

# 実堤防を用いた浸透実験結果に関する一考察

中田智広・川井正彦・佐藤謙司

A study on the seepage experiments using an actual levee

Tomohiro NAKATA, Masahiko KAWAI and Kenji SATO

## Abstract

The mid- and down-stream area of Ishikari River is one of the typical soft ground areas in Japan, where the shallow ground mainly consists of the peat layer, which is an accumulation of partially decayed vegetation matter. At the levees in such an area, the widening and raising have been frequently repeated to ensure the safety level for the flood control. The seepage characteristics were not understood enough for those levees, which were constructed on the peaty ground and had complex levee histories, and were considered as one of the important issues to assess the safety of the levees.

Based on this, a levee seepage experiment was planned by using an actual levee, which would be removed in the construction project of a new river channel. The authors have been engaged in planning and conducting the experiments, and evaluating the results.

As the results of the experiments, it was found that the initial water level was high in the levee on the peaty ground, and the rain falls were much more effective than the floods for the development of the seepage line in the levee. These facts enabled us to enhance the knowledge for evaluating safety of the river improvement in the mid- and down-stream area of Ishikari River.

**Keywords :** levee, seepage, seepage experiment, peat

## (要 旨)

石狩川中下流域は未分解の植物遺骸である泥炭層を主体とした我が国有数の軟弱地盤地帯であり、治水安全度を確保するために堤防の拡幅や嵩上げが幾度となく繰り返されてきた歴史を持っている。このような泥炭地盤上に築造され、かつ、築堤履歴が複雑な堤防の浸透特性については十分に把握されていない状況にあり、治水安全度を評価する上での課題として考えられている。このような背景のもと、新水路事業によって撤去される堤防を用いて、実物大の堤防浸透実験が行われることとなり、当社はその計画段階から実験の実施、結果の評価といった一連の業務に携わることができた。

実験の結果、泥炭地盤上の堤体においては初期水位が高いこと、洪水外力に比べて降雨外力が浸潤線の発達に大きく寄与することが明らかとなり、石狩川中下流域の治水安全度の評価に極めて有用な知見を得ることができた。

**キーワード:** 河川堤防, 浸透, 堤防実験, 泥炭

## 1. まえがき

我が国有数の軟弱地盤地帯である石狩川中下流域は、度重なる洪水を受け河道掘削や堤防整備などにより治水安全度の向上が図られてきた地域である。このため、極めて複雑な築堤履歴を有するとともに、さまざまな基盤処理工法が採用されてきた経緯がある。

しかしながら、これまで我が国において実施されてきた実物大規模の堤防を用いた浸透実験は、計測や評価の困難さから均質な材料を用いることがほとんどであり、複雑な堤体構造を持つ実堤防における浸透特性の評価については実現象との対比などの知見が少なく、数値解析によらざるを得ない側面を有している。

また、石狩川中下流域においては、堤防基礎地盤が北海道内特有の泥炭層によって構成されることが多く、かつ、昭和30年代までの築堤工事においては、河道改修によって発生した泥炭を堤体材料として利用していたことから、これらの浸透特性の評価が河川堤防の治水安全度を評価する上で極めて重要な要因となるものと考えられた。

このような観点から、新水路事業によって撤去される堤体を利用して、石狩川中下流域の河川堤防の浸透特性についての知見を得ることを目的とした実物大堤防による浸透実験が行われた。

## 2. 実験の概要

### 2.1 データと解析方法

石狩川中下流域は図-1に示すように軟弱な泥炭層が広範囲に分布する低平地にあたり、開拓以降、幾度かの洪水に見舞われた地域である。このため、大きく蛇行する河川の直線化が図られるとともに、堤防の高上げや拡幅によって治水安全度の向上が図られてきた。

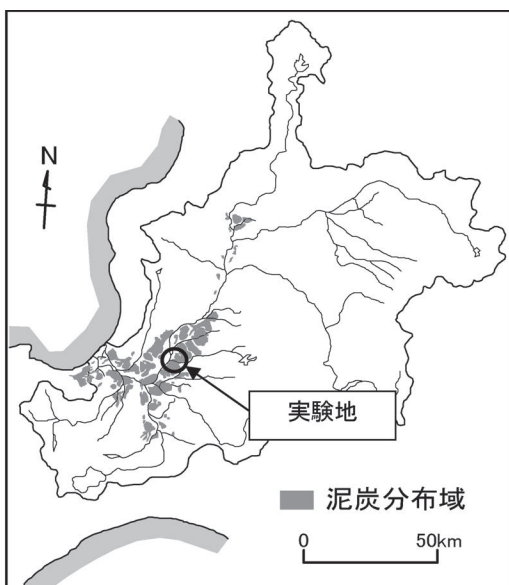


図-1 石狩川流域における泥炭の分布域

Fig. 1 Distribution of peat soil in Ishikari river basin

実験堤は、石狩川と支川幾春別川の合流点付近に位置しており、写真-1に示すように新水路事業によって撤去される堤防の一部区間を用いて実施した。

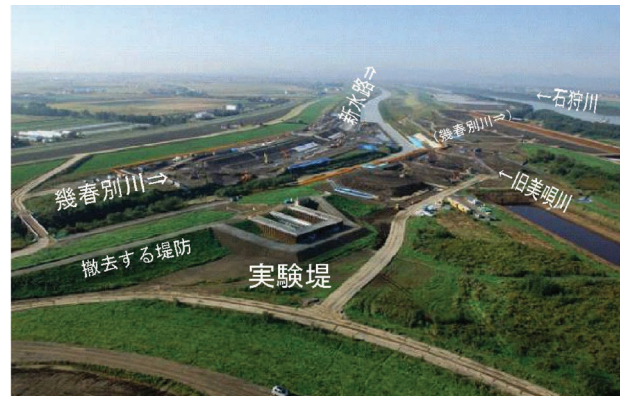


写真-1 実験堤遠景

Photo. 1 Bird view of the experiment levee

また、石狩川中下流部の堤防は、将来的にはのり面を「一枚り化」する計画であるが、整備に膨大な時間を要するため標準断面形で完成している区間については、当面この断面を維持していくこととしている。このため、実験堤防の形状は、図-2に示すように支川における標準断面形を基本とした。

