

# 大規模洪水時における堤防の浸透，裏法滑りによる破壊確率の評価法に関する研究

浸透流解析 信頼性解析 破壊確率評価

中央大学大学院 ○田端 幸輔  
中央大学研究開発機構 福岡 捷二

## 1. はじめに

近年，洪水外力の規模の増大，頻度の増加によって，水災害が毎年のように発生している状況にあり，流域が抱えるリスクを踏まえた総合的な減災適応策の立案が強く求められている．このためには，堤防破堤個所の推定技術の確立が喫緊の課題である．長大な線状構造物である堤防の破堤箇所を推定するためには，堤防断面形状に加えて，堤体前面の水位波形，堤体土質の不確実性を考慮する必要がある．しかし，現在の河道計画では H.W.L.（暫定堤防区間ではスライドダウン高一計画余裕高）を基準とし，これ以上の水位となると破堤するものとして，堤防の治水機能が評価されている．また，パイピング及び法面滑りに関する堤防詳細点検では，H.W.L.を上限とする外力設定が行われるとともに，土質の不確実性は考慮されていない<sup>1)</sup>．このように，洪水時における堤防の安全性について，評価方法も含めて十分な検討がなされていないのが実情である．本研究では，堤防の安全性評価技術の確立を目指し，水理解析モデルと，堤体のボーリング調査データに基づいた信頼性解析を用いて，堤防の浸透，裏法滑りに関する破堤確率の縦断分布を算出する方法を提案する．また，本手法を，H.W.L.を超過する規模となった梯川の平成 25 年 7 月洪水に適用し，浸透及び滑りによる破壊確率を検討する．

## 2. 破壊確率の算出方法

### (1) 計算の流れ

本研究では，堤防前面水位の時間変化（水位ハイドログラフ）の縦断分布を入力条件とし，土質定数を確率変数として扱う信頼性解析によって，堤防破堤確率を算出する手法を提案する．堤防前面の水位ハイドログラフの縦断分布は，検討対象領域において観測された水面形の時間変化に基づいた洪水流・河床変動解析の結果を用いるものとする．堤防破壊モードの検討には，堤体内の粒度分布や土質定数の不確実性のため推定が困難と考えられる浸透（堤体漏水）と裏法の滑りを扱う（図 1）．

### (2) 堤体内浸透

堤体内の浸潤線の評価に関しては，古くから様々な方法が提案されている．キャサグランデ法<sup>2)</sup>は不透水層上に設置された盛土内の浸潤線を，水位と断面形状から推定する手法である．この手法は，長時間経過し定常状態に落ち着いた浸潤線をよく説明できることが

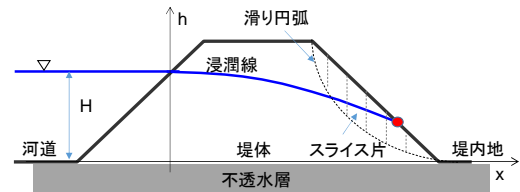


図 1 堤体内の浸潤線と滑り円弧の概念図

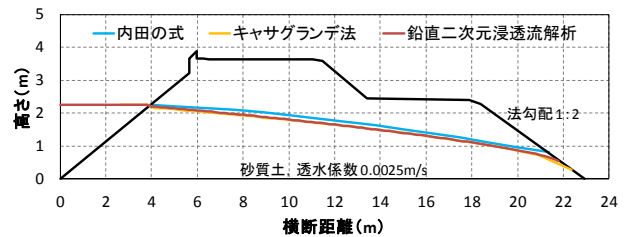


図 2 浸潤線の算定結果の比較

知られているが，外水位や浸潤線の時間変化は考慮できない．一方，堤防詳細点検等の目的で実施される堤体内浸透流の計算には，外水位の時間変化や，土層毎の土質定数分布，飽和度に応じた透水係数の変化等が考慮できる鉛直二次元浸透流解析手法（式(1)）を用いるのが一般的である<sup>1)</sup>．

$$(C + \alpha \cdot S_s) \frac{\partial \Psi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( -k \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( -k \frac{\partial \Psi}{\partial z} - k \right) = 0 \quad (1)$$

