# 河川での津波防災検討における 津波移動床モデルの適用性に関する研究

Applicability of movable bed model for tsunami in tsunami disaster reduction in rivers

# 玉田 崇<sup>1</sup>·田村 保<sup>2</sup>·高橋智幸<sup>3</sup>·佐々木元<sup>4</sup>

# Takashi TAMADA, Tamotsu TAMURA, Tomoyuki TAKAHASHI and Hajime SASAKI

Using the numerical analysis of tsunami run-up and inundation, safety assessment of river levee, damage prediction by tsunami inundation and countermeasures for the safety of residents are considered. For the past examination, fixed bed model were used for the numerical analysis even in the area of river mouth where the sand bar is well developed and the reflection and dissipation of tsunami wave and sand deposit in the channel were prominent. In this study, movable bed model for tsunami wave proposed by Takahashi et al.(1999) was used to analyze the dominant factor for the computational accuracy in order to apply this model to tsunami run up in the river. Kiku-river was chosen for applicability evaluation and tsunami prevention measures were considered through the results obtained from proposed model.

## 1. はじめに

津波災害の発生が危惧される河川では,想定津波を対 象に津波の河川遡上および陸域氾濫解析を行い,河川堤 防の安全性評価,堤内地の浸水被害予測および沿川住民 への避難対策等を検討している.しかし,これまでの検 討では固定床モデルによる予測計算が採用されており, 特に河口砂州が発達した河川においても砂州での津波減 衰や反射,土砂移動に伴う河道埋没は考慮されていない. 一方,津波による土砂移動モデルとしては,藤井ら (1998),高橋ら (1999),西畑ら (2007)による研究成 果が報告されているが,いずれも沿岸域や港湾を対象と しており,河道内へ適用した事例はない.

そこで、本研究では、まず高橋ら(1999)による津波 移動床モデルを用いて、計算精度に影響を及ぼす諸量を 分析し、同モデルを河道内で適用するための検討を行っ た.次に、河口砂州の発達している静岡県菊川を対象に、 津波移動床モデルによる津波遡上解析を実施し、河道内 の津波挙動や津波に伴う土砂移動形態を調べることによ り、河口砂州の地形変化を考慮した河川での津波防災の あり方を検討した.

# 2. 津波移動床モデルの精度に影響を及ぼす諸量の 検討

## (1) 津波移動床モデルの概要

本研究では、高橋ら(1999)により提案された「掃流砂

1	正会員	工修	いであ(株)建設技術事業本部 海岸部
2	フェロー	工修	いであ(株)建設技術事業本部 海岸部
3	正会員	博 (工)	秋田大学准教授 工学资源学部
4			国土交通省 中部地方整備局 浜松河川
			国道事務所

層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデル」 を用いて、地形変化を伴う津波伝播計算を実施した.計算 モデルは図-1のフローに示す通りであり、水位および流量 の計算は、非線形長波理論(浅水理論)式をStaggered Leap-frog法により差分化した.一方、津波による流砂の 現象は、掃流砂層と浮遊砂層とを分離して考え、掃流砂と 浮遊砂間での巻上げ・沈降フラックスによる鉛直方向の土 砂移動を「掃流砂層と浮遊砂層間の交換砂層」と定義した 上で定式化した.ただし、これらの区分は粒径の移動形態 の相違による概念的なものであるため、ここでは高橋ら (1999)と同様に、掃流砂層とは砂粒が掃流形態で移動す る領域,浮遊砂層とは砂粒が浮遊形態で移動する領域と定 義した.なお、基礎方程式や計算手法は高橋ら (1999)に 詳述されており、そちらを参照されたい.

