

開水路わん曲部河床の安定形状（その2）

建設省土木研究所 正会員 須賀 堯 三

1. 結 言

わん曲流に特徴的なものはらせん流であるが、接線方向の流速分布はもとより、半径方向および鉛直方向の流速成分も重要な役割を果す。ところが、これまでの数多くの研究は、そのほとんどが $\partial/\partial\theta=0$ の完全発達一様域に集中し、これららせん流成分の縦断変化の様子は、まだ解析的に詳細には知られていなく、実験的にも固定床の単純一様断面の場合ですら十分とはいえない。しかし、最近の村本・井上¹⁾の渦度成分変化の特性に関する研究は一つの方向を示すものである。その他、わん曲流入部および末端部の流れがある程度解明されている。

移動床水路では河床の変形に伴って二次流が変化し、さらに二次流と砂の動きの関係も複雑であるので解析は一層困難である。これを解決するのに、水流の運動式と連続式、および適当な流砂関数と砂の連続式とを用いて数値的に求めることも不可能ではないであろう。しかし、種々の境界条件に対する定性的性質は解析の方法によらなければならない。現状においては、その第一段階として、広範囲の境界条件を包含する実験によって大方の見当をつけておくことが望ましい。

わん曲部河床の安定形状は移動床上の土砂と水の流れと一体をなすものであり、同時に解決されなければならない。ここでは、わん曲角 θ_0 および水路中心までの曲率半径 R と水路幅 B との比 R/B をいろいろと変えた8種のわん曲水路（表-1）を用いて、静的平衡および動的平衡に関する実験を行ない、安定形状や流速分布などについて、前報告⁽²⁾の続編として検討を行なった。ただし、河床の安定に至るまでの変形に対しては、局所的な問題であるから掃流砂の影響を重視したが、浮遊砂の影響を調べるためには実験砂の限界掃流力に対して規模の大きい掃流力の実験を行なわなければならない。また、流れは常流に限り、砂はほぼ均一粒径のものを用い河床材料特性の影響（ふるいわけ現象なども含む）は考慮しないことにした。わん曲部は円弧で近似し、上下流とも緩和曲線を有さず、直接に十分な長さの直線部と接続する兩岸壁を垂直に固定した水路を仮定した。以下に実験の結果明らかにされた2, 3の特性について報告する。

2. わん曲部の洗掘を支配する要素

次元的考察によれば、わん曲部の最大洗掘深 $h_{\max}$ や深掘れの範囲を表わす関数 F は、おおよそ、

$$F = f\left(\frac{R}{B}, \frac{h_m}{B}, \theta_0, F_r, \frac{v_m h_m}{\nu}, I, \frac{v_* d_m}{\nu}, \tau_*, \frac{h_m}{k_s}, \beta\right) \quad (1)$$

と表わされる。ここに、 h_m は平均水深、 θ_0 はわん曲角、 $F_r = v_m / \sqrt{g h_m}$ はフルード数、 v_m は平均流速、 g は重力加速度、 I はエネルギー勾配、 $v_* = \sqrt{g h_m I}$ は摩擦速度、 d_m は平均粒径、 ν は動粘性係数、 $\tau_* = h_m I / \{(\rho_s / \rho - 1) d_m\}$ 、 ρ_s および ρ はそれぞれ土砂および水の密度、 k_s は相当粗度、 β は土砂の混合状態を表わす無次元量である。式(1)の各項のうち、 β 、流速分布の影響を表わす I 、および2つのレイノルズ数の影響は実河川の場合はあまり大きくないと考えられる。粗度については議論の余

