

2.3 河川堤防の基礎地盤の透水特性調査手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 19～平 22

担当チーム：材料地盤研究グループ（地質）

研究担当者：佐々木靖人、品川俊介、吉田直人、
日外勝仁

【要旨】

本研究は、河川堤防基礎地盤の漏水、パイピングに関する弱点箇所調査において、地形・地質学的知見を活用して、面的、効率的に把握する手法を提案しようとするものである。

地形区分と堤防被災履歴との関係から、一般に被災しやすい地形区分を明らかにした。またこれらの関係に基づく、基礎地盤漏水の安全性概略評価手法の開発を試みた。

過去の地形情報を客観的に把握するツールとして、空中写真から自動化手法で作成したデジタル標高モデル (DEM) が地形分類作業に有効であることが分かった。

地盤漏水対策に必要な 3 次元地盤構造の推定のために、堆積構造との関連性に着目した新たな地形分類を試行した。また荒川中流域において地形区分と堆積構造とを考慮した自然堤防周辺の地質構造の推定を試み、それが堤防被災原因の推定に有効であることを示した。

堤防の存在が基礎地盤漏水に与える影響について 2 次元浸透流解析で検討した結果、堤体規模、堤体及び基礎地盤の土質の組み合わせ等により相対的な危険度が異なることが分かった。この結果は堤防概略点検の評価指標として、あるいは一連区間における照査断面の選定に利用可能と考えられる。

室内パイピング試験により、土質の違いによるパイピング抵抗性の違いを把握し、パイピング抵抗性評価のための基礎資料を得た。

キーワード：地形区分、堤防被災履歴、堆積構造、パイピング試験

1. はじめに

近年、河川堤防が破堤した場合、甚大な被害が生じていることから、全国の河川堤防について安全性評価が実施されているところである。その中で、基礎地盤の浸透性に関する調査では、概査段階で、治水地形分類図・旧版地形図などにより高透水性地盤を示唆する旧河道と落堀の位置を抽出し、これらの情報を加味して代表地点を精査する。しかしながら、自然堤防と後背湿地の境界部など、地形・地質学的に認定できる要注意地形が見落とされている。また、自然河川によって形成された沖積地盤の構造は複雑であり、空間的な広がりを把握可能な地形地質情報の有効利用が必要である。特に、見落とされた箇所は以後の調査で対象とならないため、見落としを少なくするための概査手法の高度化が必要である。

本研究は、河川堤防基礎地盤の漏水、パイピングに関する弱点箇所調査において、地形・地質学的知見を活用して、面的、効率的に把握する手法を提案しようとするものである。

まずは堤防基礎地盤と堤防被災要因との関連性を解明

する目的で、地形区分と堤防被災履歴、基礎地盤土質との関係について河川堤防概略点検結果表を用いて解析を行った。また地形区分と被災履歴との関係に基づく、基礎地盤漏水の安全性概略評価手法の開発を試みた。

地形学的な調査方法の高精度化に関し、過去の地形情報を客観的に把握するツールとして、空中写真から自動化手法でデジタル標高モデル (DEM) を作成し、有用性を検討した。

地質学的な調査方法の高度化に関し、3 次元地盤構造の推定のために、堆積環境との関連性に着目した新たな地形分類を試行した。また荒川中流域において地形区分と堆積構造とを考慮し、自然堤防周辺の地質構造の推定を試みた。

堤防の存在が基礎地盤漏水に与える影響を把握するため、堤体規模、堤体及び基礎地盤の土質等の組み合わせで多数の 2 次元浸透流解析を実施した。

さらに、一般に解析的手法で判定される地盤のパイピング抵抗性評価について、各種土質材料を用いた室内パイピング試験を行い、評価指標の検討を行った。

2. 地形区分と堤防被災履歴、基礎地盤土質との関係^{1,2)}

2.1 直轄河川の堤防概略点検結果表に基づく調査方法

地形区分と堤防被災履歴、基礎地盤土質との関係を調べる目的で、全国の直轄河川について、図-1に示す堤防概略点検結果表³⁾より地形区分、基礎地盤・堤体土質及び堤防被災履歴の項目を100m間隔で読みとり、電子化した。その際、河川独自の記載名称を用いているものについては、治水地形分類図の凡例に読み替えた。ただし、

記述を残した。

記載された情報には粗密があり、河川によっては全く堤防被災履歴がないもの、記入されている区間が不連続なものなども多数存在した。

そこでまず、比較的記載が豊富な6河川(利根川、小貝川、庄内川、淀川、紀ノ川、筑後川)について地形区分と地質との関係、および地形区分と被災履歴の関係を調べた。

2.2 6河川沿川の地形の出現率

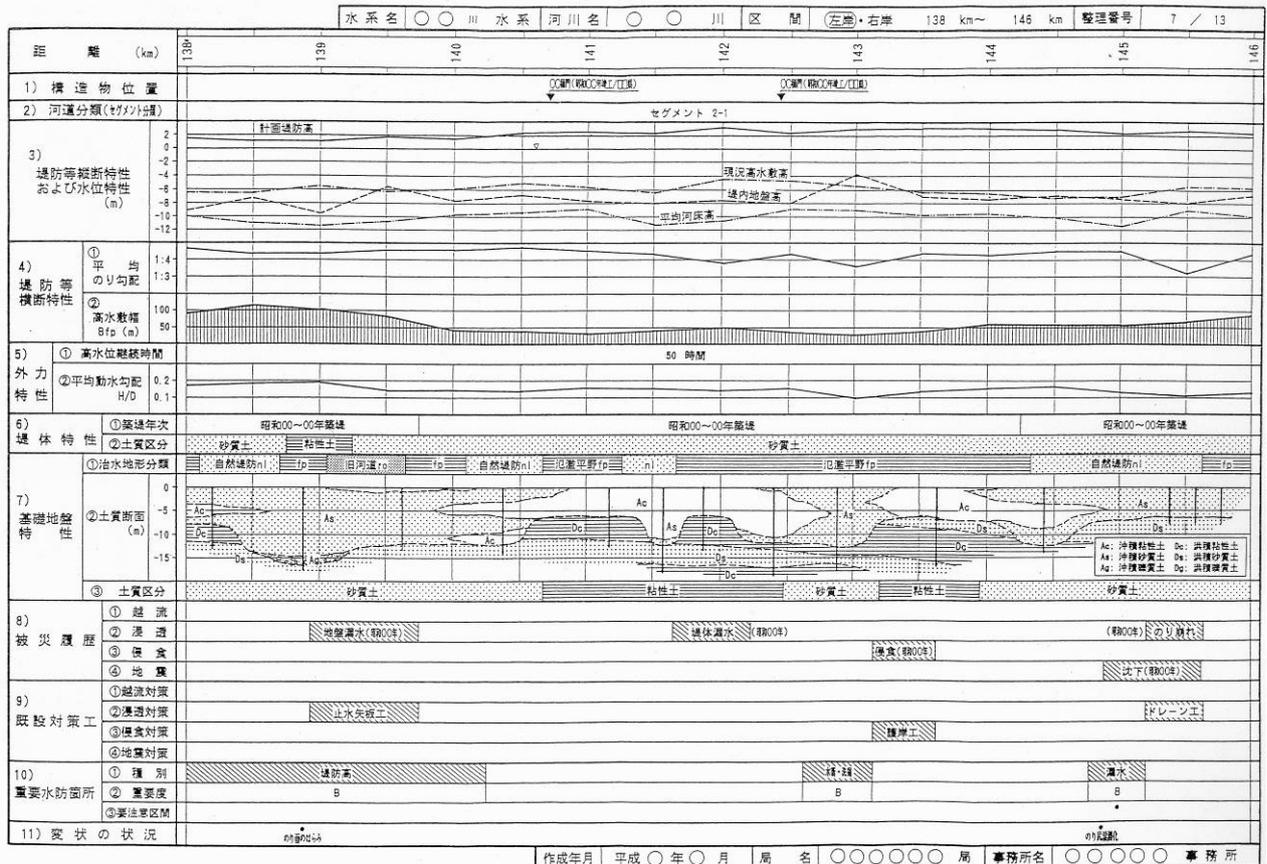


図-1 堤防概略点検結果表の例³⁾

表-1 6河川の沿川地形の出現率

	各地形の出現率(%)										延長(km)
	氾濫平野	自然堤防	旧河道・破堤地形	湿地・旧湿地・干拓地	旧川微高地	砂丘	扇状地	台地・丘陵地・山地	高い盛土地	その他	
利根川	32.5	36.2	11.8	8.0	1.5	0.0	0.0	4.7	0.1	5.2	339.4
小貝川	31.7	53.1	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.1	0.0	0.0	156
庄内川	18.4	35.3	13.2	18.1	0.0	0.0	0.0	15.0	0.0	0.0	90.1
淀川	16.7	8.7	10.4	54.7	5.9	0.0	1.0	2.0	0.3	0.4	103.3
紀ノ川	37.2	4.5	11.0	0.0	24.8	0.0	0.5	21.9	0.0	0.0	125.3
筑後川	50.7	27.5	6.7	1.5	5.0	0.0	0.0	8.5	0.0	0.0	146.7
6河川計	32.7	30.5	10.3	10.6	5.2	0.0	0.2	8.6	0.1	1.9	960.8

破堤地形と記載されたものについては落堀の様な浸食地形の場合と、自然堤防に似た堆積地形の場合があるため、

河川Pの地形種Aの出現率 $R(P)_A$ を以下の式で定義する。

$$R(P)_A[\%] = 100 \times \frac{L(P)_A[km]}{L(P)_{Total}[km]}$$

ただし、

$L(P)_{Total}$: 河川 P の地形の記載総延長[km]

$L(P)_A$: 河川 P の地形種 A の記載延長[km]

沿川の地形の出現率を表-1に示す。一般には氾濫平野、自然堤防が多いが、河川によってその出現率はかなり異なることがわかった。

淀川、庄内川については湿地が多いが、他河川においてはそのほとんどが氾濫平野と分類されているものと思われる。また、紀ノ川については旧川微高地が多い。旧川微高地はその定義がわかりにくく、記載されている地形が様々であるか、記載に用いられていない。なお、旧川微高地は成因的には旧河道の一種と捉えることも可能である。

また、今回調査した6河川においては、落堀、砂丘は存在しなかった。

2.3 6河川沿川の地形区分と基礎地盤土質との関係

表-2に地形別、河川別の基礎地盤土質構成比を示す。

旧河道、自然堤防などは砂質土、扇状地、旧川微高地は礫質が多いことがわかる。その内訳をやや詳しく見ると、例えば紀ノ川は全体に礫質であり、利根川は砂質であるなど、河川ごとの特徴により、同じ地形種でもその土質構成が異なることがわかる。

同じ地形種でも河川によって基礎地盤の土質構成が大きく異なる例として、湿地、旧湿地、干拓地がある。この区分の地形種は、利根川では砂質土が99%を占めるが、

当区分については各河川の運搬土砂の粒度分布の違いに加え、異なる成因の地形を含んでいる可能性が示唆される。例えば筑後川についてみると、当区分の内訳は河口付近の干潟の干拓地であるが、淀川ではこれに加えて平野内陸部の后背湿地を幅広く取り込んでいる。以上のように、地形と基礎地盤にはある一般的な関係が見いだせるが、個々の川の特徴、および地形分類の仕方によってやや異なることがわかった。

2.4 6河川の堤防被災箇所の地形区分

被災内容別にどのような地形の箇所に堤防の被災が生じているかを調べた。表-3に、代表的な3つの被災内容（破堤、漏水、のり崩れ・すべり）について、河川毎に被災箇所の地形延長を計数し、表-1の河川毎の地形種の出現率で規格化した、被災度を示す。

河川 P の被災内容 X についての地形種 A の被災度 $D(P,X)_A$ を以下の式で定義する。

$$D(P,X)_A = \frac{L(P,X)_A[km]}{L(P,X)_{Total}[km] \times R(P)_A[\%] \div 100}$$

ただし、

$L(P,X)_{Total}$: 河川 P の被災内容 X の被災総延長[km]

$L(P,X)_A$: 河川 P の被災内容 X についての地形種 A の被災延長[km]

$R(P)_A$: 河川 P の地形種 A の出現率[%]

河川 P において、被災度が1を超える地形種は、被災内容 X について相対的に被災しやすい地形と考えることができる。

表-2 地形別、河川別基礎地盤土質構成比

	治水地形別基礎地盤土質構成比(%)										河川全体		
	氾濫平野	自然堤防	旧河道 落堀 破堤地形	湿地 旧湿地 干拓地	旧川 微高地	砂丘	扇状地	台地 山地 丘陵地	高い 盛土地	その他	延長 (km)	比率 (%)	
利根川	粘性土	26	16	7	1	45	0	0	44	0	18	15.8	20
	砂質土	72	78	88	99	55	0	0	56	100	75	62.2	78
	礫質土	2	6	5	0	0	0	0	0	0	8	2.0	3
小貝川	粘性土	42	52	45	0	0	0	0	40	0	0	17.9	45
	砂質土	41	40	37	0	0	0	0	60	0	0	17.8	45
	礫質土	17	9	18	0	0	0	0	0	0	0	4.3	11
庄内川	粘性土	0	2	1	12	0	0	0	0	0	0	1.5	3
	砂質土	99	67	39	39	0	0	0	11	0	0	25.6	51
	礫質土	1	31	60	48	0	0	0	89	0	0	22.9	46
淀川	粘性土	26	43	21	35	36	0	0	0	0	100	26.2	29
	砂質土	69	32	62	56	61	0	0	0	100	0	37.9	42
	礫質土	6	24	17	9	3	0	100	100	0	0	25.9	29
紀ノ川	粘性土	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0.2	0
	砂質土	16	57	20	0	37	0	50	2	0	0	18.2	30
	礫質土	84	43	80	0	62	0	50	98	0	0	41.7	69
筑後川	粘性土	48	12	40	100	14	0	0	50	0	0	26.3	44
	砂質土	49	79	56	0	86	0	0	50	0	0	32.1	53
	礫質土	3	9	4	0	0	0	0	0	0	0	1.6	3
6河川	粘性土	24	27	14	23	10	0	0	15	0	22	13.5	15
	砂質土	54	60	58	64	44	0	14	24	100	71	49.0	54
	礫質土	21	13	28	13	46	0	86	62	0	7	27.5	31

