2011年東北地方太平洋沖地震津波の 現地調査と地形変化予測法

成吉 兼二1・山本 吉道2

¹学生会員 東海大学大学院 総合理工学研究科 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目4-1-1) E-mail:0btad007@mail.tokai-u.jp

²フェロー会員 東海大学教授 総合理工学研究科 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目4-1-1) E-mail:yo-yamamo@tokai-u.jp

巨大地震によって発生した大津波が浅海域に達すると、海底では地形変化が生じ、侵食・洗掘による構造物の倒壊等の被害が生じる.2011年東北地方太平洋沖地震津波は、東北地方を中心に甚大な被害をもたらし、各地で侵食・洗掘被害が発生し、多くの構造物が倒壊した.また、津波の越流により、海岸堤防・ 護岸等の法先が洗掘されている箇所が複数見られた.本研究では、まず、津波来襲後に宮城県と福島県で 実施した洗掘被害調査について報告する.次に、津波の進入および戻り流れ時の構造物法先の洗掘量算定 式を提案する.また、地形変化予測数値モデルによる宮城県気仙沼湾での検証計算から、現地海岸に適し た漂砂量係数を決定する.

Key Words: 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake tsunami, field survey, topography change, hydraulic experiment, numerical simulation

1. 緒言

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波 は我が国の太平洋沿岸に来襲し、特に岩手県、宮城県、 福島県に甚大な被害をもたらした.この大津波は浅海域 で大規模な地形変化を引き起こし、侵食・洗掘によって 多くの海岸構造物が倒壊した.さらに、津波が海岸堤 防・護岸等を越流したことにより、構造物の背後地盤が 洗掘されている箇所も複数見られた.また、戻り流れに よって構造物の海側にも同様の洗掘被害が生じ、多くの 構造物が被災した.

それゆえ,事前に侵食・洗掘規模を予測しておくこと は,将来発生が予想されている南海トラフ巨大地震の津 波防災対策を立てるために重要である.

津波による構造物法先の洗掘に関して、天端上の津波 の水流厚さが流れの落下高さに比べて小さい場合、津波 は天端から離れて放物運動をする.この場合、普及して いる平面二次元の数値モデルを用いて洗掘量を詳細に評 価することは困難である.また、洗掘の数値モデルとし てMPS法による後藤ら¹⁰の先駆的な研究があり、定性的 に現象を良く再現しているものの、計算時間が多く掛か るなどの難点があるため、コンピューターの処理能力と 数値モデルの計算精度の向上が課題として残っている.

一方,津波の戻り流れを対象として,西村・堀川²に よる数多くの小規模実験から、野口ら³⁾による数ケース の大規模水理模型実験から、護岸前面の最大洗掘深を計 算する手法を提案している.しかし、前者では戻り流れ の護岸天端上での限界水深を、後者では戻り流れの流量 が必要であるが、現地海岸において戻り流れに関する記 録が残っていることは考えにくい. そこで、山本ら⁴は 入射波条件から, 戻り流れに放物運動モデルを仮定し, 数多くの水理模型実験を行い、最大洗掘深とそれが生じ る位置を求める方法を提案し、2004年スマトラ島沖地震 津波の現地実測データとの整合性を確認している. また, 成吉ら⁹は山本ら⁴が提案した算定式に堤防・護岸の天端 高の違いの影響を考慮する等の改良を行うことで予測精 度を向上させ、準大規模水理模型実験結果との整合性を 確認しているが、現地海岸での適用性については検討を 行っていない.

また、これらの研究は、戻り流れを対象としたもので あり、進入時の津波による洗掘の評価法については、一 般式まで提案した研究例は見当たらない.なお、中村・ 水谷⁹が三次元の数値モデルを用いて遡上津波による陸 上構造物周辺の洗掘予測法について検討しているが、計 算容量の多さから広域の検討が困難な点があるが、将来 的には有用な手法となるだろう. 津波による海底の地形変化予測に関して、高橋ら^{7,8,9} による一連の研究があり、掃流砂量だけでなく浮遊砂量 も考慮する必要があることを指摘している.藤井ら¹⁰, 高橋ら¹¹⁾,西畑ら¹²は浮遊砂の巻き上げ量と沈降量を考 慮することで、地形変化の予測精度を向上させた.成吉 ら⁵は山本ら¹³の計算法を基に、1960年チリ地震津波によ る気仙沼湾での地形変化計算を試み、漂砂量係数の評価 方法の検討から、対象領域での侵食量再現を試みている.

