

津波伝搬遡上解析を用いた新北上流域の津波特性の評価

中城拓也¹・幸左賢二²・佐々木達生³

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式会社（株） 技術統括部（〒170-0003 東京都豊島区駒込3-23-1）

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震津波により、東北地方の太平洋沿岸部の、浸水域の橋梁に多数の流出被害が生じた。これらの流出被害が生じた橋梁の中には、緊急輸送道路に指定された路線上に架橋されるものも存在する。緊急輸送道路上の橋梁の流出は、被災後の救助活動や救援物資の輸送の遅れにつながるため、橋梁の流出被害に対する対策が望まれる。

橋梁の津波対策を考える上で、今時津波の実態を正確に把握することは、上部構造の流出被害のメカニズムを解明するという意味において重要である。

本論文では、図-1 に示す新北上川流域に着目し、新北上川に架橋される左岸側の2径間のみが流出した新北上大橋に焦点をあてている。映像解析と数値解析を用いて津波特性を推定し、1つの橋梁の中に流出した桁と流出を免れた桁が混在する理由を考察する。

特に、左右岸の堤内地（陸部）と河川内の流況の変化（流速、水位、流向）を明らかにし、これらの変化が生じる原因について考察を行う。

2. 新北上川流域の被害の状況

(1) 新北上川流域の被害の状況

図-1 に新北上川流域の津波浸水範囲及び現地調査により確認した橋梁位置と桁流出の有無を示す。同図に示す浸水範囲は、国土地理院から公開される2万5千分の1の浸水範囲である。同図に示すように、新北上川流域では、浸水範囲内に架かる橋梁の全7橋中、2橋（新北上大橋、白浜2号橋）の上部構造の流出被害が生じている。また、新北上川では、新北上大橋に上部構造流出の被害が生じているもの

の、新北上川に比べ小規模な河川である富士川や皿貝川での橋梁の流出被害は皆無である。

図-2 に新北上川河口から約3.8km上流に架橋される新北上大橋の流出状況を示す。流出した桁は左岸側高水敷上の2径間で、約600m上流に移動しており、流出した桁は大きく2つに折れ曲がっている

