

# 堤防脆弱性指標を用いた平成 28 年十勝川大洪水時における丘陵堤整備区間の浸透破壊に対する安全性と破堤リスク軽減に向けた今後の堤防設計の考え方

福岡 捷二<sup>1</sup>・石塚 宗司<sup>2</sup>・田端 幸輔<sup>3</sup>

<sup>1</sup>フェロー 中央大学研究開発機構 機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)  
E-mail: sfuku@tamacc.chuo-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 国土交通省北海道局水政課長 (〒100-8918 東京都千代田区霞が関 2-1-2)  
E-mail: ishiduka-s82ac@mlit.go.jp

<sup>3</sup>正会員 中央大学研究開発機構 機構准教授 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)  
E-mail: k-tabata@tamacc.chuo-u.ac.jp

平成 28 年 8 月十勝川大洪水では、計画規模に匹敵する大流量が流下したにも関わらず、丘陵堤が整備されていた下流部で目立った堤防被害は生じなかった。このことは、丘陵堤が軟弱地盤対策だけでなく、浸透に対しても高い安定性を有していると考えられる。

本研究では、十勝川下流部を対象とし、洪水及び地震災害履歴と堤防整備の経緯を整理し、丘陵堤の土質・構造を把握する。そして、堤防前面の水位ハイドログラフと堤防断面形状、平均透水係数を用いて、堤防の浸透破壊に対する無次元力学指標である堤防脆弱性指標の縦断分布を算定する。これより、十勝川平成 28 年 8 月大洪水で丘陵堤整備箇所が浸透破壊を引き起こさなかった理由を明らかにし、幅広で緩傾斜の丘陵堤が、計画規模洪水の浸透被害軽減に対しても有効であることを実証した。これにより、今後の堤防設計の方向性を示している。

**Key Words:** Tokachi River 2016 flood, gently sloping levee, flood flow analysis, levee vulnerability index, levee failure

## 1. 序論

積雪寒冷地である北海道では、植物等の有機物が未分解のまま厚く堆積して出来た泥炭性軟弱地盤が広く分布する。よって、北海道管内の主要河川では、軟弱地盤対策として丘陵堤と呼ばれる緩傾斜幅広断面堤防の整備が行われてきた(写真-1)。平成 28 年十勝川大洪水では戦後最大の大流量が流下し<sup>1)</sup>、長時間に亘って高い水位が継続した。しかし、丘陵堤が整備されている下流区間では顕著な堤防被害は生じなかった。このことは、丘陵堤が軟弱地盤対策だけでなく、浸透に対する安定性を有していること、堤防設計において堤防幅と法勾配を大きくとることの重要性を示しており、計画洪水規模を含む大きな洪水外力に対する丘陵堤の耐浸透効果を明らかにし、今後の堤防整備のあり方に生かす必要がある。

我が国の堤防の法勾配は、2 割以上を確保することが河川管理施設等構造令<sup>2)</sup>で明示されている。洪水による堤防被害の経験を通じ、現場では原則 3 割勾配の堤防が一般的になりつつある。しかし、計画高水流量に応じて天端幅、高さが決定されるいわゆる形状規定に基づいた

現行堤防設計の考え方だけでは、堤防敷幅を大きくすることの意義を説明することは難しい。これに対して、堤防に作用する洪水外力、堤防敷幅、堤防の透水性・空隙率を反映した無次元力学指標である堤防脆弱性指標<sup>3)</sup>に基づくことで、科学的に丘陵堤整備による耐浸透性の効果の検討が可能であると考えられる。

北海道の河川堤防に着目するもう一つの理由は、明治以降に流域開拓が始まり、昭和の初め頃(十勝川下流部では戦後)から本格的な堤防整備が実施され、堤防の築堤履歴や、材料・構造に関して、比較的信頼性の高い情報が得られていることによる。このことは、「堤体や基礎の内部構造が不明である」ことを前提とする現行の堤防設計法の共通認識に捉われることなく、堤防破壊危険性を高い信頼性をもって議論することが可能であるためである。

本研究は、浸透破壊に対して新しい科学的視点から安全性を実証し、計画高水規模で HWL を越える洪水に対しても丘陵堤整備が有効であることを示すと共に、今後の堤防の計画・設計技術のあり方に対し、重要な知見を与えることを目的とする。まず、十勝川下流部を対象と



