

砕波段波の作用を受ける橋桁の津波荷重評価

平木雄¹・庄司学²

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

²正会員 博(工) 筑波大学准教授 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年インド洋大津波においては橋梁構造物に甚大な被害が発生した。橋梁構造物は交通社会インフラの重要な要素であり、被災時の緊急活動や復旧活動を支える交通基盤として、機能保持が強く求められる。そのため、橋梁構造物に作用する津波荷重評価は社会的に喫急な課題となっている。橋梁構造物に作用する津波流体力はきわめて強い非定常な荷重となるため、インド洋大津波以降、水理実験による実験的検討が多数の研究者により行われている^{1)~7)}。その中でも例えば庄司、森山ら⁷⁾は橋桁の横移動という被害形態について水理実験を実施し、津波流体力と被害との関係を定量的に評価している。しかし、津波の形態として巻き波型並びに砕け寄せ波型の砕波段波を想定した場合の津波荷重評価は必ずしも十分に行われているとは言えない。特に、それらの作用を受ける橋桁の抗力係数の評価は重要であるが、定量的に明確になってはいない。

そこで、本研究では単径間RC桁橋に作用する津波を模擬した水理実験を実施することで、巻き波型砕波段波及び砕け寄せ波型砕波段波の作用を受ける橋桁の津波荷重評価を行ったので、その結果を報告する。

2. 実験の概要

表1には実験条件を、図1には実験水路を示す。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橋桁への砕波段波の作用を模擬している。図2ならびに表2には本実験で使用した橋桁模型の構造諸元を示す。橋桁模型はインド洋大津波においてインドネシアで被災したLueng le Bridgeの桁長、幅員、桁高を幾何学的に1/100(0.01)で縮尺している。実験に際しては、静水深 h_0 を40mm, 30mm, 20mm, 10mmの4通りとした

上で、橋桁模型の設置する位置を図1に示す0地点より1,500mmと5,500mmの2通りの位置とし、1,500mmの位置における砕波段波を巻き波型砕波段波、5,500mmの位置における砕波段波を砕け寄せ波型砕波段波とそれぞれ定義した。したがって表1においてCASE1-1~4-1が砕け寄せ波型砕波段波、CASE5-1~8-1が巻き波型砕波段波の津波作用としている。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桁模型前面の津波流速、0地点及び桁模型前面の水位(前面水位)、橋桁に作用する水平波力及び鉛直力である。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)、水平波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。データのサンプリン

表1 実験条件

CASE 番号	橋桁模型 設置位置 (mm)	静水深 h_0 (mm)	桁下高 (mm)	桁中心 位置 h_c (mm)	貯留 水深差 (mm)	貯水部 水位 (mm)
1	1	5,500	40	10	18.5	422
	2				18.5	432
	3				18.5	445
2	1	5,500	30	20	28.5	412
	2				28.5	422
	3				28.5	432
3	1	5,500	20	30	38.5	422
	2				38.5	432
	3				38.5	442
4	1	5,500	10	40	48.5	442
5	1	1,500	40	10	18.5	382
	2				18.5	390
	3				18.5	402
6	1	1,500	30	20	28.5	372
	2				28.5	382
	3				28.5	391
7	1	1,500	20	30	38.5	392
	2				38.5	402
	3				38.5	412
8	1	1,500	10	40	48.5	442

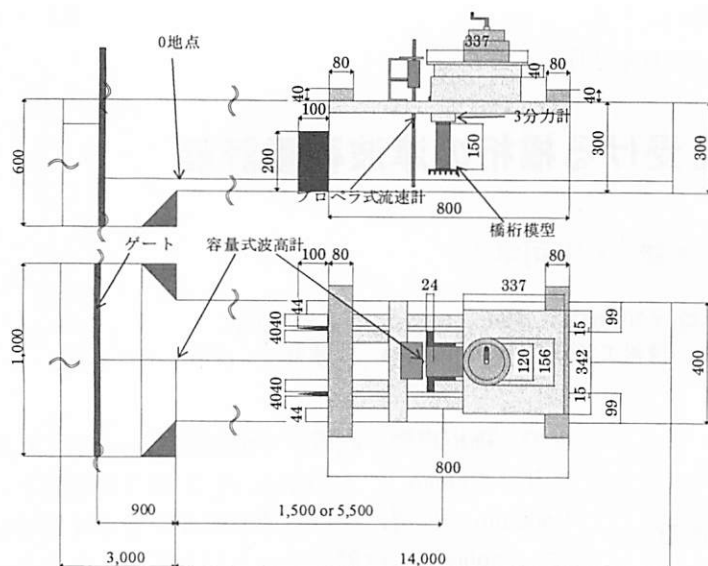


図1 実験水路(単位 mm)

