

洪水流の河道内貯留に及ぼす 堤防と低水路の位相差および高水敷幅の影響

EFFECT OF LEVEE AND MAIN CHANNEL ALIGNMENTS AND
FLOOD CHANNEL WIDTH ON WATER STORAGE DURING FLOOD FLOW

福岡捷二¹・栗栖大輔²・Alex Mutasingwa³・中村剛⁴・高橋政則⁵

Shoji FUKUOKA, Daisuke KURISU, Alex MUTASINGWA, Tsuyoshi NAKAMURA and Masanori TAKAHASHI

¹フェロー会員 Ph.D. 工博 広島大学大学院教授 社会環境システム専攻 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

²学生会員 広島大学大学院 環境工学専攻 博士課程前期 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

³学生会員 広島大学大学院 環境工学専攻 博士課程後期 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

⁴正会員 前田建設工業株式会社 長野支店 (〒399-5608 長野県篠ノ井御幣川1095)

⁵正会員 工修 国土交通省中国地方整備局 河川計画課長 (〒730-0012 広島県広島市中区上八丁堀 6-30)

The objective of this study is to clarify the effects of levees and main channel alignments and flood channel width on storage volume during flood flow. In order to realize our objective, we conducted three experiments in a channel in which both the levee and main channel are meandering but with a phase difference between them. Comparisons of these results were made with past experiments of a compound meandering channel with straight levees. The results of these experiments, water depth-discharge relationship showed almost the same behavior. On the other hand, water depth-main channel velocity relationship showed significant differences for each channel with different levee phase. It was also shown that the main cause controlling storage volume was the width of flood channel and the main channel alignment. Comparison of the experimental and Ota River flood data showed similar flood flow storage characteristics.

Key Words : *flood flow, compound meandering channel, flood flow storage in channels, phase difference, sinuosity amplitude, width of flood channel, Ota River*

1. 序論

我が国の河川における治水設備の整備は十分と言えないまでも、洪水対策は着実に進歩してきた。近年では、治水のみならず、地域の人々の意見を反映した河川づくりが重視されつつある。こうした動きに対応して、多くの河川では治水と環境の調和を考慮に入れた、新しい河川整備の計画が検討されている。これらの計画策定にあたっては、流域における河川本来の姿、安全性、役割などを十分に考慮する必要がある。しかし、上流から下流へと変化する河道特性の影響を受けた洪水の水位、流量ハイドログラフがどのように変化し、洪水流が河道内をどのように流下しているのかという洪水流の水利現象が十分に理解され、計画に反映されているのだろうか。

我が国の多くの大河川の中下流域では、治水と環境への配慮から河道の横断面形状は、主に低水路と高水敷とか

らなる複断面形が採用されている。河道が複断面蛇行形状を持つ場合、低水路と高水敷の間の流れが混合するために、単断面の場合と抵抗特性が大きく異なることが明らかにされており¹⁾、また、流量が時間的に変化する洪水流は、その流下過程において河道の平面形、横断面形によっては貯留が生じ、ピーク流量の低減などハイドログラフの変形が生じることが知られている^{2),3)}。しかし、洪水流が河道を流下する際の河道特性と河道内貯留の関係の実態については理解が進んでいないために、河川が本来有する洪水流の貯留効果を治水計画に取り入れるには至っていない。

これまで、福岡ら^{4),5),6)}は、日本の河川で一般的に見られる複断面蛇行流路において、洪水流の水利特性に及ぼす平面形および横断面形の影響と非定常性⁷⁾の影響を実験的に検討し、基本的な理解を得ている。