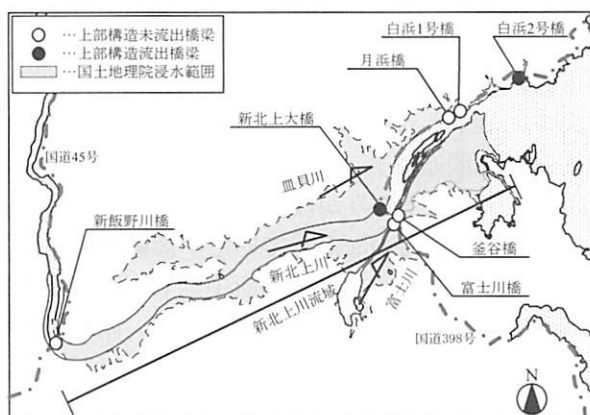


図-1 新北上川流域の橋梁被害と浸水範囲

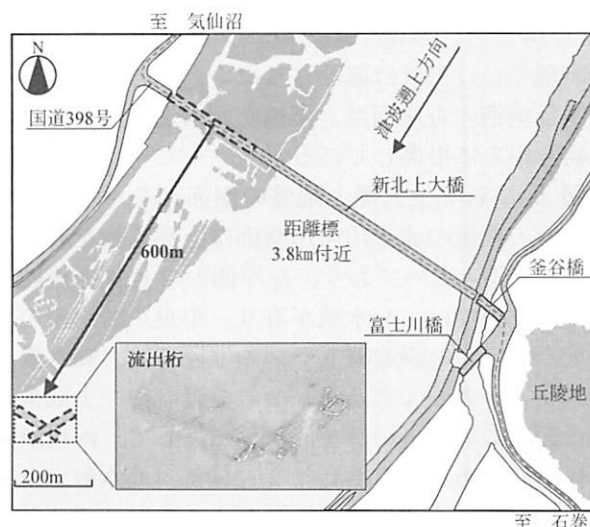


図-2 新北上大橋被害状況

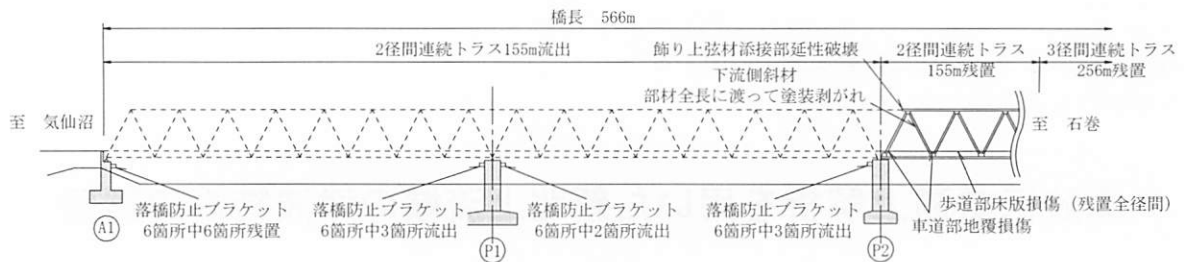


図-3 新北上大橋側面図（被災後）

ことが確認できる。なお、富士川に架橋される橋梁の釜谷橋や富士川橋は流出を免れている。

(2) 新北上大橋の諸元と被害状況

図-3 に被災後の新北上大橋の側面図を、図-4 に新北上大橋断面図を示す。新北上大橋は橋長 566m のうち 2 径間連続が 2 連と 3 径間連続が 1 連の合計 7 径間の鋼連続下路トラス橋である。上部構造の詳細は、主構高さ（上下弦材中心間隔が）9.5m のトラスの下端に、横方向に設置された横桁と、これとクロスする縦桁で構成された床組上に、RC 床版が非合成構造で設置される。幅員構成は車道が 6.5m、下流側のみブラケットで張り出した歩道が 2.0m であり、地覆外側の全幅員が 10.65m である。なお、歩道部の床版はプレキャストの PC 構造である。

図-3 に示すように、右岸側の 3 径間連続トラスや中央の 2 径間連続トラスは残置しており、左岸側の 2 径間連続トラスのみが流出している。上部構造の縦桁とケーブルでつながっていた下部構造側面のブラケットは A1 橋台 では 6 箇所中全 6 箇所が残置し、P1 橋脚左岸側では 6 箇所中 3 箇所流出、同右岸側が 6 箇所中 2 箇所流出、P2 橋脚左岸側では 6 箇所中 3 箇所流出している。

流出したトラスを支持していた下部構造は、地中部や水中部は確認できないものの、A1 橋台、P1、P2 橋脚とも、縦壁や柱のコンクリート表面に大きな剥離やひび割れは確認されない。一方で、これらの下部構造の沓座面は、落橋防止構造や支承等の付属物を中心に損傷している。

図-5 に新北上大橋と地盤の側面図を示す。新北上大橋の位置の北上川河川断面は、高水敷を有する複断面構造となっており、左岸側の 2 径間鋼連続トラスの位置では、高水敷が有り、中央、右岸側の 2 径間、3 径間の鋼連続トラスの位置では、高水敷が無いことが確認できる。1 つの橋梁の中で上部構造物に流出被害の違いが生じた理由として、河川断面が複断面であり、流出した 2 径間部は高水敷上であることから、津波の遡上断面が小さくなり流速が局部的に上昇したと推察される。

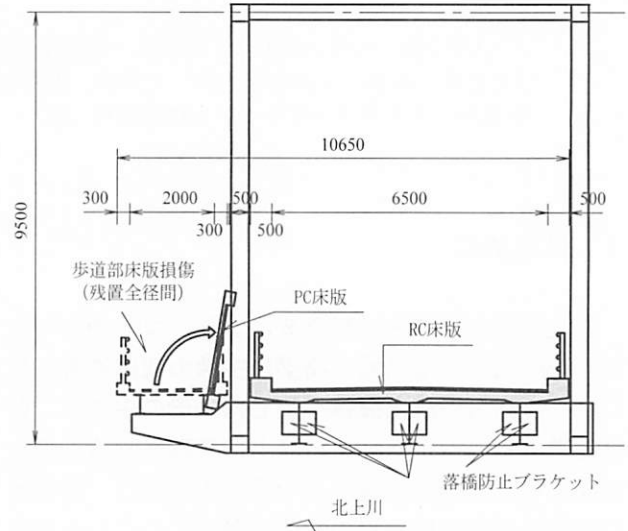


図-4 新北上大橋断面図

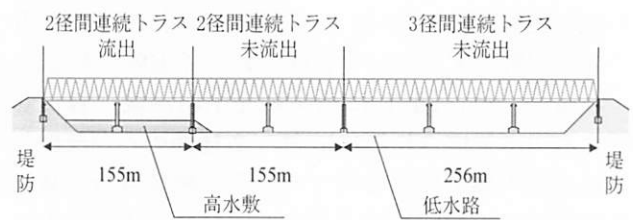


図-5 新北上大橋と地盤の側面図

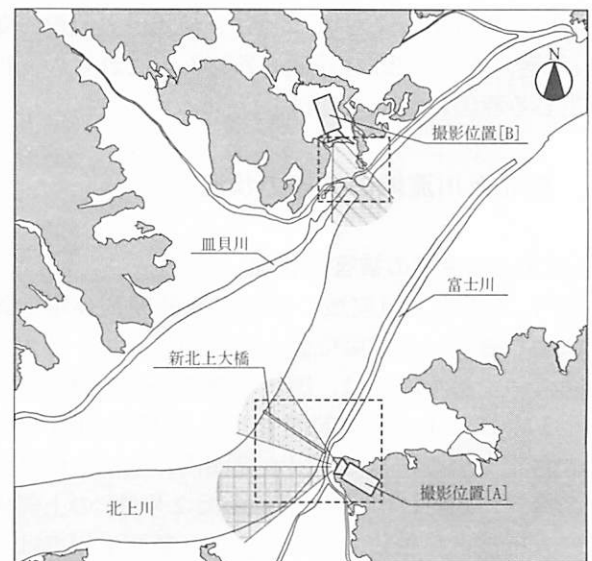


図-6 映像資料の撮影位置と撮影範囲

3. 映像解析による津波特性の評価

(1) 映像資料の概要

図-6 に分析に用いた資料の撮影位置と撮影範囲を示す。撮影位置 [A]の映像資料は、新北上大橋の南側丘陵地の斜面中腹から撮影された動画で、撮影位置 [B]の映像資料は、石巻市立北上中学校の正門前道路上から撮影されている。位置[A]の資料は、新北上大橋周辺の流速や水位、波形状の推定が可能であり、位置[B]の資料は北上川の堤防を越流した津波遡上速度の計測が可能である。

