

## 河岸近傍の局所洗掘に関する実験的検討

### Experiment on Local Scour near the Side Wall

建設省土木研究所 正 員 橋本 宏

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

河川改修工事の進展に伴い、河川の疎通能力は向上し、洪水氾濫に対する安全性は増大してきた。しかしながら、氾濫にまでは至らない河川災害は未だに発生しており、これが洪水氾濫の誘因となる可能性も多い。このような河川災害の一例として、護岸前面の局所洗掘による護岸の崩壊があげられよう。したがって、治水安全度の向上を図るため、護岸前面の局所洗掘の特性、とくに根入れ深の設計において重要となる洗掘深について検討することは極めて重要である。

局所洗掘に係わりをもつ要因としては、流れの集中と二次流とがあげられる。流れの集中は、狭窄部の流れあるいは川幅・水深比の大きな河道などにおいて生じ、たとえば後者のような河道では、砂れき堆の形成に伴う流れの集中、あるいは河道の平面形状に基づく流れの集中などが重要となり、天竜川・黒部川などの扇状地急流河川の局所洗掘はこのような原因によるものである。これに対し、二次流は川幅・水深比がそれほど大きくない河道わん曲部において重要となり、利根川・石狩川などの緩流河川の局所洗掘はこのような原因によるものである。

本研究は、以上の局所洗掘のうち、とくに直線部において生ずる局所洗掘、すなわち砂れき堆の形成に伴う局所洗掘のみを対象としたものであって、種々の水理量のもとで行なった実験に基づき、局所洗掘の発生位置及び洗掘深(本文では最大水深により表現)と種々の水理量との関係を検討するとともに、発生確率の概念を導入し、河川の重要性を考慮した洗掘深の予測方法を提案している。なお、ここでは局所洗掘現象は大出水時の低減期あるいは継続時間の長い中出水時において著しいとの立場から、流量規模としては平均年最大流量を対象としている。

#### 2. 実験方法と解析方法

一様砂を用いた移動床上の平衡流れを対象とした場合、独立した水理量として、川幅 $B$ 、平均水深 $H$ 、河床勾配 $I_b$ 、砂粒径 $d_m$ 、砂の水中比重 $S(=\sigma/\rho-1)$ 、水の動粘性係数 $\nu$ があげられる。流れのレイノルズ数及び砂粒レイノルズ数が充分大きな流れを対象とした場合、水の動粘性係数 $\nu$ は支配的でなく、また通常、 $S=1.65$ としてよいから、ここでは水中比重 $S$ を定数として取扱い、基本水理量として水深 $H$ を選定し、上記各種の支配水理量を無次元化すると、3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 $H/d_m$ が得られる。まず、実際河川におけるこのような無次元量の範囲を検討するため、建設省直轄47河川から142区間を選定し<sup>1)</sup>、平均年最大流量流下時の川幅・水深比 $B/H$ と無次元掃流力 $\tau_*$ あるいは水深・粒径比 $H/d_m$ との関係を示すと、図-1あるいは図-2のようになる。ただし、同図には、河床勾配が $I_b>1/500$ あるいは平均粒径が $d_m>2\text{ mm}$ の127区間の値のみが示されている。各種の無次元量は大きくばらついているが、さらに研究の対象を扇状地河川、すなわち河床勾配が $I_b>1/500$ 及び平均粒径が $d_m>20\text{ mm}$ の河川<sup>2)</sup>とした場合、各種無次元量の範囲は限定され、おおむね川幅・水深比については $50\leq B/H\leq 200$ 、無次元掃流力については $0.05\leq \tau_*\leq 0.15$ 、水深・粒径比については $10\leq H/d_m\leq 100$ となる。

したがって、実験においても上記のような範囲を極力満足するような条件を選定するとともに、中規模河床形態が支配的となる条件、すなわち小規模河床形態が発生しない条件を選定することが望ましく、以下のような実験を実施した。すなわち、幅60 cm、深さ50 cm、長さ30 mの鋼製両面ガラス張りの可変勾配水路にお