本研究では、河川が一般に不規則な平面形、横断面形を

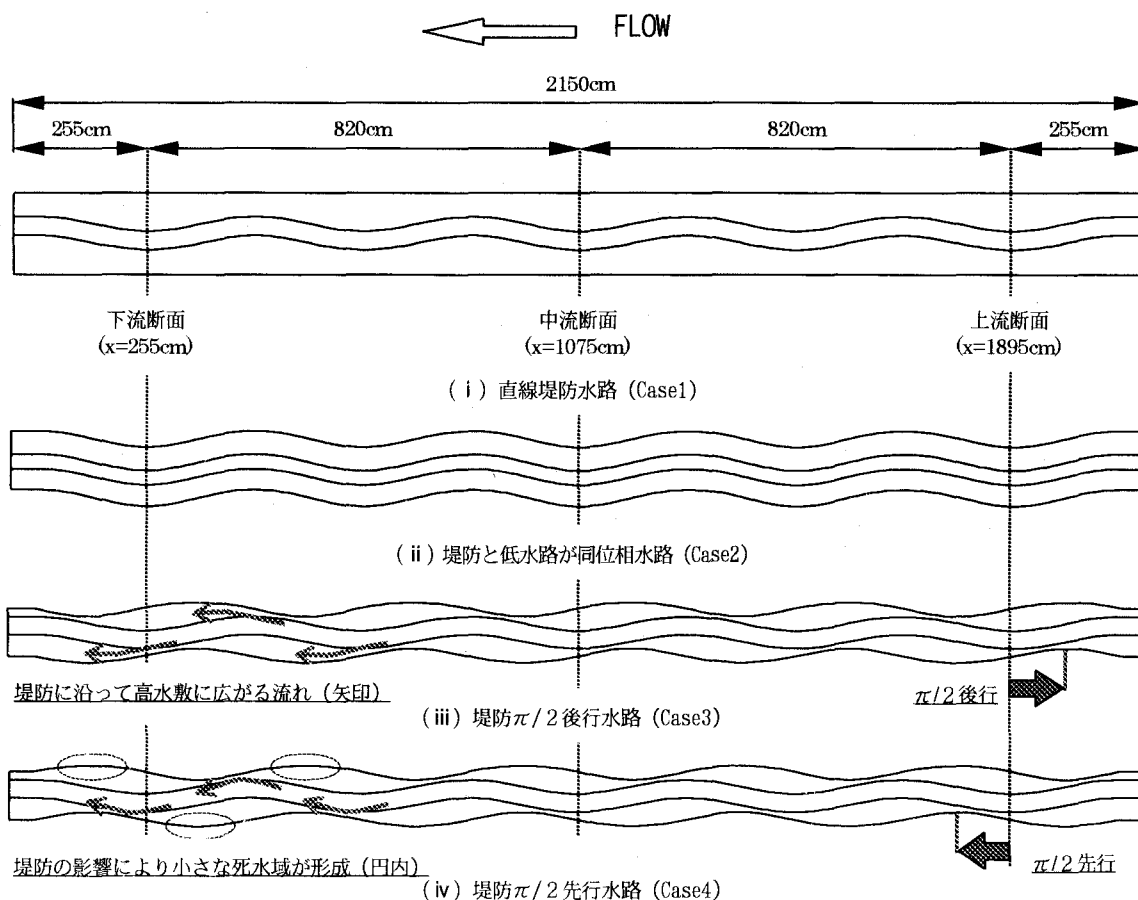


図-1 実験水路平面図

表-1 実験水路諸元

ケース	水路長	低水路幅	低水路床からの 高水敷の高さ	水路床 勾配	蛇行度	蛇行波長	全水路幅	高水敷幅 / 低水路幅	位相差
Case1	2150cm	50cm	4.5cm	1/1000	1.02	410cm	220cm	3.4	直線堤防
Case2							130cm	1.6	同位相
Case3									$\pi/2$ 後行
Case4									$\pi/2$ 先行

有していることを考慮に入れ、堤防法線形に対する低水路法線形と位相差、高水敷幅に着目し、堤防と低水路が同位相および位相差がある形で蛇行している場合について、河道内貯留に及ぼす位相差と高水敷幅の影響を実験によって明らかにする。さらに、太田川における洪水観測データの解析を行い、実河川での貯留現象と実験水路での貯留現象を比較検討することを目的としている。

2. 洪水流実験

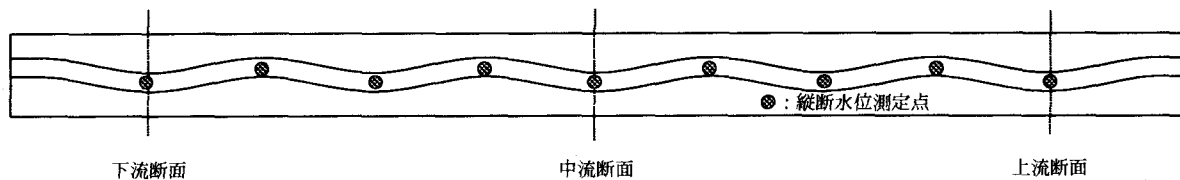
(1) 実験方法

複断面蛇行形状を有する大型水路を用い、洪水流の流下形態に及ぼす堤防と低水路の位相差および高水敷幅の影響を評価する実験を行った。図-1および表-1に本研究で用いた実験水路について示す。大型直線水路内に木製型枠でつくられた低水路と同じ蛇行度、蛇行波長を有するアクリル製蛇行堤防を図-1(ii), (iii), (iv)のように設置した。水路上流端から図-5に実線で示すハイ