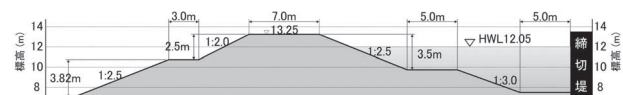


図-2 実験堤の形状

Fig. 2 Form of the experiment levee

一方、実験区間の約30m下流において実施した開削調査によると、実験堤の築堤履歴は、図-3に示すとおりである。昭和34年に高水敷を掘削した泥炭を用いて高さ4mで築堤されたのを始まりとして、以降、高上げや拡幅工事が幾度にわたって繰り返され、その後、昭和50年8月の水害を受け、基礎処理工（サンドコンパクションパイル、以下SCPと表記する）を含む我が国最初の河川激甚災害対策特別事業が行われ、現在の形状に至っている。

このため、堤体材料も多岐にわたり、初期の堤体が泥炭によって築堤された後、河床掘削によるものと考えられる砂質土や粘性土が初期の堤体を覆って築堤されている。

図-4に、築堤履歴をもとに、ボーリングにより推定した実験堤の土質構造を示す。

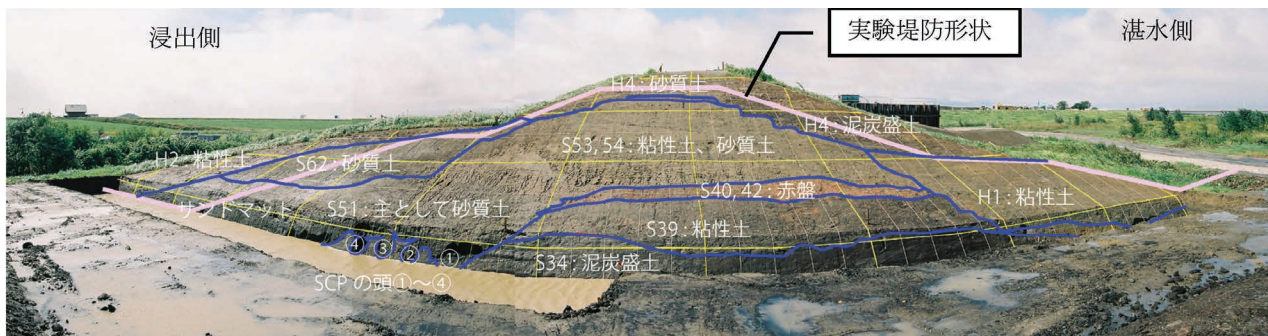


図-3 実験堤下流開削断面の築堤履歴

Fig. 3 Banking record of the experiment levee with soil constitution

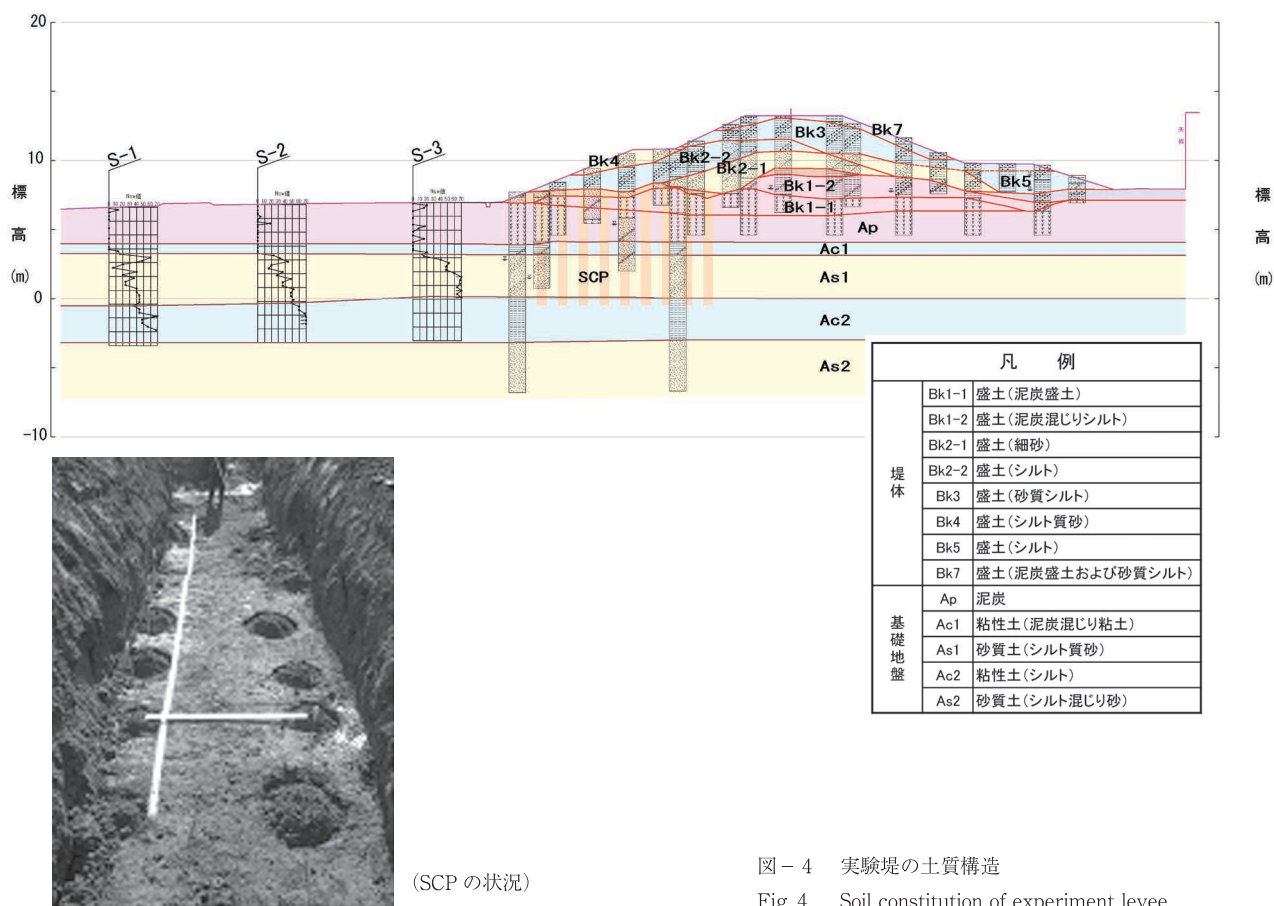


図-4 実験堤の土質構造

Fig. 4 Soil constitution of experiment levee



2.2 実験概要

実験は以下の3ケースを平成17年及び平成18年の2カ年で実施した。

- ケース1 長期湛水のみを外力による浸潤線の把握
- ケース2 長期湛水+降雨外力による浸潤線の把握  
(SCPによる排水効果あり)
- ケース3 長期湛水+降雨外力による浸潤線の把握  
(SCPによる排水効果を排除)

