

平成16年7月福井豪雨における 足羽川の洪水災害と洪水流解析について

ANALYSIS OF FLOOD IN THE ASUWA RIVER
DUE TO THE HEAVY RAINFALL IN FUKUI ON JULY 2004

廣部英一¹・田安正茂²・榎田真也³・宇治橋康行⁴・玉井信行⁵
Eiichi HIROBE, Masashige TAYASU, Shinya UMEDA, Yasuyuki UJIHASHI and Nobuyuki TAMAI

¹正会員 博士(工学) 福井工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒916-8507 福井県鯖江市下司町)

²正会員 修士(工学) 福井工業高等専門学校助手 環境都市工学科 (〒916-8507 福井県鯖江市下司町)

³正会員 博士(工学) 金沢大学大学院助手 自然科学研究科 (〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20)

⁴正会員 工博 福井工業大学教授 建設工学科 (〒910-8505 福井県福井市学園3-6-1)

⁵フェロー会員 工博 金沢大学大学院教授 自然科学研究科 (〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20)

This report presents the results of the research on the actual condition of the flood damage due to the heavy rainfall in Fukui on 18th July 2004. The flood of the Asuwa River was simulated by solving the two-dimensional depth-averaged equations in a generalized curvilinear coordinate. Three kinds of the discharge curves were adopted for the upstream boundary conditions. Fairly good agreements were obtained at a flow rate of approximately 2300 m³/s between the numerical results and the observations for the hydrographs and the profile of the maximum water level. We also examined the effects of the bridge piers, the meandering flow of the river and the drainage pump operations on the water level and the flow velocity. The results indicate that the water level comes up in the section where the bridges stand close together. The curved channel also affects the water elevation around the dyke break point about 200 m upstream from the section. The water elevation due to these effects was estimated to be about 55 cm.

Key Words : Flood damage, flood simulation, water elevation, bridge pier, curved channel

1. はじめに

平成16年7月18日に、福井県嶺北地方を中心として梅雨前線の活動による豪雨が発生した。近年における福井県の豪雨災害としては、人的被害・浸水家屋数ともに従来の記録を大きく超過した規模となり、公共施設の被害も多大であった。福井豪雨による被害は、上流山間部における土石流による被害と下流部における河川堤防の越水・破堤による被害が同時に発生したことに特徴がある。

足羽川は、九頭竜川の2次支川で、集中豪雨の発生した上流山間部から扇状地を流下して沖積平野（福井平野）を形成する。勾配が緩くなった扇状地末端からは福井市街地の中心部を2分するように蛇行しながら流れる。破堤は、市街地で発生した。上流山間部からの流入量は規模の大きいものであったが、破堤に関して、幾つかの状況が福井県内で話題となった。すなわち、破堤地点から九頭竜川の1次支川日野川合流点までの約4.6kmの区間

には橋梁が12本架設されていること、破堤地点は蛇行の外湾部であること、破堤地点の対岸で内水河川の排水ポンプが稼働していたことなどで、河川管理と水防活動に対する厳しい議論があった。

本論文は、福井市街地に甚大な被害を及ぼした足羽川の破堤による洪水災害の実態と洪水流の再現について報告する。

2. 九頭竜川流域及び足羽川の概要

九頭竜川流域は、本州日本海側のほぼ中央にあり、福井県嶺北地方に位置している。流域には、福井市をはじめ福井県嶺北地方の大半と岐阜県白鳥町の一部が含まれている。九頭竜川の2次支川である足羽川は、流域の規模からは中小河川の分類となるが、表-1に示すように工事実施基本計画で策定されている治水安全度は150年であり、他の規模の河川に比べて大きい。これは写真-1に

