

単径間橋桁に作用する砕波津波の荷重に関する実験的検討

Experimental study associated with a breaking tsunami wave load acting onto a single span bridge deck

庄司学*, 森山哲雄**, 藤間功司***, 嶋原良典****・笠原健治*****
Gaku Shoji, Tetsuo Moriyama, Koji Fujima, Yoshinori Shigihara, Kenji Kasahara

*博(工), 筑波大学准教授, 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)

**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)

***工博, 防衛大学校教授, システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

****博(工), 防衛大学校助教, システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

*****防衛大学校システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

The giant earthquake of $M_w=9.3$ and the induced tsunami in December 26, 2004 caused the catastrophic damage of infrastructures such as coastal structures, utilities and transportation facilities. In this study, the hydraulic experiments were carried out to clarify a tsunami wave load to a bridge deck, focusing on the clarification of the dependence of the bridge deck lateral movement on a wave height induced by a tsunami. Maximum ratio of the drag force to the deck weight becomes 0.43 to 0.44, that means the boundary lateral load by which deck movement occurs.

Key Words: 2004 Indian Ocean Tsunami, tsunami wave load, bridge, hydraulic experiment

キーワード: 2004 年インド洋大津波, 津波荷重, 橋梁, 水理実験

1. はじめに

2004 年 12 月 26 日 (UTC 00:58:49) に発生したスマトラ沖地震($M_w=9.3$)およびインド洋大津波は, スマトラ島北西部のみならず, インド洋に面する多くの沿岸諸国に甚大な被害を引き起こした. 津波被害が拡大した要因としては, 家屋等の被害と共に, 港湾, 道路, 鉄道, 電力施設, 上下水道等の様々な社会基盤構造物の被害が発生したことが挙げられる. それらの中でも, 海岸線の極近傍に立地する橋梁構造物は津波作用によって落橋や橋台の洗掘等の様々なパターンの被害を被った¹⁾.

一方, 我が国は地震多発国であり, マグニチュード 8 クラスの巨大海溝型地震とそれに伴う津波が度々発生している. よって, 今後の発生が懸念されている東海地震, 南海地震, 東南海地震等を想定した津波リスクマネジメントは社会的に喫急な課題となっている. このような観点から, 道路や鉄道は, 地震・津波災害時の避難や救命救助等の緊急活動やライフラインの復旧活動を支える交通基盤として重要な機能が求められることを考え合わせると, それらに対する津波荷重の評価は極めて重要となる. 構造物の中でも護岸や家屋, 建屋等に対しては,

これらに作用する津波波力の観点から様々な研究が行われている^{2),3),4),5),6)}. 特に, 朝倉ら⁶⁾による建物に対する津波波圧の算定式は, 内閣府の津波設計ガイドライン⁷⁾の中で採用されている. しかし, これらはいずれも港湾施設や海岸線近傍に立地する家屋等構造物を対象としており, 河口や河川内に位置する橋梁構造物に作用する津波荷重を明確に研究したものは極めて少ない.

このような観点から, インド洋大津波以降, 橋梁構造物に作用する津波荷重評価に係わる水理実験や数値解析が多数の研究者によって実施されている. 庄司・森⁸⁾は, インド洋大津波で被災したスリランカの橋桁の縮尺模型に対して水理実験を実施し, 橋桁の横移動と津波流速との関係性を定量的に明らかにしている. Iemura, et al.⁹⁾は, 同様に橋梁模型に対する水理実験を行い, 津波浸水深と津波流速の関係性や津波流速と津波波力の関係性について示した他, 緩衝マウンド等の効果についても検討している. 片岡ら¹⁰⁾, 荒木ら¹¹⁾, 杉本・運上¹²⁾は, 橋桁の縮尺模型に対する水理実験を実施し, いずれも橋桁被害を津波作用力の観点から分析している. 片岡ら¹⁰⁾は, 橋桁に作用する津波波力に合田式⁴⁾を用いることの妥当性を検討している. 荒木ら¹¹⁾

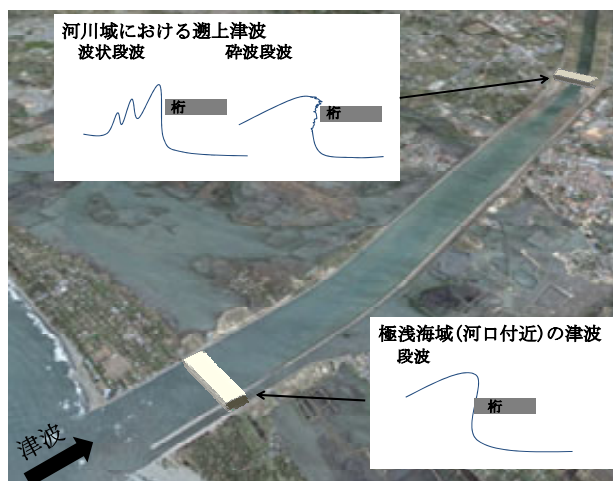


図1 河川を遡上する津波の形態

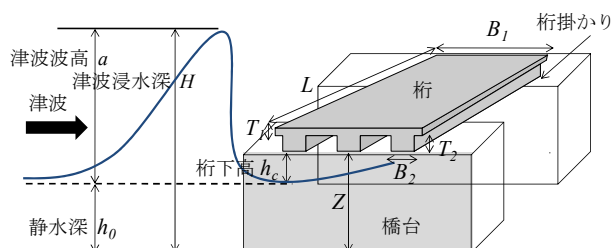


図2 桁模型とそれに対する津波作用

は、水平方向の波力に加えて鉛直方向の波力を測定し、橋桁の桁下高さとの関係を示している。杉本・運上¹²⁾は、荒木ら¹¹⁾と同様に橋桁に作用する津波波力を水平方向と鉛直方向に分けて計測した上で、両方向の力と橋桁被害の関係性について整理している。一方、数値解析の観点からは、幸左ら¹³⁾が

個別要素法による粒状体挙動解析による橋桁の津波被災メカニズムの解明を実施し、五十嵐・後藤¹⁴⁾が、粒子法による津波の遡上と氾濫流に伴う橋桁の被災過程のシミュレーションを行っている。

しかし、力学的な相似を考慮した上で、橋梁が被害を受ける境界となる津波波力をどの程度の荷重と考えたらよいのか、依然として明確になっていない。

以上より、本研究では、2004年インド洋大津波においてインドネシアで被災した桁橋の幾何学的な縮尺模型を製作した上で、これらに対するゲート急開流れによる水理実験を実施し、橋桁に作用する流体力の相似を念頭に入れて、橋桁が橋台に対して横移動するという橋桁の津波被害が生じる際の津波波力の同定を試みることにする。

2. 水理実験

2.1 対象とする津波

深海域で発生した津波は、一定の周期を保ちながら浅海域へと進行する。この状態で、浅海域では、水深の変化に伴う変形によって津波の波長と波速は減少するとともに津波高が高くなり、その結果、水位の高い部分の水面形と水位の低い部分の水面形との移動速度の差が大きくなることで波の峰が前傾化し、段波が形成される。河口付近はこのような極浅海域と位置付けられるので、河口付近に架橋する橋桁はこのような段波の作用を受けることになる。その上で、津波が河川に侵入し、水深の更に

