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

片岡 正次郎1・金子 正洋2・松岡 一成3・長屋 和宏4・運上 茂樹5

¹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

²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)
³非会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 地震防災研究室 研究官(〒305-0804 つくば市旭1)
⁴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)
⁵正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 地震災害研究官(〒305-0804 つくば市旭1)

東北地方太平洋沖地震の津波で上部構造と橋脚1基が流出した国道45号小泉大橋の地震・津波被害再現 解析を実施した.現地で計測した余震波形から本震時の地震動を推定し、それを入力する地震応答解析を 実施した.上部構造に孤立波を作用させる水路模型実験で得られた津波力が数値波動水路解析によりほぼ 再現可能であることを確認した上で、地震応答解析後の損傷状態で引き続き、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.その結果、地震作用では致命的な損傷には至って いないもののP3橋脚基部には損傷が発生した可能性があること、津波作用により上部工の水平耐力とP3橋 脚のせん断耐力を超過することがわかった.

Key Words : earthquake-tsunami damage simulation, highway bridge, numerical wave tank, 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.本年2月に改定された道路橋示方書V 耐震設計編¹⁰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^{2,3}およ び数値解析⁴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.

気仙沼市本吉町の津谷川河口部に架かる国道45号小泉 大橋は、上部構造全6径間のみならず橋脚1基や橋台背面 盛土も流出する甚大な被害を受けた⁵.気仙沼市は震度6 弱、地点によっては震度6強に相当する地震動も観測さ れている⁹ことから、津波が作用する前の地震動により 損傷した可能性も否定できない.本稿では、道路橋の設 計に用いる津波作用の検討に向けて、小泉大橋を対象に、 架橋地点の本震時の地震動と津波特性を推定した上で、 本橋の構造解析モデルに作用させる地震応答解析と津波 応答解析を順次実施した結果を報告する.また、応答解 析結果を実際の被災状況と比較し、本橋に作用した津波 外力を検討した結果をあわせて報告する.

2. 解析モデル

小泉大橋の側面図を図-1に示す.小泉大橋は橋長約 182m,幅員約11mの鋼3径間連続非合成I桁橋2連および 壁式橋脚と逆T式橋台からなり,図の通りPl,P4橋脚に 炭素繊維巻立て補強を施しているほか,PCケーブルと 緩衝チェーンによる落橋防止,粘性ダンパーおよび変位 制限構造が設置されている.

作成した構造解析モデルの概要を図-2に示す. 橋脚を 非線形ファイバー要素,上部構造を弾性はり要素でモデ 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.なお,後述の数値波動水 槽解析で得られた波圧を橋のほぼ同じ位置に作用させら れるよう,構造解析モデル上に節点を設けてある.上部 構造は実際には津波が作用すると横構と対傾構が座屈し 主桁も大きく変形する可能性があるが,このような大変 形を考慮する解析は困難であり,ここでは支承に作用す る力に着目することとして弾性はり要素を用いた.





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.また,橋台部に設置されている粘性 ダンパーは,最大ストローク100mmのバイリニアモデル によりモデル化した.

橋脚と支承の耐力は当初設計図書および耐震補強設 計図書から算出した.また、応答解析に用いる減衰は剛 性比例型の部材減衰とし、振動モードに対応する減衰定 数算出時の等価減衰定数は上部構造と橋脚0.02、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

(1) 本震時の地震動の推定

小泉大橋架橋地点は、N値10~20の砂質土が15~25m 程度卓越したII種地盤である.本震時の地震動を精度良 く推定するには、この地点でのサイト特性が必要となる. そこで、架橋地点から北に約200mの場所に地中観測用 のセンサーを地下75cmの位置に設置し、2011年11月から 2012年3月にかけて余震観測を行った.1ヶ月に1度、バ ッテリー交換と記録の回収を行った.