表-1 九頭竜川水系における治水計画と足羽川高水流量の改定の経緯

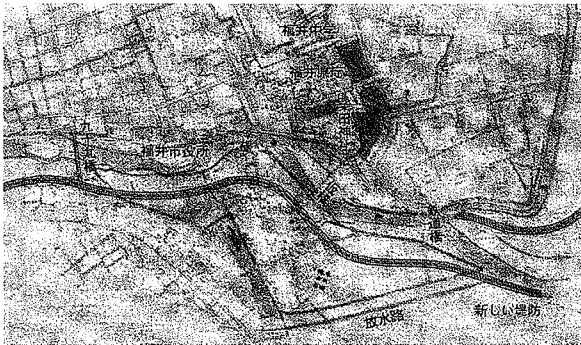
治水計画	工期	着手の契機	工事内容	計画高水流量 (基本高水流量)	治水安全度
九頭竜川 第一期改修計画	明治33年～ 明治44年	明治29年河川法の制定	九頭竜川・日野川・足羽川に連続 堤を築造	695m ³ /s	
九頭竜川 第二期改修計画	明治43年～ 大正13年	明治時代の4大洪水	日野川の支川筋への逆流被害防止	695m ³ /s	
九頭竜川 再改修計画	昭和31年～ 昭和35年	昭和28年9月台風13号出水	低水路の浚渫、高水敷の河積拡大 と堤防嵩上	890m ³ /s	
改修変更計画	昭和35年	昭和34年8月台風7号及び9月台 風15号	九頭竜ダム建設による洪水調節	890m ³ /s	
九頭竜川水系工事 実施基本計画 (第1回改定)	昭和43年	昭和40年の奥越豪雨	上流ダム群による洪水調節	700m ³ /s (1,100m ³ /s)	1/80
九頭竜川水系工事 実施基本計画 (第2回改定)	昭和54年～ 現在	昭和47年9月台風20号出水及び 昭和50年8月台風6号出水	2日雨量の超過確率1/150年で計 画、日野川五大引堤などの促進、 足羽川ダム建設の検討	1,800m ³ /s (2,600m ³ /s)	1/150

表-2 九頭竜川水系主要河川の緒元

河川名	流域面積(km ²)			流路延長 (km)
	山地面積	平地面積	合計	
九頭竜川(本川)	2280.0	650.0	2930.0	116.0
日野川(1次支川)	962.3	313.2	1275.5	71.5
足羽川(2次支川)	356.8	58.8	415.6	61.7



写真-1 福井市街地を貫流する足羽川(九頭竜川流域誌に加筆)



(野理五家文書・福井県文書館蔵)

図-1 足羽川の左岸堤防新築の設計図と放水路

示すように、福井市街地の中心部を貫流することにある。福井市街地は、藩政時代から3大河川と呼ばれる九頭竜川・日野川・足羽川に囲まれた地形に発達したため、一旦破堤した場合の被害は甚大である。このため、明治33年から始まる九頭竜川改修計画においても、規模の異なる3大河川に水系一貫した連続堤が築造された。表-2に九頭竜川水系主要河川の流域面積と流路延長等を示す¹⁾。

写真-1で見ると、足羽川は天神橋付近を扇央として緩やかな扇状地を形成して流下し、足羽橋付近が扇端部となる。ここから下流は河床勾配が緩くなり、市街地中心部の河道では数ヶ所の蛇行が見られる。市街地中心部より下流では明治以降に大規模な捷水路工事が2ヶ所で行われている。福井市街地は藩政時代の城下町であることから、近世以降に河道の付け替えが行われた。例えば、図-1の古地図によれば、破堤地点は旧河道を改修した放水路上に位置しており、破堤後に行われた堤体地盤の調査によれば下部に砂礫層が存在している。

3. 豪雨による浸水区域と足羽川の破堤状況

図-2に、浸水等による被災箇所を示す²⁾。足羽川の全流域、日野川支川の浅水川流域及び九頭竜川本川上流域の大野盆地の多くの箇所で破堤浸水した。図-3は福井市街地の浸水区域であるが、みのり地区と春日地区での浸水は足羽川破堤による外水浸水で、その他の地区は内水浸水である。このため、浸水区域によって、浸水開始時刻、浸水深、土砂堆積等の状況等、被害状況は大きく異なる。また、朝方の内水浸水に加えて午後には外水浸水を被った地区もある。

写真-2は、破堤地点での越流の状況で、撮影は破堤時刻とされる午後1時34分から約15分前である。

写真-3は、破堤後の状況で、撮影は午後3時頃である。奥に写っている堤防断面から旧堤防と嵩上げた現堤防の境界面が分かる。手前は旧堤防のみが残っている。

4. 洪水流解析による流況の再現

(1) 洪水流モデル

日野川合流点から天神橋までの約12.6km区間を対象にして、一般曲線座標系を用いた平面2次元洪水流解析を行った³⁾。なお、この区間には橋梁が多数存在するので橋脚による抗力をモデルに取り込み、また、足羽川へのポンプ排水もモデルに組み込んだ。