(2) 流速と波形状の推定

図-7 に漂流物を用いた津波流速の測定例を示す。同図は、図-6に示した撮影位置 [A] で撮影された漂流物の移動速度を測定した例であり、[a]地点では15時45分22秒であったのに対して、[b]地点に移動した時間は15時45分34秒で12秒経過している。[a]地点から[b]地点までの距離は約30mで、移動距離と時間により、漂流物の移動速度は2.5[m/sec]と求められる。この速度は津波の表面上の流速であり、対象物の質量等で少なからず流速が異なってくるが、実際に作用した流速に近い値であると推察される。

図-8 に示すのは、上記のような分析手法を用いて映像解析から推定した津波の流速である。同図に示す流速は、位置 [A] で撮影された映像から計測している。図中の[1]から[3]までの3点が北上川の新北上大橋付近での流速である。3点の平均値は3.24[m/sec]と非常に遅い流速であることが確認できる。これは、対象とする映像記録が第1波目のピーク後であるため、最大浸水高を迎えた以降、減少した流速を計測したためと考えられる。

[4]から[6]までの3点は富士川橋での流速であり、3点の平均値をとると、7.74[m/sec]と北上川に比べて大きな流速が得られた。これは、陸上部を遡上した津波が新北上大橋の南側の丘陵地斜面で富士川に集中して流れ込んだ影響と考えられる。

次に図-9 に示すのは、位置 [B]で撮影された映像から計測した流速である。[1]から[7]までの7点の流速は、概ね 5[m/sec]前後でばらつきが少なく、これら7点の流速の平均値は、4.90[m/sec]程度と、前述の北上川の流速に対して速いことがわかる。これは、北上川の堤防を越流した影響と考えられる。さらに、これらの流向は新北上川の方角に対して直角方向を向いている。