ここに， $\Psi$ ：圧力水頭(m)， $k$ ：透水係数(m/s) (=  $kr \cdot ks$ )， $kr$ ：係数 ( $\Psi$ の関数)， $ks$ ：飽和透水係数(m/s)， $C$ ：比水分容量( $m^{-1}$ )（圧力水頭 $\Psi$ ～体積含水率 $\theta$ の接線勾配）， $\alpha$ ：係数（飽和領域で 1，不飽和領域で 0）， $S_s$ ：比貯留係数（砂質土で  $0.0001m^{-1}$  程度）である．しかし，この手法は，ボーリング調査結果が無い区間において，詳細な土質構造及び土質定数の設定に限界があること，土質の不確実性を考慮した信頼性解析の適用が困難であることから，長大区間の堤防破堤確率の縦断分布を検討するには不向きである．そこで本研究では，内田<sup>3)</sup>が提案した非定常浸潤線の推定式（式(2)）を用いる．

$$\frac{h(x,t)}{H} = 1 - \left\{ \frac{x/H}{\sqrt{8/(3\lambda)} \sqrt{k\Delta t/H}} \right\}^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

ここに， $h$ ：堤体内水位(m)， $H$ ：河川水位(m)， $k$ ：透水係数(m/s)， $\Delta t$ ：浸透時間(sec)， $\lambda$ ：空隙率である．本手法は，不透水地盤上に設置された盛土内の水平浸透流の近似解である．不飽和特性を無視した式(1)を図解法によって解かれたもので，模型実験との比較によ

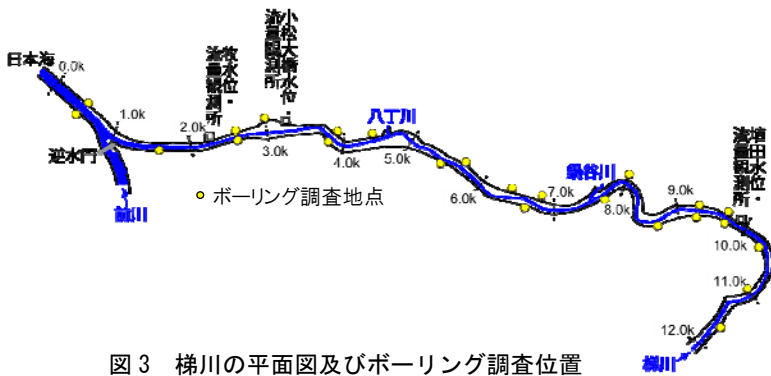


図3 梯川の平面図及びボーリング調査位置

表1 土質、N値による河川堤防のcとφの分類<sup>5)</sup>

| 土質  | N値         | 粘着力 (kN/m <sup>2</sup> ) | 内部摩擦角 (度) |
|-----|------------|--------------------------|-----------|
| 砂質土 | 16 ≤ N     | 13                       | 35        |
| 砂質土 | 6 ≤ N ≤ 15 | 8                        | 36        |
| 砂質土 | 0 ≤ N ≤ 5  | 1                        | 37        |
| 粘性土 | 0 ≤ N ≤ 5  | 5                        | 32        |

って手法の妥当性が示されている。内田の式を適用するにあたり、内田の式、鉛直二次元浸透流解析、キャサグランデ法による浸潤線の比較を行った。堤体内は透水係数 0.0025m/s の一様な砂質土を想定し、降雨浸透及び基礎地盤への鉛直浸透は無視した。河道水位は、6時間かけて 2.2m まで上昇させた。鉛直二次元浸透流解析における初期飽和度には 0.6 を与えた。図2に6時間後の浸潤線の算定結果の比較を示す。内田の式による浸潤線は、鉛直二次元浸透流解析及びキャサグランデ法に比べて、裏法の浸出点が若干高めに算出されているが、その差はわずかであり、他の手法とほぼ一致することが確認できる。

堤体の浸透破壊に関しては、安全性基準が確立されていないため、本手法では、水位上昇～ピーク時までを対象とし、式(2)で計算される浸潤線が、裏法面のいずれかの地点に達した場合に破壊判定とした。

### (3) 裏法の滑り

堤体裏法の滑り面の力の釣り合いを円弧滑り法<sup>1)</sup>によって評価する。粘着力と内部摩擦角によるせん断抵抗に対して、滑り土塊の重量が大きくなる場合、すなわち安全率が 1 より小さくなった場合に滑り破壊が生じるものとする。

$$F_s = \frac{\sum cl + (w - ub) \cos \theta \tan \phi}{\sum w \sin \theta} \quad (3)$$

