

# 堤防詳細点検の精度向上に向けた 新たな評価手法の提案

立野 祐輔<sup>1</sup>・石井 陽<sup>2</sup>・小池田 真介<sup>3</sup>

<sup>1</sup>北陸地方整備局 富山河川国道事務所 調査第一課 (〒930-8537 富山県富山市奥田新町2-1)

<sup>2</sup>北陸地方整備局 富山河川国道事務所 調査第一課 (〒930-8537 富山県富山市奥田新町2-1)

<sup>3</sup>北陸地方整備局 富山河川国道事務所 調査第一課 (〒930-8537 富山県富山市奥田新町2-1)

富山河川国道事務所の管内4河川(常願寺川, 神通川, 庄川, 小矢部川)は、「河川堤防の構造検討の手引き(以下、「手引き」とする)」<sup>1)</sup>に基づき、堤防詳細点検(河川堤防の浸透に起因するすべり破壊やパイピング破壊に対する安全性の照査)を実施している。その結果、5割以上の区間で所要の安全度を満足できず、対策工が必要であった。

本報告は、対策が必要となる区間に対し、実現象を精度良く再現できる新たな詳細点検の評価手法を提案し、質的強化の必要性を再照査するとともに、効果的な河川堤防の質的整備計画を立案するものである。

キーワード 河川堤防, 詳細点検, 質的強化, 浸透流解析

## 1. はじめに

富山河川国道管内の4河川(図-1)は、2005~2009年にか「手引き」に基づき堤防詳細点検(河川堤防の浸透に対する安全性の照査)を実施している。その結果、管内河川堤防は、全延長の55%(122.4km)が浸透に起因するすべり破壊やパイピング破壊の安全度を満足できない結果となった(表-1)。この結果に基づき要対策区間の整備を実施すると、膨大な費用と時間が必要となる。一方、管内河川の被災履歴では、急流河川特有の強大な

洪水エネルギーによる洗掘・侵食が起因となった被災が多く、浸透による被災は庄川下流での1箇所であり、実態との乖離が発生している。

このような背景から、本検討は、実現象の再現性を向上させることを重点に置き、堤防構造や土質、地下水位の特性を踏まえた新たな詳細点検手法を提案したものである。また、この手法に基づき対策工が必要な区間を再照査し、真に対策工が必要な区間を抽出して効果的な河川堤防の質的整備を立案した結果を報告する。

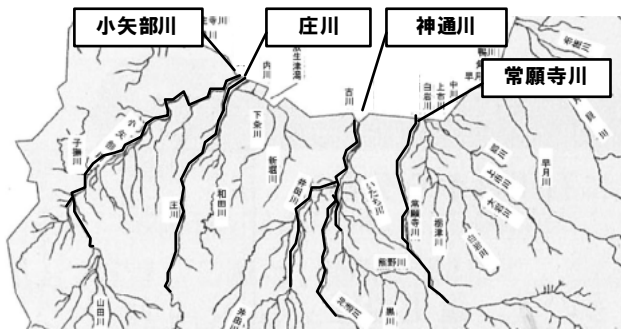


図-1 富山河川国道管内河川位置図

表-1 詳細点検結果一覧表(2005~2009年実施結果)

水系名	堤防詳細点検		既往詳細点検結果					
	実施区間延長		対策不要区間		要対策区間		対策必要割合	
	延長 [km]	断面数	延長 [km]	断面数	延長 [km]	断面数	延長比	断面比
常願寺川水系	29.3	26	18.6	16	10.7	10	36.5%	38.5%
神通川水系	76.2	71	39.7	41	36.5	30	47.9%	42.3%
庄川水系	49.6	40	21.6	19	28.0	21	56.5%	52.5%
小矢部川水系	67.6	50	20.4	16	47.2	34	69.8%	68.0%
管内全体	222.7	187	100.3	92	122.4	95	55.0%	50.8%

