

橋桁に作用する津波波力の水平成分と鉛直成分の発生メカニズムに関する実験的考察

庄司 学¹・平木 雄²・江面 嘉之³・飯高 稔⁴・藤間 功司⁵・嶋原 良典⁶

¹筑波大学大学院システム情報工学研究科准教授
(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail:gshoji@kz.tsukuba.ac.jp

²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)

E-mail:s1021008@u.tsukuba.ac.jp

³筑波大学理工学群工学システム学類 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail:e0811167@edu.esys.tsukuba.ac.jp

⁴筑波大学大学院システム情報工学等技術室 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail:iidaka@kz.tsukuba.ac.jp

⁵防衛大学校建設環境工学科教授 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

E-mail:fujima@nda.ac.jp

⁶防衛大学校建設環境工学科助教 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

E-mail:shigi@nda.ac.jp

本研究では水理実験を通して橋桁に作用する砕波段波の津波波力について、水平成分及び鉛直成分の発生メカニズムを明らかにした。津波が橋桁に作用する位置と津波波力の関係に着目した上で、高速度カメラを用いた撮影を行い、津波波力の水平成分及び鉛直成分のバランスについて検討を行った。津波の上部が橋桁に作用する場合には水平力は静水圧相当の荷重に対して1.47~2.02倍と大きな値となる一方で、鉛直力は発生しなかった。津波の中間部が橋桁に作用する場合には水平力及び鉛直力共に発生し、更に津波の下部が橋桁に作用する場合には水平力は静水圧相当の荷重に対して0.85~1.16倍の値を有した上で、鉛直力が静水圧相当の荷重に対して0.38~0.48倍と最も大きくなる。これらの傾向は砕け寄せ波型の砕波段波よりも巻き波型の砕波段波においてより顕著となる。

Key Words : bridge deck, breaker bores, horizontal wave force, vertical wave force, wave height, hydraulic experiment

1. はじめに

2011年3月11日に宮城県沖で発生した地震津波は東日本の広域を襲う大災害となり、死者行方不明者数は19,797名となった(2011年9月27日時点)¹⁾。このような甚大な人的被害の要因としては家屋等の構造物の被災が挙げられる。これらに加え、港湾、道路等の社会基盤構造物が多数被災したことにより、社会経済活動に甚大な影響が発生している。それらの中でも橋梁構造物は、交通インフラの重要な要素として被災時の緊急活動や復旧活動を支え、津波災害時においても機能保持が強く求められる。

このような橋梁構造物に作用する津波荷重評価に関しては、2004年12月26日(UTC 00:58:53(USGS)²⁾に発生したインド洋大津波を契機として、多数の研究者が実験及び解析の両面から取り組んでいる。

水理実験においては、片岡ら³⁾は橋桁のように静水面との間に空間を有する物体に作用する津波波力の評価においての合田式⁴⁾の妥当性を検討しており、

庄司・森⁵⁾は津波作用を受ける橋桁の前後における流速の測定により松富式⁶⁾の妥当性を検討している。Iemuraら⁷⁾及び杉本・運上⁸⁾は、橋桁模型より水理実験により津波浸水深と流速の関係や流速と津波波力の関係について明らかにしており、特にIemuraら⁷⁾は緩衝マウンド等の効果についても検討している。荒木ら⁹⁾は河川流を考慮した橋桁への水平力及び鉛直力の測定を行い、桁上の水位及び波高と波力の関係を明らかにしている。二井ら¹⁰⁾は実験により得られる水平力及び鉛直力から同様に合田式⁴⁾の妥当性を検討し、桁下の位置と波圧の関係について評価している。庄司ら¹¹⁾は橋桁が横移動する際の水平力について、流体力の相似則を考慮した水理実験から桁重量と水平力の関係を明らかにしている。中尾ら^{12), 13)}は長方形断面とみぞ形断面による津波波力の作用の差異についての実験を高速度カメラを用いた水理実験により明らかにしている。荒木ら¹⁴⁾は

水平板により模擬された橋桁模型により波高と水平力及び鉛直力の関係を明らかにするとともに波圧分布について検討している．庄司ら¹⁵⁾は巻き波型砕波段波が砕け寄せ波型砕波段波と比較してより水平波力が大きく、抗力係数の数値においても差異が生じることを示している．数値解析においては、五十里・後藤¹⁶⁾はDEM-MPS法を用いた粒子法により流木及び欄干を考慮した橋桁の流出シミュレーションを行っており、中尾ら¹³⁾はMPS法によるモデル化の妥当性について評価している．村上ら¹⁷⁾はSPH法に基づいた解析により流速や橋桁の越波の表現、及び抗力評価の妥当性を示している．嶋原ら¹⁸⁾はStaggered leap-frog差分法に基づく平面2次元モデル及びNavier-Stokes方程式に基づく3次元モデルにより2004年インド洋津波において被災した橋桁の数値解析を行っている．しかし、津波の形態として巻き波型及び砕け寄せ波型の砕波段波を想定した場合の橋桁に作用する水平力及び鉛直力の作用メカニズムや、それに付随した流況の詳細については十分に明らかになっていない．

