津波移動床モデルの再現性に及ぼす 流砂パラメータの影響

有光 剛¹・松田 周吾²・村上 嘉謙³・志方 建仁⁴・川崎 浩司⁵・
三島 豊秋⁵・清水 涼太郎⁶・菅原 大助⁷

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関西電力株式会社 土木建築室 技術グループ (〒530-8270 大阪市北区中之島3-6-16)

³関西電力株式会社 土木建築室 土木建築エンジニアリングセンター

(〒553-0003 大阪市福島区福島5-1-7 住友不動産西梅田ビル4F)

⁴株式会社ニュージェック 港湾・海岸グループ (〒530-8270 大阪市北区本庄東2-3-20)

⁵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)

⁶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)

⁷ふじのくに地球環境史ミュージアム (〒422-8017 静岡県駿河区大谷5762)

本研究では、津波移動床モデルにおける飽和浮遊砂濃度および流砂量係数の設定が地形変化の再現性に及ぼす影響を把握するために、東北地方太平洋沖地震津波による岩手県高田海岸における地形変化の再現計算を行った。その結果、得られる砂移動量の計算値が飽和浮遊砂濃度の設定方法によって大きく異なることが明らかとなった。飽和浮遊砂濃度を固定値として与えると、十分な巻き上げが許容されないために地形変化の再現性が不十分となった。一方で、飽和浮遊砂濃度を流況に応じて可変とした場合は、水理条件による時空間的な砂移動量の変動を考慮することができ、大規模な地形変化に対しても良好な再現性を得ることができた。この際、飽和浮遊砂濃度による制約の効果が大きいために、流砂量係数による計算結果の差異が小さいことが明らかとなった。

Key Words : movable bed model for tsunamis, saturation concentration of suspended sediment, sediment transport coefficients, topography change

1. はじめに

津波の作用により大量の土砂が巻き上げられて輸送されると、航路の埋没、陸域への堆積、海岸の侵食、発電所取水設備の閉塞などの被害の原因となり得る。これらの被害の想定と、対策の検討を目的として、津波に伴う砂移動・海底地形変化に関する研究が行われている。

津波に伴う砂移動評価に関しては、高橋ら¹⁾(以下、高橋ら(1999))によって掃流砂層と浮遊砂層の交換砂量を考慮したモデルが提案され、既に実務に用いられている²⁾。しかしながら、津波による土砂移動に関する知見は十分でなく、現在も評価手法の高度化の取り組みが継続されている。例えば、高橋ら³⁾(以下、高橋ら(2011))は、大型水理実験により流砂量係数の粒径依存性を確認し、粒径ごとの係数の値を提案している。また、森下・高橋⁴⁾は、土砂移動に支配的な因子に着目し、感度分析により土砂移動への応答特性を確認している。

一方で、砂移動計算時に設定する飽和浮遊砂濃度が再現性に与える影響は大きく、その設定方法も課題となっている。浅井ら⁵⁾は、安政東海沖地震津波による伊豆半島における地形変化の計算を行い、飽和浮遊砂濃度の差異が計算結果に大きな影響を及ぼすことを示している。藤田ら⁶⁾は、1960年チリ津波による八戸港における地形変化の再現計算の中で、飽和浮遊砂濃度を変化させたパラメータスタディを実施している。その結果、飽和浮遊砂濃度を5%とした場合は堆積を過大評価するのに対して、1~2%とすると良好な再現性が得られている。これに対して、菅原ら⁷⁾は、流況に応じて値を変化させるための飽和浮遊砂濃度算定式を提案している。今井ら⁸⁾、山下ら⁹⁾は、それぞれ、北上川河口部、陸前高田市を対象に、東北地方太平洋沖地震津波による地形変化の再現計算に菅原らの方法を適用し、妥当性を検証している。

このように、流砂量係数や飽和浮遊砂濃度などの流砂パラメータの新たな設定方法が提案され、現地適用性の

図-1 検討対象（高田海岸）の初期地形

検証が進んでいるものの、手法間の比較が示された例はなく、新たなパラメータの導入の効果が明確に把握されていないのが現状である。

そこで、本検討では、流砂パラメータが砂移動・地形変化計算の再現性に及ぼす影響の把握を目的として、異なる流砂量係数および飽和浮遊砂濃度を用いて、山下ら⁹⁾と同様の東日本大震災時の岩手県陸前高田市の高田海岸における地形変化の再現計算を行った。

