

映像解析による歌津大橋の 流出メカニズムの推定

中野亜美¹・幸左賢二²・佐々木達生³・付李⁴

¹非会員 九州工業大学 工学部 建設社会工学科（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）

²正会員 Ph.D. 九州工業大学 工学部 建設社会工学科（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）

³正会員 大日本コンサルタント（株）技術統括部（〒170-0003 東京都豊島区駒込3-23-1）

⁴学生会員 九州工業大学大学院 建設社会工学専攻（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）

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付近を震源とし東北地方太平洋沖地震が発生した。この地震は、M9.0という日本の観測史上最大の規模を記録し、震源域は岩手県沖から茨城県沖までの広範囲に及んだ。この地震による津波により、10m以上¹⁾の津波高が津波観測点付近の痕跡等から推定されており、東北地方の太平洋沿岸部を中心に甚大な被害をもたらした。地震発生後の現地調査では、多くの橋梁が流出していることが確認できる。

今回対象とする橋梁は、図-1に示す宮城県南三陸町の歌津大橋である。歌津大橋は東北地方太平洋沖地震により発生した津波により、上部構造の流出被害が生じている。映像記録から水位の上昇や流速の変化を解析することにより津波特性の推定を試みた。本論文では、歌津大橋を対象に、流出メカニズムの解明を目的として行った映像解析の結果について示している。

2. 歌津大橋の流出被害状況

歌津大橋は、仙台側より第1～2径間はPC単純ポステンT桁、第3～7径間はPC単純プレテンT桁（図-2(a)）、第8～12径間はPC単純ポステンT桁（図-2(b)）からなる橋長304mの12径間のコンクリート道路橋である。今回の津波による本橋の被害状況の概要を図-3に示す。本橋の橋脚は、RC巻立てによ

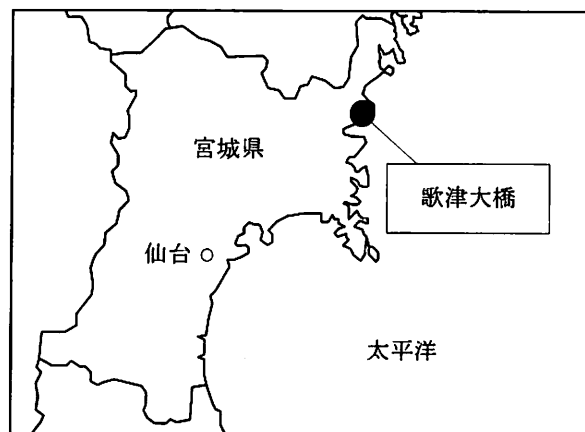


図-1 対象橋梁位置

る耐震補強を施している。上部構造では、第1～2径間の2連と第11～12径間の2連が流出することなく残存したままであったが、第3～10径間の合計8連が津波により陸側に流出した。第3径間～第4径間と第5径間～第7径間は桁が連なったまま全体的に流出しており、かつ、第3径間～第4径間は橋軸鉛直回りに回転し流出していることが確認できる。第8径間～第10径間は連なることなく流出しており、かつ、橋軸回りに回転し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橋脚では陸側の鋼製ブラケットが完全に破壊され流出しており、P3橋脚では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、梁端部が破損していることも確認できる。

