

$$q(x,y) = \frac{\beta_s}{(\rho_s - \rho)gh} \frac{\partial}{\partial x} W_s(x,y) \quad : \quad \frac{\partial W_s}{\partial x} \geq 0$$

$$= 0 \quad : \quad \frac{\partial W_s}{\partial x} < 0$$
(14)

したがって、波エネルギーフラックスの減耗量 $W_s(x,y)$ の空間分布を計算できれば、砕波による海底からの浮遊砂巻き上げ率を求めることが可能になる。

4.2 浮遊砂に対する連続方程式

海底の底質粒子は、砕波によって式(14)の割合で巻き上げられ、浮遊して海浜流で運ばれ、重力によって次第に沈降する。巻き上げ率が沈降率を上回る場所では海底が洗掘され、水深が増加する。巻き上げ率が沈降率よりも少ない場所では、堆積が生じる。鉛直拡散プロセスを無視すると、浮遊砂に対する連続方程式が次のように表される。

$$q - w_f \bar{c} + \frac{\partial(\bar{c}vh)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{c}uh)}{\partial y} = \varepsilon_x \frac{\partial^2(\bar{c}h)}{\partial x^2} + \varepsilon_y \frac{\partial^2(\bar{c}h)}{\partial y^2}$$
(15)

ここに、 ε_x と ε_y は x および y 方向の水平拡散係数、 u と v はそれぞれ x と y 方向の海浜流の速度成分である。

上記の連続方程式を、波浪場の計算から求められる海浜流速度および各地点の浮遊砂巻き上げ率を入力として解くことによって、平均濃度 $\bar{c}(x,y)$ の空間分布が求められる。各地点の水深変化率は、浮遊砂の巻き上げ率と沈降率との差として次式で与えられる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} (q - w_f \bar{c})$$
(16)

ここに、 λ は底質の堆積状態での空隙率である。

ある時間が経過すると、海底は式(16)で計算される速度で水深が変化し、新しい形状となるので、波浪場を再び求めて浮遊砂平均濃度の計算を繰り返す。ここに述べた方式は断面平均の浮遊砂濃度を用いて水深変化の空間分布を求めるので、2HD 型のモデルの一つである。

このモデルは掃流砂を全く考えず、浮遊砂のみを対象としている。このモデルによって海底地形変化がある程度良く予測できるならば、沿岸方向の海浜地形変化の主役が浮遊砂であることの証拠となろう。

4.3 離岸堤に対する新しいモデルの適用例

現在、片山博士は著者と共同で新しい海浜変形モデルによる数値計算を実行中である。Figs. 6~8 は離岸堤背後の水深変化を計算している途中結果である。計算モデルは今後とも改良され、最終結果はここに示すものとは異なるかも知れない。計算条件を以下に記す。

海岸地形：勾配 1/50 の直線状平行等深線海岸，底質粒径 $d = 0.2\text{mm}$

波浪条件： $H_{1/3} = 2.0\text{m}$, $T_{1/3} = 8.0\text{s}$, 直角入射,

離岸堤：長さ 200m, 幅 10m, 設置水深 4m

波高分布と海浜流場は一方向不規則波についてブシネスク方程式で計算し、Fig. 6 のようになった。

波エネルギーフラックスの減耗量は、式(13)に従い、非砕波・砕波時の波浪変形の解析結果から求めた。この計算は、単一周期で 10 方向成分の不規則波を対象として、放物型方程式を用いて行った。放物型方程式を使用したのは、水深ゼロの汀線まで非砕波の浅水変形を計算できるためで、ブシネスク方程式では水深が非常に小さいときに計算不安定を起こす問題がある。すなわち、今のモデルはハイブリッド型である。浮遊砂の巻き上げ率は波エネルギーフラックスの空間減耗率から式(14)で計算し、断面平均濃度は式(15)の連続方程式を解いて、Fig. 7 のような結果を得た。離岸堤の背後では、両側から中央へ向かう二つの高濃度の部分があり、離岸堤の外側からその背後へ浮遊砂が引き寄せられていることを表す。

