

変状と被災の統計的解析による堤防の点検及び 巡視の合理化に関する一考察

STATISTICAL ANALYSIS OF FAULTS OR FAILURE FOR RATIONALIZATION OF INSPECTION OR PATROL FOR RIVER LEVEES

下川大介¹・福原直樹²・森啓年³・服部敦³

Daisuke SHIMOKAWA, Naoki FUKUHARA, Hirotoshi MORI and Atsushi HATTORI

¹正会員 工修 国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地）

²正会員 工修 国土技術政策総合研究所企画部国際研究推進室（前河川研究部河川研究室）（同上）

³正会員 博士（工学）国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室（同上）

Inspection or patrol plays an important role in the condition monitoring of river levees in Japan. The analysis of data obtained in the inspection or the patrol was attempted for the rationalization under the human resource shortage or the financial limitation.

The results depicted the relation between the faults, the failure and the characteristic of river levees. There is correlation between the piping and the hydraulic gradient or soil stratum of river levees and its foundation ground. However, no correlation was found between that faults and the characteristic. The results suggest that the priority section for the inspection or the patrol could be specified by the characteristic of river levee with the failure history.

Key Words : river levee, inspection, patrol

1. はじめに

(1) 背景と目的

堤防は長い歴史の中で構築された長大で不均質な土構造物であり、その内部の把握はボーリング調査や、機器によるモニタリング等により特定の地点に限定される。そのため、堤防の維持管理は、人の目による状態把握に頼らざるを得ない。そこで、河川管理者は、徒歩で詳細な観察を行う点検¹と主に車上から外観を包括的に目視する巡視²により、変状を小規模な時期から把握し、必要に応じて補修することによって堤防の機能を維持し、出水時の治水安全性を確保してきた。

しかし、今後の経済的及び人員的な制限を考慮すると、治水安全性の確保のためには、現状の点検や巡視を合理化することが求められている。その様な中、点検や巡視で発見される変状と出水時の被災の関連性など、蓄積されてきたデータを用いた検討は殆ど行われていないのが現状である。

本論文では、点検・巡視の効率化を図るために点検・巡視の重点区間の設定方法の提案を目的として、8河川

（変状に関する検討：8河川、被災に関する検討：5河川）を対象に、点検結果、巡視結果、被災履歴、堤防特性（堤防概略点検、堤防詳細点検）のデータを収集し、分析を行った。

(2) 方法

初めに、点検・巡視にて発見される変状の種類、発生頻度、規模について整理・分析し、変状の分布状況の把握を行った。また、被災履歴についても整理し、分布状況の把握を行った。次に変状、被災及び堤防特性の関係性について検討するために、ロジスティック回帰分析を用いて、変状と堤防特性の関係、被災と堤防特性の関係について定量的な評価を行い、変状及び被災の発生しやすい堤防特性を求めた。また、変状が被災の予兆として発生しているかを検証するために被災発生箇所と変状の発生頻度を整理し、被災と変状の関係性について調べた。

なお、本論文では、点検・巡視にて目視で確認される軽微な異常及び変化等を「変状」と定義し、出水によって堤防機能の低下が認められる大規模な異常及び変化等を「被災」と定義し、被災の原因の違いにより「すべりによる被災」、「漏水による被災」、「パイピングによ

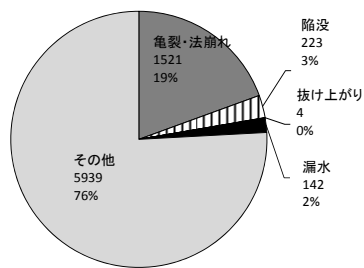


図-1 点検・巡視にて発見される変状の種類

表-1 1kmあたりの変状発見数

河川	点検対象 (km)	変状数		発生発見数(年平均)	
		全変状	浸透4種	全変状	浸透4種
A川	41.1	623	207	3.1	1.0
B川	59.8	638	127	2.1	0.4
C川	265.1	1682	432	3.2	0.8
D川	130.3	1249	99	2.3	0.2
E川	24.8	209	86	3.5	1.4
F川	99.8	1270	248	3.2	0.6
G川	75.2	451	50	1.2	0.1
H川	95.9	1707	641	8.3	3.1
平均				3.4	1.0