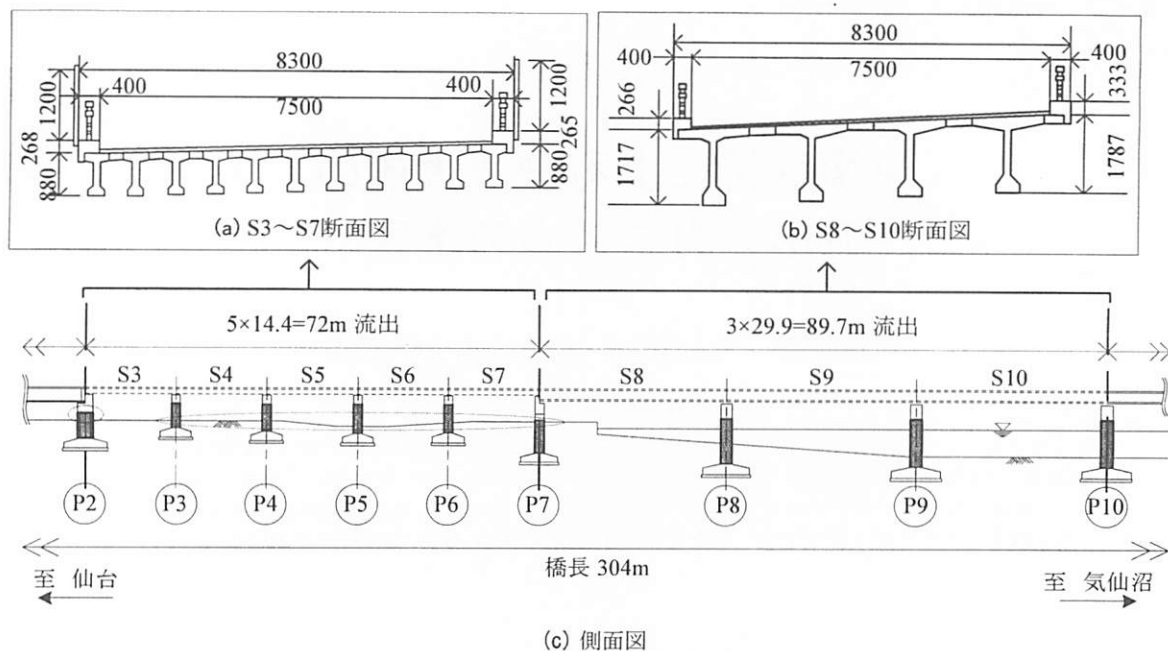


図-2 歌津大橋概況図

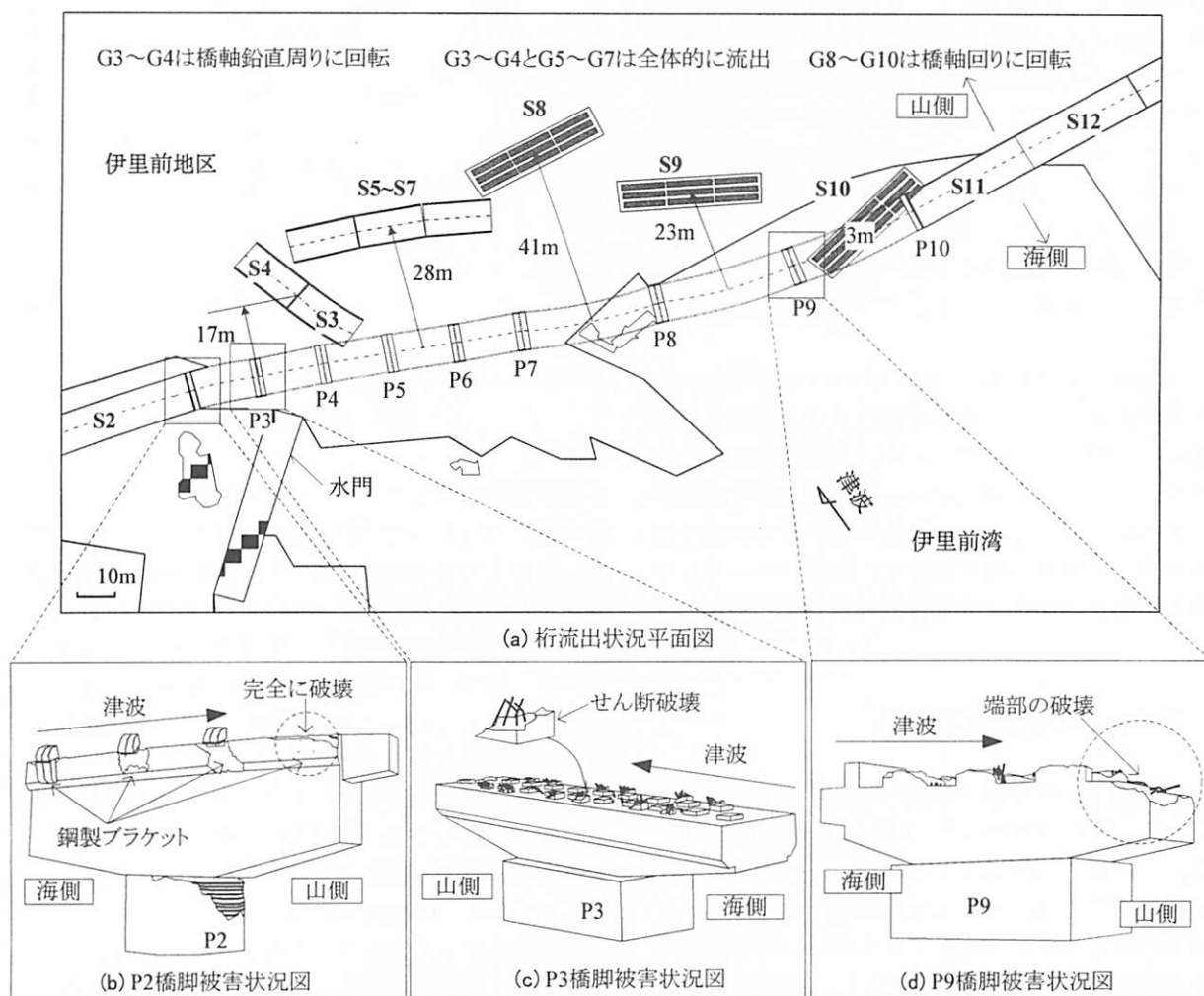


図-3 桁流出状況と橋脚被害状況図

3. 映像解析による津波特性の推定

(1) 分析に用いた映像記録

今回用いた映像記録は、南三陸町伊里前地区に在住する撮影者より入手した映像である。この映像記録は、およそ地震発生20分後から撮影が始まっており、津波到達から津波が引く様子が撮影されている。この映像記録より、流速と水位を計測した。

図-4に流速測定を行った対象物を示す。また、それぞれの対象物の移動方向と移動距離を図-5に示す。対象とした漂流物は、図-4に示す①～⑥の船舶や流木、箱等である。映像より距離測定点の指標とする2点を抽出し、映像上での距離とGoogle Earthの距離測定ツールより実際の距離を計測し、それらの比率を求めた。次に、測定開始時と終了時の映像を照らし合わせ映像上での移動距離を求め、先に求めた比率を利用して実際の移動距離を求めた。

今回抽出した2点は、歌津大橋の高欄と住宅前の電信柱であり、映像上での距離は4[cm]、実際の距離は21.53[m]である。従って、映像上での縮尺は1/538である。図-4に示す②の船舶は、計測開始から終了までの間に映像上では0.6[cm]移動した。よって、実際の移動距離は3.23[m]である。この移動距離に要した時間をストップウォッチで計測し、式(1)を使用し、漂流物のおおよその速度を算出した。

$$v = \frac{l}{t} \quad (1)$$

