

2016年台風10号による二ツ森川の破堤箇所における詳細調査及び被災要因分析

Detailed investigation and factor analysis of disaster for levee destruction of Futatsumori-river due to Typhoon No.10 in 2016.

東 拓生¹・秋場 俊一²・石原 雅規³・佐々木 哲也³
Takuo Azuma, Shunichi Akiba, Masanori Ishihara, Tetsuya Sasaki

¹正会員 国立研究開発法人 土木研究所 地質・地盤研究グループ(土質・振動)
(〒305-0035 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 株式会社 建設技術研究所 大阪本社 水工部
(〒541-0045 大阪市中央区道修町1-6-7)

³国際会員 国立研究開発法人 土木研究所 地質・地盤研究グループ(土質・振動)
(〒305-0035 茨城県つくば市南原1-6)

Typhoon 10 from August 30 to 31, 2016 caused the embankment to collapse at around 0.1 km on the left bank of the Futatsumori-river (Shitchinohe-Town, Kamikita-gun, Aomori Prefecture). The trace level of the damaged area is lower than the top of the embankment and the state of sediment remaining between the roots of the fallen trees on the river front side is presumed to be low flow velocities other than the breakout mouth, Because it is difficult to think of bankrupt due to erosion, I guessed it was broke by permeation.

The authors conducted observation and recording of cross section by opening of levee breakage site, field permeability test, collection of soil sample and indoor soil test (indoor permeability test etc) by sampled sample, sounding investigation by soil strength inspection bar at the site etc In addition to conducting the analysis, we analyzed the factors of disaster by performing penetrant flow analysis based on these investigation results.

Key Words : *Levee, Damage factor analysis, Excavation investigation, Cone penetration test, Seepage analysis, Circular arc method*

1. はじめに

2016年8月30日～31日の台風10号により、高瀬川水系二ツ森川左岸0.1km付近(青森県上北郡七戸町)において堤防が決壊した。被災箇所の痕跡水位が堤防天端よりも低く、川表側の河岸の倒木の根の間に土砂が残存していた状態から破堤口以外での流速が低かったと推定されるなど、越流や侵食による破堤とは考え難いことから、浸透により破堤したものと推測された。そこで、被災要因をより詳細に検討するために、著者らは、堤防決壊箇所の開削による断面の観察・記録、現場透水試験、土層強度検査棒によるサウンディング調査、土質試料の採取及び採取試料による室内土質試験(室内透水試験等)等を行い、その一部については既に報告したところである

¹⁾ 本論文では、調査結果を振り返りつつ、既報で触れることができなかった調査結果を加えた上で、これらの調査結果に基づく浸透流解析を行うことにより、被災要因の分析を行った。

2. 被災の概要

(1) 被災箇所の概要及び被災時の状況

被災箇所及び被災状況を図-1に示す。二ツ森川は、青森県東部を流れる高瀬川の支川である坪川の支川であり、青森県上北郡東北町から七戸町までを流れる中小河川である。

台風10号における降雨量は、8月28日～8月31日における観測では、二ツ森川水域に近い気象庁の七戸町鶴見平



図-1 ニツ森川の被災箇所及び被災状況

(出典: 青森県提供資料)

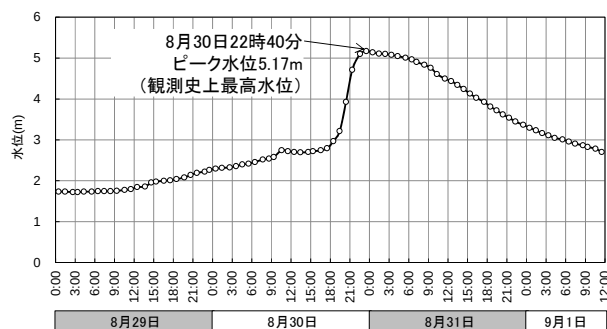


図-2 坪川天間館水位観測所での河川水位

(出典: 青森県提供資料に基づき作成)

の観測所で最大時間雨量21mm程度、累加雨量108mm程度であったが、坪川上流域の降雨量が非常に多く、上北鉦山雨量観測所において、最大時間雨量42mm、累加雨量273mmを記録している。また、図-2に示すとおり被災時の河川水位については、坪川の天間館水位観測所のデータによると、8月30日の22時40分に観測史上最高水位5.17mに達した。



