

簡易河道模型実験の技術者教育及び 治水プロジェクトへの活用

APPLICATION OF SIMPLIFIED RIVER CHANNEL MODEL TEST TO ENGINEERING EDUCATION AND FLOOD CONTROL PROJECT

市山誠¹・浜口憲一郎²・北村忠紀³・加納敏行⁴・桜井亘⁵
Makoto ICHiyAMA, Kenichiro HAMAGUCHI, Tadanori KITAMURA,
Toshiyuki KANO and Wataru SAKURAI

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ (株) 筑波実験場 (〒300-4204 茨城県つくば市作谷642-1)

²正会員 パシフィックコンサルタンツ (株) (〒163-0730 東京都新宿区西新宿2-7-1)

³正会員 (株) パシフィックコンサルタンツインターナショナル (〒206-8550 東京都多摩市関戸1-7-5)

⁴正会員 JICA専門家 フィリピン国治水砂防技術センター

⁵JICA専門家 フィリピン国治水砂防技術センター

A simplified river channel model test is one of powerful and useful tools in flood control projects. It is a low-cost and easy-implementing method for investigating responses against several engineering measures and/or natural disturbances in a river channel that has less information on topography and hydrology. The methodology has been proposed and tested during the training course on movable bed hydraulic model test in Flood Control and Sabo Engineering Center in Philippines. It has been verified that the model can reproduce the deposition and erosion pattern that is associated with bar formation induced mainly by plan shape of a river channel. Proper arrangement of spur dykes to mitigate bank erosion can also be investigated using the model test. It is not only suitable for engineering education but also potential for all processes in flood control projects.

Key Words: Movable bed experiment, river channel, spur dyke, bank erosion, flood control, engineering education

1. はじめに

フィリピン国(「フィ」国)では、地すべり、洪水をはじめとする様々な自然災害が頻繁に発生してこれまでに甚大な被害をもたらしているが、ハードおよびソフト対策が必ずしも十分に行われてきたとはいえない。このような背景から、独立行政法人国際協力機構(JICA)は、「フィ」国からの要請に基づいて、治水・砂防技術力強化プロジェクト¹⁾を、「フィ」国の治水・砂防事業を所管する公共事業・道路省(DPWH)を実施機関として、2000年1月から5.5年間の計画で、実施している。

同プロジェクトを実施している治水砂防技術センター(FCSEC)では、日本の無償援助により、2003年に水理実験施設が完成した。同施設は、最大流量 $0.4\text{m}^3/\text{s}$ が可能なポンプ・高架水槽による給水設備と、4つの水路(幅広水路(長さ40m、幅3m、可変勾配 $0\sim 1/50$)、2次元水路(長さ25m、幅0.5m、可変勾配 $0\sim 1/50$)、土石流水路(長さ20m、幅0.5m、可変勾配 $0\sim 20^\circ$)、ラハール

水路(長さ10m+10m、幅1m/4m、可変勾配 $0\sim 30^\circ + 0\sim 1/50$)、1つの人工降雨装置(降雨域10m×5m、最大降雨強度200mm/hr相当)、及び各種水理計測機器を有する。

プロジェクトの枠組みにおいては、これらの水理実験設備は、1)DPWH地方技術者その他への教育及び研修、2)治水砂防技術基準に関わる基礎研究、を主目的として使用されるものであり、その目的を達成すべく、FCSEC職員に対する水理実験指導が行われている。

これまでのところ、短期専門家による集中指導ならびに長期専門家によるフォローアップの組み合わせにより、河川、砂防に関わる基礎実験と応用実験に関する水理実験指導が行われている。なお、プロジェクトにおいては、このほか、フィリピン大学との共同研究での水理実験棟活用などが行われている。

本報告の目的は、こうした活動のうち、2004年11月に行われた応用実験としての移動床水理模型実験に関わる技術指導の内容を取りまとめ、そこで用いられた手法の今後の活用法について議論することにある。

2. 簡易河道模型実験

本技術指導においては、予算に限りがあり、かつ、詳細な河道の情報がない場合が多い開発途上国の現状に鑑みて、従来の大型水理模型実験に比べて安価で容易に実施可能となることを意図した移動床模型実験手法（仮に「簡易河道模型実験」と呼ぶ）を提案し、それにより実際の河道における水制工の適正配置の検討手法に関するトレーニングを行った。

