

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)

Hydraulic Model Test on the Functions of the Historical Flood Control Structures including Shingen Tsutsumi (Levee) along the Kamanashi River by using the Table-top hydraulic model

和田一範¹・岡安徹也²・市山誠³・浜口憲一郎³

Kazunori WADA, Tetsuya OKAYASU, Kenichirou HAMAGUCHI and Makoto ICHIYAMA

- 1 正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所流域管理研究官(前甲府工事事務所長)
(〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地)
2 正会員 財団法人国土技術研究センター 調査第1部 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門 3-12-1)
3 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)

A number of the historical flood control facilities can be found on the compound fan at the confluence of the Kamanashi river and its tributary, the Midai river. In this paper, the functions of the systematical flood control facilities are examined by using the micro movable bed model, and the future applications of the table-top hydraulic model as an exhibition tool for the public in the basin is also included in this paper. The scale of the model is 1/4,000 with the width of 2.5m and the length 3.0m. Finally, the hydraulic functions of the flood control facilities are tested qualitatively with the model such as the flow control function with spur dike, flow & sediment control functions with the acuminate hydraulic structure (known as "Shougi-gashira"), energy dissipater functions with diversion notches, and also other hydraulic functions.

Key Words : Hydraulic Model Test, Table-Top, Kamanashi river, Fan form

1. はじめに

富士川水系, 御勅使川・釜無川合流部には, 信玄堤の名称で総称される, 一連の複合的な流水コントロールシステムが配置されている。これらは御勅使川上流部の巨大石積出し, 将棋頭と呼ばれる複数の水制, 掘切, 十六石, 水防林, 霞堤などから構成されている。これら歴史的な治水施設は武田信玄による信玄堤完成以前から, 長年にわたって築造されてきたと考えられ, 各施設が相互に関連し合うことで流域の治水機能を高めていたと考えられる。

その流水コントロールシステムの仕組みについては長年にわたって, 様々な解釈がなされてきた¹⁾が, これまで水理学的な検討がなされた事例はない。

このような大規模な治水施設群の水理機能の検討について, フルードの相似則に従った模型では模型が大規模となり実験経費, 実験効率などから実験の実施は困難であり, また扇状地河道の変遷など流路の変化に関する移動床模型実験は, 不確定要素が多く, 大規模模型を用いた実験的研究は困難である。

そこで, 本論は筆者等が研究を進めている卓上水理模型を用いて御勅使川扇状地に展開された歴史的治水施設群を再現し, 各施設が持つ水理的機能, 各施設群のシステム的な機能について検証を試みたものである。扇状地の流路変遷については, 流量, 給砂量, 通水時間をパラメータとし, 卓上水理模型の通水条件による再現性を検討した。そこで, 各治水施設が有していた機能を明確にし, 各施設がどのような状況により築造されたか, 築造後どのようなメンテナンスが施されていたかなどについて考察をおこなった。

2. 信玄堤の治水機能検討への適用

(1) 検討の概要

釜無川と支川御勅使川には信玄堤に代表される, 歴史的治水施設群と呼ばれる一連の機能を持つ治水施設が残存している。このような施設については古文書の類をはじめ既往文献などにより歴史的な経緯などが示されているが, 設置された順序, 理由, 根拠などについては明確な資料が無く, 様々な考察が

なされている¹⁾。そこで、各施設の機能についての歴史的な検証にあたって、御勅使川扇状地と釜無川本川を含む範囲を卓上水理模型に再現し、各施設の流路や扇状地形の安定化に及ぼす影響について検討を行い、各施設群の持つ機能について考察を行った。

