

PC箱桁橋に作用する津波波力に関する基礎的検討

(株)高速道路総合技術研究所	工修	○林	秀和
(株)高速道路総合技術研究所	正会員	工修	青木 圭一
三菱重工鉄構エンジニアリング(株)	工博	鈴木	俊光
三菱重工業(株)	工修	四條	利久磨

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波により、多数の橋梁が流出した。今後、発生切迫性が高いとされる南海トラフ地震など巨大地震による津波に対して、高速道路の橋梁構造物の被害を適切に評価し、起こり得る被害を最小限に抑え、道路ネットワーク網を保持する必要がある。これまで防波堤やビル等の建造物に作用する津波外力は基準等に規定されているが、橋梁構造物に対しては設計基準が確立されていない。そこで、標準的な高速道路の上部構造を対象に水路模型実験を行い、橋桁に作用する津波波力を評価した。また、津波の遡上現象や建屋群に作用する津波波力の再現解析¹⁾に適用された汎用の流体解析コードとVOF法を用いた数値解析を行い、橋桁断面における津波波力評価への適用性を検証した。

2. 水路模型実験

2.1 実験概要

実験に用いた水路は、**図-1**に示す長さ20m、断面幅0.7m、断面高さ1.0mの可視化水路である。実験模型は2車線のPC箱桁断面を対象とし、縮尺1/50の部分模型を用いた**(写真-1)**。**図-1**のスライド式造波板により孤立波性状の津波を生成し、模型に作用する水平波力と鉛直波力を計測した。

本実験は、最大で津波高10m(実験値20cm)、流速6.4m/s(実験値0.91m/s)の津波が橋桁に作用する状況を模擬した。本稿では、実験結果の一例として、最も大きい津波波力が作用した津波高20cmのケースについて述べる。なお、本実験の概要を**表-1**に示す。

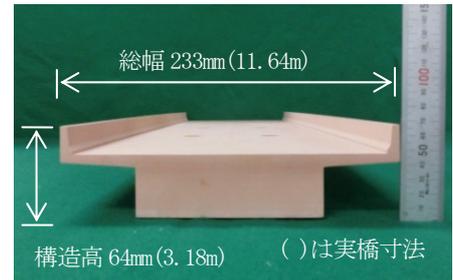


写真-1 実験模型

2.2 津波波力の作用状況

流速0.91m/sにおける津波波力の時刻歴を**図-2**に、代表的な断面周りの流況を**写真-2**に示す。なお、力の向きは、水平波力は流れの方向を正、鉛直波力は上向きを正とした。また、造波板に近い方の面を前流側、遠い方の面を後流側とした。グラフの横軸は、造波板の稼働開始を0秒と定義した時刻である。

写真-2(a)は造波板稼働後5.8秒後の状況で、波が下フランジ前流側端部から作用している。その角度から桁下へ浸入する波は、桁を持ち上げながら進行するものと考えられる。

水平波力と鉛直波力はピークが2回発生してお

表-1 実験概要

実験パラメータ	流速
実験条件	津波高：20cm(波が桁全体を超越) 流速：0.91m/s, 0.83m/s, 0.80m/s
計測項目	水平波力, 鉛直波力
波力の計測	・模型上部に取付けた分力計で計測 ・各ケース3回計測 ・サンプリング周波数：1000Hz ・模型位置：静水面から10cm
流速の計測	・PIV※を使用 ・計測位置 流れ方向：模型位置 高さ方向：模型下端
相似則	フルード数