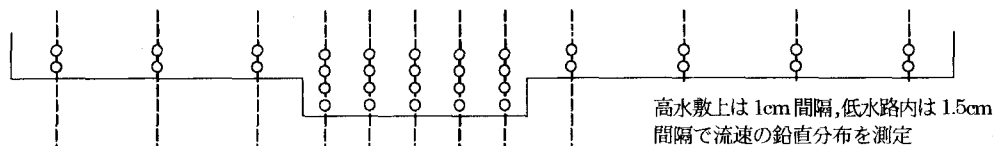
ドログラフを持つ洪水流を流下させる。表-2に、実験で用いたハイドログラフと、後に実河川での貯留量を解析するために用いた太田川の昭和58年洪水ハイドログラフの特性を比較して示す。水路を1/200の模型と考え、フルードの相似則を適用すると、ピーク流量に違いはあるが、流れの特徴は相対水深によって示され、高水敷冠水時間についてもほぼ近い値を示す。よって、実験ハイドログラフは、太田川の洪水流にほぼ対応していることが分かる。

(2) 実験条件

本研究では、4つの異なる水路条件で比較検討を行っている。Case1では、堤防が直線であり高水敷幅が他の3ケースに比べて広い場合、Case2では、堤防と低水路が同位相である場合、Case3では、堤防が低水路に対して $\pi/2$ 後行する場合、Case4では、堤防が低水路に対して $\pi/2$ 先行する場合について実験を行い、堤防と低水路の位相差の違いと高水敷幅が河道内貯留に及ぼす影響につ



(i) 流速および水位観測断面



(ii) 各断面内での流速および水位の測定箇所 (Case1)

図-2 水位、流速の測定場所

表-2 ハイドログラフの特性

	実河川換算 ピーク流量	最大 相対水深	実河川換算 高水敷冠水時間
実験ハイドログラフ	9,622 (m^3/sec)	0.4	4.7 (hr)
太田川 (矢口第一) S.58 洪水	3,500 (m^3/sec)	0.37	6.0 (hr)

いて考察した。

水路下流端には、空隙の大きなプラスチック製の多孔体 (空隙率 91%) を設置している。多孔体は、十分な抵抗を負荷することによって各時間の水面形が下流端で低下背水にならないような条件に設定をしている。

(3) 測定方法

水位の測定はサーボ式波高計、流速の測定は I 型電磁流速計を用い、1 秒間隔の連続したデータの測定を行った。水路内に設定した 9 つの観測点 (図-2 (i)) において水位の縦断分布を測定した。さらに上流、中流、下流に設定した 3 つの観測断面内において、直線堤防水路では 12 点、蛇行堤防水路では 11 点の水位の横断分布に加えて、水面の変動に応じて選択した各点での流速の鉛直分布を測定した (図-2 (ii))。

得られたデータより各観測断面における流量を算出し、各断面の流量ハイドログラフより上流断面と下流断面間の貯留量 (S) の時間変化 (dS/dt) を求めた。

3. 実験結果と考察

(1) 堤防と低水路の位相差が流下形態に及ぼす影響

各実験ケースについて、中流断面 ($x=1075cm$) における水位-流量 (図-3) および水位-低水路平均流速の関係性を求め、それぞれ無次元化し、比較したものを図-4、図-5 に示す。ここで示す無次元水位は、高水敷高さの水深を無次元量 0 とし、1 をピーク水位としている。また、無次元流量および無次元流速については 0 を最小値、1 を最大値としている。

