

3. 解析結果

3. 1 浸透破壊に対する安全性の解析結果（一覧表）

表-2.2 の検討対象となった堤防被災事例について、浸透流解析を行い、浸透破壊に対する安全性指標（円弧すべりに対する安全率、パイピングに対する局所動水勾配、及び盤ぶくれに対する G/W^{*3} ）を算出した結果を表-3.1 に示す。浸透破壊に対する安全性指標の値のうち、浸透破壊を起こす限界値とされる値（円弧すべりに対する安全率が 1.0、局所動水勾配が 1.0^{*3} ）、 G/W が 1.0）より安全側の値のものについては、水色の網掛けをかけた。危険側の値のものについては、ピンク色の網掛けをかけた。また、「No.」欄に朱色の網掛けをかけた事例は、1つ以上の安全性指標が危険側の値を示しているものである。

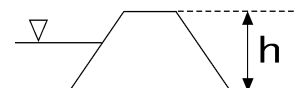
表-3.1 解析結果（一覧表）

No.	被災事例	被災形態 ^{※1}	土質特性		堤高 (m) ^{※2}	円弧すべり安全率		局所動水勾配		盤ぶくれ G/W^{*3}
			基礎	堤体		表法	裏法	水平	鉛直	
1	最上川（左岸 CsNo92~No94）	すべり	砂質	粘性	5.0	4.842	2.901	0.351	0.686	0.986
2	阿武隈川（左岸 4km）	すべり	砂質	粘性	7.0	0.602	0.588	0.175	0.651	1.021
3	米代川（左岸 0/5）	パイピング	砂質	砂質	5.0	1.467	1.202	0.704	0.495	—
4	宇治川（左岸 42.8km）	すべり	粘性	砂質	5.0	2.331	2.704	0.170	-0.087	—
5	斐伊川（右岸 11.4~11.6km）	パイピング	砂質	砂質	5.0	1.299	1.229	0.447	0.180	—
6	江戸川（左岸 24.5k~24.5k+200）	?	砂質	砂質	8.2	2.120	2.128	0.138	0.135	1.550
7	荒川（左岸 11.3km）	すべり	砂質	砂質	9.2	1.397	1.077	-0.753	-1.208	1.939
8	荒川（左岸 13.7km）	すべり	砂質	粘性	5.9	1.335	1.172	-0.205	-1.004	2.101
9	荒川（右岸 23.0km）	すべり	砂質	粘性	5.2	—	1.202	0.704	0.495	—
10	荒川（左岸 28.2km）	?	砂質	粘性	5.4	—	2.059	0.152	-0.795	8.877
11	荒川（左岸 64.0km）	?	砂質	砂質	3.8	1.333	1.273	0.213	-2.053	4.541
12	荒川（左岸 67.6km）	すべり	粘性	粘性	7.6	0.810	0.831	0.580	-1.000	1.893
13	荒川（左岸 69.6km）	すべり	粘性	砂質	7.3	0.828	0.934	0.597	-1.273	1.557
14	荒川（左岸 70.0km）	すべり	粘性	砂質	7.1	0.925	1.138	0.020	-0.950	0.809
15	荒川（左岸 70.4km）	すべり	粘性	粘性	8.1	1.060	1.146	-0.640	-1.363	1.301
16	荒川（左岸 71.2km）	?	砂質	粘性	6.4	2.862	2.627	0.153	0.473	1.363
17	荒川（左岸 72.0km）	?	粘性	砂質	8.8	2.711	2.751	0.283	0.103	0.809
18	荒川（右岸 72.0km）	?	砂質	砂質	8.1	1.010	0.820	0.763	0.707	0.926
19	庄内川（左岸 25.0k+155m）	すべり	礫質	砂質	6.7	1.244	0.849	0.663	0.550	—
20	庄内川（右岸 23.8km）	?	砂質	砂質	6.1	0.939	0.987	0.620	0.223	—
21	庄内川（右岸 24.4km）	?	砂質	砂質	5.4	1.342	1.597	0.387	0.370	—
22	阿賀野川（左岸 19.2km）	すべり	砂質	粘性	5.1	0.977	1.128	0.474	0.007	—
23	米代川（左岸 7.8km）	すべり、パイピング	砂質	砂質	5.3	1.000	1.840	1.020	0.650	—