筑後川では粘性土 100%となっている。このことから、

2.4.1 破堤

表-3 6河川における被災内容別地形区分ごとの被災度

	破堤箇所 の 地形区分ごとの被災度										被災延長 (km)
	氾濫平野	自然堤防	旧河道 落堀 破堤地形	湿地 旧湿 干拓地	旧川 微高地	砂丘	扇状地	台地 山地 丘陵地	高い 盛土地	その他	
利根川	-	-	5.10	-	-	-	-	-	-	7.63	0.05
小貝川	1.75	0.52	2.08	-	-	-	-	-	-	-	0.36
庄内川	0.19	1.11	1.89	1.58	-	-	-	0.24	-	-	0.28
淀川	-	3.83	-	1.22	-	-	-	-	-	-	0.03
紀ノ川	1.15	-	0.19	-	1.48	-	12.79	0.56	-	-	0.49
筑後川	1.09	1.13	0.52	-	2.05	-	-	-	-	-	0.58
6河川	1.26	0.73	1.03	0.53	2.59	-	10.06	0.45	-	0.59	3.58
	漏水箇所 の 地形区分ごとの被災度										被災延長 (km)
	氾濫平野	自然堤防	旧河道 落堀 破堤地形	湿地 旧湿 干拓地	旧川 微高地	砂丘	扇状地	台地 山地 丘陵地	高い 盛土地	その他	
利根川	1.03	1.10	1.27	-	1.79	-	-	0.69	-	1.08	3.35
小貝川	0.66	1.31	0.98	-	-	-	-	0.20	-	-	5.59
庄内川	1.07	0.79	0.62	2.45	-	-	-	-	-	-	0.61
淀川	1.34	0.77	0.99	1.01	0.74	-	0.53	-	-	1.33	3.89
紀ノ川	0.88	0.88	3.86	-	0.76	-	-	0.08	-	-	1.74
筑後川	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6河川	0.77	1.24	1.37	1.50	0.75	-	0.79	0.17	-	0.73	30.36
	のり崩れ・すべり箇所 の 地形区分ごとの被災度										被災延長 (km)
	氾濫平野	自然堤防	旧河道 落堀 破堤地形	湿地 旧湿 干拓地	旧川 微高地	砂丘	扇状地	台地 山地 丘陵地	高い 盛土地	その他	
利根川	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
小貝川	1.72	0.55	0.52	-	-	-	-	1.65	-	-	1.19
庄内川	1.85	1.17	1.11	0.40	-	-	-	0.16	-	-	0.41
淀川	1.72	0.59	1.87	0.82	-	-	-	-	7.03	-	0.98
紀ノ川	0.86	0.41	1.88	-	1.29	-	-	0.60	-	-	0.53
筑後川	0.96	0.87	2.67	-	1.63	-	-	0.16	-	-	1.46
6河川	1.30	0.67	1.43	0.97	1.23	-	-	0.61	7.01	-	9.14

太字は被災度が1を超過。

利根川の破堤箇所は2箇所のみであり、その内1地点は右岸、大和町新川通付近で、その他と記載されている。なお、この地点は治水地形分類図上では氾濫平野とされている。

小貝川では16箇所破堤が記録されている。本河川では旧河道の被災度が高く、次いで氾濫平野が多い。自然堤防についてはその出現割合が約5割と高いため被災度は低い、3箇所破堤している。

庄内川においては、25箇所破堤の記録がある。旧河道、干拓地、自然堤防の順で被災度が高く、いずれも1を超えた。

淀川の破堤箇所は2箇所のみであり、後背湿地(湿地)および自然堤防で発生している。

紀ノ川では36箇所破堤が生じており、わずかに分布する扇状地区間で破堤しているほか、氾濫平野、旧川微高地の被災度が1を超えた。

筑後川では12箇所破堤が生じており、旧川微高地、自然堤防および氾濫平野の被災度が1を超えた。

2.4.2 漏水

利根川においては旧川微高地、旧河道の被災度が高か

った。自然堤防、氾濫平野も被災度が1を超えた。

小貝川では自然堤防、庄内川では後背湿地(湿地)、淀川では氾濫平野、そして紀ノ川では旧河道の被災度が高い。なお、筑後川では漏水箇所の被災記録がなかった。

2.4.3 のり崩れ・すべり

6河川中4河川において、旧河道、破堤地形の被災度が1を超えた。次いで3河川において、氾濫平野の被災度が1を超えた。また、紀ノ川、筑後川においては旧川微高地の被災度が高い。淀川では出現率が低い高い盛土地の被災度が高いが、これは河口付近の埋め立て地であった。なお、利根川においてはのり崩れ・すべりの被災記録がなかった。

2.4.4 6河川における地形区分と被災履歴との関係

6河川における地形区分と被災履歴との関係を調べた結果、被災内容および河川ごとに異なる特徴を有していることが判った。その原因の一つとして、出現率の低い地形種(例えば扇状地、高い盛土地)で被災が起こると、被災度が著しく大きくなることが挙げられる。

そのため、事例数の多寡の影響や、特殊な分類の影響を小さくするために地形の出現率が高い(ここでは1%

以上) 地形区分について、6 河川をまとめて解析した結果を考察する (図-2)。

従前より要注意地形として指摘されている、旧河道および破堤地形については、3 つの被災内容すべてにおいて被災度が1を超えており、一般的に要注意地形として把握する必要があることが確認できた。

旧川微高地については河川によって記載の有無がはっきり分かれるが、記載があった紀ノ川、筑後川については破堤、およびのり崩れ・すべりについて被災度が高かった。旧川微高地という分類は、旧河道とも解釈ができるなど、河川ごとに分類された地形が異なる可能性があるため、今後は具体的にどのような地形が記載されているのか整理する必要がある。

氾濫平野はこの分類では低地の一般面として位置づけることができるが、破堤、およびのり崩れ・すべりに関して被災度がやや高かった。一方、漏水に関しては被災度が低かった。これは氾濫平野の堆積物が軟弱でやや透水性に劣ることが関係しているのかも知れない。

平野の中で微高地を形成する自然堤防については比較的 안전한土地と考えられてきたが、漏水に関しては被災度が高かったほか、河川によっては破堤の被災度が高かった。一方、のり崩れ・すべりに対しては被災度が低い。これは、自然堤防堆積物の透水性が高く、排水が良好なためと推測される。

湿地、旧湿地については旧川微高地と同じく、河川ごとに記載の有無がはっきり分かれ、その被災度もかなりばらつきがあることから、分類に課題がある可能性がある。

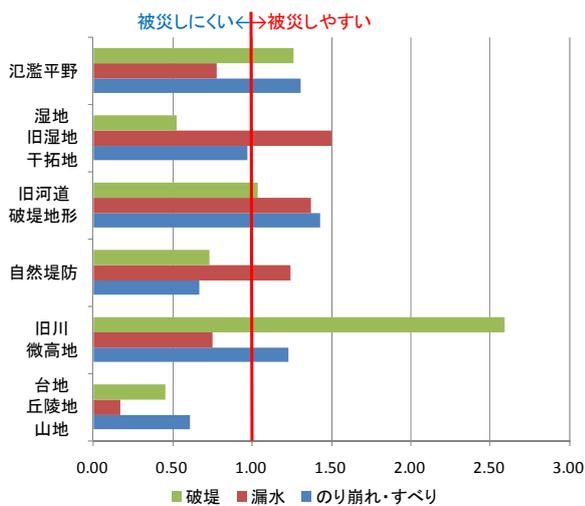


図-2 6河川の被災履歴に基づく、被災内容別地形区分ごとの被災度

2.5 全国の国管理河川における地形区分と基盤漏水被災との関係⁴⁾

基礎地盤の透水特性と関係が深いと考えられる漏水被災について、より多くの事例に基づいて傾向を把握するため、全国の国が管理している109水系で実施された堤防概略点検のうち92水系の河川(総延長10,415km)分の結果表より地形区分および漏水被災履歴を抽出し、整理した。

漏水被災履歴の記載について、「堤体漏水」、「基盤漏水」および単に「漏水」と記載されているものがある。本稿では、三者を合わせたものを指す場合に「全漏水」という語を用いる。漏水被災箇所延長を表-4に示す。また、堤防概略点検結果表に記載の地形種については16種類に再整理した。表-5に地形区分とその出現延長、出現率を示す。

漏水履歴のある区間の延長は、調査総延長の3.5%であった。また、漏水箇所が明らかになっているのを見ると、堤体漏水:基礎地盤漏水の延長比は約10:1と、堤体漏水が多いことがわかった。

表-4 漏水被災箇所の延長

	延長(km)	全漏水に対する割合(%)	調査総延長に対する割合(%)
堤体漏水箇所	197.7	54.9	1.9
基盤漏水箇所	18.6	5.2	0.2
全漏水箇所	360.4	-	3.5
調査総延長	10415.7	-	-

表-5 整理した地形区分とその出現延長、出現率

地形区分	含まれる分類項目	延長(km)	出現率(%)
氾濫平野	谷底平野、デルタ、三角洲	4696.9	45.1
微高地	自然堤防、旧川微高地、破堤地形	1980.8	19.0
山地・台地・段丘	丘陵地	1301.2	12.5
旧河道・落堀	旧落堀	1001.9	9.6
扇状地		508.8	4.9
後背湿地	湿地、旧湿地、旧池沼	371	3.6
干拓地		153.8	1.5
不明	空欄、その他	148.2	1.4
背割堤	河原、水面、河道内	90.2	0.9
砂州・砂丘	砂堆	63.9	0.6
盛土地・埋立地	高い盛土、人工盛土地	39	0.4
河川合流		27.5	0.3
天井川		22	0.2
山麓の堆積地形	土石流	4.8	0.0
崖		4.7	0.0
海	港	1	0.0
計		10415.7	100.0

表-6 地形区分と漏水被災度の関係

地形区分	堤体漏水被災度	基盤漏水被災度	全漏水被災度	地形出現率(%)
氾濫平野	0.64	0.85	0.69	45.1
微高地	1.30	1.81	1.80	19.0
山地・台地・段丘	0.09	0.00	0.09	12.5
旧河道・落堀	1.36	2.74	1.39	9.6
扇状地	1.24	0.22	0.72	4.9
後背湿地	5.07	0.00	2.98	3.6
干拓地	1.82	0.00	1.69	1.5
その他*	1.40	0.00	0.93	3.9
計	-	-	-	100.0

太字は被災度が1を超過。

*) 地形区分のうち、出現率が1%未満のものおよび、地形が不明なものを一括した。

2.3 河川堤防の基礎地盤の透水特性調査

地形区分のうち、出現率が1%以下のもの、および地形が不明なものを「その他」と一括した上で、地形ごとの漏水に対する被災度を表-6に示す。

基礎地盤漏水は旧河道・落堀、次いで自然堤防などの微高地で被災しやすい。また、堤体漏水および漏水箇所不明のデータを含めた全漏水に関してみると、上記に加えて後背湿地、干拓地で被災しやすいことが分かった。この結果は前述の6河川の解析と整合的である。

上記の検討の結果、現在行われている河川堤防の浸透に対する概略点検における一般的な要注意地形として、これまで指摘されている、旧河道、落堀に加えて、後背湿地、干拓地、微高地（自然堤防や旧川微高地）を追加すべきであることが分かった。また、個別の河川ごとに被災しやすい地形が異なる場合があることから、河川ごとに地形区分と被災履歴との関係を調べることで、概略点検結果の精度を向上させることができると考えられる。

3. 地形と堤防被災履歴との関係に基づく、基礎地盤の漏水に対する安全性評価手法の開発

3.1 基本的考え方

2章において、堤防沿川の地形区分と堤防被災履歴との間に関係があることを明らかにした。そこで次に、その関係を使った、基礎地盤の漏水に対する新たな安全性の相対評価手法を検討する。

基礎地盤の透水現象を支配する主な要因として、透水係数に代表される地盤の透水特性のほか、動水勾配および洪水継続時間を挙げることができる。

透水現象は、相対的な高透水部で発生すると考えることができる。近接した一連区間においては洪水継続時間の差はほとんど生じないと見なせるので、基礎地盤の浸透安全性に対する相対評価手法の検討においては考慮する必要がないと考える。

地盤の透水特性は地盤材料と密接に関係するが、表層においては地盤材料と地形に関係があると考えられる。一方、2.3 で明らかかなように、同じ地形種（例えば自然

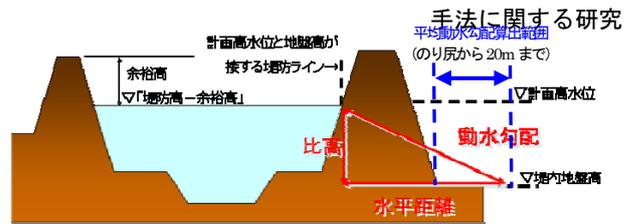


図-3 平均動水勾配の算出

堤防)でも河川ごと、あるいは同じ河川でも上流と下流で地盤材料が異なるので、一律に地形と透水特性との関係を規定することは難しい。そこで、河川ごと、あるいは河川のセグメント区分ごとに漏水被災履歴との関係に基づいて、地形ごとの安全性を点数化するとともに、評価箇所の動水勾配分布とを組み合わせ、地盤漏水の起こりやすさを空間的に評価する方法の開発を試みた。

地形区分ごとの安全性の点数化については2.4 で定義した被災度を定義した。被災度が1を超える地形種は、ある被災内容（例えば漏水）に対して相対的に被災しやすい地形と考えることができる。本稿においては漏水に関する被災度をもって地形点数 T とすることとする。

動水勾配に関して、ここでは計画高水位の状態での堤内地の平均動水勾配 G を計算し、用いることとする。

以上を整理し、基礎地盤漏水ポテンシャル P を次のように定義する。

$$P = T \times G$$

この基礎地盤漏水ポテンシャルを実際の河川データを用いて試行的に算出し、その有効性を検証した。

3.2 作業方法

基礎地盤漏水ポテンシャルを空間的に連続する情報として得るため、GISを用い、次のような作業を行った。

- ①治水地形分類図のポリゴンデータ化
- ②被災履歴のGISデータ入力（被災履歴は区間で示されているが、ここでは便宜的に20m幅の帯状の領域として入力）
- ③航空機レーザー測量データおよび河川の計画高水位のデータを用い、堤内地盤（堤防のり尻から20mまでの領域）の任意の測量ポイントに対して平均動水勾配の分布を算出

表-7 荒川における被災内容別、地形別被災面積

(単位: m²)

被災内容	数式	山地・丘陵地	台地	自然堤防	旧河道・落堀	氾濫平野	湿地	干拓地	高い盛土地	総計
①破堤		0	60,697	237,774	80,825	603,076	0	0	0	982,372
②侵食		0	0	22,139	54,711	14,542	0	0	0	91,392
③のり崩れ・すべり		0	0	54,007	87,474	132,295	0	0	0	273,776
④漏水		0	0	287,324	40,638	736,476	0	133,072	0	1,197,510
⑤被災なし		22,119	176,879	2,789,207	489,388	5,709,386	0	129,284	114,859	9,431,122
⑥総計	①+②+③+④+⑤	22,119	237,576	3,390,451	753,036	7,195,775	0	262,356	114,859	11,976,172

表-8 荒川における各地形の出現率および地形点数

	数式	山地・丘陵地	台地	自然堤防	旧河道・落堀	氾濫平野	湿地	干拓地	高い盛土地	総計
⑦地形出現率= R_A	⑥/Σ⑥	0.002	0.020	0.283	0.063	0.601	0.000	0.022	0.010	1.000
⑧漏水被災度=地形点数 T	(④/Σ④)/⑦	0.000	0.000	0.848	0.540	1.024	0.000	5.073	0.000	1.000

④治水地形分類図と被災履歴を重ね合わせて漏水に対する被災度を算出

⑤治水地形分類の各地形区分に対して漏水に対する被災度を適用（地形点数）

⑥堤内地盤（堤防川裏のり尻から 20m までの領域）の任意の測量ポイントに対して地形点数と平均動水勾配の積（基礎地盤漏水ポテンシャル）を算出（図-3）

本検討においては、堤防被災箇所および平均動水勾配算出について、堤防延長方向に対して一定幅(20m)の領域で示している関係上、2.4 で示した各式の「延長」は、以後、「面積」に読み替えるものとした。また、被災履歴と治水地形分類との重ね合わせにおいて、同じ属性の組み合わせの領域について、領域内の平均動水勾配の最大値をもって、その領域の平均動水勾配の代表値とすることとした。

