

扇状無堤河川に築堤する場合の堤防法線と河岸 侵食防御工の実験とその考察

DIKE ALIGNMENT AND BANK PROTECTION WORKS FOR NEW EMBANKMENT ON ALLUVIAL FAN RIVERS

井上 和則¹・御園 功²・浜口憲一郎³・須賀 如川⁴

¹正会員 工修 (株)パシフィックコンサルタンツグループ PCI(〒206-8550 東京都多摩市関戸 1-7-5)

²ラオアグ川洪水砂防プロジェクトマネージャー (株)パシフィックコンサルタンツグループ PCI(同上)

³正会員 工修 (株)パシフィックコンサルタンツグループ 筑波実験場(〒3004204 茨城県つくば市作谷 642-1)

⁴フェロー会員 工博 宇都宮大学名誉教授 河相工学研究堂代表(〒276-0023 千葉県八千代市勝田台 4-2-4)

There have been limited experiences on the technology of new embankment works at braided alluvial fan rivers for flood control. Therefore, the detailed design should be done carefully and precisely considering the river characteristics. In the detailed design for the Cura/Labugaon River in the Laoag River Basin, Philippines, appropriate dike alignment, type and layout of bank protection works have to be decided to take sand bar formation into account. For this purpose, movable bed hydraulic model test, which covers the entire reach of the proposed river improvement works was conducted to study sand bar development, scouring, and the resultant critical reaches, as well as to study the facility design in terms of dike alignment and layout of spur dike for bank protection. This paper presents a practical engineering process to decide the appropriate dike alignment, type and layout of bank protection works for the braided primitive alluvial fan river, which we cannot experience any more in Japan at present.

Key Words: Alluvial fan, dike alignment, bank protection, spur dike, hydraulic model, movable bed

1. プロジェクトの経緯

ラオアグ川(図1)は、北緯18度05分、東経120度42分のフィリピン国ルソン島の北西端に位置する流域面積1,332km²の河川である。南シナ海の熱帯収束帯に位置し、毎年平均して5つの台風の常襲地帯である。年平均降雨量は2,135ミリで、5月から10月の雨季にその97%が降る。地質は、標高2,500mクラスの中央コルデイレラ山脈をその上流域に擁し、至る所に断層が走り、風化が進行しているため、崩壊などによる流出土砂は多い。

上流域では、主として4本の河川が山地から出たところで川幅を広げ、水深・流速を減じ、巨石・砂礫を堆積させることにより扇状地が構成されている。土砂量が多いため流路は安定していないが、対象地区は用水が豊富な事から農耕地として利用されている。これら4本の支川は、上流からパパ川、マドンガン川、ソルソナ川およびクラ・ラブガオン川であり、それぞれがラオアグ本川上流区間のボンゴ川に右岸から流入している。この上流扇状地地域は、過去の度重なる台風による洪水で流路が安定せず、周辺農地や集落が被害を受けて来た。

