

扇状無堤河川の築堤後の洪水による河道特性 変化についての考察

CHANGE OF RIVER MORPHOLOGY AFTER RIVER IMPROVEMENT BY DIKE FOR ALLUVIAL FAN RIVERS

井上 和則¹

Kazunori INOUE

¹正会員 工修 (株)オリエンタルコンサルタンツGC事業本部(〒151-0071東京都渋谷区本町3-12-1)

Natural alluvial fan rivers were improved by dike in 4 years-river improvement project in the Philippines. After the construction works, the river suffered from significant large floods in 2008 and the resultant channel morphology enabled us to compare in proto type scale with the results of distorted movable bed hydraulic model test conducted before the construction. The resultant mid-scale riverbed pattern and scour depth were regarded similar to those of the model test although the discharge must be analyzed further in detail. Also the river bed pattern after the floods had tendency to maintain the natural condition even after the confinement by dike and such phenomenon for the neighbor tributaries should be studied.

Key Words : Alluvial Fan, Earth Dike, Spur Dike, Distorted Movable Hydraulic Model Test, Mid-scale riverbed pattern

1. はじめに

河道計画における河道の平面形の基本は、現河道の平面形を中心にして治水・利水・環境についての目指すべき方向性を踏まえて設定するとされている¹⁾が日本の直轄管理の大河川では堤防が概成しており計画法線そのものの検討を行う河川は少ない²⁾。筆者³⁾は2003年にフィリピン国ラオアグ川流域(図-1、面積1,332km²)上流の扇状地の無堤河川(クラ・ラブガオン川)に築堤する場合の堤防法線と河岸侵食防御工の設計について移動床模型実験の結果に基づき、議論をした。

図-2に示すようにクラ・ラブガオン川の築堤工事(兩岸の総延長約20Kmの築堤と約300基の水制群)と各支川1基の貯砂(砂防)ダム工事は、2004年に開始され2008年初頭に完工した。2008年7月と8月には計画規模相当の大洪水が連続して生じ、堤防河岸防護工に影響が出た他、砂州等の河道特性の変化が見られた。

クラ・ラブガオン川では、扇状地の無堤状態の空中写真等の資料がある時に支川毎の堤防法線が一から検討され、支川の全体・部分模型実験(移動床)に基づく設計³⁾⁴⁾、霞堤を含む築堤による河道改修工事が短期間に実施され

た後、計画規模相当の洪水が発生した。

河道計画において、水理模型実験や数値解析の結果が河道に現れる実現象をどの程度再現しているかが重要である⁵⁾。本論文は前回論文³⁾の継続研究として、扇状地河道の水理模型実験と築堤後の大洪水後の現象を比較するという現在の日本では例の少ないものであり、ここに研究の新規性がある。近年、気候変動の影響による適応策等が必要になる中、資料の少ない外国河川に対する本論の取組は今後の類似業務の参考となる他、扇状地河道の動態の研究の発展に役立つと思われる。

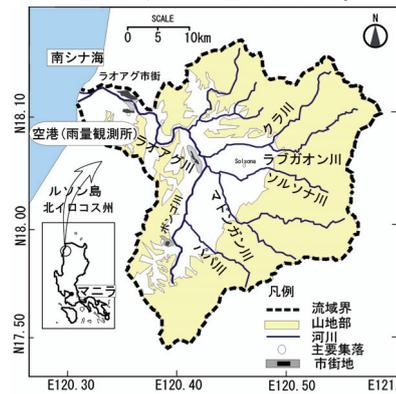


図-1 ラオアグ川流域図

	1996	1997	98	99	00	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
プロジェクトの段階	JICA技術協力					JICA(JBIC) 円借款								
	M/P, F/S 事業妥当性調査					設計、水理実験 入札図書作成			工事入札		施工(本川+5支川 築堤等) (砂防ダム5基)			
来襲した台風と3日雨量	▲					▲			▲		▲		▲	
	1996/8 Gloria 643mm					2001/7 Feria 504mm			2004/6/29 Igme 621mm	2005/9/20 Labuyo 621mm	2006/7/13 Florita 449mm	2007/8 Dodong 330mm	7月14-16日 Helen 972mm	8月8-10日 Julian 168mm
													7月26-28日 Igme 353mm	8月19-21日 Karen 426mm

図-2 プロジェクトの段階と来襲した台風とその3日雨量(計画3日雨量643mm;25年確率)

