# 津波による底質移動が<br /> 港湾施設に与える影響について

## 藤本 典子1

1近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所環境課(〒651-0082 兵庫県神戸市中央区小野浜町7-30)

広域で甚大な被害が予想されている東南海・南海地震は、ハードソフト両面の対策が推進され ている.1960年のチリ地震、2004年のスマトラ沖地震および2011年東北地方太平洋沖地震など では、津波により海底土砂の底質移動が発生<sup>1)23)</sup>して、洗掘による港湾施設の被害や堆積に伴 い水深が不足するなど船舶の利用制限が発生している.これら津波による底質移動の研究は、 原子力発電所の被害想定を実施した砂質土地盤のみであり、大阪湾のような粘性土地盤におけ る底質移動の研究事例は無かった.このため、本研究では粘性土地盤を対象とした底質移動の 解析手法を検討するとともに、底質移動に伴う被害想定をシミュレーションにより実施した.

キーワード 東南海南海地震,津波,底質移動,被害想定

## 1. はじめに

東南海・南海地震が発生した場合、その被害は東海地 方から九州地方までの広域にわたると想定されている. 近畿地方では、和歌山県内の港湾を利用して緊急物資を 搬入するとともに、大阪湾では国際コンテナ貨物やバル ク貨物をはじめとする物流機能を継続する必要がある.

以下本稿では、和歌山下津港および大阪港を対象(図-1)として、東南海・南海地震の津波によるシミュレーションを実施し、底質移動の把握を行うとともに、港湾施設への影響とその対策について研究した成果について述べる.



図-1 対象港湾の航空写真

## 2. 底質移動シミュレーションの実施

(1) 底質移動シミュレーションモデル

津波来襲時の底質移動に関する既往研究等の資料を収

集し,現状での技術レベルで可能な底質移動シミュレーション手法とその適用性について整理を行い,以下の理由から本研究に用いる底質移動モデルを表-1のように決定した.

a) 底質が砂の場合のモデル(和歌山下津港)

(社)土木学会原子力委員会津波評価部会は、底質が砂 の場合の底質移動モデルに関する既往研究結果をレビュ ーし、その妥当性等を評価している<sup>4)</sup>.その結果、現 地の洗掘・堆積を表現できる混合モデル(掃流砂と浮遊 砂を同時に扱うモデル)として、藤井ら(1998)<sup>1)</sup>および 高橋ら(1999)<sup>5)</sup>のモデルが有用であるとされている.

また、電力各社は原子力発電所の耐震安全性評価において、藤井らおよび高橋らのモデルを用いた底質移動シ ミュレーションを行い、その結果を用いて底質移動に対 する取水口の埋没等に関する安全性評価を実施している ことから、本研究でも両モデルを採用した.

b) 底質がシルト・粘土の場合のモデル(大阪港)

底質がシルト・粘土の場合について、津波に伴う土砂 移動モデル等が検討されたものはほとんどない.一方、 潮流に対するシルト・粘土の底質移動モデルについては (独)港湾空港技術研究所、九州地方整備局および九州大 学等が中心となって、航路および泊地の埋没を予測する ために多くのシルテーションモデルの研究が行われてい る.そこで、これらのシルテーションモデルから、限界 せん断応力と底泥の降伏値の関連を明確にして、巻き上 げ量の算定式を提案している村上ら(1989)<sup>6</sup>の方法を試 みることとした.