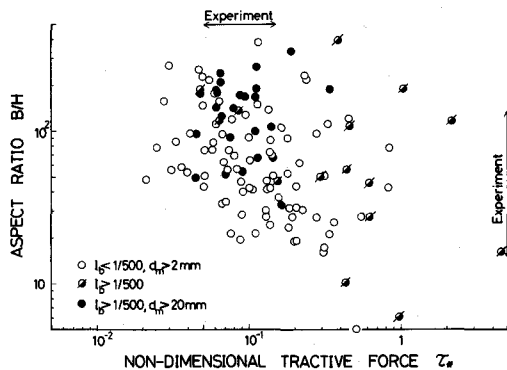


図-1

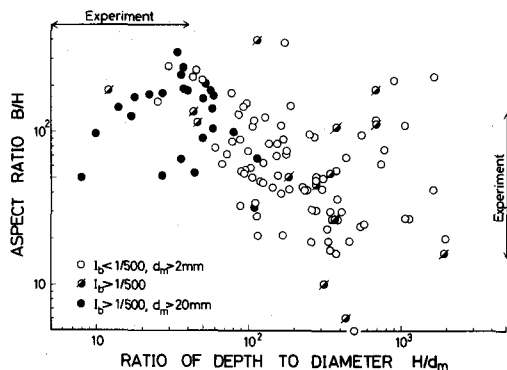


図-2

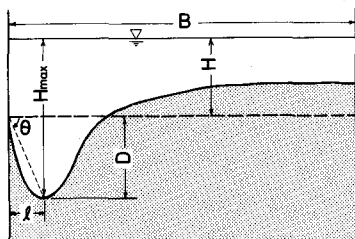


図-3

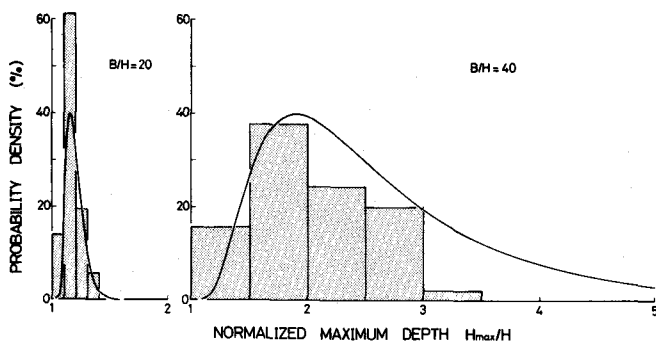


図-4

いて、移動床材料として2種の均一砂（平均粒径  $d_m = 1.0 \text{ mm}$  及び  $1.5 \text{ mm}$ ）を用い、種々の河床勾配  $I_b$ （ $1/50$ ,  $1/71$ ,  $1/100$ ,  $1/141$ ,  $1/200$ ,  $1/283$ ）のもとで、それぞれ数種の流量を通水し、合計28種の実験を行なうことにより、図-1及び図-2に併記されるような範囲を満足させた。いずれの実験においても、通水時間は予備実験の結果より90分間とし、さらに現象の再現性を確認するとともに、実験精度の向上を図るため、同一条件の実験をそれぞれ3回実施した。給砂については、土研式によりその量を算定し、水路上流端で給砂を行なった。水路床面高の計測においては、場所的変動及び時間的変動を把握するため、3箇所の横断面（水路下流端から8.5 m, 9.5 m, 10.5 mの断面）において、それぞれ15分毎に横断面形状の測定（水路床面高の測定の最大間隔は6 cm）を実施するとともに、水位の計測を行なった。ただし、解析にあたっては、平衡状態に完全に達したとみなされる通水開始75分後及び90分後の測定値のみを用いることとした。なお、予備実験により、直線部河道の局所洗掘に及ぼす河岸勾配の影響は著しくないことが明らかになったため、本検討においては直壁河岸を対象とした実験を行なっている。

