

堤体土質の不確実性を考慮した河川堤防の 設計について

LEVEE DESIGNING TAKING INTO ACCOUNT OF UNCERTAINTY OF SOIL SITUATION

三木 博史¹・中山 修²・佐古 俊介³・堀越 信雄⁴
Hiroshi MIKI, Osamu NAKAYAMA, Shunsuke SAKO, Nobuo HORIKOSHI

¹正会員 工博 建設省土木研究所 土質研究室 (〒305 茨城県つくば市旭 1 番地)

²正会員 財団法人国土開発技術研究センター 調査第一部 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門 2 目 8-10 第 15 森ビル)

³正会員 工修 財団法人国土開発技術研究センター 調査第一部 (同上)

⁴応用地質株式会社 技術本部河川部 (〒330-8632 埼玉県土呂町 2 丁目 61-5)

River levees are important structures that protect life and property in floodplains, but there is as yet no established design methodology based on hydraulic and geotechnical knowledge. From the viewpoint of ensuring safety from seepage of flood waters, the empirical method of determining the required levee height and crown width according to flood discharge and designing levee configurations by specifying the gradients of levee slopes has been in use. Although levee construction based on the conventional shape-based approach has contributed to early enhancement of flood protection efficiency in floodplains, there are cases which the degree of safety of levees from floods is not clearly known.

In this study, utmost use was made of the results of levee excavation surveys conducted in the past, and the relationship between the density of soil survey points and the degree of safety of levees from seepage was investigated through seepage flow analysis and circular slip factor of safety analysis.

Key Words : River levee, levee design, safety of levees, seepage, modeling of levees

1. はじめに

河川堤防は、氾濫域の人命と資産を防御する重要防災構造物であるが、水理学的、土質工学的知見に基づく設計体系が確立しているとはいえない。特に、洪水による浸透に対する安全性の確保の観点からは、河川の流量に応じて堤防高と天端幅が定まり、のり勾配を規定することにより堤防形状を設計する手法が経験的に採用されてきた。^{1), 2)}

従来のいわば形状主義に基づく堤防の築造は、調査、設計ならびに施工の期間短縮というメリットがあり、度重なる浸水被害を受けていた氾濫域の治水安全度の

早期向上に寄与してきたものの、一方では、築堤材料や基礎地盤が異なっても同一の堤防断面となるため、洪水に対する堤防の安全性がどの程度確保されているのかが明確で無いともいえる。このため、洪水に対する堤防の安全性を客観的に照査する手法の開発が必要とされている。

本研究は、過去に実施された堤防開削調査の結果を活用し、堤防横断方向の土質調査の調査密度と浸透に対する堤防の安全性の関係について分析し、既設堤防の浸透に対する安全性評価にあたっての照査水準設定における留意事項を提案したものである。

2. 堤体の土質構造とモデル化

(1) 堤体土質構造

河川堤防の堤体材料は、河道の浚渫土や掘削土を用いている場合が多く、堤防の多くは洪水による災害を蒙るたびに嵩上げや拡幅等による補強が繰り返され現在に至っている。しかし、堤体の土質材料及び土質構造に関する情報は比較的希薄であり、土質構造の把握という観点からは、樋管の増改築にともない実施する堤防開削時の開削断面土質調査が重要な情報となる。

図-1 は堤防開削時に実施した土質調査結果に基づく堤体土質構造の事例である。両堤防とも 2 回以上の築堤履歴を有していることが読み取れるとともに、複雑な土質構造となっていることが理解できる。

(2) 堤防のモデル化

現在の土質工学の知見の基づけば、河川堤防の浸透に対する安全性は、堤防横断方向の 2 次元断面を適切にモデル化し、設定した外力条件のもとでのり面のすべり破壊、基礎地盤の浸透破壊（パイピング）に対する安全性を照査する方法が標準と考えられる。ここでモデル化とは照査の対象となるモデルを作成する、すなわち堤防の形状や土質構造をモデル化することであり、安全性の照査にあたり非常に高度で信頼性の高い解析手法を用いても、このモデル化が曖昧では、算出された安全性の確度は著しく低下することとなる。

築堤材料を予め選定し、材料や施工の品質管理も可能であるフィルダムや新設堤防の場合には、堤防のモデル化は容易であるが、図-1 に示すような築堤履歴を有する既設堤防の土質構造を忠実にモデル化しようとすれば、土質調査を相当密に実施することが必要となる。しかしながら、密に調査を実施することは、効率的にも経済的にも難しく、堤防開削時の土質調査事例が活用できる区間を除けば、一般には限られたボーリングと土質試験により堤防の土質構造をモデル化することになる。

