

5. 堤防の決壊メカニズムに関する考察

5.1 新潟の地質と河川

新潟県は、日本海沿いに 250km にわたり細長く分布し、その面積は全国でも 5 番目の広さを有している。新潟の西縁には、糸魚川から静岡に至る大きな構造線が延びており、そこに向かって新発田 - 小出線といわれる明確な地質構造線が存在する。これを境に地質・地形とも大きく異なっている。

新潟県を地形上 3 分割してみると、その概観は、日本でも有数の規模をもつ平野部、そしてそれをとりまくように存在する丘陵部が広く分布するのが特徴で、その背後にそびえる山地部が占める割合はあまり多くない。その特徴がそれぞれ地質の特徴にも反映されている。新潟県の地質図（図 5-1）をみると、平野部には厚い沖積層が分布し、県内に広がる丘陵部は、主に第三紀層、第四紀層の泥質岩で構成されていることがわかる。その丘陵部では、非常に広範囲に地すべり地形を呈しており、日本でも有数の地すべり地帯を形成している。

新潟の代表的な河川として信濃川がある。この信濃川水系は、源を関東山地の甲武信岳に発し、長野県では千曲川、新潟県で信濃川となり、日本海に注ぐ日本有数の河川である。新潟県内で信濃川は南北方向に位置し、北に向かって流れている。信濃川は、阿賀野川とともに県内二大河川であり、それらに流れ込む多くの支流により構成されている（図 5-1 参照）。信濃川は、十日町地方で特に発達した河岸段丘や、支流上流における河川の側方浸食による流下土砂等により、南北約 120km、幅最大約 30km の規模をもつ新潟平野を形成した。新潟県には、ほかに高田（頸城）平野、柏崎平野のように同様に形成された沖積平野が存在するのが特徴である。沖積平野では、長い年月の間に蛇行する数々の河川により自然堤防や後背湿地、氾濫原などが形成され、自然堤防上に村落が、湿地帯には水田地帯が作られた。このように新潟平野を流れる信濃川は度々氾濫するため、その対策として 80km の間に 14 本もの人工放水路が形成されている²⁾。その中でも大河津分水や関屋分水は有名である。

河川の特性を地形学的に検討するために、表 5-1 に地形要素と洪水氾濫形態の関係についてまとめる。図 5-1 による地質図にこの氾濫形態を照らし合わせてみると、信濃川に注ぐ支流には、完新統や段丘堆積物にあたる地質が多く存在し、側方浸食の影響が大きいことが推測できる。いずれの中小の河川でも平野に至るところで大小の扇状地を発達させ、氾濫平野（自然堤防地帯）を形成しており、それぞれの地形における洪水の特徴がわかる。

ここで、中越地域において信濃川に流れ込む支流についてみる（口絵 5-1 参照）。代表的な支流として今回の豪雨により破堤を引き起こした河川である五十嵐川、刈谷田川、

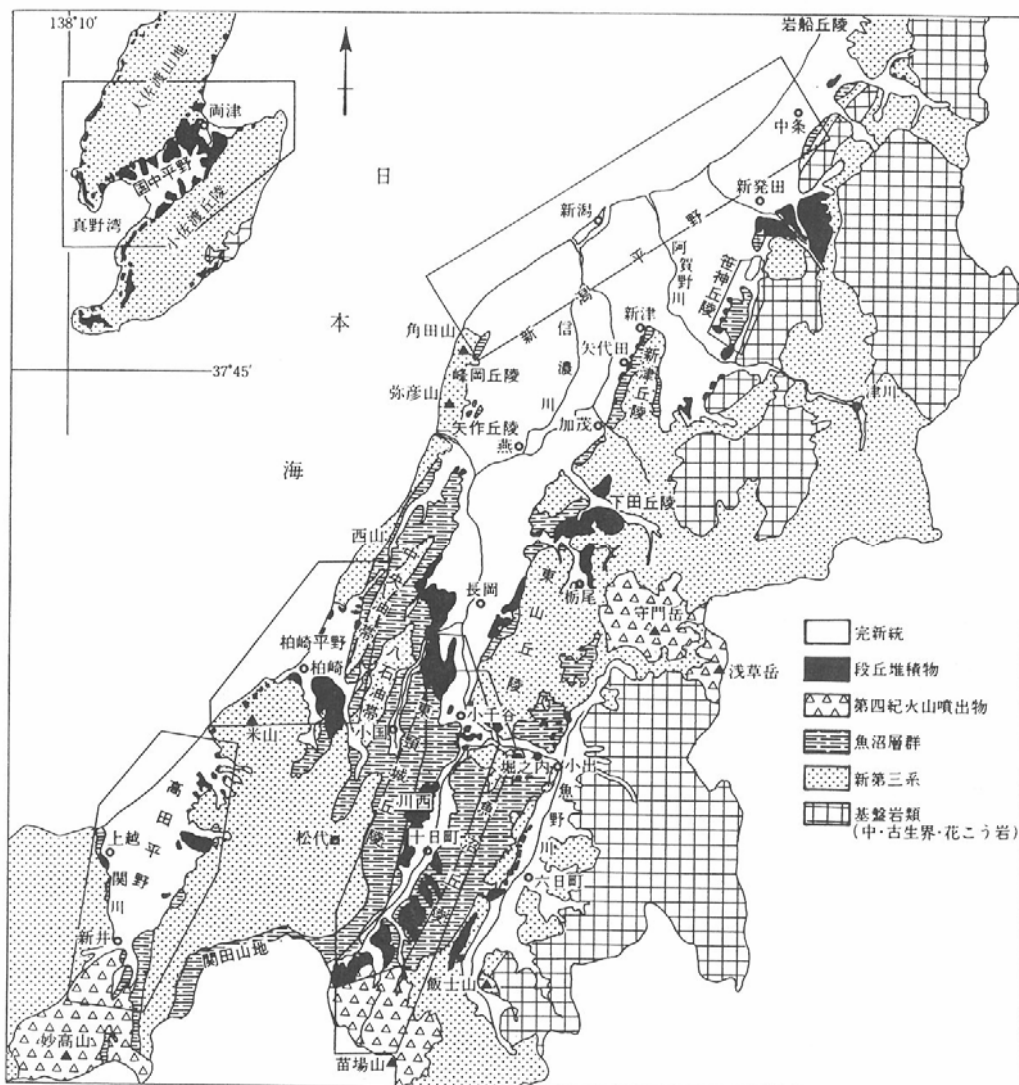


図 5-1 新潟県の地質図¹⁾

猿橋川などを示している。特に被害の大きかった五十嵐川，刈谷田川に対して，同時に示されている地質図と対比すると，両河川とも，山地部まで新しい地質を示す白い部分が入り込んでいるのがわかる。さらに小さな地形の高まりを示す微地形である自然堤防が随所にみられ，特に刈谷田川では古くからの蛇行による屈曲の跡を示す自然堤防が多く存在し，それに沿って蛇行を繰り返していることがわかる。