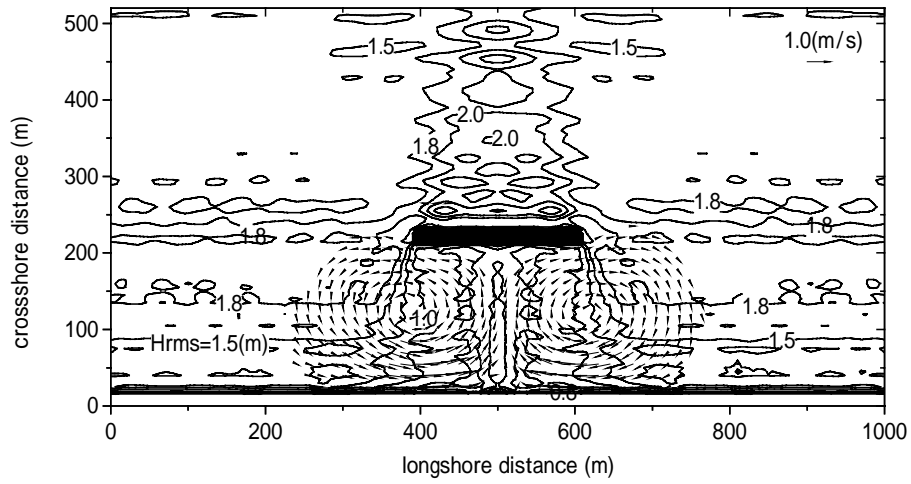


Fig. 6. 離岸堤周辺の H_{rms} と海浜流の分布

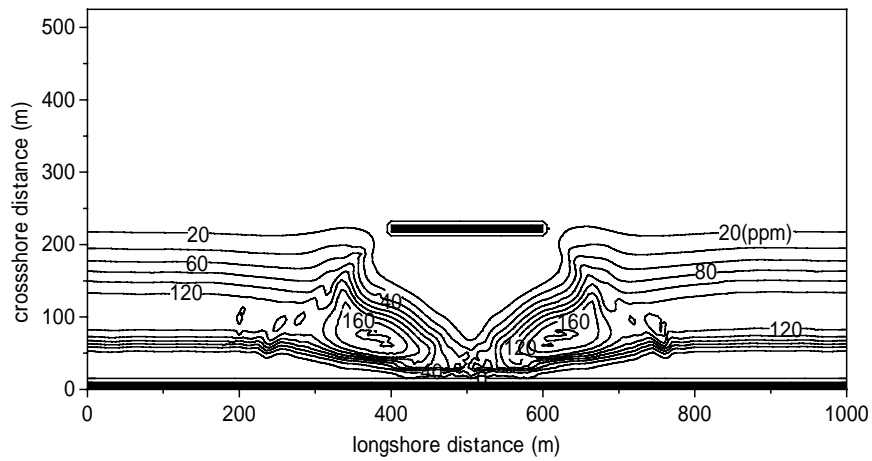


Fig. 7. 断面平均浮遊砂濃度 (ppm) の分布

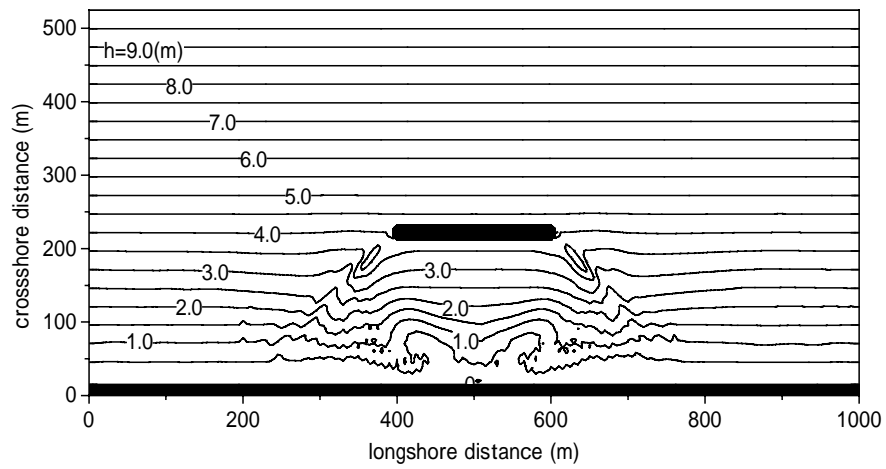


Fig. 8. 水平拡散係数 $\varepsilon = 0.01$ の場合の3日後の等深線

Fig. 8は3日後の離岸堤周辺の等深線を示す。 $x = 450\text{m}$ および 570m 付近では水深 0.5m と 1.0m の等深線が顕著に前進しており、二山形のトンボ口が形成されたことを示している。ここへ堆積した底質は、離岸堤の端部から斜めに岸に向かう部分から運ばれたもので、ここは砕波による巻き上げが著しい場所である。

5. 海浜地形変化に関する今後の研究の方向について

(1) 浮遊砂量に関する現地観測

本論文は、沿岸方向の海浜変形が浮遊砂が主体となって生じるとの見方を取っている。しかし研究者の多くは、逆に掃流漂砂が主体であると考えている。どちらが卓越するかの問題を解決するには、系統的な現地観測を実施して、浮遊砂量に関するさらに多くのデータを取得する必要がある。

砕波帯内の砂の浮遊現象の特徴の一つは、高濃度の浮遊砂雲が間欠的に噴き上がることである。これが何時、どこで起きるかを予測することはむずかしい。計測は1測点当たり数分ではなく、十分に長い時間をかけないと、平均濃度を精度良く測定できない。中間水深から海面に至る浮遊砂濃度の鉛直分布を計測することも必要であり、特に高波時のデータが望まれる。これには、計測用の頑丈なプラットフォームと支柱が欠かせない。十分に練り上げた観測計画がデータ取得の鍵となる。

(2) 海浜流計算の精度

海浜変形の主役が掃流砂から浮遊砂へ代替わりすることは、海浜流システムの役割が重要になることを意味する。掃流砂を主体に考えたこれまでの研究では、波浪や長周期波の変動流速が主役であって、海浜流は砂移動の起動力としては二次的な役割にとどまっていた。しかし浮遊砂が主体となる新しいアプローチでは、海浜流が底質移動の唯一の起動力である。海浜流予測に求められる精度はこれまで以上に高いものとなる。

