

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

【要旨】

河川堤防周辺の地形と被災履歴との関係に基づき、基礎地盤の浸透に対する安全性を概略評価するためのツールおよび評価指標（基礎地盤漏水ポテンシャル）を開発し、荒川を対象に試行した。その結果、被災履歴がある箇所は被災履歴がない箇所に比べて平均動水勾配がやや大きい傾向が認められた。一方、本研究で開発した、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ことがわかった。

過去の地形情報を客観的に把握するツールの開発を目的に、空中写真を用いたデジタル標高モデルの作成を試みたところ、自動化手法を用いて、過去に失われてしまった微地形を客観的に表現できることがわかった。

さらに、堤防基礎地盤の物性調査手法として、地盤注水試験を実施した。その結果、地盤の浸透破壊抵抗性を調査できることがわかった。

キーワード：地形、堤防被災履歴、デジタル標高モデル、漏水、浸透破壊

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、空間的な広がりや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、河川堤防の基礎地盤の弱点箇所を把握する概査段階において、特にその透水特性を地形・地質学的知見を活用して、安価に面的に把握する手法を提案しようとするものである。

19年度は、堤防概略点検結果表を用いた地形と堤防被災履歴との関係について解析を行い、その関係の概況が把握できた^{1,2)}。ただし、個別河川の状況を議論する際にはその区分方法を精査した上で河川ごとの特徴を議論する必要があることが判った。また、米軍空中写真を用いたデジタル標高モデル(DEM)の作成を試みたところ、過去に失われてしまった微地形を客観的に表現できる可能性があることがわかったものの、その精度は写真の画質

に大きく依存することが判った。

そこで今年度は、堤防周辺の地形と堤防被災履歴との関係に基づく、基礎地盤の浸透に対する安全性概略評価のためのツールの開発、および評価指標の開発を行った。

また、19年度に引き続き、過去の地形情報を客観的に把握するツールの開発を目的に、国土地理院撮影の空中写真を用いてDEMの作成を試み、その精度を検証した。

さらに、堤防基礎地盤の物性調査手法として、地盤注水試験機を製作し、実験土槽での実験を実施した。

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

2.1 基本的考え方

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

漏水現象は、一連の区間の中で相対的な弱部で発生すると考えることができるので、洪水継続時間は差がないものと見なし、ここでは考慮しない。

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、同じ地形種（例えば自然堤防）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、あるいはセグメント区分などの河川の区間ごとに漏水被災履歴との関係に基づいて、地形種

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

ごとに点数化する方法を開発した。

河川堤防沿いにおける治水地形種 A の出現率 R_A を以下の式で定義する。

$$R_A = \frac{L_A}{L_{Total}}$$

ただし、

L_{Total} : 調査区間の総延長[km]

L_A : 地形種 A の出現区間延長[km]

被災内容 X (X はたとえば漏水) についての治水地形種 A の被災度 $D(X)_A$ を以下の式で定義する。

$$D(X)_A = \frac{L(X)_A}{L(X)_{Total} \times R_A}$$

ただし、

$L(X)_{Total}$: 被災内容 X の被災総延長[km]

$L(X)_A$: 被災内容 X についての地形種 A の被災延長[km]

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。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。

動水勾配については、基礎地盤の漏水の評価には局所動水勾配を用いるが、ここでは計画高水位の状態で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、その有効性を検証する。

2.2 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

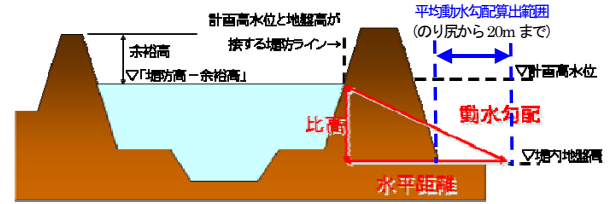


図-1 平均動水勾配の算出

勾配の分布を算出

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-1)

今回の作業においては、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、2.1 で示した各式の「延長」は、以後、「面積」に読み替えるものとする。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。

