

肱川河口砂州の変形について

伊 福 誠*・米澤泰雄**・中西まゆみ***

1. ま え が き

愛媛県西南部に位置する肱川は比較的標高の低い水源(標高 460 m)より河口まで、途中多くの支川と合流し喜多郡長浜町において伊予灘に注ぐ、幹線流路延長 103 km, 流域面積 1210 km²の一級河川である。また、肱川は流域の 90% を山地に囲まれているため、河道に沿って山が迫り、かつ流路延長に対して水源が低いために河床勾配は 1/8600 と緩く、規模の大きい降雨による出水時には川沿いの狭い平野部に洪水や氾濫をもたらしてきた。

肱川では 1960 年代の後半から河口閉塞が社会問題となってきた。1968 年頃、右岸より伸びた砂州の長さは河幅の 10% 程度であったが、1976 年には河幅の 40~50% 程度にまで達し河口が閉塞され、その頃より出水による砂州の崩壊によって河口付近に堆積した土砂が航路に浅瀬を形成し、漁船の事故がたびたび発生した(建設省, 1977)。また、肱川の河口砂州は河道内に位置しており、現在も徐々に海側に移動しその規模も増大する傾向にある。

こうしたことから、まず、肱川河口周辺の地形図、流量年表および砂州周辺に関する観測資料をもとに、河口砂州周辺の地形変化特性の解明に努める。次に、出水時における河口周辺の流況や地形変化を予測する平面 2 次元モデルを構築し、Rajaratnam・Nwachukwu (1983) が水路中に groyne を設置した場合の実験との比較から数値モデルの有用性を確認する。さらに、肱川の河口周辺地形の観測資料に基づいて、出水時を対象として河口周辺の地形変化を数値解析的に調べようとするものである。

2. 観測資料に基づく地形変化の解析

2.1 解析方法

肱川河口周辺の地形図(1978~1990 年)および右岸砂州周辺の地形図(1978~1984 年)をもとに、河口周辺では 50 m×50 m の正方形の格子網を河口部付近を中心に

上・下流方向に 1200 m, 河幅方向に 750 m の範囲で作成した(図-1)。また、右岸砂州地形周辺では 10 m×10 m の正方形の格子網を右岸砂州部を中心に、上・下流方向に 210 m, 河幅方向に 100 m の範囲で作成した。読みとった水深をもとに河口周辺および砂州周辺の地形の変遷について調べた。

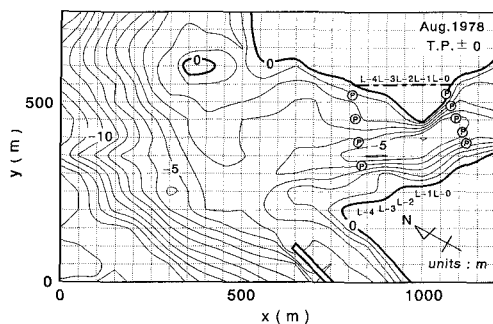


図-1 肱川河口深淺図(1978年8月)