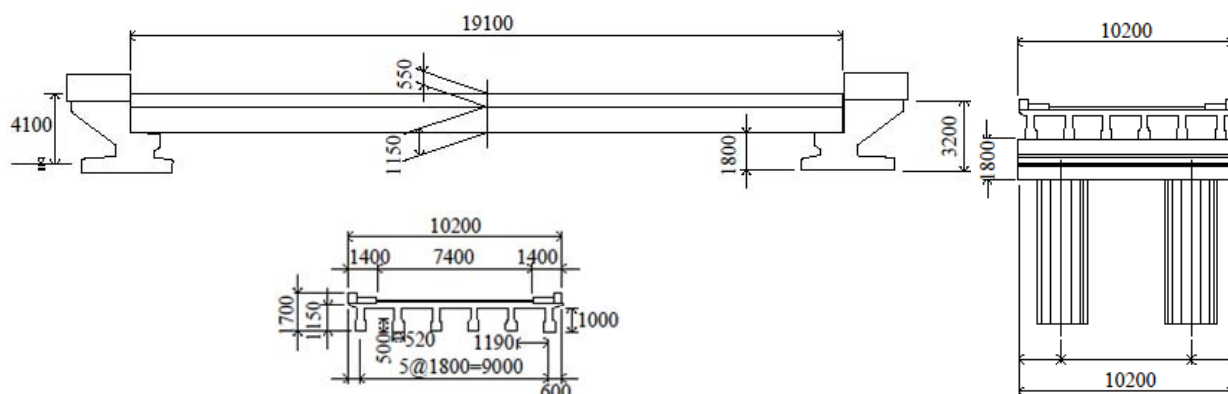


図3 Lueng Le Bridge の一般図(単位 mm)¹⁵⁾

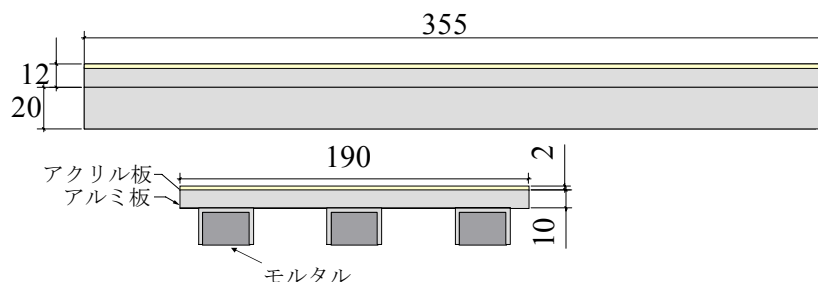


図4 桁模型の図面(大模型の場合)

表 1 実験で用いた桁模型と実験条件

実験条件	模型サイズ	使用材料	ケース	桁長 L (mm)	床版厚さ T_1 (mm)	床版幅 B_1 (mm)	桁厚 T_2 (mm)	桁幅 B_2 (mm)	桁下高 h_c (mm)	静水深 h_0 (mm)	貯留水深差 h_1 (mm)	被害形態
0	大	発砲スチロール	0-1	355.0	12.0	190.0	20.0	30.0	10	40	140	波力測定
			0-2	355.0	12.0	190.0	20.0	30.0	30	20	140	波力測定
	中	発砲スチロール	0-3	220.0	8.0	120.0	12.0	20.0	10	40	103	波力測定
			0-4	220.0	8.0	120.0	12.0	20.0	30	20	125	波力測定
	小	発砲スチロール	0-5	178.0	6.0	95.0	10.0	15.0	10	40	103	波力測定
			0-6	178.0	6.0	95.0	10.0	15.0	30	20	110	波力測定
1	大	モルタル アクリル板 アルミ板	1-1	355.0	12.0	190.0	20.0	30.0	10	40	190	桁移動がぎりぎり生じない
			1-2	355.0	12.0	190.0	20.0	30.0	10	40	191	極めて軽微な桁移動
	中	モルタル アクリル板 アルミ板	1-3	220.0	8.0	120.0	12.0	20.0	10	40	103	桁移動がぎりぎり生じない
			1-4	220.0	8.0	120.0	12.0	20.0	10	40	105	極めて軽微な桁移動
			1-5	220.0	8.0	120.0	12.0	20.0	10	40	170	30cm程度の中規模な桁移動
			1-6	220.0	8.0	120.0	12.0	20.0	10	40	191	橋台端部までの大規模な桁移動
	小	モルタル アクリル板 アルミ板	1-7	178.0	6.0	95.0	10.0	15.0	10	40	103	桁移動がぎりぎり生じない
			1-8	178.0	6.0	95.0	10.0	15.0	10	40	120	極めて軽微な桁移動
			1-9	178.0	6.0	95.0	10.0	15.0	10	40	145	橋台端部までの大規模な桁移動
			1-10	178.0	6.0	95.0	10.0	15.0	10	40	191	橋台端部を越える桁の流出
2	大	モルタル アクリル板 アルミ板	2-1	355.0	12.0	190.0	20.0	30.0	30	20	203	桁移動がぎりぎり生じない
			2-2	355.0	12.0	190.0	20.0	30.0	30	20	205	極めて軽微な桁移動
	中	モルタル アクリル板 アルミ板	2-3	220.0	8.0	120.0	12.0	20.0	30	20	125	桁移動がぎりぎり生じない
			2-4	220.0	8.0	120.0	12.0	20.0	30	20	130	桁移動がぎりぎり生じない
			2-5	220.0	8.0	120.0	12.0	20.0	30	20	135	極めて軽微な桁移動
			2-6	220.0	8.0	120.0	12.0	20.0	30	20	170	30cm程度の中規模な桁移動
			2-7	220.0	8.0	120.0	12.0	20.0	30	20	205	橋台端部までの大規模な桁移動
	小	モルタル アクリル板 アルミ板	2-8	178.0	6.0	95.0	10.0	15.0	30	20	110	桁移動がぎりぎり生じない
			2-9	178.0	6.0	95.0	10.0	15.0	30	20	115	極めて軽微な桁移動
			2-10	178.0	6.0	95.0	10.0	15.0	30	20	140	30cm程度の中規模な桁移動
			2-11	178.0	6.0	95.0	10.0	15.0	30	20	170	橋台端部までの大規模な桁移動
			2-12	178.0	6.0	95.0	10.0	15.0	30	20	205	橋台端部を越える桁の流出



写真1 Lueng le Bridge の被害状況



写真2 計測器の設置

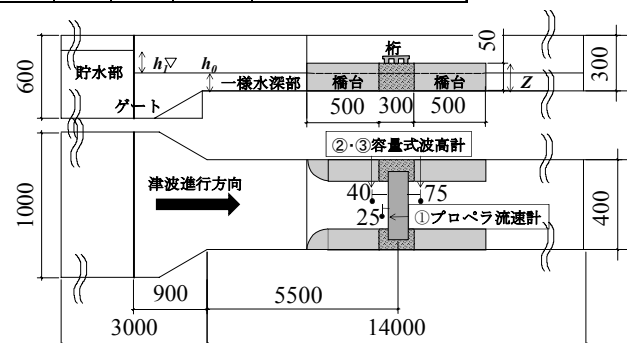


図5 実験水路の概要(単位 mm)

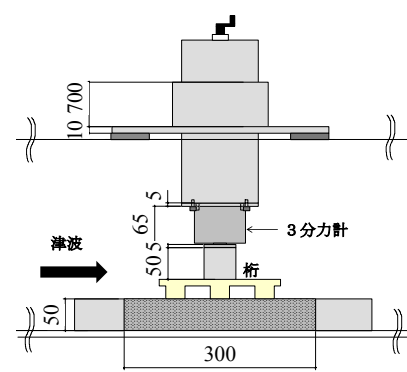


図6 波力計の概要(単位 mm)