ここに、Fs: 裏法滑りに対する安全率、c: 粘着力 (kN/m<sup>2</sup>)、l: スライス片の円弧長(m)、w: スライス片の重量(kN/m)、q: スライス片の斜面勾配、u: 間隙水圧 (kN/m<sup>2</sup>)、b: スライス片の幅 (1m で設定)、φ: 内部摩擦角(度)である。ここでは、裏法肩～法尻を包絡する円弧を仮定して計算する (図1)。

### (4) 破壊確率の算出

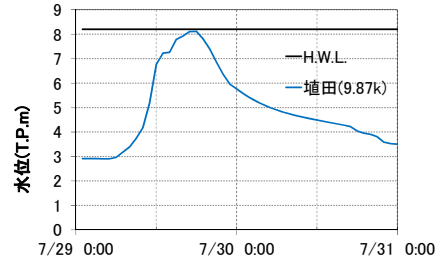
式(2), (3)に含まれる透水係数、粘着力、内部摩擦角は、堤体内の土質構造や築堤材料の不均質性等により不確実性を有する。本研究では、ボーリング調査で測定された堤体内の土質定数を、堤体内の代表値として

(a) 流量規模 (小松大橋)

| 洪水        | ピーク流量 (m <sup>3</sup> /s) | 洪水継続時間 <sup>※2</sup> (hr) |
|-----------|---------------------------|---------------------------|
| 平成25年7月洪水 | 761 <sup>※1</sup>         | 16 <sup>※1</sup>          |
| 計画ハイドロ    | 1000                      | 12                        |

※1: 観測値

※2: 高水数が冠水する時間



(b) 水位ハイドログラフ (埴田)