2. 津波移動床モデルによる計算方法

(1) 検討の概要

山下ら⁹⁾は、流砂パラメータとして高橋ら（2011）の流砂量係数、菅原ら⁷⁾の飽和浮遊砂濃度設定方法を用いて、高田海岸における東北地方太平洋沖地震津波による地形変化の再現計算を行っている。計算結果は、現地調査結果¹⁰⁾との比較に基づき、遡上過程・浸水高などの津波挙動や、地形変化量・海域における堆積土砂の分布傾向などの砂移動特性の良好な再現性が確認されている。

本検討では、山下ら⁹⁾を参考に計算条件を設定し、流砂パラメータを変えた計算を行った。計算領域は波源域を含む東日本の広範囲とし、津波波源にはSatakeら¹¹⁾のモデルを使用した。ネスティングにより格子間隔を1215 mから5 mまで徐々に細分化して、6階層の空間解像度で計算を行った。紙面の制約により省略するが、津波水位時系列を山下ら⁹⁾と比較することで、伝播計算の妥当性を確認している。高田海岸付近の計算初期地形を図-1に示す。計算結果を現地調査結果¹⁰⁾（図-2）と比較し、流砂パラメータによる再現性の差異を検討した。なお、本論文では、地形変化量の正值を堆積、負値を侵食とする。

(2) 砂移動・地形変化の計算方法

津波による砂移動・地形変化の計算には、高橋ら（1999）による掃流砂層と浮遊砂層間の交換砂量を考慮

図-2 津波作用前後の地形変化の現地調査結果

表-1 計算条件（流砂パラメータ）

	流砂量係数		飽和浮遊砂濃度
	巻き上げ砂量	掃流砂量	
Case 1	0.012	21.0	固定 (1%)
Case 2	4.4×10^{-5}	4.0	
Case 3	0.012	21.0	可変 (菅原ら ⁷⁾)
Case 4	4.4×10^{-5}	4.0	

した津波移動床モデルを用いた。各ケースの流砂パラメータの値を表-1に示す。流砂量係数については、Case 1およびCase 3では高橋ら（1999）の値とし、Case 2およびCase 4では高橋ら（2011）の値を用いた。土砂の粒径はNaruseら¹²⁾を参考に0.267mmとした。飽和浮遊砂濃度は、1%で固定とした場合（Case 1, 2）と、菅原ら⁷⁾の式(1)を用いて流況に応じて時空間的に値を変化させた場合（Case 3, 4）の計算を行った。

$$C_s = \frac{\rho_s \rho_w}{\rho_s - \rho_w} \left(\frac{h^{4/3} w_s}{e_s n^2 U^3} - 1 \right)^{-1} \quad (1)$$

ここで、 C_s は飽和浮遊砂濃度（ kg/m^3 ）、 ρ_s は土砂の密度（ kg/m^3 ）、 ρ_w は水の密度（ kg/m^3 ）、 h は水深（m）、 w_s は土砂の沈降速度（m/s）、 e_s は土砂の巻き上げ効率、 n はマンニングの粗度係数（ $\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}$ ）、 U は断面平均流速（m/s）である。巻き上げ砂量を計算する際に、式(1)の飽和浮遊砂濃度を上回らないように調整する。ただし、移流や流況の急変などの巻き上げ以外の理由による超過（過飽和）は許容する。なお、次章以降の浮遊砂濃度の計算結果は、体積濃度で表示する。

砂移動計算においては土地利用区別に土砂供給源を限定し、砂は砂質地盤からのみ供給されることとし、シルト等で構成される泥の挙動は考慮していない。このため、計算では、家屋や舗装面、田畑等における地盤高は、地震による地盤低下量より低下しない。なお、堤防の破壊を考慮するために、津波で被災した堤防の一部または全てを砂質土で構成されるものとする。なお、津波伝播計算に用いる粗度係数は、小谷ら¹³⁾を参考に、土地利用別に設定した。

図-3 津波作用前後の地形変化の計算結果

3. 津波作用前後の地形変化の計算結果

(1) 地形変化の計算結果

図-3に、津波作用前後の地形変化の計算結果を示す。いずれの条件でも、高田松原および気仙川河口部の侵食および人工リーフ岸側の堆積が計算されており、侵食域と堆積域の分布は現地調査結果（図-2）を定性的に再現できている。ただし、堆積厚や侵食深などの地形変化量には条件による差異が認められ、例えば、Case 1の人工リーフ岸側の堆積厚は現地データや他のケースより大きい。また、Case 1, 2では、気仙川河口付近の侵食深は小さく、人工リーフの2号堤と3号堤の間の侵食が認められないなど、現地調査結果との差異がみられる。