浅い領域を伝播すると、波は周期の短い複数の波に分裂し、波高が増幅する現象が発生する場合がある。これはソリトン分裂と呼ばれ、津波先端部は波状段波となる。また、ソリトン分裂が発生しない場合は、段波津波は減衰していき、津波先端部は砕波段波となる。このように、河川内に位置する橋桁は河川を

遡上する波状段波か砕波段波の作用を受けると想定される。これらの津波作用の形態の中でも、福井ら²⁾によれば、砕波段波の破壊力は最も懸念されるところである。従って、本研究では、図1に示すように、対象となる橋桁は、河口から数百m程度河川内に入った位置に架橋されており、これらの橋桁

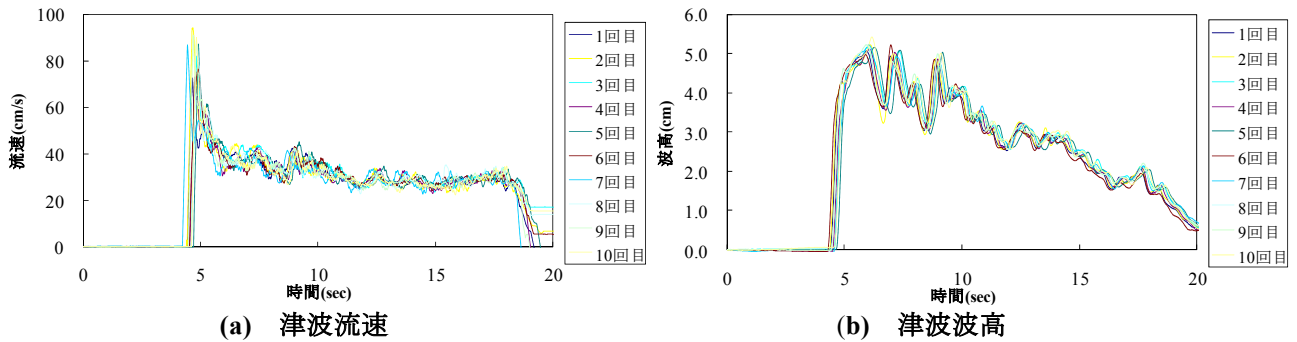


図 7 計測器で測定された 10 回分の時系列波形 (CASE1-2 の場合)

が砕波津波の作用を受ける場合を想定する。その上で、図 2 のように、津波作用に対して、桁が橋台上の桁掛かりから横移動するという桁移動の被害形態をモデル化した。

2.2 実験模型

実験模型の設計にあたっては、インドネシアスマトラ島の 30 橋梁の津波被害データを参考にした。その中から選定した橋梁は、図 3 に示す 1 径間 RC 桁橋(Lueng Ie Bridge)で、津波被害としては、橋桁が約 4m 移動する被害を受けたものである(写真 1)。なお、この橋梁の詳細な構造諸元や周辺地形等を完全に相似させる事は、実験水路の制約や模型製作の困難さの観点より不可能であった為、図 3 に示す橋梁と後述する桁模型の構造が完全に一致するわけではない。この結果、橋梁の橋桁の桁長、幅員、桁高を幾何学的に 3 通りに縮尺し(大模型：1/54、中模型：2/175、小模型：1/108)、図 4 のように橋桁の模型を作成した。また、実際の橋梁(Lueng Ie Bridge)は 5 主桁であったが、前述した通り、模型製作における加工の観点から、3 主桁での設計に変更した。なお、材料は、モルタルを主として用いたが、後述する流体力に関する相似の観点から、実橋の単位体積質量 ρ_p と模型の単位体積質量 ρ_m を合わせるために、橋桁模型の一部にアルミ板およびアクリル板を用いて桁の形を成形した。一方、波力測定実験を行う際の桁模型は、発砲スチロールを用いて設計した。

2.3 実験方法

本実験では、図 5 の様に、静水深 h_0 を 40mm および 20mm の 2 通りとした上で、ゲート急開流れによって津波を発生させた。その上で、貯水部と一様水深部の水位差 h_l を変化させることで津波高さ a を変化させ、橋桁の被害がぎりぎり生じないケースから大規模な被害を被るケースまでの津波を再現した。これ等の実験ケースを表 1 に示す。

津波は、ゲートから 1m~2m 付近において巻き波状に砕け始め、橋桁を設置するゲートから 6.4m の位置においては、砕波段波津波となって橋桁に作用

する。その上で、各実験に対して、津波流速、津波波力、桁前面・背面の津波波高を計測した。津波流速と津波波高に関しては、図 5 の①の位置にプロペラ式流速計(KENEK 製,VOT2-100-10)、②および③の位置に容量式波高計(正豊工学実験装置製作所製,L-300)を設置した(写真 2 参照)。データのサンプリング間隔は実験条件 0 の場合は 1/200 秒、実験条件 1 および 2 の場合は 1/100 秒とし、ゲート開放から 20 秒間の計測を行った。また、実験条件 0 の場合のみ、図 6 に示すように、3 分力計(日計電測株式会社製,Y102)を片持ち梁で支持し、流れ方向および鉛直方向の津波波力を計測した。計測器によって出力された時系列データは、全てのデータに対して、ある時刻におけるデータとその前後 10 点の合計 21 データを用いて移動平均を行い、その当該時刻の数値とした。また、本実験は、全てのケースにおいて、最初に橋桁を設置した状態で 10 回分の計測を行い、被害の再現性を確認した上で、橋桁を設置しない状態で通過波を流し、5 回の計測を行った。津波波高および津波流速の分析に際しては、橋桁を設置した場合のデータに対して 10 回の中から信頼性の高い 8 回分のデータを採用し、橋桁を設置しない場合のデータに対して 5 回の中から 3 回分のデータを採用し、それ等の平均値を用いた。図 7 は、その典型的な実験データの事例である。

