

礫のネットワークに着目した 振動流下における砂礫混合土砂輸送過程の解明

A Study on the Movement of Sands and Gravels and the Contact Network of Gravels under Oscillatory Flow

西嶋宏介¹・高川智博²・佐藤慎司³

Kousuke NISHIJIMA, Tomohiro TAKAGAWA and Shinji SATO

The movement of sand and gravels under asymmetric oscillatory flow was studied by laboratory and numerical experiments. The experiment under asymmetric oscillatory flow showed that the movement of gravels was drastically restrained because of the contact network between gravels when the ratio of gravels was over 60%. The result of these experiments did not agree with the established formula of the mixed grain sand transport under oscillatory flow. From numerical simulation of filling up of particles with DEM(Discrete Element Method), it was found that 3D-contact networks between gravels drastically developed while the mixing ratio of gravels increased from 40% to 60%. It was found that the movement of sand and gravels was greatly different from the movement of the mixed sand.

1. はじめに

砂礫混合海岸は耐侵食性に優れていると考えられており(佐藤ら, 2007), 現地海浜において実際に砂礫混合土砂による養浜が実施されているが, 波浪作用下における砂礫混合土砂の挙動については未解明の部分が多く残されている。よって, その挙動を解明することは, 海岸侵食対策や地形の予測に対して非常に重要であると考えられる。

粒径の異なる混合砂の移動現象に関する実験的研究では, 田中ら(1988), Dibajnia・Watanabe(1992), 鈴木ら(1994), 乾ら(1995), Dibajniaら(1998), 渡辺ら(1999), 佐藤ら(2000)など, 数値計算では原田ら(2006)など多くの研究がなされており, 突出の効果によって大きな粒子が動きやすくなること, 鉛直分級が生じ表面が粗粒粒子に覆われることによって土砂移動が抑制されることなど混合粒径特有の現象が報告されている。しかし, 砂と礫のように, 粒径が大きく異なる粒子が混合した状態の底質の移動機構に関する実験的研究は現在までにほとんど行われていない。

そこで本研究では, 振動流装置を用いて, 振動流下における砂礫混合状態の底質の挙動を観察する実験を行った。また, 個別要素法を用いた数値計算によって, 礫同士の3次元的な接触ネットワークを解析し, 振動流下における砂礫混合状態の底質に特有の土砂輸送過程を解明すること目的とした。

2. 振動流装置を用いた実験

(1) 実験装置及び方法

実験には, 任意波形振動流装置を使用した(図-1,2)。これは, 外部からの電圧信号によってピストンを動かして振動流を発生させる装置で, 任意の流速波形を与えることができる。本実験では流速波形として図-3のような

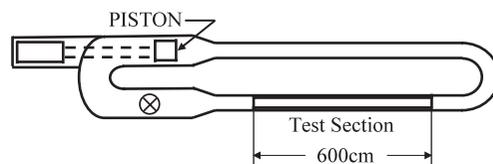


図-1 振動流装置の概念図

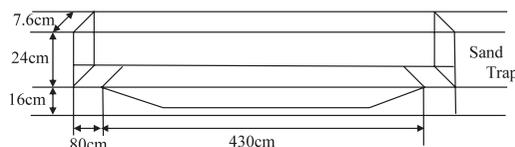


図-2 振動流装置観測部

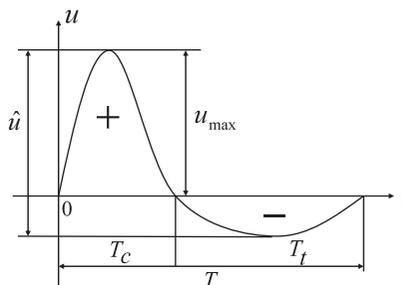


図-3 流速波形

1 学生会員 東京大学大学院 工学系研究科
社会基盤学専攻
2 正会員 博(理) 東京大学助教 同上
3 フェロー 工博 東京大学教授 同上

三次のクノイド波相当の非対称波形を用いた。非対称性は $u_{max} / \hat{u} = 0.7$ とし、砂のみではシートフロー状態、礫のみでは移動限界を少し超え、砂礫混合の影響がもっとも顕著に現れると考えられる状態になるように、 u_{max} は $0.7m/s$ とした。中央の観測部は長さ $4.3m$ 、高さ $24cm$ 、幅 $7.6cm$ の長方形断面であり、観測部の両端にはハニカムで製作した捕砂器を設置し、観測部外への底質の流失を防止している。

