

地震により変形した堤防の 機能評価に関する一考察

THE INTERPRETATION ABOUT EVALUATING FUNCTIONS
OF THE DIKE WHICH WAS DEFORMED BY THE EARTHQUAKE

柳畑 亨¹・中山 修²・佐々木 康³・阿部 知之⁴

Tohru YANAGIHATA, Osamu NAKAYAMA, Yasushi SASAKI and Tomoyuki ABE

¹正会員 博(工) (財)国土技術研究センター 調査第一部 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-12-1)

²(財)国土技術研究センター 調査第一部 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-12-1)

³フェロー会員 工博 (財)国土技術研究センター 技術顧問 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-12-1)

⁴応用地質(株) 東京本社 技術センター (〒305-0841 茨城県つくば市御幸が丘43)

Deformations of the dike such as a subsidence and a lateral stretch, a crack and so on often occurred as a result of the earthquake. These were observed in the past earthquakes. The countermeasures to protect the dike against an earthquake give priority to keeping the height of the dike and have been executed. However, the elements which are necessary for the deformed dike feature is the looseness in the dike, the deformation form, the crack initiation status of the dike and so on.

This report clarified the crack depth of the dike with some of the past's earthquakes. Moreover, it considered evaluating the dike feature (the feature to endure a flood) taking consideration of the looseness in the dike, the crack and so on. As a result, it shows the necessity of evaluating functions of the dike which was deformed by the earthquake needs be considered from the viewpoint of deformation form in addition to the height of dike.

Key Words : dike, deformation, earthquake, subsidence, lateral stretch, crack,
evaluating functions

1. はじめに

平成19年3月に国土交通省河川局が策定した「河川構造物の大規模地震に対する耐震性照査指針(案)・同解説」では、河川堤防については、地震による沈下後の堤防高が緊急復旧期間中に発生する外水位を下回らないことを照査することを原則としており、下回った場合には堤防機能が発揮できないとして事前の耐震対策を優先的に実施することとしている。

しかしながら、過去の多くの地震被災状況に見られるように、河川堤防は地震時に沈下変形の他、側方変形、亀裂発生(クラック)等の変状を呈しており、このような堤防断面変状が発生すると、変形箇所およびクラック周辺では堤体土の締固め度が低下し、緩んだ状態になっていることが予想される。緩みの生じた堤体は、透水係数が非常に大きくなり、かつ堤体土の強度も低下することから、耐浸透性能が著しく損なわれた状態にあり、耐

洪水機能の面から堤防断面が減少していることと同様な状態にあるといえる。

そこで筆者らは、過去の地震被災状況から河川堤防における天端沈下量とクラック深さの関係を明らかにし、地震によって変状を呈した堤防の耐浸透性能がどの程度低下するかについて検討するために、被災形状をモデル化し、飽和-不飽和浸透流解析を行った。

