

低湿地堤防の弱点箇所と安全性に関する考察

STUDY ON LEVEE SYSTEM AND IT'S WEAKPOINT IN LOW-LYING WETLAND AREAS

瀬川 明久¹・港 高学²・吉川 勝秀³
Akihisa SEGAWA¹・Takanori MINATO²・Katsuhide YOSHIKAWA³

^{1,2}正会員KKエーティック (〒063-0801 札幌市西区二十四軒1条5丁目6-1)

³正会員 工博 日本大学教授 理工学部社会交通工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

The qualitative weak points exists for ground property and non-homogeneous characteristic of levee body in low-lying wetland areas in the Ishikari River down stream, and these can cause levee failure and leak of water in flood.

We analyzed levee dimension, disaster classification, and ground condition to grasp influence to give the levees, and we found weak point factors of ground and levee body.

As a result, we extracted old wetland topographic features and former river channel on flood plain.

About a levee failure and several levee disasters, we did seepage analysis and slope stability analysis, and explained mechanism of levee failure and leak of water.

In addition, we found existence of a liquefaction trace to occur in earthquake in levee body as a new weak point.

As a result of general examination of these, a permeable layer exist directory under the levee body, the permeable layer is dead-end type for the ground property, and the levee body has high permeability, a pervious layer.

Key Words : wetland levee, peaty soft ground, levee failure, levee disaster

1. はじめに

石狩川下流の河道変遷に伴い形成された低湿地は、泥炭性軟弱地盤¹⁾のため土層構造の変化や地盤沈下が著しく、ほぼ全域が洪水氾濫原である。この地域の堤防は、築造条件から不均質に仕上がる実態にあるため、質的な弱点箇所が少なからず実在し、既往洪水では、これらの箇所において漏水や決壊などの災害が発生している。

本文では、この災害の発生要因及び堤防と地盤の弱点要因を分析し、これらの要因が堤防の安全性に及ぼす影響を把握するため、以下の検討を行った。

堤防災害の発生要因を把握するため、既存の堤防災害調査資料²⁾を用いて、堤防の諸元と土質、堤防災害の種別形態及び地盤条件などを整理した。地盤条件からの弱点箇所は、堤防災害と治水地形の関係を分析し、災害種別毎の災害発生件数を考慮して把握した。

堤防の安全性検討は、災害種別と治水地形毎に各々を代表する箇所及び決壊箇所について土層モデルを設定し、浸透流解析と法面安定解析により行った。

この結果から、堤防や地盤の漏水及び決壊に至るメカニズムを考察した上で、治水地形を考慮した弱点要因を明らかにした。また、新たな弱点部として、堤防内に地震時に発生する液状化痕跡の存在について明らかにした。

以上の結果を総合的に比較検討し、低湿地堤防に関わる安全性への課題について考察した。

2. 堤防災害の実態

表-1は、1981年洪水の漏水に関わる堤防災害³⁾19件の実態分析のため、現地調査に基づき分類した災害の種別と形態、堤防諸元、堤体と地盤の土質、治水地形の一覧である。

表-1 1981年石狩川洪水の堤防災害事例

NO	堤防高	天端幅	敷幅	堤防災害の種別・形態	堤体土質	地盤土質	治水地形
1	4.0 ^m	3.1 ^m	23.0 ^m	堤体漏水:法すべり バイピング	粘性土 火山灰砂	泥炭	旧湿地
2	3.3	4.0	15.2	地盤漏水:法すべり	粘性土	泥炭	旧湿地
3	3.8	4.0	23.0	地盤漏水:バイピング	砂質土	泥炭	旧湿地
4	4.6	4.0	22.0	堤体漏水:法すべり	シルト質砂	粘性土	旧湿地
5	2.6	5.2	20.5	地盤漏水:法すべり	砂質シルト	泥炭	旧湿地
6	2.6	3.2	18.5	地盤漏水:法すべり	砂質シルト	泥炭	旧河道
7	4.5	4.0	21.2	地盤漏水:法すべり	シルト質砂	粘性土・泥炭	旧河道
8	4.0	3.0	18.8	堤体漏水:法すべり	シルト質砂	粘性土・泥炭	旧湿地
9	3.5	3.4	15.8	堤体漏水:法すべり	砂質シルト	砂・粘性土・泥炭	旧河道
10	3.0	3.2	27.8	堤体漏水:法すべり	砂質シルト	砂質土	旧湿地
11	4.6	5.6	23.6	堤体漏水:法すべり	火山灰混粘性土	シルト	旧湿地
12	4.7	5.6	31.0	堤体漏水:バイピング	火山灰混粘性土	粘性土	旧河道
13	5.0	5.0	25.0	堤体漏水:法すべり	火山灰混粘性土	粘性土	旧湿地
14	2.7	5.5	14.6	決壊	砂質シルト	砂・火山灰	旧河道
15	3.0	3.8	22.0	決壊	軽石混火山灰	火山灰・泥炭	旧湿地
16	2.9	3.8	15.6	複合漏水:法すべり バイピング	火山灰混粘性土	シルト・火山灰・粘性土	旧湿地
17	6.6	7.1	58.5	地盤漏水:バイピング	砂質シルト	砂質土	旧河道
18	2.7	3.6	20.5	地盤漏水:バイピング	シルト質砂	泥炭・粘性土	旧湿地
19	3.2	3.6	20.5	地盤漏水:バイピング	シルト質砂	泥炭・粘性土	旧湿地
平均	3.7	4.3	23.0				