ケース1の実験では、湛水側に長期間湛水した実験を行い、ケース2の実験ではケース1の実験外力に加えて降雨による影響を把握した。さらにケース3の実験では、堤防開削調査で確認されたSCPの浸透現象に対する影響を確認するため、ケース2の実験外力条件下で浸出側に難透水層(Ac2層)まで矢板を打設し、SCPの効果を排除した状況で実験を行った。

なお、実験にあたっては、湛水を実施するための二重締切矢板による河道内の流下阻害を避けるため、川裏側を湛水域とした。

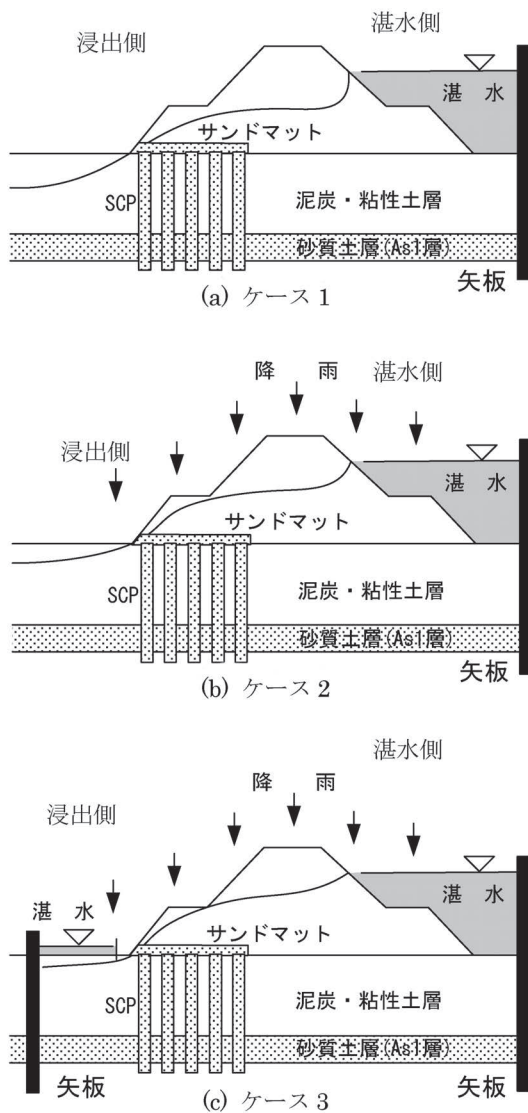


図-5 浸透実験の概要

Fig. 5 Cases of the seepage experiment. (a) Case 1. (b) Case 2. (c) Case 3

2.3 実験施設

実験堤は、これまで述べてきたように複雑な土質構成であるため、堤体(初期の堤体とその上部)と基礎地盤(泥炭及び砂層)の浸透挙動がそれぞれ異なることが予想できた。このため、堤体と基礎地盤のそれぞれに水位計を配置し、観測を行うこととした。

また、堤体内の飽和度の変化を密に把握するため、これらの水位観測孔を利用して挿入型 RI 土壤水分密度計(図-6参照)による計測を実施した。

さらに、これらの観測とともに、浸出側には、堤体の変位挙動を把握することを目的として伸縮計及び傾斜計を設置した。

また、降雨外力を与えるケース2及びケース3ではスプリンクラーを用いた降雨施設や雨量計などを追加して設置するとともに、SCPによる排水効果を排除するケース3では浸出側に矢板を打設した。

これらの実験施設の配置を図-7に示す。

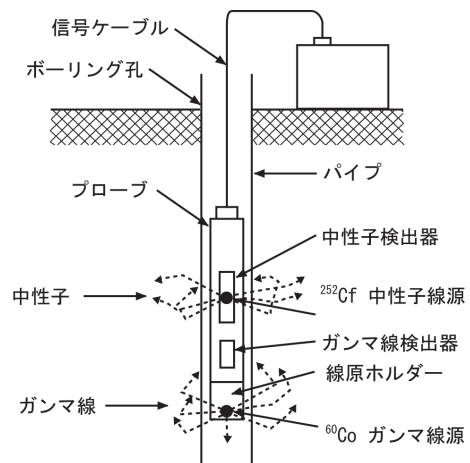
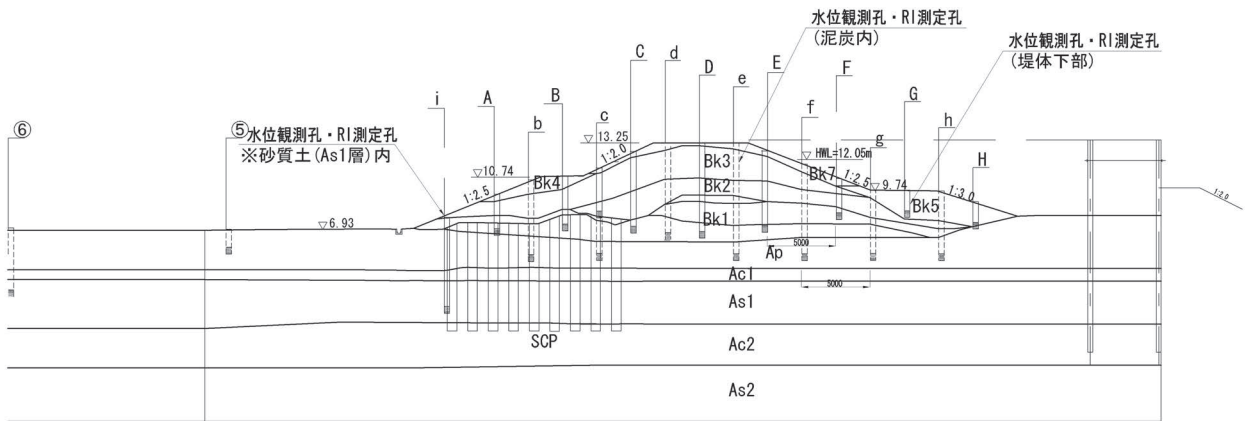
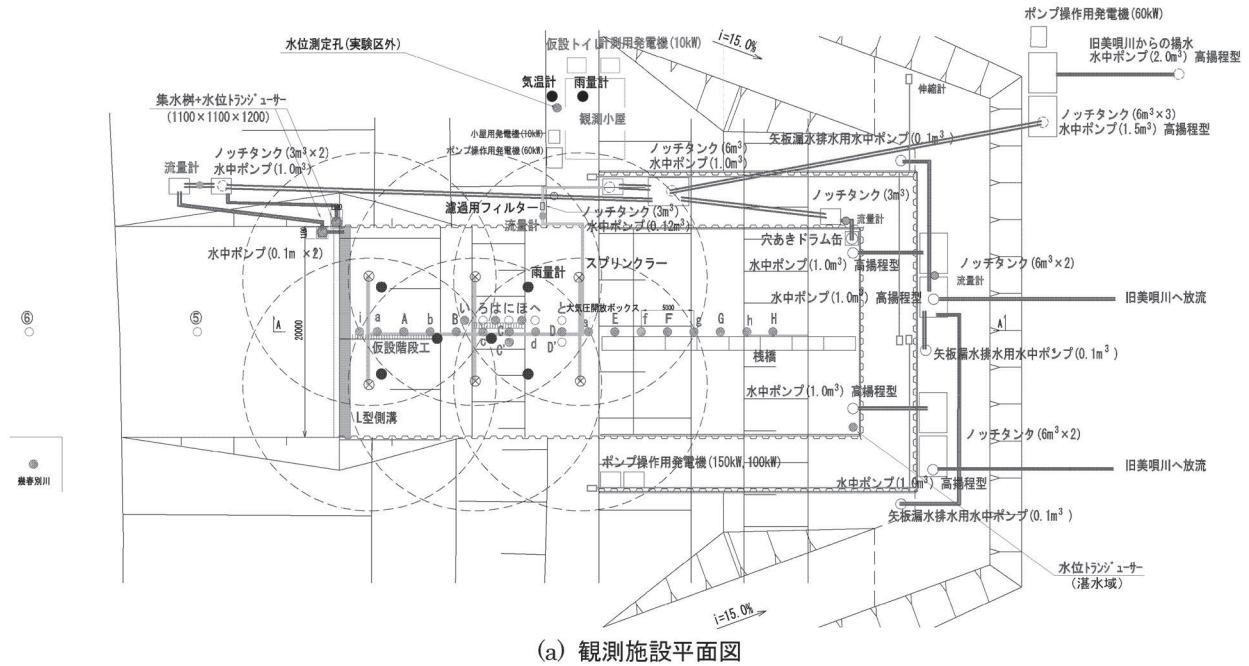


