

レーザー濃度計・ADCP によるストーム時、砕波帯内での 浮遊砂濃度・平均粒径計測と沖方向浮遊砂量の推算

加藤 茂*・山下隆男**・Abbas Yeganeh-Bakhtiary***

京都大学防災研究所大渦波浪観測所の T 型観測専用棧橋を援用して、高波浪条件下、砕波帯内でのレーザー濃度計による浮遊砂濃度・平均粒径と ADCP による平均流速の鉛直分布計測および波高計による波浪特性の計測を行った。その計測データと Vanoni の分布形を用いて、浮遊砂濃度および砕波によって混入した気泡の鉛直分布の推定を試みる。また、推定した浮遊砂濃度の鉛直分布を用いて、ストーム時、砕波帯内での沖方向浮遊砂量の算定を行う。その結果、沖方向浮遊砂量と波浪エネルギーフラックスの間には線形関係があり、波浪条件から砕波帯内での沖向き浮遊砂量が定量的に推算可能であることが示された。

1. 緒 言

冬季風浪による海岸侵食は沖方向漂砂に起因しているが、それが何時、どのように、どれ位、現地の海岸で発生しているのかを明確にするデータが必要である。最近の観測により、砕波帯近傍での沖方向流れ（戻り流れ）の発生特性は、波浪による平均海面上昇（set-up）と吹き寄せによるそれとで決まり、主に砕波条件（強度）がある値を超えると、突発的に発生することが明らかになっている（山下ら, 1997）。この戻り流れは砕波帯の沖、漂砂移動限界付近まで観測されるが、それによる沖方向漂砂（特に浮遊漂砂量）がどの程度あるかを直接計測することは興味深い。浮遊砂濃度やその粒径の計測・推定に関する研究は数多く実施されてきているが、それらは実験データ（例えば、Williams ら, 1999a; Rijn, 1984）、河川流や潮流など的一様流条件下での観測データ（例えば、Williams ら, 1999b; Rose・Thorne, 2001）、比較的穏やかな波浪条件下での沿岸域での観測データ（例えば、片山ら, 1999; 泉宮ら, 1999; Beach・Sternberg, 1996）による検討が多く、実際に沿岸海域で漂砂移動の活発となる強風・高波浪条件下での観測データは非常に限られている（例えば、Williams ら, 1996）。

本研究では、浮遊砂の平均粒径と濃度が計測できるレーザー濃度計、ADCP および波高計によって、高波浪条件下での平均流速、浮遊砂の濃度・平均粒径の鉛直分布と波浪特性を計測し、ストーム時、砕波帯内での沖方向浮遊漂砂量の算定を試みる。また、計測結果と推定した浮遊砂濃度の鉛直分布から、砕波によって混入した気泡の鉛直分布の推定を試みる。

2. 観測の概要

観測は京都大学防災研究所大渦波浪観測所の T 型観測専用棧橋を援用して実施された。観測棧橋では、棧橋

に沿って設置された 7 台の超音波式波高計による波浪観測（サンプリング 10 Hz, 毎正時 20 分間の水位変動計測）と、プロベラ式風向風速計による海上風（10 分間移動平均風向風速）の計測が常時行われている。棧橋先端の 4 台の波高計は直線アレイ状に配置されている。そのうちの 1 台（WG3）のほぼ直下に専用ケーブルに接続された ADCP を海底設置し、平均流（30 秒平均）の鉛直分布のリアルタイム計測を行った。浮遊砂濃度と平均粒径の計測にはレーザー濃度計（LISST-25: Laser In-Situ Scattering and Transmissometry, 粒径計測範囲: 1.25~250 μm ）を用い、棧橋から海底に張られたメッセンジャーワイヤーロープに沿って LISST を海底から上方向に移動させて（図-1）、5 測点（海底面を $z=0$ として $z=1.35, 1.85, 2.85, 4.35, 5.35$ m）での鉛直分布計測を行った。各測点では、サンプリング 10 秒（30 サンプルのアンサンブル平均）の 5 分間計測を行った。計測は 2002 年 2 月 9 日 8 時から翌日 10 日 12 時までの約 28 時間に 2 または 3 時間毎に LISST を上げ下げし、そのときの平均流・波浪計測結果と対応させて、合計 13 データセットを取得した（表-1）。

