

# 津波越流後に交通機能が保持された 道路橋の地震・津波応答再現解析

片岡 正次郎<sup>1</sup>・金子 正洋<sup>2</sup>・長屋 和宏<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 地震防災研究室 主任研究官 (〒305-0804 つくば市旭1)

E-mail:kataoka-s92rc@nilim.go.jp

<sup>2</sup>正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 地震防災研究室長 (〒305-0804 つくば市旭1)

<sup>3</sup>正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 地震防災研究室 主任研究官 (〒305-0804 つくば市旭1)

東北地方太平洋沖地震の津波が路面を数m越流したものの、ほぼ無被害であった国道45号矢の浦橋の地震・津波応答再現解析を実施した。架橋地点から最も近い強震観測点で得られた加速度波形を一次元等価線形解析により基盤層に引き戻し、架橋地点の地表面へ引き上げることにより、架橋地点における本震の地震動を推定した。その推定地震動を矢の浦橋の構造解析モデルに入力する地震応答解析の結果、地震作用では支承の応答値が耐力を下回るため無被害と推定された。次に、数値シミュレーションにより再現した津波を作用させる津波応答解析を実施した結果、津波作用により一部の支承には降伏耐力を上回る力が作用するものの、終局耐力は下回っており、実際の状況と整合することが確認された。

**Key Words :** earthquake-tsunami response analysis, highway bridge, numerical wave flume, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake

## 1. はじめに

平成23年東北地方太平洋沖地震では多数の橋梁が被災し、特に津波による上部構造の流出は交通機能に多大な影響を及ぼした。平成24年2月に改定された道路橋示方書V耐震設計編<sup>1)</sup>では、津波の影響を考慮した構造計画を行うことが新たに規定された一方、津波の影響が避けられず、また流出等の甚大な被害を許容しない場合に設計で必要となる具体的な津波作用等は示されていない。津波による上部構造の移動や流出を考慮した実験<sup>2) 3)</sup>および数値解析<sup>4)</sup>の事例も限られていることから、今後の調査研究が必要とされているところである。なかでも、東北地方太平洋沖地震津波で実際に橋梁に発生した被害や現象の分析<sup>5)</sup>が基本となると考えられる。

著者らは先に、上部構造と橋脚1基が流出した国道45号小泉大橋の地震・津波被害再現解析を行い、橋脚および支承の耐力と作用力との比較により、実際の被災状況と矛盾しない結果<sup>6)</sup>を得た。また、同じく国道45号新相川橋と矢の浦橋を対象に、上部構造の抵抗力と津波による作用力を推計・比較したところ、上部構造が流出した新相川橋では鉛直上向きの作用力が抵抗力を上回る一方で、流出しなかった矢の浦橋では橋軸直交方向・鉛直上向きとも作用力が抵抗力を上回らないという、実際の被害・無被害と整合する結果が得られた<sup>7)</sup>。ただし、小泉

大橋の場合、作用力と抵抗力の単純な比較では、橋軸直角方向・鉛直上向きとも作用力が抵抗力を上回らないという結果になり、上部構造の流出には地震動による損傷や、支承線上の4つの支承に均等に力が作用せず下流側の支承から順に損傷するといった損傷過程を考慮しなければ、上部構造が流出した事実を説明できなかった<sup>8)</sup>。したがって、前述の矢の浦橋についても、地震動や動的応答の影響を考慮した上でなお上部構造が流出しないという結果が得られるかどうかを確認する必要がある。

釜石港の近傍、甲子川河口部に架かる国道45号矢の浦橋は、東北地方太平洋沖地震の津波が路面を数m越流したものの、ほぼ無被害であり、緊急輸送道路としての機能を果たした。この理由として、桁下に空気が溜まりにくい構造と漂流物の少なさが指摘されている<sup>9)</sup>。

本研究では、以上のような背景から、実際に発生した現象の再現を試みるとともに、津波特性等の観点から、本橋が津波を受け流すことができた理由を考察することを目的として、地震・津波応答再現解析を実施した。

まず、架橋地点の本震時の地震動を簡易に推定し、構造解析モデルを用いて地震応答解析を実施した。次いで、津波伝播・遡上解析と数値波動水路解析により推定した津波作用を用いて津波応答解析を実施した。その際、上流側に位置する水管橋の影響もあわせて検討した。

