

津波の影響を受ける橋の挙動に及ぼす床版の張出し部の 影響に関する解析的検討

中尾 尚史¹・張 広鋒²・星隈 順一³

¹正会員 博（工） （独）土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 専門研究員
（〒305-8516 つくば市南原1-6）

²正会員 博（工） （独）土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 研究員
（〒305-8516 つくば市南原1-6）

³正会員 博（工） （独）土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員
（〒305-8516 つくば市南原1-6）

1. はじめに

平成23年（2011）東北地方太平洋沖地震で発生した津波は東北地方の沿岸部に甚大被害を与えた。橋梁構造物も多く被害を受けた¹⁾。橋梁が流出したことで被災地への復旧が遅れるなどの2次被害も発生している。橋梁構造物の津波対策は急務であるが、橋梁構造物の津波対策に関する規定はまだ定められていないのが現状である。

津波による橋梁に作用する流体力や圧力などについては、これまでに多くの実験的な検討が行われている^{2)~5)}。しかし地理的条件や水位条件、また津波特性の条件など複雑な諸条件に合わせて実験を行うのは困難を要する。

一方、解析手法についても粒子法や個別要素法などの手法があり、これらの解析手法を用いた研究も行われている^{6)~8)}。このような数値解析は地理的条件などを細かく変更して検討を行うことができ、さらに細部の圧力など実験では計測が困難な箇所も解析により算出することが可能であるが、その適用にあたっては、このような解析手法による計算結果が実験結果を適切に評価することが検討されていることが大前提となる。

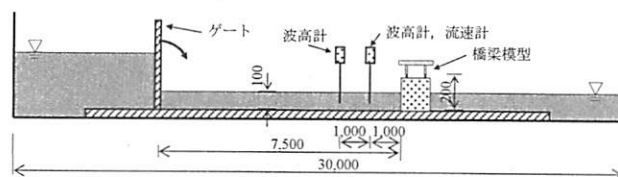
本研究は津波作用時の橋梁周辺の流況のシミュレーションや、津波作用時の橋梁に作用する流体力の解析手法を確立させることを目的として、著者らが別途行った1/20縮小の橋桁模型（2主桁断面模型）に対する大型水路実験をモデル化して解析を行い、得られた結果と実験結果とを比較検討することで、

解析方法を評価した。なお、本研究で対象とした解析手法は差分法を用いた解析とした。

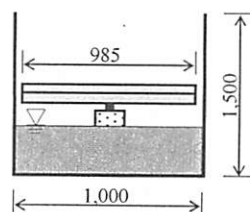
2. 実験概要

(1) 実験装置

実験装置は図-1および写真-1に示すような長さ30m、幅1m（縮尺1/20）の水路を用いて実験を行った。本研究では、段波状の津波が橋桁に作用したことで、橋桁が反転して流出した場合を想定して、実験装置は貯水槽に一定量の水をため、水槽と水路の間に設けたゲートを倒すことで、段波状の津波を発生させる仕組みになっている。



(a) 全体図



(b) 断面図

図-1 実験装置



写真-1 実験装置

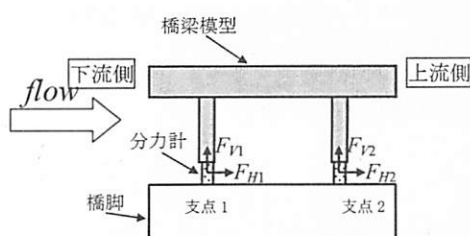
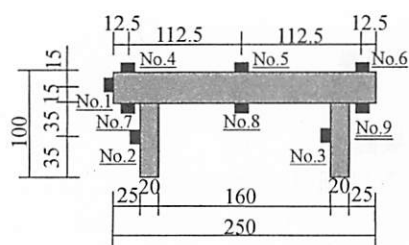
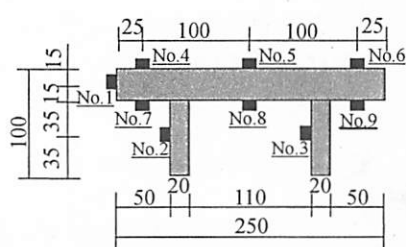


図-2 支点反力の計測位置



(a) ケース1

■: 波圧計



(b) ケース2

図-3 橋梁模型

橋桁模型はゲートから7.5m離れた位置に設置した。また橋桁模型から1mおよび2m離れた位置に波高計、橋桁模型から1m離れた位置に流速計を設置して、波高および流速を計測した。

