

砂れき堆の形成による護岸近傍の局所洗掘

Local Scour Near Revetment Caused by Bars

建設省土木研究所 正員 福岡捷二

建設省土木研究所 正員 ○浅野富夫

建設省土木研究所 正員 林 正男

1. はじめに

直線河道においても、砂れき堆の形成に伴い流れの集中が生じ、その結果護岸近傍に局所洗掘が発生することが多い。したがって、護岸の設計においては、このような局所洗掘の範囲と洗掘深の大きさをあらかじめ予測しておく必要がある。前者については、現在の河床状況からある程度予想することができるものの、後者については洪水時の河床高を測定することが困難なため、洪水時の洗掘深を測定することは容易でない。さらに、洪水時河床高の予測は、護岸の設計においてだけでなく、既設護岸の安全度評価を行う場合にも重要となるものである。このような状態に呼応して、近年単列砂れき堆(交互砂州)の波高に関する研究<sup>1)~3)</sup>が数多く行われるようになり、波高と河道特性との関係が明らかにされてきた。しかしながら、実河道においては、単列砂れき堆のみでなく種々の河床形態が存在し、河床変動の不規則性・不確実性も局所洗掘深の評価に関係する。

このような状況に鑑み、著者らは既報<sup>4)</sup>において、単断面河道の多列砂れき堆の形成に伴う局所洗掘をも対象として、川幅・水深比の範囲を広くとった実験的検討を行った。しかしながら、そこでは局所洗掘深の分布特性に関する検討に不十分さが残っていた。本報告においては、先の検討で用いた個々の実験値に立ち帰り、検討を行うとともに新たに実験を行い、局所洗掘深の分布特性について詳細な検討を加えた。さらに、複断面河道の局所洗掘及び、また単断面河道の局所洗掘に及ぼす護岸法面勾配の影響についても同様の検討を加えた。このようにして得られた局所洗掘の分布関数を用い、さらに提案した局所洗掘の発生確率の概念<sup>4)</sup>を用い護岸近傍の局所洗掘予測手法の確立を図った。

2. 検討方法

一般に、局所洗掘は洪水時において著しく、護岸・根固めの安全性を検討する場合には、洪水時の洗掘深、すなわち最深河床高が重要となる。しかしながら、現地河川において洪水時に河床高の分布あるいは時間的変化を測定することは容易でなく、また低水時における定期横断測量成果は、洗掘箇所の洪水減水期以後の埋め戻しにより、洪水時の河床高を適切に表しているとは限らず、むしろ洪水時における局所洗掘を過少評価する傾向にある。図-1は、代表的な急流大河川下流部の模型を用いて得られた結果を示したものである。図中に併示された洪水流のもとで、最深河床高は洪水前よりも最大6m程度も低下し、これが洪水後4m程度埋め戻されている。洪水直後に存在していた局所洗掘箇所は、通常の定期横断測量時までには、さらに埋め戻されるものと推測される。

したがって、本研究では洪水時の局所洗掘の把握を目的として、水路実験において河床高の時間的・空間的分布特性を通水中測定し、その結果を用いて、護岸前面の局所洗掘と水理条件・河道条件との関係を把握する方法を採用した。

実験条件の選定にあたっては、現地河川との相似性に充分配慮するとともに、実験結果の適用範囲を明確にしておく必要がある。いま、建設省直轄57河川から164区間を選定し<sup>5)</sup>、平均最大流量流下時における4種の無次元量、すなわち川幅・水深比 $B/H$ 、無次元掃流力 $\tau_*$ 、水深・粒径比 $H/d_m$ 及び流速係数 $\psi$ の分布を検討すると、約45%区間に相当する $d_m \geq 20\text{mm}$ の河道を対象とした場合、各種無次元量の範囲は比較的限定される。たとえば、 $B/H$ については $B/H < 200$ 、 $\tau_*$ については $\tau_* < 0.2$ 、 $H/d_m$ については $H/d_m < 200$ とみなされ、実験においてもこのような範囲を極力満足させることが望ましい。また、実験精度の向上及び流速係数 $\psi$ の相似性を考慮すると、小規模河床波(砂澁・砂堆等)が発生しないことが好ましい。したがって、本研究では $d_m =$

