令和2年7月豪雨における筑後川の自噴現象について

北島　夏実[1]・田脇　康信[2]・高木　耕太郎[3]

[1, 2]九州地方整備局　筑後川河川事務所　調査課　（〒830-8567 福岡県久留米市高野1-2-1）

[3]九州地方整備局　武雄河川事務所　朝日出張所　（〒843-0001 佐賀県武雄市朝日町甘久1521-6）

令和2年7月豪雨において筑後川金島地区（筑後川右岸39/600付近）では，堤防の川裏側で水が湧き出るような現象（自噴）が生じた．この変状に対して，既往調査結果の精査，試掘調査，地質調査及び地下水調査を実施し，変状要因・メカニズムの分析を行った．また，調査により得られた条件を基に，今次出水における外力と『河川堤防の構造検討の手引き（改訂版）』で定められた外力それぞれに対して浸透流解析を行うことで，堤防の安全性を照査した。その結果，盤膨れに対する強化対策が必要であることが示されたため，その対策工の検討及び効果検証を行い，今後の課題について整理した．

キーワード　令和2年7月豪雨，筑後川水系，筑後川，堤防変状（自噴，噴砂，漏水），堤防強化

1. 序論

筑後川は，熊本県阿蘇郡瀬の本高原を源流として有明海河口までの流路延長143km，流域面積2,860km^{2}に及ぶ九州最大の一級河川である．その流域は，熊本県，大分県，福岡県及び佐賀県の4県にまたがり，流域内人口は約110万人を数える．流域の平均年降水量は約2,140mmで，全国の平均年降水量1,560mmの約1.4倍の値となっている．

近年，線状降水帯による集中豪雨に伴う洪水が全国各地で頻発しているが，筑後川流域でも平成24年7月や平成29年7月の九州北部豪雨において，記録的な降雨による甚大な被害が発生している．

そして，令和2年7月豪雨においても，流域内の多くの観測所で既往最高の雨量が観測されることとなり，筑後川中流域の右支川小石原川合流点の下流付近（筑後川右岸39/600付近）に位置する金島地区（**図-1**）では，堤防の変状現象が生じた．本論文では，この変状箇所における詳細調査等に基づいた要因分析及び浸透流解析を行い，その対策工の検討を行った上で，今後の課題について整理した．

図-1　筑後川水系流域図

2. 令和2年7月豪雨における堤防変状の概要

(1) 降雨の状況

7月6日から8日にかけて梅雨前線が九州付近に停滞し，太平洋高気圧の周辺から梅雨前線に向かって暖かく湿った空気が流れ込んだ．この影響により，非常に不安定な大気の状態が続いたため，広い範囲で記録的な大雨となった．

(2) 河川水位の状況

筑後川本川の片ノ瀬水位観測所では**図-2**に示すように，令和2年7月6日14時から7月8日13時の46時間にわたり，氾濫注意水位を超過し（ピーク水位10.52m），観測史上一位の水位を記録した．

(3) 変状の概要

片ノ瀬水位観測所近傍の金島地区において，**図-3**に示す複数の箇所で変状現象が確認された．このうち「①39/600+10付近」においては，7月7日10時30分頃，水が湧き出る現象（以下，自噴と称する）が生じた．尚，自噴には僅かな砂分の流出はあるものの，多量の湧水や噴砂は確認されなかった．その他の地点でも「②39k600+40」「③39k600+60」の2箇所で僅かな湧水が，「④39k600+120」「⑤39k600+180]「⑥39k800+120」の３箇所で少量の微細～細砂の流出が確認された．本論文では，今回最も大きな変状のあった箇所として，①の自噴に関してその要因やメカニズムを調査・分析した結果を示していくこととする．

3. 変状箇所の地形特性及び既往調査結果

(1) 治水地形分類図

今次出水における漏水箇所と地形分類との関連を把握するために，変状が見られた箇所の「治水地形分類図[1)]」を**図-4**に示す．同図より，39k600～39k900付近の堤内地は噴砂等が懸念される旧河道ではなく，氾濫平野に分類されることが確認できる．

