# 巻き波砕波段波及び砕け寄せ波砕波段波の作用を受ける 橋桁の津波荷重評価

# Evaluation of a Tsunami Wave Load Acting on a Bridge Deck Subjected to Plunging Breaker Bores and Surging Breaker Bores

庄司 学<sup>1</sup>·森山哲雄<sup>2</sup>·平木 雄<sup>3</sup>·藤間功司<sup>4</sup>・鴫原良典<sup>5</sup>・笠原健治<sup>6</sup>

## Gaku SHOJI, Tetsuo MORIYAMA, Yu HIRAKI, Koji FUJIMA Yoshinori SHIGIHARA and Kenji KASAHARA

The giant earthquake of Mw=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, hydraulic experiments considering similarity laws 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 inundation height and wave velocity induced by plunging breaker bores and surging breaker bores. Maximum ratio of the drag force to the deck weight becomes 0.31 to 0.34 when subjected to plunging breaker bores, and becomes 0.43 to 0.48 when subjected to surging breaker bores, that indicates the boundary lateral loads by which the deck movement against static friction force induced between a deck and abutments occurs.

### 1. はじめに

2004年のインド洋大津波の際には海岸線の近傍の橋梁 構造物に落橋や桁移動等の甚大な被害が発生した.橋梁 構造物は道路・鉄道インフラの重要な要素であり,地 震・津波災害時の避難,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,その機能保 持が強く求められる.

従って、それらに対する津波荷重の評価は社会的に重 要なテーマとなっており、インド洋大津波以降、橋梁構 造物の橋桁に作用する津波荷重の評価が多数の研究者に よって行われている. 庄司・森(2006)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を定 量的に明らかにしている. Iemuraら(2007)は、橋桁模 型に対する水理実験を行い、津波浸水深と津波流速の関 係や津波流速と津波波力の関係について明らかにした上 で、緩衝マウンド等の効果について検討している. 同様 に、橋桁の縮尺模型に対する水理実験によって、片岡ら (2006)は、橋桁に作用する津波波力に合田式(1973) を適用することの妥当性を検討しており、荒木ら(2007) は水平波力に加えて鉛直波力を測定し、橋桁の桁下高と の関係を明らかにしている. 杉本・運上(2008)も同様

5 正会員 博(工) 防衛大学校助教建語 6 修(工) 元防衛大学校建設現	4 正会員   工博   防衛大学校教授建設# 5 正会員   博(工)   防衛大学校助教建設#	1 2 3 4 5 6	正会員 正会員 正会員	<ul> <li>(工)</li> <li>(工)</li> <li>(工)</li> <li>(工)</li> </ul>	丸波入学准教授 双日株式会社 筑波大学工学シス 防衛大学校教授員 防衛大学校助教員 二時年主党技術書
--	--	----------------------------	-------------------	--	---

表-1 桁模型の諸元

試験形態	模型 サイズ	使用材料	使用材料の 単位体積重量 (g/cm <sup>3</sup> )	桁長 L (mm)	床版厚さ <i>T</i> 1 (mm)	床版幅 B <sub>1</sub> (mm)	桁厚 T <sub>2</sub> (mm)	桁幅 B <sub>2</sub> (mm)
波力試験	大	発砲スチロール	0.084	355.0	12.0	190.0	20.0	30.0
	中	発砲スチロール	0.084	220.0	8.0	120.0	12.0	20.0
	小	発砲スチロール	0.084	178.0	6.0	95.0	10.0	15.0
被害試験	大	モルタル	2.15		12.0	190.0	20.0	30.0
		アクリル板	1.2	355.0				
		アルミ板	2.68					
	中	モルタル	2.15					
		アクリル板	1.2	220.0	8.0	120.0	12.0	20.0
		アルミ板	2.68					
	小	モルタル	2.15	178.0			10.0	15.0
		アクリル板	1.2		6.0	95.0		
		アルミ板	2.68					

の取り組みを行っている.数値解析の観点からは,幸左 ら(2007)が個別要素法による粒状体挙動解析によって 橋桁の津波被災メカニズムを検討しており,五十嵐・後 藤(2007)が粒子法による津波の遡上と氾濫流に伴う桁 橋の被災シミュレーションを行っている.しかし,力学 的な相似を明確に規定した上で,橋桁が被害を受ける境 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,依然として明確にはなっていない.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 被災した橋桁の幾何学的な縮尺模型を製作した上で,こ れらに対して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際の津波荷重の同定を試みる.



