

津波による海底地形変化評価モデルの 現地適用性に関する研究

STUDY ON FIELD APPLICABILITY OF ESTIMATION MODEL FOR TOPOGRAPHY CHANGE DUE TO TSUNAMIS

藤田尚毅¹・稲垣和男²・藤井直樹³・高尾誠⁴・金戸俊道⁵

Naoki FUJITA, Kazuo INAGAKI, Naoki FUJII, Makoto TAKAO and Toshimichi KANETO

¹非会員 株式会社三菱総合研究所 (〒100-8141 東京都千代田区大手町2-3-6)

²非会員 株式会社ユニック (〒153-0041 東京都目黒区駒場3-5-18)

³正会員 東電設計株式会社 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

⁴正会員 東京電力株式会社 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町1-1-3)

⁵非会員 東京電力株式会社 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町1-1-3)

There is a need for an accurate and practical analysis model of topography change as sea-bed erosion and deposition due to tsunami events have large impacts on safety of port and coastal facilities such as revetments.

This work is aimed at evaluating field applicability of existing estimation models of topography change due to tsunamis. For this purpose, we conducted hydraulic experiments in horizontally two-dimensional water tank, reproduced the results by the numerical models, and evaluated the validity of a specified upper limit of suspended sediment density.

Key Words : *Topography change, suspended sediment density, hydraulic experiment, numerical simulation*

1. はじめに

津波発生時の海底土砂移動による侵食・堆積は、護岸等の港湾・海岸施設の安全性に影響を与えるため、再現性の高い海底地形変化評価モデルが必要とされており、評価モデルの開発やモデルの妥当性検証に関する研究が行われてきた。津波による海底地形変化予測に関しては、高橋ら(1999)¹⁾により研究が行われ、予測モデルが開発された。池野ら(2009)²⁾は、このモデルを実務に適用するため、粒径依存の効果を考慮したモデルを開発し、精度を向上させた。モデルの検証という観点からは、藤井ら(2009)³⁾により、実験から得られた海底地形変化の再現計算による検証が行われた。また、藤井ら(1998)⁴⁾や、高橋ら(1999)が、1960 年チリ地震津波来襲時の気仙沼湾における海底地形変化再現計算を実施し、現地適用性の評価を行った。浅井ら(1999)⁵⁾は安政東海沖地震津波における伊豆半島入間において再現計算を実施した。この研究の中で浅井らは、浮遊砂上限濃度(C_{MAX})による堆積量の相違について検討を行い、 C_{MAX} の違いが堆積量に与える影響が大きいことを明らかにした。このように、海底地形変化評価モデルについて様々な研究が行われているが、実験結果の再現および現地適用性評価を併

せて実施した研究はされておらず、海底地形変化に与える影響が大きいとされる浮遊砂上限濃度の設定値に着目した研究は少ない。また、1960 年チリ地震津波による八戸港の地形変化再現計算を実施した例はない。

そこで、本研究では、既往の海底地形変化評価モデルの現地適用性の把握を目的として平面二次元水槽による実験を行い、モデル検証のため実験の再現計算を実施した。さらに、現地地形変化事例として1960 年チリ地震津波による八戸港における地形変化を取り上げ現地適用性の検証を行うとともに、浮遊砂上限濃度設定値の妥当性評価を行った。

2. 水理模型実験

海底地形変化評価モデルの検証データ取得および現象把握のため、水槽内に単純な矩形形状の港湾を設置し、水位と流速の平面分布を計測する固定床実験と砂移動による海底地形変化量を計測する移動床実験を実施した。本実験は、電力中央研究所実施の水路実験(榊山ら(2007)⁶⁾)の2倍のスケール(表-1)で実験を行った。

