

陸前高田地区に襲来した津波の特性に関する研究

佐々木達生¹・幸左賢二²・中城拓也³

¹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)

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

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震津波で甚大な被害が生じた三陸沿岸部において、特に陸前高田地区では広範囲に渡る浸水面積¹⁾であったことに加え、津波の痕跡高から推測された陸域の浸水高²⁾は非常に高いものであった。

それが故に、陸前高田地区に遡上した津波で発生した被害の状況は甚大なものであったと考えられるが、陸前高田地区に代表される三陸沿岸部特有のリアス式海岸は、海岸形状が複雑であることや海底勾配が急峻であるために、波高が増幅されやすい環境にあることがあげられる。

本研究では、湾内に侵入した津波の水位波形が、地形のどのような影響を受けて陸域に到達するのかを明らかにすることを目的としている。

具体的には、三陸沿岸部を代表して陸前高田地区を対象に、例えば画像解析から得た流速等の実測値等と比較して再現性を確認した2次元の数値解析に基づき、数値解析結果から得た最大浸水高を用いて、広田湾に侵入した津波の流量の変化を把握した。さらに、広田湾に侵入した津波の水位波形の変化の過程を説明することで、浅水変形による水位の増加メカニズムの説明を試みる。

2. 陸前高田地区の浸水被害状況

(1) 陸前高田地区の橋梁被害の状況

図-1に陸前高田地区の津波浸水範囲と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

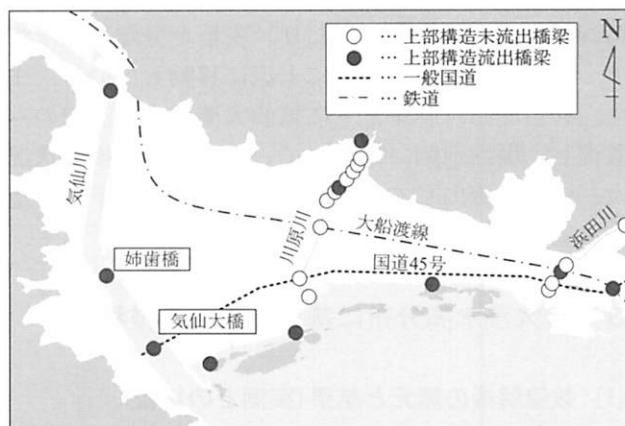


図-1 陸前高田地区の浸水範囲と橋梁被害状況

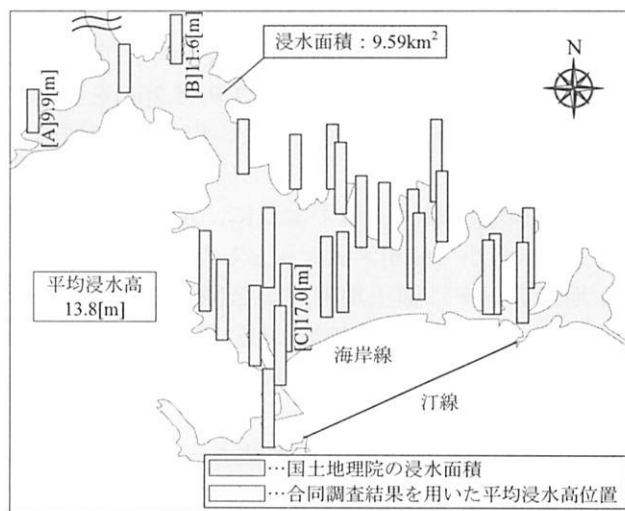


図-2 陸前高田地区の浸水高

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

(2) 浸水範囲と浸水高

図-2に示すのは、国土地理院が公開する1/2万5千の陸前高田地区の浸水範囲¹⁾に、東北地方合同調査グループの浸水高²⁾を併せ示した。

同図によれば、陸前高田地区の浸水面積は9.56[km²]に及ぶ。この範囲は広田湾に面する陸前高田地区の丘陵部に囲まれた平地の面積に相当する。

浸水高は平均値で表せば13.8[m]と非常に高く、特に海岸線付近では最大で17.0[m]にも及ぶ。その値は陸奥に向かって徐々に低くなるものの、図中に示す範囲の最も陸奥部でも9.9[m]と高めの傾向を呈する。このように、陸前高田地区に襲来した津波の陸上部の浸水高は非常に高く、このことが浸水面積を拡大した理由であると考えられる。

また、陸前高田地区の流出橋梁を代表して、図-3に気仙大橋の流出被害状況を示す。流出した桁は全5径間で、右岸側3径間が約330[m]、左岸側2径間が約290[m]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-3 気仙大橋の流出被害状況

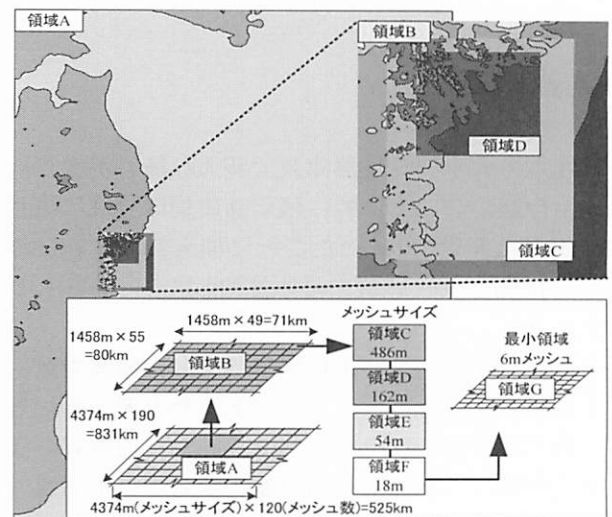


図-4 数値解析で設定した解析領域

3. 最大浸水高分布に基づく流量の推移

(1) 数値解析の諸元と結果(実測との比較)

