

論文 津波に対する歌津地区の詳細被害分析

付 李^{*1}・幸左 賢二^{*2}・中野 亜美^{*3}・佐々木 達生^{*4}

要旨：宮城県南三陸町歌津地区は、東日本大震災で発生した津波で甚大な被害を被っており、海岸線に位置する歌津大橋は、上部構造に流出部と未流出部が混在する。歌津大橋に作用した津波の特性を得るために津波伝播適上解析を実施し、各桁に作用する津波の流速と流向を把握した。解析結果に基づいた水平方向作用力と浸水状況に応じた桁抵抗力の関係を求め、現地の流出状況との比較から流出部と未流出部の整合性を確認した。この結果、歌津大橋は完全に浸水した状況で浮力の影響による抵抗力の減少で流出し、4m/s 程度以下の流速下で上流側に桁が移動したと推察される。

キーワード：津波伝播適上解析, 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、宮城県牡鹿半島の東南東約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代表的な7地域における痕跡高は7から12mと報告されている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。

本研究は、著者らが実施した現地調査に基づき、上部構造に流出部と未流出部が混在する歌津大橋に着目し、図-1に示すように歌津大橋に作用した津波特性の把握と上部構造の流出メカニズムの解明を目的として、歌津大橋の損傷状況を整理し、数値シミュレーションを実施