「簡易河道模型実験」とは、河道平面形状に関して河道側壁をブリキ板と支柱により作成（図-1参照）して移動床実験を行うものである。1m程度ごとのユニットをあらかじめ準備しておき、河岸線に沿ってこれらを設置・固定していくことで、短時間で容易に任意の河道平面形状を作り出すことが可能である。この実験手法では、河岸形状の厳密な再現は行わないものの、河道平面形状自体が主要因となる砂州の形成やそれに伴う洗掘堆積傾向の検討は十分に行えることが期待される。

こうした模型製作のアイデアは、近年、住民参加や合意形成、河道現象説明ツールのひとつとして、注目されている卓上水理模型²⁾、³⁾と類似しているが、「簡易河道模型実験」は模型製作を安価で容易に行うものの、相似則については極力満足すべく実験を行うものであり、大型水理模型実験と卓上水理模型の中間型ともいえる。

3. 実験指導概要

(1) 目的

2004年11月に行われた移動床水理模型実験に関する技術指導について、次の3つの目標を設定した。

目標1：種々の河道特性を有する河川における適切な水制工の配置を移動床水理模型実験によって検討する手法の習得。

目標2：容易に実施可能な移動床水理模型実験手法の準備。

目標3：これまでにFCSECが準備した水制工に関する技術基準の検証。

(2) 対象河川

実験対象河川としては、まず、これまでにFCSECが行ってきたDPWH地方技術者に対するOJTサイトの中から、河岸侵食が問題とされている4河川を抽出し、さらに、このうち河床材料が比較的大きく、模型と実物の物理的相似性の確保が比較的容易なBadoc川を選定した。

Badoc川は、ルソン島北西部ラオアグ市より南方約30kmに位置する中小河川である。実験対象区間として、平均川幅200m、平均河床勾配1/600、河床材料平均粒径15mmである中流部の約3km区間を選定した（図-2参照）。

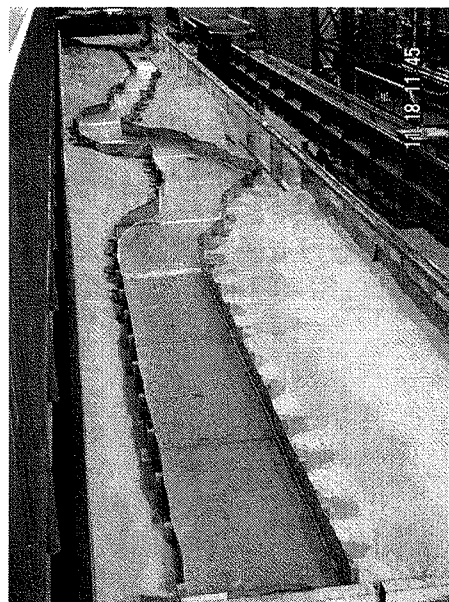


図-1 ブリキ板と支柱で河道側壁を作成した簡易河道模型

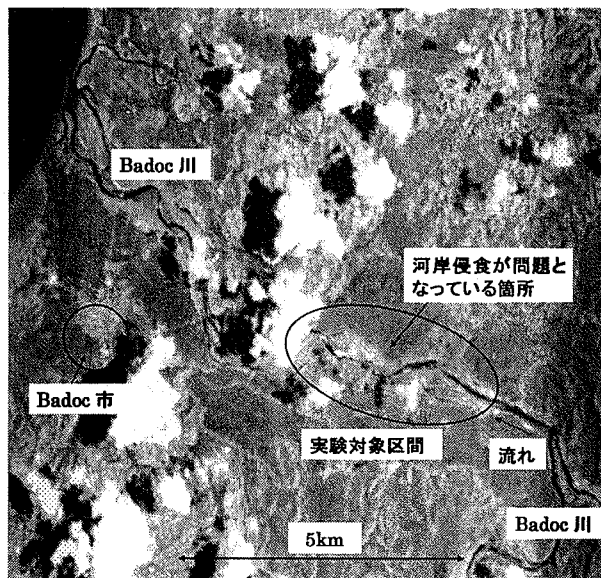


図-2 実験対象河川

(3) 問題設定

実験対象区間は、基本的には掘り込み河道であるが、川幅が縦断方向に大きくなる箇所であり、そこでの土砂堆積が引き金となって蛇行が発達すると同時に河岸侵食が進行していると考えられる。右岸沿いには、集落や地方道が存在し、これらを侵食から守る必要がある。

