

河川堤防の浸透に対する照査・設計のポイント



洪水後の河川沿いの堤内地では、写真のクレーター状のもの（噴砂痕）が見られる場合がある。「ガマが噴く」と言われるもので、河川沿いでは多く見られた現象である。戦後、止水矢板が施工され、堤内地が市街化される際の盛土等により、このような現象が発生する場所は少なくなっている。

上の写真は2012年の九州北部豪雨において矢部川左岸16.0k付近の田圃に発生したガマを写したものである。矢部川沿いの田圃では多数発生した。その後の調査で、基礎地盤の土質構造から漏水に対する対策が必要な箇所であったことが確認されており、洪水時の事象を見逃さず調査・検証することが重要である。

写真とよく似た噴砂痕は、液状化によっても生じ、東日本大震災でも多く発生した。

平成26年7月

独立行政法人土木研究所

地質・地盤研究グループ土質・振動チーム

目次

| | |
|--|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 堤防の被災形態 | 2 |
| 2.1 浸透による／2.2 侵食による／2.3 液状化による／2.4 樋管（附帯構造物など）まわりの堤体土の被災 | |
| 3. 堤防の構成 | 7 |
| 3.1 堤防を構成する要素／3.2 土の見分け方／3.3 築堤履歴／3.4 基礎地盤・地形等の影響 | |
| 4. 照査・設計の手順 | 14 |
| 4.1 浸透に対する／4.2 侵食に対する／4.3 地震に対する | |
| 5. 土質定数 | 18 |
| 5.1 浸透に対する照査・設計に係る定数／5.2 定数の設定法／5.3 密度と含水状態の定数／5.4 透水係数の推定／5.5 強度定数を求めるための試験法の種別／5.6 圧密条件とは／5.7 排水条件とは／5.8 拘束圧の設定／5.9 強度定数のチェック／5.10 安全率と定数の関係 | |
| 6. 被災しやすい堤防の見方 | 29 |
| 6.1 被災しやすい堤防の断面形状／6.2 被災しやすい堤防の土層構造のとらえ方／6.3 過去の堤防の詳細点検結果の活用 | |
| 7. 堤防の浸透対策 | 33 |
| 7.1 破壊形態に対応した対策の考え方／7.2 浸透流計算結果の確認／7.3 すべり円弧の形状等の確認／7.4 局所動水勾配の照査位置の確認／7.5 GW の照査位置の確認 | |
| 8. 断面拡大工法 | 38 |
| 8.1 断面拡大工法の設計／8.2 近隣への影響の回避／8.3 断面拡大工法に適した材料／8.4 断面拡大工法の施工 | |
| 9. ドレーン工法 | 42 |
| 9.1 ドレーン工法の設計／9.2 ドレーン工法の効果が高い堤防・低い堤防／9.3 ドレーン設置時の既設堤防の掘削範囲 | |
| 10. 表のり面被覆工法 | 45 |
| 10.1 表のり面被覆工法の設計／10.2 表のり面被覆工法の効果が低い堤防土質構造 | |
| 11. 川表遮水工法 | 47 |
| 11.1 川表遮水工法の設計／11.2 川表遮水工法の効果が低い基礎地盤 | |
| 12. ブランケット工法 | 49 |
| 13. 堤内基盤排水工法 | 50 |
| 14. 天端舗装工 | 51 |
| あとがき | 52 |
| 参考資料 | 53 |
| 巻末資料 | 54 |
| A1.土質定数と必要な土質試験法／A2.河川堤防の詳細点検フロー／A3.単位体積重量 γ の一般値／A4.飽和透水係数 k の一般値／A5.Hazen の式／A6.Creager の方法／A7.福田・宇野の方法／A8.粘着力 c の一般値／A9.内部摩擦角 ϕ の一般値／A10.強度試験結果の集計／A11.Taylor 安定図表の補足説明 | |

1. はじめに

- 1) 主要な河川構造物としての河川堤防は国民、地域住民、家族とその財産を護る崇高な使命を担っている。河川堤防は先人が築造し、現在我々の世代が受け継ぎ管理しているものである。我々はこれをより良い状態とし、子孫に引き継いで行かなければならない。
- 2) 河川法(明治 29, 1896)で河川制度が誕生し、昭和 39 年(1964)には治水に利水を加えて水系一貫管理を導入した現行の河川法の制度が確立した。この河川法改正に併せて、現在の河川堤防の基本的な管理の拠り所となる「河川管理施設等構造令(昭和 51.7)」が制定された。その後、河川法の目的に河川環境の整備と保全を取り入れた河川法改正(平成 9, 1997)がなされ、現在の河川法に至っている。
- 3) 河川堤防は、平成 9 年の河川砂防技術基準設計編の改正の中で、経験的「形状主義」の設計に「性能・機能」の照査を加える設計が導入された。平成 14 年には河川堤防設計指針が策定され、全国的に洪水の「浸透」に対する安全性照査が実施された。平成 16 年には破堤を含む大水害が多発したことを契機にして、直轄堤防に限定されているが、河川堤防の照査結果に基づいて、直轄約 1 万 km の約 3 割強の区間が弱部とする評価が初めて公表された。ただし、河川堤防の照査は、地盤工学的に専門的な内容が多く含まれるため現場の職員にはその詳細が理解しにくい部分が多い。そのため、照査による評価精度の向上、対策の優先箇所の絞り込み検討等のためには、現場の職員が照査結果を理解しチェックできるような手引書が必要とされている。また、導入された照査手法についても発展途上のものであり、現地の堤防を強化するに当って、現地の経験を地盤工学や河川工学の知見に基づいて理解することが重要であることは現状においても変わらない。堤防は延長の長い線状の土構造物のため、断面の照査だけで安全性を評価しきれない点には留意しなければならない。
- 4) 一方、レベル 2 地震動に対する「耐震性能照査」が平成 19 年より開始されているが、東日本大震災の教訓を踏まえ基礎地盤の液状化だけでなく堤体の液状化も含めて一体的に照査可能な手法の検討が進められている。本資料では浸透面の堤防設計に主眼を置くが、外力が洪水か地震かで異なるものではなく、堤防強化はあらゆる外力について一体的に検討し、総合的に堤防が強化できる対策としなければならない。このため、堤防強化についても浸透、侵食、地震を一体的に学習すべきである。
- 5) 河川堤防は河川近傍で得られた土砂により築造されてきた履歴を持ち、長期にわたる維持管理を容易にすることなどから「土堤」が原則とされる。しかし、その土堤は災害の発生に対応し嵩上げや拡幅がなされてきたことから様々な土質材料が使用されている。同じ粒状の土粒子でも、粘土、シルト、砂、礫、巨礫に見られるように、粒径(粒の大きさ)が著しく異なる。それらの集合体としての土の力学特性(「応力～変形」挙動等)は、粒径の分布だけでなく土が受けている圧力(拘束圧)や含水比、土の粗密(体積変化や間隙水圧の変化という複雑な挙動と相まって)によっても異なる。すなわち、一言で「土堤」といっても、実際の堤防は様々な異質の材料によって構成されているものと考えらるべきである。
- 6) 本資料は、そのような土堤の実情を踏まえながら、現場の職員の参考となるよう堤防の設計に当ってのポイントを取りまとめたものである。本資料を活用することにより、業務成果の精度向上が図れ、結果的に要対策区間の絞り込み、対策優先箇所の選定が適切に行われることにつながる。また、質的整備に係る地質調査成果と照査・設計成果は、その多くが電子化され、活用しやすい環境が整いつつあるので、これらを活用し、精度向上を図ることも忘れてはならない。本資料を通じて、これら土質物性に親しみ、馴染むとき堤防の声が聞こえるに違いない。
- 7) 新たに得られた知見や皆様のご意見をもとに、本資料を更新する予定である。

2. 堤防の被災形態

2.1 浸透による

—視点—

- 洪水時，降雨および河川水の堤体および基礎地盤への浸透による被災形態
 - ・ のりすべり，パイピング

—ポイント—

- ☞ 過去の被災発生位置，堤防の構造諸元とその形態は？
- ☞ 発生が懸念される被災の位置，堤防の構造諸元と被災形態は？
 - ・ 過去の被災発生位置やその被災形態，基礎地盤を含めた堤防の構造諸元，被災原因を調べ，整理・蓄積しておくこと。川ごとに被害の発生しやすい場所，条件が違うため，この結果を踏まえて，一連区間の設定や代表断面の選定，点検結果の分析，対策の優先順位，対策工法を考えることが重要（2.2節も同様の主旨の問い）。また，過去の被災発生状況と点検結果が整合しない場合もある。

—参考資料—

- ・ 河川カルテ*
- ・ 被災履歴
- ・ 詳細点検結果
- ・ 地質断面図
- ・ 河川堤防設計指針¹⁾
- ・ 河川堤防の構造検討の手引き（改訂版）²⁾など

