

論文 津波被害を受けた小泉地区橋梁の詳細被害分析

佐々木 達生^{*1}・幸左 賢二^{*2}・神宮司 博志^{*3}

要旨：気仙沼市本吉町小泉地区の橋梁群は、東日本大震災で発生した津波で甚大な被害を被った。現地調査に基づいて、津谷川を跨ぐ小泉大橋はほぼ橋に直角方向に桁が流出しているのを確認している。津波の浸水高と流速を得るために津波伝播遡上解析を実施し、小泉地区の橋梁被害を代表する小泉大橋に作用した津波特性を流速と流向、水面勾配の観点で分析し、大きな流速が小泉大橋の橋軸直角方向に作用したと推察される。この結果に基づき水平方向の桁抵抗力と津波作用力の関係を求め、小泉大橋は津波が橋桁に直角方向に作用し、浸水高4.7mから急激に流速が上昇したことで作用力が抵抗力を上回り流出したと推察される。

キーワード：津波被害、津波伝播遡上解析、流速分布、流出メカニズム評価

1. はじめに

2011年3月11日14時46分、宮城県牡鹿半島東南東約130km付近を震源とするM9.0の大地震が発生し、これに伴う津波の影響で、東北地方の太平洋沿岸部が壊滅的な被害を受けた。気象庁発表によれば岩手県や宮城県で7~12mの津波痕跡高が報告されている¹⁾。東北地方の太平洋沿岸部では多数の橋梁が流出しており、著者らは橋梁の流出状況等の被害調査を実施している。

本論文では、著者らが実施した東北地方の太平洋沿岸地域の現地調査で確認した範囲で、道路橋と鉄道橋の全11橋中、6橋の上部構造が流出した気仙沼市本吉町小泉地区²⁾を対象として、詳細な地形条件を用いた非線形長波理論に基づく数値解析を実施し、結果得られた流速と

流向の分析を行った。さらに、数値解析結果に基づき、地域の代表として上流側に大きく上部構造が流出、移動した小泉大橋を対象に、桁の抵抗力と水平作用力の比 β 値を用いて、上部構造の流出メカニズムの推定を試みた。

2. 小泉大橋の被害状況

津谷川を渡架する小泉大橋の流出状況を図-1に平面図で示し、現地調査結果より復元した小泉大橋の概況図を図-2、3に示すが、橋長182.1mの3径間連続4主桁桁が2連の合計6径間の鋼道路橋である。全幅員は11.3mで、200mmの厚さのRC床版を有する。被災前には耐震補強工事が行われており、P1、P4橋脚に繊維シート補強が実施され、A1、A2橋台にダンパーおよび落橋防止構

