津波作用に伴う急拡大部における 地形変化に関する数値計算

有光 剛¹・川崎 浩司²・高橋 智幸³

¹正会員 関西電力株式会社 技術研究所 (〒661-0974 兵庫県尼崎市若王寺3-11-20)

E-mail: arimitsu.tsuyoshi@d3.kepco.co.jp

²正会員 株式会社ハイドロソフト技術研究所 (〒530-6126 大阪市北区中之島3-3-23中之島ダイビル26F)

E-mail: kawasaki@hydro-soft.co.jp

³正会員 関西大学教授 社会安全学部(〒530-6126 大阪府高槻市白梅町7番1号)

E-mail: tomot@kansai-u.ac.jp

本研究では、海域の急拡大部の影響を受けた津波に伴う砂移動・地形変化特性を把握するために、水理模型実験とその再現計算を実施した。具体的には、矩形構造物を設置することで作成した急拡大部を有する海域を対象に、津波作用前後の地形変化量を求めた。実験および計算の結果から、海域の平面形状が異なる条件であっても、構造物背後領域に同程度の規模の循環流が生じ、構造物背後に形成された堆積域の位置と規模も同程度となることがわかった。また、数値計算において、流動および浮遊砂の拡散効果による地形変化量の再現性についても検討した。その結果、循環流の影響を受けた背後領域における流動・地形変化の再現のためには、拡散項の導入が必要であることが認められた。

Key Words : tsunami, sediment transport, bottom topography change, coastal sea area with abrupt expansion region, hydraulic experiment, numerical simulation

1. はじめに

沿岸部に立地する原子力発電所の津波に対する安全性を評価する際には、取水口の埋没や取水ポンプの機能損失の原因となり得ることから、津波作用時の砂移動・地形変化の正確な予測が求められる。津波が沿岸域まで伝播して湾や港に進入すると、浅水変形だけでなく、海域の平面地形や人工構造物の影響を受ける。このような場所では、水位変動のみならず、流れとしての性質も強くなる。特に狭窄部や急拡大部の近くでは、局所的に渦が発生するなど、複雑な流れ場が形成されることもある。このような沿岸域における津波挙動は砂移動にも影響を及ぼすため、砂移動・地形変化の高精度な評価には、津波に起因する複雑な流れ場の影響を考慮する必要がある。

津波による砂移動に関しては、これまで漂砂量に関する実験^{1)~4)}や海底地形変化に関する水理実験⁵⁾が行われ、地形変化の計算手法^{1), 2), 6)~9)}も検討されている。また、急拡大部を通過する津波による流れに関しては、水平拡散を考慮することで再現性向上が試みられており^{10), 11)}、港湾に来襲した津波に伴う砂移動に対しては、浮遊砂の拡散を考慮した計算事例^{6), 8)}もある。しかしながら、これらの研究では拡散項の効果に関する検討は十分ではなく、

計算パラメータの設定方法が確立していないのが現状である。

そこで、本検討では、急拡大部を有する海域を対象に、津波に伴う砂移動・地形変化計算手法の適用性の検証および拡散の効果の把握を目的として、水理模型実験とその再現計算を実施した。

2. 津波作用時の急拡大部を有する海域での砂移動・地形変化に関する水理模型実験

(1) 実験装置および条件

本検討では、砂移動・地形変化特性の把握を目的とした移動床実験と、流れ場を把握するための固定床実験を行った。実験には長さ50 m、幅1 m、高さ1.2 mの水路(図-1)を用い、ピストン型造波機により津波を発生させた。水路内に勾配1/10および1/50のモルタル製斜面を設け、その岸側を水路床から0.6 mの高さの水平床とした。水平床の岸側端部には直立壁を設置し、非越流条件とした。急縮による流速増大に伴う砂の巻き上がり、急拡大後の背後領域への沈降による地形変化を発生させるために、水平床開始部から岸側へ2.5 mの位置に長さ0.5 m、幅0.86 mの非越流の矩形構造物を設置した。構造物

図-1 実験装置の概要

の大きさと位置は予備実験により決定した。海域の平面形状の影響の把握するために、構造物から終端の直立壁までの距離 L を2m, 3mの2種類とした。初期水深は、造波機位置で0.7m, 水平床部で0.1mとした。