(2) 実験に用いた底質

本実験では、砂として中央粒径 $0.271mm$ の相馬標準砂を、礫として中央粒径 $7.34mm$ の大磯砂利を用いた。砂及び礫の性質を以下の表-1 に示す。沈降速度は Rubey の式 (例えば、関根, 2005) によって算出した。本実験では底質全体の投入量に対する底質に占める礫の体積割合が 20% 、 40% 、 60% 、 70% 、 80% となる 5 ケースに分けて実験を行った。

表-1 振動流装置の概念図

	中央粒径 (mm)	比重	沈降速度(m/s)
標準砂	0.271	2.64	0.0376
礫	7.34	2.75	0.289

(3) 底質の移動量測定

まず、実験装置の観測部に $50cm$ ごとに仕切りを立て、後に示す礫の体積割合に応じて砂と礫を、偏析を抑えるために交互に投入し、厚さ $4cm$ の初期堆積層を形成した。実験後に $50cm$ ごとに仕切りを入れて底質を採取し、乾燥させて重量を量った。礫を用いる実験の場合、礫が障害となり、仕切りを正確な位置に入れるのが困難であり、わずかな仕切りの位置の違いによって結果が大きく変わる可能性がある。仕切りによる採取の際の誤差を少なくするために図-4 の①、②、③の3箇所を左右に分けてそれぞれの場合に対し q を以下の式によって求め、それらを平均したものをそのケースにおける正味の底質移動量とした。

$$q = \frac{\Delta M_{on} - \Delta M_{off}}{2\rho_s B \Delta t} \dots\dots\dots (1)$$

ここで q は岸向きを正とした単位幅・単位時間当たりの正味の底質移動量、 ρ_s は砂の密度、 B は実験装置観測部の幅を表す。 ΔM は底質の質量の変化分、 Δt は実験時間であり、on, off はそれぞれ岸側と沖側を表す。また M ,

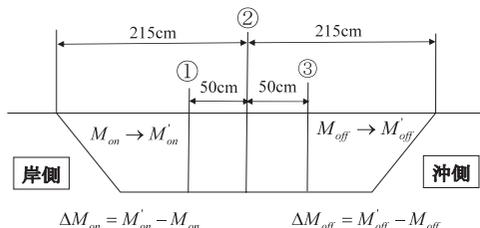


図-4 底質移動量の評価方法

M' はそれぞれ実験前、実験後の底質質量を表す。

無次元漂砂量 Φ は、この q を用いて以下の式によって求める。

$$\Phi = \frac{q}{w_0 d_i} \dots\dots\dots (2)$$

ここで w_0 は沈降速度、 d_i は砂または礫の粒径を表す

また、振動流装置を動かしている際に、ビデオカメラにより底質の動きを撮影し、実験後にその動画を解析することにより、砂の巻き上がり層の厚さを求めた。

(4) 実験結果及び考察

本実験で得られた結果として、礫の体積割合と砂及び礫の無次元漂砂量の関係を以下の図-5、6 に示した。これらの図を見ると、砂の場合は礫の体積割合が 40% から 60% の間で急激に無次元漂砂量が減少してゼロに近づき、礫の場合は礫の体積割合が 60% から 70% の間で急激に無次元漂砂量が減少し、ゼロに近づいており、どちらも礫の体積割合に対し非線形な挙動を示している。

今回の実験で用いた底質は砂と礫が混合している状態のもので混合砂ではないが、混合砂を用いた実験に基づき提案された Dibajnia・Watanabe (1992) 及び佐藤ら (2000) による無次元漂砂量式を適用した結果を図-5、6 に合わせて示した。Dibajnia・Watanabe の式による漂砂量は、 100% 砂、または礫だったときの漂砂量を求め、礫と砂の相互干渉はないと考えて、その値に砂及び礫のそれぞれの存在割合を乗じて算出した。