写真-1 十勝川丘陵堤



図-1 十勝川の流域図

し、洪水及び地震災害履歴と堤防整備の経緯を整理し、丘陵堤の土質・構造を把握する。次に、十勝川平成 28 年 8 月洪水流下特性を明らかにする。そして、堤防際の水位ハイドログラフと堤防断面形状、平均透水係数等を用いて、堤防の浸透破壊に対する無次元力学指標である堤防脆弱性指標の縦断分布及び時間変化を算出する。これより、十勝川平成 28 年 8 月大洪水を受けても丘陵堤が浸透により問題箇所が発生しなかった理由を明らかにするとともに、計画高水流量流下時の堤防の浸透、越水に対する危険性についても考察する。

## 2. 十勝川下流部の概要

### (1) 十勝川流域の特徴

十勝川の流域図を図-1 に示す。十勝川は幹線流路延長 156km、流域面積 9,010km<sup>2</sup> の一級河川である。河口から 53～56k の区間で、主要支川である札内川、音更川が相次いで流入し、さらに、29k 付近で最大支川である利別川が流入する。十勝川は流域形状が円形に近く、流域形状係数（流域面積／幹線流路延長の二乗）は 0.37 と国内の主要河川の中でも特に大きい。このため、各支川出水のピーク流量がほぼ同時に生じ、本川に合流することで大流量の洪水が流下する特性を有している。

### (2) 十勝川下流部における丘陵堤整備の経緯<sup>4)</sup>

図-2 に十勝川下流部の平面図を示す。十勝川下流部の基盤層には、泥炭性軟弱地盤が広く分布しているため、下流部の堤防は地震災害の度に対策がなされてきた。表-1 には、十勝川下流部堤防の築堤履歴と災害の関係を、図-3 には例として 16k 左岸地点の堤防の地質横断図をそれぞれ示す。昭和 29 年時点（黄緑色）では敷幅 20m 程

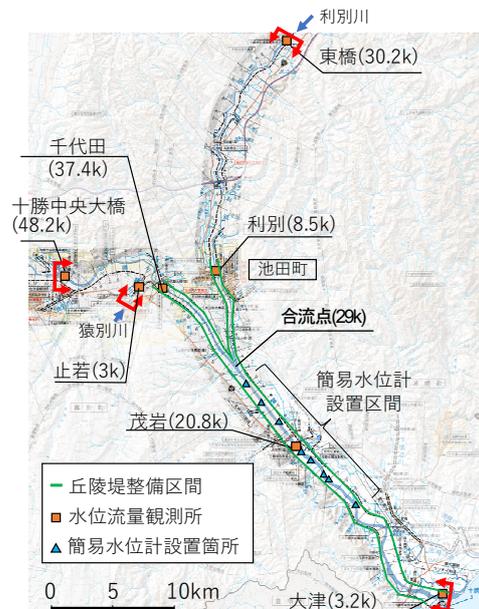


図-2 十勝川下流部の平面図

度の堤防であったが、昭和 43 年十勝沖地震、昭和 50 年台風 6 号を受けて幌岡築堤工事が実施され、昭和 54 年（薄い赤色）には断面が拡大されている。その後、平成 5 年釧路沖地震、平成 15 年十勝沖地震を受け、更なる断面拡大、災害復旧工事、嵩上げが行われ、最終的に図-2 の緑色で示す区間で、現在の法勾配 5 割、堤防敷幅約 80m の大断面の丘陵堤が完成した。

### (3) 平成 28 年十勝川大洪水における流域被害<sup>1)</sup>

平成 28 年 8 月 17～23 日に、3 個の台風が北海道に上陸し、道東地方を中心に大雨をもたらした。十勝川流域では、更に台風 10 号の接近により 28～31 日にかけて支川札内川上流域を中心に大雨がもたらされ、多くの箇所が既往最大降雨を記録した。本川上流域と札内川・音更川等の主要支川で出水ピークがほぼ同時生じ、計画規模に匹敵する大流量が流下した。十勝川本川では、越水は生じなかったものの、直轄区間のほとんどで HWL を越え、39k 付近等では堤防天端高から数 10cm のところまで洪水水位が達した。更に、札内川及びその支川の戸蔦別川では堤防決壊により 50ha の浸水被害が生じ、音更川では深刻な堤防侵食被害が生じた。このように、上流部では堤防決壊や侵食等の深刻な被害が生じたものの、下流部の丘陵堤整備区間では、HWL よりも 1m 程度高い水位が長時間継続したにも関わらず、深刻な堤防被害は発生しなかった。また、基盤漏水やパイピング被害は見られなかった。これは、大きな堤防によって泥炭性軟弱地盤が圧密され、最終圧密状態の透水係数が 10<sup>-11</sup>m/s と非常に小さい値を持つためである<sup>2)</sup>。

