

4. 開水路橋脚洗掘実験（テーマー 3）

4-1. 実験の目的

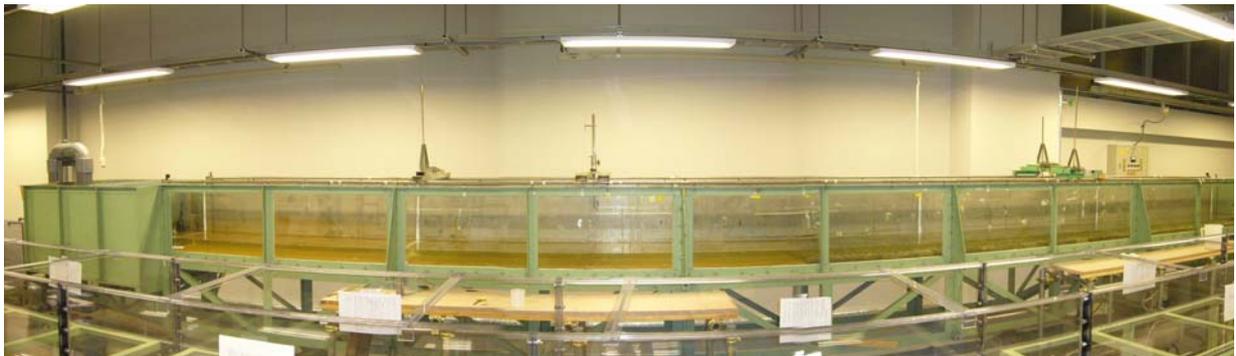
実際の河川においては、河床は砂やレキなどにより構成されている。そのため、洪水時には、河道に設置された構造物の周辺では流れの偏向による局所的な洗掘が生じ、場合によっては洗掘により構造物が倒壊する事がある。（参考に写真を示す）

本実験では、このような構造物による局所的な洗掘現象の代表的な例として「橋脚の洗掘現象」を例に橋脚周辺部に生じる局所流による洗掘現象について計測を行い、流速（フルード数）、河床材料（粒径、比重）、橋脚規模（形状、径）による洗掘深、洗掘形状について計測を行う。

- ★ 開水路流れの把握（水面勾配、流速分布の観測）
- ★ 橋脚周辺部の洗掘状況と局所的な流れの流況の把握
- ★ 径時的な洗掘状況と橋脚形状による洗掘形状の把握
- ★ ベンチュリーメーターによる流量計測

4-2. 実験装置

実験装置は、可変勾配直線水路内に設置された橋脚模型を用いて、河床洗掘実験を行う。



直線水路全景



円柱型橋脚の洗掘



小判型橋脚の洗掘

4-3. 実験方法

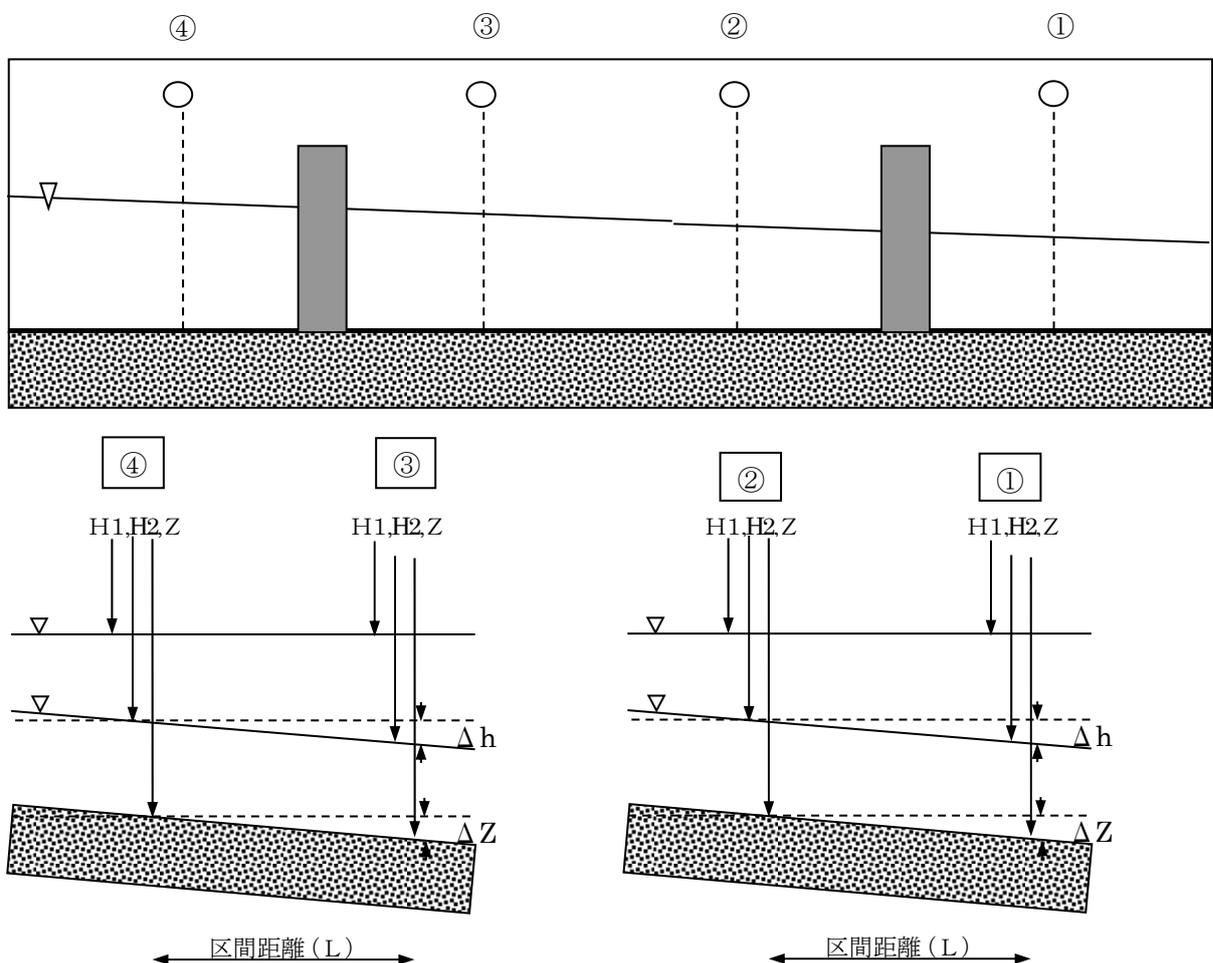
- ① 水位の計測地点にポイントゲージを設置し、静水中の状態では水面、河床に針先を合わせ水面、河床の高さを読み取り、記録する。
- ② 橋脚の前面部の点の河床高をスタッフを用いて読み取る。
- ③ ゲートを開放し通水を開始する。開始後当初は1分間隔で橋脚前面部の洗掘深を計測する。
- ④ 流れが安定した時点で、同時に各ポイントゲージの針先を水面に合わせ、その値を記録し、水面勾配、水深を計測する。
- ⑤ 水面勾配計測後、橋脚上流部（丸ピア）において鉛直流速分布を計測する。
- ⑥ 小判型橋脚の上流地点で電磁流速計を用いて断面流速分布を計測する。
- ⑦ 水面勾配計測後、ベンチュリーメーターの値を読み取り流量を算出する。
- ⑧ 橋脚前面部の洗掘深が安定（最終洗掘深に達した）した事を確認し、通水を停止する。
- ⑨ 排水後、洗掘形状についてスケッチを行うとともに、洗掘深、洗掘範囲についてメジャー、スタッフを用いて計測を行う。

