

4.2 変状要因の特定及び変状メカニズムの推定

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)を行った。以下に、解析で対象とした外力と安全性評価の基準を示す。

4.2.1 解析で対象とした外力

本検討では、下記の 2 つの外力に対して浸透流解析を行い、変状時の堤防の安全性評価及び堤防点検の再評価を行った。

(1) 変状時の外力

変状時の堤防の安全性評価を行うため、実際の洪水による変状時の外力に対して浸透流解析を実施した。外力条件は、該当地点近傍の雨量観測所と水位観測所の観測データを用いて設定した。

(2) 「手引き」による外力

堤防点検の再評価を行うため、「河川堤防の構造検討の手引き(改訂版)」、平成 24 年 2 月、財団法人 国土技術研究センター(以下、「手引き」と言う)で定められる外力に対して浸透流解析を実施した。ここで、前回の点検から現在までの観測記録を踏まえて、既往の堤防点検時と同等の外力条件を設定した。

4.2.2 安全性評価の基準

「手引き」のなかで、堤防の安全性評価において盤膨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、地盤の不均質性を考慮し、水みちとなる弱部を想定したケースについて浸透流の流速を対象として評価した。

(1) 盤膨れ(G/W)

パイピング破壊に対する安全性を照査する項目の一つであり、被覆土のある地盤において、その重量(G)と被覆土層基底面に作用する揚圧力(W)の比(G/W)の最小値が 1.0 より大きい場合に安全であると評価する。

(2) 局所動水勾配(i_v)

パイピング破壊に対する安全性を照査する項目の一つであり、被覆土のない地盤において、裏法尻近傍の基礎地盤の局所動水勾配の最大値が 0.5 より小さい場合に安全であると評価する。

なお、裏法尻に腰止め擁壁がある場合は、水平方向のパイピングが生じないとして、水平の局所動水勾配 (i_b) は照査不要とした。

(3) 水みちの実流速 (V_s)

「手引き」の浸透に対する安全性照査の項目外であるが、土層内に水みちとなる弱部を想定した解析において、パイピング現象を土砂の粒子の移動として評価することを目的として、水みちの実流速 (V_s) と土砂の限界流速 (V_c) から土砂流出の危険度を評価した。

なお、評価にあたっては、「手引き」では土質調査結果を基に地盤条件が均質であるとした検討となるが、実際の土層は不均質であるため、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幅 10 cm、定数は A_s 層と同等と仮定してモデル化し、水みちの実流速 (V_s) と土砂の限界流速 (V_c) から土砂の粒子の移動の危険度を考察した。

4.2.3 変状要因の特定及び変状メカニズムの推定のための検討フロー

以上を踏まえて、図 4-25 に変状要因の特定及び変状メカニズムの推定のための検討フローを示す。

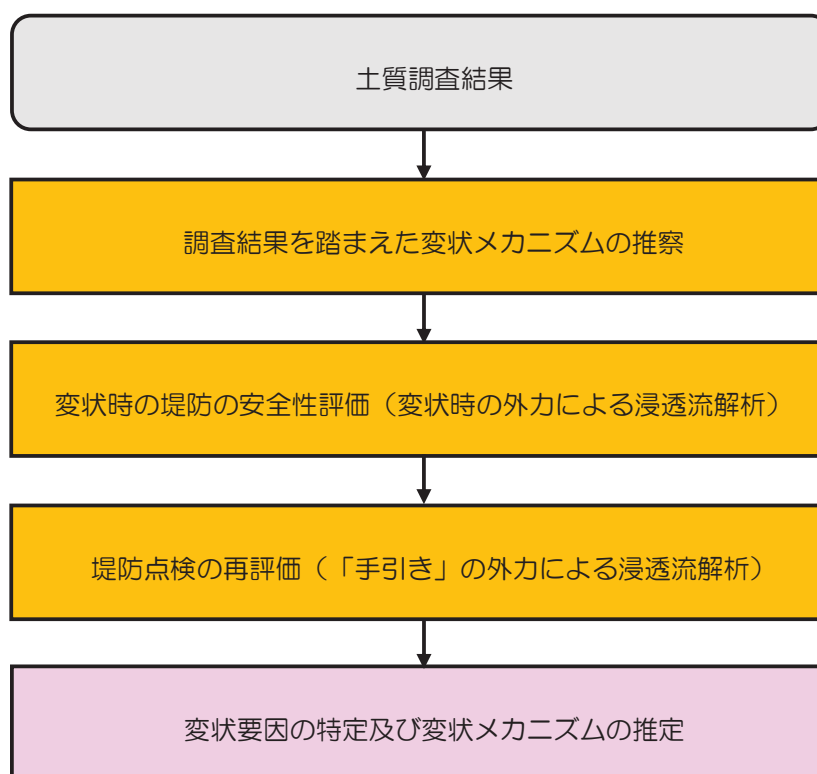


図 4-25 変状要因の特定及び変状メカニズムの推定における検討フロー

4.2.4 39k600 地点の検討（自噴発生箇所）

(1) 調査結果を踏まえた自噴発生箇所の変状メカニズムの推定

- ・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する。被覆土層は図 4-5 に示したように、植物根や水みちが存在しており、不均質である。
- ・図 4-26 上段の断面図に示すように、堤内外及び上流からの浸透水による浸潤線の発達に伴い、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。これは、図 4-26 下段あるいは図 4-27 に示したように、堤内外及び上流からの地下水浸透によると考えられる。
- ・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推定される。

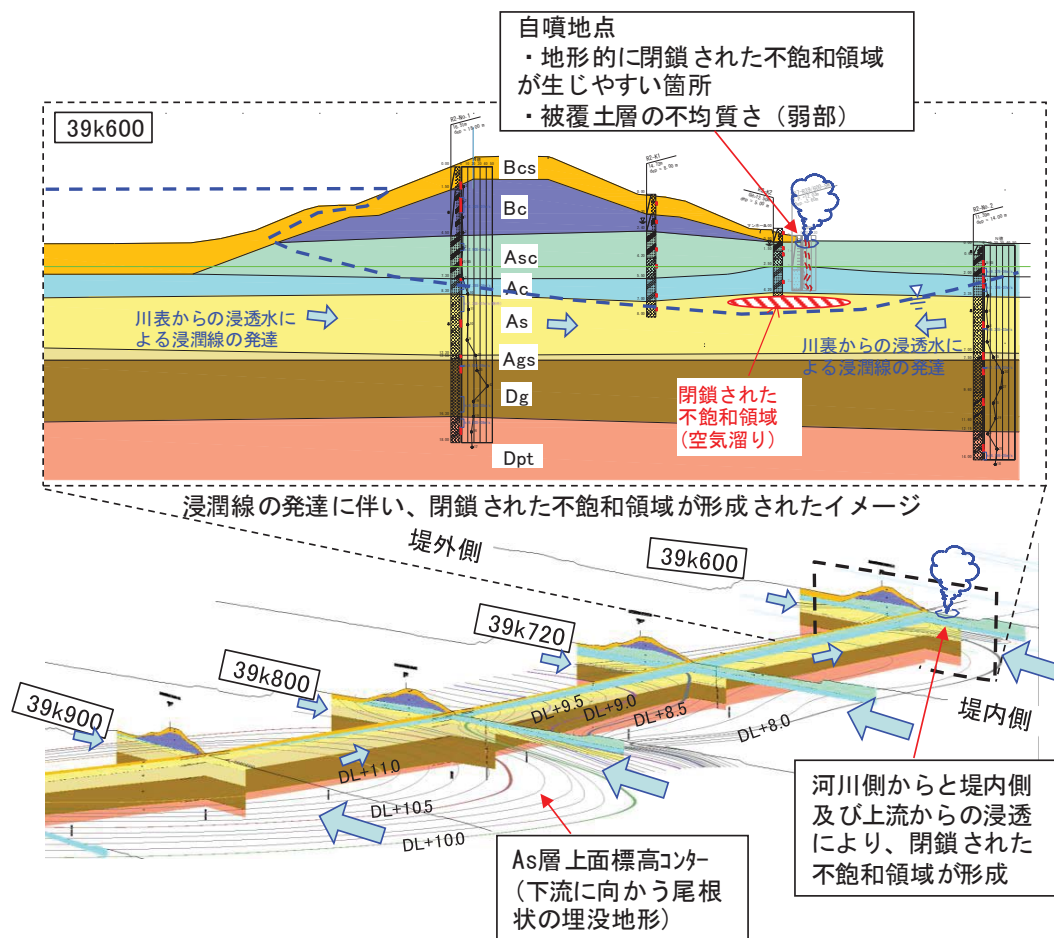


図 4-26 39k600 地点における出水に伴う空気溜りの形成イメージ

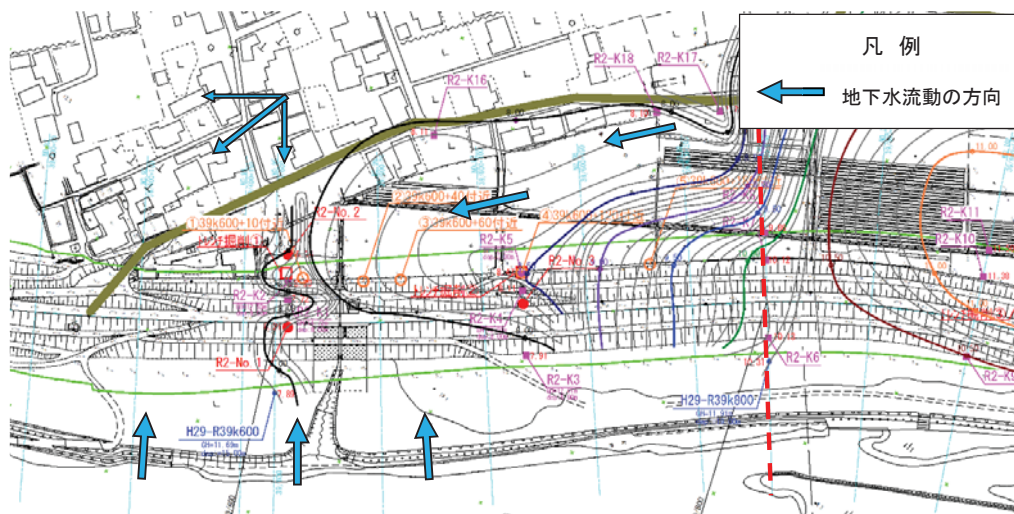


図 4-27 推定される主たる地下水流動の方向

(2) 浸透流解析結果（変状時外力による検討）

局所動水勾配(i_v)については、図 4-28 に示すように、変状時外力に対して堤内側法尻部で $i_v = 0.030 < 0.5$ となり、照査基準を満足する。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。なお、浸透流解析の解析条件、解析パラメータ等については、「4.3.1 <参考1> 浸透流解析条件の設定」に参考資料としてまとめた。

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(V_s)については、図 4-29 に示すように、 $V_s = 0.008$ (cm/s) となった。限界流速(V_c)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いと考えられる。

水系名

筑後川

筑後川

河川名

筑後川

右岸

394.600~400.200

区間No.

394.600

照査断面

現況再臨岸析

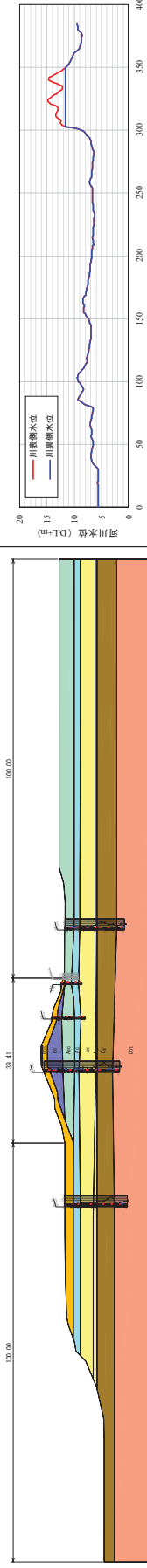
外分条件

無対策

394.600

100.00

39.44



100.00

39.44

394.600

土質	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_t (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ (°)	k (m/s)	Ss (1/m)	不飽和 浸透特性
Bes	17.0	17.0	6.7	18.9	3.00E-07	1.00E-04	細粒分の多い砂質土
Bc	17.3	17.3	28.5	4.5	1.00E-06	1.00E-03	粘性土
Asc	15.7	15.7	8.5	5.2	2.00E-05	1.00E-03	粘性土
Ac	16.3	16.3	20.7	0.0	9.00E-07	1.00E-03	粘性土
As	18.9	18.9	0.0	39.4	9.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Afs	19.0	19.0	0.0	32.0	1.00E-03	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dfs	21.0	21.0	0.0	35.0	3.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dfs	17.0	17.0	0.0	32.0	1.00E-06	1.00E-04	礫質土・砂質土
傾斜					1.00E-07	1.00E-03	粘性土

強度は算定しない。

*Ssは、「手引き」に示されている目安値より設定
砂質土：1.0E-04(1/m)、粘性土：1.0E-03(1/m)
*飽和浸透特性は、「手引き」にて提案されている
一般値より、土質に応じて設定している。

土質

γ_{sat}
(kN/m³)

γ_t
(kN/m³)

C
(kN/m²)

ϕ
(°)

k
(m/s)

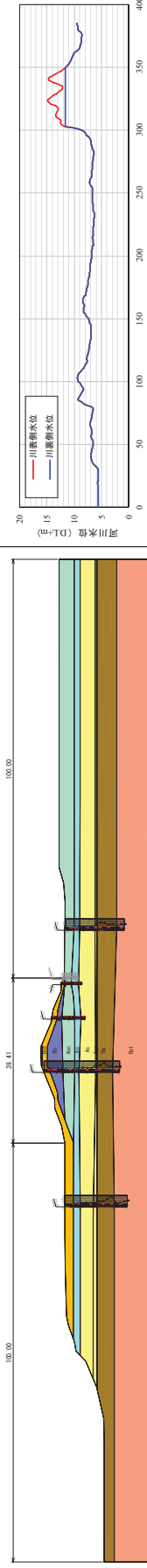
Ss
(1/m)

不飽和
浸透特性

394.600

100.00

39.44



100.00

39.44

394.600

土質	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_t (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ (°)	k (m/s)	Ss (1/m)	不飽和 浸透特性
Bes	17.0	17.0	6.7	18.9	3.00E-07	1.00E-04	細粒分の多い砂質土
Bc	17.3	17.3	28.5	4.5	1.00E-06	1.00E-03	粘性土
Asc	15.7	15.7	8.5	5.2	2.00E-05	1.00E-03	粘性土
Ac	16.3	16.3	20.7	0.0	9.00E-07	1.00E-03	粘性土
As	18.9	18.9	0.0	39.4	9.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Afs	19.0	19.0	0.0	32.0	1.00E-03	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dfs	21.0	21.0	0.0	35.0	3.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dfs	17.0	17.0	0.0	32.0	1.00E-06	1.00E-04	礫質土・砂質土
傾斜					1.00E-07	1.00E-03	粘性土

強度は算定しない。

*Ssは、「手引き」に示されている目安値より設定
砂質土：1.0E-04(1/m)、粘性土：1.0E-03(1/m)
*飽和浸透特性は、「手引き」にて提案されている
一般値より、土質に応じて設定している。

土質

γ_{sat}
(kN/m³)

γ_t
(kN/m³)

C
(kN/m²)

ϕ
(°)

k
(m/s)

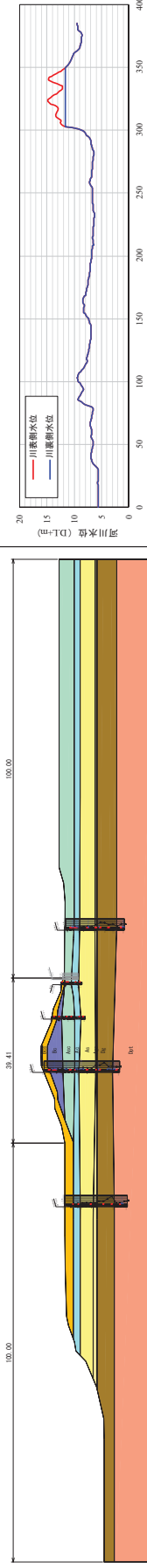
Ss
(1/m)

不飽和
浸透特性

394.600

100.00

39.44



100.00

39.44

394.600

土質	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_t (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ (°)	k (m/s)	Ss (1/m)	不飽和 浸透特性
Bes	17.0	17.0	6.7	18.9	3.00E-07	1.00E-04	細粒分の多い砂質土
Bc	17.3	17.3	28.5	4.5	1.00E-06	1.00E-03	粘性土
Asc	15.7	15.7	8.5	5.2	2.00E-05	1.00E-03	粘性土
Ac	16.3	16.3	20.7	0.0	9.00E-07	1.00E-03	粘性土
As	18.9	18.9	0.0	39.4	9.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Afs	19.0	19.0	0.0	32.0	1.00E-03	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dfs	21.0	21.0	0.0	35.0	3.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dfs	17.0	17.0	0.0	32.0	1.00E-06	1.00E-04	礫質土・砂質土
傾斜					1.00E-07	1.00E-03	粘性土

強度は算定しない。

*Ssは、「手引き」に示されている目安値より設定
砂質土：1.0E-04(1/m)、粘性土：1.0E-03(1/m)
*飽和浸透特性は、「手引き」にて提案されている
一般値より、土質に応じて設定している。