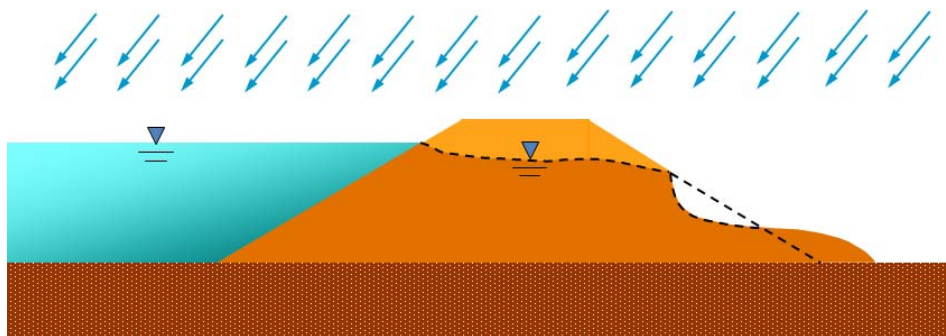


図 2.1.1 裏のりすべり

河川水だけでなく雨水が堤体に浸透することにより，堤防の重量が増えるとともに堤体土の強度が低下し，すべり破壊が生じる。裏のり尻及びのり面に浸潤線が達すると川裏のり面がすべり破壊を起こしやすくなる。河川水が急激に低下すると川表のり面がすべり破壊を起こしやすくなる。

*河川カルテとは：河川管理者が河川巡視や点検の結果，維持管理や河川工事の内容等を継続的に記録するものであり，河道や施設の状態を把握し，適切な対応を検討する上での基礎となる重要な資料である。基本カルテ，経時カルテ，施設カルテから構成される。

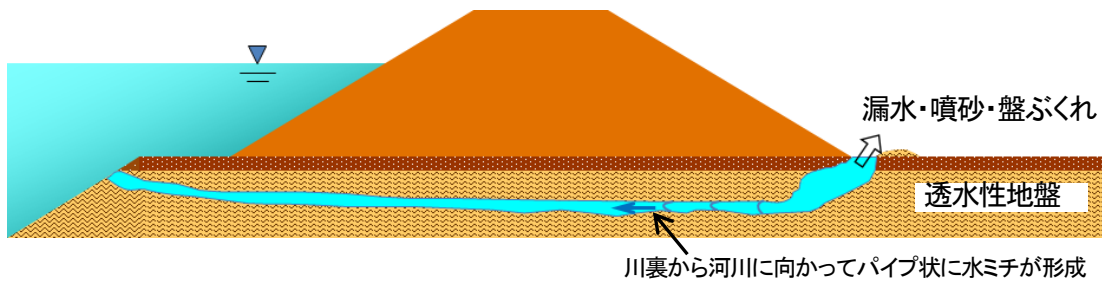


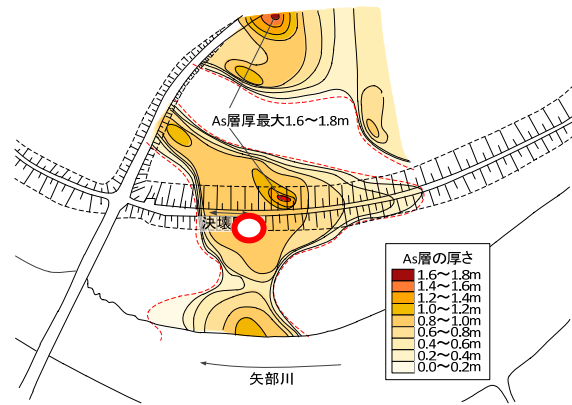
図 2.1.2 パイピング

河川水位が上昇し川裏のり尻付近の動水勾配が高まると、浸透破壊が起き、噴砂が始まる。堤内地盤に被覆土層が存在する場合には被覆土層下面に圧力が作用し、ある程度大きくなると盤ぶくれが生じる。さらに圧力が大きくなると被覆土層が破れ、漏水・噴砂が生じる。このような噴砂が継続すると、徐々にパイプ状の水みちが川表側に向かって形成される。漏水・噴砂は勢いを増し、堤防にとって有害な空洞が堤防下に形成される（下のコラム参照）。

～～矢部川の破堤（浸透による被災）～～



矢部川堤防決壊箇所付近（R7.3 付近）
の開削堤防断面からの地下水浸出状況



矢部川堤防決壊箇所付近（R7.3 付近）
地下水浸出状況確認位置（○）

（九州地方整備局提供）

2012年九州北部豪雨における矢部川の堤防決壊箇所（右岸7.3k付近）³⁾については、

- ・計画高水位を超え、その継続時間が長かった
 - ・基礎地盤上部に比較的透水性の高い砂層（以下、As層）が堤防を横断して分布
 - ・高水敷の砂礫層（Fg層）とAs層が繋がっていた
- 以上を要因として、以下のプロセスにより決壊に至ったものと推察される。
- ・河川水の上昇に連動しAs層の圧力が高まる
 - ・堤防のり尻付近でAs層上部の被覆土層（透水性の低いFc層）を破壊し、漏水・噴砂が生じた
 - ・漏水・噴砂（As層の土粒子の流出）により、堤防直下の空洞化が進行し、堤体が沈下・陥没
 - ・沈下・陥没箇所から河川水が溢れ出し、堤体を洗掘

また、復旧においては、①決壊により洗掘された基礎地盤も含め良質土で置き換え堤体を再構築し、②堤防の川表側の遮水矢板（川表遮水工法，11章）と③高水護岸（表のり面被覆工法，10章）により河川水の浸透を遮断することとしている。

ここでの重要な課題は、透水性の高い局所的な砂層の分布を把握することである。地形及び地質の成り立ちや出水時及び出水後の点検結果等を踏まえ、調査方法を工夫することも考えられる。なお、物理探査手法の活用など、局所的な分布を効率的に把握するための調査法については今後の技術的な課題でもある。

また、堤防決壊箇所以外にもガマの発生（表紙の写真）が確認されているようにガマの発生に留まった場合と、変状が進行し決壊に至った場合とが存在する。また、これら事例を収集・分析することにより、危険性の違いを把握し、対策に活かすことも重要な課題である（p31【堤防の声】参照）。

なお、ガマの発生などについては、現象を早期に発見し適切な水防活動を行うこと、また、各箇所でのガマの発生状況（範囲、大きさ、噴砂粒度等）を調査し、原因究明や災害復旧に活かし、記録を蓄積することも重要である。

2.2 侵食による

—視点—

- 洪水流による被災形態
 - ・ 高水敷および堤体表のり面の侵食
- 高水敷の侵食 ⇨ 低水路からの側方侵食, 洗掘に対する安全性

—ポイント—

- ☞ 過去の被災発生位置とその形態は？
- ☞ 発生が懸念される被災の位置と形態は？

—参考資料—

- ・ 河川カルテ
- ・ 定期横断測量成果（経年変化による河道の変遷）
- ・ 河川堤防設計指針¹⁾
- ・ 護岸の力学設計法⁴⁾
- ・ 被災履歴
- ・ 河川堤防の構造検討の手引き（改訂版）²⁾
- ・ 堤防等河川管理施設及び河道の点検要領⁵⁾ など



図 2.2.1 侵食による被災 (H23.9・音更川)

河床面や堤防のり面上に作用する洪水流による力（掃流力）が土砂の移動限界（限界掃流力など）を越えると土砂が流送されるようになり、その流送量に見合う土砂が流れの上手から供給されない場合に侵食が進行する。土砂の移動限界は、粒径や粘着力などの土質、河岸や堤防の裏面の勾配などの地形、植生等の地表の被覆状況等により変化する。

2.3 液状化による

－視点－

- 地震時に、地震動および（基礎地盤と堤体の）液状化による被災形態
 - ・ 堤防沈下、はらみ出し等の変形、主に天端の縦断的な亀裂

－ポイント－

- ☞ 過去の被災発生位置とその形態は？
- ☞ 発生が懸念される被災の位置と形態は？
 - ・ 液状化による被害実績は、特定の河川にしかないため、他の河川の被害の状況を把握しておくことも重要である。基礎地盤の液状化に関しては干拓地や旧河道等において被災率が高い。また、自然堤防上にあった堤防を引堤等により地盤条件の悪い場所に移した区間も注意を要する。さらに、築堤材料として液状化しやすい砂を使っており、基礎地盤が粘性土の場合には、堤体の液状化により被災する可能性が高い。

－参考資料－

- ・ 河川カルテ
- ・ 被災履歴
- ・ 耐震点検成果
- ・ 地質断面図
- ・ 河川堤防設計指針¹⁾
- ・ 河川構造物の耐震性能照査指針・解説⁶⁾
- ・ レベル2地震動に対する河川堤防の耐震点検マニュアル⁷⁾



図 2.3.1 基礎地盤の液状化（1995年兵庫県南部地震・淀川）⁸⁾



図 2.3.2 堤体の液状化（2011年東北地方太平洋沖地震・阿武隈川）⁹⁾

地震動により基礎地盤または堤体下部の緩い飽和した砂質土層が液状化すると、これより上部の堤体を支えられず沈下するとともに堤体が横に引き伸ばされ縦断亀裂が発生する。

2.4 樋管（附帯構造物など）まわりの堤体土の被災

—視点—

- 軟弱粘土層の長期的な圧密による
 - ・ 底板下の空洞，樋管沿いの横断亀裂，継手の開き等
- 地震時に，地震（液状化等）による
 - ・ 底板下の空洞，樋管沿いの横断亀裂，継手の開き等
- 洪水時に，河川水の繰返し作用による
 - ・ 樋管周りの漏水，噴砂，吸出等

： 長期的な圧密や地震により周辺堤防に損傷があると洪水時に漏水等が生じやすい

—ポイント—

- ☞ 過去の被災発生位置とその形態は？
- ☞ 発生が懸念される被災の位置と形態は？
 - ・ 樋管周辺堤防は弱部となる可能性がある。過去の被災形態からは，樋管の止水性（継手部の止水板の破断や函体の亀裂）や底板下の空洞の有無（天端やのり面に抜け上がりの有無）などが着目点となる。