図5 梯川平成25年7月洪水の流量規模及び水位ハイドログラフ

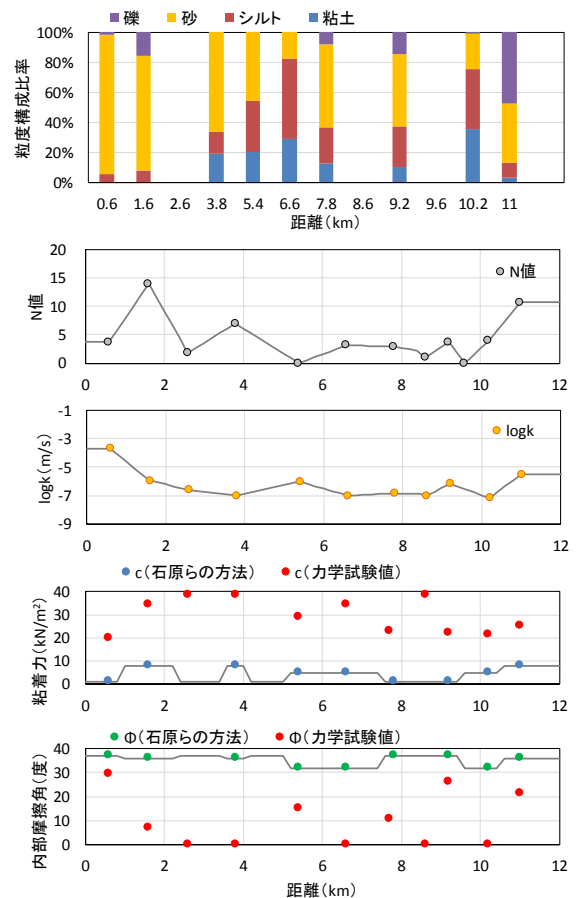
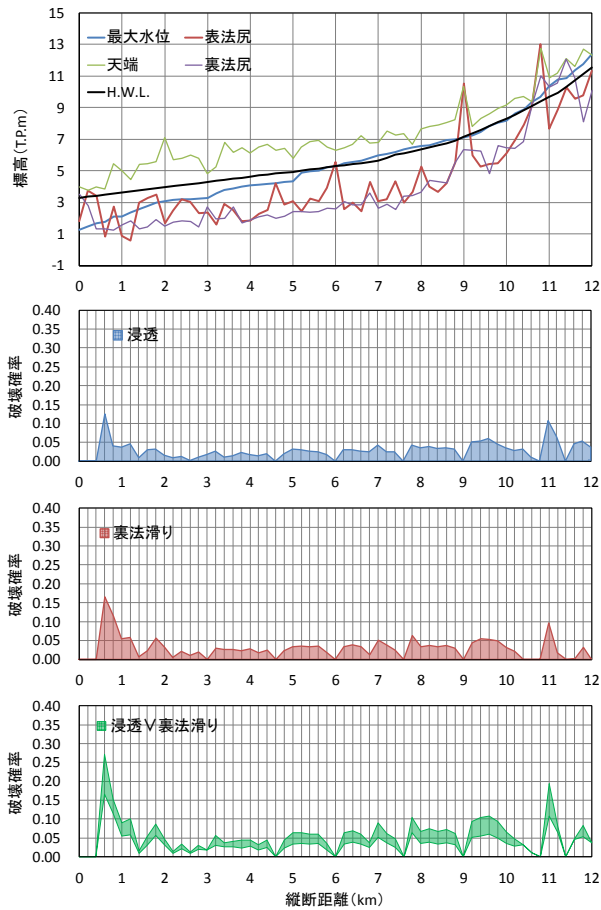
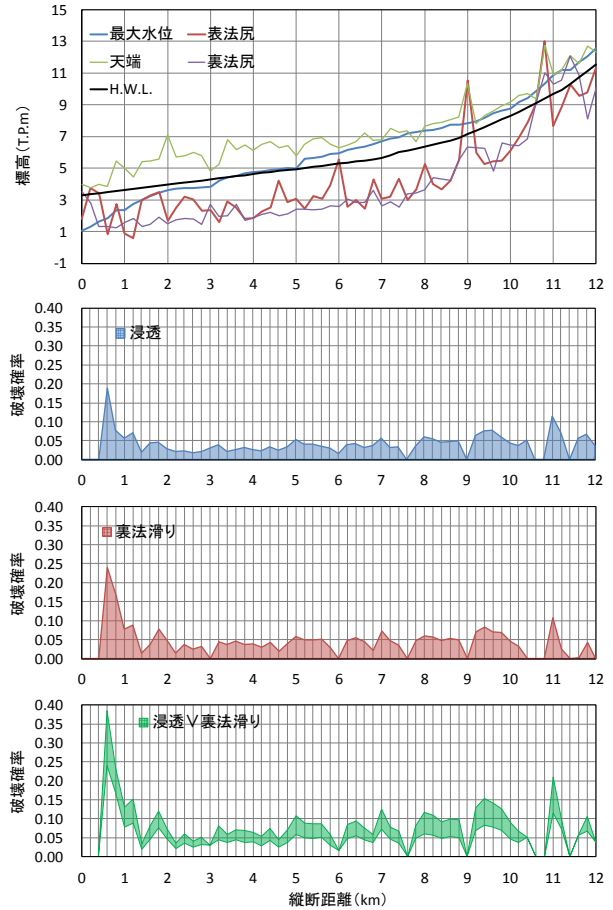


図4 設定した土質定数の縦断分布

扱うものとし、土質定数が正規分布または対数正規分布に従うとして、モンテカルロ法<sup>4)</sup>によってランダムに抽出した値を式(2), (3)に与えて浸透、裏法滑り破壊の有無を評価し、破壊判定となった回数を総試行回数で除すことで破壊確率を算出する。また、「浸透または裏法滑りが生じる確率」は、2つの破壊モードの和事象で表される。しかし、和事象の確率は、相互の相関の程度によって値に幅を持つため、正確に求めることが困難であることから<sup>4)</sup>、ここでは式(4)に示す範囲で表すものとする。