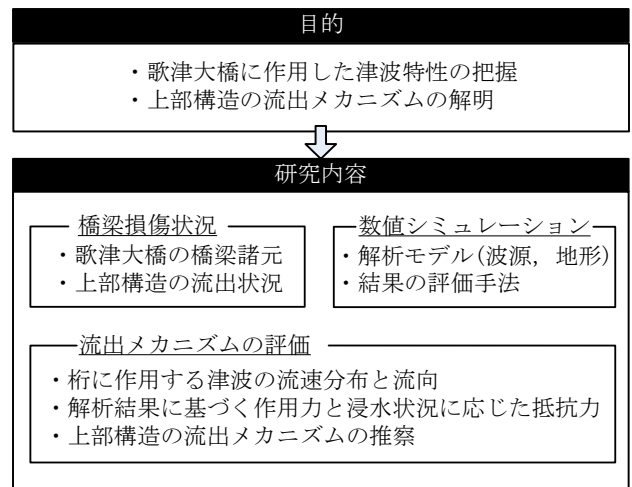


図-1 研究フロー

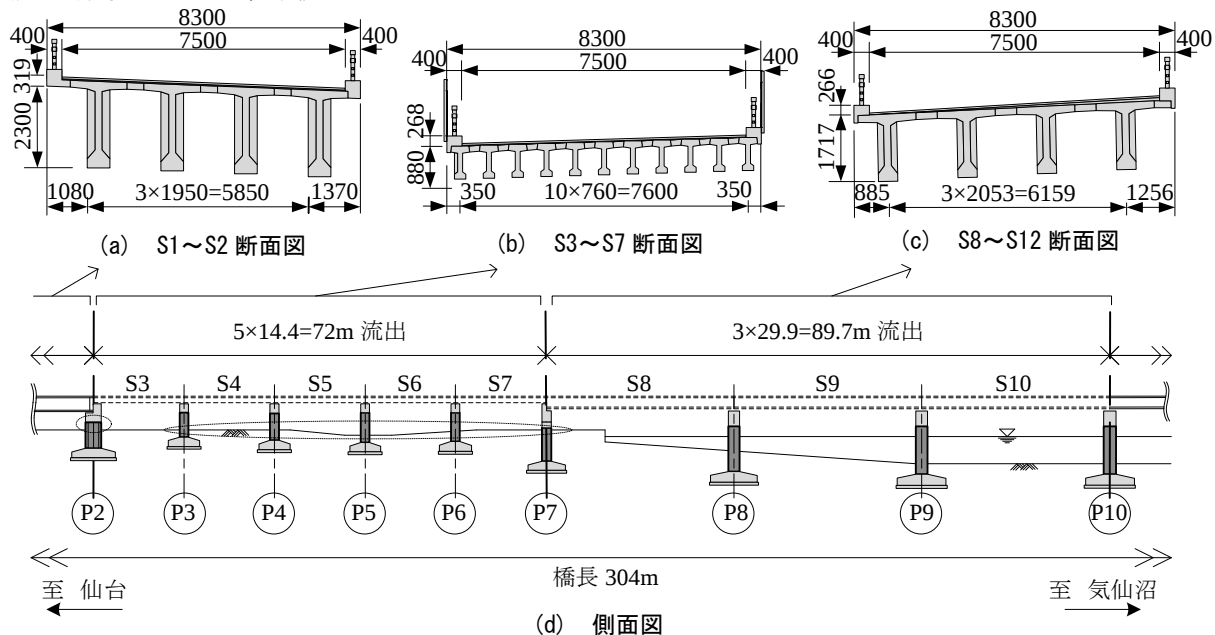


図-2 歌津大橋概況図

*1 九州工業大学大学院 建設社会工学専攻 (学生会員)

*2 九州工業大学 工学部建設社会工学科教授 (正会員)

*3 九州工業大学 工学部建設社会工学科

*4 大日本コンサルタント(株) 技術統括部 (正会員)

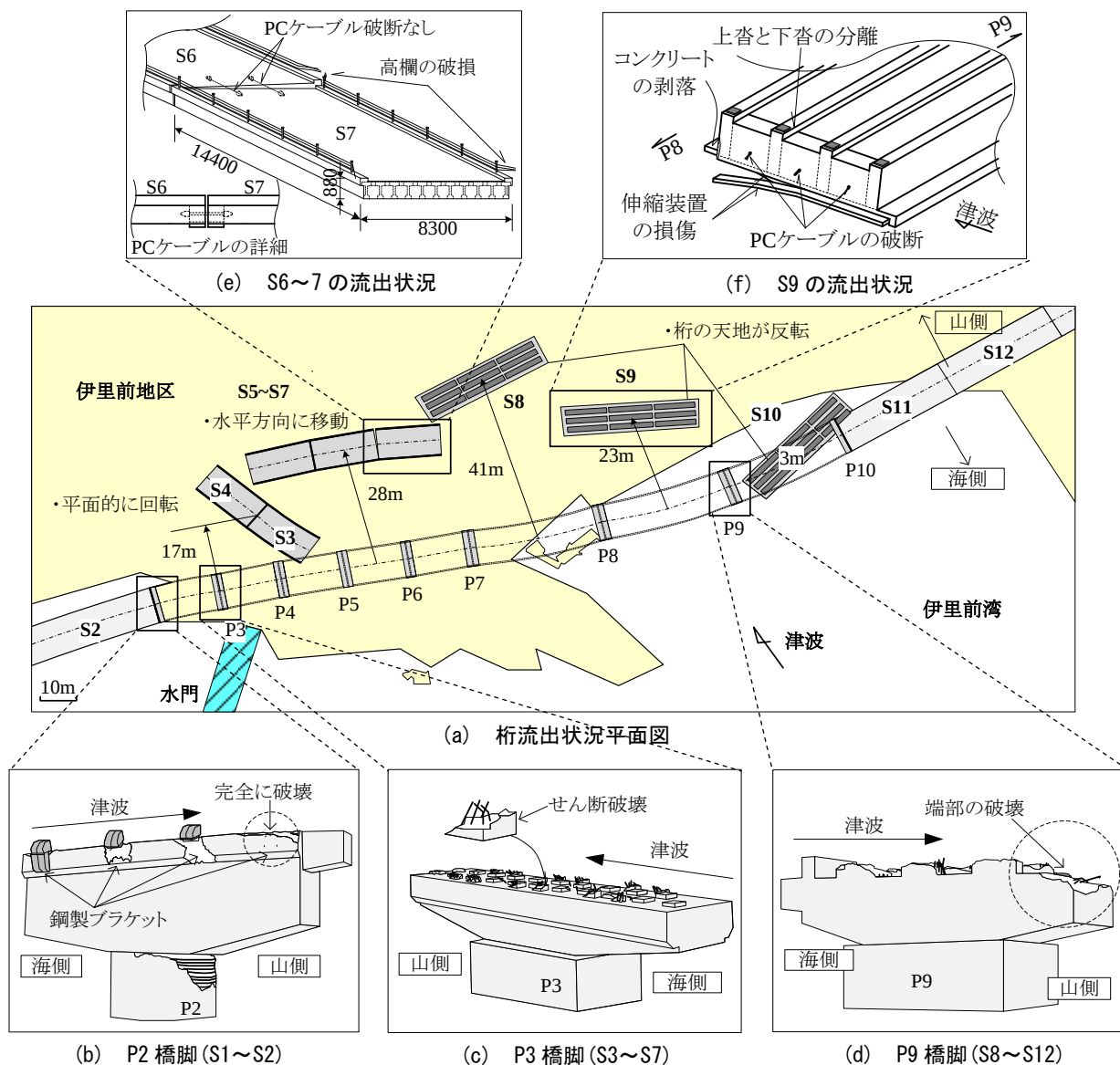


図-3 桁流出状況と橋脚被害状況図

して歌津大橋の各桁に作用した津波の流速と流向を推定した。さらに、解析結果に基づき、各桁の桁抵抗力と津波作用力の比 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. 歌津大橋の流出被害状況