数値解析は非線形長波理論に基いており、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。
- 解析領域は図-4に示すように、AからGの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5[m]メッシュデータを最小解析領域のGに用いており、海岸部は図-5に示すように被災後の地形状態をそのまま用いた。
- 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-6に数値解析結果に基づく浸水範囲と国土地理

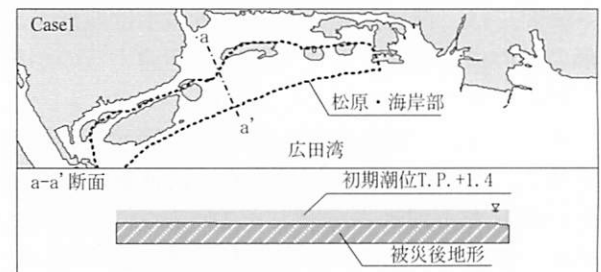


図-5 海岸線付近の地形モデル

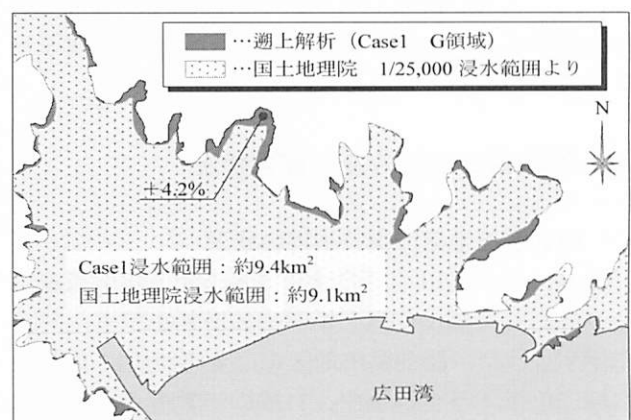


図-6 浸水範囲の比較

院から公開される2万5千分の1の浸水範囲の比較を示す。比較した範囲は数値解析上の最小解析領域Gと同範囲の国土地理院が公開する浸水範囲である。

同図に示すように、実際の浸水面積が9.1[km²]であるのに対して、数値解析結果に基づく浸水面積は9.4[km²]と4%程度の微小な誤差は伴うものの、概ね近い浸水範囲が再現される。

数値解析結果による浸水面積が実際よりも若干大きい範囲となる原因は、波源モデルや計算式等、様々な要因が考えられるが、特に地形モデルに被災後の地形データを用いたため、つまり、被災前に存在していた海岸線付近の砂浜や防潮堤が、数値解析上は無いものとして評価されたためと考えられる。

次いで図-7 には、地区中央部が概ね最大流速となる時刻の流速ベクトル図を示すとともに、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、最大流速の平均値は、画像解析と数値解析でそれぞれ 6.3[m/s]、5.3[m/s]と差異が認められるものの、数値解析は実測値と概ね同程度の流速が再現される。

また、同図には前述の浸水高²⁾と同位置で抽出した数値解析結果の最大浸水高を示す。図の下段に示す通り、実測の浸水高の平均値が 13.8[m]であるのに対して、数値解析で得た浸水高は 14.6[m]と約 6%の微小な差異であることがわかる。

これらの結果をもって、本研究に用いた数値解析は後述する分析に耐え得る精度を持っていると判断した。

(2) エリアの定義と流量の算出方法

本節では、前章で述べたように広い浸水範囲と高い浸水高を記録した陸前高田地区に襲来した津波について、湾口から海岸線まで伝播する津波の流量と陸上に遡上した津波の流量の推移を把握する。

図-8に、流量を算出するエリアを示す。同図に示すように湾口から陸域に向かって、それぞれエリアA、エリアB、エリアCとする。これらの範囲は陸上に遡上した浸水面積と等価となるように設定したエリアである。陸上に遡上した津波の浸水深で重みを付けて算出した平均幅で面積を除して得た距離を平均遡上距離と定義すれば、平均遡上距離は2.95[km]と算出される。汀線を境界として海側に平均遡上距離で区切ることで各エリアを設定している。なお、ここでいう汀線とは、湾曲する海岸線の端部を結んだ線である。