4-4. 実験結果の整理

(1) 水面勾配の算出

水面勾配は、計測する水理量の中で最も重要な値。無次元掃流力の算出に大きく影響するため正確に計測することが必要。

しかし、今回の実験では各観測点間の距離が短いため、水位計測の誤差が水面勾配に大きく影響するので、水深の計測に十分な注意が必要。



(4) 河床の掃流力の算定

計測した流れの水面勾配、フルード数、平均流速を用いて河床に作用する掃流力を算定する。摩擦速度とは流れにより底面近傍での流速で表され、河床変動などを算定する場合の基本的な諸量である。

無次元掃流力は水面勾配により大きく影響を受ける。(実験で無次元掃流力が0.05を上回った場合は、水面勾配の算出のチェック、水位計測誤差がどれくらい影響するかを検討する)

$$U^* = \sqrt{g \cdot R \cdot I}$$

U^* : 摩擦速度 (m/s)
 R : 径深 (m)
 I : 水面勾配

$$\tau^* = \frac{U_*^2}{s \cdot g \cdot d}$$

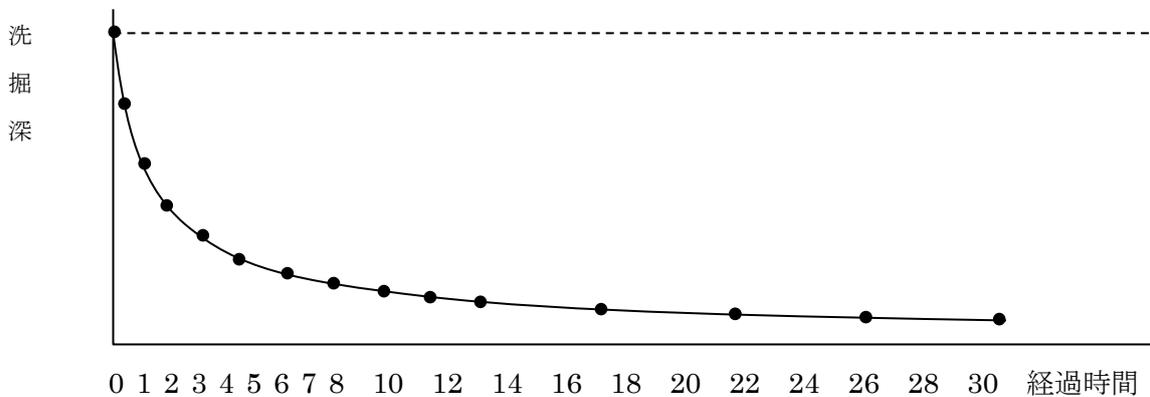
τ^* : 無次元掃流力
 s : 砂の水中比重 (2.65 - 1.0 = 1.65)
 d : 砂の平均粒径 (0.8mm)

(5) 洗掘形状、洗掘深の算定

経時的に計測した橋脚前面の洗掘深について時間経過と洗掘深についてプロットし、洗掘深について時間的にどのように変化しているか整理する。

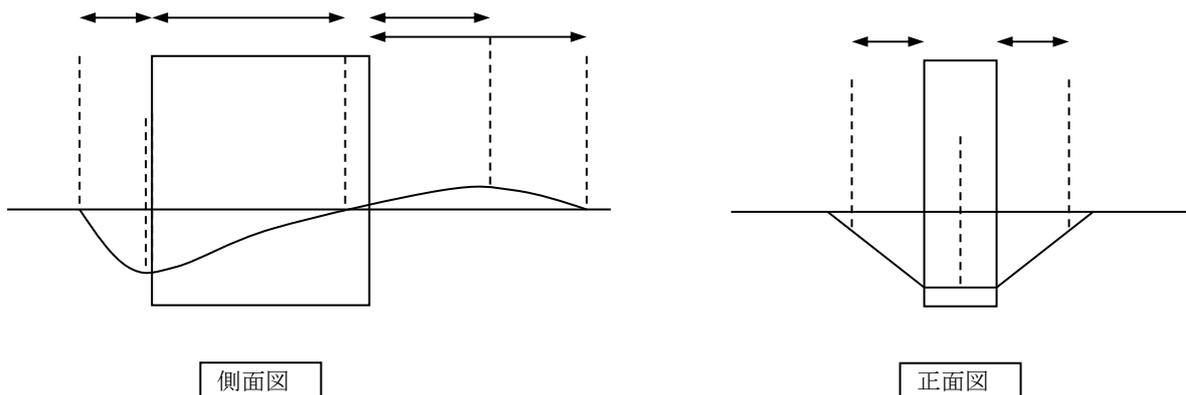
計測した洗掘深を図2 ($Z/D \sim h_o/D$) にプロットし、これまでの洗掘深推定式との一致度について算定する。また、スケッチした洗掘図について下記の様に整理する。