表2 橋桁の構造緒元

桁長 L (mm)	床板厚さ T_1 (mm)	桁高 T_2 (mm)	床板幅 B_1 (mm)	桁厚 B_2 (mm)	桁間長さ B_3 (mm)	縮尺
200	7	10	95	5	13	1/100

グ間隔は 1/200 秒とし、ゲート開放から 20 秒間の計測を行っている。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ている。なお、全てのケースについて桁模型を設置した状態で実験を行った後、桁模型を除いた上で通過波の計測を行い、5 回の再現性の高いデータが得られるまで計測を行っている。分析に際しては水平波力及び鉛直力は桁有りの場合のデータを採用し、津波流速及び前面水位については模型を除いた場合の結果を採用している。

3. 抗力係数の算出

橋桁に作用する水平波力 F_X を津波に対する橋桁の抗力相当であると仮定することで、次式を用いて抗力係数 C_D を算出した。

$$C_D = \frac{F_X}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (1)$$

ここで、 ρ は水の単位体積質量、 v は津波流速、 A は橋桁の被水圧面積である。

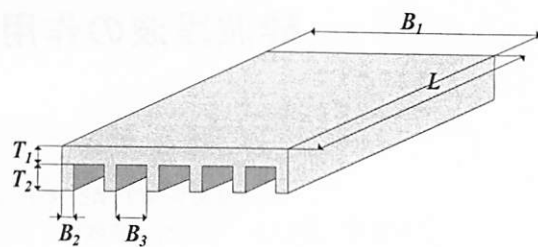


図2 実験で使用した橋桁模型

図3には各ケースの抗力係数 C_D を時系列で表示した結果を示す。なお、全5回の測定中、水平波力 F_X と津波流速 v との間で、データの立ち上がりにはばらつきがみられたため、全5回の中でそれらのばらつきが少ない1~3回分のデータを用いて表示している。式(1)において分母の津波流速 v の数値が低くなると抗力係数 C_D の数値が高くなるためそのようなデータの信頼性が低い時間領域を除外した。更に、砕け寄せ波型、巻き波型共に津波流速 v のピーク時刻からデータの信頼性が高い領域において抗力係数 C_D の平均を算出した。なお、図3中にはその領域を点線で囲んで示した。ここで、水平波力 F_X のピークは橋桁に津波が衝突した瞬間の衝撃的な波力とし、津波流速 v のピークは津波が流速計の感知部に衝突した瞬間としている。CASE1-3, 6-1 については全5回の測定中いずれのデータにおいても立ち上がりにばらつきが見られたため、全て除外している。