※1 被災形態については、浸透破壊のうち「すべり」と「パイピング」の別を記述した。不明のものは「?」とした

※2 堤防高（h）は天端と堤内地基礎地盤との高度差を指す。

※3 G/W については、裏法尻付近の基礎地盤が粘性土で被われている事例のみ計算した。



3. 2 浸透破壊に対する安全性の解析結果（個票）

p. 15～p. 36 に対象被災事例の解析結果を示す。各個票について右側 2 列に実外力を与えた再現計算結果を示し、参考までに対象被災事例の直近の「堤防の浸透破壊に対する詳細点検」（詳細点検）の解析結果を「被災時の再現計算」の欄の左側に記載した。ただし、詳細点検の解析結果は、詳細点検を行った時点の堤防断面形状を用いていること、及び外力についても「河川堤防の構造検討の手引き」で定められている計画規模のものを用いていることが「被災時の再現計算」と異なるので単純な比較はできない。

「詳細点検」の欄には、計算に用いた堤防形状、計算に用いた外力（河道水位、降雨強度）のグラフ、解析結果（浸潤線、浸透流速ベクトル）、算出された安全性指標（円弧すべりに対する安全率：Fs、パイピングに対する局所動水勾配：ix（水平方向）、iy（垂直方向）、盤ぶくれに対する安全率：G/W）を示した。「1. 被災時の再現計算」については、それらに加えて、ピーク水位時における「飽和度分布」、「被災形状」、「被災要因」、「被災状況」及び「被災時の再現計算結果に対するコメント」を記載した。また、個票に記載されている主な土質記号の意味は、下記のとおりである。

・ 一般的な土質記号

先頭の大文字の A は沖積層（沖積世に堆積した新しい地層）、D は洪積層（洪積世に堆積した比較的古い地層）を示す。大文字につづく小文字 c は粘性土層（clay）、s は砂質土層（sand）、g は礫質土層（gravel）、p は有機質土層（peat）を示す。

表-3.2 主な土質区分

地層区分	土質区分	記号
沖積世 (A)	粘土層 (c)	Ac
	砂層 (s)	As
	礫層 (g)	Ag
	有機質土層 (p)	Ap
洪積世 (D)	粘土層 (c)	Dc
	砂層 (s)	Ds
	礫層 (g)	Dg
	有機質土層 (p)	Dp

砂 (s) 混じりの粘土 (c) 層を示すときに、Acs や Dcs のように 2 種類の小文字を組み合わせる表現することもある。沖積世及び洪積世が属する第四紀よりも古い第三紀 (Tertiary) の地層を Tc、Ts、Tg と表現することがある。

・ 固有の地層を示す土質記号

固有の地層を示す代表的なものとして、有楽町層を示す土質記号がある。有楽町層は沖積世に堆積した地層であり、関東地方に分布している。先頭の Yu、Yl はそれぞれ有楽町層上部 (Yurakucho Upper)、有楽町層下部 (Yurakucho Lower) を示す。

表-3.3 固有の地層を示す土質記号（例：有楽町層）

地層区分	部位	土質区分	記号
有楽町層 (Y)	上部 (u)	粘土層 (c)	Yuc
		砂層 (s)	Yus
		礫層 (g)	Yug
	下部 (l)	粘土層 (c)	Ylc
		砂層 (s)	Yls
		礫層 (g)	Ylg

・その他

同じ土質の地層を区別するために、添え字を付けて、Aca、Acb、あるいは添え数字を付けて、Ac1、Ac2 のように示すことがある。ロームを示す Lm がある。

3. 3 解析結果の評価

被災事例のうち堤体または基盤が砂質土により構成されているものが多いと言える。23 被災事例のうち、堤体にも基盤にも砂質土を含んでいないのは 2 事例のみである。透水性の大きい砂質土は浸透に対して危険度が高いとされているが⁹⁾、砂質土を含む堤防の被災事例の割合が多いことは、このことを示していると言える。

3. 3. 1 安全性指標の妥当性

対象事例の一覧表（表-3.1）のうち浸透破壊に対する安全性指標の値が 1 つでも危険側の値をとったものの番号に朱色の網掛けをしている。23 被災事例のうち、約 45%の 11 事例が何らかの形で被災の危険性があると判断されたこととなる。逆に、約 52%の事例が被災したにもかかわらず、浸透破壊に対して安全と評価されたと言いうことができる。また、現在の基準⁴⁾ に従い、安全率 $F_s=1.2 \times \alpha_1 \times \alpha_2$ 、局所動水勾配 $i=0.5$ の限界値にすると、対象被災事例のうち約 74%が危険側の安全性指標値をとると判断され、約 26%が安全と判断されたこととなる（表-3.4）。