2.2 解析結果

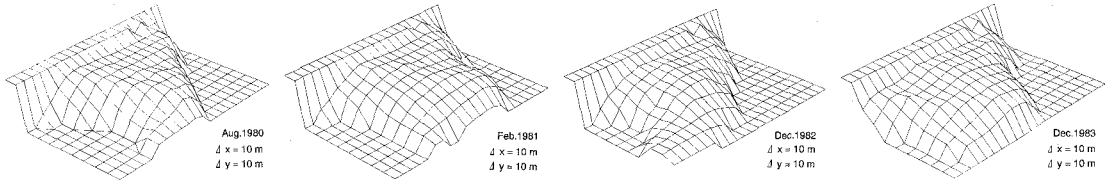
a) 出水による右岸砂州の変形

図-2 は、出水による右岸砂州の変形について示したものである。(a), (b), (c) および (d) は、それぞれ 1980 年 8 月, 1981 年 2 月, 1982 年 12 月 および 1983 年 12 月のものである。(a) は、1980 年 7 月の出水後(日平均流量の最大値 1379 m³/s)のものであり、出水により砂州上流側が侵食され、砂州先端部は海側に曲がり鎌型の形状を呈する。(b) では、(a) と比較すると砂州の上流側および海側とも堆積し、とくに先端部付近の砂州幅が広くなり、1980 年 7 月の出水前の形状に戻りつつある。(c) では、1982 年 7 月の出水(日平均流量の最大値 1833 m³/s)により砂州上流側がかなり侵食され、(a) と同様先端部は海側に曲がり鎌型の形状を呈するが、その変形の度合いは (a) よりも大きい。(d) は、(c) の約 1 年後のものである。砂州先端部の上流側は堆積し、海側は侵食されている。また、砂州の上流側の護岸付近は (c) とほぼ似た形状であるが、海側の護岸付近は土砂が堆積し (c) と比較すると砂州が成長しているようである。1978 年 8 月

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部土木海洋工学科

** 正会員 工修 国際工業(株)

*** 学生会員 愛媛大学大学院工学研究科



(a) 1980年8月 (b) 1981年2月 (c) 1982年12月 (d) 1983年12月
 図-2 出水による砂州の変形

から1984年11月までをみると、砂州は上流側から海側へ移動しているようである。出水の直後では、砂州の上流側が侵食され先端部が曲がり変形する。その後は、波浪による漂砂や河川の流砂現象により徐々に砂州の海側に堆積し曲がった先端部は消滅する。こうした過程が繰り返されることによって砂州は徐々に海側に移動するものとする。

b) 河口縦断面形状の経年変化

図-3は、図-1における $y=500$ m の砂州のほぼ中央部を通る K-11 断面の経年変化を示したものであり、河口周辺の深浅図のなかで最も古い1978年8月とそれ以降4年間隔のものである。なお、図中には全観測期間における平均断面も示している。1982年12月の地形は、1982年7月および8月の台風による出水によって砂州の形状が大きく変化し、砂州が海側に曲がり鎌型の形状を呈する。なお、1978年8月には約130mであった砂州幅は徐々に増大し1990年12月には約200mにもなり、

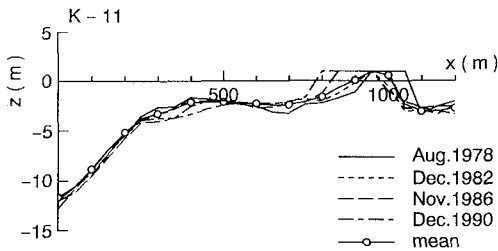


図-3 河口縦断面形状の経年変化

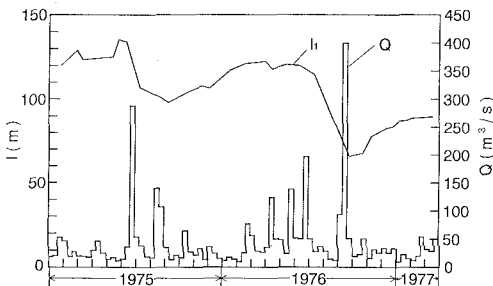


図-4 砂州の長さと同流量

砂州は成長しながら約12年間で海側に140m程度移動していることがわかる。

c) 砂州の長さと同流量の経年変化

図-4に図-1中の測線L-1に沿って、右岸護岸から測った砂州の長さ l の1975年1月より1977年3月までの経年変化を示す。なお、図中に示す流量は河口から18.6km上流において観測された河川の固有流量であり、10日間の平均値である。流量が比較的少ない10月から翌年の3月あるいは4月頃まで砂州の長さは増大する傾向を示し、比較的流量が多い5月頃より9月頃までは砂州の長さは減少する傾向を示すことがわかる。とくに、冬期において砂州の長さは20m程度増大し、1975年6月下旬および1976年9月中旬の出水後には、それぞれ30mおよび50m程度減少している。なお、砂州の長さに影響を及ぼす河川の固有流量は、10日平均流量で約150 m^3/s 以上であることがわかる。