る被災」の3つに区分した。

2. 変状及び被災の分布状況の把握

(1) 変状の分布状況の整理

点検・巡視により発見される変状の分布状況を把握することを目的とし、8河川の過去5年間の点検・巡視結果を用いて、変状の種類、発生頻度、変状規模について整理した。

まず、図-1に8河川の点検・巡視により発見された変状の種類について整理した。河川堤防の耐浸透機能の低下が懸念される変状（亀裂・法崩れ、陥没、抜け上がり、漏水 以下、「浸透に関する変状」）に着目すると、全体の4分の1を占めていることがわかる。その他に発見された変状は、植生の異常、表土の異常、モグラ等小動物の穴、樹木の侵入、踏み荒らし・轍等である。なお、点検で発見される変状と巡視で発見される変状は種類や発見数に有意な差は認められなかった。

次に、各河川での変状発生頻度について整理した。表-1に変状発見数を堤防延長で除したものをまとめた。1kmあたりに発見される全変状数は約3.4個であり、そのうち、浸透に関する変状は1.0個しか発見されておらず、堤防延長に対して比較的低い頻度でしか変状が発生していないことがわかる。

(2) 変状規模の影響

また、森らの研究³⁾では、変状規模が堤防の機能維持へ与える影響についての検討を行っている。そこでは、浸透に関する変状の中で亀裂に着目し、亀裂深さが堤防

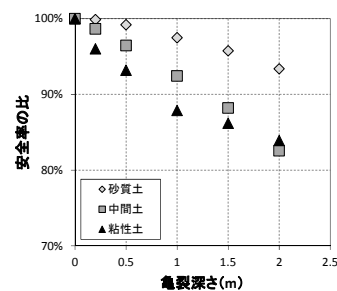


図-2 亀裂深さと安全率の関係³⁾

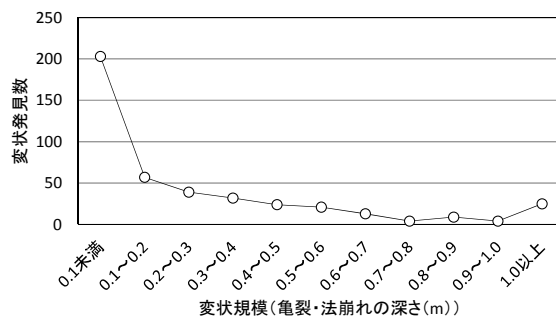


図-3 発見される亀裂の規模(m)

の機能維持に与える影響を、堤防の安全性評価に用いられる円弧すべり解析を実施し定量的に評価を行っている。解析モデルは堤防高6.3m、法面勾配を1:2の単断面とし、堤体土は砂質土（ $c=1.0\text{kPa}$ 、 $\phi=30.0$ 度）、中間土（ $c=10.0\text{kPa}$ 、 $\phi=35.0$ 度）、粘性土（ $c=15.0\text{kPa}$ 、 $\phi=0.0$ 度）の3種類を想定し、浸潤線は浸透流解析により求めた結果を用いている。その結果を図-2に示す。図は亀裂深さとすべりに対する安全率の関係を示したものであり、亀裂深さが増加するに従いすべりに対する安全率が低下していることがわかる。

ここで、点検・巡視で発見される亀裂の規模（深さ）を整理したものを図-3に示す。亀裂の深さは0.1m未満のものが大半を占めており、図-2に照らし合わせると、堤防に0.1m未満の亀裂が生じて安全率はほとんど低下しないことがわかる。よって、現状の維持管理では、堤防の機能維持に影響を与える前に、早期に補修を実施することにより治水機能を維持していることが示唆される。

(3) 堤防詳細点検結果との比較

堤防の安全性が不足している区間を抽出し、優先的に堤防強化を進めるために、堤防詳細点検が行われている。詳細点検では、設定された一連区間ごとに裏法及び表法すべり、パイピング各々の照査項目についてのOK/NGの判定を行っている。そこで、このNG区間において、変状が被災の予兆として出現していないかを検討した。図-4は河川毎に1kmあたりに発見される変状数とOK/NG区間で発見される変状種別を示したものである。河川によってはNG区間での変状数が多い河川も見られるが、ほとんどの河川で変状数はOK区間とNG区間で差は見られなかった。さらに、OK/NG区間で発見される変状種