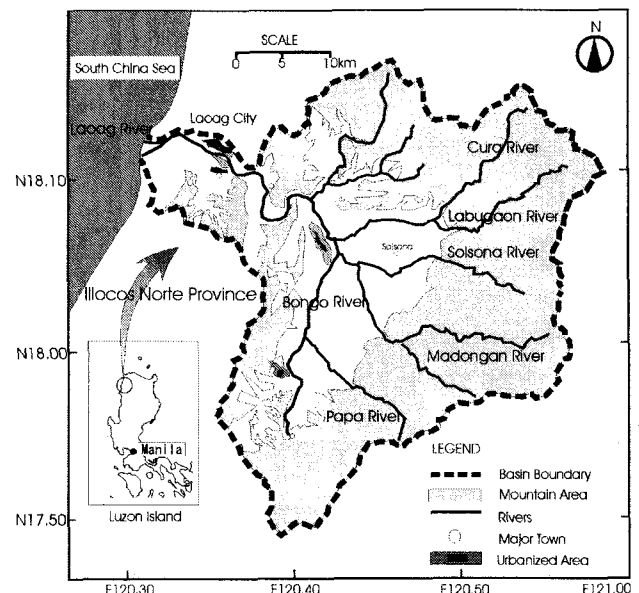


図1 ラオアグ川流域図

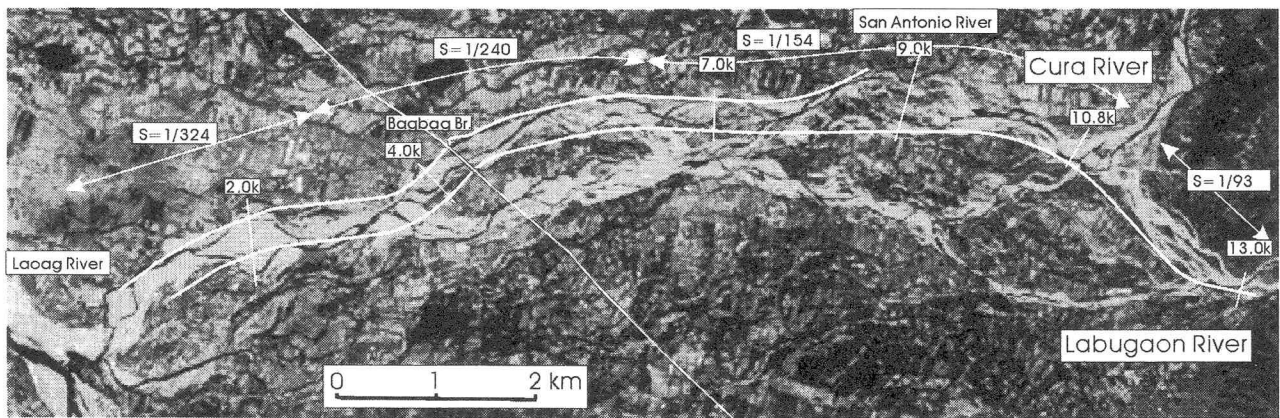


図2 クラ・ラブガオン川のF/S計画法線(背景は2001年10月のSPOT衛星画像)

国家灌漑庁 (NIA) は1991年までに緊急災害事業としてパパ川、マドンガン川、ソルソナ川の約27kmの築堤工事を実施したが、1996年の洪水によりその半数以上が破堤・損壊を被った。1996-97年にかけてわが国の技術協力によりラオアグ川流域の洪水砂防実施可能性調査(F/S)¹⁾がなされ、その中で上流域4支川の河道改修事業としてパパ川、マドンガン川、ソルソナ川の現況堤防の強化修復とクラ・ラブガオン川の新規築堤が提案された。また、1996年洪水による築堤河岸の洗掘、崩壊の状況を勘案し、堤防の河岸防護工として両岸で約1,300基の水制工の設置が提案された。2001年に始まったわが国の円借款による実施設計・施工監理では、基本的にF/Sに基づいた実施設計を行っているが、過去破堤を繰り返す支川の特性を踏まえた上流域扇状地4支川の堤防法線および河岸防護工(水制群)の設計が求められた。特にクラ・ラブガオン川のような網状化した扇状地河川における新規堤防の建設はこれまでにあまり例がなく、慎重かつ詳細な対応が必要であった。

2. クラ・ラブガオン川の現状と計画(F/S)

クラ・ラブガオン川(図2)は、扇頂部における集水域面積がそれぞれ69.5km²、100.5km²であり対象区間は網状化した扇状地河川である。右岸側からサンアントニオ川が流入する他は、比高3m程度の段丘地形となっており、クラ川、ラブガオン川が扇頂部において扇頂溝を刻んだ後、網状化しながら並行して流下し、ボンゴ川合流点近くで1本の河川となっている。扇状地部の延長は約13km、網状化した川幅は2km程度であり、扇頂部下流の河川勾配は1/93から1/324である。F/Sでは、集落の位置・灌漑水路網・土地の農地利用可能性を考慮した築堤工費比較がなされ、ラブガオン川の扇頂部から堤防により同河川をクラ川に合流させ、9.0km下流のクラ川を両岸連続築堤する計画が立てられた。計画洪水流量は25年確率の2,360m³/s、計画河道幅はその流量に応じたレジーム理論から340mに設定された。河岸侵食防護工は洪水時に越

流を許す水制によるものとし、水制の長さを両岸でそれぞれ河道幅の5%(15m)とし、河床勾配 $S=1/125$ を境として水制工の間隔を30mと60mとすることがF/Sでは提案された。

