

不規則波浪下でのシートフローによる漂砂量算定式

山下 淳平*・Mohammad Dibajnia**・渡辺 晃***

1. はじめに

高濃度の砂層を含む固液混相流であるシートフロー状移動は、多量の土砂移動を伴うために海浜変形を考える上で非常に重要な現象である。これまでに種々の実験的、数値的研究がなされ、シートフロー状移動の特性について様々な知見が得られている。そのなかで漂砂量に関する実験的研究としては、半周期正弦振動流作用下での漂砂量を測定した山下ら (1984) の研究、大型振動流水槽で正味 (net) の漂砂量を測定した Ribberink・Al Salem (1990) の研究、非対称振動流と定常流との共存場での漂砂量を測定した Dibajnia・Watanabe (1992) の研究、着色粒子群の移動状態を撮影したビデオの解析から漂砂量を求めた浅野ら (1993) の研究などが挙げられる。

しかし、これらの研究はすべて規則波に対するものであり、実際の海のような不規則波浪場においてシートフロー漂砂がどのような挙動を示すかは明らかにされていない。そこで本研究では、振動流装置を用いた実験を行うことによって、不規則な波浪条件の下でのシートフロー状移動の様子を観察するとともに、漂砂量を測定し漂砂量算定式を提案することを目的とする。不規則波浪下での漂砂移動についてシートフロー状移動を対象とした研究は例がないが、砂漣上の漂砂移動については大塚ら (1984)、佐藤ら (1986)、(1987) 等によって報告されている。

さて、現地海岸における漂砂移動は多くの要因が作用し合い、極めて複雑な現象となっている。これらの多くの要因の中からいくつかを選択し、制御された条件下で実験を進めることによって、個々の要因が及ぼす影響を解析できることが室内実験の利点である。今回の研究では、波の不規則性に加え、浅海域で顕著に見られる非線形性、さらには流れの影響をも考慮した条件下でのシートフロー漂砂の移動機構と漂砂量について考察する。

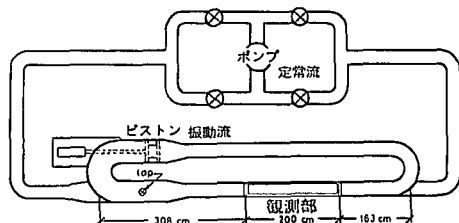


図-1 実験装置

2. 実験の概要

(1) 実験装置および方法

実験には図-1に示すような任意波形振動流装置を用いた。この振動流装置はピストンとポンプを有しており、振動流と定常流（順流、逆流）を同時に作用させることが可能である。観測部には長さ 160 cm の砂床部分を設け、砂が観測部外に流出しないように両端にサンドトラップを設置した。実験方法は、(1) 観測部を岸沖方向に二分するように区切り板を置き、両側に等量の砂（粒径 $d=0.2$ mm、沈降速度 $w_b=2.3$ cm/s）を平坦に敷き詰める。(2) 水をゆっくりと入れた後、不規則信号を入力し振動流装置を駆動させる。(3) 実験終了後、岸側、沖側別々に砂を採取し、それぞれの乾燥重量を計測し、それらの増減分を平均する。以上の方法で観測部中央断面を通過した砂の量を測定し、正味の無次元漂砂量を算出した。実験のケース数は、振動流のみで 24 ケース、振動流および定常流（順流、逆流）で 11 ケース、全部で 35 ケースである。

(2) 不規則信号について

振動流装置のピストンは入力された信号にしたがって作動するが、この入力信号としては底面流速データを時間について数値積分したものを与えることが適当である。底面流速データの作成方法は、数値モデルを用いた計算による方法と実験による方法が考えられるが、本研究では後者を選択した。

まず、正弦波の重ね合わせによって、Bretschneider・光易型、JONSWAP 型のスペクトルを有する不規則波の水位変動を計算し、これを勾配 1/16 の 2 次元造波水路

* 正会員 株式会社 大林組
 ** 正会員 工博 東京大学助教授 工学系研究科社会基盤工学専攻
 *** 正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻