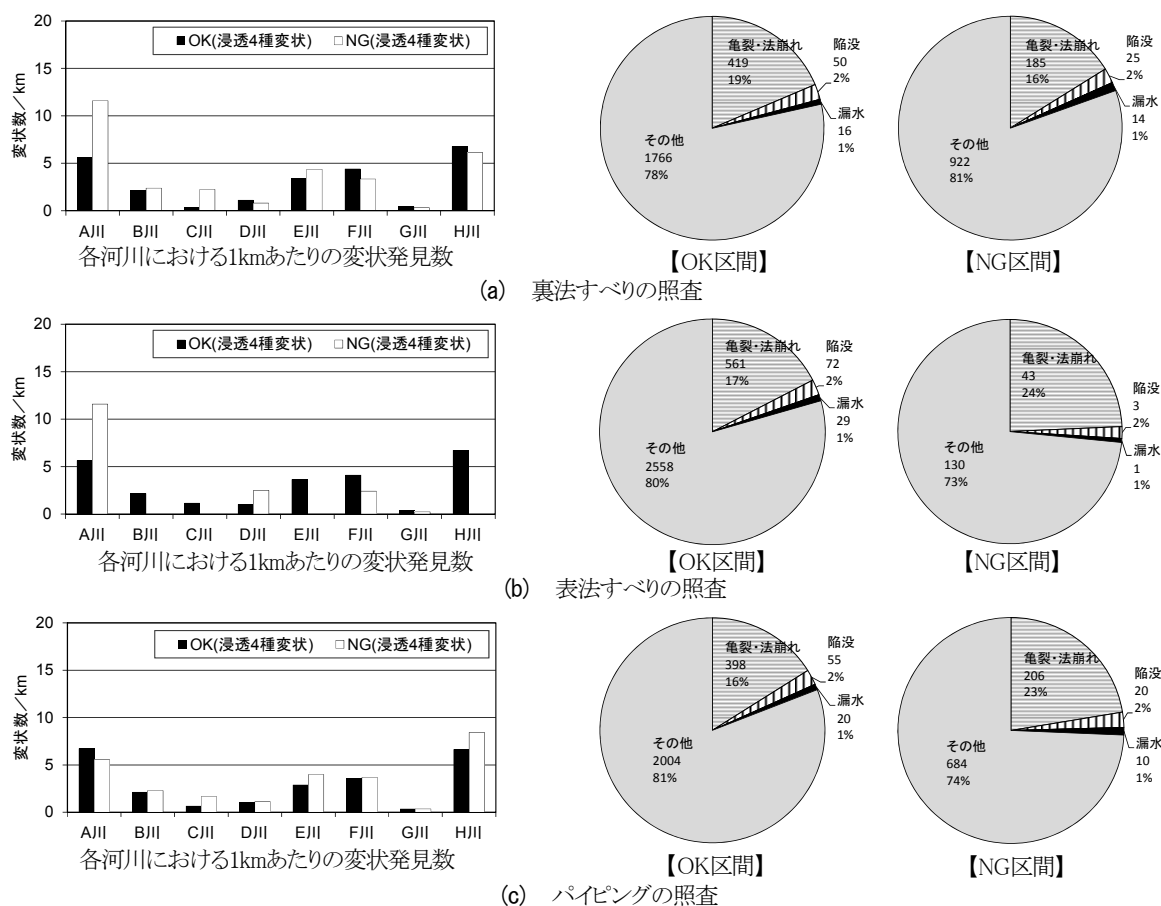


図-4 詳細点検におけるOK区間とNG区間の変状分布状況

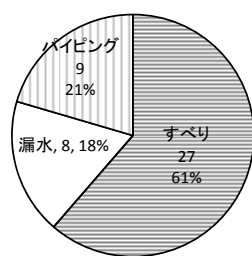


図-5 被災履歴の種類

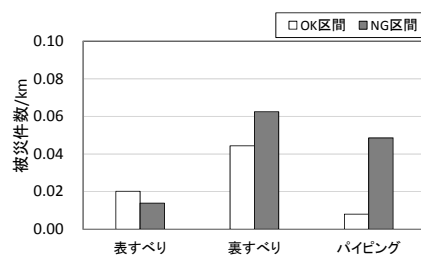


図-6 被災発生割合と詳細点検の比較

別を比較しても、浸透に関する変状の割合に有意な差はみられなかった。以上の結果から、詳細点検にて危険と判定される区間と変状が多発する区間は一致しないことが示唆された。