本研究では、まず、2011年東北地方太平洋沖地震津波 来襲後に著者らが宮城県と福島県で実施した海岸構造物 法先の洗掘被害調査について報告する.次に、成吉ら⁵⁾ の洗掘算定法を基に、進入および戻り流れ時の津波によ る構造物法先の洗掘量算定式の提案を行う.さらに、現 地海岸の洗掘事例を使って、本式の適用性を検討する.

また、広域の地形変化予測モデルを構築するために、 山本ら¹³⁾の平面二次元数値モデルを用いて、2011年東北 地方太平洋沖地震津波による宮城県気仙沼湾での検証計 算から、現地海岸に適する漂砂量係数を決定する.

2. 津波の洗掘被害調査

(1) 現地調査の概要

三陸沿岸や仙台湾沿岸に来襲した津波は、堤防・護岸 上の越流、さらには戻り流れにより、各地で洗掘被害を 引き起こし、多くの構造物が倒壊した.本調査は、津波 による構造物法先での洗掘および構造物の被害状況を明 らかにすることを目的として、2011年11月1日と2日に宮



図-1 新地町での調査地点(国土地理院が2011年3月12日に撮影した航空写真に加筆)

城県と福島県で実施した.各調査地点では、スタッフ、 オートレベル、メジャーを用いて、構造物の天端高,洗 掘量、浸水高等の計測を行った.表-1に各調査地点の洗 掘被害状況を示してある.ここで、最大洗掘位置は、構 造物法先から洗掘深が最大の地点までの水平距離である. なお、天端高と浸水高は調査時の海面を基準に測定を行 い、調査後に、津波の最大波来襲時刻における潮位から の値に換算した.また、浸水高は、著者らの調査結果や 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによる調査 結果¹⁴を参考にした.

(2) 福島県相馬郡新地町での調査

本調査は図-1に示す埒木崎沿岸部の護岸周辺で実施された.本海岸では、図-2に示すように、越流により護岸 背後地盤で大規模な洗掘が生じており、最大洗掘深は約 1.8m,洗掘幅は約7.0mであった.また、図-3に示すよう に護岸天端部が沈下している区間もあり、護岸内部の土 砂が吸い出されていた.



図-2 新地町での護岸背後(陸側)の洗掘状況



図-3 新地町での護岸天端部の被害状況

| | 調査地点 | 北緯 | 東経 | 洗掘状況 | 海岸構造物 の天端高(m) | 浸水高 (m) | 洗掘幅 (m) | 最大洗掘 位置 (m) | 最大 洗掘深 (m) | |
|---|-------------------|-------------|--------------|-------------------|------------------|------------|------------|----------------|---------------|--|
| Α | 福島県相馬郡 新地町埒木崎 | 37° 53' 16" | 140° 55' 55" | 進入波による 裏法先の洗掘 | 5.9 | 8.9 | 14 | 7.0 | 1.8 | |
| В | 宮城県本吉郡 | 38° 38' 34" | 141° 27' 43" | 進入波による 裏法先の洗掘 | 2.0 | 10.5 | 8.8 | 4.8 | 1.5 | |
| С | 南三陸可 波伝谷漁港 | 38° 38' 38" | 141° 27' 45" | 戻り流れによる 表法先の洗掘 | 5.9 | 10.5 | 8.5 | 3.5 | 2.1 | |
| D | 宮城県亘理郡 山元町山元海岸 | 37° 57' 31" | 140° 54' 56" | 進入波による 裏法先の洗掘 | 6.0 | 8.9 | 35~45 | 13 | 2.0 | |

表−1 調査地点と構造物および洗掘量の諸元

(3) 宮城県本吉郡南三陸町での調査

本調査は図-4に示す志津川湾南部の波伝谷漁港で実施 された.図-5に示すように、進入時の津波によって胸壁 背後に洗掘が生じている.一方、図-6では海側の地盤が 洗掘されていることから、津波の戻り流れによるものだ と分かる.また、図-7に示すように、戻り流れによって 一部の胸壁が海側に転倒していた.