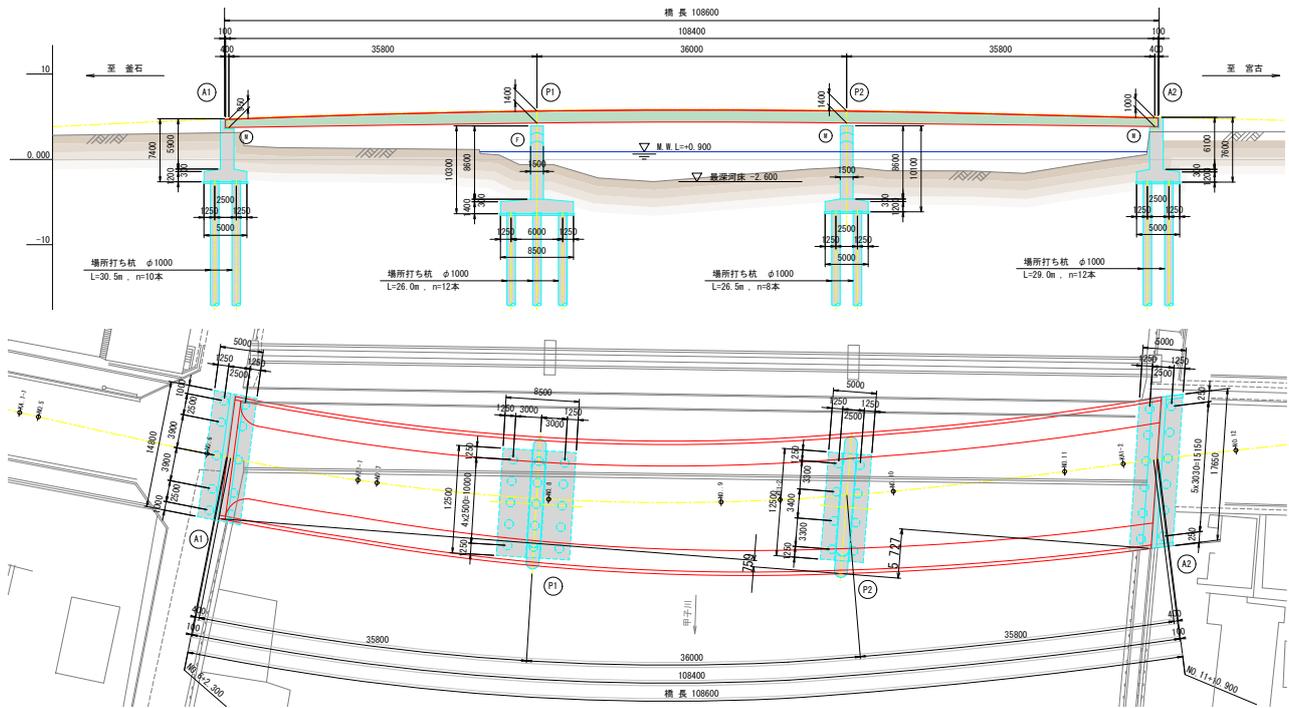


図-1 矢の浦橋の側面図(上)と平面図(下)

表-1 矢の浦橋構造概要

橋長	108.6m	幅員	2.5m+8.5m+2.5m
支間長	35.8m+36.0m+35.8m	上部構造形式	鋼3径間連続非合成桁
下部構造	橋台	逆T式橋台, 幅14.8/17.65m, 高さ7.4/7.6m (表記: A1/A2)	
	橋脚	張出式RC橋脚(小判型), 幅10.1/11.4m(張出部15.1/16.4m), 高さ10.3/10.1m(表記: P1/P2)	
	基礎	場所打ち杭φ1000mm, 長さ30.5/26.0/26.5/29.0m, 本数10/12/8/12 (表記: A1/P1/P2/A2)	
支承	高力黄銅支承板支承(BPA) 10基×4		



写真-1 津波来襲後の状況(左:下流側, 右:上流側水管橋の流出)

## 2. 解析モデル

矢の浦橋の側面図を図-1に, 平面図を図-2に示す。矢の浦橋は昭和55年道路橋示方書適用, 昭和62年竣工の下流側に膨らんだ曲線橋であり, 橋長108.6m, 有効幅員12.5mの鋼3径間連続非合成I桁および壁式橋脚2基と逆T式橋台2基からなる。本橋の構造概要を表-1に示す。

写真-1の通り, 本橋の被害はほとんど無く, 照明柱や

欄干の損傷程度である一方で, 上流側の水管橋は3支間のうち2支間が流出している。

設計図書等をもとに作成した構造解析モデルの概要を図-3に示す。ここでは支承の被災可能性に着目し, 支承のみ非線形モデルを用いた。

橋脚と上部構造を線形はり要素でモデル化し, それぞれ可視化もしくは波力作用のためのダミー要素・ダミー節点を設けた。

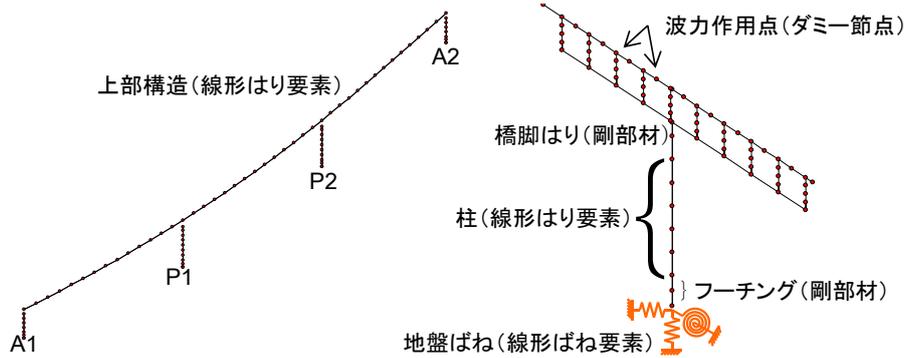


図-3 矢の浦橋の構造解析モデル概要

表-2 支承の終局耐力 [MN] (G1が上流側, G10が下流側)

