

波・流れ共存場における混合砂シートフロー漂砂量の算定式

渡 辺 晃*・佐藤 慎司*・二宮 宗**・高地 潤***

1. はじめに

一般に自然海浜の底質は波による淘汰作用のために局所的には粒径が比較的揃っている。しかし、漂砂源近傍で淘汰が進んでいない海域や養浜工が実施された海岸などでは、局所的にも広い粒度分布の混合粒径砂が存在する。そのような場合の海浜変形や底質粒径の時空間変化を予測するためには、波・流れ共存下における混合砂の粒径別漂砂量を合理的に算定する手法が必要となる。

混合砂の漂砂に関し、砕波帯内で卓越するシートフロー条件に対する研究は少ない。例えば波・流れ共存下のシートフロー漂砂量式である Dibajnia・Watanabe (1996) の式はその提案時点までの実験データにはよく適合するものであったが、その後のより広範で高精度の実験データとの整合性は特に混合砂に対してあまりよくなかった。それを受けて佐藤ら (2000) は更に広範な条件での混合砂シートフロー実験を行い、細粗底質間の相互作用を考慮した漂砂量式を提案した。しかしながら、実験が定常流成分のない振動流のみに対するものであったこともあり、その算定式により大型波動水路を用いた現地スケールの細粗混合砂海浜断面実験に対する漂砂量算定を行ったところ、砕波点近傍から戻り流れが卓越する範囲にかけての再現性がかなり低いことが見出された (田中ら, 2000b)。

そこで本研究では、特に「戻り流れの影響」に着目し、細粗 2 粒径混合砂に対して沖向き定常流を重合した振動流水槽実験を行い、実験結果と従来の研究成果に基づいて波・流れ共存場の混合砂シートフロー漂砂量算定式を提案することを目的とした。

2. 振動流・逆流共存下の混合砂漂砂実験

任意波形振動流水槽を用いて細粗混合砂に対するシートフロー漂砂実験を行った。佐藤ら (2000) と同様に、混合砂としては中央粒径 $d_f=0.2\text{ mm}$ の細砂と $d_c=0.8\text{ mm}$ の粗砂を組合せ、細砂混合率 P_f を 30%, 50%, 70%,

100% の 4 種類に変化させた。振動流は周期を $T=3\text{ s}$ 、流速波形の非対称度 $u_{\max,0}/\bar{u}$ を 0.6 に固定し ($u_{\max,0}$ は振動流成分の岸向き最大流速、 $\bar{u}$ は流速全振幅)、定常流重合時の最大流速は $u_{\max}=0.67\sim1.85\text{ m/s}$ の範囲、定常流流速は $U=0, -1, -2\text{ m/s}$ (岸向き正) の条件に対する 27 ケースを扱った。各ケースについて、観測部中央断面を挟む両側の砂の質量の増減から細粗砂それぞれの正味の体積換算単位幅単位時間漂砂量 Q_f, Q_c (岸向き正) を求め、またハイスピード VTR により現象を観察記録した。

表一に実験条件と次式で定義される無次元漂砂量を示す。

$$\phi_f = \frac{Q_f}{w_{bf}d_f}, \quad \phi_c = \frac{Q_c}{w_{bc}d_c} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 w_{bf} と w_{bc} は細砂・粗砂それぞれの沈降速度である ($w_{bf}=2.3\text{ cm/s}$, $w_{bc}=10.0\text{ cm/s}$)。