## 3. 平成 28 年十勝川大洪水の再現計算

表-1 十勝川下流部の堤防築堤履歴と災害の関係 (左岸堤防の例) 4)

横断距離 [km]	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38									
築堤名	ウツナイ築堤			トイトッキ築堤							幌岡築堤							育素多築堤							千代田築堤																				
H20-25	耐震工事			H22-23 トイトッキ築堤工事 (嵩上げ)							H21-22 幌岡築堤外工事 (嵩上げ)							育素多築堤側帯外工事																											
H17-19				H16-17 トイトッキ築堤 (裏腹付け)																																									
H16											災害復旧工事																																		
H15	十勝沖地震が発生し河川堤防に大きな被害が生じた																																												
H11-14				H12-14 トイトッキ築堤工事 (裏腹付け)														H11-14 育素多堤外一連工事 (嵩上げ)							H12-13 千代田築堤工事 (嵩上げ)																				
H6-11	H6ウツナイ築堤工事										H8-11 幌岡下流築堤工事 (裏腹付け)							H6-8 育素多築堤工事 (拡幅)							H6-10 千代田築堤工事 (拡幅)																				
H5	創路沖地震により統内築堤をはじめ、幌岡、トイトッキ築堤等で堤防縦断亀裂、法滑り等の基大な被害が生じた																																												
S51-H4	S63-H2 ウツナイ築堤工事 (裏腹付け)			S56-62 トイトッキ築堤工事 (裏腹付け)							S51-55 幌岡築堤工事 (拡幅)							S60-H4 育素多築堤工事 (拡幅)							S52-H2 千代田築堤工事 (拡幅)																				
S50	台風6号による大雨																																												
S44-49	昭和50年 トイトッキ築堤工事																								S48 千代田築堤工事 (拡幅)																				
S43	十勝沖地震 当時の築堤は暫定断面で構成したものであり、氾濫平野の泥炭部の堤体及び旧河道締切堤において被害が発生した																																												
S30-42				S37-39 トイトッキ築堤工事							S33 下幌岡築堤工事							S27-30 築堤							S42 樋門締切							S31-37 育素多築堤工事							S36-37 千代田築堤工事						
S37	台風9号による大雨																																												
S4-5	河川切り替え完了																																												

16.0k横断面 (土質調査)

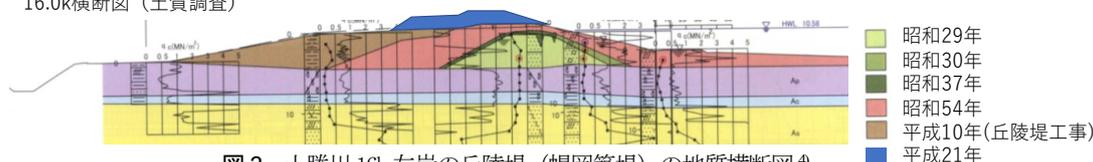


図-3 十勝川 16k 左岸の丘陵堤 (幌岡築堤) の地質横断面図 4)

十勝川下流部では、通常の水位観測所の他に 25.6k 地点等計 8 箇所 で圧力式水位計が設置され、詳細な洪水水位観測が行われた (図-2 の△印で示す水位観測地点参照)。これらの水位データを用い、十勝川本川及び支川での水面形の時間変化に基づく洪水流解析<sup>9)</sup>を行い、平成 28 年 8 月洪水の流下特性を把握した。

### (1) 解析条件

検討対象範囲は、十勝川 (3~49k)、支川の利別川 (0~31k) と猿別川 (0~4k) であり、一般座標系による計算メッシュを作成した。8k より下流以外の箇所では洪水前後での河床変動量が小さかったため、洪水後の横断測量データを基に地形を与え、固定床条件で計算を行った。十勝川、利別川、猿別川の上流端には、それぞれ十勝川中央大橋、東橋、止若の観測水位ハイドログラフを、下流端には大津の観測水位ハイドログラフを与えた。小支川 (牛首別川、途別川、十弗川、居辺川) からの流入については、流出計算結果を直接与えた。

