

2004年福井水害における鉄道橋梁の被災原因の調査解析と今後の長寿命化方策の検討

STUDY ON THE CAUSES OF COLLAPSED BRIDGES DURING THE DISASTER IN FUKUI 2004.7 AND INVESTIGATION ON EXTENDING LIFE OF BRIDGES

石野和男¹・榎田真也²・玉井信行³

Kazuo ISHINO, Sinya UMEDA and Nobuyuki TAMAI

¹正会員 工博 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

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

³正会員 工博 金沢大学大学院教授 自然科学研究科 (〒920-8667 金沢市小立野2-40-20)

In recent years, the floods which discharge over the design discharge and the disasters of river structures due to the floods have occurred. During the disaster Fukui 2004.5 bridges collapsed. Few reports to exam the causes of that disaster could be found. For this reason, the investigation into such disaster causes and consideration of extending the life of other bridges may make a development of the technique in the river structures. In this paper, it is the final purpose to investigate the extending life of river structures based on the results of the disaster causes.

Key Words : Floods, disaster, bridge, collapse, FUKUI, extending the life of river structure, disaster causes

1. はじめに

近年,計画高水流量を超える異常出水とそれによる河川関連構造物の被災が発生している。2004年福井水害における鉄道橋梁の被災はその一例である。この被災では,7本の橋梁の内,5本の橋梁が倒壊するという稀に見る被災が生じた。このような被災原因を調査解析した報告事例は見られない。このため,被災原因を調査解析し今後の他の橋梁の長寿命化方策を検討することは,河川工学の構造物の分野における技術の発展に寄与すると考えられる。本報告では,本被災原因の調査解析を行うとともに,調査解析結果を元に異常出水に対する河川関連構造物の長寿命化方策を検討した。なお,本検討は,土木学会の2004年北陸豪雨災害調査¹⁾に一環として行われた。

2. 2004年福井豪雨の概要

福井県の嶺北地方では,2004年7月18日の0時過ぎから1時間に80mm以上の豪雨が降った。この豪雨により洪水が発生して,足羽川の天神橋観測所では戦後最高水位を測定した¹⁾。足羽川ダム工事事務所は,この水位に対

する流量は2400m³/sと発表した²⁾。本報告では,この流量を用いて検討を行った。

3. 越美北線の橋梁およびその被害の概要

図-1に越美北線の位置図を示す。越美北線は,昭和初期に建設された単線鉄道であり,その橋梁は,谷底河川である足羽川上に設置されている。第一鉄橋は,天神橋観測所の約1.5km上流に位置する。各鉄橋の桁は上路プレートガーダー形式で,支間長(桁高)は,それぞれ12.9(1.2)~25.4(1.81)mである。表-1に,越美北線の橋梁,架橋地点の河川および今回の被害等の概要を示す。このように,越美北線の橋脚の特徴は7橋中6橋が岩着の円柱であり,被害の特徴はそれらの岩着橋脚が剥れ倒壊または折損倒壊したことである。また,過去の最高水位は桁下2m程度であった。今回の被害では,本調査および写真-1に示す福井新聞社撮影の航空写真により,最高水位は桁にかかっていたことが判明している。

4. 越美北線橋梁の被害状況調査結果

(1) 第1鉄橋付近の被災状況

図-2、写真-2、3に第1鉄橋付近の被災状況を示す。
写真-3に示すように、第1鉄橋では河川中央の橋脚1本が剥れ倒壊していた。倒壊橋脚の左岸側の未倒壊橋脚周辺には護床工が施されていた。図-2、写真-4に示すように第1鉄橋の中央の桁は洪水流に流されて堤内地に流出していた。