表一 実験条件と細砂・粗砂の無次元漂砂量の実測値

Case No.	U (m/s)	$u_{\max}$ (m/s)	P_f (%)	t_{cut} (s)	Fine ϕ_f	Coarse ϕ_c
1	-0.2	0.67	100	156	-2.51	---
2	-0.2	1.00	100	36	-17.1	---
3	-0.2	1.19	100	30	-29.3	---
4	-0.2	1.19	100	66	-35.8	---
5	-0.2	1.41	100	36	-72.7	---
6	-0.2	1.63	100	39	-103.0	---
7	-0.1	1.30	100	30	-27.7	---
8	-0.1	1.41	100	30	-50.8	---
9	-0.1	1.63	100	27	-77.3	---
10	0	1.19	100	48	4.28	---
11	0	1.41	100	54	-3.14	---
12	0	1.63	100	33	-10.1	---
13	-0.2	1.00	70	48	-5.40	0.0026
14	-0.2	1.19	70	57	-11.6	-0.0258
15	-0.2	1.19	70	51	-17.6	-0.123
16	-0.2	1.19	70	48	-26.1	-0.165
17	-0.2	1.41	70	36	-21.6	-0.0613
18	-0.2	1.41	70	42	-23.7	-0.160
19	-0.2	1.63	70	39	-24.3	-0.0605
20	-0.2	1.63	70	39	-38.7	-0.294
21	-0.2	1.85	70	30	-57.3	-0.522
22	-0.2	1.00	50	39	0.178	0.131
23	-0.2	1.19	50	42	-1.75	0.187
24	-0.2	1.41	50	33	-2.42	0.313
25	-0.2	1.63	50	48	-6.73	0.200
26	-0.2	1.00	30	30	-1.38	-0.0643
27	-0.2	1.41	30	30	-0.639	0.508

* 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
* 正 会 員 修(工) 御電通
*** 学生会員 東京大学大学院修士課程 社会基盤工学専攻

3. 既往の漂砂量式への適用結果

3.1 佐藤らの混合砂漂砂量算定式

佐藤ら (2000) は, Dibajnia・Watanabe (1996) の漂砂量式をベースに, 異粒径底質間の干渉機構をモデル化することにより, 以下の混合砂漂砂量式を提案した.

$$\Phi_i = P_i \cdot \Phi_{i,100} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\Phi_{i,100} = 0.0015 \cdot \text{sign}(\Gamma_i) |\Gamma_i|^{0.5} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\Gamma_i = \frac{u_c T_c (\Omega_{ci}^3 + \Omega_{ti}^3) - u_t T_t (\Omega_{ci}^3 + \Omega_{ti}^3)}{(u_c + u_t) T} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで, 添え字の i は対象とする粒径 d_i の底質に相当することを意味し, u_c, u_t は流速波形の岸向き・沖向き rms 振幅 $\times \sqrt{2}$, T_c, T_t は岸向き・沖向き流速の継続時間である. また, $\Omega_{ji}, \Omega'_{ji}$ (j は c または t を表す) は次式で与えられる.

$$\left. \begin{aligned} \Omega_{ji} &= g_{ji} \cdot f_{1i} \\ \Omega'_{ji} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{ for } \omega_{ji} \cdot f_{2i} \leq \omega_{cr},$$

$$\left. \begin{aligned} \Omega_{ji} &= \frac{\omega_{cr}}{\omega_{ji} \cdot f_{2i}} q_{ji} \cdot f_{1i} \\ \Omega'_{ji} &= \left(1 - \frac{\omega_{cr}}{\omega_{ji} \cdot f_{2i}}\right) q_{ji} \cdot f_{1i} \end{aligned} \right\} \text{ for } \omega_{ji} \cdot f_{2i} > \omega_{cr}$$

$$\dots\dots\dots (5)$$

ただし, q_{ji} は正負各周期間の底質輸送量を直接規定するパラメタ, ω_{ji} は巻き上げられた底質が沈降するのに要する時間と正負各周期との比 (すなわち, 相対巻き上げ高さ) を表すパラメタで, それぞれ式 (6) と式 (7) で定義される.

$$q_{ji} = \omega_{ji} T_j \sqrt{\frac{sg}{d_i}} = \frac{1}{2} \frac{u_j^2}{\omega_{bi} \sqrt{sg d_i}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\omega_{ji} = \frac{1}{2} \frac{u_j^2}{sg \omega_{bi} T_j} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$f_{1i} = \left(\frac{d_i}{d_m}\right)^{0.5}, \quad f_{2i} = \left(\frac{d_i}{d_m}\right)^{0.7} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$d_m = P_f \cdot d_f + (1 - P_f) d_c \quad \dots\dots\dots (9)$$