対象物それぞれの流速を求めた結果を表-1に示す。ここで、 v は波の流速[m/s]、 l は2点間の距離[m]、 t は2点間の漂流時間[s]である。No.1やNo.2の船舶は流速が2.0[m/s]前後であるのに対し、その他の漂流物は船舶より大きい流速が得られた。計測した流速のばらつきが大きいため、これらの平均値を取ることとし、この時点での流速とした。ここでの平均流速は3.79[m/s]である。なお、図-4の住宅の手前（沖側）に白波が立っていることが確認できる。これは、図-6に示す海岸堤防を越流したことによって生じた跳水の白波である。

次に水位測定について説明する。図-6に示すように、映像記録から読み取れる静水面（T.P.+0.500m）を測定開始高さとして水位の上昇を計測する。水位の計測には映像記録に映っている構造物の高さを利用した。まず、図-6の住宅の高さは2.300[m]であり、この住宅が浸水するまでの時間は118[s]である。よって、水位は118[s]で3.85[m]上昇した。次に、歌津大橋の路面の高さは静水面から

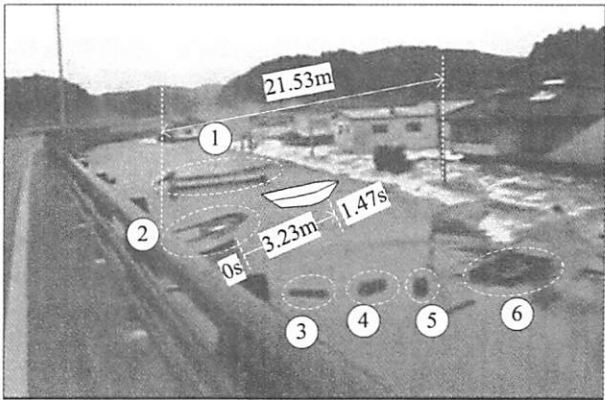


図-4 流速測定対象物

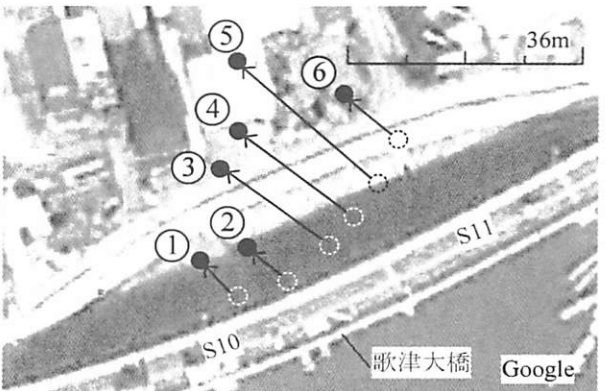


図-5 流速測定対象物の様子

表-1 流速測定結果

No.	対象物	距離 [m]	時間 [s]	流速 [m/s]
1	船舶	2.79	1.47	1.90
2	船舶	3.23	1.47	2.20
3	流木	5.38	1.47	3.66
4	黒い物体(大)	6.46	1.47	4.39
5	黒い物体(小)	9.15	1.47	6.22
6	箱	6.46	1.47	4.39
平均流速				3.79