## 2. 課題

既往詳細点検結果を実際の現象に合わせて精度向上を図ることを目標とし、以下に示す課題を抽出した。

### (1) 断面形状および土質定数のモデル化に関する課題

#### a) 堤防構造のモデル化における過度な簡略化

兼用道路として舗装整備されている天端や、川裏側の法尻擁壁、堤脚水路などの堤防構造(写真-1)の取扱い

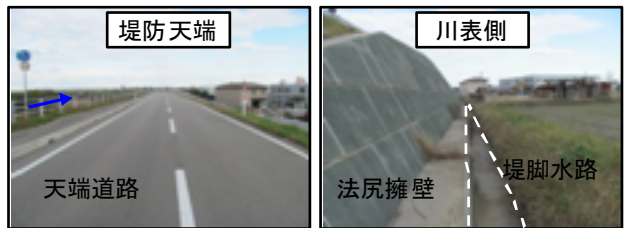


写真-1 庄川 右岸の堤体構造

は「手引き」に明確な評価手法が記載されていない。そのため、天端舗装の有無や堤防天端での排水の実態に関わらず全てを透水層として評価、3面張構造（U型側溝など）や2面張構造（底面構造無し）の堤脚水路の土留め機能を評価せず、本来堤防が備えている遮水効果や土留め機能を無視した結果となっている。

**b) 原位置の試験結果をそのまま適用した土質定数設定**  
土質定数は「手引き」において原則土質試験結果に基づき設定することと、土の不均一さに対して配慮が必要であることがあわせて記載されている。

しかし、既往詳細点検結果では、原位置での試験結果をそのまま適用しており、ひとつの一連区間に対して1断面の試験結果のみに基づいた土質定数を設定しており、土の不均一さに対して配慮がなされていなかった。そのため、試験値の妥当性が確認されず過度に強度を見込んでいるケースが見られた。（表-2）

表-2 庄川 左岸0.6k 土質定数一覧（既往詳細点検）

【庄川】 1.0.6km							
土層記号	土質区分	湿潤単位体積重量 (KN/m <sup>3</sup> )	飽和単位体積重量 (KN/m <sup>3</sup> )	飽和透水係数 (cm/sec)	粘着力 (KN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 (°)	
堤体土	Bgs1	硬質土	20.00	20.40	5.13E-02	9.5	34.50
	Bgs3	硬質土	18.00	20.00	1.13E-02	4.3	29.10
基礎地盤	Ac1	粘性土	16.40	16.90	1.00E-05	32.3	0.00
	As1	砂質土	19.00	19.30	3.97E-03	0.0	44.60
	Ac2	粘性土	18.00	18.00	1.00E-05	47.1	0.00
	As2	砂質土	19.00	20.00	1.06E-03	0.0	39.20
	透水係数が非常に高く典型的な砂礫質の性状であるが、三軸試験結果をそのまま適用し粘着力も見込んでいる						

(2) 浸透流解析の設定条件に関する課題

a) 支川水位の変動を再現していない外力条件

図-2に示す小矢部川の事例のように、合流点に逆流防止施設がない場合は、本川の背水位も合わせて上昇する。しかし、「手引き」では背割堤に対する評価方法の記載がないため、支川の水位変動は再現していない(図-3)。

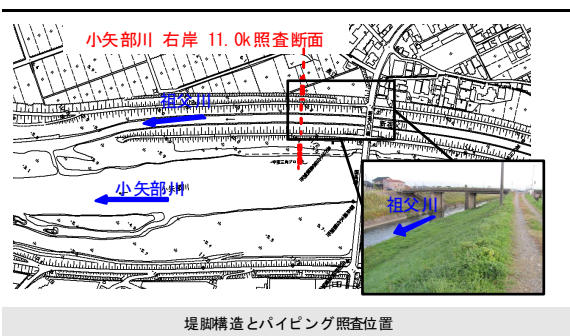


図-2 小矢部川（本川）と祖父川（支川）の合流点

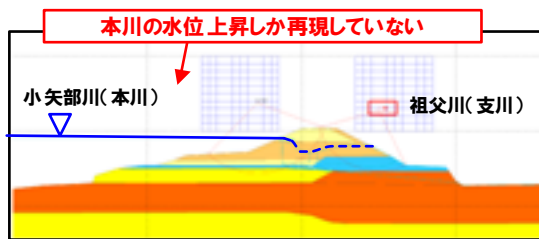


図-3 小矢部川 右岸 11.0k の洪水ピーク時解析断面

b) 画一的に設定した地下水位

地下水位は堤体内の飽和・不飽和状態を再現する浸透流解析での重要な条件である。既往詳細点検結果では、実際の地下水位観測結果が数多くあり、画一でないにもかかわらず「手引き」に記載されている地下水位の設定方法に基づき、地下水位を堤内地盤高から50cm下で一律に設定している。これにより、実際の地下水位を無視した結果となっている。