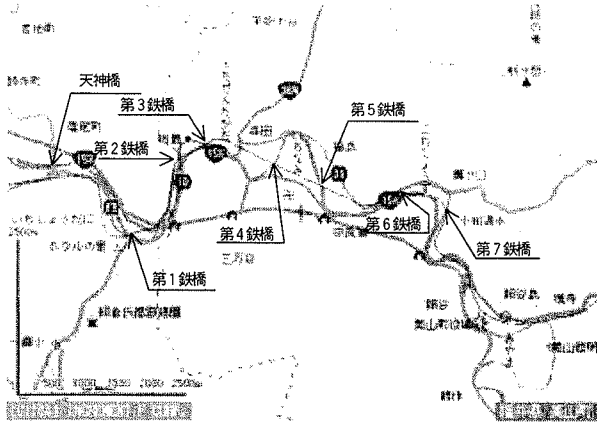


図-1 越美北線の位置図

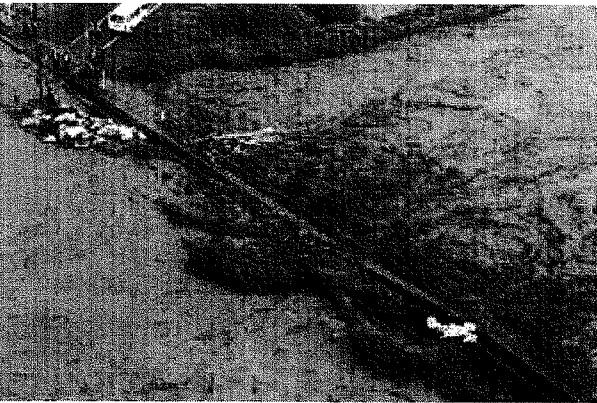


写真-1 11：34に福井新聞社により上流側から撮影された第1鉄橋の洪水作用状況

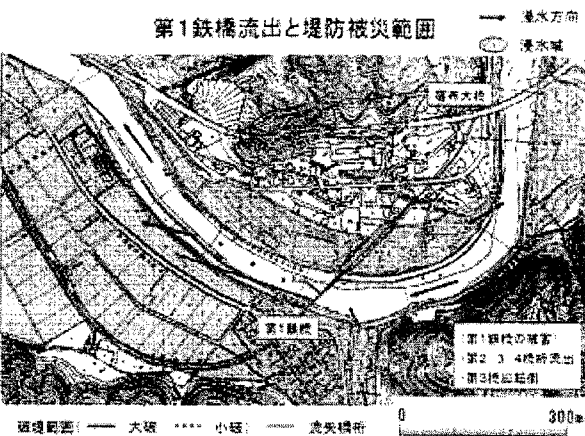


図-2 第1鉄橋付近の被災状況



写真-2 第1鉄橋付近の被災状況

表-1 越美北線の橋梁およびその被害の概要

橋梁№	第1	第2	第3	第4	第5	第6	第7
川幅(m)	108	136	75	85	74	92	58
河床勾配	1/200	未計測	1/87	1/6000	1/370	1/250	1/210
過去の最高水位(m) と発生年月	桁下2.41 昭和28.9	桁下2.64 昭和29.9	桁下1.92 昭和28.9	桁下1.67 昭和28.9	桁下1.74 昭和9.9	桁下2.11 昭和9.9	桁下2.02 不明
橋脚形状	円柱	円柱	円柱	楕円柱	円柱	円柱	円柱
基礎状態	岩着	岩着	岩着	直接基礎	岩着	岩着	岩着
桁上～基礎の高さ(m)	11.5	12.1	11.6	11.4	13.4	12.9	12.4
橋脚の被害状況	剥れ倒壊	被害なし	剥れ倒壊	洗掘倒壊	剥れ倒壊	被害なし	折損倒壊
桁流出距離(m)	247	被害なし	測定困難	174	約1500	被害なし	73