表-1から堤防の標準的な形状は、堤防高3.8m、天端幅4.3m、敷幅23.0mであり、堤防の災害形態は、法すべり、パイピング、決壊に分類される。堤体土質は、砂質・火山灰系が7箇所36.8%、砂質シルトとシルト質砂・粘性土が各6件31.6%であり、透水性の大きい箇所が多く、地盤土質は、泥炭、粘性土系が14件73.7%、砂質・火山灰系5件26.3%であり難透水性の箇所が多い。

表-2は、表-1に基づき堤防災害と治水地形の関係を分析したものであり、治水地形は地盤の土質特性を考慮すると旧湿地と旧河道に大別され、各々の災害件数は、旧湿地13件68.4%、旧河道6件31.6%である。決壊は、旧湿地と旧河道の2件である。漏水種別毎の件数は、地盤漏水8件42.1%、堤体漏水9件52.7%、複合漏水1件5.3%、漏水決壊と推定される箇所が2件10.5%である。

表-2 堤防災害と治水地形

堤防災害		治水地形 (件)		
種別	形態	旧湿地	旧河道	計(%)
地盤漏水	法すべり	2	2	4(21.0)
	パイピング	3	1	4(21.0)
堤体漏水	法すべり	5	1	8(42.1)
	パイピング		1	1(5.3)
	法すべり、パイピング	1		1(5.3)
複合漏水	法すべり、パイピング	1		1(5.3)
決壊		1	1	2(10.5)
計(%)		13(68.4)	6(31.6)	19(100)

3. 堤防災害箇所の数値解析

洪水による災害メカニズムを考察するため、表-1に示す堤防災害事例から治水地形及び災害種別と形態を考慮し、モデル条件が整った6箇所を選定して数値解析を行った(表-3参照)。

表-3 数値解析実施箇所

治水地形	No.*	堤防災害の種別(現象)
旧河道	9	法すべり
	17	パイピング
旧湿地	1	パイピング・法すべり
	3	パイピング
	7	法すべり
	15	決壊

※表-1のNo.に対応

各箇所における災害現象の発生を確認するため、洪水発生時の漏水に伴うパイピングと堤体内の飽和による法面のすべり安定性について検討した。

パイピングは、有限要素法による非定常状態における不飽和～飽和の浸透流解析により、洪水時に堤体内に形成される浸潤線と水圧分布を算出し、堤内法尻部の水平(ih)、鉛直(iv)方向の局所動水勾配を求めて行った。

