

I S S N 0386—5878

土木研究所資料第2803号

土木研究所資料

河川水理模型実験の手引

平成元年10月

建設省土木研究所
河川部河川研究室

Copyright © 1989 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 General 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、複製は土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土木研究所資料

第2803号1989年10月

河川水理模型実験の手引

河川研究室 室 長 山 本 晃 一

主任研究員 高 橋 晃

要 旨

本報告書は、河川構造物の設計や河道計画のために、河川水理模型実験を1つの技術的手段として、それを企画、実施し、さらに解析、報告するための手順や手法について全般的にとりまとめたものである。

キーワード、模型実験、相似則

ま え が き

本論は、河川構造物の設計や河道計画のために、河川水理模型実験を1つの技術的手段として、それを企画、実施し、解析報告する河川技術者、またその報告を利用して実際河川の河道計画や河川の処理方針を決定したり、予算付けを行う意思決定者のために書かれました。本論は、第1章に河川水理模型実験の必要性および実施するために必要となる現地資料や検討項目等を含めた全体の模型実験計画について述べ、第2章においては、模型実験の相似則と模型縮尺の決め方、および河床形態の特性等について述べております。第3章～第5章では模型設計および製作、検証実験、本実験について具体的な手順や手法等について述べ、第6章、第7章では、実験によって得られた測定資料の整理とそのデータの一般的な解析手法および報告書の構成、記述内容等について述べております。第8章、第9章では、模型実験を実施するときに必要な手続き、および設計書の構成や仕様書の内容等についてとりまとめ、また第10章では、移動床の相似則の検討のための基礎情報を示してあります。本論をまとめた理由は以下のとおりです。

河川水理模型実験の位置付けについては、極端な見解があり、この河川水理模型実験に河道計画の適否がすべて乗りかかってしまう見方がある一方、河川水理模型実験は水遊びや砂遊びにすぎないというような見方があります。このような極端な見解を収束するため、河川水理模型実験の実状、実態を知らしめ、共通の認識レベルの場で、議論ができるようにしたいというのが、第1の理由です。

河川模型実験の手引きは、建設省土木研究所河川研究室の諸先輩によって昭和34年(1959)にガリ版刷りのものが出版されています¹⁾。ちょうど河川模型実験を用いて、河道計画等の計画作りが急速に進められた初期の段階に作られており、業務量の増大に伴って模型実験のやり方の標準化、能率化が求められていたのでしょう。内容を見ますと、模型実験の実施体制や組織については、現在と大幅に変わっていますが、基本的な実験手法については、あまり変わっていないようです。その後土木学会の水理講演会や専門書にも模型実験に関する論文²⁾³⁾が数多く取り上げられていますが、模型実験の手引きのようなものは作られていません。ところで、ここ30年の河川および移動床の水理に対する知識の増大は、河川水理模型実験の相似性の考え方や実験条件の与え方に大きな変化をもたらしております。このような情状は、模型実験の相似性や、実験条件の与え方に混乱をもたらす要因になっています。現在の時点(1989)で、河川研究室の考え方を示しておきたいというのが第2の理由です。

ところで、昭和54年(1979)に建設省土木研究所は、筑波研究学園都市への移転、統合され、旧赤羽支所河川研究室と旧鹿島試験所が統合され現在の河川研究室となりました。このことは業務量の増大となり、さらに、研究室の職員の若年化、経験不足から模型実験の実施に当って、問題点も生ずるようになりました。そこで、河川水理模型実験の意義や、内容を理解してもらい、もって模型実験への取り組み姿勢をより良いものにしようというのが本論を取りまとめた第3の理由です。

目 次

まえがき

第1章 模型実験計画	1
1-1 模型実験の意義	1
1-2 模型実験の適用	2
1-3 実験計画	4
1-3-1 実験の進め方	4
1-3-2 模型縮尺, 範囲の選定	5
1-3-3 固定床, 移動床実験の選定	6
1-3-4 実験水理条件	7
1-3-5 模型製作および実験に必要な資料	7
1-3-6 模型実験に必要な期間と費用	9
1-3-7 実験施設	10
1-3-8 水理量の測定機器	13
第2章 模型実験の相似則と模型縮尺の考え方	20
2-1 流れの相似則	20
2-1-1 三次元流れの相似則	20
2-1-2 一次元流れの相似則(歪模型)	23
2-2 移動床の相似則	24
2-2-1 移動床流れを規定する物理量とその無次元化	24
2-2-2 移動床模型の相似則	28
2-3 模型縮尺の考え方	31
2-3-1 固定床模型の模型縮尺	31
2-3-2 移動床模型の模型縮尺と時間縮尺	31
2-3-3 混合粒径河床材料と模型材料粒径	34
2-4 河口部移動床模型の相似則	35
第3章 模型設計および製作	38
3-1 模型設計製作の手順	38
3-2 模型設計	41
3-2-1 模型設計予備作業	41
3-2-2 模型河道設計	49
3-2-3 河道付帯構造物設計	50

3-3 模型製作	50
3-3-1 準備作業	50
3-3-2 模型製作予備作業	50
3-3-3 河床製作	51
3-3-4 模型付帯構造物製作	52
3-3-5 河道付帯構造物製作, 据付	52
3-3-6 模型改造および撤去作業	52
第4章 検証実験	54
4-1 固定床検証実験	54
4-1-1 検証方法	54
4-1-2 歪模型の粗度調整	57
4-1-3 検証の基準	57
4-2 移動床検証実験	57
4-2-1 検証方法	57
4-2-2 河口部移動床模型実験の検証	58
4-2-3 水温の影響	59
第5章 本実験	60
5-1 固定床実験	60
5-1-1 実験条件設定	60
5-1-2 検討項目と実験方法	61
5-1-3 測定項目と方法	62
5-2 移動床実験	63
5-2-1 河床整形	63
5-2-2 実験条件設定	63
5-2-3 検討項目と実験方法	63
5-2-4 測定項目と方法	64
第6章 測定資料の整理と現象解析	66
6-1 測定資料の整理	66
6-1-1 資料整理一般	66
6-1-2 測定項目別の処理法	66
6-2 実験データの解析	67
6-2-1 検証実験データの解析	67
6-2-2 各解析項目と手法	67

第7章 報告書の作成	69
7-1 報告書の構成	69
7-1-1 構成項目の書き方	71
7-1-2 各項目の内容	72
7-2 報告書の記述について	73
7-2-1 測定項目の記述	73
7-2-2 水理諸量の比較検討	73
7-2-3 図面, 写真の選定	74
第8章 模型実験の実施手続き	75
8-1 土木研究所へ依頼する場合	75
8-2 建設コンサルタント等に依頼する場合	76
第9章 設計書および仕様書	77
9-1 設計書	77
9-1-1 設計書の構成	77
9-1-2 構成項目の内容	79
9-2 仕様書	81
9-2-1 共通仕様書	81
9-2-2 特記仕様書	81
9-3 施工および業務計画書	81
9-4 検査	82
9-4-1 検査事項と必要書類	82
9-4-2 検査の要点	83
第10章 移動床の相似則検討のための基礎資料	85
10-1 均一砂を持つ移動床流れの抵抗と流砂量	85
10-1-1 河床波の分類とその特徴について	85
10-1-2 流れの抵抗と河床形態	87
10-1-3 流砂量と河床形態	92
10-2 軽量河床材料の流送特性	100
10-3 海浜変形の相似性	104
あとがき	114
参考文献	115

付録資料	117
------------	-----

- I 河道特性調査の進め
- II 石炭粉を使った移動床模型実験の相似性
- III 緩流河川の模型実験の考え方
- IV 河口部水理模型実験の問題点
- V 仁淀川模型における河口砂州の崩壊と再形成に関する相似性の検討

第1章 模型実験計画

1-1 模型実験の意義

河川改修事業を進めてゆく際に、解決すべき多くの水理的諸問題が発生する。これらの問題の解決方法を誤ると、新たな問題が発生したり、問題解決を図ることができず、時には災害につながることもある。したがって、事業の実施に先だって、これらの問題点を解明し、その解決を図ることがまず必要となる。このような場合の解決手段として次のようなものが考えられる。

- (1) 資料解析
- (2) 現地調査および観測
- (3) 河川水理模型実験
- (4) 数値解析
- (5) 水理基礎実験

これらの解決手段は、単独で解決を図るというよりも多くの場合、これらが互いに補完し合って解答を見い出すことになる。

河川関係の模型実験には砂防模型実験もあるが、ここに述べる模型実験の取り扱い範囲は、河川関係の水理的な模型実験に限定し、河川水理模型実験のことを簡単のため、“模型実験”と呼称することにする。いま、現地調査、観測および資料解析から問題解決が図れるものは検討の対象外とすると、現地調査、観測および資料解析は、模型実験や数値解析のための入力条件の設定や、検討結果が適切なものとなっているかを調べるための検証データ精度の判定資料を提供することになる。いっぽう、水理基礎実験は、模型実験に比較してスケールが小さく、かつ実現象との相似性は必ずしも満足するものではないので、定量的評価を期待するものでないものの、十分計画された水理実験を行えば、問題となっている現象の理解や判断に役立つものとなる。

模型実験は、実物の現象を支配している基礎方程式を模型で解くことによって、実際に生じている水理現象を詳細に把握し、生起する可能性のある計画規模の現象を必要な精度で予測し、必要があれば対策工まで検討しようとするものである。我々の取り扱い分野においては、実物が大きい場合が多く、現地試験や実測による検討には多額の費用と日数を要するので、小さい模型を作って検討する場合が多い。また、自然の現象は、種々の要素から成り立っており、そのような場合の水理現象を比較的正確にかつ容易に知り得る模型実験が有力な手段として重要な役割を果たしている。模型実験には次のような利点が考えられる。

- ① 解析的、数値的に解の得難い場合でも实际的に解を得ることができる。
- ② 多数のケースを比較的容易に検討でき、自然界では稀にしか起こらない計画規模の洪水でも模型の中で容易に検討できる。
- ③ 実現象に近い現象を眼で見ることができ、複雑な現象が容易に理解できる。
- ④ 対策工の直接的検討が可能である。

模型実験のその他の利点としては、模型上において複雑な現象が再現され、問題を検討するための素

材が与えられる。それによって新たな問題点の発見にもつながり、改修上の有益なアイディアを生み出すことにもなり得る。

しかしながら、模型実験は、模型を幾何学的に相似にし、現地と力学的に相似な境界条件を与えても、完全に内部現象を相似にさせることは不可能であり、すべての水理現象を模型上に再現することはできない。このため目的に応じ、場合によっては、特定の現象のみを注目して他を犠牲にする場合もある。したがって、模型実験は現象の相似性に関して十分に検討し、かつ結果の解釈に当たっても相似性の差異の影響について判断し、模型で生じた結果を過信することのないようにすることも必要である。また模型実験を実施する場合、模型範囲だけの現象の理解と認識だけでは不十分であって、その川全体を一つの生きたシステムとして捉え、模型実験による検討結果の範囲をその中で位置付け、解釈しなければならない。

以上のような諸点に十分留意して模型実験を行い、その成果が河川のより合理的な改修計画や設計に資するよう努力することが大切である。

1-2 模型実験の適用

模型実験は、河川改修事業を進めていくうえで、複雑な水理的諸問題の解決を図る際に古くから重視され、数多く実施されてきた。数値計算が広くかつ容易に行えるようになった現在においても、三次元的な問題を考察するうえでは欠くことのできない重要な役割を果たしている。しかし、模型実験も水の運動を解く一つの解析手段であって、問題によっては理論的解析方法、数値計算による計算の方が効率のよい場合もあり、その手段の選択には十分な検討を必要とする。

模型実験が他の方法に対して、比較的得意とする現象は二次元流と三次元流の流れであり、具体的水理現象としては、局所的な流況（流量、流速分布、水位、エネルギー損失、渦と剝離現象、および流線と水あたり）および土砂流送に基づく洗掘と堆積の現象である。これまでに行われた模型実験の実施例から判断して、河川改修計画やその事業の実施にあたって、模型実験により問題解決の図れる具体的な例としては、表-1.1に示すようなものが挙げられる。検討事項の内容によって固定床実験と移動床とに区分したが、これらの選択は個々のケースによって異なることがあり、一般的なものを示した。固定床実験で信頼できる結果が得られるものについては、固定床実験によることとし、移動床実験の覧は空白としている。固定床模型実験は、水位、流速分布および流況の把握には適しているが、適用にあたっては、あくまでも現地での河床変動が激しくないことが前提である。したがって、固定床模型実験のみによって結論を得る場合には、現地資料や河床変動計算によって、河床の安定性について十分検討しておく必要がある。

いっぽう、電子計算機の進歩と数値計算技術の発達は、解析手段では解けなかった問題を数値的に解くことを可能にしてきた。数値シミュレーションは、現象を記述する方程式系を特定の初期条件、境界条件のもとに直接的に解くものである。数値シミュレーションは河道など、複雑な境界形状を有する流れの場を種々の初期条件、境界条件に対して解を求めることから、模型実験と同様な意義を持ち、数値実験とも呼ばれている。河道内の平均的な流れや河床の縦断的な変化を知るには、不等流計算、不定流計算、河床変動計算などの一次元数値シミュレーションで実用上十分な解が得られる。最近では二次元

表- 1.1 模型実験の具体例

項 目	検 討 内 容	実験種別	
		固定床	移動床
河道の縦横断計画	- 河道の縦横断形状, 低水路法線形, 構造物の配置, 段階施工 - 流下能力 - 河床変動, 水衝部等の対策効果	△ ○ ×	○ ○ ○
分 流	- 平面, 縦横断形状, 低水路法線形, 流量配分 - 堰, 水門の構造配置, 水門操作方法 - 河床変動, 水衝部等の対策効果	△ ○ ×	○ △ ○
合 流	- 平面, 縦横断形状, 低水路法線形, 背割堤, 導流堤の配置 - 河床変動, 水衝部等の対策効果	△ ×	○ ○
河口処理	- 河口水位, 流下能力 - 波浪侵入 - 河口砂州形成, 砂州フラッシュ機構	△ ○ ×	○ ○ ○
堰・水門	- 流出量, 流量係数 - 操作方法 - 位置, 堰軸, 仮締切工, 護床工の長さ - 河床変動, 局所先掘と対策	○ ○ △ ×	△ ○ ○ ○
橋 脚	- 配置, 水位, 流下能力 - 河床変動, 局所洗掘と対策	△ ×	○ ○
床 止 め	- 配置, 形状 - 護床工, 局所洗掘と対策	△ ×	○ ○
調 節 池	越流堤の配置形状, 越流係数, 越流量	○	
氾 濫 流	水位, 侵水状況	○	
密 度 流	塩水くさびの侵入, 取水限界, 水門の塩水侵入防止, 堰の効果, 淡水化	○	

※ここに○：適しているもの（または最終的な検討で実施されるもの）

△：概略の検討が可能（特定の水利諸量の把握が可能）

×：適していないもの

洪水流計算, 二次元河床変動計算⁴⁾など, より高度な数値シミュレーションも行われるようになってきたが, これらのシミュレーション技術は発展段階にあり, 水利現象の予測や対策工の配置などを検討するには, いまだ解決すべき多くの問題が残されている。数値シミュレーションが適切であるかどうかの検証は, 現地観測および模型実験の結果との比較を通して行われ, これによってシミュレーション結果の精度検証が行われる。重要なことは, 一次元計算で実用上十分な結果が得られる現象と, 必要な精度を得るには少なくとも二次元計算によらなければならない現象とに分類し, 二次元計算が必要な場合にも模型実験等を行う場合と比較し, 求められる精度, 時間, 経済性などを十分吟味したうえで計算を実行することが望まれる。

水利問題の中には, 数値シミュレーション以外の手段では, 解を得ることが難しいものもある。これは境界条件, 場の条件が複雑で, 模型実験では現象を再現することが困難なもの, 例えば湖や河口域での二次元・三次元流れおよび水質問題がこれに該当する。このような場合には, 数値シミュレーションが相対的に有力な解決手段を与える。現状では, 数値計算技術上の問題, 現地観測資料の不十分さなどから初期条件, 境界条件の違いによる解の相対的評価を行うことによって, 近似解を見い出そうとする。

このとき、得られたものが妥当な解となっているかの判断には、現象に対するかなりの洞察力が要求される。したがって、数値シミュレーション結果の信頼度の向上には、対象とする場での現地データの蓄積が最も必要とされるところである。数値計算技術は今後一層進歩し、その適用範囲は今日よりもさらに広がることとなるが、ますます多様化する河川の水利問題の解明のためには、模型実験と数値シミュレーションが補完的關係にあることは今後も変わらず、むしろその関係は強まるであろう。

1-3 実験計画

1-3-1 実験の進め方

模型実験を実施するに当たっては、その目的とする検討項目に対して、必要な現地資料の収集と解析、水利計算、境界条件の検討、現地状況の調査などが重要となる。これより模型実験の全体計画が作成され、模型製作、検証実験による相似性の検討、本実験での測定、さらに測定資料の解析を行い、必要があれば模型の改造を行って実験を繰り返す。以上の検討から総合して目的に対する結論を導く。これらのフローチャートの概略を示したのが図-1.1である。

実験方法については、その目的により固定床模型にするか移動床模型にするか、さらに実験目的に対する必要精度、実験施設（敷地面積、給排水設備の能力等）や移動床河床材料の制約と相似性などから、模型縮尺が決定される。このとき現地の各種資料が必要となり、これらの資料収集および解析が不十分であると、実験全体の信頼性が著しく低下するだけでなく、実験計画の立案やその遂行が困難となる場合もある。したがって、模型実験の実施に当たっては、現地資料の解析や水利計算のほかに、現地の河道計画等を予め相当しっかりつめておく必要がある。検討事項の内容も含めて、これらに十分な時間をかけ、多少実験開始が遅れても、結果的にはその方が速く結論に到達できることの方がむしろ多い。なお、模型改造は、現況から計画河道へ改造したり、比較検討のためにYesの場合でも、模型改造を行うケースがある。

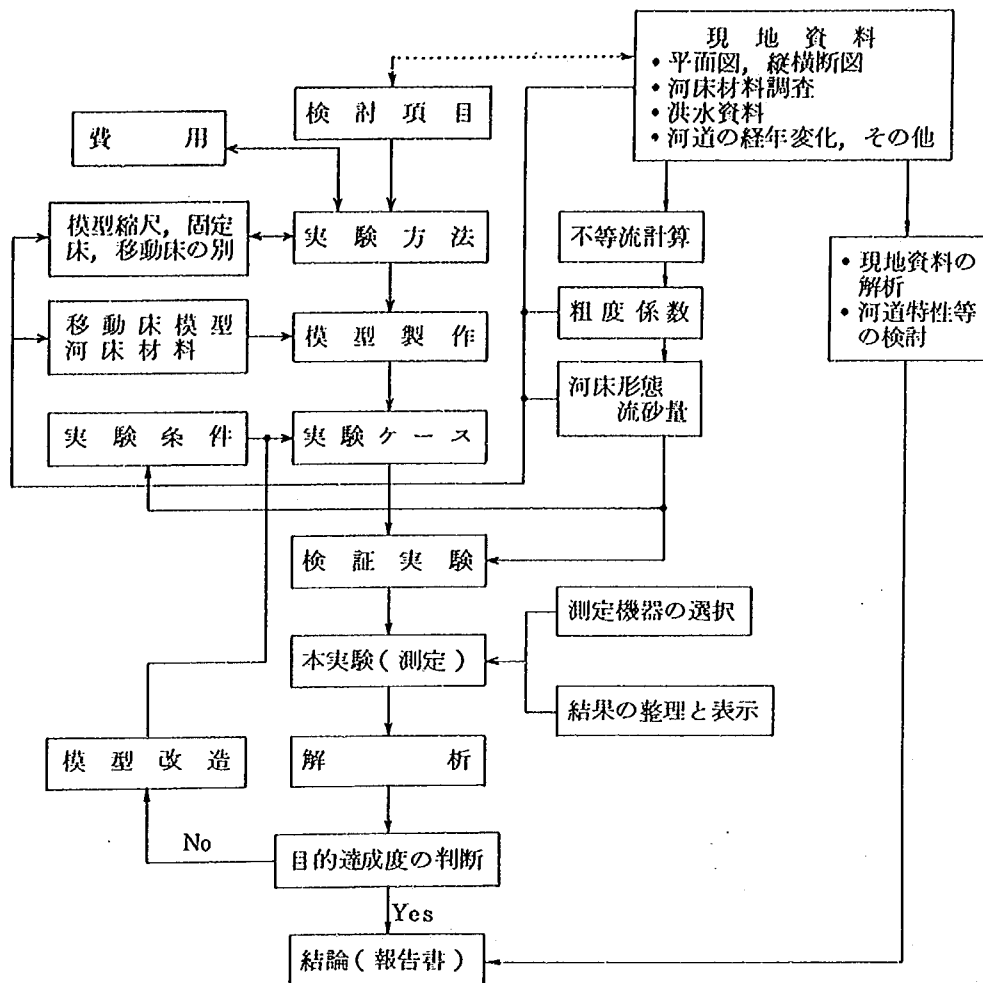


図- 1.1 実験計画のフローチャート

1-3-2 模型縮尺, 模型範囲の選定

模型の縮尺は大きい方が望ましいが, 一般には実験目的に対する必要精度, 実験施設(面積, 給排水設備の能力等)および相似性との関係等で決められる。とくに移動床模型の場合, 現地の河床材料粒径が非常に重要となる。模型縮尺の決定に当たっては, 以上のような項目のほかに次のような制約条件を考慮する必要がある。

①水深: 重要区間の水深は 3 cm 以上となるようにし, 粘性の影響を無視し得, かつ乱流域とする。

②測定精度とその能力

最近は微流速まで測定可能な機器も開発されているが, 通常は流速 $v > 5 \text{ cm/s}$, 水位の精度 0.5 mm, 河床変動量 2 mm 程度である。

③流れの相似性

固定床模型は、通常モルタルの木ゴテ仕上げで製作される。このときの粗度係数 n は約 0.012～0.015 であり、金ゴテ仕上げでも約 0.010～0.012 程度である。また移動床模型では河床形態が相似にならないと河床抵抗、すなわち粗度係数も異なってくる。

④限界掃流力、河床形態、流砂形態の相似

河床材料との関係もあり、対象流量が小さい範囲まで完全に相似にさせることはかなり困難である。砂を河床材料とした河川の移動床模型では、模型に使用できる移動床材料に制限がある。

これらの条件を満たし得ない場合、歪模型とすることもある。ただし、移動床実験では無歪模型の場合が多い。

検討対象区間以外の上流側の模型必要範囲としては、主流部位置やその変動特性（交互砂州や砂礫堆の流下状況）および補給砂の状況と給砂方法に左右される。通常は直線部の河道位置とし、川幅の 3～6 倍程度（蛇行の影響が卓越するときは蛇行波長以上）必要である。下流側は川幅の 2～5 倍程度必要であり、このとき基準量水標地点が含まれれば最良である。

1-3-3 固定床、移動床実験の選定

模型実験には、河床の取り扱い方によって固定床実験と移動床実験がある。固定床実験とは、河床がモルタル等の動かない材料で構成された模型を使用して行うものである。移動床実験とは、河床が砂等の移動可能な材料で構成された模型を使用して行うものである。それぞれの特徴は次のようである。

固定床実験では、河床変動の情報は得られないが、水位や流況の情報は移動床実験に比べて精度良く得られる。したがって、流下能力、河道形状の変化による水理諸量、水理量の変化による形状損失、流速分布および流況等を検討する場合に適している。ただし、実現象において河床変動が著しい場合には不適当であり、現地資料や河床変動計算により、事前に検討区間の河床の安定性について十分検討しておくことが必要である。これに対し、移動床実験は、河床変動や構造物周辺の洗掘の予測、およびその対策効果の検討が可能である。しかし、固定床実験に比べて、費用と時間が多くかかり、また相似性を満足することが困難な場合もある。これら固定床、移動床実験の利点および欠点をまとめると表 1.2 のようである。

表 1.2 固定床実験と移動床実験の比較³⁾

	実験内容	主な測定項目	相似性との問題点	境界条件の与え方		費用と時間	備考
				水位・流量条件の変化	形状の変化		
固定床実験	- 流下能力 - 流量係数、操作方法等	水位、流速、流量	粗度係数	易	難	少	現地河川において河床変動が激しくないことが前提
移動床実験	- 河床変動 - 構造物の配置計画 - 洗掘対策の効果	水位、流速、流況、河床高、局所洗掘	- 河床形態 - 限界掃流力 - 補給砂 - 時間縮尺	難	易	多	

※実験内容については表 1.1 の具体例を参照

1-3-4 実験水理条件

模型実験は、時間の取り扱いによって定流実験と不定流実験があり、このほか流量を段階的に変化させる実験もある。定流実験は不定流実験に比べて簡便であり、現象の時間的な変化過程を必要としない定流量時の水理量の把握や流下能力の検討に適している。不定流実験は、氾濫過程、1 洪水中および洪水後の河床変化、堰操作時の水位変化、遊水池の貯留効果等の時間変化量を検討するのに適している。

このとき用いる入力条件、境界条件の水理量は、把握しようとする現象により条件も異なる。例えば、河口潮位の影響を受ける河道の洗掘現象を調べる場合は、下流端水位を低い条件で設定し、水位堰上げ量を調べる場合は、下流端水位を高い条件で与える必要がある。このように模型実験の水理条件は、目的とする現象によって異なるため、その現象を解明するための水理諸量を十分検討して決定し、そのうえで実験を実施することが必要である。

1-3-5 模型製作および実験に必要な現地資料

模型実験を実施する場合、まず重要なことは実験の目的はもちろん、河川の全体計画や河道の特性等を十分検討し、何を求めようとするのか、その目的と河道の問題点を確実に把握することである。これによって目的に応じた現象を正しく解明するための模型が製作され、実験も最少時間で合理的に進めることができ、かつ正確な実験成果が得られることになる。よって、模型実験の実施に当たっては、現地資料の解析や水理計算のほかには現地の河道特性、河道計画等を予め十分検討しておくことが非常に大切である。これらの検討資料も含め、模型実験に必要な現地資料は次のようなものとなる。なお、これらの資料は全て満たされなければ実験ができないわけではないが、精度向上と十分な検討のためにも諸資料の整備が望まれる。

1) 模型製作に必要な資料

(1) 河道の縦横断面図、平面図、平水時の空中写真

- ① 平面図は一般に 1/2500 を使用している。他に距離標位置の座標値があれば精度向上に役立つ。
- ② 横断面図は一般に縦 1/100、横 1/1000 を使用している。同様にこの横断面形状の数値のあることが望ましい。なお、定期横断面測量では通常縦断面方向は 200 m 間隔で実施されている場合が多い。しかし、縮尺 1/50 程度の模型製作には縦断面方向 100 m 間隔の横断面が必要とされる。
- ③ 平面図、縦横断面図には、計画法線、計画水位、計画断面形とこれらの変更予定計画資料が必要である。
- ④ 平水時の空中写真は、断面間の形状変化や移動床模型時の固定床部との境界の設定等に参考となる。

(2) 河川構造物およびこれらの根入れ深さ

- ① 模型実験に必要な河川構造物としては、護岸および根固工、水制、床止め、堰、橋梁等があり、実験内容によっては、樋門、樋管等も含まれる。よって、計画の資料も含め、これらの配置、構造、使用ブロック重量等が必要となる。
- ② 河川構造物は模型区間内の調査でよいが、緩流河川ではその下流の、また急流河川ではその上流の比較的大きな構造物も調べておくことが望ましい。

(3) 河床材料およびボーリング資料

- ① 河床材料は河道の性格を知るためにも必要であり、またこれより粗度係数の推測の資料となり、洪水痕跡からの逆算粗度係数や計画粗度係数との比較検討にも役立つ。
- ② 移動床模型の場合、模型縮尺および模型河床材料粒径を決定するための極めて重要な資料となる。
- ③ 採取位置は、検討対象区間内のみならず可能なかぎり上下流を含む広範囲とし、通常は1.0km毎の右左岸で採取しているが、河川によって異なる。
- ④ 河川砂防技術基準による採取方法は、表面から30cmの表層を取り除いて調査することになっている。しかし、砂利河川では河床の表面はアーミング現象によって比較的大きい粒径の砂礫で覆われており、表層を取り除いた場合、これらの粒径の大きい部分が欠落することが多いので留意する必要がある。すなわち、このような場合、模型に用いる河床材料粒径が実際より小さくなるため、模型内の河床材料が流送され易く、かつ局所洗掘等が過大な結果となるので注意が必要である。とくに、急流河川では、この粒径の大きい部分が河床変動に多大な影響を与えるので、相似性や精度の上からも非常に重要である。
- ⑤ 将来大幅な河道掘削計画のある場合、堰や床止め等の大規模構造物の計画箇所では、ボーリング資料等による地質調査資料が必要である。また河道内に岩や粘土層等が露出している場合、その強度や形状を把握しておく必要がある。

2) 実験に必要な現地資料

(1) 河道の縦横断面図、平面図とその経年変化図

- ① 最深、平均河床高の経年変化および河道掘削、砂利採取量から河床高の変化状況を把握し、河道の問題点等を検討する資料とする。
- ② みお筋および砂れき堆等の経年変化と移動状況から、水衝部位置、土砂移動等の実験との比較検討と問題点の把握に役立つ。
- ③ 既往の洪水を再現する場合（検証実験）には、その洪水前後の横断が必要である。洪水時および平水時の空中写真があると流況や河床形態の相似性等の検討の参考となる。

(2) 河川構造物およびこれらの根入れ深さ

- ① 前述の模型製作とともに、実験においても必要である。

(3) 河床材料およびボーリング資料

- ① 前述の模型製作とともに、実験においても河床形態や局所洗掘等の相似、対策の必要性等を判断する資料となる。
- ② 河床材料粒径は、出水の有無、河道の変化（河床低下）等によって変化する可能性もあり、経年的な変化も調べておくことが望ましい。

(4) 既往洪水および水理状況資料

- ① 河状に与える影響の大きい支配流量を求める参考となる。
- ② 個々の洪水のハイドログラフがそろっていることが望ましい。これは不定流実験に必要であり、また移動床実験の通水時間の参考となる。
- ③ 出水時の航測写真および表面流速分布等の資料も相似性の検討に参考となる。

- ④ 平水流量等の流況は分合流や河道付替によって利水や水質に影響を与える可能性もあるので調べておく必要がある。
- (5) 水位～流量曲線
 - ① 模型下流端に相当する箇所のもが必要である（通常は不等流計算資料より作成している）。
 - ② 感潮区域では、河口潮位の違いによるH～Q曲線が必要である。
- (6) 洪水痕跡水位、粗度係数資料
 - ① 痕跡水位、粗度係数は、模型の相似性を検討するうえで重要な資料となる。
 - ② 粗度係数は、固定床模型での粗度付けや調整の判断の参考となる。
- (7) 改修計画資料
 - ① 実験では現況河道のほか、河道改修計画案について検討する場合が多く、その場合の計画案の資料も必要である。
 - ② 実験によっては、利水計画等の資料も必要である。
- (8) 河道特性の検討資料（参考資料Ⅰ参照）
 - ① 現況および計画河道の特性を把握するため、各種流量時の不等流計算、平均流速、掃流力、川幅水深比 B/H および流砂量、河床変動計算等の資料が必要となる。
 - ② これらは模型実験に必要な各種の境界条件や実験条件設定のための基礎資料となる。
- (9) その他
 - ① 災害記録、河川改修の記録、環境問題等の社会条件に関する資料
 - ② 高水敷の植生の種類と高さおよびその分布状況、密度等の資料は、粗度調整や流況の相似性の検討に必要である。
 - ③ 河口処理等に関する実験では、以上のような資料のほか、潮位、波浪、砂州フラッシュと復元状況、河口砂州高と形状および汀線の経年変化、海浜横断図、塩水遡上等の資料が必要である。

1-3-6 模型実験に必要な期間と費用

模型実験の実施に当たっては、先の実験の進め方および実験に必要な現地資料で述べたように、実験目的に対する現地の各種資料の収集と解析が重要である。これによって実験の期間が異なることもある。また、屋外実験の場合、天候の問題もあり、さらに移動床実験では河床管理や整形などにも多くの人手と時間を要する。これらの実験には、その方針等が決定された後、概略次のような期間が必要となる。

- ① 模型設計 2週間（ただし模型製作に必要な資料がそろっている場合）
- ② 模型製作 2～3ヶ月（約1000 m^2 程度の模型）
- ③ 実験 3ヶ月（1検討課題当たり）
- ④ 解析および報告書作成 3ヶ月

ただし、場合によっては、検証実験だけで3ヶ月～1年もかかるものもある。通常は1実験で2～3年、少し大掛かりな実験では4～5年を要している。

いっぽう、実験費用は、模型の規模、実験内容と方法（移動床、固定床、定流、不定流）実験ケース等によっても異なる。土木研究所で実施する場合、概略の実験費用の目安は次のようである（平成元年度現在）。

- ① 模型設計 約 100 万円（模型縮尺，模型諸元と配置の検討，付帯設備の設計等も含む。通常は担当職員が直営で行っている。）
- ② 模型製作 約 1.5～2 万円/㎡（模型面積当り，給水施設，量水槽，帰還水路を除き，他の付帯設備はこの中に含まれる。ただし，監督費用は含まない）。
- ③ 実験用河床材料 粒度調整砂 1～1.5 万円/㎡（輸送距離によって異なる）
 均一粒径砂 2～3 万円/㎡（ " ）
 石 炭 粉 7 万円/㎡ （ " ）
- ④ 実験費（データ整理，図表作成含む）
 - ・固定床実験 50～100 万円 / ケース（実験方法，計測内容によって異なる）
 - ・移動床実験 100～150 万円 / ケース（模型面積や実験方法，計測内容によって異なる）
- ⑤ 実験結果の解析，比較検討，報告書
 - ・実験費の 20～30 % 程度（現象解析，全体の最終とりまとめとその報告書作成は通常担当職員が行っている）
- ⑥ その他，光熱水料，消耗品等として実験費の約 10 % 程度の費用が必要

1-3-7 実験施設

土木研究所の河川関係の実験施設は，屋内実験棟の河川水理実験施設と屋外の河川模型実験施設があり，このほかに河川，海岸，砂防に関する基礎的な水理実験を行うための屋内実験施設として水理共同実験棟などがある。

河川水理実験施設は，河道改修や河口処理に関連する実験を行う施設で，図-1.2 に示すように，幅 50m，長さ 200 m の上屋を有している。ここではとくに屋外では困難な測定精度を要求される実験，流量や水位の自動制御を必要とする実験，波浪の影響を考える河口部の実験，移動床実験の精度改良のための実験などが行われる。ここには縮尺 1/10～1/100 の模型が 3～5 河川配置され，また二次元密度流水路，潮流発生装置，潮流実験用風洞，実験用水循環のための合計容量 4.5 m³/s のポンプ，給水配管，量水槽（流量計），低水槽，帰還水路等が設置されている。これらの施設，装置の主要諸元を表-1.3 に示す。

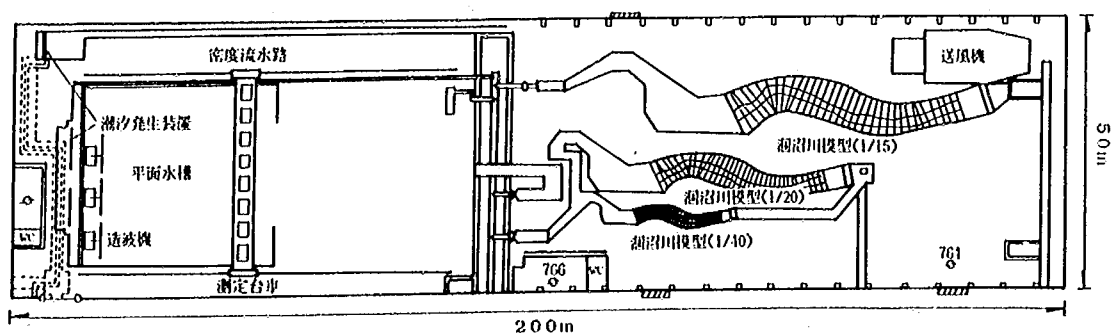


図-1.2 河川水理実験施設平面図

なお、給排水の機構は、低水槽と呼ばれる大きな池に貯留してある水をポンプで高水槽と呼ばれる高い位置に汲み上げ、そこから圧力差を利用して給水配管により各河川模型の量水槽（流量計）に通水される。圧力は一定に保たれている必要があるため、高水槽はオーバーフロー形式として水槽内の水位を一定に保ち、余剰水は低水槽に還流される。各模型への供給量は、給水配管に取り付けられているバルブと量水槽あるいは流量計により、目標値に設定される。通水された水は、模型下流端から帰還水路と呼ばれる低水槽に通じる水路に排水されて循環するシステムとなっている。

表- 1.3 河川水理実験施設の主要諸元

実験施設	水路・設備	概 要
河川水理 実験施設 (205 m ×53 m)	模 型 実 験 場	長さ100 m×幅50 m, 長さ80 m×幅40 m, 各1ヶ所。給排水施設を含む。
	造 波 装 置	移動式ベンジュラム型, 3連。波高最大25 cm, 周期0.5~4 sec。
	起 潮 装 置	基準水位0.35~0.70 m。波形, 正弦波。周期1.0~2.4 時間。潮位変動量0~0.1 m。
	計 測 台 車	スパン37.5 m, 走行範囲53.9 m, 横行範囲33 m, 総重量50 ton。走行・横行速度1.5, 10, 30 m/min。マイコン制御。
	密 度 流 水 路	長さ90 m, 幅0.6 m, 高さ0.8 m, 両面ガラス張り。最大供給可能流量淡水60 ℓ/s, 塩水30 ℓ/s。 海部水槽—長さ15 m, 幅6 m, 高さ1.5 m。 送風設備—最大風量510 m ³ /min。最大風圧150 Ag。 貯水槽および廃水槽—長さ27 m×幅11.4 m×深さ4.0 m。貯水容量1,200 m ³ 2ヶ所。 貯塩水槽—長さ11.4 m×幅5.6 m×深さ2.5 m。容量150 m ³ 。
	湖流実験用風洞	押込開放型, 風速1~3 m/s。吹出口, 幅10 m, 高さ1 m, 最大風量600 m ³ /min, 最大風圧15 mmAg。電動機3.7 kw。
	低 水 槽	長さ55.6 m, 幅45 m, 深さ4.3 m, 貯水深3.0 m。貯水容量7,500 m ³ 。
	ポ ン プ	吐出容量80 m ³ /min, 揚程10.5 m, 電動機200 kw 3基。 吐出容量30 m ³ /min, 揚程10.5 m, 電動機75 kw, 1基。

いっぽう、河川模型実験施設は、大型の河川模型を用いて分合流、遊水地、放水路、護岸や根固工、水制、床止め、橋脚の洗掘など河道計画や構造物の設計に関する問題を水理実験により検討することができる。実験場は図- 1.3 に示すように、総面積が約15 haで、約17河川の模型を配置することができる。給水施設としては、合計容量で2.2 m³/sのポンプ、給水配管、量水槽、低水槽および帰還水路が設けられており、この給排水の機構は先に述べた河川理実験施設と同じである。これら施設の主要諸元を表- 1.4 に示す。なお、実験場は、河川水理実験施設のポンプが共用できるようになっている。付属施設として、実大規模の大型水路もあり、この他に護岸、根固め、護床工等の河川構造物に作用する流水外力の計測、破壊機構の検討を行うための大型回流閉水路などがある。

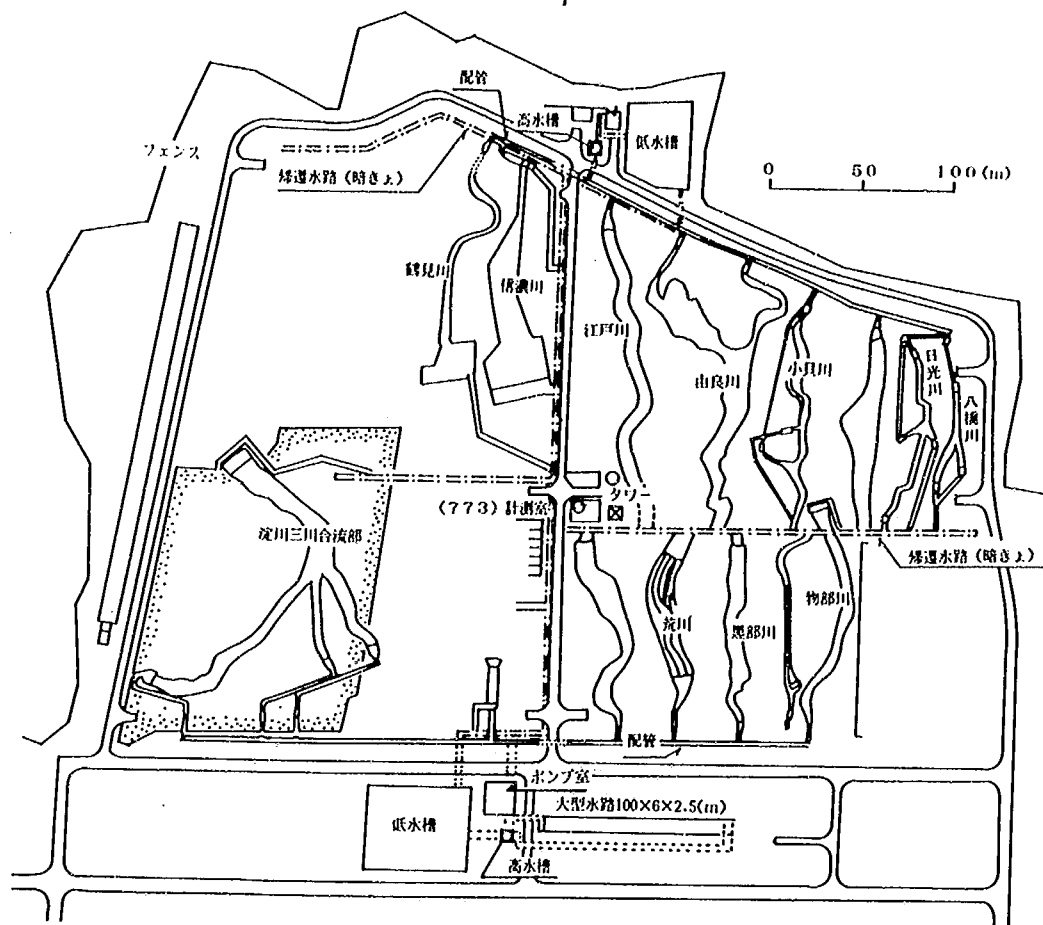


図-1.3 河川模型実験施設平面図

表-1.4 河川模型実験施設の主要諸元

河川模型 実験施設 (15 ha)	実 験 場	北東エリア(100 m×150 m), 北西エリア(150~100 m×200 m), 南東エリア(125×180 m), 南西エリア(150×150 m)
	大 型 水 路	長さ100 m, 幅6 m, 高さ2.5 m, 最大流量4.5 m ³ /s。
	低 水 槽	長さ46 m, 幅36 m, 深さ5.0 m, 貯水深3.0 m, 面積1,600 m ² , 貯水容量4,800 m ³ 。
	ポ ン プ	吐出容量60 m ³ /min, 揚程11.3 m, 電動機150 kw, 2基。 吐出容量12 m ³ /min, 揚程11.3 m, 電動機 30 kw 1基。

1-3-8 水理量の測定機器

模型実験における水理量の測定機器は数多くのものがあり、またこれらの検出装置にくらべ、記録やデータ処理装置の分野の進歩が非常に著しい。ここではこのような記録装置やデータ処理装置については省略し、現在使用されている主要な測定機器を以下に概説する。

1) 水面の測定

水理実験では、管路の実験などの例外を除けば、常に水面の測定を行う必要がある。しかし、ただ単に水面と言っても、非常に静かで滑らかな水面とか、激しく波立って乱れた水面など様々である。したがって、測定には水面の性質に応じて最も適した機器を選定する必要がある。水面の測定機器の代表的なものは次のようなものがある。

(1) ポイントゲージ

ポイントゲージは、測定ロッドの針先を水面にタッチさせ、このときの値を読み取るものであり、バーニヤは普通 $1/10\text{ mm}$ まで読めるようになっている。わが国で普通用いられているポイントゲージは図-1.4のようなものである。このポイントゲージによる測定は、針先が水面に接触したかどうかを判断するのが最も重要な技術である。乱れの少ない水面では、針先が水面に接触した瞬間に付着力によって水面は盛り上がるので、容易に計測することができる。水面の乱れが激しい場合は、その変動を把握することは困難であり、平均水面として針先が水面に接触している時間と、離れている時間がほぼ等しくなるように測定を行う。なお、最近ではデジタル式のポイントゲージも作られている。

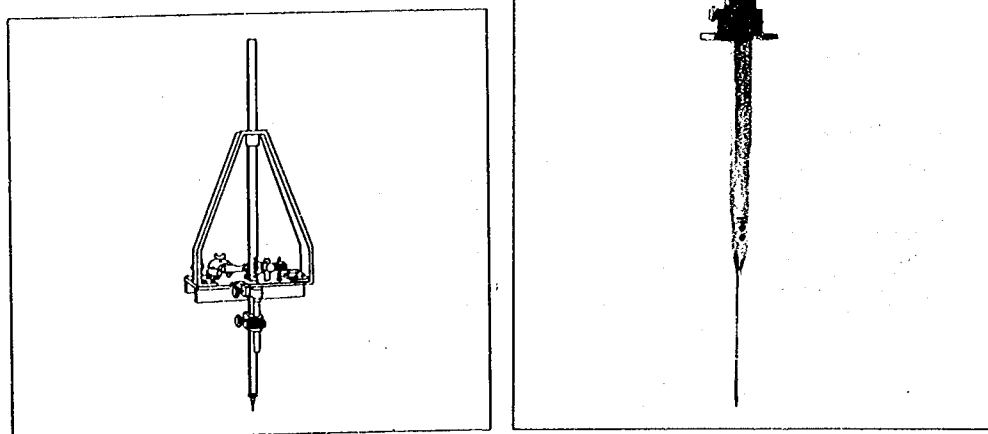


図-1.4 ポイントゲージ(三光精密工業製)

(2) 触針型水位計

水位検出は、測定ロッドや検出指針が水面に接触した瞬間を電氣的に捉えるものである。したがって、比較的水位変動がゆるやかな現象の測定に適している（図-1.5）。

(3) サーボ式水位計

この水位計は、検出針と水中電極との間の抵抗値が常に一定になるように、すなわち針の先端水中深さが常に一定に保たれるようにサーボ機構で上下させるものである。この上下変位をポテンショメータに連動させて水位値を出力する。比較的早い水位変化にも追従し、その連続計測等に適している（図-1.6）。

(4) 抵抗線式波高計

波高計も水面を測定する機器の一種である。この波高計は、水位の変動を抵抗線2本間の抵抗値変化として、ブリッジ回路で検出し、増幅器により増幅して測定するものである。なお、本器は水温、水質が変化すると出力も変化するため、その取り扱いに注意が必要である（図-1.7）。

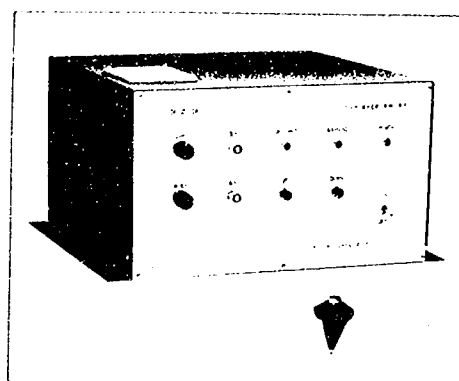


図-1.5 触針型水位計（計測技研製）

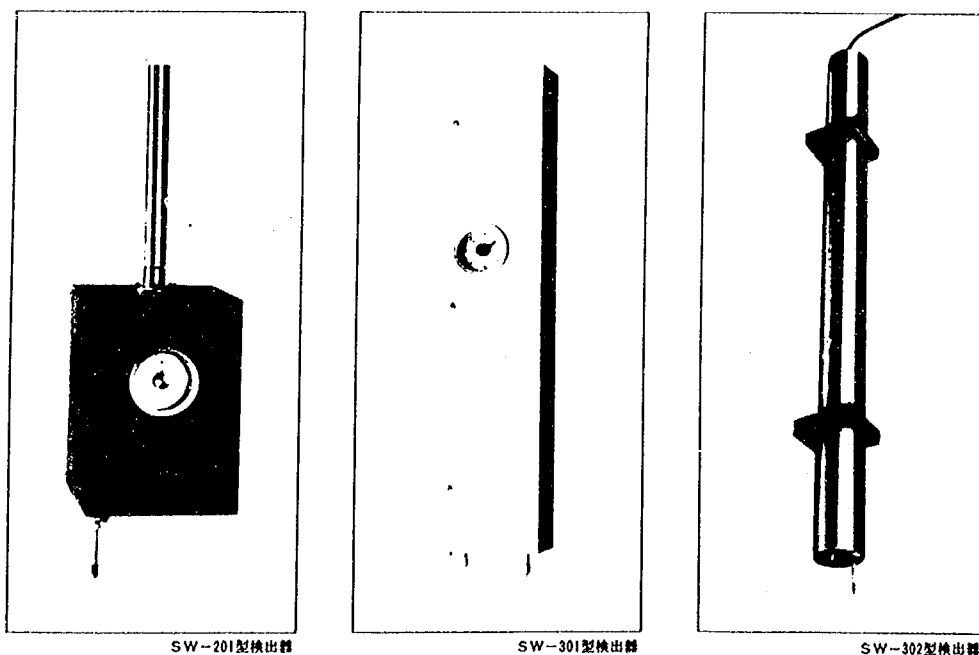


図-1.6 サーボ式水位計（計測技研製）

(5) 容量式波高計

芯線が導体、被覆が絶縁体でできた検出線を水中に入れると、導体と水の間にコンデンサが形成され、そのコンデンサの容量は水深に比例する。検出部内でこの容量変化をそれに比例した電圧に変換して測定する。水温、水質の影響を受けず、近年応答性もよく、分解能も高いものが作られている（図-1.8）。

2) 流速の測定

流速および流向は、圧力とならんで流れの運動学的、または力学的状態を知るうえで欠かすことのできない重要な測定量である。速度の時間的変動値はさらにレイノルズ応力の計測、拡散係数の計測などにも関係する。このように流速の測定は重要であるにもかかわらず、なかなか困難である。これらの測定法および機器の主要なものを以下に示す。

(1) 表面浮子法

これは紙片、コルク片、アルミニウムの粉末など軽い小片を水面に浮かせ、その移動を追跡する方法である。追跡には一定時間間隔に写真（モータドライブ等）を撮って、その軌跡をたどる方法やビデオカメラによる画像解析法などがある。

(2) 水素気泡法

流れの中に細線（マンガン線等）を張り、直流の陰極として水を電気分解することにより生ずる水素気泡をトレーサとして用いる方法である。一般に二次元水路実験などの流れの可視化に用いられる（図-1.9）。

(3) ビトー管

ビトー管は、静圧管と動圧管の圧力差を讀んで流速を求める装置である（図-1.10）。

ビトー管の圧力は、マノメータに接続して測定する。流速が小さいときはこの圧力差が小さく、測定精度も悪くなる。このため流速（20 cm/s 程度以上）の大きい場合の測定に適している。また、圧力の測定に時間がかかる（安定も含め）ため、非定常の測定には適さない。ビトー管とマノメータ間は、ビニール管で接続されるが、このビニール管内に気泡が発生し易いので注意が必要である。

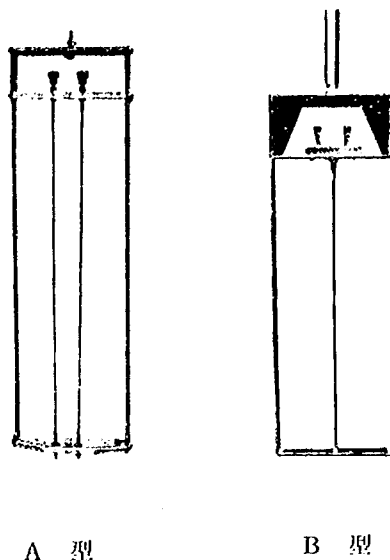


図-1.7 抵抗線式波高計
（三光精密工業製）

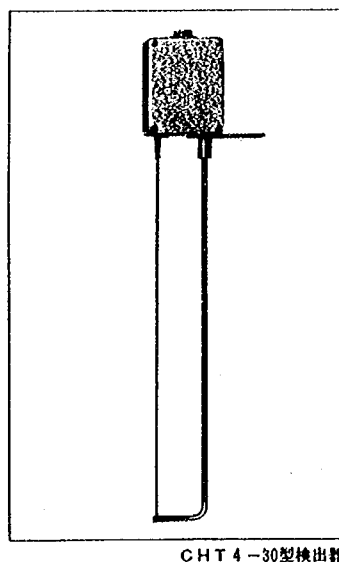


図-1.8 容量式波高計
（計測技研製）

(4) プロベラ式流速計

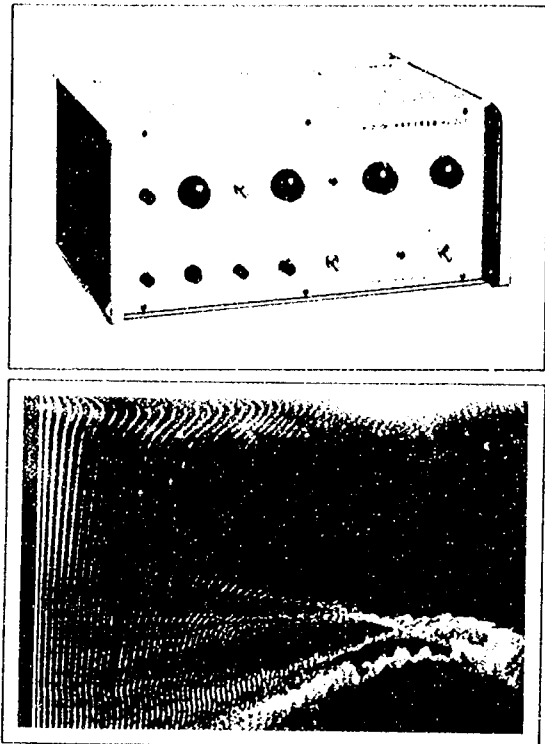
この形式の流速計は、プロベラの回転を主として電氣的に検出するものである。検出方法としては、光方式、抵抗変化方式、磁気検出方式等がある。プロベラは径25mm～5mm程度のものがあり、このプロベラの回転数と流速の関係はキャリブレーションによって定める。したがって大事な測定の前には検定が必要である。また使用に際しては、軸受やプロベラの状態が変化すると回転数と流速の関係も当然変わってくるので、衝撃やゴミ等の付着には注意しなければならない。測定可能流速は3.0 cm/s以上となっているものもあるが、精度的には5.0 cm/s以上と思われる。現在、模型実験に用いられているプロベラ径は10mm程度のものが多く、携帯用の小型のカウンターなども使用されている(図-1.11)。

(5) 電磁流速計

磁界の中で磁界に直角に導体を動かすと、運動の方向と直角の方向に電位差を生ずることを利用した流速計である。応答性が早く、かつ小さな流速でも測定可能であり、また水質の影響も少なく、安定性にも優れている。測定方向はx-Y軸2成分の測定が可能であり、センサー部は $\phi 8 \times 30$ mmの小型のものも作られている(図-1.12)。

(6) その他

流速計にはこの他に、超音波流速計、レーザ流速計、サーマル式微流速計などがある。測定(使用)目的によっては、非常に威力を発揮するが、それぞれに特質があり、適用にあたってはそれらを十分検討したうえで使用することが望ましい。



観測例

図-1.9 水素気泡発生器
(計測技研製)

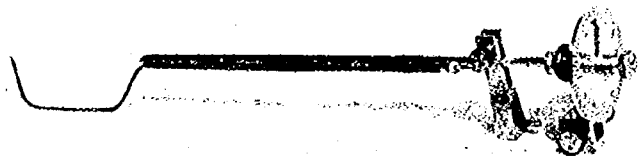


図-1.10 ピトー管(三光精密工業製)

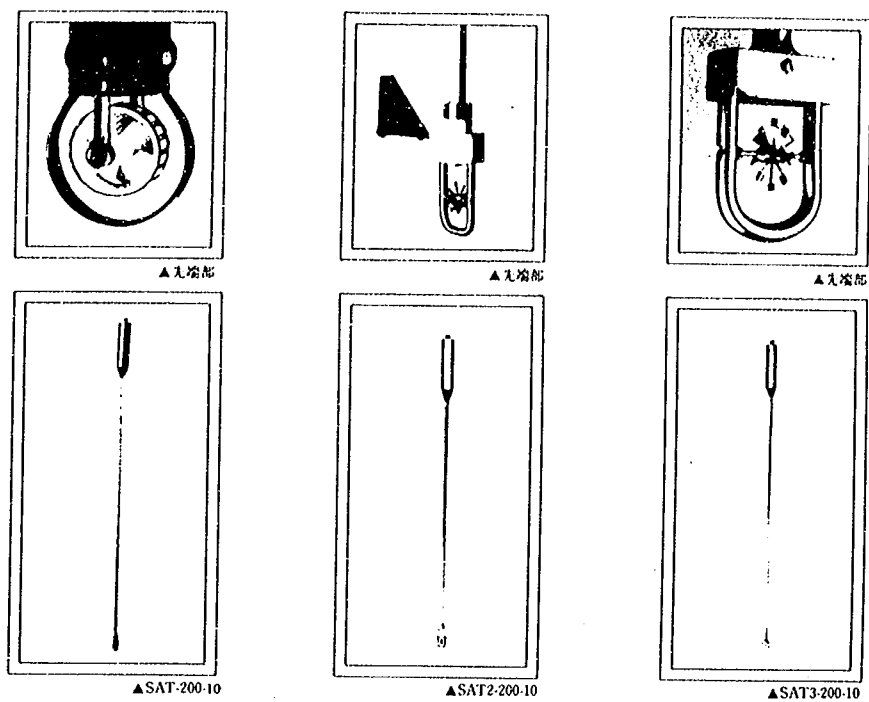


図-1.11 プロベラ式流速計(東京計測機)

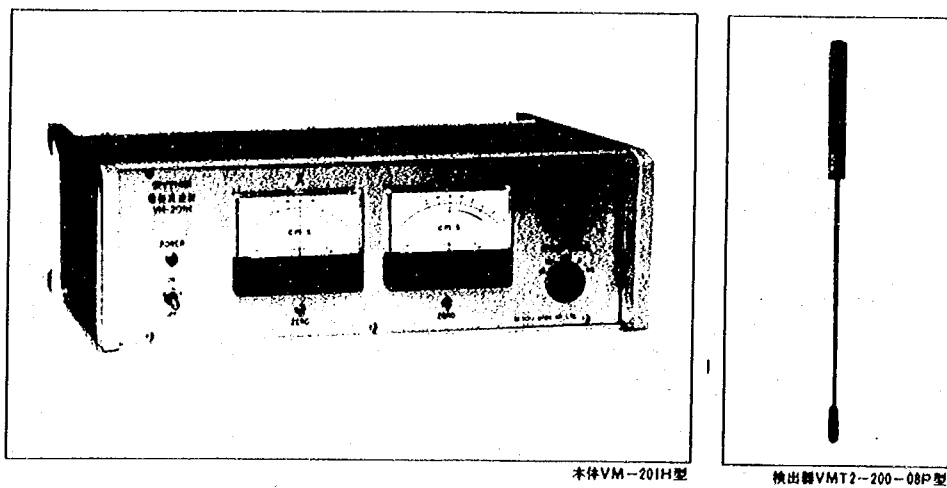


図-1.12 電磁流速計(計測技研製)

3) 河床高の測定

移動床実験では、通水中あるいは通水後の河床高変化を測定する。これらのいちばん簡単な測定方法は、測定箇所上にピアノ線等を水平に張り、そこからの下りをスケールで読み取る方法である。この他に測定棒の目盛を直接レベルで読み取る方法もある。ここではこれ以外の河床高測定器を以下に述べる。

(1) 砂面測定器（接触式砂面計）

測定点上に設置した検出部により、基準面から水面、基準面から砂面、水面から砂面が触針式の検出棒にて測定できるようになっている。砂面検出には、特殊タッチスイッチが用いられ、砂面を変形せずに測定することができる。決められた測点の河床高変化を測定するのに有効である（図-1.13）。

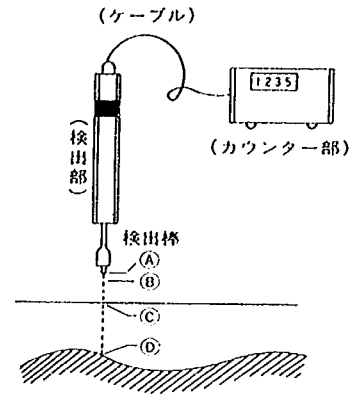


図-1.13 砂面測定器
(計測技研製)

(2) 連続式砂面計

非接触変位センサーとサーボ機構を組合せ、河床高変化に応じて車輪と非接触変位センサー間の距離が一定となるように、検出棒を上下させるものである。台車を断面上に走らせ、水の有無に関係なく、河床高を連続して計測することが可能である（図-1.14）。

