

## 画像解析と数値解析に基づく陸前高田地区の 津波特性の評価

佐々木達生<sup>1</sup>・幸左賢二<sup>2</sup>・神宮司博志<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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）

<sup>2</sup>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）

<sup>3</sup>学生会員 九州工業大学 工学部建設社会工学専攻2年（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）

### 1. はじめに

東北地方太平洋沖地震津波で東北地方の太平洋沿岸部の中でも甚大な被害が生じた陸前高田地区では、浸水域に架橋される橋梁に着目すれば、図-1に示すように、多数の橋梁が上部構造の流出被害を受けている。特に気仙川の河口部に位置する一般国道45号の気仙大橋は上流方向に大きく流出しており、緊急輸送路としての機能を喪失している。

今時津波以来、陸前高田市を対象とした津波の被害分析は、著者らを除いては、例えば佐貫<sup>1)</sup>が津波の遡上過程を知る手がかりとして、津波の流向に着目して現地の流跡データと数値シミュレーションの比較から沿岸低地の津波挙動の解明を試みている。他にも、小笠原<sup>2)</sup>や、山本<sup>3)</sup>、川崎<sup>4)</sup>、森<sup>5)</sup>等も散見されるものの、これらは主に被災後の津波痕跡に基づいた分析や、被害速報的な意味合いが強く、陸前高田地区に襲来した津波特性を、流速や水位上昇の傾向、波形状の解明といった観点で論じたものは、多数の映像資料が存在する割には少ないといえる。

本研究では、襲来した津波の模様を撮影した画像が多数存在する陸前高田市を対象に、画像解析と数値解析に基づく津波特性の分析から、気仙川を遡上する水位の上昇傾向や流速を明らかにするとともに、陸域の遡上状況に着目して防潮堤が健全であった場合の津波の減勢効果を明らかにする。

### 2. 陸前高田地区の橋梁の流出被害状況

#### (1) 陸前高田地区の橋梁被害

前述の様に、図-1に陸前高田地区沿岸部の浸水範囲と、現地調査で確認した橋梁位置を示す。同図に

示すように、陸前高田地区では今時津波による浸水域に位置する全24橋中、11橋の半数近くが上部構造の流出被害が生じている。流出被害が生じた橋梁の多くは、海岸線近傍であるか、または同地区内で最も大きな河川である気仙川を渡架する橋梁である。また、沼田跨線橋に代表される陸上橋にも流出被害が確認されることも特徴的である。