2.4 橋桁の静止摩擦係数と固有振動数の計測

桁-橋台間の静止摩擦係数 μ に関しては、図 8 のように、各桁模型を橋台と同じ表面加工のコンクリ

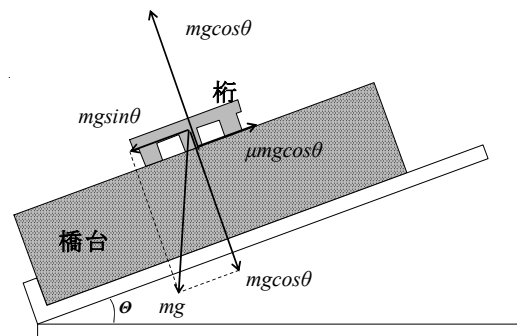


図 8 静止摩擦係数の測定方法の概要図

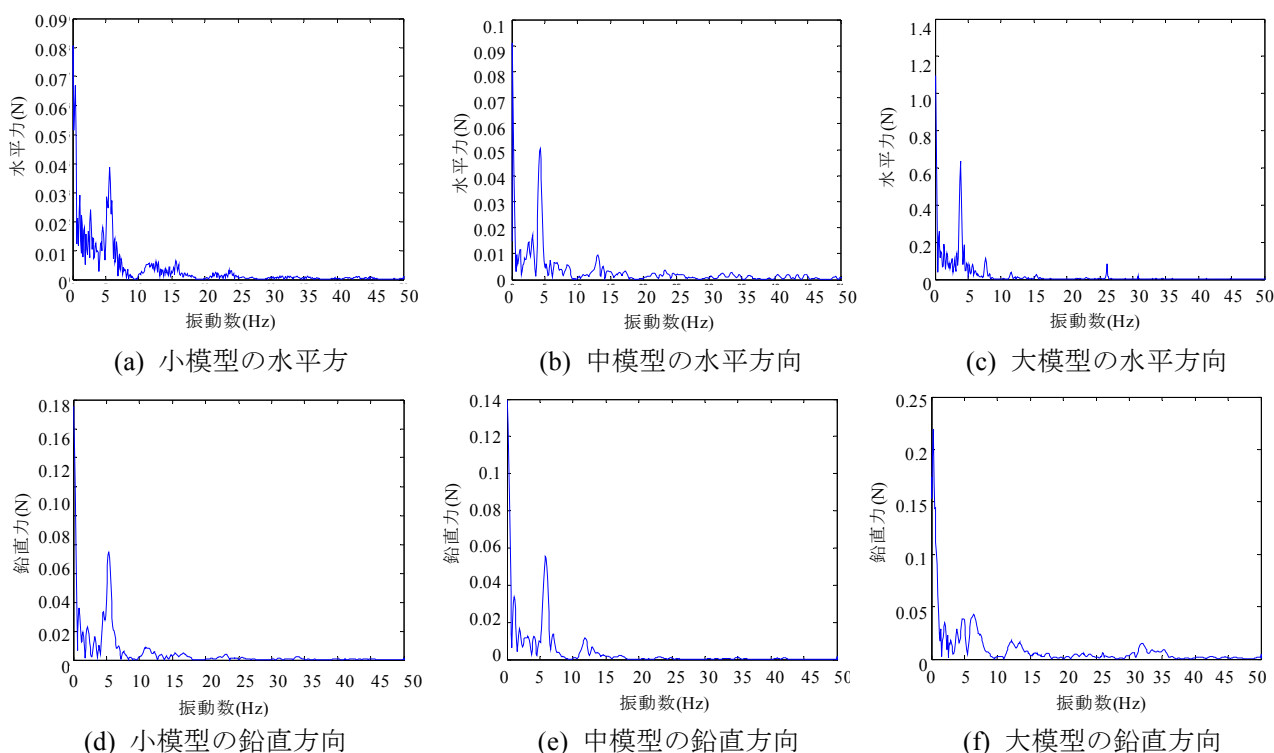


図9 桁模型を軽打した際の水平力ならびに鉛直力に対するフーリエスペクトル

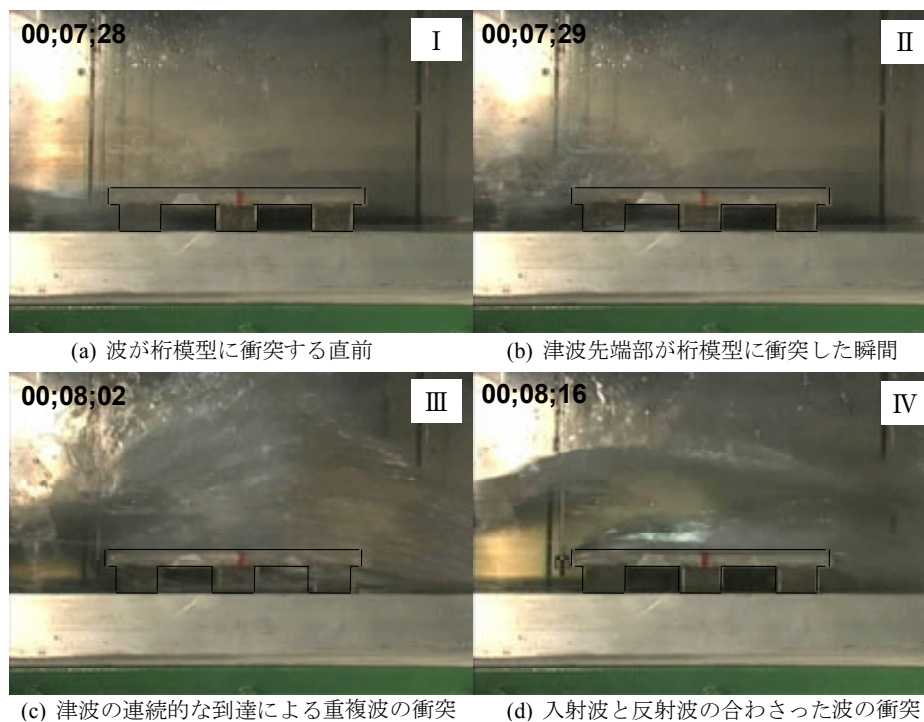


写真3 橋桁に対する津波の衝突(CASE1-2の場合、左上はゲート開門からの経過時間)

ート板上に置いた後、この板に傾斜を与え、桁模型が滑動した時点の $\tan\theta$ を計測することで求めた。摩擦条件を水理実験と同様にするため、桁模型とコンクリート板の接触部分は湿潤状態に保って計測を行い、各模型に対してそれぞれ10回ずつ計測を行った。これより静止摩擦係数 μ の平均値を求めると、大模型は0.65、中模型は0.64、小模型は0.62となった。

次に、桁模型を波力計に取り付けた状態で、桁模型の桁面中央部および横側面中央部付近を軽打し、その際の水平力および鉛直力を測定することで、桁模型-波力計で構成される系の固有振動数を測定した。それらを模型並びに水平方向、鉛直方向別に示すと図9のようになる。これらによると、水平方向の固有振動数は、大模型で3.91Hz、中模型で4.39Hz、小模型で5.66Hzである。更に、鉛直方向の固有振

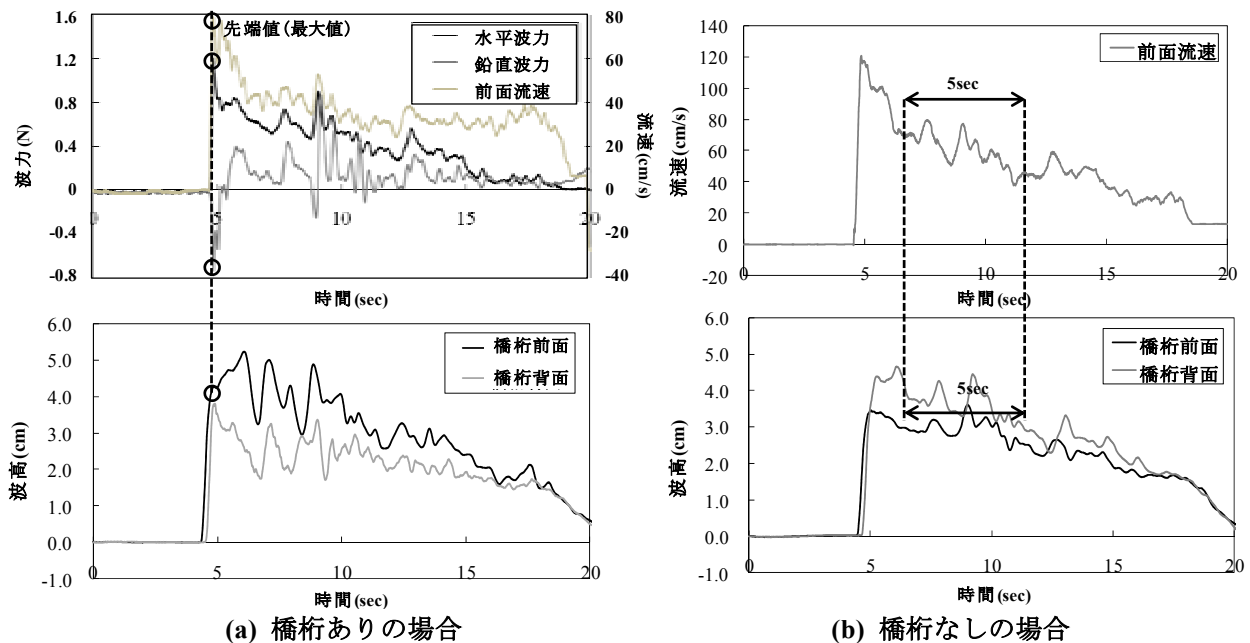


図 10 計測した時系列波形の一例(CASE0-5 の場合)

