

漂砂対策検討のための2次元海浜変形予測システム

小野 信幸*・入江 功**・武若 聡***

1. はじめに

砂浜の保全技術としては、最近いろいろな提案がなされている。もし種々の代替案の漂砂対策工法による海浜変形を正しく相互比較出来れば、たとえそれらが室内実験の規模のものであっても多くの貴重な指針を得ることが出来る。海浜変形を移動床水理実験で再現する場合、諸現象は真値で生起しているわけであるが、実験ケースを全く同じ状態で2度再現すること、すなわち「実験の再現性」に極めて乏しく、代替案の微妙な違いの比較評価が困難である。一方数値計算は、その「再現性」は完璧であるが複雑な水理現象の取り込みに限界がある。

本論文は、水理実験と数値計算それぞれの長所を生かすことで、漂砂対策工法をより精度良く評価検討するための海浜変形の予測システムを構築するものである。その前提として、(1)海浜断面形状は、漂砂対策を必要とする現地の海岸から与えられるもので、与件である。そして、その断面は代表波浪に対して平衡状態にある、(2)養浜・土捨て・構造物設置などの漂砂対策後の海浜変形は、平衡状態を保ってきた波浪特性が変化し、その「変分」に応じた海浜の変形過程を正しく計算することで求まる、などと仮定した。以下本システムを図-1のフローに基いて述べる。

2. 底質移動のモデル化

2.1 浮遊砂の平均移動速度 V_{sg}

今回は室内実験スケールの漂砂現象を対象にしているので、砂れん上の底質移動が重要となる。まず波の半周期間に砂れん頂部付近で掃流移動する底質の全量を、岸向き・沖向き別に Madsen・Grant (1976) の式 $\phi(t) = 40\psi^3(t)(\phi(t): \text{無次元漂砂量}, \psi(t): \text{Shield 数})$ を用いて求めた。そのうち r (巻き込み率) の割合が砂れん下流側の後流渦に巻き込まれ、残りの $(1-r)$ の部分は掃流移動分として流下後そのまま沈降するものとした。この巻き込まれた底質は、その後の反転する流れに乗って拡散浮

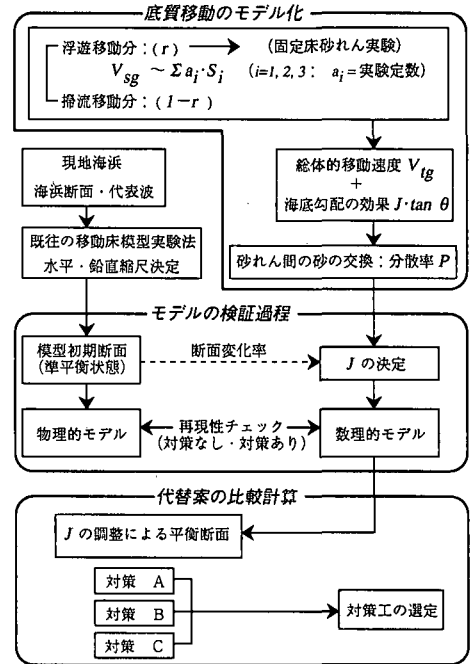


図-1 海浜変形予測システムのフロー

遊し、ある浮遊砂分布を形成しつつ移動するが、この過程が複雑なので同じ波の条件、砂れん特性の固定床実験により浮遊にあずかる底質の平均移動速度 V_{sg} を求めた。まず固定床砂れんの谷部に一箇所 20 g の砂を 4 列に置き、一定の時間波を作用させた後に各々の砂れんの谷に残る砂を採取して計量し、全体の平均移動速度 V_g を求めた。多くの実験の結果、この V_g は図-2 に示す波の上下の非対称 $S_1 = (H_c - H_s)/H$ 、前後の非対称 $S_2 = (L_r - L_f)/L$ 、砂れんの波形の歪み $S_3 = (\lambda_r - \lambda_f)/\lambda$ を用いて以下の様に表わすことができた。

$$V_g^* = \sum a_i \cdot S_i \quad (i=1, 2, 3) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $V_g^* = (V_g/U_m)(w/U_m)(h/\eta)$ (沖向き正) であり、 U_m, w, h, η はそれぞれ底面軌道最大流速、底質沈降速度、水深、砂れん波高、 $a_1 = 0.044, a_2 = -0.028, a_3 = 0.033$ である。(1)式による値と実験値との相関係数は、0.91 であった。この V_g は、波作用後に砂れんの谷に沈殿した

