

移動床歪模型実験による洪水時河床変動の検討

A Study on Bed Variation during a Flood

by Distorted Model Experiments with a Movable Bed

内島 邦秀^{*}・高木 厚^{**}・井出 康郎^{***}・加治 昌秀^{****}・早川 博^{*****}

By Kunihide UCHIJIMA, Ko TAKAGI, Yasuro IDE, Masahide KAJI and Hiroshi HAYAKAWA

The purpose of this study is to investigate bed variation during a flood by a distorted model in which the horizontal scale differs from the vertical scale. Similarity laws for a distorted river model derived from dual dimensionless parameters of the bed form classification diagram for the bars and braids and the Manning-Strickler formula were used. The 9.6km reach (KP6.2 ~ 15.8) of the Chubetsu river (a tributary of the Ishikari river) was reproduced in the model.

The usefulness of the similarity laws of a distorted model was ascertained, and it was found that the maximum scour depth occurs during a recession of the flood hydrograph.

Keywords : bed variation, distorted model, similarity law, scour depth

1. はじめに

洪水時における河道災害を防ぐには、水衝部の位置や最大洗掘深などを予測するとともに河床形状の変動特性を把握することが重要であり、その方法として水理模型実験は有効である。著者らはこれまでに、流れのフルード相似にこだわらず、無次元掃流力を原型と模型で一致させる、いわゆる砂粒フルード相似と呼称できる移動床歪模型の相似則を砂州形成領域区分図の無次元パラメータに基づいて定式化し、この相似則を用いた低水路満杯流量以下の移動床定常流実験によって洪水流下後の河床形状を検証し良好な結果を得てきた^{1), 2)}。

本研究では、石狩川水系忠別川を原型に、計画規模の洪水流量ハイドログラフを対象とした非定常流実験を行い、まず、縮尺1/600の移動床歪模型実験と北海道開発局の縮尺1/50の無歪模型実験³⁾の洪水通水後における横断河床形状を比較し、歪模型相似の有用性を示す。次に、歪模型実験の洪水流量通水中の河床形状を詳細に測定し、洪水期間中の河床変動の特性について検討する。

-
- * 正会員 博(工) 北見工業大学助教授 工学部土木開発工学科(〒090 北海道北見市公園町165)
** 学生員 北見工業大学大学院工学研究科土木開発工学専攻(〒090 北海道北見市公園町165)
*** 正会員 (財)ダム水源地環境整備センター研究第3部(〒102 東京都千代田区麹町2-14-21)
**** 正会員 北海道開発局開発土木研究所河川研究室(〒062 北海道札幌市豊平区平岸1条3)
***** 正会員 北見工業大学助手 工学部土木開発工学科(〒090 北海道北見市公園町165)

2. 移動床歪模型の相似則

歪模型の水理相似則としては、銚川らの砂州形成領域区分図の無次元パラメータとManning-Strickler型の抵抗則から導かれる表-1の式(1)～(6)を、また、砂州形状相似則として1次元の流砂の連続式とBrown型の流砂量式から導かれる式(7)、(8)を用いた⁴⁾。添字rは縮尺比(=原型値/模型値)を示し、以後、原型値、模型値に対してそれぞれ添字p、mを付した。また、歪比nは水平方向縮尺比/鉛直方向縮尺比と定義している。なお、式(1)～(8)において、h:平均水深、B:河幅、d:平均粒径、u:平均流速、Q:流量、t:時間、Fr:フルード数、H:砂州波高、 t_{sr} :河床変形の時間である。

表-1の各式において、 $n=1$ でフルード相似になるが、本歪模型ではフルード相似は成立せず、当然、常流・射流の発生域は異なる可能性がある。しかし、後掲の歪比nを考慮した洪水流下後あるいは洪水期間中の河床形状は大型無歪模型(フルード相似)の河床をよく再現しており、フルード相似にこだわる必要はないと考える。