一方、同図中に示す川原川や浜田川は、気仙川に

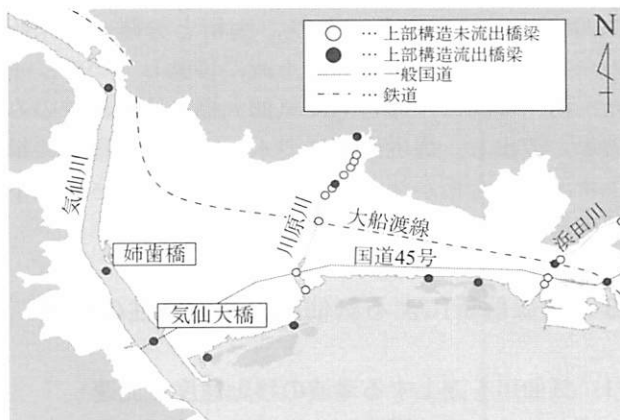


図-1 陸前高田地区の橋梁被害状況

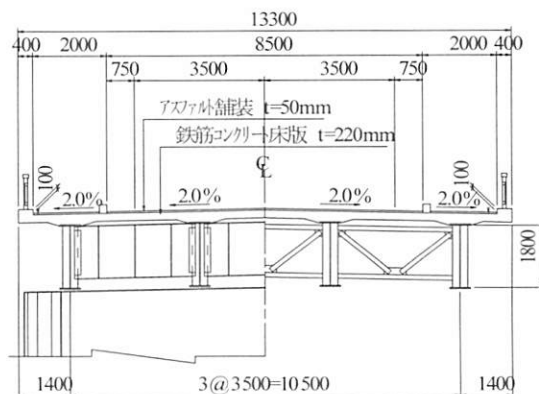


図-2 気仙大橋断面図

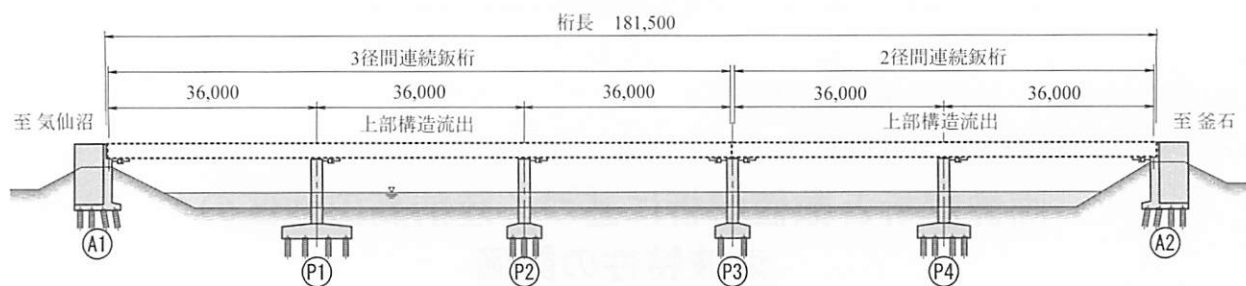


図-3 気仙大橋側面図

比べ小規模が河川であり、多数の橋梁が存在するものの、流出被害が生じた橋梁数は少なく川原川では2橋、浜田川では1橋にとどまる。

## (2) 気仙大橋の被害状況

気仙大橋の断面図と側面図をそれぞれ、図-2、図-3に示す。気仙大橋は橋長181.5mの3径間連続と2経過連続の合計5径間の非合成鋼連続鉄桁橋である。図-2に示すように、幅員構成は車道が8.5mであり、両側歩道はそれぞれ2.0m、全幅員が13.3mで厚さ220mmのRC床版を有する。桁の特徴としては、全幅員13.3mを4主桁で支えることから主桁間隔が3.5m、張出し長が1.4mと、RC床版としては比較的支間長が大きい。

図-4に気仙大橋の流出状況を示す。流出した桁は全5径間で、右岸側3径間が約330m、左岸側2径間が約290m上流に移動しており、主桁と分離した床版の一部が主桁よりもさらに上流に移動している。また、河川堤防は兩岸ともに気仙大橋の直上流でのみ破堤、流出し、堤内地側に浸水している。橋梁の損傷状況は、全桁が流出しているものの、残された下部構造に目立った損傷はみられない。



図-4 気仙大橋の流出状況

## 3. 画像解析による気仙川の津波特性の評価

### (1) 気仙川を遡上する津波の移動速度と流速

著者らは、現地調査によって陸前高田地区に襲来した遡上津波を撮影した岩手県警の空撮動画をはじめとする複数の画像資料を入手している。これらの資料を用いて、流速や波形状等の津波特性の分析を行った。

特に気仙川河口部には、津波の進行を妨げる構造物が無く、越流等の影響を受けない津波特性が純粋に現れていると考えられる。このことから、本章で述べる画像解析は、主に気仙川を遡上する津波特性を推定し、後述の数値解析結果の妥当性指標を得ることに加え、河川を遡上する津波の波形状の実態把握を目的とする。

図-5に気仙川を遡上する津波先端部の移動速度の



図-5 津波先端部の移動速度測定例

推定例を示す。推定には気仙川西部に位置する諏訪神社、並びに泉増寺から撮影された2種類の連続写真に加えて、岩手県警が上空より撮影した航空映像を用いている。各写真の撮影時刻は、撮影機器の設定時刻と思われる誤差が生じていたため、撮影時間の長い泉増寺からの写真群の時刻を基準とし、同一の車が橋を渡る瞬間など、3種類の資料に共通して出現する特定のイベントから時刻を同期した。

同図に示す例のように、同図が撮影された15時26分06秒から20秒後に、波の先端が約110m上流に移動していることから、移動速度は概ね5.5[m/sec]で

あると推定できる。

図-6には、漂流物を用いた津波流速の推定例を示す。同図は、気仙大橋の650m上流に位置する姉齒橋の桁前で確認された漂流物の移動速度を測定した

例であり、写真の撮影時間間隔と移動距離から、流速は概ね5.5[m/sec]であることがわかる。この流速は前述の津波先端部とは異なり、桁高と同じ高さの水位状態での流速であり、実際に作用した流速に近いものであると推察される。

上記のような分析手法を用いて各資料から推定した津波先端部の時系列変化のまとめを図-7に、各位置の移動速度と流速を表-1に示す。同図に示すように、波先端部の移動速度は姉齒橋付近までは概ね5～6[m/sec]である。高水敷のある[4]姉齒橋の上流側ではばらつきがあるものの、7～8[m/sec]と下流側に比べて大きな波先移動速度が得られており、これは高水敷が遡上方向に出現することで河川断面の変化した影響と考えられる。

また、同図より先端部の角度は、図中[4]で示す姉齒橋付近まで堤防に対して直角であることから、津波は気仙川に対して概ね直角に入射したと推定される。[4]の位置より上流側は、津波の左岸側部分が高水敷上に乗りあげた波先の進行が遅れる傾向が見受けられるが、低水路内を移動する波先の進行速度は逆に速くなり、かつ[4]より下流側と同様に河川堤防の接線方向に対して概ね直角である。

(2) 気仙川を遡上する津波の波形状

図-8に気仙川を遡上する津波の波形状の模式図を示す。遡上する津波の先端は概ね2[m]程度の高さを持つ碎波状の段波であり、5～6[m/sec]の速度で上流方向へ遡上する。姉齒橋を通過してから河川断面の変化の影響と思われる速度変化で7～8[m/sec]程度に上昇するものの、この先端部の段波は桁に直接作用せず、実際に作用するのはその後続く準定常的な持続流であることがわかる。