観測期間中は、図-2 に示すように観測棧橋先端で有義波高 2 m, 平均風速 10 m/s を超える風浪条件で、最大

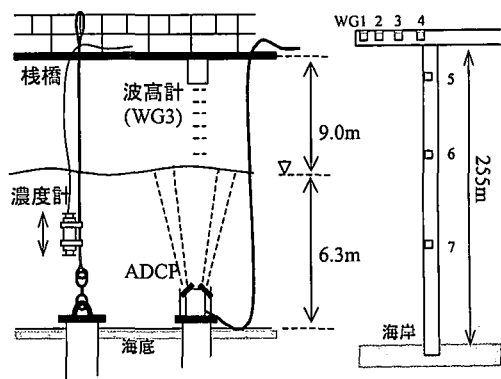


図-1 波高計、ADCP、レーザー濃度計の設置概要と観測棧橋での演高計の配置

* 正会員 博(工) 京都大学助手 防災研究所

** 正会員 博(工) 京都大学助教授 防災研究所

*** Dr.Eng. Assistant Professor, Iran Univ. of Science and Technology

表-1 計測ケース一覧 (ケース番号, 計測時間)

No.	Time (hh:mm:ss)	No.	Time (hh:mm:ss)
020908	7:48:45-8:14:40	020922	22:58:20-21:24:20
020909	9:04:50-9:34:50	021001	0:58:10-1:24:10
020911	10:57:30-11:22:40	021004	4:06:00-4:31:50
020913	12:57:00-12:22:40	021007	7:05:00-7:30:50
020915	14:55:30-15:26:10	021010	10:03:20-10:29:10
020917	17:04:50-17:30:30	021012	11:57:00-12:23:10
020919	18:55:30-19:21:10		

波高 4.5 m, 瞬間最大風速 15 m/s が観測されたストーム来襲時であった。ほとんどの波は栈橋沖側で既に砕波し、栈橋先端周辺もしくは栈橋の途中で再び砕波する場合も多々あった(栈橋先端での目視観測)。したがって、今回の計測点(観測栈橋先端)は砕波帯内または砕波帯外縁部(計測期間の始めと終わり)に位置しており、ここで得られたデータはストーム来襲時の砕波帯内から沖へ流出する浮遊砂量を代表していると考えられる。

3. 浮遊砂濃度・平均粒径の鉛直分布

3.1 計測結果

図-3 はケース番号 020911 と 020919 での浮遊砂濃度と平均粒径の計測結果を示している。計測データは各測点で 30 個(サンプリング 10 秒×5 分間)得られているので、それらをアンサンプル平均した 5 分間平均値(●)をエラーバー(最大-最小値)とともに示している。浮遊砂濃度は海面付近で非常に大きな値を示しているが、これは砕波によって混入した非常に小さな気泡を浮遊物として計測しているからである。すなわち、浮遊砂と海面から混入した気泡が混在した浮遊物の鉛直分布を示している。したがって、下層の 2 測点は浮遊砂濃度の、上方の 2 点は気泡の影響を大きく受けた計測結果であると考えられる。このため、平均粒径の鉛直分布では、中層で粒径が最も小さく、海底、海面に近づくに連れて粒径が大きくなっている。Farmer ら(1998)がメキシコ湾で行った計測によれば、海面下 0.7 m で砕波によって混入したと推測される気泡の径は 80~200 μm であり、深くなるに連れて気泡径が小さくなることが推定されている。今回の計測でも、最上層(平均水面下約 1 m)で平均