法面のすべり安定性は、浸透流解析結果から得られた浸潤線を用いて簡便分割法による円弧すべり解析からす

べり安全率(Fs)を算出して行った。

パイピングの発生は、洪水時の法尻部局所動水勾配の最大値が0.5以上の場合に可能性があるとし、すべりの安全率は、1.0を境界として安定性を判断した。

また、数値解析に用いた地層モデルは、被災後に近辺で行われた調査結果を基にして作成した。

(1) 旧河道上の堤防災害事例検討

a) No. 9地点：図-1は、No. 9地点における土層モデルである。主な条件は表-4、表-5に示した。

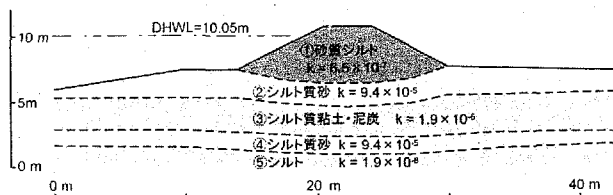


図-1 No. 9地点堤防の土層モデル

表-4 土質条件及び降雨・洪水条件

区分	土質	透水係数 k(m/sec)	湿潤密度 ρ (kN/m ³)	強度定数	
				c(kN/m ²)	ϕ (度)
堤体	①粘性土	6.5E-07	18	12	0
	②砂質土	9.4E-05	18	0	18
基盤	③粘性土	1.9E-06	-	-	-
	④砂質土	8.3E-05	-	-	-
	⑤粘性土	1.9E-06	-	-	-
総降雨量(mm)		洪水継続時間(h)		最高水位継続時間(h)	
395		88		9	

図-2は、浸透流解析結果を示し、堤体内の浸潤線は上昇しているが、堤内側の法尻部分の局所動水勾配はih=0.351、iv=0.157でありパイピングの発生はない。

一方、図-3は円弧すべり解析結果であり、Fs=0.952となり法すべりが発生する。

この地点の現象は法すべりであり、結果は災害現象と整合する。なお、この洪水では、最高水位継続時間が短かったため、決壊に至らなかったと考えられる。

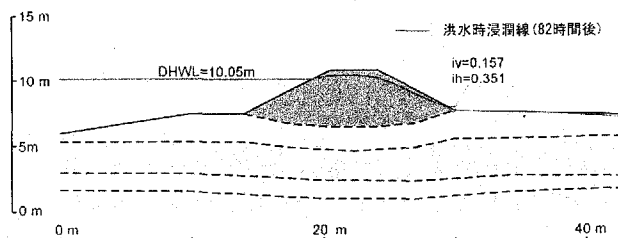


図-2 浸透流解析結果

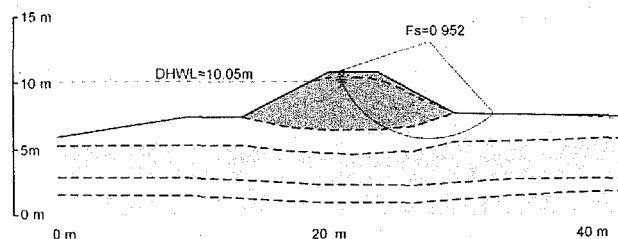


図-3 円弧すべり解析結果

b) No. 17地点：図-4は、No. 17地点における土層モデルである。主な条件は表-5に示した。

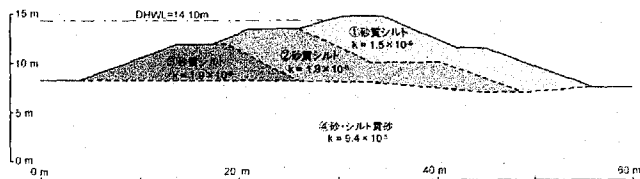


図-4 No. 17地点堤防の土層モデル

表-5 土質条件及び降雨・洪水条件

区分	土質	透水係数 k(m/sec)	湿潤密度 ρ (kN/m ³)	強度定数	
				c(kN/m ²)	ϕ (度)
堤体	①粘性土	1.5E-06	-	-	-
	②粘性土	1.9E-06	-	-	-
	③粘性土	1.9E-06	-	-	-
基盤	④砂質土	9.4E-05	-	-	-
総降雨量(mm)		洪水継続時間(h)		最高水位継続時間(h)	
335		89		6	

図-5は、浸透流解析結果を示し、堤体内の浸潤線は上昇し、堤内側法尻部分の局所動水勾配は $i_h=0.425$, $i_v=0.300$ であり、水平方向で局所動水勾配が0.5に近くパイピング発生の可能性があると判断する。この地点の現象はパイピングであり、解析結果は、災害現象と整合すると判断される。この洪水では、洪水継続時間が短いため、パイピングで止まったものと考えられる。