検討は、関東地方整備局管内の荒川で実施した。航空機レーザー測量、計画高水位等の必要なデータは関東地方整備局および管轄の各河川事務所よりご提供頂いた。

3.3 結果

荒川における被災内容別、地形別の被災面積との関係を表-7、表-7 から算出した各地形の出現率および地形点数を表-8 に示す。

荒川沿川の地形の約 6 割が氾濫平野、約 3 割が自然堤

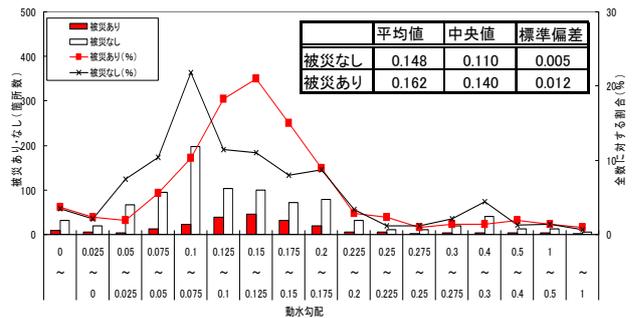


図-4 荒川における平均動水勾配の頻度分布

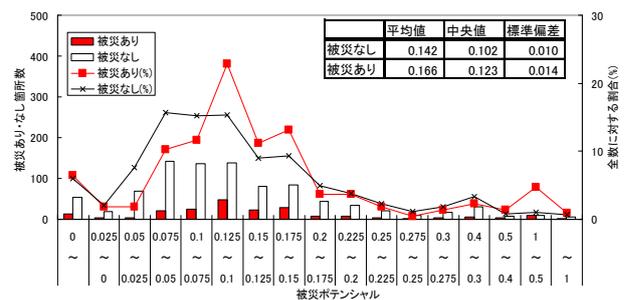


図-5 荒川における基礎地盤漏水ポテンシャルの頻度分布

防、約 6%が旧河道・落堀であり、これら 3 区分で全体の 94%を占める。漏水被災度の高い地形を見ると、河口付近の干拓地、次いで氾濫平野が高い。

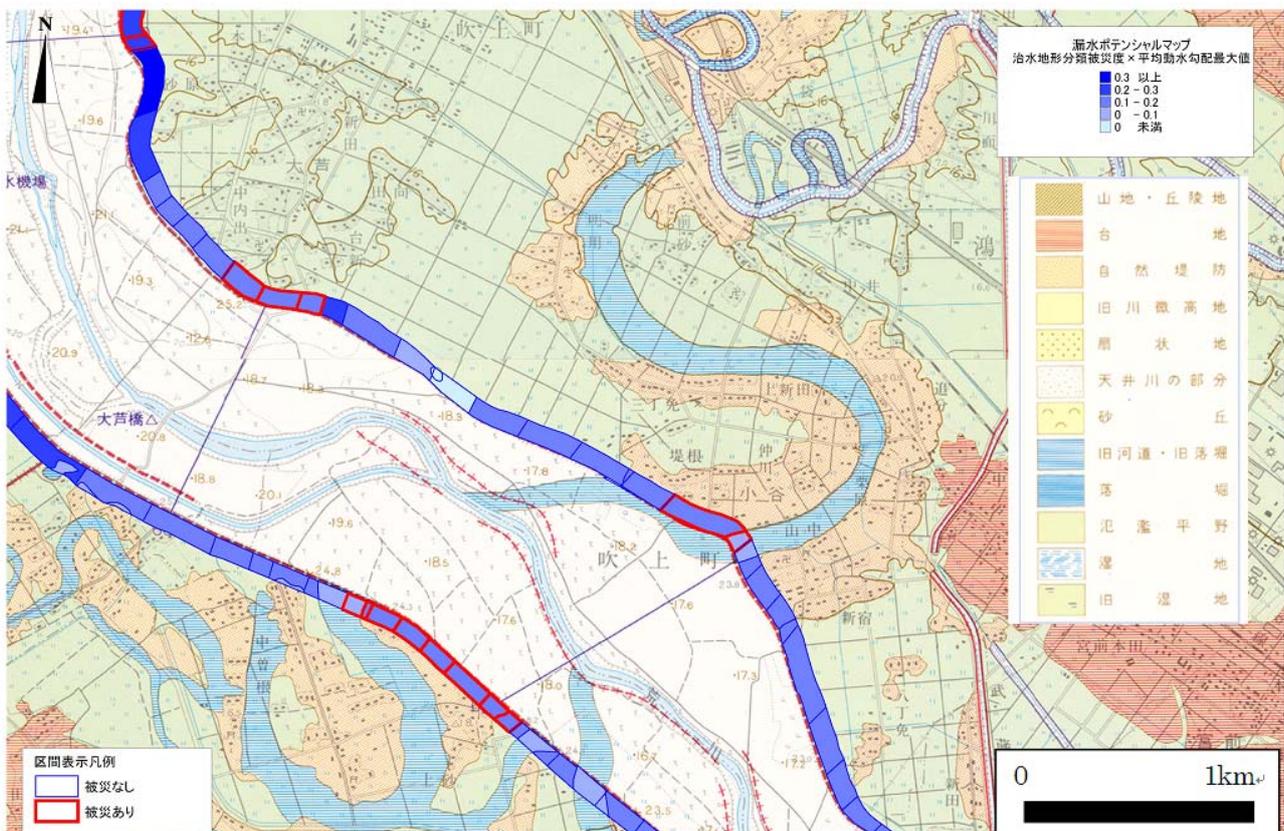


図-6 基礎地盤漏水ポテンシャル図の例

被災のありなし別の平均動水勾配および基礎地盤漏水ポテンシャル分布を図-4、5、基礎地盤漏水ポテンシャル図の例を図-6に示す。平均動水勾配の頻度分布（図-4）をみると、被災がある箇所が、被災がない箇所と比べて大きな平均動水勾配を持つことが分かる。基礎地盤漏水ポテンシャルの頻度分布（図-5）をみると、被災がある箇所が、被災がない箇所と比べてややポテンシャルが高いものの、平均動水勾配の頻度分布に比べて大きな差がないことが判る。基礎地盤漏水ポテンシャル指標については今後、検討を深める必要がある。

4. 空中写真を用いたデジタル標高モデル(DEM)の作成

5)

河川堤防の浸透に対する安全性評価において、地形分類結果が利用されているが、地形分類作業においては通常、地形図読図と実体視による空中写真判読および現地調査を併用する。実体視による空中写真判読においては地形の高低だけでなく画像の色調、明暗なども参考に地形の分類を行うが、正確な地盤高分布の情報があると判読の助けとなる。正確な地盤高分布に関する情報は、航空レーザー測量技術の普及により得られるが、人工改変前の地形について、高精度DEMを得る手法は一般化していない。そこで、過去に撮影された空中写真を用いてDEMを作成し、写真判読の補助ツールとしての適用性

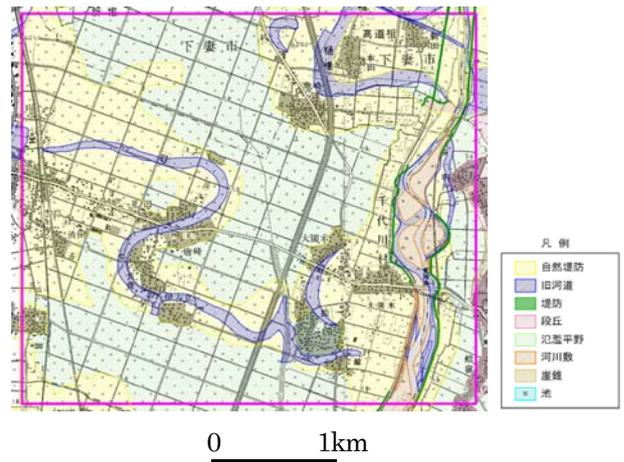


図-7 DEM作成範囲の地形分類図

(平野の微地形がどの程度表現されるか)を検証する。

4.1 DEM作成方法

作成対象地域は、小貝川中流部、常総市大園木付近とした。本地域には氾濫平野の中に旧河道および自然堤防が分布する（図-7）。

使用した空中写真は米軍 1947 年撮影（縮尺約 1/16,000）、国土地理院 1961 年撮影（縮尺約 1/10,000）、1964 年撮影（縮尺約 1/25,000）、1968 年撮影（縮尺約 1/20,000）および国際航業 2008 年撮影（縮尺約 1/8,000）を用い、これらをピクセルサイズ 10 μ m でスキャナーで読み取った。

DEM の作成はステレオマッチング法による完全自動

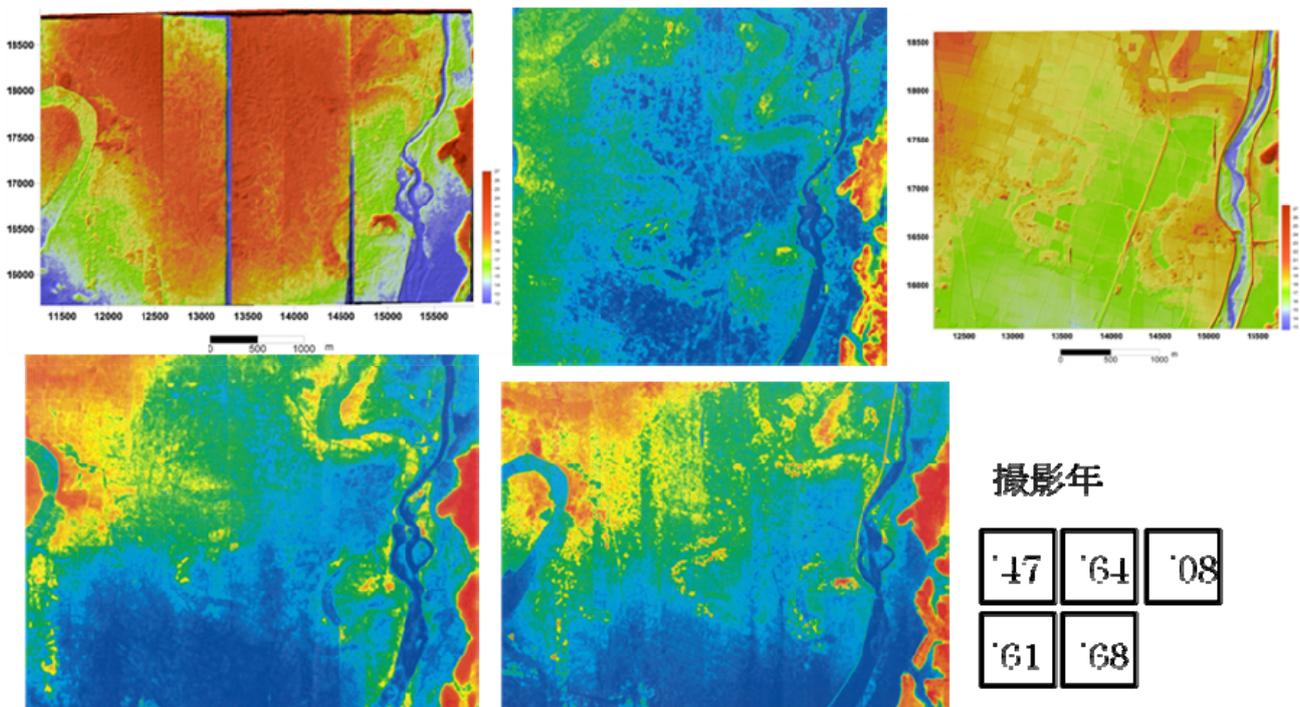


図-8 撮影時期の異なる空中写真から作成したDEM（ステレオマッチング法）

同一標高でも塗色が異なることに注意。

化処理とした。ステレオマッチング法は、ステレオペア写真の一方の格子点について、他方の写真上で画像の一致する箇所を自動抽出し、両写真の持つ視差を利用して格子点の標高分布を描く方法である。ほとんど自動処理で作製するため、迅速かつ安価で入手が可能と考えられる。DEMの作成にあたってはIntergraph社製のMicrostationデジタル図化機を用い、格子点間隔を5mとした。ステレオマッチングの後、隣接モデルの接合を行った。なお建物、樹木等の標高補正は行なわなかった。

また、地上基準点計測にあたっては、2008年撮影の写真についてオルソフォトを作成し、これを基準として過去の写真と対比可能性のある10点について現地で測量を行った。これらを用いてデータの吟味を行い、7~9点の地上基準点を採用した。空中三角測量の結果、2008年のみ、公共測量作業規定で規定する精度を満足した。

4.2 結果

作成したDEMを段彩図として示す(図-8)。

2008年撮影の写真は、田の区割りまで表現されており、最も精度良く作成できているが、地形改変により一部の地形が失われている。

1947年撮影の写真が最も撮影時期が古く、原地形を最もよく残していると考えられるが、写真の品質が悪く、地形を適切に表現できていない。

1961年撮影の写真は縮尺が大きく、精度良く作図されることが期待されたが、1964年もしくは1968年撮影のものの方が地形がよく表現されている部分もある(たとえば、写真中央やや左の旧河道と自然堤防)。1961年撮影の写真は複数の撮影コースの写真を合成して作成することによる誤差により、地形の再現性が低下している可能性があると考えられ、そのため、単モデルによる方が複数モデルを調整するより地形表現には適しているようである。

いずれにせよ、1960年代に撮影された写真は、いずれもよく地形が表現されており、平野部における微地形判読の補助ツールとしては十分な精度を持っていると言える。ただし、画面中央部のまだら模様の部分は、ステレオマッチングが適切にできなかった部分と考えられるので、判読時に留意が必要である。

4.3 自動化手法で作成したDEMの現場への適用

DEMの作成精度は写真の品質に大きく依存するため、品質の悪い米軍写真では利用が困難な場合があることが分かった。また、ステレオマッチングが不良の箇所に、特有のノイズが現れることがある。また、複数モデルの接合箇所に不整合が生じることがある。

上記を踏まえることで、空中写真から自動化手法によ

って作成したDEMは、過去の地形情報を客観的に把握するツールとして有効であると考えられる。

5. 堆積構造との関連性に着目した地形分類手法の検討

平野の地形は、平野を構成する堆積物の最表層の形であることから、地形と堆積構造とは密接な関わりがある。

一般に、平野の基礎地盤の性状を調査する方法として、ボーリング調査が用いられる。ボーリング調査を補完するものとして、サウンディング、物理探査のほか、地形情報等が利用されることもある。一方、地形情報は安価に面的に取得することが可能にもかかわらず、必ずしも有効に活用されていない。

