南海トラフ巨大地震津波による大阪市域の河川沿いにおける 土砂堆積の傾向に関する研究

NICOLAS EKO SAPUTRA¹⁾ ・重松 孝昌²⁾

大阪公立大学 大学院工学研究科 e-mail: su23213g@st.omu.ac.jp
 大阪公立大学 大学院工学研究科 e-mail: shige@omu.ac.jp

南海トラフ巨大地震津波は大規模な津波を発生させる恐れがあり、大量の水だけでなく、海底土 砂も陸域を遡上すると容易に予想される.陸上における海底土砂の堆積は避難行動、救助・救護・ 救援活動にも大きな影響を与えると考えられる.そのため、土砂堆積の状況を予測することは、 非常に重要であると考えられる.本研究では、南海トラフ巨大地震津波により輸送される土砂が 大阪市域の河川沿いにどのように堆積するかを数値解析によりを行い分析した.

Keywords:南海トラフ巨大地震津波,土砂堆積,河川沿い,浮遊砂濃度

1. はじめに

津波はめったに起こらない現象だが、非常に大きな被害をもたらす、津波により輸送される海水が街へ浸入すれ ば、海水を排水するのに雨水排水ポンプに頼る必要がある。特に、海抜ゼロメートル地帯において、海水は自然に 排水が難しく、排水設備は街の機能回復に必要不可欠な存在である。しかし、津波は海水だけでなく、海底土砂も 同時に輸送する。松富ら¹¹は津波が RC 造建築物に作用する際に、水中に砂を含む場合と含まない場合で建築物に 作用する水平力の相違を実験的に検討し、津波荷重は浮遊砂濃度に依存すると述べている。山下ら²¹は気仙沼市に おいて東日本大震災による土砂移動を数値的に再現し、土砂の移動の影響により被害実績が最大で 40%の木造家 屋が流失したと推定している。このほかにも土砂の堆積によって避難行動、救助・救護・救援活動に大きな影響を 与えてしまう可能性がある。したがって、津波による被害を最小限にとどめるためには、陸上に遡上する水中の土 砂濃度やその堆積厚などを予測することが重要である。

津波による海底土砂の輸送に関する研究は今まで数多く実施されている.高橋ら³)は津波による海底土砂の輸送 の予測方法を質量保存則に基づいて開発し、チリ地震による気仙沼湾における海底土砂輸送の解析を行った. Sugawara et al.⁴⁾ はその解析法を改良し、仙台湾における東日本大震災による海底土砂の再現計算を行った.さら に、有光ら⁵⁾ は開発されたモデルに対して海底土砂の輸送過程に及ぼす流砂パラメーターの影響を調査した.し かし、これらの研究は海域における海底土砂の輸送過程がほとんどであり、陸域における土砂堆積に焦点を当てる 事例はまだ少ない.

そこで、本研究では、南海トラフ巨大地震津波により輸送される海底土砂の堆積状況を予測することを目的とする.

2. 数值解析手法

(1) 津波伝播の支配方程式

図1 に示すような座標系を設定し,式(1)~(3)で示される質量保存式および浅海長波方程式を解くことによって,津波の伝播・遡上計算を行った.基礎式の離散化にはスタガード格子を用い,時間差分にはリープフロッグスキームを用い,移流項および摩擦項の空間差分には一次風上差分,静水圧項の空間差分には中心差分を用いた.

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

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

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

ここに、 η は水面変動、tは時間、MおよびNはそれぞれx軸およびy軸の線流量、 $D = h + \eta$ は全水深、hは朔望平均 満潮における水深, gは重力加速度である. nはマニングの粗度係数で海域において 0.025 で与え, 陸域では内閣府 が公表しているマニング粗度係数の分布のを用いた.



図1. 水深および座標の概要

(2) 土砂移動計算の支配方程式

本研究では、土砂の移動計算は高橋ら3により開発され(以下、高橋モデル)、Sugawara et al.4により海底の傾斜 が考慮できるように改良されたモデルを用いた. 当モデルは掃流砂層と浮遊砂層から成る. 海底土砂が底面せん 断応力により転動および滑動により移動する掃流砂量q_Bは以下の式で求めた.