箇所	桁	条件	橋軸方向	橋軸直角方向	鉛直上向き
A1,A2	G1-10	M	—	10@0.28	10@0.08
P1	G1	F	0.97	1.06	0.25
	G2-10	F	9@0.55	9@0.58	9@0.19
P2	G1	M	—	0.94	0.25
	G2-10	M	—	9@0.64	9@0.18

基礎-地盤系は線形スウェーローキングばね要素, 支承は上部構造の流出を再現できる非線形ばねでモデル化した. 支承の終局耐力を超える力が作用すると支承の機能を受け持たないものとし, 鉛直下向きには剛性の高い線形ばねとした. ここで, 支承の終局耐力は, 支承を構成する各部位 (上沓・下沓ストッパー, 浮上止め構造, アンカーボルト, 桁取付ボルト) が各方向に破断する応力度を計算して得られた最小値 (すなわち, 最弱部位の破断強度) とした. 得られた終局耐力を表-2に示す.

また, 応答解析に用いる減衰はレーリー減衰とし, 減衰定数は上部構造0.02, 橋脚と橋台0.05, 支承0.0, 基礎-地盤系0.2とした.

### 3. 地震応答解析

矢の浦橋架橋地点は, 厚さ5~10mの砂礫層の下にN値10程度の粘性土が20m程度堆積し, その間に薄い砂質土層が2層挟まった地盤構造である. フーチングは粘性土層の上面付近に設置されている.

この地点での本震時の地震動を推定するために, 架橋地点に近い (約1.6km) 国土交通省地震計ネットワークの釜石維持出張所観測点で観測された加速度波形 (図-4) から一次元等価線形解析(SHAKE)により基礎層への引き戻しと地表面への引き上げを行った. 釜石維持出張所観測点は, 数mの表層地盤の下は標準貫入試験では貫入不能の粘板岩となっており, 良好な地盤条件の地点である.

