

粘性土河床における洪水時の堰下流部の局所洗掘

Local Scour downstream of a Weir on the Cohesive Material Bed during Flood

鳥取大学工学部

正員 道上 正規

京都大学防災研究所

正員 芦田 和男

建設省琵琶湖工事事務所

正員 竹林 征三

鳥取大学工学部

正員 鈴木 幸一

1. ま え が き

本研究は、琵琶湖から流出する瀬田川に構築されている洗堰下流部の局所洗掘に関する観測資料の解析とその数値シミュレーションを取扱ったものである。

洗堰下流部の河床は、堰直下流部約100m区間は捨て石あるいはコンクリートブロックで保護されており、またそれより下流側では侵食抵抗が比較的大きな粘土によって河床が覆われていた。このため昭和52年度までは河床はほとんど洗掘されていない。昭和54年の5月末の洪水時から洗堰のゲート操作方法をそれまでの全門全開方式から第3、4および第5門の3門（あるいは、第4、5の2門）を全開、他の7門（8門）は越流させるという方式に変えてから、河床の局所洗掘が大きくなったといわれている。河床の洗掘現象は河床構成材料の特性と流水の掃流力との関係で決る現象である。したがって、将来、洗堰下流部の河床変動がゲートの操作方法、バイパスの設置に伴う河床浚渫など水理条件あるいは地形条件の変化によって、どのような特性を示すかを検討するためには、洗堰直下流部の河床形状の経時変化の実態を概観するとともに洗堰直下流部河床の地質特性を三次元的に示し各地層の流水に対する侵食抵抗について考察する。つぎに、ゲートを2門あるいは3門のみを全開にしたときの流速分布あるいは流速の流下方向への通減など流況特性について検討する。これらの結果を用いて河床形状の経時変化の数値シミュレーションを行ない過去のデータとの比較検討を行なう。

2. 洗堰直下流部の河床形状

昭和50年以降、洗堰直下流部の河床高の測量は合計6回行なわれており、測量実施日は、S50年1月19日、S52年6月9日、S54年6月5日、S54年8月6日、S55年12月23日、S58年10月28日～31日である。これらの測量実施より得られた河床の等高線図の数例を示したものが図1である。昭和50年11月から52年6月までの期間では河床形状はほとんど変化していない。この間の500m³/Sの以上の放流は表1に示すようにゲートを全門全開して、合計525.5時間であった。（a）図と（b）図を比較すると、52年6月から54年6月までの期間では、河床洗掘が顕著に生じたことがわかる。とくに、69.8kmから69.6km区間の左岸の河床が局所的に2m～4m程度洗掘されている。洗掘は一様に生じているわけではなく洗掘されない部分もあり地質が場所によって異なっていることがわかる。とくに、69.8kmより上流側には顕著な洗

表－1 瀬田川洗堰ゲート全開操作記録

年	全開期間		全開時間	全開ゲート No.	放流量
	始	終			
50	8月24日 15:30	8月30日 10:30	139.0	全 門	736(8/24) 843(8/30)
51	8月10日 18:00	8月17日 13:30	185.5	全 門	809(8/10) 715(8/17)
51	9月10日 13:00	9月25日 13:00	380.0	全 門	560
54	5月21日 13:00	5月23日 11:00	48.0	※ゲート点検 他ゲート全開 ゲート5付き	500
54	7月1日 18:00	7月7日 11:30	137.5	他ゲート全開 ゲート5付き	500
55	6月11日 18:00	6月18日 14:00	118.0	他ゲート全開 ゲート5付き	500
55	7月11日 18:30	7月15日 12:30	92.0	他ゲート全開 ゲート5付き	500
55	7月15日 12:30	7月17日 17:17	52.8	全 門	800
55	7月17日 17:17	7月21日 14:00	92.7	他ゲート全開 ゲート5付き	500
55	8月27日 17:30	9月3日 18:00	166.5	全 門	550
56	7月8日 11:30	7月15日 10:30	71.0	全 門	800(7/8) 580(7/11)
58	6月22日 18:45	6月25日 8:30	63.3	全 門	800