式 (5) 中の ω_{cr} はシートフロー漂砂に対しては定数 1.0 である. また, s は底質の水中比重 ($=1.65$), d_m は混合砂の平均粒径で, 式 (9) は細粗 2 粒径混合砂の場合に相当する. 均一砂の場合には, 異粒径間干渉に関わる係数が $f_{1i} = f_{2i} = 1$ となり, 上式は Dibajnia・Watanabe (1996) の式と完全に一致する.

3.2 細砂 100% の場合の実測漂砂量と計算値の比較

図-1 は, 流れなしおよび逆流 $U = -0.2 \text{ m/s}$ の条件に対して, $P_f = 100\%$ (細砂のみ) のケースの無次元漂砂量 Φ_f と $u_{\max}$ の関係を, 本実験の実測値と Dibajnia・

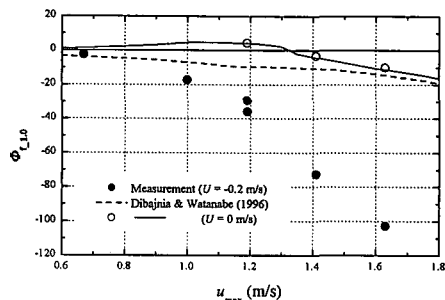


図-1 定常流なしおよび逆流 ($U = -0.2 \text{ m/s}$) 存在時の均一細砂の無次元漂砂量の実測値と Dibajnia・Watanabe の式による計算値の比較

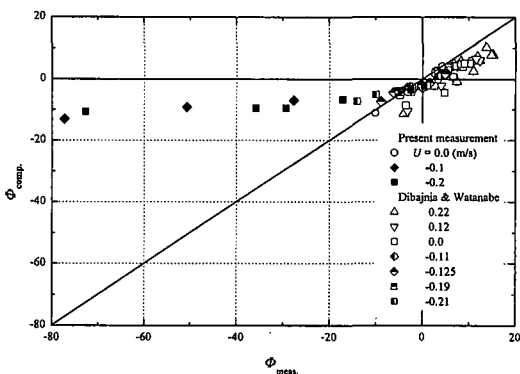


図-2 均一細砂の無次元漂砂量の実測値と Dibajnia・Watanabe の式による計算値の定常流流速別比較

Watanabe (1996) の式による計算値とで比較したものである. 振動流のみの場合の両者の一致は良好だが, 逆流が重なったときには $u_{\max}$ が大きくなるほど実測値と計算値の差異は極めて大きくなり, 均一砂に対してもこの算定式の見直しが必要であることは明瞭である.

図-2 に, 均一細砂に対する Dibajnia・渡辺 (1991) の実験と本実験の全ての実測無次元漂砂量 Φ_{meas} と Dibajnia・Watanabe の式による計算値 Φ_{comp} の関係を, 振動流に加えた定常流流速別に記号を変えて示す. やはり逆流 ($U < 0$) の場合には実測値と計算値の差が極めて大きい. 順流 ($U > 0$) の場合 (Dibajnia・渡辺のデータのみ) に両者の差が小さいのは, 順流における実験では流速全振幅 $\bar{u}$ ないしは定常流流速を差し引いた振動流成分の岸向き最大流速 $u_{\max,0}$ が相対的に小さな条件のみであったためと考えられる. これらの結果は漂砂量算定式の改良には U と $u_{\max}$ の組合せの影響が重要であることを示唆する.