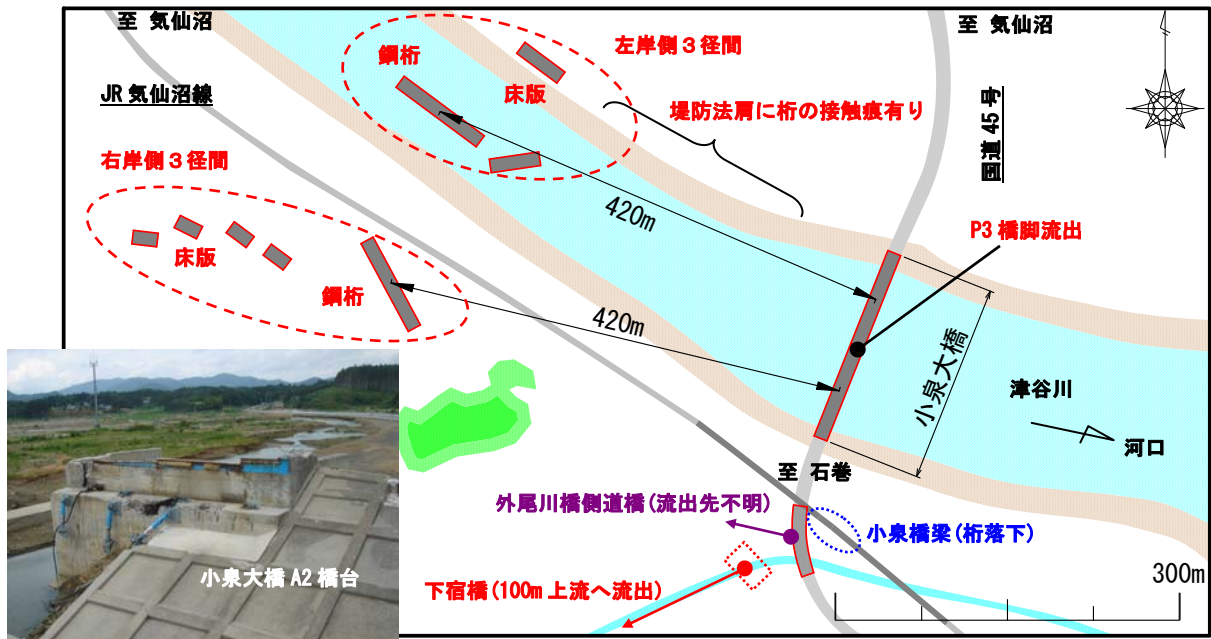


図-1 小泉大橋の流出状況

*1 大日本コンサルタント(株) 技術統括部 (正会員)

*2 九州工業大学 工学部建設社会工学科教授 Ph.D. (正会員)

*3 九州工業大学 工学部建設社会工学科

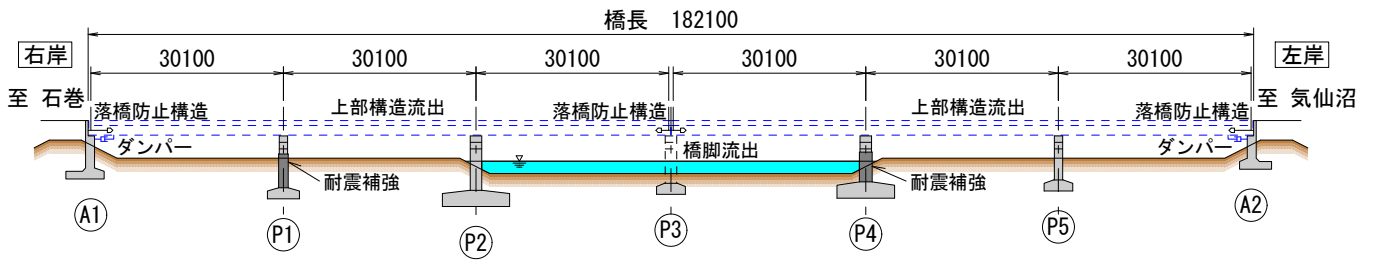


図-2 小泉大橋概況図

造が設置されている。また、P3 橋脚上の掛け違い部には、桁間連結タイプの落橋防止構造が設置されている。

今回の津波により全 6 径間が流出し、左岸側 3 径間の主桁は架橋位置から上流約 420m の津谷川河川内に移動し、主桁と床版は完全に分離している。右岸側 3 径間の主桁も上流約 420m の右岸堤内地に移動しており、同様に床版と主桁は完全に分離していた。左岸側堤防河川側の法肩のコンクリート面には、約 300m にわたって引っ掻き傷のような損傷があり、一部青色塗料の付着があるため、左岸側主桁は堤防法肩と接触しながら上流へ移動したと考えられる。

さらに河川中央の低水敷内の P3 橋脚は、柱基部から流出しており、P3 橋脚以外の残された下部構造にはひび割れや角部の欠損等は見られるが、大きな損傷は無い。下部構造の沓座周辺には、破断した制震ダンパーや鋼製支承が残されている。

全体的な下部構造の損傷傾向は、橋梁中央の P3 橋脚を挟んで右岸側と左岸側の下部構造がほぼ対称の損傷度合となっており、津波作用力は、ほぼ橋軸直角方向であったと推定される。また、耐震補強工事で橋軸方向の地震時慣性力を分散する目的で追加した制震ダンパーは、全てそれらの取付部が損傷し、津波作用力に抵抗できていない。これは、これらの装置が主に橋軸方向について抵抗を期待するものであり、橋軸直角方向が主な作用方向である津波については、別途補強装置が必要と考えられる。従って、3 章の損傷メカニズムの評価では、流出に対する上部構造の抵抗力にダンパーや落橋防止構造等の装置の抵抗力を考慮しない。

3. 津波伝播遡上解析

本章では津波伝播遡上解析を実施し、小泉大橋に作用した津波の特性を把握した。

3.1 解析モデル

図-4 に津波伝播遡上解析に用いた解析モデルを示した。解析手法は既往報告¹⁾と同様の手法で非線形長波理論に基づいているが、以下に示す点を変更している。

(a) 波源モデルに、より再現性の良い藤井佐竹モデル (Ver4.6) に変更して 40 領域のすべり量等のパラメータを設定している²⁾。図-4 (a)に示す E5 と E14 の 2