次に図-10に示すのは、映像資料に基づいた北上川の水位変化である。同図の映像時間は第1波目の

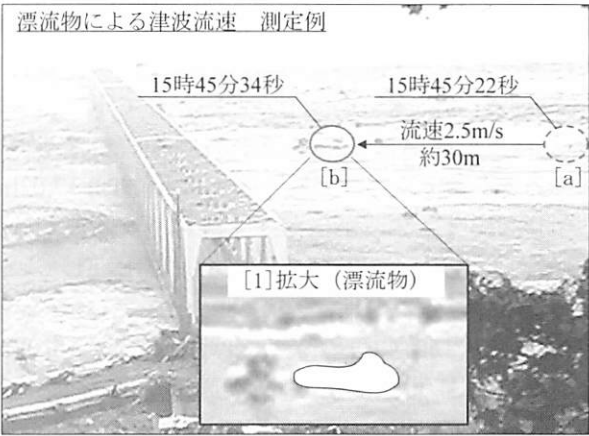


図-7 漂流物による津波流速の測定例

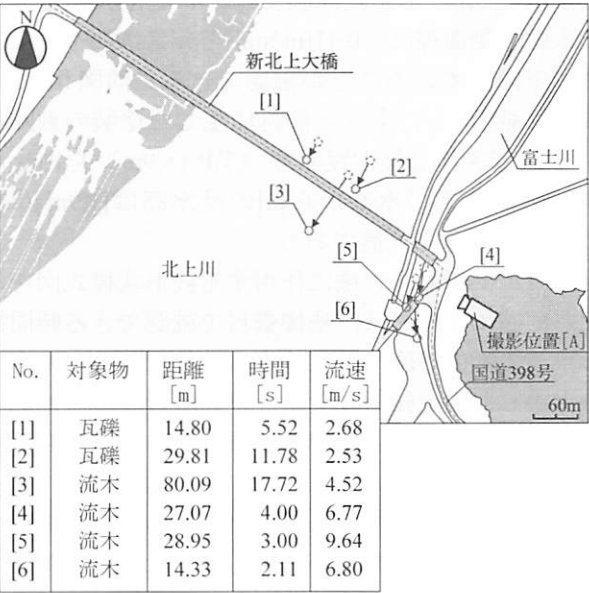


図-8 [A] 位置から計測した流速

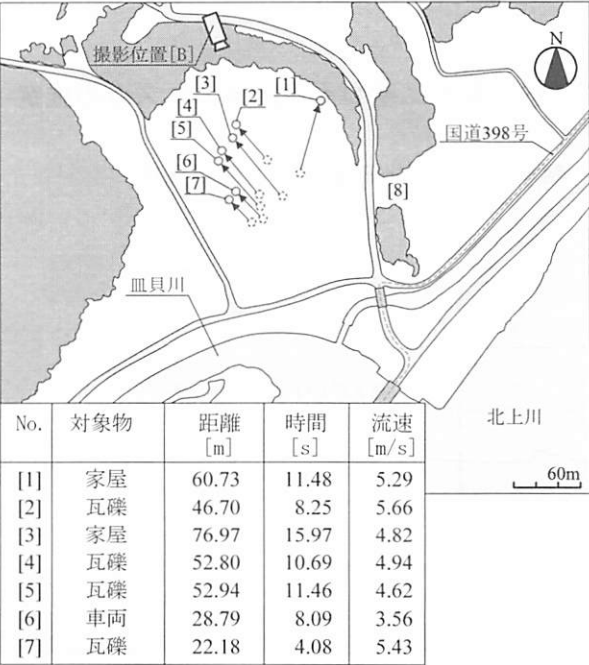


図-9 [B] 位置から計測した流速

ピークを超えた後の時間帯であるため、水位は時間の経過とともに下降している。ここでは映像資料から読み取れる範囲を水位下降曲線として示した。同図(a)は、位置[A]から撮影された映像資料に基づいているが、15時45分の時点では、水位T.P.+7.02[m]となり、橋脚に津波が当たって跳ね上がる波が確認されるとともに、下部構造の支承まで水没しているのが確認できる。

同図(b)の15時49分の時点では、水位T.P.+5.39[m]となり、同図(a)よりさらに水位が低下した状態である。

これらの資料に基づいて、構造物の高さから算出した水位を(c)に示す。同図より、新北上大橋地点での水位変動曲線は、0.41[m/min]と非常に緩やかな速度で下降していることが確認できる。同図(c)には参考文献¹⁾から、トラス部材に生じた塗装の剥離等から推定される最大浸水高(T.P.+8.9m)を併せ示す。この最大浸水高から[a]の浸水高は[1.9m=(8.9-7.02)m]下降した状態である。

図-11 に新北上大橋に作用する波形状模式図を示す。同図に示すのは、映像資料で確認できる時間帯の津波の水位が低下した時点のものであり、波形状は上記した国土技術政策総合研究所¹⁾の現地調査による最大浸水高より 3.0m 減少した時点の波形状である。

同図から、水面は若干波立っていることが確認できるものの、高い波高を有するような目立った波は映像資料の再生時間中で確認されず、桁に作用する津波の状態は、準定常的な持続流であったと推察される。

4. 数値解析に基づく流出メカニズムの推定

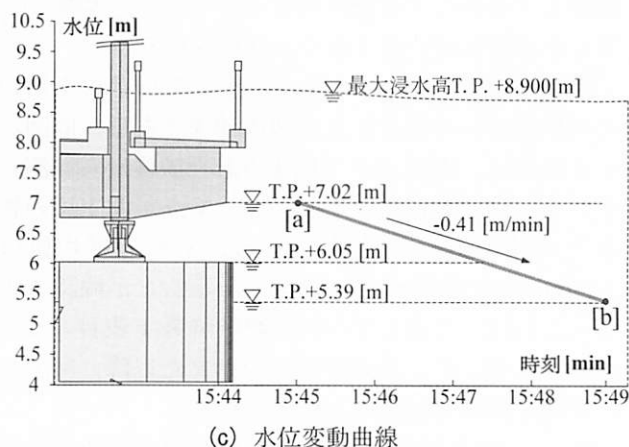
(1) 解析に用いた地形モデルと解析条件



(a) 15:45 時点での水位



(b) 15:49 時点での水位



(c) 水位変動曲線

図-10 映像解析から求めた水位

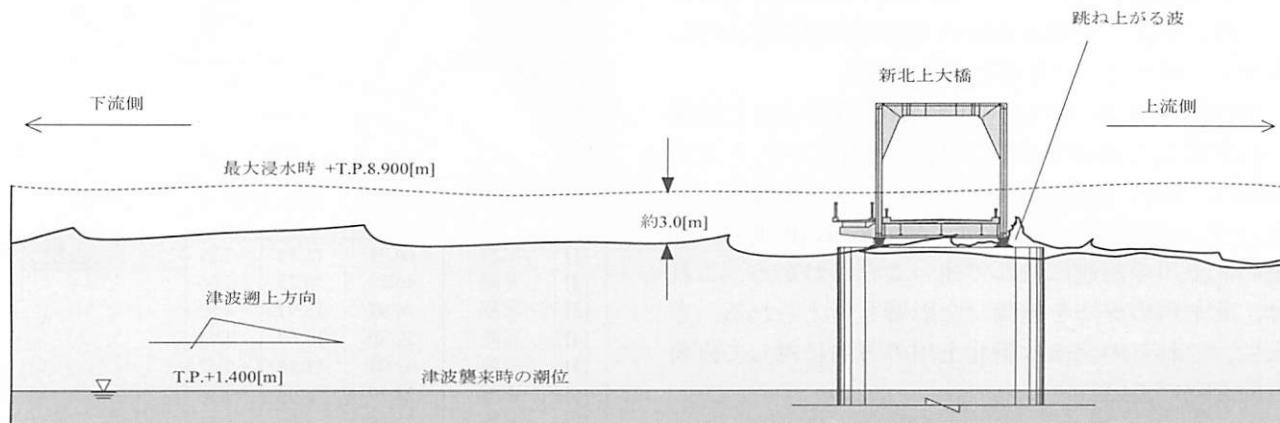


図-11 新北上大橋に作用する波形状模式図

解析手法は、基礎方程式に非線形長波理論を用い、波源モデルは藤井佐竹モデル (Ver4.6)を用いた。

- 陸域のデータは 5m, 10m メッシュを使用した。
- 宮城県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、すべり面を 1.5 倍としている²⁾。
- メッシュサイズは最小領域の H を 1 辺あたりの長さを 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 Mansinha and Smylie (1971) 方法を用いて、この方法の沈下量を考慮した上で、気象庁潮位観測データに基づき T.P.+1.400m を基準にして設定した²⁾。

