

津波の戻り流れによる海岸洗掘・侵食予測方法の改良

Improvement of Prediction Method of Coastal Scour and Erosion due to Tsunami Back-flow

山本吉道¹・成吉兼二²・ヴタンカ³

Yoshimichi YAMAMOTO, Kenji NARIYOSHI and Vu Thanh CA

When the Indian Ocean tsunami attacked in December, 2004, large-scale erosion or large-scale scour was caused in various places. If the coastal scour by the first tsunami wave caused the destruction of a dike or a seawall, it is also considered that the second tsunami wave may generate much more serious damage. Therefore, research on a predicting method of the coastal erosion and scour by tsunami is important. In this research, a numerical model which can predict the coastal erosion and scour in a wide area including land as easily as possible has been built on the basis of Takahashi's et al model. Moreover, predicting methods of the maximum scour depth and its position in the front beach of the seawall are also proposed.

1. はじめに

大津波の来襲によって海岸地形が大きく変わる場合のあることは以前から知られていたが、2004年12月のインド洋津波では、各所で大規模な海岸侵食や洗掘が生じた。大津波の戻り流れによる海岸洗掘が堤防・護岸の破堤に繋がり、破堤後の来襲波による一層の被害も考えられる。

それゆえ、津波による洗掘や侵食の予測研究は、堤防・護岸の破堤も含めた被害予測のために重要であり、本論文では、(1) 広域での使い勝手の良い海岸洗掘・侵食の予測法と、(2) 海岸洗掘断面での最大洗掘量とその位置の予測法の提案を試みた。

2. 津波による洗掘予測計算法

(1) 津波による地形変化予測モデル

津波による地形変化の予測が最終目的と考えられる初期の論文に高橋ら(1992, 1993)によるものが在り、有効シルズ数の m 乗に比例する関数で掃流砂量を見積もれるが、浮遊砂量も無視できないことを指摘している、小林ら(1996)は有効シルズ数の1.5乗に比例する関数で掃流砂を精度良く見積もることができ、藤井ら(1998)と高橋ら(1999)は浮遊砂の巻き上げ量と沈降量を考慮することにより、地形変化の予測精度を高めた。その後、Nishihataら(2006)は掃流砂と浮遊砂の両方を考慮した類似の数値モデルでSri LankaのKirinda漁港の港内埋没砂のフラッシュ現象を再現、木原・松山(2007)は浮遊砂量の計算精度向上のために3次元地形変化数値モデルを構築、中村・水谷(2008)は地盤内で生じる応力変動の

影響を考慮した掃流砂・浮遊砂量式を提案した。

著者達は、発展途上国にも普及させることを第一目標とし、大型コンピュータでなく、通常のパーソナル・コンピュータを用いて、広域の海岸侵食と洗掘の計算を実用レベルの精度で予測できるように、対象海岸の陸域も含めた平面2次元の浸水計算に山本ら(2008)の数値モデルを用い、地形変化計算には高橋ら(1999)の数値モデルを参考に以下のように構築したモデルを用い、両者の繰り返し計算を行うようにした。

a) 掃流砂輸送のモデリング

掃流砂量にはRibberink(1998)の次式を用いた。本式は横山ら(2002)の洗掘量算定図作成の際に0.2mm～10mm間の底質粒径に対して係数を変えることなく用いられ、同論文や山本・岩崎(2006)によって実測データとの一致度が高いことを確認されている。

$$q_b = \begin{cases} m \left[\theta'_s(t) - \theta_c \right]^n \frac{\theta'_s(t)}{\left| \theta'_s(t) \right|} \sqrt{\Delta g D_{50}} & (\theta'_s(t) \geq \theta_c) \\ 0 & (\theta'_s(t) < \theta_c) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 q_b は単位面積単位時間当たりの掃流砂量、 $\theta'_s(t)$ はシルズ数、 θ_c は限界シルズ数、 Δ は掃流砂の相対密度、 g は重力加速度、 D_{50} は掃流砂の中央粒径、 m (=11)および n (=1.65)は係数である。

そして、シルズ数は次式で表され、

$$\theta'_s(t) = \frac{0.5 f_w \rho_s |u_b(t)| u_b(t)}{(\rho_s - \rho) g D_{50}} \quad (2)$$