作業対象は、地形の多様性を考慮し、関東地方整備局管内の荒川とした。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。

2.3 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-1、表-1 から算出した各地形の出現率および地形点数を表-2 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。

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-2、3、基礎地盤漏水ポテンシャル

表-1 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-2 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/(④/Σ④)/⑦	0.000	0.000	0.848	0.540	1.024	0.000	5.073	0.000	1.000

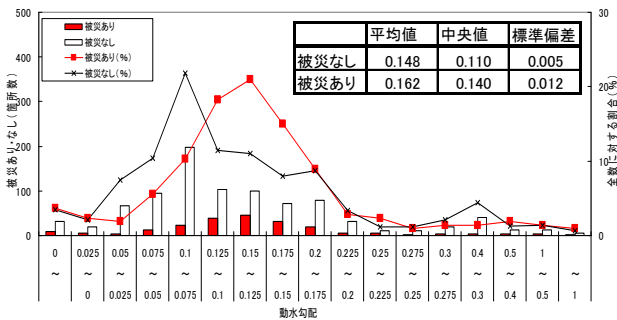


図-2 荒川における平均動水勾配の頻度分布

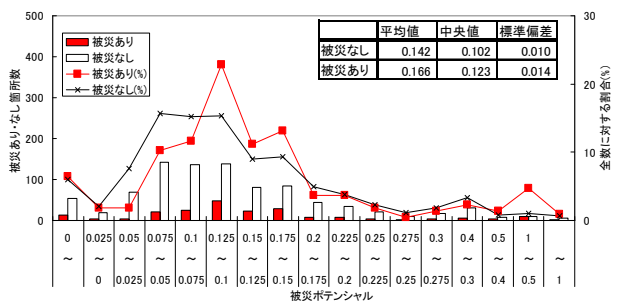


図-3 荒川における基礎地盤漏水ポテンシャルの頻度分布

図の例を図-4に示す。平均動水勾配の頻度分布(図-2)をみると、被災がある箇所が、被災がない箇所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-3)をみると、被災がある箇所が、被災がない箇所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。

3. 空中写真を用いたデジタル標高モデル(DEM)の作成

3.1 DEM作成方法

作成対象地域は、小貝川中流部、常総市大園木付近である。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-5)。

国土地理院撮影の空中写真(1961年撮影の縮尺約1/10,000および1964年撮影の縮尺約1/25,000)を用い、ステレオマッチング法によってDEMを作成した。