(2) 堤防及び河道の変遷

金島地区については，金島捷水路工事(S7～S26)に合わせて昭和20年代に現在の堤防が完成している(**図-5**参照)．今回の自噴箇所については，旧堤防と現堤防に囲まれた箇所に位置しており，周辺と比べて標高が低い．

河道については変状発生箇所の上流の小石原川で付け替え（新川掘削，1970年～1975年の間に実施）が実施されている．

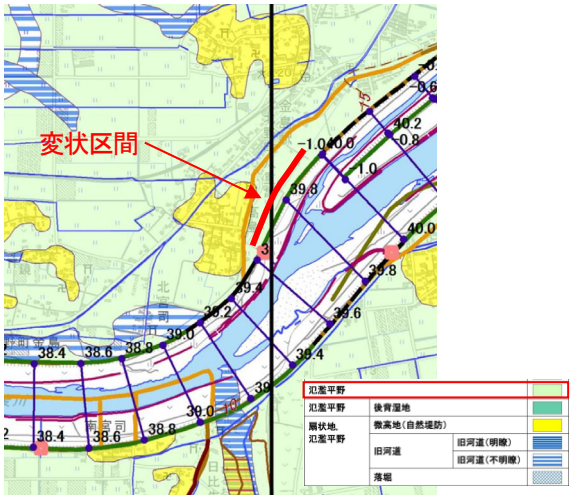


図-4　治水地形分類図

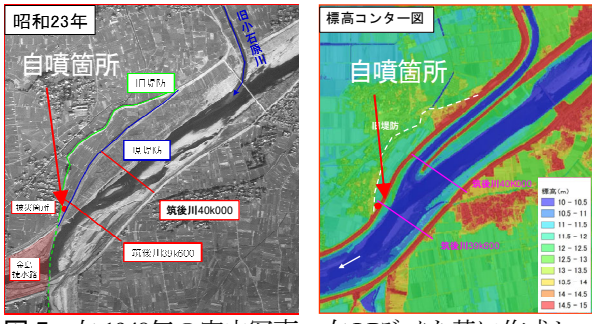


図-5　左:1948年の空中写真，右:LPデータを基に作成した標高コンター図（出典：国土地理院）

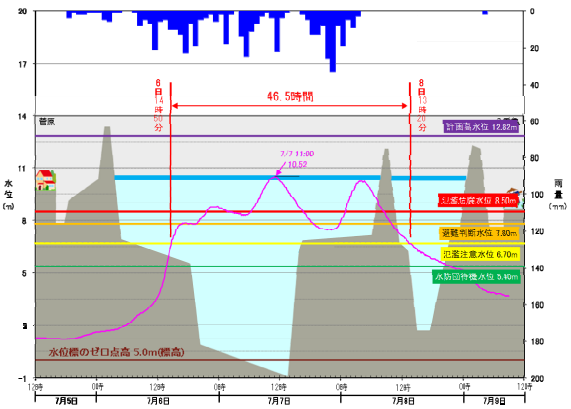


図-2　片ノ瀬水位観測所の水位記録

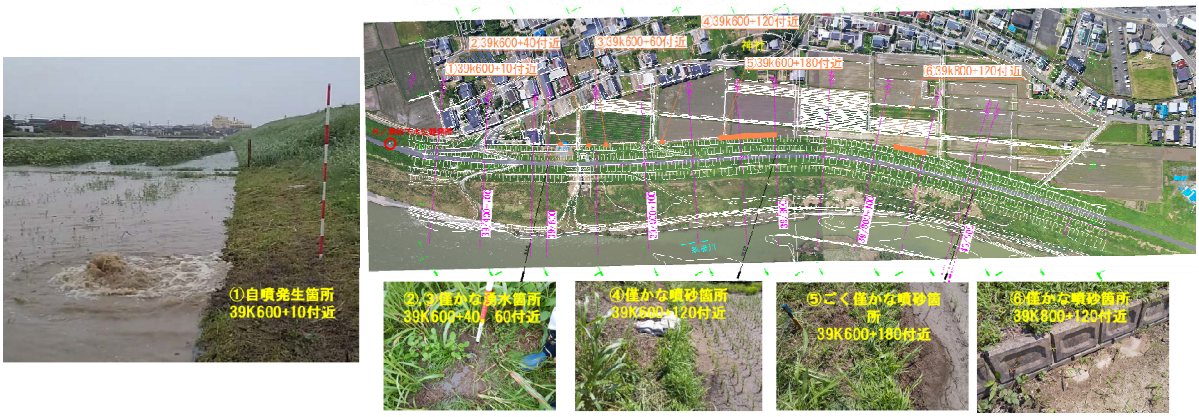


図-3　変状発生位置図

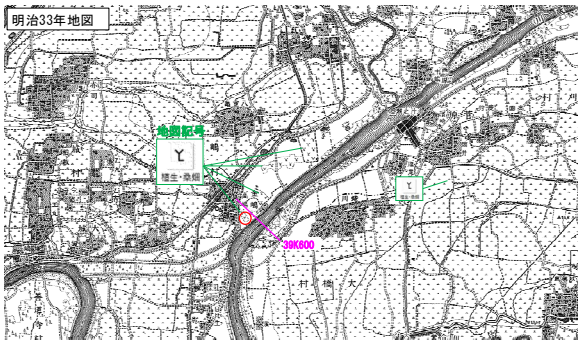


図-6　明治33年地図をもとに推定されるかつての背後地の土地利用状況

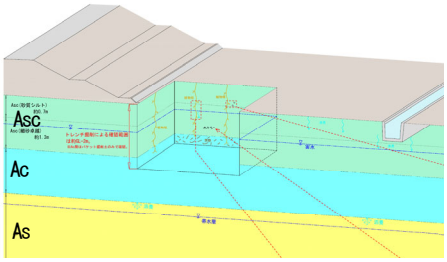


図-7　39k600+10付近のトレンチ掘削の結果

