

東北地方太平洋沖地震によるPC桁橋の津波被害分析

佐々木達生¹・田崎賢治²・坂本佳子³・幸左賢二⁴

¹正会員 大日本コンサルタント(株) 東北支社(〒980-0021 仙台市青葉区中央1-6-35)

²正会員 博(工) 大日本コンサルタント(株) 大阪支社(〒550-0014 大阪市西区北堀江1-22-19)

³正会員 (株)地震工学研究開発センター(〒889-2155 宮崎市学園木花台西1-1)

⁴正会員 Ph.D. 九州工業大学教授 建設社会工学科(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

1. はじめに

2011年3月11日午後14時46分頃、東北地方三陸沖(牡鹿半島の東南東約130km付近)を震源とするマグニチュード $M=9.0$ の地震が発生した。震源の深さは約24km、震源付近の水深はおよそ1,600mである。この地震に伴う津波により、東北～関東地方の太平洋沿岸部を中心に甚大な被害を受けた。津波高は津波観測付近の痕跡等から、宮城県北部から岩手県南部にかけて約7～12mと推定されている¹⁾。地震後、宮古市から東松島市にかけて、沿岸部を中心に被害状況の調査を行い、今回の東北地方太平洋沖地震において津波被害を受けた橋梁のうち、代表的なPC桁橋を対象に、数値流体解析プログラムを用いて津波解析を実施した。解析では、橋に作用する水平力や上揚力の時刻歴波力を算出し、橋の推定耐荷力や現地の被害状況と比較することで、被害要因の推定を試みた。

本文では、津波により流失した橋梁のうち、天地が反転し、特徴的な被害を生じたPC桁橋を対象に、津波解析と被害分析を行った結果について報告する。

2. 対象橋梁の諸元と被害概要

被害分析の対象としたPC桁橋は、図-1の位置図に示すように、国道45号線上にあり、図-2に示すように、PC単純ポステンT桁2連とPC単純プレテンT桁5連、PC単純ポステンT桁5連からなる橋長 $L=303.597\text{m}$ の12径間のコンクリート道路橋(昭和47年竣工)である。なお、本橋の橋脚はすべてRC巻立てによる耐震補強済みであり、支承部の桁間にコンクリート製や鋼製の突起形式の落橋防止構造が設置済みである。今回の地震に伴う津波による本橋の被災状況の概要を図-2に示す。12連のPC桁のうち、P2～P7橋脚までのプレテンT桁5連と、P7～P10橋脚までのポステンT桁3連が津波により、陸側に流され、特に、流失したポステンT桁の3連は、

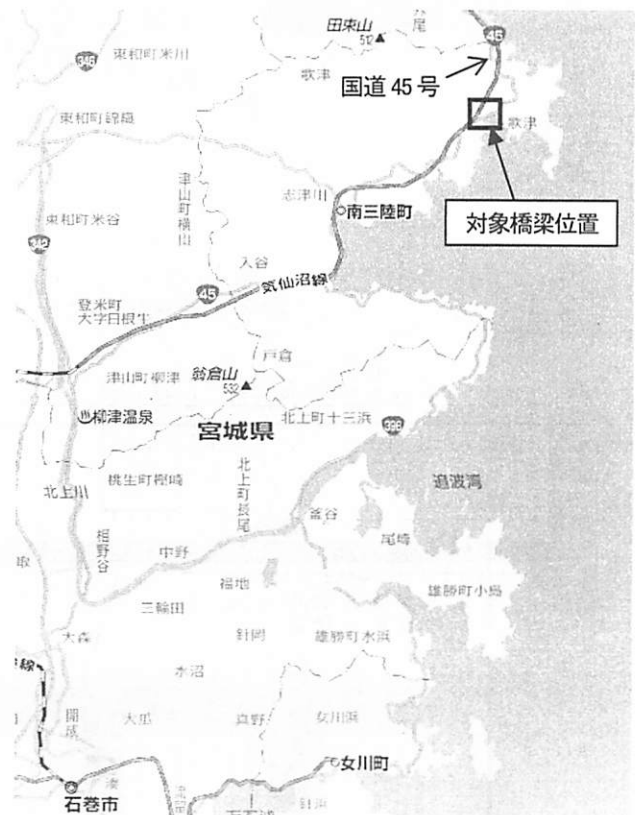


図-1 対象橋梁の位置図

桁の天地が反転し、逆さまになった状態であった。その他、橋脚のRC巻立て部や梁部、RC突起部の一部に断面欠損が生じる被害が見られたが、桁間にあるコンクリート製や鋼製の突起は比較的残ったままであった。

3. 津波解析

(1) 津波解析条件

a) 解析モデル

流失したPC桁のうち、P7～P8橋脚間のポステンT桁を対象に、VOF (Volume of Fluid) 法に基づく数値波動水路の解析プログラム CADMAS-SURF/3D²⁾ (非圧縮流体