(2) 歴史的治水施設群の概要

信玄堤をはじめとする歴史的治水施設群は、御勅使川の流れと釜無川本川の流れを制御するための総合的な流水制御施設群と考えることができる。

信玄堤の特徴は、総合的な流水コントロールシステムにある。元来、扇状地を自由に流れていた御勅使川の流れを二つに分けて、その主流を竜王の高岩にぶつけ水勢を削ぐ方法をとった。竜王の高岩は釜無川左岸、赤坂台地の西端にあり、国道20号竜王バイパス、竜王町と双葉町の境に位置する、釜無川の河岸崖である。前御勅使川の流下ルートではまっすぐに釜無川の堤防を突き破ってしまう洪水流を、途中で流路を変え、水勢を削ぐ施設を設けることにより、高岩という天然の水制にぶつけて制御するのが、信玄堤の流水コントロールプランである。

通説として理解されている各施設の機能を図-1に沿って説明する。

- ① 山間から流れ出した御勅使川の流路を、扇状地の出口に「石積み出し(A)」を並べて安定させ、北側に向ける。
- ② 「白根将棋頭(B)」で流路を二分してエネルギーを減じ、御勅使川本流を二つの流れに分ける。
- ③ 北側の流れをさらに下流の「竜岡将棋頭(C)」で再び分流し、支川の割羽沢川を合流させる(D)。
- ④ 竜岡台地の溶岩岩盤を掘り下げて「堀切(E)」という流路を作り、流れをここに誘導する。
- ⑤ 釜無川との合流点に十六個の巨石「十六石(F)」を並べ、水流を高岩へ向ける。
- ⑥ 御勅使川と釜無川の合流した水を高岩(G)へとぶつけ、水勢を弱める。
- ⑦ 高岩の断崖延長線上に、信玄堤(H)と「付け出し」堤を設け、さらに流水のエネルギーを減ずる。
- ⑧ 高岩から跳ね返ってくる釜無川の水勢を、下流で合流する前御勅使川の水勢とぶつけ相殺する(I)。
- ⑨ 信玄堤より下流の釜無川堤防は、霞堤(J)構造として、洪水に流量が増したときに、一時的に氾濫させ、甲府盆地への壊滅的な洪水氾濫を防止する。

(3) 卓上水理模型による再現

1) 再現範囲と模型縮尺

歴史的治水施設群の検討に用いる卓上水理模型の水平縮尺は $S=1/4,000$ とした。この縮尺の設定根拠は、製作された卓上水理模型の取り扱いが容易な規模であることと、筆者等が釜無川本川を対象に卓上水理模型による河床形状の再現性を検討した時の水

平縮尺が $1/4,000$ であることに基づいている。釜無川本川を対象とした卓上水理模型では、水衝部の洗掘位置やその下流側の堆積位置が概ね再現できおり、扇状地模型も釜無川を再現範囲に含むため同様の水平縮尺とした。

模型対象範囲は、釜無川本川および御勅使川扇状地をカバーする南北約10km、東西約12kmとし、模型寸法は $3.0\text{m} \times 2.5\text{m}$ となった。

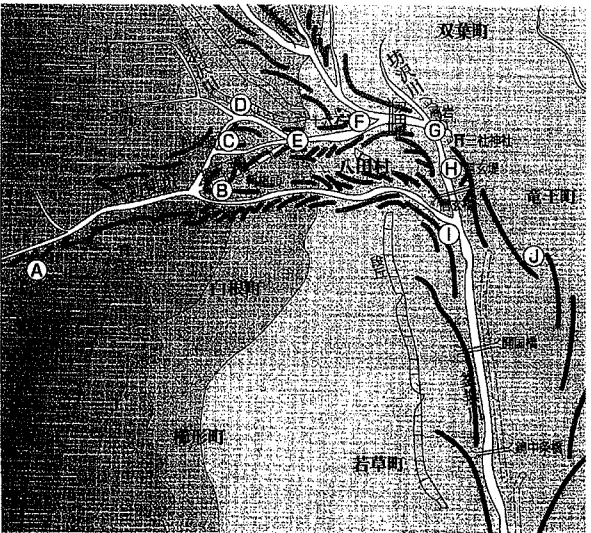


図-1 信玄堤と歴史的治水施設群

表-1 御勅使川扇状地モデル

範 囲	釜無本川	K150~215, L=6000m
	御勅使川	M0~M17, L=500m
給 水	釜無川本川, 御勅使川, 割羽沢川	
縮 尺	水平縮尺 1/4,000	
模型勾配	1/35 (現地地形勾配を参考に設定)	
扇状地材料	平均粒径 0.4mm, 石川ライト	
模型規模	3.0m × 2.5m	