(3) 背後地の土地利用状況

金島地区付近の背後地は，現在，主に水田や畑として利用されている．過去の土地利用状況を把握するため，図-6に示す大日本帝國陸地測量部の明治33年製版[2]を文献調査すると，金島地区において桑畑の記号の表記があることから，当該地では過去に桑畑が存在していたと考えられる．大日本蚕糸会[3]によれば，桑の根は地表下3～4mまで広がるといわれており，地層構成に影響を及ぼしている可能性が考えられる．

(4) 既往堤防詳細点検における安全性検討

当地では，平成29年度に浸透に対する堤防の安全性照査[4]が行われ，その結果，パイピングに対する安全性（盤ぶくれ（G/W））において照査基準を満足せず，その対策として，川表遮水工法（鋼矢板）が示されている．

4.　変状の要因・メカニズムの分析

(1) 変状箇所の調査結果

今次出水を受け，変状地点周辺において，試掘調査，地質調査，地下水調査を実施した．

a）試掘調査結果

ここでは，重機規格の制約から自噴発生箇所ではなく，その隣接地を対象箇所としてトレンチ掘削を実施した．図-7に示すトレンチ掘削の結果からは，土層は地表面よりAsc，Ac層からなることが確認され、Ac層は，植物根の侵入により水みちが形成されていることや斑鉄[5]の存在によって層内に亀裂が発生していることが確認された．

