# 霞堤周辺流れの水理特性に関する実験的検討 HYDRAULIC EXPERIMENTS ON THE FLOW AROUND OPEN DYKE

# 川中龍児<sup>1</sup>・石垣泰輔<sup>2</sup>・島田広昭<sup>2</sup> Ryuji KAWANAKA, Taisuke ISHIGAKI, Hiroaki SHIMADA

<sup>1</sup>学生会員 関西大学大学院 工学研究科(〒564-8680大阪府吹田市山手町3-3-35)
 <sup>2</sup>正会員 関西大学工学部(〒564-8680大阪府吹田市山手町3-3-35)

In recently years, the hydraulic design with nature has become the most important factor in planning river management. Some traditional counter measures for flood have become of special interest. The traditional measures can not fully control floods, however, the nature is not fully destroyed by them. One of the traditional measures is an open dyke system. The open dyke is the discontinuous bank of which upstream end is opened and connected to the downstream bank with small angle of 10 to 30 degrees. The open dyke has some functions by which the river water inundated through it to the surrounding flood plains during floods. However, these hydraulic characteristics have not been examined yet. In this paper, the flow around the open dyke was investigated by the experiment. The result of this experiment shows hydraulic functions of it.

Key Words : Traditional flood management, open dyke, flood plain, experimental study

### 1. はじめに

日本の河川は山間部を短い距離で流れるという急流河 川であることが特徴である.この特徴により大雨や長雨 が発生すると容易に河川が氾濫してしまうため、日本で は古くから治水技術が発達してきた1). 仁徳天皇による 茨田堤(むまたのつつみ)と呼ばれる堤防,武田信玄に よる信玄堤と呼ばれるさまざまな治水技術を取り入れた 治水システム、明智光秀による明智藪(あけちやぶ)と 呼ばれる水害防備林などが有名である. これらの伝統的 な治水技術の特徴として、自然や天然素材を利用してい ること、地域の特徴に応じた治水技術であることが挙げ られる. これは現在の河川法で求められている治水・利 水・環境保全という点において合致している.しかし, 伝統的治水技術の水理機能については明らかにされてい ない部分が多いため、現在の治水技術への応用には問題 が残る. また, 現存する伝統的治水技術についても, 近 年の土地利用の高度化に伴い保存するべきかが問題と なっている.

本研究では、京都府亀岡市に現存している伝統的治水 技術の一つである霞堤について水理機能の検討を行った. 「霞堤」とは、図-1に示すように堤防のある区間に幾つ



図-1 亀岡市の霞堤

かの開口部を設け、その下流部の堤防を堤内地側に伸ば し、上流の堤防と二重になるようにした堤防である。そ の設置目的は、①洪水時に河川の氾濫を許容し堤防の決 壊を逃れる、②上流側で氾濫した水を河川へ戻す、③下 流の狭窄部より堰上げられた水を再び河川へ戻すという 機能(還流機能)である。以上のことにより、当該地域で 洪水時の水を循環および遊水させることにより、下流域 への流出を低減させ下流域を洪水から守っていると考え



図-3 霞堤部概要

られる.しかしながら、これらの水理機能については明 らかにされていない.本研究では「①洪水時に河川の氾 濫を許容し堤防の決壊を逃れる」という機能に注目し、 霞堤を含む河道の水理実験を行い、霞堤の部分から流出 する流量を計測することにより、洪水時に霞堤から流出 する流量について検討を行った.この流量を算定する際 には流量係数を決定する必要があるが、既往の研究より 横越流についての流量係数は検討されているものの<sup>20</sup>、 霞堤のような形態の流量係数は検討されていない.そこ で、この流量係数について検討を行った.さらに、水位、 流速を計測することにより、霞堤の周辺流れへの影響に ついて検討を行った.以下ではこれらの実験より得られ た霞堤の水理機能について示す.