写真-1 川表側の樹木根の状況

被災直後の9月2日に国土技術政策総合研究所河川研究室とともに被災箇所の現地調査を実施した。被災箇所の上下流にお

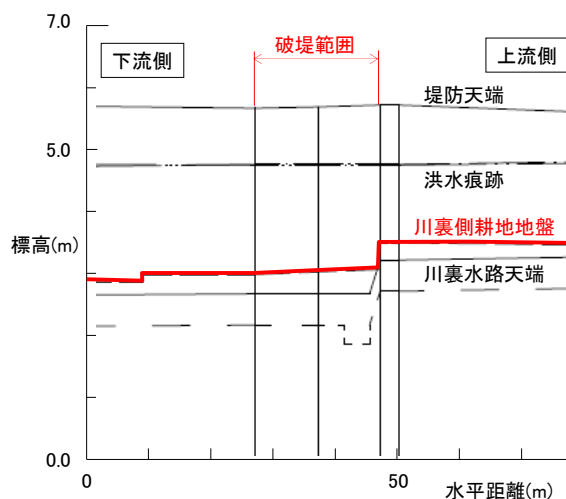


図-3 破堤範囲付近の縦断面

(出典: 青森県提供資料に基づき作成)

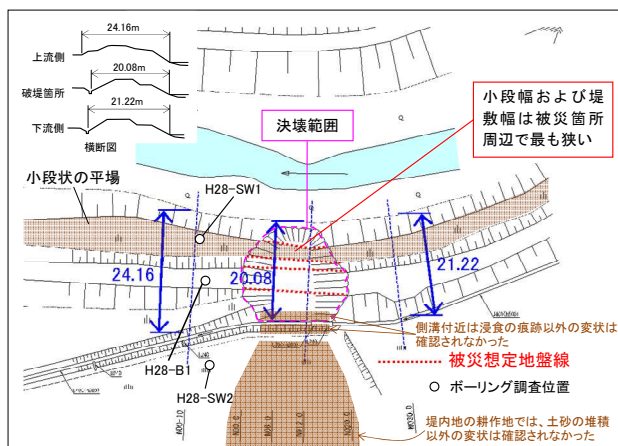


図-4 測量結果に基づく被災箇所周辺の地形

(出典: 青森県提供資料に基づき作成)

ける痕跡水位を確認した結果、堤防天端より低く、越流は発生していないものと考えられた。また、破堤口周辺は川幅が比較的広く、川表側で多く見られた倒木の根が土を抱えたままの状態(写真-1参照)であったことから、流速は高くなかったと推測され、侵食により破堤したとは考えづらい。

図-3に、破堤範囲付近の縦断面図を、図-4に測量結果に基づく被災箇所周辺の地形を示す。被災箇所の堤内地盤高は、一連区間の中で低く、直上流では耕作面が約55cm高かった。また、下流側では堤防と堤脚水路の間に坂路があるため堤防断面が大きくなっており、坂路のさらに下流～坪川合流部の間は、表のり尻付近が一段高い平地になっていた。さらに、川表側には天端から約0.5m低い位置に小段状の平地があるが、被災箇所付近では、この小段状の平地の幅が最小となっていた。

川裏側の側溝には変位や角欠け等の力を受けた痕跡は見つけられず、側溝の堤防側及び堤内地側の少し盛り上がった箇所では、土が侵食を受けた痕跡が確認できたが、それ以外の変状は一切確認できなかった。堤内地の耕作地の状況も同様で、堤防付近の侵食と少し離れた位置における土砂の堆積以外の変状は確認できなかった。以上

のことから、のり尻の下で基礎地盤からパイピングを起こした可能性も低いと考えられた。

最初に現地調査を実施した際には、応急復旧済みであったため、破堤断面全体は観察できなかったが、川表側のり尻付近に断面が露出した部分があり、ここで透水性が高いとみられる砂質土を主体とした土層が確認された。この土層の高さは裏のり尻の高さに近く、限られた範囲ではあるが、水平に連続している様子も確認された。また、破堤の際に堤内地側に流出し堆積した土砂の中には、かなりの量の亜角礫（角の取れた礫）や粗砂が含まれていたが、これらの礫や粗砂は少なくとも川表側の破堤断面が露出していた範囲では確認されなかった。

