

画像及び数値解析を用いた気仙大橋の津波被害分析

神宮司博志¹・幸左賢二²・佐々木達生³・佐藤崇⁴

¹学生会員 九州工業大学 工学府建設社会工学専攻1年（〒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正会員 （株）長大 九州支社（〒810-0004 福岡市中央区渡辺通1-1-1）

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波により、東北地方沿岸部は壊滅的な被害を受けた。当時襲来した津波の実態を正確に把握することは、津波被害を受けた橋梁等土木構造物への今後の対策を考える上で重要事項であるが、その被害メカニズムは複雑であるため被害後の状況資料による分析に加え、様々な角度からのアプローチが必要である。このような観点で今回の震災を振り返ると、特徴的なのは、近年の撮影機器の技術進歩や普及に伴って津波が町を襲う様子を記録した画像や映像が数多く残されていることである。そこで本論文では、橋梁の上部構造流出が複数確認された岩手県南部の陸前高田市を対象とし¹⁾、主要河川である気仙川を遡上する津波をとらえた写真や映像から、その遡上特性や作用状態を推定した。さらに津波伝播遡上解析を実施し、映像分析の結果と比較することで、解析結果の妥当性を検証した。その上で、市内への主要アクセス道である一般国道45号の、水平方向に大きく流出移動した気仙大橋を対象として被害分析を行い、上部構造流出メカニズムの推定を試みた。

2. 陸前高田地区の橋梁被害状況

(1) 陸前高田地区の被害状況

図-1に陸前高田市沿岸部の津波浸水範囲及び現地調査により確認した橋梁位置を示す。浸水範囲は国土地理院より提供されている2万5千分の1浸水範囲を示している。範囲内には上部構造が流出している橋梁が多数確認できる。特に対象地区で最も大きな河川である気仙川に架かる橋梁は全て上部構造が流出している。一方、気仙川と比べて小規模な河川で

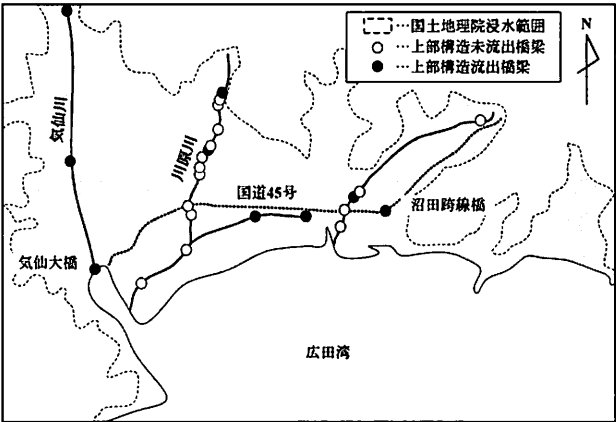


図-1 陸前高田地区全体の橋梁被害と浸水範囲

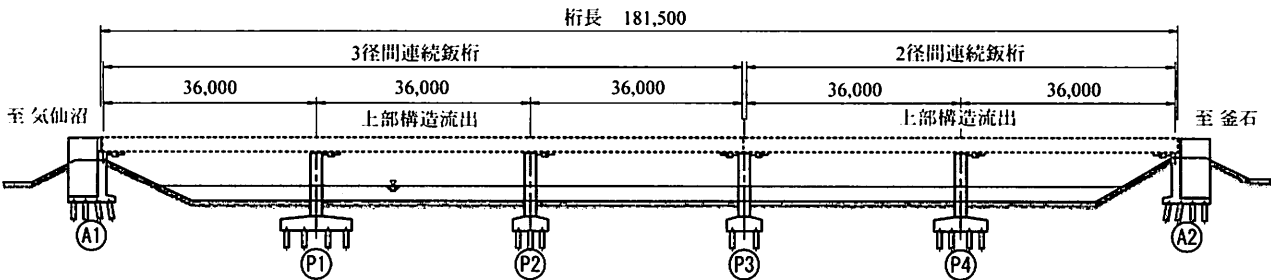


図-2 気仙大橋側面図

物や、図面等で高さが既知である構造物を基準にし、津波の形状や移動距離を比率等を用いて推定した。さらにそれらを根拠に津波流速や水面勾配を推定している。なお撮影時間は撮影位置[Y]の撮影機器の時刻を基準とし、同一の車が姉齒橋を通る時刻によってタイムラインを統一している。また撮影範囲Bは、遡上する津波の進行方向に向かって遠距離から撮影されており、津波先端の移動距離が計測し難い場合が多い反面、高さ方向の変化は計測しやすいため、主に津波の高さ推定に用いている。

