

宮城県北部地震による 河川堤防被害調査について

SURVER AND RESEARCH OF DAMAGE TO RIVER EMBANKMENTS CAUSED
BY THE MIYAGIKEN HOKUBU EARTHQUAKE

関沢元治¹・佐藤伸吾、 中山 修²・鈴木善友、 勝山明雄³・小松田孝寿、
杉浦達也⁴・太田史朗、 平塚智幸⁵

Motoharu Sekizawa, Shingo Sato, Osamu Nakayama, Yoshitomo Suzuki, Akio Katsuyama,
Takahisa Komatsuda, Tatsuya Sugiura, Shiro Ota and Tomoyuki Hiratsuka

¹正会員 国土交通省 東北地方整備局 北上川下流河川事務所 (〒986-0861 宮城県石巻市蛇田字新下沼80)

²(財) 国土技術研究センター (〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-12-1)

³応用地質株式会社東北支社 (〒983-0043 宮城県仙台市宮城野区萩野町3-21-2)

⁴川崎地質株式会社北日本支社 (〒983-0852 宮城県仙台市宮城野区榴岡3-4-16)

⁵基礎地盤コンサルタント株式会社東北支社 (〒983-0842 宮城県仙台市宮城野区五輪2-9-23)

This paper reports the results of investigations of the damage to the embankments in the Naruse River caused by a great earthquake originating in the north of Miyagi prefecture on July 26, 2003.

A geophysical exploration in the damaged section found that the body of the embankments in the Naruse River was generally loose and weak.

In the embankments in the Naruse River, seepage water easily accumulates and can hardly be drained because they contain the old embankments and revetments.

Based on the investigation results, measures were assessed for reinforcing the embankments in the Naruse River.

Keywords: structure of embankment, geophysical exploration, soundness of embankment, drainage of seepage water, drain

1. はじめに

(1) 地震の概要

2003年7月26日、宮城県北部を震源とする大規模な地震が発生した。今回の地震の特徴は1日のうちに

震度6規模の大規模地震が3回連続して発生していること、また、図-1に示すように県内は地震の3日前から低気圧の影響で降雨があり、本震発生時点(7時13分発生M6.2)で、鹿島台雨量観測所126mm、同水位観測所において指定水位を超え、河川水位が堤内地盤高より高い状況であった。