(2) 被災箇所周辺の地質

青森県が今回の開削調査範囲よりも約15m下流側で実施した地質調査結果を図-5に示す（地質調査の平面位置は図-4参照）。堤体は6段階の築堤履歴が確認されており、全体的にシルト～砂質土で構成されている。第3、第4盛土層においては、試験方法が明確ではないが、現場透水試験が行われており、その結果によれば透水係数が $1.51 \times 10^{-5} \sim 2.29 \times 10^{-5}$ m/secとなっており、透水性は比較的高いものと考えられる。また、堤体下には沖積砂質土層が6～7m程度分布し、その下層には沖積粘性土層が堆積している。

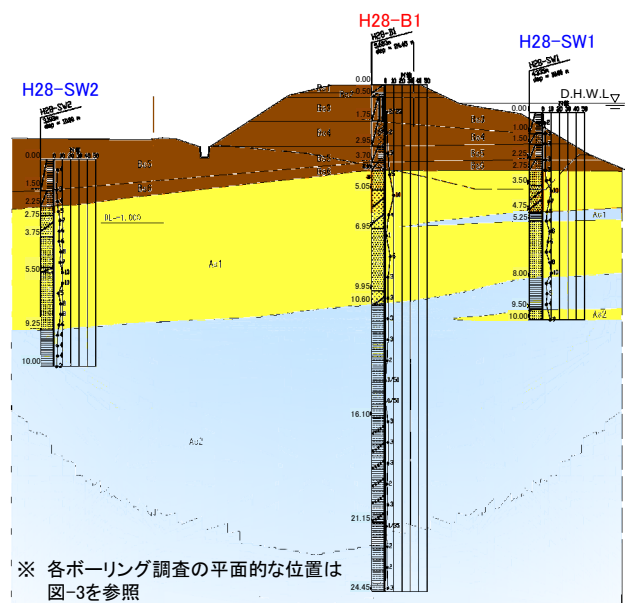
3. 調査結果

(1) 開削調査の結果

開削調査は、本復旧前の平成29年2月18日～19日に実施した。開削断面の状況を図-6に示す。開削断面を観察すると、堤体の川裏側～天端部分はシルト混り砂で構成されているが、川表側の堤体はやや細粒分の少ない砂質土を主体としており、両者の境界は不明瞭であった。また、川表側のり面から数mの範囲には樹木根の混入がみられた。

シルト混り砂層の下部（天端から-3m）からは、内部に薄いシルト層を多数挟んだ砂質土層が確認され、この層は図-5の柱状図のAS1層の最上部の砂層に相当すると考えられ、この層以深が自然堆積層（基礎地盤）であると推測される。

さらに、この自然堆積の砂質土の下部には、厚さ40cm程度の



地質時代	地層名	記号	土質構成	N値	γ_1 (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ (°)	透水係数 k(m/s)	
									試験値	フレーガー法
新 生 代	第1盛土層	Bs1	砕石	—	20.0	—	0	40	—	—
	第2盛土層	Bs2	礫混じりシルト	—	18.0	—	50	15	—	—
	第3盛土層	Bs3	有機質土	2	15.2	15.4	17	18	2.29×10^{-5}	2.34×10^{-5}
	第4盛土層	Bs4	シルト質砂	2	15.2	17.2	5	34	1.51×10^{-5}	6.21×10^{-5}
	第5盛土層	Bs5	シルト	3	18.0	—	50	15	—	1.77×10^{-5}
	第6盛土層	Bs6	細砂	—	19.0	—	30	25	—	—
第 四 紀	沖積第1砂質土層	As1	細砂 礫混じり砂・軽石混じり砂	4	17.0	—	0	25	—	8.48×10^{-5}
	沖積第1粘性土層	Ac1	粘性土（推定）	—	—	—	—	—	—	—
	沖積第2砂質土層	As2	砂質土（推定）	—	—	—	—	—	—	—
	沖積第2粘性土層	Ac2	シルト 貝殻混じりシルト	2	14.0	—	15	10	—	—