地があり、Finstein-Harder³⁾によればその影響が効くことになっているが、 h_m/k_s が大きいときは、さしあたり考慮しないことにしてもよいであろう。したがって、式(1)は、

$$F=f(R/B, h_m/B, \theta_0, F_r, \tau_*) \quad (2)$$

となる。なお、横断形状とらせん流の強さとは密接な関係にあるが、その影響は近似的に横断の平均水深や最大水深の中に含ませて扱うことにした。

わん曲部の流れでは形の影響が卓越し、 R/B は重要な指数であることが知られているが、 θ_0 の影響も無視することはできない。村本・井上¹⁾は渦度変化および二次流の発達過程の立場から、I：二次元回転流域（発生域）、II：三次元回転流域（発達域）、III：一次元回転流域（完全発達一様域）の3領域に分類しているが、移動床の場合には、取り扱いを簡単にするためにIおよびIIの領域を合同して流入部の慣性の効果の大きい領域、IIIの一様領域、および新たにIV：渦度が減少にかかる末端部の領域を考慮するのが便利であると思われる。これは主に末端部が下流直線部の横断方向に一様な河床の影響を受けて安定するために考えるものである。総じて移動床の場合には、渦や二次流と土砂の動きの関係は未解決であるので、むしろ土砂の動きの方に着目した分類法を採らなければならない。わん曲角 θ_0 の影響はこのような領域の大きさとの関連において重要であり、例えば θ_0 が小さくて一様領域がない場合には、慣性領域と末端部領域が重って前者の影響が下流直線部にまで及ぶことがある。

h_m/B は二次流や摩擦に関係する。 F_r は他の項に比してその影響が大きいといわれている。 τ_* は流砂関数や粗度に関連するものである。以上の諸項について実験的に検討する。

表-1 わん曲水路の種類

$R/B \backslash \theta_0$	15°	30°	60°	90°	180°
1.5	○	○	○	○	○
2.5				○	○
4.03					○

3. 実験内容

実験に関する諸量は表-1および表-2のようである。水路はわん曲部の上・下流に十分な長さの直線部を有し、両壁鉛直のブロック製モルタル仕上げである。測定内容は、水位、流れ方向の流速分布、流線の角度、河床せん断力 τ_0 の分布、および河床高などとした。 τ_0 測定はPreston型のSurface Pitot Tubeによった。また、動的平衡状態における水理量の測定は固結剤アロン41を使用し河床を固めてから行なった。このようにした河床では流

表-2 実験諸元

実験 番号	水 路			水 理 量				河 床 砂		通 水 時 間	河床状態 (準)	
	θ_0	B_m	R/B	$Q \text{ L/s}$	$h_{m \text{ cm}}$	F_r	h_m/B	$d \text{ mm}$	安息角 乾 水 中			
1	180°	1.0	1.5	73	2.21	0.22	0.22	0.903	40°	34°	2420'	静的平衡
2	"	"	"	"	15.2	0.39	0.15	"	"	"	640'	動 "
3	90°	"	"	52	11.7	0.41	0.12	3.05	44°40'	40°45'	24	静的平衡
4	"	"	"	"	10.8	0.47	0.11	"	"	"	530'	動 "
5	60°	"	"	"	16.5	0.25	0.17	"	"	"	2330'	静的平衡
6	"	"	"	"	13.6	0.33	0.14	"	"	"	6	動 "
7	30°	0.8	"	47	15.5	0.31	0.19	"	"	"	24	静的平衡
8	"	"	"	"	18.9	0.23	0.24	"	"	"	530'	動 "
9	15°	0.3	"	20	15.1	0.37	0.50	0.46	32°	25°	10	静的平衡
10	"	"	"	218	17.4	0.32	0.58	2.33	35°	23°	1830'	"
11	"	"	"	208	17.7	0.30	0.59	"	"	"	"	"
12	"	"	"	"	12.1	0.53	0.40	"	"	"	19	動 "
13	"	"	"	22.0	14.0	0.45	0.47	3.05	44°41'	40°45'	1830'	静的平衡
14	180°	"	2.5	10	10.9	0.30	0.36	0.98	40°	34°	22	"
15	"	"	"	"	8.6	0.42	0.29	"	"	"	6	動 "
16	90°	1.0	"	70	11.2	0.6	0.11	2.33	35°	23°	44	静的平衡
17	"	"	"	80	14.0	0.49	0.14	"	"	"	18	"
18	"	"	"	28.2	8.0	0.4	0.08	0.46	32°	25°	"	"
19	"	"	"	69.3	11.6	0.56	0.12	2.33	35°	23°	"	"
20	"	"	"	79.2	22.0	0.25	0.22	"	"	"	1830'	"
21	"	"	"	112	161	0.55	0.16	0.46	32°	25°	"	"
22	"	"	"	103	30.1	0.20	0.30	"	"	"	"	"
23	"	"	"	56	21.5	0.18	0.22	"	"	"	"	"
24	"	"	"	19.8	8.3	0.40	0.08	"	"	"	"	"
25	"	"	"	69.3	21.9	0.21	0.22	"	"	"	"	"
26	"	"	"	9.9	4.0	0.40	0.04	"	"	"	"	"
27	180°	0.6	4.03	45	22.1	0.23	0.37	0.903	40°	34°	2330'	"
28	"	"	"	54.6	17.0	0.41	0.28	35.8	—	—	1830'	"
29	"	"	"	45	19.4	0.28	0.32	0.903	40°	34°	6	動 "