図-2 は図-1 の a) に示す堤防の土質構造をモデル化した場合の例であり、3 種類の方法・仮定によりモデル化している。a) は開削調査結果に基づき忠実に堤防土質構造をモデル化したものである。一方、b) 及び c) はボーリング結果を基に堤防土質構造をモデル化したものである。前者は天端 1 本のボーリング結果を基にモデル化した場合であり、後者は天端及び表・裏のり面の合計 3 本のボーリング結果を基にモデル化した場合である。

1 本の場合には土質構造を水平層としてモデル化しているが、3 本の場合には天端と表のり面のボーリング結果があるため、築堤履歴を若干考慮したモデル化が可能となる。

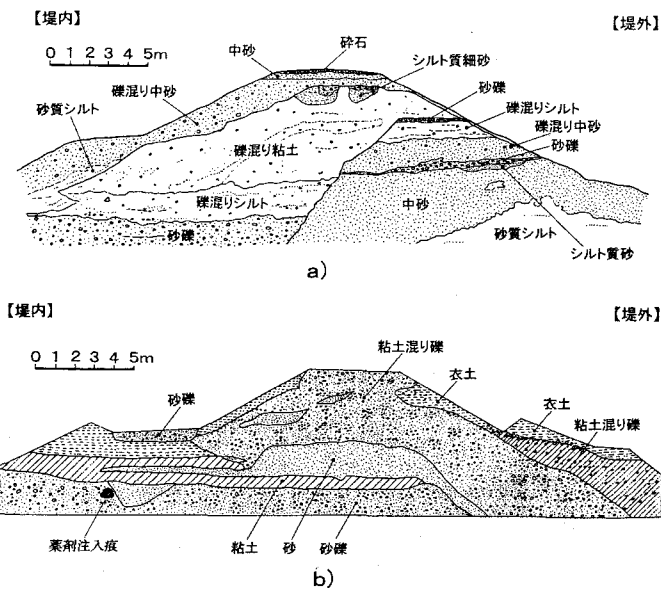


図-1 堤防開削調査断面の土質構造例

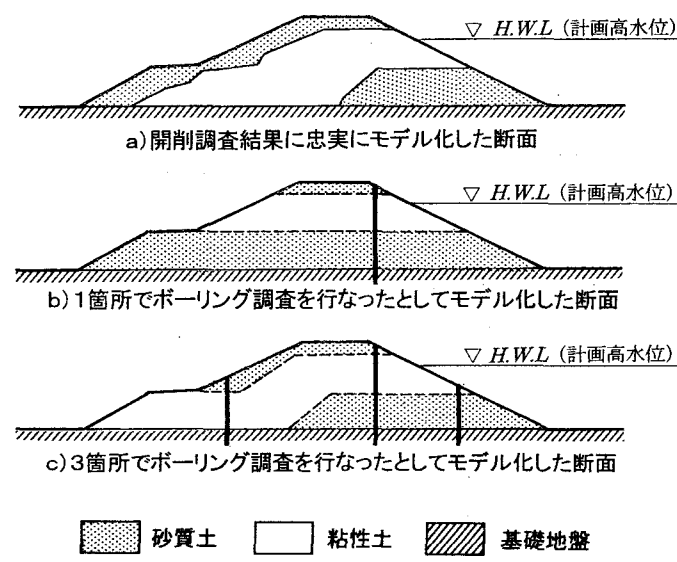


図-2 堤防モデル化の事例

3. 堤防のモデル化とすべり安全率

本研究は、堤防横断方向の土質調査密度、言い換えればボーリング配置密度と堤防モデル化との関係、さらには浸透に対する安全性との関係を把握することに主眼を置いている。

以下では、堤防開削時に断面土質調査を実施し、図-1 に示すような堤体土質構造が把握されている 12 箇所の堤防断面について、図-2 に示したようなボーリング配置密度に応じた堤体土質構造のモデル化を行った。