—参考資料—

- ・ 河川カルテ
- ・ 被災履歴
- ・ 重要点検箇所台帳（樋門編）
- ・ 地質断面図
- ・ 樋門等構造物周辺堤防詳細点検要領¹⁰⁾ など



図 2.4.1 樋管周辺での決壊（1986 年台風 10 号，小貝川）¹¹⁾

3. 堤防の構成

3.1 堤防を構成する要素

－視点－

➤ 強化等の対策を検討するための堤防を構成する要素：

①天端, ②表のり, ③裏のり, ④堤体, ⑤基礎地盤

－ポイント－

☞ 強化等の対策は堤防のどの部分に対応しているか？ (6章, 7章参照)

| | 浸透に対して望ましい状態等 | 典型的な対策※ |
|---------|---|--|
| ① 天 端 | できるだけ降雨を浸透させない | 天端舗装工 |
| ② 表 の り | できるだけ河川水, 降雨を浸透させない | 表のり被覆工 断面拡大 |
| ③ 裏 の り | できるだけ降雨を浸透させないが, 浸透水は抜けるのり尻構造へ | 断面拡大 (浸透し難くするため) ドレーン工 (浸透水を抜くため) |
| ④ 堤 体 | できるだけ大きく, 安定した形, 低透水, 高強度 築堤履歴を考慮し点検・設計精度の向上を図る (3.3節) | 断面拡幅 |
| ⑤基礎地盤 | できるだけ河川水を浸透させない(相対的に川表側が低透水の方がよい) 治水地形分類図, 地質縦断図等を参考に点検・設計精度の向上を図る(3.4節) | 川表遮水工 ブランケット 堤内基盤排水工 |

※周辺環境, 地盤条件等により, 対策には様々な留意事項がある. 例えば, 軟弱地盤の圧密沈下により小段が逆勾配となり雨水が堤体に浸透しやすくなることに対し, 断面拡大(一枚のり化)は有効であるが, 一方で, 圧密沈下がさらに進行し, 天端も含めた沈下や亀裂が生じる場合もあるので, 8章以降参照.

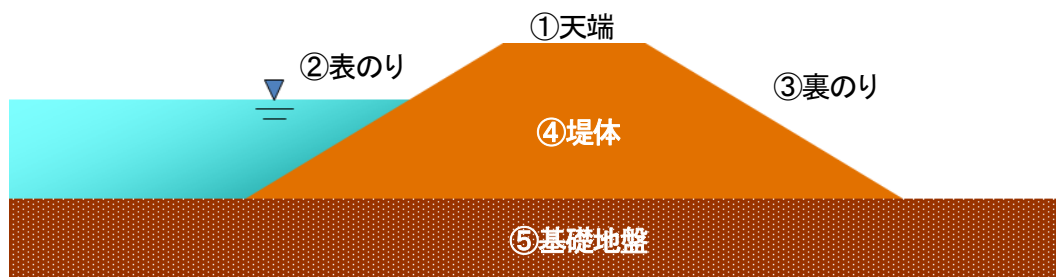


図 3.1.1 堤防強化等の対策の検討にあたり堤防を構成する5つの要素

～～堤防の形態と名称～～

“堤防は, 護岸, 水制その他これらに類する施設と一体として, 計画高水位以下の水位の流水の通常的作用に対して安全な構造とする”(河川管理施設等構造令¹²⁾(以下, 構造令)第18条)と規定されている. 構造令は, 堤防, 高規格堤防, 霞堤に適用され, 越流堤, 圍繞堤, 背割堤及び導流堤は構造令の適用外となっている. これらは設置目的に応じて個別にその構造を定めるものであることから構造基準を統一的に定めることは適当でなく, 実施例も非常に少ないためである.

3.2 土の見分け方

—視点—

- 土粒子：「粘土」「シルト」「砂」「礫」等
- 土粒子の構成比率 ⇒ 土の**粒度試験**：JIS A 1204
- 構成比率（「粒度組成」という）により，**堤体土**は，大まかに「**礫質土**」，「**砂質土**」，「**粘性土**」の土質に分類（構造検討の手引き参照）
- 土質分類や締固め度等 ⇒ 強度や透水性，耐侵食性等の**工学的性質が変化**

—ポイント—

- ☞ 堤防材料として**望ましい材料**はどんな材料か？
 - ・用いる場所（上流と下流，洪水継続時間など）や部分（3.1節参照）によっても異なり，実際に入手可能な材料（場合によってはブレンドや改良も検討する）の中でより良いものを選択するということを常に念頭におくべき。

—参考資料—

- ・ 地盤材料試験の方法と解説¹³⁾ など

| 粒 径 (mm) | | | | | | | | | |
|----------|--------|------|------|----|------|----|----|-----|----|
| 0.005* | 0.075* | 0.25 | 0.85 | 2 | 4.75 | 19 | 75 | 300 | |
| 粘土 | シルト | 細砂 | 中砂 | 粗砂 | 細礫 | 中礫 | 粗礫 | 粗石 | 巨石 |
| | | 砂 | | | 礫 | | | 石 | |
| 細粒分 | | 粗粒分 | | | | | 石分 | | |

図 3.2.1 土粒子の粒径と呼び名¹⁴⁾

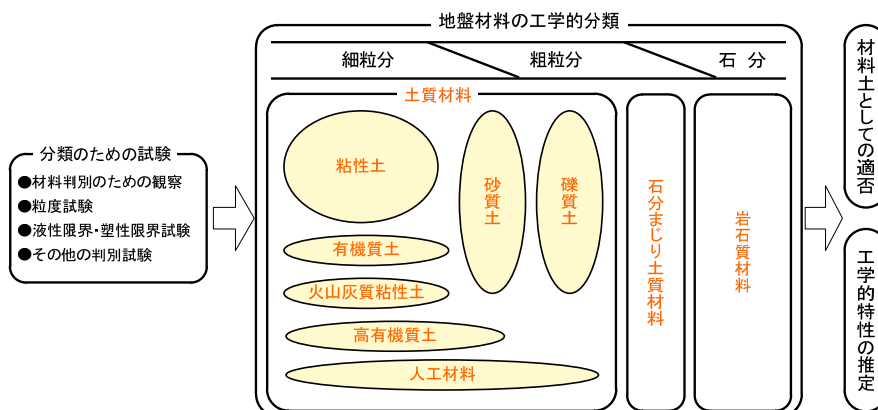


図 3.2.2 地盤材料の工学的分類¹⁴⁾

*国際基準：国際地盤工学会によれば，細粒分の2ケの区分変更（0.005→0.002，0.075→0.0625=1/16）が2004年に決定した。

参考URL：<http://www.iso.org/iso/catalogue.detail.htm?csnumber=34082>

| JIS A 1204 JGS 0131 | | 土の粒度試験 (粒径加積曲線) | | | |
|------------------------|--------|-----------------|-----------------------------------|-----------|--------|
| 調査件名 ○○調査 | | 試験年月日 | | 試験者 ○○ ○○ | |
| 試料番号 (深さ) | 砂質土1 | 砂質土2 | 試料番号 (深さ) | 砂質土1 | 砂質土2 |
| ふるい | 75 | 75 | 粗 礫 分 % | 0.0 | 0.0 |
| | 53 | 53 | 中 礫 分 % | 1.3 | 4.7 |
| | 37.5 | 37.5 | 細 礫 分 % | 1.9 | 9.9 |
| | 26.5 | 26.5 | 粗 砂 分 % | 17.0 | 25.2 |
| | 19 | 19 | 中 砂 分 % | 44.4 | 18.7 |
| | 9.5 | 100 | 細 砂 分 % | 21.5 | 10.2 |
| | 4.75 | 98.7 | シ ル ト 分 % | 8.4 | 17.3 |
| | 2 | 96.8 | 粘 土 分 % | 5.5 | 14.2 |
| | 0.850 | 94.5 | 2mm ふるい 通過質量百分率 % | 96.8 | 85.3 |
| | 0.425 | 79.8 | 425 μm ふるい 通過質量百分率 % | 79.8 | 60.1 |
| 析 | 0.250 | 35.4 | 75 μm ふるい 通過質量百分率 % | 13.9 | 31.5 |
| | 0.106 | 17.0 | 最大粒径 mm | 9.5 | 19 |
| | 0.075 | 13.9 | 60 % 粒径 D_{60} mm | 0.34 | 0.42 |
| | 0.0343 | 11.6 | 50 % 粒径 D_{50} mm | 0.31 | 0.32 |
| | 0.0222 | 10.5 | 30 % 粒径 D_{30} mm | 0.22 | 0.058 |
| | 0.0114 | 8.4 | 10 % 粒径 D_{10} mm | 0.018 | 0.0028 |
| | 0.0075 | 6.8 | 均等係数 U_c | 19 | 150 |
| | 0.0045 | 5.3 | 曲率係数 U_c | 7.9 | 2.9 |
| | 0.0035 | 4.6 | 土粒子の密度 ρ_s g/cm ³ | 2.640 | 2.573 |
| | 0.0020 | 3.5 | 使用した分散剤 溶液濃度、溶液添加量 | | |
| 降析 | 0.0015 | 2.9 | | | |
| | 0.0009 | 2.4 | | | |