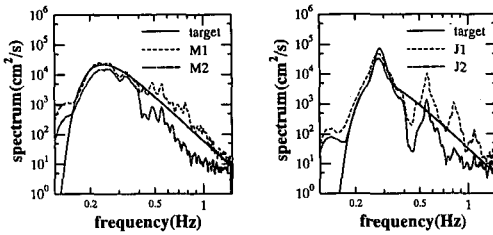


図-2 底面流速のスペクトル分布

表-1 底面流速データの歪み度

	M1	M2	J1	J2
歪み度	0.96	0.46	1.10	0.52

(一様水深部 40 cm) に入射させた。この時、砕波帯のすぐ沖側の底面付近に電磁流速計を設置して底面流速を測定した。測定ポイントは P1 (水深 6 cm), P2 (水深 11 cm) の 2 点である。この様にして得られた底面流速データからノイズ等を取り除き、フルード相似則にしたがって加工したものを数値積分して不規則信号とした。以上の様にスペクトル型を 2 種類、測定ポイントを 2 点とすることで、不規則性・非線形性の異なる 4 種類の底面流速データ (M1, M2, J1, J2) を作成した。ただし M, J は Bretschneider・光易型, JONSWAP 型を表し, 1, 2 は P1, P2 で測定された流速データであることを示している。

次に各流速データの特徴について述べる。まず、図-2 はそれぞれの流速データのスペクトル分布を示したものである。データ J1, J2 では、ピーク周波数の 2 倍だけでなく 3 倍、4 倍の位置にも小さなピークが見られる。

図-3 は底面流速の頻度分布を示したものである。この図から、実験で与えた流速の度数分布はすべて、ピークが 0 cm/s よりも左に位置しており、右に長く裾を引いた分布形になっていることがわかる。この様に流速の頻度分布が正規分布 (点線) から外れることは、波の非線形性を表すものと解釈されている。また、このずれは歪み度によって定量的に評価することができる。歪み度は頻度分布が左にずれたときに正の値を、右にずれたときに負の値を取り、値が増加するにつれて非線形性が強くなることがわかっている。したがって今回の流速データでは J1, M1, J2, M2 の順で非線形性が大きいと考えることができる。

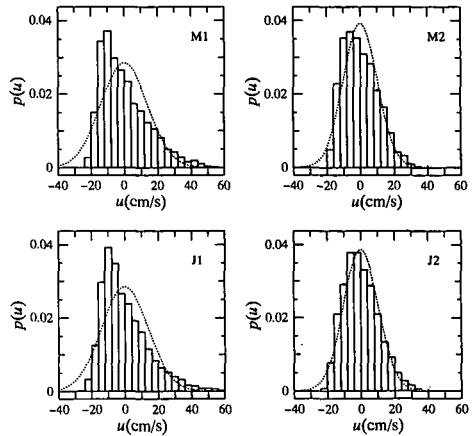


図-3 底面流速の頻度分布

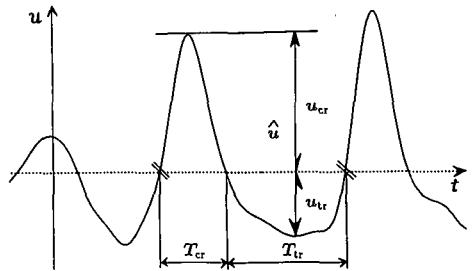


図-4 表-2 中の記号の定義

個々の波は、振動流の時系列データと定常流速を重ね合わせて得られる流速変動データに対してゼロアップクロス法を適用することによって定義した。表に示した値 (u_{cr} , u_{tr} , T_{cr} , T_{tr} , $u_{cr}/\bar{u}$) は、以上の方法により定義された波の諸元の有義値を表している。ただし、 U は定常流速、 Φ_{net} は正味の無次元漂砂量である。 ω_{cr} については後述する。

(2) 不規則性と漂砂量

図-5 は横軸に有義流速、縦軸に無次元漂砂量をとって、スペクトル型と漂砂量との関係を示したものであるが、図からわかるように、スペクトル型の異なる 2 種類のデータ群の間に有意な差は見られない。一般に、狭帯域スペクトルを有する不規則波は、波群を形成するために、同程度の波高を持つ波が連続的に現れるのに対して、広帯域スペクトルを有する不規則波では、大小の波高を持つ波がまったくランダムに現れる。このように波の現れる順番が変化することによって漂砂量が変化するのはないかと予想されたが、今回の実験結果からはそのような傾向は見られなかった。