橋桁模型は橋脚と連結材で連結し、連結材に分力計を設置することで支点反力（水平 F_H および鉛直 F_V ）を計測した（図-2）。本論文では津波が作用す

る側の支点反力を下流側の支点反力（支点1、 F_{H1} および F_{V1} ）、反対側の支点反力を上流側の支点反力（支点2、 F_{H2} および F_{V2} ）とする。実験により得られたデータは模型の固有振動数以上の成分をカットするため、10Hz以上の成分をカットするローパスフィルタをかけた。

同時にハイスピードカメラ(CASIO:EX-F1)を用いて、橋桁周辺の流況を撮影した。

(2) 橋梁模型

本研究で用いた橋桁模型は図-3に示すように、床版張り出し部の影響による津波作用力の違いを検討するため、床版張り出し長の異なる2主桁断面を用いた。

また解析結果を評価するために、図の位置に波圧計を設置し、橋桁模型に作用する波圧を計測し、解析で得られた波圧と比較、検討した。得られた波圧も支点反力と同様に10Hzの成分をカットするローパスフィルタをかけた。図中のNoは波圧計の番号である。

(3) 実験結果

図-4は津波により支点部に作用する水平反力の計測結果である。横軸は時間、縦軸は水平反力である。津波作用直後（4秒）に両ケース共に衝撃的な水平反力が作用する。また津波が作用した直後は両支点ほぼ同じ水平反力であるが、その後は下流側の支点（支点1）の水平反力が若干大きくなる。最大値はケース1の方が大きくなる。

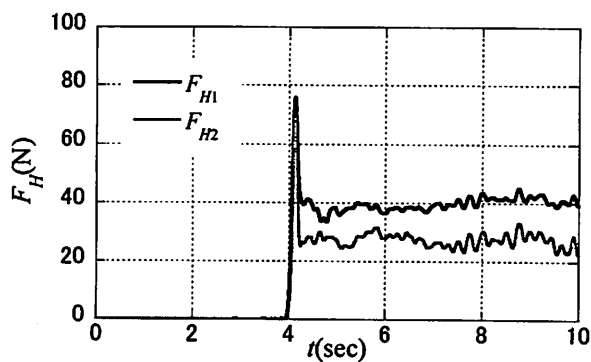
図-5は津波により支点部に作用する鉛直反力の計測結果である。横軸は時間、縦軸は鉛直反力であり、プラス側が引張り、マイナス側が圧縮である。

水平反力と同様に、津波が作用した直後に急激に鉛直反力が作用する。そのピーク値の絶対値は床版張り出し長が大きいケース2の方がケース1よりも大きくなる。また津波が作用する下流側（支点1）では負の反力、上流側（支点2）では正の反力が作用する。このことから、津波が作用すると下流側が浮き上がり、上流側が沈み込むような回転力が発生していると考えられる。

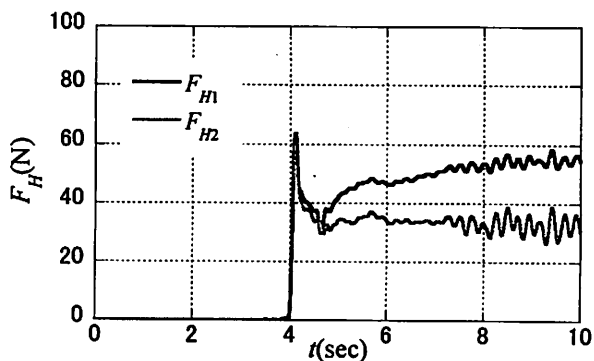
3. 解析概要

(1) 解析モデル

本研究の解析は、解析ソフト(CADMAS-SURF/3D)を用いて解析を行った⁹⁾。本解析ソフトは

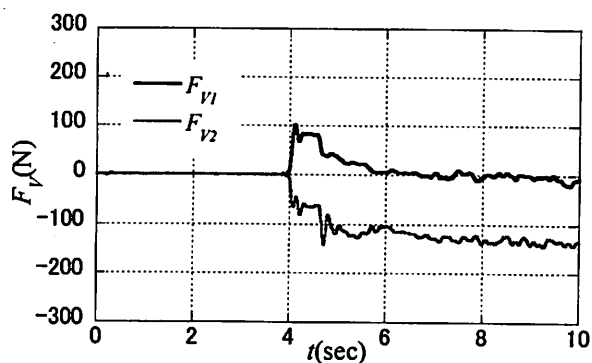


(a) ケース1

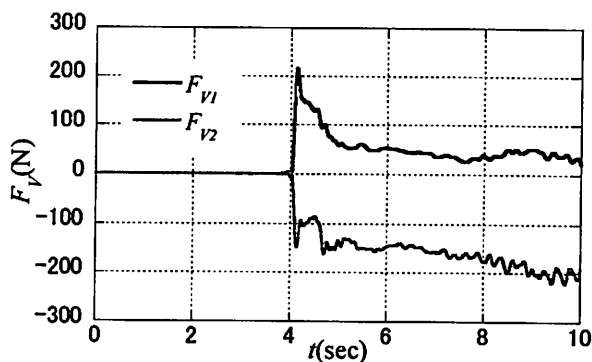


(b) ケース2

図-4 水平反力の計測波形



(a) ケース1



(b) ケース2

図-5 鉛直反力の計測波形

自由表面の運動をPC上で精度よく追跡できるVOF法に着目し、差分法により解いていく数値計算ソフトである。この解析方法は、粒子法などに比べ解析速度が速いという利点がある。