図-5 被災箇所近傍の地質断面図

(出典: 青森県提供資料より抜粋)

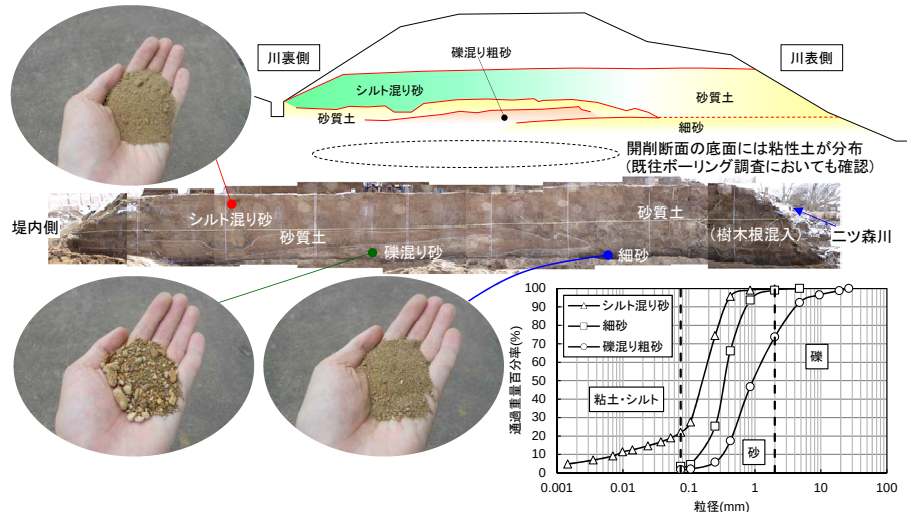


図-6 開削断面の状況

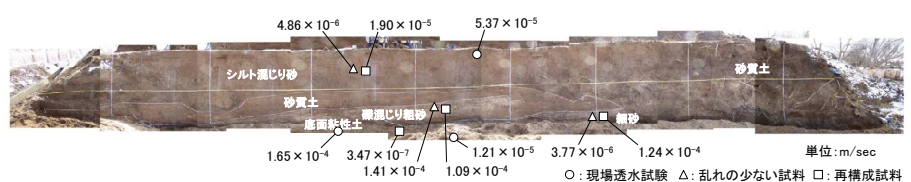


図-7 開削断面の透水係数分布

礫混り粗砂層が分布しており、これは図-5のH28-B1ボーリングの柱状図の5m以深の礫混り砂層に相当すると考えられる。図-5のボーリング柱状図は開削断面よりやや下流側のものであり、開削断面では礫混り砂層が天端から3.4mと浅層で出現していることから、破堤箇所においては、より浅い位置に分布していたことが想定される。礫には角がなく、長径が数cm程度のもので含まれており、2.1で述べた堤内地側に堆積していた大量の垂角礫や粗砂は、この層由来のものであると考えられる。その量から推定すると破堤箇所では礫混り砂層が厚かった可能性もある。礫は、上層ほど大きな粒子が多く含まれ、下層ほど少なくなり、下層の細粒分の少ない細砂層との境界は不明瞭につながっている。この細粒分の少ない細砂層と礫混り粗砂層は川表側から川裏側まで横断的につながっているものとみられ、川表側から浸透した河川水がこれらの層を浸透し、容易に裏のり尻付近に到達できたと考えられる。

細砂の下部には粘性土層が分布していると考えられるが、川裏側まで広がっているかは、今回の開削調査では確認できなかった。

(2) 開削断面の透水係数分布

開削調査の際に行った現場透水試験及び現地から採取した試料を用いた室内透水試験の結果に基づく、開削断面の透水係数の分布を図-7に示す。試験結果には、ばらつきがみられるが、細砂層及び礫混り粗砂層の透水係数

($1.09 \times 10^{-4} \sim 1.65 \times 10^{-4}$) は、堤体のシルト混り砂層 ($4.86 \times 10^{-6} \sim 5.37 \times 10^{-5}$) より平均的に5倍程度、下層の粘性土層 ($3.47 \times 10^{-7} \sim 1.21 \times 10^{-5}$) より平均的に約25倍高く