(1) 実験条件

a) 実験仕様

仕切板を用いて波を集約させ、港湾に所定の波が入射するようにした（図-1）。

b) 波条件

本実験では、造波装置により孤立波を発生させ入射した。発生させた孤立波の時間波形を図-2に示す（計測位置は図-1中のH0地点である）。

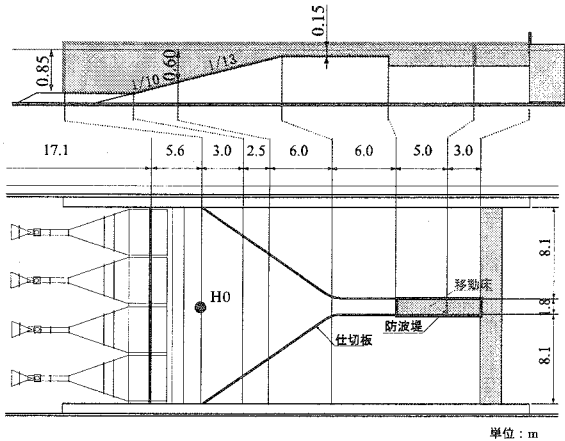


図-1 矩形港湾実験概要図

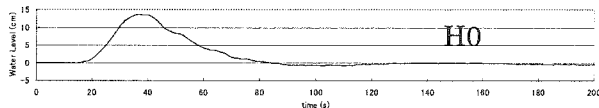


図-2 発生させた孤立波の時間波形

表-1 矩形港湾実験仕様

項目	矩形港湾実験	樺山ら(2007)
水路幅	1.8m	0.9m
水平床長さ	14m	25m
水深	1.050m	0.635m
護岸前面	0.150m	0.075m
護岸からの距離	3.0m	1.5m
防波堤		
厚さ	0.24m	0.12m
開口部幅	0.48m	0.24m
高さ		無越波

(2) 実験概要

移動床実験は、反射板から8mの部分（幅1.8m、厚さ0.15m）に中央粒径0.08mmの移動床（図-1）を設置して実験を実施した。計測項目は、水位・流速・海底地形変化量とした。水位と流速を計測した地点を図-3に示す。固定床実験は、平面流速分布・水位分布データの取得を目的として、反射板から8mの移動床部分を固定床に変更し計測を行った。なお、実験は、同じ波を3回入射した計測を行い、再現性の確認を行った。

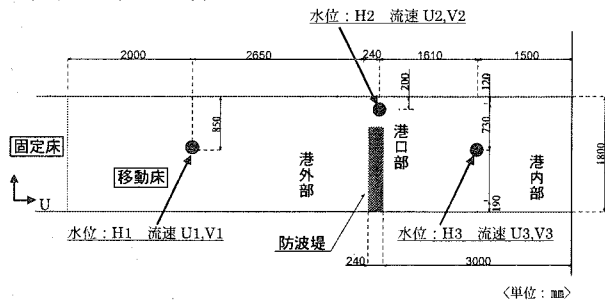


図-3 移動床実験における水位・流速計測地点

(3) 実験結果

水位・流速の時系列および海底地形変化量分布の図化を行い定性的な評価を実施するとともに、移動床領域を図-5のように領域区分し、堆積量と侵食量を整理し定量的な評価を行った。

移動床実験の移動床設定範囲全体の海底地形変化量分布図を図-4に示す。防波堤先端部で侵食が起こり、港内部の渦中心付近に堆積していることがわかる。領域を区分し、海底地形変化量を整理した結果（表-2）、港外部（領域A）では、地形変化の収支は堆積傾向になった。港内部では、流速の遅い中心部（領域C）で堆積傾向となり、領域Bの堆積量と中心部の領域Cの堆積量の比較から、堆積量の半分が渦中心部に集まっていることがわかる。一方で、流速が早い場所（領域D、E）では侵食傾向となった。地形変化の収支は若干の侵食傾向を示したが、堆積量と侵食量はほぼ同じであった。これは港口および港内で巻き上がった砂が水位降下時に港外へ流出したためと考えられる。

防波堤先端部での最大侵食量は6cmで、防波堤の港外側コーナー部では水位上昇時に侵食が、港内側コーナー部では水位降下時に侵食が起こった。防波堤先端部の局所侵食量は港内部の堆積量の20%程度となるが、港内部での侵食量と堆積量が同程度であることから、港内に堆積する砂の大半は港内で巻き上がった砂であると推測でき、防波堤先端部の局所侵食の港内部堆積への寄与は小さいと考えられる。