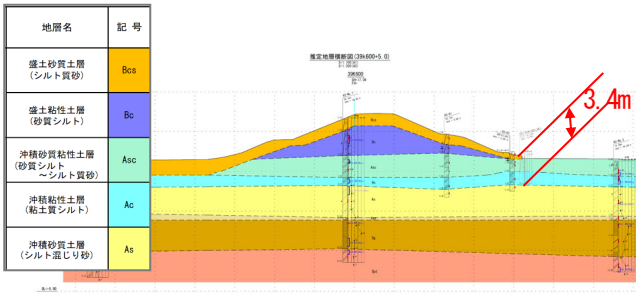


図-8　39/600付近の推定地質横断図

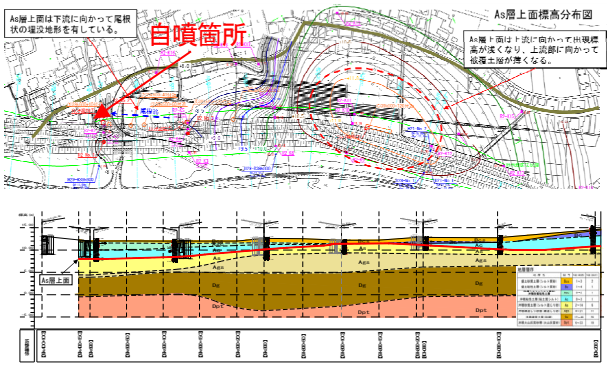


図-9　As層上面標高分布図

b）地質調査結果

調査ボーリング，簡易サンプリング調査は，既往地質縦断及び地質横断の精査を行うために実施し，代表として，その調査を踏まえて作成した39/600付近の地質横断図を図-8に示す．川裏側にはAsc，Ac層からなる層厚約3.4mの被覆土層と基礎地盤には透水層となるAs層，Ags層が堆積していることが確認される．

堤防の浸透に対する安全性評価においては，地下水浸透が透水性の低い被覆土層の影響を受けることから，被覆土層の分布状況の把握が重要である．よって，地質調査結果をもとに図-9に示すAs層上面の標高分布図を作成した．被覆土層（Asc層，Ac層）下面のAs層の分布は一様ではなく，埋没した地形として，尾根や高まりなどの微地形があると推測され，被覆土層はその上位に堆積するため，層厚も一様ではなく複雑に変化していると考えられる．

c）地下水調査

変状発生の一因になった可能性がある地下水流動を確認するため，地下水調査を実施した．調査結果より，難透水層（Ac層）を挟んで，2つの地下水位（上位地下水位，下位地下水位）が確認された．上位地下水位は，降雨に対し，鋭敏に反応し，下位地下水位は，平常時はAs層，Ags層に帯水し，河川水位より高いという特徴

をもち，また，地下水の流向は概ね堤防から堤内側へ向かっていることが確認された．

前述のAs層上面標高分布図や地下水調査に基づき，変状箇所周辺の地下水流動について推定を行った．その結果，図-10に示すように，主要な帯水層であるAs層から下位及び，被覆土層(Bc～Ac～Asc層）は上流の小石原川などを含む広域的な範囲においても行き止まり地盤がなく，上下流に連続していると判断される．したがって，出水時の広域的な地下水流動としては，水位の高い上流から下流に向かう流れとなっているとともに，本川の筑後川や支川である小石原川の水位上昇により，As層には河川水が広域にわたって供給される状況になっていると想定される．

(2) 変状の要因・メカニズムの推定

調査及び分析の結果より推定される変状の要因・メカニズムのイメージを図-11に示す．第一に自噴地点は，被覆土層(Asc層，Ac層)下面に埋没微地形の影響による凹みが存在し，被覆土層は植物根や水みちの影響で不均質であった．今次出水において，堤内外及び上流からの浸透水による浸潤線の発達に伴って，前述の被覆土層下面の凹み部に，地下水位面とAc層に挟まれた閉鎖された不飽和領域（空気溜り）が形成されたと推定される．そして，更なる浸潤線の発達に伴い，閉鎖された不飽和領域内の間隙空気の圧力が高まり，不均質な被覆土層内の弱部を通して自噴が生じ，自噴に伴う攪乱によって自噴孔が拡大したと考えられる．