表-3.4 安全性指数の妥当性^{*}

安全性指標	被災との一致・不一致の別	
	一致	不一致
理論上の限界値	47.8%	52.2%
基準値 ⁴⁾	73.9%	26.1%

^{*}安全性指標を一つでも満たさないものは危険とした。

3. 3. 2 パイピング被災事例の解析結果

まず、パイピングにより被災した 2 事例（No. 3 米代川左岸 5.0k、No. 5 斐伊川右岸 11.4~11.6k）についての解析結果について、ピーク水位時の浸透流速のベクトル図を見てみると裏法尻付近で動水勾配が大きくなる様子が現れており、概ね浸透流の挙動を適正に表現していると判断することができる（図-3.1、3.2）。ただし、局所動水勾配の最大値が破壊現象の目安となる $i=1.0$ を下回っており、

計算上はパイピングは起きないという結果が出ている。ただし、現在の指標では局所動水勾配の限界値を 0.5 と定めており、この基準に従うと危険と判断される。

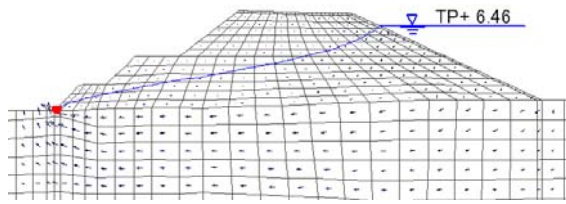


図-3.1 浸透流解析結果（米代川 No. 3）

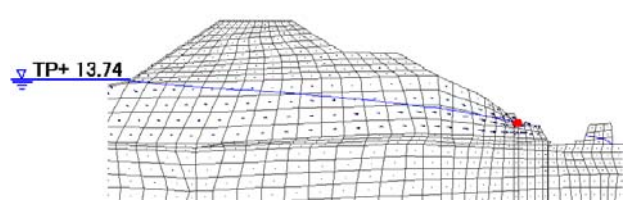


図-3.2 浸透流解析結果（斐伊川 No. 5）

3. 3. 3 すべり破壊事例の解析結果

図-3.3 の米代川の被災事例は、すべり破壊により破堤に至ったと考えられる。浸透流解析結果によると浸潤線は上がっておらず、堤体の飽和度も高くない。裏法の円弧すべりに対する安全率も $F_s = 2.704$ となっており安全側の値を示している。図-3.4 のハイトグラフより 50mm/h 以上の降雨を記録しており、被災時には堤防天端及び法面からの降雨が堤体内に浸透し、飽和度の上昇に寄与したと考えられるが、それが反映されていない。

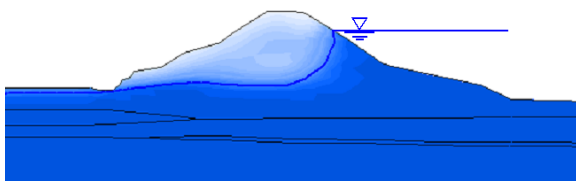


図-3.3 浸透流解析結果（米代川 No. 4）

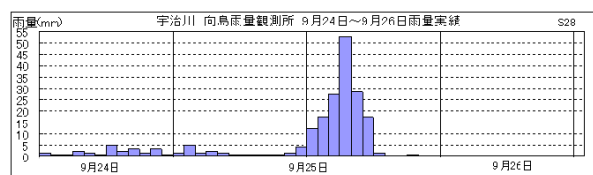


図-3.4 破堤事例（米代川）のハイトグラフ

図-3.5、3.6 は、すべり破壊により被災した事例である。両者とも浸潤線の位置は低い、堤体内の飽和度が高くなっており、これが滑り破壊を起こした原因と考えられる。このことは、浸透流解析では浸潤線の位置だけでなく、堤体の飽和度もチェックする必要があることを示している。