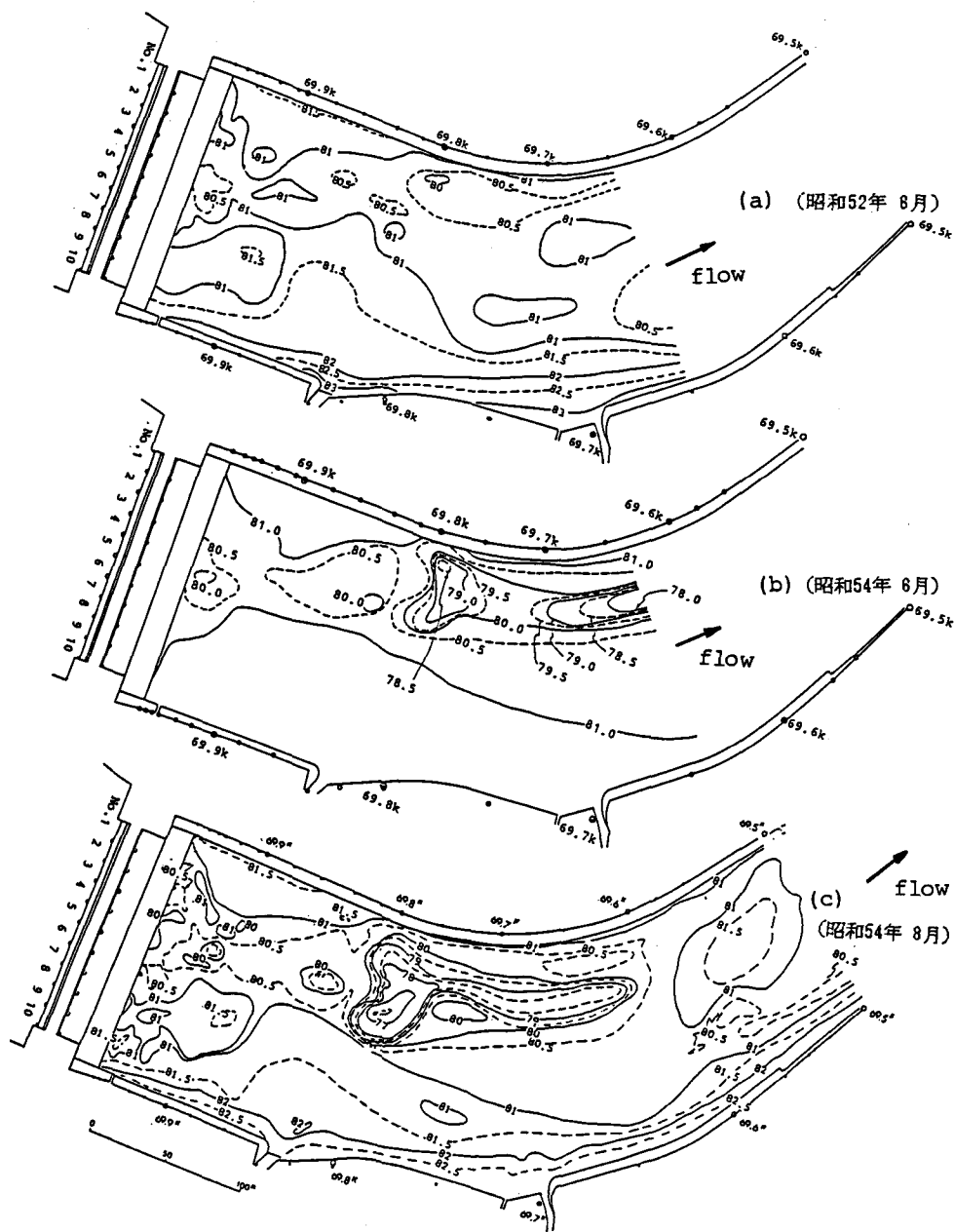


図1 河床等高線図

掘は認められない。この期間では、 $500 \text{ m}^3/\text{S}$ 以上の放流を行なったのは、表1に示すように54年6月の測量直前の5月の46時間だけである。このとき、全開したゲートは左岸から第3、4および第5門のみで残り全部は越流させていた。50年11月～52年6月および52年6月～54年6月の洗掘特性の違いは明らかにゲート操作の違いに基づくものといえる。54年6月測量の翌月に第4および第5の2門だけを全開にし他のゲートは越流状態にして $500 \text{ m}^3/\text{S}$ の流量を137.5時間放流している。その直後の8月に測量した結果の(c)図と6月の(b)図を比較すると、大きいところではさらに数m洗掘が生じていることがわかる。全門全開方式に戻した55年12月以降58年10月までの期間の河床変動は小さい。

3. 洗堰下流部の地質と侵食抵抗

洗堰下流部の自然河床は、おおまかにいえば、粘性土の層とシルト混りの砂礫層とが平面的にも鉛直方向にも入り交って形成される。ボーリングによる地質調査が行なわれているが、図2に代表的な土の粒度分布を示している。(a)は主に一部の河床表面付近に堆積している沖積層で粒径は比較的大きく砂質土である。また、古琵琶湖層は(b)で示すシルト混りの砂質土の部分と(c)で示す粘性土とに分れる。現在、沖積砂礫層は主として右岸側の河床面近くに薄く存在するのみで、洗堰が問題になっている河床中央から左岸にかけてはすでに古琵琶湖層が現れている。