高水敷に洪水が乗り始めてからピーク付近までの観測水面形を再現するように粗度係数を調整し、最終的に低水路で 0.021~0.035、高水敷で 0.025~0.060 を与えた。樹木群抵抗については航空写真を基に、樹木群透過係数によって表現した。樹木群透過係数には 30~50m/s を与えた。洪水時のこれら抵抗の時間変化は考慮していない。

### (2) 解析結果

図-4 に、十勝川及び利別川の水面形の時間変化を示す。河口から 9k 付近までは、大きな水面勾配がついて

おり、解析最大水位は痕跡水位よりやや高い値を示しているが、9k より上流においては解析最大水位は痕跡水位を概ね再現できている。また、水位上昇期からピークにかけての解析水面形は観測水面形の時間変化を良好に再現している。

十勝川下流部では、洪水上昇期の各時刻の水面形はほぼ平行であるが、千代田観測所付近 (35~41k) では、水位の上昇量が他の区間に比べて大きくなっており、河道貯留が顕著に現れている。水面形の再現で得られた流量は、基準点茂岩で 10,870m<sup>3</sup>/s (計画高水流量 13,700m<sup>3</sup>/s) にも達し、HWL を 1m 程度超過した。幸いにも最大支川利別川では、上流域にそれほど多くの雨が降らなかったため、最大流量は利別地点で 1,324m<sup>3</sup>/s (計画高水流量 3,900m<sup>3</sup>/s) であった。しかし少なくとも 12k より下流では本川の背水を強く受け、6k より下流の水位は HWL を超えていた。

図-4 には、計画高水流量流下時の最大水位 (赤色) も示している。これは、検証計算で得られた実績流量ハイドログラフを計画規模まで引き伸ばした場合の洪水流計算結果である。これより、茂岩ではピーク流量が計画高水流量に達したときの水位は HWL を 2m 越え、ほぼ堤防満杯で流下することになる。特に、十勝川 25~27k、利別川 3~6k では越水の危険性が高くなるのが分かる。

平成 28 年 8 月洪水では、札内川、音更川の合流点付近についても HWL を越えていたことから、特に支川では本川の背水の影響を受けて、かなりの水位上昇と洪水継続時間の長期化が生じたことは明らかである。