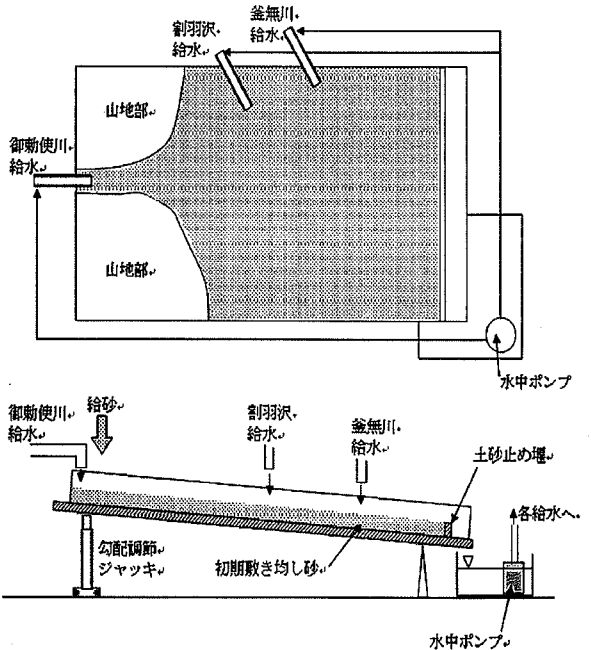


図-2 御勅使川扇状地モデルの概要

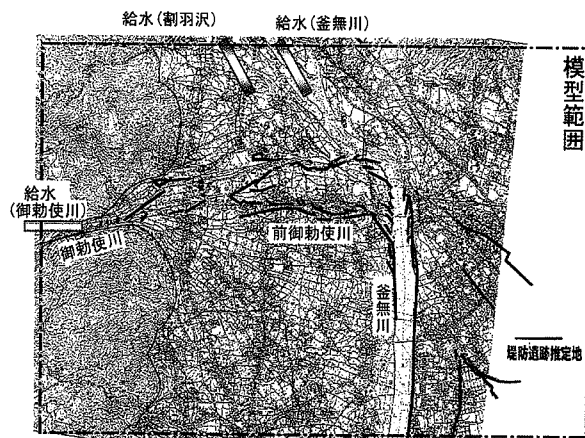


図-3 御勅使川扇状地モデルの対象範囲

2) 扇状地の構成材料

実際の扇状地は、山地部から流出した土砂の分級作用によって、複雑な粒度構成を呈するものであるが、本研究では扇状地の主たる形成要因を土砂供給量および流量であるとし、模型に用いる河床材料の粒径分布は現地の広範囲な粒径分布を対象とはしていない。しかし、実験に用いた河床材料は均一材料を基本として用いたが、一部細粒分を有することから流路形成時に分級作用が生じており、その結果が流路の移動や安定に少なからず影響しているものと思われる。

実験に用いた扇状地構成材料は、大型水理模型実験でも軽量河床材料として使用されている石川ライト(比重は1.6程度)であり、平均粒径 $d=0.4\text{mm}$ のものを採用した。これは、御勅使川扇状地の外縁を流れる釜無川を対象とした卓上水理模型において、石川ライトを用いることにより河床洗掘や堆積位置を概ね再現可能であることを確認していることから、同様の河床材料を扇状地模型使用するものとした。

(4) 実験条件の検討

筆者らはこれまで、河道内の流れを対象とした卓上水理模型の再現性を、洗掘・堆積形状、河床形態の再現性や洪水時の平面流速分布の再現性によって検討してきた(図-4)。その結果、河道の平面的な要因により流れが影響を受ける緩流河道では河床洗掘位置や洗掘深の相対的な分布などが概ね再現できることが確認されている³⁾。また、急流河川に関する適用では砂礫堆形状の再現などは模型規模が影響することが判っているが、水衝部や河道形状による水刃など主流の流れなどについては再現が可能であることを確認している。⁶⁾