## 2. 実験装置及び実験方法

実験水路は図-2に示す全長11.0m,水路幅B=0.4m,水路の深さ0.12m,勾配1/1670,の木製長方形断面水路である.なお,水路内の流量制御についてはコンピュータによる自動制御が可能である.図-3に示す霞堤部は実験水路上流より6.3mの左岸側に設置し,開口幅L=0.6m,堰高S=0.04m,奥行き0.3m,霞堤内部の幅0.8m,霞堤と開口部のなす角度を霞堤設置角度 θ とした.また,図の霞堤内部の破線になっている部分は開口しており,そこから図-4のように三角堰へ排水している.

実験は水路内を定常流として設定流量Qを、0.006m³/s、



図-4 三角堰の様子



0.008 m<sup>3</sup>/s, 0.010 m<sup>3</sup>/s, 0.012 m<sup>3</sup>/sの4ケースとし, そ れぞれの設定流量Qに対して霞堤設置角度 θ を10°20° 30°45°60°90°の6ケース計24ケースを行った.また, 水路下流端の条件については予備実験により開口部を閉 じた状態で水路内が等流水深となるように堰上げを行った.

また、実際の霞堤においては、水害防備林が併用され ていることから、水害防備林の効果についても検討を 行った.水害防備林の実験については事前に京都府亀岡 市の霞堤内に存在する水害防備林について調査を行い、 水害防備林の密度を求め、その結果に基づいて水害防備 林の模型を作成した.水害防備林の実験は、設定流量Q を、0.006 m<sup>3</sup>/s、0.008 m<sup>3</sup>/s、0.010 m<sup>3</sup>/s、0.012 m<sup>3</sup>/sの 4ケースとし、霞堤設置角度  $\theta$  は10°90°の2ケース計8 ケース行った.

実験では、霞堤より水路外へ流出する流量を氾濫流量 qとして三角堰を用いた計測を行った. 霞堤開口部の水 深はポイントゲージを用いて開口部の上流側より下流に 向かって0.1m, 0.3m, 0.5mの3点について計測を行い, この3点での平均水深を氾濫水深hとした.また、霞堤開 口部の上流端から上流に0.6m,下流端から下流に0.6m, 計1.8mの範囲においては超音波水位計を用いて水位の計 測を行った.なお、超音波水位計のデータについては水 路左岸側を0.0mとし、右岸側に向かってy方向にy=0.01m から0.35mまで0.02m間隔で計測を行ったものを水位とし た.流速については、トレーサとしてアルミニウム粉末



を塗布したおが屑を散布し, 霞堤の表面流況についてデ ジタルビデオを用いて撮影し, その映像から連続な10コ マの静止画をキャプチャーし, その静止画をインタレー ス処理した後に, PIV(粒子画像流速測定法)による画 像解析を行った結果を用いて流速の検討を行った.

### 3. 実験結果及び検討

### (1) 氾濫流量と越流水深の関係

図-5は、氾濫流量qと氾濫水深hの関係を角度別に示したものである。図より、氾濫流量qと氾濫水深hの関係を角度別に見ると氾濫水深hの増加につれて氾濫流量qも増加しており、その変化は累乗近似が可能なことがわかる。

図に示した近似曲線を見ると、どの角度においても近 似曲線の傾きがほぼ等しくq∝h<sup>1.5</sup>という関係で表される ことがわかる.これは、開口部より霞堤内部へ流入する 流れが、霞堤開口部付近で常流から射流となり限界水深 が表れているため、段落ち式と同様な表示が可能なこと を示している.そこで、この関係を用い氾濫流量qの評 価式について検討を行う.氾濫流量qと氾濫水深hの関係 を段落ち式と同様に表示すると次式のように表される<sup>3</sup>.

$$q = CLh^{1.5} \sqrt{g} \tag{1}$$



図-8 氾濫流量の実験値と計算値の比較

ここに、Cは流量係数、gは重力加速度である. 霞堤の 氾濫流量qは図-5からわかるように、霞堤の設置角度の 影響が最も大きいと考えられる. そこで、流量係数Cを 決定するパラメータとして相対水深h/Lsin θ と相対開口 幅Lsin θ /Lの2ケースを仮定して検討を行った. このと きの流量係数Cはそれぞれ次式で表される.