図-12 に、数値解析で着目した新北上大橋の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図が得られるが、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、幅員 13.9[m]×桁長 155[m] (3 径間部は 256[m]) を標準に 1 桁を対象とした面領域の中に 10[m]の間隔で設定した抽出点の結果を平均化した。すなわち、図に示すように右岸部と中央部と左岸部のそれぞれ 1 連の桁に対して 1 平面としている。1 平面内の 52 または 32 着目点を平均化した値を用いて、上部構造に作用する津波特性を評価した。

(2) 解析結果の妥当性評価

図-13 に数値解析の結果として、新北上大橋の中央部の流速と浸水高の時刻歴を示す。同図には、映像解析から得られた流速と浸水高を併せ示した。なお、[A]-1 は映像位置[A]の映像資料 1 番目という意味である。これらの 5 つの映像資料をそれぞれ撮影順に[A]-1, [A]-2, [A]-3, [A]-4, [A]-5 とすると、それぞれの撮影開始時間は 15:45:00, 15:49:32, 16:01:30, 16:05:44, 16:06:02 である。

[A]-1 と[A]-2 を用いて、15:45:00 時点と 15:49:32 時点での映像解析値と数値解析結果の比較を行った。比較した津波特性は、浸水高と流速である。[A]-1 での映像解析と数値解析の浸水高は、それぞれ 5.62[m], 2.60[m]と数値解析結果が映像解析結果の 1/2 以下となるものの、流速はそれぞれ 2.5[m/sec], 2.34[m/sec]と概ね一致する。また、[A]-2 での映像解析と数値解析の浸水高は、それぞれ 3.99[m], 3.00[m]と 1m 程度誤差が生じるものの、流速はそれぞれ 2.7[m/sec], 0.72[m/sec]と 2[m/sec]程度の誤差が生じた。この誤差は、数値解析結果が新北上大橋中央の桁長 155m の 2 径間分の平均値と比較したため



図-12 解析に用いた地形データと結果抽出点

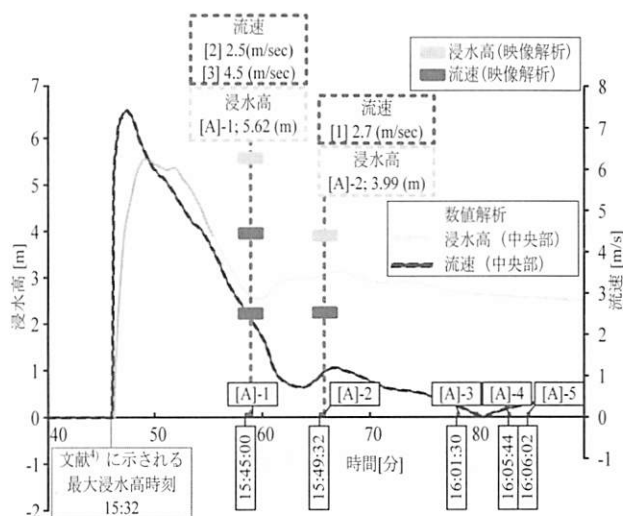


図-13 映像資料の時系列整理 (新北上大橋中央)



図-14 映像解析結果との比較

に生じたためと考えられる。従って、映像解析で計測した位置と同位置の数値解析結果との比較を行う。

図-14 に映像解析で流速を計測した位置と同じ位置に着目した、数値解析の流速を示す。これらの値を比較すると、[1]の地点では、映像解析流速値が 2.5[m/sec]であるのに対して、数値解析流速値は

2.02[m/sec]とほぼ同程度の流速値となる。同様に、[2]の地点では、それぞれ 2.7[m/sec]に対して、2.36 [m/sec]と概ね一致する結果となるものの、[3]の地点では、それぞれ 4.5[m/sec], 2.05[m/sec]と非常に大きな誤差が生じる。これは、橋脚柱周辺を通過した流れが渦流となることで生じた流速の上昇と考えられ、前述の図-10(a)でもこの現象は確認できる。一方、数値解析では橋梁はモデル化されていないため、この現象を再現できなかったことが、大きな誤差の原因と考えられる。

