

大分川粘り強い河川堤防事業について

橋本 裕也¹・藤原 吉洋¹

¹九州地方整備局 大分河川国道事務所 工務第一課 (〒870-0820 大分県大分市西大道1丁目1-71)

近年、大規模出水による堤防越水によって堤防決壊等の甚大な被害が生じており、大分川においても堤防強化は急務の課題となっている。

越水に対して危機管理型ハード対策を上回る効果を有する粘り強い河川堤防を目指して、越水で甚大な被害が想定される区間を堤防強化区間として設定した。堤防強化対策工法は、現況堤防の断面形状を基本とし、コンクリートブロックで覆う工法を選定した。

越水時に弱点となる川裏法面において、越流水に耐えられるコンクリートブロックの選定と、吸出し防止材の差し込み長等を検討し、パイロット事業として実施している。

キーワード 粘り強い河川堤防、川裏法面、被覆ブロック、吸出し防止材、パイロット事業

1. はじめに

令和元年の台風19号を踏まえ設置した、「令和元年台風第19号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会」の報告書¹⁾によれば、台風19号により越水した箇所のうち、予め、危機管理型ハード対策による法尻補強（ブロックによる被覆）を行っていた箇所については、法尻部の洗掘等が確認されておらず、一定の効果を確認した。

一方で、補強されていない法面中腹や法肩から崩れるといった被災形態が確認され、現在の危機管理型ハード対策では効果に限界があり、より高い効果を追求する際には、「越水した場合であっても堤防が決壊するまでの時間を少しでも引き延ばす」とした危機管理型ハード対策の概念を発展的に踏襲し、越水に対し危機管理型ハード対策を上回る効果を有する「粘り強い河川堤防」を目指す必要があることが改めて認識された。

しかし、既往研究の整理等でも粘り強い河川堤防の強化対策の効果の発揮に幅や不確実性があることも確認されており、「粘り強い河川堤防」に必要となる性能を評価し、設計できる段階には至っていない。

大分県大分市を流れる一級河川である大分川においても、気候変動による洪水被害がさらに頻発化・激甚化することが想定される。従来の河川水位を少しでも下げる整備に加えて、治水施設の能力を超える洪水に対しても、浸水による被害をできるだけ減らすための効率的・効果的な対策として「粘り強い河川堤防」をパイロット事業としてを行うこととなった。

2. 堤防強化区間の設定

(1) 大分川の概要

大分川流域は、大分市、由布市、別府市、竹田市等をはじめとする5市2町にまたがる幹川流路延長 55 km、流域面積 650 km²の一級河川である。基準地点府内大橋の整備計画(W=1/70)目標は 4,900 m³/s である。大分川の想定氾濫区域内の人口密度は約 3,400 人/km²、資産密度は約 674 億円/km²と九州の一級河川の中で最も高く、ひとたび氾濫すると被害は甚大である。



図-1 大分川水系流域図

(2) 氾濫リスクが高い地点の設定

粘り強い河川堤防の強化区間は、地形条件、背後地の資産状況、被災履歴、水位計算により対象流量が越水又は計画高水位(H.W.L)を超過する、氾濫リスクの高い地点を設定する。