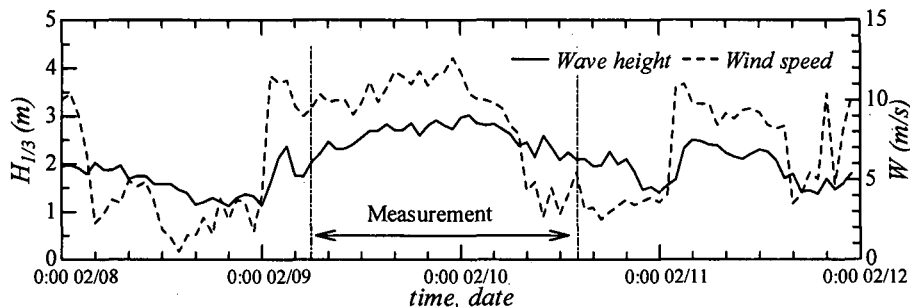
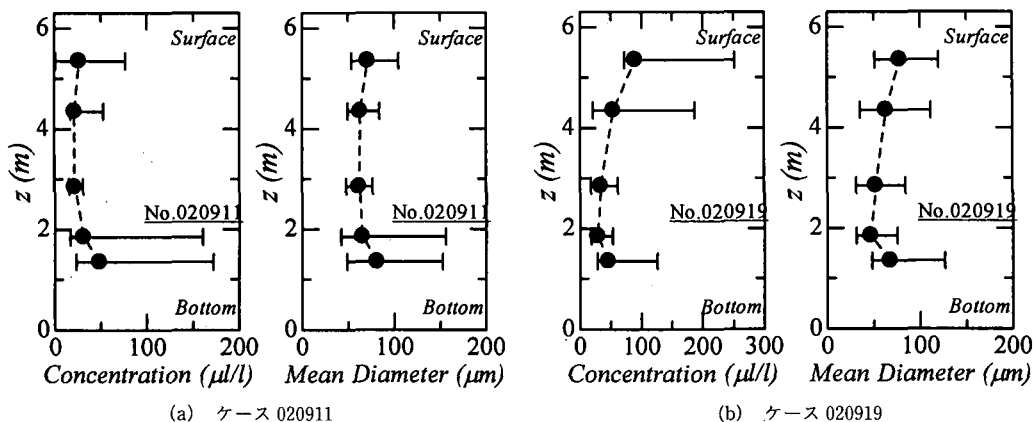


図-2 計測期間中の風浪条件 (計測期間の前後 1 日を含む)



(a) ケース 020911

(b) ケース 020919

図-3 浮遊砂濃度と平均粒径の計測結果例 (平均値とエラーバー (最大-最小値))

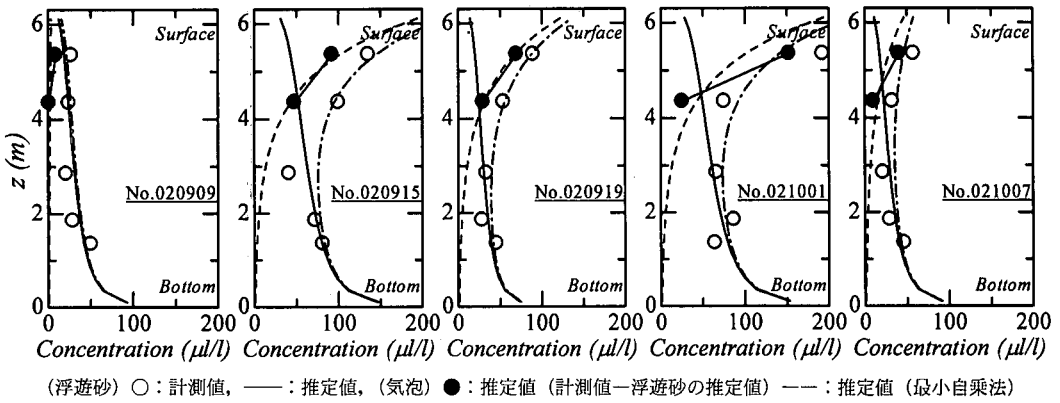


図-4 計測値と推定値の比較

粒径として $40 \sim 120 \mu\text{m}$ が計測されており，上層から中層へと深くなるに連れて平均粒径は小さくなっている。浮遊物の平均粒径の鉛直分布から判断して，海底からの浮遊砂と海面からの気泡が混在した状況であることが推測できる。

3.2 浮遊砂濃度の鉛直分布の推定

観測で得られた浮遊砂，流れおよび波浪の平均値を用いて，浮遊砂濃度の鉛直分布の推定を行った。前述のように，今回の計測期間中の波浪条件では，ほとんどの波が観測機橋先端で既に砕波しているため，浮遊砂の計測結果，とりわけ上層の2測点では気泡の影響が含まれていることが推測される。ここでは5測点のうち下層の2測点を対象とし，浮遊物の分布には次式の Vanoni の分布式 (Vanoni, 1975) を用いた。

$$C(z) = C_b \left(\frac{D-z}{z} \frac{b}{D-b} \right)^{\alpha}, \quad \alpha = \frac{w_s}{\kappa u_*} \quad \dots (1)$$