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。今回は格子点間隔を5mとした。

また、地上基準点については19年度業務において実施した現地調査に基づき、最新の空中写真との対比によって設定した。

3.2 結果

作成したDEMを段彩図として示す。合わせて19年

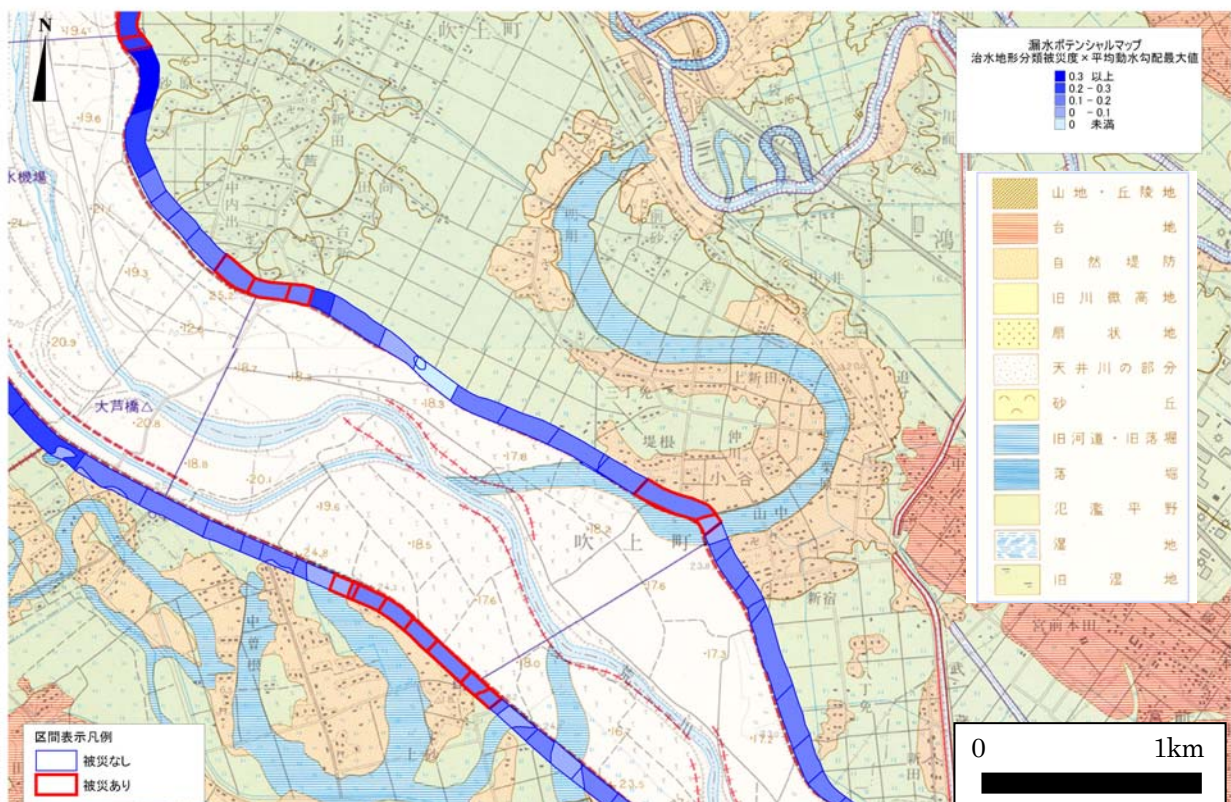


図-4 基礎地盤漏水ポテンシャル図の例

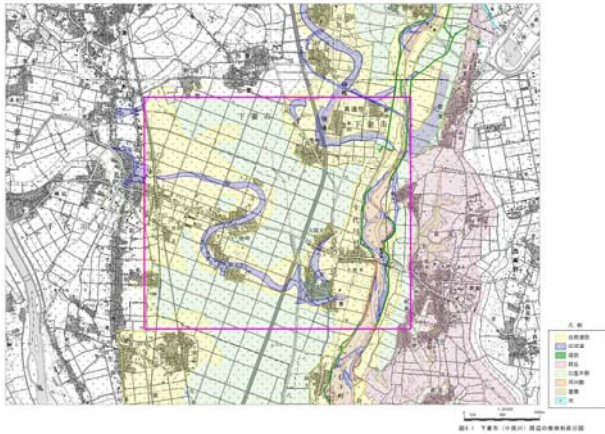


図-5 DEM作成範囲の地形分類図

度に同様の手法で作成した1947年米軍撮影の写真(縮尺約1/16,000)、2008年撮影の写真(縮尺約1/8,000)より作成したDEMを示す(図-6)。

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、地形変化により一

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ものと思われる。