表 5-2 に信濃川下流における河川の流域面積の一覧表を示す。これより五十嵐川，刈谷田川の両河川の山地と平地との流域面積を比較してみると，圧倒的に山地面積が大きく，平地部分は全流域面積の一割程度にすぎない。今回の豪雨では，この山地部分の流域に想定以上の降雨をもたらした。これらの河川上流にはダムが整備されており，ある程度の洪水調節機能を果たしたと考えられている⁴⁾。参考までに，口絵 5-1 には，今回の豪雨により破堤した主な箇所を示してある。山地から平地へと流れ込む付近での破堤が多いようにも見受けられる。

表 5-1 地形と洪水氾濫形態³⁾

地形要素	洪水氾濫形態
山間平地	谷の低地部であり、洪水時の水位上昇が急。狭窄部での破堤や山崩れによる土砂流の発生。
扇状地	河幅大で砂礫層が発達し、流路の変動が著しく、流速が大きい。旧流路部での破堤。
氾濫平野 (自然堤防)	旧河道部において氾濫や、後背低湿地に長時間湛水。支流合流点などで内水氾濫が発生。

表 5-2 信濃川下流における河川の流域面積²⁾

	山地面積 (km ²)	平地面積 (km ²)	水面積 (km ²)	流域面積 (km ²)
五十嵐川	315.2	8.9	5.1	329.2
刈谷田川	221.7	13.2	5.7	240.6
小阿賀野川	89.4	61.4	3.7	154.5
猿橋川	28.1	49.8	0.6	78.5
加茂川	68.7	0.7	0.9	70.3
西川	0.3	46.4	0.8	47.5
中ノ口川	0	17.5	4.4	21.9
下条川	17.9	3.6	0.2	21.7

5.2 破堤のメカニズムに関する考察

ここでは破堤が起こる一般的原因について考える。口絵 5-2 に河川水位上昇により破堤するメカニズムを示す。

まず、一つ目の原因として、川の流れによる堤防の浸食が考えられる。石張りや植生によるのり面保護に努めることが重要である。また、表のり面は水位上昇により、容易に堤防の飽和度が上昇する。堤防の強度低下によりすべり破壊が起きないように十分な締固めを行っておくことも重要である。

二つ目の原因としては、基礎地盤のパイピングである。一般に、旧河道跡には砂礫層が発達していることが多い。川の水位上昇により、この砂礫層を水圧が伝わり、堤内地側の表層が弱いところで、水および土砂が吹き上げる現象がパイピングである。もしこのパイピングがのり尻付近で発生したら、のり尻が削られていくことにより、堤防のり面の崩壊を招く可能性がある。

三つ目の原因として、堤体内への河川水や雨水の浸透が挙げられる。堤体内に浸透した水は、のり尻付近で動水勾配が大きくなることによりパイピング破壊を生じたり、堤体の強度低下による裏のりのすべり破壊を生じる可能性がある。

四つ目の原因として、越流がある。越流水によりのり面が削られていき、最終的に破堤を招くことが考えられる。

以上は、破堤した時刻や目撃談による崩壊の様子を総合的に分析しながら、破堤原因を絞っていく必要があるが、堤防構築後のこれまでの履歴や今回の降雨の状態を考えると、複合的な要因が連鎖的に働いた可能性もあり得る。なお、現在の堤防に関しては、越流しないことが前提になっており、越流しても破堤しないという考え方は基本的に適用されていない。

5.3 五十嵐川の破堤

(1) 概要

三条市諏訪（曲淵）で五十嵐川の左岸が破堤し，三条市が浸水した（口絵 5-3）．三条市においては，9 名が死亡，床上浸水の家屋は 6,000 戸におよんだ．川の流れを青矢印で，破堤による水の流れを赤矢印で示してある．田んぼに残っている流出土砂跡より，まず堤防直角方向（点線赤矢印）に水が流れ出し，その後破堤が下流に拡大するにつれ，直線赤矢印方向に変わったと思われる．全壊の家屋が 1 戸と少ないのは，破堤地点には田畑が広がっており，水の直撃をまぬがれたからであろう．川が湾曲しており，水の流れを考えると水衝部となる外岸に遠心力が作用し水位も上がるはずであるが，内岸が破堤している．口絵 5-4 に破堤点の写真を示すが，大きくえぐられた跡が残っている．洗掘されたと考えられるが，上流側に関しては，裏のり面付近だけでなく，表のり面の方まで洗掘されているのがわかる．

(2) 表のり面浸食に関する考察

まず，川の流れによるのり面の浸食を考えてみる．浸食量は，流速と継続時間に支配される．破堤点は湾曲部の内岸側である．一様水深を考えれば，内岸の水圧は外岸より小さくなるため，流速は大きくなると考えられる．破堤点の堤防は流出しており，その詳細はわからないが，破堤点付近の堤防表のり面には適度な植生もあり特段問題になるようなところは見あたらない．流速の差もそれほど大きいとは考えられず，破堤時刻も満水位になった直後（午後 1 時過ぎ）とされていることより浸食継続時間も長くない．破堤前の堤防の状態が，植生も他と同じようであったということなら，破堤箇所の浸食に対する危険度は小さかったと考えられる．

(3) 基礎地盤のパイピングに関する考察

パイピングの影響であるが，水田内において，砂や円礫が噴き上がった跡が確認されている．しかしながら，堤体の自重が作用しているため，破堤前に堤体下の骨格構造をなしている円礫が運び出された可能性は低い．またのり尻を削るなど，堤体に直接影響を与えるようなパイピング（ボイリング）の可能性を論じるには，詳細な地盤情報が必要である．破堤後は基礎地盤も削られているため，この種のパイピングは評価しにくいのが現状である．通常より水位が上がった時に，基礎地盤でボイリング現象が見られる場合には，止水矢板を打つなどの対策を施しておくことが望ましい．

(4) 堤体の浸透および安定性に関する検討

a) 基礎理論

飽和 - 不飽和浸透流解析の支配方程式に，赤井ら⁶⁾によって提案された式を用いた二次元

浸透流解析を行う。降雨に関しては、降雨強度を全水頭に変換するのではなく、地表面に対し流量として入力する。降雨強度が飽和土の透水係数を超えた場合は、その点は飽和したものとして扱う。