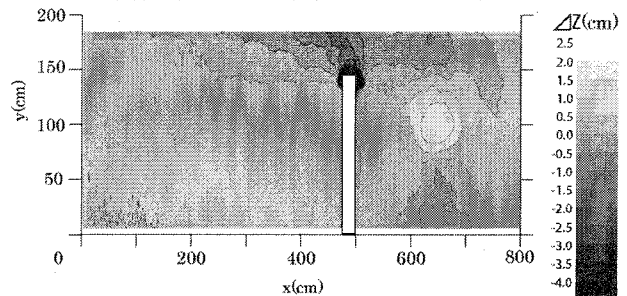


図-4 海底地形変化計測結果

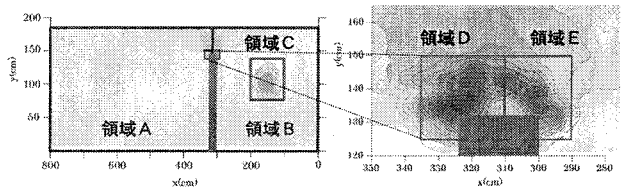


図-5 定量評価時の領域区分け図

表-2 領域ごとの地形変化量

	領域A		領域B		領域C (領域B内)	
	堆積量 (10³cm³)	侵食量 (10³cm³)	堆積量 (10³cm³)	侵食量 (10³cm³)	堆積量 (10³cm³)	最大堆積厚 (cm)
1回目	12.5	5.8	7.4	7.9	3.8	1.3
2回目	15.0	6.3	8.5	8.8	4.3	1.4
3回目	14.6	6.6	8.4	8.9	3.9	1.7

	領域D		領域E	
	侵食量 (10³cm³)	最大侵食深 (cm)	侵食量 (10³cm³)	最大侵食深 (cm)
1回目	1.7	5.6	1.2	4.3
2回目	1.5	5.0	1.6	5.7
3回目	2.1	6.6	1.6	5.4

3. 海底地形変化評価モデルの概要

津波による地形変化の計算は、非線形長波方程式による平面2次元の津波伝播計算から水位と流速を計算し、それらを外力として砂層の地形変化計算を行う。砂層の地形変化計算では、流砂量公式と砂の連続式を解くが、流砂量式では流体層から受け渡されたせん断力を用いて、流砂量を見積もっている。砂の連続式では、見積もられた流砂量から海底地形変化を求め、海底地形を更新する。

本検討では、以下に示す高橋ら(1999)、池野ら(2009)の2つの砂移動モデルを用いた。

(1) 高橋ら(1999)の地形変化評価モデル

高橋ら(1999)の地形変化評価モデルにおける掃流砂量算定式と掃流層・浮遊層間の交換砂量 w_{ex} を以下に示す。

$$\frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = 21\psi^{3/2} \quad (1)$$

$$\frac{w_{ex}}{\sqrt{sgd}} = 0.012\psi^2 - \frac{w\bar{C}}{\sqrt{sgd}} \quad (2)$$

$$\psi = \frac{u_*^2}{sgd} \quad (3)$$

ここに、 q_B ：単位幅当たりの掃流砂量、 ψ ：シールズ数、 s ：砂の水中比重、 g ：重力加速度、 d ：砂の粒径、 w ：沈降速度、 $\bar{C}$ ：平均浮遊砂濃度である。式(2)の右辺第1項は砂の巻上げ量、第2項は砂の沈降量として提案されたものである。式(1)および式(2)の右辺第1項の ψ に関する係数は、0.2mmの砂実験に基づき提案されている。

(2) 池野ら(2009)の地形変化評価モデル

池野ら(2009)は、掃流砂量の算定式として、河川流を対象に適用実績の高い次の芦田・道上(1972)⁷⁾の式が有効であることを示した。

$$\frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = 17\psi^{3/2}(1-\psi_c/\psi)\{1-(\psi_c/\psi)^{1/2}\} \quad (4)$$

また、浮遊砂の巻上げ量 P の算定式としては、砂粒径効果を考慮した次式の無次元巻上量算定式が提案された。

$$\frac{P}{\sqrt{sgd}} = a(\nu^2/sgd^3)^{0.2}\{(w/\sqrt{sgd})^{0.8}(\psi-\psi_c)\}^2 \quad (5)$$

