

堤防被災箇所における 変状機構解明事例からの考察

ANALYSIS OF DEFORMATION MECHANISM OF DAMAGED AREA OF DIKE

植野 直美¹・檀上 裕司¹・小俣 雅志¹・長谷川 浩夫¹・水草 浩一²・西尾 仁志²
Naomi UENO, Yushi DANJO, Masashi OMATA, Hiro HASEGAWA, Koichi MIZUKUSA, Hitoshi NISHIO

¹正会員 株式会社アイ・エヌ・エー 事業本部河川第二部・地質部 (〒112-8668 東京都文京区関口1-44-10)

²国土交通省 中国地方整備局 出雲河川事務所 (〒693-0023 島根県出雲市塩冶有原町5-1)

During the torrential rain on July 2006, the water level exceeded the design water level at the Nadabun station along Hii River. The trench excavation investigation was conducted at Imazaike, which is one of two places where the cave-in on the downstream surface and the leakage in the channel at the toe of dike were identified. The things carried out were the geotechnical investigations, the in-situ tests at the excavation site, and the water quality analyses. It is shown that the cave-in on the downstream surface should be due to a cavity caused by the piping and outflow of sand in the foundation ground below the dike body. It is considered that the main reason for the cave-in is the rising phreatic surface by spring water and seepage block caused by the existing dike-toe channel.

Key Words : record of deformation, piping, deformation mechanism

1. はじめに

国土交通省中国地方整備局出雲河川事務所管轄の斐伊川においては、平成18年7月豪雨時に最下流観測所の灘分で計画高水位を超過する出水が発生し、周辺の河川堤防では、裏のりの堤体陥没、堤脚水路での漏水発生等多数の変状が確認された。2箇所での陥没箇所のうち下流側の今在家箇所では、堤体開削調査を行い、陥没地点周辺の土質の観察および原位置試験を実施することにより、変状の発生機構と原因の検討を行った。本報告は、今後の河川堤防の管理手法に資することを目的とし、被災箇所での調査検討事例より考察を行ったものである。

2. 調査地と変状の概要

(1) 調査地の概要

斐伊川は、島根県東部の出雲平野を流れ宍道湖へ注いでいる。出雲平野は斐伊川の氾濫平野であり、旧河道・旧落堀が多く見られ、河口では旧河道が分岐流路として拡がっている¹⁾。上流域の地質は花崗岩を主体としている²⁾。このため、斐伊川はマサ土が多量に堆積した天井川となっており²⁾、堤体もマサ土を主体とすることが特徴的である。

調査地は右岸7k500付近に位置し、斐川統合樋門の下流にあたる。地形条件としては氾濫平野に分類されており、堤内地には水田、民家が隣接している。図-1に調査位置図を示す。

(2) 変状の概要

変状は平成18年7月21日午前11時頃に発見され、のり尻において細粒砂を含んだ漏水が発生するとともに、のり面中段に陥没が確認された(写真-1)。変状発生後、水防活動により緊急対策工が施工され、漏水箇所への月の輪工法、陥没箇所への土のうによる補強と大型土のう工法が施工され、シート被覆により保護された(写真-2, 3)。変状発生後に行った近隣住民へのヒアリングから、当地点では過去の洪水においても同様の被災をしたことが確認された。



