

研究報告

堤防の信頼性評価について



桑島 偉倫

元河川政策グループ
研究主幹 総括



佐古 俊介

河川政策グループ
席主任研究員



井上 悟士

河川政策グループ
主任研究員

1. 信頼性評価の背景

1.1 河川堤防の来歴

古くから農業水利が発達し、河川を生活の糧を得る手段として活用してきたわが国では、水害のリスクが高い沖積平野に集落が立地し都市が形成されてきた。治水対策において、堤防は重要な役割を果たしているが、河川に強固な連続堤防を築き流路固定する治水手法は「紀州流」と呼ばれ、わが国の治水対策のスタンダードとなっている。

梅雨期や台風期といった出水期にはたびたび洪水に見舞われ、繰り返し堤防は強化されてきた（図 1-1 参照）。このため、堤防内部は必ずしも均質な構造となっているわけではなく、外形だけでその強度を推し量ることは難しい。さらに、堤防は盛土構造物である「土堤」が原則で、何らかの原因で損傷した際の復旧が容易であるという利点も有するが、その多くが築造する際に容易に材料が得られる、河床材料などで造られる場合が多い。つまり、堤防区間毎の構成材料が異なり堤防そのものの物性が異なるという事情も有している。

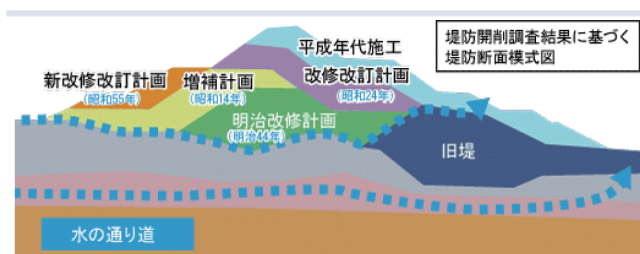


図 1-1 過去の河川改修による複雑な築堤履歴（土質構成）

こうした堤防の持つ不均質性や空間的ばらつきを背景に、出水時には漏水による被害や、のり崩れ、すべりによる被害が発生しているのが実態である。これら破堤による重大災害につながりかねないリスクについては、適正に分析・評価し、必要な対策を着実に実施していくことが課題

となっている。

1.2 質的安全度の向上へ向けて

わが国では、戦前から戦後暫くの間たてつけに大洪水に見舞われた時期があった。年間の降水量も多く、特定の時期に降雨が偏在する厳しい自然条件のなかで、氾濫原に都市が集積するようになると、洪水による被害が顕在化するようになった。当時は、河川内で洪水を処理する能力（量的安全度）が決定的に低かったこともあり、主たる治水対策の方策としてできるだけ多くの洪水を迅速に流下させることに主眼が置かれてきた。このため、堤防の整備や河床の掘削など、河川の流下能力向上が主体となり河川の整備が行われていた。

勿論、河川を整備するための技術的な基準も整備され、備えるべき堤防の形状、堤防の材料、施工管理などの基準化も行われ、新しく対策が実施される箇所においては、一定の信頼性を担保しつつ整備が進められてきたが、全面的にリニューアルされるケースは希であり、過去の履歴による不確実性を依然として内包していると言わざるを得ない。

また、河川の本整備が進むにつれて治水安全度も向上し、浸水被害を受ける面積は徐々に低下しつつある一方で、むしろ被害額は増加する傾向にある（図 1-2 参照）。このことは、水に弱い資産の増加等に見られるように、私たちの生活や社会が水害のリスクに対して脆弱となっていることの証左であると考えられる。このため、水害被害をうける頻度は低下したが、一旦水害が起こると被害が甚大となり、復旧・復興に要する費用や時間も大きくなることから、堤防等の治水施設に対し、より高い信頼性が求められるようになってきたと換言できるであろう。