3. クラ・ラブガオン川移動床模型実験

実施設計においては、網状化した無堤河川のクラ・ラブガオン川を築堤し、河道内に安定した流路となるように、適切な法線形および砂州形状を考慮した河岸防御施設の工種・配置を具体的に決定する必要がある。そこで、計画堤防区間全体を対象とした移動床水理模型実験により河道特性を把握し、施設計画の比較を行い、適切な河岸防御工の検討を行った。対象区域の経年的な河道資料、水文資料がない事、プロジェクト完了までの施工期間を考慮すると模型実験の時間的制約がある事から無堤状態での再現実験は省略し、築堤計画河道を対象として実験を実施した。実験ではF/Sおよび修正堤防法線での模型により砂州の発達・洗掘位置の変遷・水衝部について把握し、河岸防御工として必要な水制工の規模・位置、護岸工の位置、規模を検討した。また、新堤建設に際して河道内に残地する現況砂州の撤去について、河岸洗掘軽減の観点から検討を行った。

3.1 移動床模型

模型の範囲は、クラ川、ラブガオン川のそれぞれ扇頂部からボンゴ川合流点までの縦断延長13km、河道幅はF/Sの築堤幅340mとした。水平縮尺はフィリピン大学実験施設の制約から1/200とし、鉛直縮尺は水の粘性による影響を避け、模型水深を3cm程度確保するため1/100とした。設置した模型は、延長は65m、河道の堤間幅は1.7mである。模型堤防法面はモルタル製の固定床模型とし、堤防間には中州も含め河床材料により現地地形を再現する移動床模型とした。移動床部は洗掘を考慮し模型で30cmの敷設厚を確保した。図4(後述)に模型の全体平

面と代表的な横断形状を示す。

現況河床の河床材料については、滞筋部、中州など 12 カ所の河床材料(表層から 20cm を除く)を調査した。平均粒径は 30mm~150mm 程度に分布し、2mm 以下の砂成分が 10%~30%の砂利で構成されている(図 3)。実験では全川区間について検討を行う事から河床材料の平均的な粒径分布を対象とし、分級作用を考慮し混合粒径材料を用いた。しかし、河床骨格構成材料として 10mm 以下の材料は無視できる事、模型縮尺を考慮して 10mm 以下の粒径分布は対象外とした。実験では歪み模型で無次元掃流力が現地と一致するように河床材料を選定した。用いた河床材料は平均粒径 1.6mm、 $D_{85}/D_{15}=4$ 程度の比重 2.56 の混合粒径材料である。表 1 は相似則に基づく諸元を示すが、実物の河床材料の粒径範囲と U. の関係は日本の冲積河川²⁾のそれと概ね類似している。

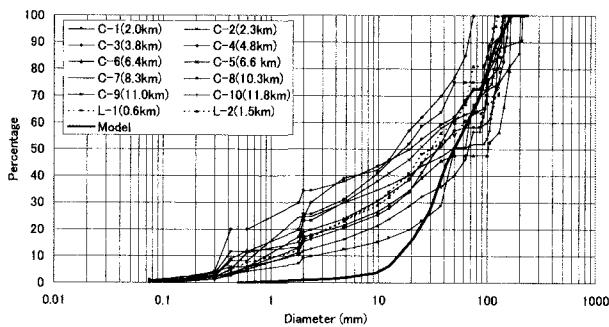


図 3 河床材料粒度分布

表 1 相似則に基づく諸元

パラメータ	実物	模型	パラメータ	実物	模型
縮尺・水平 x_r		200	河床材料 d (mm)	75	1.6
縮尺・鉛直 h_r		100	河床材料比重 σ	2.73	2.56
歪度		2	河床勾配	1/200	1/100
水深 H (m)	2.1	0.021	H/d	28.0	13.0
河道幅 b (m)	340	1.7	Fr	0.73	0.73
河積 m^2	714	0.04	U^* (m/s)	0.32	0.05
流量 Q (m ³ /s)	2360	0.012	τ^*	0.08	0.08
流速 U (m/s)	3.3	0.33	Re^*	26732	81