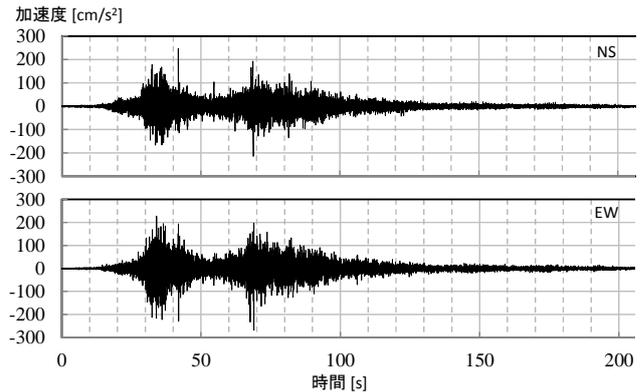


図-4 釜石維持出張所で観測された加速度波形

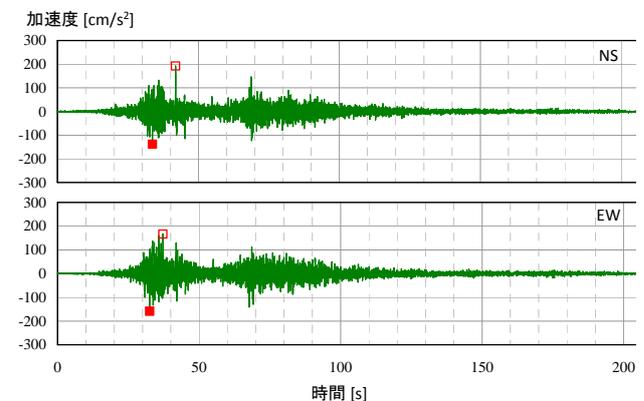


図-5 推定した矢の浦橋架橋地点での加速度波形

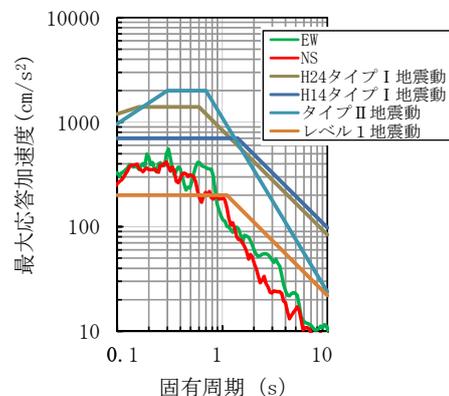


図-6 推定地震動の加速度応答スペクトル (減衰定数 5%) と道路橋示方書<sup>1)</sup>の設計地震動との比較

表-3 地震応答時に支承に作用する最大の力と終局耐力の比較

		上揚力			橋軸方向水平力			直角方向水平力		
		応答値 kN	終局耐力 kN	判定	応答値 kN	終局耐力 kN	判定	応答値 kN	終局耐力 kN	判定
A1	G1	-228	79	OK	-	-	-	113	284	OK
	G2	-181	79	OK	-	-	-	104	284	OK
	G3	-172	79	OK	-	-	-	96	284	OK
	G4	-174	79	OK	-	-	-	87	284	OK
	G5	-166	79	OK	-	-	-	79	284	OK
	G6	-166	79	OK	-	-	-	70	284	OK
	G7	-166	79	OK	-	-	-	62	284	OK
	G8	-174	79	OK	-	-	-	57	284	OK
	G9	-192	79	OK	-	-	-	55	284	OK
	G10	-202	79	OK	-	-	-	52	284	OK
P1	G1	-476	252	OK	329	972	OK	235	1056	OK
	G2	-395	185	OK	307	546	OK	234	583	OK
	G3	-371	185	OK	286	546	OK	232	583	OK
	G4	-382	185	OK	264	546	OK	230	583	OK
	G5	-372	185	OK	242	546	OK	229	583	OK
	G6	-367	185	OK	240	546	OK	227	583	OK
	G7	-364	185	OK	252	546	OK	225	583	OK
	G8	-393	185	OK	264	546	OK	224	583	OK
	G9	-407	185	OK	276	546	OK	222	583	OK
	G10	-431	185	OK	289	546	OK	221	583	OK
P2	G1	-530	252	OK	-	-	-	209	940	OK
	G2	-423	177	OK	-	-	-	208	640	OK
	G3	-376	177	OK	-	-	-	206	640	OK
	G4	-382	177	OK	-	-	-	205	640	OK
	G5	-358	177	OK	-	-	-	203	640	OK
	G6	-363	177	OK	-	-	-	202	640	OK
	G7	-369	177	OK	-	-	-	200	640	OK
	G8	-390	177	OK	-	-	-	199	640	OK
	G9	-446	177	OK	-	-	-	197	640	OK
	G10	-429	177	OK	-	-	-	196	640	OK
A2	G1	-262	79	OK	-	-	-	122	284	OK
	G2	-181	79	OK	-	-	-	114	284	OK
	G3	-172	79	OK	-	-	-	108	284	OK
	G4	-195	79	OK	-	-	-	103	284	OK
	G5	-187	79	OK	-	-	-	98	284	OK
	G6	-178	79	OK	-	-	-	93	284	OK
	G7	-189	79	OK	-	-	-	89	284	OK
	G8	-196	79	OK	-	-	-	84	284	OK
	G9	-194	79	OK	-	-	-	80	284	OK
	G10	-231	79	OK	-	-	-	76	284	OK

推定された矢の浦橋地点のフーチング下位置での加速度波形を図-5に示すが、最大加速度が $200\text{cm/s}^2$ に満たない比較的振幅の小さい地震動となっている。加速度応答スペクトルを道路橋示方書的设计地震動と比較したものが図-6である。周期約1[s]よりも短周期側ではレベル1地震動を超過しているが、レベル2地震動よりはかなり小さいことがわかる。

死荷重を静的に作用させたのち、図-5の推定加速度波形を構造解析モデルに入力する地震応答解析を実施した。鉛直地震動の影響は小さいと考え無視した。その結果を表-3に示すが、橋軸方向、橋軸直角方向とも、支承に作用する水平力は最大でも終局耐力の半分以下であった。また、鉛直上向きの力は作用しない（応答によって生じる力は死荷重反力に満たない）結果となった。降伏耐力（最弱部位の降伏強度）を推定した結果、終局耐力の5～6割程度となったため、地震応答時に支承に作用した力は降伏耐力よりも小さく、支承に損傷は生じないことが確認された。

## 4. 津波応答解析

### (1) 津波再現解析

矢の浦橋周辺の津波特性を再現するため、非線形長波理論による津波伝播・遡上解析を行った<sup>9)</sup>。図-7は解析領域を示したものであり、A～Hの全8領域を結合している。領域が最小のHではグリッド間隔を2mとしているが、その理由は、国土地理院が被災後に計測した2mメッシュ標高データを用いて陸上の地形データを作成するため