砂のある場合の粗度とは多少異なるが、砂粒の凸凹の状態を変えないので良好であると思われる。実験の初期河床は一樣勾配で横断方向には水平とした。なお、表-2で通水時間とは実験開始までの通水時間である。実験中は河床状態をほとんど不変とみなすことができた。

4. 実験結果に基づく検討

(1) 深掘れ部の発達過程と総説

二種類の掘れ方がみられる。1つはわん曲流入部に顕著にみられる現象で、内側の最大流速線沿に直線的にできる溝である。ただし、この部分は流砂量は多いが、補給砂も十分にあるのであまり深く掘れることはない。また下流にいくにしたがい溝は浅くなり、その内岸側には州が形成されていく。他の1つは、流入直線部の中心線延長上外壁付近から壁沿い下流にわたって掘れる現象で、主として2次流の影響に基づくものである。これは補給砂もあまりなく、急激に、かつ深く掘れる。この深掘れ部ではらせん流が激しく、ときとして不安定になる。深掘れ部の側面は急傾斜で

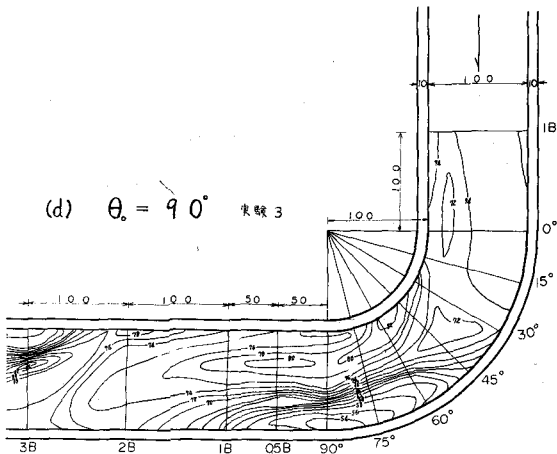
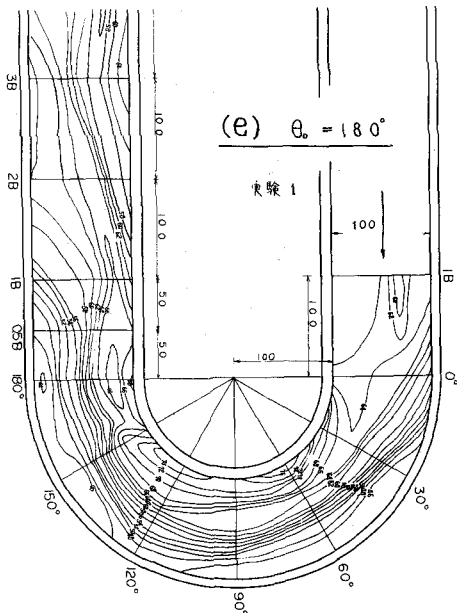
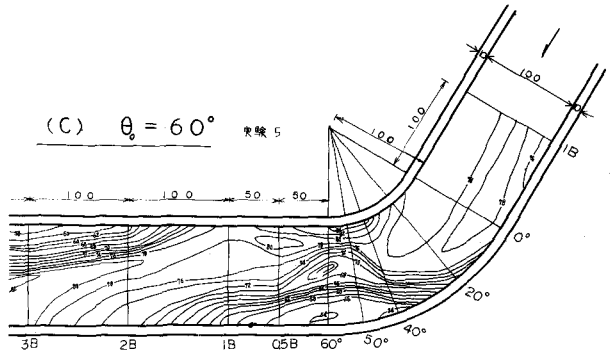
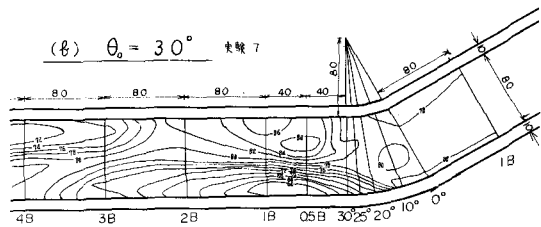
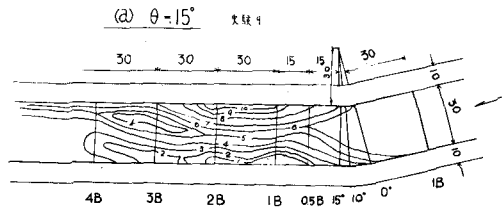


図-1 静的平衡河床等高線図 単位 cm ($R/B = 1.5$, $F_r = 0.22 \sim 0.41$)

安息角に近い。このあたりまでが流入部の慣性の影響が大きい領域である。