このモデル化した堤防断面を対象に浸透流計算を実施し、裏のり面の最小すべり安全率を算出した。検討にあたっての各種条件は以下の通りである。

(1) 検討の仮定と条件

a) 土質定数等

モデル化した堤防の土質は、礫質土、砂質土および粘性土の3種類に単純化し、それぞれ表-1に示すような土質強度及び透水係数を設定した。なお、基礎地盤も堤体と同様ボーリングの配置密度によりモデル化が異なるわけであるが、ここでは堤体の土質構造のモデル化と裏法すべり安全率との関係に主眼を置いているため、図-2のa)、b)、c)のモデルとも同一とし、基礎地盤を通るすべりが発生しない程度の強度を設定した。

b) 外力

河川堤防の浸透に対する外力は、河川水位と降雨であるが、本研究では計算条件の単純化のため河川水位のみを対象とし、計画高水位相当水位での定常状態を設定した。

c) 計算手法

浸透流計算は外力条件と連動し、有限要素法による定常計算とした。また、すべり計算は全応力法による円弧すべり法を用いた。

(2) 計算結果

前述した条件のもとで12箇所の堤防断面について計算した結果を整理し図-3に示す。堤防裏のりのすべりに対する最小安全率をプロットしたものであり、堤防開削調査に基づき堤体土質構造をモデル化した場合とボーリング1本の土質試料で堤体土質構造をモデル化した場合及びボーリング3本の土質試料で堤体土質構造をモデル化した場合の関係を示したものである。

堤防開削調査に基づき堤体をモデル化した場合の計算値を真値とすれば、ボーリング1本でモデル化したケースではすべり安全率のバラツキが著しく、標準偏差は0.29となる。一方、3本のボーリング試料により堤体をモデル化した場合には、バラツキは小さくなり、標準偏差は0.19となる。

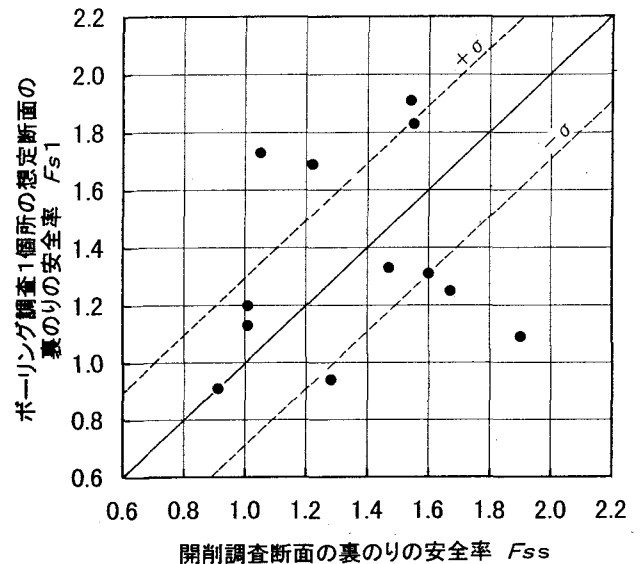
なお、図-2に示すa)、b)、c)についてみると、それぞれ最小安全率は1.28、0.94、1.15となっており、ボーリング1本の場合に比べ3本の資料に基づき堤体土質構造をモデル化した場合の値が真値に近づいている結果となった。

4. 考察

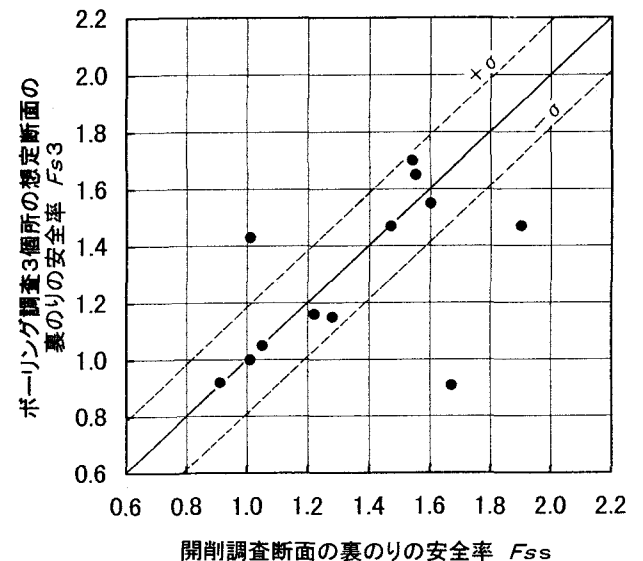
嵩上げや拡幅等の築堤履歴を有している河川堤防の浸透に対する安全性の評価にあたっては、堤防内部の土質構造をいかにモデル化するかが重要となる。堤