同図には、津波水位が桁高さまで上昇した段階に



図-6 漂流物による津波流速の推定例

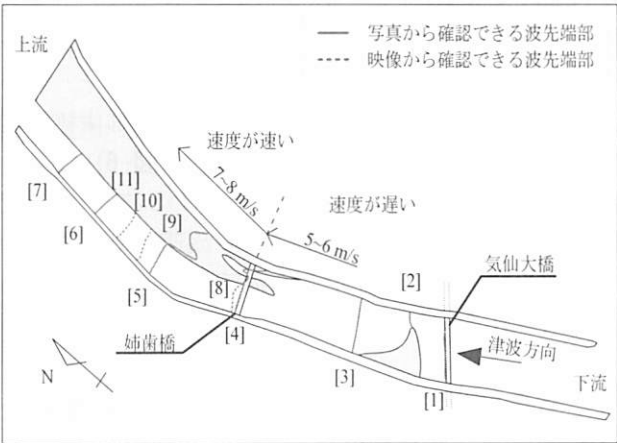


図-7 画像資料から確認される波先位置の時系列変化

表-1 画像と数値解析による河川部の遡上速度

| 位置        | 距離 $l$ (m) | 時間 $t$ (s) | 流速 $v$ (m/s) |     |      |
|-----------|------------|------------|--------------|-----|------|
|           |            |            | 写真           | 映像  | 数値解析 |
| [1]-[2]   | 110        | 20         | 5.5          | —   | 2.5  |
| [2]-[3]   | 150        | 26         | 5.8          | —   | 3.0  |
| [3]-[4]   | 390        | 70         | 5.6          | —   | 3.7  |
| [4]-[5]   | 300        | 40         | 7.5          | —   | 3.7  |
| [5]-[6]   | 265        | 32         | 8.3          | —   | —    |
| [6]-[7]   | 140        | 18         | 7.8          | —   | —    |
| [9]-[10]  | 70         | 12         | —            | 5.8 | —    |
| [10]-[11] | 90         | 12         | —            | 7.5 | —    |

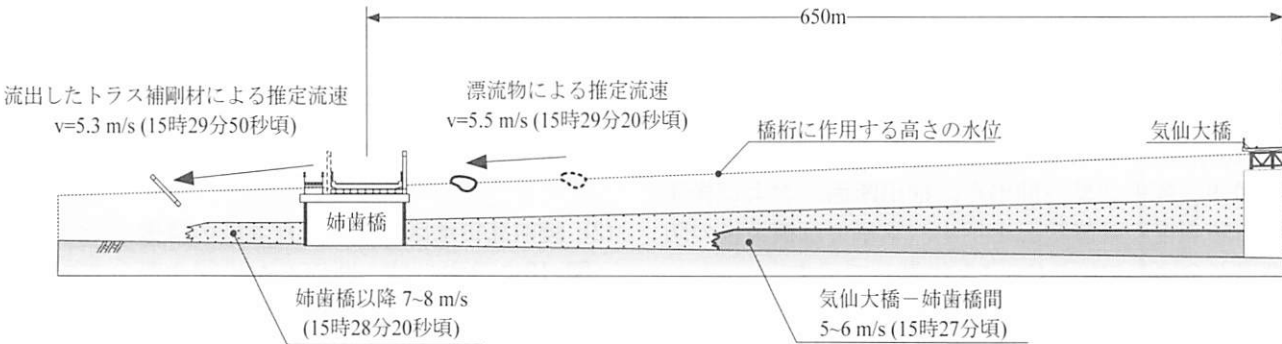


図-8 画像解析による遡上津波の側面模式図

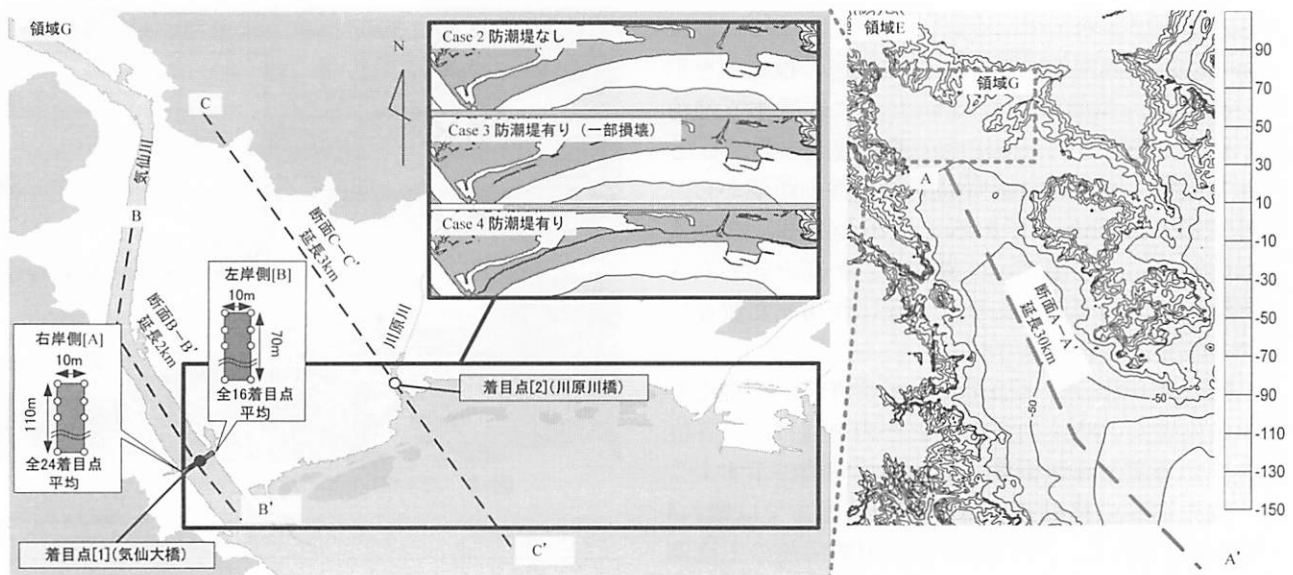


図-9 解析モデル及び結果抽出点

おける推定流速を示す。この推定流速は姉齒橋の直下流で確認された漂流物の移動速度（図-6）であり、流速は概ね5.5[m/sec]であることがわかる。この流速は桁位置と同じ高さの水位での流速であることから、姉齒橋に実際に作用した流速に近いものであると推察される。