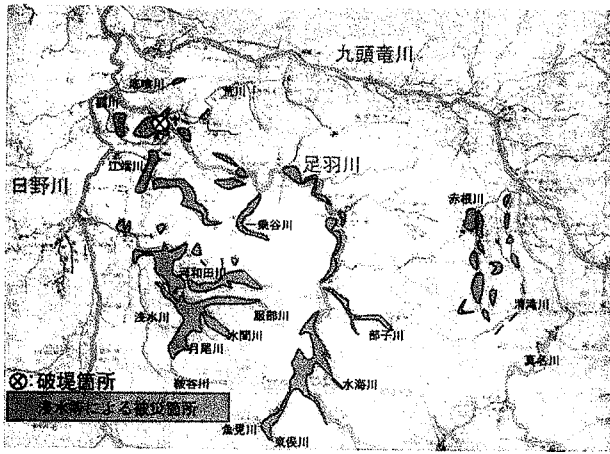


図-2 浸水等による被災箇所(第23回九頭竜川流域委員会資料)

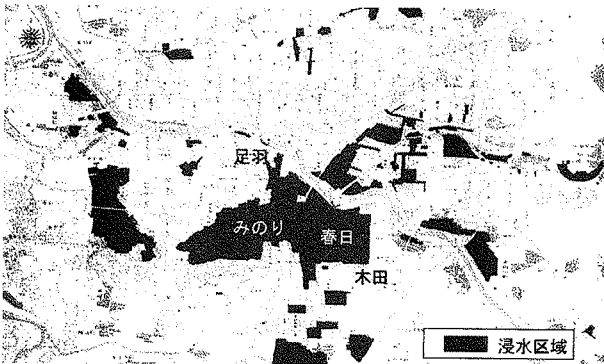
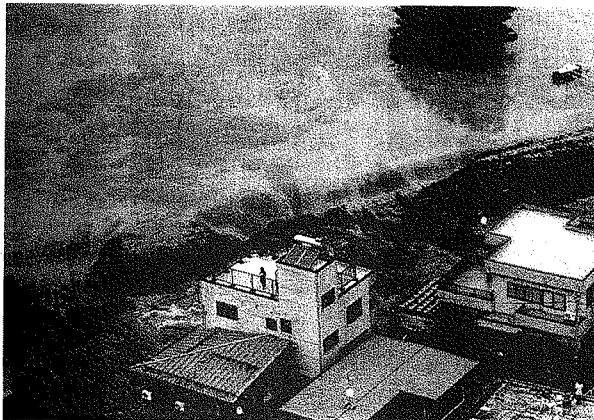


図-3 福井市街地の浸水区域(第23回九頭竜川流域委員会資料)



(午後1時20分頃)

写真-2 破堤地点での越流の状況(撮影：中日新聞社)



(午後3時止頁)

写真-3 破堤地点での破堤直後の状況(撮影:土木学会調査団)

(2) 河道資料と上・下流の境界条件

足羽川は直轄区間外の指定区間であるため河道資料が乏しかったが、平成16年3月に距離標を再設置して河道測量が行われた。また、平成16年7月福井豪雨の直後に日野川との合流点から板垣橋までの6.0km区間で再度測量が実施された。解析で用いた横断面は、合流点から6.0kmまでは約50m間隔、6.0kmから12.6kmの天神橋までは3月測量の約200m間隔であり、橋梁部を加えて横断面数164である。横断面方向の格子は100分割とした。

上流の境界条件は、天神橋で流量を与えた。図-4に国土交通省公表の流量時系列の推定値を白丸で示す。国土交通省公表の流量時系列の推定値と水位時系列の観測値から作成した水位-流量曲線を図-5に白丸で示す。一般に河床勾配の小さい河川では水面勾配の変化が無視できずに反時計回りのループを描くが、急流河川ではほぼ一価の関係となる。観測例では時計回りのループを描くことがあり、図-5でもこれが見られた。しかし、次の3点が特異である。①例えば昭和56年洪水時にも時計回りのループが観測されたがループは扁平であるのに比べて厚みが大きく、同じ水位で増水期と減水期での流量差が大きい。②洪水のピーク時に8の字のループとなる。③過去の洪水に比べて平成16年7月洪水の流量は、水位の増加量から外挿される流量よりもかなり大きい。