2. 既往研究のレビュー

(1) 扇状地における河道平面計画

日本では北陸や東海地方を始めとする代表的な扇状地河川に対して大正以降は高水工事が実施され、昭和初期には主要区間の堤防は概成した状況にあった。橋本⁶⁾は北陸地方の扇状地における河川堤防の特徴を、大変広い河幅と随所にある霞堤と表現した。山本⁷⁾は、そのような「堤防の配置は扇状地全体を1つの計画論として意図的に行ったものではなく、新田開発の進行に伴い堤防が築かれ、徐々に霞堤状の配置となったものが多かった」と述べた。木下⁸⁾は、「日本の河川改修史では既往の流路を適当な幅で囲って堤防が築かれたが水路の中の水流蛇行の波長は改修以前の蛇行流路の波長と常にほとんど変わらないという事実がある。沖積面上の旧流路は長大な年月をかけた実物モデルによる総合的な実験の結果として判読利用することが可能」、「扇状地河道の法線には洪水時の水衝部を固定するために緩やかな蛇行の導入が必要」と述べている。山本⁹⁾は扇状地の河道特性の整理に基づき、「平面計画の堤防法線は、現状の堤防間隔が十分でも遊水効果等の保持により、極力その幅を確保することが望ましい」と提案しているが、日本では扇状地無堤状態からの堤防法線の検討・研究は少ない。

(2) 中規模河床形態

中規模河床形態は沖積河川における流路変動の支配要因であり、河道の安定に大きな影響を及ぼすことから、平面計画を立案する際には当該河川で卓越する中規模河床形態(砂礫堆、複列砂州、非発生)をまず検討し、次いで河床の変動特性を検討する。従来、形成条件は実河川及び模型実験による領域区分図作成ならびに線形安定解析によって研究されてきた。領域区分図は、移動床歪模型の相似概念によるものと次元解析に基づく方法がある。

次元解析による中規模河床形態の研究は、村本・藤田¹⁰⁾ら極めて多く、土木学会水理委員会¹¹⁾によって取りまとめられている。移動床歪模型の相似則については魏・内島¹²⁾が鮭川らの領域区分図のパラメータに基く歪相似律を理論的に研究している。線形安定解析に対して岸・黒木¹³⁾の理論研究があり、渡邊¹⁴⁾は実河川の水理条件が複列砂州であっても砂州モード減少の特性を有していると指摘し、砂州のモード変化に着目した砂州形成過程の解析と実験をしている。また木下ら^{8) 11)}によって河岸防衛を効率的にするために、河道の彎曲角 20° で砂州による水衝部を固定化する研究も行われた。

芦田ら¹⁵⁾は「流路形態に関する議論は殆どの場合一様砂を対象としているが、河川の現場での流砂問題は殆どが混合砂に関わる問題であり、流路・河床形態の形状や伝播特性は砂礫の分級現象に影響を受ける」と指摘する。竹林¹⁶⁾らは混合砂による砂州の形状・伝播特性値の変化について模型実験と数値解析研究を行い、混合砂の場合

は交互砂州波長が一様砂に比べ小さくなると指摘した。

また藤田¹⁷⁾は、「(河床形態等の)メカニズムの解明の進行状況に関わらず、丹念な広範囲の実験や観測、事実の入念な記述は後年の研究の展開を大いに助ける」と述べている。須賀¹⁸⁾は、扇状地河道の網状化とそれに内在する発散収束現象に着目した。この現象は、井口¹⁹⁾と木下^{20) 8)}に代表される砂礫堆を中心とする交互砂州に伴う流れの収束発散と異なり、大径礫・巨石を含む混合粒径河川において多く見られる自然状態で流路と水流の発散収束である。混合粒径の流砂の分級作用の結集、河床材料の場所的分布に不均衡が生じ、大径礫堆・巨石堆が形成され、安定するという。この現象は堤防法線に蛇行を持たせるか否か、新規霞堤の位置、予想される水衝部位置の議論に重要と考える。山本⁹⁾による手取川の混合粒径実験においても、流れによるふるいわけ作用で流水の収斂する所では深く掘られ粒径も粗く、また収斂した流れが拡散する所、砂州前縁の手前側は細砂となることが指摘されている。

既往研究では、混合砂を用いた全体河道模型実験と現地河道での洪水後の河床形態との比較等は多くない。

3. クラ・ラブガオン川の築堤

(1) 河川の特徴と河道平面の基本的計画

クラ川とラブガオン川(図-5及び図-6)は、扇頂部における集水域面積がそれぞれ 69.5km^2 、 100.5km^2 であり、網状化しながら幅約 2km で大局的に見て約 3.5km 毎に河道の発散と収束を呈しながら流下し、ラオアグ川に合流点している。扇状地部の延長は約 13km 、扇頂部下流の河川勾配は $1/93$ から $1/324$ である。(図-5, 6に重ね表示のある堤防法線は、2004年から築堤が開始された。)