その結果、地震被災によって生じた堤体の緩みやクラック等の断面変形についても、堤防の機能評価に不可欠な要因であることを提案した。

2. 過去の地震被災事例に基づく堤防天端沈下量

とクラック深さの関係

過去の地震被災事例より、沈下が発生した堤防にどの

河川名	長良川(厚見郡江崎村字論田)
被害地震	1891年 濃尾地震

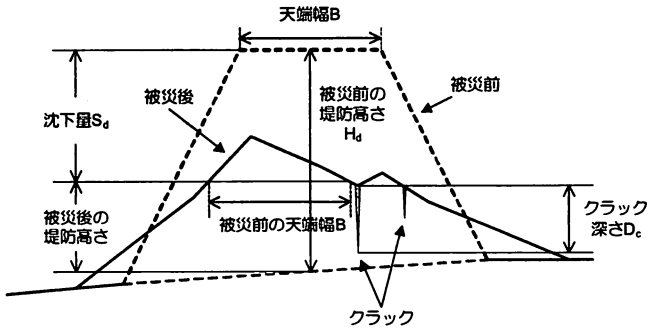
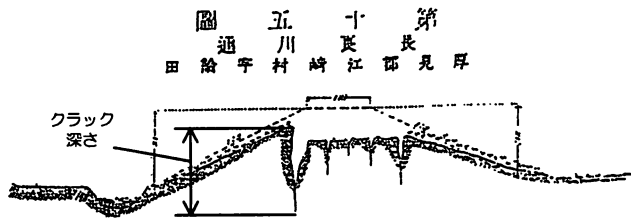
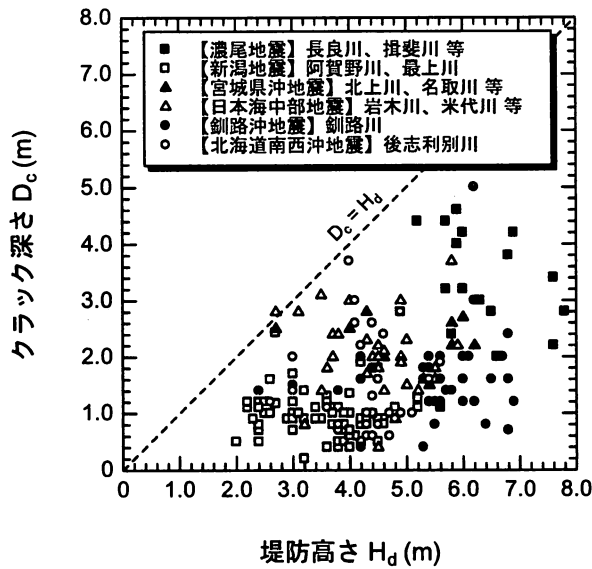
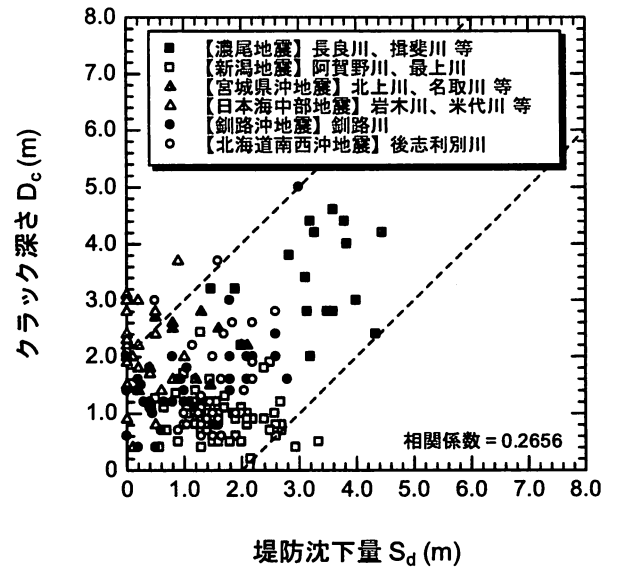