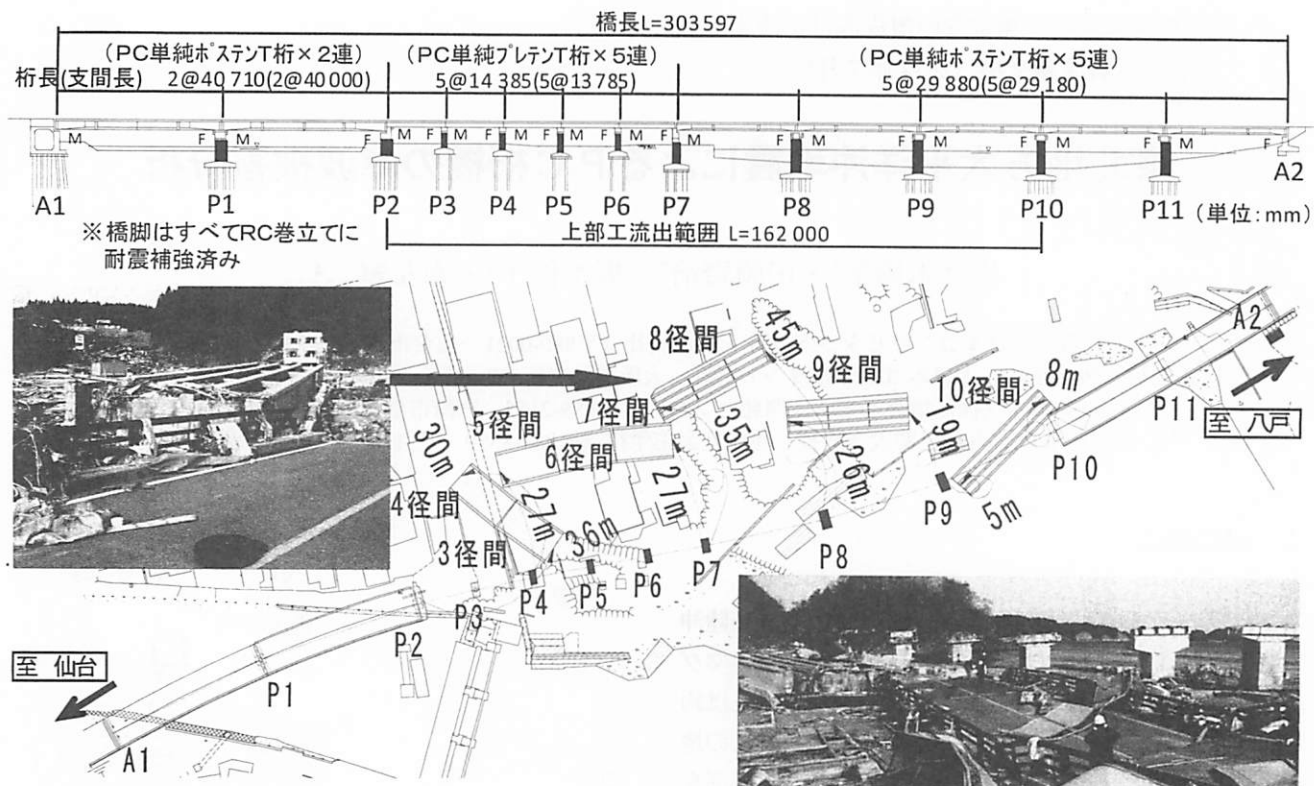


図-2 分析対象としたPC桁橋の構造諸元と被災状況の概要

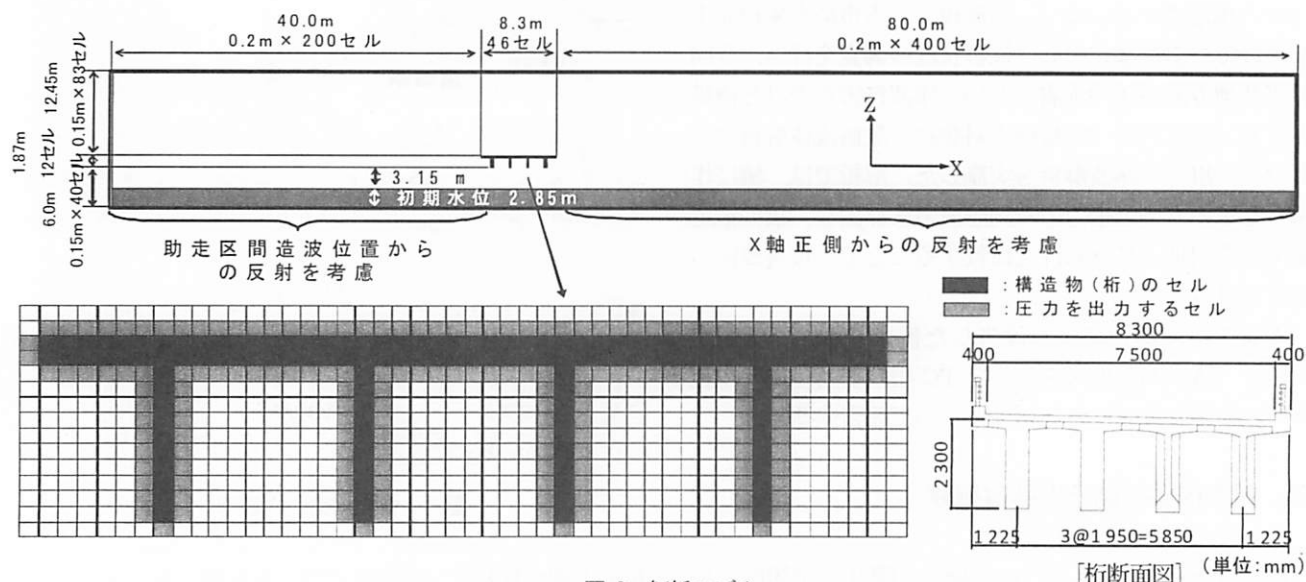


図-3 解析モデル

の Navier-Stokes 方程式と連続の式を基礎方程式とする解析手法)を用いている。解析モデルを図-3 に示す。本解析では、簡易的に奥行き方向(橋軸方向)を1格子とする2次元モデルで解析を実施した。構造物については、解析プログラムの特性上、桁のみを剛体要素としてモデル化し、支承部の支持条件も全方向固定条件としている。また、津波波形はX軸負側から造波する。

b) 解析ケース

後述する解析結果および支承の耐荷力照査結果から、桁が水平の場合は、津波作用方向側の張出し床版と外桁

に波力が作用し、内桁には津波が回り込まず、外桁と次の内桁の支承のみ、鉛直方向の支承耐力を超過する。このことから、実際は津波作用方向側の支承から損傷し、浮き上がる挙動が推定されることから、解析ケースとしては、桁が水平の場合(ケース1)の他に、津波下流側(右側)下端を回転中心として、5°回転させた場合(ケース2)と、10°回転させた場合(ケース3)の3ケースについて実施し、桁の回転挙動により、津波(水)の回り込み方や、桁や支承に作用する波力の違いについて考察を行うこととする。

c) 津波波形

図-4 に示すように、津波襲来時のビデオ映像と痕跡調査結果から、対象橋位置には、津波は海側からと北側の山側道路からも押し寄せたことがわかるが、桁の流失に影響が大きい津波方向は海側から橋軸直角方向に作用すると思われることから、解析では海側からの方向のみに着目している。