図-4 波伝谷漁港での調査地点(国土地理院が2011年6 月7日に撮影した航空写真に加筆)



図-5 B地点での進入波による胸壁裏法先の洗掘状況



図-6 C地点での戻り流れによる胸壁表法先の洗掘状況



図-7 C'地点での戻り流れによる破堤状況

(4) 宮城県亘理郡山元町での調査

本調査は図-8で示す山元海岸の堤防周辺で実施された. この場所では、図-9に示すように、堤防陸側の砂地盤の 広範囲で洗掘が生じており、簡易測量を行った結果、最 大洗掘深が約2.0m、幅が35~45m程度であった.また、 図-10,11に示すように、堤防の天端部と裏法面の被害が 大きく、堤体内から土砂が吸い出されていた.



図-8 山元海岸の調査地点(国土地理院が2011年5~11月 に撮影した航空写真に加筆)



図-9 山元海岸での堤防背後の洗掘状況



図-10 山元海岸での堤防天端部の被害状況



図-11 山元海岸での堤防裏法面の被害状況

3. 津波による構造物法先の洗掘量算定法

(1) 水理模型実験の概要

図-12に示す大型タンクと放水路を有する二次元水路 を用いて、タンクから3.8mの地点に護岸模型を設置し、 その間は勾配1/15の固定誘導路、その右側は勾配1/15の 移動床斜面にし、図-13に示すような、流量 q、底質粒 径 d₈₀、護岸前面水深h、前面の落差zを変えた、表-2に 示す計23ケースの水理模型実験を行い、最大洗掘深D_{mx} およびその水平距離Lを測定した.

(2) 最大洗掘位置の算定法

Δ

円般型

 \boldsymbol{Z}

電磁流速計

3.8m

図-12

♦ 6.0cm

α 🎝

流出口

図-13に示す護岸から洗掘深が最大に達した位置までの距離 L(最大洗掘位置)は、流れが天端から放物運動すると仮定すれば、砂面上の落下位置までの水平距離の計算値 Lに等しいと考えられ、式(1)から求められる.

$$L_t = u_{\max} \times t_r \tag{1}$$

ここで、*u*_{max}は天端上での水平方向のピーク流速、*t*_rは 流れが護岸天端から砂面に到達するまでの時間である.

流速には、戻り流れの場合は式(2)を用いる.また、 進入波の場合は飯塚・松富¹⁵⁾や山本ら¹⁶⁾の研究を参考に フルード数F,(遮蔽物の無い海岸線付近で1.5程度,遮蔽 物がある陸側で1.1程度)の定義式(3)を用いる.

水路 (22m)

水理模型実験装置

 D_{max}



$$u_i = F_r \sqrt{gH_i} \tag{3}$$

ここで、 β は陸側地盤勾配、f は陸側地表面の摩擦係数、g は重力加速度、 H_b 、 H_i はそれぞれ戻り流れ、進入時の 天端上における水流厚さである.

戻り流れのピーク水流厚さh_{b max}は山本ら⁴の式(4)から 求め,これを式(2)に代入すればピーク流速u_{bmax}が得られ るので,式(1)から最大洗掘位置を求めることができる.

$$H_{b\max} = \frac{\frac{1}{3}(R-Z)f}{f+\sin\beta} \tag{4}$$

ここで, R は津波の打ち上げ高, Z は堤防・護岸背後の 地盤高であり, R は山本ら⁴やFreeman and Mehaute¹⁷など の式から近似的に求められる.

まず,底質粒径0.2mm、前面水深0.0m,落差0.15mで, 流量を変えた実験について解析した.図-14は護岸天端 上における単位幅当りの最大流量 q_{mx} ,最大洗掘位置の 計算値対実測値の比 L_p/L_t ,ナップの打ち込み角 α との関 係を示したものである.本図に示すように、 α が約0.67 より大きくなると、 L_p/L_t は0.9程度であまり変化しなくな るが、流量が大きくなり、ナップの打ち込み角 α が0.67 より小さくなると、沖向きの洗掘傾向が強まり、最大洗 掘位置の実測値は計算値に比べて大きくなる.