図-3 に示した水深-流量関係は、いずれのケースにつ

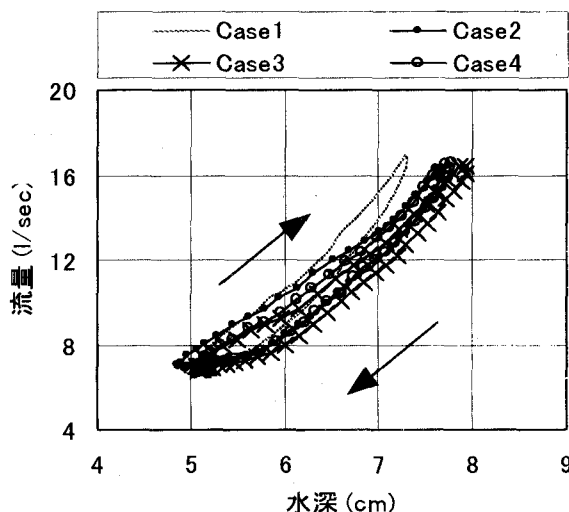


図-3 水深-流量関係

いても増水期と減水期とは同じ水深において異なる流量を示す、非定常流れ特有のループを描いている。Case1 では、Case2~Case4 に対して水路幅が広いために、ピーク水深は他の 3 ケースに比べて小さくなっている。蛇行堤防を用いた 3 ケースでは、ピーク流量時の水深はほぼ同じ値を示しており、全体の傾向にもほとんど違いが見られない。また、増水期と減水期での同じ水深における流量差の程度を示すループの大きさを無次元化によって比較すると、Case1 での高水敷幅が Case2~Case4 と比較して大きいために、高水敷の抵抗の与える影響が大きく、大きなループを描いている。しかし Case2~Case4 では堤防に位相差があるにもかかわらず、それぞれのケースのループにはほとんど違いが見られない (図-4)。

無次元水位-無次元低水路平均流速関係 (図-5) も非定常流れ特有のループを描くが、各ケースで異なった関係がみられる。まず Case1 では、増水期に流速が急激に増加し高水敷冠水直後に第一次ピークをむかえ、その後高水敷の抵抗により流速は低下する。水位の増加に伴い流速が増加するが、高水敷幅が低水路幅に対し 3.4 倍と広く高水敷の抵抗が大きいので、第二次ピークの流速はそれほど大きな値を示さない。Case2 の堤防と低水路が同