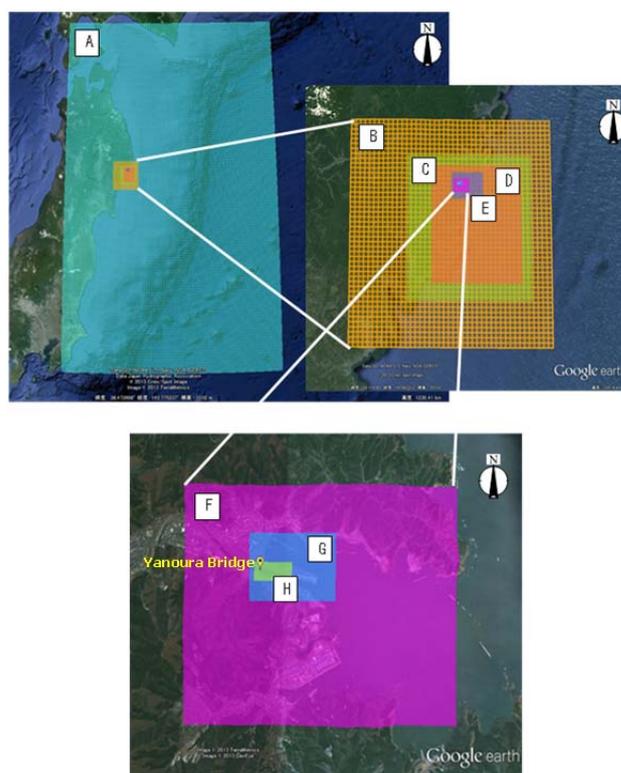


図-7 津波伝播・遡上解析領域

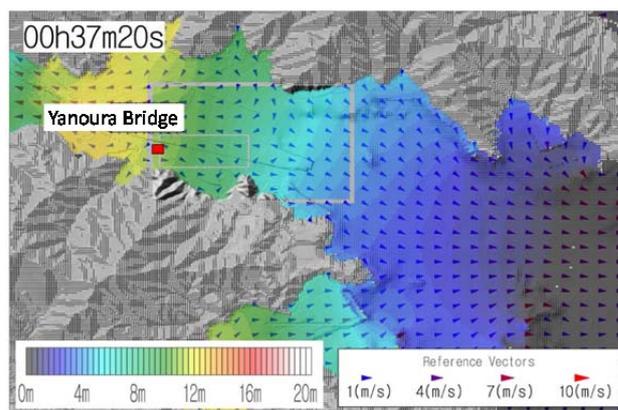


図-8 矢の浦橋周辺の津波再現解析結果（波高最大時）

である。大小領域の結合は3倍間隔であるため、領域が最大のAではグリッド間隔は4,374mとなる。

陸上の地形データのうち、浸水域とその近傍は上述の通り国土地理院が被災後に計測した2mメッシュ標高データを、それ以外は同じく国土地理院の数値地図50mメッシュ（標高）をもとに作成している。海底地形データは、(財)日本水路協会の海底地形デジタルデータと日本近海30秒グリッド水深データおよびNOAAのETOPO2を用いて作成した。

津波波源モデルは40枚の小断層からなる藤井・佐竹モデル<sup>10)</sup>のVer. 4.6を基本に、岩手南部沖に設置されたGPS波浪計<sup>11)</sup>による沖合での津波高さ6.7mが再現できるよう、2枚の小断層（E03, E14）のすべり量を1.5倍、別の1枚の