材料特性として重要なのは、不飽和土の透水係数と水分特性である。不飽和土の透水係数は一定ではなく、土の含水状態により変化する。そこで、飽和土の透水係数に対する不飽和土の透水係数を比透水係数 ($k_r = k/k_s$) として、体積含水率 θ と比透水係数の関係として与える。水分特性は、体積含水率とサクシオン s の関係 (水分特性曲線) として与える。これらの関係を近似する式として、van-Genuchten⁷⁾の式などがよく用いられる。また、不飽和土の試験は容易でないため、土質により代表的な値を用いることも多い。

b) 浸透解析のための土質定数

五十嵐川については堤体土 (上流側の破断面、天端からおよそ 1m 程度下) と基礎 1 (破堤区間の中央付近、砂礫層より上部) と基礎 2 (破堤区間の下流部、砂礫層より上部) を得ることができた。図 5-2 に粒度分布を示す。砂分を中心に、細粒分も 40% ほど含まれている。堤体の土質としては問題なさそうである。また、基礎 2 は細粒分を多く含んでいるものの、基礎 1 の土質は堤体と非常によく似ていることがわかる。破堤点の上流側と下流側の未崩壊堤防裏のり面より不攪乱試料を採取し、その間隙比を求めたところ、 $e = 1.01 \sim 1.34$ であった。ばらつきがあり、かつ非常にゆるいことがわかる。この

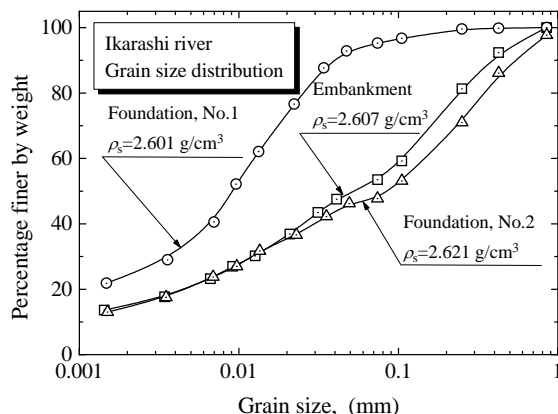


図 5-2 五十嵐川の堤体と基礎の粒度分布

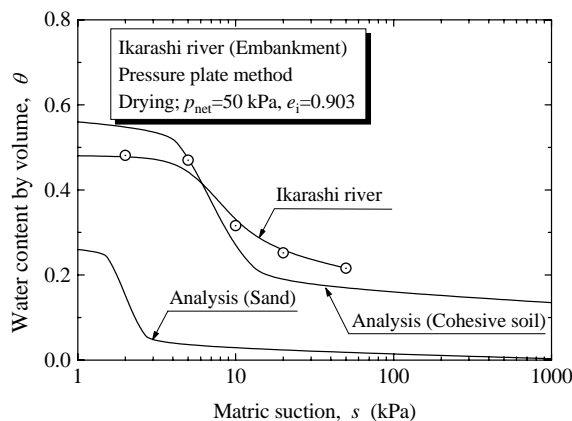


図 5-3 五十嵐川の堤体の水分特性曲線

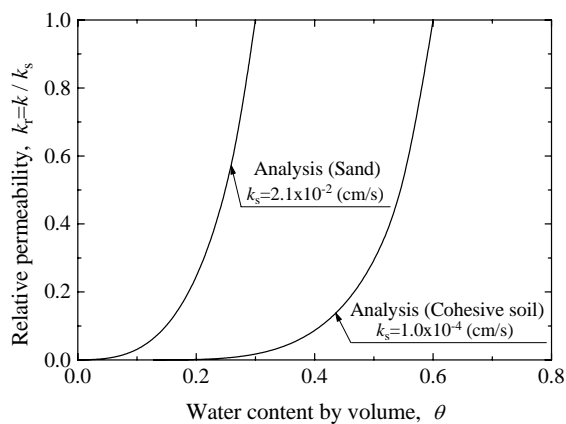


図 5-4 解析で用いた不飽和透水係数

理由として、のり面から 30~40cmほど掘り下げて試料を採取したが、まだ植物の根が存在しており、これにより間隙比が大きく計算されたと思われる。試験における供試体作製に関しては、含水比を調整した堤体土を $e = 1.00$ となるように静的に締固めて作製することとした。図 5-3 に堤体土の水分特性曲線を示す。空気侵入値は 5~10kPaの間である。多くの場所より試料採取できなかつたが、当然堤体内の土質にもばらつきがあることが考えられる。浸透破壊を考えたとき、透水性のよい材料の方が短時間で破壊に至りやすい。そこで、危険側を考え、サンプリングした試料と同等の土質定数をもった土と（解析では、粘性土と表記）、ずっと透水性のよい砂 (2.1×10^{-2} (cm/s)) で解析を行った（国交省の指針では堤体の透水係数として 1×10^{-3} (cm/s) を目安としている）。五十嵐川の堤体試料 ($e = 0.86$) の飽和透水係数は 3.68×10^{-4} (cm/s) であった。図 5-4 に解析で用いた不飽和透水係数を示す。基礎地盤に関しては、複雑な地層構造が考えられるが、ここでは堤体土と同じ土質とした。一般には、堤体土の方が基礎地盤より弱いと考えられるため、危険側の評価となる。また、築堤履歴や被災履歴があれば、安全率を割り増して評価することも通常行われている。

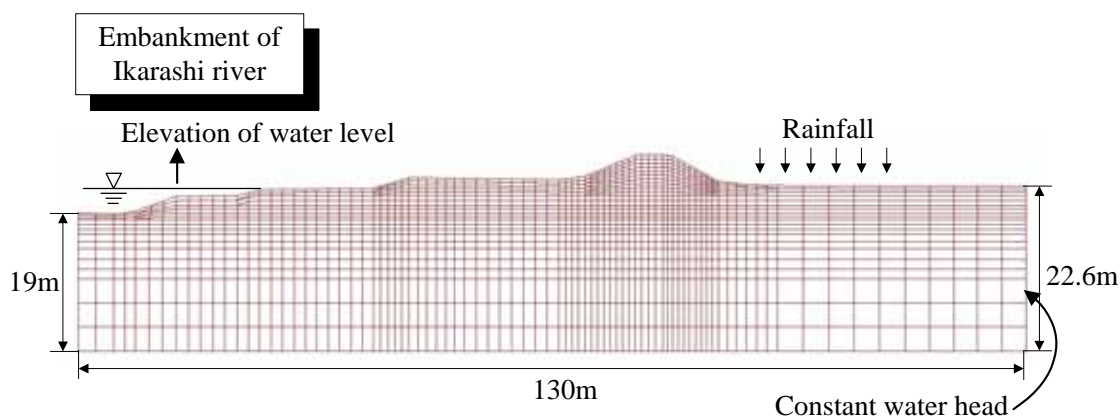


図 5-5 五十嵐川解析メッシュ

c) 浸透解析結果

解析には市販の FEM 解析を用いた。図 5-5 に解析メッシュを示す。左端境界（堤外地）では実測データに基づいて、川の水位を上昇させた。右端境界（堤内地）では、正確には内水位の変化を考慮しなければいけないが、本解析では水頭一定とした。土質は図 5-3, 5-4 に示した特性を用い、解析断面内で均一とした。