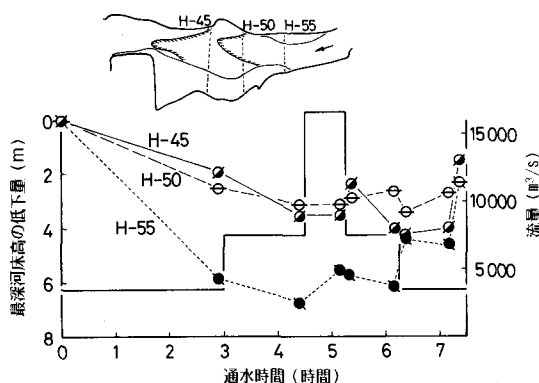


図-1 洪水時における最深河床高の低下

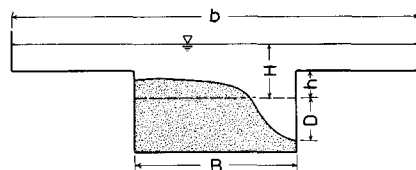


図-2 複断面河道の局所洗掘

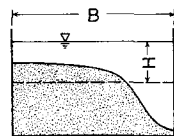


図-3 単断面河道の局所洗掘

表-1 実験水理条件

| 実験  | 断面形状 | 水理条件 | デー々数 | 流量 (l)   | 水深 (cm) | 平均流速 (cm/s) | 水路床勾配      |
|-----|------|------|------|----------|---------|-------------|------------|
| I   | 単断面  | 28種  | 756  | 0.7~9.0  | 0.6~3.4 | 12~54       | 1/50~1/280 |
| II  | 単断面  | 8種   | 288  | 3.0~6.0  | 1.2~2.3 | 32~50       | 1/100      |
| III | 複断面  | 24種  | 1152 | 0.7~15.0 | 0.7~2.9 | 15~43       | 1/100      |

1.0mm及び1.5mmの均一砂を用い、表-1に示されるような条件のもとで実験を行った。

単断面河道に関する実験においては、幅 $B=0.6\text{m}$ 、長さ $L=30\text{m}$ の鋼製両面ガラス張りの可変勾配水路が用いられている。平均流速 $U_m$ 、河床勾配 $I_b$ 、 $B$ 、 $H$ 、 $dm$ について、実験における水理量の範囲と現地の水理量の範囲とを比較すると、本実験結果は実験水路の200倍程度の規模を有する河道、すなわち  $B<150\text{m}$ 、 $H<8\text{m}$ 、 $20\text{mm}\leq d<200\text{mm}$ 、 $1/50\leq I_b<1/300$ の河川に適用されることにある。したがって、本研究で得られた成果をこのような範囲を越える河川に適用する場合、さらに検討が必要とされる。

さらに、現地河川を対象とした場合、図-2のような複断面形状を有する河道が多い。いま、直轄40河川から抽出した73地点について、低水路幅・低水路満杯水深比 $B/H$ を算定すると、ほとんどの値が $25\leq B/H<95$ の範囲に含まれている。したがって、本研究においては、低水路幅・全川幅比を代表的な値である  $B/b=0.4$  に固定し、 $dm=1.0\text{mm}$ の均一砂の敷き均し高さを調整することにより、 $25\leq B/H<95$ の範囲を対象として、表-1に示されるような実験を実施した。なお、実験においては、水路幅3m、長さ50mの可変勾配鋼製水路内に、 $b=150\text{cm}$ 、 $B=60\text{cm}$ 、 $L=30\text{m}$ の複断面水路を耐水合板で製作し、高水敷には低水路と同一の砂粒を貼付した。本実験においても、現地河道における $dm$ 及び $U_m$ の範囲に対する考慮より、上記単断面河道の場合と同様に、本実験結果は主として $B<150\text{m}$ 、 $H<8\text{m}$ 、 $20\text{mm}\leq d\leq 200\text{mm}$ の低水路を有する河道に適用される。また、 $b$ については $B/b=0.4$ としており、 $b<300\text{m}$ に相当している。先に示した  $dm\geq 20\text{mm}$ の河道では、約80%の河道において $b\leq 300\text{m}$ となっており、本実験結果は多くの複断面急流河川に適用されるものと推測される。