最大流速線沿の洗掘部がぼやけてきた下流では、深掘部が外壁沿のみとなり、内側には大きいなだらかな砂州が形成される。これはわん曲流入部の内側から伸びるバーが発達するにしたがい安定した状態に移行する。これが一様域で、流れは強制渦に近い。ただし、わん曲の末端部が慣性の領域に入る場合は、一様域は現われずに、わん曲末端部の影響もあまり顕著ではなく、だいたい流入直線部中心線の延長が下流直線部の外壁と交わる付近において深掘部を形成し、その直下流で一様な河床形に戻る。一様域がわん曲部に存在するときは、末端部下流 $B \sim 2B$ の距離の間に一様河床に戻っているようである。なお、わん曲部の影響によって下流直線部においては蛇行現象が発生し易くなる。

流入直線部中心線延長上のわん曲外壁側付近より始まり、外壁沿いに下流に伸びる深掘部の形状は、河床付近の内岸側に向う強い二次流と密接な関係にある。図-2に示す深掘部のように上流で幅が広く、下流にさがるにしたがって狭くなり、内側の州の発達にともなって安定した横断形に近づくのが特徴であるが、これは深掘部に発生する水平軸渦の影響によるところが大きい。その場合、激しい渦によって砂が内側の斜面をはい上るのが観測され、流線も安定しないが、 R/B および θ_0 がともに大きいときにはこの渦が下流にいくつもでき、その数だけ深掘部ができることがある。

このような洗掘の平面形状の特性は、時間の経過で補給砂量や州の発達により、最終の位置が初期の位置より多少下流になることはあるが、この実験範囲に関する限り、掃流力が限界掃流力以上であれば、掃流力の影響をあまり受けないようである。

(2) F_r と h_m/B の影響

大きいフルード数の静的平衡河床を得るには、大径の砂を使用する必要があり、今回は実験が行なわれていない。ただし、表-2の実験ケースの中には初期のフルード数が $F_r = 0.6 \sim 0.8$ のものが4ケース含まれている。これらの実験を通じて、洗掘位置におよぼすフルード数の影響はあまりないとみなしうようであった。