図 5-6 に 7 月 13 日の五十嵐川破堤点付近の水位上昇と栃尾市の雨量を示す。水位は雨量が多くなるのとほぼ同時に急激に上昇し、5 時間ほどで一度ピークを迎え、少し下降した後、またピークを迎えている。図に示してあるように、この二度目のピークの時に破堤したといわれている。つまり、満水位になると破堤に対するねばりがなく、すぐに決壊してしまったということである。また、降雨の増加とほぼ同時に、急激に水位が上昇している。こ

のような日本の河川においては、6時間程度の短い時間雨量も重要なパラメータになることがわかる。解析においては、この水位上昇データを用いた(解析開始より13時間後が破堤時間)。ただし、二度目のピーク以降はその水位を保持することとした(図5-6の破線矢印)。また解析における雨量については大きめの値を用い、50mm/h一定とした。また、天端の舗装道路を考慮し、その部分には不透水層を設けた。

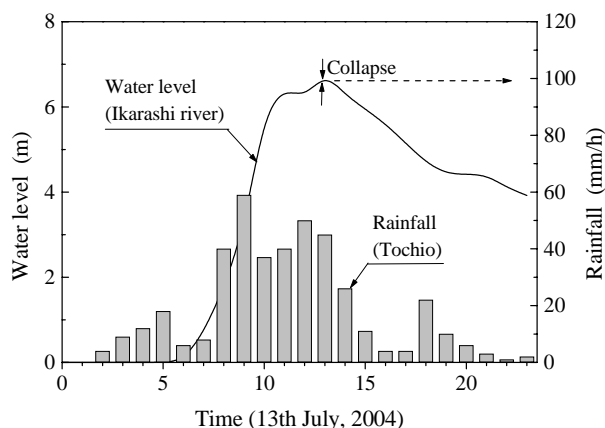


図 5-6 五十嵐川水位上昇と雨量

口絵 5-5 に五十嵐川堤防の浸透解析初期状態を示す。水位面を青線で、赤い方が負の水圧(サクション)の大きいことを示している。口絵 5-6 に 13 時間後までの解析結果を示す。解析の 13 時間後というのが二度目のピーク水量時であり、破堤もほぼこの時間で起こっている。雨量自体は、地表面からごく浅いところのみ影響しており、全体的にはそれほど大きく影響していないことがわかる。河川水位上昇において、粘性土では地表面しか水が浸透していない。砂であっても、破堤時刻には全く裏のり尻まで湿潤面は到達していない。つまり、浸透により破堤が起こったとは考えにくい。

この河川水位(ほぼ満水)の状態を保持して解析を継続した結果を口絵 5-7 に示す。堤体のみ抜き出して結果を示してある。30 時間後に、砂の場合にようやく湿潤面が裏のり尻に達している。50 時間後には、裏のり尻に動水勾配が発生しており、危険な状態になっている。粘性土の場合には、湿潤面の進展は遅く、堤体裏のりの水圧の上昇は起こっていない。ただし、降雨浸透により裏法がかなり水を含んだ状態になっている。粘性土の場合は含水状態の変化で、強度が著しく低下する場合があるので、注意が必要である。いずれにせよ、一日以上満水位の状態が続かない限り、浸透で問題になることはない。注意すべきは、一様均質な土質を仮定していることである。実際には、堤体から水が噴き出していたという証言もあり、モグラの穴等により、水みちができてしまっていることも考えられる。また、昔の旧堤防を嵩上げした場合は、新堤防との境目が不連続面となり、水が通りやすくなり、悪影響をおよぼすことも考えられる。このような弱面から少しずつ破壊が進行していくことも考えられる。ただしこのような不均質、不連続面を調査で見つけ、その影響を解析で定量的に考慮することは難しい。

d) 安定解析のための土質定数

強度試験として、五十嵐川堤体の不飽和試料の定圧一面せん断試験を行った。試料作製は、

含水比を変化させ、所定の空隙比 ($e = 1.00$)となるように静的締固めを行った試料を用いた。図 5-7 に一面せん断試験による代表的な応力と変位の関係を示す。鉛直応力が大きいほど、強度も大きくなっている。また、鉛直力が小さいほど、ピーク(最大強度点)が現れやすく、膨張挙動(ダイラタンシー)を示す。図 5-8 に、一面せん断試験より得られた破壊線を示す。試料の含水比 w に関しては10%から飽和状態、鉛直応力 σ_v に関しては 25kPa から 100kPa までの範囲で試験を行った。それぞれの含水比で破壊線は飽和土破壊線とほぼ平行になっている。また、含水比が小さいほど見かけの粘着力が大きくなっている。含水比が 30%から 20%で粘着力が大きく変化しているが、20%から 10%ではほとんど変化がない。この変化を詳しく見るために、図 5-9 に粘着力と体積含水比の関係を示す。水が土に浸透して、含水比が大きくなると、このような強度低下を考慮した解析をする必要がある。

e) 安定解析結果

次に、裏のり面の安定解析を行った。裏のり面に関しては、時間とともに土が水を含み、強度が弱くなり、土が重くなることにより滑動力が増す。まず、解析断面の強度定数 (c, ϕ) を決めるために、13 時間後(破堤時刻), 20 時間後、50 時間後、100 時間後の浸透解析の結果を使う。この結果にはサクシジョンのコンターが描かれているが、このコンター内のサクシジョンの値から図 5-3 の試験結果を用いて、土の含水状態(体積含水率)を読み取る。次に、図 5-9 からこの体積含水率のときの粘着力を読み取り、このコンター内の土の粘着力とする。なお、図 5-8 の試験結果より内部摩擦角 ϕ は含水

