

簡易現場透水試験による河川堤防の透水性評価とその活用

石原雅規・青柳悠大

1. はじめに

我が国には膨大な延長の河川堤防が存在する。これらの殆どは盛土構造であり、順次、腹付・嵩上げをされてきたものが多く含まれる。施工時期に応じて腹付・嵩上げに用いられる地盤材料が異なる場合もあり、不均質な堤防構造が形成される。また、施工時の含水比によって透水係数が大きく変化する¹⁾ため、浸透に関しては特に不均質性の影響が大きい。河川堤防の浸透による被災事例の中には不均質性が影響したと考えられるものが多い²⁾。このような不均質性に起因する不確実性を考慮して透水性や土質構造を評価することが、河川堤防における地質・地盤リスクマネジメントにおける重要な観点の1つである。

不均質性が高く、膨大な延長を有する堤防の透水性等を評価するにあたっては、精密であるが少数しか実施できない調査法よりも、精度が若干劣ったとしても簡易で多数実施可能な調査法を用いることが有効であると考えられる。

このような背景の元、既存の透水試験法に比べ、多点での実施が容易な簡易現場透水試験法を開発した。本報では、簡易現場透水試験法の特徴と、不均質性に起因する不確実性に対して多点調査が可能な簡易現場透水試験の有効性を示す事例を報告する。

2. 簡易現場透水試験法

2.1 試験法の概要

「地下水面より上の地盤を対象とした透水試験方法」(JGS1319)には試験箇所を地表面とするか試験孔内とするか、浸潤方法を正圧とするか負圧とするか等の違いにより、異なる試験方法が示されているが、いずれの方法も浸潤圧を一定に保ち(定水位)、浸透流量が一定になった状態(定常状態)における浸透流量から透水係数を算出する方法である。定水位を維持するためにマリオッ

トサイフォン等の特別な装置が必要である。この装置のために、タンク内の水位を継続的に目視で読み取るか(手間がかかる)、差圧計とデータロガーの組み合わせで自動計測するかによって、注水流量を算出する必要がある。

堤防の開削調査においては、「締め固めた地盤の透水試験方法」(JGS1316)が用いられることが多い。この方法は、JGS1319にも包含されており、 $\phi 300\text{mm} \times \text{H}300\text{mm}$ の試験孔を設け、試験孔内の水位を一定に保ち、定常状態における浸透流量から透水係数を算出する方法である。地盤の透水性によっては定常状態までに数日かかる場合もある。また1箇所あたりポリタンク数個分の水を用意する必要がある点も現場によっては実施数を増やせない原因となる場合がある。

一方で、開発した簡易現場透水試験法は、地表面における変水位(浸潤圧が徐々に減少)の試験法である。模式図を図-1に示す。変水位とすることでマリオットサイフォン等の水位を一定に保つための特別な装置が不要となり、さらに注水流量の計測に小型で安価な自記水位計を用いることができ、測定中の手間がかからない。計測精度、携帯性、作業性、使用する水の量を総合的に勘案し、 $\phi 68\text{mm} \times \text{L}200\text{mm}$ 程度の透明塩化ビニル管を用いることとしている。この大きさであれば、1箇所当たり数リットルの水で試験が実施できる。簡易現場透水試験は、装置が安価で試験中の手間が

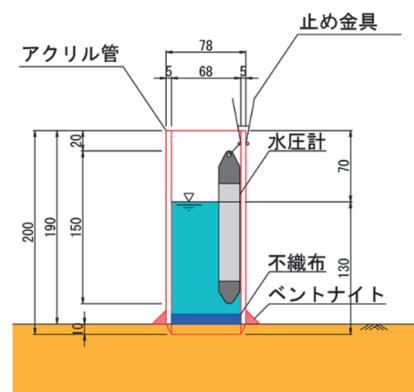


図-1 簡易現場透水試験法の模式図

かからないため、複数箇所の試験を同時並行で実施することが可能となる。

2.2 試験方法と透水係数の算出方法

未だ改良の余地がある試験法であるため、今後、変更の可能性があるが、現状においては以下に示す方法で試験を実施している。

地表面にφ300mm程度の水平かつ平坦な試験面を整形し、透明塩化ビニル管（パイプ）の先端を10mm程度、試験面に貫入させる。

ベントナイトと整形時に出た土を、透明塩化ビニル管の周りに盛り、漏水防止工とする。また、自記水位計を止め金具を用いてパイプ内の所定の高さに設置する。

水位が高さ100mm程度になるまで、パイプ内に水を注ぐ。水位が下がってきたら水を注ぐ。これを4回程度繰り返す。透水性の低い地盤では1回あるいは途中で終了する場合もある。