* 学生会員 工修 九州大学大学院 工学研究科

** 正 会 員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科

*** 正 会 員 工博 筑波大学講師 筑波大学造工学系

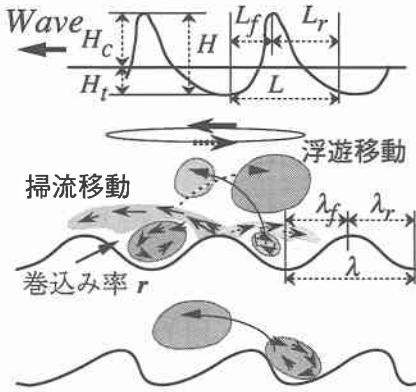
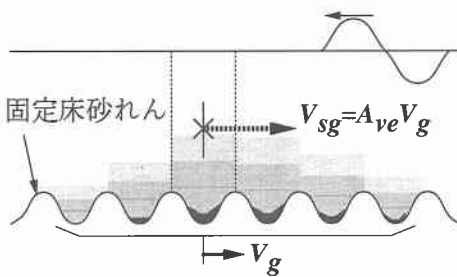


図-2 砂れん上の砂移動の模式図

図-3 固定床上の砂の移動と V_{sg} の関係

砂の平均移動速度である。これより、波作用下で浮遊移動している砂の平均移動速度 V_{sg} を求めるため、図-3に示すように、 $V_{sg} = A_{ve} \cdot V_g$ と仮定したとき、固定床上の砂の移動状況を最も良く再現する様に A_{ve} を定めた。後述の方法で浮遊砂の数値シミュレーションを行なった結果、 $A_{ve} = 4 + 15.2(\Psi - 8.7)\exp[-(\Psi - 8.7)/4.2]$ が得られた。ここで、 $\Psi = U_m^2/(s-1)gd$ (s : 比重、 d : 粒径、 g : 重力加速度) である。この浮遊砂の平均移動速度 V_{sg} は、同じ波、砂れん形状条件の移動床の場合にも適用できるものとした。すなわち、移動床における浮遊砂の鉛直方向積分値 Q_s に、この V_{sg} を掛けることにより岸沖方向の浮遊移動フラックスを求めた。なお、浮遊砂の鉛直分布の式には、Skafel・Krishnappan ら (1984) の式を用いた。

2.2 総体的移動速度 V_{tg}

水平床における岸沖方向の全漂砂量を求めるには、上記の浮遊移動フラックスに加え掃流移動量を求める必要がある。ここでは、岸向き・沖向きの流れの位相における半周期間の掃流砂の全量に対し、巻き込み率 r を除いた量を Q_{bon} , Q_{boff} で表わし、それらの重心が半周期間に移動する平均移動速度をそれぞれ V_{bon} , V_{boff} としたとき、移動にあずかる全砂量 $Q_t (= Q_{bon} + Q_{boff} + Q_s)$ の平均

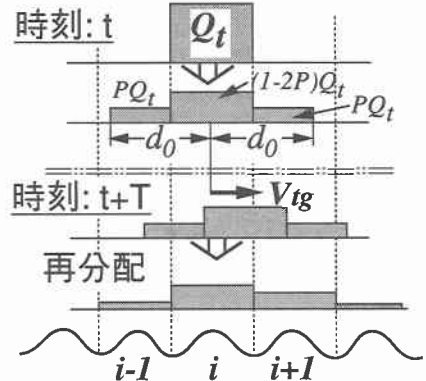


図-4 OM プロセス

移動速度 V_{tg} は、次のように表わせるものとし、これを総体的移動速度とよんだ。

$$V_{tg} = (Q_{bon} V_{bon} + Q_{boff} V_{boff} + Q_s V_{sg}) / Q_t \quad \cdots (2)$$

2.3 砂れん間混合を伴う移動過程 (OM プロセス)