いずれの実験においても、土研式あるいは予備実験に基づき給砂を行うとともに、通水を継続しながら河床高の測定を数断面で一定時間間隔(5分~15分)で行い、実験値の数を増加させた。また、本研究では砂れき堆の形成に伴う局所洗掘を対象としており、解析にあたっては、通水後数時間を経過して砂れき堆が十分に発達した後の実験値を採用している。

### 3. 解析方法

本研究では、種々の局所洗掘特性のうち、図-3に示されるように、対象とした横断面の平均河床高と最深河床高との差で与えられる局所洗掘深 $D$ に着目し、これを当該断面の平均水深 $H$ で無次元化し、検討を加えることとする。

従来より、局所洗掘深に対する第一因子として $B/H$ を取り上げることが多く、本検討においても、まず $B/H$ の値を限定し、局所洗掘深・平均水深比 $D/H$ の値について、その分布を検討すると以下のようなものである。 $D/H$ は必ず正の値をとり、また実際現象を考慮すると極めて大きな値もとり得ないことより、 $D/H$ の分布として両側有限対数正規分布が想定される。両側有限対数正規分布を適合させる場合、個々の実験値 $D_i/H_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )を $\log X_i = \log [(D_i/H_i) / \{M - D_i/H_i\}]$ に変換する必要がある、上限値 $M$ を設定しなければならない。このような場合、 $\log X_i$ が正規分布を呈するまで、すなわち $\log X_i$ が正規確率紙上で直線分布となるまで、 $M$ を試行錯誤的に設定することにより、 $M$ の値を確定させることができる。いま、単断面河道において、河岸沿いに最深部が生じた断面を対象として、両側有限対数正規分布を適合させると図-4のようになり、 $D/H$ は両側有限対数正規分布を呈することが確認される。このような特性は、他の場合にも同様であって、 $D/H$ の分布特性は両側有限対数正規分布を適合させたときの平均値、標準偏差、上限値によって規定されることが知られる。

なお、本論で対象とした $d_m \geq 20\text{mm}$ の河川においては、 $0.05 \leq \tau_* \leq 0.15$ 、 $H/d_m \leq 40$ の範囲内で、 $\tau_*$ 及び $H/d_m$ の影響は $B/H$ に比して相対的に小さく<sup>4)</sup>本検討においては $B/H$ のみによって $D/H$ の特性を評価することとする。また、河川管理上重要となる局所洗掘は河岸近傍に発生するものであり、以後においては水路側壁面沿いに河床の最深部が発生した実験値に限定して検討を行っている。