図-6 挿入型 RI 土壤水分密度計の概要

Fig. 6 Outline of insertion RI soil moisture densimeter



- A~H : 堤体内浸潤線測定用水位測定孔
- a~i, ⑤, ⑥ : 基礎地盤浸潤線用水位測定孔
- I : 実験区外の水位測定孔
- ①, ② : 堤体内変位 (傾斜計) 測定孔

(b) 観測施設断面図

図-7 実験施設 (ケース 2)

Fig. 7 Location of measurements in Case 2

(a) Plan, (b) Cross section

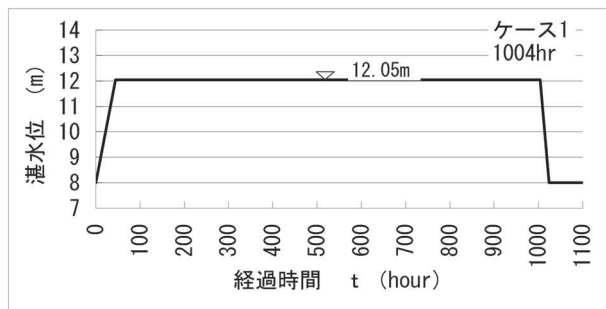
2.4 実験外力

実験の外力については、実績の洪水波形や浸透に対する安全性評価のための照査外力波形をもとに湛水位の上昇速度を0.1m/hr、下降速度を0.2m/hrと設定した。また、湛水位（最高水位）は、当該堤防の計画高水位相当とし、堤防天端-1.2mと設定した。

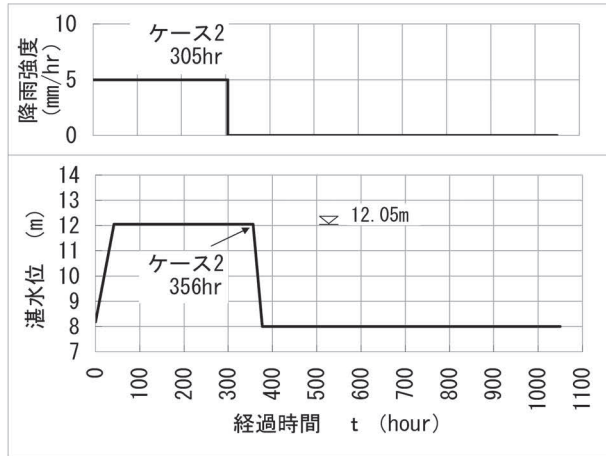
一方、それぞれのケースの湛水継続時間は堤体内の浸潤線に変化が見られなくなるまで可能な限り長期間観測することとした。

また、降雨強度は、堤体表面の透水係数から、降雨強度を5mm/hrと設定した。

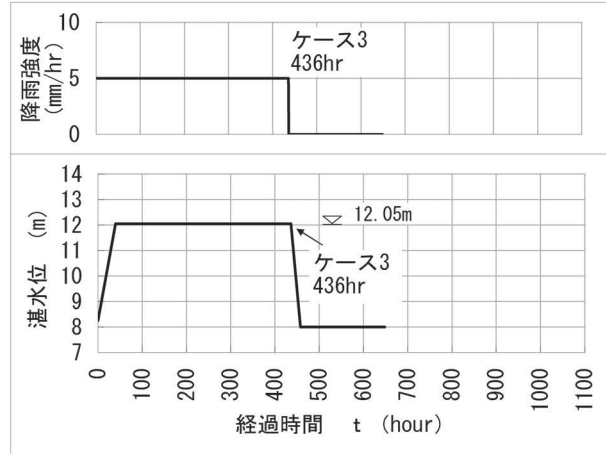
実験で与えた外力を図-8に示す。



(a) ケース1



(b) ケース2



(c) ケース3

図-8 実験外力（実績）

Fig.8 Experimental conditions for rainfall and river water level. (a) Case 1. (b) Case 2. (c) Case 3