※Particle Image Velocimetry：粒子画像化速度計測法

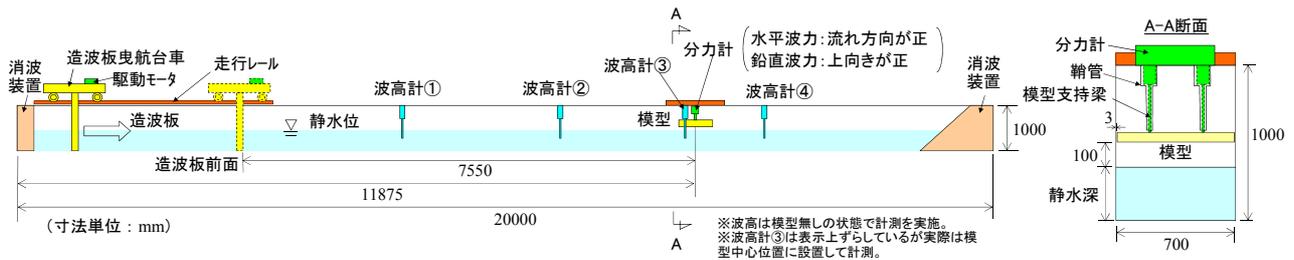


図-1 水路実験設備の概要

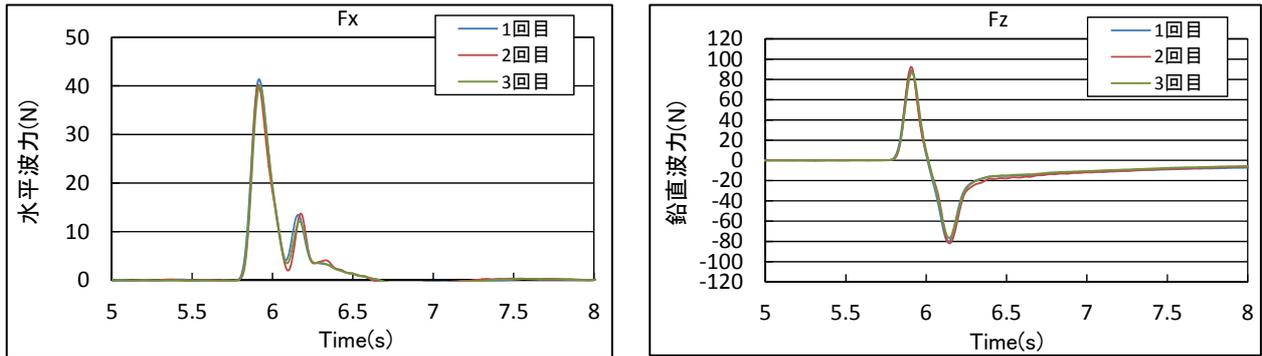
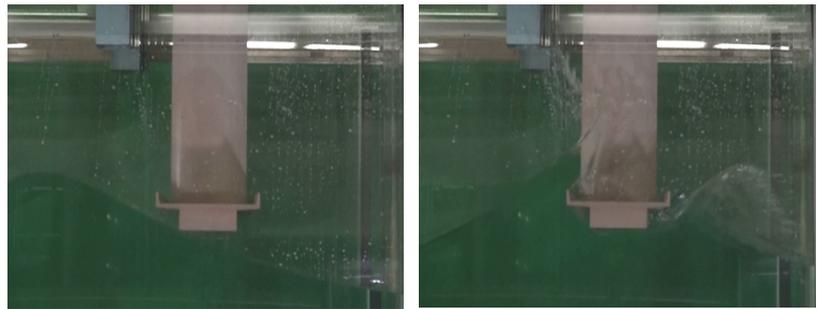


図-2 津波波力の時刻歴 (津波高=20cm, 流速=0.91m/s)

り、いずれもほぼ同時刻である。最初のピークは、水平波力については波が前流側高欄やウェブに衝突し、前流側高欄上端より斜め上方に打ち上げられたことにより発生したものと考えられる (写真-2 (b))。鉛直波力は、下フランジ下面や前流側床版張出し下面に波が浸入したことが要因と推測される。

また、2番目のピークでは、水平波力は前流側高欄上端で打ち上げられた越波水塊が、後流側高欄に落下することにより発生したと推察される (写真-2 (c))。鉛直波力は、この水塊の落下や下フランジ前流側下面および後流側床版張出し下面の剥離による負圧が影響し、下向きに力が作用したものと考えられる。



(a) 5.8s (衝突前)

(b) 5.95s (第1ピーク)



(c) 6.1s

(d) 6.25s (第2ピーク)

写真-2 断面周りの流況 (津波高=20cm, 流速=0.91m/s)

2.3 津波波力の特性

津波波力の特性を把握するため、津波高が一定 (20cm) の条件下で流速の変化が及ぼす影響を表-2 および図-3に整理した。なお、実験結果は3回計測の平均値である。最大水平波力は、流速の増加とともに増加する傾向となった。一方、最大鉛直波力は、

表-2 最大波力 (津波高=20cm)

流速 (m/s)	0.80	0.83	0.91
水平波力 (N)	32.3	33.8	40.5
鉛直波力 (N)	上向き	91.1	89.6
	下向き	-142.1	-129.7
			89.5
			-79.7

上向きが流速によらずほぼ一定であったのに対し、下向きの絶対値は流速の増加にしたがい減少した。これは流速の違いにより、波の衝突時に打ち上げられる越波水塊の流れや体積が影響しているものと推測される。また、上向きの最大鉛直波力の大きさは、最大水平波力に対して2~3倍程度であった。