このようにして区切った各エリアに、10[m]間隔の格子点状を設置して最大浸水高（陸上においては

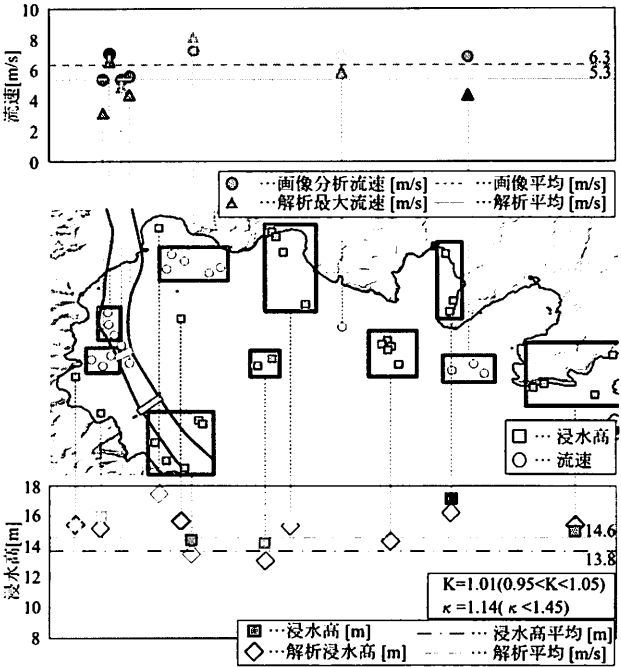


図-7 流速と浸水高の比較

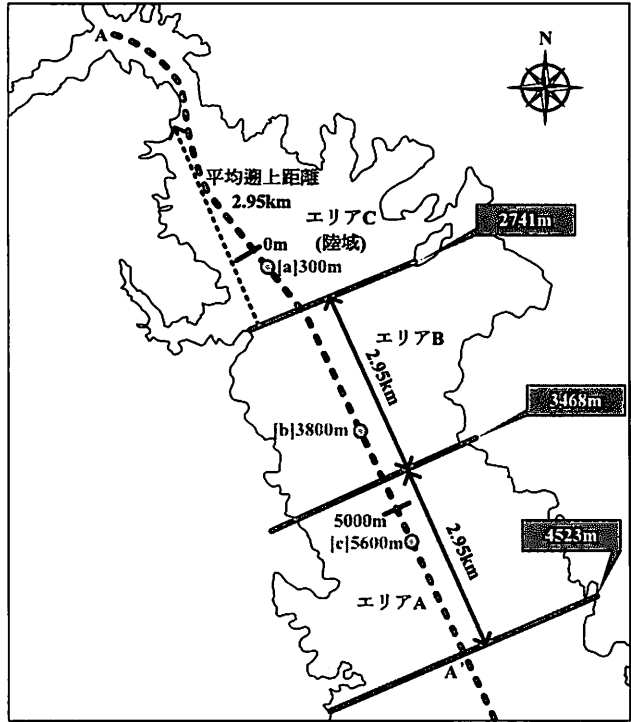


図-8 流量を算出するエリアの定義

最大浸水深)を抽出して、各エリアで平均化する。

さらに、この平均化した最大浸水高（陸上は最大浸水深）を面積で積分することで各エリアの流量を得る。このことを示したのが図-9であるが、ここで算出した流量は、各抽出点で異なる時刻で生じる最大浸水高（陸上では最大浸水深）に基づいているため、時間軸で累積した流量と同義である。

(3) 流量の比較

前節で説明した方法で算出したエリア毎の流量を図-10に示す。同図に示す通りエリアA, B, Cのそれぞれの流量は、 $123.80 \times 10^6 [\text{m}^3]$ 、 $135.83 \times 10^6 [\text{m}^3]$ 、 $134.74 \times 10^6 [\text{m}^3]$ となり、AからBで流量は10%増加し、BからCでほぼ変化は無い。このことから、湾口へ入射した津波の流量は湾内で増加して海岸線に到達するが、陸上を遡上する津波の流量は海岸線に到達した流量がそのまま推移するといえる。

ところで、湾口に入射した津波の流量が海岸線までに増加する理由は、前述のように各エリアの面積が等価であることから、ここでは津波の最大浸水高分布に支配されると仮定できる。

図-11に、前述の図-8、図-10で定義するA-A'縦断上の最大浸水高分布を示す。この最大浸水高分布は、同図には代表で32分、33分30秒、35分、37分、40分、42分、48分の浸水高分布の最大値を示しており、これらを通る線であるが、実際には5秒間隔の最大値を連続させた図である。なお、沖合からの最大浸水高の変化の状況が確認出来るように、同図の横軸の幅は海岸線を0[m]として、陸側に5,000[m]、海側に25,000[m]の範囲をとっている。

まず、同図から最大浸水高は、海岸線より沖へ25,000[m]の位置より徐々に増幅しており、図に示す代表点の最大浸水高は、8.7[m]、9.9[m]、10.3[m]、9.7[m]となってエリアA、言い換えれば湾口に進入する。ここで、エリアAの海側境界部で増幅した最大浸水高が一度減少するのは、沖から伝播する津波が湾口に進入することで幅方向の境界が出現し、流入断面が減少することで流速が増加した結果で生じ



