

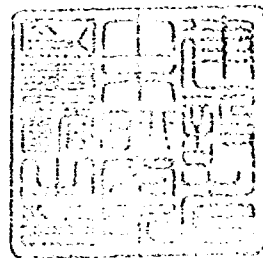
土研資料第 1797 号

ISSN 0386-5878



土 木 研 究 所 資 料

橋脚による局所洗掘深の予測と対策
に関する水理的検討



昭和57年 3 月

建設省土木研究所
河 川 研 究 室

Copyright © 56 年度 by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。
したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行なってはならない。

工本研究所資料 第1797号

橋脚による局所洗掘深の予測と対策
に関する水理的検討 正誤表

頁	行数及び箇所	誤	正
記号-覧	上から17行目	$\sqrt{(S-1)} gdm$	$\sqrt{(b/p-1)} gdm$
8	" 5 "	Lausren	Laurser
10	" 8 "	contineolls	continuolls
	" 13 "	"	"
12	" 1 "	"	"
	" 8 "	"	"
14	表-1.1 2行目	"	"
	" 6 "	Moza	Masa
	" 9 "	contineous	continuolls
	" 11 "	Scheu	Shen
	"	(Rep)	(Rp)
	" 13 "	contineous	continuolls
15	下から6行目	Tarapre	Tarapore
30	" 11 "	Dhalexswari	Dhaleswari
42	上から8行目	Qurstens	Carstens

目 次

まえがき	1
第1章 橋脚周辺の流れと洗掘機構	3
1-1 橋脚周辺の洗掘機構	3
1-2 橋脚による局所洗掘の分類	3
1-3 従来の研究の概要	3
第2章 橋脚の基部洗掘に関する実験的研究	15
2-1 次元解析	15
2-2 実験装置および実験方法	16
2-3 実験結果とその考察	19
2-3-1 最大洗掘深の時間変化特性	19
2-3-2 洗掘口形状	19
2-3-3 最大洗掘深と水理量の関係	20
2-4 データの収集	30
2-4-1 実験データの収集	30
2-4-2 実測データの収集	30
第3章 橋脚の基部洗掘深の推定に関する検討	41
3-1 従来の各推定式に対する検討	41
3-2 洗掘深の推定	44
3-3 橋脚形状による洗掘深変化への適用	51
3-4 洗掘範囲の推定	56
第4章 近接橋脚による影響の検討	59
4-1 複数橋脚配置に関する実験	59
4-2 実験の概要と実験ケース	59
4-3 実験結果とその考察	60
第5章 橋脚の洗掘防止に関する検討	71
5-1 洗掘防止工の敷設範囲と形状に関する実験	71
5-1-1 実験概要と実験ケース	71
5-1-2 実験結果とその考察	72
5-2 洗掘防止工法の概要と問題点	79
5-3 根固ブロックによる洗掘防止工法	80
5-3-1 河道特性と根固工法	80
5-3-2 ブロック重量と各種水理量の関係	80

5-3-3	ブロックの移動限界流速	82
5-3-4	根固ブロックの敷設厚さ	85
5-3-5	吸い出し防止工法	85
第6章	橋脚の被災および補強事例に関する調査	86
6-1	アンケート調査概要	86
6-2	アンケート調査結果とその考察	86
第7章	全体のまとめと今後の課題	93
7-1	橋脚の基部洗掘に関する実験結果について	93
7-2	橋脚の基部洗掘深の推定に関する検討結果について	94
7-3	近接橋脚による影響について	94
7-4	橋脚の洗掘防止に関する検討結果について	95
7-5	橋脚の被災および補強事例について	95
あとがき		97
参考文献		97

図・表・写真目次

図- 1. 1	橋脚、橋台および水制周辺における最大洗掘深さと流量との関係	4
図- 1. 2	洗掘深と橋脚径の関係 (Laursen)	5
図- 1. 3	橋脚前部の形状に関する修正係数 K_s	5
図- 1. 4	流向が洗掘に及ぼす効果を表わす係数 $K_{\alpha L}$	5
図- 1. 5	U_* , W_o が洗掘に及ぼす影響を表わす係数 K_{τ}	5
図- 1. 6	洗掘深と水深の関係 (Clear Water Scour)	6
図- 1. 7	実測実験結果と Larras , Breusers の推定式の比較図	6
図- 1. 8	橋脚への流れの入射角に対する係数	7
図- 1. 9	h_o / D とピアーフールド数による係数の関係	7
図- 1.10	Neill , Qureshi の式による $Z / D \sim h_o / D$ の関係	8
図- 1.11	洗掘口模式図	9
図- 1.12. 1 ~ 1.12. 2	実験値と (1 - 13) 式の比較図	10
図- 1.13	ピアーレイノルズ数と洗掘深の関係 ($d_m < 0.52 \text{ mm}$)	11
図- 1.14	〃 〃 ($d_m > 0.52 \text{ mm}$)	11
図- 1.15	〃 〃	12
図- 1.16	$Z / D \sim D / d_m$ の関係図	13
図- 1.17	実測データとの比較図	13
図- 1.18	根入れ長と橋脚幅の関係	14
図- 2. 1. 1	実験水路一般図 (流砂水路)	16
図- 2. 1. 2	実験水路一般図 (構造物水路)	17
図- 2. 1. 3	実験水路一般図 (大型水路)	17
図- 2. 2.(1) ~ 2. 2.(2)	粒径加積曲線	17
図- 2. 3	洗掘深の時間変化特性	19
図- 2. 4	洗掘深形状図 (静的平衡状態)	20
図- 2. 5	ピアー前面と側面の洗掘深比較図	20
図- 2. 6. 1 ~ 2. 6. 4	洗掘深形状図	21
図- 2. 7	$Z / D \sim Fr$ の関係	26
図- 2. 8	河床形態の領域区分図 ($\tau_* \sim h_o / d_m$)	27
図- 2. 9	ϕ と h_o / d_m , τ_* の関係	28
図- 2.10	河床形態の領域区分図 ($Fr \sim h_o / d_m$)	29
図- 2.11	$Z / D \sim Fr$ の関係	29
図- 2.12	洗掘深形状図 (豊川放水路)	31

図- 2.13	洗掘深形状図 (パキスタン Dhaleswari 河)	31
図- 2.14	阿賀野川計画高水流量配分図	33
図- 2.15.1	阿賀野川河床材料 (低水路) 縦断面図	34
図- 2.15.2	阿賀野川現計画高水位, 高水敷高, 最深河床高, 常水路平均河床高縦断面図	34
図- 2.15.3	阿賀野川川幅, 常水路幅縦断面図	35
図- 2.15.4	砂礫堆の移動変化図 (阿賀野川)	35
図- 2.16	阿賀野川下流平面図	36
図- 2.17.1	洗掘深形状図 (阿賀野川)	37
図- 2.17.2	洗掘深形状図 (阿賀野川国鉄線橋脚 4.5 Km 地点)	38
図- 3.1	$Z/D \sim h_o/D$ による Laursen の式との比較図	41
図- 3.2	$Z/D \sim h_o/D$ の関係図	42
図- 3.3	実験値と推定式 (Shen) の比較図	43
図- 3.4	$Z/D \sim Fr$ 図 (Shen)	44
図- 3.5.1 ~ 3.5.4	洗掘深推測図	46
図- 3.6.1 ~ 3.6.4	$Fr \sim Z/D$ と h_o/d_m 関係図	50
図- 3.7	$Z/D \sim h_o/D, h_o/d_m$ の関係	51
図- 3.8	橋脚模型の前後頭部形状 (石原の実験)	51
図- 3.9.1	洗掘深形状比較図	53
図- 3.9.2	橋脚軸変化による洗掘深形状比較図	54
図- 3.10	流水が斜めに当る場合の橋脚形状による流線の変化	56
図- 3.11	空中および水中における息角と平均粒径との関係 (久宝の実験による)	57
図- 3.12.(1) ~ 3.12.(3)	洗掘深と範囲の関係	57
図- 3.13	橋脚周囲の洗掘範囲と形状の推定模式図	58
図- 4.1	実験施設概要図	61
図- 4.2.1 ~ 4.2.4	実験の観察記録図	62
図- 4.3.1 ~ 4.3.5	洗掘深形状比較図	66
図- 5.1	橋脚の保護形状図	71
図- 5.2	保護工の法勾配の違いによる比較図	74
図- 5.3	保護範囲の違いによる比較図	75
図- 5.4	水理量変化による形状比較図	77
図- 5.5	河床粒径とブロック重量の関係	81
図- 5.6	計画高水時平均流速とブロック重量の関係	81
図- 5.7	計画高水勾配とブロック重量の関係	82
図- 5.8	掃流力とブロック重量の関係	82

図- 5. 9	ブロック単体の移動限界図	83
表- 1. 1	洗掘深推定式比較表	14
表- 2. 1	実験範囲	18
表- 2. 2	観測時の水理量	33
表- 2. 3. 1	実測結果一覧表(阿賀野川), 実測時の水理量による整理	39
表- 2. 3. 2	〃 〃 (〃), 洪水ピーク時の水理量による整理	40
表- 4. 1	実験ケース一覧表	59
表- 5. 1.(1)~ 5. 1.(2)	実験ケース一覧表	73
表- 5. 2	河道分類	80
表- 5. 3	実物ブロックの移動限界	84
表- 5. 4	ブロック群の流失に対する許容係数	84
表- 6. 1. 1 ~ 6. 1. 3	被災事例アンケート調査票	87
表- 6. 2	補強工事例アンケート調査票	89
表- 6. 3 ~ 6. 5	アンケート調査集計結果一覧表	90
表- 6. 6	被災時の推定水理量一覧表	91
表- 6. 7 ~ 6. 8	補強工事集計一覧表	92
写真- 2. 1. 1 ~ 2. 1. 3	通水後の洗掘状況	25
写真- 3. 1 ~ 3. 3	〃 〃	55
写真- 5. 1. 1 ~ 5. 1. 4	通水後形状の状態	75
写真- 5. 2. 1 ~ 5. 2. 4	通水後形状の状態	78
付表- 1	実験データ一覧表(Shen)	99
付表- 2. 1 ~ 2. 3	〃 (Chatou)	100
付表- 3. 1	〃 (小川)	103
付表- 4. 1 ~ 4. 4	〃 (土研)	103
付表- 5	〃 (Tarapore)	105
付表- 6	〃 (石崎)	106
付表- 7	〃 (石崎, 本間)	106
付表- 8	〃 (Chitale)	107
付表- 9	〃 (中川)	108
付表- 10	〃 (土研)	109
付表- 11. 1. ~ 11. 2	〃 (吉川, 福岡)	110
付表- 12. 1 ~ 12. 6	〃 (土研)	111

記 号 一 覧

Q_{so}	: 洗掘口から出る流砂量
Q_{si}	: 洗掘口に入る流砂量
Z	: 洗掘深
h_o	: 上流平均水深
u_o	: 上流平均流速
Q	: 流量
B	: 水路幅
D	: 橋脚幅
d_m	: 砂礫の平均粒径
u_*	: 摩擦速度 ($=\sqrt{gRI}$)
g	: 重力加速度
I	: 水面勾配
w_o	: 粒子の沈降速度
τ_*	: 無次元掃流力 ($=u_*^2 / sgdm$)
τ_c	: 無次元限界掃流力
Fr_p	: ピアーレイノルズ数 ($=u_o / \sqrt{gD}$)
N_s	: 流砂の特性を表わすセディメント数 ($=u_o / \sqrt{(S-1) gdm}$)
α	: ピアーに対する水流の入射角度
φ	: 流速係数 ($=u_o / u_*$)
R_p	: ピアーレイノルズ数 ($=U_o D / \nu$)
Z_t	: 遷移洗掘深
ρ	: 流体密度
ν	: 動粘性係数
σ	: 粒子の密度
σ_o	: 粒径の混合度合
t	: 時間
Fr	: フルード数 ($u_o / \sqrt{gh_o}$)
θ	: 洗掘口の斜面角度
q	: 単位幅流量
Re	: レイノルズ数 ($u_o h_o / \nu$)
S	: 砂の水中比重 ($\sigma / \rho - 1$)

まえがき

河川においては流域の開発による流量規模の増大や河床低下等によって、橋脚の設計条件が変更になっているものや根入れ不足となっているものなど、橋脚周辺の洗掘に対する安全性の低下により、橋梁に関する災害のうち、水害による被災例の占める割合は多い。

このような橋脚の水理的側面からみた安全性は、周辺に生ずる局所洗掘現象が大きな比重を占める。橋脚周辺の局所洗掘機構に関しては、従来から数多くの調査、研究が行われているが、現象を支配する多くの要素が複雑に影響しあうため、種々の条件に対応しうる予測法は確立されておらず、洗掘範囲や防止工等は経験的に処理されているものが多い。したがって、これらの水理的諸問題の解明と合理的な洗掘の予測や対策工法を明確にすることが重要な課題となっている。

本報告書は道路事業調査費によって昭和53年度～昭和56年度に実施した「橋脚の局所洗掘と対策に関する調査」および「橋脚の水理的設計基準の作成に関する調査」で行った橋脚における局所洗掘深の推定と対策に関する実験結果、現地調査結果について述べたものである。

本資料集が橋脚の洗掘対策、橋脚の設計および計画策定上の良い指針となれば幸いである。

河川研究室	須	賀	堯	三
	西	田	祥	文
	高	橋		晃
	坂	野		章

第1章 橋脚周辺の流れと洗掘機構

橋脚が流れに作用する影響のうち問題となるのは、橋脚周辺に生ずる局所洗掘、橋脚上流水位のせき上げ、河岸および下流流向に及ぼす影響等である。前2者は古くから研究されており、とりわけ局所洗掘に関しては数多くの試験、研究が行われている。本章ではこのうち橋脚周辺の洗掘機構、および局所洗掘に関する従来の研究の概要について述べる。

1-1 橋脚周辺の洗掘機構

橋脚周辺の流れの特性は、橋脚前面で左右に分かれる流れと、前面で鉛直下方に橋脚に沿う下降流とに大別される。左右に分かれた流れは、橋脚壁面に沿った湾曲流となり、橋脚側面で局所的な流れの集中を呈する。いっぽう、橋脚前面での下降流は河床に衝突し、河床砂礫を巻き上げる回転渦を発生する。この渦によって巻き上げられた土砂は、左右に分かれる流れによって橋脚後方に運ばれる。一般に、同一水理量ならば橋脚幅の厚いほど流れが集中、すなわち流速が大きくなり橋脚最前縁から側部にかけての河床材料を掃流する。これらの現象や最大洗掘位置は橋脚の規模および形状、水理量ならびに河床材料等の特性に支配される。洗掘機構の異なる二つの作用によって生じた洗掘口は、洗掘深の増加に伴い橋脚の平面形状に近似した形状となる。平衡状態に達した洗掘口法面勾配は河床材料の水中安息角に見合い、最深部が帯状に橋脚側面に沿って伸び、その深さはしだいに浅くなる。掃流力の低下する橋脚下流部では一般に洗掘されることはまれで、上流で洗掘された土砂を後流領域では堆積する。

1-2 橋脚による局所洗掘の分類

局所洗掘現象は洗掘される領域からの流出土砂量 Q_{so} とその領域への流入土砂量 Q_{si} のアンバランスから生ずる現象であって、 $Q_{so} = Q_{si}$ となるように洗掘深形状が変化していく。 Q_{so} と Q_{si} との関係から局所洗掘は次の3つに分類される。¹⁾

- (a) $Q_{so} = Q_{si} = 0$: No scour (固定床)
- (b) $Q_{so} > Q_{si} \cong 0$: Clear water scour (静的平衡洗掘)
- (c) $Q_{so} > Q_{si} > 0$: Scour with continuous sediment motion (動的平衡洗掘)

ここで(a)は洗掘のおこらない場合である。(b)は限界掃流力以下の流れで河床が移動していない場合におこる洗掘で、(c)は限界掃流力を超える流れの場合におこる洗掘をさしている。静的平衡状態では最終洗掘深に達するのに長時間を要するが、動的平衡状態では短時間に平衡洗掘深に達し、河床波の影響を受けて洗掘深は変動する。

1-3 従来の研究の概要

橋脚周辺の局所洗掘に関する研究は、かなり古くから行われており、日本では1938年～

1942年に京都大学の石原²⁾により系統的に検討されている。その後研究が進み、洗掘深に対する推定式が提案され始めたのは1960年代以後であるといえる。しかしこれらの推定式は、それぞれの提案者の行った実験、実例の範囲では正しくとも、あらゆる条件の場に適合するというものではなかった。したがって現在、過去の研究の適用範囲を明らかにするとともに、系統的な研究により種々の条件に対応しうる推定式についての検討が必要とされている。以下にこれまでの研究成果の主要なものについてその概要を述べる。

(1) Andru の研究³⁾ (1956)

自然河川の平衡状態における断面形状に関する研究において、Lacey は bed factor F_b という値を導入したが、Andru は洗掘深 $Z \times F_b^{1/3}$ と単位幅流量 q との間に一義的な関係があることを見出した。その関係は図-1.1 に示すように、橋脚の実測や模型実験の結果、また似たような現象の水制先端部の洗掘データなども含まれている。

図-1.1 の関係式は

$$(Z + h_o) \cdot F_b^{1/3} = 1.8 q^{2/3} \dots\dots\dots (1-1)$$

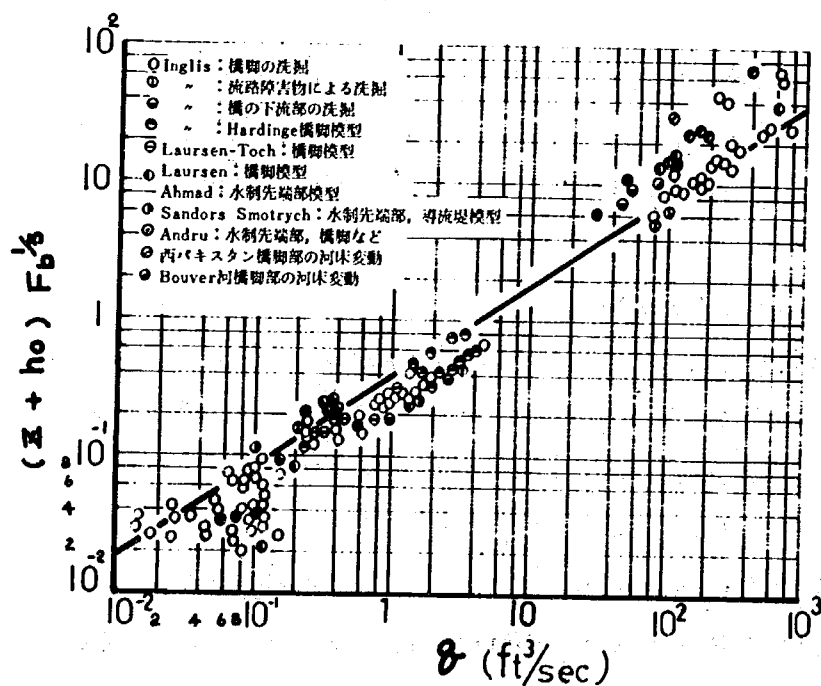


図-1.1 橋脚、橋台および水制周辺における最大洗掘深さと流量との関係

ここで水路を長方形断面と仮定すれば

$$F_b = \frac{u_o^2}{h_o} = \frac{Q^2}{B^2 \cdot h_o^3}$$

で表わせるから

$$\frac{(Z + h_o)}{h_o} = 1.8, \therefore \frac{Z}{h_o} = 0.8$$

..... (1 - 2)

の関係になる。ここに h_o は平均河床からの水深, Z は平均河床からの洗掘深である。

Andru の推定式はきわめて簡易な表現で, 従来よく使用されてきたものであるが, 後述するようにこの推定式は

$0 < h_o/D < 1.5$ において数千の h_o/dm の時に妥当な表現式である。なお D はピアー幅, dm は河床材料平均粒径である。

(2) Laursen の研究^{4), 5)} (1960)

Laursen は橋脚幅による通水面積減少に着眼し, 水路幅急縮部における河床低下量が橋脚側面の洗掘量に対応するものとし, 洗掘深を橋脚径および水深の関数として次式で表わした。

$$\frac{D}{h_o} = 5.5 \frac{Z}{h_o} \left[\left(\frac{1}{11.5} \cdot \frac{Z}{h_o} + 1 \right)^{1.7} - 1 \right]$$

..... (1 - 3)

(1 - 3) 式は長方形断面の橋脚に対して得たものであり, この洗掘深の関係は図 - 1. 2 に示した。また実験により, 橋脚頭部の形状や, 流水に対する角度の影響, および掃流力 $u_* = \sqrt{ghoI}$ (g : 重力の加速度, I : 水面勾配) と河床砂の沈降速度 W_o との比の洗掘におよぼす影響を図 - 1. 3 ~ 1. 5 のように表わした。したがって, 洗掘深を求めるには (1 - 3) 式で与える洗掘深 Z にそれぞれ図に示す効果を係数と

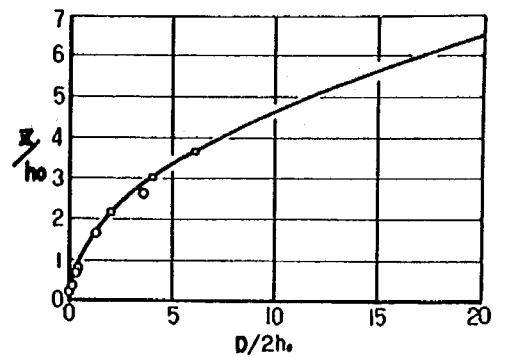


図 - 1. 2 SCOUR AT AN ENCROACHING ABUTMENT

頭部形状	長さとの比	K_s
長方形		1.00
半円形		0.90
長円形	2 : 1	0.80
	3 : 1	0.75
レンズ形	2 : 1	0.80
	3 : 1	0.70

図 - 1. 3 橋脚前部の形状に関する修正係数 K_s

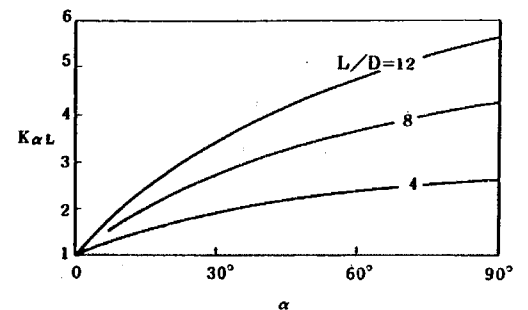


図 - 1. 4 流向が洗掘に及ぼす効果を表わす係数 $K_{\alpha} L$

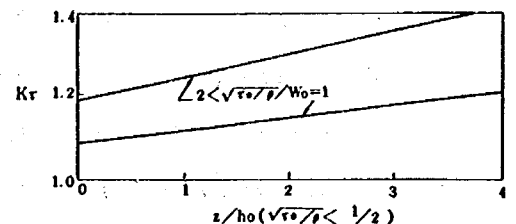


図 - 1. 5 U_*/W_o が洗掘に及ぼす影響を表わす係数 K_{γ}

して乗ずることによって求めることを提案した。なおここに得られた結果は、いわゆる縮流モデルの動的平衡状態におけるものである。また Laursen は Clear Water の場合について同様の解析を行い、次式で表わした。

$$\frac{D}{h_0} = 5.5 \frac{Z}{h_0} \left[\frac{(1/11.5 \cdot Z/h_0 + 1)^{2/6}}{(\tau_* / \tau_{c0})^{1/2}} - 1 \right] \dots\dots\dots (1-4)$$

(1-4) 式を計算したものが図-1.6 である。この式は限界掃流力を与える水理量で洗掘深は最大値を持つことを表わしており、興味深い。

(3) Tarapore の研究⁶⁾ (1962)

Tarapore は理論的、実験的研究により局所洗掘深に対する推定式として次式を得ている。本推定式は h_0/D が小さいときは洗掘深は水深のみの関数であり、 h_0/D が大きいときはピアの幅のみの関数であるとするものである。

本式は Andru の式を修正したものに相当するとも言える。しかし、これらはごく少ないデーターによって決められた値である。

$$\left. \begin{aligned} Z &= 1.17 h_0 & 0 < h_0/D \leq 1.15 \\ Z &= 1.35 D & h_0/D > 1.15 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1-5)$$

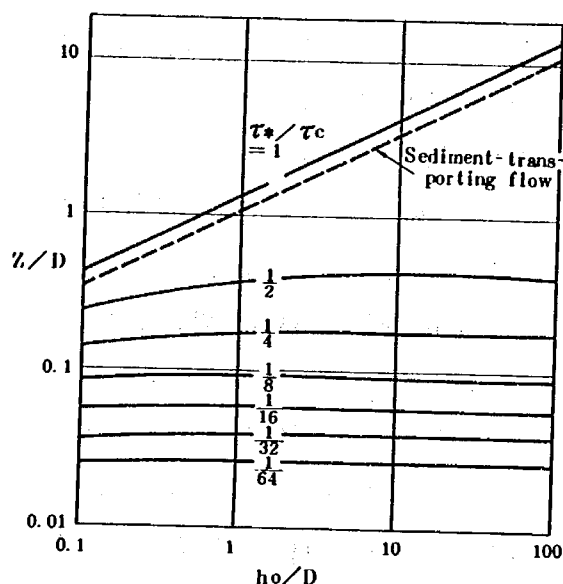


図-1.6 CLEAR-WATER SCOUR AT A PIER

(4) Larras, Breusers の研究⁷⁾

Breusers (1965) は洗掘深推定式として次式を提案した。

$$Z = 1.4 D \dots\dots\dots (1-6)$$

いっぽう、Larras (1963) はフランスの河川の実測により、次式を提案した。

$$Z = 1.42 K D^{0.75} \dots\dots\dots (1-7)$$

ここで円柱ピアについては $K=1$ ，方形ピアについては $K=1.4$ としている。

(1-6) 式，(1-7) 式と実験結果および実測結果と比較したものが図-1.7 である。

これらの式は、いずれも流速、水深に無

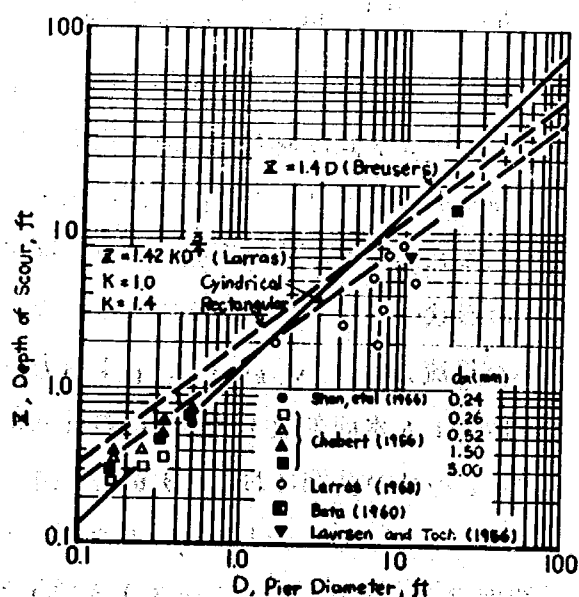


図-1.7 実測実験結果と推定式の比較図

関係となっている。したがって、これらはいずれも最大洗掘深に関する推定式と考えることができ、かつ水深の効果が考慮されていないことより、比較した実験データ、実測データの範囲でのみ成立するものであると言える。

(5) Maza and Sanchez の研究 (1964)

Maza and Sanchez は、ソ連の川の実測より導かれた Yaroslavitsiev の推定式を修正し次式を得ている。

$$\frac{Z}{D} = K_1 K_2 \frac{u_0^2}{gD} - \frac{3100 \text{ dm}}{D} = \frac{h_0}{D} \left(K_1 K_2 \frac{u_0^2}{gh_0} - \frac{3100 \text{ dm}}{h_0} \right) \dots\dots\dots (1-8)$$

ここに K_1 は橋脚の形状と橋脚への水流の入射角に依存する係数で図-1.8 に与えてある。 K_2 は水深とピア幅の比 h_0/D とピアフルード数 $Fr_p = u_0^2 / gD$ に依存する係数で図-1.9 に示してある。なお、(1-8) 式は後述する Clear Water scour の場合の特性を示した推定式である。

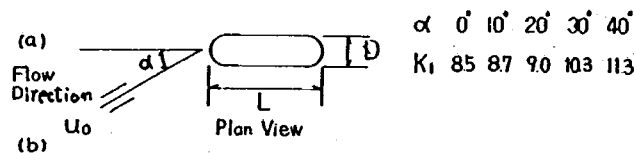


図-1.8 Variation of K_1 with flow angle after Maza and Sanchez (1964)

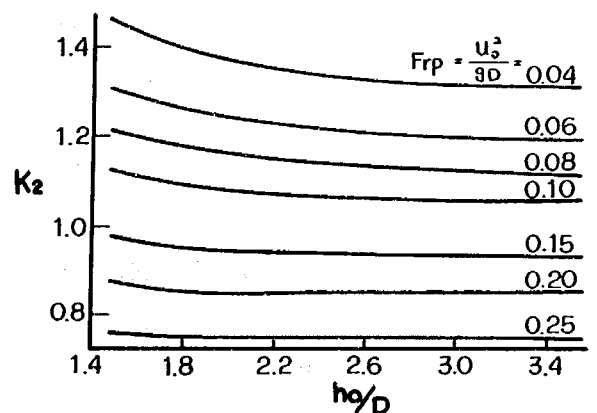


図-1.9 Variation of K_2 with flow after Maza and Sanchez (1964)

(6) Neill, Qureshi の研究

Neill (1965) は実験で与えられる最大洗掘深に対して次式を与えた。

$$\left. \begin{aligned} \frac{Z}{D} &= K \left(\frac{h_0}{D} \right)^{0.3} \\ \frac{Z}{h_0} &= K \left(\frac{D}{h_0} \right)^{0.7} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1-9)$$

ここに円柱ピアに対して $K = 1.2$ 、角柱ピアに対しては $K = 1.5$ である。(1-9) 式は粒径の影響を含んでいないが、Neill は粒径が小さい場合、洗掘深は若干小さくなると指摘している。

いっぽう、Qureshi は粒径の小さい場合について次式を与えている。

$$\left. \begin{aligned} \frac{Z}{h_o} &= 1.8 \left(\frac{D}{h_o} \right)^{0.25} - 1 \\ \frac{Z}{D} &= 1.8 \left(\frac{h_o}{D} \right)^{0.75} - \frac{h_o}{D} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1-10)$$

(1-9), (1-10) 式の関係を示したのが図-1.10 である。

Neill の式は Lausren の式とほぼ同様な結果を与える実験式であり、水深粒径比 h_o/dm の小さい場合にはほぼ妥当である。Qureshi の式は h_o/dm が大きく、 h_o/D が小さい場合に比較的よいと考えられる。

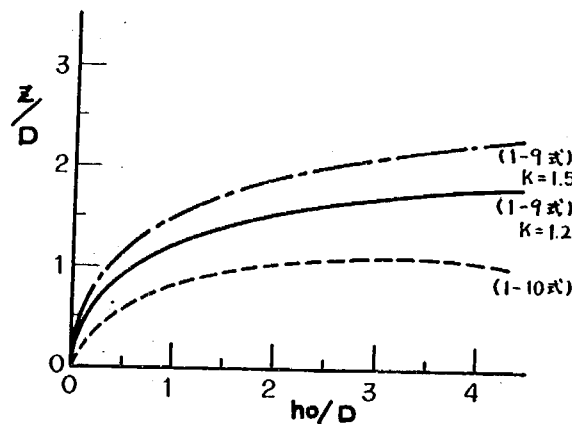


図-1.10 Neill, Qureshi の式による $Z/D \sim h_o/D$ の関係

(7) Carstens の研究⁸⁾ (1966)

Carstens は、無次元パラメータ (Sediment Number) N_s を導入し、洗掘深推定式として次式を与えた。

$$\left. \begin{aligned} \frac{Z}{D} &= 0.546 \left(\frac{N_{s2}^2 - N_{s1}^2}{N_{s2}^2 - N_{s2}^2} \right)^{3/4} \\ N_s &= \frac{u_o}{\sqrt{(\sigma/\rho - 1) g d m}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1-11)$$

ここに N_{s2} は河床材料の動き始める Sediment Number でほぼ 2.24 とおくのが妥当とされている。また N_{s1} は基部洗掘がおこり始める Sediment Number で N_{s2} のほぼ半分とすると良い結果を与える。この事はポテンシャル理論により、橋脚前方十分上流における流速に対して、橋脚側面における流速は 2 倍になるという結果に対応している。

なお前述した Maza & Sanchez の式は N_s を用いることにより

$$\frac{Z}{D} = K_1 K_2 (\sigma/\rho - 1) \left(\frac{d m}{D} \right) N_{s2}^2 - 3100 \frac{d m}{D} \dots\dots\dots (1-12)$$

と変化でき、 Z/D が N_s と dm/D の関数である。Carstensの $Z/D = f(N_s, N_{s2})$ という結果と似ているが、前者は N_s が大きくなると Z/D は増加する傾向にあり、後者は N_{s2} より大きい N_s のとき、すなわち scour with continuous sediment motion の場合にのみ適用でき、 N_s の増加に伴い Z/D は減少する。

(8) 齊藤，浦，柴田の研究⁹⁾ (1969)

齊藤らは洗掘口を図-1.11に示す形状とみなし、渦および副流による河床の洗掘作用をそのまま量的に表わすかわりに、上流から掃流されてきて洗掘口に落ち込む砂量および渦によって洗掘される砂量と、洗掘口の下流に形成される斜面上を掃流されて出ていく砂量との間にある種の平衡関係が成り立つものと考え、次式を導いた。

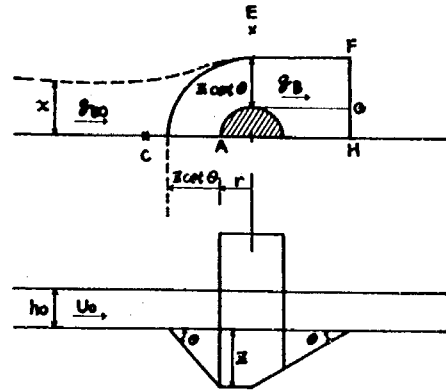


図-1.11 洗掘口模式図

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\phi_0}{\phi} \frac{\bar{u}}{u_0} \right)^{2m} \left\{ 1 - \frac{\phi_0^2 u_{*c}^2}{u_0^2} \left(\frac{\bar{u}}{u_0} \right)^2 \right\} &= \frac{x}{Z \cot \theta} \left(1 - \frac{\phi_0^2 u_{*c}^2}{u_0^2} \right) \\ \frac{x}{Z \cot \theta} &= 1 + \frac{\sqrt{R}}{2.15 \cot \theta} (2.35 + 1.25 \log Fr_0^2) \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{2.15 \cot \theta}{\sqrt{R}} \right) \right\} \\ \frac{\bar{u}}{u_0} &= \frac{x}{Z \cot \theta} \left(1 + \beta \frac{Z}{h_0} \right)^{-1} \end{aligned} \right\}$$

..... (1-13)

ここに u_{*c0} 、 u_{*c} は水平河床および θ なる斜面における砂の限界摩擦速度、 u_0 、 u は等流および代表断面における流速、 ϕ_0 、 ϕ は等流部および代表断面における流速係数、 m は流砂理論から決まる常数、 $R = \nu / h_0$ 、 $\beta = 1.7$ である。流速係数 ϕ 、 ϕ_0 を適当に与えると(1-13)式を解くことができる。その結果と実験結果とを比較したものが、図-1.12.1~1.12.2である。この計算は諸係数等、実際に使用するには難点も多い。また本モデルも縮流モデルである。

(9) Shenらの研究¹⁰⁾ (1969)

Shenらは、局所洗掘の原因はPier前面の馬蹄型にあるとして、二次元的なモデルより、Pier前面の渦の強さをピアレーノルズ数で表現し、洗掘深を示すパラメーターとして用いた。すなわち、

$$Z = f \left(\frac{Du_0}{\nu} \right) = f(R_p) \quad \text{..... (1-14)}$$

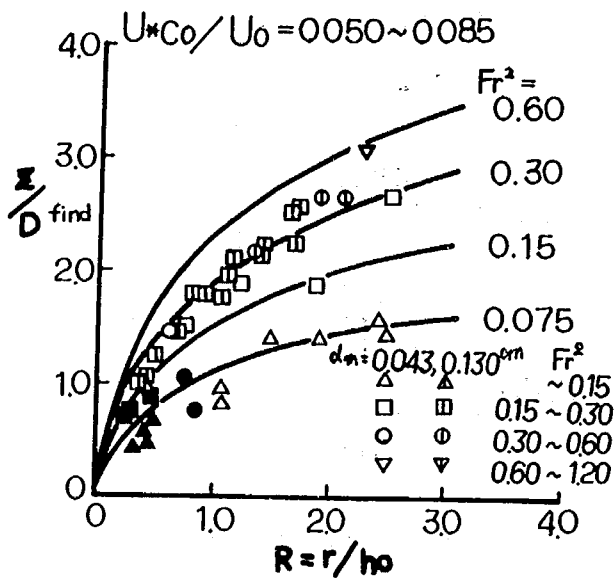


図-1.12-1 実験値と(1-13)式の比較図

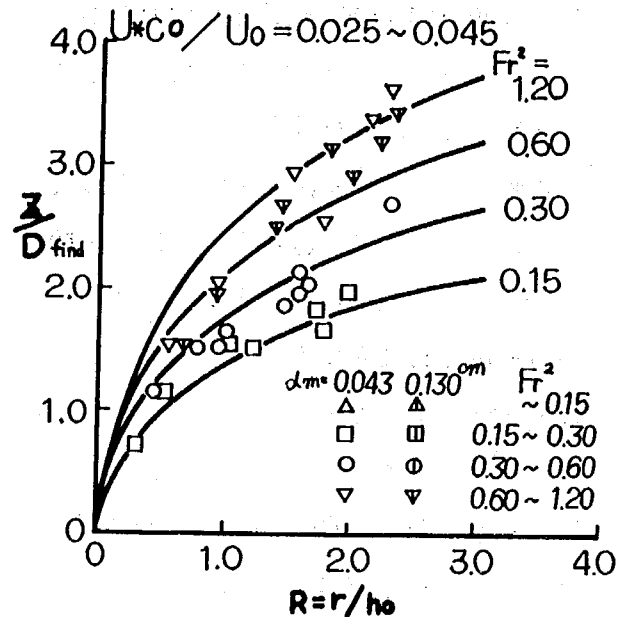


図-1.12.2 実験値と(1-13)式の比較図

ここに ν は動粘性係数である。Shen らは $Z \sim R_p$ 曲線を描くにあたり、粒径 $dm < 0.52 \text{ mm}$ 、 $dm > 0.52 \text{ mm}$ の場合に分け、その定性的違いに注目した。図-1.13 は $dm < 0.52 \text{ mm}$ の場合でほぼ

$Z = 0.0222 R_p^{0.619} (\text{cm})$, $Z = 0.00073 R_p^{0.619} (\text{feet})$ (1-15) で洗掘深が推定できるとした。

次に図-1.14 は $dm > 0.52 \text{ mm}$ の場合で chatou の実験 ($dm = 3 \text{ mm}$) を選んで比較してある。この場合は河床材料に対して限界掃流力を与える流れ、つまり Clear water scour と Scour with contineous sediment motion の限界で最大値をもつ。

このことは、流れが限界掃流力を超えると洗掘口の埋め戻しが行われることを示している。このように大きな粒径の場合は、(1-15)式の推定式の下にくる事が解る。したがって、すべてのデータは(1-15)式より下にくることが予想され、このような目的で書いたのが図-1.15 である。

以上より、Shen は(1-15)式は Scour with contineous sediment motion の場合は過大な値を与えると述べ、最終的に次のように洗掘深を推定することを提案した。

① Clear water scour の場合

$$Z = 0.0222 R_p^{0.619} (\text{cm}) \quad \text{..... (1-16)}$$

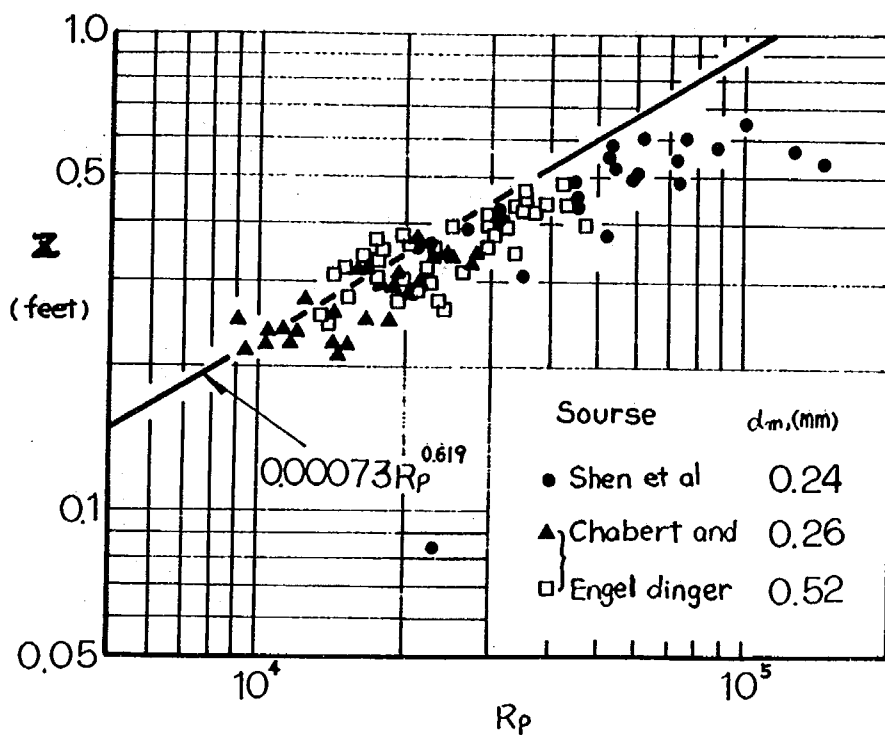


図- 1.13 ピア-レイノルズ数と洗掘深の関係 ($d_m < 0.52 \text{ mm}$)

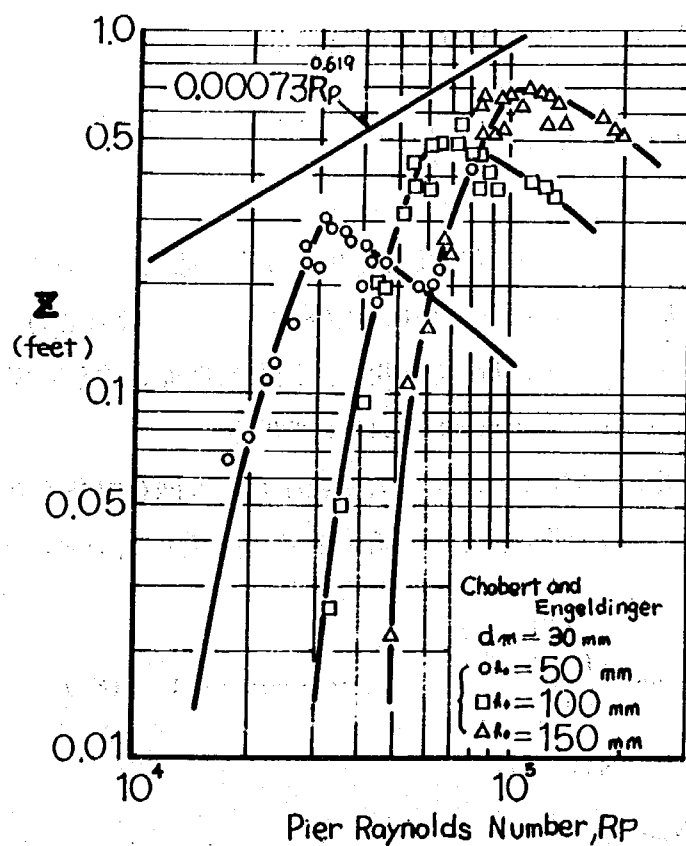


図- 1.14 ピア-レイノルズ数と洗掘深の関係 ($d_m > 0.52 \text{ mm}$)

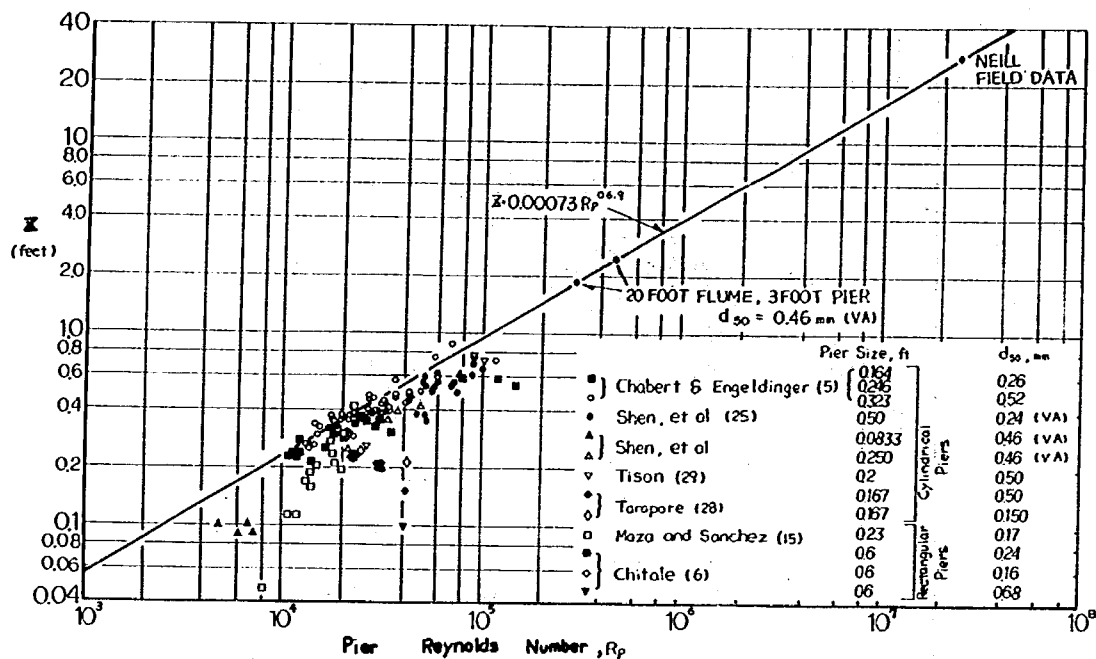


図- 1.15 ピアーレイノルズ数と洗掘深の関係

② Scour with contineous sediment motion の場合

$$\left. \begin{aligned} Z &= 1.4 D \quad (\text{Breusers}) \\ Z &= 1.42 K D^{0.75} \quad (\text{Larras}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1-17)$$

⑩ 中川の研究 1) (1974)

中川は Shen の考察と同様に、限界掃流力を与える点で洗掘深は最大値をもち、それより大きな掃流力を与えるような流れにおいては一定値になるとの考察を行った。

また Carstens の Sidiment Number を使用して洗掘深の推定式を提案した。

① Scour with contineous sediment motion の場合

この場合中川は、最大洗掘深は N_s によらず粒径だけの関数であるとし、過去のデータを使用し、無次元最大洗掘深 Z/D と無次元粒径 D/d_m との関係を図- 1.16 のように整理し、次式を与えた。

$$\frac{Z}{D} = 3.4 - 0.9 \log \frac{D}{d_m} \dots\dots\dots (1-18)$$

② Clear water scour の場合

$$\frac{Z_t}{D} = \frac{N_s - kN_{sc}}{N_{sc} - kN_{sc}} \cdot \frac{Z}{D} \dots\dots\dots (1-19)$$

($k = 0.5$)

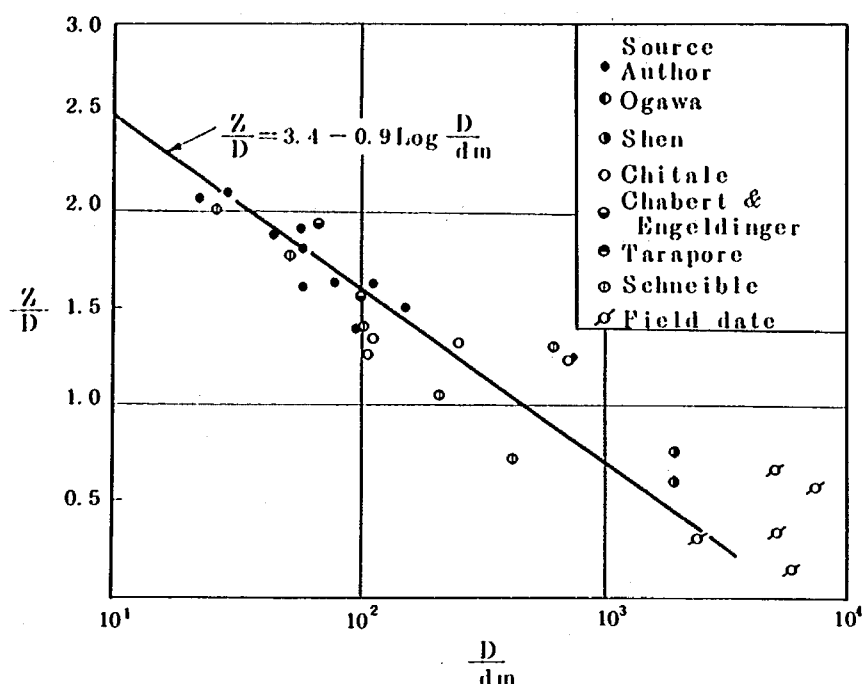


図-1.16 $Z/D \sim D/dm$ の関係図

Clear water の場合、洗掘深は N_s に対して一次的に増加する場合であるとし、したがって (1-18) 式で求めた洗掘深から N_{sc} を与える水理量で与え、 $1/2 N_{sc}$ で洗掘深として (No Scour) その間を直線で結び洗掘深を推定することとした。また中川は上式で推定した結果と、淀川水系瀬田川の支川である大戸川および木津川における実測データとを比較して図-1.17 を得ている。