(2) 流速の推定

流速の推定に用いた写真の一部を図-6に示す。捉えている津波は気仙川を遡上する第一波の先端である。気仙川河口付近に防波堤等の障害物はなく、この遡上する波は海岸に到達した津波の特性が直接影響していると思われる。

流速は同図に示すような写真をもとに家屋や河川堤防法面のブロック数等を根拠に衛星写真から津波先端の移動距離を求め、撮影機器側に残された撮影時刻の時間差で除すことで算出している。

上記手法で推定した流速を図-7に示す。気仙大橋から姉齒橋間は主に撮影範囲A-1からA-3の側方からの写真から推定しているため比較的明確な距離を得たが、姉齒橋より上流側は撮影範囲B、すなわち奥行き方向の写真のみであるため明確な波の先端位置が計測できなかった。そこで参考値として、この区間の同時間帯に撮影された航空映像（岩手県警より入手）を基に推定した流速を同図に示した。航空映像は気仙川が映る時間は短いものの、上空から平面的に津波先端を捉えているため、移動距離は測定しやすい。

この結果から、気仙大橋位置[1]から姉齒橋位置[2]の区間の流速は5.6m/sとなっており、姉齒橋より上流の[4]-[7]区間の7m/s以上となる流速に比較して小さい。映像から計測した[4]-[7]区間の流速も非常に大きく、8.7m/sにのぼる。これは姉齒橋を境とする上流側の河道形態が高水敷を有する復断面となることで低水路断面が小さくなるため、津波の流速が上昇したと考えられる。

図-8にはZhengら¹⁾の方法で得た陸前高田地区全体の流速を示す。これらの流速は津波先端ではなく、映像に映る漂流物を対象として移動距離と再生時間に基づいて算出している。映像資料は複数種類を用いており、それぞれの漂流物が映る映像のタイムラインの統一化が困難であったため、流速の時間的変化は示せないが、陸前高田地区全体で計測された流



図-6 津波先端の移動距離および撮影時間間隔

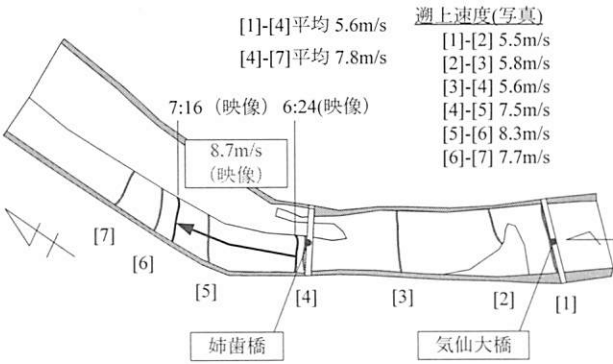


図-7 気仙川流速測定結果

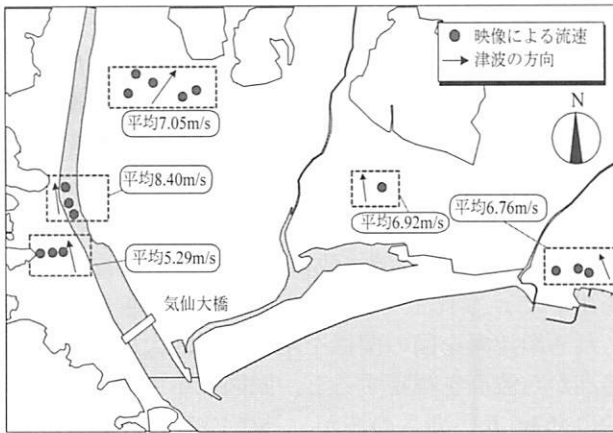


図-8 陸前高田全体の流速測定結果

速は5.3m/sから最大で8m/s、平均すると7m/s前後であった。

(3) 気仙川遡上津波の波形状推定

前述の気仙大橋の流速推定に使用した写真画像を用いて、気仙川を遡上する津波の形状的な特徴を推定した。本節ではその代表例として撮影時刻15時28分06秒の津波を対象に、その推定手法と結果について述べる。

