53 a_H - 1/2.18 z) \quad (4)$$

5. 外力算定式の提案

上述の式(3)は水平波力の波圧分布を示し, 式(4)は上揚力に換算する水平波圧分布を示す。変数は, 波高と桁位置であり, 両値が既知であれば波圧の算定が可能となる。

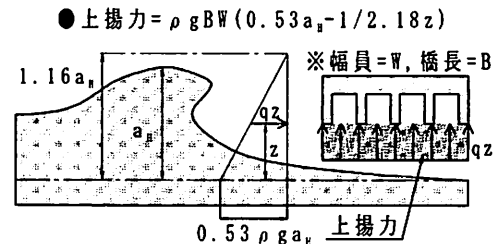
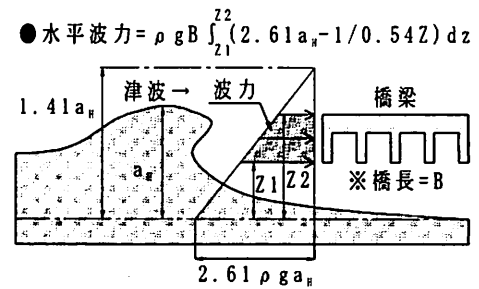


図-17 津波外力模式図 (上: 水平波力, 下: 上揚力)

図-17 に式(3)と式(4)の波圧分布図と外力算定式の模式図を示す。上図に示す通り, 式(3)に示す水平波圧分布は, 波高 a_H の 1.41 倍の位置を頂点とし, 静水面ではその波高 a_H に対する静水圧の 2.61 倍を底辺とした三角形分布となる。同図中の桁下高は $Z1$ で橋面は $Z2$ であり, これを変数とした積分式を解くことで水平波力が算定される。なお, この三角形分布は, 既往の波力算定式である合田式等で想定される三角形波圧分布より小さい。

次に, 上揚力は鉛直波圧 qz が桁下面を一様に作用する状態を想定する。その鉛直波圧 qz の分布は, 波高 a_H の 1.16 倍の位置を頂点とし, その波高 a_H に対する静水圧の 0.53 倍を底辺とした三角形分布より求める。この鉛直波圧 qz に幅員及び橋長を掛けて算定する。

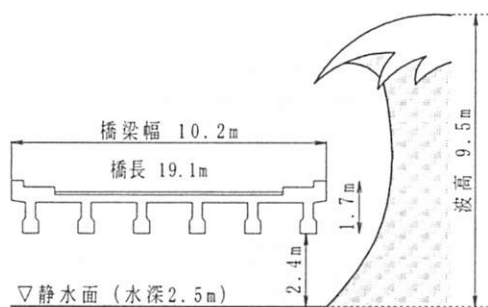


図-18 「Lueng Ie 橋」の推定津波高

以上より、津波外力の算定式を以下の通り提案する。式(5)は、水平波力 Q_x を算定する式であり、式(6)は、水平波力 Q_z を算定する式である。

$$Q_x = \rho g B \int_{z_1}^{z_2} (2.61a_H - 1/0.54Z) dz \quad (5)$$

$$Q_z = \rho g BW (0.53a_H - 1/2.18z) \quad (6)$$

6. 安全性の照査

(1) 安全照査対象橋梁の概要

本実験の対象橋梁であるコンクリート構造の単純橋である「Lueng Ie 橋」を例に安全照査を行う。

橋梁形式は、単純 PCT 桁橋（橋長 19.1m、橋梁幅 10.2m、構造高 1.7m）である。図-18 は架橋状況である。桁下高は 2.4m で、河川の水深は 2.5m である。津波高は橋梁周辺の津波痕跡より 9.5m とする。被害状況を図-19 に示す。上部工が約 3m 横移動し、高欄が崩壊した。

(2) 津波外力の算定

図-20 に「Lueng Ie 橋」の津波外力算定模式図を示す。計算に用いる定数は、 Z_1 及び z が 2.4m、 Z_2 が 4.1m、 a_H が 9.5m で、上揚力算定に用いる被圧面積は橋長 19.2m、幅員 10.2m より 195.84m² である。以上より、式(5)と式(6)を用いて外力を算定する。計算の結果、水平波力は 6200kN、上揚力は 7800kN となる。