図-9 エリア毎の浸水高の抽出点と平均浸水高

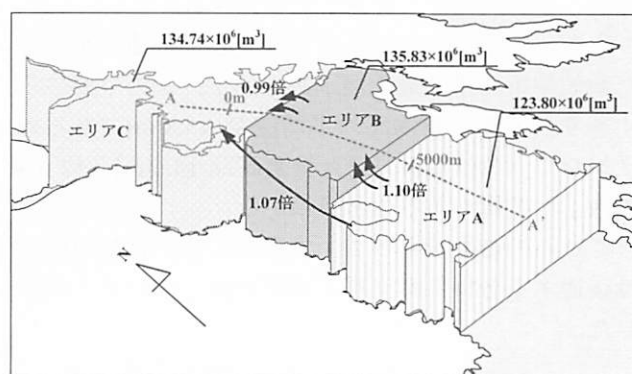


図-10 最大浸水高分布に基づくエリア毎の流量

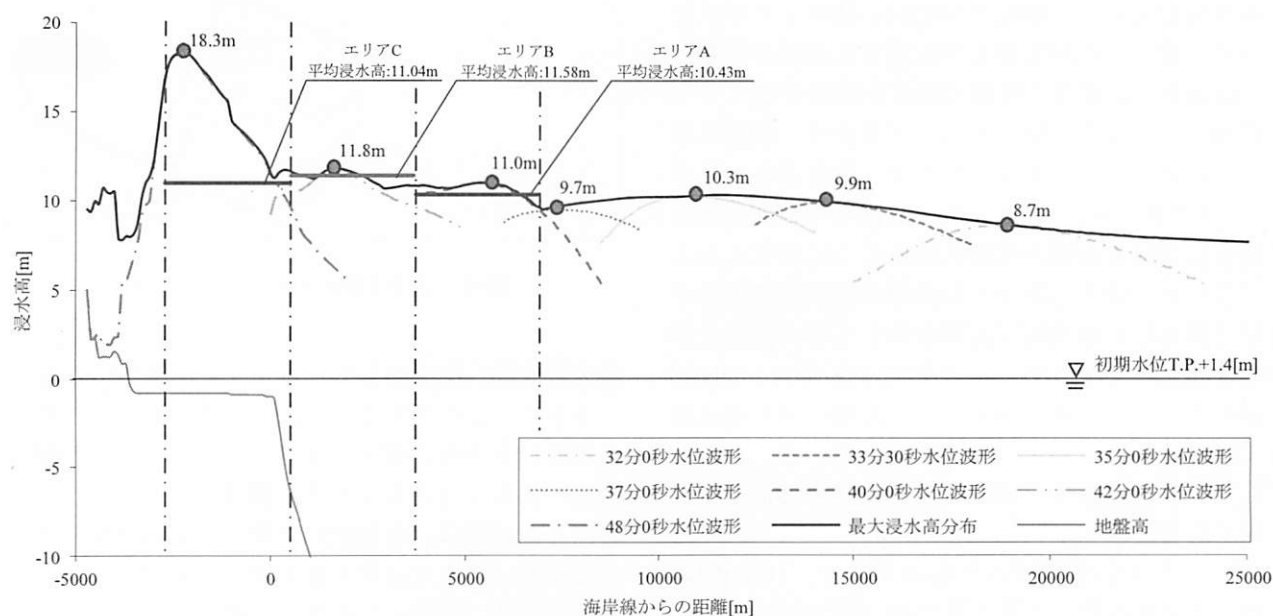


図-11 最大浸水高分布とエリア毎の平均浸水高

たとえられる。

続いて、エリアAに進入した津波の最大浸水高はエリアBとCの境界まで増加傾向を見せて、陸域であるエリアCに到達する。このとき、同図に示す一点鎖線で区切ったエリアA、エリアB、エリアCの、それぞれの最大浸水高の平均値は、それぞれ10.43[m]、11.58[m]、11.0[m]となり、これらの比率は1：1.11：1.05である。各々のエリアの浸水高の比率は、前述の各々のエリアの流量の比率と概ね同値となる。

従って、湾内に進入した津波の流量の変化を説明するのは、最大浸水高がどのように変化するかを説明することと同義である。

なお、エリアCにおいて陸上に遡上した津波の最大浸水高はさらに増加傾向を見せ、陸側の一点鎖線で示した位置にて、最大値の18.3[m]を呈する。これはこの位置が図-8で示した平均遡上距離2.95[km]の位置であり、ここで急激に津波の進行方向に対して陸域の両側の丘陵部が狭まるために生じた増幅傾向と考えられる。

4. 波形状の変化

前章に述べた流量は、最大浸水高分布に基いて求めた流量であり、各エリアの面積は概ね同等であるから、流量の変化は最大浸水高が変化することに起因する。本章では、この最大浸水高が変化することについて詳細に分析を行う。

(1) 時刻毎の波形の変化状況

本節では各エリア毎の代表時刻における水位波形を示して波形の変化の状況を説明する。代表時刻は、エリアAの区間で最大浸水高のピークとなる40分の水位波形を[a]とし、エリアBの区間で最大浸水高のピークとなる42分の水位波形を[b]とする。