#### 4. 数値解析に基づく流出メカニズムの推定

前述の映像分析に加えて、数値解析を実施し、両者の結果を比較するとともに気仙大橋の流出メカニズムを推定した。

##### (1) 解析条件および結果抽出点

数値解析は非線形長波理論式を用いており、変数の配置法はStaggered格子であり差分スキームはLeap-Frog法である。解析の主要な諸元を以下に示す。

- 波源は藤井佐竹モデル(Ver4.6)を用い、宮城県北部沖のGPS波浪計の最高潮位T.P.+5.7[m]を再現するべく、地震規模が変化しない程度に3領域のすべり量を1.5とした。
- 解析領域は7階層とし最小で6[m]メッシュとした。
- 地形データは国土地理院が公開する震災後の5[m]メッシュデータを最小領域に用いた。
- Manningの粗度係数は全領域で一律0.025とした。
- 初期潮位は気象庁観測値からT.P.+1.4[m]とした。

図-9に解析結果の抽出点、抽出断面、および後述する防潮堤の設置状況を示す。本章では被災後の防潮堤が全壊しているCase1を代表して示す。

気仙大橋の解析結果は抽出点毎に生じる微小な誤差や局所的な位置における特異値を除去することを

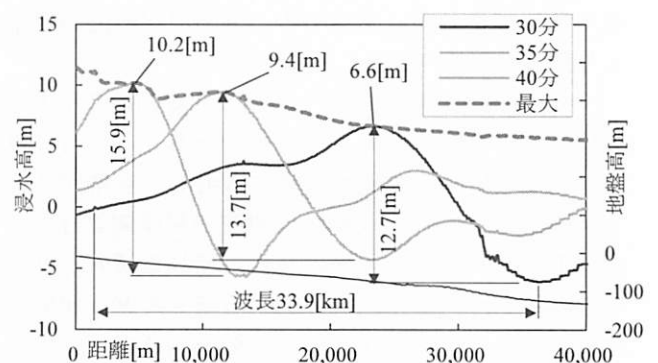


図-10 沖から海岸までの波形（A-A'断面）

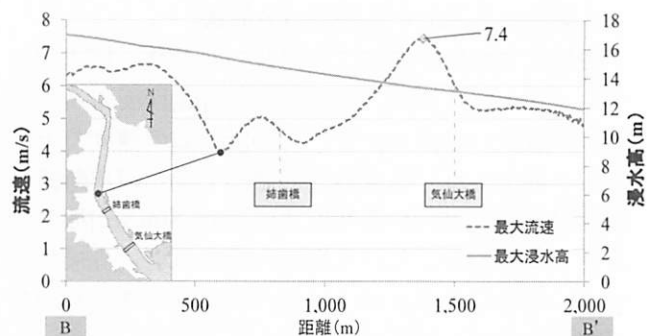


図-11 気仙川の最大流速および浸水高分布（B-B'断面）

目的に、図中に示す[A]右岸側と[B]左岸側のそれぞれ1連の桁に対して、桁長×幅員を1つの平面として、平面を10[m]ピッチで設置した16、または24の抽出点の結果を平均化した。

##### (2) 陸前高田地区に襲来した津波の特徴

図-10に示すのは、断面A-A'の浸水高分布である。同図は、図-9に示した海岸から沖方向へ延長40[km]にわたって50[m]間隔で設定した抽出点の浸水高を

プロットしたものである。浸水高0[m]から波形の谷部までの距離を波長、浸水高の頂点から谷部までの水位差を波高と定義すれば、図-10から地震発生から30分後で、波長34[km]、波高12.7[m]の波が、35分後、40分後でそれぞれ13.7[m]、15.9[m]と海岸線に近づくにつれて波高を増幅させながら伝搬していることがわかる。このことから、陸前高田地区に襲来した津波は非常に波長が長い、つまり、非常に周期が長い孤立波であったといえる。

次いで、図-11に示すのは、気仙川の縦断方向にとったB-B'断面の解析結果である。同図から、気仙川を遡上した津波の最大浸水高分布と最大流速分布が確認できる。

浸水高は河川上流、すなわち内陸の山間部に近づくほど大きな最大値をとる。これは、陸奥に行くに従って左右岸の丘陵地が迫ることで気仙川に津波が集中するためと考えられる。一方、最大流速分布では縦断方向に大きな差がみられる。気仙大橋上流部では7.4[m/sec]と特に大きな値をとるものの、姉齒橋上流部では4[m/sec]程度まで低下する。

図-12は、気仙大橋地点で最大流速となる時刻の流速ベクトル図を示す。ここで図-11で最大流速の小さい姉齒橋上流部に着目すると、堤防線形が屈曲しているとともに、全体の流向と方向が異なることがわかる。一方、大きな最大流速となる気仙大橋付近では、遡上する津波全体の流向と河川堤防の線形が並行である。これらのことから、津波の進行方向と気仙川の堤防法線方向が概ね一致する場合は最大流速が増加し、一致しない場合は最大流速が減少すると考えられる。