砂においては、Dibajnia・Watanabe の式及び佐藤らの式のどちらにおいても、礫の体積割合が増加するにつれて岸向き漂砂量が減少するという傾向は捉えられているが、礫の体積割合が 40% から 60% の間で急に漂砂量が減少し、以後漂砂量がほぼゼロに近づくという特徴はどちらのモデルでもうまく再現できていないことが分かる。

礫においては、Dibajnia・Watanabe の式を用いると礫の体積割合の増加に応じて礫の漂砂量も増加するという結果が得られたが、これは本実験で得られた結果とは異なるものである。それに対し佐藤らの式 (2000) を用いると、礫の体積割合の増加に応じて礫の漂砂量が減少する傾向は再現できていることが見て取れる。しかし、礫の無次元漂砂量そのものの値は実験値とは大きく離れており、特に礫の体積割合が 60% を超える付近で急激に礫の漂砂量が減少し、ゼロに近づくという特徴は捉えられておらず、実験をうまく再現できているとは言い難い。

以上の結果から、今回の実験で用いた底質のように粒径差が非常に大きい砂礫混合状態の底質には、従来の混合砂の漂砂量計算式の適用は難しいことが分かった。

さらに、ビデオ解析より求めた砂の巻き上がり層厚さを縦軸にとり、横軸に礫の体積割合をとったのが図-7で

ある。砂の漂砂量は礫の体積割合が40%から60%にかけてほぼゼロになっているが、砂の巻き上がり自体は礫の体積割合が70%になっても起こっていることが観察された。礫は動いていないが、表面の礫の隙間の流体運動によって砂が浮遊している。このことから、礫の移動限界を考慮する上で、砂を介した接触ネットワークの影響は相対的に小さく、底面の礫は主に礫同士の接触によって支持されているものと考えられる。

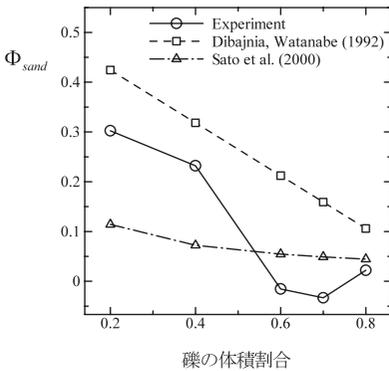


図-5 礫の体積割合と砂の無次元漂砂量との関係

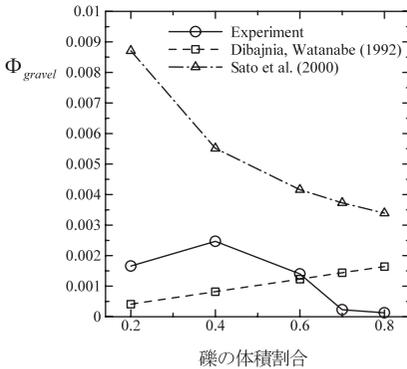


図-6 礫の体積割合と礫の無次元漂砂量との関係

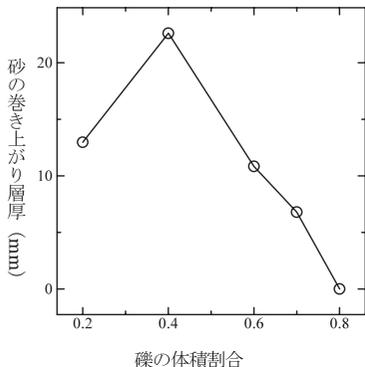


図-7 砂の巻き上がり層厚

3. 個別要素法を用いた混合粒径粒子充填計算

(1) 個別要素法

礫同士の三次元的なつながりを実験で測定することは非常に難しい。そこで、個別要素法 (Cundall, 1971) を用いて複数の粒径の球を様々な割合で混合し、充填計算を行い、三次元的な粒子のつながりを解析した。個別要素法の数値計算モデルは、原田ら (2006) を参考にした。また、3次元において煩雑になりがちな回転演算は、四元数 (例えば、越塚, 2005) を用いる計算方式を採用し、簡略化を図った。