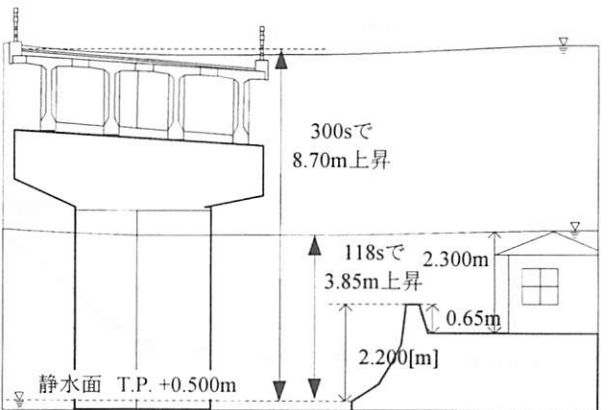


図-6 浸水高測定図

8.70[m]であり、歌津大橋が浸水するまでの時間は300[s]である．よって、水位は300[s]で8.70[m]上昇した．同様に、路面から上方の水位は歌津大橋の標識等を対象として水位の計測を行っている．

これらの水位の測定地点は、図-7に示す水位測定点Aである．なお、この他に水位測定点Bでも水位の計測を行っている．水位測定点Bの選定理由としては、映像記録より、B地点側からA地点側に向かって路面上を流れる様子が確認でき、B地点側の水位上昇量がA地点側よりも大きくなっていることを確認するためである．

(2) 時系列における水位と流速

前述した流速と水位、および時刻関係を図-9に示す．実線で示すグラフはA地点、破線で示すグラフはB地点の水位上昇を表している．横軸の時間は水位測定開始からの時間である．縦軸は水位上昇の様子を浸水高で表現した．なお、図-8に、「東北地方太平洋沖地震合同調査グループ²⁾」で定義されている浸水高の定義を示す．

まず、水位上昇について着目する．A地点では、水位測定開始から6分22秒のとき、浸水高は3.45[m]であった．測定開始4分24秒後の浸水高は-0.4[m]であったため、118[s]で3.85[m]上昇した．同様に計測を行った結果を表-2に示す．A地点における水位上昇速度は、445[s]で水位が12.1[m]上昇したことから1.62[m/min]、B地点における水位上昇速度は、