3. 模型水路と実験条件・方法

模型水路は、原型の忠別川と平面形状を相似にした水平縮尺が1/600の複断面水路で、対象区間はKP6.2～KP15.8であり、上流KP15.2までを助走区間としている。対象区間にある2ヶ所の頭首工取水堰(KP12.6, KP15.2)として簡単な蛇竈状の模型を設置し、支川ポン川(KP8.5)、霞堤(KP6.4)は実験の便宜上閉じてある(写真-1、図-4参照)。

実験条件は、図-1の手順で決定した。原型の河床材料の平均粒径は $d_p=71\text{mm}$ 、平均河床勾配は $I_p=1/138$ であり、模型の河床材料にはほぼ均一な平均粒径 $d_m=0.75\text{mm}$ の東北珪砂を用いることにして、式(2)より歪比 $n=2.5$ と求まり、模型水路勾配は $I_m=1/55$ 、鉛直縮尺は1/240に定まる。流量は、忠別川の計画高水流量ハイドログラフ(最大流量 $885\text{m}^3/\text{s}$)を段階的増・減水流量で模擬し(図-2)、この各流量を式(4)によって模型値に換算した。通水時間は計画高水流量ハイドログラフにおいて $100\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流量が $t_{sp}=40$ 時間継続しているので、式(8)から導かれる以下の式、

$$t_{sm}=n^{-2} \cdot B_r^{-1/2} \cdot t_{sp} \quad \dots\dots\dots (9)$$

より15分40秒となる。なお、図-2の増水期では一気にバルブを解放するため、最大流量 $900\text{m}^3/\text{s}$ に達するまでに時間的遅れが生じ、その分流量 $900\text{m}^3/\text{s}$ の流下時間が短くなることが予想される。しかし、計画高水流量ハイドログラフにおけるピーク流量の継続時間も短いことから、段階的増・減水流量によって計画高水流量ハイドログラフが十分近似さ

表-1 歪模型の相似則

$h_r=n^{-1} \cdot B_r$	 (1)
$d_r=n^{-2} \cdot B_r$	 (2)
$u_r=n^{-5/6} \cdot B_r^{1/2}$	 (3)
$Q_r=n^{-11/6} \cdot B_r^{5/2}$	 (4)
$t_r=n^{5/6} \cdot B_r^{1/2}$	 (5)
$Fr_r=n^{-1/3}$	 (6)
$H_r=n^{-1} \cdot B_r$	 (7)
$t_{sr}=n^2 \cdot B_r^{1/2}$	 (8)

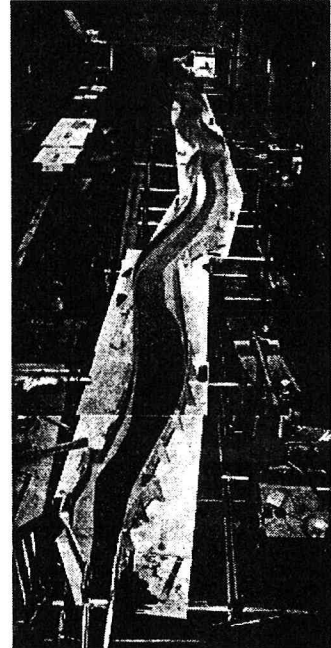


写真-1 忠別川の複断面模型水路

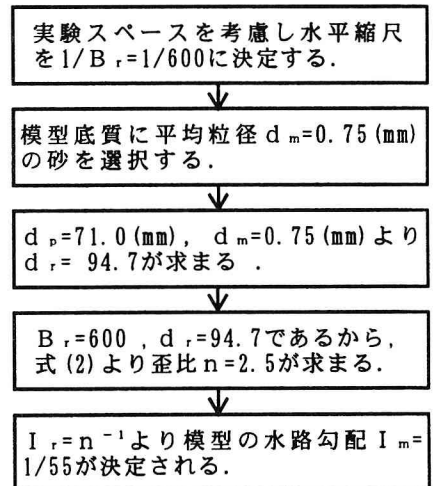


図-1 実験条件の決定

れていると判断した。表-2に実験条件をまとめて示す。

低水路内移動床の初期河床面位置は、対象区間の「計画高水敷高-計画河床高」の平均値が2.5mであるから鉛直縮尺1/240より1cmとなる。したがって、模型高水敷から1cm低い位置まで砂を平坦に敷きならして初期河床面とした。