なお越水は、当面河川改修における計画堤防高と現況堤防高の低い方を越える場合に発生することとした。

a) 地形条件による抽出

大分川の地形条件から、越水しやすい場の特徴(図-2)に該当する箇所を整理する。複数の条件に該当する危険箇所を抽出した。

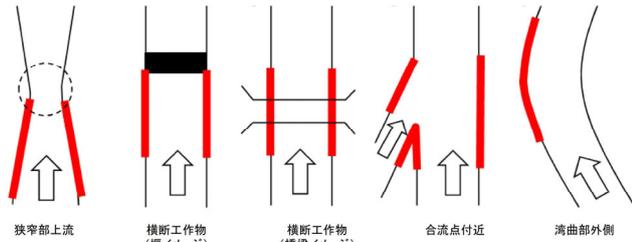


図-2 越水しやすい場の特徴

b) 資産状況による抽出

大分川背後地の資産状況から、堤防決壊時の被害ポテンシャルが大きく、整備効果が高い区間を抽出した。

背後地の資産状況として、氾濫ブロック毎に区域内の家屋戸数が2,000戸以上の範囲と、重要施設(公共行政機関、大規模工場等)の有無を整理した(図-3)。

c) 被災履歴

大分川では既往洪水(昭和28年6月出水)において、堤防決壊を伴う大規模な浸水被害が発生している。

既往洪水による決壊箇所は、地域の関心が高い地点として、被災履歴より堤防決壊箇所を抽出した。

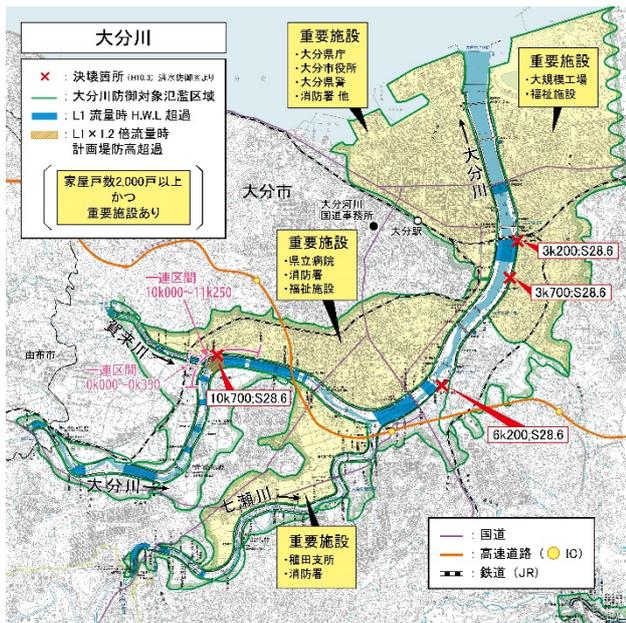


図-3 大分川 堤防強化区間の抽出結果図

d) 水位による抽出

大分川は当面河川改修において整備計画河道(W=1/70)が概成する計画である。効果的な事業実施箇所を抽出するため、当面河川改修後の河道において、基本方針流量(L1:W=1/100)又は、気候変動を考慮したL1×1.2倍流量流下により、越水又はH.W.Lを超過する箇所を抽出する。

その結果、大分川10k800地点において、L1流量流下時にH.W.Lを0.44 m超過し、L1×1.2倍流量では計画堤防高を0.22 m超過することを確認した。

a)~d) によって抽出された大分川10k800は、地形条件において越水しやすい危険箇所(合流点付近、湾曲部外側)であり、左岸側は背後地の資産状況から被害ポテンシャルが高く、既往洪水による決壊履歴も確認できるため、氾濫リスクが高い地点に設定した。

(3) 堤防強化区間の設定

大分川における堤防強化区間は、氾濫リスクが高い大分川10k800左岸を含む一連区間とする。

大分川10k800付近は、地形条件から左岸側が湾曲水衝部である。そのため、湾曲による高速流が影響する大分川10k000~11k250左岸を堤防強化区間とした。右岸は湾曲内側のため対象区間に含まない。(図-4, 5)

なお、流入する支川賀来川は、大分川の背水区間や堤内地盤高がH.W.Lより低い築堤区間を設定した。

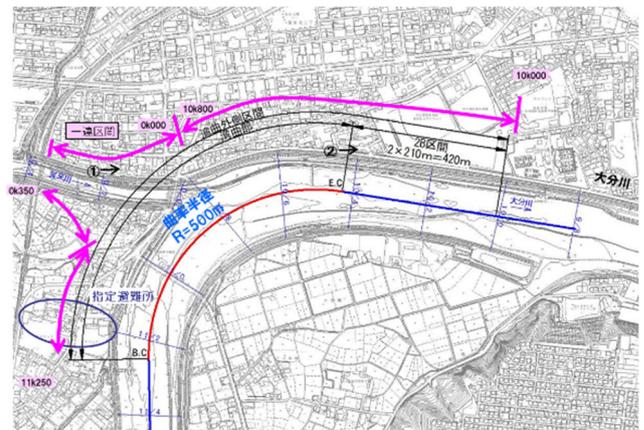


図-4 堤防強化区間平面図



図-5 航空写真による堤防強化区間と背後地の状況

3. 大分川における堤防強化対策工法

(1) 堤防強化対策工法の選定

堤防強化対策工法は、粘り強い河川堤防の施工等について(案)²⁾を参考に、現地状況や施設の施工性、施工実績の有無などから決定する。堤防強化区間は、背後に市道や家屋が隣接しており、用地買収が困難な地区である。粘り強い河川堤防に必要な性能と現地の施工性から、「コンクリートブロック系」を採用した(図-6)。