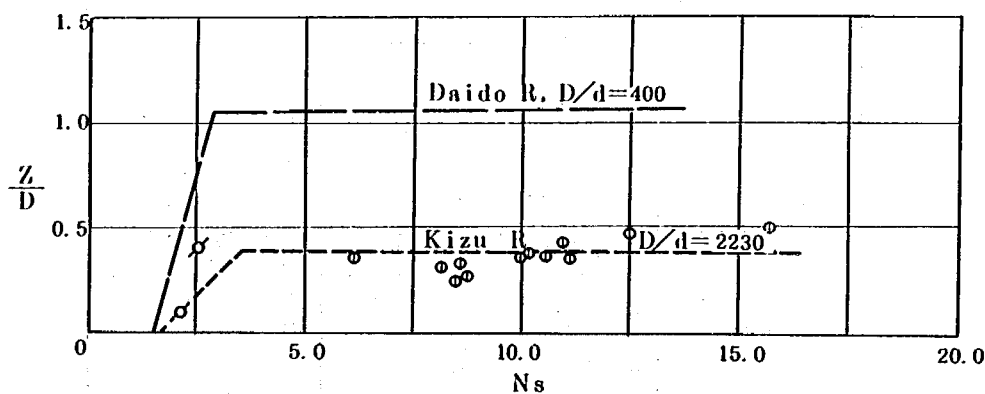


図-1.17 実測データとの比較図

(1) 国鉄(今井)の研究

国鉄では過去被災を受けた橋脚について、根入れ長と橋脚幅の関係を描き、図-1.18 のようになった。これによれば、ほとんどのデータは、根入れ長/橋脚幅 = 1.6 / 1.0 の線の下にくることが解る。実測値は河床低下をきたしてもものがあることが考えられるとともに、根

入れ長さを洗掘深と定義しているため、精度はあまりよくないが、これが国鉄の推定式といわれるものである。

$$\frac{Z}{D} = 1.6$$

..... (1 - 20)

(12) 各推定式の整理

前述した推定式をまとめて年代順に表-1.1に記した。これらの推定式は2つに分類できる。1つは最大洗掘深に関するものであり、いま1つは与えられた水理条件、河床条件に対する洗掘深の推定式であり、目的に応じて使い分ける必要がある。なお後章において各推定式の比較検討を行う。

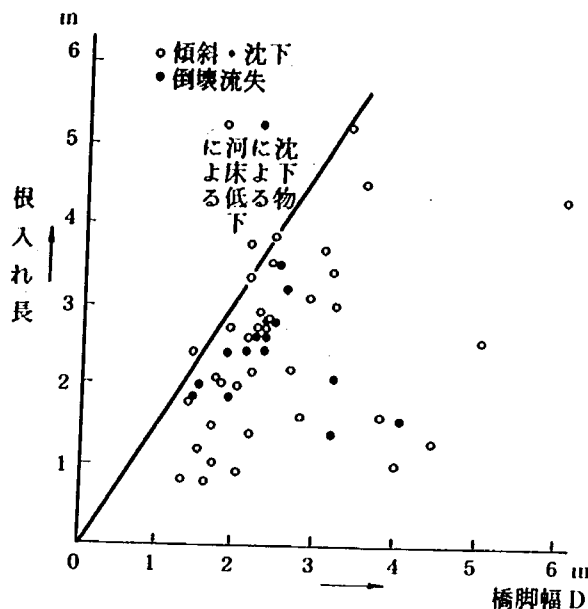


図-1.18 根入れ長と橋脚幅の関係

表-1.1 洗掘深推定式比較表

研究者	推定式	備考
Andru (1956)	$\frac{Z}{D} = 0.8 \frac{h_o}{D}$	
Laursen (1960)	$\frac{D}{h_o} = 5.5 \left[\left(\frac{1}{115} - \frac{Z}{h_o} + 1 \right)^{1.7} - 1 \right]$	Continuous sediment motion
" (1963)	$\frac{D}{h_o} = 55 \frac{Z}{h_o} \left[\left(\frac{1-Z}{115 h_o} + 1 \right)^{7/6} - \left(\frac{r_s}{r_c} \right)^{1/2} - 1 \right]$	clear water
Tarapore (1962)	$\frac{Z}{D} = 1.35 \quad h_o/D > 115$ $\frac{Z}{h_o} = 1.17 \quad 0 < h_o/D \leq 115$	
Larraa (1963)	$Z = 1.42 K D^{0.75}$	円柱ピア K=1 方形ピア K=1.4
Brussers (1964)	$Z = 1.4 D$	
Mora and Sanchez (1964)	$\frac{Z}{D} = K_1 K_2 \frac{u_o^2}{g D} - \frac{3000 \text{ dm}}{D}$ $= \frac{h_o}{D} \left(K_1 K_2 \frac{u_o^2}{g h_o} - \frac{3000 \text{ dm}}{h_o} \right)$	K_1 は橋脚形状と水流への入射角によって変化する係数 K_2 は h_o/D 及び u_o^2/gD によって変化する係数
Neil (1965)	$\frac{Z}{D} = K \left(\frac{h_o}{D} \right)^{0.3}$	円柱ピア K=1.2 方形ピア K=1.5
Qureshi (1965)	$\frac{Z}{D} = 1.8 \left(\frac{h_o}{D} \right)^{0.75} - \frac{h_o}{D}$	
Carstens (1966)	$\frac{Z}{D} = 0.546 \left(\frac{N_s^2 - N_{s1}^2}{N_s^2 - N_{s2}^2} \right)^{3/4}$	continuous sediment motion $N_s = \frac{u_o}{\sqrt{(s/\rho - 1) g d m}}$
吉野, 橋, 柴田 (1969)	$\frac{Z}{h_o} = f(F_r)$	
Scheu (1969)	$Z = f(R_o p)$	
小川 (1966)	$\frac{Z}{h_o} = f(F_r)$	
小川, 福崎 (1971)		
小川, 鈴木 (1974)	$\frac{Z}{D} = 3.4 - 0.9 \log \frac{D}{d m}$ $\frac{Z_1}{D} = \frac{N_s - k N_{sc}}{N_{sc} - k N_{sc}} - \frac{Z}{D}$	continuous sediment motion clear water

第2章 橋脚の基部洗掘に関する実験的研究

2-1 次元解析

従来の研究成果をふまえ、洗掘深の推定について何等かの知見を与えるべく実験を行ったが、それに先立ち以下のような次元解析を行った。

橋脚周辺の局所洗掘現象に影響を及ぼす因子としては、次のようなものが考えられる。まず、流体の物性に関する要素として流体密度 ρ 、動粘性係数 ν 等、流体の運動に関する水理量として、橋脚の影響を受けない断面における平均流速 u_0 、および平均水深 h_0 、重力の加速度 g 、時間 t 等がある。次に河床を構成する材料に関する物理量として、砂礫の平均粒径 d_m 、密度 σ 、砂礫粒径の混合度合 σ_0 等がある。さらに橋脚に関する要素としては、橋脚幅 D 、平面形状、洗掘に関するものとして洗掘深 Z 、洗掘場所 (x, y) および洗掘口形状等がある。これら各要素のうち、流砂の特性をあらわすセディメント数 $N_s = u_0 / \sqrt{(\sigma/\rho - 1) g d_m}$ や、流れの特性をあらわすフルード数 $Fr = u_0 / \sqrt{g h_0}$ 等を用いることにより、各要素間の次元を考慮すれば次のように表現できる。

$$\frac{Z}{D} = f \left(N_s, \frac{d_m}{D}, \frac{u_0 \cdot t}{D}, \frac{u_0 \cdot D}{\nu}, \frac{h_0}{D}, Fr, \frac{x}{D}, \frac{y}{D}, \sigma_0, \dots \right) \dots \dots (2-1)$$

これらの各要素の中でも洗掘深に極めて支配的な要素や、水理学上用いられている量によりまとめることが可能な要素を考えれば、(2-1)式は次式のように書き改められる。

$$\frac{Z}{D} = f \left(\frac{h_0}{D}, \frac{h_0/d_m}{\text{or } D/d_m}, \frac{Fr}{\text{or } N_s} \right) \dots \dots (2-2)$$

ここでこれまでの研究に用いられたパラメータについて分類すると次のようになる。

$$\frac{Z}{D} = F_1 \left(\frac{h_0}{D} \right) \dots \dots \left\{ \begin{array}{l} \text{Laurson, Andru, Tarapre} \\ \text{Neill, Qureshi} \end{array} \right.$$

$$\frac{Z}{D} = F_2 (D) \dots \dots \text{Larras, Breusers}$$

$$\frac{Z}{D} = F_3 \left(\frac{d_m}{D} \right) \dots \dots \text{中川, 鈴木}$$

$$\frac{Z}{D} = F_4 (R_p) \dots \dots \text{Shen}$$

$$\frac{Z}{D} = F_5 (Fr_p) \dots \dots \text{Maza and Sanchez}$$

$$\frac{Z}{D} = F_6 (Ns) \dots\dots\dots \text{Carstens, 中川, 鈴木}$$

$$\frac{Z}{D} = F_7 (Fr) \dots\dots\dots \text{斉藤, 浦, 柴田, 吉川, 福岡}$$

$$\frac{Z}{D} = F_8 \left(\tau_*, \frac{h_0}{D} \right) \dots\dots\dots \text{Laursen}$$

上記のような研究を考慮して、本報告書では次式で最大洗掘深を表現することにする。

$$\frac{Z}{D} = f \left(\frac{h_0}{D}, \frac{h_0}{d_m}, Fr \right) \dots\dots\dots (2-3)$$

2-2 実験装置および実験方法

本実験に使用した水路は、図-2.1.1～2.1.3に示す長さ30m、幅0.6m、深さ0.5mの両面ガラス張りの可傾水路、長さ30m、幅2.0m、深さ1.5mの構造物水路、および長さ100m幅6.0m、深さ2.4mの大型水路である。構造物水路は中央部の長さ10m間にわたって、両側ともガラス張りの観測部となっており、最大600ℓ/sを通水することができる。大型水路は原寸大に近い規模の実験を目的としたものであり、水路中央部10m間は深さ4.5mのピットが設けられている。給水設備は最大4.5m³/sまで可能となっている。

Pierのモデルは、可傾水路で2.6～9.0cm、構造物水路で2.0～32.0cm、大型水路で10～100cmの円柱を主として使用した。

河床材料としては図-2.2に示すような粒径加積曲線をもつ中央粒径 $d_{50} = 0.22\text{ mm}$, 0.25 mm , 0.47 mm , および 1.5 mm の4種類を用い、可傾水路で約20cm、他の水路は約50cm厚に敷き

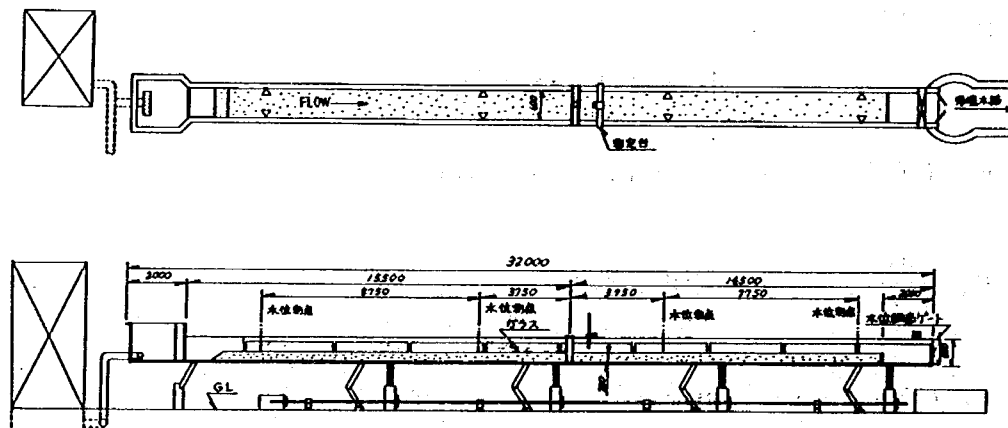


図-2.1.1 実験水路一般図 流砂水路

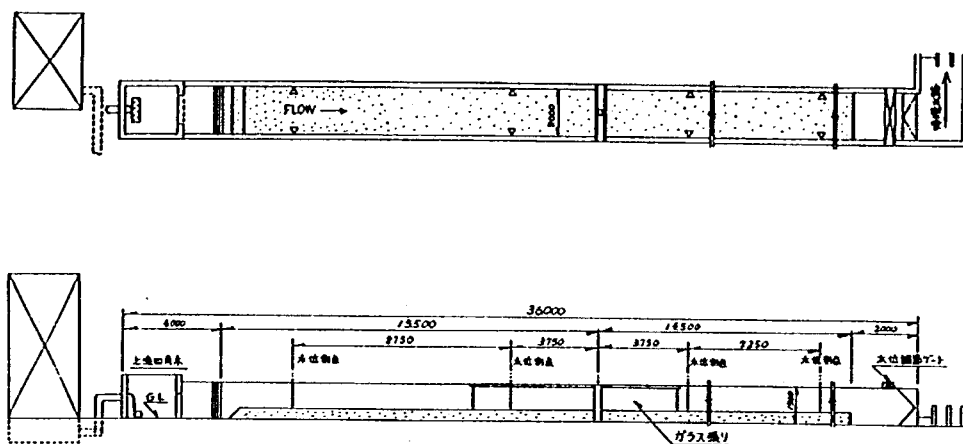


図- 2. 1. 2 実験水路一般図 構造物水路

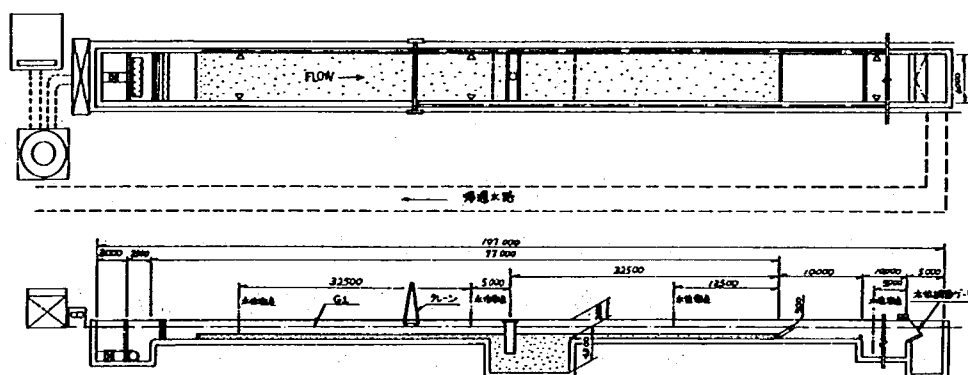


図- 2. 1. 3 実験水路一般図 大型水路

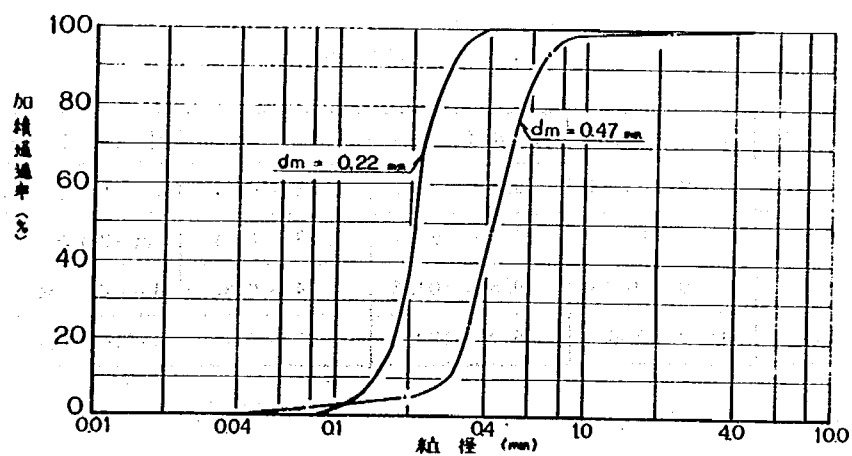


図- 2. 2. (1) 粒径加積曲線

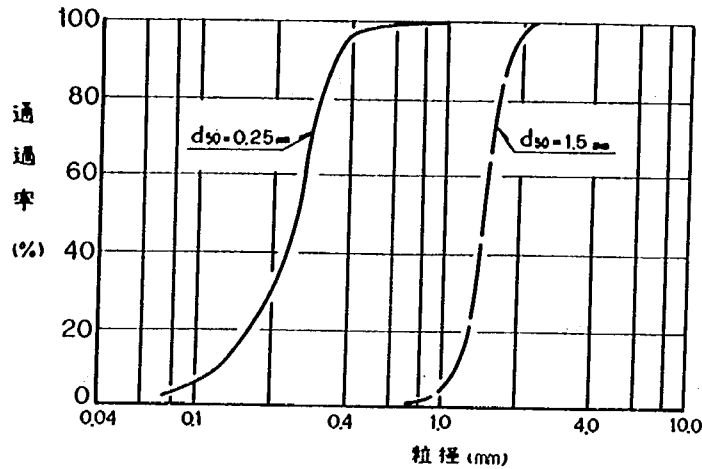


図- 2.2.(2) 粒径加積曲線

移動床とした。実験方法は通水初期の流れのために砂粒が異常な動きをしないよう下流端を堰上げておき、徐々に水路に水を張って所定の流量を通水しながらゲートを所定の水位になるまで降下させ、流れが定常になった時点で実験開始とした。したがって、洗掘は開始以前に若干進行するため、洗掘開始時間やその変化特性は必ずしも正確には測定されていない。なお、実験条件によっては、水面勾配にほぼ一致するような河床勾配を与え、また平均河床高が低下しないように給砂を行った。河床面の高さは砂漣などにより著しく変化するため、可傾水路でピアー上流側 1.0 ～ 3.0 m 間断面、構造物および大型水路で 2.0 ～ 5.0 m 間断面の平均河床高を求め、この平均河床からの低下量を洗掘深とした。

実験は従来の研究成果資料の不足する領域をより広範囲に検討することを目的とし、表- 2.1 に示す静的平衡から動的平衡状態までの範囲で連続的に行った。

表- 2.1 実験範囲

実験水路	橋脚径 (m)	水深 (cm)	流速 (cm/S)	フルード数	河床材料	実験資料数
可傾水路(1)	5.0	3.9 ～ 25.3	9.3 ～ 88.5	0.11 ～ 0.87	$d_m \approx 1.6 \text{ mm}, 0.22 \text{ mm}$	57
" (2)	2.6 ～ 8.9	5.0	30.1 ～ 56.7	0.43 ～ 0.81	$d_m \approx 0.47 \text{ mm}$	27
構造物水路	1.8 ～ 32	5.0 ～ 100.0	9.8 ～ 104.6	0.14 ～ 0.86	$d_m \approx 0.22 \text{ mm}$	109
大型水路	8.9 ～ 100	10.0 ～ 150.0	26.9 ～ 124.0	0.11 ～ 0.74	$d_m \approx 0.22 \text{ mm}$	61

2-3 実験結果とその考察

2-3-1. 最大洗掘深の時間変化特性

Clear water scour の場合，従来の研究によって知られているように，上流から洗掘口への土砂の供給がないため，図-2.3に示される通り，かなりの長時間を経過しても洗掘深は大きくなり続け，ほぼ20時間を経過して洗掘深は一定値に近づいているように見える。しかし，本実験では少量ではあるが，大きな粒径のものも含んでいたため，アーミングによって洗掘がほぼ収束してきた可能性もある。Clear water scour の場合に，このように最

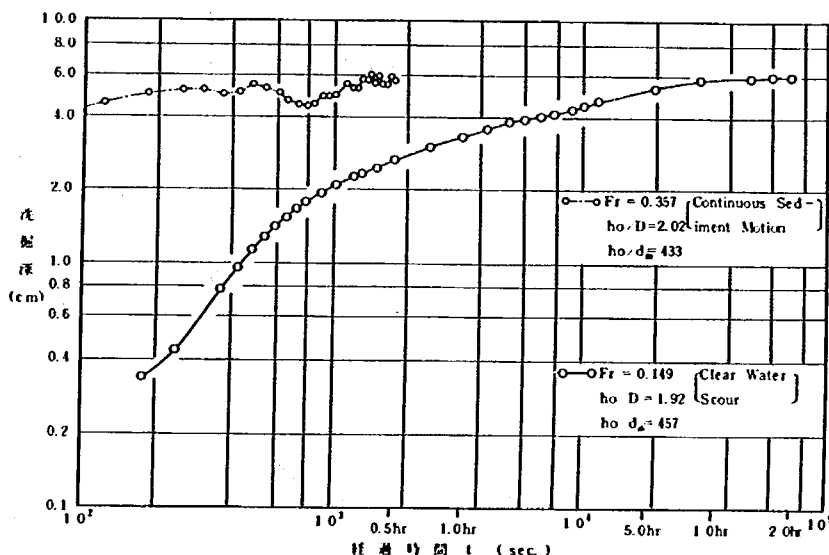


図-2.3 洗掘深の時間変化特性

終洗掘深と認められる洗掘深に達するのに長時間を要するのは，洗掘によって生じた洗掘口に定着した渦の発生と，その変動がさらに洗掘を引き起こすといったメカニズムが存在していると考えられる。したがって，この場合最終洗掘深もしくは平衡洗掘深は，何等かの定義を必要とする。本研究では便宜的に洗掘速度がかなり減少する通水後2時間を最終洗掘深と定義して実験を行った。

いっぽう，動的平衡状態の場合，RippleもしくはDuneの影響を受け，図-2.3のように洗掘深が変動しつつ短時間に平衡状態に達する。また粒径が0.22mmの場合は，円柱周辺の強い乱れにより洗掘口への埋め戻しは小さく，Ripple，Duneの波高より小さな変動しか生じない。これに対し，河床材料の粒径が大きい1.5mmの場合，洗掘深は河床波の影響を顕著に受ける。これは粒径の小さい場合，流砂形態が浮遊状態になり易いことに原因していると考えられる。

2-3-2. 洗掘口形状

静的平衡状態における洗掘口形状は，図-2.4の1例に示すように，上流部が半円状の逆

円錐形を示し、最大洗掘深はピア前面に生ずる場合が多い。この最大洗掘深位置は、通水初期に側面で生じ、時間の経過とともにある程度洗掘が進行すると前面が最大となる。ただし、以前土木研究所で行った実験結果によれば、図-2.5に示すように、フルード数がある程度より大きければ最大洗掘深はピア前面でおこり、フルード数が小さく最大洗掘深が側面に出るような場合でも前面と側面との差はわずかであることが解る。なお図-2.5でぬりつぶしてあるものはClear water scourの場合の実験値である。

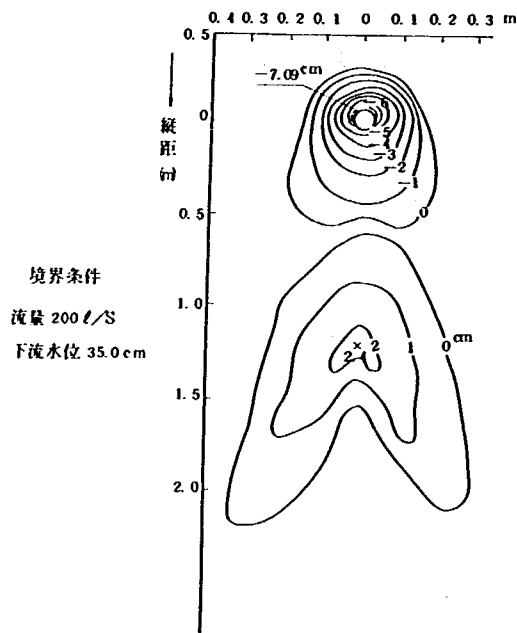


図-2.4 洗掘深形状図

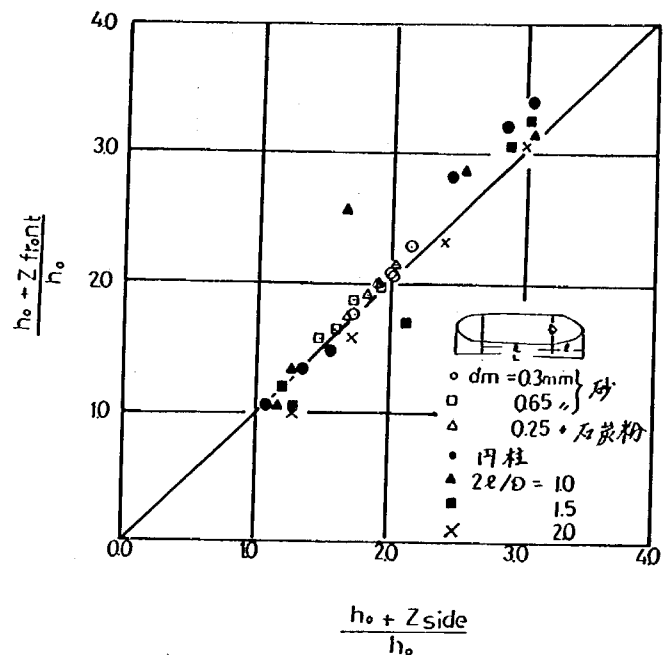


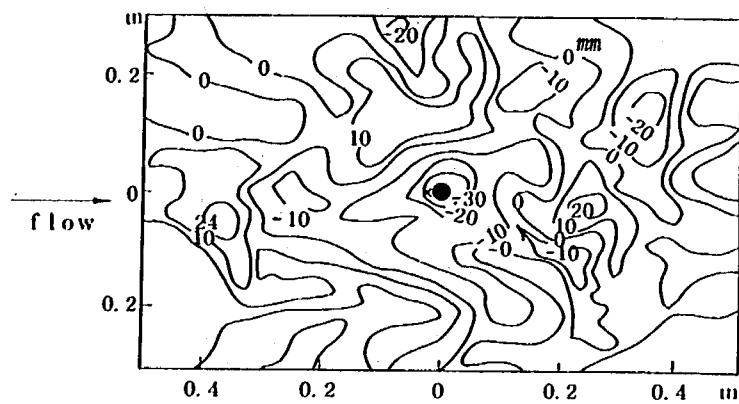
図-2.5 ピア前面と側面の洗掘深比較図

洗掘口の斜面形状は、前面および側面とも河床材料の水中安息角（ $28 \sim 36^\circ$ ）をほぼ保ち、洗掘深と範囲は密接な関連を示す。

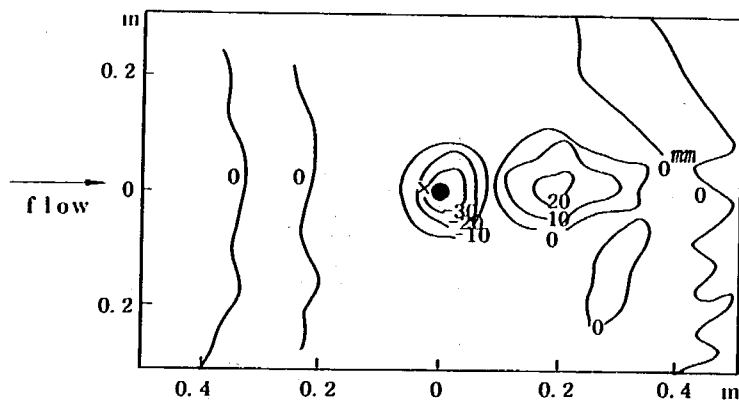
いっぽう、動的平衡状態の洗掘形状も図-2.6.1～2.6.4および写真-2.1.1～2.1.3の1例に示すように、同様逆円錐形をしているが、河床波の影響により、変形し洗掘深も変動する。また橋脚下流側は堆積域も含めて、その影響による3次元的河床波が強く発達する。

2-3-3. 最大洗掘深と水理量の関係

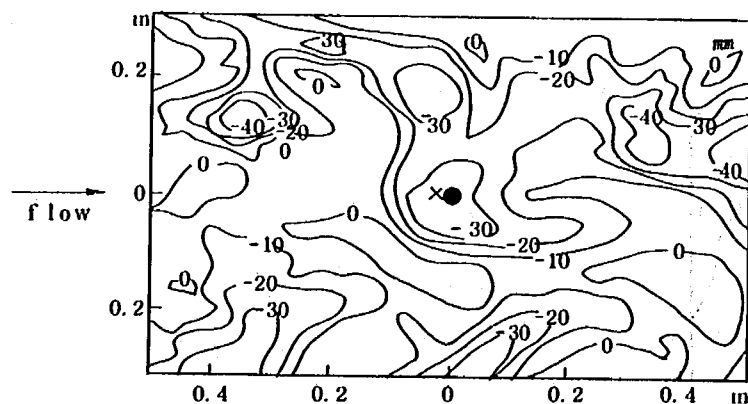
図-2.7は粒径0.25 mmについて橋脚前面の水深を5 cm, 10 cm, 20 cmの3通りとし、水深の違いによる最大洗掘深とフルード数の関係を示したものである。この図より水深の影響を顕著に受けていることが示されている。水深の影響についてはLaursenが指摘する通りであり、水深が大きくなるほど洗掘深も大きくなっている。なお、この図は、水深の影響だけを示しているわけではないが、この場合、 h_o/d_m よりも h_o/D そのものの影響の方が大きい



$Q = 13 \text{ l/S}$ $h_0 = 6.6 \text{ cm}$
 $Z = 5.6 \text{ cm}$ $D = 2.6 \text{ cm}$
 $Z/D = 21.5$ $h_0/d_m = 140$
 $d_m = 0.047 \text{ cm}$ $Fr = 0.41$



$Q = 11 \text{ l/S}$ $h_0 = 7.4 \text{ cm}$
 $Z = 3.9 \text{ cm}$ $D = 2.6 \text{ cm}$
 $Z/D = 1.50$ $h_0/d_m = 160$
 $d_m = 0.047 \text{ cm}$ $Fr = 0.29$



$Q = 16 \text{ l/S}$ $h_0 = 5.6 \text{ cm}$
 $Z = 4.4 \text{ cm}$ $D = 2.6 \text{ cm}$
 $Z/D = 1.69$ $h_0/d_m = 120$
 $d_m = 0.047 \text{ cm}$ $Fr = 0.64$

图-2.6.1 洗掘深形状图

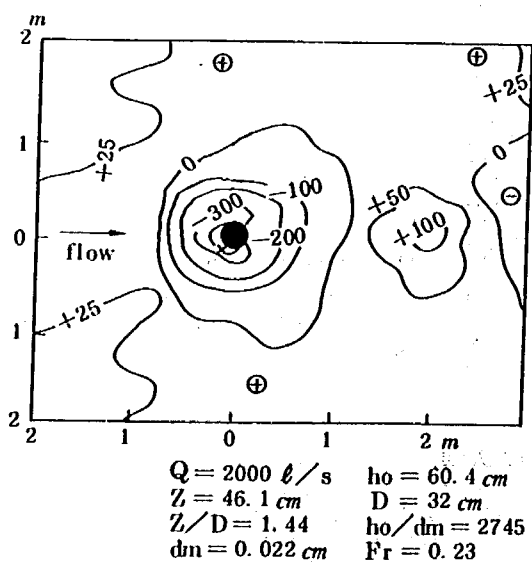
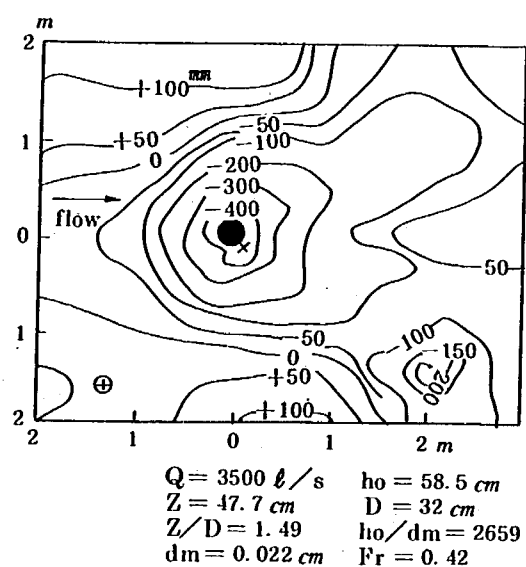
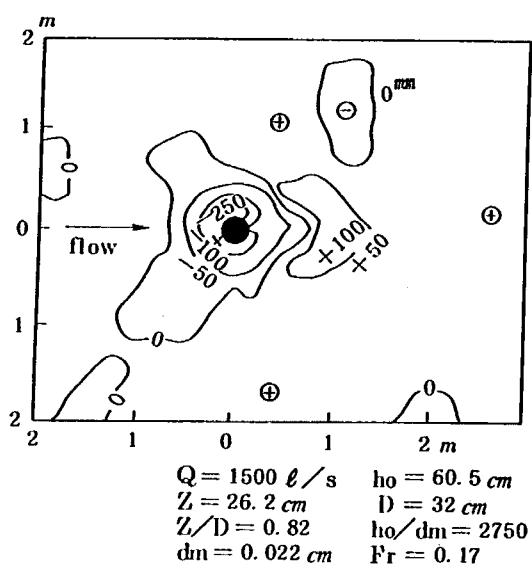
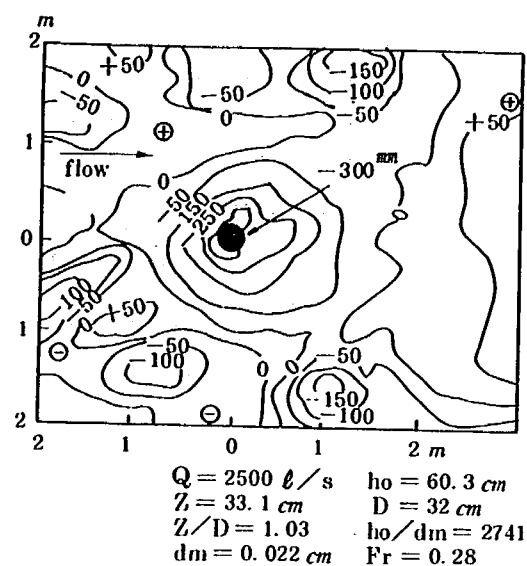
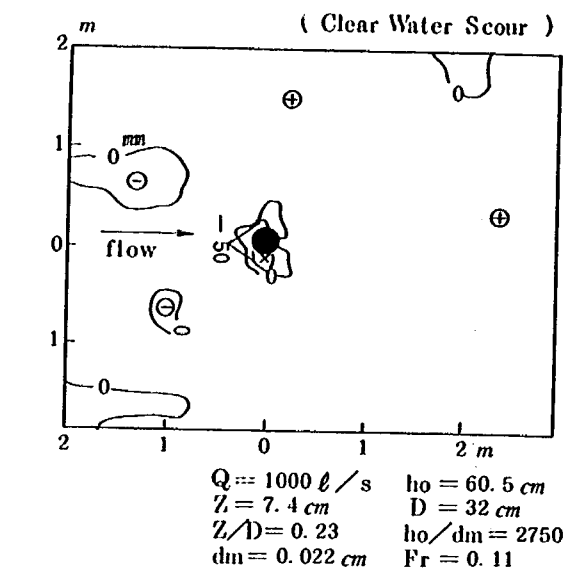


图-2.6.2 洗掘深形状图

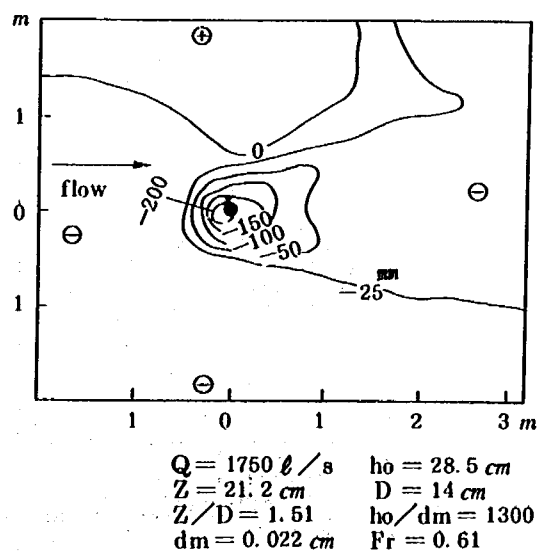
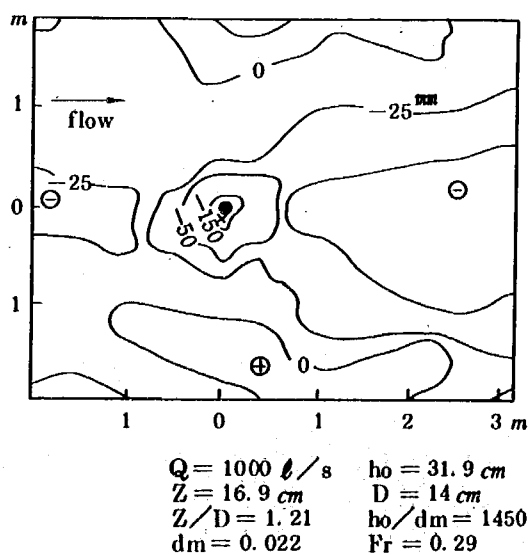
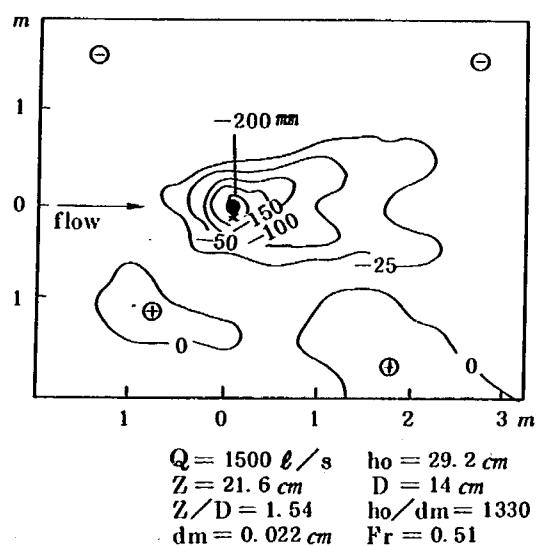
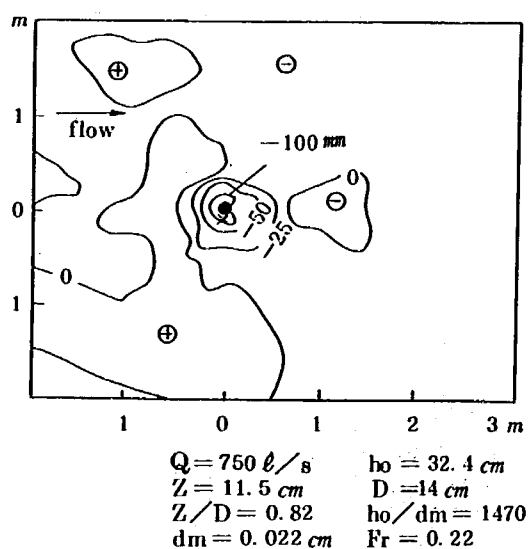
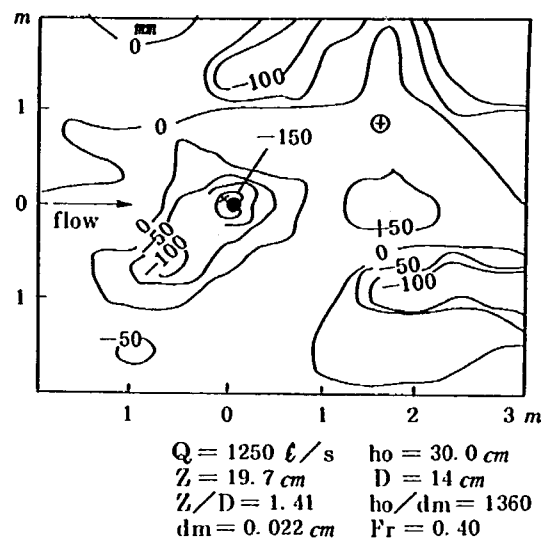
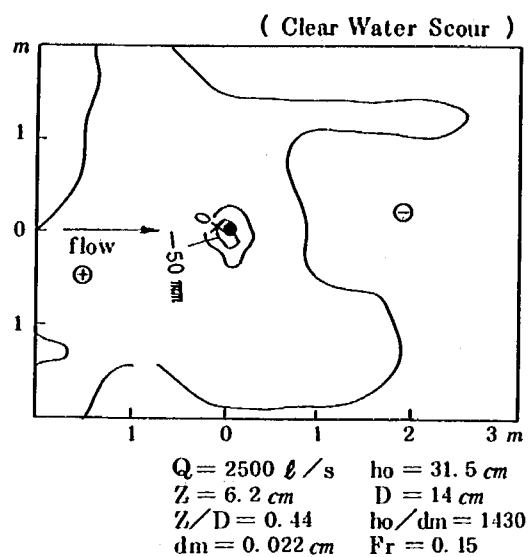


图-2.6.3 洗掘深形状图

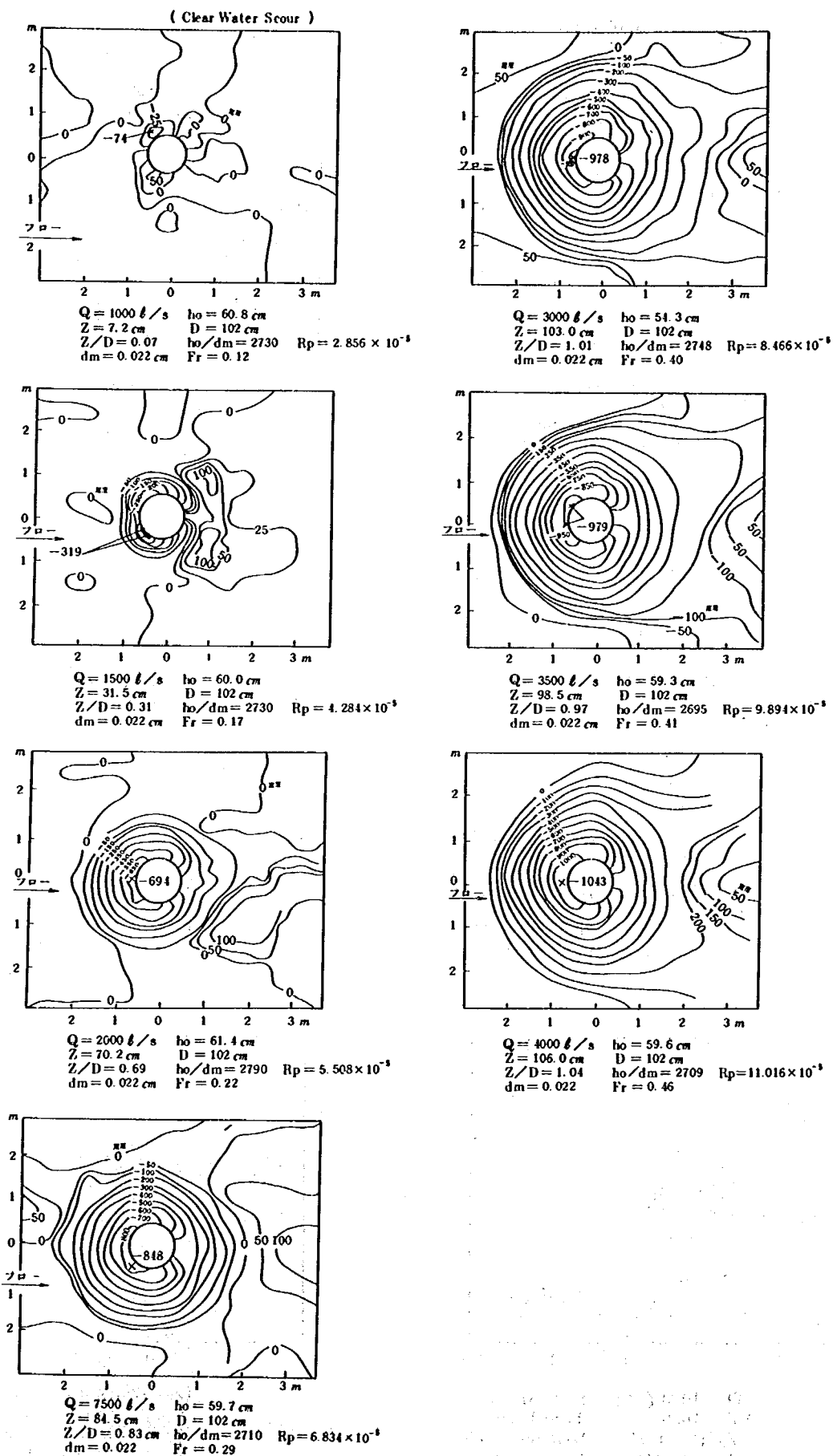


图-2.6.4 洗掘深形状图



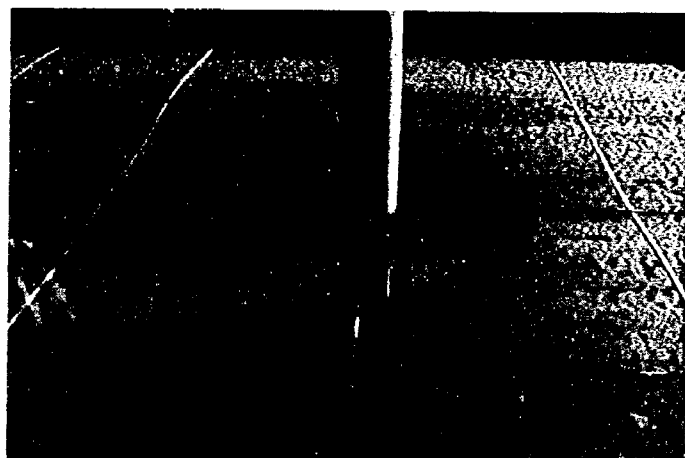
$Q = 10 \text{ } \ell / \text{S}$
 $h_o = 6.5 \text{ cm}$
 $D = 4.8 \text{ cm}$
 $d_m = 0.022 \text{ cm}$
 $h_o / d_m = 295$
 $U_o = 25.6 \text{ cm} / \text{S}$
 $Fr = 0.32$
 $Z = 6.0 \text{ cm}$
 $Z / D = 1.25$

写真－ 2. 1. 1 通水後の洗掘状況



$Q = 55 \text{ } \ell / \text{S}$
 $h_o = 9.2 \text{ cm}$
 $D = 8.9 \text{ cm}$
 $d_m = 0.022 \text{ cm}$
 $h_o / d_m = 418$
 $U_o = 29.9 \text{ cm} / \text{S}$
 $Fr = 0.32$
 $Z = 8.1 \text{ cm}$
 $Z / D = 0.91$

写真－ 2. 1. 2 通水後の洗掘状況



$Q = 1400 \text{ } \ell / \text{S}$
 $h_o = 26.7 \text{ cm}$
 $D = 30.7 \text{ cm}$
 $d_m = 0.022 \text{ cm}$
 $h_o / d_m = 1214$
 $U_o = 87.4 \text{ cm} / \text{S}$
 $Fr = 0.54$
 $Z = 21.6 \text{ cm}$
 $Z / D = 1.42 \text{ cm}$

写真－ 2. 1. 3 洗掘後の洗掘状況

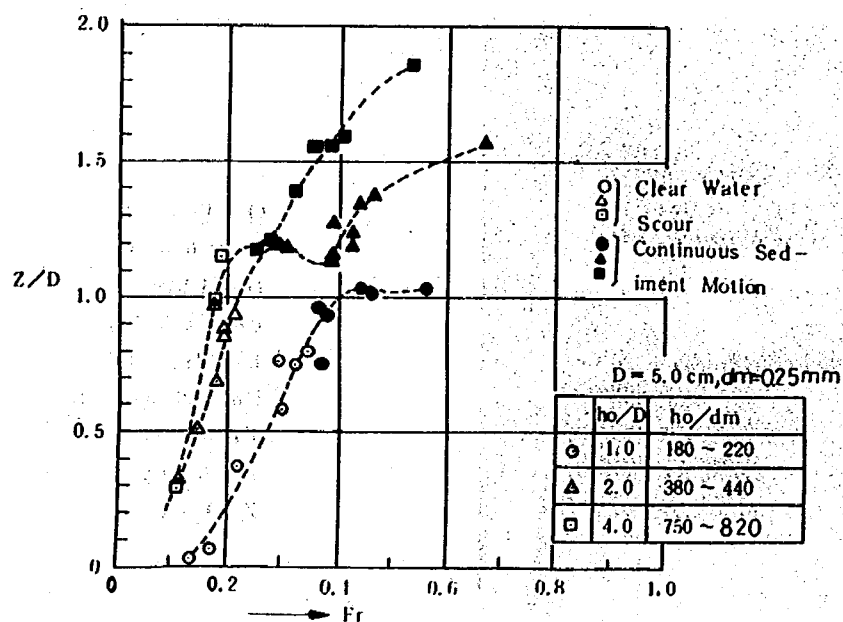


図-2.7 $Fr \sim Z/D$ の関係

ことを示していると思われる。またフルード数とともに洗掘深も増加するが、限界掃流力を超えた付近で上流からの補給砂によって若干洗掘深は減少し、再び増加する傾向を示す。ただし、水深粒径比の小さい場合では、減少後の増加量は小さい傾向となっている。反対に水深粒径比の大きい場合は、限界掃流力を超えた付近での減少傾向は小さく、水深粒径比のより大きい場合は減少傾向がなくなり、フルード数とともに洗掘深は増加する。河床材料が小さく水深粒径比が大きい場合のフルード数に対する洗掘深の増加傾向は、Ripple ができはじめると流砂の輸送形式が浮遊形態となるため、洗掘口を埋めもどす流砂量の増加分が洗掘量の増加分より少なくなることにより起因していると考えられる。