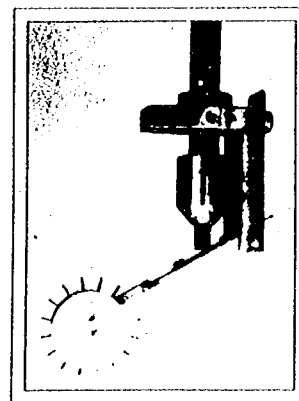
(3) 超音波河床高計

これは計測台車の所定位置から、河床形状の変化状況を連続計測できる超音波測深器である。計測に際しては、超音波発振器が水中に没していなければならないが、したがって水面より出ている砂面形状等は計測できない。また流砂量が多い場合は、浮遊して流下する地点の高さをとらえてしまい、真の河床高が測定できない場合もある。

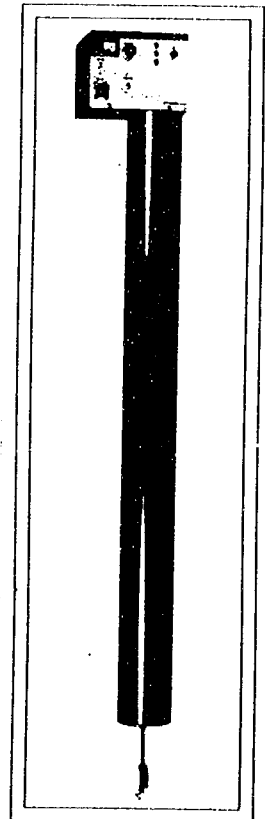
4) その他の水理測定機器

水理模型実験に使用されるその他の水理計測機器としては、以下のようなものがある。

- ① 濁度計：水中微粒子の混入度を光の透過光量の変化として測定する。
- ② 流体剪断力計：流体によるせん断



▲先端部



▲検出部 HIT-1380

図-1.14 連続式砂面計（東京計測製）

力の計測用として製作されている。

- ③ 導電率計：塩分濃度の測定用に用いられる。
- ④ 水面油膜層計測器：水面上の油膜層の厚さを計測する超音波測定器である。
- ⑤ 二層流内部波高計：水と塩水などの境界面を検出する。

第2章 模型実験の相似則と模型縮尺の考え方

2-1 流れの相似則

2-1-1 三次元流れの相似則

実河川に起こる現象を水理模型実験によって検討するためには、実河川と河道模型とにおいて検討の対象としている現象が似たものとならなければならない。従って検討の対象としているものが何かによって相似条件が異なってくる。

今流れの相似条件を三次元流れ、非圧縮性の重力場の流れを考えると、流体の運動は Navier Stokes の運動方程式および連続式によって支配される。座標を直交座標で考えればそれは以下のごとくとなる。

$$\left. \begin{aligned} \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \nabla^2 u \\ \left\{ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \nabla^2 v \\ \left\{ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} + \frac{\partial(w^2)}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \nabla^2 w - g \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2-1)$$

となる。ここで x, y は水平方向、 z は垂直方向の座標であり、 u, v, w は x, y, z 方向の流速である。

上式において、長さスケールの異なった場合（たとえば、実物と模型）において流速分布が相似であるためには、それぞれの基礎式の各項の比が等しくなければならない。その条件は、実物と模型の比をサフィクス r で表わせば、

$$\begin{aligned} \left(\frac{u}{t} \right)_r &= \left(\frac{u^2}{x} \right)_r = \left(\frac{uv}{y} \right)_r = \left(\frac{uw}{z} \right)_r = \left(\frac{P}{\rho_w x} \right)_r = \left(\frac{\nu u}{x^2} \right)_r = \left(\frac{\nu u}{y^2} \right)_r = \left(\frac{\nu u}{z^2} \right)_r = g_r = 1 \\ \left(\frac{u}{t} \right)_r &= \left(\frac{vu}{x} \right)_r = \left(\frac{v^2}{y} \right)_r = \left(\frac{vw}{z} \right)_r = \left(\frac{P}{\rho_w y} \right)_r = \left(\frac{\nu v}{x^2} \right)_r = \left(\frac{\nu v}{y^2} \right)_r = \left(\frac{\nu v}{z^2} \right)_r \\ \left(\frac{w}{t} \right)_r &= \left(\frac{wu}{x} \right)_r = \left(\frac{wv}{y} \right)_r = \left(\frac{w^2}{z} \right)_r = \left(\frac{P}{\rho_w z} \right)_r = \left(\frac{\nu w}{x^2} \right)_r = \left(\frac{\nu w}{y^2} \right)_r = \left(\frac{\nu w}{z^2} \right)_r \\ \left(\frac{u}{x} \right)_r &= \left(\frac{v}{y} \right)_r = \left(\frac{w}{z} \right)_r \end{aligned}$$

となる。上式より

$$\left. \begin{aligned} (y/x)_r &= (z/x)_r = 1 \\ (v/u)_r &= (w/u)_r = 1 \\ (u/\sqrt{gx})_r &= 1 \\ (ux/\nu)_r &= 1 \\ (x/tu)_r &= 1 \\ (P/\rho_w u^2)_r &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2-2)$$

となる。よって流体を水とすれば $\rho_w r = \nu_r = 1$ であるから $X_r = 1$ となり、縮尺を変えることができなくなる。つまりレイノルズ数 $(ux/\nu)_r = 1$ 、フルード数 $(v/\sqrt{gx})_r = 1$ を同時に満足させるためには、同一スケールの場合のみ可能であることになる。なお(2-2)式は11個の物理量が関係し、一次量が3つであるから π 定理より8個の無次元量は、おたがいに、1つの関係で結ばれる。よって(2-2)式の1つは他の無次元量の従属関数となる。

このように粘性の影響のある流れでは(2-2)式の粘性に関する $(ux/\nu)_r = 1$ の条件、すなわちレイノルズ数を見捨てることはできない。

流れのレイノルズ数 $V_m H/\nu$ が大きくなると流れは乱流場となり、(2-2)式の粘性項の代わりにレイノルズ応力を考えなければならない。ここで V_m 、 H はそれぞれ流れの場の代表流速、代表水深である。乱流場では、(2-1)式は、

$$\left. \begin{aligned} \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \nu \nabla^2 \bar{u} - \left[\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right] \\ \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \nu \nabla^2 \bar{v} - \left[\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right] \\ \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \nu \nabla^2 \bar{w} - \left[\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right] - g \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2-3)$$

である。ここで $u = \bar{u} + u'$ で $\bar{u}$ は時間平均流速、 u' は乱れ速度で、 v 、 w についても同様である。上式において、右辺第二項が第三項より小さく無視しえれば、前に行った方法と同様に

$$\left. \begin{aligned} (y/x)_r &= (z/x)_r = 1 \\ (\bar{v}/\bar{u})_r &= (\bar{w}/\bar{u})_r = 1 \\ (\bar{u}/\sqrt{gx})_r &= 1, \quad (\bar{P}/\rho \bar{u}^2)_r = 1 \\ (\overline{u'^2})_r &= (\overline{u'v'})_r = (\overline{u'w'})_r = (\overline{v'^2})_r = (\overline{v'w'})_r = (\overline{u'w'})_r \\ &= (\overline{v'w'})_r = (\overline{w'^2})_r = (\overline{u^2})_r \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2-4)$$

が、長さスケールの異なった場で相似な流れの条件となる。

ところで、 $V_m H/\nu$ の大きな乱流場では(2-4)式の上から三項が成立すれば、四項の乱れ特性の相似条件はおのずから成立すると考えられている。このことを2つの例によって示してみよう。

○開水路せん断流場の Reynolds 応力

開水路のレイノルズ応力 $-\rho \overline{u'v'}$ は $u_* k_s/\nu$ が大きければ

$$-\rho \overline{u'v'} = \rho u_*^2 \left(1 - \frac{z}{H}\right) \dots\dots\dots (2-5)$$

であり、また Nikuradse によれば、粗面完全乱流場の開水路の流速分布形は、 $\bar{u}/u_* = f(z/k_s)$ であるから $(k_s/H)_r = 1$ なら、Reynolds 応力の相似性の条件が成立する。なお河床が平坦であれば $k_s \propto d$ であるので、 $(H/d)_r = 1$ であれば、Reynolds の相似条件が成立することになる。

なお、平坦河床の流速分布は、Nikuradse の実験によって、 $u_* k_s / \nu < 5$ なら、底面は粘性底層におおわれ、

$$\bar{u}/u_* = 5.5 + 5.75 \log(u_* k_s / \nu \cdot z/k_s) \quad \dots\dots\dots (2-6)$$

$$V_m/u_* = 3.0 + 5.75 \log(u_* k_s / \nu \cdot H/k_s) \quad \dots\dots\dots (2-7)$$

$u_* k_s / \nu > 70$ なら、完全粗面乱流状態で

$$\bar{u}/u_* = 8.5 + 5.75 \log \frac{z}{k_s} \quad \dots\dots\dots (2-8)$$

$$V_m/u_* = 6.0 + 5.75 \log \frac{H}{k_s} \quad \dots\dots\dots (2-9)$$

$5 < u_* k_s / \nu < 70$ なら底面の状態は滑面から粗面への遷移状態で

$$\bar{u}/u_* = f(u_* k_s / \nu, z/k_s) \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

$$V_m/u_* = f(u_* k_s / \nu, H/k_s) \quad \dots\dots\dots (2-11)$$

となることが明らかにされている。なお $k_s \propto d$ と言われている。

以上、完全粗面乱流の状態であるような流れでは、流れの平均的な性質がレイノルズ数に影響を受けないことが、経験的に明らかになっている。

○自由な乱れの相似性

河床面は、河床波が存在し、これによって流れのはく離が生じる。このようなはく離によって生じる乱れの統計的性質は構造物による後流の相似性の問題と似ている。このような後流の乱流構造は VD/ν が大きければ、いわゆる自己保存の状態にあり、乱れが下流に移っていく場合には、単に乱れの運動の流さ、時間および速度の尺度が変化するだけの状態となる。ここで D は流れの場の代表長さ（構造物の大きさ等）、 V は代表速度である。この場合、後流の流れの運動に関する長さ $l(x)$ 、速度 $\bar{u}(x)$ は、

$$l(x)/D \propto (X/D)^p, \quad \bar{u}(x)/V \propto (x/D)^{-q} \quad \dots\dots\dots (2-12)$$

で表わすことができる。たとえば円柱の背後では $p = 1/2$ 、 $q = 1/2$ である。

このように後流の乱流構造は、自己保存の状態にあり、また流速分布形が、形状のみによって決まるという経験的事実は、河床波近傍の流れの構造は、(2-4)式の上から三項が成立すれば、四項はおのずから成立するだろうということを推察させる。

以上、十分に乱れた乱流場であり、 $\frac{u_* k_s}{\nu}$ が70程度以上であれば、流れの相似性は、レイノルズ数の影響を無視して良いと考えられる。(2-4)式の上から3行の式は、9個の物理量が関係し、一次量が3つであるから、 π 定理より6個の無次元量はお互いに1つの関係で結ばれる。すなわち、無重(幾

何学的相似) のフルード相似則を満たす河道模型が相似条件となる。

2-1-2 一次元流れの相似則 (歪模型)

河川の流れを簡単のために一次元の流れと考え、 y 軸と z 軸の平均流速 $\bar{u}$, $\bar{w}$ を無視し、さらにレイノルズ応力の項を渦動粘性係数 ϵ を用いて書き直すと、

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \quad \dots\dots (2-13)$$

となる。実河道と河道模型との流れの相似性を得るためには、このような運動方程式が、実河道と河道模型とで同時に成立しなければならない。一般には断面平均流を考えて、式(2-13)の各項を断面平均化し、断面平均流速を U , 水深を h , 河床勾配を I , 潤辺に働くせん断力を τ_0 , 運動量補正係数を β , エネルギー補正係数を α , 径深を R とすると、

$$\frac{\rho}{g} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\alpha}{2g} \frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - I + \frac{\tau_0}{\rho g R} = 0 \quad \dots\dots (2-14)$$

となる。ただし

$$\frac{1}{A} \iint_A \left\{ \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} dA = \frac{1}{\rho A} \iint_A \left\{ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right\} dA = \frac{1}{\rho A} \oint_s \tau_n ds$$

$$S \cdot \tau_0 = \oint_s \tau_n \cdot ds \quad \left(\begin{array}{l} S: \text{潤辺長} \\ A: \text{断面積} \end{array} \right. \quad S \cdot R = A \quad \left. \right)$$

より、河床せん断力 τ_n を潤辺に沿って平均化した τ_0 を用い、

$$\frac{1}{A} \iint_A \left\{ \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} dA = -\frac{\tau_0}{\rho A}$$

$$P + \epsilon_x \frac{\partial u}{\partial x} \rightleftharpoons P$$

と置き換えてある。

連続の方程式は

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

を一方向流れに対して平均化すると、流量を Q , 水路単位長当りの流出量を q として、

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + q = 0 \quad \dots\dots (2-15)$$

となる。

以上の(2-14)式および(2-15)式は、漸変流に関する一次元解析で、一般に用いられる運動方程式と連続方程式である。この場合式(2-14)は流れの消費するエネルギーが、すべての平均流速と水深の相似を得るだけであれば、壁面に人工的な粗度を与えることによって達成できることになる。このようにして、(2-14)式、(2-15)式が、実河道と河道模型とで同時に成り立つようにした場合

(両者における基礎式の各項の比が等しい), 諸量の縮尺は次に示すように表わされ, いわゆるフルードの相似則を満たす河道模型が得られるわけである。

$$\begin{aligned}
 \text{流速} \quad U_r &= h_r^{1/2} \\
 \text{時間} \quad t_r &= x_r \cdot h_r^{-1/2} \\
 \text{河床勾配} \quad I_r &= h_r \cdot x_r^{-1} \\
 \text{流量} \quad Q_r &= x_r \cdot h_r^{3/2} \\
 \text{粗度} \quad n_r &= h_r^{2/3} \cdot x_r^{-1/2} \\
 \text{断面積} \quad A_r &= x_r \cdot h_r
 \end{aligned}
 \tag{2-16}$$

x_r : 流れ方向の縮尺

h_r : 水深方向の縮尺

しかし, 流速分布の相似まで考えると無歪のフルード相似則にのっとった模型が必要となる。ただし, 歪率が大きくなく, 歪模型においても流れが漸変流的であれば, ある程度の流速分布の相似性が成立し, 特に z 軸方向の河床の変化が漸变的で, はく離等の現象が生じなければ水平方向の流速分布形はほぼ相似形となる。

2-2 移動床の相似則

2-2-1 移動床流れを規定する物理量とその無次元化

移動床を持つ流れにおいては, 流水の運動, 土砂粒子の運動は河床面に生じる河床波に大きく影響され, 逆に河床波は流水と土砂の運動によって形成され, 河床波, 流水の運動, 土砂の運動は相互に作用を及ぼし合う。このような流れの場の状態量である河床波, 流れの抵抗係数, 流砂量を規定する物理量は, 直線水路, 長方形断面で側壁によって流れが拘束されている水路で底質材料がほぼ均一粒径で極端に偏平でなく, また流れの状態が定常流れであれば, 次のような物理量によって規定されると考えられる⁵⁾。

水路の特性	水路幅 B , 勾配 I
流れの特性	水深 H
流体の特性	水の密度 ρ_w , 水の動粘性係数 ν
底質の特性	粒径 d , 密度 ρ_s
場の特性	重力加速度 g

従って移動床流れの状態量 λ は

$$\lambda = f(B, I, H, \rho_w, \nu, d, \rho_s, g) \tag{2-17}$$

となる。基本量として ρ_w, g, d を取り, $u_* = \sqrt{gHI}$ の関係を使うと流れの場の状態流量 λ の無次元量 $\pi\lambda$ は, 次元解析の手法より

$$\pi\lambda = f(\sqrt{gd} \cdot d/\nu, u_*^2/sgd, H/d, B/d, s) \tag{2-18}$$

となる。ここで $s = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w$ である。

各項の無次元量を乗じたり、あるいは除したりすることによって上式は良く知られた無次元量の形に表現することができる。たとえば、 λ として流砂量 q_s 、あるいは流速係数 φ （平均流速 V_m を u_* で除した値）をとると、

$$q_s/u_*d \text{ or } \varphi = f(Re_*, \tau_*, H/d, B/H, s) \quad \dots\dots\dots (2-19)$$

となる。ここで、 $Re_* = u_*d/\nu$ （粒子レイノルズ数）、 $\tau_* = u_*^2/sgd$ （無次元掃流力）である。

もし、底質材料として通常の河川で見られる砂や砂利（人工的に砕かれたものでない砂、および極端に偏平でない砂）を底質材料とし、水路の側壁が滑面であり、水路幅水深比 B/H が3以上、かつ砂州が生じるほど大きくなければ（2-19）式における s 、 B/H を除くことができる。なぜならば、 s はほぼ一定（1.6～1.7）であり、また側壁の影響もWilliams, G. P.⁶⁾の水路側壁が流砂量に及ぼす影響に関する実験的研究より、 B/H が3以上であれば、側壁の影響はほとんど考慮しなくて良いことが分かっているからである。

この場合（2-19）式は次のようになる。

$$q_s/u_*d, \text{ or } \varphi = f(Re_*, \tau_*, H/d) \quad \dots\dots\dots (2-20)$$

ただし、河床の三次元的形態（砂州等）および、それが流砂量、流れの抵抗に及ぼす影響を知るためには、 B/H を除くことができない。

なお、（2-20）式の3量のうち、一般に認められているように、 q_s/u_*d 及び φ に影響を与える効果としては τ_* 、 H/d が第一義的であり、 Re_* はそれを多少変形する第二義的な量であるという基本的な立場を本論ではとることとする。

以上述べたように移動床流れの無次元状態量 $\pi\lambda$ を規定するものは、 Re_* 、 τ_* 、 H/d 、 B/H 、 s の5つの無次元量である。このうち二次元的流れを考えれば B/H の影響を考えなくて良い。二次元的流れの無次元状態量を規定する他の4量の力学的意味とその影響程度を明らかにするために、また移動床流れの無次元状態量を規定するものとして上述の無次元量は正しいものであるかを検証するために、移動床流れの部分現象を取り出して考察してみる。

○浮遊砂運動の相似性

浮遊砂の運動は流れの乱流場で生じている。よって個々の粒子の運動の相似性により、その運動の統計的特性の相似性が重要である。ここでは統計的特性の1つである浮遊砂の平均濃度 C の分布の相似性について考えてみよう。

二次元の等流の場で考えると、 x 方向、 y 方向の拡散を無視しえるので、浮遊砂の濃度分布に関する基礎式は次式で示される。

$$\frac{d}{dz}(\epsilon_z \frac{dc}{dz}) + w_0 \frac{dc}{dz} = 0 \quad \dots\dots\dots (2-21)$$

水面および水底を通して物質の移動がないので、上式を積分すると次式となる。

$$\epsilon_z \frac{dc}{dz} + w_0 c = 0$$

底面から a の距離の点の濃度を Ca とし $\frac{z}{H} = x$ 、 $\frac{a}{H} = x_a$ とすれば、

$$C/C_a = \exp \left\{ - \int_{x_a}^x (w_0 H / \epsilon_z) dx \right\} \quad \dots\dots\dots (2-22)$$

と表わされる。これより水深Hが異なった場合でも同一の濃度分布形になるためには、

$$(w_0 H / \epsilon_z)_r = 1, \quad (x_a)_r = 1 \quad \dots\dots\dots (2-23)$$

でなければならない。今 ϵ_z として運動量の渦動粘性係数を用いると、

$$\epsilon_z = u_* \cdot \kappa \cdot H \cdot x \cdot (1 - x) \quad \dots\dots\dots (2-24)$$

である。ここで κ はカルマン定数。これを (2-23) 式に代入すれば

$$(w_0 / \kappa u_*)_r = 1, \quad (x_a)_r = 1 \quad \dots\dots\dots (2-25)$$

が濃度分布の相似条件となる。ところで浮遊粒子の沈降速度 w_0 は、抗力係数を C_D とすると、

$$w_0^2 \propto \frac{1}{C_D} s g d$$

となる。よって上式は

$$\left(\frac{s g d}{C_D \kappa^2 u_*^2} \right)_r = \left(\frac{1}{C_D \kappa^2 \tau_*^{-1}} \right)_r = 1, \quad (x_a)_r = 1 \quad \dots\dots\dots (2-26)$$

となる。

図-2.1 は粒径と沈降速度の関係を示したものである。0.3 cm ぐらいまでは $w_0 \propto \sqrt{d}$ であり、 C_D は一定である。0.01 cm 以下では、 $w_0 \propto d^2$ に比例し、いわゆるストークスの沈降速度式が成立する。0.01 cm から 0.3 cm は遷移領域である。

よって d が 0.3 cm 以上であるなら、濃度分布の相似のためには、 $(\tau_*)_r = 1$ 、 $(x_a)_r = 1$ であれば良く、 d が 0.3 cm 以下の場合には、 $(C_D \tau_*)_r = 1$ 、 $(x_a)_r = 1$ となる。

なお、 s が異なると、同一 $w_0 / \kappa u_*$ でも粒径が異なるため、乱れに対する粒子の応答やまた仮想質量力の効果も異なるため、 s によって多少濃度の分布形に相違が生じると思われる。

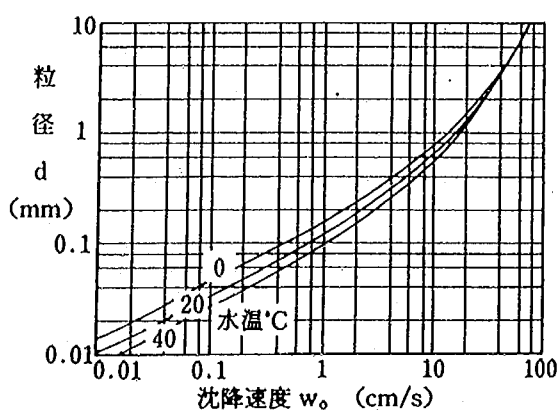


図-2.1 砂粒の沈降速度と粒径の関係

○底面を動く粒子の運動の相似性

底面近くを動く粒子の運動式は底面が平坦な場合,

$$\begin{aligned} \rho_s \frac{\pi}{6} d^3 du_s / dt = C_D \frac{\rho_w}{8} \pi d^2 |u - u_s| (u - u_s) - [(\rho_s - \rho_w) \frac{\pi}{6} g d^3 - C_L \frac{\pi}{8} \rho_w d^2 |u - u_s| \cdot \\ (u - u_s)] \mu_s - \frac{1}{2} \rho_w \frac{\pi}{6} d^3 \left(\frac{du_s}{dt} - \frac{du}{dt} \right) + \frac{\pi}{6} \rho_w d^3 \frac{du}{dt} \\ + \frac{3}{2} \rho_w d^2 \sqrt{\pi \nu} \int_{t_0}^t \left[\frac{du}{dt_1} - \frac{du_s}{dt_1} \right] / \sqrt{t - t_1} \cdot dt_1 \quad \dots\dots (2-27) \end{aligned}$$

となる。ここで u_s : 粒子の移動速度, μ_s : 粒子の摩擦係数, C_D , C_L : 粒子の抗力および揚力係数である。

(2-27) 式の右辺第一項は、水粒子と砂粒子の速度差にもとづく抗力、二項は摩擦による抗力、第三項は加想質量を加速させるための力、四項は粒子のまわりの流体の圧力勾配によって生じる力、五項はいわゆるバセット項で非定常な運動をしている粒子に作用する抵抗と定常な運動をしている粒子に作用する抵抗との相違に起因する項を表わす。なお、本来底面近くでは流れは速度勾配を持ち、また粒子の存在状態によって μ_s 等も変わり、(2-27) 式は正確には底面近くの粒子の運動を表現していないが、ここでは単に粒子に働く力としてどんなものがあるかを考えるためと考え、そのままにしておく。

今代表速度として $y = d$ の所の流速 u_d をとり、 T を代表時間とし、 $u'_s = u_s / u_d$, $t' = t / T$, $t'_1 = t_1 / T$, $u' = u / u_d$ とすると、(2-27) 式は、

$$\begin{aligned} (\rho_s + \frac{1}{2} \rho_w) \frac{\pi}{6} d^3 \frac{u_d}{T} \cdot \frac{du'_s}{dt'} = \frac{\rho_w}{8} \pi d^2 u_d^2 |u' - u'_s| (u' - u'_s) - [C_D - \mu_s C_L] \\ + (\rho_s - \rho_w) \frac{\pi}{6} g d^3 \mu_s + \frac{3}{2} \rho_w d^3 \frac{u_d}{T} \cdot \frac{du'}{dt'} \\ + \frac{3}{2} \rho_w d^2 \sqrt{\pi \nu} \cdot u_d / T^{1/2} \times \int_{t'_0}^{t'_1} \left[\frac{du'}{dt'_1} - \frac{du'_s}{dt'_1} \right] / \sqrt{t' - t'_1} \cdot dt'_1 \quad \dots\dots (2-28) \end{aligned}$$

上式より底面近くを動く粒子の運動の相似条件は

$$\begin{aligned} \left\{ \frac{C_D - \mu_s C_L}{(\rho_s / \rho_w + 1/2) d} \cdot T \cdot u_d \right\}_r = \left\{ \frac{\rho_s / \rho_w - 1}{\rho_s / \rho_w + 1/2} \cdot \mu_s \cdot \frac{g T}{u_d} \right\}_r = \left\{ \frac{1}{\rho_s / \rho_w + 1/2} \right\}_r \\ = \left\{ \frac{\sqrt{\nu T}}{(\rho_s / \rho_w + 1/2) d} \right\}_r = 1 \end{aligned}$$

となる。ところで d を代表距離スケールとすると、 $T = d / u_d$ としえるので、上式は以下のごとくになる。

$$\left. \begin{aligned} (C_D - \mu_s C_L)_r &= 1 \\ s_r &= 1 \\ (\mu_s g d / u_d^2)_r &= 1 \\ \left(\frac{u_d \cdot d}{\nu} \right)_r &= 1 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (2-29)$$

2-1-1より u_*d/ν が大きければ $u_d \propto u_*$ であり、また C_D, C_L, μ_s は $\frac{u_*d}{\nu}$ によってほとんど変化せず、バセット項の影響も無視しえるので

$$\begin{aligned} s_r &= 1 \\ (u_*^2 / sgd)_r &= 1 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2-30)$$

を満足させれば、ほぼ底面近くの運動の相似性が成立する。しかし u_*d/ν が小さい場合には $u_d/u_* = f(u_*d/\nu)$ であり、 C_D, C_L も u_*d/ν によって変化するので

$$\left. \begin{aligned} s_r &= 1 \\ (u_*^2 / sgd)_r &= 1 \\ (\frac{u_*d}{\nu})_r &= 1 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2-31)$$

が必要となる。

なお移動限界掃流力を考える時には(2-23)式の右辺の二項および三項のみを考えることが多い。この場合には、移動限界時の u を u_c とすると、

$$\left\{ \frac{sgd\mu_s}{(C_D + \mu_s C_L) u_c^2} \right\}_r = 1 \quad \dots\dots\dots (2-32)$$

となる。 u_*d/ν が大きければ、 C_D, C_L, μ_s は $\frac{u_*d}{\nu}$ によらず、 $u_c \propto u_{*c}$ であるから

$$\left(\frac{u_{*c}^2}{sgd} \right)_r = 1 \quad \dots\dots\dots (2-33)$$

となり、限界状態で無次元掃流力 τ_* は一定となる。なお、 s の効果は、 s が 1.06 から 5 ぐらいまではあまり大きくないが、流体が空気の場合 $s = 1000 \sim 2000$ となり、この場合には s によって τ_{*c} が変わることが分かっている。本来 s は独立の変数と考えるべきであり、二項、三項のみによって移動限界状態を表現することには問題が残ろう。

なお岩垣⁷⁾によれば、移動限界掃流力 τ_{*c} は R_{*c} がほぼ 150 を越えれば一定値となり R_{*c} の影響を受けなくなる ($s = 1.65$ の場合、 $R_{*c} = 150$ で移動限界掃流力状態になる粒径は 0.3 cm 程度である。)

以上総合すると、通常の川砂や砂利を底質材料とする場合、流体の運動、浮遊砂の運動、底面を動く粒子の無次元状態量を規定する無次元パラメータとして、 $\tau_*, R_{*c}, H/d$ の 3 量が必要であることが分かる。ただし R_{*c} が 150 以上 ($s = 1.65$ の場合、 d が 0.3 cm 以上) であれば、 R_{*c} は無次元状態量を規定せず、 $\tau_*, H/d$ の 2 量で表現し得ることがわかる。

これより移動床流れの無次元状態量は、(2-19)、(2-20)式で十分に表現し得るだろうことが推察される。

2-2-2 移動床模型の相似則

ところで人工的に粗度を与えることのできない移動床模型では、流れの相似のためには、河床形態の相似が得られていなければならない。すなわち、平均流の相似を考えた場合、(2-14)式中のせん断抵抗を決める河床形態がどのような関数になっているかを知らなければ、移動床の相似性を検討すること

とができない。一般に河床形態を含めた流れは、(2-19)式に示された無次元量に支配される。後述する 10-1 に示すように移動床の流れは、(2-19)式の各項のうち河床抵抗に大きく関係する小規模河床形態に最も支配的なのは、粒子レイノルズ数 $Re = u_* d / \nu$ 、無次元掃流力 $\tau_* = u_*^2 / (\rho_s / \rho_w - 1) g d$ 、水深粒径比 H/d 、水中比重 $s = (\rho_s / \rho_w - 1)$ であると考えられ、 $u_* d / \nu$ が大の時はこの項を無視することができる。従って現地河川の河床材料の大きい扇状地河川では、河床材料の粒径を模型の幾何学的縮尺と同様に縮尺し、その模型の材料が 0.6 mm 以上であれば、実河道と河道模型とでは同じような河床形態が生じ、フルードの相似関係を得ることができる。しかし実河川で Re_* の値が十分大きく無視できても一般の河道模型では、 Re_* の値が小さくなり、この項が現象を支配することがまれではない。具体的には、実河川では発生しないと考えられる ripple と呼ばれる河床波が Re_* の値が小さいと発生し、実河道と異なる河床形態、すなわち多くの場合異なる河床抵抗を呈することになる。このような領域は、模型における粒径 d が小さく、摩擦速度が小さいほど生じやすい。

ところで模型において河道の平面形状や中規模河床波によって決まる三次元的流況を把握することを目的とする場合には、移動床模型では、中規模河床形態の相似も必要となる。この場合、上述の小規模河床形態に関係する無次元量に河幅と水深の比 B/H を加える必要があり、無歪模型の条件が必要になってくる。

移動床模型におけるもうひとつの大きな問題点は、流砂量および流砂形態の相似である。流砂量を表わす関数の無次元表示も(2-19)式と同様で、 Re_* が無視できれば、流砂量は、 τ_* と H/d を実河道と河道模型とで等しくすれば、流砂量、流砂形態したがって河床変動形態も流れと同じ縮尺で相似とすることができる。 Re_* が河道模型で無視できない場合は、実河道では生じていない ripple が河道模型で生じることが有り、河床抵抗と同様、流砂量の相似も得られなくなる。また浮遊砂形態の流砂量が多くなると、摩擦速度と砂粒子の沈降速度の比が現象を決める重要な要素となり、模型の砂粒子の径が 0.2 mm 位以上あればそれほど問題がないが、それ以下あるいは比重の軽い模型河床材料の場合は、沈降速度の縮尺が、フルード則による速度の縮尺と異なるため、流砂形態の相似性が得られず、また一般に流砂量も相似にならない。実際には、移動床模型実験で上述のような無次元量すべてを、模型と実河道で一致させなくても、河床形態や流砂形態の相似条件は、支配的な無次元量が同一形態領域の範囲内にあれば、異なる形態の境界付近の現象を除けば比較的相似にしやすい。

流砂量が相似でない場合には、フルード則による時間縮尺とは別に、模型と実河道における河床変動量が相似となるように時間縮尺を決め、河道の変動状況を調べることができる。⁸⁾ 断面平均の河床変動量の式は、

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial (B q_s)}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (2-34)$$

ここで Z は河床高、 Q_s は全断面の流砂量である。今代表の平面スケールを x_0 、垂直スケールを h_0 、時間スケールを T_0 、代表流砂量を q_{s0} とすると、(2-34)式は、

$$\frac{\partial Z'}{\partial t'} + \frac{T_0}{(1-\lambda)} \frac{q_{s0}}{x_0 h_0} \frac{\partial (B' q_{s'})}{\partial x'} = 0 \quad \dots\dots\dots (2-35)$$

となる。ここで $Z' = Z/h_0$ 、 $t' = t/T_0$ 、 $B' = \frac{B}{x_0}$ 、 $q_{s'} = q_s/q_{s0}$ 、 $x' = x/x_0$ である。模型と実河川で河床変動量の相似が成立するためには、(2-35)式の各項の比が同一でなければならない。

つまり,

$$\frac{T_0 q_{s0}}{(1-\lambda) x_0 h_0} r = 1 \quad \dots\dots\dots (2-36)$$

となる。従って模型の時間縮尺は,

$$t_r = (1-\lambda) r x_r h_r q_{sr}^{-1} \quad \dots\dots\dots (2-37)$$

となる。しかしながら(2-37)式が成立するためには、暗に $\partial(B'q_s')/\partial x'$ が模型と実河川で同一であるという仮定を含んでいる。実際には、模型と実河川の小規模河床形態が異なると、この仮定は一般では成立せず、河床変動速度を相似にすることができない。このことをもう少し詳しく説明してみよう。

今流砂量が,

$$q_s = Cu_*^P \quad \dots\dots\dots (2-38)$$

の関係が成立するとしよう。これを(2-34)式に代入して多少の変形をすると,

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{q_s}{(1-\lambda)} \left(\frac{\partial B}{\partial x} + \frac{p}{u_*} \frac{\partial u_*}{\partial x} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (2-39)$$

となる。もし空間的な掃流力の分布が模型と実物で同一であるなら上式から求まる時間縮尺は,

$$t_{r1} = (1-\lambda) r x_r h_r q_{sr}^{-1} \quad \dots\dots\dots (2-40)$$

$$t_{r2} = (1-\lambda) r x_r h_r p_r^{-1} q_{sr}^{-1} \quad \dots\dots\dots (2-41)$$

の2つである。従って p_r が1であれば t_{r1} と t_{r2} が一致し、(2-37)式と同一となり、この時間縮尺を使って河床の変動速度を予測することができる。しかし $p_r \neq 1$ でない場合は、時間縮尺が2つあり、また場所的にも時間縮尺を変えなければならないという結論となり、厳密には河床の変動形態を相似することはできないことになる。しかしながら模型実験は、現象把握の一手段であり、ある程度の相似性の違いを許しても良い。それでは $p_r \neq 1$ でない場合、模型の時間縮尺をどう決めたら良い結果を得るだろうか。ところで実際に q_{sr} を決める場合には、模型全区間の平均的な流砂量あるいは代表断面の流砂量を予測して決めざるを得ない。従って平均的な流砂量と異なる所ほど(掃流力が平均的な値よりずれている所ほど) $p_r \neq 1$ でない場合には河床変動速度が実物と相似にならないことになる。このようにして q_{sr} を決め、 t_{r1} と t_{r2} を求めると t_{r1} は t_{r2} の p_r 倍となる。ここで t_{r1} は、代表的な断面を通過する流砂量(みかけの体積)を模型と実物で同一とするための時間縮尺、つまり模型の q_s を $(1-\lambda)r \cdot x_r \cdot h_r$ 倍すれば、実物の流砂量となる時間縮尺、 t_{r2} は、川幅の変化がない場合で、代表的断面での河床の微少の凹凸の伝播速度、生長あるいは消滅速度を同一にするための時間縮尺と考えられる。なお中規模河床波の伝播速度は、本来(2-38)式と(2-39)式の連立方程式を解くことによって表現されず、その速度を合わせるには、砂州形態を支配する長さスケールと流砂量の相似性が必要である。

実際の模型実験に当っては、実験によって何を見るかに応じて時間縮尺を選ばざるを得ないが、模型の現象を実物に近づけるための時間縮尺は t_{r1} と t_{r2} の間にあると考えられる。

2-3 模型縮尺の考え方

2-3-1 固定床模型の模型縮尺

三次元流れの影響が強い現象を見る実験、すなわち鉛直方向の流速変化が大きい現象、水平軸渦を生じるような現象、二次流を伴う現象、水面形が大きな変化を伴う現象のような局所洗掘とか湾曲流、水門、堰などの構造物周辺の流れを取り扱う場合には、無歪のフルード相似の模型実験を行なう必要がある。この場合の模型縮尺は、水門、堰、水制等の構造物周辺の局所的な流れ、越流堤の越流係数等を調べる場合には、レイノルズ数の影響を小さくするため縮尺としては $1/10 \sim 1/25$ 程度を標準としている。

なお、河道計画のための流れの状況や水位、流速等の把握の実験では、模型が大きくなることもあって $1/40 \sim 1/70$ 程度の縮尺が標準となっている。

ところで比較的広い水域の模型実験を行なう場合、流れのレイノルズ数の影響を受けないように（一般には水深 3 cm 以上になるような模型縮尺に設計する）すると実験場の広さや費用の面で制約を受けることから流れが漸变的なものであれば歪をつけた模型が使用される。固定床模型実験において歪模型を使用する例はほとんどないが、遊水池の実験のように遊水量や遊水効果を把握し、その貯留ボリュームを精度良く評価するため、歪模型が使われることがある。この場合、越流堤の部分の流れは、三次元の影響やレイノルズ数の影響が強く、歪模型では越流堤を評価する越流係数が異なるので、越流堤の部分は次のような工夫を行なって越流係数を模型と実河川で一致させるようにしている。すなわち、あらかじめ粘性の影響を受けない縮尺とした無歪の越流堤抽出模型により、越流係数の正しい値を求めておき、さらに歪模型とした全体模型において真値の越流係数となるような越流堤天端幅を抽出模型により求める。これより全体模型において越流係数が相似となるような越流堤天端幅を決定した検討を実施している。

2-3-2 移動床模型の模型縮尺と時間縮尺

現地の河川の河床材料の平均粒径が 4 cm 以上の場合、無歪模型として縮尺 $1/60$ の模型実験を行なえば、模型の河床材料は、0.6 mm 以上となる。したがって、河床形態の相似、流れの相似、流砂量の相似がほぼ成立するので、時間縮尺は通常のフルード則から得られる。

$$t_r = x_r^{1/2}$$

と考えると良い。模型の縮尺は、水位や河床高の測定精度を考慮して、 $1/50 \sim 1/100$ の範囲とし、模型河床材料は現地河川の河床材料を模型縮尺の $1/x_r$ とした粒径を模型で使用すれば良い。

現地河川の河床材料の平均粒径が $1 \sim 4$ cm 程度の場合、無歪の模型縮尺 $1/60$ とした模型実験を行うと、模型の河床材料粒径は、0.6 mm 以下となり、実河川では発生しないと考えられる砂澱河床 (Ripple) が模型で生じ、流れの相似性、流砂量の相似性が成立しないことがある。この河床形態の相違を避けるため、模型の河床材料として 0.8 mm 以上の $s \approx 0.5$ の石炭粉あるいは $s = 0.8$ のスラッジライトを用いて実験すると良い。この場合、現地河道と模型河道の無次元掃流力が一致するような、次式の条件

$$\tau_{*r} = \left(\frac{Hl}{s d} \right)_r = 1 \quad \dots\dots\dots (2-42)$$

を満足するような粒径の材料、すなわち

$$d_r = H_r \cdot s_r^{-1}$$

………… (2-43)

の粒径とすれば、ほぼ参考資料に示すようにほぼ同一の無次元掃流力となり、同一の無次元流砂量となり、模型の時間縮尺は、フルード則から求まる

$$t_r = x_r^{1/2}$$

としておけば良い。なおこの場合フルード則に基づく流量

$$Q_r = x_r \cdot h_r^{3/2}$$

に従って模型に流量を流すと、現地流量 Q の時の水位は、河床が平坦河床であれば、 H/d が模型の方が小さく、その分だけ粗度が大きくなるので、模型の方が多少水位が大きめに評価され、また流砂量も多くなると考えられるが、通常は、この影響を無視して、フルード則に基づいて模型実験が行なわれる。

現地河川の河床材料粒径が1 cm以下の場合、大縮尺の河川模型実験を行なわない限り、流れの相似性や流砂量の相似性を含むことができない。しかし、実際には河川移動床模型実験として1/40以上に模型の縮尺を大きくすることは困難であるので、精度の良い、すなわち相似性の良い実験を行なうことはできない。従って、このような河床材料を持つ河川の実験を行なって信頼性の高い実験を行なう場合には、十分な事前検討と工夫が必要である。

以下に河床材料が小さな河川の移動床模型実験の問題点とその改善法について記す。

1) 緩流河川の相似性に関する問題点

模型の諸元を決める場合、まず第一に河床材料も含めた幾何相似を考える。河床材料粒径の大きい河川ほど模型の河床材料に大きな粒径のものをを用いることができるので、(2-19)式の Re_* の影響が及ばず、高い相似性を得やすい。ところが現地河床材料粒径が細かい緩流河川を対象としたとき、模型に用いる河床材料粒径を非常に小さくすると、 Re_* の影響が現れ、河床形態や流砂形態、流砂量の相似が成立しなくなる。一般には現地では砂堆あるいは平坦河床であるものが模型では砂澁が発達する。この場合河床抵抗が大きいので、粗度係数の相似が得られなくなる。粗度係数の相似が得られないと移動床の相似則を満たさないばかりかフルードの相似則もくずれるので流砂、流れの相似性が共に失われることになる。これが緩流河川の模型実験の相似性に関する問題点である。

砂澁の発生を抑制する方法は3つ考えられる。1つは模型を小縮尺とし、すなわち大きく製作することである。模型を大きく作れば河床材料も大きなものをを用いることができるのでこの問題を解決できる。しかし、大きな模型を作るとは経済面、労力の面からみれば必ずしも得策ではない。模型の全長は実験の機動性等を考えれば100 m程度以下に抑えたいので、日本の一級河川を対象とした場合1/50程度の縮尺が限度であろう。2つめは河床材料として軽量材料を用いる方法である。粘性の影響が無視できる程度に粒径が大きくかつ比重の軽い材料を用いれば、砂澁の発生を防ぎかつ移動床の相似則のうちの最も重要な無次元量である τ_* を満足することができるので、概ね相似が得られるものと考えられる。ただし、比重が非常に軽いものをを用いると、砂粒に働く抗力、摩擦力等の比が現地と模型とで差異が大きくなり、流砂形態の違いが無視できなくなる。実際問題として、水中比重 $s = 0.5$ 程度の石炭粉で粒径0.2 mmのものが使用できる限界の軽量材料であると考えられる。3つめの方法は歪模型を用いる方法である。歪模型では、鉛直縮尺と水平縮尺を変え、河床勾配と水深を大きくするので大きな掃流力が生じる。このため、歪模型は無歪模型より小さく造ることができる。このことは、限られた実験場敷地においては

実験できる河川の許容範囲が広がることを意味する。しかし、この方法では河道自体の幾何形状が変わるので三次元的な流況、流砂の相似性は失われやすく、局所洗掘深や河床変動量を模型で調べる場合には歪度（＝鉛直縮尺／水平縮尺）は概ね 1.5 ～ 2 が限界であると判断される⁹⁾。以上のように、いずれの方法にも限界があり、事実この限界のために相似性の高い模型実験ができない河川も少なくない。

これまで、緩流河川を対象とした模型実験の困難さを述べてきたが、緩流河川の模型実験が意味のないものとなるわけではない。以下のように模型実験を位置づけることによって、より信頼性の高い河道処理ができると考えられる。すなわち、模型の相似性についてあらかじめ十分検討し、相似の得られる現象と得られない現象を種別しておくとともに、相似性の低い現象については実験結果によってのみ現象の解釈を行なうのではなく、現地河道の資料など他の情報を加え、総合的に判断する必要がある。以下に河川で生じる種々の現象を移動床模型で把握する場合の考え方について簡単に述べる。

2) 縮尺の考え方

現地河川の河床材料粒径が小さい河川に対しては、模型の河床材料としては今の所粒径 0.2～0.3 mm の石炭粉を使用することにする。模型の水平縮尺はなるべく大きくするべきであるが、1/50 程度が実際上の限界である。水平縮尺が決まったら、次に鉛直縮尺の検討を以下のごとく行なう。

まず無歪の場合、模型で見たい最少の流量で河床材料が移動するか判断する。模型の河床材料を使って、その流量時の平均的な無次元掃流力 τ_* が 0.1 以下となる場合は、模型上の一部は動かない所が生じると考えられるので、この場合には無次元掃流力が 0.1 以上になるように鉛直方向に縮尺 h_r を決め、歪模型とする。（掃流力は歪度 h_r/x_r に比例して大きくなる。）

なお、歪度 h_r/x_r が 2 以上になる場合には、三次元的な現象は十分に把握し得ないとして模型で生じる現象を解釈する必要がある。

移動床の河床変動を調べる場合の時間縮尺は、ある流量に対する現地と模型の τ_* と H/d を現地の粗度を使用して評価し、その水理量に対する現地と模型の流速係数 φ 、無次元流砂量 q_s/u_*d を後述する 10-1, 10-2 に示した資料を使ってそれぞれ求める。なお、模型において τ_* 、 H/d の範囲が資料の範囲を越えていれば、基礎実験を行なって φ と q_s/u_*d を必要な範囲で求める必要がある。時間縮尺は、

$$t_r = (1 - \lambda)_r x_r h_r q_{sr}^{-1} \quad \dots\dots\dots (2-44)$$

として評価する。この場合、流量が異なれば時間縮尺は異なることになる。一洪水を通水した場合の河床変動量を見る場合には、この時間縮尺で歪めたハイドロを流下させると良い。

なお、現地と模型の小規模河床形態が一致していれば、流速係数 φ が現地と模型とでそれほど大きく変わらず、フルード則に基づいた流量を模型で流せば、水位はほぼ一致する。しかし、通常は現地と模型の小規模河床形態が一致せず、 φ の値が大きく異なるので、フルード則に従って模型流量を通水させると水位が一致しないことがある。この場合は、水位を一致させるために、模型に流す流量を現地の水位に合うように歪めさせることも考えられるが、そこまで実施するかどうかは模型で知りたい現象をどの程度の精度で知りたいかで決めるべきであろう。

3) 高水敷への河床材料の輸送・堆積について

高水敷への浮遊砂の輸送、堆積は、低水路で舞上がった砂が高水敷への乗り上げ流や拡散によって高

水敷へ運ばれ、高水敷上で掃流力の低下とともに沈降することによって起こる。したがって、高水敷への堆積現象の相似性について検討するには、浮遊砂濃度分布、乗り上げ流、高水敷上の堆積環境の相似性について考える必要がある。

定常等流における浮遊砂濃度分布式としては、以下に示す Rouse 式がよく知られている。

$$\frac{C}{Ca} = \left(\frac{h-z}{a} \cdot \frac{z}{h-a} \right)^p \quad (2-45)$$

$$p = w_0 / \kappa \cdot u_*$$

ここに h : 水深, κ : カルマン定数, Ca : 基準点 $z = a$ での濃度である。

上式によれば、浮遊砂の濃度分布等には u_*/w_0 , Ca が大きく関わっていることがわかる。模型と現地で u_*/w_0 が一致するように模型の縮尺を決めれば堆積範囲は十分な精度をもって評価し得ると考えられる。しかし、比重の軽い石炭粉の場合、基準点における濃度 Ca の相似性は成立していないので、堆積速度のフルード相似則は成立しない。

高水敷への乗り上げ流は、低水路内の流体が遠心力や慣性力の作用により高水敷に輸送される現象である。よって、低水路内の流れの相似性を検討することにより、乗り上げ流れの相似性が検討できるものと考えられる。

まず、低水路内の流れの相似性に対する歪縮尺の影響度を推定する。(2-1) 式中の $(W/V)_r = (Z/y)_r$ の条件に注目する。歪模型の場合、右辺は 1 でないので鉛直方向の流速比と水平方向の流速比が異なることになる。したがって、歪模型においては鉛直方向の流れが無視できないような二次流の強いところの流況の相似は得られないが、歪度が 2 以下であれば、河岸際、湾曲のとくにきつところを除き、歪縮尺の影響は小さく、平面流況の相似が得られるものと考えられる。

いっぽう、粗度係数の違いによる影響度は、以下のように推定し得る。高水敷への乗り上げ流量と水面の横断勾配は密接な関係があると考えられる。流れが等流に近い場合、水位上昇量 Δh は次式で表される。

$$\Delta h = \frac{b_c \cdot u_c^2}{g \cdot R} \quad \dots\dots\dots (2-46)$$

ここに、 b_c : 低水路幅, u_c : 低水路平均流速, R : 水路中央での曲率半径である。

ある流量時の模型と現地河川の流速係数 ϕ が異なれば、模型の流速 u がフルード則に従わないので水位上昇量が異なり、湾曲部外岸での水位上昇量、さらには高水敷上の乗り上げ量に大きな影響を与えよう。

2-3-3 混合粒径河床材料と模型材料粒径

模型河床材料は、現地河床材料の平均粒径を河道模型の縮尺と同じとするだけでなく、粒度分布形まで相似とすることが望ましい。実際には、河床材料の粒度分布形は、河道の縦断方向や場所的にも変化する。河道のある区間におけるこのような粒度分布形の変化は、河床材料が未分級な扇状地河道においてとくに顕著である¹⁰⁾。しかしながら、模型実験では河道全域にわたって同一粒度分布形の河床材料を用いざるを得ないため、縦断方向にも平均化したような分布形を想定し、模型における河床材料の粒度分布を決める必要がある。なお、現地の河床材料粒径が図-2.2に示すように A, B, C 集団を持つ分

布形の場合、A 集団を無視して B、C 集団に合わせるように模型材料を混合粒径とすると良い。これは現地河川の A 集団は、B、C 集団の間を埋めているマトリックス集団であり、河床変動にあまり影響を与えないためである。なお、A 集団は、B、C 集団とはまったく異なった運動形態（浮遊運動）で移動している。

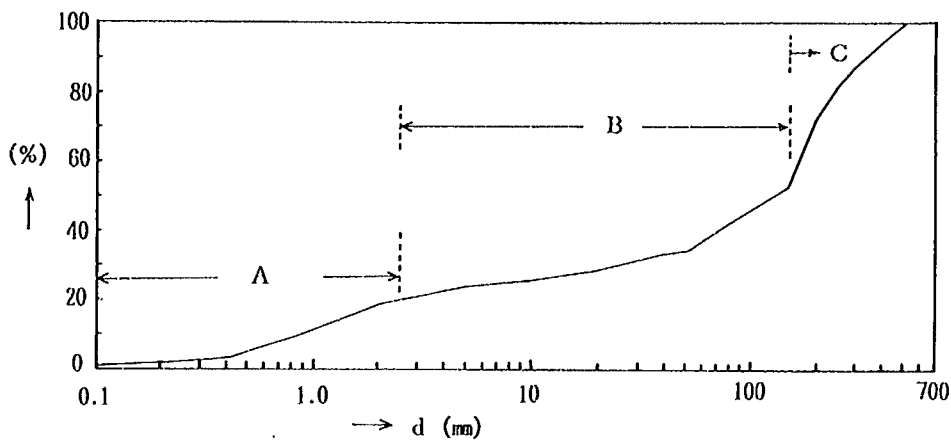


図-2 2. 粒径加積曲線図

2-4 河口部移動床模型の相似則

河口部の模型実験においても、これまでに述べた Froude 則が適用されることは言うまでもない。ここでは河口部模型実験を行う場合の相似条件について述べる。¹¹⁾

(1) 河口から出た土砂の堆積の相似性について

河口から出た土砂は海浜部に堆積するが、掃流砂は別として、浮遊砂の堆積には、砂粒の沈降速度 w_0 と流れの速度 u の比が重要な要因となる。 w_0/u が大きいほど河口近くに沈積し、小さいほど河口からはなれたところで沈積する。それゆえ模型と現地で、 w_0/u の比が同一であることが望ましい。また、掃流砂と浮遊砂量の模型と現地の比も同一であることが望ましい。

(2) 表面張力の影響

波は波長が 5 cm 程度に短くなると、波速が深水重力波のそれに比べて約 5 % 程度増加する。したがって模型をあまり小さくして、模型上の波の波長を短くすると表面張力波の影響を受けるので模型の縮尺をあまり小さくしてはならない。

(3) 反射に対する相似性について

模型と現地の波の反射率は同一にしなければならない。反射率は、壁面の勾配や波形勾配によって異なる。よって現地と模型は少なくとも幾何学的相似（無歪）をもたなければならない。

(4) 砕波条件に対する相似性について

沿岸近くの海底地形の変形は、砕波によるエネルギーに基づくところが多い。したがって、砕波地点が模型と現地とで同一地点でなければ、海浜地形の変化の相似性を満足することができない。

砕波水深と沖波波高の比 h_b/H_0 は周期が2秒より大きいときは、沖波の波形勾配 H_0/L_0 の関数であり、模型を幾何学的相似、フルード相似とすれば、砕波点の位置および砕波波高はほぼ相似となる。しかし模型が小さく、周期の短い波を使用すると、砕波水深に周期の効果が入り、Diephuis の実験によると図-2.3 のようである。図によれば H_0/L_0 の値が0.02の場合、 $T \geq 0.7$ sec であれば模型の縮尺の影響はないが、 $H_0/L_0 = 0.08$ にもなると $T \geq 2$ sec でないと縮尺の効果が入ってくることを示している。

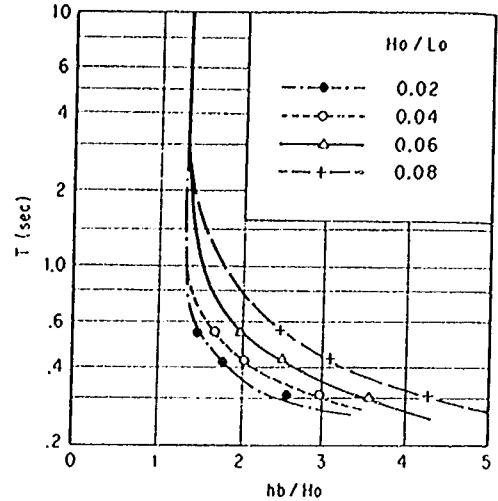


図-2.3 砕波水深に及ぼす周期の効果

(5) 海床変化の相似性について

均一粒径海床の場合、海床変化の相似性は、

$$h/L_0 = f(x/L_0, H_0/L_0, \sqrt{gH_0}/w_0, s, \sqrt{\nu}(H_0)^{1/4} g^{3/4} w_0^2, i_0) \dots (2-47)$$

で表わせる。ここで右辺第5項は、粒径が極端に小さくなければその影響は二次的である。ここに、 h は水深、 x は基準点よりの距離、 H_0/L_0 : 沖波波高と波長、 w_0 : 粒子の沈降速度、 s : 粒子の水中比重 ($=\rho_s/\rho-1$)、 i_0 : 海床の初期形状である。

したがって、 H_0/L_0 、 $\sqrt{gH_0}/w_0$ 、 s を同一とするように波と底質材料を選べば、海床変化の相似性が成立する。しかしながら、現地海浜の粒径 d が小さい場合、模型の海浜移動床材料として使えるのは0.1 mm ぐらいまでであり、通常は移動床材料の幾何学的相似律を合わせることができない。このような場合、 s の小さな材料を使い、 H_0/L_0 と $\sqrt{gH_0}/w_0$ のみを合わせるのが普通である。後述する10-3に示すように、 s の効果は0.5 ぐらいまでならそれほど大きいものではなく、ある程度海浜の相似が成立することが分かっている。なお、移動限界水深は底質が小さくなると $\sqrt{\nu}(H_0)^{1/4} \cdot g^{3/4}/W_0^2$ の影響を受けるが、模型実験の目的から言えば砕波点より岸側の現象が大切であるから、それほど考慮しなくても良いと思われる。また $\sqrt{gH_0}/W_0$ は底質の動き易さを表わす指標と考えられる。

(6) 河口密度流の相似性に及ぼす影響

河口には塩水くさびが存在し、この塩水くさびは模型実験の相似性に種々やっかいな問題を発生させる。塩水くさびによる模型と実物の違いは次のようなものがある。

- ① 塩水くさびの存在によって、上層の流速が速くなり、砂州に対する侵食力は実物の方が大きい。
- ② 上層の流速が大きく、二層流となることによって波の変形が実物と模型で異なる。
- ③ 浮遊土砂の海浜部での堆積が密度流によって異なること。
- ④ 掃流砂の動きが二層流のため異なること。

などがある。洪水の実験の場合には、河水が海水を河道から押し出し、砂州のフラッシュ、河道の河床変動には影響を及ぼさないが、海浜部での堆積状態は若干違いが生ずると思われる。波による砂州の形成の実験では、河水の影響が小さめになる恐れがある。

これらの問題を解決するためには、海浜部に塩水をためて実験を行う方法もあるが、実験施設等の制約もあって困難である。

第3章 模型設計および製作

3-1 模型設計，製作の手順

模型の縮尺，範囲の選定については，第1章に述べたように，実験施設の規模（面積，給排水設備の能力等），実験目的に対する必要精度，流れの相似性および移動床の相似則などから模型縮尺が決定される。このとき現地の河川構造物の設置状況，土砂の生産，河床変動状況，河道地形，地質，底質材料，既往の主な災害，土地利用状況等について調査して，模型設計，製作および実験等に反映させなければならない。すなわち移動床模型では，断面内の土砂の移動範囲を予測して模型に取り入れるほか，河岸侵食の程度を推測し，地形条件によっては，侵食の受けにくい場所を固定する等の検討も行わなければならない。よって，このためには現地踏査なども必要となってくる。

模型設計，製作業務の区分およびその名称は表-3.1，3.2に示すようなものとなる。その作業手順のフローは図-3.1のようになる。まず模型設計予備作業として，模型設置場所の測量が行われ，模型付帯構造物も含めた全体の配置，高さの概略が決定される。高さは，模型設置の基盤高を既設の帰還水路天端に近づけることを原則としている。さらに平面位置は，他の模型実験の実験作業に邪魔にならない距離をあけること，また実験場の空間をむだにならないようにし，帰還水路等の付帯構造物が小さくなるようにすることが原則とされる。これらに基づき模型河道および付帯構造物の細部設計が行われる。次にこの模型設計諸元から，準備作業として，模型設置箇所の盛土敷均しが行われ，さらに模型製作予備作業，河床および模型付帯構造物製作，河道付帯構造物の製作，据付けが行われ，模型全体が完成する。

表-3.1 模型設計の区分，名称

種 別	細 別	内 容	表 示 数 量
模型設計予備作業	模型設置予定場所測量	平板および水準測量	原則として1模型の設計に対して1回
	模型付帯構造物設計	水路，水槽，沈砂池，堰上げ装置等の設計	
模型河道設計	基 線 設 計	オフセット測量における基準となる測線と距離標位置の設計	主基線の長さ
	縦横断指示書作成	模型の断面形指示書（現況，計画等）の作成	断面数または断面総延長距離（模型値）
河道付帯構造物設計	河道構造物模型値換算	橋脚，水制，堰，各種堤，減勢工，仮締切工，その他	構造物数または構造物の種類
	測定設備設計	水位，流速，流況，流量，河床高，流砂量，その他	原則として1模型製作に対して1回

表-3.2 模型製作の区分、名称

種 別	細 別	内 容	表 示 数 量
準 備 作 業	盛土敷均し作業	小運搬、敷均し、締固め作業	締固め後盛土量(m^3)
模型製作予備作業	水準基点設置	模型の水準基点の設置作業	設置点数
	基線設置および撤去	オフセット測量の基準線の設置(正角材の枕上に平割材を固定して基線を設ける)	主基線の長さ
	距 離 標 設 置	断面延長上の側壁両外側に控杭として設置	断面数
	側 壁 製 作	堤防外側に防水の建築用空洞コンクリートブロックで側壁を製作する。	ブロック2段積みまで m 3段積み以上は m^2
	縦横断板製作、据付	ラワン合板に断面形をプロット切断し、支持杭で固定しかつモルタルで根固めを施す。	断面数または断面総延長距離(模型値)
河 床 製 作	模型河床の製作	断面間の整地、モルタル打設、仕上、養生	模型河床面積(m^2)
模型付帯構造物製作		導水路、整流槽、沈砂池、堰上げ装置、排水路等	水路、水槽、床版(m^2) 側壁(m or m^2) 堰上げ装置: 1連, m
河道付帯構造物製作、据付	河道内模型構造物の製作、据付	橋脚構造物、堰、減勢工、水制各種堤等	橋脚: 脚数 減勢工: 箇所 水制各種堤: m
模型改造および撤去作業	底質材料搬入、回収、撤去作業	床掘、袋詰、積込、小運搬、積上げ	搬入、撤去量: m^3
	実験設備等回収撤去作業	観測塔、実験設備、水理条件設定構造物	原則として1模型に対して1回
	模型取壊し、整地作業	模型取壊し、整地、残土搬出	取壊し量: m^3