図-2 に歌津大橋の概況図、図-3 に歌津大橋の桁流出状況と橋脚の被害状況図を示す。

歌津大橋は仙台側を起点として、S1～2 が PC 単純ポステン T 桁 (図-2(a))、S3～7 が PC 単純プレテン T 桁 (図-2(b))、S8～12 が PC 単純ポステン T 桁 (図-2(c)) で構成された橋長 304m の 12 径間のコンクリート道路橋である。本橋の橋脚は、RC 巻立てによる耐震補強が施され、S1 と S2、S3～7、S8～12 のそれぞれの桁間に落橋防止構造としての PC ケーブルが、各下部構造の橋座部に変位制限構造としての鋼製ブラケット、またはコンクリートブロックが設置されている。図-3 (a) に示すよ

うに、上部構造は、S1～2 の 2 連と S11～12 の 2 連は流出することなく残存した状況であるが、S3～10 の合計 8 連が津波の被害を受けて陸側に流出した。流出状況は、隣接する桁同士が分離しているものと一体で流出しているものと 2 種類がある。同図 (e) に示すように、S3～4 と S5～7 はそれぞれ桁が連結したまま流出している一方で、同図 (f) に示すように、S8～10 は桁間の PC ケーブルが破断して桁同士が分離しており、桁は天地が反転した状況で流出していることが確認できる。

橋脚の被害に関しては、図-3 (b)～(d) に示すように、P2 橋脚は、鋼製ブラケットの変形が確認され、特に山側の鋼製ブラケットは完全に脱落している。P3 橋脚では、橋座面の変位制限構造用のコンクリートブロックがせん断破壊をしていることが確認できる。また、P9 橋脚では、コンクリートブロックの断面欠損に加え、梁端部が破壊している。これらの損傷は、一様に津波の作用方向を向いているため、上部構造の流出に伴って発生したと考え

られる。

3. 津波伝播適上解析

歌津大橋に作用した津波の特性を推定するため、津波伝播適上解析を実施し、流出メカニズムの評価を行った。なお、波源となる断層モデルは、藤井・佐竹モデル Ver.4.6 を使用し²⁾、陸域の最小の地形データは、震災前と震災後で大きな地形改変が無いことを確認した上で国土地理院のレーザー計測による震災後の 5m、10m メッシュを用いて、地形の細部をモデル化した。

3.1 解析手法

図-4(a)に、津波伝播適上解析に用いた解析領域 G'、H'を示す。解析領域 A'~H'の範囲は、同図に示す最小領域 H'のメッシュサイズを 1 辺あたり 2m とし、伊里前湾の沖合を含む領域 G'では、メッシュサイズを 1 辺あたり 6m と領域 A'に向かいメッシュサイズを 3 の倍数で大きくし、各領域を結合した。

図-4(b)に、数値解析の着目点を示す。上部構造の流出・未流出、桁の種類ごとに着目点を分類しており、着目点 A、B、C、D はそれぞれ、S1~2 の残存したポステン T 桁、S3~7 の流出したプレテン T 桁、S8~10 の流出したポステン T 桁、S11~12 の残存したポステン T 桁の範囲を表している。

着目点 A~D は面で評価することとし、幅員 10m×桁長 30m を標準に 1 桁を対象とした面領域の中に 10m 間隔で設定した抽出点の結果を用いた。つまり、1 つの面の中に 8 個の抽出点を設定し、これらを平均した流速の値を津波特性として評価した。

3.2 数値解析結果

図-5 に、着目点 B、C、D における浸水高と流速の結果を示す。津波が上部構造に作用し始めてから、浸水高が最大となる時点までの深さ方向の流速分布を表している。津波の水位が、桁に作用を開始した時点から路面が浸水する時点（地覆から上方へ 400mm）までを区間[1]、路面が浸水した時点から浸水高が最大となる時点までを区間[2]と定義した。同図に示す流速は、区間[1]、[2]のそれぞれの最大流速を示している。