これまでの筆者らの検討では航空写真や河床横断面図などを検証資料として模型の再現性検討を行っている。しかし、本論で扱う扇状地の形成や扇状地を網状に流下する流路の形成については、現地にある流路痕や扇状地形が唯一の検証材料であり、扇状地形を形成した長期間におよぶ外力などを卓上水理模型の外力条件として与えることは困難である。

そこで、扇状地の形成に寄与する流量と土砂供給

量については、実験パラメータとして変化させることにより、経験的に決定した。以下に実験条件を設定するための検証実験の詳細を記述する。

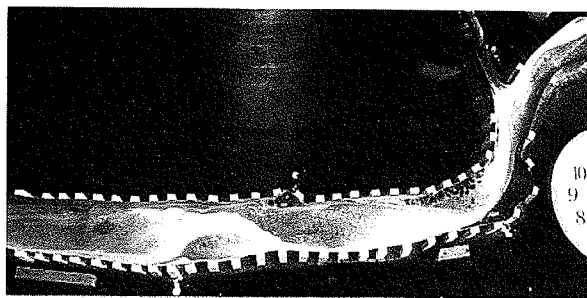


図-4 釜無川卓上水理模型の河床形状 ($S=1/4,000$)

1) 通水流量

扇状地模型の通水流量は、流量と流路の形成状況から実験的に決定したが、通水流量の一次設定値としてフルードの歪み相似に基づく流量を用いるものとし、その後段階的に通水流量を変化させて流路の状況を観察した。

扇状地模型の水平縮尺は $1/4,000$ であり、鉛直縮尺については5倍の歪模型と仮定して $1/800$ とした。5倍の歪み率については、前出の河道を対象とした卓上水理模型において、概ね5倍程度の歪み率を一次設定値とすれば最終的な通水流量と大きな差がないことを経験的に得ていたためである。フルード相似則による歪み模型の流量縮尺は次の値となる。

$$\text{流量縮尺} : L \cdot y^{3/2} = 4,000 \times 800^{1.5} = 90,509,668$$

ここで、 L : 水平縮尺、 y : 鉛直縮尺

扇状地を形成した流量については不明であるが、最大の外力として御勅使川の計画高水流量 $700\text{m}^3/\text{s}$ を上記縮尺倍率で模型に通水するものとした。その結果、模型に通水する流量は約毎分 0.5 リットルの流量となる。

$$\begin{aligned} \text{一次設定流量 } Q_0 &= 700/90,509,668 = 0.077 \text{ } \mu\text{L}/\text{秒} \\ &= 0.46 \text{ } \mu\text{L}/\text{分} \end{aligned}$$

この流量で通水したところ、図-5に示すように扇状地上流付近で流路が浸透によって消失してしまったため、 $0.5 \text{ } \mu\text{L}/\text{分}$ の割合で流量を変化させた実験を行い、扇状地の外縁にあたる釜無川まで流路が維持される通水流量を検討した。

$1.0 \text{ } \mu\text{L}/\text{分}$ の通水流量では扇状地の出口と釜無川本川の間付近で流路が消失し、流量が十分でない結果となった。図-6の写真は $2.5 \text{ } \mu\text{L}/\text{分}$ の通水ケースであり、扇状地外縁で流路幅が細くなるものの、釜無川本川まで流路が到達する結果が得られた。通水流量を更に多くした $3.0 \text{ } \mu\text{L}/\text{分}$ の検証実験も行ったが、後述の土砂供給量の検証実験において、流路内の掃流力が過大となり扇状地上流部における過大な鉛直方向の侵食が発生した。その結果、扇状地外縁部への供給土砂の堆積傾向が生じ、扇状地形が形成されなかったため、 $2.5 \text{ } \mu\text{L}/\text{分}$ を検討流量の採用値とした。