(4) 被災の発生状況

本論文の分析では、被災履歴は被災位置と被災形態が判明している昭和51年から平成25年の間に確認された被災記録を使用した。堤防が被災した場合、現況復旧を基本としていることから、基礎地盤の特性は変化していないと仮定し、過年度の被災も分析の対象とした。分析は8河川のうち、被災履歴のあった5河川を対象として実施した。図-5に本論文で用いた被災種類の件数とその割合を示す。すべりによる被災が最も多く約60%を占める。また、被災が詳細点検の照査結果のNG区間と一致するかを調べた(図-6参照)。すべりによる被災には、照査

でNGと判定された区間よりもOK区間で多く発生していることが確認された。これはすべりの発生により断面拡大等の対策を行ったことも影響していると考えられる。パイピングによる被災は9件発生している。そのうち、パイピングの照査でNGと判定された区間で発生しているものが7件(0.05件/1km)発生しているのに対し、OKの区間で2件(0.01件/1km)発生していることから、パイピングの照査によりNGとなった区間については、パイピングの被災が発生する可能性が高いと言える。

3. 被災と堤防特性の関係

(1) 方法

前章で分析を行った被災事例について、どのような条件下で被災が発生しているかを検討するために、被災と

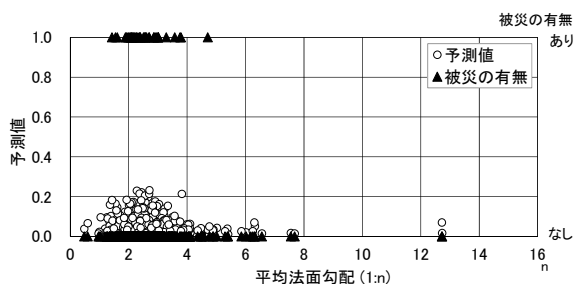


図-7 平均法面勾配とすべりによる被災の関係

表-9 土質構成別のすべりによる被災発生の予測値

堤体土 基礎地盤	粘性土	砂質土	礫質土
粘性土	0.18	0.12	0.04
砂質土	0.17	0.18	0.11
礫質土	0.23	0.18	0.09

堤防特性の関係について、ロジスティック回帰分析を行った。分析は8河川のうち、被災履歴のあった5河川を対象として実施した。

ここで、ロジスティック回帰分析は、一般化線形モデルの一つであり、変状の発生有・無データと堤防特性との関係を分析できる統計モデルである。具体的には、任意の説明変数を与え、被災の有無（有：1，無：0）をもとに変状の発生確率（最大で1になるように計算）を求める方法である。その特徴として、正規分布に従わない堤体土質、治水地形なども説明変数として取り扱うことができることがあげられる。

説明変数には堤防概略点検にて求められる項目のうち、パイピングによる被災と関係性の高い平均動水勾配及び土質構成を用いて分析を行った。また、一般的に法勾配が急になるとすべり破壊が生じやすいため、すべりによる被災については平均法面勾配との関係性について分析を行った。

(2) 平均法面勾配とすべりによる被災の関係

すべりによる被災と平均法面勾配の関係について図-7に示す。平均法面勾配が1：2～1：4の堤防にて被災が集中しており、予測値も高くなっているが、勾配が1：4よりも緩くなると被災が確認されておらず、予測値がほぼ一定になっていることがわかる。また、今回の分析では、小段や法面の数を考慮せず、法肩と法尻を結んだ直線の勾配を平均法面勾配として用いているため、実際に被災が発生した箇所の法面勾配よりも緩い値を採用している可能性も考えられる。