3. 実験結果

3.1 長期湛水実験（ケース1）

長期湛水外力のみを与えた実験によって得られた浸潤線及び飽和度の変化を図-9に示した。

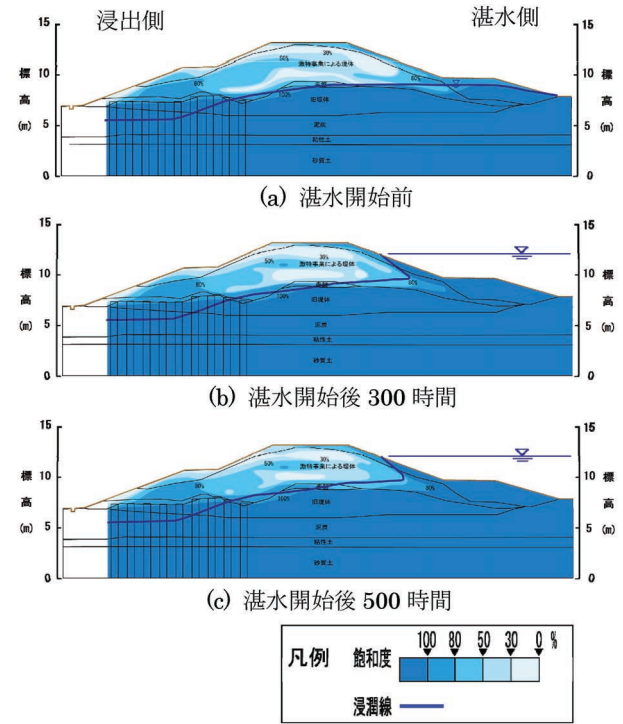


図-9 ケース1における浸潤線と飽和度分布

Fig.9 Transition of seepage water level and saturation degree in case 1. (a) Before starting the experiment. (b) After 300 hours from starting. (c) After 500 hours from starting

また、湛水実験終了後に堤体上部の浸透性を把握する目的で塩水トレーサー試験を実施した（図-10参照）。

この結果、降雪が続く悪条件のため計測が不連続であるが、塩水投入孔より3.75m離れた観測孔で9日後に明瞭な電気伝導度の上昇が確認された。これをもとに堤体上部の透水係数を推定すると、 $3.6 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ となることがわかった。

このケース1の結果から、以下の事項が明らかとなった。

- (1) 泥炭や泥炭を含む粘性土からなる初期の堤体は、実験前の状態においても高い浸潤線を維持していることがわかった。この現象は翌年に実施した実験でもみられ、実験前に約1ヶ月間降雨が無い期間があったにもかかわらず、堤体内の初期水位は高い状況にあった。
- (2) 川表に難透水性の材料で拡幅された堤防では、河川水の浸透は拡幅材の透水係数に支配される。本実験のように川表（湛水側）を泥炭で厚く拡幅した堤防では、河川水の浸透量が抑えられ浸潤線の発達が極めて緩やかだった。

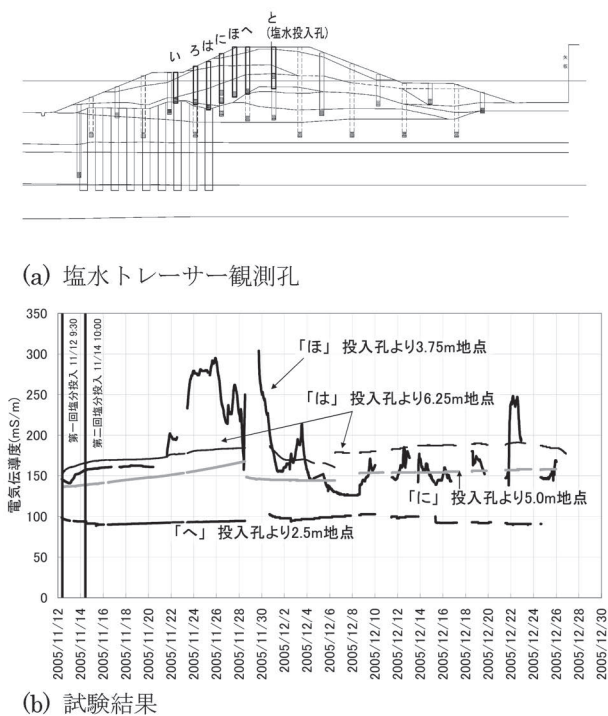


図-10 塩水トレーサー試験結果

Fig. 10 Results of tracing test using salt water. (a) Location of observation well. (b) Changes of electric conductivity of seepage water

(3) 旧堤天端に存在する透水性の良い赤盤を経て堤内側へ浸透していることが、塩水トレーサー試験で確認できた。ここでいう赤盤とは、この地方で採掘された石炭の屑で、よく自然発火したため赤色を呈しており、かつては天端の碎石として使用されていたものである。この透水係数(赤盤)は $10^{-3} \text{cm/s}$ 以上であった。図-9の飽和度分布をみても、赤盤の周囲は飽和度が低く、周囲と比較して透水性が良いことがわかる。

(4) 長期湛水実験を通じて、浸出側の法面からのり尻部の観測水位が低い状態を保っていた。これは浸透水がSCPを経て基礎地盤の砂層(As1層)に流れ、のり尻部の浸潤面の上昇を抑制したためと推定された。

### 3.2 長期湛水+降雨 (SCPによる排水効果あり) 実験 (ケース2)

長期湛水の実験(ケース1)を行った翌年に、降雨外力を追加した実験を実施した。実験により得られた浸潤線と飽和度分布の変化を図-11に示した。

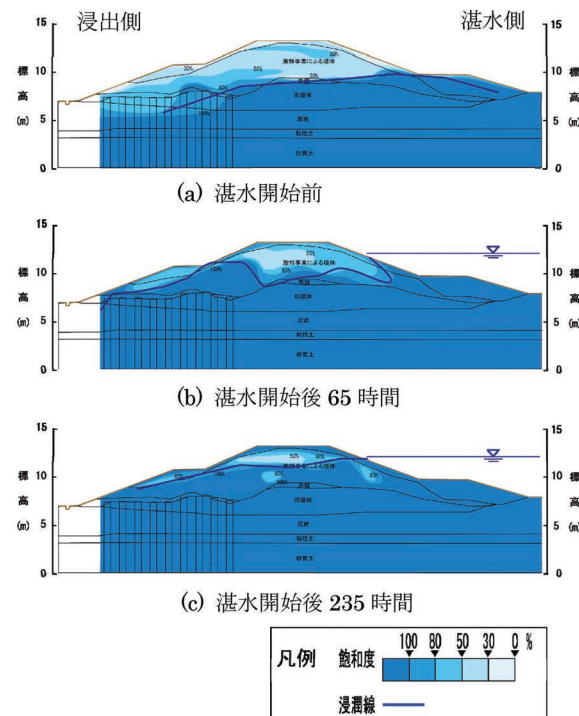


図-11 ケース2における浸潤線と飽和度分布

Fig. 11 Transition of seepage water level and saturation degree in case 2. (a) Before starting the experiment. (b) After 65 hours from starting. (c) After 235 hours from starting