波形状推定に使用した画像は主に図-5に示す撮影範囲A-1、A-2、Bの、複数枚の写真である。同図に示す2箇所の撮影位置から、秒単位での時刻の同定は撮影時刻にずれがあるため困難であり、かつ後述する数値解析結果の出力が5秒間隔であることも踏まえて、今回は撮影時刻のずれが5秒以内の場合は同一時刻とみなしている。また、撮影範囲A-1、Bでとらえた波形状をA-2より推定した波形状で補完することで気仙川全体の波形状を推定している。さらに推定区間の中で大きく波立っている箇所については既知高さの構造物を基準に写真上の比率を確認することでその高さを算出している。本例では、既往の設計図書によって諸元が明確で、写真に出現頻度の高い気仙大橋を既知高点[α]とし、基準高さに用いている。

詳細は後述するが、区間Aに写る津波には一部分で明らかに大きく起伏している波が見られた。その波と基準高さである気仙大橋、撮影者の位置関係を図-9に示す。撮影範囲A-1から見えるこの起伏した波と気仙大橋の位置関係は撮影方向から見て奥行き方向に離れているため、写真上に映る気仙大橋の諸元をそのまま基準高さとして波高を比率から測定できない。そこで図-10に示すように既知高点[α]と、対象とする特徴的な波、撮影者位置のほぼ直線上にさらに既知高点[β]を同図に示すように設定し、その距離を測定することで写真上の高さ倍率が距離に応じてどのように変化するかを確認した上で、この大きく起伏した波の具体的な高さを測定した。

同図に示す撮影時刻15時28分06秒の写真は撮影範囲A-1で、気仙大橋の位置を基準に、撮影者側に470m手前に写る物体は約3.6倍の大きさで写っていることが確認できる。一方測定対象とする波が気仙大橋から120mの場所に位置することから、三角法を用いて、写真上では約1.7倍の大きさとなる。これらの比率を図の関係を用いて気仙大橋の上部構造高から波高を推定すると、同図に示すように局所的に約3m近い高さの波が立っていることが分かる。

同様に推定したさらに上流部の波形状を図-11に



図-9 波と既知高点および撮影者の位置関係

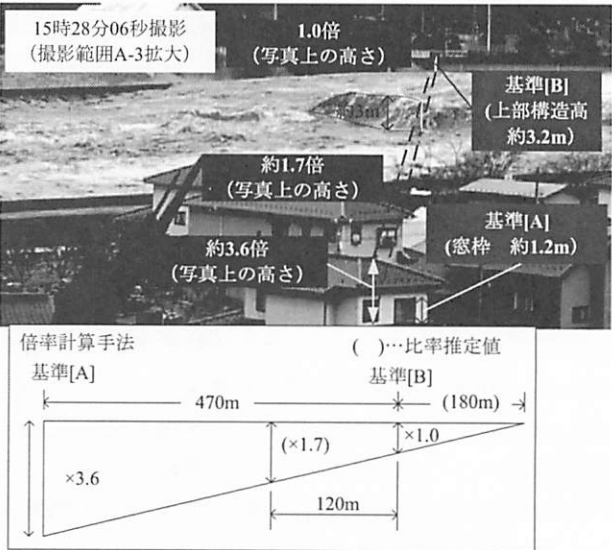


図-10 写真倍率を考慮した波高さの推定手法



図-11 写真倍率を考慮した波高さの推定手法

示す。水面は波立っているものの、前述した波高3mの波とさらに上流に位置する波高約1mの波が確認される他、目立った波はない。

続いて図-12にほぼ同時刻15時28分08秒の撮影範囲Bにおける写真から推定した波形状を示す。対象とする津波は第一波であり、姉齒橋上流側数十メートルに位置する波の先端は元々の河川水面に向かって徐々に水位が低下しており、同図(b)，(d)に示すように2～3mを超えるような段波形状にはなっていない。波の高さは姉齒橋の路面高さや別時刻に姉齒橋付近を通る軽トラックの高さ等から比率により橋桁から約3.8m下方に水面があり、津波によって増加した高さは約2.8mであることが推定できる。またこの時の波先端は同図(c)に示すように波先端付近に距離の指標になるような構造物が写っておらず、明確に位置が特定できない。そこで姉齒橋の真下を津波が通過する瞬間を捉えた同図(a)との差が6秒であること、また前述した姉齒橋までの波先端の流速が5.6m/sであることから波先端の位置は姉齒橋の真下から約33.6mの位置に来ていると仮定した。