図-1 実験水路と桁模型の設置位置(単位mm)

実験条件	ケース	模型 サイズ	橋桁模型の 設置位置 (mm)	桁下高 h <sub>c</sub> (mm)	静水深 ho(mm)	貯留水深差 h <sub>l</sub> (mm)	被害形態	実験条件	ケース	模型 サイズ	橋桁模型の 設置位置 (mm)	桁下高 h <sub>c</sub> (mm)	静水深 h <sub>0</sub> (mm)	貯留水深差 h <sub>l</sub> (mm)	備考
1	1-1	+	5,500	10	40	190	桁移動がぎりぎり生じない		5-1	大	5,500	10	40	140	波力測定
	1-2	入	5,500	10	40	191	極めて軽微な桁移動		5-2	中	5,500	10	40	103	波力測定
	1-3	ta	5,500	10	40	103	桁移動がぎりぎり生じない		5-3	小	5,500	10	40	103	波力測定
	1-4	Ψ	5,500	10	40	105	極めて軽微な桁移動		5-4	大	5,500	30	20	140	波力測定
	1-5	5 1	5,500	10	40	103	桁移動がぎりぎり生じない		5-5	中	5,500	30	20	125	波力測定
	1-6	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	5,500	10	40	120	極めて軽微な桁移動	5	5-6	小	5,500	30	20	110	波力測定
2	2-1	+	5,500	30	20	203	桁移動がぎりぎり生じない	5	5-7	大	1,500	10	40	60	波力測定
	2-2	入	5,500	30	20	205	極めて軽微な桁移動		5-8	中	1,500	10	40	78	波力測定
	2-3	ta	5,500	30	20	130	桁移動がぎりぎり生じない		5-9	小	1,500	10	40	48	波力測定
	2-4	Ψ	5,500	30	20	135	極めて軽微な桁移動		5-10	大	1,500	30	20	80	波力測定
	2-5	al.	5,500	30	20	110	桁移動がぎりぎり生じない		5-11	中	1,500	30	20	85	波力測定
	2-6	小	5,500	30	20	115	極めて軽微な桁移動		5-12	小	1,500	30	20	70	波力測定
3	3-1	1	1,500	10	40	135	桁移動がぎりぎり生じない								
	3-2	入	1,500	10	40	150	極めて軽微な桁移動								
	3-3		1,500	10	40	78	桁移動がぎりぎり生じない								
	3-4	Ψ	1,500	10	40	83	極めて軽微な桁移動								
	3-5	J.	1,500	10	40	48	桁移動がぎりぎり生じない								
	3-6	\n ∖n	1,500	10	40	53	極めて軽微な桁移動								
4	4-1	-	1,500	30	20	158	桁移動がぎりぎり生じない								
	4-2	2 ^	1,500	30	20	163	極めて軽微な桁移動								
	4-3	ta	1,500	30	20	85	桁移動がぎりぎり生じない								
	4-4	Ψ	1,500	30	20	90	極めて軽微な桁移動								
	4-5	,t	1,500	30	20	70	桁移動がぎりぎり生じない								
	4-6	6 小	1,500	30	20	75	極めて軽微な桁移動								

表-2 実験ケース

#### 2. 水理実験

#### (1) 想定する橋桁の被害形態と橋桁模型の設計

本実験では、河口付近に架橋された橋桁と河口から数 百m程度河川内に入った位置に架橋された橋桁を対象と し、これらの架橋位置において想定される津波作用に対 して、橋台上の桁掛かりから横移動するという被害形態 (桁移動)を再現する.

桁模型の設計に当たっては、インドネシア・スマトラ 島の27橋梁の津波被害データ(九州工業大学,2008)を 参考とした.これらの中から約4mの桁移動が生じた1径 間RC桁橋(Lueng Ie Bridge)を取り上げた.この橋梁の 詳細な構造諸元や周辺地形を実験模型において幾何学的 に完全に相似させることは、実験水路の制約や模型製作 の困難さにより不可能であったため、もとの橋梁(原橋 梁)と桁模型の構造細目を完全に一致させてはいない.