図-15に東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループの現地調査結果と数値解析の浸水高の比較図を示す。新北上大橋周辺 [a] 地点、[b] 地点、[c] 地点と国道 398 号沿いの左岸側 [d] 地点、[e] 地点、[f] 地点の比較を行った。[c]地点の合同調査の浸水高と数値解析の浸水高は、それぞれ 12.58 [m], 10.17 [m]、と局所的に大きな誤差が生じる箇所が他にも 1 点あるものの、[d]地点は、それぞれ 8.88 [m], 8.79 [m]、と誤差が少なく、他 3 点も同様の結果であった。合同調査の浸水高と数値解析の浸水高の平均は、それぞれ 9.02 [m]と 9.19 [m]と一致する。

以上より、実施した数値解析は新北上川を遡上する津波特性を概ね再現できていると判断する。

(3) 北上川流域を遡上する津波の特性

図-16に示すのは、数値解析結果に基づく流速と浸水高の時刻歴変化図である。同図には、前述の映像解析結果の流速と浸水高を併せ示した。また、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として、以降の 43 分後から 65 分後の 22 分間を横軸に示した。

まず、地震発生から 46 分頃から流速とともに浸水高の上昇が開始し、約 1 分間で急激に[1]の最大流速 6.89[m/sec]に至る。これは、例えば小泉地区⁴⁾の流速の上昇傾向に比して非常に急激であることが特徴的である。

この後、流速は緩やかに減少するものの、浸水高は上昇を続け[2]で最大浸水高 5.7[m]に到達する。ここで、数値解析で得られる最大浸水高と新北上大橋の桁位置との関係は、同図に示す通り、桁下 50[cm]程度浸水する程度である。

続いて浸水高は減少に転じ、[3]の下部構造天端を経て、地震発生後 60 分まで減少を続ける。この間、流速も同様に減少する。

図-17に新北上川流域の遡上する津波の流速ベクトル図を示す。[a], [b], [c], [d]はそれぞれ地震発生後 45 分 20 秒、47 分 20 秒、49 分 20 秒、57 分 20

秒の流速ベクトルである。同図(a)では、新北上大橋に到達する直前の流速ベクトルである。右岸側河口部と河川部の[1]点周辺を遡上する流速が速いことを示し、河口部全域ですでに越流していることが確認できる。

同図(b)は、新北上大橋位置の最大流速時の流速ベクトルである。また、[a], [b]ともに右岸側の丘陵地に津波が衝突して、津波が富士川や北上川に集中していることが確認できる。

同図(c)は、最大浸水高時の流速ベクトルである。第 1 波目の遡上する波と引き波が混在する状態を河口部[1]点で確認できる。また、津波の先端部[2]の

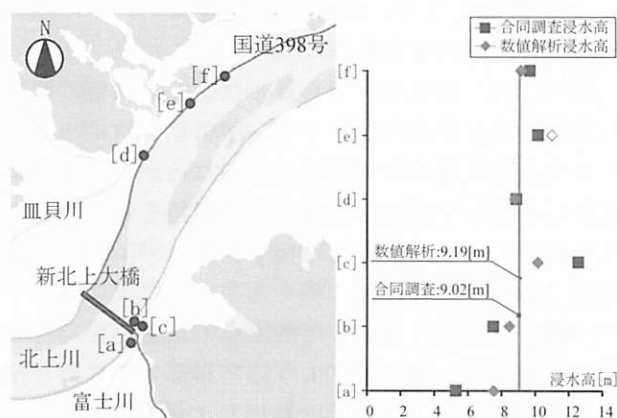


図-15 合同調査結果との比較

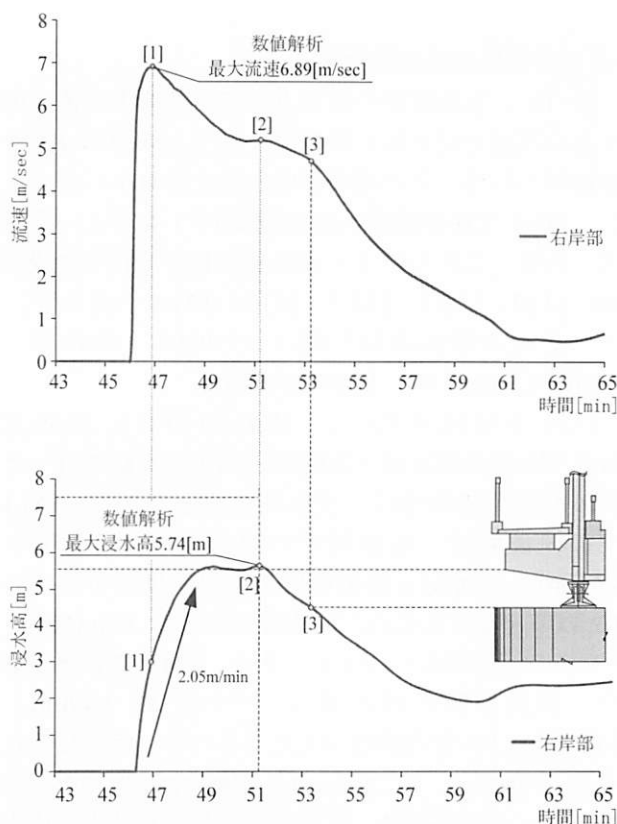
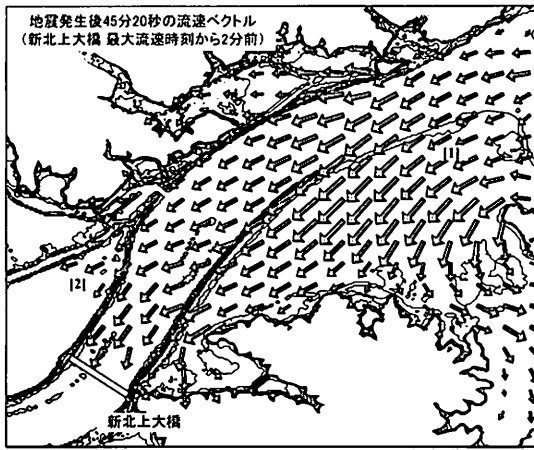
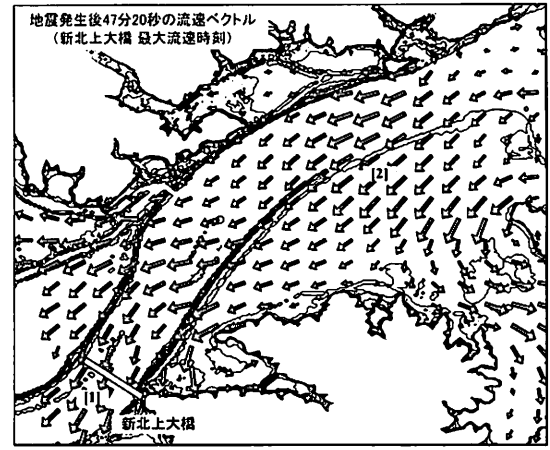