上記のようにして求めた気仙大橋上流部と姉齒橋上流部の波形状を他時刻の写真を用いて補完し、気仙川全体の波形状を推定した結果を図-13に示す。具体的な補完手法は、この時刻において2種類の撮影範囲A-1とBのどちらにも写っていない姉齒橋の下流部を撮影範囲A-2に写る他の時刻の写真画像より仮定する。同図に示すこの予測範囲の波形状は、姉齒橋の桁下高さまで水位が上昇するまで特徴的な

起伏は見られず一様に進行方向に向かって水位が下がっている傾向であった。したがって気仙川全体の波形状は正確な高さが判定できる気仙大橋と姉齒橋の水面を図-11に示すようにトレースした水面状態を考慮して連続させ、写っていない区間は破線で示している。

上記手法によって当時の写真をもとに推定した気仙川全体の津波形状より、津波先端部の水面勾配が $i=1/12$ と全体の勾配 $i=1/85$ に比べて非常に大きいこ

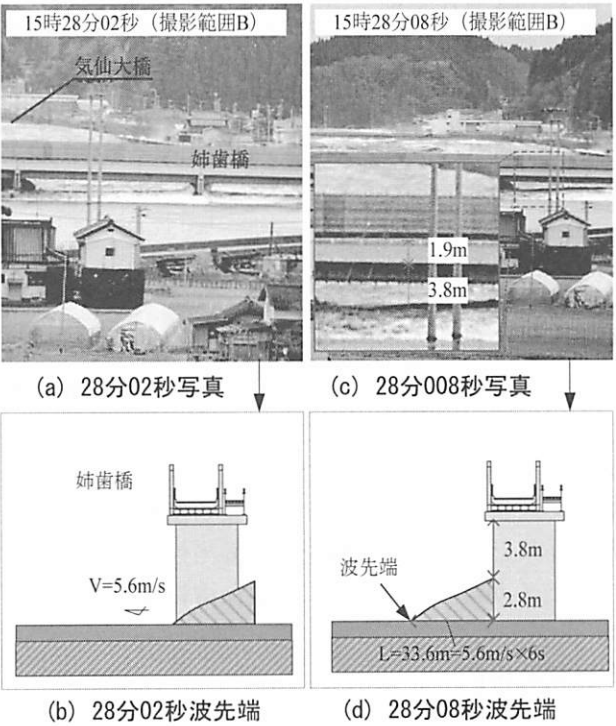


図-12 区間D波形状推定

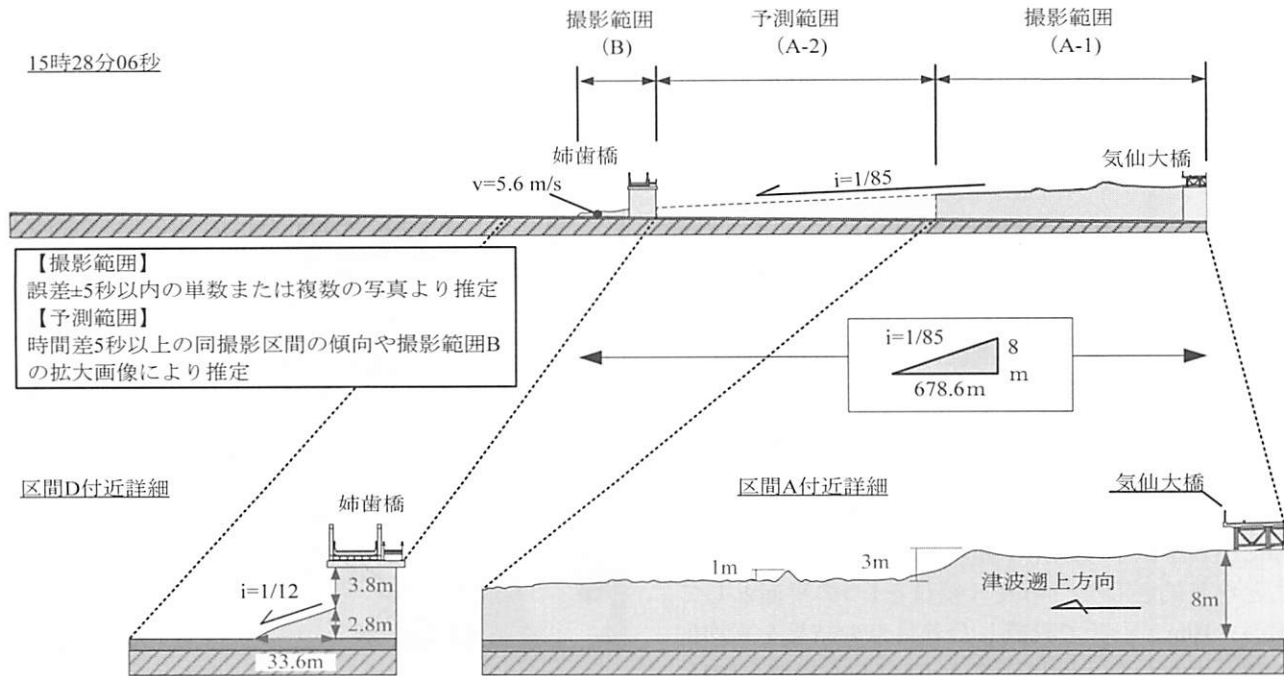


図-13 気仙川全体の波形状と水面勾配

とが分かる。すなわち遡上した津波によって河川の水位は波先端が通り過ぎてから数秒間に約3m程度急激に上昇し、その後は一様に上昇する傾向にある。さらに、局所的に3mにもなる大きな水頭差が生じている箇所も見られた。

(4) 水位上昇傾向

気仙大橋のP4橋脚位置の前節と同様の手法を用いて計測した水位の上昇傾向を図-14に示す。対象としたP4橋脚位置の水位は津波が到達してからの約20秒間は急激に上昇するものの、その後は概ね一様上昇する。続いて135秒後、すなわちT.P.+6mを超えた付近から上昇傾向が緩やかになっている。これは、水位が気仙川の堤防を超え、堤内地側に浸水が始まったためと考えられる。

4. 津波伝播遡上解析に基づく流出メカニズムの推定

前述の写真画像より得られた津波の形状の特徴は事実に基づく分析結果であるが、桁の流出メカニズムについて検討する上では不完全な部分も多い。そこで数値シミュレーションによる解析を実施し、解析結果と事実との比較を行い妥当性を把握した上で流出メカニズムの推定に必要な情報を補完した。

(1) 解析条件

解析は非線形長波理論を用い、以下に具体を示す。波源モデルに藤井佐竹モデル(Ver4.6)を用いた。

- 陸域のデータは5m, 10mメッシュを使用した。
- 図-15に示すようにE4とE13,E14の3枚の小断層を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倍としている³⁾。
- メッシュサイズは最小領域のHを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-16に、気仙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[A]右岸側と[B]左