### 3. 解析方法

局所洗掘に係わる水理量としては、図-3に示されるように、局所洗掘深  $D$ （平均河床高と最深河床高との差）、最大水深  $H_{\max}$  と最深部の河岸からの距離  $l$  があげられる。ここでは、洗掘深を表す特性量として最大水深  $H_{\max}$  をとりあげ、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。

本研究では、便宜上従来の研究<sup>3)</sup>に従い、川幅・水深比  $B/H$  を局所洗掘に対する第一因子と考え、川幅・水深比  $B/H$  の値により、測定値を  $15 < B/H \leq 25$ ,  $25 < B/H \leq 35$ ,  $35 < B/H \leq 45$ ,  $45 < B/H \leq 65$ ,  $65 < B/H \leq$

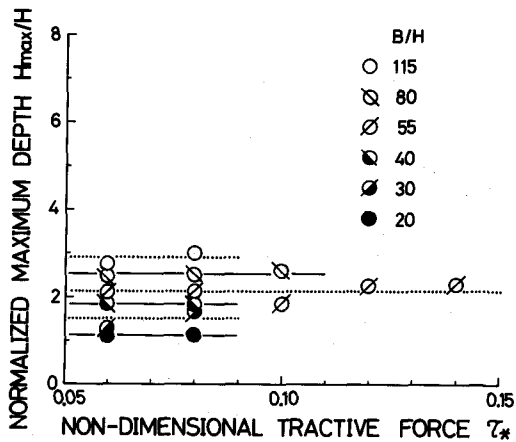


図-5

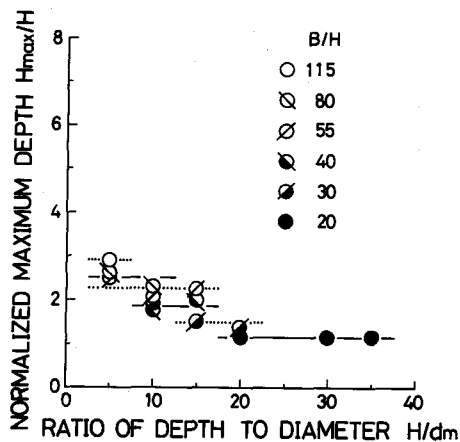


図-6

95,  $95 < B/H \leq 135$  に分類し、それぞれの代表値を  $B/H = 20, 30, 40, 55, 80, 115$  とした。このように分類した測定値の最大・平均水深比  $H_{\max}/H$  の分布の一例として、 $B/H = 20$  及び  $40$  に関するものを示すと図-4 のようであって、最大・平均水深比  $H_{\max}/H$  の度数分布は、 $H_{\max}/H = 1$  から無限大までの対数正規分布とよい一致を呈している。したがって、以下における最大・平均水深比  $H_{\max}/H$  の平均値の算定にあたっては、対数正規分布を仮定し、対数変換後の平均値を用いることとする。

つぎに、無次元掃流力  $\tau_*$  あるいは水深・粒径比  $H/d_m$  が最大・平均水深比  $H_{\max}/H$  に及ぼす効果について検討するために、それぞれの川幅・水深比  $B/H$  について、両者の関係を示すと図-5 あるいは図-6 のようになる。図-5 では、無次元掃流力  $\tau_*$  を  $0.05 \leq \tau_* \leq 0.07$ ,  $0.07 < \tau_* \leq 0.09$ ,  $0.09 < \tau_* \leq 0.11$ ,  $0.11 < \tau_* \leq 0.13$ ,  $0.13 < \tau_* \leq 0.15$  に分割し、それぞれの領域における最大・平均水深比  $H_{\max}/H$  の平均値（対数正規分布を仮定、以下同じ）を、無次元掃流力の代表値  $\tau_* = 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14$  に対して示している。図より、無次元掃流力  $\tau_*$  の範囲は、川幅・水深比  $B/H = 55$  についてのみ広く、断定はできないものの、最大・平均水深比  $H_{\max}/H$  に及ぼす無次元掃流力  $\tau_*$  の効果は、それほど大きくないことが知られる。したがって、ここでは、近似的に見た場合、無次元掃流力  $\tau_*$  の影響を無視できるものとする。

