

## 岩手県北部の橋梁の被害状況と津波の挙動特性の評価

中城拓也<sup>1</sup>・幸左賢二<sup>2</sup>・佐藤崇<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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）

<sup>2</sup>正会員 Ph.D. 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）

<sup>3</sup>正会員 (株)長大 福岡構造技術部（〒810-0014 福岡県福岡市中央区渡部通1-1-1サンセルコビル6F）

### 1. はじめに

東日本大震災による津波の挙動はビデオカメラ、航空画像等により多くのデータが残されている。ビデオ画像を分析した既往研究は、例えば表-1 に示す山中ら<sup>1)</sup>が白浜海岸を撮影したビデオ画像を用いて、白浜海岸のある点の水位の時間変化、漂流物に着目して、白浜海岸線近傍の流速や流向を明らかにしている。このように、実現象の情報は、津波の作用の下で、インフラ施設に発生する被害の状況を解明していく上では非常に貴重な資料であるといえる。しかし、沿岸域の津波の挙動だけでは、実際に沖合から陸域に向かって伝搬する津波の形状の変化が明らかになっていないという課題点がある。また、表-1 に示す安田ら<sup>2)</sup>がソリトン分裂の発生・発達及び砕波、遡上の違いを実験的に検証している。また、ソリトン分裂波が構造物前面で砕波することによって、衝撃的な波力が発生することを明らかにしている。このように、津波実験を用いて、短周期波の挙動を明らかにした文献は散見されるものの、東北地方太平洋沖地震津波を撮影した映像や観測値を用いて、沖合から海岸線へ伝搬する長波の形状の変化の過程に着目した例はほとんどないのが現状である。

そこで、今回東北地方太平洋沖地震津波を撮影した映像が多数残されている中で、久慈湾において、沖合から襲来した津波が段波状の波であることが確認できたことから、久慈湾に襲来した津波の状況を明らかにすることを1つ目の目的とし、航空画像と沖合の波浪計の観測値を用いて明らかにした。また、久慈湾近傍に位置する広内橋に襲来した津波の状況を明らかにすることを2つ目の目的とし、数値シミュレーションを実施し、沖合からの津波の形状の変化を経時的に明らかにしようとした。

### 2. 分析対象範囲の橋梁の被害状況

東北地方太平洋沖地震津波は、岩手県北部の橋梁に甚大な被害を及ぼしたため、以下の分析を実施した。分析範囲は図-1に示す久慈港から野田村の下安家漁港までとした。この分析範囲内の対象とする橋梁は、沿岸沿いに位置する東北地方整備局が管理する国道45号及び岩手県が管理する県道268号に架橋する橋梁とした。その橋梁の中で、桁まで浸水した橋梁は7橋あり、橋梁の被害ランク付けを行った。

表-1 既往文献

論文名	内容	課題
ビデオ画像解析に基づく綾里湾白浜海岸に集中した津波外力場特性の分析	白浜海岸を撮影したビデオ画像を用いて、白浜海岸のある点の水位の時間変化や、漂流物に着目して、白浜海岸線近傍の流速や流向を明らかにしている。	沿岸域の津波の挙動だけではなく、実際に沖合から陸域に向かって伝搬する津波の形状の変化が明らかになっていないという課題点がある。
ソリトン分裂津波の変形と波力特性に関する実験的研究	ソリトン分裂の発生・発達及び砕波、遡上の違いを実験的に検証している。また、ソリトン分裂波が構造物前面で砕波することによって、衝撃的な波力が発生することを明らかにしている。	沖合を伝搬する津波は長波の波形状であるのに対して、津波実験における造波は短周期波の波形状である違いがある。

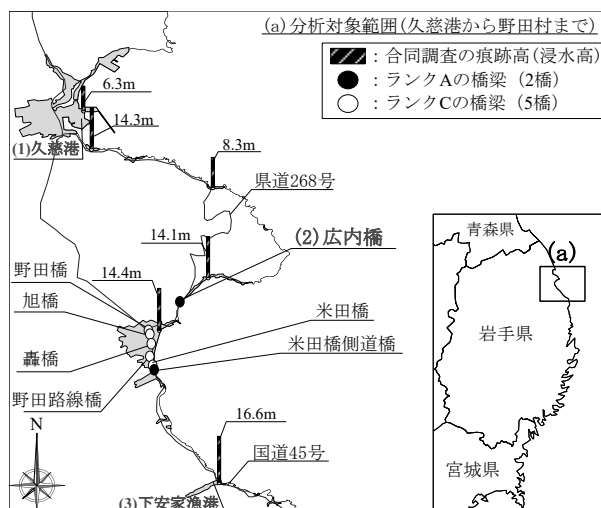


図-1 分析対象範囲と対象とする橋梁の位置

橋梁の被害ランクの定義については文献<sup>3)</sup>に示す。この被害橋梁の中で、ランクAに属する橋梁（被害が甚大であった橋梁）は、コンクリート桁である広内橋と鋼桁である米田橋側歩道橋の2橋である。広内橋は、津波の作用で上部構造が流出し、支承部に損傷が生じたと推察される。米田橋側歩道橋は、上部構造の流出だけでなく、津波の洗掘による下部構造の不安定化が挙げられ、津波の作用力が非常に強かったことが分かる。また、ランクCに属する橋梁は、コンクリート桁である4橋（野田橋、旭橋、轟橋、米田橋）、鋼桁である1橋（野田路線橋）の合計で5橋ある。ランクBに属する橋梁は無く、被害の生じた橋梁は、致命的な橋梁被害が生じるか、小規模な損傷に分類される。同図に示す浸水高は合同調査グループの痕跡高<sup>3)</sup>を用いており、痕跡位置が密集している地域は代表箇所を選出した。この分析範囲の浸水高は、図中に示す(1)久慈港では約6.3mと低いものの、(2)広内橋周辺、(3)下安家漁港周辺では、それぞれ14.1m、16.6mであり、三陸海岸特有の地形の影響で10mを超える地域が多くを占めていることがわかる。本論では、久慈港及び野田湾に襲撃する津波の状況を把握し、海岸線近傍に位置する広内橋に着目した分析を行った。