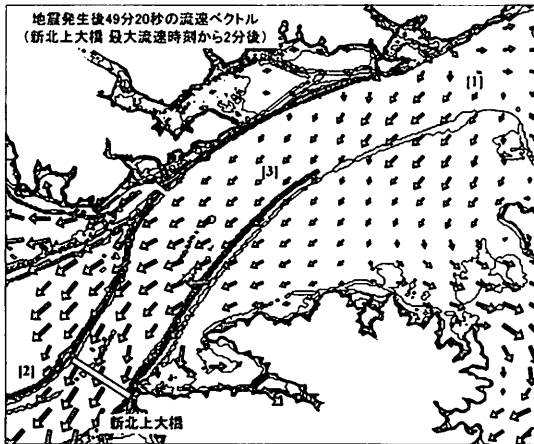
図-16 新北上大橋の流速と浸水高の時刻歴図



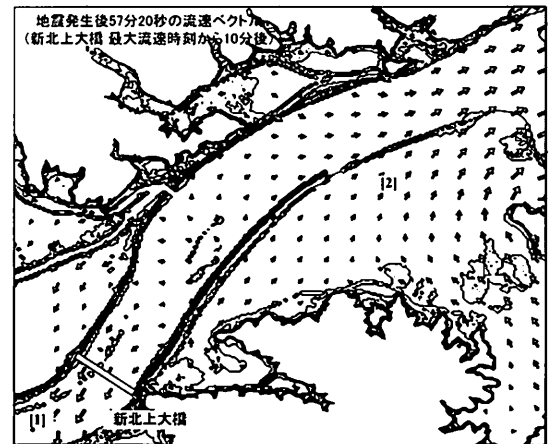
(a) 地震発生後 45 分 20 秒



(b) 地震発生後 47 分 20 秒



(c) 地震発生後 49 分 20 秒



(d) 地震発生後 57 分 20 秒

図-17 新北上流域の流速ベクトル図

流速は速いものの、中間部[3]点では、遡上する波と引き波が混在するため、流速が遅いと考えられる。

同図(d)は、最大流速時から10分後の流速ベクトルである。流速や浸水高がピーク時から降下し、安定していることから、流速がほとんど出ていないことが考えられる。津波先端部[1]点の遡上速度が低下しており、河口部[2]点周辺が引き波に変化していることが確認できる。

これらの結果から、新北上流域を遡上する津波は、北上川と右岸側河口部を遡上した後、堤防を越流して左岸側陸上部を遡上する傾向にある。

(4) 新北上大橋の流出メカニズム

数値解析の結果から得られた流速を用いて、連毎に流出評価を行った。図-18に示すのは、流出評価における、津波水位と作用力の概念図である。

図-19に水平作用力と桁抵抗力の関係図を示す。数値解析で求めた第1径間と第2径間、第3径間のそれぞれの最大流速は5.7[m/sec]、7.4[m/sec]、6.9[m/sec]であり、この流速を用いて水平作用力を求める。なお、数値解析の最大水位は、T.P.+7.14

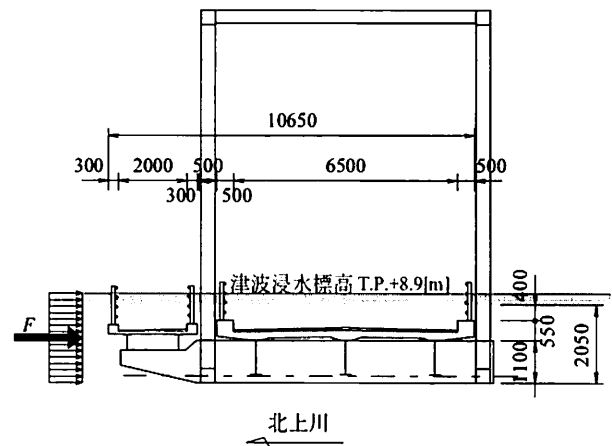


図-18 流出評価方法の概念図

[m]であり、この浸水高は桁が完全に浸水しないため、現地調査結果に基づく最大水位T.P.+8.9[m]を仮定している。

新北上大橋を対象として数値解析結果から得られた流速に基づき、式(1)から求めた水平方向の作用力と、式(2)から求めた抵抗力の関係を図-19に示す。鋼とコンクリートの間の摩擦係数には、Rabbatらの