図-13 洗掘量諸元と放物運動モデル 対実測値、ナップの打ち込み角との関係

水理増
刑
宇
融
ケ
ー
マ
ー
階

| | 汉 2 小埕陕王夫歌户 八 見 | | | | | | | | | | | |
|------------------|--|----------------------|---------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 底質粒径 d 50 (mm) | 単位幅当りの最大流量 q max (m ² /s) | 落差 z (cm) | 護岸前面水深 h (cm) | | | | | | | | | |
| 0.2 | 0.028, 0.039, 0.043, 0.057, 0.062, 0.073 | 15.0 | 0.0 | | | | | | | | | |
| 0.2, 0.66, 5, 10 | 0.039, 0.073 | 15.0 | 0.0 | | | | | | | | | |
| 0.2 | 0.073 | 15.0 | 2.0, 5.0, 7.5, 10.0, 12.0 | | | | | | | | | |
| 0.2 | 0.073 | 5.0, 7.5, 10.0, 15.0 | 0.0 | | | | | | | | | |

.8m

Δ

 d_{50}

さらに、底質粒径、前面水深によって最大洗掘位置が どの程度低減するかを調べたが、成吉ら⁵と違い、前面 水深の低減率は図-15に示すように、前面水深を水流厚 さではなく、落差 z で無次元化した. これは、天端から 砂面までの落差 z に対して前面水深 h がどの程度占めて いるかで表す方が水深の影響度が明瞭になるからである.

以上の関係を定式化すると、L,を補正した最大洗掘位 置L,を求める次式が得られる.

$$L_{p} = C_{aL} \cdot C_{dL} \cdot C_{bL} \cdot L_{t} \tag{5}$$

ここで、ナップの打ち込み角 α 、底質粒径 d_{50} 、前面水 深hによる低減係数 C_{al} 、 C_{al} 、 C_{hl} は実験結果から、次式 を用いて求められる.

$$C_{\alpha L} = \begin{cases} 0.9 \exp\{6.3(0.67 - \alpha)\} & \alpha \le 0.67 \\ 0.9 & \alpha > 0.67 \end{cases}$$
(6)

$$C_{dL} = \exp\left\{-0.003 \left(\frac{d_{50} - d_{0.2mm}}{d_{0.2mm}}\right)\right\}$$
(7)

$$C_{hL} \begin{cases} \frac{1}{2} \left\{ 1.0 - \tanh\left(2.8\sqrt{\frac{h}{z}} - 3.0\right) \right\} & \frac{h}{z} < 1.0 \\ \frac{1}{2} \left\{ 1.0 - \tanh(-0.2) \right\} & \frac{h}{z} \ge 1.0 \end{cases}$$
(8)

ここで、 d_{50} は対象底質の中央粒径、 d_{02mm} は0.2mm粒径である.

(3) 最大洗掘深の算定法

進入波や戻り流れが砂面に衝突することにより洗掘が 起きることから,これらの流れの鉛直方向の運動エネル ギーまたは力積を洗掘深が最大になるまで累加した値で 洗掘を評価できると考えられる.しかし,洗掘深が最大 になるまでの時間を事前に予測することが困難であるた め,予測が比較的容易な流速がピークになるまでの時間 を使い,式(9)で定義される単位幅当りの運動エネルギ ーの累加値ΣE,と,式(10)の単位幅当りの力積の累加値 ΣF,Δtを求めた.

 $\sum E_{y} = \frac{1}{2} \rho \sum (uH\Delta t) u_{y}^{2}$



$$\sum F_{y} \Delta t = \rho \sum (u H \Delta t) u_{y} \tag{10}$$

ここで、 ρ は流体の密度、u は天端上の流速、H は天端 上の水流厚さ、 Δt は累加時間間隔、 u_y は流れが砂面に到 達する瞬間における流速の鉛直方向成分である.

そして、上記の運動エネルギーおよび力積をそれぞれ 単位体積・単位幅当りのエネルギー pg,単位体積当り の力積 p(gH)¹²を用いて長さの次元にしたものと、最大 洗掘深との関係を調べると、図-16,17に示すように、良 好な相関が得られた.

さらに、底質粒径、前面水深によって最大洗掘深がどの程度低減するかを調べたが、前面水深は最大洗掘位置と同様の考え方から、図-18のように整理している.

また,落差が大きくなればナップ落下点の鉛直方向流 速が大きくなり,運動エネルギーおよび力積は増加する ため,最大洗掘深は大きくなると考えられる.しかし, 実験結果は減少傾向にあった.この原因は落下距離が長 くなると,水流が広範囲に飛散し,運動エネルギーや力 積の単位断面積当りの密度が低減するためである.