そこで本研究では、より高い精度で3次元地盤構造の推定を行うために、堆積構造との関連性に着目した地形分類手法の検討を行った。

5.1 平野の地形分類試案

堆積構造との関連性に着目した、平野部の地形分類試案(表-9)を作成した。

河川堆積物との関連では、網状流路堆積物と関連が深いと考えられる「中州性微高地」、蛇行流路堆積物と関連

表-9 平野の地形分類試案

名称	備考	対応する治水地形分類図の凡例
地形境界線(明瞭)		—
地形境界線(不明瞭)		—
山地・丘陵・台地		山地・丘陵地 台地
崖線	概ね高さ2m以上のもの。	崖
氾濫原	現成の沖積面の一般面。	氾濫平野
自然堤防		自然堤防
中州性微高地	網状流路の中州など。扇状地に多い。	旧川微高地
緩斜面	主として台地崖下に分布。	—
旧微高地	河道改修や河道変遷により消失した微高地。	—
ポイントバー	蛇行河川の内岸に発達する弧状の高まりと低まり。	氾濫平野
氾濫堆積物分布域	河岸沿いにやや幅広く分布。地形をほとんど形成しない。(地形を形成するものは自然堤防)	—
砂嘴・砂州		砂丘
浜堤		
堤間低地		湿地
後背低地		
旧流路		—
旧河道(明瞭)		旧河道
旧河道(不明瞭)		
破堤堆積物分布域	河岸の1点から流出した堆積物の分布域	—
落堀・旧池沼		落堀 旧落堀
現河道・水面		—
堤防		完成堤防 暫定堤防 未改修堤防

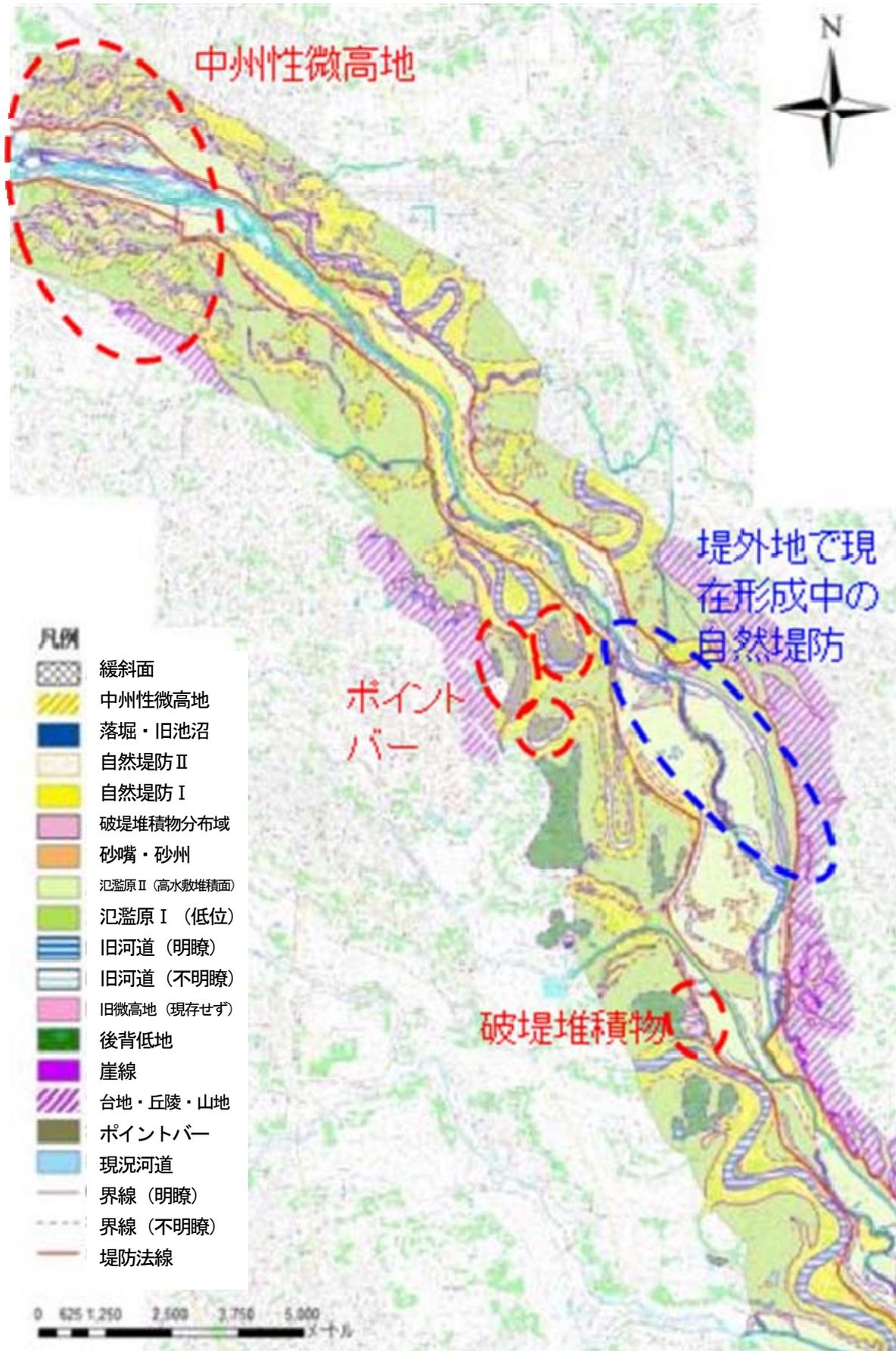


図-9 堆積構造との関連性に着目した、平野部の地形分類試案に基づく荒川の地形分類図 (部分)

などで形成される「破堤堆積物分布域」、「落堀・池沼」を設けた。海浜堆積物との関係については、「砂嘴・砂州」、「浜堤」、「堤間低地」などを設けた。

また、地形はその形成過程によっては異種の地形が漸移することもあることから、地形の境界線を「明瞭」と「不明瞭」に区分することとした。

5.2 平野の地形分類試案の試行

作成した地形分類試案を荒川（埼玉県および東京都）で試行した（図-9）。空中写真判読や地形図読図においては、純粋に地形の高低のみならず、土地利用、写真の濃淡、空間的な模様の特徴等から総合的に判断するべきとの考えに基づき、主な地形種について判読規準を整理した。

1) 自然堤防

自然堤防堆積物は、河道からあふれた洪水流が、急速に流速を減じることにより河道周辺に浮遊土砂を堆積させてできる地形である。河道の堆積物よりは細粒で、後背低地の堆積物よりは粗粒であると考えられる。荒川の判読における特徴は以下の通り。

- ・米軍空中写真で白っぽく写ることが多い。
- ・実体視で微高地が確認できる。
- ・畑、宅地として利用されていることが多い。
- ・高水敷にて現在形成中のものもある（写真-1②）。

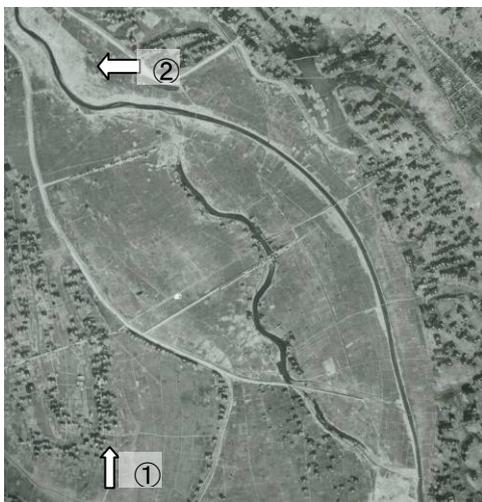


写真-1 自然堤防（吉見町付近）

①は一般的な自然堤防。②は高水敷に現在形成中のもの。

2) 中州性微高地

扇状地などの網状流路が、洪水によって流路を転じることで河道が放棄されることがある。このような河川の旧河道と旧河道の中州跡が中州性微高地である。中州は砂礫で構成されるが、表層は河道が放棄された後に堆積した細粒物質で覆われること

もある。荒川の判読における特徴は以下の通り。

- ・写真-2において、低水路に現地形が認められる。
- ・網状流路から蛇行流路への移行帯では、中州性微高地の上を蛇行流路の堆積物（自然堤防）が被覆している可能性があり、不明瞭となっている。

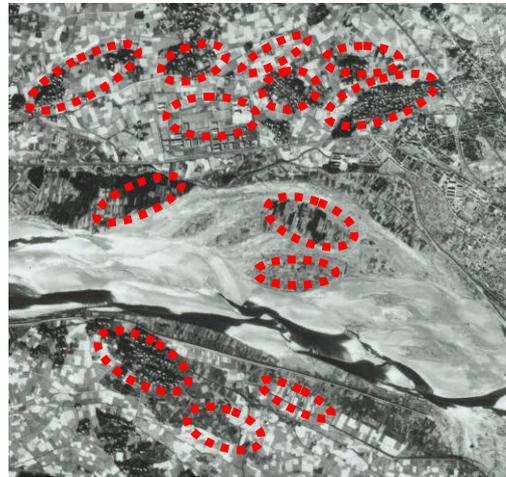


写真-2 中州性微高地（熊谷市付近）

赤点線は紡錘形の高まり。

3) ポイントバー（または突州、寄州）

蛇行河川の外岸側は水深が深く、流速が早いことから浸食が進む。一方、内岸側は水深が浅く堆積が進む。蛇行河川の内岸側に、流下方向へ延びるように形成される州がポイントバーである。流下方向に直行する断面で見ると、水平ではなく外岸側に傾斜する方向で堆積する。ポイントバー堆積物は後背低地に比べて粗粒な堆積物で構成されると考えられる。荒川の判読における特徴は以下の通り。

- ・空中写真での線状地形の判読は困難だが、土地利用の配列（特に旧版地形図の情報）、周辺地盤の比高（自然堤防未満・旧河道以上）等で総合的に判断ができる（図-10）

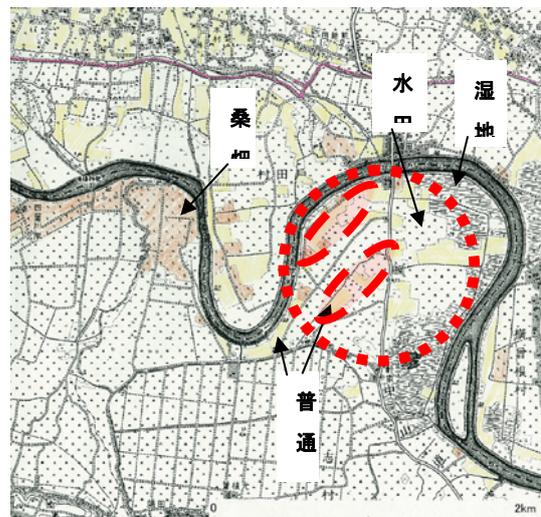


図-10 ポイントバー（東京都北区付近）

赤破線部をポイントバーと推定する。

（陸地測量部 1/2 万地形図 白子を使用）

- ・本川近くでは、現在の荒川による堆積物で被覆もしくは、洪水形態の違いから自然堤防が形成されている可能性がある。

荒川における試行の結果、河川堆積物に関連が深いと考えられる地形区分が抽出できた。ただし、海岸地形および風成の地形については荒川沿川では顕著な例が存在せず、検証ができなかった。今後は海浜地形が発達する地域で試行を行うとともに、各種の地形と堆積物との関係を調査する必要がある。

6. 微地形と堆積構造を考慮した自然堤防周辺の地質構造の推定

堤防周辺の基礎地盤の性状把握は、ボーリング調査、サウンディング調査に基づき地質構造を推定することが多い。しかしながら通常作成されている地質断面図を見ると、同一の層相を側方に連続させるように作成したものが多く、堆積学的に合理性のある推定を行っていないことが多い。

本研究では、離散データであるボーリング資料に加えて、連続データとして得られる地形学的情報および堆積学的な知見を踏まえた、自然堤防周辺の地質構造の推定を試みた。

6.1 対象地域および調査方法

対象地域は、自然堤防が良く発達し、ボーリング資料が豊富な、埼玉県比企郡吉見町古名付近(図-10)を選定した。本地域は北西から南東方向に流下する荒川の氾濫原であり、荒川の蛇行跡の地形(旧河道と自然堤防)が顕著である。またこの付近では旧河道と自然堤防の地形を横断する方向に、ボーリング資料が延長約500mに渡り約50m間隔で存在する。さらに、本地域においては数本のボーリングコアについての観察経験があることから、

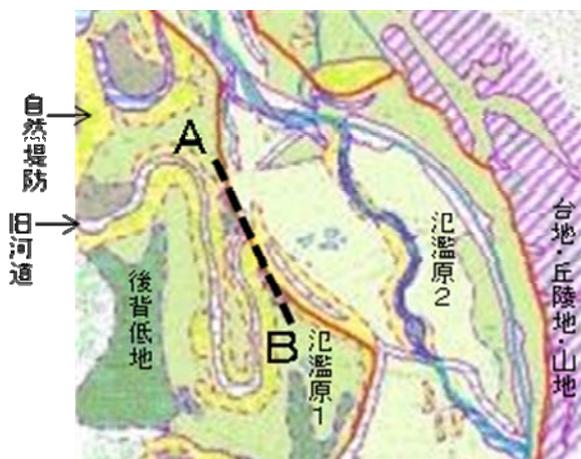


図-11 埼玉県吉見町古名付近の地形分類図

A-Bは地質断面図(図-12)の位置を示す。凡例は図-9を参照。

ら、地形と堆積物との関係についてある程度把握している。

調査方法は、空中写真判読による地形分類図を作成すると共に、自然堤防周辺のボーリング資料を収集した。そして、地形学的情報と堆積学的情報を踏まえて自然堤防周辺の地質断面図を作成した。

空中写真は米軍撮影の縮尺約4万分の1白黒写真および国土地理院撮影の縮尺約2万分の1白黒写真を用いた。また、ボーリング資料の提供及び地質断面図の作成について国土交通省関東地方整備局荒川上流河川事務所の協力を得た。

6.2 結果

図-11に地形分類図、図-12に作成した地質断面図を示す。地形区分としては、旧河道、自然堤防、および後背低地が存在した。本地域における空中写真判読の判読基準を表-10に示す。地質断面図の区分としては、従来、「礫」「砂」「シルト」「粘土」など、土質構成によることが多い。しかしながらこのような区分は、地質の成因と直接関係がないことがあり、地質の成因に根ざした推定にはなっていない。本研究では、ボーリング資料の記載および地形分類を元に、堆積環境に基づく地質区分を試みた。地質区分と推定の根拠、土質との対応を表-11に示す。

この付近の地形は荒川堤防の堤外地側の地盤高が、堤防内地盤高より約3m高い。これは、江戸時代以前より堤防が築かれ、河川が堤外地に長期間固定化された結果、堤外地側に堆積が進んだものと考えられる。そこで、地質断面図においては、表層約3mを「堤内地の堆積物」とした。地形区分では氾濫原2に対応する。また、昭和57年以降、平成14年までの間に堤外地側に堤防の拡築がおこなわれたことから、一部のボーリングの孔口標高が3m程度高くなっている。標高が高くなった部分については「堤体」と表記した。

放棄河道充填堆積物は、基本的に地形分類結果に基づき旧河道にあたる部分で腐植の存在が認められるものとした。

表-10 本地域における空中写真判読規準

地形区分	平面形	比高	色調その他
旧河道	蛇行河川の形状で連続	周辺よりやや低い	周辺よりやや暗色
自然堤防	河川周辺部に比較的連続的に分布	周辺よりやや高いことが多い	淡色(土壌水分が少ないため)
氾濫原1		平坦	低地一般面
氾濫原2	堤外地に存在	氾濫原1より高い	築堤により堆積
後背低地	旧河道、自然堤防に当てはまらないもの	平坦、あるいはやや窪地をなす	暗色を示す部分が多い