したがって、水深粒径比が大きく、流砂形態が浮遊形式となる場合は現場において実在するフルード数の限界を考え、設計に使用する最大洗掘深とすべきであろう。

自然河川で生ずる水理量の概略は、山本¹¹⁾によって図-2.8のように示されている。 $\tau_* \sim h_o/d_m$ 平面上での河床形態の領域区分は、 h_o/d_m が2000以下では $10 < B/h_o < 20$ の場合を示してある。これより、 $Fr = \phi \cdot S^{1/2} \tau_*^{1/2} (h_o/d_m)^{-1/2}$ によって実在し得る限界フルード数を算定することができる。流速係数 ϕ は図-2.9に示すように中規模河床波が発生せず、またほぼ均一砂の場合の ϕ と h_o/d_m 、 τ_* の関係を山本¹²⁾が得ている。よって、この図より $\tau_* \sim h_o/d_m$ 平面上の領域区分を $Fr \sim h_o/d_m$ 平面上に転換したものが図-2.10である。

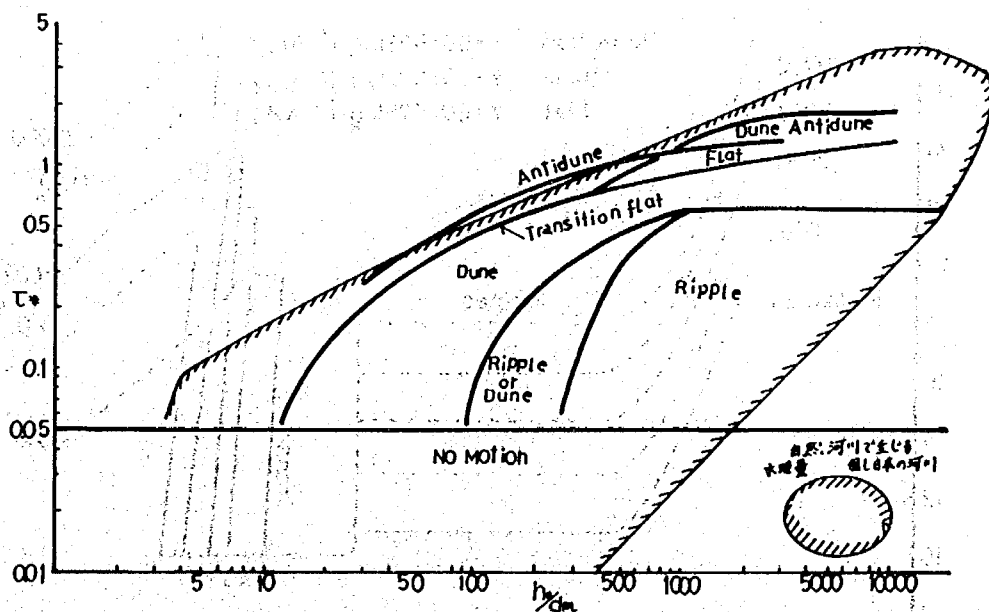


図-2.8 河床形態の領域区分図 ($\tau_* \sim h_o/d_m$)

いっぽう、水深粒径比が小さく、河床波ができて流砂形態が掃流形式である場合の結果が図-2.11である。

この実験は粒径 1.5 mm、水深 10 cm 程度としたから、水深粒径比は約 67 である。この場合は限界掃流力を若干超えた所で最大の洗掘深となり、さらにフルード数の増加に伴い洗掘深

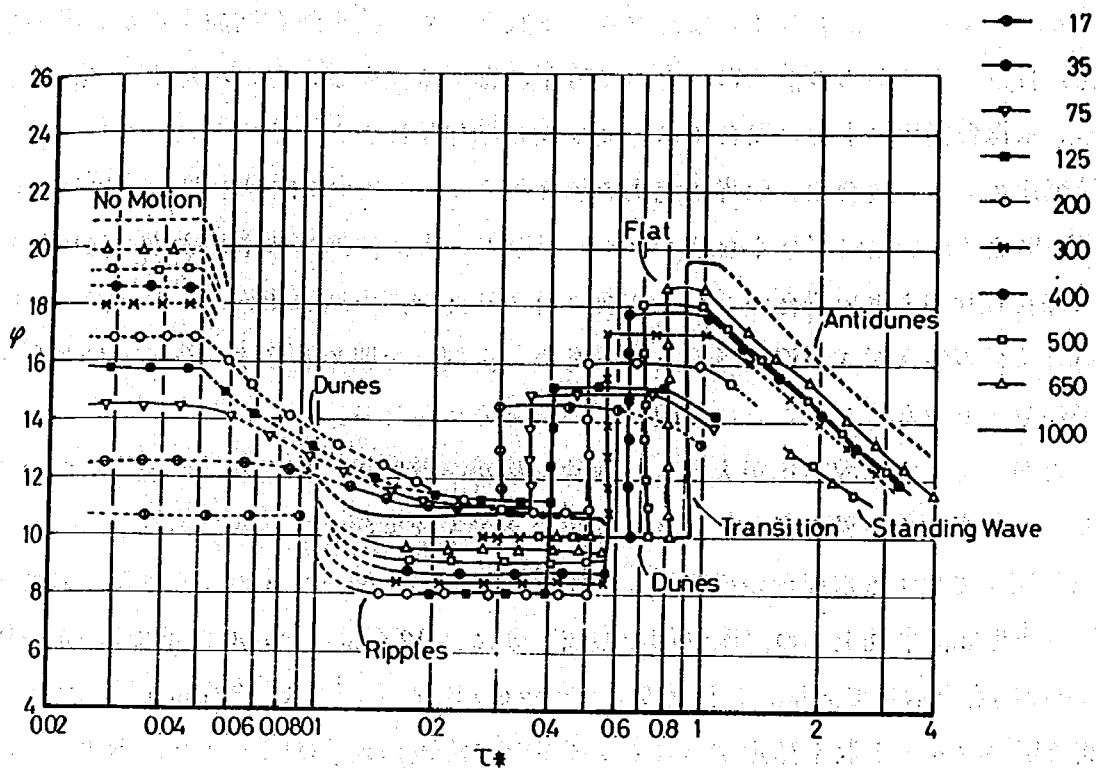


图-2.9.(1) ϕ vs τ_* , $dm = 0.03$ cm

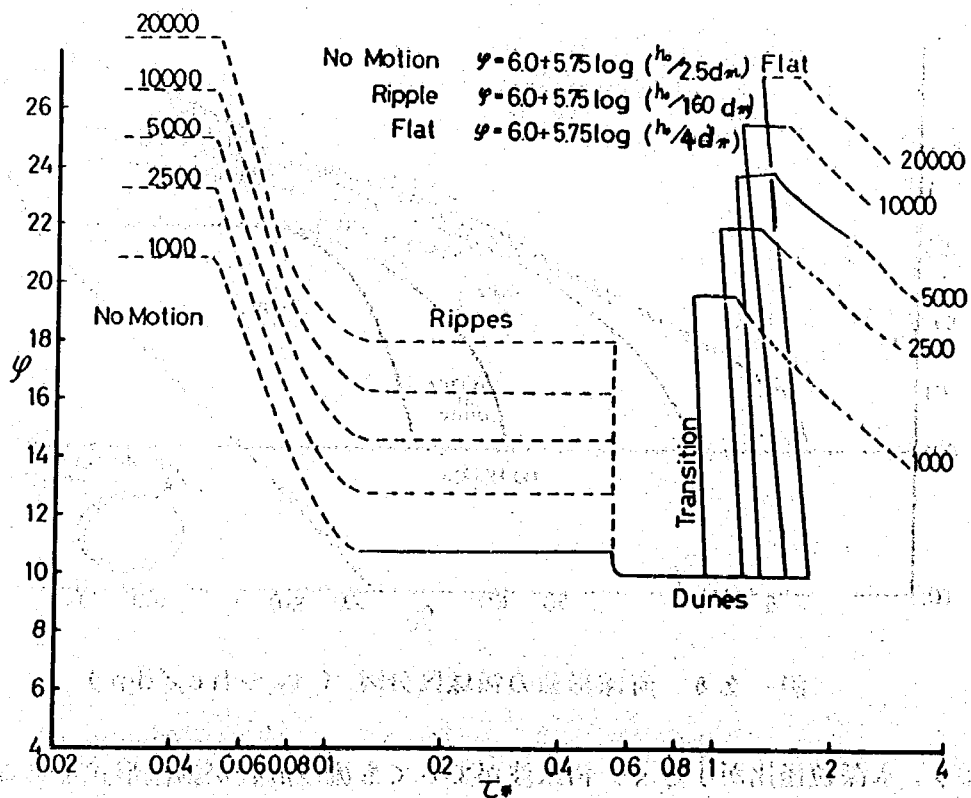


图-2.9.(2) ϕ vs τ_* , $dm = 0.03$ cm

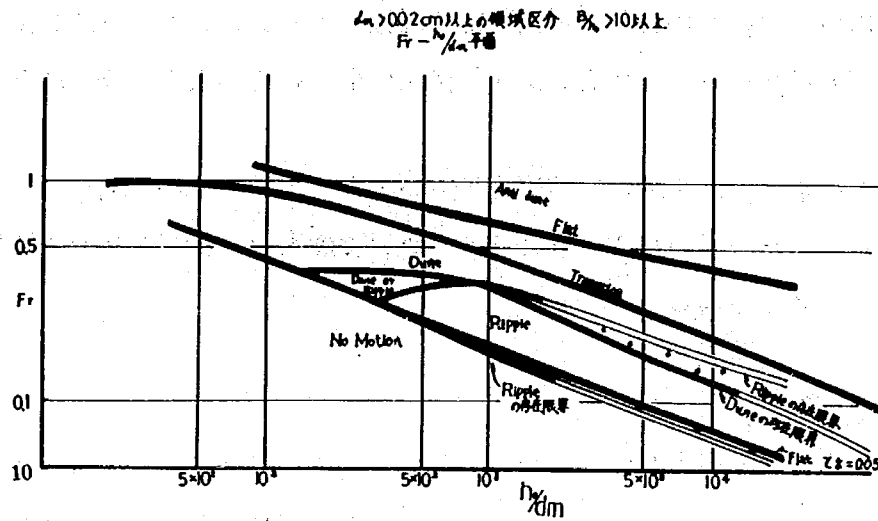


図-2.10 河床形態の領域区分図 ($Fr \sim h_o/dm$)

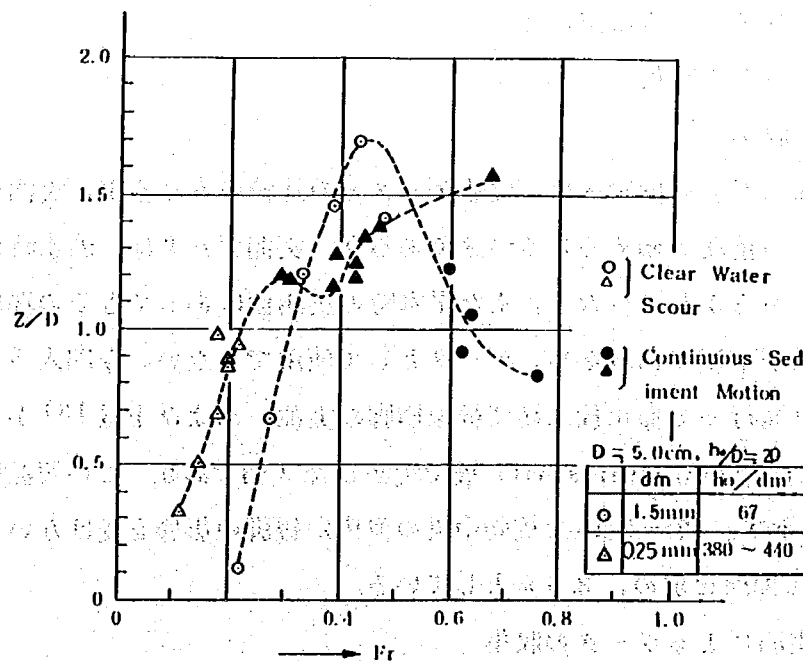


図-2.11 $Z/D \sim Fr$ の関係

は減少し、その後一定値となる傾向を示している。したがって、この場合は掃流砂による埋めもどしの増加の割合が円柱前面の渦による洗掘量より大きいことを示している。なお図-2.11で h_0/D が同一とした場合、水深粒径比の小さい方が大きな洗掘深となる結果が得られている。

以上のように水深粒径比が大きい場合と小さい場合では $Fr \sim Z/D$ 曲線の定性的な違いが明らかである。また限界掃流力を与える流れ付近で最大の洗掘深を持つ場合は、水深粒径比の小さい場合と考えられる。

2-4 データの収集

2-4-1 実験データの収集

洗掘深推定のために過去のデータの収集を行った。収集したデータは円柱ピアーの場合における実験を中心とした250余である。またこれらの研究成果の不足する領域の補足、および範囲拡大のため、大規模橋脚実験を含め表-2.1に示す範囲の実験により、今回300余におよぶ資料を得た。

収集データを整理し、実験者名を記すとともにそれぞれの実験の基本的水理量、および基本的無次元量の一覧表を巻末に記した。

2-4-2 実測データの収集

(1) 既往データの収集

従来の洗掘深に対する推定式は、実験データとの比較のみならず、実測結果との十分な対比によってその精度が確められるべきであろう。実測データは、洪水時の計測の危険性や経済的困難さからかなり少なく、また平水時の実測値はあってもその洗掘深を支配した水理量等の関係が不明であるため、データとして使用できない。今回入手し得たデータは、土木研究所が以前行った豊川放水路新幹線橋脚の実測、および土屋¹³⁾が東パキスタンのDhaleswari河に架かるDhalexswari橋で実測した2例である。この実測結果を図-2.12および2.13に示す。図-2.13で橋脚中央の河床は橋脚の影響を受けないものとして、橋脚周辺の最大洗掘深を求め、3.6mとしている。

(2) 阿賀野川の実測によるデータの収集

(1) 観測上の問題点

観測上の問題として1つには、観測の安全性がある。橋桁や橋上等の安全な箇所からの測定には、測定の精度や範囲に限りがあり、実際には、洪水中に船を出して船上で作業せざるを得ない。流速が1m/s以上になると特に危険である。

さらに、測定に要する時間の制約があり、尖鋭な洪水ハイドロの場合に洗掘現象と水理量との対応性に問題が生じる。したがって、長期間出水が継続している融雪洪水が、データの的に作業的に有利と考えられる。

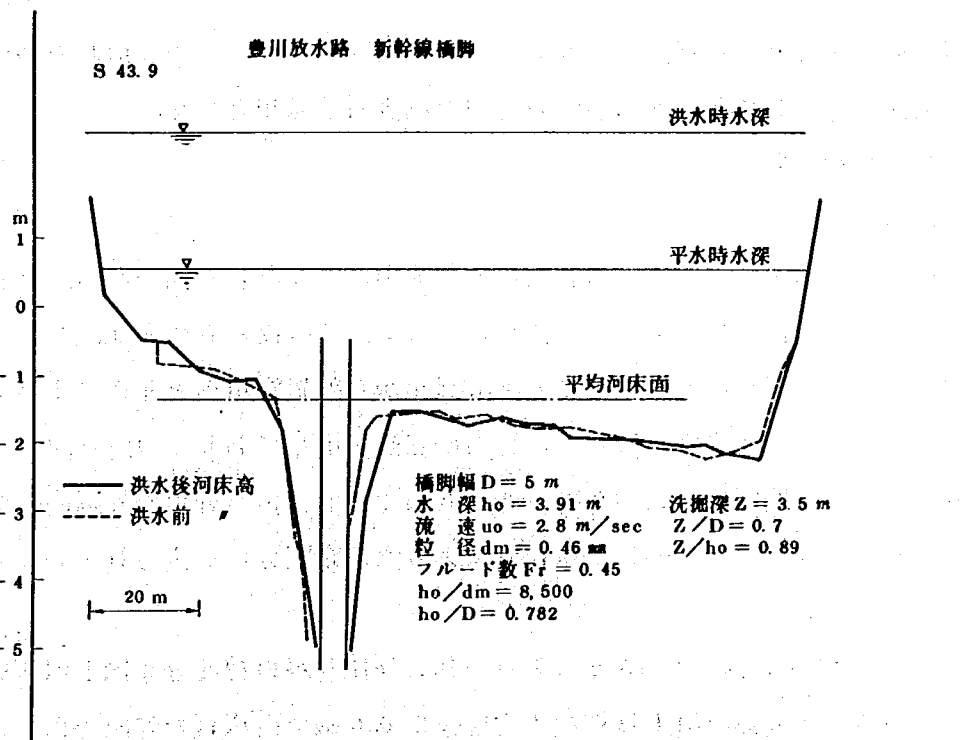


図-2.12 洗掘深形状図 (豊川放水路)

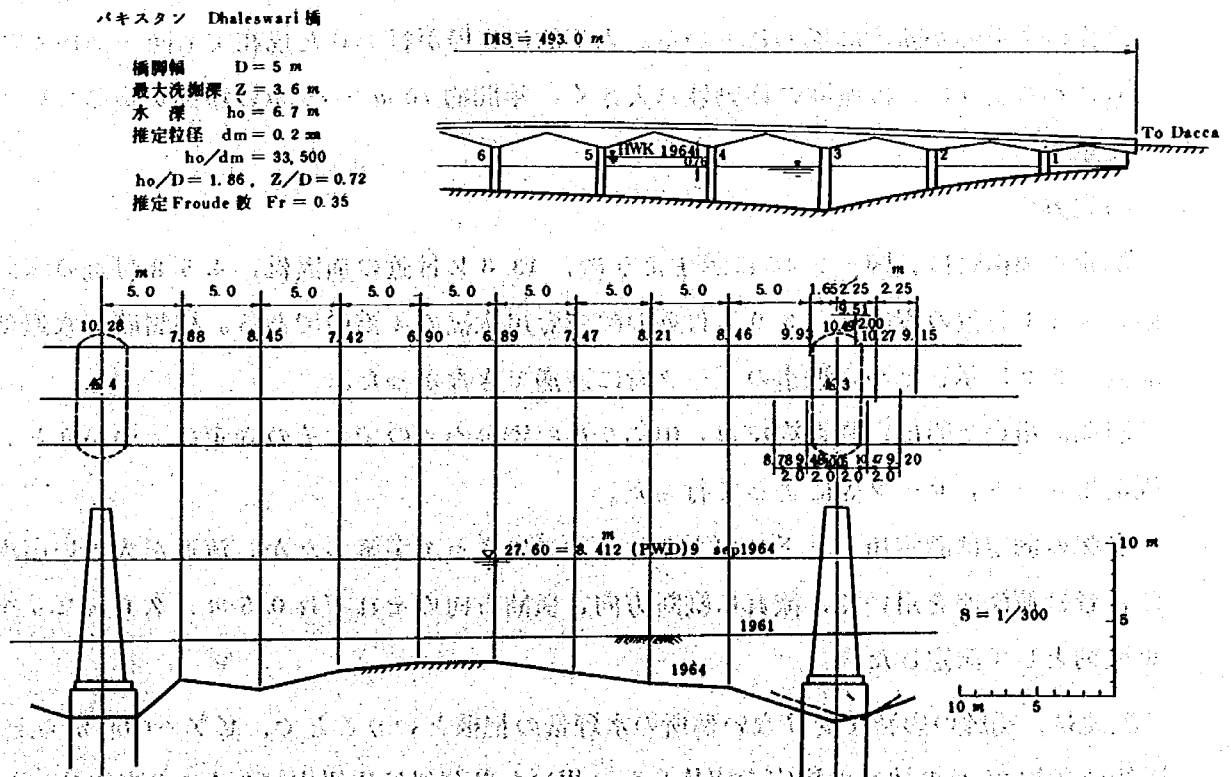


図-2.13 洗掘深形状図 (パキスタン) Dhaleswari 河

3つめは、洪水への遭遇性があり、測定機器や船の準備等、観測出動体制に限りがある。

以上のことより、夏期洪水よりも比較的長期間にわたって測定機会の多い融雪洪水で且つ流速も考慮して北陸地方の阿賀野川を調査対象河川とした。

(2) 阿賀野川の概要

① 流域概要

阿賀野川水系は、栃木、福島県境の荒海山に源を発し、福島県境の南西部の山岳地帯を北上し、田島盆地を経て会津盆地に入る。その後さらに西北流して山間部で只見川を合わせ新潟県に入り、その名を阿賀川から阿賀野川へと変え馬下地先で越後平野に入る。下流部流域は、裏日本の特有の気候を示しており11月から4月上旬までは積雪が多い。年間雨量は2,000 mm～2,500 mmである。阿賀野川の計画高水流量は、昭和41年の流量改訂に伴い図-2.14に示すような流量配分に決定されている。

② 河道特性概要

図-2.15.1、図-2.15.2はそれぞれ、河床材料の粒度分布図と河床縦断図が示されている。下流部の河床材料の平均粒径が0.6 mmで河床縦断勾配が約 $1/2,000$ であり、17 k付近で粒径、勾配が急変している。さらに図-2.15.3には、河道幅が示されているが、やはり17 k付近で低水路幅が変化し、それより下流は河口まで漸拡している。この下流部では、昔から河道の蛇行が顕著に生じている部分で、現堤内地には昔の河道跡が随所に現われている。人工的に築堤が行われた現在でも図-2.15.4に示されるように、砂礫堆の移動性は大きく、年間約70 m～80 mの移動が生じている。文献14)

(3) 測定方法

測定対象橋梁は、図-2.16に示すように、13.8 k付近の横雲橋、4.5 k付近の国鉄橋、4.2 k付近の泰平橋、3.0 k付近の阿賀野川大橋の4橋梁である。観測時の水理量は表-2.2に示したが、洪水のピーク時に遭遇できなかった。

観測に用いた船は、長さ約13 m、巾約2 mの鋼製のもので、その固定は、いかりと、固定用ロッド、ロープ等によって行った。

水深の測定は測定用ロッド、おもり付ロープによって実施したが、流速が大きい箇所は、音響測深機を用いて、流れに縦断方向、横断方向のそれぞれ0.5 m、2.0 mピッチを原則として測定した。

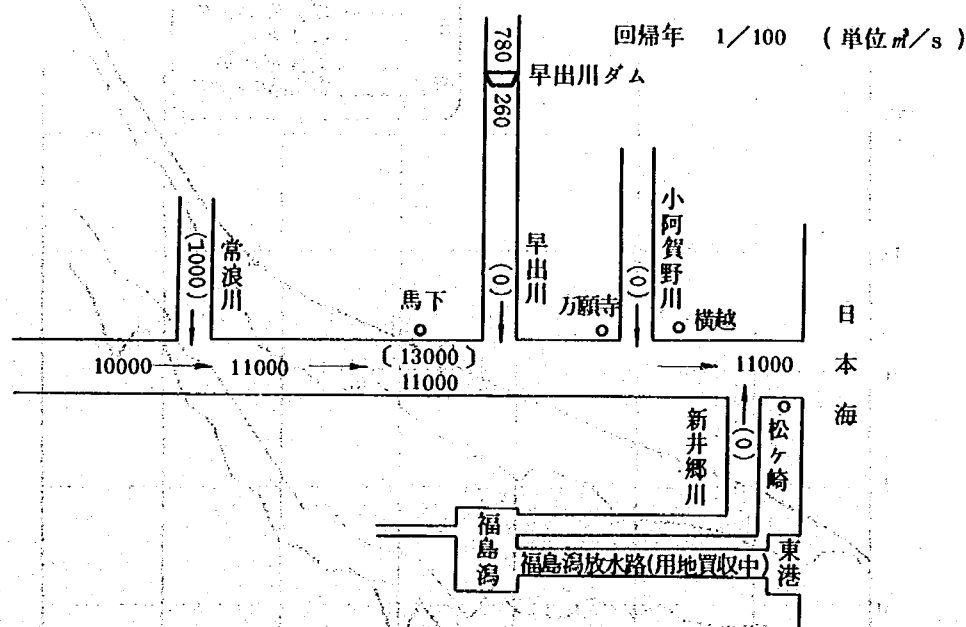
流速は、橋脚の影響を受けない個所の水理量の把握ということで、ピア中心から上流側延長約20 mの地点で測定を実施した。用いた計測器は現場用プライス式流速計と微流速計で、水深方向0.5 mピッチで測定した。

表－2.2 観測時の水理量（横越 13.0 km地点流量）

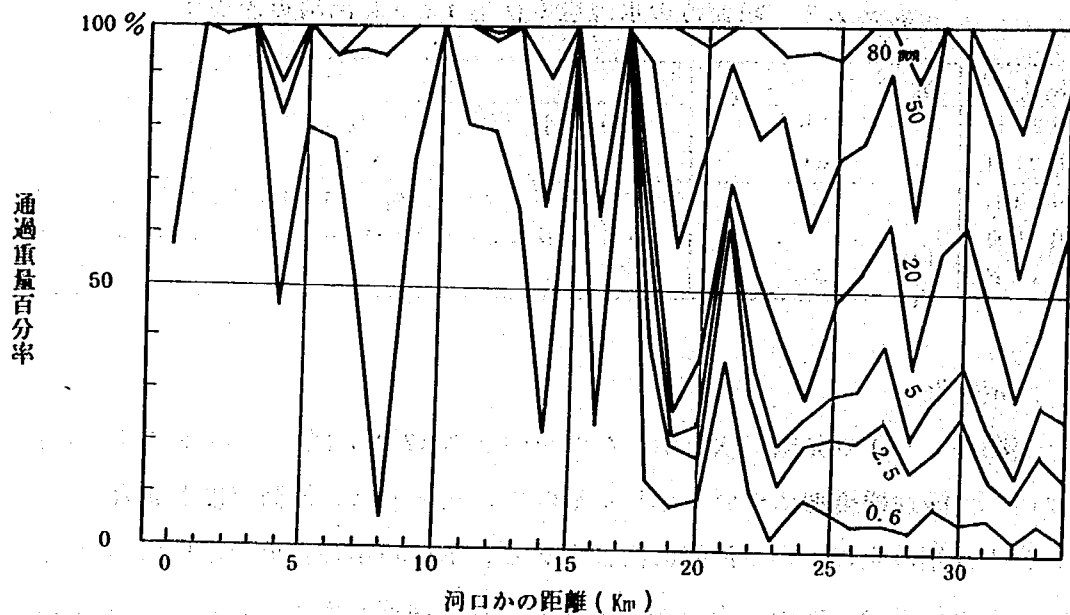
実測日	流量 (m^3/s)	
55年3月26日	190	3月11日に流量ピーク ($Q \approx 770 m^3/s$) となり、その後の減水時に観測
" 3月27日	260	
55年4月24日	690	4月7日流量ピーク ($Q \approx 2,170 m^3/s$) 減水時に観測 4月11日流量ピーク ($Q \approx 2,450 m^3/s$) 減水時に観測
56年4月15日	1010	
" 4月16日	1020	

(4) 測定結果

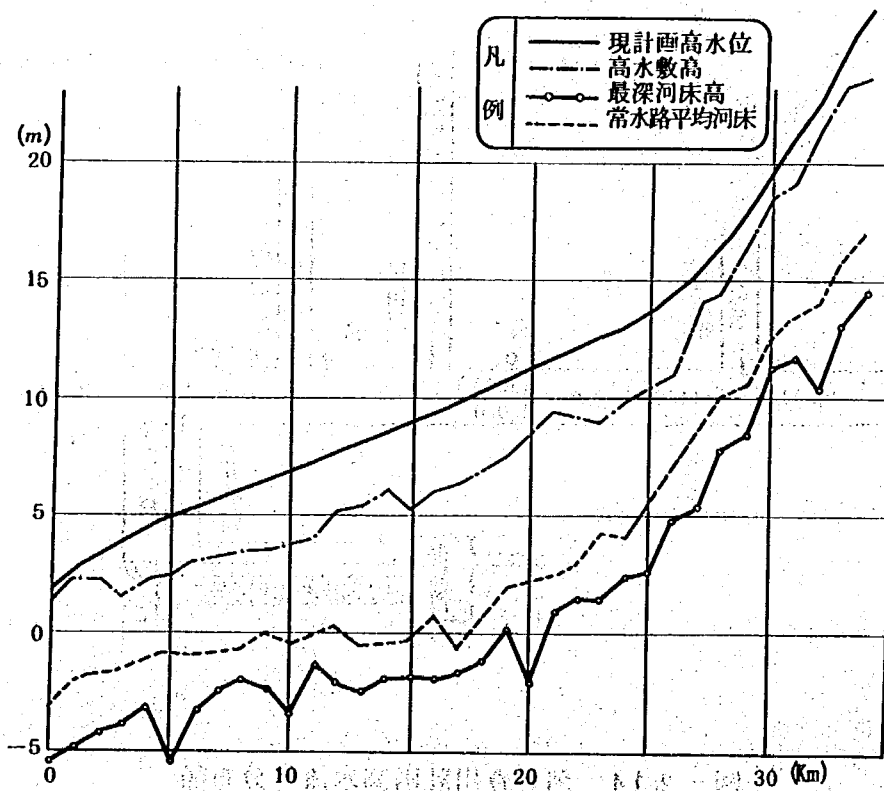
実測のデータの洗掘形状を示したのが図－2.17.1，図－2.17.2である。図－2.17.2は同一の国鉄橋橋脚について示したもので、左と右は、観測年度が異なっている。同図の最大洗掘の生じている位置に注目すると、昭和55年の結果では橋脚の下流側に、昭和56年度の結果では橋脚の上流側にそれぞれ最大洗掘が生じている。我々の基礎実験による検討から小判型橋脚の軸に斜め方向に流れが衝突する場合には、橋脚後方に最大洗掘が生じるということが判明されており、この実測データでも、砂レキ堆の形成等によって、橋脚付近の流れの方向が変化したものと推定される。



図－2.14 阿賀野川計画高水流量分布図



図— 2.15.1 阿賀野川河床材料（低水路）縦断面図



図— 2.15.2 阿賀野川計画高水路，高水敷高，最深河床高
常水路平均河床高縦断面図

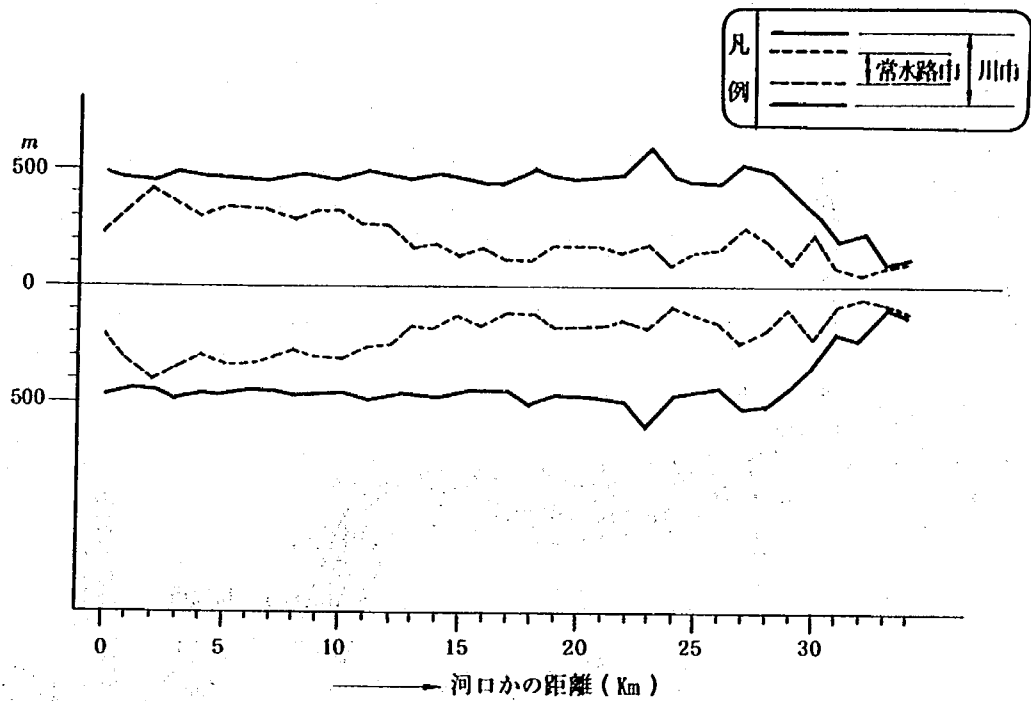


図- 2. 15. 3 阿賀野川川幅，常水路幅縦断面図

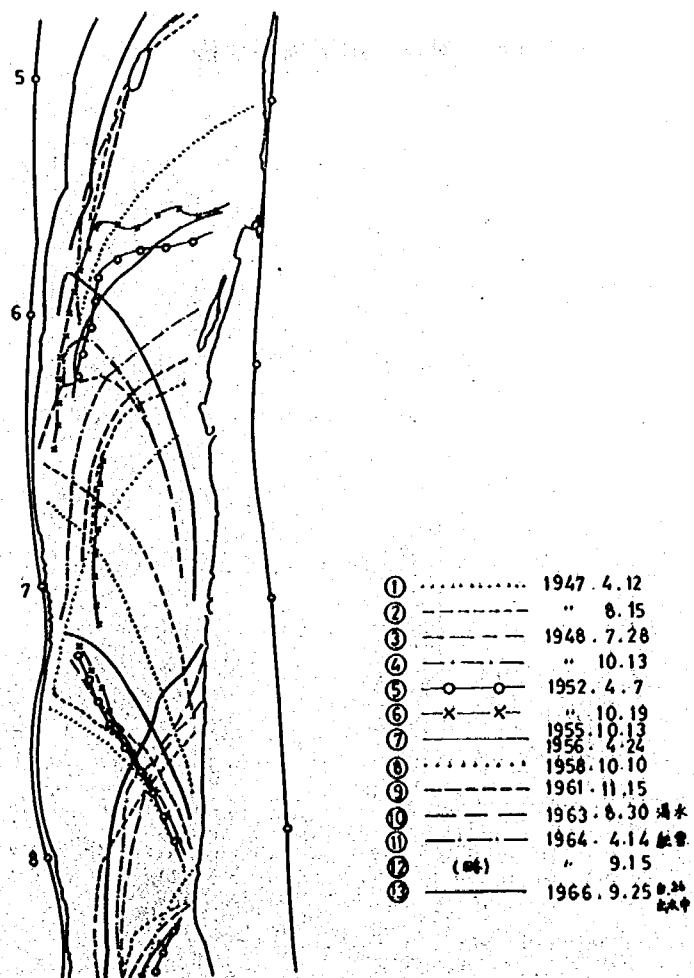


図- 2. 15. 4 砂レキ堆の移動変化図 (阿賀野川)

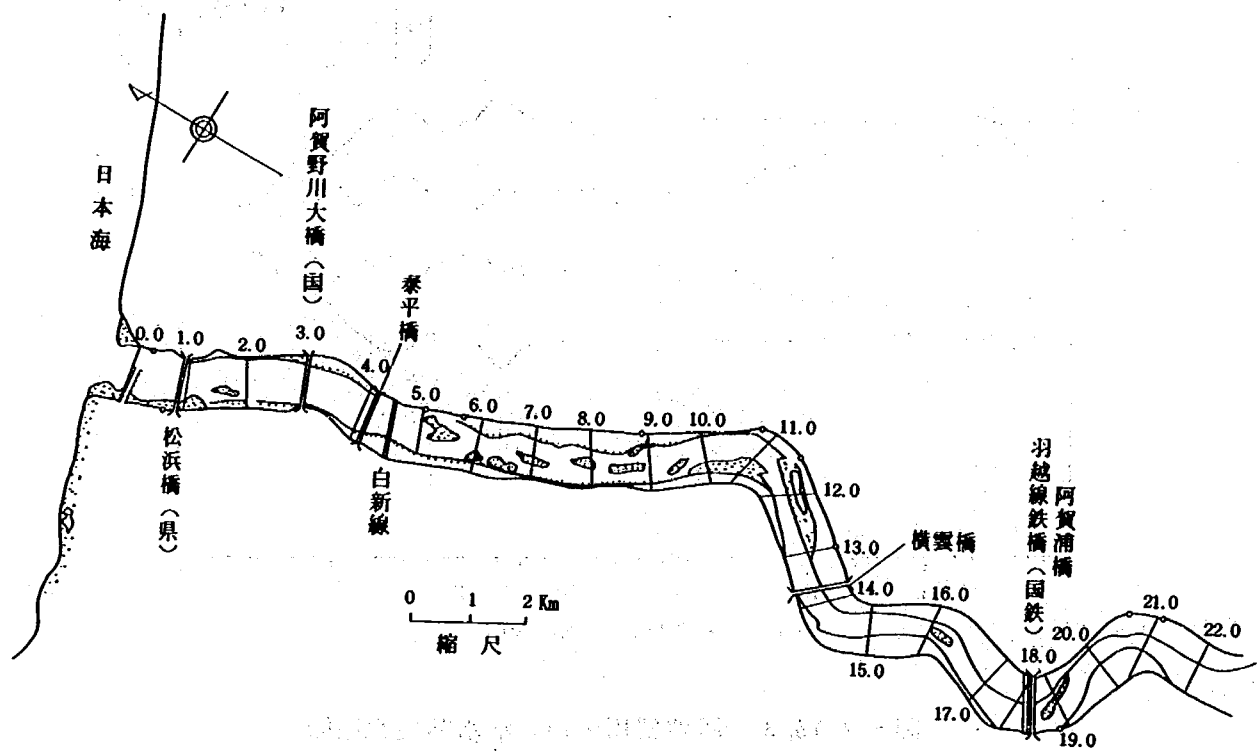
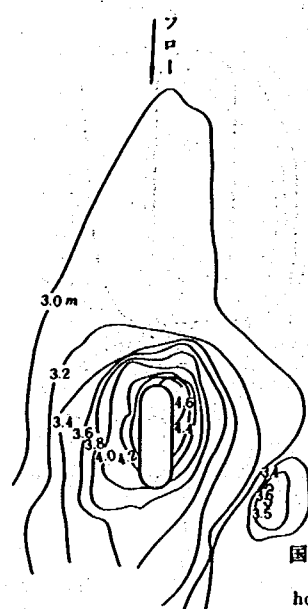


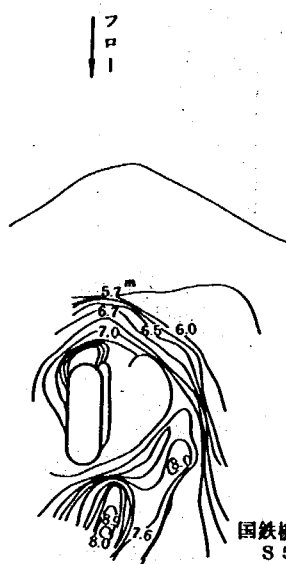
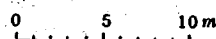
図 - 2.16 阿賀野川下流平面図



国鉄橋 (右岸より2脚目)

S 56.4.15
 $h_o/D = 1.29$
 $h_o/dm = 4290$
 $Fr = 0.27$
 $Z/D = 0.80$

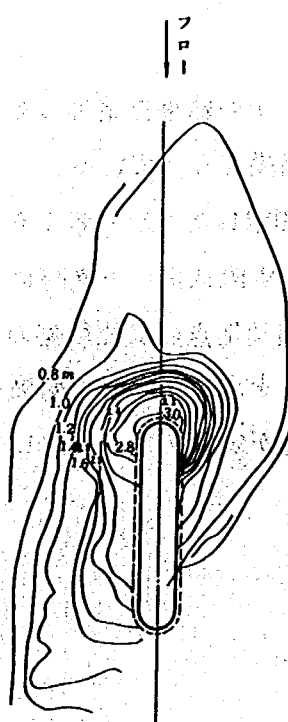
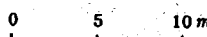
$h_o = 2.58 \text{ m}$
 $u_o = 1.36 \text{ m/s}$
 $D = 2.0 \text{ m}$
 $L = 6.0 \text{ m}$
 $Q = 2,450 \text{ m}^3/\text{s}$ (ピーク時)
 $Q = 1,010 \text{ m}^3/\text{s}$ (観測時)



国鉄橋 (左岸より2脚目)

S 56.4.15
 $h_o/D = 1.29$
 $h_o/dm = 4,290$
 $Fr = 0.27$
 $Z/D = 0.75$

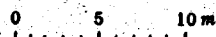
$h_o = 2.58 \text{ m}$
 $u_o = 1.36 \text{ m/s}$
 $D = 2.0 \text{ m}$
 $L = 6.0 \text{ m}$
 $Q = 2,450 \text{ m}^3/\text{s}$ (ピーク時)
 $Q = 1,010 \text{ m}^3/\text{s}$ (観測時)



横張橋 (左岸より3脚目)

S 55.3.26
 $h_o/D = 0.29$
 $h_o/dm = 1,480$
 $Fr = 0.35$
 $Z/D = 0.52$

$h_o = 1.30 \text{ m}$
 $u_o = 1.24 \text{ m/s}$
 $D = 4.5 \text{ m}$
 $L = 12.1 \text{ m}$
 $Q = 770 \text{ m}^3/\text{s}$ (ピーク時)
 $Q = 190 \text{ m}^3/\text{s}$ (観測時)



国鉄橋 (右岸より2脚目)

S 55.4.24
 $h_o/D = 1.2$
 $h_o/dm = 3,950$
 $Fr = 0.27$
 $Z/D = 0.80$

$h_o = 2.37 \text{ m}$
 $u_o = 1.31 \text{ m/s}$
 $D = 2.0 \text{ m}$
 $L = 6.0 \text{ m}$
 $Q = 2,170 \text{ m}^3/\text{s}$ (ピーク時)
 $Q = 690 \text{ m}^3/\text{s}$ (観測時)

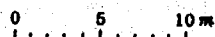
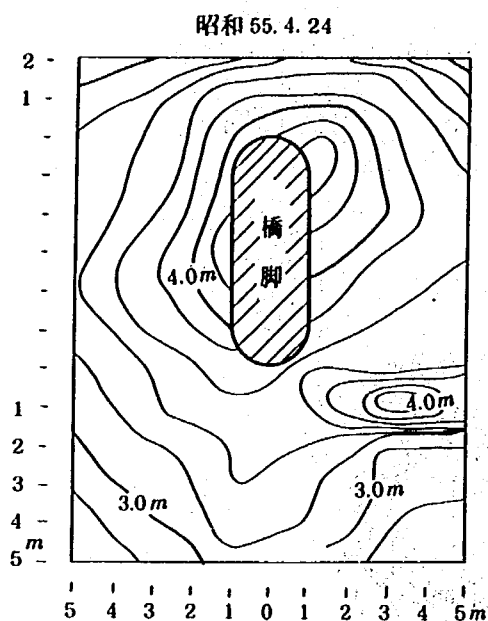
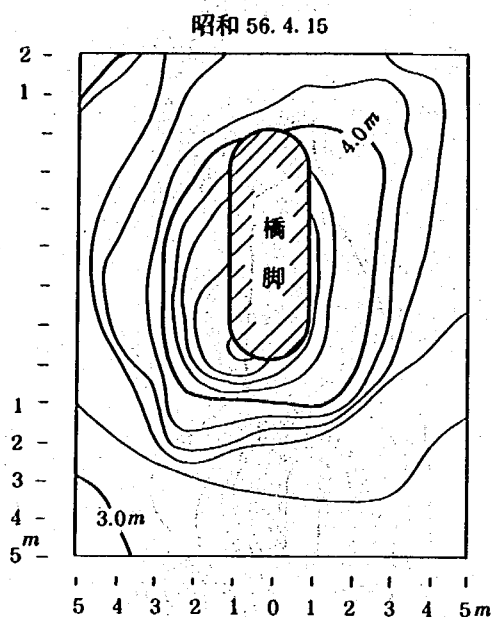


図-2.17.1 洗掘深形状図 (阿賀野川)



$h_o = 2.4 \text{ m}$
 $u_o = 1.31 \text{ m/S}$
 $Fr = 0.27$
 $h_o/dm = 3,950$
 $D = 2.0 \text{ m}$
 $Z = 1.6 \text{ m}$
 $h_o/D = 1.20$
 $Z/D = 0.8$



$h_o = 2.6 \text{ m}$
 $u_o = 1.36 \text{ m/S}$
 $Fr = 0.27$
 $h_o/dm = 4,290$
 $D = 2.0 \text{ m}$
 $Z = 1.6 \text{ m}$
 $h_o/D = 1.29$
 $Z/D = 0.80$

図- 2. 17. 2 洗掘深形状図 (阿賀野川国鉄線橋脚 4.5 k 地点)

観測時の水理量は、橋脚より約20m離れた地点を代表させた。その結果を整理したのが表- 2. 3. 1であり、水理量に対して洗掘深が相対的に大きい結果となっている。

この原因は実測日前の洪水ピーク時付近で洗掘されたものを測定したためと考えられる。そこで、洪水ピーク時の水理量を各橋脚毎に把握してみた。実際洪水ピーク時に各橋脚付近で水理量の観測は実施していないため、13.3 k 付近の横越地点の水位観測のデータと、河床縦断測量のデータを参考にして、各橋脚毎の水理量を求めた。その結果を表- 2. 3. 2に示したが、この場合の方が水理量と洗掘深との関連が実験データと比しても妥当な結果を示している。

表-2.3.1 実測結果一覧表

	流速 u_0	水深 h_0	粒径 d_m	ビアー巾 D or D'	洗掘深 Z	h_0/D or h_0/D'	D/d_m or D'/d_m	h_0/d_m	Fr	Z/D or Z/D'	Z/h_0	(L) ビ アー軸長	$(Rp) \frac{u_0^2 D}{\nu \times 10^5}$	$(Ns) \frac{u_0}{\sqrt{Sgd}}$	備 考
	m/s	m	mm	m	m							m			
1	0.77	1.0	0.09	2.3 (4.50)	2.4	0.41 (0.21)	26.1 (5.11)	1080	0.17	1.02 (0.52)	2.47	12.1	17.641	6.43	横雲橋 S55.326 (左岸より3脚目)
2	0.07	6.8	0.06	2.0	1.5	3.40	33.3	11330	0.01	0.75	0.22	6.0	1.400	0.71	国鉄橋 S55.326 (左岸より2脚目)
3	0.45	1.5	0.06	2.0 (7.0)	4.7	0.75 (0.21)	33.3 (116.7)	2500	0.09	2.35 (0.67)	31.3	17.0	9.000	4.57	阿賀野川大橋 S55.327 (右岸より2脚目)
4	0.32	5.0	0.06	2.0	3.8	25.0	33.3	8330	0.03	1.90	0.76	6.0	6.300	3.20	国鉄橋 S55.424 (左岸より2脚目)
5	0.56	2.8	0.06	2.0	1.6	1.40	33.3	4670	0.08	0.80	0.57	6.0	11.260	5.72	国鉄橋 S55.424 (右岸より2脚目)
6	0.95	1.9	0.06	2.0 (7.0)	1.0	0.95 (0.27)	33.3 (116.7)	3170	0.10	0.50 (0.14)	0.53	17.0	19.800	9.69	阿賀野川大橋 S55.424 (右岸より3脚目)
7	0.61	3.0	0.06	3.3 (5.3)	3.2	0.91 (0.57)	55.0 (87.5)	5000	0.08	1.27 (0.80)	1.07	12.0	20.229	6.22	泰平橋 S55.424 (左岸より4脚目)
8	0.38	5.5	0.06	2.0	2.5	2.75	33.3	9170	0.04	0.75	0.22	6.0	7.560	3.84	国鉄橋 S56.415 (左岸より2脚目)
9	0.66	3.1	0.06	2.0	1.6	1.55	33.3	5170	0.09	0.80	0.52	6.0	13.280	6.74	国鉄橋 S56.415 (右岸より2脚目)
10	0.84	2.9	0.06	3.3 (5.3)	2.4	0.88 (0.55)	55.0 (87.5)	4830	0.12	0.73 (0.46)	0.83	12.0	27.588	8.49	泰平橋 S56.415 (右岸より2脚目)
11	0.72	2.9	0.06	2.0	1.6	1.45	33.3	4830	0.11	0.78	0.54	6.0	14.420	7.32	国鉄橋 S56.416 (右岸より3脚目)
12	1.15	2.1	0.06	3.3 (5.3)	2.7	0.64 (0.40)	55.0 (87.5)	3500	0.20	0.82 (0.51)	1.29	12.0	38.082	11.72	泰平橋 S56.416 (右岸より1脚目)

注) 実測時の水流量による整理

表-2.3.2 実測結果一覧表(阿賀野川)

	流速 u_0 m/S	水深 h_0 m	粒径 d_m m	ビアー 巾 D m	洗掘深 Z m	h_0/D	D/d_m	h_0/d_m	Fr	Z/D	Z/h_0	(L)ビ アー軸長 m	(RD) $\frac{u_0 D}{\nu}$ $\times 10^5$	(NS) $\frac{u_0}{\sqrt{Sgd}}$	備考 (Dはフーチング巾)
1	1.24	1.30	0.09	4.5	2.4	0.29	51.1	1480	0.35	0.52	1.31	12.1	28.497	10.39	横雲橋 (左岸より3脚目) S55.3.26
2	1.05	1.02	0.06	2.0	1.5	0.51	33.3	1700	0.33	0.75	1.47	6.0	20.940	10.63	国鉄橋 (左岸より2脚目) S55.3.26
3	1.11	1.11	0.06	7.0	4.7	0.16	116.7	1850	0.34	0.67	4.24	17.0	22.280	11.31	阿賀野川大橋 (左岸より2脚目) S55.3.27
4	1.31	2.37	0.06	2.0	3.8	1.19	33.3	3950	0.27	1.90	1.60	6.0	26.140	13.27	国鉄橋 (左岸より2脚目) S55.4.24
5	1.31	2.37	0.06	2.0	1.6	1.19	33.3	3950	0.27	0.80	0.68	6.0	26.140	13.27	国鉄橋 (右岸より2脚目) S55.4.24
6	1.39	2.60	0.06	7.0	1.0	0.37	116.7	4330	0.28	0.14	0.39	17.0	27.820	14.12	阿賀野川大橋 (右岸より3脚目) S55.4.24
7	1.39	2.60	0.06	5.3	3.2	0.49	87.5	4330	0.28	0.80	1.23	12.0	45.903	14.12	泰平橋 (左岸より4脚目) S55.4.24
8	1.36	2.58	0.06	2.0	2.5	1.29	33.3	4290	0.27	0.75	0.97	6.0	27.180	13.80	国鉄橋 (左岸より2脚目) S56.4.15
9	1.36	2.58	0.06	2.0	1.6	1.29	33.3	4290	0.27	0.80	0.62	6.0	27.180	13.80	国鉄橋 (右岸より2脚目) S56.4.15
10	1.45	2.82	0.06	5.3	2.4	0.54	87.5	4710	0.28	0.46	0.85	12.0	47.718	14.68	泰平橋 (右岸より2脚目) S56.4.15
11	1.36	2.58	0.06	2.0	1.6	1.29	33.3	4290	0.27	0.78	0.60	6.0	27.180	13.80	国鉄橋 (右岸より3脚目) S56.4.16
12	1.45	2.82	0.06	5.3	2.7	0.54	87.5	4710	0.28	0.51	0.96	12.0	47.718	14.68	泰平橋 (右岸より1脚目) S56.4.16