ここに、 ψ_c ：限界シールズ数、 ν ：動粘性係数である。係数 a は既往の実験結果から 0.1~0.2 の範囲と推定しており、本研究では 0.15 と設定した。

(3) 掃流砂と浮遊砂の計算

地形変化の計算には、次式に示す掃流砂量の連続式と掃流量・浮遊層間の交換砂量式を用いた。

$$\frac{\partial z_B}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} - P + wC_b \right) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \bar{C}D}{\partial t} + \frac{\partial \bar{C}M}{\partial x} + \frac{\partial \bar{C}N}{\partial y} - P + wC_b = 0 \quad (7)$$

ここに、 z_B ：基準面からの底面高さ、 λ ：底面砂の空隙率、 q_{Bx} 、 q_{By} ：掃流砂量の x 、 y 方向成分、 C_b ：底面濃度、 M 、 N ：津波計算から求められる x 、 y 方向成分の線流量、 D ：全水深である。

浮遊砂濃度については、鉛直分布を指数分布と仮定し、底面濃度を用いることとした(藤井ら(2009))。

浮遊砂濃度の鉛直分布 $C'(z)$ は、鉛直拡散係数 k_z を用いて、

$$C'(z) = C_b \exp\left(-\frac{w}{k_z}z\right) \quad (8)$$

と仮定する。また、鉛直拡散係数 k_z は、藤井ら(1998)にならい未定数 c_k ($=0.2$) を用いて以下のように仮定する。

$$k_z = \kappa u_* (h+\eta) \times c_k \quad (9)$$

したがって、底面濃度は次式で求められる。

$$C_b = \frac{w(h+\eta)}{[1-\exp\{-w(h+\eta)/k_z\}]} \bar{C} \quad (10)$$

ここに、 κ ：カルマン定数($=0.4$)、 u_* ：摩擦速度、 η ：水位である。

4. 実験の再現計算

高橋ら(1999)、池野ら(2009)の2手法を用いた数値計算を実施し、水槽実験によって得られた結果との比較を行った。

(1) 計算条件と検討ケース

本検討における海底地形変化評価モデルの計算条件を表-3に示す。

表-3 実験再現計算の計算条件

項目	条件
計算格子間隔	2cm
計算時間間隔	0.004 秒
粒径	0.08mm
砂の密度	2650kg/m ³
空隙率	0.483
沈降速度	0.554cm/s
浮遊砂上限濃度	1%, 5%
粗度係数	0.012
水平渦動粘性係数	1cm ² /s

(2) 再現計算結果

固定床実験の再現計算では、水位、流速の平面分布と時間変動は良好に再現できた(図-6)。移動床

実験に対しては、高橋ら(1999)と池野ら(2009)の2つの地形変化モデルを用いた再現計算を行い、各モデルにおける海底地形変化の計算結果の傾向を把握した。いずれのモデルにおいても実験で得られた港内中央部の渦の中心に集中する堆積傾向と港口部における侵食傾向を良好に表現できた(図-8)。

計算では浮遊砂が非常に大きくなる場合があったため、濃度の上限を変化させて計算したが、上限濃度5%とした高橋ら(1999)のモデルによる計算結果は、堆積・侵食とも過大となった。池野ら(2009)のモデルでは浮遊砂の上限体積濃度の条件が、海底地形変化に寄与しない結果となったが、侵食量が若干過少であるものの、比較的再現性が良い(図-7)。