以上を踏まえ、本研究では単径間RC桁橋に作用する砕波段波を模擬した水理実験を実施し、巻き波型及び砕け寄せ波型の砕波段波を受けた場合の橋桁に作用する津波波力の作用メカニズムを評価する．更に、高速度カメラを用いることにより、計測した水平力及び鉛直力の発生メカニズムの細部に対する分析を行う．

2. 実験条件

橋桁へ作用する砕波段波としては砕け寄せ波型と巻き波型の2種類をモデル化した．前者は河川を遡上した後に橋桁へ作用する砕波段波をモデル化したものであり、後者は河口部において橋桁へ作用する砕波段波をモデル化したものである．なお、通常は砕波形式は海底勾配 β 及び波長 L_0 に依存し、文献17)によると、波高と波長の関係から砕け寄せ波型及び巻き波型に対応する海底勾配を算出することが可能となる．例えば、波高 H_0 (文献19)の記載に基づく)を波長 L_0 で除した $H_0/L_0=0.01$ と仮定した場合、巻き波型の場合は $\tan\beta=0.046$ となり、砕け寄せ波型の場合は $\tan\beta=0.33$ となる．本研究ではそれらの砕波区分を試行的に繰り返し、目視により津波の進行状況を観察し砕け寄せ波型及び巻き波型とそれぞれ定義した．

実験条件を表-1に、実験水路を図-1に示す．本実験では全長が17m、幅0.4m、高さ0.3mの開水路を使用し、ゲート急開流れによって砕波段波を模擬した．表-2、図-2には橋桁模型の構造諸元を示す．橋桁模型はインド洋大津波の際にインドネシアで実際に被災した Lueng Ie Bridge の桁長、幅員、桁高を幾何学的に1/79.2 (0.013) で縮尺している．実験に際しては、静水深 h_0 を表-1に示す8通りとした上で、前述した方法により図-1中の0地点から1,500mmの位置における砕波段波を巻き波型、

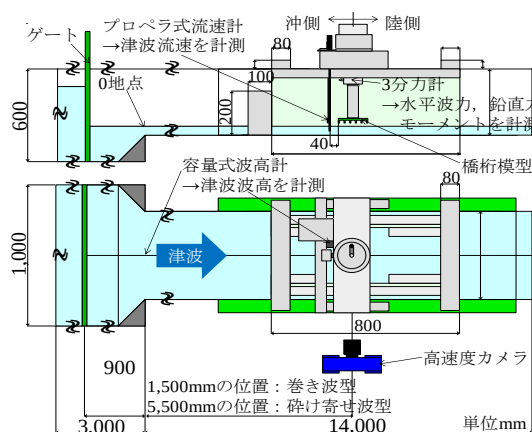


図-1 実験水路

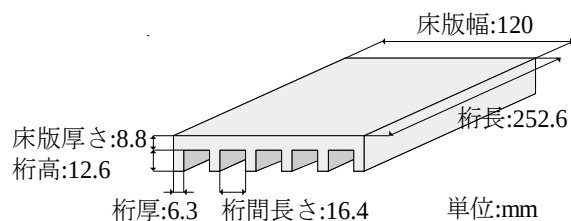


図-2 橋桁模型

表-1 実験条件

CASE 番号	模型 設置 位置 (mm)	静水深 h_0 (mm)	桁下高 h_c (mm)	貯水部 水位 (mm)	高速度 カメラに よる撮影	CASE 番号	模型 設置 位置 (mm)	静水深 h_0 (mm)	桁下高 h_c (mm)	貯水部 水位 (mm)	高速度 カメラに よる撮影
1	1	5,500	50	0	430	9	1	1,500	50	0	410
1	2				440	9	2				420
1	3				450	9	3				430
2	1	5,500	45	5	430	10	1	1,500	45	5	402
2	2				440	10	2				412
2	3				450	10	3				420
3	1	5,500	40	10	425	11	1	1,500	40	10	410
3	2				435	11	2				420
3	3				445	11	3				430
4	1	5,500	35	15	425	12	1	1,500	35	15	390
4	2				435	12	2				400
4	3				445	12	3				410
5	1	5,500	30	20	425	13	1	1,500	30	20	390
5	2				435	13	2				400
5	3				445	13	3				410
6	1	1,500	25	25	425	14	1	1,500	25	25	410
6	2				435	14	2				415
6	3				445	14	3				420
7	1	5,500	20	30	425	15	1	1,500	20	30	420
7	2				435	15	2				425
7	3				445	15	3				430
8	1	5,500	10	40	460	16	1	1,500	10	40	440
8	2				465	16	2				445
8	3				470	16	3				450