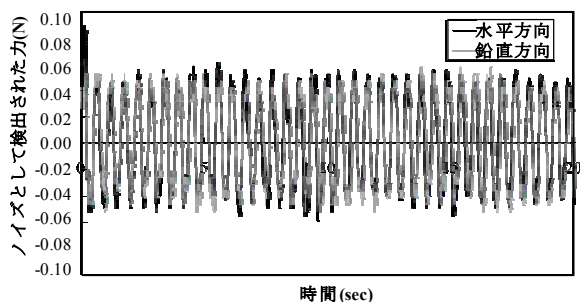


図 11 波力試験に含まれるノイズの波形

動数は、大模型で 6.54Hz、中模型で 5.96Hz、小模型で 5.47Hz である。

2.5 実験データの整理

桁模型に対する津波作用の状況を写真 3 に示した。また、図 10 は、津波流速、津波波高、津波の水平波力および鉛直波力の一例を示す。水平波力は上流側、鉛直波力は上方が正である。これらの波形における特徴としては、津波の水平波力および鉛直波力、津波流速の 3 つの波形は最初のピークをほぼ同時刻に迎え、その後も何度か大きなピークが生じている。一方、津波波高は、前述した津波流速よりも立ち上がり早い、最初のピークは他の計測値よりも遅い。

水谷・今村¹⁶⁾の研究結果を考慮に入れると、橋桁に作用する津波波力は次のように分類することができる。まず、津波先端部が橋桁に衝突する際の衝撃的な波力(段波波力、写真 3 のフェーズⅡに対応)、次に、津波衝突以降に入射波の連続的な到達によって著しい水位上昇を伴いながら生じる重複波力(写真 3 のフェーズⅢに対応)、そして、橋桁に

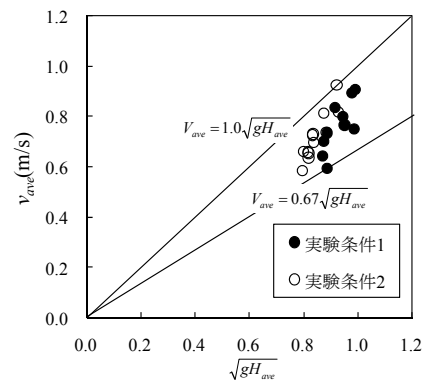


図 12 5 秒平均流速 v_{ave} と 5 秒平均浸水深 H_{ave} の関係

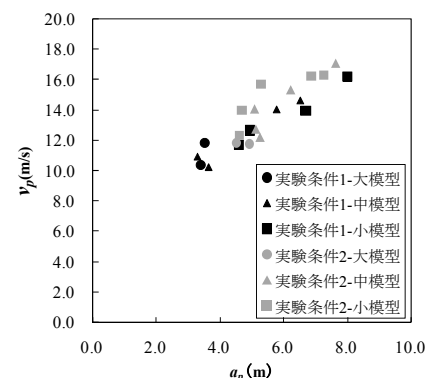


図 13 実橋に作用する津波を想定した津波波高 a_p と津波流速 v_p の関係

衝突した後に戻ってきた波(反射波)が入射波と衝突することによって生じる重複衝突波力(写真 3 のフェーズⅣに対応)であり、これらの外力が橋桁の移動や流出に影響を及ぼしている。本研究では、津波作用力を評価する際において、これらの最大値の特性を持つとされる津波先端部の衝撃的な波力を主に対象とした。

以上を踏まえ、津波流速に関しては流れ場における物体の影響を除去し、津波の純粋な津波作用力を評価するために、桁模型なしの状態計測されたデータを採用し、その上で津波先端のピーク値を用いている。また、津波波高に関しても同様の理由により、橋桁なしの状態を採用し、その上で津波流速の最大値が測定された時刻と同時刻の値を用いた。一方、津波の水平波力および鉛直波力に関しては、桁ありの場合のデータを採用し、津波先端部が橋桁に衝突した際のピーク値を用いた。

図 11 は、波力計に桁模型を取り付けていない状態において津波を発生させ、その際の水平力および鉛直力を測定し、波力測定時に含まれるノイズを検出した。波力データの整理にあたっては、このようなノイズ波形の振幅のピーク値の絶対値を平均化し、その値を各々のケースで測定された津波波力の値から差し引いて調整した。

3. 橋桁に作用する津波荷重

3.1 津波波高と津波流速の関係性およびフルード数の位置づけ

図 12 には、桁前面の 5 秒平均流速 v_{ave} と 5 秒平均浸水深 H_{ave} の関係を示した。ここでの 5 秒平均流速は、桁模型が無い状態で、津波の先端より背後を流れる定常的な津波流速の 5 秒間の平均値として定義した(図 10-(b)参照)。また、5 秒平均浸水深は、5 秒流速と同様の方法で 5 秒間の津波波高 a_{ave} を測定し、これに静水深 h_0 を加算することで定義した。これによると、本実験のフルード数 $F_r (=v_{ave}/(gH_{ave})^{0.5})$ は 0.67~1.00 であることが明らかとなった。

水理実験において相似則を厳密に満たすためには、実橋と桁模型の間でフルード数 F_r とレイノルズ数 Re を同時に満足させる必要があるが、津波を再現した水理実験の場合には、実橋と桁模型の間でこれらを共に満足させるのは困難である。よって、本実験においても、粘性の効果が重力の効果に比べて十分小さいという仮定の基に、レイノルズ数 Re は考慮せずに、フルード数 F_r による相似則を満足するものとする¹⁷⁾。すなわち、実橋と桁模型の間で幾何学的相似則を考慮の基に、前述したフルード数 $F_r=0.67\sim1.0$ の範囲で以下の相似を考える。

$$F_r = \frac{v_p}{\sqrt{gH_p}} = \frac{v_m}{\sqrt{gH_m}} \quad (1)$$

ここで、 v は津波流速、 g は重力加速度、 H は浸水深をそれぞれ表わし、下付きの p および m は実橋 (prototype) と桁模型 (model) に対応するそれらの諸量を表わすものとする。ゆえに、式(1)より次式が得られる。

$$\frac{v_p}{v_m} = \sqrt{\frac{H_p}{H_m}} \quad (2)$$

この関係を考慮に入れると、本実験の幾何学的な縮尺は大模型で 1/54、中模型で 2/175、小模型で 1/108 であるので、式(2)に基づけば実験より得られる津波流速 v_m と実現象における津波流速 v_p の関係は、幾何学的縮尺の平方根の値を考えればよいことになる。例えば、大模型について考えると、以下の式(3)が成り立つ。

$$\frac{v_p}{v_m} \cong \sqrt{54} \cong 7.4 \quad (3)$$

よって、実橋に作用する津波流速 v_p は、対象とする実験で測定された流速 v_m のおよそ 7.4 倍であり、同様に中模型は 9.4 倍、小模型は 10.4 倍である。これより、実験で測定された津波波高 a_m を各々の桁模型の幾何学的な相似に基づいて、実橋に作用する津波波高 a_p とし、実験で測定された津波流速 v_m を式(2)に基づいて実橋に作用する津波流速 v_p とし、それらの関係性を図 13 に示した。