横断形は二次流の特性に影響をおよぼすと考えられる。しかし洗掘がある程度進行し平衡状態に近づくと実験の範囲ではすべて同様な形状となり、結局大きな影響はないと考えてよい。

したがって、式(2)で F_r と h_m/B は近似的に無視することができる。

$$F = f(R/B, \theta_0, \tau_*) \quad (3)$$

(3) R/B と θ_0 の影響

わん曲部河床の平面的洗掘形状におよぼす影響としては、形の要素が重要であるが、なかでも R/B と θ_0 が卓越するようである。

図-1の等高線図は静的平衡の場合であるが、動的平衡の場合でも本質的な差異はない。そしてすべての実験を通じて結論的にい

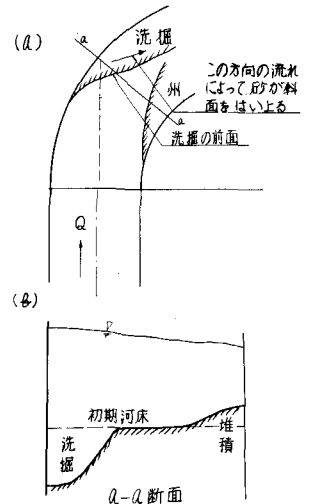


図-2 洗掘と堆積の状況

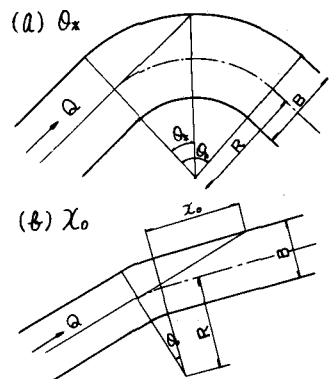


図-3 θ_0 と x_0 の定義

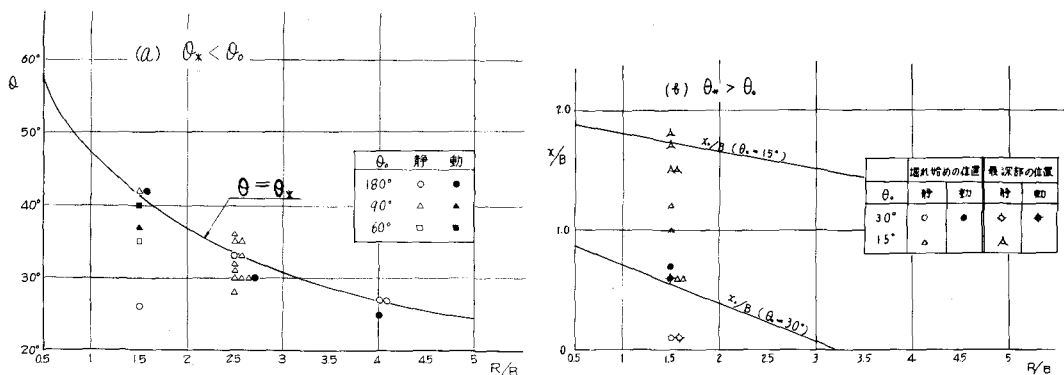


図-4 洗掘開始位置(外壁沿い深掘部)

ることは、洗掘の平面形と横断形とは近似的にはほぼ独立と考えてよく、 τ_* は平面形にほとんど影響を与えないということである。また、洗掘の平面形状におよぼす流入部の慣性の影響は大きく、ほとんど他の条件を凌駕するようである。図-3で定義する θ_* と x_0 は、

$$\cos \theta_* = 1 - 1 / \{ 2 (R/B) + 1 \} \quad (4), \quad x_0/B = 1 / (2 \tan \theta_0) - (1 - \cos \theta_0) (R/B) / \sin \theta_0 \quad (5)$$