### 3. 久慈港へ来襲する津波の形状変化

本章では、本解析の手法について記述した後に、久慈港に襲来した津波の状況を把握するため、各波浪計や航空画像を用いて津波形状の分析を行った。加えて、津波伝播適上解析を実施し、津波がどのように伝搬したのか明らかにした。

#### (1) 数値解析の諸元

本解析手法は文献<sup>4)</sup>を参考に、摩擦及び移流項を考慮した非線形長波理論を基礎方程式とし、変数の配置法にStaggered格子を、差分スキームはLeap-Frog法を用いた。解析の主要な諸元を以下に示す。

- 解析領域はA からH までの8 階層とし、格子サイズは、領域A から久慈港の位置する[a] 点に向けてメッシュサイズを3の倍数で小さくした。
- 波源は55 枚の断層パネルから構成される藤井佐竹モデル(Ver8.0)を用いた<sup>5)</sup>。
- Manning の粗度係数は全領域で一律 0.025 とした。
- 初期水位は、気象庁潮位観測データに基づき、T.P.-0.4 mを基準にして設定した。
- 計算時間間隔は全解析領域で0.01秒とした。
- 断層変位はOkada (1985) の方法を用いた<sup>6)</sup>。
- 地形データは国土地理院が公開したレーザー測量

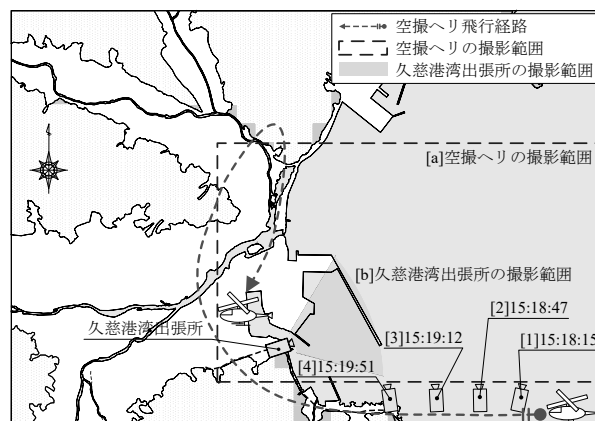


図-2 久慈市の撮影範囲と撮影時刻

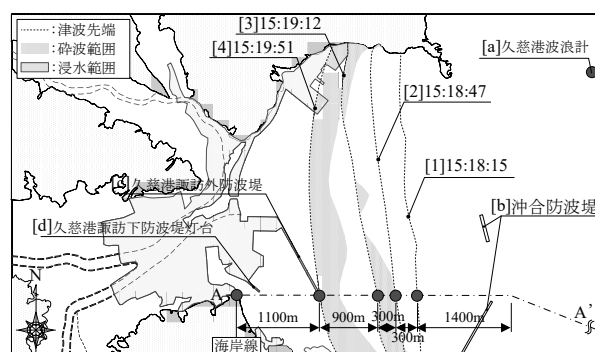


図-3 湾内を進行する津波の主要な観測位置

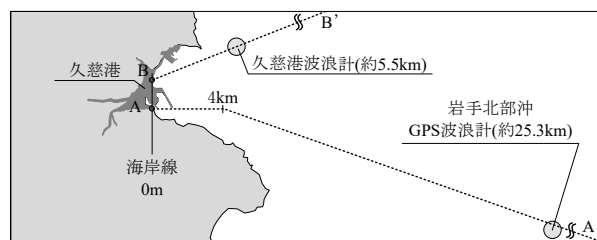


図-4 久慈港と各波浪計の位置関係

による震災後の5mメッシュデータを用いた。

#### (2) 解析に用いる画像の諸元

図-2 は、画像解析に用いた久慈湾を撮影した航空画像の詳細を示す。まず、本章で用いた航空画像は陸上自衛隊が撮影したものであり、同画像は2011年3月11日の15:17:00に撮影を開始している。航空画像の撮影位置は、津波の進行とともに、同図に示す[1] 15:18:15 から [2] 15:18:47, [3] 15:19:12, [4] 15:19:51のように西に向かって移動しながら、[a] の範囲を撮影している。また、図中に示す[b] は久慈港出張所から撮影した範囲である。

図-3 はA-A'断面と主要な観測位置、着目した空撮時間における津波先端位置を示す。A-A'断面は海岸線位置を基準として、沖に向かって引いた線である。A-A'断面については、以降の図-4で詳細な説明を行う。同図に示す主要な観測位置は、[a] 久慈港

波浪計, [b] 沖合防波堤, [c] 久慈港諏訪外防波堤, [d] 久慈港諏訪下防波堤灯台である。また, 同図に示す点線は航空画像を用いた各時刻の津波先端位置である。その津波先端位置を撮影した時刻は, [1]15:18:15, [2]15:18:47, [3]15:19:12, [4] 15:19:51である。同時刻を代表時刻としたのは, [1] では津波が沖合防波堤を越流したのを確認した時刻であり, [2], [3], [4] はそれぞれに波形状の変化や遡上傾向が変化した時刻だからである。