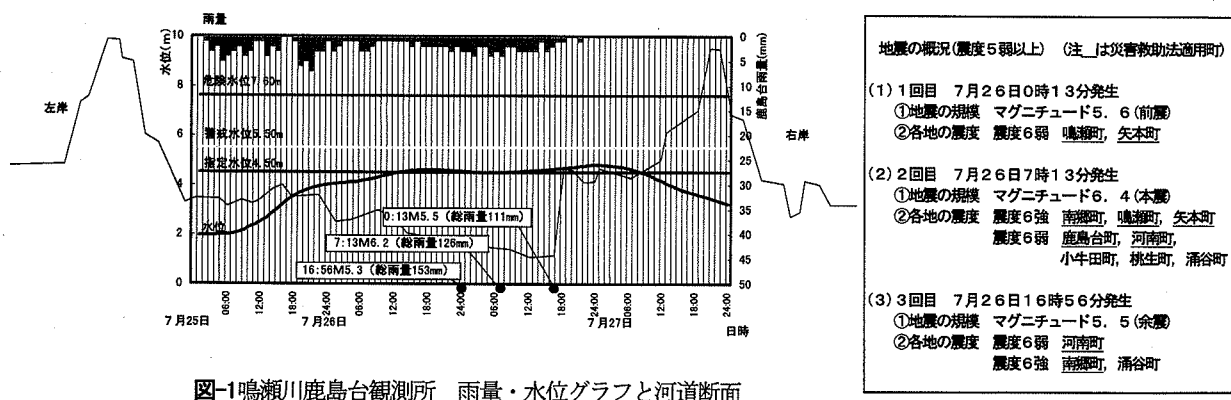


図-1鳴瀬川鹿島台観測所 雨量・水位グラフと河道断面

(2) 地震による河川管理施設の被害

今回の地震による被害は震源地に近い宮城県北部の鹿島台町・涌谷町・南郷町・矢本町・河南町・鳴瀬町を中心に発生している²⁾。

一方、河川管理施設の被害は鳴瀬川の下流～中流部、江合川に集中し、堤防の滑り、沈下、クラックなどが発生した。

表-1 宮城県内の一般被害

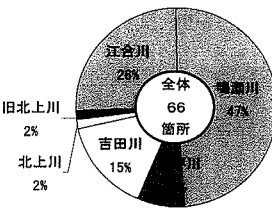
災害区分	宮城県内	
	数	人
人的被害	重傷	51
	軽傷	624
	負傷者計	675
住家被害	全壊	1,276 棟
	半壊	3,809 棟
	一部破損	3,200 世帯
	住家被害計	10,975 棟
		8,821 世帯
		16,080 棟
非住家	公共建物	19 棟
	その他	5,404 棟
その他	土木施設被害	516 箇所
	産業関係被害	3,507 箇所
	文教施設被害	268 箇所
	保健福祉関係被害	79 箇所
	その他公共施設被害	58 箇所
	水道	15,449 戸
	電気	115,425 戸

写真1 鳴瀬川左岸13.4k

堤防被害状況



河川別被害状況



河川管理施設別被害状況

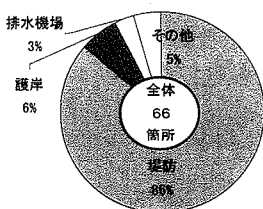


図-2 河川管理施設の被害状況

(3) 被災要因

堤防の被災要因は、現地でのボーリング調査や堤防開削調査、築堤履歴調査をはじめ、「鳴瀬川堤防検討会（委員長：山村和也日本大学生産工学部講師）」による専門家の指導のもと、次のように推定した。

<外力>

- a) 地震発生時、堤防は100mmを超える事前降雨の影響で湿潤状態となり、堤体強度が低下していた。
- b) 湿潤状態の堤防に震度6規模の地震が連続して発生し、段階的に地盤や堤体の強度が低下した。

<地盤>

- a) 堤防開削調査で砂脈が確認されるなど、地震動による過剰間隙水圧の上昇により、表層下の緩い砂層の液状化が認められた。
- b) 被害の大きかった鳴瀬川下流から中流部周辺の地盤は既存のボーリング調査の結果等からN値2～4程度の軟弱層が深さ30～40mで広く分布しており、地震動が増幅しやすい。

<堤体>

- a) 被災した堤防は大正時代に築堤された「旧堤防」に昭和30年代～40年代に砂質土主体（河道掘削土砂）で嵩上げ・腹付けする形状で施工されたが、強度の低い堤体であった。

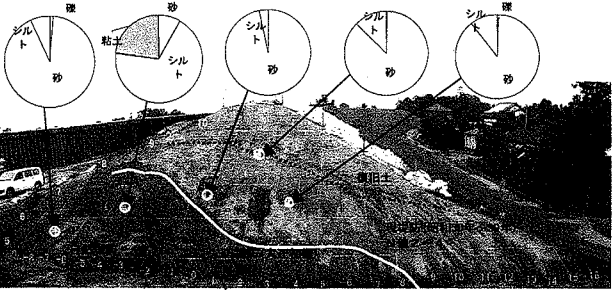


写真-2 鳴瀬川左岸12.4k開削状況

表-2 土質性状

土層区分	湿潤密度 γ_t (t/m ³)	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (度)	透水性係数 k (cm/sec)
Bs	1.75	10.0	38.0	1×10^{-3}
Bc	1.66	16.6	0.0	1×10^{-4}
Ac1	1.71	40.0	0.0	1×10^{-5}
As1	1.81	0.0	38.0	2×10^{-3}
Ac2	1.55	37.0	0.0	1×10^{-5}
As2	1.80	0.0	38.0	2×10^{-3}