図-16 単位幅当りの累加運動エネルギーと最大洗掘深 との関係







(9)

以上の関係を定式化すると、最大洗掘深D_{max}を求める 次式が得られる.

$$D_{\max} = \begin{cases} C_{dD} \cdot C_{hD} \cdot C_{e} \times 0.44 \left(\frac{\sum E_{y}}{\rho g}\right)^{1/3} \\ C_{dD} \cdot C_{hD} \cdot C_{f} \times 0.15 \left(\frac{\sum F_{y} \Delta t}{\rho \sqrt{gH}}\right)^{1/2} \end{cases}$$
(11)

ここで,底質粒径 d_{50} ,前面水深hによる低減係数 C_{aD} , C_{hD} ,および落差zによる運動エネルギー,力積の低減 係数 C_{e} , C_{f} は実験結果から次式を用いて求められる.

$$C_{dD} = \exp\left\{-0.027 \left(\frac{d_{50} - d_{0.2mm}}{d_{0.2mm}}\right)\right\}$$
(12)

$$C_{hL} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left\{ 1.0 - \tanh\left(3.7\sqrt{\frac{h}{z}} - 3.0\right) \right\} & \frac{h}{z} < 1.0 \\ \frac{1}{2} \left\{ 1.0 - \tanh(0.7) \right\} & \frac{h}{z} \ge 1.0 \end{cases}$$
(13)

$$\begin{cases} C_e = 1.11 \exp\left\{-0.038\left(\frac{z}{H}\right)\right\} \\ C_f = 1.04 \exp\left\{-0.018\left(\frac{z}{H}\right)\right\} \end{cases}$$
(14)

なお,流量が減少するにつれて,渦により舞い上がって いた土砂が沈降するため,実際の最終的な洗掘深は計算 値より1~2割程度小さくなる.

(4) 算定式の現地海岸への適用

前述の算定式を現地海岸の洗掘事例に適用することに

よって、本式の実用性を検討する.

表-3に適用結果を示しているが、タイ国での2004年スマトラ島沖地震津波による洗掘事例については山本ら⁴のデータを使用した.

本検討で用いた天端上のピーク水流厚さは,進入時の 場合は適用地点のピーク浸水高と構造物の天端高との差 に等しいとした.

流速がピークになるまでの時間には、GPS波浪計の観 測波形¹⁸⁾を参考にして、その最大水位が沿岸部における 浸水高と同じになると仮定し、津波が堤防・護岸天端を 越流してから水位がピークになるまでの時間を、対象海 岸での流速のピーク時間と同じであると仮定した.

前面水深は、越流後に徐々に増加していき減衰層とし て働くため、その経時変化を水深として考慮するべきで あるが、その予測が困難であることから、進入時は陸側 の浸水高さの1/2を、戻り流れ時は天端上のピーク水流 厚さを前面水深として考慮した.

なお、平均洗掘幅は、運動エネルギーおよび力積から 求まった最大洗掘深の平均値を用いて、洗掘断面の岸沖 方向の勾配を安息勾配に近い30°として推定したもので あるが、これは水理模型実験の結果から、ほとんどのケ ースにおいて、洗掘断面の勾配が約30°であったことか ら、この値を用いて計算を行っている.

また、図-19は最大洗掘深の計算値と実測値の比較図 を示しており、本図から判るように、適用地点によって 過大または過小評価するケースがあるが、進入波の場合 は誤差が運動エネルギー法で10-40%、力積法で10-30% であった.