注) h_0 は横越地点の水位データと平均河床高から n を算出し、その n を参考に洪水ピーク時の水理量を求め整理した。

第3章 橋脚の基部洗掘深の推定に関する検討

3-1 従来の各推定式に対する検討

最大洗掘深に対する各推定式のうち、まず Laursen の式に対する検討を行う。今回行った実験および収集したデータを Laursen の式と比較したものが図-3.1 である。Laursen の推定式は $Z/D = f(h_o/D)$ で与えられ最大洗掘深に対する表現式となっているが、ほとんどのデ

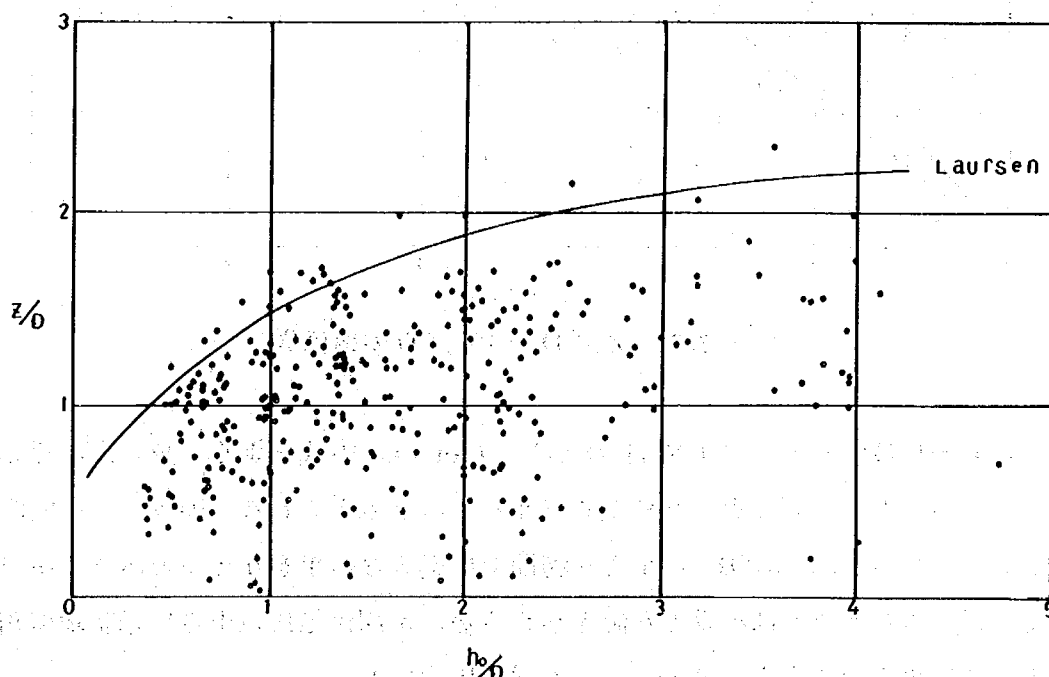


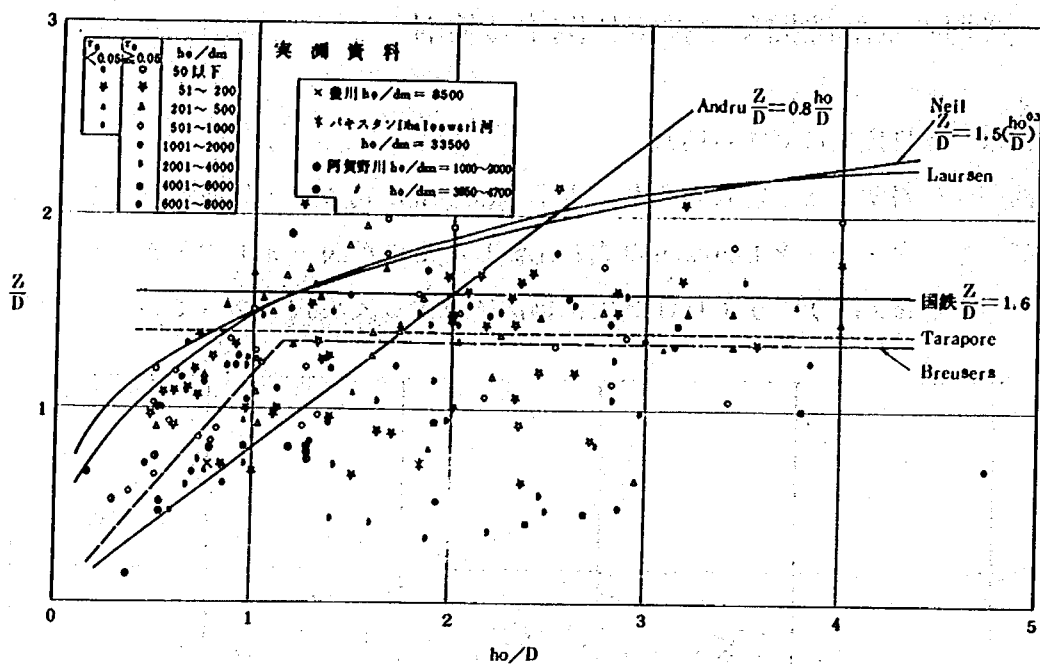
図-3.1 $Z/D \sim h_o/D$ による Laursen 式との比較

ータはこの下にくる。

いっぽう、著者らの洗掘深の推定に関する次元解析によれば、洗掘深は $Z/D = f(h_o/D, h_o/dm, Fr)$ で与えられる。ここで最大洗掘深についてのみ考えれば Fr 数に無関係となることが期待され、 $Z/D = f(h_o/D, h_o/dm)$ の関数形で表わされるだろう。そこで h_o/D , h_o/dm が同一の場合、 Z/D の最大のデータを用い、 h_o/dm を分類して示したのが図-3.2 である。なお、 $Fr = \phi \cdot S^{\frac{1}{2}} \cdot \tau_*^{\frac{1}{2}} \cdot (h_o/dm)^{-\frac{1}{2}}$ より流速係数 ϕ を山本による図-2.9 の No Motion の表現式 $\phi = 6.0 + 5.75 \log h_o / 2.5 dm$ を用い、 τ_* を逆算して限界掃流力によるデータの分類も行った。

この図より水深粒径比 h_o/dm の違いによる有意な傾向はあまりないが、 h_o/dm の小さいデータが Z/D の大きい部分を多く占めている。Laursen の曲線はほぼ実験値の包絡線を示すものと見なせるが、 h_o/D および h_o/dm の大きい範囲では過大な結果を与える傾向を示している。

さらにこの図中に Neil, Breusers, 国鉄, Andru, Tarapore の推定式による評価も示し



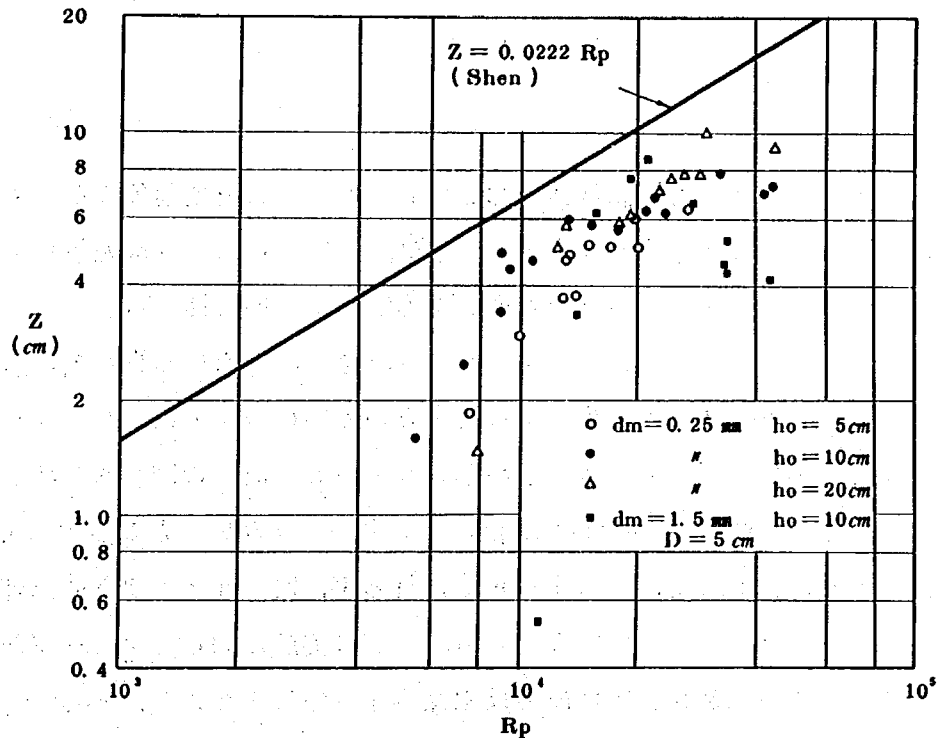
図— 3.2 $Z/D \sim ho/D$ の関係図

である。これらを比較すると、まず Neil の式は、Laursen の式とよく一致し、同様 ho/D および ho/dm の大きい範囲で過大な結果を与えるものと考えられる。国鉄の式は実測により求められたものであるが、 ho/D の小さな範囲では過大な結果を与えるであろう事が示され、また ho/D が大きな所ではほぼ妥当な値を与えるが、水深粒径比の小さい扇状地河川では洗掘深を過少に評価するであろう。Breusers の式も同様である。

Audru の式は、実験結果と実測結果とを整理することによって得られたものであるが、洗掘深が一様流での水深のみによって支配されるというものであって、限られた範囲で適用可能な式であり、 $ho/D \geq 2.0$ では大きすぎる値を与えるであろう。また Carstens の推定式も Audru と同様の性質を持っている。Tarapore の推定式は ho/D が小さい場合と大きい場合にわけ、Audru の式をより合理的に修正したもののように見えるが、水深粒径比の小さい範囲では過少評価する傾向を示している。また洗掘深は ho/dm によっても変化するものであるから Tarapore の比較した実験データの範囲のみではほぼ妥当とみなされるべきであろう。図— 3.2 には実測資料も示してあるが、 ho/D が違うにもかかわらず Z/D はほぼ一定となっている。このことは ho/dm の違いが洗掘深に寄与していることを表わしているとも考えられる。

Carstens の推定式は半実験的理論より導かれたものであるが、定数の決定に当り種々の実験が使用されており、実際的使用は難しい。Maza and Sanchez の式は dm/ho が大きい場合、つまり ho/dm の小さい場合には Z/D が負となり推定不能となる。したがって限られた範囲で適用可能な式となっていることが考えられ、実際に使用することは難しい。

Larras の式は洗掘深が D の関数であり、流速や水深等に関係なく、比較した実験、実測データの範囲のみで成立するものであると言える。Shen の推定式と著者らの実験との比較



図－3.3 実験値と推定式（Shen）の比較図

を行ったものが図－3.3である。これからも解るように Shen の推定式は洗掘深を過大評価している。さらに h_o/D が小さい場合、より過大な結果を与えると考えられる。

以上のように、各推定式はそれぞれ種々の問題点を持っており、実際に使用するときには、各推定式の適用範囲など十分にわきまえ使用せねばならない。

また図－3.2で行った考察より次のような推定が可能であろう。

$$\frac{Z}{D} = K \left(\frac{h_o}{d_m} \right), f \left(\frac{h_o}{D} \right) \dots \dots \dots (3-1)$$

ここに K は h_o/d_m によって変化する定数、 f は h_o/D の関数で Laursen の推定式かもしくは Laursen の推定式とほぼ同値を与える Neil の推定式を使って (3-1) 式を書き直すと次式となる。

$$\frac{Z}{D} = K \left(\frac{h_o}{d_m} \right)^{1.2} \left(\frac{h_o}{D} \right)^{0.3} \dots \dots \dots (3-2)$$

(3-2) 式で $K(h_o/d_m)$ を決めれば Z/D が求まる。ただし、 $K(h_o/d_m)$ を決定するための問題点もある。なぜならば、水深粒径比の小さい場合は、洗掘深は限界掃流力を与える水理量付近でピークを持つため、最大洗掘深を求めることは実験技術上簡単であるのに対し、 h_o/d_m の大きい場合の洗掘深はピークを持たないために、最大洗掘深を与える水理量とともに、大きな水理量規模での実験が困難となる。したがって、この場合の最大洗掘深の評価の間

題もあるが、(3-2)式は簡単で使用可能な推定式となりうるので検討していく必要がある。

3-2 洗掘深の推定

実験によって明らかにされた洗掘特性に関しても、個々の影響要素等まだ多くの不明な点を残しており、厳密な意味で洗掘深を推定することは難しい。ここでは次元解析により洗掘深を $Z/D = f(h_o/D, h_o/dm, Fr)$ で表現した推定法について述べる。

まず、すべてのデータを処理し、 h_o/D を一定の範囲に分割して他の3要素を同一紙面上で表わすことにした。 h_o/D の変化による Z/D の違いについては、2-3-3の検討で述べたように、水深の影響が顕著であることが示されている。前記の図-2.7は h_o/dm も変化しているので、厳密な意味では h_o/D の変化によるものではない。ところで Shen は h_o/D が一定程度以上ならば、 h_o/D に対する考察は行わず、図-3.4のように処理することにより、 Z/D はピークを持つと述べている。しかし、これは実験においてフルード数が小さい所では水深が大きく、フルード数が大きい所では水深が小さいことにより、 h_o/D および h_o/dm の変化によってピークを持っていると考えられる。著者らの考察によれば、水深粒径比の小さい領域では Z/D にピークを持つが、この程度の水深粒径比になると Z/D はピーク後一旦減少し、その後増加する傾向を示す。

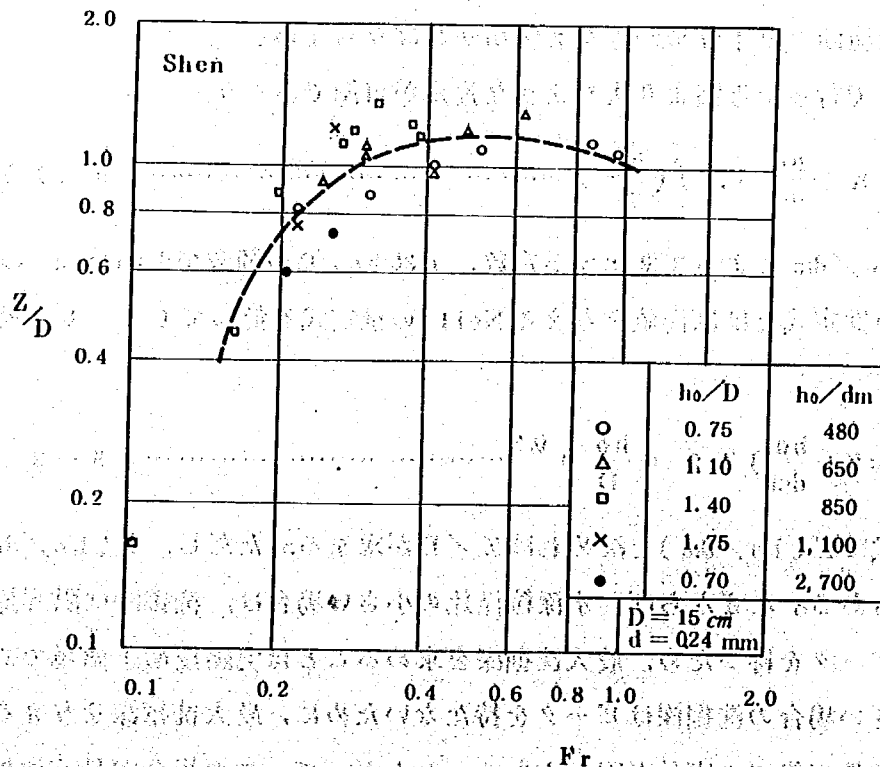


図-3.4 $Z/D \sim Fr$ 図 (Shen)

ここではこのような点を留意し、すべてのデータの中で、設定する $h_o/D \sim \text{Const}$ 近傍のデータを選び出し $h_o/D = 0.5 \sim 0.7, 0.75 \sim 1.25, 1.75 \sim 2.25, 2.75 \sim 3.50$ の4分割にし、 $Z/D \sim Fr$, h_o/dm 曲線を作成するとともに、実験においては不足する領域の補足と範囲拡大を行った。この結果が図-3.5.1～3.5.4である。同図中で $\tau_* = 0.05$ の線は $Fr = \phi \cdot S^{\frac{1}{2}} \tau_*^{\frac{1}{2}} \cdot (h_o/dm)^{-\frac{1}{2}}$ より計算された限界掃流力を与える曲線を描いたもので、Clear Water Scour の場合と Continuous Sediment Motion の場合をわけるものであり、 $\tau_* = 0.0125$ はピア側面における流れで限界掃流力を与える線で、近似的に No Scour と Clear Water Scour をわける線である。また同図中には山本の図-2.8による河床形態分類が示してあるが、年一回洪水の水理量に対する線はほぼ Upper Regime を与える線で近似できると考えられ、 h_o/dm が大きく、フルード数に対して Z/D がピークを持たないような場合の最大洗掘深の推定に寄与するものである。

Z/D の実験値は h_o/D 変化や実験でのバラツキ等もあり、 Z/D 曲線に一致しないデータも存在するが、これらの結果より、次のようなことが明らかとなる。

いずれの場合も水深粒径比が大きいほど低フルード数で洗掘が起り、フルード数に対する Z/D の増加は急激である。またこの場合は Z/D にピークを持たない。

いっぽう、水深粒径比が小さい場合は、フルード数が大きくなって洗掘が起り、その増加は同様急激で Z/D なピークを持つ。 h_o/D の違いによる洗掘深は、同一の h_o/dm およびフルード数に対し、 h_o/D の大なる方が Z/D も大きい。このことはピア幅に対する相対洗掘深が大きくなることで、洗掘深そのものが大きいことではない。さらにこの洗掘深推測図より h_o/dm 別による $Z/D \sim Fr$ の関係を示したのが図-3.6.1～3.6.4である。この場合、実験で得られた結果と同様、水深粒径比の小さい範囲では、洗掘深は掃流力に対して linear に増加し、限界掃流力を与える付近で最大値を持ち、動的平衡領域に入り洗掘深は減少してその後一定値に近づく。水深粒径比が大きくなると、洗掘深はピークを持った後若干減少し、再び増加に転じその後一定値に近づく傾向を示す。またさらに水深粒径比が大きくなるとピークの傾向はなくなり、フルード数とともに洗掘深も大きくなるが、その増加量は少なくなって同様一定値に近づく傾向を示す。

さて以上の洗掘深推測図より、工学上最大洗掘深を推定することが重要となってくる。水深粒径比が小さい場合は、限界掃流力となる付近で最大洗掘深を与えるが、 h_o/dm が大きい場合は、フルード数の実存限界で最大洗掘深を与える必要がある。ただし山本によって概略示されている自然河川で生ずる水理量限界以下の範囲では、 h_o/dm の大きい場合は Upper Regime を与える線で推定すればほぼ最大となるようである。したがって、このような観点から最大洗掘深を与える $Z/D \sim h_o/D, h_o/dm$ の関係を求めたのが図-3.7である。この結果を用いることによって(3-2)式のような推定法も簡便な方法として検討可能である。なお、図-3.5の推測図は橋脚構造物自体の局所洗掘深であり、河道の湾曲部や砂州による偏流

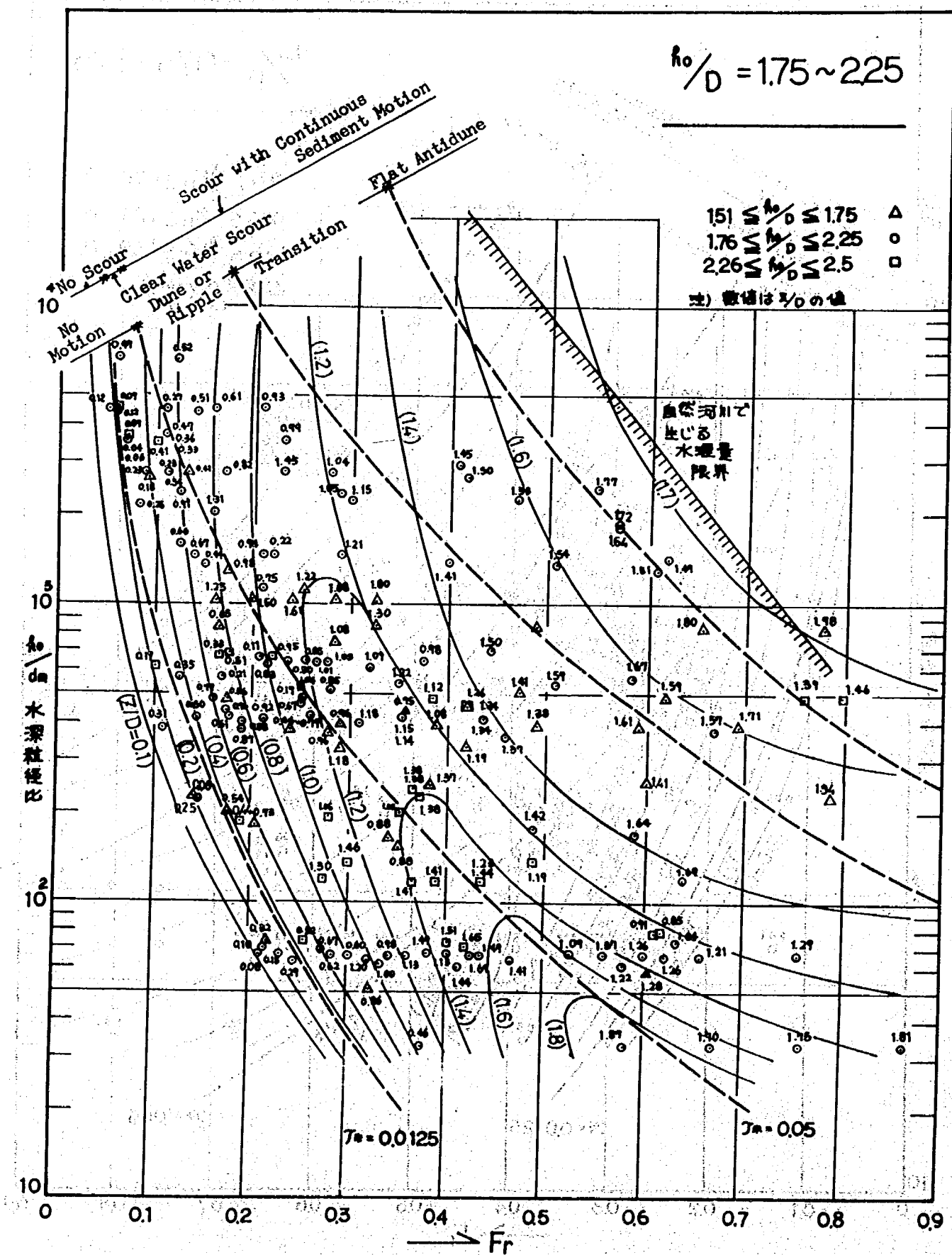


図-3.5.3 洗掘深推測図

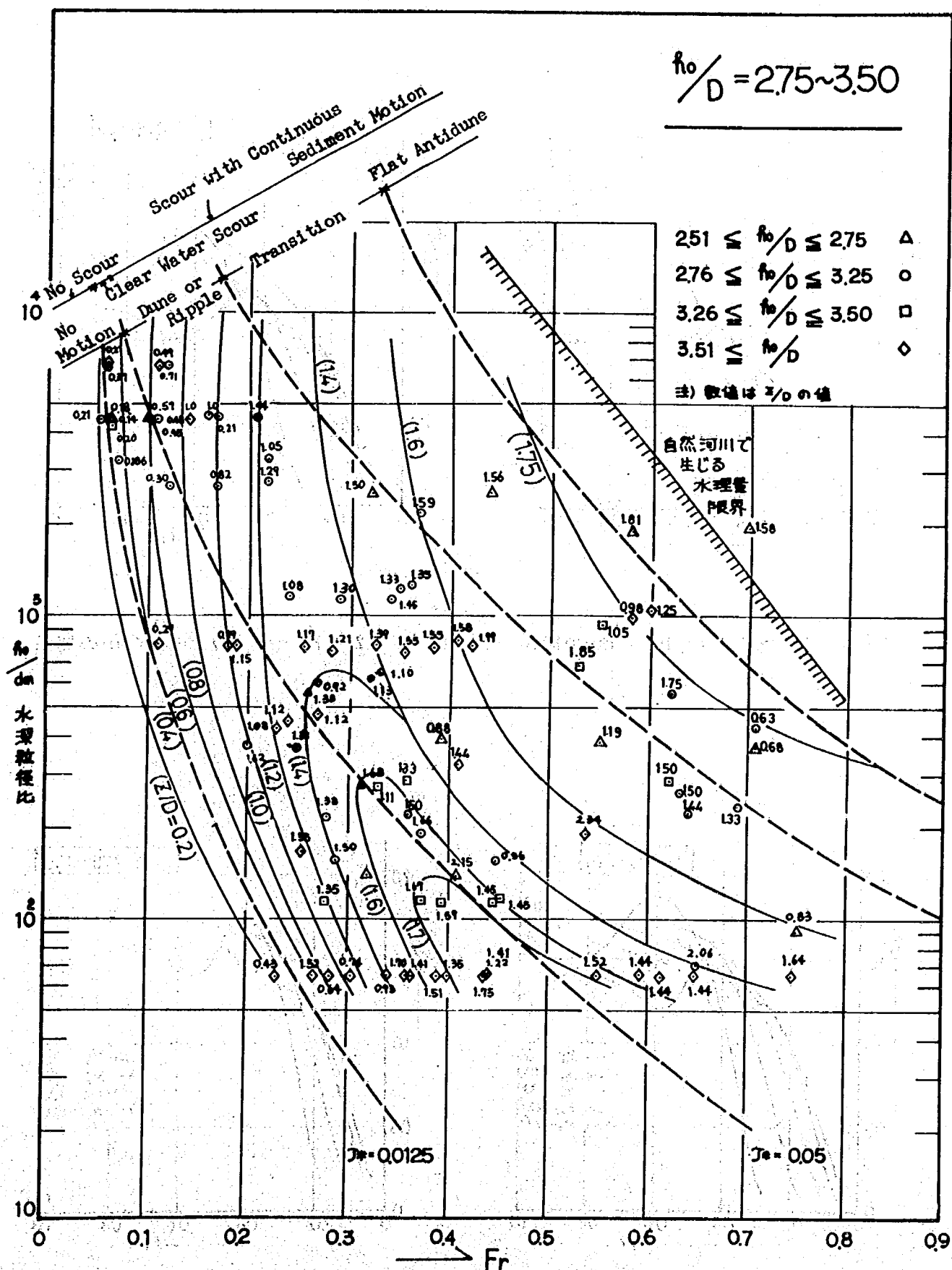


図-3.5.4 洗掘深推測図

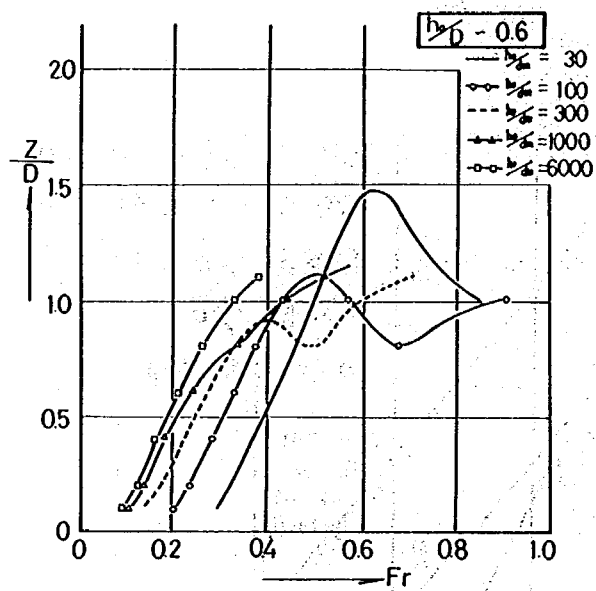


図-3.6.1 $Fr \sim Z/D$ と h_0/dm の関係

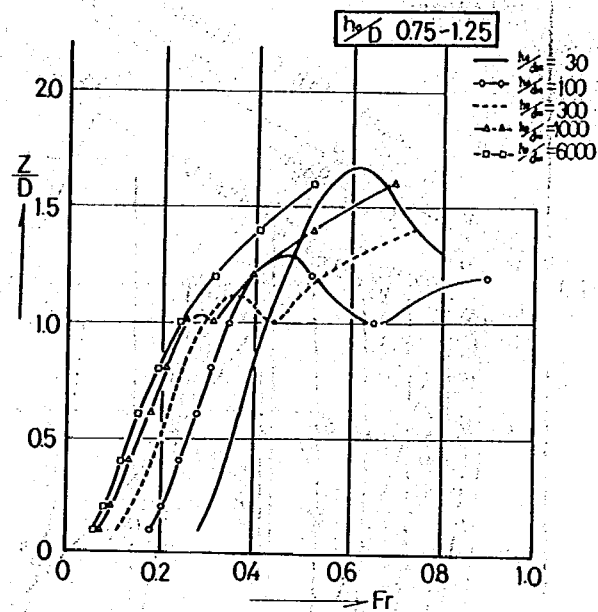


図-3.6.2 $Fr \sim Z/D$ と h_0/dm の関係

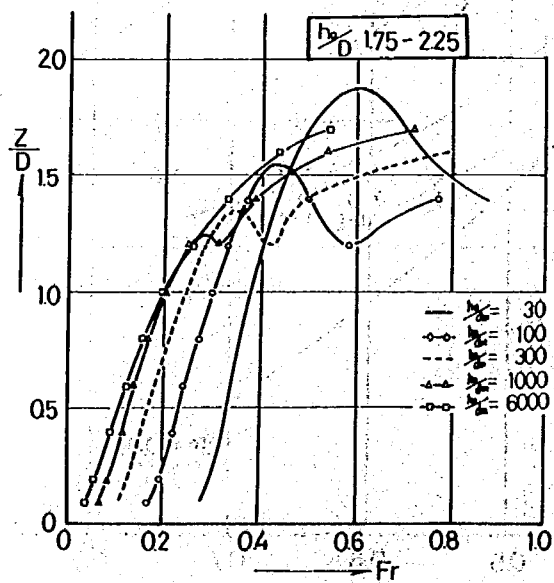


図-3.6.3 $Fr \sim Z/D$ と h_0/dm の関係

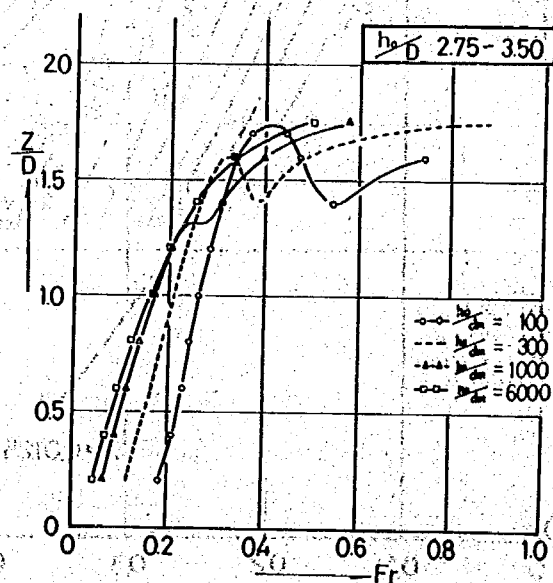


図-3.6.4 $Fr \sim Z/D$ と h_0/dm の関係

のある場合、河道断面の急変部、あるいは洗掘に伴う土質変化や強度等、河道特性による洗掘深を別途考慮した適切な判断が必要である。いっぽう図-3.5で分割している h_o/D の範囲外の間値における洗掘深を推定するような場合は、分割した大小両側の h_o/D より洗掘深を求め、さらに中間値の h_o/D に対する洗掘深を推定する方法で使用可能と考えられる。しかし、 $h_o/D \geq 3.50$ の領域は現在データ不足で作図は困難であり、また図-3.5においてもさらに水深粒径比の大きい領域での推測も必要であり、これについては実測による範囲拡大が今後の課題である。

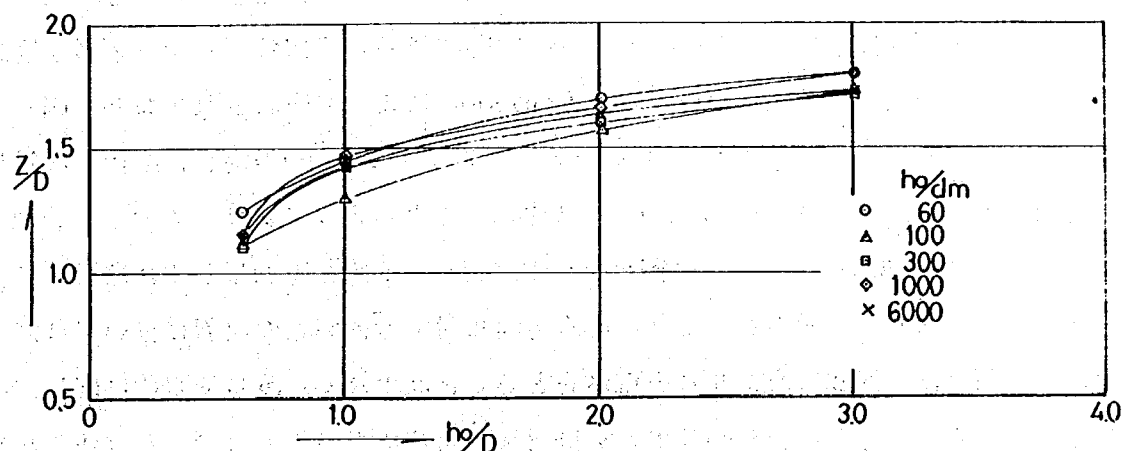


図-3.7 $Z/D \sim h_o/D$, h_o/D , h_o/dm の関係

3-3 橋脚形状による洗掘深変化への適用

橋脚形状と洗掘量との関係は、石原によって図-3.8に示すような一円弧型、二円弧型あるいは直線型の前・後頭部をとりつけた橋脚模型による詳しい実験が行われた。それによると洗掘深は 2η を 180° から減少するにつれて激減していくが、ある程度以下に 2η を減少しても、洗掘量の軽減にさしたる効果はなかった。結局実用上最も優れた前頭部形状としては、二円弧型では $2\eta = 70 \sim 80^\circ$ ($\ell : D/2 = 3.2 \sim 2.6 : 1$)、直線型では $2\eta = 40 \sim 60^\circ$ ($\ell : D/2 = 2.6 \sim 1.7 : 1$)を提唱した。なお、前頭部より腹部への移行を円滑にして、腹部壁体に接

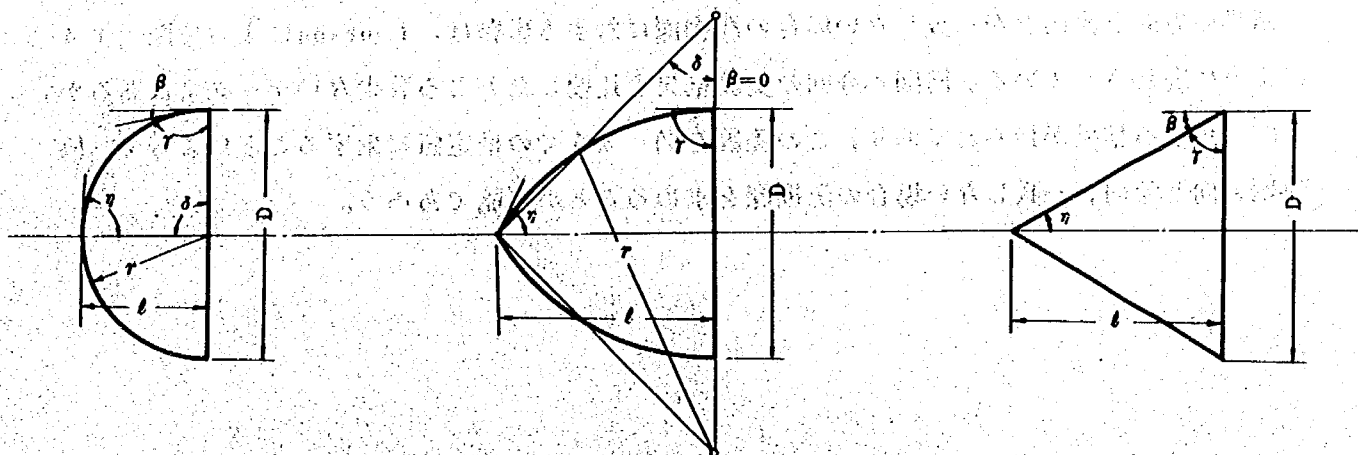


図-3.8 橋脚模型の前後頭部形状(石原の実験)

してできる鉛直渦の範囲をなるべく少なくする点からは、直線型よりも二円弧型の方が好ましいとされている。

つぎに円柱橋脚に対し、半円形小判型橋脚の最大洗掘深変化および流水方向に対する橋脚軸の傾斜による影響について検討した結果が図-3.9.1~3.9.2および写真-3.1~3.3に示してある。水理条件が完全に同一でないため、単純に比較はできないが、円柱橋脚と半円形小判型橋脚では洗掘に形状は異なるものの、最大洗掘深については有意な差は生じていない。これは最大洗掘位置がほぼ流頭部側面に生ずるためと考えられる。したがって、図-3.5の推測図は主として円柱橋脚のデータに対するものであるが、これによる推定値との差も少なく、半円形小判型橋脚の洗掘深推定に際してもそのまま適用可能である。二円弧型(レンズ形)橋脚による洗掘深軽減効果の定量的評価については、Laursen によって検討されており、図-1.5の結果が得られている。これによれば二円弧型の $\ell : D/2 = 2 : 1$ の場合、半円形に対して約90%の洗掘深となり、 $\ell : D/2 = 3 : 1$ では約80%となるようであり、このような形状の場合、図-3.5の推定洗掘深に対してその割合を乗じて得られる値を洗掘深とすればよいであろう。

いっぽう、図-3.9.2で明らかなように流水方向に対する橋脚軸の傾斜については慎重な考慮を要する。河道は長区間にわたり直線流路をとることは少なく、流量や水位に応じて流向も変化しやすいため、実際上は流れが多少とも橋脚軸に斜めに当たってくることを覚悟しなければならない。石原の実験で明らかであるが、図-3.9.2に示すように橋脚軸の流水方向に対する傾斜角 α が 10° の場合最大洗掘深がやや増大し、その位置も流頭部より下流側に発生する。 $\alpha = 20^\circ$ になると流水の当る後頭部側で最大の洗掘深となり、その領域とともに大幅な増加を示す。このように α の増大による悪影響は加速度的に増すことから、橋脚軸は洪水時の流向に一致させ、流量や水位によって流向が変化しても、最少限の α となるようにする必要がある。 α の増大に伴う洗掘上の悪影響は、橋脚形状によっても異なる。一般に壁体式橋脚では流頭部を尖らすほど洗掘量を軽減させるが、反対に流向に対し、傾斜している場合は、図-3.10に示されるように、流頭部を尖らすほど影響が大きい。したがって、流れの方向が一定しない河川では、むしろ流頭部をまるくしておく方が安全なことになる。とくに円柱橋脚は流向に影響されないため、その変動が大きい河川では、細長い橋脚よりも円柱橋脚の方が問題が少ない。

橋脚の方向と流向とが一致しない場合の洗掘深に対する影響は、Laursenによって図-1.4のように表わされている。同図へ今回の実験結果を比較したところ数少ないデータではあるが、ほぼ一致する結果が得られており、この係数を図-3.5での推定値に乘ずることによって、橋脚軸方向と流向が一致しない場合の洗掘深を求めることが可能であろう。

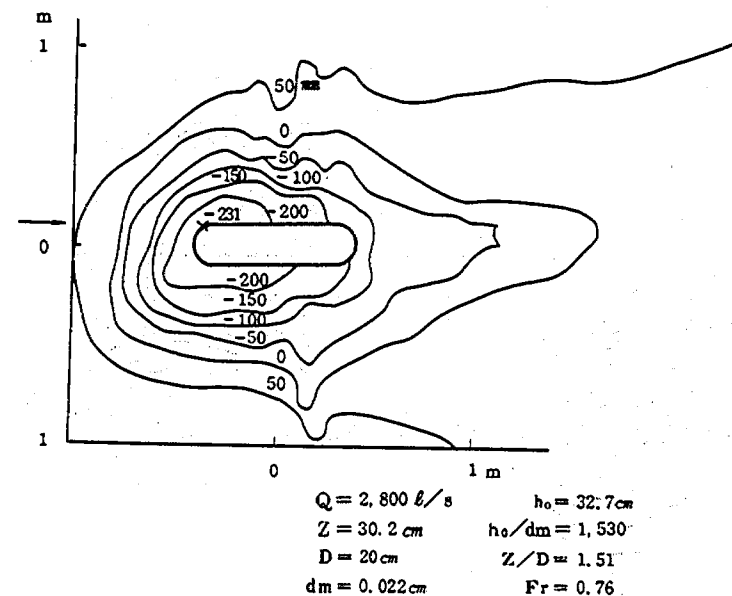
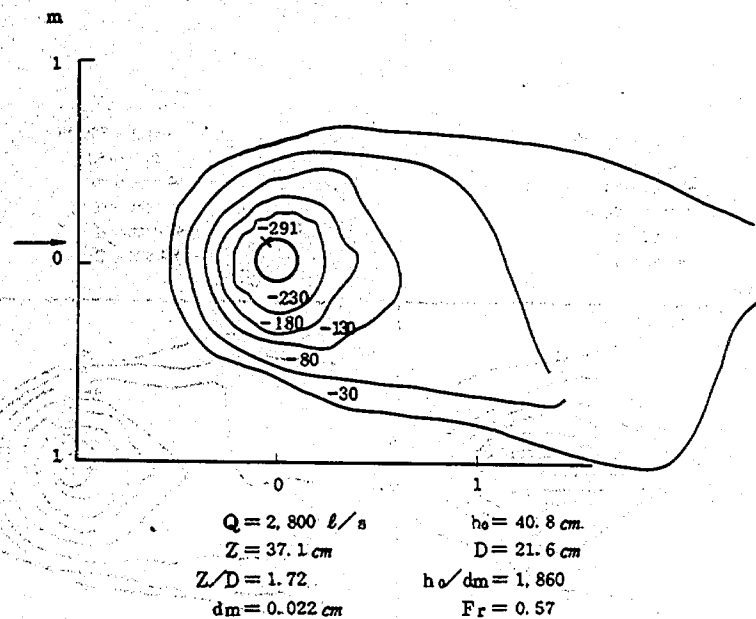
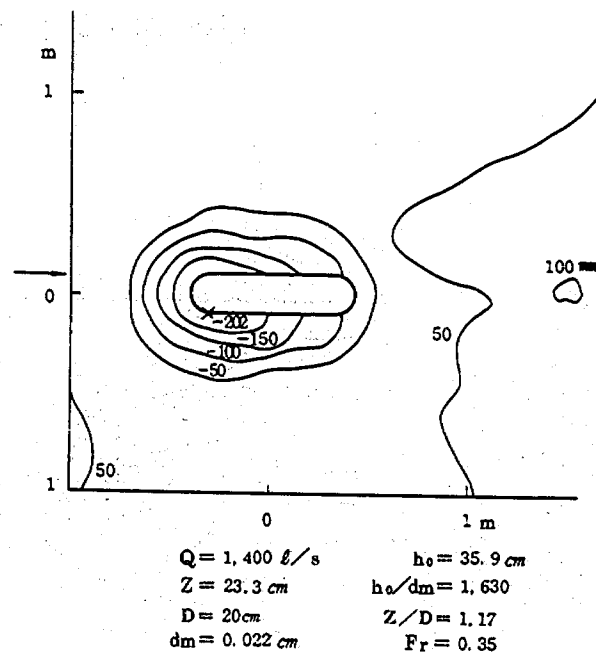
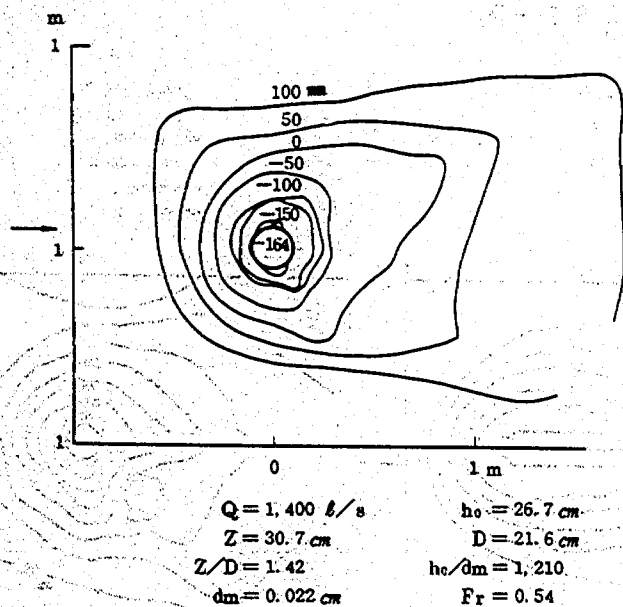


图-3.9.1 洗掘深形状比较图

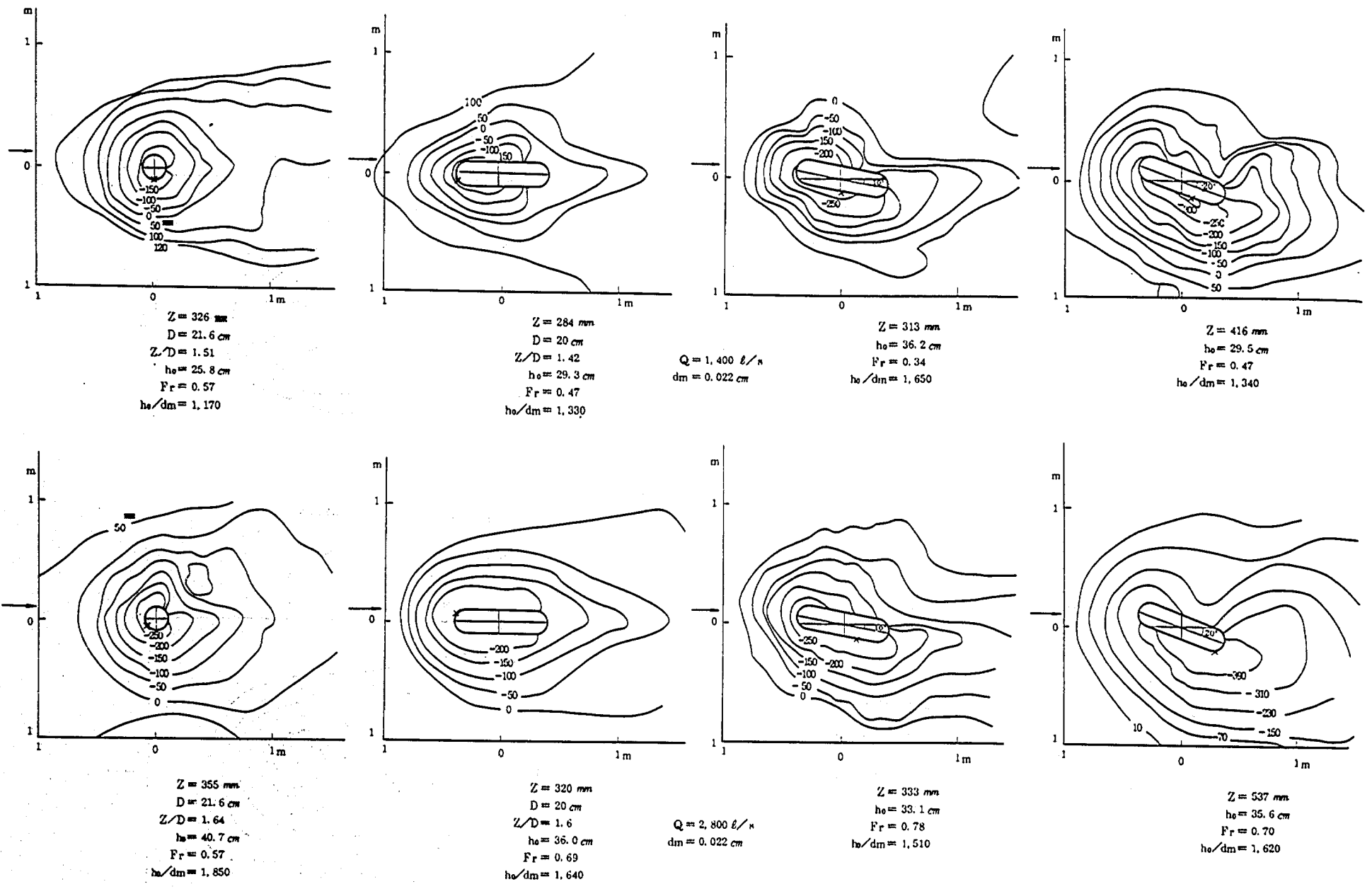
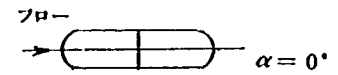