ここで， w_s ：砂粒子の沈降速度 (m/s)，

$$w_s = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) \frac{gd^2}{18\nu} \quad \dots (2)$$

C_b ：海底面からの高さ b (m) における浮遊砂濃度 (基準濃度)， D ：水深 (m)， z ：海底面からの高さ (m)， α ：Rouse 数， κ ：カルマン定数 ($=0.4$)， u_* ：海底での摩擦速度 (m/s)， γ ， γ_s ：水および砂の密度 (kg/m^3)， g ：重力加速度 (m/s^2)， ν ：水の動粘性係数 (m^2/s)， d ：砂粒子の粒径 (m) を示している。 u_* の推定には次式を用いた (Fredsoe・Deigaard, 1992)。

$$u_* = \sqrt{\frac{2}{\pi} f_w U_{1m} U_s} \quad \dots (3)$$

ここで， f_w ：摩擦係数， U_{1m} ：波浪による流速の振幅， U_s ：平均流速を示している。 U_s には ADCP 計測で得られた最下層での平均流速を用いた (計測時間約 25 分間の平均値)。基準濃度 C_b の決定には，境界層外縁での掃流砂濃度として与える Einstein の方法や海底粗度として

の砂蓮の影響を考慮した Rijn (1984) の方法などが提案されているが，ここでは下層 2 測点の平均値を海底面上 $b=1.60 \text{ m}$ ($z=1.35, 1.85 \text{ m}$ の平均高さ) における基準濃度 C_b として与え，式 (1) を用いることとした。計測された平均粒径は，どの計測ケースにおいても値に大きなばらつきが見られたため，砂粒子の沈降速度の推定式 (2) には，計測の最下層 ($z=1.35 \text{ m}$) における計測期間内での平均値 $75 \mu\text{m}$ を粒径 d として用いた。

図-4 では，各計測での式 (1)～(3) によって推定した浮遊砂濃度の鉛直分布 (実線) と計測された浮遊砂濃度 (5 分間平均値) (○) の比較を示しており，推定値が概ね良好な分布形を示していることが確認された。式 (1) の分布形は粒径によりその傾きが大きく変化する (図-5)。したがって，レーザー濃度計によって現地における (代表) 粒径を推定できたことが，浮遊砂濃度の鉛直分布の推定精度に大きく影響していると考えられる。

3.3 砕波による混入気泡の鉛直分布の推定

計測結果から，浮遊砂と砕波によって混入した気泡の

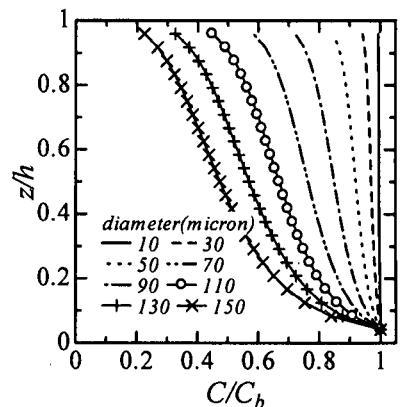


図-5 粒径による浮遊砂濃度分布式 (式 (1)) の傾きの違い (水深 h および基準濃度 C_b で無次元化)