幾何学的には原橋梁に対して桁長,幅員,桁高を3通りに縮尺した(表-1).大模型,中模型,小模型の原橋梁 に対する縮尺率はそれぞれ1/54 (0.019), 2/175 (0.011), 1/108 (0.009) である.桁模型の材料に関しては,桁移 動の津波被害を把握するための実験条件1から4(被害試 験)においてはモルタルを主として用いたが、後述の3. (3)の流体力に関する相似の観点から、原橋梁の橋桁の 単位体積質量 $\rho_{cp}$ と模型の単位体積質量 $\rho_{cm}$ を合わせるた めに、桁模型の一部にアルミ板とアクリル板を用いた. 一方、実験条件5の波力測定(波力試験)を行う際の桁 模型は、発砲スチロールを用いて製作した.なお、モル タル製の桁模型については、橋桁と橋台間の静止摩擦係 数 $\mu$ を別途測定した.これより静止摩擦係数 $\mu$ の平均値 を求めると、大模型 $\mu'$ ,中模型 $\mu'''$ ,小模型 $\mu''$ のそれぞ れに対して0.57, 0.67, 0.55となった.

#### (2) 想定する津波作用と実験ケース

実験水路は全長が17m,幅0.4m,高さ0.3mの矩形断面 水路である(図-1).本実験では、ゲート急開方式により 段波津波を発生させ、勾配3/5の斜面に続く水路部分を 河川と見立てることで、段波津波を模擬した.

まず,水路に模型を設置しない状態で津波を発生させたところ,津波は可変勾配区間の入口(図-1のX=0.0m地点)から約1.0m付近までは非砕波段波の状態で進行し,1.0m~2.0m付近において巻き波状に砕け始め,徐々に波



形を変化させながら砕け寄せ波として伝播した.以上より、本実験では、X=1.5m地点の段波津波を河口付近の 橋桁に作用する巻き波砕波段波、X=5.5m地点の段波津 波を河口から数百m程度河川内に入った位置の橋桁に作 用する砕け寄せ波砕波段波とそれぞれ定義した.

以上の2通りの津波作用に対して、図-2に示すように 静水深 $h_0$ を40mmおよび20mmの2通りに変化させた上 で、貯水部と一様水深部の水位差 $h_1$ を変化させることで 津波波高aを変化させ、橋桁の桁移動がぎりぎり生じな いケースとぎりぎり生じるケースを再現した(表-2).実 験条件5では、ぎりぎり桁移動が生じないケースに対し て水平方向および鉛直方向の波力測定を行った.

#### (3) 計測方法

津波流速,津波波高,及び水位の計測に当たっては, 図-2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.実験条件5の場合に は3分力計(日計電測株式会社製Y102)を片持ち梁で支 持し,桁模型に作用する水平波力並びに鉛直波力を計測 した.データのサンプリング間隔は,実験条件1並びに 実験条件2では1/100秒とし,実験条件3,実験条件4及 び実験条件5では1/200秒とした.また,全ての時系列デ 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施した.

全ての実験ケースにおいて,最初に橋桁ありの状態で 10回の計測を行い,桁移動の再現性を確認した上で,橋 桁なしの状態で5回の計測を行った.その上で,橋桁あ りの場合のデータに対しては10回の中から再現性の高い



図-4 各々の実験条件に対して逆算された抗力係数

8回分のデータを,橋桁なしの場合のデータに対しては5 回の中から再現性の高い3回分のデータを採用した.

なお,実験条件5の波力測定実験に際しては,桁模型-計測装置系の固有振動数を別途測定し,桁模型と計 測装置間の共振の問題がないことを改めて確認している.

#### (4) 実験データの処理

得られた時系列波形を精査したところ,水平波力,鉛 直波力及び津波流速の3つの波形の特徴としては,最初 のピークをほぼ同時刻に迎え,その後、0.5秒も経過しな いうちに2つ目のピークを迎え,その後にも何度か大き なピークが生じていることが明らかとなった.また,水 位の特徴としては,津波流速よりも0.05秒程度立ち上が りが早いが,最初のピークは他の計測値よりも遅く現れ ることが明らかとなった.このような時系列においては 津波先端部の衝撃的な波力が津波荷重として最大値の特 性を有するとされるため(水谷・今村,2002),本実験 データの処理に当たっては津波先端部の衝撃的な波力を 扱うこととした.

また,津波流速に関しては橋桁なしの状態で計測され たデータを採用し,その上で津波先端部のピーク値を用 いた.水位に関しても,橋桁なしの状態で計測されたデ ータを採用し,その上で津波流速の最大値が測定された 時刻と同時刻の数値を用いた.津波の水平波力および鉛 直波力に関しては,橋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.こ れらのデータは2.(3)で述べた計測回数分得られるので, その平均値を以下では議論する.