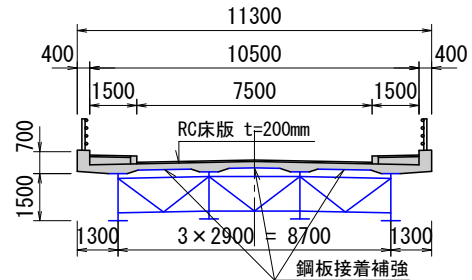
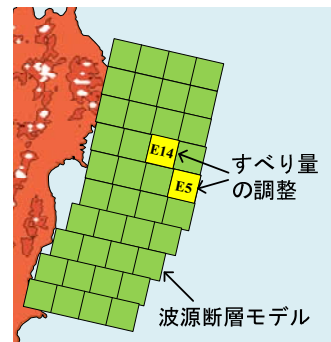
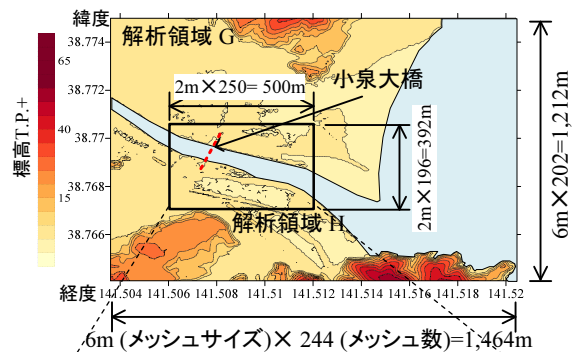


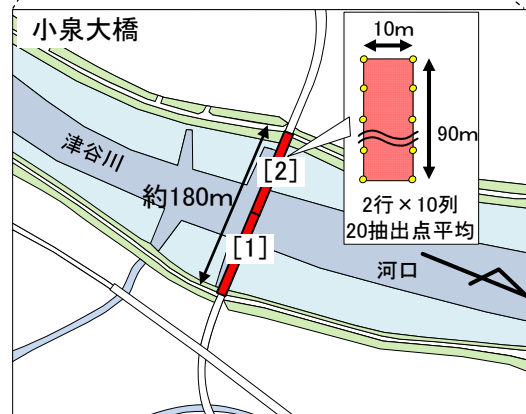
図-3 小泉大橋断面図



(a) 波源モデルとして用いた断層モデル



(b) 解析領域 G, H と小泉大橋



(c) 解析結果の抽出点と評価手法

図-4 解析モデルと結果の評価手法

枚の小断層は、宮城北部沖に設置された GPS 波浪計による沖合での津波高さ 5.7m が再現できるよう、すべり量を 1.5 倍とした³⁾。

- (b) 地形データは、陸域において 5m, 10m の詳細なメッシュ標高データを使用し、細部の地形の影響を考慮できるモデルとした。
- (c) 解析領域 A~H の範囲は図-4 (b) に示す最小領域 H のメッシュサイズは 1 辺あたりを 2m とし、G では 6m, F では 18m と A に向かってメッシュサイズを 3 の倍数で大きくして各領域を結合した。

なお、津波発生時の初期潮位は気象庁潮位観測データに基づき T.P.+1.400m としている³⁾。

図-4 (c) に、小泉大橋を対象とした解析で着目した解析結果抽出点と評価手法を示す。解析結果は抽出点毎に浸水高と流速の時刻歴が得られるが、抽出点毎に生じる微小な誤差や局所的な特異値を除去することを目的として、桁長×幅員を 1 つの平面として、平面を 10m ピッチで設置した着目点の結果を平均化した。すなわち、図に示すように[1]右岸側と[2]左岸側のそれぞれ 1 連の桁に対して 1 平面として、1 平面内の 20 の着目点を平均化した値を用いて上部構造に作用した津波特性を評価した。

3.2 解析結果

図-5 に、解析結果として図-4 に示す[1]の右岸側と[2]の左岸側の流速と浸水高の時刻歴変化をそれぞれ上段と下段に示す。同図は地震発生時、すなわち数値解析上の断層にずれが発生した時点をもととして、以降の 25 分後から 50 分後の 25 分間を横軸に示した。図中[A], [B], [C], [D]点は、それぞれ小泉大橋の位置の水位が上昇し始めた時点、桁下水位到達時、路面浸水時、最大流速時の流速と浸水高を示している。なお、本稿では流速の変化に応じて、同図に示すように流速が生じてから流速が急激に上昇する直前までを第 1 ステージとし、それ以降から引き波に転じるまでを第 2 ステージと定義した。