この結果は、規則波による漂砂量と不規則波による漂砂量との間に差異が生じないことを示唆している。そこ

3. 実験結果および考察

(1) 実験結果

実験条件および漂砂量の測定結果を表-2 に示す。表中の記号は図-4 で定義された通りである。

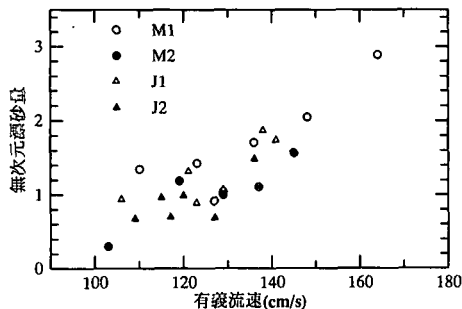


図-5 不規則性と漂砂量 (1)

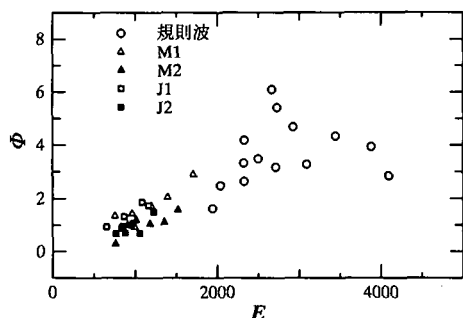


図-6 不規則性と漂砂量 (2)

で次に, Dibanja・Watanabe の規則波による漂砂量のデータと今回のデータとを図-6 にプロットして比較した。ただし彼らのデータは周期, 定常流速とも広範にわたっているため, それらの中から今回の実験条件に近いものだけを選んでいる。またグラフの横軸には, 波のエネルギーを代表する指標として次式で定義されるパラメータ E_u をとった。

$$E_u = \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

図からわかるように, 非対称性の違いによるばらつきはあるものの, 非対称性が同程度であるデータに関しては有意な差は見られない。これらのことから, スペクトル型が漂砂量を決定する支配的な要因ではないと言える。

4. Dibanja・Watanabe の式の適用と拡張

Dibanja・Watanabe (1992) は, シートフロー状漂砂の移動機構をモデル化するとともに, 非対称振動流と定常流が共存する条件下で実験を行い, シートフロー状漂砂についての漂砂量算定式を提案した。このモデルの特徴は, 巻き上げられた全ての砂粒子が半周期間で沈降するのではなく, その一部は次の半周期に逆方向に運ばれるという現象を考慮に入れたことである。以下の式群は, Dibanja・Watanabe の提案した式に乾ら (1995) が若干

の修正を加えたものである。

$$\phi_{net} = \frac{q_{net}(1-\lambda)}{w_0 d} = 0.0023 \cdot \text{sign}(\Gamma) |\Gamma|^{0.5} \quad \dots (2)$$

ここで, λ は空隙比, Γ は砂移動のメカニズムを表すパラメータで, 次式で表される。

$$\Gamma = \frac{u_c T_c (\Omega_c^2 + \Omega_i^2) - u_i T_i (\Omega_i^2 + \Omega_c^2)}{(u_c + u_i) T} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし, T は周期, T_c, T_i はそれぞれ岸向き, 沖向き流速の継続時間であり, $u_c, u_i, \Omega_c, \Omega_i, \Omega_c, \Omega_i$ は次式で表される。

$$u_c^2 = \frac{2}{T_c} \int_0^{T_c} u^2 dt, \quad u_i^2 = \frac{2}{T_i} \int_{T_c}^T u^2 dt \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\begin{cases} \text{if } \omega_j \leq \omega_{cr} \begin{cases} \Omega_j = \omega_j \cdot \frac{2w_0 T_j}{d} \\ \Omega'_j = 0 \end{cases} \\ \text{if } \omega_j > \omega_{cr} \begin{cases} \Omega_j = \omega_{cr} \cdot \frac{2w_0 T_j}{d} \\ \Omega'_j = (\omega_j - \omega_{cr}) \cdot \frac{2w_0 T_j}{d} \end{cases} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\omega_c = \frac{1}{2} \frac{u_c^2}{sgw_0 T_c}, \quad \omega_i = \frac{1}{2} \frac{u_i^2}{sgw_0 T_i} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし, 式中の添字 j は c, i で置き換えられる。また, ω_{cr} はシートフロー時に 1.0, 砂漣時に 0.03 を用いる。