解析モデルを図-6に示す。奥行きを単位長さとする2次元モデルで解析を実施した。解析領域は、模型前面は造波した段波状の津波が安定し、造波境界からの反射の影響がない距離を確保するため、また模型背面は流れの影響が生じないように長めに距離を確保するために、模型の前後5000mmの距離をとり、長さ10250mm、高さ800mmに設定した。解析領域を

幾つかの長さで分割し、高さ80セル、長さ877セル、合計70160セルの解析モデルを作成した。

初期水深および河床から模型下面までの高さは実験と合すために、初期水深を100mm、河床から模型下面までの高さを350mmに設定した。

橋桁モデルは図-7に示すように、床版の張出し長の異なる2種類の2主桁断面模型を剛体要素としてモデル化した。実験による波圧の計測位置を合わすように橋梁モデルを分割した。

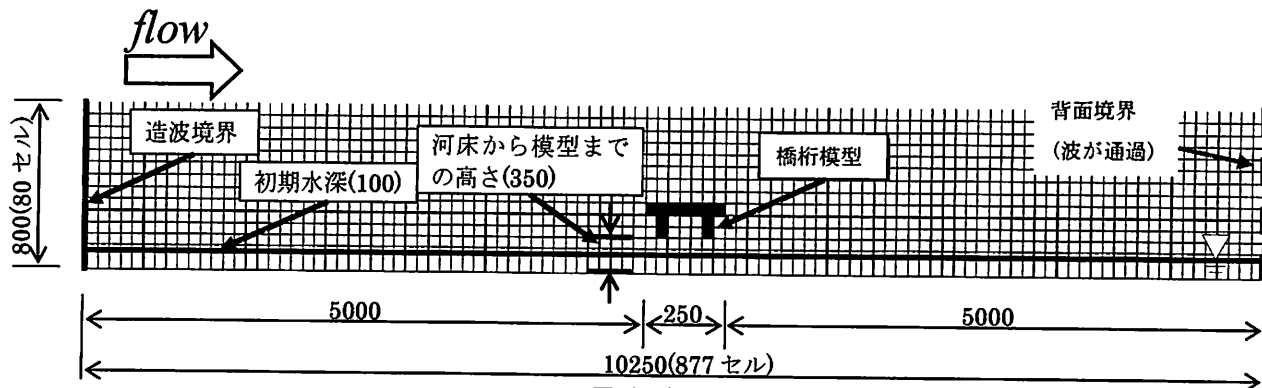


図-6 解析モデル

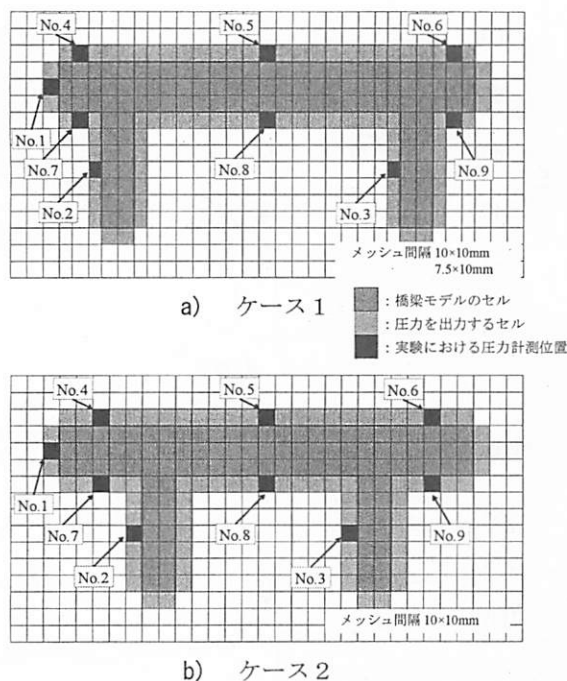


図-7 橋桁モデルの解析モデル

(2) 造波方法

造波位置は模型前から5000mmの位置から造波した。造波波形は図-8に示すような段波型の波形とし、波高および流速が一定になるような造波を行った。また段波の速度は次式より算出した¹⁰⁾。