浸水高は、着目点 B、C、D でほぼ同様の傾向を示している。地震発生から 38 分後に上部構造の桁下に津波の水位が達し、43 分後に浸水高は最大の 19[m] 程度となる。

流速は、着目点 B では、区間[1]、[2]でそれぞれ 4.13[m/s]、4.48[m/s]、着目点 C では、区間[1]、[2]でそれぞれ 3.47[m/s]、3.66[m/s]であるのに対して、着目点 D では、それぞれ 1.09[m/s]、1.29[m/s]となる。上部構造が流出した着目点 B と C は、上部構造が流出していない着目点 D に比べて流速が大きいことが確認できる。

図-6に、歌津大橋に作用する津波の流向を示す。同図

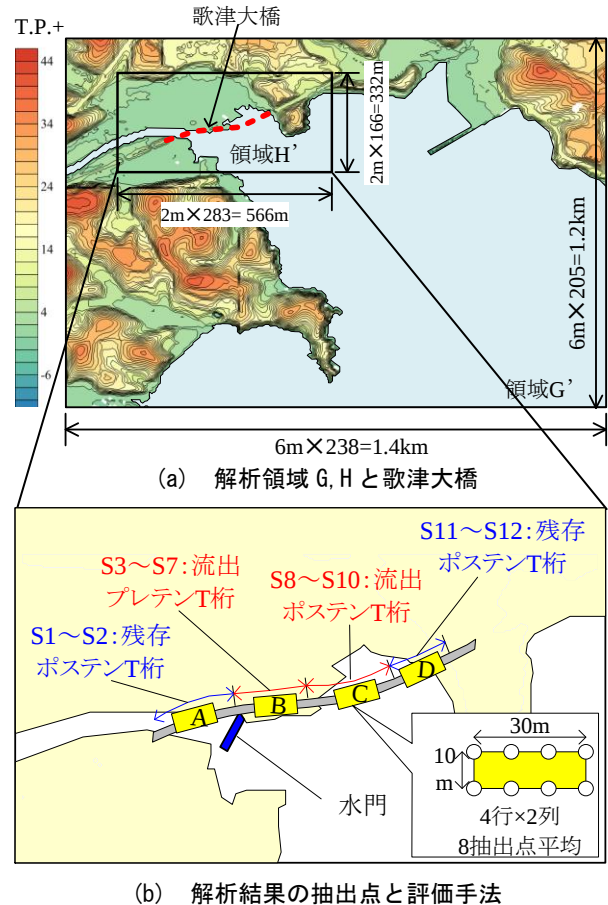


図-4 解析モデルと結果の評価手法

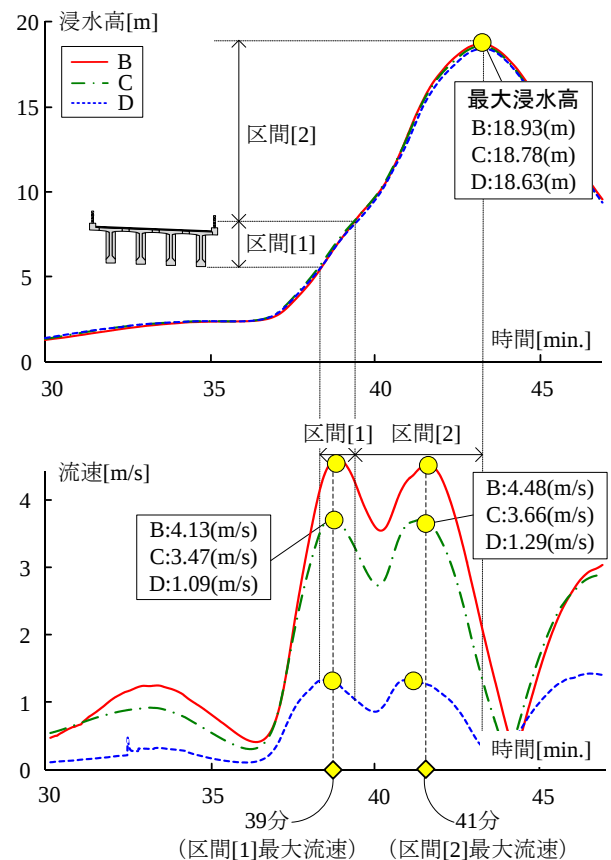


図-5 歌津大橋における津波の浸水高と流速

(a), (b)はそれぞれ区間[1], [2]の最大流速となる時点の流向である。同図(a)より、着目点 B, C, D における津波の遡上方向と桁の角度は、それぞれ 43.46° , 66.14° , 88.63° であり、着目点 B から D に向かって津波の遡上方向は桁に直角向きに変化することがわかる。同様に、同図(b)から着目点 B, C, D の角度は、それぞれ 44.36° , 65.23° , 90.63° であり、区間[1]と[2]で若干の角度変化が生じているものの、概ね同様の角度で、かつ同様の傾向である。