(2) 侵食・堆積土量

図-2の黒実線で示した範囲内の堆積量および侵食量と、それらを差し引きした総変化量を図-4に示す。いずれの条件でも総変化量は現地と同様に侵食傾向を示しているものの、ケースによる地形変化量の差異が認められる。Case 1, 2では流砂量係数による差異はあるものの、両ケースとも現地データと比較すると堆積量が大きいのにに対して侵食量は小さく計算されており、総変化量では侵食量が過小評価となっている。一方、Case 3, 4の流砂量係数による違いは小さく、両ケースの堆積量・侵食量は現地を良好に再現できている。

図-4 地形変化量の計算結果と現地データの比較

4. 流砂パラメータが地形変化の再現性に及ぼす影響

(1) 津波挙動とシールズ数

図-5に、静水深10mの地点（図-1中の星印）における水位・流速・シールズ数の計算結果の時系列を示す。ここで、流速は2方向の成分を合成した絶対値とし、シールズ数は流速絶対値を用いて計算した値である。同じ波源を用いているため、条件による津波挙動の差異は小さい。ただし、条件によって地形の計算結果が異なるために、計算時間の後半にはケース間の差異が現れる。

この地点の水位（図-5(a)）は、地震発生の約30分後から1波目による上昇が始まり、約45分後に押し波のピー

図-5 静水深10mの位置における津波挙動

ク(約13m)に到達している。その後の引き波による約65分後の最低水位は-8mを下回っており、初期水深10mのこの地点における水深が非常に小さくなる。

流速絶対値の時系列(図-5(b))からは、1波目の水位上昇および下降の両方の過程で速い流れが生じていることが分かる。ただし、押し波時に比べると、引き波時の流速の方が大きい。これは、海底勾配の影響を受けて引き波時に加速されることが原因といえる。

上述の水深と流速を用いて算定されるシールドズ数(図-5(c))にも、1波目の押し波時と引き波時にピークが認められる。ただし、押し波時の最大値が20程度であるのに対して、引き波時には50以上にまで達していることから、対象海岸では1波目の引き波時に非常に大きな外力が作用したことが分かる。2波目以降は大きなシールドズ数は現れない。

(2) 流砂パラメータによる砂移動特性の差異

図-6に、静水深10mの位置における飽和浮遊砂濃度と

図-6 飽和浮遊砂濃度および浮遊砂濃度の時系列

浮遊砂濃度の時系列を示す。ここで、飽和浮遊砂濃度はCase 1, 2では固定値(1%)であり、Case 3, 4では流況に応じて式(1)で求められる値である。また、浮遊砂濃度は津波移動床モデルの浮遊砂層内の土砂濃度を示す。

津波が到達した地震発生30分後以降のCase 1の浮遊砂濃度は、ほぼ飽和浮遊砂濃度(1%)で推移する。これに対して、流砂量係数が小さいCase 2の浮遊砂濃度は、Case 1より小さい。しかしながら、1波目の引き波時には、Case 2の浮遊砂濃度も1%に達していることから、この時間は大量の砂が巻き上げられる水理条件であるものの、両ケースとも飽和浮遊砂濃度の制約により浮遊砂濃度が1%に抑えられていることが分かる。

Case 3, 4の飽和浮遊砂濃度が大きくなるのは1波目の引き波時のみであり、その最大値はCase 1, 2で固定条件とした1%を大きく上回る。それ以外の時間は、1波目の押し波時を含めて飽和浮遊砂濃度が小さい。Case 3, 4の浮遊砂濃度は、ほぼすべての時間で流砂量係数による差異が小さく、飽和浮遊砂濃度とほぼ等しい。これらのことから、Case 3, 4では、1波目の引き波時には大量の土砂移動が計算される一方で、他の時間の巻き上げ砂量は飽和浮遊砂濃度の制約によって抑えられているといえる。なお、図-6(a), (b)を比較すると、Case 3, 4で浮遊砂濃度が飽和浮遊砂濃度の値を上回る時間がある。これは、移流や流況の急変による過飽和を許容しているためである。

図-7に、1波目の押し波時(40分後)および引き波時(60分後)の浮遊砂濃度の空間分布を示す。Case 1では、ほぼ全域で飽和浮遊砂濃度(1%)となっている。Case 2

図-7 浮遊砂濃度の空間分布 (40分後: 押し波時・60分後: 引き波時, 赤線は浮遊砂濃度1%の等値線)

は、浮遊砂濃度が若干小さい領域があるものの、押し波時には岸側、引き波時には沖側の広範囲で飽和浮遊砂濃度 (1%) となっている。一方で、Case 3, 4は浮遊砂濃度の時空間的な変動が大きく、押し波時には岸側で、引き波時には沖側で部分的に非常に大きな値が認められる。

これらの結果から、Case 1, 2では1%を超える浮遊砂濃度が許容されないために侵食量が過小評価となったのに対して、Case 3, 4では1波目の引き波時に生じる大量の巻き上げが考慮できるために地形変化の良好な再現性が得られたといえる。また、図-7(f), (h)にみられる引き

波時の局所的な高濃度の浮遊砂の移動により, Case 3, 4 では人工リーフ間の侵食が再現できたと考えられる.