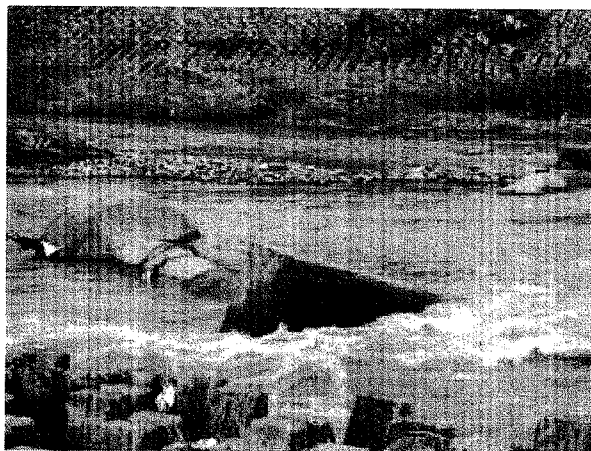


写真-3 第1鉄橋の橋脚の倒壊状況

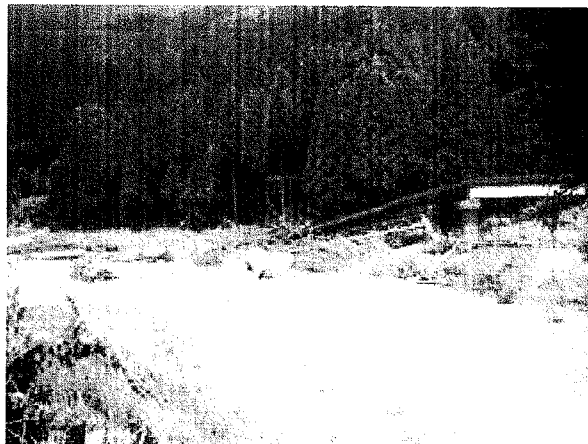


写真-5 第3鉄橋付近の被災状況



写真-4 第1鉄橋の桁の流失状況



写真-6 第3鉄橋の橋脚の倒壊状況

(2) 第3鉄橋付近の被災状況

写真-5, 6に第3鉄橋付近の被災状況を示す。写真-5に示すように、第3鉄橋では河川中央の橋脚3本が倒壊し桁は流失していた。また、第3鉄橋の左岸の道路には道路面から2m程度の高さの洪水痕跡が見られ、第3鉄橋の桁に洪水が作用したことが推測された。さらに、写真-6に示すように、第3鉄橋の橋脚はその基礎が岩盤から剥れて倒壊していた。

(3) 第4鉄橋付近の被災状況

図-3、写真-7, 8に第4鉄橋付近の被災状況を示す。

写真-7に示すように第4鉄橋では、非洪水時に流れが存在し植生が繁茂せずに低水路状になっている左岸側の橋脚2本が倒壊して、その両側の桁が流失した。流失した桁の1本は174m下流で発見された。また、第4鉄橋付近の河床は礫混じりの砂であり、さらに、第4鉄橋の橋脚は楕円柱であるとともに、橋脚の基盤は砂層であり、基礎は直接基礎であることが判った。なお、写真-8に示すように、第4鉄橋右岸側の未倒壊橋脚の下流側では2m程度の深さの洗掘孔が見られた。

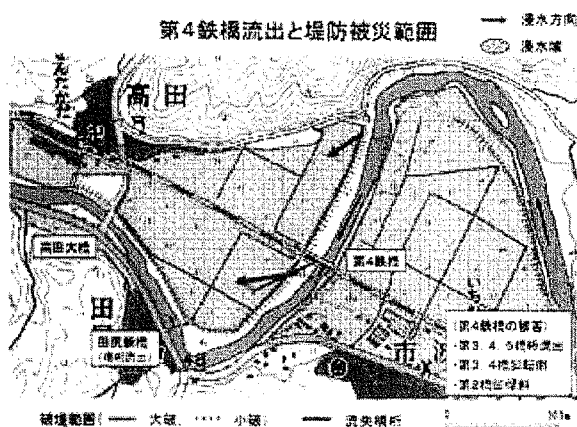


図-3 第4鉄橋付近の被災状況

(4) 第5鉄橋付近の被災状況

写真-9, 10に第5鉄橋付近の被災状況を示す。写真-9に示すように、第5鉄橋では左岸側の橋脚3本が倒壊し、それらの両側の桁は洪水流に流されて約1500m下流に流出していた。写真-10に示すように、第5鉄橋の橋脚はその基礎が岩盤から剥れて倒壊していた。



写真-7 第4鉄橋の橋脚の倒壊状況



写真-8 第4鉄橋の橋脚下流の洗掘孔の状況

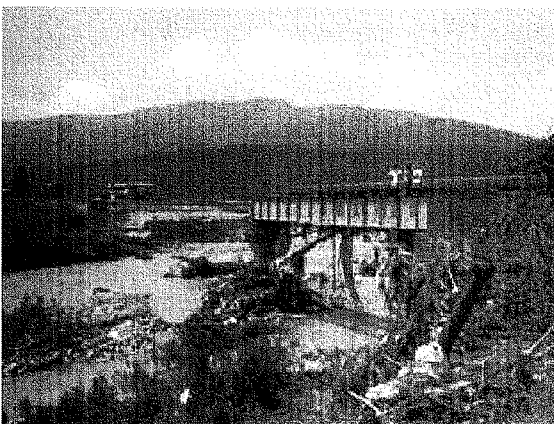


写真-9 第5鉄橋の橋脚の倒壊状況

(5) 第7鉄橋付近の被災状況

図-4、写真-11、12に第7鉄橋付近の被災状況を示す。写真-11、12に示すように第7鉄橋では河川内の橋脚3本が折損倒壊していた。また第7鉄橋の桁は洪水流により73m下流に流されていた。