本試験法では、JGS1319の地表面において正圧で浸潤させる方法で用いられている次式により透水係数を算出することとした。この式は定水位・定常状態における流量や水頭から透水係数を算出する式であるため、変水位である本試験法に対しての適用性は不明であった。そこで、後述する模擬地盤や実堤防での別試験法との比較などにより適用性の検証を行っている。

$$k_{fs} = \frac{\alpha G Q_s}{r_0 \alpha h + r_0 + G \alpha \pi r_0^2} \quad \dots (1)$$

ここで、 Q_s ：定常浸潤流量、 h ：浸潤水頭(m)、 r_0 ：浸潤用円筒の半径(m)、 α ：土の種類に応じて設定される土壌パラメータ(1/m)、 G ：浸潤用円筒の半径 r_0 (m)と貫入深さ d (m)から算定される形状係数、詳細はJGS1319を参照されたい。

このような方法で得られた水位の時刻歴の例が図-2である。線形に変化している区間を選び、その勾配を算出し、透明塩化ビニル管の内径及び自

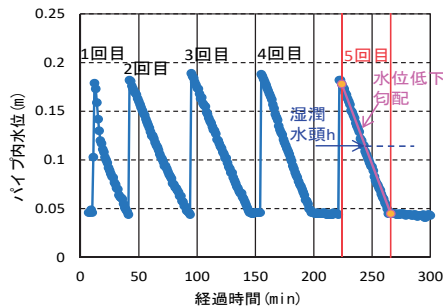


図-2 簡易現場透水試験法で得られる計測データ例

記水位計の断面積を考慮して、流量($\text{cm}^3/\text{秒}$)を算出する。この流量を定常浸潤流量に、流量を算出した区間の平均水位を浸潤水頭と読み替えて、飽和透水係数を算出する。図-2では1回目の途中から5回目まで勾配に変化はほぼないが、地盤によっては2、3回目まで変化する場合もあるため、4回程度繰り返し、最後の勾配から透水係数を算出する。

2.3 模擬地盤における他の試験法との比較³⁾

粒度の異なる3種類の試料（硅砂、山砂、ローム）を用いて、図-3に示す模擬地盤を高さ1m×幅0.9m×奥行0.75mの土槽内に作製した。

模擬地盤の地表面の複数箇所で簡易現場透水試験法とインフィルトロメータ法の2手法を、1箇所の掘削した試験孔内でJGS1316を実施した。インフィルトロメータ法は多孔質ディスクを介して一定の負圧で浸潤させる方法で、簡易現場透水試験法よりも小型であるが、目視で水位を記録し、流量を求めなければならない。また、土槽端部の水槽の水位に差をつけ、その水位差と定常流量から模擬地盤全体の透水係数（土槽定水位法）を、模擬地盤から採取した乱れの少ない試料を用いた

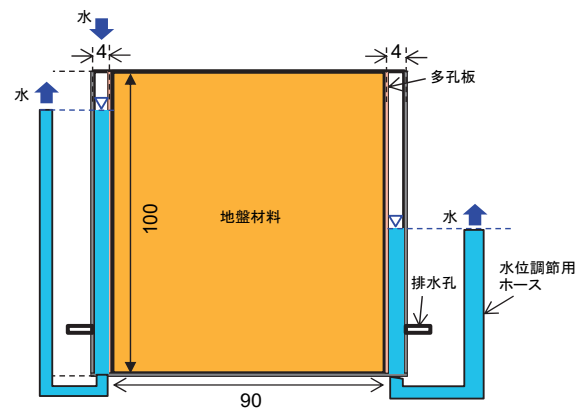


図-3 模擬地盤と土槽（図中の数字cm）

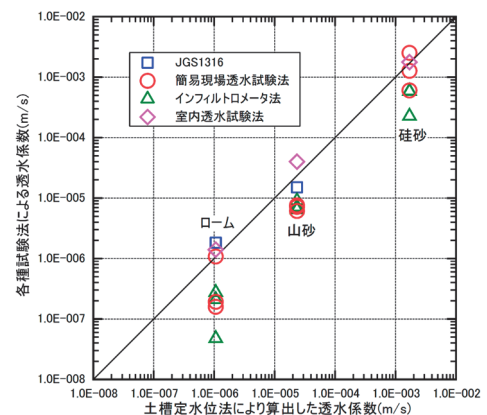


図-4 各種透水係数の比較

室内透水試験により透水係数を求めた。

各種試験法で得られた透水係数の比較を図-4に示す。模型地盤全体を利用する土槽定水位法を横軸に、その他の試験値を縦軸とした。全体的には簡易現場透水試験法も含め同じような透水係数が得られていることが分かり、透水係数の算出式の適用性を含め、簡易現場透水試験法の妥当性が確認できた。