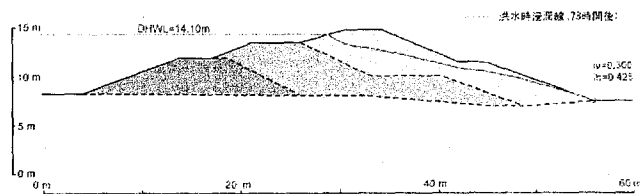


図-5 浸透流解析結果

(2) 旧湿地

a) No. 1地点：図-6は、No. 1地点における土層モデルである。主な条件は表-6に示した。

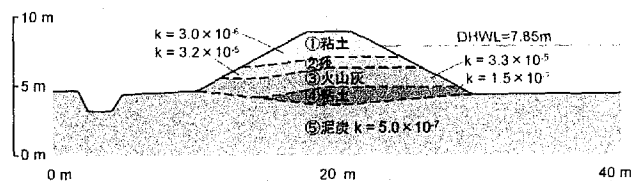


図-6 No. 1地点堤防の土層モデル

表-6 土質条件及び降雨・洪水条件

区分	土質	透水係数 k(m/sec)	湿潤密度 ρ (kN/m ³)	強度定数	
				c(kN/m ²)	ϕ (度)
堤体	①粘性土	3.0E-06	18	15	0
	②砂質土	3.2E-05	17	0	22
	③砂質土	3.3E-05	17	0	23
	④粘性土	1.5E-07	17	25	0
	⑤粘性土	5.0E-07	11	25	0
総降雨量(mm)		洪水継続時間(h)		最高水位継続時間(h)	
252		55		4	

図-7は、浸透流解析結果を示し、浸潤線は堤体の半分以上上昇している。堤内側の法尻部分の局所動水勾配は $i_h=0.579$, $i_v=0.359$ であり、水平方向でパイピングが発生する。図-8は、円弧すべり解析結果であり、 $F_s=0.966$ となり法すべりが発生する。この地点の現象は、パイピング及び法すべりであり、結果は災害現象と整合する。

この洪水では、洪水継続時間が短く、水位低下が早かったため、決壊しなかったと考えられる。

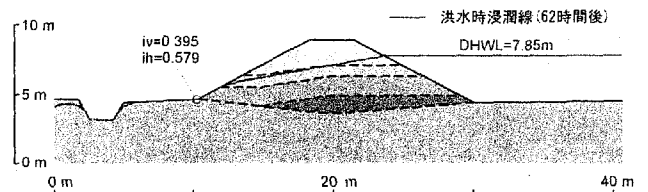


図-7 浸透流解析結果

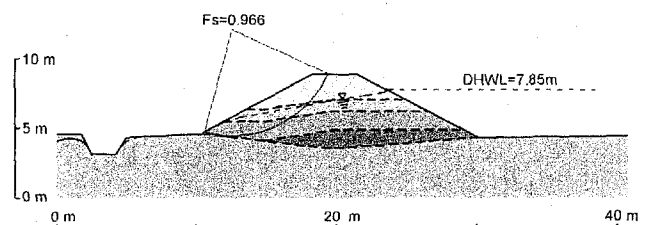


図-8 円弧すべり解析結果

b) No. 3地点：図-9は、No. 3地点における土層モデルである。主な条件は表-7に示した。

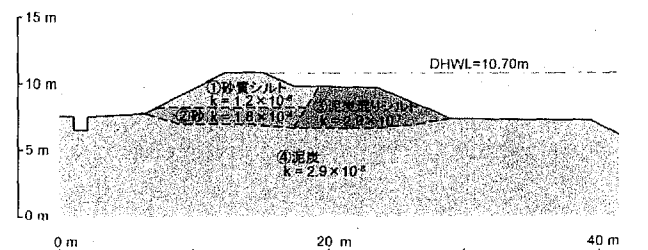


図-9 No. 3地点堤防の土層モデル

表-7 土質条件及び雨・洪水条件

区分	土質	透水係数 k(m/sec)	湿潤密度 ρ (kN/m ³)	強度定数	
				c(kN/m ²)	ϕ (度)
堤体	①粘性土	1.2E-06	-	-	-
	②砂質土	1.8E-04	-	-	-
	③粘性土	2.9E-07	-	-	-
	④粘性土	2.9E-08	-	-	-
総降雨量(mm)		洪水継続時間(h)		最高水位継続時間(h)	
330		70		11	