(a) 平成 25 年 7 月洪水規模



(b) 平成 25 年 7 月洪水×1.2 倍

図 6 梯川右岸堤防の破堤確率縦断分布の算定結果

$$P_f = P_{f1} \cup P_{f2}, \quad (4)$$

$$\max(P_{f1}, P_{f2}) \leq P_f \leq P_{f1} + P_{f2} - P_{f1} \cdot P_{f2}$$

ここに、 $P_f$ : 破堤確率, 添え字  $i$ : 破壊モード(1: 浸透, 2: 裏法尻)である。

### 3. ボーリング調査データに基づいた梯川の堤体内土質定数の設定

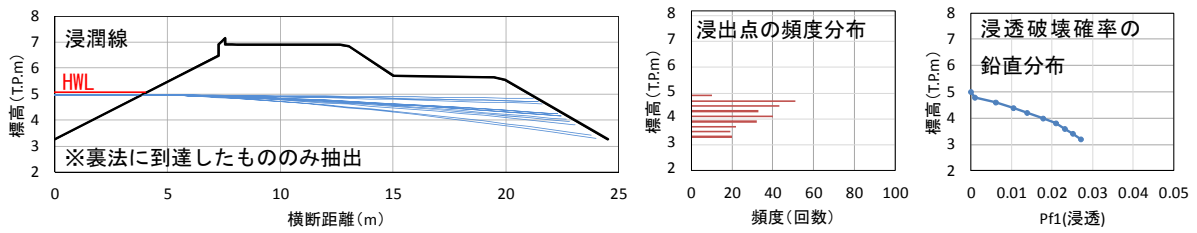
本研究で対象とする梯川の平面図を図 3 に示す。梯川では、平成 18 年から平成 20 年にかけて、左右岸堤防で計 24 箇所のボーリング調査が実施され、データが公表されている（国土技術総合政策研究所 HP 参照）。本検討では、堤体部分に相当するデータ（粒度分布、 $N$  値、10% 粒径、 $c$ 、 $\phi$ ）を抽出し、土層厚で荷重平均することで、調査地点における土質定数の代表値を設定した。透水係数は、10% 粒径から Hazen の式<sup>1)</sup>により推定した。集計した土質定数の縦断分布を図 4 に示す。これによると、河口付近では砂が多く存在し、透水係数が相対的に大きくなっていることが分かる。一方、 $c$  に関する力学試験値は全体的に  $20 \sim 40 \text{ kN/m}^2$  と大きな値が分布しており、これらを直接使用すると裏法尻の危険性を過小評価するおそれがある。石原ら<sup>5)</sup>は、堤体法面滑りに関しては、粘着力の値によって滑り安全率が大きく変わることから、粘着力と内部摩擦角の組み合わせを適切に設定することが重要であると、

全国の河川堤防のボーリング調査結果に含まれている非排水三軸試験から得られた膨大な数の強度定数を、 $c$ 、 $\phi$  の組み合わせで整理し、頻度の高い組み合わせを土質区分と  $N$  値によって分類している（表 1）。本研究では、石原らの方法によって  $c$ 、 $\phi$  を設定した。このようにして設定した  $c$ 、 $\phi$  を図 4 の青色及び緑色プロットで示す。これによると、 $3.8 \text{ k} \sim 7.8 \text{ k}$  付近ではシルト・粘土分が多いが  $N$  値が低いいため  $c$  は比較的小さめの値となっており、全体的に見て、粘着力は赤色プロットの力学試験値よりも小さめの値となる。透水係数の平均値の縦断分布は、ボーリング調査が実施されている箇所では調査データを直接与え、調査データが無い区間については、近隣のデータから内挿することで設定した。また、土質定数のデータのばらつきは、全国の一級河川で実施されたボーリング調査結果の公表値を基に集計した結果から得られた変動係数（=標準偏差/平均値）を与えるものとした。

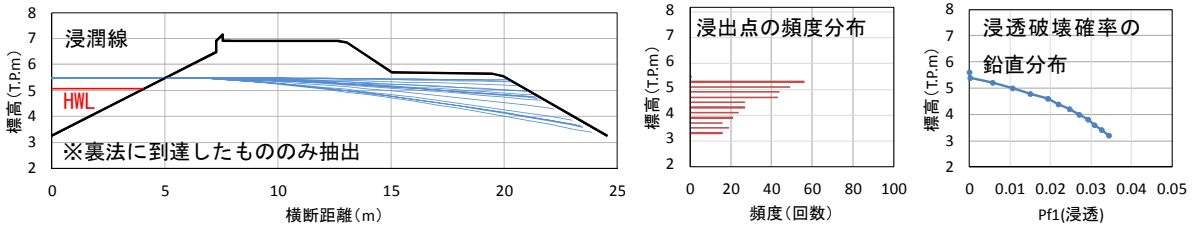
### 4. 梯川における堤防破堤確率の算定

#### (1) 平成 25 年 7 月洪水における堤防破堤確率

図 5 に梯川平成 25 年 7 月洪水の水位ハイドログラフを示す。平成 25 年 7 月洪水は、埴田地点でピーク水位がほぼ H.W.L. に達した。ピーク流量は小松大橋地点で  $761 \text{ m}^3/\text{s}$ 、洪水継続時間が 16 時間であり、ほぼ計画規