土質

γ_{sat}
(kN/m³)

γ_t
(kN/m³)

C
(kN/m²)

ϕ
(°)

k
(m/s)

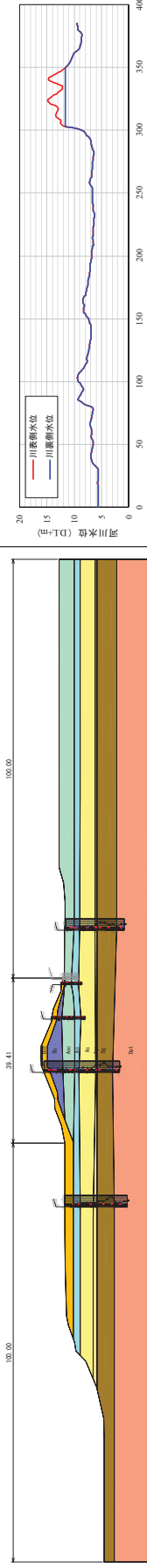
Ss
(1/m)

不飽和
浸透特性

394.600

100.00

39.44



100.00

39.44

394.600

土質	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_t (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ (°)	k (m/s)	Ss (1/m)	不飽和 浸透特性
Bes	17.0	17.0	6.7	18.9	3.00E-07	1.00E-04	細粒分の多い砂質土
Bc	17.3	17.3	28.5	4.5	1.00E-06	1.00E-03	粘性土
Asc	15.7	15.7	8.5	5.2	2.00E-05	1.00E-03	粘性土
Ac	16.3	16.3	20.7	0.0	9.00E-07	1.00E-03	粘性土
As	18.9	18.9	0.0	39.4	9.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Afs	19.0	19.0	0.0	32.0	1.00E-03	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dfs	21.0	21.0	0.0	35.0	3.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dfs	17.0	17.0	0.0	32.0	1.00E-06	1.00E-04	礫質土・砂質土
傾斜					1.00E-07	1.00E-03	粘性土

強度は算定しない。

*Ssは、「手引き」に示されている目安値より設定
砂質土：1.0E-04(1/m)、粘性土：1.0E-03(1/m)
*飽和浸透特性は、「手引き」にて提案されている
一般値より、土質に応じて設定している。

土質

γ_{sat}
(kN/m³)

γ_t
(kN/m³)

C
(kN/m²)

ϕ
(°)

k
(m/s)

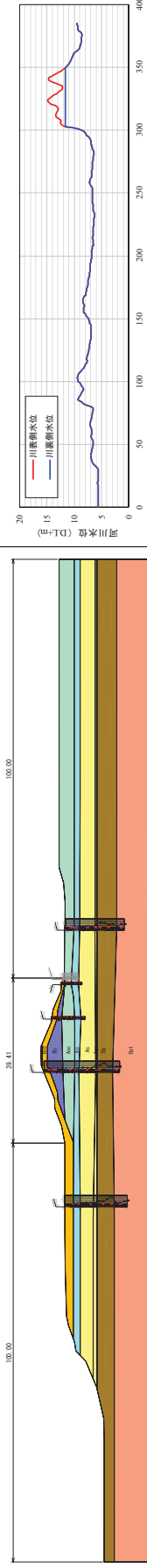
Ss
(1/m)

不飽和
浸透特性

394.600

100.00

39.44



100.00

39.44

394.600

土質	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_t (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ (°)	k (m/s)	Ss (1/m)	不飽和 浸透特性
Bes	17.0	17.0	6.7	18.9	3.00E-07	1.00E-04	細粒分の多い砂質土
Bc	17.3	17.3	28.5	4.5	1.00E-06	1.00E-03	粘性土
Asc	15.7	15.7	8.5	5.2	2.00E-05	1.00E-03	粘性土
Ac	16.3	16.3	20.7	0.0	9.00E-07	1.00E-03	粘性土
As	18.9	18.9	0.0	39.4	9.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Afs	19.0	19.0	0.0	32.0	1.00E-03	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dfs	21.0	21.0	0.0	35.0	3.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dfs	17.0	17.0	0.0	32.0	1.00E-06	1.00E-04	礫質土・砂質土
傾斜					1.00E-07	1.00E-03	粘性土

強度は算定しない。

*Ssは、「手引き」に示されている目安値より設定
砂質土：1.0E-04(1/m)、粘性土：1.0E-03(1/m)
*飽和浸透特性は、「手引き」にて提案されている
一般値より、土質に応じて設定している。

土質

γ_{sat}
(kN/m³)

γ_t
(kN/m³)

C
(kN/m²)

ϕ
(°)

k
(m/s)

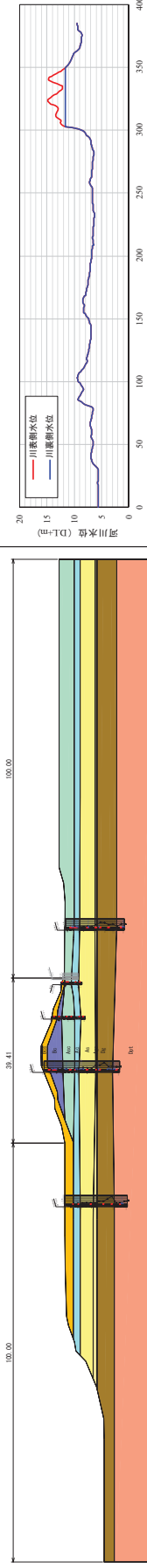
Ss
(1/m)

不飽和
浸透特性

394.600

100.00

39.44



100.00

39.44

394.600

土質	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_t (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ (°)	k (m/s)	Ss (1/m)	不飽和 浸透特性
Bes	17.0	17.0	6.7	18.9	3.00E-07	1.00E-04	細粒分の多い砂質土
Bc	17.3	17.3	28.5	4.5	1.00E-06	1.00E-03	粘性土
Asc	15.7	15.7	8.5	5.2	2.00E-05	1.00E-03	粘性土
Ac	16.3	16.3	20.7	0.0	9.00E-07	1.00E-03	粘性土
As	18.9	18.9	0.0	39.4	9.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Afs	19.0	19.0	0.0	32.0	1.00E-03	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dfs	21.0	21.0	0.0	35.0	3.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dfs	17.0	17.0	0.0	32.0	1.00E-06	1.00E-04	礫質土・砂質土
傾斜					1.00E-07	1.00E-03	粘性土

強度は算定しない。

*Ssは、「手引き」に示されている目安値より設定
砂質土：1.0E-04(1/m)、粘性土：1.0E-03(1/m)
*飽和浸透特性は、「手引き」にて提案されている
一般値より、土質に応じて設定している。

土質

γ_{sat}
(kN/m³)

γ_t
(kN/m³)

C
(kN/m²)

ϕ
(°)

k
(m/s)

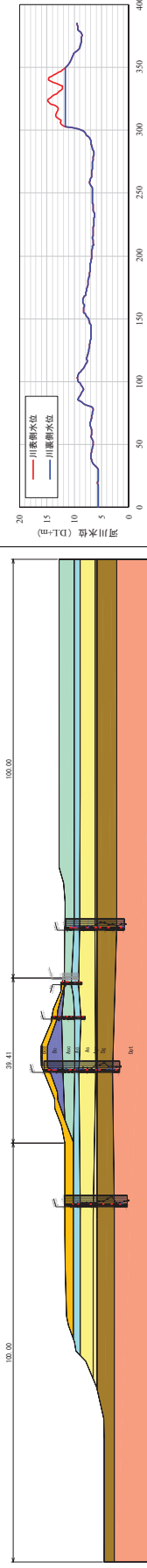
Ss
(1/m)

不飽和
浸透特性

394.600

100.00

39.44



100.00

39.44

394.600

土質	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_t (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ (°)	k (m/s)	Ss (1/m)	不飽和 浸透特性
Bes	17.0	17.0	6.7	18.9	3.00E-07	1.00E-04	細粒分の多い砂質土
Bc	17.3	17.3	28.5	4.5	1.00E-06	1.00E-03	粘性土
Asc	15.7	15.7	8.5	5.2	2.00E-05	1.00E-03	粘性土
Ac	16.3	16.3	20.7	0.0	9.00E-07	1.00E-03	粘性土
As	18.9	18.9	0.0	39.4	9.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Afs	19.0	19.0	0.0	32.0	1.00E-03	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dfs	21.0	21.0	0.0	35.0	3.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dfs	17.0	17.0	0.0	32.0	1.00E-06	1.00E-04	礫質土・砂質土
傾斜					1.00E-07	1.00E-03	粘性土

強度は算定しない。

*Ssは、「手引き」に示されている目安値より設定
砂質土：1.0E-04(1/m)、粘性土：1.0E-03(1/m)
*飽和浸透特性は、「手引き」にて提案されている
一般値より、土質に応じて設定している。

土質

γ_{sat}
(kN/m³)

γ_t
(kN/m³)

C
(kN/m²)

ϕ
(°)

k
(m/s)

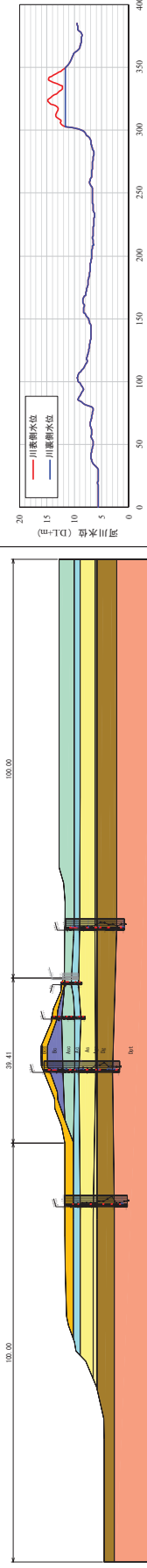
Ss
(1/m)

不飽和
浸透特性

394.600

100.00

39.44



100.00

39.44

394.600

土質	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_t (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ (°)	k (m/s)	Ss (1/m)	不飽和 浸透特性
Bes	17.0	17.0	6.7	18.9	3.00E-07	1.00E-04	細粒分の多い砂質土
Bc	17.3	17.3	28.5	4.5	1.00E-06	1.00E-03	粘性土
Asc	15.7	15.7	8.5	5.2	2.00E-05	1.00E-03	粘性土
Ac	16.3	16.3	20.7	0.0	9.00E-07	1.00E-03	粘性土
As	18.9	18.9	0.0	39.4	9.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Afs	19.0	19.0	0.0	32.0	1.00E-03	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dfs	21.0	21.0	0.0	35.0	3.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dfs	17.0	17.0	0.0	32.0	1.00E-06	1.00E-04	礫質土・砂質土
傾斜					1.00E-07	1.00E-03	粘性土

強度は算定しない。

*Ssは、「手引き」に示されている目安値より設定
砂質土：1.0E-04(1/m)、粘性土：1.0E-03(1/m)
*飽和浸透特性は、「手引き」にて提案されている
一般値より、土質に応じて設定している。

パイピング破壊に対する安全性照査：側溝れ（GW）

土質

γ_{sat}
(kN/m³)

γ_t
(kN/m³)

C
(kN/m²)

ϕ
(°)

k
(m/s)

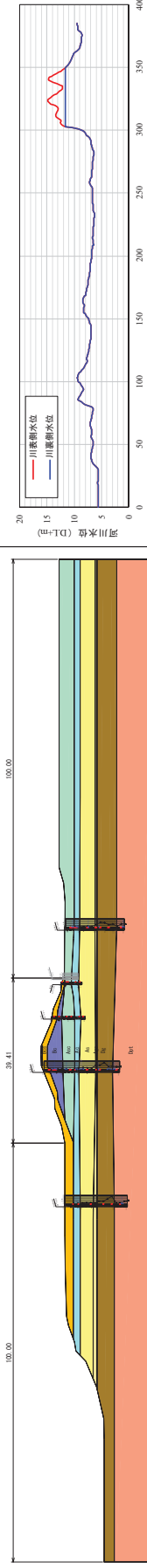
Ss
(1/m)

不飽和
浸透特性

394.600

100.00

39.44



100.00

39.44

394.600

土質	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_t (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ (°)	k (m/s)	Ss (1/m)	不飽和 浸透特性
Bes	17.0	17.0	6.7	18.9	3.00E-07	1.00E-04	細粒分の多い砂質土
Bc	17.3	17.3	28.5	4.5	1.00E-06	1.00E-03	粘性土
Asc	15.7	15.7	8.5	5.2	2.00E-05	1.00E-03	粘性土
Ac	16.3	16.3	20.7	0.0	9.00E-07	1.00E-03	粘性土
As	18.9	18.9	0.0	39.4	9.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Afs	19.0	19.0	0.0	32.0	1.00E-03	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dfs	21.0	21.0	0.0	35.0	3.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dfs	17.0	17.0	0.0	32.0	1.00E-06	1.00E-04	礫質土・砂質土
傾斜					1.00E-07	1.00E-03	粘性土

強度は算定しない。

*Ssは、「手引き」に示されている目安値より設定
砂質土：1.0E-04(1/m)、粘性土：1.0E-03(1/m)
*飽和浸透特性は、「手引き」にて提案されている
一般値より、土質に応じて設定している。

土質

γ_{sat}
(kN/m³)

γ_t
(kN/m³)

C
(kN/m²)

ϕ
(°)

k
(m/s)

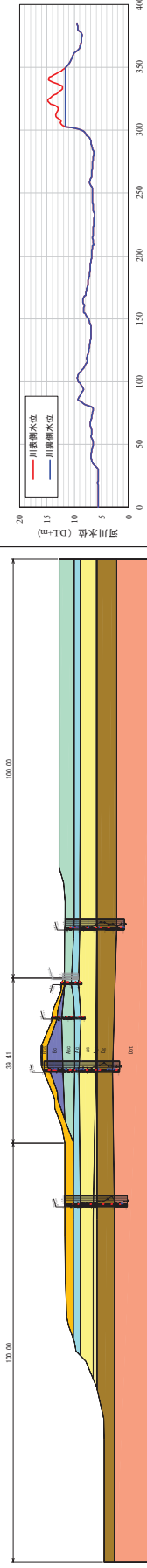
Ss
(1/m)

不飽和
浸透特性

394.600

100.00

39.44



100.00

39.44

394.600

土質	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_t (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ (°)	k (m/s)	Ss (1/m)	不飽和 浸透特性
Bes	17.0	17.0	6.7	18.9	3.00E-07	1.00E-04	細粒分の多い砂質土
Bc	17.3	17.3	28.5	4.5	1.00E-06	1.00E-03	粘性土
Asc	15.7	15.7	8.5	5.2	2.00E-05	1.00E-03	粘性土
Ac	16.3	16.3	20.7	0.0	9.00E-07	1.00E-03	粘性土
As	18.9	18.9	0.0	39.4	9.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Afs	19.0	19.0	0.0	32.0	1.00E-03	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dfs	21.0	21.0	0.0	35.0	3.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dfs	17.0	17.0	0.0	32.0	1.00E-06	1.00E-04	礫質土・砂質土
傾斜					1.00E-07	1.00E-03	粘性土

強度は算定しない。

*Ssは、「手引き」に示されている目安値より設定
砂質土：1.0E-04(1/m)、粘性土：1.0E-03(1/m)
*飽和浸透特性は、「手引き」にて提案されている
一般値より、土質に応じて設定している。

土質

γ_{sat}
(kN/m³)

γ_t
(kN/m³)

C
(kN/m²)

ϕ
(°)

k
(m/s)

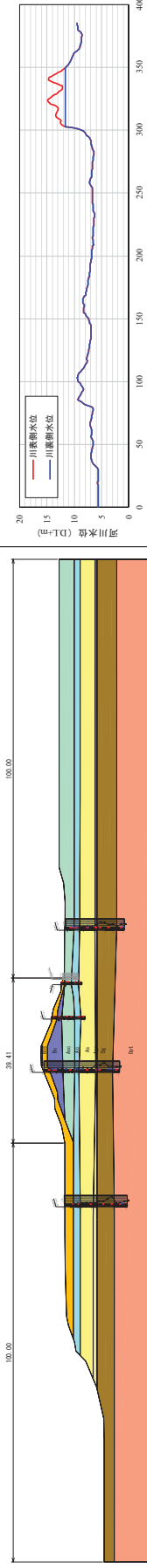
Ss
(1/m)