なお、堤体内部の浸透水の上昇抑制や、すべりやパイピング破壊の防止のため、川裏法尻部にはドレーンを整備し、排水処理を行うものとした。

(2) 「粘り強い河川堤防」の構造検討

越水時の土堤侵食過程は、川裏部から始まり、天端の崩壊へと進行する¹⁾。従って、川裏部の法尻及び法面の補強が重要と考えられる。そこで、大分川の「粘り強い河川堤防」の整備では、川裏法面に使用する被覆ブロックや法留工の安定計算及びブロックの下に敷設する吸出し防止材の差し込み長さの設定を行った。なお、大分川の当該検討区間においては、L1×L2 流量流下時に計画堤防高を0.22m超過することから、構造検討における越流水深の設定目安を30cmとした。その際の流速は「第3回令和元年台風第19号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会」の参考資料³⁾を基に算定する(図-7)。

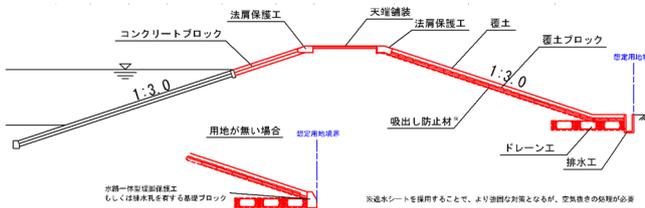


図-6 堤防強化対策工法(案) コンクリートブロック系

$$v_f = \frac{q}{h_f} \quad h_f = \left(\frac{n^2 g}{i} \right)^{\frac{3}{10}} h_c^{\frac{9}{10}}$$

$$q = \sqrt{g h_c^3} \quad h_c = \frac{1}{3(h_t + H)^2} h_c^3 + \frac{2}{3} h_t$$

v_f : 等流流速 h_c : 法肩の水深
 h_f : 等流水深 q : 単位幅あたりの流量
 i : 法面勾配($\sin \theta$) H : 比高 h_t : 越流水深

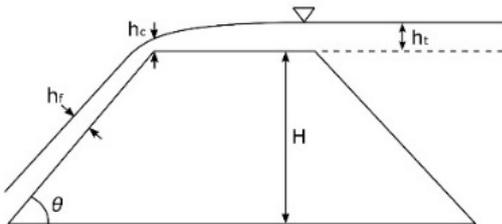


図-7 川裏法面上の流速算出方法

(3) 堤防川裏の構造検討

a) 川裏法面に使用する被覆ブロックの安定計算

越流水の作用によってブロックが流出、滑動しないように、川裏法面に使用する被覆ブロックの安定計算を行う。目安とする安定計算は護岸の力学設計法⁴⁾を援用した式(1)、式(2)、式(3)によって表される滑動の照査を使用する。ただし滑動の照査は、式(4)により算出した30cmの越流水深を目安とするブロックの重量に対して1.3倍の安全率を見込んだ値を採用する。なお、ブロック同士の連結を基本とするため、群体構造のモデルとして計算を行う。越流水に対しては、越流水が法面最大傾斜角方向に流下すると仮定し、越流水による抗力が法面最大傾斜角方向に作用するものとする(図-8)。

$$\mu(W_w \cdot \cos \theta - L) > (W_w \cdot \sin \theta) + D \quad (1)$$

$$\text{揚力} \quad L = \frac{\rho_w}{2} \cdot C_{Lg} \cdot A_b \cdot V_d^2 \quad (2)$$

$$\text{抗力} \quad D = \frac{\rho_w}{2} \cdot C_{Dg} \cdot A_D \cdot V_d^2 \quad (3)$$

$$W_w = \frac{\mu L + D}{\mu \cos \theta - \sin \theta} \quad W = \frac{W_w}{(1 - \rho_w / \rho_b)} \times 1.3 \quad (4)$$