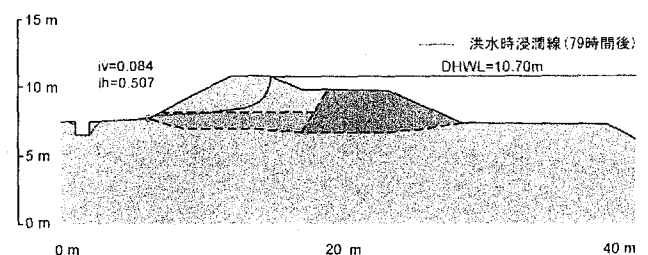


図-10 浸透流解析結果

図-10は、浸透流解析結果を示し、堤体内の浸潤線は上昇量は小さいが、堤内側の法尻部分の局所動水勾配は、 $ih=0.507$ 、 $iv=0.084$ であり、水平方向でパイピングが発生する。この地点の現象はパイピングであり、結果は災害現象と整合する。この洪水では、洪水継続時間が短いため、パイピングで止まったものと考えられる。

c) No. 7地点：図-11は、No. 7地点における土層モデルである。主な条件は表-8に示した。

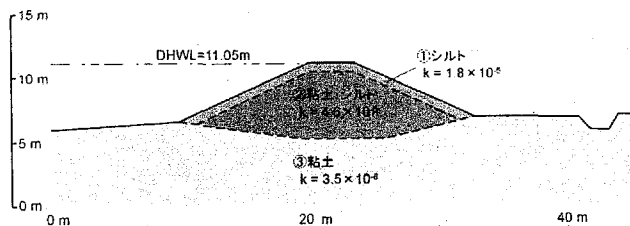


図-11 No. 7地点堤防の土層モデル

表-8 土質条件及び降雨・洪水条件

区分	土質	透水係数 $k(m/sec)$	湿潤密度 $\rho_t(kN/m^3)$	強度定数	
				$c(kN/m^2)$	$\phi(度)$
堤体	①粘性土	1.8E-05	19	20	0
	②粘性土	4.6E-06	18	10	0
基盤	③粘性土	3.5E-08	17	55	0
総降雨量(mm)		洪水継続時間(h)		最高水位継続時間(h)	
330		106		14	

図-12は、浸透流解析結果を示し、堤体内の浸潤線は上昇し、堤内側の法尻部分の局所動水勾配は $ih=0.495$ 、 $iv=0.297$ となり、水平方向で局所動水勾配がほぼ0.5でありパイピング発生の可能性が高いと判断する。

図-13は、円弧すべり解析結果を示し、安全率は $Fs=1.186$ となり1.0以上であり、円弧すべりによる法すべりは発生しない結果である。

この地点の現象は、法すべりでありパイピングは発生していない。解析では、パイピングが発生し、法すべりは発生しない結果となり、災害現象と整合しない。

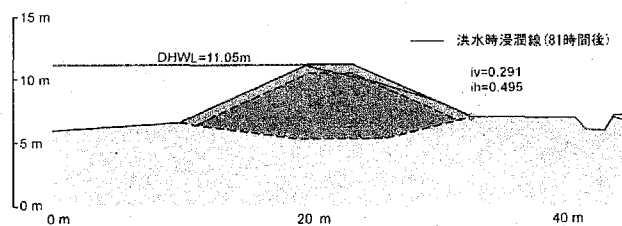


図-12 浸透流解析結果

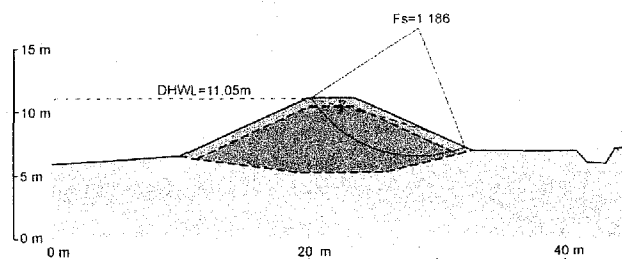


図-13 円弧すべり解析結果

この箇所の堤防は、堤防嵩上げ時に旧堤防表面に盛土厚さ0.7m程度が施工されている。

被災時には、写真-1に示すように、堤防の表面部分がすべり破壊を起こしており、円弧すべりにより堤防内部の深くまで破壊していない。この状況から、法すべりは旧堤防表面がすべり面となり法すべりが発生したと考えられる。