### (3) 沖合を進行する津波形状の変化

本節では, 各波浪計の観測値を用いて津波の遡上状況について, 図-5の(a)と(b)で説明する。

図-4には久慈港と岩手北部沖 GPS 波浪計, 久慈港波浪計の位置関係を示す。同図に示すA点は久慈港の海岸線とした。また, 久慈湾を撮影した航空画像の範囲が沖4km近傍までであったため, A点から沖4kmまでは着目断面を直線で引いた。A'点は, 上記した沖4km位置から岩手北部沖GPS波浪計位置を通過するように引いた延長線上の点である。同図に示すB点はA点位置と同様に久慈港の海岸線位置とし, B'点はB点から久慈港波浪計位置を通過するように引いた延長線上の点である。図中に示す久慈波浪計および岩手北部沖GPS波浪計の位置は, それぞれ海岸線から約5.5km, 約25.3km沖合にある。以降に, 上記したA-A', B-B'断面に着目した分析を行う。

a) 岩手北部沖GPS波浪計の観測値を用いた水位波形  
 図-5の(a)に岩手北部沖GPS波浪計の津波形状を示す。同図は, 同波浪計で観測された第1波目の1峰の周期に, 同波浪計位置の水深を用いて算出した波速Cを掛けて算出した波長を示した図である。同図の(a)の1/4波長は5.6km, 水面勾配は1/1334, 最大水位は4.0mである。

b) 久慈港波浪計の観測値を用いた水位波形  
 図-5の(b)に久慈港波浪計の津波形状を示す。同図は, 同波浪計も図-5の(a)と同様の方法を用いて, 算出した波長を示した図である。同図の(b)の1/4波長は1.8km, 水面勾配は1/300, 最大水位は5.1mである。図-5の(a)から図-5の(b)に津波が伝搬する過程で, 第1波目の津波は水位が上昇し, 短周期化しているため, 浅水変形が生じていると考えられる。

### (4) 久慈港を進行する津波形状の変化

本節では, 航空画像, 久慈港湾出張所から撮影した画像を用いて, A-A'断面位置の図-5の(c)と(d)の津波の形状について説明する。

a) 久慈湾を撮影した航空画像を用いた水位波形  
 図-5の(c)は15:19:51時の先端の波形状である。

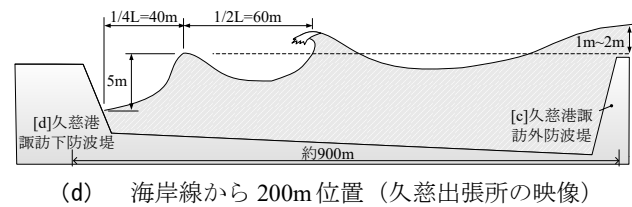
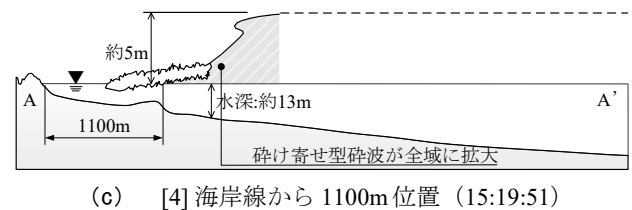
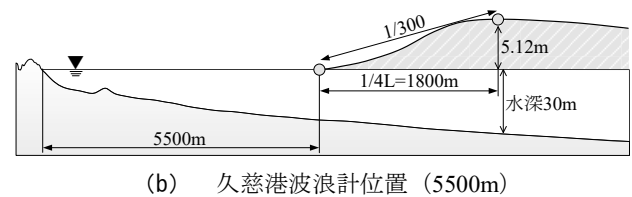
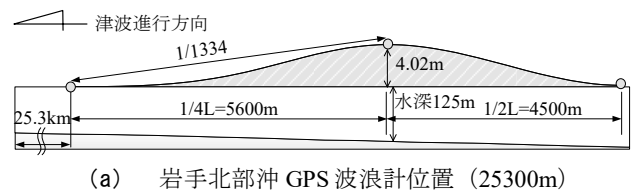


図-5 湾内を進行する津波形状の変化 (A-A'断面)

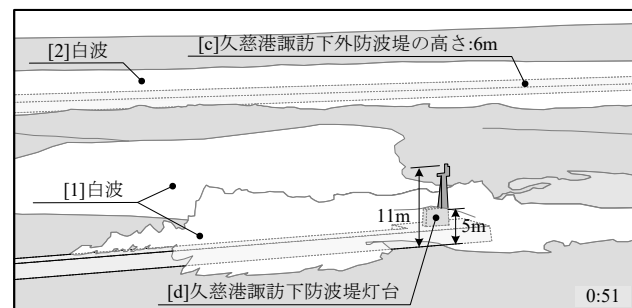


図-6 海岸防波堤位置の津波高さの推定

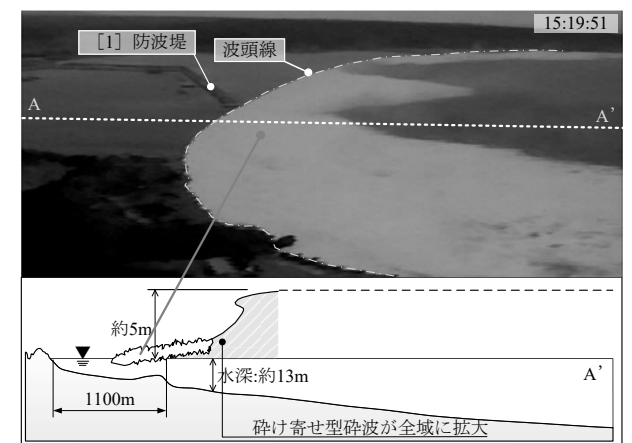


図-7 15:19:51時の波形状の推定

同図の津波先端位置や波形状の詳細な推定方法は図-7に後述する。同図は、海岸線から波頭線までの距離が1100m、この波頭線位置近傍の水深が約13m、先端の津波高さが約5mである。また、同図に示す津波の先端の砕波形態は、久慈出張所からの映像より、波の波峰部で弱い巻き波が発生し、波の進行に伴い、白波が前面に広がる傾向がみられる。これらの特徴から、砕け寄せ型砕波に近い性質であったと考えられる。