# 防災·保全部門∶No.03

	藤井ら(1998)の手法	高橋ら(1999)の手法	村上ら(1989)の手法	式中の記号の説明
対象底質	砂	税少	シルト・粘土	Z :水深変化量(m), t :時間(s), x :
地盤高の連続式	$\frac{\partial Z}{\partial t} + \alpha \left(\frac{\partial Q}{\partial x}\right) + \frac{E - S}{\sigma(1 - \lambda)} = 0$	$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{1 - \lambda} \left( \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{E - S}{\sigma} \right) = 0$	$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{E - S}{\sigma(1 - \lambda)} = 0$	平面座標, Q:単位幅、単位時間当たり の掃流砂量(m <sup>3</sup> /s/m), σ:砂粒の密度
浮遊砂濃度の 連続式	$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (UC)}{\partial x} - \frac{E-S}{D} = 0$	$\frac{\partial (C_s D)}{\partial t} + \frac{\partial (MC_s)}{\partial x} - \frac{E - S}{\sigma} = 0$	$\frac{\partial (C_s D)}{\partial t} + \frac{\partial (MC_s)}{\partial x} - \frac{E-S}{\sigma} - \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k \frac{\partial (DC_s)}{\partial x} \right\} = 0$	(kg/m <sup>3</sup> )、ρ:海水の密度(kg/m <sup>3</sup> )、λ: 空隙率、α:局所的な外力のみに移動を 支配される成分が全流砂量に占める比
流砂量式	小林ら(1996)の実験式	高橋ら(1999)の実験式	_	率, C · C <sub>b</sub> : 浮遊砂濃度, 底面浮遊砂
(掃流砂)	$Q = 80 \tau_*^{1.5} \sqrt{sgd^3}$	$Q = 21\tau_*^{1.5}\sqrt{sgd^3}$		濃度(kg/m <sup>3</sup> ), U :流速(m/s), D :全水
巻き上げ量の 算定式(浮遊砂)	$E = \frac{(1-\alpha)Qw^2\sigma(1-\lambda)}{Uk_z \left[1 - \exp\left\{\frac{-wD}{k_z}\right\}\right]}$	$E = 0.012 \tau_*^2 \sqrt{sgd \cdot \alpha}$	$E = M_0 \left(\frac{\tau_b}{\tau_e} - 1\right)^{n_m}$	深(m), $C_s$ :浮遊砂体積濃度, $M$ : $U$ × $D$ (m <sup>2</sup> /s), $\tau_s$ :シールズ数, $s$ := $\sigma$ / $\rho$ -1, $g$ :重力加速度(m/s <sup>2</sup> ), $d$ :砂の粒
沈降量の算定式	$S = wC_b$	$S = wC_s \cdot \sigma$	$S = wC_s \cdot \sigma$	径(m), w : 土粒子の沈降速度(m/s),
摩擦速度の 計算式	log-wake 則を鉛直方法に積分した式より 算出	マニング則より第出 $u_* = \sqrt{gn^2 U^2 / D^{1/3}}$	マニング則より第出 $u_* = \sqrt{gn^2 U^2 / D^{1/3}}$	$k_z$ : 第直拡散係数(m <sup>3</sup> /s), log-wake 則: $u_s/U = k/\{\ln(h/Z_0) - 1\}$ に wake 関数を付加した式, $k : カルマン定数, h :$ 水深(m), $Z_0 : 粗度高さ(=ks/30)(m),$
特徴	<ul> <li>・浮遊砂と掃流砂を区別して取扱う</li> <li>摩擦速度は log-wake 則を用いて評価</li> <li>・掃流砂量はシールズ数の 1.5 乗に比例</li> <li>・ 後上げ量はシールズ数の 1.5 乗に比例</li> </ul>	<ul> <li>・浮遊砂と掃流砂を区別して取扱う</li> <li>・摩擦速度はマニング則を用いて評価</li> <li>・掃流砂量はシールズ数の1.5 乗に比例</li> <li>・巻上げ量はシールズ数の2 乗に比例</li> </ul>	<ul> <li>・浮遊砂のみを取扱う</li> <li>・摩擦速度はマニング則を用いて評価</li> <li>・巻上げ量は、実験等で検討されたパラメー</li> <li>タ M<sub>n</sub>、 n<sub>n</sub> を用いて評価</li> </ul>	ks:相当相度(=(7.66ng <sup>µ</sup> ) <sup>*</sup> )(m), n:マ ニングの相度係数(m <sup>10</sup> s), τ <sub>b</sub> :底面のせ ん断力(Pa), τ <sub>c</sub> :限界せん断力(Pa), M <sub>0</sub> , n <sub>m</sub> :定数, k:水平拡散係数(m <sup>3</sup> s)
課題	<ul> <li>狭窄部における地形変化量は過小評価の 傾向にある</li> </ul>	<ul> <li>狭窄部における地形変化量は過小評価の 傾向にある</li> </ul>	<ul> <li>         ・津波を対象とした検討事例がない     </li> </ul>	•

#### 表-1 本研究で用いた底質移動モデルの概要

## (2) 底質移動シミュレーションの実施手順および条件

津波による底質移動シミュレーションの手順を図-2 に示すとおり,津波の計算(流体力の計算)と土砂移動の 計算を連成して行うものとした.

底質が砂の場合は掃流砂および浮遊砂の計算と両者の連続式の計算で構成され、底質がシルト・粘土の場合は浮遊砂の計算のみで構成される.また、その他の計算条件等を表-2に示す.