$$C = f(h / L \sin \theta)$$
(2)

$$C = f(L\sin\theta/L) \tag{3}$$

図-6は相対水深の場合において、実験によって得られた値を用いて計算した流量係数Cと相対水深のパラメータとの関係を示したものである.図より、近似曲線を求めると次式が得られた.

$$C = 0.1 \cdot \left(h / L \sin \theta\right)^{-0.3} \tag{4}$$

# $R^2 = 0.662$

図-7は相対開口幅の場合において、実験によって得られた値を用いて計算した流量係数Cを角度ごとに平均した値を各角度の流量係数Cとして、相対堰長のパラメータとの関係を示したものである.ただし、相対開口幅のパラメータは設定流量Qに関わらず決まる値であり、 霞 堤設置角度ごとの流量係数の相対誤差が10%以下であったので角度ごとに平均した流量係数を用いた.図より、流量係数CとLsin θ/Lは、関数で表されることがわかる.この関数について近似式を求めると次式が得られた.

$$C = 0.7 \cdot (L\sin\theta/L)^3 - 0.4 \cdot (L\sin\theta/L)^2 + 0.3 \cdot (L\sin\theta/L)$$
(5)

$$(E \sin \theta / E)$$
  
 $R^2 = 0.996$ 

図-8に、式(4)、式(5)より得られた流量係数Cと実験 より得られた氾濫水深を用いて計算した氾濫流量をQ<sub>cal</sub>、 実験によって得られた氾濫流量をQ<sub>exp</sub>とした場合の関係 を示す.この図より式(5)が式(4)より実験値Q<sub>exp</sub>を再現 していることがわかる.このことより、相対水深より相 対開口幅の方がより氾濫流量を精度良く算定できる.



### (2) 霞堤周辺の水位変化

図-9は霞堤開口部上流端をx=0.0m,開口部下流端を 0.6mとし、左岸側から右岸側に向かってy=0.03mの位置 における水位を超音波水位計で計測した結果について示 したものである.ただし、どの設定流量についても変化 の傾向が同じであったので設定流量が0.012 m³/sの場合 についてのみ示す. 図より, 霞堤の設置角度が小さくな ると、氾濫流量が減少するため霞堤前面部での水位が上 昇していることがわかる. これは, 図-10に示すように 霞堤内部へ進入した流れが図のように霞堤を沿って水路 内に戻ってくる流れと、そのまま霞堤外部へ流出する流 れに分かれる. この水路内に戻ってくる流れは霞堤設置 角度が小さくなるほど大きくなるため、霞堤前面部にお いて流れが堰上げられ水位が上昇したものと考えられる. また、水位の最も高くなる位置を霞堤設置角度別に見る と、霞堤設置角度 $\theta$ =10°の場合で約0.1m、 $\theta$ =20°で約 0.2m, θ=30°で約0.3m, θ=45°で約0.45m, θ=60°で 約0.5m, θ=90° で0.6mというように,水位が最大とな る位置は霞堤設置角度が大きくなるほど下流側へ移動す るという特徴がある.