離岸堤、突堤、人工リーフなどの構造物周辺の海浜流の計算精度は、使用する数値モデルによって異なる。Fig. 6の計算例はブシネスク方程式モデルで求めたものであり、放物型方程式のモデルでは、離岸堤背後に形成される二つの対称形の循環流が十分に中までに入り込めなかった。突堤の先端や離岸堤の両端など、鋭角の端部から発生する離散渦については、現在の数値モデルの大半が処理できない。また、潜堤や人工リーフの上から流れ込む水量は、構造物と汀線間の流況解析にとって重要である。しかし、こうした場所での不規則砕波が十分にモデル化されていないため、越流の予測は初歩的段階にとどまっている。

このように、海岸保全施設周辺の海浜流の予測精度を向上させるためには、さらに多くの努力が必要である。

(3) 波エネルギーフラックス損耗率の算定

浮遊砂輸送に基づく海浜地形変化モデルの構築に当たってもっとも重要な課題は、砕波による砂の巻き上げ率の推定である。これには幾つかのアプローチがあると思われるが、入射波浪条件を与えただけで、任意の地点の砂の巻き上げ率を計算できることが必要である。砕波の位置やその頻度なども、数値モデルの中で自動的に計算できなければならない。

現在のモデルは、浮遊砂巻き上げ率が波エネルギーフラックスの減耗量の空間差分に比例すると仮定している。式(13)で表されるように、エネルギーフラックスの減耗量は、非砕波時と砕波時との差として求めている。このため、波の浅水変形を汀線に至るまで計算可能な波浪変形モデルが必要である。

エネルギーフラックス減耗量の空間差分の計算にも微妙な配慮が必要である。波の入射方向のどの格子点との差分をとるかを判定しなければならない。対応する格子点間の差分を単純に計算しただけでは、浮遊砂巻き上げ率に大きな場所的変動が現れる。現在のモデルでは、多方向の波浪成分を使うとともに、 x, y 両方向の5格子分に対して三角フィルタによる移動平均を行っている。