作用させた津波の波形は1種類であり、波高0.1m, 周期48sの正弦波を押し波初動で半周期のみを造波した後、反射波の影響の低減を目的として吸収制御を行った。沖からの津波伝播特性の把握のため、地点S1～S4で容量式波高計を用いて水位を計測し、地点S2では初期水位から深さ0.24mの位置の水平流速を電磁流速計で計測した。

図-2に、 $L=2\text{m}$ のケースの地点S1～S4で計測された水位時系列と地点S2における水平流速時系列を示す。図は、地点S2で水位が最大となった時刻を $t=0\text{s}$ としている。

(2) 固定床実験の概要

砂移動実験に先立ち、構造物による急縮・急拡の影響を受けた流れ場の把握と、津波伝播計算の再現性検証用のデータ取得を目的として、固定床で水位・流速の測定を行った。固定床実験では、水平床部にコンクリートパネルを敷設した。計測位置は図-1中の地点P1～P9とし、水位計測には容量式波高計を用い、P1の流速はプロペラ式流速計、P2～P9の流速は電磁流速計を使って計測した。

(3) 移動床実験の概要

移動床実験には粒径 $d=0.064\text{mm}$ の珪砂を用い、水平床部に平坦な初期地形を成形し、津波作用前後の地形を計測した。移動床の厚さは0.1mとした。なお、本実験は、

図-2 造波した津波の条件

津波によって生じる構造物周辺の流れと砂移動・地形変化の関係を把握するための基礎的な検討であり、特定の縮尺と相似側に基づいて実現象を再現するものではない。

地形計測には、光学式砂面計（正豊工学実験装置製作所 MT-EPI-5）を用いた。岸沖方向に0.01m～0.05m間隔で設けた測線において、砂面計を搭載した台車を水路横断方向に走行させることで、断面形状を計測した。計測は、 $L=2\text{m}$, 3mのそれぞれの条件に対して3回ずつ行った。 $L=2\text{m}$ の3回と $L=3\text{m}$ の1回目については、構造物周辺および背後領域 ($2.2\text{m} \leq x$) を計測した。 $L=3\text{m}$ の2, 3回目については、沖側への砂の流出状況の確認のために、移動床領域全体 ($0.4\text{m} \leq x < 6\text{m}$) を計測した。

浮遊砂濃度は、図-1中の地点P3, P5, P6, P9において濁度計（KENEK PM-501N）を用いて測定した。計測高さは初期砂面から0.05m上方とした。濁度計による流れの変化が砂移動に与える影響を排除するために、前述の地形変化の計測とは別に、浮遊砂濃度の計測のみを行う実験を行った。用いた濁度計は1本であり、計測位置の移動の都度、初期地形を成形してから造波した。浮遊砂濃度の計測については各計測位置で1回ずつとした。

(4) 津波作用前後の地形変化

図-3に、 $L=2\text{m}$, 3mのそれぞれの条件における地形変化量 Δz の平面分布を示す。構造物と水路側壁の間では速い流れによる洗掘が生じている。一方で、構造物背後領域では、海域の平面形状に関わらず堆積が発生している。 $L=2\text{m}$ では、堆積のピークが背後領域の中央 ($x=4\text{m}$) 付近で生じている。これは、長さ15mの矩形港湾を対象とした既往の実験⁹⁾において港内の中央に堆積が生じたことと同様の傾向といえる。一方で、 $L=3\text{m}$ の場合は、背後領域の中央より構造物側に堆積域が生じており、その位置と規模は $L=2\text{m}$ のケースと同程度である。また、

図-3 浮遊砂の巻き上がり状況のスナップショット

水路側壁沿いの侵食域についても、背後領域の規模による差異は小さく、構造物から1m程度離れた位置 ($x=4\text{m}$) から水路中央に向かって分布している。なお、移動床領域全体を計測した $L=3\text{m}$ のデータからは、背後領域から流出した砂が構造物沖側に堆積していることがわかる。なお、各回の計測データを比較すると、計測回による多少の差異はあるものの、侵食域・堆積域の分布形状に関しては良好な再現性を確認している。

3. 津波に伴う砂移動・地形変化の計算方法

(1) 流動計算モデル

津波伝播の計算には、下記の非線形長波モデルに基づく有限差分法による計算モデルを用いた。

連続式：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

運動方程式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial M}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial M}{\partial y} \right) = 0 \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial N}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial N}{\partial y} \right) = 0 \quad (3) \end{aligned}$$