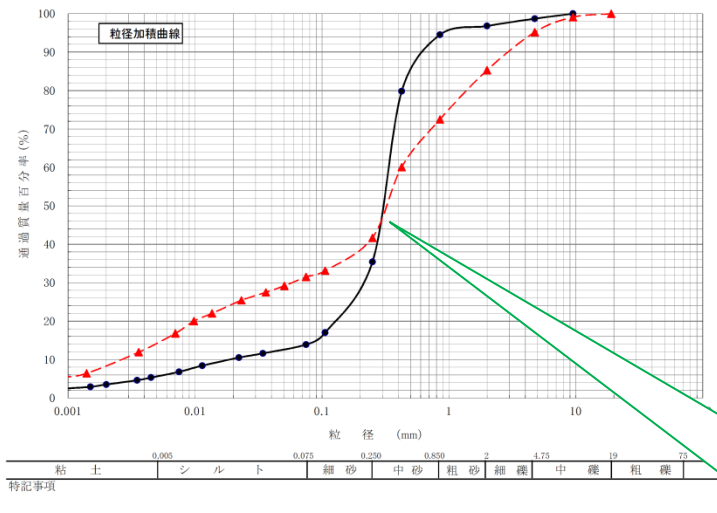
計 3.2% 礫の割合

計 82.9% 砂の割合

計 13.9% シルト・粘土の割合

- シルト・粘土の割合を細粒分含有率(Fc)という
- Fcが50%未満
砂より礫が多い土 → 礫質土
礫より砂が多い土 → 砂質土
- Fcが50%以上 → 粘性土

したがって、左に例示する土は「砂質土」と分類される。



更に、細かい分類をする場合には、

| 質量構成比 | 分類記号 | 接続記号 |
|------------|----------|---------|
| 15%以上50%未満 | ○○質 | なし |
| 5%以上15%未満 | ○○まじり | -(ハイフン) |
| 5%未満 | ※特に表記しない | なし |


砂 S(82.9%→主要)
 細粒分 F(13.9%→細粒分まじり)
 礫 G(3.2%→表記しない)
 したがって、細粒分まじり砂 (S-F)

赤線と青線の試料の違い？

- 50%粒径は 0.3 mm でほぼ等しい。
- 砂分は、青線は 80%近く均等な粒径、赤線は 40%で細粒分が多い。
- 結果として、透水係数は青線の土の方が高く、粘着力は赤線の土の方が大きいことが多い。

図 3.2.3 土の粒度試験結果の例

～～堤防の土を握ってみよう！！～～



- ☞ 締固めがしやすい土質か？
力を入れて握るほどよく締まる。
- ☞ 締め固まった土かどうか？
指で押したり、足で踏んだりしてみる。
- ☞ 透水性は？
指先で擦って細かい土の混じり具合をみる。細かい土が多いほど水を通しにくい
- ☞ 施工性は？
水を加えて足踏みしてみる。柔らかくなっていくようであれば、施工性は低い。

3.3 築堤履歴

－視点－

堤防は嵩上げや拡幅工事を経て作られた土構造物であるため、複数の土層が存在する。各土層を構成する土質の種類（粒度組成と締固めの状態等）、また各土層の組成による土層構造を示す堤防建設の履歴（工事年代、施工方法、土砂採取場所も含めて）のことを築堤履歴という。

- 堤体内に異なる性質の土層（分布形状）が存在（土層構造）
→ 浸透安全性を左右
- 土層構造により、堤防の力学特性は多様
 - ・ 力学特性とは、耐浸透性、安定性、耐侵食性、耐震性など
- 地盤調査結果だけでなく、築堤の工事記録、横断測量による堤防形状の変遷も加味しながら、築堤履歴を推定することが重要
- 既往の照査断面には上述の方法で推定されている場合も多いが、それでも開削調査結果と異なることも多い。築堤履歴の更新・保管は継続的に取り組むことが不可欠

－ポイント－

- ☞ 築堤履歴、工事記録、横断測量成果などの情報が整理・保管されているか？
 - ・ 古い工事記録についても順次電子化し、活用しやすい状況とすることと、対策の設計等においてもこれらの情報を活用する必要がある。
- ☞ 築堤履歴を反映した堤防のモデル化ができているか？
 - ・ 疑わしい場合には、工事記録などに立ち返って確認すべきである。

－参考資料－

- ・ 築堤記録
- ・ 河川史・事務所史
- ・ 工事記録
- ・ 近傍の開削調査結果 など

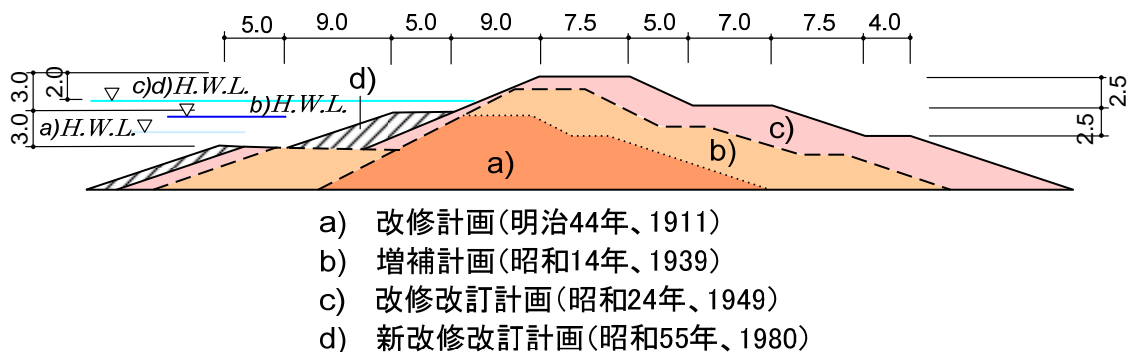


図 3.3.1 江戸川における堤防断面の変遷¹⁵⁾

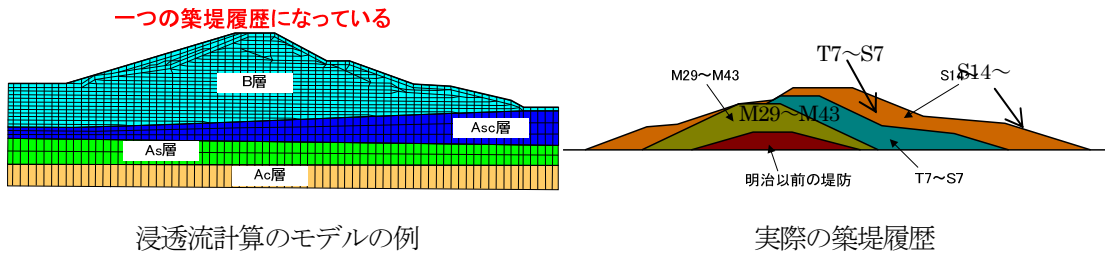
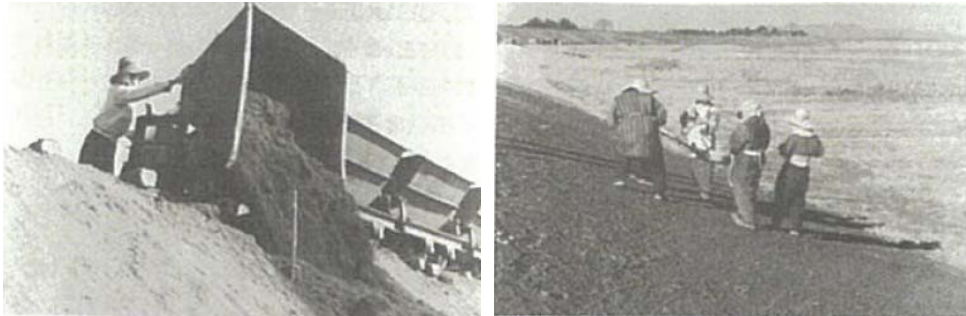


図 3.3.2 築堤履歴が考慮されていない計算モデルの例

~~典型的な築堤の歴史~~

改修計画に基づき施工されるようになったのは明治末期以降。それ以前の築堤工事では舟運などの理由（水深の確保）から低水路掘削土砂を用いて築堤された箇所も多い。また、明治末期以降においても十分な運搬機械がないため、手近な河床材を築堤材料として用いている。

施工方法は人力から機械施工へと推移した後も、築造中の堤防天端から撒きだして施工（堤体中に斜めの土質構造が残存）された時期もあり、堤体内の構造は一様ではない。



大正～昭和 30 年代に行われた撒き出しと人力による締固め¹⁶⁾



天端からの撒き出しによって形成されたと考えられる斜めの構造

3.4 基礎地盤・地形等の影響

—視点—

堤防の基礎地盤は、河道変遷による複雑な侵食（時として破堤箇所では深くまで掘れる）や運搬、堆積の作用により、その土質は種々である。それを包括的に把握するための情報は、地表の高低等を表す地形図、洪水と関連の深い微地形を分類して示した治水地形分類図がある。

- 堤防沿いの地盤の高低や微地形 → **基礎地盤の表層地質条件**を類推
- **河川・地形等の特徴**を把握することが重要
 - ・ 急流 or 緩流による堆積環境の違い： 縦断勾配
 - ・ 堤防基礎を横切る旧河道の湾曲性 or 直線性による堆積環境の違いなど
 - ： 治水地形分類図から判読（直線の場合には破堤の痕跡の可能性もある）
 - ・ 洪水時の水位の急変：河幅の変化（例えば、千曲川や吉野川など）
 - ・ 風化し易さ： 堆積土砂や堤防の土粒子の鉱物組成（細粒分の多少に影響） など