| | | | | | | 1 | | | | ИСТИЗ | BJF | | × 764/14 | | | | | |
|----|----------------------|---|--------------|----------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------|---------------|------------------|---------|--------------------------|--------------------------|-----|--------------------------------|-------------------|--------------------------|--------------------|
| 国名 | 適用箇所 | 対象 津波 | 越 形 能 | 浸水高さ (m) | 堤防等 の天端 高 (m) | 天端上 の ピーク 水流厚さ (m) | 天端上 の ピーク 流速 (m/s) | 底質粒径 (mm) | 落 差 (m) | ピーク 時間 (s) | 前面水深(m) | 最大 洗位置 (計算) (m) | 最大 提 位 実 (m) | 運 | 力積による 最大洗掘深 (計算値) (m) | 最大 洗掘測) (m) | 平均 洗掘幅 (計算) (m) | 洗掘幅 (実測) (m) |
| 日本 | 宮城県 南三陸町 波伝谷漁港 | 2011年 進 東北地方 太平洋沖 地震津波 進 戻流 | 進入 | 10.5 | 3.9 | 6.65 | 8.88 | 4.0 | 2.35 | 570 | 4.50 | 3.5 | 4.8 | 1.7 | 1.8 | 1.5 | 6.4 | 8.8 |
| | 宮城県 山元町 山元海岸 | | 進入 | 8.9 | 6.0 | 2.89 | 7.98 | 0.5 | 4.00 | 291 | 3.45 | 4.2 | 13.0 | 2.7 | 2.6 | 2.0 | 8.1 | |
| | 福島県 新地町 埒木崎 | | 進入 | 8.9 | 5.9 | 3.08 | 8.24 | 0.2 | 1.75 | 310 | 2.42 | 3.7 | 7.0 | 1.6 | 1.6 | 1.8 | 6.2 | _ |
| | 宮城県 南三陸町 波伝谷漁港 | | 戻り 流れ | 10.5* | 3.9 | 1.48 | 3.81 | 5.0 | 2.50 | 360 | 1.48 | 1.7 | 3.5 | 1.6 | 1.6 | 2.1 | 6.2 | 8.5 |
| タイ | パトン海岸 北部 | 2004年 スマトラ 島沖地震 津波 | 戻り 流れ | 5.0* | 4.1 | 0.09 | 2.05 | 0.2 | 0.10 | 1200 | 0.09 | 0.2 | - | 0.3 | 0.5 | 1.0 | 4.0 | — |
| | パトン海岸 南端 河口近く | | 戻 り 流れ | 4.0* | 3.0 | 0.17 | 1.81 | 0.2 | 0.60 | 1200 | 0.17 | 0.5 | - | 1.6 | 2.3 | 2.0 | 6.8 | _ |
| | カマラ海岸 東部 | | 戻り流れ | 4.0* | 3.0 | 0.11 | 2.09 | 0.2 | 1.00 | 1200 | 0.11 | 0.8 | - | 1.5 | 2.6 | 1.5 | 6.9 | 5.0 |
| | ピピ島南側 湾内東部 | | 戻り流れ | 4.0* | 3.5 | 0.06 | 1.48 | 0.2 | 0.10 | 1200 | 0.06 | 0.1 | - | 0.4 | 0.7 | 0.8 | 4.4 | 5.0 |

表-3 現地海岸への洗掘量算定式の適用結果

*打ち上げ高

使用データの信頼性の問題を無視しても,算定法の改善の余地があると考えられるが,海岸堤防・護岸等を越流した大津波による構造物法先での洗掘予測法が確立していない現状では,ここに提案した算定法でも大いに役立つと判断できる.

最大洗掘位置は、計算結果が全体として過少評価する 傾向があり、改善の余地が残っている.また、洗掘幅の 一致度は概ね良好であるが、値を記載していないケース は、津波が砂面に衝突したことによる洗掘だけでなく、 陸上遡上に伴う流れによる洗掘の影響が大きいと考えら れるので、比較の対象外とした.

本算定式を用いて,最大洗掘位置と洗掘深を求めるこ とができれば,次に岸沖方向への安息勾配の斜面を描く ことにより,洗掘量および洗掘断面を推定できるので, これを考慮した構造物の安定計算が可能になる.

4. 津波による広域の地形変化予測法

2011年東北地方太平洋沖地震津波によって地形変化が 生じた宮城県気仙沼湾で検証計算を行うことによって, 現地海岸に適した漂砂量係数の決定を試みる.

計算方法は、山本ら¹³の平面二次元数値モデルを基に、 非線形長波方程式を用いて浸水計算を行い、掃流砂量の 算定にはRibberink¹⁹の式(15)を、浮遊砂量の算定には、巻 き上げ量と沈降量を考慮した移流拡散方程式を用いた.

ここで、 q_b は単位面積単位時間当りの掃流砂量、 $\theta_s(t)$ は シールズ数、 θ_c は限界シールズ数、 Δ は掃流砂の相対密 度、mは掃流砂量係数であり、検証計算により決定する.

対象となる気仙沼湾の津波来襲前後の水深分布データ は震災前後の測量結果²⁰⁾を使用して作成した.



図-20に津波来襲前後の水深分布データから作成した 地形変化分布を示しており、図中央の狭窄部で約8mの 顕著な侵食が生じていた.

入力波形は宮城北部沖のGPS波浪計の観測波形¹⁸に同 じと仮定した.また,Fritzら²¹⁾の津波映像解析から気仙 沼湾の狭窄部で最大津波高が9mであったことから,本 数値モデルの沖側境界から入力させる最大水位を狭窄部 における最大津波高に一致するまで試行して設定した.