**b) 久慈港湾出張所の画像を用いた水位波形**

図-5の(d)は久慈港湾出張所から撮影した海岸線から200m位置の先端の波形状である。同図に示す津波先端を撮影した位置は、A-A'断面から若干北上した[d]久慈港諏訪下防波堤位置である。図中に示す波状段波に至るまでは、第1波目の津波が図中に示す[c]久慈港諏訪外防波堤を越流した後に、砕波が形成し、砕波から再び波状段波へ変形する経緯を辿っている。波状段波の1峰目の津波先端部の立ち上がりから最大水位までを1/4波長と定義すると、1/4波長は40mとなり、波状段波の1峰目の最大水位から2峰目の最大水位までを1/2波長と定義すると、1/2波長は60mとなる。越流後再形成した波状段波は、海岸線までに砕波する峰と砕波しない峰に分かれている。また、後続の波は連続的に来襲しており、後続の波の津波高さは、津波先端部の波状段波よりも数m高く、約7m~8mであると推察できる。

**c) 画像を用いた波高と波形状の詳細な推定方法**

図-6には、図-2に示す[b]の範囲を撮影した久慈港湾出張所からの映像を用いて、海岸線近傍の津波高さの推定を示す。同図に示す津波は図-5(c)位置から約1km 遡上したものである。同図に示す[c]と

[d]は、それぞれ久慈港諏訪下外防波堤と久慈港諏訪下防波堤灯台である。これらの詳細位置は、図-3に示す[c]と[d]である。同図の実線は51s時に見えている箇所を、点線は51s時に見えていない箇所を示す。同図に示す[c]の高さ11mと襲来した津波高さを対比すると、先端の[1]白波の津波高さは、防波堤近傍では5m程度と推定できる。図-5(c)位置から約1km 遡上しても津波の高さがあまり変化していないように見えるため、この津波高さの推定値を用いて、図-5(c)では津波高さを約5mとしている。

図-5(d)も同図中に示す[d]位置近傍であるため、同様の津波高さを用いた。また、海岸線から5.5kmに位置する久慈港波浪計の最大水位は5.1mであり、海岸線近傍の白波の津波高さと大差がない。

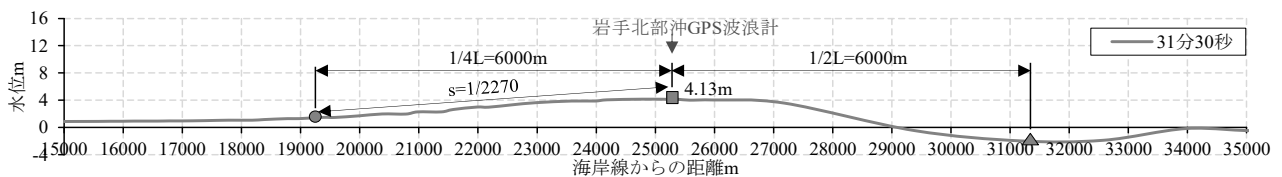
図-7では、図-5(c)に示した15:19:51時のA-A'断面の波形状の算出方法を示す。同図に示す波頭線的位置は津波先端の水しぶきが生じている位置とし、津波先端の峰部の波形状は久慈港湾出張所からの映像を用いて推定した。以降の詳細な説明については参考文献<sup>7)</sup>に示す。

**(5) 数値解析における津波形状の変化**

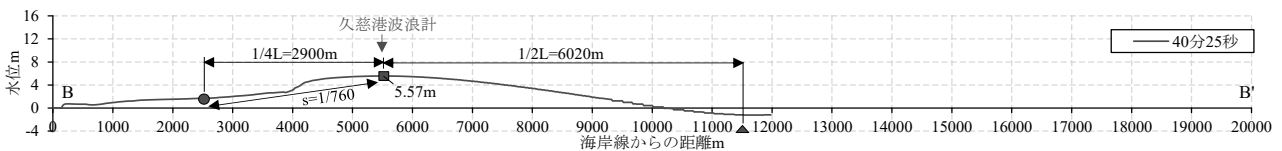
図-8においては、図-5(a), (b), (c), (d)の波形状と同断面位置の解析の水位波形の比較を行った。

**a) 岩手北部沖GPS波浪計位置の水位波形**

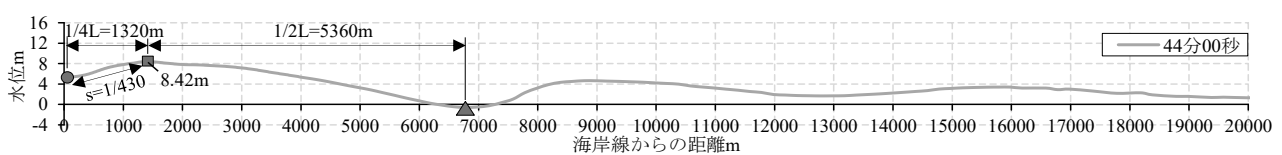
同図の(a)は岩手北部沖GPS波浪計位置に最大水位を合わせた31分30秒時の水位波形である。同図の解析の上昇域の1/4波長と下降域の1/2波長は、それぞれ6000m、6000mである。それに対して、図-5の(a)に示す上昇域の1/4波長と下降域の1/2波長は、それぞれ5600m、4500mであり、概ね一致する。また、