3.2 実験条件確認のための予備実験結果

(1) 通水流量

現地での水文、流量観測資料、経年的地形図などが少ない状態で、網状扇状地河道の河道特性の支配流量については不明であった。そこで、水理模型実験では、初期河床から平均年最大流量を 1 時間通水、続けて 25 年確率流量(計画流量、記録上の既往最大である 1967 年洪水に相当)を定流で通水することで、河道内の流況、水衝部の変化を把握し、河岸防御工の効果、機能について判断を行った。

(2) 初期河床(島の考慮)

現状のクラ・ラブガオン川は網状化しており、計画河道内には樹木が密生した島が存在する(図 2 中流部の黒い部分)。F/S においてはそれらの撤去は考慮されておらず、工事では基本的に島を残すことが前提となる。過去 10 年間の空中写真や衛星画像判読では、大規模な島は概ね固定していると判断されたため、それらの範囲と標高を模型河床材料で再現し、初期河床条件とした。島以外は計画堤防間の平均河床高に均した河床とした。

(3) 給砂条件

クラ・ラブガオン川ではそれぞれの扇頂部上流に砂防ダムが建設される。実験においては、F/S に倣い芦田道上式により土砂量の算定を行い、砂防ダムが設置された後の流量規模に応じた流送土砂量を通水中クラ川、ラブガオン川上流から給砂した。

(4) 河床形状の再現性

現地資料が少ないことからクラ川全川に渡る模型の再現性検討は困難であったが、クラ川のみから通水した場合の通水時間による河床形状の変化を観察することで、模型の再現性について検討を行った。クラ川扇頂からラブガオン川への合流点付近の現況河道形状が計画流量を 3 時間通水した状態で概ね再現されたことから、以後の実験では計画流量の通水時間を 3 時間と設定した。この時間は模型の時間縮尺が(水平縮尺)^{0.5}=14 より、現地では 40 時間以上に相当する。

3.3 F/S 計画堤防実験

F/S 計画堤防法線(水制なし)での通水を行った。通水直後の 7.4km 左岸において初期河床としての島に導流された流れによる堤防越流が生じた。

図 4 に、F/S 計画河道に通水を行った後の河床形状のスケッチと、河岸沿いの洗掘が著しい区間を示す。また河岸防御において問題と考えられる以下の 4 つの地点、現象を抽出した。該当箇所を図中に示した。

- ① 現河川が湾曲外岸を直進している線形を強制的に変更することによるラブガオン川扇頂部下流の大湾曲部における外岸部の大規模な洗掘。
- ② 中流部右岸側における河道内砂州形状により堤防法線にほぼ直角に向かう流れによる河岸洗掘
- ③ 中流から下流の直線区間の砂州位置および河道線形に応じた左右岸の水衝部による洗掘が認められた。通水中の観察では、これら直線区間において水衝部が砂州の移動に伴って移動することが顕著であった。
- ④ 4.5km 地点下流では、線形と砂州による蛇行モードが半波長ずれ、流れの集中化により両岸に著しい洗掘が生じた。

本ケースの通水後の滞筋の位置は図 4 と図 2 の比較が

ら現況の無堤状態のものと似ており、現況の滞筋に堤防が掛かる個所が水衝部となっている。このように基本的には原川と新規堤防法線が交差する箇所において河岸防御を行うと同時に、新たな河岸防御工により水衝部位置を変化させて、新たな水衝部を生じさせない必要性が認識された。

3.4 F/S 計画堤防線形+水制実験

F/S の計画堤防線形に約 350 基の水制を配置した実験を行った。水制の長さは実物 15m、間隔は 10.8km 下流で 60m、上流で 30m である。水制の天端高は初期河床高+1m とした。この実験においては、問題点②に対処するため中流区間河道中央左岸寄りの島を堤防法線に沿って掘削して初期河床とし、島以外の場所は平均河床高に均した上で水制工を配置し、通水を行った。