図-7 水位測定点

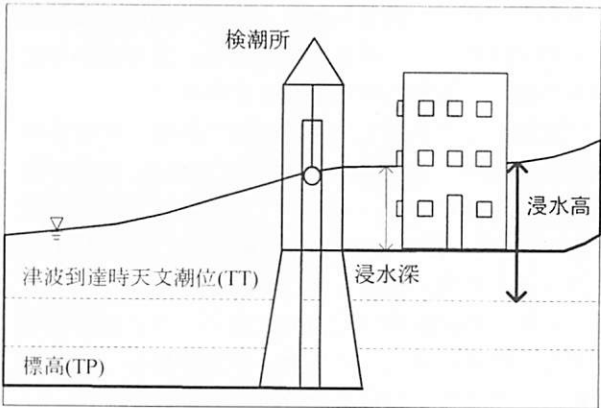


図-8 浸水高の定義

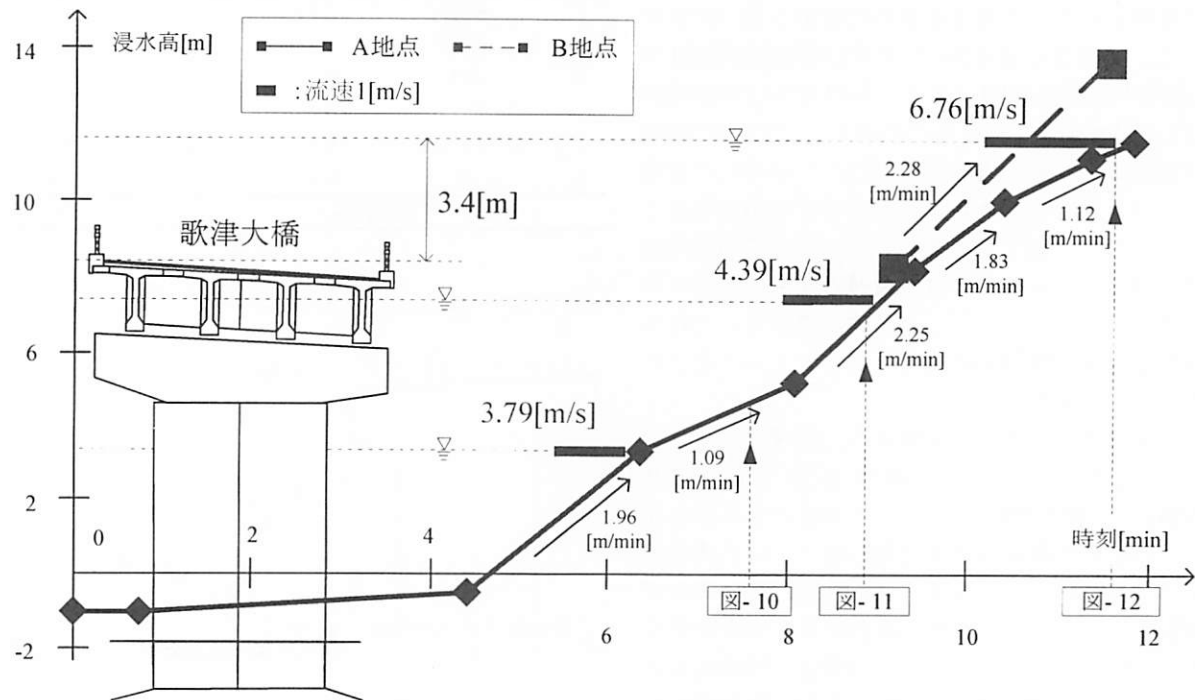


図-9 水位流速時刻歴図

表-2 水位上昇結果

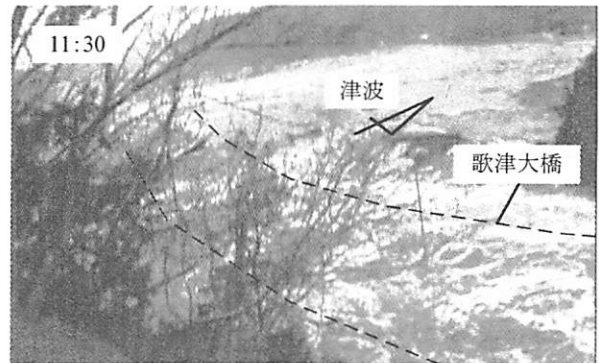
A地点		B地点	
時間	浸水高[m]	時間	浸水高[m]
4:24	-0.4	9:15	8.3
6:22	3.45	11:36	13.7
8:04	5.3		
9:24	8.3		
10:23	10.1		
11:21	11.3		
11:49	11.7		



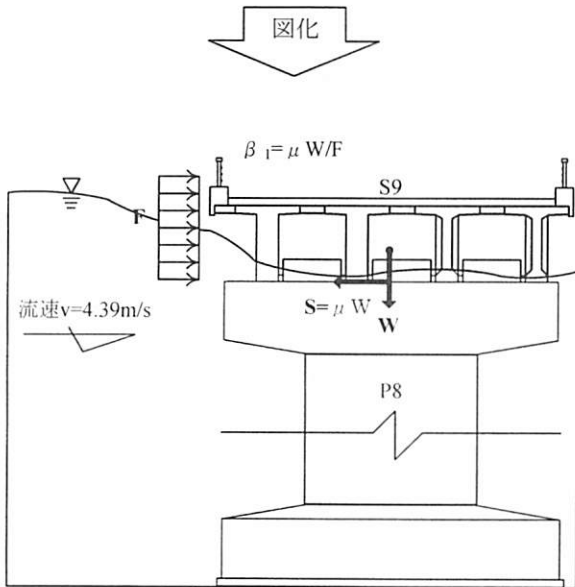
図-10 浸水状況図-1



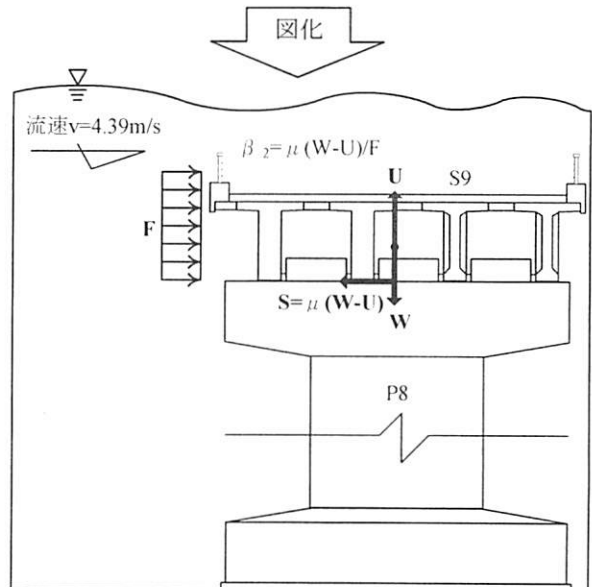
(a) 桁に作用する津波



(a) 桁に作用する津波



(b) 桁と水位の関係 (case1)