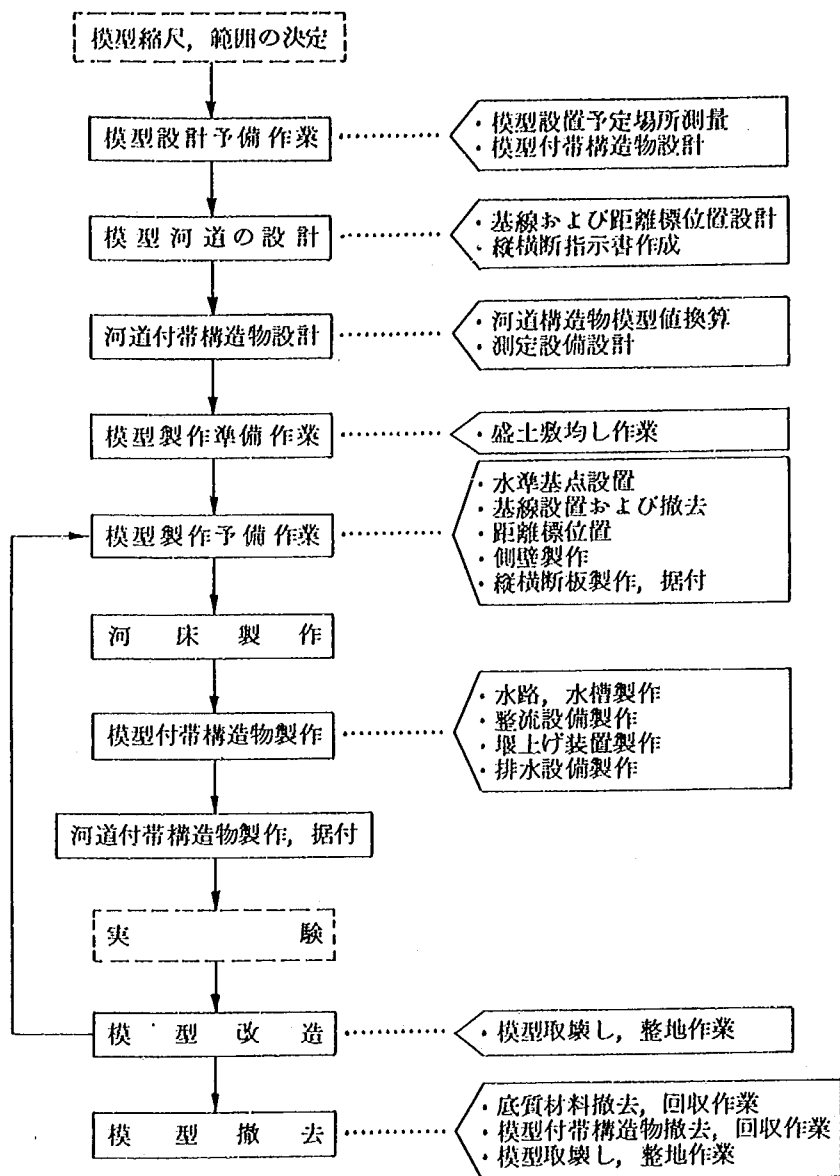


図-3.1 模型設計, 製作のフロー

3-2 模計設計

3-2-1 模型設計予備作業

模型設計予備作業とは、表-3.1に示すように、模型設置場所の測量および模型付帯構造物設計により構成される。なお以下に述べる模型設計の参考として模型標準横断面図、模型平面図、縦断面図、模型付帯構造物等を図-3.2.1～3.2.8に示す。

1) 模型設置予定場所測量

3-1に述べたような模型設置条件、あるいは別途指示される条件を考慮して、模型設置場所の測量を行い、模型の平面および縦断的な配置を検討する。またこの測量結果に基づき、模型設置基準高、基線設置位置が決定される（図-3.2.1～3.2.5参照）。

2) 模型付帯構造物の設計

模型付帯構造物としては、導水路、整流設備、堰上げ装置、排水路があり、この他に移動床模型では沈砂池、給砂設備等が加わる（図-3.2.6～3.2.8参照）。

(1) 水路の設計

水路には、導水路、排水路、余水吐水路等が含まれるものとする。設計に当たっては、設計流量疎通可能断面および水路床勾配と平面的な配置について検討が必要である。図-3.3に概略の水路幅と水深、流量の関係を示す。

(2) 整流設備の設計

量水槽に設ける整流板は、直径20mmの穴を中心間隔30mmの千鳥にあけたものが最も良いとされており、通常これを2～4枚設置して用いている。いっぽう、模型流頭部における整流槽は、流向の相似性を考慮して、設置位置、設置角度を検討する必要がある。またこの整流槽内には、流向を合わせたり、流れの均一化を図るために、建築用空洞コンクリートブロックあるいは木材等を横断方向に設置し、このときの整流に適した配置間隔を検討する。

(3) 排水設備の設計

実験の実施に当たっては、模型改造、粗度付け、河床整形ならびに河床高測定、清掃等の作業が行わ

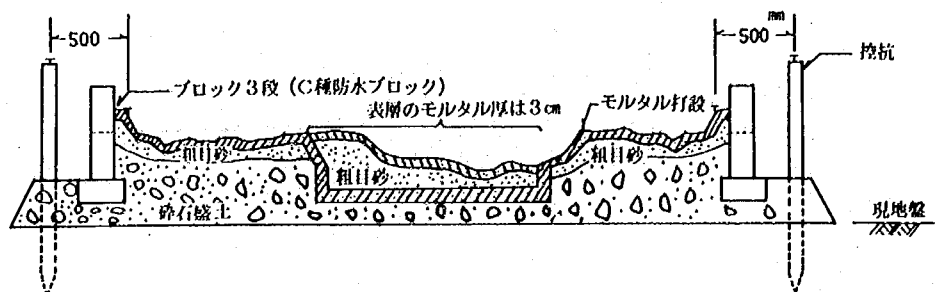


図-3.2.1 模型標準横断面図

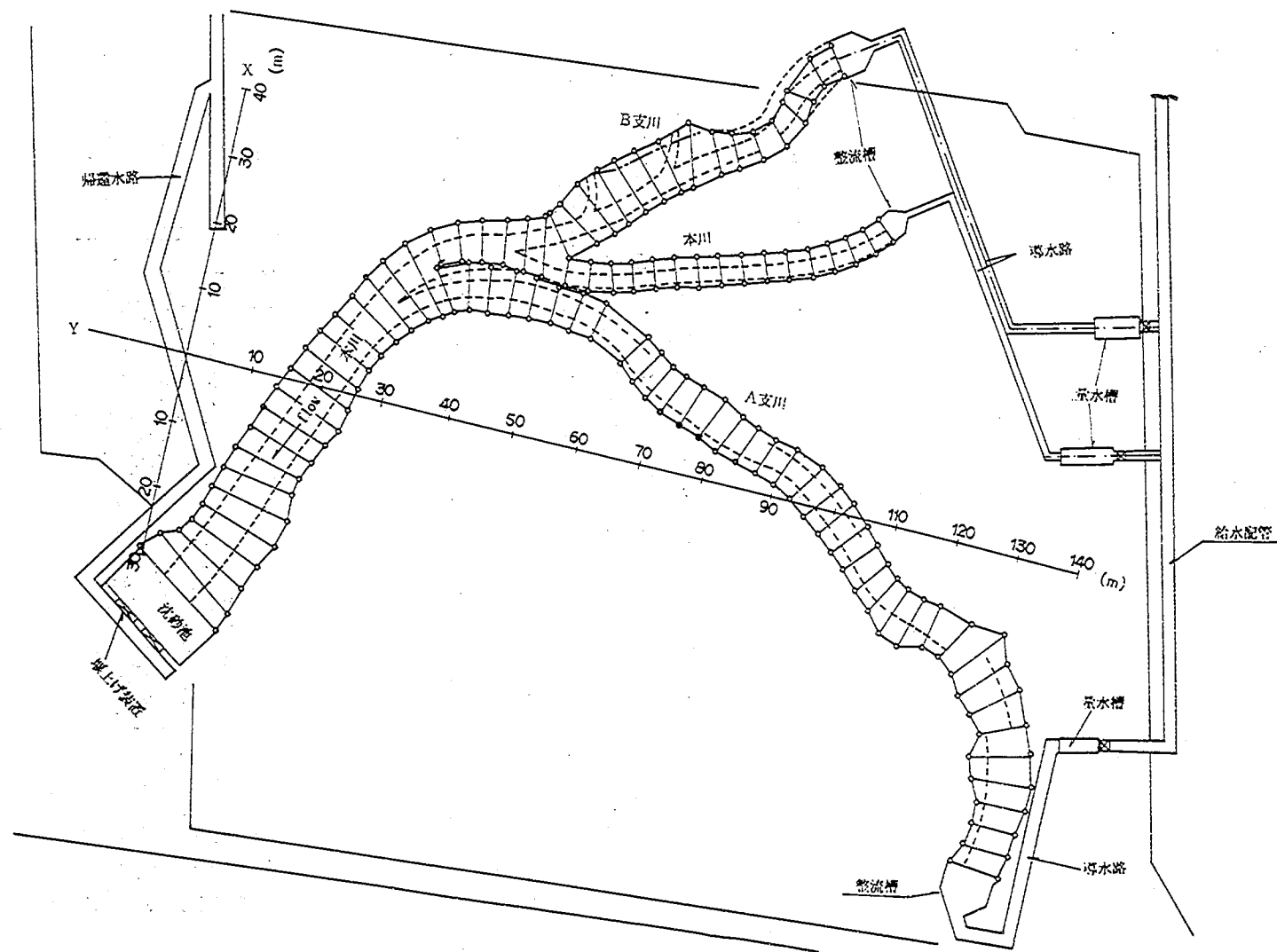


图- 3.2.2 Y川三川合流部模型平面图

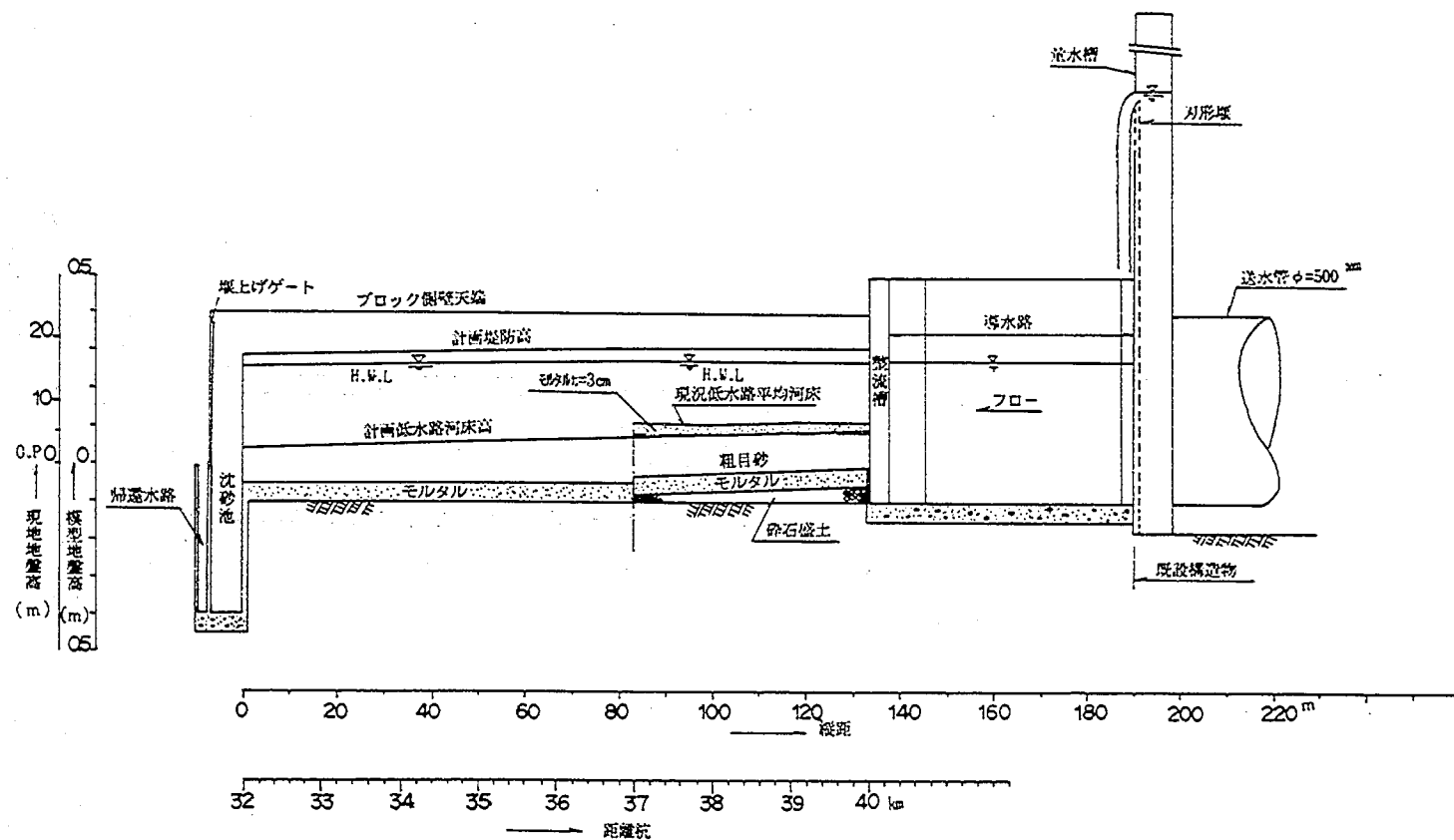


図-3.2.3 Y川三川合流部模型縦断面図(本川)

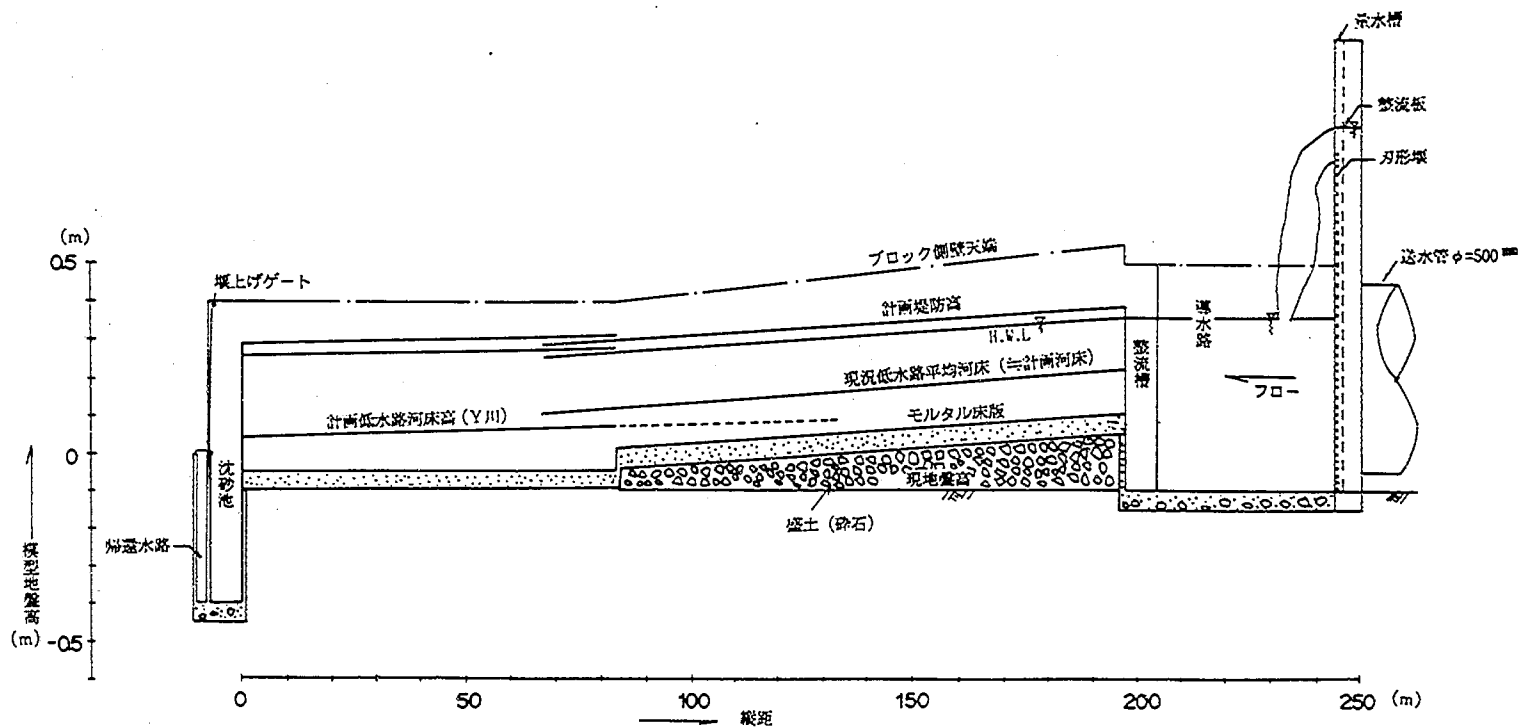


図-3.2.4 Y川三川合流部模型縦断面図(A支川)

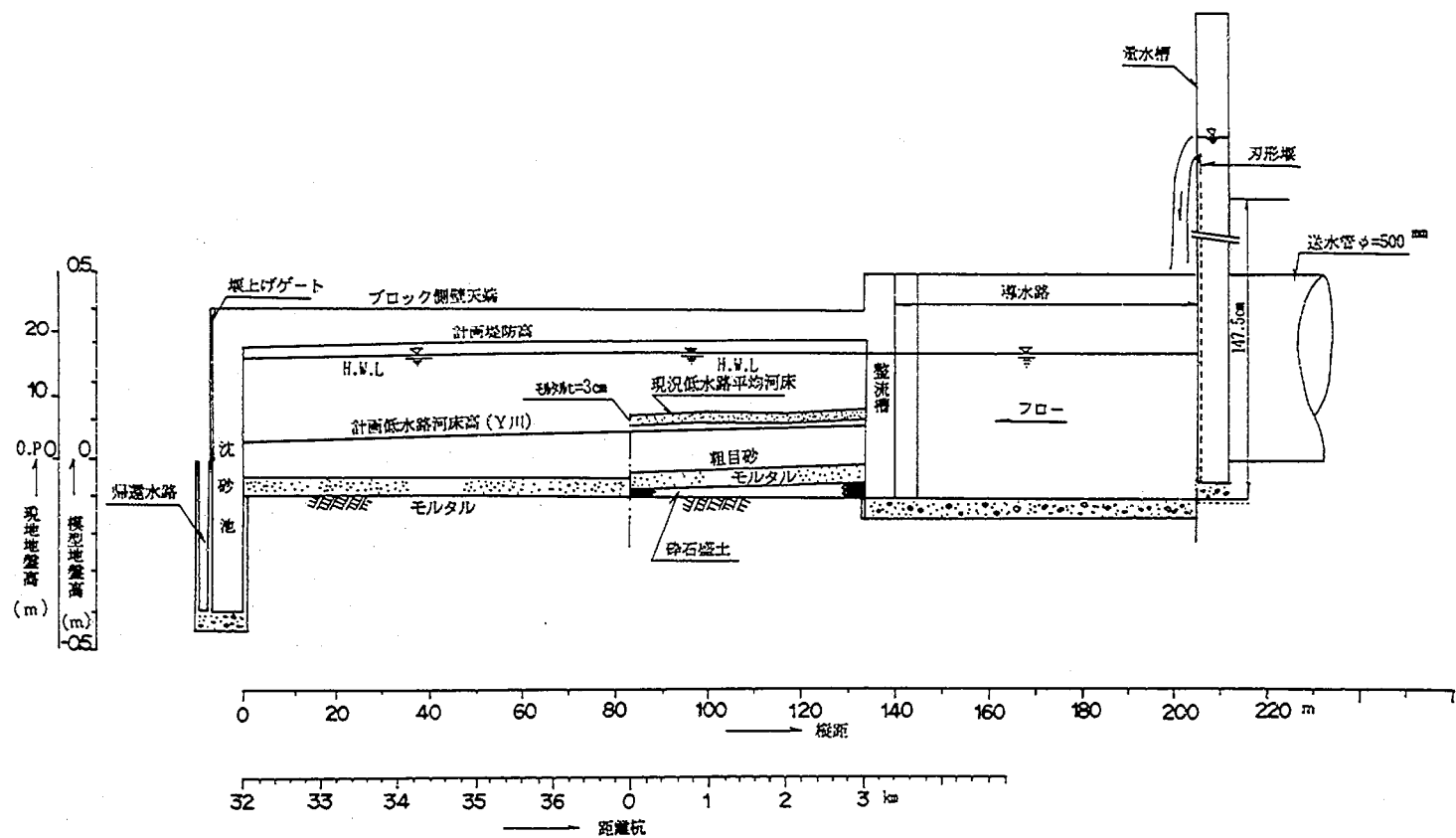


図-3.2.5 Y川三川合流部模型縦断面図 (B支川)

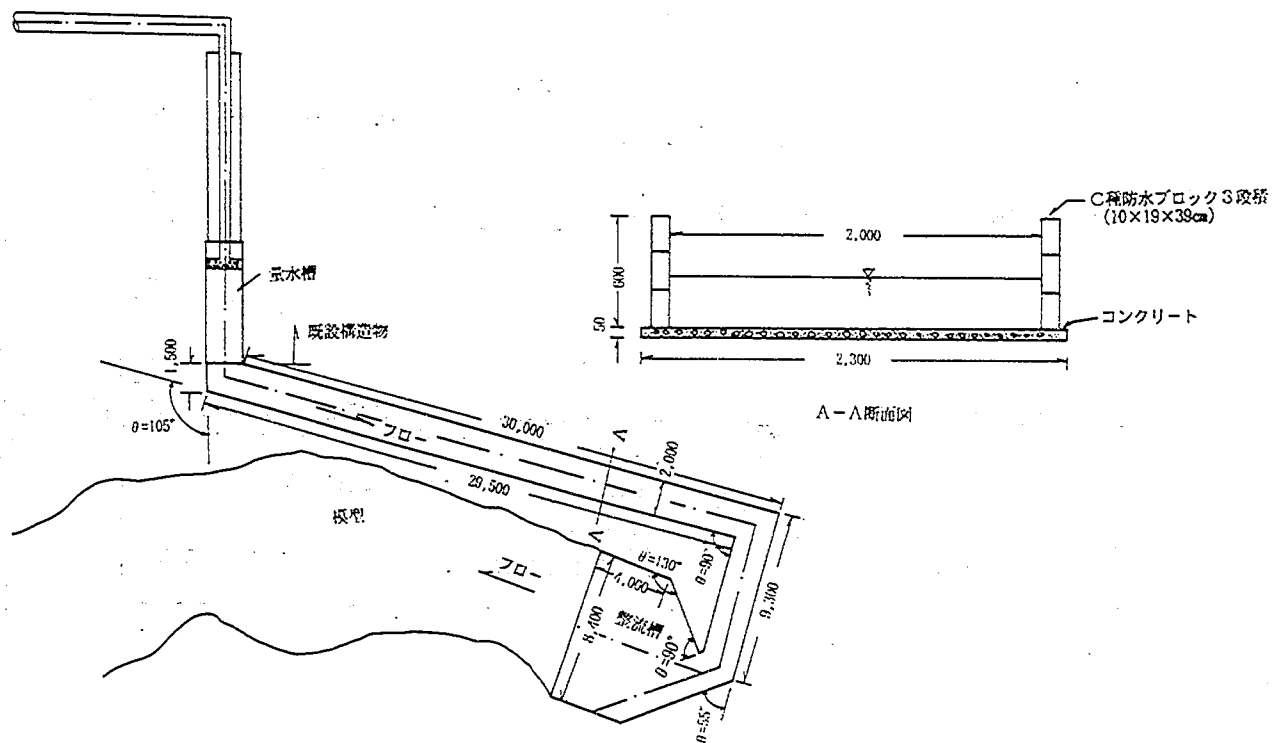


図-3.2.6 導水路及整流槽製作詳細図

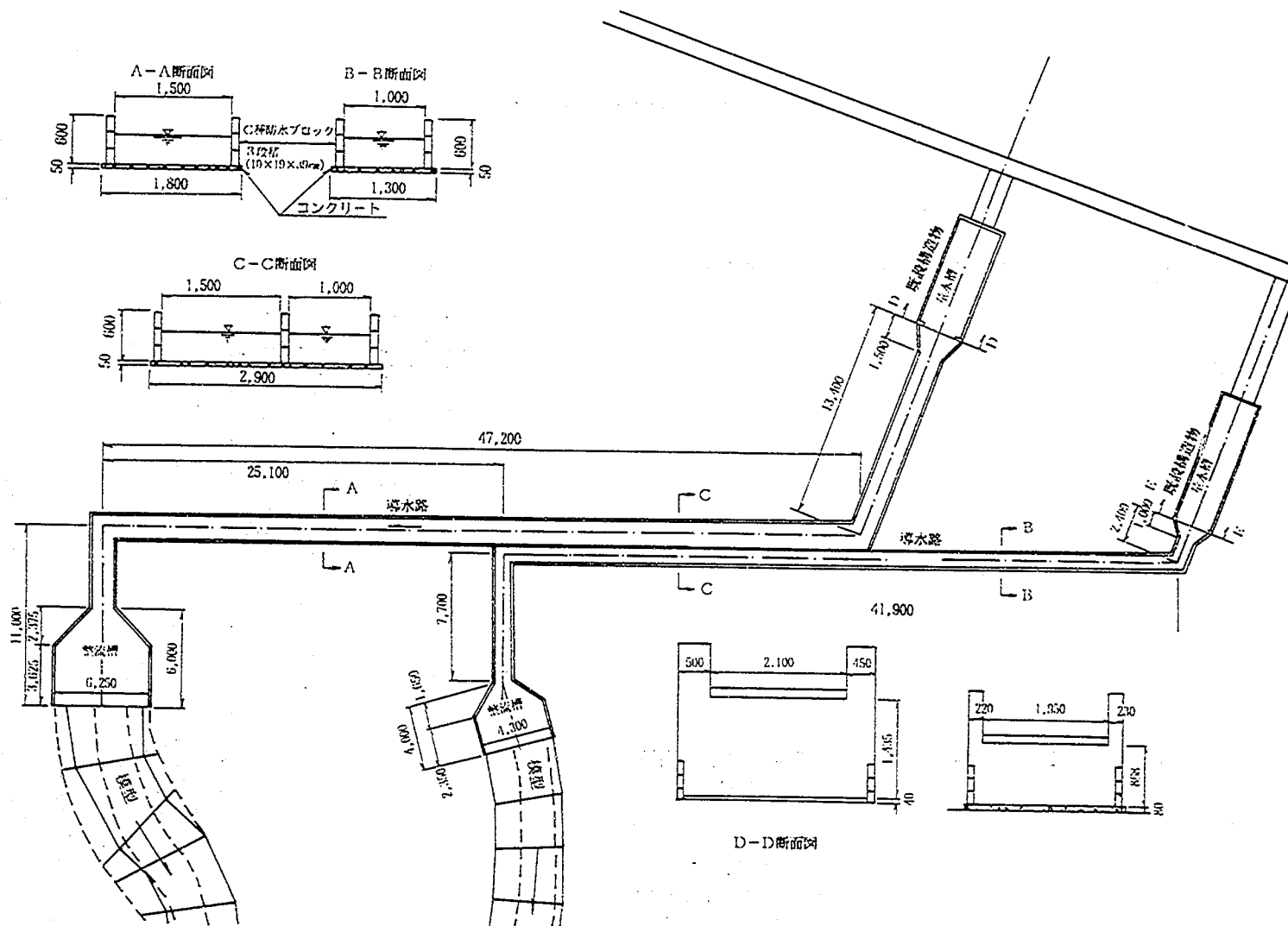


図-3.2.7 導水路及整流槽製作詳細図

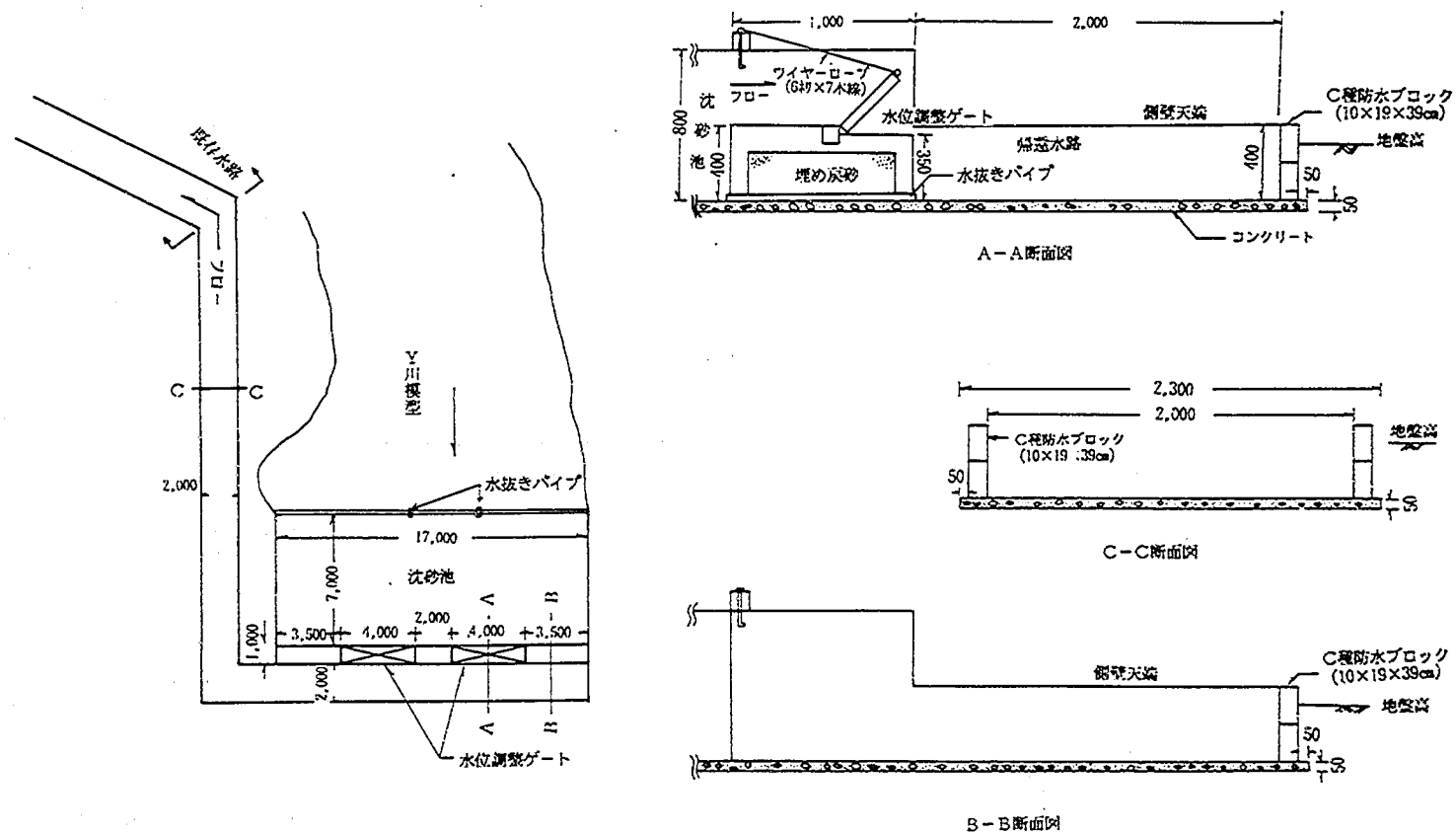


図-3.2.8 沈砂池及帰還水路製作詳細図

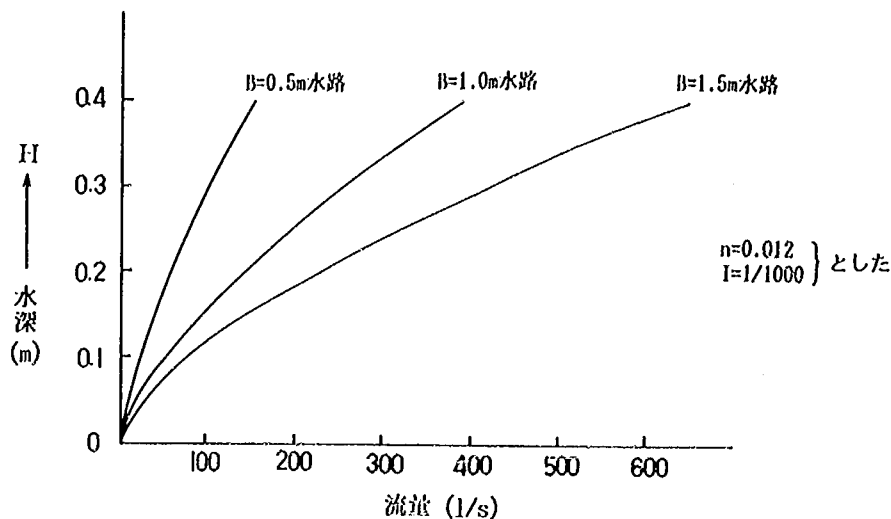


図-3.3 水路幅に対する概略の水深と流量の関係

れる。このとき水槽類や通水直後の模型河道の排水を行うための設備が必要であり、場所、排水方法と構造等を検討し、設計に際して配慮する必要がある。

(4) 沈砂池の設計

沈砂池は、使用底質材料の沈降速度と設計流速および土砂流出量等より規模と構造が決定される。このとき沈砂池の設計流速を正しく評価しないと補砂効果が得られないので、とくに軽量河床材料の場合注意が必要である（沈砂池断面の平均流速を設計値とすると失敗する）。

(5) 堰上げ装置の設計

堰上げ装置の設置位置は、下流端水位を与える断面および河道特性等を考慮して決定する。堰上げ装置の構造は、堰上げ幅4mを一連とし、二連以上の構造の場合には間仕切を設ける。

3-2-2 模型河道設計

1) 基線設計

基線とは、現地測量断面の起点、終点を示す距離標の相対的位置を模型設置予定場所に表示するため、オフセット測量による基準となる測線を言う。この基線設計とは、各距離標から基線にいたる距離（従距）と、基線上の基準となる点から従距測線が、基線と交わる点までの距離（主距）をそれぞれ求め、模型値化するものである。

2) 縦横断指示書作成

横断面と平面図の距離標間距離が不一致の場合は、平面図の距離標間距離に調整したうえ、断面変化点座標値を模型値に換算し、その結果を一覧表化する。距離標間距離の調整は、平面図および空中写真と横断図を比較して、その誤差が過失と判断される場合は、その箇所を修正し、累積および偶然誤差と判断される場合は、各変化点までの距離に応じて比例配分する。このとき各断面別に誤差原因、補正総距離、調整方法を表わしておくものとする。なお、移動床の場合は、河床構成材料の移動境界の検討を行い、模型における移動床の範囲を決定し、平面図に記入する。河床構成材料を敷きつめる厚さは、一

般には模型値で10 cm程度としており、移動床部は予めその分だけ低下させておくものとする。さらに局所洗掘が予想される場所は、10 cm以上低くしてモルタル床版を製作しておくものとする。

3-2-3 河道付帯構造物設計

1) 河道構造物模型値換算

河道構造物の模型値換算は、水没しない部分の上部構造については原則として必要としない。また、橋脚等の基礎部が露出している構造物や、移動床実験等で基礎部が露出することが予測される場合は、基礎部の模型値換算も行わなければならない。

2) 測定設備の設計

固定床模型の測定設備は、水位、流速、流況、波高、流量等についての設計が必要であり、移動床模型では、このほかに河床変動の測定設備の設計が加わる。

(1) 水位、流速、波高等の測定設備

模型内の測定断面および各測定断面上の測定点を選定するものである。また、測定機器の設置台および測定者の移動用足場等の設計も含まれる。

(2) 流況観察設備

流況観察および流線追跡範囲の検討を行い、流線追跡の方法を求める。次に測定機器の設置台および観測者の足場を選択するとともに、流況観測の基準線等を設計する。

(3) 流量測定設備

流量を直接測定する場合の設計は、各公式に対応したJIS規格に基づき、量水槽の設置位置の決定を行う。間接測定する場合は、測定断面における平均流速および有効河積の測定方法も検討する。

(4) 河床変動測定設備

実験目的に応じた測定断面あるいは、測定点を選定し、それに必要な測定方法、機器を選択する。また沈砂池等へ流出した底質材料の回収方法および計量方法も検討しておく必要がある。

3-3 模型製作

3-3-1 準備作業

準備作業とは模型の平面図および縦断面図に基づき、先の図-3.2.1の標準横断面図に示すような範囲の盛土、敷均しを行うことを言う。作業は小運搬、敷均し、および締固めまで含まれる。盛土敷均し作業は、通常ブルドーザーによる機械施工を原則とするが、小量の場合または機械施工が困難な場合は、人力による盛土、敷均し作業を適用する。盛土締固めは、1回の盛土厚さを20 cm以下として、一様な締め固め度が得られるように施工する。

3-3-2 模型製作予備作業

模型製作予備作業とは、先の表-3.2に示したように、水準基点設置、基線設置および撤去、距離標設置、側壁製作、縦横断板製作、据付を対象とする。以下にその作業内容を述べる。

1) 水準基点設置

水準基点は、10.5 cm角の正角材（杉1等）を80 cm以上の長さで半分以上を地中に埋めたいえ、周囲をモルタルで固め、周囲に保護工も施す。角材にはペンキを塗布し、杭の天端内に犬釘等で基点を示す。また水準基準高は、水準標に模型名と合わせて記入しておく。

2) 基線設置および撤去

基線は、10.5 cm角の正角材（杉1等、長さ80 cm以上）を2 m間隔に打ち込み、杭の天端を水平にそろえ、その上に2.4×9.0 cmの平割材（杉1等）を固定して設ける。これよりオフセット測量で距離標を設置した後、撤去する。

3) 距離標設置

基線の平割材上に主距離をとり、ここから直角に従距離をおとすオフセット測量で距離標（控杭）を設置する。なお、これとは別にx、y座標の角度換算値より、トラバース測量によって距離標（控杭）を設置する方法もある。ただし、この方法は、過失等による誤差が生ずると、その影響が全体に及ぼすので細心の注意が必要となる。また、このときは基線設置および撤去作業はなくなる。設置した距離標杭は、モルタルで根固めを施し、杭の天端内に釘で位置を示し、さらに距離標番号を杭の見え易い場所に記入する。距離標杭は、移動床模型の場合、原則として7.5 cm角の正割材（杉1等）を用い、固定床模型では4.5 cm角の正割材を使用してもよいものとする。距離標杭間の距離の許容誤差は、通常±3 mm程度としている。

4) 側壁製作

側壁は、10×19×39 cmの建築用空胴コンクリートブロック（防水）を用いて製作する（図-3.2.1参照）。側壁天端は、堤防天端より原則として5 cm以上高くし、かつ側壁の内法も堤防法線より5 cm以上離して製作する。なお、堤内側法尻まで堤防を製作し、側壁を設けない場合は、別に定める仕様によるものとする。

5) 縦横断板製作、据付

模型値化した断面形を完全耐水ラワン合板（横断板は厚さ5.5 mm、縦断板厚さ3.0 mm）にプロットし、各変化点の連結線上に切断したものを縦横断板と称する。縦横断板の最小幅は5 cmとし、据付は2.4×3.0 cm平割材によって作った小杭に釘で固定し、モルタルで根固めを施す。このとき縦横断板の据付高の許容誤差は、通常±2 mm以内としている。なお、根固めのモルタルは縦横断板の下部まで連結させ、漏水防止に極力留意する必要がある。

3-3-3 河床製作

縦横断板を据付後、その天端から5 cm以上低くさせ、各断面間を断面形に沿って整地する。このとき土中に埋っている有機物の除去を行い、また充分締固める。モルタルの配合比は、原則として1:4を用いる。モルタル打設は、締固めを充分行い、平面図および空中写真を参考にして、縦横断板間相互の変化点を連結して表面を仕上げる。なお、暑中および寒中時に打設するモルタルは、土木工事共通仕様書の第4章第4節および第5節に準ずるものとする。

3-3-4 模型付帯構造物製作

(1) 水路、水槽の製作

床版は、1:4 配合モルタルを原則として用い、5 cm以上の厚さに打設する。側壁は建築用空胴コンクリートブロック（C種防水）を使用する。側壁と床版との継目から漏水が無いように施工し、かつブロック側壁の内側全面および天端に上塗りを施す。なお、3段以上のブロック積工のうち、土圧等がかかる場合は、鉄筋を挿入し、場合によっては支保工等で補強する。

(2) 整流装置の製作

模型上流端の整流装置は、設計対象流量における流向の制御、あるいは流れの均一化を図るために設ける。木製の場合は整流に適した間隔に配したラワン合板片等を平割材あるいは等辺山形鋼で固定した上ベンキを塗布する。ブロック製の場合は、建築用空胴コンクリートブロックを流況に合わせて配置し、モルタルで固定する。

(3) 堰上げ装置製作

堰上げ装置は、堰上げ幅4 mを一連とし、二連以上の構造の場合の間仕切りは、建築用空胴コンクリートブロック積として上塗りを施す。堰上げ板は等辺山形鋼（4×50×50 mm）を外枠および支保材として使用し、これに杉板とその補強として平割材によって製作する。この堰上げ板および巻取り装置の固定台としてはそれぞれ正角材（杉2等10 cm角）を使用する。これよりワイヤーロープで巻取り装置と堰上げ板を連結し、アンカーボルトで堰上げ板支持台を固定する。堰上げ板および巻取り装置の固定台、堰上げ板の取付け部等は、水圧で破壊しないよう充分な根固や固定を行う必要がある。

(4) 排水設備製作

沈砂池等においては、水が集中しやすい場所に水中ポンプを設置できる面積の集水枡を製作する。また模型河道や水槽等の自然排水に用いる管路は、ゴミ等で閉塞されない流積を有するもので製作する。

3-3-5 河道付帯構造物製作、据付

河道付帯構造物としては、橋脚、堰、減勢工、水制、各種堤等がある。これらは、模型設計作業の結果より製作し、木材による構造物は原則として表面にベンキを塗布する。構造物の据付けおよび設置位置と高さは、平面図、設計図書等に基づき、正確に施工し、また各構造物とモルタルの接合部から漏水がないように据付けるものとする。

3-3-6 模型改造および撤去作業

1) 底質材料搬入、回収、撤去作業

底質材料の搬入は、材料置場から模型までの運搬と敷詰め作業からなる。底質材料の回収および撤去作業は、集積、積込、運搬、場合により袋詰および積上げ作業の工程よりなる。袋詰および積上げ作業は、砂より比重の小さい材料（石炭粉等）に対して実施する場合が多い。なお、底質材料の撤去時には、有機物の除去に努力し、また格納に際しては、未使用の材料と混合しないような措置を講ずる。

2) 実験設備等回収、撤去作業

実験設備の撤去は、取り外しと必要な場所までの小運搬からなる。なお、模型改造の撤去に対しては、再設置作業を含むものとする。

3) 模型取壊し，整地作業

模型取壊し，整地作業は，模型破砕，破砕片押上，破砕片山積および模型撤去後の跡地の整地まで含み，原則として機械施工とする。ただし，小範囲または機械施工が困難な場合には，人力施工とする。残土の搬出は，積込，運搬，捨土，場合により捨土場所における敷均，整地作業が含まれる。

第4章 検 証 実 験

4-1 固定床検証実験

検証実験とは、模型で生ずる現象が現地現象に対してどの程度の再現性が得られているか、すなわちその相似性を確かめる実験のことを言う。固定床実験では、通常現地の出水時における痕跡水位、または粗度係数を合わせることで検証する。その方法は、豆砂利等をモルタルペーストや接着材等によって河床に貼り付けて、粗度を調整することにより行われる。

4-1-1 検証方法

粗度係数は、一般に流量や水深により変化するので、固定床模型では対象とする水理量近傍の粗度に合せる方法がとられる。また計画河道等では、低水路と高水敷の粗度係数が異なることがあり、このような場合、まず低水路満杯流量規模程度で低水路内の粗度係数に調整する。その後検証対象とする洪水流量の水位になるように高水敷の粗度を調整することで、低水路と高水敷の粗度係数を変えた調整方法も行われている。粗度付けの方法としては、豆砂利等を密に貼り付けたときの粒径と粗度係数の関係式として次式が知られている。

$$n = 0.0404 \cdot d^{1/6} \quad \dots\dots\dots (4-1)$$

これより、粗度係数を与える豆砂利の粒径を求めることができる。ただし、多くの場合、砂粒は楕円形状であり、(4-1)式より求まる粒径の豆砂利を数き詰めると粒度係数がやや小さめとなるため、実際はこれより若干大きめの粒径が用いられている。

いっぽう、通常用いられている突起型の粗度要素については、開水路の抵抗法則として対数分布則を用いれば次式で表わすことができる。

$$\phi = \frac{u_m}{u_*} = 6.0 + 5.751 \log_{10} \frac{h}{k_s} \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

ここに ϕ : 流速係数, u_m : 平均流速, u_* : 摩擦速度, h : 水深, k_s : 相当速度である。なお、(4-2)式は

$$\phi = \frac{u_m}{u_*} = \frac{h^{1/6}}{n \sqrt{g}} \quad \dots\dots\dots (4-3)$$

の関係となる。これより相当粗度 (k_s) と粗度要素の高さ (h_g) や間隔 (I) などとの関係が分かれば、粗度係数を求めることができる。この突起粗度については、図-4.1に示すように、 I は粗度要素の間隔、 S は粗度要素1個が受け持つ面積、 F は流れ方向から見た粗度要素1個の投影面積とし、足立、小川らが k_s/h_g を S/F により表現することを検討している^{12) 13)}。藤田らは粗度要素1個が受け持つ面積から真上から見た粗度要素1個の面積を除いたものを S' とし、Schlichtingの半球、球、L型钢を用いた実験結果も含め、 k_s/h_g と S'/F の関係として図-4.2を得ている¹⁴⁾。これより、相当粗度は、 S'/F が2~6付近で大きくなる。したがって粗度要素としては $S'/F = 2 \sim 6$ 付近の配置間隔のとき

に最大となり、 S'/F がこれより小さくとも、反対に大きくとも効果は少ないことを示している。よって、粗度付けに当たっては、図-4.2のような関係を考慮して配置間隔を設定する必要がある。

なお、固定床実験では、先に述べたように通常現地出水のピーク流量とそのときの痕跡水位が用いられ、これに一致するように粗度調整が行われる。また、これと同時に出水時の空中写真および表面流速分布等の資料も相似性を検討するうえで非常に参考となる。よって、このような現地資料は第1章に述べたように、モデルの相似性を検討するうえで非常に重要であり、模型実験の精度がこれによって左右されると言っても過言ではない。とくに、出水時のピーク流量については、模型範囲の中に基準量水標地点が含まれていれば問題は少ないが、離れていると場合によっては、流量低減等の問題も生ずるので注意が必要である。さらに遊水池や氾濫源等が模型内に含まれる場合は、その貯留効果もあるので不定流実験による検証が必要となろう。このとき模型区間が長い場合は、洪水の到達時間を考慮して下流端水位も設定しなければならぬ。

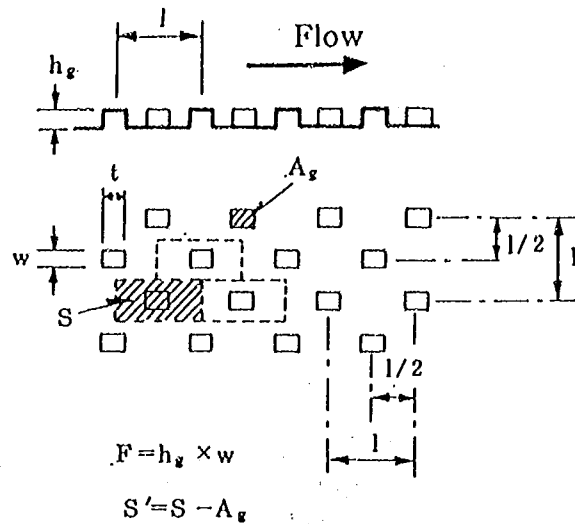


図-4.1 突起型粗度形状

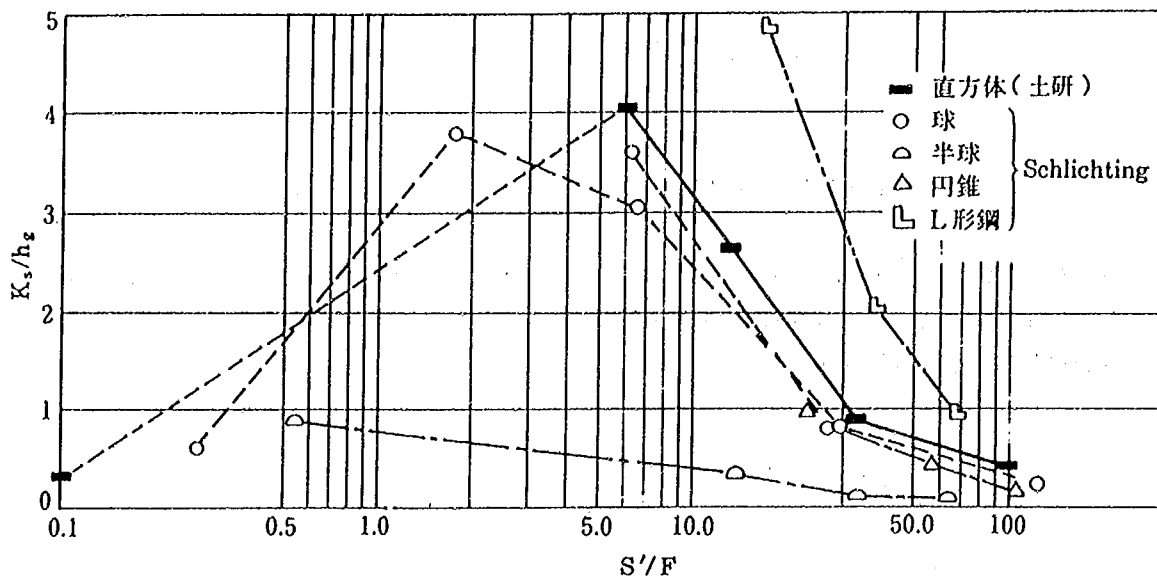


図-4.2 $K_s/h_g \sim S'/F$ (突起粗度)

痕跡水位についても、その精度と誤差等を十分吟味する必要がある。この痕跡水位に含まれる誤差（量水槽、自記水位計などの水位と痕跡水位の差）については、河道特性量として河床勾配との関係が図-4.3のように調べられている¹⁵⁾。これによると、河床勾配が大きいときに誤差のバラツキが大きく、河床勾配が小さいときに誤差のバラツキが小さいことが分かる。これは河床勾配が大きいときは、流れが激しく、水面の揺動も激しいため、痕跡は一定の位置に付着しにくく、明瞭に残らない。このため痕跡の判定は困難で、測定自体に誤差が生じ易い。これに対し、河床勾配が小さいときには、流れが穏やかで水面の揺動も小さいため、痕跡の位置の判定は比較的簡単で測定誤差が小さくなることが述べられている。図-4.3によると、痕跡水位の誤差は、河床勾配が1/2000より大きい河道では、最大約±0.2 m程度含まれる可能性が考えられよう。河床勾配が約1/2000より小さい河道では、痕跡水位が低く捉えられる傾向となっており、最大約-0.1 m程度の誤差が含まれることが考えられる。

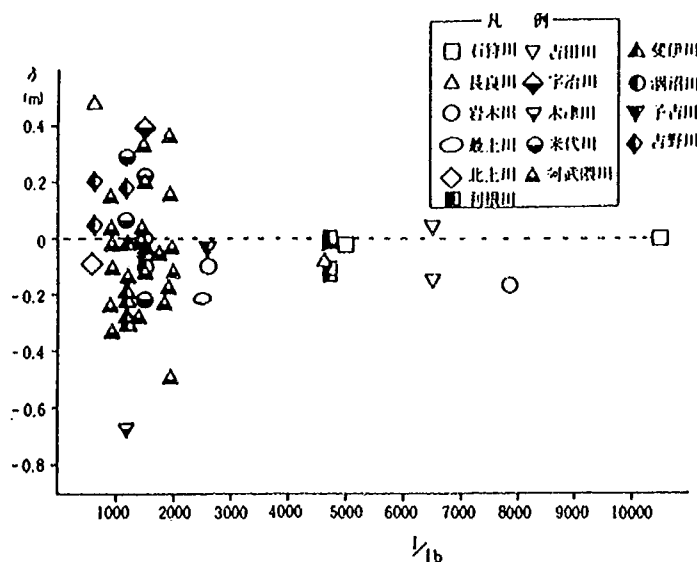


図-4.3 痕跡水位に含まれる誤差と河床勾配との関係

以上のような粗度付けの方法、および痕跡水位等に基づき、検証実験は、粗度付け後に水位、流況等の測定、粗度係数の計算および検討が行われる。これより痕跡水位や粗度係数の目標値を満足するまで、粗度調整作業と先の工程がくりかえされる。

4-1-2 歪模型の粗度調整

歪模型の場合には、模型の勾配が急になるので、相当大きい粗度石を必要とすることがある。このような場合、模型上の流水の有効水深が減少し、Froudeの相似条件が満足されないことになる。とくに貯留量が問題となる場合には、厳密にFroude則を満足させなければならないので、大きい粗度石は適当でない。このような場合、金網等を設置することによって、良い結果が得られるが、ゴミの付着には十分注意する必要がある。

4-1-3 検証の基準

検証実験は、模型の現象が現地現象に対してどの程度の相似性が得られているかを確かめるものであり、その検証の基準は、痕跡水位や粗度係数をどの程度まで一致させるかである。これは痕跡水位に含まれる誤差等も考えられ、すべてをぴったり一致させることは困難であり、また無駄な努力になってしまう場合もある。したがって、検証の基準は、先に述べたような痕跡水位に含まれる誤差を考慮して、その範囲内で水位縦断形が平均的に見て一致していれば良いと考えられる。ただし、この検証の基準は個々の河道特性や実験目的によっても異なってくると考えられ、画一的に決定することは困難である。

4-2 移動床検証実験

人工的に粗度を与えることのできない移動床模型では、水理条件と粒径に応じて河床面に各種の河床波が発生し、これが流れの抵抗係数や流砂量に大きな影響を及ぼす。したがって、流れの相似のためには、河床形態の相似が得られていなければならず、さらに河床変動の相似のためには、流砂量および流砂形態が相似となる必要がある。これらの河床形態や流砂形態の相似条件は第2章に述べた。よって、移動床検証実験は、河床抵抗、流砂量、あるいは三次元流況の相似を検証することであり、また計画河道における実験結果を検討する際の比較資料を得ることにもなる。

4-2-1 検証方法

移動床模型は、先の2-3に述べたように、まず模型河床材料粒径の選定が非常に重要となる。これは河床材料を一度決めてしまうと、途中でそれを変えることが困難であることにもよる。移動床検証実験は、できるだけ検討対象とする水理量に近い既往洪水を通水し、そのときの水位、流況、河床形態、最深河床高とその位置、河床変動状況等の相似性について検証が行なわれる。実験は、現地の洪水前の河床形状に整形し、既往洪水ハイドログラフを第2章で述べたような方法で求めた時間縮尺 t_{sr} により通水する。このときの水位、流況、水衝部位置と最深河床高、小規模河床波、砂州の形成と河床変動状況等が現地現象に対してどの程度の相似性が得られているか検討する。まず水位は、現地と模型河道で小規模河床形態の相似が得られていれば、水位もほぼ相似となる。また洪水時および平水時の空中写真等からは流況や河床形態についての相似性を調べることができる。さらに現地の洪水後と実験結果の河床横断を比較することによって、最深河床位置や河床変動量の相似性について検討が加えられる。

いっぽう、現地の洪水資料やそのときの河床変動状況が得られておらず、かつ、河道計画等の長期的な河床変動を解明する場合は、低水路内あるいは河床移動可能断面内を平均河床高に整形し、支配流量

程度（自然に形成される低水路河道の地形は、低水路溝杯程度となる平均年最大流量と言われている）を定流で通水した検討が行われる。これは水衝部の最深河床や砂州の形成、流下状況がほぼ安定する時間を通水し、最深河床高とその位置および砂州形状等についての再現性が検証される。このように移動床モデルの検証は、モデルが正しいかどうかを見るために行うのではなく、どの程度まで再現性を有しているかを調べるものである。このとき支配流量、時間縮尺、補給砂量、通水時間などの現地現象に対する位置づけや、モデルと現地河川の河床材料の粒度分布の相違の影響等の検討も含まれるであろう。また、これまでにも述べたが、モデルの検証には現地における各種の実測資料が不可欠である。現地資料があって初めてモデル上の再現性の程度が知れるのである。すなわち現地資料が定性ならびに定量判断とその精度の基本となる。

なお、移動床実験の検証の基準は、実験目的に対する必要精度のほか、そのモデルにおける河床形態や流砂形態等の相似条件の面からもある程度決まってくるものと考えられる。よって、ここでは相似性を判断するための留意事項について、以下に述べる。

水位については、4-1-1に述べたような痕跡水位に含まれる誤差、および小規模河床波の形成に伴う河床抵抗特性等を考慮した判断が必要となる。河床形態や砂州形状等の相似性は現地出水後の平水時における空中写真を用いた検討が行なわれるが、出水から撮影時までの経過した期間等も勘案した検討が必要である。さらに、最深河床高とその位置、および河床変動状況も同様に出水から調査時（測量時）までの経過期間を考慮した適切な判断が必要である。またこのとき現地の地質調査資料等により、水衝部位置あるいは局所洗掘箇所の土質変化や強度、アーミング程度に対する影響等も相似性の判断に反映させる必要があるだろう。

4-2-2 河口部移動床モデル実験の検証

河口部移動床モデル実験の相似条件は、2-4に述べたとおりであり、また洪水流に関する検証実験の方法も4-2-1と同じである。ここでは洪水による河口砂州フラッシュおよび河口砂州フラッシュ後の波による河口砂州再形成に関する検証方法を以下に述べる。

河口砂州のフラッシュに関する検証実験は、河道モデルと同様に洪水前の河口地形に整形して、既往洪水のハイドログラフを通水し、モデルに生ずる現象が現地現象に対してどの程度の相似性が得られているかを検討する。検証の対象は、河口砂州上流の水位および砂州部開口幅、砂州フラッシュ状況、海部への土砂流出範囲とその量などであり、その相似性について検討を行う。次に波の運動に関しては、2-4に述べたような条件を満足すれば相似はほぼ成立すると考えられる。しかし、これに応じた海床変化、河口砂州の形成に関する相似性が問題となる。これはどのような波浪条件を用いるかであり、その選定が重要となる。河口部の地形変化の再現については、多くの場合地形変化状況を検討しつつ実験条件に修正を加えながら、最終的に相似性の得られる実験条件が決定されている。これに対し、現地底質粒径とモデル河床砂の粒径から、底質の主要な移動範囲と海浜の横断形状、砂州高などが相似となるための波浪条件を選定し、これを用いた検証結果より、その手法の妥当性が示されている。^{16) 17)} この方法は、まず現地の海浜形状図および河口砂州の変動状況より、砂の移動している範囲の砂州高を求めた。さらにこのときの前浜勾配を求め、この前浜勾配の変化点で砕波して、砂州高まで打ち上げる波浪条件を選定する。打ち上げ高はSavilleの仮想勾配法により、砕波条件は合田による波形勾配と砕波水深の関係

から両者を満足する波高と周期が求まる。

いっぽう、この現地波浪条件を模型に適用したときの模型における砂の打ち上げ高、および前浜勾配がどの程度になるかを求める必要がある。最終的に平衡となる砂州高 H_R および前浜勾配は、これまでの研究成果より 10-3 に示すような結果が得られている。^{11) 18)} これより砂州高、前浜勾配の概略が求まり、その相似性が把握できる。なおこのとき海浜変形の生ずる深さや底質砂の移動限界水深等の相似性も検討しておく必要がある。

以上のような検討から得られた波浪条件に対し、検証実験は波形勾配や波向変化について実施され、河口砂州形成の相似性が検討される。このとき実験に用いる河川流量は、平水流量を与えるべきであるが、河口部の下層には海水が侵入し、表層流速が大きくなることを想定した流量を設定する必要がある。

19) 20)

4-2-3 水温の影響

現地と模型における小規模河床形態が相似となるためには、模型の河床材料が 0.6 mm 以上であることが望ましいことを先の 2-2-2 において述べた。ところで砂澁と砂堆に関係する粒子レイノルズ数 Re_* は、 u_* と d が定まっている場合、水の動粘性係数 ν に反比例する。 ν は水温によって変化し、水温が 20℃ から 40℃ に上昇すると Re_* が約 50 % 増加する。逆に水温が 20℃ から 0℃ に下がると約 50 % 減少する。したがって、模型河床材料として 0.4 ~ 0.8 mm のものを使用すると水温の高い時期において、粒子レイノルズ数が大きく、砂堆あるいは平坦河床であるものが、水温が低くなると実河川では砂堆あるいは平坦河床と考えられるものが、模型では最も小規模な河床波である砂澁が発生することがある。このため小規模河床形態が相似とされないばかりでなく、流れの抵抗とともに流砂量も異なってくる。事例によると²¹⁾、小規模河床形態が相似となっていた夏季の実験結果に対し、冬季においては、砂澁の発生に伴って水位が上昇し、かつ河床変動もかなり少なくなる。水位は夏季に約 10 cm の水深であったものが、これより約 0.4 ~ 0.7 cm 上昇した。また、河床変動状況は、定流実験において夏季の 2 倍の通水時間としたにもかかわらず、夏季の約 8 割程度の洗掘および変動であることなどが明らかとなっている。よってこのような水温の影響によって、実験結果が左右されることもあるので、相似性や実験精度のうえからも、影響のない状態での実験を進める必要がある。

第5章 本 実 験

5-1 固定床実験

5-1-1 実験条件設定

固定床模型の実験条件設定とは、揚水ポンプの始動、測定機器の設置、流量、水位および波浪、潮汐さらに分流量等の条件の設定、測定終了後の後片付けが含まれる。このほかに実験および測定上の管理面からは、実験の実施に際しての気象条件の判断、大流量の実験においては、通水流量に合わせた揚水ポンプの選択やバルブ開度等も考慮する必要がある。また、模型のたん水流量が大きい実験では、事前に実験用水の補給等も実施しておく必要があろう。以下に実験に先立って行われる模型の河床管理、および実験条件設定等の主要項目に対する留意事項について述べる。