(3) 抵抗力の算定と安全照査

図-21 は「Lueng Ie 橋」の橋座の状況を示す。図に示す通り、日本の橋梁にあるような支承アンカーが無く、上部工と下部工は接続していない。これを踏まえ、抵抗力に上部工重量のみを考慮した照査を行う。作用力と抵抗力の関係を図-22 に示す。本橋の上部工重量 (W) は、上部工断面積に橋長と鉄

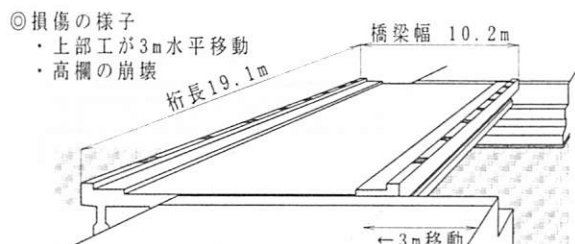
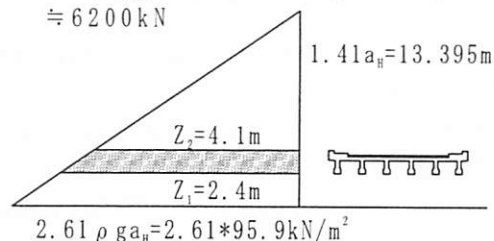


図-19 「Lueng Ie 橋」被害状況

◎ 水平波力

$$\begin{aligned} Q_x &= \rho g B \int_{2.4}^{4.1} (2.61a_H - 1/0.54Z) dz \\ &= 1.03 \times 9.8 \times 19.1 \times \int_{2.4}^{4.1} (2.61 \times 9.5 - 1/0.54Z) dz \\ &\approx 6200 \text{ kN} \end{aligned}$$



◎ 上揚力

$$\begin{aligned} Q_z &= \rho g BW (0.53a_H - 1/2.18Z) dz \\ &= 1.03 \times 9.8 \times 19.1 \times 10.2 \times (0.53 \times 9.5 - 1/2.18 \times 2.4) \\ &\approx 7800 \text{ kN} \end{aligned}$$

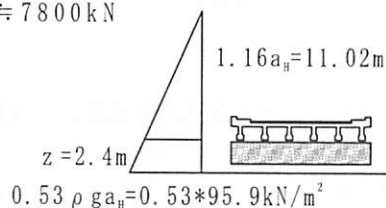
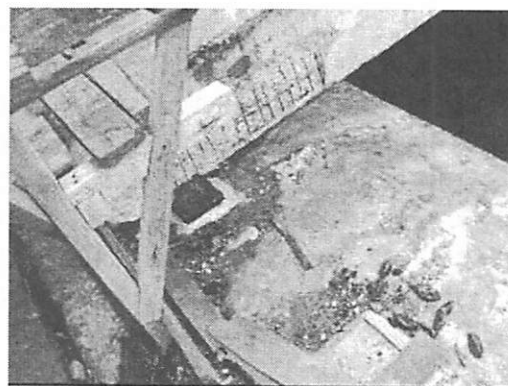


図-20 津波外力算定模式図



- ① 支承は薄いゴムであり、アンカーは無い。
- ② 日本のように変位制限構造等の落橋防止システムは無い。

図-21 抵抗機構

筋コンクリートの単位体積重量 ($W=5.84\text{m}^3 \times 19.1\text{m} \times 24.5\text{kN/m}^3=2747.1\text{kN}$) より 2800kN とする。浮力 (W_u) は、上部工体積と海水密度から ($W_u=\rho_0$