と表わされる。これは便宜的な量にすぎないが、洗掘の平面形と密接な関係にある。図-4は洗掘の始まる位置を $\theta_* < \theta_0$ および $\theta_* > \theta_0$ の場合に分けて示したものであるが、おおよそ洗掘の始まる位置は流入直線部の中心線の延長がわん曲部あるいはその下流の外壁と交わる付近であると考えてよいようである。ただし、洗掘始点の上流側の傾斜は

ほぼ安息角に近いので、安息角で延長した面が河床の縦断形の折れているあたりで交わる外壁上の点を洗掘の始点とした。

(4) 平衡時の流れ

わん曲部河床の安定形状を計算する場合²⁾に問題となるのは流速分布と流砂量分布であった。この場合、次の3式

$$v/v_* = a (h'/k_s)^b \quad (6)$$

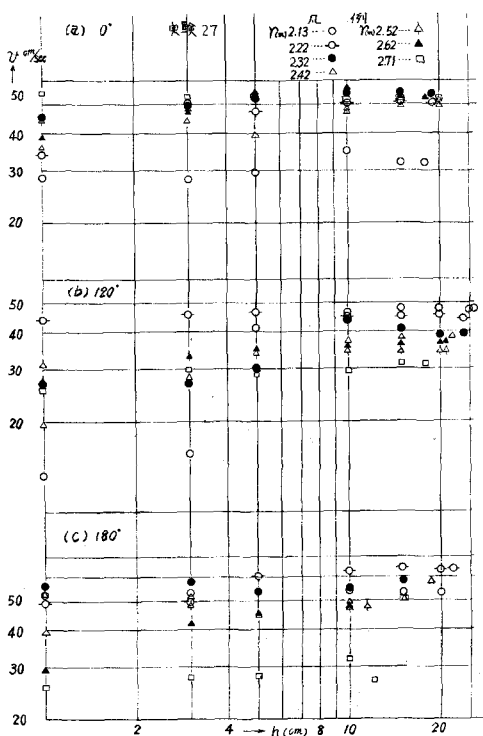
$$v_m = c r^d \quad (7)$$

$$v_* = v_{*i} \{ r / (R - B/2) \}^e \quad (8)$$

について検討する。ここに、 v は河床から h' の高さの点の流速、 r は曲率中心からの距離、 v_{*i} は $r = R - B/2$ における v_* の値、 a, b, c, d, e は定数である。

式(6)の関係は半径および鉛直方向の分速 u および w の影響を受け、洗掘形状とも関係があるが、近似的には認められてもよい。ただし、 b は図-5の例にもみられるように、二次流の発達に伴い $1/7$ よりは小さくなる傾向がある。

式(7)の関係は激しいらせん流の生じる範囲では、 図-5 v の分布の例(静的平衡 $R/B=4.03$)



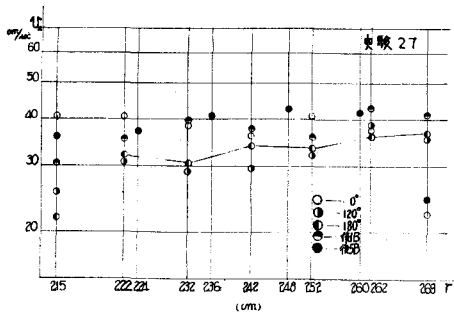


図-6 v_m 分布の例

(静, $R/B=403$, $\theta_0=180^\circ$)

多少の疑問も持たれるが, 流入部および一様域では妥当性がみられる。一例を図-6に示す。

l は θ の増大に伴い負から正に変わるが, $l=0$ となる断面の位置は F_r の影響をほとんど受けない。 l の値は洗掘形状と関係があるので, θ_* あるいは x_0 との関連において整理すると図-7のようである。 $l=1$ となる断面の位置は, だいたい $\theta=2\theta_*$ であり, 末端部の影響はあまり現われていない。 $\theta_* > \theta_0$ の場合はさらに検討を要するが, x_0 も何らかの意義を有すると思われる。末端部あるいは最大洗掘位置を過ぎてからの l の変化は緩まとなり, 単調にゼロに近づく。