(2) 外力および地形条件

津波移動床モデルの検討は、1960年チリ地震津波前後 の宮城県気仙沼湾での地形変化を対象とした.津波来襲



Case	メッシュ サイズ(m)	粒径 dm(mm)	飽和浮遊 砂濃度(%)	侵食量 (m <sup>3</sup> )	堆積量 (m <sup>3</sup> )	最大侵食深 (m)	最大堆積深 (m)	最大流速 (m/s)	侵食·堆積比	計算結果/実績	
										侵食量誤差	堆積量誤差
1	25	0.001	- 1	-650,011	55,677	-12.580	2.000	5.786	0.086	0.251	0.068
2		0.005		-678,854	53,480	-8.924	1.772	5.687	0.079	0.262	0.065
3		0.01		-675,159	62,396	-6.292	2.748	5.827	0.092	0.261	0.076
4		0.05		-614,209	337,857	-4.429	2.781	5.522	0.550	0.237	0.410
5		0.1		-577,349	418,904	-4.180	2.523	4.660	0.726	0.223	0.509
6		0.2		-566,249	475,983	-4.338	2.953	4.697	0.841	0.219	0.578
7		1		-409,496	380,010	-5.543	2.155	4.381	0.928	0.158	0.461
8		0.001	- 5	-1,617,525	110,784	-7.339	4.553	5.047	0.068	0.625	0.134
9		0.005		-1,990,839	491,381	-12.569	6.026	5.643	0.247	0.769	0.597
10		0.01		-2,720,738	1,295,879	-23.823	11.104	5.720	0.476	1.050	1.573
11		0.05		-2,443,670	1,881,761	-19.734	5.748	4.855	0.770	0.944	2.284
12		0.1		-2,095,224	1,688,519	-15.994	4.833	4.221	0.806	0.809	2.050
13		0.2		-1,716,393	1,422,963	-12.969	4.445	4.105	0.829	0.663	1.727
14		1		-872,309	803,221	-10.690	3.350	3.645	0.921	0.337	0.975
15	- 5	0.1	1	-1,015,329	516,135	-24.921	3.225	6.504	0.508	0.392	0.627
16			5	-2,126,385	1,657,871	-36.338	4.663	6.283	0.780	0.821	2.013
_	—	実績	-	-2,590,000	823,750	-9.900	6.800	_	0.318	_	_

表-1 計算ケースおよび計算結果の一覧

前後の気仙沼湾における地形データは、Kawamura・Mogi (1961)による実測値があり、検討範囲で260万m<sup>3</sup>程度 の侵食が観測されている.また、気仙沼湾における1960 年チリ地震津波に関する研究には、前述の研究の他に、 高橋ら(1991,1992,1993)によるものがある.入射波 条件は高橋ら(1991)に習い、小々汐での530分間に渡 る潮位記録を0.924倍して補正した波形(図-2を参照)を 湾口方向境界(南側)から設定する方法を採用した.

### (3) 津波移動床モデルのパラメータ検討

津波移動床モデルの計算では,種々のパラメータの設 定により,その精度に影響が及ぶ.ここでは,特に,計 算精度に及ぼす影響が大きいと考えられる底質粒径,飽 和浮遊砂濃度および格子間隔を対象に,これらの諸量を 種々変化させた全16ケース(表-1を参照)の数値実験を 行った.これらの結果をもとに,モデルの再現性や精度 に影響を及ぼす主たる要因を分析することとした.なお, 1960年チリ地震津波発生当時の気仙沼湾における底質粒 径や粒径分布と,飽和浮遊砂濃度に関する詳細なデータ は存在しておらず,高橋ら(1999)の研究では,底質粒 径は0.2mmの一様粒径,空隙率は0.4を仮定して検討し ている.一方,津波来襲時の飽和浮遊砂濃度については, 経験的に1%~5%程度とされているが,指標が定式化さ れるまでには至っていない.

図-3には、25mメッシュでの粒径および浮遊砂濃度の 違いによる土砂移動量の計算結果を示しており、数値を 表-1に整理した.これらによると、飽和浮遊砂濃度が1%





の場合には、いずれの粒径においても、侵食量が40万m<sup>3</sup> ~70万m<sup>3</sup>程度となり、実績値の260万m<sup>3</sup>に比べて著し く小さくなった.一方、飽和浮遊砂濃度を5%とした場 合には、侵食量が90万m<sup>3</sup>~270万m<sup>3</sup>、堆積量が10万m<sup>3</sup> ~180万m<sup>3</sup>の範囲となり、特に、平均粒径が0.01mm~ 0.1mmの範囲で実測値と非常によく一致する結果となっ



図-4 粒径および浮遊砂濃度の違いによる最大侵食・堆積深の計算結果(1960年チリ地震津波[25mメッシュ]

た. なお,この粒径の範囲は,近年実施された実測値 (鈴木・千葉,2003)とも調和的である.

この条件での最大侵食・堆積深の計算結果を図-4に整 理した.これによると、粒径が0.001mmの最大侵食深を 除いて、最大侵食深および堆積深のいずれにおいても、 飽和浮遊砂濃度を5%とした場合の計算結果が、それを 1%とした場合のものに比べて大きくなる傾向がみられ た.これは、飽和浮遊砂濃度を大きく設定したことによ り、浮遊砂量が増大し、土砂が移動しやすくなったため と考えられる.