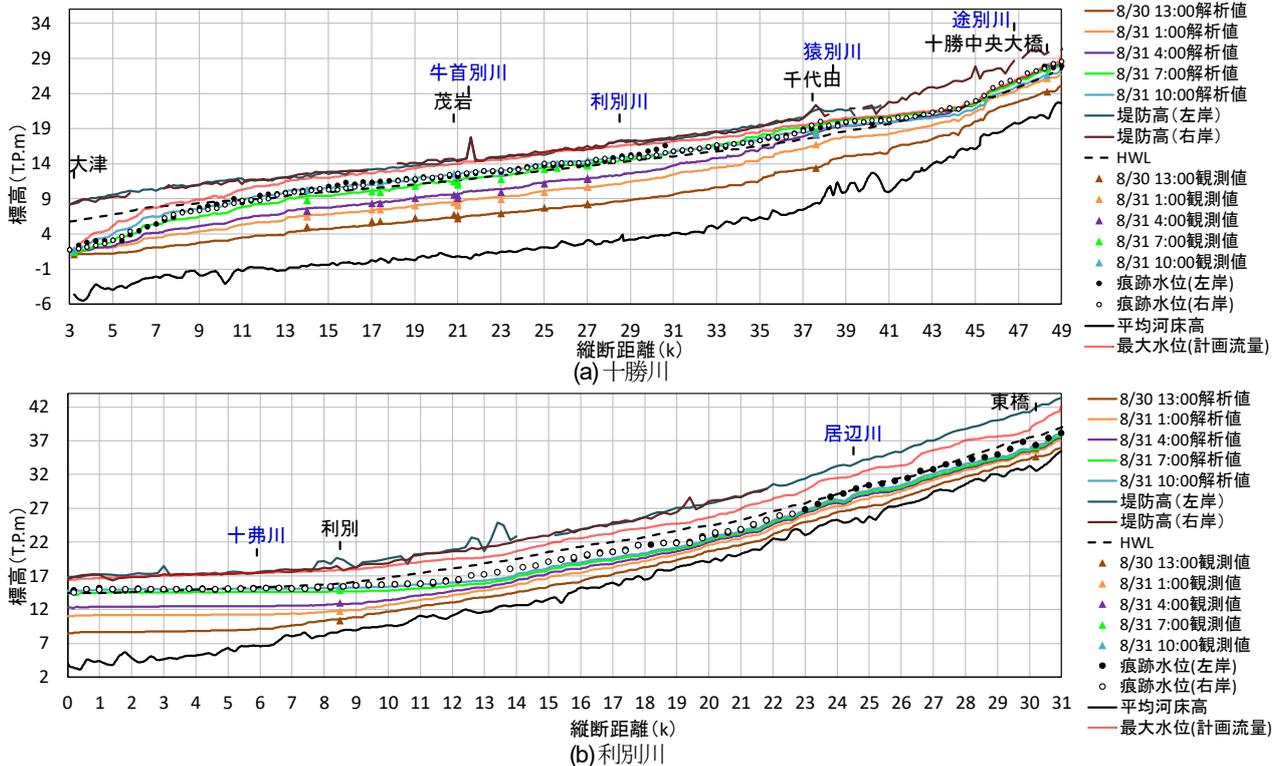


図4 水面形の時間変化の解析値と観測値の比較

#### 4. 丘陵堤の浸透破壊に対する安定性の検討

丘陵堤は、堤防幅を大きくし、法勾配を5割とすることで、基盤漏水や裏法滑りの発生危険度が低下することが、浸透流計算及び円弧滑りの安定性計算により示されている<sup>7)</sup>。しかし、丘陵堤築造後、浸透破壊に対する安全性を検証出来るほどの大洪水を受けていず、浸透に対する安全性は十分確認されていない。

ここでは、平成28年8月十勝川で発生した大洪水を対象とした洪水解析から得られた水位ハイドログラフの縦断分布と、堤防の土質・構造特性を考慮して堤防脆弱性指標  $t^*$  を算定し、十勝川丘陵堤の浸透に対する安定性を検証する。また、計画高水流量流下時を想定した場合の堤防脆弱性指標、水位と堤防高の関係から、丘陵堤区間での浸透と越水に対する堤防破壊の危険性について考察する。

##### (1) 検討方法

福岡・田端<sup>3)</sup>は、洪水時における堤防の浸透破壊危険性を評価する堤防脆弱性指標  $t^*$  を式(1)で与えている。

$$t^* = \frac{5 k H t'}{2 \lambda b^2} \quad (1)$$

ここに、 $H$  は水位、 $b$  は堤防幅、 $t'$  は水位が高水敷に冠水してからの洪水継続時間、 $\lambda$ 、 $k$  は対象とする堤体断面内の平均空隙率と平均透水係数である。現地堤防及び模型堤防への適用の結果、堤防脆弱性指標の値が  $10^2 \sim 10^1$  で裏法滑り、 $10^1$  を超えると決壊の危険性が高まることが確認されている<sup>3)</sup>。

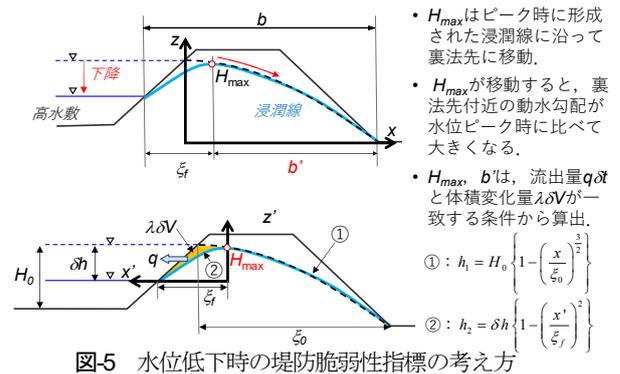


図5 水位低下時の堤防脆弱性指標の考え方

洪水水位が最大の時は、堤防表面からほぼ水平に堤体内に水が浸透する。一方、河道の洪水水位低下時には堤体内に含まれている水は、河道へ向かって流出を始める。同時に、堤体内の浸潤線の最大高さ  $H_{max}$  は、最大水位時に形成される浸潤線(図5の水色線)に沿って、堤体内を裏法方向へ移動し、堤体内の水は裏法先にも向かい続ける。この時、堤防裏法先に向かう浸透流の動水勾配は、最大洪水水位時の動水勾配に比して大きくなる。これにより、洪水水位低下時のある時間までは、洪水ピーク時に比して堤防裏法の浸透破壊の危険性が高まることになる。解析では、この浸透破壊危険性増大機構を、各時間の  $H_{max}$  発生時の水平距離  $b'$  で表現し、洪水水位低下時の堤防脆弱性指標を式(2)により評価する。

$$t^* = \frac{5 k H_{max} t'}{2 \lambda b^2} \quad (2)$$

$H_{max}$  と  $b'$  については、表法からの流出流量と堤体内の水の体積変化量が一致する条件から力学的に求めることが出来る。詳細は文献<sup>8)</sup>を参照されたい。