ここでは, Dibanja・Watanabe の漂砂量算定式による計算値と実験で得られた測定値を比較, 検討した。計算の手順は, (1) 不規則振動流の時系列データについてゼロアップクロス法で一波を定義する。(2) 定義された個々の波について算定式を適用し漂砂量を計算する。(3) それらを足し合わせることで全漂砂量を求める (以下, 時系列解析法と呼ぶ)。

図-7 は横軸に計算値, 縦軸に測定値をとって, 振動流のみ, 振動流および順流, 振動流および逆流にわけてプロットしたものである。ただし, 図中のエラーバーは, 沖側, 岸側の砂の増減分が一致しないことによる誤差を示している。図からわかるように, 振動流のみ, 振動流および順流を作用させたケースについては概ね良好な計算結果が得られている。一方, 振動流および逆流を作用させたケースでは移動方向さえも一致していないものが多く, 測定された移動方向は岸向きであるのに対し, 計算では沖向きに移動するという結果になっている。不規則振動流場での漂砂の移動形態は時間とともに変化していくので, 移動形態を分類することは容易ではないが, おおまかに言って, 前者ではシートフロー状漂砂が卓越しているケースが, 後者では比較的大きな砂漣 (波高 $\eta \approx 1.5$ cm) が形成されたケースが多かった。これらのことから, 彼らの提案したモデルはシートフロー状移動の漂砂量は良好に計算できるが, 砂漣上の浮遊砂を十分には

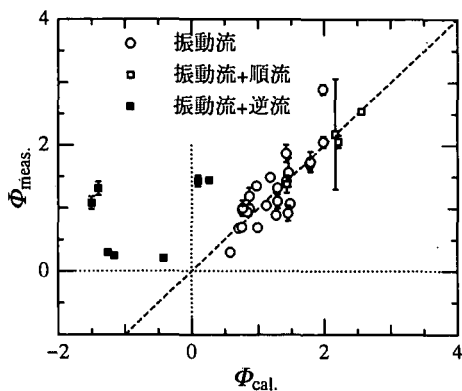


図-7 Dibajnia・Watanabe の式の適用結果
(時系列解析法)

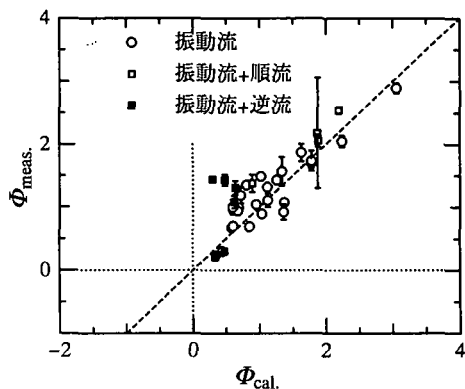


図-9 拡張された Dibajnia・Watanabe の式の適用結果
(時系列解析法)

流速小



流速大



図-8 砂漣上の浮遊砂

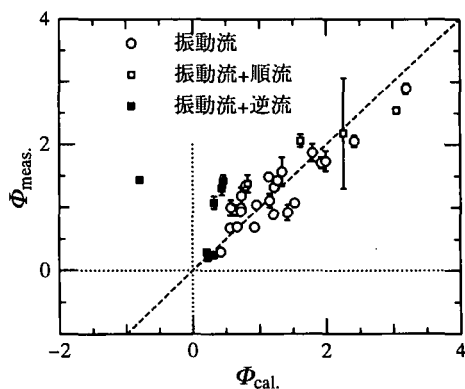


図-10 拡張された Dibajnia・Watanabe の式の適用結果
(代表波法)