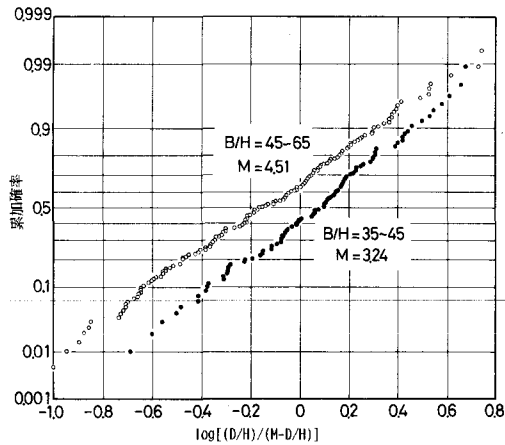


図-4 局所洗掘深・平均水深比の分布特性

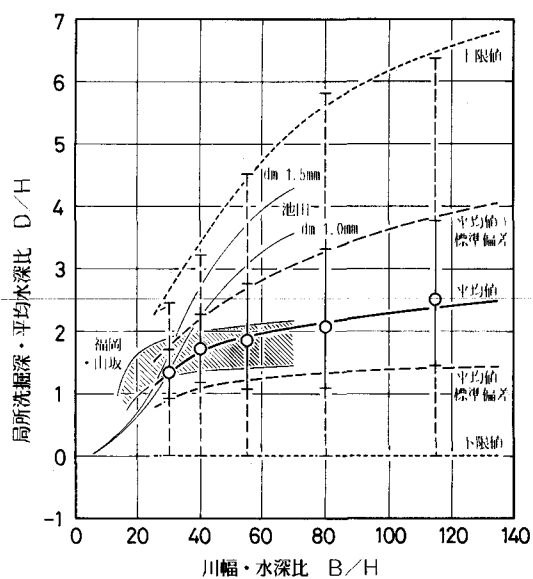


図-5 局所洗掘深・平均水深比と川幅・水深比

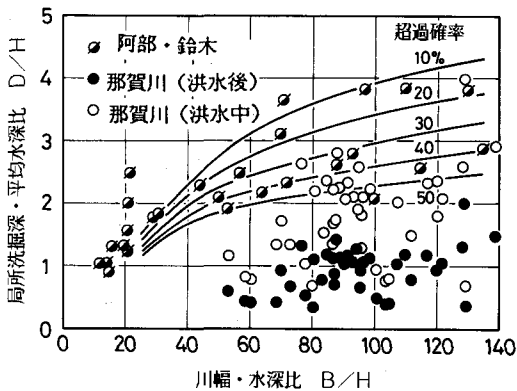


図-6 超過確率を考慮した局所洗掘深・平均水深比

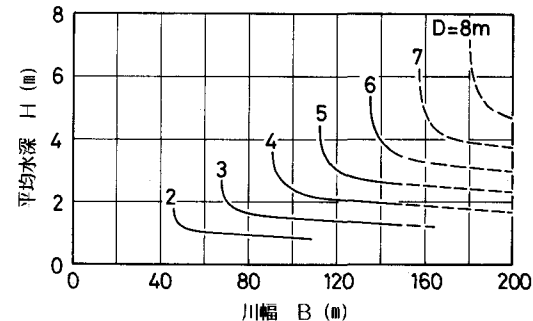


図-7 単断面河道の局所洗掘深

#### 4. 単断面河道における局所洗掘深特性

##### (1) 単断面河道の局所洗掘深

図-4において例示したように、 $D/H$ の分布に対する両側有限対数正規分布の適合性は極めて高い。この分布より $D/H$ の平均値及び標準偏差を算定し、 $B/H$ に対して図示すると図-5のようになる。図において、平均値は $B/H$ の増加とともに増加するものの、増加の割合は $B/H$ の増加につれて小さくなっている。また、標準偏差も $B/H$ の増加とともに大きくなり、 $B/H$ が大きくなると $D/H$ の分布は広くなることが知られる。

以上のように、 $D$ は $H$ に比例せず、 $D$ の特性は $B/H$ によって異なる様相を呈している。すなわち、 $H$ が同一であっても $B$ が異なる場合、 $B$ の大きい断面の方が $D$ は大きくなることが同われる。これは、単列砂れき堆を有する直線河道における局所洗掘は、砂れき堆の形成に伴う流れの集中によって生じ、 $H$ が同じ場合、その集中は $B$ が大きい方が相対的に著しいことを意味している。すなわち、局所洗掘箇所の単位幅流量が大きくなる可能性は $B$ が大きい方が高く、その結果 $D$ の値も大きくなるものと解される。しかし、流れの集中によって単位幅流量が増加する割合は、 $B$ に比例するほどではなく、 $B$ の増加とともに減少していき、 $D$ の増加割合も $B$ の増大とともに減少するものと考えられる。このような $B$ の増加に伴う流れの集中化は、 $B$ がさらに増加して複列砂れき堆あるいは多列砂れき堆が形成されるようになってからも継続し、 $B$ の増加に伴い $D$ は増大するという特性を有している。なお、 $D$ の分布幅は $B$ が大きくなるほど広がるが、これは $B/H$ が大きくなると、河床形態が単列から多列砂れき堆へと移行し、横断形状が次第に多様化することによるものと解される。

図-5には、池田<sup>2)</sup>が次元解析の手法を用いて実験値を整理して求めた  $D/H$ の推定値が併示されている。池田の推定値は、ある区間における最大局所洗掘深に関する実験結果に基づくものであり、 $3 < B/h < 70$ に対して与えられている。さらに、図-9には福岡・山坂<sup>3)</sup>の理論式による $D/H$ の範囲が示されている。実河川との相似性に配慮して、 $B/H$ の範囲を広くした実験を行った本結果は、 $20 < B/H < 70$ の範囲において池田の推定値及び福岡・山坂の理論値と同様の傾向を示している。ただし、池田及び福岡・山坂は砂れき堆による局所洗掘深の最大値を与えており、本結果よりも若干大きな値となっている。