また、地震後の調査結果によると、図-5 に示すように、A2 橋台背面切り土部付近の漂流物の痕跡から、津波高さは橋面より 7m 程度であったと推定される。さらに、対象橋梁付近の津波の流速は、周辺のビデオ記録された映像分析から、水表面で 6m/s 程度であったと推定される。

したがって、解析上は、波高と流速を初期条件として与える必要があるが、図-6~7 に示すように、最大波高（初期水位からの高さ）を 12m、最大波高までの立ち上がり時間を 20 秒とする波高データを X 軸負側より造波する。また、流速を $\sqrt{gH}$ として与えている。実際には、解析は 15 秒までで終了したため、与える波形は図中の途中までである。

(2) 解析結果

a) 流速履歴結果

図-8 には、流速計測位置と橋梁前面位置の C 点における水表面の流速変化を示す。水表面位置（＝波高）は随時変化するため、図中の流速出力高さ位置は一定ではないものの、15 秒付近では、ビデオ判定と同程度の 6m/s 程度の流速を再現できていることがわかる。

b) 波力履歴結果

図-9~11 には、解析した 3 ケースについて、桁断面の A~X の箇所ごとに積分して算出した波力時刻歴応答結果（単位は奥行き方向への分布荷重）を示す。図中の X 方向は水平波力、Z 方向は鉛直波力を、また、時刻 12 秒時のスナップショットを併せて示している。

図より、回転なしのケース 1 では、津波は作用方向側の張出し床版と外桁のみに波力が作用し、内桁には津波

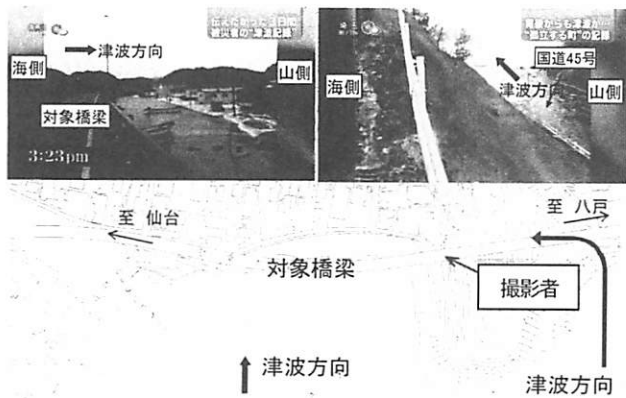


図-4 津波方向

が回り込まないが、回転角が 5° から 10° と大きくなるにつれて、内桁内に津波が回り込んでいることがわかる。その結果、 5° 回転時の波力は、回転なしの場合とほとんど変わらないが、 10° 回転時の波力は、外桁部の位置 X と Y で 20~30% 程度小さくなるものの、内桁部の位置 P や O では、100kN/m 程度の水平波力や上揚波力が作用する結果となっている。