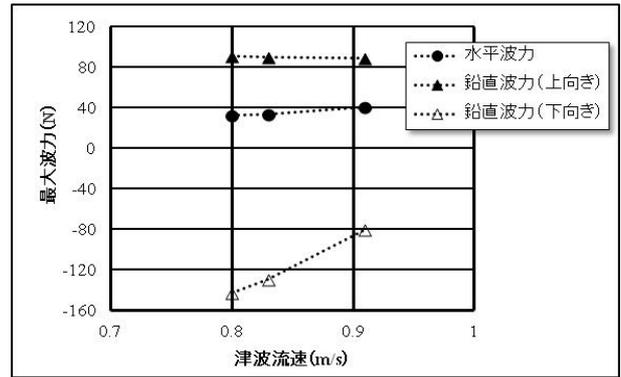


図-3 最大波力 (津波高=20cm)

3. 数値解析

3.1 数値解析手法

津波の自由表面の決定には、界面補足手法の1つであるVOF (Volume of Fluid) 法を採用し、水と空気の2相流として流体をモデル化した。支配方程式は、連続式と2次元非定常のNavier-Stokes方程式である。空間離散化には有限体積法を用い、流速と圧力の連成解法にはPISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) 法を採用した。解析には汎用の流体解析コードとしてANSYS社のFLUENTを用いた。

3.2 解析条件

2次元数値解析により水路模型実験の再現計算を行い、橋梁モデルに作用する津波波力を算定した。解析領域の概要を図-4に示す。造波板前面の解析領域長さは12.0mとし、実験と同様に造波板前面から7.55mの位置に橋梁モデルを配した。解析領域の境界条件は、解析領域端面および底面を壁面境界条件 (No-slip条件)、解析領域

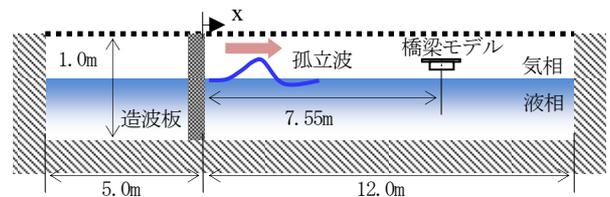


図-4 解析領域

上面を出口圧力境界条件とした。解析における津波の造波は、実験で用いた造波板の動きを移動計算格子で直接模擬した。また、津波が橋桁に衝突した際の打ち上げ高さや剥離など断面周りの流れを精度よく求めるため、橋梁モデル近傍は1mmの等間隔直交格子を用いた。計算負荷の軽減のため、橋梁モデルから離れるに従い格子サイズを最大10mmまで大きくした。なお、解析は実験と同様のケースを実施した。

3.3 津波挙動の再現性

流速0.91m/sにおける断面周りの流況を図-5に示す。この解析結果の画像は、VOF値が0.5の等値線を境界として水面形を示している。ここで、VOF値とは計算格子における流体の充填率を表す数値である。VOF値が1の場合は計算格子内が流体で満たされ、逆に0の場合は計算格子内に流体が存在しないものとして計算されることから、VOF値が0.5となる位置を水面位置とした場合を描画した。

図-5より以下の特徴が捉えられている。

a) 波がはじめに下フランジ前流側端部に接触する。

b) 波が下フランジ下面および前流側床版張出し下面に浸入すると同時に、ウェブ側面、前流側高欄側面に

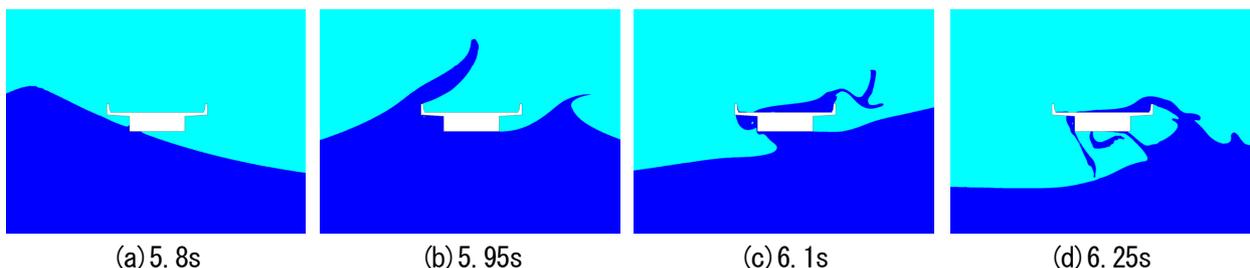


図-5 橋桁に作用する津波の流況 (津波高20cm, 流速0.91m/s)