1997年の事業妥当性調査²¹⁾(以下、F/S)では、同扇状地区間は河床上昇の傾向にあると判断され、その対策として各支川扇頂部直上流に貯砂ダムが計画された。またF/Sでは集落の位置・灌漑水路網・土地の利用可能性を考慮した築堤工費比較がなされ、ラブガオン川をその扇頂部から堤防によりクラ川に合流させ、 9.0km 地点から下流を兩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 $2,360\text{m}^3/\text{s}$ 、計画河道幅はその流量に応じたレジーム理論から 340m が基本となった。堤間幅を更に広く取ることは左岸側の集落の位置から困難であった。

河岸侵食防護工は面的に均一な強度を有する護岸等が経済的施工的にも困難な事から、洪水時に越流を許す水制群とした。水制長は兩岸でそれぞれ河道幅の5%(15m)、間隔は河床勾配 $S=1/125$ を境として 30m と 60m がF/Sでは提案された。

現況河床の滲筋部、中州など12カ所の河床材料(表層から 20cm を除く)が調査され、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)。

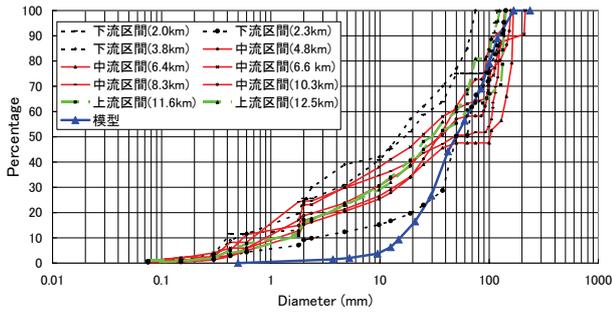


図-3 河床材料粒度分布

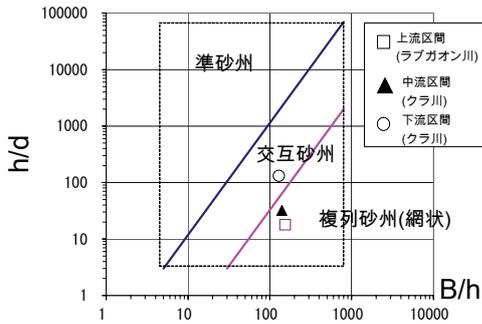


図-4 中規模河床形態の領域区分図

主要区間の計画川幅、計画流量、水深及び平均河床材料によると、藤田ら¹⁰⁾による領域図では、中・上流は複列砂州に入るが下流は交互砂州領域に入る(図-4)。

図-5と図-6の流路形態を比較する。1991年ではラグアグ川の水はクラ川へ向かう傾向であったがその後2001年7月までに図-2に示す2つの計画規模相当の洪水があり、2001年10月時点ではラグアグ川の扇頂部で流水が一部西進し、中流区間の左岸側(計画堤内地)の網状河道が発達し、3.5kmで収束後下流区間は河道に流量が集まり、河道幅は広がった。図-5と図-6の10年間で中規模河床形態としては2km地点の複列砂州の発達の他は大きな変化はないと観察される。

(2)クラ・ラグアグ川移動床全体模型実験

図-5と図-6に表示した堤防法線は模型実験で検討されたものであり、2004年までは現地は基本的に無堤である。その法線に至った検討プロセスの詳細は井上等³⁾によって報告がされているので、ここでは模型実験の基本条件と実施設計に反映させた結果を述べる。