4. 定常流重合時の混合砂漂砂量算定式

4.1 現象の解釈と漂砂量算定式

振動流・定常流重合時の混合砂漂砂量算定式の提案を目指す, 振動流のみの場合には上述の佐藤ら (2000)

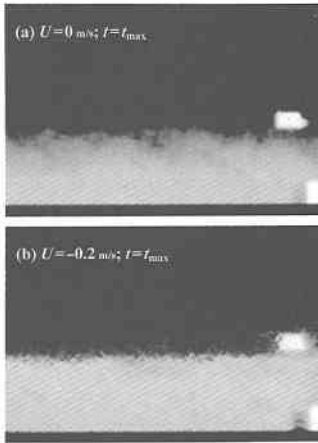


写真-1 砂の舞い上がり状況 (岸向き流速最大時)

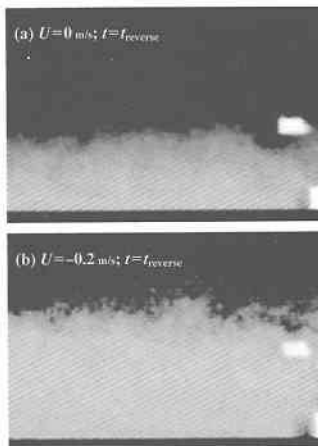


写真-2 砂の舞い上がり状況 (岸→沖向き流速反転時)

の式が広範な細粗混合砂実験における実測漂砂量を精度よく再現できることが既に確かめられているので、この式をベースにして改良を加えることとする。

写真-1, 2は、実流速の岸向き最大値 $u_{\max}$ ($u_{\max,0}$ ではない) が共に 1.63 m/s で (a) 振動流のみの場合と (b) 逆流が重合した場合に対する、岸向き流速最大時および岸向きから沖向きへの流速反転時の、砂の舞い上がり状況の画像である。写真-1 では (a) と (b) にあまり差は認められないが、写真-2 では (b) の逆流が重なった場合の方が著しく砂の舞い上がりが大きいことが明らかである。こうした現象観察から、特に岸向き (正) 流速から減速して沖向き (負) 流速へ反転する位相において、逆流が重合した場合の方が砂の舞い上がり強度が著しく増加することが分かった。これは $u_{\max}$ が等しい条件同士では、逆流が重合している場合の方が上記位相での負の加速度 (減速) が大きいと相対的に強い乱れが生じて、より多量の砂を巻き上げた結果と解釈される。

しかしながら、この効果を加速度の変化として直接定式化して佐藤らの式に組み込むことは困難である。また式をあまり複雑にすることも望ましくない。そこで実測漂砂量の変化の定常流速 U や岸向き ($U > 0$ の場合には沖向き) 最大流速 $u_{\max}$ への依存性の検討と上記の漂砂現象観察結果に基づいて、いわば経験的に、できるだけ簡便な形でこの効果を取り入れることにした。すなわち、逆流の重合による岸向き流速時の舞い上がり強度の増加に伴う漂砂量の変化をより精度よく評価するためには q_c , ω_c の式中の u_c を、また逆に順流が重合したときには q_t , ω_t の式中の u_t を補正することが必要であると考え、式 (6) と (7) 中の u_j を以下の式の u'_j で置き換えることにする。

$$\left. \begin{aligned} u'_c &= u_c \\ u'_t &= u_t (1 + A \cdot \sqrt{u_t \cdot U} / w_{0m}) \end{aligned} \right\} \text{ for } U > 0 \cdots \cdots (10)$$

$$\left. \begin{aligned} u'_c &= u_c (1 + A \cdot \sqrt{u_c |U|} / w_{0m}) \\ u'_t &= u_t \end{aligned} \right\} \text{ for } U < 0 \cdots \cdots (11)$$

ただし、 w_{0m} は混合砂の平均沈降速度で、細粗 2 粒径混合砂の場合には次式で算定するものとする。

$$w_{0m} = P_f \cdot w_{0f} + (1 - P_f) w_{0c} \cdots \cdots (12)$$

式 (10)～(12) を佐藤らの式 (2)～(9) と組み合わせたものが本研究で提案する振動流・定常流共存場の混合砂シートフロー漂砂量算定式である。なお、式 (10), (11) 中の定数 A の値としては、試行計算の結果 0.035 と定めた。