表-11 本地域における地質区分

堆積環境に基づく地質区分	推定の根拠	土質との対応
堤体	築堤履歴	様々
堤内地の堆積物	堤外地と堤内地の地盤高の差	シルト～砂質シルト
放棄河道充填堆積物	主に旧河道地形と堆積物中の腐植の存在	腐植混じりのシルト～砂混じりシルト
後背低地堆積物	主に後背低地の地形および堆積物の粒度がやや細粒であること	有機質土、粘土、シルト、細砂を挟むこともある
ポイントバー堆積物もしくは自然堤防堆積物	後背低地堆積物より相対的に粗粒であること、ポイントバー堆積物は蛇行の内側に位置、自然堤防堆積物は自然堤防地形の箇所存在	シルト、細砂およびその互層
蛇行河川流路堆積物	やや粗い砂で構成	中粒砂～礫混じり砂
網状流路堆積物	礫を主体に構成	礫層、砂礫層

後背低地堆積物および自然堤防堆積物、ポイントバー堆積物は、主に堆積物の粒度および堆積場の空間的位置によって区分した。近傍のボーリングコアの詳細観察からは、自然堤防地形の表層部に粘土分がやや多く、植物根が多数認められる湿地的な堆積物が認められており、これらの堆積物の正確な区分には、ボーリングコア観察が必要であると考えられる。従って、本区分については不確かな部分が含まれている。

蛇行流路堆積物および網状流路堆積物は、それぞれやや粗い砂および礫で特徴づけられるものと解釈した。この地域で特徴的なこととして、地形分類において蛇行流路跡が認められるが、予想に反してこれに対応した粗粒な河床堆積物が認められず、その代わりに放棄河道を充填する腐植質の堆積物が認められたことである。これは

この蛇行流路跡をなすかつての河川がほとんど堆積物を運び得ないような河川（無能河川という）であった可能性を示唆する。この流路跡と、その地下（標高0～12m）に存在する蛇行河川流路堆積物との関係は明らかではないが、少なくとも地形からこれらの堆積物の存在は推定することはできない。地形から推定できる堆積物はごく表層に限られると考えるべきであろう。

6.3 堤防被災と地盤構造との関係

本地域では、外水位が上昇した際に川裏のりすべりや堤脚水路で噴砂が生じた。調査の結果、本地域では被圧地下水が常時存在するとともに、降雨時に地下水頭が上昇し、噴砂がたびたび生じていることが分かった。

噴砂や裏のりすべりが生じた場所は、地形的には後背低地、自然堤防、旧河道と地形が複雑に変化する場所にあたる。また地質的には、表層の粘性土の厚さが南から北に向かって薄くなる場所にあたる。自然堤防の中心域は粘性土がないか非常に薄く、地下水は比較的スムーズに湧出しているものと思われる。一方、後背低地の中心域では粘性土が厚く、地下水頭が上昇しても湧出しにくいと考えられる。粘性土が中程度の厚さで存在する領域で、地下水頭が上昇した際に地盤が破壊され、噴砂や裏のりすべりが起こったものと推定できる。すなわち地形や堆積構造に基づく地質構造推定は、堤防被災メカニズムの推定に有効であると考えられる。

7. 堤防の存在が基礎地盤漏水に与える影響

堤防の存在そのものが、基礎地盤漏水の安全性評価上なんらかの影響を与える可能性がある。そこで本論では、基礎地盤の土質や構造、堤体の土質や規模の違いによる、基礎地盤の浸透に対する安全性評価を行い、影響評価を

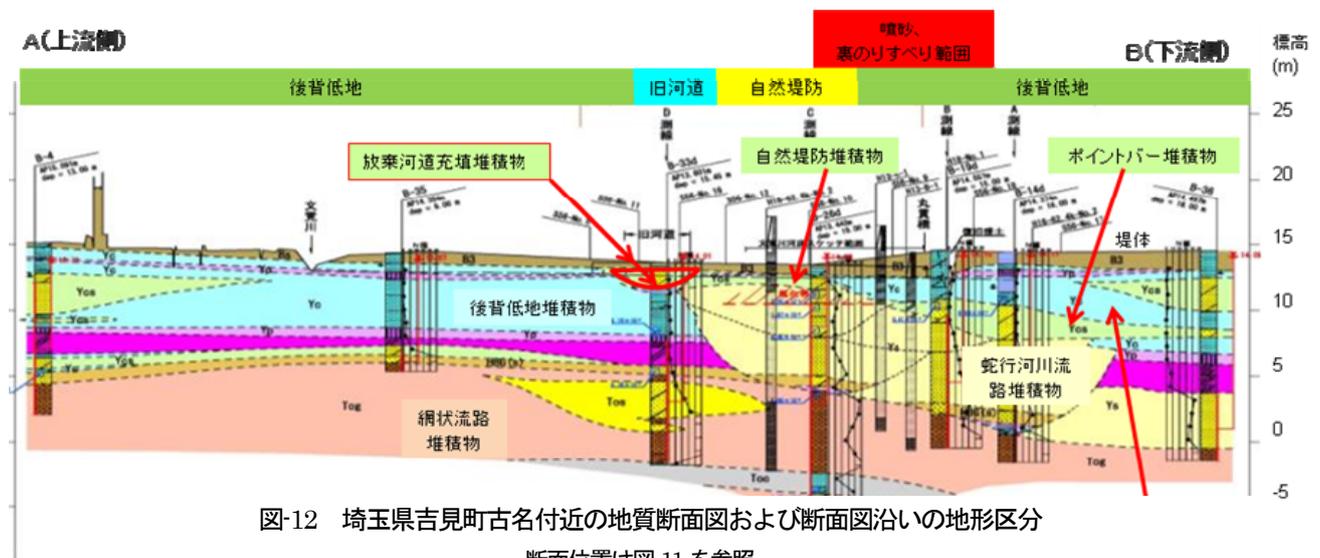


図-12 埼玉県吉見町古名付近の地質断面図および断面図沿いの地形区分
断面位置は図-11を参照。

行った。

7.1 検討方法

河川堤防の浸透に対する安全性評価で通常実施される、2次元浸透流解析による、堤体川裏のり尻付近における基礎地盤の局所動水勾配および揚圧力のシミュレーションを各種の条件で実施し、比較した。

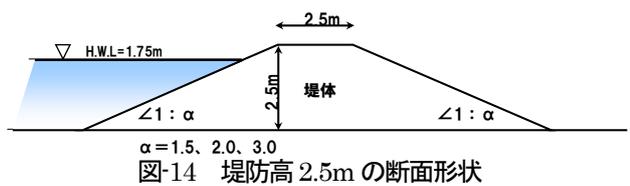
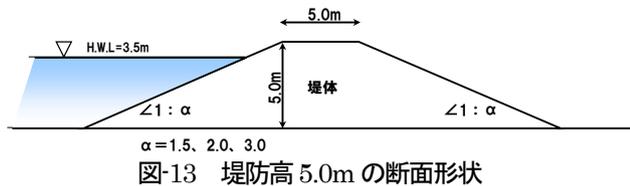
(1) 浸透流解析条件

基本的な方法は、「河川堤防の構造検討の手引き」⁷⁾に準拠し、非定常の飽和・不飽和浸透流計算を行った。

① 堤防形状

検討を行った断面の堤防高は5.0mおよび2.5mとし、それぞれのり面勾配が1.5割、2.0割、3.0割の3パターンとし、計6断面で検討を行った。

図-13に堤防高が5.0mの断面形状、図-14に堤防高が2.5mの断面形状を示す。



② 基礎地盤形状

基礎断面形状は、表層に粘性土がある場合と表層に粘性土がない場合の2パターンとした。

表層に粘性土がある場合は、その層厚は1mとした。

なお、基礎地盤をモデル化する範囲は、基礎地盤の上面から10mとした。

図-15に表層に粘性土がない場合の基礎地盤形状を、

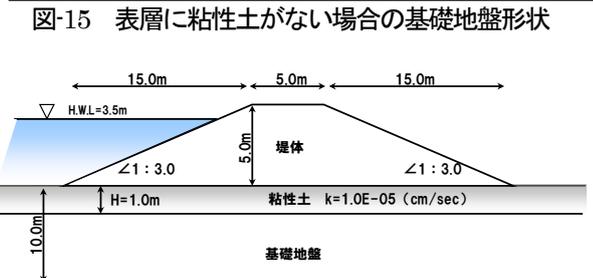
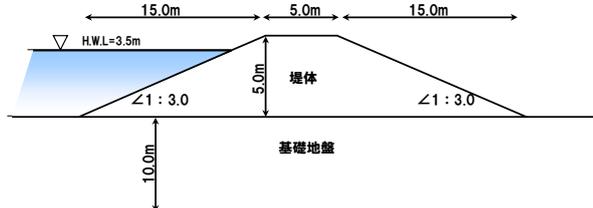


図-16 に表層に粘性土がある場合の基礎地盤形状を示す。

③ 地盤定数

浸透流解析に必要な地盤定数は以下のように設定した。

(i) 透水係数

透水係数は以下のように設定した。

- 礫： 透水係数 1.0×10^{-1} (cm/s)
- 礫質土： 透水係数 1.0×10^{-2} (cm/s)
- 砂： 透水係数 1.0×10^{-3} (cm/s)
- 砂質土： 透水係数 1.0×10^{-4} (cm/s)
- 粘性土： 透水係数 1.0×10^{-5} (cm/s)

(ii) 不飽和特性

各土質の不飽和浸透特性は文献⁷⁾に従い、土質分類ごとに表-12、表-13に示す関係を用い、表-14のように設定した。

表-12 みかけ体積含水率 (θ) と比透水係数 (k_r) の関係

① 礫質土:[G], [G-F], [GF] 砂質土:[S], [S-F], [SF]		② 粘性土:[M], [C]	
体積含水率 θ	比透水係数 k_r	体積含水率 θ	比透水係数 k_r
0.000	0.000	0.000	0.000
0.010	0.010	0.005	0.003
0.020	0.020	0.010	0.006
0.030	0.030	0.015	0.010
0.040	0.040	0.020	0.015
0.050	0.050	0.025	0.020
0.060	0.060	0.030	0.030
0.070	0.080	0.035	0.040
0.080	0.090	0.040	0.050
0.090	0.110	0.045	0.070
0.100	0.030	0.050	0.090
0.110	0.160	0.055	0.100
0.120	0.190	0.060	0.140
0.130	0.230	0.065	0.180
0.140	0.290	0.070	0.230
0.150	0.360	0.075	0.290
0.160	0.450	0.080	0.360
0.170	0.550	0.085	0.460
0.180	0.650	0.090	0.590
0.190	0.800	0.095	0.750
0.200	1.000	0.100	1.000

(「河川堤防の構造検討の手引き」⁷⁾による)

表-13 みかけ体積含水率 (θ) と負の圧力水頭 (ψ) の関係

③ 礫質土:[G], [G-F], [GF] 砂質土:[S], [S-F]		④ 砂質土:[SF]		⑤ 粘性土:[M], [C]	
体積含水率 θ	圧力水頭 ψ	体積含水率 θ	圧力水頭 ψ	体積含水率 θ	圧力水頭 ψ
0.049	12.00	0.119	12.00	0.059	12.00
0.050	1.90	0.120	1.90	0.060	1.90
0.056	1.50	0.123	1.50	0.062	1.50
0.068	1.00	0.129	1.00	0.066	1.00
0.078	0.80	0.135	0.80	0.068	0.80
0.084	0.70	0.138	0.70	0.070	0.70
0.090	0.60	0.141	0.60	0.072	0.60
0.100	0.50	0.146	0.50	0.074	0.50
0.112	0.40	0.153	0.40	0.076	0.40
0.126	0.30	0.160	0.30	0.081	0.30
0.136	0.25	0.166	0.25	0.084	0.25
0.150	0.20	0.173	0.20	0.088	0.20
0.164	0.15	0.181	0.15	0.092	0.15
0.178	0.10	0.188	0.10	0.095	0.10
0.190	0.05	0.195	0.05	0.098	0.05
0.200	0.00	0.200	0.00	0.100	0.00

(「河川堤防の構造検討の手引き」⁷⁾による)

表-14 設定した不飽和特性

土質	不飽和特性	
	$\theta - Kr$	$\theta - \psi$
	表-12	表-13
礫	①	③
礫質土	①	③
砂	①	③
砂質土	①	④
粘性土	②	⑤

(iii) 比貯留係数 S_s

比貯留係数は、文献⁸⁾に従い、以下のように設定した。

- 礫、礫質土、砂、砂質土 $S_s = 1.0 \times 10^{-4}$ (ℓ/m)
- 粘性土 $S_s = 1.0 \times 10^{-3}$ (ℓ/m)

④ 外力条件

浸透流解析に必要な降雨波形および河川水位波形は堤防高毎に図-17および図-18のように設定した。

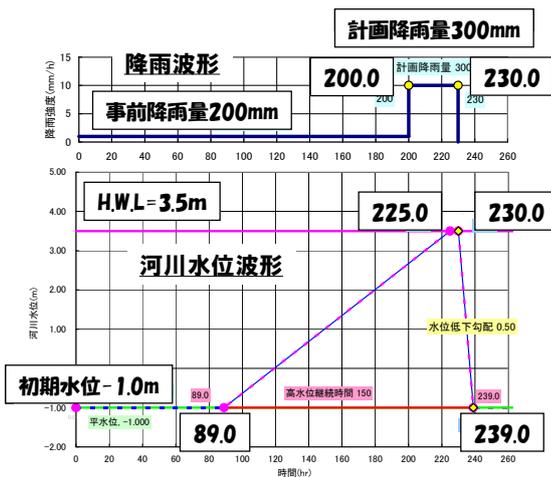


図-17 堤防高 5.0m の場合の外力条件

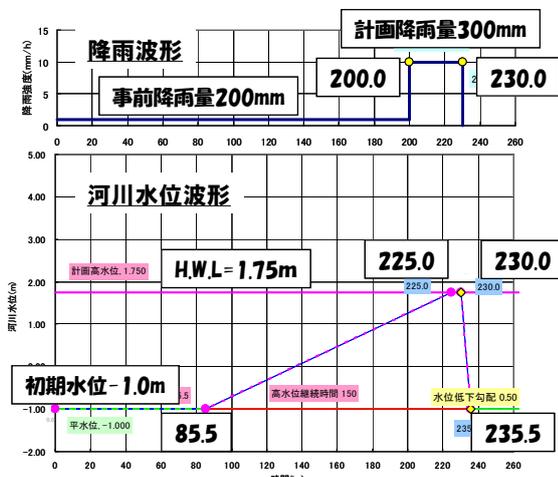


図-18 堤防高 2.5m の場合の外力条件

(2) 評価項目

浸透流解析で得られた堤防川裏のり尻における圧力水頭を用いて、局所動水勾配および揚圧力を求めた。

<局所動水勾配の判定>

裏のり尻近傍の堤内地盤表層が粘性土で被覆されていない場合の局所動水勾配による判定は以下による (図-19)。

鉛直方向の局所動水勾配

$$iv = \Delta\phi / dv$$

($\Delta\phi$: 節点間の圧力水頭差, dv : 節点間の鉛直距離)