不飽和
浸透特性

394.600

100.00

39.44



100.00

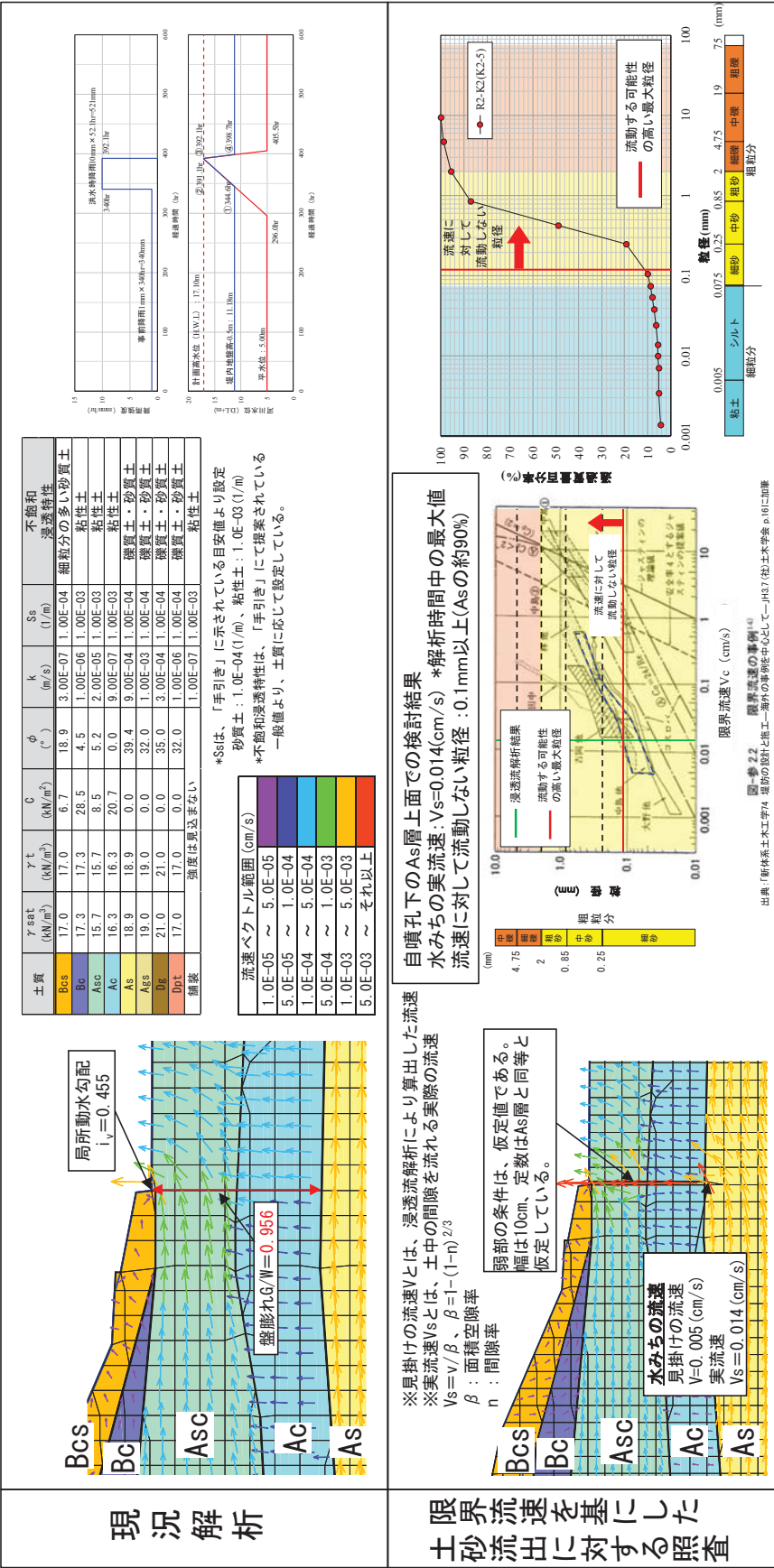
39.44

394.600

土質	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_t (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ (°)	k (m/s)	Ss (1/m)	不飽和 浸透特性
Bes							

(3) 浸透流解析結果（「手引き」の外力による検討）

局所動水勾配(i_v)については、図 4-30 に示すように、「手引き」で定められている外力に対して堤内側法尻部で $i_v=0.455<0.5$ 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 $G/W=0.956\leq 1.000$ となり、照査基準を満足しない。よって、盤膨れに対する強化対策が必要である。なお、すべりについては、堤内地側で $F_s=1.335>1.320$ 、堤外地側で $F_s=1.344>1.000$ と、照査基準を満足する。



4.2.5 39k720 地点の検討（噴砂発生箇所）

(1) 噴砂発生箇所の変状メカニズムの推定

- ・ 噴砂が発生した堤内側堤防法尻付近には被覆土層がある。この被覆土層は過去の植生（桑畑）の影響を受けていると想定され、不均質であると考えられる。
- ・ 変状時の地下水流動傾向を確認するために浸透流解析を行った結果、図 4-32 に示すように堤内地で $G/W=1.210>1.000$ となり、盤膨れに対する照査基準値を満足するが、不均質な被覆土層を考慮して弱部を想定すると、図 4-31、図 4-33 に示すように、弱部に高流速部が集中して生じる結果となり、そこから漏水発生が示唆される結果となった。
- ・ この漏水は、堤内外及び上流からの浸透水による浸潤線の発達に伴い、不均質な被覆土層内の弱部を通して発生したと推定される。

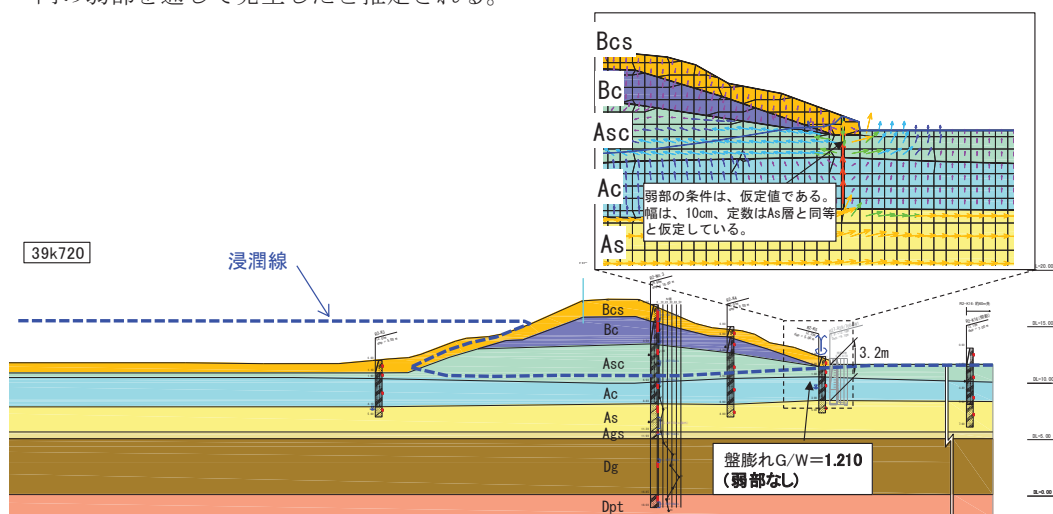
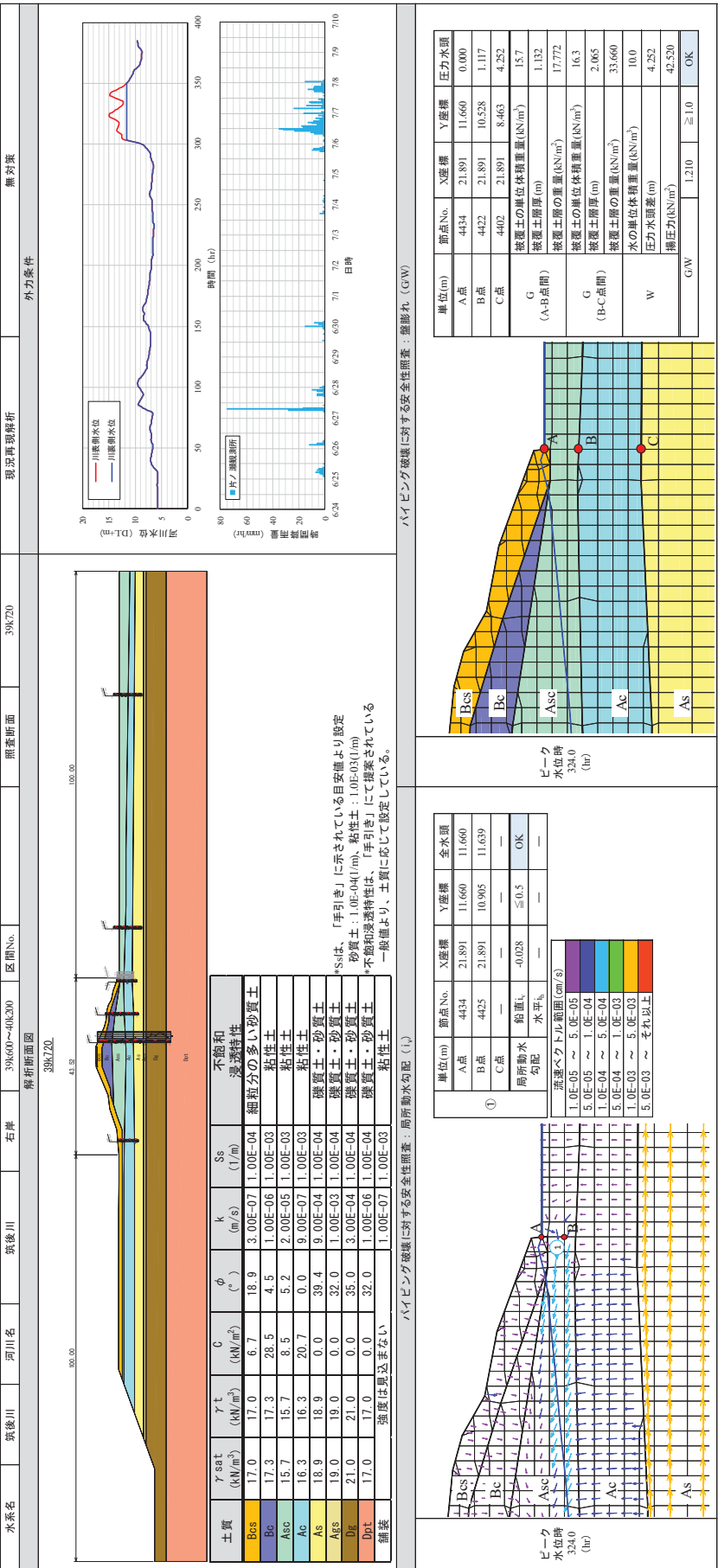


図 4-31 39k720 地点の盤膨れ発生のイメージ

(2) 浸透流解析結果（変状時外力による検討）

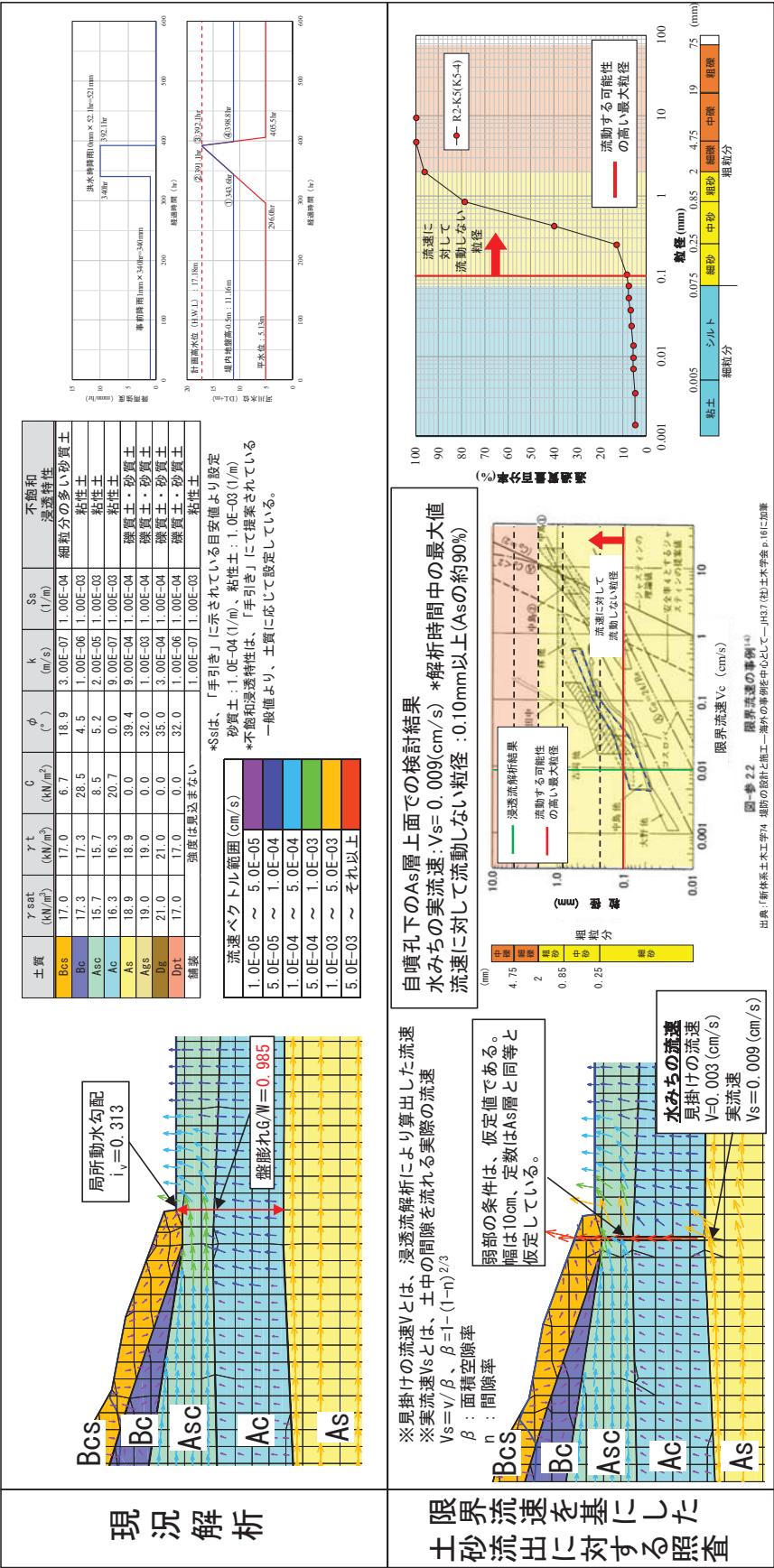
局所動水勾配(i_v)については、図 4-32 に示すように、変状時外力に対して堤内側法尻部で $i_v = -0.028 < 0.5$ となり、照査基準を満足する。また、盤膨れ(G/W)についても堤内側法尻部で $G/W = 1.210 > 1.000$ となり、照査基準を満足する。

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(V_s)については、図 4-33 に示すように、 $V_s = 0.004(\text{cm/s})$ となった。限界流速(V_c)に対して流動しない粒径は 0.04mm 以上と A_s 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、噴砂現象がすぐさま多くの土砂流出を伴うパイピングに発達した可能性は高くはないと考えられる。



(3) 浸透流解析結果（「手引き」の外力による検討）

局所動水勾配(i_v)については、図 4-34 に示すように、「手引き」で定められている外力に対して堤内側法尻部で $i_v=0.313<0.5$ 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 $G/W=0.985\leq 1.000$ となり、照査基準を満足しない。よって、盤膨れに対する強化対策が必要である。なお、すべりについては、堤内地側で $F_s=1.413>1.320$ 、堤外地側で $F_s=1.381>1.000$ と、照査基準を満足する。



4.2.6 39k800 地点の検討（噴砂発生箇所）

(1) 噴砂発生箇所の変状メカニズムの推定

- ・ 噴砂が発生した堤内側堤防法尻には被覆土層がある。被覆土層厚は下流に比べて薄く、その層厚は 1.7m である。
- ・ 変状時の地下水流動傾向を確認するために浸透流解析を行った結果、図 4-35、図 4-36 に示すように堤内地で $G/W=0.834 \leq 1.000$ となり、盤膨れに対する照査基準値を満足しない。
- ・ 堤内外及び上流からの浸透水による浸潤線の発達に伴い、図 4-35 に示すように揚圧力に対して最も安全性が低くなる堤防法尻部から漏水が発生したと推定される。