- b) 堤防の築堤履歴（旧堤体の位置）や堤体内の土質構成によって浸透した水が抜けにくく堤体が飽和しやすい構造である。

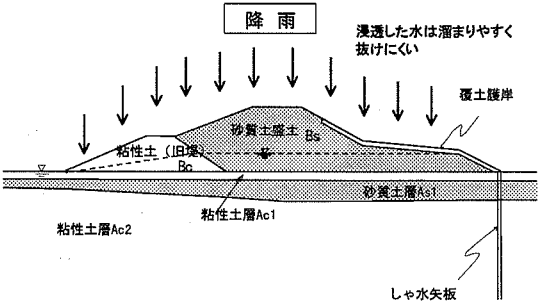


図-3 鳴瀬川左岸13.4kの堤防構造

以上に示したような地盤及び堤体構造の堤防に事前降雨が加わり堤防は湿潤状態となり、強度が低下したところに震度6規模の地震が作用し、堤防が被災したものと推定される。

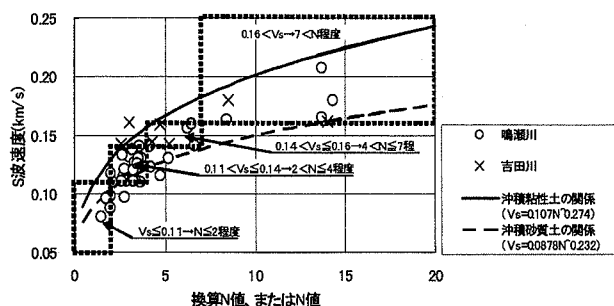


図-7 深度5 mまでの平均値で見たS波速度とN値の関係

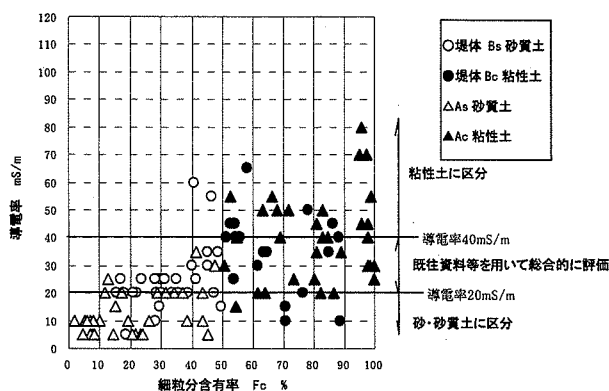


図-10 細粒分含有率と導電率値の関係

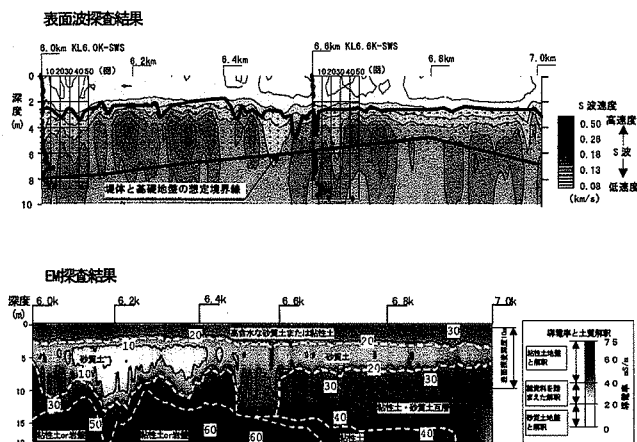


図-8 物理探査結果の例

b) 鳴瀬川の「堤防の緩み」程度を図-9に示した。調査区間のうち、 $N \leq 4$ 相当の緩い区間は全体の66%を占め、 $N \leq 2$ 相当の特に緩いと評価される区間は全体の43%を占める結果であった。

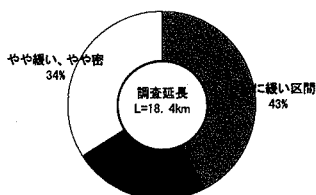


図-9 堤防の緩み (鳴瀬川)

c) サウンディングによるN値換算で見た場合も、堤体のN値は2~4を示す区間が多い。被災を受けた区間は総じてN値が低い堤体であると言える。また、既往調査でのサウンディング結果を比較すると地震前後での貫入抵抗はほとんど差がない区間が多い。

d) EM探査による土質区分は、図-10に示す探査測線上の既存土質試験結果をもとに細粒分含有率と導電率の相関を整理し、各土層の層相と導電率値が一般的なものであることを確認した。