得られた記録のうち、本震時に大きく破壊したと考 えられており架橋地点にも影響の大きい宮城県沖で発生 し、本震に近い走向・傾斜角をもつ逆断層の余震による 記録を選定した結果、2012年1月26日に発生した余震

(M5.2)の強震記録を用いることとした.

この余震記録を用いた本震時の地震動の推定には, 余震記録に含まれるサイト増幅・位相特性を比較的簡便 に考慮することができる拡張型サイト特性置換手法⁸と よばれる手法を用いた.サイト特性を置換する強震記録 としては,南に4kmほど離れているものの地盤条件の良 いK-NET⁹歌津で得られた本震時の記録を用いた.

推定結果の波形を図-4に、加速度応答スペクトルを 図-5に示す. K-NET歌津の記録を前半(第1波)と後半 (第2波)に分割し、それぞれに対してサイト特性の置 換を行い、最後に足し合わせる⁸ことにより、2つの振幅 の大きい波群が卓越する地震動が推定されていることが わかる.





図-6 津波伝播·遡上解析領域

(2) 推定地震動を作用させた地震応答解析

小泉大橋の橋軸方向は北から26°東の方向であること から、この角度を補正した上で、水平2成分の推定地震 動を作用させる地震応答解析を実施した.上下動の影響 は大きくないと考え無視した.

橋脚に作用するせん断力は、いずれの橋脚も橋軸,橋 軸直角方向ともにせん断耐力を超えておらず、地震動に よるせん断破壊は生じない結果となった.

橋軸方向の応答塑性率は、固定橋脚のP4橋脚において 1.03と降伏限界をごくわずかに超過するのみである.また、橋軸直角方向ではP3橋脚のみ応答塑性率4.1となったが、平成24年道路橋示方書V耐震設計編の式^Dで計算 される許容塑性率13.7に対しては余裕がある.なお、解 析結果では、応答塑性率が最大となるのは第2波が作用 している時間帯(98.4[s])であった.



図-7 広域および小泉大橋周辺の津波再現解析結果 (上から地震発生時,38分後,42分後)

以上より、いずれの橋脚も地震作用では大きな損傷 には至らなかったものと考えられる.

支承については、地震作用により発生する鉛直上向 きの力が全ての支承で降伏耐力を超過した.橋軸方向に 作用する力は、固定橋脚(P2, P4)の一部のみ支承の耐 力を超過した.また、橋軸直角方向に作用する力は、 A2橋台の支承線内の全4点で、A1橋台と固定橋脚(P2, P4)の支承の一部で耐力を超過した.耐力を超過する 力が作用したのは、地震動の第1波よりも、第2波による ものの方が多い(後出表-1参照).

4. 津波応答解析

(1) 津波再現解析

小泉大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¹⁰. 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.

被災後の標高データでは津谷川の堤防が一部破堤し た状態になっているため、被災前の状態になるよう当該 部分のデータを修正した.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¹¹⁾のVer. 4.6を基本に,宮城北部沖に設置されたGPS 波浪計¹²⁾による沖合での津波高さ5.7mが再現できるよう, 2枚の小断層(E05, E14)のすべり量を1.5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5.8mとなり,ほぼ観測記録を再現することが できた.広域および小泉大橋周辺の津波再現解析による 水位の分布を図-7に示す.

この結果をもとに、痕跡高と計算値の平均的な対応 関係および対応関係のばらつきを示す幾何平均Kと幾何 標準偏差¹³を小泉大橋周辺を対象に算出すると、それ ぞれK=0.99, k=1.11となり、実測とよく一致する計算結 果となっていることがわかった.また計算で得られた浸 水域も、国土地理院の判読による浸水域¹⁴とよく一致し ていた.

図-8は津波再現解析で得られた小泉大橋地点の浸水深, 流速,流向の時刻歴である.浸水深が5.1mになった時点 で橋の路面まで水位が上昇し,そこから浸水深や流速が 最大となる時点を含め流向はN290℃でほぼ一定である が,これは津波の流れがほぼ橋軸直角方向であったこと を意味する.