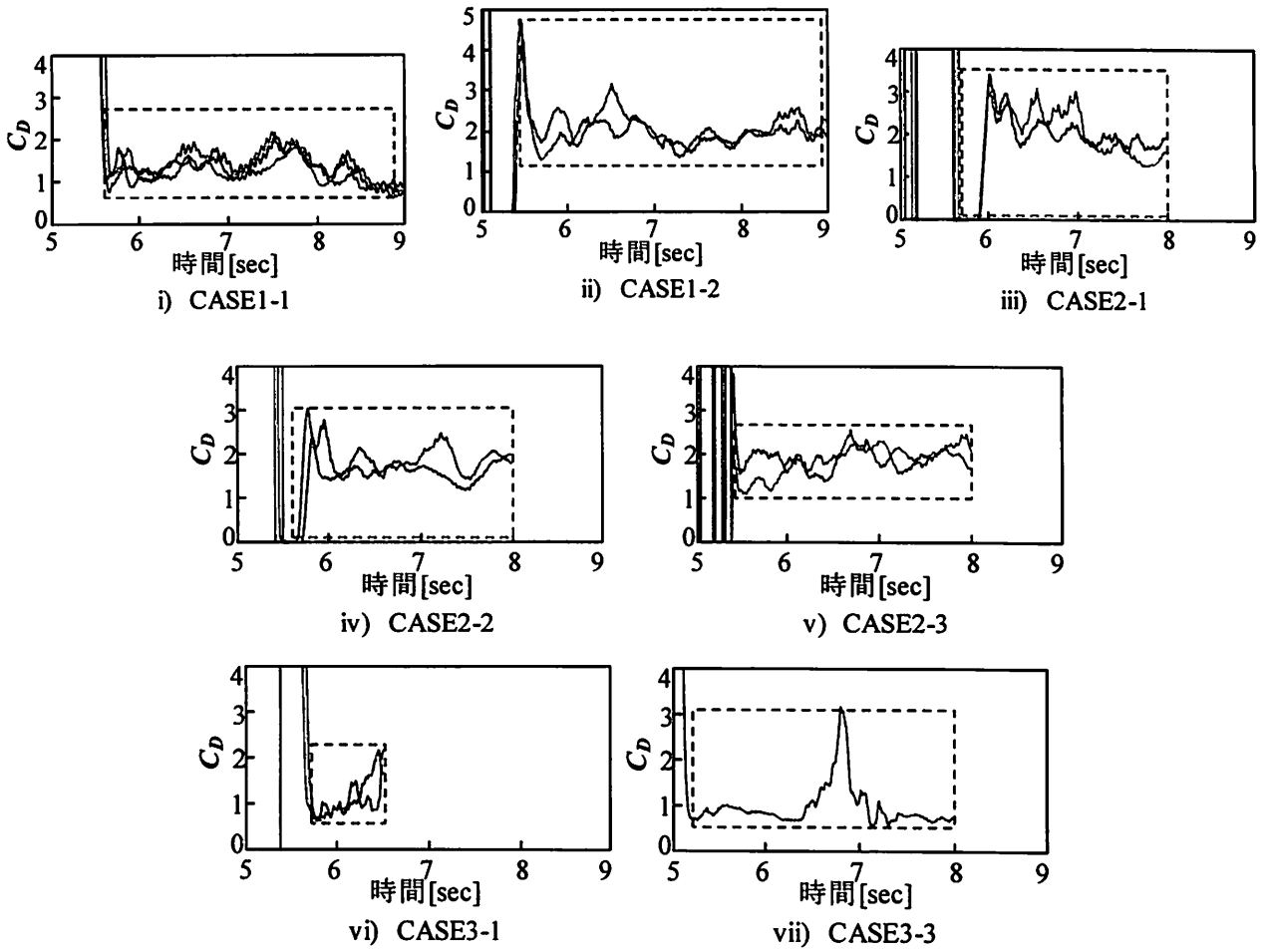
図3より、砕け寄せ波型砕波段波の場合、津波流速 v がピークとなる時刻は 5.21~5.81 秒の間であり、抗力係数 C_D の値は平均的に 0.98~2.03 の間で変動していることがわかる。同様に巻き波型砕波段波の場合、津波流速 v がピークとなる時刻は 2.17~2.44 秒の間であり、抗力係数 C_D の値は平均的に 1.20~2.12 の間で変動していることがわかる。

次に、水平波力 F_X と津波流速 v がピークとなる値を用い、データの信頼性が保証された回数分の平均値 $\overline{F_X}$, $\overline{v}$ を用いて次式のように抗力係数 C_D の平均値 $\overline{C_D}$ を図4のように求めた。