～～空中写真の利用～～

旧地形図や空中写真^{例えば17)}からは明治末期以降（空中写真はおよそ昭和20年代以降）の地形の変遷を読み取ることができる。例えば、旧河道部が耕作地へ変化していることや堤防が構築された状況（1947年になかった堤防が1976年には河川沿いに連続している）など、現状の地形のみでは把握できない情報を得ることができる。



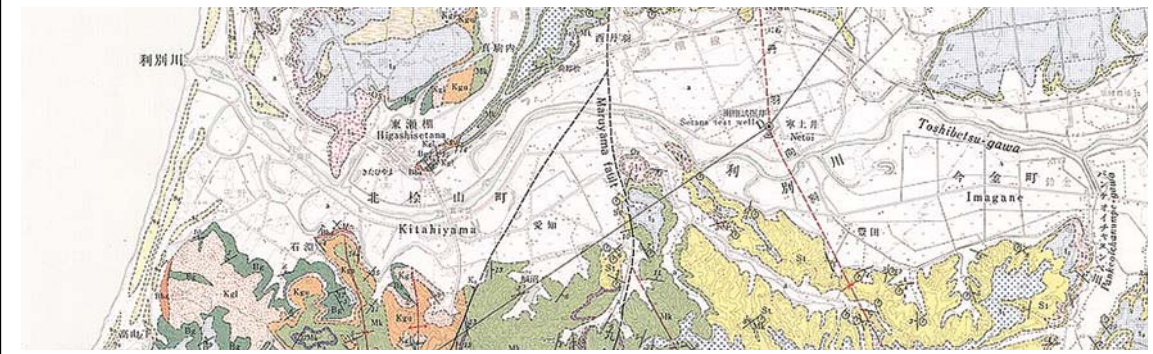
～～地質図の利用～～

地質図からは河川沿いや周辺の丘陵を構成する地質等の広域の地質情報を読み取ることができる。例えば、河川近傍に丘陵が存在する場合には基礎地盤の深部に丘陵を構成する地質が分布すると考えられる。

また、築堤材料の土取場が明らかな場合には、おおよその堤体材料を推定することもできる。

※産業技術総合研究所地質調査総合センター¹⁸⁾等から地質情報を閲覧可能

※縮尺は20万分の1、5万分の1等がある



ーポイントー

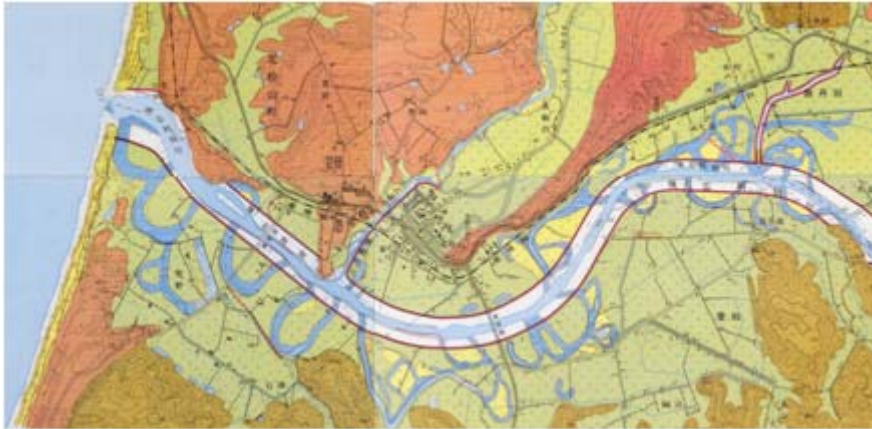
- ☞ 旧河道などの堤防の弱点部を照査・設計の代表断面に選定しているか？
- ☞ 検討する堤防はどのような地質・地形上に成り立っているか？
- ☞ 河川・地形の特徴（堆積環境等）を踏まえ基礎地盤のモデル化を行っているか？
 - ・ 上下流のモデルを並べて見たときに、河川の特徴と整合しているか確認する。（例えば、上流ほど透水係数が高く、下流ほど透水係数が低いかなど。）

ー参考資料ー

- ・ 治水地形分類図
- ・ 地質図
- ・ 旧地形図
- ・ 空中写真（過去からの変遷把握）
- ・ 地質縦断面図 など

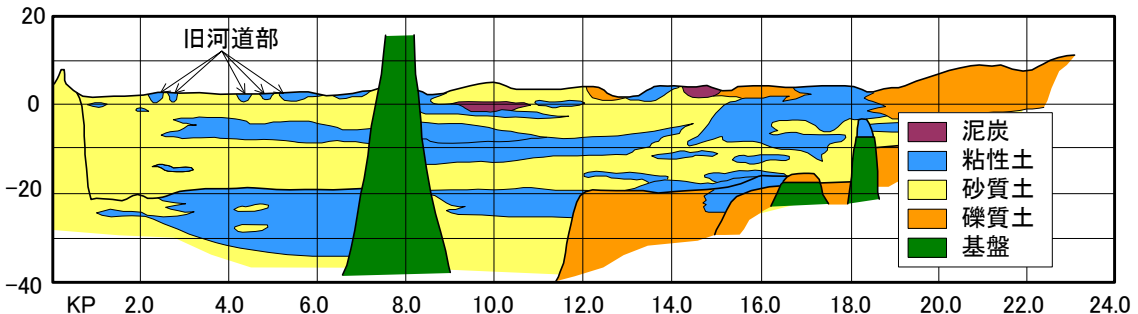
～～治水地形分類図の利用～～

治水地形分類図からは平野部の扇状地、自然堤防、旧河道、氾濫平野等の詳細な地形分類を読み取ることができる。例えば、後志利別川の下流部では、河口部の砂丘や河道沿いに複雑に分布する旧河道、旧河道沿いに形成された旧川微高地、自然堤防等をみることができる。ただし、治水地形分類図は万能ではない点に注意する必要がある。例えば、河道はさらに古い時代には別の場所にあったかもしれない。



～～既往地質縦断面図の利用～～

既往の地質縦断面図が作成されている場合、おおよその基礎地盤の構成を把握することができる。後志利別川下流部では砂質土を主体とした地盤構成であるが、旧河道部などでは地表面付近に粘性土や泥炭の分布が確認できる。



4. 照査・設計の手順

4.1 浸透に対する

—視点—

- 浸透に関する堤防の性能照査は、浸透流計算とそれから得られる浸潤面を用いた円弧すべり、パイピング、盤膨れによる堤防破壊に対する安全性の評価
- のりすべりの照査 ⇨ 円弧すべり安全率を $(1.2 \times \alpha)$ 以上確保
- パイピングの照査 ⇨ 局所の動水勾配を限界動水勾配以下に抑制
- 盤ぶくれの照査 ⇨ 透水層から被覆土層底面に作用する揚圧力を被覆土層土被り厚相当以下に抑制

—ポイント—

- ☞ 一連区間の細分は、基礎地盤の土質や微地形、堤防形状などを考慮しているか？
(3章参照)
- ☞ 代表断面は浸透に対して最も厳しい条件を有する箇所か？
厳しい条件：「堤内地盤が低い」、「堤防幅が狭い」、「局所的な砂層が分布」など