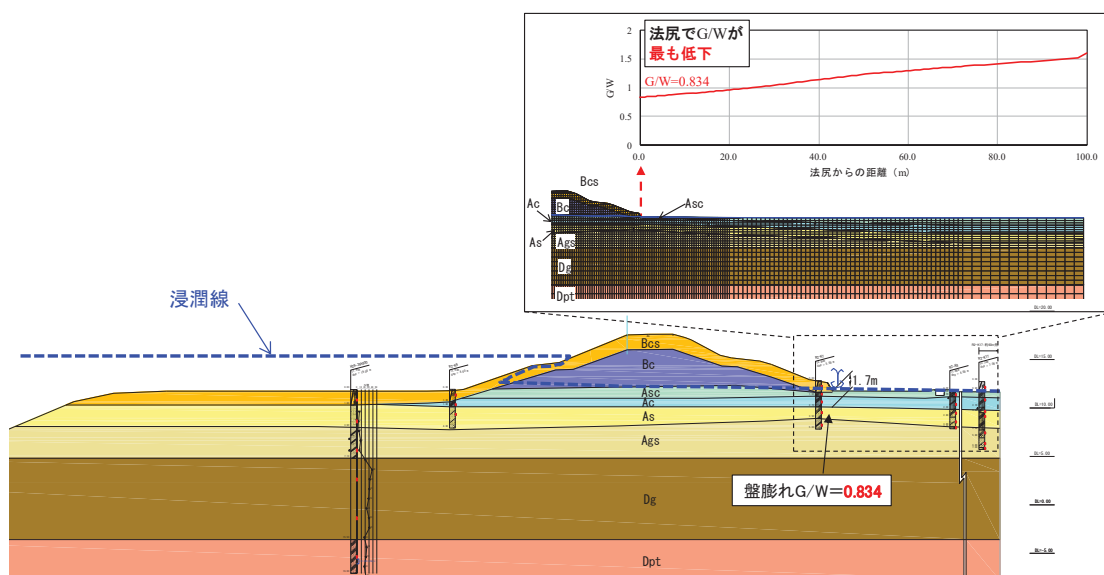
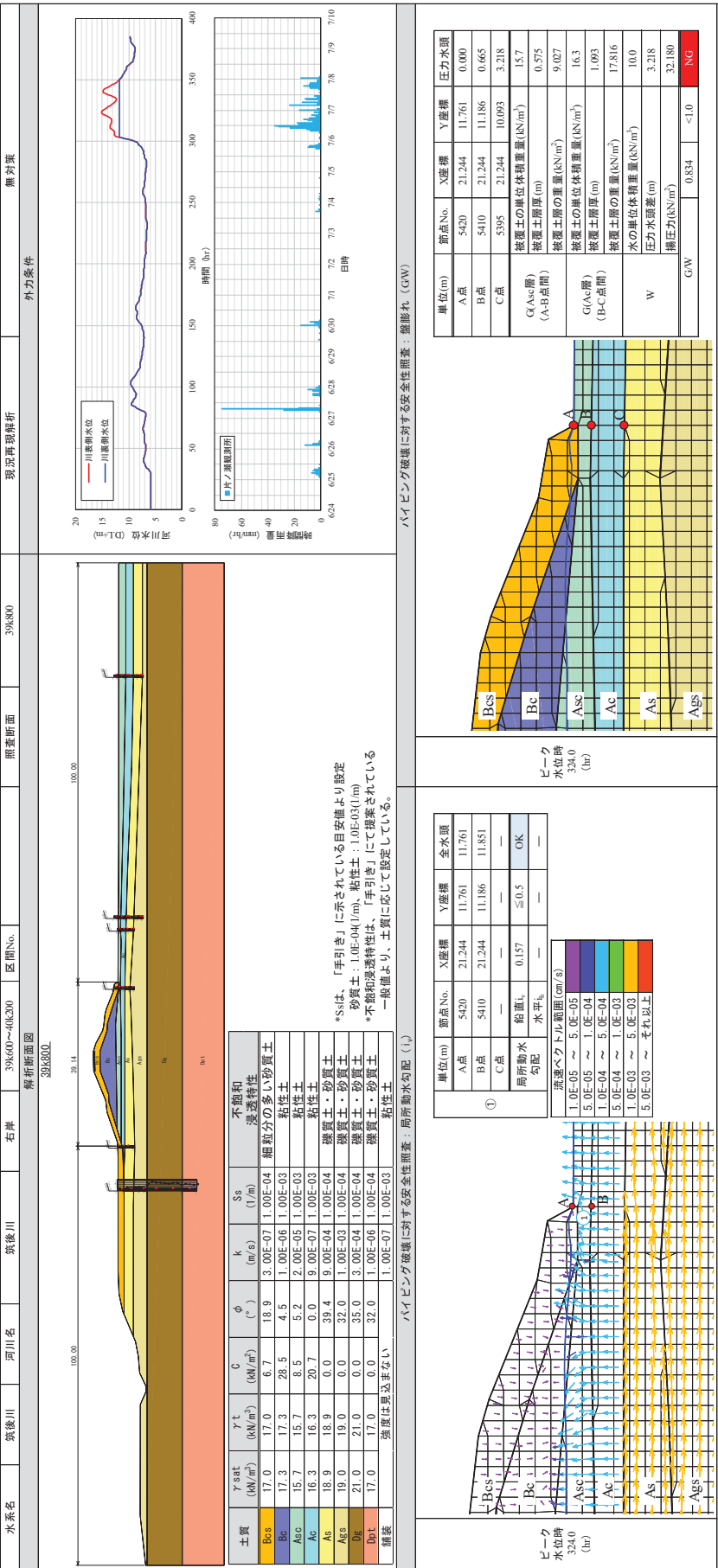


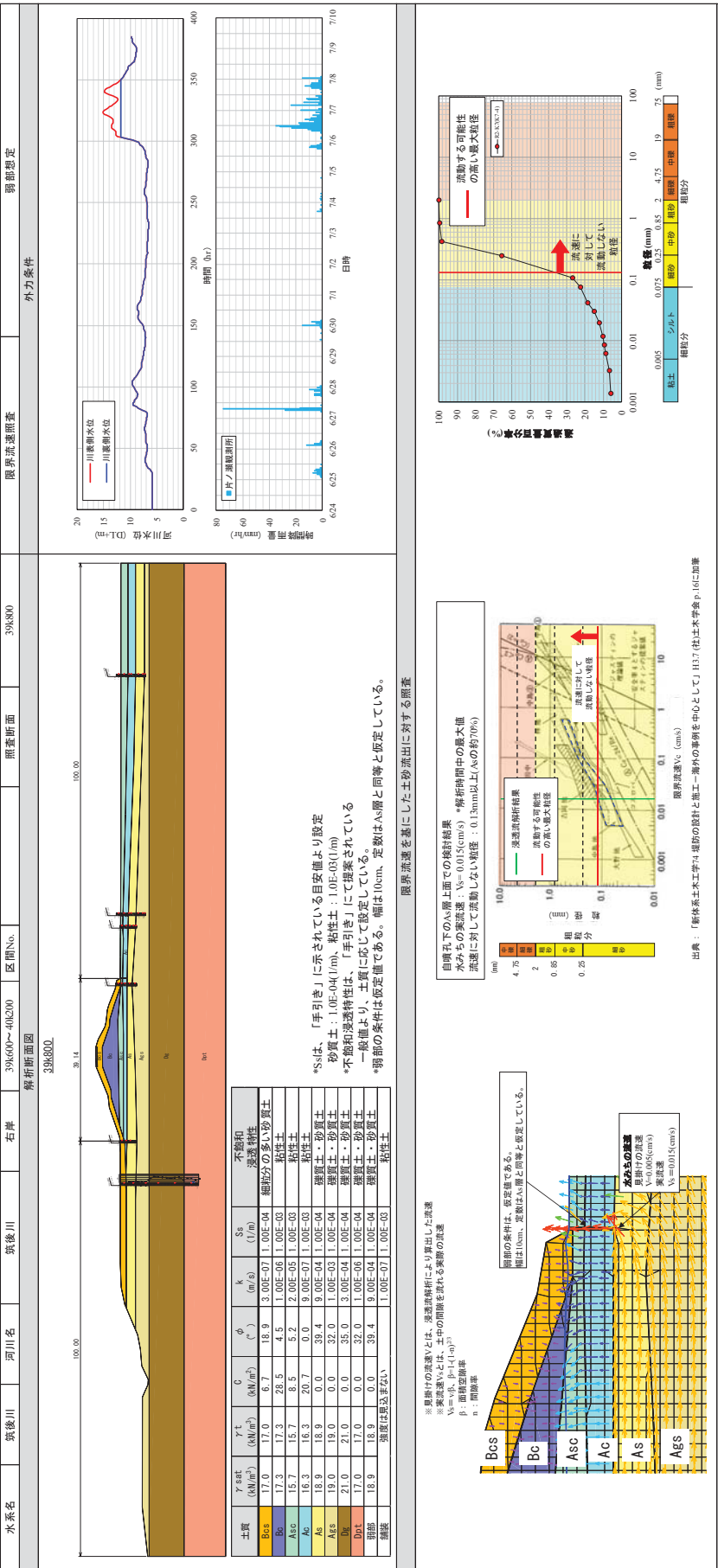
図 4-35 39k800 地点の盤膨れ発生のイメージ

(2) 浸透流解析結果（変状時外力による検討）

局所動水勾配(i_v)については、図 4-36 に示すように、変状時外力に対して堤内側法尻部で $i_v = 0.157 < 0.5$ 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 $G/W = 0.834 \leq 1.000$ となり、照査基準を満足しない。

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(V_s)については、図 4-37 に示すように、 $V_s = 0.015(\text{cm/s})$ となった。限界流速(V_c)に対して流動しない粒径は 0.13mm 以上となり、 A_s 層の約 70%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、噴砂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推察される。





(3) 浸透流解析結果（「手引き」の外力による検討）

局所動水勾配(i_v)については、図 4-38 に示すように、「手引き」で定められている外力に対して堤内側法尻部で $i_v=0.440<0.5$ 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 $G/W=0.620\leq 1.000$ となり、照査基準を満足しない。よって、盤膨れに対する強化対策が必要である。なお、すべりについては、堤内地側で $F_s=1.686>1.320$ 、堤外地側で $F_s=1.624>1.000$ と、照査基準を満足する。

Figure 10 shows a cross-section of soil layers and groundwater levels. The layers are labeled Bcs, Bc, Asc, Ac, As, and Ags. The groundwater level (GW) is indicated by a dashed line, and the water table (WT) is indicated by a solid line. The diagram also shows the relationship between the water table and the groundwater level.

土質	γ_{sat} (kN/m^3)	γ_t (kN/m^3)	C (kN/m^2)	ϕ ($^\circ$)	k (m/s)	Ss (1/m)	不飽和 透達特性
Bcs	17.0	17.0	6.7	18.9	3.00E-07	1.00E-04	細粒分の多い砂質土
Bc	17.3	17.3	28.5	4.5	1.00E-06	1.00E-03	粘土質土
Asc	15.7	15.7	8.5	5.2	2.00E-05	1.00E-03	粘土質土
Ac	16.3	16.3	20.7	0.0	9.00E-07	1.00E-03	粘土質土
As	18.9	18.9	0.0	39.4	9.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Ags	19.0	19.0	0.0	32.0	1.00E-03	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dg	21.0	21.0	0.0	35.0	3.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dnt	17.0	17.0	0.0	32.0	1.00E-06	1.00E-04	礫質土・砂質土
舗装					1.00E-07	1.00E-03	粘性土

Figure 10 also includes a table for the permeability range of each soil layer:

土質	流速ベクトル範囲 (cm/s)
Bcs	1.0E-05 ~ 5.0E-05
Bc	5.0E-05 ~ 1.0E-04
Asc	1.0E-04 ~ 5.0E-04
Ac	5.0E-04 ~ 1.0E-03
As	1.0E-03 ~ 5.0E-03
Ags	5.0E-03 ~ それ以上

※異掛けの流速 V とは、浸透流解析により算出した流速
 ※実流速 V_s とは、土中の間隙を流れる実際の流速
 $V_s = v / \beta$ 、 $\beta = 1 - (1 - n)^{2/3}$
 n : 間隙率
 β : 面積空隙率

図1は、河床の断面図を示し、異なる粒径の礫層（Armor Layer）が堆積している様子を描いている。図中の層は、上から順に Bcs、Bc、ASC、AC、As、Ags とラベルされている。各層の厚さや構成は、右側の注釈で説明されている。また、図中には流速の矢印が描かれ、異なる掛け（傾斜）での流速の違いが示されている。右側の注釈には、浸透流解析による流速 V と、実際の流速 V_s の関係式 $V_s = v / \beta$ が示されており、 β は面積空隙率、 n は間隙率と定義されている。さらに、 $\beta = 1 - (1 - n)^{2/3}$ という関係式も示されている。図中の数値として、 $V = 0.009$ (cm/s) と $V_s = 0.026$ (cm/s) が記載されている。

Figure 2-2 is a log-log plot showing the relationship between bed diameter (mm) on the y-axis and boundary flow velocity (cm/s) on the x-axis. The y-axis ranges from 0.01 to 100 mm, and the x-axis ranges from 0.001 to 10 cm/s. The plot is divided into several regions by dashed lines, representing different flow conditions. A legend box on the left indicates that the green line represents the '浸透流解結果' (Infiltration flow solution result) and the red line represents the '流動する可能性の高い最大粒径' (Maximum particle size with high possibility of flow). The plot is divided into regions for '大野河' (Ono River), '大野川' (Ono River), '大野川' (Ono River), and '大野川' (Ono River). The plot is divided into regions for '大野河' (Ono River), '大野川' (Ono River), '大野川' (Ono River), and '大野川' (Ono River). The plot is divided into regions for '大野河' (Ono River), '大野川' (Ono River), '大野川' (Ono River), and '大野川' (Ono River).

4-53

4.3 まとめ

表 4-6 に浸透流解析結果、表 4-7 に変状要因及び変状メカニズムの推定結果を示す。

- ・今回変状した区間は、過去に「手引き」に基づいて実施された浸透に対する堤防詳細点検の結果、対策が必要と判定されていた区間である。今回変状時の外水位は「手引き」によるものに比べて低かったものの、変状に至る結果となったことから、今回変状時の外水位を基に変状の原因について考察を行った。
- ・①39k600、④39k720、⑤39k800 地点の調査・解析による変状の要因・メカニズム分析を行った結果、いずれの地点においても変状につながる調査地点特有の要因があり、そこに出水による浸潤面の上昇が引き金となって、変状が生じたと推定される。
- ・その上で、今回変状後に実施した結果を基に「手引き」に基づく堤防点検の再評価を実施した結果、過去に実施した浸透に対する堤防詳細点検の結果と同様に、いずれの地点においても盤膨れの照査基準値を満足しておらず、盤膨れに対する対策が必要と判断された。

表 4-6 解析結果一覧

解析断面	外力条件	解析結果								評価	
		盤膨れ、局所動水勾配				すべり安全率					
		結果		照査基準 評価		結果		照査基準 評価			
39k600	変状時外力	局所動水勾配	$i_v =$	0.030	<	0.5	OK	堤内地側	$F_s =$	—	すべて照査基準値を満足する
			$i_h =$	—			堤外地側	$F_s =$	—		
		盤膨れ	$G/W =$	1.173	>	1.000	OK				
	手引きの外力	局所動水勾配	$i_v =$	0.455	<	0.5	OK	堤内地側	$F_s =$	1.335 > 1.320 OK	盤膨れの照査基準を満足しない
			$i_h =$	—			堤外地側	$F_s =$	1.344 > 1.000 OK		
		盤膨れ	$G/W =$	0.956	≤	1.000	NG				
39k720	変状時外力	局所動水勾配	$i_v =$	-0.028	<	0.5	OK	堤内地側	$F_s =$	—	すべて照査基準値を満足する
			$i_h =$	—			堤外地側	$F_s =$	—		
		盤膨れ	$G/W =$	1.210	>	1.000	OK				
	手引きの外力	局所動水勾配	$i_v =$	0.313	<	0.5	OK	堤内地側	$F_s =$	1.413 > 1.320 OK	盤膨れの照査基準を満足しない
			$i_h =$	—			堤外地側	$F_s =$	1.381 > 1.000 OK		
		盤膨れ	$G/W =$	0.985	≤	1.000	NG				
39k800	変状時外力	局所動水勾配	$i_v =$	0.157	<	0.5	OK	堤内地側	$F_s =$	—	盤膨れの照査基準を満足しない
			$i_h =$	—			堤外地側	$F_s =$	—		
		盤膨れ	$G/W =$	0.834	≤	1.000	NG				
	手引きの外力	局所動水勾配	$i_v =$	0.440	<	0.5	OK	堤内地側	$F_s =$	1.686 > 1.320 OK	盤膨れの照査基準を満足しない
			$i_h =$	—			堤外地側	$F_s =$	1.624 > 1.000 OK		
		盤膨れ	$G/W =$	0.620	≤	1.000	NG				

表 4-7 変状要因の特定及び変状メカニズムの推定におけるまとめ

地点	変状現象	(a)調査・解析による変状現象の要因 メカニズム分析	(b)変状時の堤防の 安全性評価	(c)堤防点検の 再評価
①39k600	自噴	- 過去の土地利用による水みちの可能性がある。 - 被覆土層下面の埋没微地形の影響による凹みが存在する。 - 常時及び出水時ともに、広域的な地下水流動として上流から下流方向への流れが存在する。 - 出水時に川表、川裏及び上流からの浸透による浸潤線の発達により、堤体下部に閉鎖された不飽和領域が形成され、不均質な被覆土層の弱部を通して自噴したと推定される。	・基盤の土砂移動は小さく、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。	・盤膨れの照査基準値を満足しないため、対策が必要。なお、法すべりの照査基準値は満足する。
②、③ 39K600+40, 60付近	湧水	・堤体はBc、Bcs層の透水性の低い堤体から構成され、河川水が堤体を通じて漏水している可能性は低い。 ・堤体表面への雨水が法尻に集中して流出したものと推定される。 ・実際に、近傍の雨量観測所(片ノ瀬)では、最大35mm/h、平均的に20mm前後の降雨が10時間程度にわたって生じており、相当量の雨水が継続的に供給されたといえる。	・堤体の局所動水勾配は$i_h=0.347$で堤防からの湧水ではなく、堤体表面付近を流下して生じた湧水と評価されることから、堤防の安全性に問題が生じるような事象ではない。	・同上
④39k720	噴砂	・過去の土地利用による水みちの可能性がある。 ・出水時に不均質な被覆土層の弱部を通して噴砂が生じたと推定される。	・基盤の土砂移動は小さく、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。	・同上
⑤39k800	噴砂	・薄い被覆土層が存在する。 ・表層部は現在の土地利用による水みちの可能性はある。 ・出水時に盤膨れを起こし、そこから噴砂が生じたものと推定される。	・基盤の土砂は移動している懸念があるため、上記①、④地点に比して、土砂流出を伴うパイピングに発達する可能性は高かった。	・同上
⑥39k800+120 付近	噴砂	・被覆土層が存在しない。ただし、表層部は現在の土地利用により、難透水層と水みちが存在する可能性がある。 ・出水時に盤膨れを起こし、そこから噴砂が生じたものと推定される。	・基盤の土砂は移動している懸念があるため、上記①、④地点に比して、土砂流出を伴うパイピングに発達する可能性は高かった。	・同上