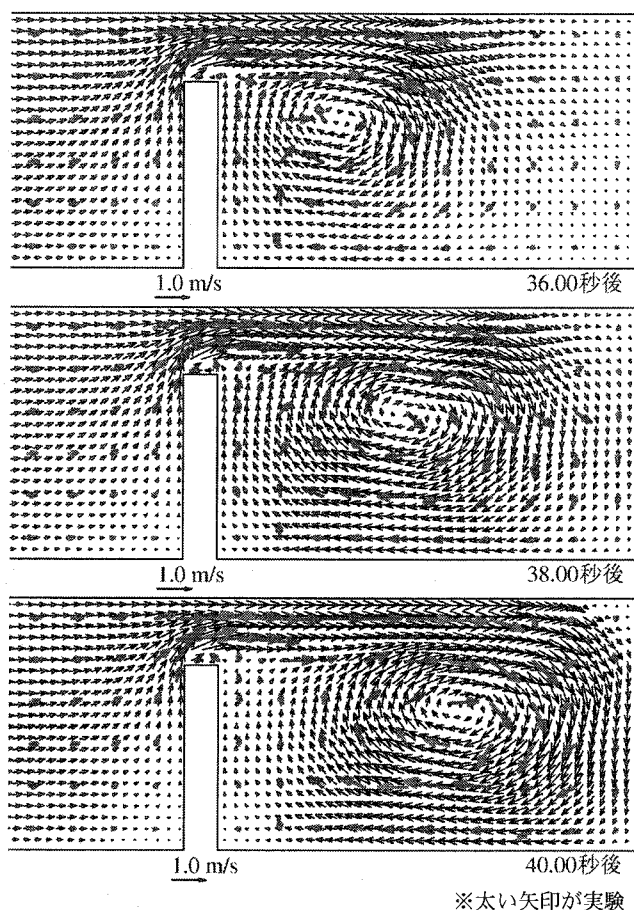


図-6 港内部の水位・流速時系列

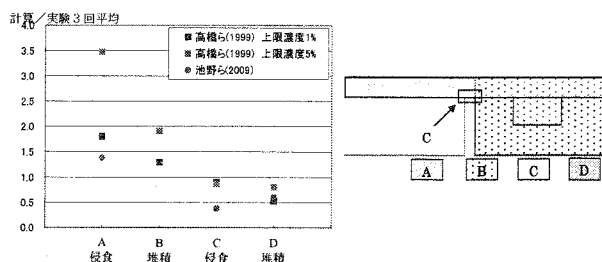


図-7 海底地形変化量定量比較

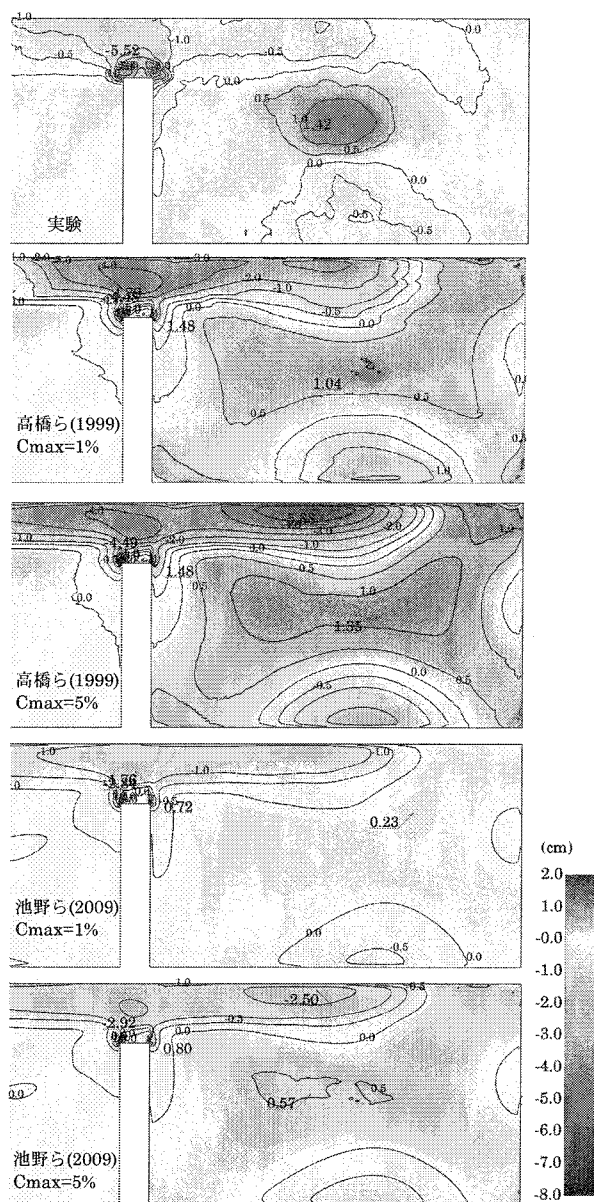


図-8 海底地形変化量分布図の比較

5. 現地事例の再現計算

1960年5月24日のチリ津波について、八戸港における地形変化事例に対する計算を実施し、地形変化モデルの再現性について検討した。

(1) 計算条件

再現計算の解析対象範囲は図-9に示した八戸港周辺、東西方向約3.2km、南北方向約2.2kmの範囲とした。この範囲の水深データおよび標高データをモデル化し、遡上領域も含め、津波伝播計算を実施した。ただし、計算初期の時点で陸域の格子については、砂移動計算時には初期値より侵食されることが生じない設定として計算を行った。図-10は、沖側境界条件に用いた水位時間波形である。津波数値計算および砂移動計算の計算条件を表-4に示す。なお池野ら(2009)のモデルの係数 a (5式)は0.15と設定した。

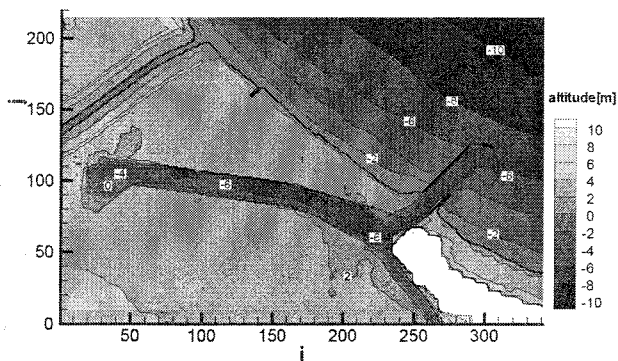


図-9 八戸港周辺の標高のモデル化

表-4 実地形適用計算の計算条件

項目	条件
計算格子間隔	10.3m
計算時間間隔	0.45 秒
流体の基礎方程式	非線形長波