(b) 桁と水位の関係 (case2)

141[s]で水位が5.4[m]上昇したことから2.28[m/min]である。これらの水位上昇速度から確認できるように、水位は非常にゆっくりとした速度で徐々に上昇している。

次に、流速と水位上昇の関係について着目する。

流速は3つの浸水高において計測した。図-9にはそれぞれの浸水高ごとに流速の大きさを横棒の長さで表している。なお、図-9に示している図番号（図-10～12）は、本頁から示す図番号と一致させたものであり、図10～12はそれぞれの時刻での桁に作用す

る津波の様子を示している。

まず、水位測定開始から6分22秒後のとき、流速は3.79[m/s]であった。図-4の写真から確認できるように、このときの水位は歌津大橋の桁には達していない。図-10に示す時刻では、B地点側から流れてきた津波が、歌津大橋の終点側に到達した後、路面から溢れ沖側と陸側に流れている様子が図-10より確認できる。図-11に示す時刻では、流速が4.39[m/s]であった。図-11(a)では、路面には水が流れ込んでいるが、これはB地点側から流れ込んできたものであり、桁と水位の関係は図-11(b)のようになっている。続いて、水位測定開始から11分46秒後のとき、流速は6.76[m/s]であった。図-12(a)では、歌津大橋が完全に浸水し、波が白くなっている。映像記録からは、終点側から歌津大橋へ向かう流れの勢いが凄まじいことが伝わってくる。このときの桁と水位の関係は図-12(b)のようになっている。なお、図-13では、船舶が流速6.76[m/s]で陸側に流れて行っており、歌津大橋より陸側で白波が立っていることが確認できる。

以上の映像解析の結果より、水位の上昇とともに流速は増加し、桁が浸水し始めた時点よりも更に水位が上昇して完全に浸水した時点の方が、流速が大きくなったことが確認された。流速が大きい時点では水深も大きいため段波が発生する要因はなく、桁に作用する津波は定常流に近い状態であったことが、図-10(a)や図-11(a)からも確認できる。それを裏付けるように、伊里前地区に襲来した津波は碎波段波ではないことが映像でも確認でき、更に、撮影者本人へのヒアリングにおいても碎波段波ではなかったという証言を得ている。

4. 流出メカニズム

前章までの被害状況と映像解析結果に基づき、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る。

(1) β 値に基づいた流出メカニズム

この節では桁抵抗力と津波作用力の比である β を算出することにより、損傷分析を行う。分析対象とする桁と水位の関係は、図-11と図-12に示すcase1とcase2であり、それぞれの β 値を β_1 、 β_2 とする。

津波作用力は、これまでの調査³⁾を参考として、式(2)に示す簡便式を用いる。

$$F = \frac{1}{2} \rho C_d v^2 A \quad (2)$$

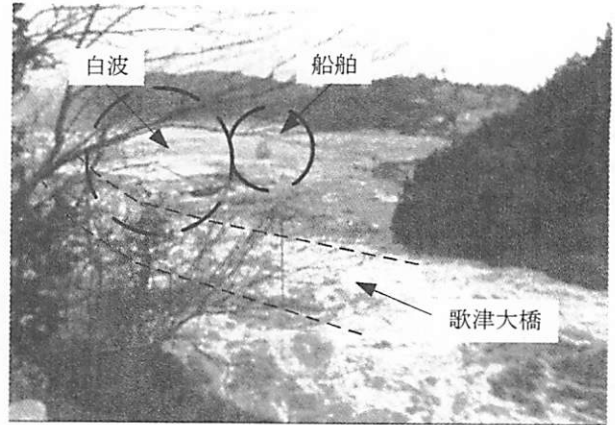


図-13 浸水状況図-4

ここで、 F は波の水平波力[kN]、 ρ は水の密度[1030kg/m³]、 C_d は抗力係数(道路橋示方書⁴⁾により幅 B と高さ D の比より決定)、 v は波の速度[m/s]、 A は上部構造の有効鉛直側面投影面積[m²]である。