表-2 土砂移動シミュレーションの条件

設定項目	和歌山下津港	大阪港
津波計算の 基礎方程式	非線形長波方程式および連 続式	非線形長波方程式および連 続式
土砂移動計算 のモデル	高橋ら(1999)の方法 藤井ら(1998)の方法	村上ら(1989)の方法
断層モデル	中央防災会議の東海・東南 海・南海地震モデル (M 8.6)	中央防災会議の東海・東南 海・南海地震モデル(M 8.6) 大阪市の防災計画の断層モ デル(M8.4)
潮位条件	H.W.L. (T.P.+0.8m) L.W.L. (T.P1.1m)	H.W.L. (T.P.+0.8m) L.W.L. (T.P0.8m)
計算格子間隔	対象港湾周辺で12.5m	対象港湾周辺で12.5m
計算時間間隔	0. 15s	0. 15s
計算時間	6時間	6時間
底質条件	種類:砂 粒径:0.14mm 密度:2.69g/cm <sup>2</sup>	種類:シルト・粘土 粒径:0.05mm 密度:2.67g/cm <sup>2</sup>

# 3. 底質移動シミュレーションの結果

底質移動シミュレーションの結果を図-3(和歌山下津 港)および図-4(大阪港)に示す.

洗掘は流速が大きい防波堤堤頭部および狭窄部で著しく,砂地盤の和歌山下津港では最大 6.4m,粘性土地盤の大阪港で最大 4.5mの洗掘深となった.

一方, 堆積は流速が小さい港内を中心に広く発生し, 和歌山下津港で最大 1.9m, 大阪港で最大 0.4m の堆積と なった.

これらの洗掘現象は、両港ともにLML 時の方がHML 時と比較してわずかに大きい結果となった.

## 防災·保全部門:No.03



## 4. 底質移動による被害想定

## (1)洗掘に伴う構造物被害の検討

## a) 被災ランクの設定

洗掘現象により防波堤等の港湾構造物が被災するメカ ニズムは、マウンドの基礎捨石の抜け出し、地盤のすべ り破壊およびそれらの複合発生等が考えられる.しかし、 どの程度洗掘すれば、ケーソン等の堤体が傾斜あるいは 転倒する被災が発生するのか等を調査・研究されたもの はなく、津波による被災事例も数例にとどまる.



したがって、本研究では津波だけでなく波浪、潮流, 洪水等による被災も含む過去の構造物の被災に関する資料<sup>50</sup>等から、洗掘が原因と考えられるものを収集し, 洗掘深と被災程度の関係等から被災ランクを整理した (図-5および表-3).

次に、その被災ランク指標と底質移動シミュレーション結果を比較することによって、洗掘に伴う構造物被害 を評価した.

和歌山下津港では、防波堤の堤頭部前面における最大 洗掘深が全地点で 4.0m を上回るため、被災ランクは全 地点で『ランクⅢ』となり、構造物被害としてはマウン ド全体の崩壊に加えてケーソン等の堤体の傾斜や転倒が 予想される結果となった.また、大阪港では最大洗掘深 が 2.3~4.5m となり、被災ランクは『ランク I ~ III』と なった.

なお,底質移動シミュレーションでは,これら防波堤 の被災は考慮せずに実施している.

## b)洗掘に伴う構造物被害の対策検討

防波堤堤頭部周辺の洗掘対策として、マウンド崩壊等 が予想される箇所にあらかじめ被覆材(被覆石または被 覆ブロック等)を設置することが有用と考え、被覆材の 対策範囲の設定および被覆材の所要質量の算定を行った.

対策範囲は、底質移動シミュレーション結果と被災ラ ンクから、マウンドの被害が出現し始めると考えられる 最大洗掘深 1.5m 以上(被災ランク I 以上)の範囲を包括 するように設定した.また、所要質量は、津波シミュレ ーションから算定される最大流速を用いて、「港湾の施 設の技術上の基準・同解説」(pp.561-562)<sup>8)</sup>に示される 式(1)により算定した.







**表-3** 洗掘に伴う構造物の被災ランクの設定

$$M = \frac{\pi \rho_r U^6}{48g^3 y^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \qquad \vec{x}(1)$$

M: 被覆材の安定質量(t)  $\rho_r$ : 被覆材の密度(t/m<sup>3</sup>) u: マウンド上の流速(m/s)  $S_r$ : 被覆材の水に対する比重(被覆石: 2.65, 被覆ブ uック: 2.30) g: 重力加速度(m/s<sup>2</sup>) $\theta: 斜面の勾配(°)$ 

y:イスバッシュ(Isbash)の定数(0.86)

上記の方法にしたがって設定される被覆材の所要質量 を表-4に、対策範囲を図-6,7に示す.