また、鉛直方向には古琵琶湖層の粘性土層と砂質土層とが交互に存在しており、洗堰を考える場合はこの古琵琶湖層の侵食抵抗を主に考えておけばよいだろう。

古琵琶湖層の粘性土および砂質土それぞれの流水に対する侵食抵抗については、現地実験が行なわれており、その結果は図3(a)および(b)に示されている。図中縦軸は侵食されて土層表面が低下するいわゆる侵食速度Eで横軸は侵食力を示す摩擦速度 u_* である。(a)図に示す砂質土は侵食速度と摩擦速度の比 E/u_* は 1×10^{-4} 程度であり、(b)図で示す粘性土についてはデータが少ないが、 $E/u_* = 10^{-6} \sim 10^{-5}$ のオーダーであろう。

4. ゲート操作と流況特性

洗堰はスパン長が10.8mの水門が10基ついておりますピアを含めて全長133.0mとなっている。水門は、図4の(a)図に示すように越流させる(ドン付)こともできるし、(b)図に示すようにゲートを上げて下を流すこと(全開)もできる。通常の流量ではドン付状態で流量を調節できるが、大流量時や逆に水位が極端に低いときは全開状態にする必要がある。前に示した表1の流量が多いときは、昭和54年と55年を除いて、全門を全開状態で通水している。昭和54年と55年の大流量時については、左岸からのゲート番号No.3,4およびNo.5のうち主としてNo.3,4,5あるいはNo.4,5のみを全開とし他のゲートは全てドン付状態で通水している。洗堰下流部の局所洗堰は