KP断面の横断河床形状測定には自製の河床形状測定器を用い（写真-2）、初期河床面からの高低差を通水中に4時間間隔（原型値に換算）で計10回測定した。測定時間は図-2のハイドログラフの各流量通水中の中間および最終時間に対応している。また横断方向の測定間隔は1cmである。

模型河床の洗掘深及び堆積高を原型値に換算する方法は以下のとおりである。平均河床面からの高低差 η と砂州波高 H が線形の関係（ $\eta=3/4H$ ）にあることから $\eta_r=H_r$ であり、式(7)より、

$$\eta_p = n^{-1} \cdot B_r \cdot \eta_m = 0.24 \cdot \eta_m \text{ (m)} \quad \cdots \cdots \cdots (10)$$

となり（ただし η_m :mm単位）、単に η_m に鉛直縮尺比240を掛けた値と同値となる。また、横断方向の原型値換算は水平方向縮尺比 $B_r=600$ をかけて得られる。

なお、最大流量900m³/sの通水時に高水敷への水流の乗り上げが狭窄部とその下流1～1.5kmで発生した。その範囲はKP9.8下流では左岸側、KP12.8下流では右岸側で、それぞれ高水敷幅半分程度までであったので、主流に及ぼす影響が少ないと考え、高水敷の粗度は特に考慮していない。

4. 歪、無歪模型による河床形状の比較と水衝部の予測

図-2の洪水流量流下後の歪模型河床と無歪模型河床を比較した結果、KP8.2～KP8.8、KP14.4～KP15.0で歪模型と無歪模型の河床形状に差がみられたが、他のほとんどのKP断面において洗掘や堆積の発生箇所が一致した。

図-3は洪水流量流下後の横断河床形状が無歪模型実験河床と特によく一致したKP断面の河床横断図であり、平均河床高を一致させて示している。太実線は無歪模型の高水敷および計画河床高である。図-3より明らかのように歪模型と無歪模型の実験結果は、ほぼ同じ横断河床形状を呈している。これらのことから歪模型実験によって無歪模型実験と同程度の精度で河床形状の検証が可能であると言える。

図-4に歪模型実験で発生した水衝部を○印で示す。×印は無歪模型実験における水衝部で、発生箇所はほぼ一致する。また、図-3, 4より流量流下後の局所洗掘及び流下時の河床洗掘箇所は対象区間をその水路幅によって区分すると次の3つに分類できる。

①川幅の広い区間：図-4から川幅の広い区間の局所洗掘は、湾曲凹岸部で発生しているのが分かる。図-3

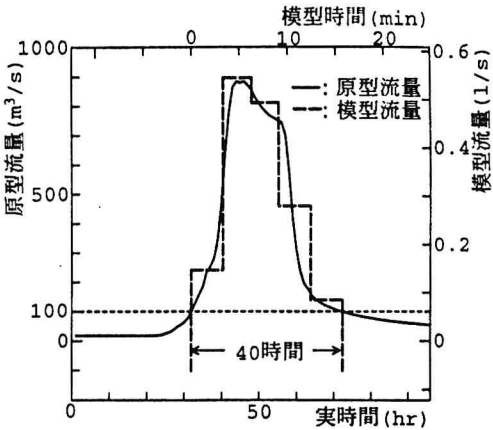


図-2 計画高水流量ハイドログラフ

表-2 実験条件

物理量	原型	歪模型
水平縮尺	—	1/600
鉛直縮尺	—	1/240
歪比	—	2.5
勾配	1/138	1/55
底質粒径	71.0 (mm)	0.75 (mm)
流量	240 (m³/s)	0.146 (l/s)
	900	0.548
	810	0.493
	460	0.28
	140	0.085