なっており、透水性が低いシルト混り砂層と粘性土層の間に、比較的透水性の高い細砂層及び礫混り粗砂層が挟まれたような断面となっていることがわかる。

4. サウンディング調査

破堤箇所における比較的透水性の高い砂層及び礫混り粗砂層の分布状況を把握するため、土層強度検査棒を用いて、写真-2に示すとおり横断方向3測線、縦断方向1測線のサウンディング調査を行った。

図-8に横断方向3測線のサウンディング調査で確認された、貫入抵抗が増加する層の深度分布を示す。貫入抵抗が増加する層の出現深度は、川裏側では横断方向3測線のうち開削面（破堤箇所近傍）で最も浅く、破堤箇所から遠ざかるに従い深くなっている。また、図-9に示す

縦断方向のサウンディング調査でも、貫入抵抗が増加する層の出現深度は、破堤範囲において他の箇所より最大で約66cm浅い深度で出現している。

図-5のボーリング調査結果では、天端から深度4m以深に砂層が、5m以深に礫混り粗砂層が記載されている。深度4m付近が川裏側堤脚水路から1m下がりであるので、貫入抵抗が増加する高さは礫混り粗砂層の上面を示していると推測される。

破堤した範囲の土は堤内地側に流出したため明確にはわからないが、破堤箇所付近は礫混り粗砂層が浅い位置に分布していたことが、漏水を助長したものと考えられる。また、破堤範囲ののり尻から堤外地側へ1m程度の箇所ののり尻とほぼ同じ高さに礫混り粗砂が残存していたことが現地で確認されている。