図-3.92 橋脚軸変化による洗掘深形状比較図



写真-3.1 通水後の洗掘状況



$$Q = 1400 \text{ l/s}$$

$$h_0 = 29.3 \text{ cm}$$

$$d_m = 0.022 \text{ cm}$$

$$U_0 = 0.79 \text{ m/s}$$

$$Fr = 0.47$$

$$Z = 28.4 \text{ cm}$$

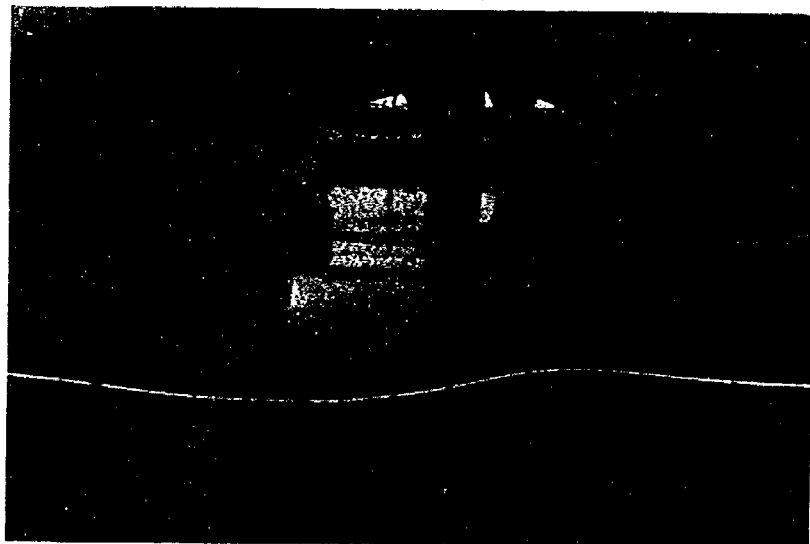


写真-3.2 通水後の洗掘状況



$$Q = 2800 \text{ l/s}$$

$$h_0 = 33.1 \text{ cm}$$

$$d_m = 0.022 \text{ cm}$$

$$U_0 = 1.41 \text{ m/s}$$

$$Fr = 0.78$$

$$Z = 33.3 \text{ cm}$$

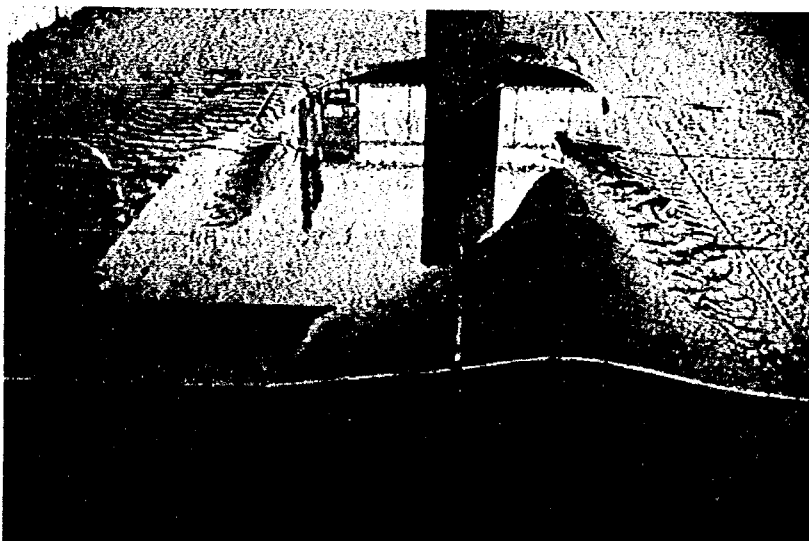


写真-3.3 通水後の洗掘状況



$$Q = 1400 \text{ l/s}$$

$$h_0 = 29.5 \text{ cm}$$

$$d_m = 0.022 \text{ cm}$$

$$U_0 = 0.79 \text{ m/s}$$

$$Fr = 0.47$$

$$Z = 41.6 \text{ cm}$$

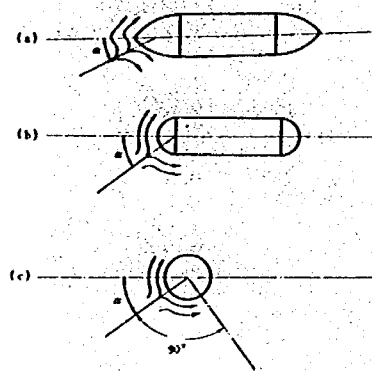


図- 3.10 流水が斜めに当る場合の橋脚形状による流線の変化

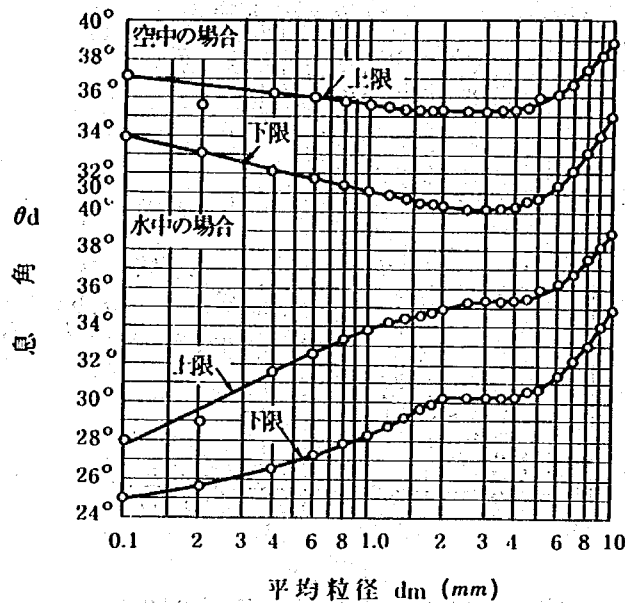
3-4 洗掘範囲の推定

橋脚周囲の局所洗掘範囲は河床砂の水中安息角と洗掘深によって密接な関連を示す。一般に安息角は、漏斗の口などから落下する砂礫が堆積して形成される円錐形の山の自然勾配として測定される。この場合には、砂礫が斜面を滑り落ちながら漸次停止して山を形成するのであるから、そのときの斜面のなす角度は動摩擦角とみなしてよいであろう。図- 3.11は久宝の実験結果¹⁵⁾を示したもので、空中における場合でも水中の場合でも、ともに実験値の上限と下限とにかなりのひらきがあるのは、砂礫の移動開始を示す静止摩擦角が動摩擦角より大きいことに原因があるように思われる。なお、平均粒径が2 mmより小さくなればなるほど、水中安息角が空中におけるものより小さくなっていくことがわかる。これは水中では粒径が小さくなると流動性をおび、動摩擦係数が小さくなるからであると説明される。安息角は粒径のほかには砂礫の形や比重に影響されると考えられるが、Gibson¹⁵⁾はこれらの効果を導入して、水中における安息角 θ_d に対して次のような実験式を得ている。

$$\tan \theta_d = K \cdot d_m^{0.125} (\sigma/\rho - 1)^{0.19} \gamma^{0.025} \dots \dots \dots (3-3)$$

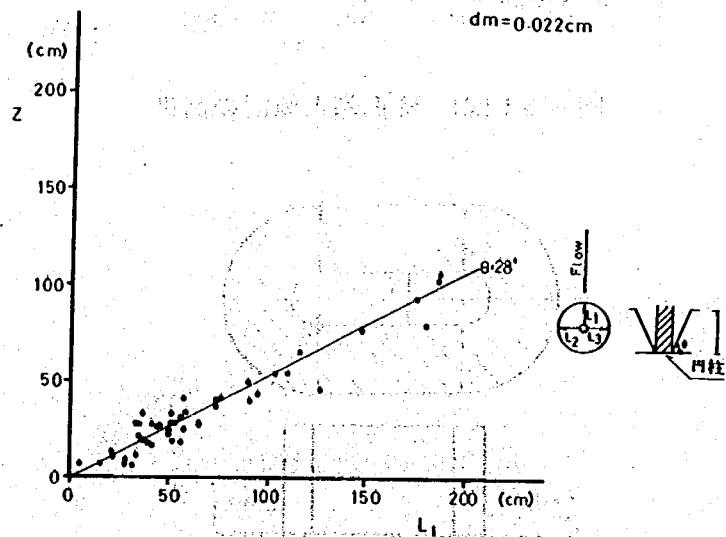
ここに d_m は平均粒径 (inch), σ/ρ は砂の比重, γ は砂の最長径と最短径との比, K は常数であって、水を乱さないとき 0.92, 乱したとき 0.71 である。なお (3-3) 式の基礎となっている実験範囲は、粒径が 0.00505 ~ 0.0223 inch, 比重が 1.90 ~ 3.89, γ が 1.19 ~ 1.57 である。

洗掘口形状は 2-3-2 で述べたように橋脚前面から側面の¹⁵⁾上流部で最大洗掘深を示すが、実験結果より、洗掘深とその範囲の関係を求め、図- 3.12 に示した。河床料料の平均粒径が 0.022 mm のものであるが、洗掘深によって範囲はほぼ決まり、橋脚前面と側面での斜面勾配は同一であることが解る。これらの洗掘口斜面勾配はほぼ 28° 付近であり、図- 3.11 の上下限の平均値を示している。また、粒径 $d_m = 0.87$ mm の実験でも $\theta = 29 \sim 33^\circ$ の範囲の結果であり、図- 3.11 のほぼ平均値を与える勾配を考慮すればよいと考えられる。

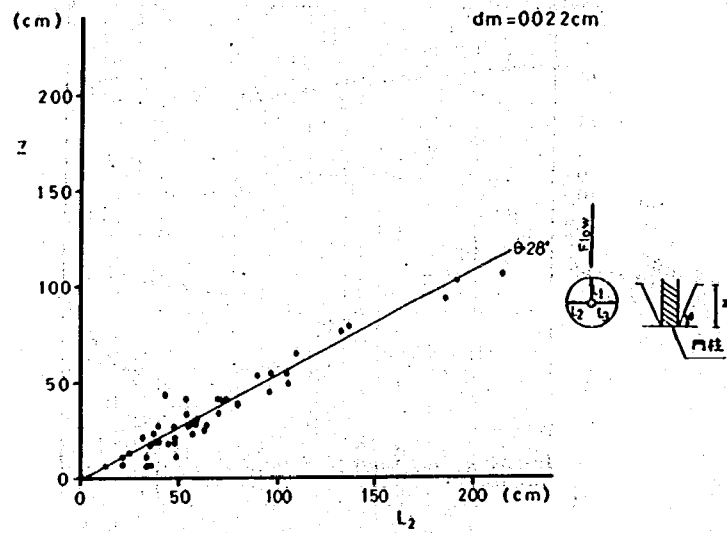


図－3.11 空中および水中における息角と平均粒径との関係（久宝の実験による）

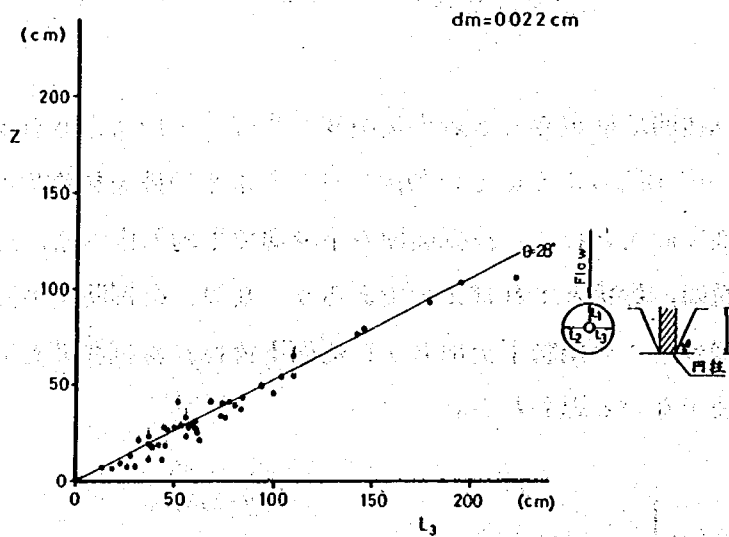
したがって、洗掘範囲は推定される最大洗掘深より図－3.11に示される水中安息角の平均値を用い、図－3.13の模式図のようにその勾配に見合う水平距離を橋脚周囲に与え、洗掘深は橋脚前面と上流の側面で最大として、洗掘範囲の下流端で平均河床へ結ぶ形状としたものを推定される概略の洗掘範囲、形状とすればよいであろう。なお、洗掘防止範囲は第5章で検討結果を述べるが、洗掘深の小さい橋脚下流部および側面下流側は洗掘範囲を対象としたような広い範囲の保護工は必要でないと思われる。



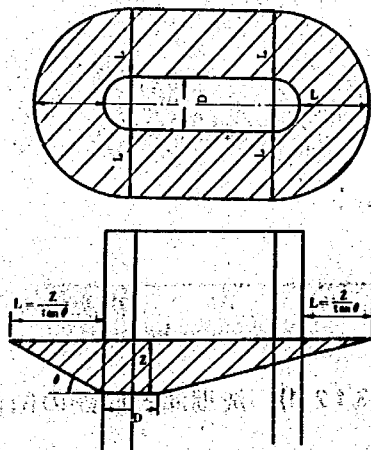
図－3.12(1) 洗掘深と範囲の関係



図－ 3.12(2) 洗掘深と範囲の関係



図－ 3.12(3) 洗掘深と範囲の関係



図－ 3.13 橋脚周囲の洗掘範囲と形状の推定模式図

第4章 近接橋橋脚による影響の検討

4-1 複数橋脚配置に関する実験

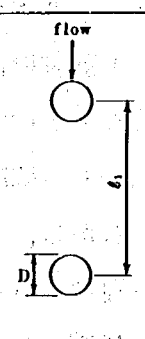
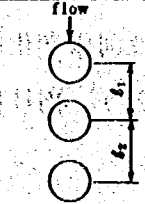
連続して配置される近接橋のような場合、その橋脚群の流れにおよぼす影響や橋脚相互の洗掘は非常に複雑である。ここではこのような複数の円柱橋脚が配置された場合の水理機構と局所洗掘を把握し、配置相違がこれらにおよぼす影響を調べた。ただし、砂礫堆の移動やみお筋の変化等、河道特性が生ずる現象や諸問題を考慮した検討が必要であるが、ここでは橋脚自体の影響のみを主眼とした検討を行った。

4-2 実験の概要と実験ケース

実験は図-4.1に示す長さ30m、幅1.46m、深さ1.0mの二次元水路へ $d_m = 0.867$ 程度のほぼ一様粒径の砂を25cm厚に敷き詰めて行った。実験条件は限界掃流力近傍の水理量を用い、円柱橋脚 ($D = 4.9$ cm) の配置を種々変えて、水位、流況および河床高を測定した。

橋脚の配置形状は、表-4.1の実験ケース一覧表に示す2本円柱の直線配置ケースおよび不規則配置ケースと3本円柱の直線配置ケースについて、その配置間隔を変えた各ケースの検討を行った。

表-4.1 実験ケース一覧表

ケース	実験条件	l_1/D	l_2/D	b/D	Z_{p1} cm	Z_{p2} cm	Z_{p3} cm	h_o cm	Fr	備 考
直線配置ケース	1				7.09			35.31	0.21	
	2	1			6.90			35.18	"	
	3	2			7.90			35.38	"	
	4	4			7.58	5.73		35.34	"	
	5	6			7.89	5.10		35.24	"	
	6	8			9.19	6.12		35.24	"	
	7	10			8.53	5.25		35.29	"	
	8	15			7.06	7.38		35.18	"	
不規則配置ケース	9	1		1	7.40	7.64		35.27	"	
	10	2		1	8.20	7.39		35.39	"	
	11	3		1	8.40	8.70		35.26	"	
	12	1		2	7.90	8.21		35.23	"	
	13	2		2	8.0	7.40		35.24	"	
直線配置3本円柱ケース	14	1	1		8.0			35.054	"	
	15	2	2		8.5	6.6	6.0	35.254	"	
	16	4	4		8.6	4.7	4.8	35.259	"	
	17	2	4		7.5	5.7	4.1	35.984	"	
	18	4	2		8.4	7.1	4.0	35.112	"	

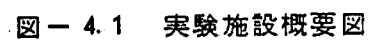
4-3 実験結果とその考察

橋脚の配置相違にもとづく各ケースの特徴をまとめた観察記録を図-4.2.1~4.2.4に、洗掘口形状の等高線図を図-4.3.1~4.3.5に示す。全ケースとも橋脚前面で水位が盛り上がり、側面で下がる傾向になるが、橋脚間隔が広くなるにしたがい、橋脚間の流れの相互干渉が弱まり、単円柱のような流れを示す。2本円柱の場合、 $\ell/D=2$ までは、1本の単円柱のような流れを示し、円柱間の巻き込みも少ない。洗掘深は、前面円柱の先端部が最も深く、洗掘口形状は逆円錐形に近似している。しかし、後流域部の堆積は、徐々に増加しており、中心間隔の違いの影響が生じている。 $\ell/D=4$ 以上に中心間隔が広がると、後方円柱前面も単円柱のような水位を示し、洗掘口形状も後方円柱に単独の逆円錐形に近似した洗掘が生ずる。ただし、上流側円柱で洗掘され、その下流に堆積しようとする砂礫が後方円柱の影響を受けて、さらに後方へ流されることによって、 $\ell/D=10$ までは下流側円柱の洗掘深、範囲とも小さい。しかし、さらに間隔の広い $\ell/D=15$ では円柱間に堆積域が生ずることによって、むしろ下流側円柱で洗掘深、範囲とも大きい結果となっている。したがって、近接橋においては、後方堆積域とその下流に橋脚を設置する場合では洗掘深、範囲にかなりの違いが生ずると考えられる。また、単円柱の場合の後流堆積域からみて、橋脚相互の影響を無くするためには $\ell/D=30$ 以上は必要と思われる。

円柱が不規則の配置である場合は、円柱間へ巻き込む流れが直線配置に比べて激しく、洗掘口形状は円柱前面でハート形に近似した逆円錐形を示す。また、円柱間もかなりの洗掘を生じ、流水に対する遮蔽幅と橋脚の相互干渉によって洗掘を助長させるというような悪影響が強い。

いっぽう、3本円柱の直線配置のケースは、橋脚間隔が狭い場合($\ell_1/D=\ell_2/D=2$)、上流側第1橋脚の乱れが、第2、第3橋脚によって弱められるような流れを示す。この流況の乱れをおだやかにする橋脚配置は、 $\ell_1/D=\ell_2/D=2$ 以下がよいようである。洗掘口形状は橋脚間がある間隔をとるようになると、各橋脚単独に周辺部とは別に、逆円錐形の洗掘口が生ずる。しかし、2本円柱の場合と同様、洗掘された砂礫が、後方円柱の影響を受けて、さらに後方へ運ばれることによって、下流側の洗掘深は小さく、 $\ell_1/D=\ell_2/D=4$ までの結果では、3橋脚一体の領域周辺部が洗掘範囲の傾向を示している。

以上の結果より、橋梁を近接して並列する場合は、両橋脚の軸を直線に配置し、橋脚間の距離 $\ell/D=10$ 以下ならば下流側橋脚は洗掘深、範囲とも上流より少なく、 ℓ/D が小さいほど下流側橋脚の洗掘は軽減される。ただし、両橋脚の軸線と流向が一致しない場合は、反対に洗掘深、範囲ともより助長させ、悪影響が大きい。したがって、橋脚軸と流向を並列して一致させることは河床変化等からして非常に困難であり、両橋脚相互に悪影響を与えない距離をとる必要がある。円柱橋脚の場合、約 $\ell/D=30$ 以上の距離が必要と考えられる。



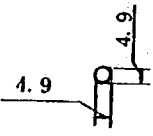
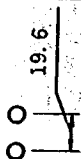
ケース	形 状 (cm)	実 験 結 果 と 考 察	
		流 況	河 床 状 態
1		 盛り上がり	逆円錐形の形、左右対称  円柱前端が一番深い この付近よりゆるやかに堆積の傾向 堆積 この所左右対称でない
2	 $\ell_1/D = 1.0$	1本の円柱のように流れる 	 前端が深い この円、左右対称 ゆるやかに堆積の傾向 堆積 不規則
3	 $\ell_1/D = 2.0$	 巻き込み	 わずかな堆積 洗掘より堆積に移る区間 堆積 左右対称 筋ができている堆積部よりの落こみのためと考える。
4	 $\ell_1/D = 4.0$	 巻き込み	このケースより2つの逆円錐形を形成  堆積 筋

図-4.2.1 実験の観察記録図

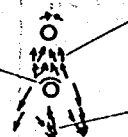
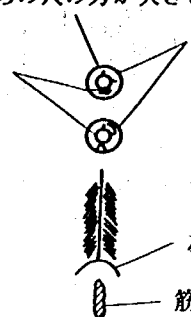
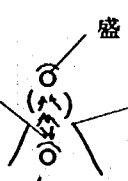
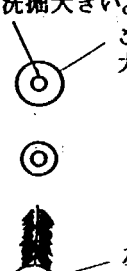
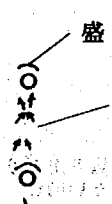
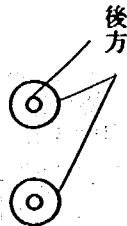
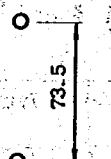
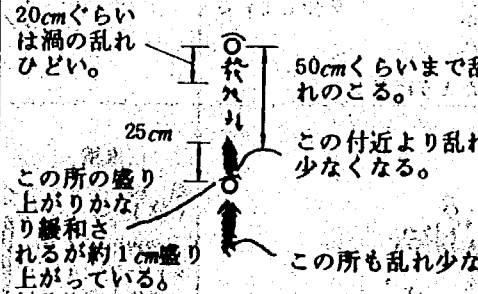
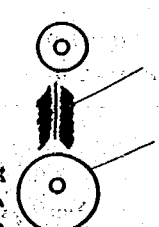
ケース	形 状 (cm)	実 験 結 果 と 考 察	
		流 況	河 床 状 態
5	 $\ell_1/D = 6.0$	周期的にこの円柱にあたった流れが前面円柱に及ぶこともある。  ケース4に比べて円柱間の巻きこみが大きい。これは円柱間の間隔が広がった為、前面円柱の乱れが円柱間に存在すると思われる。	こっちの穴の方が大きい。 
6	 $\ell_1/D = 8.0$	周期的にこの乱れが後方円柱に強くあたり、かなりの力をあたえているようである。  後流域の範囲が少なくなった前面円柱の乱れが円柱間でほとんど消去されるためと思う。	後方より洗掘大きい。 
7	 $\ell_1/D = 10.0$	盛り上がり 	後方よりこちらの方が少し深い穴の大きさだいたい同じであるが前面の方が多少大きい 
8	 $\ell_1/D = 15.0$	20cmぐらひは渦の乱れひどい。 	この堆積が前方円柱の洗掘をさまたげたようである。この穴の方が前方円柱より大きい。 

図-4.2.2 実験の観察記録図

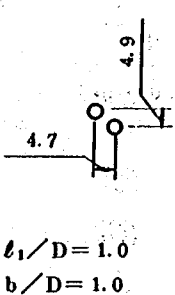
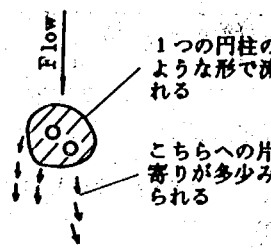
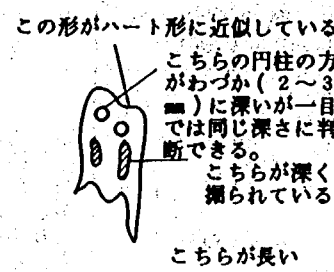
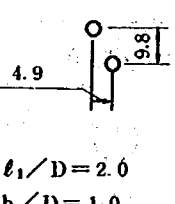
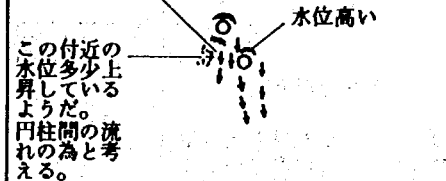
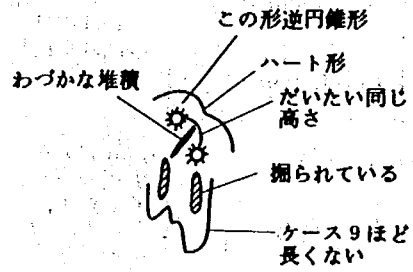
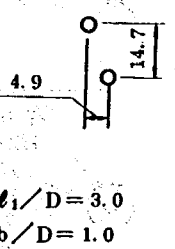
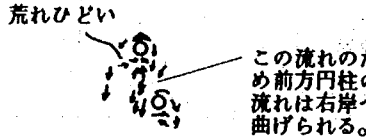
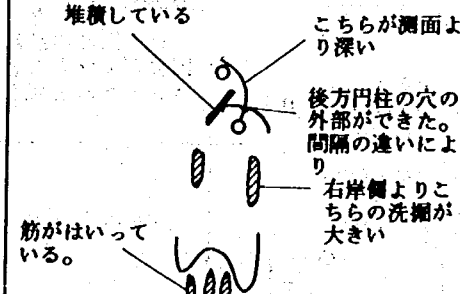
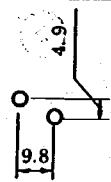
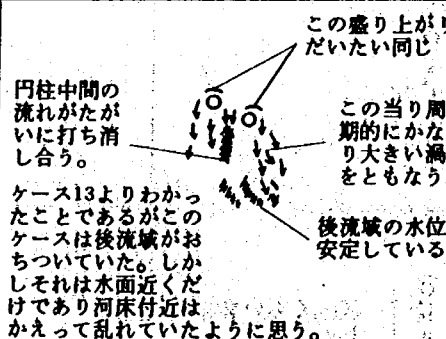
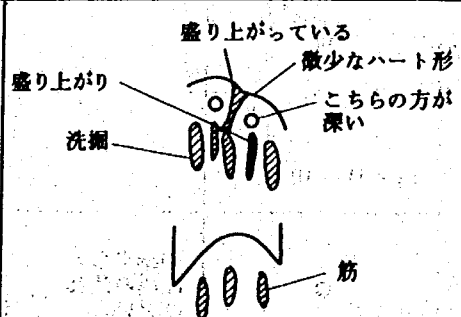
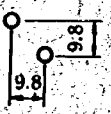
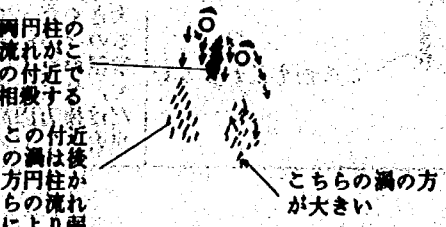
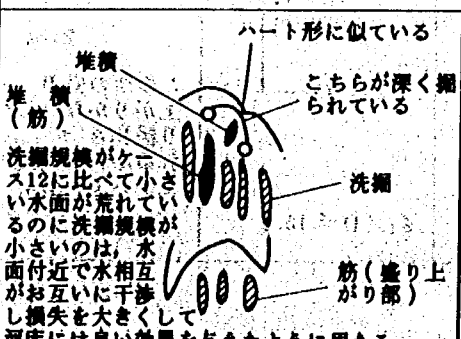
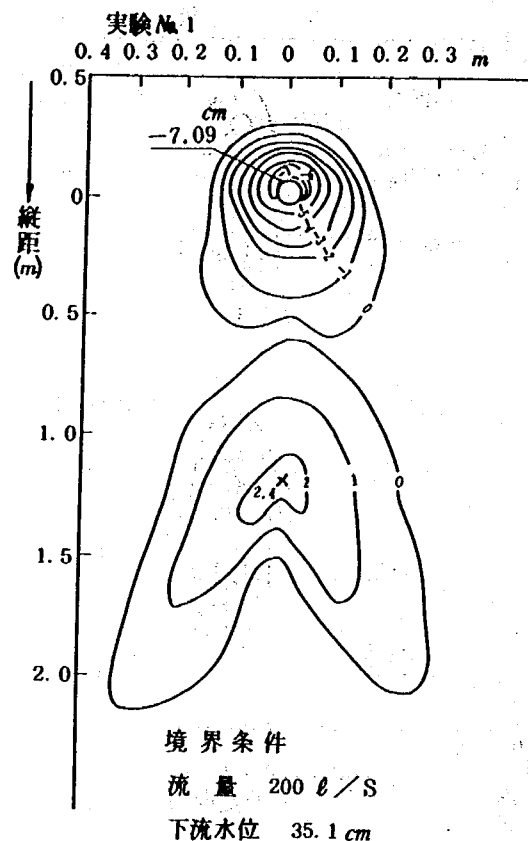
ケース	形 (cm) 状	実 験 結 果 と 考 察	
		流 況	河 床 状 態
9	 $l_1/D = 1.0$ $b/D = 1.0$	 1つの円柱のような形で流れる こちらへの片寄りが多少みられる	 この形がハート形に近似している こちらの円柱の方がわづか(2~3mm)に深いが一目では同じ深さに判断できる。 こちらが深く掘られている こちらが長い
10	 $l_1/D = 2.0$ $b/D = 1.0$	 この流れが目立つ 水位高い この付近の水位多少上昇しているようだ。円柱間の流れの為と考える。	 この形逆円錐形 わづかな堆積 ハート形 だいたい同じ高さ 掘られている ケース9ほど長くない
11	 $l_1/D = 3.0$ $b/D = 1.0$	 荒れひどい この流れのため前方円柱の流れは右岸へ曲げられる。	 堆積している こちらが淵面より深い 後方円柱の穴の外部ができた。間隔の違いにより 右岸側よりこちらの洗掘が大きい 筋ははいっている。
12	 $l_1/D = 1.0$ $b/D = 2.0$	 この盛り上がりだいたい同じ この当り周期的にかなり大きい渦をとまう。 後流域の水位安定している 円柱中間の流れがたがいに打ち消し合う。 ケース13よりわかったことであるがこのケースは後流域がおちついていた。しかしそれは水面近くだけであり河床付近はかえって乱れていたように思う。	 盛り上がっている 洗掘 筋 盛り上がり 洗掘 筋 散少なハート形 こちらの方が深い
13	 $l_1/D = 2.0$ $b/D = 2.0$	 両円柱の流れがこの付近で相殺する この付近の渦は後方円柱からの流れにより弱められる こちらの渦の方が大きい	 ハート形に似ている 堆積 (筋) 洗掘規模がケース12に比べて小さい水面が荒れているのに洗掘規模が小さいのは、水面付近で水相互がお互いに干渉し損失を大きくして河床には良い効果を与えたように思える。 こちらが深く掘られている 筋 (盛り上がり部)

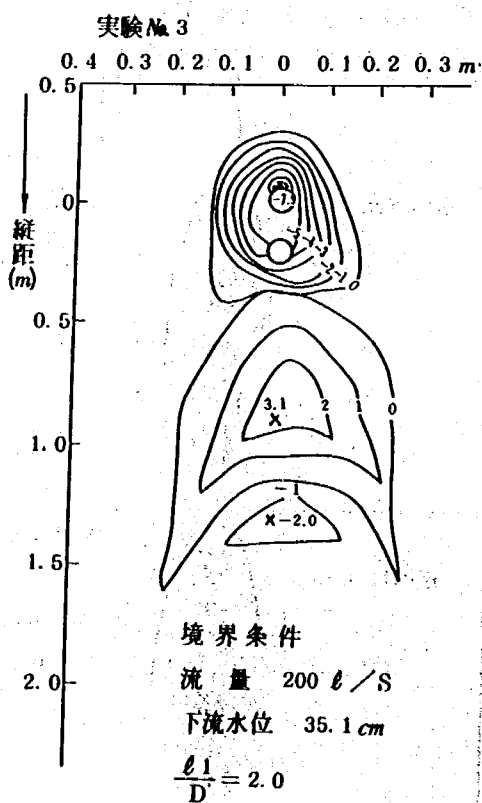
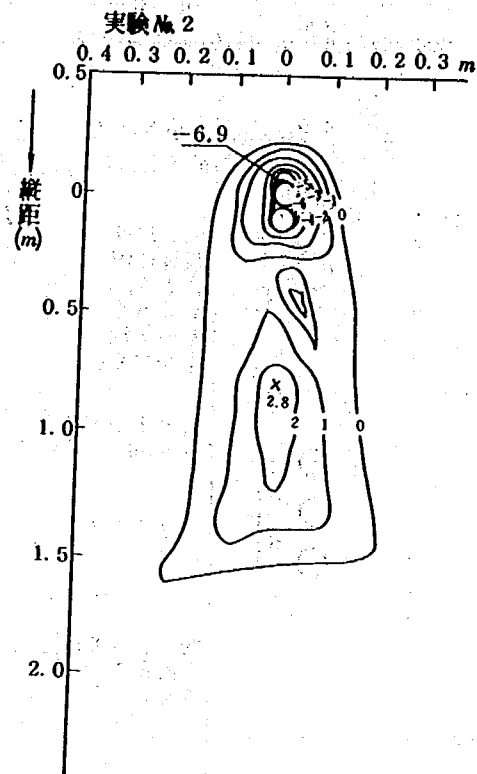
図-4.2.3 実験の観察記録図

ケース	配置形状 (cm)	水 理 現 象	
		流 況	河 床 状 態
14			
15			
16			
17			
18			

図-4.2.4 実験の観察記録図



境界条件
流量 $200 \ell / S$
下流水位 35.0 cm
 $\frac{\ell 1}{D} = 1.0$
 $D = 4.9 \text{ cm}$



境界条件
流量 $200 \ell / S$
下流水位 35.0 cm
 $\frac{\ell 1}{D} = 4.0$

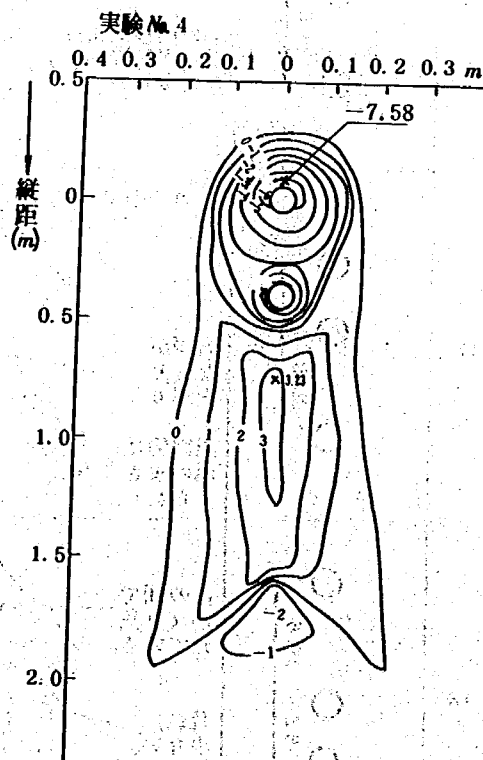


図-4.3.1 洗掘深形状比較図

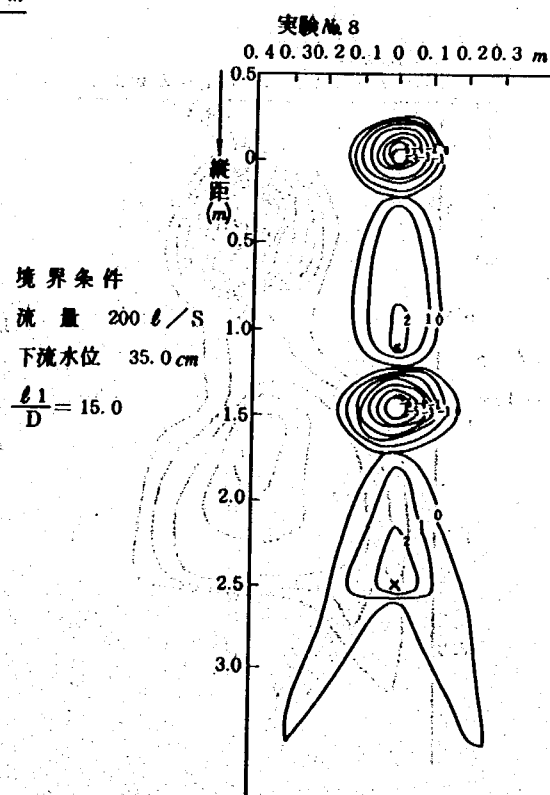
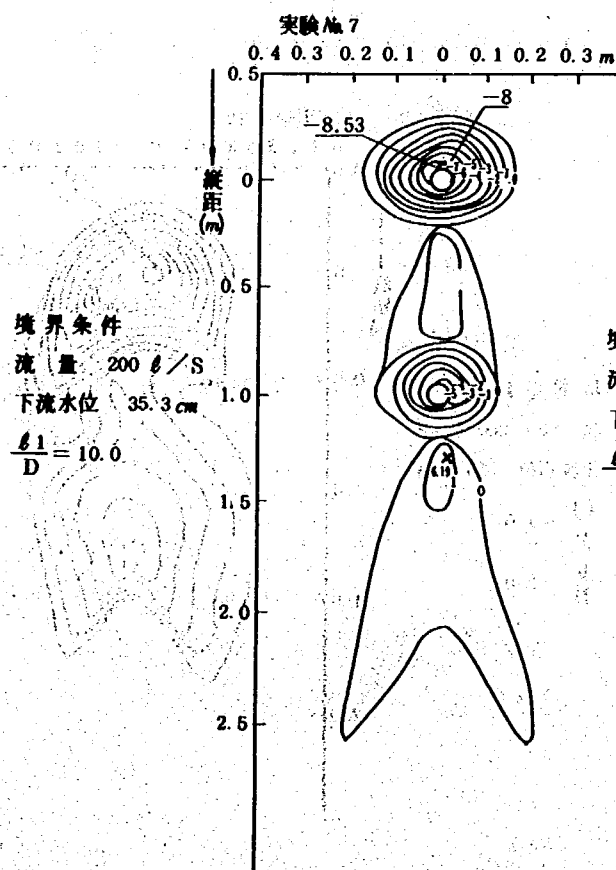
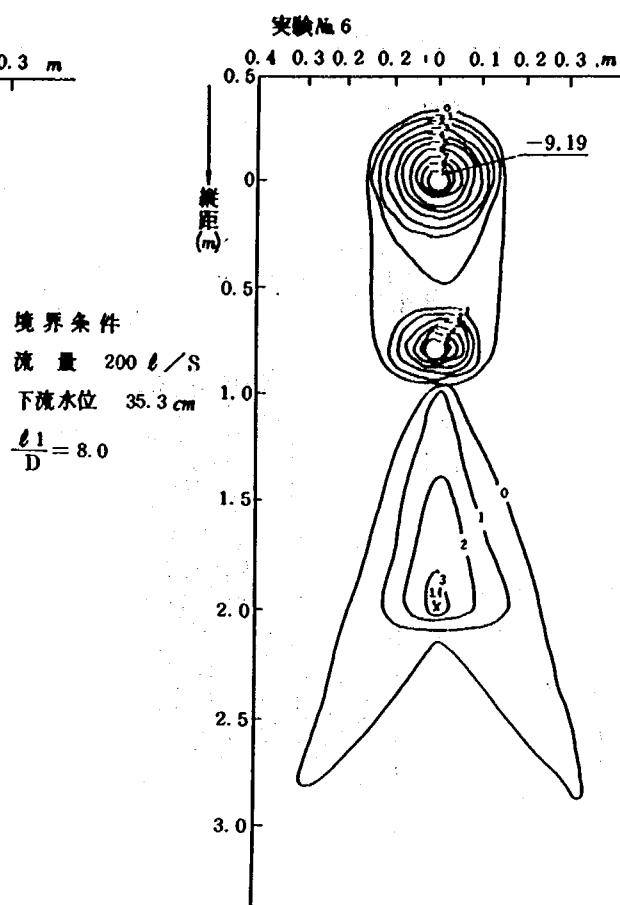
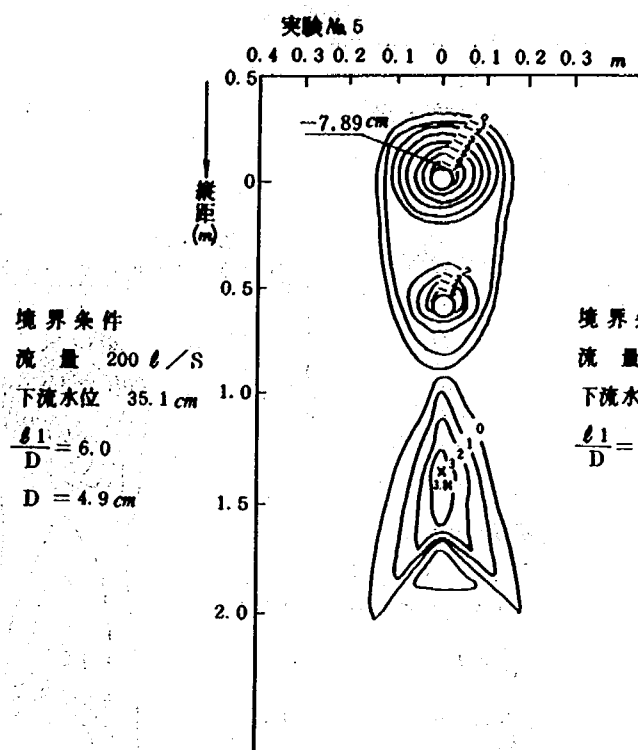


图 4.3.2 洗網深形状比較図

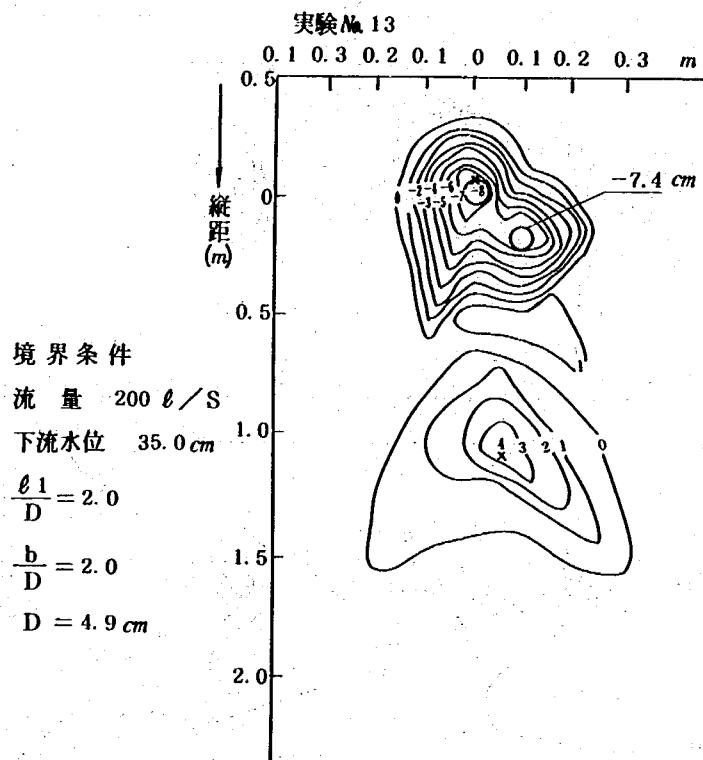


図- 4.3.4 洗掘深形状比較図

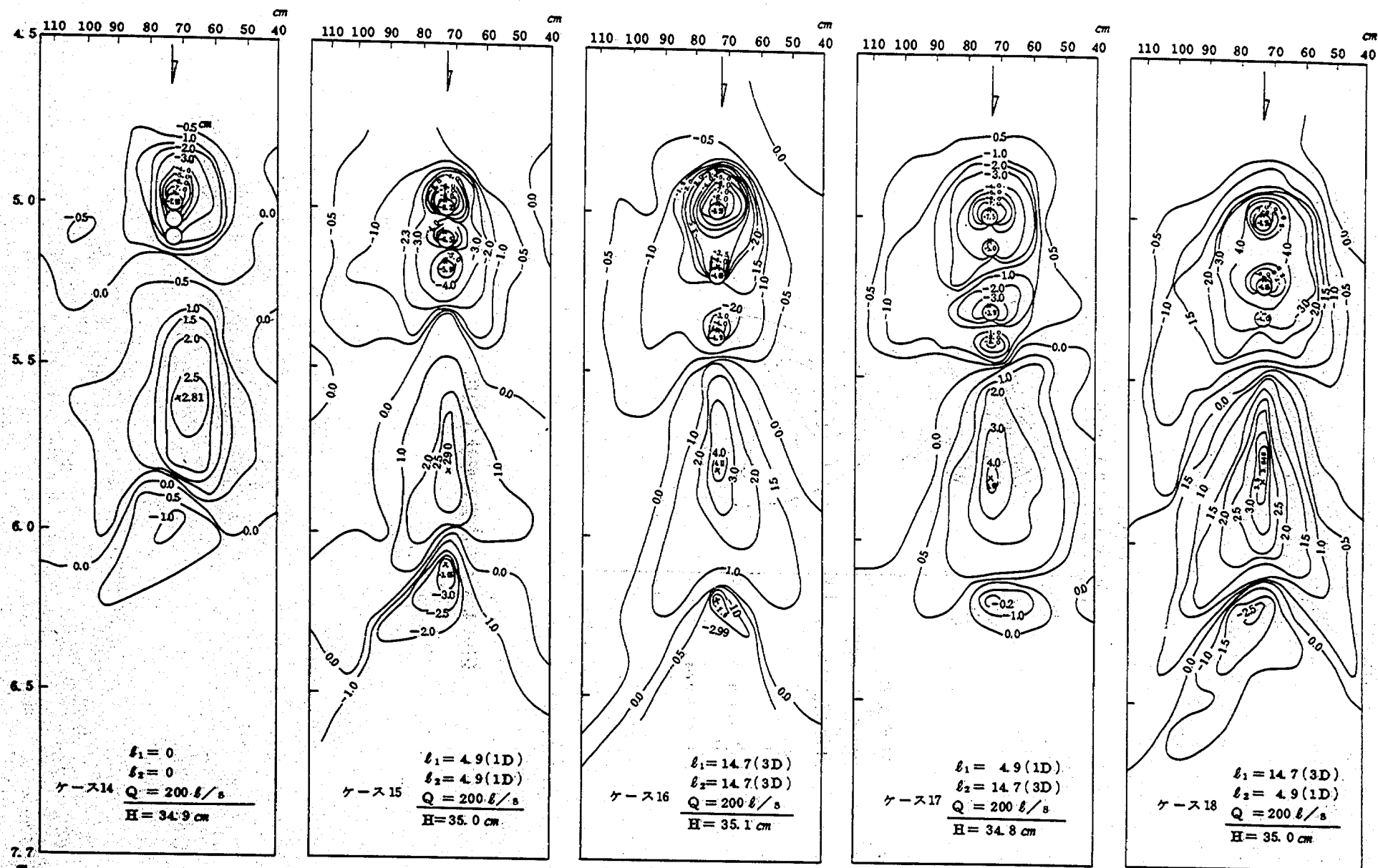


図-4.3.5 洗掘深形状比較図

第5章 橋脚の洗掘防止に関する検討

5-1 洗掘防止工の敷設範囲と形状に関する実験

橋脚の形状や配置によって、洗掘は若干軽減されるが、洗掘をうけても安全なように、その分を見込んだ根入れを十分行う必要がある。しかし、このような場合でも多少の洗掘は免れないであろうし、また種々の制約や外力条件の増大、および河床低下などによる根入れ不足等の対策として、洗掘防止工が必要となる。ここでは洗掘防止工として橋脚周囲を碎石等で保護した場合の実験を行い、洗掘を防止するための敷設範囲と形状について以下に検討を行った。

5-1-1 実験概要と実験ケース

実験は、前述した図-2.1.2に示す長さ30m、幅2.0m、深さ1.5mの構造物水路と、図-2.1.3に示す長さ100m、幅6.0m、深さ2.4mの大型水路を用いて実施した。両水路内には、 $d_m = 0.22 \text{ mm}$ の細砂を底質材料として敷き結めてある。対策工として、ブロック積み(乱積み)や捨石による工法を想定して、実験では、限界掃流力以下に相当する碎石($d = 20 \sim 30 \text{ mm}$)と異型ブロックモデルを橋脚周辺に敷設することによって検討した。

洗掘現象の原因として支配的な要素である橋脚前面の下降流を制限する上で、有効的と考えられる敷設形状として、橋脚の基部周辺における保護工を図-5.1に示すように、円錐形

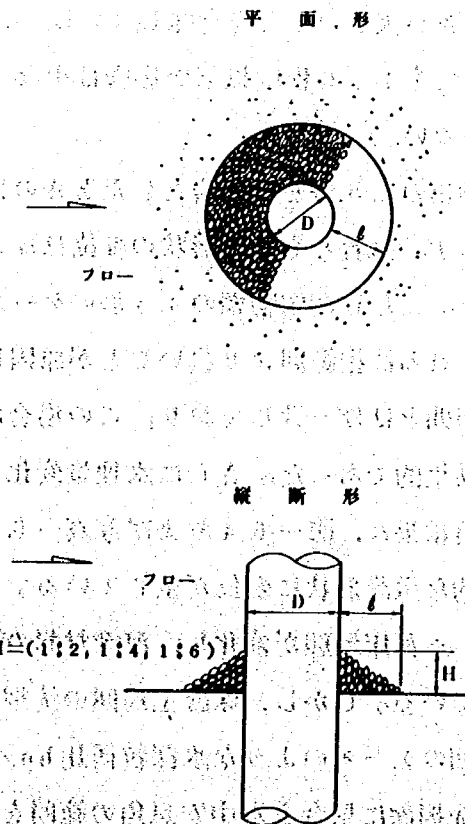


図-5.1 橋脚の保護形状図

状に積んで、この法勾配と敷設範囲について、試行錯誤的な比較検討行って、適切な設計諸元を求めた。実際に法勾配は 1 : 2, 1 : 4, 1 : 6 の 3 種類、保護工の敷設範囲は、ピー幅の 1.5 倍と 2.0 倍の同心円内の 2 種類とし、表— 5. 1.(1)に示すような水理量を与えた。