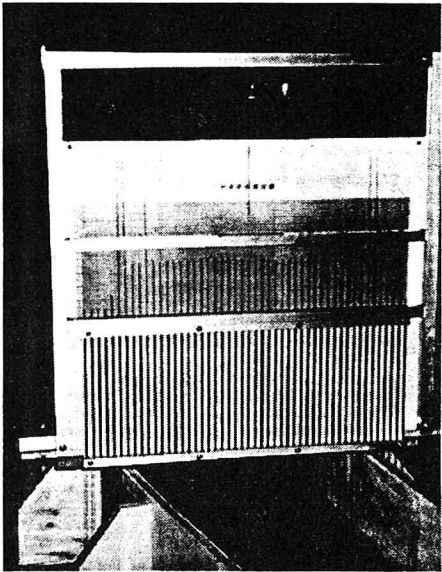
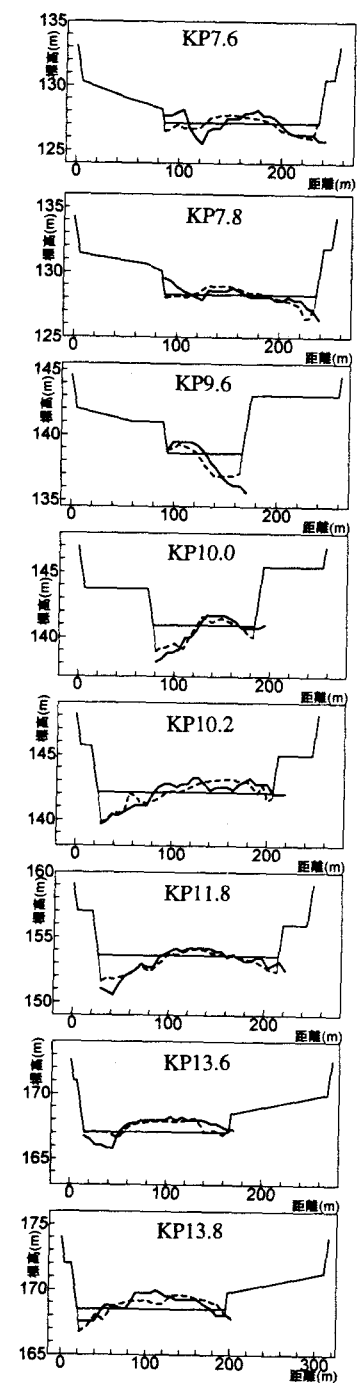


写真-2 河床形状測定器



(— 歪模型 - - - 無歪模型)