さらに図-12には、画像解析から得られた流速と、数値解析による同地点の最大流速値を併せ示した。同図から、画像解析と数値解析のそれぞれの流速には、1～2割程度の小さな差異が認められるものの、数値解析は概ね同程度の流速が再現される。

続いて、図-13は画像解析で推定した気仙大橋のP4橋脚位置の時刻歴水位変化と、数値解析結果に基づく左岸側平均値の水位時刻歴図を示す。同図には、本章の冒頭に述べたCase4の結果も併せ示した。

同図に示す約3分45秒間の両者の結果を比較すると、上昇の傾向に若干の差がみられるものの、全体を通しての水位上昇速度は約2[m/min]程度となり、概ね同様の結果が得られる。これは、Case4でも概ね同様の傾向であり、海岸線の膨張の有無によって気仙川を遡上する津波の水位上昇傾向に違いは生じないといえる。

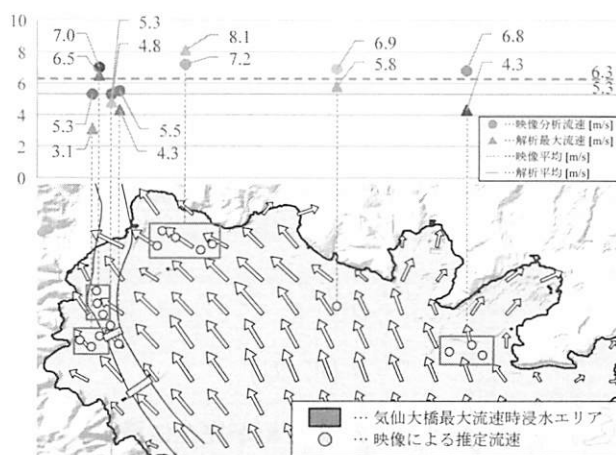


図-12 画像解析および数値解析による流速

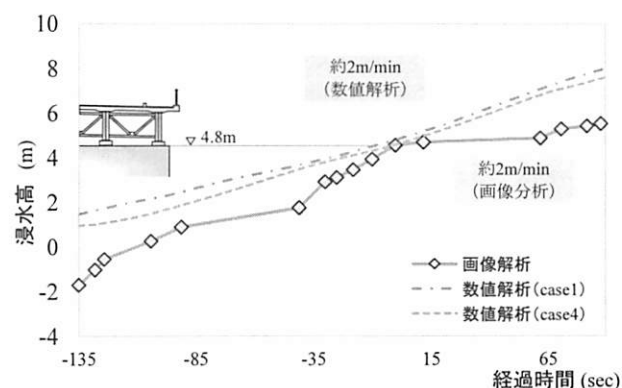


図-13 画像解析および数値解析による水位変化

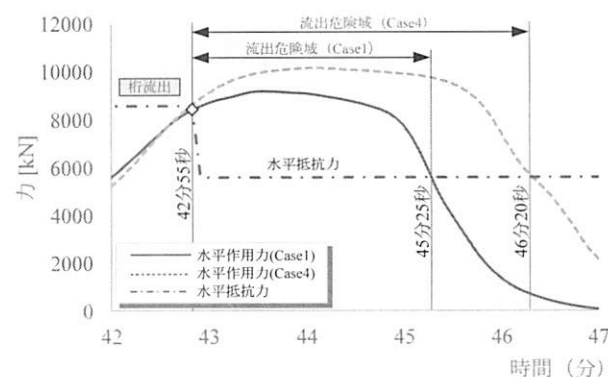


図-14 気仙大橋に働く水平作用力

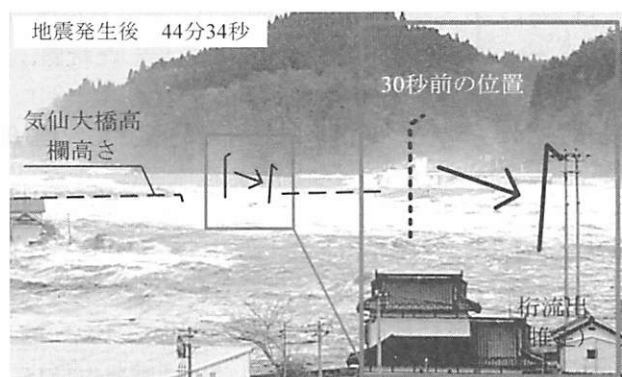


図-15 気仙大橋が流出したと推定される瞬間

### (3) 気仙大橋の流出メカニズムの推定

図-14に、気仙大橋を対象として数値解析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示す。同図も、前述の図-13と同様に、Case4の結果に基づいた作用力曲線を併記した。

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

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

ここで、式(2)の浮力Uは、桁が完全に浸水した以降にのみ考慮している。

同図より、Case1、Case4ともに地震発生から概ね43分後に津波による作用力が抵抗力を上回ることがわかるとともに、Case4では、気仙川を遡上する津波の流速が大きくなる時間が増加するため、作用力が抵抗力を上回った後も、作用力は上昇を続ける。

図-15に示すのは、気仙大橋が流出したと推定される瞬間の写真である。同図は、気仙大橋の鏡面状に設置された照明柱が移動している様子が確認できる。この写真の撮影時刻から推定すると、気仙大橋が流出したのは地震発生から44分34秒後であり、この時刻は図-14に示した流出危険域に該当するとともに、流出事実と整合する。このことから、気仙大橋は津波による水平作用力で流出したと推定される。