4.2 新漂砂量算定式による計算値と実測値との比較

まず均一細砂 ($P_f = 100\%$) に対して、図-1 と同様に $U = -0.2$ m/s のケースの本実験結果を新算定式による計算値と比較したものが、図-3 である。計算値と実測値の一致度は著しく向上している。

図-4 は図-2 に対応しており、均一細砂に対する順流・逆流・定常流なしの全データについて無次元漂砂量の計算値が実測値と比較されている。図-2 に比し全体の

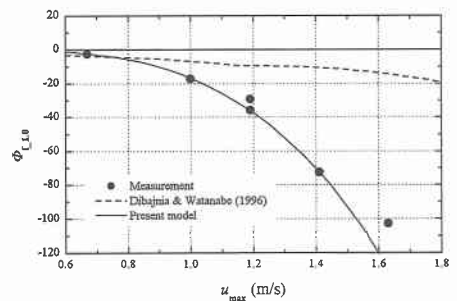


図-3 逆流 ($U = -0.2$ m/s) 存在時の均一細砂の無次元漂砂量の実測値と新漂砂量算定式による計算値の比較

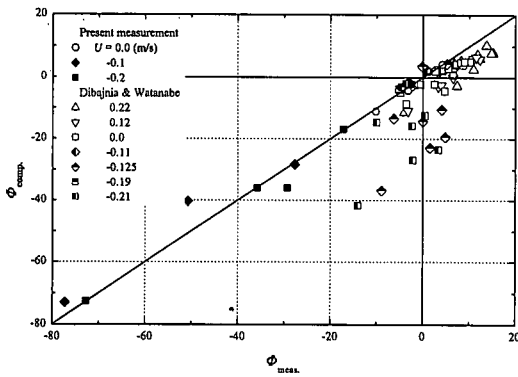


図-4 均一細砂の無次元漂砂量の実測値と新漂砂量算定式による計算値の定常流速別比較

的な一緻度が格段に向上していることは明らかである。ただし、Dibajnia・渡辺 (1991) の $U=-0.125$ m/s と -0.21 m/s のケースのデータについては、逆に一緻度が低下している。そこで、均一細砂に対して、今回の実験と Dibajnia・渡辺の実験の漂砂量データを比較したところ、これらのケースではほぼ同一条件の下での両者の実験における漂砂量の測定値自体がかなり異なっていることが認められた。従って、上記の不一致は必ずしも新算定式の問題とはいえない。

次に細粗混合砂に対して新算定式の適用性を調べる。定常流なしの条件については、本式は既に精度が確認されている佐藤ら (2000) の式と合致するので、ここでは強い逆流条件である $U=-0.2$ m/s のケースについてのみ検討結果を示す。図-5, 6, 7 は $P_f=70\%$, 50% , 30% の場合の細砂・粗砂それぞれの無次元漂砂量 ϕ_r , ϕ_c と u_{max} の関係を示したものである。

まず $P_f=70\%$ に対する図-5 を見ると、細砂については佐藤らの式よりも適合度が向上しているが、本式において $P_f=80\%$ とした計算値がより実測値に近い。一方、粗砂については佐藤らの式よりもむしろ適合度が低下しており、本式においては $P_f=97\%$ とした計算してようやく実測値に近づく。これらは細砂混合率 P_f が高い場合、本式中の係数 A の値を細砂に対しては 0.035 より大きく、粗砂に対しては小さくしなければならないこと、言い換えれば新算定式では定常流重合時には粗砂含有率が低い場合に粗砂の含有の影響が過大評価されることを意味し、式表現自体に改善の必要がある。

一方、細砂混合率がそれほど高くない $P_f=50\%$, 30% に対する図-6, 7 では、佐藤らの式に比し本算定式による計算値は特に粗砂について実測値との適合度が著しく向上していることが明瞭である。