2次元空間における不規則砕波の計算は、砕波帯内の浮遊砂の巻き上げを直接に影響するので、モデル構築の決め手の部分である。掃流漂砂を主体とした従来のモデルは、支配要因であるシールズ数が砕波帯内でも緩やかに変化するので、事情が異なる。今後は、不規則砕

波の最先端モデルを海浜変形モデルに取り込むことが要請される。

6. あとがき

砕波帯内の砕波による底質の巻き上げ現象は、海浜地形研究の研究では多年にわたって不当に無視されてきた。既往研究の大多数は、地形変化の主たるメカニズムが掃流砂の移動であるとみなしてきた。幾つかの研究では、海浜地形変化の補足要因として浮遊砂の移動を取り込んだ。こうした研究では、海底面での波による水粒子速度がもたらすせん断力の関数として浮遊砂量を表現した。浮遊砂に二次的な役割を当てはめるのは、Bagnold (1946) や Einstein (1948) 以来の海岸堆積学の伝統を反映している。

こうしたアプローチは、短期間の海浜断面の変形予測に部分的な成功を収めている。しかしながら、底質の浮遊プロセスを海浜変形の主役として取り上げない限り、沿岸方向の海浜変形の中・長期的予測の信頼度向上は期待できないであろう。これまでの研究者は、砕波による砂の巻き上げを海浜変形モデルに導入することに消極的であった。このプロセスがあまりに複雑であり、数学的にエレガントな形で取り扱えないことも一因であろう。

若手の研究者各位にお願いしたいのは、研究の方向として、せん断力による掃流砂から砕波による浮遊砂へのパラダイム変換を推進することである。本論文では、砕波による砂の巻き上げ率の簡単なモデルを紹介し、それを用いた二、三の結果を提示した。いわばマクロモデルであり、今後いろいろと改良が必要であろう。しかし、荒削りの現段階においても、幾つもの有望な結果が得られている。計算負荷が極めて小さいので、日々の海浜地形の予測に使用することが容易であろう。実務者が求めているのは、末梢な事項をむずかしく取り扱ったりせずに、オーダー評価を間違わない答えを出せるような、良好でかつ実用的なモデルである。

今後、多くの研究者や技術者が、砕波帯内の砂の巻き上げという魅力的な現象に焦点を切り替え、この現象を取り込んだ新しい海浜地形変化モデルの構築に向けた努力を傾注していただければ、これに過ぎる喜びはない。

謝 辞

4.3 節に紹介した海浜地形変化は片山裕之博士の未公開の計算結果であることを記し、ご厚志に謝意を表する次第である。

参考文献

- Asp Hansen, E., Fredsoe, J., and Deigaard, R. (1994): Distribution of suspended sediment over wave-generated ripples, *J. Water, Port, Coast., and Ocean Engng.*, ASCE, Vol. 20, No.1, pp.37- 55.
- Bagnold, R.A. (1946): Motion of waves in shallow water: interaction between waves and sand bottom, *Proc. Roy. Soc. London*, Vol.187, pp.1-15.
- Bagnold, R.A. (1963): Beach and nearshore processes: Part I. Mechanics of marine sedimentation, *The Sea: Ideas and Observations*, Vol.3, Interscience, New York, pp.507-528.
- Bagnold, R.A. (1966): An approach to the sediment transport problem from general physics, *Geological Survey, US Dept. Interior, Professional Paper 422-I*, pp.11-137.
- Bailard, J.A. (1981): An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach, *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, No.C11, pp.10,938-10,954.
- Bailard, J.A. (1984): A simplified model for longshore sediment transport, *Proc. 19th Int. Conf. on Coastal Engng.*, Houston, ASCE, pp.1454-1470.
- Bayram, A., Larson, M., Miller, H.C., and Kraus, N.C. (2000): Performance of longshore sediment transport formulas evaluated with field data, *Proc. 27th Int. Conf. on Coastal Engng.*, Sydney, pp.3114-3127.
- Beach, R.A. and Sternberg, R.W. (1988): Suspended sediment transport in the surf zone: response to cross-shore infragravity motion, *Marine Geology*, Vol.80, pp.61-79.
- Black, K.P. and Rosenberg, M.A. (1994): Suspended sand measurements in a turbulent environment: field comparison of optical and pump sampling techniques, *Coastal Engineering*, Vol.24, pp.137-150.
- Black, K. P., Gorman, R.M., and Symonds, G. (1995): Sediment transport near the break point associated