3.2 橋桁に作用する流体力の評価

(1) 抗力および抗力係数

桁模型に作用する水平波力 F_s を橋桁の抗力 F_D 相当とみなし、式(4)が成立すると想定した上で、式(5)を用いて津波作用に対する橋桁の抗力について検討する。

$$F_s = F_D \quad (4)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w C_D v^2 A \quad (5)$$

ここで、 ρ_w は水の単位体積質量、 A は桁の被水圧面積、 v は桁がない場合の津波先端の流速である。この際、抗力係数 C_D は、式(4)および式(5)より次式を得ることで逆算する。

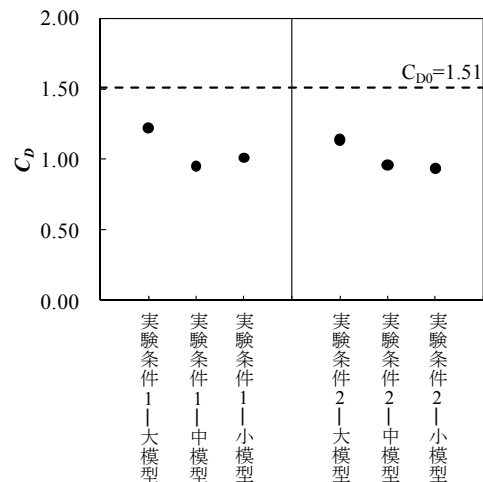


図 14 各々の実験条件に対する抗力係数

$$C_D = \frac{F_s}{\frac{1}{2} \rho_w v^2 A} \quad (6)$$

これより、表 1 に示した実験条件 0 の結果に式(6)を適用し、抗力係数 C_D を求めると、図 14 のようになる。なお、図 14 には、式(7)のような道路橋示方書¹⁸⁾において示されている設計用抗力係数 C_{D0} を合わせて示す。

$$C_{D0} = \begin{cases} 2.1 - 0.1(B/T) & 1 \leq B/T \leq 8 \\ 1.3 & 8 \leq B/T \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 B は橋桁の幅員、 T は桁長である。

抗力係数 C_D は、物体の形状や物体の流れに対する傾き(迎え角)によって変化する¹⁷⁾。橋桁に作用する津波を考えた場合、砕波・非砕波の違い等、津波の作用形態は異なるため、それによって橋桁の被水圧面と津波の流れ方向が変化する。従って、実際の橋桁に対して、一般性を持つような抗力係数の値を推測するには、完全に相似を満足する試験体を作成した上、実験的に抗力係数を求める等の検討が必要であろう。

一方、本研究では、使用した橋桁模型の大きさは異なるものの形状は同じであり、津波の形状も、図 7 に示したようにある程度の一意性はあるため、図 14 のように抗力係数 C_D はおよそ近い数値を示した。本研究では、後述する分析に際しては、各模型の津波作用に対する等価な抗力係数 C_D として、図 14 に示す数値を用いることとする。

(2) 流体力の評価

本研究ではフルード数 F_r の相似則に加えて、桁模型に作用する流体力と実橋に作用する流体力の相似を考慮するために、桁重量 W に対する抗力 F_D の比 β に関する相似を実橋と桁模型との間で考慮する。なお、桁重量 W は、次式のより求められる。

$$W = \rho_c V g \quad (8)$$

ここで、 ρ_c は桁の単位体積質量、 V は桁の体積である。

以上より、桁重量 W に対する抗力 F_D の比 β に関する相似を次式のように定義する。

$$\beta \equiv \frac{\frac{1}{2} \rho_w C_{Dp} v_p^2 A_p}{\rho_p V_p g} = \frac{\frac{1}{2} \rho_w C_{Dm} v_m^2 A_m}{\rho_m V_m g} \quad (9)$$

ここで、式(9)の中の下付きの p および m は、式(1)～式(3)と同様に実橋 (prototype) と桁模型 (model) に対応するそれらの諸量を表わすものとする。桁の体積 V と桁の被水圧面積 A 、および幅員 B の間に

は、 $V=A \times B$ が成り立つので、式(9)は容易に式変形可能で、さらに、津波流速 v の比の 2 乗は幾何学的な尺度の比と式(2)のように同一となるので、式(9)は最終的に次式ようになる。

$$\frac{C_{Dp}}{\rho_p} = \frac{C_{Dm}}{\rho_m} \quad (10)$$

抗力係数 C_D はレイノルズ数 Re の変化に対しておよそ反比例の関係にある¹⁹⁾。従って、式(3)より本実験においては v_p は v_m よりも大模型は 7.4 倍、中模型は 9.4 倍、小模型は 10.4 倍大きくなるので、レイノルズ数 Re に関しては $Re_p > Re_m$ となり、その結果、厳密には抗力係数 C_D は $C_{Dp} < C_{Dm}$ となると考えられる。しかし、ここでは、実橋と桁模型の抗力係数は等しい ($C_{Dp} = C_{Dm}$) と仮定する。このことは、本節で示した相似則を介して模型実験によって得られた津波作用力を実橋に対する津波作用力に換算する場合に、実橋に対する津波作用力を大きく見積もることを意味する。従って、以降の考察で用いられる橋桁に対する津波作用力は津波荷重の観点から安全側の評価結果を示していると考えることができる。

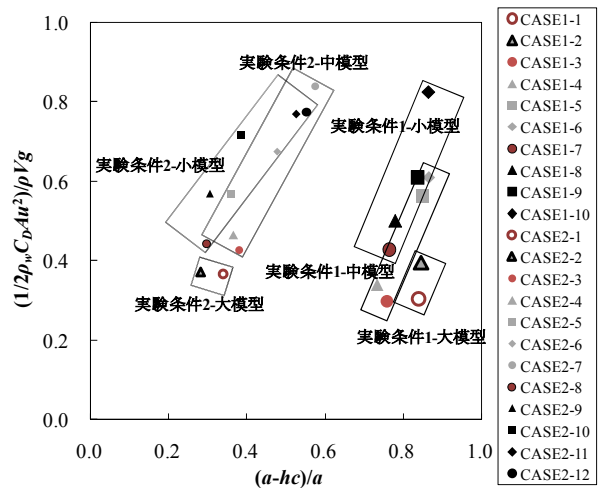


図 15 β と η の関係

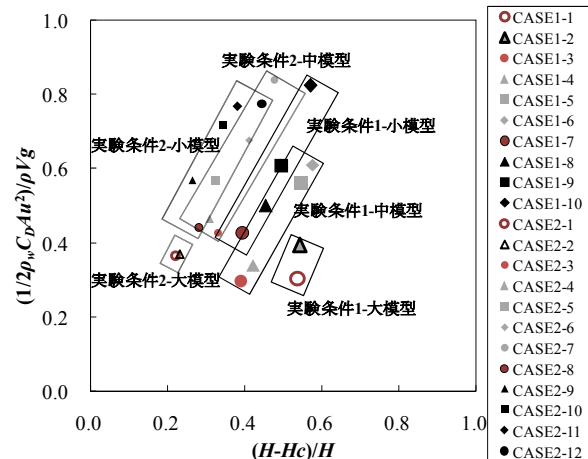


図 16 β と η' の関係

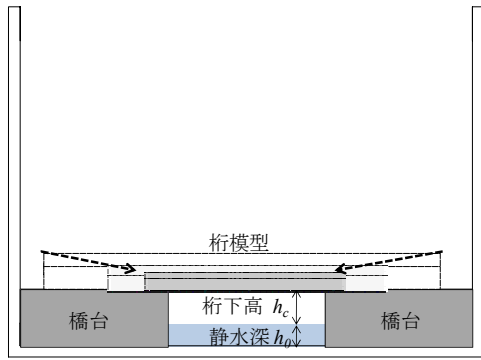


図 17 水路に設置された桁模型および橋台模型の境界条件

よって、実橋と桁模型の密度 ρ を次式のように合わせれば、桁重量 W に対する抗力 F_D の比 β に関する相似を満足させることができる。

$$\rho_p = \rho_m \quad (12)$$

本実験では、2.2 節で前述した通り、実橋の密度 ρ_p と桁模型の密度 ρ_m を合わせたため、実験より得られたデータを解釈する際には、式(9)による相似を満足しているものと見なすことができる。