ここに、 t ：時間、 x 、 y ：水平座標、 η ：水位変動量、 M 、 N ：単位幅流量の x 、 y 方向成分、 D ：全水深、 n ：マンニングの粗度係数、 A_h ：渦動粘性係数である。

本検討では、拡散項の有無および A_h の値が構造物背後の流れ場の再現性に及ぼす影響についても検討した。

(2) 砂移動・地形変化計算モデル

砂移動・地形変化は、高橋ら²⁾による掃流砂層と浮遊砂層の交換砂量を考慮したモデルに浮遊砂の拡散項を付加した計算を行い、拡散を考慮しない場合と比較した。

表-1 固定床計算の条件

ケース	粗度係数 n	渦動粘性係数 A_h
ah0	0.010	$0\text{ m}^2/\text{s}$
ahl-3	0.015	$1 \times 10^3\text{ m}^2/\text{s}$
ahl-4	0.020	$1 \times 10^4\text{ m}^2/\text{s}$
ahl-5		$1 \times 10^5\text{ m}^2/\text{s}$

掃流砂層の砂移動の連続式：

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + w_{ex} \right) = 0 \quad (4)$$

浮遊砂の移流拡散方程式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_s h_s}{\partial t} + \frac{\partial MC_s}{\partial x} + \frac{\partial NC_s}{\partial y} - w_{ex} \\ - \frac{\partial}{\partial x} \left(A_c \frac{\partial C_s}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(A_c \frac{\partial C_s}{\partial y} \right) = 0 \quad (5) \end{aligned}$$

ここに、 z_b ：砂面高さ、 λ ：砂の空隙率、 Q_x 、 Q_y ：掃流砂量の x 、 y 方向成分、 w_{ex} ：掃流砂層と浮遊砂層間の交換砂量、 C_s ：浮遊砂層での平均体積濃度、 h_s ：浮遊砂層厚、 A_c ：砂の水平拡散係数である。

(3) 計算条件

計算領域は地点S1から構造物背後の直立壁までの範囲とし、格子間隔は $0.01\text{ m} \times 0.01\text{ m}$ 、時間間隔は 0.001 s とした。沖側境界からの射波形には、地点S1で計測された水位時系列を用いた。 A_h 、 A_c の条件については後述する。

4. 急拡部における津波に伴う流動・地形変化の再現計算

(1) 津波に伴う流動の再現計算

地形変化の計算に先立ち、固定床条件で流動計算を実施した。固定床計算の条件を表-1に示す。 A_h を0（拡散項なし）および一定値として、それぞれの計算結果と実験結果を比較した。なお、紙面の制約のため、詳細は省略するが、粗度係数を変化させた計算の結果に基づき、以降の計算では粗度係数の値を $n=0.01$ としている。

図-4に、水位・流速ベクトルの平面分布を例示する。拡散項がない場合および $A_h = 1 \times 10^5\text{ m}^2/\text{s}$ では、背後領域の規模に関わらず側壁に沿う流れが強く、背後領域に循環流が形成されない。 $L=2\text{ m}$ のケースでは、 $A_h = 1 \times 10^4\text{ m}^2/\text{s}$ の場合に背後領域と同規模の循環流が形成されるのに対して、 $A_h = 1 \times 10^3\text{ m}^2/\text{s}$ で生じる循環流は背後領域の半分程度の規模となる。一方、 $L=3\text{ m}$ の $A_h = 1 \times 10^3\text{ m}^2/\text{s}$ および $1 \times 10^4\text{ m}^2/\text{s}$ で形成される循環流規模は、背後領域より小さく、 $L=2\text{ m}$ の場合と同程度となっている。

実験における浮遊砂の巻き上がり状況を、図-5に示す。津波流入時に構造物背後で巻き上げられた砂が、背後領域に形成される循環流に取り込まれている。 $L=2\text{ m}$ では

図-4 浮遊砂水位・流速の空間分布の計算結果

図-5 水理実験における浮遊砂巻上げ状況

背後領域全域に浮遊砂が分布しているのに対して、 $L=3\text{ m}$ では終端の直立壁まで浮遊砂が輸送されず、 $L=2\text{ m}$ の場合と同様の範囲に留まっている。これは、流動計算で見られたように、 $L=2\text{ m}$ の構造物背後で生じる循環流が背後領域と同程度の規模であるのに対して、 $L=3\text{ m}$ では背後領域より小さな循環流が生じることを示している。