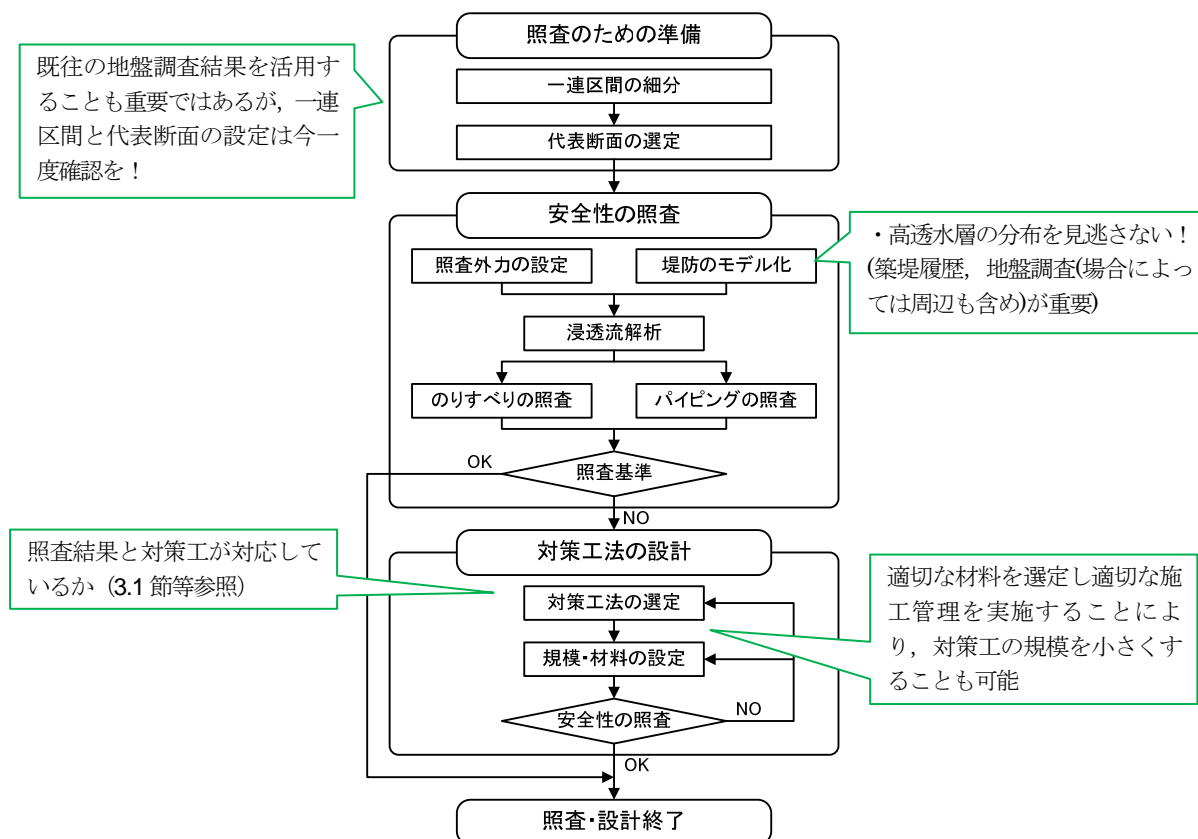


図 4.1.1 浸透に対する照査・設計の流れ²⁾

4.2 侵食に対する

－視点－

- 侵食に対する照査は「堤防表のり面・のり尻の侵食」、「高水敷の側方侵食」、「護岸の安定性」などの項目について実施する
- 侵食に対する安全性は河道の形状、高水敷の幅や高さ、土質、洪水流の水量、河岸・堤防を防護する構造物の工種、堤防の土質条件などに関係

➤ 法面の侵食の照査

植生、河床構成材料の侵食移動限界流速>代表流速

➤ 高水敷の側方侵食の照査

高水敷幅>洪水時に生じる侵食幅

➤ 護岸の安定

工種により照査項目は異なるが、以下の項目が基本

- ・ のり覆工、根固め工等の移動限界流速>代表流速
- ・ 基礎工、または根固め工の設計に用いた最深河床高<最深河床高

－ポイント－

- ☞ 一連区間の細分は、河道条件や堤防の構造（護岸の有無）などを考慮しているか？
- ☞ 代表断面は侵食に対して最も厳しい条件を有する箇所か？

厳しい条件：「流速が速い」、「河岸近くに深い局所洗掘が位置する」、「高水敷幅が狭い」など

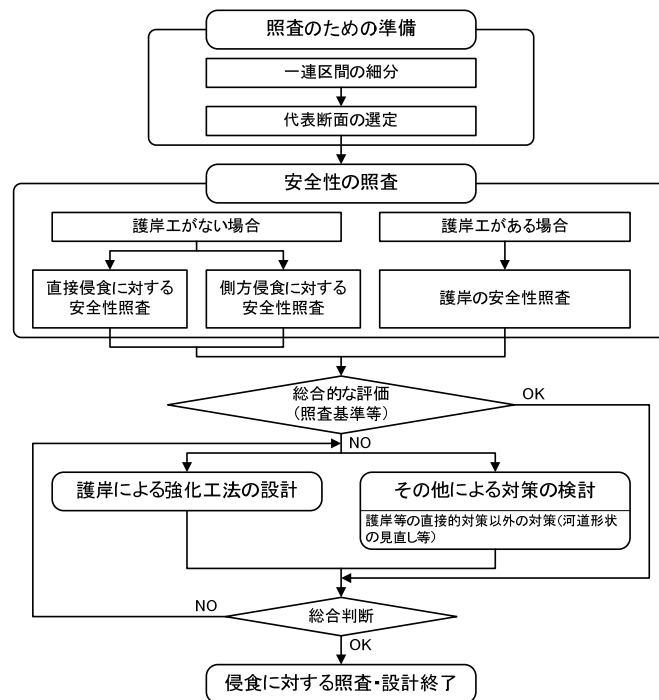


図 4.2.1 侵食に対する照査・設計の流れ²⁾

4.3 地震に対する

—視点—

- 基礎地盤の液状化 ⇔ 静的照査法により求めた沈下量 vs. 外水位
- 堤体の液状化 ⇔ 液状化しやすい土質 & 堤体内の飽和領域の厚さ

—ポイント—

- ☞ 一連区間の細分は、基礎地盤の土質や微地形、堤防形状などを考慮しているか？
(3章参照)

- ☞ 代表断面は地震に対して最も厳しい条件を有する箇所か？

厳しい条件：「許容沈下量が小さい」、「地下水位が高い」、「液状化層が厚い」など

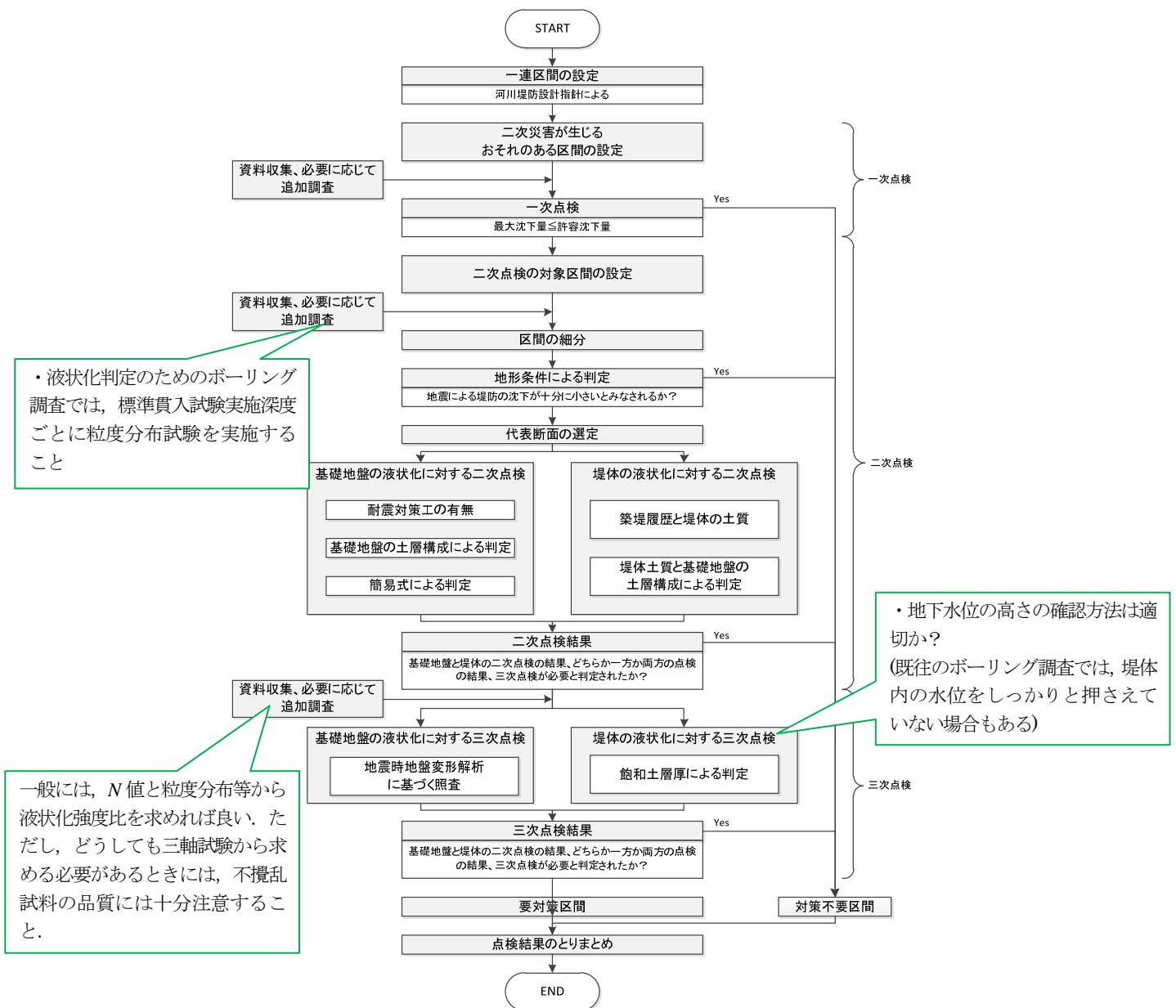


図 4.3.1 地震に対する点検の流れ⁷⁾

➤ 液状化判定と調査

- ・堤防の地震による大規模な被害は主として液状化が原因.
- ・液状化する可能性のある土層（液状化層）の分布を調査（液状化判定）することが重要
- ・不攪乱試料を用いた非排水繰返し三軸試験から液状化強度比を求めることも可能だが・・・
 液状化強度比は試料の乱れの影響を特に強く受ける（採取時に密な砂は緩み、緩い砂は締まることにより、本来の強度が出ない。）ため、試料採取方法やオペレータの技術に大きく依存する
- ・物理試験は省略されがちであるが、全深度実施し、 N 値とセットのデータとすること
- ・地下水位の高さが重要. ボーリング調査では、無水掘りによって初期水位を押える