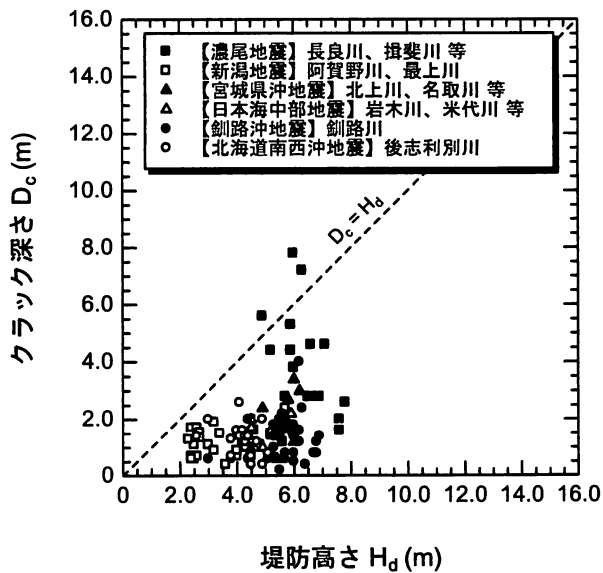
図-1 堤防沈下量とクラック深さの関係



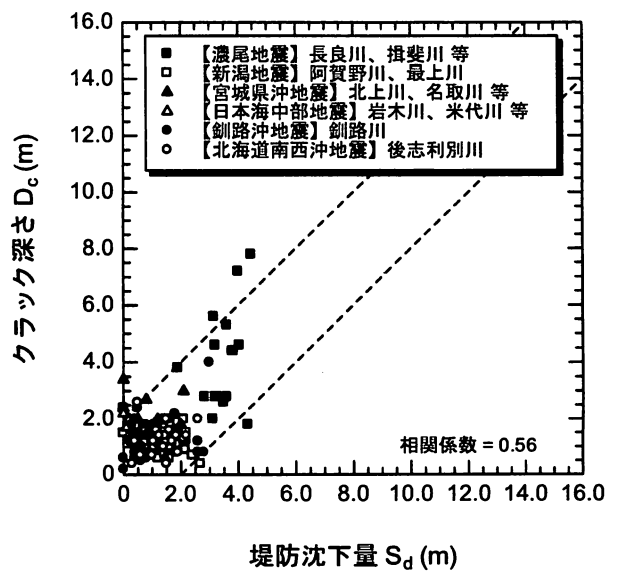
(1) クラック深さと堤防高さの関係(天端部)



(2) クラック深さと堤防沈下量の関係(天端部)



(3) クラック深さと堤防高さの関係(のり面)



(4) クラック深さと堤防沈下量の関係(のり面)

図-2 既往地震被災事例におけるクラック深さの実態

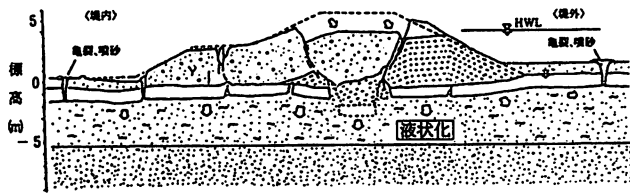


図-3 平成5年北海道南西沖地震での
後志利別川における被災事例

程度のクラックが発生しているかについて確認することを目的として、以下に示した6つの地震を対象に、河川堤防における堤防高さとクラック深さの関係及び堤防天端沈下量とクラック深さの関係についてそれぞれ整理した。整理に用いた事例は226事例（クラックが天端部のみに発生：93事例、クラックがのり面のみに発生：32事例、クラックが天端部およびのり面に発生：101事例）である。なお、クラック深さについては、図-1に示すように、被災報告書等¹⁾にスケッチされている被災前後の堤防断面をもとに被災（沈下）後の堤防天端からクラック最深部までの深さとした。また、複数のクラックが発生している箇所については、最も深いクラックの深さを採用している。

- ① 明治24年（1891年） 濃尾地震
- ② 昭和39年（1964年） 新潟地震
- ③ 昭和53年（1978年） 宮城県沖地震
- ④ 昭和58年（1983年） 日本海中部地震
- ⑤ 平成5年（1993年） 釧路沖地震
- ⑥ 平成5年（1993年） 北海道南西沖地震

既往地震被災事例における天端部の(1)クラック深さと堤防高さの関係及び(2)クラック深さと堤防沈下量の関係と、のり面の(3)クラック深さと堤防高さの関係及び(4)のり面クラック深さと堤防沈下量の関係を図-2に示す。図-2(1)及び図-2(3)から、地震被災時に発生するクラックの深さは、被災前の堤防高さの高低に係わらず堤防高さ程度のものがあることがわかる。また、図-2(2)及び図-2(4)から、クラック深さはばらつきの範囲が大きいものの、被災時の堤防沈下量と正の相関関係にあることがわかる。なお、上記の関係は、被災箇所での地震外力（最大加速度、地震動継続時間）、液状化の程度、堤体土質構成等により差異があるものと考えられるが、十分な基礎資料が得られていないため本稿では検討していない。