水平方向の局所動水勾配

$$ih = \Delta\phi / dh$$

($\Delta\phi$: 節点間の圧力水頭差, dh : 節点間の水平距離)

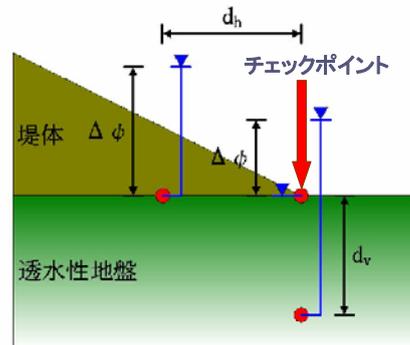


図-19 局所動水勾配の算出の考え方

<揚圧力の判定>

裏のり尻近傍の堤内地盤表層が粘性土で被覆されている場合の揚圧力による判定は以下による (図-20)。

$$G/W = (\rho \cdot H) / (\rho_w \cdot P)$$

G: 被覆層の重量 (kN/m²)

W: 被覆層底面に作用する揚圧力 (kN/m²)

ρ : 被覆層の密度 (kN/m³)

H: 被覆層の厚さ (m)

ρ_w : 水の密度 (kN/m³)

P: 被覆層底面の圧力水頭

(全水頭と位置水頭の差) (m)

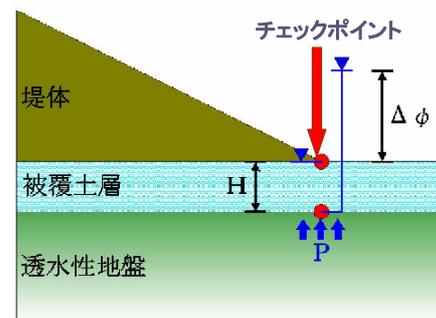


図-20 揚圧力の算出の考え方

(3)解析パターン

検討を行う断面の計 6 断面についてそれぞれ表-15 および表-16 に示す 45 ケース (表層に粘性土がない場合 25 ケース、表層に粘性土がある場合 20 ケース)、総計 270 ケースの浸透流解析を実施した。

表-15 表層に粘性土がない場合の解析パターン一覧

基礎地盤	堤体材料				
	礫 k=1.0E-01 (cm/s)	礫質土 k=1.0E-02 (cm/s)	砂 k=1.0E-03 (cm/s)	砂質土 k=1.0E-04 (cm/s)	粘性土 k=1.0E-05 (cm/s)
基礎地盤	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
基礎地盤	A-6	A-7	A-8	A-9	A-10
基礎地盤	A-11	A-12	A-13	A-14	A-15
基礎地盤	A-16	A-17	A-18	A-19	A-20
基礎地盤	A-21	A-22	A-23	A-24	A-25

表-16 表層に粘性土がある場合の解析パターン一覧

基礎地盤	堤体材料				
	礫 k=1.0E-01 (cm/s)	礫質土 k=1.0E-02 (cm/s)	砂 k=1.0E-03 (cm/s)	砂質土 k=1.0E-04 (cm/s)	粘性土 k=1.0E-05 (cm/s)
基礎地盤	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5
基礎地盤	B-6	B-7	B-8	B-9	B-10
基礎地盤	B-11	B-12	B-13	B-14	B-15
基礎地盤	B-16	B-17	B-18	B-19	B-20

7.2 解析結果

解析結果を堤防高毎に整理して以下に示す。

1) 堤防高 H=5.0m

(1)局所動水勾配 (水平)

堤防高 H=5.0m における局所動水勾配 (水平) の解析結果 (最大値) を表-17 に示す。

解析結果から求まる堤防高 H=5.0m における局所動水勾配 (水平) は、以下のような特徴がある。

- ①堤防のり面勾配が小さくなるほど、局所動水勾配の値は大きくなる。(安全性が低下する)
- ②のり面勾配が 2 割、1.5 割の場合は堤体と基礎地盤の土質が同じ場合に相対的に値が大きくなる傾向がある。
- ③のり面勾配が 3 割の場合は、基礎地盤より堤体の透水係数が 1 桁低い場合に値が大きくなる傾向がある。(基礎地盤が砂質土および粘性土は除く)
- ④特に堤体および基礎地盤の土質が砂・砂質土の場合に値が高くなる傾向がある。
- ⑤堤体が粘性土の場合は相対的に値が小さい。

表-17 堤防高 H=5.0m における局所動水勾配 (水平) の解析結果

のり勾配3割		のり勾配2割		のり勾配1.5割		凡例
局所動水勾配 水平 (5m, 3割)		局所動水勾配 水平 (5m, 2割)		局所動水勾配 水平 (5m, 1.5割)		
基礎地盤の材料と透水係数 (cm/s)	堤体の材料と透水係数 (cm/s)					
	礫	礫質土	砂	砂質土	粘性土	
礫 1.0E-01	0.37	0.37	0.35	0.33	0.33	0.70~0.74
礫質土 1.0E-02	0.34	0.38	0.44	0.36	0.33	0.65~0.69
砂 1.0E-03	0.33	0.34	0.39	0.44	0.33	0.60~0.64
砂質土 1.0E-04	0.33	0.33	0.34	0.39	0.17	0.55~0.59
粘性土 1.0E-05	0.33	0.33	0.33	0.34	0.33	0.50~0.54
礫 1.0E-01	0.53	0.48	0.45	0.43	0.43	0.45~0.49
礫質土 1.0E-02	0.51	0.55	0.54	0.45	0.43	0.40~0.44
砂 1.0E-03	0.50	0.51	0.58	0.54	0.43	0.35~0.39
砂質土 1.0E-04	0.50	0.50	0.51	0.57	0.33	0.30~0.34
粘性土 1.0E-05	0.50	0.50	0.50	0.51	0.45	~0.29

表-18 堤防高 H=5.0m における局所動水勾配 (鉛直) の解析結果

のり勾配3割		のり勾配2割		のり勾配1.5割		凡例
局所動水勾配 鉛直 (5m, 3割)		局所動水勾配 鉛直 (5m, 2割)		局所動水勾配 鉛直 (5m, 1.5割)		
基礎地盤の材料と透水係数 (cm/s)	堤体の材料と透水係数 (cm/s)					
	礫	礫質土	砂	砂質土	粘性土	
礫 1.0E-01	0.30	0.26	0.24	0.23	0.23	0.55~0.59
礫質土 1.0E-02	0.34	0.33	0.31	0.24	0.23	0.50~0.54
砂 1.0E-03	0.35	0.37	0.37	0.31	0.22	0.45~0.49
砂質土 1.0E-04	0.35	0.37	0.36	0.36	0.08	0.40~0.44
粘性土 1.0E-05	0.35	0.37	0.36	0.37	0.18	0.35~0.39
礫 1.0E-01	0.39	0.32	0.30	0.30	0.29	0.30~0.34
礫質土 1.0E-02	0.45	0.42	0.37	0.31	0.29	0.25~0.29
砂 1.0E-03	0.46	0.47	0.48	0.37	0.29	0.20~0.24
砂質土 1.0E-04	0.46	0.48	0.48	0.46	0.20	0.15~0.19
粘性土 1.0E-05	0.46	0.48	0.48	0.48	0.20	0.10~0.14

表-19 堤防高 H=5.0m における揚圧力の解析結果一覧表

のり勾配3割		のり勾配2割		のり勾配1.5割		凡例
揚圧力 (5m, 3割)		揚圧力 (5m, 2割)		揚圧力 (5m, 1.5割)		
基礎地盤の材料と透水係数 (cm/s)	堤体の材料と透水係数 (cm/s)					
	礫	礫質土	砂	砂質土	粘性土	
礫 1.0E-01	0.85	0.85	0.86	0.86	0.86	0.65~0.69
礫質土 1.0E-02	0.77	0.76	0.77	0.78	0.83	0.70~0.74
砂 1.0E-03	0.74	0.72	0.74	0.75	0.88	0.75~0.79
砂質土 1.0E-04	0.94	0.91	0.94	0.94	1.34	0.80~0.84
礫 1.0E-01	0.81	0.81	0.82	0.82	0.82	0.85~0.89
礫質土 1.0E-02	0.74	0.74	0.74	0.75	0.78	0.90~0.94
砂 1.0E-03	0.71	0.70	0.70	0.72	0.81	0.95~0.99
砂質土 1.0E-04	0.88	0.86	0.87	0.88	1.19	1.00~1.04
粘性土 1.0E-05						1.05~1.09
						1.10~

表-20 堤防高 H=2.5m における局所動水勾配（水平）の解析結果

のり勾配3割						のり勾配2割						のり勾配1.5割						凡例				
局所動水勾配 水平 (2.5m, 3割)		堤体の材料と透水係数 (cm/s)					局所動水勾配 水平 (2.5m, 2割)		堤体の材料と透水係数 (cm/s)					局所動水勾配 水平 (2.5m, 1.5割)		堤体の材料と透水係数 (cm/s)						
		礫	礫質土	砂	砂質土	粘性土			礫	礫質土	砂	砂質土	粘性土			礫	礫質土		砂	砂質土	粘性土	
基礎地盤の材料と透水係数 (cm/s)	礫	1.0E-01	0.34	0.31	0.29	0.28	0.28	礫	1.0E-01	0.47	0.38	0.36	0.35	0.35	礫	1.0E-01	0.54	0.43	0.41	0.40	0.40	0.70~0.74
	礫質土	1.0E-02	0.34	0.36	0.37	0.30	0.28	礫質土	1.0E-02	0.50	0.49	0.44	0.37	0.35	礫質土	1.0E-02	0.62	0.58	0.49	0.41	0.40	0.65~0.69
	砂	1.0E-03	0.33	0.34	0.38	0.39	0.30	砂	1.0E-03	0.49	0.50	0.55	0.47	0.37	砂	1.0E-03	0.63	0.64	0.68	0.53	0.41	0.60~0.64
	砂質土	1.0E-04	0.33	0.33	0.34	0.38	0.39	砂質土	1.0E-04	0.49	0.50	0.51	0.56	0.47	砂質土	1.0E-04	0.63	0.64	0.67	0.69	0.53	0.55~0.59
	粘性土	1.0E-05	0.33	0.33	0.33	0.34	0.36	粘性土	1.0E-05	0.49	0.50	0.50	0.51	0.52	粘性土	1.0E-05	0.63	0.64	0.66	0.67	0.69	0.50~0.54

表-21 堤防高 H=2.5m における局所動水勾配（鉛直）の解析結果

のり勾配3割						のり勾配2割						のり勾配1.5割						凡例				
局所動水勾配 鉛直 (2.5m, 3割)		堤体の材料と透水係数 (cm/s)					局所動水勾配 鉛直 (2.5m, 2割)		堤体の材料と透水係数 (cm/s)					局所動水勾配 鉛直 (2.5m, 1.5割)		堤体の材料と透水係数 (cm/s)						
		礫	礫質土	砂	砂質土	粘性土			礫	礫質土	砂	砂質土	粘性土			礫	礫質土		砂	砂質土	粘性土	
基礎地盤の材料と透水係数 (cm/s)	礫	1.0E-01	0.25	0.21	0.20	0.19	0.19	礫	1.0E-01	0.30	0.25	0.24	0.24	0.24	礫	1.0E-01	0.34	0.29	0.28	0.27	0.27	0.55~0.59
	礫質土	1.0E-02	0.28	0.27	0.25	0.20	0.19	礫質土	1.0E-02	0.35	0.32	0.29	0.25	0.24	礫質土	1.0E-02	0.40	0.36	0.32	0.28	0.27	0.50~0.54
	砂	1.0E-03	0.29	0.31	0.33	0.27	0.20	砂	1.0E-03	0.36	0.38	0.41	0.31	0.25	砂	1.0E-03	0.41	0.43	0.46	0.34	0.28	0.45~0.49
	砂質土	1.0E-04	0.29	0.32	0.34	0.34	0.27	砂質土	1.0E-04	0.36	0.39	0.44	0.42	0.31	砂質土	1.0E-04	0.41	0.44	0.51	0.47	0.34	0.40~0.44
	粘性土	1.0E-05	0.29	0.32	0.34	0.34	0.26	粘性土	1.0E-05	0.36	0.39	0.44	0.44	0.36	粘性土	1.0E-05	0.41	0.44	0.51	0.52	0.47	0.35~0.39

表-22 堤防高 H=2.5m における揚圧力の解析結果

のり勾配3割						のり勾配2割						のり勾配1.5割						凡例				
揚圧力 (2.5m, 3割)		堤体の材料と透水係数 (cm/s)					揚圧力 (2.5m, 2割)		堤体の材料と透水係数 (cm/s)					揚圧力 (2.5m, 1.5割)		堤体の材料と透水係数 (cm/s)						
		礫	礫質土	砂	砂質土	粘性土			礫	礫質土	砂	砂質土	粘性土			礫	礫質土		砂	砂質土	粘性土	
基礎地盤の材料と透水係数 (cm/s)	礫	1.0E-01	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	礫	1.0E-01	1.19	1.19	1.18	1.19	1.19	礫	1.0E-01	1.19	1.19	1.18	1.19	1.19	0.65~0.69
	礫質土	1.0E-02	1.06	1.06	1.05	1.05	1.07	礫質土	1.0E-02	1.06	1.05	1.05	1.05	1.06	礫質土	1.0E-02	1.05	1.05	1.05	1.05	1.06	0.70~0.74
	砂	1.0E-03	0.97	0.95	0.93	0.94	0.98	砂	1.0E-03	0.95	0.95	0.92	0.93	0.96	砂	1.0E-03	0.95	0.94	0.92	0.93	0.95	0.75~0.79
	砂質土	1.0E-04	1.10	1.07	1.03	1.03	1.09	砂質土	1.0E-04	1.07	1.05	0.99	1.00	1.05	砂質土	1.0E-04	1.05	1.03	0.98	0.99	1.04	0.80~0.84
	粘性土							粘性土							粘性土							0.85~0.89

(2)局所動水勾配（鉛直）

堤防高 H=5.0m における局所動水勾配（鉛直）の解析結果（最大値）を表-18 に示す。解析結果から求まる堤防高 H=5.0m における局所動水勾配（鉛直）は、以下のような特徴がある。

- ①堤防のり面勾配が小さくなるほど、局所動水勾配の値は大きくなる。（安全性が低下する）
- ②相対的に値が大きくなる範囲は、各のり面勾配とも概ね同じである。
- ③基礎地盤より堤体の透水係数が小さくなると相対的に値が小さくなる傾向がある。
- ④堤体が粘性土の場合は、相対的に値は小さくなる。