図- 5 0.5 L/分の通水時の
扇状地流路



図- 6 2.5 L/分の通水時の
扇状地流路

2) 供給土砂量

卓上水理模型における扇状地の形成は、一定量の土砂供給によって自然に扇状地形を形成させるものとした。ただし、実際の扇状地を形成した土砂の発生パターンや流出量は不明なため、ここでは卓上模型上に現地の扇状地形に類似したような扇状地形を最も表現している土砂供給量を実験的に決定した。以下にその実験過程と結果を記述する。

扇状地上流からの給砂は連続的に行われるが、1分毎の供給土砂量をパラメータとして、毎分 7.5cc ~ 75cc までの4ケースについて扇状地の形成状況を観察する実験を行った。ここで、本論の卓上水理模型における適切な扇状地形の形成条件として、以下の条件を満たすことを判定基準とした。

- 扇状地上流部に過大な堆積が生じないこと
- 扇状地の外縁まで土砂の一部が流送されること
- 扇形の扇状地が敷き均した砂の上に形成され、その中を流れる流路が常に扇状地全体を移動すること

図- 7、図- 8は、土砂供給量を変化させたときの扇状地形と流路の状況をとらえた写真である。実験中は、デジタルビデオカメラにより1分ごとに1秒間のインターバル撮影を行い、実験過程を記録した。

土砂供給が毎分 15cc 未満の場合は、扇状地形が形成され難く、流路の変遷も見られず固定した流路となった。土砂供給を 15cc/分とすると図- 7の写真のように、一定勾配の扇状地形が形成され、その上を流路が時間と共に移動する状態が継続する状況が得られた。



図- 7 土砂供給を 15cc/分
としたときの流路形成



図- 8 土砂供給を 45cc/分
としたときの堆積状況

更に土砂供給量増加させた実験ケースでは、土砂堆積が過大となり流路が固定し、扇頂部に台地状の地形が形成され、扇状地形とは異なる地形となった。図- 8の写真は 45cc/分の土砂供給条件の状況であり、向かって右側に台地状の堆積が生じている。

以上のように土砂供給量を変化させて検証実験を

行った結果、毎分 15cc 程度の土砂量が適切な扇状地形と流路の変遷が得られる条件とした。

(5) 御勅使川扇状地モデルを用いた信玄堤の検討

御勅使川扇状地および釜無川に展開される歴史的治水施設群の機能を卓上水理模型によって検討した。信玄堤と一般に称される歴史的治水群は、御勅使川扇状地扇頂部にある「石積み出し」、扇状地各所に展開された「将棋頭」、溶岩台地を穿った「堀切」、御勅使川と釜無川合流部に置かれた「十六石」、最後に釜無川屈曲部の「高岩」から構成されており、卓上水理模型では、扇状地の上流側から順番にそれぞれの施設の機能を検討した。

実験方法において特に次のことに留意し実験ケースを設定した。扇状地河道の形成などの現象は、洪水発生など確率論的な要素があるため、実験では同一条件で5回通水を行い、安定的に繰り返し発生する現象について、定性的な把握を行うものとした。また、将棋頭の機能検討では、実際の将棋頭が全ての規模の出水に対応できたのではなく、被災や補修の履歴を経ているという考えに基づき、卓上水理模型の土砂供給量を増やすことで施設の安定性や機能を考察した。以下に、信玄堤の各施設の機能検討結果を示す。

1) 石積み出しの機能

石積み出しは、山間から流れ出した御勅使川の流路を安定化させ北側に向ける機能を有していたと考えられる施設である。

卓上模型による機能検討は、次の手順で行った。上流から1倍 (15cc/分) の土砂を供給し扇状地を自然に形成させる。このとき、石積み出しは設置せず、扇状地を形成しながら流路が南北に移動する様子を確認した。次に石積み出しを設置し、給砂を継続する。このとき、北側に流路が向かい安定することを確認する。北側に流路が向かうことが確認された場合、土砂量を増やすことによって流路の安定と土砂量の関係を検討する。