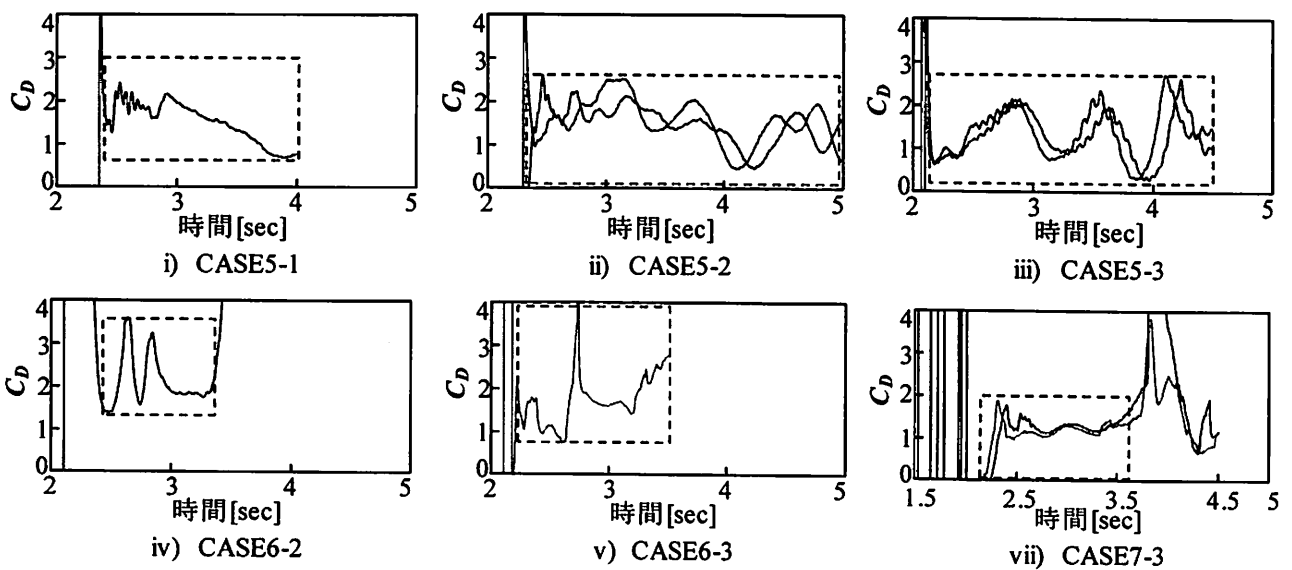
$$\overline{C_D} = \frac{\overline{F_x}}{\frac{1}{2} \rho \overline{v}^2 A}$$

(2)

なお、CASE3-2, 7-1 については津波流速 v のピーク値が精度よく計測できなかったため、抗力係数 $\overline{C_D}$ の算出を行っていない。また、CASE4-1, 8-1 につい