区間[1], [2]の双方で、津波の遡上方向は北西を向いているものの、内陸側の流速は小さくなる一方で、伊里前川では河川方向に遡上し、流速ベクトルは比較的大きい様子も確認できる。これは、図-4 (a) に示すように、歌津地区が北側に斜面を有することで流れが阻害されるのに対し、伊里前川上流に開けた地形であるため、河川上流に津波の進行向きが変化するとともに、より山側の着目点 D の流速が小さくなったと考えられる。

図-7 に、歌津大橋に津波が作用している状況写真を示す。同図は、歌津大橋の桁が浸水を始めた時点の映像であり、図-5 で示した区間[1]に相当する。図-7 の(I)に示すように、第9 径間位置に沖合から船舶が漂流してくるが、この船舶が漂流してくる速さは $4.39[m/s]$ である。また、船舶が漂流している方向を同図に矢印で示している。津波の作用方向は、桁に対して 60° 程度の角度をもつことが映像資料から確認できた。よって、流速と流向は、数値解析結果と同様の傾向を示していると推察され、次章で述べる流出メカニズムの評価では、流向も評価に加える。

4. 流出メカニズムの評価

前章までの数値解析結果に基づき、本章では、桁抵抗力と津波作用力の比である β 値を用いて、流出メカニズムの推定を試みた。

4.1 β 値の算出

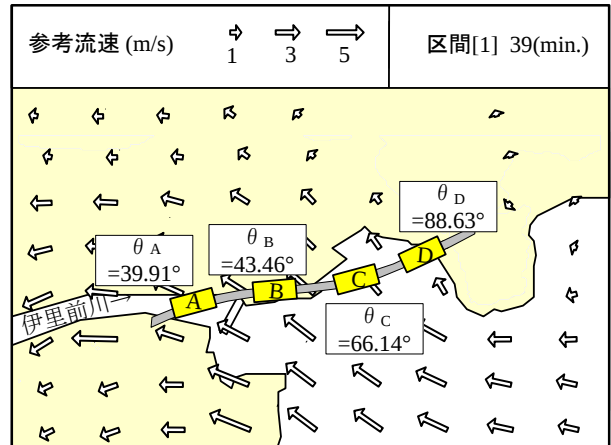
本節では、桁抵抗力と津波作用力の比である β 値を算出することで損傷分析を行う。

まず、津波作用力は、モリソン式を参考に下記の式(1)を用い算出した。

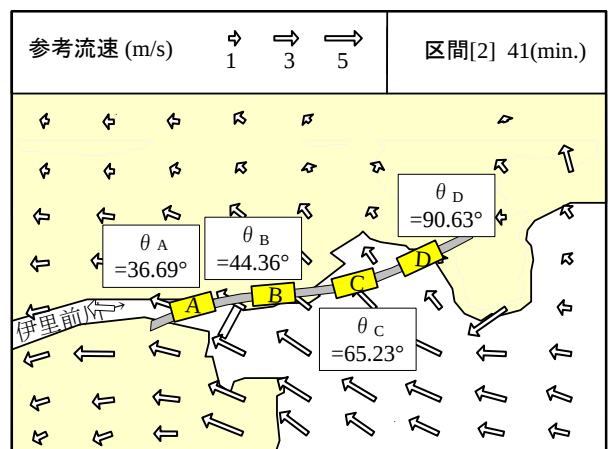
$$F = \frac{1}{2} \rho_w C_d v^2 A_h \quad (1)$$

ここに、 F は津波作用力[kN]、 ρ_w は水の密度[1030kg/m^3]、 C_d は抗力係数（道路橋示方書により、幅 B と高さ D の比より決定）、 v は波の流速[m/s]、 A_h は上部構造の有効鉛直投影面積[m²]

