

津波が越流した被害が軽微な道路橋の 地震・津波応答再現解析

片岡正次郎¹・金子正洋²・長屋和宏³

¹正会員 博（工） 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）

²正会員 工修 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）

³正会員 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）

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。昨年2月に改定された道路橋示方書V耐震設計編¹⁾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ない場合に設計で用いることになる具体的な津波作用等は示されておらず、今後の調査研究が必要とされているところである。

著者らは先に、上部構造が流出した道路橋の地震・津波被害再現解析を行い、実際の被災状況と矛盾しない結果を得た²⁾。しかし、津波の影響を受け、被災しなかった橋については、同様な再現解析により無被害という実現象を説明可能かどうかは検討されていない。

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³⁾が、本稿では実際に発生した現象の再現を試みた上で、津波の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結果を報告する。

まず、本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。

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。

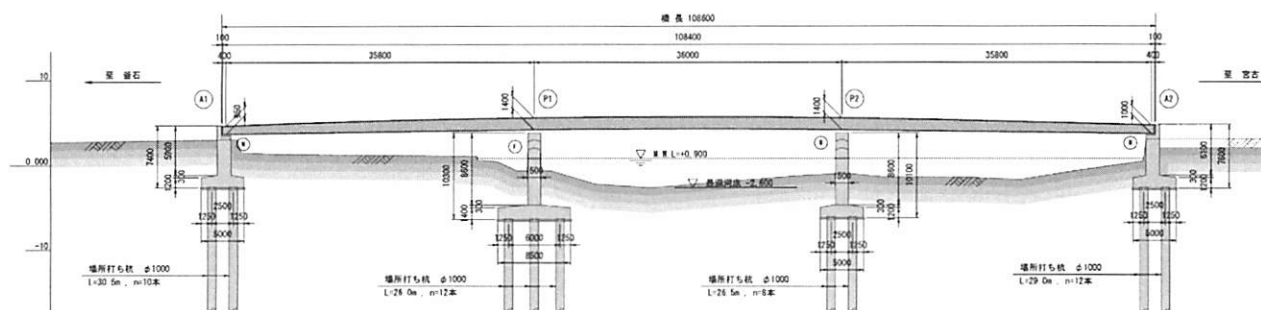


図-1 矢の浦橋側面図

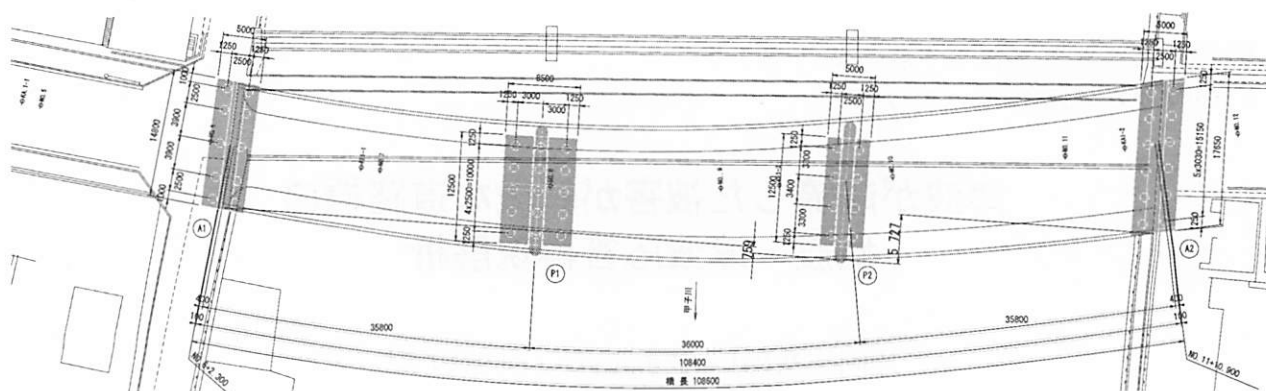


図-2 矢の浦橋平面図

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I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)