(3) 浸透に対する安全性の照査方法に関する課題

a) すべり破壊に関する課題

浸透によるすべり破壊に対する安全性の検討は、堤体内の飽和状態に起因して発生する円弧すべりを対象としている。そのため、浸透を原因とした被災履歴がある場合は安全率の割増対象とし照査を行うものとしている。しかし、既往詳細点検結果では、侵食などによるその他の要因で破堤した被災履歴も安全率の割増対象として照査を行っていた。

b) パイピング破壊に対する課題

川裏側法尻が砂質地盤の場合、パイピングに対する照査が必要である。断面形状や川裏法尻部の構造、利用状況を確認の上、照査位置を決定すべきであるが、図-4のように堤防とは関係がない地点での局所動水勾配を照査している事例があった。これについては、照査位置の決定にあたっての統一的な考えが整理されていなかったものと思われる。

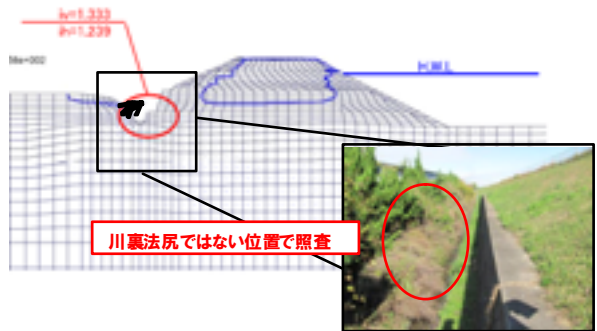


図-4 不適切なパイピング照査位置の例（庄川左岸21.4k）

3. 精度向上対策の提案と効果の検証

(1) 堤体および基礎地盤が実際にもつ機能を反映した検討モデルの構築

a) 堤体構造の浸透抑制効果の再現

浸透の抑制効果を期待できる天端舗装は「手引き」の記載に準じ不透水層として再現した。その際には、堤防天端での排水に着目し、排水を考慮している場合には天端舗装の遮水を見込んだ。この結果、図-5の神通川事例では、降雨による堤体への浸透を抑止でき、川裏側の円弧すべりに対する安全率が0.98から1.52へ上昇し、所定

の安全率を満足できることを確認した。

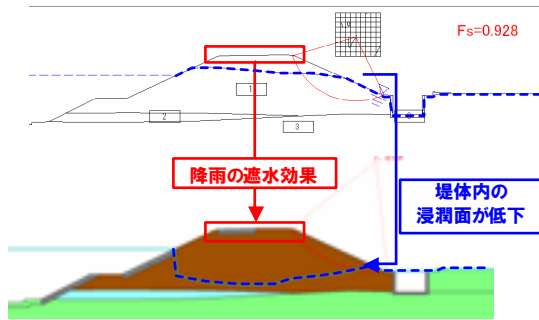


図-5 天端舗装による遮水効果の検証 (神通川 右岸 10.0k)

**b)円弧すべり破壊に与える影響の再現**

川裏側の堤脚構造 (法尻擁壁, 堤脚水路) が備える土留め機能と遮水効果を考慮しモデル化を行う。

法尻擁壁は抗土圧構造物であり, 単独で土圧に抵抗できるように設計するため<sup>2)</sup>, すべり円の安全率が最小となる臨界円が擁壁面を通過することはない。したがって, 法尻擁壁面は臨界円が通過しない不可断線として設定した (図-6)。