図-1 調査位置

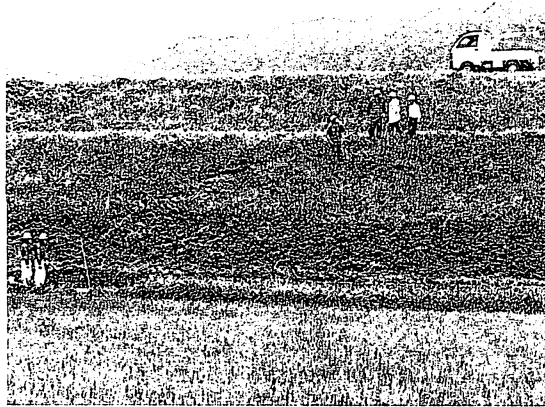


写真-1 変状発生状況



写真-2 陥没部の応急対策状況

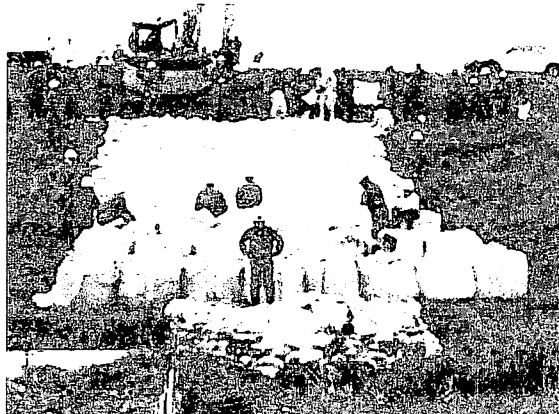


写真-3 応急対策完了状況

3. 調査手法

被災機構の解明を目的として、堤防を掘削断面の土質観察と、原位置試験を実施した。

陥没箇所直下の土質状況が確認できるよう、陥没箇所を横断する方向に堤体を掘削し、掘削面を整形し土質観察を行った。掘削深度は、掘削面崩壊のおそれがあったため、地下水位の直上までとした。

原位置試験は、堤体土質の締め具合を把握することを目的として、土壌硬度計による測定と、土層毎の現場密度試験 (JIS A 1214)³⁾ を実施した。また、各層の透水性状を把握することを目的としてマリ奥特サイフォンによる現場透水試験 (JGS1316)³⁾ を実施した。さらに、掘

削面下部の土質状況を確認するため、簡易貫入試験 (JGS1433)³⁾ を実施した。加えて、各層の物理性状把握を目的として表-1に示す室内土質試験を実施した。そのほか、地下水の状況を把握するために、水質分析を行った。

表-1 室内土質試験項目

土質試験の項目	規格	得られる定数等	目的
土粒子の密度試験	JIS A 1202	土粒子の密度 ρ_s	基本的な土質性状の把握
土の含水比試験	JIS A 1203	含水比 w_a	基本的な土質性状の把握
土の粒度試験	ふるい	JIS A 1204	粒径加積曲線
	ふるい-沈降	JIS A 1204	粒径加積曲線
土の最小密度・最大密度試験	JIS A 1224	最小密度 ρ_{dmin} 最大密度 ρ_{dmax}	締め固め状況の把握
力学試験	土の透水試験	JIS A 1218	飽和透水係数 k_s
	三軸圧縮試験	CD条件 JGS 0524	内部摩擦角 ϕ (粘着力 C_d)

4. 調査結果

(1) 土質構成と土質性状

図-2に掘削断面の土質横断面を示すとともに、表-2に土質区分を示す。堤体盛土は、シルト質細粒砂からなる旧堤体 (堤体 I) と、堤体 I を拡幅したシルト～粗粒砂 (堤体 II) からなり、のり尻にはドレーン (堤体 IV) が設置されている。また、堤体 II と現表土 (VII層) の間に過去に発生した陥没に対する盛土 (VI層) が確認される。

旧表土 (V層) は、標高8.5m測線8.5付近には、せん断面が確認される (図-2、写真-4)。せん断面は堤体 II 中のシルトの薄層をせん断することが確認され、堤体 I の表層標高7m測線8.5付近まで連続している。更に、堤内側では、V層の標高7.5m測線11付近から堤体 II 中の標高6m測線12.5付近まで、堤外落ちのせん断面の連続が確認される。これら2つのせん断面の間では、堤体 II 中の盛土層の分布構造が乱れており、この直上が陥没箇所に対応する。

堤内側噴砂箇所直下では、粘性土層 (IIIa) 層中の標高4.5m測線18付近から噴砂孔である標高5m測線17.5付近まで、パイピング跡と考えられる細かい砂および空隙が連続している (写真-5)。噴砂箇所には20～30cm程度砂が堆積している。また、噴砂箇所の直下では被災後6ヶ月経過した調査時点でも湧水が確認されており、湧水の温度は17℃と周辺の地下水に比べてやや高い。

(2) 試験結果

a) 現場密度試験

表-2に現場密度試験結果を示すとともに、図-2に試験位置を示す。堤体 I および堤体 II の湿潤密度は、現場密度試験の結果1.51～1.62g/cm³であり、盛土の一般値である1.9g/cm³⁴⁾と比較すると非常に緩い堤体であると評価できる。また、相対密度は全体的に小さく55～65%であり、特に陥没直下では40%と極めて小さい。