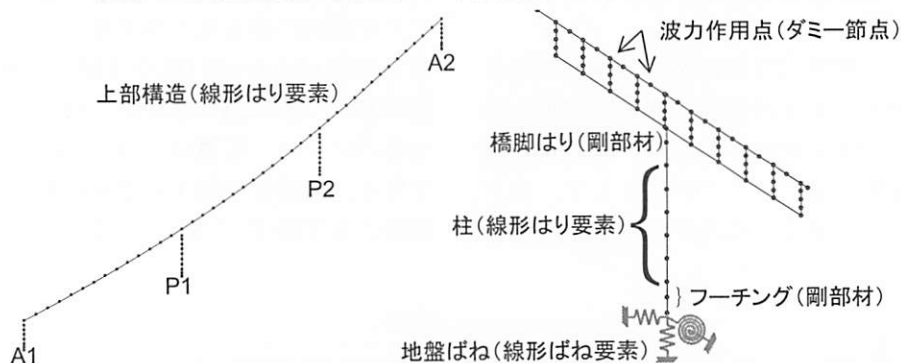


図-3 矢の浦橋の構造解析モデル概要

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。

基礎ー地盤系は線形スウェーローocking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、支承の終局耐力は各方向の応力度を計算し、最弱部位の

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

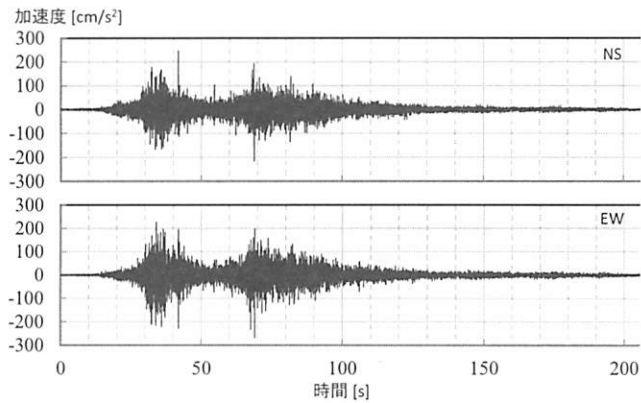


図-4 釜石維持出張所で観測された加速度波形

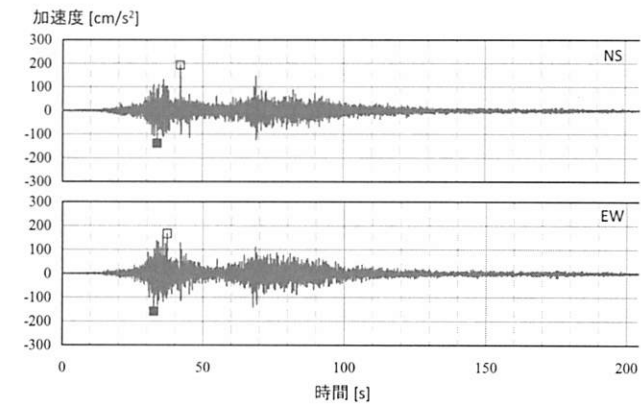


図-5 推定した矢の浦橋架橋地点での加速度波形

耐力とした。その結果を表-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、架橋地点から最も近い距離（約1.6km）にある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

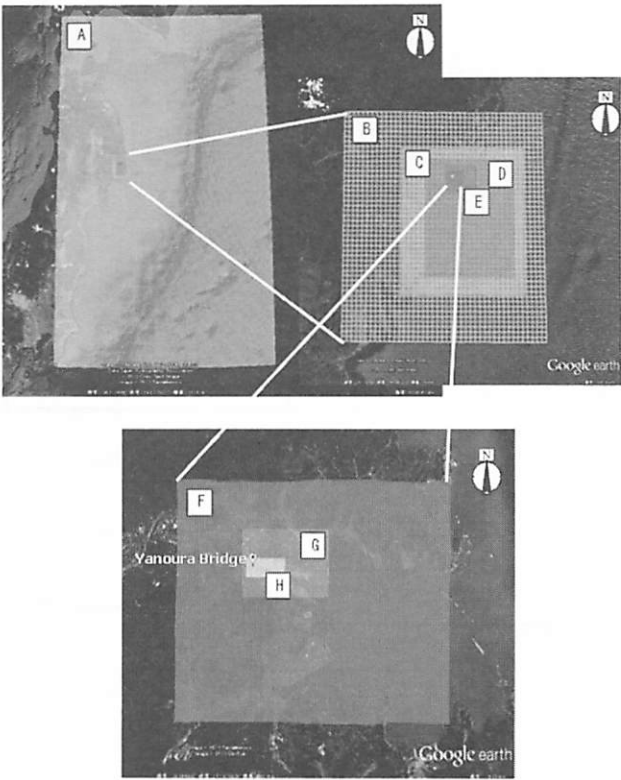


図-6 津波伝播・遡上解析領域

形解析(SHAKE)により基盤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。

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200cm/s²に満たない比較的振幅の小さい地震動となっている。