## 5. 防潮堤設置状況による影響

本章では、大きく損壊した海岸防潮堤の設置状況が津波の陸域遡上に与える影響度を、防潮堤の被災程度をパラメータとした数値解析結果から把握する。モデルは防潮堤のみを変えており、下記の4ケースを実施している。

- a) Case1；防潮堤が全壊している状態
- b) Case2；松原等を被災前に再現し、かつ防潮堤が無い状態
- c) Case3；被災後わずかに防潮堤が残置した箇所のみ、被災前堤高5.5[m]で再現した状態
- d) Case4；被災前の健全な状態

陸域の遡上状況の変化の確認を目的として、図-9に示したC-C'断面における流速と浸水高について、最も顕著な差が生じたCase1とCase4を代表として比較する。

### (1) 陸域の津波特性の変化

図-16は、最大浸水高分布、並びに地震発生後45分の浸水高分布図を示す。同図(a)に示す最大浸水

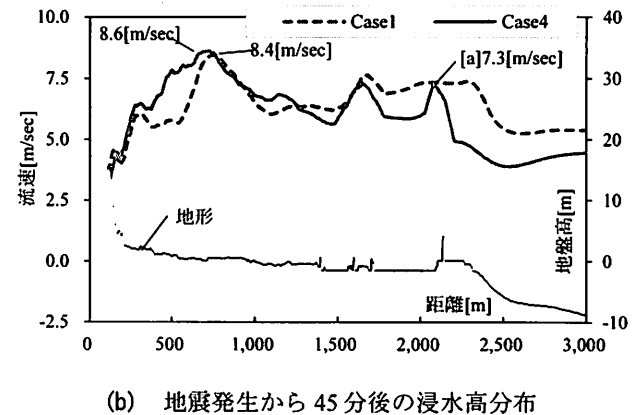
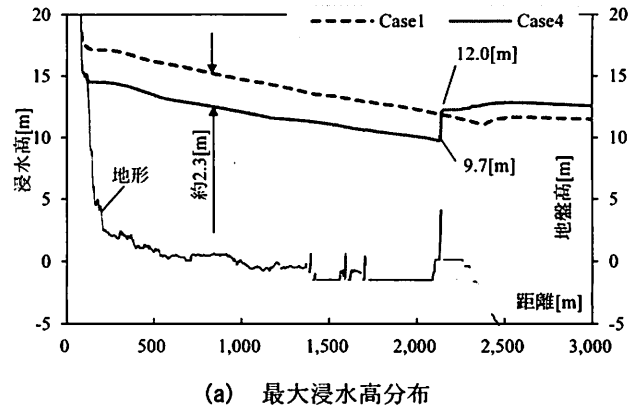


図-16 防潮堤設置状況の違いによる浸水高分布の比較

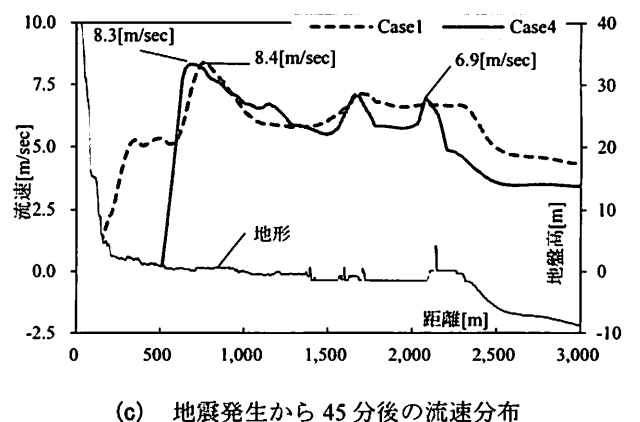
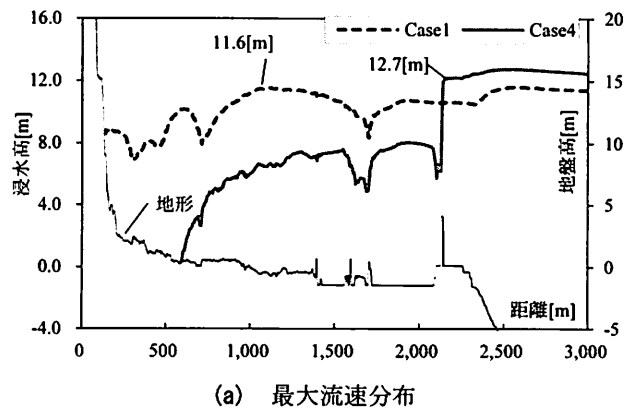


図-17 防潮堤設置状況の違いによる流速分布の比較

高分布を確認すると、防潮堤より海側の浸水高は、Case1, Case4でそれぞれ12[m]程度の同等の浸水高分布となる。一方、陸側では、Case1は水頭差が無く、陸奥に行くに従い最大浸水高は徐々に上昇し、斜面付近で最大の18[m]となり、Case4では防潮堤の位置で急激な水頭差が生じ、浸水高は2.3[m]減少して9.7[m]となる。以降は、Case1と同様の傾向で最大浸水高が上昇し、斜面付近で最大の15[m]となる。このことから、防潮堤が健全で、その機能を十分に発揮できれば、陸域の浸水高を全体的に2[m]程度下げる効果があることがわかる。