##### (2) 単断面河道における局所洗掘深の予測方法

図-6は、図-5に示された $D/H$ の平均値及び標準偏差から得られる $D/H$ の分布形に基づき、種々の超過確率における $D/H$ と $B/H$ との関係を示したものである。図-6を用いると、以下のようにして局所洗掘深 $D$ を予測することができる。すなわち、まず河道の線形及び現在の局所洗掘の状況に応じ、基本高水流量策定と同様に、 $D/H$ の超過確率を設定する。つぎに、当該断面の計画水位に基づき川幅 $B$ 及び平均水深 $H$ を算定し、図-6を用いて $D/H$ の予測値を求めることにより $D$ を推定することができる。

さらに、図-6には阿部・鈴木<sup>6)</sup>の実験結果及び横断面形状が比較的単断面に近い那賀川(2.0km~10.0km)における測定結果が併示されている。阿部・鈴木は、 $B=0.4\sim 2.0\text{m}$ 、 $l_b=1/30\sim 1/120$ 、 $dm=1.0\sim 3.2\text{mm}$ の均一砂を用い、通水中河床高の測定を行い、実験区間内において生じた数個の砂れき堆を対象として最大局所洗掘深 $D_{\max}/H$ を検討している。那賀川では、昭和51年9月の出水( $Q_{\max}=4.315\text{m}^3/\text{s}$ )を対象として、その痕跡水位と昭和52年12月に実施された横断測量成果とに基づき、 $D'/H$ が算定されている。また、図-1に例示されたA川の模型実験では、洗掘が生じた10断面における洪水中の局所洗掘深 $D$ と洪水直後の局所洗掘深 $D'$ との比がほぼ2であったことより、洪水中の推定値は $D/H=2D'/H$ として算定されている。図-6において、本検討で得られた $D/H$ の特性は、実験結果及び現地観測値の傾向をよく表現しているものと判断される。

つぎに、川幅 $B$ 、平均水深 $H$ の単断面河道における局所洗掘深 $D$ の一例として、超過確率50%の値を例示すると図-7のようになる。図-7は、種々の $D$ と $H$ に対して、図-6の超過確率50%の曲線より所定の $D/H$ となる $B/H$ 、すなわち $B$ を算定することにより描かれたものである。先に示したように、本実験結果は $B < 150\text{m}$ の単断面河道を対象としたものであり、この範囲を越える領域の $D$ については、図-7において破線で示されている。

##### (3) 局所洗掘深に及ぼす護岸法面勾配の影響

単断面河道において、護岸法面の勾配が護岸沿いの局所洗掘深に与える影響を検討すると以下のようであ

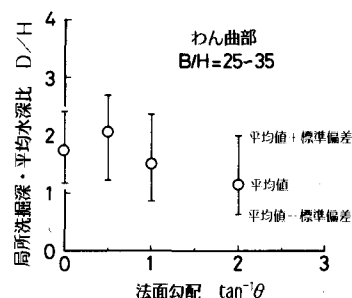
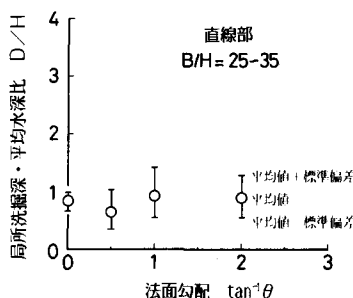
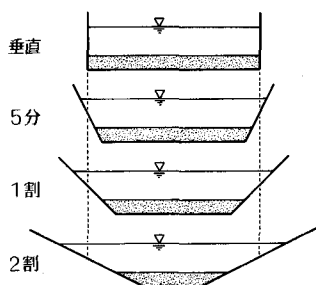


図-8 法面勾配を有する単断面河道

図-9 法面勾配と局所洗掘深

図-10 法面勾配と局所洗掘深

る。図-9は、図-8に示されるような直線水路において、移動床部の平均河床高より算定した $H$ 及び $D$ に基づき評価した $D/H$ について、両側有限対数正規分布を適合させたときの $D/H$ の平均値及び標準偏差を、4種の法面勾配(垂直, 5分, 1割, 2割)に対して示したものである。なお、水路幅 $B$ は水面幅と移動床部の幅との平均値で示されており、いずれの場合にも $B \approx 60\text{cm}$ となるように、水位及び河床高が設定されている。図において、 $D/H$ は法面勾配に係りなくほぼ一定値を呈しており、法面勾配は局所洗掘深 $D$ にあまり影響していないことが知られる。したがって、直壁河道を想定した長方形断面水路における結果は、2割程度までの法面勾配を有する河道にも、そのまま適用されることになる。