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。その結果、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耐力の半分以下となった。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。

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^{4), 2)}。図-6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である。大小領域

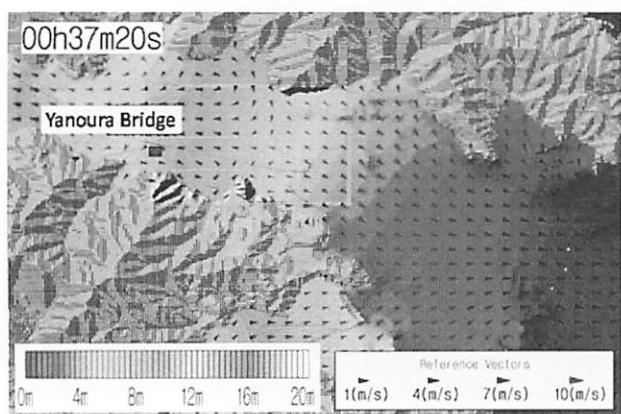


図-7 矢の浦橋周辺の津波再現解析結果（波高最大時）

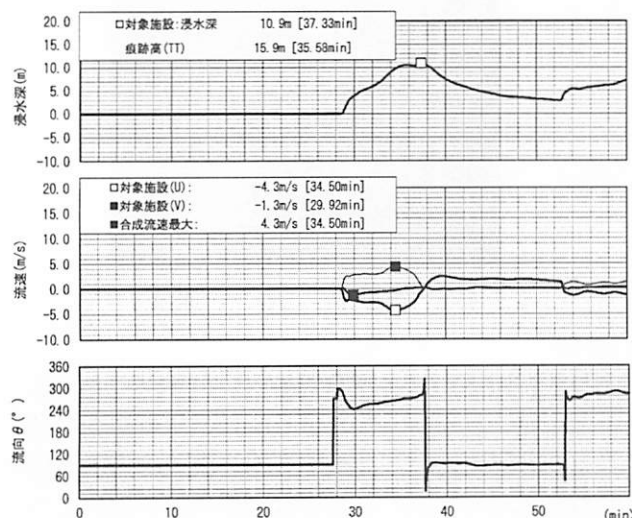


図-8 矢の浦橋地点の浸水深、流速、流向の時刻歴

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⁵⁾のVer. 4.6を基本に、岩手南部沖に設置されたGPS波浪計⁶⁾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、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-7に示す。また、架橋地点の浸水深、流速、流向の時