堤脚水路は, 構造の種類に応じて表-3の3種類に分類して土留め効果と遮水効果を再現した。

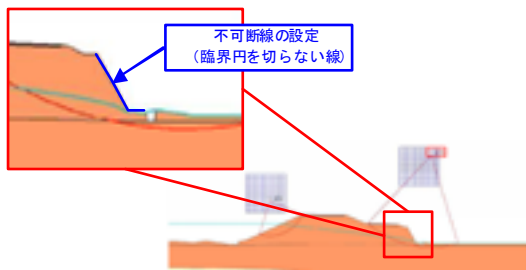


図-6 法尻擁壁のモデル化事例

表-3 堤脚構造の分類表

	3面張構造	2面張構造	土側溝
設置構造	U型側溝や大規模な用排水路などコンクリートで3面(側面、底面)とも施工されている構造	ブロック積で構築されている水路で、底面に何も施工されていない構造	コンクリート構造の水路や擁壁構造が設置されていない素掘りの水路
現地事例			
常願寺川 左岸	0.6k	4.2k	12.2k
遮水効果	○ (水抜き孔がある場合を除く)	○または× (土留め構造に応じて選択)	×
土留め効果	○	○	×

**c) 縦横断方向の土層構成を踏まえた土質定数の設定**

管内河川の特徴として, 扇状地地形へ流下する急流河川であることが挙げられる。常願寺川, 神通川, 庄川は, 図-7に示すように, 扇状地下流から中流域と扇状地上流で土層構成が明確に分かれている。また, 急流河川であるため直線的であり, 左右岸の層構成が同一である。このような土層の連続性に着目し, 縦断方向および横断方向で同一層と判断できる土層内の試験結果を抽出することにより, 各断面の土質定数を設定した。これにより, 土の不均一性に起因する土質定数のばらつきに対し, 地質調査を追加することなく試験結果の平準化を実施できた。

また, 「手引き」では設計上の安全を考慮して砂質土では内部摩擦角のみを, 粘性土では粘着力のみを強度として評価することとなっている。しかし, 管内の土質試験結果では, 細粒分を多く含む粒度配合がよい土が確認できる。このような土は, 本来中間的な性質のために両者の性質を併せ持つものの, 「手引き」に準拠すると強度が小さく評価される結果になる。

そこで, 内部摩擦角と粘着力の両方を評価できる土として中間土を設定した。中間土は, 既往の文献等<sup>3) 4) 5) 6)</sup>から「細粒分含有量が20%以上50%未満」かつ「透水係数 $1.0 \times 10^{-4} \sim 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 」を満足する土であると定義した (表-4, 図-8)。

表-4 中間土の分類表

	礫・砂	中間土	粘土
細粒分含有量(%)	20未満	20以上50未満	50以上
透水係数 $k(\text{cm/s})$	$10^{-4}$ 以上	$10^{-4} \sim 10^{-7}$	$10^{-7}$ 以下