次に、桁抵抗力の算出に際し、分析の対象とする上部構造と水位の関係を、図-8 に示した。



(a) 桁に津波が作用している時点



(b) 桁が完全に浸水し更に水位が上昇している時点

図-6 歌津大橋における流向と流速

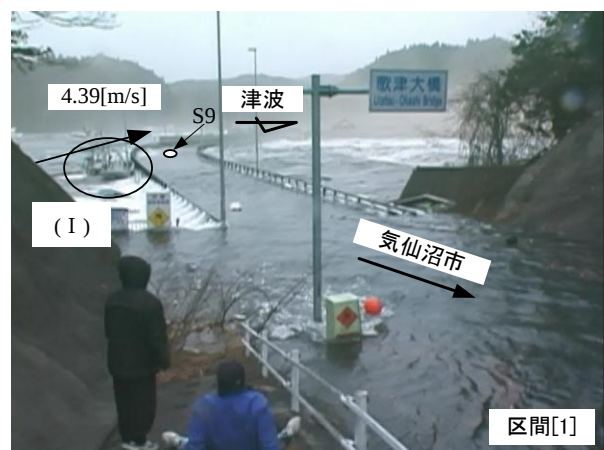


図-7 区間[1]で桁に作用する津波の様子と流速

同図(a), (b), (c)はそれぞれ、上部構造が完全に浸水する直前の状態を Case1 として、上部構造が完全に浸水した状態で上部構造体積に相当する浮力のみを考慮した Case2、上部構造が完全に浸水し、上部構造体積に加え桁間の空気層の浮力を考慮した Case3 を示している。

Case1, 2, 3 の桁抵抗力はそれぞれ式(2), (3), (4)で評価した。特に式(4) は文献³⁾より、水路実験において橋梁

模型に作用させた津波が越流した際に、最も下流側の桁間空間には空気層が残留し、下流側から2つ目、3つ目の桁間には若干の水が入り込む挙動となる。このような状態を、桁間の1/2の空間に空気層が残留する状態に等しいと仮定し、その体積に相当する浮力を考慮した。

$$S = \mu W \quad (2)$$

$$S = \mu(W - U_1) \quad (3)$$

$$S = \mu(W - U_1 - \sum U_{2i}) \quad (4)$$

ここに、 μ は摩擦係数 (Rabbat らの実験結果⁴⁾より、コンクリートと鋼、またはコンクリートとの間の摩擦係数を0.6と仮定)、 W は上部工重量[kN]

また、 U_1 は上部構造の浮力、 U_{2i} は桁間空間1つあたりの浮力であり式(5)、(6)を用いて総和で評価する。

$$U_1 = \rho g V_1 \quad (5)$$

$$U_2 = \rho g V_2 \quad (6)$$

ここに、 ρ は水の密度[1030kg/m³]、 g は重力加速度[9.8m/s²]、 V_1 は上部構造の体積[m³]、 V_2 は桁間空間1つの体積[m³]

津波作用力と桁抵抗力の関係は、上部構造の抵抗力 S を津波作用力 F で除す式(7)に基づいて、桁抵抗力津波作用力比 β を求めた。

$$\beta = \frac{S}{F} \quad (7)$$

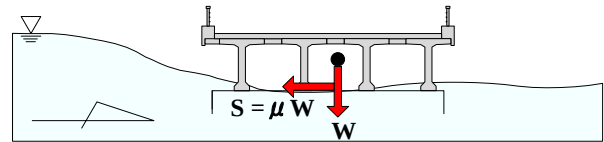
4.2 流出メカニズムの評価

図-9 に、着目点 B、C、D を3.1節で述べたようにそれぞれ S3~7、S8~10、S11~12 と読み替え、各桁に作用する浸水高方向の流速分布を示した。同図は区間[1]、[2]での最大流速を示しており、3.2節で示した桁に対する津波の作用角度で補正を行った橋軸直角作用成分の流速を a 、補正前の流速を b として示している。