さらに、曲率半径 $R$ について $R/B=5$ の $90^\circ$ わん曲を対象として、直線水路の場合と同様に、法面勾配の影響を検討すると図-10のようになる。図に示された値は、わん曲始端から $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 及び $90^\circ$ の断面における測定値より得られたものであって、わん曲部においては法面勾配が緩くなるとともに $D$ は減少することが確認される。

## 5. 複断面河道における局所洗掘深の特性

### (1) 複断面河道の局所洗掘深

図-2に示されるような $B/b \leq 0.4$ の複断面河道においては、水位が高水数高よりも若干高い場合、低水路内の流れと高水数上の流れとの間に生ずる混合は著しくなり、その結果流れの抵抗(合成粗度係数)は大きくなることが知られている<sup>7)</sup>。低水路と高水数間の流れの混合は低水護岸近傍の局所洗掘にも大きく係っているものと推定され、以下においてはこのような観点から検討を行う。

単断面河道の場合と同様に、複断面水路について種々の低水路幅・低水路満杯水深比 $B/H$ に関する実験値を、低水路平均水深・満杯水深比 $H/h$ の値により分類し、 $D/H$ の分布に両側有限対数正規分布を適合させ、 $D/H$ の平均値及び標準偏差を求めると図-13のようになる。図にみられるように、複断面河道の場合、 $H/h$ の増加に伴う $D/H$ の変化の様子は、 $B/h \leq 45$ の場合と $B/h > 45$ の場合とで異なっている。すなわち、前者の場合、 $D/H$ は単調に減少し、 $D/H$ は $B$ 及び $H$ をそれぞれ川幅及び水深とする単断面河道とする破線の値に較べ小さくなっている。これに対し、後者の場合、 $H/h$ の増加とともに $D/H$ は増加し、単断面河道の場合よりも大きくなり、さらに $H/h$ が増加すると $D/H$ は減少傾向に転じている。これは、前者の場合には流れ場の水平スケールに較べ鉛直スケールが大きいため、相互干渉に伴う混合の影響が低水路河床面までは及ばないのに対し、後者の場合には鉛直スケールが相対的に小さいため、混合の影響が河床面にまで及び、その結果局所洗掘は $B$ を川幅、 $H$ を水深とする単断面河道の場合よりも大きくなるものと解される。なお、 $D/H$ が最大となる $H/h$ は、合成粗度係数が最大となる $H/h$ にほぼ一致しており、局所洗掘に流れの混合が大きく係っていることが確認される。水位が高くなると、このような混合は相対的に弱まり、また $B/H$ が小さい場合、混合の影響は河床面にまでは及ばなくなるものと推定される。

以上のように、 $B/H \leq 45$ の場合、低水路岸沿いの深掘れは低水路満杯時に、また $B/H > 45$ の場合、水位が高水数高よりも高い時に、それぞれ最も著しくなっている。複断面河道の局所洗掘特性は、低水路内の流れと高水数上の流れとの間の相互干渉に伴う混合と大いに係っているため、本実験結果は水位の増加に伴う合成粗度係数の増加が認められる $B/b \leq 0.4$ の複断面河道にも適用されるものと推測される。