2.4 浸透流解析による特徴の把握⁴⁾

簡易現場透水試験の特徴を把握するために、簡易現場透水試験と、比較のためにJGS1316を模擬した浸透流解析を実施した。

簡易現場透水試験法は変水位の試験法であるが、JGS1316と同じ定水位とした場合の非定常浸透流解析を行った。

モデル化した地盤材料の透水係数が $1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 、 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ の場合の浸透流量の時刻歴を図-5に示す。試験法に依らず、試験開始直後に極大となり、その後徐々に低下し、水平線に漸近する。定常状態を半分の時間の浸透流量と比較して変化量が5%未満となった状態と仮に定義し、定常状態までに要する時間、総浸透量を整理した。簡易現場透水試験の定常状態までに要する時間がJGS1316の約1/200、総浸透量で約1/4300であった。このような浸透流解析から

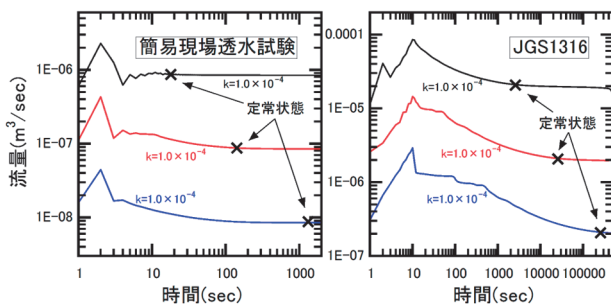
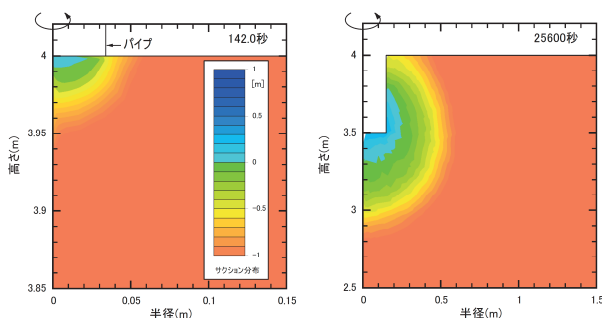


図-5 浸透流解析から得られた流量の時刻歴



(a)簡易現場透水試験 (b)JGS1316

図-6 定常状態におけるサクションの分布

も簡易現場透水試験の手軽さが理解できる。なお、簡易現場透水試験の定常状態までに要する総浸透量は約 14 cm^3 であった。この量は、簡易現場透水試験で実際に使用する水の量の1回分よりも遥かに小さな量であり、これを4回も繰返し実施すれば、十分に定常状態における含水状態になっていることが推測される。透水係数を $1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ とした場合の定常状態におけるサクション（不飽和土が有する吸水圧力）の分布を図-6に示す。サクションが正の範囲は飽和した状態を表し、負で0に近づいた範囲は飽和度が上昇した状態を表している。簡易現場透水試験により水が流れサクションが上昇した範囲は、JGS1316に比べ極めて小さいことが分かる。これより簡易現場透水試験は局所的（下側に数十mm）な透水係数を求めており、JGS1316は広い範囲（ $\phi 1 \text{ m}$ 程度）の透水係数を算出していると考えられる。

3. 開削箇所への活用事例

3.1 大型模型実験における活用事例

高さ3mの半断面の堤防模型（図-7左）を作製し、浸透による崩壊実験を実施した。紹介するケースは堤体材料に模型実験としては比較的不均質な山砂を用いたケースであり、浸透により図-7右に示すように法面の中央から崩壊し始めた。模型実験としては特殊な壊れ方である。そこで、模