図-6に、 $L=3\text{ m}$ のP8における水位・岸沖方向流速の時系列の実験と計算の結果を示す。 A_h の値による計算結果の差異が認められる。 A_h が小さい場合は側壁沿いの流れが岸側端部まで到達するため、P8で強い岸向きの流れが生じている。 $A_h=1\times 10^4\text{ m}^2/\text{s}$ のケースでは、水位・流

(a) 水位

(b) 岸沖方向流速

図-6 水位・流速の計算結果と実験結果の比較 ($L=3\text{ m}$, P8)

速が実験結果と近い波形となる。一方で、 A_h が大きい場合 ($1\times 10^3\text{ m}^2/\text{s}$) は、水位・流速ともに過小評価となる。

これらの結果から、構造物背後領域に形成される循環流を再現するためには、流動計算への水平拡散項の導入が必要であるといえる。本検討の条件では、 A_h の値は $1 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$ を用いた場合に再現性が最も良好であったため、砂移動計算では浮遊砂の拡散を考慮する場合の A_h の値を、 $1 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$ とした。

(2) 砂移動・地形変化の再現計算

移動床計算の条件を表-2に示す。拡散の有無による計算結果の差異を比較した。本検討では西畑ら⁹と同様に摩擦速度と水深を用いて次式で定義した。

$$A_c = \frac{1}{2} \kappa u_* D \quad (6)$$

ここに、 κ : カルマン定数 (=0.4) である。

掃流砂量および巻上量は、高橋ら²および粒径依存性を考慮した高橋ら⁴の係数を用いて計算し、結果を比較した。高橋ら⁴で使用された砂 ($d=0.166 \text{ mm}$, 0.267 mm ,

0.394 mm) は、本検討の砂 ($d=0.064 \text{ mm}$) と同粒径ではないが、ここでは最も小さい粒径に対する係数を用いた。

地形変化量の分布を図-7に示す。ケース1999_eddyは、急縮部を中心に侵食が卓越するのに対して、防波堤背後では堆積域が形成されており、侵食・堆積の分布の実験結果(図-3)を再現できている。背後領域の長さに関わらず同程度の位置・規模の堆積域が形成される点でも、再現性は良好である。ケース1999_noeddyでは、急縮部の侵食は再現できるものの、堆積域が背後領域の隅角部に集中している点が実験結果とは異なる。ケース2011_eddyと2011_noeddyの計算結果は、実験結果と比較して、侵食・堆積ともに過小である。なお、最大地形変化量の再現性もケース1999_eddyが最も高く、例えば最大侵食深の実験値 $L=2 \text{ m}$ で 4.8 cm 、 $L=3 \text{ m}$ で 5.1 cm に対して、計算値は $L=2 \text{ m}$ で 4.5 cm 、 $L=3 \text{ m}$ で 5.4 cm であった。ただし、高橋ら⁴と比べて、本検討の砂の粒径が小さいため、漂砂量係数の妥当性については今後の課題である。

浮遊砂濃度の時系列を図-8に例示する。 $L=2 \text{ m}$, 3 m ともに、拡散の有無に関わらず、高橋ら⁴を用いたケース2011_eddyと2011_noeddyで、かなり過小評価となっている。一方で、高橋ら²の係数を用いて拡散を考慮したケース1999_eddyで、比較的实验結果と近くなっている。

これらの結果から、津波来襲時に急縮部において発生する循環流の影響を受けた砂移動・地形変化を精度よく

表-2 移動床計算の条件

ケース	渦動粘性係数 A_h	拡散係数 A_c	漂砂量係数	
			掃流砂量	巻上量
1999_eddy	$1 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$	式(6)	21.0	0.012
1999_noeddy	$0 \text{ m}^2/\text{s}$	$0 \text{ m}^2/\text{s}$		
2011_eddy	$1 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$	式(6)	5.6	0.00007
2011_noeddy	$0 \text{ m}^2/\text{s}$	$0 \text{ m}^2/\text{s}$		