さらに、地球温暖化による気候変化の影響が懸念されているが、降雨量の変化をみると水害被害の要因となる降雨量が、地域差はあるものの増加することが予測されてい

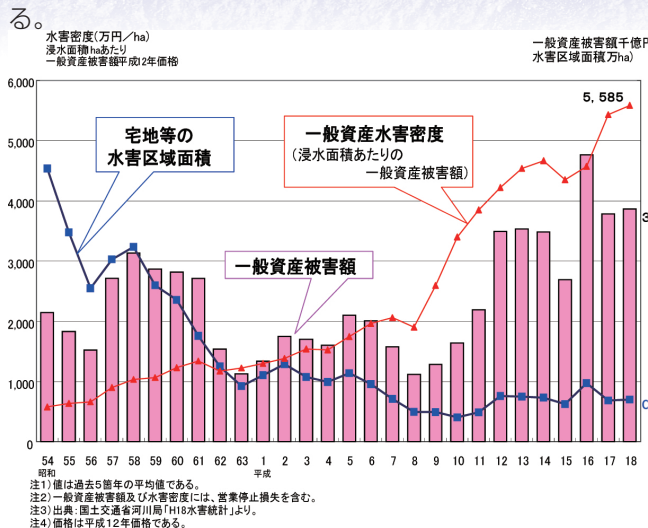


図 1-2 水害被害面積と被害額の推移

予測には不確実性が伴う一方で堤防自体の安定性（質的安全度）にも堤体の不均質性、空間的なばらつき等に起因する不確実性が内在していて、これらを可視化し必要な対策を講じていくことにより、リスクの低減を図っていくことの必要性が高まっていると言えるであろう。

以下で、堤防の安定性に影響を及ぼす「不確実性」の要因を分析するとともに、堤防の「信頼性評価」を行うための枠組みや手法について整理を行った内容について報告する。

2. 不確実性の分析

2.1 堤防の安定性に影響する要因

過去の被災履歴等から堤防の被災状況を区分してみると、概ね以下のように区分される。

- ① 堤体のすべりや法崩れに起因した欠損等
- ② 堤体や基盤からの漏水に起因したパイピング、盤ぶくれ
- ③ 堤体や河岸の洗掘に起因した欠損等

このうち、洗掘に起因したものは、堤体の構造自体の問題というよりも、洪水流下時の流向、流速や河床の変動と河岸の構造、耐力等との関係がより支配的な要因となることから、この検討からは除外して考えることとする。

堤防の浸透に対する安定性に影響を与える要因について整理すると、堤防に作用する「外力」の観点からは、降雨や河川水位、地下水位の条件等が挙げられる。また、堤防の「耐力」の観点からは、堤体基礎地盤の土質や既設の対策工等が挙げられる。

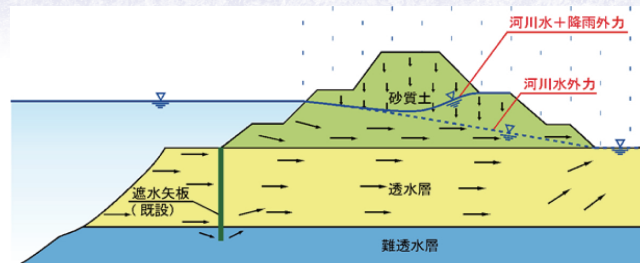


図 2-1 堤体に作用する外力

図 2-1 に浸透に関して堤体に作用する外力の概要を、表 2-1 に内在する不確実性・不確定性とともこれらを整理した。

表 2-1 堤体の安定性に影響する要因（浸透）

安全性に影響する要因		内在する不確実性・不確定性
外力	河川水位	・ピーク水位、継続時間、勾配変化点
	降雨	・総降雨量、降雨強度、継続時間
	地下水位条件	・初期地下水位の発達状況
耐力	堤体基礎地盤土質	・土質材料・土層構成のバラツキ、築堤履歴 ・要注意地形(旧河道)、被覆土層の有無
	土質定数	・土質定数(γ, t, C, ϕ, k)のバラツキ
	既設対策工	・遮水矢板、ドレーン工などの対策効果

2.2 堤防等土構造物の不確実性

盛土構造物の連続体である堤防の不確実性を評価する場合、鋼構造物やコンクリート構造物とは異なる観点からその評価を行う必要がある。不確実性は以下のように分類されるが、一般に構造工学の分野では、材料特性のバラツキは小さく、外力の不確実性が支配的な要因となる。

- ① 材料の性質や寸法、外力の本来の不確実性：荷重や強度、剛性や形状寸法等が本来的に持っているバラツキによる不確実性
- ② 統計的推定誤差：限られたデータから、荷重や強度等のバラツキを記述する確率モデルを決定したり、そのパラメータ値（母数）を推定することに関する不確実性
- ③ モデル化誤差：単純化や理想化された荷重や強度の確率モデルや、設計計算モデルの実現象の再現性に関する不確実性
- ④ グロス・エラー（ヒューマン・エラー）：人為的な誤りにより発生する不確実性