#### (3) 霞堤周辺の流速変化

図-11は設定流量がQ=0.012m<sup>3</sup>/s, 霞堤設置角度がθ =90°の場合のPIVによる流速の可視化の結果である.こ の図の破線で囲った位置について, 設定流量が Q=0.012m<sup>3</sup>/sにおける霞堤設置角度別の流速の検討を 行った. 図-12は破線で囲った部分について、下流へ向 かう流れを正とした場合のx方向流速成分をU, 左岸側に 向かう流れを正とした場合のv方向流速成分をVとしたと き、霞堤開口部の流速を霞堤設置角度別に示したもので ある.X軸については霞堤開口部上流端をX=0.0mとし下 流へ向かう距離とする.図より,流速Vの霞堤設置角度 *θ*=10°20°30°の下流側では流速が負となっている. これにより前項の霞堤周辺の水位変化で述べたように、 霞堤内部に広がった流れが霞堤に沿って水路内に戻って くる流れがあるということを確認することができた.次 に霞堤設置角度別に流速を見ると霞堤設置角度が小さく なると全体的に流速U, Vは小さくなっていることがわか る. このことより、 霞堤設置角度が小さくなると霞堤よ り水路内に戻ってくる流れが大きくなり、その結果によ り霞堤前面部での流速が低下している. また, 霞堤設置 角度別に流速Vが最大となる位置を見ると、霞堤設置角 度θが10°20°30°45°60°90°と変化すると流速Vが 最大となる位置が0.1m, 0.15m, 0.2m, 0.2m, 0.25m, 0.35mと下流側へ移動している.流速Vが最大になる位置 より下流側では流速Vは減少しているということから、 霞堤に沿って水路内に戻ってくる流れの影響がその位置



図-13 霞堤と併用されている水害防備林



以降大きくなっている. つまり, 霞堤設置角度が小さく なると霞堤に沿って水路内に戻ってくる流れの強さが大 きくなると言える. 実際の霞堤でも霞堤前面部で水深の 減少が生じているとすれば, 洪水時に河川の流量や流速 が増加している状態において, 通常の堤防であれば浸透 圧による堤体の破壊や水の流れによって堤体が侵食され るのに対し, 霞堤の前面部では流速が低下しているとい うことから堤防の侵食被害が減少しているのではないか と考えられる.

### (4) 水害防備林の効果

京都府亀岡市に現存している霞堤には図-13のように, 霞堤と水害防備林が併せて設置されている.そこで, 霞堤に水害防備林が設置されている場合と設置されていな い場合において氾濫流量,水位,流速についてどのよう な影響が表れるかの検討を行った.

水害防備林の模型を作る際に前述したように現地調査 を行い水害防備林に使用されている樹木の太さ,水害防 備林の密度について計測をおこなった.現地調査の結果 水害防備林に用いられている樹木は竹であり,直径は平 均0.1m,密度は1㎡あたり約6本程度であった.この結果 より,縮尺を1/100と想定した模型を霞堤設置角度が



図-15 水害防備林の有無による氾濫流量の比較



図-16 水害防備林の有無による水位の比較

10°90°の2ケースについて作成した.この模型を図-14のように設置して実験を行った.

図-15はx軸に設定流量Q, y軸に氾濫流量gを示し,水 害防備林の有無による氾濫流量qの比較を行ったもので ある.また、水害防備林を設置した場合の霞堤設置角度 が θ=10°90°の実験結果を10Y,90Y,水害防備林を設置 しない場合の霞堤設置角度がθ=10°90°の実験結果を 10N,90Nとしている.図より、霞堤設置角度が10°の場 合において氾濫流量はあまり変化が見られないことがわ かる。霞堤設置角度が90°の場合において氾濫流量は水 害防備林を設置している方が10%ほど減少している.こ れは、霞堤設置角度が10°の場合において、水害防備林 が無い場合では図-14の丸で囲った部分で常流から射流 へ遷移するのに対し、霞堤設置角度が90°の場合の水害 防備林が無い場合では丸で囲った部分で常流から射流へ 遷移する. このため霞堤設置角度が10°の場合において は水害防備林の無い部分で常流から射流へ遷移するため に氾濫流量に影響が無いことに対し、霞堤設置角度が 90°の場合においては水害防備林の内部で常流から射流 へ遷移するため、水害防備林の影響により常流から射流 へ遷移する位置が変化することにより氾濫流量に影響が 出たと推測される.