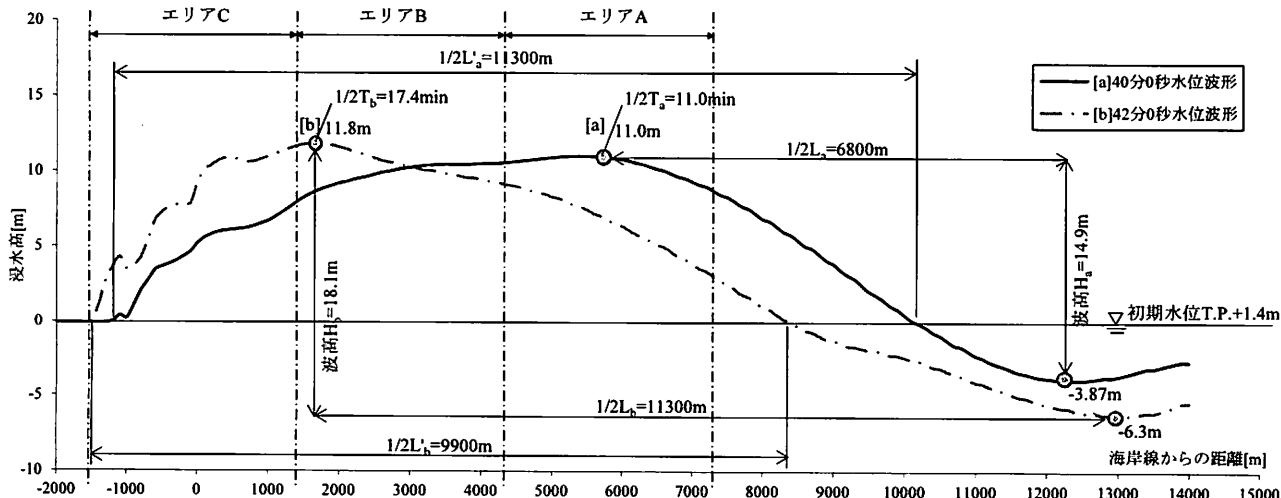
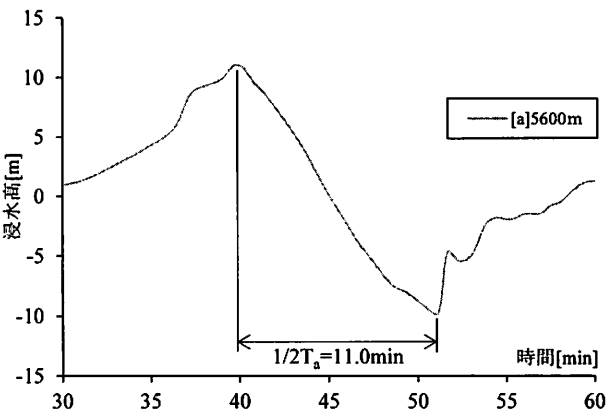


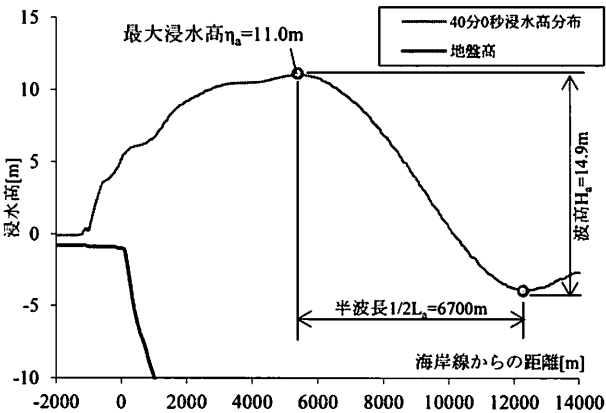
図-13 エリア毎の水位波形に基づく波高と波長

先ず、1/2波長と1/2周期の取り方を図-12に示した。図-12 (a) は、図-13に示す[a]の位置における時刻歴水位波形である。図に示す様に、最大浸水高となる波の峰と最小浸水高となる波の谷が明確に捉えることができる。波の全体像を概ねsinカーブに近い形状であると考えれば、波の峰と谷の間を周期の1/2と考えることができる。

同様に、図-12 (b) に1/2波長の取り方を示した。



(a) [a]地点の周期の取り方 (軸ラベルを追加)



(b) [a]地点の波高、波長の取り方 (軸ラベルを追加)

図-12 周期、波高、波長の取り方

この場合の横軸は距離であり、40分後の縦断方向の水位波形である。周期と同様の考えに基づいて、波の峰と谷の間の距離を1/2波長と定義し、またその間の高さ方向の振幅を波高と定義する。

この場合、[a]地点の1/2周期、1/2波長、波高はそれぞれ $1/2T_a=11.0[\text{min}]$ 、 $1/2L_a=6,800[\text{m}]$ 、 $H_a=14.9[\text{m}]$ となる。

これに対して、図-12に示した[b]地点の1/2周期、1/2波長、波高はそれぞれ $1/2T_b=17.4[\text{min}]$ 、 $1/2L_b=11,300[\text{m}]$ 、 $H_b=18.1[\text{m}]$ となる。この2つの水位波形を比較すれば、[a]から[b]に移動することで1/2周期は58%程度、1/2波長は66%程度増加するとともに、波高は21%程度増加する。ここで[B]の波形における1/2波長が増加するのは、波形の谷の箇所では引き波に転じているためであり見かけ上の増加であることを踏まえて、津波の先端部（本稿は水位変動が生じ始める位置と定義する）から津波の尾部（本稿は水位が低下して初期水位と交わる位置と定義する）までを $1/2L'$ と定義し直す。

このようにして[a]と[b]の波形を比較すれば、 $1/2L'_a=11,300[\text{m}]$ 、 $1/2L'_b=9,900[\text{m}]$ と、[a]から[b]に移動することで、 $1/2L'$ は12%減少する。このことから、エリアAからエリアBに津波が進行することで最大浸水高が増加するのは、初期水位から上方に水位が変動する範囲の波形の長さ $1/2L'$ が減少するためと考えられる。

(2) Greenの式による浸水高との比較

海岸線に向けて波高が変化する現象について、Greenの法則を用いて説明を試みる。

図-14に示すのは、エリアAの海側の境界線から、沖へ1[km]離れた（海岸線から8[km]）位置を波の入

射境界 [1]とする。数値解析の結果から [1] で水位波形のピークとなる最大浸水高は9.9[m]である。そこから1[km]陸側へ移動した海岸線から7[km]位置の最大浸水高は9.5[m]と若干減少する。