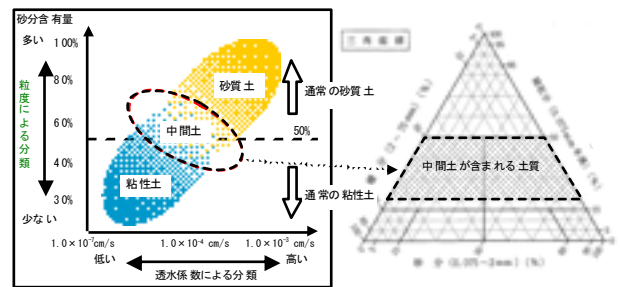


図-8 中間土の分類イメージ

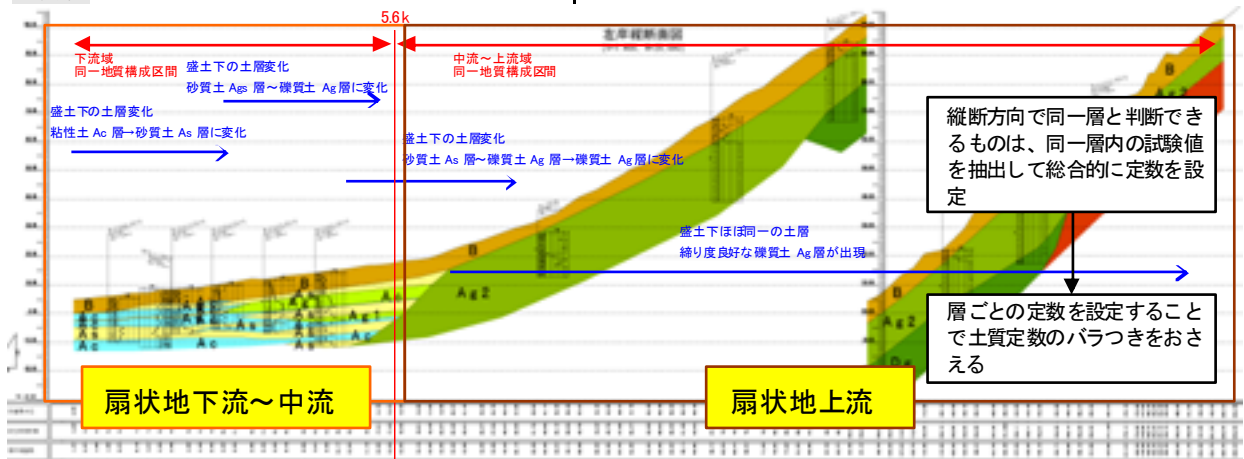


図-7 地質縦断図による土層構成の分類 (常願寺川 左岸)

(2) 実現象を再現できる解析条件の設定

a) 本川と連動した支川における水位上昇の再現

合流点に逆流防止施設がない場合は、本川の背水位も合わせて上昇する。この現象を浸透流解析に再現させるため、支川の水位を本川外水位の時系列変化に合わせて連動させて解析を実施した。水位上昇の時系列変化を図9に示す。

川裏側の被災は、洪水終了直前における外水位と堤内地下水位の水頭差によってもたらされるが、背割堤の場合には水頭差がほとんど発生しない。そのため、パイピングの照査は不要と判断した。また、川裏側円弧すべりは、川表側の円弧すべりと同様に洪水終了後にすべり破壊の危険が高い状態となるため、洪水終了後の安全率で評価した。ただし、洪水終了後の破堤は致命的な被害を招かないため、確保すべき安全率は、洪水終了直前の値ではなく、川表側と同様の値でよいものとした。

この結果、前述した小矢部川と祖父川の合流点をはじめ、背割堤を再現した3区間全てで所定の安全を確保できる結果となった。

b) 地下水位観測結果に基づいた初期条件の設定

庄川、小矢部川が流れる射水平野、砺波平野では、

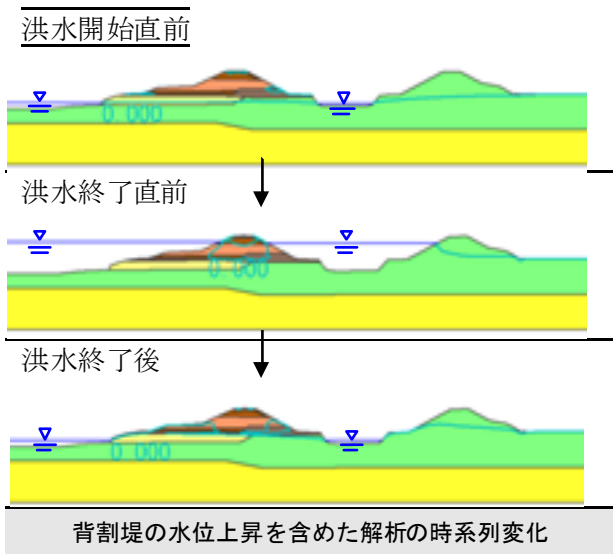


図-9 背割堤における水位上昇の時系列変化

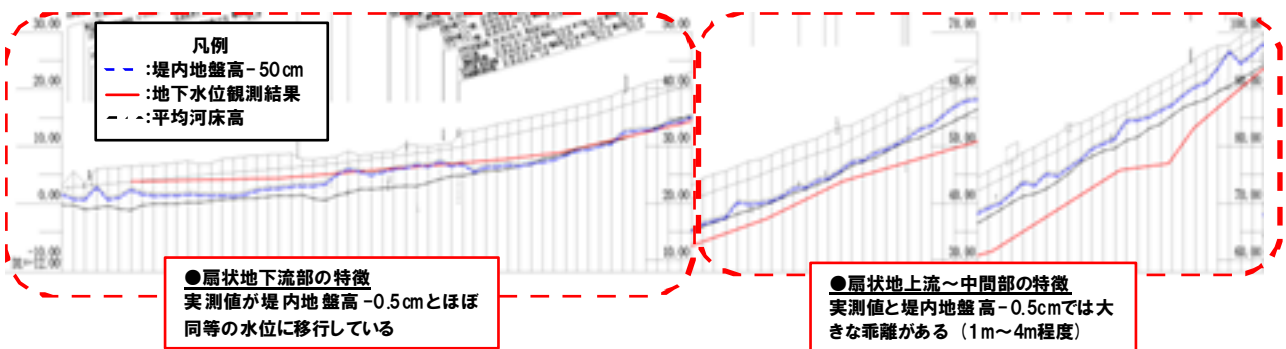


図-10 庄川における地下水位観測結果と堤内地盤高-50cmの比較 (右岸)