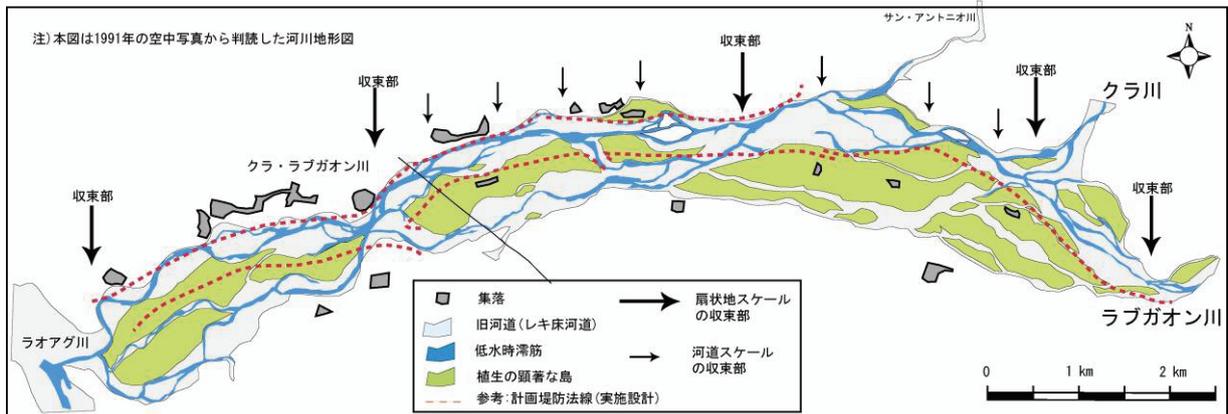


図-5 1991年のクラ・ラグアグ川河川地形区分

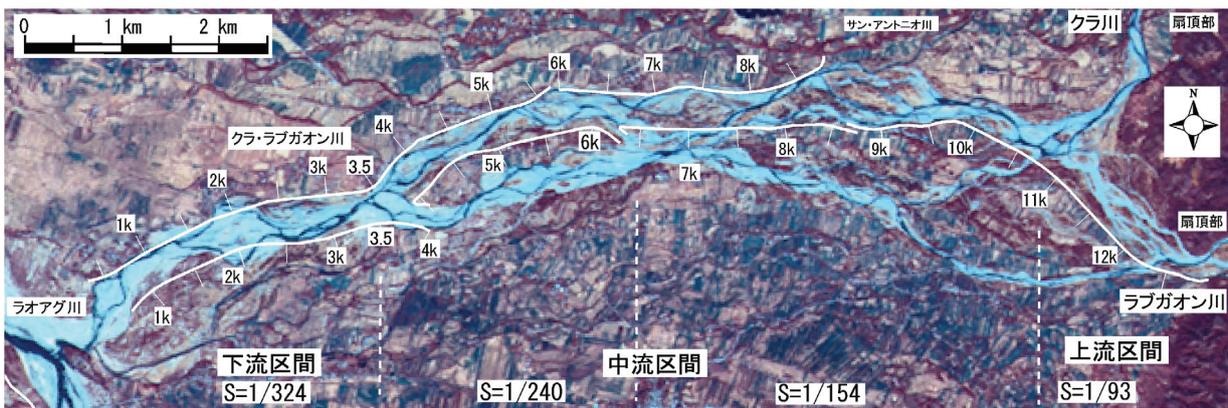


図-6 2001年10月の衛星画像SPOTによるクラ・ラグアグ川状況(無堤)

水平縮尺は1/200、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。模型の延長は65m、河道の堤間幅は1.7mである。模型堤防法面は固定床模型とし、堤防間は移動床模型とした。クラ・ラグアグ全川区間の実験であるので河床材料の平

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。歪模型の相似律^{22) 23)}については、砂礫堆と粒子レイノルズ数に着目し、フルード数と無次元掃流力及び B^*I/H を現地と一致させた。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。図-3に模型材料分布も併記した。表-1は相似則に基づく諸元であるが、実物の河床材料の粒径範囲と U_* の関係は日本の沖積河川⁽²⁴⁾のそれと概ね類似している。

表-1 相似則に基づく代表諸元

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 (m^3/s)	2360	0.012	τ_*	0.08	0.08
流速 (m/s)	3.3	0.33	Re_*	26732	81

河道特性の支配流量は、網状扇状地であり現地水文・地形等の資料が乏しく不明であった。実験では平坦な初期河床から平均年最大流量を1時間、続けて25年確率流量(12 l/s)を3時間通水して河道内の流況、水衝部を把握した。給砂は砂防ダム有りの流送土砂量とした。この模型の3時間は時間縮尺 $X_r/h_r^{0.5}=20$ より現地の約60時間に相当する。

図-7、図-8はそれぞれ実施設計の堤防法線における水制工配置説明と、25年確率流量定流3時間後の河床スケッチである。図-7に示すように4カ所の霞堤と河岸防衛としての水制工群が導入された。以下、上流区間から結果の要点を説明する。

12.7~11.0kmはラブガオン川左岸で、計画法線から明らかに水衝部となるため、長さ15m、間隔30mのコンクリート水制を連続的に設置し、一連の水制群の下流端には水はねを目的として長さ30mの水制を置いた。実験ではこの区間の下流側ほど濡筋が河道中央へ向く事を確認し、水制工の総設置延長の短縮化を図った。