(3) 平均動水勾配とパイピングによる被災の関係

堤防の構造検討の手引き⁴⁾では平均動水勾配が大きい

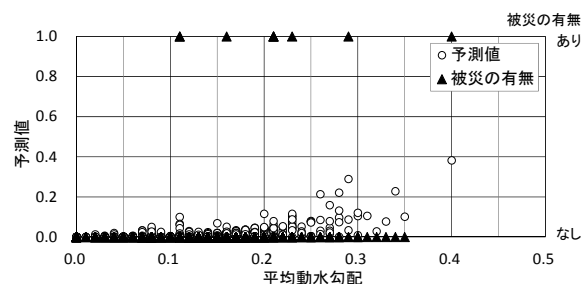


図-8 平均動水勾配とパイピングによる被災の関係

表-10 土質構成別のパイピングによる被災発生の予測値

堤体土 基礎地盤	粘性土	砂質土	礫質土
粘性土	0.03	0.10	0.01
砂質土	0.04	0.29	0.07
礫質土	0.38	0.12	0.08

と浸透に対し危険となりやすいとされていることから、パイピングによる被災と平均動水勾配の関係について検討を行った（図-8参照）。パイピングによる被災は、平均動水勾配が0.1を超えている箇所が発生し、平均動水勾配が大きくなるに従い被災発生箇所が増加する傾向がみられた。また、平均動水勾配の増加に従い、予測値も大きくなる傾向が確認された。

(4) 土質構成との関係

表-9は堤体土質と基礎地盤土質の組合せによるすべりによる被災発生の予測値を整理したものである。すべりによる被災の予測値は、全体的に小さい値を示すが、堤体土質が礫質土の場合の予測値は、粘性土・砂質土に比べるとおよそ1/2～1/4倍程度であることがわかる。礫質土の方が粘性土、砂質土に比べ、せん断強度が強いことが要因であると考えられる。

表-10は堤体と基礎地盤の土質の組合せによるパイピングによる被災発生の予測値を整理したものである。被災の予測値は、堤体土質が粘性土、基礎地盤が礫質土の場合、堤体土、基礎地盤がともに砂質土の場合の予測値が大きくなった。矢部川の被災事例⁵⁾のように、堤体土に不透水層、基礎地盤に透水層の組合せがパイピングの発生しやすい条件とされており、今回の分析でも基礎地盤が透水性地盤の場合に予測値が大きくなる結果となった。

4. 変状と堤防特性の関係

(1) 方法

被災と同様に、変状についてもロジスティック回帰分

析により、堤防特性との関係を定量的に評価した。目的変数は、浸透に関する変状とし、説明変数は被災の分析と同様とした。

(2) 平均法面勾配と亀裂の関係

浸透に関する変状の中で、すべりによる被災の予兆として出現することが想定される亀裂と平均法面勾配の関係について分析を行った。図-11に平均法面勾配と亀裂発生の予測値の関係を示す。図に示す通り、平均法面勾配の大小に関わらず、亀裂が発生しており、予測値と平均法面勾配の間にも関係性は確認されなかった。

(3) 平均動水勾配と漏水の関係

浸透に関する変状の中で、パイピング及び漏水による被災の予兆として出現することが想定される漏水による変状と平均動水勾配の関係について分析を行った。図-12に平均動水勾配と浸透に関する変状発生の予測値の関係を示す。図に示す通り、平均動水勾配の大小に関わらず、漏水が発生しており、予測値も平均動水勾配との間には特に関係性は確認されなかった。

(4) 土質構成

表-13は堤体と基礎地盤の土質の組合せによる亀裂発生の予測値を整理したものである。亀裂については堤体土質が礫質土以外の予測値は約50%を超える結果となった。礫質土の方が粘性土、砂質土に比べてせん断強度が強く、変形が生じにくいことが要因であると考えられる。

表-14は堤体と基礎地盤の土質の組合せによる漏水発生の予測値を整理したものである。砂質土及び礫質土を含む場合に予測値が大きくなっているが、堤体及び基礎地盤が粘性土の場合でも予測値が大きくなっており有意な関係性は得られなかった。

5. 被災と変状の関係

(1) 被災発生と変状発生頻度の比較

3章、4章にて変状と堤防特性、被災と堤防特性の間には特に関係性は確認されなかったが、被災と変状の関係については明らかになっていない。そこで、変状発生の傾向から被災発生の予測を行うことを目的として、平面図上に被災発生箇所と変状発生件数を整理し、被災と変状の関係性について分析を行った。