$$C = \sqrt{\frac{g(h+\zeta)(2h+\zeta)}{2(h+\zeta-\eta\zeta)}} \quad (1)$$

式中の h は初期水位(m)、 ζ は波高(m)、 η は抵抗係数であり、ここでは1.03に設定した¹⁰⁾、 g は重力加速度(9.8m/s^2)である。

解析では造波の波高および立ち上がり時間について設定して解析を行い、実験値と比較して最適な造

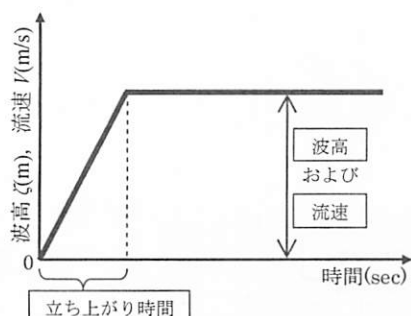


図-8 波高および流速の作用方法

表-1 造波パラメータ

	波高(m)	流速(m/s)	初期水位(m)	立ち上がり時間(sec)
ケース1	0.170	1.43	0.1	2.0
ケース2	0.165	1.35	0.1	1.5

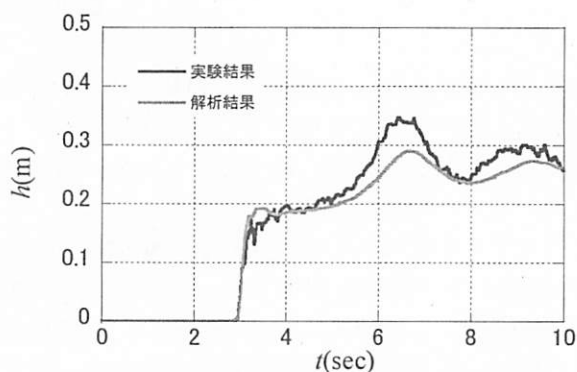
波の波高および立ち上がり時間を設定した。各諸元は表-1に示した通りである。

4. 解析結果

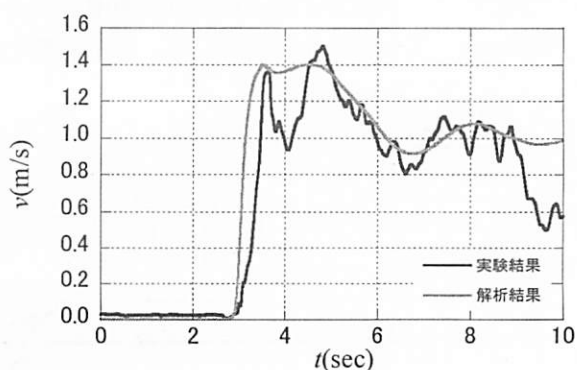
(1) 波高および流速

図-9は解析により得られた橋梁模型から1m下流側における波高および流速の結果である。一例として、ケース1の結果を示す。実験で得られた橋梁模型から1m下流側で計測した波高および流速の結果も図中に示した。横軸は時間、縦軸は波高および流速である。なお解析で得られた波形は10Hzの移動平均を行い波形を処理した。グラフは波高および流速の立ち上がり時間を揃えて示した。

波高の立ち上がり時間、7秒付近における最大の波高に若干の違いが見られるが、模型に衝突するときの波高(0.2m)はほぼ一致する。同様に流速の立ち上がり時間も実験結果に比べて若干速いが、最大の流速(1.4m/s)および波形はほぼ同じである。よって、波高および流速は実験結果をほぼ正確に再現できていると考えられる。

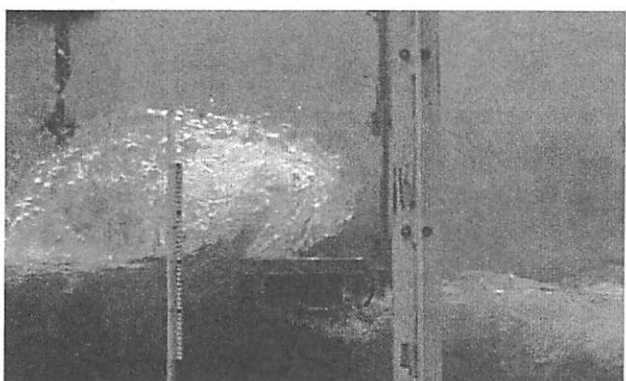
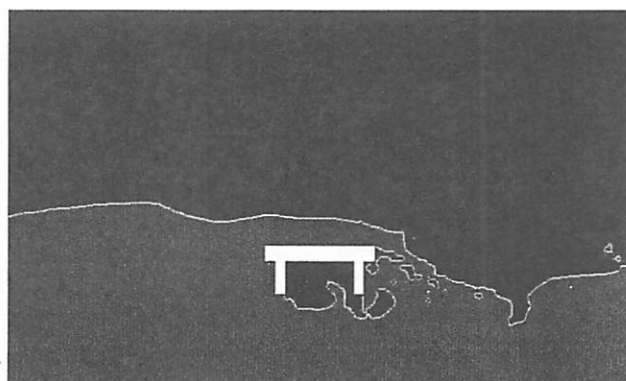
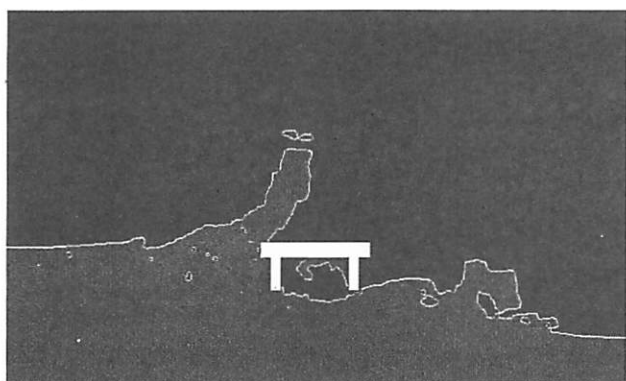