堤体の土質は、「砂質土」、「粘性土」、「高含水の砂質土あるいは粘性土」に区分された。導電率が比較的低~中位の「砂質土」~「高含水の砂質土あるいは粘性土」に土質区分された割合が多い。

また、ところにより築堤履歴に応じ、上部「砂質土」、下部「粘性土」の2層パターンの構成も確認された。地盤は堤防直下~比較的浅い深度において、低導電率を示す「砂質土」が分布する区間が多く、サウンディング等によって締まりの非常に緩い区間が多いことが確認された。

3. 堤防の健全度評価

(1) 健全度評価と危険区間の抽出

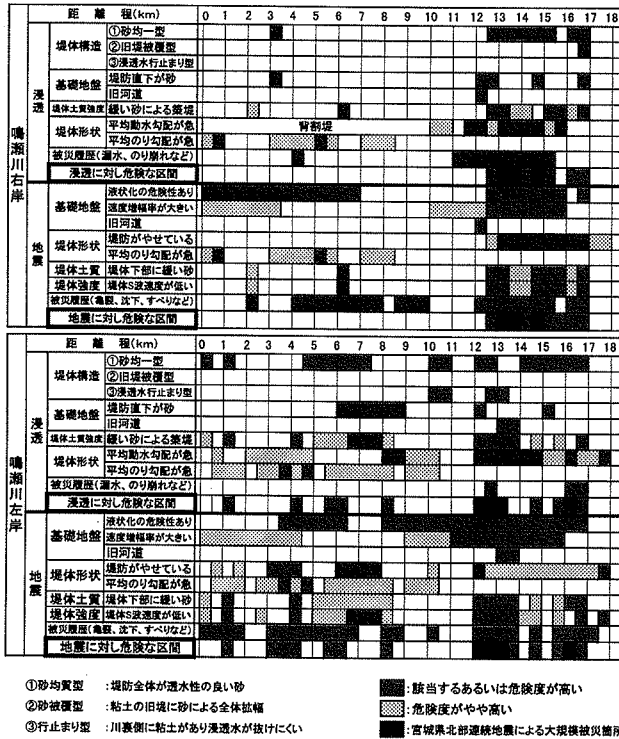
これまでの調査を踏まえ、「浸透」及び「地震」に対する堤防の健全度評価を行った。この結果から危険区間の抽出を行った。

評価に用いた項目及び基準³⁾を表-3に、堤防の健全度(鳴瀬川)について図-11に示す。

表-3 鳴瀬川評価項目と危険区間抽出基準

検討項目	評価項目	危険区間抽出基準
浸透	築堤構造	砂均一型、旧堤被覆型、浸透水行止り型
	基礎地盤	堤防直下に砂が分布する区間を地質縦断面より抽出
	堤体形状	平均動水勾配 $i > 0.20$ → 非常に危険な区間 $i = 0.10 \sim 0.20$ → 危険な区間 $1:2.0$ 未満 → 非常に危険な区間 $1:2.0 \sim 2.5$ → 危険な区間
	堤体土質及び強度	堤体土質と堤体S波速度により「堤体に緩い砂質土がある」区間を抽出
	基礎地盤	液状化 振れやすさ 表層部分の砂のN値と層厚に着目してN値が低く、層厚が厚い区間を地質縦断面より抽出 最大速度増幅率 $W = 2.5 \sim 3.0$ → 非常に振れやす 最大速度増幅率 $W = 2.0 \sim 2.5$ → 振れやすい
地震	堤体形状	B/H (堤防敷高/堤防高) 平均のり勾配 $B/H \leq 7$ かつ堤防天端幅が5m以下 → 非常に危険な区間 浸透と同じ
	堤体土質	堤体土質と堤体S波速度により「堤体下部が緩い砂質土」が想定される区間を抽出
	堤体強度	表面波探査による堤体評価結果を用いて堤体剛性の低い区間を抽出

図-11 健全度評価（鳴瀬川）



鳴瀬川における健全度を概括すると「浸透」では、堤体構造（砂均一型），堤体土質，堤体形状（平均動水勾配），被災履歴の項目で危険度が高い区間が比較的多く見られる。「地震」では，設定した項目の殆どで危険度が高い区間が見られた。また，「浸透」及び「地震」とも危険度が高い区間は左岸側で多く見られ，右岸側は12K～17Kの間に集中している。さらに今回の地震において堤防に大きな被害が発生した箇所も，健全度評価において「危険度の高い区間」内にある結果となった。