(3)揚圧力

堤防高 H=5.0m における揚圧力の解析結果（最小値）を表-19 に示す。解析結果から求まる堤防高 H=5.0m における揚圧力は、以下のような特徴がある。

- ①堤防のり面勾配が小さくなるほど、揚圧力の値は小さくなる。（安全性が低下する）
- ②堤体の土質にかかわらず、基礎地盤が礫質土および砂

の場合に揚圧力が小さくなる傾向がある。（堤体が粘性土の場合は除く）

- ③基礎地盤が砂質土の場合、相対的に値は大きくなる。

2) 堤防高 H=2.5m

(1)局所動水勾配（水平）

堤防高 H=2.5m における局所動水勾配（水平）の解析結果（最大値）を表-20 に示す。

解析結果から求まる堤防高 H=2.5m における局所動水勾配（水平）は、以下のような特徴がある。

- ①堤防のり面勾配が小さくなるほど、局所動水勾配の値は大きくなる。（安全性が低下する）
- ②のり面勾配が 2 割、1.5 割の場合は堤体と基礎地盤の土質が同じ場合に相対的に値が大きくなる傾向がある。（基礎地盤が礫質土の場合は除く）
- ③のり面勾配が 3 割の場合は、基礎地盤より堤体の透水係数が 1 桁低い場合に値が大きくなる傾向がある。
- ④特に堤体および基礎地盤の土質が砂・砂質土の場合に値が高くなる傾向がある。
- ⑤基礎地盤が礫の場合は相対的に値は小さい。

(2)局所動水勾配（鉛直）

堤防高 $H=2.5\text{m}$ における局所動水勾配（鉛直）の解析結果（最大値）を表-21 に示す。

解析結果から求まる堤防高 $H=2.5\text{m}$ における局所動水勾配（鉛直）は、以下のような特徴がある。

- ①堤防のり面勾配が小さくなるほど、局所動水勾配の値は大きくなる。（安全性が低下する）
- ②相対的に値が大きくなる範囲は、各のり面勾配とも概ね同じである。
- ③基礎地盤より堤体の透水性が小さくなると相対的に値が小さくなる傾向がある。
- ④基礎地盤が礫の場合は、相対的に値は小さくなる。

(3)揚圧力

堤防高 $H=2.5\text{m}$ における揚圧力の解析結果（最小値）を表-22 に示す。

解析結果から求まる堤防高 $H=2.5\text{m}$ における揚圧力は、以下のような特徴がある。

- ①堤防のり面勾配が小さくなるほど、揚圧力の値は小さくなる。（安全性が低下する）
- ②堤体の土質にかかわらず、基礎地盤が砂の場合に揚圧力が小さくなる傾向がある。
- ③基礎地盤が礫の場合、相対的に値は大きくなる。

7.3 まとめと結果の利用

(1)局所動水勾配（水平）

局所動水勾配（水平）は堤体漏水を評価する場合に利用される。解析結果では以下のような特徴があった。

- 堤防のり面勾配が小さくなるほど、危険度が高くなる
- 堤体と基礎地盤の透水性が同じ場合に危険度が高くなる傾向がある
- 特に堤体及び基礎地盤の土質が砂および砂質土の組合せの場合、危険度が高い傾向にある
- 堤体の規模・土質、基礎地盤の土質の組合せによって危険度が異なる
 - ・堤防高が小⇒基礎地盤が礫の場合、相対的に危険度が低い
 - ・堤防高が大⇒堤体が粘性土の場合、相対的に危険度が低い

(2)局所動水勾配（鉛直）

局所動水勾配（鉛直）は、表層に粘性土層が分布しない場合の地盤漏水を評価する場合に利用される。解析結果では以下のような特徴があった。

- 堤防のり面勾配が小さくなるほど、危険度が高くなる
- 基礎地盤より堤体の透水性が小さくなると危険度が高くなる傾向がある
- 堤体の規模・土質、基礎地盤の土質の組合せによって

危険度が異なる

- ・堤防高が小⇒基礎地盤が礫の場合、相対的に危険度が低い
- ・堤防高が大⇒堤体が粘性土の場合、相対的に危険度が低い

(3)揚圧力

揚圧力は、表層に粘性土層が分布する場合の地盤漏水を評価する場合に利用される。解析結果では以下のような特徴があった。

- 堤防のり面勾配が小さくなるほど、危険度が高くなる
- 堤体の土質にかかわらず、基礎地盤が砂の場合に危険度が高くなる傾向がある
- 堤体の規模・土質、基礎地盤の土質の組合せによって危険度が異なる
 - ・堤防高が小⇒基礎地盤が礫の場合、相対的に危険度が低い
 - ・堤防高が大⇒基礎地盤が砂質土の場合、相対的に危険度が低い

(4)解析結果の堤防概略点検への利用

これらの結果を総括すると、堤体及び基礎地盤の土質の組み合わせによって浸透に対する相対的な危険が異なることを表していると言える。従ってこれらの結果は河川堤防の概略点検の評価指標として、あるいは一連区間における照査断面の選定に利用可能と考えられる。

8. 基礎地盤のパイピング進行に対する抵抗性の調査手法の検討

8.1 研究の概要

近年、河川堤防の破堤による甚大な被害が生じていることから、国管理区間の既設堤防を対象に浸透に対する安全性の照査が実施されている。その結果、照査基準を満たさない区間が、対象区間長の4割程度にも及ぶ結果となっており、これらの区間については、何らかの対策（質的整備）を行う必要がある。しかし、これらの区間全てで対策を行うことは財政的にも非常に困難であるため、弱点箇所絞り込みなどにより効率的かつ経済的に対策を行う必要がある。

河川堤防の破堤要因の一つである基礎地盤のパイピングにおいて問題となるのは、パイピングの進行による基礎地盤の空洞化等により、堤防に変状（沈下やクラック等）が発生し、それが要因として破堤に至ることである。濁りが無い、あるいは継続的な噴砂を伴わない湧水で終始するならば、早急に対策工（止水矢板やドレーン工）を行う必要は低いと考えられる。しかしながら、パイピングに関して対策優先度を定める上で必要となる、パイ

ピング破壊にまで至るか否かを現地地盤材料を用いて直接判定する方法は確立されていないのが現状である。

そこで、原位置においてパイピングの進行性を適切に把握できる手法の開発を目的として、室内模型実験を実施した。

8.2 室内模型実験^{9,10)}

8.2.1 室内模型実験概要

(1) 実験目的

室内模型レベルで地盤のパイピング破壊現象の再現を試み、パイピングが発生する時の実験状況や地盤条件を比較することで、パイピング破壊の進行状況を把握できる観測項目の検討を行った。

(2) 装置概要

実験装置の概要を図-21 に示す。室内模型実験で用いた実験装置は、幅 650mm、高さ 500mm、奥行き 500mm のアクリル製水槽の他、給水装置、補助水槽、飽和用水槽、砂溜め用容器からなる。

給水装置は、水タンクの位置を任意の高さに移動することで水頭を自在に設定可能で、0.1cm の精度で、最大水頭差 (ΔH) 250cm まで設定することが可能とした。

ストレーナー区間は幅 50mm、高さ 250mm とし、パイピングを発生させる弱点箇所として、 $\phi 50\text{mm}$ の受水孔を試験間隔が 500mm となるように設置した。

受水孔の水位を常に一定に保つために排水口を設け、流出した土砂を砂溜め用容器に受け、砂溜め用容器からオーバーフローした排水は容器で採水計量した。

測定計器としては、流量を把握する電磁流量計、土層内の間隙水圧分布を把握する間隙水圧計 (16 個)、排水のにごりを検出するためのレーザーセンサー、流出土砂量の経時変化を把握するロードセル (3 個) を設置した。

(3) 実験試料物性

室内実験に用いた試料の物性を表-23 に示す。地盤の物理特性の違いによるパイピング特性の差異を把握するため、実験試料については以下のような粒度調整を行った上で、縮固め度(Dc)を 85%、90%、95%に違えた、計 16 ケースの室内実験を行った。

◎Case1～Case9・・・霞ヶ浦産の川砂を最大粒径が 850 μm 、細粒分含有率(Fc)が約 5%になるように粒度調整した砂質土 (Case1～Case3) と、これに粘土 (トククレ) を加えて細粒分含有率を約 10% (Case4～Case6)、約 30% (Case7～Case9) に粒度調整した砂質土。

◎Case10～Case15・・・霞ヶ浦産の川砂を最大粒径が 4.75mm になるように粒度調整をおこなった砂質土 (Case10～Case12) と、これに礫含有率が約 20%になるように粒度調整した砂質土 (Case13～Case15)。

◎Case16・・・豊浦砂。縮固め度は 90%のみ。

実験地盤の製作にあたっては、実験試料を層厚 5cm ずつ 7 層に分けて必要な縮固め度になるように管理しながら製作した。実験試料の上位には粘性土を層厚 2cm 程度で敷き均し、アクリル製の止水板を設置した。実験地盤

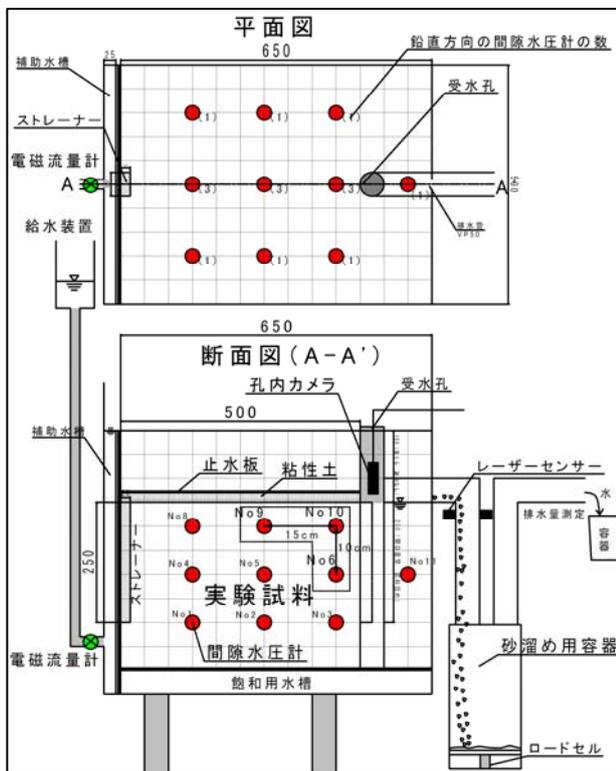


図-21 実験装置の概略図

表-23 実験に用いた試料の物性

Case	細粒分含有率 (%)	細砂分 (%)	粗砂分 (%)	細礫分 (%)	縮固め度 (%)	透水係数 (m/sec)	コーン貫入抵抗 qc (kN/m ²)
Case1	5.7	83.5	10.8	0.0	85	2.81E-04	143.3
90					1.87E-04	285.3	
95					6.94E-05	338.5	
Case4	9.1	56.5	33.0	0.0	85	1.28E-04	245.5
90					6.40E-05	305.8	
95					2.26E-05	390.8	
Case7	30.9	44.2	24.9	0.0	85	8.71E-05	273.2
90					2.62E-05	345.5	
95					5.95E-06	432.5	
Case10	4.3	55.1	39.6	1.4	85	7.42E-04	179.0
90					3.83E-04	238.1	
95					1.24E-04	342.5	
Case13	4.6	35.7	38.5	21.2	85	9.40E-04	144.9
90					7.25E-04	280.8	
95					3.26E-04	410.7	
Case16	0.0	100.0	0.0	0.0	90	2.32E-04	264.2

製作後は飽和用水槽を利用して、実験地盤の下面よりゆっくり水を供給し、実験地盤を2日以上水浸させ、十分に飽和させた。

(4)実験手順

実験は、ストレーナーと受水孔間(50cm)の平均動水勾配が0.1(水位差5cm)ずつ増加するように給水装置を上昇させ、段階毎に受水孔内の状況、流入水量、間隙水圧、流出土砂量、透過量(にぎり)、排出水量を測定した。

水位上昇間隔は5分間を基本としたが、流入水量が増加または受水孔内の土砂に動きが生じた場合には、流入水量および土砂状態が定常状態になったことを確認した後、次の段階の注水圧を上昇させた。

(5)実験観測項目

実験では、ストレーナー箇所における注水圧、ストレーナーと受水孔の間の平均動水勾配、流入水量、排水量、間隙水圧値(16箇所)、任意2点の間隙水圧値から算出できる局所動水勾配、受水孔から排出される流出土砂量について、データロガーを用いて1秒毎の自動計測を行った。排水量は1分間に容器に採水した量をデジタル秤で測定を行った。また、受水孔内に設置したビデオカメラによる噴砂状況を確認する他、受水孔からの排水のにぎりについて目視観察した。

室内模型実験では、目視などから把握できる土砂流出を伴うパイピング進行状況を、流量や間隙水圧などの実験観測値からいかに推察できるかについて検討を行った。

8.2.2 室内模型実験結果

(1)パイピング進行状況

ビデオカメラによる受水孔内の観察において、パイピングの進行状況を把握できる観察目安として、土砂流出①と土砂流出②の2つの段階があることが確認された。

◎土砂流出①・・・最初に噴砂した時点。これ以後、継続的な噴砂が続く。

◎土砂流出②・・・ストレーナー区間と受水孔間の空洞が繋がった時点。大量の土砂流出と排水が発生。

実験 Case2 における受水孔内での土砂流出状況を図-22 に、実験終了後に確認された地盤のパイピングによる水みち形成状況を図-23 に示す。水の注入口であるストレーナー箇所から受水孔までを、最短距離となる直線ではなく、蛇行形状の水みちが、粘性土層層直下の地盤に水平に観察された。他の実験ケースにおいても、水平方向以外の深さ方向の水みち形成は認められなかった。

目視観察の他に流入水量や間隙水圧の変化などから、土砂流出②になった時点が、「連続する水みち(パイプ)が形成された時点」と判断した。本研究では、土砂流出①が生じた時点から、土砂流出②に至るまでの過程を“パ

イピングの進行”と定義することとした。

受水孔内の土砂状況は Case9 (Fc=30%、Dc=95%)を除き、以下に示す2つの土砂状況の変化(土砂流出①および②)を各実験ケースに共通して確認することができた。Case9 は平均動水勾配2.9で補助水槽から漏水したため、土砂流出②を確認することが出来なかった。なお、土砂流出①から土砂流出②までの途中で、比較的大きな土砂流出が発生するケースも幾つか確認された。

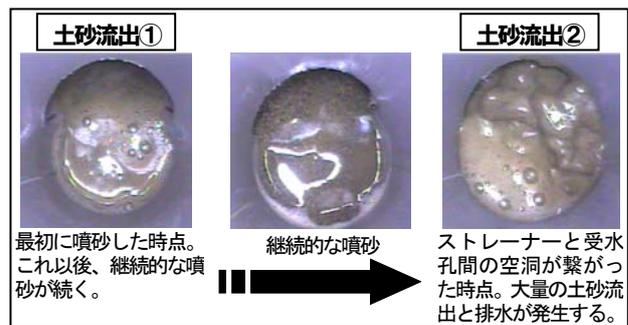
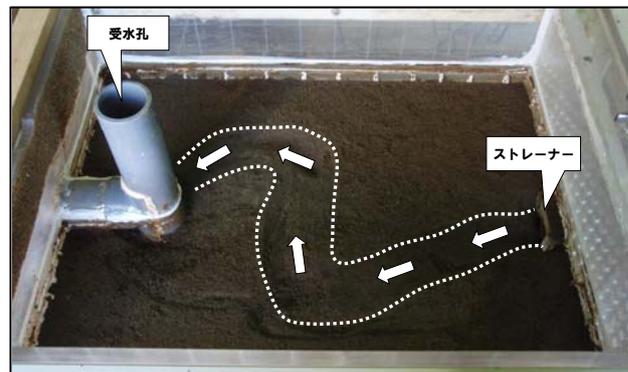


