数値計算による東北地方太平洋沖地震津波による岩手県北部での 構造物被災状況の把握

The numerical study about structure destruction condition at the north Iwate area due to
The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

犬飼直之¹・永沢 薫²

Naoyuki INUKAI and Kaoru NAGASAWA

The north coast area of Iwate Prefecture was attacked by tsunami due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. Firstly, this study surveyed the tsunami traces in the coast area of Iwate Prefecture. The observed data are changed to the height of the Tokyo datum line by the tide prediction model. Secondary, this study calculated the tsunami wave dynamics in the two domains, one is the large scale area which is the Pacific Ocean include the hypocenter, and the other is the small and detail scale area include the north area of Iwate Prefecture. The results of the simulation are compared with observation data. Finally, this study considered the relationship between the wave velocity and the structure broken scale.

1. はじめに

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震で、図-1に示す領域で津波が発生し東日本の太平洋岸を中心に陸上構造物の多数に被害が生じた。ところで、松富ら(1992)は津波の浸水深と家屋被害程度との関係を明らかにした。今回の震災ではコンクリート構造部を含む多数の構造物が被災していることから更に多くの情報を把握する事が可能である。本研究では、東北地方太平洋沖地震で発生した津波が発生後どのように太平洋沖から三陸北部へ伝播したのか、海岸へ到達した津波の挙動にはどのような特徴があったのか、久慈港では湾口防波堤が津波に対しどのような効果があったのか、また陸上へ遡上した津波高さや流速と構造物の被害とはどのような関係があるのかを把握する事を目的とした。

2. 本研究の概要

本研究では、現地調査および数値計算をおこなった。

現地調査では、津波の痕跡を調査し、遡上高などから陸地へ到達した津波の規模を把握した。数値計算では、東北地方太平洋沖における大領域での津波の伝播状況および、久慈市から普代村までの海岸線を領域とする岩手県北部沿岸域の小領域へ到達した津波の挙動を把握した。

大領域の太平洋の津波再現計算では、計算開始時に断層モデルを用いて地震エネルギーに相当する量だけ震央の海面を変位させ津波の初期変位として入力した。計算

結果はGPS波浪計の観測結果と比較をおこない、最大波到達時間や最大津波高さなど定性的に再現出来ている事を確認した。小領域の計算では、岩手県北部に設置されたGPS波浪計で観測された波形を入力した。領域への津波の入射角度は大領域計算結果で得られた小領域に侵入する入射角度を参考にした。計算結果は現地調査と比較をして計算の妥当性を確認し痕跡高を把握した。その後、陸上へ遡上した津波高さおよび流速と家屋や堤防などの構造物破壊との関係を調べ、津波の規模と被災の程度を定量的に把握した。

図-1 震源および震央

図-2 調査箇所 (図中黄色ピンが調査場所)

3. 現地調査

震災後、現地への到達および調査活動が可能と考えられる岩手県北部および福島県北部を主要な調査地として選定し、合計3回にわけて調査を実施した。調査では、建物壁に残る泥水が浸水した最上部の痕跡（浸水高）や、山の斜面などに残る遡上部の最上部（遡上高）から津波痕跡を把握した。図-2に数値計算での小領域における調査地点を示す。この領域では40点で痕跡高の情報を得た。

本調査では津波の痕跡高さを求めるのにレーザー距離計を使用した。ここで、現地調査で求められた痕跡高は調査時における潮位から痕跡最上部までの高さであり、津波来襲時の潮位から痕跡最上部までの高さとは異なる。また、統一された基準面からの高さではない。よって、得られた数値は高さ基準を統一したTP（東京湾平均海面）やDL（観測基準面）などの高さの基準へも数値を変換する必要があることから、潮位補正をおこなう必要がある。今回の災害では、海岸付近の主要な観潮所は被災以降観測不能であった他、主要港湾以外での各地での潮位変動はもともと観潮所がなく、潮位表や観測情報を得る事ができない状態であったことから、本著では潮位推算により調査時と被災時の潮位を推算して求め、それを用いて潮位補正や高さ基準の補正をおこなった。本著では潮位推算モデルにMatsumoto他（2000）のNAO.99bを用いた。NAO.99bはTP値で計算される。