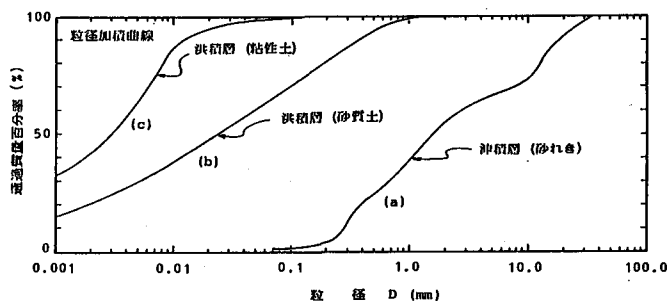


図2 河床土の代表的な粒径加積曲線

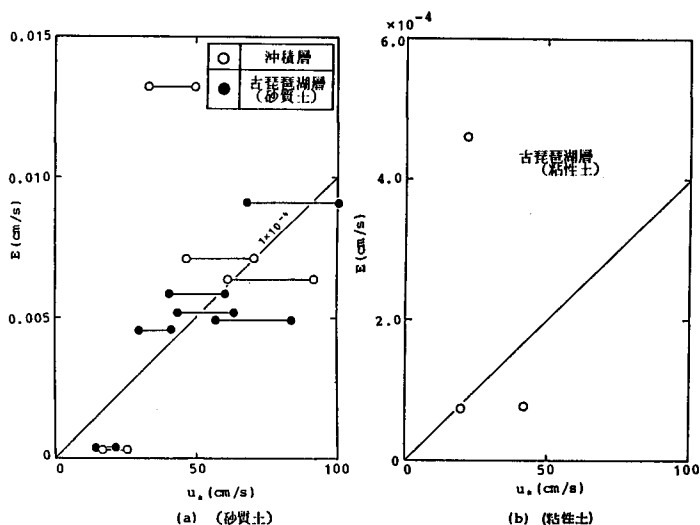


図3 摩擦速度 u_* と侵食速度Eの関係

図中縦軸は侵食されて土層表面が低下するいわゆる侵食速度Eで横軸は侵食力を示す摩擦速度 u_* である。(a)図に示す砂質土は侵食速度と摩擦速度の比 E/u_* は 1×10^{-4} 程度であり、(b)図で示す粘性土についてはデータが少ないが、 $E/u_* = 10^{-6} \sim 10^{-5}$ のオーダーであろう。

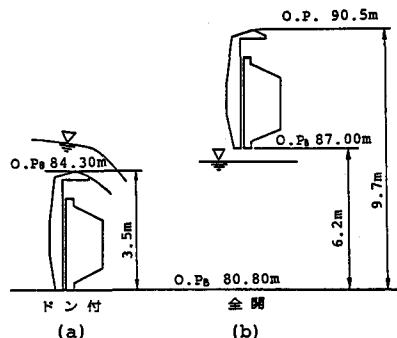


図4 水門操作方法

主として、ゲート操作が変更された昭和54年と55年に生じたものと推定される。

毎秒 500 m³程度の流量でゲートを部分的に全開にした場合の流況に関しては建設省土木研究所で模型実験が行なわれている¹⁾。その結果からゲートを部分操作した場合の流況分布特性について述べる。図5はNo.4,5の2基を全開にして470 m³/Sを通水した場合の模型実験による等流速線図の1例を示している。いずれの場合にも、堰から69.9 km付近までは、3 m以上の流速になっている場所がある。しかし、この部分では護床工が施されており洗掘は生じていない。また、69.6 km付近まで流速が2 m以上となる流速が存在しており、護床工がなくて流速がおおよそ2 m/S以上となる場所で洗掘が生じていると報告されている。最大流速を連ねた線を中心として水路横断方向流速分布を示したものが図6である。ゲートに近い部分では流れは中心部に集中して流速分布形は鋭く変化しているが、流下していくにつれて分布形は徐々に平坦になっている。このような流速の変化特性は二次元水平噴流におけるものと酷似している。水平噴流においては各断面の最大流速 u_{max} の流下方向 X への通減は、 X がある程度より大きくなれば（流れの確立領域では） $X^{-1/2}$ に比例する。図7は、図6に対応する条件での u'/u_{max} と X/b の関係を示している。ここに、 b は全開ゲート部の総長（ピア部も含む）であり、 u_0 は b 部を流れる平均流速（ゲート直下流部の出口流速）である。ただし、 u'_{max} は全開ゲート以外のドン付ゲート部での越流量を考慮した流速分だけ減少させているため u'_{max} で示している。これらの図からわかるように、 $X/b > (2 \sim 4)$ では u'_{max} は $X^{-1/2}$ に比例して通減することが認められる。また、二次元噴流においては、流速分布は Görtler によると、