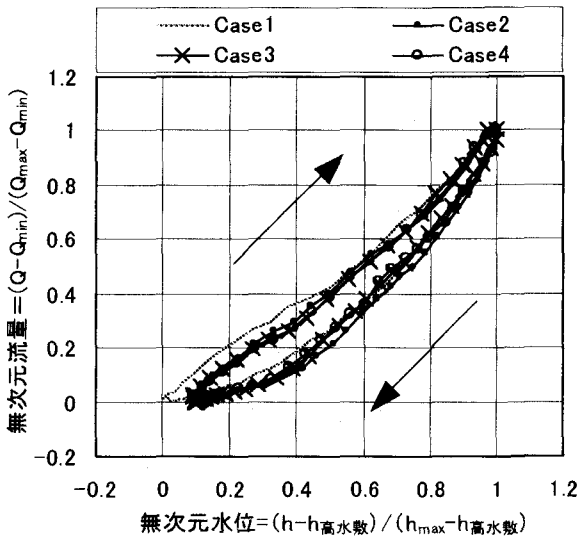


図-4 無次元水位と無次元流量の関係

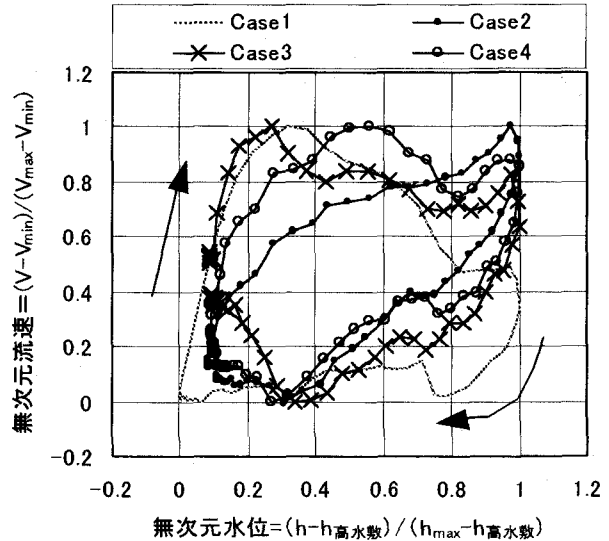


図-5 無次元水位と無次元流速の関係

位相の水路では、低水路蛇行帯の外には蛇行帯内よりも小さい流速の領域が現れ、直進性の高い流れとなる。Case2の流れは、Case3、Case4に比較して、最も抵抗の小さい流下形態をとっている。これは、高水敷上の遅い流れが低水路内の流れと干渉する度合いが最も小さく、結果として水位の増加に伴い流速も増加し、最大水位でピーク流速を示すことになる。Case3の堤防 $\pi/2$ 後行水路では、低水路から流出した流れが高水敷上で堤防を沿うように流れ(図-1(iii)内に矢印で示す)、水路全体に広がった流れとなる。このような流れでは、Case1と同様に高水敷冠水直後に第一次ピークをむかえる。その後高水敷の抵抗によって流速は減少するが、高水敷幅が低水路幅に対し1.6倍と相対的に大きくないため、その抵抗はあまり大きく影響せず、水位の増加とともに最大水深で第二次ピークをむかえる。Case4の堤防 $\pi/2$ 先行水路では、低水路から高水敷へと流出する流れが堤防との位相差のために低水路内へと戻されるために、蛇行帯の外に死水域を形成する(図-1(iv)の円内)。Case3では、高水敷の抵抗は小さいので第一次ピークの発生時刻が遅れ、その後Case3と同じ傾向で第二次ピークを示す。

(2) 堤防と低水路の位相差および高水敷幅の違いが貯留量に及ぼす影響

図-6に、上流断面($x=1895\text{cm}$)からの流入流量(Q_{in})および各ケースにおける下流断面($x=255\text{cm}$)からの流出流量(Q_{out})を示す。流量ハイドログラフは流下に伴い、高水敷粗度、低水路の線形、高水敷上の流れと低水路の流れの混合による影響を受け、下流断面ではピーク流量の低減、ピーク流量発生時刻の遅れおよび洪水継続時間の延長といった波形の変形を生じている。このような変形は、高水敷幅が低水路幅に対して十分広いCase1で顕著である。しかしながら、蛇行堤防を設置したその他の3ケースについては、波形の変形がほぼ同じになっている。流量ハイドログラフの時間的な遅れおよびピーク流

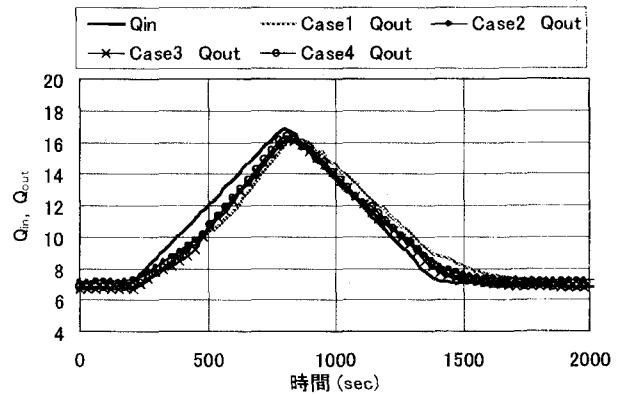


図-6 上流、下流での流量の比較

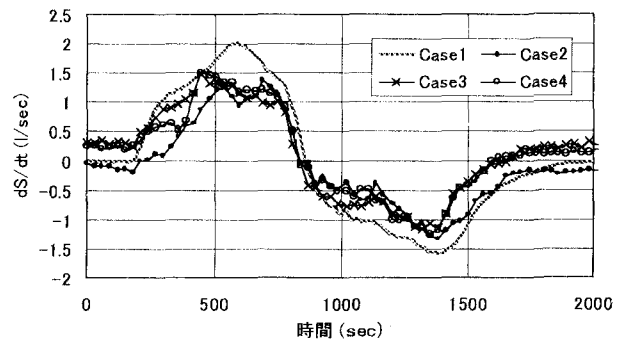


図-7 dS/dt の経時変化

量の低減は、主に洪水流量の貯留と大きく関わりがある。図-7に、各ケースの上流断面と下流断面の間での、単位時間あたりの貯留量(dS/dt)の経時変化を示す。ここで貯留量とは、式(1)から求めたものである。

$$\frac{dS}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (1)$$

Case1の貯留量が最も多く、Case2~Case4の貯留量の違いはほとんどない。Case1は、高水敷幅が低水路幅に対し3.4倍と広く、高水敷上の流れの抵抗による影響が大きい。それによって、流下に伴う洪水波形を変形させ、貯留量が多くなった。これに対し蛇行堤防を用いた