4. 数値計算

(1) 津波の伝播計算に使用した方程式

津波計算に使用した数値モデルは、大領域は球面座標系であり、小領域は直交座標系の平面2次元であり、それぞれ運動方程式と連続式を陽的に差分する手法を用いている。以下に、大領域計算で用いた球面座標系の運動方程式および連続式を次に示す。

a) 運動方程式（経度方向）

$$\frac{\partial u}{\partial t} + L(u) - \frac{uv \tan \phi}{a} - fv = -\frac{1}{\rho_w} \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial P}{\partial \lambda} + A_h \left\{ \nabla^2 u + \frac{(1 - \tan^2 \phi)}{a^2} \frac{u}{\cos^2 \phi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} \right\} + \frac{g \sqrt{u^2 + v^2}}{(\xi + h) c^2}$$

b) 運動方程式（緯度方向）

$$\frac{\partial v}{\partial t} + L(v) - \frac{u^2 \tan \phi}{a} + fu = -\frac{1}{\rho_w} \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial P}{\partial \phi} + A_h \left\{ \nabla^2 v + \frac{(1 - \tan^2 \phi)}{a^2} \frac{v}{\cos^2 \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} \right\} + \frac{g \sqrt{u^2 + v^2}}{(\xi + h) c^2}$$

c) 連続式

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \{ (\xi + h) u \} + \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \{ (\xi + h) (v \cos \phi) \} = 0$$

(2) 計算条件

a) 大領域（東北地方太平洋沖）

計算領域は、東北地方太平洋沖を十分に含む北緯32°～46°、東経136°～156°の領域を選択し、地形データは、Amante, et al. (2009) のEtopo1を使用した。断層モデルで用いた断層パラメータは、国土地理院（2011）による2枚の断層モデルを使用した。地盤の変異時間は、気象庁（2011）を参考に、北部の宮城・岩手沖で100秒、南部の福島沖で60秒とした。

b) 小領域（岩手県北部沿岸域）

計算領域は、市街地に津波が浸水した久慈市や、壊滅的な被害を受け、津波の全痕跡記録で2番目に高い38mの場所がある野田村を含む、北緯40°～40°15'、東経141°5'～142°5'の領域を選択し、地形データは、陸域では国土地理院（2001）の数値地図50mメッシュを、海域では日本海洋データセンター（2011）の500mメッシュ水深データをさらに50m間隔に細分化したものを結合さ

図-3 GPS波浪計の観測波形（岩手県北部沖）

図-4 小領域の計算領域および波の入射角度

図-5 地盤初期変位状況

せて50m間隔の精度とした。入力波形は、図-3に示すように岩手県北部沖のNOWPHAS (2011) GPS波浪計で観測された波形を入力した。入射角度は、大領域での計算結果で小領域の領域へ到達する際の入射角度を参考にし、図-4に示すように、小領域において縦600格子に対し、横5格子 (1メッシュ=50m) の角度で入射させた。

5. 計算結果

(1) 大領域 (東北地方太平洋沖)

図-5に地震直後の水面の状態を示す。図より、震央の西側で3m程度沈降しており、東側で7m程度隆起している。今村ら (2011) の10枚の断層を変動させた結果と比較をすると、本研究は2枚断層であることから、全領域での良好な津波挙動を再現できてはいないが、岩手県沖付近での津波到達時間などは比較的良好に再現できていると考えられる。図-6に津波発生後10分、27分、31分および36分の水位分布を示す。図より、最初に岩手県南部付近に引き波が到達し、その後岩手県北部の北西方向へ進行している様子がわかる。本研究では小領域での計算にこの結果を用いて津波の進行方向を設定した。

(2) 小領域 (岩手県北部沿岸域)