図-21に掃流砂量係数mを154として計算を行った結果 を示しており,狭窄部の顕著な侵食を良好に再現できた.



図-20 気仙沼湾での2011年東北地方太平洋沖地震津波
 来襲前後の地形変化分布(2011年3月22日と2011
 年3月26~4月1日との水深変化図)



図-21 気仙沼湾での2011年東北地方太平洋沖地震津波 来襲前後の地形変化分布(計算)

また、実測では狭窄部で最大11m/sの流速が発生して いるが²¹⁾、図-22の計算結果の流速ベクトル図に示すよ うに、最大で約13m/sの流速が確認できており、実測値 と良い一致を示している.また、湾奥部には鹿折川、湾 口部には大川があり、本モデルではそれらの河川流の影 響を考慮していないので、本検討では黒枠線内で示す領 域内で侵食量の実測値と計算値を比較した.その結果、 実測の侵食量は約62万m³であるのに対して計算値は約78 万m³と、約8割の一致を示しており、狭窄部周辺におけ る再現性は良好である.

さらに、掃流砂量係数m=154として、1960年チリ地震 津波による気仙沼湾での地形変化計算を成吉ら⁹と同様



図-22 気仙沼湾での2011年東北津波による狭窄部におけ る最大流速発生時の流速ベクトル図(計算)





の方法で検証を行った. 図-23に津波来襲前後の水深デ ータ⁷から作成した地形変化分布を示している.

地形変化計算の結果を図-24に、流速ベクトル図を図-25に示している.黒枠線内で示す領域内の実測の侵食量 は約68万m³であるのに対して計算値は約62m³、実測の最 大流速は6m/s⁷であるのに対して計算では約6.2m/sの流速 が発生しており、良好に再現できている.

なお、本検討ではm=154として計算を行い、山本ら¹³ はm=11、成吉ら⁵はm=110と大きく異なっているが、 Ribbernk¹⁹の式に含まれるシールズ数は、海底のせん断 力と底質の自重との比で表わされるが、底質には抗力成 分も働き、その流体力係数は0.01~1の間で変化する.



図-24 気仙沼湾での1960年チリ地震津波来襲前後の地 形変化分布(計算)



図-25 気仙沼湾での1960年チリ地震津波による狭窄部に おける最大流速発生時の流速ベクトル図(計算)

また、底質の自重は粒径 dの3 乗を用いて表すべきところを、シールズ数として無次元化するために dの1 乗を 用いているため、シールズ数は底質粒径の影響を過小評 価している.

それゆえ、対象海岸ごとに、掃流砂量に働く外力や粒 径の違いに応じて、漂砂量係数を変える必要性がある.

5. 結論

2011年東北地方太平洋沖地震津波を対象とした現地調 査結果から,海岸堤防・護岸天端を超えるような巨大津 波が来襲すると,越流により構造物背後では大規模な洗 掘が生じ,また,それに伴い海岸構造物内部の土砂の吸 い出しが発生する場合があることを確認できた.さらに, 戻り流れによっても同様の被害が発生する場合があるこ とも確認できた.

津波による構造物法先での洗掘予測法について,成吉 ら⁵⁰の放物運動モデルに基づいた算定法を基に,進入波 および戻り流れによる洗掘量算定式を提案し,現地被災 事例への適用検討から,進入波の場合にも適用でき,実 用に耐えうる精度で,現地における洗掘量を評価できる ことを示せた.

津波による広域の地形変化予測について、山本ら¹³の 平面二次元数値モデルを用いた現地海岸での検証計算か ら、対象海岸での適切な漂砂量係数を決定することで、 地形変化量の予測精度を向上させることができた.