式(8)の関係は動的平衡断面を求める場合に必要となる。 τ_0 の測定値は砂面のわずかな凹凸に影響されて, 図-8の例にみられるように, 多少ばらつくが, 下流直線部および兩岸近傍を除くと指数の関係が認められ, τ は1あるいは1よりやや小さい数である。

5. 結 言

実験結果に基づき, 前報告²⁾の続編として, わん曲部河床の安定形状と水理量の特性について述べた。 $\theta_0 > 2\theta_*$ の場合, 末端部は安定するところであり, 安定横断形の近似値を計算することもできるが, らせん流の強い範囲や $\theta_0 < \theta_*$ の場合には渦度や流速分布などの検討を行なって, 一層の精度向上に努力したい。

参 考 文 献

- 1) 村本・井上: 京大防災研究所年報 8号 昭. 40. 3 (1965)
- 2) 須賀堯三: 第9回水理講演会 昭. 40. 2 (1965)
- 3) H. A. Einstein, J. A. Harder: Trans. A. G. U. Vol. 35. No. 1, (1954)

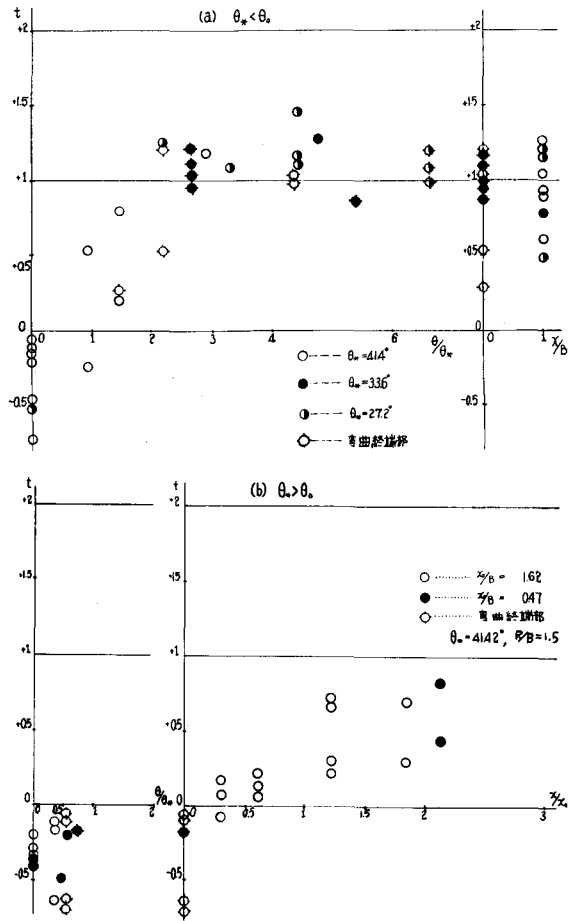


図-7 l の変化

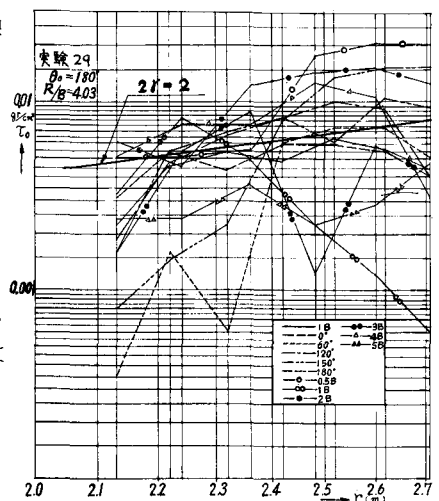


図-8 河床せん断力分布の例