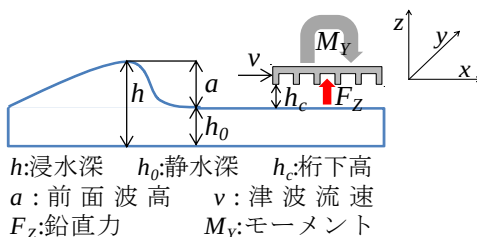


図-3 橋桁と各パラメータについて

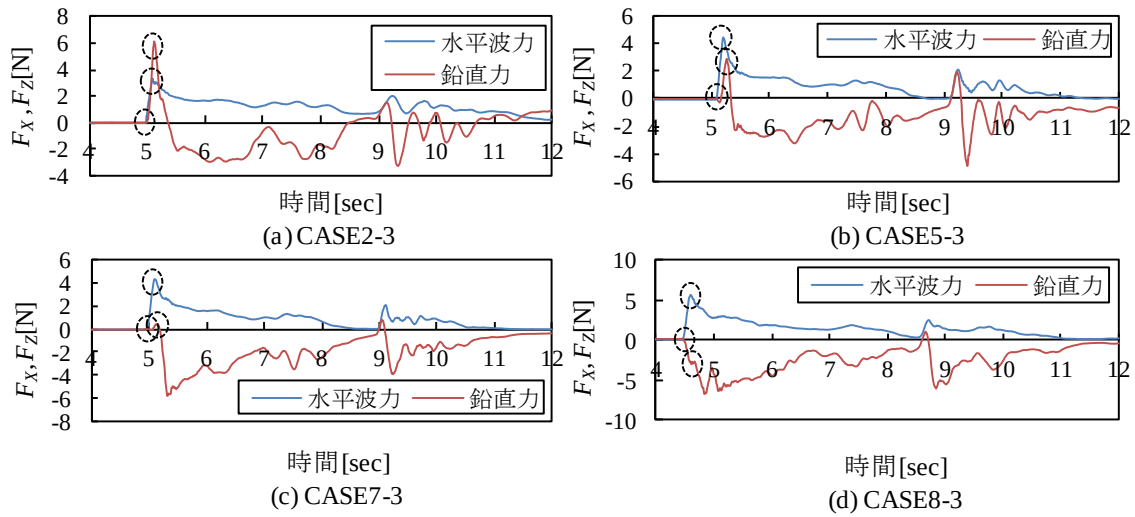


図-4 水平力及び鉛直力の時系列

5,500mm の位置における碎波段波を砕け寄せ波型とそれぞれ定義した。従って表-1 において CASE1-1～8-3 が砕け寄せ波型、CASE9-1～16-3 が巻き波型の津波作用を表わしている。その上で、同一の静水深 h_0 で貯水部水位を変化させることで各ケースにおいて最大 3 段階の異なる波高の津波を作用させている。計測したパラメータは橋桁模型前面の津波流速、静水面を基準とした 0 地点及び橋桁模型前面水位、橋桁模型に作用する水平力、鉛直力及び y 軸回りのモーメントである。津波流速についてはプロペラ式流速計 (KENEK 製, VOT2-100-10), 0 地点水位及び前面水位については容量式波高計 (正豊工学実験装置製作所製, L-300), 水平力及び鉛直力については 3 分力計 (日計電測株式会社製, Y102) を用いて計測している。また、高速度カメラ (株式会社日本ファステックイメージング, SportsCam 250) を用いた撮影に関しては砕け寄せ波型及び巻き波型共に静水深 45mm, 30mm, 20mm 及び 10mm の各ケースについて貯水部水位が最大となるケースに対して行っている。また、高速度カメラの撮影は解像度 640×480 ピクセル, 撮影速度 125fps (0.008 秒) でゲート開放から 10 秒間計測を行い、撮影の際には水路にトレーサ (和光純薬工業株式会社, ウラニン試薬 (CI45350)) を溶解させた上で実験を行った。分析に際して、水平力及び鉛直力は橋桁模型有りの場合のデータを採用し、前面波高については橋桁模型を除した場合のデータを採用している。

3. 水平力と鉛直力の評価

(1) 水平力と鉛直力の関係

図-4には水平力 F_x および鉛直力 F_z の時系列の一例を示す。鉛直力については上向きを正としている。いずれの場合にも 5 秒付近において橋桁に津波が衝突した後、0.14 秒から 0.18 秒後に水平力のピークを迎えている。その後、上向きの鉛直力が発生しているケースでは水平力のピークより 0.015 秒から 0.04 秒後に鉛直力がピークを迎えている。その後 9 秒付近

において後続波による水平力及び鉛直力のピークを迎えることが分かる。なお、図-4中には水平力の立ち上がり、水平力及び鉛直力のピークを迎える時刻に○印を併記した。

図-5には水平力と鉛直力の関係を示す。図-6には各静水深において最大のケースについて水平力及び鉛直力をベクトル表示したものを示す。ここで F_x 及び F_z はそれぞれ橋桁に津波が作用した瞬間の衝撃的な水平力及び鉛直力であり、それらの計測回数分の平均が $\overline{F_x}$ 及び $\overline{F_z}$ である。図-5において上向きの鉛直力が 0 となっているケースでは津波が橋桁に作用する際に衝撃的な鉛直力が生じていないため、 $F_z = 0$ としてデータの処理を行っている。砕け寄せ波型の場合には静水深 50mm のケースにおいて鉛直力が最も大きくなっており静水深の低下と共に小さくなる。更に、静水深 10mm では鉛直力が発生していない。一方で、水平力は静水深 10mm において最大となり、静水深 50mm において水平力は最小となる。巻き波型の場合には静水深 45mm において鉛直力が最大となり、それ以降は静水深の低下と共に小さくなる。水平力は静水深 10mm において最大となり、静水深 50mm において最小となる。このように、巻き波型及び砕け寄せ波型共に津波の上部が橋桁に作用する場合には水平力は大きくなり、上向きの鉛直力は発生しない。一方、津波の下部が橋桁に作用する場合には水平力と共に上向きの鉛直力が発生する。