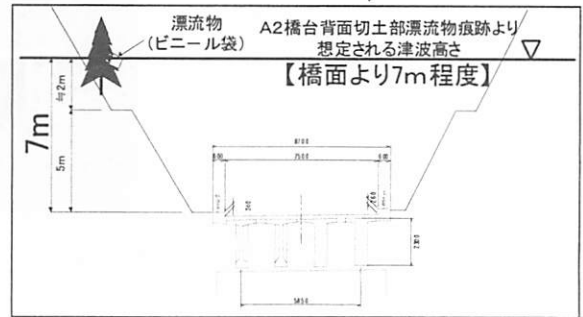


図-5 想定津波高さ

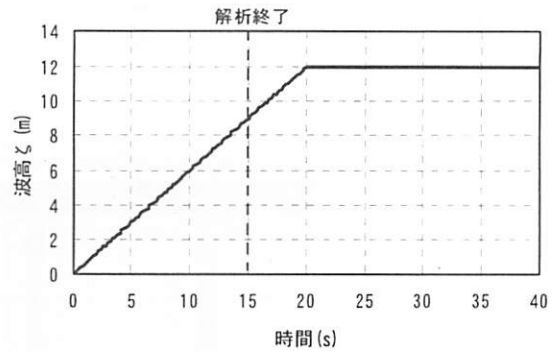


図-6 波高の作用方法

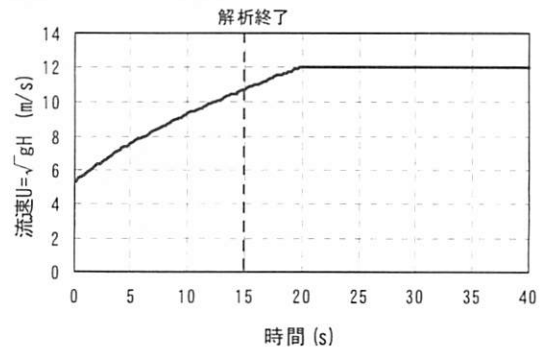


図-7 流速の作用方法

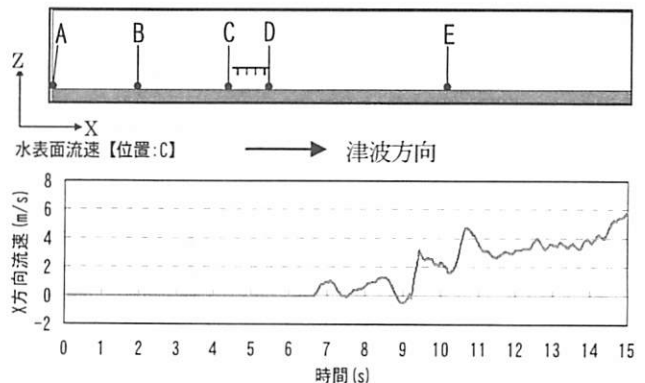
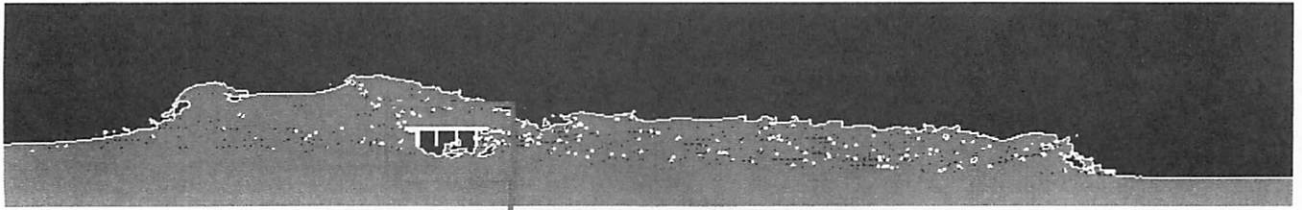


図-8 橋梁位置 (C 点) における流速履歴結果



[時刻 12 秒時のスナップショット]

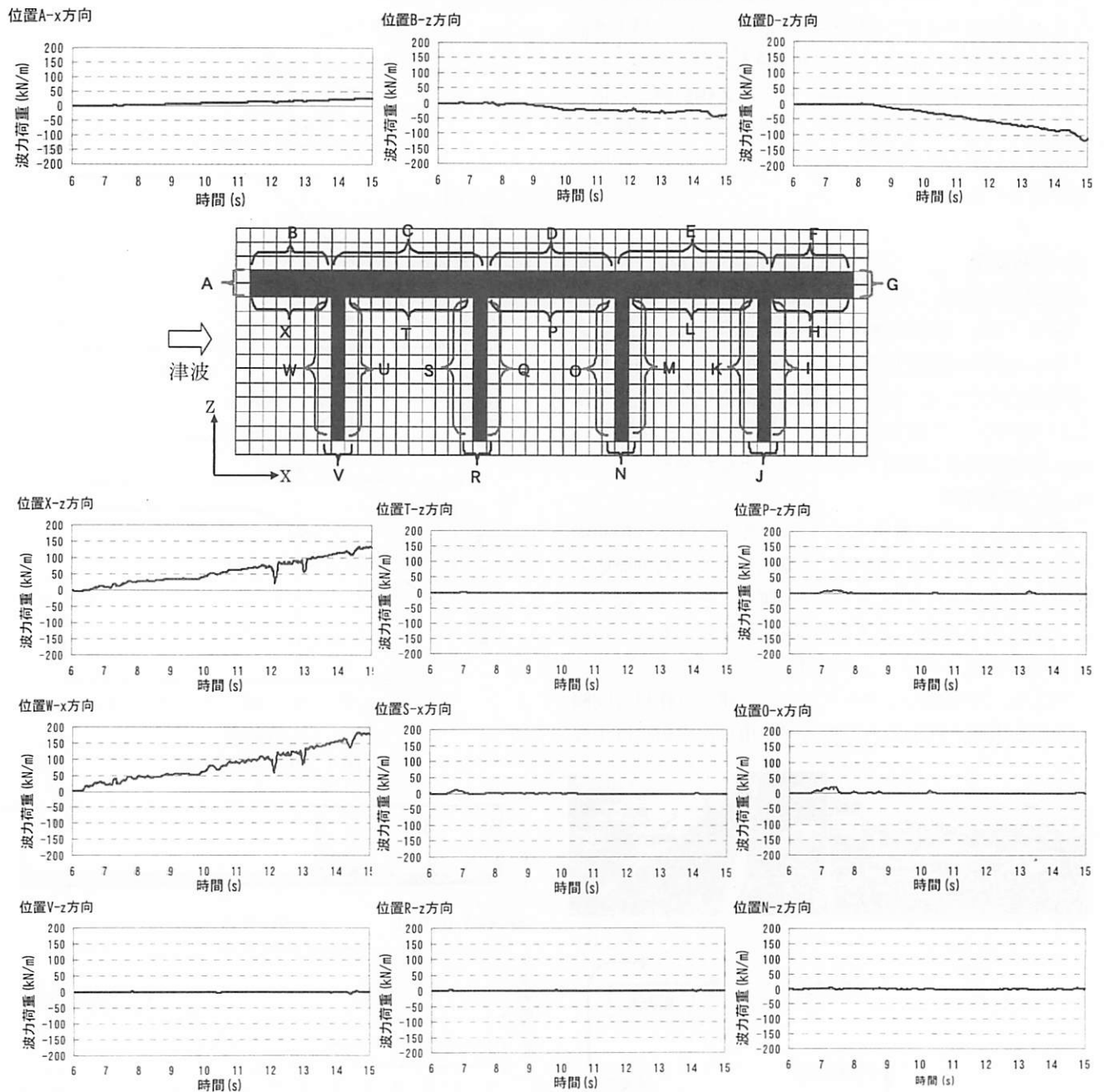
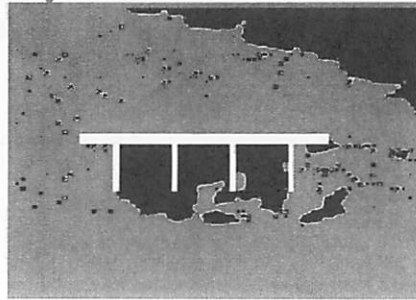
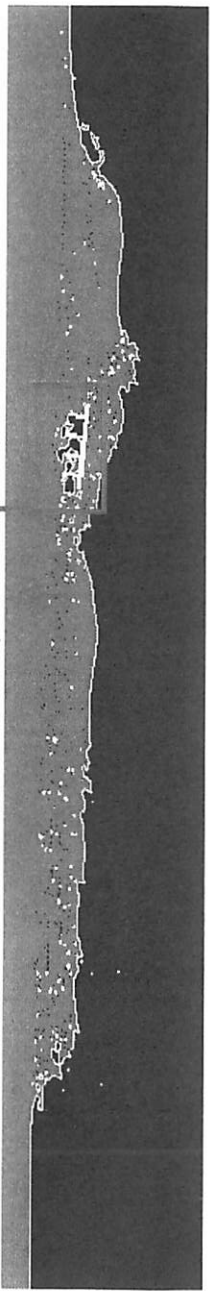