(a) 波高



(b) 流速

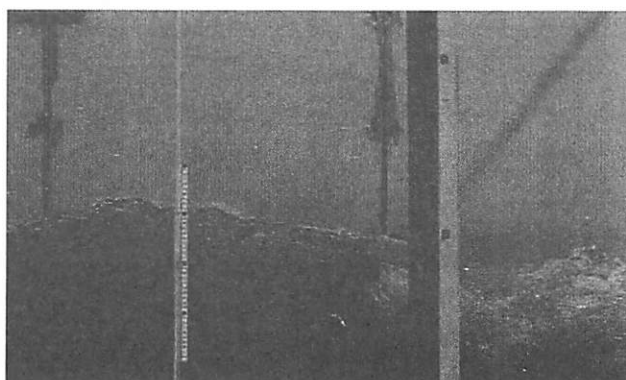
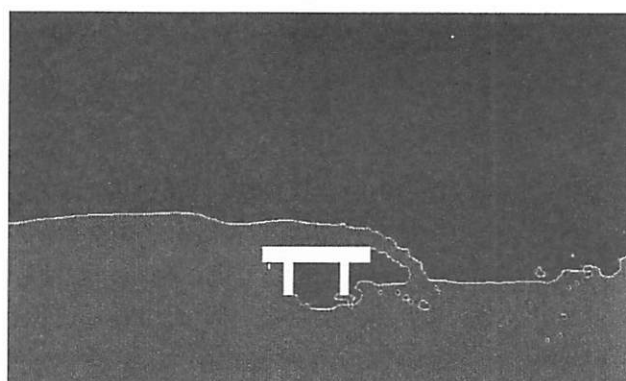
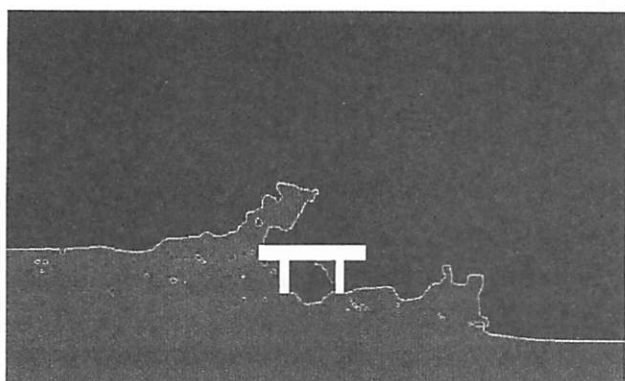
図-9 解析結果