表現していないと考えられる。

Dibajnia・Watanabe の式は、元々シートフロー状漂砂に対する漂砂量算定式として提案されており、以後の研究において砂漣上の浮遊砂移動にも対応できるようにパラメータ ω_{cr} を導入したという経緯がある。当初の研究で彼らが対象としていたのは、次の半周期に入る時点でまだ沈降していない砂、すなわち「浮遊状態にある砂」である。この「浮遊状態にある砂」は「砂漣上の浮遊砂」とはやや性質の異なるものであり、拡張時にこれらを一つのパラメータ ω_{cr} で表したところに問題があると思われる。そこで次に、これらを別々のものとして考えると、砂漣上の浮遊砂の移動機構を単純化して Dibajnia・Watanabe の式に組み込むことによって、シートフロー状移動、砂漣上の浮遊砂移動の双方のモードへの適用を可能にすることを試みた。

まず、砂漣の形成された砂面に比較的小さな流速の波が作用した時、砂粒子は全て砂漣背後の渦に取り込まれて次の半周期の流れによって逆方向に運ばれる(図-8上)。一方、比較的大きな流速の波が作用した時は、砂粒子の一部は砂漣背後の渦に取り込まれるが、渦に取り込むことのできる容量を超えた分の砂はそのまま流れの方

向に運ばれることになる。(図-8下)

ここで、 ω_{cr} に「渦に取り込むことのできる砂の量」という定義を与え、上に述べたことを定式化すると、算定式の条件判定部は以下のように表すことができる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{if } \omega_j \leq \omega_{cr} \left\{ \begin{array}{l} \Omega_j = 0 \\ \Omega_j = \omega_j \cdot \frac{2w_0 T_j}{d} \end{array} \right. \\ \text{if } \omega_j \geq \omega_{cr} \left\{ \begin{array}{l} \Omega_j = (\omega_j - \omega_{cr}) \cdot \frac{2w_0 T_j}{d} \dots\dots\dots (7) \\ \Omega_j = \omega_{cr} \cdot \frac{2w_0 T_j}{d} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

ここで、 ω_{cr} はその定義から砂漣波高や砂漣の非対称性などの関数で表され、シートフロー時には0をとる。ただし、今回の報告ではその関数を特定するまでには到らなかったために、観察された砂漣の形状から判断した値を用いている(表-2)。また、二つの状態の浮遊砂を別々に考慮する必要があると述べたが、今回の実験では周期が3.7秒前後と比較的長いことから、流速反転時に「浮遊状態にある砂」は非常に少ないと考えて、砂漣上の浮遊

表-2 実験条件

No.	Type	u_{cr} (cm/s)	u_{tr} (cm/s)	T_{cr} (s)	T_{tr} (s)	$\frac{u_{cr}}{U}$	U (cm/s)	ω_{cr}	ϕ_{net}
1	M1	111	53	1.46	2.45	0.68	0	0.0	2.89
2	M1	101	47	1.46	2.45	0.68	0	0.0	2.05
3	M1	94	44	1.48	2.48	0.68	0	0.0	1.71
4	M1	85	42	1.48	2.46	0.67	0	0.0	0.92
5	M2	62	42	1.64	2.08	0.60	0	0.03	0.30
6	M2	70	48	1.66	2.09	0.59	0	0.01	1.19
7	M2	76	52	1.64	2.06	0.59	0	0.01	1.04
8	M2	80	56	1.69	2.11	0.59	0	0.0	1.11
9	J1	96	45	1.32	2.23	0.68	0	0.01	1.74
10	J1	88	41	1.31	2.22	0.68	0	0.01	1.07
11	J1	82	39	1.31	2.24	0.68	0	0.02	1.32
12	J2	66	43	1.57	2.00	0.60	0	0.02	0.68
13	M2	85	60	1.70	2.13	0.58	0	0.0	1.57
14	J1	84	39	1.30	2.25	0.68	0	0.04	0.89
15	J2	70	47	1.56	1.97	0.60	0	0.03	0.70
16	J2	71	48	1.55	1.96	0.60	0	0.03	0.99
17	J2	69	46	1.56	1.99	0.60	0	0.03	0.96
18	M1	74	36	1.48	2.44	0.68	0	0.04	1.35
19	J2	75	51	1.55	1.94	0.59	0	0.0	0.69
20	J1	72	34	1.32	2.24	0.68	0	0.04	0.94
21	J1	92	45	1.34	2.14	0.67	0	0.01	1.87
22	M1	83	40	1.46	2.45	0.68	0	0.01	1.43
23	M2	67	46	1.64	2.06	0.59	0	0.03	1.00
24	J2	80	56	1.56	1.94	0.59	0	0.0	1.49
25	M1	100	23	2.20	1.90	0.81	16.3	0.0	2.54
26	M2	83	33	2.05	1.80	0.71	14.3	0.0	2.06
27	M2	75	42	1.81	2.02	0.64	5.6	0.0	1.38
28	M1	93	28	1.83	2.06	0.77	10.9	0.0	2.18
29	M1	74	52	1.10	2.80	0.59	-13.7	0.2	1.31
30	M1	69	55	1.10	2.90	0.56	-16.1	0.2	1.08
31	M1	77	45	1.29	2.74	0.63	-6.7	0.2	1.43
32	M2	63	57	1.49	2.37	0.52	-8.8	0.2	0.21
33	M2	60	62	1.41	2.46	0.49	-12.9	0.2	0.25
34	M1	63	52	1.03	2.87	0.55	-16.6	0.2	0.30
35	M1	72	42	1.23	2.67	0.63	-6.4	0.2	1.44