(2) 波高による水平力及び鉛直力の評価

津波波高のピーク値 a を 3 回の実験回数分で平均し、 a を求める。これより a 相当の静水圧 $\rho g a$ に対する水平力による圧力 $\overline{F_x}/A_s$ 及び鉛直力による上向きの圧力 $\overline{F_z}/A_b$ の倍率を求め、次式のように κ 及び λ として定義する。

$$\kappa = \frac{\overline{F_x}/A_s}{\rho g a} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\overline{F_z}/A_b}{\rho g a} \quad (2)$$

ここで、 A_s は橋桁の被水圧部面積、 A_b は橋桁底面の水面への投影面積、 ρ は水の単位体積質量、 g は重力加速度である。次に、津波波高の平均 $\bar{a}$ で橋桁底面から波頂部までの高さ $(\bar{a}-h_c)$ を除し、津波波高に対する相対的な橋桁の位置である $(\bar{a}-h_c)/\bar{a}$ を η と定義し、 κ 及び λ と η の関係を図-7及び図-8に示す。

図-7によれば、砕け寄せ波型では η が0.24~0.71となり相対的な橋桁の位置が高い段階では κ は1.10~1.79となり大きな水平波圧が発生している。 η が0.79~1.00となり相対的な橋桁の位置が低い段階では、 κ が0.89~1.55となり水平波圧は小さくなる。巻き波型の場合には、 η が0.21~0.65となり相対的な橋桁の位置が高い段階では κ が1.35~2.02となり大きな水平波圧が発生する。更に η が0.75~1.00となり、相対的な橋桁の位置が低くなる場合においても κ は1.03~1.71となり大きな水平波圧となる。ほぼ同一の η において κ は巻き波型の方がより大きく、大きな水平波圧が作用する。

図-8によると、砕け寄せ波型の場合には η が0.27~0.37の間では λ は0であり、鉛直力が発生してい

ない。CASE7-3において η が0.41の場合に λ が0.05となり、鉛直力が発生し始める。それ以降は η が0.41~0.71へと推移し λ も0.05~0.39へと上昇し、津波波高に対する相対的な橋桁の位置が低くなるにつれて鉛直力が大きな値となり、CASE1-1において λ は0.41の最大値を示す。次に巻き波型の場合には η が0.21~0.25の間では λ は0となっており、鉛直力が発生していない。CASE15-1において η が0.39の場合に λ が0.04となり、鉛直力が発生し始める。それ以降は η が0.39~0.65へと推移し λ も0.04~0.44へと上昇し、津波波高に対する相対的な橋桁の位置が低くなるにつれて鉛直力が大きな値となり、CASE9-1において λ は0.48の最大値を示す。巻き波型の場合には鉛直力が $\eta=0.39$ で生じ始め、砕け寄せ波型よりも津波波高に対する相対的な橋桁の位置が高い段階から鉛直力が発生し、ほぼ同一の η において λ は巻き波型の方がより大きく、大きな上向きの鉛直力が作用する。巻き波型の最大値は砕け寄せ波型の最大値の1.17倍となる。