(2) 数值波動水槽解析

上記(1)で計算された特性をもつ津波により小泉大橋 に作用した力を推定するために,解析プログラム





CADMAS-SURF/3D¹⁵による数値波動水槽解析を実施した. 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¹⁶に基づく数値解析を実行するものである.

この解析による波力の推定精度を確認するために、橋 桁に衝突する津波力の検討を目的とする水路模型実験^{ID} を対象に、実験で得られた波力等を再現する2次元数値 波動水路解析を実施した.実験に用いられた水路130m のうち橋桁模型の前方(造波側)21.2m,後方12.5mの範 囲をモデル化し、21.2m前方で計測されている波高と流 速を解析の入力とした.

実験では模型の振動,解析では数値計算上のノイズ が発生するため,時間幅0.1sの移動平均によって波力を 平滑化して比較した例を図-9に示すが,水平力,上揚力 ともに実験と良く一致する波力が得られていることがわ かる.ここでは静水深15cm,初期波高40cmの桁下空間 がやや広いケースで得られた波力を例として示したが, 桁下空間が狭い静水深30cmのケースでも同様に,波力 や水位,流速,水面形状も実験結果をよく再現できるこ とが確かめられた.

3次元解析では計算量および必要な記憶容量が大きい ことから、反射波の影響がない十分広い領域をモデル化 することや、図-8と全く同じ条件となるよう造波するこ とが困難であった.そのため、ケーススタディを実施し た結果、解析結果に影響が少なくなるよう、対象施設の 背面に50m程度の領域を確保しすることとした.結果と して、図-10の示す矩形を解析範囲として設定し、入射 方向236mを298セル、入射直交方向238.5mを172セル、鉛 直方向21mを40セルでモデル化する約205万セルの解析モ



デルを作成した.モデルの横断面と縦断面を図-11,図-12に示すが、国土地理院の標高データと小泉大橋の設計 図書から、3次元的に変化する詳細なモデルを作成している.

造波条件についてもケーススタディを実施した結果, 30秒間かけて目標の流速・波高になるように造波するこ ととした.ただし、造波条件に制限があるため、流速は 最大流速の7.8m/s,波高は最大流速時の越流水深にでき るだけ近くなる設定で造波した.そのため、静水深等の 条件が(1)の解析結果とは同一になっていない.

解析の結果得られた流速ベクトルをP3-P4支間中央の 縦断図として図-13に示す.また,1径間ごとに集計した 水平波力と鉛直波力を図-14に示す.水平波力が徐々に 増大していくのに対して,鉛直波力はまず上向きに水平 波力を上回る最大値となったのち,橋桁に乗り上げた波 の水圧により下向きの力が支配的となっていくことがわ かる.

(3) 推定津波波力を作用させた津波応答解析

上記(2)で得られた津波波力を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.このとき,3.の地震 応答解析により耐力を超過した部材等はその状態を引き 継ぎ,また津波波力は時刻歴の波圧を節点荷重へと変換 して構造解析モデルの節点位置に作用させた.

地震応答解析と津波応答解析の結果をあわせて,支承 とP3橋脚の橋軸直角方向を対象に,作用する力が耐力を 超過する時間とその順序を整理すると表-1のようになる. ただし,解析値が発散しはじめる前までのデータをもと に整理しており,P3橋脚の支承で一部耐力を超過しない 結果となっているのはそのためである.

この表から、支承部とP3橋脚が損傷する順序を推定すると以下のようになる.



図-12 数値波動水槽解析モデルの縦断図(各断面の位置は図-10(a)参照)

①地震作用によりA1,A2支承の一部が損傷
②地震作用によりP2,P4支承が一部損傷
③地震作用によりP3橋脚基部が塑性化
④地震作用によりA2支承が損傷
⑤津波作用によりA1,P1,P5支承が損傷

⑥津波作用によりP3支承およびP2, P4支承の残りが損 傷, P3橋脚がせん断破壊

これは小泉大橋の実際の被災状況⁵と大局的には矛盾 しない結果となっている.