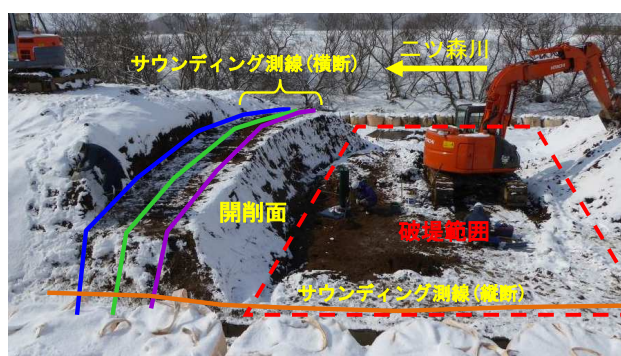


写真-2 サウンディング調査の概要

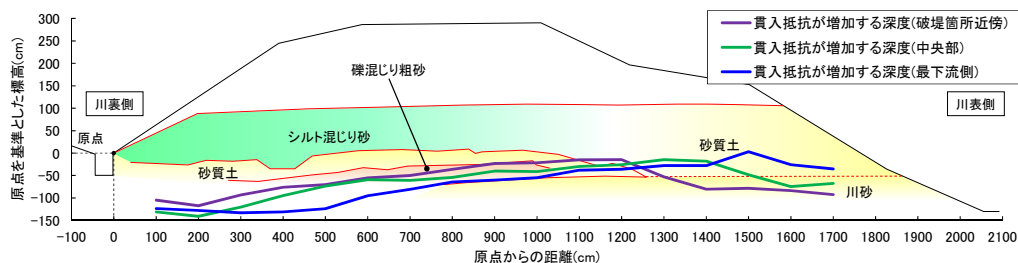


図-8 横断方向のサウンディング調査結果

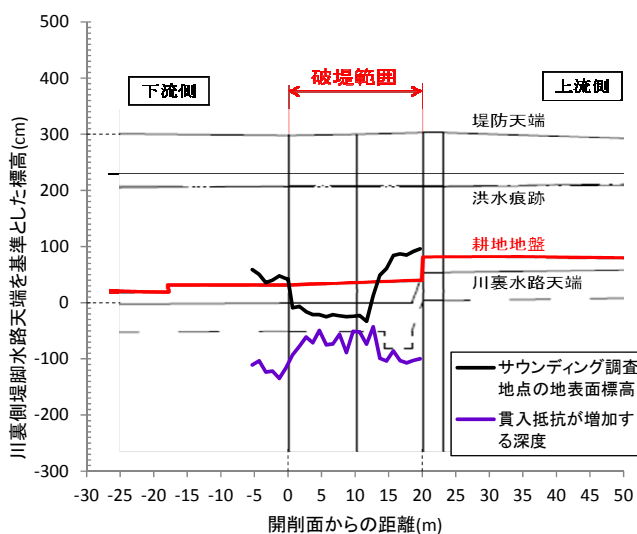


図-9 縦断方向のサウンディング調査結果

5. 調査結果に基づく被災要因の分析

現地状況や開削調査結果を踏まえて、被災の要因を分析した。被災箇所は図-10に示すとおり、破堤箇所より上流側では堤外地側の小段状の平場が広く、堤内地側の耕作面も高く、また破堤箇所より下流側では、堤内地側に坂路と小段があり、破堤箇所はその上下流に比べて堤体幅が狭小で動水勾配が大きくなりやすい条件であり、浸透安全性が低かったと推定される。

また、土質の面からみると、破堤箇所ではその上下流に比べて比較的浅層に厚く透水性の高い砂質土及び礫混り粗砂層が横断的に分布しており、これらの砂層を河川水が浸透したことで、川裏側のり尻付近に高い動水勾配を発生させたものと推測される。

これら堤防の外形的要因及び土質的要因により、浸透破壊による破堤が発生したものと推測される。

6. 浸透流解析及び円弧すべり計算

(1) 解析方法及び解析モデル

開削調査を行った断面を対象として、2次元非定常浸透流解析及び円弧すべり計算により破堤の検証を行った。

解析モデルを図-11に、解析に使用した土質定数の一覧を表-1に示す。解析モデルは、開削調査及び測量等で得られた断面形状及び土層分布を再現し、各層の透水係数については、現場透水試験及び現場から採取した試料を用いた室内透水試験から得られた透水係数の対数平均値を用いた。また、強度定数（粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ ）は、現地から採取した乱れの少ない土質試料によるCUB試験結果に基づき、 c' 、 ϕ' （有効応力表示）を c_d 、 ϕ_d として用いた。

浸透流解析における外力のうち、水位については図-12に示すとおり、坪川の天間館水位観測所での水位波形（図-2参照）の全体の倍率を調整し、そのピーク水位を現場で確認した洪水痕跡水位に調整した波形を用いた。降雨量については、気象庁の青森県七戸の観測所での降

雨量に基づいて作成した波形を用いた。

Case-1では、開削断面を想定し、堤体下層に比較的透水性の高い砂質土層、礫混り粗砂層、細砂層を再現したモデルで解析を行った。

Case-2については、土層強度検査棒によるサウンディング調査結果と、破堤範囲ののり尻から堤外地側へ1m程度の箇所ののり尻とほぼ同じ高さに礫混り粗砂が残存していたことが現地で確認されていた。そのため、破堤範囲では比較的透水性の高い砂質土層が厚く堆積し、浅い位置まで分布することを想定した解析を行った。これにより、透水性の高い砂層が川裏側のり尻付近の動水勾配の発生に及ぼす影響を検討した。

(2) 解析結果

図-13に浸透流解析及び円弧すべり計算の結果を示す。坪川の水位がピークを迎えた2016年8月30日23時頃の解析結果を比較すると、開削断面を想定したCase-1では、川裏側のり尻に0.69程度の動水勾配（水平・鉛直合成、以下同じ）が発生している。一方、比較的透水性の高い砂質土層が厚く堆積し、浅い位置にあったことを想定したCase-2では、Case-1と比較してのり尻付近の堤体内水位が高く、川裏側のり尻の動水勾配も0.77と、Case-1と比較して約1.1倍となっている。

また、円弧すべり計算による最小安全率は、Case-1で1.45。Case-2では1.28となっており、開削断面を想定したCase-1よりも破堤範囲を想定したCase-2の最小安全率が低くなっている。Case-2の低い円弧すべり安全率でも1を上回っており、破堤要因は前述のとおり、高い動水勾配がのり尻付近に作用したことであると推測される。

以上のことから、堤体下の比較的透水性の高い砂層が、浅い深度に厚く分布していたことが、浸透安全性を低下させ、今回の破堤被害に大きく影響を及ぼしたものと考えられる。

7. まとめ

2016年8月の台風10号により破堤被害が発生した高瀬川水系二ツ森川において開削調査等を行い、破堤被害の要因分析を行うとともに、浸透流解析を行い破堤の検証を行った。