図-4に示すように、水平移動床の砂れん i 上で移動にあずかる全量 Q_t が、左右均等に分配率 P で水粒子軌道全振幅 d_0 の範囲に分散するものとする。これが形を変えずに移動速度 V_{tg} で移動するものとし、一周期後に各砂れんに再分配する。このプロセスが生起する箇所(砂れん)を乱数を用いて選択し、すべての砂れんに対し重複することなく施して波の一周期分の計算を完了する。この一連のプロセスをOMプロセス (Oscillatory Movement Process) と呼ぶことにする。このとき、分配率 P は、固定床砂れん上の砂の分散移動状況の再現結果から $P=0.3$ とした。

2.4 浮遊巻き込み率 r の決定

OMプロセスにより水平移動床での岸沖方向漂砂量を計算するには、巻き込み率 r を決定する必要がある。そこで図-5に示すように、本モデルに種々の r の値を代入した時の無次元漂砂量 $\Phi (= (1-n)(Q_t/\lambda) V_{tg}/wd, n$: 空隙率) と渡辺 (1981), 砂村 (1984) による経験式とを最大 Shield 数 Ψ を用いて比較した。渡辺の式は一樣勾配斜面での海浜変形実験より得られたもので、水平床上で得られたものとは異なるが、今後対象とする現象を考慮し、ここでは $r=0.4$ を選定した。

3. 底面が勾配を持つ場合の考察

自然海浜のように底面が勾配を持つ場合は、波高や波の上下の非対称 S_1 , 前後の非対称 S_2 が変化し、さらに水深が浅いほど水粒子軌道全振幅 d_0 が大きいことによる沖向き漂砂の存在 (小野ら, 1996), 底面勾配に伴う重力の効果による沖向きの漂砂の発生, 碎波の発生等が加わって、非常に複雑になる。そこで本研究では、これら

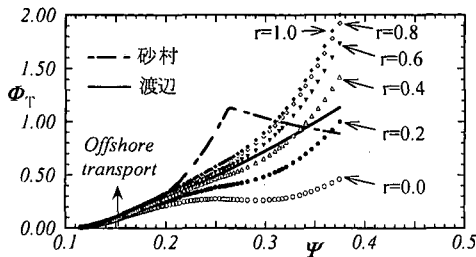


図-5 巻込み率 r による漂砂量の変化

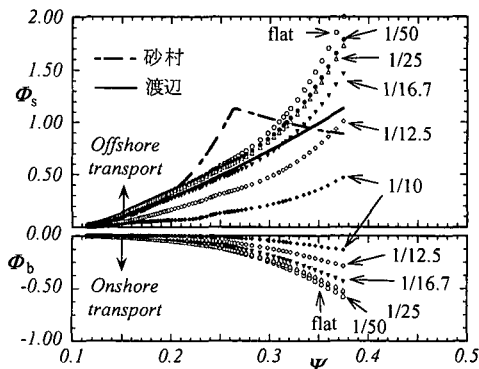


図-6 海底勾配変化による漂砂量の変化

を以下の様に取り扱った。(1)波高については、砕波前を首藤(1974)の浅水変形理論により、砕波後は合田による砕波波高式によった。(2) S_1 , S_2 については、武若ら(1996)が直線勾配の固定床に対する理論と実験により求めた経験式を用いた。(3)砂れん間の水粒子軌道全振幅 d_o の違いによる沖向き漂砂については、OM プロセスの中で取り入れた。(4)重力の効果については、底面勾配 $\tan \theta$ に比例して増加するものとし、その比例定数 J は、岸沖方向に異なるものとした。(5)砕波帯内では、戻り流れを考慮した。

傾斜海浜の沖浜帯における総体的移動速度 V_{ω} は、海底勾配の効果を考慮して次の様に表わした。

$$V_{\omega} = V'_{\omega} + J' \tan \theta \\ = (V_b + V_s) + J' \tan \theta \dots \dots \dots (3)$$