4.3 大型水路海浜断面実験データへの適用

上記で提案・検討した新漂砂量算定式を、田中ら (2000a, 2000b) による現地スケールの細粗 2 粒径混合砂

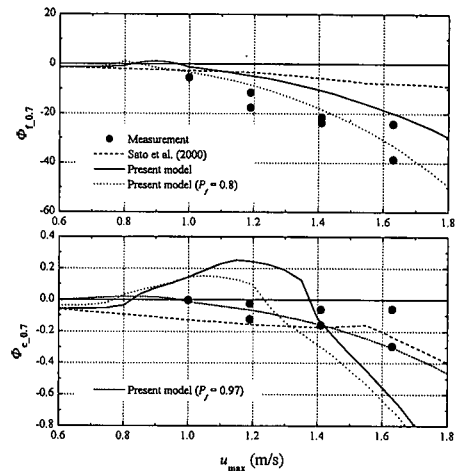


図-5 逆流存在時の混合砂の無次元漂砂量の実測値と新漂砂量算定式による計算値の比較 ($P_f=70\%$)

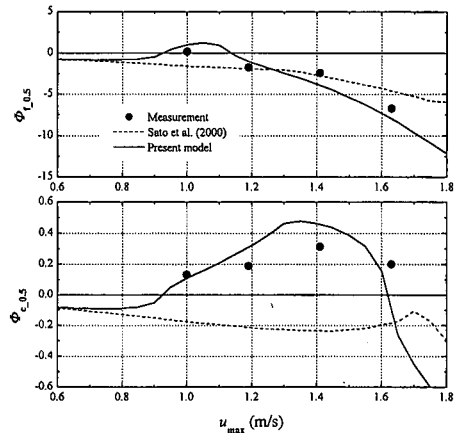


図-6 逆流存在時の混合砂の無次元漂砂量の実測値と新漂砂量算定式による計算値の比較 ($P_f=50\%$)

海浜断面実験データへ適用してみた。実験条件・手法の詳細は原論文に譲るが、底質は中央粒径 0.27 mm の細砂と 0.84 mm の粗砂を初期細砂混合率 $P_f=70\%$ で混合したものを用い、初期地形を一樣勾配 $1/30$ として、周期 $T=3.5$ s, 換算沖波波高 $H_0=0.34$ m の堆積性の波を 38 時間作用させた後、引続き $H_0=1.0$ m の侵食性の波を 20 時間作用させて各種計測を行い、地形変化や分級過程を検討している。ここでは、侵食性の波作用 7.2 時間後の漂砂量を検討対象とする。

図-8 に実測データと計算結果を示す。横軸の X は初期静水汀線からの沖向き距離であり、上段から、(a) 細砂漂砂量 Q_r の実測値(便宜上、地形変化と分級度実測値からの算定値を実測値とよぶ)と本算定式による計算値、

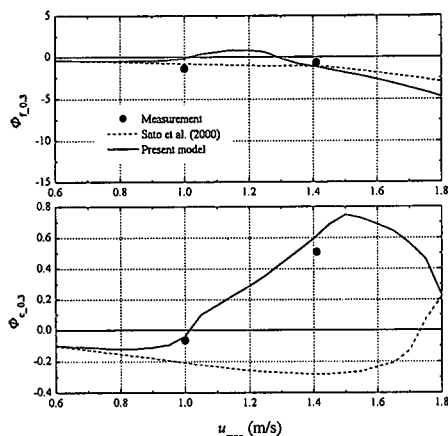


図-7 逆流存在時の混合砂の無次元漂砂量の実測値と新漂砂量算定式による計算値の比較 ($P_f=30\%$)

(b) 粗砂漂砂量 Q_c の実測値と計算値, (c) 細砂混合率 P_f の実測値, (d) 定常流 (戻り流れ, ただし岸向きを正) 流速 U の計算値, および (e) 静水位を基準とした底面高 z_b の実測値である。漂砂量算定式の適用にあたって必要となる u_c , u_t , T_c , T_t , U の岸沖分布は地形と沖波条件から修正 Boussinesq 方程式に基づく数値モデルで求まる計算値を用いた。また細砂混合率 P_f に関しては、実測値が離散的であることやその精度と漂砂量算定式の上述の特性等を勘案して $P_f=75\%$ の一定値とし、粗砂漂砂量については $P_f=95\%$ として計算した値も示した。