3. 数値シミュレーション

3.1 基礎方程式

静水面に沿って x 軸および y 軸、 $x-y$ 平面に直角に上方に z 軸を取ると水深方向に平均された2次元の連続の式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial (u\bar{h})}{\partial x} + \frac{\partial (v\bar{h})}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 \bar{h} は全水深 ($\bar{h} = h + \eta$; h : 静水深, η : 水面変動量), u および v は、それぞれ x 方向および y 方向の速度成分である。

一方、運動方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} \\ = \frac{1}{\rho \bar{h}} \left\{ \frac{\partial (\bar{h} \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{h} \tau_{xy})}{\partial y} \right\} + g \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{f u \sqrt{u^2 + v^2}}{\bar{h}} \end{aligned} \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \bar{h}}{\partial y} \\ = \frac{1}{\rho \bar{h}} \left\{ \frac{\partial (\bar{h} \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{h} \tau_{yy})}{\partial y} \right\} + g \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{f v \sqrt{u^2 + v^2}}{\bar{h}} \end{aligned} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 g は重力の加速度、 τ_{xx} 、 τ_{xy} および τ_{yy} はレイノルズ応力、 ρ は流体の密度、 f は摩擦係数である。

式 (2) および (3) 中のレイノルズ応力はテンソル表示すると以下のように表せる。

$$\frac{\tau_{ij}}{\rho} = (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} K_G \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 ν は動粘性係数、 ν_t は渦動粘性係数であり次式で評価する。

$$\nu_t = (c_s \Delta)^2 \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right]^{1/2} \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 c_s はモデル定数 ($c_s=0.1$)、 Δ は格子平均サイズ $\Delta = (\Delta x \cdot \Delta y)^{1/2}$ ($\Delta x, \Delta y$: 空間刻み) である。

また、 K_G は乱流エネルギーであり次式で表せる。

$$K_G = k \delta_{ij} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。また、 k は水深平均の乱れエネルギーであり次式で評価する (細田・木村, 1993)。

$$k = 2.07 V_*^3 \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 V_* は合成摩擦速度 ($V_* = \sqrt{f(u^2 + v^2)}$) である。

3.2 初期条件および境界条件

初期条件は、流れがない状態とする。壁面では non-slip の境界条件、上流境界では等流の境界条件とする。また、下流境界では水深を与える。

3.3 漂砂の連続式および流砂量式

a) 漂砂の連続式

局所的底面高さの時間変化の計算は、次式で表される底勾配の効果も考慮した渡辺ら (1984) の式を採用する。

$$\frac{\partial z_B}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(q_x - \varepsilon |q_x| \frac{\partial z_B}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(q_y - \varepsilon |q_y| \frac{\partial z_B}{\partial y} \right) \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 z_B は任意の高さを基準にした局所的底面高さ、 q_x および q_y は、それぞれ空隙を含む有効堆積で表示した x 方向および y 方向の流砂量、 ε は正の係数である。

b) 流砂量式

x 方向および y 方向の流砂量は次式で評価する。

$$q'_x = q_{T*} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}}, \quad q'_y = q_{T*} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \dots \dots \dots (9)$$

ここに、 q_{T*} は無次元流砂量であり、次式で与えられる Graf・Acaroglu (1968) の回帰式を採用する。

$$\left. \begin{aligned} q_{T*} &= 10.39 \tau_*^{2.52} \\ \tau_* &= V_*^3 / sgd \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (10)$$