一方、図-6 は水深・粒径比  $H/d_m$  の効果を検討したものであって、図-5 と同様に、各川幅・水深比  $B/H$  に対して、水深・粒径比  $H/d_m$  の値により測定値を7種に分割し、それぞれにおいて平均化された最大・平均水深比  $H_{\max}/H$  が示されている。水路幅が一定の水路で行なった測定値のみを用いているため、川幅・水深比  $B/H$  の値により水深・粒径比  $H/d_m$  の範囲は変動し、いずれにおいても水深・粒径比  $H/d_m$  の範囲はそれほど広くないものの、各川幅・水深比  $B/H$  について最大・平均水深比  $H_{\max}/H$  は著しい増減傾向を呈していない。したがって、近似的には、最大・平均水深比  $H_{\max}/H$  に対する水深・粒径比  $H/d_m$  の影響は無視できるものとして差し支えなく、以下においては、川幅・水深比  $B/H$  のみによって最大・平均水深比  $H_{\max}/H$  を近似的に評価することとする。

#### 4. 最深部の発生位置

水路横断面内の最深部の位置を、図-3 に示されるように、近い河岸からの距離  $l$  で評価し、川幅・水深比  $B/H$  との関係を検討すると以下ようになる。なお、距離  $l$  の検討にあたっては、最深部が河岸沿いに発生した場合 ( $l = 0$ ) と河岸沿い以外の中央寄りで発生した場合 ( $l \neq 0$ ) とに分けることとする。

図-7 及び図-8 は、最深部が河岸沿いに発生する場合と河岸沿い以外で発生する場合との割合を表すとともに、最深部が河岸沿い以外で発生する場合については、最深部の河岸からの距離  $l$  の平均値を示している。