ここで、 W : ブロックの空中重量 (N), ρ_b : ブロックの単位体積重量 (=2,300 kg/m³), ρ_w : 水の単位体積重量 (=1,000 kg/m³), W_w : ブロック自重の水中重量 (N), θ : 法面の傾き (°), μ : 土と吸出し防止材との摩擦係数 (=0.65), A_b : ブロックを上方から見た場合の投影面積 (m²), A_D : ブロックの抗力に関する投影面積 (m²), C_{Lg} : 群体ブロックに対する揚力係数, C_{Dg} : 群体ブロックに対する抗力係数, $V_d (=V_f)$: ブロック近傍流速 (m/s) である。

なお、越流時の流向と、ブロックの水理特性値取得時の流向が異なる場合がある。流向が異なる場合は、護岸の力学設計法⁴⁾より式(5)を用いて抗力係数値を算出する。

$$\text{抗力係数} \quad C_{Dg} = 2 \cdot A_b / (8.5^2 \cdot A_D) \quad (5)$$

粗度係数 n は、式(6)から裏法面の堤防強化に使用する被覆ブロックの相当粗度 K_s より求めた値を採用する。

$$n = K_s^{1/6} / (7.66 \sqrt{g}) \quad (6)$$

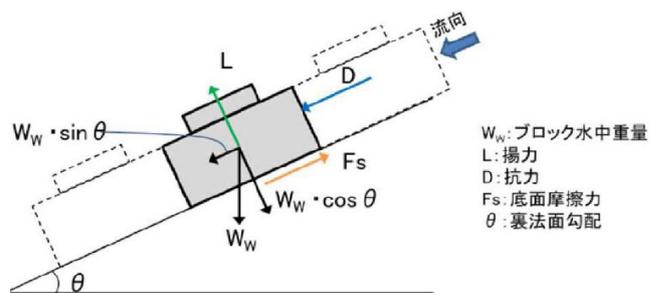


図-8 越流時にブロックに作用する力

b) 法留工による安定計算

大分川の粘り強い河川堤防整備では、川裏法尻部にドレーンを整備し、ドレーンの上部は調整コンクリートを設置することとした(図-9)。

法尻部の基礎コンクリートとドレーン上部の調整コンクリートが一体となって川裏法面ブロックを支える構造の法留工であるとして、法留工にかかる外力(図-10)を算定し、転倒及び滑動に対する安定性の照査を行った。

なお、被覆ブロックを滑動させる力の合力 N_B を式(7)及び(8)から算出し、式(9)、(10)、(11)を転倒、式(12)、(13)、(14)を滑動に対する安全性の照査式として計算を行う。

$$N = D + W \sin \theta - \mu(W \cos \theta - L) \quad (7)$$

$$N_B = K \cdot N \quad (8)$$

転倒に対する安全性

$$M_V/M_H \geq 1.5 \quad (9)$$

転倒モーメント M_H

$$M_H = P_A \cos \delta \cdot D/3 + \tau B1 \cdot D + P_N \cos \alpha \cdot D + N_B \cos \theta \cdot D \quad (10)$$

抵抗モーメント M_V

$$M_V = P_A \sin \delta \cdot B2 + P_N \sin \alpha (B2 - h_0/\sin \theta) + W_W \cdot B2/2 + N_B \sin \theta \cdot B1 \quad (11)$$

滑動に対する安全性

$$F_V/F_H \geq 1.5 \quad (12)$$

滑動させようとする力 F_H

$$F_H = P_A \cos \delta + \tau B1 + P_N \cos \alpha + N_B \cos \theta \quad (13)$$

抵抗する力 F_V

$$F_V = \mu(P_A \sin \delta + P_N \sin \alpha + N_B \sin \theta + W_W) \quad (14)$$