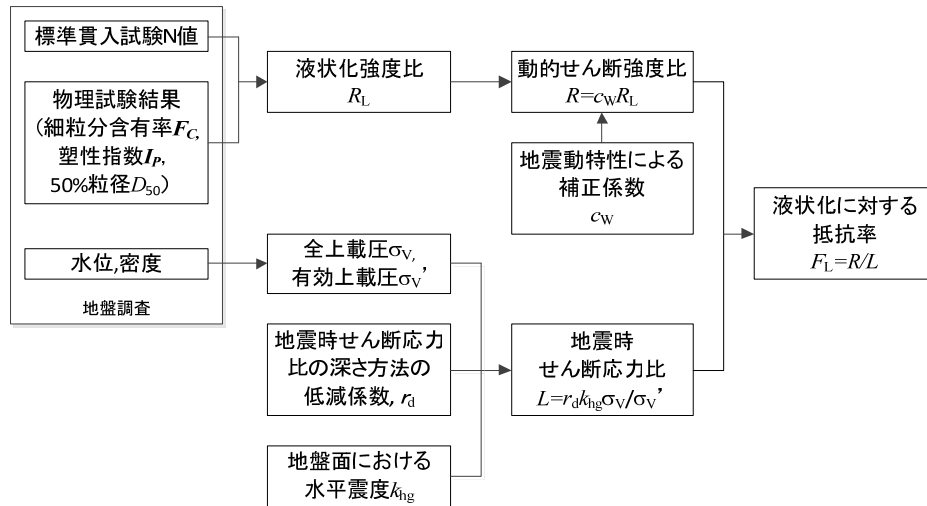


図 4.3.2 深度ごとの液状化判定方法⁶⁾

➤ 静的照査法（三次点検）

- ・静的照査法：ALID と東畑モデルが代表的
- ・液状化層の分布（地下水位含む）を設定することが最も重要
- ・ALID では、次いで、液状化強度比の設定が重要
- ・東畑モデルでは、次いで、境界条件と非液状化層の強度の設定が重要

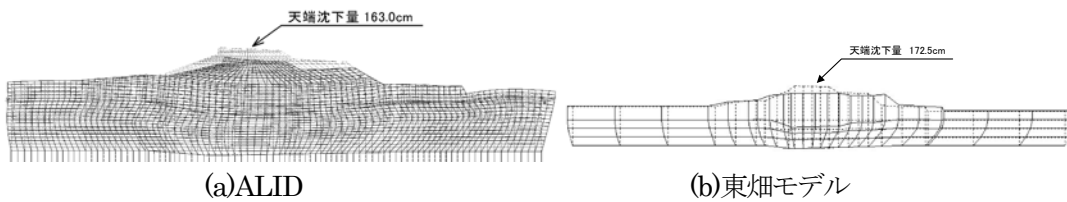


図 4.3.3 堤防の変形解析例⁶⁾

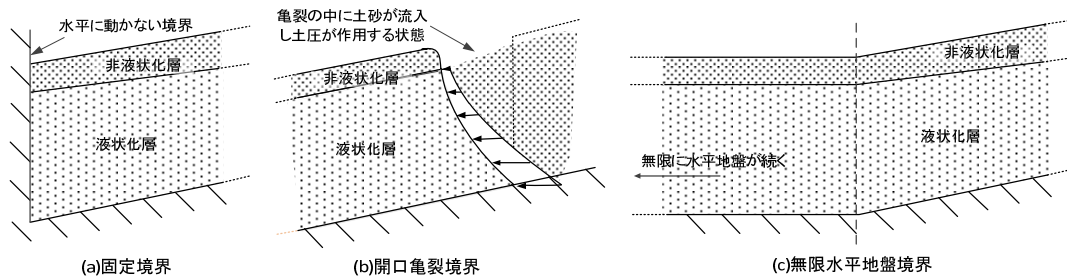


図 4.3.4 東畑モデルの境界条件の種類

5. 土質定数

5.1 浸透に対する照査・設計に係る定数

—視点—

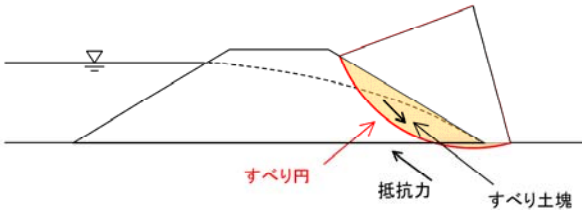
浸透に対する照査・設計においては、浸透流計算と円弧すべり面計算を実施。その際必要な定数は以下のとおり。

- **土質基本量**：1)土粒子の密度 G_s ， 2)乾燥密度 ρ_d ， 3)湿潤密度 ρ ， 4)飽和密度 ρ_{sat} ，
5)間隙比 e ， 6)含水比 w ， 7)体積含水率 θ ， 8)飽和度 S_r
- **浸透流計算**に用いる土質定数（飽和透水係数 k_s が最重要）
 - ・ 飽和透水係数は5.4節で詳説する。
 - ・ 浸潤面（地下水面）より上の不飽和状態の土中への浸透や土中からの排水を不飽和浸透・排水と呼ぶ
 - ・ ① θ ～比透水係数 (k_u/k_{sat}) 関係
 - ： 体積含水率 θ の低下とともに透水係数 k_u は著しく低下
 - ・ ②水分特性曲線 ($\theta \sim \psi$ 関係)
 - ： 不飽和状態の土中の間隙水圧は負圧（サクション）であり、体積含水率 θ の低下とともにサクション ψ は著しく増加
 - ・ 不飽和浸透・排水については①と②の関係をを用いて時間的変化（非定常という）も計算するプログラムが照査業務に使用されている（構造検討の手引き²⁾参照）
 - ・ ①と②の関係については試験方法が確立されていないことなどから、割り切って土質分類ごとに設定した関係を用いる。
- **円弧すべり面計算**に用いる定数
 - ・ 強度定数：粘着力 c ，内部摩擦角（せん断抵抗角） ϕ
 - ・ 強度試験から推定過程の留意事項は5.5節以降を参照
 - ・ 基本的な注意事項： c と ϕ をバラバラに使用せず、一括して組合せて評価すべき

—ポイント—

☞ 検討に必要な土質定数はすべて準備できたか？

～～円弧すべり面計算とは～～



円弧すべり安全率 F_s は、すべり土塊がその重量ですべろうとする力（正確にはモーメント）と、すべり円上で土が抵抗する力の比のこと。1より大きければすべらないということであるが、照査・設計では様々な不確定要素を考慮し、 $1.2 \times \alpha$ 以上を求めている。

- ・ すべり土塊の重量を求めるのに必要な土質定数： ρ と ρ_{sat}
- ・ すべり円で抵抗する土の強度：粘着力 c ，内部摩擦角（せん断抵抗角） ϕ

5.2 定数の設定法

—視点—

新築でない既設の堤防断面の土質定数を如何に推定するかが、本節のポイントである。既往の照査で整理あるいは実施した地盤調査結果（地盤調査の頻度の高いところで、堤防延長 200～400 m 間隔毎にボーリング調査結果が存在するため隣接する照査断面の地盤調査結果）や近隣で実施の地盤調査結果を十分に活かすこと。

また、河川堤防を新設する場合には、河川砂防技術基準（調査編）に準拠すること。

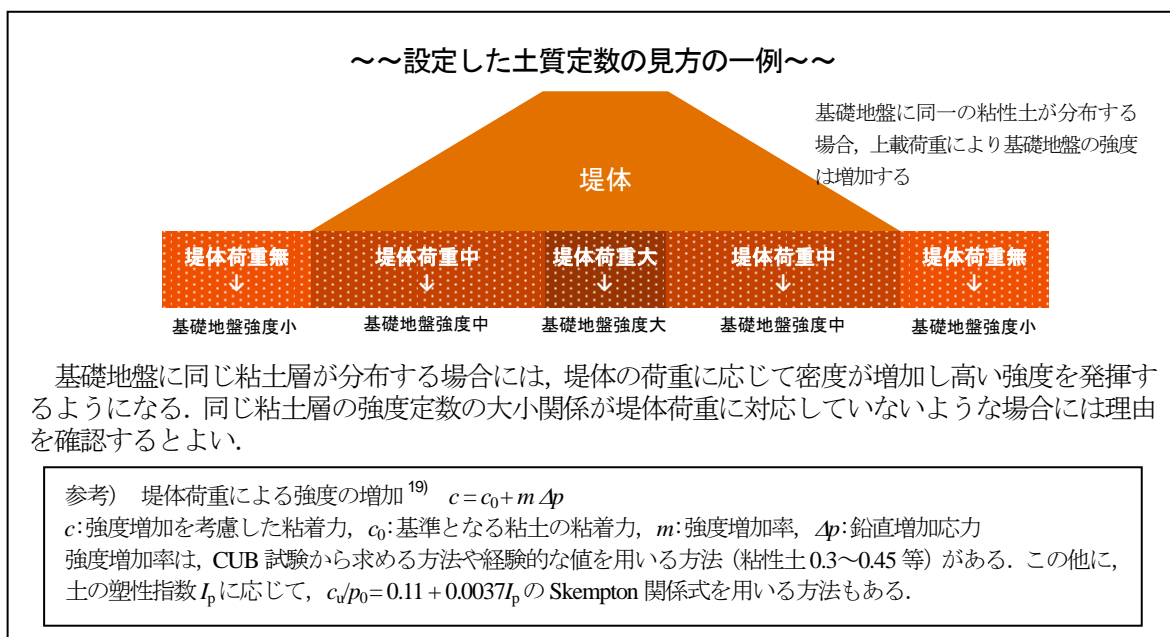
➤ 土質試験から推定することが原則

- ・ 1つ1つの試験結果には**バラツキが存在**（近隣の試験結果と比較すること）
- ・ 土質定数によってよく見られる**バラツキの程度**は異なる
例えば、透水係数は数倍～10 倍程度、密度は±0.1g/cm³程度
- ・ 同じ土層・土質の定数は類似している。したがって、その**粒度分布が類似した土層**であつて、**密度あるいはN値が類似のものは平均化**できる
- ・ 透水係数は**指数のオーダーが異なる**ため、指数値を平均化する手段もあり得る
- ・ 次節に指摘するように異なる定数間（例えば、密度と間隙比）に**定量的な関係式**があるので、それを無視した平均化にならないように
- ・ 土質試験結果が少ないなどの理由から土質試験結果から**信頼性の高い土質定数を設定しがたい**場合には、**N値等からの推定**もしくは**土質に応じた一般値**を使用できる。推定方法や一般的な値については、巻末資料を参照