浸水高は、地震発生より 32 分 45 秒後に小泉大橋の架橋位置の水位が上昇し始める。39 分 05 秒後の[B]点で小泉大橋の桁下に水位が達し、さらに 40 分 30 秒後の[C]点で路面が完全に浸水する。最大浸水高となるのは、地震発生より 43 分 55 秒後の時点である。

流速は、[A]の時点まで浸水高の上昇とともに緩やかに上昇して 1.5m/s となるが、その後 37~38 分の時点から急激に上昇する。[B]の時点で右岸側流速は 3.7m/s (左岸側流速は 4.2m/s), [C]の時点で右岸側流速は 5.5m/s (左岸側流速は 5.7m/s), 最大流速は[D]点で両岸ともに 7.3m/s と非常に速い流速が得られる。

[A]点から[B]点までは、左岸側の流速が若干速めではあるものの、左右岸の流速と浸水高の上昇傾向は概ね同様であり、流速の急激な上昇とともに浸水高の上昇速度

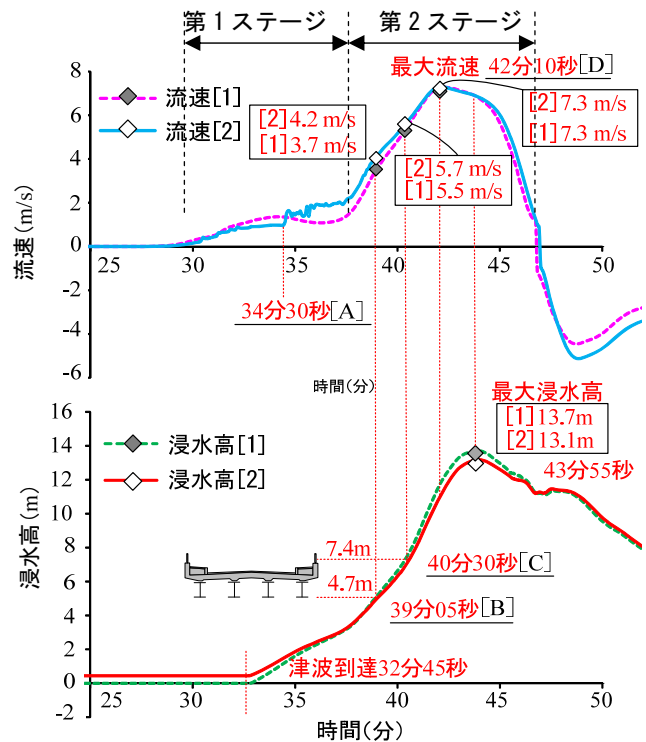
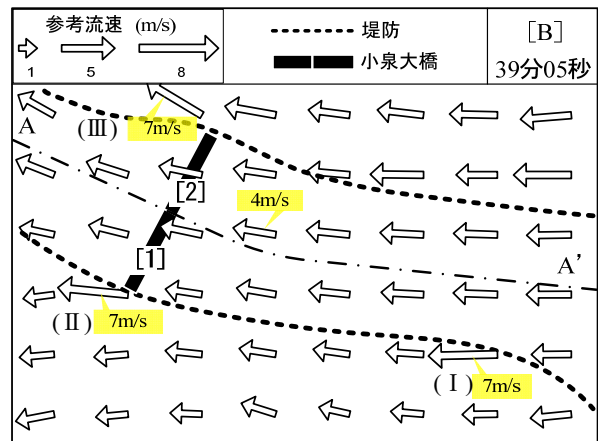
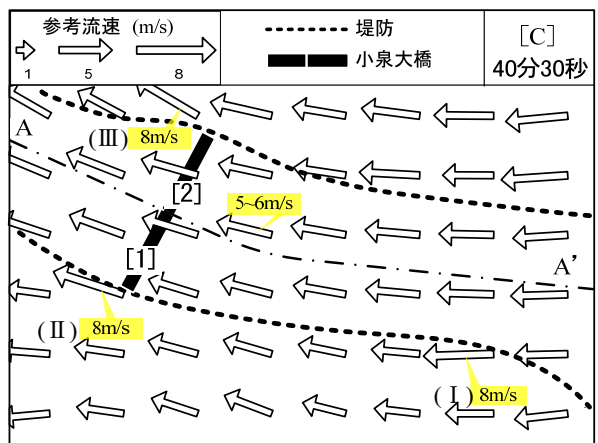


図-5 小泉大橋における津波の流速と浸水高



(a) 桁下に津波水位が到達した時点



(b) 路面が完全に浸水した時点

図-6 小泉大橋における流速と流向の変化

も速くなる。最大流速[D]点を迎えた後は流速は低下傾向を示すとともに浸水高の上昇速度は徐々に緩やかになり、最大浸水高に到達した後、流速は急激に減少して引き波に転じる。