図-3 横断河床形状の比較図

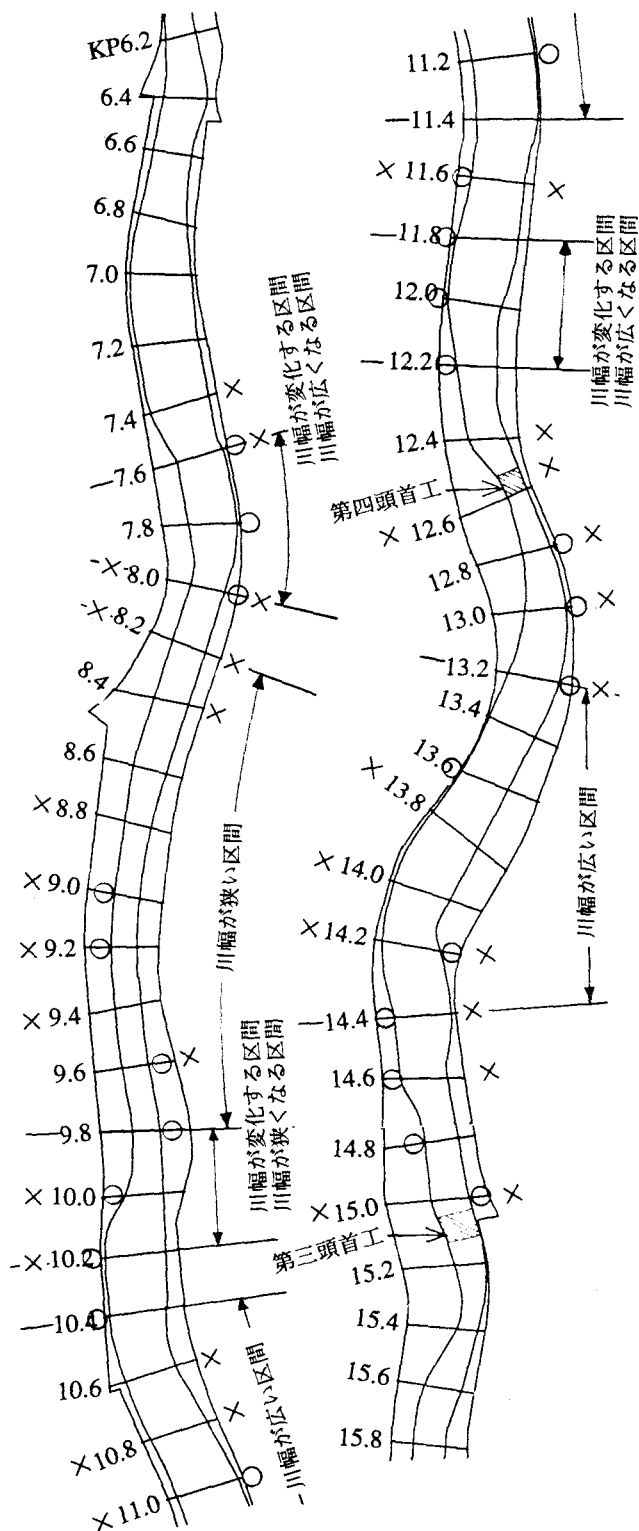


図-4 対象区間の低水路及び堤防法線

のKP13. 6, KP13. 8からも湾曲凹岸部である左岸側に洗掘が発達しているのがわかる。

②川幅の狭い区間：図-4を見ると、両実験において左右交互に水衝部が現れていることから単列交互砂州の影響と思われる（後掲の図-6）。

③川幅が変化する区間：川幅の広くなる区間では、河道狭窄部から供給された土砂が低水路中央部に堆積し、砂州が形成されることから、その左右岸で水衝部が発生する可能性が大きい。図-3のKP7. 6, KP7. 8, KP11. 8から、河道中央部が堆積傾向にあり、両岸が洗掘しているのが確認できる。また、川幅の狭くなる区間では河道狭窄部の入り口付近で大きく洗掘されており、水当たりによって偏角を増して下流対岸に及ぶ可能性が高い。実験時にも、上流からの流れがKP10. 0～KP10. 2左岸で水当たりを起こすことが観察されており、図-3のKP10. 0, KP10. 2を見ると、左岸に水当たりによる激しい洗掘が発生しているのが分かる。

5. 忠別川における洪水期間中の河床変動

図-3のKP断面はいずれも歪模型と無歪模型の河床形状が非常によく一致していることから、図-3の中から4断面（KP7. 6, KP10. 0, KP11. 8, KP13. 8）を選定し、また、狭窄部の2断面（KP8. 0, KP8. 8）を加えた6断面を代表例として、洪水期間中の河床変動について考察する。

図-5は歪模型実験の通水24時間後の河床と、無歪模型実験において25時間後に停水し測定された河床を比較したものである。図-5よりKP8. 0では洗掘箇所が、KP10. 0では洗掘深に違いが見られる。この原因としてKP8. 0は移動性交互砂州の発生区間にあること、KP10. 0は、歪模型が通水時に河床を測定しているのに対し、無歪模型では停水後に河床を測定するため埋め戻しが発生し洗掘を小さくしていることが考えられる。その他のKP断面においては両実験の横断河床形状がよく一致している。したがって、両実験において通水中にほぼ同様の河床変動が起こるものと予想される。

図-6は歪模型実験における代表6断面の横断河床形状の時間的变化を示したものであり、図-6の再通水40時間後の河床形は、KP13. 8を除き図-3の河床形を良く再現している。