桁抵抗力は、上部構造が水没していないcase1は浮力を無視して式(3)を用い、水没しているcase2は浮力を考慮して式(4)を用いる。

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

$$S = \mu(W - U) \quad (4)$$

ここで、 μ は摩擦係数(Rabbatらの実験結果⁵⁾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]である。また、 U は浮力であり、式(5)を用いる。

$$U = \rho g V \quad (5)$$

ここで、 ρ は水の密度[1030kg/m³]、 g は重力加速度[9.8m/s²]、 V は上部構造の体積[m³]である。

水平作用力と水平抵抗力の関係は、上部構造の抵抗力 S を津波による水平波力 F で除す式(6)に基づいて、桁抵抗力津波作用力比 β を求め、桁移動発生の有無を判断する。ここで、 β が大きい場合は、上部構造の抵抗力が大きく、移動しにくい橋梁であることを示す。

$$\beta = \frac{S}{F} \quad (6)$$

まず、case1について検討する。このときの桁と水位の関係は、歌津大橋の路面は浸水しておらず、沖側の桁端部に津波が作用し始めしづきが立っている状態である。ここで算出する β_1 は式(3)を式(2)で除したものである。津波作用力 F は、映像解析より求

めた流速4.39[m/s]を用いると、1360.2[kN]である。映像記録より、水位は歌津大橋の桁にほぼ水平に上昇していることが確認できるため、ここでは静水圧は考慮していない。上部工重量は3600[kN]であるため、桁抵抗力 S は2160[kN]である。よって、case1における桁抵抗力・津波作用力比 β_1 は1.59である。

次に、case2について検討する。このときの桁と水位の関係は、歌津大橋が全て浸水し浮力が発生している状態である。ここで算出する β_2 は式(4)を式(2)で除したものである。映像解析の結果より、case2の状態での流速は6.76[m/s]であるが、水位が路面より3.4[m]上方となった時点で突然移動を始めた船舶の流速であり、桁流出時に作用した流速であることを立証できる証拠が不明である。そこで、case2での状態で $\beta=1.0$ と仮定したときの流速を算出する。このときの流速は4.24[m/s]であり、case1で用いた流速である4.39[m/s]とあまり変化はない。従って、 β_2 を算出する際に用いる流速も、case1と同値である4.39[m/s]を用いることとする。津波作用力 F は、流速4.39[m/s]を用いると、case1と同様、1360.2[kN]である。このときの浮力は1482.3[kN]であるので、桁抵抗力 S は1270.6[kN]である。よって、case2における桁抵抗力・津波作用力比 β_2 は0.93である。

図-14にcase1とcase2の桁抵抗力・津波作用力比の関係を示す。case1とcase2を比較すると、双方で同じ流速を用いているため津波作用力は同値となっているが、桁抵抗力はcase2の方が小さくなっている。これは、case1では浮力を考慮しておらず、case2では浮力を考慮していることが原因である。この結果より、case2の状態の方が桁が移動しやすい状態であるということがわかる。

(2) 数値解析結果との比較

映像解析では、最大流速6.76[m/s]を記録したが、その後の流速を計測することはできなかった。また、浸水高に関しても、11.2[m]の高さまでは計測することが可能であったが、その後は指標となる構造物が存在せず不可能であった。しかし、映像記録からは水位はその後にも上昇したことが確認できる。そこで、この節では、非線形長波理論を用いた津波伝播週上解析の結果と比較することにより、歌津大橋における水位上昇と流速変化について検討する。なお、波源となる断層モデルは、藤井・佐竹モデルVer.4.6⁶⁾を使用し、陸域の最小の地形データは国土地理院のレーザー計測による震災後の5mメッシュを用いた。解析抽出点は図-7に示すA地点である。