10.0km地点から下流は右岸河岸と左岸砂州により流れの集中化が見られ、収束発散現象が連続する。実験による濡筋の変動からその下流区間は約1kmを半波長とする単列蛇行流れが卓越している。この蛇行流に沿って法線に蛇行を考慮し、左岸9km、右岸7.3km、右岸5.7km地点で河道幅を広げ、右岸5.7kmで霞堤を導入した。これにより、図-8の矢印で示すカ所で水衝部が固定されると考え、それらのカ所では水制工の長さを30m、あるいは間隔を30mの密にした。

左岸4.5km地点下流については、図-8の左上の拡大図にも示したように、実験では水制群の水はね効果と堤防線形により、その下流で流れが河道中央を通過し、両岸の水衝部解消が図れる結果を得た。

4. 築堤後の2008年洪水と河道応答

(1)2008年洪水の規模評価

築堤工事終了後の2008年7月8日に、4つの台風が来襲した(図-2参照)。河口近くの空港(図-1参照)の雨量は、2ヶ月間で2,266mmに上り平年の年間雨量2,135mmを超過した。特に7月14-16日の台風は3日雨量972mmが25年確率を大きく超過した。扇状地上流に信頼できる雨量データがないがクラ砂防ダム地点での越流痕跡とクラ・

ラブガオン川の痕跡水位から、この2ヶ月間の最大水位は25年程度の確率規模と考えられる。クラ・ラブガオン川の河道は築堤完成後に計画規模程度の洪水外力を受けたことになる。一方、各支川上流の砂防ダム(貯砂耐用年20年)は2007年までに完成しており、2008年は貯砂ダムで土砂が捕捉される状態での下流への初めての洪水であった。この間現場では2ヶ月間に次々来襲する台風による堤防・護岸損傷への応急作業に追われた。

(2)移動床模型実験と現地現象との比較

本移動床模型実験の特徴は、河道区間全体を対象にして、混合粒径の河床材料を用いていることである。実験の粒度分布は1パターンを全川に用いているが、現地河川では上下流で粒度分布に少なからず差がある。そこで実験結果と現地現象を比較する際の材料として、全川を河床勾配で3区間(図-6参照)に分け、各区間の無次元掃流力 τ_* ($=HI/d$)~水深粒径比 H/d_m を作成した(図-11)。

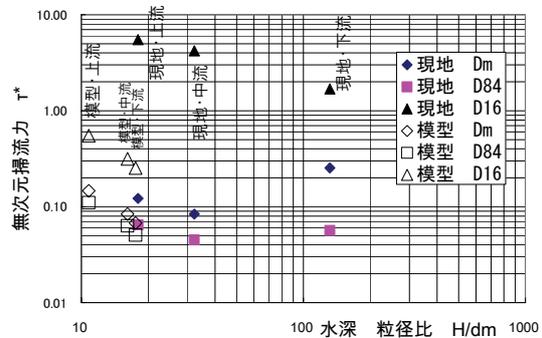


図-11 模型と現地の無次元掃流力と水深粒径比

各区間の無次元掃流力は粒径毎の動きを見るために、 D_m 、 D_{84} 、 D_{16} 毎に評価した。模型では区間毎の粒度分布形の差はない。水深は計画流量時の区間毎の平均値とした。模型の上流区間(ラブガオン川)では D_{84} の場合でも $\tau_* \approx 0.10$ であり、河床材料が全て動き易い状況にあった。模型の下流区間では、 D_m で $\tau_* \approx 0.05$ であり、比較的細粒分が移動する傾向であった。

図-8に示す実験の計画流量定流通水後の河床形態は、2008年の台風性洪水(ピークは数時間)に比べ、累積時間としては1オーダー長い時間の外力を受けた結果である。外力の大きさも正確に同じでない。図-9は、洪水後の2008年11月に撮影された衛星画像SPOT(解像度2.5m)と現地踏査から堤外地の河道地形を図化したものである。

実験結果と2008年洪水後の現地との大きな違いは、4.5km地点下流の濡筋の蛇行形態である。実験では蛇行をさせた堤防法線に従った濡筋の単列蛇行モードが得られていたが、2008年では4km地点右岸に濡筋が振れた。現地の下流区間では砂州波長が短く複列砂州に近くなった。水理的に築堤後の現地の下流区間は図-4からも単列砂州傾向であるが、2008年洪水後ではまだ単列砂州が発達していないと解釈できる。また実験のこの区間は細粒分が動く傾向であったため、平坦河床の通水初期に堤防法線に影響された濡筋が計画流量時にも卓越した可能性