$$u'/u'_{max} = 1 - \tan^2(\sigma y/x) \quad (1)$$

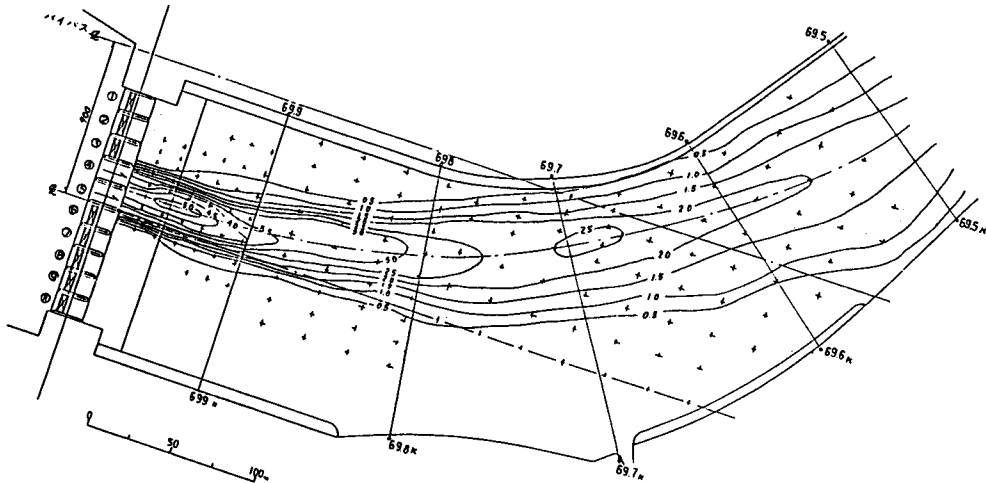


図5 模型実験による等流速線図

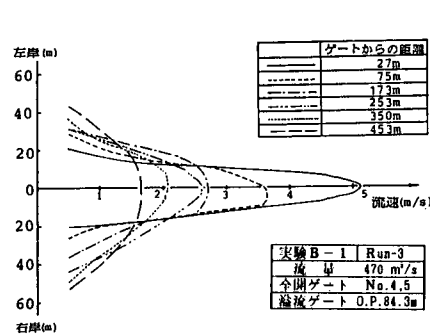


図6 流速分布の流下方向変化

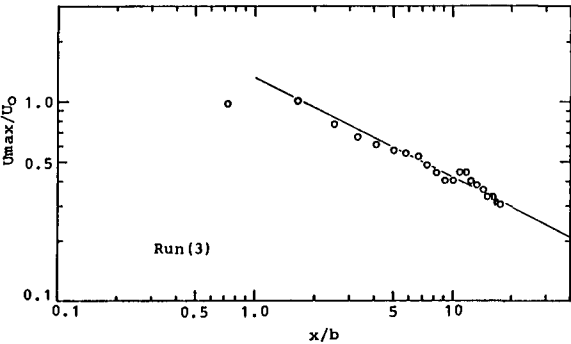


図7 最大流速の流下方向変化

で表われる。ここに、 u' は中心線から中心線の法線方向距離 y での流速（ドン付ゲート部からの流出量を補正している）であり、 σ は拘束係数である。図8は σ を仮りに10とした場合の（1）式と確立領域（ $X/b > \sim 2$ ）のものとの比較を行なったものである。図中丸印で（1）式の曲線を示しているが、確立領域での実測の流速分布はほぼ（1）式で表わされている。

以上のことより、ゲートの一部を開放したときの流速は、二次元水平噴流と考えると求めた流速で表われるといえよう。

つぎに、500 m³/S 程度の水を流したときの水位についてであるが、洗堰から 300 m 程度下流にある瀬浅水位が 83.8 m 程度であり、この付近の河床高が 81 m 程度であるから水位は 3 m 足らずとなる。これらによってここでのマンニングの粗度係数 n を計算すると $n = 0.025 \sim 0.03$ 程度となる。