個別要素法では、それぞれの粒子に個別に運動方程式を適用し、粒子間の相互作用力を考慮しつつ、粒子の動きを追跡する。運動方程式として、並進及び回転の運動方程式を用いる。ここで、三次元場での運動方程式は以下の式のように書ける。

$$m \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = m\mathbf{g} + \mathbf{F}_p \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\mathbf{I} \frac{d\mathbf{w}_p}{dt} = \mathbf{T}_p \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 m ：粒子質量、 \mathbf{u}_p ：粒子速度ベクトル、 t ：時間、 \mathbf{g} ：重力加速度ベクトル、 \mathbf{F}_p ：粒子間相互作用力の総和ベクトル、 \mathbf{I} ：慣性モーメント、 \mathbf{w}_p ：粒子角速度ベクトル、 \mathbf{T}_p ：粒子間相互作用力によるトルクの総和である。

(2) 個別要素法の構成

個別要素法では、粒子間の接触を考える際に、法線方向及び接線方向に弾性スプリング (バネ定数 K_n, K_s) と粘性ダッシュポット (粘性定数 C_n, C_s) を設定する。バネ定数と粘性定数は以下の式を用いて決定した。

$$K_n = \frac{2\pi^2 m}{\alpha_m^2 \cdot \Delta t^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 m ：粒子質量、 Δt ：計算時間間隔である。本研究では、 α_m の値として、20.0を与えた。また、この Δt は、個別要素法で頻用される計算時間間隔制約条件

$$\Delta t \leq 2 \sqrt{\frac{m}{K_n}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

を満たす必要がある。まず Δt を決定し、バネ定数 K_n を算定し、以下の関係式を用いて K_s を決定する (θ ：ポアソン比 (=0.3))。

$$K_s = \frac{K_n}{2(1+\theta)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

さらに、粘性定数は C_n, C_s 以下の式を用いて算定する。

$$C_n = \alpha_{cn} \cdot 2\sqrt{m \cdot K_n} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$C_s = \frac{C_n}{\sqrt{2(1+\theta)}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

本研究では上式の α_{cn} として 1.0 を用いた。

本研究で扱う三次元粒子充填計算では、粒径比 5、質量比 125 ほどの粒子同士の相互作用力を求めるため、バネ定数と粘性定数を求める際の粒子質量 m にどの値を用いるかによって大きく計算の安定性が異なってくる。そこで本研究においては、同一粒径の粒子が接触する場合にはその粒子の質量を m の値として採用し、異粒径の粒子が接触する場合には、粒径が小さいほうの粒子の質量を m の値として採用した。これにより、粒子間反発力を抑制し、安定した計算を行うことが可能となった。

(3) 三次元粒子充填計算

三次元粒子充填数値計算では、まず粒径 1.8mm, 2.0mm, 2.2mm の三種類の小粒子を合計 24000 個準備し、それぞれの粒子がどの粒径になるかは乱数を用いてランダムに決定した。その小粒子を、小粒子径の 10 分の 1 程度間隔を空け、縦 40 列、横 40 列、高さ 15 列配置する。その後粒径が 4.5mm, 5.0mm の二種類の大粒子を、小粒子を配置した領域と同じ領域に乱数を用いてランダムに配置する。大粒子を配置する際に、既に計算領域に存在する小粒子と重なってしまう場合には重なった分の小粒子を取り除いた。以上の初期配置が終了したら、全 15 層ある小粒子を、1 層ずつ重力をかけて落下させていく。本来ならば初期位置が決定した後に全粒子を一度に落下させて安定した状態を見ることができれば、この 1 層ずつ落下させていくというプロセスを踏む必要はないが、一度に粒子を落下させると、安定するためには時間ステップ間隔を小さくとる必要が生じ、計算効率が著しく低下してしまう。そのため、本研究では時間ステップ間隔 Δt を 1.0×10^{-4} s に設定し、一層ずつ小粒子を落下させていくことで安定性と計算効率を向上させた。

ある層の小粒子を落下させ粒子の動きが十分に収束した後、それらの粒子を固定し 1 つ上の層を落下させるという操作を繰り返し、粒子充填を完了する。1 層ずつ小粒子を落下させる際、落下させる層の小粒子の Z 座標よりも Z 座標の小さい大粒子も同時に落下させる。以下の図-8 に三次元粒子充填の進行の様子の例を示す。なお、Z 方向には $Z=0$ に壁を作りそれ以上粒子が下に落下しないように設定し、X, Y 方向はそれぞれ周期境界とした。