【洗掘深径時変化図】



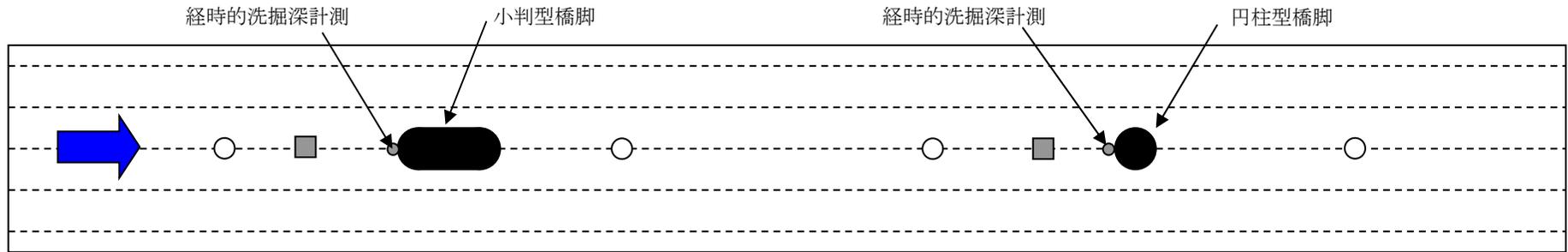
【洗掘状況図の作図のための計測】

←→ : 洗掘堆砂形状を図化するために寸法を計測する。

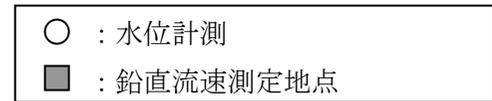
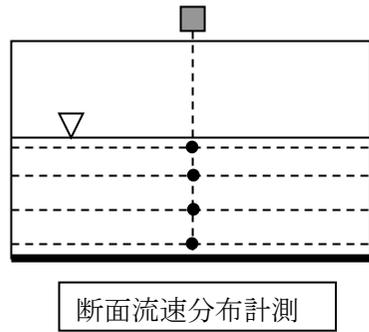
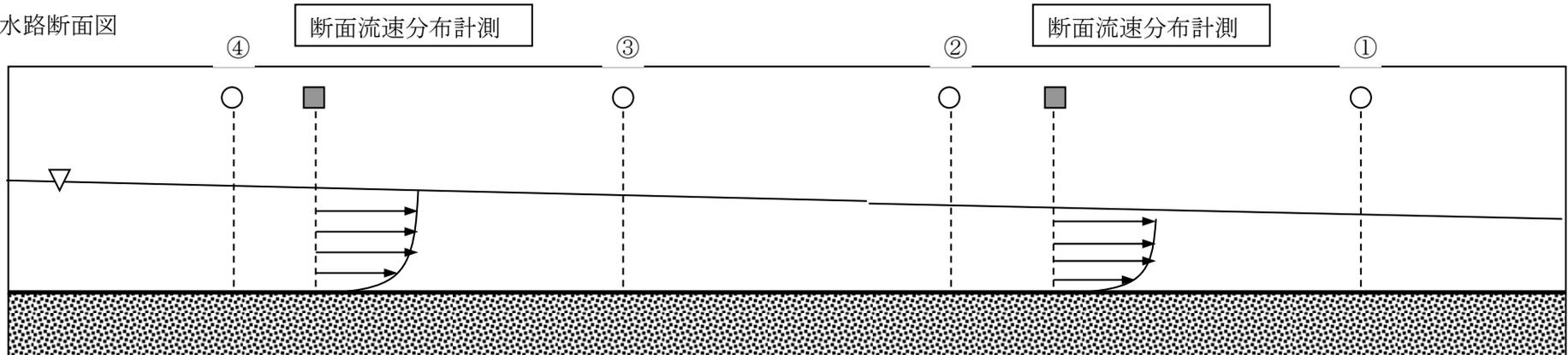


【水位、流速測定位置】

• 水路平面図



• 水路断面図



4-5. レポートの提出

レポートは下記の内容を記述して提出。

- ① 表紙に、グループ名、学籍番号、氏名、実験名、実験日時を必ず記入。
- ② 記録シートを整理して、実験時の水路河床勾配、水面勾配を算出し、摩擦速度、無次元掃流力を算定する。
- ③ ベンチュリーメーターの値から流量を算出する。水位差による流量について 1-9 に示す様なベンチュリーメーターのH-Q曲線を作成する。ベンチュリーメーターの諸元は 1-9 の値を用いる。グラフの範囲は実験で計測したマノメーターの値を含む前後でよい。(単位は mm 単位)
- ④ 流速について流量、水深から算定した断面平均流速と、鉛直流速分布から算出する流量を比較し、各々フルード数を算定する。
- ⑤ 鉛直流速分布図を作成する。
- ⑥ 洗掘状況図を作成するとともに、洗掘深算定図を用いて洗掘深を読み取り、計測した洗掘深を比較する。
- ⑦ 考察について記述する。

● 提出するのは、「水理実験演習提出レポート」の部分

計測データのシートは提出しなくてよい。(計測値は計測結果整理表で提出)

【記録シート】

実験日 : 平成 年 月 日

氏名 : _____

● 水路勾配の算定

	区間距離(m)	静水面(cm) H1	水路床(cm) Z	水面(cm) H2
①				
②				
③				
④				

● 洗掘深径時変化 (丸ピア、 小判型ピア)

通水後時間	河床高(cm)	通水後時間	河床高(cm)	通水後時間	河床高(cm)	通水後時間	河床高(cm)
通水前		10分		26分		42分	
1分		12分		28分		44分	
2分		14分		30分		46分	
3分		16分		32分		48分	
4分		18分		34分		50分	
5分		20分		36分		52分	
6分		22分		38分		54分	
8分		24分		40分		56分	

● 流量 ベンチュリーメーターによる流量

	静圧	動圧	水位差
マンメータの読み			

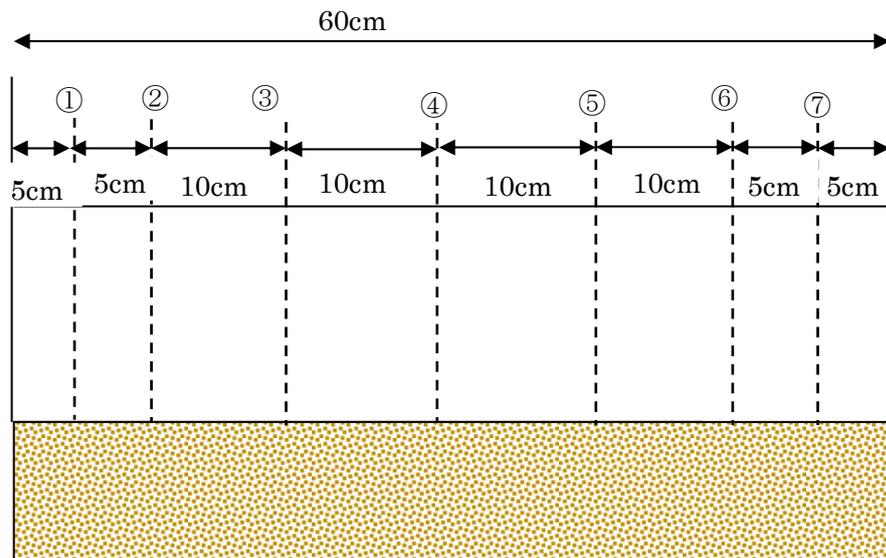
● 流速計

断面：円柱上流

水路中央 (水深：)

水面から		1回目	2回目	3回目	平均値
水深 (cm)	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
	7				
	8				
	9				
	10				
	11				
	12				

断面：小判型上流



断面：小判型上流

水深：

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
1回目							
2回目							
3回目							
平均							

水深：

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
1回目							
2回目							
3回目							
平均							

水深：

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
1回目							
2回目							
3回目							
平均							

水深：

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
1回目							
2回目							
3回目							
平均							

水深：

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
1 回目							
2 回目							
3 回目							
平均							

水深：

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
1 回目							
2 回目							
3 回目							
平均							

水深：

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
1 回目							
2 回目							
3 回目							
平均							

水深：

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
1 回目							
2 回目							
3 回目							
平均							

水深：

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
1 回目							
2 回目							
3 回目							
平均							

水深：

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
1 回目							
2 回目							
3 回目							
平均							