洪水のピーク時に8の字のループとなることから、次の試算を行った。第1の方法は、平成16年7月洪水でのピーク値（水位が24.04mの時、流量が2320m³/s）が流下する河床勾配を等流計算で求め、観測された水位時系列に応じた流量時系列をこの河床勾配から算出した。これを、図-4の破線で示す。第2の方法は、観測水位は変えずに流量を試行錯誤的に変化させて、8の字のループを図-5の黒丸のように扁平となるようにH-Q曲線を補正することにより、水位時系列の観測値から流量時系列を算出した。具体的には10時30分から13時30分の流量を変化させた。これを、図-4の黒丸で示す。

図-4によると、等流計算による流量時系列とH-Q曲線のループ補正による流量時系列はピーク近傍でほぼ一致している。また、国土交通省公表の流量時系列に比べてピーク出現時刻が40～50分程度遅れることになる。

これらのことから、図-4に示す3つのCaseで解析を行い比較検討した。Case1：国交省公表の流量時系列（図中の白丸），Case2：観測水位を基に等流計算で流量を推定した流量時系列（図中の破線），Case3：H-Q曲線で8の字ループを補正した流量時系列（図中の黒丸）。

また、それぞれのCaseに対して、最大流量が2500, 2400, 2320, 2200, 2100, 2000m³/sとなるように変化させた流量時系列を作成して検討を行った。

下流の境界条件は、日野川合流点の約1km上流で観測された狐川外水位と約1km下流で観測された底喰川外水位から内挿補間して、日野川合流点の水位時系列として与えた。

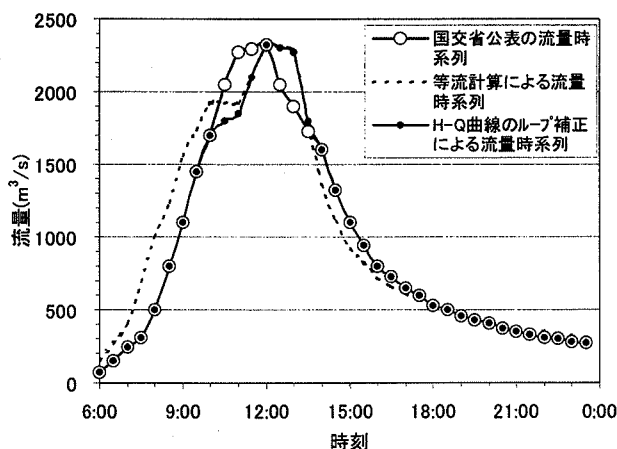


図-4 流量時系列

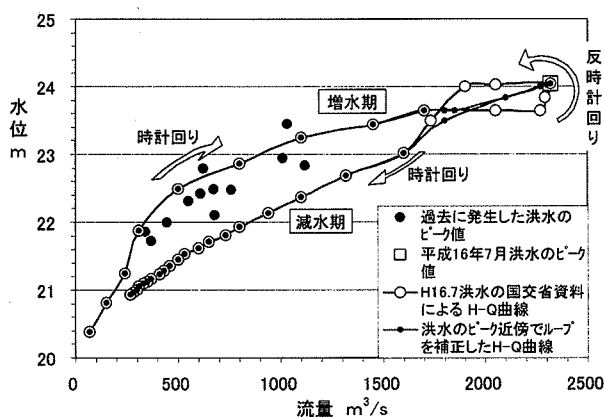


図-5 水位-流量曲線

(3) 対象区間内の水位記録と流出量

九十九橋直下右岸（約3.1km地点）の水位と破堤地点対岸の荒川外水位（約4.5km地点）を観測水位の時系列として利用できた。また、洪水直後に合流点から天神橋までの兩岸堤防に残る洪水痕跡の測量を行った。これらを解析結果の適合性の検証に用いた。