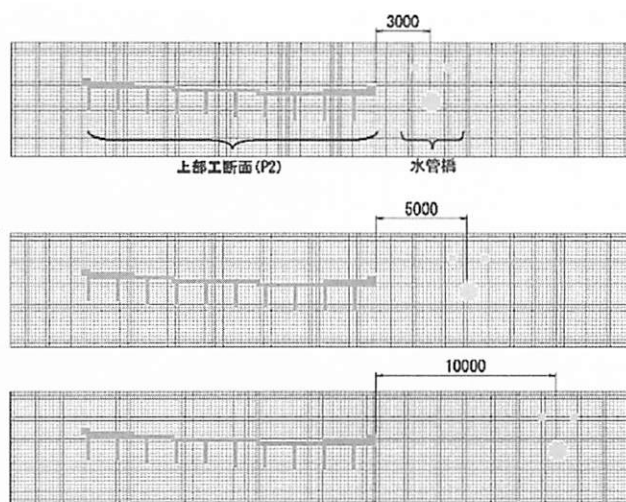


図-9 数値波動水路解析のモデル（上部構造の周辺、上からケース1、ケース2、ケース3）

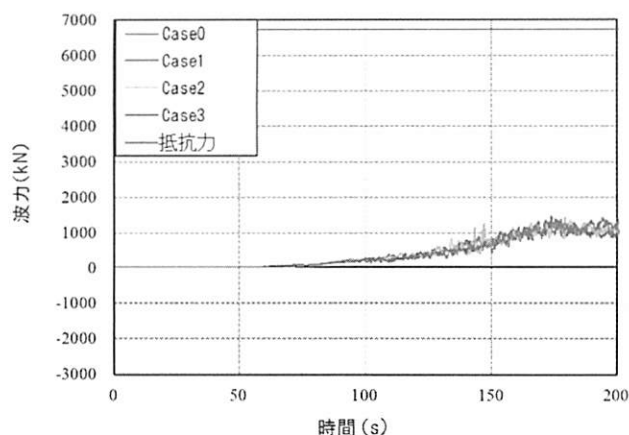
刻歴を図-8に示す。

(2) 数値波動水路解析

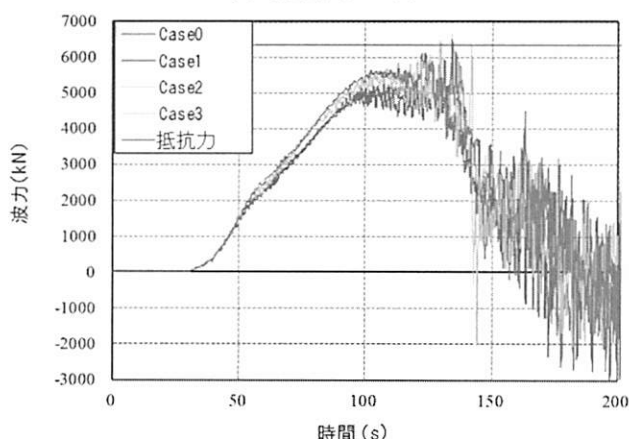
上記(1)で計算された特性をもつ津波により矢の浦橋に作用した力を推定するために、解析プログラムCADMAS-SURF⁷⁾による数値波動水路解析を実施した。本プログラムは自由表面の運動を精度良く追跡できるVOF法⁸⁾に基づく数値解析を実行するものであり、橋の上部構造に作用する力の推定にも適用可能であることが水路模型実験の結果との比較により確認されている²⁾。ただし、計算機容量等の問題から、図-8と同一の造波条件にはなっていないことに注意する必要がある。

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-9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⁹⁾を参考に設定した。

得られた結果を図-10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。



(a) 橋軸直交方向



(b) 鉛直上向き

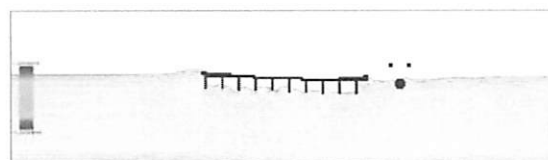
図-10 波力の水管橋との距離による変化

図-11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。

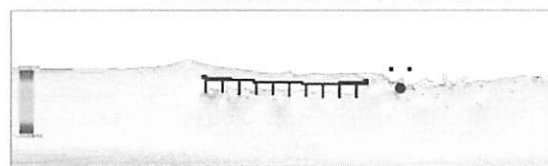
(3) 推定津波波力を作用させた津波応答解析

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。

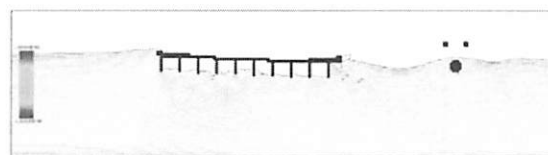
その結果、支承に作用する力は表-3のようになり、耐力を超過する力は作用しない結果となった。図-12はP1橋脚上の10支承の支承反力の時刻歴であるが、いずれの支承も表-2に示した終局耐力を超える力は作用していないこと、橋軸直交方向と比較して鉛直上向きの力は位置による違いが大きいことが分かる。A1, P2, A2上の支承もほぼ同様の結果であった。



(a) ケース1 (造波開始後125秒, 路面到達)



(b) ケース1 (造波開始後170秒, 越流最大)



(c) ケース3 (造波開始後125秒, 路面到達)



(d) ケース3 (造波開始後170秒, 越流最大)