図-6, 7に流速ベクトル図を、図-8に水面勾配の変化を示す。これらの図は第2ステージの主要イベントである[B], [C], [D]点をそれぞれ(a), (b), (c)で示している。図-6, 7のベクトルサイズは流速の大きさを、ベクトルの向きは津波の遡上方向を示す。図-8の断面図は、図-6, 7に示すA-A'方向であり、小泉大橋を中心に河川方向に上下流400m, 合計800mの範囲を図化した。

図-6 (a)は小泉大橋の桁下に水位が到達した時点である。津谷川河道内を遡上する津波の流速は4m/s程度で、左岸側(北側)堤内地の流速とほぼ同様である一方、右岸側(南側)堤内地の流速は比較的小さい。図中の(I), (II), (III)は津谷川の堤防部や一般国道45号の道路盛土部であり、局所的に7m/sと流速が大きい。遡上の方向は、概ね津谷川の河川方向である。

水面勾配は図-8 (a)図に示すように、津波襲来時の潮位T.P.+1.400mを基準として浸水高をプロットすると、小泉大橋の上流側400mの位置で浸水高4.5m, 下流側400mの位置で浸水高7.0mとなり、小泉大橋を中心とした上下流の合計800m間の水位差は2.5mである。よって水面勾配は概ね $i=1/320$ ($=2.5m/800m$)と求められる。

図-6 (b)図は小泉大橋が完全に浸水した時点であり、津谷川の堤防天端を越えた状態である。津波は5~6m/sの流速で津谷川の河川方向に遡上している。(a)図で見られた大きな流速(図中(I)~(III))は7m/sであり、この時点でも局所的に大きな流速となっている。この時点の水面勾配は図-8 (b)より概ね $i=1/145$ である。

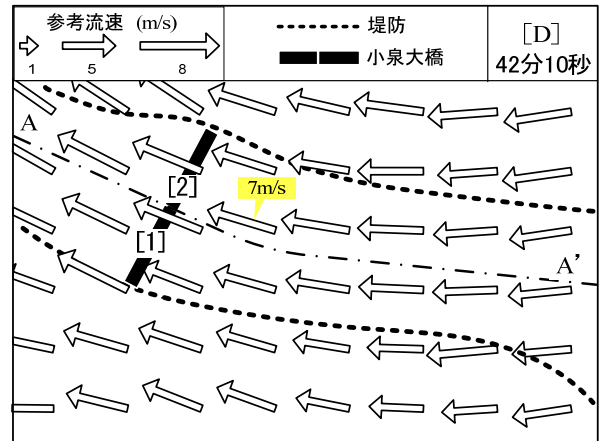
図-7 (c)は小泉大橋の架橋位置で流速が最大となった時点である。津波の遡上の方向は(a), (b)図と同様に、津谷川の河川方向である。この時点の水面勾配は図-8 (c)より概ね $1/118$ である。

これらの図に示したベクトルの方向を確認すると、いずれの時点も小泉大橋に対して概ね直角方向を向いており、かつ図-1に示した桁の移動方向と概ね一致する。

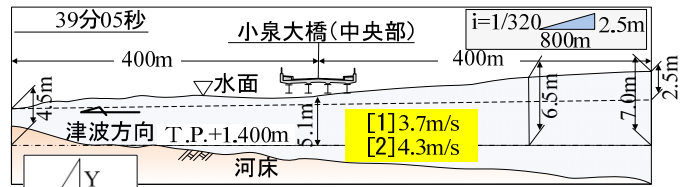
また、流速の増加に伴い、水面勾配も大きく変化していることがわかる。特に、[B]点から[C]点までの1分25秒間で水面勾配は $i=1/320$ から $1/145$ まで変化し、その変化率はおよそ2倍以上と大きい。続いて[C]点から[D]点までの1分40秒間では $i=1/145$ から $1/118$ と、比較的緩やかであるものの水面勾配は急勾配へと変化を続ける。

4. 小泉大橋の流出メカニズム

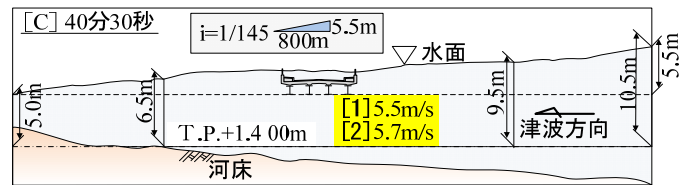
前章で述べた解析結果について、流速が急激に上昇する理由を広域な地形の観点から考察を加え、小泉大橋の流