-2500

-5000

-7500

10

5. 上部構造への津波作用の考察

20

30

時間 [s]

40

50

図-14 1径間ごとに集計した波力(左:水平波力,右:鉛直波力)

1000

500

0

10

図-8に示したとおり、小泉大橋周辺では津波高さが比 較的ゆっくりと上昇し、津波の到達から流速が最大にな るまで12分間, 波高が最大になるまで14分間程度を要し ている. したがって小泉大橋地点での津波は段波や砕波 状ではなく、上部構造には主として抗力が作用したもの と考えられる. 図-14に示した数値波動水槽解析結果か

ら、P3-A2径間(桁長90.9m)に作用する水平波力の最大 値は6,000kN程度である.

30

時間 [s]

40

50

P3-P4

P4-P5 P5-A2

20

水路模型実験との比較により、橋桁に作用する津波 による抗力は、直立壁に作用する非砕波の津波波力の算 定式18)(以下,港湾基準式)によって安全側の評価がで きる¹⁰という結果が得られている.

そこで,数値波動水槽解析と同条件で港湾基準式に より上部構造に作用する水平波力を推定すると14,000kN

	条件	支承	水平方向			耐力超過		
箇所			直角	耐力	判定	時刻	順序	備考
			kN	kN		8		0113 0
A1	М	1	348	348	OUT	54.8	33	地震作用 第1波
		2	348	348	OUT	105.7	45	地震作用 第2波
		3	348	348	OUT	20.5	47	津波作用
		4	348	348	OUT	97.3	34	地震作用 第2波
P1	М	1	891	891	OUT	20.6	48	津波作用
		2	891	891	OUT	21.3	56	津波作用
		3	891	891	OUT	20.6	48	津波作用
		4	891	891	OUT	20.4	46	津波作用
P2	F	1	1042	1042	OUT	97.6	39	地震作用 第2波
		2	1042	1042	OUT	22.4	63	<u>津波作用</u>
		3	1042	1042	OUT	20.6	48	津波作用
		4	1042	1042	OUT	97.3	34	地震作用 第2波
Р3	М	1	891	891	OUT	21.7	59	津波作用
		2	891	891	OUT	22.2	62	津波作用
		3	418	891	OK	22.2		お過せず
		4	891	891	OUT	22.1	61	津波作用
Р3		1	891	891	OUT	20.9	54	津波作用
		2	891	891	OUT	21.3	56	津波作用
	М	3	282	891	OK	21.3	50	お過せず
		1	801	801		21.1	55	<u></u> 注述作田
P4	F		1042	1042		97.6	38	₩電作用 笛?波
		2	1042	1042		22.5	<u> </u>	<u>地展下所 第20</u> 津油作田
		3	1042	1042		07.3	34	神雪作田 笛?油
			1042	1042		97.3	34	地震作用 第2波
	М	4	801	801		20.7	52	<u>地展下所 第20</u> 津油作田
		2	801	801		20.7	56	津油作田
P5		3	801	801		21.3	52	津油作田
			801	801		20.7	18	津油作田
A2	М	4	3/8	3/8		50.3	40	神雪作田 第1波
		2	348	348		105.1	32	地震作用 第1波
		3	348	348		46.5	++ 0	地震作用 第1波
			348	348		46.5	0	地震作用 第1波
		4	540	540	001	40.5)	地展[[7]] 为1次
箇所	条件	位置	直 角	オム新耐力	判定	時刻	順序	備老
			世円 kN	kN			/戌/丁	ν μ ντ ο
P3	橋期	基部	2682	2664	OUT	21.8	60	津波作用
	104/4-1.	CT HF	2002	2004	001	21.0	00	1 10/11/10
	条件	位置	水平方向			最大値		
箇所			応答塑性率	許容塑性率	判定	発生時刻	順序	備考
			μr	μa	=	S		···· •
P3	橋脚	基部	. 4.1	13.7	塑性化	98.4	40	地震作用 第2波
P3	橋脚	基部	15.6	13.7	OUT	23.0	65	津波作用
·								