河岸侵食が破堤とそれに伴う大規模な氾濫を引き起こす恐れがある場合には、河岸侵食防止対策としては、十分な侵食対策を施した護岸と流れの適切な制御を狙った水制工の組み合わせによる最も信頼性の高い対策が施されるべきである。しかしながら、実験対象区間は、掘り込み河道であること、さらに、たとえ河岸侵食が生じたとしてもその影響は一洪水の間には局所的にしか現れないと考えられることから、若干の侵食を許容しつつも侵食速度を軽減させ、河道を長期的に安定させる対策が必

要であると判断された。

そこで、本実験では、水制工の適切な配置による流れの制御によって、河岸侵食を軽減させる方策について検討を行った。

(4) 手 法

複雑な構成土砂、植被状態によって成り立つ自然河岸の河岸侵食現象そのものを模型実験において再現するのは難しい。本実験においては、河岸付近の河床の堆積・洗掘速度が河岸侵食速度を規定するものと仮定し、側岸を固定した実験を行って、種々の水制工配置状況における河岸近傍の河床の堆積・洗掘傾向から、河岸侵食傾向を判断することとした。

(5) 実験計画策定のための情報とその整理

実験対象河川では、多くの「フィ」国の中小河川がそうであるように、河川計画自体がないばかりか、通常の実験実施のために必要となる詳細な河川の情報がない。河道に関する情報不足は、今後、FCSECにおいて、水理実験を実施していく上で大きな阻害要因となるが、このような状況においても、入手可能な情報（例えば、現地観測、ヒアリング結果や衛星画像）を用いて、実験条件を設定していく必要がある。

a) 入手した情報

FCSEC の現地調査により、1) 1:50,000 地形図、2) 実験対象区間の写真、3) 縦断勾配、4) 河床材料、5) 周辺住民からのヒアリングによる過去の洪水状況、に関する情報を入手した。

さらに、これらに加えて、1) Landsat イメージ (2000 年)、2) SRTM3 秒グリッド標高データ、をウェブサイト⁴⁾、⁵⁾ から無償で入手した。

b) 河道平面形状の推定

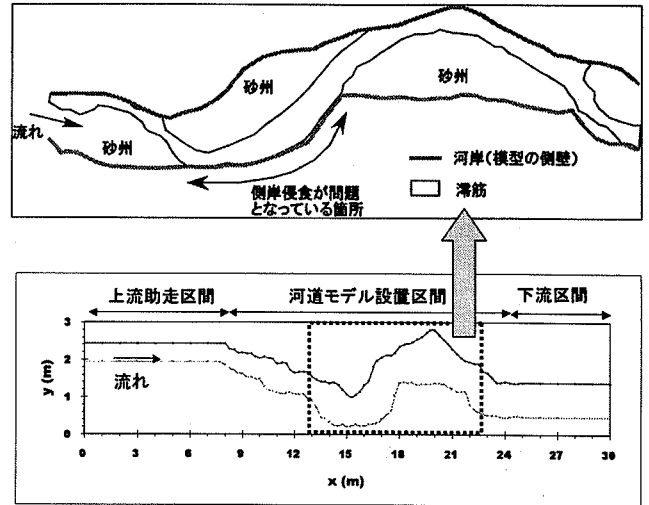
入手したLandsatイメージから、次の手順で河岸位置を推定し、模型の河道平面形状を決定した。

Step 1: フリーソフト「カシミール」⁶⁾ を用いて、高解像度画像を作成。

Step 2: 市販の画像処理ソフトを用いて、1) 濃い植生域の判読を容易にするために色調、輝度の調整、2) 3m x 40m の幅広水路に模型が収まるようにするために、幅広水路に収まりがよいように画像を適当に回転、といった画像処理の実施。

Step 3: Step 2で調整された画像をGISソフトなどで読み込み、河岸の位置を推定するとともに、そのローカル座標を抽出。

今回は、普段の洪水で流れが発生する領域には濃い植生が生育しないものと仮定し、濃い植生域と非植生域の境界を河岸と仮定した。なお、河岸位置を推定する際、現地踏査の際の写真、SRTM標高データについても参照し