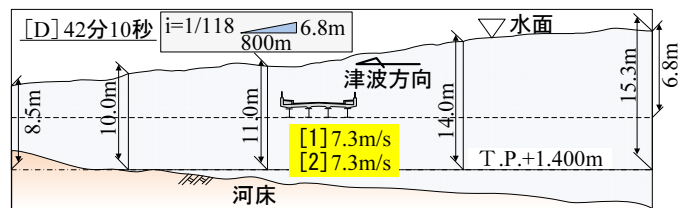
(c) 最大流速に達した時点
図-7 小泉大橋における流速と流向の変化



(a) 桁下に津波水位が到達した時点



(b) 路面が完全に浸水した時点



(c) 最大流速に達した時点

図-8 小泉大橋における水面勾配の変化 (A-A' 断面)

出メカニズムを推定した。

4.1 小泉大橋に作用する津波特性

図-9に、図-5に示した[B], [D]点の広域地形における流速ベクトル図を示した。同図に示すA-A', B-B', C-C'はそれぞれを津谷川河口位置、小泉大橋架橋位置、津谷川橋梁架橋位置に津谷川の河川方向と直角に定義した断面である。この3断面における平均流速と平均浸水断面積から簡易的に流量Qを算出して示した。

(a)図を確認すると、沖合から襲来する津波の遡上方向は、概ね小泉地区の陸域平野部の奥行き方向に一致し

て地形に沿って津波が流れていることと、小泉地区の周辺の津波の流れが小泉地区に集まっていく様子がわかる。次いで、海側の津波流量 Q は $Q_C=0\text{m}^3/\text{s}$, $Q_B=16,000\text{m}^3/\text{s}$, $Q_A=28,800\text{m}^3/\text{s}$ と C-C'断面から A-A'断面に向かって大きくなり、海側にさらに大きな津波の流れが控えていることがわかる。一方、(b) 図では A-A'断面の流量は大きいですが、陸域の流速に対して海域の流速は非常に小さい。前章の図-5 と併せてみると、この後 B-B'断面で流速は減少をはじめ、A-A'断面の流量が到達することで最大浸水高を迎える。

これらから第 2 波の [B]点から [D]点の間で小泉地区周辺の海域における津波の主流が集積した上で襲来することで流速が急激に上昇したと考えられ、[D]の時点で津波の主たる流量は概ね陸域に流入したと考えられる。

以上より、桁下に津波水位が到達した [B]点から最大流速となる [D]点までの流速と水面勾配の大きな変化が、小泉大橋の上部構造流出に影響を及ぼしたと考えられる。さらに上部構造に作用した津波は、ほぼ小泉大橋の橋軸直角方向に一致する。

4.2 損傷メカニズムの評価

図-10 に、解析結果に基づき各上部構造に作用する浸水高に応じた津波の平均流速を示す。前節の評価手法と同様に、[1]の右岸側と [2]の左岸側に分けて示す。また、水位が桁下到達点から路面浸水点までを区間 [a]、路面浸水点から最大浸水高までを区間 [b] と定義した。なお、本稿では地覆より上方へ 400mm の点を路面浸水点としている。

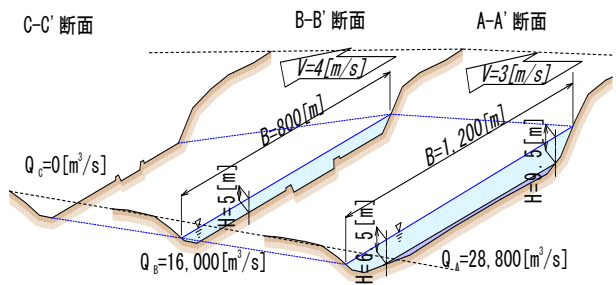
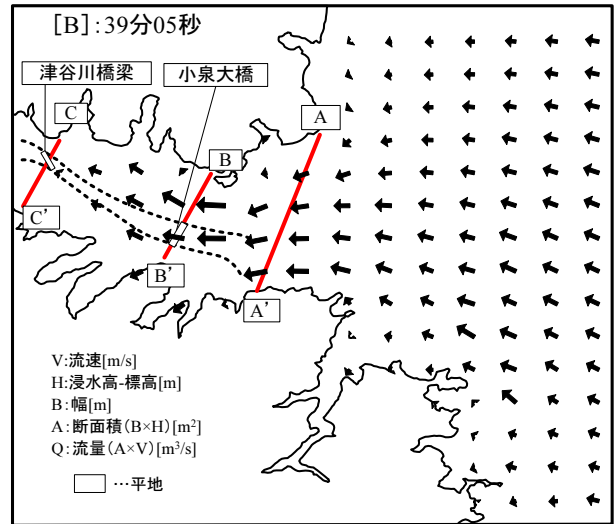
同図より、区間 [a]の流速は V_1 が [1], [2]でそれぞれ 3.7m/s, 4.2m/s (以降, [1], [2]の順で示す) から $V_2=5.5$, 5.7m/s まで上昇する。区間 [b]の中間点付近で最大流速 $V_3=7.3\text{m/s}$ を迎え、区間 [b]の平均流速は $V_4=6.8\text{m/s}$, 7.0 m/s となる。