以上の結果を踏まえ、洪水期間中の洗掘深進行の要因を偏流型、湾曲流型、砂州型の3項目に分けて以下に考察する。

①偏流型（KP11. 8）：この型は、比較的初期に州が発達し、減水期に流れが洗掘部に集中すること（偏流）によって徐々に洗掘が進行する。KP11. 8の図-6より流量 $900\sim810\text{m}^3/\text{s}$ の間に波高約1m以上の州が成長し、その後洗掘が進んでいくのが分かる。また、流量 $460\sim140\text{m}^3/\text{s}$ の間に堆積部の横断形状にほとんど変化が見られないことから、減水期において、洗掘部に流れが片寄っていたと予測できる。

②湾曲流型（KP7. 6, KP13. 8）：湾曲部における遠心力により水面近くの流れが凹岸に集中することによって洗掘が起こる。KP7. 6, KP13. 8の両断面とも蛇行部の頂点付近に位置する（図-4参照）。また、図-6よりピーク流量時に洗掘が進んでいるのがわかり、これはピーク流量時に遠心力が大きくなるためである。

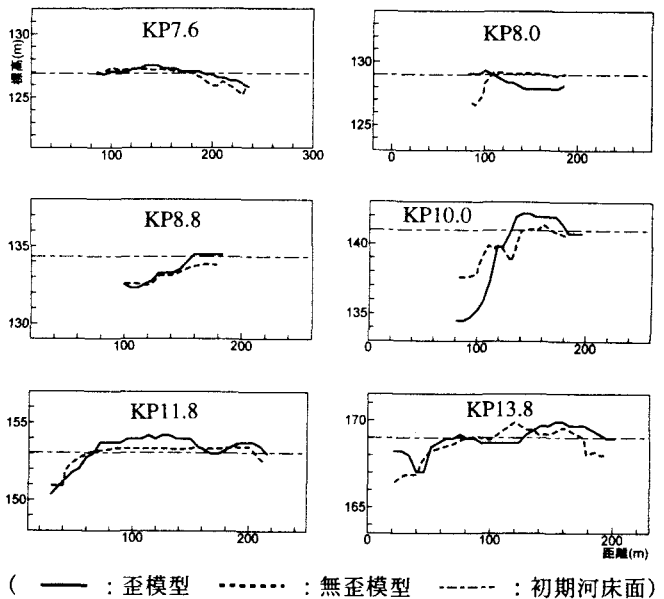


図-5 横断河床形状の比較

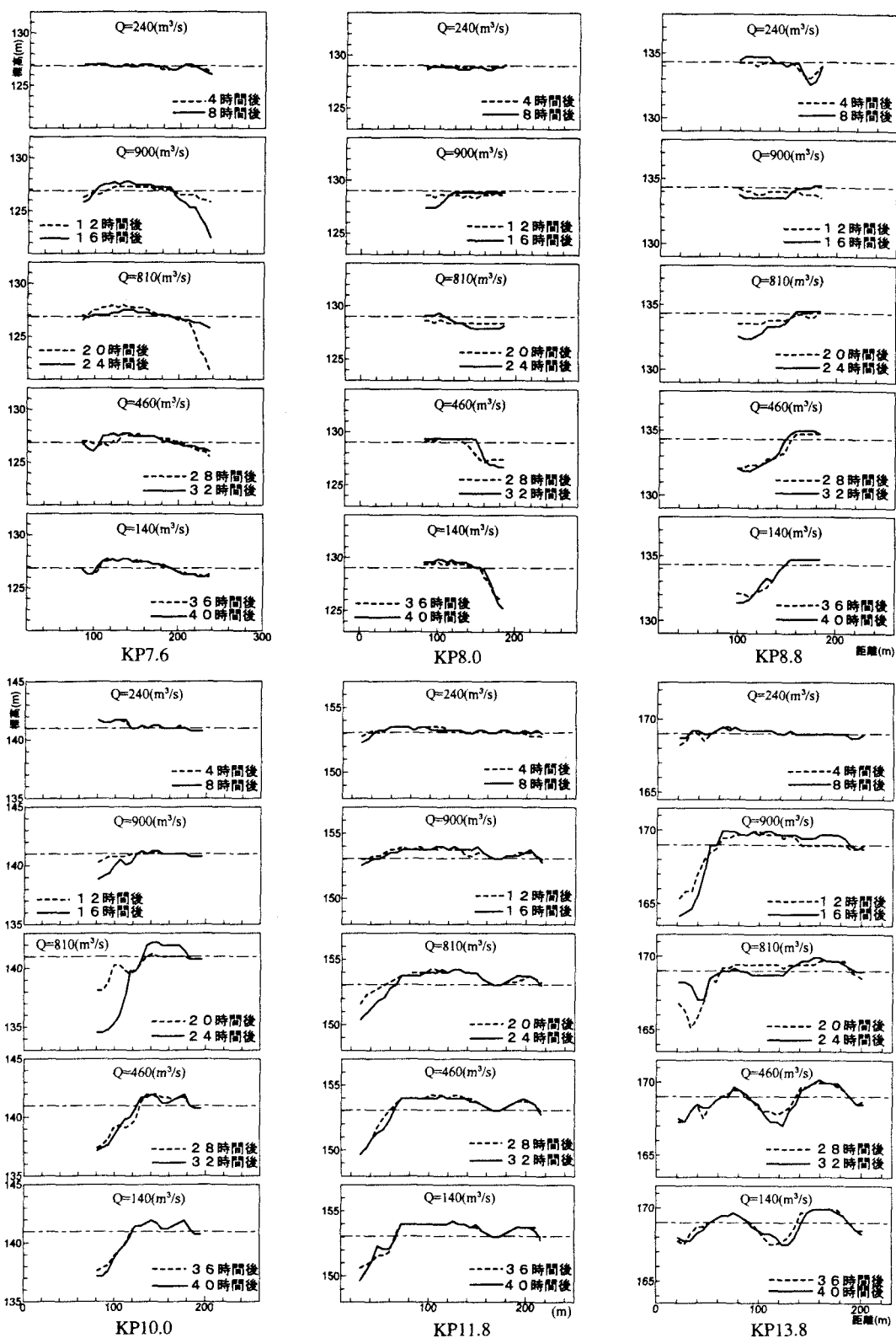


図-6 横断河床形状の時間的变化 (----- : 初期河床面)

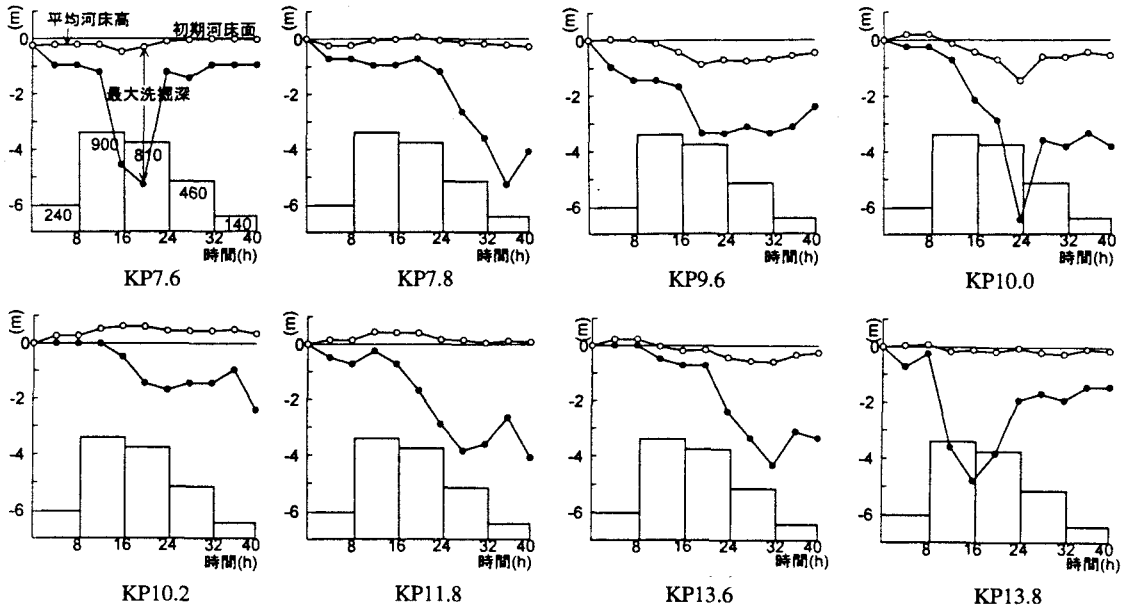


図-7 最大洗掘深及び平均河床高の時間的变化

③砂州による洗掘 (KP8.0, KP8.8) : KP8.0~KP9.8では、移動性交互砂州が発生する区間で、図-6のKP8.0, KP8.8より、流量240~900m³/s通水時に発生した側岸洗掘が、一旦平坦化した後に対岸へ移行していく様子が分かる。