また、粒径0.1mmを対象とした場合において、格子間 隔の違いが及ぼす計算精度への影響を分析した結果を図-5にとりまとめた、横軸に格子間隔と浮遊砂濃度の違い による計算結果と実績値を並べ, 左縦軸に土砂移動量を 棒グラフで、右縦軸に最大侵食・堆積深を折れ線グラフ で表示した. 飽和浮遊砂濃度が5%の場合には、格子間 隔の違いによる土砂移動量への影響はほとんどみられな かったが、飽和浮遊砂濃度が1%の場合には、5mメッシ ユの侵食量が25mメッシュのそれに比べて2倍程度増加 した.一方,最大侵食深および堆積深は,いずれも格子 間隔が小さい方がその数値が大きくなった.これらより、 格子間隔を詳細にして空間解像度を上げることに、狭窄 部の急激な流速の変化を計算することが可能となり、局 所的な侵食・堆積状況を再現できるものと考えられる. ただし、格子間隔を小さくした場合には、5%の飽和浮 遊砂濃度では実績値よりも侵食深を過大に評価する傾向 があった.このことから、1960年チリ地震津波における 気仙沼湾での飽和浮遊砂濃度は5%よりも小さかったも のと推察される. また, 飽和浮遊砂濃度および格子間隔 の違いによる最大流速の変化を図-6に示す. 飽和浮遊砂 濃度に比べて格子間隔の影響が大きく,格子間隔が小さ い場合の最大流速は、それが大きい場合の5割程度速く なることが確認された.

粒径0.1mmで飽和浮遊砂濃度が1%の場合における侵 食・堆積の空間分布を図-7に整理した.全体的な侵食・



図-5 格子間隔および飽和浮遊砂濃度の違いによる土砂移動 量および最大侵食深・堆積深への影響(底質粒径0.1mm)



図-6 飽和浮遊砂濃度と最大流速の関係(全粒径),格子間隔 と最大流速の関係(粒径0.1mm)

堆積傾向は,いずれの格子間隔も実績値とほぼ同様の傾向を示しているが,5mメッシュまで空間解像度を詳細に しなければ,狭窄部の局所的な洗掘を表現することがで きないことがわかる.

## 3. 静岡県菊川を対象とした津波遡上計算

#### (1) 計算条件

河口砂州の発達した河川における津波遡上特性と土砂 移動実態を把握するため,静岡県菊川を対象に津波移動 床モデルを適用した.ここでは,①津波移動床モデル (現況河口砂州地形),②固定床モデル(現況河口砂州地 形),③固定床モデル(砂州なし)の3ケースの計算を実 施した.これらの計算結果より,モデルや地形の違いが 河道内の津波挙動や河口砂州を含む地形変化へ及ぼす影 響を評価し,河道内の津波による土砂移動も考慮した津 波防災のあり方を検討することとした.

数値計算は、2.と同様に高橋ら(1999)のモデルを用 いて実施した.格子間隔は波源域から陸域にかけて徐々 に詳細(1,350m→450m→150m→50m)にし、最小格子



図-7 侵食堆積図(飽和浮遊砂濃度1%の計算結果例)

間隔は16.7mとした.また、断層モデルは中央防災会議 で想定された「想定東海地震津波」を対象とし、計算潮 位は朔望平均満潮位(御前崎:H.W.L.=T.P.+0.771m) とした.なお、現況の地形データは平成14年度に実施さ れた河道横断測量成果をもとに作成しており、固定床モ デルの砂州なしは、菊川での既往洪水履歴より河口砂州 がフラッシュした昭和57年出水後の地形を再現した.現 地の状況を鑑み、底質粒径は0.2mm(一様粒径)、空隙 率は0.4とした.さらに、飽和浮遊砂濃度は1%を設定し たが、2.の検討において空間解像度が高い場合には、飽 和浮遊砂濃度を大きくしすぎると過剰な局所洗掘が発生 することに配慮したためである.

#### (2) 津波水位

図-8には、移動床モデルと固定床モデル(河口砂州の 有無)による0.2k(図-9に距離標を示す)での河道内水 位の時間変化を示す.同地点(0.2k)では、最大津波が 到達する地震発生40分後までは、モデルの違いによる影 響はほとんどみられないが、その後は固定床モデルの砂 州なしのピーク水位が高くなる傾向がみられた.

また,澪筋に沿った最大津波水位の縦断分布図を図-10 に示す.河口砂州のすぐ背後では河口砂州の有無が大きく 影響しており,河口砂州なしの場合では河口砂州ありに比 べて30~50cm程度津波水位が高くなることが分かった.