ここに、 τ_* は無次元掃流力、 $s = \rho_s / \rho - 1$ (ρ_s : 砂の密度)、 d は砂の粒径である。

3.4 初期条件および境界条件

初期条件は、基準面から底面までの高さとする。また、

上流境界においては式 (10) で算出される流砂量を与え、下流境界においては流砂量は線形に変化するものとする。

4. groyne 周辺の流れ場

Rajaratnam・Nwachukwu の実験に基づいた解析を行い、実験結果との比較を通して数値モデルの有用性を確かめる。実験は、長さ 37 m、幅 0.915 m、深さ 0.76 m の水路で行われた。水路下流の実験対象領域の右岸に groyne が設置されている。実験は、上流境界における断面平均流速が 0.22 m/s と 0.25 m/s の 2 ケースがあるが、ここでは断面平均流速が 0.22 m/s のケースを解析対象とする。図-5 に Rajaratnam・Nwachukwu の実験に諸元と解析範囲を示す。なお、Manning の粗度係数は $10^{-3} \text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ とする。

図-6 の (a)、(b) および (c) に groyne の上流部、groyne の設置位置および groyne の下流部における主流方向流速 u の分布を示す。なお、図中の ●印は実験値、実線は計算値を表す。(a) は、groyne の上流側の $\bar{x}/b = -4$ (b は groyne の長さである) におけるものである。実験値は水路の中央部付近において最大値を取るが、計算値は groyne を設置していない壁面付近で最大値をとる。また、計算値は $y/b = 1.3 \sim 4$ 付近までは実験値より僅かに小さいものの両者は極めて良く一致している。(b) は、groyne を設置した $\bar{x}/b = 0$ におけるものである。実験値は $y/b = 0 \sim 1$ では groyne の存在のため流速は 0 である。 $y/b = 1.3$ において流速は 0.29 m/s と急激に増大し、そこから $y/b = 5$ まで流速はほとんど変化しない。なお、 $y/b = 1.3$ 付近において計算値は実験値より 20% 程度小さいことを除けば、(a) と同様両者は極めて良く一致している。(c) は groyne の下流側の $\bar{x}/b = 4$ におけるものである。計算値は groyne 背後における循環流を再現し得ている。しかしながら、 $y/b = -2$ 付近を境にして $y/b < 2$ の領域では計算値は実験値より小さい。一方、 $y/b > 2$ の領域では計算値は実験値の 90% 程度である。groyne の下流側において、実験値と計算値が 10% 程度異なるものの両者は定性的・定量的に一致している。

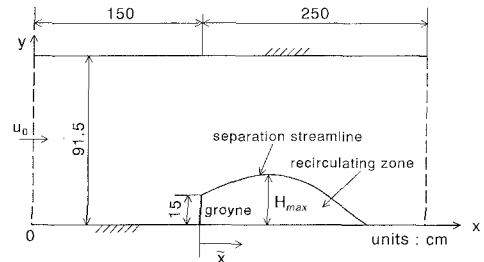


図-5 解析対象領域

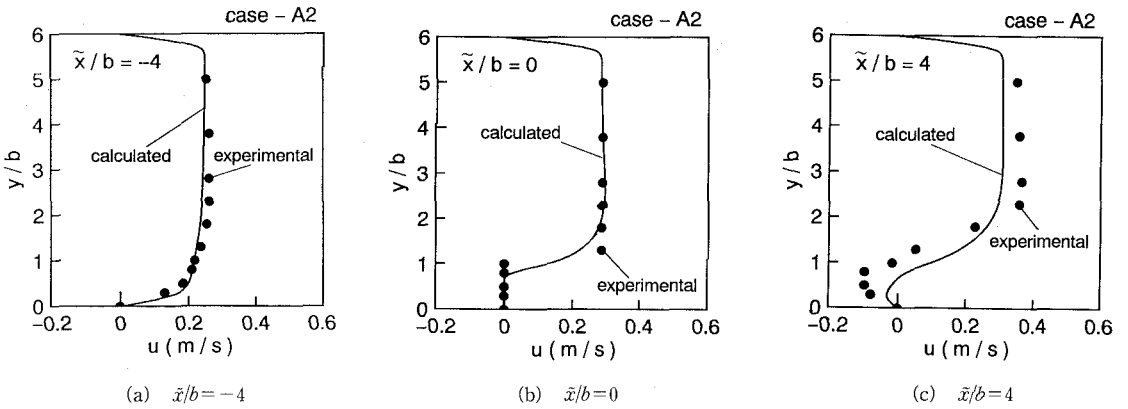


図-6 groyne 近傍の流速分布

5. 脇川の河口砂州周辺の流れ場と地形変化の解析

5.1 河口周辺地形および出水のモデル化

1980年2月の深淺図から読み取った河口周辺地形を対象として、25m×25mの正方形の格子網を河口部付近を中心に上・下流方向に825m、河幅方向に500mの範囲で作成した(図-7)。