ここで V_b , V_s は V_{ω} 中の掃流・浮遊の各成分を表わす。図-5に示したように、水平床の場合は著しい沖向きの漂砂が発生する。底面の勾配が増大する場合の V_b , V_s の変化に伴う岸沖漂砂成分 (ϕ_b , ϕ_s) の変化を図-6に示す。それぞれの漂砂成分は、 V_b は岸向き、 V_s は沖向きであるが、その傾向は勾配の増大とともに減少する。直線状の底面勾配が $1/10 \sim 1/30$ の場合は、今回対象としている底質粒径や波に対しては、著しい沖向きの漂砂が発生することから、この場合の V_{ω} はかなり大きいものと考えねばならない。しかし今回は平衡海浜に近い(すなわち V_{ω} が非常に小さい)状態を初期条件とし、これからの地形変動量を求めるものであり、直線勾配からの変動状況とは条件がかなり異なる。そこで重力の効果に関係する定数 J' は、平衡海浜に近い状態について以下の検証段階で求めることにした。

4. モデルの検証過程

4.1 模型初期断面の作成

本研究の目的は、ある特定の対象海浜が現地にあり、一定の相似条件を満足する模型海浜を試行錯誤により水槽内につくり(物理的モデル)、その海浜の漂砂現象を出来るだけ忠実に再現するソフト(数理的モデル)を構築してその再現性を検証するものである。現地の海浜が長

表-1 移動床実験の実験ケース

Case	H (m)	T (s)	$\tan \theta_i$	time(hr)	測定項目
1 規則波	8	1.5	1/30	20	
2 不規則波	8	1.5	1/30	106	蛍光砂移動
3 不規則波	7	1.4	1/30	106	海底掘削

* H : 波高, T : 周期, $\tan \theta_i$: 初期海底勾配
 * 底質は全て中央粒径 $d=0.16$ mm, 比重 $s=2.65$ の砂を用いた
 * 沖側一様水深部は $h=35$ cm である。

期的には準平衡状態にあることから、模型海浜も完全に平衡断面を対象にしたいところであるが、これは一般に不可能なので、平衡状態に近い断面について、物理的モデルと数理的モデルをつくり、再現性を調べた。その上で、数値的に完全な平衡断面をつくり、漂砂対策の効果を純粋に取り出すことにした。表-1に本論文に引用する模型初期断面の波の条件を示す。

4.2 数値計算における代表波の選定

これまで数理的モデルの構築はすべて規則波を前提にしている。これに対し検証用の物理的モデルは不規則波に依ることにした。その理由は、模型海浜に規則波を用いると、部分反射波の影響等、岸沖漂砂は連続性を失い、正しい再現が出来ないからである(中野ら, 1996)。模型海浜に規則波と不規則波を作用させたときの違いについてはこれまでいくつかの研究がなされている。それによれば、海浜の断面形状は、規則波の波高と同じ有義波高を用いたとき、砂れん形状や沿岸砂洲の位置等の特性が最も類似しているという結果となっており(大塚ら, 1984)、著者等の実験でも同じ結果を得た。ただし断面の時間的変化率は互いに相当異なる。図-7は、Case 1と2について、沖浜帯の沖向き漂砂量の時間変化を示したものである。これらはともに直線勾配の初期断面に波を作用させた初期の状態(初期漂砂量)から準平衡状態(準平衡漂砂量)へと漂砂量が減少している。また、規則波の場合の初期漂砂量は、渡辺(1981)の漂砂量式とほぼ

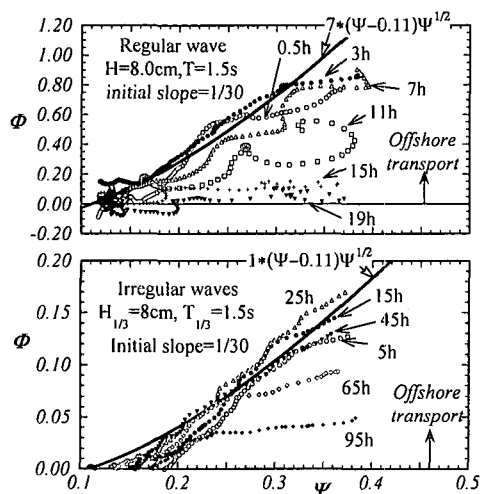


図-7 沖向き漂砂量の時間変化

一致している。不規則波の場合、初期漂砂量は規則波の場合の約 1/7 の変化速度となっており、先の規則波を前提とした総体的移動速度 V_{ig} には、修正係数が必要である事が分かる。