上: 推定された河岸位置と滞筋、砂州の状況。

下: 3m x 40mの幅広水路における模型設置状況。

図-3 河道平面形状の設定

た。GISソフトとしては、安価ではあるが多様な機能を持つManifold⁷⁾を用いてそれらの処理を行った。図-3に設定された河道平面形状を示す。

c) 流域面積

地形図から、実験対象位置における流域面積は約200km²と推定された。

d) 既往最大洪水

FCSECの現地調査時に、周辺住民に対するヒアリングから既往最大洪水時の水位を調査し、次の仮定のもと、既往最大流量を推定した。

仮定: Manning粗度係数 0.035、川幅 200m、水深 3m
推定流量: 平均流速 2.4m/s、流量 1,500m³/s

(6) 実験対象とする流れの条件

今回は既往最大洪水時の流れを実験対象とした。また、ハイドログラフに関する情報がないため、最大流量の定常流での実験とした。

(7) 水制工の条件

水制工には様々な種類が存在するが、今回は、越流非透過型水制を対象とした。形状および配置については、基本的には、FCSECの技術基準⁸⁾に従って、次のように設定した。

形状: 長さ=20m (川幅の10%)、クレスト長さ=2m、高さ=1m (水深の33%)
角度: 河岸線に対して直角
配置間隔: 30m (長さの1.5倍)

表-1 実験条件

		実物	模型	備考
			水平縮尺1/200 鉛直縮尺1/100	
水路長	L(m)	3,000	15	
水路幅	B(m)	200	1.0	
河床材料粒径	d (m)	0.015	0.00045	
水深	h (m)	3.00	0.030	>0.03
Manning粗度係数	n	0.035	0.023	
1/(エネルギー勾配)	1/I	600	300	
エネルギー勾配	i	0.00167	0.00333	
流速	V(m/s)	2.426	0.243	
流量	Q(m ³ /s)	1,456	0.0073	
Froude数	Fr	0.45	0.45	
河床材料の比重	σ/ρ	2.64	2.5	
河床材料の水中比重	$\sigma/\rho-1$	1.64	1.5	>0.4
摩擦速度	u _* (m/s)	0.221	0.031	
Shieldsパラメータ	τ^*	0.203	0.148	
	τ^*r	—	1.37	0.8 - 1.2
限界摩擦速度	u _c (m/s)	0.110	0.016	
	u _c /u _*	0.50	0.51	
	(u [*] c/u [*])r	—	0.97	0.8 - 1.2
沈降速度	w ₀ (m/s)	0.40	0.056	
	u [*] /w ₀	0.55	0.56	
	(u [*] /w ₀) _r	—	0.99	0.8 - 1.5
砂粒Reynolds数	Re [*]	3698	15.7	>20
	h/d	200	67	
	Bl ^{0.2} /h	18.5	10.7	

表-2 実験ケース

予備実験		模型が実物と同様の洗掘・堆積パターンを作れるかどうかの確認。 流れの状況を確認し、必要な対策について議論。
本実験	ケース1	水制設置に関するアイデアの確認 必要な修正に関して議論
	ケース2	修正が適切かどうかの確認 必要な修正に関して議論
	ケース3	水制設置パターンを最終決定 河床形状の詳細計測

(8) 実験用河床材料

本実験では、安価で大量に入手可能なピナツボ火山堆積土砂を実験用河床材料（平均粒径0.45mm、比重2.50）として用いた。なお、この材料に関しては、本実験施設においてすでに流砂量特性が調べられている⁹⁾。

(9) 模型のスケールと実験条件

模型は長さ40m、幅3mの可変勾配式幅広水路上に展開した。スペースの関係上、水平縮尺スケールは1/200とし、掃流力の相似性を可能な限り満たすために、鉛直縮尺スケールを1/100とした歪模型とした。表-1に実験条件をまとめた。なお、この条件では、実物、模型ともに、lower regimeで交互砂州発生領域の条件となる。

(10) 実験ケース

実験ケースは、予備実験1ケース、本実験3ケースの合計4ケースとした。予備実験では、水制がない場合の堆積・洗掘パターンの再現性の確認、堆積・洗掘が生じる要因とその対策に関する議論を行う。本実験3ケースでは、水制の配置と流れ、河床のパターンの関係を確認しながら、水制の配置を修正して、最終的に最適な配置を見出す。表-2に実験ケースを取りまとめた。