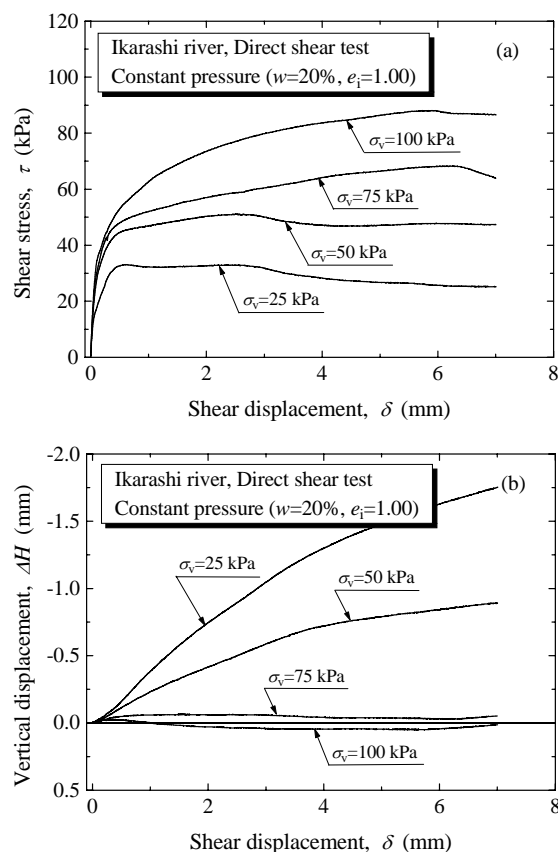


図 5-7 五十嵐堤体土の一面せん断試験結果

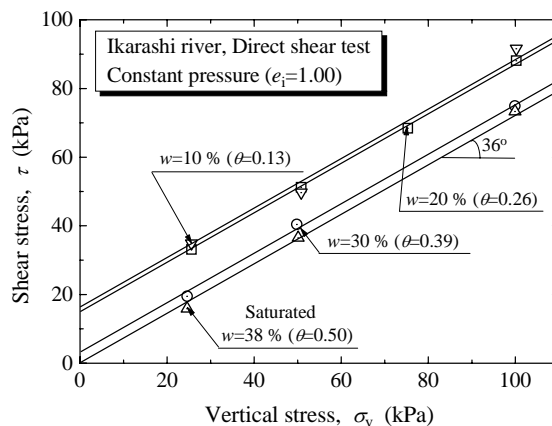


図 5-8 五十嵐堤体土の破壊線

状態によらず、36度で一定である。このようにして求めた13時間後の解析堤防断面における粘着力を口絵 5-8 に示す。

安定解析には、スライス法による円弧すべりを用い、解法はスペンサー法を用いる。計算により、最も小さい安全率とそのときの円弧すべり形状を取り出す。まず、13 時間後の表のり面の安定に関する解析結果を口絵 5-9 に示す。解析結果より、表のり面のごく薄い表層部分が最も危険ということであるが、安全率 F_s は 1

を上回っており、崩壊の危険性は小さい。表のり面は、飽和度が高くなるものの、河川水位が崩壊を防ぐ力として働くため、安全率はそれほど小さくならない。そこで以降は、裏のり面の安定について考える。口絵 5-10 に示すように、破堤時刻である 13 時間後の安全率は大きく 1 を上回っており、安定であるといえる。20 時間後には、浸潤線が裏のり側に進展してくることにより、表のり側まで含んだ大きなすべり破壊となっているが、安全率はまだ大きく 1 を上回っている。浸潤線が裏のり尻に達した後は（50 時間後）、のり尻の表面で安全率が 1 を下回り、破壊が起こることになる。浸潤面がのり尻に達したときは、のり尻で容易に破壊が起こり、この破壊がのり面全体に渡る破壊を誘起すると考えられる。しかしながら、今回の破堤した時刻（13 時間後）には堤体は安定であり、浸透による破壊の可能性は小さい。

(5) まとめ

五十嵐川の破堤のメカニズムを検討した。現地調査の結果、表のり面の浸食により破堤が起こった可能性は低いと考えられる。基礎地盤のパイピングは発生したようであるが、破堤を引き起こすほど重要なパイピングがあったかについては、そのような目撃証言もなく、堤体や基礎地盤も流されてしまっているため不明確である。一様均質地盤を仮定した解析の結果、浸透による破壊は起こさないことが明らかになった。以上のことを総合的に考えれば、越流が破堤の引き金となった可能性が最も高い。越流に関しては、兩岸とも、幅広い範囲で起こっていたという証言があるが、この地点が破堤した理由として、植生の影響や越流深が最もあったことが考えられる。

5.4 刈谷田川の破堤

刈谷田川においては 4 箇所、また稚児清水川においては、刈谷田川に合流する地点で兩岸とも破堤し、中之島町および見附市に多大な被害を与えた。これにより、死者 3 名（中

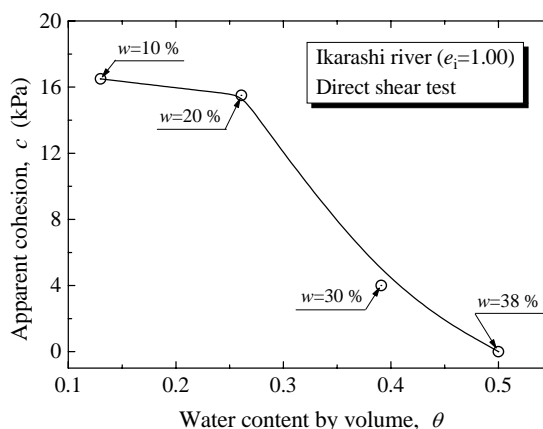


図 5-9 五十嵐堤体土の粘着力

之島町), 家屋の全壊 10 戸, 床上浸水は 1,000 戸を越えた。

特に被害が甚大であったのが, 中之島町中之島における刈谷田川の左岸の破堤である(口絵 5-11)。川の流れを青矢印で, 破堤による水の流れを赤矢印で示してある。堤防近くにお寺や民家が迫っていたため, 全壊の家屋も多くなった。この破堤原因について定性的な考察を行う。

口絵 5-12 に破堤点を対岸から撮った写真を示す。下流側には風の絵の描かれた

化粧護岸が残っており, この辺りは高水護岸が施されていたようである。上流側は階段が残っており, のり面保護があるため, 川の流れがのり面を浸食する可能性は低いと考えられる。口絵 5-13 に破堤点より堤内地側を写した写真を示す。堤防裏のり尻にあったと思われる擁壁が流されてしまっている。また, 裏のり尻付近には池ができているが, これは破堤により洗掘されたものと思われる。水位が上昇すると, 堤防や地盤の弱いところにおいて, パイピングを起こす可能性があるが, 五十嵐川同様, 破堤に結びつくほど大規模なパイピングが発生したかどうかは, 断言できるほど情報がない。図 5-10 に刈谷田川堤体と基礎の粒度分布を示す。証言より, 破堤時刻は満水位になった直後(午後 1 時過ぎ)ということであるが, 堤体には細粒分も 50%ほど含まれているため, 満水位になって即座に浸透破壊を起こすとは考えにくい。ただし, 細粒分が多めであることより, 水を含むと軟らかくなる。破堤箇所は堤体の幅も短かったことより, 亀裂などが発生し, そこが弱面となり破堤に至った可能性もある。また, 越流も発生しており, 裏のり面が損傷を受けて破堤した可能性も高い。問題は, 越流し始めてからの破堤までの時間が短いということである。今後は, 越流してもすぐには破堤しない, ねばりのある堤防も考えていかなければならない。