(a) 31分30秒時の水位波形 (A-A'断面)



(b) 40分25秒時の水位波形 (B-B'断面)



(c) 44分00秒時の水位波形 (A-A'断面)

図-8 解析の各時刻の水位波形 (A-A'断面)

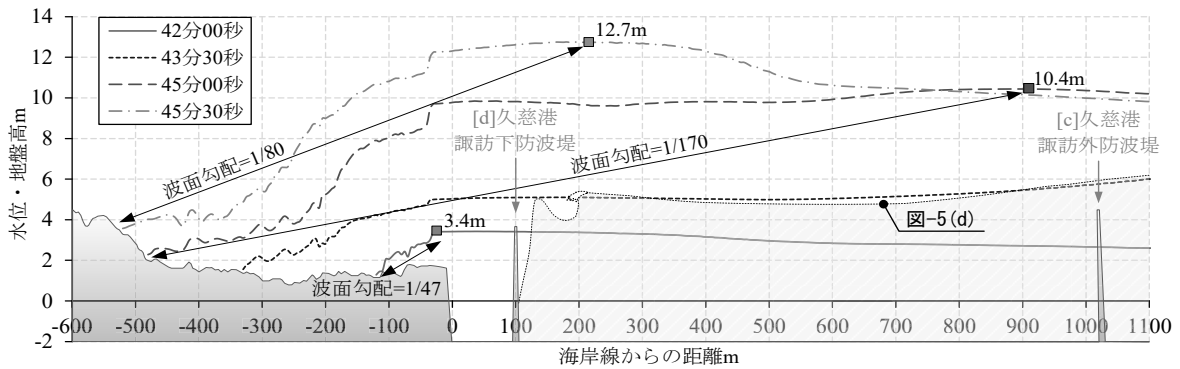


図-9 42分00秒，43分30秒，45分00秒，45分30秒時の水位波形（津波先端部の拡大図）

最大水位も，解析値と観測値を比べると，それぞれ4.1m，4.0mと概ね一致している。

#### b) 久慈港波浪計位置の水位波形

同図の(b)は久慈港波浪計位置に最大水位を合わせた40分25秒時の水位波形である。同図の解析の上昇域の1/4波長は2900mであるのに対して，図-5の(b)に示す上昇域の1/4波長は1800mであり，若干異なる傾向となっているが，最大水位は，解析と観測を比較すると，それぞれ5.6m，5.1mと概ね一致している。

#### c) 海岸線から1100m位置近傍の水位波形

同図の(c)は海岸線から1100m位置近傍で最大水位となる44分00秒の水位波形である。図中に示す上昇域の1/4波長は1320mである。また，図中に示す最大水位は8.4mであるのに対して，図-5の(c)に示す津波先端部の水位は5mであり，異なる値となっている。このような水位の違いは，解析では第1波目の最大水位に着目したものの，映像では津波先端部の最大水位に着目したものの違いと考えられる。

#### d) 陸上を遡上する各時刻の水位波形

図-9は数値解析による海岸線近傍を遡上する各時刻の津波の水位波形を示す。図中に示す実線は42分00秒の水位波形を，点線は43分30秒の水位波形を，破線は45分00秒の水位波形を，1点鎖線は45分30秒の水位波形を示す。まず，図中に示す[c]と[d]の堤防高は，図-5(d)で示した[c]と[d]の堤防高を示したものである。45分00秒の水位波形は，最大水位が10.4m，波面勾配が1/170であるが，45分30秒の水位波形は，最大水位が12.7m，波面勾配が1/80である。45分00秒の水位波形から45分30秒の水位波形にかけて，水位が上昇し，波面勾配が急になっており，前傾化している。図中に示す43分30秒の水位波形と図-5(d)に示す波形状の比較をみると，解析では津波先端部の波状段波や砕波を再現できていない。再現できないのは，本解析の計算条件は，非線形効果による津波の前傾化（段波）は考慮しているが，分散項や砕波条件を考慮していな

いことが要因と考えられる。

以上より，図-5に示した観測波形は，沖合6.2km位置で1/4波長は1800m，最大水位は5.1mと波長の短い長波であることが分かった。その後，久慈湾内では，波状段波から砕波に転じたが，砕波した津波が久慈港諏訪外防波堤を越流後，再び津波高さ5mの波状段波を形成し，波状段波の峰毎に津波挙動を変えながら陸上へ遡上したことを確認した。また，図-8，9で示した解析結果から，沖6kmまでの第1波目の水位波形は再現可能であるが，津波先端部の分散性の強い波状段波や砕波の再現は困難であることがわかった。

## 4. 広内橋に作用した津波形状の推定

本章では，数値解析における沖合から野田湾へ来襲する津波の形状の変化を示し，野田湾の中でも桁の流出被害の生じた広内橋を対象として，広内橋へ来襲した津波形状の推定を行った。

### (1) 野田村の地形概要

図-10は広内橋の位置する野田湾の湾形状と広内橋の位置関係を示す。同図の表に示すように，野田湾の平面形状は，湾口幅Wは9.3kmであり，湾口幅は比較的大きいものの，湾長Lは4.3kmと小泉や釜石と大差ない長さであることがわかる。また，広内橋の位置する地域は丘陵地に囲まれた狭隘な地形を有している。同図に示すC-C'とD-D'断面は，概ね等高線の法線方向に引き，岩手北部沖GPS波浪計を通過するように引いた着目断面である。以降にC-C'断面とD-D'断面に着目した水位波形の分析を行う。

### (2) 広内橋の被害状況

図-11に示す広内橋は，県道268号の野田長内線で岩手県九戸郡野田村に位置する桁長28.4m，幅員8.2mのPCT桁橋である。同図の損傷状況としては，上部構造が山側に約10m流出していた（図中に示