一方、地盤上に構築される盛土構造物においては、箇所毎に地盤の材料特性（地盤パラメータ）を調査・決定しなければならないうえ、それらが本来持っている空間的バラツキも大きい。荷重については、自重が相対的に大きい場合が多いが、自重のバラツキは比較的小さいため、相対的

に不確実性の程度が低いと判断できる。

これらを踏まえて、土構造物の考慮すべき不確実性の特性は表 2-2 のように整理することができる。堤防の不確実性を取り扱う場合、これらのうち重要視すべきと考えられる (2) 空間的バラツキ及び (3) 統計的推定誤差を対象として、信頼性評価の検討を進めることとする。

表 2-2 土構造物設計の不確実性

(1)調査・試験誤差	調査や試験に含まれる、いわゆる計測誤差。使用機器や計測者の違いによる偏差が含まれる可能性もある。一般に、定量的な解析は難しく、他の不確実性に比べて影響は小さいと考え、無視される場合が多い。
(2)空間的ばらつき	地盤パラメータを計測したときに経験される、空間的ばらつき。確率場(random field)としてモデル化される。地盤パラメータは本来それぞれの位置では決定値を持ち、既に存在しているが、「知識の不足から来る不確実性」を定量的に取り扱う便宜として、確率場により単純化・理想化して、モデル化する。
(3)統計的推定誤差	当てはめた確率場の統計量(平均、分散、相関構造等)や、指定された個々の点における地盤パラメータの値を、限られた地盤調査(サンプル)から推定するときの誤差。この場合も、地盤は確率場としてモデル化され、統計理論が展開されることになる。
(4)変換誤差	地盤調査の結果に基づき、設計で直接使用する地盤パラメータを推定する場合、このパラメータが直接に計測されておらず、地盤調査で直接計測された値から変換して推定する場合が、きわめて多い。例えば、 N 値から、内部摩擦角、ヤング率、相対密度など多くのパラメータが推定される。周知のように、この変換には大きな偏差と不確実性が伴う場合が多い。
(5)設計モデル誤差	設計計算に採用されたモデルが、現実の現象を再現する精度にかかわる誤差。地盤構造物の設計では、実大規模に近い試験が多数なされること、実際の破壊例が比較的多いことなどのため、この誤差を定量的に把握できる場合が多い。

出典：地盤工学会誌「地盤構造物の設計コードと信頼性設計法」

3. 堤防の信頼性評価

3.1 信頼性評価の手順

堤防の構造は「河川管理施設等構造令」などにより、治水計画上の河道で洪水処理をする目標流量（計画高水流

量）の規模に応じて、高さ、幅、法勾配等の外形の標準が規定されている。この場合、堤体の形状・構造は横断面で評価されており、本来、縦断的に連続することにより一定の機能を発現する堤防の信頼性を評価するには不十分と考えられる。

このため、堤防の信頼評価を行うにあたっては、河川縦断方向の一連区間を対象として、前節で述べた不確実性の評価を行い、単位区間毎の信頼性評価を行う枠組みを整理した。

また、信頼性評価結果より導き出される区間毎のフレンジリテリカーブをもとに、想定破堤区間の発生確率評価、及び氾濫ブロックのフレンジリテリカーブを算定することを検討の目的とする。図 3-1 に堤防の信頼性評価の流れについて示し、その要点について詳述することとする。

3.2 区間設定の考え方

堤防の区間設定にあたっては、洪水時の外力特性、堤体土質や基礎地盤の構成等が均質な一連区間を設定する必要がある。このため、堤防の詳細点検結果等を参照し、堤体や基礎地盤の土質区分や土質構成を確認しておくことが必要となる。また、築堤履歴の情報から堤体の均質性などを確認し、区間設定を行うことが不確実性を低減し、評価の信頼性を高めることにつながる（図 3-2 参照）。