(a) 津波作用直後（上：解析，下：実験）

(b) 津波通過時（上：解析，下：実験）

図-10 橋桁周辺の流況（ケース 1）



(a) 津波作用直後（上：解析，下：実験）

(b) 津波通過時（上：解析，下：実験）

図-11 橋桁周辺の流況（ケース 2）

(2) 橋桁周辺の流況

図-10および図-11は津波作用直後および津波通過時の橋桁周辺の流況である。津波作用直後（図-10

(a) および図-11(a))，橋桁模型に作用した津波の上昇，またフランジからの剥離とそれに伴い桁間に流入する水を両ケースとも再現できている。

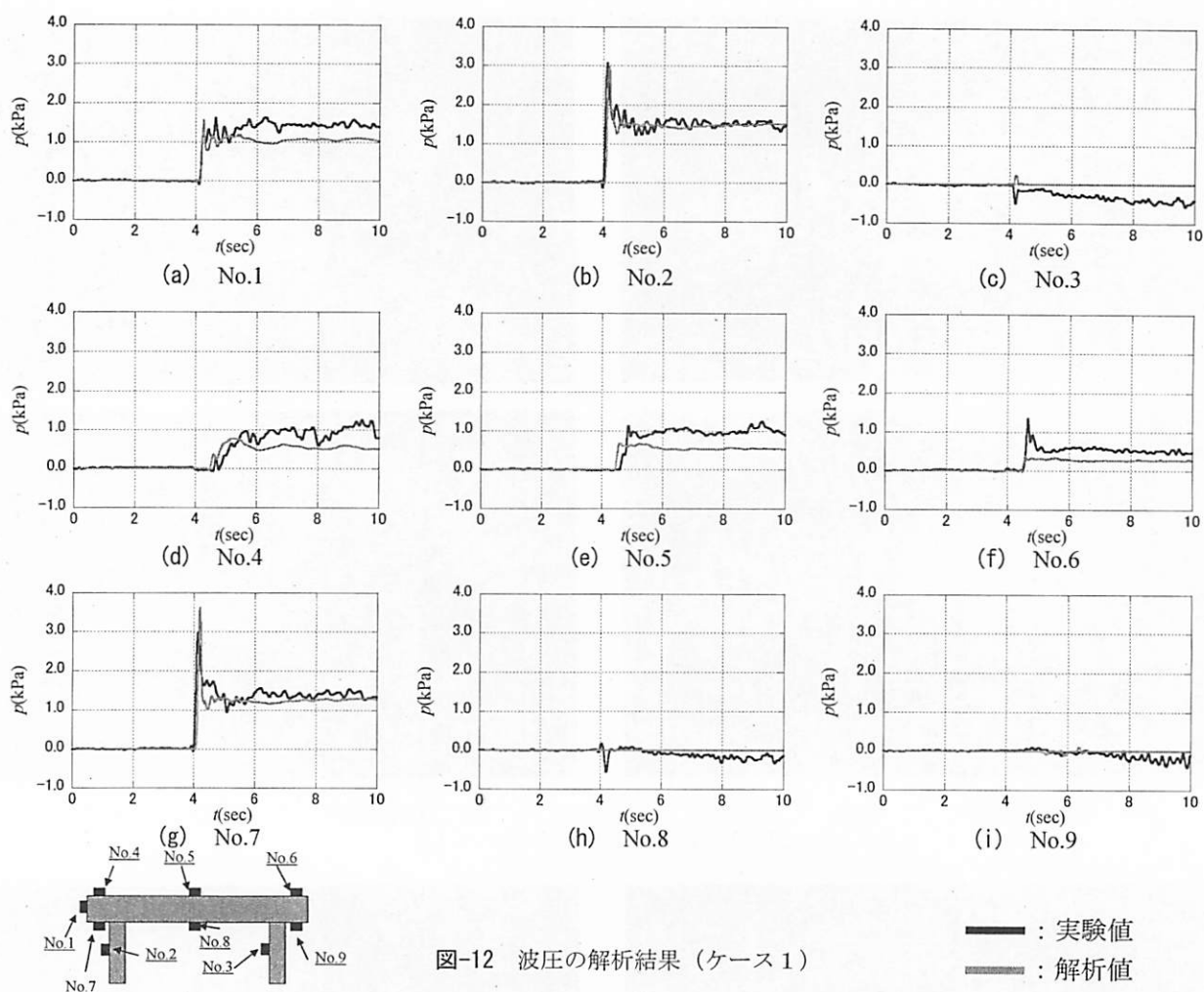


図-12 波圧の解析結果（ケース1）

津波通過時（図-10(b)および図-11(b)）もフランジからの剥離の様子や模型後部の水の流れ込む様子を再現することができている。なお、解析における流れの中に表れている空洞（黒い部分）は空気の泡である。

(3) 波圧

図-12および図-13は実験及び解析による波圧の結果である。横軸は時間、縦軸は波圧である。先ほどと同様に波圧が作用した時間を揃えて示した。

ケース1の場合、図-12の(a)から(c)に示す床版前面および下流側の主桁の波圧（No.1, No.2）は、津波衝突時のピークが再現できており、最大値もほぼ同じである。またその後の波形も一部異なる個所があるが概ね実験値を捉えていると考えられる。上流側の主桁の波圧（No.3）は実験では負圧になっている。図-10(b)よりフランジから剥離した流れにより桁間が負圧になったと考えられるが、解析ではこの負圧をうまく再現できていない。