これらの流速が上部構造に直角方向に作用したと考え、モリソン式を参考に下記の式 (1) に基づき作用力を算出した。

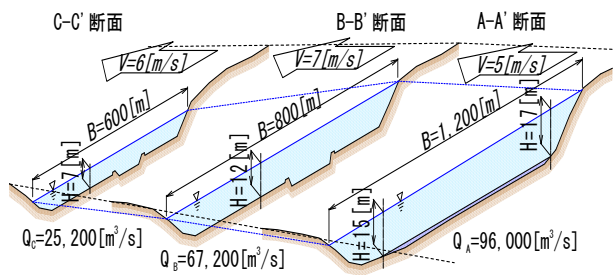
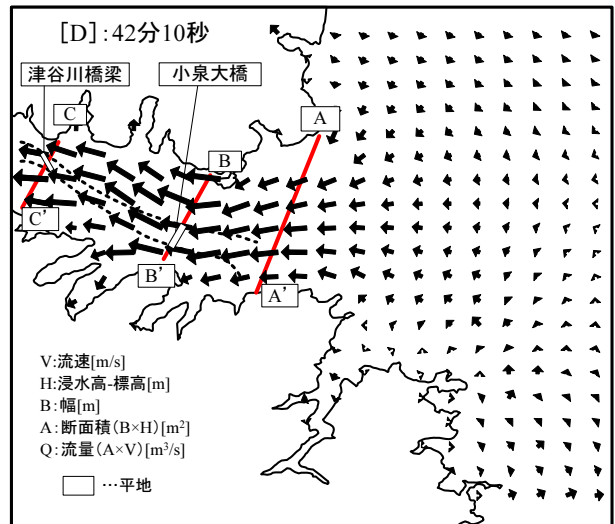
$$F = \frac{1}{2} \rho_w C_d v^2 A_h + C_m \rho_w A_h \frac{dv}{dt} + (\rho_w g h_1 A_1 - \rho_w g h_2 A_2) \quad (1)$$

ここに、津波作用力 F 、抗力係数 C_d 、水の密度 ρ_w (1030kg/m³)、津波の流速 v 、上部構造の有効鉛直投影面積 A_h 、慣性力係数 C_m 、加速度 dv/dt 、 h_1 と h_2 は静水圧高、 A_1 , A_2 は側面積、式 (1) 中の右辺第 1 項は抗力項、第 2 項は慣性力項、第 3 項は静水圧項である。

本稿では抗力項に比較し慣性力項は微小と考え、第 2 項は省略した。また、図-8 の (a), (b), (c) の津波作用状態を踏まえ、水位差は生じないと仮定して第 3 項の静水圧項を省略した。



(a) 桁下に津波水位が到達した時点



(c) 最大流速に達した時点

図-9 広域地形における流速ベクトル図

次に、上部構造の抵抗力は摩擦係数 $\mu (=0.6)^{4\sim 5)}$ と上部構造重量 W の積で求めた摩擦力とし、浮力 U を評価した式 (2) に基づいて算出した。

$$S = \mu \cdot (W - U) \quad (2)$$

なお、浮力 U は上部構造が完全に浸水した以降の区間[b]にのみ考慮している。さらに、桁抵抗力 S を作用力 F で除す式 (3) より桁抵抗力作用力比 β を求めることで判定する。

$$\beta = \frac{S}{F} \quad (3)$$

区間[a], [b]それぞれの津波作用力と抵抗力を評価した結果を図-11に示す。区間[a]は、流速が比較的小さいものの、津波作用力は6,035 kN (左岸側は6,526 kN)となり、抵抗力6,000kNを上回る。桁抵抗力と作用力の比 β 値は左右岸でそれぞれ0.99, 0.92 と、1.0未満となる。