2) 現場透水試験

表-2に現場透水試験結果を示すとともに、図-2に試験位置を示す。飽和透水係数については、 $3 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ であり、全体に透水性が高く、降雨や河川水による浸透流が発生しやすい堤体と評価できる。

b) 土壌硬度計

図-3に土壌硬度計計測結果を示す。上断面(標高7.0m以上)では、堤外側せん断面の外側で硬度が小さい。下断面(標高7.0m以下)については、2つのせん断面の間で硬度が小さくなっている。

c) 簡易貫入試験

図-4に簡易貫入試験結果を示す。標高4~5mにかけて、Nd値3以下の軟弱層が堤内側まで連続している。簡易的にサンプリングを行ったところ、この部分は軟弱な粗粒砂層とシルト質砂層であった。

d) 粒度試験結果

図-5に粒度試験結果を示す。のり尻漏水地点の噴砂の粒径加積曲線は、堤体Ⅱおよび堤体直下の基礎地盤(As-1層)のものと類似しており、これらが流出したものと想定される。

(3) 変状発生機構の原因と考察

以上のように、本調査箇所は締め固めの緩い砂材料からなり、透水性が高い堤体と評価される。陥没発生箇所直下には両端にせん断面が確認され、このせん断面間の陥没により地表部に変状が発生したものと考えられる。また、簡易貫入試験結果から、堤体直下の軟弱な粗粒砂層とシルト質砂層が堤内噴砂箇所深部へ連続していることが推定され、この軟弱層でパイピングが発生した可能性が高い。これらのことから、変状の発生機構としては、堤体直下にある軟弱層においてパイピングが発生し砂が流出したため、堤体盛土が沈下し、陥没が地表に現れたものと考えられる。また、当箇所が過去にも被災している原因は、堤体直下に難透水路の分布が判明していることから浸透流が集中することや、噴砂箇所直下では湧水が確認されることから、平常時の地下水の流れが影響しているものと考えられる。

表-2 現場密度、現場透水試験結果

大区分	小区分	土質	原位置試験結果			
			試料 No.	湿潤密度 $\rho_t(\text{g/cm}^3)$	乾燥密度 $\rho_d(\text{g/cm}^3)$	透水係数 k(cm/sec)
本被災跡	VIII	噴砂	砂質土	-	-	-
H18.7豪雨以前の被災跡	VII	復旧表土	砂質土	-	-	-
	VI	復旧盛土	砂質土	-	-	-
	V	表土	砂質土	-	-	-
堤脚部整備に関する盛土	IV	ドレーン	砕石	-	-	-
	IIIb	埋土	砂質土	-	-	-
	IIIa	埋土	粘性土	-	-	-
Ⅱ期堤	IIb	表土	砂質土	-	-	-
	IIa	堤体	砂質土	① 1.62 ② 1.51	1.47 1.34	65 40
旧堤	Ic	表土	砂質土	-	-	-
	Ib	堤体	砂質土	③ 1.54 ④ 1.54	1.43 1.43	55 58
	Ia	基礎地盤	砂質土	-	-	-

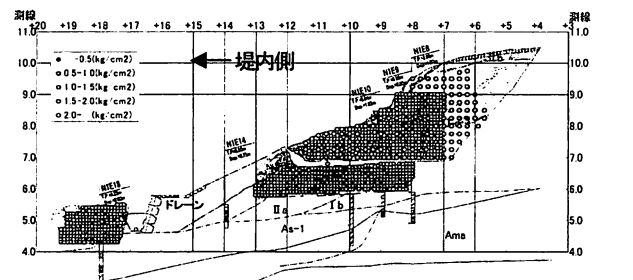


図-3 土壌硬度計計測結果(上流向)

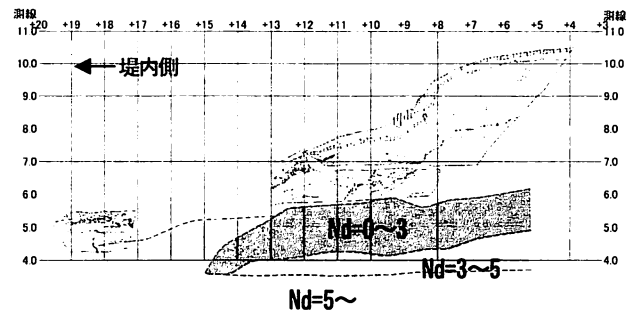


図-4 簡易貫入試験結果(上流向)