1964年撮影の写真は、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。

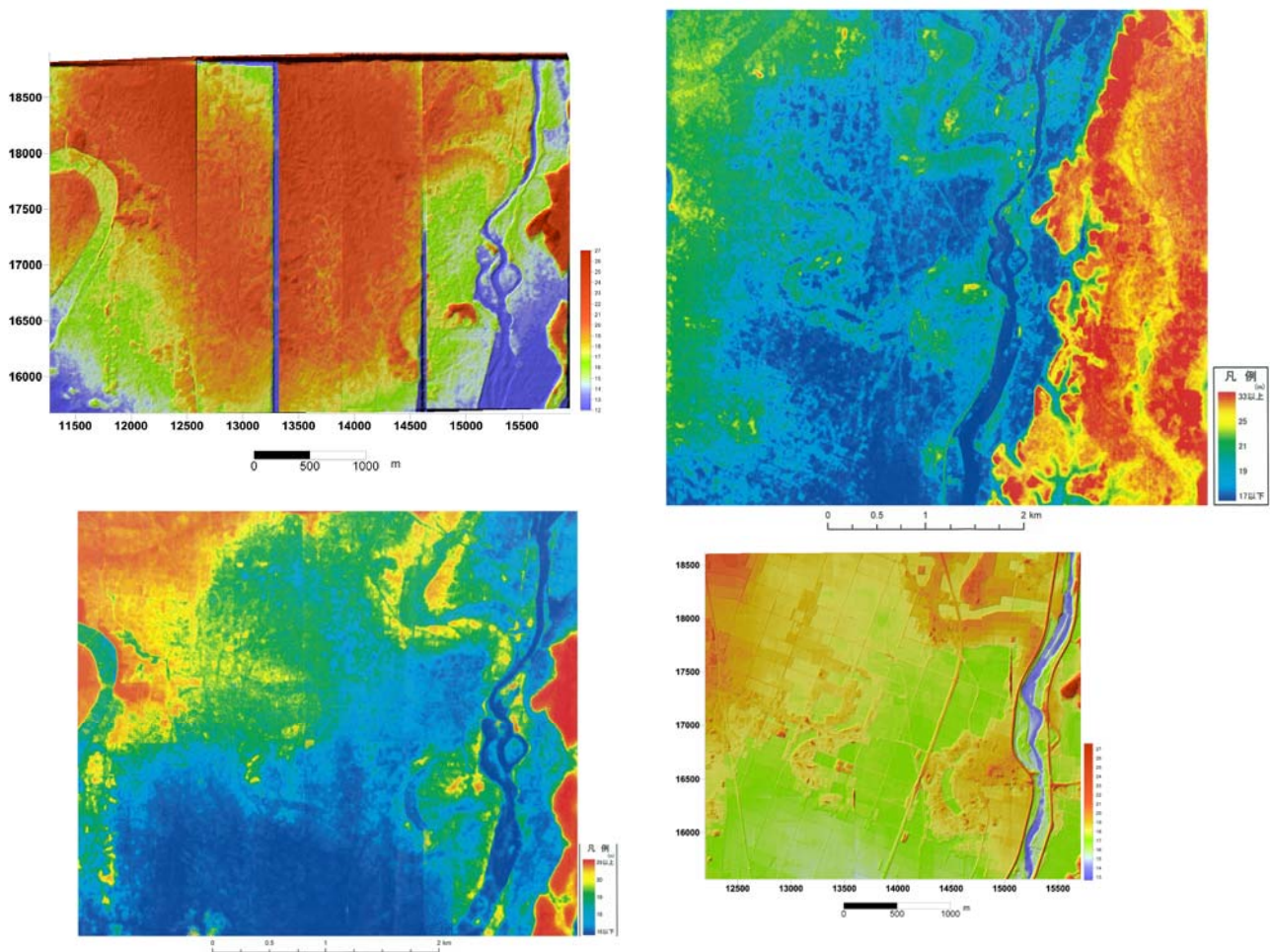


図-6 空中写真から作成したDEM(ステレオマッチング法)

左上: 1947年撮影、左下: 1961年撮影、右上: 1964年撮影、右下: 2008年撮影
同一標高でも塗色が異なることに注意。

3.3 空中写真を用いたDEMの現場への適用

過去の地形情報を客観的に把握するツールとして、空中写真から作成したDEMが利用できる。

作成する手法として、自動化手法（ステレオマッチング法）が利用可能であることが判った。ただし、品質が悪い米軍撮影の写真は一般に用いることが困難であることが判った。

DEM作成にあたっては、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ことが判った。

また、ステレオマッチング法によるDEMには、自動化処理時に適切にマッチングできなかつた場合に特有のノイズが現れることがあるので、データの利用時には留意する必要がある。