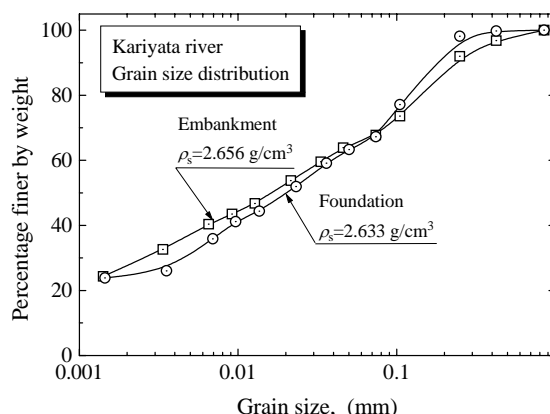


図 5-10 刈谷田川堤体と基礎の粒度分布

1.5 猿橋川の破堤

また長岡市富島町でも猿橋川が破堤し, 長期間水が引かずに, 農作物等に深刻な被害があった。表 5-2 にあるように, 猿橋川は五十嵐川や刈谷田川と比較すると規模の小さい川である。口絵 5-14 に破堤点より堤内地側を写した写真を示す。ここでもやはり堤防裏のり尻付近に池ができている。ここで農業を営んでいる住民の話によると, この堤防は大雨の度に欠壊して補修しているそうである。補修しても違った場所が欠壊するので, 堤防自体が弱い(施工時の締固め不足)と考えられる。実際, 口絵 5-15 に示すように, 堤体内にボーリング跡が多数見られた。堤体裏のり面に塩ビパイプを打ちこんで試料を採取したが(口

絵 5-16), 簡単に塩ビパイプを堤内に挿入でき, また取りだした試料は, 容易に塩ビパイプから抜け落ちてしまったことより, 堤体が非常に軟弱であることがわかる.

図 5-11 に堤体の粒度分布を示す. 粒度の良い砂を含んでおり, 細粒分が 40%ほど含まれている. 土粒子密度が 2.566g/cm^3 と小さめの値となっているが, これは細かい植物の根などの有機分が含まれているからであろう. 不攪乱試料

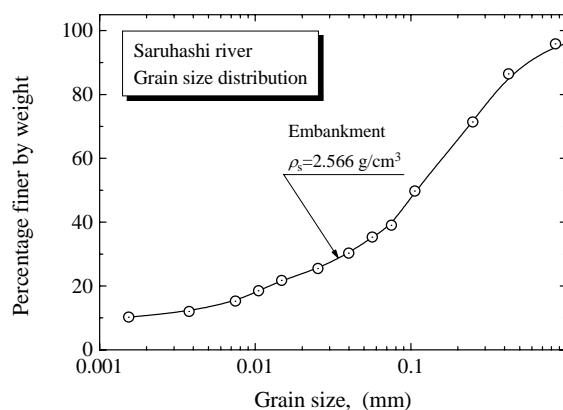


図 5-11 猿橋川堤体の粒度分布

よりその乾燥密度を求めたところ, 0.848g/cm^3 ($e = 2.026$) であり, 非常にゆるく堆積していることがわかる. 口絵 5-17 にあるように, 土を水に浸すと植物の根などが浮いてくることより, 間隙比を大きめに評価しているとはいえ, 異常な値である. 細粒分が多く適用範囲外であるが, JIS A 1224 の試験により最大, 最小間隙比を求め ($e_{\max} = 2.012$, $e_{\min} = 1.253$), 相対密度を計算するとほぼゼロとなることから非常にゆるい状態であることがわかる. これでは, 水位が上昇するといつ破堤してもおかしくない状態であり, この周辺の堤防全体にわたる調査を行い, 補強 (再度締固める) することが必要であろう.

謝辞: 五十嵐川と刈谷田川の試料に関しては, 新潟大学工学部建設学科大川秀雄教授より提供されたものである. 土質試験に関しては, 長岡技術科学大学環境・建設系地盤工学研究室の学生諸君の協力を得た. ここに謝意を表する.

参考文献

- 1) 吉越正勝: 第四系 日本海沿岸地域, 日本の地質 4, 中部地方 I, 共立出版, pp. 123-124, 1988.
- 2) 信濃川水系新潟県地域主要水系調査書 (信濃川, その他), 国土庁土地局国土調査課, 1985.
- 3) 水谷武司: 防災地形 災害危険度の判定と防災手段, 古今書院, pp. 26-41, 1982.
- 4) 平成 16 年 7 月新潟・福島豪雨 (第 2 報), 国土交通省北陸地方整備局・新潟県, pp. 4-5, 2004.
- 5) 北陸地方土木地質図解説書, 北陸地方土木地質図編集委員会, 1990.
- 6) 赤井浩一, 大西有三, 西垣誠: 有限要素法による飽和 - 不飽和浸透流解析, 土木学会論文報告集, 第 264 号, pp. 87-96, 1977.
- 7) van Genuchten, M. Th: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society American Journal, Vol. 44, pp.892-898, 1980.