堤防施工直後の洪水で流れが中流区間左岸に集中して越流破堤する問題点は回避できることが確認された。図 5 に、中流区間の島の現況と想定掘削位置を示す。

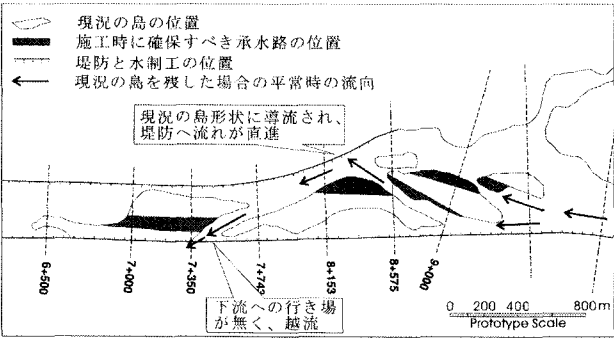


図 5 中流区間の島の現況と想定掘削位置

問題点③については、水衝部が経時的に移動すること、水衝部への流向が河岸に大きな流入角度となるため水制工間での洗掘が大きいことから、対象区間全区間に根入れを十分に取った護岸や間隔を密にした水制工群を設置する必要が生じた。しかし、このような対策工は規模が大きくなることから経済的ではないと判断され、水衝部を固定化する方策が必要であった。

3.5 修正堤防線形+水制実験

図 4 で見たクラ・ラブガオン川のように網状扇状地河川を両岸築堤によって川幅を直線的に制限しても、洪水時には直線区間では河道内砂州が移動し、それに伴い水衝部位置が移動するため、対策工が困難となる。また、中小洪水では旧河道に沿った流れが生じ、河道内砂州と堤防に挟まれた狭い区間に流れが集中し、それが水衝部となり結果として堤防法尻に著しい洗掘を生じさせる。

この問題に対処するために、河道内の流れが河岸に及ぼす影響を緩和するように堤防線形を現況河道の河岸を

考慮して設定し、一部を霞堤とすることで外力の軽減を図った。

水衝部移動現象は、河道内砂州による流れの発散・収束が原因であるため、河道線形に流れの蛇行特性を考慮した変化を付けることで水衝部位置を固定化し、水制工などによる水衝部対策範囲の縮小化を図った。堤防線形については現行蛇行や旧蛇行跡を尊重した堤防線形（引き堤）とし、河道幅に変化を持たせた線形に修正した。

また、霞堤には超過洪水を考慮して洪水の一時貯留、氾濫水の排除、河道変遷の調整（常水路の固定）、流水の減勢および支川土砂の調整機能を持たせ、河床勾配の変化点、旧河道位置、小支川の流入点を考慮して霞堤を設置した。

具体的には図 2 と図 4 から、クラ川合流点下流の 10.0km においては右岸河岸と左岸砂州により流れの集中化が見られ、下流区間への収束・発散現象の端緒と判断される。

実験による滞筋の変動からその下流区間は約 1km を半波長とする蛇行流れが卓越している。ミオ筋の集中化による河道中央部の砂州形成による発散区間では両岸部に水衝部が生じるが右岸部は支川合流地点に位置すること、左岸側は堤内地の土地利用を考慮して引き堤を行い流速低減を行うこととし、下流には霞堤を設置した。

水制工は、面的に均一な強度を有する護岸等の堤防の河岸防御工が経済的にも施工的にも困難なことから、修正堤防線形に対しても、河岸に作用する外力を低減させる目的で設置した。図 6 に、修正した堤防法線、水制工の配置、通水後の河床形状のスケッチと、4.0km 区間と 12.5km 区間の水制工配置と洪水時の流れパターン、図 7 に通水後の左岸沿いの洗掘深の縦断をそれぞれ示す。

水制工は河岸へ作用する流れを水制群の水はね効果と河道線形により河道中央部へ向くように、あるいは堤防線形の曲がりに応じて、霞堤の方向へ流れが向くように考慮した(図 6 の 4.0km 付近)。

また、水制工の全体的な規模を縮小化するため、一部の区間に長めの水制を設けることで下流区間の流速低減、比較的大きな河床材料の堆積を促進させ、水制工の総設置延長の短縮化を図った。(図 6 の 12.1km 付近)。

霞堤を取り入れた堤防線形と、それに対応した水制工 314 基の配置によって、F/S の直線的な線形と比較し、安定した砂州、水衝部区間の固定・短縮が図れる事が分かった。特に 4.5km 地点右岸の水はね水制により下流区間で流れが河道中央を通過し、F/S 計画堤防線形ケースで見られた問題点④の両岸の水衝部を解消することができた。しかし、図 7 の洗掘深縦断面図にもあるように、左岸の 6.9km 区間、10.0km 付近では堤防法尻に 3m 以上の洗掘が認められ、砂州の発達による堤防法尻の深掘は完全には解消できない。これらに対しては本実験の傾向を踏まえ、施工後のモニタリングにより対処する必要がある。