以上より、実験より得られた津波流速 v_m と図 14 に示した抗力係数 C_D を用いて桁模型に作用する抗力 F_{Dm} を求め、桁の重量 W_m によって無次元化した数値 β に関する評価を行った。

図 15 は、 β と橋桁に対する津波波高 a との関係性を示す。ここでは、桁下高 h_c の相違により、後述する橋桁の津波作用メカニズムに違いが生じることを想定し、桁下高 h_c を用いて橋桁上部の波高($a-h_c$)を求め、この無次元値を横軸のパラメータ $\eta=(a-h_c)/a$ として用いた。なお、津波波高 a および橋桁の桁下高 h_c の定義は図 2 に示す通りである。さらに、桁下高 h_c に加え、静水深 h_0 のパラメータの影響も考慮に入れるため、 β と橋桁に対する無次元化された浸水深 $\eta'=(H-(h_0+h_c))/H$ との関係性を図 16 に示した。なお、静水深 h_0 および津波の浸水深 H の定義は同様に図 2 に示す通りであり、 H は津波波高 a と静水深 h_0 を合わせた値($H=a+h_0$)のことである。

まず、図 15 によれば、静水深 h_0 が 40mm および 20mm の各々の場合において、桁移動が生じるか生じないかのぎりぎりの場合の β と η の関係性に着目すると、静水深が 40mm の場合には、各々の模型における β の値は 0.30～0.43 となっており、静水深が 20mm の場合には 0.37～0.44 となっている。

このように、ある開水路の境界条件下に存在する桁-橋台模型において、図 17 のように橋桁が大模型・中模型・小模型と小さくなる条件下で、桁下高の相違があるにも関わらず、実橋に対して桁移動が生じる閾となる津波荷重は、桁重量に対して、最大で 0.43 倍および 0.44 倍とほぼ一致している。一方で、横軸の η に関しては、桁下高が 30mm(静水深 10mm)の場合には 0.30～0.38 であるのに対して桁下高が 10mm(静水深 40mm)の場合には、0.78～0.84 と大きく異なっている。一般的に、構造物に作用する波力は、谷本ら⁵⁾が示すように静水面に近い位置を最大値、波高の最大到達位置を最小値とした三角形分布で表現出来るとされているが、それらの場合の境界条件は、図 17 に示す本研究の境界条件とは異なるため、上記のような結果が示されたと推察される。

すなわち、本研究では、桁下空間という境界条件を有するため、その結果、図 15 に示すように桁移動を生じる際の β に対応した η の数値が異なり、津波作用のメカニズムに相違が生じていると考えられる。つまり、図 18 に示すように、本研究で対象としている津波は、先端に砕波を伴う段波津波であるが、砕波津波は、波の頂上部から砕け始めるため、頂上部が最もエネルギーの減少が大きいいため、それに応じて波力が大きくなっている。従って、図 18-(a)のように橋桁が、このような砕波津波の波の頂上部に近い位置で津波を受ける場合、衝撃的な波力を受けること考えられる。一方で、図 18-(b)のように、波の頂上部から下方になるほど、砕波による影響は小さくなるが、橋桁上部の波高は高いため、津波頂上部と同程度の波力を受けていると考えられる。ただし、これらはあくまで本実験で推察される仮定であるため、今後はこれらを定量的に実証することが必要である。

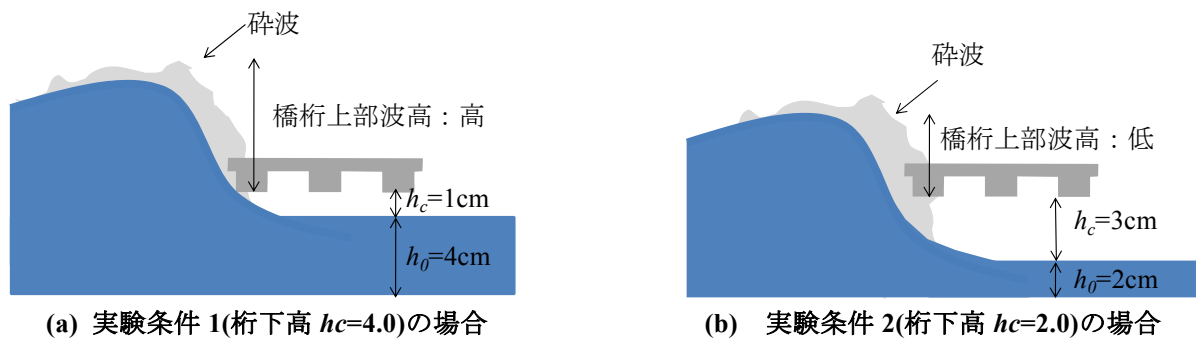


図 18 橋桁に衝突する砕波津波のモデル図

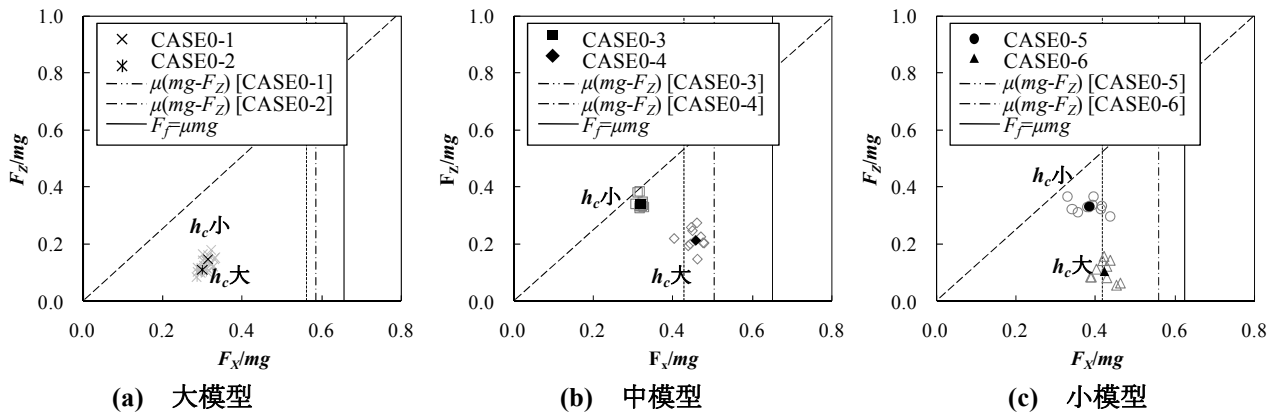
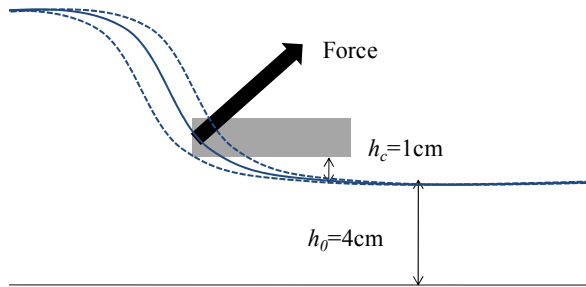
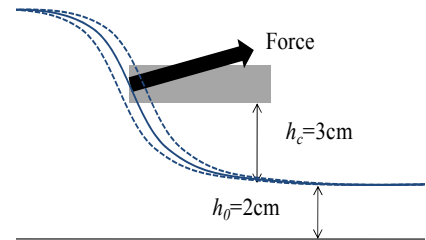