図-15は、A河川の平面図上に被災履歴と変状発生箇所を整理し、「見える化」を行ったものである。被災履歴は前章で分析を行った被災を使用した。図に示す通り、変状が高頻度に発生する箇所と被災箇所は必ずしも一致していないことがわかる。これは、変状のほとんどが、表層部分で生じている小規模な変形であり、被災の予兆として生じているものが少ないことが推察される。この

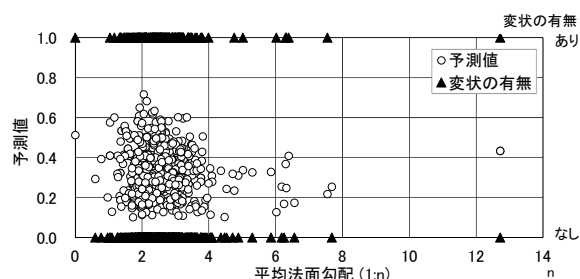


図-11 平均法面勾配と亀裂の関係

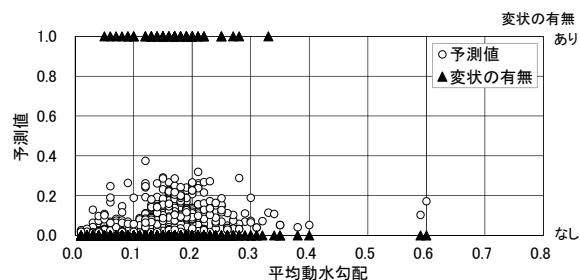


図-12 平均動水勾配と漏水の関係

表-13 土質構成別の亀裂発生の予測値

堤体土 基礎地盤	粘性土	砂質土	礫質土
粘性土	0.68	0.57	0.21
砂質土	0.66	0.56	0.32
礫質土	0.61	0.72	0.40

表-14 土質構成別の漏水発生の予測値

堤体土 基礎地盤	粘性土	砂質土	礫質土
粘性土	0.25	0.29	0.05
砂質土	0.16	0.37	0.32
礫質土	0.05	0.23	0.13

ことから、変状発生頻度から出水時の被災発生を予測し、点検の重点箇所を設定することは困難であると言える。

(2) 被災箇所における変状の分布特性

被災形態の違いにより、その周辺にて発見される変状の分布特性について検討を行った。図-16は被災が発生した箇所の周辺（200m間隔）にて発見される変状種別を示す。その被災に関連した変状が発生しているのではないかと予測したが、被災種別と発生する変状種別には関係性は確認されなかった。

図-17は、発見される部位、変状（亀裂）の深さについて整理したものである。被災箇所周辺にて発見される亀裂は、全体の変状と比較しても、特に傾向の違いは確認されなかった。このことから、被災が発生する可能性がある箇所を平常時の点検で見分けることは困難であると言える。