一方、式(1)に示すGreenの式に基づき、位置[1]における最大浸水高 $\eta_0=9.9[\text{m}]$ 、水深 $h_0=51.6[\text{m}]$ 、湾幅 $b_0=4,606[\text{m}]$ を初期条件とする。次いで、位置[2]における $h_1=45.2[\text{m}]$ 、湾幅 $b_1=4,628[\text{m}]$ から浸水高（水面変動量） η_1 を求めると、同図に示すように $\eta_1=10.2[\text{m}]$ となり、数値解析結果とは逆に増加傾向となる。

$$\left| \frac{\eta_n}{\eta_0} \right| = \left(\frac{b_0}{b_n} \right)^{1/2} \left(\frac{h_0}{h_n} \right)^{1/4} \quad (1)$$

数値解析結果とGreenの式の浸水高の傾向の違いは、Greenの式では沖から陸に向かって一様に水深と湾幅が変化することが前提条件となる簡易的な評価式であることに起因すると考えられる。ただし、位置[2]の浸水高の差異は7%程度と小さい。

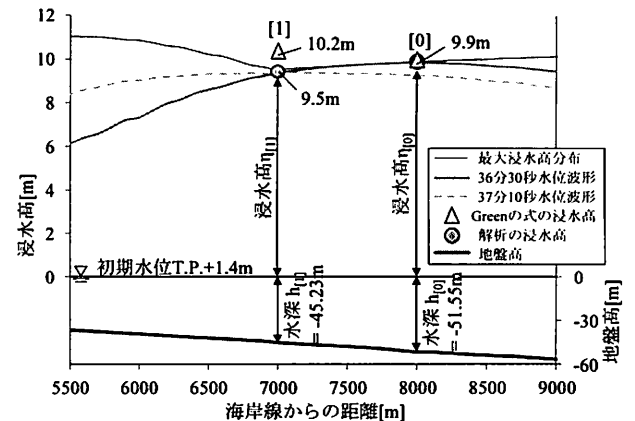


図-14 Green の式に基づく波高の算出

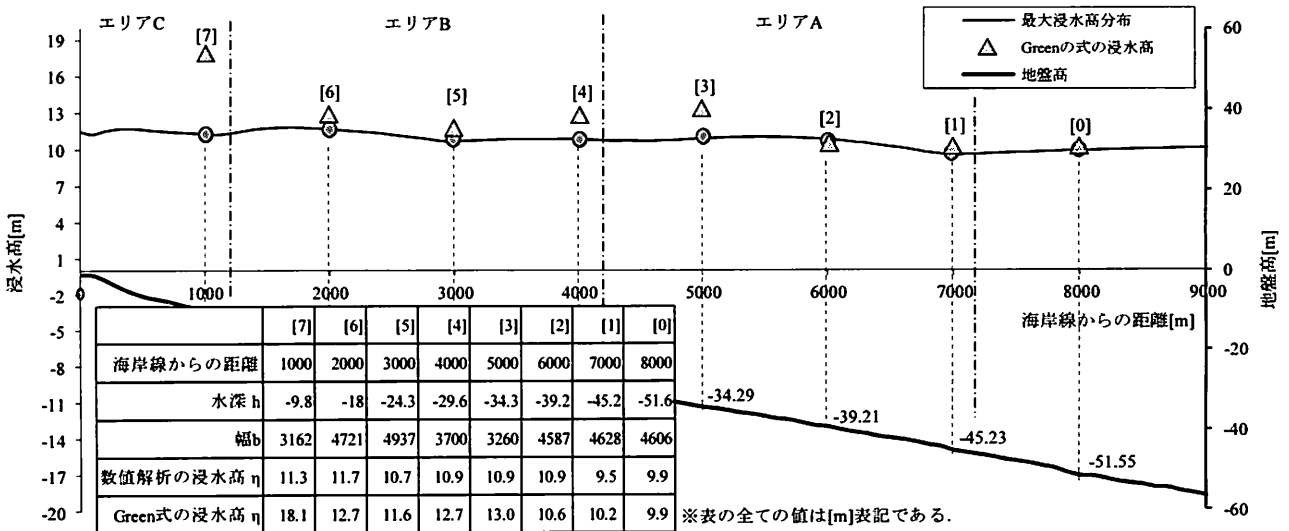


図-15 Green の式に基づく最大浸水高と数値解析結果の比較

このように、海岸線から沖へ8[km]の範囲で、1[km]毎にGreenの式で求めた浸水高と数値解析の結果を比較した図を図-15に示した。

同図を確認すると、見かけ上はGreenの式で求めた浸水高の値は、数値解析から得た浸水高と良く一致する。しかしながら、図中の[3], [4], [7]など2割以上の差異が生じている箇所が存在する。同図中に、[0]から[7]までのそれぞれの水深 h , 幅 b , 数値解析の浸水高, Greenの式で求めた浸水高を示しているが、まず水深 h を確認すると、[0]から[7]に向けてほぼ一様に浅く変化していくことがわかる。一方、湾幅 b を確認すると[0]から[1], [2]と湾幅が $b_0=4,606[m]$, $b_1=4,628[m]$, $b_2=4,587[m]$ と同程度である幅が[3]で $b_3=3,260[m]$ と急激に減少し、[4]から $b_4=3,700[m]$ と増加し始めることが確認できる。さらに[7]では $b_7=3,162[m]$ と再度、急激に減少する。