支川流入量は、破堤地点対岸の荒川の流量が大きい。荒川の現在の疎通能力は約100m³/sであり、7月の豪雨時にはこれを越えた。また、足羽川からの逆流防止のために、午前10時11分に水門が全閉され、41.7m³/sのポンプ排水が午後3時30分まで継続された。この時間帯は図-4に見るように足羽川の流量が2000m³/sを越えた時間帯である。また、破堤地点の上下流では、12時頃から越流が始まったが、越水深と越流した堤防の長さから概算すると、破堤時刻までの最大越流量は50～100m³/s程度である。なお、合流式下水道ポンプ場の雨水ポンプが5箇所稼働し、それぞれの雨水ポンプから2～5m³/s程度の排水があった。

(4) 観測値との適合性

a) 水位時系列との適合性

上流の境界条件として、前記の3つのCaseで解析を行い比較検討した。国交省公表の流量時系列であるCase1

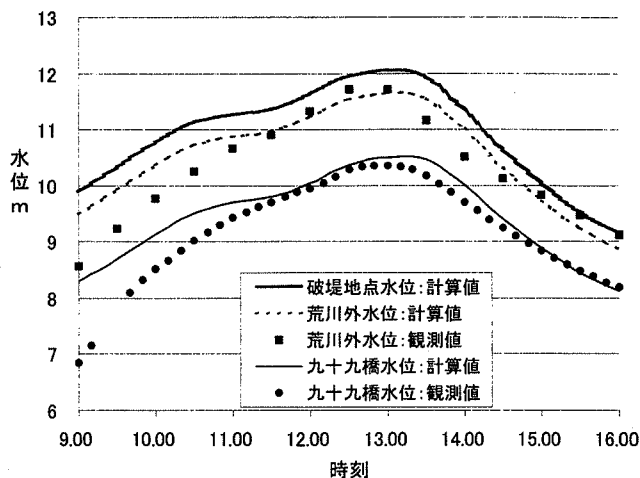


図-6 計算水位と観測水位の時系列 (Case2の場合)

の場合、下流での計算水位は観測水位に比べて40分程度早く最高水位が表れた。Case2とCase3は、ピーク近傍では上述のようにほぼ同様な流量時系列であるが、立ち上がり部で少し異なる。図-6はCase2の流量波形で最大流量2320m³/sの場合であるが、荒川外水位の計算値は低めで、九十九橋の計算値は高めである。なお、図-6では、低水路の粗度係数は全て0.035とし、高水敷の粗度係数は合流点から6.0kmまでは0.045、6.0kmから天神橋までは0.060とした結果が示されている。

粗度係数の設定は、最大流量を変化させた流量時系列を用いて、幾つかの組み合わせで検討を行ったが、上記の数値が比較的適合した。低水路の粗度係数は若干大きめとなったが、砂州の植生繁茂を考慮すると、許容範囲内であろう。粗度係数を小さくすると最大流量は大きくなるが、この場合には河道の全区間で洪水痕跡と適合させるためには、上流部の扇状地区間の低水路の粗度係数を下流よりも小さくする必要がある。足羽川の河床状況から判断すると不自然であった。これらのことから、天神橋を通過した洪水のピーク流量は2200～2300m³/s程度であったと推定される。

破堤地点（日野川合流点より約4.6km）での堤防天端高さは、平成16年3月の測量では左岸で11.67m、右岸で11.46mである。破堤した左岸側の水位は、図-6では一番上の実線がこれを示しており、荒川外水位はその対岸の右岸側の河川水位を示している。左岸側で水位が堤防天端を超えていた時間は、1時間40分程度であると予測でき、越流の最終段階が破堤時刻に対応している。

b) 洪水痕跡との適合性

図-7は、Case2で最大流量2320m³/sが天神橋を流下した場合の再現で、破堤地点での水位が最高となった午後1時10分の水位縦断面図である。図には、右岸と左岸の計算水位、及び右岸と左岸の洪水痕跡が示されている。粗度係数と最大流量の組み合わせで幾つかの検討を行ったが、洪水痕跡に近い計算水位の例を示した。なお、最大流量2200m³/sとした場合にも、洪水痕跡から大きく相違