(2) 堤防の現況照査

堤防の健全度評価において「危険度が高い」区間の代表断面を抽出し，「浸透」及び「地震」に対する安全度の照査を試みた。

なお，ここ数年以内に「堤防完成」の目処がたっている箇所については「完成堤防断面」での照査も合わせて実施した。図-12に「照査フロー」，表-4に照査結果を示す。

照査の結果は，現況断面においては浸透及び地震において，所定の安全率を下回る断面が確認されたものの鳴瀬川左岸4.2k，8.2k，14.7kでは，堤防が完成することによってその安全率が確保できる結果となった。

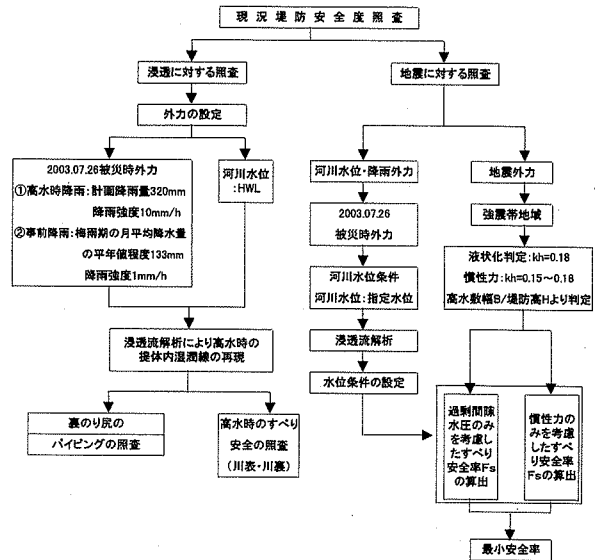


図-12 現況堤防照査フロー

表-4 現況堤防の安全度照査結果

河川名	左右岸別	代表地点	地質断面図	安全率 F_s													
				現況								改修後					
				浸透			地震				浸透			地震			
				川表	川裏	$\frac{H}{V}$ ソク	川表		川裏		川表	川裏	$\frac{H}{V}$ ソク	川表		川裏	
			ΔU	k h	ΔU	k h	ΔU	k h	ΔU	k h	ΔU	k h	ΔU	k h			
鳴瀬川	左岸	4.2 k		1.71	1.78	$\frac{H}{V}=1.0$ $\frac{H}{V}=1.05$	1.17	0.96	1.24	1.32	—	—	—	—	—		
		8.2 k		1.38	1.42	$G/W=0.83$	1.93	1.33	1.96	2.25	1.33	2.16	$G/W=1.23$	1.85	1.28	2.64	1.84
		14.7 k		1.28	1.12	$G/W=1.08$	1.48	1.07	0.67	1.07	1.16	1.81	$G/W=1.17$	1.41	1.04	1.43	1.16
	右岸	15.7 k		1.84	1.70	$G/W=1.57$	1.58	1.49	1.16	1.21	1.74	2.07	$G/W=1.67$	1.52	1.39	1.62	1.82
吉田川	右岸	8.2 k		1.78	1.35	$G/W=1.54$	—	—	—	—	—	—	—	—	—		

*) 囲みは，照査安全率を満足していないものを表す。 $n' \cdot i \cdot \eta$ の iV ， iH は局所動水勾配， G/W は揚圧力による照査を表す。地震検討の ΔU は，過剰間隙水圧考慮， k_h は慣性力考慮を表す。

(3) 影響要因分析

代表的な鳴瀬川の堤防断面をモデル断面として、二次元飽和不飽和浸透流解析により、断面形状や透水係数、築堤構造の違いによる堤体内浸透特性の違いを比較検討した。

①堤防完成による効果

堤防を完成させることによって、天端～川裏にかけて堤体内浸潤線の抑制効果が見られる。

②堤体透水係数による影響

図-13より、透水係数が $1 \times 10^{-3} \rightarrow 1 \times 10^{-4}$ cm/sにかけて堤体内の浸潤線が上昇しにくくなり、 5×10^{-5} になると殆ど浸潤線は上昇しない。