(a) 砕け寄せ波型碎波段波



(b) 巻き波型碎波段波

図3 抗力係数 C_D の時系列表示

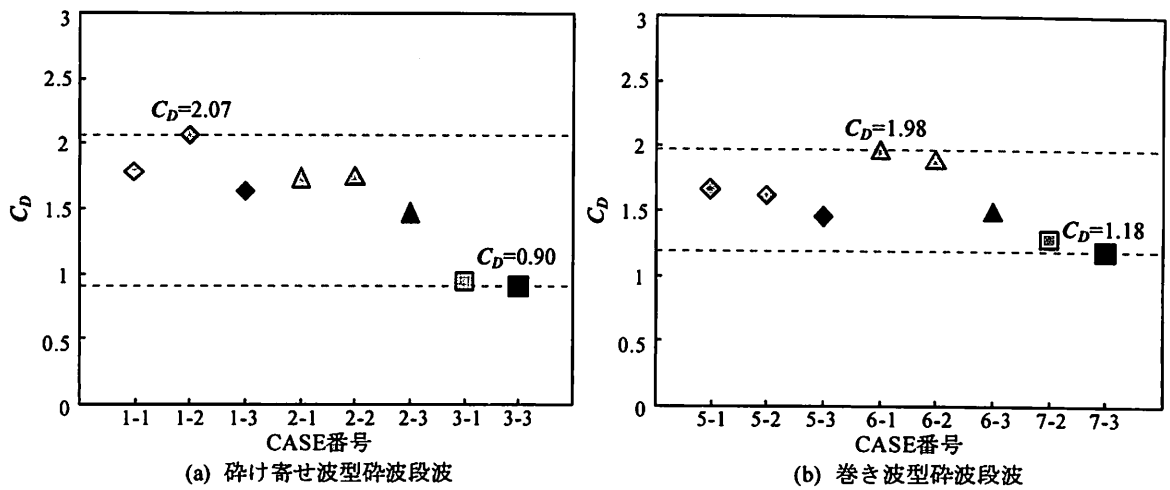


図4 算出した抗力係数 $\overline{C_D}$

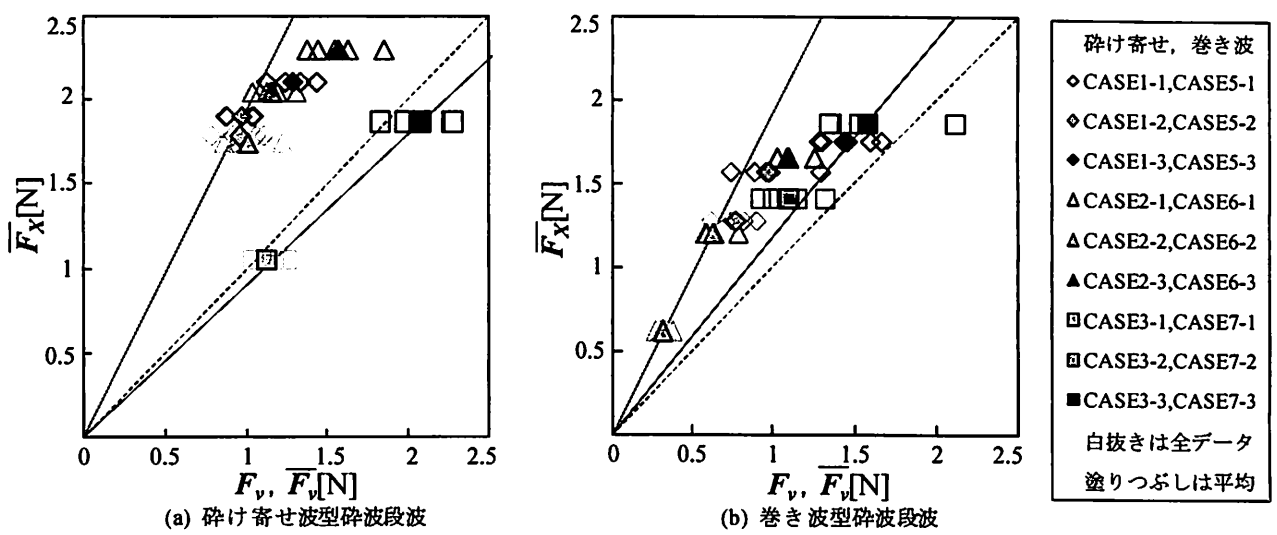


図5 $\overline{F_x}$ と F_v および $\overline{F_v}$ の関係

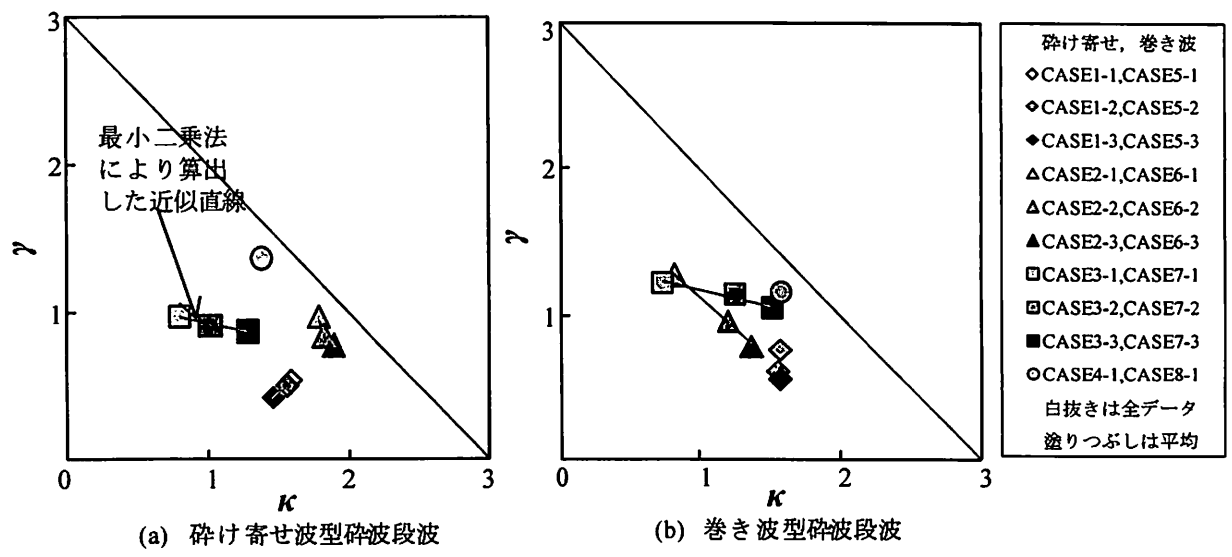


図6 水平波力 $\overline{F_x}$ の評価

ては流速計の感知部に波が十分に到達していなかったため、抗力係数 $\overline{C_D}$ の算出は行っていない。

図 4 によると、抗力係数 $\overline{C_D}$ は砕け寄せ波型では 0.90~2.07、巻き波型では 1.18~1.98 となっている。およそ砕け寄せ波型、巻き波型を問わず、1.0~2.0 の範囲に収まっている。ただし、求められた抗力係数 $\overline{C_D}$ には図 4 に示す通りばらつきが生じているが、その一因としては実験ケースの違いによる橋桁の被水圧部と津波の流れ方向の角度にばらつきが生じたためであると推察される。

図 5 には、水平波力 $\overline{F_x}$ と津波流速 v 及び $\overline{v}$ を用いて算出した抗力 F_v 及び $\overline{F_v}$ との関係を示す。図 5 によると、砕け寄せ波型砕波段波の場合、CASE1 では $\overline{F_x}$ の値は 1.78~2.10、 $\overline{F_v}$ は 0.96~1.29 となっており、CASE2 では、 $\overline{F_x}$ は 1.74~2.29、 $\overline{F_v}$ は 1.01~1.57 となっている。