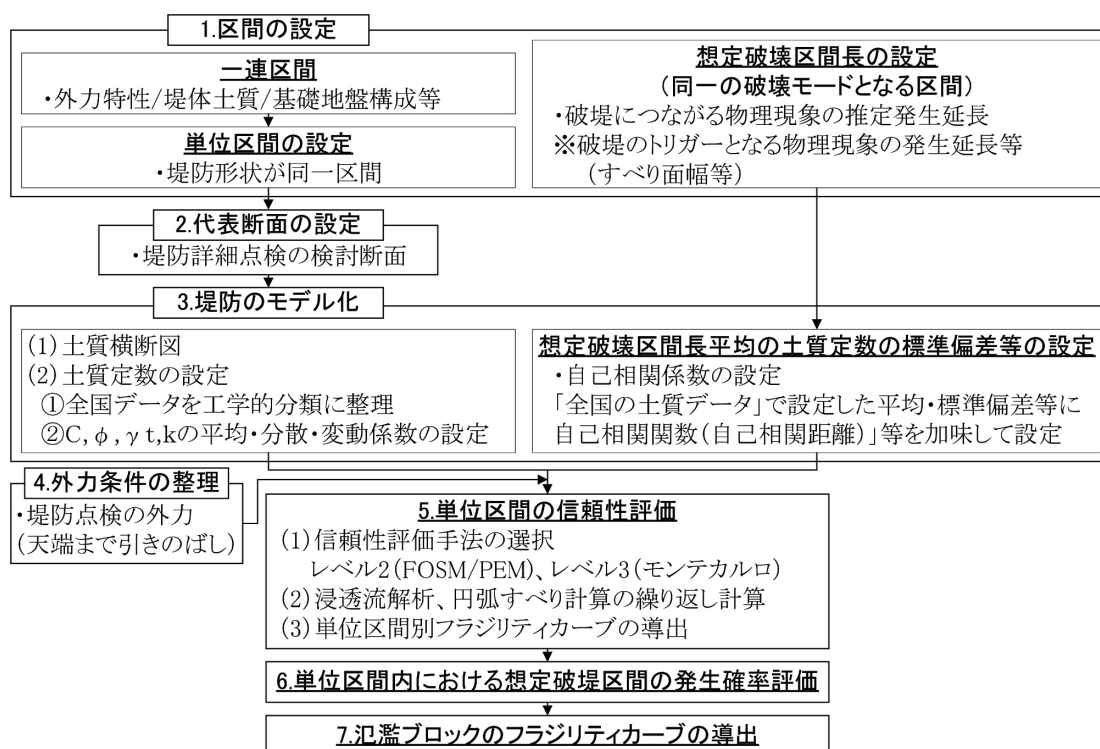


図 3-1 堤防の信頼性評価の流れ

モデル区間							
一連区間の設定 外力特性、堤体土質、基礎地盤構成等が同一である区間。 詳細点検における細分区間。							
外力特性	A				B		
土質	堤体	S		C		S	
	基礎地盤	C		S		C	
築堤履歴	2回				4回		
一連区間	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦

図 3-2 区間設定の概念図

3.3 堤防のモデル化

堤防の信頼性評価を行うためには、堤体を構成する土質材料の物性に着目し、客観的な評価が行えるようモデル化をする必要がある。堤防を構成する材料については、「河川土工マニュアル」で以下の条件を満たしているものが望ましいとされている。

- ① 高い密度を与える粒度分布であり、かつせん断強度が大ですべりに対する安定性があること。
- ② できるだけ不透水性であること、河川水の浸透により浸潤面が裏のり尻まで達しない程度の透水性が望ましい。
- ③ 堤体の安定に支障を及ぼすような圧縮変形や膨張性がないものであること。
- ④ 施工性がよく、特に締固めが容易であること。
- ⑤ 浸水、乾燥などの環境変化に対して、のりすべりやクラックなどが生じにくく安定であること。
- ⑥ 有害な有機物および水に溶解する成分を含まないこと。

また、実際の盛土に使用される土質材料は、程度の差こそあれ土質が変化するのが普通である。特に、河川土工では盛土材の入手方法から同一現場であっても取扱う土質が変化する可能性が大きく、現場では土質の変化を的確に判断して、できあがった盛土の品質が均質になることが重要となる。河川堤防では、盛土の品質を確保するため、従来盛土の締固め度を下限値で規定してきたが、使用する盛土材料が天然の土であり、材質がバラツキを有していること、仮に代表的なサンプルを用いて基準密度を設定しても、必ずしも品質管理上の代表値とはなり得ないことがあり、その適用には自ずと限界があると言わざるを得ない。したがって、盛土の品質規定値は下限値よりも平均値で規定しておくことが現実的であることも踏まえ、現在では堤