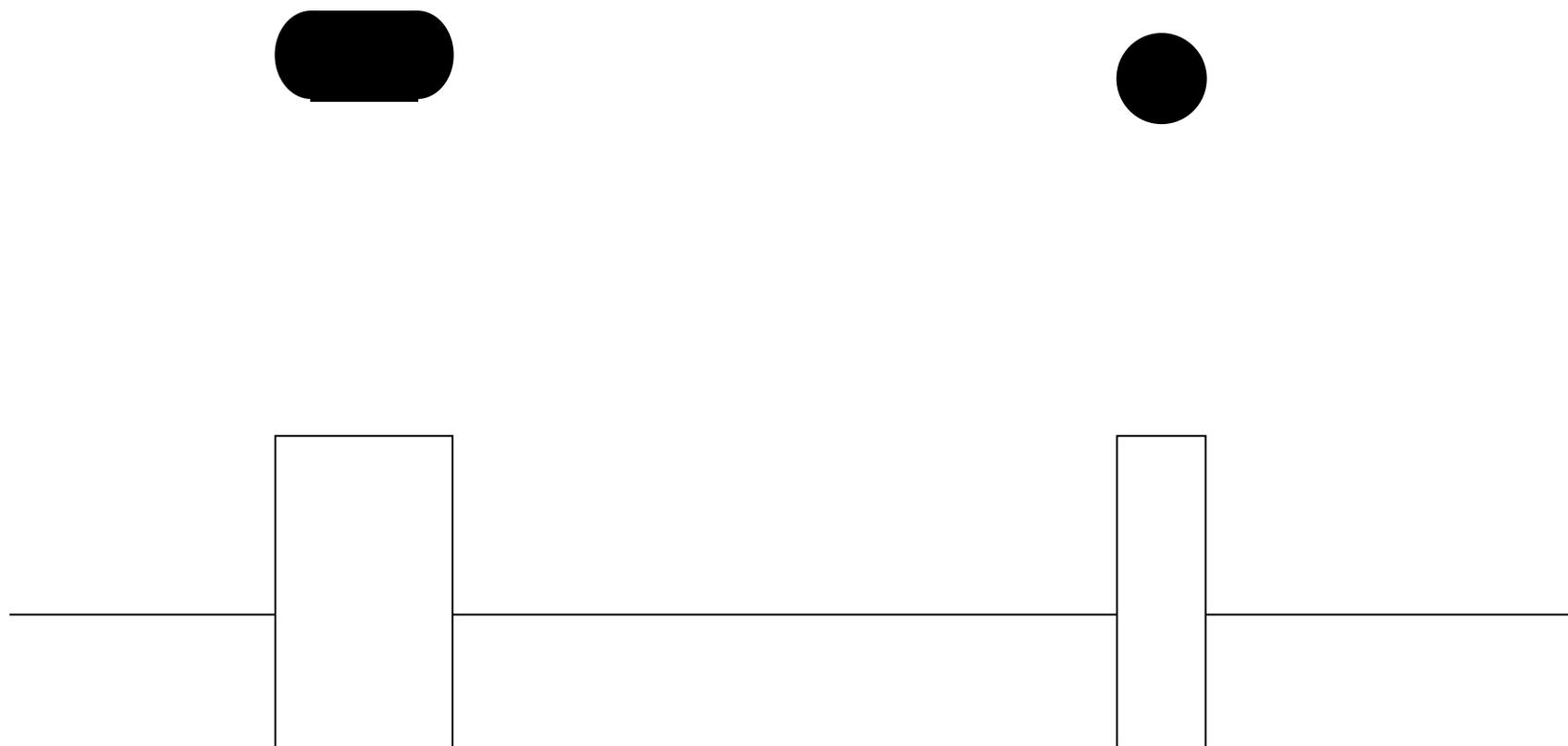
水深：

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
1 回目							
2 回目							
3 回目							
平均							

水深：

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
1 回目							
2 回目							
3 回目							
平均							

【洗掘状況図】



【参考：橋脚周辺に生じる水理現象の概要】

1. 橋脚による水理現象の概要

下図は洪水時に橋脚周辺に生じる水理現象を示したものである。河道内に橋脚を設置した場合、橋脚周辺に、流れを乱す渦や水面を乱す波が発生し、図示したように橋脚が河道に及ぼす水理現象は下降流、馬蹄型渦、表面回転渦、橋脚側方の速い流れ、カルマン渦、橋脚後流、橋脚背面の縦渦、衝撃波、波状水面と後流に分類することが出来る。

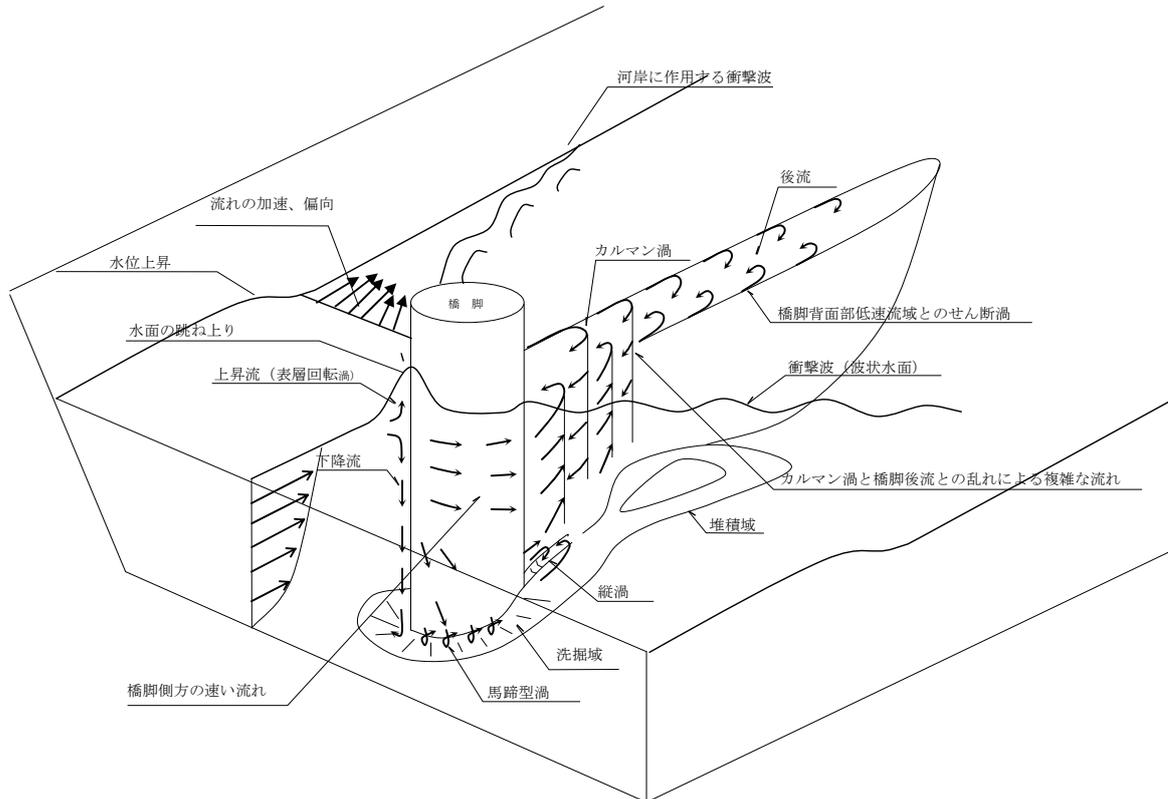


図 1 橋脚により生じる水理現象



図-2 橋脚での複雑な流れ



図－3 橋脚周辺の洗掘による橋脚の沈下（神奈川県、酒匂川）



図－4 橋脚防護工の事例（富士川）

1) 下降流

下降流とは橋脚に衝突した流れが橋脚下方に潜り込む流れである。下降流には橋脚前面の狭い範囲に生じる鉛直方向の下降流と橋脚側面に流下する下降流の2種類の下降流とがある。下降流の強度は橋脚前面に生じる最大洗掘に影響を及ぼしている。

2) 馬蹄型渦

橋脚前面部に生じる下降流は、橋脚底面部において馬蹄型渦と呼ばれる局所渦を生じさせる。この馬蹄型渦により橋脚前面底部においては洗掘が進行するようになるが、洗掘深が増大すると下降流による馬蹄型渦の強度は低減するようになり、洗掘深は流れの強さと橋脚の形状により定まる一定の深度で安定するようになる。

3) 水面跳ね上がり（表層回転渦）

橋脚に衝突した流れが水面上方に跳ね上がることで生じる渦である。流れが激しい河川では、この上昇流の橋桁に達するような状況となる場合もある。流れが早い場合には渦は見られず上昇吹き上げ現象となる。