(1) 模型の河床管理

実験に先立って、模型の清掃を行う。固定床模型では、模型河床のほかに量水槽、整流槽、沈砂池等の清掃と模型河床の粗度補正作業が含まれる。これは河床清掃後、粗度石等が剥がれているような箇所は、検証実験で得られた粗度石の配置、間隔に補正するものである。

(2) 流量条件

量水槽の各公式における適用範囲外の流量を通水しなければならない場合には、他の検定方法等を考慮して実験条件を設定する必要がある。またこのとき堰エッジを越えたナップが堰板外側に付着してはならず、したがってナップ下側の通気は完全でなければならない。

これより定流実験では、実験対象流量に対応した越流水深が維持されていることの確認を定期的に実施する。不定流実験の場合は、原則として流量設定用人員を張り付け、流量の時間的変化の設定と追跡を行わなければならない。

(3) 下流水位条件

下流水位は、設定した水位に合うように堰上げ装置または水位調節装置を操作する。このとき定流実験においては、通水流量に対応した水位が維持されていることの確認を定期的に実施する。不定流実験では、洪水の到達時間を考慮して、流量に対応した下流水位を常に満足するように操作する。

(4) 分流量条件

分流量が各派川等の水位の影響を受ける場合は、各分流量と水位の対応が全派川で一致するまでトライアルに堰上げ装置を操作して設定する。下流水位の影響を受けない派川がある場合は、この派川の分流量を操作して設定する。さらに各派川の分流量がすべて下流水位の影響を受けない場合は、分派構造物上流の水位と各分流量の関係をトライアルに操作して設定する。なお、以上の分流量の測定およびその資料整理は実験条件設定作業に含まれるものとする。また、不定流の分流量実験では、洪水の到達時間を考慮する。

(5) 波浪条件

二次波の発生防止のための導波板や消波装置の設置に当たっては、水深あるいは海浜勾配等を考慮する必要がある。また対象とする波向、波高、周期等の条件を合わせるため、造波機の軽微な移動および

調節等も実施するものとする。

5-1-2 検討項目と実験方法

固定床実験は、先の1-2, 1-3に述べてあるように、河床変動の情報は得られないが、水位や流況の情報は移動床実験に比べて用意に得られる。したがって、流下能力、河道形状の変化による水理諸量、水理量の変化による形状損失、流速分布および流況等を検討する場合に適している。ただし、適用にあたっては、あくまでも現地での河床変動が激しくないことが前提である。これらの検討可能項目の具体例は先の表-1.1に示してある。ここではこれらの検討項目に対する実験方法の概要を以下に述べるものとする。

(1) 河道の縦横断計画に関する実験

河道計画に関する固定床模型実験は、流下能力、河道の低水路法線形および局所的な水理諸量等の検討が主な目的となる。またこの他に構造物の配置(床止め、堰、魚道、橋脚等)や段階施工等の検討も行われる。ただし、これらのうち河道形状や構造物の配置、形状等について、概略の検討を固定床模型で実施し、河床変動を考慮した対策工を含む最終的な検討を移動床模型で実施する場合もある。これは多数のケースを移動床模型で実施するには、多くの費用と日数がかかるため、その費用節減や調査期間の短縮をも目的とされる。しかし、このような場合、固定床と移動床実験の各々で解明すべき項目を十分検討し、かつ明確にしておく必要がある。これが不十分であると結局は必要のない無駄な実験となってしまうり、費用や日数が反対に多くかかってしまうこともある。いっぽう、実験に用いられる流量は、既往洪水流量を含め、通常平均年最大流量から計画高水流量までの数ケースについて、定流実験を主体とした検討が実施される。また、これらの実験に必要な主な測定項目は、水位、流速、流況等である。

(2) 分合流に関する実験

分合流実験においても、河道の平面形状や縦横断形等の検討方法は、前述の(1)と同じである。このうちとくに固定床模型で威力を発揮するのは、分流点における堰や水門の構造、配置および水門の操作方法等である。この場合、流量配分とともに不定流時の水門操作方法の検討においても効果的である。なお、検討対象となる流量条件や測定項目等は前述の(1)と同じであるが、他に分流実験ではこの分流量の測定が含まれる。

(3) 堰、水門に関する実験

固定床模型による堰、水門に関する実験は、流量係数や操作方法等の検討が主体となる。なお、堰操作方法については魚道等に関する検討も行われる。このような実験は主として流量が平水時から小洪水時に対して検討されることが多く、水深の確保から小縮尺の模型、すなわち大きな模型にする必要が生ずる。このため、流量係数等の検討では抽出模型による実験が実施される場合もある。測定項目は、同様に水位、流速、流況等であるが、流速の測定にあたっては、水深が小さく、かつ微流速となるため、測定機器の選定と測定方法についても予め検討しておく必要がある。

(4) 調節池および氾濫流に関する実験

調節池計画における越流堤の配置形状や越流量の検討は、固定床模型実験が有力な手段となる。ただし、この場合も越流水深を確保するため、大きな模型としたり、歪模型にする必要が生ずる。さらに、

越流堤の細部形状や越流係数等の検討に際しては、抽出模型による検討も行われる。

いっぽう、氾濫域を持つ河道の浸水状況や水位変化等の検討も固定床実験が有効である。これは氾濫域の浸水、拡がり状況、および遊水効果等の検討を目的として行われる。流量条件は先の(1)、(2)と同一であるが、氾濫流に関しては不定流実験が主体となろう。測定項目は先の(1)と同じである。

(5) 河口に関する実験

河口部に関する固定床模型実験では、波浪侵入状況、高潮堤の必要性や消波工効果、および河口水位と流下能力等の検討が行われる。波浪侵入実験は、主として計画波高や河口部において砕波限界となる付近の波が用いられ、このときの潮位は、同様に計画潮位や朔望平均満潮位とし、河水流量は通常平水流量程度を用いる場合が多い。洪水流実験の流量条件等は先の(1)と同じである。いっぽう、波浪侵入実験における測定項目は、水位、波高、波の打上げ高、流況等であり、洪水流実験は先の(1)と同じである。

5-1-3 測定項目と方法

固定床実験における主な測定項目は、先の5-1-2において述べた。ここでは、各測定項目に対する測定上の注意事項や方法について以下に述べる。

(1) 水位測定

水位測定は、実験目的によって測定位置や方法等も異なってくる。また、不定流実験では、時間的な変化の測定が必要となる。測定上の基本は、水深、水位とも鉛直に測り、水面振動の1サイクル以上の平均を測定することである。この測定にあたっては、測定ロッドを実験工が持って、それをレベルで読み取る方法は精度が悪いので、このような方法は行うべきではない。

(2) 流速測定

流速測定にあたっては、流速および流向が周期的に変化している場合、それらの影響を考慮して測定時間を長くする等のことを行ない、その平均値を求めるか、その変動そのものを測定するようにしなければならない。また、任意の時刻の流速測定においては、2回以上の測定を行い、原則として2個の測定値が5%以内に存在するものの平均値を採用する。水深方向の流速分布を測定する場合は、原則として5測点程度とし、そのとき流向も測定しておくものとする。いっぽう、構造物によって流速が変化するときの影響を把握する場合、測定最下流部は、流速が原状に復する付近とする。さらに始端から終端間の測定は、その間の流速変化が把握できるように行う。なお、流速の横断平面分布の測定法として、染料や浮子の流下距離を一定時間間隔で写真撮影して解析する方法等もある。

(3) 流況観察

流況観察は、流線や主流部の位置、構造物の影響、渦の位置とその時間的動向、分流境界線、水衝部、死水域、および剝離領域、射流部と跳水現象等の状況を測定するものである。これらの現象は写真撮影によって補い、他に近年はビデオ撮影による観測や気球による上空からの流況写真撮影も多く行われている。いっぽう、不定流時の流況観察は、ピーク流量時付近が主体となるが、上述した現象の流量変化に伴う流況変化を測定する必要がある。なお、河口部における波浪侵入等の実験では、波向の変化、波峰線および沿岸流等の海浜流況についての現象の測定が含まれる。

(4) 波高および打ち上げ高測定

波高および打ち上げ高は、水面振動の10サイクル以上を測定し、1波ずつ波高および周期あるいは打

ち上げ高を読み取り、最大および平均波高等を算出する。

5-2 移動床実験

5-2-1 河床整形

移動床模型においては、実験に先立って行われる模型の河床管理として、模型付帯構造物を含む模型の清掃の他に、模型河床材料中の異物の除去作業が含まれる。次に通水前の準備作業として河床整形が行われる。この河床整形とは、移動床部を通水前の所定の河床地形に製作する作業を言う。通常は模型横断面上にピアノ線を張り、そこから各変化点の距離を測定して整形断面の帯を作る。なお、簡易な方法として、最近では糸を張った測定が行なわれているが、これは張り方によって非常に精度が悪いのであまり感心しない。着色した釣り糸等に強度のあるものがあり工夫する必要がある。この他レベルにより断面上の変化点を表わし、帯を作ることも行われる。これより断面間は、この帯と平面図および空中写真等を参考に正しく連結し、かつ整形を行う。河床整形にあたって注意しなければならないのは、均一粒径の場合も同様であるが、とくに混合粒径の場合は整形毎に河床材料をよく混ぜ合わせる事、および河床材料は湿潤状態にし、均一に締め固めなければならないことである。実験を実施して行く過程で堆積箇所を削り、洗掘箇所にはこれを埋めるといった河床整形が行われがちである。この場合、実験毎にはほぼ同じような河床変動状況となり、非常に再現性や精度が良いように思える場合があるが、これは精度が良いわけではなく、河床材料の締め固めに問題があり、前ケースで河床変動の生じた部分の河床だけが動き易くなっているだけのことがある。とくに混合粒径の場合は、節分け作用が生ずるのでこれらの混ぜ合わせと、均一な締め固めを行わなければならない。

5-2-2 実験条件設定

移動床模型の実験条件設定は、先の固定床実験の5-1-1に述べた作業の他に通水初期のたん水、通水中の給砂（必要な場合）、通水後の排水作業が加わる。なお、通水初期のたん水、および通水後の排水作業は、整形河床や実験で形成された河床形状を変化させないように進めなければならない。

5-2-3 検討項目と実験方法

移動床実験は、河床変動や構造物周辺の洗掘の予測、およびその対策効果等の検討が主な項目となる。移動床実験の検討可能項目の具体例は同様に先の表-1.1に示してあり、これらの検討項目に対する実験方法等の概要を以下に述べる。

(1) 河道の縦横断計画に関する実験

河道計画に関する実験は、砂州の形態やその変動状況、それに伴う河床変動状況および水衝部位置とその局所洗掘深を予測し、さらにこれらの対策法とその効果等の把握、検討が主要な項目となる。このような検討はもちろん現況河道においても行われる。これらの実験に用いる流量条件等は固定床実験と同じである。ただし、河床変動の解明は、1洪水の不定流実験による検討の他に長期的な河床変動状況を把握する場合、比較的出水頻度の高い流量条件の定流実験による検討が実施される。実験によって河床変動や局所洗掘状況、あるいは流況等に問題があれば、まず第一に可能な範囲で断面形および法線形

の修正が行われ、問題点の解消または軽減が図られる。このような検討によっても問題点が解消できない場合、対策工によって対処する方法がとられ、その工法と範囲および対策効果等について検討が行われる。これより最終的な河道断面形や法線形および対策工案等の提案が行われる。またこの他に段階施工時の問題点把握と対策工等の検討も行われる。

(2) 分合流に関する実験

河道の平面形や横断面形、あるいは低水路法線形の検討方法は先の(1)と同じである。他の検討項目としては、分流実験の場合、分流点構造物周辺における河床変動状況とその影響、および対策法や効果についての検討が行われる。合流部の実験においては、背割堤や導流堤の配置とその効果等の検討が含まれる。実験条件や方法等の基本は本節の(1)と同じである。

(3) 堰、床止め、橋脚等に関する実験

堰や床止め、および橋脚等の河川構造物に関しては、この構造物周辺における洗掘状況あるいは設置効果やその影響と対策効果等の検討が主な項目となる。ただし、このとき河道の低水路断面形や法線形の検討も一緒に行われる。他に堰については、その位置や堰軸方向の選定、護床工長、施工時の仮締切工設置に伴う問題点把握と対策工等の検討がある。床止めに関しては、配置、形状、護床工長等の検討が必要であり、橋脚についてはその配置、方向等の検討が必要となる。これらの実験流量や方法は、本節の(1)と同じである。

(4) 河口処理に関する実験

河口部に関する実験は、洪水流による河口砂州のフラッシュ状況と河口水位、流下能力および導流堤等構造物周辺の洗掘の予測とその対策等について検討が行われる。いっぽう、波による河口砂州形成実験により、砂州フラッシュ後の再形成状況や河口処理対策効果の検討も主要な項目である。この洪水流実験の流量条件は本節の(1)と同じであるが、不定流実験が主体となる。波による河口砂州形成実験は、先の4-2-4の検証実験で相似性の得られた波浪条件を用いた検討が主として実施される。

5-2-4 測定項目と方法

移動床実験における測定項目は、先の5-1-3に述べた固定床実験での測定項目の他に、河床変動と河床波形成状況等の測定が加わる。これらの測定方法と留意事項を以下に記す。

(1) 流況観察

これは、固定床実験で述べた測定項目に砂渾の発達、砂堆および砂れき堆の形成、移動状況、局所洗掘、流線の変化等が加わる。さらに河口部の実験では、河口断面変化あるいは、汀線の変化等を加える必要がある。

(2) 河床高測定

河床高測定は、原則として模型値で10cm間隔に特定断面上の河床高について行い、写真撮影も併用する。なお、測定方法は河床整形時と同じであり、このとき、砂れん、砂堆等の形状要素が含まれるような測定でなければならない。写真撮影は、砂州、砂堆および砂れん等の状況が分かるように、白色の水性ペイントを低流量で流した状況や、多少水が残った状態で撮影すると良い。

(3) 局所洗掘深および形状の測定

構造物周辺においては所定の場所において、洗掘深の時間的変化の測定が行われる。また、これらの

局所洗掘箇所は、詳細な等高線図が描ける程度に縦横に河床高および位置を測定しなければならない。

(4) 流出砂量の測定

これは移動床部分以外に流出している河床材料の回収とその測定を行うものである。対象区域は、原則として固定床模型部、沈砂池および排水路部とし、各部ごとに測定しなければならない。なお、固定床模型部に流出砂がある場合は、流況図またはその他の平面図、あるいは他の方法により、その分布状況が把握できるようにする。

第 6 章 測定資料の整理と現象解析

6-1 測定資料の整理

実験において得られた各測定結果は、その検討目的に対する答えとして、一番分かり易く工夫して表現することが最も大切とされる。このため、測定資料の整理は、検討目的によって、測定項目が同じであっても異なる場合もある。したがって、このような個々の検討目的に対する工夫した整理法を述べるのではなく、ここでは各測定項目に対する基本的な整理法について以下に記するものである。

6-1-1 資料整理一般

測定資料は、測定後直ちに現地換算し、別に定める様式により図表化する。図表の版は、原則として A-4 版とし、この図表等には実験ケースおよび実験条件等を記入し、かつ図には寸法および目盛りを入れることを原則とする。

6-1-2 測定項目別の処理法

(1) 水位測定資料

水位測定結果は、現地換算を行い、各測点別、各断面別平均水位の一覧表とし、これより断面平均水位を水位縦断面図に表わす。水位縦断面図は、測定水位の他に、原則として次のようなものを記入する必要がある。

- ① 通水初期平均および最深河床高
- ② 計画高水位
- ③ 縦断面距離および距離標位置

なお、測定結果を水位横断面図として表現する場合は、初期河床横断面および各測点水位、計画高水位等を図示するものとする。

いっぽう、不定流実験においては、時間的な変化要素が加わり、縦断面図の他に、各断面別に時間水位曲線図として表わす必要がある。

(2) 流速測定資料

流速分布等の測定結果は、現地換算を行ったうえ、各測点別、各断面別一覧表とし、平均および最大値も明示する。これらの結果は、横断面図、構造物図等に、位置および流速の大きさ、流向が判断できるように図化し、平均および最大値は、縦断面変化図等に示すものとする。水衝部、射流部等の局所的な流速測定の結果は、現地換算値を流況図に記入したり、文章記述する等理解し易い方法によるものとする。

(3) 流況観察、測定資料

測定結果は、河道平面図に諸現象の位置および規模等を記入し、図示しがたい現象は、写真あるいは文章で表現する。流線は、矢印の長さおよび太さで方向、流速、流勢等の要素を定性的に表現するものとする。このとき時間以外の現象は原則として現地量に換算したものとする。いっぽう、写真は現象の理解し易いものを選び、位置および現象の説明を付けて添付する。なお、流況から得られる情報は非常

に多いはずであるが、測定結果の流況図から読める情報は以外と少ないのが実情である。整理法等をさらに工夫する必要がある。

(4) 波高、打ち上げ高の測定資料

波高および打ち上げ高の測定結果は、現地換算を行い、各測点別、各断面別の平均および最大波高等の一覧表とする。さらにこれを平面図あるいは海浜流況平面図に図示するものとする。

(5) 河床高測定資料

測定結果は、現地換算を行い、河床移動範囲部分の平均河床高を計算する。これより初期河床高断面図に、測定結果の標高をプロットし、河床移動境界線および平均河床高、H. W. L, 水位測定断面図においてはそのときの水位等も合わせて明記する。さらに平均および最深河床高は、先の水位縦断面図等に図示する。

(6) 局所洗掘測定資料

洗掘深の時間変化は、現地標高でその変化状況が分かるように図化し、合わせて測定点の平面的な位置等も明示する。いっぽう、局所洗掘測定箇所は、洗掘周囲の平面図とともに等高線図として示す。

(7) 砂州形態とその変動に関する資料

河道平面図に砂州の形成、発達およびその変動状況を記入し、さらに水衝部や堆積箇所も合わせて表現する。

6-2 実験データの解析

実験データの解析は、測定資料の整理結果を用いて、いわば二次処理を行うことをいう。ただし、この場合も先の6-1に述べたように、検討項目によって、解析方法も当然異なってくると考えられる。したがって、ここでは6-1の資料整理結果を用いた基本的な現象解析のみに限定して以下に記すものとする。なお、実験データの解析にあたっては、その種類、解析方法についても記載するものとする。

6-2-1 検証実験データの解析

検証実験は現象の相似性に関する解析が主体となる。固定床実験においては、痕跡水位や粗度係数、流況、流速等の項目別の現象および測定量为目标と比較して、その傾向と再現性および結果等をまとめるものである。移動床実験は、固定床実験の検証項目の他に、河床変動、河床形態、流砂形態、時間縮尺あるいは通水時間等が検証および比較検討項目に加わる。なお、検証実験は第4章に述べたように、模型の現象が現地現象に対してどの程度の再現性を有しているかを調べるものである。したがって、現地における洪水時の各種実測資料および空中写真等から、比較検討を行うための資料解析も含まれる。

6-2-2 各解析項目と手法

(1) 水位の比較検討と解析

現地実績水位との比較、あるいは河道形状の違いによる水位への影響等とその相違を比較検討し、かつこれらの原因の解明と水理的問題点やその効果について検討する。すなわち、河道構造物の変化

が水位に及ぼす影響については、損失水頭や水位差が収束する範囲等を検討する必要がある。また、河道計画案については、河床勾配、河道幅および断面形状等の河道諸元の変化による影響を解析する。流量の増減が水位に及ぼす影響は、径深や死水域等との関連も考慮する必要がある。

(2) 流況の比較検討

流況の比較検討は、流量の相違、構造物による影響、河道計画案の改良、水位および河床変動等が対象となる。これらの比較対象項目は、検討目的によって、その視点や重要度も変ってくる。したがって、実験目的に応じた適切な検討が必要である。

なお、流況の比較検討で共通の基本的な項目は、流線、主流部および分流域境界線等の変化、渦の位置とその時間的動向の比較、水衝部、射流部、死水域および剝離領域の位置、規模、形状等の比較である。

(3) 等流速線図

等流速線図は、平面図および横断面図の2種類の表わし方がある。等流速平面図においては、対象とする深さの流速、断面図においては、水深方向の流速分布より、隣接する流速間を比例配分し、想定流速を算定して等しい点を結んで等流速線図を作成する。このとき最大流速値とその発生位置も図示するものとする。なお、断面に対して流向が直交していない場合は、補正を行うことなどの配慮が必要である。

(4) 区分積分による流量計算

特定断面の流速分布図をもとに、隣接測定点間を分割し、その区分面積に流速を乗じて流量を求める方法である。なお、このとき断面が流線に直交していない場合はその補正を行い、他に死水域や逆流域の取扱いには充分注意を払わなければならない。

(5) 河床変動平面図および等高線図

初期河床に対する河床変化量を各断面に表わし、当該断面を平面図の対象位置に挿入するものである。その表現には、河床変化量のうち堆積を正、洗掘を負とし、これを基準線により図示する方法と、測定結果及び初期河床とともに標高で表わし、洗掘および堆積が識別できるように表現する方法がある。図には各種の河川構造物はもちろん、河床材料の移動境界線および通水前後の平均河床高等を記入しておく必要がある。

いっぽう、等高線図は、測定断面上の標高より、隣接する標高間を比例配分し、想定標高を算出して等しい高さの点を結んで作成する。なお、このとき最深河床高とその位置および構造物等を明示し、あわせて初期河床の等高線との比較が行えるようにする。これらの河床変動状況は河道形状の違いや河川構造物の設置に伴う影響、洗掘対策工の効果等についてさらに比較検討が行われる。

(6) その他

他に行われる一般的な実験データの解析としては、水位等の測定結果を用いて、各測定断面間の粗度係数を計算し、実測値等と比較検討することがある。また、固定堰や可動堰における流量係数の解析なども行われる。

第7章 報告書の作成

7-1 報告書の構成

報告書は、まえがき（過去の経緯を含む）、実験目的、実験方法、実験結果、結論および今後の問題点等の内容が含まれた構成とし、かつわかり易く記述するものとする。この他に水理的検討の対象となる現地状況と河道の特性、当初計画案とその問題点等、実験の実施上あるいは実験結果の適用に際しての留意点等についても記載することが望まれる。

なお、報告書に使用する用字および用語は、以下に定めるところによる。

- ① 文体は、口語体とする。
- ② 漢字、かなづかいおよび送り仮名は、現在適用されている「常用漢字表」、「現代かなづかい」および「送り仮名の付け方」による。
- ③ 学術用語は、それぞれの専門分野で用いられている用語集による。
- ④ 量、単位記号などは、原則として J I S (Z 8203) による。

河道計画および河口処理に関する報告書目次例を以下に示す。

・〇〇川放水路模型実験報告書目次例

はじめに

第1章 全体概要

第2章 〇〇川の概要

2-1 流域の概要

2-2 地形

2-3 地質

2-4 植生

2-5 水文

第3章 改修の歴史

第4章 〇〇川の河道特性

4-1 低水路部の河道特性量

4-2 河床の変動傾向と土砂収支

第5章 〇〇川の水理模型実験の目的と意義

5-1 目的と意義

5-2 これまでの経過

第6章 相似則

6-1 〇〇川模型の相似則

6-2 模型実験のための基礎知識

1) 現地河川の流れの抵抗と流砂量

2)	石炭粉の流れの抵抗と流砂量
3)	河床形態について
4)	模型実験の時間縮尺の考え方について
6-3	模型実験の条件設定
6-4	検証の結果と問題点
第7章 実験ケース	
7-1	模型概要
7-2	実験ケース
第8章 実験結果とその考察	
8-1	計画分流時の一般的流況について
8-2	堰の位置について
8-3	沈砂池の設計諸元について
8-4	局所洗掘とその対策工について
8-5	分流点付近の法線形状について
8-6	放水路への流入土砂量について
8-7	堰の操作について
8-8	将来の河床変動について
第9章 結論	
あとがき	
参考文献	

• ○○川河口模型実験報告書目次例

はじめに

第1章 改修事業の概要と実験目的

- 1-1 改修事業の概要
- 1-2 実験目的

第2章 ○○川河口の自然条件

- 2-1 ○○川の概要
- 2-2 河口の概要
- 2-3 ○○川の縦断形と川幅
- 2-4 流量
- 2-5 河床材料および海部の底質材料
- 2-6 粗度
- 2-7 波浪
- 2-8 潮位
- 2-9 河口砂州の変化
- 2-10 河口付近の水深

第3章 模型実験の相似則

3-1 相似則

3-2 ○○川河口模型実験における模型縮尺について

第4章 実験ケースと実験方法

4-1 実験施設

4-2 実験の概要

4-3 実験ケース

第5章 模型の相似性に関する検証実験

5-1 検証実験の意義

5-2 洪水時現象の相似性に関する検討

5-3 波による海床変化の相似性

第6章 導流堤による河口水深変化の把握

第7章 導流堤による河口埋没防止の効果及び汀線変化に関する検討

7-1 概要

7-2 導流堤内河床高が維持しうる水深

7-3 導流堤による河口付近の汀線変化

7-4 模型実験による導流堤の河口埋没防止効果および汀線変化に関する検討

第8章 洪水時の河口水位

8-1 概要

8-2 現況河道における河口水位

8-3 導流堤設置時の河口水位

第9章 結論

あとがき

参考文献

7-1-1 構成項目の書き方

1) まえがきについて

まえがきについてはいくつかの形式があるが、最近はこの2つの形式が多い。

① 総括形式

報告の中の要点を重要順序にまとめたもの。

② 問題解決形式

こういう問題があり、このように解決したということをもとめたもの。

2) 本論のまとめ方

① 論文内容を簡潔にすること。

② 筋書きに忠実であること。

③ 主題について系統的によく考えること(筋書きをはっきりさせておく)。

3) 結論の書き方

- ① 結論は本論の中で明らかにされた主要な検討結果、および問題点について考察した結果をできるだけ簡明にまとめ論述する。
- ② 報告が中間報告的なもので、引き続き調査するものについては、将来どのように調査が続けられるべきか、その方向と見通しを具体的に述べる。

4) 謝辞の書き方

謝辞は、次のような人又は機関を対象として書く。

- ① その調査や実験などの協力者
- ② 討論に加わった人や示唆を与えた人
- ③ 実験の材料、装置、器具などの便宜を与えた人
- ④ 報告に使ったデータ、図、表、写真などの提供者

5) 参考文献の書き方

参考文献は必ず報告書末に記載する。

- ① 文献を引用するに当っては必ず原典と照合し、原典が本当に役立つかどうか自分で確認してから引用すること、孫引きはやめること。
- ② 参考文献の表示は当該箇所の右肩に 1), 2), 3) …… n) を付け、n) で示す。
- ③ 参考文献の刊行年月として表示する年号は、西暦とする。
- ④ 参考文献の巻号は、日本語の文献については「巻」、「号」を、外国語の文献については、「Vol.」, 「No.」を使用する。

7-1-2 各項目の内容

1) 実験目的について

河川改修事業を進めて行くうえで、複雑な水理的諸問題の解決を図る際に水理模型実験が実施されるわけであるが、実験目的にはこれらの解明すべき問題点とその検討項目等について述べるものである。ただし、第1章に述べたように、模型実験を実施する場合、模型範囲だけの現象の理解と認識だけでは不十分であって、その川全体を一つの生きたシステムとして抱え、その中での模型実験の位置付けが大事である。このようなことから、改修事業や流域の概要の他に、河道の諸特性等を検討し、河道の問題点を確実に把握し、それによって模型実験を行うことが必要であること、検討項目が生じたというような記述を行なうべきであろう。

2) 実験方法について

実験方法は模型実験の相似則、模型および実験の概要、実験ケースの説明等が範中に含まれるものとする。相似則については、第2章に述べたような基本事項と各物理量に対する縮尺、および相似条件に対する適用性やその問題点等を記述する。模型概要では、模型の範囲、模型縮尺、境界条件の与え方、移動床模型においては河床材料の特性等について触れる。実験概要では、各境界条件、解析方針、実験手法と各測定方法等について述べ、実験ケースについては、各実験目的に対する検討事項と各実験条件等の説明が必要であろう。

3) 実験結果について

実験結果は、大きくは検証実験と本実験の2つに分けられる。検証実験は、各々の測定結果とその現象について述べるとともに、これら模型の現象が現地現象に対してどの程度の相似性が得られ、かつ問題点がどのようなものであるかについて触れる。さらに現地現象に対する位置付けや留意点等についても記述する。

本実験においては、各々の測定結果とそれらの現象を解析した結果について述べる。さらに把握、解明しようとする各項目について検討を行うとともに、文献および現地調査資料等も含め、総合的に考察を加えた結果について記述する。なお、各段階における検討項目については、その結論を書き、次の段階に移った理由等についても記述するものとする。

4) 結論について

結論部分は、実験および水理計算、現地調査、解析、文献調査等によって明かとなった主要な水理現象や計画案に対する問題点と効果等をまとめる。さらに個々の問題点の対策法とその効果等に関する結論を記述する。

7-2 報告書の記述について

7-2-1 測定項目の記述

測定項目とその内容は、検討目的によって異なってくる。しかし、第5章に述べたように、実験で必要となる主な測定項目は、水位、流速、流況等であり、他に移動床実験では河床変動および局所洗掘状等が加わる。さらに、河口模型実験では波高やその打ち上高も含まれる。これらの一般的な記述内容は次のようなものが考えられる。

水位については、まず計画高水位とその関係、水面勾配とその変化点および横断方向の水位差や変化状況等があり、さらに不定流実験においては時間的な水位の変化状況等が対象となろう。流速については、平均流速と最大流速の縦断的な特性、最大流速の発生位置と河道の平面的な特性、あるいは構造物との関連等が考えられる。流況は、測定項目に述べたように、主流部の位置、水衝部および死水域等の発生位置とその状況、高水敷への乗り上げおよび低水路への落ち込み流れ、射流部や跳水等の発生状況、分流境界や合流部の流勢等の諸状況が対象となる。さらに移動床実験では、河床波の形成、移動状況や局所洗掘状況等が含まれる。

河床変動については、平均および最深河床高の縦断的な変化状況、横断および平面的な堆積、洗掘状況と河床形態等との関連、局所洗掘状況とその発生箇所、構造物等の影響あるいは効果等が記述の対象となろう。いっぽう、波高や波の打ち上げ高については、最大および平均波高の分布とその減衰状況、打ち上げ高と高潮堤の関係、回折や反射波、砕波状況等が考えられる。

7-2-2 水理諸量の比較検討

河道改修効果や河川構造物の設置に伴う問題点、およびこれらの対策効果等を把握するため、測定された水理諸量の比較検討が行なわれる。まず水位に関しては、痕跡水位との比較、河道改修に伴う水位低減効果を知るための比較、および河川構造物等の設置に伴う影響や流量の遠いに対して比較検討する

必要があろう。流速および流況については、水位と同様に河道改修や種々の対策効果、構造物の影響、流量の違い等を知るための検討が行なわれる。これは平均および最大流速の比較、主流部や水衝部位置の変化状況、および流況的に見て問題となる現象の対策効果等の比較がある。河床変動量についても、平均および最深河床高の比較、河床変動の平均的な関係および局所洗掘深等の軽減や対策効果について比較検討が行なわれる。他に測定される水理諸量の比較検討も基本的には同様と考えられる。

7-2-3 図面、写真の選定

実験結果の図面は、検討目的を解明するための水理諸量やその現象を適切にかつ分かり易く表現されたものを選定するのが基本となる。すなわち、水理諸量の他に改修効果や水理的な問題あるいは種々の対策効果が分かるもの、またそれらの現象が比較的できたり、水理諸量等によってうまく説明できるように整理されたものを用いることが重要である。

いっぽう、写真については、状況や結果とその効果が一見して分かることが重要であり、このような視覚に訴えることが文章表現よりも非常に効果的である。したがって、現象や種々の対策効果等が分かり、かつ比較できるものを選定する必要がある。

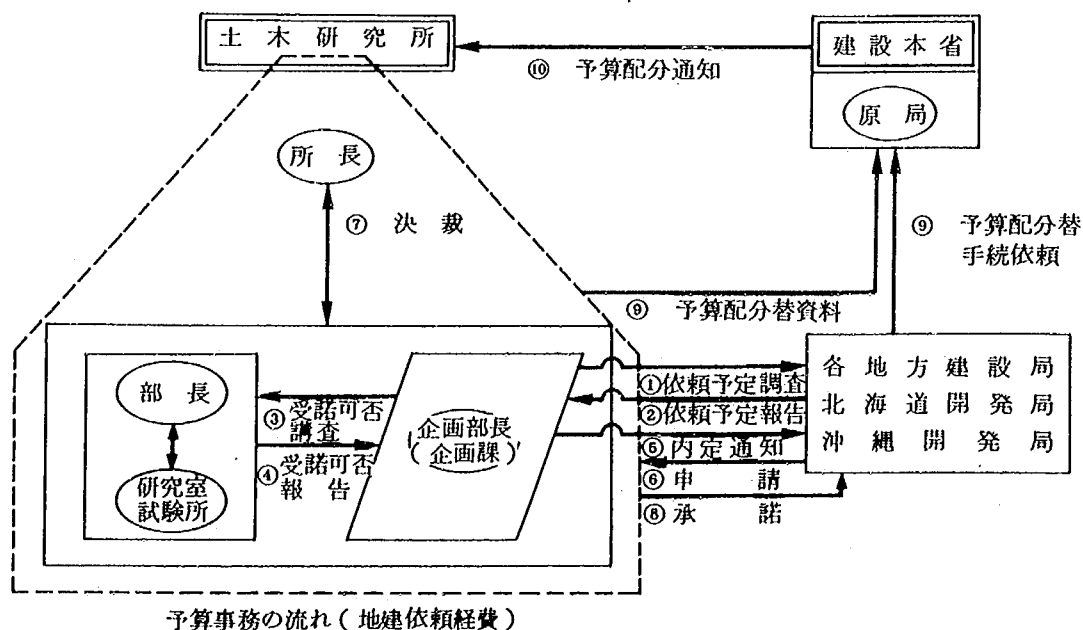
第 8 章 模型実験の実施手続き

8-1 土木研究所へ依頼する場合

土木研究所で実施する模型実験は、建設省の所管する公共事業のうち、個々の事業現場で直面する計画、調査設計、施工および技術的問題に対し、現場の条件に合致した解決を図るために行なわれる。これは、地建依頼経費と呼ばれ、他に建設省設置法第3条、第58号から第61号までの国以外の公共団体等からの依頼による受託研究（受託工事）経費がある。

(1) 予算事務の流れ

模型実験による検討が必要となったときの地建依頼による予算事務の流れは、下図に示すようなものとなる。なお、年度途中において早急に検討し、かつ解決を図る必要が生じた場合等は、担当研究室において受託可否の判断を仰ぎ、その実施が決定したときは④以降の諸手続きが行なわれる。予算の移し替えは、手続きを行ってから約2カ月程度はかかっている。



(2) 説明資料の作成

土木研究所に模型実験を依頼し、その実施が決定すると、担当研究室において、様式に基づいた課題別実施計画書の作成が行なわれる。これには、目的と必要性、全体計画の概要と予算額、当該年度の主な実施項目と費用の内容等について作成したものを提出しなければならない。

8-2 建設コンサルタント等に依頼する場合

各地方建設局の事務所や、地方公共団体等が実験施設を有している建設コンサルタントに直接模型実験業務を発注して、問題の解決を図る方法がある。この場合は、通常の調査、設計業務の発注と同様の手順で行なわれる。

いっぽう、近年土木研究所へ模型実験を依頼する件数は、非常に多くなっているのに対し、研究室において実施する調査、研究課題数は人員等の関係からも限度があるのが実情である。このため、土木研究所の実験施設、試験機器を広く活用して受託研究を行なう機関として、財団法人土木研究センターがある。ここでは、土木研究所の施設を使用して模型実験を実施するとともに、専門技術者の適切な意見、指導を受けた調査、検討が行なわれる制度がとられている。この土木研究センターに依頼する方法は、土木研究所への施設使用による模型実験実施の要請、さらに施設使用の手続きがまず行なわれる。その後の土木研究センターへの模型実験依頼は、通常の調査、設計業務の発注手順と同様である。

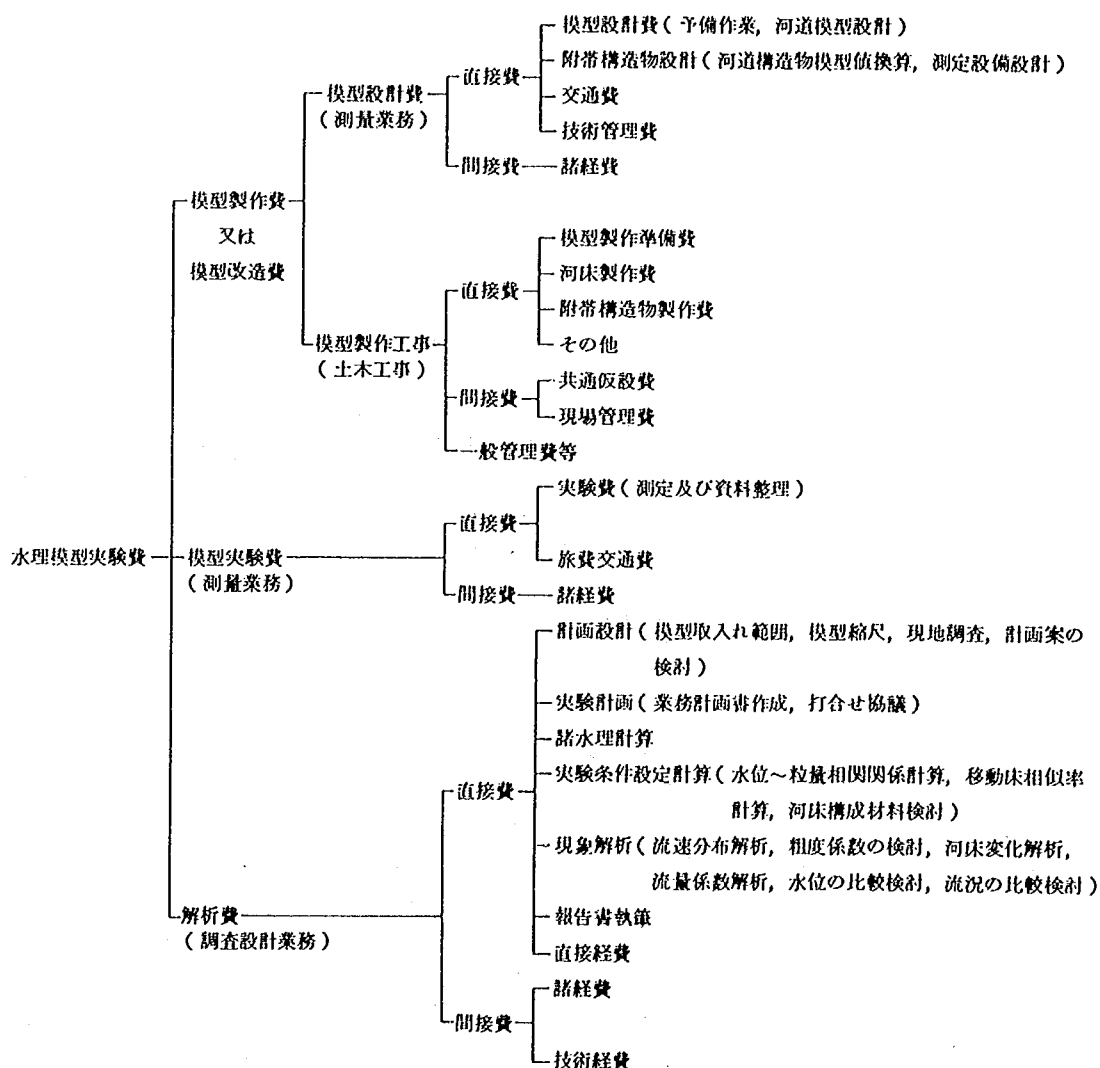
第9章 設計書および仕様書

9-1 設計書

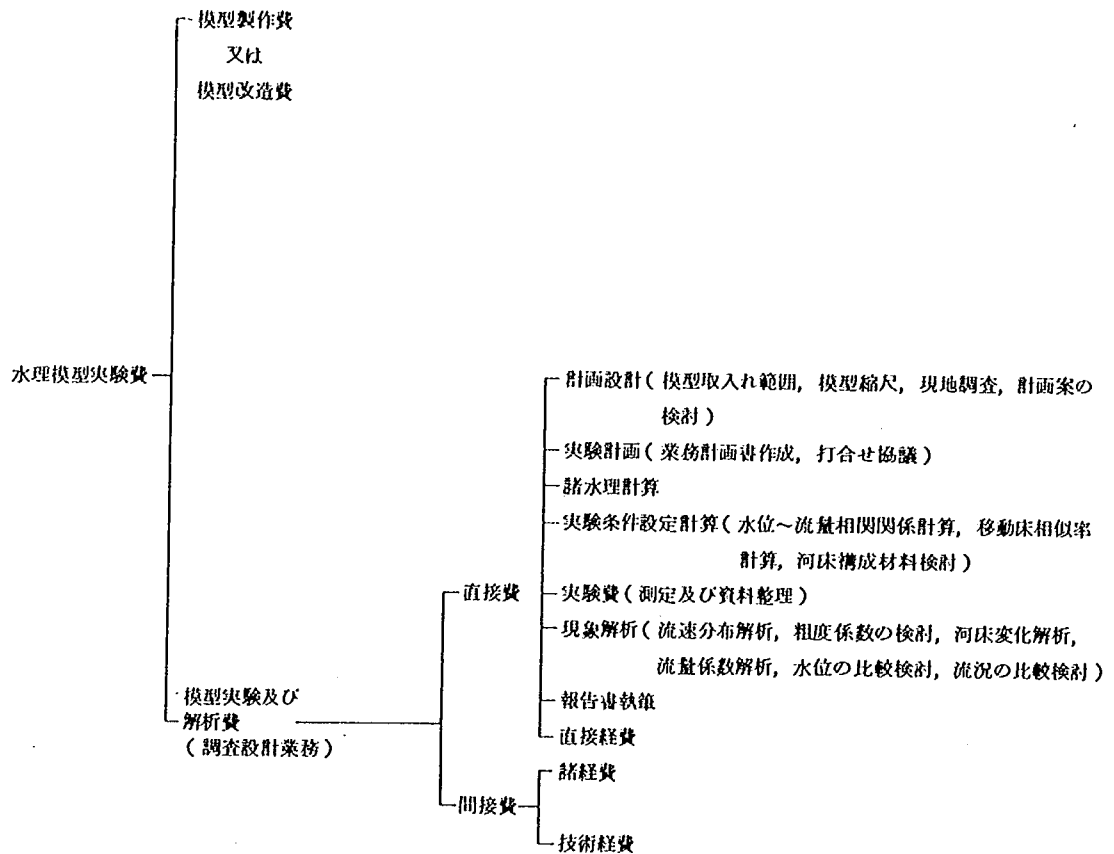
9-1-1 設計書の構成

水理模型実験の請負業務の構成内容は、現在のところ必ずしも確立されたものとはなっていない。

ここでは筆者らの考えによる一般的な構成内容を以下に示すものとする。ただし、これは官が所有する実験施設および主要実験機器等の提供を受けて実施する場合である。



いっぽう、企業が所有する施設および実験資材、計測機器等を使用して実験業務を実施する場合の構成内容は下図のようになる。この場合、直接経費の中には、実験に要する光熱水料、および実験施設の維持管理に要する費用等も含まれる。なお、模型設計および模型製作（改造）工事は前述の官の施設で実施する場合の構成と同じである。



9-1-2 構成項目の内容

1) 模型設計費

模型設計費は次のような項目を内容とする。

(1) 模型設計直接費

① 設計予備作業および河道設計費

先の3-2に述べたような模型設置予定場所測量、模型付帯構造物設計、基線設計、縦横断指示書作成等に要する費用である。

② 付帯構造物設計費

3-2に述べた河道構造物模型値換算、測定設備設計等に要する費用である。

③ 交通費

交通費は、模型設置予定場所測量、基線設計等を実施するのに要する費用である。

④ 技術管理費

技術管理費は、模型設計業務の精度を確保するために行なり検測、精度管理表の作成および機械器具の検定費用である。

(2) 模型設計間接費

間接費は、直接費で積算された以外の費用とし、一般管理費等と合せて諸経費として計上する。一般管理費等は、一般管理費および利益より成る。

2) 模型製作費

模型製作費は、次の項目について計上する。

(1) 模型製作直接費

① 模型製作準備費

模型製作準備費は、3-3に述べた準備作業、模型製作予備作業等に要する費用がある。

② 河床製作費

3-3に述べた河床製作費に要する費用である。

③ 付帯構造物製作費

3-3に述べたような模型および河道付帯構造物製作、据付け等に要する費用である。

④ その他

その他としては、3-3に述べた模型改造および撤去作業等に要する費用がある。

(2) 模型製作間接費

① 共通仮設費

共通仮設費は、下記項目から必要のあるものについて計上する。

・準備費

準備費として積算する内容は、準備および跡片付けに要する費用、伐開、除根、除草、整地、段切り等に要する費用、および他に工事施工上必要な準備作業等に要する費用である。

・運搬費

運搬費は、建設機械器具の運搬等に要する費用である。

- 安全費

安全費は、安全施設および安全管理等に要する費用の他、工事施工上必要な安全対策等に要する費用である。

- 技術管理費

技術管理費は、品質管理のための試験、出来形管理のための測量および工程管理のための資料作成等に要する費用の他、技術管理上必要な資料の作成に要する費用である。

- ② 現場管理費

現場管理費は、現場労務者に係る労務管理費および工事を管理するために必要な共通仮設費以外の経費である。

- (3) 一般管理費等

一般管理費等は、一般管理費と付加利益から成る。一般管理費は、企業経営に要する費用である。

- 3) 模型実験費

模型実験費は、次の項目を内容とする。

- (1) 模型実験直接費

- ① 実験費

実験費は、実験予備作業、予備実験、実験条件設定、測定および資料整理等に要する費用である。

- ② 旅費交通費

旅費交通費は、模型実験を実施するのに要する交通費である。

- (2) 模型実験間接費

間接費は直接費で積算された以外の費用とし、一般的管理費等と合わせて諸経費として計上する。一般管理費等は、一般管理費および利益より成る。

- 4) 解析費

- (1) 解析直接費

- ① 直接人件費

直接人件費は、計画設計、実験計画、諸水理計算、実験条件設定計算、現象解析、報告書執筆等に要する費用である。

- ② 直接経費

直接経費は、旅費交通費、印刷製本費、機械損料等に要する費用である。

- (2) 解析間接費

- ① 諸経費

諸経費は、業務処理に必要な経費のうち直接費以外の業務管理費および企業経営に要する一般管理費等である。

- ② 技術経費

技術経費は、建設コンサルタントにおける平素の技術能力の高度化に要する経費等で、技術研究費および技術報酬から成る。

9-2 仕様書

仕様書は、模型製作や実験業務を遂行するうえで必要な、発注者と請負者間の諸手続き、業務の質的、技術的な事項や手法等を記載したものである。したがって、仕様書は、発注者側の意志を請負者に正確に伝え、必要とする出来形や目的等を満足する成果を得るための重要なものとなる。各工事や実験に共通する共通仕様書と当該工事あるいはその実験のみに必要な特殊事項を記載した特記仕様書がある。

9-2-1 共通仕様書

模型製作および実験業務の内容は多種多様にわたるが、各工事や業務で共通する事項も少なくない。これらの共通した一般事項（提出書類、施工管理、工事材料、模型製作および実験を行なう際の基本事項等）を記述したものが共通仕様書である。土木研究所において模型製作および実験業務に関した共通仕様書は次のようなものがある。

- ① 土木工事共通仕様書（昭和52年）
- ② 測量作業共通仕様書（昭和52年）
- ③ 河川水理模型実験、模型製作等共通仕様書（昭和57年）

9-2-2 特記仕様書

模型製作および実験業務は、検討目的によって特殊な条件があり、共通仕様書の規定だけでは模型製作や実験を実施するうえで必要な事項を表わすことはできない。このためその工事や業務で必要な特有の事項、および共通仕様書にない事項、あるいは適用できない事項などについて特記仕様書で定める。なお、特記仕様書が共通仕様書と重複している条項は、特記仕様書が優先するものとする。

特記仕様書に記載される事項は次のようなものである。

- ① 特殊な施工方法、および特殊な材料の規格に関すること。
- ② 模型設計、製作等に関する基本諸元
- ③ 実験条件とケース、実験方法、検討項目、測定項目等
- ④ 現地調査の内容、現地資料の解析内容
- ⑤ 実験資料の解析内容、項目等
- ⑥ 工期

9-3 施工および業務計画書

河川水理模型実験、模型製作等共通仕様書に基づく提出書類のうち、模型製作等には施工計画書、実験業務においては、業務計画書を提出する必要がある。これらは業務着手前に監督職員に提出して必ず承認を得なければならない。なお、施工および業務計画書等は内容や実施工程表に変更が生じ、その内容が重要な場合には、その都度変更計画書、あるいは変更実施工程表を提出する。記載事項は次のようなものである。

(1) 施工計画書（模型設計，製作および改造等）

- 模型設計，製作，改造等の概要
- 模型設計，製作，改造等の方法
- 実施工程表
- 組織表
- 主要機械
- 主要資材
- 施工方法
- 施工管理
- 安全管理
- その他

(2) 業務計画書（水理模型実験および解析等）

- 模型実験の概要
- 模型実験の方法，実験ケースと実験条件
- 測定位置，範囲および測定方法
- 検討項目と解析方針
- 実施工程表
- 組織表
- 実験使用資材および測定機器
- その他

9-4 検 査

9-4-1 検査事項と必要書類

水理模型実験および模型製作等の請負契約において，契約履行の確保という意味からこれらの検査が義務づけられている。すなわち検査は水理模型実験および模型製作等に関する業務において，その目的物あるいは成果品の引渡しの際，これらの出来形と品質，成果等が契約書，設計図，仕様書に合致しているかどうかを確認によって可否を判定することである。

検査に必要な技術的事項は次のとおりである。

- ① 水理模型実験および模型製作等に関する業務の実施状況の検査
- ② 模型実験の検討内容と実験ケース，測定項目，明確となった主な事項等の検査
- ③ 模型製作の出来形および品質の検査
- ④ 出来形部分の数量の確認

検査に必要な関係図書は次のとおりである。なお，このうち実験業務に関しては①～④および⑥が必要であり，模型製作のみの場合は⑤を除いたものが必要となる。

- ① 契約書
- ② 数量内訳書（変更を含む），図面

- ③ 仕様書
- ④ 現場説明書および現場説明に対する質問回答書
- ⑤ 請負代金内訳書（必要な場合）
- ⑥ 施工及び業務計画書（実施工程表）
- ⑦ 打合せ書
- ⑧ 実験成果報告書
- ⑨ 材料検査票
- ⑩ 工事報告
- ⑪ 規格値および施工管理基準による資料
- ⑫ 工事および実験記録写真，その他
- ⑬ 出来形数量計算書

9-4-2 検査の要点

検査の実務としては通常，次のような書類検査と実地検査とに分けて行なわれる。ただし，水理模型実験業務においては，通常書類検査のみであり，この場合下記の(1)の①～②，⑥～⑦が対象となり，模型製作においては②を除いたものが対象となる。

(1) 書類検査

① 施工および業務計画書（実施工程表）

水理模型実験および模型製作等に関する業務が，実施工程表や施工計画書，あるいは業務計画書に従い実施されているかどうかを確認する。

② 実験成果報告書

実験内容とそれらの測定および測定資料整理，解析等が仕様書に基づいて実施されているか，さらに実験目的を満足する成果が得られているかを確認する。

③ 品質管理資料

模型製作工事の過程において，品質の管理，試験内容について十分管理されているかどうか，試験数値が規格値合格判定値を満足しているかどうかを品質管理表によって確認する。

④ 出来形関係図書

出来形図（中間または完成）と出来形数量計算書をチェックする。つぎに出来形管理表による測定基準に基づいて測定された寸法について，また出来形数量と契約数量とを対比して過不足の程度をチェックする。

⑤ 数量検査を必要とする工事材料

材料検査票，施工検査データ，写真などによって確認する。

⑥ 工事報告と工事打合せ書および業務打合せ書

業務の実施上やむを得ず生じた内容の変更，これに伴う工程の変更，工事および業務打合せ書の内容，ならびに指示書などについて適切な処置がとられているかどうかを確認する。

⑦ 安全管理状況

業務実施中の事故の有無，安全管理のためにとられた具体的な手段，またはその処理状況を確認

する。

⑧ 工事記録および実験記録写真

記録写真により、検査時に測定を行えないような部分の出来形寸法、および品質について適正に施工されているか、あるいは実験が適正に行なわれているかを確認する。

(2) 実地検査

① 品質検査

視察と単純な判断方法等によって適正な品質であるかどうかを確認する。

② 出来形検査

原則として書類上確認した出来形寸法が現地と一致しているかどうかを検測し、合格判定値または規格値を満足しているかどうかを確認する。

(3) 合否の判定

書類および実地検査の結果、設計図書、仕様書に適合した模型あるいは実験成果報告書ができているかどうかの合否を判定し、とりあえず現場代理人あるいは主任技術者に口頭で合否および手直しなどを通知する。なお不合格の際の処置については、その状況に応じ適正に処理するものとする。

第10章 移動床の相似則検討のための基礎資料

10-1 均一砂を持つ移動床流れの抵抗と流砂量

10-1-1 河床波の分類とその特徴について

本章においては、移動床の模型縮尺、時間縮尺あるいは模型の移動床用河床材料の選定を行なう場合に必要な相似則に関する基礎資料を示した。

移動床模型では、水理条件と粒径に応じて河床面に各種の河床波が発生し、これが流れの抵抗係数や流砂量に大きな影響を与える。それゆえ第2章に述べたように河床面の相似性にも種々やっかいな問題が発生する。ここでは河床形態の分類と、各種の河床波の形態の特徴について山本の研究資料⁹⁾より抜粋したものを以下に記す。

河床波の形態区分の方法は、本来河床波を発生させる要因の違いの視点から区分されるべきであるが、現在種々の河床波の成因が明確になっておらず、各種の河床波をそのスケールと形態の差によって区分せざるを得ない状態である。

ここでは、基本的には土木学会移動床流れと河床形状委員会の定義²²⁾した河床波の分類と名称を使用するが、砂漣と砂堆の区分だけは別の方法によった。水理委員会の定義に多少の修正を加えた河床波の形態と名称は以下のごとくである。

(1) 砂漣 (Ripples)

砂漣は河床面近傍の物理量によって支配される最も小規模な河床形態であって、その波長・波高は粒径と密接な関係があり、水深が砂漣のスケールより充分に大きい場合は平均水深のような物理量にはほとんど影響を受けない。砂漣の平面形状には、三次元的に不規則なものから頂と谷が流れと直角方向に一直線に並んだ比較的規則的なものまで各種ある。また縦断形状には、上流側斜面勾配が緩やかで下流側斜面勾配がほぼ水中安息角をなす三角形状から比較的対称的な形状まで各種ある。砂漣は平均流速に比して遅い速度で下流に伝播する。なお砂漣はその特性からして閉管路でも発生する。

いっぽう、模型実験においては、河床材料粒径が0.6 mm以上、または $u \cdot d / \nu$ が20以上であれば現地と模型で生ずる小規模河床形態はほぼ相似となることを述べた。しかし、動粘性係数 ν は、水温によって変化するため、夏季に $u \cdot d / \nu$ が20以上であっても冬季には20以下となり、模型上にこの砂漣が発生して河床形態の相似性が得られない場合があるので注意が必要である。

(2) 砂堆 (Dunes)

砂堆は、砂漣よりも規模が大きく、その波長・波高が水深と密接な関係があり、河床波と逆位相の水面波を伴う河床形態である。砂堆は、砂漣に比べて一般に不規則であり、その縦断形状は、上流側斜面勾配が緩やかで、下流側斜面勾配が砂礫の水中安息角にほぼ等しい三角形状をなす。砂堆は平均流速に比して遅い速度で下流に伝播する。なお砂堆は閉管路でも発生する。

(3) 反砂堆 (Antidunes)

反砂堆は、水面波(重力波)と強い相互干渉作用を持って形成され、河床波と同位相の水面波を伴う河床状態である。反砂堆には水流と砂れきの特性に応じて上流へ移動、下流へ移動、移動しないの三通

りの場合がある。反砂堆は一般に非定常性が強く、河床波の発達と衰退を繰り返す。反砂堆の縦断形状には三角形から正弦波形状までいろいろあり、後者は前者に比し大きなフルード数の時形成される。シャープな頂を持った三角形の反砂堆は実験水路において観測されており、常に下流に移動する。反砂堆は、フルード数が大きくなると射流であるシュートと射流あるいは常流であるプールとを連結したような河床状態になるが、これを特にシュート・プールと呼んでいる。反砂堆は閉管路では発生しないと言われている。

(4) 平坦河床 (Flat Bed)

砂澍, 砂堆, 反砂堆及び砂州を伴わない平坦な河床形態である。

(5) 遷移河床 (Transition)

砂澍や砂堆と平坦河床との遷移領域における河床形態であって、砂澍や砂堆の部分と平坦河床の部分からなる。

(6) 砂州 (Bars)

砂州は、最も規模の大きい河床形態であって、その波長は水路幅あるいは水深と密接な関係がある。

砂州には湾曲部の凸岸などに見られる固定砂州 (Point Bars) や左右交互に周期的に現れる交互砂州 (Alternate bars), 川幅水深比の大きい時に現れるうろこ状砂州 (Multiple bars) などがある。

以上の河床の起伏を総称して河床波 (sand wave) と呼ぶ。また砂澍, 砂堆, 反砂堆の規模は砂州に比べて小さいので、前者を小規模河床形態、後者を中規模河床形態と言う。なお小規模河床形態と中規模河床形態は、ある水理量の範囲では共存可能である。これをまとめると図-10.1.1のごとくなる。

ところで砂澍と砂堆の河床形態はかなり似ており、前述の形態の特徴から区分しようとするとき

河床形態			形状・流れのパターン		移動方向	河床波の特性
			縦断図	平面図		
小規模河床形態	低水流領域	砂澍		直線状	下流	河床波の移動速度は、流水の速度よりも小さい。砂澍の波長は河床材料の粒径の約500~1,500倍である。
		砂堆		曲線状 三日月状 舌状	下流	河床波の上流側斜面は、通常勾配の急な下流側斜面に比べると緩やかに傾斜している。砂堆の波長は水深の約4~10倍である。
		遷移河床				発達の初期段階にある小さな砂澍と砂堆が平坦河床の間に広がっている。
	高水流領域	平坦河床				多量の流砂が平坦な河床上を流れている。
		反砂堆			上流 停止 下流	河床波と同位相の水面波と強い相互干渉をもつ河床波。
中規模河床形態	交互砂州				停止 下流	水流は水路内を曲がりくねって流れる。交互砂州の波長は水路幅の約5~16倍である。
	複列砂州				下流	-
	うろこ状砂州				下流	うろこ状砂州は B/H が非常に大きい領域で発生する。それは魚のうろこのように見える。

図-10.1.1 河床波の特徴と定義

とが多い。しかしながら砂澁と砂堆では、流砂量及び流れの抵抗と水理量の関係がかなり違うので、本論では流砂量と流れの抵抗に関する資料より、その資料が砂澁の特性を持つか、砂堆の特性を持つかによってその河床波を区分することにした。この方法によると Re_* が20以上であり、また波長も長いので従来なら砂堆と見なされるものが砂澁と定義されることがある。

10-1-2 流れの抵抗と河床形態

自由水面を持った移動床には、流れの水理量変化に応じて種々の河床波が発生する。この河床波の形および大きさは、流れの抵抗と密接な関係があり、移動床模型実験の相似条件にも大きな影響を与える。ここではこれらの特性を知り、現地と模型との相似性やその条件等の検討に資するため、山本によって調べられている中規模河床形態が生じない場合での小規模河床波と流れの抵抗との関係を以下に記す⁷⁾。図-10.1.2～図-10.1.8は、粒径0.02, 0.03, 0.05, 0.1 cmの移動床材料に対して流速係数 ϕ が τ_* , H/d の変化に対してどう変るかを河床形態が分かるように示したものである。ここで図中の実線の部分は実測資料を基にして描いたものであり、点線の部分は、実測資料が無い領域での推定線である。推定線は実測資料がある所の河床形状と ϕ の関係、および各河床波ごとの ϕ と τ_* , H/d の関係を詳細に分析し、そこで分かった経験的法則性を資料の無い所にまで適用して描いたものである。

図の読み方を図-10.1.5, 10.1.6の $d=0.05$ cmの ϕ と τ_* , H/d の関係図を用いて説明する。図-10.1.5の同一のシンボルが付された線、および図-10.1.6の数字が付された線は、相対水深 H/d がある値に固定された時、 τ_* の変化によって ϕ がどう変るかを示したものである。また、図中No Motion, Ripples, Dunes, Flat, Antidunes と記されているのは、その付近の曲線群の河床形態を示すものである。これをより明確にするために、例を使って説明する。

図-10.1.5に示す $d=0.05$ cm, $H/d=125$ の場合は、 τ_* が0.04以下では τ_* が移動限界無次元掃流力より小さいため、河床は河床材料が移動しない平坦河床のままの状態で $\phi=16.2$ 位であるが、掃流力が大きくなると砂堆が発生し始め、抵抗が大きくなるため ϕ の値が徐々に小さくなる。さらに τ_* が大きくなり τ_* が0.45程度になると砂堆は消滅し始め遷移河床となり、ついには平坦河床となって ϕ は11程度から急に16程度に上昇する。さらに τ_* が大きくなると表面波が発生し始め、河床は反砂堆となり抵抗が増し ϕ が減少することを示したものである。なお τ_* が0.1～0.3では砂堆の変わりに砂澁が発生することがあり、この場合の ϕ は9程度となる(砂澁は H/d が小さい場合には発生しないが、この程度の値となる砂澁にもなりうるのである。より H/d が大きいには、逆に τ_* が0.5以下では砂澁は発生しない)。