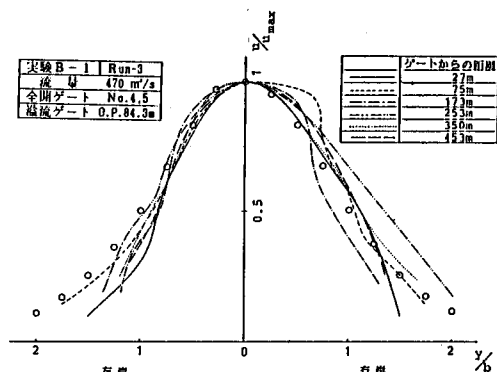


図8 無次元流速分布

5. 河床形状の経時変化の数値シミュレーション

全部のゲートを全開して放流した場合には全体的に流量が小さいので顕著な河床洗掘は生じない。したがって、ここでは測量実施日を考慮して、全開ゲートを3門以内に於て放流した昭和54年5月および7月における局所河床変動量に関して数値シミュレーションを行なう。

シミュレーションの方法は、河床の各点における平均流速 u は、二次元平面噴流の（1）式を用いて与え、摩擦速度 u_* はマンニングの粗度係数 n が 0.026 に相当する流速係数 $\varphi = 15$ を用いて $u_* = u/\varphi$ によって計算する。（1）式の u'_{max} の流下方向の変化は図7を参照して

$$u'_{max}/u_o = 1.3(x/b)^{-1/2} \quad (2)$$

また、河床土の侵食速度 E は図3を参考にして、

粘性土に対して $E = 1.0 \times 10^{-5} u_*$ 、砂質土に対して $E = 1.0 \times 10^{-4} u_*$

とする。洗掘が進行して空間の任意点での地質（砂質土であるか粘性土であるか）の判定は鉛直方向に 10 cm 間隔で与えられた地質図による。

なお、（1）式でのゲート出口での流速 u_o は、全放流量 Q のうち全開ゲート部を流れる流量 Q' を用いて計算する。堰直下流の各点の水深は瀬浅の水位から河床高を引いたものとして与える。また、洗掘が進行しても各点を流れる流量は変化しないという大きな仮定を設ける。したがって、洗掘が進行すると一定水位からの水深が大きくなった分だけ流速が減少し、ひいては掃流力が減少することになる。

流量および全開ゲート等の計算条件は表2に示すとおりであって昭和54年5月21日から23日の期間と昭和54年7月1日から7日までの2つの期間での大出水時を対象としている。ケース2とケース3は同一期間ではあるが、初期河床高として6月測量の実測値を用いたもの（ケース2）とケース1に引き続いて計算したもの（ケース3）との違いである。

表2 計算条件

	ケース1	ケース2	ケース3
放流期間	S54.5/21 ~ 5/23	S54.7/1 ~ 7/7	S54.7/1 ~ 7/7
初期河床高	S52.10月測量結果	S54.6月測量結果	ケース1計算結果
流量（全開ゲート）	500 (418.4) m ³ /s	500 (318.5) m ³ /s	500 (318.5) m ³ /s
全開ゲート	3.4.5	4.5	4.5
全開時間	48.0 hr	137.5 hr	137.5 hr
下流水位	83.82 m	83.82 m	83.82 m
下流水深	3.02 m	3.02 m	3.02 m
U_o	3.71 m/s	4.35 m/s	4.35 m/s
b	37.4 m	24.1 m	24.1 m

図9(a)～(c)は各ケースの河床等高線図の計算結果を示している。これらを図1(b), (c)と比較するとき、詳細にみればくい違っているところもあるが、巨視的には計算結果は実測の河床洗掘形状をかなり良くシミュレートしていることがわかる。