4) 橋脚側方の早い流れ

橋脚周辺部では橋脚側方への流れの集中化が生じるため、橋脚側面では流速の加速・局所的な水位の低下が生じる。また、橋脚側面においては馬蹄型渦の強度の低下により洗掘深は浅くなるため、橋脚底面から下流には洗掘形状に従った上昇流が生じるようになる。

5) カルマン渦

カルマン渦は流れの中に設置された橋脚などの構造物の背後において、流線が剥離する際に生じる左右対称型の渦であり、河川に設置される橋脚においては左右交互に発生するようになる。カルマン渦は、橋脚背面での洗掘及び堆積による上昇流が強い程乱されるようになる。

6) 橋脚後流

橋脚前面に生じた下降流が橋脚背面部に流下し、橋脚側面で加速された流れや橋脚背面で生じたカルマン渦などと複雑に流れが交錯し乱れた流れを形成する。また、橋脚背面ではカルマン渦や乱された流れのため流速の低減域が生じるようになり、その低下域と側方の流れとの間では流速差によるせん断渦が生じるようになる。橋脚後流はこのような複雑な流れにより形成された流れであり、橋脚形状や流れの状態では下流に長く影響を及ぼす。

7) 橋脚背面の縦渦

橋脚背面部では、河床底面の左右からの上昇流が交わり縦渦を形成するようになる。この縦渦により、橋脚背面部には下流方向に一筋の溝が洗掘される。

8) 衝撃波

橋脚が流体中に置かれると橋脚前面部から下流に拡散するように波状水面が形成される。この波状水面を衝撃波と呼んでいる。(衝撃波は射流において生じる波状水面であるが、常流においても便宜上衝撃波と呼ぶ。) この衝撃波は一般に、乱れの例として示される場合が多いが、渦のような乱れや流速変動を伴うような乱れではなく、若干の水面振動が伝播する流れである。衝撃波は、橋脚形状と流れの状態により、波高・拡散状況は異なる。

9) 波状水面と後流

流れが速い場合、橋脚背面部では渦流を伴う大きな乱れが衝撃波のように下流に拡散する現象が見られることがある。しかし、この現象は河床面が固定床で流れが速い場合に生じる乱れであり、橋脚背面に生じる強い縦渦が下流に拡散する現象である。実河川のように河床洗掘が生じるような橋脚においてはこの乱れは小さくなり、橋脚による後流として下流に流下する。

2. 橋脚による局所洗掘

橋脚周辺の流れは、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が生じる。一方、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の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とほぼ相似な形状となる。

(1) 橋脚による局所洗掘の分類

局所洗掘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じる現象であって、 $Q_{so}=Q_{si}$ 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 7)。

(a) $Q_{so}=Q_{si}=0$: No scour (固定床)

(b) $Q_{so} > Q_{si}=0$: Clear water scour (静的平衡洗堀)

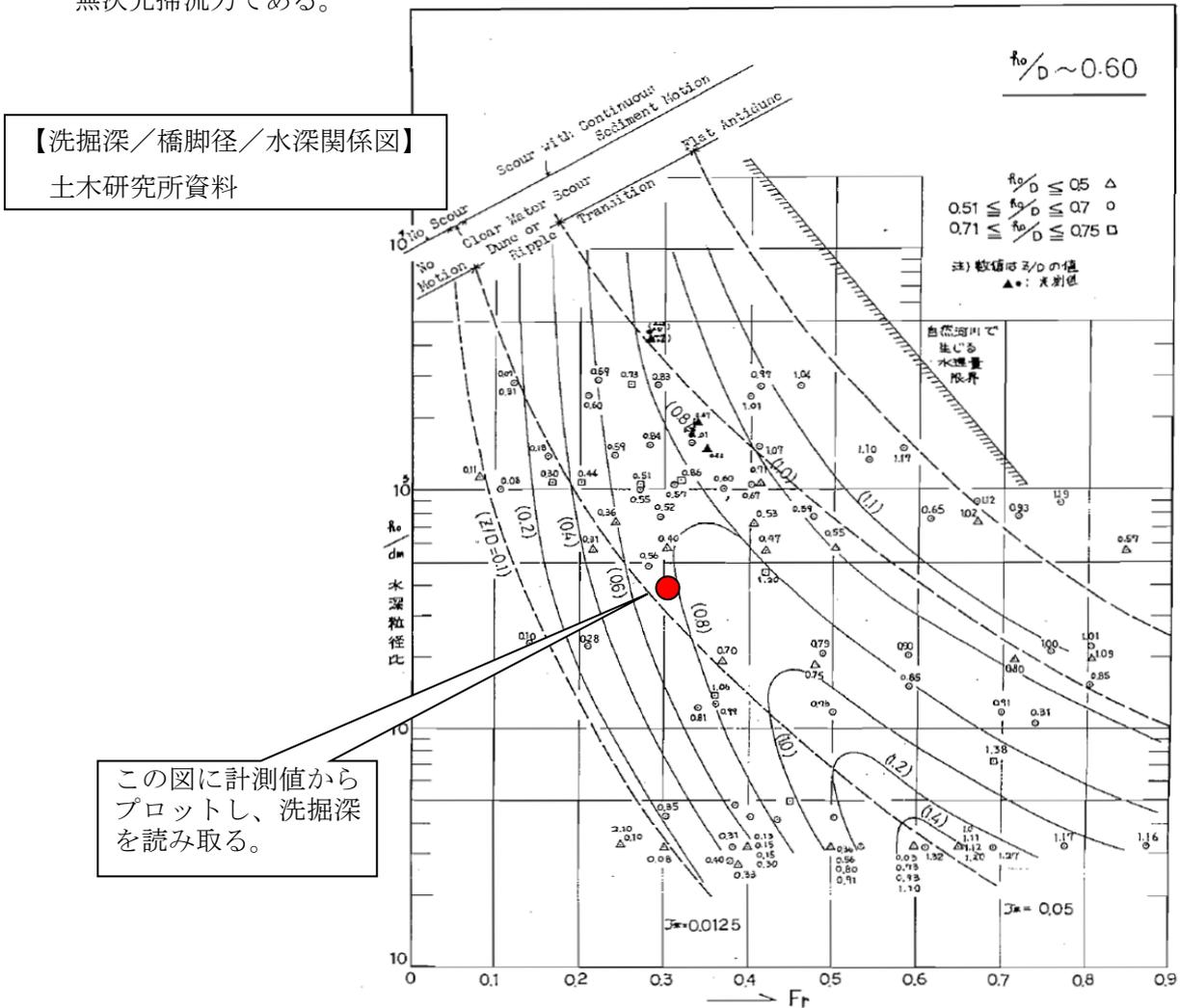
(c) $Q_{so} > Q_{si} > 0$: Scour with continuous sediment motion (動的平衡洗堀)

ここに(a)は洗堀の起こらない場合である。(b)は限界掃流力以下の流れで、河道内の河床が移動していない場合に橋脚周りにのみ起こる洗堀で、(C)は限界掃流力を越える流れの場で起こる洗堀を指す。静的平衡洗堀状態では最終洗堀深に達するのに長時間を要するが、動的平衡洗堀状態では短時間のうちに平衡洗堀深に達し、河床波の影響を受けて洗堀深は変動する。