開削調査や測量等の結果、破堤が発生した範囲は、前後（上下流）と比較して堤体幅が狭小であるとともに、堤体下部の浅層に透水性の高い細砂層及び礫混り粗砂層が厚く分布していた。

また、浸透流解析によると、開削断面を想定したケースでは、川裏側のり尻付近の動水勾配が0.69程度であった

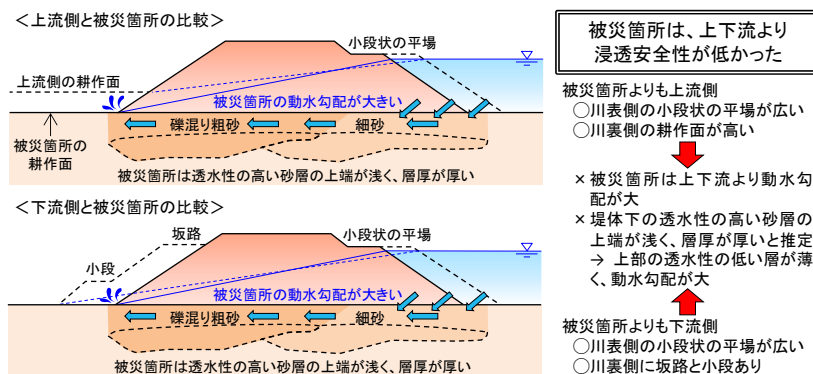


図-10 被災箇所とその上下流との浸透安全性の比較（イメージ）

が、堤体下層にある比較的透水性の高い砂質土層、礫混り粗砂層、細砂層を、堤体と同じシルト混り砂層に置き換えて解析を行った結果、堤体内水位が低く抑えられ、川裏側のり尻付近の動水勾配も0.77程度と、透水性の高い砂層がある場合と比較して約1.1倍に高くなっていた。

以上のことが破堤範囲の浸透安全性を低下させ、今回の破堤被害に大きく影響を及ぼしたものと考えられる。

8. 謝辞

開削調査の実施にあたっては、青森県県土整備部、上北地域県民局地域整備部の皆様に多大なご協力を頂いた。厚く謝意を表する。

参考文献

- 1) 東, 秋場, 石原, 佐々木: 2016年台風10号による二ツ森川の破堤箇所における開削調査, 第5回河川技術堤防シンポジウム, 平成29年11月
- 2) (財)国土技術センター: 河川堤防の構造検討の手引き (改訂版), 平成24年2月

(2018. 4. 3受付)