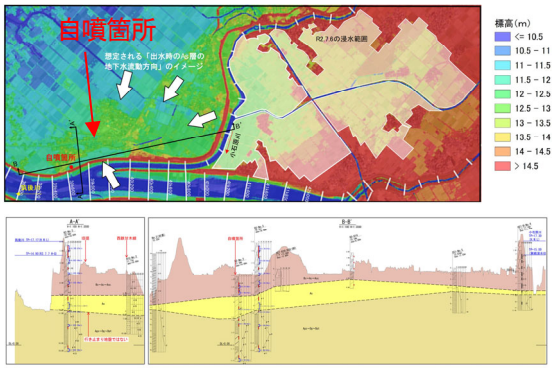


図-10　出水時のAs層の地下水流動方向のイメージとAs層の状況

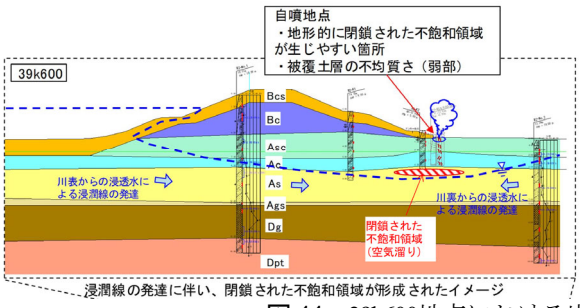
5.　浸透流解析による堤防の安全性評価

(1) 解析方針

堤防の浸透による変状には，すべり破壊(浸潤破壊)とパイピング破壊(浸透破壊)がある．本検討では，それぞれの安全性の照査を目的として，想定外力に対する2次元の非定常浸透流解析（以下，浸透流解析とする）を行った．解析に用いた外力は，今次出水時における外力（以下，変状時の外力とする）及び堤防点検の再評価を行うための「河川堤防の構造検討の手引き（改訂版）[6]」（以下，「手引き」という）で定められた外力（以下，「手引き」外力という）とした．「手引き」の中に示される堤防の安全性評価において，盤ぶくれと局所動水勾配がパイピング破壊の照査項目として定められているため，それらを対象に評価を行った．また，土層の不均質性を考慮する検討として，水みちとなる弱部を想定し，水みちの実流速（Vs）と土砂の移動限界流速(Vc) [7]から，土砂流出の危険度を評価した．

(1) 「変状時の外力」における浸透流解析結果

図-12に示す「変状時の外力」における浸透流解析結



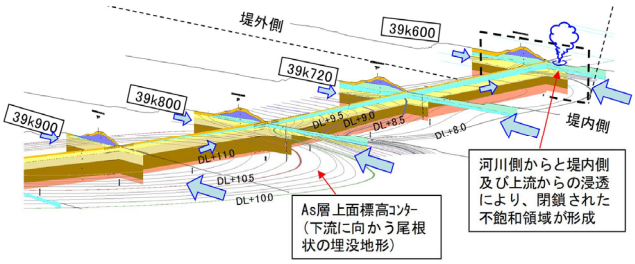


図-11　39k600地点における出水に伴う空気溜りの形成イメージ

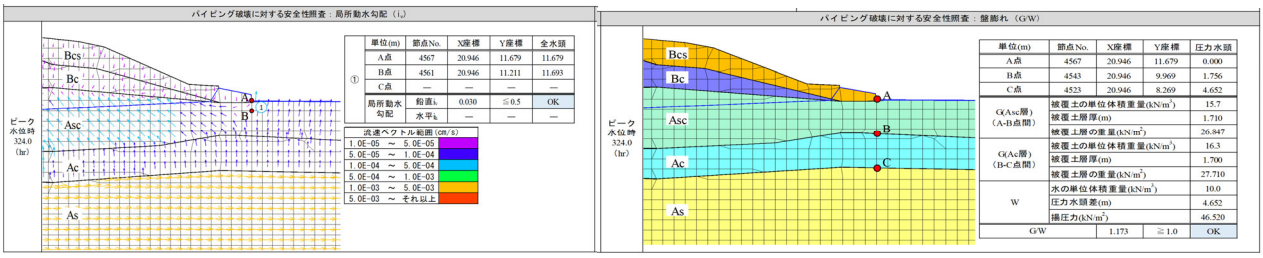


図-12　変状時外力における現況解析結果(39k600)

果からは，局所動水勾配(iv)については，堤内側法尻部でiv＝0.030＜0.5となり，照査基準を満足し、また，盤膨れ(G/W)についても堤内側法尻部でG/W＝1.173＞1.000となり，照査基準を満足することが確認される．**図-13**に示す被覆土層の不均質性を考慮して弱部を想定した解析を実施した結果，水みちの実流速(Vs)については，Vs＝0.008(cm/s)となった．限界流速(Vc)に対して流動しない粒径は0.1mm以上となり，As層の約90%を占めることから，継続時間が長かった場合でも土砂の流出は少なかったと推測され，自噴現象がすぐさま土砂流出を伴うパイピングに発達した可能性は高くないと考えられる．