$u_b(t)$ は海底境界層上の岸沖方向流速、 ρ_s は底質の密度、 ρ は海水の密度であり、 f_w は波の摩擦係数で、次式で表される。

1 フェロー 博(工) 東海大学教授
2 学生会員 修(工) 東海大学大学院工学研究科土木工学専攻
3 Ph.D ヴェトナム気象水文研究所センター長

$$f_w' = \begin{cases} e^{\{5.2(k_s/\hat{a})^{0.194} - 5.98\}} & (k_s/\hat{a} < 0.63) \\ 0.3 & (k_s/\hat{a} \geq 0.63) \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\hat{a}$ は海底付近の岸沖方向の流速振幅であり、 k_s は次式で表される代表海底粗度長さである。

$$k_s = \max \left\{ 3D_{50}, D_{50} \left[1 + 6 \left(\left| \overline{\theta_s} \right| - 1 \right) \right] \right\} \dots\dots\dots (4)$$

$\left| \overline{\theta_s} \right|$ はシールズ数の絶対値の時間平均値であり、次式で表される。

$$\left| \overline{\theta_s} \right| = \frac{\left| \overline{\tau_b(t)} \right|}{(\rho_s - \rho)gD_{50}} \dots\dots\dots (5)$$

$$\left| \overline{\tau_b(t)} \right| = 0.5\rho f_w' \overline{u_b(t)^2} = 0.25\rho f_w' \hat{U}^2 \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $\hat{U}$ は振動流の流速振幅である。

また、限界シールズ数には van Rijn (1993) の次式を用いる。

$$\theta_c = \frac{\tau_{bc}}{(\rho_s - \rho)gD_{50}} = \begin{cases} 0.24D_*^{-1} & 1 < D_* < 4 \\ 0.14D_*^{-0.64} & 4 \leq D_* < 10 \\ 0.04D_*^{-0.1} & 10 \leq D_* < 20 \\ 0.013D_*^{0.29} & 20 \leq D_* < 150 \\ 0.055 & 150 \leq D_* \end{cases} \dots\dots (7)$$

ここに、 D_* は、動粘性係数 γ を用いて、次式で定義される無次元量である。

$$D_* = D_{50} \left(\frac{g\Delta}{\nu^2} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (8)$$

さらに、傾斜面でのモデリングには重力の影響を考慮する必要がある。傾斜角度 β の底面上限界シールズ数 θ_{sc} は次式で表される。

$$\theta_{sc} = \theta_c \frac{\sin(\phi + \beta)}{\sin\phi} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 ϕ は底質の安息角である。

b) 浮遊砂輸送のモデリング

津波による地形変化のモデリングでは浮遊砂輸送も重要であり、浮遊砂の岸沖方向の輸送には乱流に対する次式を用いる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial uC}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial C}{\partial y} \right) - C_s + C_{ut} \end{aligned} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 u は移流速度、 C は水深方向に積分した浮遊砂

の濃度、 C_s は底面に沈降する浮遊砂量、 C_{ut} は底面より巻き上がる浮遊砂量、 ν_t は渦動粘性係数である。

沈降する砂の量 C_s および巻き上がる砂の量 C_{ut} は浮遊砂の鉛直分布を仮定して評価する。浮遊砂濃度の鉛直方向分布 $C(z)$ を用いて、 C_s および C_{ut} を次式のように表す。

$$C_{ut} = -\nu_t \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=z_a} \dots\dots\dots (11)$$

$$C_s = w_s C(w_s/2) \dots\dots\dots (12)$$

全域でシートフロー状態が卓越すると仮定し、浮遊砂濃度の鉛直分布を次式のように仮定する(Soulsby, 1997)。

$$C(z) = C_a (z/z_a)^{-b} \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 b は次式で定義される。

$$b = \frac{w_s}{K\mathcal{U}_*} \dots\dots\dots (14)$$

w_s は砂粒子の沈降速度、 C_a および z_a は Zyserman・Fredsoe (1994) の次式から求める。

$$C_a = \frac{0.331(\theta_s - 0.045)^{1.75}}{1 + 0.720(\theta_s - 0.045)^{1.75}} \dots\dots\dots (15)$$

$$z_a = 2D_{50} \dots\dots\dots (16)$$

c) 漂砂の連続式

地形変化の計算に用いられる漂砂量の保存式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{1}{1 - \varepsilon_s} \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} - C_s + C_{ut} \right) \dots\dots (17)$$