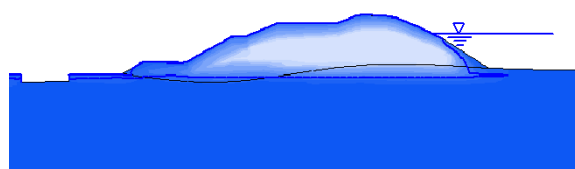


図-3.5 浸透流解析結果（荒川 No. 13）

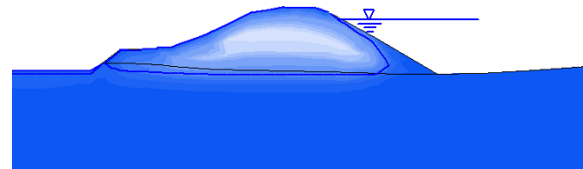


図-3.6 浸透流解析結果（荒川 No. 15）

図-3.7、3.8 は、河道水位があまり上がらず、降雨により堤体の飽和度が上がり法すべりが生じたと考えられる事例である。河道水位が上がらないと浸潤線も上がらないので、堤体の飽和度をチェックする必要がある。

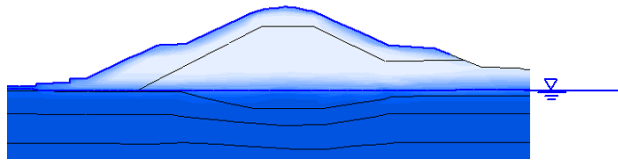


図-3.7 浸透流解析結果（荒川 No. 7）

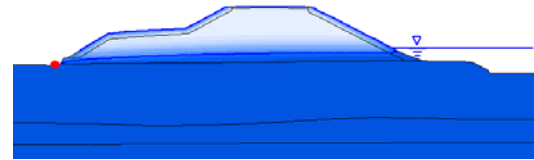


図-3.8 浸透流解析結果（阿賀野川 No. 22）

図-3.9、3.10 は粘性土の旧堤を砂質土でかさ上げした堤防の被災事例である。粘性土の旧堤部分で雨水の浸透が遮られ、堤防天端から裏法上部にかけての部分の飽和度が高くなっているのがわかる。図-3.11、3.12 は粘性土の旧堤に砂質土で表腹付けした堤防の被災事例である。粘性土が浸透水の裏法からの排出を妨げるかたちになるため、浸潤線が上がっている。浸透水の排出を妨げる、あるいは浸透水の滞留を助長するかたちで粘性土が配置されている堤防は、浸透破壊に対して危険な状態になることがわかる。

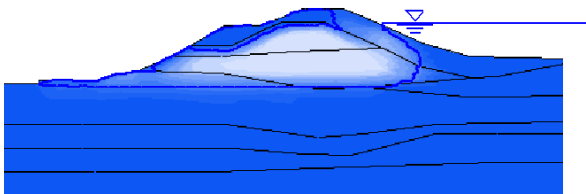


図-3.9 浸透流解析結果（荒川 No. 12）

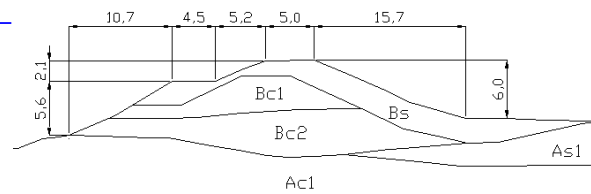


図-3.10 土質構成図（荒川 No. 12）

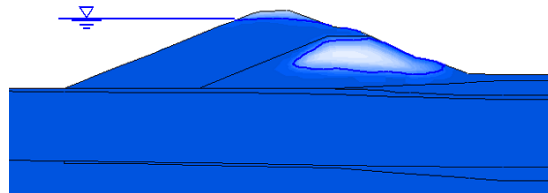


図-3.11 浸透流解析結果（荒川 No. 18）

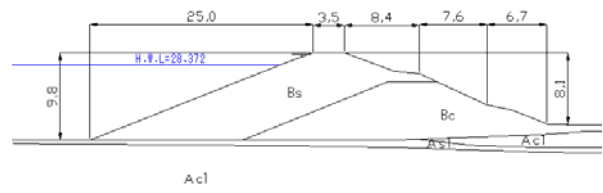


図-3.12 土質構成図（荒川 No. 18）

図-3.13、3.14 は解析結果と被災事例の被災形態が合致していたと考えられる事例である。破堤には至らない小規模な法面すべりであるが、被災した部位や規模をよく表している。粘性土の上に砂質土が配置された層構造をもつ堤防で、被災しやすい部位が想定しやすい構造ともいえる。