以上の実験は構造物水路を用いて検討を進めたが、さらに実河川の問題として対策上の安全性を高める上で、水理量の変動に対する対策工の追従性の把握の必要性が生じてくる。大型水路ではこのような観点から同一諸元の対策工について、4 種類の流量を小さい順に通水して、各々の状況を観測した。実験の要領はまず規定通りの勾配に河床を平坦に整形し、橋脚周辺は敷設範囲を橋脚幅の 2 倍の同心円内とし、保護工の法勾配を 1 : 6 としたのち、表— 5. 1.(2)に示すような流量を小さい順に 30 分～ 2 時間通水させた。

5 — 1 — 2 実験結果とその考察

橋脚周囲を橋脚幅の 1.5 倍の範囲について、内錐形状に保護敷設し、この保護工の法勾配の違いによる結果を、図— 5. 2 に示した。法勾配が 1 : 2, 1 : 4, 1 : 6 と緩くなるにしたがい、碎石の移動流下も少なく、保護工自体の沈下も少ない。さらに、実験後の状況も写真— 5. 1. 1 ～写真— 5. 1. 3 に示すように、とくに顕著な相違点としては、橋脚下流部の河床変動状況にある。法勾配が 1 : 2 のケースは、橋脚直下流中心から下流方向に、稜線のごとく土砂の高まりが生じ、その両側は大きく凹んでいる。これに対し、法勾配が 1 : 6 のケースでは、変動の度合いが小さくなっており、法勾配によって橋脚前面の下降流の規制が可能であっても、橋脚直下流での影響が大きいことを意味している。したがって、保護工の法勾配は吸い出しによる沈下等を考慮しても 1 : 6 程度以下が影響は少なく、下降流を制限することによる有意な効果は得られていない。

いっぽう、保護範囲を橋脚幅の 1.5 倍と 2.0 倍としたときの比較検討結果を図— 5. 3 および写真— 5. 1. 3 ～ 5. 1. 4 に示す。両者とも敷設形状の変位はほとんどなく、洗掘防止工としての機能は十分と考えられた。ただし、橋脚幅の 1.5 倍のケースは敷設周囲が若干低下する傾向が強く、3 — 4 で推定される洗掘範囲より狭いことが原因している。橋脚幅の 2.0 倍のケースは、推定される洗掘範囲とほぼ一致しており、この場合は、敷設周囲の変化もなく、洗掘防止範囲としてはより効果的であった。さらに水理量変化に対する追従性の把握を目的とした大型水路における実験結果は、図— 5. 4 および写真— 5. 2. 1 ～ 5. 2. 4 に示すように、水理量の増加とともに平面的な敷設形状に変位が生じている。とくに水理量の大きい場合は、水路床全体が Upper Regime へ河床形態が変化し、河床材料の吸い出しによって保護工の法勾配 (1 : 6) が平らになっている。しかし、保護工周囲の洗掘は生じておらず、洗掘深の推定で述べているように、今回のケースのような水深粒径比 h_o/d_m の範囲では洗掘深にピークを持つことにより、最大洗掘深に見合う水中安息角の範囲を保護することによって、洗掘の防止が可能であることが明らかとなった。ただし、吸い出し防止工法や保護工の屈撓性を考慮する必要はあろう。

表-5.1(1) 実験条件一覧表

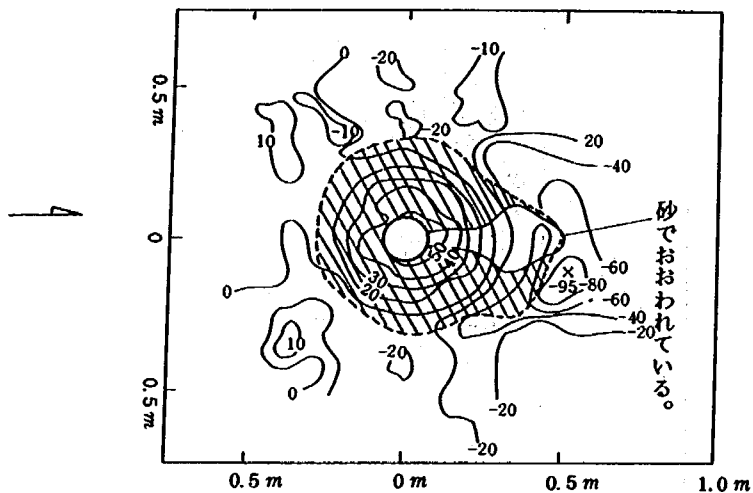
実験 No	D (cm)		Q (ℓ/s)	dm (cm)	h _o		h _o /D		h _o /dm		U _o (cm/s)		Fr(U _o /√gh _o)		Z		Z/D		通水時間	備 考
	上 流	下 流			上 流	下 流	上 流	下 流	上 流	下 流	上 流	下 流	上 流	下 流	上 流	下 流	上 流	下 流		
1	140	140	105	0.022	29.4	30.2	2.10	2.16	1340	1370	17.9	17.4	0.10	0.10	24	31	0.17	0.22	2時間	構造物水路における 実験
2	"	"	255	"	30.8	31.1	2.20	2.27	1400	1410	41.4	41.0	0.24	0.24	99	78	0.71	0.56	"	
3	"	"	255	"	31.3	31.1	2.24	2.22	1420	1410	40.7	41.0	0.23	0.24	30	41	0.21	0.29	"	
4	"	"	255	"	30.1	31.1	2.15	2.22	1370	1410	42.4	41.0	0.25	0.24	57	47	0.41	0.34	"	
注: D: ピアーモデル外径 h _o : 各モデル上流側最終水深 dm: 底質材料の平均粒径 Q: 流 量 U _o : 各モデル上流側平均流速 Fr: フルード数 Z: 最大洗掘深																				

表-5.1(2) 実験条件一覧表

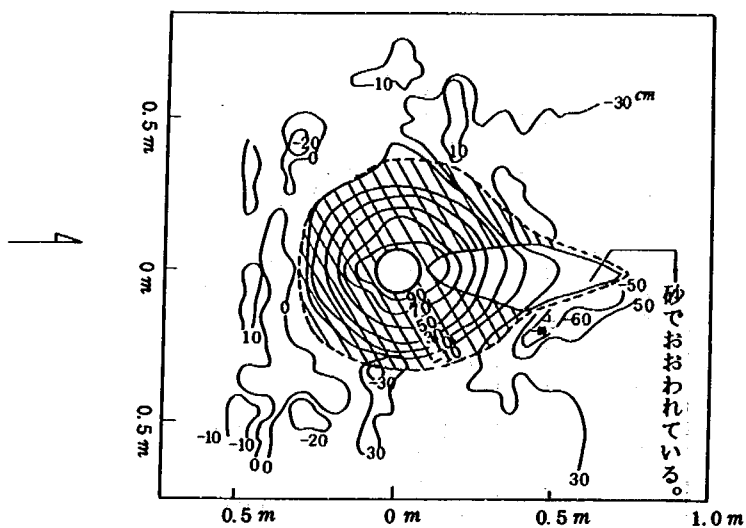
実験 No	D (cm)			Q (ℓ/s)	h ₀			h ₀ /D			dm (cm)	h ₀ /dm			U ₀ (m/sec)			Fr (U ₀ /√gh ₀)			Z (mm)			Z/D			初期 河床 勾配	通水 時間 (分)	
	上流	中央	下流		上流	中央	下流	上流	中央	下流		上流	中央	下流	上流	中央	下流	上流	中央	下流	上流	中央	下流	上流	中央	下流			
1	8.9	3.2	16.5	180	8.6	8.5	8.7	0.97	2.66	0.53	0.022	390	390	400	0.35	0.35	0.35	0.38	0.39	0.37	85	28	29	0.88	0.88	0.25	1/400	120	大型水路 による実 験
2	"	"	"	250	9.3	8.4	8.5	1.05	2.63	0.58	"	420	380	390	0.45	0.50	0.50	0.47	0.55	0.54	11	38	37	1.19	1.19	0.30	"	60	
3	"	"	"	320	8.6	8.3	9.2	0.97	2.59	0.56	"	390	380	370	0.62	0.64	0.58	0.68	0.71	0.61	28	28	39	0.68	0.68	0.36	"	30	
4	"	"	"	330	10.2	9.5	9.5	1.15	2.97	0.58	"	460	430	430	0.64	0.68	0.68	0.64	0.71	0.71	11	29	37	0.63	0.63	0.36	"	30	

注：D：ピアーモデル外径
Q：流 量
h₀：各モデル上流側最終水深（モデル上流側平均河床高からの値）
dm：河床材料の平均粒径

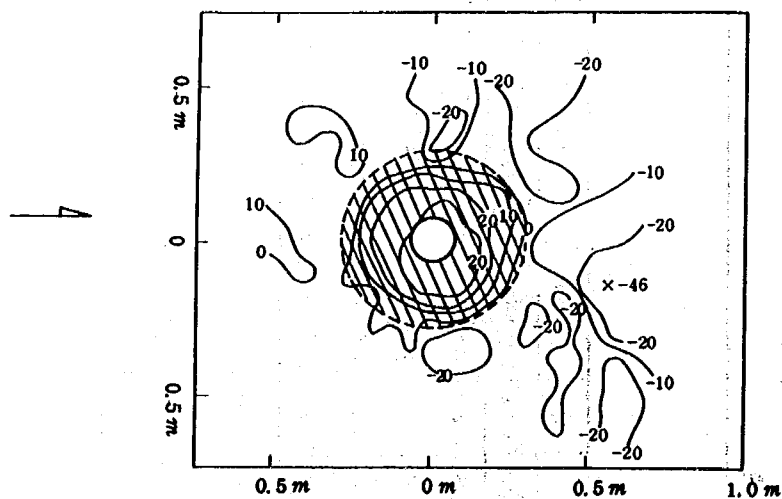
U₀：各モデル上流側平均流速
Fr：フルード数
Z：最大洗掘深（モデル上流側平均河床高からの値）



$h_o = 30.8 \text{ cm}$
 $D = 14.0 \text{ cm}$
 $h_o/d_m = 1400$
 $Fr = 0.24$
 $h_o/D = 2.20$
 $Z/D = 1.1$ (推定)
 $L = 1.5 D$
 $I = 1 : 2$



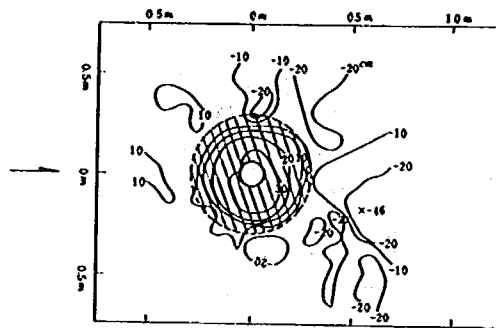
$h_o = 31.1 \text{ cm}$
 $D = 14.0 \text{ cm}$
 $h_o/d_m = 1410$
 $Fr = 0.24$
 $h_o/D = 2.22$
 $Z/D = 1.1$ (推定)
 $L = 1.5 D$
 $I = 1 : 4$



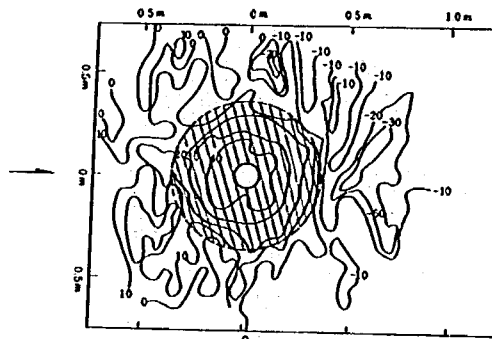
$h_o = 31.3 \text{ cm}$
 $D = 14.0 \text{ cm}$
 $h_o/d_m = 1420$
 $Fr = 0.23$
 $h_o/D = 2.24$
 $Z/D = 1.1$ (推定)
 $L = 1.5 D$
 $I = 1 : 6$

※ ハッチ部分はブロック敷設範囲を示す。

図-5.2 保護工の法勾配の違いによる比較図



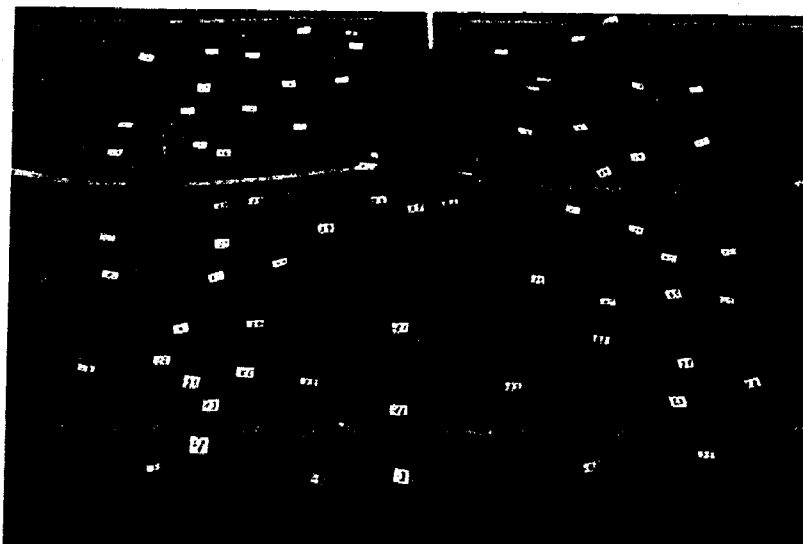
$h_0 = 31.3 \text{ cm}$
 $D = 14.0 \text{ cm}$
 $h_0/d_m = 1470$
 $Fr = 0.23$
 $h_0/D = 2.24$
 $Z/D = 1.1$ (推定)
 $L = 1.5D$



$h_0 = 30.1 \text{ cm}$
 $D = 14.0 \text{ cm}$
 $h_0/d_m = 1370$
 $Fr = 0.25$
 $h_0/D = 2.50$
 $Z/D = 1.1$ (推定)
 $L = 2.0D$

※ ハッチ部分は、ブロック敷設範囲を示す。

図－5.3 保護工範囲の違いによる比較図



ブロック敷設勾配 1 : 2

〃 〃 範囲 1.5 D

$Q = 255 \text{ } \ell/\text{S}$

$h_0 = 30.8 \text{ cm}$

$D = 14.0 \text{ cm}$

$d_m = 0.022 \text{ cm}$

$h_0/d_m = 1400$

$U_0 = 41.4 \text{ cm/S}$

$Fr = 0.23$

$h_0/D = 2.20$

Z/D (推定) = 1.1

ℓ (推定) = 2.07 D

写真－5.1.1 通水後形状の状態（下流から撮影）

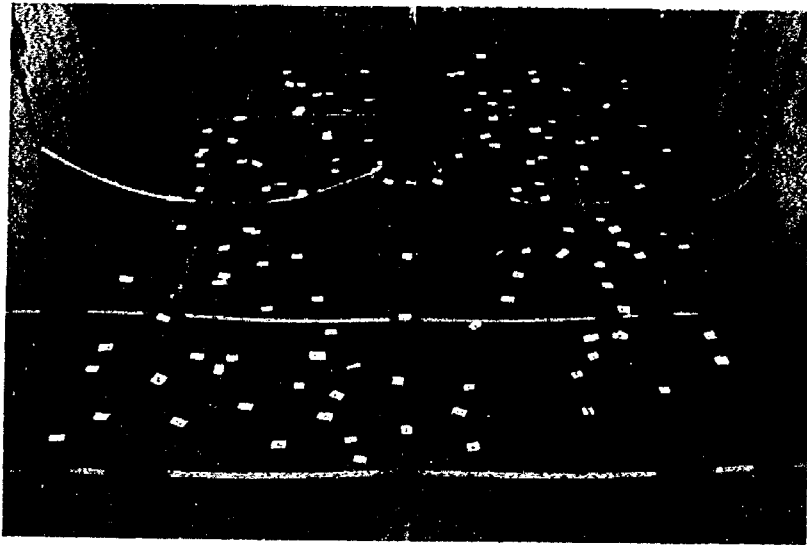


写真 - 5. 1. 2 通水後形状の状態（下流から撮影）

ブロック敷設勾配 1 : 4
" " 範囲 1.5 D

$$Q = 255 \ell/S$$

$$h_o = 31.1 \text{ cm}$$

$$D = 14.0 \text{ cm}$$

$$d_m = 0.022 \text{ cm}$$

$$h_o/d_m = 1413$$

$$U_o = 41.0 \text{ cm/S}$$

$$Fr = 0.24$$

$$h_o/D = 2.22$$

$$Z/D (\text{推定}) = 1.1$$

$$\ell (\text{推定}) = 2.07 D$$

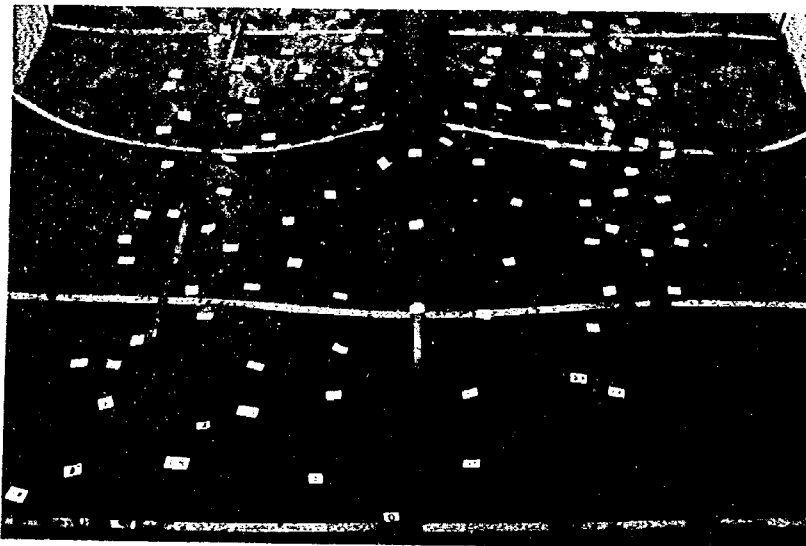


写真 - 5. 1. 3 通水後形状の状態（下流から撮影）

ブロック敷設勾配 1 : 6
" " 範囲 1.5 D

$$Q = 255 \ell/S$$

$$h_o = 31.3 \text{ cm}$$

$$D = 14.0 \text{ cm}$$

$$d_m = 0.022 \text{ cm}$$

$$h_o/d_m = 1423$$

$$U_o = 40.7 \text{ cm/S}$$

$$Fr = 0.23$$

$$h_o/D = 2.24$$

$$Z/D (\text{推定}) = 1.1$$

$$\ell (\text{推定}) = 2.07 D$$



写真 - 5. 1. 4 通水後形状の状態（下流から撮影）

ブロック敷設勾配 1 : 6
" " 範囲 2.0 D

$$Q = 255 \ell/S$$

$$h_o = 30.1 \text{ cm}$$

$$D = 14.0 \text{ cm}$$

$$d_m = 0.022 \text{ cm}$$

$$h_o/d_m = 1368$$

$$U_o = 42.3$$

$$Fr = 0.25$$

$$h_o/D = 2.50$$

$$Z/D (\text{推定}) = 1.1$$

$$\ell (\text{推定}) = 2.07 D$$

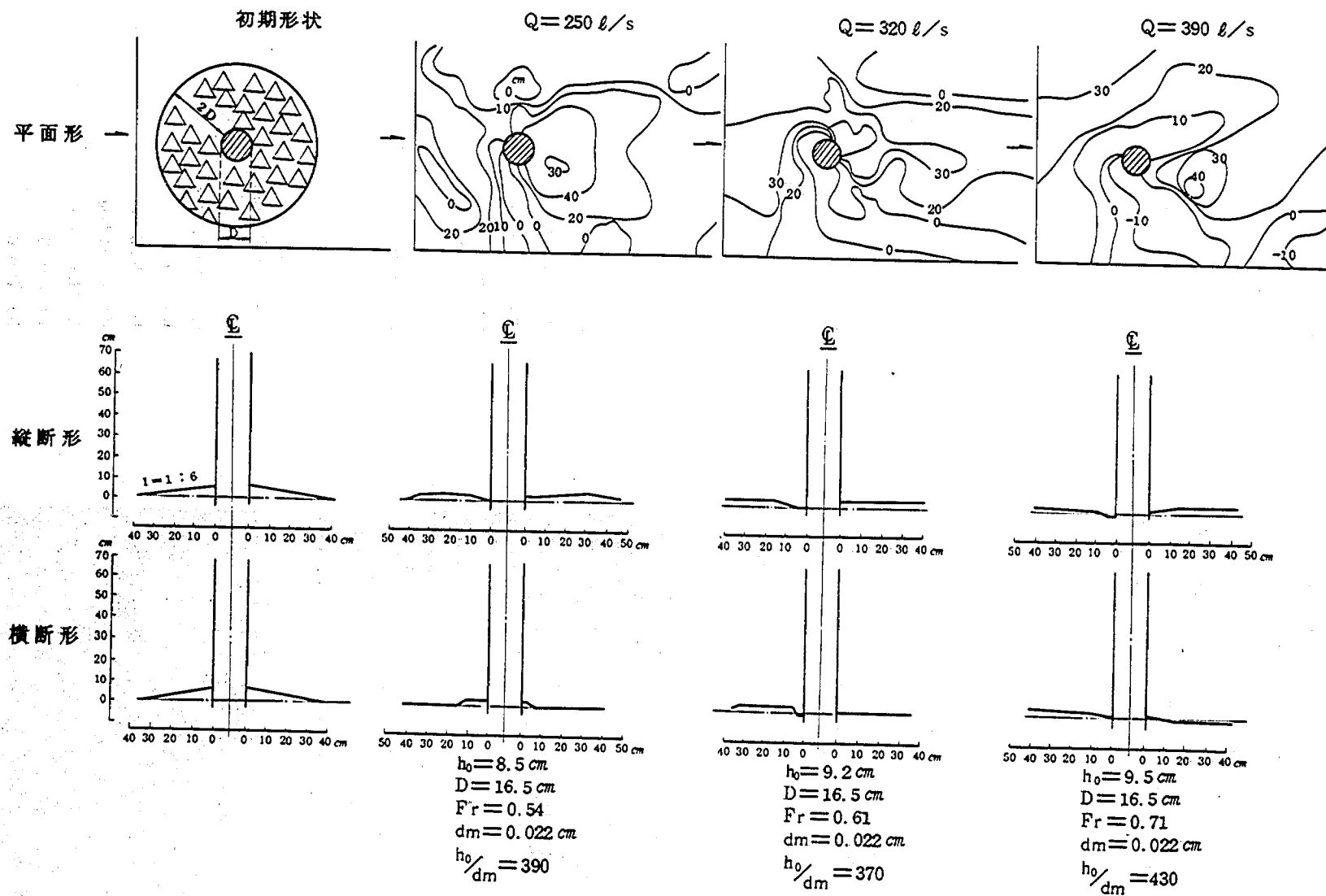


図-5.4 水理量変化による形状比較図



写真－5.2.1 通水後形状の状態(下流から撮影)

ブロック敷設勾配 1 : 6
 " " 範囲 2.0 D
 $Q = 180 \ell / S$
 $h_o = 8.7 \text{ cm}$
 $D = 16.5 \text{ cm}$
 $dm = 0.022 \text{ cm}$
 $h_o / dm = 400$
 $Fr = 0.7$
 $h_o / D = 0.53$
 $Z / D (\text{推定}) = 0.85$
 $\ell (\text{推定}) = 1.60 D$



写真－5.2.2 通水後形状の状態(下流から撮影)

ブロック敷設勾配 1 : 6
 " " 範囲 2.0 D
 $Q = 250 \ell / S$
 $h_o = 8.5 \text{ cm}$
 $D = 16.5 \text{ cm}$
 $dm = 0.022 \text{ cm}$
 $h_o / dm = 390$
 $Fr = 0.54$
 $h_o / D = 0.52$
 $Z / D (\text{推定}) = 0.90$
 $\ell (\text{推定}) = 1.69 D$



写真－5.2.3 通水後形状の状態(下流から撮影)

ブロック敷設勾配 1 : 6
 " " 範囲 2.0 D
 $Q = 320 \ell / S$
 $h_o = 9.2 \text{ cm}$
 $D = 16.5 \text{ cm}$
 $dm = 0.022 \text{ cm}$
 $h_o / dm = 370$
 $Fr = 0.61$
 $h_o / D = 0.56$
 $Z / D (\text{推定}) = 1.0$
 $\ell (\text{推定}) = 1.88 D$



写真－5.2.4 通水後形状の状態(下流から撮影)

ブロック敷設勾配 1 : 6
 " " 範囲 2.0 D
 $Q = 390 \ell / S$
 $h_o = 9.5 \text{ cm}$
 $D = 16.5 \text{ cm}$
 $dm = 0.022 \text{ cm}$
 $h_o / dm = 430$
 $Fr = 0.71$
 $h_o / D = 0.58$
 $Z / D (\text{推定}) = 1.1$
 $\ell (\text{推定}) = 2.07 D$

以上の結果より、洗掘防止工としての敷設範囲は、第3章で検討した最大洗掘深の推定と、それに見合う水中安息角による推定洗掘範囲を保護することによって、洗掘が防止できることが明らかとなった。ただし、河道特性による河床波の発達や、流れが蛇行する場合には、さらに敷設範囲を大きくするなど、設計に際しては十分河川の状態を反映させる必要がある。

5-2 洗掘防止工法の概要と問題点

橋脚周囲の洗掘防止工としては、種々の根固工法が考えられる。根固工の基本的な性能としては河床とのなじみが良く、河床変動に追従して変形するという屈撓性が要求される。

このような機能をもつものとして、古くからいろいろな方法が考え出され実用化されてきた。根固工法には大別して捨石工、蛇籠工、沈床工および異型ブロック工等によるものがあるが、その歴史はかなり古く、人間が沖積平野に生活の基盤を見い出すと共に改良、発展してきたものである。

近代的な河川改修が行われるようになった明治期以降では、蛇籠工や沈床工が根固工の主流であったが、これらの工法は、耐久性や施工性の面で問題が残ったこと、急流河川ではその強度をさらに増加させ、根固の効果をより確実に期待する必要があることから、各種の異型ブロックを主体とした根固工法の開発、応用へと向かうようになった。しかし、形状等の異なる多種類のブロックが開発使用されてきたにもかかわらず、その機能や性能についてほとんど検討が加えられていない。したがって、洗掘防止だけにしぼってみても、各種ブロック類の効用を適切に評価、判断することは難しく、このことがこのように多種類のブロックを開発し、使用している最大の理由といっても過言ではない。いっぽう、現実の河道ではその河相や流況の違いも大きく、これら多種類のブロックが全ての河川に同様に適用可能というものでないことは明らかであって、河川特性との関連から適切な工種、工法の選定が行われなければならないことはいうまでもない。

異型ブロック類による洗掘防止工としては、平型の屈撓性を重視したものが望ましく、また形状だけではなく、重量、結線の有無、対策範囲等も考慮しなければならない。しかし、異型ブロックにはもともと海浜における消波を主目的に開発使用されてきたものも多く、これらのブロックは本来、波力に対する安定性を重視した形状をもっているが、河川のような一方向流の場では単体として移動しやすい欠点もあり、かつ、河川の根固工として開発されたブロック類と比べて、洗掘防止という面に問題を残すブロック類も少なくない。とくに根固工としての基本的な要件は、洗掘防止と洗掘を若干生じて河床となじんで屈撓し、構造物を保護することとあり、そのためには、単体ブロックではなく、群としてのブロックの機能をもつ必要がある。したがって、連結を可能とするようなブロックの方が望ましく、とくに層積可能な場合には、屈撓性の良い連結されたブロックが望ましいことが指摘できる。

5-3 根固ブロックによる洗掘防止工法

5-3-1 河道特性と根固工法

洗掘防止工法は敷設される河道の特性と密接な関連をもっている。扇状地の急流河川では河床の変動も激しく、水衝部の激流による堤防災害も頻発しており、洗掘対策には大重量の根固工が必要となる。洗掘対策としての根固工はこのような河道特性、とくに河床材料の大きさ、河床勾配および河床に形成される砂礫堆を中心とした蛇行特性と密接な関係をもっている。これらの諸特性量からみると河道は一般に表-5.2のような形で大別される。

表-5.2 河道分類

分類	河道の特徴
1 山地河道	峡谷や狭窄部を流れる河道 河床材料は礫から砂までいろいろある。
2 扇状地河道	扇状地を形成する河道 河床材料は礫を主体とする。 河床勾配が大略 $1/500$ より急である。
3 中間地河道	自然堤防を沖積平野に形成する。 河床材料は砂および小砂利を主体とする。 河床勾配が $1/500 \sim 1/5,000$ 程度である。
4 三角洲河道	三角洲を形成する。 河床材料が細砂を主体とする。 河床勾配が大略 $1/5,000$ 程度以下である。
5 河口部河道	河口部で波浪や潮汐変動の影響を受ける。

この分類の基準は主に地形特性からみたものであるが、長年月にわたって人工の力によらないで河道および沖積地は、その形成に作用した営力の差を反映しており、扇状地河道では土砂も粗礫～小砂利が主体であるが、緩流になれば砂、シルト分に変化していく。そして河道内の砂礫堆の形成条件や河床変動特性も変化するので、このような河道特性の相違を考慮した工法、工種の選定が必要とされる。

一般的傾向として、扇状地河道では層積で連結可能な重量の大きなブロック類、中間地、三角洲河道では乱積あるいは層積で結線のない1～2t級のブロックが多用されている。

5-3-2 ブロック重量と各種水理量との関係

ブロックの重量は、ブロック群としての移動限界、沈下、耐洗掘抵抗特性、粗度としての機能および施工性、環境条件、経済性等から決められるべきものである。

これらの機能は、河川工学的に合理的に判断されなければならないが、ここではブロック単体重量と水理諸量との関係を現地の敷設例、実験結果等より以下に検討した。

(1) 河床材料の平均粒径と使用されているブロック重量との関係

図-5.5は、ブロック重量と河床材料の大きさを、施工数で分類したものである。これによれば、河床材料が大きいほど重量の大きいブロックを使用している傾向が見られる。一般に、扇状地河道では、河床礫も大きく、緩流になるほど砂、シルトに変化していくので、これを総合的に勘案すれば、上流ほど大きなブロック、下流では1t級のブロックが多用されることを示している。図によれば $dm=2mm$ 以下の砂河川では、1t、2tのブロックが多いが、2t級のは流速が大きいとか、河床勾配が急とかの条件で大きくなっていると考えられる。また、 $dm=50mm$ 以上の礫河川では3t級以上のブロックの占める割合が多くなることが判断される。

(2) 計画高水時断面平均流速とブロック重量

図-5.6は計画高水時断面平均流とブロック重量の関係を敷設数で分類したものである。これによれば流速が大きくなるにつれて、重量が大きくなる傾向がある程度うかがえる。とくに $4m/s$ を超える流速になると2t級以上のものが増え、 $5m/s$ 以上では3t級以上の重量のブロックが数多く施工されるようになってくる。

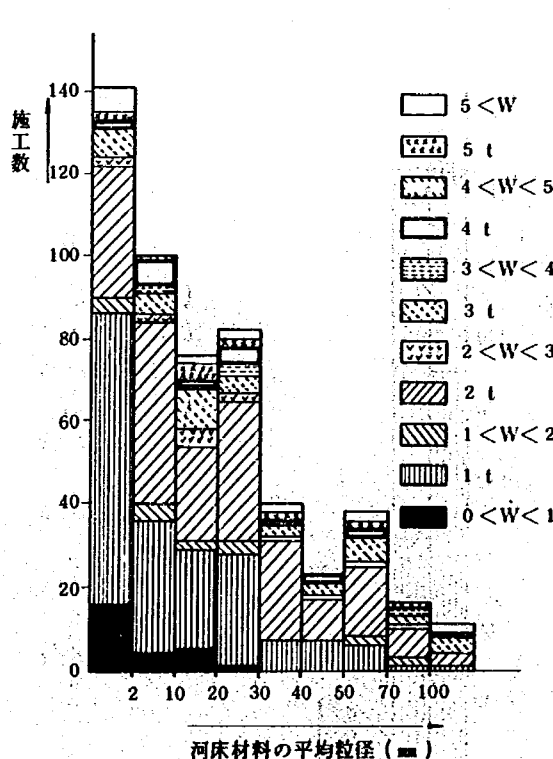


図-5.5 河床粒径とブロック重量の関係

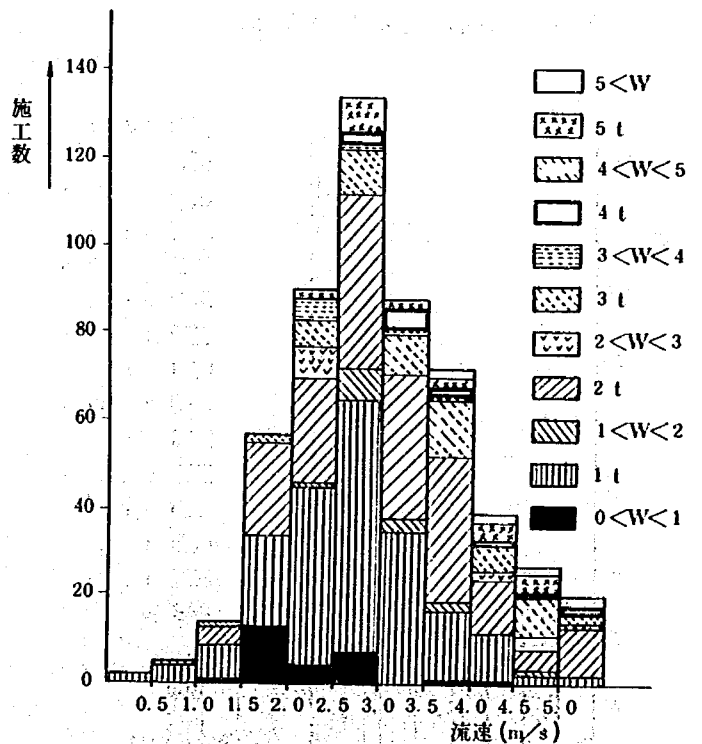


図-5.6 計画高水時平均流速とブロック重量の関係

なお、砂礫堆が発達している河川等では、中小洪水において局所的に大きな流速が生じることがある。また、流れが蛇行する場合には、局所的な流速は平均流速より相当大きくになるので、設計に際しては十分河川の状態を反映させる必要がある。

(3) 計画高水勾配とブロック重量の関係

図-5.7は計画高水勾配とブロック重量の関係を調べたものである。これによれば、水面勾配が急になる程、ブロック重量が大きくなる傾向が判断される。特に $I = 1/300$ 以上の急勾配の河道では3 t級以上のブロックが多用され、 $1/2000$ 以下の緩流河川では1 t級ブロックが主となっており、この部分で1 tを超えるブロックを適用する場合は特殊な条件(流速が早いか、とくに重要な地点か、湾曲部の異常な深掘れ地点かなど)をもつものと判断される。

(4) 掃流力とブロック重量の関係

図-5.8は、敷設事例より掃流力($I \times h$, I : 計画高水勾配, h : 計画高水時水深)とブロック重量との関係を調べたものである。実河川では、 Ih は、 $0.2 \sim 0.5 \times 10^{-2}$ (m)程度の範囲にあるものが多くて、このため、敷設例についても特記されるような形で、抽出される事項はないが、この図によれば、 $Ih > 2.0 \times 10^{-2}$ (m)では、ブロック重量が2 t以上のものが多く、 3.0×10^{-2} (m)以上では、3~4 t級のブロックが多用される傾向にあるといえる。

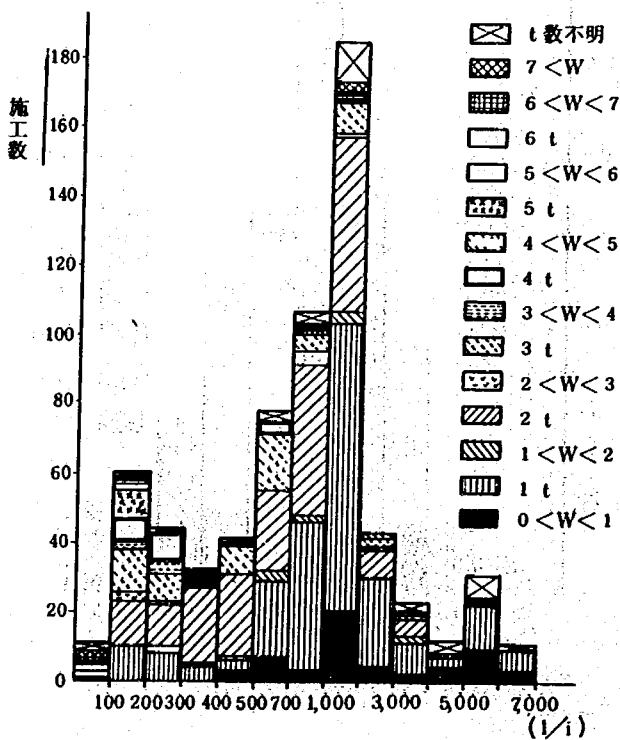


図-5.7 計画高水勾配とブロック重量の関係

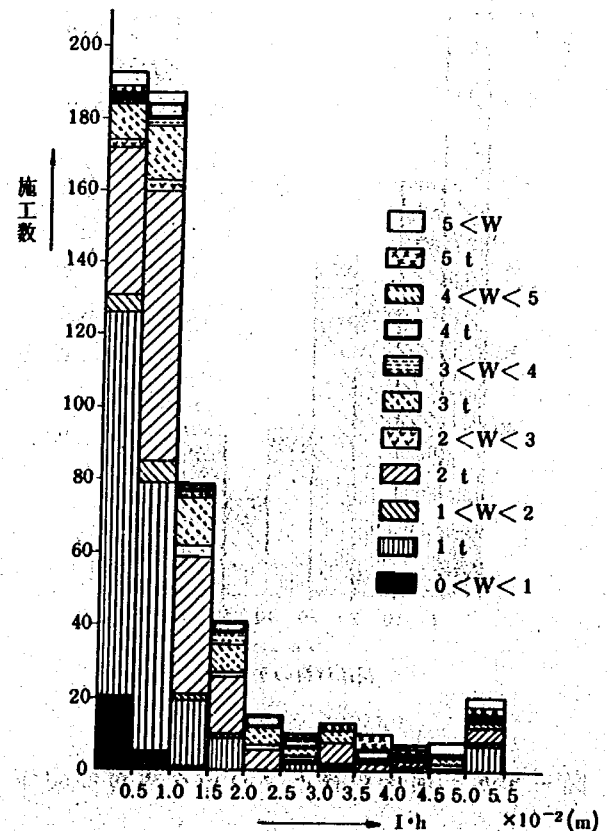


図-5.8 掃流力とブロック重量の関係

5-3-3 ブロックの移動限界流速

根固ブロックの単体としての移動限界流速は、ブロックの種類と重量および河床の状況等により異なる。土木研究所で行った数種類のブロックの移動限界流速と、重量の関係につい

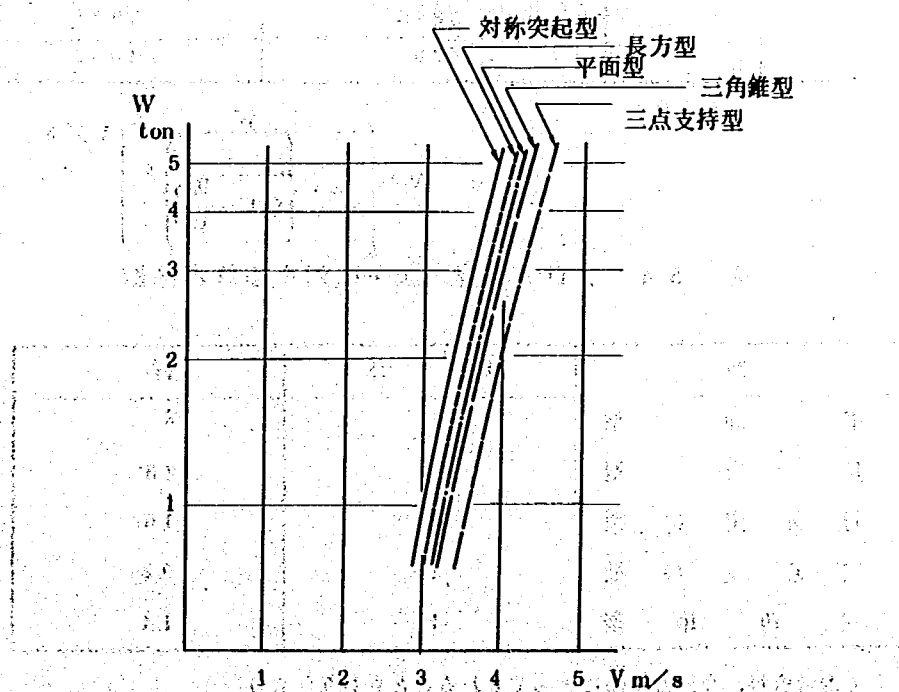
ての実験結果は、図－5.9 および表－5.3 のようである。

この実験は、模型ブロックが移動する限界時の流速を、ブロック柱頭部で測定し、その結果を実物大のブロックに換算し直したものである。この図を参考にして、単体ブロックの移動限界流速を求め、敷設させる地点の流速と比較し、ブロック重量の選定に用いることができる。

ブロックの敷設地点の流速としては、一般に断面平均流速を用いるものとするが、河道の湾曲部や、砂州による偏流がある場合、河道断面の急変部等では最大平均流速の1.3～2倍程度の流速になる場所も生じるので、適切な流速値を判断して用いる必要がある。

なお、根固ブロックは、通常一層あるいは二層に敷設され、群として用いられる。この場合、群としてのブロックの移動特性は、ブロック相互間のかみ合せ効果や、ブロックによるしゃへい効果があるため、単体ブロックとしての、移動限界流速よりも大きな流速でなければ移動しなくなる。この場合の許容流速の割増しを考えるものとして、実験に基づいて得た結果を示したのが表－5.4である。

したがって、群としての流失に対する許容流速は、表に示される係数を単体ブロックの移動限界流速に乗じて求める必要がある。ただし、一層積みでは、ブロック群の周囲における単体ブロックの移動という観点から、単体ブロックの移動限界流速を用いる。さらにブロッ



図－5.9 ブロック単体の移動限界（今後の実験の増加によって変わる可能性あり）

表-5.3 実物ブロックの移動限界

型	$\frac{1}{a}$	ブロック重量 W (kg)	移動限界 流速V (m/s)
対称突起型	0.2538	1000	2.988
		2000	3.354
		3200	3.627
		4000	3.764
		5000	3.907
平面型	0.1406	1020	3.308
		2012	3.704
		3036	3.967
		4014	4.156
		5025	4.315
三角錐型	0.1620	1001	3.221
		2013	3.618
		2990	3.865
		4016	4.060
		5029	4.215
三点支持型	0.0937	1012	3.535
		1976	3.952
		3414	4.329
		5419	4.675
長方形型	0.1913	1044	3.155
		2038	3.527
		2861	3.732
		3885	3.927
		4901	4.082

$$V = \left[\frac{1}{a} \cdot \left\{ \frac{1}{1 - \frac{W_0}{W^b}} \right\}^3 \right]^{1/6}$$

表-5.4 ブロック群の流失に対する許容係数

型	単体	群
平面型	1	2
長方形型	1	2.8
対称突起型	1	1.5
三点支持型	1	2.3
三角錐型	1	1.4

(参考資料、今後の実験によって変わることもありうる)

(この図は、ブロックの形状、大きさ、重量、流速の割合、移動限界の計算式、および、その結果を示す。)

クが、土中に埋没しているような場合、ブロックの移動限界は、その流水抵抗、抗力の違い等により増加するものと考えられる。その増加の割合は、埋没程度によって異なるが、洗掘されることも考えられるので、その効果は考慮していない。つぎに、連結工法をとれば、単体ブロックより移動限界流速は、大きくなるものと考えられるが、単体として移動するような恐れのあるものでは、連結部に外力をかけることになるので好ましくないこと、連結は全体としての屈撓性を重視しているものであること、および耐久性を考慮し、限界流速の割り増しは行わないものとした。なお、実際の設計に際しては、ブロックによる流速低減効果やブロック周辺の洗掘の特性には十分考慮する必要がある。すなわち、ブロックが流失する原因には、ブロックの単体としての重量不足によるものと洗掘が生じ2次的に流出するものがあり、後者についてはブロック形状による影響が存在するものと考えられる。しかし、現段階では明瞭な結論が得られておらず、今後の調査を必要とする。

5-2-4 根固ブロックの敷設厚さ

根固ブロックは、群として一体となって流勢や洗掘力に抵抗するものである。したがってブロック重量の決定と共に、敷設厚さ、敷設幅の設計が重要となる。特に敷設厚さはブロック群下の河床材料の吸い出し防止のためにブロック群内流速を減少させるのに重要な要素である。

一般に根固ブロックは一層、二層積みが多用されており三層以上の敷設厚をもつ根固工は、一般に重量の小さいもの、河床材料の粒径が小さいものに多いことを指摘できる。

根固工の敷設厚さは採用するブロック工種、重量、敷設される河道特性によって安定と考えられる厚さを用いる必要がある。ただし、三層以上の場合には基層に捨石をするなど他の対策を考える方がよい場合が多い。そして、吸い出し防止を主目的として層厚を増すべきでないことに留意する必要がある。吸い出しが問題となる場合には、粗梁沈床、捨石およびマットなども優先して検討することが必要といえる。

なお、乱積みの場合は同様にして、ブロック工種、重量に応じて変化するが、下層に小型ブロックを投入したうえ、上層に大型ブロックを敷設するなどの方策を講じておくと良いと考えられる。

5-2-5 吸い出し防止工法

一般に河床材料として砂やシルトが主体となる中間地河道や三角州河道では、河床砂のブロック群下からの吸い出しが発生し、ブロックの沈下による破壊をうける恐れがあるので、吸い出し防止工法の採用を必要とする。吸い出し防止工法には、河床材料の置換や捨石、吸い出し防止マット、粗梁沈床などがある。施工実例によれば、河床材料が10mm以下になると吸い出し防止マットの施工例が増えることが認められる。

また、河床材料の置き換えを行った場合、著しく河床を乱すおそれのあるときは、吸い出し防止マットの使用等の措置を講ずる必要がある。

なお、中間地河道、デルタ性河道では、二層積にしてもブロック群下の土砂が移動する恐れが強いので、原則として吸い出し防止工を行うことが望ましい。

第6章 橋脚の被災および補強事例に関する調査

6-1 アンケート調査概要

橋脚の水理的な設計諸元の検討の一端として、現場においては、経済性等を考慮する必要上、橋脚の水理的な安全度の評価及び補強工法の検討の必要が生じてくる。そこでその基礎資料収集の為、被災事例と補強工事について全国河川の橋梁を対象にアンケート調査を実施した。被災事例は53年度内に生じたものとし、補強工事については、最近4～5年間を対象に取扱った。

53年災害のアンケート調査要領は、表-6.1.1～6.1.3に示すように、橋梁の構造的な諸元と、河道の特性、さらに災害時の様子の三項目の内容について調査することとした。なお、取り扱った事例は災害復旧を実施し、建設省本省治水課に復命書を提出したものを対象としている。いっぽう、補強工事の調査は表-6.2に示すような内容を調査した。

6-2 アンケート調査結果とその考察

53年災害のアンケート調査の一次集計結果は、表-6.3～表6.5に示すように、全国で16橋梁の被災事例がある。その大部分は県管轄の小さい河川の橋梁の事例がほとんどで、建設省管轄のものは3事例のみであった。

災害橋梁の河川の河床勾配は、信濃川の1/1200を除けば全て1/500以上の急勾配の山地～扇状地河川の部分によるものが圧倒的に多く、中には1/100以上の急な河床勾配をもつ河川が6事例もあった。さらに河床材料の粒径が大きく、最小のもので平均粒径が10mm、最大のものは300mmであった。したがって、水深粒径比 h_0 / d_m は200以下となり、洗掘深の推定は容易になる。

災害時の水理量は、不明であるため、各河川の計画高水流量と、計画高水位を参考データとして、災害時の水理量を推定算出した。その結果は表-6.6に示すように、各事例とも、かなり高いフルード数が示され、無次元掃流力でも0.8付近の値を示す事例もあり、河床形態の遷移するような水理量となっており、災害時の激甚さが想像できる。また、得られた洗掘深は推定値とは異っており、実際の河道においては河床材料のアーミング効果、その他河床形態等の河道特性をも加味して検討を加える必要性を感じる。

被災の原因は流水による局所洗掘によって、橋脚の根入れ不足が生じたものが16事例中14事例を占めており、河道法線の屈曲や、砂州の発達および移動性が大きいということも、この洗掘現象に影響を及ぼしているのである。

いっぽう、補強工事の調査結果の一次集計結果を表-6.7、表-6.8に示す。建設省管轄の橋梁は52事例もあった。補強に致った原因として、顕著なものは、河床洗掘による橋脚の支持力不足で全体の約半分を占めている。その他の原因は、橋梁自体の老朽化や耐震対策等の安全度増のためである。