それに対して、CASE3 では、 $\overline{F_x}$ は 1.05~1.87、 $\overline{F_v}$ は 1.12~2.08 となっており、CASE1、2 と CASE3 を比較すると CASE3 においては、同一の津波流速 v 及び $\overline{v}$ に対して水平波力 $\overline{F_x}$ が低くなっていることがわかる。一方、巻き波型砕波段波の場合は、前述した砕け寄せ波型砕波段波のような傾向は見られなかった。

4. 静水深を基準とした桁中心位置と前面水位による水平波力の評価

静水深 h_0 を基準とした桁中心位置 h_c を前面水位 a_h の平均値である $\overline{a_h}$ で除し、次式のようにパラメータ γ を定義する。なお、 $\overline{a_h}$ はデータの信頼性が保証された回数分の平均値としている。

$$\gamma = \frac{h_c}{\overline{a_h}} \quad (3)$$

この時、 γ が 1 より大きな値では波高が桁の中心まで到達しておらず、 $\gamma=1$ の場合には桁中心位置に波が到達する。さらに γ が 1 より小さくなるに従って橋桁に対して波高が高くなることを示している。

次に、水平波力 F_x の平均値である $\overline{F_x}$ を被水圧面積 A で除した上で、それを静水圧相当の圧力 $\rho g \overline{a_h}$ で除したパラメータ κ を次式のように定義した。

$$\kappa = \frac{\overline{F_x}/A}{\rho g \overline{a_h}} \quad (4)$$

図 6 には γ と κ の関係を示す。ここで CASE4-1、6-1、7、8-1 では γ が 1.0 より大きな値となっているが、これらのケースにおいても桁有り時の津波先端部は橋桁に衝突している。