- -

$$q_B = \alpha \sqrt{sgd^3} (\tau_* - \tau_{cr})^{3/2}$$
 (4)
ここに, $\alpha = 5.95$ は掃流砂量係数⁷), sは砂粒子の水中比重, dは砂粒子の粒径である. $\tau_* = u_*^2/sgd$ はシールズ数
である. $u_* = \frac{gn^2}{p^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2}$ は底面摩擦速度, $\tau_{cr} = u_{cr}^2/sgd$ は土砂が移動をし始めるために必要な限界シール
ズ数, $u_{cr} = 1.06 \times 10^{-2} \text{ m/s}^4$ である. また, 掃流砂量 q_B に海底の傾斜を考慮するために, 式(4)を以下のように書
き換えた.

$$Q_{Bx} = q_{Bx} - |q_{Bx}|\varepsilon \frac{\partial Z_B}{\partial x} \quad , \quad Q_{By} = q_{By} - |q_{By}|\varepsilon \frac{\partial Z_B}{\partial y} \tag{5}$$

ここに、
εは掃流砂輸送に対する傾斜の影響を表す係数、本研究では Sugawara et al.4に倣い、2.5 に設定した. 掃流 砂による海底地盤高の変化は次式により求めた.

$$\frac{\partial Z_B}{\partial t} + \frac{1}{1 - \lambda} \left(\frac{\partial Q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial Q_{By}}{\partial y} + w_{ex} \right) = 0$$
⁽⁶⁾

ここに、んは砂粒子の間隙率である. wexは浮遊砂と掃流砂の交換量を表し、以下の式により求められる.

$$w_{ex} = \beta \sqrt{sgd} (\tau_* - \tau_{cr})^2 - w_o C \tag{7}$$

ここに, $\beta = 9.0 \times 10^{-5}$ は巻き上げ砂量係数⁷, *C*は浮遊砂濃度である. w_o は底質の沈降速度で、本研究では Rubey の沈降速度式 ⁸により求めた.

浮遊砂濃度は次式の拡散方程式により求めた.

$$\frac{\partial CM}{\partial x} + \frac{\partial CN}{\partial y} - w_{ex} + \frac{\partial CD}{\partial t} = 0$$
⁽⁸⁾

高橋モデルは非平衡状態を前提としており、浮遊砂が海底より無限に供給される場合がある.このような現象を防 ぐために、水中に存在できる浮遊砂量の上限値を設ける必要があり、この値を飽和浮遊砂濃度という.飽和浮遊砂 濃度について定量的な知見はほとんどなく、経験的に 0.01kg/m³で与えられている場合が多い(例えば、有光ら⁵)、 近藤ら¹⁰⁾.本研究でもこの値を用いた.

(3) 計算領域

計算領域を図2に示す.計算領域を810m, 270m, 90m, 30m, 10mの5段階の格子サイズでネスティング計算 を行い,それぞれの領域で基礎方程式を解いた.計算で用いた標高データおよび防波堤高のデータは内閣府の「南 海トラフ巨大地震モデル検討会」ののモデルのうち,810m,270m,90m,30mの格子サイズは第6系のデータを用 いており,10mの格子サイズは大阪市提供の標高データを用いた.また,本研究では大阪市に最も被害が大きいと 予想される断層モデルケース 50を用いた.防波堤の影響は津波が防波堤を超えると,防波堤が決壊すると判断さ れ,その後防波堤なしとして計算される.



3. 計算結果

(1) 津波伝播計算の検証



図3. 水面変動の時系列変化

南海トラフ巨大地震モデル検討会のは断層モデル毎に様々な地点において水面変動の時系列の推算結果を公表 している.当検討会が公表している大阪および阪南港の水面変動の時系列と本研究による計算結果の比較を図3に 示す.両者の整合性は良好であると判断される.

(2) 浮遊砂の流れ



図4および図5は線流量ベクトルおよび浮遊砂濃度の分布図を示している.図4は津波発生から120分後の線 流量ベクトルおよび浮遊砂濃度の分布を示したものであり、津波第1波が大阪湾奥部に到達した直後の押し波時 の状況を示している.同図(a)より、湾央部では浮遊砂濃度が低く、湾奥部や東部沿岸区域では、有意な浮遊砂濃 度が見られることがわかる.同図(b)の大阪港海域では、淀川、安治川、木津川などの河口および埋立地周辺に浮 遊砂濃度の高い箇所が見られる.図5は津波発生から150分後で、津波第一波の引きが発生している時点の結果 を示したものである.同図(a)と図4(a)を比較すると、局所的に浮遊砂濃度の高い領域が広がっている海域も見ら れるが、大きな差違は見られない.一方、両図(b)を比較すると、150分後の河道内の浮遊砂濃度は120分後のそ れよりも高く広範囲に及んでいることがわかる.また、埋め立て造成地間の水路においても浮遊砂濃度の高い領域 が大きく広がっていることがわかる. さらに,陸域浸水箇所では 0.003kg/m³程度の浮遊砂濃度が出現していること がわかる.