図-10.1.6に示す $d=0.05$ cm, $H/d=1,000$ の場合は、 τ_* が0.04以下では砂移動無しの平坦河床の状態であるが、0.04を越えるとこの場合は相対水深 H/d が大きいので砂澁が生じる。 τ_* が0.55程度になると砂澁は消滅し始め、砂堆が発生し、 ϕ は11程度から8程度に小さくなる。さらに τ_* が大きくなり $\tau_*=1.2$ 程度になると砂堆は消滅し始め、平坦河床へ移行し、 $\phi=8$ から18程度に急増する。さらに τ_* が大きくなれば反砂堆となり ϕ は減少していく。

同一河床形態の ϕ と τ_* の関係は、 H/d によって異なるが、同じような傾きを持った関係線であり、逆に同じような傾きを持った関係線は、同一の河床形態となっている。なお各河床形態の発生領域をより直截に分かるように、 $d=0.05$ cmの場合の領域区分図を τ_*-H/d 平面上に示せば、図-10.1.7のご

とくである。 H/d が80～500で τ_* が0.04～0.4の範囲では、砂堆と砂澁のどちらの河床波も生じる可能性があることが良く示されている。この領域区分図は、粒径が異なると、各河床波の発生領域が多少変化するので多少違ったものとなるが、基本的には、同様の区分図となる。

ところで河床形態の発生領域区分図には、 F_r-H/d 平面で表したもの、 $I/s-H/d$ 平面で表したもの等多数あるが、 ϕ と τ_* 、 H/d の関係が分かれば、図-10.1.9は他の平面に変換しうる。なお、 F_r はフルード数で、 $F_r = V_m / \sqrt{gH}$ である。

参考のため図-10.1.9には、芦田、道上²³⁾による τ_*-H/d 平面での領域区分図は一点鎖線で示した。UはUpper Regime、Tは遷移河川、LはLower Regimeである。ただし F_r が0.8以上をUpper Regimeとしている。

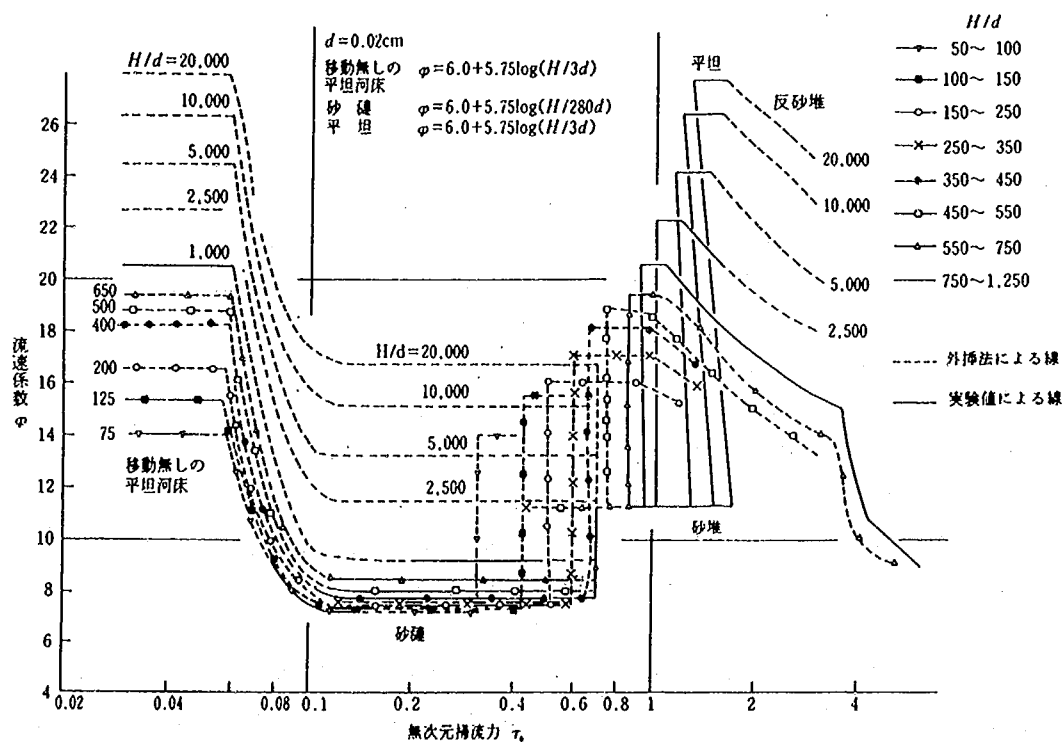


図-10.1.2 ϕ と τ_* の関係 ($d=0.02\text{ cm}$)

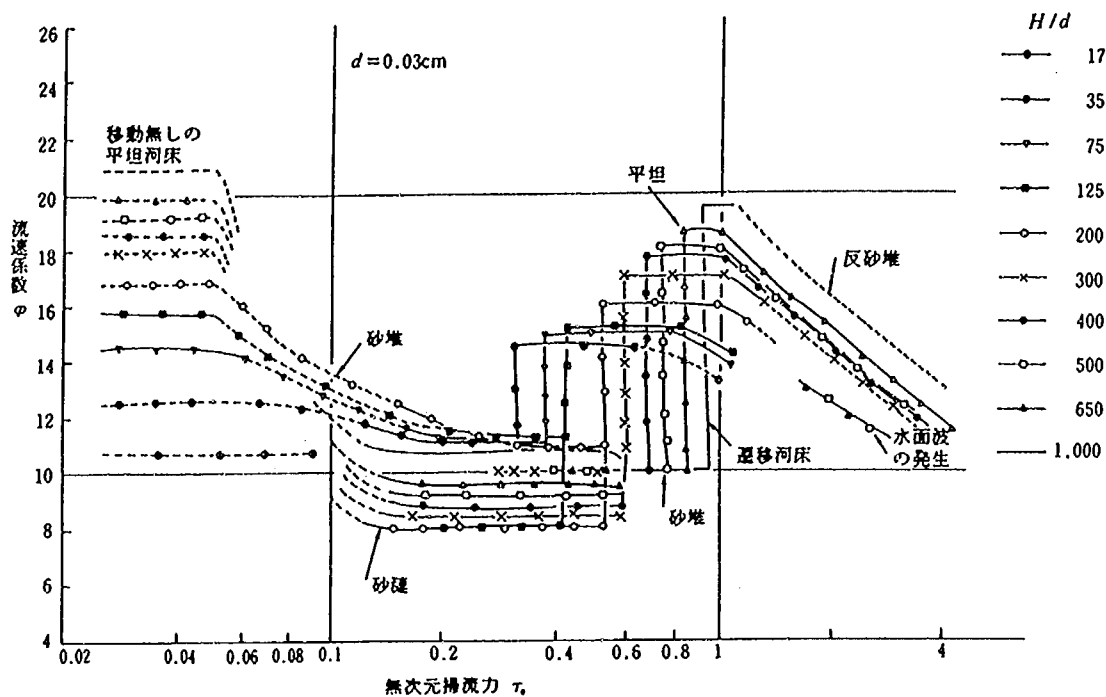


図-10.1.3 ϕ と τ_* の関係 ($d = 0.03 \text{ cm}$, $H/d = 10 \sim 1000$ の場合)

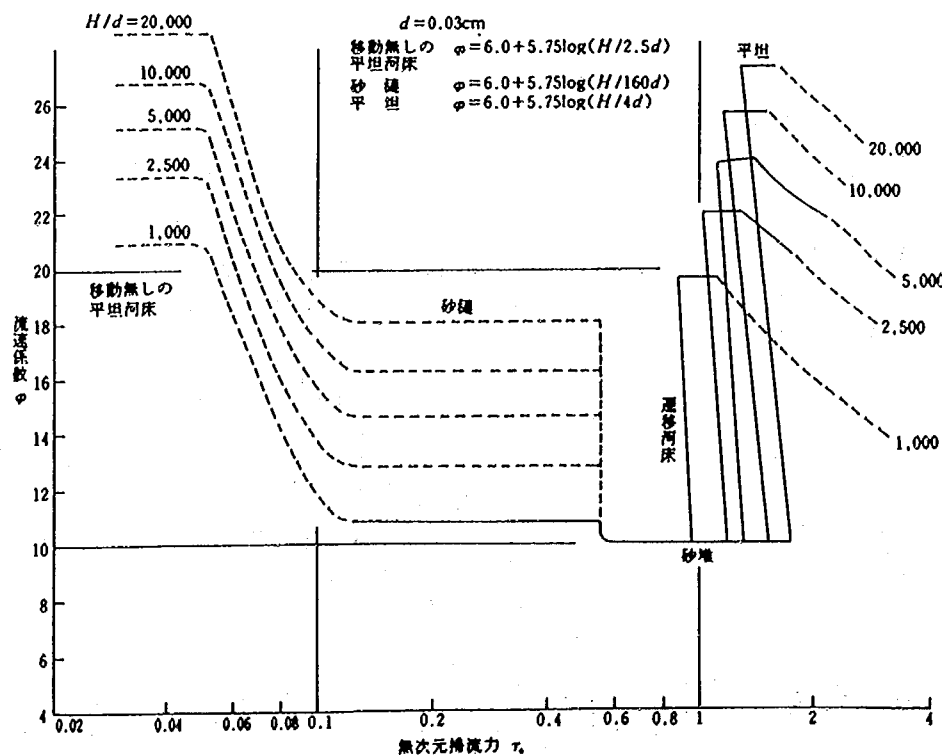
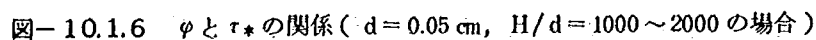
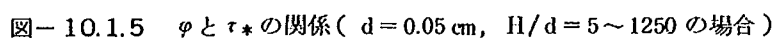


図-10.1.4 ϕ と τ_* の関係 ($d = 0.03 \text{ cm}$, $H/d = 1000 \sim 20,000$ の場合)



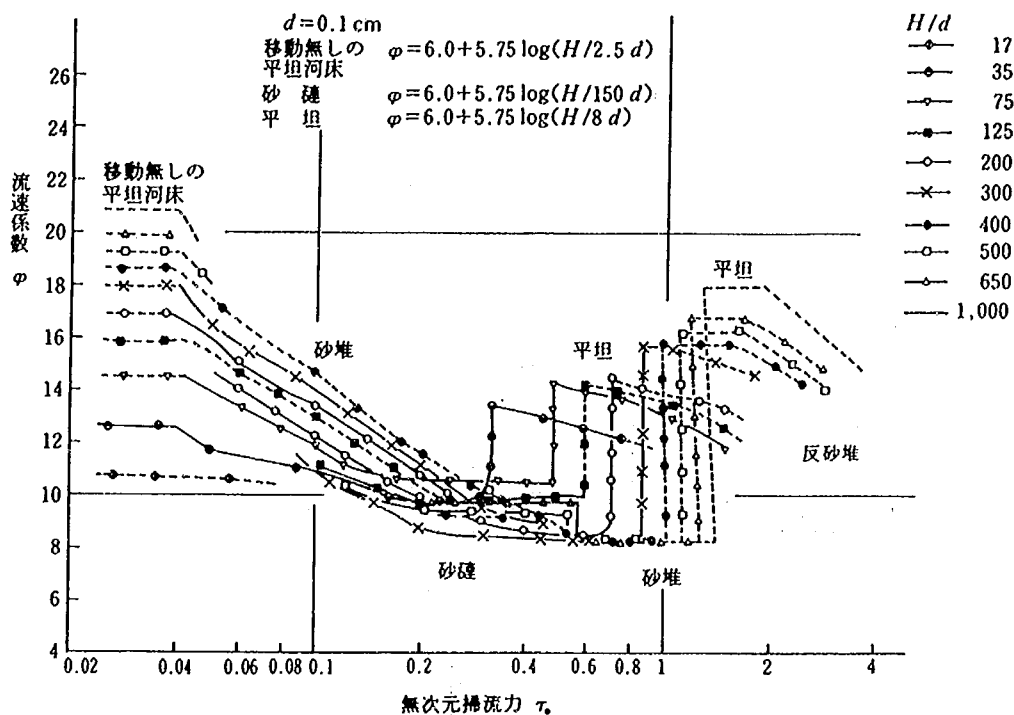


図-10.1.7 φ と τ_* の関係 ($d = 0.1 \text{ cm}$, $H/d = 15 \sim 1000$ の場合)

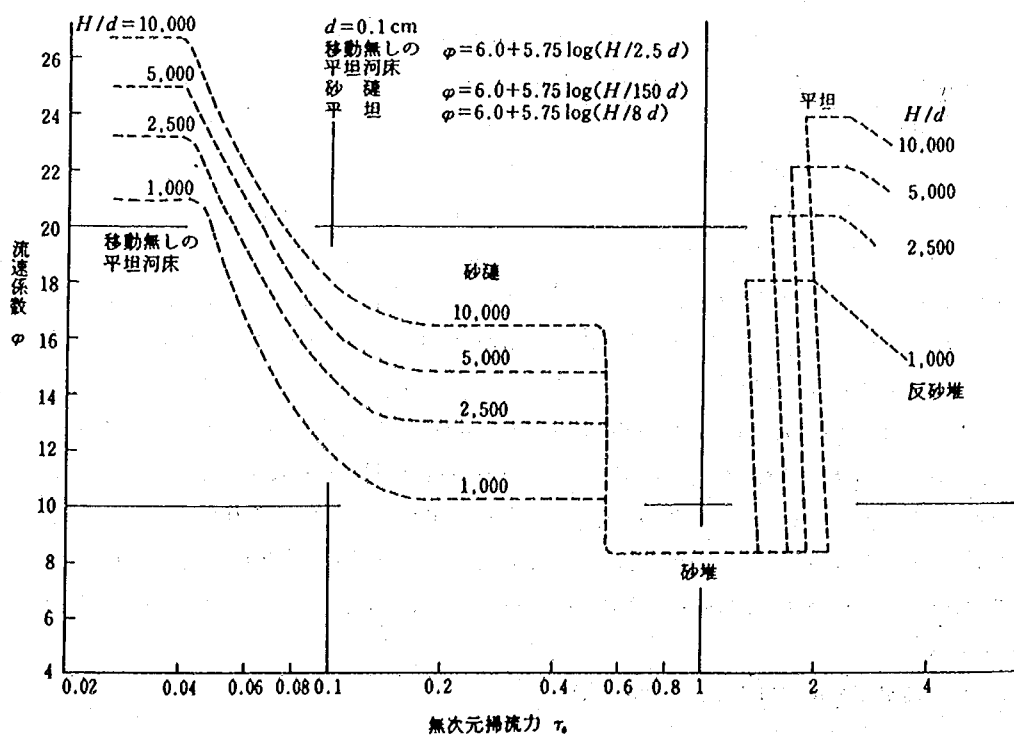


図-10.1.8 φ と τ_* の関係 ($d = 0.1 \text{ cm}$, $H/d = 1000 \sim 10000$ の場合)

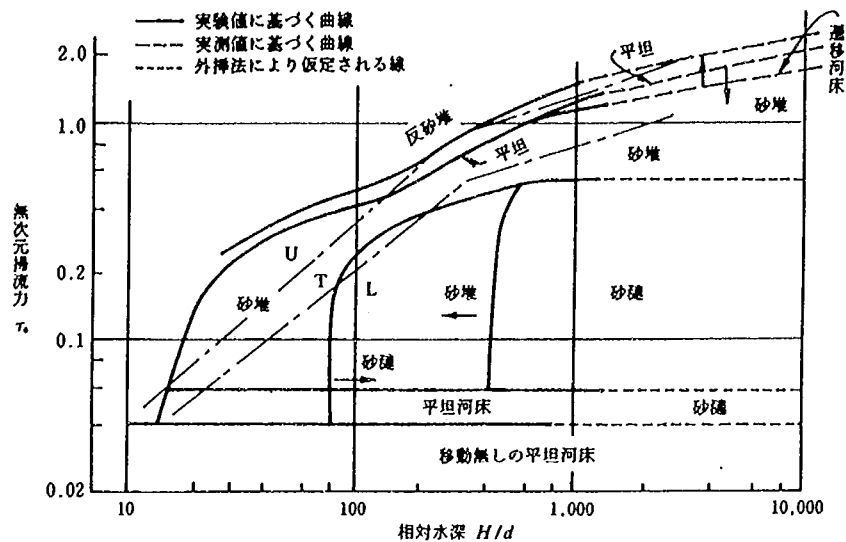


図- 10.1.9 小規模河床波の領域区分, $d = 0.05 \text{ cm}$ の場合

10-1-3 流砂量と河床形態

河床形態は流れの抵抗と密接な関係にあるのみならず流砂量とも強い関係がある。ここではこれらの関係について山本の研究結果を以下に述べる⁹⁾。なお、ここで得られる流砂量から河床変動に対する模型の時間縮尺を求めることが可能であり、このような河床形態との関係を考慮することによって、相似性のより得られる時間縮尺が決定できるものと考えられる。

図- 10.1.10 ~ 図- 10.1.14 は、粒径 $0.02, 0.03, 0.05, 0.1, 1.0 \text{ cm}$ の移動床の無次元流砂量 $q_s / u_* d$ が τ_* , H/d の変化に対してどう変るかを、河床形態が分かるように図示したものである。ここで、図中の実線の部分は、実験室資料を基にして描いたものであり、点線の部分は、実験室資料の無い領域での推定線である。推定線は、実験室資料がある所の河床形態と $q_s / u_* d$ の関係を分析し、そこで分かった経験的事実を資料の無い所まで広げ、また粒径が異なっても同一の τ_* , H/d で河床形態が同じものであれば、 $q_s / u_* d$ と τ_* , H/d の関係がほぼ類似のものになるだろうとして描いたものである。ただし、 H/d が 5000 以上の場合の推定線は Einstein の流砂量理論を援用して描いた。

図中の同一シンボルを付した線は、相対水深をある値に固定した時、 τ_* の変化によって、 $q_s / u_* d$ がどう変るかを示したものである。河床形態が異なると土砂の運動形態が異なり、 $q_s / u_* d$ と τ_* , H/d の関係が変るため、明確に曲線群が識別しえ、曲線の勾配がほぼ同じである曲線群は、同じ河床形態となっている。

各河床形態と流砂量の関係は次の如くである。

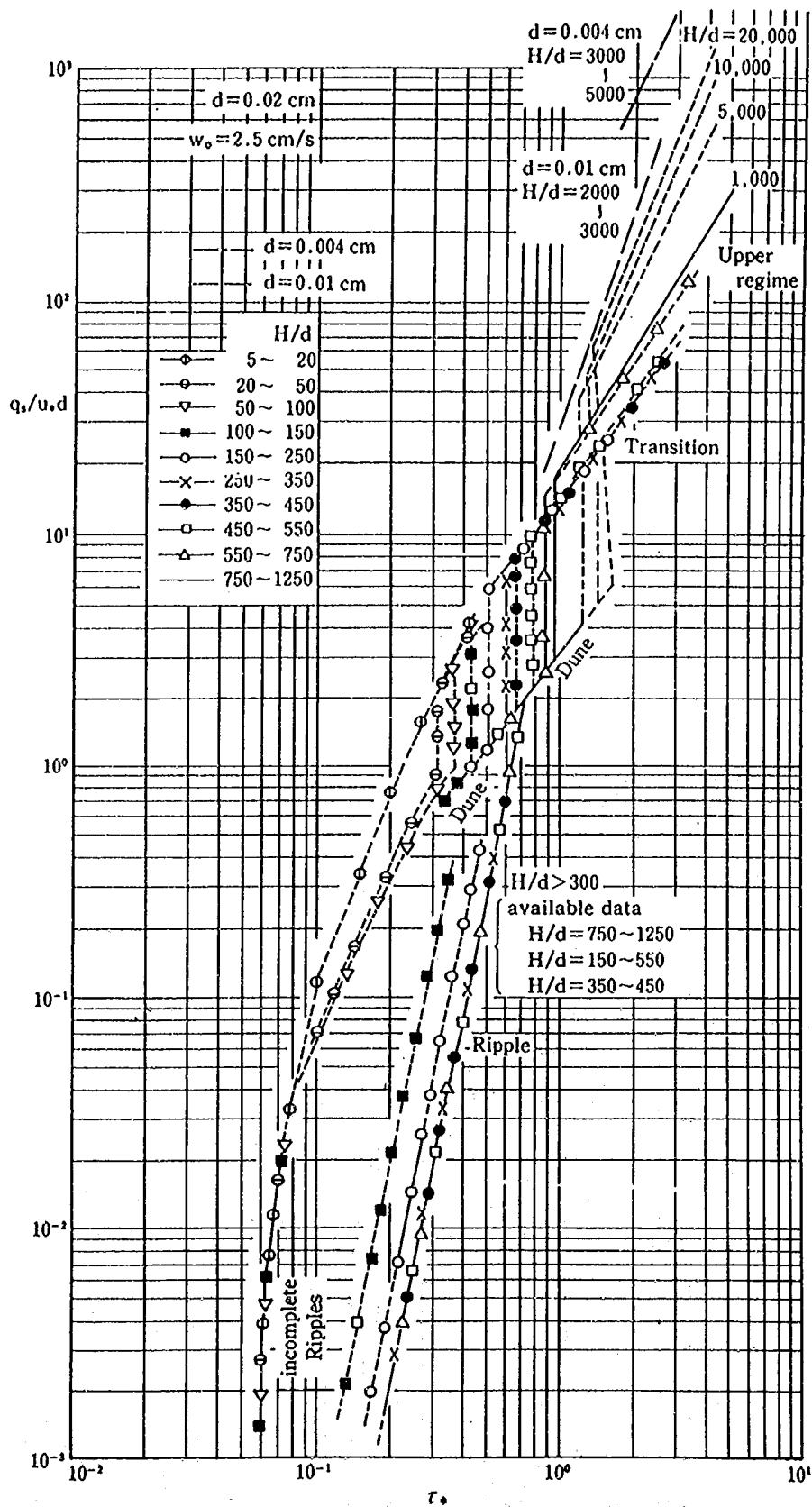


図-10.1.10 $q_s / u_* d$ v. s. τ_* , $d = 0.02 \text{ cm}$ の場合

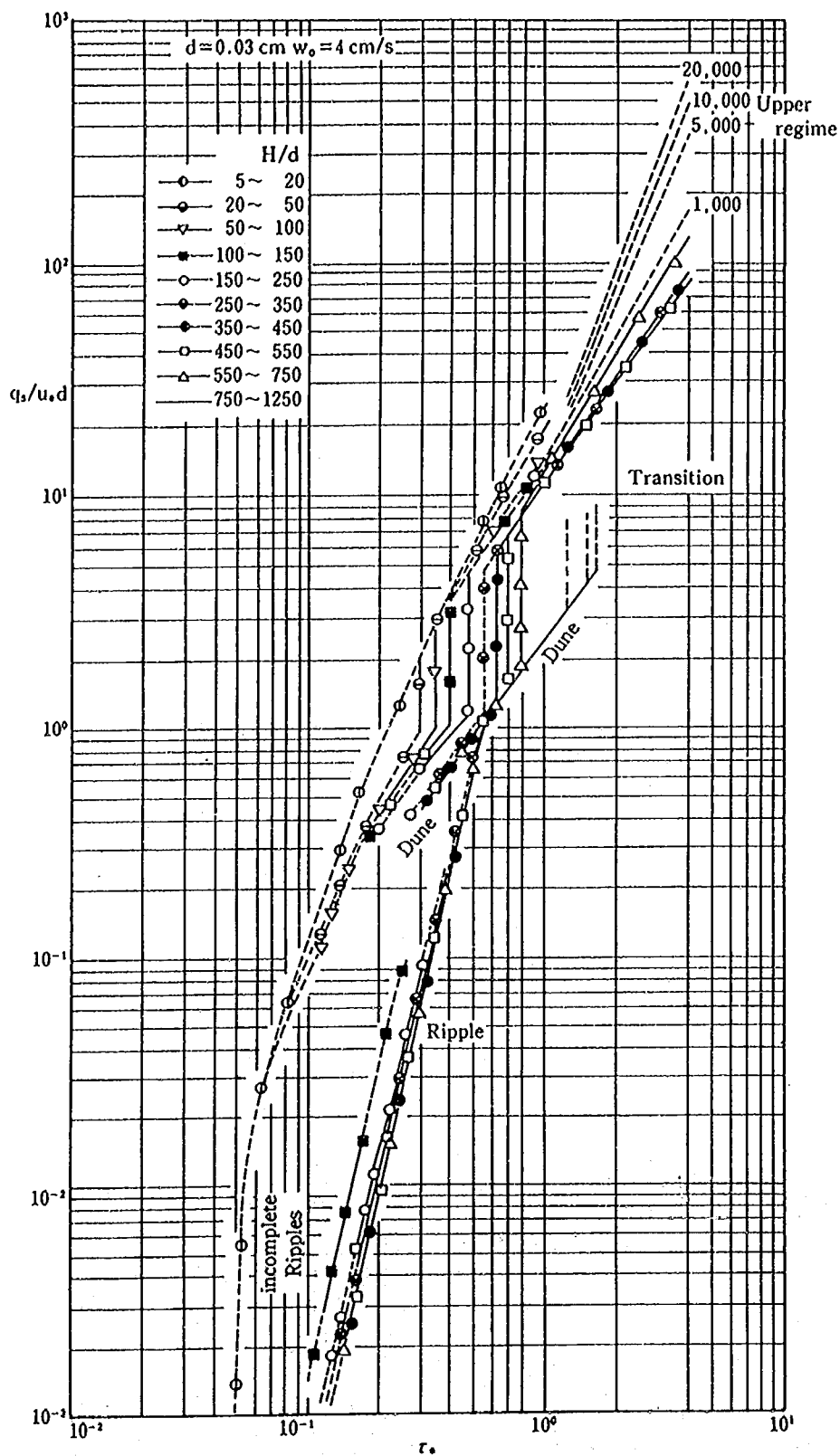


図-10.1.11 q_s/u_*d v. s. τ_* , $d = 0.03 \text{ cm}$ の場合

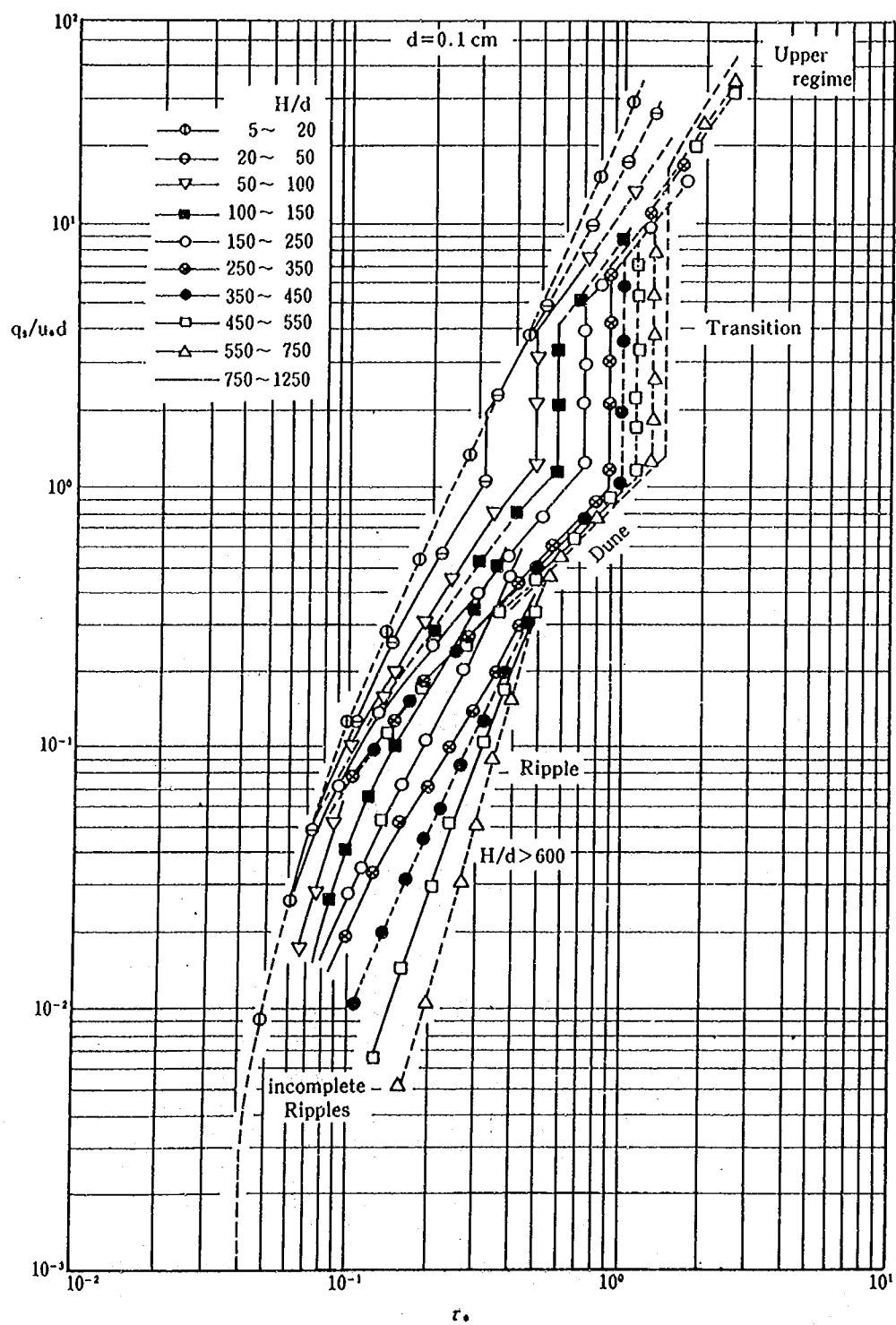


図-10.1.13 $q_s / u_* d$ v. s. τ_* , $d = 0.1$ cmの場合

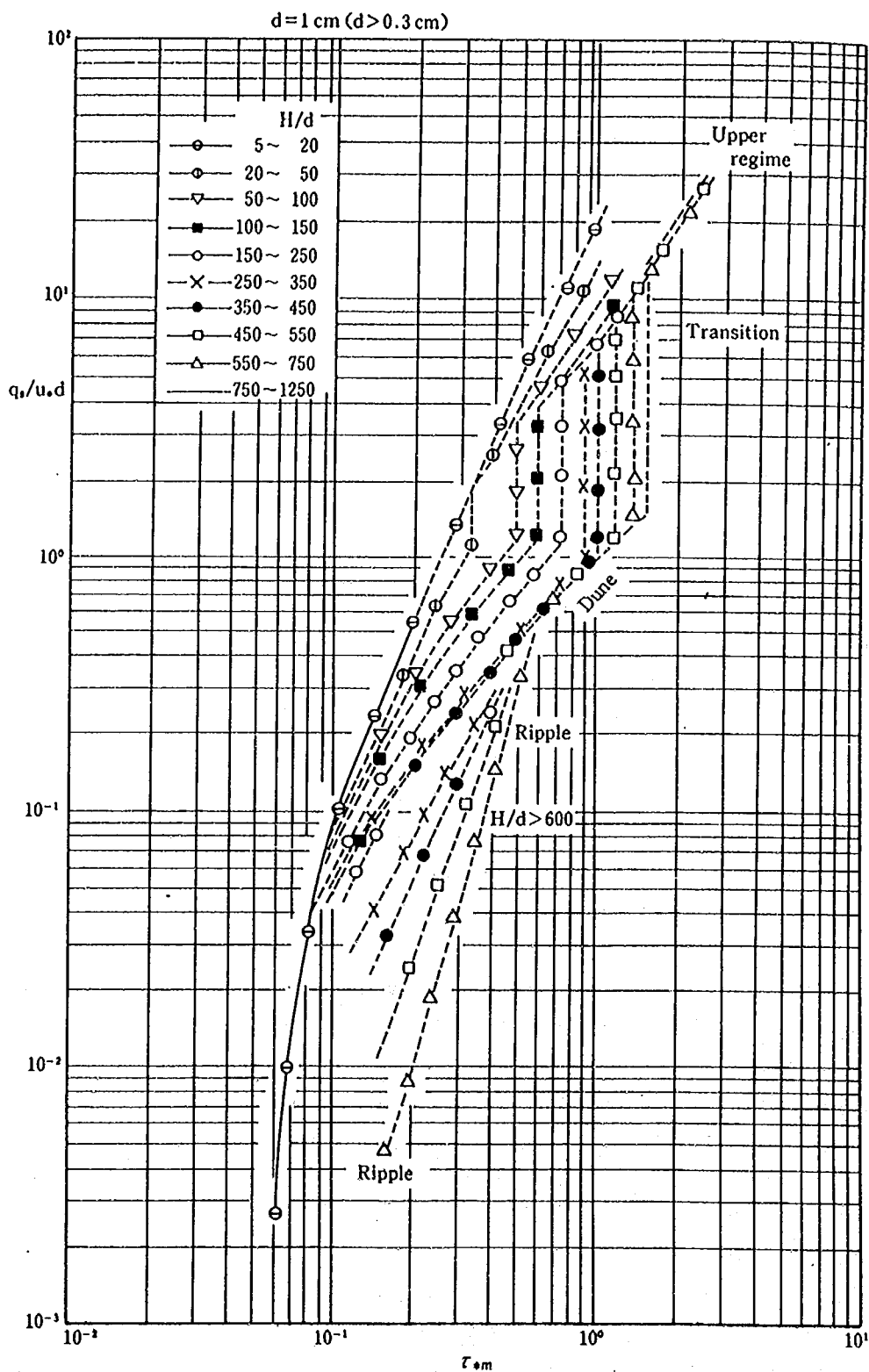


図-10.1.14 $q_s / u_* d$ v. s. τ_* , $d = 1 \text{ cm } (d > 0.3 \text{ cm})$ の場合

(1) 砂漣 (Ripples)

H/d がある程度大きいと、ある特定の粒径に対して十分に発達した砂漣 H_s/d はほぼ一定値となり、砂漣の相当粗度 K_s は $K_s = C_2 d$ となる (H_s : 砂漣の波高, C_2 : 定数)。つまり、河床近くの流速や乱れの強さは、水深によっては変化せず、 u_* と平均河床面からの高さ y のみに依存することになる。このことは、砂漣では流砂は河床近くのみで動くので、ある特定の粒径に対する無次元流砂量 q_s/u_*d は τ_* のみに依存し、 H/d に影響を受けないことが推察される。事実図-10.1.10～図-10.1.13 に示す如く

$d = 0.02 \text{ cm}$ 及び 0.03 cm に対して $H/d = 300$

$d = 0.05 \text{ cm}$ に対して $H/d = 450$

$d = 0.1 \text{ cm}$ に対して $H/d = 600$

以上であれば、 q_s/u_*d は τ_* のみの関数となる。なお、 $d = 0.1 \text{ cm}$ 場合には H/d が 600 を越える実験室資料が無く推定値であるが、米国 East Fork 川の掃流砂観測資料 ($d = 0.1 \sim 0.2 \text{ cm}$) を整理解析した結果は、図-10.1.13 の H/d が 600 以上の q_s/u_*d と τ_* の関係線に近い値となっており、この推定値は十分に耐えるものと考えている。

この H/d が大きい場合の砂漣河床の流砂量式は、資料が十分にある 0.02 , 0.03 , 0.05 cm に対して示せば以下の如くである。

$$d = 0.02 \text{ cm} \text{ に対して } q_s/u_*d = 11.4 \tau_*^{5.4}$$

$$d = 0.03 \text{ cm} \text{ に対して } q_s/u_*d = 14.6 \tau_*^{4.5}$$

$$d = 0.05 \text{ cm} \text{ に対して } q_s/u_*d = 7.99 \tau_*^{4.25}$$

(10-1)

H/d が小さい場合は、砂漣の形状が水深の影響を受けるので q_s/u_*d は τ_* , H/d の両方の影響を受けることになる。この場合 d が 0.05 cm 以下では、 H/d が前述した値より大きな場合の q_s/u_*d と τ_* の関係線と平行な関係線となり、その傾きは H/d が大きな場合とほぼ等しいが、 d が 0.1 cm になると傾きが緩くなる。なお d が 0.06 cm 以上になると Re_* が 10 以上となって砂漣が発生しないと言われるが、図-10.1.13 に示すごとく流砂量から見ると $d = 0.1 \text{ cm}$ の場合でも、 d が 0.06 cm 以下の砂漣の場合の q_s/u_*d の τ_* , H/d の関係と似たような関係となっている。今まで砂堆として分類されてきたもののうちには、砂漣と見なすべきものが含まれていると思われる。 $d = 0.1 \text{ cm}$ の砂漣の波長は、 L_s/d が 1000 程度であるので 1 m にも達する。これが砂漣と見なされなかった大きな理由である。 d が 0.06 cm 以上の砂漣と砂堆の区分は形態だけで明確に分類しえず、 ϕ および q_s/u_*d の値から総合的に判断する必要がある。

τ_* が $0.06 \sim 0.15$ で q_s/u_*d が 10^{-2} 以下の場合の砂漣河床の q_s/u_*d は、平坦河床より実験を行った場合、砂漣が十分に発達しないので、 τ_* が大きく砂漣が十分に発達した q_s/u_*d より大きくなることがある。この範囲の q_s/u_*d は砂漣の発達過程の履歴の影響を受け、明確に流砂量と τ_* の関係を求められない。図-10.1.10～図-10.1.13 において incomplete ripples と示した領域がそれに当たる。

(2) 砂堆 (Dunes)

τ_* が 0.6 より大きく、また H/d がある程度大きい場合 ($H/d > 300$)、 q_s/u_*d と τ_* の関係は、 H/d が大きくなると同一 τ_* に対して q_s/u_*d が多少小さくなるが、ほとんど H/d の影響を受けていない。このことは底質材料を有効に動かす掃流力は、表面まさつ力によるものと考えられるので、砂堆

による形状損失と表面まざつ損失の比が水深によってあまり変わらないと解釈することができる。

H/d が小さい場合 ($H/d < 300$) には, H/d が大きな方が同一 τ_* に対して q_s/u_*d は小さい値を持つ。これは H/d が小さいほど表面まざつ損失の割合が全損失に占める割合が大きく, H/d が小さい方が有効掃流力が大きいことによると考えられる。

$d = 0.05 \text{ cm}$ の場合に顕著に見られる現象であるが, H/d が 200 前後で q_s/u_*d と τ_* の関係が多少変わり, H/d がこの値より小さい場合と大きい場合では曲線群の位置が多少ずれている。ちょうど $H/d = 150 \sim 250$ の場合は, どちらの曲線群の中にも入れる。前述の図-10.1.11 に示されるように, $H/d = 200$ 前後の ϕ と τ_* の関係線が 2 本有り, ϕ の値の大きな場合が, 図-10.1.12 における q_s/u_*d と τ_* の関係において H/d が小さい曲線群 (q_s/u_*d の値が大きな曲線群) に対応している。このことは $H/d = 200$ 前後で砂堆の形状が多少性質の異なったものとなっていると思われる。

(3) 遷移河床 (Transition)

遷移河床における q_s/u_*d の値は, τ_* , H/d が分かっているとしても, 河床形態が砂堆から平坦河床まで変化しえるので予測することはできない。予測するためには, 河床形態に関する情報量, つまり ϕ の値が必要である。

ただし, たとえ ϕ の値が分かっているとしても, 流砂量に関する実測資料の不足のため, いかに q_s/u_*d を評価したら良いのかは, 現在の所明確にし得ていない。

(4) 平坦河床及び反砂堆 (Upper Regime)

平坦河床および反砂堆での流砂量は, 浮遊砂の占める割合が多いのでこれを考慮した考察が必要である。

H/d が 1000 以下の場合, 実験室資料がある場合は資料を基に, 無い場合は 1000 以下での平坦河床の流砂量および粒径の異なる場合の q_s/u_*d と τ_* の関係を基に類推によって q_s/u_*d と τ_* , H/d の関係図を描いたが, H/d が 1500 以上の実験室資料が少ないので, H/d が大きな場合は, q_s/u_*d と τ_* , H/d の関係を以下の如く評価することにした。

Einstein の流砂量理論によれば, 全流砂量 q_s は次式に示される。

$$q_s/u_*d = 23.2 Ca/\rho_s \cdot [P_r I_1 + I_2 + 1] \quad (10-2)$$

ここで u_*' は Einstein によって定義された有効掃流力に対応するまざつ速度, Ca は河床から $2d$ 離れた所の土砂濃度 (重量) である。 I_1 , I_2 , P_r は以下の如くである。

$$I_1(\eta_0 \cdot \beta) = 0.216 \frac{\eta^\beta - 1}{(1 - \eta_0)^\beta} \int_{\eta_0}^1 \frac{(1 - \eta)^\beta}{\eta} d\eta \quad (10-3)$$

$$I_2(\eta_0 \cdot \beta) = 0.216 \frac{\eta^\beta - 1}{(1 - \eta_0)^\beta} \int_{\eta_0}^1 \frac{(1 - \eta)^\beta}{\eta} \ln \eta d\eta \quad (10-4)$$

$$P_r = 2.3 \log \frac{30.2 \times H}{d} \quad (10-5)$$

$$\beta = \frac{w_0}{0.4 u_*'} \quad (10-6)$$

ここで $\eta_0 = 2d/H$, $\eta = z/H$, X は $u_*'d/11.6\nu$ の関数, w_0 は底質材料の沈降速度, z は河床か

ら垂直方向の距離である。

もし河床形態が平坦河床とすると、ある特定の粒径に対しては、河床近くの流速分布、乱れの特徴は H/d の影響は少なく τ_* のみに関係すると考えられる。従って $u'_* = u_*$ と仮定し、(10-2)~(10-6)式を使って、 $H/d \approx 1,000$ の場合の q_s/u_*d と τ_* の関係線より、 Ca を求め、この Ca は H/d が大きくても、 τ_* が同じであるなら同じ値を持つと仮定して q_s/u_*d を (10-2)~(10-6)式より評価した。なお沈降速度は Rouse による水温 20°C の値とした。評価された q_s/u_*d は形状損失や浮遊砂によるカルマン常数の変化等を考慮していないので、精度良く流砂量を評価しているといえないが、河川工学上の種々の判断に役立つものと考ええる。

なお図-10.1.12に見るごとく H/d が300以下では、同一 τ_* に対して H/d が大きくなるほど q_s/u_*d が小さくなるが、これ以上は H/d が大きくなるほど逆に q_s/u_*d が大きくなる。 H/d が小さい場合は、浮遊砂濃度が高く、これによって流速分布形の変化や土砂含みの流体の密度の増加等によって流砂量が多くなるものと思われる。

10-2 軽量河床材料の流送特性

(1) 材料の特性

模型実験に現在用いられている軽量河床材料は、石炭粉とスラッジライトである。石炭粉は、従来から砂河川や河口域の水理現象の検討において使用されてきたもので、一般には濾過剤として使用されている。材料の形状は砂のような粒子状ではなく、薄い剥片状であり、種々の粒径に調整が可能である。いっぽう、スラッジライトは、下水汚泥の焼却灰を $1100^\circ\text{C} \sim 1500^\circ\text{C}$ の高温にさらし半熔融したものを空冷却したものである。粒径は $0.3\text{ mm} \sim 5.0\text{ mm}$ 程度までを有し、一般には軽量骨材として利用されている。材料の形状はほぼ球形である。これらの材料の各使用粒径の特性一覧を以下に示す。

表-10.2.1 軽量材料の諸特性量

諸 元	石炭粉 A	石炭粉 B	石炭粉 C	スラッジ ライト A	スラッジ ライト B
粒 径: d (cm)	0.027	0.03	0.10	0.105	0.12
水中比重: s	0.50	0.58	0.48	0.8	0.8
沈降速度: W_0 (cm/sec)	1.11	1.25	4.16	10.2	12.0
水中安息角: θ (度)	33.0	30.0	33.0	31.3	31.3
空隙率: λ	0.45	0.45	0.47	0.47	0.47
形 状	剥片状			球	

※ 沈降速度測定時の水温は石炭粉 A, B が 20°C 前後、石炭粉 C, スラッジライト A, B が 25°C 前後である。

(2) 流送特性について

石炭粉およびスラッジライトの流送特性と河床形態等について、土木研究所で行なわれた実験結果⁸⁾
29) を用いて得られた結果を以下に示す³⁰⁾。石炭粉 A, B, C の流速係数 ϕ と無次元掃流力 τ_* の関係

を図-10.2.1に、無次元流砂量と無次元掃流力の関係を図-10.2.2に示す。また石炭粉と同様にスラッジライトの $\phi \sim \tau_*$ の関係および $q_s/u_*d \sim \tau_*$ の関係を示したのが図-10.2.3, 10.2.4である。これらの結果によると流速係数 ϕ は砂の場合とほぼ同一の傾向を示すのに対し、流砂量は砂の場合より約1.5～2倍程度大きくなる傾向となっている。

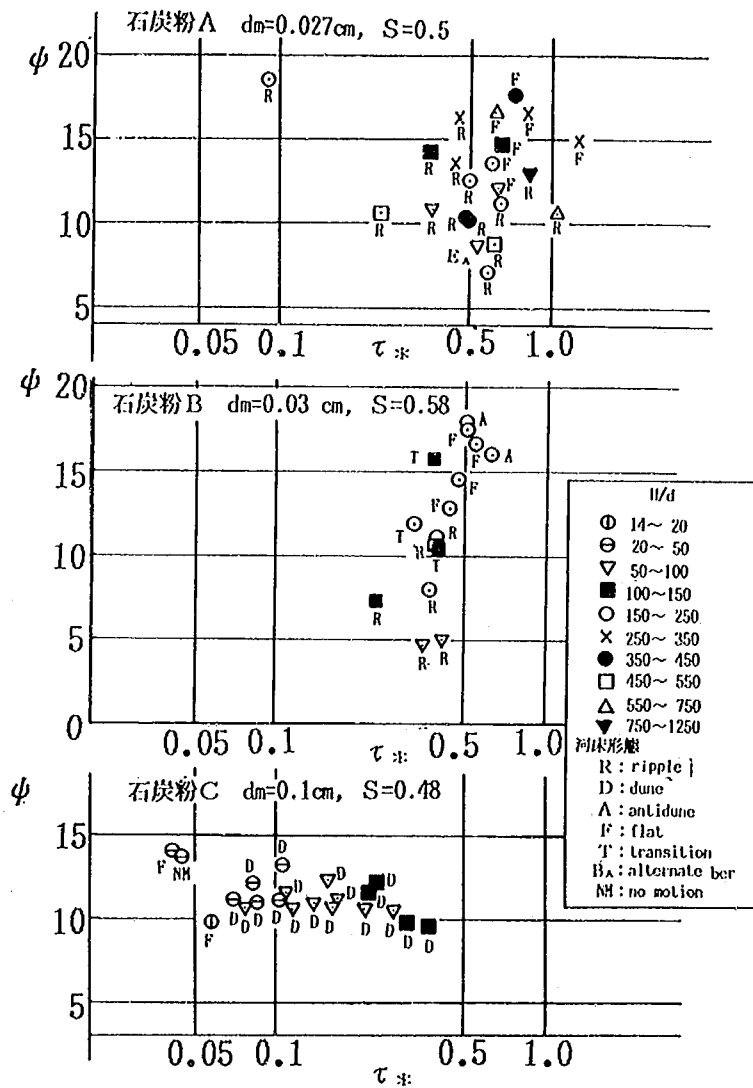
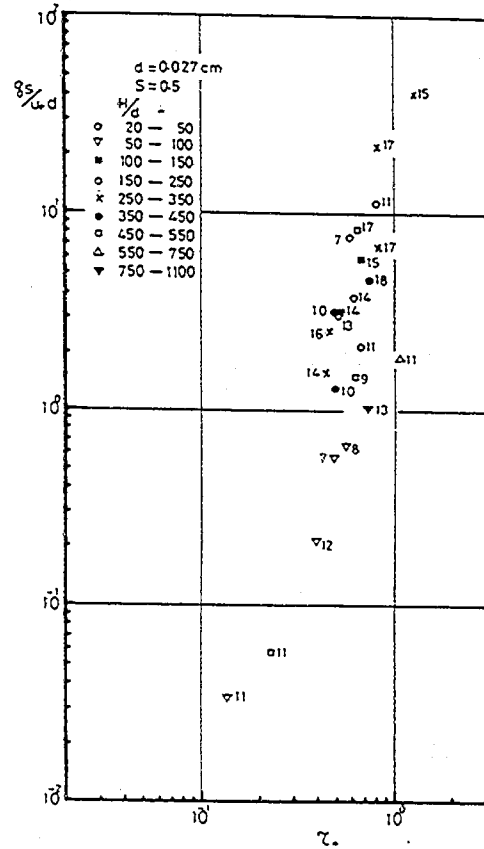


図-10.2.1 石炭粉の場合の ϕ と τ_* の関係

石炭粉 A



石炭粉 B

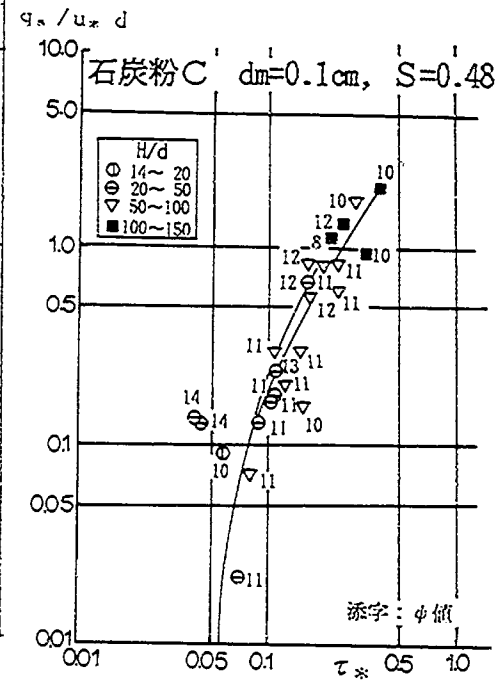
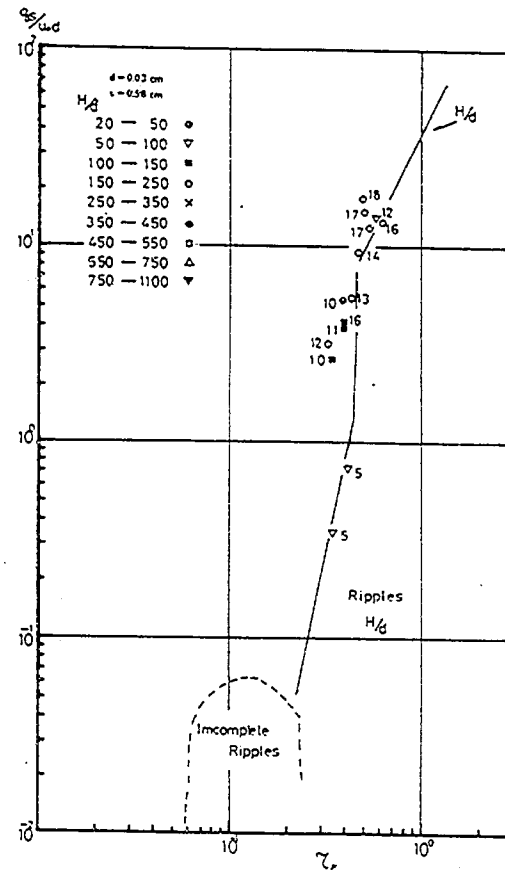


図-10.2.2 無次元流砂量と無次元掃流力の関係(石炭粉)

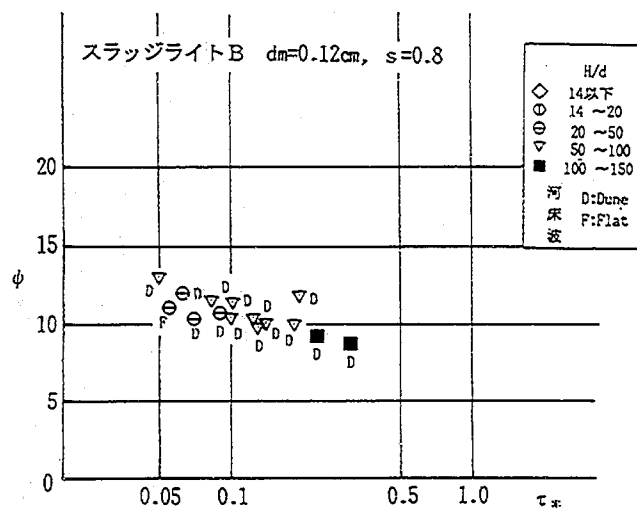
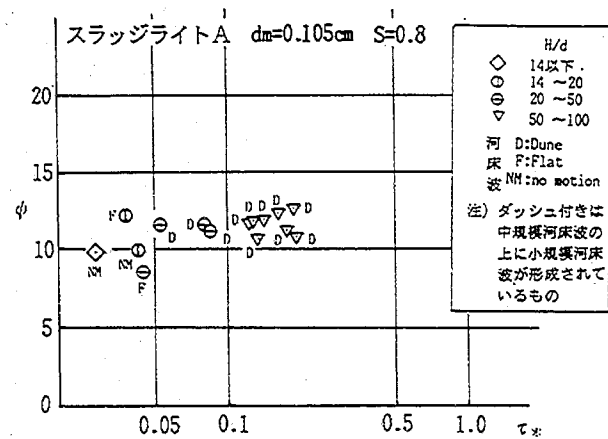


図-10.23 スラッジライトの場合の ϕ と τ_* の関係

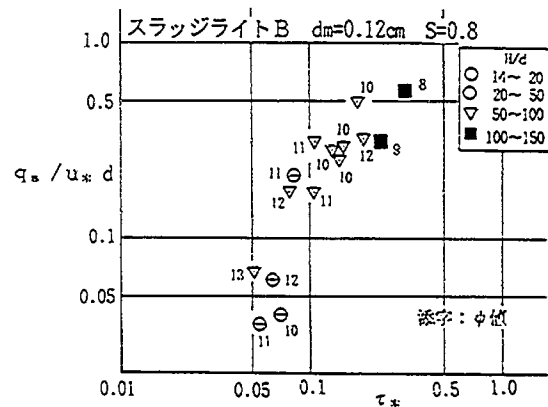
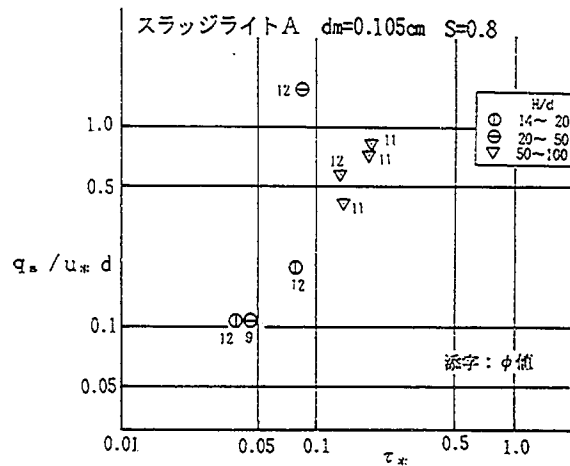


図-10.24 無次元流砂量と無次元掃流力の関係(スラッジライト)

10-3 海浜変形の相似性に関する検討資料

海浜変形の相似性を検討する場合、一定の波をある初期形状に与えたとき、その海浜変形過程が同一でなければならないが、ここでは最終平衡海浜の相似性を検討することによって代用する。先の2-4に述べたように最終海浜形状は¹¹⁾

$$h/L_0 = f(x/L_0, H_0/L_0, \sqrt{gH_0}/W_0, S, \frac{\sqrt{\nu}(H_0)^{1/4}g^{3/4}}{W_0^2}, i_0) \dots (10-7)$$

と考えられる。ここで i_0 は初期形状を現わすものと考えておく。この結論はRector²⁷⁾、岩垣・野田²⁵⁾らの考え方と同一の無次元量だが、 H/d のかわりに $\sqrt{gH}/W_0$ で表した方が、ある程度 ν の影響を含んだものと考えられるので、ここでは(4-1)式によって実験結果を整理する。なお(4-1)式における $\frac{\sqrt{\nu}H_0^{1/4}g^{3/4}}{W_0^2}$ の結果は、底質材料が小さく、底面の境界層が層流であったり、沈降速度がStokes則にのるような粒径より大きければ、無視して良いだろう。

(1) 沿岸砂州の発生

平衡海浜には、暴風海浜型、正常海浜型に分けられると言われるが、山本¹¹⁾等が多くの実験資料より、海浜を二つの形態に区分しようとする時、典型的な海浜は少なく、どちらに組入れるべきか困難を覚えることが多かった。そこでBarと言うものが、砕波と深く結びついているものと考え、砕波点近くに海床の凸部が存在するものは暴風海浜とみなすようにつとめ、砕波水深より十分深い所に存在する凹凸は砕波によるBarとは認めず、暴風海浜とはみなさないことにした。さらに、海床を注意深く見てみると、波長 $1/2 L$ の海床波、および波長 $2 L \sim 3 L$ の海床波が見られる。

よって我々は河浜形状を次の5つの区分に分けることにした。

暴風海浜型

遷移海浜型

正常海浜型

2 L型

1/2 L型

1/2 L型は、入射波と反射波の干渉による部分重複波と密接に結びついている。この型は暴風と正常の二つの区分に入れるとすると正常海浜型に入ることが多い。

2 L型は、汀線に近いBarの背後の距離 $2 L \sim 3 L$ の所に、第2のBar時には第3のBarを作るもので、勾配が小さい、石炭粉を海床材料にした模型実験で良く見られる。最上川²⁰⁾、千代川²⁴⁾の河口模型実験では、石炭粉を使ったが、2 L型のBarの発生が見られた。この2 L型の海浜は、第1のBarから第2のBarに砕波点の移動が観測されることが多い。また2 L型と1/2 L型の共存型も見られた。

2 L型の発生には初期形状の影響がかなりあるものと思われる。現地海浜は沖浜勾配が1/100位である所が多いが、このような海岸で二列のBarがよく見られる。この原因として、大きな波によって沖側のBarが生じ、その後の小さな波によって浜側にBarが生じたとも考えられるが、上述の2 L型のBarのように、1つの波によって2つのBarが生じたとも考えられる。

図-10.3.1～10.3.4は、波形勾配 H_0/L_0 と $\sqrt{gH_0}/W_0$ の関係を s の違いごとに海浜形状の分類を示したものである。この海浜型の判断は、海浜形状図がある資料は、その図より筆者らが前述した定義にしたがって判断したが、かなり主観の入るもので、原論文の判断とは異なっているものもあった。海浜形状図が無い文献は原論文の判断にまかせた。

図-10.3.1は $s=1.65$ の砂の場合で、点のばらつきが多く、明確に区分線を引くことができない。この原因としては波高の測定誤差(10数%が考えられる。)および初期形状の違い、 W_0 の不正確、 $\frac{\sqrt{g}H_0^{1/4}g^{3/4}}{W_0^2}$ の効果および実験時間の違いなどが原因しょう。図-10.3.1の結果は、ほぼ岩垣²⁵⁾らの領域区分と対応しているようである。

図-10.3.2は $s=0.45$ の石炭粉の場合で、領域区分は資料が少なくはっきりしないが、砂の場合とは区分線の位置が異なる。図-10.3.3はNayak²⁶⁾の行なった $s=0.39$ のくるみ殻の場合で $d_{50}=1.22$ mmと $d_{50}=1.22$ mmと $d_{50}=0.915$ mmの資料で、判断はNayakによるものである。

図-10.3.4はNayakが行なった $s=0.05$ のプラスチックの場合ですべて正常海浜とNayakは判断している。

砂以外は、実験資料が少なく領域区分ははっきりしないが、 s が異なると領域区分がかなり異なってくることははっきりした。 s は浮遊砂の運動に大きく関係することから当然のことであろう。なおNayakはプラスチックの場合浮遊砂が多く、スプ状になり、砕波も、Rippleも発生せず、波のエネルギーが吸収されたと言っている。

以上のことより、海浜形状の区分に関係する第一次の要因は H_0/L_0 、 $\sqrt{gH_0}/W_0$ 、 s であり、二次的の要因として i_0 および $\sqrt{g}(H_0)^{1/4}g^{3/4}/W_0^2$ であることが分かった。

(2) 砂の打ち上げ高

砂の打ち上げ高に関しては、すでに数多くの検討が行なわれ、Recter²⁷⁾以外は、打ち上げ高 H_R を H_R/H_0 と H_0/L_0 の関係で調べている。それらの結果は、ほぼ同じで、 H_0/L_0 が大きくなるほど H_R/H_0 が小さくなっている。ここでは、手に入った文献をすべて使い、今まで言われていることを確認しておくと同時に $\sqrt{gH_0}/W_0$ の影響を調べてみたい。

図-10.3.5は、砂の場合で H_0/L_0 の低下に伴って H_R/H_0 は大きくなっている。なおSavilleの資料は現地スケールの実験であり、この資料が、他の小スケール実験と大きくずれないことは、この図の現地海岸への適用に一つの根拠を考えよう。

図-10.3.6は石炭粉の場合で、2L型の場合同一 H_0/L_0 に対して H_R/H_0 が小さくなっているのは、沖のBarによってエネルギーが消散し、岸に到着するエネルギーが小さくなるためと考えられる。