さらに、同図(b)に45分後のCase1, Case4のそれぞれ45分の浸水高分布を示している。同図から、Case4は防潮堤の前背面位置で急激な水位差が生じているとともに、陸奥の津波先端位置が斜面に到達しておらず、防潮堤が健全な場合は津波の進行を遅延させる効果があることもわかる。

次いで、図-17(a)に、最大流速分布を、図-16と同時刻の45分後の流速分布を同図(b)に示した。同図(a)より、図中[a]に示すように、越流の影響で7.3[m/sec]まで流速が上昇する箇所があるものの、全体的に1,700[m]付近より海側ではCase4の流速が低い傾向が伺える。一方、陸側では目立った変化は生じず、陸域の最大流速もCase1, Case2でそれぞれ8.4[m/sec], 8.6[m/sec]と大きな差は生じない。このことから、防潮堤の効果は、ある程度の流速が減少が期待できるものの、陸奥に行くに従って流速の差が生じなくなるといえる。

また、同図(b)では、前述のようにCase4では防潮堤が健全であるため、陸域への津波進行の遅延効果によって各時刻の流速分布は異なる。特に、Case4の防潮堤の陸側では6.9[m/sec]と、高い流速が確認される。これは、防潮堤を越流する際に生じる流速の上昇と考えられ、図-16で前述した津波の進行に対して防潮堤の背面側で浸水高が急激に減少する理由は、この流速の上昇によって生じたと推察される。

## (2) 防潮堤が陸上遡上津波に与える影響

図-18に、図-9で示した着目点[2]の川原川橋位置の浸水高と流速の時刻歴変化を示す。同図より、防潮堤が健全な場合（Case4）は浸水高が約2[m]低下することが確認できる。また、流速は6.9[m/sec]から6.0[m/sec]と若干の低下が確認できるものの、顕著な差は生じていない。

この陸奥で流速の差が生じない現象を考察する目的で、図-19に式(3)で表される津波のエネルギーを評価した図を示した。エネルギー評価は図-17(a)に

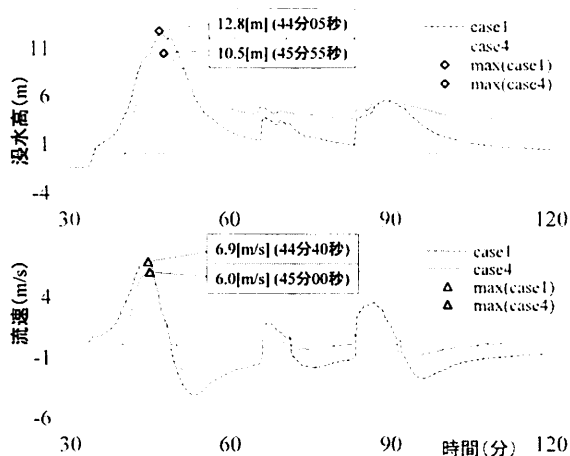
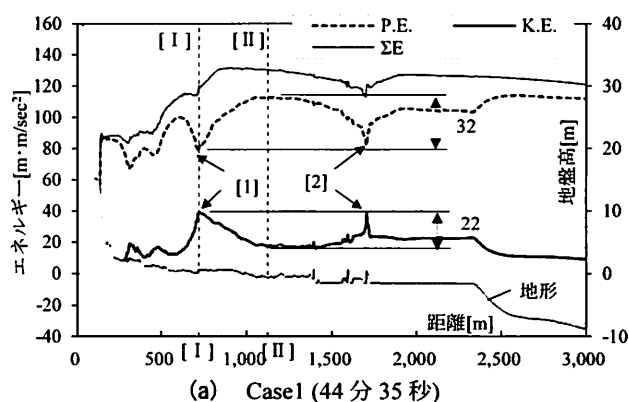
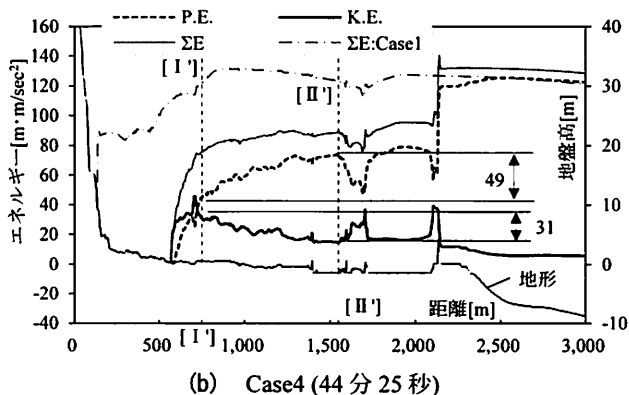


図-18 川原川橋における防潮堤の影響



(a) Case1 (44分35秒)



(b) Case4 (44分25秒)

図-19 津波エネルギーの評価

示した、陸奥で最大流速が生じる時刻の浸水高と流速を用いており、Case1, Case4でそれぞれ地震発生後44分35秒と、44分25秒である。

$$E = \frac{v^2}{2} + gz \quad (3)$$

ここで、 $E$ はエネルギー[m·m/sec²],  $v$ は流速[m/sec],  $g$ は重力加速度(=9.81)[m/sec²],  $z$ は浸水高[m]である。

まず、図-19(a)から、位置エネルギーと運動エネルギーのそれぞれの曲線は、水平を軸として反転したような関係にあることがわかる。特に、図中の[1]と[2]に示すように、位置エネルギーが極端に減少する箇所に対応して、運動エネルギーが上昇する