## (3) 土砂移動

図-11に押し波および引き波の最大波が通過した直後 と,計算終了時の地形変動状況を示す。押し波最大波が 通過した直後に河口砂州の先端部がフラッシュされ,引 き波最大波の通過後に河口部はさらに侵食し,河口テラ スに土砂が堆積する傾向がみられた。特に,河口部の堤 防根入部では,最大侵食深が2.0mにも達する結果となっ た.なお,このケースでは図-12に示した通り,河口砂 州は流れが集中した先端部のみ侵食され,砂州基部での 土砂移動はほとんどみられなかった。また,左岸0.4kの



図-8 菊川での想定東海地震による津波波形 (0.2k)



図-9 静岡県菊川の河口部の状況



大東マリーナ出入口の前面では,津波により土砂が1.5m も堆積するため,同マリーナは津波来襲後には使用困難 になると予想された.



## (4) 河川津波防災への適用

現状の河川を対象とした津波防災は、津波固定床モデ ルによる水理計算結果により、河川堤防の安全性評価、 堤内地の浸水被害予測および沿川住民への避難対策等を 検討することが一般的である.しかしながら、局所洗掘 に対する構造物の安定性の検討や、土砂の過剰堆積等を 踏まえた総合的な河川での津波防災対策を検討する上で は、津波水位の挙動だけでなく、土砂移動の観点も重要 であることを示唆する結果が得られた.

#### 4. おわりに

本研究では、津波移動床モデルを用いて、計算精度に 影響を及ぼす諸量を分析し、同モデルを河道内で適用す るための検討を行ってきた.また、河口砂州の発達して いる静岡県菊川を対象に、河道内の津波挙動や津波に伴 う土砂移動形態を調べることにより、河口砂州の地形変 化を考慮した河川での津波防災のあり方を検討してきた. 得られた主要な結果を要約すると、以下の通りである.

- 宮城県気仙沼を対象とした検討では、飽和浮遊砂濃度 が5%の場合で、平均粒径が0.01mm~0.1mmの範囲で 実測値と非常によく一致する結果となった。この粒径 の範囲は近年実施された実測値とも調和的であった。
- 2)静岡県菊川で東海地震を対象とした場合には、河口 砂州のすぐ背後では河口砂州の有無が大きく影響して おり、河口砂州なしの場合では河口砂州ありに比べて 30~50cm程度津波水位が大きくなることが分かった.
- 3) 静岡県菊川では、押し波最大波が通過した直後に河 口砂州の先端部がフラッシュされ、引き波最大波の通 過後に河口部はさらに侵食し、河口テラスに土砂が堆 積する傾向がみられた。特に、河口部の堤防根入部で は、最大侵食深が2.0mにも達する結果となった。

謝辞:本研究の3.で使用した静岡県菊川の地形データや 堤防高データは、平成14年度に実施された河道定期横断



図-12 河口砂州先端のフラッシュと開口部の洗掘状況

測量成果をもとに,平成17年3月時点までの改修工事を 反映させたものである.これらのデータは,国土交通省 中部地方整備局浜松河川国道事務所から提供していただ きました.ここに明記し謝意を表します.

#### 参考文献

- 鈴木貢治・千葉充子(2003):気仙沼湾の底質および水質の 経年変化,宮城水産研報,第3号, pp.53-62.
- 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫(1991);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-,海岸工学講演会論文集,第38巻, pp.161-165.
- 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫(1992);土砂移動を伴う津 波計算法の開発,海岸工学講演会論文集,第39巻, pp.231-235.
- 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫(1993);津波移動モデルの 適用性と再現性の検討,海岸工学講演会論文集,第40巻, pp.606-610.
- 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅井大輔(1999): 浮遊砂 層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波土砂移動モデ ルの開発,海岸工学講演会論文集,第46巻,pp.606-610.
- 西畑 剛・佐貫 宏・森屋陽一・後藤和久(2007) :津波に よる地形変化モデルに関する研究,海岸工学講演会論文 集,第54巻,pp.521-525.
- 藤井直樹・大森政則・高尾 誠・金山 進・大谷英夫 (1998) :津波による海底地形変化に関する研究,海岸工学講演 会論文集,第45巻, pp.376-380.
- Kawamura, B. and T. Mogi (1961): On the deformation of the sea bottom in some harbors in the Sanriku coast due to the Chile Tsunami, 1960年5月24日チリ地震津波に関する論文及び 報告, チリ地震津波合同調査班, 丸善(株), pp.56-61.