図-10.3.7、図-10.3.8はクルミとプラスチックの場合で、資料はすべてNayakのものである。

これによると、砂の場合が同一 H_0/L_0 に対して H_R/H_0 が一番大きく、石炭粉、くるみがその次でプラスチックが一番小さい。石炭粉が砂より小さくなることは、すでに田中、新保²⁸⁾が述べているが、 $\sqrt{gH_0}/W_0$ の実験範囲が砂と石炭粉では異なっているので、石炭粉の方が小さいとは一概に言えないであろう。プラスチックが小さくなるのは、前にも述べたように、浮遊砂がスプ状になり波のエネルギーを吸収し、岸に到着するエネルギーが小さくなるためと思われる。なお波の打ち上げは、底面粒子の摩擦係数 μ_s が異なれば、底面を動く粒子の運動が異なり、材料によって打ち上げ高の異なるのは μ_s 。

の違いの影響もあると考えられる。

砂の動き易さの指標と考えられる $\sqrt{g H_0} / W_0$ の効果は、この図でははっきりしないが（測定誤差、 W_0 が正確に計られていない。文献からの読み取り誤差、 $\sqrt{g} (H_0)^{1/4} g^{3/4} / W_0^2$ の効果、 i_0 の効果などが原因する。）同一実験者が行なった実験データを取り出してみると $\sqrt{g H_0} / W_0$ が大きくなると H_R / H_0 は小さくなる傾向が見受けられる。

これによって砂の打ち上げ高も、沿岸砂州の発生で述べたのと同じの無次元量が支配要因であることが確認された。なお砂の打ち上げ高は、波のはいり高とほぼ等しい。

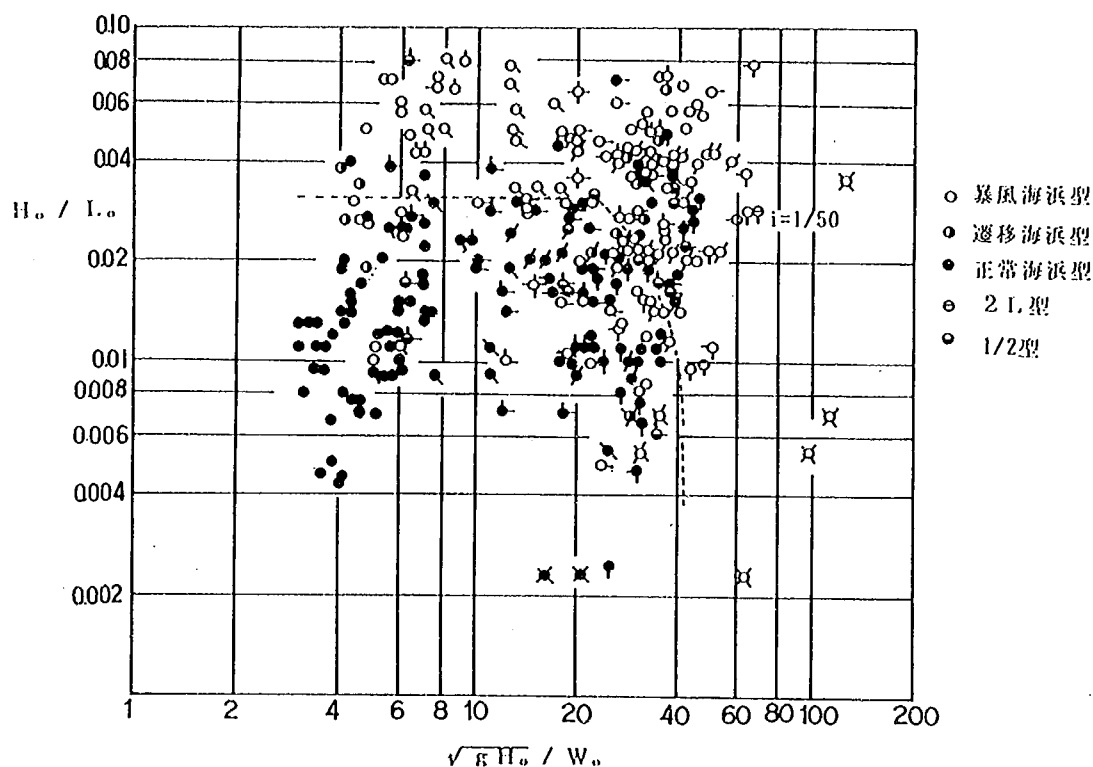
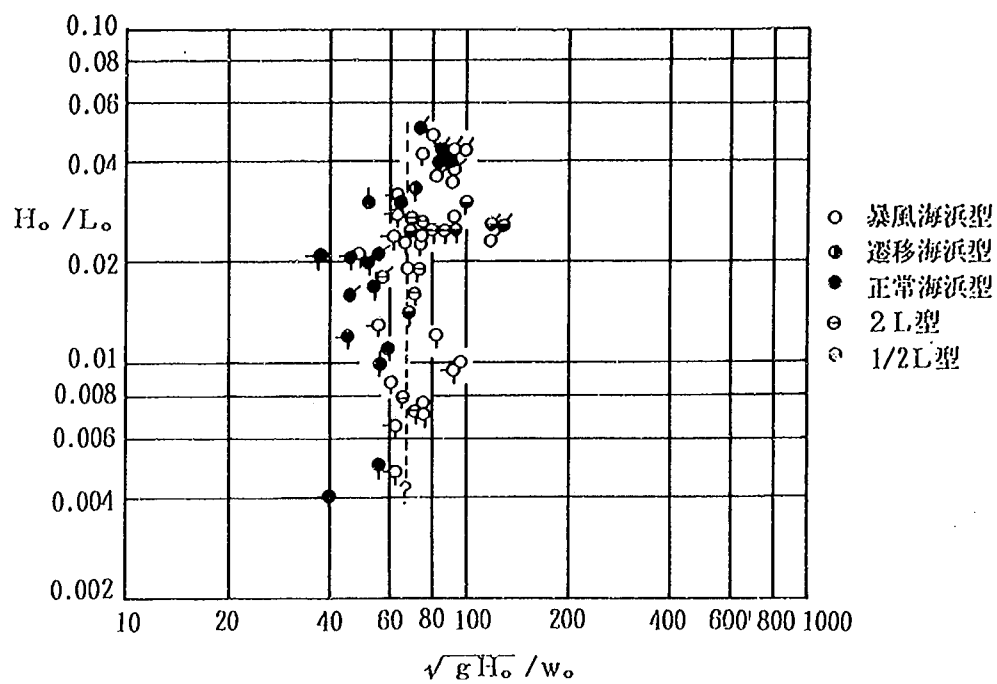
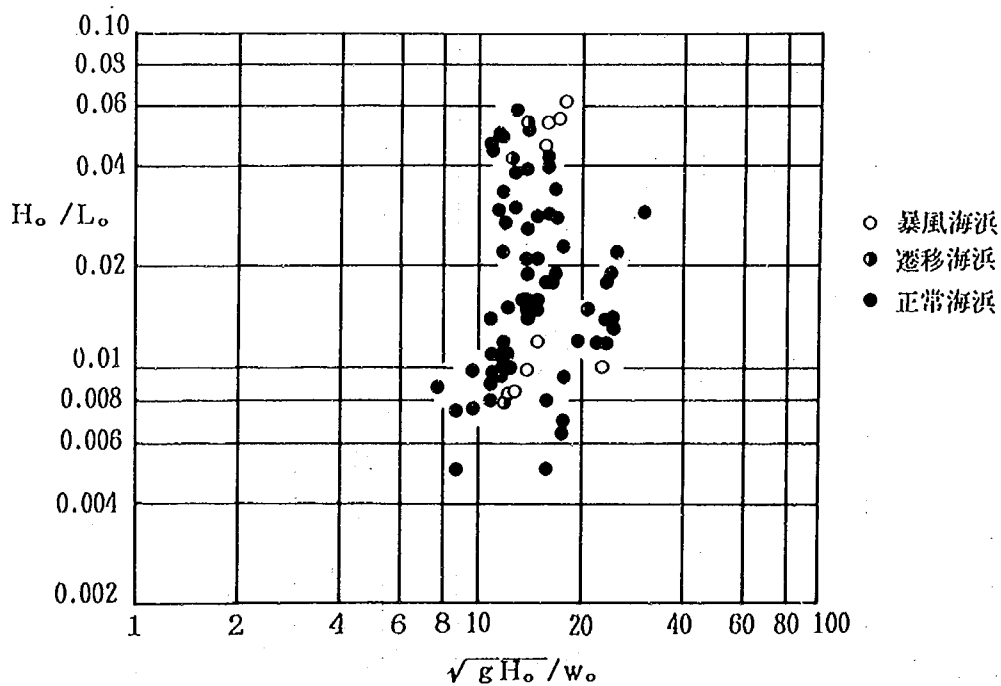


図-10.3.1 平衡海浜形状(砂)



図一 10.3.2 平衡海浜形状 (石炭粉)



図一 10.3.3 平衡海浜形状 (クルミ)

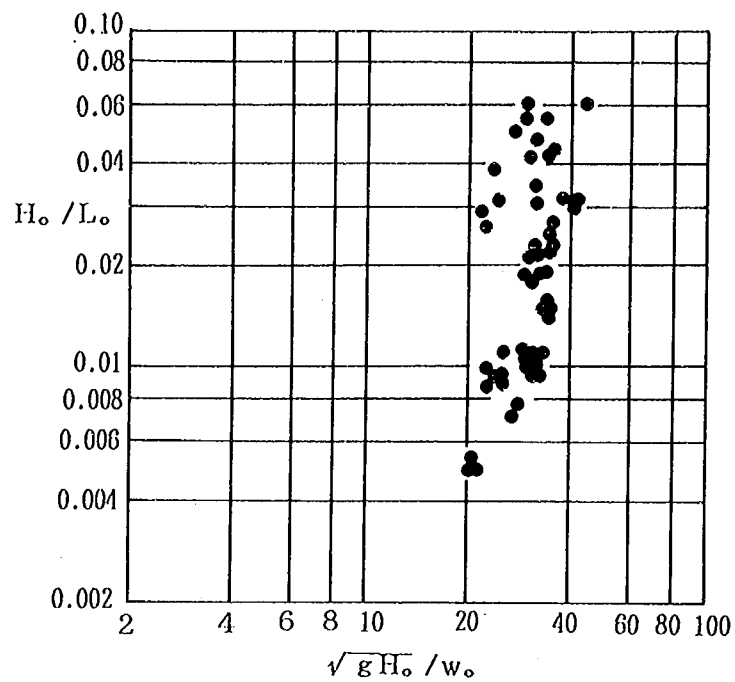


図-10.3.4 平衡海浜形状(プラスチック)

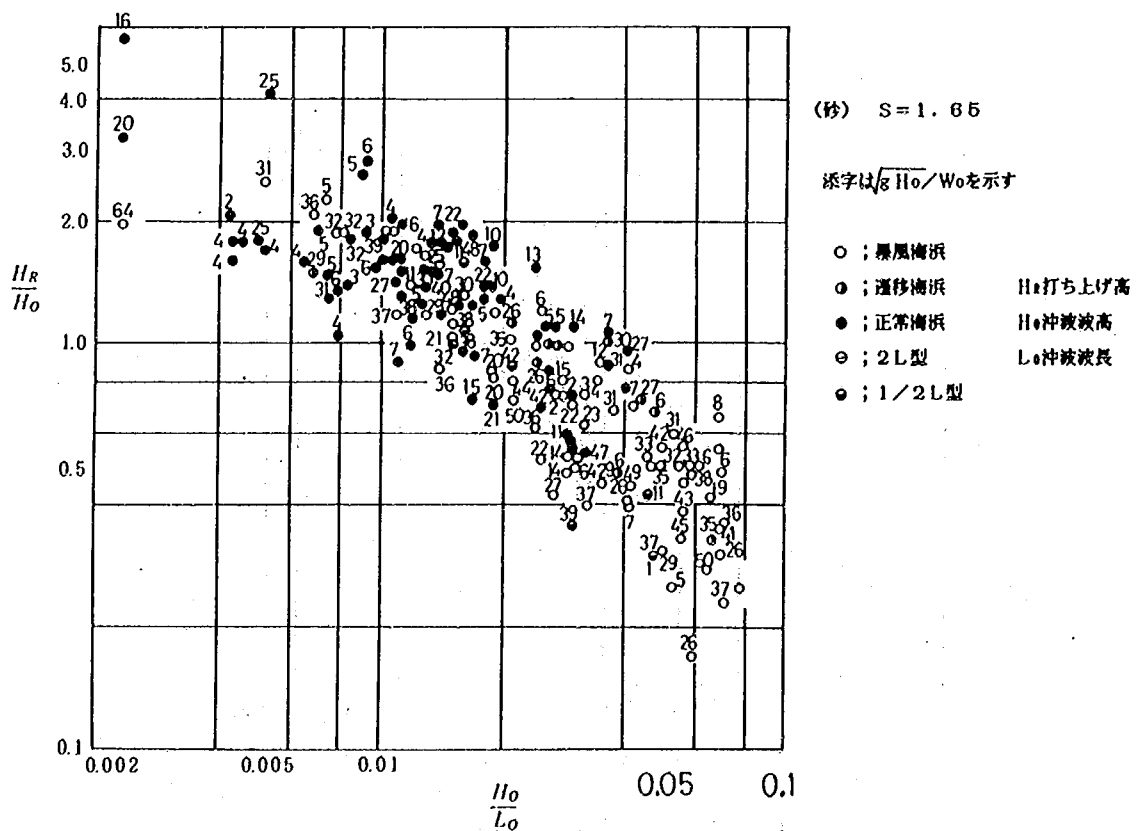


図-10.3.5 砂の打ち上げ高(砂)

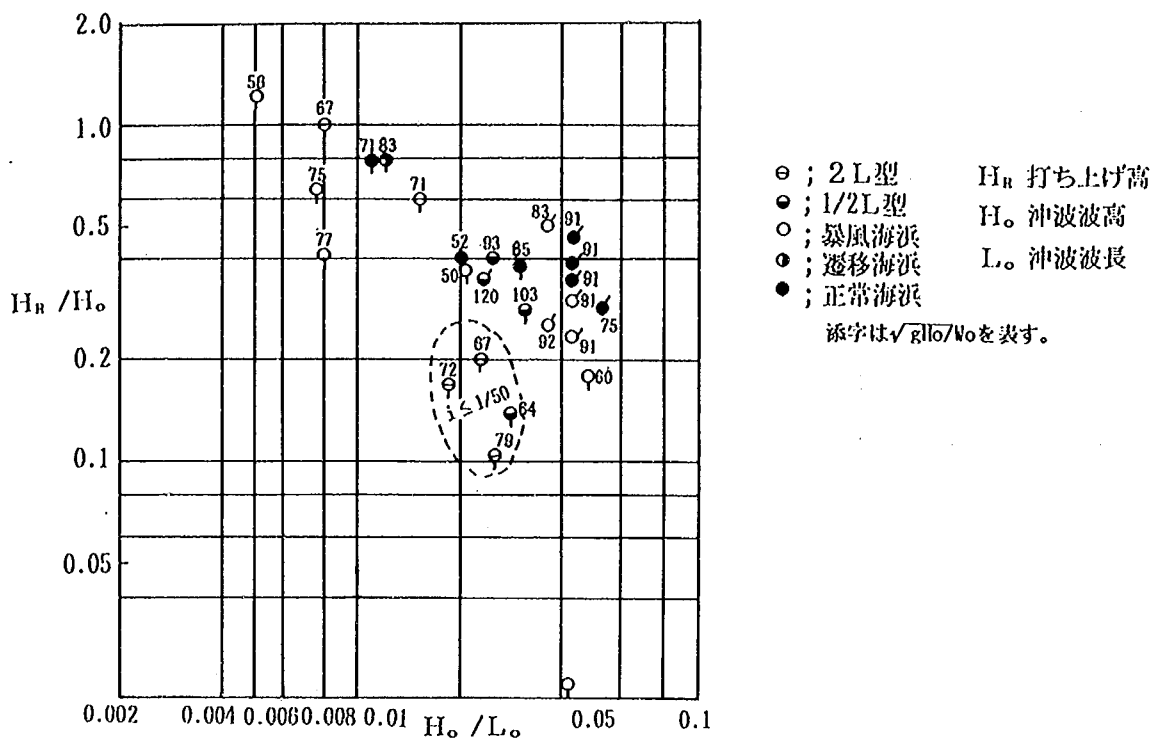


図-10.3.6 砂の打ち上げ高(石炭粉)

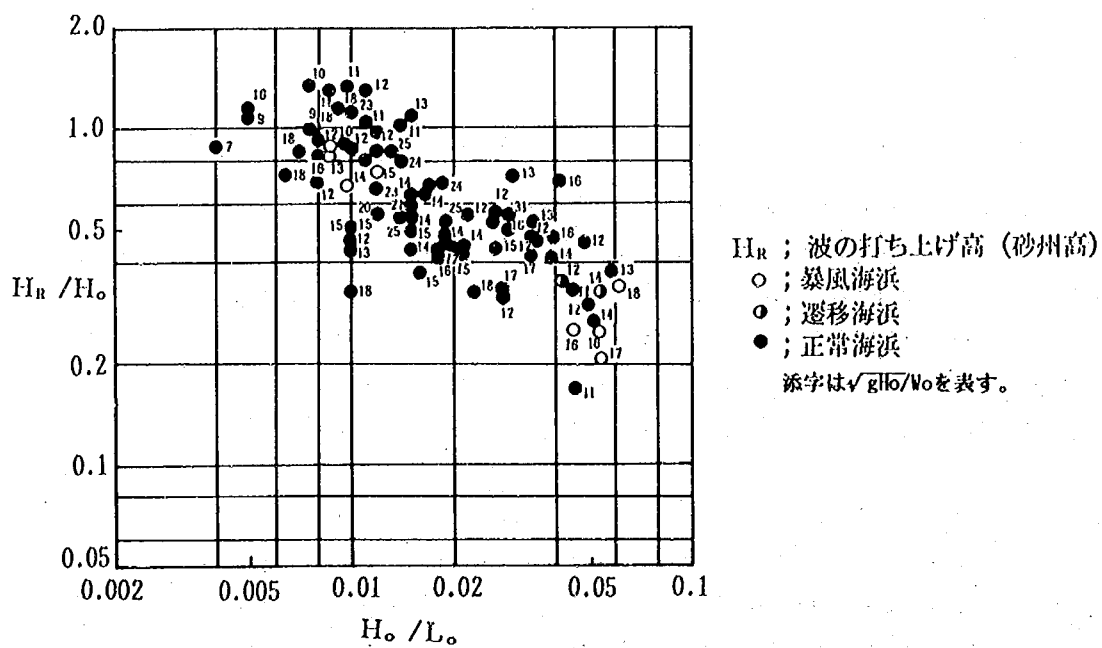


図-10.3.7 砂の打ち上げ高(クルミ)

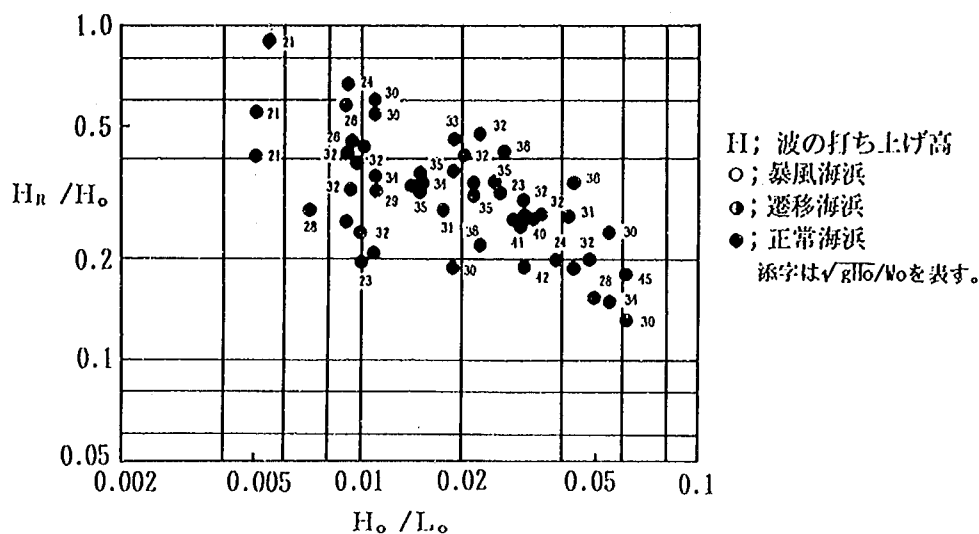


図-10.3.8 砂の打ち上げ高(プラスチック)

(3) 前浜勾配

前浜勾配については、すでに Rector²⁷⁾, Nayak²⁶⁾, 田中, 新保²⁸⁾, 岩垣, 野田²⁵⁾ が調べ、前浜平均勾配を θ とし、原論文を少し変形すると

$$\text{Rector は } \tan \theta \approx 0.30 (H_0/L_0)^{-0.10} \cdot (d_s/H_0)^{0.20}$$

とし

$$\text{Nayak は } \tan \theta = f(\sqrt{H_0/L_0} \cdot \sqrt{gH_0/W_0})$$

とし、 $\sqrt{H_0/L_0} \cdot \sqrt{gH_0/W_0}$ が大きくなるにしたがって $\tan \theta$ が小さくなるとしている。また岩垣は $i_0 = 1/10$ の時の $\tan \theta$ と H_0/L_0 , d_s/H_0 の関係を調べ、 d_s/H_0 が 0.0056~0.042 の範囲と 0.00128~0.00242 の範囲では、 $\tan \theta$ と H_0/L_0 の関係が異なり、 $d_s/H_0 = 0.0024 \sim 0.0056$ を境とし、それ以下では $\tan \theta$ が小さくなることを述べている。なお $d_s/H_0 = 0.0024 \sim 0.0056$ は $\sqrt{gH_0/W_0}$ の 30 前後に当たり、岩垣の言うように沿岸砂州の発生限界の急変する $\sqrt{gH_0/W_0}$ にほぼ等しい。

上述のことによると H_0/L_0 および $\sqrt{gH_0/W_0}$ が大きくなれば $\tan \theta$ は小さくなることを示している。

図-10.3.9~図-10.3.12 は、前浜勾配 $\tan \theta$ と H_0/L_0 および $\sqrt{gH_0/W_0}$ の関係を示したものである。砂については H_0/L_0 の増加につれて $\tan \theta$ の減少の傾向があり、また $\sqrt{gH_0/W_0}$ の小さい値が図の上部に集中し、 $\sqrt{gH_0/W_0}$ が小さくなると勾配の増加する傾向も分かる。図-10.3.13 は現地海岸の d_s と前浜勾配の関係である。粒径が 0.2 mm ぐらいになると急激に前浜勾配が減少し $\tan \theta = 0.02$ 位までにもなっている。このような勾配は実験データに現われていない。今現地海岸で、前浜勾配を作った波の波高を 0.5 m~3 m とすると、 $\sqrt{gH_0/W_0}$ は $d_s = 1 \text{ mm}$ に対して 33~54, $d_s = 0.5 \text{ mm}$

に対して $54 \sim 90$, $d_s = 0.2 \text{ mm}$ に対して $130 \sim 218$ となり, d_s が 0.2 mm では $\sqrt{gH_0}/W_0$ が 10^2 のオーダーとなり, 図-10.3.9 で行なわれている実験範囲を越えている。もし実験範囲を $\sqrt{gH_0}/W_0$ を 10^2 のオーダーまで広げれば, $\tan \theta$ が小さくなると考えられる。石炭粉において $\tan \theta$ が砂より小さいのは, 一つには $\sqrt{gH_0}/W_0$ が石炭粉の方が大きいのが原因でしょう。プラスチックにおいては, 前浜勾配が H_0/L_0 によって変化が無い。

これによって, 前浜勾配も, 沿岸砂州の発生で述べたのと同一无次元量が支配要因であることが確認された。

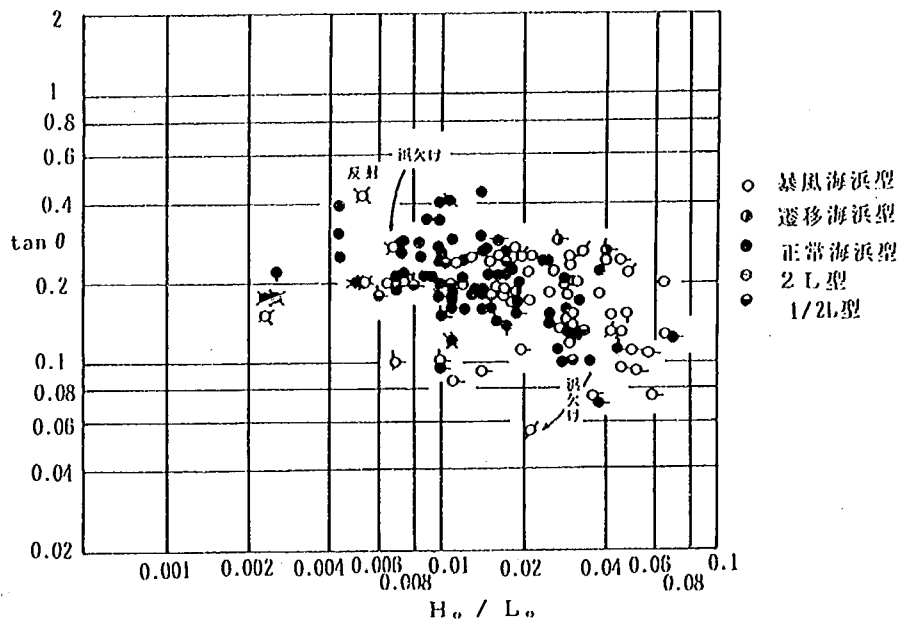


図-10.3.9 前浜勾配と波形勾配(砂)

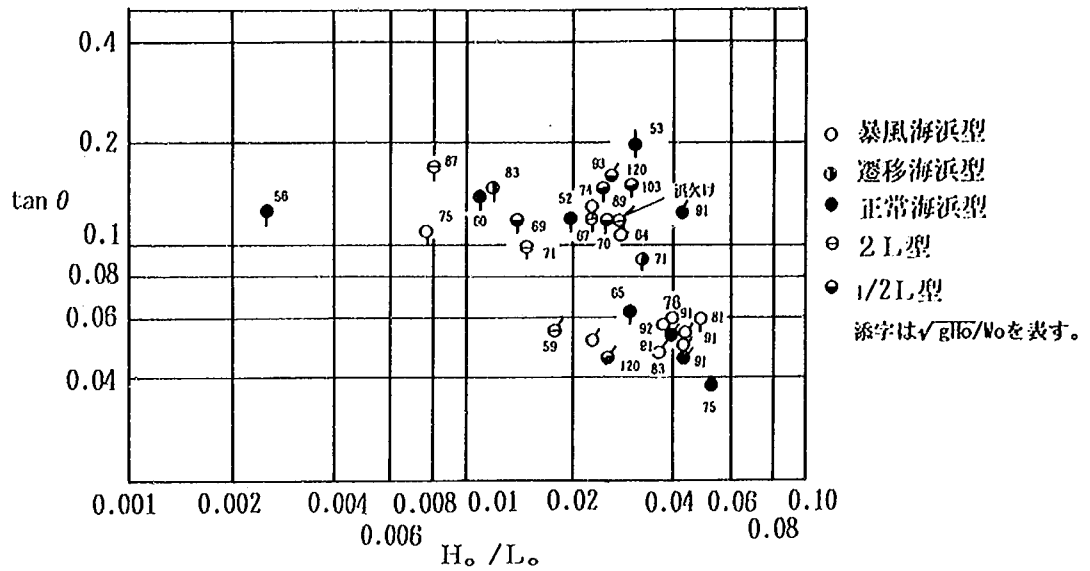


図-10.3.10 前浜勾配と波形勾配(石炭粉)

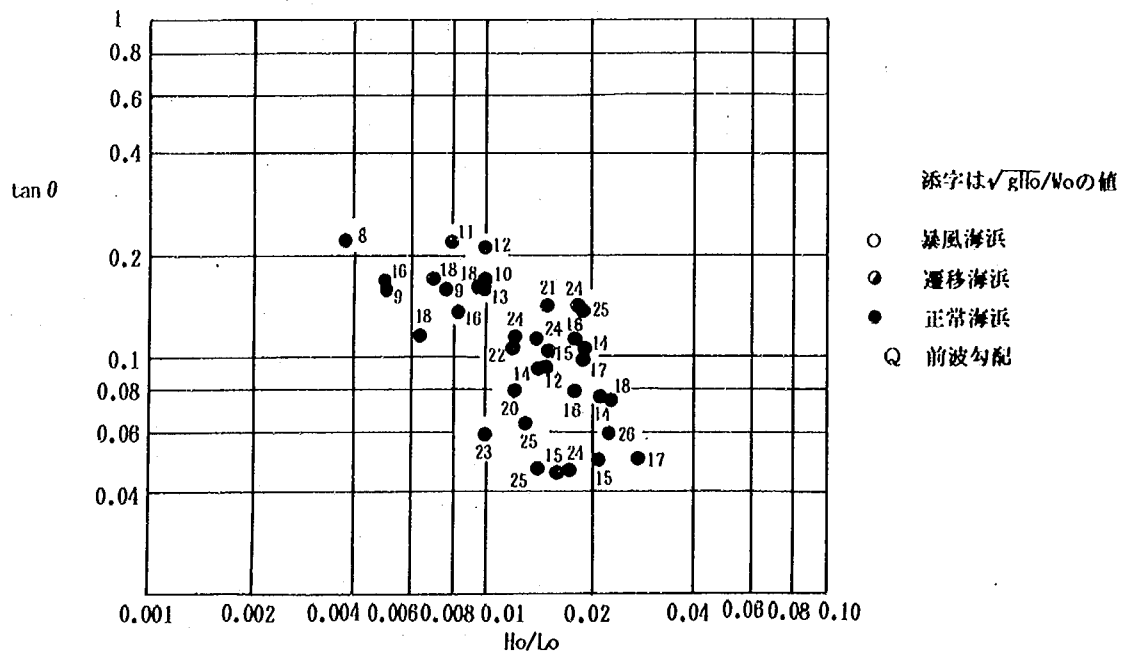


図-10.3.11 前浜勾配と波形勾配(クルミ)

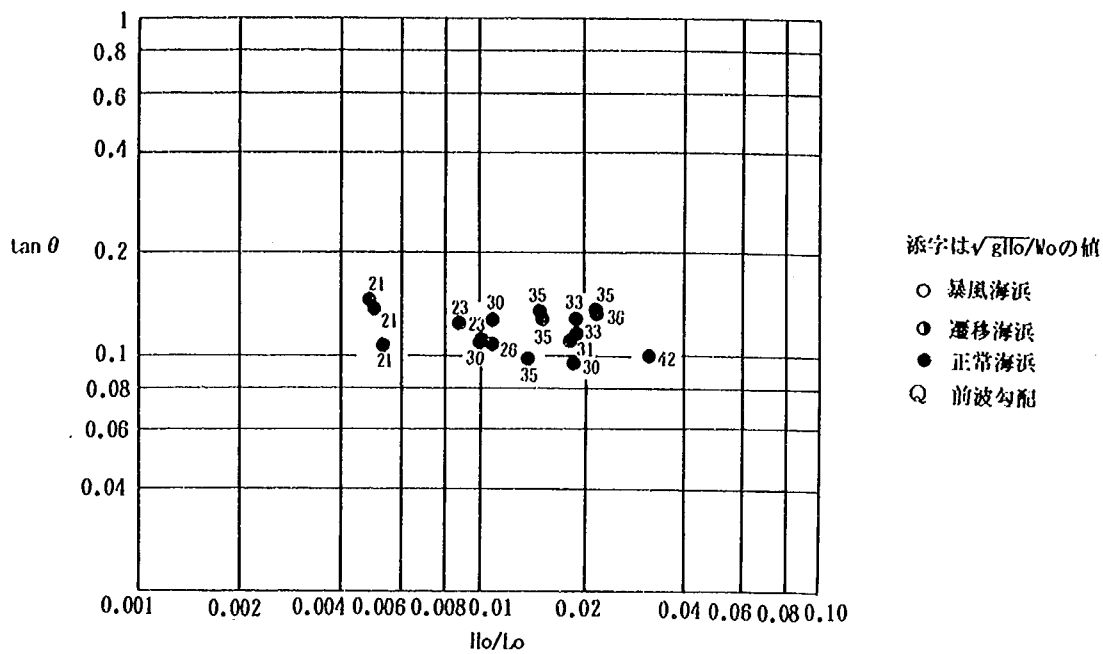


図-10.3.12 前浜勾配と波形勾配 (プラスチック)

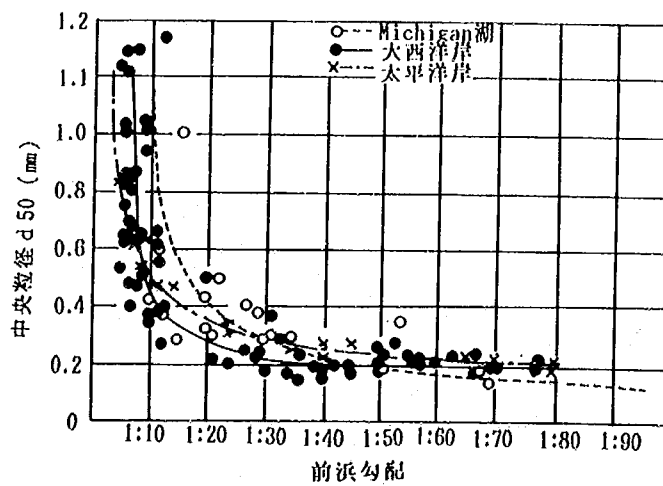


図-10.3.13 中央粒径と前浜勾配との関係
[Beach Erosion Board 1961]

あ　と　が　き

模型実験の手引のようなものの必要性が感じられたのは、筑波移転後数年経ってからである。まえがきに述べたような問題を生じ、その改善法の一つとして企画されたが、忙しさにまみれそのままになっていました。その後前河川部長橋本宏博士の元で再度企画され、その意思をも引き継いでまとめたのが本手引きです。

本手引きは、高橋が初稿を作り、それを山本が見直し、構成の再編等を行ないました。忙しい中での高橋の努力がなければ本手引きは完成しなかったでしょう。

1989. 10. 17

山　本　晃　一　記

参 考 文 献

- 1) 土木研究所河川研究室：河川模型実験の手引，1959.
- 2) 土屋昭彦：水理設計と模型実験，土木技術資料 12-5，1970.
- 3) 須賀亮三：河川水理模型実験の最近の進歩，土木学会水工シリーズ，1974.
- 4) 清水康行：板倉忠興：河川における二次元流れと河床変動の計算，北海道開発局土木試験所，1985.
- 5) 山本晃一：相似律の観点から見た移動床流れの水理，土木研究所資料第1059号，1975.
- 6) Williams, G.P: Flume width and water depth effects in sediment-transport experiments, U.S. Geological Survey Professional Paper 562-H. 1970.
- 7) 岩垣雄一：限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集第41号，pp. 1-21，1956.
- 8) 山本晃一，坂野 章：河川移動床模型実験材料としての石炭粉の移動特性と斐伊川模型への応用，土木研究所資料第1802号，1982.
- 9) 山本晃一：河道特性論，土木研究所資料第2662号，1988.
- 10) 福岡捷二，高橋 晃，森田克史：信濃川小千谷，越路地区河道計画模型実験報告書，土木研究所資料第2610号，1988.
- 11) 山本晃一，野積 尚：海浜変形の相似性に関する研究，土木研究所資料第975号，1978.
- 12) 足立昭平：人工粗度の実験的研究，土木学会論文集，第104号，1964.
- 13) 小川，竹本，大石，村端：護岸法覆工の水理学的研究，北海道開発土木試験所月報，第213号，1971.
- 14) 福岡捷二，藤田光一，森田克史：護岸法覆工の水理設計法に関する研究，土木研究所資料第2635号，1988.
- 15) 建設省河川局治水課，土木研究所河川研究室：河道特性に関する研究，第41回建設省技術研究会報告，1987.
- 16) 福岡捷二，高橋 晃：仁淀川模型における河口砂州の崩壊と再形成に関する相似性の検討，第32回水理講演会論文集，1988.
- 17) 福岡捷二，高橋 晃，加賀谷均：仁淀川河口水理模型実験報告書，土木研究所資料第2611号，1988.
- 18) 山本晃一：河口処理論(I)，土木研究所資料第1394号，1978.
- 19) 須賀亮三，山本晃一：河口部水理模型実験の問題点，第18回水理講演会，1974.
- 20) 須賀亮三，山本晃一，高橋 晃，林 敏夫：最上川河口模型実験報告書，土木研究所資料第887号，1974.
- 21) 山本晃一，高橋 晃，加賀谷均：山良川，土師川合流点模型実験報告書，土木研究所資料第2746号，1989.
- 22) 土木学会水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会：移動床流れにおける河床形態と粗度，土木学会論文集第210号，1973.

- 23) 芦田和国, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文集第206号, pp. 59-69, 1972.
- 24) 山本晃一, 野積 尚: 千代川河口付替に関する水理的検討, 土木研究所資料第974号, 1975.
- 25) 岩垣雄一, 野田英明: 海岸変形の実験における縮尺効果の研究, 第8回海岸工学講演会, 1961.
- 26) Nayak I. V. : Equilibrium Profiles of Model Beaches, University of California Technical Report HEL-2-25, 1970.
- 27) Rcetor, R. L. : Laboratory Study of Equilibrium Profiles of Beaches, Beach Erosion Board, T.M. No. 41, 1954.
- 28) 田中則男, 新保 修: 移動床模型実験用底質材料としての石炭粉の特性について, 港湾技術研究所報告 Vol. 12 No. 1 Mar. 1973.
- 29) 福岡捷二, 浅野富夫, 林 正男: 軽量河床材料の流送特性と移動床模型実験の相似性に関する研究, 土木研究所資料第2641号, 1988.
- 30) 山本晃一, 林 正男: 河川移動床模型実験材料としての軽量材料の水理特性, 土木研究所資料第 号, 1990 予定:

付録資料

ここでは、本論のために役立つ以下に示す既発表論文を掲載する。

- I. 河道特性調査の進め（地質と調査88' 第4号多少訂正）
- II. 石炭粉を使った移動床模型実験の相似性（土木技術資料23-3, 1981）
- III. 緩流河川の模型実験の考え方（土木技術資料32-1, 1990）
- IV. 河口部水理模型実験の問題点（第18回水理講演会論文集, 1974）
- V. 仁淀川模型における河口砂州の崩壊と再形成に関する相似性の検討
（第32回水理講演会論文集, 1988）

I 河道特性調査のすすめ

山本 晃一*

1. まえがき

河川調査について書いてほしいと頼まれた。河川調査には、河川を地学・地質学的観点からとらえる理学的なものと、河川を人間のために制御して利用するために、それをとらえようとする工学的なものとの二つの立場があり、調査の目的も方法にも違いがある。私の経歴から言えば後者の立場で書くべきであろうが。

ところで工学サイドからの河川調査の方法については、一応マニュアル的なもの〔建設省河川砂防技術基準(案)調査編〕がある。そこで、記されていることを抜き出して書いても意味のあることとは思われないので、ここでは本誌の読者である地質・地形関係者に興味のあるような河道特性調査の内容と意義、および、荒川中流部の河道特性調査から、地形・地質に関係のある所を抜きだして、河道特性調査には地形・地質関係者の参画の必要性を示してみたい。

2. 河道特性調査の内容と意義

河川は人間の生活にとって極めて密接な関係を持っている。歴史時代を通じて現在まで、河川は人間社会に大きな影響を与え続け、また河川も人間の生活環境をより良いものとしていく営為の中でさまざまな変化を受けてきた。

河川は地形学の立場からは、地表面のほぼ一定した流路を通して下方に流れ、湖、海、他の河川に注ぐ水体とその河道を含めた総称であり、地表に降った降水や湧水等の陸水の排水路であるということができ、侵食・運搬・堆積の作用を営み、たえず地表を変化させ、また河川自身も変化してやまない。現存する河川は、この三作用による自然史と人間が河川・流域に働きかけた歴史との相互関連性との具体的現われといえる。

河川工学から見た河川調査とは、この自然史と社会史の相互関連の結果である対象の特性を、人間の生活にとって脅威となる可能性を順次取り除き、利用することによって、社会により良く役立たせるという目的のために、把握することである。従来多くの河川について種々の調査が実施されてきており、その調査資料はおびただしい量に上る。〔建設省砂防技術基準(案)調査編〕で示されている種々の調査やある個別目的のために行なわれる河川の調査は、その河川の特性調査そのものと言えるが、そこで得られた資料は、河川の特性の一部分を示すものである。

それらの調査を有機的に結びつけ、対象河川の全体像を浮かび上がらせ、かつ河川の種々の特性(以下においてはこれを河道特性と言う)の共通認識を作り出すには、河川を上流から下流まで一貫してとらえた河道情報の整理と分析を行なうことが必要であろう。このためには河道特性調査の内容、収集すべき資料の種類および記述の形式等は、ある程度共通のものとする必要がある。

ここでは個別河川の河道特性調査として行なわれることが望ましい項目を目次の形で示しておく。

目次

〇〇川の河道特性

1 章 河川および流域の概況

1-1 河川の概況

河川の位置、流域面積、河川長等に関する記述

1-2 流域の地形・地質

特に段丘地形、段丘堆積物の質、沖積地の微地形

1-3 流域の地形発達史

特に第4紀

1-4 〇〇川の河道変遷史

完新世の河道変遷

1-5 流域の土地利用の変遷

1-6 河川の利用状況

* 建設省土木研究所河川部河川研究室長

- 2章 水文資料調査
- 2-1 降雨特性
- 2-2 洪水特性
過去の洪水、氾濫形態の記述
- 2-3 流出特性
流出率、平水、豊水、渇水、平均年最大流量、計画高水流量、確率流量に関する記述
- 2-4 流量と水位
H-Q の関係、低水路・高水敷の粗度に関する記述
- 3章 洪水時の河道特性量と河道
- 3-1 河床材料
- 3-2 低水路幅、高水敷幅
- 3-3 河床勾配と河床高
平均河床高は、低水路の平均河床高とする
- 3-4 洪水時の河道特性量
平均年最大流量時（あるいは低水路満杯時）と計画高水時の水理量（水深、流速、 u_*^2 、 τ_{*m} 、 H_m/d_m 、 B/H_m 等）の縦断方向の変化の記述と図表化、なおここで u_*^2 は摩擦速度の2乗、 τ_{*m} は無次元掃流力 $= u_*^2 / sgd_m$ 、 H_m は平均水深、 d_m は河床材料の平均粒径、 s は河床材料の水中比重、 g は重力の加速度である。
- 3-5 河道特性量から見た河道のセグメント区分はほぼ同一の河道特性量を持つ河道区間、通常は、ほぼ同一勾配を持つ区間に河道をセグメント区分する。
- 4章 高水敷の特性
- 4-1 高水敷の平面形状
高水敷と低水路、堤防との平面形状の関係
- 4-2 高水敷の土質構造
ボーリング試料による高水敷土中の土質および地質の横断および縦断層序構造
- 4-3 河岸近くの表層堆積物と河岸物質
表層堆積物と洪水時の浮遊物質との関係、河岸物質の特性と堆積条件
- 4-4 高水敷の微地形と堆積物
- 4-5 高水敷の植生
- 4-6 大出水時の高水敷上の水理量
水深、流速、流向等に関する記述
- 5章 河道の平面形
- 5-1 低水路の平面形状と砂州、みお筋
- 5-2 河岸侵食位置と侵食形態
- 5-3 洪水時の流況と平面形
水衝部、低水路と高水敷との流れの干渉、死水域等の航測写真解析による把握
- 6章 各セグメントの流砂形態と河床変動形態
- 6-1 各セグメントの流砂形態
河床材料の粒径集団 (population) ごとの流砂形態

6-2 縦横断形変動形態

6-3 土砂収支

各粒径集団ごとの各セグメントにおける土砂の収支把握

6-4 河床変化の方向

7章 その他

・基本的には河道特性調査結果を何に利用するかによって調査項目を選定する。

このような個別河川の河道特性調査が多くの河川で行なわれれば、個別河川の特長相が一層明確になると同時に、沖積地河川の共通認識も急速に増加するものと思われる。さらに個別の河川の治水・利水・環境管理計画等に当たっても、次のような利点を生むものとなろう。

i) 対象とする河川の河道特性を上流から下流まで調査することにより、その河川の全体像が浮かび上がり、上・下流一貫した河道計画、治水計画、河川総合計画等に役立てることができる。

ii) ある程度、共通の基準で河道情報の整理がなされるため、他の河川の河道特性の把握および相互の比較が容易になる。また他の河川の経験を利用したり、技術的な議論を行なうことに共通の基盤を提供することになる。

iii) 人間活動のインパクトが河道に及ぼす影響について判断しやすくなる。また過去に行なった河道の人工的改変や河川工事の影響がつかみやすくなる。

iv) 河川構造物の設計にあたって、設計条件をつかみやすくなる。

v) 河道および高水敷の微地形情報は、氾濫原（堤内地）の情報として利用でき、氾濫原管理計画（土地利用計画等）に参考になる。

vi) 土砂の動態がつかみやすくなる。

ところで目次に沿った形で河道特性調査を行なうことは膨大な費用と調査日数がかかるように思われるが、日本の一級河川の場合はほとんどの項目はすでに何らかの目的のために調査がなされており、資料収集にそれほど労力がかかるものではない。河道特性調査としては、それらの既存資料を河道特性量を媒介として互いの関連性と因果関係を記述すること、さらに河床堆積物、河岸物質、高水敷堆積物、河岸侵食形態、高水敷の微地形観察等のフィールドワークを通して、それらの相互関連性を確認し、河の様子を記述することが新たな情報生産の大部分を占めると言って良い。河道特性調査が良いものとなるかならないかは、調査担当者の河川に関する共通認識の程度とフィールドワークの良否に依存している。この意味で応用地質学、応用地形学を学んだ技術者の河道特性調査への参画と河川技術者との協働を期待したい。

なお以下に述べることは、筆者が実際に河道特性調査作業を通して、作業の能率化、また作業方針の統一化のために留意しておいた方が良いと考えたことを記したものである。

i) 河道特性量を求める場合の洪水流量としては、平均年最大流量程度の流量とすること。この流量が河道形成流量と言うことでは無いが、ほぼ低水路満杯流量に近いこと、またこの流量が河道特性を記述しやすいこと、資料が得やすいこと、さらに、既往の河道特性量がほぼこの流量で評価されていることを考えると、今後もこの流量を使っていくことができであろう。なお治水計画のためには、計画高水流量時の種々の水理量も求めておくことが望ましい。

ii) 河道特性量は、あくまでも低水路の河道スケールを使って求めること。たとえば平均河床高 Z_m は、低水路部の平均河床高とすること。川幅水深比 B/H_m も低水路で求めておくこと。扇状地河川の低水路幅の決定は非常に難しいが、植生や横断面図、航空写真、不等流計算等によって総合的に判断すること。

iii) 低水路の流速係数 φ (平均流速 V_m ÷ 摩擦速度 u_*) あるいはマンニングの粗度係数 n を適確に評価すること。治水計画のための計画粗度は実質の粗度より大きめなことが多い。実測資料の解析や、同じような河道特性量を持つ河川の粗度を調べて参考とすること。

iv) 平面図に横断面図を書き込むと、平面形状と横断面形

状の関係が分かりやすい。この場合の縮尺および横断面図の縦横比は次の値を基準にすると良い。

○川幅 100 m 以下の場合、平面図の縮尺 1/2,500, 縦横比 10

○川幅 100 m ~ 500 m の場合、平面図の縮尺 1/5,000, 縦横比 10

○川幅 500 m 以上、平面図の縮尺 1/10,000, 縦横比 20
横断面図は平面図上のその断面の測線が、ちょうど平均年最大流量時の水位の位置になることが好ましいが、計画高水位でも良い。また必ず測線位置が標高いくつに相当するか、図に記してとくこと。

v) 河道特性量の縦断方向の特性値を図表化する場合には、すべての特性値を同一縦断方向スケールのグラフに描くこと。たとえばある特性値を区間距離 1 km をグラフの横軸で 1 cm として描いたら、他のすべてのグラフの横軸は区間距離 1 km は 1 cm とすること。

3. 荒川中流部の河道特性量と河道特性

ここでは、河道特性量を媒介とした河道特性調査の意義をより明確にするため、関東の荒川の河道特性調査結果¹⁾よりその概要を述べてみよう。

荒川水系は、関東平野の西部に位置し、わが国の政治、経済、文化の中心である首都をひかえ、その重要性はきわめて大きいものがある。

荒川河道は、寛永 6 年 (1629) に熊谷市久下の地先に

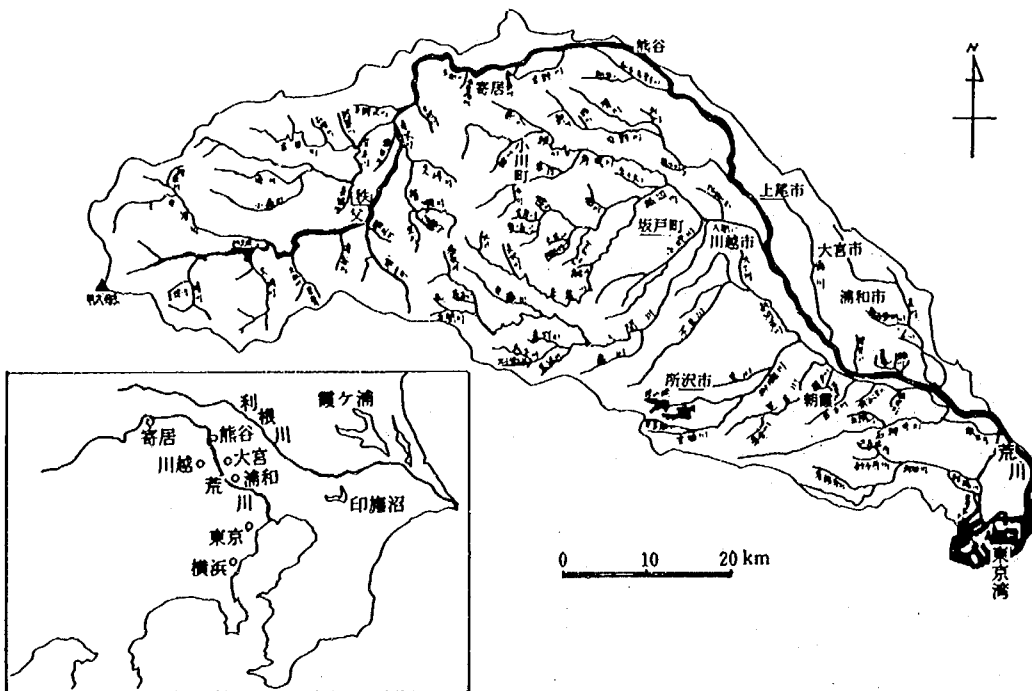


図1 荒川流域図 (建設省関東地方建設局「荒川」昭和51より)

おいて、元荒川の主流を和田吉野川の流路に落とす付替え工事が行なわれ、これ以後、荒川低地は荒川本流の流下場所となった（数千年以前には、荒川低地には荒川と合わせて利根川の本流が流下していたと推定されている^{1),2)}）。明治時代に入ると近代的改修が始まり、大正時代から昭和にかけて堤防、横堤の築造、シュートカットが行なわれ、現在の荒川となった。シュートカットされた区間は、荒川中流部の大部分におよび、現在の荒川流路は人工河道と言っても過言でない（図10参照）

荒川中流部の河道の特徴と河道特性量を通してながめて見る。

荒川中流部の河道特性量は河口より76 km下流は、低水路満杯流量時の、それより上流は平均年最大流量約1,200 m³/s時の水理量で評価した。76 kmより下流の径深 R は、低水路兩岸肩から以下の河積 A を兩岸肩幅 B で除することによって求めた。

図2に低水路の径深 R 、深掘れ高（平均河床高と最深河床高の差） ΔZ 、平均河床高 Z_m の縦断方向変化、図3に川幅 B 、川幅径深比 B/R 、図4に河床材料、図5に摩擦速度の2乗 $u_*^2 = gRI$ 、および、無次元掃流力 $\tau_{*A} = u_*^2 / sg d_A$ の縦断方向変化図を示した。ここで I は勾配、 d_A は河床材料の主モードの材料の平均粒径である。なお d_A は河床材料の平均粒径とほぼ等しい。

以上の資料および河岸物質、現在踏査などの結果より、荒川中流部(28.8~88.8 km)の河道は、次の6つのSegmentに区分せると判断される。

i) Segment 1=74~88.8 km

いわゆる扇状地河川に相当するSegmentで、河床勾配は約1/380である。84 kmより上流は、旧扇状地を下刻化し段丘地形を作っている。現成扇状地は84 km地点を扇頂としていいと考えると良い。本Segmentへの上流からの砂利分の供給は減少の方向にあると判断される。83 kmより下流の低水路の砂州の列数は2~4列であり、83 km以上では第三紀の砂泥岩が河床に露出し、深掘れの生じるのを防いでいる。

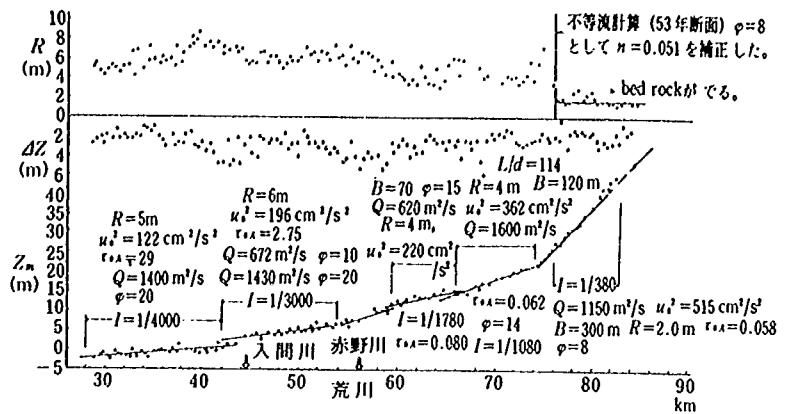


図2 g の縦断方向の変化

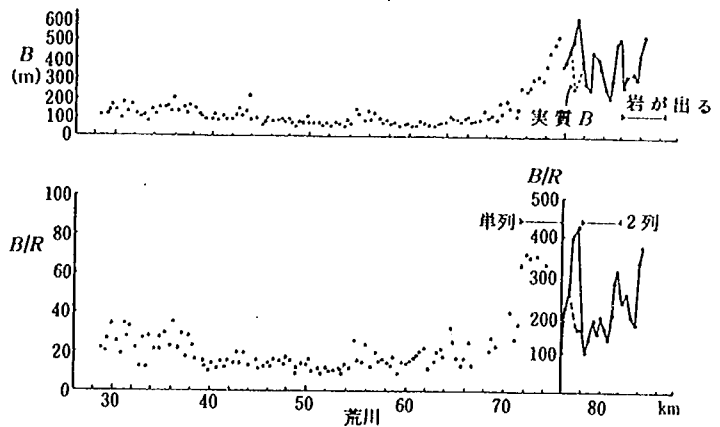


図3 g の縦断方向の変化

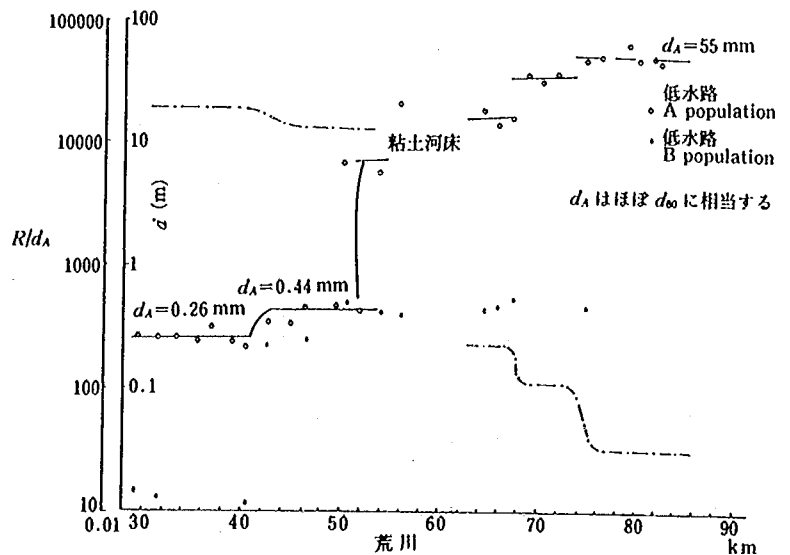


図4 g の縦断方向の変化

ii) Segment 2-1=67~74 km

この Segment は河道特性量から見ると通常の河川では、自然堤防帯の河川の特性を持ち、蛇行の自然短絡などが起こりやすい区間であるが、荒川の場合、横方向に活発に動いた形跡が見られない。河床は平均 3~4 cm 程度の礫と砂から成っている。

iii) Segment 2-2=59~67 km

この区間の大部分は、大正・昭和期の河川改修によって人工的に掘削された河道部分であり、河岸物質の下層は後背湿地堆積物である粘性土からなる。人工河川区間ではない 65~68 km 区間は、河川沿いに微高地が発達しており、自然堤防の発達が良いが、掘削河道区間ではほとんど発達していない。なお本区間の下流部は埋没洪積層上を流れている。

iv) Segment 2-3=54~59 km

この区間は、勾配が上流の Segment に比し急である。河床は掘削河道部分は粘性質である。

v) Segment 2-4=44~54 km

この区間は荒川の有力な支川である入間川と市野川の合流点間の区間であり、河床材料は上流部はまだ小砂利があるが、主に 0.4 mm の中砂からなる。

vi) Segment 3=28~42 km

この Segment は勾配が緩く、また川幅も Segment 2-4 の 1.5~2 倍程度である。低水路満杯時の摩擦速度の 2 乗 u_{*2}^2 は上流の Segment で $190 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 程度、この Segment で $120 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 程度に減少している。この掃流力の減少に応じて河床材料も 0.44 mm から 0.26 mm の砂に変化している。

以上 6 つの Segment は、おのおのが異なった特性を持っており、河川にかかわる種々の工事や計画にあたっては、この特性を十分に踏まえておく必要がある。ここでは、



写真 1 58.5 km 地点の様子

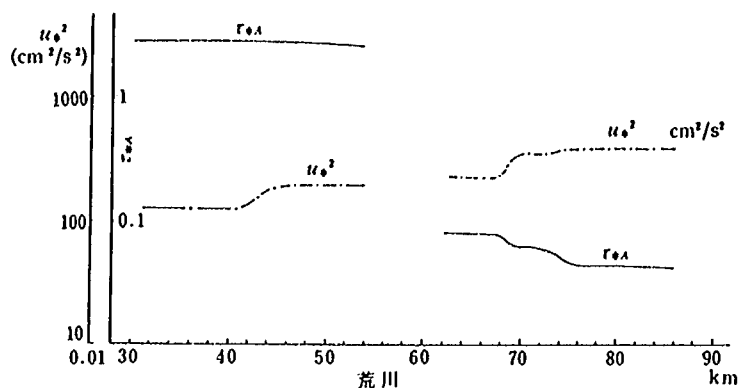


図 5 g の縦断方向の変化

表 1 に各 Segment ごとに各種河道特性を簡単に記載しておいた。本表によって河道を Segment に区分する十分な理由が、また各種河道特性を、平均年最大流量程度の時の河道特性量で説明、記述し得ることが理解し得よう。

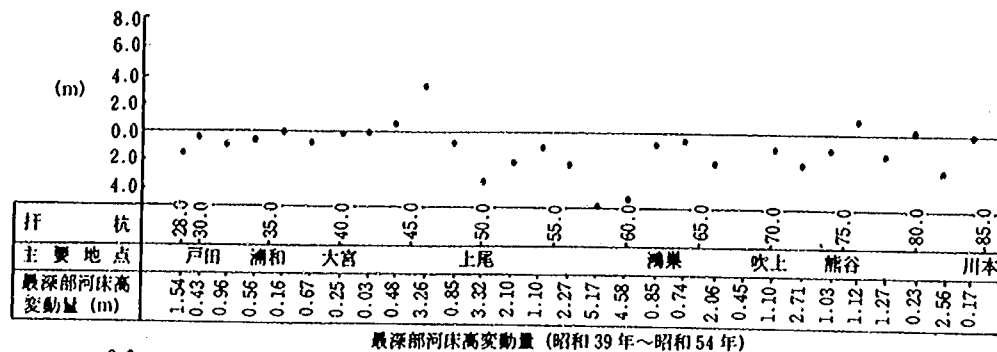
4. 河床の変動形態に及ぼす河床・河岸物質の影響

沖積地河川の河床変動や局所洗掘は、通常河床材料が非粘着質の物質から成るとして、流砂の連続条件と水量の縦断方向の変化より、平均河床高の変化を予測し、また局所洗掘深は、流れと河床材料の相互関係を力学的に解析あるいは経験則として評価するということが一般に行なわれている。しかしながら個別河川の河道特性調査を通じて、河床の変動形態は、河岸物質・河床物質の粘着性や層序構造、すなわち堆積の歴史性について十分な認識が無ければ、解釈し得ないことが多いことがわかってきた。ここでは前節で述べた荒川中流部の河床変動や護岸の被災原因を通してこれを見てみよう。