計算時間	10 時間
陸側境界条件	遡上考慮
沖側境界条件	図-10 の時間波形を入力 潮位は T.P.+0.0 とする
粒径	0.26mm
砂の密度	2675kg/m ³
空隙率	0.4
沈降速度	0.035m/s
浮遊砂上限濃度	1%, 2%, 5%
粗度係数	0.03
水平渦動粘性係数	10m ² /s

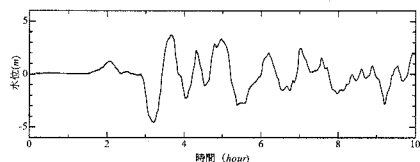


図-10 沖側境界条件に用いた水位時間波形

(2) 再現計算結果

数値計算による海底地形変化量の検証を行うため、津波来襲前後の深浅測量図（八戸港工事事務所⁸⁾）から、海底地形変化量の観測データを作成した（図-11）。計測値と再現計算から得られた最終地形変化量の分布図（図-12, 13）との比較から、いずれのモデルにおいても、港口で侵食、分岐地点で少量堆積、港奥部で堆積という計測による海底地形変化量の傾向を良く再現できていることを確認した。また、浮遊砂上限濃度を 1, 2, 5% に変化させたパラメータスタディを実施し、堆積・侵食量に関して定量的な評価を行った。その結果、浮遊砂上限濃度が 5% のときは、港口の分岐点周辺（part4）における侵食量と港奥（part1）の堆積量が過大に評価されること、浮遊砂上限濃度 1~2% の場合の再現性が良好であることを確認し、海底地形変化評価モデルによる予測計算における浮遊砂上限濃度は、基本的には 1~2% 程度と設定すればよいとの結論を得た（図-14, 15）。