防の品質管理の規定を以下のように設定している。

平均締固め度： $\overline{Dc} = 90\%$ 以上

締固め度品質下限値： $Dc = 80\%$

堤防のモデル化にあたっては、堤防の強度、品質にとって重要となる堤体の土質定数（ C 、 ϕ 、 γ_t 、 k ）の分布について整理する必要があるが、上記を踏まえそれぞれの定数が正規分布すると仮定し、全国の堤防詳細点検の結果等から得られた平均値、分散、標準偏差等から設定を行った。

なお、今回の検討では自己相関関数（自己相関距離）については既存のデータを分析するだけでは、十分な確からしさを説明することが困難と判断されたことから、Honjo and Setiawan(2007)の研究成果より、指数型の関数をもちいることとした。

3.4 単位区間の信頼性評価手法

堤防のモデル化を行ったのちに、そのモデルを使って信頼性の評価を行うこととなる。一般的に、信頼性評価を行う場合の限界状態設計は、表 3-1 に示す 3 つのレベルに分類される。

表 3-1 信頼性評価法の分類

	基本変数	信頼性評価
レベル1	決定変数	部分計数 (γ)、荷重・抵抗係数等
レベル2	確率変数 平均、分散、共分散	信頼性指標 (β)
レベル3	確率変数 確率分布	破壊確率 (P_f)

このうち、レベル1 設計法は、部分係数 (γ) を荷重の特性値、耐力の公称値に乗じて割増（低減）し、

$$(\text{荷重}) \leq (\text{耐力})$$

となるように設計する方法であり、従来の設計法と型式が類似しているため、一般には理解しやすい方法である。

レベル2 設計法は、破壊モードに対する限界状態関数 (Z) の平均値と標準偏差から、信頼性指標 (β) を求め、

$$\beta \geq \text{目標信頼性指標} (\beta_T)$$

となるように設計する方法である。この際、土質データや地盤物性値は平均と分散を考慮した評価を行うこととなるが、分布形については正規分布するなどの仮定を置いて扱うなどの制約も生じる。

レベル3 設計法は、破壊確率 (P_f) を正確に評価できる方法であり、物性値等の分布形も考慮した評価が可能である。この際、全ての不確定要因の確率分布を正しく評価

することが重要となる。

以下で、Risk-Based Analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning Studies (USACE ETL1110-2-556) より、レベル2及びレベル3設計法の概略について示すこととする。

(1) レベル2設計法

レベル2設計法で扱う信頼性指標 (β) は、図 3-4 に示すように、破壊領域と安全領域の境界点と平均値との離隔を示すものである。

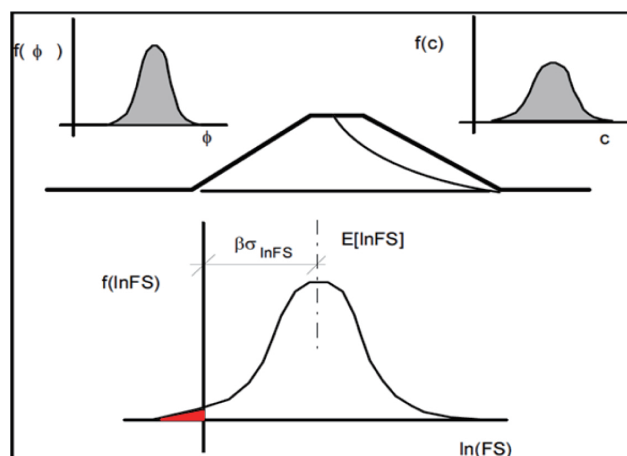


図 3-3 レベル2設計法（テーラー級数展開）の概念図

破壊確率は、確率密度関数を積分することにより得られる（※2）が、対数変数 X に関する確率密度関数（※1）は、次式により得られることとなる。

$$f(X) = \frac{1}{\sigma_Y \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln X - E[Y]}{\sigma_Y} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (\ast 1)$$

σ_Y は標準偏差で次式から得られる。

$$\sigma_Y = \sigma_{\ln X} = \sqrt{\ln(1 + V_X^2)} \quad V_X = \frac{\sigma_X}{E[X]}$$