- with cross-shore gradient in vertical eddy diffusivity, *Coastal Engineering*, Vol.26, pp.153-175.
- Bijker, E.W. (1971): Longshore transport computations, *J. Wtwy., Harb. and Coast. Engrg.*, ASCE, Vol. 97, No.WW4, pp.687-703.
- Bodge, K.R. and Dean, R.G. (1987): Short-term impoundment of longshore transport, *Proc. Coastal Sediments '87*, ASCE, pp.468-483.
- Dally, W.R. and Barkaszi, S., Jr. (1994): High-resolution measurements of sand suspension by plunging breakers in a large wave channel, *Proc. Coastal Dynamics Conf.*, Barcelona, pp.263- 277.
- Dally, W.R., and Dean, R.G. (1984): Suspended sediment transport and beach profile evaluation, *J. Wtwy., Prt., Coast., and Ocn. Engrg.*, ASCE, Vol.110, pp.15-33.
- Das, M.M. (1972): Suspended sediment and longshore sediment transport data review, *Proc. 13th Int. Conf. Coastal Engrg.*, Vancouver, pp.11-1048.
- Dean, R.G. (1973): Heuristic models of sand transport in the surf zone, *Proc. Conf. Engineering Dynamics in the Surf Zone*, Sydney, pp.208-214.
- Del Valle, R., Medina, R., and Losada, M. A. (1993): Dependence of coefficient K on grain size, *J. Wtwy, Port, Coast., and Ocn. Engrg.*, ASCE, Vol.119, No.5, pp.568-574.
- Detle, H. and Uliczka, K. (1986): Velocity and sediment concentration fields across surf zones, *Proc. 20th Int. Conf. on Coastal Engrg.*, Taipei, ASCE, pp.1062-1076.
- Eagleson, P.S. and Dean, R.G. (1961): Wave-induced motion of bottom sediment particles, *Trans. ASCE*, Vol.126, Part I, pp.1162-1189.
- Einstein, H.A. (1942): Formulas for the transportation of bed load, *Trans. ASCE*, Vol.107, pp. 561-577.
- Einstein, H. A. (1948): Movement of beach sands by water waves, *Trans. Amer. Geophys.Union*, Vol.29, No.5, pp.653-655.
- Fairchild, J.C. (1972): Longshore transport of suspended sediment, *Proc. 13th Int. Conf. Coastal Engrg.*, Vancouver, pp.1069-1088.
- Fredsoe, J., Andersen, O.H., and Silberg, S. (1985): Distribution of suspended sediment in large waves, *J. Wtwy. Port, Coast., and Ocn. Engrg.*, Vol.111, No.6, pp.1041-1059.
- Goda, Y. (1975): Irregular wave deformation in the surf zone, *Coastal Engineering in Japan*, JSCE, Vol.18, pp.13-26.
- Goda, Y. and Watanabe, N. (1991): A longshore current formula for random breaking waves, *Coastal Engineering in Japan*, JSCE, Vol.34, No.2, pp.159-175.
- Greer, M.N. and Madsen, O.S. (1978): Longshore sediment transport data: a review, *Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Engrg.*, Hamburg, pp.1563-1576.