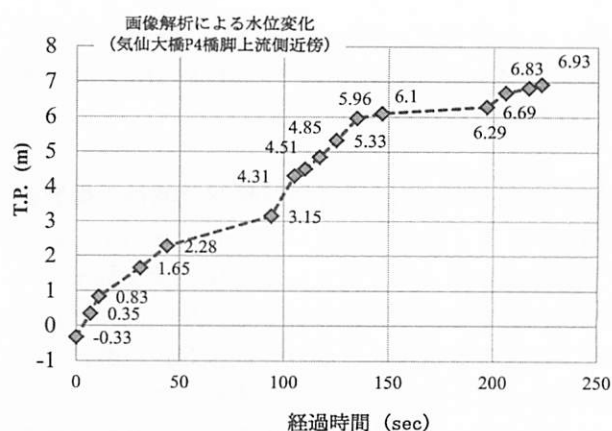


図-14 気仙大橋P4橋脚上流側の水位上昇傾向

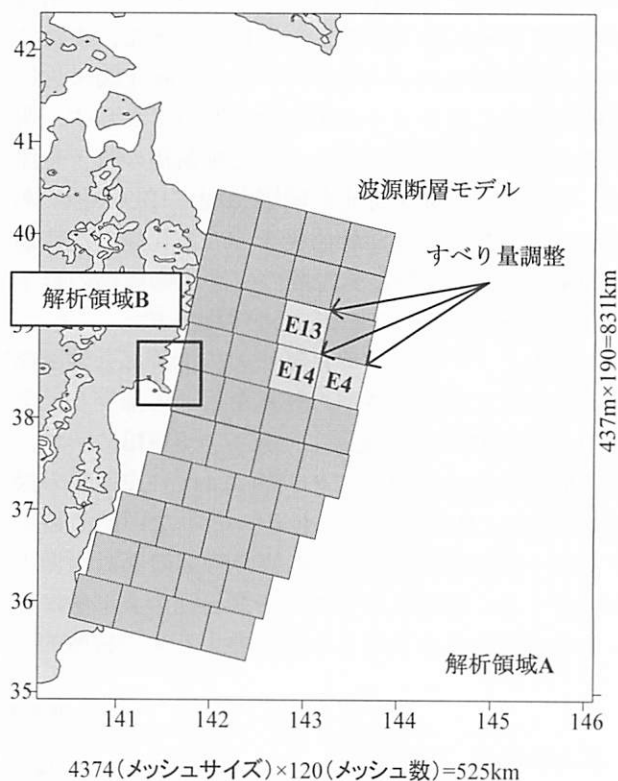


図-15 波源モデル

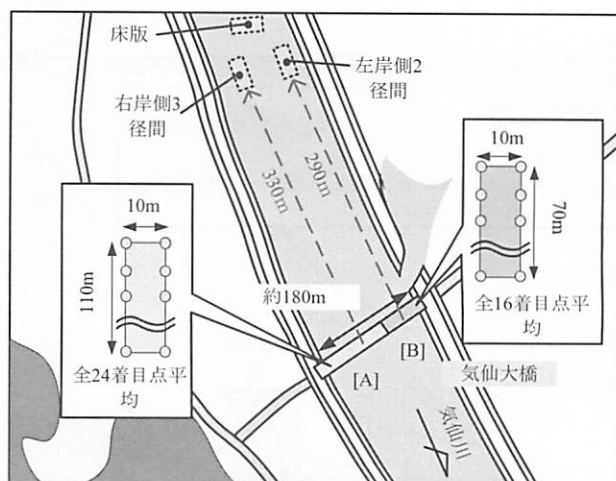


図-16 解析結果抽出点と評価手法

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24または16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。

(2) 解析結果と画像解析との比較による妥当性評価

図-17に、解析結果として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点を0分として、以降の35分後から60分後の25分間を横軸に示した。図中に示す[C]点と[D]点はそれぞれ津波水位が桁に達した時刻と橋が完全に水没した時刻の浸水高を示す。

浸水高は地震発生から38分後頃から上昇を始め、46分頃に最大浸水高に至る。また流速は上昇を始めてから水位が気仙大橋の桁下の高さに至る時点で約5m/sとなり、桁が完全に水没する時点で最大流速の約6m/sまで上昇する。その後最大浸水高時点で引き波に転じる。なお右岸側[A]と左岸側[B]とで大きな差は見られない。

同図には併せて、数値解析結果と前述の画像解析による水位上昇より算出した浸水高の結果との比較を示す。ここで、写真資料は撮影機器による撮影時刻が残されているものの、設定等により実際の時刻と大きく違う可能性があるため、数値解析による浸水高と画像解析結果の双方の桁下浸水時の時刻を同定した。

図に示す約3分45秒間の両者の結果を比べると、画像解析より算出した浸水高の時刻歴は遡上開始時とその後の上昇の傾向に差が見られるのに対し、数値解析に基づく浸水高は時間の経過とともに一様に上昇する。全体を通しての上昇量は数値解析結果が3分45秒間に6.77m上昇するのに対して画像解析結果では7.16m上昇する結果となっており、若干の差がみられるものの概ね同様の結果が得られた。

次に図-18に映像及び数値解析により推定した流速を示す。同図には数値解析によって得た浸水状況も併せて示す。津波の流向は気仙川と概ね同じ北西方向を向いている。流速は、解析結果の値が、映像分析結果に比較して若干小さい傾向である。