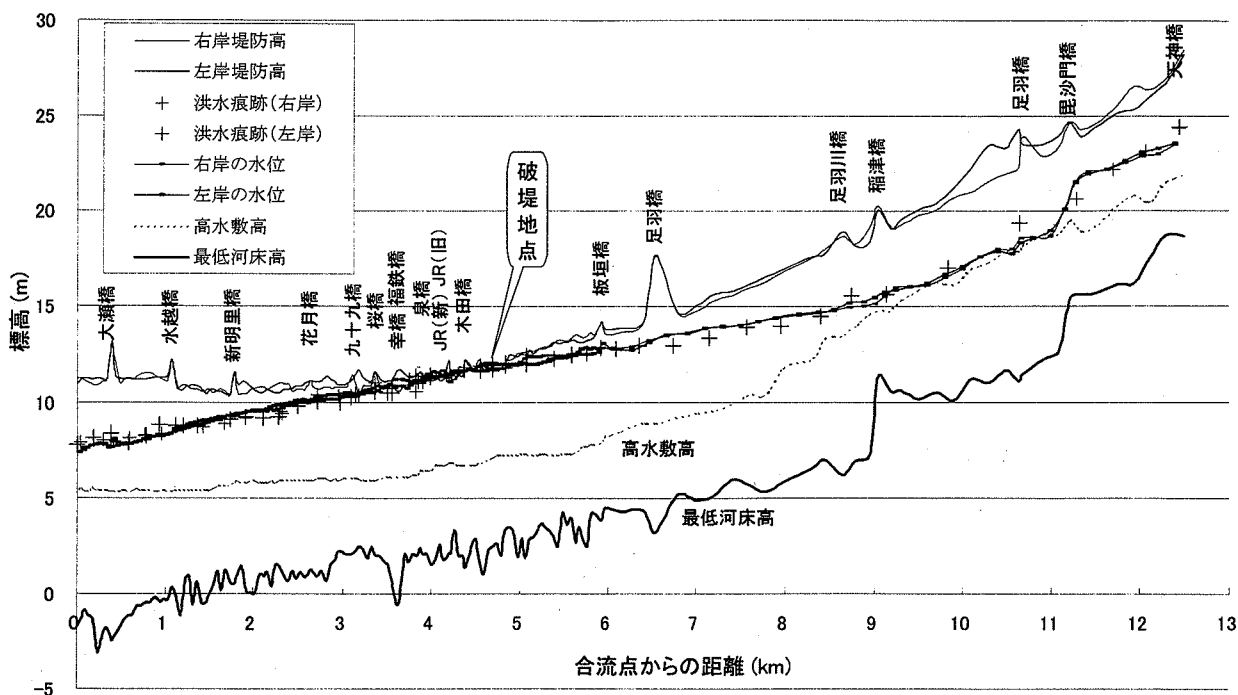


図-7 洪水痕跡水位及び右岸と左岸の計算水位

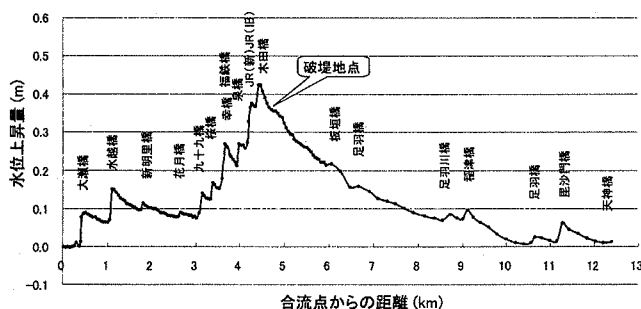


図-8 橋脚によるせき上げ水位

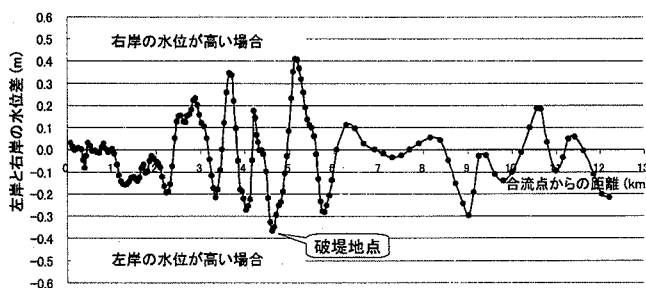


図-9 蛇行による右岸と左岸の水位差

しなかった。水位を縦断的に見ると、破堤地点から九十九橋までは最高水位が堤防高に迫っているが、上流では最高水位と堤防高までの差があり、下流の日野川との合流点近くでも同様に余裕があった。