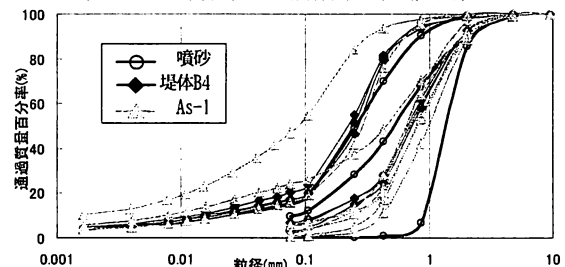


図-5 粒径加積曲線

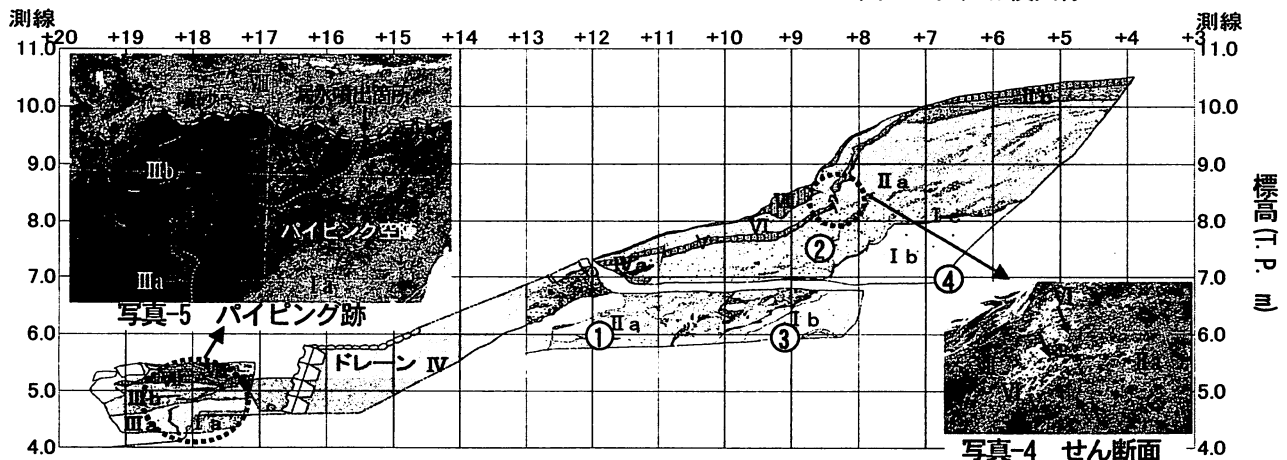


図-2 開削断面観察結果(上流向, ①~④ 現場密度試験・現場透水試験実施位置)

5. 浸透流解析

(1) 検討手法

掘削断面の実際の土質構成ならびに実績推定波形を用いて二次元非定常条件の飽和－不飽和浸透流解析を行い、被災の発生機構の検証解析を行った。

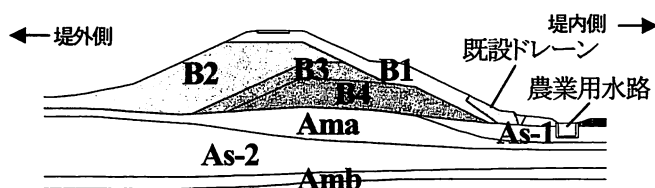
図－6に検討モデルを示す。検討モデルは、調査・試験結果をもとに基礎地盤や堤体構造（築堤履歴、材料）などを考慮した堤防土質横断面を用いて設定した。モデル化の方法は「河川堤防の構造検討の手引き」⁴⁾によった。なお、浸透流解析においては、図－6に示す層番号を用いており、土質区分と設定土質定数を表－3に示す。

水位波形は、検討地点近傍の灘分水位観測所における観測値を用い、ピーク水位が痕跡水位に一致するように設定した。これによれば、被災箇所での最大水位は計画高水位程度と推定される。また、降雨波形は、検討地点近傍の平田雨量観測所における観測値を用いて設定した。解析に用いた外力波形を図－7に示す。