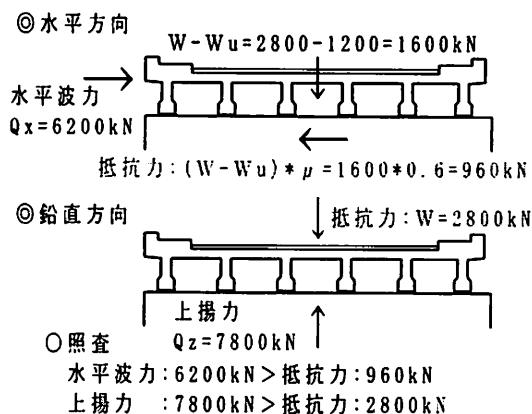


図-22 津波外力と抵抗力

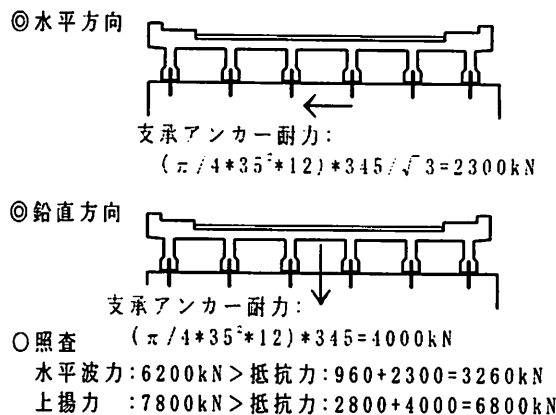


図-23 津波外力とアンカーを見込んだ抵抗力

$\times g \times V = 1.03 \text{ t/m}^3 \times 9.8 \text{ m/s}^2 \times 5.84 \text{ m}^2 \times 19.1 \text{ m} = 1125.9 \text{ kN}$ 1200kN とする。

水平抵抗力は、その上部工重量から浮力分を控除した重量と係数 ($\mu = 0.6$)³⁾ の積より算定する。計算の結果、抵抗力は 960kN で水平波力は 6200kN であることから、作用力の方が 6.5 倍大きい結果となる。次に、上揚力に対する抵抗力は、実験の上揚力計測結果に上部工の浮力が含まれている結果であることを考慮し、上部工重量のみとする。抵抗力は 2800kN で上揚力が 7800kN であることから、作用力の方が 2.8 倍大きい結果となる。

(4) 支承アンカーの抵抗力を考慮した安全照査

ここでは、支承アンカーを仮定し、その抵抗を見込んで抵抗力を算定する。支承アンカーは、現行の変位制限構造相当の抵抗力を有するものとする。試設計の結果、図-23 に示す通り $\Phi 35$ の異形鋼棒 (SD345) が 1 支承線上に 6 本配置され、合計 12 本が抵抗すると仮定する。

水平抵抗は、鉄筋の降伏せん断耐力を想定し、鉄筋の断面積に降伏応力 345 N/mm^2 を掛け、 $\sqrt{3}$ で割って算定する。計算の結果 2300kN となり、抵抗力の合計は図-22 のものと併せ 3260kN となるが、作用力の方が 1.4 倍大きい結果となった。次に鉛直抵抗は鉄筋の耐力とする。鉛直抵抗の合計は 6800kN となるが、作用力が 1.1 倍大きい結果となった。

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、模型を用いた実験を行い、結果を反映し、安全照査の一例を示した。以下に知見を記す。

- 1) 碎波の有無を区分して、作用力特性を検証したところ、碎波して桁に作用する場合は水平波力が大きく、揚力は小さくなり、碎波しないで桁に作用する場合は、その逆の傾向を示した。碎波の有無が混在する場合は、桁の位置によって変わる波の形状が影響するものの、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。
- 2) 全実験結果を無次元量で評価し、実験結果を包括する波圧分布線 (1 次近似線) から波圧分布式を導き、水平波力と上揚力の算定式を提案した。
- 3) スマトラ島に実在する橋梁を例に安全照査を行い、現地の状況に則して支承等の抵抗力を加えずに安全照査をすると、水平波力は 6.5 倍、上揚力は 2.8 倍程度、抵抗力を上回る結果となった。そこで、支承アンカーを仮定して、その抵抗力を見込んで照査したところ、水平波力は 1.4 倍、上揚力は 1.1 倍程度に減少する結果となった。津波外力が本提案通りであれば、落橋防止装置のような別途対策工を橋梁に施すことで、津波対策が可能になると考える。

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) 幸左賢二，二井伸一，宮原健太，庄司学：スマトラ沖地震に伴う津波による PC 橋梁の被害分析，プレストレストコンクリート技術協会 第 18 回シンポジウム論文集，pp.265-270，2009.10