流域地下水の高度利用を目的とした地下水観測を2002年に実施している。この結果と「手引き」にある堤内地盤高-50cmとの比較を図-10に示す。地下水位が自噴する扇状地下流域では、両者はほぼ同一の傾向を示している。しかし、河床勾配が急峻な扇状地中流域から上流域では、最大で4mの差が確認できた。

この結果を反映すると表5のとおりとなる。適用した9断面のうち、4断面で対策工が不要となった。これは、初期地下水位が低下することによって洪水ピーク時の浸潤量が低下し、川裏側法尻に局所動水勾配が発生しない、あるいは発生しても小さな値になるためである。

表-5 地下水位観測結果を適用した照査結果

項目	地下水水位 [T.P.+m]	平水位 [T.P.+m]	安全率		判定		
			すべり破壊	パイピング破壊			
庄川	左岸 16.0k	既往照査	37.900	34.550	1.519	0.947	×
		今回照査	34.550		1.574	0.603	×
	11.0k	既往照査	15.197	13.630	1.285	3.601	×
		今回照査	12.560		1.302	2.495	×
	12.0k	既往照査	19.740	17.200	1.420	1.421	×
		今回照査	16.163		1.607	0.351	○
	右岸 13.6k	既往照査	25.610	23.440	1.504	3.530	×
		今回照査	23.643		1.536	3.165	×
	17.6k	既往照査	47.020	42.930	1.449	1.302	×
		今回照査	42.930		1.861	-	○
	20.6k	既往照査	63.800	59.450	1.405	0.522	×
		今回照査	60.184		1.600	0.150	○
小矢部川	左岸 22.4k	既往照査	18.152	16.630	1.809	0.540	×
		今回照査	17.930		1.848	0.484	○
	右岸 15.2k	既往照査	8.830	6.980	1.572	1.182	×
		今回照査	8.470		1.570	1.100	×
	19.0k	既往照査	14.090	11.340	1.513	0.510	×
		今回照査	14.035		1.514	0.509	×

(3) 照査手法の統一による判定結果の精査

a) 侵食に対する被災履歴の選別

管内の河川は急流河川であることから、大きな掃流力が発生する特性がある。そのため、被災履歴は、根固めの流失、高水敷の決壊など侵食による被災履歴がほとんどである。一方、浸透による破堤は庄川下流で1箇所確認できるのみである。

浸透流解析で照査する円弧すべりは、堤体内の築堤材料が飽和することで発生する円弧すべりである。

したがって、「手引き」に記載されているとおり、侵食などによるその他要因で被災履歴がある断面においては、安全率の割増を行わないものとした。

**b) パイピング照査位置の統一**

パイピングの照査位置は、最も局所動水勾配が大きくなる川裏側法尻で実施することが基本である。しかし、川裏法尻部の構造や利用状況によっては「手引き」にある法尻位置では一律に照査できない場合がある。

そのため、パイピングによって堤防が破堤に至るか否かの照査を実施するため、照査を実施すべき位置を明確にし、照査位置の統一とルール化を実施した。

具体的には、「①：2Hルール範囲内の川裏側法尻を基本」「②：法尻擁壁や舗装により保護されている場合は別の地点を選定」「③：『①』の範囲内でパイピングが発生する箇所がない場合は照査不要」という手順で照査位置を再選定した。