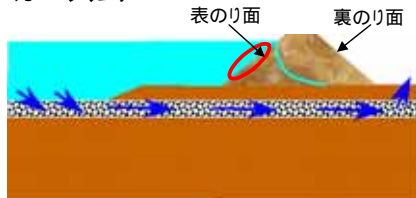


口絵 5-1 新潟県中越地域の河川と微地形の関係⁵⁾

破堤のメカニズム

1. 浸食

川の流れによる表のり面の浸食，すべり破壊



2. パイピング

旧河道などの砂礫層を伝って起こる



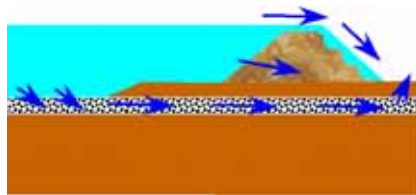
3. 浸透

のり尻の劣化や強度低下によるすべり破壊を誘発



4. 越流

裏のり面を削りとっていく



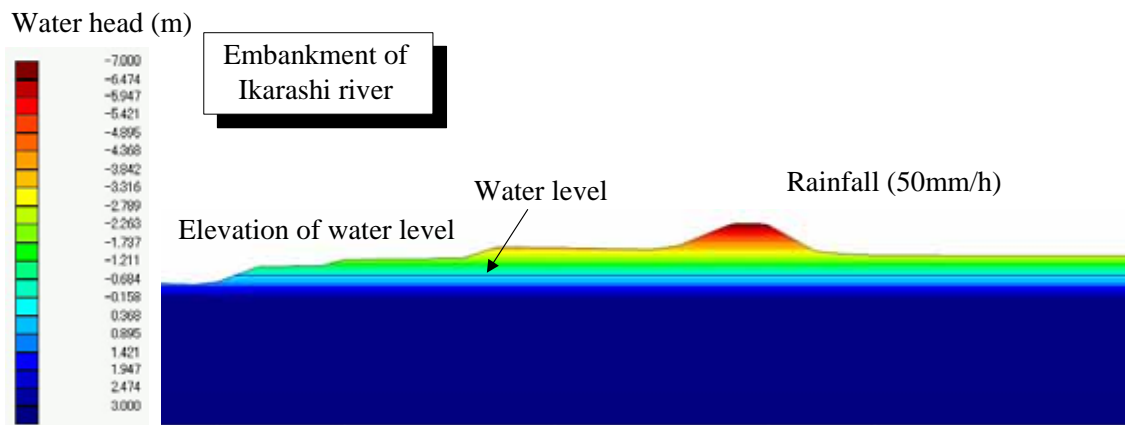
口絵 5-2 破堤のメカニズム



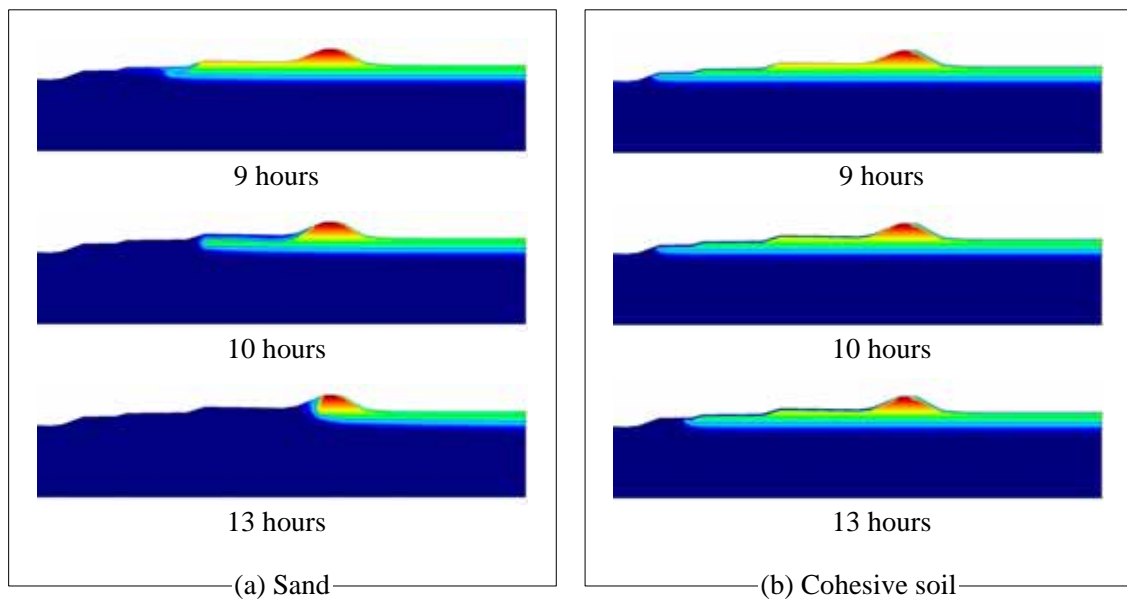
口絵 5-3 三條市諏訪における五十嵐川の破堤（提供：国土交通省北陸地方整備局）