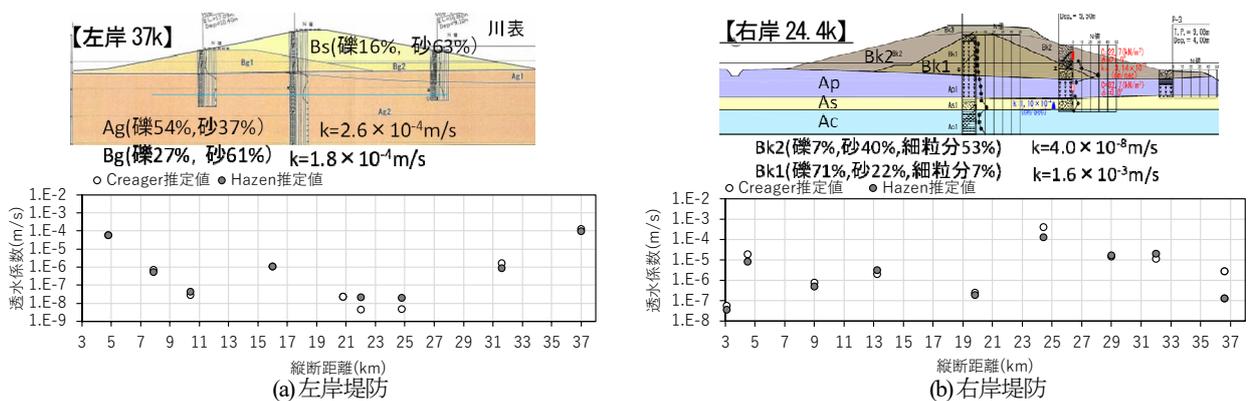


図-6 十勝川堤防の地質横断面図<sup>4)</sup>と透水係数の縦断分布

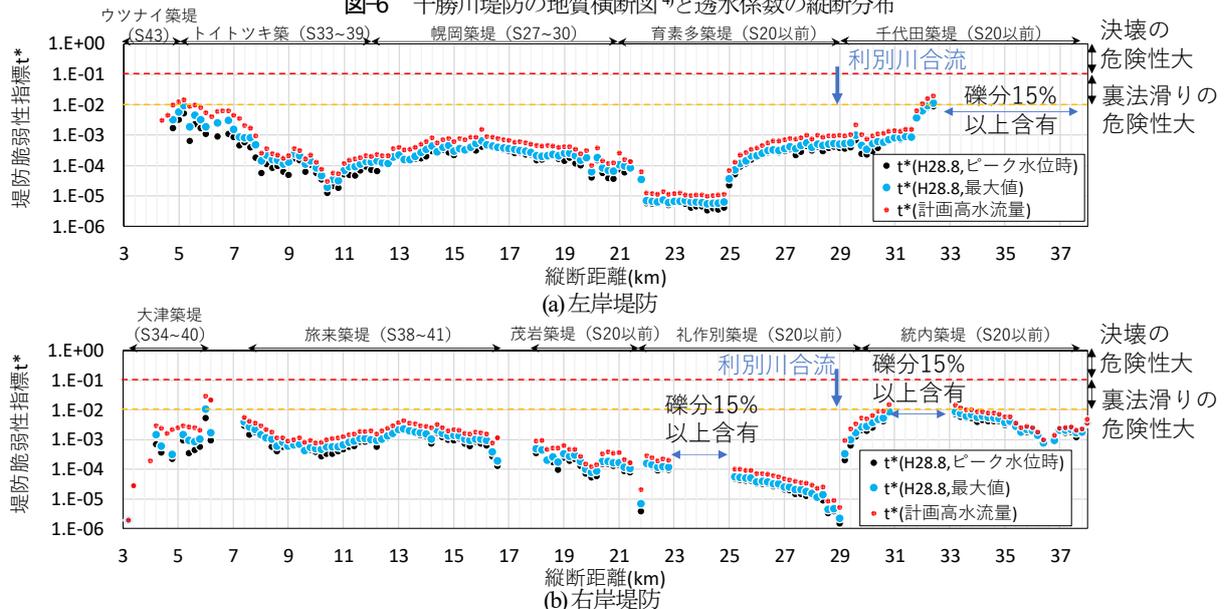


図7 算定した堤防脆弱性指標の縦断分布

## (2) 検討条件

ボーリング調査結果に基づく十勝川堤防土質横断面図と断面内の平均透水係数を図-6に示す。透水係数は、Hazen, Creagerの推定法により求め、大きい方の値を採用した。左岸37k堤防は主に礫分で構成されている。右岸24.4k堤防は、初期に築堤された堤防に粗い材料を多く含んでおり、表面は透水係数の低い難透水性の材料で覆われている。礫分含有率が15%以上の堤防では浸透破壊危険性が極めて小さいことが、大型堤防模型実験により確認されている<sup>9)</sup>。よって、図-7に示すように礫分含有率の堤体内平均値が15%以上で、平均透水係数の大きい左岸32.6~37k、右岸23~25k、31~33kの堤防は、堤防脆弱性指標 $t^*$ の値が大きく算定されても浸透破壊の危険性が低く、検討対象から除外した。空隙率 $\mu$ は、場所毎の変化が小さく、平均値である0.4を一律で与えた。

## (3) 検討結果

図-7に十勝川平成28年8月洪水時における丘陵堤整備区間の堤防脆弱性指標 $t^*$ の縦断分布を示す。黒色は水位ピーク時、水色は洪水位減衰時に現れる最大値を示す。左右岸ともに全区間において良質な材料で堤体が構成されており、堤防敷幅が十分大きいので、HWLを超過し