(3) 気仙大橋の流出メカニズム推定

図-19に、解析結果に基づき上部構造に作用する浸水高に応じた津波の流速分布を示す。前節の評価手法と同様に、[A]の右岸側と[B]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

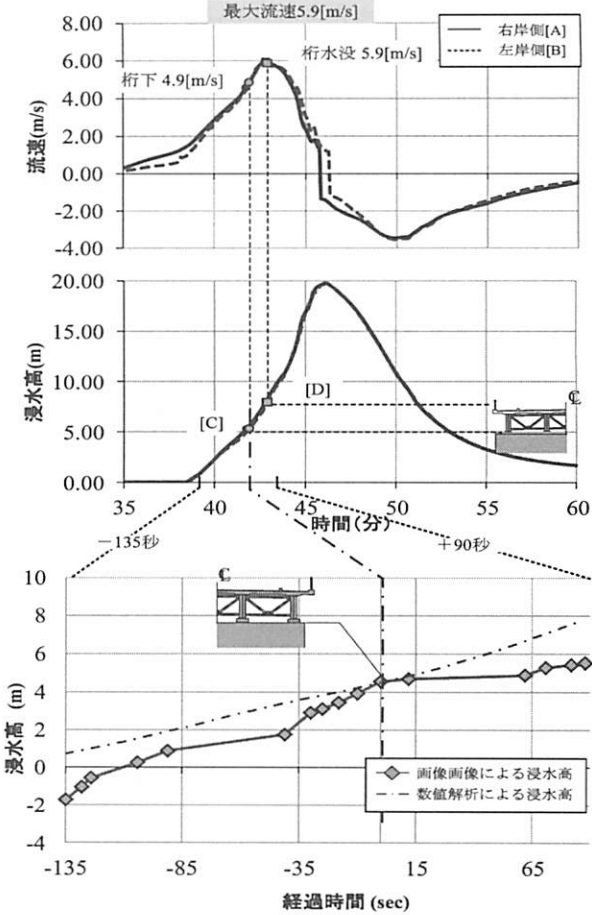


図-17 数値解析結果及び画像解析値との比較

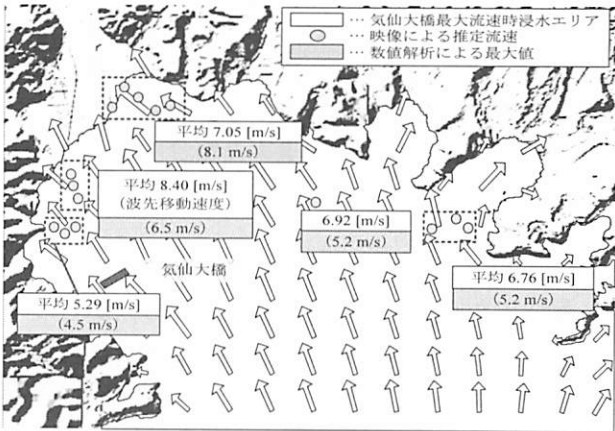


図-18 映像解析及び数値解析による流速と浸水状況

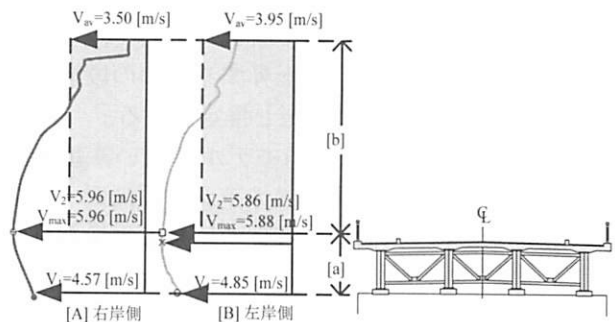


図-19 上部構造に作用する津波の流速分布

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V1が[A], [B]でそれぞれ4.57m/s, 4.85m/s (以降, [1], [2]の順で示す) からV2=5.96, 5.86m/sまで上昇する。また最大流速V3はV2とほぼ同様となっている。区間[b]の平均流速はVav=3.50, 3.95m/sとなる。

図-20はこれらの流速が上部構造に直角方向に作用したと考え、佐々木ら (2013)³⁾と同様に式 (1) で作用力を、式 (2) で抵抗力を算出した結果を示している。なお式中の抗力係数は文献⁴⁾より、摩擦係数はRabbatらの実験結果⁵⁾から0.6と仮定した。