【1999_eddy】

【1999_noeddy】

【2011_eddy】

【2011_noeddy】

(a) $L=2 \text{ m}$

【1999_eddy】

【1999_noeddy】

【2011_eddy】

【2011_noeddy】

(b) $L=3 \text{ m}$

図-7 津波作用前後の地形変化量の計算結果

図-8 浮遊砂濃度の計算結果と実験結果の比較 ($L=3\text{m}$, P8)

再現するためには、拡散の考慮が必要であるといえる。また、高橋ら⁴⁾の係数を用いた計算と比べると、高橋ら²⁾の値を用いた方が漂砂量の再現性が良好であったため、地形変化に関しても、拡散を考慮して高橋ら²⁾を用いた方法（ケース1999_eddy）の再現性が最もよかった。

5. おわりに

本研究では、急拡大部を有する海域を対象に、異なる平面形状の海域に津波を入射した際の砂移動・地形変化について、水理実験と数値計算の両面から検討を行った。得られた主要な結論を以下に示す。

- (1) 構造物背後領域では、海域の平面形状によらず、同程度の位置・規模の堆積域が形成された。
- (2) 急拡大部に形成される循環流とそれに伴う地形変化を数値計算で良好に再現するためには、拡散項の導入が必要である。

なお、数値計算に用いた漂砂量係数が本実験で用いた粒径に対応するものでないため、地形変化の定量的な再現性については、引き続き検討する予定である。

謝辞：本研究の実施にあたり、電力中央研究所・松山昌史上席研究員、吉井匠主任研究員、甲斐田秀樹研究員より、水理実験に関する貴重なご助言を頂いた。実験計測

には、日本工業試験所・内西博氏、池田博和氏にご協力頂いた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 池野正明, 吉井 匠, 松山昌史, 藤井直樹: 津波による砂移動量実験と浮遊砂卷上量式の提案, 電力中央研究所報告, V08064, 43p., 2009.
- 4) 高橋智幸, 黒川貴博, 藤田将孝, 島田広昭: 津波による土砂移動の粒径依存性に関する水理実験, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I_231-I_235, 2011.
- 5) 榊山 勉, 松山昌史, 吉井 匠: 津波による港湾内の海底地形変化に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.506-510, 2007.
- 6) 西畑 剛, 田島芳満, 森屋陽一, 関本恒浩: 津波による地形変化の検証—2004 年スマトラ地震津波 スリランカ・キリンダ港—, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.1386-1390, 2005.
- 7) 木原直人, 松山昌史: 地形変化を考慮できる静水圧 3 次元浅水流モデル C-HYDRO3D の開発—津波による矩形港湾周辺土砂移動問題への適用—, 電力中央研究所報告, N07010, 17p., 2007.
- 8) 松山昌史: 津波による地形変化予測数値モデルの適用性—一流砂量式の特性と矩形港湾実験の再現—, 電力中央研究所報告, N08085, 21p., 2009.
- 9) 森下 祐, 高橋智幸: 2011 年東北地方太平洋沖地震津波来襲時の気仙沼湾を対象とした津波移動床モデルの再現性向上, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I_491-I_495, 2014.
- 10) 富澤 大, 今村文彦, 首藤伸夫: 急拡大部を通過する津波の水理特性, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp.131-134, 1990.
- 11) 佐々木洋之, 今村文彦: 遷移流における水平拡散項の効果について, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, 第 II 部門, pp.28-29, 2000.

(2016.3.16 受付)

NUMERICAL SIMULATION OF BOTTOM TOPOGRAPHY CHANGE DUE TO TSUNAMI IN COASTAL SEA AREA WITH ABRUPT EXPANSION REGION

Tsuyoshi ARIMITSU, Koji KAWASAKI and Tomoyuki TAKAHASHI

Hydraulic experiments and numerical simulations were carried out in order to analyze the influence of the planar shape of coastal sea area on sediment transport and bottom topography change due to tsunami. High velocity flow occurred due to the passage of tsunami through the abrupt expansion and a circulation flows took place in the rear area of the structure. The circulation flows generated behind the structure were found to be the same scale regardless of the length of the rear area. Therefore, deposit area with the same position and scale was formed even if the scale of the rear area was different. The numerical results also revealed that the introduction of the diffusion terms into the equations of fluid motion and suspended sediment are necessary to reproduce flow structure and topography change.