5. まとめ

飽和浮遊砂濃度の設定によって砂移動特性が大きく異なることが明らかとなった. 飽和浮遊砂濃度を1%で固定した場合には, 十分な巻き上げ砂量が許容されないために, 侵食量が過小評価となった. 一方, 飽和浮遊砂濃度を可変とした場合には, 水理条件による時空間的な砂移動量の差異を考慮することができ, 大規模な地形変化に対する良好な再現性を得ることができた. この際, 飽和浮遊砂濃度による制約の効果が大きいいため, 流砂量係数による計算結果の差異が小さいことが明らかとなった.

謝辞: 本研究の実施にあたり, 現地資料に関して国土交通省国土技術政策総合研究所海岸研究室の加藤史訓室長のご協力を得るとともに, 国土交通省東北地方整備局岩手河川国道事務所より貴重な現地資料の提供を受けた. また, 関西大学の高橋智幸教授より貴重なご助言を頂いた. ここに記して深甚なる謝意を表する.

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) 玉田崇, 田村保, 高橋智幸, 佐々木元: 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, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.65, No.1, pp.301-305, 2009.
- 3) 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, pp.231-235, 2011.
- 4) 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.
- 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—安政東海地震津波における伊豆半島入間での場合—, 津波工学研究報告, Vol.16, pp.119-130, 1999.
- 6) 藤田尚毅, 稲垣和男, 藤井直樹, 高尾誠, 金戸俊道: 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, 海洋開発論文集, 第 26 巻, pp.213-218, 2010.
- 7) 菅原大助, 成瀬元, 後藤和久: 堆積粒子の巻き上げに伴うエネルギー散逸を考慮した津波土砂移動の計算と検証, 日本堆積学会講演要旨, O27, 2014.
- 8) 今井健太郎, 菅原大助, 高橋智幸, 岩間俊二, 田中仁: 2011 年東北津波における北上川河口部の大規模洗掘・堆積に関する数値的検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I_247-I_252, 2015.
- 9) 山下啓, 菅原大助, 高橋智幸, 今村文彦, 齋藤友一, 今任嘉幸, 甲斐恭, 上原均, 加藤季広, 中田一人, 坂良太郎, 西川朝雄: 岩手県陸前高田市における 2011 年東北地方太平洋域地震津波による大規模土砂移動の再現計算, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I_499-I_504, 2015.
- 10) 加藤史訓, 野口賢二, 諏訪義雄, 坂上敏彦, 佐藤祥昭: 津波による地形変化に関する現地調査, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.68, No.2, pp.I_174-I_179, 2012.
- 11) Satake, K., Y. Fujii, T. Harada and Y. Namegaya : Time and space distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku earthquake as inferred from tsunami waveform data, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol.103, No.2B, pp.1473-1492, 2013.
- 12) Naruse, H., K. Arai, D. Matsumoto, H. Takahashi, S. Yamashita, G. Tanaka and M. Murayama: Sedimentary features observed in the tsunami deposits at Rikuzentakata City, Sedimentary geology, Vol.282, pp.199-215, 2012.
- 13) 小谷美佐, 今村文彦, 首藤伸夫: GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp.356-360, 1998.

(2017.3.15 受付)

INFLUENCE OF COMPUTATIONAL PARAMETERS ON ACCURACY OF MOVABLE BED MODEL FOR TSUNAMIS

Tsuyoshi ARIMITSU, Shuugo MATSUDA, Yoshikane MURAKAMI, Takemi SHIKATA, Koji KAWASAKI, Toyoaki MISHIMA, Ryotaro SHIMIZU and Daisuke SUGAWARA

Numerical simulations of sediment transport, which was caused by the 2011 Tohoku Tsunami, were conducted in order to investigate the influence of computational parameters on accuracy of movable bed model for tsunamis. Simulation results revealed that the amount of sediment transport differed depending on saturation concentration of suspended sediment. Erosion volume was underestimated in the case that saturation concentration was given as a constant value (1%). On the other hand, erosion caused by the strong return flow was reproduced using saturation concentration of suspended sediment which varies depending on the flow fields. The simulation results also showed that the sediment transport coefficients in the governing equations had relatively less effect on the sediment transport.