解析および実験結果から、水平反力は床版前面および下流側の主桁に作用する波圧の影響が大きいと

考えられ、特に主桁に作用する波圧が作用することで衝撃的な水平反力が発生すると考えられる。

図-12(d)に示す模型上面前部の波圧（No.4）は、津波作用直後の波圧の最大値を捉えている。中央部および後部の波圧は、解析値と実験値の津波作用直後のピーク値に差が生じる（図-12(e)(f)）。模型に作用した津波が模型に落下したときに模型上面に衝撃的な力が作用すると考えられるが、解析ではこの影響を再現できていないと考えられる。

図-12(g)から(i)に示す模型下面の波圧は、津波作用直後に下流側の床版張出し部（No.7）に衝撃的な波圧が作用する。残りの波圧計（No. 8, No.9）ではほとんど波圧が作用していないことから、鉛直方向の津波作用力は、この下流側の床版張出し部に作用する波圧の影響が大きいことが考えられる。作用する波圧の波形は実験値とほぼ同じである。桁間や後部の床版張出し部に作用する負圧は解析では表現されていない。解析では津波作用時の衝撃的な波圧や、桁間などに発生する負圧の計算方法が課題である。

上下面に作用する波圧の結果から、下流側の支点

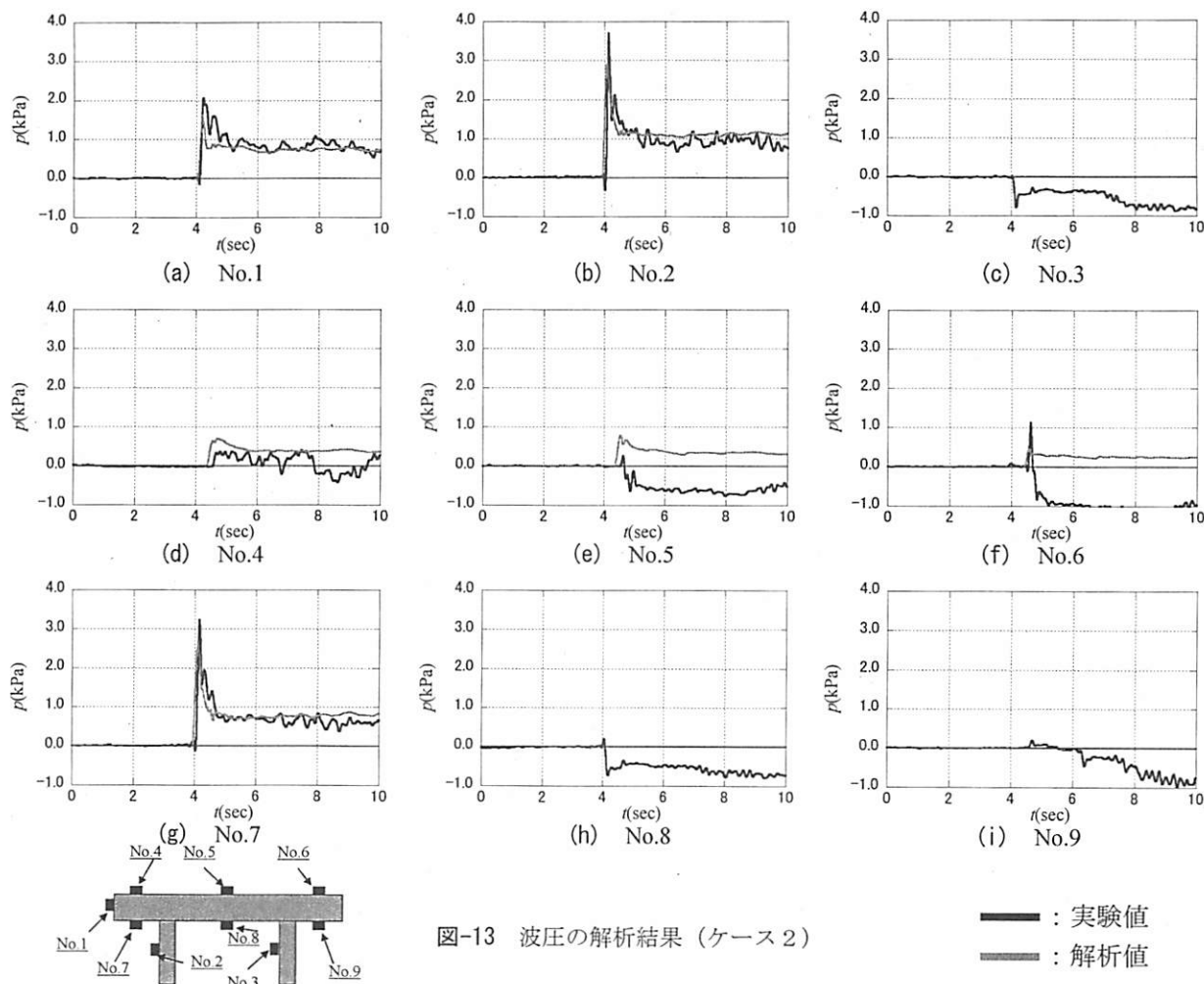


図-13 波圧の解析結果 (ケース 2)