今回の事例調査では、構造物の力学的強度増のために、橋梁各部の補強工事が大部分を占め、洗掘防止対策工としての根固工法等の事例は建設省管轄の3事例のみであった。

表-6・1・1

1. 橋梁諸元

1・1 橋 梁 名 称 _____

1・2 道 路 路 線 名 _____

1・3 直 接 管 理 者 (機関名) _____ 道・府・県 _____ 事務所 _____

担当者氏名 _____ (電話番号)

1・4 竣 工 年 月 明治 年 月
大正 年 月
昭和 年 月

1・5 上 部 工 形 式 a I型 b 箱型 c トラス d アーチ
e 吊橋・斜長橋 f ラーメン g P・C桁 h R・C桁
i 木橋 j その他 k 不明

1・6 有 効 桁 下 高 m

1・7 各橋脚洗掘防止工の有無 a 有 b 無 c 不明

以下の各設問は当初設計図書が添付できる場合は回答不要、添付できない場合は概要図等を含め極力詳しく御回答下さい。

1・8 径 間 長 及 び 径 間 割 _____ 幅員 _____

1・9 各 橋 脚 形 状 及 び 規 模 _____

1・10 基 礎 部 の 土 質 等 a 岩着 b 礫 c 砂質 d シルト・粘土
e その他 N値

1・11 基 礎 工 a 杭 b ケーソン c その他 d 不明

1・12 杭 基 礎 の 場 合 材料 長さ m 直径 cm
1脚当り打込本数 本 平均打込密度 本/m²

1・13 橋脚周辺の洗掘防止工の有無 a 有 b 無 c 不明
有 の 場 合 ブロックの種類
ブロック敷設範囲 面積

1・14 設 計 対 象 最 高 水 位 基準面名 m

1・15 設 計 対 象 河 床 面 基準面名 m

表-6・1・2

2. 河川諸元

- 2・1 架橋地点河川名 _____ 支派川の場合は本川名 _____
- 2・2 架橋地点地先名 _____ ゼロKm地点より Km
- 2・3 架橋地点河川の管理者名 _____
- 2・4 計画高水流量規模 現計画 m^3/s 確率年 1/
 将来計画 m^3/s 確率年 1/
- 2・5 年1回程度の洪水流量 (最近10年間程度の平均) m^3/s
- 2・6 低水流量 (最近10年間程度の平均) m^3/s

以下の各設問は架橋地点、上下流1Km区間程度の平均または対象として御回答下さい。

- 2・7 平均河幅 m 複断面の場合、平均低水路幅 m
- 2・8 平均河床勾配 1/
- 2・9 河床材料平均粒径 mm
- 2・10 砂利採取の有無 過去 a 有 b 無 c 不明
 現在 a 有 b 無 c 不明
- 2・11 河床状況 a 整正安定河道 b 砂州発達河道 c その他
- 2・12 砂州移動の有無 a 有 b 無 c 不明
- 2・13 現河道の横断形状 a 単断面 b 複断面 c 自然河道 d その他 _____
- 2・14 堤防法線平面形状 a 直線状 b やや屈曲 c 蛇行 d その他 _____

表-6・1・3

3. 災害時の模様

- 3・1 災害生起年月日 昭和53年 月 日 洪水原因 _____
- 3・2 架橋地点洪水規模 推定最高流量 m^3/s
 最高水位 基準面名 _____ m
- 3・3 被災範囲 a 上部工のみ 径間分 b 橋脚と上部工 径間分
- 3・4 上部工の被災形態 a 落橋流下 m b 落橋 c 橋脚上だけの移動
 d その他 _____
- 3・5 橋脚の被災形態 a 流失流下 m b 陥没 cm
 c 傾斜 天端で cm d その他 _____
- 3・6 上部工の被災原因 a 冠水 b 流木等による堰上げ c 橋脚被災による二次災害
 c その他 _____
- 3・7 橋脚の被災原因 a 橋脚の支持力低下 b 流木等による堰上げ
 c 両者の組合せ d その他 _____
- 3・8 支持力低下の原因 a 局所洗掘 b 河床低下 c 水筋変化 d 高水敷流失
 e その他 _____
- 3・9 原因が局所洗掘の場合、洪水後の周囲の河床からの洗掘深 m
- 3・10 その他の被災時の状況を把握されていたら、極力詳しく御記入下さい。

調 査 票

1. 補強工事実施機関名 _____ 都・道・府・県 _____ 事務所 _____
 担当者氏名 _____ (電話番号)
2. 橋 梁 名 称 _____
3. 道 路 路 線 名 _____
4. 当該橋梁竣工年月日 明治 _____ 年 _____ 月
 大正 _____ 昭和 _____
5. 当初上部工形式 a I桁 b 箱桁 c トラス d アーチ
 e 吊橋・斜長橋 f ラーメン g P・C桁 h R・C桁
 i 木橋 j その他 _____
6. 当初上部工規模 径間長 m 径間長 径間 幅員 m
7. " 橋脚形状及び規模 _____
8. 補強工事施工年月 昭和 年 月
9. 補強に至った経過・原因 _____

補強工事設計図書が添付できない場合にお答え下さい。

10. 補強工事部分 a 上部工 b 橋脚 c 基礎工 d その他 _____

橋脚・基礎工が含まれている場合、補強前の状態でお答え下さい。

11. 基礎部の土質 a 岩着 b 礫 c 砂質 d シルト・粘土
 e その他 _____ N値 _____

12. 基礎工形式 a 杭 b ケーソン c その他 _____

13. 杭基礎の場合 材料 _____ 長さ m 直径 cm 1脚当り打込本数 本
 平均打込密度 本/m²

14. 設計・施行時における問題点と注意事項 _____

表-6・3 アンケート調査集計結果一覧表

1-4 竣工年		1-5 上部工形式		1-6 有効桁下高		1-8 経路長および経路間	
年	箇所数	種類	箇所数	有効桁下高	箇所数	種類	箇所数
不記不明	0	不記不明	1	不記不明	0	不記不明	0
昭和 5-10	2	PC 桁	3	0-0.5m	0	2-3	1
11-15	2	RC 桁	5	0.51-1.0	3	3.1-4	2
16-20	0	I桁アーチ	1	1.01-1.5	1	4.1-5	7
21-25	0	木 橋	1	1.51-2.0	0	5.1-6	4
26-30	2	トラス	2	2.01-2.5	0	6.1-7	1
31-35	7	低市部-I桁 以外-RC桁	1	2.51-3.0	0	7.1-8	1
36-40	1	I 桁	2	3.01-3.5	1	合計	16
41-45	1	ポスト アンション T桁橋	1	3.51-4.0	2		
46-50	1	合 計	16	4.01-4.5	2		
51-55	1			4.51-5.0	1		
合計	17			5.01-5.0	1		

1-9 各種鋼形式		1-10 基礎部の土質等		1-11 基礎工		1-13 竣工後の補強補修の有無	
種類	箇所数	種類	箇所数	種類	箇所数	種類	箇所数
不記不明	3	不記不明	0	不記不明	1	不記不明	0
鉄筋コンクリート	3	観	10	杭	1	有	7
壁式直接基礎	1	砂 質	1	直接基礎	5	無	9
逆 T 式	2	岩 着	5	土台木	1	合計	16
木 造	1	砂 利	1	ケーソン	5		
ケーソン	1	合計	17	合計	16		
逆 T 型	3						
重力式	2						
合計	16						

表-6・4 アンケート調査集計結果一覧表

2-4 計画洪水流量(現)		2-4' 計画洪水流量(将)		2-5 年1回洪水流量		2-6 低水流量		2-7 平均川巾	
流 量	箇所数	流 量	箇所数	流 量	箇所数	流 量	箇所数	流 量	箇所数
不記不明	1	不記不明	5	不記不明	0	不記不明	0	不記不明	0
100 m ³ /s以下	2	100m ³ /s以下	2	0-50m ³ /s	3	0-10m ³ /s	7	5m以下	1
100-300	3	101-300	3	51-100	1	101-30	3	51-10m	0
301-500	3	301-500	3	101-200	4	301-50	1	101-20m	2
501-1000	0	501-1000	0	201-500	2	501-100	1	201-40m	4
1001-2000	2	1001-2000	1	501-1000	3	1001-200	1	401-80m	2
2001-3000	2	2001-3000	1	1001-2000	1	2001-300	1	801-150m	2
3001-4000	0	3001-4000	0	2001-3000	2	3001-400	1	1501-300m	2
4001-5000	0	4001-5000	0	合計	16	4001-500	1	3001-500m	1
5001-6000	1	5001-6000	0			合計	16	5001以上	2
6001-7000	0	6001-7000	0					合計	16
7001m ³ /s以上	2	7001以上	1						
合計	16	合計	16						

2-8 平均河床勾配		2-9 河床材料平均粒径		2-10 砂利採取の有無		2-11 河床状況		2-12 河川の横断形状	
	箇所数		箇所数	種類	箇所数	種類	箇所数	種類	箇所数
不記不明	0	不記不明	0	過 不記不明	2	不記不明	0	不記不明	0
1/ 10-1/ 50	2	1mm以下	0	去 有	8	砂州発達河床	7	準	7
1/ 51-1/ 100	3	11-10	3	無	8	修正安定河床	6	狭	3
1/ 101-1/ 200	5	101-20	0	合計	16	その他の他	3	自然河床	6
1/ 201-1/ 400	1	201-30	0			合計	16	合計	16
1/ 401-1/ 600	4	301-40	0						
1/ 601-1/ 800	0	401-50	2						
1/ 801-1/1000	0	501-100	4						
1/1001-1/1200	1	1001-200	1	現 不記不明	1	2-13 砂州移動の有無		2-14 河床の横断形状	
合計	16	2001-300	1	在 有	3	種類	箇所数	種類	箇所数
		合計	16	無	13	不記不明	0	不記不明	0
				合計	16	有	8	やや顕曲	5
						無	8	蛇 行	3
						合計	16	直 線 状	3
								その他	1
								合計	16

表-6・5 アンケート結果一覧表

3-1 災害年超年月日

月	箇所数
1月	0
2月	0
3月	0
4月	2
5月	0
6月	12
7月	0
8月	0
9月	2
10月	0
11月	0
12月	0
合計	16

3-2 架橋地点洪水規模

流量	箇所数
不記・不明	1
100m/s以下	3
101- 300	6
301- 1000	2
1001- 2000	2
2001- 3000	0
3001- 4000	1
4001- 5000	0
5001- 6000	0
6001- 7000	0
7001- 8000	0
8001- 9000	0
9001-10000	1
合計	16

3-5 橋脚の被災形態

被災形態	箇所数
不記・不明	4
橋脚基礎洗掘	6
流出・流下	2
陥 没	2
天端傾斜	2
合計	16

3-7・8 被災原因

原因	箇所数
不記・不明	2
局所洗掘又は河床低下	14
合計	16

3-9 洗掘深

洗掘深	箇所数
不記・不明	1
0.5-1.0m	6
1.1-1.5	7
1.6-2.0	1
2.1-2.5	1
合計	16

表-6・6 被災時の推定水理量一覧表

RUN	Q(m³/s)	n	B(m)	I	d m(cm)	h ₀ (m)	U ₀ (m/s)	Fr	r ₀	Z(m)	D(m)	Z/D	h ₀ /dm	河川名	備考
1	970	0.07	570	1/480	10	1.78	0.96	0.23	0.02	1.5			17.8	阿賀川	
2	300	0.037	68	1/130	5	1.56	3.21	0.82	0.15	1.5			31.2	宮川	
3	55	0.03	25	1/450	1	1.22	1.80	0.52	0.16	1.5			1220	旧湯川	
4	3200	0.03	65	1/500	15					1.2				只見川	
5	130	0.120	18	1/70	30	3.28	2.21	0.39	0.10	1.3			109	松沢川	
6	1500	0.04	100	1/200	5	3.61	4.16	0.70	0.22	0.5			722	一の戸川	
7	9200	0.073	625	1/1200	8	8.39	1.72	0.19	0.05	1.0			1049	早出川	
8	500	0.110	110	1/60	8	2.25	2.02	0.43	0.28	1.5	55	0.27	28.1	信濃川	
9	30	0.10	15	1/30	15	1.01	1.86	0.59	0.14	0.8	1.0	0.80	6.7	五十嵐川	
10	105	0.11	25	1/43	20					1.0	1.2	0.83		内原川	
11	1				20									早木戸川	
12	150	0.05	30	1/150	1	1.96	2.54	0.58	0.79	1.5			1960	南川	
13	300	0.10	35	1/100	10	3.63	2.39	0.40	0.22	1.7			363	安曇川	
14	1760	0.077	480	1/540	20	3.09	1.21	0.22	0.02				155	紀ノ川	
15	300	0.050	110	1/263	15	1.61	1.71	0.43	0.03	2.5	2.8	0.89	10.7	安芸川	
16	50	0.150	5	1/10	20	2.54	3.94	0.79	0.77	1.0	6.0	0.17	12.7	川辺川	

Q = 流量

n = 粗度係数

B = 川巾

I = 河床勾配

d_m = 河床材料
平均粒径

h₀ = 水深

U = 流速

Fr = フルード数 ($\frac{U}{\sqrt{g h_0}}$)

r₀ = 無次元掃流力 ($\frac{h_0 + 1}{d}$)

Z = 洗掘深

D = ピアー巾

表-6・7 補強工事集計一覧表

県＜補強工事＞

4 補強工事年

年	箇所数
不記不明	1
S 2	3
S 3-S 10	15
S 11-S 20	5
S 21-S 30	12
S 31-S 40	12
S 41-S 50	4
合 計	52

6-1 当初上部工規模（区間長）

区 間 長	箇所数
不記不明	0
1m-10m	7
11-20	14
21-40	13
41-60	3
61-80	5
81-100	3
101-140	1
141-180	2
181-210	1
210-	3
合 計	52

6-2 当初上部工規模（幅員）

幅 員	箇所数
不記不明	0
3m-4m	4
4.1-5	16
5.1-6	19
6.1-7	1
7.1-8	5
8.1-9	1
9.1-10	1
10.1-11	1
合 計	52

7-1 当初橋脚の幅

幅	箇所数
不記不明	30
0 m-1m	5
1.1-2	13
2.1-3	1
3.1-4	1
4.1-5	1
5.1-6	0
6.1-7	0
7.1-8	0
8.1-9	1
合 計	52

8 補強工事施工年

年	箇所数
不記不明	1
S 50	6
51	7
52	14
53	19
54	7
55	1
合 計	55

9 補強に至った原因

原 因	箇所数	原 因	箇所数
不記不明	5	橋台・橋脚・橋脚・橋脚	2
河床洗掘	28	ク ラ ッ ク	1
床版等の破損	2	橋台の劣化	1
老 朽 化	8	歩道橋の併設	1
主桁破損	2	コンクリートの併設	3
橋台・橋脚破損	1	耐震対策	1
腐 蝕	1	交通量増加	2
鉄筋露出	3	落 橋	1
合 計	62		

10 補強工事部分

部分	箇所数
不記不明	13
上部工	15
基礎工	15
橋脚	24
その他	1
合 計	68

11 基礎部の土質

種 類	箇所数
不記不明	15
礫	22
砂 礫	7
砂 質	6
シルト粘土	1
その他	1
合 計	52

12 基礎工形式

種 類	箇所数
不記不明	16
ケーソン	16
杭	7
直接基礎	3
根籠コンクリート	1
その他	9
合 計	52

表-6・8 補強工事集計一覧表

建設省＜補強工事＞

4 補強工事年

年	箇所数
不記不明	0
S 3-S 10	4
S 11-S 20	1
S 21-S 30	8
S 31-S 40	11
S 41-S 50	3
合 計	27

5 当初上部工形式

種 類	箇所数
不記不明	0
R+C形	7
1 桁	11
トラス	4
ゲルバー	3
アーチ	1
P+C形	3
合 計	29

6-1 当初上部工規模（区間長）

区 間 長	箇所数
不記不明	0
11m-20m	7
21-40	9
41-60	7
61-80	1
81-100	0
101-140	1
141-180	0
181-210	0
210-	2
合 計	27

6-2 当初上部工規模（幅員）

幅 員	箇所数
不記不明	0
1.1m-2m	1
2.1-3	0
3.1-4	0
4.1-5	0
5.1-6	6
6.1-7	5
7.1-8	9
8.1-9	2
9.1-10	3
10.1-11	1
合 計	27

7-1 当初橋脚の幅

幅	箇所数
不記不明	21
0 m-1m	1
1.1-2	3
2.1-3	0
3.1-4	2
合 計	27

8 補強工事施工年

年	箇所数
不記不明	7
S 4	1
45	2
46	2
47	1
48	2
49	5
50	3
51	4
52	9
53	5
54	4
55	2
合 計	47

9 補強に至った原因

原 因	箇所数
不記不明	7
河床洗掘	11
床版等の破損	1
老 朽 化	4
腐 蝕	1
河床外架	3
歩道橋架の設置	1
交通量の増加	3
合 計	31

10 補強工事部分

部分	箇所数
不記不明	13
上部工	6
基礎工	5
橋脚	11
橋脚	1
合 計	36

11 基礎部の土質

種 類	箇所数
不記不明	8
礫	11
砂 礫	2
砂 質	1
粘土質土	4
シルト粘土	1
合 計	27

12 基礎工形式

種 類	箇所数
不記不明	10
ケーソン	12
杭	4
その他	1
合 計	27

第7章 全体のまとめと今後の課題

本研究では、従来の洗掘深の推定式を検討し、その問題点や適用範囲を明らかにするとともに、これらの研究成果の資料も含め、不足する領域の大規模橋脚実験によって、より広範囲な水理的検討を行い、その結果に基づいた洗掘深推定法について考察した。さらに対策工実験による洗掘防止に関する検討など前章までその検討結果について記述した。ここではその主要な結果と問題点などそれら全体をまとめて以下に記した。

7-1 橋脚の基部洗掘に関する実験結果について

- (1) 洗掘口形状は、上流部が半円状の逆円錐形を示し、最大洗掘深は流頭部で生ずる。ただし、半円形小判型橋脚では、橋脚軸の流向に対する傾斜角 α が大きくなるにしたがい、流水の当る後頭部側で最大の洗掘となり、その領域とともに α の増大による悪影響は加速度的に増加する。湾曲部や砂州による偏流のある河道では、橋脚形状とともに慎重な考慮が必要である。
- (2) 円柱橋脚と流水が橋脚軸に一致する場合の半円形小判型橋脚では、最大洗掘位置が流頭部前面から側面で生ずることによって、洗掘口形状は異なるものの、最大洗掘深については橋脚幅が同一であれば有意な差が生じないことが判明した。
- (3) 洗掘深は水深粒径比の小さい範囲では、限界掃流力を若干超えた所で最大の洗掘深を示す。フルード数がさらに増加しても掃流砂による埋めもどしの増加の割合が、円柱前面の渦による洗掘量より大きいことによって、洗掘深は減少し、その後一定値となる傾向を示すことが明らかとなった。
- (4) 水深粒径比の大きい場合は、限界掃流力を超えた付近での洗掘深の減少傾向は小さく、水深粒径比のより大きい場合は減少傾向がなくなり、フルード数とともに洗掘深も増大し、その後一定値に近づく傾向を示す結果が得られた。
- (5) 河床材料が小さく、水深粒径比の大きい場合のフルード数に対する洗掘の増加傾向は、Rippleができ始めると流砂の輸送形態が浮遊形式となることにより、洗掘口を埋めもどす流砂量の増加分が、洗掘量の増加分より少なくなることに起因していると考えられる。
- (6) 砂礫堆の前縁線が橋脚の局所洗掘部に重なった場合の実験観察によれば、河床波の高低差の7~8割程度の所が平均河床高となり、この最深部より橋脚自身の洗掘深が大きければ、洗掘深はさらに増えないことが認められた。砂礫堆の移動に伴う影響についての検討も今後必要である。
- (7) 洗掘深の実測データは洪水時の観測の危険性や測定精度、および範囲に限りがあり数少ない。危険な橋脚については洪水時の観測に基づく緊急システムを考えることが必要であり、精度のよい現場計測機器の開発が望まれる。

7-2 橋脚の基部洗掘深の推定に関する検討結果について

- (1) 橋脚周辺の局所洗掘に影響をおよぼすと考えられる物理量について考察し、その関係を次元解析するとともに、従来の研究も考慮して最大洗掘をここでは(2-3)式で表現した。
- (2) 実験および実測データを(2-3)式の関係で表現することによって得られた洗掘深推測図が、図-3.5.1~3.5.4である。この場合、水深粒径比が大きいほど低フルード数で洗掘が起り、フルード数に対する Z/D の増加は急激であって、 Z/D にピークを持たない。反対に水深粒径比の小さい場合は、フルード数が大きくなって洗掘が起り、その増加は同様急激で Z/D はピークを持つ特性を示す結果が得られた。
- (3) h_o/D の違いによる洗掘深は、同一 h_o/d_m および Fr に対し、 h_o/D の大なる方が Z/D も大きい結果となった。ただし、このことはピア幅に対する相対洗掘深が大きくなることで、洗掘深そのものが大きいことではない。
- (4) 図-3.5で分割した h_o/D の範囲外における洗掘深の推定は、分割した大小両側の h_o/D より洗掘深を求め、その中間の h_o/D に対する洗掘深を推定する方法で使用可能である。
- (5) ただし、 $h_o/D \geq 3.50$ の領域は現在データ不足で作図は困難であり、また図-3.5においても、さらに h_o/d_m の大きい領域での推測が必要である。これらについては実測による範囲拡大が今後の課題であろう。
- (6) 洗掘深推測図は、橋脚構物自体の局所洗掘深であり、河道の湾曲部や砂州による偏流のある場合、河道断面の急変部等では、河道特性による洗掘深も考慮した適切な判断が必要であろう。また、洗掘に伴う土質変化や強度に対する洗掘深への影響等に関する検討が必要であり、今後の課題とされる。
- (7) 図-3.5の推測図は主として円柱橋脚のデータに対するものであるが、半円形小判型橋脚の洗掘深推定に際してもそのまま適用可能である。他の形状については推定洗掘深に対して、Laursenが得ている係数を乗じることによって推定が可能であろう。
- (8) 橋脚軸と流向が一致しない場合の洗掘深に対する影響は、同様Laursenによって求められている。今回の実験結果とほぼ一致することにより、この係数を乗ずることによって、その影響を考慮した洗掘深の推定が可能である。
- (9) 橋脚周囲の局所洗掘範囲は河床砂の水中安息角と洗掘深によって密接な関連を示す。河床粒径による水中安息角と最大洗掘深より、推定される洗掘範囲、形状は図-3.13に示されるようなものとすればよいと考えられる。

7-3 近接橋脚による影響について

- (1) 橋梁を近接して並列する場合は、両橋脚の軸を直線に配置し、橋脚間の距離 $\ell/D = 10$ 以下ならば、下流側橋脚は洗掘深、範囲とも上流より少なく、 ℓ/D が小さいほど下流側橋脚の洗掘が軽減される。

- (2) 両橋脚の軸線と流向が一致しない場合は、流水に対する遮蔽幅と橋脚の相互干渉によって、洗掘、範囲ともより助長させ、悪影響が大きい。
- (3) 両橋脚相互に悪影響を与えない間隔は、円柱橋脚の場合、約 $\ell/D = 30$ 以上の距離が必要と考えられる。

7-4 橋脚の洗掘防止に関する検討結果について

- (1) 橋脚周囲を円錐形状に保護敷設した場合、その法勾配によって橋脚前面の下降流の規制が可能であっても、橋脚直下流の堆積とその両側での洗掘の影響が大きいことが明らかとなった。
- (2) 保護工の法勾配は吸い出しによる沈下等を考慮しても 1 : 6 程度以下が影響が少なく、下降流を制限することによる有意な効果は得られないことが判明した。
- (3) 洗掘防止工としての敷設範囲は、第3章で検討した最大洗掘深の推定と、それに見合う水中安息角による推定洗掘範囲を保護することによって、洗掘が防止でき、これ以下の保護範囲では、敷設周囲が低下する結果となった。
- (4) ただし、敷設範囲は、河道特性による河床波の発達や、流れが蛇行する場合には大きくするなど、設計に際しては十分河川の状況を反映させる必要がある。
- (5) 異型ブロック類による洗掘防止工としては、平型の屈撓性を重視した連結可能なものが望ましく、さらに河道特性の相違を考慮した工法、工種の選定が必要とされる。
- (6) ブロック重量と各種水理量との関係を根固工敷設例より検討した。実際の設計に際しては、ブロックによる流速低減効果や河道特性等を考慮して、適切な重量を判断して用いる必要がある。
- (7) 保護敷設する厚さは採用するブロック工種、重量、敷設される河道特性によって安定と考えられる厚さを用いる必要がある。ただし、吸い出し防止を主目的として層厚を増やすべきでないことに留意する必要がある。乱積みの場合は、ブロック工種、重量によって異なるが、下層に小型ブロック、上層に大型ブロックを敷設するなどの方策を講じておくのが良いと考えられる。
- (8) 河床材料として砂やシルトが主体となる中間地河道や三角州河道では、河床砂のブロック群下からの吸い出しが発生し、ブロックの沈下による破壊をうける恐れがあるので、吸い出し防止工法の採用を必要とする。根固工施工実例によれば、河床材料が 10mm 以下になると吸い出し防止マットの施工例が増えることが認められる。

7-5 橋脚の被災および補強事例について

- (1) 53年度における被災事例は、全国で16橋梁であり、その大部分は県管轄の河川におけるものである。被災原因は、流水による局所洗掘によって、橋脚の根入れ不足が生じたものが、

14事例を占めている。

- (2) 補強工事例は建設省管轄の橋梁で52事例あった。補強に致った原因としては、河床低下による橋脚の支持力不足が全体の約半分を占めている。その他の原因は、橋梁自体の老朽化や地震対策等の安全度増のためである。このうち洗掘防止工としての根固工法等に関しては3事例のみであった。

あとがき

橋脚の基部洗掘に関する大規模実験を行い、水深粒径比のより大きい領域での洗掘特性を明らかにするとともに、広範囲な実験結果を基に洗掘深推測法を提案し、さらに洗掘防止工について検討した。橋脚の水理的設計基準の作成という調査の目的から見れば、本報告は十分なものであるとは言えない。やり残したこと、実験の精度を上げなければならないこと等々、多くの問題点を残している。今後も現地調査や実験等により補足して行きたいと考えている。

なお、本調査を遂行するにあたり、当時河川研究室山本晃一主任研究員の有益な助言と、研究初期の段階では当時実修生であった有田正光氏の多大な貢献があった。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 中川博次，鈴木幸一：橋脚による局所洗掘深の予測に関する研究，京都大学防災研究所年報，17-B，1974.
- 2) 石原藤次郎：橋脚による河床洗掘に関する実験的研究，土木学会誌，24-1，1938，28-9，28-11，1942.
- 3) Andru, P. : Scour at Obstructions in Non-Cohesive Beds, Thesis for M.Sc. University of Alberta, 1956.
- 4) Laursen, E. M. : Scour at Bridge Crossings, Proc. of ASCE, HY2, Vol. 86, 1960.
- 5) Laursen, E. M. : An Analysis of Relief Bridge Scour, Proc. of ASCE, HY3, Vol. 89, 1963.
- 6) Tarapore, Z. S. : A Theoretical and Experimental Determination of the Erosion Pattern Cansed by Obstructions in an Alluvial Channel with Particular Reference to Vertical Circular Cylindrical Piers, Unpublished ph. D. Thesis, University of Minnesota, 1962.
- 7) Brenseres, H. N. C. : Scour around Drilling Platforms ; Bulletin, Hydraulic Research 1964 and 1965, I AHR, Vol. 19.
- 8) Carstens, M. R. : Similarity Laws for Localized Scour, Proc. of ASCE, Vol. 92, HY3, 1966.
- 9) 斉藤隆，浦 勝，柴田幸信：円柱周囲の洗掘について，山口大学工学部報告，20-1，1969.
- 10) Shen, H. W., V. R. Schneider and S. Karaki : Local Scour around Bridge Piers, Proc. of ASCE, Vol. 95, HY6, 1969.
- 11) 山本晃一：河川の抵抗係数の予測法，土木技術資料 19-7，1977.
- 12) 山本晃一：河道特性論ノート(I)，－護岸論のために－，土木研究所資料第1625号，1981.

- 13) 土屋昭彦：橋脚周辺の洗掘，橋梁と基礎，4-1，1970.
- 14) 木下良作：洪水流航測の河道計画への応用，日本写真測量学会誌，1976.
- 15) 石原藤次郎，本間仁編：応用水理学 I

実験データ一覧表

付表-1 Schen

Run	Uo cm/s	ho cm	dm cm	D cm	Z cm	ho/D	D/dm	ho/dm	Fr	Z/D	Z/ho	Rp × 10 ^a	備考
1	43.9	11.4	0.024	15.2	15.5	0.75	635	474	0.42	1.02	1.77	0.669 05	
2	39.9	21.9	0.024	15.2	18.0	1.44	635	913	0.27	1.18	2.62	0.609 05	
3	22.9	11.7	0.024	15.2	12.5	0.77	635	489	0.21	0.82	1.59	0.348 05	
4	32.0	11.6	0.024	15.2	13.4	0.76	635	483	0.30	0.88	1.64	0.488 05	
5	54.3	11.9	0.024	15.2	16.8	0.78	635	497	0.50	1.10	1.88	0.827 05	
6	89.6	11.5	0.024	15.2	17.5	0.75	635	479	0.84	1.15	1.90	0.137 06	
7	101.8	11.7	0.024	15.2	16.5	0.77	635	489	0.95	1.08	1.85	0.155 06	
8	75.3	15.5	0.024	15.2	19.8	1.01	635	644	0.61	1.30	2.31	0.115 06	
9	58.8	15.9	0.024	15.2	18.0	1.04	635	660	0.47	1.18	2.22	0.897 05	
10	49.1	15.1	0.024	15.2	14.9	0.99	635	630	0.40	0.98	1.97	0.748 05	
11	36.0	15.6	0.024	15.2	15.9	1.03	635	652	0.29	1.04	2.07	0.548 05	
12	29.0	15.0	0.024	15.2	14.1	0.99	635	626	0.24	0.92	1.91	0.441 05	
13	23.8	22.0	0.024	15.2	7.0	1.44	635	915	0.16	0.46	1.90	0.362 05	
14	15.2	21.4	0.024	15.2	2.6	1.40	635	890	0.10	0.17	1.57	0.232 05	
15	29.0	21.7	0.024	15.2	13.4	1.42	635	903	0.20	0.88	2.30	0.441 05	
16	37.8	20.6	0.024	15.2	17.1	1.35	635	857	0.27	1.12	2.47	0.576 05	
17	43.9	21.0	0.024	15.2	21.0	1.38	635	876	0.31	1.38	2.76	0.669 05	
18	52.7	20.7	0.024	15.2	18.3	1.36	635	864	0.37	1.20	2.56	0.804 05	
19	55.2	21.3	0.024	15.2	18.0	1.40	635	888	0.38	1.18	2.58	0.841 05	
20	41.5	26.3	0.024	15.2	18.6	1.72	635	1,097	0.26	1.22	2.95	0.632 05	
21	34.8	26.8	0.024	15.2	11.4	1.76	635	1,118	0.21	0.75	2.51	0.530 05	
22	38.1	17.6	0.024	15.2	16.6	1.16	635	734	0.29	1.09	2.24	0.581 05	
23	66.1	67.0	0.024	91.4	67.1	0.73	3,810	2,794	0.26	0.73	1.47	0.605 06	
24	49.5	61.0	0.024	91.4	54.9	0.67	3,810	2,540	0.20	0.60	1.27	0.453 06	

実験データ一覧表

付表-2・1 Chatou 1

Run	Uo cm/s	ho cm	dm cm	D cm	Z cm	ho/D	D/dm	ho/dm	Fr	Z/D	Z/ho	Rp × 10 ^a	備考
25	20.2	20.0	0.300	15.0	1.1	1.33	50	67	0.14	0.07	1.41	0.303 05	
26	33.1	20.0	0.300	15.0	3.2	1.33	50	67	0.24	0.22	1.55	0.497 05	
27	43.3	20.0	0.300	15.0	7.5	1.33	50	67	0.31	0.50	1.83	0.650 05	
28	41.1	20.0	0.300	15.0	8.3	1.33	50	67	0.29	0.55	1.89	0.617 05	
29	49.1	20.0	0.300	15.0	12.7	1.33	50	67	0.35	0.85	2.18	0.737 05	
30	52.0	20.0	0.300	15.0	16.3	1.33	50	67	0.37	1.09	2.42	0.780 05	
31	57.5	20.0	0.300	15.0	15.8	1.33	50	67	0.41	1.05	2.39	0.863 05	
32	58.9	20.0	0.300	15.0	16.2	1.33	50	67	0.42	1.08	2.41	0.884 05	
33	62.2	20.0	0.300	15.0	20.2	1.33	50	67	0.44	1.34	2.68	0.933 05	
34	74.5	20.0	0.300	15.0	15.7	1.33	50	67	0.53	1.05	2.38	0.112 06	
35	79.3	20.0	0.300	15.0	21.2	1.33	50	67	0.57	1.41	2.75	0.119 06	
36	85.1	20.0	0.300	15.0	18.7	1.33	50	67	0.61	1.24	2.58	0.128 06	
37	88.0	20.0	0.300	15.0	17.7	1.33	50	67	0.63	1.18	2.51	0.132 06	
38	92.0	20.0	0.300	15.0	18.0	1.33	50	67	0.66	1.20	2.53	0.138 06	
39	106.9	20.0	0.300	15.0	20.2	1.33	50	67	0.76	1.34	2.68	0.160 06	
40	37.5	10.0	0.300	15.0	4.7	0.67	50	33	0.38	0.31	0.98	0.563 05	
41	52.7	10.0	0.300	15.0	20.0	0.67	50	33	0.53	1.33	2.00	0.791 05	
42	50.0	10.0	0.300	15.0	19.8	0.67	50	33	0.61	1.32	1.99	0.900 05	
43	68.0	10.0	0.300	15.0	19.1	0.67	50	33	0.69	1.27	1.94	0.102 06	
44	76.5	10.0	0.300	15.0	17.6	0.67	50	33	0.77	1.18	1.84	0.115 06	
45	86.5	10.0	0.300	15.0	17.4	0.67	50	33	0.87	1.16	1.83	0.130 06	
46	116.4	10.0	0.300	15.0	18.1	0.67	50	33	1.18	1.21	1.88	0.175 06	
47	120.0	10.0	0.300	15.0	17.1	0.67	50	33	1.21	1.14	1.80	0.180 06	
48	52.0	35.0	0.300	15.0	19.6	2.33	50	117	0.28	1.31	3.64	0.780 05	
49	68.7	35.0	0.300	15.0	21.2	2.33	50	117	0.37	1.41	3.75	0.103 06	
50	73.5	35.0	0.300	15.0	21.2	2.33	50	117	0.39	1.41	3.75	0.110 06	
51	82.5	35.0	0.300	15.0	18.6	2.33	50	117	0.45	1.24	3.57	0.124 06	
52	82.5	35.0	0.300	15.0	21.7	2.33	50	117	0.45	1.45	3.78	0.124 06	

実験データ一覧表

付表-2・2 Chatou 2

Run	U_0 cm/s	h_0 cm	dm cm	D cm	Z cm	h_0/D	D/dm	h_0/dm	Fr	Z/D	Z/h_0	$Re \times 10^{-6}$	備考
53	30.2	20.0	0.300	10.0	0.9	2.0	33.3	67	0.22	0.07	2.09	0.302 05	
54	33.1	20.0	0.300	10.0	1.6	2.0	33.3	67	0.24	0.16	2.16	0.331 05	
55	40.4	20.0	0.300	10.0	6.3	2.0	33.3	67	0.29	0.63	2.63	0.404 05	
56	42.9	20.0	0.300	10.0	6.0	2.0	33.3	67	0.31	0.61	2.61	0.429 05	
57	48.4	20.0	0.300	10.0	9.9	2.0	33.3	67	0.35	0.99	2.99	0.484 05	
58	51.6	20.0	0.300	10.0	11.4	2.0	33.3	67	0.37	1.14	3.14	0.516 05	
59	57.1	20.0	0.300	10.0	11.3	2.0	33.3	67	0.41	1.13	3.13	0.571 05	
60	61.8	20.0	0.300	10.0	15.0	2.0	33.3	67	0.44	1.50	3.50	0.618 05	
61	74.5	20.0	0.300	10.0	10.9	2.0	33.3	67	0.53	1.09	3.09	0.745 05	
62	79.3	20.0	0.300	10.0	15.7	2.0	33.3	67	0.57	1.57	3.57	0.793 05	
63	84.7	20.0	0.300	10.0	12.6	2.0	33.3	67	0.61	1.26	3.26	0.847 05	
64	88.0	20.0	0.300	10.0	12.6	2.0	33.3	67	0.63	1.26	3.26	0.880 05	
65	92.7	20.0	0.300	10.0	12.1	2.0	33.3	67	0.66	1.21	3.21	0.927 05	
66	106.9	20.0	0.300	10.0	13.0	2.0	33.3	67	0.76	1.30	3.30	0.107 06	
67	37.5	10.0	0.300	10.0	3.0	1.0	33.3	33	0.38	0.30	1.30	0.375 05	
68	58.9	10.0	0.300	10.0	14.7	1.0	33.3	33	0.60	1.47	2.47	0.589 05	
69	67.3	10.0	0.300	10.0	15.1	1.0	33.3	33	0.68	1.51	2.51	0.673 05	
70	79.3	10.0	0.300	10.0	13.3	1.0	33.3	33	0.80	1.33	2.33	0.793 05	
71	86.5	10.0	0.300	10.0	12.4	1.0	33.3	33	0.87	1.24	2.24	0.865 05	
72	117.1	10.0	0.300	10.0	12.5	1.0	33.3	33	1.18	1.25	2.25	0.117 06	
73	120.0	10.0	0.300	10.0	13.1	1.0	33.3	33	1.21	1.31	2.31	0.120 06	
74	52.0	35.0	0.300	10.0	13.5	3.5	33.3	117	0.28	1.35	4.85	0.520 05	
75	70.2	35.0	0.300	10.0	16.8	3.5	33.3	117	0.38	1.68	5.18	0.702 05	
76	73.8	35.0	0.300	10.0	15.9	3.5	33.3	117	0.40	1.59	5.09	0.738 05	
77	83.3	35.0	0.300	10.0	14.5	3.5	33.3	117	0.45	1.45	4.95	0.833 05	
78	84.7	35.0	0.300	10.0	14.5	3.5	33.3	117	0.46	1.45	4.95	0.847 05	

実験データ一覧表

付表-2・3 Chatou 3

Run	Uo cm/s	ho cm	dm cm	D cm	Z cm	ho/D	D/dm	ho/dm	Fr	Z/D	Z/ho	Rp × 10 ⁴	備考
79	32.7	20.0	0.300	5.0	2.2	4.0	16.7	67	0.23	0.43	4.43	0.163 05	
80	40.0	20.0	0.300	5.0	3.2	4.0	16.7	67	0.29	0.65	4.65	0.200 05	
81	42.9	20.0	0.300	5.0	3.7	4.0	16.7	67	0.31	0.75	4.75	0.215 05	
82	48.0	20.0	0.300	5.0	4.7	4.0	16.7	67	0.34	0.94	4.94	0.240 05	
83	56.4	20.0	0.300	5.0	6.8	4.0	16.7	67	0.40	1.35	5.35	0.282 05	
84	51.6	20.0	0.300	5.0	7.1	4.0	16.7	67	0.37	1.41	5.41	0.258 05	
85	61.8	20.0	0.300	5.0	8.8	4.0	16.7	67	0.44	1.76	5.76	0.309 05	
86	77.5	20.0	0.300	5.0	8.1	4.0	16.7	67	0.55	1.63	5.63	0.388 05	
87	83.6	20.0	0.300	5.0	7.2	4.0	16.7	67	0.60	1.44	5.44	0.418 05	
88	86.2	20.0	0.300	5.0	7.2	4.0	16.7	67	0.62	1.44	5.44	0.431 05	
89	91.3	20.0	0.300	5.0	7.2	4.0	16.7	67	0.65	1.44	5.44	0.457 05	
90	105.5	20.0	0.300	5.0	8.2	4.0	16.7	67	0.75	1.64	5.64	0.528 05	
91	37.5	10.0	0.300	5.0	2.3	2.0	16.7	33	0.38	0.46	2.46	0.188 05	
92	58.2	10.0	0.300	5.0	9.4	2.0	16.7	33	0.59	1.87	3.87	0.291 05	
93	66.9	10.0	0.300	5.0	8.5	2.0	16.7	33	0.68	1.70	3.70	0.335 05	
94	76.0	10.0	0.300	5.0	8.8	2.0	16.7	33	0.77	1.76	3.76	0.380 05	
95	86.2	10.0	0.300	5.0	9.1	2.0	16.7	33	0.87	1.81	3.81	0.431 05	
96	116.0	10.0	0.300	5.0	7.2	2.0	16.7	33	1.17	1.44	3.44	0.580 05	
97	120.0	10.0	0.300	5.0	9.7	2.0	16.7	33	1.21	1.94	3.94	0.600 05	
98	51.3	35.0	0.300	5.0	7.6	7.0	16.7	117	0.28	1.53	8.53	0.257 05	
99	67.3	35.0	0.300	5.0	8.5	7.0	16.7	117	0.36	1.70	8.70	0.337 05	
100	72.7	35.0	0.300	5.0	7.6	7.0	16.7	117	0.39	1.51	8.51	0.364 05	
101	81.8	35.0	0.300	5.0	7.1	7.0	16.7	117	0.44	1.41	8.41	0.409 05	
102	81.8	35.0	0.300	5.0	6.1	7.0	16.7	117	0.44	1.22	8.22	0.409 05	

実験データ一覧表

付表-3・1 小 川

Run	U_o cm/s	h_o cm	dm cm	D cm	Z cm	h_o/D	D/dm	h_o/dm	Fr	Z/D	Z/h_o	$R_p \times 10^3$	備考
103	43.9	11.4	0.020	30.5	14.5	0.37	1,524	569	0.42	0.48	0.85	0.134 06	
104	39.9	21.9	0.020	30.5	15.7	0.72	1,524	1,096	0.27	0.52	1.23	0.122 06	
105	22.9	11.7	0.020	30.5	9.7	0.39	1,524	587	0.21	0.32	0.70	0.697 05	
106	32.0	11.6	0.020	30.5	12.3	0.38	1,524	579	0.30	0.40	0.78	0.975 05	
107	54.3	11.9	0.020	30.5	16.8	0.39	1,524	596	0.50	0.55	0.94	0.165 06	
108	89.6	11.4	0.020	30.5	17.5	0.38	1,524	575	0.84	0.57	0.95	0.273 06	
109	101.8	11.7	0.020	30.5	17.0	0.39	1,524	587	0.95	0.56	0.94	0.310 06	
110	75.3	15.5	0.020	30.5	20.0	0.51	1,524	773	0.61	0.66	1.16	0.229 06	
111	58.8	15.9	0.020	30.5	18.1	0.52	1,524	793	0.47	0.59	1.11	0.179 06	
112	49.1	15.2	0.020	30.5	16.3	0.50	1,524	758	0.40	0.53	1.03	0.150 06	
113	36.0	15.6	0.020	30.5	15.9	0.51	1,524	782	0.29	0.52	1.03	0.110 06	
114	29.0	15.0	0.020	30.5	11.1	0.49	1,524	752	0.24	0.36	0.86	0.883 05	
115	23.8	22.0	0.020	30.5	9.2	0.72	1,524	1,098	0.16	0.30	1.02	0.725 05	
116	15.1	21.4	0.020	30.5	2.6	0.70	1,524	1,069	0.10	0.08	0.79	0.461 05	
117	29.0	21.7	0.020	30.5	13.5	0.71	1,524	1,084	0.20	0.44	1.16	0.885 05	
118	37.8	20.6	0.020	30.5	17.0	0.68	1,524	1,029	0.27	0.56	1.23	0.115 06	
119	43.9	21.0	0.020	30.5	17.4	0.69	1,524	1,052	0.31	0.57	1.26	0.134 06	
120	52.1	20.7	0.020	30.5	18.3	0.68	1,524	1,037	0.37	0.60	1.28	0.159 06	
121	57.0	21.3	0.020	30.5	20.5	0.70	1,524	1,066	0.40	0.67	1.37	0.174 06	
122	41.5	26.3	0.020	30.5	18.6	0.86	1,524	1,317	0.26	0.61	1.47	0.126 06	
123	34.7	26.8	0.020	30.5	18.2	0.88	1,524	1,341	0.21	0.60	1.48	0.106 06	

付表-4・1 土 研 1

Run	U_o cm/s	h_o cm	dm cm	D cm	Z cm	h_o/D	D/dm	h_o/dm	Fr	Z/D	Z/h_o	$R_p \times 10^3$	備考
124	9.3	4.8	0.025	5.0	0.2	0.96	200	192	0.14	0.04	1.00	0.465 04	
125	11.4	4.6	0.025	5.0	0.3	0.92	200	184	0.17	0.06	0.98	0.570 04	
126	15.0	4.7	0.025	5.0	1.9	0.95	200	189	0.22	0.37	1.38	0.749 04	
127	20.1	4.6	0.025	5.0	3.0	0.92	200	183	0.30	0.59	1.51	0.100 05	
128	22.7	6.0	0.025	5.0	3.8	1.20	200	240	0.30	0.77	1.97	0.113 05	
129	25.2	5.4	0.025	5.0	4.1	1.07	200	215	0.35	0.81	1.88	0.126 05	
130	25.8	6.4	0.025	5.0	3.8	1.27	200	254	0.33	0.76	2.03	0.129 05	
131	26.3	5.0	0.025	5.0	4.6	1.00	200	199	0.38	0.93	1.93	0.132 05	
132	26.8	5.4	0.025	5.0	4.8	1.08	200	217	0.38	0.96	2.05	0.134 05	
133	27.7	5.6	0.025	5.0	3.8	1.12	200	224	0.38	0.76	1.87	0.139 05	
134	30.5	4.9	0.025	5.0	5.2	0.98	200	196	0.44	1.03	2.01	0.152 05	
135	34.3	5.7	0.025	5.0	5.1	1.14	200	228	0.46	1.02	2.16	0.172 05	
136	40.0	5.2	0.025	5.0	5.1	1.04	200	208	0.56	1.02	2.06	0.200 05	
137	53.9	4.0	0.025	5.0	6.3	0.79	200	158	0.87	1.26	2.05	0.270 05	

付表-4・2 土 研 2

実験データ一覧表

Run	Uo cm/s	ho cm	dm cm	D cm	Z cm	ho/D	D/dm	ho/dm	Fr	Z/D	Z/ho	Rp × 10 ^a	備考
138	11.1	9.5	0.025	5.0	1.6	1.9	200	378	0.12	0.32	2.21	0.555 04	
139	14.7	10.2	0.025	5.0	2.5	2.0	200	406	0.15	0.50	2.53	0.734 04	
140	18.1	10.3	0.025	5.0	3.4	2.1	200	410	0.18	0.68	2.73	0.907 04	
141	18.2	10.9	0.025	5.0	4.8	2.2	200	435	0.18	0.97	3.14	0.908 04	
142	18.9	9.6	0.025	5.0	4.4	1.9	200	384	0.20	0.87	2.79	0.945 04	
143	19.1	9.8	0.025	5.0	4.4	2.0	200	391	0.20	0.88	2.84	0.953 04	
144	21.7	10.0	0.025	5.0	4.6	2.0	200	402	0.22	0.93	2.93	0.108 05	
145	26.6	8.1	0.025	5.0	5.9	1.6	200	323	0.30	1.19	2.80	0.133 05	
146	30.6	9.7	0.025	5.0	5.9	1.9	200	388	0.31	1.19	3.12	0.153 05	
147	35.5	10.1	0.025	5.0	5.8	2.0	200	403	0.36	1.15	3.17	0.178 05	
148	35.5	10.1	0.025	5.0	5.7	2.0	200	403	0.36	1.14	3.16	0.178 05	
149	38.3	8.3	0.025	5.0	6.0	1.6	200	330	0.43	1.20	2.85	0.192 05	
150	41.9	11.8	0.025	5.0	6.4	2.4	200	473	0.40	1.27	3.64	0.210 05	
151	43.4	8.9	0.025	5.0	6.9	1.8	200	355	0.47	1.37	3.14	0.217 05	
152	44.2	10.2	0.025	5.0	6.7	2.0	200	407	0.44	1.34	3.37	0.221 05	
153	45.2	11.4	0.025	5.0	6.2	2.3	200	458	0.43	1.24	3.53	0.226 05	
154	64.4	9.3	0.025	5.0	7.9	1.9	200	373	0.67	1.57	3.44	0.322 05	
155	84.1	12.2	0.025	5.0	7.0	2.4	200	489	0.77	1.40	3.84	0.421 05	
156	88.5	12.3	0.025	5.0	7.3	2.5	200	492	0.81	1.47	3.93	0.443 05	

付表-4・3 土 研 3

0

Run	Uo cm/s	ho cm	dm cm	D cm	Z cm	ho/D	D/dm	ho/dm	Fr	Z/D	Z/ho	Rp × 10 ^a	備考
157	15.8	20.0	0.025	5.0	1.5	4.00	200	801	0.11	0.30	4.30	0.788 04	
158	25.3	19.8	0.025	5.0	5.0	3.96	200	792	0.18	1.00	4.96	0.127 05	
159	26.7	19.8	0.025	5.0	5.8	3.97	200	794	0.19	1.15	5.12	0.133 05	
160	35.8	19.7	0.025	5.0	5.9	3.94	200	788	0.26	1.18	5.11	0.179 05	
161	38.4	19.2	0.025	5.0	6.1	3.83	200	766	0.28	1.22	5.05	0.192 05	
162	45.4	19.8	0.025	5.0	7.0	3.95	200	791	0.33	1.39	5.35	0.227 05	
163	48.3	18.7	0.025	5.0	7.8	3.74	200	747	0.36	1.55	5.29	0.242 05	
164	52.7	19.1	0.025	5.0	7.8	3.83	200	766	0.39	1.56	5.39	0.264 05	
165	58.2	20.6	0.025	5.0	7.9	4.12	200	824	0.41	1.59	5.71	0.291 05	
166	59.5	20.0	0.025	5.0	10.0	4.00	200	799	0.43	1.99	5.99	0.298 05	
167	69.6	17.2	0.025	5.0	9.3	3.44	200	688	0.54	1.85	5.30	0.348 05	