(6) 第2.5鉄橋の残存状況

表-1に示すように、第2鉄橋では河幅が136mと、2番目

に長い第1鉄橋の108mよりも長いことから、桁に流体力が作用しなかったため未倒壊であると推察される。一方、第6鉄橋では河幅が92m（河床勾配：1/250）で、第1鉄橋108m（河床勾配：1/200）よりも短い。ここで、第1鉄橋では、外岸側の左岸側に堤防が築かれていて河積が狭められていたことから倒壊して、一方、第6鉄橋では外岸側の右岸側に舗装道路が築かれていてそちらに大量の流れが発生したことにより未倒壊であった可能性が高い。

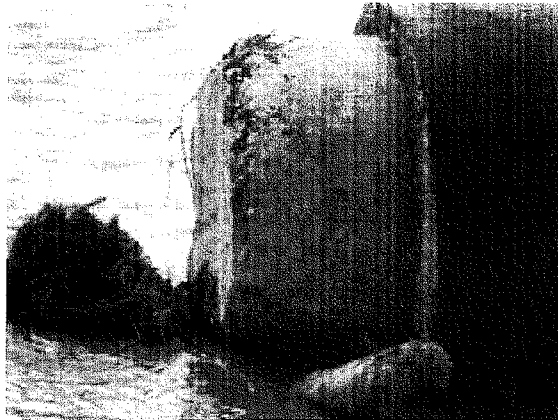


写真-10 第5鉄橋の橋脚の倒壊状況

第7鉄橋流出と堤防被災範囲

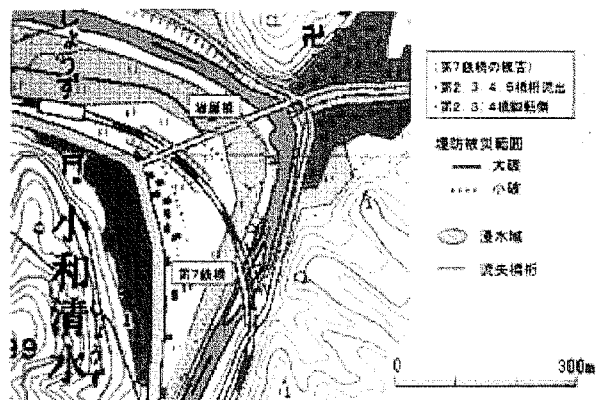


図-4 第7鉄橋付近の被災状況

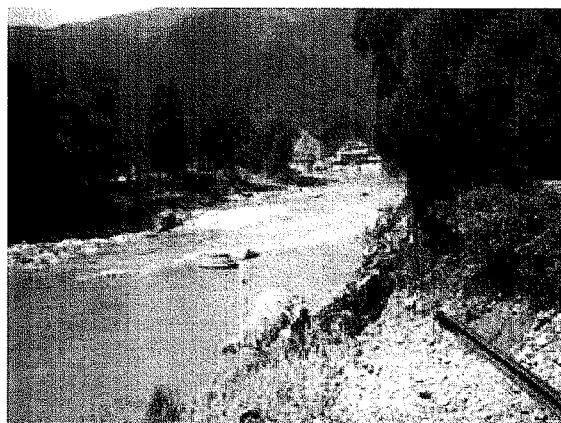


写真-11 第7鉄橋の橋脚の倒壊状況

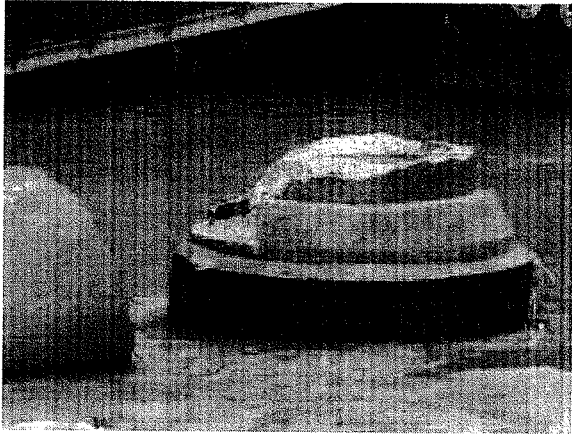


写真-12 第7鉄橋の橋脚の折損状況

5. 岩盤から剥離した橋脚（第1,3,5鉄橋）およびコンクリートが折損した橋脚（第7鉄橋）の倒壊状況解析

橋脚および桁に作用した流体力 F は（1）式で表される。

$$F = C_d \cdot (V^2/2g) \cdot A \text{----- (1)}$$

ここで、流速 V は流量 Q 、水深 h 、河床勾配 i 、マンニングの流速公式を用いて算出した。円柱橋脚の抗力係数 C_{d1} ：0.8、桁の抗力係数 C_{d2} ：1.0を用いて流体力を算出した。また、 A は作用面積である。なお、桁に作用した流体力は左右橋脚間の半分の支間長分、合計1支間長分が作用したと仮定した。表-2に橋脚基礎の破壊部での曲げ発生応力と終局耐力の比較表を示す。折損した無筋コンクリートの終局耐力 σ_{ca1} 、岩盤から剥離したコンクリートの終局耐力 σ_{ca2} は、T. OGAWAの実験値³⁾を示した。

表-2から、橋脚および桁に作用した流体力により、橋脚が剥れまたは折損破壊したと判定された。過去の最高水位は桁下であり、また、設計では桁に作用する流体力を見込んでいないことから、表-2の結果は妥当であると推察される。なお、写真-1には、流木が大量に作用している状況は示されていないが、倒壊時には流木による衝撃力も加わっていた可能性もある。

6. 洗掘で倒壊した橋脚（第4鉄橋）の倒壊原因の解析