た洪水に対しても $t^*$ の値のほとんどが $10^3$ 程度の値をとることが分かる。なお、利別川と同様の検討を行った結果、右岸堤防の $t^*$ は $10^5 \sim 10^3$ 程度、左岸堤防には礫を多く含んでおり、堤防の浸透被害の危険性は小さかった。

図-8には、16k左岸(図-3参照)と $t^*$ の値が高めに算定された30.8k右岸の $t^*$ と水位についての時間変化を示す。これらの断面の礫分含有率は6~8%程度である。水位下降期も $t^*$ の高い状態が10時間に亘って続いており、堤防崩壊の危険性が看過できないことが分かる。下流側では水位下降速度が遅くなる傾向にあり、左岸16kの $t^*$ の値はほぼ低減することなく高い値が継続されるが、その値は $10^2$ 未満であったため、堤体浸透被害の危険性は低かったと判断される。一方、計画高水流量流下時(図-7赤色点)には、利別川合流点に近い左岸32kや右岸30.8k等で $t^*$ が $10^2$ を越え、30.8kでは図-8の青色破線で示すように12時間に亘って $10^2$ を超過する結果となる。

平成28年8月洪水に対して $t^*$ が $10^2$ を下回ったのは丘陵堤が整備されたからであり、丘陵堤整備前の痩せた堤防(例えば図-3の薄緑色や薄ピンク色)では極めて危険であったことは明らかである。ただし、現在の丘陵堤であっても計画規模洪水に対しては $t^*$ が0.01を越える箇

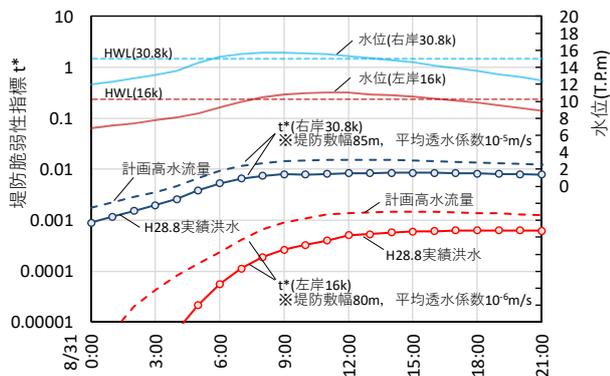


図8 堤防脆弱性指標と水位の時間変化

所があることから、更なる堤防強化が必要となる。特に、背水により越水が生じる危険性の高い利別川の0~8kでは、堤防決壊リスクが高いことを踏まえ、河道や堤防の造り方、更には氾濫時の被害想定に基づいた適切な土地利用等を考えていく必要がある。