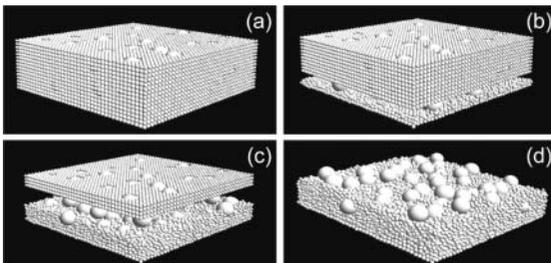


図-8 三次元粒子充填計算の様子

(4) 計算結果

本研究で行った振動流装置を用いた実験の条件では、礫の移動限界を考慮する上で砂を介した接触ネットワークの影響は小さいと考えられる。そこで本数値計算では大粒子同士の接触を考え、以下の図-9 では粒子として大粒子のみを小さい球で表示し、大粒子同士が接している場合には線分でつなげた。なお、図-9 は全て鉛直上方から見た図である。

図-9 から、粒子同士の X, Y 方向の最大ネットワーク径の平均及び大粒子同士の平均配位数を計算し、大粒子の体積割合との関係を示したものが以下の図-10 である。

図-10 から、大粒子の体積割合が 40% から 60% の間で XY 方向のネットワーク径及び平均配位数が急激に増加していることが分かる。特に、本数値計算では XY 方向をそれぞれ周期境界としているために、XY 方向のネットワーク径の計算領域に対する割合が 1 に近づくと、それは XY 方向の大粒子同士のネットワーク径が無限大に発散することを示している。

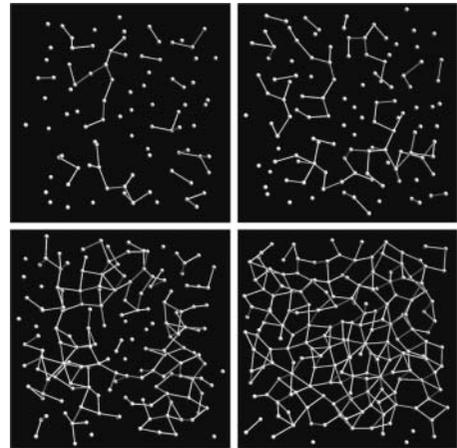


図-9 大粒子と小粒子の体積比による大粒子間ネットワークの変化 (左上: 38%, 右上 48%, 左下 60%, 右下 81%)

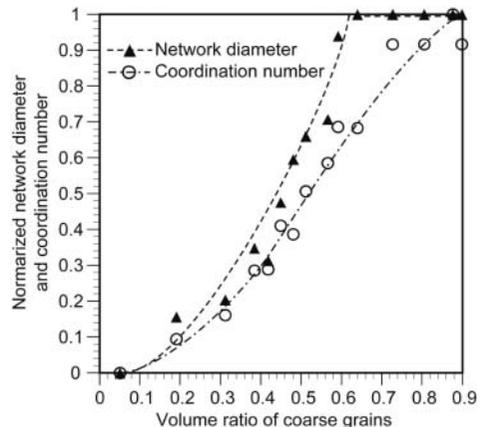


図-10 大粒子の体積割合とネットワーク径の関係

4. 砂礫の移動特性と礫間接触ネットワーク

3次元粒子充填計算を行うことにより、大粒子の体積割合が40%から60%の間でXY方向の礫同士のネットワーク長及び平均配位数が急激に増加することが分かった。

ここで、ネットワーク径が大きいうことはそれだけ多くの粒子がつながっているということを表す。つながっている粒子の数が多くなるほど粒子が動くためにはより大きな力が必要となり粒子は動きにくくなるが、上記のように本数値計算では周期境界条件を用いたため、大粒子の体積割合が40%を超えてネットワーク径が無限大に大きくなる場所で大粒子は急激に動きづらくなると考えられる。

平均配位数も同様に、平均配位数の値が大きくなるほどより多くの粒子とかがみ合っていることになり、大粒子は動きづらくなる。平均配位数においても大粒子の体積割合が40%から60%の間で急激に大きくなっており、その部分を越えたところで急激に大粒子が動きづらくなると考えられる。