ケース2の結果から、以下の事項が明らかとなった。  
 (1) 前年のケース1と比較すると、浸潤線、飽和度分布の変化に明確な違いが確認され、実験開始直後から降雨による影響を受け、特に浸出側ののり尻付近ののり面(観測孔A)で水位及び飽和度が速やかに上昇する現象が確認できた(図-12)。

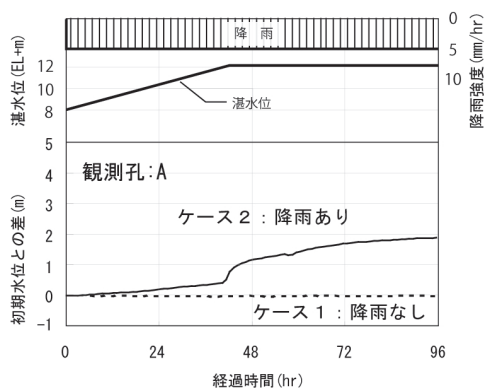


図-12 堤体内水位の経時変化(水位上昇時)

Fig. 12 Changes of seepage water level from initial water level in case 1 and case 2

(2) この浸潤線の発達、図-13に示すように水位上昇速度でみると、ケース1と比較して約5倍の速度であった。実験堤のような堤体においては、浸潤線上昇に降雨が大きく寄与することがわかった。



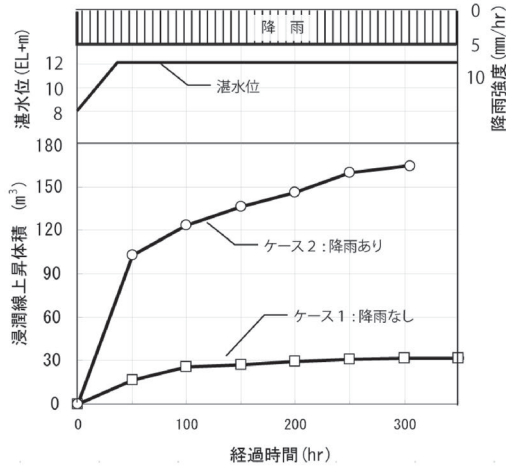


図-13 堤体内の浸潤線の変化（水位上昇時）  
Fig. 13 Changes of seepage water volume (that was effected to rising seepage water level) from initial water level in case 1 and case 2

3.3 長期湛水+降雨 (SCP による排水効果排除) 実験結果 (ケース3)

ケース3の実験では、浸出側に打設されていたSCPの排水効果を排除するため、浸出側に止水矢板を打設し、ケース2と同じ「長期湛水+降雨」の実験を実施した。

得られた浸潤線と飽和度の変化を図-14に示すとともに、実験開始直後の水位変動を図-15に、低下時の水位変動を図-16に示した。

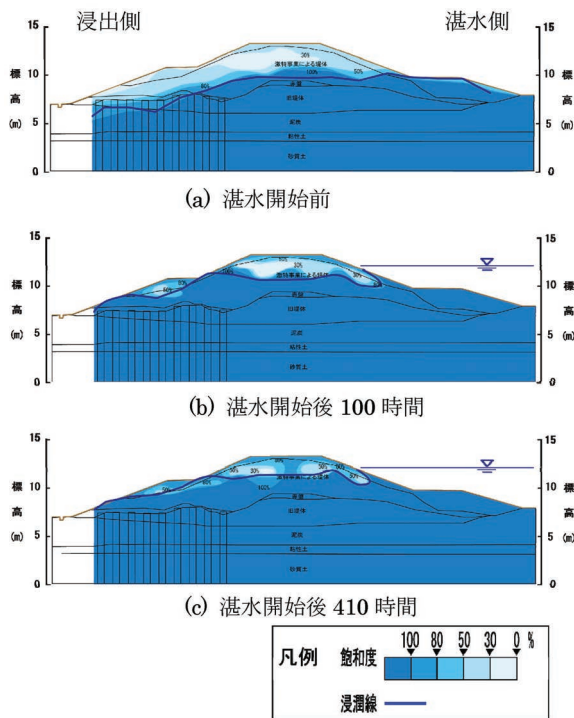


図-14 ケース3における浸潤線と飽和度分布  
Fig. 14 Transition of seepage water level and saturation degree in case 3. (a) Before starting the experiment. (b) After 100 hours from starting. (c) After 410 hours from starting

- これらの図によると、以下の事項が明らかである。
- (1) ケース2と比較して水位上昇はより早い時間に生じており、堤体内の浸透挙動にSCPの排水効果が影響していたことを伺わせている。
- (2) また、SCPの排水効果を排除することにより、ケース2に比べ水位低下速度も緩やかとなる。

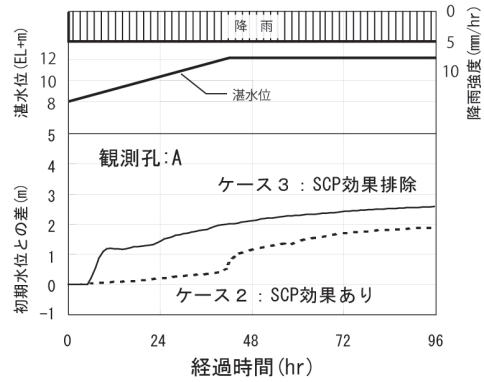


図-15 堤体内水位の経時変化（水位上昇時）  
Fig. 15 Changes of seepage water level from initial water level in case 2 and case 3

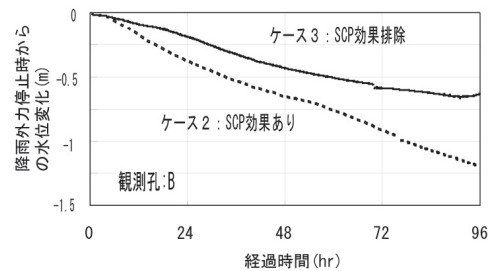


図-16 堤体内水位の経時変化（水位低下時）  
Fig. 16 Changes of seepage water level during falling of river water level in case 3 and case 4

また、ケース3の実験においては写真-2に示すようなり尻部の泥濁化が見られた。これは昭和51年からの激特事業により実験堤のり尻部に施工されたサンドマットを介して堤体内の浸透水が浸出したことが原因であると考えられた。