図-15は、映像解析の結果と数値解析の結果を比

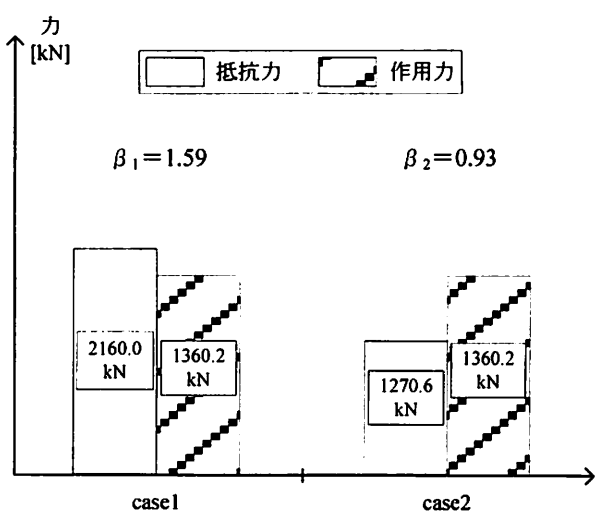
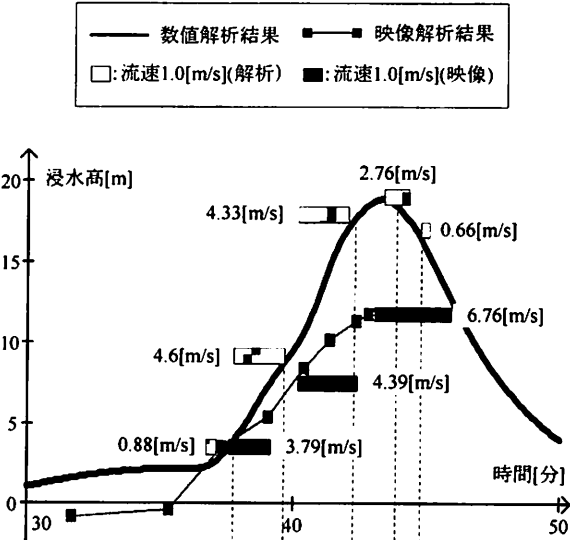
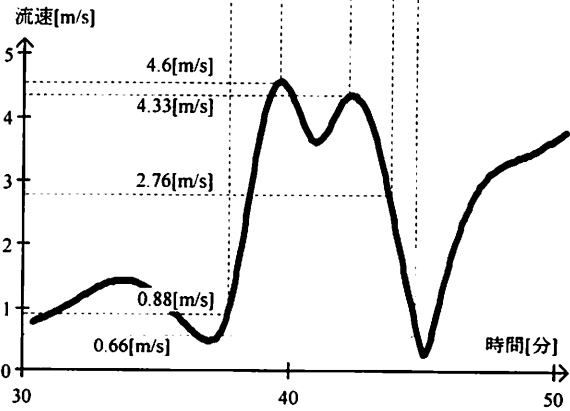


図-14 桁抵抗力・津波作用力比



(a) 水位流速時刻歴図



(b) 流速変化図

図-15 解析結果との比較

較したものである。水位に関しては、数値解析の方が浸水高の最高値が大きい、ほぼ同様のグラフの形状をとっている。流速の変化に関しては、映像解析と数値解析の双方で、歌津大橋の桁に波が作用する前の流速より、作用し始めたときの流速の方が大きく、作用し始めたときの流速より、水位が上昇し桁が浸水した後の方が流速が大きくなっている。また、数値解析の結果に着目すると、桁が浸水してから水位が上昇したときに流速が4.6[m/s]と最大となり、それ以降の流速は減少傾向となる。水位はそれ以降も上昇を続け、水位が最大となる時点の流速は2.76[m/s]まで減少する。

映像解析と数値解析における水位と流速の変化の様子はほぼ同様の傾向を示しており、水位も流速も徐々に上昇するが、先に流速が最大値を迎えた後に減少方向となり水位最大時点を超えてから引き波に転じる。このことから、歌津大橋のように桁下空頭が大きい橋梁の場合では、桁に津波が作用する時点よりも、桁が浸水し更に水位が上昇した時点の方が危険であるということが言える。ただし、水位と流速の傾向が同様となる場合に限る。

5. まとめ

本論文では、歌津大橋を対象橋梁とし、現地の被害調査を実施した上で、映像解析を実施し、以下の結果が得られた。

- (1) 歌津大橋は、S3～S10の桁が流出しており、S3～S4は連なったまま橋軸鉛直回りに回転して流出、S5～S7は連なったまま水平に流出、S8～

S10はそれぞれが橋軸回りに回転して流出している。

- (2) 水位は、非常にゆっくりとした速度で徐々に上昇しており、歌津大橋の桁に作用した波は砕波段波ではない。
- (3) 数値解析では、流速は、桁に津波が作用し始めた時点よりも桁が浸水し、さらに水位が上昇した時点の方が大きくなるが、水位最大点となる前に流速は減少方向に転じる。
- (4) 桁下空頭が大きい橋梁では、桁に津波が作用する瞬間よりも、桁が浸水しさらに水位が上昇した時点の方が危険側となる。

参考文献

- 1) 防災科学研究所：東北地方太平洋沖地震について（速報），2011.3.
- 2) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ発表資料，2011.7.：<http://www.coastal.jp/tjt/>
- 3) 幸左賢二，二井伸一，庄司学，宮原健太：スマトラ沖地震に伴う津波による橋梁の被害分析，構造工学論文集，Vol.56A，pp.454-463，2010.3.
- 4) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ 共通編，pp.52，2002.3.
- 5) 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
- 6) 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