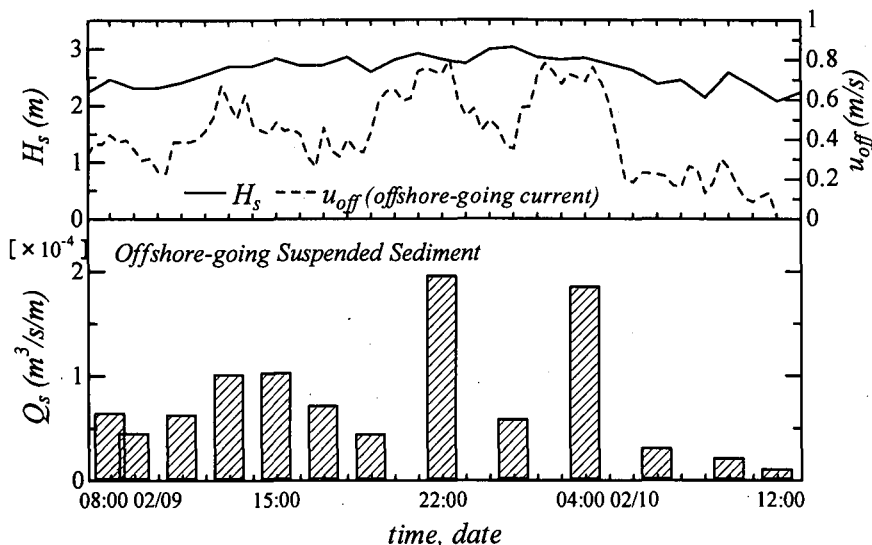


図-6 各計測で算定した沖方向浮遊砂量 Q_s と波高 H_s 、沖向き流れ u_{off} の時系列変化

分離し、混入気泡の鉛直分布の推定を試みた。計測結果（5分間平均値）から前節で推定した浮遊砂濃度を差し引くことによって上層2測点での気泡濃度（図-4中の●）を求め、分布形を海底からの高さ（ z ）の指数関数と仮定し、最小自乗法により混入気泡濃度の鉛直分布を推定した（同図の破線）。この時、海底まで到達した気泡は無視できると仮定している（実際には $1 \mu l/l$ と仮定する）。推定結果では、砕波頻度が上がる（目視観測）に連れて上層での混入気泡濃度も高くなり、波浪条件による混入気泡の分布の変化も確認できる。今回の推定では海底まで到達した気泡は無視したが、吉岡ら（1998）によれば、風波砕波の場合、最大で有義波高の5倍程度の深さまで気泡が侵入することが観測されている。レーザー濃度計の計測はストーム来襲時に砕波帯内で実施しており、砕波による気泡が海底付近まで到達しているものと考えられるので、浮遊砂濃度を過大評価している可能性はある。

4. 沖方向浮遊砂量の推算

推定された浮遊砂濃度の鉛直分布と ADCP によって得られた平均流の鉛直分布から各計測での沖方向浮遊砂量 Q_s （範囲は $z=1.35\sim 5.1$ m）を算定した（図-6）。最大で $2.0 \times 10^{-4} m^3/s/m$ を超える浮遊砂量が推算され、砕波帯内での浮遊砂による沖方向漂砂量の多さが確認できる。また、このような砕波帯からの大量の沖方向浮遊砂は、砂を砕波帯の外側にまで輸送し、砕波帯沖では風による沿岸流（広域海浜流）によって沿岸域の広範囲に輸送されていると推測され、沖合での海底地形変化の予測にも砕波帯内からの沖方向漂砂量の推算は重要な課題であると考えられる。

波浪のエネルギーフラックスに關係する量として次式の W (m^2/s) を仮定し、波浪エネルギーと沖方向浮遊砂量の關係を図-7に示す。

$$W = H_s^3 T_s \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 H_s 、 T_s ：観測栈橋先端の4台の波高計で得られた有義波高 (m) および有義波周期 (s) の平均値である。両者には線形關係があり、 W がある限界値 (W_c) を超えると沖方向浮遊砂が発生することがわかる。これにより、波浪条件から砕波帯内での沖方向浮遊砂量が定量的に推定可能であると考えられる。

5. 今後の検討課題

現地での浮遊砂の粒径を測定するために、観測期間中に北原式採水器を用いて採水を行った。採水地点は、浮

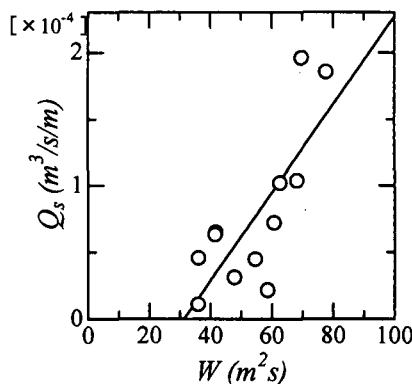


図-7 波浪エネルギーフラックスに關係する量 W と浮遊砂量 Q_s の關係

遊砂濃度の計測地点から約2m離れた位置の海底面上約1.5m地点(レーザー濃度計の最下層測点に相当)である。採水サンプル内の粒径の測定は、光学式顕微鏡による写真画像から目視によって行った。