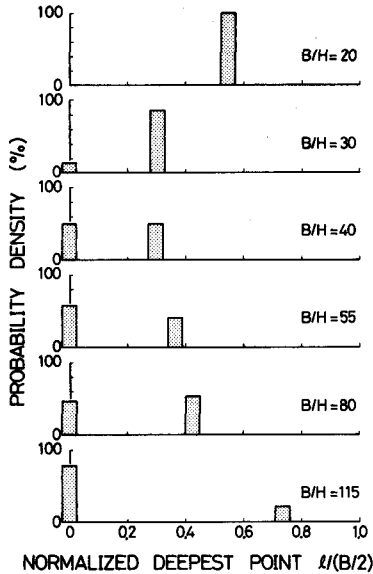


図-7

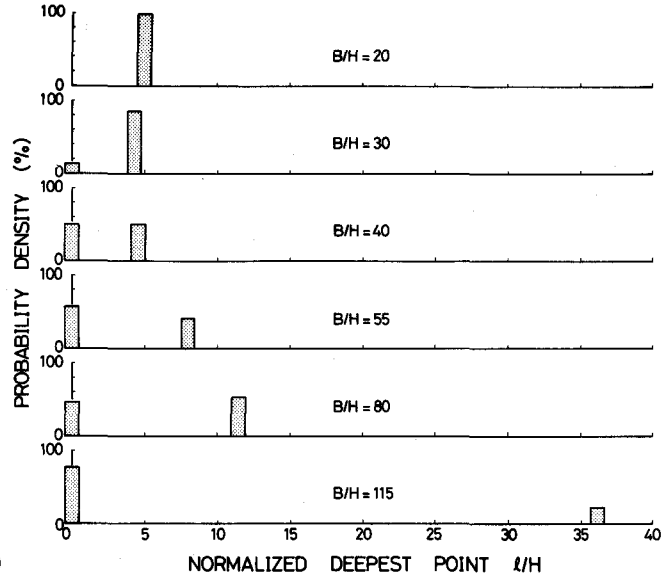


図-8

まず、最深部が河岸沿いに発生する割合は、川幅・水深比が  $B/H=20$  の場合皆無であり、このように川幅が狭く水深が大きい河川では、顕著な砂れき堆が形成されず、河岸沿いに最深部が現れないことが知られる。しかし、川幅・水深比  $B/H$  の増加とともに、最深部は河岸沿いでも発生するようになり、その発生割合は川幅・水深比  $B/H$  の増加とともに増加し、川幅・水深比が  $B/H=55$  の場合には、約60%の割合で最深部は河岸沿いに生ずることが明らかとなる。最深部が河岸沿いに発生する割合が高くなる川幅・水深比  $B/H$  は、単列砂れき堆の形成領域<sup>4)~7)</sup>ともほぼ一致しており、河岸沿いに発生する洗掘に砂れき堆が大きな係わりをもっていることが確認される。さらに川幅・水深比  $B/H$  が増加すると、河岸沿いに最深部が発生する割合は減少するものの、川幅・水深比が  $B/H=115$  の場合には再び大きくなっている。このような傾向は、砂れき堆の複列化とともに、河岸沿いに最深部が発生する割合が減少し、多列砂れき堆が形成された場合には、河道内に発生した数箇所の洗掘箇所のうち、河岸沿いが最も発達しやすいことを示すものと解される。しかし、川幅・水深比が  $B/H=115$  の測定値は、他の川幅・水深比  $B/H$  に対するものに較べるとかなり少なく、結果の信頼性は若干劣るものと考えられる。したがって、大きな川幅・水深比  $B/H$  における最深部の河岸沿いの発生割合については、さらに検討される必要がある。

これに対し、最深部が河岸沿い以外に発生した場合について検討すると以下のようなものである。図-7は、最深部の河岸から距離  $l$  を水路の半幅  $B/2$  で無次元化し、この単純平均を示したものであって、たとえば川幅・水深比が  $B/H=20$  の場合、最深部は全て河岸沿い以外で発生し、河岸からの無次元化距離  $l/(B/2)$  は0.5程度であることが知られる。すなわち、最深部の発生箇所は河道内にはば一様分布していることが知られる。川幅・水深比  $B/H$  が増加すると、最深部が河岸沿い以外で発生する割合は減少するとともに、河岸沿い以外に発生した場合の河岸からの平均無次元化距離  $l/(B/2)$  も減少する様相を呈する。このような平均無次元化距離  $l/(B/2)$  は、単列砂れき堆の形成領域に相当する川幅・水深比が  $B/H=40$  付近で最小となり、さらに川幅・水深比  $B/H$  が増加すると平均無次元化距離  $l/(B/2)$  は逆に増大していく。したがって、川幅  $B$  が一定の場合、水深  $H$  の増加とともに最深部は河岸沿いで発生する割合が大きくなり、また河岸沿い以外で発生する場合にもその発生位置は河岸に近くなるとともに、川幅・水深比が  $B/H=40\sim55$  のときこのような傾向がもっとも顕著となり、さらに水深  $H$  が増加すると、最深部は河岸沿いで発生しにくくなり、またその発生位置は河岸から遠ざかるという特性が明らかとなる。すなわち、大流量時よりも、川幅・水深比が  $B/H=40\sim55$