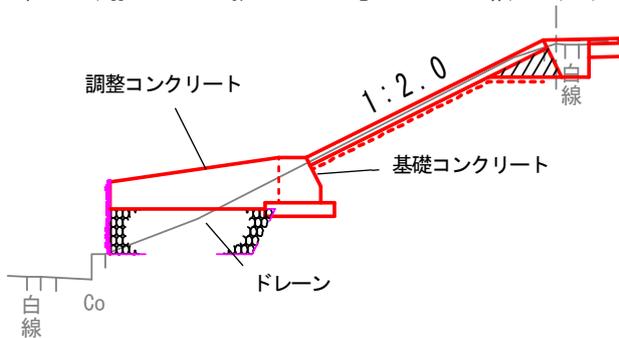


図-9 大分川 川裏法尻部の整備イメージ図

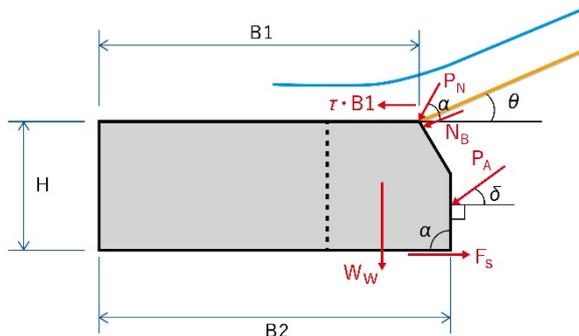


図-10 法留工にはたらく外力イメージ

ここで、 K ：法面に配置したブロック個数、 P_A ：主働土圧 (Pa)、 N ：被覆ブロックに作用する力 (N)、 τ ：越流水によるせん断力 (N)、 δ ：堤体土と法留工との摩擦角 (°)、 α ：法留工背面の傾斜角 (°)、 h_0 ：等流水深 (m)、 P_N ：動水圧 (Pa) である。

計算の結果、大分川の粘り強い河川堤防における川裏部の安定性を確認した。

c) 吸出し防止材の差し込み長の設定

越流水によって川裏法面の被覆ブロックが流出した場合においても、法面の侵食過程を遅らせることを期待し、被覆ブロックの下に吸出し防止材(シート)を設置する。

越流水によるせん断力によって、天端下に差し込んだシート(図-11)が抜け落ちないために必要な差し込み長 L は式(15)により求める。

$L >$

$$\frac{F_s \cdot \gamma_w \cdot L_s \cdot h_0 \cdot \sin \theta}{\alpha} + \gamma_b L_1 H_1 - \gamma_a (L_1 + L_2) H_1 / 2 > \frac{\gamma_b L_1 + \gamma_c H_2}{\gamma_b L_1 + \gamma_c H_2} \quad (15)$$

天端下に差し込んだシート上の天端保護工等の水中重量により、差し込み部分のシート底面に働く単位幅当たりの引き抜き耐力 F_0 は、式(16)により求められる。ただし、 F_0 は安全率を F_s として式(17)が成立するように設計する。なお、安全率 F_s は暫定的に2.0とする。

$$F_0 = \alpha(\gamma_a(L_1 + L_2) H_1 / 2 + \gamma_b(L - L_1) H_1 + \gamma_c L H_2) \quad (16)$$

$$F_0 > \tau_0 L_s \times F_s \quad (17)$$

γ_w ：水の単位体積重量 (kN/m³)、 γ_a ：法肩保護工の水中単位体積重量 (kN/m³)、 γ_b ：天端舗装工の水中単位体積重量 (kN/m³)、 γ_c ：碎石の水中単位体積重量 (kN/m³)、 α ：補正係数 (=1.0)、 L_s ：裏法面のシート長 (m)、 τ_0 ：シートに作用する越流せん断力である。