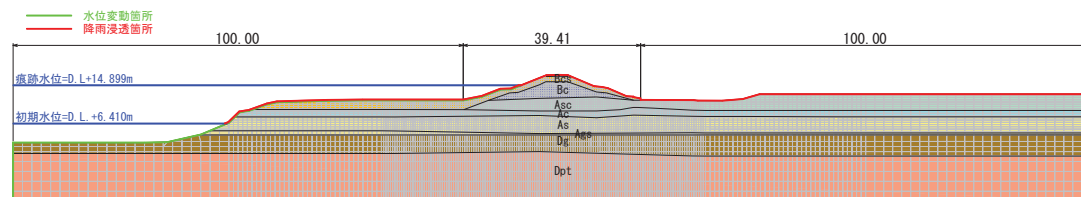
4.3.1 <参考1>浸透流解析条件の設定

(1) 解析条件とモデルの設定

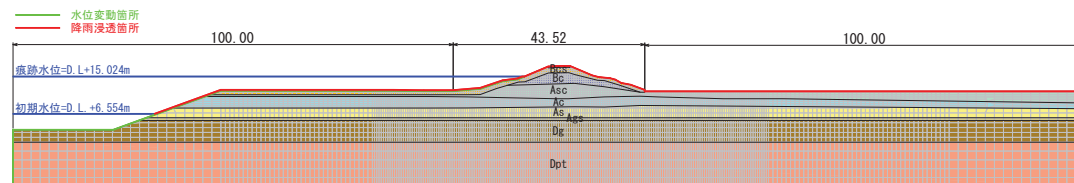
(a) 解析モデルと土質定数

変状箇所横断測量結果、ボーリング調査結果をもとに地盤モデルを作成し、土質調査結果をもとに土質定数を設定した。

■39k600



■39k720



■39k800

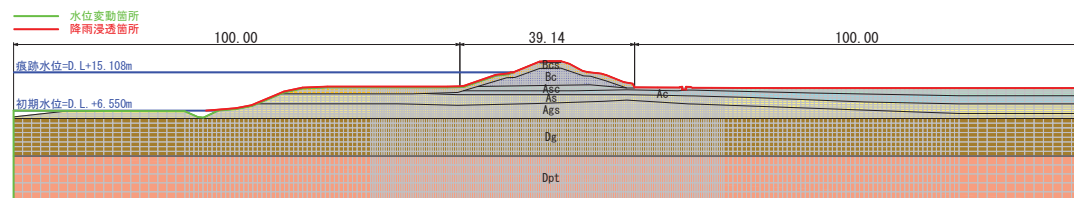


図 4-39 解析モデル図

表 4-8 土質定数

土質	γ_{sat} (kN/m^3)	γ_t (kN/m^3)	C (kN/m^2)	ϕ ($^\circ$)	k (m/s)	Ss (1/m)	不飽和 浸透特性
Bcs	17.0	17.0	6.7	18.9	3.00E-07	1.00E-04	細粒分の多い砂質土
Bc	17.3	17.3	28.5	4.5	1.00E-06	1.00E-03	粘性土
Asc	15.7	15.7	8.5	5.2	2.00E-05	1.00E-03	粘性土
Ac	16.3	16.3	20.7	0.0	9.00E-07	1.00E-03	粘性土
As	18.9	18.9	0.0	39.4	9.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Ags	19.0	19.0	0.0	32.0	1.00E-03	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dg	21.0	21.0	0.0	35.0	3.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dpt	17.0	17.0	0.0	32.0	1.00E-06	1.00E-04	礫質土・砂質土
舗装	強度は見込まない				1.00E-07	1.00E-03	粘性土

*比貯留係数(Ss)は、「手引き」に示されている目安値より設定した。

(砂質土 : Ss=1.0E-04(1/m)、粘性土 : Ss=1.0E-03(1/m))

不飽和透水特性は、「手引き」にて提案されている一般値より、土質に応じて設定した。

(2) 不飽和浸透特性

(a) 比透水係数・水分特性曲線

比透水係数・水分特性曲線は「手引き」に示されている表 4-9 を参考に設定した。

表 4-9 不飽和浸透特性数値表

a) 見かけの体積含水率 θ と比透水係数 K_r の関係

礫質土: [G], [G-F], [GF] 砂質土: [S], [S-F], [SF]		粘性土: [M], [C]	
体積含水率 θ	比透水係数 K_r	体積含水率 θ	比透水係数 K_r
0.000	0.000	0.000	0.000
0.010	0.010	0.005	0.003
0.020	0.020	0.010	0.006
0.030	0.030	0.015	0.010
0.040	0.040	0.020	0.015
0.050	0.050	0.025	0.020
0.060	0.060	0.030	0.030
0.070	0.080	0.035	0.040
0.080	0.090	0.040	0.050
0.090	0.110	0.045	0.070
0.100	0.130	0.050	0.090
0.110	0.160	0.055	0.100
0.120	0.190	0.060	0.140
0.130	0.230	0.065	0.180
0.140	0.290	0.070	0.230
0.150	0.360	0.075	0.290
0.160	0.450	0.080	0.360
0.170	0.550	0.085	0.460
0.180	0.650	0.090	0.590
0.190	0.800	0.095	0.750
0.200	1.000	0.100	1.000

b) 見かけの体積含水率 θ と負の圧力水頭 ψ の関係

礫質土: [G], [G-F], [GF] 砂質土: [S], [S-F]		砂質土: [SF]		粘性土: [M], [C]	
体積含水率 θ	圧力水頭 ψ	体積含水率 θ	圧力水頭 ψ	体積含水率 θ	圧力水頭 ψ
0.049	12.00	0.119	12.00	0.059	12.00
0.050	1.90	0.120	1.90	0.060	1.90
0.056	1.50	0.123	1.50	0.062	1.50
0.068	1.00	0.129	1.00	0.066	1.00
0.078	0.80	0.135	0.80	0.068	0.80
0.084	0.70	0.138	0.70	0.070	0.70
0.090	0.60	0.141	0.60	0.072	0.60
0.100	0.50	0.146	0.50	0.074	0.50
0.112	0.40	0.153	0.40	0.076	0.40
0.126	0.30	0.160	0.30	0.081	0.30
0.136	0.25	0.166	0.25	0.084	0.25
0.150	0.20	0.173	0.20	0.088	0.20
0.164	0.15	0.181	0.15	0.092	0.15
0.178	0.10	0.188	0.10	0.095	0.10
0.190	0.05	0.195	0.05	0.098	0.05
0.200	0.00	0.200	0.00	0.100	0.00

出典: 「河川堤防の構造検討の手引き (改訂版)」 H24.2 (財) 国土技術研究センター p. 56

(b) 比貯留係数

比貯留係数は「手引き」に示されている表 4-10 を参考に設定した。

表 4-10 強化工法に用いる材料の土質定数の目安値

材 料	浸透流計算に必要な定数		安定計算に必要な定数		
	飽和透水係数 k_s (cm/sec)	比貯留係数 S_s (l/m)	密度 ρ_t (t/m ³)	粘着力 c (tf/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)
土質	砂質土	1×10^{-3}	1×10^{-4}	実際に用いる材料に応じて設定する。	
材料	粘性土	1×10^{-5}	1×10^{-3}		
砕 石		1×10^{-1}	1×10^{-4}	2.0	0.1
アスファルト		1×10^{-5}	1×10^{-3}	安定計算では考慮しない(強度を見込まない)	
遮水シート		1×10^{-8}	1×10^{-3}		
鋼 矢 板		1×10^{-7}	1×10^{-3}		

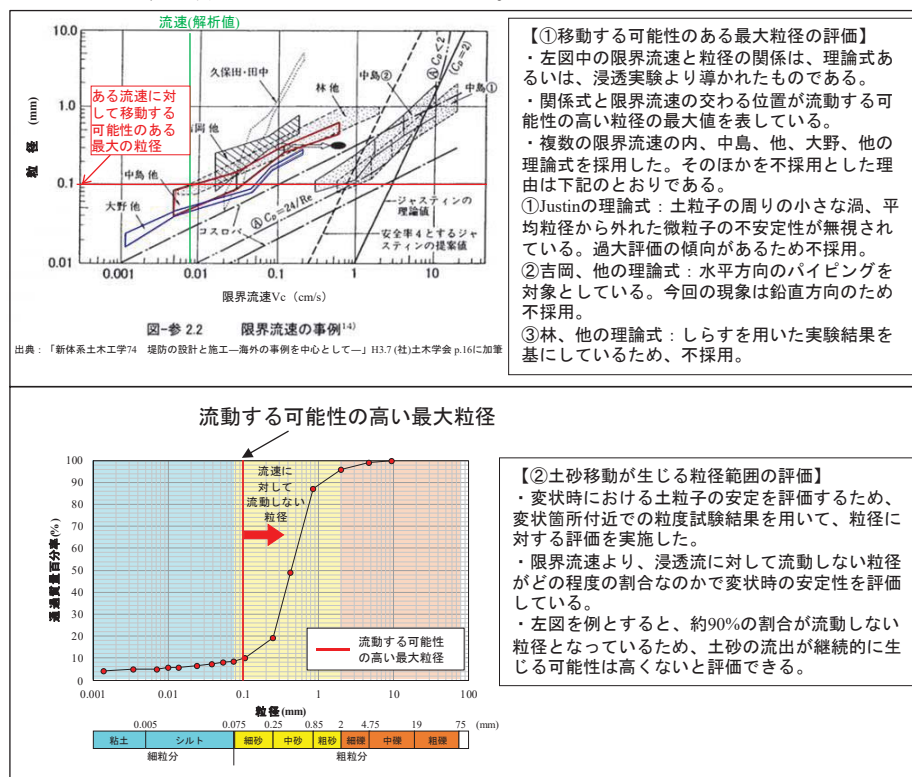
注1) 遮水シート、鋼矢板の飽和透水係数はそれぞれ厚さ1mm、1cmに対するものであり、計算では表 4.3.4 に示すようにモデルの厚さに応じて設定する必要がある。

注2) 砕石の飽和透水係数はフィルター材料を含めた値

出典：「河川堤防の構造検討の手引き（改訂版）」H24.2（財）国土技術研究センター p. 70

(3) 限界流速を基にした土砂流出に対する照査の補足説明

- ・限界流速(V_c)は、土粒子の安定が失われるときの限界の流速と定義している。
- ・パイピング現象を土塊の浮き上がりとしてではなく、個々の粒子の移動として評価することを目的として、限界流速での照査を実施した。



(4) 変状時の外力条件

変状時の外力条件は、変状地点近傍の片ノ瀬雨量、水位・流量観測所の観測データを用いて図 4-41 に示すとおり設定した。

収集した観測データの期間は、変状の発生が 2020/7/7 10:50 頃であったことから、下記のとおりとした。

- ・水位データの観測期間：2020/6/24 0:00 ～ 2020/7/10 0:00
- ・降雨データの観測期間：2020/6/24 0:00 ～ 2020/7/9 0:00

図 4-41 の上段に示す水位条件のうち、川表側水位については、上記期間の片ノ瀬水位観測所の水位データにより設定し、川裏側水位については、観測値が存在しないことに加え、平水位が堤内地盤高に比べて低く、河川水位と同程度であることから、下記の仮定により設定した。

- ・川裏側水位及び変化速度は川表側水位と同様
- ・川裏側水位のピークは堤内地盤高で頭打ち

図 4-41 の下段に示す降雨条件は、変状発生 2 週間前の観測降雨を事前降雨として与えることで、変状発生直前の飽和度分布状況を再現できるようにした。

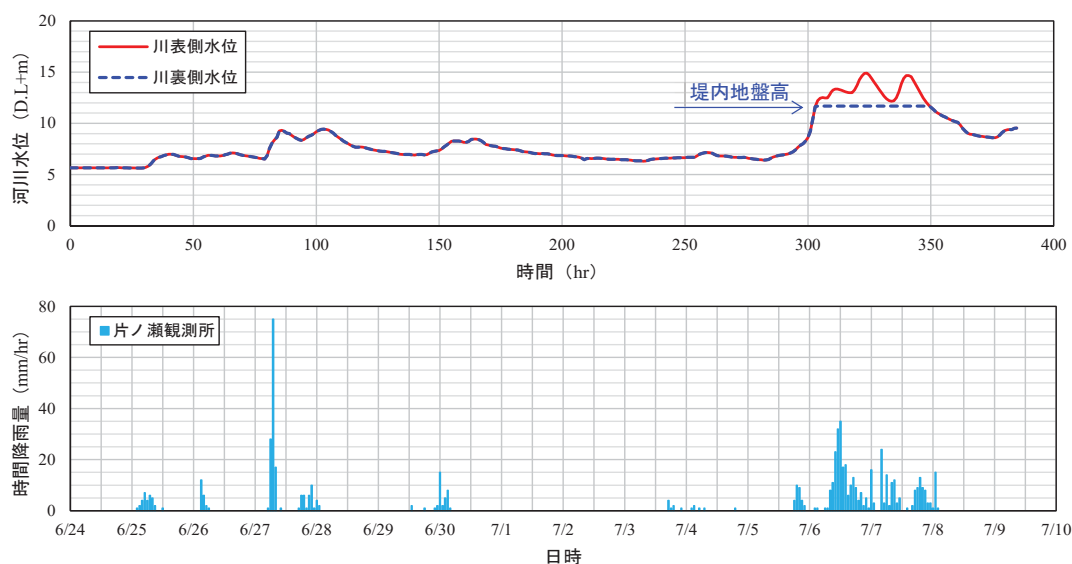


図 4-41 変状時の外力条件

(5) 「手引き」による外力条件

「手引き」による外力条件は、近年の観測記録も踏まえて既往の堤防点検時の外力条件を照査の上、変更なしとして表 4-11、図 4-42、図 4-43 のとおりとした。

表 4-11 外力条件

図面諸元			
水位・高さ等		算定波形時刻	
計画高水位	10.60	水位上昇開始時刻	-100.3
平水位	2.83	水位低下終了時刻	9.1
堤内地地盤高さ	-	水位上昇時間	99.8
HWL継続時間	1.00	水位低下時間	8.6
水位低下勾配	0.9	高水位継続時間	109.5

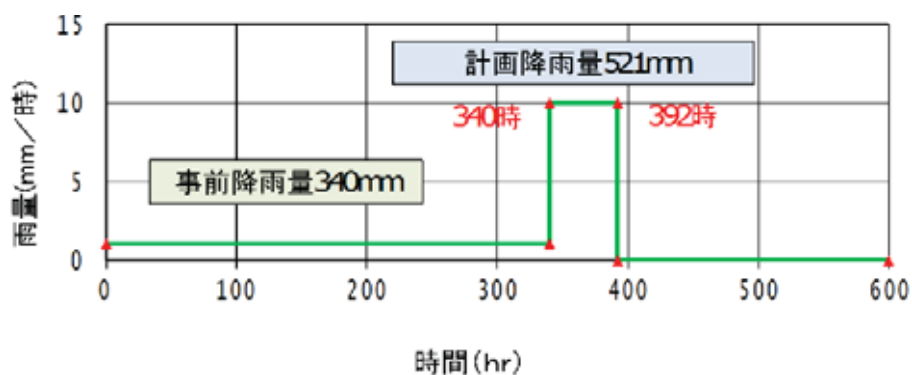


図 4-42 基準地点（瀬ノ下水位観測所）における降雨波形（H29）

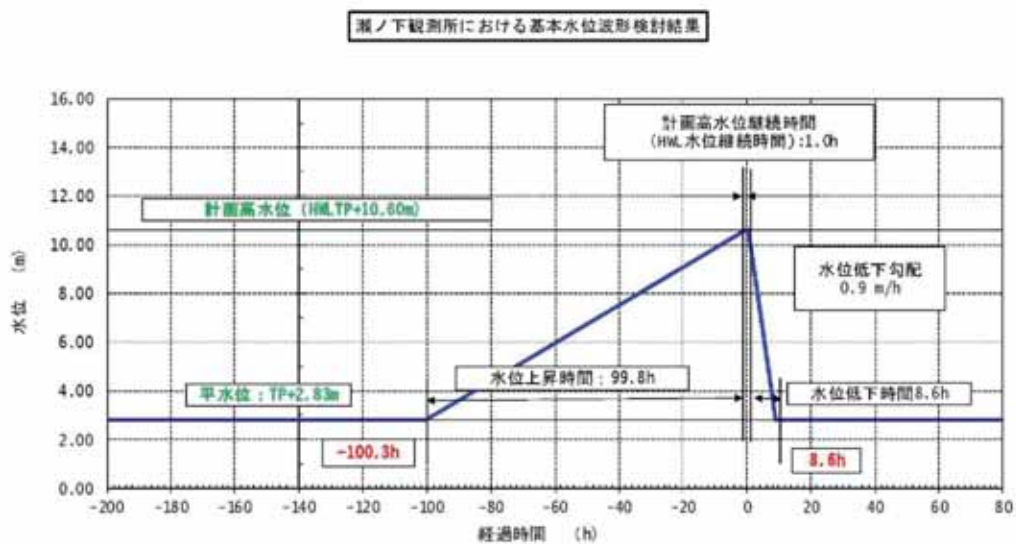


図 4-43 基準地点（瀬ノ下水位観測所）における水位波形（H29）

4.3.2 <参考 2>変状時外力における浸透流解析結果のまとめ

変状メカニズム解明のための基礎資料として、2次元飽和不飽和非定常浸透流解析を行った。

解析断面は、主たる変状箇所の①39k600地点、②39k720地点、③39k800地点の堤防断面とした。解析ケースは表 4-12 に示すとおりである。解析ケースの各条件は次のとおりである。