表─1 支	え承	(陸側が1)	とP3 橋脚の)橋軸直角方向を対象と	した耐力を超過す	る時間と順序
-------	----	--------	---------	-------------	----------	--------

となり,数値波動水槽解析による結果の2倍以上の値と なった.ただし,静水深が深く桁下空間がないケースで は,港湾基準式が実験値の2倍程度になる傾向があるた め^{ID},港湾基準式による推定値との比較という点では, 今回の数値波動水槽解析の結果は水路実験結果と整合し ている.

今後,このような傾向が一般的といえるか等に関す る検討を進めるとともに、水路実験や数値波動水槽解析 の結果に対する説明性の高い新たな推定式の構築が必要 と考えられる.

6. 結論

国道45号小泉大橋の構造解析モデルを作成し,余震観 測結果をもとにサイト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 数値波動水槽解析により推定した津波波力を作用させる 津波応答解析を実施した一連の結果を示した.解析結果 は実際の被災状況と矛盾しないことが確認できた.

解析の結果得られた津波波力は,水路模型実験による 従来の知見と整合するものであった. 今後,津波の影響 を受けたものの被災しなかった橋梁等も含め,さらに検 討を進める必要がある. 謝辞:本研究では、(独)防災科学技術研究所の強震観 測網K-NETによる観測記録および国土地理院の「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、余震観測に際しては仙台 河川国道事務所にご協力いただいた.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.
- 注司学,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.
- Kataoka, S.: Dynamic response analysis of road bridges struck by tsunami, 6th International Conference on Urban Earthquake Engineering, pp. 807-810, 2009.
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所,独立行政法人土木研究所::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,国土技術政策総合研究所資料第646号/ 土木研究所資料4202号,2011.
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所:国土交通省河川・道 路等施設の地震計ネットワーク情報,

http://www.nilim.go.jp/japanese/database/nwdb/index.htm

- (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 丸善, 2002.
- 8) 秦吉弥,野津厚,中村晋,高橋良和,後藤浩之:拡張型サ

イト特性置換手法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震に よる新幹線橋梁被災地点での地震動の推定,第14回性能に 基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.227-234,2011.

- (独)防災科学技術研究所:強震観測網(K-NET,KiK-net), http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/
- 10) 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.
- 11)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

- 12) 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
- 相田勇:三陸沖の古い津波のシミュレーション,地震研究 所彙報, Vol.52, pp.71-101, 1977.
- 14) 国土地理院:2万5千分1浸水範囲概況図,http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku/40014.html
- 沿岸技術研究センター: CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽 の研究・開発,沿岸技術ライブラリー, No. 39, 2010.
- 16) 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.
- 17) 片岡正次郎,日下部毅明,長屋和宏:津波衝突時に橋桁に 作用する波力,第12回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.154-157,2006.
- (社)日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解説, p.237,2007.

EARTHQUAKE-TSUNAMI DAMAGE SIMULATION OF A HIGHWAY BRIDGE OF WHICH SUPERSTRUCTURE AND A PIER WERE WASHED OUT

Shojiro KATAOKA, Masahiro KANEKO, Kazunari MATSUOKA, Kazuhiro NAGAYA and Shigeki UNJOH

A continuous earthquake-tsunami response analysis was conducted in order to simulate process of damage to a highway bridge of which superstructure and P3 were washed out 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 aftershock record. The base of P3 was found to be possibly damaged by the seismic action. A tsunami response analysis was then conducted assuming the seismic damage remained. The tsunami action was found not only surpass the strength of bearings but shear strength of P3; the result concides with the actual damage to the bridge.