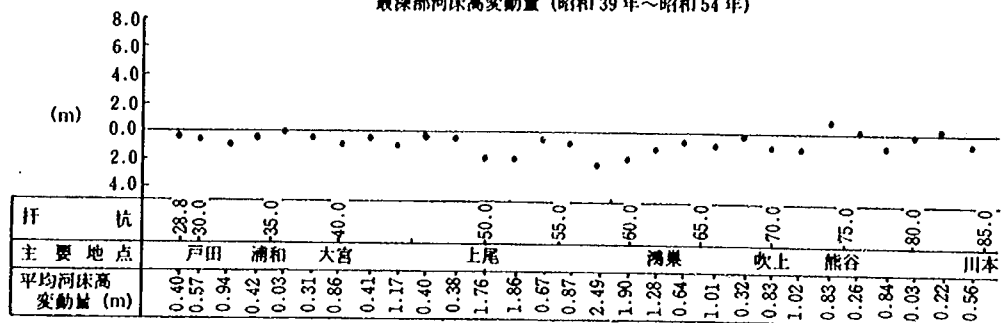
図 6 に昭和 39 年と昭和 54 年に行なわれた横断測量結果より、その間の最深河床高の変動量を示した。最深部の変動量は最大 6 m 近くあるが (56 km)、ほとんど変動していない場所もある。最深部の変動量の大きい場所は 44 km, 56 km, 60 km, 66 km の付近で、いずれも 4~5 m 下降している。この深掘れは資料によると、ますます深くなる傾向にある。またこの変動量の大きい場所は、いずれも河床勾配の変化点に相当している。通常の沖積河川であれば、勾配の変化点は河床に働く掃流力が小さくなる所であり、堆積傾向となる所であるが、荒川中流部の場合は、低水路の人工的直線化によって、低水路部の土砂の輸送能力より供給土砂量が少なく、全般的に下刻化しつつある河道である。Segment の結接点の直上流には泥層が存在し、この泥層が一時的侵食基準面となり、河道の下刻化を防ぎ、Segment の形成因となっている。

表1 各Segmentの各種河道特性総括表

	Segment 1 (扇状地)	Segment 2 (自然堤防帯)				Segment 3 (デルタ)
		2-1	2-2	2-3	2-4	
低水路満杯時の水理量	$b=1/380$ $H=300\text{m}$ $R=2\text{m}$ $u_*^2=515\text{ cm}^2/\text{s}$ $r_{sA}=0.058$	$b=1/1080$ $H=120\text{m}$ $R=4\text{m}$ $u_*^2=362\text{ cm}^2/\text{s}$ $r_{sA}=0.062$	$b=1/1780$ $H=70\text{m}$ $R=4\text{m}$ $u_*^2=220\text{ cm}^2/\text{s}$ $r_{sA}=0.08$		$b=1/3000$ $H=85\text{m}$ $R=6\text{m}$ $u_*^2=196\text{ cm}^2/\text{s}$ $r_{sA}=2.75$	$b=1/4050$ $H=130\text{m}$ $R=5\text{m}$ $u_*^2=122\text{ cm}^2/\text{s}$ $r_{sA}=2.9$
河床材料および河床物質	5~6mの砂利を主体として0.4~0.5mの砂がマトリックス、74km以上は三紀層露出	3~4cm程度の砂利が主体、70km以下は泥層が河床に露出している所有り	泥層(縄文時代の河の後背地堆積物)および泥層上に2~3cmの砂利を主とした堆積物が薄く乗る	泥層が露出していると思われる。所々に砂利砂の堆積	泥層の上に小砂利53km以下は0.4cm程度の中砂	0.2~0.3mmの砂、最深部はデルタ底層の粘土
河岸物質	82kmより上流は、下層は岩、その上に右岸側は田舎状堆積物、左岸側は沖積扇状地堆積物、表層はシルト含み細砂 82kmより下流は砂利の上に表層に薄くシルト含み細砂	70kmより上流は、下層に砂利の上にシルト含み細砂、70kmより下流は下層は粘土、その上4~6mのシルト含み細砂	下層は粘土その上にシルト含み細砂4~6m、粘土層の上部は黒色の腐植層 60km付近より、下層は泥層の堆積物	下層粘土層 その上4~5mはシルト含み細砂 腐植層みられず	下層粘土層 その上にシルト含み細砂 54K左岸 Clean Sand 有り	下層粘土、上層、シルト含み細砂、粘土も有る。
高水敷の微地形と堆積物	人工掘削(400~500万 m^3)による河床の低下による段丘化(高水敷の形成)表層1~2mのシルト含み細砂	自然堤防の発達(2~3mの高さ、横方向勾配1/150~1/200)	旧川沿いの自然堤防(横方向勾配1/250~1/300)	堤防幅狭く、自然堤防の発達良くない	ゴルフ場が多く高水敷の地形改変されている、あまり自然堤防の発達良くない	旧川沿いに自然堤防がある、入間川の土砂による堆積によるかもしれない。
堤内と堤外の地盤高差		2~3m、高水敷の平均上昇速度年1cm程度と推測される 1600年代に堤防築造	2~3m 1600年代に堤防築造			ほとんど無い 新堤の築造(大正期)
低水路の平面形状	82km以上は岩が露出し砂州の発達は、顕著でなく、それより下流よりでは、2~4列の砂州	砂州の発達 顕著でないが川幅の広い所にPoint bar 発生、旧流路は蛇行度 $S=1.20$ で川幅の10~15倍の蛇行波長であった。	人工掘削河道が大部分、砂州の発達は見られない 旧流路は $S=1.1$ 蛇行波長650m		人工河川が大部分砂州の発達は見られず、旧流路 $S=1.3$	砂州の発達見られず
計画高水時の高水敷の水理量推定(7,000 m^3/s)		水深4~5m $V_m=2\text{m/s}$	水深4~5m 1.5~2.0 m/s	水深4~5m 1.5~2.0 m/s	水深5~6m 1.3~1.5 m/s	水深6m 1.2~1.6 m/s
低水路満杯時の河床波の粗度と平均流速	$\varphi=8\sim10$ $n=0.03\sim0.035$ $V_m=2\sim3\text{m/s}$ $V_{max}=5\sim6\text{m/s}$	$\varphi=13\sim15$ $n=0.025$ 程度	粘土層露出部分多し	粘土層露出 $\varphi=13\sim16$ 程度か、 $n=0.025\sim0.03$	flat bed or dune bed 一部は粘土層露出 $\varphi=15\sim22$ $n=0.025$ 程度か	flat bed $\varphi=20\sim25$ $n=0.02\sim0.022$ $V_m=3\sim3.5\text{m/s}$
洪水時の流砂形態	平均年最大流量程度(1300 m^3/s)の時は、河床のA集団(5.5cm)の $r_{sA}=0.0588$ であり、砂州を形成しながら動き始めるが十分なものではなく、動かない所もある。計画高水時(5800 m^3/s)には $r_{sA}=0.15$ 程度となり1時間に4~5万 m^3 のA集団を動かそう。B集団(0.4~0.5mm)の砂は、1300 m^3/s 時には $r_{sA}=5.6$ であり浮遊砂0.2mm以下はWash load的運動形態	$Q=1300\text{ m}^3/\text{s}$ 時の $r_{sA}=0.0588R/dA=100$ A集団(3.5cm)は掃流砂 B集団(0.4~0.5mm)浮遊砂しかし河岸材までまき上らず 0.2mm以下 Wash load	$d=4\sim5\text{ cm}$ の砂利はここではほとんど動けない 2cmの砂利に対して $r_{sA}=0.068$ 0.4~0.5cmの砂は浮遊砂であるが高水敷上まではまき上がらない。	土砂の通過区間 河床は粘土質らしい。	低水路満杯時0.4~0.5mmの砂の $r_{sA}=2.7$ であり浮遊砂として移動砂利は動けない、0.2mm以下はWash load 的	主モードの河床材料は、0.26mm、低水路満杯時の $r_{sA}=2.9$ 0.45mmの砂は浮遊形式というより河床近くをSaltateする。 0.1mm程度の砂は、高水敷上までまき上がっている。



最深部河床高変動量 (昭和39年～昭和54年)



平均河床高変動量 (昭和35年～昭和54年)

図6 昭和39年から昭和45年の河床高の変動量

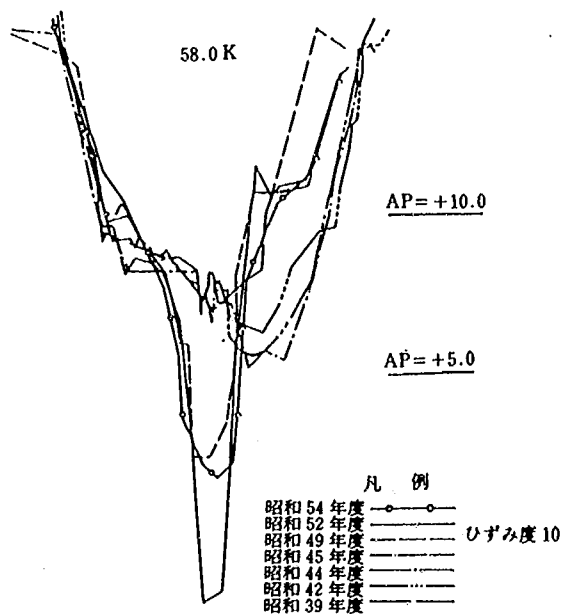


図7 横断形状の経年変化

河床勾配の変化点は、この泥層が破壊されつつある所であり、下刻化が進むのである。このことは、図7に示す横断形状の経年変化に示されるように、河床の一部が急激に低下する形で下刻化が進むことによく示されている。逆に河床の低下の進まない所は、横断形状が台形状であり、河床は同一の侵食抵抗を持つ泥層の存在が暗示

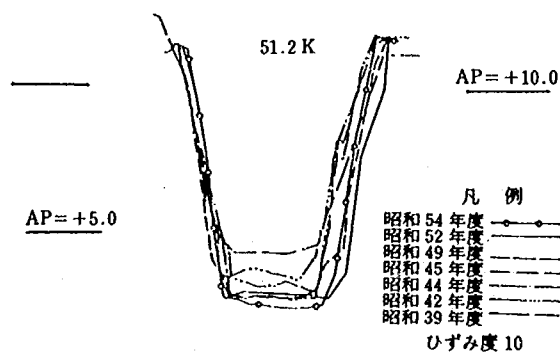


図8 横断形状の経年変化

される。多少河床低下のある所は質の違う堆積層が一枚一枚はがされていくような形態を取っているようである(図8)。ただし扇状地扇端である74 km地点は、いくらか河床が上昇傾向にある(図9)。ここはセグメント1から運ばれてきた砂利が堆積するところである。なお扇状地部では昭和37年ごろから砂利採取が始まり46年度に砂利採取が禁止となっている。この間の72~84 km区間の河積は400~500万 m^3 増となっている。昭和46年から昭和54年では24万 m^3 ほど河積が減少しており、この間平均3万 m^3 の砂利の堆積があったことになる。

次に護岸の設置位置について述べてみよう。護岸の設置位置は、通常河道の平面形状や砂州の配置構造との関係で説明されることが多い。すなわち河岸侵食位置は、流水の集中(水衝部の発生)との関連性で説明される。しか

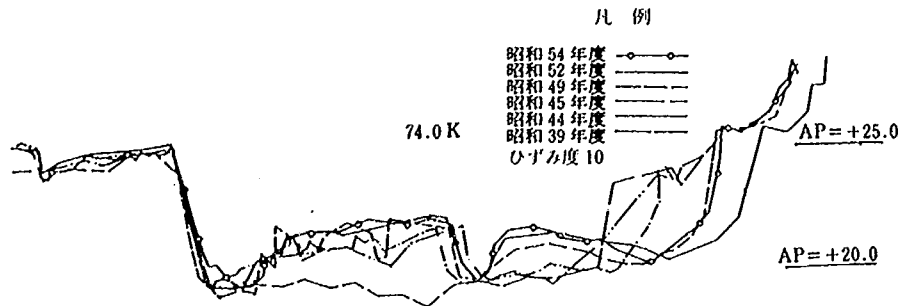


図9 横断形状の経年変化

- 護岸位置
- 人工水路部
- 旧河道
- 昭和56年8月洪水後災害復旧工事位置

出典：1. 荒川工事事務所 S 54.12「荒川上流改修六十年史」
2. 荒川工事事務所「堤防視況平面図」(構造物関係図)
- 荒川本川(28.8K~84.4K)1/5000(現地踏査で補足)

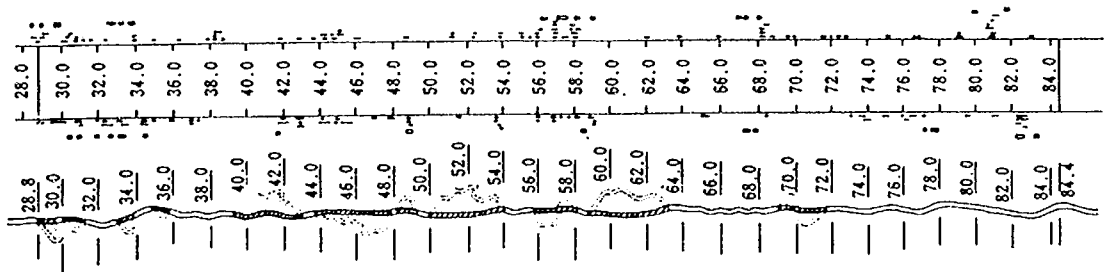


図10 護岸の分布

し荒川の場合には、3節で述べた河床の垂直変動特性との関係から説明されなくてはならないことが多い。

護岸の分布状況を図10に示す。この図は昭和41年から昭和52年までの工事記録から取ったものである。なお同図には昭和56年8月洪水後の災害復旧工事位置も示しておいた。ここで1か所に多数の護岸位置が示されている所は、設置された護岸が破壊され、再度護岸が設置されたことを示す。現在の護岸はほとんどが災害復旧工事として施工されており、洪水等によって河岸が侵食を受け崩れた場所、既存の護岸が破壊された場所を重点に順次施工されている。

護岸の設置回数、設置密度の高い区間の理由を考えてみたい。

セグメント1で護岸の設置回数の多いのは、82.5 km付近左岸および81 km地点右岸である。82.5 km地点は、ちょうど河床が、岩から砂利に変わる所であり、みお筋が左岸に寄った所である。81 km地点は、左岸によって水が右岸に寄ってくる所である。このみお筋位置はほとんど動いていない。この地点下流より、川幅が拡がり、4列程度の砂州が発生しだす。河岸侵食されやすい所は、84 kmより上流の単列砂州の平面形態をこの地点まで持っており、川幅の狭いこともあって洪水時には流速が速く、また上流からの供給土砂量の減少もあって、

河床が低下傾向にある所である。

セグメント2-1では、このセグメントの上流部の74~75 km地点および、68 km右岸に護岸の設置数が多い。74~75 km地点は扇面の直下流にあたり、砂州の形態が多列から単列河道に変わり、また堆積空間であることもあって、河岸侵食が起こりやすい所である。68 km右岸は、大芦橋の近くであり、人工掘削河道の直下流にあたっている。なぜここで河岸侵食されやすいかは良くわからないが、68.8 km地点の河床横断形状の経年変化図を見ると昭和39年から42年にかけて最深河床が2.5 m低下しており、河床低下による河岸崩壊に原因しよう。この区間(68.3~68.8 km)は、昭和23年(1948)に開削した人工河道の部分であり、昭和39年ごろ河床の堆積物が幾分侵食に強いものから、弱い堆積物の層に変わり河床低下が進んだものと考えられる。

セグメント2-2の区間は河岸侵食があまり生じていない。後背湿地性堆積物、洪積層を掘削した人工河道部分が多く、侵食に対して強い河床および側岸物質から水路が成るためであろう。

セグメント2-3では58 km~56 km区間にかけて多数の護岸が設置された。この原因は、3節で述べたようにこの区間が河床低下区間にあたり、河床低下によって引き起こされる河岸崩壊によって護岸の破壊が進むものと



写真2 鬼怒川豊水道橋下流、利根川合流点より11 km (1982年2月)

考えられる。

セグメント2-4では、44 km～45 km 区間で護岸の設置数が多い。この区間の末端は入間川との合流点に当たる所で、セグメントの変わり目の所にあたる。44.4 km (入間川合流点直下流) と 44.0 km 地点の平均河床および最深河床の差は2～3 m も有り、ここで河床高に段差を生じている。44.0 km の河床には流れに対する侵食力に強い堆積物の層があるようで、44.4～44.8 km が上流のセグメントの一時的侵食基準面にあたり、最深部の河床物質はその下流の44.0 km とは異なった質のものと考えられる。護岸の設置数が多いのは、入間川との合流点にあたり、また国道16号が横断しており治水上重要地点であることが第一に原因すると考えられるが、セグメントの結接点であり、また合流点であるので洪水時の河床変動形態が複雑なことになる。

セグメント3では38 km 右岸に護岸の設置回数が多い。ここは、わん曲部の外わん側にあたり、流水が集中し、右岸沿いにみお筋がある。本堤と低水路との距離がほとんどないこともあって護岸が集中的に設置されている。38 km 以下は首都に近くなり、高水敷の利用度も高まることもあって、護岸の設置数が多くなる。ほぼみお筋が河岸に寄る方に護岸が設置されている。なお横断面図の経年変化を調べてみると、この区間は、護岸の設置されている側の対岸が侵食されている所が多く、その侵食面もAP-1 m より上層が削られている。河岸物質は表面からAP 1～2 m は、泥層シルト細砂の互層からなる河岸近くに堆積する自然堤防成の堆積物の所が多く、+1～-2 m 間は海成・汽水成の砂層から成り、-2 m 以下は粘土層となっている。このような層序を持つ河岸が多いことが河岸侵食量が多い一因であろう。またこのセグメントでは、夜間ポンプ船による盗掘があり、その取り締りに苦慮していることも河岸侵食の原因になっている。

5. 河岸、河床下の堆積物、地質調査の必要性

実河川の河岸侵食形態や局所洗掘形態を見ると河床材料、河川の縦横断面形および洪水流の情報だけでは、その形態が生じた原因を推察できないことが多い、特に日本

の沖積地河川は河床低下の傾向があり、局所洗掘には河床下の堆積物や地質が大きく関係している。これは前章の荒川中流部の河床変動形態で見たごとくである。今後も沖積地河川の上流部、中流部で河床低下の傾向は続くものと思われ、河床下の堆積物が局所洗掘形態に関係する例が増加すると思われる。

実際に鬼怒川では河床低下により洪積層が河床に露出している個所が増えている。その洪積層が固いものであれば、そこが床固めのようになり、上流側の河床安定に寄与しているが、下流では河床低下が進み小さな流のような形となっている。固い層の一部が破壊され、その下に砂層などがあれば、そこが異常に掘れることがあろう。

このような所は河川の縦断面形のコントロールポイントとなっており、また弱点ともなっている。河川の今後の変化方向を予測するために、流域の地形発達史の理解の上で、河床および河岸物質、高水敷表層下の土質、地質、堆積物の質の縦横断特性すなわち土質、地質の層序構造の調査の必要性がますます高まると思われる。幸い道路、橋脚、高層建築物等の基礎地盤調査のためのボーリング資料は急速に増大している。これらの資料と河川の河岸物質、河床物質の観察を通して沖積地河川近傍の土質、地質の層序構造の把握は可能になってきたと思われる。

6. おわりに

河道特性の調査は、土木系の技術者と地形地質関係の技術者の協働作業によって最も効率良く作業が進められると思われる。この場合、土木の言葉と地形・地質の言葉との相互理解が、すなわち空間・時間スケールに関する相互の歩み寄りが必要となろう。

参考文献

- 1) 山本晃一・安田毅彦・松浦茂樹：河道特性論ノート(II) 荒川中流部の河道特性と河川処理、土木研究所資料第1745号、1981。
- 2) 菊地隆男：先史時代の利根川水系とその変遷、Urban Kubota 18, 1981。

II 石炭粉を使った移動床模型実験の相似性

——斐伊川模型を通して——

坂 野 章* 山 本 晃 **

はじめに

河川の移動床模型実験において、模型上で生じる現象を、実際の現象と似たものにさせることは、大変難しい。その大きな原因は、模型の底質材料の粒径が制約を受けるということにある。つまり底質材料が 0.2mm より細くなると、水の粘性の影響を受けやすくなり、小規模河床波や、流砂の形態の相似性が得られなくなる。そのために砂を用いた単純な幾何学的相似模型による実験は、砂利河川においては、相似性の良いものとなるが、砂河川では相似性の悪い実験となる。これを回避するために、いくつかの方法が考えられるが、一つには、模型の幾何学的な形状を歪ませるというやり方である。この方法では、川幅と水深の比 B/H が当然実物と異なってくる。中規模河床波の特性の把握が重要な実験の場合には、中規模河床波の形成や、そのスケールを支配する要因として、 B/H が主要な要素となるので、不適当と考えられる。したがって、これまで模型を歪ませずに底質材料に比重の小さいものを用いるという方法がなされてきた。

ここで取り上げた斐伊川は、河床材料の平均粒径が、 0.25cm 前後の花崗岩風化物からなり、さらに河道の縦断勾配 ($i_b=1/800$) が急であるということで、小さな洪水でも多量の土砂が移動し、また計画洪水程度の出水があると、河床の小規模河床波は砂堆から平坦河床へ、また中規模河床波は多列から単列に変化するという状況が予想されている。ここでは、このような特性を持つ河川の移動床模型実験を行って、相似性の良い結果が得られるのかどうかを検討した。なお実験は模型の底質材料として、砂粒子より比重が小さい石炭の粉 ($d_m=0.03\text{cm}$) を、移動床模型材料として用いている。

1 斐伊川の河道計画と模型実験の位置

出雲地方を流下する斐伊川は、昔は日本海に直接流入していたが、現在は河口から 15K 付近の出西地点で東に流れを変え、矢道湖へ注ぐようになった。

多量の花崗岩の風化物であるマサを8本の支川が運び

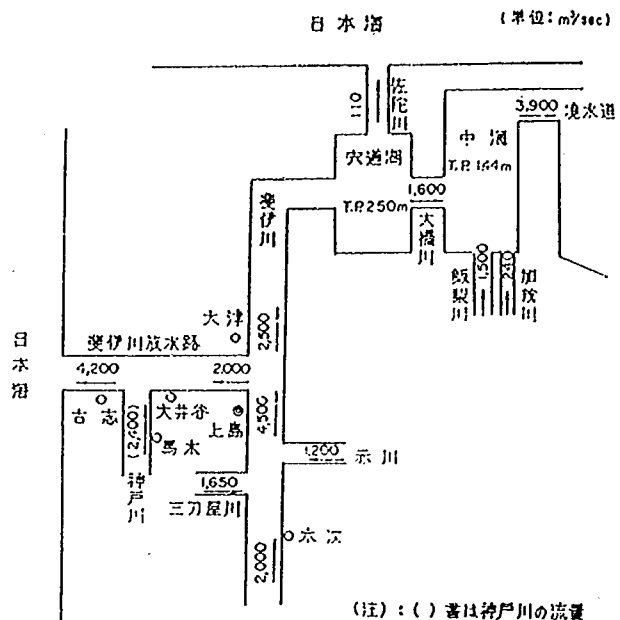


図-1 斐伊川水系計画高水流量配分図

出し、河床勾配を急なものとし、河道は右往左往し、しばしば氾濫していた。このことを端的に表わしたものが、伝説で有名な“八岐の大蛇”であり、斐伊川そのものにほかならない。現在のように矢道湖に流れ注ぐようになると、多量の土砂が矢道湖に流入するため、矢道湖は徐々に狭まり、その矢道湖周辺は小さな洪水でも湖水面の上昇により、しばしば氾濫する状態になってしまった。

そこで図-1に示すような流量配分計画に基づく治水工事が実施されることになった。すなわち基準地点の大津において、計画高水流量をそれまでの $3,600\text{m}^3/\text{s}$ から $4,500\text{m}^3/\text{s}$ (上流のダムで $600\text{m}^3/\text{s}$ を調節して) に改訂した。これに伴う施設計画の一環に放水路計画がある。これは、斐伊川本川の流量を減らすことを目的として、斐伊川の洪水の一部を放水路を通じて神戸川へ分流させようとするものである。本川流量と放水路流量を5対4の比にするというこの計画は、単に水量の調節だけでなく、その際の分流機構、特に本川側の河床変動、放水路への流入土砂の量的評価という非常に難しい問題を含んでいる。

斐伊川模型実験は、この放水路計画の水利的検討の一つの手段として行われたものである。

* 建設省土木研究所河川部河川研究室

** " " 河川研究室主任研究員

Akira Sakano and Koichi Yamamoto: Similarity of Moveable Bed Model by Using Coal Sands

2 検証実験において模型上で再現しようとしたこと

実際に模型実験で明らかにしなければならないことは次のようなことである。

- 1) 放水路にどれだけの流入土砂量があるか。
- 2) 計画の分流比どおりに水が流れるのか。
- 3) 洪水時のわん曲部の深掘れはどの程度であり、またどの程度の護岸工、あるいは護床工が必要か。

以上のことを明らかにするためには、洪水時の実際の河川、また模型河川の流砂量、小規模河床波の形態、河床の抵抗係数、中規模河床波のスケール等が、流量によってどう変わっていくのかということに関する知識が必要である。模型実験ではこのような現象について、実物と模型での相似が成立することに意味があるので、これらに関する十分な知識があれば、検証実験の必要はないが次節で述べるように、砂河川の模型実験の方法はまだ確立されていない。実験は相似条件を探りながら進めていかなければならず、模型で生じた現象が、現地の河川とどれだけ似ているのかを検証しながら進めていく必要がある。検証の対象にしたのは、1972年7月の洪水（最大流量 $2,333 \text{ m}^3/\text{s}$ ）後に撮影された写真と洪水数か月後に行われた横断測量結果である。この検証実験によって主に見ようとしたものは次のごとくである。

- 1) 斐伊川実河川で生じている中規模河床波の平面的な形状を似せることができるのか。
- 2) 洪水によって、この中規模河床波の平面的形状のスケールの変化、また、その変化速度を似せることができるのか。
- 3) 小規模河床波の砂堆から平坦河床へ移行する形態を似せることができるのか。
- 4) 河床の抵抗が、現地と同様となるか。

以上である。

3 模型実験の条件設計のための基礎知識

模型の縮尺が決まると、序章で記述したような理由から使用する底質材料は、ほぼ決まってしまう。模型は1/50の縮率とし、底質材料は図-2に示す石炭粉（平均粒径 $\phi = 0.03 \text{ cm}$ 、水中比重 $s = 0.5$ ）とした。この模型上で、どのような条件の水理量で実験を行ったら良いかを知るために行った基礎実験と、実物と模型で生じる現象をいかに推定したかについて簡単に述べておく。

3.1 流砂量

図-3の太線は、斐伊川の模型対象区間（勾配約1/800）の河床構成材料のうち主モードの河床材料の無次元流砂量 $q_{B*} = q_s / U_* d_m$ と無次元掃流力 $\tau_* = U_*^2 / s g d_m$ の関係の推定値を示したものである。ここで q_s は河床の主モードの材料の流砂量、 U_* は摩擦速度、 d_m は河床材料の

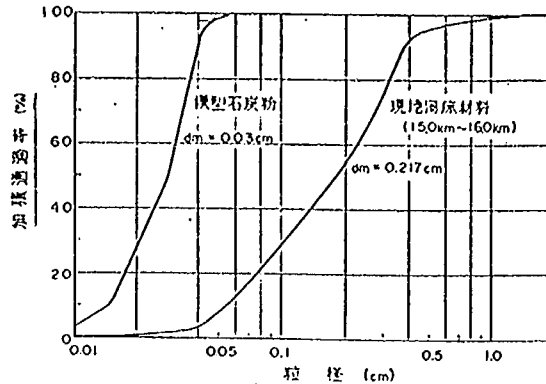


図-2 模型および現地河床材料の粒度分布図

平均粒径、 g は重力加速度である。図中の推定線は、多くの実験資料と実際の河川の資料より推定したものである（文献(1)参照）。図に示すように τ_* が0.4付近で若干流砂量が減少するのは、河床の形態が砂堆から砂漣に変わるためであり、さらに τ_* が2付近になって、急激に流砂量が増加するのは、河床の形態が砂堆から平坦河床へ遷移するためである。これまで流砂量を示すのに、土研式やブラウン式等を用いていたが、実はこのような流砂量と河床形態の密接な関係を見逃していたことになる。なお図中には斐伊川で土研式掃流採砂器によって観測された流砂量と掃流力の関係も示しておいた。これによると、 $\tau_* = 0.3$ 程度までは推定値と実測値はほぼ一致しているが、それ以上の τ_* ではまったくといって良いほど一致していない。これは推定線の方に間違いがあるのではなく、むしろ採砂器や採砂方法の方に問題があるものと考えられる。

石炭粉の流砂量は、十分な実験的検討資料がないので幅60 cm、深さ50 cm、長さ30 mの両面ガラス張水路を使って、勾配1/200、1/500、1/770の3種の河床勾配の時の流砂量を測定した。流量は斐伊川で問題となる $400 \text{ m}^3/\text{sec} \sim 4,500 \text{ m}^3/\text{sec}$ に相当する値とし、この水量を水路に通水している（実際に模型に与えた単位幅流量は縮尺スケールを h_r とすると、 $q_r = h_r^{3/2}$ の流量スケールとなる）。その結果は図-3に示してある。同図から分かるのは流量が増加したにもかかわらず、無次元掃流力が大きくならずまた流砂量は急増している。これは現地相当流量が $1500 \text{ m}^3/\text{sec}$ 付近の時に、河床が砂漣から平坦河床に変化し、河床の抵抗が、急激に減少し、水位の増加なしに流速が増加するためである。したがって、図-3のように、無次元掃流力と相対水深だけで、流砂量を表現するのは困難となってくる。つまり、河床の小規模河床波が変化する水理量の所では、抵抗係数に関する情報が流砂量を表現するために必要となってくる。今回は以上のことより、現地相当単位幅流量と現地相当単位幅流砂量（体積）の関係図（図-4）を使って、模型と現地の流砂量の比較をすることにした。

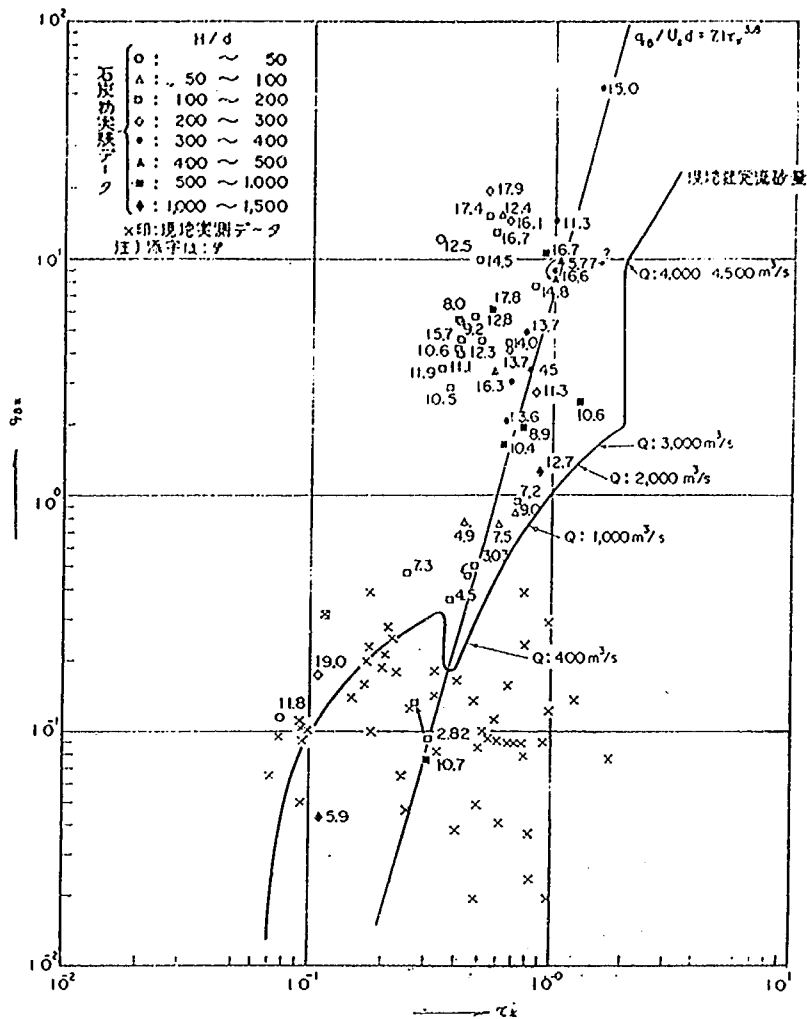


図-3 石炭粉および現地流砂量

3.2 河床の粗度

図-5の太線で現地河川の抵抗係数 ϕ (平均速度 U_m ÷摩擦速度 U_*)の推定値を示した。この推定値も多くの実験資料と実際河川の資料を基に作成された。図中には斐伊川での観測結果も記入しておいた(文献(1)参照)。 r_* が1以上のデータは少ないが、それ以下の領域ではほぼ推定値と一致している。 r_* が1以上になると、河床の状態が砂堆から平坦に遷移するような状況になるが、この領域のデータが少ないということは、現地の今までの洪水ではこのような状況になっていないことを示している。しかし計画高水に近い洪水が来た場合には r_* が2以上となり、河床は平坦になると同時に、 ϕ の値は大きくなると推定される。つまり流量が3,000~4,000 m³/s付近になると、水位の増加なしで流量と流速が増加し、流速は急に2倍も増加することが予想される。これに対して石炭粉を実験河床材料に用いた場合の ϕ 値は、現地相当流量400~1,000 m³/secで $\phi=7\sim8$ 、1,500 m³/sec以上で $\phi=15\sim18$ 程度である。この ϕ 値が変わるのは

小規模河床波が砂堆から平坦河床に変わるためであるが、現地よりも小さな現地換算流量でこの状況が生じている。

3.3 中規模河床波のスケール

山本⁽¹³⁾と深見⁽²⁾は、多列砂州のスケール H/d_m があまり小さくなければ、ほぼ水深によって決まってしまう砂州の幅は水深の約100倍となることを示している。

石炭粉を用いた斐伊川模型からもこのことは言え、流量400 m³/s時の川幅と水深の比 $B/H \div 180$ 程度で3~4列の砂州が発生している。計画洪水時には流量が増加し B/H が100以下となるため、砂州が単列的なものとなることが予想される。

4 模型実験の条件の設計

模型は平面、縦断とも同一縮率(1/50)の幾何学的に相似な形のもので、模型の高水敷部分は、実際の洪水時に浸食等がないものとしてモルタル固定床としてある。さらに低水路内には、前述の特性および諸元を有する石炭の粉が約10 cmの厚さで敷き詰められている。したがって模型は実物の土や砂でできた河道と違って、そのかわりコンクリートモルタルと、石炭の粉によって造られている。

この模型にどのような形で洪水を与えてよいかが重要となる点である。ここでは前節で述べた知識を基に、“洪水中の流砂量(体積)を実物と模型で同一にさせる”という考え方で、模型の通水時間を調節して実験を行った。この場合河道の流砂量を無次元的に表わした場合に、現地と模型のそれが同一または同一勾配の相関で表わされることができれば、いかなる水理量下においても、現地と模型の流砂量の比は一定となる。ところが前述したように石炭粉の無次元流砂量と無次元掃流力の関係は実物のそれとは異なるために、流砂量の比は流量が変わると同一とはならない。そのため“一洪水中の流砂量(体積)を実物と模型で同一にさせる”という考え方で行おうとすると、洪水中的各流量ごとの時間縮率が違ってくる。したがって模型上で与えた洪水波形は、実物の洪水波形

よりもピーク付近でとがったゆがんだ形となる。模型における流量の与え方は、河床の砂レキ堆の履歴性等を考慮して、洪水前と洪水後に流量 $400 \text{ m}^3/\text{sec}$ を定流で数時間通水した。そして前述の目的を達成するために、昭和47年洪水大津地点（ピーク流量 $2,333 \text{ m}^3/\text{s}$ ）を用い、こ

の洪水一週間の航空写真とさらに、数カ月後の横断測量結果等を考慮し模型の相似性のチェックを行った。

5 実験結果と今後の問題点

水位、河床、流況等水理現象は、単独に存在しうるものでなく、相互的な因果関係によって結ばれているために、実験の考察に関しては、このことを考慮しておくことが必要である。

この実験では、1 通水実験中に数回の測定を実施しており、これらのデータから河床の抵抗係数 ϕ （流速と摩擦速度の比）を算出し整理すると、図-6に示すようになる。この河床抵抗の違いは、河床形態の履歴性、つまり河床形態の水理量に対する応答性の度合いを示しているのである。このことは洪水増水期には河床の形態が、砂礫や砂堆の領域から徐々に平坦河床へと移行するのに従って、河床の抵抗が小さくなり、洪水末期には、また平坦河床から砂礫にもどるが、十分な砂礫に発達しなかったことを示している。さらに洪水直後の河床の状態は写真-2に示すとおりであり、その中に砂礫と中規模河床波の共存も見られる。

以上の実験における現象が実物の現象とどれだけ相似になっているものかを表わすのに図-6に、現地洪水痕跡水位から求めた河床の抵抗係数を書き加えた。これによるとピーク流量時の抵抗係数 ϕ は実験におけるものとほぼ一致していた。このことは現地のピーク流量時の河床は一部遷移河床であったことを示そう。また写真-3の現地の洪水後の写真と比較すると、水衝部の位置、砂レキ堆の前縁線の位置などかなり一致している。

さらに実験におけるこの洪水前の平水時（ $400 \text{ m}^3/\text{s}$ ）の状況を写真-4に示すが、写真-1と同様、中規模河床波の平面的な形の相似性は良い。

つまり、模型河道上で河床形態の相似性という点では良好な結果が得られた。さらに実験で気づいた点をまとめると、

① 石炭粉を底質材料に用いた場合、河床の形態、流砂量は、同一掃流力で、数種のパターンを生じた。したがって、模型の流砂量を一つの式で表示することが困難であり、模型実験の精度を高めるには、さらに基礎的な検討を行う必要性を感じた。

② 洪水実験を実施する際に、洪水のピーク流量を数時間流したケー

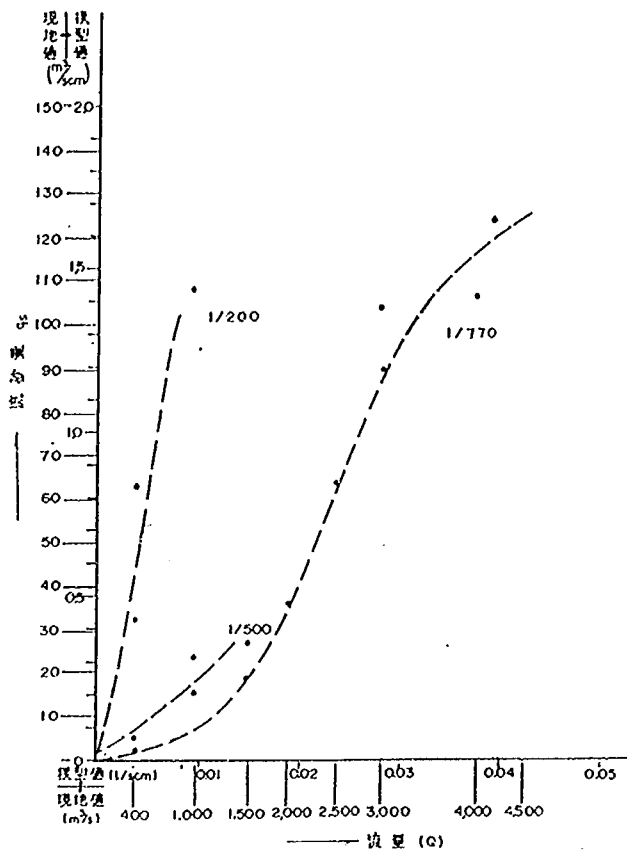


図-4 石炭粉流砂量

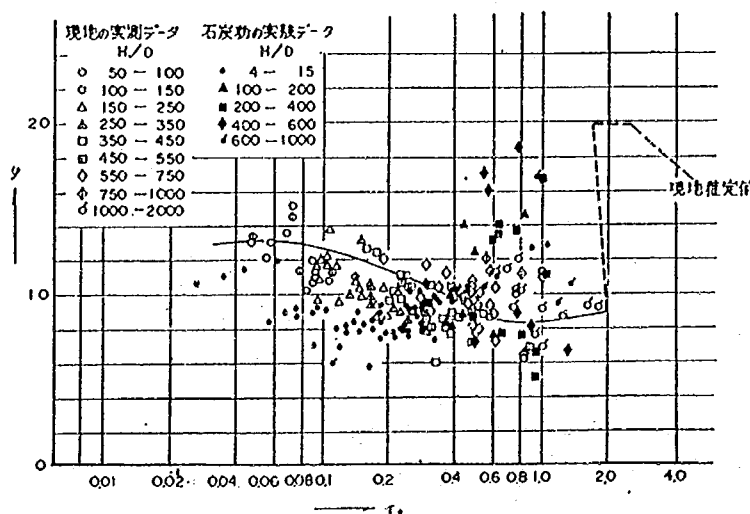


図-5 ϕ - τ 相関図

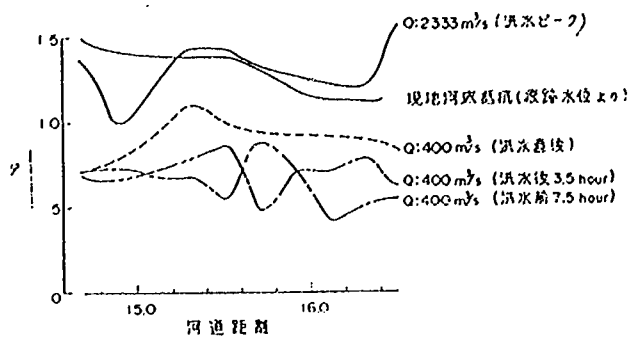


図-6 洪水中の河床抵抗の変化

スと、不定流で実施したケースを比較すると、前者の方がわん曲部の洗掘深、洗掘範囲とも大きな値を示しており、前者の方法で実験を行うことは、河道計画を立てる上で過剰な外力を模型で与えることになる。

おわりに

模型実験に要求されるものが、定性的なものから、定量的なものへと変化し、より高度化されつつあるが、模型上ではすべての現象を再現できるものとは限らない。したがって、模型実験で再現が可能なものと不可能なものとを明確にした上で実験を進めていくことが重要であろう。どの程度再現可能であるかの判断はその時の移動床に関する認識と、また模型設計のための基礎的な判断材料の量に大きくかかわってくる。今回、模型で使用する石灰粉の流送特性についての検討を行い、実物との相違点を今までよりさらに明確にした上で“流砂量を模型と実物で合わせる”という手段で実験を行い、中規模河床波に関しては、かなりのところまで相似にすることができた。しかし、さらに実験の精度を上げるには実物と模型の流砂特性に関するデータの収集が重要であると考えている。

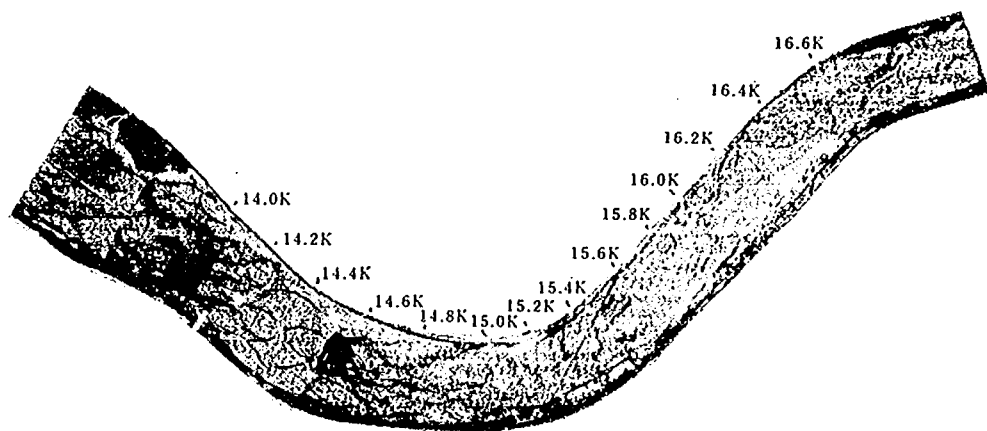


写真-1 平水時の河床状況 (現地)

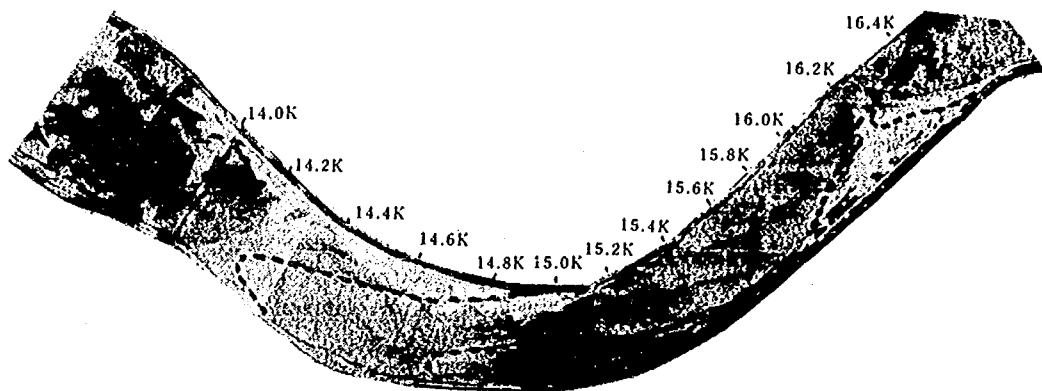


写真-2 昭和47年洪水後の河床状況 (現地)

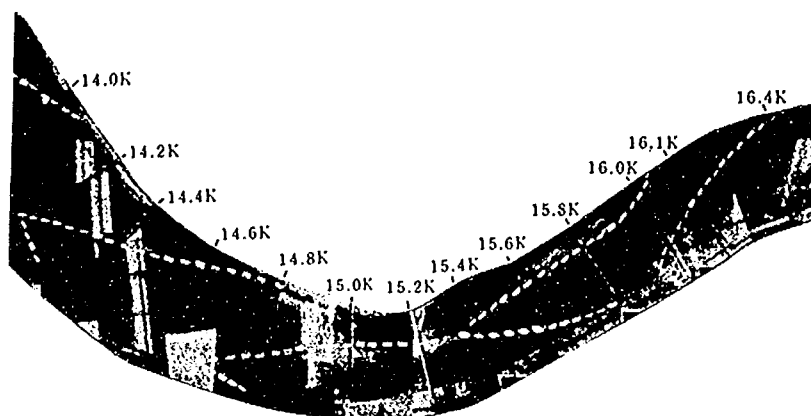


写真-3 洪水後の河床状況（模型）

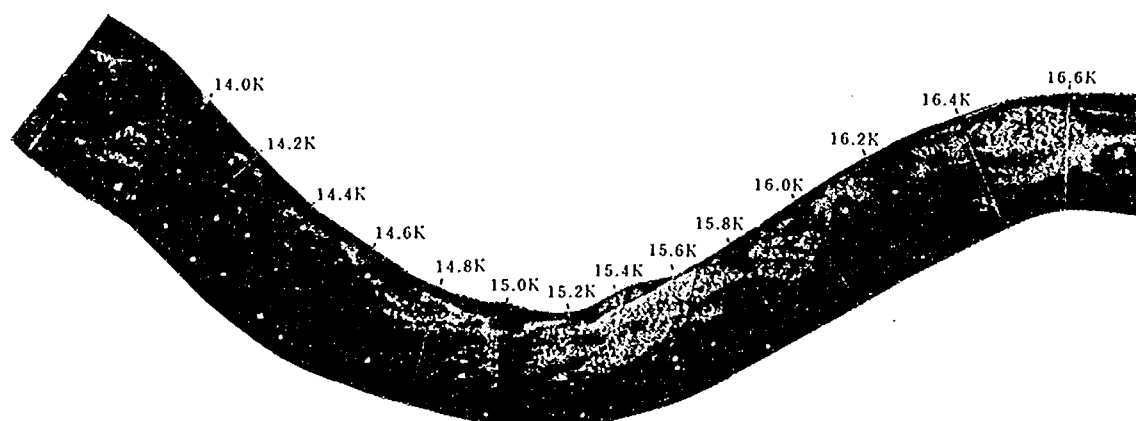


写真-4 洪水前の河床状況（模型）

参考文献

1. 山本晃一：河川における土砂の移動機構に関する研究ノート（Ⅱ）土木研究所資料第1543号，1980年
2. 深見親雄：砂礫堆と砂鏈・砂堆の共存，土木技術資料 Vol. 21-10，1979.
3. 山本晃一：相似律の観点から見た移動床の水理（Ⅰ），土木研究所資料第1059号，1975.

料粒径, h : 水深, B : 川幅, K : 粒度分布を表す無次元量, u_* : 摩擦速度, w_0 : 河床材料の沈降速度, Re : 粒子レイノルズ数, である。これらすべての無次元量をすべて同時に満足させることはできないので, 検討しようとする現象に関わりの深い無次元量を優先的に扱う。河床変動を調べるのが目的の実験の場合, これらの無次元量のうち特に τ , h/d , u_*/w_0 等が重要である。以上が移動床の相似則の概要である。

2.3 緩流河川の相似性に関する問題点

模型の諸元を決める場合, まず第一に河床材料も含めた幾何相似を考える。河床材料の粒径の大きい河川ほど模型の河床材料に大きな粒径のものをを用いることができるので, (3)式の Re , u_*/w_0 の影響が及ばず, 高い相似性を得やすい。ところが現地河床材料粒径が細かい緩流河川を対象としたとき, 模型に用いる河床材料粒径を非常に小さくすると Re , u_*/w_0 の影響が現れ河床形態や流砂形態, 流砂量の相似が成立しなくなる。一般には現地では砂堆あるいは平坦河床であるものが模型では砂澱が発達する。この場合河床抵抗が大きいので, 粗度係数の相似が得られなくなる。粗度係数の相似が得られないと移動床の相似則を満たさないばかりかフルードの相似則もくずれるので流砂, 流れの相似性が共に失われることになる。これが緩流河川の模型実験の相似性に関する問題点である。

砂澱の発生を抑制する方法は3つ考えられる。1つは模型を小縮尺のもので大きく製作することである。模型を大きく作れば河床材料も大きなものをを用いることができるのでこの問題を解決できる。しかし, 大きな模型を作ることは経済面, 労力の面からみれば必ずしも得策ではない。模型の全長は実験の機動性等を考えれば100m程度以下に抑えたいので, 日本の一級河川を対象とした場合1/50程度の縮尺が限度であろう。2つめは河床材料として軽量材料を用いる方法である。粘性の影響が無視できる程度に粒径が大きくかつ比重の軽い材料を用いれば, 砂澱の発生を防ぎ, かつ移動床の相似則のうちの最も重要な無次元量である τ を満足することができるので, 概ね相似が得られるものと考えられる。ただし, 比重が非常に軽いものを用いると, 砂粒に働く抗力, 摩擦力等の比と現地の比との差異が大きくなり, 流砂形態の違いが無視できなくなる。実際問題として, 水中比重 $S=0.5$ 程度の石炭粉が使用できる限界の軽量材料であると考えられる。3つめの方法は歪模型を用いる方法である。歪模型では, 鉛直縮尺と水平縮尺を変え, 河床勾配と水深を大きくするので大きな掃流力が生じる。このため, 歪模型は無歪模型より小さく造ることができる。このことは, 限られた実験場敷地においては実験可能な河川の数が大きくなることを意味する。しかし, この方法では河道自体の幾何形状が変わるので3次元的な流況,

流砂の相似性は失われやすく, 局所洗掘深や河床変動量を模型で調べる場合には歪度 (= 鉛直縮尺/水平縮尺) は概ね1.5~2が限界であると判断される²⁾。以上のようにより, いずれの方法にも限界があり, 事実この限界のために相似性の高い模型実験ができない河川も少なくない。

2.4 相似性の低さを考慮した緩流河川の模型実験の位置付け

これまで, 緩流河川を対象とした模型実験の困難さを述べてきたが, 緩流河川の模型実験が意味のないものとなるわけではない。以下のように模型実験を位置づけることによってより信頼性の高い河道改修ができると考えられる。すなわち, 模型の相似性についてあらかじめ十分検討し, 相似の得られる現象と得られない現象を種別しておくとともに, 相似性の低い現象については実験結果によってのみ現象の解釈を行うのではなく, 現地河道の資料など他の情報を加え総合的に判断する。

このような位置づけで行った模型実験の一例として, 典型的な緩流河川である江戸川の模型実験手順を以下に紹介する。

3 江戸川模型実験の概要

3.1 実験の目的

江戸川総合開発事業は, 新規水資源開発を行い都市用水を確保することを主目的に, 江戸川水閘門, 行徳可動堰の改築と河積容積の確保のための河道改修および低水護岸の整備, さらに水質維持のために処理水を河道と分離し高水敷上を流下させる流水保全水路の建設を行うものである(図-1参照)。これらの事業のうち, 河道改修は現況低水路を広げかつ低水路の位置を河道中央に移動させる大規模なものであり, 河道設計においては河道の安定性に関する十分な事前検討が必要である。また, 流水保全水路の設置位置に関しても, 堤脚近傍に設置すると堤脚近くの流れを速め堤防安全度を低下させ, 逆に河岸近傍に設置すると洪水時に低水路で巻上がった土砂が保全水路内に堆積し浚渫が必要になるなどの問題を引き起こす可能性があるため, 設置位置は慎重に決定する必要がある。

このため, 低水路設計の妥当性の把握, 河道内における適切な低水路の位置決定, 流水保全水路の設置位置の決定を目的とした模型実験を行うことになった。実験対象区間は, 河道が蛇行し江戸川全区間のなかで最も複雑な流況を呈するとみられる16.5km~25.0km区間(図-2参照)を対象とした。この区間は河床勾配1/4000程度, 河床材料の平均粒径0.3mm程度であり緩流河川に属する。

3.2 模型の概要

模型の縮尺の選定は, 以下のような考えに沿って行った。模型の製作範囲と実験場の面積を考えた場合, 模型の縮尺は1/60程度が上限となる。現地の河床材料は平均

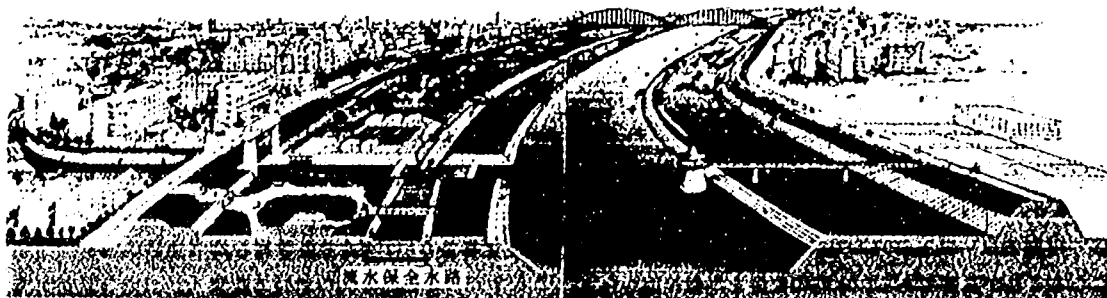


図-1 流水保全水理の概観

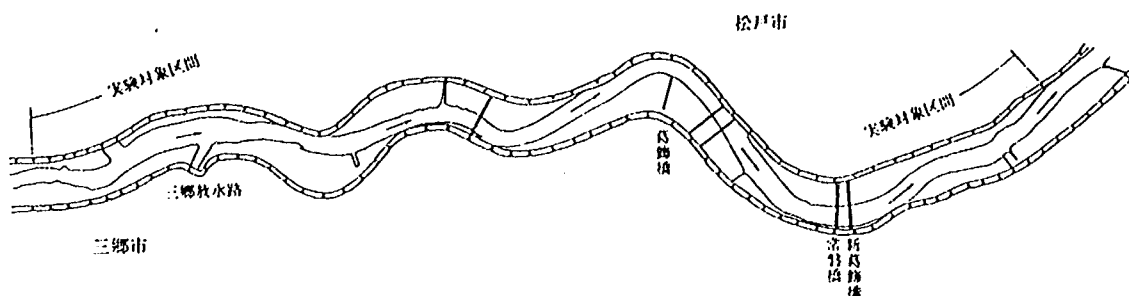


図-2 江戸川模型対象区間の平面図

粒径0.3mm程度の細砂であって、模型の河床材料にはできる限り比重が軽く粒径の小さいものを用いる必要がある。この条件を満たし、比較的簡単に入手可能な材料は、平均粒径0.2mmの石炭粉である。ところがこの材料でもまだ比重、粒径が大きすぎ、中小洪水時に模型の河床材料が移動しない問題が生じる。そこで模型の河床材料をさらに動きやすくするために、鉛直縮尺1/40、水平縮尺1/60の歪縮尺を採用することにした。歪模型にすれば、水深を大きくできるのに加え、河床勾配も大きくなるので河床材料は十分に移動可能となる。この場合、 $(u_*'/u_{*0}) \approx 1.0$ 、 $\tau_*'/\tau_{*0} \approx 10$ となる。この条件下では、砂澱の発生が予想されるが、他に適当な材料がないので妥協せざるを得ない。

なお、粘土層が河床に露出しているとみられる地点には碎石を置き固定床化した。

3.3 本模型の相似性に関する問題点

本模型実験の主目的を考えた場合、模型は高水数への浮遊砂の堆積現象および低水路河床の局所的な河床変動について十分な相似性を有していなければならない。しかし、3-2で述べたように、江戸川模型は相似性を得るには厳しい条件のもとで設計されており、相似性の低さが懸念される。本模型の相似性に影響を与えるとみられる問題点は次の2点である。

① 歪縮尺の影響

模型が幾何的な相似となっていないために3次元的な流況は相似にはならないと考えられる。

② 粗度係数のずれの影響

現地河道の低水路粗度係数はつぎのような挙動を示すことが現地洪水資料より明らかとなっている(図-3参照)。中小洪水の場合、河床には砂堆が生じ粗度係数は0.03程度となる。大洪水の場合、河床は平坦となり粗度係数は0.02程度まで下がる。模型の粗度係数は検証実験の結果、計画高水流量以下の流量では洪水規模にかかわらず河床に砂澱が生じ粗度係数は現地換算値で0.03程度となった。このため中小洪水の場合には粗度係数の相似はほぼ得られるが、大洪水時には相似は得られなくなる。

信頼性の高い検討を行うには、以上の2つの問題が高水数への浮遊砂堆積と低水路内の河床変動の相似性にど

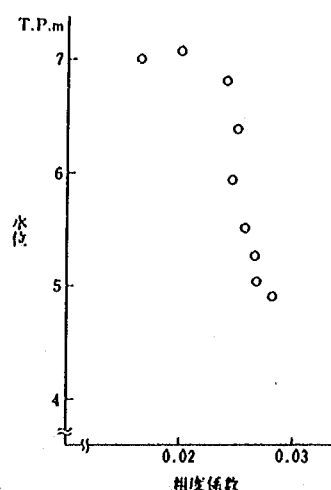


図-3 江戸川野田地点における水位と低水路粗度係数との関係 (S.57.8洪水)

のような影響を与えるかを把握し、問題があれば他の情報を利用して実験結果を補わなければならない。以下にその過程を示す。

3.4 相似性の検討と実験の補完法

3.4.1 高水数への浮遊砂の輸送、堆積

1) 相似性の検討

本模型実験においては、河床材料である0.3mmの砂が堆積することのない流水保全水路の位置を決める必要がある。よって模型では、0.3mmの砂の河畔上への堆積範囲が相似になることが重要である。水路の位置を堆積範囲から遠ざければよいので堆積量については必ずしも相似とならなくとも良いと考える。

高水数への浮遊砂の輸送、堆積は、低水路で舞上がった砂が高水数への乗り上げ流れや拡散によって高水数へ運ばれ、高水数上で掃流力の低下とともに沈降することによって起こる。したがって、高水数への堆積現象の相似性について検討するには、浮遊砂濃度分布、高水数への乗り上げ流れ、高水数上の堆積環境の相似性について考える必要がある。

① 浮遊砂濃度分布について

定常等流における浮遊砂濃度分布式としては、以下に示す Rouse 式がよく知られている。

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{h-z}{a} \cdot \frac{z}{h-a} \right)^p$$

$$p = w_0 / \kappa \cdot u_* \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 h :水深、 κ :カルマン定数、 C_a :基準点 $z=a$ での濃度、である。

上式によれば、浮遊砂の濃度分布等には u_*/w_0 、 C_a が大きく関わっていることがわかる。本模型においては、粗度係数が相似となれば模型と現地とで u_*/w_0 の値はほぼ等しくなる ($(u_*/w_0)_r \approx 1.0$)。しかし、石炭粉の基準点における濃度 C_a の相似性は成立していないので、堆積速度の相似性は成立しないが、模型実験の目的が堆積範囲を知ることにあるので C_a の相似性が成立しなくても良いと考える。粗度係数が相似となりフルード相似が成立していれば、堆積範囲については検討可能であると考えられる。

② 高水数への乗り上げ流れについて

高水数への乗り上げ流れは、低水路内の流体が遠心力や慣性力の作用により高水数に輸送される現象である。よって、低水路内の流れの相似性の検討することにより乗り上げ流れの相似性が検討できるものと考えられる。

まず、低水路内の流れの相似性に対する歪縮尺の影響度を推定する。(1)式中の $(W/V)_r = (z/y)_r$ の条件に注目する。歪模型の場合、右辺は1でないので鉛直方向の流速比と水平方向の流速比が異なることになる。したがって、歪模型においては鉛直方向の流れが無視できないところ、すなわち2次流強度の強いところでは流況の相似