写真-2 のり尻部の泥濁化  
Photo 2 Muddy situation with seepage water at the foot of slope



### 3.4 実験結果

#### (1) 堤体内の水位挙動

これら3ケースの実験結果より、堤体内の水位挙動について以下の知見を得ることができた。

- ① 泥炭地盤上に築堤された河川堤防の堤体内水位は、平常時においても比較的高い状態にある。
- ② 石狩川中下流のように粘性土を主体とする河川堤防では、外水位が長時間作用しても堤体内の水位上昇はあまり顕著に生じない。
- ③ 外水位と降雨外力が作用した場合には、外水位のみが作用する場合に比べ、数倍の速度で堤体内の水位が上昇する可能性がある。
- ④ 軟弱地盤上の築堤に際して施工された基盤処理工(SCP)は、浸透水を基礎地盤内の透水層への流出を促進させ、堤体内の水位上昇を抑制する効果がある。

#### (2) のり尻の変形挙動

のり尻部で実施した伸縮計(地すべり計)による変位計測結果を図-17に示した。

この図によると、ケース1で実施した長期湛水実験ではほとんど変位を生じなかったが、降雨外力を付加したケース2およびケース3の実験では一旦堤体側に変位を生じた後、浸出側への変位が累積する傾向を示しており、SCPの影響を排除するための矢板を打設したケース3の実験における変位がより大きくなっていることがわかる。

これは、浸潤線の発達と併せて考えると、浸出側の浸潤線の上昇に応じて変位が発生していることを伺わせる結果と考えられる。

また、降雨実験において開始直後に一旦堤体側に1~2mm程度変位を生じる現象については、堤体内の飽和度が上昇することによって、堤体の重量が増し『引き込み沈下』的な挙動を示したものと推測できる。

なお、ケース3の実験においては、のり尻部が泥濁化するような現象も確認されており、浸潤線の上昇によって堤体のり尻部の安定性が極限状態に近い程度にまで進行していたものと考えられる。

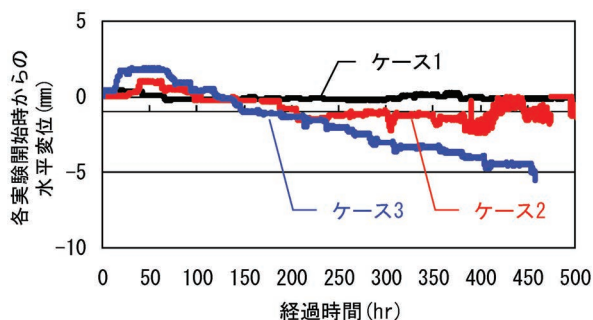


図-17 浸透実験に伴うのり尻部の変形挙動

Fig. 17 Horizontal displacement at the foot of slope during each experiment case

### 4. 考察

石狩川中下流域における支川堤防の浸透特性を考察するため、実験結果の同定解析を行い、次の2点について考察を加えた。

- ① 初期水位条件の違いによる耐浸透機能の評価
- ② 基盤処理工による浸潤線発達の抑制効果

#### 4.1 浸透流解析を用いた同定解析

既往調査結果によると、実験堤の透水係数は、 $10^{-5}$  ~  $10^{-8}$  cm/s と透水性の低い材料であることが把握されていた。しかしながら、この透水係数では長期湛水時の浸潤線の変化は概ね再現できるものの、降雨時の急激な浸潤線の発達や飽和度の変化を再現することはできなかった(図-18)。

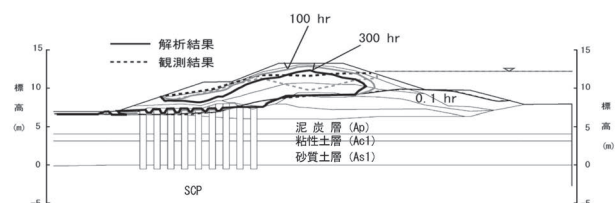


図-18 既往調査結果に基づいて透水係数を設定したモデルを用いたケース2の再現計算結果

Fig. 18 Results of seepage analysis for the experiment case 2 using a set of permeability determined from existing soil investigation

そこで、透水係数を調査、試験データをもとに変化させた同定解析を行った結果、降雨に伴う浸潤線の発達は、堤体の透水係数を表-1に示すように $10^{-3}$  cm/sとした場合に再現性が高いことが確認できた(図-19、図-20参照)。

表-1 堤体の透水係数一覧

Table 1 Permeability of soils constituting the experiment levee

土質記号	履歴	土質	室内土質試験による透水係数 (cm/sec)	同定解析による透水係数 (cm/sec)
Bk1-1	S34年盛土	泥炭	$5 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-7}$
Bk1-2	S39年盛土	泥炭混りシルト	$1 \times 10^{-7}$	
Bk2	S51年盛土	シルト混り砂	$3 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-3}$
Bk3	S51年盛土	砂質シルト	$4 \times 10^{-6}$	
Bk4	S62年盛土	シルト質砂	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
Bk5	H1盛土	シルト	$4 \times 10^{-8}$	
Bk7	H4盛土	砂質シルト	$1 \times 10^{-7}$	

開削調査結果によると、堤体上部はブロック状の粘性土を主体とし、その間隙を網目状に細砂が充填している部分があるなど、極めて不均質な状態にある。同定解析結果は、堤体の透水性が網目状の細砂の透水性によって支配されていることを示唆している。

複雑な土質構造をもつ堤体の透水係数の設定にあたっては、土質の不均質性を適切に考慮する必要があると考えられるが、設定手法については、より多くの事例を蓄積して検討する必要があると考えられる。