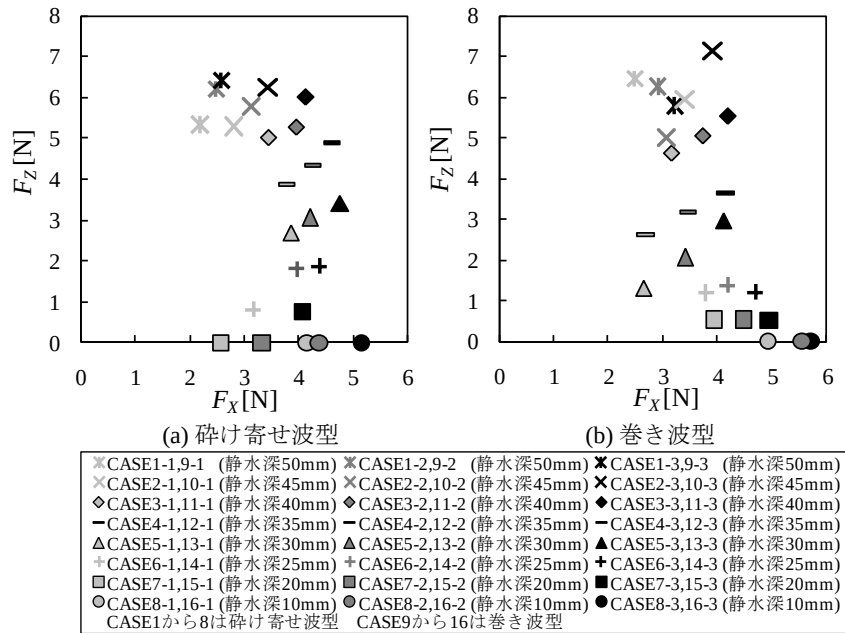


図-5 水平力と鉛直力の関係

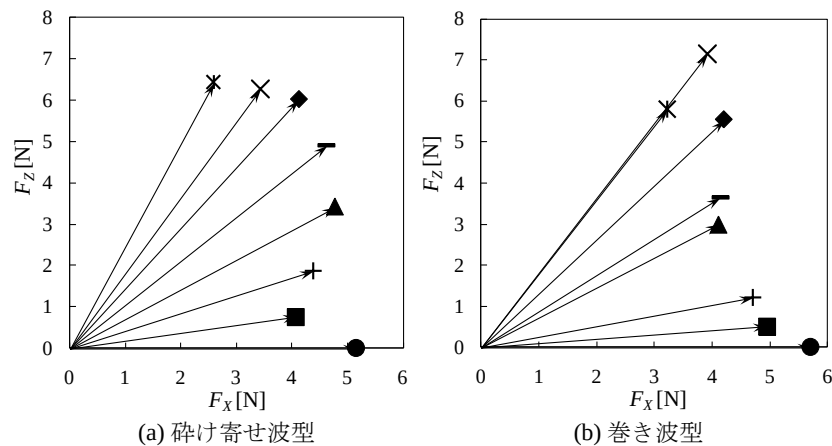
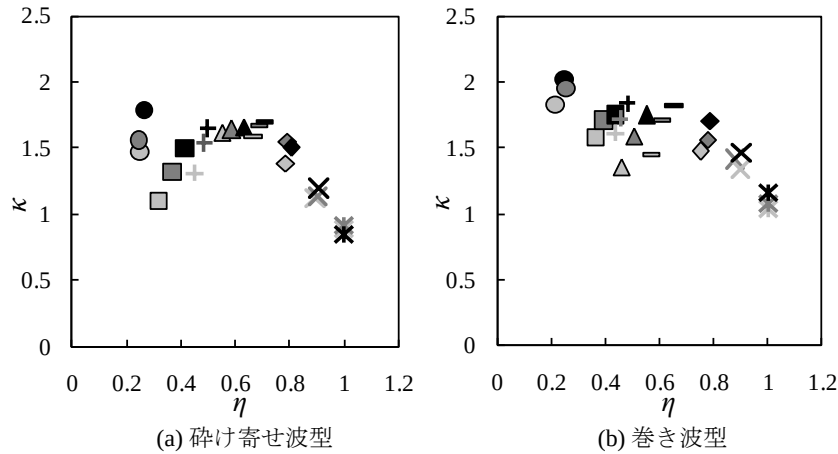
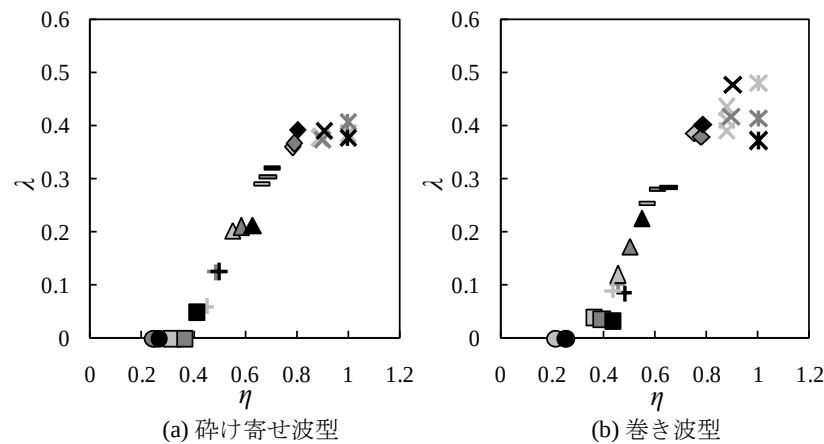


図-6 水平力及び鉛直力のベクトル表示 (凡例は図-5と同様)


 図-7 κ と η の関係(凡例は図-5と同様)

 図-8 λ と η の関係(凡例は図-5と同様)

4. 津波の流況に基づく考察

写真-1には津波が橋桁へ衝突後、波力の立ち上がる瞬間、水平力及び鉛直力が各々ピークを迎える瞬間の状態を示す。なお、その際静水深10mmのケースでは上向きの鉛直力が発生していないため、下向きに橋桁を抑えつける力のピークの瞬間を示す。以降の分析では写真-1を基に橋桁への津波の作用メカニズムの評価を行った。