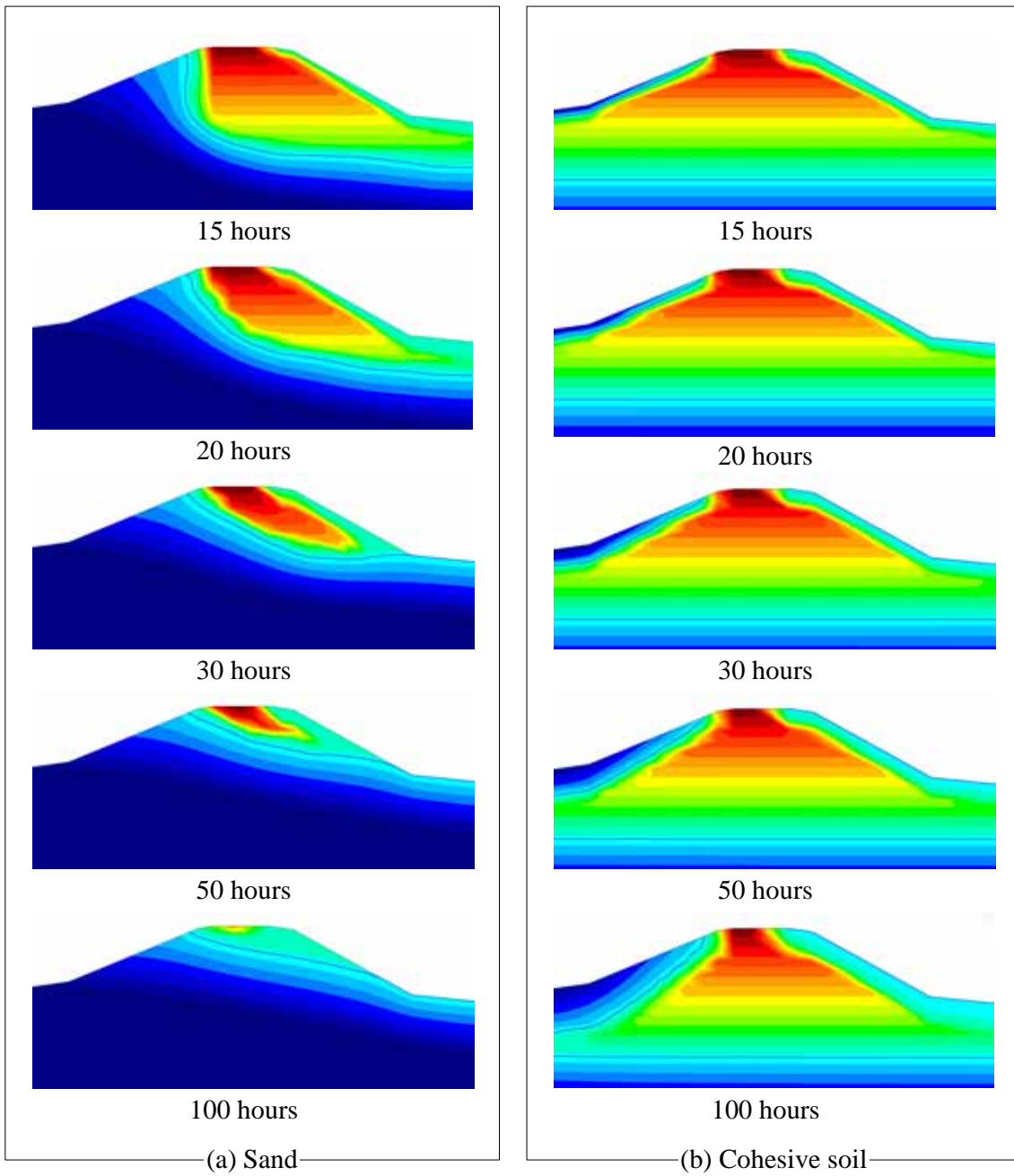
口絵 5-4 破堤点に残る大きくえぐられた跡



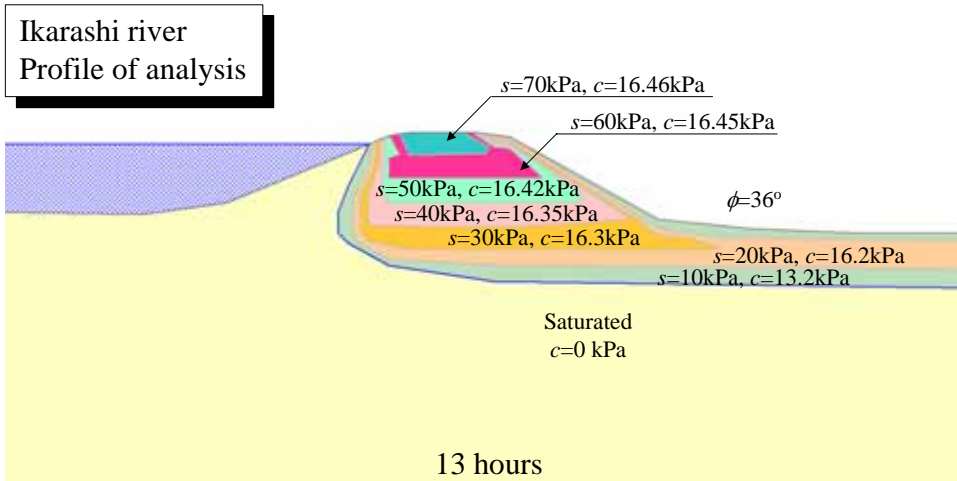
口絵 5-5 五十嵐川堤防浸透解析の初期状態



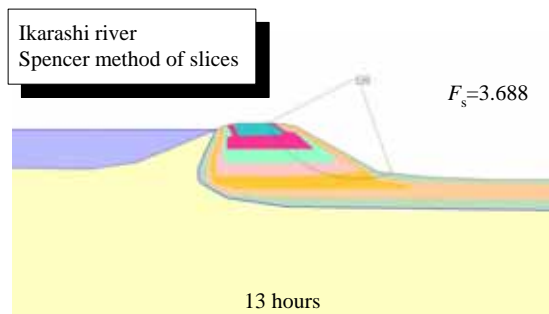
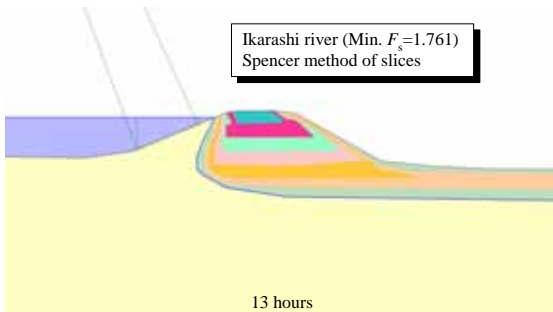
口絵 5-6 五十嵐川堤防浸透解析結果（破堤時刻まで）



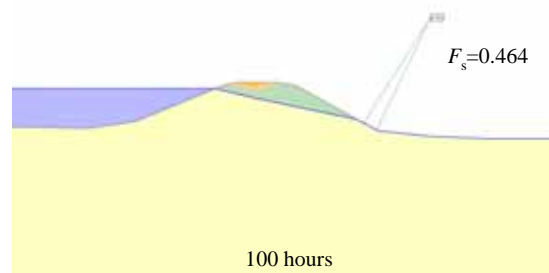
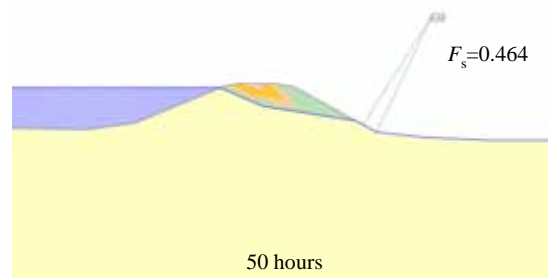
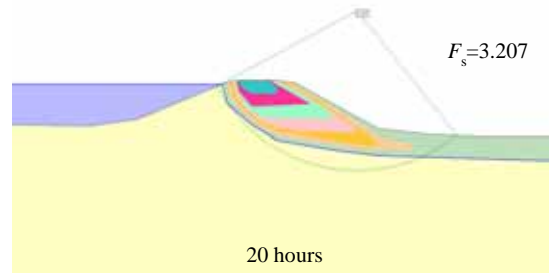
口繪 5-7 五十嵐川堤防浸透解析結果（破堤時刻以降）



口絵 5-8 五十嵐堤体解析断面における強度定数



口絵 5-9 五十嵐堤体の表のり面の安定解析



口絵 5-11 中之島における刈谷田川の破堤
(提供：国土交通省北陸地方整備局)

口絵 5-10 五十嵐堤体の裏のり面の安定解析



口絵 5-12 破堤箇所の表のり面



口絵 5-13 破堤箇所の堤内地側



口絵 5-14 猿橋川破堤箇所の堤内地側



口絵 5-15 猿橋川堤体のパイピング跡



口絵 5-16 猿橋川堤体の試料採取



口絵 5-17 植物の根などを含む猿橋川堤体土