す[a]）。また、橋台の横座部のアンカーバーは、海側の3本は直立に立っていることから上揚力が発生した可能性はあるものの、陸側の3本は約90度に折れ曲がり、上部構造が引きずられて流出したと推察できるため、水平作用力が卓越していると考えられる(図中に示す[b])。

### (3) 野田湾へ来襲する津波形状の変化

次に、本節では実際に広内橋の位置する野田湾へ来襲した津波形状について、C-C'断面位置における各時刻の解析の水位波形を用いて説明する。

#### a) 岩手北部沖 GPS 波浪計位置の水位波形

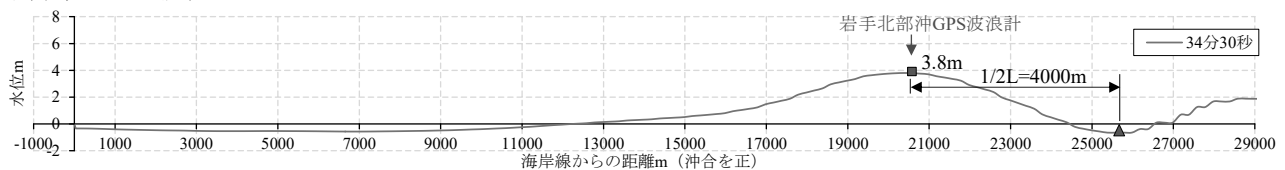
図-12の(a)は岩手北部沖 GPS 波浪計位置に最大水位を合わせた34分30秒時の水位波形である。同図の解析の下降域の1/2波長は4000mである。それに対して、図-5の(a)に示す下降域の1/2波長は4500mであり、概ね一致する。また、最大水位も、解析では3.8m、観測では4.0mと概ね一致している。

#### b) 44分00秒時の水位波形

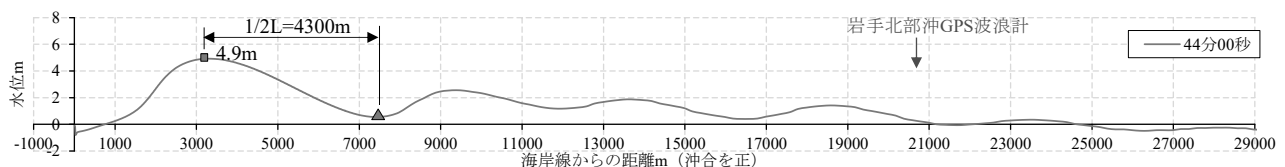
図-12の(b)は44分00秒時の水位波形である。同図の解析の下降域の1/2L波長は4300m、最大水位は4.9mである。同図の(a)から同図の(b)に示すように、津波は野田湾に近づくにつれ、水位が上昇し、前面の波面勾配が急になっており、浅水変形による津波の前傾化が生じている。

#### c) 46分00秒時の水位波形

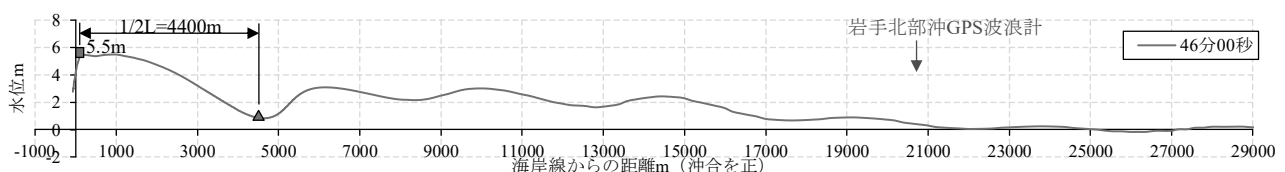
図-12の(c)は46分00秒時の水位波形である。同図は、陸上を遡上し始めた津波の形状を示したものであり、46分00秒時の水位波形は最大水位が5.5m、下降域の1/2L波長が4400mである。



(a) 34分30秒時の水位波形(C-C'断面)



(b) 44分00秒時の水位波形(C-C'断面)



(c) 46分00秒時の水位波形(C-C'断面)

図-12 解析の各時刻の水位波形(C-C'断面)

### (4) 広内橋位置の水位と流速の関係

ここで、当該橋梁の位置で生じる水位と流速の時系列変化を図-13に示す。同図は水位と流速の時系列変化をそれぞれ上段と下段に示す。同図は地震発生時を0分として、以降の45.5分後から48分後の2分30秒間を横軸に示した。図中の(a)点と(b)点はそれ