図-9 PC 桁の各位置に作用する波力時刻歴応答結果 (ケース 1 : 回転なし)



【時刻 12秒時のスナップショット】

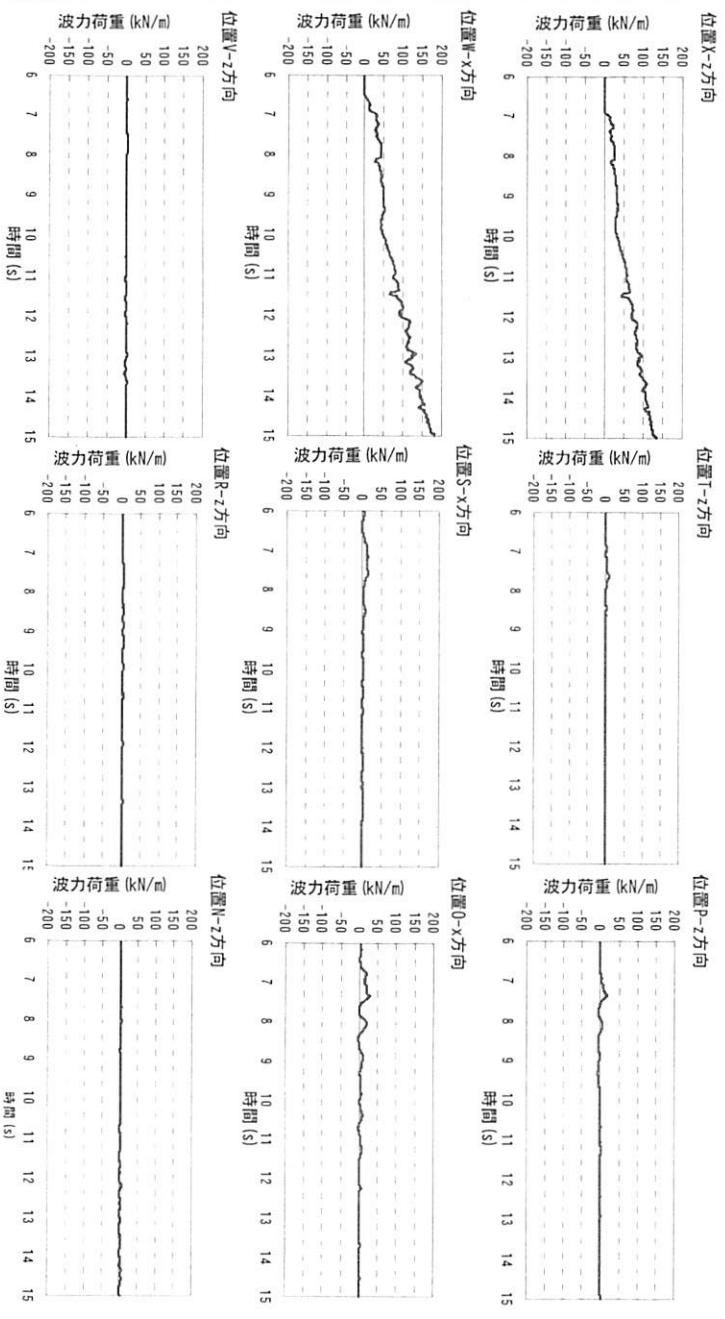
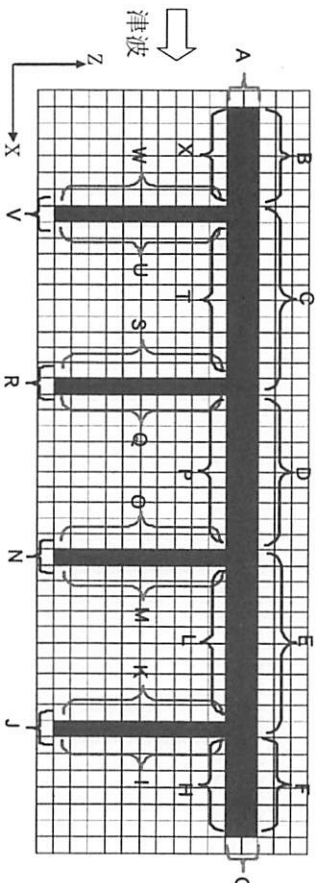
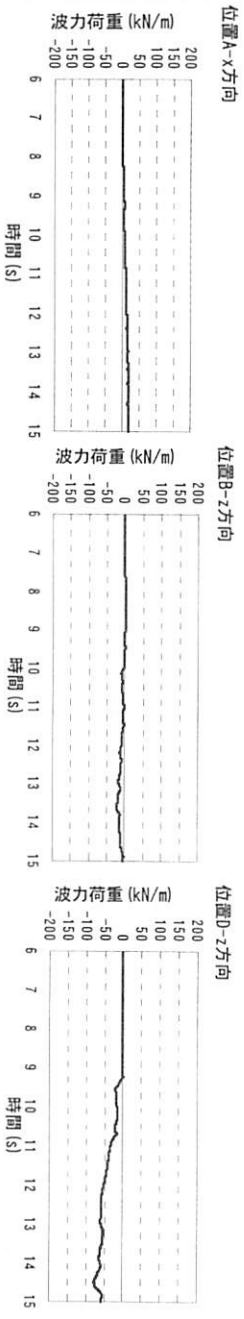
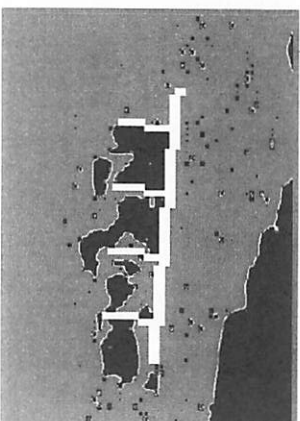
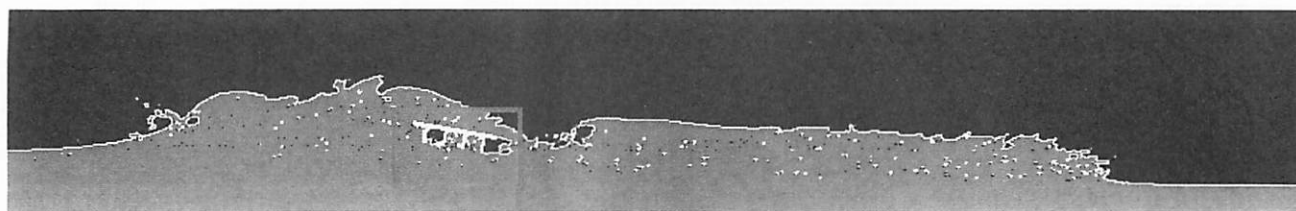