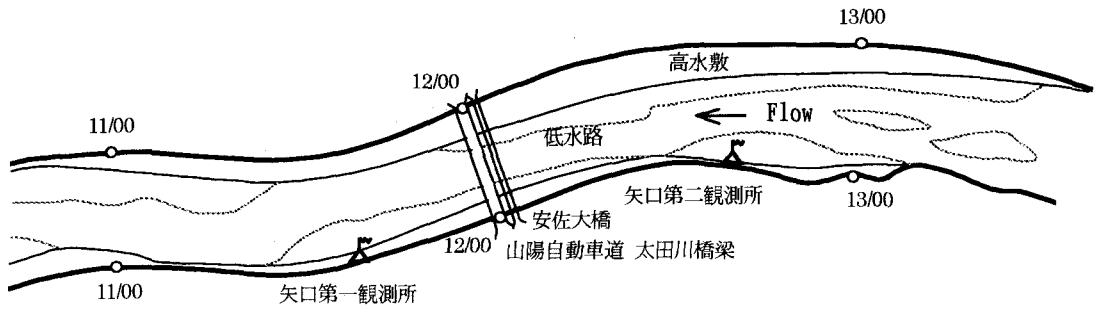


図-8 矢口第一～第二観測所付近平面図

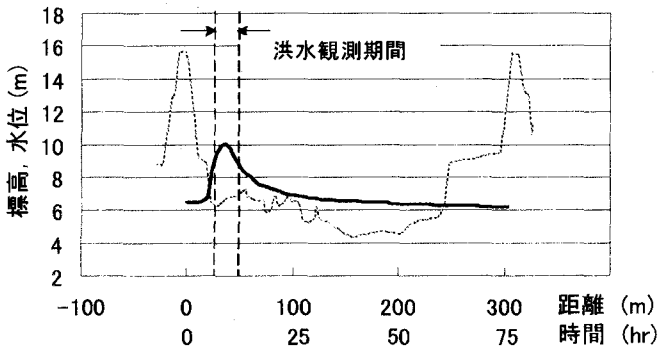


図-9 矢口第一観測所横断面と
昭和58年7月洪水ハイドログラフ

Case2～Case4は、高水敷幅がCase1に比べ狭く、高水敷上の流れの抵抗による影響が小さいために、洪水波形の変形が小さく、貯留量が相対的に小さくなった。また、Case2～Case4の貯留量にほとんど違いがない。Case4では死水域が形成されているにも関わらず、貯留量に与える影響が少なかったのは堤防および低水路の蛇行度が1.02と小さく、死水域の形成される領域が狭かったことによるものと考えられる。このことから、河道内貯留を支配する要因は第一に高水敷の幅と粗度（粗度に関しては、福岡ら⁹⁾¹⁰⁾により検討され、高水敷の粗度が貯留量に与える影響は大きいと結論されている）および低水路の蛇行度の大きさであり、堤防と低水路の位相差は二次的であると結論される。低水路の蛇行度は流れの混合が関係する蛇行帯の幅を規定するため、蛇行振幅が貯留量に及ぼす影響も大きいと考えられる。

4. 太田川での洪水観測結果の検討

(1) 洪水観測データ

昭和58年7月23日出水の矢口第一観測所（河口から11.6km上流）～矢口第二観測所（河口から12.7km上流）区間での洪水観測データを用い、実験値との比較および河道内貯留について検討を行った。図-8は太田川矢口第一観測所～矢口第二観測所区間の平面図を示す。対象河道区間は、緩やかな蛇行を呈する複断面形である。図-9には矢口第一観測所で観測された洪水ハイドログラフおよび河道の断面形状を示した。また、表-2に太田川の洪水ハイドログラフの特性を示している。