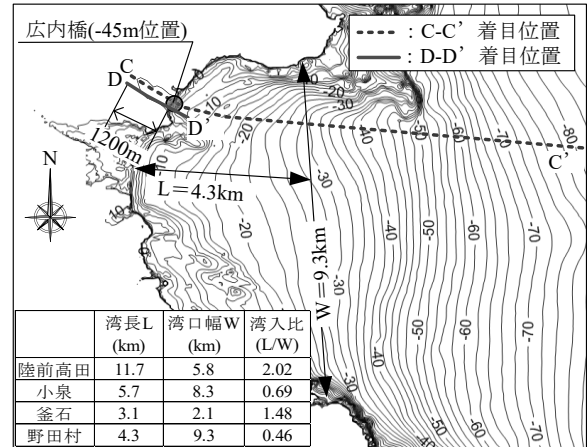


図-10 野田村の陸域地形と海底地形の形状

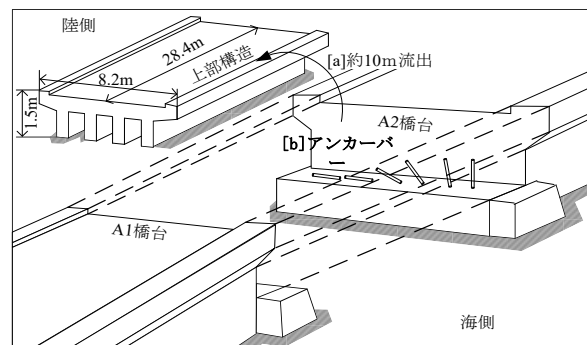


図-11 広内橋の被害状況

ぞれ津波水位が桁に達した時刻と桁が完全に水没した時刻の浸水高並びに流速を示す。第1波目の津波は地震発生から45分35秒後から上昇を始め、桁下の高さに至る時点46分05秒で浸水高4.4m、流速2.8 m/sとなる。また、桁が完全に水没する時点46分10秒で浸水高6.4m、最大流速3.6m/sに至った後、流速は減少を始めるものの、水位は上昇を続け、47分15秒で最大浸水高11.9mを迎える。これらの結果から、水位上昇速度は、45分35秒から46分10秒の間では8.6 m/min、46分10秒から47分15秒の間では5.1 m/minとなり、桁が完全に水没するまでは、非常に速いが、水没後は緩やかになることがわかる。

### (5) 広内橋位置の流出メカニズムの推定

広内橋を対象とし、図-14には数値解析に基づく流速より水平方向の作用力を算出し、抵抗力との関係を示す。なお、同図は文献<sup>3)</sup>と同様に式(1)で準定常的な波による水平作用力 $F$ を、式(2)で抵抗力 $S$ を算出した。なお、広内橋の上部構造と橋脚上面は支承で連結されているが、破壊形態が多様であることから、最低限発揮されるであろう上部構造の重量による摩擦抵抗のみを評価している。

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

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

ここで、 $\rho_w$ は水の密度 ( $=1030\text{kg/m}^3$ )、 $C_d$ は広内橋では1.55を使用(道路橋示方書に従った抗力係数<sup>8)</sup>)、 $v$ は流速、 $A_h$ は上部構造の下流側の被圧面積、 $W$ は上部構造の重量であり、浮力 $U$ は桁が浸水し始めたときから考慮することとした。なお、桁間空間の空気層は残留しないものと仮定した。同図より、数値解析から算出した浸水高が上部構造の下面高さを上回り、津波が上部構造に作用すると推定される間の水平作用力は、図-13に示す流速を式(1)に代入して推定した。このように算出した水平作用力は、いずれも桁抵抗力1516kNを大きく下回る結果となった。この結果となるのは、図-13に示す最大流速が

3.6m/sと遅いことが要因として考えられる。

次に、広内橋に作用した波形を、C-C'断面とD-D'断面を用いて、解析の水位波形から推定した。

図-15にC-C'断面の数値解析における水位波形を示す。同図に示す実線は46分00秒の水位波形を、破線は46分10秒の水位波形を、一点鎖線は46分30秒の水位波形を、点線は47分00秒の水位波形を示す。同図以降に示す波面勾配は津波先端と最大水位の水位差に、津波先端から最大水位までの距離で除したものである。46分00秒の水位波形は、最大水位が5.5m、波面勾配が1/86であるが、広内橋の桁前面に津波が作用した46分10秒の水位波形は、最大水位が7.1m、波面勾配が1/12となり、段波状の波であることがわかる。また、46分30秒時の波面勾配は1/16となり、陸奥においても段波形状となっている。このように、海岸線付近では陸域勾配が急変するため、段波形状となった可能性が考えられる。

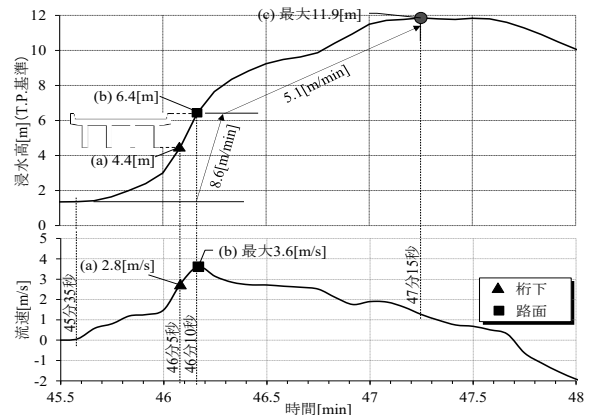


図-13 広内橋位置の水位と流速の時系列変化

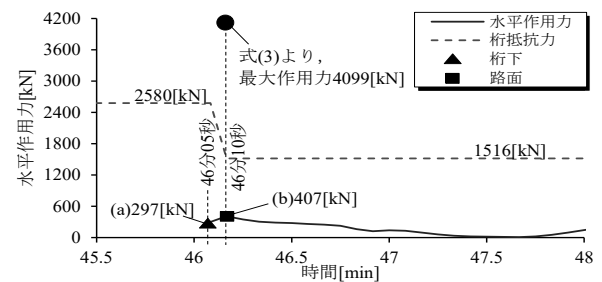


図-14 広内橋に働く水平作用力

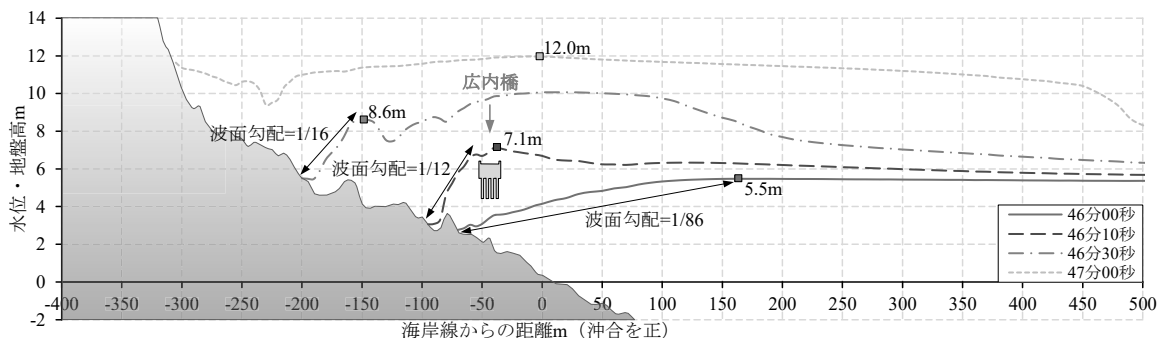


図-15 46分00秒、46分10秒、46分30秒、47分00秒時の水位波形 (C-C'断面)