- ・ケース 1 は「基本ケース」であり、変状後の土質調査を行った結果を基に定めた地盤条件が、土層内で均質であるとしたケースである。
- ・ケース 2 は、土層内に水みちとなる弱部を想定して水みちの実流速(V_s)と土砂の限界流速(V_c)から土砂流出危険度を考察するためのケースである。
- ・ケース 3、4 は、39k600 断面で堤内地の水位上昇速度が解析結果に及ぼす感度を確認するために実施したケースである。

なお、解析条件とした水位変動条件は、平常時の低い地下水を初期条件としていることから、堤外側だけでなく堤内側の水位変動も考慮した解析とする必要があった。しかし、堤内地の水位上昇速度は観測されていないことから詳細は不明であった。そのため、ケース 1、2 については水位上昇速度を片ノ瀬水位観測所にて観測されている河川水位の水位上昇速度と同様と仮定した。

表 4-13 に要因分析の根拠とした変状時外力における浸透流解析結果をまとめて示す。

表 4-12 検討ケース一覧表

解析断面	ケース	解析目的	解析モデル	検討イメージ
39k600	1	基本ケース	- 変状後の土質調査結果を反映したモデル - 外力条件の堤内地水位上昇速度は河川水位と同じ上昇速度	
	2	弱部の流速確認による土砂流出の危険度確認	ケース 1 の土層モデルにおいて、法尻部に被覆土層の不均質性を考慮した弱部を想定し、モデル化	
	3	堤内地水位上昇速度の感度確認	- 土層モデルはケース 1 と同じ - 外力条件の堤内地水位上昇速度がケース 1 より速いケース	
	4	堤内地水位上昇速度の感度確認	- 土層モデルはケース 1 と同じ - 外力条件の堤内地水位上昇速度がケース 1 より遅いケース	
39k720	1	基本ケース	- 変状後の土質調査結果を反映したモデル - 外力条件の堤内地水位上昇速度は河川水位と同じ上昇速度	
	2	弱部の流速確認による土砂流出の危険度確認	ケース 2 の土層モデルにおいて、法尻部にトレンチ掘削で確認された弱部を考慮し、モデル化	
39k800	1	基本ケース	- 変状後の土質調査結果を反映したモデル - 外力条件の堤内地水位上昇速度は河川水位と同じ上昇速度	
	2	弱部の流速確認による土砂流出の危険度確認	ケース 2 の土層モデルにおいて、法尻部に被覆土層の不均質性を考慮した弱部を想定し、モデル化	

表 4-13 解析結果まとめ

解析断面	ケース	解析目的	解析モデル	検討イメージ	解析結果		盤膨れ、 β' ・ β ・ γ	水みちの流速	浸潤線、流速ベクトル図	解析結果の考察	備考						
39k600	1	基本ケース	・変状後の土質調査結果を反映したモデル ・外力条件の堤内地水位上昇速度は河川水位と同じ上昇速度		$G/W=1.173$ $i_v=0.030$ $i_h=---$	—		被覆土層は不均質である。堤内外及び上流からの浸透水による浸潤線の発達に伴い、被覆土層下面の凹み部に閉鎖された不飽和領域が形成された可能性が高い。	・流速ベクトル図の凡例 <table><tr><th>流速ベクトル範囲 (cm/s)</th></tr><tr><td>1.0E-05 ~ 5.0E-05</td></tr><tr><td>5.0E-05 ~ 1.0E-04</td></tr><tr><td>1.0E-04 ~ 5.0E-04</td></tr><tr><td>5.0E-04 ~ 1.0E-03</td></tr><tr><td>1.0E-03 ~ 5.0E-03</td></tr><tr><td>5.0E-03 ~ それ以上</td></tr></table>	流速ベクトル範囲 (cm/s)	1.0E-05 ~ 5.0E-05	5.0E-05 ~ 1.0E-04	1.0E-04 ~ 5.0E-04	5.0E-04 ~ 1.0E-03	1.0E-03 ~ 5.0E-03	5.0E-03 ~ それ以上	・盤膨れ、 β' ・ β ・ γ の基準値 ①盤膨れ $G/W > 1.0$ ここに、 G：被覆土層の重量 W：被覆土層基底面に作用する揚圧力 ② β' ・ β ・ γ （局所動水勾配） 鉛直方向： $i_v<0.5$ 水平方向： $i_h<0.5$ ・見掛けの流速と実流速 $V_s=V/\beta$ 、 $\beta=1-(1-\gamma)^{2/3}$ ここに、 V：見掛けの流速 V_s ：実流速 β ：面積空隙率 n：間隙率 出典：土質工学ハンドブック 1982 年版（社）土質工学 会
	流速ベクトル範囲 (cm/s)																
	1.0E-05 ~ 5.0E-05																
5.0E-05 ~ 1.0E-04																	
1.0E-04 ~ 5.0E-04																	
5.0E-04 ~ 1.0E-03																	
1.0E-03 ~ 5.0E-03																	
5.0E-03 ~ それ以上																	
2	弱部の流速確認による土砂流出の危険度確認	・ケース 1 の土層モデルにおいて、法尻部に被覆土層の不均質性を考慮した弱部を想定し、モデル化		—	見掛けの流速： $V=0.003$ (cm/s) 実流速： $V_s=0.008$ (cm/s)		流速によって流動しない粒径は 0.1mm 以上で、As 層の 90%以上を占めることから、洪水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る。										
3	堤内地側の水位上昇速度の感度確認	・土層モデルはケース 1 と同じ ・外力条件の堤内地水位上昇速度がケース 1 より速いケース（後掲の図 4-44 に示す。）		$G/W=1.417$ $i_v=0.002$ $i_h=---$	—		堤内地の水位上昇が河川水位上昇より速く、水位上昇前は堤内から堤外への浸透流が生じる。そのため、法尻の圧力水頭が基本ケースに比べて小さくなり、 G/W が基本ケースより大きくなる結果となった。										
39k720	4	堤内地側の水位上昇速度の感度確認	・土層モデルはケース 1 と同じ ・外力条件の堤内地水位上昇速度がケース 1 より速いケース（後掲の図 4-45 に示す。）		$G/W=1.223$ $i_v=0.047$ $i_h=---$	—		堤内地の水位上昇が河川水位上昇より速く、法尻の圧力水頭が基本ケースに比べて小さくなり、 G/W が基本ケースより大きくなる結果となった。									
	1	基本ケース	・変状後の土質調査結果を反映したモデル ・外力条件の堤内地水位上昇速度は河川水位と同じ上昇速度		$G/W=1.210$ $i_v=0.028$ $i_h=---$	—		被覆土層は不均質である。堤内外及び上流からの浸透水による浸潤線が発達し、不均質な被覆土層内の弱部を通して漏水が発生した可能性がある。									
39k800	2	弱部の流速確認による土砂流出の危険度確認	・ケース 2 の土層モデルにおいて、法尻部にトレンチ掘削で確認された弱部を考慮し、モデル化		—	見掛けの流速： $V=0.001$ (cm/s) 実流速： $V_s=0.004$ (cm/s)		流速によって流動しない粒径は 0.04mm 以上で、As 層の 90%以上を占めることから、洪水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る。									
	1	基本ケース	・変状後の土質調査結果を反映したモデル ・外力条件の堤内地水位上昇速度は河川水位と同じ上昇速度		$G/W=0.834$ $i_v=0.157$ $i_h=---$	—		堤内側堤防法尻には被覆土層があることから、堤内外及び上流からの浸透水による浸潤線が発達し、堤防法尻部から漏水が発生した可能性がある。									
39k800	2	弱部の流速確認による土砂流出の危険度確認	・ケース 2 の土層モデルにおいて、法尻部に被覆土層の不均質性を考慮した弱部を想定し、モデル化		—	見掛けの流速： $V=0.005$ (cm/s) 実流速： $V_s=0.015$ (cm/s)		流速によって流動しない粒径は 0.13mm 以上で、As 層の 70%以上を占めることから、洪水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る。しかし、他地点に比べて土砂移動量が相対的に多いことから、 β' ・ β ・ γ に移行する可能性は高かった。									

水点名	筑後川	河川名	筑後川	右岸	394.600~404.200	区間No.	394.600	照査断面	394.600	密度分析	堤内地側の水位上昇速度を調べた	外力条件																																																																																
特析断面図																																																																																												
100.00 29.41 100.00 河川水位 (DL-n) 時間 (hr) 川震動水位 川震動水位 時降雨量 (mm/hr) 時間 (hr) 時降雨量調査																																																																																												
<table><thead><tr><th>土質</th><th>γ^{sat} (kN/m³)</th><th>γ^t (kN/m³)</th><th>C (kN/m²)</th><th>ϕ (°)</th><th>k (m/s)</th><th>Ss (1/m)</th><th>不飽和・浸透特性</th></tr></thead><tbody><tr><td>Bcs</td><td>17.0</td><td>17.0</td><td>6.7</td><td>18.9</td><td>3.00E-07</td><td>1.00E-04</td><td>細粒分の多い砂質土</td></tr><tr><td>Bu</td><td>17.3</td><td>17.3</td><td>28.5</td><td>4.5</td><td>1.00E-06</td><td>1.00E-03</td><td>粘性土</td></tr><tr><td>Ase</td><td>15.7</td><td>15.7</td><td>8.5</td><td>5.2</td><td>2.00E-05</td><td>1.00E-03</td><td>粘性土</td></tr><tr><td>Ac</td><td>16.3</td><td>16.3</td><td>20.7</td><td>9.0</td><td>9.00E-07</td><td>1.00E-03</td><td>粘性土</td></tr><tr><td>As</td><td>18.9</td><td>18.9</td><td>0.0</td><td>39.4</td><td>9.00E-04</td><td>1.00E-04</td><td>礫質土・砂質土</td></tr><tr><td>Ags</td><td>19.0</td><td>19.0</td><td>0.0</td><td>32.0</td><td>1.00E-03</td><td>1.00E-04</td><td>礫質土・砂質土</td></tr><tr><td>Dg</td><td>21.0</td><td>21.0</td><td>0.0</td><td>35.0</td><td>3.00E-04</td><td>1.00E-04</td><td>礫質土・砂質土</td></tr><tr><td>Dpt</td><td>17.0</td><td>17.0</td><td>0.0</td><td>32.0</td><td>1.00E-06</td><td>1.00E-04</td><td>礫質土・砂質土</td></tr><tr><td>補強</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>1.00E-07</td><td>1.00E-03</td><td>粘性土</td></tr></tbody></table> *Ssは、「手引き」に示されている目安値より設定 砂質土：1.00E-04(1/m)、粘性土：1.00E-03(1/m) *不飽和浸透特性は、「手引き」にて調査されている 一般値より、土質に応じて設定している。													土質	γ^{sat} (kN/m ³)	γ^t (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ (°)	k (m/s)	Ss (1/m)	不飽和・浸透特性	Bcs	17.0	17.0	6.7	18.9	3.00E-07	1.00E-04	細粒分の多い砂質土	Bu	17.3	17.3	28.5	4.5	1.00E-06	1.00E-03	粘性土	Ase	15.7	15.7	8.5	5.2	2.00E-05	1.00E-03	粘性土	Ac	16.3	16.3	20.7	9.0	9.00E-07	1.00E-03	粘性土	As	18.9	18.9	0.0	39.4	9.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土	Ags	19.0	19.0	0.0	32.0	1.00E-03	1.00E-04	礫質土・砂質土	Dg	21.0	21.0	0.0	35.0	3.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土	Dpt	17.0	17.0	0.0	32.0	1.00E-06	1.00E-04	礫質土・砂質土	補強					1.00E-07	1.00E-03	粘性土
土質	γ^{sat} (kN/m ³)	γ^t (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ (°)	k (m/s)	Ss (1/m)	不飽和・浸透特性																																																																																					
Bcs	17.0	17.0	6.7	18.9	3.00E-07	1.00E-04	細粒分の多い砂質土																																																																																					
Bu	17.3	17.3	28.5	4.5	1.00E-06	1.00E-03	粘性土																																																																																					
Ase	15.7	15.7	8.5	5.2	2.00E-05	1.00E-03	粘性土																																																																																					
Ac	16.3	16.3	20.7	9.0	9.00E-07	1.00E-03	粘性土																																																																																					
As	18.9	18.9	0.0	39.4	9.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土																																																																																					
Ags	19.0	19.0	0.0	32.0	1.00E-03	1.00E-04	礫質土・砂質土																																																																																					
Dg	21.0	21.0	0.0	35.0	3.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土																																																																																					
Dpt	17.0	17.0	0.0	32.0	1.00E-06	1.00E-04	礫質土・砂質土																																																																																					
補強					1.00E-07	1.00E-03	粘性土																																																																																					
パイピング破壊に対する安全係数照査：照査断面（GW）																																																																																												

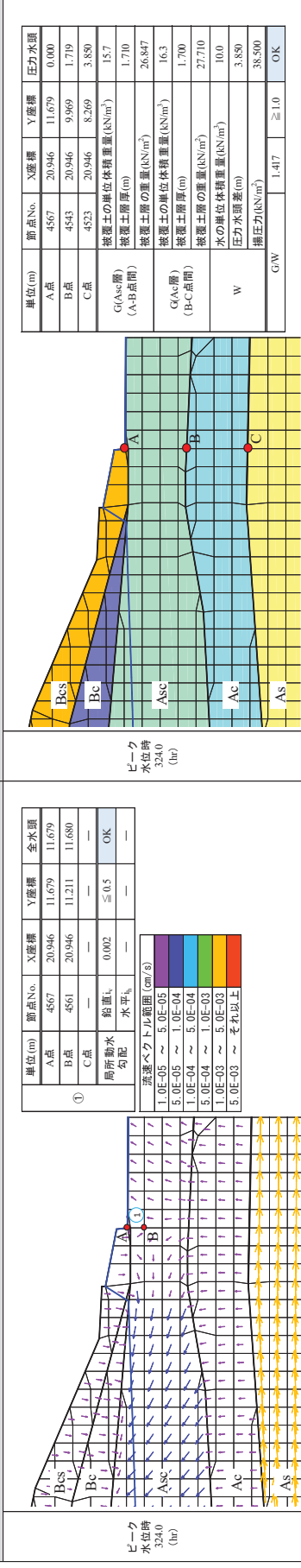


図 4-44 堤内地側の水位上昇速度を速くしたケース (39k600)

5 変状箇所の対策工法の検討

変状箇所の対策工法については、盤膨れに効果がある工法を採用するものとし、それらの対策工法の効果検証（浸透流解析）を行った上で、対策工法を決定した。図 5-1 に検討フローを示す。

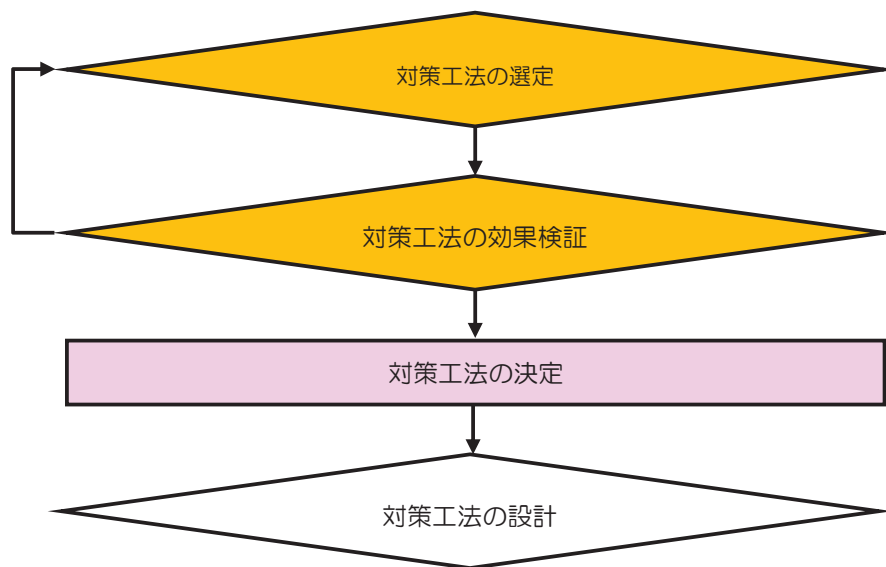


図 5-1 対策工法の検討フロー

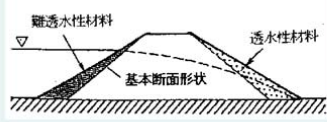
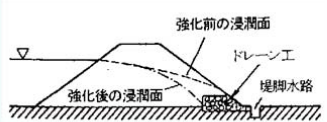
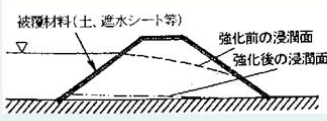
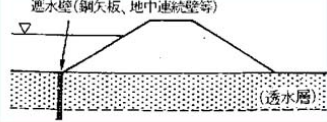
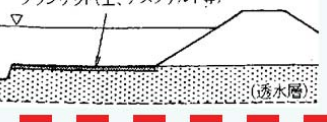
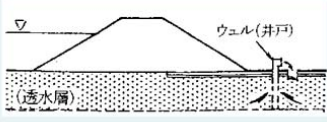
5.1 対策工法の選定