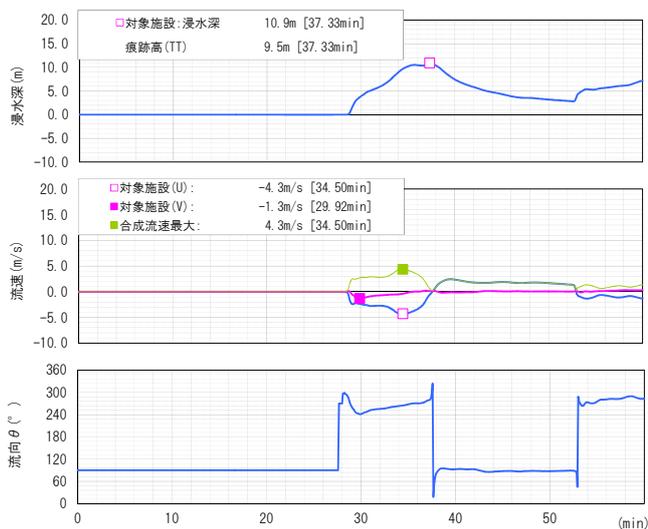


図-9 矢の浦橋地点の浸水深、流速、流向の時刻歴

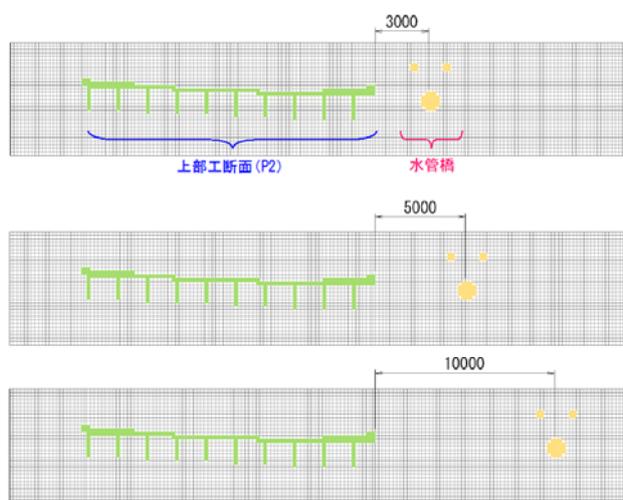


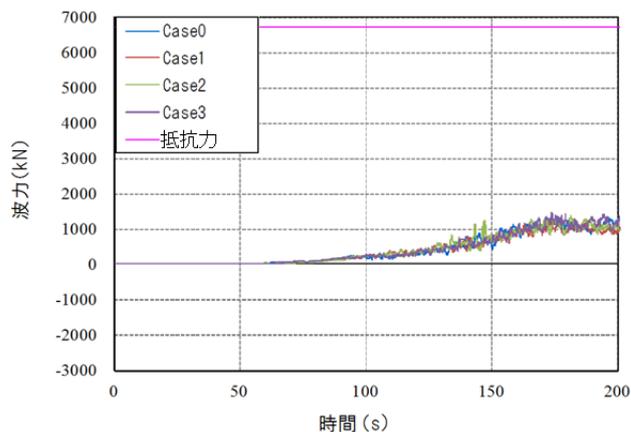
図-10 数値波動水路解析のモデル（上部構造の周辺、上からケース1、ケース2、ケース3）

小断層 (E13) のすべり量を2倍した波源モデルを用いた。この結果、GPS波浪計設置位置での津波高さの計算結果は6.7mとなり、ほぼ観測記録を再現することができた。

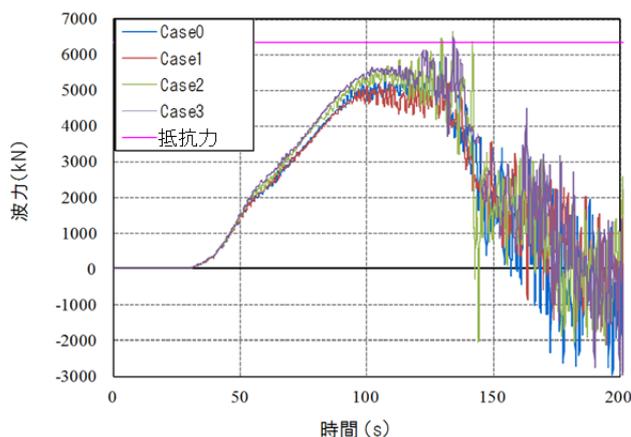
矢の浦橋周辺の津波再現解析で得られた、架橋地点の波高最大時の水位と流速ベクトルの分布を図-8に示す。また、架橋地点の浸水深、流速、流向の時刻歴を図-9に示す。矢の浦橋周辺での浸水深の調査結果（痕跡高）は6.5～10.4m<sup>12)</sup>となっており、推定された浸水深の痕跡高9.5mは調査結果と整合している。

## (2) 数値波動水路解析

上記(1)で計算された特性をもつ津波により矢の浦橋に作用した力を推定するために、解析プログラムCADMAS-SURF<sup>13)</sup>による数値波動水路解析を実施した。本プログラムは自由表面の運動を精度良く追跡できるVOF法<sup>14)</sup>に基づく数値解析を実行するものであり、橋の上部構造に作用する力の推定にも適用可能であることが



(a) 橋軸直交方向



(b) 鉛直上向き

図-11 波力の水管橋との距離による変化

水路模型実験の結果との比較により確認されている<sup>2)</sup>。ただし、計算機容量等の問題から、図-9と同一の造波条件にはなっていないことに注意する必要がある。

2. で述べたとおり、矢の浦橋の上流側直近に被災した水管橋があり、矢の浦橋との距離は3～10m程度である（図-2）。この水管橋が矢の浦橋に作用する津波波力に及ぼす影響を把握するため、図-10に示すとおり距離を3, 5, 10mとしたケース、および水管橋をモデル化しないケース0の計4ケースの数値波動水路解析を実施した。ここではP2橋脚位置での上部構造断面をモデル化し、水管橋の寸法等は文献<sup>15)</sup>を参考に設定した。

得られた波力の時刻歴を図-11に示す。波力はP1-P2支間の中間点からP2-A2支間の中間点までの区間に作用した力に換算したものである。これによると、矢の浦橋に作用する橋軸直交方向の波力は、水管橋との距離や水管橋の有無にほとんど影響されておらず、いずれのケースでも抵抗力（支承の終局耐力の合計）を大きく下回っている。鉛直上向きの波力は橋軸直交方向よりは変動が大きく、瞬間的に抵抗力（支承の終局耐力の合計と上部構造重量の和）を上回るケースもあるものの、最大値で2割程度の変化である。