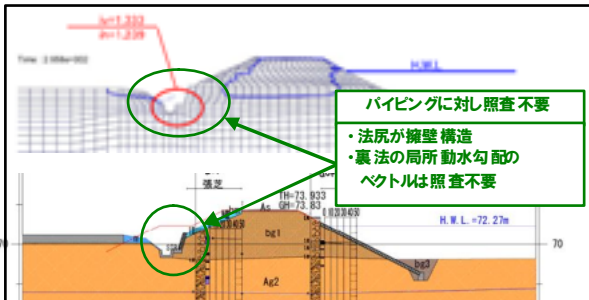


図-11 背割堤における水位上昇の時系列変化

**4. まとめ及び考察**

**(1) 精度向上対策の導入による再照査結果**

3章で提案した精度向上対策を導入して再照査した結果を表-6、図-12、図-13に示す。「手引き」に基づく既往詳細点検結果では、全延長のうち55.0% (122.4km)

／222.7km) の区間で対策が必要であった。しかし、今回の精度向上対策の導入によって照査すると、24.1% (53.7km／222.7km) となり対策工が必要な区間が減少した。特に、庄川は天端舗装や法尻擁壁などの堤防構造物が多く、地下水の観測結果が揃っていないため、今回の精度向上対策による影響が大きく、当初52.5% (28.0km／49.6km) で対策工が必要であったが、再照査後は8.1% (4.0km／49.6km) にまで減少した。

**(2) 精度向上案の効果検証**

管内の各河川に対し、3章で提案した各項目を適用した断面数と照査結果を表-7に示した。各精度向上案のうち、いずれも約50%程度の断面で、対策が不要となっている。このうち、解析条件の対策案である背割堤の再現や地下水観測結果の反映は、単独で用いた場合の照査結果であり、背割堤は全ての断面、地下水位観測結果の反映は全体の4割の判定結果に影響している。

その他の項目については、項目同士の複合的な要因により所定の安全が確保できる結果となっているため、いずれかを単独で用いた場合の評価ではない点に留意が必要である。

表-7 精度向上案の適用効果一覧

水系名	精度向上対策 [断面数]					
	堤防のモデル化		浸透流解析条件	照査方法		
	堤体構造モデル化	土質定数再設定	背割堤再現	地下水位観測結果反映	被災履歴の見直し	パイピング照査位置統一
常願寺川水系	8	10	0	0	2	2
神通川水系	27	30	0	0	2	1
庄川水系	21	21	0	6	0	10
小矢部川水系	33	34	3	3	5	17
管内全体	89	95	3	9	9	30
対策が不要に変化	41	55	3	4	5	19

表-6 既往詳細点検結果と見直し後の詳細点検結果一覧表

水系名	堤防詳細点検実施区間延長		既往詳細点検結果						見直し後詳細点検結果					
	延長 [km]		対策不要区間		要対策区間		対策必要割合		対策不要区間		要対策区間		対策必要割合	
	延長 [km]	断面数	延長 [km]	断面数	延長 [km]	断面数	延長比	断面比	延長 [km]	断面数	延長 [km]	断面数	延長比	断面比
常願寺川水系	29.3	26	18.6	16	10.7	10	36.5%	38.5%	25.7	22	3.6	4	12.3%	15.4%
神通川水系	76.2	71	39.7	41	36.5	30	47.9%	42.3%	58.7	58	17.5	13	23.0%	18.3%
庄川水系	49.6	40	21.6	19	28.0	21	56.5%	52.5%	45.6	35	4.0	5	8.1%	12.5%
小矢部川水系	67.6	50	20.4	16	47.2	34	69.8%	68.0%	39.0	32	28.6	18	42.3%	36.0%
管内全体	222.7	187	100.3	92	122.4	95	55.0%	50.8%	169.0	147	53.7	40	24.1%	21.4%