この現象を考慮すると、すべり解析のモデルは、図-14のような旧堤防表面に沿うようなすべり面が設定される。



写真-1 No. 7地点被災状況

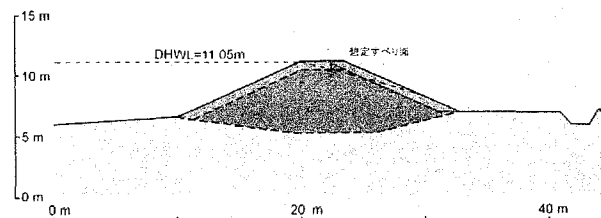


図-14 旧堤防表面に沿うすべり面の設定

堤防の嵩上げの盛土施工は、直接的に旧堤防表面に被覆しただけの施工であり、すべり面の強度はかなり低いものと考えられる。すべり面の強度は、図-15に示すように $c=4 kN/m^2$ 以下程度であったと考えられる。

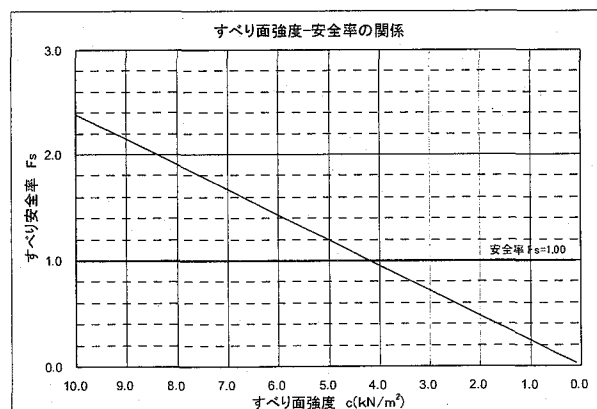


図-15 すべり面強度と安全率の関係

d) No. 15地点：写真-2は、No. 15地点の決壊直後の状況である。この箇所の上流側では、約4時間前から越水が

あったため堤内法尻周辺は浸水していた。現地からの決壊状況報告では、堤防10m程度が5m程度堤内側に水平移動し、そこで潰れるように破壊したとの報告はあるが、パイピングや法すべりの発生状況は不明である。しかし、この箇所が決壊が発生した事実を踏まえ、以下に決壊に至るメカニズムを解析的に考察した。

堤防の土質土層構成は、決壊部と周辺より推定した土層モデルを図-16に示し、主な条件は表-9に示した。



写真-2 No. 15地点の決壊状況

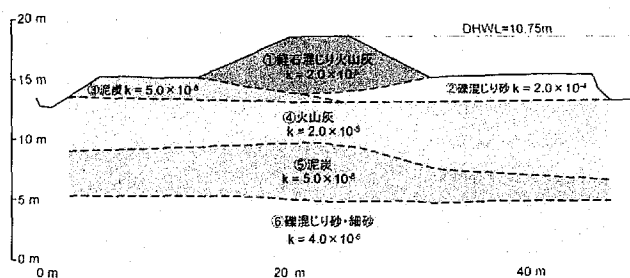


図-16 No. 15地点堤防の土層モデル

表-9 土質条件及び降雨・洪水条件

区分	土質	透水係数 k (m/sec)	湿潤密度 ρ_t (kN/m ³)	強度定数	
				c (kN/m ²)	ϕ (度)
堤体	①砂質土	2.0E-05	15	0	25
基盤	②砂質土	2.0E-04	18	0	25
	③粘性土	5.0E-08	13	15	0
基盤	④砂質土	2.0E-05	-	-	-
	⑤粘性土	5.0E-08	-	-	-
	⑥砂質土	4.0E-05	-	-	-
総降雨量 (mm)		洪水継続時間 (h)		最高水位継続時間 (h)	
313		76		2	

図-17は、浸透流解析結果を示し、堤体内の浸潤線は上昇し、堤内側の法尻部分の局所動水勾配は $i_h=0.477$ 、 $i_v=0.255$ となり、水平方向では局所動水勾配が0.5に近くパイピングが発生する可能性が高い。

図-18は、円弧すべり解析結果を示し、 $F_s=0.879$ となり法すべりが発生する。

この地点は決壊しており、法すべりが主体の決壊と推定される。本地点とNo. 1地点では、パイピングと法すべりが発生する結果であるが、前者は決壊し、後者は決壊

に至っていない。そのため当地点については、No. 1地点とは異なる現象が発生した可能性がある。

当地点とNo. 1地点との相違点は基礎地盤の土層分布状況であり、堤内側の基礎地盤上面に難透水性の泥炭層が分布し、下位の透水層である火山灰層を被覆するような行き止まり型の土層構成となっている。