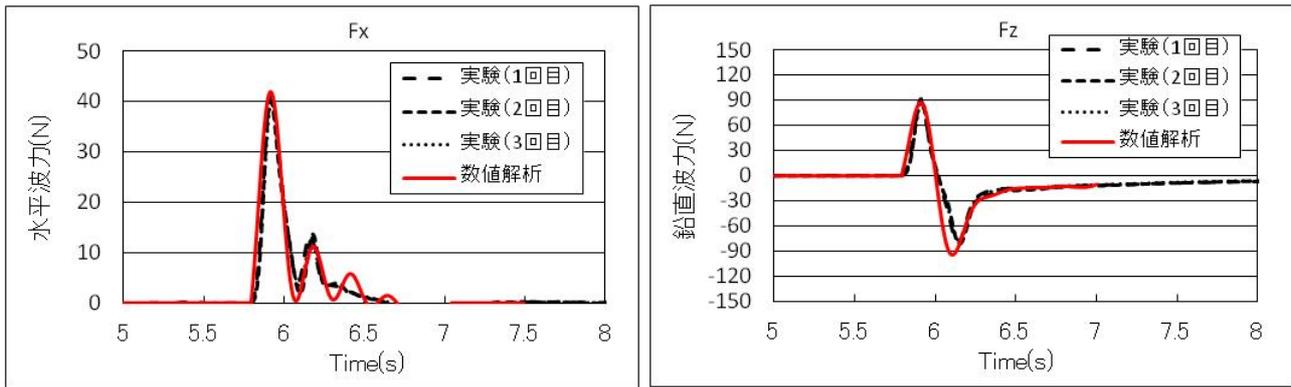


図-6 実験と解析の波力波形の比較 (津波高=20cm, 流速=0.91m/s)

衝突して打ち上げられ越波する。

c) 越波水塊が床版上面に落下する。

d) 落下した水塊が後流側の高欄を乗り越えるとき、橋桁下面では波が下フランジから離れる。

上記挙動は実験で観察された流況と概ね一致しており、実験結果を定性的に再現できていると言える。

次に、波力波形を実験と解析で比較したものを図-6に示す。図-5(b)に示した、ウェブ側面および前流側床版張出し下面に波が浸入した時刻に、最大の水平波力、鉛直波力が作用する特性を再現できていることがわかる。また、波力波形における複数ピークの存在や作用方向など波力の時間変化の傾向も良く再現できている。なお、解析では、水路壁面と模型の隙間を考慮していないため、橋面上に溜まった水が動揺し高欄に衝突することによるピークが3つ目以降に現れている。

ピーク時の波力を比較したものを表-3に示す。1つ目のピークについては、水平波力が+4%、鉛直波力が-2%の誤差で波力が評価できている。一方、2つ目のピークについては、誤差が水平波力で-14%、鉛直波力で19%と比較的大きい。2つ目のピークは、橋桁に作用して砕けた波が再び橋桁に作用した際に発生する波力に関係しており、砕けた波による作用力の評価精度の向上が今後の課題である。

表-3 実験と解析のピーク波力の比較 (津波高=20cm, 流速=0.91m/s)

区分		実験*	解析	解析誤差
水平波力 (N)	1つ目のピーク	40.5	42.1	+4%
	2つ目のピーク	13.1	11.3	-14%
鉛直波力 (N)	1つ目のピーク	89.5	87.8	-2%
	2つ目のピーク	-79.7	-94.7	+19%

*実験結果は3回計測の平均値を示す。

4. まとめ

2車線の標準的なPC箱桁断面を対象とした水路模型実験により、作用する津波波力の挙動や流速の変化に伴う津波波力の特性を確認することができた。また、汎用の流体解析コードとVOF法を用いた数値解析により、実験結果を定性的に再現でき津波波力の評価への適用性が確認できた。本検討は津波条件として孤立波を対象としたが、今後は異なる津波条件についても検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 四條利久磨, 佐藤敏浩, 池末俊一: 複数構造物に作用する津波波力に関する3次元数値シミュレーション, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. 761-765
- 2) 林秀和, 青木圭一, 横山薫, 四條利久磨, 越村俊一: 津波波力に関する基礎的検討—水路模型実験—, 土木学会第68回年次学術講演会, 2013. 9
- 3) 四條利久磨, 青木圭一, 林秀和, 鈴木俊光, 越村俊一: 津波波力に関する基礎的検討—数値解析—, 土木学会第68回年次学術講演会, 2013. 9