- Hallermeier, R.J. (1980): Sand motion initiation by water waves: two asymptotes, *J. Wtwy., Port, Coast., and Ocn. Engrg.*, ASCE, Vol.106, No.WW3, pp.299-318.
- Hanes, D.M. and Huntley, D.A. (1986): Continuous measurements of suspended sand concentration in a wave dominated nearshore environment, *Continental Shelf Res.*, Vol.6, No.4, pp.585-596.
- Ikeno, M., Shimizu, T., Kubo, M., and Sadamori, Y. (1998): Development and verification of 3D beach morphology model in consideration of wave multidirectionality and suspended sediment, *Proc. Japanese Conf. Coastal Engrg.*, JSCE, Vol.45, pp.531-535 (in Japanese).
- Jaffe, B.E. and Sallenger, A., Jr. (1992): The contribution of suspension events to sediment transport in the surf zone, *Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Engrg.*, Venice, ASCE, pp.2680-2693.
- Kalinske, A. A. (1947): Movement of sediment as bed load in rivers, *Trans. Amer. Geophy. Union.*, Vol.28, No. 4, pp.615-620.
- Kamphuis, J.W. (1991): Alongshore sediment transport rate, *J. Wtwy., Port, Coast. and Ocn. Engrg.*, ASCE, Vol.117, No.WW6, pp.624-640.
- Kana, T.W. and Ward, L.G. (1980): Nearshore suspended sediment load during storm and post-storm conditions, *Proc. 17th Int. Conf. on Coastal Engrg.*, Sydney, ASCE, pp.1158-1173.
- Katayama, H. and Goda, Y. (1999): Sediment suspension by random breaking waves evaluated from the CERC formula, *Proc. Coastal Sediments '99*, Long Island, New York, ASCE, pp.1019-1033.
- Katayama, H. and Goda, Y. (2000): A sediment pickup rate formula based on energy dissipation rate by random waves, *Proc. 27th Int. Conf. Coastal Engrg.*, Sydney, ASCE, pp.2859-2872.
- Komar, P.D. (1978): Relative quantities of suspension versus bed-load transport on beaches, *J. Sedimentary Petrology*, Vol.48, No.3, pp.921-932.
- Komar, P.D. (1988): Environmental controls on littoral sand transport, *Proc. 21st Int. Conf. on Coastal Engrg.*, Malaga, Spain, ASCE, pp.1238-1252.
- Kuroiwa, M., Noda, H., Kato, K., Taniguchi, N., and Song, S. (1999): Predictions of 3D beach deformations around coastal structures using a quasi-3d nearshore current model, *Proc. Japanese Conf. Coastal Engrg.* JSCE, Vol.46, pp.616-620 (in Japanese).
- Larsen, L.H., Sternberg, R.W., Shi, N.C., Marsden, M.A.H., and Thomas, L. (1981): Field investigations