#### 3. 橋桁の移動限界に係わる津波荷重評価

#### (1) フルード数の相似

図-3には、桁前面の3秒平均流速 $v_{ave}$ と3秒平均浸水深  $H_{ave}$ の関係を示す.3秒平均流速 $v_{ave}$ は、橋桁なしの状態 で、津波先端部より背後を流れる定常的な津波流速の3 秒間の平均値として定義した.3秒平均浸水深 $H_{ave}$ は、3 秒流速と同様の方法で3秒間の平均水位 $a_{ave}$ を測定し、こ れに静水深 $h_0$ を加算することで求めた.図-3によると、 本実験におけるフルード数 $F_r$ (= $v_{ave}/(gH_{ave})^{0.5}$ )は0.61~1.12 であることが明らかである.

本実験では、粘性の効果が重力の効果に比べて十分小



図-6 津波作用のメカニズム

さいという仮定の基に、レイノルズ数*R*<sub>e</sub>の相似は考慮せずに、以下のフルード数*F*<sub>c</sub>の相似を満足するものとした.

ここで、vは津波流速、gは重力加速度、Hは浸水深を 表わし、下付きのpおよびmは原橋梁(prototype)と桁 模型(model)に対応するそれらの諸量を表している.式 (1)に対して桁模型の幾何学的な縮尺を考慮すると、大 模型の場合、実橋に作用する津波流速v<sub>p</sub>は測定された津 波流速v<sub>m</sub>の7.4倍であり、同様に中模型の場合には9.4倍、 小模型の場合には10.4倍となる.

(2) 抗力係数の逆算

桁模型に作用する水平波力 $F_x$ を橋桁の抗力 $F_D$ 相当 ( $F_x = F_D$ ) と仮定し、次式により抗力係数 $C_D$ を逆算した (図-4).



ここで、 $\rho_w$ は水の単位体積質量、Aは桁の被水圧面積 である.なお、図-4には、道路橋示方書(1996)より導 かれる設計用抗力係数 $C_{D0}$ を合わせて示す.

本実験においては、桁模型の形状は大模型、中模型、 小模型で同一であるが、津波の波面は巻き波砕波段波と 砕け寄せ波砕波段波で異なり、被水圧面と津波の流れ方 向は各実験条件で必ずしも一定の角度を保っておらず、 異なっているため、図-4に示した抗力係数*C*<sub>D</sub>にはばらつ きが生じている.しかし、ここでは、このようなばらつ きを考慮した上で、図-4の結果を各桁模型の津波作用に 対する等価な抗力係数*C*<sub>D</sub>と見なし、以下の実験データの 分析の際には用いる.

#### (3) 流体力に関する相似の考え方

本実験では、3.(1) に示したフルード数 $F_{\rho}$ の相似に加 えて、桁模型に作用する流体力と原橋梁に作用する流体 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 $\beta$ に関する相似を次式のように考慮する.

ここで、下付きのpおよびmは、式(1)と同様に原橋梁 (prototype)と桁模型(model)に対応するそれらの諸量を 表わし、 $\rho_c$ は桁の単位体積質量、Vは桁の体積である.

式(1)を用いて,式(3)を変形すると次式のように なる.

$$\frac{C_{Dp}}{\rho_{cp}} = \frac{C_{Dm}}{\rho_{cm}} \qquad (4)$$

抗力係数 $C_D$ はレイノルズ数 $R_e$ の変化に対しておよそ反比例の関係にある(吉川, 1976).本実験においては、 $v_p > v_m$ となるので、レイノルズ数 $R_e$ は $R_{ep} > R_{em}$ と推定され、厳密には抗力係数 $C_D$ は $C_{Dp} < C_{Dm}$ になると推察される.

しかし、本実験においては、原橋梁と桁模型の抗力係 数は等しい ( $C_{Dp} = C_{Dm}$ ) と仮定する.このことは、式(3) を介して模型実験によって得られた流体力を原橋梁に対 する流体力に換算する場合に、原橋梁に対する流体力を 大きく見積もることを意味する.従って、以降の考察に 示される橋桁に作用する流体力は津波荷重の観点から安 全側の評価結果と解釈できる.以上より、本実験では、 2.(1) で前述した通り、原橋梁の単位体積質量  $\rho_{cp}$ と桁 模型の単位体積質量  $\rho_{cm}$ を合わせたため、本実験より得 られたデータを解釈する際には、式(3) による相似を 満足していると見なすことができる.

#### (4) 橋桁に作用する流体力の評価

図-5には $\beta$ と津波波高aの関係を示す.ここでは、桁下高 $h_c$ を用いて橋桁上部の波高 $(a-h_c)$ を求め、これの 津波波高aに対する無次元量 $\eta$ (= $(a-h_c)/a$ )で横軸を表し ている.