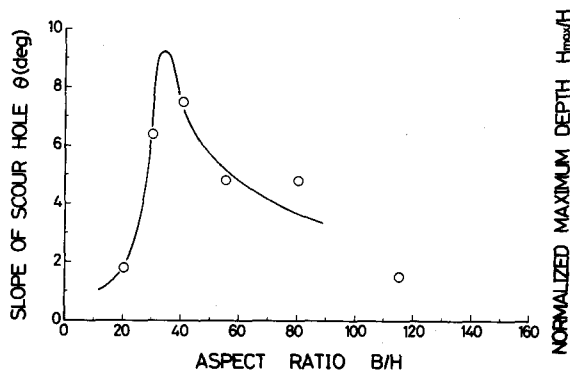


図-9

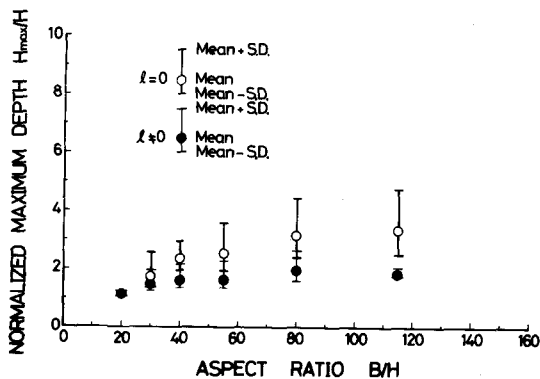


図-10

となる流量時において、最深部は河岸近傍で発生しやすくなり、護岸の安全上重要となることが知られる。

また、図-8は、図-7と同様に、最深部が河岸沿いに発生しない場合について、最深部の河岸からの距離  $l$  を示したものであって、同図においては、距離  $l$  が平均水深  $H$  で無次元化されるとともに、このようにして得られる無次元化距離  $l/H$  は、0 から無限大までの対数正規分布をするものと考えられるため、対数変換した後平均操作を施すことにより、無次元化距離  $l/H$  の平均値を評価している。図において、平均無次元化距離  $l/H$  は、川幅・水深比  $B/H$  の増加とともに若干減少し、単列砂れき堆の形成領域にはほぼ相当する川幅・水深比  $B/H=30\sim40$  において最小値  $l/H=4\sim5$  をとった後増加に転じている。したがって、水深  $H$  が一定の場合、川幅  $B$  の増加とともに、最深部が河岸沿いで発生する割合は増加し、河岸沿い以外で発生する最深部も、川幅・水深比が  $B/H=30\sim40$  のときもっとも河岸に近づき、その距離  $l$  が水深  $H$  の  $4\sim5$  倍になった後、川幅・水深比  $B/H$  の増加とともに増加していくことが知られる。しかし、この傾向は、水路幅が一定の実験結果から得られたものであり、さらに検討が必要であろう。

つぎに、最深部が河岸沿い以外に発生する場合について、図-3に示されるように、河岸上の平均河床高相当点と最深点とを結ぶ直線の勾配  $\theta$  について検討すると図-9のようになる。図より、勾配  $\theta$  は、単列砂れき堆の発生領域にはほぼ相当する川幅・水深比が  $B/H=30\sim40$  において最大となり、その値は10度近くに達することが知られる。

## 5. 最大水深（局所洗掘深）

最大水深についても、最深部が河岸沿いに発生する場合と河岸沿い以外に発生する場合とに分けて検討を進めることとする。図-10は、川幅・水深比  $B/H$  により分類された測定値を、さらに最深部の発生位置により2種に分け、それぞれについて最大・平均水深比  $H_{\max}/H$  の対数正規分布を仮定し、平均値及び標準偏差を算定したものである。まず、最深部が河岸沿いに発生する場合には、川幅・水深比  $B/H$  の増加とともに、最大・平均水深比  $H_{\max}/H$  の平均値及び標準偏差はいずれもほぼ増加傾向を呈している。これに対し、最深部が河岸沿い以外に発生する場合 ( $l \neq 0$ ) には、最大・平均水深比  $H_{\max}/H$  は、いずれの川幅・水深比  $B/H$  においても、河岸沿いに発生する場合の平均値よりも小さく、また川幅・水深比  $B/H$  の増大に伴う増加傾向も緩やかなものとなっている。すなわち、最深部が河岸沿いに発生する場合の方が、河岸沿い以外に発生する場合よりも著しい洗掘となって現れることが知られる。なお、河岸沿い以外に最深部が現れる場合のうち、川幅・水深比が  $B/H=115$  の標準偏差が著しく小さいが、これは測定値の数が他と較べ著しく少ないことに起因するものである。