図-22 受水孔内の土砂流出状況 (Case2)



止水板直下の地盤に注水部から受水孔にかけて「水みち」の形成を確認

図-23 室内模型実験終了後の地盤状況 (Case2)

(2)観測評価項目の検討

河川堤防基礎地盤のパイピングに関する安全性照査において、堤防裏法戻りの水平局所動水勾配、鉛直局所動水勾配や楊圧力(表層に粘性土層がある場合)などが判定基準となっていることから、本室内模型実験では、弱点箇所とした受水孔付近の局所動水勾配に着目することにした。実験地盤における局所動水勾配は、2点の間隙水圧値の差を2点間の距離で除すことで算出した。

地盤条件の異なる全16ケースの実験において、土砂流出①、②の発生時点や土砂流出量および流入水量の変化などと最も関係が深そうな、局所動水勾配の算出箇所について検討を行った。全ケースを比較し、水みちの形成が粘性土層直下の水平方向に限られたことから、パイピングの進行状況を適切に把握できる観測項目は、受水孔近傍の水平局所動水勾配(図-21中のNo.9とNo.10の2点間の間隙水圧の差を水平距離(15cm)で除して算出)であることが明らかとなった。

(3)パイピング進行パターン

パイピングの進行パターンは、受水孔近傍の局所動水勾配の変動傾向から大きく2つに分類することができた。パターンごとの局所動水勾配と流出土砂量の時間変化を図-24および図-25に示す。また、土砂流出状況と入口付近・出口付近の各局所動水勾配の変動傾向の違いからパターン別のパイピング進行メカニズムを推定し、その模式図を図-26および図-27に示す。

◎Aパターン；逐次進行破壊型

局所動水勾配が下がり切るまでに比較的大きなピークが複数回認められるパターンで、流出土砂量も徐々に増加する傾向にある。細粒分を比較的多く含むか、締固め度が低い実験ケースに比較的多い。局所的な目詰まりと破壊を繰り返しながらパイピングが進行していく、逐次進行破壊型であると考えられる。

◎Bパターン；一気貫通破壊型

局所動水勾配は単調な増加を続けた後、一度に初期値近くまで大きく減少するパターンで、ピーク（土砂流出②）以降に土砂流出量は急増し始める。細粒分が比較的小さいか、締固め度が高い実験ケースに比較的多い。目詰まりが一度に破壊し

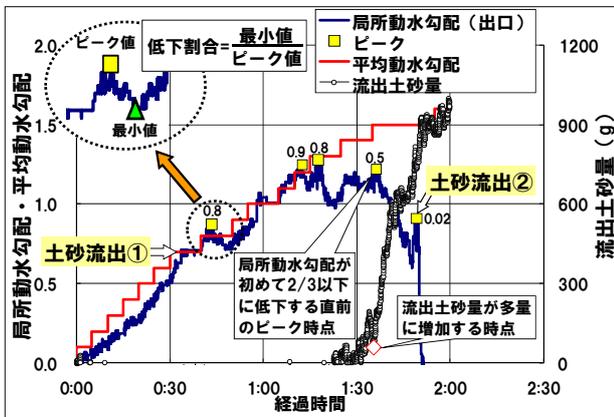


図-24 局所動水勾配と流出土砂量との関係 (Aパターン；逐次進行破壊型)

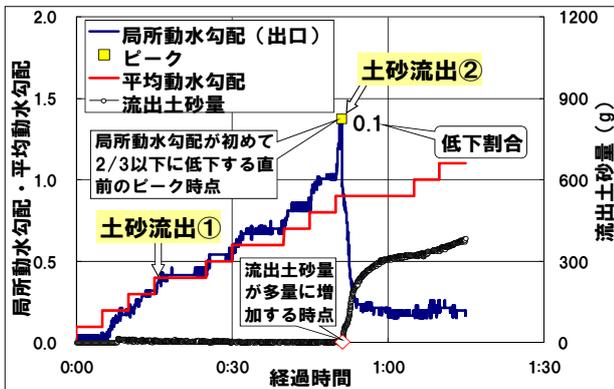


図-25 局所動水勾配と流出土砂量との関係 (Bパターン；一気貫通破壊型)

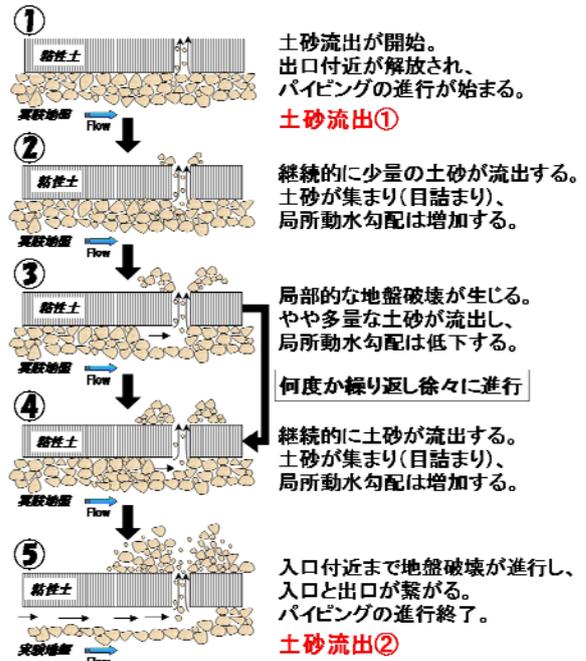


図-26 パイピング進行模式図 (逐次進行破壊型)

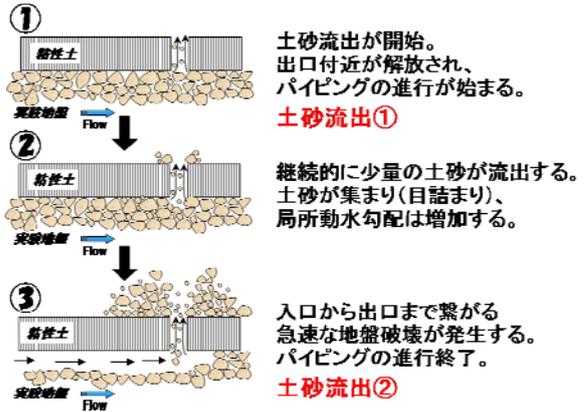


図-27 パイピング進行模式図 (一気貫通破壊型)

て水みちが形成される、一気貫通破壊型であると
考えられる。

(4)パイピング抵抗性評価指標

流出土砂量が増加し始める時は、局所動水勾配は低下しピークを示す。流出土砂量が急速に増加し始める時点（図-24、図-25中の◇印）が、河川堤防の安全上問題となる“パイピング破壊が発現する時点”とみなすことができることから、局所動水勾配の数あるピークの中から、流出土砂量の“急増”開始時点を示すピークを判別する必要がある。その判断基準となる出口付近の局所動水勾配の急落程度を表す指標として、局所動水勾配の一連の増減変動の中でのピーク値とその後の最低値の比率である“低下割合”に着目した。全実験ケースにおいて、流出土砂量急増時点と局所動水勾配の低下割合の関係から、低下割合の閾値を検討した。

初めて局所動水勾配が2/3以下に低下する前のピーク時点と流出土砂量が急速に増加し始める時点との関係を

表-24に示す。ほとんどのケース(13/15 ケース)において、初めて局所動水勾配が2/3以下に低下する直前のピーク時点と流出土砂量が増加し始める時点が一致したことから、パイピングの発生しにくさを評価する指標として、初めて局所動水勾配が2/3以下に低下する直前のピーク値を、“パイピング抵抗値”と呼ぶことにした。

パイピング抵抗値については、実験ケースを増やしてその妥当性について引き続いて検証していく必要があると考えられる。

表-24 パイピング抵抗値一覧

Case	パイピング破壊パターン	初めて局所が2/3に低下する前のピーク時点	流出土砂量増加時点	パイピング抵抗値
Case1	A	0:42:11	0:43:41	0.46
Case2	B	0:42:14	0:44:29	1.00
Case3	B	1:42:15	1:43:39	1.29
Case4	A	1:36:22	1:35:32	1.22
Case5	B	1:08:12	1:08:23	1.30
Case6	A	1:31:49	1:31:49	1.72
Case7	A	1:07:40	1:08:08	1.12
Case8	A	2:21:08	2:22:50	3.51
Case9	-	-	-	-
Case10	A	1:51:53	1:23:02	1.16
Case11	A	2:25:53	1:35:03	1.75
Case12	B	1:02:46	1:03:03	1.62
Case13	B	0:51:05	0:51:15	1.37
Case14	B	1:11:33	1:11:38	2.12
Case15	B	1:08:55	1:10:31	2.09
Case16	A	0:34:47	0:31:22	0.30
パイピング抵抗値平均				1.47

※case9は土砂流出2時点を確認することが出来なかった
※着色箇所はパイピング抵抗値が平均より小さい値を示すケース

8. 河川堤防基礎地盤の透水特性調査における、地形・地質学的知見の有効活用に向けて

本研究では河川堤防基礎地盤の透水特性調査において、地形・地質学的知見の有効活用を目指して様々な検討を行った。本研究結果に加え、充填研究プロジェクトの成果の一部を活用し、「河川堤防周辺の地形・地質調査の手引き」(仮題)をとりまとめる計画である。その目次案を表-25に示す。

9. まとめ

1) 地形区分と堤防被災履歴との関係について河川堤防概略点検結果表を用いて解析を行ったところ、一般に被災しやすい地形区分が明らかになった。河川ごとに地形区分と被災履歴との関係を調べることで、概略点検結果の精度を向上させることができる。また地形区分と被災履歴との関係に基づく、基礎地盤漏水の安全性概略評価手法の開発を試みた。

表-25 「河川堤防周辺の地形・地質調査の手引き」(仮題) 目次案

1. 河川堤防調査において地形・地質を把握する必要性と作業の内容
1.1 河川堤防の浸透に対する点検についての課題
1.2 河川堤防周辺の地形・地質と堤防被災履歴との関係
1.3 調査の目的と成果物
2. 平野の地形・地質の基礎知識
2.1 過去の気候変化と堆積体の発達
2.2 流域の地質と堆積物
2.3 河川のセグメント、微地形、堆積構造
3. 地形・地質調査の流れ
3.1 情報収集
3.2 地形調査
3.3 地質調査
3.4 とりまとめ
4. 地形調査
4.1 資料収集
4.2 地形図、航空レーザー測量図などの読図
4.3 空中写真判読
4.4 地形情報の整理
5. 地質調査
5.1 ボーリング調査
5.2 サウンディング調査
5.3 物理探査
6. とりまとめ

- 過去の地形情報を客観的に把握するツールとして、空中写真から自動化手法でデジタル標高モデル(DEM)を作成したところ、地形分類作業に有効であることが分かった。
- 地盤漏水対策に必要な3次元地盤構造の推定のために、堆積構造との関連性に着目した新たな地形分類を試行した。また荒川中流域において地形区分と堆積構造とを考慮した自然堤防周辺の地質構造の推定を試み、それが堤防被災原因の推定に有効であることを示した。
- 堤防の存在が基礎地盤漏水に与える影響を把握するため、270ケースの2次元浸透流解析を実施した結果、堤体規模、堤体及び基礎地盤の土質、基礎地盤表層の粘性土の有無の組み合わせにより相対的な危険度が異なることが分かった。この結果は堤防概略点検の評価指標あるいは一連区間における照査断面の選定に利用可能と考えられる。
- 現地地盤材料を用いた評価手法の開発を目的に、土質の違いによるパイピング抵抗性の違いを把握し、パイピング抵抗性評価のための基礎資料を得た。

参考文献

- 品川俊介・佐々木靖人(2008): 平野の微地形と河川堤防被災履歴との関係, 平成20年度研究発表会講演論文集, p.43-44, 日本応用地質学会.
- 品川俊介(2008): 河川堤防周辺の地形と堤防被災との関

係—河川堤防の概略点検結果から分かること—, 土木技術資料, Vol.50, No.12, p.43-44

- 3) 財団法人国土技術研究センター編(2002): 河川堤防の構造検討の手引き. 国土技術研究センター, p.20
- 4) 中川清森・品川俊介(2010): 河川堤防周辺の治水地形と漏水被災との関係, 全地連「技術フォーラム 2010」那覇講演集, CD-ROM.
- 5) 品川俊介・佐々木靖人(2010): 空中写真判読補助のためのステレオマッチング法による DEM の有効性, 平成 22 年度研究発表会講演論文集, p.35-36, 日本応用地質学会.
- 6) 財団法人国土技術研究センター編(2002): 河川堤防の構造検討の手引き. 国土技術研究センター, p.47-68
- 7) 財団法人国土技術研究センター編(2002): 河川堤防の構造検討の手引き. 国土技術研究センター, p.56
- 8) 財団法人国土技術研究センター編(2002): 河川堤防の構造検討の手引き. 国土技術研究センター, p.47
- 9) 中川清森・品川俊介・吉田直人・佐々木靖人(2010): 河川堤防基礎地盤のパイピング進行に対する抵抗性に関する室内実験, 第 45 回地盤工学研究発表会平成 22 年度発表講演集, CD-ROM.
- 10) 中川清森・品川俊介・日外勝仁・佐々木靖人(2011): 河川堤防基礎地盤のパイピング抵抗性に関する室内実験(その 2), 第 46 回地盤工学研究発表会平成 23 年発表論文集, 投稿中

A STUDY ON THE TECHNIQUES OF RIVER LEVEE FOUNDATION PERMEABILITY

Budget : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2007-2010

Research Team : Material and Geotechnical
Engineering Research
Group (Geology)

Author : SASAKI Yasuhito
SHINAGAWA Shunsuke
YOSHIDA Naoto
AGUI Katsuhito

Abstract: The purpose of this study is to propose the technique for understanding facially and efficiently with the use of geomorphological and geological finding, when surveying the weak point for the weak leakage and the piping of the river levee foundation. On the basis of a relationship between landform classifications and damage records of river levees, the landform classification in which disaster occurs easily in general was clarified, and moreover, we tried to develop the technique for the outline of the safety against water leakage through natural ground using the relationship. As a tool that objectively understood past topographical information, the digital elevation model (DEM) made from aerial photograph is effective for the landform classification operation. In order to estimate the three-dimension ground structure, we have produced a tentative plan of landform classification system for plains with special attention being paid to the sedimentary structure. In the middle section of Arakawa River basin, the estimation of the geological structure near the natural levee, which took micro landforms and sedimentary structure into consideration, was attempted. And it was indicated that this technique was able to estimate the cause of the river disaster. As a result of examining the influence that the levee gave to the water leak through natural ground using two dimension seepage flow analysis, it has been understood that relative risk was difference according to the difference of the scale of the levee body and the combination of soil properties of the levee body and natural ground, etc. Perhaps, this result can be used as an evaluation index of the outline check of river levee or to select the check section in consecutive section. We obtained fundamental data to evaluate the resistance to piping that difference of the resistance to piping by soil quality using laboratory piping tests.

Keywords : landform classification, damage records of river levee, sedimentary structure, piping test