ここに、 ζ はある基準高さに対する局所的底面高、 q_{bx} と q_{by} は x と y 方向の掃流砂量、 ε_s は砂層の空隙率である。

(2) 数値モデルの現地海岸への適用

前述の数値モデルを2004年インド洋大津波で被害を受けたタイ国Phuket県Patongビーチに適用した。

入射させる津波高の経時変化には、本県北隣のPhangnga県Krabi海岸と東隣のKrabi県Krabi海岸の潮位観測記録の平均値をモデル化した図-1を用いた。本津波では図-1に示されるように、0分からの押し波が来る前に-30分からの引き波が生じている。

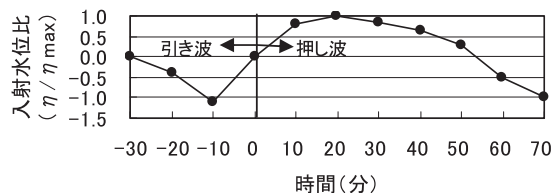


図-1 水深20m地点での水位上昇量の経時変化モデル

Phatong ビーチの地盤高，海岸線での最大津波高，最大浸水域は，タイ国政府提供資料と山本ら（2007）の調査結果を基に，図-2 のように整理できた．図中の灰色部が最大浸水域を表し，直線で示す数値は該当コンターの地盤高である．

浸水計算結果は図-3（1）～3（2）に示すようになり，濃い灰色は海側水深，淡い灰色は陸側浸水深を示し，矢印で示す数値はコンターの地盤高である．

これらの図から，北部海岸の浸水域は14分頃に，中部海岸の浸水域は14分～29分の間，南部低地は29分頃に，それぞれ最大となったことが分かる．そして，図-3（1）

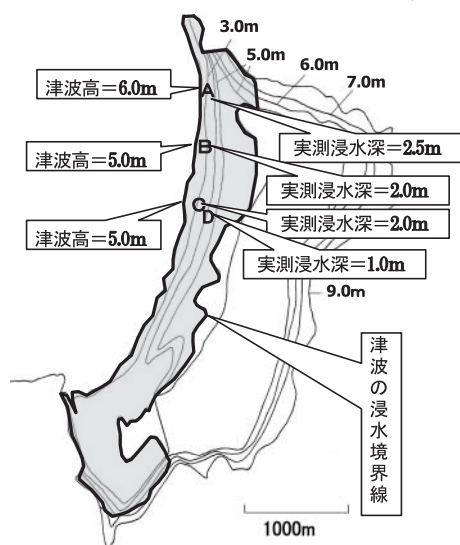


図-2 Patong ビーチの地盤高，津波高および浸水域

～3（2）の浸水域を重ね合せて得られる最大浸水域は，図-2 に示す実測と良く一致している．さらに，A～D 地点の最大浸水深の一致度も良好である．

次に，写真-1 は，人工衛星 IKONOS によるインド洋津波来襲直後の写真に，来襲前の汀線を太線で書き込んだものである．来襲直後の洗掘簡易測量結果も書き添えた．

図-4 はタイ国政府提供の津波来襲前（1996 年）と来襲後（2005 年）の海図から作成した水深変化分布を示している．陸域の灰色が地盤高変化ゼロを示し，それよりも黒い箇所が洗掘と侵食，白い箇所が堆積を表している．測量間隔が長すぎるため，津波による影響だけを表しているとは言い難いが，高波による影響が10m以深まで及んでいるとも考えにくいので，海域の広い範囲で侵食傾向となっているのは2004 年大津波によると推定できる．