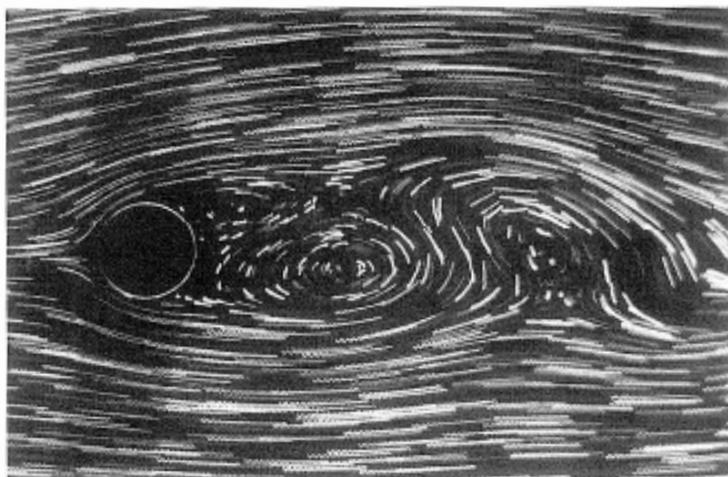
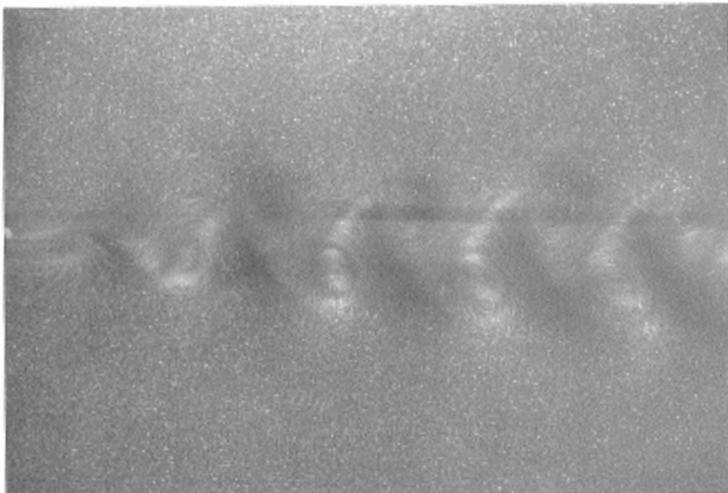
(2) 局所洗堀深の推定式

橋脚周辺の局所洗堀に関する研究はかなり古くから行われており、我が国では 1938 年～1942 年に京都大学の石原により系統的に検討された。その後も研究が進み、洗堀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。推定式は、既往の橋脚周りの洗堀深に関する実験値を用いて算定しており、実際に使用するときには各推定式の適用範囲などに十分注意しなければならない。

ここに Z : 洗堀深、 D : 円柱径 (=橋脚幅)、 h_0 : 平均水深、 d_m : 河床材料の平均粒径、 τ^* : 無次元掃流力である。



162



163

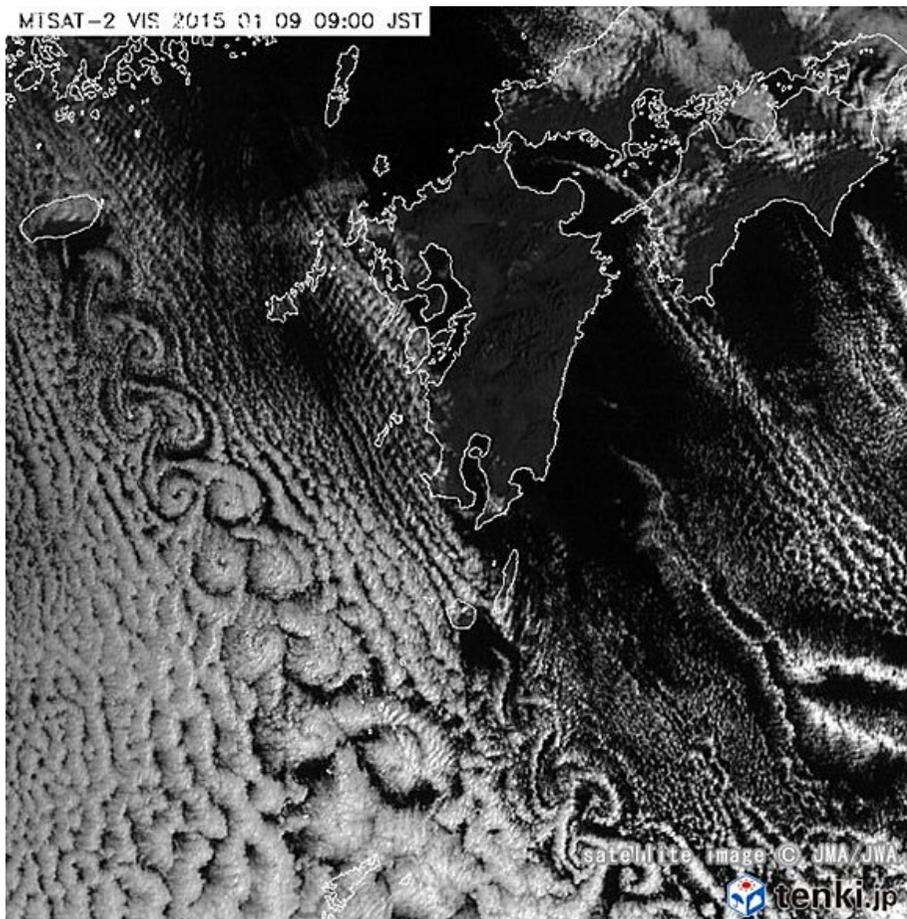
43 円柱後方のカルマン渦列の流線模様

一般に、レイノルズ数が大きいとき、一様流中に置かれた柱状物体の後方には2列の渦巻が形成される。渦巻はほぼ平行な2本の線上に等間隔に並び、同じ列の渦巻は全部同じ向きに回転しているが、他方の列の渦巻の回転方向とは逆である。また、2列の渦巻は互い違いに配列している。このような渦列はカルマン渦列(Kármán 渦列)と呼ばれる。カルマン渦列と呼ばれるようになったいきさつは次のようなものである。

1911年のこと、カルマンがドイツのゲッチンゲン大学で助手をしていたとき、ヒーメンツはプラントル教授の指導の下に円柱表面からの流れの剥離を観察するために水槽実験を行っていた。ところが、円柱は一様流中に置かれているにもかかわらず、その後流は定常でなく、はげしく振動的に揺れるのであった。プラントルの意見は円柱の断面が正しい円でないか、または水槽が対称的にできていないからであろうということであった。ヒーメンツは入念に円柱をけずり直し、水槽の再調整を行って実験を続けた。カルマンは毎朝研究室にやって来るとヒーメンツに向かって「流れは落ち着いたかね」と尋ねた。するとヒーメンツは悲しそうに「いつも振動しています」と答えるのだった。そこでカルマンは、もし流れがいつも振動するのであれば、それは流れの本質的な性質であるに違いないと考えた。そして早速、渦の配列の安定を計算することを思い立った。計算は短期間で出来上り、2つの論文が発表された。カルマンの計算結果によれば、2列の渦は互い違いの配列だけが安定で、しかも2つの列の間隔と、1つの列の中での渦の間隔との比が0.28の場合に限って安定であることがわかった。また、渦列と物体の抵抗の関係も求められた。カルマンの計算結果は実験結果と定性的に合うことが確かめられ、それ以後互い違いの配列をもつ2列の渦巻列のことをカルマン渦列と呼ぶようになった。