4. 基礎地盤の浸透破壊抵抗性の調査手法の検討

4.1 研究の概要

堤防基礎地盤の被災事例として、主に基礎地盤からの漏水がある。堤防基礎地盤の漏水は、パイピングが進行し、堤防本体の沈下や破堤に至る場合もある。

河川堤防の基礎地盤漏水には、①基礎地盤が礫質土等で水だけが漏水するもの（浸透破壊抵抗性が大）、②基礎地盤が砂質土等で土粒子と水が同時に漏水するもの（浸透破壊抵抗性が小）と2種類考えられる。現在は、原位置で地盤の浸透破壊抵抗性を測定する適切な手法はない。

そこで、浸透破壊抵抗性を原位置で調査する手法を検討した。

4.2 研究方法

4.2.1 試験機材

試験機は、ダム基礎地盤の亀裂性岩盤の透水性を測定する試験（ルジオンテスト）で使用されるルジオン試験機をベースにして、パッカー及び載荷する水压を低圧なものに改良して作製した。ルジオンテストは、通常単孔式で行われるが、今回は、浸透破壊抵抗性を把握するた

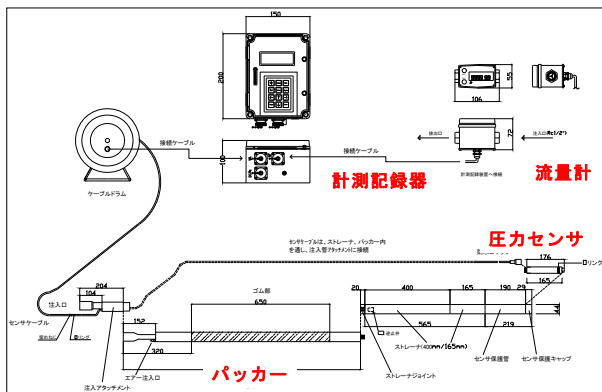


図-7 試験機の模式図

め、土砂の流出をモニターする孔を設けた2孔式にした。試験機の模式図を図-7に示す。試験機的主要機能は、表-3に示す。

表-3 試験機的主要機能

試験機器		計測範囲	精度
圧力センサ	半導体圧力センサ	0~19.6kN/m ²	±0.25%
流量計	羽根車式	3.8~38L/min	±2%
パッカー	エア-パッカー	-	-
計測記録器	データロガー	1秒~任意	-

4.2.2 実験土槽

幅3.5m×長さ3.5m×深さ4mの土槽に川砂を締固め度93.2%で敷詰めた地盤に、ボーリング掘削せず、予めストレーナーを想定して、塩ビ管（VP50mm）を埋設した。土槽に用いた地盤材料（川砂）の物性を表-4に示す。

表-4 地盤材料（川砂）の物性

粒度	最大粒径 D _{max} (mm)	19.0
	礫分 (2.00~75mm)	5.9
	砂分 (0.075~2.00mm)	89.8
	シルト分 (0.005~0.075mm)	4.3
	粘土分 (0.005mm以下)	
	均等係数 U _c	3.0
曲率係数 U _c '	1.1	
締固め	締固め度 %	93.2
透水	透水係数 (m/s)	D=93.2% 9.02E-05

4.2.3 実験方法

実験は、以下の手順で行った。

- ①試験機を孔内に設置し、パッカーを止水が出来る所定の圧力に設定し、試験機を固定した。
- ②注水を開始し、段階的に孔内の圧力が上がるように管理しながら、注水した。
- ③土砂の流出は、孔内カメラを利用してモニターすると同時に孔内に土砂が堆積した高さを、メジャーを用いて計測した。