本ビーチは細砂から成っており，中央粒径は0.15mmであった．沖合まで底質粒径は0.15mmであると仮定し，図-1 の－30 分から始まる最初の引き波を無視して，地形変化計算を行うと，広い海域での侵食が再現できなかった．この最初の引き波も考慮して地形変化計算を行い，図-4 の凡例に準じて作図すると図-5 に示すようになった．図-5 では，地盤高3mの護岸線に沿って顕著な洗掘が生じており，南部の最大洗掘量は1m～2m程度，北部の最大洗掘量は50cm～1m程度になっており，簡易測量時の洗掘状況を十分に再現している．さらに，水深10m付近を中心とした広い範囲で地盤高変化量1m程度の侵食も現れており，再現性は良好と判断できる．

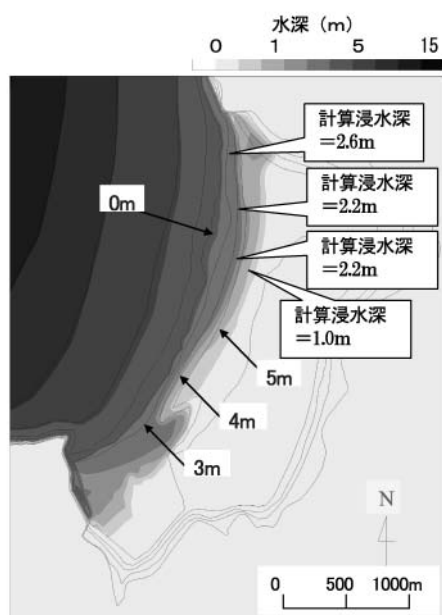


図-3（1）押し波来襲14分後の海側水深・浸水深分布計算

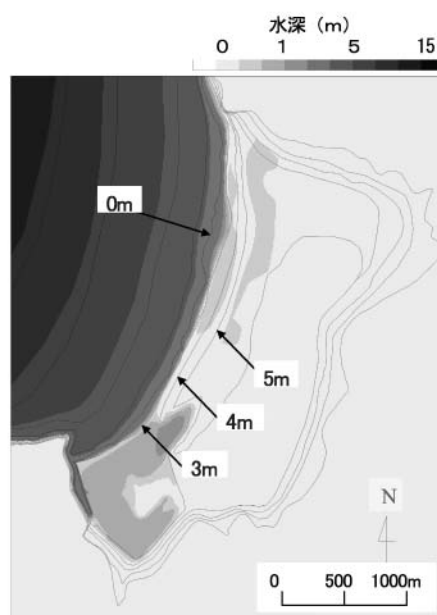


図-3（2）押し波来襲29分後の海側水深・浸水深分布計算



写真-1 Patongビーチでの洗掘状況
(IKONOSによる撮影2004年12月29日)

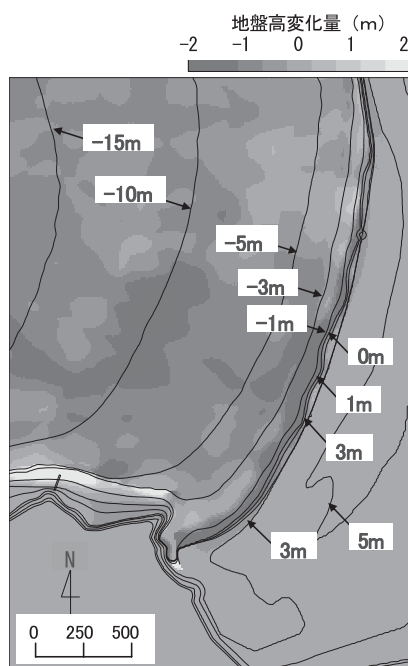


図-4 Patongビーチでのインド洋大津波前後での水深変化
(タイ国政府提供の1996年と2005年の海図による水深変化図)