図- 9は、石積み出しを設置する前の扇状地状況であり、写真の上が北方向になる。実験中は、供給土砂によって扇状地形を形成しながら流路が南北に移動する現象が確認できた。写真中の矢印は主な流路であり、同時に全ての流路を流水が流下しているのではなく、ある時は南よりその後流路が北上し北側を流れるなどの現象を呈しながら常に流路が移動している。その後、図- 10は、扇頂部にモデル化した石積み出しを設置した実験結果である。

石積み出し設置によって、流路が北側に固定され、土砂量が2倍までは北側に流路が向い、3倍を超えると流路が不安定となり、扇状地全体で流路が移動するようになる。実験の結果、中規模 (ある一定規模) の土砂量までは、石積み出しは、扇状地の流路を北に向ける役割を果たすが、大規模出水においては十分機能出来なかったと推察した。

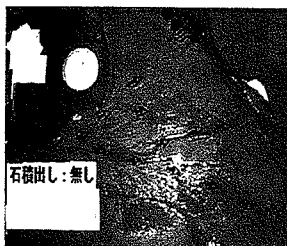


図- 9 石積出しを設置場合の流路の変遷状況

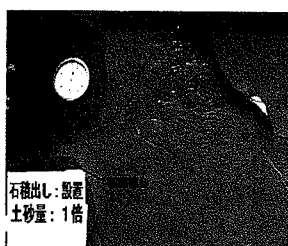


図- 10 石積出しによる流路の安定化

2) 将棋頭の形成過程

白根将棋頭は石積出しにより北側に向けられた流れを二分してエネルギーを減じ、御勅使川本流を大きく二つの流れに分ける機能を有していたと考えられている。卓上水理模型に将棋頭を設置した実験を行った結果、図- 11に示すように土砂量が基準供給土砂量の2倍までは、流路が安定していたが、図- 12の土砂量が基準供給土砂量の3倍になると流路が不安定になり、1倍の土砂量に戻しても初期の流路に戻ることがなかった。

御勅使川においては、その地形的特徴から急激な土砂流出が生じていたことを考慮すると、白根将棋頭は一定規模の流量までは機能するが、大規模出水に対しては流路変遷が生じ、機能維持のための将棋頭のメンテナンスが必要であり、扇状地に出来た微高地を利用しながら将棋頭が展開されていたと考えられる。扇状地モデル上にも図- 12や図- 13の白点線に示すような微高地が現存する将棋頭周辺に現れており、過去にはこのような場所に将棋頭が築造されてきたと推察される。

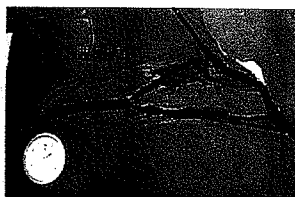


図- 11 供給土砂量 1倍時に 将棋頭で二分した流路



図- 12 供給土砂量 3倍時の 流路の乱流状況(1)



図- 13 供給土砂量 3倍時の 流路の乱流状況(2)

3) 二つの将棋頭の機能

御勅使川扇状地には、竜岡と白根という二大将棋頭が今も遺跡として残っており、御勅使川の流れは白根将棋頭によって2つに分流、減勢され、北側の流れは下流の竜岡将棋頭で再び分流されて、洪水流を減勢させる働きを持っていたと考えられている。