162は静水槽の中を円柱が一定速度で進行するとき、その後方に形成されるカルマン渦列の流線模様を、アルミ粉懸濁法を用いて可視化したものである。円柱直径でとったレイノルズ数は87、カメラは静水槽に固定されている。

163は静水中を一定速度で進行する円柱後方のカルマン渦列の流線模様を、ポリエチレン微粒子懸濁法により可視化したものである。レイノルズ数は136、カメラは円柱に固定されている。



2015年1月9日 衛星ひまわりの画像



明石海峡大橋のカルマン渦

水理実験演習提出しレポート

(土木実験Ⅰ、Ⅱ)

開水路橋脚洗掘実験 (テーマー 3))

提出者	
班番号	
学籍番号	
実験日	
提出種別	新規提出 再提出 (どちらかを○で囲む)
レポート提出日	
再提出日	

表-1 水面勾配、掃流力整理表

	平均水深	河床勾配	水面勾配	摩擦速度	無次元掃流力
上流区間					
下流区間					

注) 無次元掃流力は0.05以下、この範囲でない場合はその理由を考察に記述。

表-2 ベンチュリーメーターによる流量

	静圧	動圧	水位差	流量
マンメータの読み				

表-3 断面流速の比較

		ベンチュリーメータの流量 を用いた場合	鉛直断面流速を用いた場合
水深	上流 (小判型ピア)		
	下流 (丸ピア)		
流速	上流 (小判型ピア)	$V_{1上} : V=Q/A$	$V_{2上} : \text{計測した平均流速}$
	下流 (丸ピア)	$V_{1下} : V=Q/A$	$V_{2下} : \text{計測した平均流速}$
フルード数	上流 (小判型ピア)	$Fr_{1上流}$	$Fr_{2上流}$
	下流 (丸ピア)	$Fr_{1下流}$	$Fr_{2下流}$

表-4 洗掘深の比較 (計測値と算定値)

小判形ピア (計測した洗掘深)	h/d	フルード数	洗掘深の図表から の算定値
		$Fr_{1上流}$	
		$Fr_{2上流}$	

丸ピア (計測した洗掘深)	h/d	フルード数	洗掘深の図表から の算定値
		$Fr_{1下流}$	
		$Fr_{2下流}$	

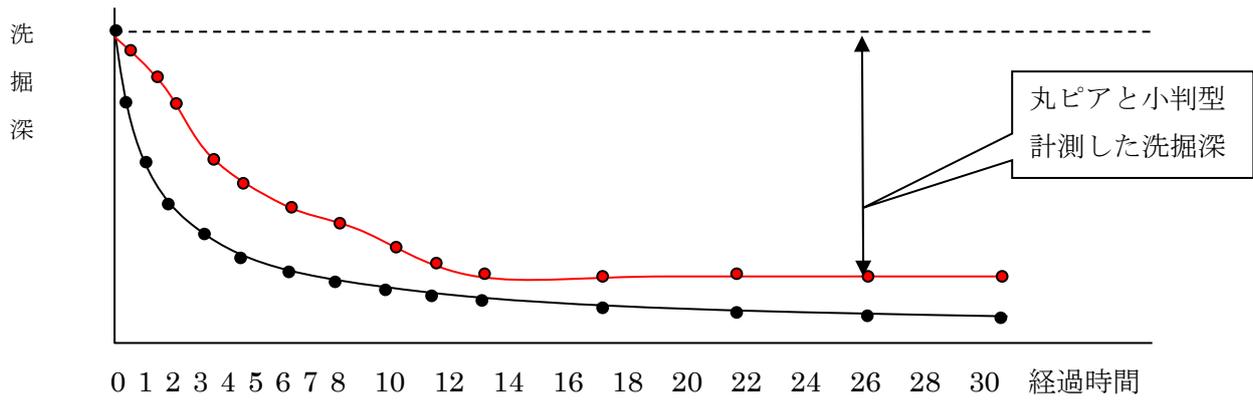


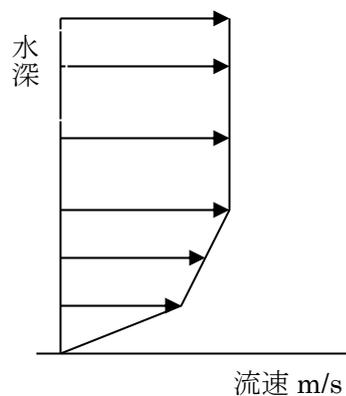
図-1 洗掘深経時変化図

表-5 洗掘深経時変化計測表

通水後 時間	河床高(cm)										
	小判 型	丸ピア									
通水前			10分			26分			42分		
1分			12分			28分			44分		
2分			14分			30分			46分		
3分			16分			32分			48分		
4分			18分			34分			50分		
5分			20分			36分			52分		
6分			22分			38分			54分		
8分			24分			40分			56分		

表-6 鉛直流速算定表 図-2 流速分布図
(小判型と丸型の2ケース)

		流速(平均値)
水深 (cm)	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	
	7	
	8	
	9	
	10	
	11	
平均流速		



表－7 断面流速分布算定表

水面から	断面①	断面②	断面③	断面④	断面⑤	断面⑥	断面⑦
水深 (cm)	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
	6						
	7						
	8						
	9						
	10						
	11						
	12						
平均							

表－8 断面流量算定表

水深： cm

	区分幅 B	区分断面積 B×h	区分流速 Vcm/s	流量 B×h×V
断面 □	7.5			
断面 □	7.5			
断面 □	10.0			
断面 □	10.0			
断面 □	10.0			
断面 □	7.5			
断面 □	7.5			
合計	60cm			