3. 護岸天端高が高い場合の局所洗掘算定法の検討

広域の津波による侵食と洗掘を予測するために前述の

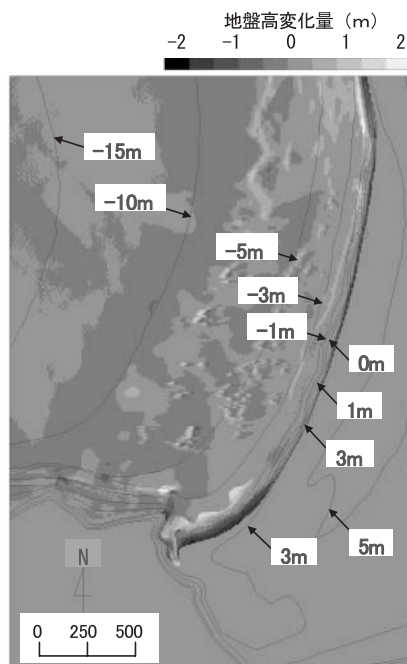


図-5 Patongビーチでの引き波来襲90分後の洗掘状況

平面二次元数値モデルを開発したが、護岸天端高が戻り流れの厚さに比べて相当に高い場合は、図-6に示すように戻り流れは地面から離れ放物運動するため、このような場合の護岸近傍の局所的洗掘特性の評価が主目的ならば、平面二次元モデルの使用は適切でないと考えられる。

このような場合に対して、堀川ら（1983）が数多くの小規模実験を、野口ら（1997）が数ケースの大規模実験を行って、最大洗掘深を求める式を提案している。しかし、前者では戻り流れの護岸天端上での限界水深と前面平均水深からの水位変化量を、後者では戻り流れの流量を求めないと、最大洗掘深を計算できない。それゆえ、護岸上の戻り流れの厚さ h_r と速度 u_r に次式を用いて、最大洗掘深とその位置を求める算定法を提案する。

$$h_r = \frac{1}{3} \frac{(R-Z)f}{\sin \beta + f}, \quad u_r = \frac{\sqrt{2 \sin \beta}}{f} \sqrt{gh_r} \quad \dots\dots (18)$$

ここで、 β は護岸陸側斜面の勾配角、 Z は同陸側対象位置の地盤高、 f は同陸側地表面の摩擦係数、 R は打ち上げ高でFreeman・Mehauteの式などを用いる。

検証用データは、戻り流れ発生用大型タンクを設置した幅50cm、高さ80cm、長さ22mの二次元水路に、粒径0.2mmから0.66mmまでの砂を用いて勾配1/15の海浜を作り、天端高0.36mと0.435mの護岸を設置し、戻り流れ流量を変えて計6ケース実施した洗掘実験から得た。護岸

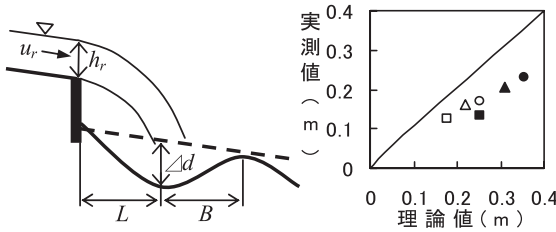


図-6 戻り流れと洗掘量の諸元の説明

図-7 最大洗掘位置 \$L\$ の理論値と実測値との比較

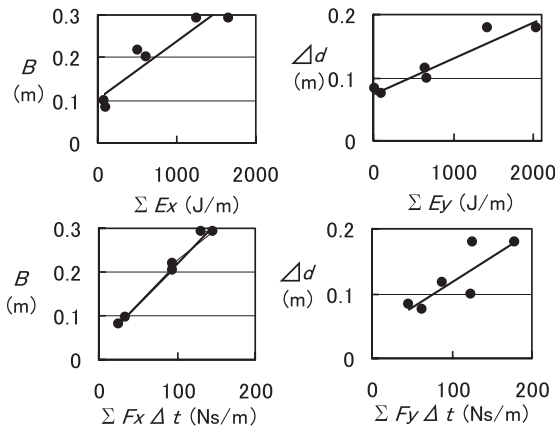


図-8 洗掘幅 \$B\$ と最大洗掘深 \$\Delta d\$ 対運動エネルギーと力積との関係

天端上の流速は KENEK 社製円盤型電磁流速計を用い、水流厚はビデオ撮影から求めた。

まず、最大洗掘位置 \$L\$ について、水流が放物運動すると仮定して得られる理論値と実測値の比較を行った。結果は図-7 に示す通りで、理論値を 0.7 倍すれば、ほぼ一致することが判った。次に、最大洗掘深を得るまで累加した単位幅当りの水平方向運動エネルギー \$\Sigma Ex\$、同鉛直方向運動エネルギー \$\Sigma Ey\$、同水平方向力積 \$\Sigma Fx \Delta t\$、同鉛直方向力積 \$\Sigma Fy \Delta t\$ と最大洗掘深 \$\Delta d\$ および洗掘幅 \$B\$ との相関を調べた。その結果を図-8 に示すが、本実験データの範囲内で各間の相関は良好である。