採水実施時のレーザー濃度計による平均粒径データは70~150 μm に分布しており、5分間平均では115 μm という結果が得られた。しかし、写真画像では最大でも40 μm 程度の粒径しか確認できなかった。実験室および現地におけるレーザー濃度計の精度に関する検討の余地がある。

6. 結 語

本研究では、大渦波浪観測所の観測栈橋を援用し、レーザー濃度計(LISST-25)、ADCPおよび超音波式波高計によって、高波浪条件下、砕波帯内での平均流速、浮遊砂の濃度・平均粒径の鉛直分布と波浪特性を計測を行った。計測データを解析し、以下の成果が得られた。

(1) 計測データとVanoniの分布式を用いて、浮遊砂濃度と気泡の分離を行い、浮遊砂濃度と気泡の鉛直分布の推定を行った。

(2) 推定した浮遊砂濃度の鉛直分布を用いて、ストーム時、砕波帯内での沖方向浮遊漂砂量の算定を行った。

(3) 冲向き浮遊砂量と波浪エネルギーフラックスの間には線形関係があり、波浪条件から砕波帯内での冲向き浮遊砂量が定量的に推算できる。

今回の計測では、高波浪条件下での貴重なデータが得られたが、波浪条件が限られていた。今後は、多様な波浪条件下での計測・データの蓄積を行うことが必要である。また、レーザー濃度計の精度に不明な点が残されているため、実験室でのデータの検証や現地での適用性について検討を行う必要がある。

最後に、本研究は京都大学防災研究所特定共同研究12P-1(代表者:今本博健)および科学研究費補助金(奨励研究A, 課題番号:13750490)の補助を受けたことを

ここに付記し、深謝する。

参 考 文 献

- 泉宮尊司・國田知基・泉 正寿・永松 宏・石橋邦彦(1999): 船体取付型 ADCP によるシルトおよび微細砂の濃度の時空間変動の現地観測, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 576-580.
- 片山裕之・岡安章夫・永田達也(1999): 連続採水による現地砕波帯浮遊砂濃度および粒度分布の時系列変化, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 571-575.
- 山下隆男・吉岡 洋・路 明・加藤 茂(1997): 砕波帯内の海浜流, 波浪場の ADCP 観測, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 361-365.
- 吉岡 洋・芹澤重厚・高山知司(1998): 超音波による海面境界層の観測(風波砕波による気泡の取り込み), 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 71-75.
- Beach, R. A. and R. W. Sternberg (1996): Suspended-sediment transport in the surf zone: response to breaking waves, *Continental Shelf Research*, Vol. 16, No. 15, pp. 1989-2003.
- Farmer, D. M., S. Vagle and A. D. Booth (1998): A free-flooding acoustical resonator for measurement of bubble size distributions, *J. Atmospheric and Ocean Tech.*, pp. 1132-1146.
- Fredsoe, J. and R. Deigaard (1992): *Mechanics of coastal sediment transport*, World Scientific, 369 p.
- Rijn, L. C. (1984): Sediment transport, Part II: suspended load transport, *J. Hydraulic Eng.* Vol. 110, No. 11, pp. 1613-1641.
- Rose, C. P. and P. D. Thorne (2001): Measurements of suspended sediment transport parameters in a tidal estuary, *Continental Shelf Research*, Vol. 21, pp. 1551-1575.
- Vanoni, V. A. (1975): *Sedimentation Engineering*, ASCE Manuals and Reports of Engineering Practice No. 54, New York, p. 76.
- Williams, J. J., C. P. Rose, P. D. Thorne, L. E. Coates, J. R. West, P. J. Hardcastle, J. D. Humphery, S. P. Moores and D. J. Wilson (1996): Observed suspended sediments in storm conditions, *Proc. 25th ICCE*, pp. 3257-3296.
- Williams, J. J., C. P. Rose and L. C. Rijn (1999a): Suspended sediment concentration profiles in wave-current flows, *J. Hydraulic Eng.*, Vol. 125, No. 9, pp. 906-911.
- Williams, J. J., C. P. Rose, P. D. Thorne, B. A. O'Connor, J. D. Humphery, P. J. Hardcastle, S. P. Moores, J. A. Cooke and D. J. Wilson (1999b): Field observations and predictions of bed shear stresses and vertical suspended sediment concentration profiles in wave-current conditions, *Continental Shelf Research*, Vol. 19, pp. 507-536.