(1) 静水深が異なるケース間の比較

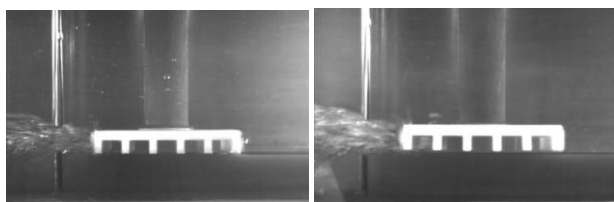
水平力の作用について着目すると、静水深45mmのケースではエネルギーが減衰した後の波の下部が橋桁に衝突していることがわかる(写真-1(a)ii)。そのため、水平力は静水深の異なるケースと比較すると相対的に小さくなる。次に静水深30mmのケースでは45mmのケースと比較すると波の上部が作用しており、比較的に大きな水平力が発生している(写真-1(b)ii)。静水深20mmのケースでは波の上部が橋桁に作用し、波の砕波部分が橋桁に衝突するためより大きな水平力となる(写真-1(c)ii)。更に、静水深10mmのケースでは波頂部分が作用することとなりこのケースにおいて水平力の作用は最大となる(写真-1(d)ii)。

る(写真-1(d)ii)。

鉛直力の作用について着目すると、静水深45mmのケースでは沖側端部に津波が作用した後に静水面が持ち上がるように橋桁の下面へと直接作用しており、このケースにおいて鉛直力は最大となる(写真-1(a)iii)。静水深30mmのケースでは砕波部が水平方向に流れる過程において橋桁の下面へと作用している。そのため、エネルギーの減衰した状態で橋桁の下面へと作用するため静水深45mmのケースと比較すると相対的に小さな鉛直力となることがわかる(写真-1(b)iii)。静水深20mmのケースではその度合が更に強くなり、砕波部が橋桁下面へ作用する際に津波の作用方向が水平方向に卓越しており、このケースでは上向きの鉛直力の発生は小さなものとなる(写真-1(c)iii)。更に、静水深10mmのケースでは、水平方向に卓越した流れが橋桁下面へ作用する際に、橋桁模型の床版部分へは波が到達しておらず、鉛直力は発生しなかった(写真-1(d)iii)。これらの傾向は砕け寄せ波型及び巻き波型どちらの場合においても同様に示された。

(2) 波の種類による比較

静水深45mmの場合については、巻き波型、砕け



1) CASE2-3 (砕け寄せ波型) 2) CASE10-3 (巻き波型)
i) 津波衝突時



1) CASE2-3 (砕け寄せ波型) 2) CASE10-3 (巻き波型)
ii) 水平力ピーク時



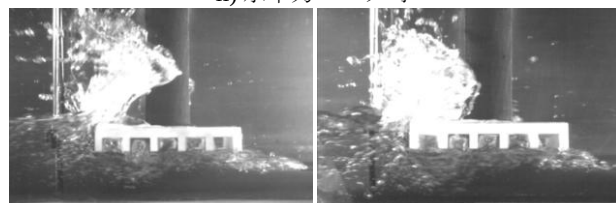
1) CASE2-3 (砕け寄せ波型) 2) CASE10-3 (巻き波型)
iii) 鉛直力ピーク時
(a) 静水深45mm



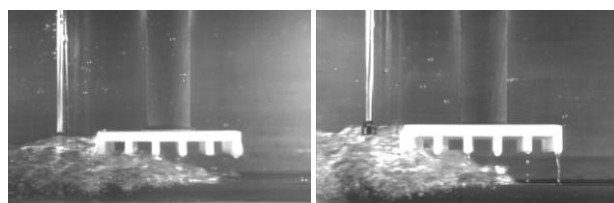
1) CASE5-3 (砕け寄せ波型) 2) CASE13-3 (巻き波型)
i) 津波衝突時



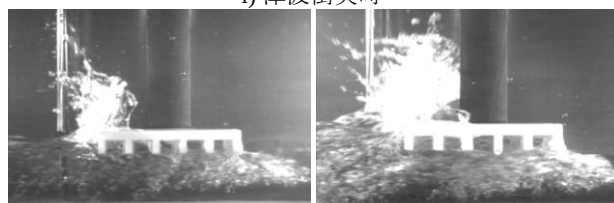
1) CASE5-3 (砕け寄せ波型) 2) CASE13-3 (巻き波型)
ii) 水平力ピーク時



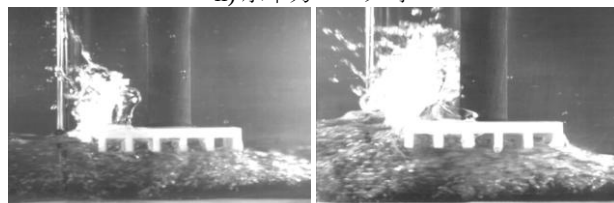
1) CASE5-3 (砕け寄せ波型) 2) CASE13-3 (巻き波型)
iii) 鉛直力ピーク時
(b) 静水深30mm