砂のみを考慮に入れて計算した。計算結果は図-9 に示す通りであり、従来の方法においてうまく計算できなかったケースについても良好な結果が得られており、拡張された Dibajnia・Watanabe の式の不規則振動流場への適用性が確認された。

さて時系列解析法は、個々の波の漂砂量を逐一計算するので高い精度が期待できるが、現地海浜を対象に考えた場合、計算時間など実務面での取り扱いに問題が残る。そこで次に、統計的に選ばれた代表流速を用いた計算を行った(以下、代表波法と呼ぶ)。代表流速は、ゼロアップクロス法で定義された N 個の波形のうち流速振幅の大きい方から $N/3$ 個について u_c, u_t を計算し、それぞれに対して $N/3$ 個の平均を取ったものを用いた。その結果、図-10 に示すように代表波法においても、係数を調整す

ることで比較的良好に漂砂量を算定することができた。

5. 結 論

本研究では、不規則性および非線形性を考慮した振動流下で漂砂量実験を行い、以下のような結論を得た。

- 今回の実験結果から判断する限り、波の不規則性が漂砂量に及ぼす影響はなく、不規則波と規則波との差異によっても漂砂量が変化することはない。ただし、砂の移動が半周期で完結するような条件 ($\omega_j < 1$) での実験が多かったため、今後は $\omega_j > 1$ となるような条件下での実験を行い、この結果の検証を行うことが必要である。
- Dibajnia・Watanabe の提案した漂砂量算定式に新たな解釈を与えることによって、シートフローと砂漣が共存する領域での漂砂量を良好に計算することができた。
- 代表波法による計算値と測定値との間に良好な一致が見られたことから、不規則波を適当な波高(流速)を有する代表波を用いて漂砂量を計算することが可能であることが確認され、実務面での不規則波の取り扱いが簡便になった。

参 考 文 献

浅野敏之・中村和夫・中野康弘・高沢俊満 (1992): シートフロー状態の底質移動に関する実験的研究, 第 39 回海岸工学論文集, pp. 295-299.

乾 武史・Mohammad Dibajnia・磯部雅彦・渡辺 晃 (1995): 細粗混合砂のシートフロー漂砂量の算定式について, 第 42 回海岸工学論文集, pp. 521-525.

大塚行則・三村信男・渡辺 晃 (1987): 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.

佐藤慎司・美谷邦章・渡辺 晃 (1986): 不規則振動流下における砂漣形状と漂砂量, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 228-232.

佐藤慎司・杉浦志樹・渡辺 晃 (1987): 不規則振動流中における砂移動機構と砂漣の消滅限界, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 246-250.

山下俊彦・沢本正樹・横山博美 (1984): 非定常流による平坦床漂砂量と砂の移動機構に関する実験的研究, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 281-285.

Dibajnia M. and A. Watanabe (1992): Sheet flow under non-linear waves and currents, Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2015-2028.

Ribberink J. S. and A. Al-Salem (1990): Bedforms, sediment concentrations and sediment transport in simulated wave conditions, Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2318-2331.