細砂・粗砂ともに沖向き漂砂量のピーク値はほぼ実測値と適合しているといえよう。 $P_f=95\%$ とした場合に粗砂漂砂量の沖向きピーク値が過小評価されて適合度がむしろ低下しているのは、その付近での実際の P_f が図に見られるように 60% 程度とかなり小さいためであろう。また細砂・粗砂ともにバーの沖側でかなり大きい岸向き漂砂量が計算されているが、これは主にその領域での戻り流れが過小評価されているためではないかと思われる (田中ら, 2000b, 図-5 参照)。バー付近やその岸側も含め、碎波に伴う乱れの影響も無視し得ない。

5. おわりに

振動流水槽を用いた逆流重合条件での漂砂量測定と現象観察の結果および考察に基づき、佐藤ら (2000) の式を補正することにより、波・流れ共存下の混合砂シートフロー粒径別漂砂量算定式を導いた。新算定式は従来の式に比較してはるかに広範な振動流・定常流条件に適用可能であることが確認された。検証用に実施した現地スケールの実験との比較によっても、戻り流れ存在時の沖向き漂砂量の算定精度が向上することが示された。しか

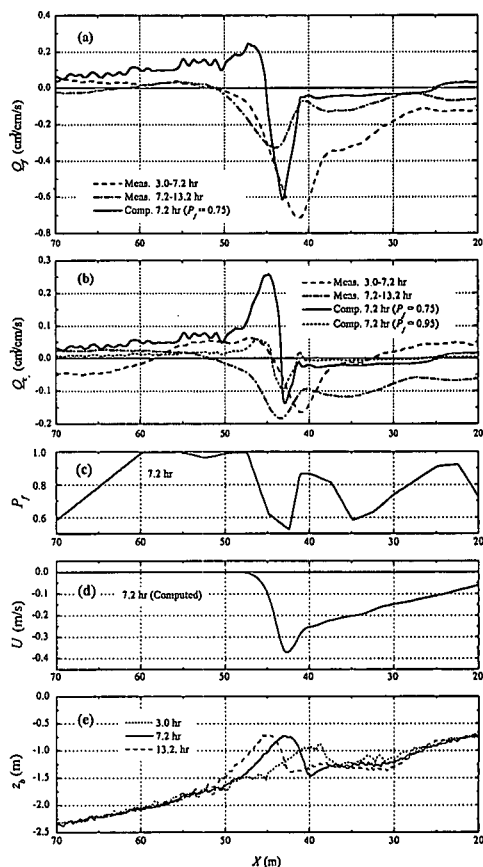


図-8 新漂砂量式の大規模水路海浜断面実験条件への適用

しながら、現実重要な対象となることの多い細砂混合率が高い場合に対しての特に粗砂漂砂量の算定精度がなはだ不十分であり、加速度の影響のより合理的な表現とともに、今後更なる改良を加えていく予定である。

参考文献

- 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.
- 田中正博・井上 亮・佐藤慎司・磯部雅彦・渡辺 晃・池野正明・清水隆夫 (2000a): 2 粒径混合砂を用いた大型海浜断面実験と粒径別漂砂量の算出, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 551-555.
- 田中正博・佐藤慎司・磯部雅彦・渡辺 晃・小林 博 (2000b): 2 粒径混合砂海浜変形モデルを用いた大型海浜断面実験の再現, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 591-595.
- Dibajnia, Mohammad・渡辺 晃 (1991): 非対称振動流によるシートフローの発生と漂砂量, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 236-240.
- Dibajnia, M. and A. Watanabe (1996): A transport rate formula for mixed-size sands, Proc. 25th Intl. Conf. on Coastal Eng., pp. 3791-3804.