本節では、小領域での津波伝播計算結果の妥当性を確認した後に、この領域での津波の挙動がどのようなであったかを把握し、高い遡上痕跡や家屋破壊が多かった場所での津波の伝播状況を確認した。

a) 計算の妥当性の確認

ここでは、数値計算と同じ領域での調査結果とを比較をして計算の妥当性を比較した。図-7に計算と調査により得られた最大水位分布をそれぞれ示す。図中より、計算結果と調査結果はよく一致していると考えられる。数値計算によると、久慈沖では15m強の水位であるが、野田村沖では25mを越える水位となっており、特に野田村南部で40mを越える水位となっている。この場所では最大38mの遡上痕跡を著者らが観測しており、現象を良く再現していると考えられる。

b) 津波伝播の様子

本節では、この海域における津波の挙動を考察する。図-8に押し波がこの海域に侵入する様子を示す。図より、久慈沖および野田村沖の両方で、南方方面からの波と、それぞれの湾北部の岬の反射波とが干渉して増幅して、それが市街地に押し込まれるような状況であったと考えられる。特に38mの遡上痕跡があった野田村米田地区では、この現象が顕著であり、局所的に津波高さが40m近くまで増大している。また、南部の普代村でも、普代水門の北側斜面からの反射波で津波高さが増幅していたと考えられる。図-9に津波の押し波到達時間および最大波の到達時間を示す。この海域では引き波から始まってお

図-6 津波伝播様子

図-7 痕跡高の比較 (計算結果と観測結果)

図-8 津波伝播状況

り、押し波到達直前には海底が見えるほど水位が低下したとの目撃情報があった。計算結果によると、水位の上昇開始時間は全域で湾奥ほど遅くなっているが、最大水位の時間は海域の中央部の岬沖合で海岸部よりも10分ほど遅くなっている。これは進行波が海岸へ到達し、沖まで反射する分時間が経過したためだと考えられる。

次に、湾口防波堤が設置されている久慈湾について、今回の津波に対する湾口防波堤の効果を検証した。釜石港湾事務所（2010）によると、久慈港では、現在湾口防波堤は計画の3,800mのうちの一部の800mが施工されている。今回の津波ではこの防波堤は顕著な被災はなかった。図-10に湾口防波堤の有無による最大水位の差を示す。図は防波堤が無い状態を基準にして、防波堤を設置した場合どれくらい水位が変動するかを示す。図より、南側防波堤の影響で久慈港では3m程度の水位の低減効果が見られた。また、南北の湾口防波堤の間と北側の防波堤がない海域では逆に3-5mの増大域も見られる。しかし、久慈港へ侵入する水位が低減したことにより背後の市街地へ遡上が低減されたと考えられることから、防波堤の設置による効果はあったのではないかと考えられる。

c) 被害と流速の関係

被害のあった場所および被害内容と、その場所での最大流速を確認した。図-11に久慈市街で最大流速となった時の流速分布図を示す。赤い点は国家石油備蓄基地の敷地の一部で、ここでは排水タンクや防波堤の損傷があった。また、黄色い点は久慈漁港の防潮堤の背後に位置し、家屋の浸水被害があった。流速分布によると、赤い点の排水タンク周辺では7~8m/s、防波堤周辺では11m/s、黄色い点の家屋浸水の周辺では4~6m/sであった。また港背後の掘込み防潮堤の天端高はTP+7.7mであるが、ここでは越流高は1m程度であった為に堤防の破壊は免れた。また、背後の家屋も浸水深が2弱であったことから破壊を免れた。

次に、図-12に野田村で最大流速となった時の流速分布を示す。野田村市街地の点線で示した場所にある堤防は大きく破壊され、点線の背後の市街地では多くの家屋の流出被害があった。堤防高はTP+10m程度であり、津波高はTP+17m程度と、7mの越流高となっている。流速分布によると、黄色い線の堤防付近で10~12m/s、赤い領域の家屋流出周辺で7~9m/s、米田の家屋残存周辺で2~3m/s、家屋流出周辺で6~8m/sであった。