実験データ一覧表

付表-4-4 土 研 4

Run	U_0 cm/s	h_0 cm	d_m cm	D cm	Z cm	h_0/D	D/d_m	h_0/d_m	Fr	Z/D	Z/h_0	$R_p \times 10^5$	備考
168	31.4	9.4	0.150	5.0	6.0	1.89	33.3	63	0.33	1.21	3.09	0.157 05	
169	27.5	10.0	0.150	5.0	3.4	2.00	33.3	67	0.28	0.68	2.68	0.138 05	
170	22.6	10.4	0.150	5.0	0.5	2.08	33.3	69	0.22	0.11	2.19	0.113 05	
171	38.2	10.0	0.150	5.0	7.5	2.00	33.3	66	0.39	1.49	3.49	0.191 05	
172	56.2	8.6	0.150	5.0	6.4	1.73	33.3	58	0.61	1.29	3.02	0.281 05	
173	45.8	9.6	0.150	5.0	7.0	1.91	33.3	64	0.47	1.41	3.32	0.229 05	
174	65.9	10.9	0.150	5.0	5.2	2.17	33.3	72	0.64	1.05	3.22	0.329 05	
175	67.6	12.0	0.150	5.0	4.3	2.40	33.3	80	0.62	0.86	3.25	0.338 05	
176	42.4	9.9	0.150	5.0	8.5	1.98	33.3	66	0.43	1.69	3.67	0.212 05	
177	40.6	25.3	0.150	5.0	7.8	5.05	33.3	168	0.26	1.55	6.60	0.203 05	
178	55.7	9.3	0.150	5.0	6.1	1.85	33.3	61	0.59	1.22	3.07	0.278 05	
179	66.9	11.8	0.150	5.0	4.6	2.36	33.3	79	0.62	0.91	3.27	0.335 05	
180	87.6	13.6	0.150	5.0	4.2	2.72	33.3	91	0.76	0.84	3.55	0.438 05	

付表-5 Taraporo

Run	U_0 cm/s	h_0 cm	d_m cm	D cm	Z cm	h_0/D	D/d_m	h_0/d_m	Fr	Z/D	Z/h_0	$R_p \times 10^5$	備考
181	53.3	7.0	0.050	5.1	6.1	1.37	101.6	140	0.65	1.20	2.57	0.271 05	
182	53.6	7.0	0.050	5.1	6.4	1.36	101.6	138	0.65	1.26	2.62	0.273 05	
183	53.0	7.0	0.050	5.1	6.4	1.38	101.6	140	0.64	1.26	2.64	0.269 05	
184	41.5	3.7	0.050	5.1	7.0	0.73	101.6	74	0.69	1.38	2.11	0.211 05	
185	39.6	11.7	0.050	5.1	6.7	2.30	101.6	234	0.37	1.32	3.62	0.201 05	
186	40.5	11.5	0.050	5.1	7.0	2.26	101.6	230	0.38	1.38	3.64	0.206 05	
187	39.3	11.8	0.050	5.1	7.0	2.33	101.6	237	0.37	1.38	3.71	0.200 05	
188	44.8	10.4	0.015	5.1	7.6	2.04	338.7	691	0.45	1.50	3.54	0.228 05	
189	76.2	6.1	0.015	5.1	6.7	1.20	338.7	407	0.99	1.32	2.52	0.387 05	
190	41.1	5.2	0.015	5.1	5.5	1.02	338.7	345	0.58	1.08	2.10	0.209 05	

実験データ一覧表

付表-6 石崎

Run	Uo cm/s	ho cm	dm cm	D cm	Z cm	ho/D	D/dm	ho/dm	Fr	Z/D	Z/ho	Rp × 10 ^a	備考
191	52.0	17.0	0.233	7.0	12.0	2.43	30	73	0.41	1.71	4.14	0.371 05	
192	49.3	14.0	0.233	7.0	10.1	2.00	30	60	0.42	1.44	3.44	0.345 05	
193	54.6	16.5	0.233	7.0	11.6	2.36	30	71	0.43	1.66	4.01	0.382 05	
194	45.2	15.5	0.233	14.0	13.6	1.11	60	67	0.37	0.97	2.08	0.632 05	
195	41.0	21.0	0.233	14.0	9.3	1.50	60	90	0.29	0.66	2.16	0.573 05	
196	35.0	14.0	0.233	14.0	9.4	1.00	60	60	0.30	0.67	1.67	0.490 05	
197	39.4	17.5	0.233	14.0	9.9	1.25	60	75	0.30	0.71	1.96	0.552 05	
198	43.8	16.0	0.233	14.0	7.8	1.14	60	69	0.35	0.56	1.70	0.613 05	

付表-7 石崎・本間

Run	Uo cm/s	ho cm	dm cm	D cm	Z cm	ho/D	D/dm	ho/dm	Fr	Z/D	Z/ho	Rp × 10 ^a	備考
199	26.0	25.0	0.030	15.0	9.8	1.67	500	833	0.17	0.65	2.32	0.390 05	
200	52.0	25.0	0.030	15.0	19.5	1.67	500	833	0.33	1.30	2.97	0.780 05	
201	78.0	25.0	0.030	15.0	25.0	1.67	500	833	0.50	1.67	3.33	0.117 06	
202	104.0	25.0	0.030	15.0	27.0	1.67	500	833	0.66	1.80	3.47	0.156 06	
203	123.0	25.0	0.030	15.0	29.8	1.67	500	833	0.79	1.98	3.65	0.185 06	
204	47.0	25.0	0.065	15.0	14.5	1.67	231	385	0.30	0.97	2.63	0.705 05	
205	62.0	25.0	0.065	15.0	16.3	1.67	231	385	0.40	1.08	2.75	0.930 05	
206	78.0	25.0	0.065	15.0	20.8	1.67	231	385	0.50	1.38	3.05	0.117 06	
207	94.0	25.0	0.065	15.0	24.3	1.67	231	385	0.60	1.62	3.28	0.141 06	
208	110.0	25.0	0.065	15.0	25.8	1.67	231	385	0.70	1.72	3.38	0.165 06	
209	26.0	25.0	0.025	15.0	18.8	1.67	600	1,000	0.17	1.25	2.92	0.390 05	
210	32.5	25.0	0.025	15.0	22.5	1.67	600	1,000	0.21	1.50	3.17	0.488 05	
211	39.0	25.0	0.025	15.0	24.3	1.67	600	1,000	0.25	1.62	3.28	0.585 05	
212	45.5	25.0	0.025	15.0	25.3	1.67	600	1,000	0.29	1.68	3.35	0.683 05	
213	52.0	25.0	0.025	15.0	27.0	1.67	600	1,000	0.33	1.80	3.47	0.780 05	

実験データ一覧表

付表-8 Chitale

Run	U_o cm/s	h_o cm	dm cm	D cm	Z cm	h_o/D	D/dm	h_o/dm	Fr	Z/D	Z/h_o	$Re \times 10^{-3}$	備考
214	24.4	38.1	0.024	17.4	11.6	2.19	724	1,588	0.13	0.67	2.86	0.423 05	
215	26.5	35.1	0.024	17.4	11.0	2.02	724	1,460	0.14	0.63	2.65	0.461 05	
216	30.8	30.2	0.024	17.4	17.1	1.74	724	1,257	0.18	0.98	2.72	0.535 05	
217	36.0	25.9	0.024	17.4	16.8	1.49	724	1,080	0.23	0.97	2.46	0.625 05	
218	50.9	18.3	0.024	17.4	21.3	1.05	724	762	0.38	1.23	2.28	0.884 05	
219	21.0	41.2	0.068	17.4	3.1	2.37	255	605	0.11	0.18	2.55	0.365 05	
220	24.4	38.1	0.068	17.4	6.1	2.19	255	560	0.13	0.35	2.55	0.423 05	
221	29.0	32.0	0.068	17.4	13.7	1.84	255	471	0.16	0.79	2.63	0.503 05	
222	36.0	25.9	0.068	17.4	17.7	1.49	255	381	0.23	1.02	2.51	0.625 05	
223	46.9	19.8	0.068	17.4	23.2	1.14	255	291	0.34	1.33	2.47	0.815 05	
224	52.7	17.7	0.068	17.4	21.9	1.02	255	260	0.40	1.26	2.28	0.916 05	
225	26.8	32.9	0.151	17.4	1.5	1.90	115	218	0.15	0.09	1.98	0.466 05	
226	31.4	29.6	0.151	17.4	9.4	1.70	115	196	0.18	0.54	2.25	0.545 05	
227	34.8	26.8	0.151	17.4	12.8	1.54	115	178	0.21	0.74	2.28	0.604 05	
228	43.6	21.3	0.151	17.4	21.9	1.23	115	141	0.30	1.26	2.49	0.757 05	
229	58.8	15.9	0.151	17.4	23.2	0.91	115	105	0.47	1.33	2.25	0.102 06	
230	24.4	38.1	0.016	17.4	15.9	2.19	1,086	2,381	0.13	0.91	3.11	0.423 05	
231	29.0	32.0	0.016	17.4	22.9	1.84	1,086	2,000	0.16	1.32	3.16	0.503 05	
232	36.0	25.9	0.016	17.4	27.4	1.49	1,086	1,619	0.22	1.58	3.07	0.625 05	
233	46.9	19.8	0.016	17.4	20.7	1.14	1,086	1,238	0.34	1.19	2.33	0.815 05	
234	57.6	16.2	0.016	17.4	22.0	0.93	1,086	1,009	0.46	1.26	2.19	0.100 06	

実験データ一覧表

付表-9 中 川

Run	U_o cm/s	h_o cm	dm cm	D cm	Z cm	h_o/D	D/dm	h_o/dm	Fr	Z/D	Z/h_o	$R_p \times 10^3$	備考
235	39.9	8.3	0.193	5.9	8.9	1.40	31	43	0.44	1.50	2.90	0.235 05	
236	36.9	11.9	0.193	5.9	5.9	2.01	31	62	0.34	1.00	3.01	0.218 05	
237	32.6	10.0	0.193	5.9	5.1	1.70	31	52	0.33	0.87	2.56	0.192 05	
238	30.9	14.0	0.193	5.9	3.7	2.37	31	72	0.26	0.62	2.99	0.182 05	
239	27.4	12.0	0.193	5.9	1.7	2.03	31	62	0.25	0.29	2.32	0.162 05	
240	44.8	9.8	0.193	8.9	13.4	1.10	46	51	0.46	1.50	2.60	0.399 05	
241	40.2	8.7	0.193	8.9	11.3	0.98	46	45	0.44	1.27	2.25	0.358 05	
242	37.0	9.6	0.193	8.9	11.1	1.08	46	50	0.38	1.25	2.33	0.330 05	
243	35.4	12.3	0.193	8.9	8.5	1.38	46	64	0.32	0.95	2.33	0.315 05	
244	28.3	5.8	0.193	8.9	3.6	0.65	46	30	0.38	0.40	1.05	0.251 05	
245	26.1	13.6	0.193	8.9	2.9	1.53	46	71	0.23	0.32	1.85	0.232 05	
246	44.0	9.9	0.193	14.0	16.8	0.71	73	51	0.45	1.20	1.91	0.617 05	
247	39.0	8.4	0.193	14.0	14.0	0.60	73	43	0.43	1.00	1.60	0.545 05	
248	37.0	9.6	0.193	14.0	14.0	0.68	73	50	0.38	1.00	1.68	0.519 05	
249	36.6	11.7	0.193	14.0	11.2	0.83	73	61	0.34	0.80	1.63	0.512 05	
250	26.1	13.6	0.193	14.0	7.0	0.97	73	71	0.23	0.50	1.47	0.365 05	
251	28.5	5.6	0.193	14.0	4.6	0.40	73	29	0.39	0.33	0.73	0.399 05	
252	44.7	4.8	0.068	1.5	3.1	3.19	22	70	0.65	2.07	5.25	0.670 04	
253	27.5	7.6	0.028	3.0	4.9	2.53	107	271	0.32	1.63	4.17	0.826 04	
254	39.4	5.4	0.028	1.5	3.5	3.57	54	191	0.54	2.34	5.91	0.591 04	
255	53.7	8.3	0.050	4.0	6.4	2.08	80	166	0.60	1.60	3.68	0.215 05	
256	36.2	9.6	0.050	3.0	5.0	3.18	60	191	0.38	1.67	4.85	0.109 05	
257	45.5	8.7	0.050	4.0	5.7	2.18	80	174	0.49	1.43	3.60	0.182 05	
258	30.8	6.4	0.026	4.0	5.5	1.60	154	246	0.39	1.38	2.98	0.123 05	

実験データ一覧表

付表-10 土 研

Run	U_o cm/s	h_o cm	d_m cm	D cm	Z cm	h_o/D	D/d_m	h_o/d_m	Fr	Z/D	Z/h_o	$R_p \times 10^3$	備考
259	42.0	20.0	0.450	30.0	10.5	0.7	67.0	44	0.30	0.35	1.02	0.126 06	
260	56.0	20.0	0.450	30.0	14.0	0.7	67.0	44	0.40	0.47	1.13	0.168 06	
261	70.0	20.0	0.450	30.0	32.5	0.7	67.0	44	0.50	1.08	1.75	0.210 06	
262	36.1	15.0	0.450	30.0	2.5	0.5	67.0	33	0.30	0.08	0.58	0.108 06	
263	48.2	15.0	0.450	30.0	9.0	0.5	67.0	33	0.40	0.30	0.80	0.145 06	
264	60.4	15.0	0.450	30.0	27.5	0.5	67.0	33	0.50	0.92	1.42	0.181 06	
265	72.6	15.0	0.450	30.0	33.0	0.5	67.0	33	0.60	1.10	1.60	0.218 06	
266	84.7	15.0	0.450	30.0	36.0	0.5	67.0	33	0.70	1.20	1.70	0.254 06	
267	36.1	15.0	0.450	30.0	3.0	0.5	67.0	33	0.30	0.10	0.60	0.108 06	
268	48.2	15.0	0.450	30.0	4.6	0.5	67.0	33	0.40	0.15	0.65	0.145 06	
269	60.4	15.0	0.450	30.0	24.0	0.5	67.0	33	0.50	0.80	1.30	0.181 06	
270	72.6	15.0	0.450	30.0	28.0	0.5	67.0	33	0.60	0.93	1.43	0.218 06	
271	84.7	15.0	0.450	30.0	33.5	0.5	67.0	33	0.70	1.12	1.62	0.254 06	
272	36.1	15.0	0.450	30.0	3.0	0.5	67.0	33	0.30	0.10	0.60	0.108 06	
273	48.2	15.0	0.450	30.0	4.0	0.5	67.0	33	0.40	0.13	0.63	0.145 06	
274	60.4	15.0	0.450	30.0	17.0	0.5	67.0	33	0.50	0.57	1.07	0.181 06	
275	72.6	15.0	0.450	30.0	31.0	0.5	67.0	33	0.60	1.03	1.53	0.218 06	
276	84.7	15.0	0.450	30.0	34.0	0.5	67.0	33	0.70	1.13	1.63	0.254 06	
277	48.2	15.0	0.450	30.0	4.5	0.5	67.0	33	0.40	0.15	0.66	0.145 06	
278	60.4	15.0	0.450	30.0	11.0	0.5	67.0	33	0.50	0.37	0.87	0.181 06	
279	72.6	15.0	0.450	30.0	22.0	0.5	67.0	33	0.60	0.73	1.23	0.218 06	
280	84.7	15.0	0.450	30.0	30.0	0.5	67.0	33	0.70	1.00	1.50	0.254 06	

実験データ一覧表

付表-11・1 吉川・福岡 et.al

Run	Uo cm/s	ho cm	dm cm	D cm	Z cm	ho/D	D/dm	ho/dm	Fr	Z/D	Z/ho	Rp × 10 ³	備考
281	43.2	8.0	0.021	6.0	5.3	1.33	286	381	0.49	0.88	2.22	0.259 05	
282	47.0	8.9	0.021	6.0	7.4	1.48	286	424	0.50	1.23	2.72	0.282 05	
283	29.1	13.2	0.021	6.0	5.1	2.20	286	629	0.26	0.85	3.05	0.175 05	
284	20.6	13.9	0.021	6.0	2.0	2.32	286	662	0.18	0.33	2.65	0.124 05	
285	24.3	12.8	0.021	6.0	5.0	2.13	286	610	0.22	0.83	2.97	0.146 05	
286	36.9	11.3	0.021	6.0	7.4	1.88	286	538	0.35	1.22	3.11	0.221 05	
287	48.7	10.5	0.021	6.0	8.5	1.75	286	500	0.48	1.21	3.17	0.292 05	
288	53.7	11.1	0.021	6.0	9.6	1.85	286	529	0.52	1.59	3.44	0.322 05	
289	62.5	11.5	0.021	6.0	10.1	1.92	286	548	0.59	1.68	3.59	0.375 05	
290	20.7	13.9	0.021	6.0	3.1	2.32	286	662	0.18	0.52	2.83	0.124 05	
291	26.1	13.7	0.021	6.0	5.7	2.28	286	652	0.23	0.95	3.23	0.157 05	
292	30.6	13.2	0.021	6.0	6.1	2.20	286	629	0.27	1.02	3.22	0.184 05	
293	32.0	13.1	0.021	6.0	6.4	2.18	286	624	0.28	1.06	3.24	0.192 05	
294	35.7	12.6	0.021	6.0	6.6	2.10	286	600	0.32	1.09	3.19	0.214 05	
295	43.2	13.4	0.021	6.0	5.9	2.23	286	638	0.38	0.98	3.22	0.259 05	
296	55.3	7.9	0.021	6.0	9.8	1.32	286	376	0.63	1.63	2.95	0.332 05	
297	86.4	7.0	0.021	6.0	10.1	1.17	286	333	1.04	1.68	2.85	0.518 05	
298	79.2	6.3	0.021	6.0	9.5	1.05	286	300	1.09	1.58	2.63	0.475 05	
299	24.4	13.5	0.021	6.0	0.7	2.25	286	643	0.21	0.12	2.37	0.146 05	
300	27.6	13.2	0.021	6.0	3.0	2.20	286	629	0.24	0.50	2.70	0.166 05	
301	34.6	9.2	0.021	6.0	4.5	1.53	286	438	0.36	0.75	2.28	0.203 05	
302	62.5	8.0	0.021	6.0	9.4	1.33	286	381	0.71	1.57	2.90	0.375 05	

実験データ一覧表

付表-11・2 吉川・福田 et al

Run	U_0 cm/s	h_0 cm	dm cm	D cm	Z cm	h_0/D	D/dm	h_0/dm	Fr	Z/D	Z/h_0	$R_p \times 10^3$	備考
303	93.9	8.0	0.021	6.0	9.0	1.33	286	381	1.06	1.50	2.83	0.563 05	
304	118.0	6.0	0.021	6.0	10.2	1.00	286	286	1.54	1.70	2.70	0.708 05	
305	18.4	11.6	0.021	6.0	1.3	1.93	286	552	0.17	0.22	2.15	0.110 05	
306	18.4	9.8	0.021	6.0	3.4	1.63	286	467	0.19	0.57	2.20	0.110 05	
307	41.2	9.6	0.021	6.0	7.6	1.60	286	457	0.43	1.27	2.87	0.247 05	
308	58.2	7.7	0.021	6.0	7.8	1.28	286	367	0.67	1.30	2.58	0.349 05	
309	39.0	6.7	0.021	6.0	5.9	1.12	286	319	0.48	0.98	2.10	0.234 05	
310	35.7	8.6	0.021	6.0	6.7	1.44	286	410	0.39	1.12	2.56	0.214 05	
311	41.4	8.3	0.021	6.0	7.4	1.39	286	396	0.46	1.24	2.62	0.248 05	
312	62.2	10.1	0.021	6.0	9.6	1.68	286	481	0.63	1.60	3.28	0.373 05	
313	70.0	7.4	0.021	6.0	9.9	1.23	286	350	0.83	1.64	2.87	0.420 05	
314	63.8	8.3	0.021	6.0	9.4	1.38	286	395	0.71	1.57	2.95	0.383 05	
315	71.4	5.2	0.021	6.0	9.2	0.87	286	248	1.00	1.53	2.40	0.428 05	
316	29.5	10.6	0.021	6.0	5.1	1.77	286	505	0.29	0.86	2.62	0.177 05	
317	47.5	8.1	0.021	6.0	9.2	1.35	286	385	0.53	1.53	2.88	0.285 05	
318	59.4	8.5	0.021	6.0	8.8	1.42	286	405	0.65	1.46	2.88	0.356 05	
319	78.3	7.7	0.021	6.0	10.3	1.28	286	364	0.90	1.71	2.98	0.470 05	
320	75.1	8.1	0.021	6.0	9.6	1.36	286	388	0.84	1.59	2.95	0.451 05	
321	67.1	7.7	0.021	6.0	10.0	1.28	286	367	0.77	1.67	2.95	0.403 05	
322	45.6	3.3	0.021	6.0	5.1	0.55	286	157	0.80	0.85	1.40	0.274 05	
323	33.3	3.3	0.021	6.0	5.1	0.55	286	157	0.59	0.85	1.40	0.200 05	
324	68.7	3.1	0.021	6.0	6.0	0.52	286	148	1.25	1.00	1.52	0.412 05	
325	63.4	4.0	0.021	6.0	6.6	0.67	286	190	1.01	1.10	1.77	0.380 05	
326	63.4	3.6	0.021	6.0	6.5	0.60	286	171	1.07	1.08	1.68	0.380 05	
327	63.4	3.6	0.021	6.0	6.5	0.60	286	171	1.07	1.08	1.68	0.380 05	
328	51.3	3.3	0.021	6.0	6.4	0.55	286	157	0.90	1.07	1.62	0.308 05	

付表-12・1 土 研

実験データ一覧表

Run	流速 U_0 cm/s	ho cm	dm cm	D cm	Z cm	ho/D	D/dm	ho/dm	Fr	Z/D	Z/ho	$R_p \times 10^6$	Ns	備考
364	22.0	147.5	0.022	76	35.9	1.94	3,454	6,705	0.06	0.47	0.24	1.672	05	3.69
365	22.0	149.4	0.022	52	19.2	2.87	2,363	6,791	0.06	0.37	0.13	1.144	05	3.69
366	44.0	150.7	0.022	32	22.5	4.74	1,454	6,850	0.11	0.70	0.15	1.408	05	7.37
367	44.0	147.5	0.022	76	39.4	1.94	3,454	6,705	0.12	0.52	0.27	3.344	05	7.37
368	44.0	149.4	0.022	52	25.6	2.87	2,363	6,791	0.12	0.49	0.17	2.288	05	7.37
369	17.0	100.4	0.022	32	6.7	3.16	1,454	4,564	0.05	0.21	0.07	0.544	05	2.85
370	17.0	97.5	0.022	102	17.5	0.96	4,636	4,432	0.05	0.17	0.18	1.734	05	2.85
371	17.0	99.9	0.022	52	6.2	1.92	2,363	4,541	0.05	0.12	0.06	0.884	05	2.85
372	33.0	100.4	0.022	32	15.4	3.16	1,454	4,564	0.11	0.48	0.15	1.056	05	5.53
373	33.0	97.5	0.022	102	18.6	0.96	4,636	4,432	0.11	0.18	0.19	3.366	05	5.53
374	33.0	99.9	0.022	52	13.8	1.92	2,363	4,541	0.11	0.27	0.14	1.716	05	5.53
375	50.0	100.4	0.022	32	31.8	3.16	1,454	4,564	0.16	0.99	0.32	1.600	05	8.38
376	50.0	97.5	0.022	102	45.7	0.96	4,636	4,432	0.16	0.45	0.47	5.100	05	8.38
377	50.0	99.9	0.022	52	31.6	1.92	2,363	4,541	0.16	0.61	0.32	2.600	05	8.38
378	67.0	100.4	0.022	32	45.7	3.16	1,454	4,564	0.21	1.43	0.46	2.144	05	11.23
379	67.0	97.5	0.022	102	81.5	0.96	4,636	4,432	0.22	0.8	0.84	6.834	05	11.23
380	67.0	99.9	0.022	52	48.2	1.92	2,363	4,541	0.21	0.93	0.48	3.484	05	11.23
381	28.0	60.5	0.022	32	7.4	1.90	1,454	2,750	0.11	0.23	0.12	0.896	05	4.69
382	28.0	60.0	0.022	102	7.2	0.59	4,636	2,727	0.12	0.07	0.12	2.856	05	4.69
383	28.0	59.3	0.022	22	6.4	2.75	1,000	2,695	0.12	0.29	0.11	0.616	05	4.69
384	42.0	60.5	0.022	32	26.2	1.90	1,454	2,750	0.17	0.82	0.43	1.344	05	7.04
385	42.0	60.0	0.022	102	31.5	0.59	4,636	2,727	0.17	0.31	0.53	4.284	05	7.04
386	42.0	59.3	0.022	22	17.8	2.75	1,000	2,695	0.17	0.81	0.30	0.924	05	7.04
387	54.0	60.4	0.022	32	46.1	1.90	1,454	2,745	0.23	1.44	0.76	1.728	05	9.05
388	54.0	61.4	0.022	102	70.2	0.60	4,636	2,791	0.22	0.69	1.14	5.508	05	9.05
389	54.0	61.3	0.022	22	27.8	2.84	1,000	2,786	0.22	1.26	0.45	1.188	05	9.05
390	66.0	60.3	0.022	32	33.1	1.90	1,454	2,741	0.28	1.03	0.55	2.112	05	11.07
391	67.0	59.7	0.022	102	84.5	0.59	4,636	2,714	0.29	0.83	1.42	6.834	05	11.23
392	71.0	56.1	0.022	22	32.4	2.60	1,000	2,550	0.32	1.47	0.58	1.562	05	11.90
393	79.0	78.4	0.022	32	31.5	2.97	1,454	3,564	0.23	0.98	0.40	2.528	05	13.25
394	83.0	54.3	0.022	102	103.0	0.53	4,636	2,468	0.40	1.01	1.90	8.466	05	13.92
395	88.0	48.8	0.022	22	33.1	2.26	1,000	2,218	0.47	1.50	0.68	1.936	05	14.75
396	96.0	58.5	0.022	32	47.7	1.84	1,454	2,659	0.42	1.49	0.82	3.072	05	16.10
397	97.0	59.3	0.022	102	98.5	0.58	4,636	2,695	0.41	0.97	1.66	9.894	05	16.26
398	101.0	56.7	0.022	22	33.8	2.63	1,000	2,577	0.44	1.54	0.60	2.222	05	16.93

大型水路による実験

実験データ一覧表

付表-12・2 土研

Run	流速 U_0 cm/s	ho cm	dm cm	D cm	Z cm	ho/D	D/dm	ho/dm	Fr	Z/D	Z/ho	$R_p \times 10^4$	Ns	備考
399	111.0	64.4	0.022	32	46.0	2.03	1,454	2,927	0.41	1.44	0.71	3.552 05	18.61	
400	108.0	59.6	0.022	102	106.0	0.59	4,636	2,709	0.46	1.04	1.78	11.016 05	18.11	
401	114.0	53.4	0.022	22	38.3	2.47	1,000	2,427	0.55	1.74	0.72	2.508 05	19.11	
402	28.0	30.4	0.022	32	8.6	0.96	1,454	1,382	0.16	0.27	0.28	0.896 05	4.69	
403	28.0	30.2	0.022	51	9.3	0.59	2,318	1,373	0.16	0.18	0.31	1.428 05	4.69	
404	28.0	31.5	0.022	14	6.2	2.25	1,818	1,432	0.15	0.44	0.20	0.392 05	4.69	
405	40.0	30.8	0.022	32	20.9	0.97	1,454	1,400	0.24	0.65	0.68	1.280 05	6.71	
406	42.0	30.5	0.022	51	30.2	0.60	2,318	1,386	0.24	0.59	0.99	2.142 05	7.04	
407	40.0	32.4	0.022	14	11.5	2.31	1,818	1,473	0.22	0.82	0.35	0.560 05	6.71	
408	50.0	31.2	0.022	32	33.2	0.98	1,454	1,418	0.30	1.04	1.06	1.600 05	8.38	
409	52.0	33.1	0.022	51	42.6	0.65	2,318	1,505	0.28	0.84	1.29	2.652 05	8.72	
410	56.0	31.9	0.022	14	16.9	2.28	1,818	1,450	0.29	1.21	0.53	0.784 05	9.39	
411	60.0	35.9	0.022	32	35.3	1.13	1,454	1,632	0.31	1.10	0.98	1.920 05	10.06	
412	63.0	34.3	0.022	51	51.1	0.68	2,318	1,559	0.33	1.00	1.49	3.213 05	10.56	
413	69.0	30.0	0.022	14	19.7	2.14	1,818	1,364	0.40	1.41	0.66	0.966 05	11.57	
414	73.0	41.1	0.022	32	26.1	1.29	1,454	1,868	0.30	0.82	0.64	2.336 05	12.24	
415	80.0	33.6	0.022	51	54.5	0.66	2,318	1,527	0.41	1.07	1.62	4.080 05	13.41	
416	88.0	29.2	0.022	14	21.6	2.09	1,818	1,327	0.51	1.54	0.74	1.231 05	14.75	
417	83.0	44.0	0.022	32	29.9	1.38	1,454	2,000	0.32	0.93	0.68	2.656 05	13.92	
418	94.0	31.0	0.022	51	56.6	0.61	2,318	1,409	0.54	1.11	1.83	4.794 05	15.76	
419	104.0	28.5	0.022	14	21.2	2.04	1,818	1,295	0.61	1.51	0.74	1.456 05	17.44	
420	89.0	51.4	0.022	32	33.3	1.62	1,454	2,336	0.29	1.04	0.65	2.848 05	14.92	
421	101.0	32.5	0.022	51	59.3	0.64	2,318	1,477	0.58	1.16	1.82	5.151 05	16.93	
422	117.0	30.8	0.022	14	20.9	2.20	1,818	1,400	0.62	1.49	0.68	1.638 05	19.62	
423	38.5	26.0	0.022	8.9	9.6	2.92	405	1,182	0.24	1.08	0.37	0.343 05	6.45	
424	40.8	24.5	0.022	31.8	27.6	0.77	1,445	1,114	0.26	0.87	1.13	1.297 05	6.84	
425	44.8	22.3	0.022	16.5	15.3	1.35	750	1,014	0.30	0.93	0.69	0.739 05	7.51	
426	45.8	25.5	0.022	8.9	11.6	2.87	405	1,159	0.29	1.30	0.45	0.407 05	7.68	
427	49.2	23.7	0.022	31.8	27.2	0.75	1,445	1,077	0.32	0.86	1.15	1.564 05	8.25	
428	53.3	21.9	0.022	16.5	16.9	1.33	750	996	0.36	1.02	0.77	0.879 05	8.94	
429	53.1	25.1	0.022	8.9	12.9	2.82	405	1,141	0.34	1.45	0.51	0.473 05	8.90	
430	54.0	24.7	0.022	31.8	28.8	0.78	1,445	1,122	0.35	0.91	1.17	1.717 05	9.05	
431	59.5	22.4	0.022	16.5	17.3	1.36	750	1,018	0.40	1.05	0.77	0.982 05	9.98	
432	56.4	26.6	0.022	8.9	12.0	3.00	405	1,209	0.35	1.35	0.45	0.502 05	9.46	
433	61.7	24.3	0.022	31.8	31.5	0.76	1,445	1,105	0.40	0.99	1.30	1.962 05	10.34	

構造物水路による実験

実験データ一覧表

付表—12—3—土研

Run	流速 U_0 cm/s	ho cm	dm cm	D cm	Z cm	ho/D	D/dm	ho/dm	Fr	Z/D	Z/ho	$R_p \times 10^3$	Ns	備考
434	71.4	21.0	0.022	16.5	19.9	1.27	750	955	0.50	1.21	0.95	1.178 05	11.97	大よる 水実験 に
435	59.5	28.0	0.022	8.9	11.8	3.15	405	1,272	0.36	1.33	0.42	0.529 05	9.98	
436	69.7	23.9	0.022	31.8	35.8	0.75	1,445	1,086	0.46	1.13	1.50	2.216 05	11.69	
437	72.5	23.0	0.022	16.5	19.9	1.39	750	1,046	0.49	1.21	0.87	1.196 05	12.16	
438	52.8	63.1	0.022	31.8	29.8	1.98	1,445	2,868	0.21	0.94	0.47	1.679 05	8.85	
439	18.1	8.3	0.022	2.6	4.2	3.19	118	377	0.20	1.62	0.51	0.047 05	3.03	
440	20.8	7.2	0.022	4.8	5.2	1.50	218	327	0.25	1.08	0.72	0.099 05	3.49	
441	22.1	6.8	0.022	8.9	6.0	0.76	405	309	0.27	0.67	0.88	0.197 05	3.70	
442	21.9	8.0	0.022	2.6	3.4	3.08	118	364	0.25	1.31	0.43	0.057 05	3.67	
443	21.6	8.1	0.022	4.8	2.1	1.69	218	368	0.24	0.44	0.26	0.104 05	3.62	
444	24.3	7.2	0.022	8.9	5.8	0.81	405	327	0.29	0.65	0.81	0.216 05	4.07	構造物水路に よる実験
445	21.5	9.3	0.022	2.6	2.8	3.58	118	423	0.23	1.08	0.30	0.056 05	3.60	
446	25.0	8.0	0.022	4.8	4.6	1.67	218	364	0.28	0.96	0.58	0.120 05	4.19	
447	24.4	8.2	0.022	8.9	5.9	0.92	405	373	0.27	0.66	0.72	0.217 05	4.09	
448	23.0	9.8	0.022	2.6	4.0	3.77	118	446	0.24	1.54	0.41	0.060 05	3.86	
449	24.7	9.1	0.022	4.8	3.8	1.90	218	414	0.26	0.79	0.42	0.119 05	4.14	
450	26.5	8.5	0.022	8.9	8.3	0.96	405	386	0.29	0.93	0.98	0.236 05	4.44	
451	25.8	9.7	0.022	2.6	2.9	3.73	118	441	0.27	1.12	0.30	0.250 05	4.33	
452	24.8	10.1	0.022	4.8	3.2	2.10	218	459	0.25	0.67	0.32	0.119 05	4.16	
453	27.8	9.0	0.022	8.9	5.7	1.01	405	409	0.30	0.64	0.63	0.247 05	4.66	
454	26.7	10.3	0.022	2.6	2.9	3.96	118	468	0.27	1.12	0.28	0.069 05	4.48	
455	25.9	10.6	0.022	4.8	5.6	2.21	218	482	0.25	1.17	0.53	0.124 05	4.34	
456	29.9	9.2	0.022	8.9	8.1	1.03	405	418	0.32	0.91	0.88	0.266 05	5.01	
457	24.0	12.5	0.022	11.4	5.7	1.10	518	568	0.22	0.50	0.46	0.274 05	4.02	
458	26.5	11.3	0.022	4.8	5.0	2.35	218	514	0.25	1.04	0.44	0.127 05	4.44	
459	28.3	10.6	0.022	16.5	9.2	0.64	750	482	0.28	0.56	0.87	0.467 05	4.74	
460	24.8	14.1	0.022	11.4	7.0	1.24	518	641	0.21	0.61	0.50	0.283 05	4.15	
461	28.7	12.2	0.022	4.8	6.4	2.54	218	555	0.26	1.33	0.52	0.138 05	4.81	
462	28.9	12.1	0.022	16.5	14.1	0.73	750	550	0.27	0.85	1.17	0.477 05	4.85	
463	28.8	13.9	0.022	11.4	7.8	1.22	518	632	0.25	0.68	0.56	0.328 05	4.83	
464	30.3	13.2	0.022	4.8	4.4	2.75	218	600	0.27	0.92	0.33	0.145 05	5.08	
465	37.0	10.8	0.022	16.5	12.9	0.66	750	491	0.36	0.78	1.19	0.610 05	6.20	
466	31.5	14.3	0.022	11.4	10.4	1.25	518	650	0.27	0.91	0.73	0.359 05	5.28	
467	32.4	13.9	0.022	4.8	6.6	2.90	218	632	0.28	1.38	0.47	0.155 05	5.43	
468	35.2	12.8	0.022	16.5	13.3	0.78	750	582	0.31	0.81	1.04	0.581 05	5.90	

実験データ一覧表

付表-12-4-土研

Run	流速 U_0 cm/s	h ₀ cm	dm cm	D cm	Z cm	h ₀ /D	D/dm	h ₀ /dm	Fr	Z/D	Z/h ₀	R _p × 10°	N _s	備考
469	35.5	14.1	0.022	11.4	11.0	1.24	518	641	0.30	0.96	0.78	0.405 05	5.95	構造物水路実験
470	36.8	13.6	0.022	4.8	5.4	2.83	218	618	0.32	1.13	0.40	0.177 05	6.17	
471	38.5	13.0	0.022	16.5	13.6	0.79	750	591	0.34	0.82	1.05	0.635 05	6.45	
472	36.2	15.2	0.022	11.4	11.0	1.33	518	691	0.30	0.96	0.72	0.413 05	6.07	
473	38.7	14.2	0.022	4.8	5.4	2.96	218	646	0.33	1.10	0.38	0.186 05	6.49	
474	40.7	13.5	0.022	16.5	13.6	0.82	750	614	0.35	0.89	1.00	0.265 05	6.82	
475	23.4	6.4	0.047	2.6	3.8	2.46	55	136	0.30	1.46	0.59	0.061 05	2.68	
476	23.8	6.3	0.047	4.8	5.5	1.31	102	134	0.30	1.15	0.87	0.114 05	2.73	
477	25.9	5.8	0.047	0.9	7.2	0.65	189	123	0.34	0.81	1.24	0.231 05	2.97	
478	25.3	6.6	0.047	2.6	3.9	2.54	55	140	0.32	1.50	1.83	0.066 05	2.90	
479	25.6	6.5	0.047	4.8	6.0	1.35	102	138	0.32	1.25	0.92	0.123 05	2.94	流砂水路による実験
480	27.8	6.0	0.047	8.9	8.8	0.67	189	128	0.36	0.99	1.47	0.247 05	3.19	
481	24.8	7.4	0.047	2.6	3.9	2.85	55	157	0.29	1.50	0.53	0.064 05	2.84	
482	25.5	7.2	0.047	4.8	5.8	1.50	102	153	0.30	1.21	0.81	0.024 05	2.93	
483	28.6	6.4	0.047	8.9	9.4	0.72	189	136	0.36	1.06	1.47	0.255 05	3.28	
484	33.3	6.0	0.047	2.6	4.1	2.31	55	128	0.43	1.58	0.68	0.087 05	3.82	
485	31.3	6.4	0.047	4.8	4.5	1.33	102	136	0.40	0.94	0.70	0.150 05	3.59	
486	36.4	5.5	0.047	8.9	6.5	0.62	189	117	0.50	0.73	1.18	0.324 05	4.18	
487	32.8	6.6	0.047	2.6	5.6	2.54	55	140	0.41	2.15	0.85	0.085 05	3.76	
488	29.7	7.3	0.047	4.8	4.2	1.52	102	155	0.35	0.88	0.58	0.143 05	3.41	
489	31.4	6.9	0.047	8.9	5.2	0.78	189	147	0.38	0.58	0.75	0.279 05	3.60	大型水路に
490	31.5	7.4	0.047	2.6	4.2	2.85	55	157	0.37	1.62	0.57	0.082 05	3.61	
491	29.9	7.8	0.047	4.8	4.2	1.63	102	166	0.34	0.88	0.54	0.144 05	3.43	
492	31.1	7.5	0.047	8.9	6.3	0.84	189	160	0.36	0.71	0.84	0.277 05	3.57	
493	39.1	6.4	0.047	2.6	3.1	2.46	55	136	0.49	1.19	0.48	0.102 05	4.49	
494	46.3	5.4	0.047	4.8	4.8	1.13	102	115	0.64	1.00	0.89	0.222 05	5.31	
495	51.0	4.9	0.047	8.9	7.2	0.55	189	104	0.74	0.81	1.47	0.454 05	5.85	
496	47.6	5.6	0.047	2.6	4.4	2.15	55	119	0.64	1.69	0.79	0.124 05	5.46	
497	55.6	4.8	0.047	4.8	4.8	1.00	102	102	0.81	1.00	1.00	0.267 05	6.38	
498	50.3	5.3	0.047	8.9	8.1	0.60	189	113	0.70	0.91	1.53	0.448 05	5.77	
499	38.3	7.4	0.047	2.6	2.7	2.85	55	157	0.45	1.04	0.36	0.100 05	4.39	大型水路に
500	54.5	5.2	0.047	4.8	3.4	1.08	102	111	0.76	0.71	0.65	0.262 05	6.25	
501	65.9	4.3	0.047	8.9	8.6	0.48	189	92	1.01	0.97	2.00	0.587 05	7.56	
502	83.7	45.8	0.022	47.0	56.7	0.97	2,136	2,082	0.40	1.21	1.24	0.131 05	14.03	大型水路に
503	80.0	47.9	0.022	16.5	26.2	2.90	750	2,177	0.37	1.59	0.55	0.790 05	13.41	

Run	流速 U_0 cm/s	ho cm	dm cm	D cm	Z cm	ho/D	D/dm	ho/dm	Fr	Z/D	Z/ho	$R_p \times 10^4$	Ns	備考
504	122.5	40.8	0.022	47.0	57.3	0.87	2,136	1,855	0.61	1.22	1.40	5.758	05	大型水路による実験
505	118.5	42.2	0.022	16.5	29.8	2.56	750	1,918	0.58	1.81	0.71	1.955	05	
506	112.8	49.4	0.022	47.0	69.6	1.05	2,136	2,245	0.52	1.48	1.41	5.302	05	
507	143.4	43.0	0.022	16.5	26.0	2.61	750	1,955	0.70	1.58	0.60	2.366	05	
508	79.8	16.7	0.022	6.0	10.5	2.78	273	759	0.62	1.75	0.69	0.479	05	
509	83.3	16.0	0.022	31.8	32.5	0.50	1,445	727	0.67	1.02	2.03	2.649	05	
510	68.4	19.5	0.022	21.6	23.8	0.90	982	886	0.50	1.10	1.22	1.477	05	
511	77.2	20.5	0.022	6.0	6.3	3.42	273	932	0.55	1.05	0.31	0.463	05	
512	93.1	17.0	0.022	31.8	29.5	0.58	1,445	773	0.72	0.93	1.74	2.961	05	
513	88.5	17.9	0.022	21.6	25.8	0.83	982	834	0.67	1.19	1.44	1.912	05	
514	84.1	21.8	0.022	6.0	5.9	3.63	273	991	0.58	0.98	0.27	0.505	05	
515	92.6	19.8	0.022	31.8	35.5	0.62	1,445	900	0.67	1.12	1.79	2.945	05	
516	102.4	17.9	0.022	21.6	29.2	0.89	981	814	0.77	1.35	1.63	2.212	05	
517	90.2	23.1	0.022	6.0	7.5	3.85	273	1,050	0.60	1.25	0.32	0.541	05	
518	106.8	19.5	0.022	31.8	37.9	0.61	1,445	886	0.77	1.19	1.94	3.396	05	
519	111.4	18.7	0.022	21.6	27.6	0.87	982	850	0.82	1.28	1.48	2.406	05	
520	12.2	4.1	0.022	1.8	0.8	2.28	82	186	0.19	0.44	0.20	0.022	05	
521	10.0	5.0	0.022	3.2	0.8	1.56	145	227	0.14	0.25	0.16	0.032	05	構造物水路による実験
522	9.8	5.1	0.022	8.9	0.9	0.57	405	232	0.14	0.10	0.18	0.087	05	
523	17.9	4.2	0.022	1.8	1.9	2.33	82	191	0.28	1.06	0.45	0.032	05	
524	16.0	4.7	0.022	3.2	2.2	1.47	145	214	0.24	0.69	0.47	0.051	05	
526	15.0	5.0	0.022	8.9	2.5	0.56	405	227	0.21	0.28	0.50	0.134	05	
527	22.7	4.4	0.022	1.8	1.9	2.44	82	200	0.35	1.06	0.43	0.041	05	
528	22.7	4.4	0.022	3.2	2.7	1.38	145	200	0.35	0.84	0.61	0.073	05	
529	23.8	4.2	0.022	8.9	6.2	0.47	405	191	0.37	0.70	1.48	0.212	05	
530	25.0	5.0	0.022	1.8	2.7	2.78	82	227	0.36	1.50	0.54	0.045	05	
531	26.6	4.7	0.022	3.2	5.9	1.47	145	214	0.39	1.84	1.26	0.085	05	
532	30.5	4.1	0.022	8.9	6.7	0.46	405	186	0.48	0.75	1.63	0.271	05	
533	25.0	6.0	0.022	1.8	2.0	3.33	82	273	0.33	1.11	0.33	0.045	05	
534	36.6	4.1	0.022	3.2	5.1	1.28	145	186	0.58	1.59	1.24	0.117	05	
535	32.6	4.6	0.022	8.9	7.0	0.52	405	209	0.49	0.79	1.52	0.290	05	
536	28.2	6.2	0.022	1.8	2.4	3.44	82	282	0.36	1.33	0.39	0.051	05	
537	38.0	4.6	0.022	3.2	4.6	1.44	145	209	0.57	1.44	1.00	0.122	05	
538	38.9	4.5	0.022	8.9	8.0	0.51	405	205	0.59	0.90	1.78	0.346	05	
539	27.8	7.2	0.022	1.8	2.6	4.00	82	327	0.41	1.44	0.36	0.050	05	

実験データ一覧表

付表-12・6 土 研

Run	流速 U_o cm/s	h_o cm	d_m cm	D cm	Z cm	h_o/D	D/d_m	h_o/d_m	Fr	Z/D	Z/h_o	$R_p \times 10^5$	Ns	備考
540	42.6	4.7	0.022	3.2	4.0	1.47	145	214	0.63	1.25	0.85	0.136 05	7.14	構造物水路による実験
541	46.5	4.3	0.022	8.9	7.1	0.48	405	195	0.72	0.80	1.65	0.414 05	7.80	
542	45.0	5.0	0.022	1.8	2.6	2.78	82	227	0.64	1.44	0.52	0.081 05	7.54	
543	56.3	4.0	0.022	3.2	6.6	1.25	145	182	0.90	2.06	1.65	0.180 05	9.44	
544	52.3	4.3	0.022	8.9	9.7	0.48	405	195	0.81	1.09	2.26	0.465 05	8.77	
545	49.0	5.1	0.022	1.8	2.4	2.83	82	232	0.69	1.33	0.47	0.088 05	8.22	
546	44.6	5.6	0.022	3.2	4.5	1.75	145	255	0.60	1.41	0.80	0.143 05	7.48	
547	52.1	4.8	0.022	8.9	8.9	0.54	405	218	0.76	1.00	1.85	0.464 05	8.74	
548	47.4	5.8	0.022	1.8	2.7	3.22	82	264	0.63	1.50	0.47	0.085 05	7.95	
549	55.0	5.0	0.022	3.2	6.2	1.56	145	227	0.79	1.94	1.24	0.176 05	9.22	
550	56.1	4.9	0.022	8.9	9.0	0.55	405	223	0.81	1.01	1.84	0.499 05	9.41	
551	48.4	6.2	0.022	1.8	2.7	3.44	82	282	0.62	1.50	0.44	0.087 05	8.11	
552	71.4	4.2	0.022	3.2	5.0	1.31	145	191	1.11	1.56	1.19	0.228 05	11.97	
553	65.2	4.6	0.022	8.9	9.5	0.52	405	209	0.97	1.07	2.07	0.580 05	10.93	
554	87.4	26.7	0.022	21.6	30.7	1.24	981	1,214	0.54	1.42	1.15	1.888 05	14.65	大型水路による実験
555	114.7	40.7	0.022	21.6	35.5	1.88	981	1,850	0.57	1.64	0.78	2.478 05	19.23	
556	90.4	25.8	0.022	21.6	32.6	1.19	981	1,173	0.57	1.51	1.26	1.953 05	15.16	
557	114.4	40.8	0.022	21.6	37.1	1.89	981	1,855	0.57	1.72	0.91	2.471 05	19.18	
558	35.3	8.5	0.022	3.2	2.8	2.66	145	386	0.39	0.88	0.33	0.113 05	5.92	
559	49.6	8.4	0.022	3.2	3.8	2.63	145	382	0.55	1.19	0.45	0.159 05	8.32	
560	64.3	8.3	0.022	3.2	2.8	2.59	145	377	0.71	0.68	0.34	0.206 05	10.78	
561	68.4	9.5	0.022	3.2	2.9	2.97	145	432	0.71	0.63	0.31	0.219 05	11.47	

橋脚による局所洗掘深の予測と
対策に関する水理的検討

土研資料第1797号
ISSN 0386-5878
昭和57年3月(1982年)

須賀 堯三・高橋 晃
坂野 章

キーワード：局所流，局所洗掘

要旨

橋脚における局所洗掘と対策に関する実験，現地調査結果
および洗掘深の推定法を検討した結果を述べたものである。

郵便はがき

3 0 5 - □ □

四十円切手
をはって下
さい

茨城県筑波郡

豊里町大字旭一番地

建設省土木研究所

河川研究室 御中

No. _____

土木研究所資料第1797号

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第1797号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印