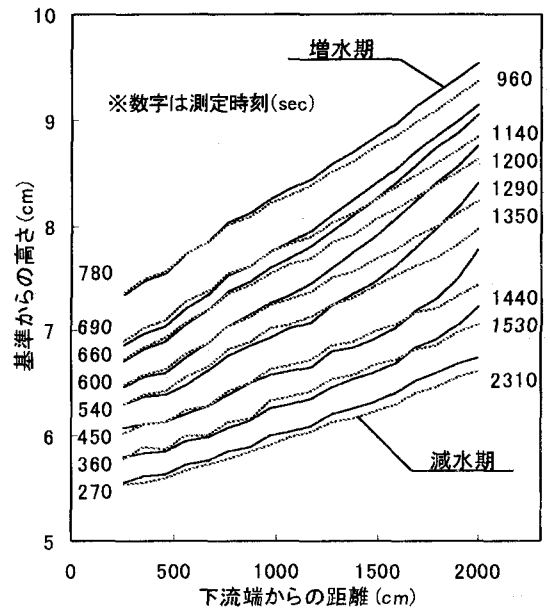


図-10 縦断水位分布 (Case1)

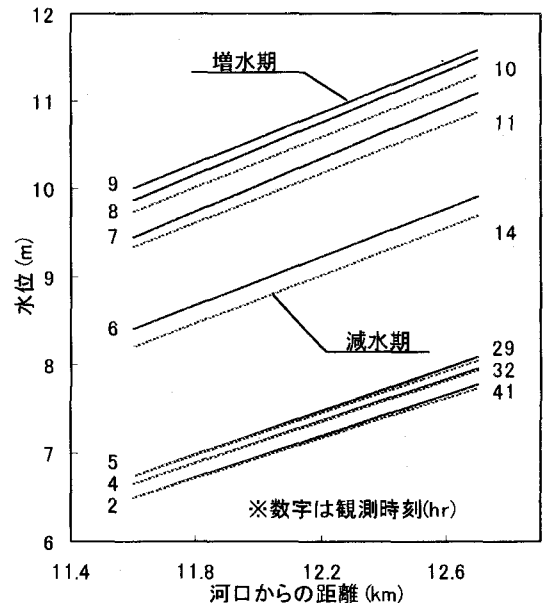


図-11 縦断水位分布 (太田川)

(2) 太田川での貯留量の検討

福岡ら⁹⁾¹⁰⁾は、太田川での洪水観測データより矢口第二観測所での水位-流量および水位-流速関係について実験結果と比較した。その結果、太田川の洪水と実験データはほぼ同様の関係が見られ、太田川の河道においても

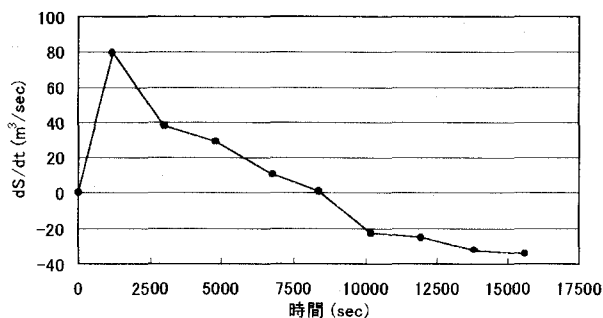


図-12 矢口第一～矢口第二観測所区間での貯留量の経時変化

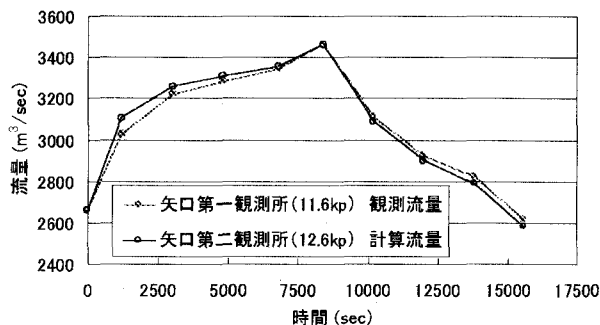


図-13 矢口第二から矢口第一観測所への流下に伴う流量ハイドログラフの変形

実験水路と同様な機構で貯留現象が発生していると判断される。実際に矢口第一～矢口第二観測所の 1,100m の横流入、流出のない区間を対象にして、 dS/dt の算出を行った。算出には、図-9 に示した洪水観測期間での、矢口第一、矢口第二観測所それぞれの洪水ハイドログラフおよびこの区間の断面形状を 200m 間隔で測量したデータを用いた。また、対象とする区間の水面勾配は各時間、一定としている。