前述したように、「河川構造物の大規模地震に対する耐震性照査指針(案)・同解説」（国土交通省河川局、平

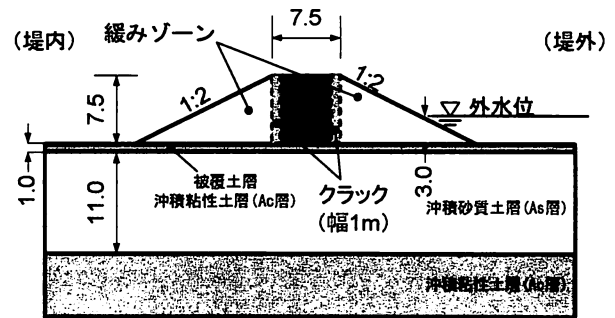


図-4 耐浸透性能評価モデル
(基礎地盤表層に非液状化層が分布する場合の例)

成19年3月)では、河川堤防については、地震による沈下後の堤防高さが緊急復旧期間中に発生する外水位を下回らないことを照査することを原則としており、照査結果が「地震による沈下後の堤防高さ」 $\geq$ 「緊急復旧期間中に発生する外水位」を満足するものであっても、地震により堤防が変形し、クラックが発生すると、変形箇所及びクラック周辺では、堤体土の締め固度が低下し、緩んだ状態となっていることが予想される。したがって、沈下やクラック発生等の変状を呈した堤体の耐浸透性能について検討を行う。

3. 耐浸透性能の検討

(1) 検討条件の設定

地震によって発生した堤体の緩み、クラック等により耐浸透性能がどの程度低下するかについてモデル断面を用いて飽和－不飽和浸透流解析により検討した。なお、飽和－不飽和浸透流解析は「河川堤防の構造検討の手引き H14.7 財団法人 国土技術研究センター」に示された手法に準拠している。

a) モデル形状

堤防のモデル化は堤体及び基礎地盤について行った。地震によるクラックは、先に述べたように堤防天端部やのり面に発生していることが観察されているが、本稿ではケーススタディとして、図-3に示す北海道南西沖地震での後志利別川堤防被災に見られるような、堤防全体に大規模な沈下・変形及び堤体のり肩より堤体底面までクラックが生じるような被災パターンを念頭に、クラックを水径（みずみち）として堤体へ降雨や河川水が浸透しやすくするために幅1mと設定し、表裏のり面下の堤体が緩んでいるために透水係数が大きくなるものとしてモデル化した。堤体形状は簡素化し、一枚のりの台形として設定した。なお、基礎地盤は表層に非液状化層が分布している場合と表層から液状化層が分布している場合の2ケースを設定した。解析に用いたモデルを図-4に示す。

表-1 検討ケース一覧

検討ケース	被災状況		基礎地盤 表層の 非液状化層	堤体の 透水係数 (cm/sec)	緩みゾーンの 透水係数 (cm/sec)
	状況	モデル化			
ケース1-0	被災前	一様な堤体	あり	1×10 ⁻⁴	—
ケース1-1	①堤体全体の大規模な沈下・ 変形を伴う被災	緩みゾーン +クラック 2箇所			1×10 ⁻⁴
ケース1-2					1×10 ⁻³
ケース1-3					1×10 ⁻²
ケース2-0	被災前	一様な堤体	なし	1×10 ⁻⁴	—
ケース2-1	①堤体全体の大規模な沈下・ 変形を伴う被災	緩みゾーン +クラック 2箇所			1×10 ⁻⁴
ケース2-2					1×10 ⁻³
ケース2-3					1×10 ⁻²

表-2 設定土質定数一覧

地層名		地層 記号	土質定数		設定根拠
			飽和 透水係数 ks (cm/sec)	※不飽和 浸透特性	
盛土	堤体		1.0×10^{-4}	砂質土	締まった砂質土を想定して設定
	緩みゾーン		1.0×10^{-4}	砂質土	透水係数を変化させて検討
			1.0×10^{-3}	砂質土	
			1.0×10^{-2}	砂質土	
	クラック		1.0×10^0		非常に大きい値を設定
沖積層	砂質土層	As	3.0×10^{-3}	砂質土	一般的な値を設定
	粘性土層	Ac	1.0×10^{-6}	粘性土	一般的な値を設定