図-10 PC 桁の各位置に作用する波力時刻歴応答結果 (ケース2: 5° 回航)



[時刻 12 秒時のスナップショット]

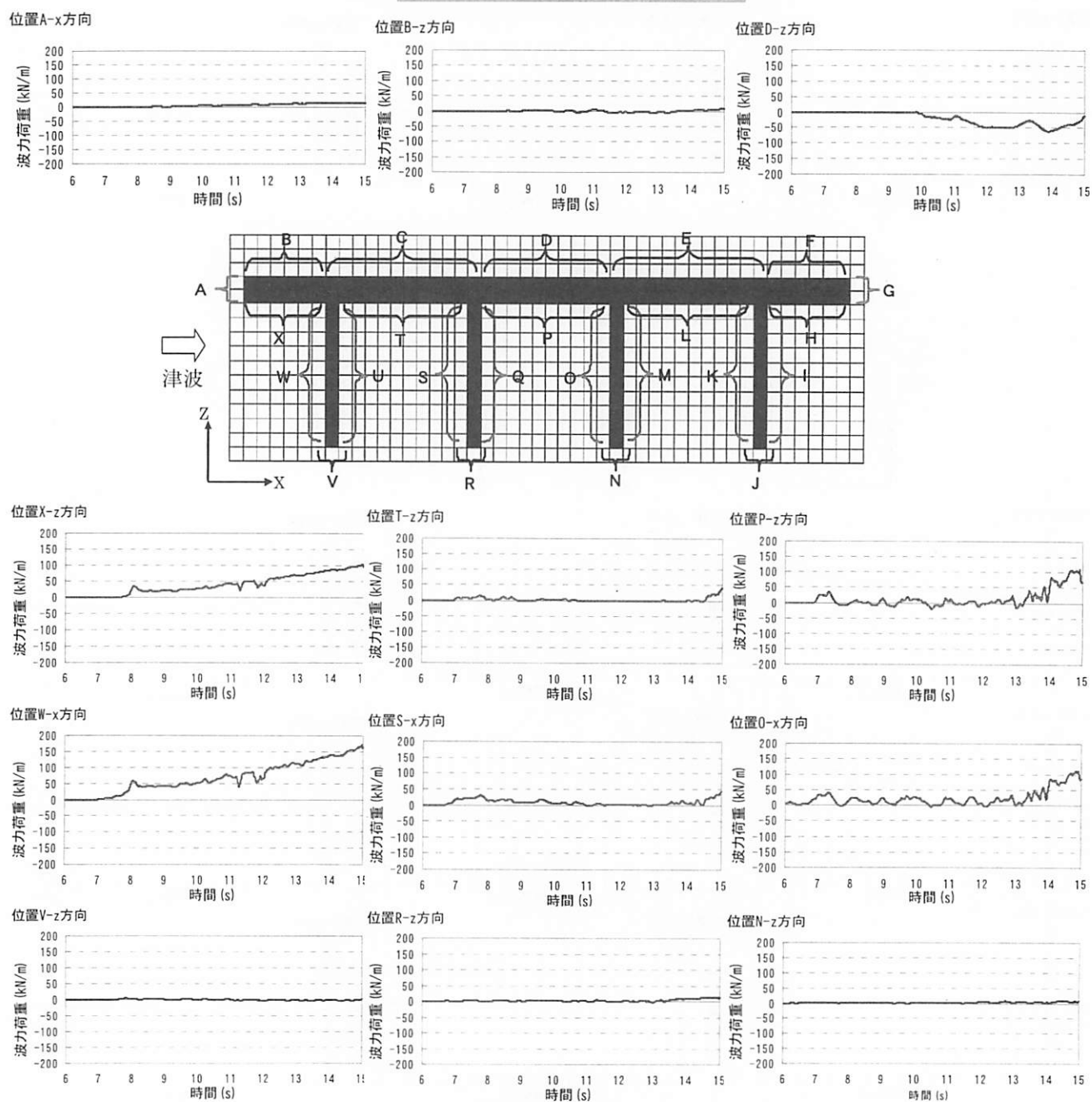
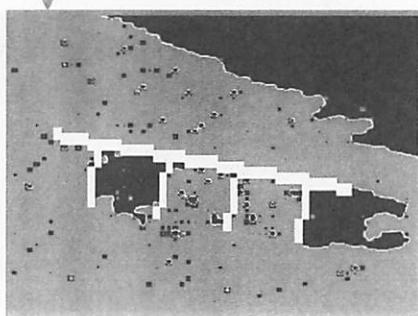


図-11 PC 桁の各位置に作用する波力時刻歴応答結果 (ケース 3 : 10° 回転)