これらのことから、河床の保護工を行なわない場合の河床洗掘の将来予測は上記の手法によって行なうことができるものと考えられる。

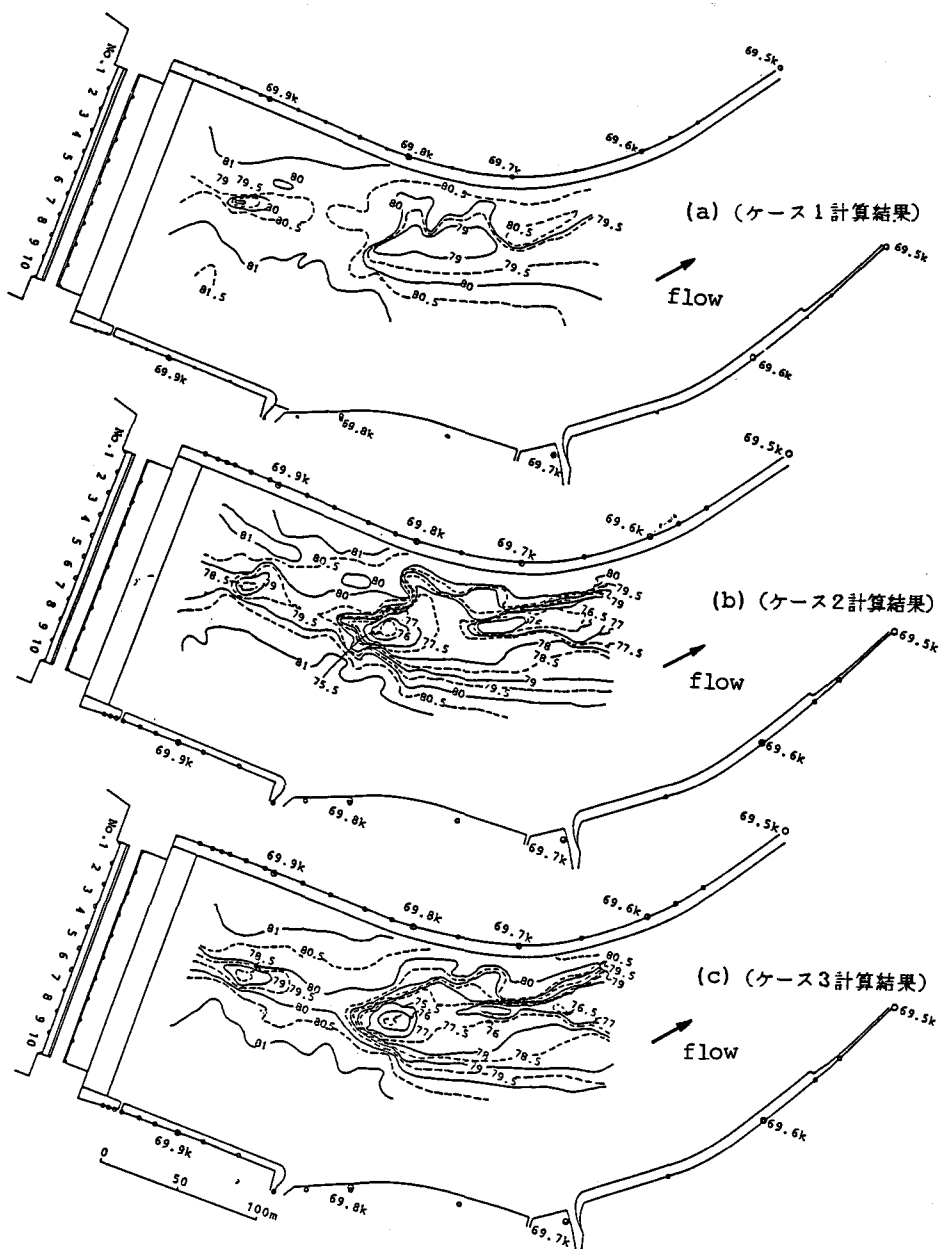


図9 河床等高線図

6. あとがき

粘性土河床の堰下流部の局所洗掘について述べてきたが、局所洗掘が顕著に現れるゲートの部分開放の流れは二次元平面噴流の流れと一致し、地質特性を考慮した河床条件を導入することによってその局所洗掘が定量的にシミュレーションできることを明らかにした。

最後に本研究を遂行するにあたって、資料収集等に多大の労をかけた建設省近畿地方建設局琵琶湖工事事務所、水資源開発公団関西支社及び新日本技術コンサルタントの関係諸氏に謝意を表するとともに、計算等で協力していただいた鳥取大学工学部松谷治氏に感謝します。

参考文献 1) 須賀・石川・林：瀬田川洗堰水理模型実験，土木研究所資料，土研資料第1941号