図 19 橋桁に作用する津波の水平波力 F_x と鉛直波力 F_z の関係性



(a) 実験条件 1(桁下高 h_c が小さい)の場合



(b) 実験条件 2(桁下高 h_c が大きい)の場合

図 20 橋桁に作用する津波波力のメカニズム

また、図 16 は、先述した観点から、横軸では、静水深 h_0 のパラメータの影響も考慮に入れて無次元化を行っているため、桁下高が 30mm の場合に 0.23~0.33、桁下高が 30mm の場合に 0.39~0.54 となり、図 15 の結果よりも桁移動を生じるか生じないかのぎりぎりの場合の β の値に対して η の値が近い数値となっている。

このように、本研究では、以上に述べたような相似則に基づき、橋桁の移動限界に関わる津波荷重の評価を行ったが、津波被害を表現する物理量としては、橋桁の変位量も含まれる。これについては、表 1 に示したように、本実験において橋桁が大規模に流出するまでの様々な変位形態の再現を行っており、それ等に対応した津波荷重については、図 15、図 16 に示すところである。しかし、変位量そのものの定量的な評価には到っておらず、それ等については、今後の検討事項とする。

3.3 水平波力と鉛直波力の関係性

図 19 に、津波の先端部が橋桁に衝突した際の水平波力 F_x と鉛直波力 F_z を桁重量 W で無次元化した数値の関係性を示す。なお、いずれの図においても計測した 10 回のデータを灰色のプロットで示し、その平均値を黒のプロットで示した。ここで、中模型と小模型に関しては、桁模型の被害の中で、桁移動が生じるか生じないかの閾値となる津波波力を測定した。しかし、大模型に関しては、3 分力計の

計測許容範囲の問題から、桁模型に被害が生じるよりも弱い波力を測定した。

これらより、いずれの模型においても桁下高 h_c が小さくなるほど鉛直波力 F_z が大きくなっており、桁下高 h_c が 3.0cm から 1.0cm に変化する場合、大模型は 0.11 から 0.14、中模型は 0.21 から 0.34、小模型は 0.10 から 0.33 程度の鉛直波力の変化を示している。これは、橋桁に津波が作用した瞬間の波面の角度が関係しており、図 20 に示すように、桁下高 h_c の違いによって、桁模型に作用する津波の水平波力および鉛直波力の大小関係に相違が生じたものと考えられる。また、図 19 には、各桁模型に作用する静止摩擦力 $F_f (= \mu mg)$ の数値を合わせて示しているが、桁移動が生じるか生じないかの閾値となる津波波力の水平方向成分は、 F_f よりも小さい値をとっている。よって、橋桁が移動する際には、水平方向の力だけでなく、鉛直方向の力も考慮に入れる必要があると考えられる。

以上より、津波が桁橋に作用した場合、津波の水平波力が、閾値に達していない場合でも、桁下高 h_c が小さいことにより、鉛直波力が大きく作用する場合には、橋桁の被害が生じる可能性があると考えられる。

4. まとめ

2004 年インド洋大津波においてインドネシアで

被災した桁橋の幾何学的な縮尺模型を製作した上で、これらに対するゲート急開流れによる水理実験を実施し、橋桁に作用する流体力の相似を念頭に入れて、橋桁が橋台に橋桁に対して横移動するという橋桁の津波被害が生じる津波波力の同定を試みた。本研究によって得られた知見をまとめると以下の通りである。

- ・ 津波作用により、桁移動が生じるか生じないかのぎりぎりとなる津波荷重は、水平方向に桁重量の 0.43 倍～0.44 倍程度の水平荷重が想定されることが明らかとなった。
- ・ 津波波力と橋桁被害の関係には、桁下高 h_c が大きく関わっており、桁下高 h_c の違いによって、桁模型に作用する津波波力のメカニズムに相違が生じることがわかった。

謝辞

本研究は、国土交通省・平成 19 年度「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(研究代表者、九州工業大学・幸左賢二教授)の助成を得て、実施されました。また、実験模型の製作に関しては、筑波大学大学院システム情報工学研究科の飯高稔氏および中島孝氏に多大なるご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 庄司学・森山哲雄：2004 年インド洋大津波の津波作用を受けた道路構造物に対する被災分析，第 10 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.115-120，2007.2.
- 2) 福井芳朗・白石英彦・中村充・佐々木泰雄：津波の研究(I)一段波津波の波速について－，第 9 回海岸工学講演論文集，pp. 44-49，1962.
- 3) 福井芳朗・白石英彦・中村充・佐々木泰雄：津波の研究(II)一段波津波の堤防におよぼす影響－，第 9 回海岸工学講演論文集，pp. 50-54，1962.
- 4) 合田良実：防波堤の設計波圧に関する研究，港湾技術研究所報告，Vol.2, No.3, pp.31-69, 1973.
- 5) 谷本勝利・鶴谷広一・中野晋：1983 年日本海中部地震津波における津波力と埋立護岸の被災原因の検討，第 31 回海岸工学講演会論文集，土木学会，pp.257-261，1984.
- 6) 朝倉良介・岩瀬浩二・池谷毅・高尾誠・金戸俊道・藤井直樹・大森政則：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第 47 巻，pp. 911-915，2000.
- 7) 内閣府：津波避難ビル等に係るガイドライン，<http://www.bousai.go.jp/oshirase/h17/050610/guide.pdf>，2008.9

- 8) 庄司学・森洋一郎：桁橋の津波被害再現実験，海岸工学論文集，第 53 巻，土木学会，pp.801-805，2006.
- 9) Iemura, H., Pradono, M. H., Yasuda, T. and Tada, T. : Experiments of Tsunami Force Acting on Bridge Models, 土木学会地震工学論文集，Vol.29, pp.902-911, 2007.8.
- 10) 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，pp. 154-157，2006.
- 11) 荒木進歩・中島悠・田中邦彦・出口一郎・伊藤禎和：橋桁に作用する津波流体力に関する実験的研究，土木学会第 62 回年次学術講演会，pp.535-536，2007.9.
- 12) 杉本健・運上茂樹：津波による橋梁の被災メカニズムに関する実験的研究，第 11 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.97-100，2008.2.
- 13) 幸左賢二・内田悟史・運上茂樹・庄司学：スマトラ地震の津波による橋梁被害分析，土木学会地震工学論文集，Vol.29, pp.895-901，2007.8.
- 14) 五十嵐洋行・後藤仁志：津波氾濫による桁橋被災過程の数値シミュレーション，海岸工学論文集，第 54 巻，土木学会，pp.211-215，2007.
- 15) 国立大学法人 九州工業大学：津波による道路構造物の被害予測とその軽減策に関する研究，平成 19 年度受託研究報告書
- 16) 水谷将・今村文彦：津波段波の衝撃性および越流を考慮した設計外力算定フローの提案，海岸工学論文集，第 49 巻，土木学会，pp.731-735，2002.
- 17) 須賀堯三編著：水理模型実験，山海堂，1990.
- 18) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，1996.
- 19) 吉川秀夫：水理学，技報堂出版，1976.

(2008 年 9 月 18 日受付)