もある。これらの点は実験当時予見できず、今後の現地 状況を踏まえて歪模型の結果を解釈していく。

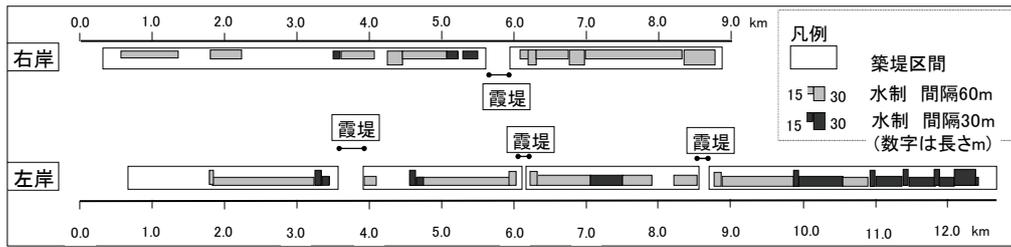


図-7 水制工配置説明図

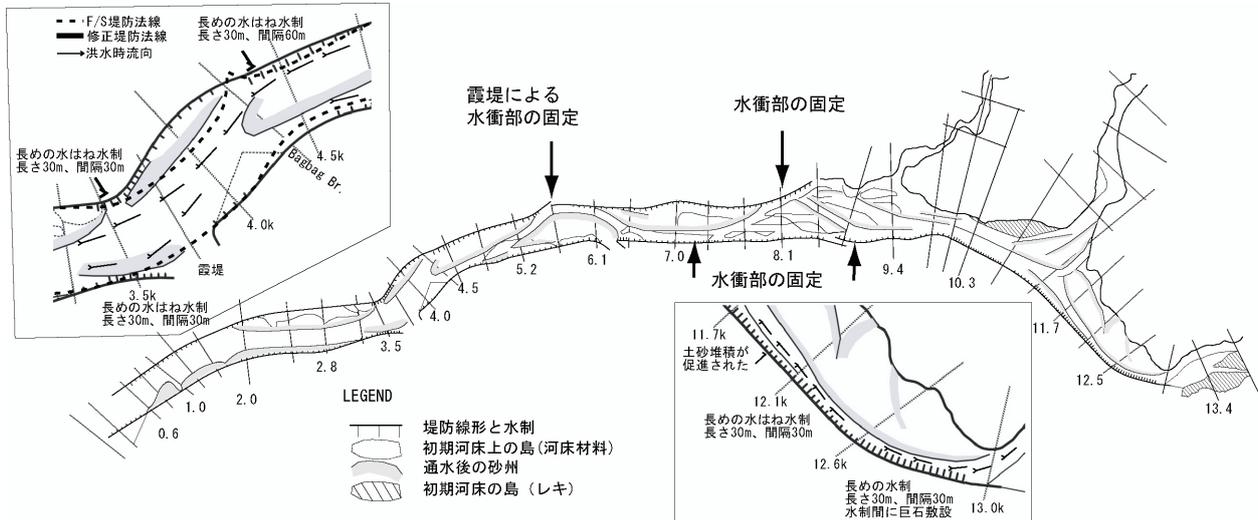


図-8 移動床模型実験の通水後の河床形状スケッチ(堤防法線と水制工は実施設計と同じ)