図-12はケース1とケース3について、津波が路面に到達した時間と越流水深が最大となった時間の圧力分布を

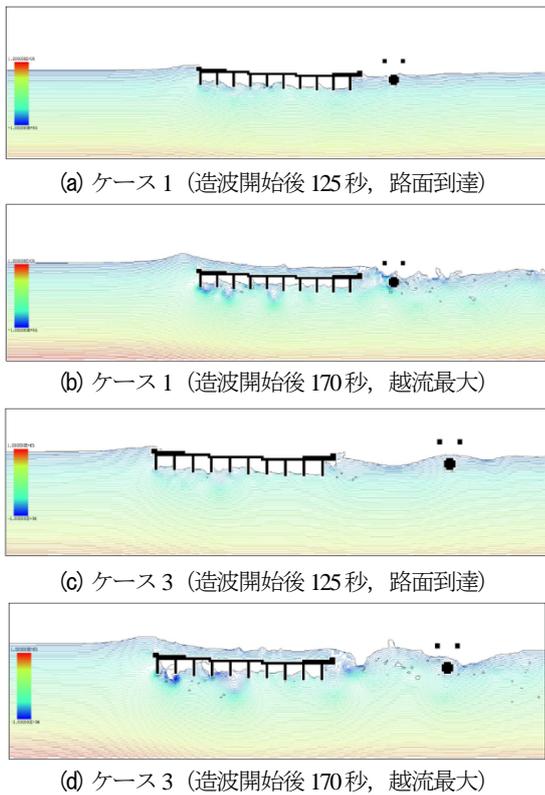


図-12 数値波動水路解析で得られた圧力分布

表-4 津波応答時に支承に作用する最大の力と終局耐力の比較

		上揚力			直角方向水平力		
		応答値 kN	終局耐力 kN	判定	応答値 kN	終局耐力 kN	判定
A1	G1	23	79	OK	144	284	OK
	G2	20	79	OK	147	284	OK
	G3	16	79	OK	150	284	OK
	G4	12	79	OK	153	284	OK
	G5	8	79	OK	155	284	OK
	G6	5	79	OK	158	284	OK
	G7	1	79	OK	161	284	OK
	G8	-3	79	OK	164	284	OK
	G9	-5	79	OK	166	284	OK
	G10	-6	79	OK	169	284	OK
P1	G1	33	252	OK	71	1056	OK
	G2	27	185	OK	71	583	OK
	G3	22	185	OK	70	583	OK
	G4	17	185	OK	70	583	OK
	G5	12	185	OK	70	583	OK
	G6	7	185	OK	70	583	OK
	G7	2	185	OK	70	583	OK
	G8	-2	185	OK	69	583	OK
	G9	-7	185	OK	69	583	OK
	G10	-12	185	OK	69	583	OK
P2	G1	46	252	OK	66	940	OK
	G2	38	177	OK	66	640	OK
	G3	28	177	OK	67	640	OK
	G4	20	177	OK	67	640	OK
	G5	13	177	OK	67	640	OK
	G6	15	177	OK	67	640	OK
	G7	0	177	OK	67	640	OK
	G8	-9	177	OK	67	640	OK
	G9	-9	177	OK	67	640	OK
	G10	-10	177	OK	67	640	OK
A2	G1	77	79	OK	213	284	OK
	G2	67	79	OK	215	284	OK
	G3	57	79	OK	216	284	OK
	G4	46	79	OK	218	284	OK
	G5	36	79	OK	219	284	OK
	G6	27	79	OK	221	284	OK
	G7	17	79	OK	223	284	OK
	G8	8	79	OK	224	284	OK
	G9	2	79	OK	226	284	OK
	G10	-1	79	OK	228	284	OK

示したものである。矢の浦橋の上部構造周りの水面形状や圧力分布はケース1と3で大きくは異なっていないが、水管橋周りの流れには若干の違いが見られる。

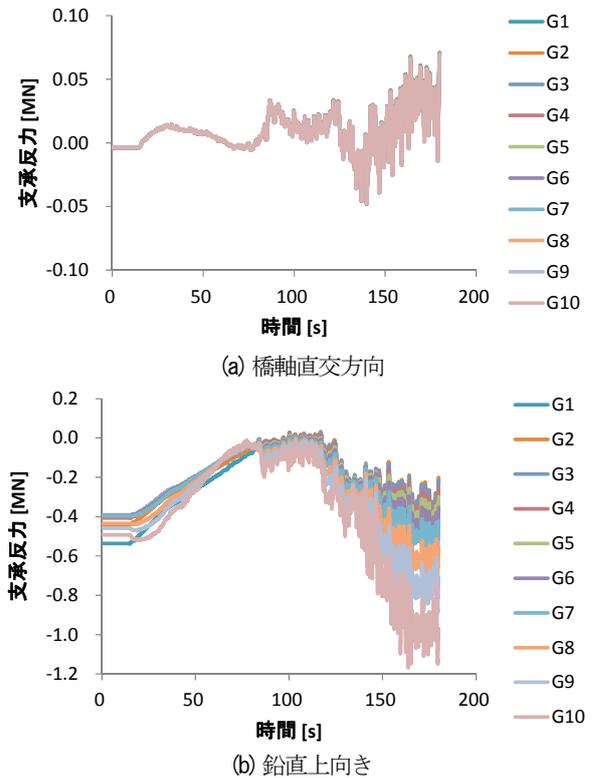


図-13 P1 橋脚上の支承に作用した支承反力の時刻歴

### (3) 推定津波波力を作用させた津波応答解析

上記(2)で得られた波力(ケース0)を2.の構造解析モデルに作用させる津波応答解析を行った。3.で述べた通り、地震応答解析では耐力を超過する力が作用した支承はなかったため、損傷等のない初期状態から開始し、時刻歴で得られた波圧を節点荷重に変換して構造解析モデルの節点位置に作用させた。