4. 結論

本研究における成果は、以下の通りである。

- 高橋ら (1999) の数値モデルをベースに、通常のパーソナル・コンピュータで、広域の海岸侵食と洗掘の計算を実用レベルの精度で予測できる平面 2 次元数値予測モデルを開発できた。
- 式 (18) を用いて、放物運動モデルの下で求めた最大洗掘位置の計算値と実測値との相関、戻り流れの鉛

直方向の累加運動エネルギーや累加力積と最大洗掘深との相関、戻り流れの水平方向の累加運動エネルギーや累加力積と洗掘幅との相関が各々良好であることも確認できた。実験ケースを増やし、定式化を行うつもりである。

参考文献

- 木原直人・松山昌史 (2007) : 静水圧 3 次元数値モデルを用いた津波による地形変化の数値計算, 海工論文集, 第 54 巻, pp.516 - 520.
- 小林昭男・織田幸伸・東江隆夫・高尾 誠・藤井直樹 (1996) : 津波による砂移動に関する研究, 海工論文集, 第 43 巻, pp.691 - 695.
- 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, 海工論文集, 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, 海工論文集, 第 40 巻, pp. 171 - 175.
- 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, 海工論文集, 第 46 巻, pp. 606 - 610.
- 中村友昭・水谷法美 (2008) : 地盤内部の応力変動の影響を考慮した漂砂量式を用いた遡上津波による地形変化シミュレーション, 海洋開発論文集, 第 24 巻, pp.57 - 62.
- 野口賢二・佐藤慎司・田中茂信 (1997) : 津波遡上による護岸越波および前面洗掘の大規模模型実験, 海工論文集, 第 44 巻, pp.296 - 300.
- 藤井直樹・大森政則・高尾 誠・金山 進・大谷秀夫 (1998) : 津波による海底地形変化に関する研究, 海工論文集, 第 45 巻, pp.376 - 380.
- 堀川清司 (研究代表者) (1983) : 陸上に氾濫した津波の挙動と津波の流動による被災のメカニズムに関する研究, 文部省科学研究費自然災害特別研究研究成果, No.A-58-2, 133p.
- 山本吉道・岩崎伸昭 (2006) : 海岸保全施設の前面海浜変化に注目した安定性検討, 海洋開発論文集, 第 22 巻, pp.781 - 786.
- 山本吉道・ウィブール ウッチャン・飯田邦彦・河合恭平 (2007) : 一般地情情報とインド洋津波被害資料を用いた津波被害の広域推定法構築の試み, 海洋開発論文集, 第 23 巻, pp. 81-86.
- 山本吉道, ウィブール ウッチャン, 有川太郎 (2008) : 津波による海岸被害の予測方法の改良, 海工論文集, 第 55 巻, pp.301-305.
- 横山嘉夫・田辺勇人・中西勝利・加藤史訓・山本吉道・有村 盾一 (2002) : ヘッドランド工法の設計手引き (案) の検討とその適用, 海工論文集, 第 49 巻, pp.936 - 940.
- Nishihata, T., Y. Tajima, Y. Moriya and T. Sekimoto (2006) : Topography change due to the Dec 2004 Indian Ocean Tsunami, Proceedings of ICCE, pp.1456-1468.
- Ribberink, J.S. (1998) : Bed-load transport for steady flows and unsteady oscillatory flows, Coastal Engineering, Vol. 34, pp.59-82.
- Soulsby, R. (1997) : Dynamics of Marine Sands. A Manual for Practical Application, Thomas Telford, UK, 249 p.
- van Rijn, L.C. (1993) : Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuarine and Coastal Seas, Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands.
- Zyserman, J. A. and J. Fredsoe (1994) : Data analysis of bed concentration of suspended sediment, J. Hydraul. Engg., ASCE, 120, pp.1021-1042.