※不飽和浸透特性は、「河川堤防の構造検討の手引きH14.7」に準拠した

b) 検討ケース

表-1に検討ケースの一覧を示す。ケース1とケース2の違いは、基礎地盤表面における非液状化層（層厚1m）の有無である。

c) 土質定数（飽和透水係数）

堤防の土質定数については、透水係数のみを取り扱う。堤体は締まった砂質土を想定し、 $k = 1.0 \times 10^{-4}$ cm/secとした。

礫混じり粘性土の締固め度と透水係数の関係²⁾から、締固め度が小さいほど透水係数は大きくなり、その増加率は小さく見積もっても締固度が10%減少すれば透水係数は10倍に増加している。このことから、堤体変状によって緩みが発生すると透水係数は大きくなるものと想定される。「緩みゾーン」の透水係数についてのデータ

が得られていないため、本稿では透水係数を1オーダーずつ変化させて感度分析を行った。さらに、「クラック」については、水径であると考えて $k = 1.0 \times 10^0$ cm/secとした。

検討に使用した土質定数の一覧を表-2に示す。

d) 外力波形

浸透流解析に用いた外力は河川水位及び降雨である。河川水位波形は、堤防高さの半分程度の洪水を想定し、高水継続時間を100時間、ピーク水位継続時間を50時間の台形波形を設定した。また、降雨は、事前降雨量として梅雨時期の月平均降水量程度の200mm、洪水時降雨量として300mm（10mm/時間）とした。