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」であるので、これらを満足する対策工法を検討対象とする。表 5-1 に各種浸透対策工法の適用性を示す。

「被覆土層下面の揚圧力の減圧」を満足する具体工法としては以下の 3 工法が挙げられるが、②は施工事例が極めて少なく、洗掘リスクが懸念される。③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ことから、採用可能な工法として、①の川表遮水工法を採用する。

- 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

表 5-1 各種浸透対策工法の効果と適用性一覧表

工 法	概 要	評価
断面拡大工法 	堤防断面を拡大し、堤体の安定性を増加させる。	×
ドレーン工法 	堤体の法尻を透水材料で置換え、堤体の浸透水を速やかに排水する。	×
全面被覆工法 	堤体の表のり面や、全面を難透水性材料で被覆し、浸透を抑制する。	×
川表遮水工法 	川表のり尻に矢板等で遮水壁を設置し、基礎地盤への浸透を抑制する。	○
ブランケット工法 	高水敷を難透水性材料で被覆し、裏法尻近傍の浸透圧を低減する。	△
ウェル工法 	裏のり尻に設置した減圧井戸で、浸透水を排水することにより、浸透圧を低減する。	△

5.2 対策工法の決定

対策断面は、次の考え方にに基づき、図 5-2 に示すとおりとした。

- ・ 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。

5.3 対策効果の検証結果（対策後の「手引き」の外力による安全性評価）

5.3.1 39k600 地点の浸透流解析結果（両側盛土＋川表遮水工法（鋼矢板））

39k600 地点において、「手引き」の外力に対して浸透流解析（両側盛土＋川表遮水工法（鋼矢板））を実施した。その結果、堤内側法尻部では、図 5-3 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。

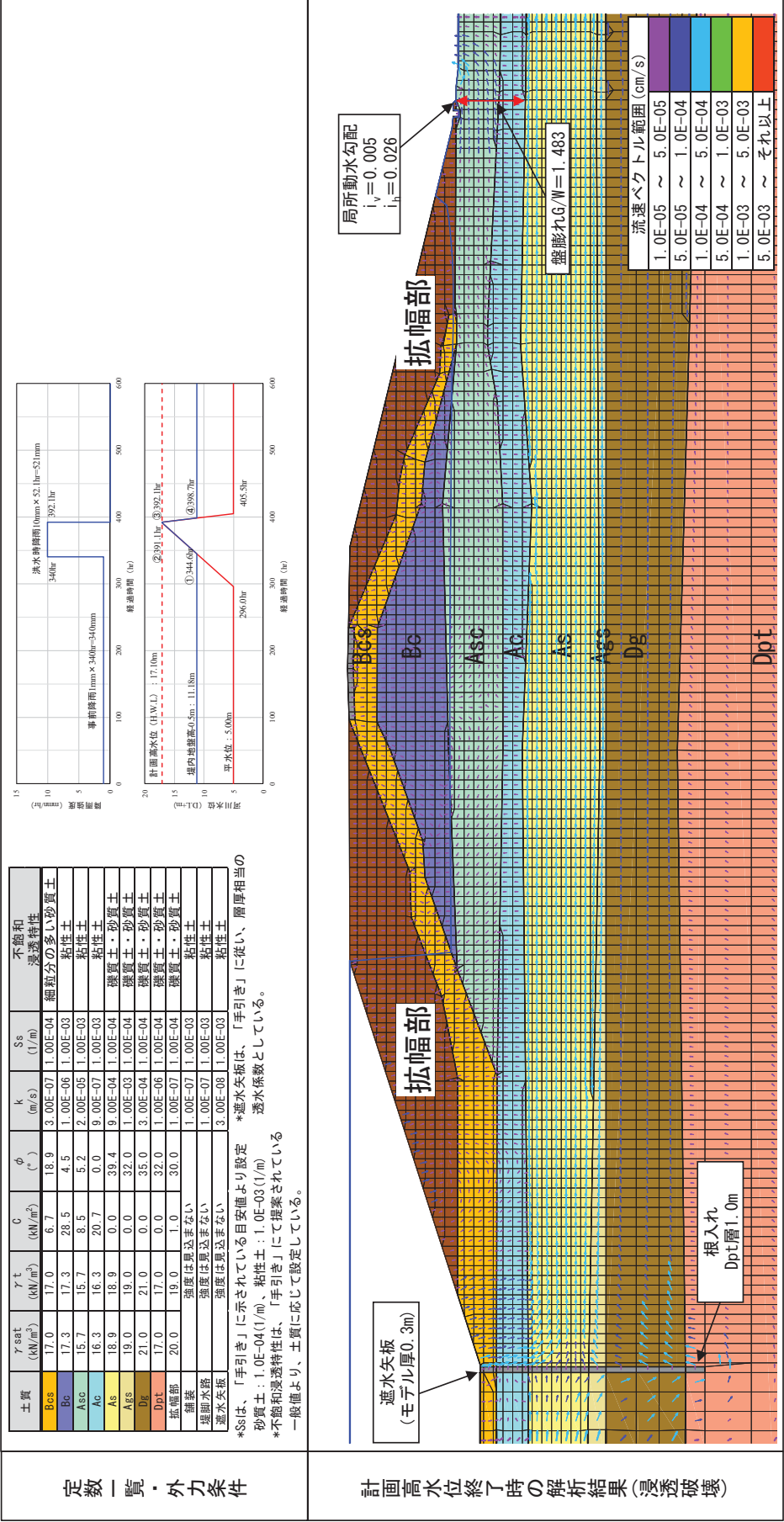


図 5-3 39k600 地点の対策後断面の浸透流解析結果

5.3.2 39k720 地点の浸透流解析結果（川表盛土＋川表遮水工法（鋼矢板））

39k720 地点において、「手引き」の外力に対して浸透流解析（川表盛土＋川表遮水工法（鋼矢板））を実施した。その結果、堤内側法尻部では、図 5-4 に示すように $i_v=0.073<0.5$ 、 $i_h=0.107<0.5$ 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 $G/W=1.556>1.000$ 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。

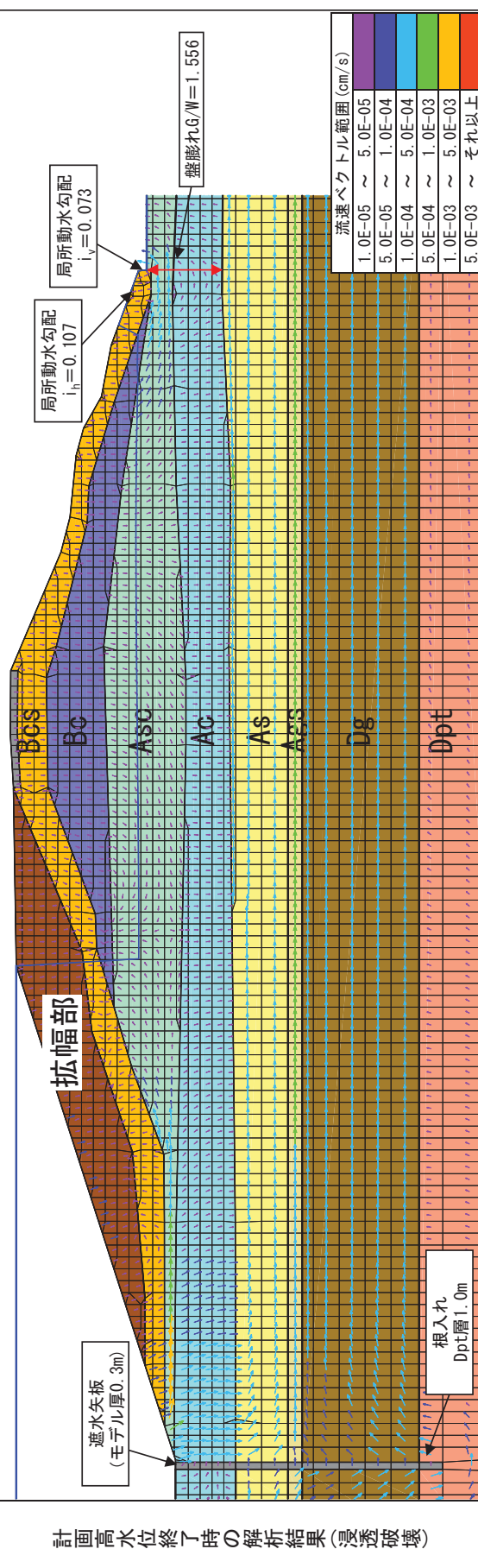
土質	γ^{sat} (kN/m^3)	γ^t (kN/m^3)	C (kN/m^2)	ϕ ($^{\circ}$)	k (m/s)	S_s ($1/m$)	不均和 浸透特性
Bos	17.0	17.0	6.7	18.9	3.00E-07	1.00E-04	細粒分の多い砂質土
Bc	17.3	17.3	28.5	4.5	1.00E-06	1.00E-03	粘性土
Asc	15.7	15.7	8.5	5.2	2.00E-05	1.00E-03	粘性土
Ac	16.3	16.3	20.7	0.0	9.00E-07	1.00E-03	粘性土
As	18.9	18.9	0.0	39.4	9.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Agss	19.0	19.0	0.0	32.0	1.00E-03	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dg	21.0	21.0	0.0	35.0	3.00E-04	1.00E-04	礫質土・砂質土
Dpt	17.0	17.0	0.0	32.0	1.00E-06	1.00E-04	礫質土・砂質土
坑漏部	20.0	19.0	1.0	30.0	1.00E-07	1.00E-04	礫質土・砂質土
舗装		強度は算定されない					
透水矢板		強度は算定されない					

地面水位 (H.W.L.) : 12.8m
 堤内地面高: 0.5m, 11.16m
 平均水位 : 5.13m
 経過時間 (hr): 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600

*透水矢板は「手引き」に従い、層厚相当の透水係数としている。

*Seは、「手引き」に示されている目安値より設定
 砂質土 : 1.0E-04(1/m)、粘性土 : 1.0E-03(1/m)

*不均和浸透特性は、「手引き」にて提案されている一般値より、土質に応じて設定している。



5.3.3 39k800 地点の浸透流解析結果（川表盛土＋川表遮水工法（鋼矢板））

39k800 地点において、「手引き」の外力に対して浸透流解析（川表盛土＋川表遮水工法（鋼矢板））を実施した。その結果、堤内側法尻部では、図 5-5 に示すように $i_v=0.023<0.5$ 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 $G/W=1.670>1.000$ 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。

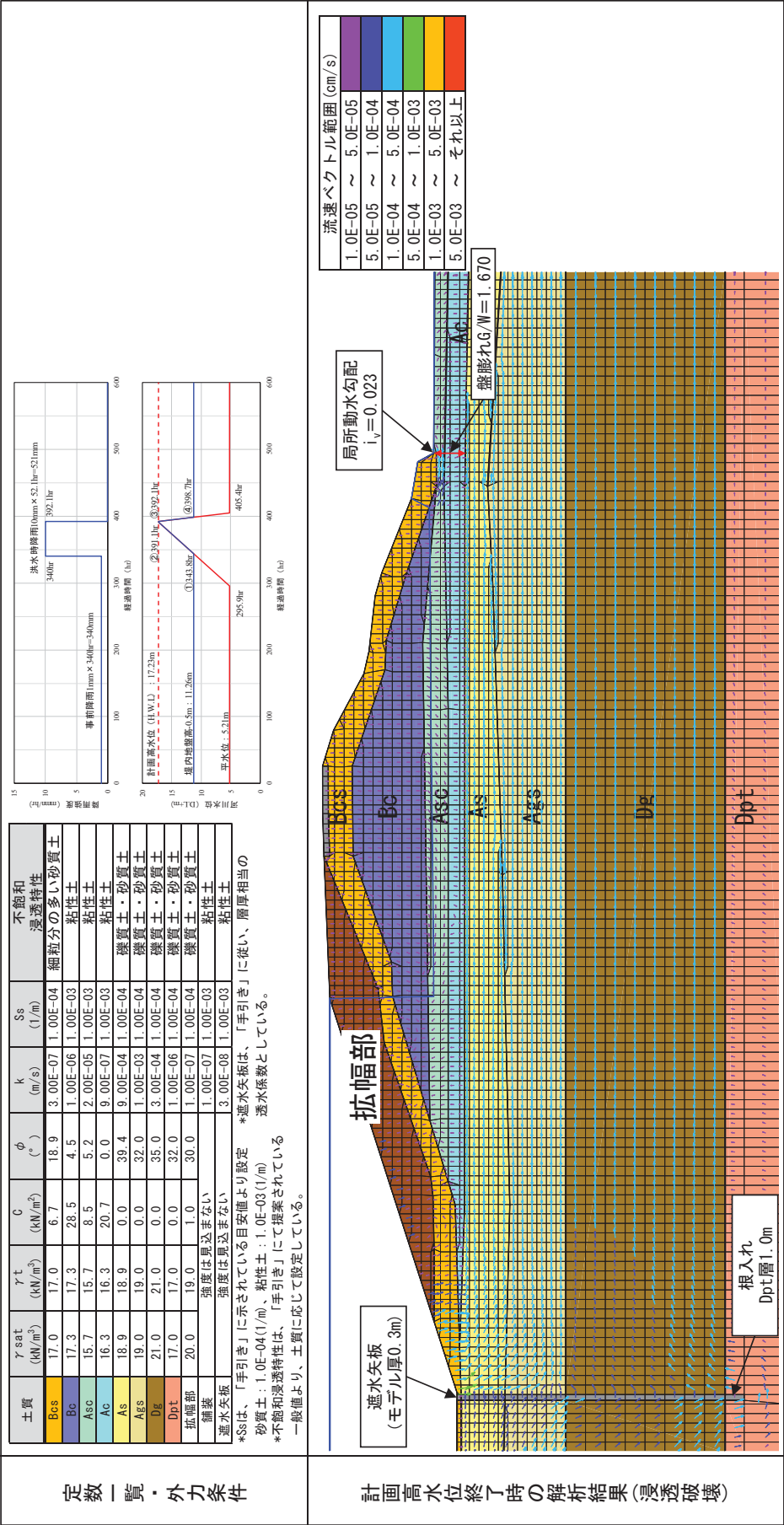
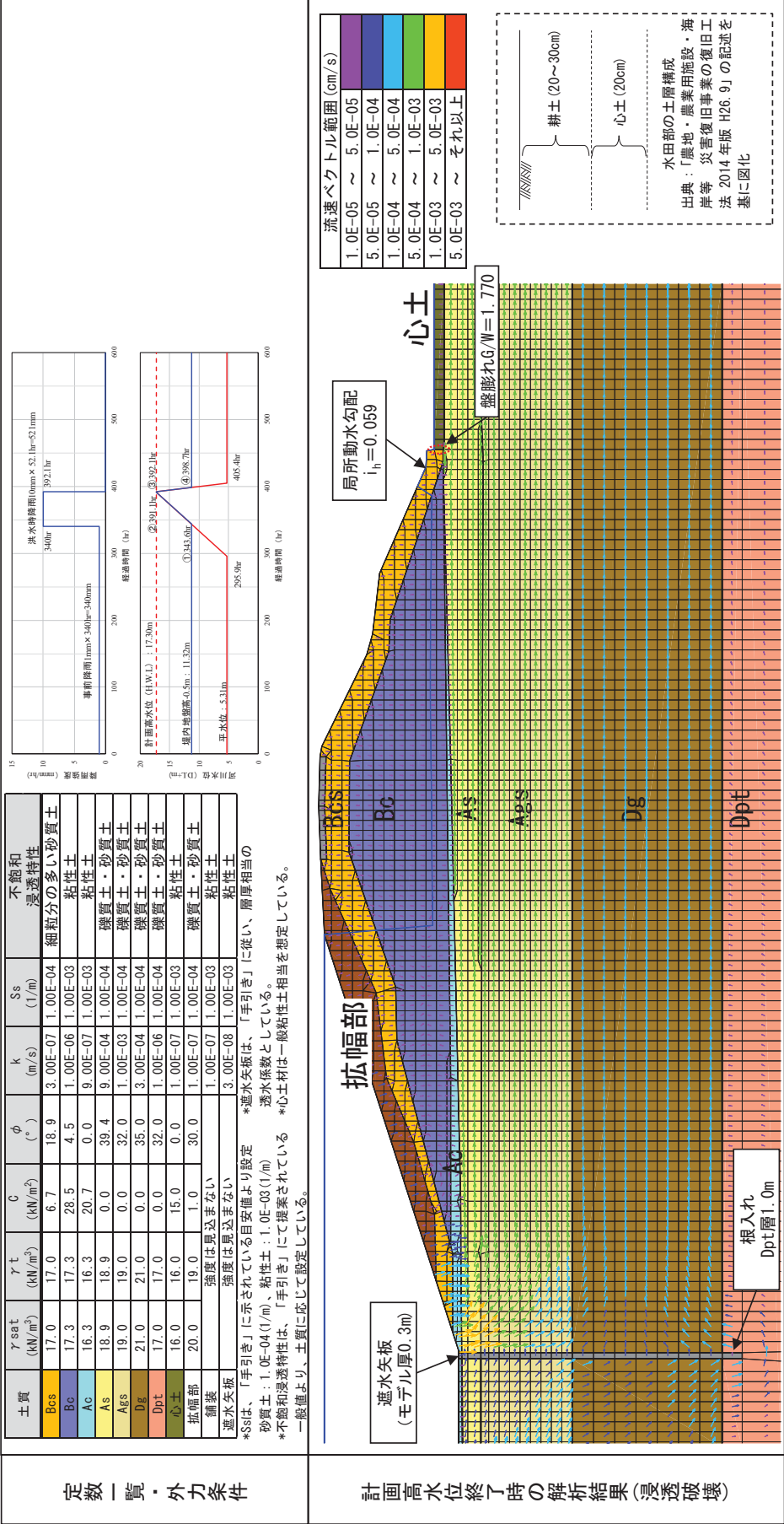