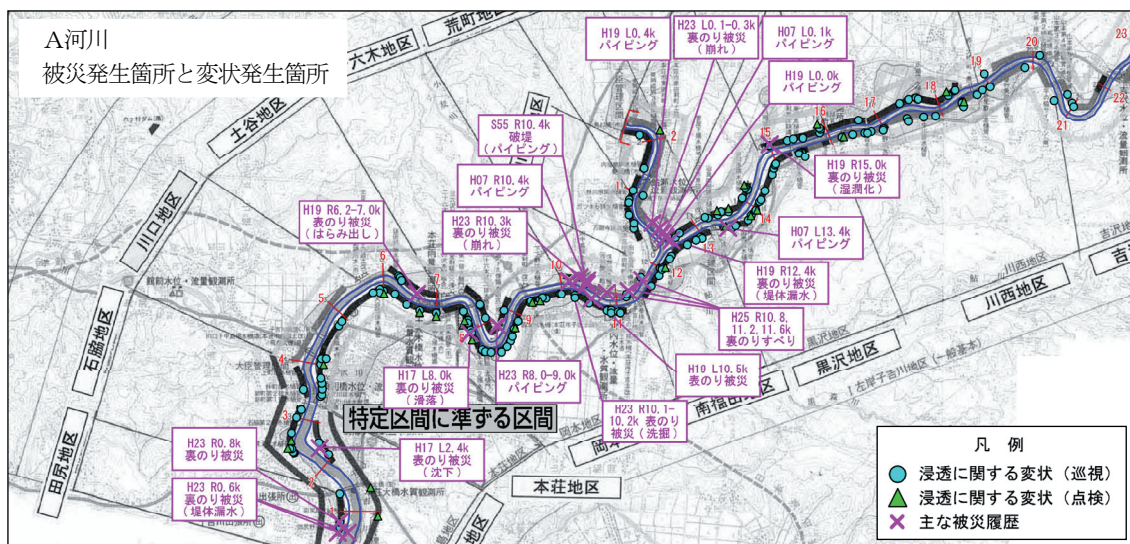


図-15 被災発生と変状発見数の比較

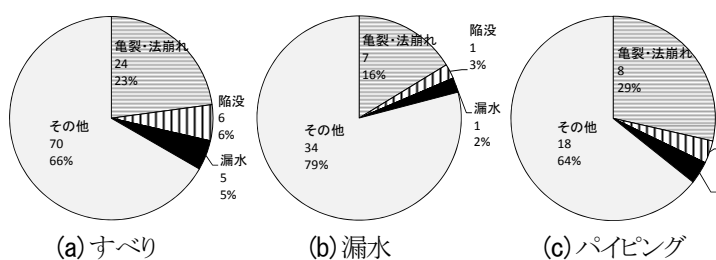


図-16 被災箇所周辺における変状の分布特性

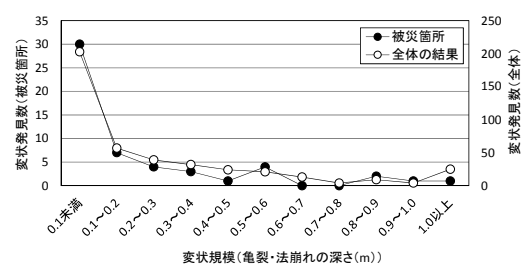


図-17 被災箇所における変状規模

6. おわりに

本研究では、より効率的な堤防の維持管理の実現を目的として、堤防の変状及び出水後に発見される被災、堤防特性の関係を分析した。以下に結果を示す。

- (1) 変状発生頻度は堤防延長に対して低く、変状規模も比較的小さいものが多い。
- (2) 堤防詳細点検結果のNG区間と変状が多発する区間は一致しない傾向がみられた。
- (3) 堤防特性のうち平均法面勾配や平均動水勾配と土層構造についてはすべりやパイピングとの関係性が確認され、堤防特性をもとに被災発生の可能性が比較的高い区間を予測することが可能であることが示唆された。
- (4) 浸透に関する変状と堤防特性に関係性はみられず、堤防特性をもとに変状発生の蓋然性が高い区間を絞り込むことは困難である。
- (5) 変状が高頻度に発生する箇所と被災箇所は必ずしも一致しておらず、変状発生の分布傾向から出水時の被災発生を予測することは困難である。

以上の結果より、現状の維持管理では、変状が小規模なうちから補修をすることによって堤防機能は相当程度の管理水準を確保していると言える。しかし、今後の経

済的、人員的影響を考慮すると、点検・巡視の重点区間を設定するなどの効率的な維持管理が必要となってくる。

平均動水勾配の大きな区間や、平均法面勾配の急な区間等は被災発生の可能性が高いことがわかった。これらの区間は堤防に変状が存在することにより、出水時に弱点箇所となり、被災の原因となる可能性があるため、重点的な点検・巡視により変状を把握し、補修を行うことで治水機能を維持できると考えられる。

なお、本分析は一部の河川の一定期間のデータを分析したものであり、検討の限界もあるため、引き続き、点検・巡視により蓄積したデータに基づく経験的知見の検証と改善を行うことが重要である。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課：堤防等河川管理施設及び河道の点検要領, 2012.
- 2) 国土交通省河川局水政課・河川環境課：河川巡視規程例について, 2011.
- 3) 森啓年, 福原直樹, 服部敦：堤防の点検・巡視の合理化に関する一考察, 河川技術論文集第20巻, pp.479-485, 2014
- 4) 国土技術研究センター：堤防の構造検討の手引き。(改訂版), JICE資料111002号, 2012
- 5) 国土交通省九州地整整備局: 矢部川堤防調査委員会報告書, 2014

(2015. 4. 3受付)