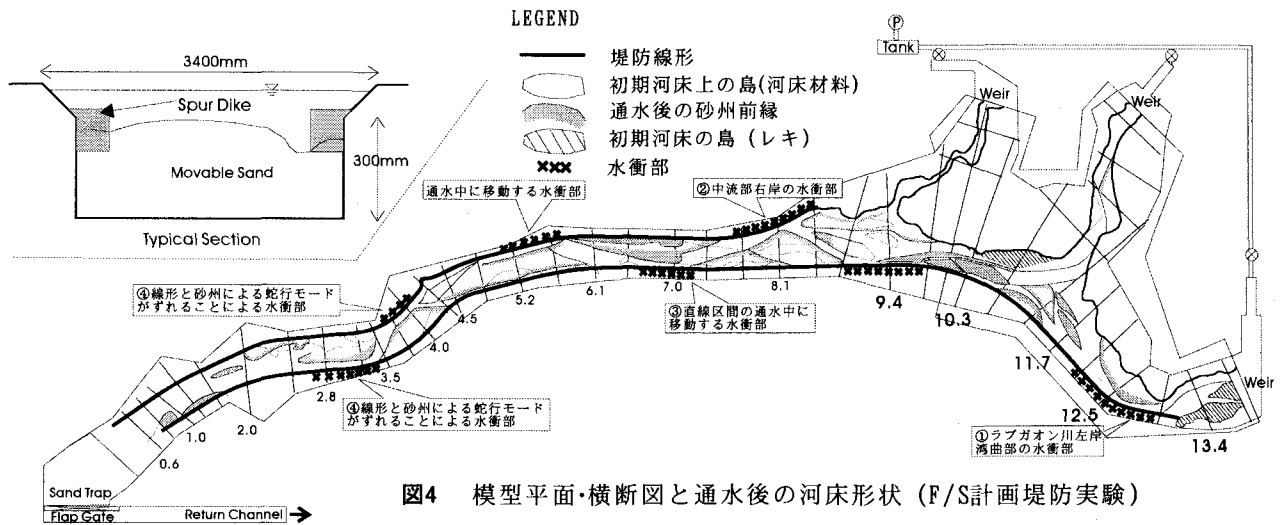


図4 模型平面・横断面図と通水後の河床形状 (F/S計画堤防実験)