当該区間における川裏最大法長は 3.13 m であるため、吸出し防止材の最大差し込み長は 60 cm と算出された。

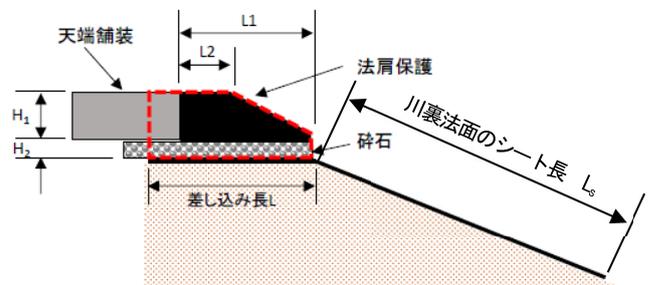


図-11 天端に設置する場合における、吸出し防止材の上乗荷重の範囲イメージ

(4) 大分川における「粘り強い河川堤防」の構造

・大分川における「粘り強い河川堤防」の整備箇所では、現況堤防の断面形状を基本とし、もしくはそれ以上の

断面整備を基本とする。

- ・川表法面は、H.W.L.を対象に算出した設計流速に対し、耐侵食性のある構造として控え 350 mm のコンクリートブロック張（2 割勾配）を採用する。また、ブロックの下には遮水シートを敷設する。
- ・川裏法尻部にドレーンを設け、堤体土の浸潤線や飽和度を低下させる。
- ・堤防天端は、天端部崩壊過程の進行を遅らせるアスファルト舗装とする。

以上の検討を踏まえ、大分川における粘り強い河川堤防の整備は図-12のような断面形とし、一部区間において施工を行っている(図-13)。

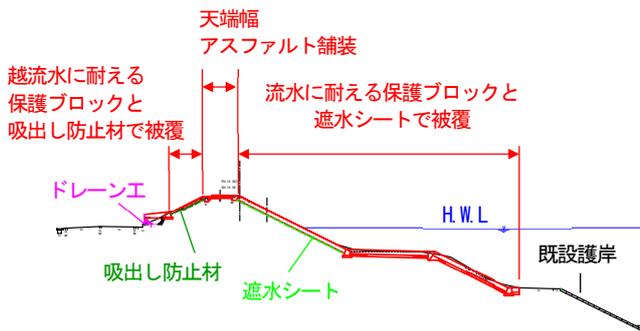


図-12 大分川整備概要図



図-13 施工写真

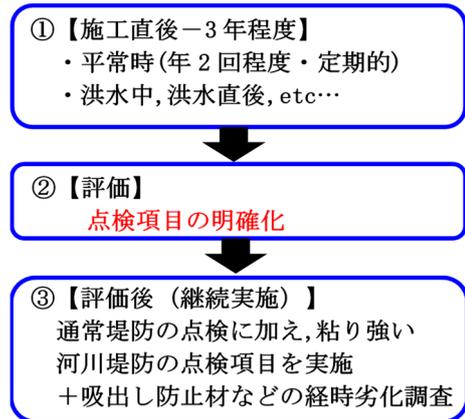
4. 今後の課題

越水した場合でも決壊までの時間を少しでも長くする性能が求められる「粘り強い河川堤防」には、通常の堤防点検に加え、新たな点検項目が必要である。そのため、点検項目（表-1）と、点検実施手順（表-2）について整理を行った。点検で得た経験を集積し、粘り強い河川堤防の性能を維持する必要がある。

表-1 粘り強い河川堤防の点検項目(案)

箇所	点検項目
天端	・法肩保護工の亀裂、破損 ・法肩保護工と法面ブロックとの目地の開き、段差
裏法面	・法覆工ブロック表面の凹凸、座屈、めくれ、ずり落ち ・連節材の変状、延びの有無
裏法尻部	・堤脚保護工の変形 ・ドレーン工のつまり

表-2 点検実施手順(案)



5. まとめ

大分川において、堤防越水により甚大な被害が想定される区間を堤防強化区間として設定した。堤防強化対策工法として、越流水に耐える保護ブロック、吸出し防止材の設置等を検討した。

洪水時の河川水位を下げる対策は、今後とも治水対策の大原則であるが、さらに、河川堤防を越水した場合でも、決壊しにくく、堤防が決壊するまでの時間を少しでも長くするなどの減災効果を発揮する「粘り強い河川堤防」の整備を、危機管理対応として実施すべきである。

「粘り強い河川堤防」の整備にあたり、必要となる性能の具体化や、構造物の安定性を長期的に維持するための維持管理の検討が重要である。

参考文献

- 1) 令和元年台風第 19 号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会報告書（参考資料）
- 2) 令和 2 年度補正予算に係る粘り強い河川堤防の施工等について(案)（参考資料）
- 3) 第三回令和元年台風第 19 号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会（参考資料 3-3）
- 4) 剛国土技術研究センター：改訂護岸の力学設計法，平成 11 年 2 月