傾向が確認できる。この箇所は地形に凹凸がみられる箇所であり同位置の総エネルギーは若干の乱れはあるものの、ほぼ滑らかな曲線を描く。さらに、図中の[2]から[□]まで位置エネルギーは一端上昇するものの、[□]から[□]へ地形に対応して位置エネルギーは $32[m \cdot m/sec^2]$ 減少し、運動エネルギーは $22[m \cdot m/sec^2]$ 上昇する。この比率は1:0.7程度であり、運動エネルギーの上昇量は位置エネルギーの減少量に比して3割程度の誤差があるものの、総じてこれらは総和で釣り合っているといえる。

一方、同図(b)に示すように、Case4ではCase1とは異なり、防潮堤を超えた時点で急激に総エネルギーが減少する。以降は、Case1と同様の傾向を呈しているものの、図中の[□]から[□]までに位置エネルギーは減少を続け、 $49[m \cdot m/sec^2]$ の減少量に対して、運動エネルギーは $31[m \cdot m/sec^2]$ 上昇する。この比率は1:0.6程度であり、Case1と同程度となる。

以上から、位置エネルギーの減少量が運動エネルギーの増加量に寄与することがわかる。従って、流速の増加は水位差によって生じていると考えられる。

これらを総括すると、防潮堤のように大きな障害物がある場合は、越流によって生じる運動エネルギーの急激な上昇に反応して位置エネルギーが減少し、津波のエネルギーが吸収されて総エネルギーは減少する。しかしながら地形状況による水位差に起因する位置エネルギーの減少量が運動エネルギーを上昇させ、陸奥部で流速差が減少したと推察される。

最後に図-20にCase1とCase4のそれぞれの地震発生から45分後の遡上状況図を示す。同図から、防潮堤が全壊しているモデルを用いたCase1では陸奥の斜面に津波先端が到達しているのに対して、健全な防潮堤モデルを用いたCase4は、斜面に到達していない。以上より、防潮堤が健全であった場合は、陸域の浸水高を2[m]程度減少させることに加え、遡上の進行速度を減少させる効果があることが明らかとなった。

## 6. まとめ

気仙川を遡上する津波特性を、画像解析と数値解析を用いて分析した。次いで、防潮堤の健全度をパラメータとした数値解析結果を用いて、陸上を遡上する津波に与える影響度を分析した。これらの分析の結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) 陸前高田地区の映像等の分析結果より、遡上津波の先端部は2m程度の波高であり、橋梁上部構造には作用しないことが明らかとなった。一方、上部構造に作用したのは、後続の準定常的な持

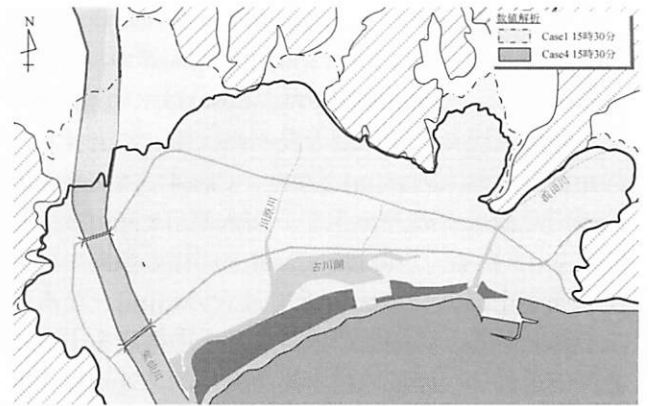


図-20 遡上範囲の比較（地震発生から45分後）

続流でありその流速は5m/s前後であったと推定される。

- (2) 非線形長波理論に基づく数値解析を実施し、気仙大橋に作用したと推測される流速の時刻歴波形から算出した水平作用力は、地震発生から43分後の桁が浸水する時点で抵抗力を上回る結果が得られた。この結果は写真画像や流出の事実と整合することから、気仙大橋は津波による水平作用力で流出したと推定される。
- (3) 海岸線に位置する防潮堤の被災度をパラメータとした数値解析結果から、防潮堤が健全な場合は陸上の最大浸水高を約2[m]低下させ、津波の進行を遅延させる効果があることが確認された。一方で、陸域の海岸線付近の流速は防潮堤の効果で減少するものの、陸奥に進行するに従い地形の影響を受けてその効果は減少する。

## 参考文献

- 1) 佐貫宏，高川智博，田島芳満，佐藤慎司：流向に着目した2011年東北地方太平洋沖地震津波の挙動解析，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.69，No.2，pp. I\_201-I\_205，2013。
- 2) 小笠原敏記，古坂梢，柳川竜一，岩間俊二，堺茂樹：東北地方太平洋沖地震津波による岩手県沿岸における建物被害の特性，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.69，No.2，pp. I\_356-I\_360，2013。
- 3) 山本吉道，成吉兼二，石井俊輔：東北地方太平洋沖地震津波による浸水域被害と構造物被害予測法，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.68，No.2，pp. I\_356-I\_360，2012。
- 4) 川崎浩司：津波の基本特性と東北地方太平洋沖地震による津波災害，混相流，26巻，1号，pp.11-18，2012。
- 5) 森信人：東北地方太平洋沖地震津波合同調査結果と被災の様子，混相流，26巻，1号，pp.19-27，2012。