(11) エ 程

実験材料準備、水路作成、実験実施、解析と取りまとめに、それぞれ約1週間、合計で約1ヶ月を要した。

(12) 経 費

水路側壁パーツ、水制模型の準備、砂の運搬、計測補助者の雇用で合計10万円程度、さらに電気水道代が必要であった。なお、本格実験に際しては、技術者の人件費等が必要となる。

4. 実験指導結果

実験実施にあたっては、トレーニング参加者が自ら考え、実践し、さらにそれを必要に応じて修正するというプロセスを重視した。これにより、自らの考えを試してみ、その答えが視覚的にすぐに得られるという水理模型実験の利点を最大限に生かしつつ、参加者の技術力向上がなされる。具体的には、各実験ケースの間には、必ずトレーニング参加者間の議論を行い、それに基づいて次のケースの条件を設定することとした。

(1) 予備実験結果

図-4に水制工がない場合の予備実験通水結果を示す。図-3に示す衛星画像と比較して砂州のパターンはほぼ表現できていること、右岸側の深掘れが再現できていることから、現地の堆積・洗掘パターンを概略再現できていると判断された。

(2) 本実験

予備実験結果を受けてトレーニング参加者に水制工の配置を自ら考えてもらい、表-3に示すようなプロセスで、水制工の配置を修正していった。ケース3ではほぼ満足 of いく配置となった。

当初、トレーニング参加者は、全体的な流れの状況をあまり考えずに、単に洗掘が生じている箇所に直接的に水制工を設置する傾向にあった。しかしながら、実験を繰り返して、流れの状況を観察するうちに、水制工の設置自体、あるいはその影響を受けた砂州の挙動の変化によって流れが変化すること、さらにその流れの変化を予測することの重要性に徐々に気づいていった。最終的な水制工の配置は、水制工による流れの変化を予測して水制先端部の連なりが新たな流れの線形と一致するように配置されている。このような配置により、水制工内の流速をうまく軽減でき、土砂堆積と河岸形成が期待できる。

表-3 水制工配置修正のプロセス

水制工配置計画	グループ1：基本方針 - 技術基準に従う。 - 洗掘の生じている箇所のみ直接水制工を設置する。 - できるだけ、水制工の数を減らす。 グループ2：基本方針 - 技術基準に従う。 - 大きな洗掘の生じている箇所への直接的な水制工の設置は避ける。 - 流れを河岸から遠ざけるために、より上流側から水制工を設置する。 - できるだけ、水制工の数を減らす。
ケース1	グループ1の方針をケース1に採用
ケース1による発見	- ケース1の配置では、流れを河岸から遠ざけることができない。 → 必ずしも技術基準に従わず、次の修正を行う。 1) 長い水制を用いる。 2) 水制設置角度については、河岸線のみでなく、流れの方向をも考慮する。 - 水制を設置すること自体によって、流れの方向が変化する。 → 水制工の位置を修正する必要あり。
ケース2	グループ2の方針をケース2とするが、ケース1の発見を基に、技術基準に従わない長い水制を、流れの方向を考慮しながら設置する。
ケース2による発見	- 長い水制を採用したことで、流れを河岸から遠ざけることはできる。 - 水制工を設置せずに流れが直接河岸に向かうような箇所の洗掘は軽減されない。 → 流れが直接河岸に向かうような箇所にも水制を設置。 - 水制工の長さや向きが急変するような箇所では、大きな洗掘が生じた。 → 水制の長さや向きは滑らかに変化させる。
ケース3	ケース2の発見を基に、水制工全体が滑らかな配置となるように修正。
ケース3の結果	- 右岸側の洗掘域が、水制工設置により、堆積傾向に変わった。 - 流れの線形を直線的に変化させることができた。 - 流れが直線的になったことで、下流側の河岸侵食も軽減した。