さらに、

$$E[Y] = E[\ln X] = \ln E[X] - \frac{\sigma_Y^2}{2}$$

安全率 FS が X の場合、上式は次式となる。

$$E[\ln FS] = \ln E[FS] - \frac{1}{2} \ln(1 + V_{FS}^2)$$

このとき、 β は次式により得られる。

$$\beta = \frac{E[\ln FS]}{\sigma_{\ln FS}}$$

以上より、破壊確率は（※1）式を $-\infty$ から $\ln X$ まで積分することにより得られる。

$$\Pr(X) = \int_{-\infty}^{\ln X} f(x) dx \quad \dots\dots\dots (\ast 2)$$

(2) レベル3設計法

レベル3設計法は、構造物の限界状態をもとに破壊確率を直接算定するもので、信頼性評価手法としてモンテカルロシミュレーションを用いることが有効であると考えられる。

モンテカルロシミュレーションは、乱数を用いてシミュレーションを繰り返すことにより、客観的な近似解を求める手法であり、破壊確率の算定は以下の方法で行う。

- ① 確率分布条件下において、一様乱数を発生させる
- ② 得られた乱数の組合せを用いて、安全性評価を実施する
- ③ 以上を繰り返し実施し、破壊判定がなされた回数を全試行回数で除して破壊確率を求める

この手法は、破壊確率を直接算定できるというメリットを有するが、精度の良い結果を得ようとした場合には数多くの試行を必要とする。コンピュータの演算速度が飛躍的に向上した今日では優れた手法であると言える。

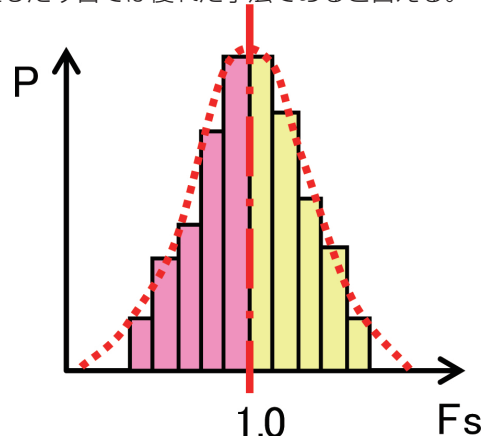


図 3-4 レベル3設計法（モンテカルロシミュレーション）の概念図

4. 今後の展開

堤防は盛土構造物であり、その多くが河道に存在する掘削土砂等で構成されており、一定の力学的性能・品質を担保することが本来的に困難な構造物である。本研究で述べた信頼性評価については、まだその緒に就いた段階で欧米でも同様の取り組みが行われているが、評価の精度は必ずしも高いとは言えず、未だ確立された分野ではない。

しかしながら、従前の形状等を規定した設計や施工管理を通じた品質管理から、洪水時の水位や降雨等の外力に対する信頼性を評価することにより、質的な安全性を確保する信頼性設計へ歩みを進めるための大きな契機となるものである。

また、洪水時の危機管理方策の一貫として、氾濫流のリアルタイムシミュレーション（氾濫流の到達時刻や浸水深等を状況に応じて随時予測更新）に取り組まれているが、洪水の状況に応じた破堤確率を随時算定するなど、上記と連動した危機管理対策が可能となれば、住民避難等のソフト対策の一助となるとも考えられる。

さらに、日常時の巡視・点検、調査結果等を蓄積し、堤体の変状や物性値の変化が、どの程度深刻な状況にあるのか、どの程度の維持修繕等の対策を行えば、どのレベルまで安全性が向上するのか等、維持管理の高度化、適正化にも資するものと思われる。

このように、単に堤防の設計法を改善するという視点だけではなく、幅広い可能性を秘めているということを念頭に置きつつ、さらに研究成果を深めていく努力を継続していきたい。

謝辞

本研究報告は、パシフィックコンサルタンツ（株）と共同で取り組んだものであり、多くの有用な示唆を与えていただいたことに、厚く謝意を表するものである。

参考文献

国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所HP（図1-1）

国土交通省河川局「水害統計」より作成（図1-2）

「地盤構造物の設計コードと信頼性設計法」

岐阜大学 本城勇介 地盤工学会誌 2010年10月

「河川土工マニュアル」平成21年4月（財）国土技術研究センター