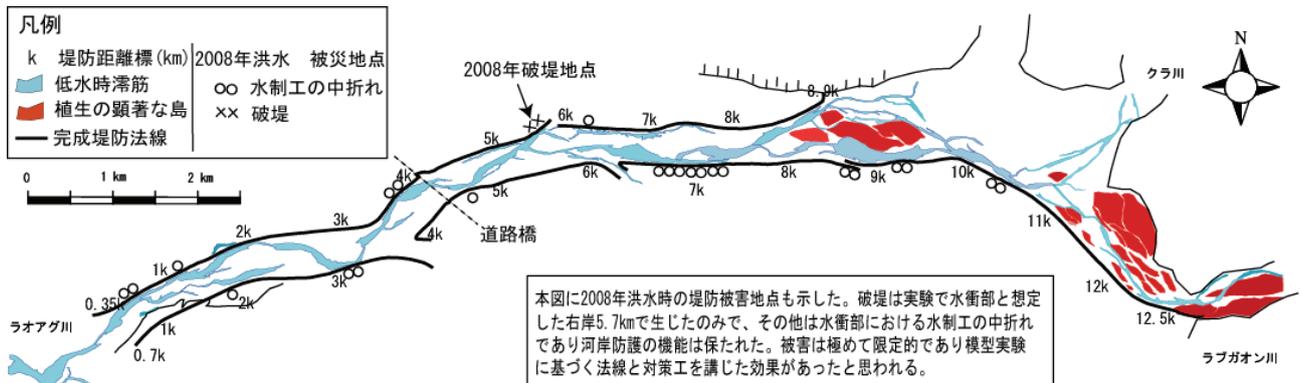


図-9 2008年7-8月洪水後のクラ・ラブガオン川の堤外地地形区分(2008年11月SPOT画像より)

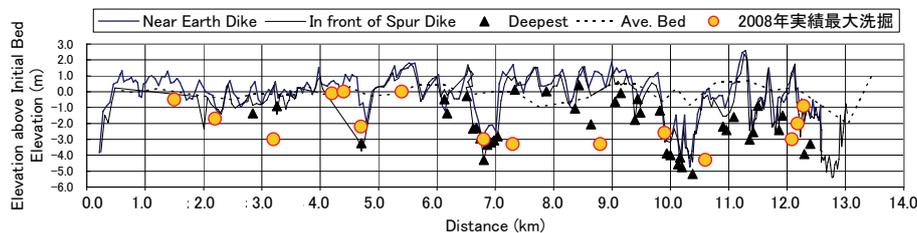


図-10 2002年に行った移動床模型実験の洗掘深(▲)と2008年11月の実績(○)との比較(左岸のみ)

上流区間(ラブガオン川)は、その堤防法線から明らかに水衝部となるため、滞筋の位置や河床形態の差は顕著に出ないカ所と考えられる。実験では密な水制群により滞筋を河道中央へ向けられる結果を得ていたが、2008年の洪水後でも図-12に示すように12.2km地点で水制前面に土砂堆積が進み、滞筋が河道中央へ向いた。

中流区間の実験での滞筋位置、水衝部位置は2008年の

現象に沿っていた。右岸8.9kmと右岸5.7kmでの水衝部の固定が実験と現地で見られた。平均的な粒度分布を全川に与えた実験であるため、中流区間の水理量の再現性が比較的高い。

実験と2008年洪水後の河道測量における最大洗掘深を比較した(図-10、但し左岸沿いのみ)。左岸3.2km地点は、2008年では砂州波長が実験より短く、水衝部となり大き

な洗掘深となった。中・上流区間では概して縦断的な砂州位置の違いが若干あるものの実験で予想された洗掘深が2008年の実績でも現れている。

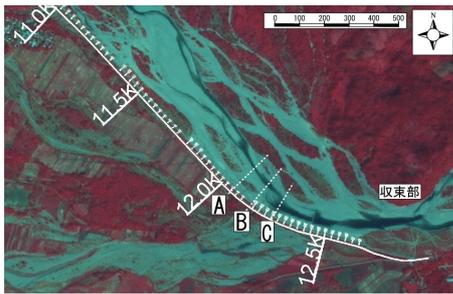


図-12 2008年11月のラブガオン扇頂部の状況

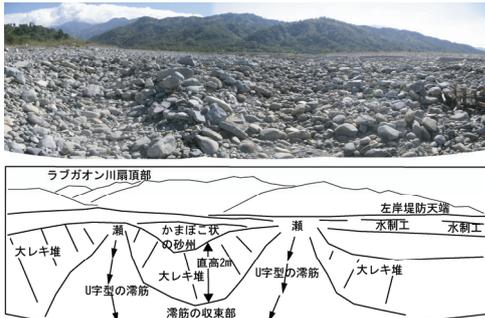


図-13 ラブガオン川の大レキ堆(図12の断面Bから上流を撮影)

(3)2001年の築堤前と築堤後の河道特性変化

無堤状態であった2001年の河道形態(図-6)と比較して、築堤後の図-9を考察する。ラブガオン川扇頂部からクラ川合流点(10.5km)までの網状形態は維持されている。またクラ川合流点から4km地点までは、単列的な滞筋のモードは大きく変化していない。無堤状態での河道幅を尊重した堤防線形であったためと考える。一方、4km地点から2km地点は蛇行した法線の影響で2001年に比べて砂州の単列が明確になった。2km地点下流は、2001年の複列砂州が築堤によって幅を狭め、モードが減少している。これは築堤によって流速が増大し滞筋の洗掘が進行し、滞の河岸に接する距離が長くなったためと思われる。