航空写真から、第4鉄橋の橋脚は桁に流水が衝突する時点では倒壊していたと推察された。ここで、桁下の水利諸元を用いて洗掘による倒壊の可能性を検討する。橋脚径 $D=2.1\text{m}$ 、水深 $h=8\text{m}$ 、河床勾配 $i=1/6000$ 、粗度係数 $n=0.03$ から、 $h/D=3.81$ 、フルード数： $Fr=0.198$ が求まる。須賀ら⁴⁾を用いると、洗掘深 $Z_s=1.2 \cdot D=2.5\text{m}$ が求まる。橋脚の根入れ長 $Z_{sc}=1.52\text{m}$ であり、洗掘により倒壊したことが推察された。なお、写真-8に示したように第4鉄橋の右岸側は植生に覆われていて橋脚周辺での洗掘は基礎には達せずに倒壊は免れた。ただし、右岸側橋脚の後方に2m程度の洗掘孔が見られた。大型の洗掘実験や現地では橋脚周辺の洗掘深よりも後方での洗掘深が深くなる場合があり、この調査結果は大型の洗掘実験等の結果と同様の傾向を示している。また、植生の繁茂により流心が固定されるとともに流心での水深、流速が大きくなり洗掘に留意しなければならないとの報告⁵⁾もある。本災害はこの報告を裏付けていて、今後の橋脚の保守に対する注意事項が示された。

7. 今後の豪雨に対する長寿命化対策工の検討

福井水害における越美北線の橋梁被害の被害要因は、設計では考慮されずに、また、過去にも経験の無かった桁に流水が掛かるような洪水流下において、流体力により、岩盤からの橋脚基礎の剥れ、橋脚コンクリートの折損、または、洗掘により倒壊したことである。

このような豪雨に対する長寿命化対策の検討としては、

- 1) 今後予想される洪水流下における橋脚の安全性の検討
 - 2) 現状で橋脚の安全性が低い場合における補強工の追加の検討
- が挙げられる。

表-2.6.2 橋脚基礎の破壊部での曲げ発生応力と終局耐力の比較表

橋梁 No	川幅 (m)	河床 勾配	桁上～基 礎深さ(m)	流速 V (m/ s)	ΣM ton ($\cdot$ m)	底 面 幅 (m)形状	σ (N/mm^2)	σ_{ca} (N/mm^2)	破壊形式	判定
第1	108	1/200	11.5	2.9	184	4矩形	0.17	0.18～2.6	岩盤剥離	△
第3	75	1/87	11.6	4.8	484	4矩形	0.45	0.18～2.6	岩盤剥離	○
第5	74	1/370	12.3	3.8	342	2.3円	2.86	0.18～2.6	岩盤剥離	◎
第7	58	1/270	12.4	4.6	645	2.4円	4.75	0.31～3.3	折損	◎

なお、補強工としては、以下の方法が挙げられる。

- 3) 洗掘に対する補強として、洗掘防止工の施工：図 - 5⁶⁾ 参照
- 4) 洗掘と基礎の根入れ不足に対する補強として、矢板等による根入れ深さの増強と洗掘防止工の施工：図 - 6⁷⁾ 参照
- 5) 岩盤と基礎の付着強度の不足に対する、アンカーによる岩盤と基礎の付着強度の補強：図 - 7参照
- 6) 橋脚の曲げせん断強度の不足に対する、連続繊維シートによる曲げせん断強度の補強：図 - 8⁸⁾ 参照