4. 被害分析

津波解析によって得られた時刻歴波力データを用いて、別途モデル化した構造物の津波時刻歴応答解析を実施し、支承部の耐力照査の実施と PC 桁の挙動の推定を行った。

(1) 構造解析モデルと解析手法

解析モデルは図-12 に示すように、P7 から P8 橋脚間の桁を 3 次元骨組みモデルとしてモデル化する。中心軸の要素にファイバー要素でモデル化した桁断面を設定する。また、各位置の波力作用位置を反映させるため、桁の表面に節点を配置し、その節点に各々の波力を作用させる。桁断面のファイバー要素の材料はコンクリートの線形要素とし、支承は線形バネとしてモデル化している。また、上部工死荷重の 3600kN はファイバー軸要素に分布荷重として載荷し、その応力状態で波力動的解析を行う。解析ケースは前述の波力を算出した 3 ケースとしている。なお、構造解析ソフトは「EERC/Fiber(Ver.1.3)」を使用している。

(2) 解析結果と考察

最大支承反力と支承耐力の比較結果を表-1 に、また、支承部の時刻歴応答反力波形と支承耐力の関係をケース 1（回転なし）について図-13 に示す。

ここで、既設支承の耐力の算出については、対象橋梁

の支承形式は鋼製支承（BP-A）であり、上揚力と橋軸直角方向の水平力に対して抵抗するサイドブロックを支承耐力と見なしている。支承の材質はミーハナイト GC（鉄の FCD270 相当）で、耐力的にはかなり大きい。また、下査からの立ち上がりの付け根に R 加工がないため、応力集中が起こりやすいことなどから、現在の鉄鋼製の支承に比べて衝撃に弱い可能性が考えられるが、耐力の算出にはこの影響は考慮していない。算出した結果、橋軸直角方向のサイドブロックの水平耐力は 1 支承当たり 864kN で、上揚耐力は 1 支承当たり 245kN である。

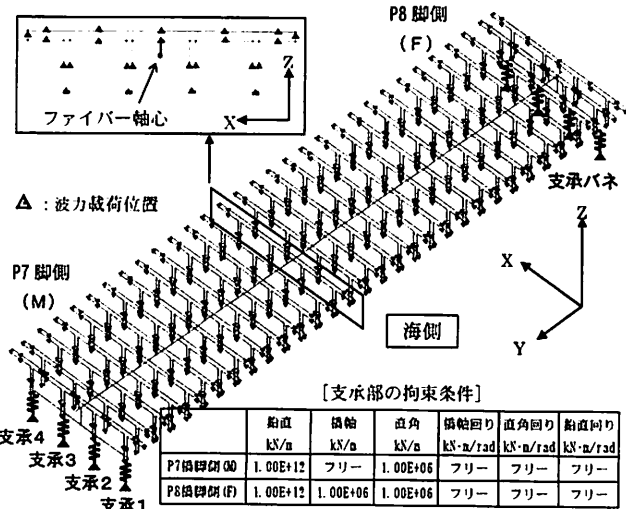


図-12 構造解析モデル波力作用位置

表-1 最大支承反力と支承耐力の比較結果

解析 ケース	支承番号		死荷重時 鉛直反力 Rd (-:圧縮)	支承耐力		波力動的解析						
						鉛直反力(-:圧縮)				水平反力		
						引張				直角方向		
						引張Pmax	Pmax/Rua	Pmax/Rd	超過時刻	直角Qzmax	Qzmax/Hza	超過時刻
ケース1 (回転なし)	P7 (M)	支承1	-450.0	245.0	864.0	1606.9	6.56	3.57	12.42	1597.3	1.85	12.88
		支承2	-450.0	245.0	864.0	272.6	1.11	0.61	14.28	1595.2	1.85	12.88
		支承3	-450.0	245.0	864.0	—	—	—	—	1593.1	1.84	12.88
		支承4	-450.0	245.0	864.0	—	—	—	—	1591.0	1.84	12.88
	P8 (F)	支承1	-450.0	245.0	864.0	1509.8	6.16	3.35	12.86	1220.4	1.41	14.14
		支承2	-450.0	245.0	864.0	269.2	1.10	0.60	14.27	1219.4	1.41	14.14
		支承3	-450.0	245.0	864.0	—	—	—	—	1218.3	1.41	14.14
		支承4	-450.0	245.0	864.0	—	—	—	—	1217.2	1.41	14.14
ケース2 (5° 回転)	P7 (M)	支承1	-450.0	245.0	864.0	2100.3	8.57	4.67	10.86	1380.1	1.60	13.19
		支承2	-450.0	245.0	864.0	538.7	2.20	1.20	14.14	1375.4	1.59	13.19
		支承3	-450.0	245.0	864.0	—	—	—	—	1370.6	1.59	13.19
		支承4	-450.0	245.0	864.0	—	—	—	—	1365.9	1.58	13.19
	P8 (F)	支承1	-450.0	245.0	864.0	1812.1	7.40	4.03	11.30	860.6	1.00	—
		支承2	-450.0	245.0	864.0	548.7	2.24	1.22	14.15	859.8	1.00	—
		支承3	-450.0	245.0	864.0	—	—	—	—	859.0	0.99	—
		支承4	-450.0	245.0	864.0	—	—	—	—	858.3	0.99	—
ケース3 (10° 回転)	P7 (M)	支承1	-450.0	245.0	864.0	2701.0	11.02	6.00	9.50	1009.1	1.17	14.26
		支承2	-450.0	245.0	864.0	1395.8	5.70	3.10	13.73	1009.1	1.17	14.26
		支承3	-450.0	245.0	864.0	122.7	0.50	0.27	—	1009.1	1.17	14.26
		支承4	-450.0	245.0	864.0	—	—	—	—	1009.0	1.17	14.26
	P8 (F)	支承1	-450.0	245.0	864.0	2577.9	10.52	5.73	9.50	926.7	1.07	14.28
		支承2	-450.0	245.0	864.0	1305.4	5.33	2.90	13.72	926.7	1.07	14.28
		支承3	-450.0	245.0	864.0	186.3	0.76	0.41	—	926.7	1.07	14.28
		支承4	-450.0	245.0	864.0	—	—	—	—	926.7	1.07	14.28