以上より、軟弱地盤対策として実施された丘陵堤整備は、80mの十分な堤防幅を有すること、更に堤体平均透水係数が $10^{-5}$ m/sより小さい良質な材料で構成されていることから、HWLを超過した平成28年8月洪水に対しても高い安全性を有することが、堤防脆弱性指標 $t^*$ を用いた検討により実証された。十勝川丘陵堤で示された技術的検討手法、検討結果は、我が国の今後の堤防構造のあり方に対する大きな教訓を与えるものである。

## 6. 結論

十勝川下流部では、軟弱地盤における施工対策として、地震や洪水被害に対応するために堤防断面の拡大を主体とした堤防整備が行われ、現在の丘陵堤完成に至っている。相対的に新しく造られた堤防のため土質構造が明確であり、堤防脆弱性指標を用いた安全性の検討が有効である。現在の丘陵堤が、堤体平均透水係数 $10^{-5}$ m/s以下の良質な材料で構成され、堤防幅が80mにも及ぶ緩傾

斜堤防であったことが、平成28年8月大洪水で浸透破壊を引き起こさなかった理由であることが示された。

これまで、土の堤防はどのような材料を用いてどこまで大きくすれば、浸透破壊に対して安全であるのかについて明確な判断基準を持たなかったが、十勝川の丘陵堤は、計画高水流量に対してもHWLを越えるものの、浸透に対して安全であることが実証され、今後の堤防設計の重要な指針を与えるものである。

## 参考文献

- 1) 国土交通省北海道開発局帯広開発建設部：第1回十勝川堤防調査委員会資料，2016。
- 2) 国土技術研究センター編：解説河川管理施設等構造令，技報堂出版，2008。
- 3) 福岡捷二・田端幸輔：浸透流を支配する力学指標と堤防浸透破壊の力学的相似条件—浸透流ナンバー $SFn$ と堤防脆弱性指標 $t^*$ ，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.74, No.5, I\_1435-1440, 2018。
- 4) 国土交通省北海道開発局帯広開発建設部 平成15年(2003)十勝沖地震河川災害復旧記録誌，平成19年11月。
- 5) 林宏親・三田地利之・西本聡：原位置透水試験および圧密試験による泥炭地盤の透水係数の評価，土木学会論文集 C, Vol. 64, No.3, pp.495-504, 2008。
- 6) 福岡捷二：洪水流の水位と流量の今日的考え方—多点で観測された洪水水位と水面形から河道の水理システムを見る化する—，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.73, No.4, I\_355-I\_360, 2017。
- 7) 竹本典道，数田 茂，元山 達：石狩川における丘陵堤の評価について，第34回北海道開発局技術研究発表会，1990。
- 8) 上村勇太・福岡捷二：堤防脆弱性指標に基づく洪水位下降時における裏法安定性に関する研究，河川技術論文集，第24巻，pp.547-552, 2018。
- 9) 独立行政法人土木研究所 地質・地盤研究グループ土質・振動チーム：浸透に起因する河川堤防ののり尻からの進行性破壊現象に関する実験，土木研究所資料第4300号，2015。

(Received May 31, 2019)

(Accepted August 7, 2019)

# ON SAFETY AGAINST SEEPAGE FAILURE OF GENTLY SLOPING LEVEE BASED ON LEVEE VULNERABILITY INDEX IN THE TOKACHI RIVER DURING 2016 FLOOD AND FUTURE LEVEE DESIGN FOR LEVEE FAILURE RISK REDUCTION

Shoji FUKUOKA, Shuji ISHIZUKA and Kosuke TABATA

In the Tokachi River large flood in 2016, there was no significant damage to the levee in the downstream area where the gently sloping levee has embanked. It means that the gently sloping levee has high stability not only for the soft ground measures but also for the seepage flow during a flood event. In this study, the downstream of the Tokachi River is targeted, the history of earthquake disasters and levee maintenance are examined, and the soil quality and structure of levee are grasped. Then, using the water level hydrograph, the cross section shape of the levee and the average permeability coefficient, the longitudinal distribution of the levee vulnerability index is calculated. We clarify the reason why the gently sloping levee has not caused the seepage failure due to the 2016 large flood based on levee vulnerability index  $t^*$ . It is concluded that the wide and gentle slope levee is very effective for seepage failure reduction. Also, the importance of embanking the levee with a structure whose  $t^*$  is less than 0.01 is discussed.