港湾区域		構造物	位置	最大 流速 (m/s)	津波に対する 被覆材の所要質量(tf/個)	
					被覆石	被覆 フ <sup>゙ロック</sup>
和歌山 下津港	北港 地区	北港沖南 防波堤	堤頭部	3.9	0.41	0.74
	本港 地区	本港沖南 防波堤	西側 堤頭部	3.6	0.25	0.46
			東側 堤頭部	6.9	-	22.75
		本港沖外 防波堤	堤頭部	6.9	-	22.75
	毛見 地区	毛見 防波堤	堤頭部	5.6	-	6.50
		毛見 防波堤	堤頭部	6.6	-	17.42
大阪港	南港地区	南港北 防波堤	堤頭部	2.5	0.03	0.05
		南港南 防波堤	堤頭部	3.5	0.22	0.39
		大和川北 防波堤	堤頭部	2.7	0.05	0.08
	堺 地区	大和川南 防波堤	西側 堤頭部	3.5	0.22	0.39
			東側 堤頭部	4.1	0.56	1.00

表-4 被覆材の所要質量



図-6 被覆材の設置範囲(和歌山下津港)



図-7 被覆材の設置範囲(大阪港)

#### (2) 堆積に伴う船舶の喫水不足の検討

#### a)津波来襲後の堆積範囲および堆積土量の把握

津波に伴う底質移動により泊地や航路に土砂が堆積す れば、和歌山下津港では被災地への緊急物資輸送、大阪 港では国際競争力を担う幹線貨物輸送に支障をきたすこ とが想定されることから、底質移動シミュレーション結 果を基に、津波来襲後の水深(地震前の水深-地盤沈降 量+堆積量)を算定するとともに、喫水不足となる航路 および岸壁前面泊地の堆積土量を算定した.

和歌山下津港では、耐震強化岸壁前面で最大で約 1.3 m程度の堆積となり比較的小型船舶を利用する緊急物資 輸送船舶の利用は可能と判断されるが、緊急物資以外の 大型船舶は、喫水不足に伴う航行制限が想定される.また,港内の航路および泊地では約 44 万m<sup>3</sup>の堆積土砂が 発生する.

大阪港では、最大で約 0.4mの堆積となりコンテナ船 をはじめとする大型船舶は、喫水不足に伴う航行制限が 懸念される.また、港内の航路および泊地では約 150 万 ㎡の堆積土砂が発生する.

その他,両港湾ともに堆積土砂による大型船舶の座礁 が想定される.

#### b) 堆積土砂の必要浚渫日数の算定

堆積土量を基に,各港を基地港とする浚渫作業船が津 波による被災を受けないことを前提として,堆積土砂を 除去するのに必要な作業日数を算定した.

和歌山下津港を基地港とする作業船4隻で浚渫を行った場合,約44万㎡の堆積土砂に対して約2か月となった。大阪港の場合は、同様に約150万㎡の堆積土砂に作業船18隻で浚渫を行った場合は約2か月となった。なお、浚渫能力については「港湾請負工事積算基準」<sup>9</sup>に準じた能力を使用した。

以上から、両港ともに被災前の水深を確保するために 約2ヶ月の浚渫作業期間が必要となるため、工事期間中 は物流機能の低下や大型船舶の利用制限が予想される.

## 5. 考察

## (1)砂地盤における底質移動モデルの再現性について

通常の波浪による土砂移動に比較して、津波による底 質移動は発生頻度が少なく、実測事例は 1960 年のチリ 地震の前後に気仙沼湾を対象として深浅測量が行われた 1 例のみであり、それによると狭窄部では局所的に 9.9 mの洗掘、湾内全域でも数mオーダーの洗掘および堆積 が確認されている<sup>1)5</sup>.

これら気仙沼湾の底質移動を事例に再現性の検証が行われてた藤井ら<sup>1)</sup>と高橋ら<sup>5)</sup>の両モデルについて,(社) 土木学会原子力委員会津波評価部会でその妥当性等を評価されているものの,藤井らのモデルは洗掘に対して過 小評価となっていることが指摘されている.

砂地盤である和歌山下津港において,藤井らと高橋ら の両モデルを実施したが,高橋らのモデルは水深の深い 地点においても地形変化が生じており,特に防波堤の堤 頭部や狭窄部等の流速が大きな地点における地形変化が 藤井らのモデルに比べて顕著に大きくなることから,被 害想定を行う場合は高橋らのモデルを用いることが望ま しい.