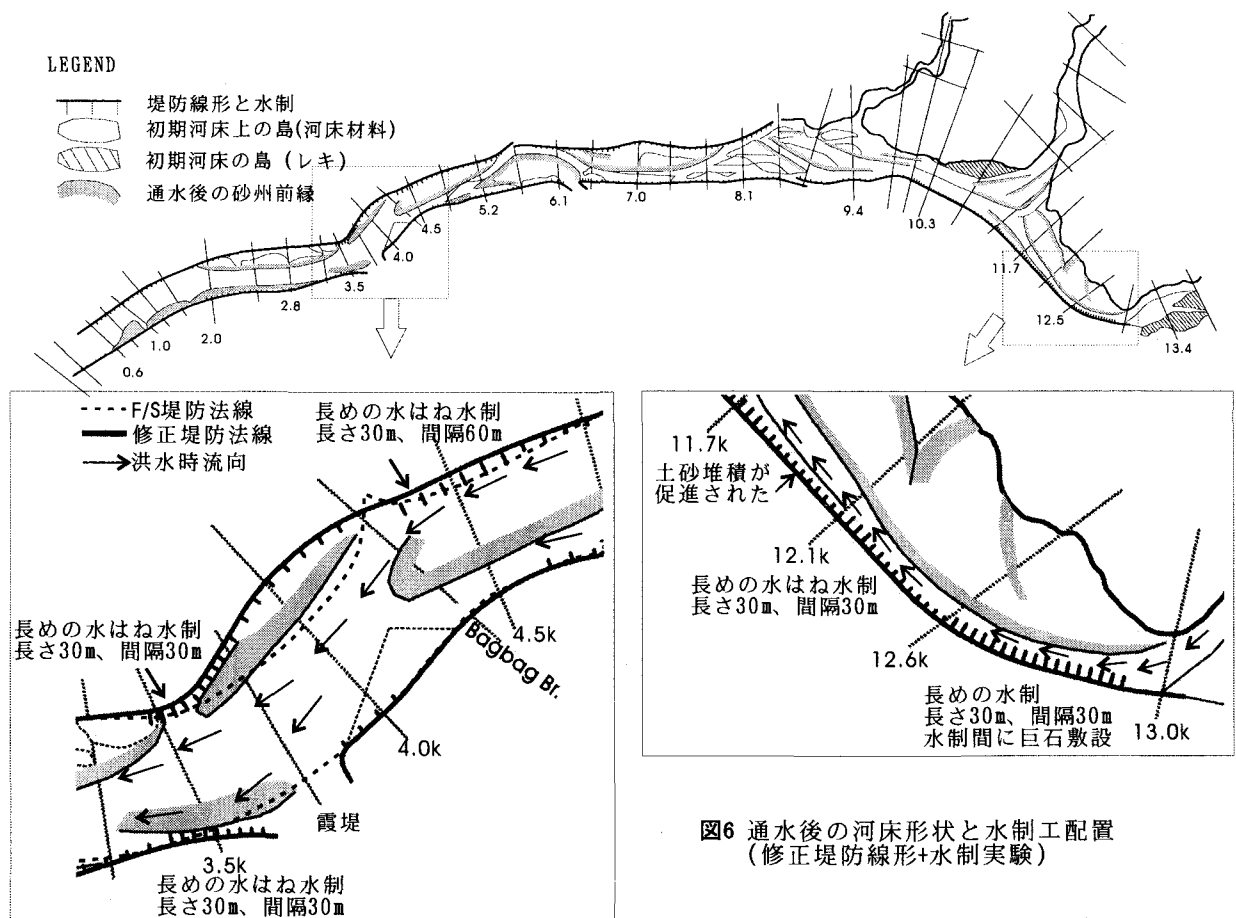


図6 通水後の河床形状と水制工配置 (修正堤防線形+水制実験)

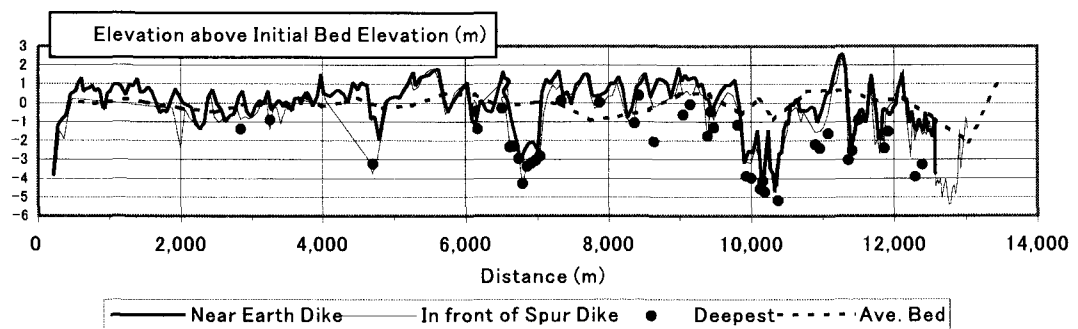


図7 修正堤防線形+水制実験の洗掘深縦断面図 (左岸)

3.6 水衝部における水制配置実験

ラブガオン川扇頂部は、1991 年、1996 年の空中写真及び 2001 年の衛星画像から大洪水の度に滞筋が左右岸に振れ、現在は計画堤防法線にほぼ直角に向かうように滞筋が形成されている(問題点①)。ラブガオン川左岸は、堤内地に集落と灌漑地域を抱えており、また他の 3 支川の堤防が過去幾度となく破堤を被ってきたため、その河岸防護は本プロジェクトにおいて非常に重要である。

中流部右岸側は、河道幅が最も狭くなっている 10.0km 区間を通過した流れが湾曲部に入ったところで、ちょうど湾曲部外岸の下流側に相当する。ここも流れが計画堤防にほぼ直角に向かうようになっている。