(2) 検討結果

浸透流解析の結果を図－8に示す。図－8によると、河川から堤体に入った浸透水は、堤体直下に存在する不透水層（Ama層）により基礎地盤への浸透が妨げられ浸潤面が上昇し、浸透水はB4層（堤体Ⅰ）から砂質土であるAs-1層を流下している。この浸透流は堤内側の既設農業用水路に妨げられ、噴砂地点で上向きの動水勾配が卓越する。

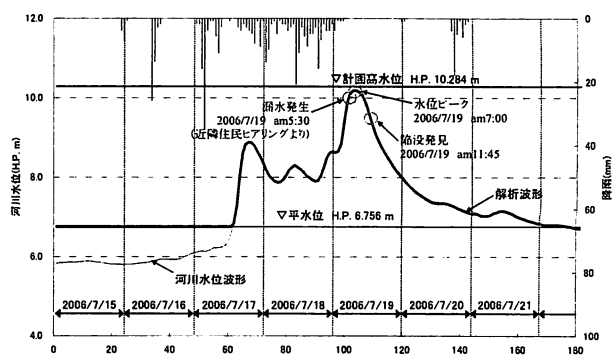
川裏のり尻噴砂地点での鉛直方向局所動水勾配は $i_v=1.60$ であり、限界動水勾配 $i=1.0$ を上回った。また、被覆土層と作用する揚圧力の比 G/W （ G ：被覆土層の重量、 W ：被覆土層底面に作用する揚圧力）は 0.55 を示し、概ね発生した現象が検証できたと考えられる。



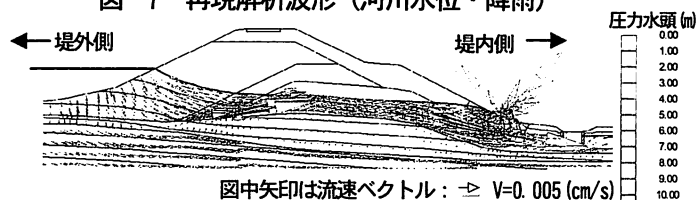
図－6 検討モデル（堤体部拡大、下流向）

表－3 設定土質定数一覧（抜粋）

土質区分	飽和透水係数 (cm/sec)
B1 堤体（堤体Ⅱ）・砂質土	4.0×10^{-3}
B2 堤体・砂質土	2.0×10^{-3}
B3 堤体・砂質土	1.0×10^{-2}
B4 堤体（堤体Ⅰ）・砂質土	4.0×10^{-2}
Ama 基礎地盤・粘性土	5.0×10^{-4}
As1 基礎地盤・砂質土	1.0×10^{-2}
As2 基礎地盤・砂質土	1.0×10^{-2}
既設ドレーン（堤体Ⅵ）	4.0×10^{-3} （堤体B1と同じ）



図－7 再現解析波形（河川水位・降雨）



図－8 浸透流解析結果（水位ピーク時、下流向）

6. まとめ

- ① 本地点では巡視活動により変状発生を早期に発見でき、壊滅的な被災を未然に防止することができた。同時に変状発生から緊急対策工設置完了までの詳細な時間的記録を残すことができた。
- ② 開削調査により、パイピング発生状況と陥没に至るメカニズムを肉眼で観察できた。また、過去の出水時にも同様の変状が発生していたことが判明した。
- ③ 過去の対策工は応急的な復旧盛土を施工しただけであったため、繰返し被災したと考えられる。このような復旧対策事例は全国的にも比較的多いと考えられる。今後は変状の発生要因を調査した上で、恒久的な対策工を施すことが必要と考えられる。
- ④ 今回詳細な土質調査と浸透流解析を行ったことにより、土質構成、地下水流動といった広域的な要因に加え、付近の水路などの周辺構造物の配置が関係した局所的な要因により変状が発生したことが判明した。

謝辞：国土交通省国土技術政策総合研究所河川部の方々には、技術的な示唆を頂きました。また、水防団をはじめとする地元周辺住民の方々には、調査検討にあたり貴重なデータを頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献：

- 1) 治水地形分類図
- 2) 土地分類基本調査 恵曇・今市 1972年 島根県
- 3) 地盤調査の方法と解説 地盤工学会
- 4) 河川堤防の構造検討の手引き 2002年 財団法人国土技術研究センター

(2008. 4. 3受付)