(5) 流況の再現

a) 橋脚によるせき上げ水量

足羽川では、大瀬橋から木田橋までの約4km区間に、12本が架設されている。図-8は橋脚が有る場合と無い場

合の水位を、図-6～図-7と同じ条件で計算を行って水位差を示した。これによると、1箇所の子き上げは最大で10cm程度であるが、九十九橋から木田橋までの橋脚密集区間での累積が大きい。橋脚によるせき上げの累積による水位上昇量が最大になる地点は木田橋の直上流であり、破堤地点の4.6kmでは36cm程度のせき上げが生じている。福井豪雨の後に、破堤の原因としてJR橋にゴミ等が付着したことによるせき上げが議論になったが、図-8によれば、JR橋で極端にせき上げが大きくなるわけではなく12本の橋梁によるせき上げが累積されたものである。なお、橋脚の幅と長さ及び河道に対する橋梁と橋脚の角度は現地測定を行い、抗力係数は0.8とした。

足羽川における40cm程度の水位上昇量は、同時に行った検討によると、流量では300m³/s程度に相当し、最大洪水流量の1割以上である。

b) 蛇行による左岸と右岸の水位差

図-9は、蛇行による左岸と右岸の水位差を示す。これによると、4.6km付近では右岸よりも破堤地点である左岸の水位の方が約40cm高い。図の表示は左右岸の水位差であるので、河道中央の水面からは半分の約20cmの水位上昇となる。破堤地点では、橋脚による水位上昇が35cm程度であるので、これを加えると55cm程度の水位上昇量である。

c) 内水河川排水ポンプの影響

破堤地点のほぼ対岸に位置する荒川排水ポンプの稼働による破堤点への水位上昇量は、洪水のピーク時には8cm程度であった。内水河川の荒川は越流しており、水門閉鎖後の排水ポンプの稼働は適正な操作であったと思われる。