実験ケースは、2孔間の距離の影響や、地盤の飽和・不飽和の影響を考え、4ケース設定した。

試験のイメージ図を図-8に示す。また、実験ケースおよび土槽の平面図を図-9に示す。

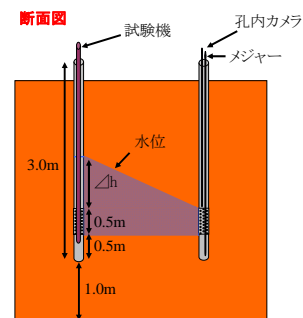


図-8 試験のイメージ図

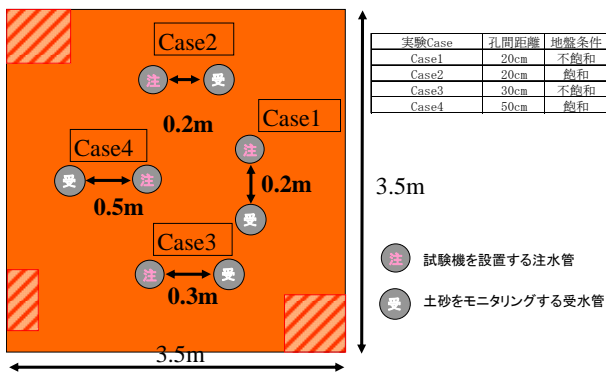


図-9 実験ケースおよび土槽の平面図

4.3 実験結果

図-10に注水圧の実験結果を示す。なお、Case2、4においては、飽和条件で実験をしたが、圧力を载荷する前に地盤が崩れてしまい、試験結果は得られなかったため、Case1 および Case3 の結果を整理した。

試験の結果、注水圧が急激に下がる地点の後、土砂の流出が確認された。地盤の破壊と注水圧力が顕著に反応している結果が得られ、注水圧力の操作が手動であるため、操作ミスによる急激な注水圧の増加や注水圧の段階的制御が困難であった。注水圧の管理については今後の課題である。また、Case1、3 の地盤が破壊されたとされる注水圧に差が見られた。注水圧の载荷段階や2孔間の距離の設定に関しては、今後詳しく検討する必要がある。

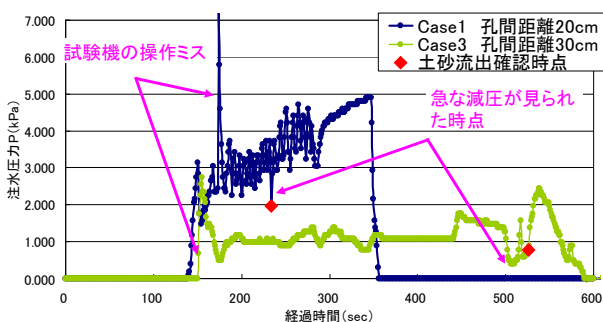


図-10 注水圧と経過時間の関係 (Case1、3)

5. まとめ

- 1) 河川堤防周辺の地形と被災履歴との関係に基づき、基礎地盤の浸透に対する安全性を概略評価するためのツールおよび評価指標（基礎地盤漏水ポテンシャル）を開発し、荒川を対象に試行した。その結果、被災履歴がある箇所は被災履歴がない箇所と比べて平均動水勾配がやや大きい傾向が求められた。一方、本研究で開発した、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ことがわかった。
- 2) 過去の地形情報を客観的に把握するツールの開発を目的に、国土地理院撮影の空中写真を用いてDEMの作成を試み、その精度を検証した結果、本手法の有効性を確認した。また、作成する手法として、自動化手法（ステレオマッチング法）が利用可能であることが判った。
- 3) 堤防基礎地盤の物性調査手法として、地盤注水試験を実施した。その結果、注水圧の急な減圧が見られた後、土砂の流出が確認されたことから、注水圧を管理することで地盤の浸透破壊抵抗性が測定できる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 品川俊介：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，平成20年12月
- 2) 品川俊介・佐々木靖人：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，平成20年10月

A STUDY ON THE TECHNIQUES OF RIVER LEVEE FOUNDATION PERMEABILITY

We developed the tool and the index for evaluate an outline of safety against water leakage through natural ground, on the basis of a relationship between landforms and actual damages around river levees. According to the result that applied the tool and the index to the Arakawa River, we found small correlation between average hydraulic gradient and actual damages. Therefore, we recognized the index needs to improve.

Additionally, on the basis of the study of digital photogrammetry using aerial photographs, it was confirmed that it is possible to construct the digital elevation model of the landform of the past.

We developed the testing machine of seepage failure. As a result of experiment, the testing machine of seepage failure showed possibility to evaluate seepage failure resistance.

Keywords : landforms, actual damages occurred to river levees, Digital Elevation Model, water leakage, seepage failure