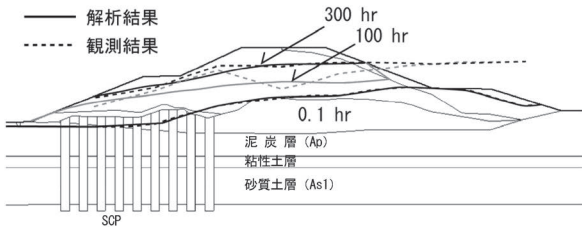


図-19 ケース2の同定解析結果

Fig. 19 Results of seepage analysis by reproduced analysis model in case 2

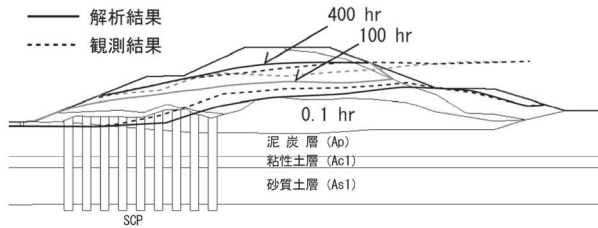


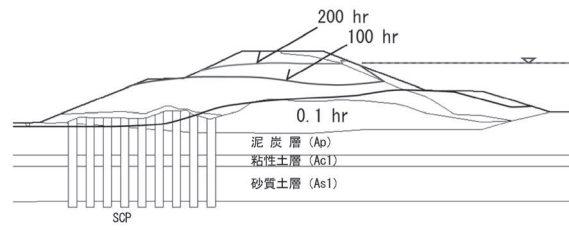
図-20 ケース3の同定解析結果

Fig. 20 Results of seepage analysis by reproduced analysis model in case 3

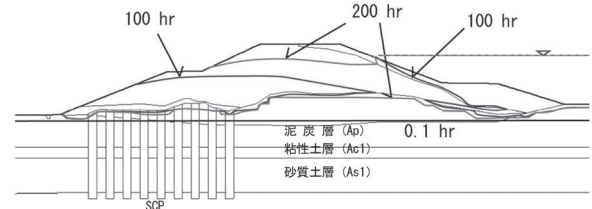
4.2 初期水位の違いによる耐浸透機能の評価

「河川堤防の構造検討の手引き」(平成14年, 財団法人国土技術研究センター)によると, 土質調査によって得られた地下水位が出水期の平均的なものであるか不明確な場合, 堤内側地表面-0.5m程度に初期水位を設定することを示しているほか, 事前降雨を与えることで堤防中央付近が1~2m高い凸レンズ状の実態に即した浸潤線を再現できるとしている。しかしながら, 実験堤のように実験前にほとんど降雨が無い状況においても堤防中央付近の浸潤線が堤内側地表面-0.5m程度の設定水位よりも約2.5mと高く, かつ, 堤体中央部に比較的透水性の低い材料(初期の堤体)が存在するような場合には, 上記のような手法では実験で確認されたような初期水位を再現することができない。

このような初期水位条件の違いは, 同定解析モデルで検証を行った結果, 図-21に示すように浸潤線の予測結果を大きく変えることとなる。したがって, 泥炭の存在等によって初期水位が高い状態が想定される場合には, 確認のための調査を実施するなど, 初期水位を適切に設定することが重要と考えられる。



(a) 初期水位を実測水位に設定した場合



(b) 初期水位を堤内地盤高-0.5mに設定した場合

図-21 初期水位による浸潤線の違い(同定モデルを用いた解析)

Fig. 21 Difference of estimated seepage water level caused by initial water level using the reproduced analysis model. (a) Observed initial water level. (b) 0.5m below ground surface

4.3 基盤処理工による浸潤線発達の抑制効果

主に泥炭層からなる軟弱地盤の分布する石狩川中下流域では, 緩速施工による築堤を主としつつも, 災害復旧時など急速施工時には様々な基盤処理工を採用してきた経緯がある。

浸出側に打設されていたSCPはサンドマットから砂質土層(As1層)までを貫いているため, 図-22に示すように排水効果を発現できる条件では, 浸潤線の上昇を抑制するとともに, 水位低下時には排水を促進している。すなわち, このような基盤処理工法によっても堤体内の浸潤線の発達を抑制する効果があるものと評価できる。

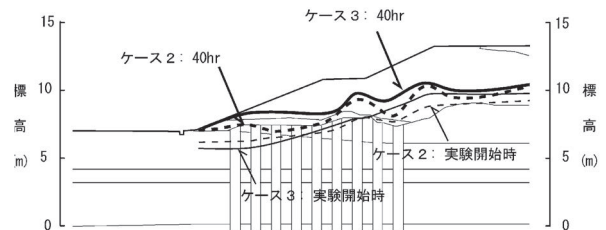


図-22 水位上昇時の浸潤線の変化(浸出側のり尻付近)

Fig. 22 Variation of seepage water level around the foot of slope during rising of river water level

## 5. あとがき

旭川開発建設部監修・発行(2001):続石狩川治水史

これまで述べてきたように、2カ年にわたる大規模な実験によって、泥炭地盤上に築造された河川堤防の浸透特性について、外水位の上昇に比べ降雨浸透による浸潤線の発達が顕著であることや過去に施工された基盤処理工が浸透挙動に影響を及ぼしていることなど重要な知見を得ることができたものと考えられる。

また、河川堤防の安全性を評価する際には、築堤履歴や初期水位条件等を十分に把握した上で、モデル化や条件設定を行うことが重要となる点について改めて認識できた。

なお、実験の計画、実施、結果の評価にあたっては、国土交通省北海道開発局石狩川開発建設部及び財団法人国土技術研究センターの関係各位に多大なご協力とご助言をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 山田拓也(2007):河川堤防浸透実験について,平成19年度国土交通省国土技術研究会 建設技術研究開発 平成18年度成果発表会
- 2) 田中陽三,西藤浩二,石郷岡淳(2007):河川堤防浸透実験について,第50回北海道開発局技術研究発表会
- 3) 加川孝介,武井正明,石郷岡淳(2006):河川堤防浸透実験について,第49回北海道開発局技術研究発表会
- 4) 金子裕幸,武井正明,小和田信一(2005):石狩川における堤防開削調査と築堤履歴の考察,第48回北海道開発局技術研究発表会
- 5) 中山修,佐古俊介,川井正彦,石川伸,武井正明(2005):石狩川における開削調査と築堤履歴について,河川技術論文集, **11**, 87-90
- 6) 河野文弘,四方哲雄,高安隆郎(1965):石狩川筋元村試験築堤について,土と基礎, **13**, No.10, 3-8
- 7) 秋好末夫,古賀正人,中島秀雄,大河原孝(1982):筑後川堤防浸透越流実験結果の概要,第17回土質工学研究発表会講演集, 2373-2376
- 8) 建設省関東地方建設局・(財)国土開発技術研究センター(1990):江戸川実物大堤防現地浸透実験
- 9) 宮川勇,河合裕志(1959):浸透水流に対する泥炭築堤の安定性試験について,北海道開発局土木試験所月報, **76**, 2-18
- 10) 北海道開発局石狩川開発建設部(1980):激特事業の記録
- 11) 北海道開発局石狩川開発建設部監修(1980):石狩川治水史
- 12) 北海道開発局石狩川開発建設部,北海道開発局