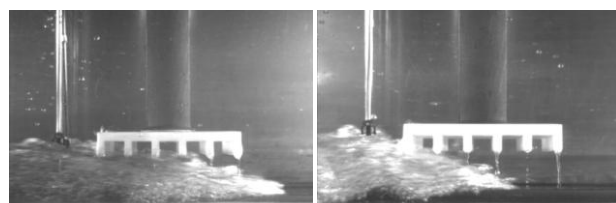
1) CASE7-3 (砕け寄せ波型) 2) CASE15-3 (巻き波型)
i) 津波衝突時



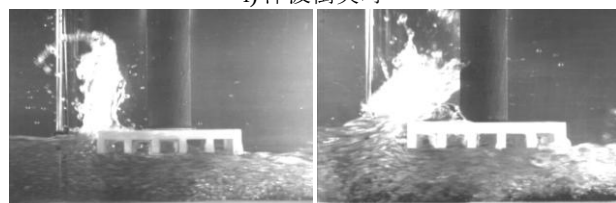
1) CASE7-3 (砕け寄せ波型) 2) CASE15-3 (巻き波型)
ii) 水平力ピーク時



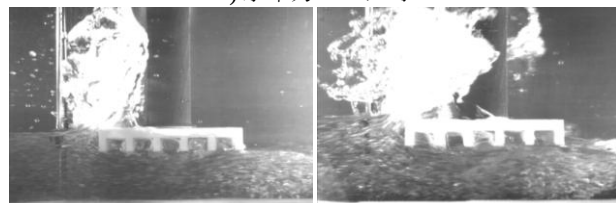
1) CASE7-3 (砕け寄せ波型) 2) CASE15-3 (巻き波型)
iii) 鉛直力ピーク時
(c) 静水深20mm



1) CASE8-3 (砕け寄せ波型) 2) CASE16-3 (巻き波型)
i) 津波衝突時



1) CASE8-3 (砕け寄せ波型) 2) CASE16-3 (巻き波型)
ii) 水平力ピーク時



1) CASE8-3 (砕け寄せ波型) 2) CASE16-3 (巻き波型)
iii) 鉛直力ピーク時
(d) 静水深10mm

写真-1 橋桁に作用する津波の流況

寄せ波型ともに波の最下部が橋桁に衝突する(写真-1(a)i)。水平力がピークの時点では、砕け寄せ波型に比べて巻き波型はより橋桁上部において跳ね上がる波の規模が大きく、より陸側方向に発展している

(写真-1(a)ii)。この時の水平力は砕け寄せ波型に比べて巻き波型のほうが大きい。また、鉛直力ピーク時には、橋桁沖側において橋桁上部を通過する波は砕け寄せ波型の場合に比べて巻き波型のほ

うが進行距離が長く橋桁の上面に接する面積も広い(写真-1(a)iii))。この時の鉛直力は水平力と同様に砕け寄せ波型に比べて巻き波型のほうが大きい。

静水深30mmの場合については、巻き波型、砕け寄せ波型ともに波の中央部が橋桁に衝突するが、波の前面の角度の違いにより巻き波型に比べて砕け寄せ波型のほうがより陸側に向けて橋桁の下部に波が進入する(写真-1(b)i))。水平力のピーク時点では、砕け寄せ波型は橋桁の上部を50°程度の角度で跳ね上がっているが、巻き波型は橋桁の上部に接しながら流れ方向に進入している(写真-1(b)ii))。また、鉛直波力ピーク時においては、橋桁沖側において橋桁上部を通過する波は砕け寄せ波型の場合に比べて巻き波型のほうが橋桁の上部と接する面積が広い(写真-1(b)iii))。各ピークにおける水平力及び鉛直力の傾向は同じ η の値に対する λ の大きさより静水深45mmの場合と同様に砕け寄せ波型に比べて巻き波型のほうが大きくなっている。

静水深20mmの場合については、橋桁衝突時には波の上部が橋桁と衝突するが、波の前面の角度の違いにより巻き波型に比べて砕け寄せ波型のほうがより陸側に向けて橋桁の下部に波が進入している(写真-1(c)i))。水平力のピーク時点では、砕け寄せ波型に比べて巻き波型はより橋桁の上部において跳ね上がる波の規模が大きく、より陸側方向に発展している(写真-1(c)ii))。また、鉛直波力ピーク時においては橋桁沖側における水位が砕け寄せ波型に比べて巻き波型は高く、橋桁陸側において橋桁の下部を通過する波の高さとの差異がより大きくなっているが、橋桁の下部を流れる波の高さはともに橋桁の下端部の高さをかろうじて越える程度である(写真-1(c)iii))。各ピークにおける水平力及び鉛直力の傾向は静水深45mmの場合と同様に砕け寄せ波型に比べて巻き波型のほうが大きくなっている。