数値計算における大粒子が礫を表しているものとして振動流装置を用いた実験と数値計算を比較すると、若干数値に違いはあるものの、礫(大粒子)の全体に対する体積割合が40%から60%あたりで礫の無次元移動量、ネットワーク径及び平均配位数が急激に変化しているという傾向は同じである。このことから、礫の体積割合が60%を超えたところで急激に礫が動かなくなるという実験で得られた結果は、礫の体積割合が増加することで、礫同士のつながりが強まり、ネットワーク径や平均配位数の値が急激に増加することによるものと考えられることができる。

5. おわりに

振動流装置を用いて砂礫混合状態にある底質に振動流を作用させる実験を行い、砂と礫それぞれに関して無次元移動量を求め、既往の混合砂の漂砂量算定式を用いた計算式と比較した。その結果、砂礫混合状態の底質は、砂と礫の粒径差が大きすぎるため、従来の混合砂の漂砂量算定式では移動量を正確に把握することが難しいことが分かった。また、礫の移動量は、全体に対する礫の移動量が60%を超えると急激に減少し、ゼロに近づくことが判明した。

さらに、3次元粒子充填計算を行うことにより、粒径の大きく異なる粒子を混合した場合、粒径の大きい方の粒子同士のつながり(ネットワーク径と平均配位数)は、粒径の大きい方の粒子の体積割合が40%から60%で急

激に増加し、ネットワーク径はおおよそ60%で領域全体に発散することを見出した。

この実験と数値計算とを合わせて検討することで、礫の移動量がある体積割合を境に急激に減少するのは、その体積割合を境として急激にネットワーク径や平均配位数の値が大きくなるからであることが考察された。

本研究では、振動流の流速や波形、底質の粒径比を固定して実験を行ったが、今後はこれらの条件を変化させて実験を行い、データを蓄積して分析していくことが必要である。また、数値シミュレーションにおいては粒子流体連成計算を行い、粒子間接触ネットワークと粒子の動きやすさを定量的に評価していきたい。

謝辞：本研究は科研費20760324の助成を受けたものである。三次元粒子充填計算の際に用いた個別要素法のプログラミングでは、京都大学原田英治准教授の協力を得た。記して深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 乾 武史・Dibajnia, Mohammad・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、海岸工学論文集，第42巻，pp. 521-525。
- 越塚誠一 (2005)：計算力学レクチャーシリーズ5 粒子法，丸善，pp. 144。
- 佐藤慎司・大畑俊和・田島芳満 (2007)：礫の挙動に着目した天竜川河口周辺の土砂移動機構の解明，海岸工学論文集，第54巻，pp. 606-610。
- 佐藤慎司・田中正博・樋川直樹・渡辺 晃・磯部雅彦 (2000)：混合砂の移動機構に基づくシートフロー漂砂量算定式の提案，海岸工学論文集，第47巻，pp. 486-490。
- 鈴木高二朗・渡辺 晃・磯部雅彦・Dibajnia, Mohammad (1994)：振動流作用下における混合粒径底質の移動現象について，海岸工学論文集，第41巻，pp. 356-360。
- 関根正人 (2005)：移動床流れの水理学，共立出版，pp. 73
- 田中 仁・片山裕貴・加賀正之・須賀克三 (1988)：混合砂海浜における漂砂量則，第35回海岸工学講演会論文集，pp. 307-311。
- 原田英治・後藤仁志 (2006)：三次元数値移動床による混合粒径シートフロー漂砂の分級過程の解析，土木学会論文集B，Vol.62 No.1，pp. 128-138。
- 渡辺 晃・磯部雅彦・Dibajnia, Mohammad・田中正博・植村勇仁 (1999)：非対称振動流作用下における混合粒径砂の移動機構に関する研究，海岸工学論文集，第46巻，pp. 521-525。
- Dibajnia, Mohammad・高沢大志・渡辺 晃 (1998)：混合粒径砂における移動層厚と漂砂量に関する研究，海岸工学論文集，第45巻，pp. 481-485。
- Cundall, P. (1971)：A computer model for simulating progressive large scale movements of blocky rock systems, Proc. of the Symp. of the Int. Soc. of Rock Mech. vol. 1, pp. 132-150。
- Dibajnia, M. and Watanabe, A. (1992)：Sheet flow under nonlinear waves and currents, Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2015-2028。