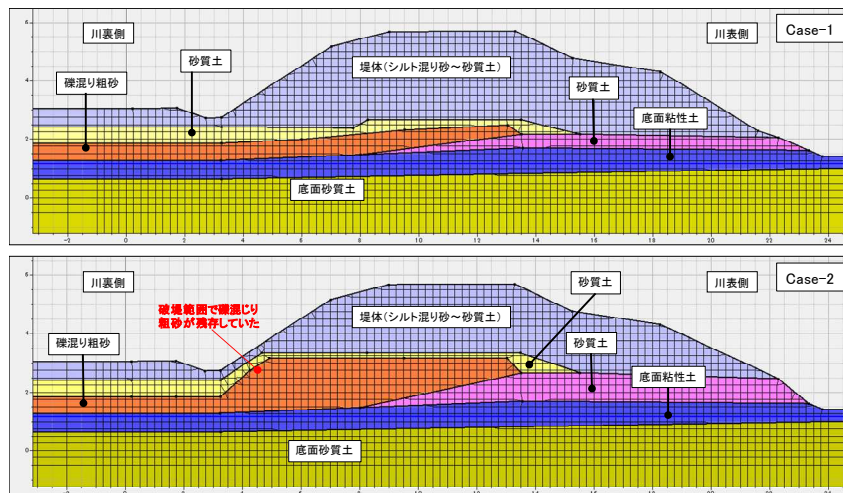


図-11 解析モデル

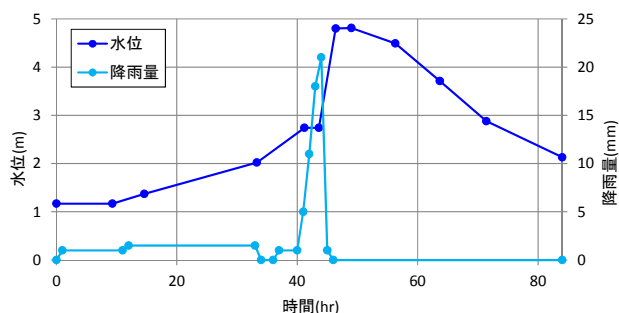


図-12 浸透流解析に用いた外力波形

表-1 解析に用いた土質定数

層	透水係数 (m/sec)	強度定数			
		c (kN/m ²)	ϕ (°)	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)
堤体	1.9E-05	10.60	16.30	3.20	34.30
砂質土	1.2E-05	8.98	25.00	0.27	34.10
礫混り粗砂	1.5E-04	8.98	25.00	0.27	34.10
細砂	6.4E-05	8.98	25.00	0.27	34.10
底面粘性土	3.5E-07	38.00	10.20	23.30	23.00
底面砂質土	1.2E-05	8.98	25.00	0.27	34.10

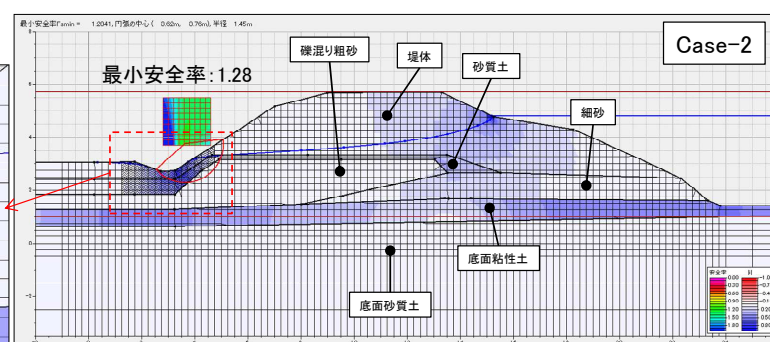
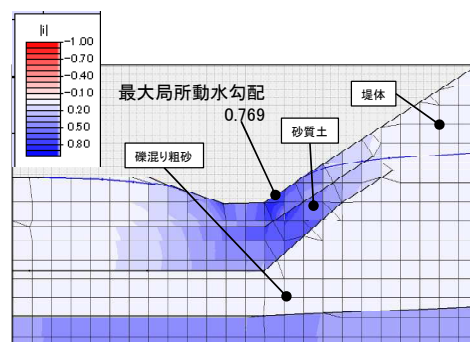
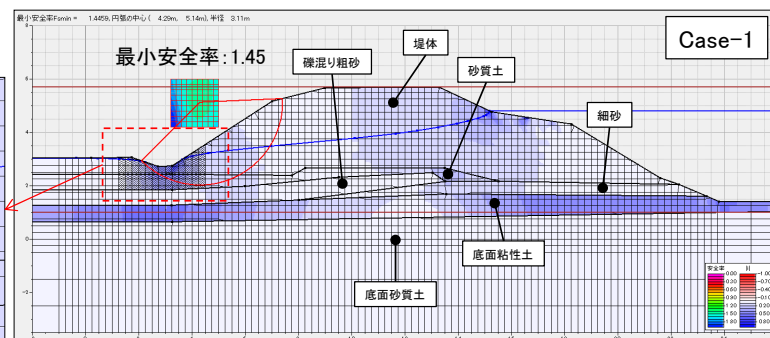
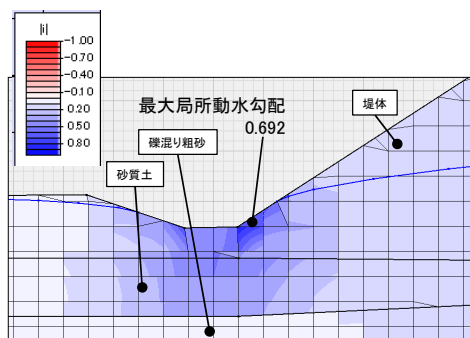


図-13 浸透流解析、円弧すべり計算結果