#### (2) 粘性土地盤におけるシルテーションモデルについて

大阪港では、村上ら(1989)のシルテーションモデルに よる実測および計算に基づく地形変化量の再現性検討な ど現地の底質が詳細に評価されていないことから、円形 回転水路を用いた村上らによる実験結果を踏まえ、シル ト・粘土の巻き上げ量の算定に用いる定数M<sub>0</sub>について 感度分析を行い、平均的な値としてM<sub>0</sub>=1.0を用いる ことが妥当であると判断した.

## (3) 地形変化による最高津波水位分布の影響

大阪港の代表地点における従来の津波シミュレーションと底質移動シミュレーションの両津波水位分布を比較したところ、全体的な分布傾向は一致しているが、底質移動シミュレーションによる津波水位が最大で約0.4m高くなる地点があった.

これは、洗掘および堆積による地形変化が津波の水位 に影響を与えていると考えられ、再現性は底質移動シミ ュレーションが高いと考えられる.

## 6. 今後の課題

#### (1)洗掘による防波堤の被災メカニズムの把握

これまでの津波に伴う洗掘が原因となる防波堤の被災 事例は数例と少ないとともに、底質シミュレーションで 算定された洗掘深の再現性に課題が残されているため、 東北地方太平洋沖地震における被災事例の解析結果も踏 まえ、洗掘による防波堤の被災メカニズムを検証してい く必要がある.

## (2) 底質移動シミュレーション精度の把握

底質移動シミュレーションは,前述の気仙沼湾以外で 再現性の検証が行われていないことから,東北地方太平 洋沖地震による底質移動の再現計算により精度の把握を 行う必要がある.

#### (3) 堆積土砂の処分場確保

近畿管内では港湾整備に伴う浚渫土砂処分場は逼迫しており、津波により発生する堆積土砂の処分は見込みが 無い状況である.

一方で,緊急物資輸送や国際コンテナ物流の継続は近 畿地方整備局の責務であるため,これら堆積土砂の処分 場の確保は緊急を要する課題である.

また,津波で発生が想定される堆積土砂の総量は,和 歌山下津港および大阪港以外の各港湾でも,底質移動シ ミュレーションにより把握する必要がある.

#### (4)発災後の広域連携について

東南海・南海地震は、中部、近畿、四国地方を中心に 広域で甚大な経済被害が予想されている.また、津波に よる作業船の被災も想定され、各種作業船不足による復 旧活動の遅れのみならず2次被害の拡大も懸念される.

人命優先の観点から緊急物資輸送を優先することは当 然である.しかし、大阪湾の港湾物流は近畿地方のみな らず西日本の経済産業活動を支えており、国際競争力を 確保する上で港湾機能の継続も至上命題となる.

これら広域で甚大な地震津波災害を限られた資源で対応するとともに、緊急物資輸送と国際競争力を担う港湾物流を両立するためには、予め事業継続計画(BCP)等の策定が肝要である.

# 7.まとめ

底質移動シミュレーションによる港湾施設への影響に ついては、初の試みであったが和歌山下津港および大阪 港をケーススタディとして被害想定を行うことができた.

2011 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震でも、 本研究で得られた被害想定と同様に底質移動に伴う洗掘 や堆積による港湾被害が報告<sup>3</sup>されており、東南海・南 海地震による津波被害の軽減のために、本シミュレーシ ョンの研究は今後も引き続き行う必要がある.

また、本研究の成果を基に「底質移動シミュレーショ ンマニュアル(案)」の策定に着手しており、残された課 題の解決と合わせて取りまとめ、津波被害の最小化に寄 与したい.

#### 参考文献

- 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) 西畑 剛・田島芳満・森屋陽一・関本恒浩(2005):津波による地形変化の検証-2004 年スマトラ沖地震津波 スリランカ・キリンダ港-,海岸工学論文集,第52巻,pp.1386-1390.
- 高橋重雄他(2011):2011 年東日本大震災による港湾・海岸・ 空港の地震・津波被害に関する調査速報,港湾空港技術研 究所資料, No. 1231, pp. 1–175.
- 4) (社) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会:原子力発電所 の津波評価技術, 2002.7
- 5) 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
- 6)村上和男,菅沼史典,佐々木均:円形回転水路による底泥の 巻き上がりと沈降に関する実験的研究,港湾技術研究所報告, 第28巻,第1号,1999.3
- 7)木村克俊他:1993年北海道南西沖地震津波による奥尻港防波 堤の被災原因について,海岸工学論文集,第41巻, pp.1191-1195,1994
- 8) (社) 日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解 説, 2007.7
- 9) 国土交通省港湾局:港湾請負工事積算基準, 2010.3