表-1 堤体及び基礎地盤の土質定数等

土 質	透水係数 k (cm/s)	湿潤密度 ρ (t/m ³)	粘着力 c (tf/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)
堤 体	礫質土	1×10^{-2}	1.90	0.1
	砂質土	1×10^{-3}	1.75	0.1
	粘性土	1×10^{-5}	1.60	2.0
基礎地盤	1×10^{-5}	1.60	5.0	0



a) ボーリング調査1箇所の想定断面と開削調査断面の安全率の比較



b) ボーリング調査3箇所の想定断面と開削調査断面の安全率の比較

図-3 堤体のモデル化とすべり安全率

防開削時の断面土質調査を実施しているよう区間を除けば、一般的にはボーリング等による土質調査に基づき堤防をモデル化することとなる。

堤防開削時の土質調査に基づき堤防横断方向の土質構造をモデル化した場合、すなわち堤防内部の土質構造が把握されている場合の浸透に対するすべり安全率を真値とすれば、1本のボーリング試料により堤防をモデル化した場合には、真値に対するすべり安全率のバラツキは著しく大きく、すべり安全率に対する信頼性は非常に低いものと考えられる。これに対し3本のボーリング試料により堤防をモデル化すると、築堤履歴や内部の土質構造をある程度再現することができるため、すべり安全率に対する信頼性は高くなる。

堤防をモデル化する場合、堤防横断方向にどの程度のボーリングを配置するかは非常に難しい課題であるが、図-3の浸透に対するすべり安全率のバラツキ程度でみれば、少なくとも3本程度が必要と考えられる。但し、内部構造が複雑な堤防の場合には、3本のボーリングを実施してもすべり破壊に対する安全率は真値（開削調査断面の安全率）に対し2割程度の誤差を有していることとなる。

一般に同一の土質材料を用い、材料や施工の品質管理が十分行える盛土構造物の場合には、すべり安全率を照査項目とし、1.2以上となるよう設計している事例が多い。^{3), 4), 5)}しかしながら、既設の河川堤防のように材料や施工等の品質管理が十分とは言えず、嵩上げや拡幅等により築造してきた複雑な土質構造を有する場合には、一定レベルの土質調査を実施しても盛土内部の土質構造を正確に把握するには限界があり、土質構造の不確実性が常に存在することとなる。

このため、既設堤防の浸透に対する安全性の照査にあたっては、堤防内部の土質構造の不確実性を考慮し、照査の目標水準を適切に設定することが重要と考えられる。本研究による成果を踏まえれば、複雑な築堤履歴を有する既設堤防の浸透に対するすべり安全率の目標水準は、堤防横断方向に最低3本のボーリング調査を実施することを前提に、通常の盛土構造物のすべり安全率の目標である1.2に、2割程度の割り増しをすることが妥当と考えられる。

ただし、本研究で対象とした事例は12断面と限られており、今後さらに事例を増して確度を高めていく必要がある。

なお、アメリカやオランダでは、河川堤防のすべり安全率の目標を照査条件によっては1.2以上を設定し

ている事例がある。^{6), 7), 8)}

5. おわりに

本研究は、過去に実施された堤防開削調査の結果を活用し、堤防横断方向の土質調査の調査密度と浸透に対するすべり安全率との関係を明確にしたものである。

堤体内部の土質構造が複雑な既設堤防においては、3本程度のボーリング試料に基づき堤防をモデル化する必要があることを提示するとともに、内部の土質構造の不確実性を考慮した安全性の照査水準を設定する必要性を示した。

河川堤防は堤体と基礎地盤が一体となり機能を発揮する構造物であることから、今後は、堤体のみではなく、基礎地盤の複雑さを取り入れた同様な解析が必要と考えられる。

また、河川堤防の延長が非常に長いことを考慮すれば、単に断面方向のみでなく線構造物としての洪水に対する安全性評価についての検討が必要であるとともに、非破壊調査の活用等による安価で効率的な土質調査法の開発が必要となろう。

参考文献

- 1) 財団法人国土開発技術研究センター編：改訂解説・河川管理施設等構造令、山海堂、2000。
- 2) 社団法人日本河川協会編：改訂新版建設省河川砂防技術基準（案）同解説、山海堂、1997。
- 3) 財団法人リバーフロント整備センター編：高規格堤防整備事業の手引、ぎょうせい、1998。
- 4) 社団法人日本大ダム会議編：第2次改訂ダム設計基準、1978。
- 5) 社団法人日本河川協会編：増補改訂防災調節池等技術基準（案）、1988。
- 6) 中山 修：諸外国の河川堤防、世界の河川情報、（社）世界の河川情報、1997。
- 7) US Army Corps Engineer：Design and Construction of Levees, Engineer Manual, No. 1110-2-1913, 1978。
- 8) CUR, TWA：Guide for the design of riverdikes, 1991。

(2000. 4. 17 受付)