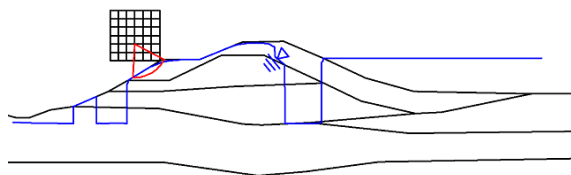


図-3.13 円弧すべり安定解析（荒川 No. 12）



図-3.14 被災状況（荒川 No. 12）

図-3.15、3.16は解析結果と被災事例の被災形態が合致していなかった事例である。解析結果では、大規模な円弧すべりを想定しているが、被災事例では裏小段下の法面の表層すべりである。強い降雨強度により表層の弱体化が進んだ結果、局所的な破壊が発生した可能性がある。

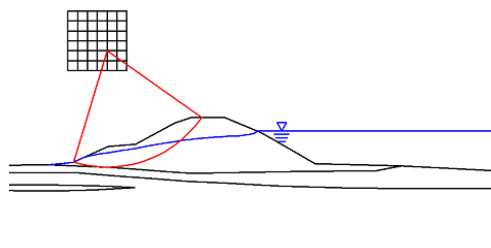


図-3.15 円弧すべり安定解析（阿武隈川 No. 2）

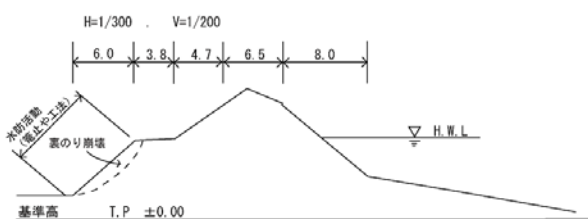


図-3.16 被災状況（阿武隈川 No. 2）

3. 3. 4 複合破壊事例の解析結果

図-3.17、3.18の事例は、目撃証言等から法尻部のパイピングによる破壊から法面すべりに進展したとされている。実外力を与えた再現計算からも鉛直方向局所動水勾配 $i_y=1.020$ 、裏法の円弧すべりに対する安全率 $F_s=1.000$ と危険側あるいは危険と判断される値に近い値を示しており、被災形状も含めて解析結果と実際の被災形態がよく合致していると言える。ただし、この解析に用いた土質定数は被災後現地ボーリングを行って得たものであり、700m程度離れている同一細分区間の詳細点検の照査断面の値と比較すると、透水係数が大きな値を示していることがわかる（p. 37 参照）。

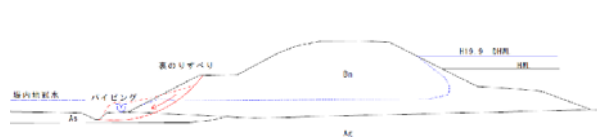


図-3.17 被災形態（米代川 No. 23）

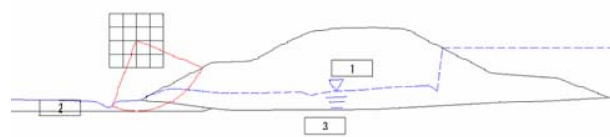


図-3.18 解析結果（米代川 No. 23）

3. 4 浸透破壊に関する安全性指標と破堤に対する安全性の関係

図-3.19、3.20にそれぞれ円弧すべりに対する安全率と破堤しない確率の関係を示したグラフを示す。円弧すべりに対する安全率については、23 被災事例のうち値の出ているもの（表法：21 事例、裏法 23 事例、合計 44 事例）について裏法、表法の区別することなくプロットした。安全率を 0.2 刻みの区分に分割した上、区分ごとに度数分布を求め、それぞれの区分について式-2.1 (pp. 3) により破堤に対する破堤しない確率の値を水色のバーによりプロットした。同様に、パイピングについては、局所動水勾配（水平方向 i_x 、鉛直方向 i_y ）を水平方向、鉛直方向区別することなく、円弧すべりに対する安全率と同様の方法でプロットした。盤ぶくれに関する安全率（ G/W ）については、値が算出できた破堤事例がなかったため、グラフは作成しなかった。

図-3.19、3.20に示すとおり円弧すべり及びパイピングに対する安全性指標と破堤しない確率の間には明確な傾向は見られなかった。その主な原因としては下記が考えられる。