このような流れの特性をもつ区間は水制のみによる河岸防護は困難であることから、水制工の洗掘強度を向上させることで河岸防御を図ることとした。強度増加については現地での施工、材料の入手を考慮し、水制の間に 50-70cm の巨石を水制天端高より若干下げた高さまで敷設する対策工とし、水制工による捨石の移動を拘束することで河岸防御を図った。さらに水制の長さを F/S の倍の 30m とし、巨石を堤防法尻から 15m 幅で敷設した。ラブガオン川左岸の水制間隔は 30m、中流部右岸側については、背後が比高 3 m 程度の段丘地形となっているため、間隔 60m の 7 基とした。

3.5 で述べた実験ケースに加え、この水制配置と巨石敷設の条件で通水した結果、堤防法尻の洗掘防止が確認された。しかし、堤防防護の反面、水制先端部の洗掘深は無視できないことが確認され、実施設計においては、水制先端部の根固めとして、2m×2m×0.6m の鉄筋籠(鉄筋直径 8mm 以上)に径 30cm 大の玉石を詰めた Steel Cage を適宜敷設することとした。

3.7 河岸および水制周辺の流速

堤防と水制工前面の流速を把握するため、電磁流速計を用いた点流速の測定と、測定した水位と通水後の河床断面形から算定した断面平均流速との比較を行った。

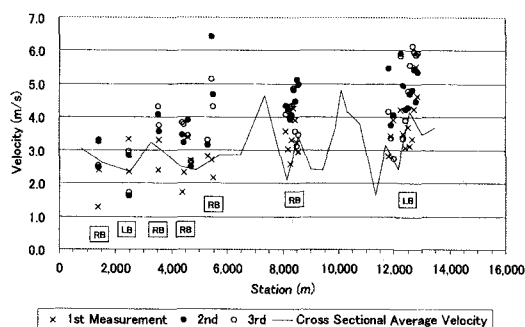


図 8 流速の縦断分布

図 8 は、3.5 で述べたケースにおける断面平均流速と通水中に複数回測定した水制工前面の点流速の分布である。

点流速は概ね断面平均流速の 1.7 倍の範囲にある。5,400m 地点の右岸側は、滞筋が収束する入り口区間に相当し、断面平均流速の 2.3 倍の流速が発生している。また、第 1 回目の流速測定は平均年最大流量時のものであるが、必ずしも計画流量時の流速より小さくないことが分かる。これは平均年最大流量時に砂州が形成した滞筋に流れが集中するためである。

4. おわりに

本検討では、F/S で提案されたクラ・ラブガオン川の堤防法線に対し、河道の蛇行、旧河道、砂州形状を考慮し堤防法線を修正、霞堤の設置による河岸防御範囲の削減、超過洪水時の安全度向上を図った。河岸防御範囲については水衝部の安定化を図ることで河岸防御工の位置を定め工費の縮減を図った。

特に F/S の直線的な堤防法線で見られた不安定な砂州の発達、移動、水衝部の拡大傾向に対して、引き堤・霞堤により全体として蛇行させた堤防法線と水はねを目的とした水制を配置することにより、砂州による蛇行の安定化、水衝部の固定を図った。

本プロジェクトは経年的な河道資料、水文資料がない状況において、扇状地無堤河川を築堤により大規模に河道を短期間で変遷させる工事であるが、本実験は無堤の河床形態の再現性を部分的に確認したのみであり、築堤後の河道内で生じる現象、時間的な変化を全て予測できたかは不測な点もある。しかし、国内での有堤河道を基本とした河道計画に対し、経験のない無堤扇状地河川の新たな築堤による氾濫の制御、河岸防護工の配置プロセスを示すことができたことに意義があると考ええる。

本プロジェクトでは 2006 年の砂防ダムを含む 4 支川の工事完成へ向けて、築堤・水制工配置後に洪水により生じる河岸侵食状況、堤防の健全度、水制工の効果などについてモニタリングを行うこととなっている。

謝辞

本実験はフィリピン国公共事業道路省 PMO の「ラオアグ川洪水砂防プロジェクト・実施設計施工監理」の一環として実施された。また、本論文の発表の了解を頂いた PMO に対して謝意を表す。

参考文献

- 1) JICA: The Study on Sabo and Flood Control in the Laoag River Basin, Final Report, 1997
- 2) 山本晃一、沖積河川学、山海堂、1994、p.36

(2003. 4. 11 受付)