参考文献

- 後藤仁志,酒井哲郎,林稔,織田晃治,五十里洋行:遡上津波の戻り流れによる護岸法先洗掘のグリッドレス解析,海岸工学論文種,第49巻,pp.46-50,2002.
- 西村仁嗣,堀川清司:遡上津波の戻り流れによる護 岸法先の洗掘,第26回海岸工学講演会論文集, pp.210-214, 1979.
- 野口賢二,佐藤慎司,田中茂信:津波遡上による護 岸越波および前面洗掘の大規模模型実験,海岸工学 論文集,第44巻, pp.296-300, 1997.
- 山本吉道, Nunthawath, C.,成吉兼二:津波による陸 域構造物被害の合理的評価法の提案,土木学会論文 集 B2(海岸工学), Vol.67, No.1, pp.72-91, 2011.
- 成吉兼二、山本吉道、石井俊輔:津波による護岸前 面洗掘と海底地形変化の予測モデルの改良、土木学 会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.68, No.4, p.I_1179-I_1185, 2012.
- 6) 中村友昭,水谷法美:渦と浸透滲出流の影響を考慮 した漂砂計算手法と遡上津波による陸上構造物周辺

の洗掘現象への適用に関する研究,土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.68, No.1, pp12-23, 2012.

- 高橋智幸,今村文彦,首藤伸夫:津波による流れと 海底変動に関する研究-1960年チリ津波の気仙沼湾で の場合-,海岸工学論文集,第38巻,pp.161-165, 1991.
- 高橋智幸,今村文彦,首藤伸夫:土砂移動を伴う津 波計算法の開発,海岸工学論文集,第 39 巻, pp.231-235, 1992.
- 高橋智幸,今村文彦,首藤伸夫:津波移動モデルの 適用性と再現性の検討,海岸工学論文集,第40巻, pp.171-175,1993.
- 藤井直樹,大森政則,高尾誠,金山進,大谷英夫: 津波による海底地形変化に関する研究,海岸工学論 文集,第45巻,pp.376-380,1998.
- 高橋智幸,首藤伸夫,今村文彦,浅井大輔:掃流砂 層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モ デルの開発,海岸工学論文集,第46巻,pp.606-610, 1999.
- 西畑剛, 佐貫宏, 森屋陽一, 後藤和久: 津波による 地形変化モデルに関する研究, 海岸工学論文集, 第 54巻, pp.521-525, 2007.
- 13) 山本吉道,成吉兼二,ヴタンカ:津波の戻り流れによる海岸洗掘・侵食予測方法の改良,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.511-515, 2009.
- 14) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ:痕跡 調査結果,東北地方太平洋沖地震津波合同調査グル ープ,http://www.coastal.jp/ttjt/(参照 2012-8-7)
- 15) 飯塚秀則,松富英夫:津波氾濫流の被害想定,海岸 工学論文集,第47巻, pp.381-385, 2000.
- 16) 山本吉道, Wutthiyan, W., 有川太郎:津波による海 岸被害の予測方法の改良,海岸工学論文集,第 55 巻, pp.301-305, 2008.
- 17) Freeman, J.C. and Mehaute, B.L. : Wave breakers on a beach and surges on a dry bed, Proc. ASCE, Vol.90, No.HY2, pp.187-216, 1964.
- 18) 河合弘泰,佐藤真,川口浩二,関克己:GPS 波浪計 で捉えた平成 23 年東北地方太平洋沖地震津波,土木 学会論文集 B2(海岸工学), Vol.67, No.2, 2011, I_1291-I_1295.
- Ribberink, J. S. : Bed-load transport for steady flows and unsteady oscillatory flow, Coastal Engineering, Vol.34, pp.59-82, 1998.
- 20) 日経コンストラクション, 2011 年 6 月 13 日号, pp.68-69.
- 21) Fritz, H.M, D. A. Philips, A. Okayasu, T. Shimozono, H. Liu, F. Mohanmed, V. Skanavis, C.E. Synolakis, and T. Takahashi : The 2011 Japan tsunami current velocity measurements from survivor videos at Kesennuma Bay using LiDAR Geophys. Res. Lett., 39, L00G23, doi:10.1029/2011GL050686, 2012.

(?受付)

FIELD SURVEY AND PREDICTION METHOD OF TOPOGRAPHY CHANGE BY 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE TSUNAMI

Kenji NARIYOSHI, Yoshimichi YAMAMOTO

The 2011 great east Japan earthquake tsunami hit the east coast of Japan and caused serious damage. The tsunami caused large-scale erosion and scour, resulting in the destruction of many coastal structures. Especially, the tsunami over- and back-flow caused the scour around the coastal structures. Therefore, research on prediction models of the topography change by tsunami is important. In this paper, a numerical model which can predict the topography change in a wide area has been built on the basis of Takahashi's et al model. Next, the scour survey carried out in Miyagi and Fukushima prefectures after the 2011 great east Japan earthquake tsunami is reported. Moreover, prediction models which can evaluate the scour around the structures are proposed.