しかし卓上水理模型による実験では、図- 14の白根将棋頭によって流れが分かれている状態と、図- 15の流れが北側に偏流し竜岡将棋頭方向に流れて分

する状態の2つの現象は確認されたが、白根将棋頭で分水された流れが再び竜岡将棋頭で分水されることはなかった。

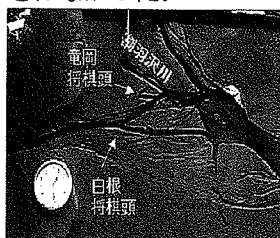


図- 14 流路が南に向かったときの流路

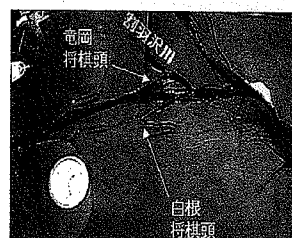


図- 15 流路が北に向かったときの流路

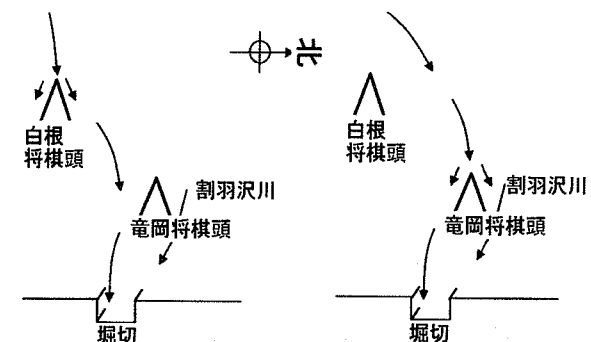


図- 16 白根、竜岡将棋頭の機能イメージ

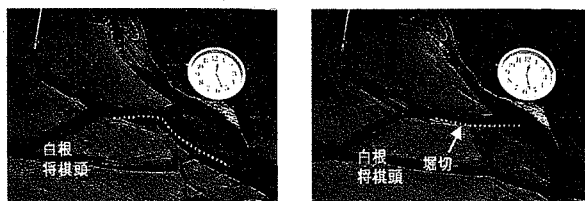
これまで2つの将棋頭は1組として機能していたのではないかと考えられているが、実験による機能評価では2つの将棋頭が1組で機能していたのではなく、流量規模、流出土砂の規模に応じて流路変遷が生じ、各々の将棋頭が独立で機能していたのではないかと判断される。また、2つの将棋頭により流路が安定することで、将棋頭の下流に位置する堀切まで流路が繋がることとなり、土砂量の増加に対しても流路を安定なものに保つことが出来ていたと考えられる。このことは、現存する将棋頭の他に地形的に類似した箇所が他にも確認されていることから類推される。

4) 堀切の機能

堀切については、割羽沢川と御勅使川の流れを一本に集めて十六石に向かわせる機能があったと考えられている。

実験は流路が白根将棋頭よりも北側に流れ、直接竜岡将棋頭で二分される場合と、図- 17の白根将棋頭で二分されて流下する場合について、それぞれ、堀切がある場合と無い場合の検討を行った。

実験の結果、堀切が設置されていなくても御勅使川の流れは、霞提、割羽沢川などにより、堀切付近へ流路が安定することが確認された。しかし、堀切がない場合、釜無川本川と合流した流れが不安定となつて、高岩へ向かう流れとならず、堀切の機能としては上流からの流れの安定のほか、釜無川河岸段丘の下流部において高岩へ向かう流れを安定させるために機能していたことが分かった。



堀切無し 堀切有り
図-17 白根将棋頭で二分された場合の堀切の機能

5)十六石の機能

十六石には、御勅使川と釜無川の合流した水を高岩に衝突させ水勢を弱める機能があったと推察されている。卓上水理模型による実験では、十六石を御勅使川の流れ、又は釜無川本川の流れを高岩に向けての導流堤群の一部と考え、その機能を確認する実験を行った。その結果、十六石及び周辺の霞堤の無い場合には堀切まで導かれた流れが再び乱流し易く、高岩に向かう流れにならない場合があり(図-18)、十六石及び周辺の霞堤によって、高岩に向かう流路が形成されることが確認された(図-19)。