図-16, 17には、著者らが実施した段波性状の波を模擬した孤立波実験<sup>3)</sup>の波形と数値解析におけるC-C'断面とD-D'断面位置の水位波形の比較を示す。孤立波実験の波形は、縮尺1/50の波高10cmの模型実験で観測した波形を実寸の波高5mに換算し、波面勾配は1/8である。これは、図-16, 17に示す46分10秒時の数値解析の波面勾配1/12, 1/11と比較すると、やや大きいものの、広内橋に作用した津波は段波状の波であると考え、文献<sup>3)</sup>と同様に、段波による水平波力算定式(式(3))を用いることとした。

$$F = 1.9\rho_w g a_H A_h \quad (3)$$

ここに $a_H$ ：波の高さ 5m (久慈港で観測された段波の想定波高)である。 $g$ ：重力加速度 ( $m/s^2$ )

図-14に式(3)を用いて、広内橋に作用する段波の水平作用力を算出した結果を示す。段波の水平作用力は、4099kNであるのに対して、広内橋の上部構造重量等により算出した桁抵抗力が1516kNを大きく上回り、上部構造が流出する結果となった。この結果から、広内橋に作用した津波は、海岸線までに砕波となる可能性があるものの、段波状の波であった可能性があるとして推定される。

## 5. まとめ

沖合から湾内へ進行する津波の形状の変化について、岩手北部沖GPS波浪計、久慈港波浪計、久慈湾撮影した航空画像、久慈港湾出張所から撮影した画像を用いて分析した。また、数値シミュレーションと津波実験を用いて、広内橋に作用した津波の推定を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 海岸線から25.3kmに位置する岩手北部沖GPS波浪計の観測結果と解析結果を比較すると、1/4波長はそれぞれ5600mと6000m、最大水位はそれぞれ4.0mと4.1mとなり概ね一致している。海岸線から6.2kmに位置する久慈港波浪計の観測結果と解析結果を比較すると、1/4波長はそれぞれ1800mと2900m、最大水位は5.1m、5.6mとなり、沖6km位置までの水位波形の再現は可能であると考えられる。
- (2) 久慈港湾出張所から撮影した海岸線から200m位置の先端の波形状は、波状段波を形成しており、波状段波の1峰目の上昇域の1/4波長は40mとなり、波状段波の1峰目の最大水位から2峰目の最大水位までの1/2波長は60mとなる。また、後続の波は連続的に来襲しており、後続の津波高さは約7m～8mであると推察できる。

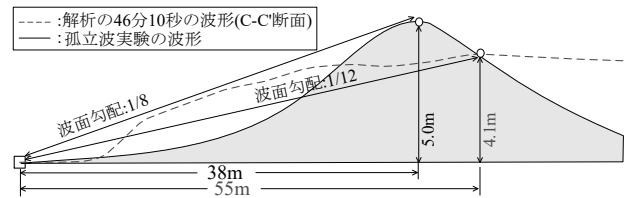


図-16 数値解析と実験の波面勾配の関係(C-C'断面)

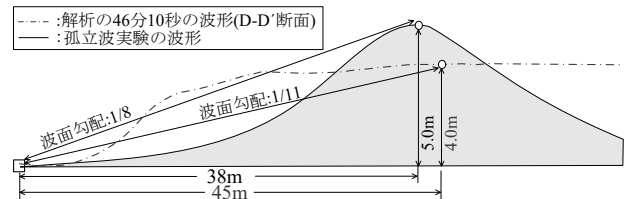


図-17 数値解析と実験の波面勾配の関係(D-D'断面)

- (3) 広内橋に作用した津波は、解析における46分10秒時の波面勾配と段波実験における波面勾配を比べると、それぞれ1/12, 1/8であり、概ね一致しており、段波状の波であった可能性があると推定される。

## 参考文献

- 1) 山中悠資, 田島芳満, 佐藤慎司：ビデオ画像解析に基づく綾里湾白浜海岸に集中した津波外力場特性の分析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.1\_341-I\_345, 2012.
- 2) 安田誠宏, 高山知司, 山本博紀：ソリトン分裂津波の変形と波力特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第53巻, 土木学会, pp.256-260, 2006.
- 3) 公益社団法人土木学会地震工学委員会, 東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会：東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会最終報告書, 2015.8.
- 4) 国土交通省：平成23年東北地方太平洋沖地震津波による津波の対策のための津波浸水シミュレーションの手引き, pp.16, 2011.7.
- 5) 藤井雄士郎・佐竹健治：2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の津波波源, [http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami\\_ja.html](http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami_ja.html)
- 6) Yoshimatsu Okada : Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.75, No.4, pp.1135-1154, 1985.8.
- 7) 中城拓也, 幸左賢二, 佐藤崇：久慈港における津波特性の評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), vol.72, 2016. (査読中)
- 8) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解 I 共通編, pp.47-52, 2002.3.