このような、土層構成の場合に発生する現象としては、難透水層が、下位の透水層からの水圧を受けて破壊する浸透破壊現象があり、堤内法尻の土層の重量 G と、この土層底面に作用する揚圧力 W の関係から $G/W < 1.0$ になる場合は、浸透破壊が発生する可能性がある。

図-19は、堤内側法尻の泥炭層についての G/W の時刻歴図であり、最高水位の終了時間の前後の数時間において $G/W < 1.0$ となり、浸透破壊の発生の可能性が高い。

このことから、洪水による堤体法尻部分におけるパイピングの発生と堤内側法尻付近の地盤の浸透破壊による侵食により、法面のすべり破壊が連鎖的に助長され決壊したものと推定することができる。

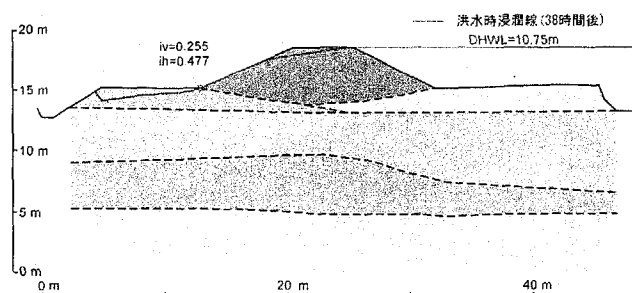


図-17 浸透流解析結果

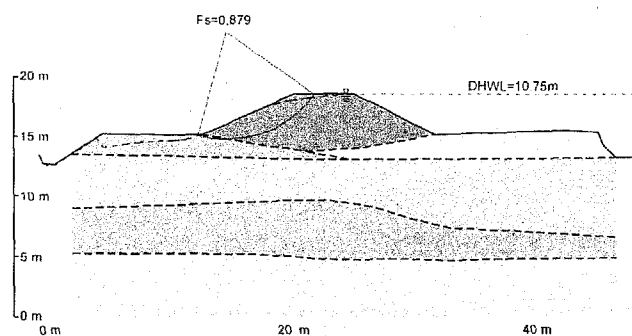


図-18 円弧すべり解析結果

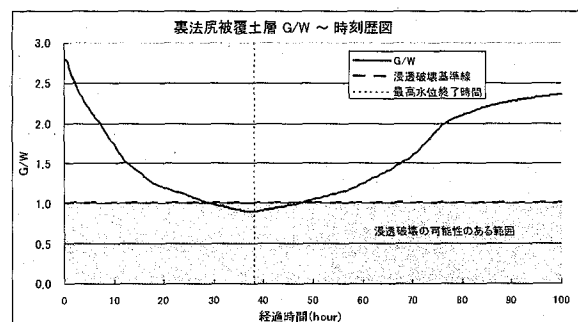


図-19 浸透による破壊の検討 (G/W ～時刻歴図)

(3) 数値解析結果のまとめ

表-10は、前述の6箇所についての結果をまとめたものである。これらの解析結果と決壊事例から、決壊はパイピング・浸透破壊～法すべり～決壊というメカニズムが推定される。

このメカニズムの発生要因は、堤防の内部構造または基礎地盤の土層構成にあり、①堤防内部の砂質系土層やサンドマットなどの透水層が挟在する、②基礎地盤の堤防横断方向で透水層が連続的に分布、③堤内側の基礎地盤上面が難透水性層で、下位に透水層が分布するような行き止まり型の土層構成の場合には、パイピングや浸透破壊が発生しやすい。特に①の場合には、堤内側法尻部の局所動水勾配が高くなる傾向があり、③の場合は、浸透破壊により空洞化が著しくなる。また、法すべりについては、④浸透により高含水比化する土層、⑤薄い被覆的な盛土による堤防構造などの場合にすべりが発生しやすい。このような箇所は堤防の安全性に対して弱点になり得る。従って、堤防災害発生の可能性は、災害発生箇所の堤防の内部構造または基礎地盤の地層構成に大きく影響される。