【洗掘深／橋脚径／水深関係図】

土木研究所資料

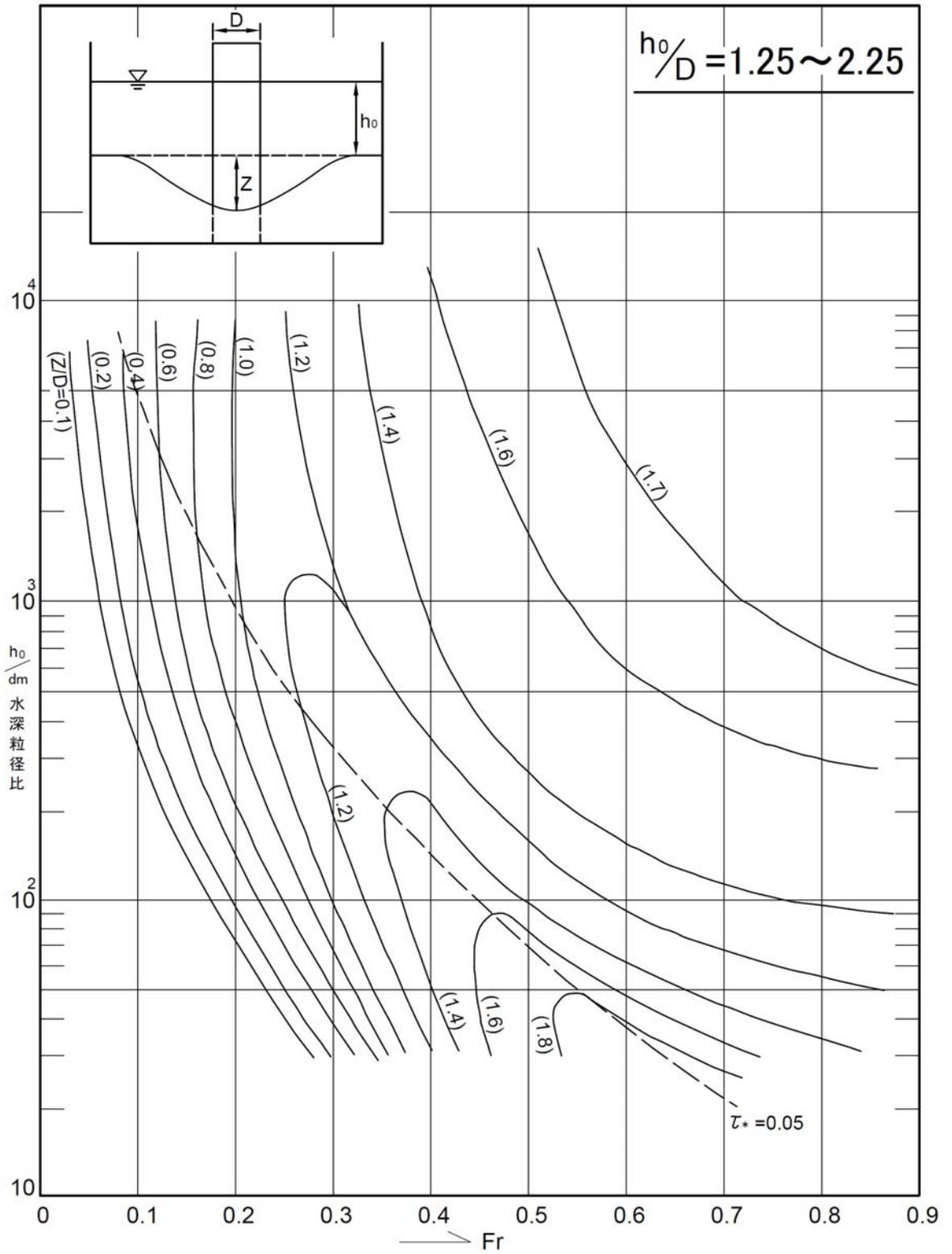
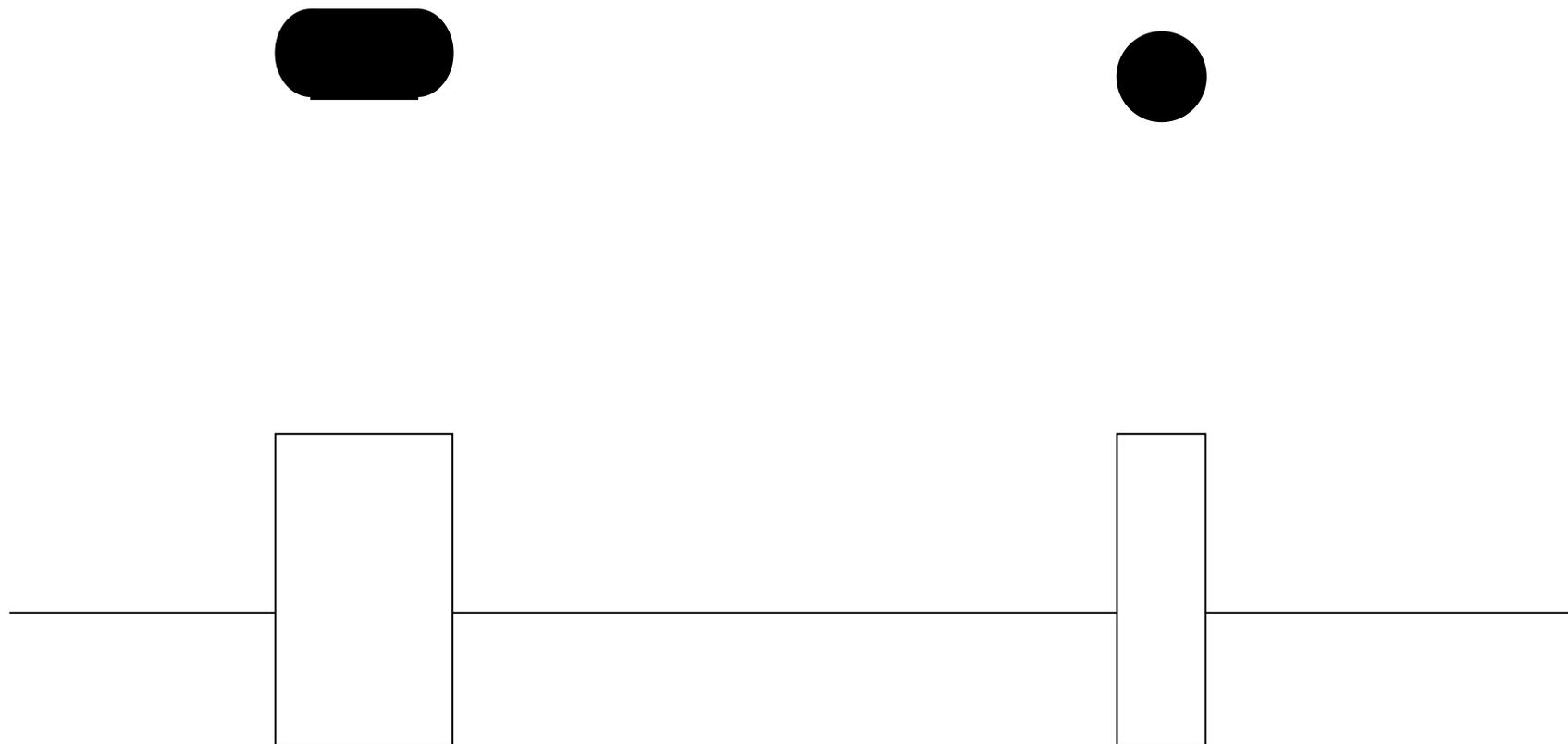


图-2 洗掘深算定图

【洗掘状況図】（画は分かりやすく、計測した洗掘深、堆積厚、洗掘幅、堆積幅を示す）



【考察】

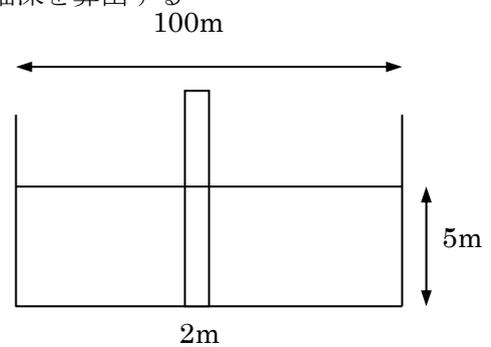
1. 既往実験結果を基にした洗掘深の算定値と演習実験の計測値を比較し、洗掘深が異なった場合、洗掘深の差に影響した要因について考察する。

何が異なっていたので算定値と実験での計測値が異なったかを考察する。

(無次元掃流力が 0.05 以上となった場合は、その原因についても考察する)

2. 図-2 の洗掘深算定図を用いて下記の橋脚による洗掘深を算出する

河川幅 100m
水深 6.0m
流量 1440m³/s
橋脚径 2.0m
河床材料 6mm
河床材料の比重 2.65



3. 下記の用語について調べる

- 摩擦速度
- 無次元掃流力
- 動的洗掘と静的洗掘
- カルマン渦