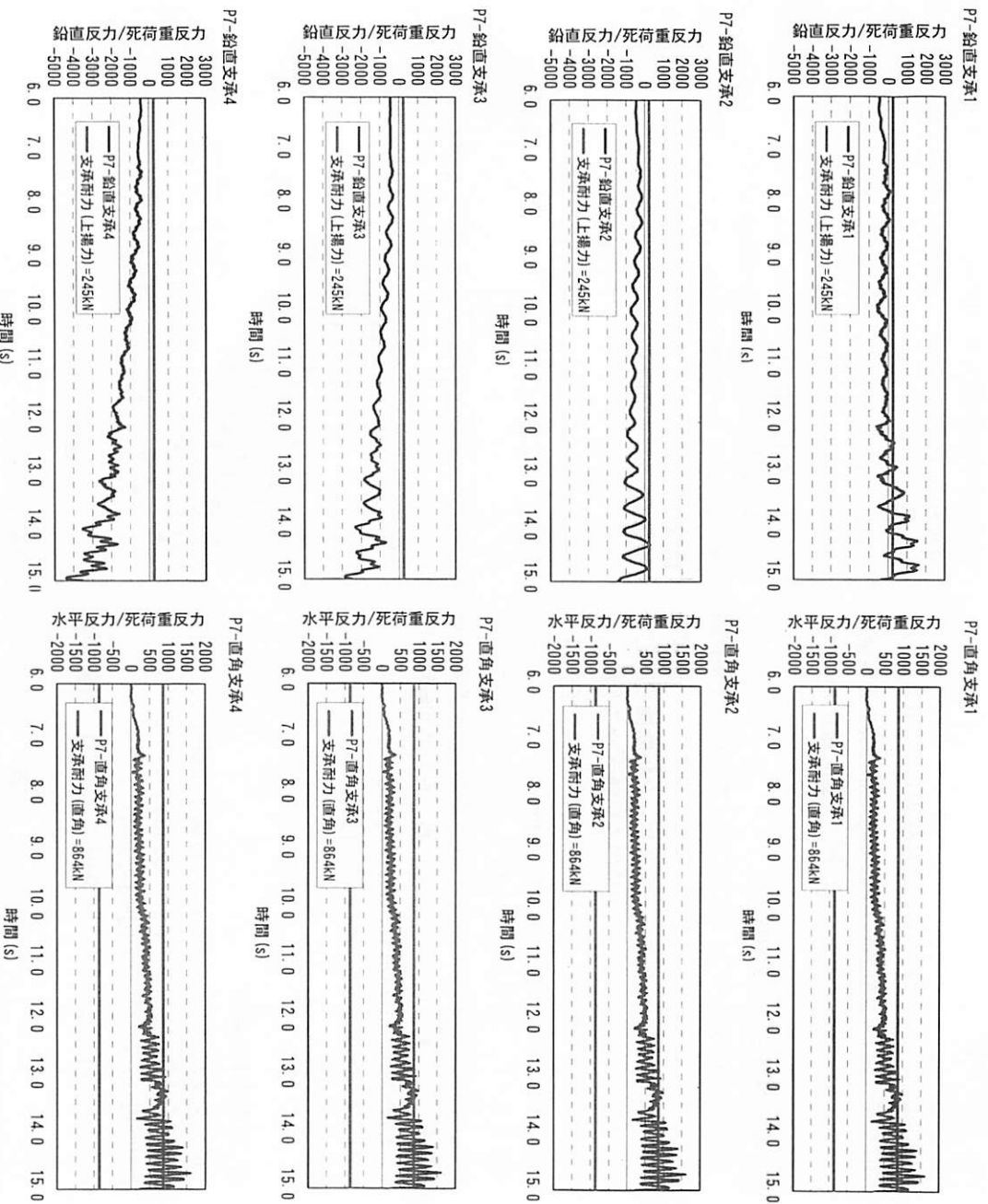


図-13 支承部の時刻歴応答反力と支承耐力の関係 (ケース 1 (回転なし))

5. まとめ

- (1) 津波により流失した PC 桁橋を対象に、数値流体解析及び構造解析の結果、既設の支承耐力を大幅に超過する波力が作用した可能性があることがわかった。
 - (2) 本解析手法により、波力は T 桁断面に均一様に作用するのではなく、津波方向の外桁から上揚力が卓越し、支承の損傷とともに桁が回転しながら浮き上がる実被害の挙動が推定できる結果が得られた。
- 今後は水槽模型実験等の比較による解析精度の検証や構造物との連成を考慮した検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 気象庁：現地調査による津波観測点付近の津波の高さについて，報道発表資料，2011.4.5
- 2) 財団法人 沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発，2010.12

表より，まず，鉛直方向については，ケース 1 の場合，津波方向側の外桁が 6.5 倍程度，2 番目の桁が 1.1 倍程度，上揚耐力を超過している。さらに，回転角が大きくなるに従って，ケース 2～3 の順に超過率が大きくなっていくことがわかる。また，死荷重 R_d に対する上揚力 P_{max} の比率では，これも回転角が大きくなるに従い，特に外桁で 3Rd～6Rd 程度の負反力が生じている。次に，橋軸直角方向の水平反力については，回転角が大きくなるに従って，上揚力が卓越すると考えられ，水平反力の超過率は小さくなっているが，殆ど全ての桁で 1.1～1.8 倍程度水平耐力を超過していることがわかる。

以上より，被災後の支承の殆どで，サイドロックが破損し流失していたが，本解析結果からも，津波の波力により，橋軸直角方向の水平耐力も超過するものの，超過する瞬間の時刻は上揚力の方が早く，超過率も大きいことから，津波方向の外桁から上揚力が卓越し，支承の損傷とともに桁が回転しながら浮き上がる挙動が推定できる結果が得られた。