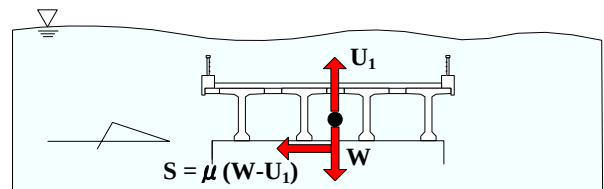
S3~7 の区間[1]、[2]は、それぞれ、桁に対する作用角度は 43.46° 、 44.36° であり、補正後の流速は区間[1]で2.84[m/s]、区間[2]で3.13[m/s]である。S8~10 では、区間[1]、区間[2]のそれぞれの補正後の流速は、3.17[m/s]、3.31[m/s]である。同様に、S11~12 では、区間[1]、[2]において桁に対してほぼ直角に津波が作用するため、補正後の流速は補正前とほぼ変わらず、区間[1]、[2]でそれぞれ1.08[m/s]、1.29[m/s]であった。

図-10、11、12 にそれぞれ S3~7、S8~10、S11~12 について、流向の補正を行った流速を用いた津波作用力、桁抵抗力、ならびに β 値を示した。

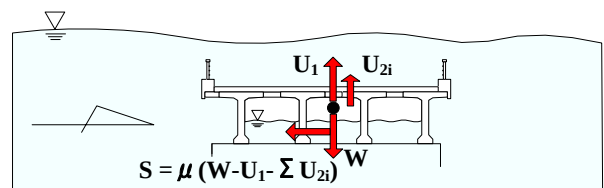
図-10 を代表して説明するが、同図は S3~7 に対応し、



(a) 桁と水位の関係(Case1)



(b) 桁と水位の関係(Case2)



(c) 桁と水位の関係(Case3)

図-8 上部構造の浸水状況図

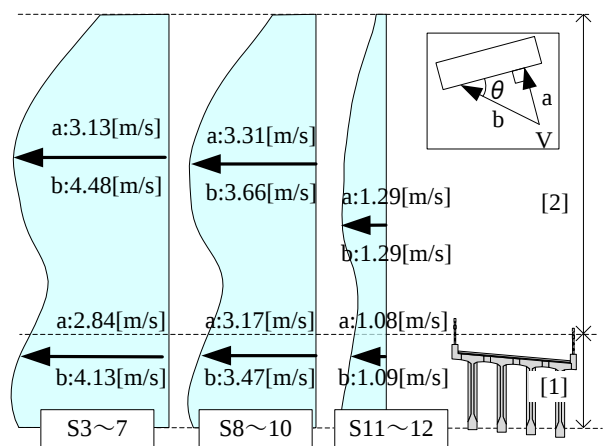


図-9 上部構造に作用する浸水高に応じた流速分布

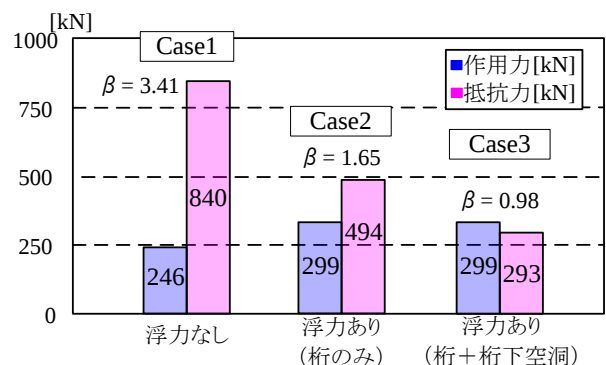


図-10 S3~7 の津波作用力と桁抵抗力の関係

左から順に Case1, Case2, Case3 の算出結果を示している。Case1 は前述の通り区間 [1]に対応しており、津波作用力 F と桁抵抗力 S はそれぞれ 246[kN], 840[kN]となる。よって、Case1 の β は 3.41 である。Case2 は区間[2]に対応しており上部構造体積に相当する浮力を考慮している。津波作用力 F と桁抵抗力 S はそれぞれ 299[kN], 494[kN], β は 1.65 である。Case3 は区間[2]に対応し上部構造、ならびに桁間空間の 1/2 体積に相当する浮力を考慮している。津波作用力 F と桁抵抗力 S は 299[kN], 293[kN]である。よって、 β は 0.98 である。

図-11 は S8~10 を示す。Case1 の津波作用力 F と桁抵抗力 S , β は 690[kN], 2040[kN], 2.96 (以降、同様の順番で示す), Case2 は 752[kN], 1199[kN], 1.59, Case3 は 752[kN], 427[kN], 0.57 と算出される。

図-12 は S11~12 を示し、Case1 は 80[kN], 2040[kN], 25.48, Case2 は 114[kN], 1199[kN], 10.50, Case3 は 114[kN], 427[kN], 3.74 と算出される。