- ① 事例数が少なく、統計的に意味のある解析ができなかった可能性がある。
- ② 実際の被災事例の被災形態とその被災事例の安全性指標が示す被災形態との一致・不一致を区別することなく解析したため、その安全性指標の妥当性の適正な評価になっていない可能性がある。

(例えば、パイピングで被災した堤防の事例を円弧すべりの安全率で評価することは適切でない可能性がある。)

- ③ 浸透破壊に対する指標により、破堤に対する安全性を評価するのは適切でない可能性がある。浸透破壊を起こしても、必ずしも破堤に至るとは限らない。浸透破壊に対する安全性指標を評価するのであれば、被災事例だけではなく、浸透破壊を起こす外力を受けたが被災しなかった事例も含めて解析し、解析事例全体に対する被災事例数の割合で評価すべきである。(今回の調査では、浸透破壊で被災した事例のみを対象としたので、そのような解析はできなかった。)

堤防の浸透破壊に対する安全性を適正に評価するためには、上記に挙げた項目を守った上、被災した事例、外力を受けたが被災しなかった事例に関するデータを蓄積し、解析を行っていく必要がある。

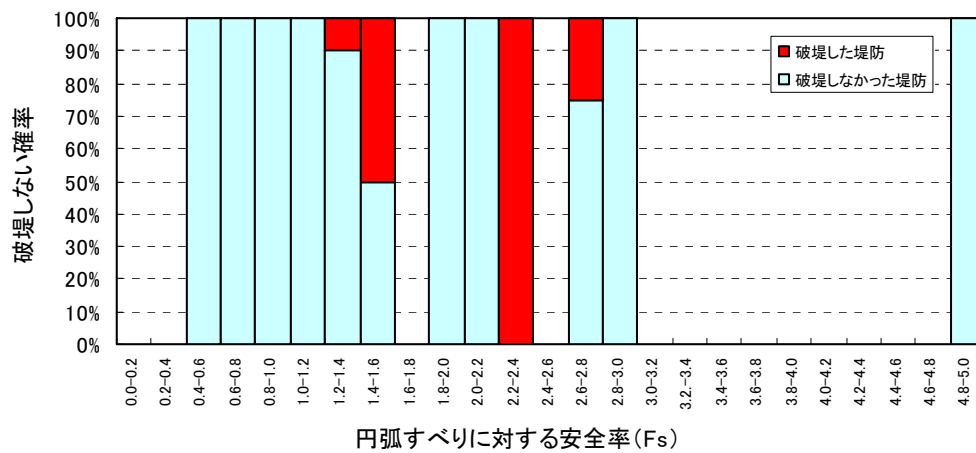


図-3.19 円弧すべりに対する安全率と破堤に対する安全性の関係

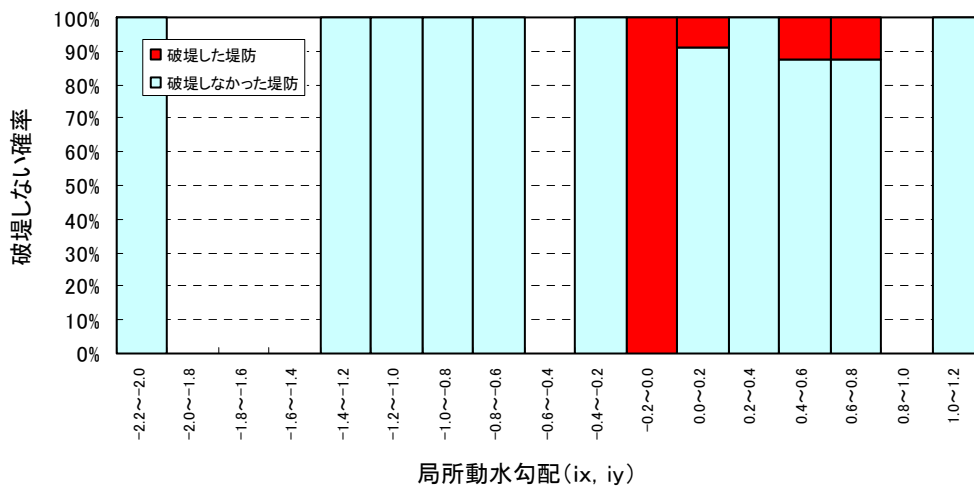


図-3.20 局所動水勾配と破堤に対する安全性の関係