観測期間中において日平均流量が比較的多い1980年

7月1~3日の梅雨前線による出水を対象として、砂州周辺の流況および出水に伴う地形変化について調べた。1980年7月1~3日の出水は図-8に示すように、7月2日に約1379 m³/sの日平均流量を記録した。この出水を時々刻々の流量曲線として近似し、1980年7月1日0時から72時間後までを計算した。なお、砂の粒径は砂州を構成する底質の中央粒径のうち最小の0.5mm、Manningの粗度係数は0.02 m^{-1/3}・sとする。また、式(8)中の係数εは10とする。

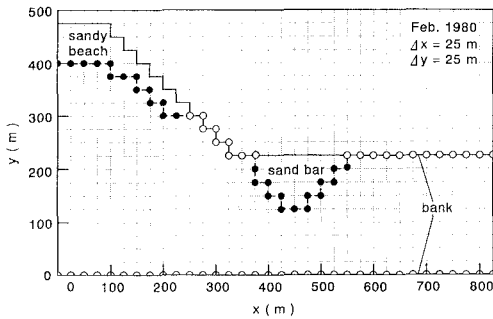


図-7 砂州周辺地形のモデル化

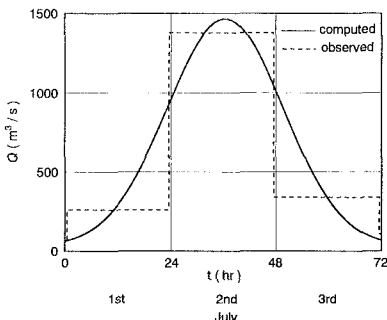


図-8 出水のモデル化

5.2 解析結果

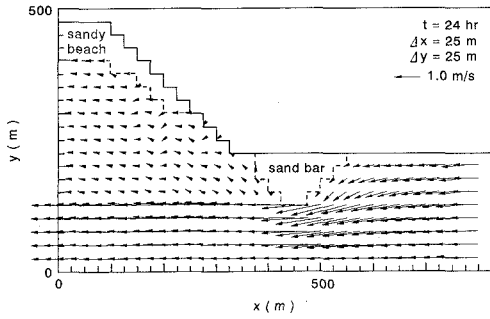
a) 流れ場

計算開始より72時間後までの上流境界におけるフルード数は、0.02~0.25である。計算開始から24時間後と40時間後の流速ベクトルを示したのが図-9(a)と(b)である。

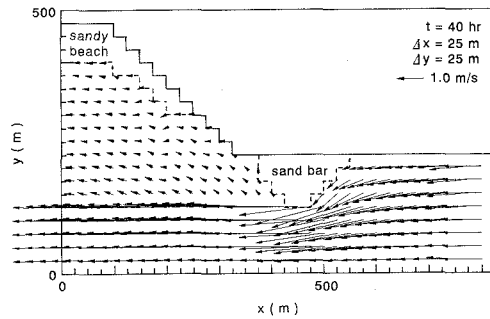
24時間後について示した(a)は、上流境界における流量が約899 m³/sの場合である。上流境界より砂州に向かって縮流し、偏向される。また、砂州の後流域では、ほぼ砂州地形、護岸および砂浜に沿う流れを示している。出水のピーク時より約4時間経過した40時間後について示した(b)は、上流境界における流量が約1446 m³/sの場合である。流量の増大に伴い砂州周辺において流れが偏向される度合いは(a)よりも大きくなる。なお、砂州の先端付近における流速は、上流境界における流速の約1.6倍の約3 m/sにも達する。

b) 地形変化

図-10に計算開始より72時間後の河口周辺の地形を示す。侵食領域は砂州の上流側付近であり、砂州の上流部では2.5m程度侵食されるのを中心に、砂州の先端部付近にまで及んでいる。一方、砂州先端部の下流側には堆積領域が生ずる。図-9の流速ベクトルを参照すると、侵食量が最大である砂州先端付近の上流側では流速がかなり大きく、砂州の下流側で堆積が生ずる領域付近は先