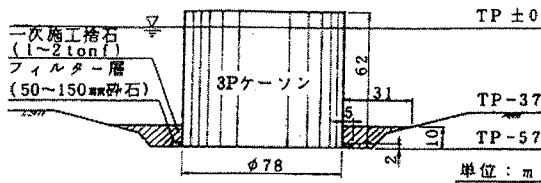


図-5 明石海峡大橋3P下部工における捨石洗掘防止工の施工状況⁶⁾

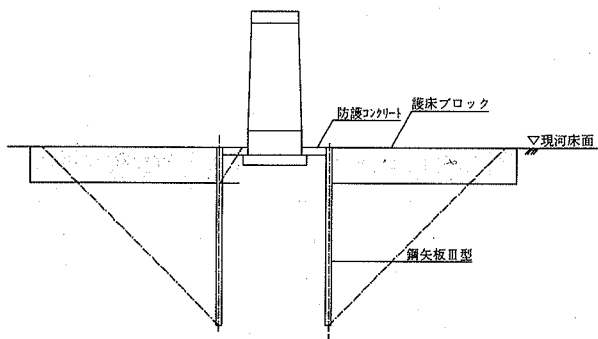


図-6 矢板等による根入れ深さの増強と洗掘防止工の施工状況⁷⁾

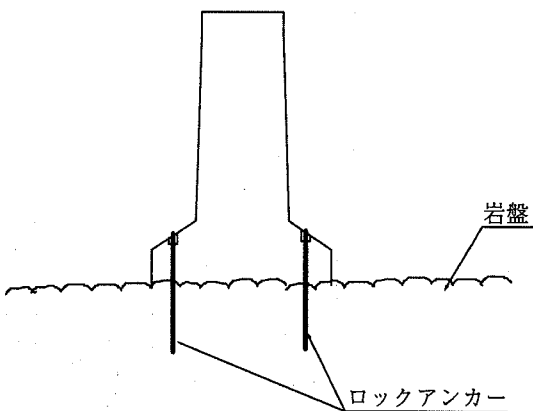


図-7 アンカーによる岩盤と基礎の付着強度の補強の施工状況

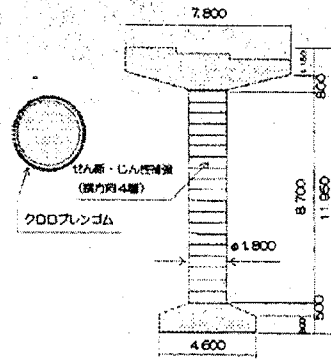


図-8 連続繊維シートによる曲げせん断強度の補強の施工状況⁸⁾

8. 結論

本報告では、福井水害における橋梁被害の中で、最も被害の激しかった越美北線橋梁被害の調査結果、および、その被害要因の解析結果を示した。また、このような豪雨に対する対策の検討方法と補強方法を示した。

本報告の内容を、今後の同様な事例の対策工の検討に参考にしていただき、被害軽減が行われれば幸いである。

謝辞：越美北線の図面はJR西日本に、洪水時の航空写真は福井新聞社に、ご提供いただきました。ここに、関係者各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 玉井信行：2004年北陸豪雨災害について－土木学会調査団報告、平成16年度河川災害に関するシンポジウム、pp. 1-14, 2005. 3
- 2) 福井豪雨を踏まえた治水計画：第24回九頭竜川流域委員会資料、資料-1、国土交通省近畿地方整備局福井河川国道事務所、2004. 10
- 3) T. OGAWA Study on the Stability Evaluation of Concrete Gravity Dam Part II, 大成技研報, 1993
- 4) 須賀他：橋脚による局所洗掘深の予測と対策に関する水理的検討、土研資料第1797号, 1982. 3
- 5) 辻本, 石野, 斎藤：河川構造物にかかる河川工学の課題、河川技術論文集第9巻, 2003. 6
- 6) 石野, 後藤, 中川, 岡田：急潮流下海洋構造物周辺の洗掘防止工に関する研究、土木学会論文集, No. 462/IV, pp. 33-42, 1993. 3
- 7) 土器川・香東川橋脚洗掘防止工計画書、大成建設株式会社, 平成2年
- 8) 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針、土木学会コンクリートライブラリー, p245, 2000. 7

(2005. 4. 7 受付)