図-10、図-11 に Case1 (直線堤防水路) および太田川での洪水流の縦断水位の時間変化を示す。増水期(実線)、減水期(点線)で同じ下流端水位となる時間について示している。これらの図より、Case1 では増水期において水面勾配が大きく、減水期には水面勾配が緩くなっており、洪水波形の伝播の特徴が顕著に現れている。太田川における水面形にもこの傾向がみられる。

dS/dt の算出結果を図-12 に示す。また図-13 は矢口第一観測所の観測流量(Q_{out})と、 $dS/dt + Q_{out}$ より求めた矢口第二観測所の流量(Q_m)の比較を示す。太田川矢口第一～矢口第二観測所区間での dS/dt は、洪水観測期間内でピーク時には約 $80(m^3/sec)$ であり、同時刻にこの区間へ流入する流量のおよそ 3%の流量を貯留していることになる。また、貯留区間で dS/dt は急激な変動を、放出区間では緩やかな変動をすることは、実験結果とほぼ同じ傾向にある。さらに、 dS/dt の存在により矢口第一観測所と矢口第二観測所を通過する流量には若干の差が生じ、ピーク流量の低減が見られる。ただし、検討区間の河道の平面形状がほぼ直線的であり区間長が 1,100m と短く、高水数幅も低水路幅に対して狭いために、流入流量に対する貯留量の比は実験結果ほどには生じていない。

貯留量を正しく評価するには、浮子による流量観測精度のさらなる向上と観測の時間間隔を短くすること、さらには観測所を含む縦断水面形の連続的な観測を精度よく、広範囲にわたって行うことが必要である。

5. 結論

本論文では、低水路と同じ蛇行度、蛇行波長を持つ堤防を水路内に設置し、低水路と堤防の位相差と高水数幅が

洪水流の流下に与える影響に着目し検討した。また、太田川の洪水流の解析^{5),6)}を進展させ、太田川での洪水流の貯留量の評価を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 水深-流量関係には、各ケースともほとんど違いがみられなかったが、水深-流速関係では低水路と堤防の位相差を持つ水路の流れの特徴が顕著に現れる。
- 2) 河道内貯留は、Case1 の直線堤防水路で大きな値を示したが、Case2～Case4 では高水数幅が低水路幅に対して小さく、流れに与える高水数の抵抗の影響が小さいため、洪水波形の変形が小さく貯留量は相対的に小さいといえる。また、Case2～Case4 では貯留量にほとんど違いが現れなかったことから、河道内貯留を支配する要因は第一に高水数幅と蛇行度であり、堤防と低水路の位相差が貯留量に与える影響は二次的であるといえる。
- 3) 太田川での洪水観測データを河道内貯留の観点から検討し、河道内貯留現象を確認した。しかしながら、検討区間がほぼ直線形状で区間が 1,100m 程度と短く、高水数幅も狭かったことから、貯留量のピークは同時刻の流入流量に対して 3%程度の大きさであった。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 大串弘哉, 加村大輔, 平生昭二: 複断面蛇行流路における洪水流の水利, 土木学会論文集, No. 579/ II-41, pp. 83-92, 1997.
- 2) Ven Te Chow: Open channel Hydraulics, McGROW-HILL, Chapter 20, pp. 586-609, 1956.
- 3) 福岡捷二: 洪水流と土砂水利の新展開, 水工学シリーズ 99-A-2, pp. 1-24, 1999.
- 4) 福岡捷二, 渡邊明英, 岡部博一, 關浩太郎: 洪水流の水利特性に及ぼす非定常性, 流路平面形, 横断面形の影響, 水工学論文集, 第 44 巻, pp. 867-872, 2000.
- 5) 福岡捷二, 關浩太郎, 栗栖大輔, 河道における洪水流の河道内貯留とピーク流量低減機能の評価, 河川技術に関する論文集, Vol. 6, pp. 31-36, 2000.
- 6) 栗栖大輔, 福岡捷二, 森川数美, 關浩太郎: 複断面蛇行流路における洪水流の河道内貯留とピーク流量低減機構, 第 55 回 年次学術講演会講演概要集, 第二部, pp. 276-277, 2000.

(2001. 10. 1 受付)