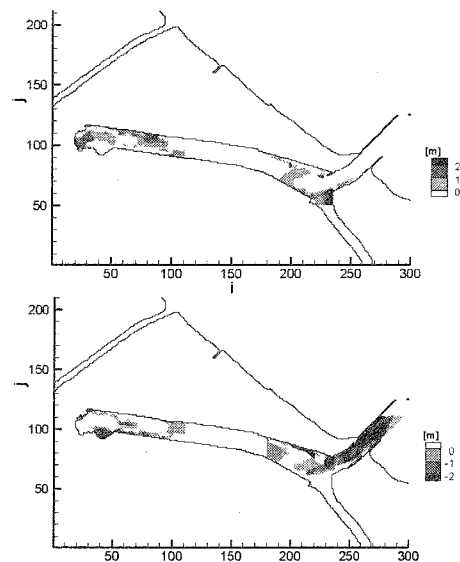


図-11 測量データから作成した地形変化量観測値
上図：堆積深，下図：侵食深

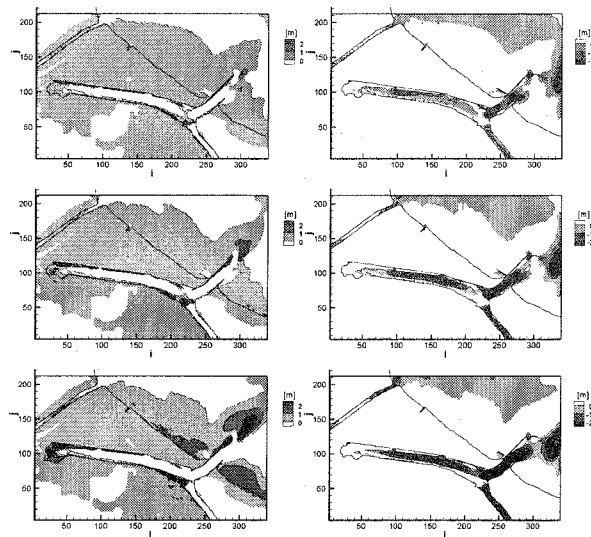


図-12 最終地形変化量分布の比較（高橋ら (1999)）

上から $C_{\max}=1\%, 2\%, 5\%$, 左図：堆積深，右図：侵食深

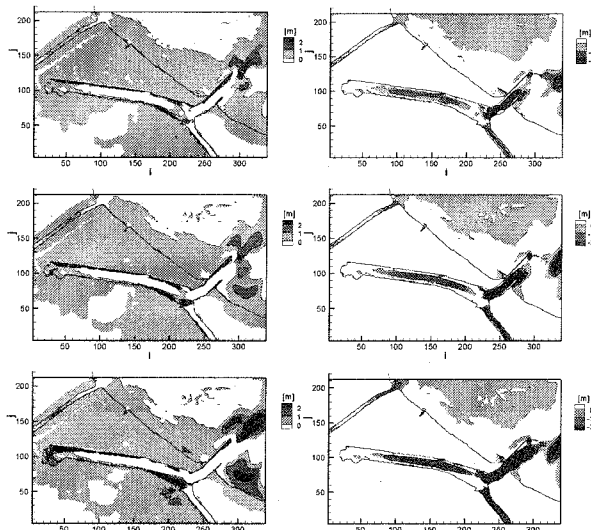
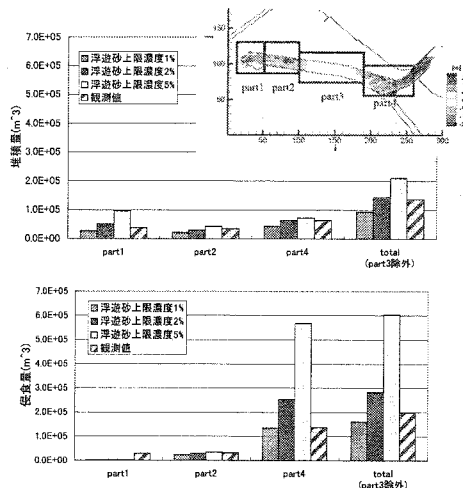
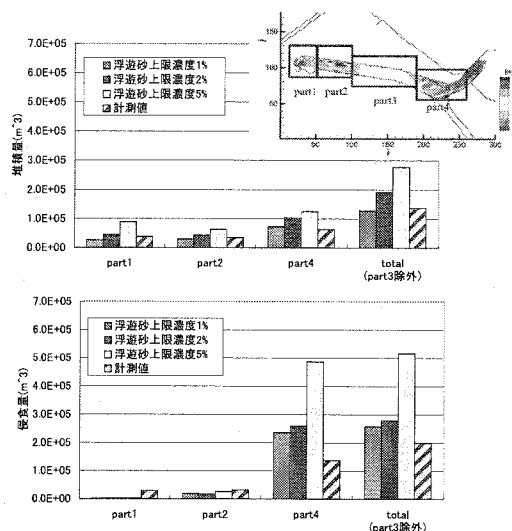