図-11 数値波動水路解析で得られた圧力分布

表-3 支承に作用する力と耐力の比較

		橋軸方向水平力			直角方向水平力		鉛直上向き	
		応答値	柱耐力	支承耐力	応答値	支承耐力	応答値	支承耐力
		kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN
A1	G1	-	-	-	113	284	-228	79
	G2	-	-	-	104	284	-181	79
	G3	-	-	-	96	284	-172	79
	G4	-	-	-	87	284	-174	79
	G5	-	-	-	79	284	-166	79
	G6	-	-	-	70	284	-166	79
	G7	-	-	-	62	284	-166	79
	G8	-	-	-	57	284	-174	79
	G9	-	-	-	55	284	-192	79
	G10	-	-	-	52	284	-202	79
P1	G1	329	528	972	235	1056	-476	252
	G2	307	528	546	234	583	-395	185
	G3	286	528	546	232	583	-371	185
	G4	264	528	546	230	583	-382	185
	G5	242	528	546	229	583	-372	185
	G6	240	528	546	227	583	-367	185
	G7	252	528	546	225	583	-364	185
	G8	264	528	546	224	583	-393	185
	G9	276	528	546	222	583	-407	185
	G10	289	528	546	221	583	-431	185
P2	G1	-	-	-	209	940	-530	252
	G2	-	-	-	208	640	-423	177
	G3	-	-	-	206	640	-376	177
	G4	-	-	-	205	640	-382	177
	G5	-	-	-	203	640	-358	177
	G6	-	-	-	202	640	-363	177
	G7	-	-	-	200	640	-369	177
	G8	-	-	-	199	640	-390	177
	G9	-	-	-	197	640	-446	177
	G10	-	-	-	196	640	-429	177
A2	G1	-	-	-	122	284	-262	79
	G2	-	-	-	114	284	-181	79
	G3	-	-	-	108	284	-172	79
	G4	-	-	-	103	284	-195	79
	G5	-	-	-	98	284	-187	79
	G6	-	-	-	93	284	-178	79
	G7	-	-	-	89	284	-189	79
	G8	-	-	-	84	284	-196	79
	G9	-	-	-	80	284	-194	79
	G10	-	-	-	76	284	-231	79

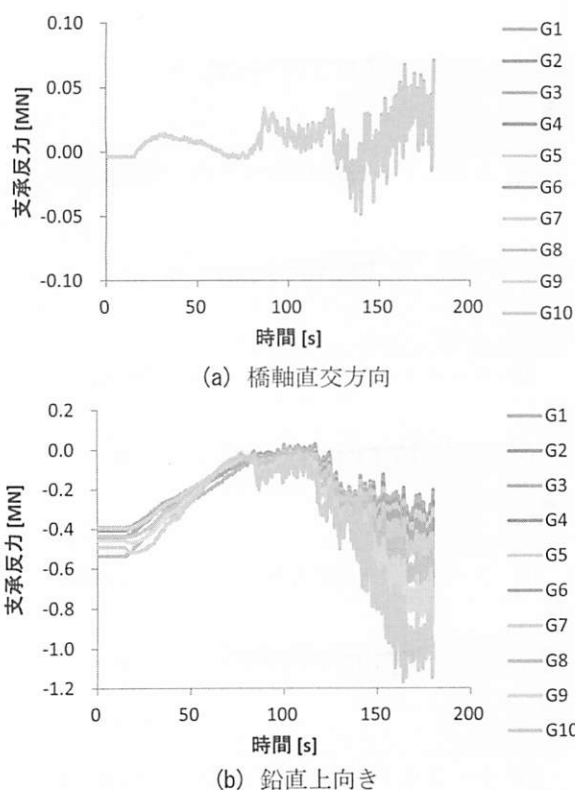


図-12 P1 橋脚上の支承に作用した支承反力の時刻歴

5. まとめ

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、一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、桁高が小さい上部構造の形状が挙げられる。

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。また、神戸大学の鵜田泰子博士には、印刷中の原稿をご提供いただいた。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- (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.
- 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, p. I_932-I_941, 2013.
- 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.
- 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.
- 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://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami_ja.html
- 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>
- 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.
- 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.
- 直田梓，米山望，鵜田泰子：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，第38回海洋開発シンポジウム講演集，2013（印刷中）。