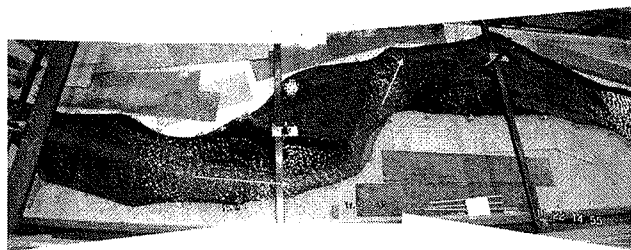
(3) 実験から得られた結論

本実験により、「簡易河道模型実験」によって、主として河道の平面形状に起因して生じる砂州などの堆積・洗掘パターンがおおむね再現可能であること、さらに、水制工の設置による流れと砂州のパターンの変化について概略検討できる可能性があること、がわかった。

FCSECにおいては、少ない河道情報の中で安価で容易に実施可能な本実験手法の利用価値は高い。

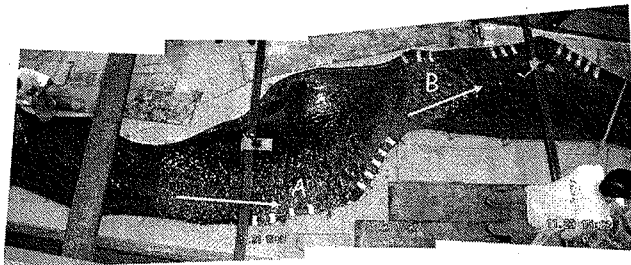
さらに、今回の水制工実験の結果、FCSECの技術基準の運用に関して、以下の提言を行った。

- ① 水制工の長さや角度の設定については、河道条件に応じて、より柔軟に設定できるようにすべきである。
- ② 水制の長さや角度の設定に際しては、流れ方向への急激な変化を避け、水制工全体が緩やかに徐々に流れを受け止めるように配慮すべきであること、について追記すべきである。
- ③ 水制工の設置によって流れが変化すること、さらにそれによって砂州の形状が変化して流れが影響を受けることを考慮すべきであること、について追記すべきである。



砂州を避けるように流れが右岸側に直接的にあたっており、河岸付近の洗掘が激しい。

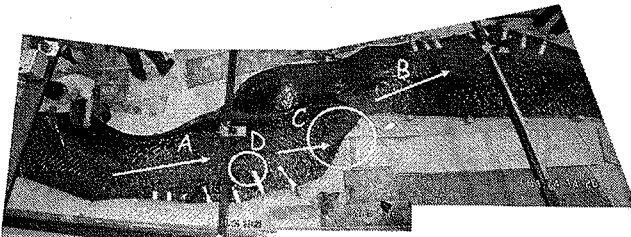
図-4 予備実験（水制工がない場合）



A：流れを河岸から遠ざけることができない。

B：水制工設置により、流れの方向が変化する。

図-5 ケース1



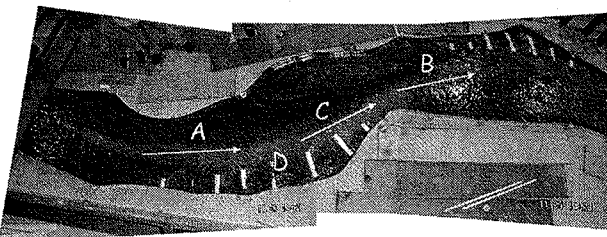
A：流れを河岸から遠ざけることができる。

B：ケース1と比較して大きな流れの方向の変化はない。

C：水制工がないため、流れが直接河岸にあたる。

D：水制長さの急激な変化により、突出部において大きな洗掘が生じる。

図-6 ケース2



A：ケース2と比較して大きな流れの変化はない。

B：流れはより直線的となる。

C：流れを河岸から遠ざけることができる。

D：局所的な洗掘はない。

図-7 ケース3

5. 簡易河道模型実験の今後の活用

日本における治水プロジェクトでは、目的に応じて、数値解析手法（1D, 2D, 3D）及び大型水理模型実験の中から、最も適切な解析手法が用いられている。これらを支えているのは、単によく教育された技術者だけではなく、河川や地形、水文などの詳細な情報の存在である。

一方で、フィリピンをはじめとする開発途上国では、そのような河川に関する詳細な情報は極めて限られている場合が多い。このような状況において、比較的必要な情報の少ない「簡易河道模型実験」は、こうした国々における治水プロジェクトにおける適切な解析手法となりうるものと考ええる。