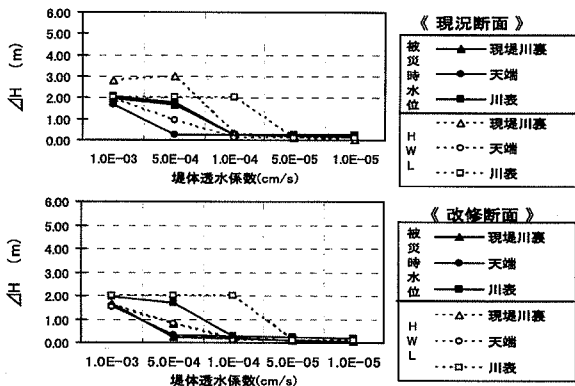


図-13 堤体透水係数による浸透特性の比較影響

③築堤構造による影響

砂均一型と旧堤被覆型で比較した場合、旧堤被覆型の方が堤体内湿潤線が上昇しやすい結果が得られた。

以上の結果から「堤防の断面規模」，「堤体の透水係数」，「築堤構造」が高水時の堤防安定性に大きく影響していると推定される。

4. 堤防強化方策

鳴瀬川における堤防強化の基本方針をこれまでの検討結果を踏まえて、実施効果・実現性にも配慮して、以下のとおり設定した。

①堤防の完成堤化を促進する

これまでの検討で堤防完成断面を確保することにより浸潤線発達を抑制し、堤防の安定化が図られることが確認されている。

また、基盤の液状化や地震動による堤体の変形などに対しても効果が期待される。

なお、堤体構造や築堤材の土質も不明な部分もあることから、裏法尻ドレーンを併用する。

②裏法尻ドレーンを設置する

当面、「堤防完成」の見通しの無い区間においては、裏法尻にドレーンを設置し浸透した水を速やかに排出することによって、高水時の法滑りやパイピング、降雨の影響を受けた堤防の地震時の安定性向上を期待する。

このほか、裏法尻ドレーンの設置が困難な場合や川表の法滑りに対しては、裏法尻ドレーン工が必ずしも効果的とならないケースもある。このような場合は、法面の緩勾配化や表法面被覆工など現場条件に合わせた対策を検討し柔軟に対応する。

5. まとめ

鳴瀬川では昭和61年8月の吉田川が破堤した未曾有の水害をはじめ、破堤までは至らないものの平成6年9月、平成14年7月と大きな洪水が発生しており、洪水の度に堤体からの漏水が生じている。さらに、将来高い確率で宮城県沖を震源とするM7～8クラスの大規模地震の発生が予測されている。

今回の地震災害では、降雨による堤体内の水位上昇が大きな被害を招いた要因となっている。従来、洪水と地震の同時生起は極めて稀とされ堤防設計等の対象となっていないが、梅雨等の長雨と地震との同時生起は稀な事象とはいえ、宮城県沖の地震により被災が想定される鳴瀬川堤防においては、特に考慮されるべきものと考えられる。縦断的に連続した評価を行うことで鳴瀬川堤防において締固めが不十分であるとともに砂質土を主体とする堤防である区間が把握でき、降雨による堤体の強度低下、堤体そのものの液状化を考慮した堤防強化対策を講じていくべき区間が把握できた。

概括的にみれば、地震力に対しても浸透に対しても完成堤とすることで安全度向上を図ることができると考えられ、現在進めている鳴瀬川中流緊急特定区間の整備を急ぐことがひとつの答えとなっている。しかしながら堤防の性状は場所により異なり、旧堤防の位置、改修による腹付盛土の方法なども異なることから、今回の調査結果を基に各断面毎に適切な強化手法を選定していくこととしている。

本報告が河川堤防の整備や管理、さらには河川に携わる技術者の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 気象庁仙台管区気象台鹿島台雨量観測所雨量データ
- 2) 宮城県北部連続地震による被害について：平成16年3月12日、宮城県災害復旧対策本部事務局
- 3) 河川堤防の構造検討の手引き：平成14年7月、財団法人国土技術研究センター

(2004. 4. 7受付)