このことから、本来Greenの式で算出される浸水高は、水深と幅が一様に減少していく地形条件であれば、例えば同図中の[0], [3], [7]を結ぶような数値解析に比較して過大な評価を与えたと考えられる。図-15に示すようにGreenの式で求めた浸水高と数値解析結果の浸水高が良く一致するのは、[0]から[2], [4]から[6]の湾幅の増加でもたらされた見かけ上の整合性とするのが適切である。

従って、湾内において進行する津波の水位の増幅の程度は微小であるといえる。

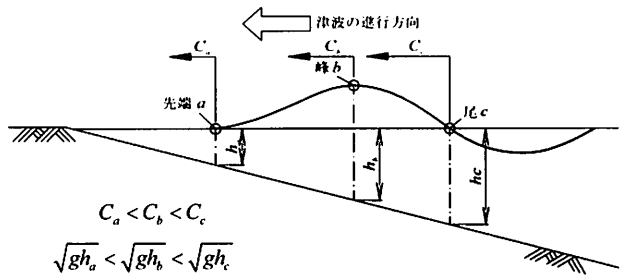
(3) 湾口までに増加する水位の波速による考察

次に、沖から海岸線に向けて進行する津波の水位波形の変化について考察する。

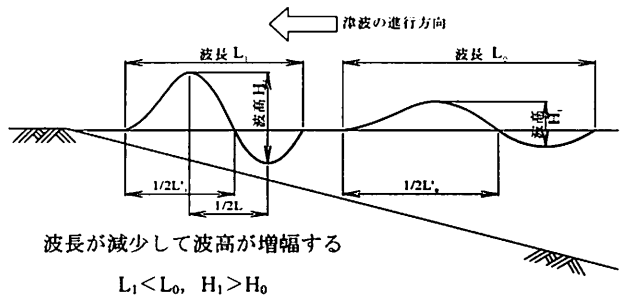
図-16に概念図を示す。ここで、同図(a)に示すよ

うに水位波形について進行方向の先端部の水位上昇を開始する点、水位波形の頂点、頂点から水位が減少して初期水位と交わる点をそれぞれ先端、峰、尾としてそれぞれの移動速度を C_a , C_b , C_c とする。図中に示したように、陸に向けて浅くなる海底地形上を移動する津波は、各々の位置の水深が異なるため、 $C_a < C_b < C_c$ の関係が成り立つと仮定できる。

さらに、同図(b)に示すように、ある位置の波が、時間の経過とともに先端に峰と尾が追いつくために



(a) 先端、峰、尾の移動速度の関係



(b) 津波の進行による波長と波高の変化

図-16 波形状の変化(概念図)