4.3 準平衡断面状態における漂砂特性

図-7 に示すように、直線勾配の海岸に波を作用させた時には、かなりの沖向きの漂砂が発生した。しかし波を長時間作用させると断面は平衡状態に近づき、漂砂量は非常に小さくなる。この場合の総体的移動速度 V_{ig} はどうなっているのだろうか。波による底面付近での振動流速に有意な変化があったとは考えにくい。したがって、掃流移動による平均移動速度 V_b に大きな変化があったとは思われない。結局、平衡状態に近くなると、浮遊砂濃度が減少すること、 S_1 , S_2 等の組み合わせが移動フラックスを小さくすること等が考えられる。そこで今回は、準平衡状態での総体的移動速度 VTG として、

$$VTG = C_{irr}(V_b + \beta V_s + J \tan \theta) \dots \dots \dots (4)$$

として先の V_{ig} を修正した。これらの係数、 C_{irr} , β , J は、物理的モデルから求めた。ここに、 C_{irr} は、物理的モデルが不規則波に依っている事による係数、 β は、準平衡断面であることによる係数である。その結果、 $C_{irr}=1/7$ (Case 2), $2/7$ (Case 3) であり、 β と J は、準平衡断面の形状と各位置での残留岸沖漂砂量、および図-8 に示すような、沖浜帯を掘削した後の海岸変形状況から求め、以下の再現計算の場合には $\beta=0.6$ が得られた。

4.4 底質移動状況の再現 (蛍光砂の分散移動)

本モデルでは、数値上の底質移動の特性が物理的モデルとほぼ等しいことを、蛍光砂の分散移動状況を再現することで調べることができる。図-9 は Case 2 の場合について、上の方法で定めた係数を用いて断面形状と漂砂

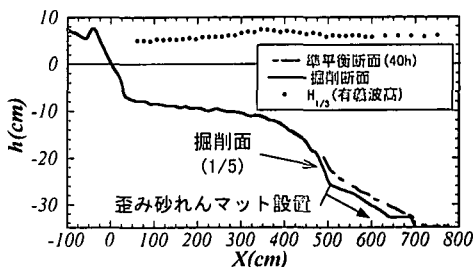


図-8 準平衡海岸断面と海底掘削位置 (Case 3)

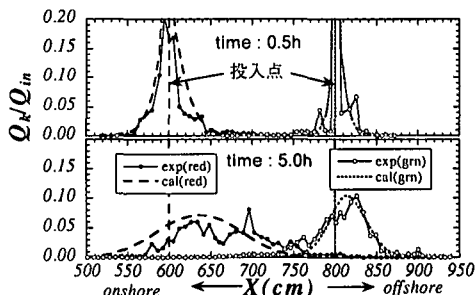


図-9 蛍光砂移動の比較 (Case 2)

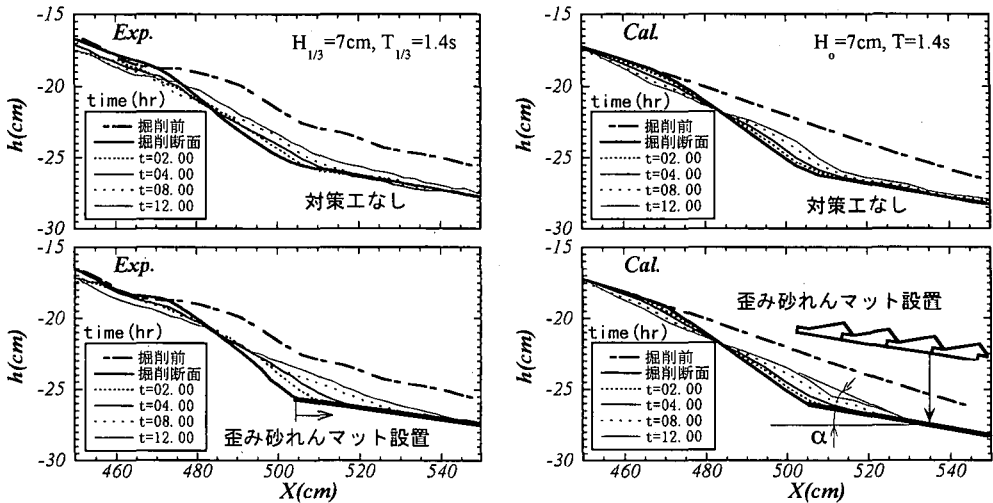
量を等しくした場合について、砕波点 (red) と沖浜帯 (grn) に投入された蛍光砂移動の様子を数値モデルで再現した結果である。蛍光砂の平均的な移動や分散状況が物理モデルと数値モデルでよく対応していることが確認される。