実験結果³⁾から0.6と仮定した。

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

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

ここで、津波作用力 F [kN]、抗力係数 C_d 、水の密度 ρ_w (1030kg/m³)、水の流速 v 、上部構造の有効鉛直投影面積 A_n [m²]である。

以上より、図-19には桁抵抗力を津波作用力で除す式 (3) に基づき桁抵抗力津波作用力比 $\beta=1.0$ の境界線も示し、この境界線よりも右側にある場合は、作用力が抵抗力を上回り、流出する可能性があることを表す。

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

図中の[A]は、水平作用力と桁抵抗力がそれぞれ $F=9,336$ [kN]、 $S=9,780$ [kN]となり、水平作用力が桁抵抗力を若干下回る結果となるものの、 β 値は式(3)より 1.05 と求められ、作用力と抵抗力は非常に拮抗する。一方で、[B]と[C]では水平作用力が抵抗力を上回り、 β 値はいずれも 0.8 と求められる。

これらの β 値は全て 1.0 近傍となり、流出被害とやや整合しない傾向⁵⁾となることがわかる。これは、[B]、[C]のそれぞれの流速に対して、[A]部の流速が 5.5[m/sec]と比較的遅かったことに起因しており、今回使用した解析モデルに破堤後の断面を使用しており、当初の高水敷の影響は考慮されていないことが原因として挙げられる。今後、地形モデルを修正するなどの数値解析結果の精度向上の試みが課題であるものの、いずれの桁も、流出するか、流出を免れるかは僅差であったと考えられる。

5. まとめ

新北上地区を対象に、映像解析や数値解析を用いて津波の特徴を分析した。その結果から得られた知見を以下に示す。

- (1) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループの浸水高と数値解析の浸水高を比較した結果、合同調査の水位の平均値は 9.02[m]であるのに対して、数値解析の水位の平均値は、9.19[m]となり、両者の水位は概ね一致する。さらに映像解析の流速と数値解析の流速を比較した結果、映像解析の平均流速は、3.23 [m/s]であるのに対して、数値解析の平均流速は、2.14[m/s]と概ね一致する結果となる。このことから数値解析結果は津波特性を概ね再現していると考えられる。

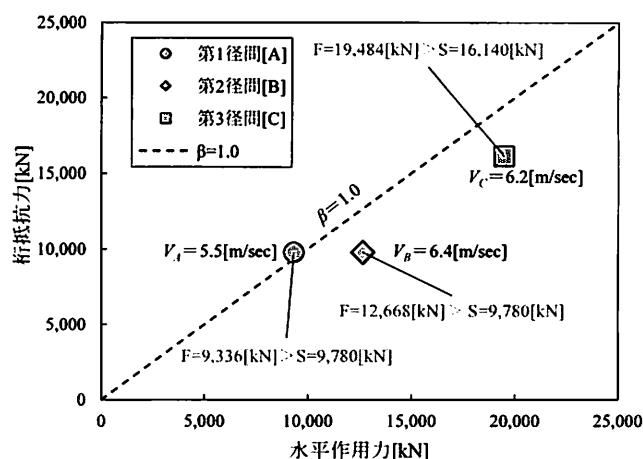


図-19 水平作用力と桁抵抗力の関係

- (2) 数値解析の結果得られた津波の流速ベクトル図から、津波は、河川部と左岸側の陸上部を遡上するが、津波が新北上川の堤防を越流し始めると、左岸側から右岸側へと流れの向きを変える。これは、新北上大橋の南側丘陵地が津波の進行を阻害する形で、津波の流れが蛇行するためと考えられる。さらに、この影響で新北上大橋の南側斜面近傍では、流速が非常に速くなる。
- (3) 数値解析の結果から得られた最大流速を用いて新北上大橋の流出評価を行うと、 β 値は 1.0 近傍となる。この結果から、流出桁と未流出桁の被害状況との整合性は、やや違いがみられるものの、いずれの桁も作用力と抵抗力の関係は拮抗する。

参考文献

- 1) 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 年東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報，2011.7
- 2) 佐々木達生・幸左賢二・神宮司博志：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, pp.805-810, 2013.7.
- 3) 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
- 4) 神宮司博志・幸左賢二・佐々木達生・佐藤崇：画像及び数値解析を用いた気仙大橋の津波被害分析，第 16 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.349-356, 2013.7.
- 5) 佐々木達生，幸左賢二，鄭玉龍：桁抵抗力津波作用力比に基づく橋梁の被害分析，構造工学論文集 Vol.59A, pp.417-427, 2013.3.