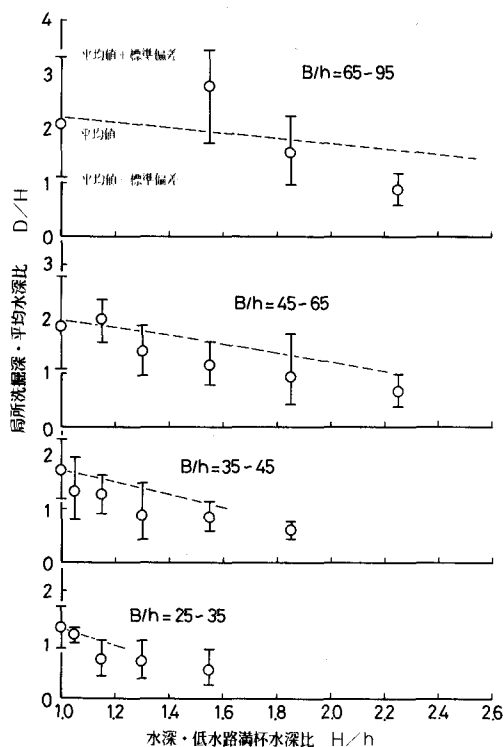


図-1 1 複断面水路の局所洗掘深・平均水深比

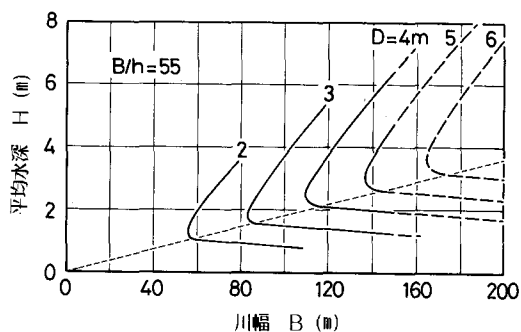


図-1 2 複断面河道の局所洗掘深 (B/h=55)

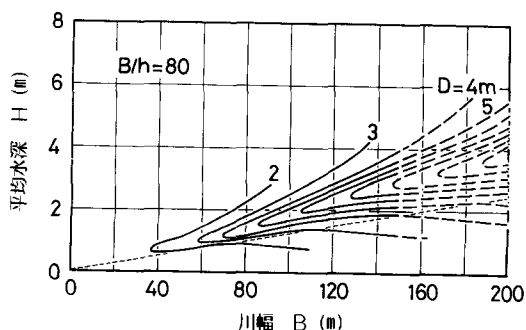


図-1 3 複断面河道の局所洗掘深 (B/h=80)

## (2) 複断面河道における局所洗掘深の予測方法

$B/h \leq 45$ の複断面河道においては、低水路満杯流量時にDは最大となり、単断面河道の場合と同様にして、Dの予測値が得られる。 $B/h > 45$ の河道においては、水位が高水敷高より高い場合にDの最大があらわれる。たとえば、 $45 \leq B/h < 65$ に対しては、 $H/h = 1.15$ 、 $65 \leq B/h < 95$ に対しては、 $H/h = 1.5$ 付近において、それぞれDは最大となる。したがって、 $B/h > 45$ の場合、設計水位に基づきHを設定し、 $B/H$ の値を用いて単断面河道の場合と同様にしてDを算定し、これに割増係数を乗ずることにより複断面河道におけるDの予測値が得られる。割増係数は、 $B/H$ によって異なり、 $45 \leq B/H < 65$ に対しては最大1.1程度、 $65 \leq B/H < 95$ に対しては最大1.5程度と見込まれる。なお、割増係数は $H/h$ の値によっても異なるため、厳密には図-11より妥当な割増係数を算定する必要がある。

図-12及び図-13は、それぞれ、 $B/h=55$ 及び $B/h=80$ の複断面河道について、図-7の場合と同様にして、種々のB、Hのもとで超過確率50%のDを示したものである。図中の細破線は、それぞれ $B/h=55$ 及び $B/h=80$ を満足する低水路満杯水深を表しており、Hがこの細破線より小さな領域については、単断面河道に関する図-7の値が示されている。

参考文献：1) 藤田裕一郎・村本嘉雄・堀池周二・小池剛：交互砂州の発達機構，第26回水理講演会論文集，pp. 25～30，1982。 2) 池田駿介：単列交互砂州の波長と波高：第27回水理講演会論文集，pp. 689～695，1983。 3) 福岡捷二：山坂昌成：河床形状・流れ・流砂量の非線型関係を考慮した交互砂州の平衡波高の理論，土木学会論文集，第357号/Ⅱ-3，pp. 45～54，1985。 4) 橋本宏・浅野富夫・林正男：河岸近傍の局所洗掘に関する実験的検討，第29回水理講演会論文集，pp. 567～572，1985。 5) 建設省河川局治水課・土木研究所河川研究室：蛇行現象と河道計画，1982。 6) 阿部宗平・鈴木浩之：流路工計画の横工に関する実験的考察，土木技術資料，第25巻，第1号，p. 44～49，1983。 7) 福岡捷二・浅野富夫・藤田光一・坂野章：複断面河道における洪水流の抵抗特性，第30回水理講演会論文集，pp. 499～504，1986。