その結果、支承に作用する力は表-4のようになり、終局耐力を超過する力は作用しない結果となった。ただし、A2橋台の支承では、橋軸直交方向の降伏耐力よりも2割程度大きい作用力が発生した。

図-13はP1橋脚上の10支承の支承反力の時刻歴であるが、いずれの支承も表-2に示した終局耐力を超える力は作用していないこと、橋軸直交方向と比較して鉛直上向き力は位置による違いが大きいことが分かる。A1, P2, A2上の支承もほぼ同様の結果であった。

## 5. 結論

津波が越流してもほぼ無被害にとどまった国道45号矢の浦橋を対象に、構造解析モデルを作成し、次元等価線形解析により表層地盤の増幅特性を考慮して推定した本震時の地震動を作用させる地震応答解析、津波伝播・遡上解析と数値波動水路解析により推定した波力を作用させる津波応答解析を実施した一連の結果を示した。

解析の結果、上部構造の流出抵抗力を超えるような力は作用しておらず、実際の状況と整合していることが確認された。

被害が小さかった理由として、矢の浦橋地点の津波の流速が比較的小さいこと、水面の上昇速度も1m/分程度と小さく水位が漸増する津波であったことが挙げられる。また、ここでは検討してはいないが、桁高が小さい上部構造の形状も寄与したものと考えられる。

**謝辞：**本研究では国土地理院の「東日本大震災からの復旧・復興及び防災対策のための高精度標高データ」を使用した。

#### 参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，丸善，2012.
- 2) 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.
- 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.
- 4) Kataoka, S.: Dynamic response analysis of road bridges struck by tsunami, *6th International Conference on Urban Earthquake Engineering*, pp. 807-810, 2009.
- 5) 土木学会地震工学委員会性能に基づく橋梁の耐震設計法に関する研究小委員会：東日本大震災による橋梁等の被害分析WG報告書,2012.
- 6) 片岡正次郎，金子正洋，松岡一成，長屋和宏，運上茂樹：上部構造と橋脚が流出した道路橋の地震・津波被害再現解析，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 69, No. 4, pp.I\_932-I\_941,2013.
- 7) Kataoka, S. and Kaneko, K.: Estimation of wave force acting on bridge superstructures due to the 2011 Tohoku tsunami, *Journal of Disaster Research*, Vol. 8, No. 4, pp. 605-611, 2013.
- 8) Kawashima, K.: Damage of bridges due to the 2011 Great East Japan Earthquake, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.12, No.4(Special Issue), pp. 319-338, 2012.
- 9) 国土交通省水管理・国土保全局，国土交通省国土技術政策総合研究所海岸研究室：平成23年東北地方太平洋沖地震による津波の対策のための津波浸水シミュレーションの手引き，2011.
- 10) 藤井雄士郎，佐竹健治：2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の津波波源，[http://isee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami\\_ja.html](http://isee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami_ja.html)
- 11) 国土交通省港湾局：全国港湾海洋波浪情報網，<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/index.html>
- 12) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ：東北地方太平洋沖地震津波情報，<http://www.coastal.jp/tjtj/index.php>
- 13) 沿岸開発技術研究センター：数値波動水路の耐波設計への適用性に関する研究会報告書，沿岸開発技術ライブラリー No.12,2001.
- 14) Hirt, C. W. and Nichols, B. D.: Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Comput. Phys.*, Vol. 39, pp. 201-225, 1981.
- 15) 直田梓，米山望，鋤田泰子：東北地方太平洋沖地震津波による矢の浦水管橋の被害に関する数値解析，土木学会論文集B3（海洋開発），pp.I\_353-I\_358,2013.

## EARTHQUAKE-TSUNAMI RESPONSE ANALYSIS OF A HIGHWAY BRIDGE THAT REMAINED FUNCTIONAL AFTER A TSUNAMI OVERFLOW

Shojiro KATAOKA, Masahiro KANEKO and Kazuhiro NAGAYA

A continuous earthquake-tsunami response analysis was conducted in order to simulate the survival of a highway bridge that was submerged by the tsunami of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. First, an earthquake response analysis was carried out using the mainshock ground motion at the site estimated from an observed motion at a neighbor site. The seismic action was found not to cause any damage to the bridge. A tsunami response analysis was then conducted and the tsunami action was found not to surpass the strength of bearings; the result coincides with the fact that the bridge remained functional after the tsunami.