(2) 「手引き外力」における浸透流解析結果

図-14に示す「手引き外力」における浸透流計算結果からは，局所動水勾配(iv)については，「手引き」で定められている外力に対して堤内側法尻部でiv＝0.455＜0.5となり，照査基準を満足する．一方，盤膨れ(G/W)については堤内側法尻部でG/W＝0.956≦1.000となり，照査基準を満足しない．よって，既往検討同様に盤膨れに対する強化対策が必要であると確認された．

6. 変状箇所の対策工法の検討

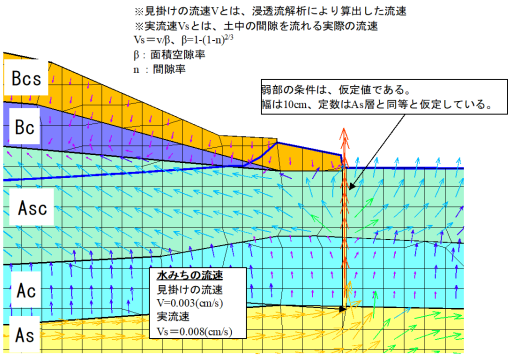
(1) 対策工法の選定

浸透に対する不安定要因が盤膨れであるため，効果が期待できる対策は「被覆土層下面の揚圧力の減圧」となる．これらを満足する具体的な対策工法としては以下の3工法が挙げられる．この中で②のブラケット工法は施工事例が極めて少なく，洗掘リスクが懸念され，③のウエル工法は，施工事例が少ない点や，長期的には目詰まりが懸念される．よって，ここでは①の川表遮水工法を採用することとする．

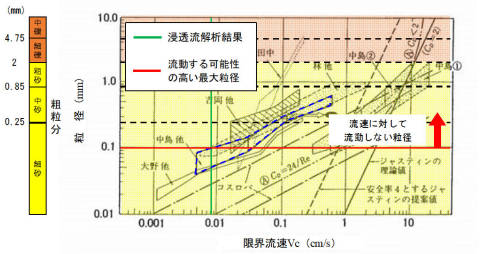
①川表遮水工法：被覆土層直下の透水層への外水浸透の遮断による揚圧力の減圧
②ブランケット工法：被覆土層直下の透水層への外水浸透の遮断による揚圧力の減圧
③ウエル工法：被覆土層直下の透水層の排水による揚圧力の減圧

(2) 対策工法の決定

対策概要図を**図-15**に示す．39k600～40k000では，川表遮水工法として，川表の被覆土（Bcs～Asc～Ac層）及び遮水矢板により外水遮断を行い，揚圧力を低減する．また，洗掘による川表被覆土の流出リスクの懸念，過去に桑畑であり高水敷が不均質土である可能性，また将来計画における断面拡大の予定を勘案し，均質な築堤土により川表盛土を合わせて行う．自噴が発生した39k600付近川裏では，同変状を踏まえ，均質な築堤土により川裏盛土を合わせて行うこととした．



自噴孔下のAs層上面での検討結果
水みちの実流速：Vs=0.008(cm/s)　*解析時間中の最大値
流速に対して流動しない粒径 ：0.1mm以上(Asの約90%)



出典：「新体系土木工学74 堤防の設計と施工－海外の事例を中心として」H3.7 (社)土木学会 p.16に加筆

図-13　変状時外力における弱部を想定した場合の解析結果(39k600)

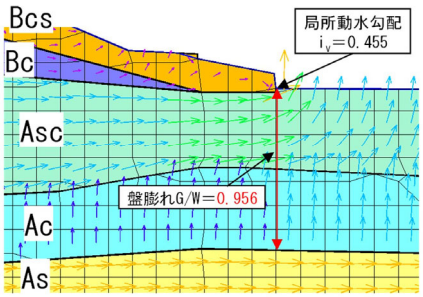


図-14　「手引き」外力における解析結果(39k600)