(3) 陸上に堆積した土砂と津波の流れとの関係



図6は図7にマーク(☆・○)されている箇所の浮遊砂濃度,堆積厚の変化および流速の時系列を示している. 同図では浸食は正の値,堆積は負の値として示している.同図(a)よりPAI地点では津波発生約120分後に津波の 第1波が到達し,流速が速くなるに伴って,浸食が発生し浮遊砂濃度が上昇し飽和浮遊砂濃度に達することがわか る.約150分後には引き波が発生し,流速が低下しはじめ,それに伴って浮遊砂濃度はやや低下して海底地盤の浸 食も止まることがわかる.しかし,引き波によって流速が再び早速くなると,浮遊砂濃度はすぐに飽和浮遊砂濃度 に回復し,海底地盤の浸食も進行することがわかる.PAIよりも沖に位置するPA2地点では,水深が深く流速が PA1よりも小さいために海底地盤の浸食はほとんど見られず,第1波の引き波以降には,緩やかな土砂堆積が見ら れることがわかる.PY1地点でも第1波から第3波の襲来に伴って大きな浸食が発生するが,約250分後の津波 の流速の急激な低下に伴って土砂の沈降による緩やかな堆積傾向が確認できる.PY2地点では,津波の第1波の 到達後の約1時間程度(津波発生約180分後)までは浸食傾向を示すが,その後は緩やかに土砂が堆積して元の海 底地盤よりも高くなっていることがわかる.



図7に、津波が発生してから360分後における土砂の堆積分布を示す.津波の襲来に伴う安治川底の土砂が巻き上げられ、巻き上げられた土砂が津波とともに陸域に遡上して堆積し、局所的には0.10m以上も堆積することがわかる.当該は地域標高が低い海抜ゼロメートル地帯のため、津波の遡上による浸水被害とともに、土砂堆積の影響を強く受けるものと推定される.同図(b)によれば、大和川の両岸は土砂が堆積する地域はそれほど広くはないが、木津川沿岸は土砂の堆積も広範囲に及ぶことがわかる.

4. まとめ

本研究では、南海トラフ巨大地震津波により輸送された堆積物が陸域にどのような堆積するか検討を行った.上 記で述べた考察から以下のようにまとめる.

- 1. 南海トラフ巨大地震津波により,海水が輸送されるが,海底土砂の巻き上がりは湾央部ではあまり発生してお らず,水深の浅い湾奥部の方が顕著に発生した.
- 2. 浮遊砂濃度は流速の上昇に伴い上昇し、それと同時に海底の浸食が発生している.しかし、流速が0.7m/sより も遅い場合、海底の浸食よりも水中の土砂の沈降が卓越し、海底土砂の堆積が発生した.
- 3. 安治川の北部および正蓮寺川の上流側の陸域は海抜ゼロメートル地帯で標高が低いため,津波の浸水被害を受けやすい.これにより,津波が遡上するたびに,海底土砂が陸域に堆積し,陸域の被害を拡大させた.

引用文献

- 1. 松富英夫・岡田隼人・久保田友寛・今野史子(2018):RC 造建築物に作用する津波荷重の氾濫水密度への依存に関する基礎実験,土木学会論文集 B2, 第74巻2号, pp. I_265-I_270.
- 山下啓・鴫原良典・菅原大助・有川太郎・高橋智幸・今村文彦(2017):土砂移動が及ぼす津波ハザード及び建物被害への 影響一東日本大震災の宮城県気仙沼市における津波氾濫・土砂移動・船舶漂流の統合計算一,土木学会論文集 B2,第73巻 2号, pp. L_355-L_360.
- 3. 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅井大輔(1999):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.
- Daisuke Sugawara, Tomoyuki Takahashi, Fumihiko Imamura, (2014): Sediment Transport due to the 2011 Tohoku-oki Tsunami at Sendai: Result from Numerical Modeling, International Journal of Marine Geology, Vol. 358, pp. 18-37.
- 5. 有光剛・松田周吾・村上嘉謙・志方建仁・川崎浩司・三島豊秋・清水京太郎・菅原大助(2017): 津波移動床モデルの再現 性に及ぼす流砂パラメーターの影響,土木学会論文集,第73巻2号, pp.1589-1594.
- 6. 内閣府 (2016):南海トラフ巨大地震モデル検討会、
 https://www.geospatial.jp/ckan/organization/naikakufu-01
 > (2022 年 12 月 24 日 参照).
- 7. 高橋智幸(2012):津波による砂移動に関する数値シミュレーションの現状と課題,堆積学研究,第71巻2号, pp. 149-155.
- 8. W.W. Rubey (1933): Settling velocity of gravels, sand and silt particles, American Journal of Science, Vol. 25, pp. 325-338.
- 9. 大阪府都市整備部事業管理室(2019):大阪府河川整備審議会第 4 回高潮専門部会, 資料 1, pp.7.
- 10. 近藤武司・森本徹・藤本典子・殿最浩司・家村健吾・志方建仁 (2011):津波による土砂移動 が港湾施設に与える影響に関 する研究, 土木学会論文集 B2, 第67巻2号, pp.1261-1265.