表-10 解析結果一覧

治水地形	No.	被災形態	洪水時間 (最高水位 継続時間)	解析による評価	
				パイピング	法すべり
旧河道	9	法すべり	88 (9)	なし	発生
	17	パイピング	89 (6)	発生	-
旧湿地	1	パイピング 法すべり	55 (4)	発生	発生
	3	パイピング	70 (11)	発生	-
	7	法すべり	106 (14)	発生	円弧すべり発生なし (旧堤表面の強度が 低くすべり発生)
	15	決壊	76 (2)	発生 (地盤の浸透破壊も発生)	発生 (法すべりが連鎖)

4. 堤防内の液状化痕跡の実態

写真-3は、地震による液状化現象で堤防内に亀裂が生じ、そこに充填された砂脈の状態を示したものである。

写真の堤防下の一点鎖線は在来地盤高を示し、その下方の破線で囲まれた部分は、地盤内に沈下埋没したサンドマットを示している。点線で示す砂脈（掘削面は拡大写真）は、サンドマット下部から地盤内に深さ約5.0m、幅5～15cmで確認され、更に下層地盤内に続いていた。砂脈内容物の分析結果ではサンドマット材が充填されたものであり、透水係数は粒度試験結果から 3.4×10^{-2} 程度である。この痕跡は、地震により基礎地盤の砂層が液状化し、同時に堤防内部に生じた亀裂に砂質粒子が流入し、間隙水圧の消散時にサンドマット材が亀裂内部に吸い込まれるようにして形成されたと考えられる。

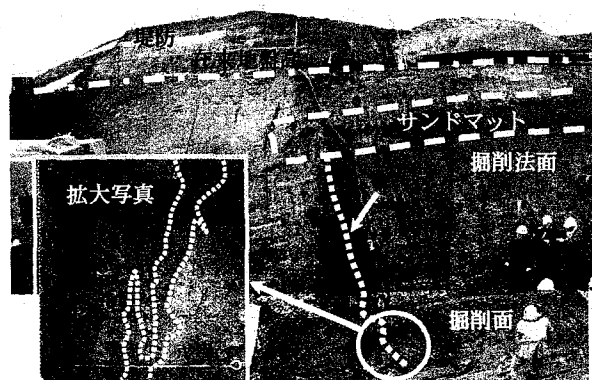


写真-3 堤防内の液状化痕跡

5. 弱点要因の分析と安全性への課題

石狩川下流の堤防災害を事例に、災害実態と弱点要因を分析した上で堤防の決壊に至るメカニズムを検討した。

この結果から浸透に対する弱点要因は、堤防構造では、透水層挟在型の土層構成及びサンドマットなど、基礎地盤では、治水地形上の旧河道や旧湿地における透水層挟在型及び透水層行き止まり型などであることが明らかになった。

法すべりに対する弱点要因は、堤防や基礎地盤では、浸透水の浸出先周辺の高含水比化など、堤防構造では、薄い被覆的な盛土による堤防嵩上げ形状などであることが明らかになった。

これらの検討から災害発生には、堤防構造と治水地形が大きく影響することが明らかにされ、決壊する場合は、小さな初期現象が他の現象を誘発して相乗的に破壊規模を進展させ、最終的に決壊に至るメカニズムが推定された。また、堤防内の液状化痕跡は、近年の地震発生状況から他の箇所でも潜在し、その痕跡は、透水性が大きいため弱点部になる可能性が大きいと考えられた。

これらから、災害要因が地表面に見られる場合は、十分な調査や対策を取ることが可能であるが、前述の事例の通り、地中に潜在する土層の瑕疵であり、現在の探査技術では、詳細情報を得ることが難しい。

洪水時においては、表面的な変状を確認するのみとなり、対策が後手に回りやすい。

低湿地堤防の安全性確保に向けては、このような課題を念頭に、潜在性の弱点部の調査方法の確立を図ると共に、弱点箇所の選定には堤防構造や治水地形に着目する経験的な手法も活用しながら、平常時から災害に備えることが重要である。

参考文献

- 北海道開発局河川工事課：泥炭性軟弱地盤における河川堤防の設計・施工指針，p7，1982
- 財団法人北海道開発協会：昭和56年堤防被災状況調査資料，1982
- 瀬川明久、奈良章、石田享平、小池剛：昭和56年8月洪水における石狩川堤防調査報告、第25回北海道開発局技術研究発表会、1982

(2007.4.5受付)