図-16は超音波水位計による水位の計測結果である. 計測位置については図-9と同様の位置について計測をお こなった. 設定流量はQ=0.012 m<sup>3</sup>/s,凡例については 図-15と同様とする. この図より,霞堤設置角度が10°



図-17 水害防備林の有無による流速の比較

においてはおよそ0.15mから0.40m,90°の場合において はおよそ0.45mから0.60mの間で水害防備林を設置してい るほうが水位は高くなっている.これは,水害防備林を 設置した場合に水害防備林によって霞堤内部へ流れが流 入しづらくなるため,流れが水害防備林によって堰上げ られ水位が高くなっている.このことより,霞堤の設置 角度 θ が10°90°の場合,水害防備林の設置前と設置後 において霞堤前面の水位は高くなっているのに対して, 氾濫流量qは10°の場合にはあまり変化が無く,90°の 場合には10%ほど減少している.これより,霞堤の設置 角度が10°で水害防備林が設置されている場合において は多少の水位変化では氾濫流量は変化しないということ が言える.

図-17は図-12と同様に流速U, Vについて比較を行った ものである. ただし、凡例については図-.13と同様とす る.図より、霞堤設置角度が10°の場合、流速Uは水害 防備林を設置している方が上昇している. 流速Vにつて は、水害防備林を設置している方が低下している. 霞堤 設置角度が90°の場合はについて流速U, Vは共に水害防 備林を設置しない場合に比べ低下している. このことよ り、水害防備林を設置することによって、流速Vは霞堤 設置角度10°90°のどちらの場合においても減少してい るということから、霞堤内部へ流入する流れが減少して いるということがわかる.以上のことより、水害防備林 は霞堤内部に流入する流れを減少させる効果があること が明らかとなった.しかし、本研究では水害防備林につ いて幹のみを模型として検討を行ったが、実際の水害防 備林は幹に枝や葉が生えており、さらに地面にはさまざ まな雑草などがあることから、さらに大きな抵抗がある ことが予測される. また, 水害防備林は氾濫する水の勢 いを弱める効果以外に上流から流れてくる流木や土砂が 堤内地に流入しないようにする、いわゆる濾過機能に よって背後地を保護するなどの機能が指摘されており4), 水害防備林についてはさらに検討する必要がある.

4. まとめ

本研究では霞堤を含む河道を対象とした水理実験と水 害防備林が霞堤周辺流れへ及ぼす影響について水理実験 を行い霞堤の水理機能について検討を行った.その結果 以下のことがわかった.

- 2) 氾濫流量Qと氾濫水深hの関係には段落ち式と同様 な関係が見られ、Q∝h<sup>1.5</sup>で表される.
- 3) 霞堤へ流入した流れが霞堤に沿って水路内へ戻ってくる流れが存在し、その流れの強さは霞堤の設置角度が小さいほど大きくなる.
- 4) 霞堤前面部の水深は霞堤を沿って水路内へ戻って くる流れの影響により堰上げられるため、霞堤設 置角度が小さくなるほど高くなる.
- 5) 霞堤前面部の流速は霞堤を沿って水路内へ戻って くる流れの影響により, 霞堤設置角度が小さいほ ど小さくなっている.
- 6) 水害防備林の効果により、霞堤内部へ流入する流れは減少する.その結果、霞堤設置角度が90°の場合において水害防備林を設置している方が氾濫流量は減少する.

今後は、実際に利用されている京都府亀岡市を対象 に2次元平面の氾濫解析を行い霞堤からの氾濫過程や氾 濫後の還流機能などについて検討を行う予定である.

### 参考文献

- 1) 高橋裕:河川工学, 財団法人東京大学出版会, pp198-235, 1993.
- 2) 鬼束幸樹・秋山壽一郎・常松智博・武田雅俊:接近流が常流 の場合の横流出を伴う流量式,水工論文集,第48巻(1), pp529-534,2004.
- 3) 土木学会水理委員会編:水理公式集[平成11年版],丸善㈱, pp249-253, 1999.
- 4)林健二郎:水害防備林,京都大学防災研究所研究集会(一般)15K-08「伝統的河川工法の特徴とその課題」,pp48-54,2004.

(2006.9.30 受付)