(a) 平成 25 年 7 月洪水規模 (5.4k 右岸堤防, ピーク時)



(b) 平成 25 年 7 月洪水×1.2 倍 (5.4k 右岸堤防, ピーク時)

図 7 浸潤線と裏法浸出点位置の発生頻度及び浸透破壊確率の鉛直分布

模に相当する洪水であった。本検討では、これまでに福岡が提案してきた、観測水面形の時間変化を用いた洪水流及び河床変動の一体解析<sup>6)</sup>により、梯川の洪水流を再現できるモデルを構築し、堤体前面の水位ハイドログラフを縦断的に算出した。

図 6 に堤防の破堤確率縦断分布を示す。ここでは、平成 25 年 7 月洪水及び、7 月洪水の流量規模が 1.2 倍になり堤防余裕高部分まで水位が達している超過洪水波形について水位を計算し、それぞれのケースにおける浸透及び裏法滑りによる破壊確率を示している。これによると、平成 25 年 7 月洪水では、透水係数の大きい河口付近で浸透による破壊確率が高まっていることが分かる。また、浸透が生じやすい箇所において裏法滑りの発生確率も増大しており、浸潤線の上昇が滑り破壊に対して危険になることが表現できている。流量規模が 1.2 倍まで増大した場合、粘性土を多く含む中流部では破堤確率に大きな変化は見られないが、砂質土を多く含む河口部付近では破壊確率が増大し、浸透または裏法滑りが生じる確率は最大で 0.4 程度にまで達していることが分かる。

## (2) 堤防断面内における浸出点の出現頻度

次に、裏法における浸出点位置と浸透確率の関係を調べた。図 7 に、5.4k 右岸堤防断面内において算出された浸潤線と、裏法の浸出点位置の発生頻度及び浸透破壊確率の鉛直分布をそれぞれ示す。ここに、裏法に到達した時には既に法先まで飽和状態になり、浸出していると考えられることから、裏法面における浸出点出現頻度を鉛直下向きに積分することで、破壊確率の鉛直分布を表現した。浸出点の頻度分布によると、透水係数が大きい場合に浸出点が高くなる傾向が見られる。これは、透水係数が大きいと浸潤線が上昇し、浸透長が短くなるためであると推察される。また、破壊確率の鉛直分布は、法先部分で最も大きくなる結果となり、その大きさは流量規模が大きくなると増大する。赤井<sup>7)</sup>は、堤体浸透が進行すると、まず法先付近の浅い部分が小規模な崩壊を生じた後、滑りを引き起こし

ながら徐々に法面上部に破壊が進行することを指摘しており、本手法においても、浸透によって法先部分が崩壊しやすくなる傾向を表しているものと考えられる。

## 5. 結論

水理解析と堤体ボーリング調査に基づいた信頼性解析によって、堤体浸透と裏法滑りの発生確率を算出する手法を提案し、梯川平成 25 年 7 月洪水に適用した。検討の結果、透水係数が大きく、浸潤線が上昇しやすい箇所において、浸透破壊の発生確率が増大すると共に、裏法の滑り破壊の発生確率も増大する傾向が表現できることが確認できた。

なお、 $c$ 、 $\phi$ の決定に関して独立行政法人土木研究所佐々木哲也氏、石原雅規氏のご指導を得た。また、梯川のデータに関しては、国交省北陸地方整備局河川計画課のご協力を得た。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 河川堤防の構造検討の手引き (改訂版), 財団法人国土技術研究センター, 2012.
- 2) Casagrande, A. : Journal of the Boston Society of Civil Engineers, pp.295-336, 1937.
- 3) 内田茂男: 自由境界を有する非定常浸透流について, 土木学会誌, pp.58-62, 1952.
- 4) 星谷 勝, 石井 清: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版社, 1986.
- 5) 石原雅規・平林 学・吉田直人・佐々木哲也, 圧密非排水三軸試験による強度定数と標準貫入試験及び物理試験結果の関係, 第 58 回地盤工学シンポジウム, pp.211-216, 2013.
- 6) 福岡捷二: 実務面からみた洪水流・河床変動解析法の最前線と今後の調査研究の方向性, 河川技術論文集, 第 20 巻, pp.253-258, 2014.
- 7) 赤井浩一: 浸透水流による盛土裏法面の局部破壊について, 土木学会論文集, No.36, pp.44-48, 1956.