さらに、図-11は、河川工学上重要となる局所洗掘、すなわち最深部が河岸沿いに発生した場合について、図-10に示された最大・平均水深比  $H_{\max}/H$  の平均値及び標準偏差に基づき、最大・平均水深比  $H_{\max}/H$  の超

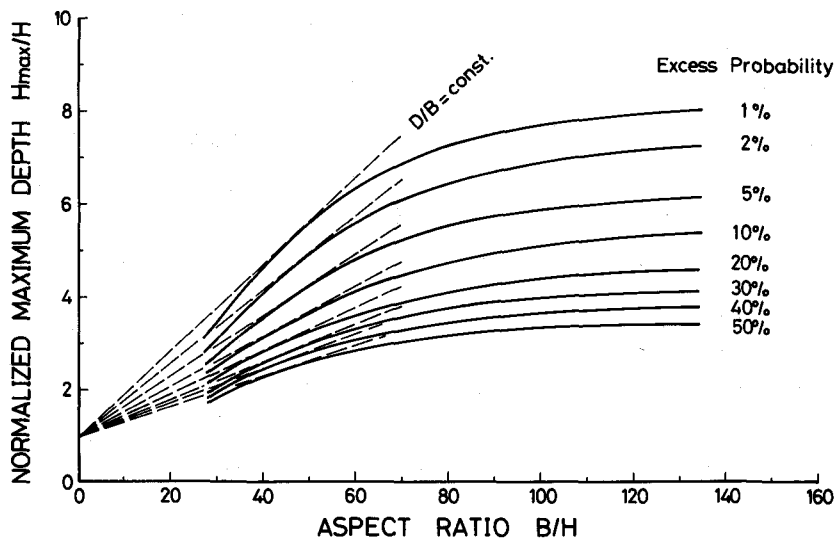


図-11

過確率を示したものである。いずれの超過確率曲線においても、川幅・水深比  $B/H$  の増加とともに、最大・平均水深比  $H_{\max}/H$  の増加傾向は緩慢となることが知られるとともに、超過確率 50% の場合、すなわち平均値を採用しても、川幅・水深比が  $B/H=100$  の河川において、河岸沿いに発生した局所洗掘による最大・平均水深比は  $H_{\max}/H=3$  前後に達することが知られ、護岸根入れ深の設計にあたって重要な知見を与えている。なお、図において、川幅・水深比  $B/H=0$  及び最大・平均水深比  $H_{\max}/H=1$  (局所洗掘深・平均水深比  $D/H=0$ ) の点を通る破線群は、局所洗掘深と川幅との比  $D/B$  が一定となる値を連ねたものであって、各曲線に接する破線は、それぞれの超過確率における局所洗掘深・川幅比  $D/B$  の最大値を示している。すなわち、川幅  $B$  の河道を対象とした場合、与えられた超過確率に対し、種々の水深  $H$  のもとで生ずる局所洗掘深の最大値を示している。また、このような局所洗掘深  $D$  の最大値は、いずれの超過確率においても、川幅・水深比が  $B/H=50$  付近において発生している。すなわち、局所洗掘深を対象とした場合にも、その最大値は単列砂れき堆が発生する領域に相当する領域において、局所洗掘はもっとも著しくなることが知られる。

## 6. おわりに

本研究の遂行にあたっては、金沢大学土木工学科辻本哲郎助教授との議論が有意義であったことを記し、同博士に感謝するとともに、実験の実施に協力された宇都宮大学土木工学科学生林真君に謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 建設省河川局治水課・土木研究所河川研究室：第 36 回建設省技術研究会報告，pp. 582-619，1983.
- 3) 山本晃一：土木研究所資料，第 1625 号，1981.
- 4) 池田宏：地理学評論，46-7，pp. 435-450，1973.
- 5) 深見親雄：土木技術資料，21-10，pp. 27-32，1979.
- 6) 村本嘉雄・藤田裕一郎：第 22 回水理講演会論文集，pp. 275-282，1978.
- 7) 黒木幹男・岸力：第 26 回水理講演会論文集，pp. 51-56，1982.