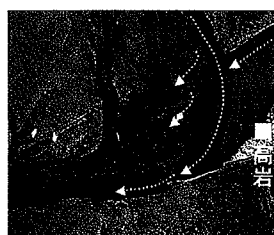


図-18 十六石及び霞堤が無い場合の高岩の状態

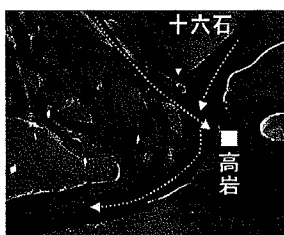


図-19 十六石及び霞堤を設置した場合の流況

6)高岩はねの流水制御

高岩から跳ね返った流れは、右岸側から合流する前御勅使川と衝突し、水勢を弱める役割を果たすと考えられている。そこで、白根の将棋頭によって二分された流れが合流する場合と合流しない場合の状況を卓上水理模型に再現性し比較検討した。

図-21の写真のように、前御勅使川の合流がある場合には、高岩によって跳ね返った主流線が、更に釜無川右岸側へ向かうのを抑制していることがわかる。また、白色実線は前御勅使川の流れが無い場合の釜無川右の河岸線位置を示しており、前御勅使川の合流によって、高岩から下流河道の右岸への侵食が軽減されることが確認できた。以上により、前御勅使川と釜無川本川の合流によって互いの水勢を弱める機能を有していたと思われる。

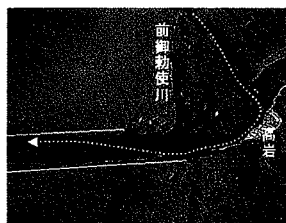


図-20 前御勅使川の合流が無い場合の流況

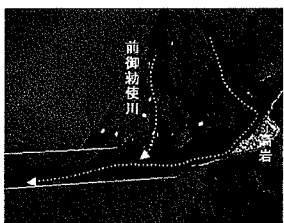


図-21 前御勅使川の合流が有る場合の流況

3. おわりに

釜無川信玄堤の治水機能の考察として、御勅使川扇状地を対象とした卓上水理模型による検討により、石積み出しの流水制御機能、将棋頭による流水の分水、土砂移動制御機能、掘切による釜無川との合流減勢機能など、御勅使川扇状地に展開された治水施設群の水理的な諸機能について確認することができた。また、これら一連の流水コントロールシステムを構成する個々の施設は、単独で機能するのではなく、相互に補完することにより、様々な流水や土砂の流出に対して、多様なパターンで機能を発現していることが確認できた。

実験模型による扇状地の氾濫流路の形成は確率論的な要素があり、本検討による条件下で検討された結果が定量的にどの程度再現性があるかは論議のあるところではある。しかし、大規模模型を用いた検討では経費、工期などが多大に掛かり、再現性の検証が非常に困難な現象について、卓上水理模型を用いることにより、種々の実験条件での検証が可能となり、古くからの文献、伝承に述べられてきた治水施設群の機能を検証することができたことは、大きな意義があるものと考えられる。

卓上水理模型が扱う、水深が浅く、水深流形比が極めて小さな領域での、河床抵抗則、河床形態などは研究事例の少ない分野であり、流れと河床変動の関係については不明な点があるが、今後も水理的な現象を進め、卓上水理模型の技術的な位置づけを明らかにし、簡便なツールとしての河川事業の合意形成の場や、教育用、説明用としての活用について、適用の可能性を研究してゆく所存である。

参考文献

- 1)武田氏研究会：武田氏研究第2号，治水特集号，1988年
- 2)木下良作：大井川牛尾狭窄部開削の影響に関する「砂レキ堆相似」による模型実験，昭和55年8月，静岡河川工事事務所
- 3)和田一範等：「極小移動床水理模型の国内での活用について」河川技術論文集，第7巻，2001年6月，PP. 497-500
- 4)三輪式：「単列砂レキ堆と複列砂レキ堆の関係」，第28回水理講演会論文集，1984年2月，PP. 775-781
- 5)黒木幹男，岸力：「中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究」，土木学会論文集第342号，1984年2月，PP. 769-774
- 6)和田一範等：「卓上水理模型による河床形状の再現性に関する研究」第48回水工学論文集，2004年3月，PP. 739-744

(2004. 4. 7受付)