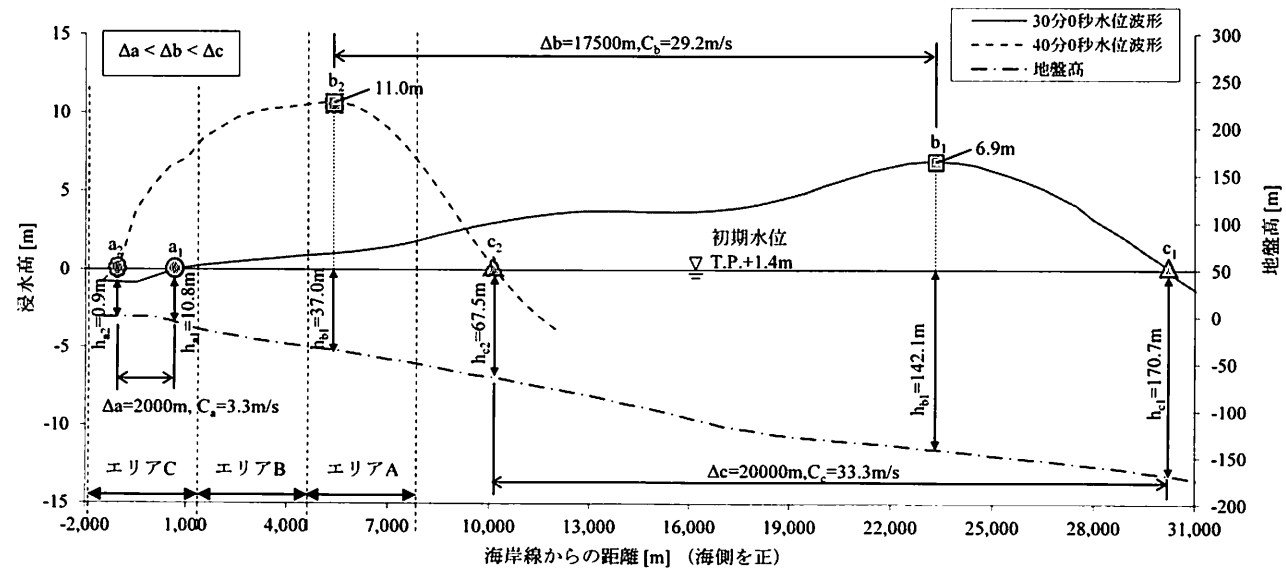


図-17 波の移動速度の比較

移動することで波長が短くなり、峰が上方に押しやられることで波高が増幅すると考えられる。

この考えに基づいて図-17に、実際に数値解析結果から時間の異なる2つの水位波形を示した。まず、30分の波形は、海岸線より沖に23,500[m]付近で水位がピークとなる波形である。次に40分の波形は前述の図-13に示す[a]の波形である。これらの水位波形をそれぞれ実線と破線で示す。それぞれの波形の最大浸水高は、30分と40分でそれぞれ6.9[m]、11.0[m]であり、沖合の30分の最大浸水高は、エリアAの中間点までに1.6倍に増加する。このことは前述のように湾内での浸水高の増加が微小であることを踏まえれば、湾高まで湾口までに水位を発達させたと考えられる。これは、宮城県中部以南の海底勾配が非常に緩やかで遠浅な状況に比して、陸前高田地区では沖から湾口までの海底勾配も概ね1/200と比較的急峻な海底地形を有する海洋上を伝播するために、水深の変化の影響を色濃く受けたと考えられる。

以上を踏まえ、水深が浸水高の増幅にどのように影響するのかを、図-16に示した仮定に基づいて考察する。前述と同様に先端、峰、尾を示す添字をa, b, cとして移動速度Cを移動した距離と時間から求めると、 $C_a=3.3$ [m/sec]、 $C_b=29.2$ [m/sec]、 $C_c=33.3$ [m/sec]と $C_a < C_b < C_c$ の関係が成り立っている。

さらに、 $C_a < C_b < C_c$ の関係を説明するために、式(2)に示す水深の関数である波速の式を用いて、図-18に水深hと移動速度Cの関係を示す。

$$C = \sqrt{gh} \quad (2)$$

図中に示す C_{ij} の添字iは、波形の先端、峰、尾を示すa, b, cであり、jは30分と40分をそれぞれ1, 2である。同図に示されるように、式(2)で算出した C_{ij} は水深の関数であるから、沖から海岸線に近づくにつれて減少する。図-17に示した C_a 、 C_b 、 C_c は、前述の通りそれぞれ3.3[m/sec]、29.2[m/sec]、33.3[m/sec]である。例えば先端aに着目すれば、式(2)で求めた速度は $C_{a1}=10.3$ [m/sec]、 $C_{a2}=3.0$ [m/sec]であるのに対して、数値解析は $C_a=3.3$ [m/sec]と、 C_{a1} と C_{a2} の間の値となり、これは峰b、尾cも同様である。

以上より、沖から湾口に近づくにつれて水深が浅くなることで波長が減少し、水位が増加したと考えられる。一方、湾内での水位の変化の傾向を説明するには、今後、更なる検討が必要である。

5. まとめ

陸前高田地区を対象に、浸水範囲や浸水高、流速など実測値と整合性の高い数値解析結果を用いて、

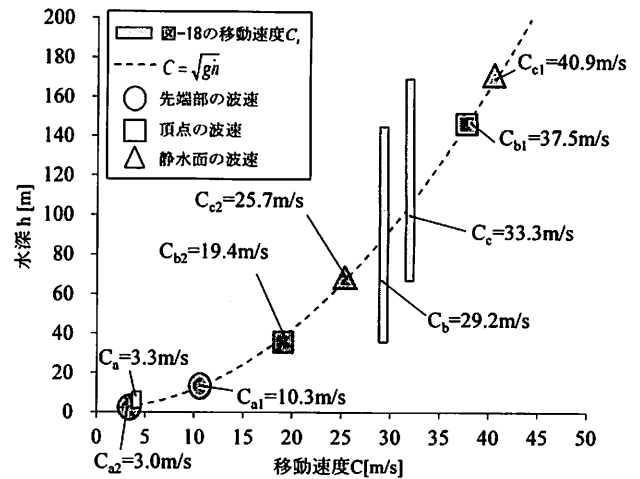


図-18 hとCの関係

沖から伝播する津波の形状の変化を分析した。この結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) 陸前高田地区の津波による実測の浸水面積は9.56 [km²]に及ぶ。さらに、実測の平均浸水高は13.8[m]と非常に高く、このことが浸水面積が大きいことの要因であると考えられる。
- (2) 数値解析結果を用いて、陸域の浸水面積と等価な面積でエリアを定義して湾内のエリア毎の流量の推移を確認した。湾口部のエリアA、汀線部のエリアB、陸域のエリアCの流量はそれぞれ123.80 × 10⁶[m³]、135.83 × 10⁶[m³]、134.74 × 10⁶[m³]となり、AからBで流量は10%程度の増加量を呈し、BからCでほぼ変化は無い。このことから湾内に入射した津波の流量は、海岸線到達までに微小な増加はあるものの、湾内での増幅は認められない。
- (3) 津波の流量の変化は、最大浸水高の変化に支配されており、湾内の浸水高の変動が微小であるために流量は増幅しない。一方、湾内に入射するまでに、沖で6.9[m]の水位湾口付近で11.0[m]まで増幅する。これは水深の影響を受けて波の移動速度が減少するとともに、津波の移動に伴って、波の先端に峰と尾が追いつくことで波長が短くなるためであり、すなわち湾口に到達するまでに浅水変形が生じたといえる。

参考文献

- 1) 国土地理院 (2011b) : 10 万分の 1, 2 万 5 千分の 1 浸水範囲概況図 (オンライン), http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html/, 参照 2013.11.13.
- 2) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ : 東北地方太平洋沖地震津波情報 (オンライン), <http://www.coastal.jp/ttjp/>, 参照2015.4.22.