(F_H) に作用する負反力は床版張り出し部に作用する波圧が大きな影響を与えている。またその後は上面に作用する波圧により支点反力が全体的に小さくなると考えられる。

ケース 2 の場合、床版側面および下流側の主桁に作用する No.1 および No.2 の波圧 (図-13(a), (b)) は、解析値の方が津波作用直後のピークの波圧が実験値よりも若干小さい結果になるが、その後の波圧や波形は実験値とほぼ同じである。No.3 の波圧はケース 1 と同様に、フランジから剥離する流れのために桁間に負圧が生じるが (図-11(b))、解析では再現できていない。これは桁間の床版下面の波圧 (No.8) も同様である。

上面の波圧は下流側の波圧 (No.4) は実験値と似た傾向を示している。中央部および後部の波圧 (No.5, No.6) は、津波作用直後の正圧を再現できているが、その後の波形は実験値と大きく異なる。

模型下面に作用する波圧は、図-13(g) に示すように、実験および解析共に津波作用直後に床版張り出し部に衝撃的な波圧が作用する。また波圧の最大値が

解析値の方が実験値よりも小さくなるが、実験値と同じ波形になる。ケース 1 と同様に、鉛直反力および回転力はこの床版張り出し部に作用する波圧の影響が大きい。

ケース 2 もケース 1 と同様に、水平反力および下流側の支点に作用する負反力は床版前面および下流側の主桁に作用する波圧と床版張り出し部に作用する波圧の影響が大きい。そのため、これらの箇所に作用する波圧を小さくすることができれば、水平反力や下流側支点に作用する負反力を小さくすることができると考えられる。

5. まとめ

本研究は津波作用時の橋桁周辺の流況のシミュレーションや、津波作用時の橋桁に作用する流体力の解析手法を確立させることを目的として、著者らが別途実施した 1/20 縮小の橋桁模型に対する大型水路実験を対象として、流体解析ソフト CADMAS-

SURF/3Dを用いて津波によって橋桁模型に生じる挙動の解析を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- ① 解析による橋桁周辺の流況は、津波作用直後および津波通過時共に、実験で撮影された橋桁周辺の流況を再現できる。
- ② 津波作用直後に支承部に作用する水平反力は床版前面および下流側の主桁に作用する波圧による影響が大きい。
- ③ 下流側支点部に作用する鉛直の負反力は、床版張り出し部に作用する波圧の影響が大きい。その後、床版上面に作用する波圧により、鉛直反力は小さくなる。
- ④ 解析で得られた床版前面の波圧は、実験で得られた結果とほぼ同じ結果となった。同様に下流側主桁に作用する波圧の解析結果も、実験結果とほぼ同じ結果となった。
- ⑤ 上流側の主桁や桁間の下面に作用する波圧は、桁間の負圧が再現できていないために、解析結果は実験結果と異なる結果になった。

参考文献

- 1) 平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報，国総研資料第646号，土研資料第4202号，平成23年7月。
- 2) 平木雄，庄司学：橋桁へ作用する砕波段波の津波流体力評価，第13回日本地震工学シンポジウム，pp.821-828，2010。
- 3) 庄司学，平木雄，江面嘉之，飯高稔，藤間功司，嶋原良典：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，第31回土木学会地震工学研究発表会講演論文集，No.5-057，2011。
- 4) 二井伸一，幸左賢二，庄司学，木村吉郎：津波形状の違いによる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.56A，pp.474-485，2010。
- 5) 張広鋒，薄井稔弘，星隈順一：津波による橋梁上部構造への作用力の軽減対策に関する実験的研究，土木学会論文集A1（構造・地震工学）[特]地震工学論文集，Vol.66，No.1，pp.425-433，2010。
- 6) 薄井稔弘，運上茂樹，杉本健：津波に対する道路橋の被害軽減に関する解析的検討，構造工学論文集，Vol.56A，pp.464-473，2010。
- 7) 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，地震工学論文集，Vol.30，pp.899-904，2010。
- 8) 佐々木 達生，幸左 賢二，付李，木下和香：東日本大震災による津波の影響を受けた沼田跨線橋の損傷判定，第31回土木学会地震工学研究発表会講演論文集，No.5-135，2011。
- 9) 沿岸技術ライブラリーNo.39：CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発，財団法人 沿岸技術研究センター，2010。
- 10) 福井芳郎ほか：津波の研究（Ⅱ）－一段波津波の堤防に及ぼす影響－，第9回海岸工学講演会論文集，pp.50-54，1962。