橋桁に砕け寄せ波砕波段波が作用した場合(図-5(a)) において,桁移動がぎりぎり生じないケースの βと nの 関係に着目すると、静水深h<sub>0</sub>が40mmの場合にはβは0.30 ~0.43, 静水深h<sub>0</sub>が20mmの場合にはβは0.43~0.48とな っており、両者の幅を包含すればβは0.3~0.5の数値を 示している.一方,この時のnに関しては,桁下高h<sub>c</sub>が 30mm (静水深h<sub>0</sub>20mm) の場合には0.32~0.47であるの に対して, 桁下高h,が10mm(静水深h,40mm)の場合に は0.77~0.83となっており、両者は大きく異なっている. これは、砕け寄せ波砕波段波の場合には、図-6(a)に示 すように、波の頂上部に近い位置で津波作用を橋桁が受 けると、衝撃的な波力を受け、それによって桁移動が生 じるが、橋桁の位置が波の頂上部から下方に位置すれば、 砕波による影響が小さくなる結果,橋桁上部の波高(ah。)が高くならないと、津波頂上部と同程度の波力を受 けることにならず,桁移動が生じないためと考えられる.

橋桁に巻き波砕波段波が作用した場合(図-5(b))において,桁移動がぎりぎり生じないケースの $\beta \ge \eta$ の関係は,静水深 $h_0$ が40mmの場合には, $\eta$ が0.65~0.72の範囲で $\beta$ が0.23~0.31,静水深 $h_0$ が20mmの場合には, $\eta$ が0.13~0.29の範囲で $\beta$ が0.28~0.34となっている.これらのメカニズムについては,図-6(b)に示す通り,前述した砕け寄せ波砕波段波が作用する場合のメカニズムと基本的には変わらない.しかし,橋桁に巻き波砕波段波が作用した場合の方が砕け寄せ波砕波段波が作用した場合の方が相対的に小さな水平波力で桁移動が生じることを意味している.巻き波砕波段波は砕波直後の波頭部が切り立った形状を有するため,砕け寄せ波砕波段波と比較して津波荷重がよりダイレクトに橋桁に伝達されるためと推察される.

また,橋桁に巻き波砕波段波が作用した場合の静水深 $h_0$ が20mmの場合における $\eta$ の数値は,橋桁に砕け寄せ 波砕波段波が作用した場合の同じ結果と比べて小さくなっている.これも前述した理由と同様で,巻き波砕波段 波が砕波直後の段波津波で最も衝撃的な波力を有するた めと考えられる.すなわち,砕波直後の段波津波が作用 する巻き波砕波段波の方が,砕波が数m前方から進行し て作用する砕け寄せ波砕波段波よりも, $\eta$ が低い段階で も桁移動が生じることになる.

#### 4. 結論

2004年インド洋大津波で被害を被った橋桁の幾何学的 な縮尺模型を製作した上で,河口付近の津波と河川内を 遡上する津波の2つのタイプの津波作用をモデル化した 水理実験を実施し,橋桁に対する流体力の相似を考慮に 入れ,桁移動が生じる際の津波荷重の同定を試みた.

これより,桁移動がぎりぎり生じるか生じないかの閾 値となる津波荷重は,河口付近の津波を想定し,橋桁に 巻き波砕波段波を作用させたケースにおいては,桁重量 に対して最大で0.31倍~0.34倍の水平波力が想定され, 河川内を遡上する津波を想定し,橋桁に砕け寄せ波砕波 段波を作用させたケースにおいては,桁重量に対して最 大で0.43倍~0.48倍の水平波力が想定されることが明ら かとなった.

謝辞 本研究は、国土交通省・平成20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. 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

- 荒木進歩・中島 悠・田中邦彦・出口一郎・伊藤禎和(2007): 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.
- Iemura, H., M. H. Pradono, T. Yasuda and T. Tada (2007) :Experiments of tsunami force acting on bridge models, 土木学会 地震工学論文集, Vol.29, pp.902-911.
- 五十嵐洋行・後藤仁志(2007) :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.
- 片岡正次郎・日下部毅明・長屋和宏 (2006) : 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.
- 幸左賢二・内田悟史・運上茂樹・庄司 学(2007) : 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.
- 合田良実(1973):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.
- 国立大学法人 九州工業大学(2008) :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.
- 庄司 学・森洋一郎(2006):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.
- 杉本 健・運上茂樹(2008):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.
- 日本道路協会(1996):道路橋示方書・同解説I共通編, 56p.
- 水谷 将・今村文彦(2002):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.
- 吉川秀夫(1976):水理学,技報堂出版, 88p.