これらの各地の被災状況を表-1に、更に流速による被害状況を表-2のようにまとめた。表より、流速が6m/sを越えると家屋が全壊しており、越村ら（2009）の家屋破壊基準とはほぼ一致していた。更に野田村の防潮堤は流速10m/s以上となっており、17m近い津波高さおよび大流速により破壊された事がわかる。

図-9 押し波到達時間および最大水位到達時間
2011年3月11日15時からの経過時間（分）

図-10 久慈湾湾口防波堤の有無による最大水位の変化
(防波堤無から有の場合の水位の変化)

図-11 久慈市流速分布

6. まとめ

平成23年3月11日の太平洋東北沖地震により津波が発生し陸地へ伝播する状況を再現した。これにより太平洋沖を津波が伝播する状況および陸地付近で局所的に津波高さが増大する状況などを把握した。久慈港では湾口防波堤による津波高さの低減効果を確認する事ができた。また、家屋流出や堤防の破壊などの被害があった場所での水位および流速を把握する事により、水位および流速と被害規模との関係について家屋だけではなく、タンクや堤防などについても把握する事ができた。

図-12 野田村流速分布

謝辞：調査時には、八戸工業高等専門学校南将人教授には現地情報などを提供していただき現地へも同行していただいた。また笹川浩孝氏および田高史夫氏には現地情報を提供していただき、さらに測量補助などの援助をしていただいた。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 今村文彦, 越村俊一, 大家隆行, 馬淵幸雄, 村嶋陽一 (2011): 東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施 東北大学モデル (version1.0) (オンライン), <http://www.coastal.jp/tjt/index.php?plugin=attach&refer=津波計算結果&openfile=110610東北大学vers1.0.pdf>.
- 釜石港湾事務所 (2010): 久慈港, 国土交通省東北地方整備局。
- 気象庁地震予知情報課 (2011): 平成23年 (2011年) 東北地方太平洋沖地震?遠地実体波による震源過程解析 (暫定) - (オンライン), <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/sourceprocess/event/20110311far.pdf>.
- (独法) 港湾空港技術研究所 (2011): NOWPHAS (全国港湾海洋波浪情報網) (オンライン), 国土交通省, <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>.
- 国土地理院 (2001): 数値地図50mメッシュ, 国土交通省。
- 越村俊一・行谷佑一・柳沢英明 (2009): 津波被害関数の構築, 土木学会論文集B Vol.65 No.4, pp.320-331.
- 日本海洋データセンター: 500mメッシュ水深データ (オンライン), 海上保安庁海洋情報部, <http://www.jodc.go.jp>.
- 松富英夫・首藤伸夫 (1992): 津波の浸水深, 流速と家屋被害, 海岸工学論文集Vol.41 No.1, pp.246-250.
- Amante, C. and B. W. Eakins, (2009): ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19 pp.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe, (2000): Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model, A Global Model

表-1 被災規模と流速まとめ

	場所	被害状況	流速 (m/s)	浸水深 (m)
久慈市	石油備蓄基地	排水タンク流出	7~8	5
		防波堤一部損壊	11	6
	漁港防潮堤横	家屋損壊	6~8	4
	市街防潮堤裏	家屋浸水・半壊	4~6	2
	玉の脇	家屋損壊	6~7	9
	舟渡	家屋半壊	4~6	2
野田村	市街地	防波堤の破壊	10~12	7
		家屋損壊	7~9	11
	米田	家屋損壊	6~8	10

表-2 被災規模と流速まとめ

被害状況	流速 (m/s)
家屋浸水・半壊	4~6
家屋・排水タンク損壊	6~9
防波堤の損傷・破壊	10~12

and a Regional Model around Japan, Journal of Oceanography, 56, 567-581.

- Okada, Y. (1992): INTERNAL DEFORMATION DUE TO SHEAR AND TENSILE FAULTS IN A HALF-SPACE, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.82, No.2, pp.1018-1040.
- Ozawa, S., T. Nishimura, H. Suito, T. Kobayashi, M. Tobita, and T. Imakiire (2011), Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake, Nature, 475, pp.373-376, doi:10.1038/nature10227.