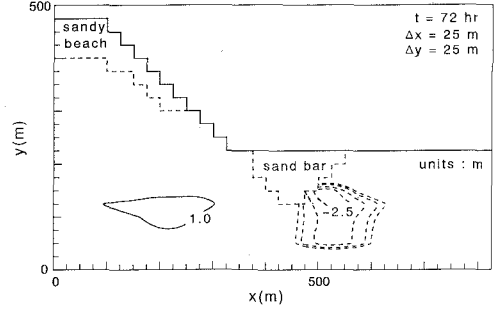


(a) 24時間後

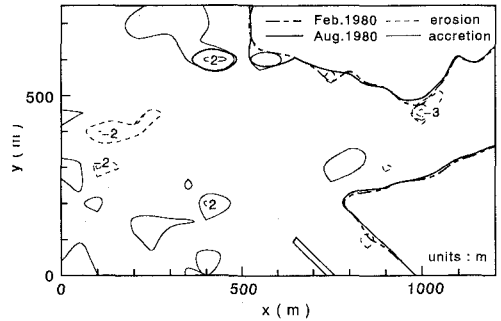


(b) 40時間後

図-9 砂州周辺の流速ベクトル



(a) 計算結果 (72時間後)



(b) 観測結果

図-10 出水による砂州周辺の地形変化

端部を通過した流れが急激に小さくなる所である。観測資料に基づく1980年2月～1980年8月における河口周辺の侵食・堆積を示す(b)と比較すると、観測では砂州先端部の上流側が3m程度侵食されており、砂州先端部より下流側に1m程度の堆積領域がある。観測結果は6ヶ月間の地形変化を示したものであり、その間の出水や波浪等が河口周辺の地形に及ぼす影響は明確ではないが、数値計算による地形変化は、砂州先端部の上流側での侵食や砂州の下流側で堆積するという観測結果と概ね一致している。

6. あとがき

肱川を対象として、河道内に存在する砂州および河口周辺の地形変化の特性を観測資料に基づいて調べた。さらに、数値モデルを用いて出水が生じた場合の河口砂州周辺の流況および地形変化について解析した。その結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 1978年8月から1990年12月までの12年間で砂州は、成長しながら海側へ約140m移動している。
- (2) 砂州の長さに影響を及ぼす河川の固有流量は、10日平均流量で約150 m³/s以上である。
- (3) 数値計算による砂州周辺の地形変化は、砂州の

先端部付近の局所洗掘や砂州の下流側に堆積するといった観測結果と概ね一致することから、本研究で用いた数値モデルで定量的な予測がある程度可能である

謝辞：本研究を行うにあたり、各種の貴重な資料を提供して頂いた建設省四国地方建設局大洲工事事務所の方々に謝意を表す。なお、この研究は財団法人 河川環境管理財団の河川整備基金の助成を受けたことを付記する。

参考文献

- 建設省四国地方建設局大洲工事事務所(1977): 昭和51年度河川事業調査成果報告書。
- 細田 尚・木村一郎(1993): 開水路急拡部の流れにおける渦の発生・発達に関する二、三の検討, 水工学論文集, 第37巻, pp. 463-468.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉(1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410.
- Graf, W. H. and E. R. Acaroglu (1968): Sediment transport in conveyance system, Part I, Bull. IAHS, XIII, No. 2, pp. 20-39.
- Rajaratnam, N. and B. Nwachukwu (1983): Flow near groyne-like structures, Journal of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 109, No. HY3, pp. 463-480.