図-13 最終地形変化量分布の比較（池野ら (1999)）

上から $C_{\max}=1\%, 2\%, 5\%$, 左図：堆積深，右図：侵食深



※part3は観測データ欠測のため除外
図-14 領域別の地形変化量 (高橋ら (1999))
上図：堆積量，下図：侵食量



※part3は観測データ欠測のため除外
図-15 領域別の地形変化量 (池野ら (2009))
上図：堆積量，下図：侵食量

6. おわりに

本研究では、津波による海底地形変化評価モデルの高度化を目指し、平面二次元水槽による実験を行い、水位と流速の分布を計測する固定床実験と海底地形変化量を計測する移動床実験を行い、評価モデルの検証用データを取得した。数値計算では平面水槽実験の再現計算を実施し、モデルの検証を行った。また、モデルの現地適用性の把握を目的とし、1960年チリ地震津波による現地地形変化再現計算を実施し、主に浮遊砂上限濃度の設定値の妥当性評価の観点から現地適用性の検証を行った。

平面水槽実験からは、津波が入射した際には水位上昇にともなって防波堤先端から渦が発生し、港内部に拡がること、港外部では、水位降下時に流速が速くなる港口そばで侵食が大きくなること、地形変化の収支は堆積傾向となることが明らかになった。港内部では、流速の遅い中心部で堆積傾向となり、堆積量の半分が渦中心部に集まること、流速が速い

場所では侵食傾向となることがわかった。

実験結果の再現計算においては、高橋ら (1999) と池野ら (2009) の2つのモデルを用いた計算を行い、港口部で大きく侵食し、港内の渦中心部に堆積域が生じる傾向を良好に再現できることを確認した。高橋ら (1999) のモデルは、浮遊砂上限濃度を5%とする条件において堆積・侵食とも過大となり、池野ら (2009) のモデルは再現性が良かった。ただし、最大堆積厚については過小評価であり、今後の課題である。

1960年チリ津波時の八戸港における地形変化事例に対する再現計算では、海底地形変化に与える影響が大きいとされる浮遊砂上限濃度の設定値に主眼を置いて検討を行った。高橋ら (1999)、池野ら (2009) 両モデルともに、地形変化傾向を良く再現することができることを確認した。また、浮遊砂上限濃度を1, 2, 5%に変化させたパラメータスタディを実施した結果、両モデルともに、浮遊砂上限濃度1~2%の場合の再現性が良好であり、5%の場合は過大評価となることを確認した。以上のことから、浮遊砂上限濃度は、基本的には1~2%程度と設定すればよいといえる。

謝辞：本研究は、電力11社による電力共通研究として実施した成果であることを付記するとともに、(社)土木学会原子力土木学会委員会津波評価部会(主査 首藤伸夫日本大学教授)の委員や先生方に、研究成果をご審議いただき、有益なご助言を賜りました。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 池野正明, 吉井匠, 松山昌史, 藤井直樹: 津波実験に基づく浮遊砂巻上量の算定と巻上量式の提案, 土木学会論文集 B2, 第56巻, pp.506-510, 2009.
- 3) 藤井直樹, 池野正明, 榊山勉, 松山昌史, 高尾誠, 向原健: 津波による港湾内の流況と地形変化に関する実験およびその数値計算, 土木学会論文集 B2, 第56巻, pp.291-295, 2009.
- 4) 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.
- 5) 浅井大輔, 今村文彦, 高橋智幸, 首藤伸夫: 地震津波による大量土砂移動の可能性—安政東海沖地震津波における伊豆半島入間での場合—, 東北大学大学院工学研究科 津波工学研究報告, Vol.16, pp.119-130, 1999.
- 6) 榊山勉, 松山昌史, 吉井巧: 津波による港湾内の海底地形に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.506-510, 2007.
- 7) 芦田和夫, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第206号, pp.59-69, 1972.
- 8) 運輸省第二港湾建設局 八戸港工事事務所: 八戸港を中心としたチリ地震津波資料集覧, 1961.