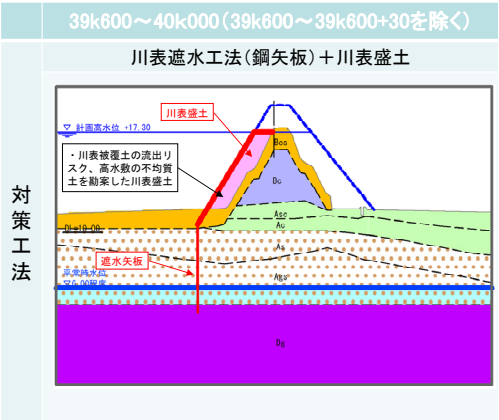


図-15　対策断面

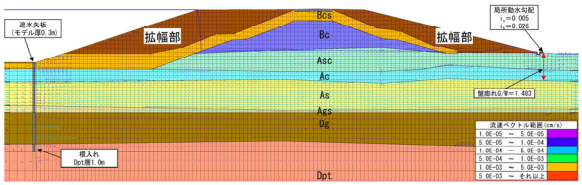


図-16　39/600地点の対策後断面の浸透流解析結果

図-17　自噴箇所直下地点のトレンチ掘削調査

(3) 対策効果の検証

自噴発生箇所である39/600地点を代表として「手引き外力」に対して，対策工（両側盛土＋川表遮水工法）を反映した浸透流解析結果を**図-16**に示す．その結果，堤内側法尻部では，同図に示すようにi_v=0.005＜0.5, i_h=0.026＜0.5となり，局所動水勾配に対する照査基準を満足する．また，堤内側法尻部でG/W=1.483＞1.000となり，盤膨れに対する照査基準も満足する．よって，盤膨れに対する強化対策として有効であることが確認された．また，他地点についても同様の浸透流解析を実施し，対策工としての妥当性が評価された．

7.　今後の取り組み

前章までの調査・検討の結果は，筑後川堤防調査委員会[8]において報告された内容である．その後，当地では，筑後川堤防調査委員会の検討結果に基づき，令和3年度出水期までに対策工の施工が完了している．この対策工完了に伴い，応急対策を実施していた自噴箇所直下での掘削調査が可能となったことから，自噴箇所でのトレンチ調査を行った（**図-17**）．この調査では，自噴箇所に向かう局所的な弱部が確認されており，今後更に詳細な分析・解析等を行っていくことが求められる．

対策実施後についても，今回推定した変状メカニズムをより確かなものとするため，継続して地下水流動等のモニタリングは実施していく．また，今後，①地盤情報の詳細な取得（部分的に簡易サンプリングなどに併用，丁寧な土質の目視確認と試験）による被覆土層の詳細把握，②堤防周辺の土地利用経年変化の把握（過去の植生の違いに伴う被覆土層の弱部の存在等），③広域な地下水流動（近傍河川，堤内川地下水，上流に位置する支川等からの地下水位補給など広域な影響をが示唆）に十分着目した堤防強化の検討が必要と考えられる．

8.　結論

今回の変状は，変状箇所の地形的な特異性や，基礎地盤の不均質性がある中で，河川水位と堤内地側からの水位上昇が引き金となって発生したと推定され，すぐさま堤防のパイピング破壊につながるような状況ではなかったと評価されたが，地域住民の不安や堤防への信頼低下を招くものであった．河川管理者としては，降雨外力が増大する中で，堤防への信頼性を確保していくためには，上段で述べた①～③の視点も踏まえ，同様の変状が起こりうる箇所の把握に努めるとともに，地域住民の方々への丁寧な説明や，必要な情報の開示，積極的な情報発信に努めていくことも重要であると考える．

謝辞：本検討にあたっては，「筑後川堤防調査委員会；秋山委員長（九州工業大学），佐々木委員（土木研究所），福島委員（国土技術政策総合研究所），安福委員（九州大学大学院），矢野委員（九州大学大学院）」により助言をいただきました．心より感謝を申し上げます．

参考文献

1) 国土地理院：治水地形分類図:更新版平成19年度
2) 大日本蚕糸会：養蚕,平成21年11月
3) 大日本帝國陸地測量部：明治33年地図,明治35年
4) 国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所：平成２９年度筑後川流域堤防質的強化対策調査検討業務報告書,平成30年3月
5) 小学館：日本大百科全書,平成6年1月
6) 財団法人 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版）,平成24年2月
7) 社団法人 土木学会：「新体系土木工学74 堤防の設計と施工ー海外の事例を中心として」,平成3年7月
8) 筑後川堤防調査委員会：筑後川堤防調査委員会報告書，令和3年3月