- of the threshold of grain motion by ocean waves and currents, *Marine Geology*, Vol.42, pp.105-132.
- Leont'yev, I.O. (1997): Short-term shoreline changes due to cross-shore structures: a one-line numerical model, *Coastal Engineering*, Vol.31, pp.59-75.
- Leont'yev, I.O. (1999): Modelling of morphological changes due to coastal structures, *Coastal Engineering*, Vol.38, pp.143-166.
- Lundgren, H. and Sorensen, T. (1957): A pulsating water tunnel, *Proc. 6th Conf. Coastal Engrg.*, Florida, p.356-358.
- Manohar, M. (1955): Mechanics of bottom sediment movement due to wave action, *Beach Erosion Board, Tech. Memo.*, No.75, 121p.
- Miller, H.C. (1999): Field measurements of longshore sediment transport during storms, *Coastal Engineering*, Vol. 36, pp.301-321.
- Nadaoka, K., Ueno, S., and Igarashi, T. (1988a): Sediment suspension due to large scale eddies in the surf zone, *Proc. 21st Int. Conf. on Coastal Engrg.*, Malaga, Spain, pp.1646-1660.
- Nadaoka, K., Ueno, S., and Igarashi, T. (1988b): Field observation of three-dimensional large-scale eddies and sediment suspension in the surf zone, *Coastal Engineering in Japan*, JSCE, Vol.31, No.2, pp.277-287.
- Nicholson, J., Broker, I., Roelvink, J.A., Price, D., Tanguy, J.M., and Moreno, L. (1997): Intercomparison of coastal area morphodynamic models, *Coastal Engineering*, Vol.31, pp.97-123.
- Nielsen, P. (1984): Field Measurements of time-averaged suspended sediment concentrations under waves, *Coastal Engineering*, Vol.8, pp.51-72.
- Nielsen, P. (1986): Suspended sediment concentrations under waves, *Coastal Engineering*, Vol. 10, pp.23-31.
- Osborne, P.D. and Greenwood, B. (1992): Frequency-dependent cross-shore suspended sediment transport. 1. A non-barred shoreface, *Marine Geology*, Vol.106, pp.1-24.
- Peters, K. and Dette, H.H. (1999): Sediment suspension in the surf zone, *Proc. Coastal Sediments '99*, Long Island, New York, ASCE, pp.195-208.
- Ribberink, J.S. and Al-Salem, A.A. (1995): Sheet flow and suspension of sand in oscillatory boundary layers, *Coastal Engineering*, Vol.25, pp.205-225.
- Roelvink, J.A. and Reniers, A.J.H.M. (1995): LIP11D delta flume experiments - A dataset for profile model validation - , *Data Report*, Delft Hydraulics.
- Roelvink, J.A. and Stive, M.J.F. (1989): Bar-generating cross-shore mechanisms on a beach, *J. Geophys. Res.*, Vol.94, No.C4, pp.4785-4800.
- Rubey, W.W. (1933): Settling velocities of gravel, sand, and silt, *American Jour. of Science*, Vo.25, No.148, pp.325-338.
- Schoonees, J.S. and Theron, A.K. (1994): Accuracy and application of the SPM longshore transport formula, *Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Engrg.*, Kobe, ASCE, pp.2595-2609.
- Schoonees, J.S. and Theron, A.K. (1996): Improvement of the most accurate longshore transport formula, *Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Engrg.*, Orland, Florida, ASCE, pp.3652-3665.
- Scott, T. (1954): Sand movement by waves, *Beach Erosion Board Tech. Memo.*, No.48, 37p.
- Shimizu, T., Ikeno, M., Okayasu, A., Kuriyama, Y., Sato, S., Shimada, H., Shimizu, T., Takewaka, S., and Nishi, R. (1996): Simultaneous observations on irregular waves, currents, suspended sediment concentration and beach profile changes with large wave flume, *Proc. Japanese Conf. Coastal Engrg.*, JSCE, Vol.43, pp.491-495 (in Japanese).
- Sleath, J.,F.A. (1982): The suspension of sand by waves, *J. Hydraulic Res.*, Vol.20, No.5, pp.439-452.
- Thornton, E.B. (1972): Distribution of sediment transport across the surf zone, *Proc. 13th Int. Conf. on Coastal Engrg.*, Vancouver, pp.1049-1502.
- U.S. Army Corps of Engrs., Coastal Engrg. Res. Center (1984): *Shore Protection Manual* (3rd Ed.), U.S. Gov. Print. Office.
- Van Rijn, L.C., Niewjaar, M.W.C., van der Kaay, T., Nap, E., and van Kampen, A. (1993): Transport of fine sands by currents and waves, *J. Wtwy., Port, Coast., and Ocn. Engrg.*, ASCE, Vol.119, No.2, pp.123-143.
- Van Wellen, E., Chadwick, A.J., and Mason, T. (2000): A review and assessment of longshore sediment transport equations for coarse-grained beaches, *Coastal Engineering*, Vol.40, pp.243-275.
- Wang, P., Kraus, N.C. and Davis, R.A., Jr. (1998): Total longshore sediment transport rate in the surf zone - field measurement and empirical predictions, *J. Coastal Res.*, Vol.14, pp.269-282.
- Watanabe, A. (1992): Total rate and distribution of longshore sand transport, *Proc. 23rd Int. Conf. on*

- Coastal Engrg.*, Venice, ASCE, pp.2528-2541.
- Williams, J.J., Rose, C.P., Thorn, P.D., Coates, L.E., West, J.R., Harcastle, P.J., Humphery, J.D., Moores, S.P., and Wilson, D.J. (1996): Observed suspended sediments in storm conditions, *Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Engrg.*, Copenhagen, ASCE, pp.3257-3269.
- You, Z.-J. (2000): A simple model of sediment initiation under waves, *Coastal Engineering*, Vol.41, pp.399-412.