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

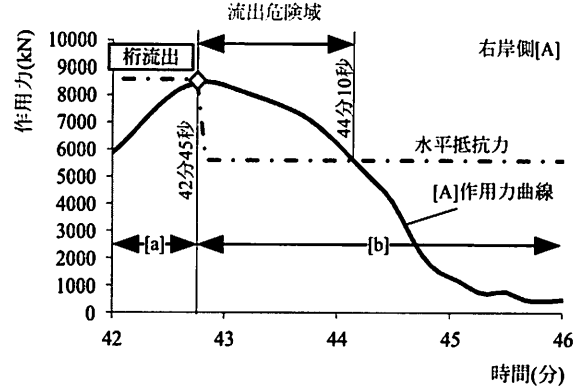
$$S = \mu \cdot (W - U) \quad (2)$$

式 (2) の浮力Uは、上部構造が完全に浸水した以降の区間[b]にのみ考慮しており、同図に示すように右岸側[A]において、区間[b]では浮力の影響で抵抗力が8,580kNから5,603kNへと35%減少し、左岸側[B]では5,720kNから3,735kNへと35%減少する。一方、作用力は上部構造に作用する流速の変化に伴って作用力が変化し、流速がピークになる時刻に上昇する作用力が抵抗力を上回る。これは[A], [B]のいずれも同様の状況である。

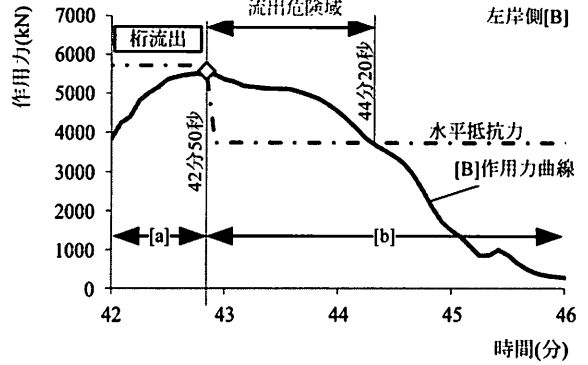
以上より、[A], [B]のいずれも、浮力を考慮しない[a]区間においても津波による水平方向作用力が抵抗力と同等まで増加しており、浮力を考慮した場合、十分に上部構造が流出することが考えられ、この結果は図-2に示した流出事実と整合する。

5. まとめ

- (1) 気仙川を遡上する津波を捉えた多方向からの写真画像と既知高さ構造物、および衛星写真による距離を複合的に用いることで、津波の形状的な特徴及び第一波遡上時の流速を推定した。
- (2) 画像解析による気仙川を遡上する津波の概形および気仙大橋近傍で推定した浸水高より、波先端部の水面勾配は波の中腹よりも高く、初めの数秒間で水位は急激に上昇するものの段波状の切り立つ波ではなかったと推定される。
- (3) 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の結果と画像解析による結果を比較したところ水位の上昇傾向は概ね一致しており、流速は全体的に数値解析値がやや小さくなる結果となった。



(a) 右岸側連続桁[A]



(b) 左岸側連続桁[B]

図-20 作用力と抵抗力の時刻歴変化

- (4) 数値解析値による流速を用いて気仙大橋に対する津波の水平作用力と桁抵抗力の関係を時刻歴で算出したところ、約6m/sの流速によって気仙大橋は流出するという流出事実と整合する結果が得られた。今回の数値解析による流速が全体的に小さく算出されていることを加味すると、災害時の桁の状態はさらに危険側にあったと考えられることから、気仙大橋の流出メカニズムは津波による水平作用力で説明することができる。

参考文献

- 1) Zheng, Y., Kosa, K., Shi, H., and Fu, L. (2012): Damage to structures in Rikuzentakata region due to tsunami, Proc. of JCI Vol.34, No.2, pp.811-816.
- 2) 建設省 東北地方建設局 道路部：東北地建の橋梁（Ⅱ），pp.310-311, 2000.3.
- 3) 佐々木達生・幸左賢二・神宮司博志(2013)：津波被害を受けた小泉地区橋梁の詳細被害分析，コンクリート工学年次論文集，Vol. 35，掲載決定済み
- 4) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ 共通編，pp.52-53, 2002.3.
- 5) 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