図 5-5 39k800 地点の対策後断面の浸透流解析結果

5.3.4 39k900 地点の浸透流解析結果（川表盛土＋川表遮水工法（鋼矢板））

39k900 地点において、「手引き」の外力に対して浸透流解析（川表盛土＋川表遮水工法（鋼矢板））を実施した。その結果、堤内側法尻部では、図 5-6 に示すように $i_h=0.059<0.5$ 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 $G/W=1.770>1.000$ 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。



5.4 対策工法のまとめ

上記対策工検討結果を踏まえた対策工の概要図を図 5-7 及び図 5-8 に示す。なお、39k600+30～36/600+50 は樋管区間である。

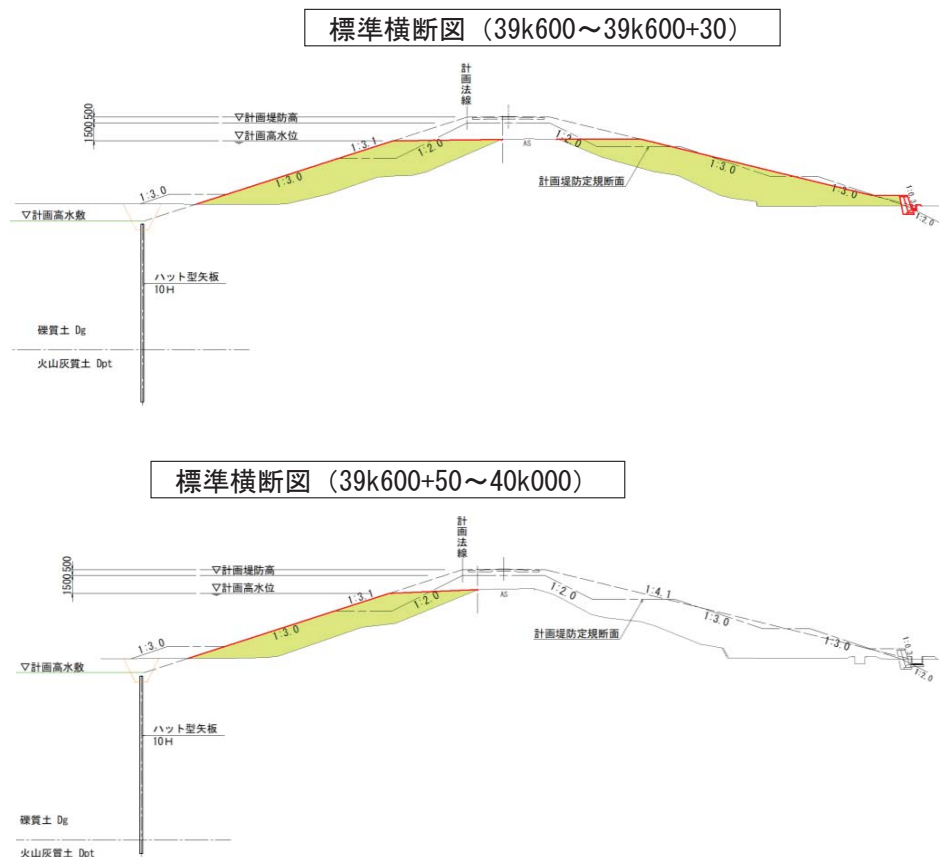


図 5-7 対策工標準横断面図

- ・当該地区（39k600～40k000）では流下能力は確保されており、他地区より越水等の懸念が小さい点や、堤防は暫定形で断面拡大を行う計画である点を踏まえ、「粘り強い構造（法肩保護コンクリート、法尻補強工等）」は実施しない。なお、将来の堤防（完成断面）の施工にあたっては、堤防を越水するような洪水に対しても粘り強い堤防の構造について検討することとする。
- ・図 5-8 に示す樋管区間は将来的に計画堤防断面に合わせて改築する必要があるが、今回は暫定的な対策として、樋管区間においても遮水矢板による対策を行い、樋管周辺の高水敷も遮水対策を行う。
- ・当対策により、川表を矢板により縦断的に遮水するが、縦断的な行き止まり地盤ではないこと（図 4-24 参照）や、As 層下部の地下水の流れは、河川流下方向に卓越していることを踏まえ（図 4-22 参照）、堤内地の地下水へは大きく影響しないと推定するが、この点については引き続き地下水のモニタリングを行い注視することとする。

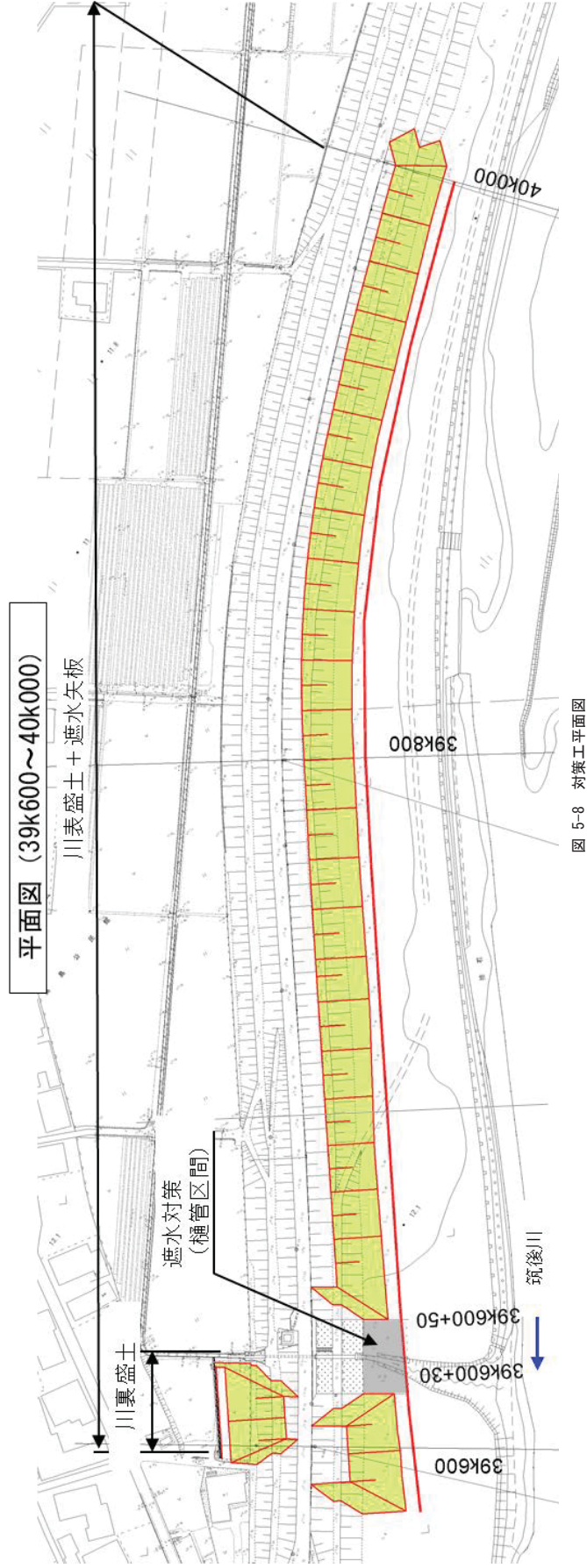


图 5-8 对策工平面图

5.5 対策工施工時における留意点

5.5.1 矢板打設工法

平成 29 年 12 月に当地周辺において同様の川表遮水矢板工事を実施した際に、Dg 層に転石が混入していたことから、矢板打設が困難となると同時に、継手部の変状や矢板の傾斜等が生じる事象が発生し、工法変更を行い施工した。当対策工は、川表遮水が重要となるが、当地の地質調査結果からも人頭大の転石が出現する可能性があるため、それらの条件下でも確実に施工可能な工法の選定に留意する。

5.5.2 盛土材料と施工方法

特に川表側については、堤体への浸透遮断や矢板と接続による遮水を行う必要があることから透水性の低い材料の使用が求められる。

- ・当地周辺の土取場（仮置土）では、概ね $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 程度の透水係数を有する土が仮置されており、その土を活かした築堤を検討することが必要である。
- ・浸透しても強度低下を生じないよう細粒分の混合や適切な粒度調整方法を事前に把握しておくことが大切である。

また、当対策は、既設堤防に対する腹付け盛土となるため、施工時に以下の点に留意する。

- ・新旧盛土との接着に注意し、表土はぎを行った上で、既設堤防の段切りを行う。
- ・盛土幅よりも広く盛土（1m 程度）を行い、薄層（20cm）以下での入念な締固めを行った上で、削り取りによる法面整形を行う。

※河川土工マニュアル 平成 21 年 4 月 （財）国土技術研究センター

6 総括

令和2年7月豪雨により発生した金島地区（筑後川右岸 39k600 付近）における変状（自噴・湧水・噴砂）に対して、既往調査結果の精査および詳細な地質調査（被覆土層、帯水層の把握、土質性状の精査等）、トレンチ掘削及び周辺地下水の流向流速観測等を実施し、得られた基本条件を基に実施した浸透流解析結果と照らして、変状要因の特定及び変状メカニズムの推定を行った。

この地区は、過去に「手引き」に基づいて実施された浸透に対する堤防詳細点検の結果、対策が必要と判定された区間である。変状時の外力（外水位）は、「手引き」による外力に比べて小さかったものの、変状に至ったことから、変状後の詳細な現地調査結果を踏まえた外水位に基づき変状要因について考察を行った。

考察の結果、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地下水位の上昇が変状の引き金となったと推定されたが、今回の変状はパイピング破壊につながるようなレベルの変状ではないと判断された。また河川水位の上昇に対する堤防補強対策を講じることで、一定の安全性向上を図ることができると判断された。

以上のような理由から、堤防点検の再評価を実施した。すなわち、過去に実施された「手引き」の外力に対する堤防詳細点検と同様に、変状発生後に実施した詳細な調査結果を踏まえ、「手引き」の外力に対して堤防点検について再評価した。再評価の結果、過去の堤防点検と同様に「盤膨れ」が不安定要因となったことから、対策工法の選定にあたっては、周辺での施工実績、施工の確実性、早期の効果発現を重視し、川表遮水工法を採用した。さらに、将来計画では堤防断面の拡大が予定されていることを踏まえ、川表側は計画に合わせた盛土を行うとともに、川裏側の自噴箇所については安全性向上のための押さえ盛土を実施することとした。

6.1 対策後も継続的に実施する調査・検討の方針

当委員会の意見を踏まえ、対策実施後も継続的に実施すべき調査・検討及び今後の課題を以下に示す。推定された変状メカニズムについては、堤外側と堤内側から堤体に向かう浸透流により低い位置にある地下水が上昇し、自噴及び噴砂に至ったと考えられたが、その検証を行うためには洪水時を含めた通年での地下水流動のモニタリングが重要である。また、盤膨れへの対策として川表遮水工を実施するため、対策後の地下水流動への影響を確認することも重要である。

そこで、4.1.4 で実施した地下水調査を表 6-1 と図 6-1 に示す内容で継続的に実施し、地下水流動のモニタリングを行う。調査期間は、調査開始時（令和2年9月）から2年間を想定しているが、今後の洪水の状況等で変更される場合もある。

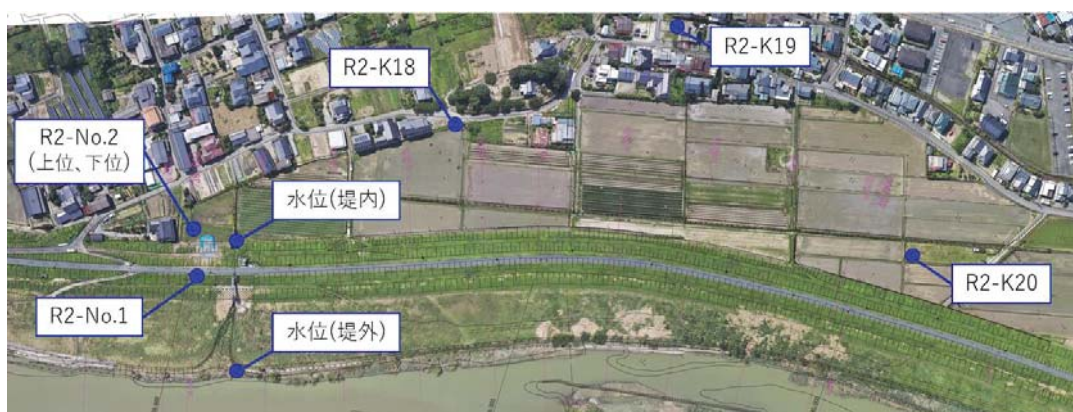


図 6-1 地下水調査位置

表 6-1 地下水調査内容

調査項目	調査箇所	確認内容	頻度
地下水位観測	・ R 2 - No 1 ・ R 2 - No 2 (上位、下位) ・ R 2 - K 1 8 ・ R 2 - K 1 9 ・ R 2 - K 2 0	・ 出水期と非出水期（平常時）の地下水（上位、下位）の変動状況の確認 ・ 河川水と地下水の連動性の確認	通年
流向流速測定		・ 出水期と非出水期（平常時）の流向変化の確認 ・ 地下水（上位、下位）の流向確認による河川水と地下水の連動性の推定	出水期（1回／年） 非出水期（1回／年）
イオン分析		・ 地下水（上位、下位）の供給源の推定	出水期（1回／年） 非出水期（1回／年）
水位観測	・ 水位(堤内) ・ 水位(堤外)	・ 河川水位と堤内水位の関連性の確認	通年

6.2 今後の課題

以下に、今回の変状を踏まえた今後の課題を示す。

①地盤情報の取得

今回変状が発生した区間は、過去に地質調査が実施され、「手引き」に基づいて実施された堤防詳細点検の結果、対策が必要と判定された区間である。今回の変状の原因究明に向けて、堤内地盤の被覆土層厚の連続的な調査を実施したが、サウンディング試験単独の土質判別では差異が生じる可能性があることから、地形的な特異性や基礎地盤の不均質性が認められる区間の堤防調査においては、部分的には簡易サウンディングなどを併用して、より丁寧に土質の目視確認、土質試験を適宜実施し、被覆土層をより詳細に把握することが必要である。

②堤防周辺の土地利用経年変化の把握

39k600 地点の土質調査結果から、植生の違い（深根系あるいは浅根系など）が地盤の均質性の違い（弱部の存在）となり、堤防の安全性に影響を及ぼす可能性があることが示唆された。これまでも堤防設計は、過去の土地利用状況（畑、水田、湿地等）を調査・把握のうえ実施してきたところであるが、例えば、当調査で使用した古地図等を用いて、同じ土地利用でも植生の違いにも着目して調査を行うことなど、調査法、点検手法の改善が望まれる。

③広域的な地下水流動の把握

変状箇所への洪水時の川裏堤脚付近の地下水は、近傍の河川水のほか、堤内側からの地下水や上流に位置する近傍の河川からの補給地下水など、広域的な影響を受けていることが示唆された。したがって、対策工法によっては地下水流動を遮断するなどの影響を及ぼす可能性があることから、洪水時を含めた広域的な地下水流動の把握に努め、対策工の設計に反映させることが重要である。

④地域への情報発信

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危険性の高いものではなかったが、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、地域の不安を解消し、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、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が重要である。

参考文献

- 1) 国土交通省九州地方整備局：筑後川水系河川整備計画（変更），平成 30 年 3 月
- 2) 国土交通省九州地方整備局：筑後川水系河川整備基本方針，平成 15 年 2 月
- 3) 国土交通省九州地方整備局：河川現況調査<調査基準年平成 22 年度末>，平成 27 年 3 月
- 4) 国土地理院：治水地形分類図（更新版平成 19 年度～）
- 5) 国土地理院：空中写真（1948 年，1975 年，2017 年）
- 6) 国土地理院：地理院地図（電子国土 Web）
- 7) 大日本蚕糸会：養蚕，平成 21 年 11 月
- 8) 大日本帝國陸地測量部：明治 33 年地図，明治 35 年
- 9) 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
- 10) 小学館：日本大百科全書，平成 6 年 1 月
- 11) 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
- 12) 社団法人 土木学会：「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」，平成 3 年 7 月
- 13) 社団法人 土質工学会：土質工学ハンドブック 1982 年版，昭和 57 年
- 14) 全国農村振興技術連盟：農地・農業用施設・海岸等 災害復旧事業の復旧工法 2014 年版，平成 26 年 9 月
- 15) 財団法人 国土技術研究センター：河川土工マニュアル，平成 21 年 4 月