実験でも予想した左岸7kmでの旧河道と堤防法線との交差部は2008年に水衝部となり、水制の中折れが起きた。右岸4kmと右岸2km地点の堤内地は築堤前の河道跡があったが、2008年の滞筋はそこに向かって堤防に急角度で当たっている。自然状態の滞筋位置は築堤によっても大きく変化はしないという木下の指摘した現象が出ている。

2008年洪水後で図-12の断面Cの上流はプール、断面B-C間は巨石でステップが形成されている。図-13は断面B(2008年12月撮影)で、巨石から成るかまぼこ状の大礫堆の間の滞筋が下流で収束している。水制工による石れきの堆積がその形成を促進している見なすことも出来、そのような収束部の安定は水衝部の軽減になる。

5. 得られた知見と結論

自然の網状状態から短期間に大規模築堤がなされた河道が計画規模相当の洪水を受け、移動床模型実験結果と

現地現象の比較が1支川単位で出来た。外力の評価に課題は残すものの、築堤後の条件で計画規模の定流流量を与えた移動床実験で見られた中規模河床形態と洗掘深は、中流と上流区間で2008年洪水後で概ね再現された。しかし現地の全川の平均的な粒度分布を移動床全体模型に一律に与えるが為の、各区間における河床材料の代表性と水理条件を考慮した砂州モード変化の検討は今後の課題である。さらに、築堤後の2008年洪水後でも低水時の滞筋は自然状態の河道に戻る傾向の可能性もあり、他3支川(ソルソナ、マドンガン、パパ川；図-1と図-2)の築堤後の応答と合わせて更に研究する必要がある。

謝辞：論文の発表に当たり比国公共事業道路省(DPWH)のご理解を得たこと、ならびに本論の取組みに当たり村本嘉雄京都大学名誉教授ならびに須賀堯三宇都宮大学名誉教授の貴重な助言を得たことに感謝する。

参考文献

- 1) 国交省:河川砂防技術基準同解説 計画編,山海堂,2005
- 2) 国土技術研究センター:河道計画検討の手引き,山海堂,p2,2002,
- 3) 井上和則,浜口憲一郎,須賀如川: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,河川技術論文集第9巻,2003
- 4) 井上,浜口,須賀:未改修扇状地築堤河道の河岸侵食防護工としての水制工水理模型実験と考察,河川技術論文集第10巻,2004
- 5) 福岡捷二:洪水の水理と河道の設計法,森北出版,2005
- 6) 橋本規明:新河川工法,森北出版,1951
- 7) 山本晃一:河道計画の技術史,山海堂,1999
- 8) 木下良作:河道平面計画試論,水工学夏期研修会,1972
- 9) 山本晃一:扇状地河川の河道特性と河道処理,土研資料3159号,1993
- 10) 村本嘉雄,藤田裕一郎:中規模河床形態の分類と形成条件,第22回水理講演会,pp.329-337,1978
- 11) 土木学会水理委員会:洪水流の3次元流況と流路形態に関する研究,土木学会論文集345号,1984
- 12) 魏炳乾,内島邦秀ら:河川の移動床歪模型相似則とその有効性,第45回水理講演会,pp.685-690,2001
- 13) 岸力,黒木幹男:中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究,土木学会論文集342号,1984.
- 14) 渡邊康玄,桑村貴志:砂州のモード減少過程水理実験への安定解析の適用,水工学論文集第49巻,2005
- 15) 芦田和男,江頭進治,中川一:21世紀の河川学,京大出版,2008
- 16) 竹林洋史,江頭進治:混合砂河床における砂州の動態,水工学論文集第45巻,2001.
- 17) 藤田裕一郎:移動床水理現象のとらえ方-研究の展開と成果の適用,水工学夏期研修会,2000
- 18) 須賀如川:大礫を含む混合粒径河川における河道システムの本質に関する考察,河川技術論文集第10巻,2004
- 19) 井口昌平:川を見る-河床の動態と規則性,東大出版会,1979
- 20) 木下良作:河床における砂礫堆の形成について,土木学会論文集No.42,1957
- 21) JICA: The Study on Sabo and Flood Control in the Laoag River Basin, Final Report, 1997
- 22) 須賀堯三:河川水理模型実験の最近の進歩,水工学夏期,1974
- 23) 内島邦秀:中規模河床形態の相似則,水工学夏期研修会,1995
- 24) 山本晃一:構造沖積河川学,山海堂,2004

(2009. 9. 30受付)