以上の様な要因による洗掘の進行は実際の河川においても観測されており⁵⁾、図-2の段階的ハイドログラフを使用した非定常流実験を行うことによって、洪水時の河床変動を再現することが可能である。本論文では代表断面によって洗掘の要因を3項目に分けたが、他のKP断面の河床変動については、これらの複合型の要因が洗掘に影響を及ぼしていることになる。

また、本実験によって洪水時における埋戻し現象が確認されている。KP10.0は、河道狭窄部の入り口付近に位置し、上流からの水当たりにより24時間後には約6mの激しい洗掘が発生する。この洗掘は本実験中において最も大きい。減水期による急激な埋戻しにより洪水流下後には3m程に落ち着く。KP7.6とKP13.8を見ても流量ピーク期に洗掘が進行し、通水16時間後には約5mの洗掘が発生しているが、急激な埋戻しにより24時間後には消えている。また、この両断面では最大洗掘部を縦断方向に砂州前縁が流下移動して、埋戻しが進行するという現象が観察された。このようにピーク流量~減水期に激しい洗掘が発生しても、流量の低下とともに埋め戻されている可能性があり、護岸の根入れ深さを決定する際には考慮すべきであろう。

図-7は、図-3のKP断面の最大洗掘深及び平均河床高の時間的变化をハイドログラフと共に示したもので、全体的に見ると、増水期に河床に大きな変動はなく、ピーク流量~減水期にかけて洗掘が進行する傾向がある。なお、ほとんどの断面において減水期に最大洗掘深が発生するという実験結果を得た。このことは、減水期の掃流力の低下に伴い流れは河床形に強く支配されて河床低位部に集中し、さらに低位部の洗掘が進むものと考えられる。また、図-7の平均河床高の経時変化に注目すると、狭窄部で河床が低下し拡幅部で堆積する傾向が伺える。

6. おわりに

本研究は、石狩川水系忠別川を原型とし、砂粒フルード相似（無次元掃流力が原型と模型で等しい）に基づく移動床歪模型実験を行い、洪水時の河床変動について検討した。本研究で得られた主要な事項は以下の

とおりである。

(1) 移動床歪模型の段階的増・減水流量の非定常流実験によって、洪水流下後の河床形状を無歪模型と同程度に再現できることを明らかにし、歪模型の相似則式(1)～(8)(表-1)の有用性を確認することができた。

(2) 上記の成果により、歪模型実験によって洪水期間中の河床形状を詳細に測定した結果、増水期には河床に大きな変動はなく、減水期に洗掘深が最大となることを明らかにした。

謝辞：本研究は、(財)河川環境管理財団および(財)北海道河川防災研究センターの研究助成(内島邦秀)を受けて行われた。ここに記して、関係各位に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 内島邦秀・早川博・宇山幹紀：湧別川の移動床歪模型実験，土木学会北海道支部論文報告集，第50号，pp. 516-519，1994.
- 2) 内島邦秀・井出康郎・加治昌秀・宇山幹紀・早川博：忠別川の移動床歪模型実験，土木学会北海道支部論文報告集，第51号(B)，pp. 178-183，1995.
- 3) 北海道開発局開発土木研究所・(財)河川環境管理財団：平成6年度大型水路水理実験検討業務の内急流河川水理模型実験編報告書，1995.
- 4) 内島邦秀：中規模河床形態の相似則，1995年度(第31回)水工学に関する夏期研修会講義集，A 4，pp. 1-16，1995.
- 5) 小澤功一：蛇行部の流れ，254 p，近代文藝社，1995.