具体的に、FCSECにおける水理実験棟において実施可能となる実践的な水理実験には次の2つがある。一つは、「簡易河道模型実験」であり、実際の河道平面形状を、幅広水路あるいは、ラハール水路の扇状地水路部分に展開するものである。もう一つは、「部分抽出模型実験」であり、従来の大型模型実験の範疇に属する。これは、より広い河川区域については、「簡易河道模型実験」や数値解析によって検討し、それらの検討結果をもとに境界条件を設定して、より限られた部分的な範囲の現象を詳細に模型で再現して、検討を行うものである。幅広水路やラハール水路の扇状地水路部分には、かなり大型の部分抽出模型を設置可能である。

これらの2つのタイプの実験の組み合わせが、治水プロジェクト全般における調査解析業務を実施するうえで、FCSECにおける強力な道具となるだろう（図-8参照）。また、同様の方法論は、他の開発途上国にとっても参考にできるところが少なくないと考えられる。

6. あとがき

本報告における「簡易河道模型実験」は、20日間という所与の時間内で、実在する河川の河岸侵食軽減対策としての水制工の適正配置に関する実験計画策定、準備、実施、結果のとりまとめに関する技術指導を行うという短期集中型の取り組みの中から、提案されたものである。多くの制約条件下でも工夫次第である程度のことはできるということも、技術指導を通して伝えたかった点である。

今後、類似の多くの実験を行うことで、経験が蓄積され、実験手法自体はより洗練されたものとなることが期待されると同時に、本手法では再現できない現象があるという、手法の限界についても、それらの経験から分析、整理していく必要がある。

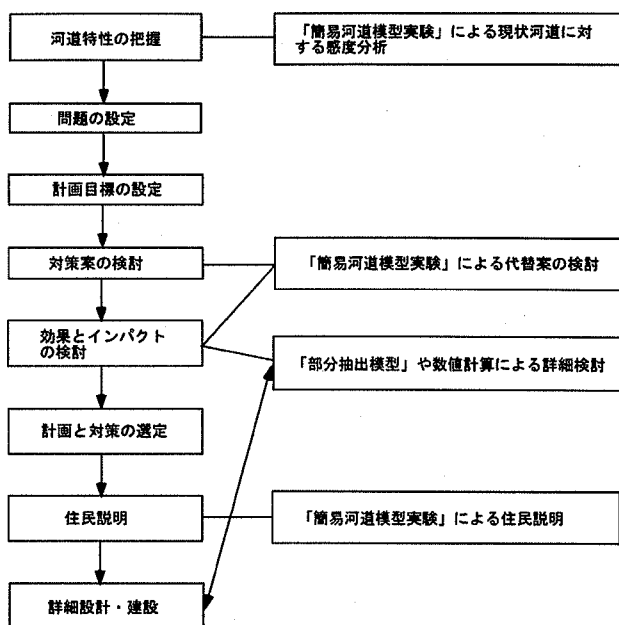


図-8 簡易河道模型実験の治水プロジェクトへの活用

謝辞：本報告の内容は、JICAによるフィリピン国治水・砂防技術力強化プロジェクトの一部として行われた短期専門家派遣による水理実験指導に基づいている。水理実験指導実施に際しては、R.V.David所長、D.M.Hipolito副所長、C.F.Jesse技師をはじめとする同センター職員諸氏の参加・協力を得た。また、実験準備、実施に際しては、JICA津田宏専門家、渡辺成男調整員の多大なる協力を得た。関係者各位に対し、ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) <http://www.pgs.com.ph/~encajica/>
- 2) 和田一範・岡安徹也・浜口憲一郎・市山誠：卓上水理模型による河床形状の再現性に関する研究、水工学論文集、第48巻(1)、pp.739-744、2004.
- 3) 和田一範・岡安徹也・市山誠・浜口憲一郎：卓上水理模型を用いた釜無川信玄堤の治水機能の考察（河道現象説明用ツールとしての活用に向けて）、河川技術論文集、第10巻、pp.161-166、2004.
- 4) <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/csdi/index.jsp>.
- 5) <ftp://edcftp.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/>
- 6) <http://www.kashmir3d.com/>
- 7) <http://www.manifold.net/>
- 8) FCSEC: Technical Standards and Guidelines for Planning and Design, Vol.I Flood Control, 2002.
- 9) JICA, PMO-FCSEC: Basic Research/Study on Fine Sediment Movement around Volcanic Area, 2004.

(2005. 4. 7 受付)