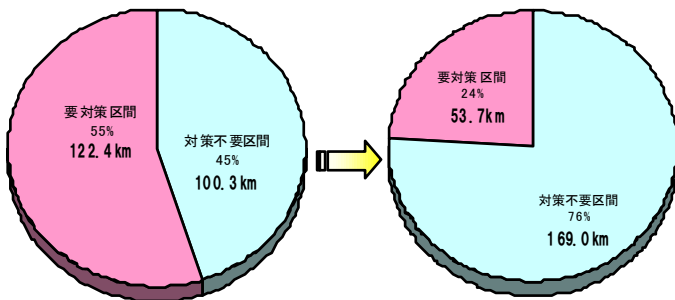


図-12 管内における対策工必要区間の変化

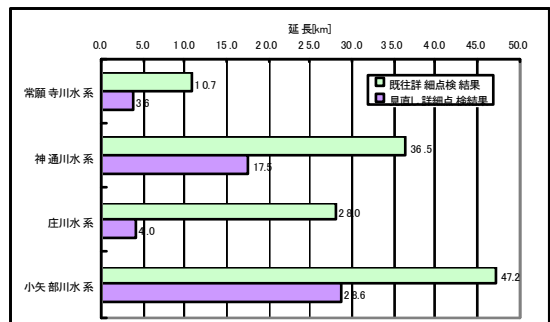


図-13 河川ごとの要対策区間

### (3) 堤防の安全度が低下する精度向上案に関する考察

#### a) 中間土の定義による過度な強度定数の低減

本提案では、中間土を定義しているため、細粒分含有量や透水係数が明らかに砂礫の性状を示しているものは、「手引き」に準拠し、粘着力を見込んでいない。

この結果、既往詳細点検から得た安全率が、中間土を定義することにより低下する結果となった(表-8)。

表-8 精度向上案の適用効果一覧

項目	すべり破壊の照査						
	川表側		判定	川裏側		判定	すべり破壊の判定
	算定	安全率		算定	安全率		
既往点検	1828	> 1.000	○	1.693	> 1.320	○	○
今回照査	1574	> 1.000	○	1.574	> 1.320	○	○

#### b) 堤脚水路の近接による局所動水勾配の上昇

堤脚水路の構造のうち、コンクリート製のU型側溝は、図-14に示す結果のように堤体内の浸透流を遮水してしまう。「解説・河川管理施設等構造令<sup>6)</sup>」では、このような悪影響を避けるために2Hルールを定めているが、管内では、2Hルール内に設置されている区間も多く、パイピングの照査結果に悪影響を与えている。

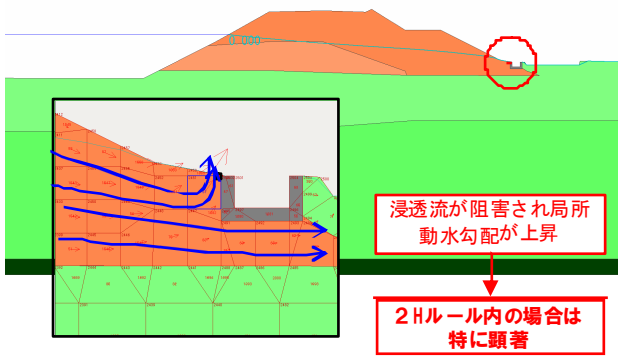


図-14 堤体内の浸透流に与える堤脚水路の悪影響

精度向上対策案として、堤脚構造の遮水効果を再現したため、局所動水勾配が大きく上昇した区間が、対策工が必要な40断面のうち9断面あった。

## 5. おわりに

実現象を精度良く再現できる新たな詳細点検の評価手法を適用することで、管内4河川の対策工必要区間が122.4kmから53.7kmに絞り込むことができた。今回提案した評価手法は、いずれも「手引き」から逸脱する提案ではなく、未記載の項目や原則を踏まえて発展させた提案である。したがって、他河川でも本提案を適用することができ、真に対策工が必要な区間を抽出して効果的な河川堤防の質的整備計画を立案することができる。

また、実現象を精度良く再現できる新たな詳細点検の評価手法を採用することで安全度が低下する場合があることも本検討で得た重要な知見である。本来対策工が必要である区間を見落とさず確実に抽出するためにも、今後は対策工が不要となっている区間での詳細点検の再照査を実施していく必要があると考える。

## 参考文献

- 1) 財団法人 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き，2002年7月
- 2) 社団法人 日本道路協会：道路土工 擁壁工指針，1999年3月，P71
- 3) 社団法人 地盤工学会：土と基礎 Vol37 「砂と粘土の混合の圧縮及び強度特性」，1993年
- 4) 社団法人 地盤工学会：ジオテク ノート②中間土，P14
- 5) 社団法人 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，P302～306
- 6) 社団法人 地盤工学会：設計用地盤定数の決め方—土質編—，2007年12月，P39～40
- 7) 社団法人 日本河川協会：改訂 解説・河川管理施設等構造令，2000年1月，P226