以上より、S3~7 と S8~10 における Case3 の β 値が 1.0 未満となる結果と、2 章で述べた着目点 B, C に相当する桁が流出している状況と整合する結果であることがわかる。一方、S11~12 では、いずれの Case も β 値が 1.0 を上回り、上部構造が未流出という状況と整合する。

このことから、上部構造の流出に対してより危険な状態は完全に桁が浸水し、桁と桁間空間の残留空気に置換される体積を浮力として評価した状態であり、かつ、被害状況の説明性も高いと言える。浮力の作用を受けて抵抗力が減少し、津波による水平作用力が上回ることによって上部構造が抵抗力を失い、その後継続した津波作用は最大流速から減少した流速であったため移動距離が小さかったと推察される。特に、S8~10 の桁間空間の浮力を考慮した場合の抵抗力は、桁のみの浮力を考慮した場合のその 65%程度減少しており、S3~7 の減少率 40%に比較して浮力の影響が大きかったと考えられる。

5. まとめ

歌津大橋を対象橋梁とし、津波遡上伝播解析を実施し、津波特性を把握した上で流出メカニズムを推定した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 歌津大橋の流出状況は、全 12 径間中 8 径間 (S3~10) の桁が流出し、S3~4 は平面的に回転、S5~7 水平方向、S8~10 はそれぞれが橋軸回りに回転し桁の天地が反転しており、最大で 41m 上流側へ移動している。
- (2) 津波遡上伝播解析結果より、流速は S3~7 に該当する着目点 B と S8~10 に該当する着目点 C でそれぞれ 4.0[m/s]程度、S11~12 に該当する着目点 D で 1.0[m/s]程度となり、津波の桁に対する作用方向は着目点 B

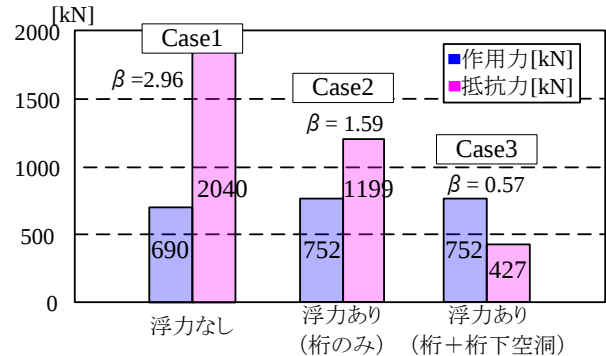


図-11 S8~10 の津波作用力と桁抵抗力の関係

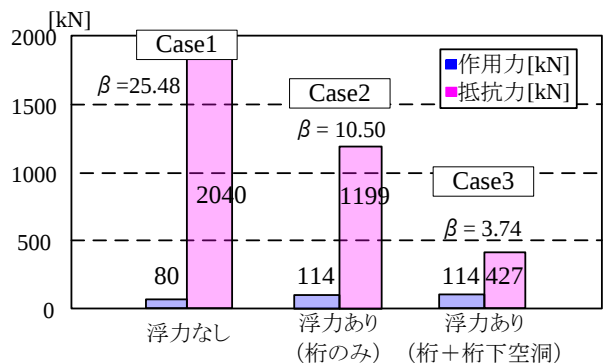


図-12 S11~12 の津波作用力と桁抵抗力の関係

が最も鋭角で、D に向かってほぼ直角に変化する。

- (3) 解析結果に基づいた 3 つの桁の β 値は桁間の浮力を評価することで流出状況と良く整合し、流出部の桁は完全に浸水して浮力が発生した状態で作用力が抵抗力を上回ることによって流出し、その後に作用した流速が最大流速 4.0[m/s]よりも遅かったため、桁の移動距離が小さかったと推察される。

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、
<http://www.jma.go.jp/jma/press/index.html?t=1&y=23>
- 2) 藤井・佐竹モデルVer.4.6 (津波波形インバージョンによる津波波源推定) :
http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami_ja.html
- 3) 張広鋒, 中尾尚史, 星隈順一：津波の影響を受ける橋の挙動に及ぼす上部構造の構造特性の影響に関する水路実験, 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, pp97-102, 2012.7.
- 4) Rabbat, B.G. and Russel, H.G. : *Friction coefficient of steel on concrete or grout*, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.111, No.3, pp.505-515, 1985.