静水深10mmの場合については、巻き波型及び砕け寄せ波型ともに橋桁衝突時には波の静水深20mmの場合よりも波の上部が橋桁と衝突するが、波の前面の角度の違いにより巻き波型は橋桁下部を橋桁の中ほどまで進入しており、一方砕け寄せ波型については橋桁の陸側下部を通過しきっている(写真-1(d)i))。水平力のピーク時点では、橋桁上部の波の高さは大きく変わらないが、砕け寄せ波型はほぼ垂直に発展しているのに対し巻き波型は流れ方向から45°程度の角度をもって発展している(写真-1(d)ii))。この時、水平力は砕け寄せ波型に比べて巻き波型のほうが大きい値を示している。また、鉛直波力ピーク時においては橋桁の下部を流れる波の高さは橋桁の下端部の高さとはほぼ同じであり、波に含まれる気泡の量から流れ方向に卓越していると考えられる(写真-1(d)iii))。この時、砕け寄せ波型、巻き波型ともに鉛直力は発生していない。

5. 結論

本研究では単径間RC桁橋に作用する砕波段波を模擬した水理実験を実施し、巻き波型及び砕け寄せ波型の砕波段波を受けた場合の橋桁に作用する津波波力の作用メカニズムを評価した。以下に得られた主要な結論を示す。

- 1) 波高による水平力及び鉛直力の評価を行ったところ、津波波高に対する相対的な橋桁の位置が高いケースでは水平力のみが作用となり、一方津波波高に対する相対的な橋桁の位置が低いケースでは水平力と鉛直力の両方が作用する。更に、巻き波型においてより大きな水平力と鉛直力が作用するため、橋桁に対する津波荷重の観点からは砕け寄せ波型の場合よりも厳しめの作用となる。
- 2) 高速度カメラを用いて撮影した画像を用いて作用メカニズムの検証を行った。水平力については静水深が浅くなるに従い津波の上部が橋桁に作用し、相対的に水平力が大きくなることが明らかとなった。更に、鉛直力については静水深が深いケースでは波が砕波しない状態で橋桁に作用し鉛直力が強くなり、静水深が浅くなるに従い鉛直力が小さくなることが明らかとなった。また、同じ静水深に対する水平力及び鉛直力は、砕け寄せ波型、巻き波型ともに鉛直力の発生しない静水深10mmを除いた全てのケースにおいて砕け寄せ波型に比べてともに大きくなる。

参考文献

- 1) 警察庁ホームページ，被害状況と警察措置：
<http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo.pdf>, 2011.9.27. 参照。
- 2) USGS Earthquake Center：<http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2004/usslav/>, 2011.9.26. 参照。
- 3) 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，No.0012，2006。
- 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) 庄司学，森洋一郎：橋桁の津波被害再現実験，海岸工学論文集，第53巻，pp.801-805，2006。
- 6) 松富英夫，飯塚秀則：津波の陸上流速，流速と家屋被害，海岸工学論文集，第45巻，pp.361-365，1998。
- 7) 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) 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。
- 9) 荒木進歩，中嶋悠，出口一郎，伊藤禎和：河口付近の橋梁に作用する津波流体力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第55巻，pp.866-870，2008。
- 10) 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, pp.471-482, 2009.
- 11) 庄司学, 森山哲雄, 平木雄, 藤間功司, 嶋原良典, 笠原健治: 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, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.826-830, 2009.
 - 12) 中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士: 断面形状の異なる橋桁に作用する津波の流体力に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.65, No.1, pp.892-898, 2009.
 - 13) 中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士: 津波作用時における橋梁周辺の流れと流体力に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.55, pp.789-798, 2009.
 - 14) 荒木進歩, 坂下友里, 出口一郎: 橋桁に作用する水平および鉛直方向津波波力の特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.796-800, 2010.
 - 15) 庄司学, 平木雄, 藤間功司, 嶋原良典: 橋桁に作用する砕波段波の流体力に関する実験的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.801-805, 2010.
 - 16) 五十里洋行, 後藤仁志: 津波氾濫による橋桁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, pp.211-215, 2007.
 - 17) 村上晋平, Bui, H.H., 中尾尚史, 伊津野和行: 橋梁に作用する津波の流体力と流況に関する SPH 法解析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.65, No.1, pp.914-920, 2009.
 - 18) 嶋原良典, 藤間功司, 庄司学: 橋梁構造物に作用する津波波力の数値計算, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.65, No.1, pp.899-904, 2009.
 - 19) 土木学会, 水理公式集, pp.467, 2007.

EXPERIMENTAL STUDY ON THE MECHANISM OF HORIZONTAL AND VERTICAL WAVE FORCES ACTING ON A BRIDGE DECK SUBJECTED TO BREAKER BORES

Gaku SHOJI, Yu HIRAKI, Yoshiyuki EZURA, Minoru IIDAKA, Koji FUJIMA and
Yoshinori SHIGIHARA

The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake tsunami caused the catastrophic damage of infrastructures such as coastal structures, utilities and transportation facilities. Among infrastructures evaluation of tsunami fluid force acting on a bridge deck is urgently required for designing a tsunami-proof bridge structure. Authors carried out hydraulic experiments by using high-speed camera to clarify the mechanism of horizontal and vertical wave forces acting on a bridge deck subjected to plunging breaker bores and surging breaker bores, focusing on the relationship between the position of a bridge deck against wave height and the occurrence of horizontal and vertical wave forces acting on a bridge deck.