図 6 によれば、砕け寄せ波型では、CASE1 において γ が 0.55~0.43 と低くなり、前面水位 $\overline{a_h}$ が高くなるにも関わらず、 κ は 1.57~1.45 の間で同程度の値を示しており、前面水位 $\overline{a_h}$ の変化に対して水平波力 $\overline{F_x}$ の変化が生じていない。CASE2 においては γ が 0.98~0.78 と低くなり、同様に前面水位 $\overline{a_h}$ が高くなると、 κ は 1.79~1.89 と徐々に大きくなっており、前面水位 $\overline{a_h}$ が高くなるに従って水平波力 $\overline{F_x}$ も大きくなり始める。CASE3 においては γ が 0.98~0.88 と低くなるもののその変化の割合は低く、それにも関わらず κ は 0.80~1.28 と大きくなっており、前面水位 $\overline{a_h}$ が高くなることによる水平波力 $\overline{F_x}$ の大きくなる割合が、CASE2 より顕著になっている。このような砕け寄せ波型砕波段波の場合の水平波力 $\overline{F_x}$ の傾向は、巻き波型砕波段波においても同様に見られた。

図 6 には朝倉式⁸⁾を直線で併せて示している。いずれのケースにおいてもデータは朝倉式の直線の内側にあることがわかる。

さらに、砕け寄せ波型及び巻き波型どちらのケースも共通して、同一の静水深 h_0 の条件下での比較を行うと、静水深 h_0 が 40mm、30mm、20mm と低くなり、前面水位 $\overline{a_h}$ が高くなる割合に対して水平波力 $\overline{F_x}$ の大きくなる割合がより顕著になっている。なお、砕け寄せ波型と巻き波型の間での違いが現段階では明らかになっていないため、今後の課題とする。

5. 結論

本研究では単径間 RC 桁橋に作用する津波を模擬した水理実験を実施することで、巻き波型砕波段波及び砕け寄せ波型砕波段波の作用を受ける橋桁の津波荷重評価を行った。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 抗力係数 C_D を時系列で評価した場合、砕け寄せ波型の場合は 0.98~2.03 の間で変動しており、巻き波型の場合は 1.20~2.12 の間で変動している。
- 2) 水平波力のピークの平均値 $\overline{F_x}$ と津波流速のピークの平均値 $\overline{v}$ により算出した抗力係数 $\overline{C_D}$ は、砕け寄せ波型では 0.90~2.07、巻き波型では 1.18~1.98 となり、およそどちらも 1.0~2.0 の範囲に収まっている。
- 3) 静水深 h_0 を基準とした桁中心位置 h_c を前面水位 a_h の平均値である $\overline{a_h}$ で除し、パラメータ γ を定義し、

また、水平波力の平均値である $\overline{F_x}$ を被水圧面積 A で除した上で、それを静水圧相当の圧力 $\rho g \overline{a_h}$ で除したパラメータとして κ を定義した。その上で、これらのパラメータを用いて、水平波力 $\overline{F_x}$ の評価を行った場合、砕け寄せ波型、巻き波型共通に見られた特徴として、静水深 h_c が40mmの場合は、前面水位 $\overline{a_h}$ の高まりによる水平波力 $\overline{F_x}$ の変化は見られなかった。静水深 h_c が30mmの場合は γ が小さくなるに従って κ は大きな値となり、前面水位 $\overline{a_h}$ の高まりによって水平波力 $\overline{F_x}$ が徐々に大きくなる。静水深 h_c が20mmの場合は γ が小さくなるにも関わらず、 κ は大きくなっており、その大きくなる割合は静水深 h_c が30mmの場合よりも顕著である。すなわち、前面水位 $\overline{a_h}$ の高まりに比して水平波力 $\overline{F_x}$ の大きくなる割合は、静水深 h_c が低くなるに従ってより強くなっている。

謝辞：本研究は、国土交通省・平成21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。本水理実験は防衛大学校の藤間功司先生、鳴原良典先生及び九州工業大学の木村吉郎先生、二井伸一氏のご指導のもと防衛大学校の開水路を用いて実施したものである。実験の準備及び実施に際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) 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.
- 2) 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, Vol.29, pp.902-911, 2007.8.
- 3) 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.
- 4) 荒木進歩, 中島悠, 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, Vol.55, pp.866-870, 2008.11.
- 5) 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, 2009.3.
- 6) 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, 2009.3.
- 7) 庄司学, 森山哲雄, 平木雄, 藤間功司, 鳴原良典, 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, 海岸工学論文集, Vol.56, 2009.1.
- 8) 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, pp.911-915, 2000.