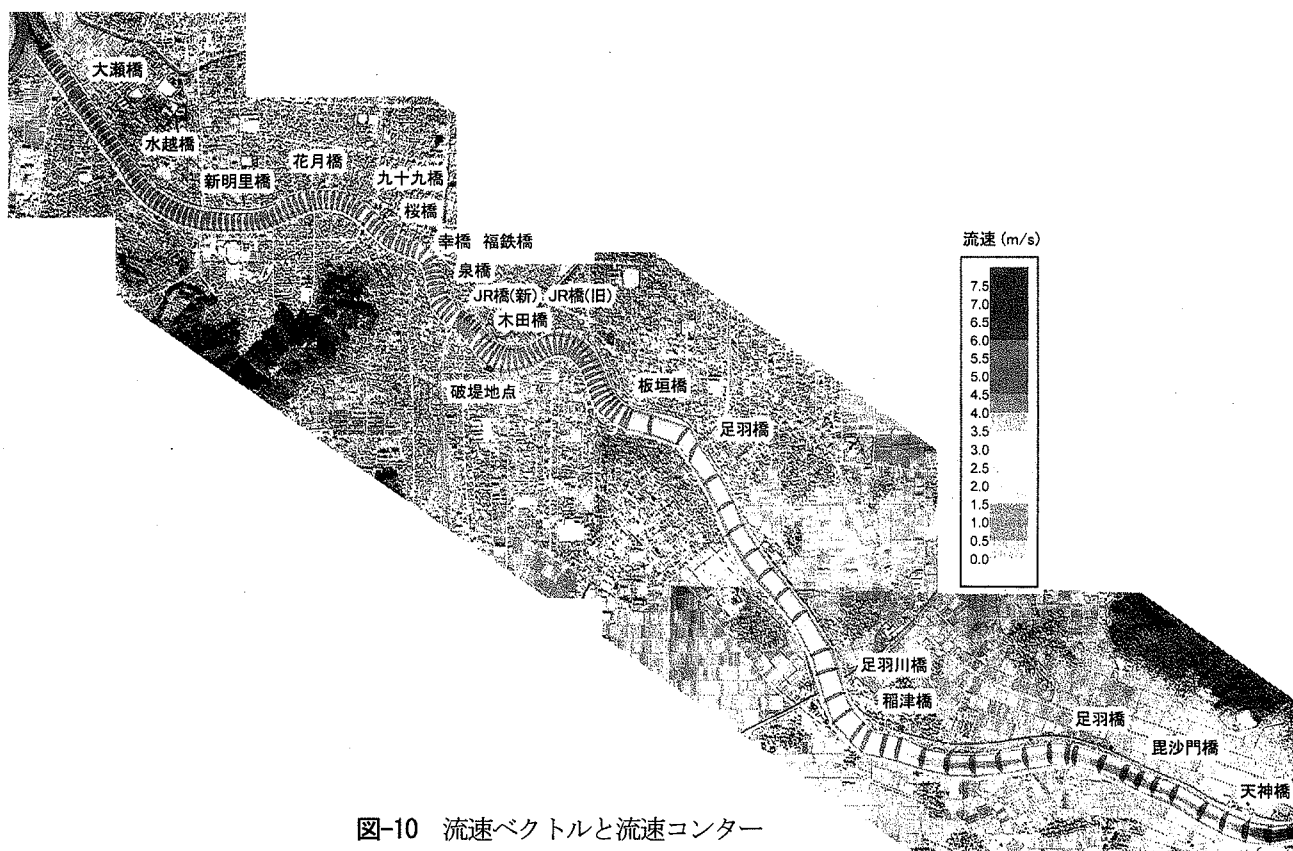


図-10 流速ベクトルと流速コンター

d) 流速ベクトルと流速コンター

図-10に、破堤地点で計算水位が最高となった午後1時10分における日野川合流点から天神橋までの流速ベクトルと流速コンターを示す。これによると、扇頂部の天神橋では流速が7.5m/sを越え、毘沙門橋から稲津橋までの流速も4.0m/sを越えるが、これより下流は3.0m/s程度である。板垣橋から花月橋までの市街地中心部区間では川幅が狭いにも拘わらず流速が小さく2.5m/s程度であるため、図-7に示すように水位が高くなったようである。新明里橋から下流は、再び流速が増加して3.5m/s程度となる。これは、今回の豪雨では、足羽川に比べて日野川上流部の降雨が少なかったため、日野川の水位が比較的低かったためである。

図-10で注目すべきことは、破堤地点は蛇行の外縁部でありながら、堤防近傍の流速が大きくないことである。破堤地点とその上流の蛇行の曲率半径と平均流速との関係から、水位が高水敷を越えた後は流心が河道の中央付近となったためである。このことから、今回の破堤は蛇行の水衝部であることから生じたのではなく、計画を上回る流量によって水位が高くなり、これに加えて、橋脚によるせき上げ、蛇行による水位上昇、ポンプ排水による水位上昇等が重なったためと推定される。

また、破堤地点の直上流左岸には逆流が見られるが、これは、当日に観測された逆流の状況と一致する。

5. おわりに

平成16年7月福井豪雨の直後から、破堤地点の堤防や越水痕跡の現地調査、天神橋から日野川合流点までの洪水痕跡測量等を行って洪水現象を把握した。また、行政機関の協力によっても水文水理資料を利用することが出来た。これらを用いた平面2次元洪水流解析によって、豪雨時の洪水流の再現計算を行った。その結果、福井市街地に密集している橋脚、河道の蛇行、ポンプ排水等が、破堤に対してどのような影響を与えたかを検討することが出来た。このことから、数時間の越流に耐えることが出来る質の高い堤防の整備の重要性が明らかとなった。

謝辞：本研究を行うにあたり、福井県河川課、福井土木事務所、福井市及び国土交通省から貴重な資料を提供して頂きました。ここに記して謝意を表します。この調査は、土木学会北陸豪雨災害緊急調査団の調査活動の一環として、河川整備基金の助成を受けて行われました。

参考文献

- 1) 九頭竜川流域誌編集委員会：九頭竜川流域誌，2000.
- 2) 国土交通省福井河川国道事務所：第23回九頭竜川流域委員会資料，2004.
- 3) 長田信寿：一般座標系を用いた平面2次元非定常流れの数値解析 水工学における計算機利用の講習会講義集，pp. 61-76，1999.

(2005. 4. 7 受付)