一方の区間[b]は、算出に用いた流速が非常に大きいため、10,506 kN (左岸側は10,592 kN)であるのに加え、抵抗力に浮力 U を評価することで3,630kNと浮力を評価しない抵抗力から40%低下しており、 β 値はそれぞれ0.35, 0.34 と区間[a]に比較してさらに小さい値となる。

従って、上部構造の流出に対してより危険な状態は区間[b]の最大流速が作用する状態であると言える。ただし、区間[a]の状態では β 値は1.0未満となることから、区間[a]の状態でも遜色ない状況であったことがわかる。

以上より、[1], [2]のいずれも、区間[a]の状態では津波による水平方向作用力が抵抗力を上回ったことで上部構造が流出し、その直後に数値解析結果に見られる急激な流速の上昇で上流側へ移動したと言える。前述したように、上部構造が上流側へ420m移動したのは水平方向の作用力が大きかったと考えられるが、この結果は上部構造流出の被害状況と整合している。

4. まとめ

橋梁の流出被害割合が大きい小泉地区を対象に、津波伝播遡上解析を実施し、襲来した津波特性の分析を行った。さらに、解析結果を用いて桁抵抗力作用力比 β 値を用いて、小泉大橋の流出メカニズムを推定した。

- (1) 波源に藤井佐竹(Ver4.6)モデルを用い、地形データに5m, 10mの詳細なメッシュ標高データを使用した津波伝播遡上解析を行った結果、小泉大橋の位置で最大流速7.3m/s, 最大浸水高13.7mの結果を得た。
- (2) 小泉地区を遡上する津波の解析結果は、小泉大橋のほぼ橋軸直角方向に作用し、その流速は桁下到達時点で3.7~4.2m/s, 路面完全浸水時で5.5~5.7m/sとなり、さらに最大で7.3m/sとなった。

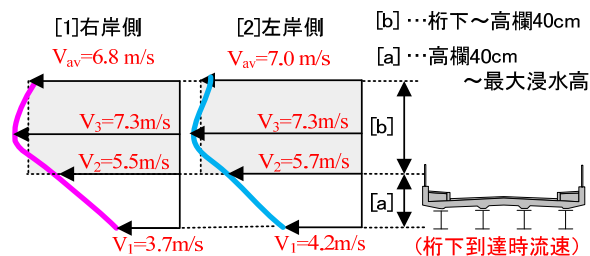


図-10 上部構造に作用する津波の流速分布

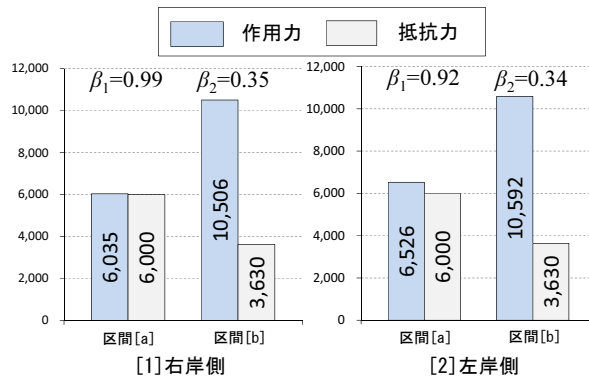


図-11 小泉大橋の津波作用力と桁抵抗力の関係

- (3) 小泉地区で、7m/sを超える流速となった原因としては、沖から襲来する津波が小泉地区周辺の海岸地形の影響を受け周囲の流れが集まるため、小泉地区を遡上する津波の流速が急激に上昇し、非常に大きな流速となったと推定される。
- (4) 小泉大橋は、桁に作用してから路面に浸水するまでの津波の作用力で流出し、その後の急激な流速の上昇で上流側へ420m移動したと推定される。

参考文献

- 1) 佐々木達生, 幸左賢二, 付李, 田崎賢治: 津波による津谷川周辺地域のPC桁橋梁を含む構造物の損傷分析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, pp. 1117-1122, 2012. 7.
- 2) 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, 2011.10. http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami_ja.html
- 3) 片岡正次郎, 金子正洋, 松岡一成, 長屋和弘: 道路橋の地震・津波複合応答解析, 第15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.9-16, 2012. 7.
- 4) Rabbat, B.G. and Russel, H.G.: Friction coefficient of steel on concrete or grout, J. Struct. Eng., ASCE, Vol. 111, No. 3, pp. 505-515, 1985.
- 5) 庄司学, 森山哲雄, 藤間功司, 嶋原良典, 笠原健治: 単径間橋桁に作用する砕波津波の荷重に関する実験的検討, 構造工学論文集, 第55巻, pp. 460-470, 2009.4