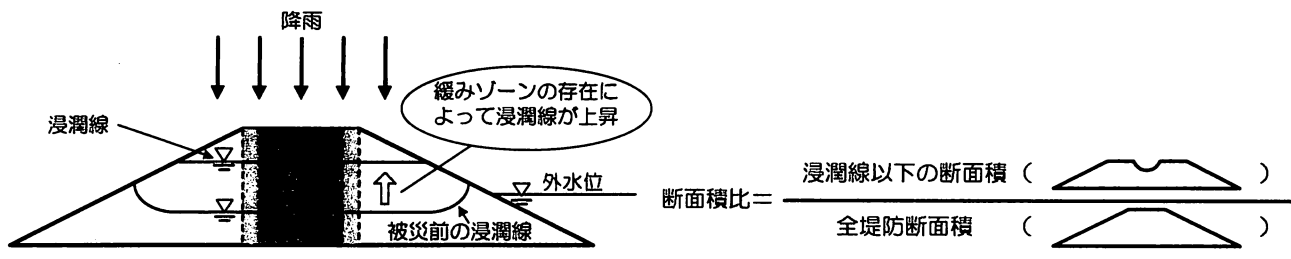


図-5 断面積比の定義図

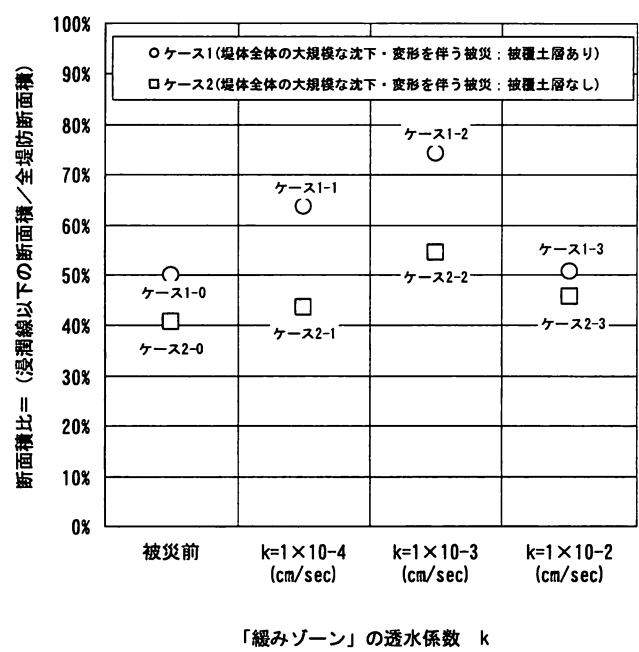


図-6 検討ケース毎の断面積比

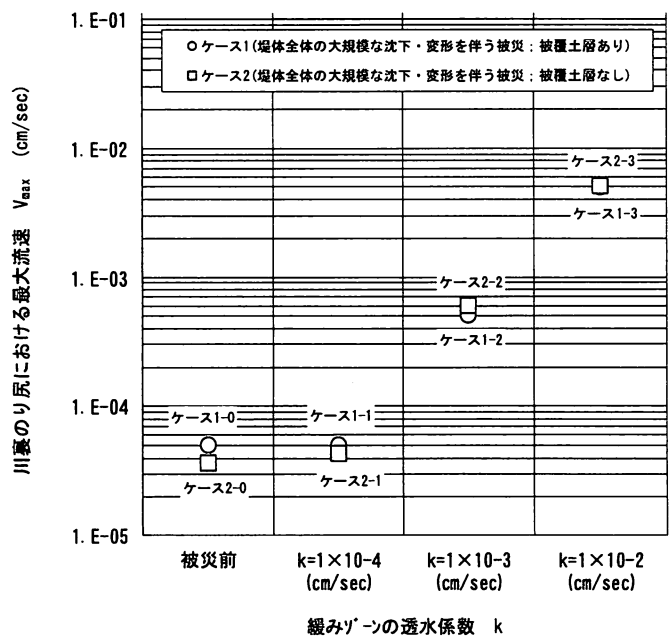


図-7 検討ケース毎の裏側のり戻部の最大流速 V_{max}

(2) 結果と考察

図-5に断面積比の定義図を示す。断面積比とは、堤体面積に占める浸潤線以下の割合と定義する。図-6に検討ケース毎の断面積比を示し、図-7に裏側のり尻部の最大流速 V_{max} を、それぞれ示す。

本検討によって、以下に示す事柄が明らかとなった。

- ① 発生したクラック部より降雨が供給され、堤体内浸潤線が上昇する。
- ② さらに緩みゾーンの透水係数が10倍大きくなると浸潤線はさらに上昇し、裏のり尻部の流速も速くなる。
- ③ 上記の傾向は、液状化層上部に非液状化層が分布している方が顕著である。
- ④ 緩みゾーンの透水係数が100倍大きくなると堤体の排水性が向上するために浸潤線は低下するが、裏のり尻部の流速はさらに速くなる。

4. まとめ

地震により変形した河川堤防の耐浸透性能の評価を目的として、堤体変状に伴う緩みやクラックを考慮して、飽和－不飽和浸透流解析を実施した。その結果、沈下後の堤防高さと河川水位との関係より定まる耐越水性能の

みだけでなく、地震による被災変状も考慮に入れた耐浸透性能の評価が必要であることがわかった。

なお、地震による堤体の緩みを観測した詳細なデータはなく、クラックや緩みの実状を把握し、これらを如何にモデル化し、堤防機能への影響を評価するかについては、今後とも調査研究が必要な事項と考える。

従前の災害復旧では、地震被災後の復旧は原形復旧に重点が置かれていたが、堤体内部の状態を把握し、堤体の耐浸透性能を損なうことのないように復旧することが重要であると考えられる。なお、原形復旧により復旧されている古い被災堤防の一部には、クラックあるいは緩み等が残されていることも考えられ、これらに対する調査方法の開発や評価方法の確立も今後重要な事項となろう。

参考文献

1) 例えば

佐伯敦崇：岐阜三重両県土木工事震害及び復旧工事報告，震災予防調査会報告 第3号，1895.

2) 久楽勝行，三木博史，関一雄：締固め度がレキ混り粘性土の工学的性質に及ぼす影響(第2報)，土木技術資料24-3，1982.

(2009. 04. 09受付)