は得られない。江戸川模型の場合、広長方形断面であり、また歪度が1.5と小さいので、河岸際、湾曲の特にきつところを除き歪縮尺の影響は小さく、平面流況の相似が得られるものと考えられる。

一方、粗度係数のずれの影響度は、以下のように推定した。高水数への乗り上げ流量と水面の横断勾配は密接な関係があると考え、粗度係数のずれと湾曲部外岸側の水位上昇量との関係を調べた。流れが等流に近い場合、水位上昇量 Δh は次式で表される。

$$\Delta h = \frac{b_c \cdot u_*^2}{g \cdot R} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 b_c :低水路幅、 u_* :低水路平均流速、 R :水路中央での曲率半径、である。大洪水時における模型の粗度係数はフルード則により決まる値の約1.5倍の値を示す。このとき流速はマニング式より推定すれば、約78%程度に減速される。この場合、水位の上昇量 Δh は(5)式より61%程度になることがわかる。この結果より、粗度係数のずれは、わん曲外岸での水位上昇量さらには高水数への乗り上げ量に大きな影響を与えるものと推定される。

③ 浮遊砂の堆積環境

浮遊砂の堆積環境が相似となるためには高水数上の流況が相似となり、かつ u_*/w_0 が現地と一致することが必要である。本模型の場合、①②で述べたように大洪水時には粗度係数の相似が得られないため浮遊砂の堆積環境は相似にならない。

2) 実験の補完について

以上3つの現象に関する相似性の検討結果を総合すると、いずれの場合も歪縮尺の影響は小さいと判断されるが、粗度係数のずれが相似性を低下させている結果となった。仮に粗度係数の相似が得られれば堆積に関する上記3つの現象は概ね相似になると考えられる。そこで、高水数の堆積に関する検討を行う場合には、模型を固定床に改造するものとした。固定床模型は粗度係数の調節が可能であるので現地と粗度係数を相似にすることができる。この模型を用い、河床材料を投入し高水数への堆積状況を調べれば、高水数上への浮遊砂の堆積範囲に関する適切な情報を得ることができると考えられる。

3.4.2 低水路における河床変動

1) 相似性の検討

本模型実験では、低水路内で局所洗掘や堆積などの河床変動を軽減するような低水路法線を決定する。したがって、模型では局所的な河床変動量(特に局所洗掘深は、護岸等の設計において必要な情報である)、およびその発生位置が相似になることが必要である。

① 局所洗掘の発生位置の相似性について

江戸川模型における局所洗掘の発生位置の相似性に与える歪縮尺の影響は、3.4.1で述べたのと同様の考え方

により推定できる。江戸川模型は浪度1.5と小さくまた幅が広く薄い流れであるので、粗度係数の相似が得られていれば河岸近傍やわん曲のきつところなど2次流の影響が無視できない地点を除くところで流況の相似がほぼ得られるものと考えられる。一方、低水路の粗度係数のずれは、流速や水深の相似性をも低下させるので、流れの相似性にも影響を与え、洗掘の発生位置にも影響を与える可能性がある。そこで、粗度係数のずれが洗掘発生位置にどの程度影響を与えるかを検証する必要がある。洗掘位置の検証は、模型と現地の洗掘位置を比較することにより行うのが理想的な方法である。しかし、江戸川の場合、現地の横断河床高は縦断方向に数百mピッチで測定されており、これより最大洗掘位置を特定するのは危険である。そこで本検討では、以下に述べるモデルを用い粗度係数のずれの影響について調べる。このモデルは工学的には精度よく水衝部の推定を行うことができると考えられる。モデルを用いる方法は、対象とする現象に対する特定物理量の応答性を見るのには有効な手段である。

今、局所洗掘の発生位置は水衝部の発生位置と一致し、かつ水衝部は河岸近傍で流速が最大となる地点と考える。蛇行河道の法線形を sine-generated-curve で近似し、流れを準定常と考えれば、流速の偏倚は次式で表現することができる (図-4 参照)¹¹⁾。

$$\frac{u}{u_0} = \sqrt{a^2 + b^2} \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot s}{L} - \alpha\right)$$

$$\cos \alpha = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

$$a = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h_0}{f \cdot L}\right)^2 \cdot \frac{\frac{u_0^2}{2 \cdot g \cdot h_0} + 1}{\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h_0}{f \cdot L}\right)^2 + 1} \cdot \frac{n}{h_0} \cdot f \cdot \theta$$

$$b = \frac{2 \cdot \pi \cdot h_0}{f \cdot L} \cdot \frac{\frac{u_0^2}{2 \cdot g \cdot h_0} - \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h_0}{f \cdot L}\right)^2}{\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h_0}{f \cdot L}\right)^2 + 1} \cdot \frac{n}{h_0} \cdot f \cdot \theta$$

.....(6)

ここに、 L ：蛇行一波長分の河道長、 f ：摩擦損失係数、 S ：河道距離、である。 $n=B/2$ とおくと左岸での流速、 $n=-B/2$ とおくと右岸での流速となる。この式は、最大

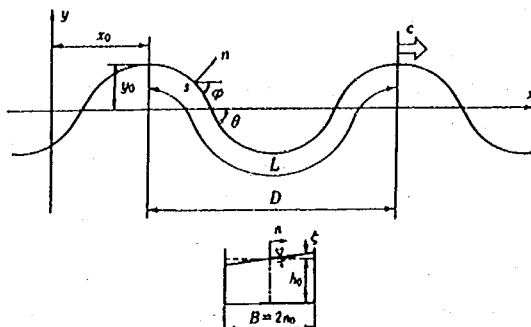


図-4 記号の定義

曲率の位置 $s=0$ から下流 $s=\alpha \cdot L/(2 \cdot \pi)$ の地点で水衝部が発生することを示している。

ここで、(6)式を用い粗度係数の相似が崩れる計画高水流量時における水衝部位置を推定する。(6)式に計画高水流量時の現地水理量(水深10m、 $L=1500$ m、粗度係数0.02、水面勾配1/4000)を代入し、水衝部位置を計算するとともに、模型水理量として粗度係数のみ0.03とし計算した。その結果、現地の水衝部の発生位置は最大曲率地点より約729m下流、模型の水衝部の発生位置は702m下流となった。局所洗掘発生位置のずれは27m程度で十分無視し得る程度である。以上の結果は、本実験の範囲では洗掘位置と粗度係数との関連性は薄いことを示していると考えられる。これらの考察により、洗掘位置については本模型で把握可能であると判断される。

② 洗掘深について

洗掘深の相似は、現地と模型とで砂の流下方向および流下形態が一致すれば得られる。砂の流下方向が一致するためには、3次元的な流向、河床形状、砂の流下形態が一致する必要がある。また砂の流下形態が一致するには移動床の相似則を満たしていることが必要となる。

江戸川模型の場合、幾何的な重の影響により2次流強度、河床面の勾配は現地と模型とで異なる。また、移動床の相似則において特に重要な無次元量 τ 、 Re 、 h/d は現地と模型とで大きく異なる。このため、砂の流下方向、砂の流下形態ともに現地と相似にはならないと推定され、洗掘深についても相似が得られないと考えられる。洗掘深の相似性に関わる現象のずれの程度がかなり大きいことを考えれば、少々工夫では洗掘深の相似は得られないと推定されるので、洗掘深の推定は模型実験結果と他の方法による推定結果を総合的に判断することにより行うものとする。

2) 実験の補完について

上記のように、洗掘位置については模型実験により検討可能であると考えられる。洗掘深については模型実験結果は参考となる程度で定量的な解析には用いることはできない。そこで、洗掘深については以下の方法により推定する。

蛇行河道において水衝部に発生する局所洗掘深は河道の曲率半径、水深、川幅などと強い相関があることが知られている。これらの諸量を江戸川の現地河道に関する資料より読取り、整理を行えば、この整理結果を用いて江戸川計画河道の洗掘深を推定できるものと考えられる。曲率半径 R 、低水路幅 B 、平均水深 h 、洗掘深発生地点での水深 D を読取り、 $R/B \sim D/h$ グラフに整理した結果を図-5に示す。水理量の算出に際しては、河道形成に密接な関係のあるとされる低水路満杯流量時を想定した。調査対象地点の選定に際しては、河床下の土層構造を考慮し、粘性土層など洗掘深に影響を与える可能性のある

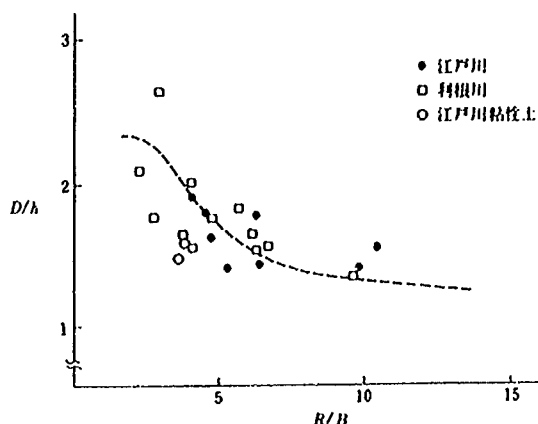


図-5(a) 江戸川0~22km区間における $D/h \sim R/B$ 関係

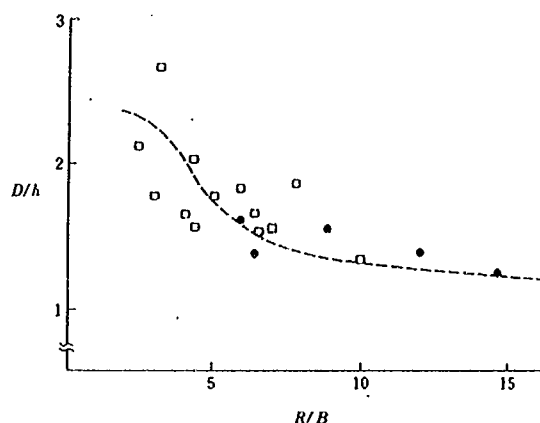


図-5(b) 江戸川22~40km区間における $D/h \sim R/B$ 関係

地点は他の点と区別した。なお、図には参考までに他の河川の資料も合わせて記入してある。この図によれば、 R/B が小さくなるにつれて D/h が大きくなる傾向が見られる。また、河床下に粘性土層があると見られる地点

の資料は、 D/h が小さめとなる、すなわち掘れかたが小さめとなる傾向を示した。

この図を用い、計画河道の平面形状より局所洗掘深の推定を行う。

4 おわりに

模型実験で生じる現象は現地の現象とすべて相似にはならず、実験により得られる解は近似解である。これは、程度の差はあるが緩流河川を対象とした模型実験に限ったことではなくあらゆる河川模型について言えることである。したがって、質の高い河道計画を行うためには、模型実験結果をすべてうのみにするのではなく、模型に生じる現象の相似性に対して常に留意するとともに、模型以外の情報、例えば現地資料の収集、数値計算等を行い、模型実験により得られた結果を補完していくことが重要であるといえよう。

参考文献

- 1) Englund : Flow and bed topography in channel bends, J. Hyd. Div., ASCE, 100, HY11, 1974
- 2) 山本晃一：河道特性論，土木研究所資料第2662号，1988年8月
- 3) 土屋昭彦，須賀堯三，馬場享：利根川移動床模型実験報告書，土木研究所資料第563号，1970年3月
- 4) 吉川秀夫：流砂の水理学，丸善
- 5) 山本晃一，坂野章：河川移動床模型実験材料としての石炭粉の移動特性と斐伊川模型への応用，土木研究所資料第1802号，1982年3月
- 6) Jansen : Principles of river engineering part4-3 scale models

IV 河口部水理模型実験の問題点

正員 須賀 晃三

正員 ○山本晃一

1. はじめに

河口部に生ずる現象は非常に複雑である。この複雑さは河口部の合理的な河口処理計画を打ち立てることを妨げている。この原因は河道に海からの影響要素（波、漂砂、飛砂、海水）が加わるために地形変化の速度が激しく、それを予想し、計画の中に組み込むことに困難を覚えるからである。

しかし現実には河口があり、河口の状態をある一定の状況内に置きたいという欲求は、河口現象の法則性、因果性の認識を深め合目的、合理的な河口処理計画方法を追求することを要求する。それゆえ、今までにも多くの河口現象、河口処理工法に関する研究が行なわれ、成果をあげてきた。だが現実の河口は個々の河ごとに独特な相を持ち単純な基礎的研究では手が出ないことが多い。その原因としては、1)河口現象を支配する影響要素が多く、時間および距離のスケールが異なる

ii) 外力の変動性、非一様性および底質の非一様性、iii) 作用の相互性（非線型性）、iv) 河口が移動域に
有り平衡概念が使えない河が多いこと、v) 河口に対する欲求（計画目的）の多様性、vi) 観測の困難さ
等々があるからである。実際に河口計画を立てる場合には、現地観測資料、他河川からの類推、水理
計算、模型実験などを基にし、計画者の経験を加え総合的な判断が下される。

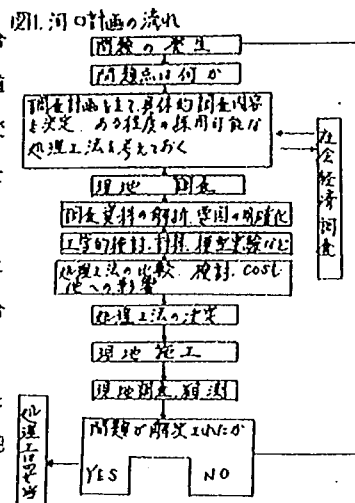
ここでは河口処理計画を立てる場合の一手段である河口模型実験の問題点と模型実験結果をどのように河口計画の中に位置づけるかを筆者らの職場で行なった模型実験を通じて述べてみたい。

2 河口模型実験での検討項目と河口の特徴

河口模型実験によって明らかにし検討してほしいと望まれていることを述べると、

- 1) 高潮時の波浪の進入程度、波高分布、堤防へのはい上りを把握し、もって防潮計画を立てたい。
2) 洪水時における河口部の水位を明らかにしてほしい。3) 河口砂州のフラッシュ程度、河口部の洪水時の河床高を明らかにしてほしい。4) 河口砂州の発生を防ぐため河口導流堤を計画しているが、どのような導流堤なら効果的か、また航路のための河口水深は維持できるか、5) 河口部の浚渫計画が有るが、これは維持できるか、局所的な洗掘や堆積が生じるか等々である。この内1)の問題は固定床模型である程度解決できるが(木曾三川、大田川)、他の問題は河床、海床変化を伴った移動床実験でなければ検討しえない。

この問題の模型実験での検討は、今までの河道模型実験と異なつた点が多々ある。その点を明らかにするには河口現象と河道の現象の違いをふまえておかなければならない。それらを簡単に述べると、1)河口は波と流れの共存の場であり、その強さ、方向は刻々変動する。洪水時には河川流の強さが卓越し、波の作用をあまり考えなくても良いが、通常は波と河川流が共存し、複雑な流れを生じる。そ



れに応じて河口部の地形変化は複雑に動き変動が激しく、外力の変化の積分の形で現われる。また外力の急変は河口地形を短時間に覚えてしまうこともある。

1) 河口はまた淡水と塩水の共存の場でもあり、密度流の効果の強い所である。この淡水と塩水の存在状態も、河川流、潮位、風の変化によって変動する。この塩水と淡水の存在は、河口部の地形変化、特に土砂の堆積場所、砂州の形成等に大きな影響をあたえる。

2) 潮位の変動があること、この要素は河口最狭部断面などに影響をあたえる。太平洋側では変動が大きい、日本海側では小さい。

3) 河口に存在する底質材料の供給源として、河からと海からを考えなければならない。また川砂と海砂では粒度分布が大きく変わることが多い。

これらの特徴を河口模型の中に全てくり込むことはできず、実験は、河口現象の一部、特殊化された場の中でしか行うことができない。この場合、河川ごとに影響要素の卓越性を把握し、実験条件を決め、無視したものの効果を常に頭に入れておく必要がある。

3 具体的実験例²⁾

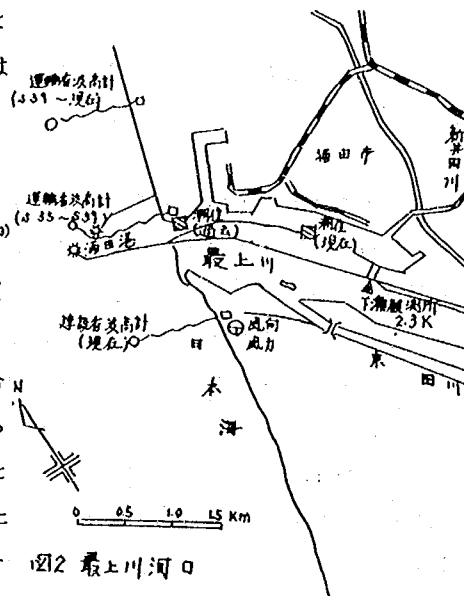
ここでは具体的な実験例、主に最上川（この川は河口左岸に大きな河口砂州があり、冬期には波浪によって開口幅50m、春先の融雪出水(2000m³/s)によって200m前後の拡大をくりかえしている。この砂州のため、洪水時水位が上昇し危険であるため、導流堤工法および浚渫によって水位低下の計画がなされている。）を通じ、どのような考え方で実験を進めたか、また今後河口現象を解明する上で考えなければならない点を模型実験の結果をとおして述べてみよう。

○ 模型範囲および縮尺

模型対象範囲は河道部3.2Km（水位観測点を含み、河川蛇行の影響を考慮）海域は沖合1.5Km、汀線方向は、酒田港防波堤より1.2Kmとした。底質の波による移動限界水深はほぼこの中に入る。ただ汀線方向の長さは導流堤による汀線変化を見るのには小さすぎた。なお造波板は16m（現地約1,000m）しかなく実際には実験できない。縮尺 $\frac{1}{60}$ とした。これより小縮尺にすると相似性や測定に問題を生ずる。河床材料は石炭粉（比重1.5、 $d_m = 0.021\text{cm}$ ）を使用した。

○ 相似律

筆者らは海岸地形の波による変形は $\frac{H_0}{L_0} \sim \frac{H_0}{d}$ or $\frac{\sqrt{gH_0}}{W_0}$ 、 $S = (\sigma_s/\rho - 1)$ および初期形状などが支配すると考えている。ここで W_0 は沈降速度、現地と模型は上述の無次元量を等しくすることが望ましい。しかし現地の海底砂の粒径は0.025cmであり汀線および河道内は0.075cmである。粒径を縮尺に合わせて縮めると底質材料がシルトとなり種々の問題が生じるので手元にある材料として石炭粉を使用した。これを使うと $(\frac{\sqrt{gH_0}}{W_0})_r = 2.2$ となり、現地の方が浮遊砂の濃度分布が上下方向に均一になる。ここで r は現地スケール/模型スケールの意味である。ただし汀線付近は $(\frac{\sqrt{gH_0}}{W_0})_r = 1$ に近い。

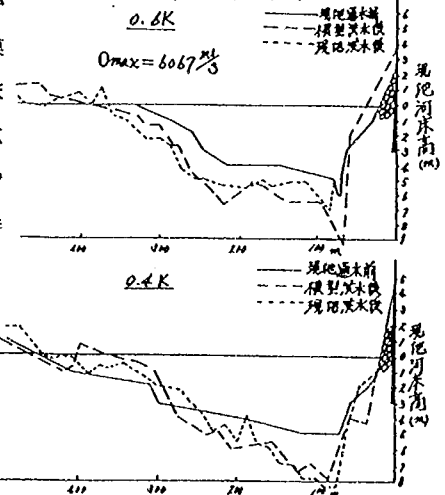


砂の比重が小さいと浮遊砂の濃度は同一の $\frac{U}{U_c}$, $\sqrt{gH}/W_0$ に対して大きくなる。また s の違いは平衡海浜形状に影響をあたえるようである⁹⁾。河道部の河床変動は $(\frac{V}{\sqrt{gH}})_r=1$, 無次元掃流力比 $\tau_{*r}=(\frac{U}{U_c})_r=1$, $(\frac{V}{W_0})_r=(\frac{\sqrt{gH}}{W_0})_r=1$, とすることが望ましい。この模型では $\tau_{*r}=5$, $(\frac{V}{W_0})_r=1$ で同一流量では模型の方が動きにくい。ただ浮遊砂の濃度分布形はほぼ相似と思われる。

○河床変動の時間縮尺の決め方

砂州のフラッシュや河道の洗掘、堆積を模型実験で求める場合、河床変動の連続式から求めた時間縮尺で洪水を流した方がよい。流砂量の多い場合には、 τ_{*} の違いは時間縮尺の中にある程度くりこんだ形で解決しうる。ただ、浮遊砂の多い場合には、洗掘場所、堆積場所を合わせるためには $(\frac{V}{W_0})_r=1$ を必要としよう。この時間縮尺を求める場合、流砂量公式に疑問があるので、検証実験にたよることになる。最上川では洪水前後の河床変動、砂州のフラッシュ量、ピーク水位の現われる時刻、水位が合うかどうかを、模型と現地データを比較することによって時間縮尺を調べた。検証実験によると $t_{sr}=40$ 位いであることがわかった。図3は現地洪水前後($Q=6067\text{m}^3/\text{s}$)の河床高と模型の変化を示した。これによると $(\frac{V}{W_0})_r=1$ だったせいか河床変動の相似性は良い。砂州の開口幅も現地240mから280mの広がりとはほぼ対応していた。洪水のピーク値もほぼ現地と同じであったが、流量の小さい時には模型の方が高かった。大流量時には水位の相似性が良いが小流量時には疑問が残った。このことから洪水時のように河道内から塩水が海にでてしまうような場合の河床変動は、初期河床を現地に合わせれば、ほぼ相似な運動をしてくれるものと判断した。

図3. 洪水時の河床変動の相似性



○海部の洪水時の土砂の堆積の相似性

塩水の存在しない場合で河床砂が浮遊型式で運ばれる場合、河口からはき出された土砂は主流の両側に高いバーを作り、(流速の遅い所に沈積するため)掃流形式だと舌状に堆積する(斐伊川)海水の存在する場合には、内部ジャンプとも関係し、浮遊砂の場合、釣がね状に外辺で高いバーを作り、河口前面にも浅い部分を作る。(例 最上川、石狩川)このように密度差の相違に原因して海部の土砂の堆積状態は、模型と現地では異なっている。また、利根河口の出水時の航空写真によると表面の流線のひろがり方は模型実験と異なっていた。ただ河口近くの主流のポテンシャルコア近くまでの堆積形態は、水平方向の拡散が密度差にあまり影響を受けないと思われるので、ほぼ相似と考えて良いのでなかろうか。

○模型にあたる波の決め方と砂州のでき方

筆者らは始め、模型にあたる波を決める時、相似性に疑問があるので現地の地形変化を決めるような波を検証実験によってさがそうとした。その目安としては砂州の発達状況を見ることにした。河川流としては低水流量 $162\text{m}^3/\text{s}$ をあたえ、波向き、波高を種々変えて行なった。その結果は波高を0.6mに落としてもどうしても現地と相似な砂州ができず図4のような砂州ができしまい、むしろ河口幅を拡げることもあった。その原因として塩水くさびの存在が考えられた。現地では塩水のそ上によ

り淡水層の厚さが減じられ、河口では淡水層の厚さは約1mであり、河口水深が5mであるので現地流量の約5倍の流量を模型上で流せば現地表層流速に近くなるものと思われる。また砂州の延進は、砂州汀線に沿う走り波の速度と流れの速度がぶつかり、ちょうど速度がおそくなる所にたまることがわかったので流量を800m³/s、波高を0.6mとした所、ほぼ現地と同様な砂州を作ることができた。

このことより最上川河口砂州の形成は次のように説明できる。開口部の水深は5~6m有り、ここを動く土砂は少なく砂州は汀線付近を動く土砂によって形成される。図9に示されるように波が強いと砂州の①点をけずり取り、波は河川側に奥まで入って回折波によって州はD型のように鎌型になり、開口部をむしろ広げることもある。(現地においても秋期に開口幅が広い時、冬期流れの作用が弱いのでD型の砂州が発生している。)流れが強い時には波は河口内に入らず、砂州をけずった土砂はB型のように堆積する。波と流れがうまく釣合うとC型のように州は延びる。その方向、形は、波の強さと、流れの変化によって微妙に変わり、その変化の程度によっては複雑な砂州型を作る。この場合、海水と淡水の密度差による塩水楔の影響は大きい。このような砂州の発達の方は、河口水深がある程度深い(4m前後)の河川で見られ、川内川、米代川、江の川、北上川でも見られる。河口水深の浅い小河川、扇状地河川では二次元的な砂州(波による砂の打上げ)が発生し、海岸線が河口まで延びたような砂州が発生する。通常の河川では二つの砂州発生の合成した形で州が発生すると考えられる。このような砂州の発達の仕方から最上川では、導流堤工法が効果があると考えられるが、導流堤を河口に作った場合の波による変化を見るにはどんな波、方向、河川流をあたえて良いかが問題となった。導流堤をある程度長くして作った場合、汀線方向の土砂移動は止められるから、汀線に直角方向の土砂移動が問題となる。この方向の運動は相似律で述べたように相似性に疑問があり、また塩水楔の影響を取り入れることができない。結局種々の波高、波向をあたえ、導流堤内の土砂の移動状況を見ることにした。流量としては800m³/sをあたえたと一度浮遊した土砂は沖合の方に移動するので危険側の結論をあたえたと考えて162m³/sをそのままあたえ、できた結果をそのままのみにせず定性的判断にとどめるようにした。この実験結果によると波高の変

図4 入射波向 NW, H=1.0m, T=77sec
Q=162m³/s (0~3h), Q=324m³/s (3~10h)
○ 2h ○ 6h
□ 4h ○ 8h

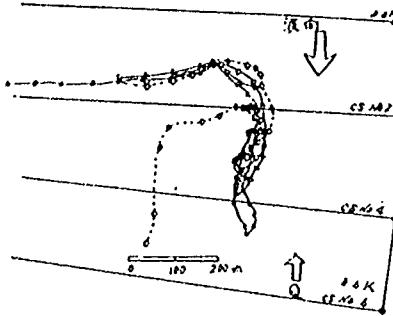


図5 入射波向 NW Q=800m³/s (0~10h) H=0.6m
Q=500m³/s (11~24h) H=1.0m

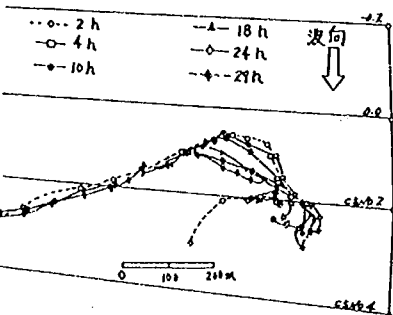


図6 現地の砂州変化例

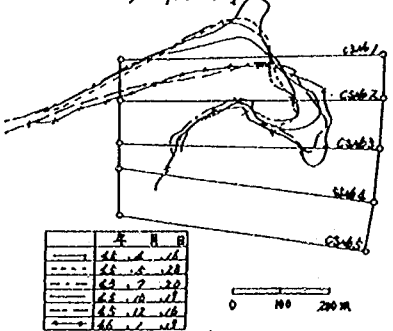
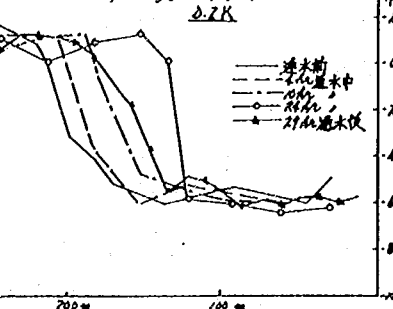


図7 河口横断面の変化(模型)



化は河道内の土砂の沈積にあまり影響をあたえず、また波高の大きい波(4 m)は沖で砕波し、導流堤内の土砂移動にはあまり影響をあたえず、波高2 m(導流堤先端付近で砕波、水深-4.5 m)の場合が先端付近に沿岸砂州(水深25~3 m)を作り一番浅くなった。1 mの場合には波は砕波せず、河道内に進み、底質の移動は少ない。導流堤幅は400 mと300 mで実験したが、河床高の変化はほぼ同じであった。なおこの州は融雪出水によって海にはき出される。その効果は導流堤幅が狭いほど良い。

○潮位変動について

日本海側の河口は潮位変動は小さく(潮位差15 cm)、潮位変動が河口流量におよぼす影響は計算の結果小さく無視した。太平洋側河川の実験および tidal basin の大きい河川では潮位変動をもちこんだ実験が必要となろう。利根川では1000 m³/sのオーダーの流量を生じている。

○波と流れの干渉

波と流れの干渉による波のステーブネスの変化等(沿岸砂州の発生位置に関係する。)は密度流の効果があり、正確には一致しない。ただ波が大きい時は淡水と塩水は急速に混合するものと考えられ、河口近くを除いて、ほぼ相似性が満足しているのではなかろうか。

○初期形状

波による地形の変形を見る場合、初期海浜形状は一つの大きな factor となる。最上川の場合、河口位置は現状のままであるので、海部は現況の海浜形状を導流堤内は、計画河床高-4.5 m(この河床高は河床変動計算等により、波を考えなければ、長期的にも安定であると考えられる。)とした。この河川の場合、河口前面は河道より運ばれた土砂により海浜勾配がゆるく浅い水深の部分のかなり長い。この浅さは、波高の高い場合、波を沖で砕波し、波高減衰を助長し、河口を防る上で有効となっている。今筆者が実験を行なっている千代川河口においては、現河口に港を作る計画があり、河口のつけ変えが計画されている。この場合海浜勾配を現況のままとすると、勾配の急なためか、最上川と同一な波をあたえた時二次元的砂州が発生している。砕波点が河口に近く、波のエネルギー減衰効果が小さいためと思われる。この模型に大出水をあたえ河口前面を大きく堆積させると砂州の発生は小さくなる。将来河口前面に土砂がたまり海浜勾配がゆるくなることを考えると、現況海浜を初期条件とすることには疑問が残る。しかし将来どのような河口前面の地形変化を生ずるかははっきりせず、実験条件として初期形状をどうあたえるかは疑問点のまま残っている。また導流堤内水深も、河道の長期的な安定性を考えないで、河床高を決めると間違いのものになる。

○沿岸流、離岸流

筆者らは海の中の流れは、導流堤内の河口維持の検討に影響が少ないと考えていたが、千代川の実験によって海浜変化におよぼす効果の大きさにおどろかされた。底質砂が浮遊形式で運ばれる時には流れの効果は大きい。特に港の防波堤などの構造物がある時定常的な海沿流が発生することがある。

図8

現地河口断面の変化

CG. NO. 2 (0.2 K)

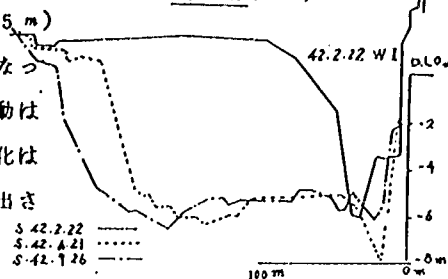
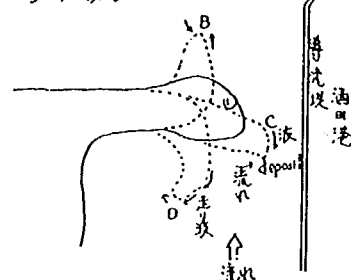


図9 砂州の形成



このような流れを相似させるためには反射条件等を現地と模型で相似にする必要がある。

○海床変化の時間縮尺

相似律で述べた無次元量が、現地と模型が同じであれば、時間縮尺はフルード則によって求める縮尺で良いと考えられる。同じでなければ検証実験にたよることになるが、外力の変動性のため検証しえない。それゆえ海床変化が小さくなるまで実験をつづけることにした。一応の目安として河床変動から求めた時間縮尺を取った。

4 河口模型実験結果の河口計画への利用

河口計画は河道全体計画の一部であり、河道計画や海岸計画と調和したものでなければならない。河が持つ相を良く考慮し、河口に無理なく接続する必要がある。この河道計画より計画高水量、ハイドロが決まり、河口の状況を加味して河口計画の概要も決まってくる。ここでは最上川模型実験の結果をどのように河口計画を考える上で利用したかを述べてみよう。

〔出発水位〕（洪水時の河口潮位）、現地資料を解析し D.L=1.20m とした。〔洪水時の河道水位〕既往実測資料および模型実験、不等流計算により検討した。模型実験は粗度の相似が良ければ、河床変動も組み込まれた水位が求まり有利である。〔洪水による河口付近の流れと砂州フラッシュおよび河床変動〕実測資料、航測資料、模型実験より判断したが、検証実験の結果相似性が良かったので主に模型実験結果を利用した。〔河道の長期的安定性〕この判断は主に河床変動計算（区間 20 km, 7 年間の流量をあたえる。）にたよった。河口近くの安定性は模型実験によっても見つめることができた。〔導流堤内の土砂のフラッシュ〕導流堤内にたまった土砂のフラッシュは主に模型実験によって判断されたが、実測データの解析より河口幅と流量の関係、塩水くさびの存在条件などを考えて検討した。〔導流堤内による河口維持〕模型実験および現況河口の変化状況、酒田港改修による海岸地形の変化などを参考にして、河口維持が可能か検討した。〔塩水遡上〕実測値を検証として数値計算によって判断した。〔波の進入〕模型実験にたよった。〔隣接海岸への影響〕主に現地資料によったが、模型実験も参考にした。

最上川河口計画では上述のように模型実験結果を位置づけたが、河相の違い、現地資料の有無によっては、模型実験、基礎的研究成果、数値計算、他河川の経験、現地資料解析のおおの位置は変わるものと考えなければならない。模型実験結果の過大な評価、過少な評価をしないためにも正しい位置づけが必要であり、このような判断は、実験者、計画者の優れた判断力と経験を必要とする。その場合、模型のなかの現象を眺めることによって、判断の材料が与えられ、検討と考察のための時間が持たれることは非常に有意義なことであろう。

5 あとがき

模型実験の正確さを上げるためにも、河口現象の解明、相似性の検討を今後につづけたいと思っている。ここでは河口模型実験の全貌の一部しか報告しなかったが、模型実験の実体を少しでも御理解いただけたら幸いである。

参考文献

- 1) 山本晃一、河口現象把握の問題点 土木技術資料 15-12 1973.12月
- 2) 須賀、山本、高橋ほか、最上川河口模型実験報告書 土木研究所資料 887号 1974.2月予定
- 3) 田中、岩垣、Nayak 等の論文、港湾技術研究所報告 Vol.12, No.2, 1973.2月ほか

V 仁淀川模型における河口砂州の崩壊と再形成に関する相似性の検討

建設省土木研究所 福岡捷二 S.Fukuoka

〃 ○高橋 晃 A.Takahashi

1. はじめに

河口部における水理機能の解明，あるいは河口処理計画の妥当性を検討する手法としては，現地観測資料，他河川からの類推，模型実験などが現在用られている。とくに河口部は，川と海の異質な作用を受け，そこに生ずる現象は個々の河川ごとの特殊性も強く，非常に複雑であり，このような場合の水理現象を比較的容易に知り得る有力な手段として，模型実験が重要な役割を果たしている。

模型実験により河口部の計画について検討する場合、現地現象の再現性を確かめるための検証実験は極めて重要であり、この過程で多くの実験的工夫がなされる。とくに洪水流による河口部の河床変動に関しては、流砂に対する相似条件および模型時間縮尺がどの程度現地の砂州フラッシュを再現するか、河口砂州の形成に関しては、どのような波を模型上で与えるべきかが重要となる。このような河口部の洪水流を含む地形変化の再現については、多くの場合地形変化状況を検討しつつ実験条件に修正を加えながら、最終的に相似性の得られる実験条件が決定されている¹⁾²⁾。波による二次元汀線変化の相似に関しては、尾崎・曳田³⁾によって、侵食堆積領域の境界、および碎波帯相似パラメータと相対粒径による汀線変化との関係が得られているが、三次元現象への適用にはまだ問題が残されている。

本研究では仁淀川河口部を対象とし、従来とは若干異なる観点から、河口砂州の崩壊と再形成に関する相似性の検討を行った。すなわち、河口砂州の形成に関しては、現地底質粒径と模型縮尺から模型河床砂の粒径を決め、底質の主要な移動範囲と海浜の横断形状、砂州高などが相似となるための波浪条件を選定した。河口砂州のフラッシュに関しては、河床変動に対する相似性と模型時間縮尺について検討した。これらの検討に基づいて実施した実験手法と検証結果についての具体例を示し、その手法の妥当性を明らかにした。

2. 仁淀川河口周辺の状況と海象特性

2. 1 河口周辺の状況

仁淀川は、標高1500～2000mの四国山地から高知平野西部を貫流して、土佐湾に注ぐ流域面積1560km²、幹川流路延長124kmの急流河川である。流路は山間部を蛇行し、直轄区間（河口から15.0km間）においてようやく平野が見られ、流域における平地面積はわずかに3%である。下流部河道は、図－1に示すように、単列砂礫堆と湾曲部に生ずる固定砂州が形成され、みお筋もほぼ固定された状態となっている。河床勾配は、河口から2.0km間で約1/2000、2.0～9.0km間付近が約1/1000である。

仁淀川の主な洪水は、台風に起因するものが多く、近年では昭和50年8月の台風5号によって未曾有の大災害をもたらした。その後も昭和51年、昭和57年に約8000m³/s前後の洪水が発生している。現在改修事業は、計画高水流量を基準地点の伊野(12.2km)で12000m³/sとした工事実施基本計画により、低水および高水護岸、河床掘削等が順次

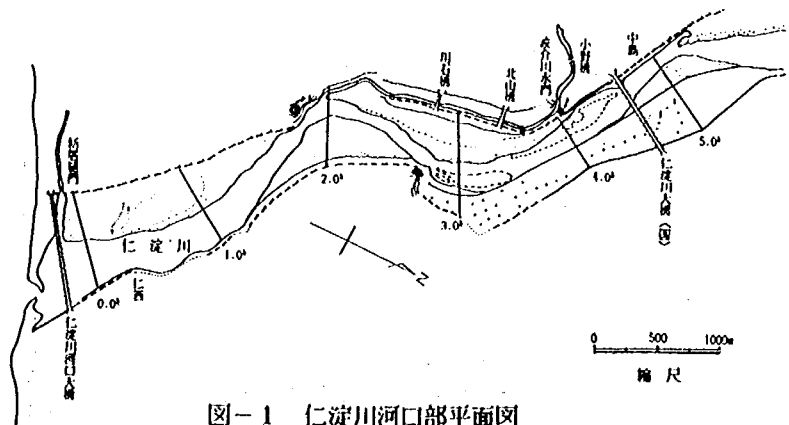


图-1 仁淀川河口部平面图

進められている。

いっぽう、河口部の砂州形状は図-2に示すように、右岸側に高い砂州が形成され、左岸方向に伸びる状況となっている。このような河口砂州の発達には、海域の漂砂の卓越方向を推定する一つの材料とすることができ、傾向としては東向きの漂砂が卓越しているものと考えられる。この河口砂州部から海側沖合い方向の海岸形状は、図-3に示すように、前浜勾配が約1/8、外浜勾配が約1/70となっており、河口周辺では汀線の後退がやや顕著である。

2.2 河道および海部の底質粒径

仁淀川下流部河道の河床材料粒径は、混合粒径分布を示し、その平均粒径は12~20mmの礫で構成されている。この河口部河道の代表平均粒径としては約17.0mm程度である。また、図-4は河口砂州および海部における平均粒径分布である。底質の粒径は、ほぼ海底の等深線と平行するように沖に向かうにつれて小さくなっている。汀線から水深7~8m付近までは礫が分布し、水深が10m付近では中砂ないし細砂が分布する。これより海床変化の大きい海部汀線付近および河口砂州部の平均粒径は、1.5~6.0mmの範囲に分布しており、河道内の粒径よりは小さく、その平均は約4.0mm程度と考えられる。

2.3 波浪特性

図-5は住吉波浪観測所（水深10.43m）における昭和54~56年の波高、周期出現率図である。観測資料によると波高0.25~1.0m、周期7~9秒の波が最も卓越し、最大の波高では6.0~6.5mの波が生じ、

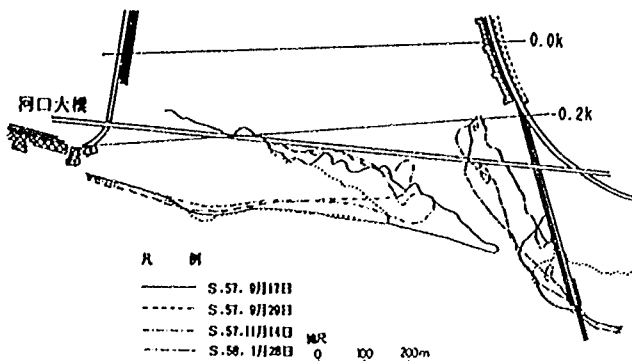


図-2 河口部砂州形状図

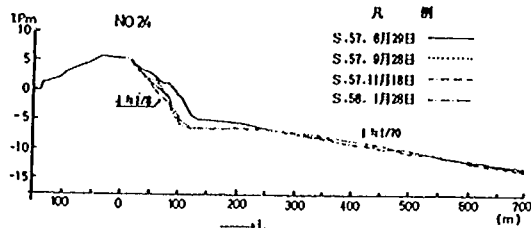


図-3 海浜横断面図

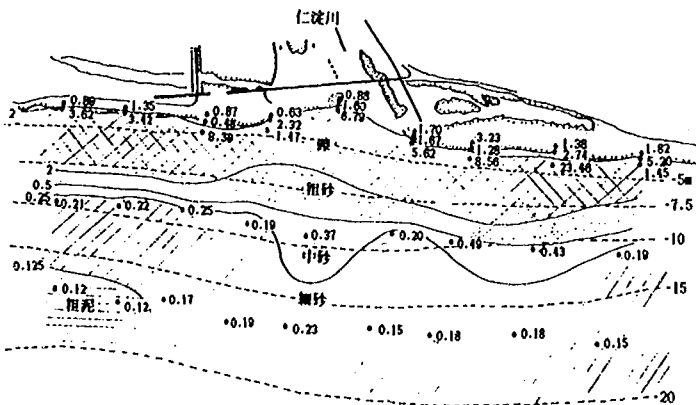


図-4 底質分布図

表-1 年間の平均波、月最大波の平均および有義波高

	平均波 (H _{1/3})	月最大波の平均(H _{1/10})		有義波(H _{1/3})	
		波高(m)	周期(sec)	波高(m)	周期(sec)
1979年	0.82m	4.11	9.4	3.26	9.1
1980年	0.62	3.23	9.0	2.59	9.0
1981年	0.69	3.65	9.1	2.86	8.6

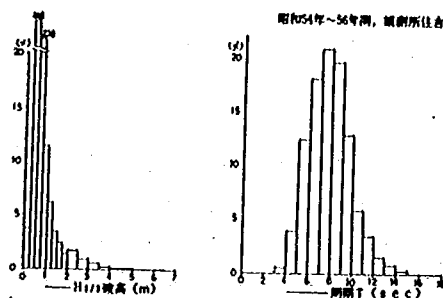


図-5 波高・周期出現率図

周期の長いものでは14~16秒の波も来襲する。これら年間の平均波、月最大波の平均値およびその有義波高を表-1に示す。また、波向の発生頻度は、いずれの波高においてもSおよびSSW方向が圧倒的に多い。

3. 模型縮尺と相似性の検討

3.1 模型の概要

模型は現地の底質粒径および実験施設、造波装置の能力等より総合的に判断して縮尺1/80 ($x_r = h_r = 80$)とした。模型対象範囲は、河道部と海浜部とにより構成され、河道部3.2km、海浜部沖合1.6km、汀線方向は2.8km (うち河口幅を含む造波可能海浜部幅約2.0km)である。実験に用いた河床砂の平均粒径は $d_m = 0.18\text{mm}$, $\sqrt{d_{84}/d_{16}} = 1.4$, 沈降速度 $w_0 = 2.3\text{cm}$ を選定した。なお、海浜部の整形においては、T.P-15mまで現地と相似に整形し、約1/30の勾配で平面水槽床版 (T.P-28.8m) にすりつけられている。

河川流量は、河道部上流端に設けられた量水槽に高水槽から送水することにより供給され、また潮位は、河口と対面する側壁に設けられた潮位調節用ゲートおよび平面水槽用給水管からの補給により調整されている。波浪実験に使用される造波装置は、幅8mの造波板を有するベンジウム形式の可動型平面造波機であって、この実験では3基連結して用いられる。

3.2 洪水による河床変動、砂州フラッシュに関する相似性

移動床模型では、現地の河床砂の粒径が小さい場合、その河床材料の入手が困難であるだけでなく、粒径が微細となるため、水の粘性の影響を受け、現象の相似を得ることが難しい。このような場合には河床形態、流砂量、流砂形態などのうち、最も重要となるものだけでも相似となるように模型の河床材料を選定する。これらのうち流砂量に関しては、河床変動が相似となるように時間縮尺を変えることによって調整することができる。残りの河床形態と流砂形態のうち、河床形態を重視する場合には、現地と模型における無次元掃流力 τ_* を一致させ、流砂形態を重視する場合には、現地と模型における摩擦速度と河床砂の沈降速度との比 u_*/w_0 を一致させることがそれぞれ重要な条件となると考えられる。よって、無次元掃流力 τ_* および摩擦速度と河床砂の沈降速度の比 u_*/w_0 の現地と模型の比は、現地河道部の平均粒径を17mm、河口砂州部付近を4.0mmとすると

$$\tau_{*r} = u_{*r}^2 / (\rho_s / \rho - 1) \cdot g_r \cdot d_r = h_r^2 / s_r \cdot g_r \cdot d_r \cdot x_r = 0.85 \text{ (河道部)} \sim 3.6 \text{ (河口砂州部)}$$

$$(u_*/w_0)_r = h_r / x_r^{1/2} \cdot w_{0r} = 0.46 \text{ (河道部)} \sim 0.95 \text{ (河口砂州部)}$$

ここに $u_{*r} = \sqrt{g_r \cdot h_r \cdot I_r} = h_r / \sqrt{x_r}$, $s_r = (\rho_s / \rho - 1)$ である。これより $\tau_{*r} = 1$ となるためには $h_r = s_r \cdot d_r$ という条件が必要となる。このため流砂の移動に関する無次元掃流力は、河口砂州部では模型の方が小さい。しかし、河口砂州部の u_*/w_0 は現地と模型とでほぼ一致しており、砂州フラッシュ時の河口から出た土砂の堆積に関する相似性は得られると考えられる。

いっぽう、模型と実河道における河床変動量が相似となるためには、河床変動の連続式から求まる時間縮尺で洪水を流す必要がある。このとき流砂量の多い場合には、 τ_* の違いは時間縮尺の中にある程度くりこんだ形で解決しうる。ここで無次元流砂量が現地と模型で近似的に一致すると考えた場合、フルードの時間縮尺と同一となり、 $t_{or} = h_r^{1/2} = 8.9$ となる。また、河口砂州部の河床変動に対する時間縮尺を全流砂量を対象としたBrown式から求めると $t_{or} = 2.6$ である。したがって、時間縮尺は、両者の範囲で検証実験を行い、その相似性を検討することによって妥当な時間縮尺を求めることにした。

3.3 河口砂州の形成に関する相似性

河口砂州部の波による底質の主要な移動範囲と海浜形状等が現地と相似となるための波浪条件について検討を行った。まず、図-3の海浜形状図および河口砂州の変動状況より、砂の移動している範囲の砂州高をT.P4.0mとした。これより前浜勾配を1/8とし、その変化点 (水深T.P-6.0m) で碎波し、T.P4.0mまで打ち上げる波浪条件を選定した。なお、潮位は平均潮位とし、打ち上げ高はSavilleの仮想勾配法により、碎波条件は合田による波形勾配と碎波水深との関係から波高と周期を求めた。このときの波浪条件は、沖波波高 $H_0 = 3.4\text{m}$, 周期 $T = 13.3\text{sec}$, 波形勾配 $H_0/L_0 = 0.012$ が得られ、先に述べた年間の月最大波の平均値に

近い結果となる。また、砂州部の現地平均粒径4.0mmを用い、この波浪条件に対して、Swartの式により侵食型の海浜変形の顕著でなくなる深さを求めると約6.3mとなる。

いっぽう、この現地波浪条件より模型縮尺を1/80、模型河床砂の平均粒径0.18mmを用いたときの模型における砂の打ち上げ高、および前浜勾配がどの程度になるかその概略を求めた。最終的に平衡となる砂州高 H_R は、これまでに得られている研究成果⁴⁾より現地換算の砂州高を求めると約T.P4.0m~T.P6.0mの範囲となる。前浜勾配も実験資料⁵⁾によれば約1/6~1/7となり、現地より若干急勾配になると予想される。また、模型での海浜変形に対する限界水深は、現地換算で約7.9mとなり、移動範囲は模型の方が大きい傾向となる。しかし、現地底質粒径は沖に向かって小さくなることなどからほぼ相似性は得られるものと考えられる。なお、海床変化の相似性は H_0/L_0 とともに $\sqrt{gH_0}/w_0$ を現地と模型で一致させることが望ましいとされている。この関係は、 $(\sqrt{gH_0}/w_0)_r = 0.95$ となり、概略一致する。

以上の検討より、ここでは沖波波高 $H_0=3.4$ mに対する波形勾配の変化についての検証実験を行い、河口砂州形成の相似性を検討することにした。

4. 洪水流による河床変動検証実験

実験は図-6に示す昭和57年9月洪水($Q_p \approx 8000 \text{ m}^3/\text{s}$)を通水して、洪水後の現地の河床変動結果に適合する時間縮尺を決定する。また、砂州開口幅と砂州上流の水位観測所(仁西約0.3km左岸)の資料との相似性の検討を行った。時間縮尺は、フルード則による $t_{er}=8.9$ 、Brown式より砂州部の河床変化に対して求めた $t_{er}=2.6$ 、および前2ケースの結果から判断した $t_{er}=5.0$ の3ケースについて実施した。この実験結果の水位変動状況は、図-7に示すように実績値と比較すると流量増加時には、実験では実績より急に立ち上がる。これは流量の増加に砂州部開口河積の拡大が追いつかないためである。その後砂州フラッシュの進行によって、水位は一旦下降傾向となり再び上昇する。なお、 $t_{er}=5.0$ のケースの初期水位が高いのは、砂州開口部河床高が他のケースのT.P-5.0mに対し、T.P-2.5mとしたためである。実績値のピーク水位は、流量ピーク時に生ずるのに対し、 $t_{er}=8.9$ のケースでは流量ピーク以前に水位ピークとなり、相似性はよくない。また、 $t_{er}=2.6$ 、および $t_{er}=5.0$ ではほぼ流量ピーク時に水位ピークとなるものの、実験値の水位はいずれも高い傾向となっている。これは河道内において河床抵抗に大きく関係する小規模河床波が卓越することが原因している。しかし、河口砂州部付近ではフラッシュ時の掃流力が大きいことにより、河床抵抗は小さく、現地粗度係数とほぼ一致することが確かめられ、流量ピーク時に水位がピークとなっていれば、砂州フラッシュ状況は再現されていると考えられる。

いっぽう、河床変動状況は、各断面とも現地洪水前後であまり大きな変化は見られず、模型においても河口砂州部や水衝部を除けばその変動は少なかった。しかし、通水時間の長い $t_{er}=2.6$ のケースでは、堆積傾向部分および水衝部の洗掘が過大となり、 $t_{er}=8.9$ では反対に若干少なく、図-8に示すように $t_{er}=5.0$ がほぼ相似となる結果が得られた。河口砂州部の開口形状は、図-9のように通水時間の長い t_{er}

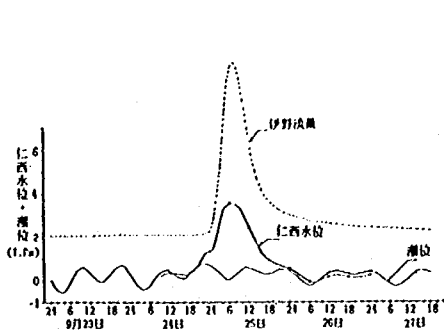


図-6 S57年9月洪水ハイドログラフ

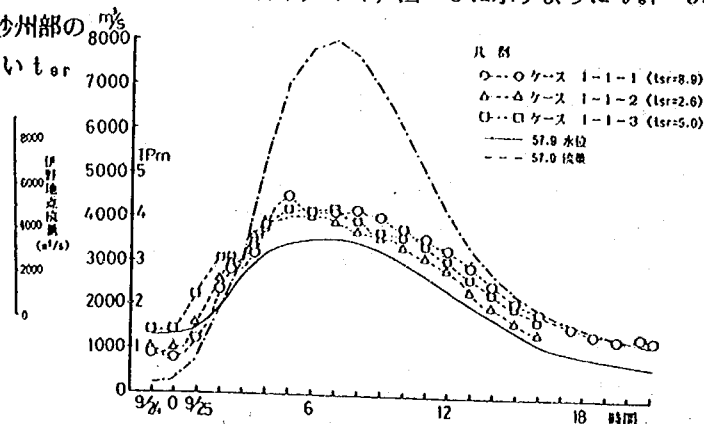


図-7 水位時間変化図

$=2.6$ がやや開口幅が広い。しかし、いずれも上流の右岸高水敷延長線上近くまでフラッシュされている。海部沖合いの堆積形状は、砂州フラッシュ直後の現地資料が得られておらず、昭和57年11月の地形によると、沖合約450m付近まで舌状に堆積している。これに対し、 $t_{sr}=8.9$ の実験では沖合いの堆積領域が少なく、反対に $t_{sr}=2.6$ で過大であり、 $t_{sr}=5.0$ がほぼ相似となっているものと判断される。

以上の結果より、水位変化も含め、河床変動および河口砂州フラッシュ状況が相似となる時間縮尺は $t_{sr}=5.0$ がほぼ妥当な値と判断し、計画案実験等に採用して検討を行う方針とした。

5. 河口砂州形成に関する検証実験

現地の海浜形状から選定した沖波波高 $H_0=3.4m$ を用い、波形勾配の変化による河口砂州形成の相似性について実験を行った。このときの初期海床形状は、洪水流検証実験結果より相似性の得られた河口砂州フラッシュ後の形状である。河川流量は平水流量を与えるべきであるが、河口部の下層には海水が侵入し、表層流速が大きくなることを想定して豊水流量を与え、潮位は遡望平均満潮位 $T.P.0.77m$ 一定とした。図-10は現地の卓越波向S方向での波形勾配 H_0/L_0 の違いによる河口砂州形状比較図である。河口砂州は、右岸側から河口大橋にほぼ平行に発達し、いずれのケースも現地形状とほぼ相似となる結果が得られる。また、このとき波による底質の移動が顕著な範囲は、約 $T.P.-6.0m$ より浅い所であり、海浜変形はこの外浜および前浜領域で生じている。とくに砂州は、河口近傍のフラッシュ土砂および右岸側の汀線後退による土砂の供給で発達、形成する。なお、この河口砂州がほぼ安定形状となる実験時間は約20時間を要した。

各波形勾配と前浜勾配および砂州打ち上げ高とその関係は、それぞれ図-11、12に示すとおりである。前浜勾配は、既存の砂州および新たに形成された砂州前面の勾配の平

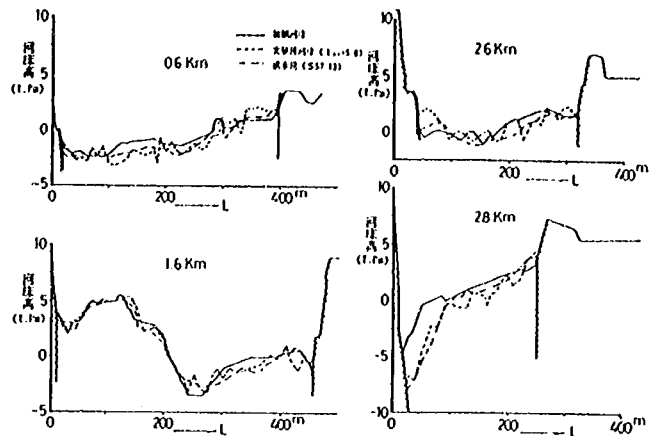


図-8 河床変動横断比較図

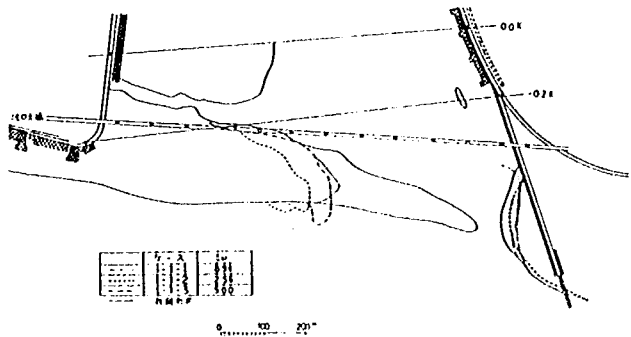


図-9 河口砂州形状比較図

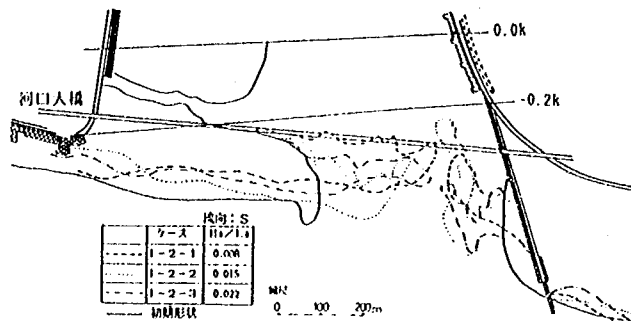


図-10 河口砂州形状比較図

均値を用いた。これによると前浜勾配の違いによる顕著な傾向はあまり見られないものの、 H_0/L_0 の増加に伴って若干急となる。しかし、その勾配は約1/5~1/6の範囲であり、現地よりやや急勾配となる結果であった。いっぽう、砂州高は波形勾配が増すと小さくなる傾向となり、現地砂州高にほぼ相似となる波形勾配は約0.015付近と考えられる。したがって、砂州高および左岸側砂州形状等も含め、比較的相似性の得られる波形勾配 H_0/L_0 は約0.015がほぼ妥当と考えられた。なお、図-13は現地の砂州フラッシュ後に形成された砂州形状との比較図である。洪水4日後の砂州形状は模型の約10時間後の形状とほぼ同じであり、これはフルードの時間縮尺と同程度となっている。

6. まとめ

仁淀川河口部を対象とし、模型の底質に砂を用いた場合の河口砂州のフラッシュ、および河口砂州の形成について、現地と模型の相似性に関する検討を行った。本研究では従来とは異なった観点から、河口砂州の形成に関する波浪条件を選定した。これに基づいた相似性と砂州形成過程を模型上で検討し、その実験手法が妥当であることを示した。

参考文献

- 1) 関川河口模型実験報告書：土木研究所資料第2055号，S59。
- 2) 加藤一正：移動床模型による河口周辺の地形変化の再現，第1回河川・海岸シンポジウム，土木学会，PP.68-78, 1986。
- 3) 尾崎晃・曳田信一：波による二次元汀線変化の相似に関する実験的研究(続)，第24回海講論文集，PP.167-169, 1977。
- 4) 吉川秀夫：流砂の水理学，丸善株式会社，PP.409, 1985。
- 5) 山本晃一：河口処理論 [I]，土木研究所資料第1394号，S53。

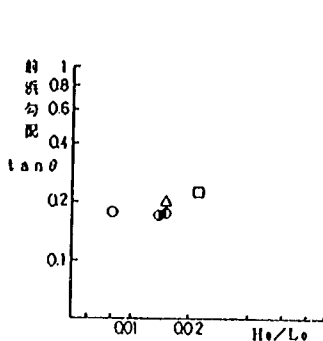


図-11 前浜勾配と波形勾配

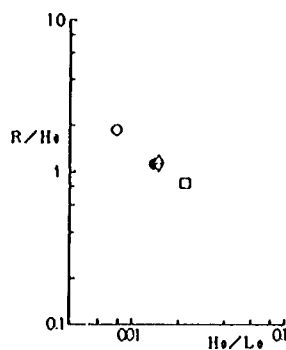


図-12 打上げ高と波形勾配

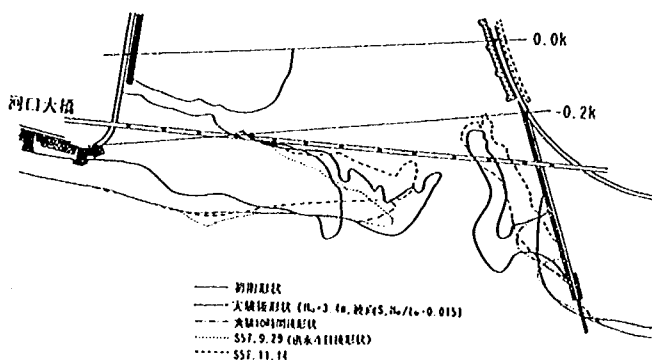


図-13 河口砂州の現地と模型の形状の比較

河川水理模型実験の手引

ISSN 0386-5878

土木研究所資料第2803号

平成元年10月(1989)

河川研究室 室長 山本晃一

主任研究員 高橋 晃

要 旨

本報告書は、河川構造物の設計や河道計画のために、河川水理模型実験を1つの技術的手段として、それを企画、実施し、さらに解析、報告するための手順や手法について全般的にとりまとめたものである。

キーワード：模型実験，相似則



郵便はがき

3 0 5 - □ □

四十一円切手
をはって下さ
い。

建設省土木研究所

河川研究室 御中

茨城県つくば市大字旭一番地

No. _____

配布先氏名

配布先住所



No. _____

○

土木研究所資料第 2803 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

土木研究所資料第 2803 号

○