5. 代替案の比較計算

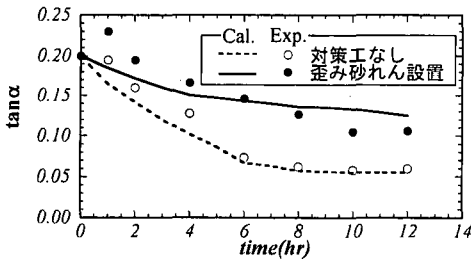
養浜された海岸の法止め工法は、養浜砂の保全の観点から極めて重要である。そこで図-8 に示すように、養浜された砂浜の沖側端が、急勾配に法止めされた場合の先端崩壊を、図-2 の下段に示すような砂れん後流渦の非対称性により砂移動方向を岸向きに制御する垂み砂れんマットを用いて防止する場合について、数理的モデルと物理的モデルの比較を行なった。

図-10 は、法面の崩壊の様子を垂み砂れんにより対策工を施す場合と施さない場合についての実験と計算結果を示したものである。実験では、初期断面状態が微妙に異なるので定量的な評価が不可能であるが、計算では初期状態を完全に等しくすることができるので対策工の効果の比較評価が可能となる。図より法面の堆積と欠損の位置などは実験と良く一致しており、計算による対策工の比較が可能な精度であると考えられる。

図-11 は、図-10 (右下) 中に示すように、崩壊土砂と沖側の掘削断面とのなす角 α の時間変化を示したものである。図によれば、実験・計算共に、垂み砂れんマットを設置した場合は、対策工なしの場合より α が急勾配



図一〇 掘削法面崩壊の様子 (波の条件: Case 3)



図一〇 掘削法面崩壊の様子 (波の条件: Case 3)

で保たれており, 歪み砂れんマットにより養浜土砂の沖向き流出が阻止された様子が認められた。

6. 結 論

(1) 波の上下の非対称, 前後の非対称, 砂れん形状の歪みを考慮し, 砂れん間の砂の交換, 海底勾配の効果をとり入れることにより, 物理的モデルに極めて類似した数理的モデルを構築した。

(2) モデルの再現性を検証しつつ, 漂砂対策の効果の微妙な違いを検出し, 比較検討することが可能なシステムを提案した。

参 考 文 献

入江 功・小野信幸・村上啓介・橋本誠也・中村 聡 (1993): 歪み砂れんマットによる沖浜帯の岸沖漂砂の制御, 海岸工学論

- 文集, 第40巻, pp. 561-565.
- 入江 功・柴山知也・渡辺 晃 (1985): 不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂量, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 316-320.
- 小野信幸・入江 功・中野 優・武若 聡 (1996): 海底の傾斜に伴う砂れん間の砂分散量の差を考慮した底質移動モデル, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 466-470.
- 大塚行則・三村信男・渡辺 晃 (1984): 不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 321-325.
- 首藤伸夫 (1974): 非線形長波の変形, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 57-63.
- 砂村継夫 (1982): 浅海域の岸沖漂砂量に関する実験的研究, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 239-243.
- 武若 聡・入江 功・深川孝之 (1996): 浅海域の水面波形と底面流速波形の非対称特性, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 146-150.
- 中野 優・小野信幸・入江 功・武若 聡 (1996): 規則波による海浜変形の形成過程と底質移動特性について, 第51回年次学術講演会講演概要集, pp. 126-127.
- 橋本誠也・入江 功・村上啓介・小野信幸・小島治幸 (1993): モンテカルロ法を用いた海浜変形の数値計算, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 366-370.
- 渡辺 晃 (1981): 海浜流と海浜変形の数値シミュレーション, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 285-289.
- Madsen, O. S., and W. D. Grant (1976): Quantitative description of sediment transport by wave, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1093-1112.
- Skafel, M. G. and B. G. Krishnappan (1984): Suspended sediment distribution in wave field, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol. 110, No. 2, pp. 215-230.