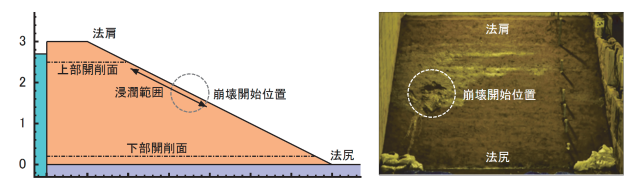


図-7 堤防模型概要と崩壊状況

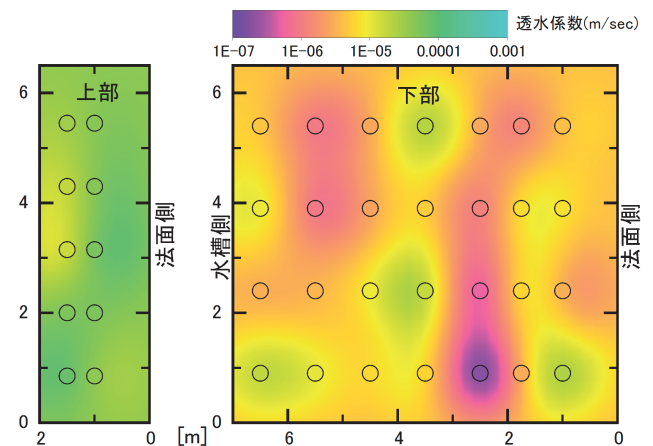


図-8 模型開削面における透水係数の分布

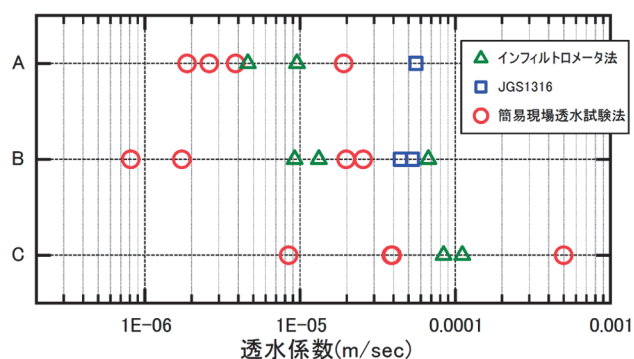


図-9 狩野川堤防における各種透水試験の比較

型の不均質性を簡易現場透水試験で調べ、壊れ方との関係を検討した。

図-8に崩壊が起きた模型上部と崩壊が発生しなかった模型下部の透水係数の分布（合計38箇所）を示す。下部は高い箇所と低い箇所で2オーダー程度の違いがあるものの、高い箇所が連続している様子は見られず、全体的に水を通しにくいことが推測される。一方で上部は下部に比べ、均質かつ透水係数が高いことが確認できた。このような透水係数の分布は、崩壊形態と良く対応している。既存の現場透水試験法では不均質性の把握は非現実的であるが、簡易現場透水試験では比較的容易に可能である。

3.2 狩野川の堤防における適用例⁵⁾

狩野川の樋門改築に伴う堤防開削現場において各種現場透水試験（JGS1316、インフィルトローメータ法、簡易現場透水試験法）等を実施した。

堤防土質に基づきA、B、Cの3つのゾーンに分け、比較した結果を図-9に示す。CゾーンのJGS1316では一定水位が保てず透水係数が得られていない。模擬地盤と異なり試験法毎に差が出ている。インフィルトローメータ法と簡易現場透水試験法には大きな幅が見られる。この幅が各ゾーンの不均質性を表しているものと考えられる。一方でJGS1316では大きな透水係数が得られており、簡易現場透水試験の上限値に近い値となっている。不均質な堤体の中でも透水性の高い部分が支配的な構造（透水性の高い部分が連続）を有していることが推測される。不均質性を把握し、その不均質性の特性を理解する上で、多点調査が可能な簡易現場透水試験法とJGS1316を組み合わせることで実施することの有効性を示す事例であると考えられる。

4. まとめ

本報告では、定水位での定常状態における流量から透水係数を求める既往の現場透水試験法と異なり、変水位・非定常とすることで装置を簡便化した簡易現場透水試験法の概要を示した上で、本試験法で得られる透水係数が他の実務に供される既往の現場透水試験法と同等であることを示した。変水位・非定常でも、既往の現場透水試験法と同等の透水係数が得られることの妥当性を、浸透流解析でも確認した。

大型模型や実堤防に対する適用事例から、多点計測が可能であり、不均質性の高い堤防においてもその不均質性の影響を考慮した透水性等の評価に利用できることが確認できた。地質・地盤の不確実性に対応する地質・地盤リスクマネジメントにおいて有効な試験法である考えられる。

今後、実現場における浸透被災後の調査等を通じて、現場における災害対応や強化対策のスキームへ組み込む方法を検討する予定である。

参考文献

- 1) 龍岡文夫：第11回盛土の締固め⑩、基礎工、Vol.42、No.5、2014。
- 2) 杉山詠一ら：法すべり等が生じた小田川における開削調査、第55回地盤工学研究発表会、2020。
- 3) 杉山詠一ら：地下水面より上の地盤を対象とした現場透水試験方法の違いによる結果の比較、土木学会全国大会第75回年次学術講演会、2020。
- 4) 石原雅規ら：地下水面より上の地盤を対象とした原位置透水試験に係る解析的検討、第56回地盤工学研究発表会、2021。
- 5) 杉山詠一：簡易透水試験法を含む現場透水試験方法の違いによる結果の比較、第56回地盤工学研究発表会、2021。

石原雅規



土木研究所地質・地盤
研究グループ 上席研
究員（河川堤防強化・
補強担当）
ISHIHARA Masanori

青柳悠大



土木研究所企画部研究
企画課 主査、博士
（工学）
Dr. AOYAGI Yudai