➤ 試験結果（データシート）は**随時確認**できるよう整理・保管することが重要

—ポイント—

- ☞ **土質定数の設定根拠**はあるか？**根拠は妥当**か？
- ☞ 土質試験から推定している場合には、**近傍の試験値・一般値と比較して妥当**か？（土質定数ごとのばらつきの程度を考慮すること）



5.3 密度と含水状態の定数

—視点—

- 湿潤密度 ρ_t と飽和密度 ρ_{sat}
- 密度は堤体の締固め度に応じて異なる
- 密度（締固め度）は土の透水性や強度に大きく影響
 - ・ 密な堤防ほど透水性が低（水を通しにくく）、強度は大
- 密度のおおよその範囲は巻末資料参照

—ポイント—

☞ 入力した密度は適切か？（桁・単位系・湿潤 or 飽和に注意）

- ◇ 土粒子の密度 $\rho_s = G_s \cdot \rho_w = 2.65 \pm 0.1$ 【g/cm³】程度
- ◇ 含水比 w 砂質土 10~30%程度, 粘性土 30~80%程度
- ◇ 間隙比 e 砂質土 0.6 前後, 粘性土 1.2 前後
- ◇ 締固め度 $D_c = \text{乾燥密度} / \text{最大乾燥密度}$
- ◇ 湿潤密度 $\rho_t = \rho_s (1 + w/100) / (1 + e)$ 【g/cm³】
- ◇ 飽和密度 $\rho_{sat} = (G_s + e) / (1 + e) \rho_w$ 【g/cm³】

※ ρ_w は水の密度=1 g/cm³

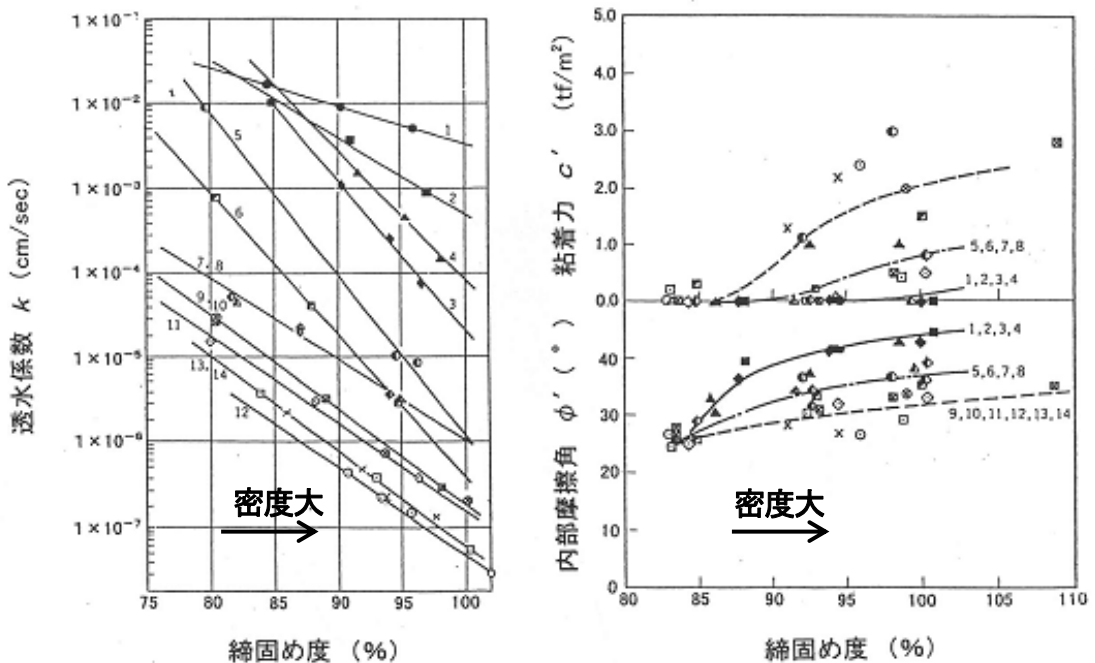


図 5.3.1 密度と土の透水性・強度との関係²⁰⁾

5.4 透水係数の推定

—視点—

➤ 飽和透水係数が大変重要

- ・ 支配的な浸透現象を説明するためには、飽和透水係数を適切に設定することが重要
- ・ 堤体土質が不飽和であるからといって不飽和透水係数を個別に設定する必要はない

➤ 土質(粒度分布)や間隙の大きさ(粒径等)に依存

➤ 単位に cm/s と m/s が使われる．単位によって 100 倍値が異なる．取り違えないように

➤ 土層毎とのオーダーや隣接土との比(同じ位か百倍違う)が計算結果を左右

➤ 飽和透水係数を推定する方法

- ・ 3種類(現地試験法, 採取土試料の室内試験法, 土の粒度などから推定する方法)

1) 現地試験法²⁾

飽和透水係数を不飽和な堤体表面で測定する方法として一例を挙げると, 締固めた地盤の透水試験(JGS 1316-2003)がある

2) 室内試験法¹⁴⁾

3) 土の粒度や間隙比などから推定する近似的な方法

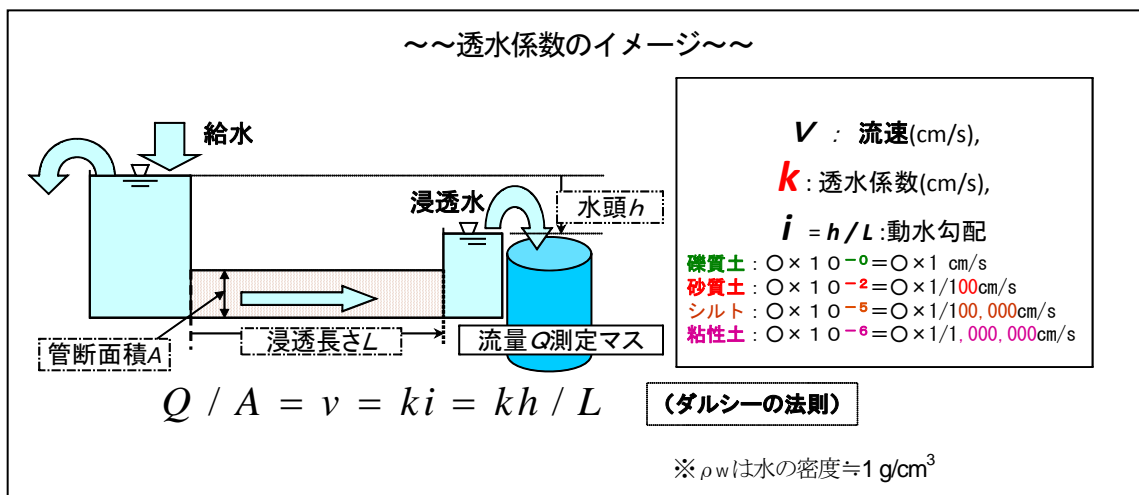
i) 10%粒径を用いる Hazen 式, ii) 20%粒径を用いる Creager の方法, iii) 50%粒径, 均等係数と間隙比も考慮する理論式, など巻末資料参照

—ポイント—

- ☞ 設定した透水係数は土質・締固め度から考えて妥当か?
- ☞ 室内試験では密度か間隙比が現場の状態に近いか?
- ☞ 試験値は近似的な方法による推定値と比較して大きなズレがないか?

| 透水係数 k (cm/s) | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|--------|
| 10^{-9} | 10^{-8} | 10^{-7} | 10^{-6} | 10^{-5} | 10^{-4} | 10^{-3} | 10^{-2} | 10^{-1} | 10^0 | 10^1 | 10^2 |
| 実質上不透水 | | 非常に低い | | | 低い | | 中位 | | 高い | | |
| 粘性土 | | 微細砂, シルト 砂-シルト-粘土混合土 | | | | | 砂および礫 | | 清浄な礫 | | |

図 5.4.1 透水係数 k の目安¹⁴⁾



5.5 強度定数を求めるための試験法の種別

—視点—

- 想定するすべり円上の土の「応力状態」と「排水状態」を再現できる試験法を選択する
- 土のせん断強度（粘着力 c ，内部摩擦角 ϕ ）
 - 土の三軸圧縮試験（JGS 0520～0524）
- 土のせん断強度は以下の条件で大きく異なる
 - ・ せん断の前に供試体を圧密させる／させない
 - ・ せん断中に供試体の体積変化（排水）を許す／許さない

—ポイント—

- ☞ 試験条件と対象土の組合せは適切か（表 5.5.1 参照）？

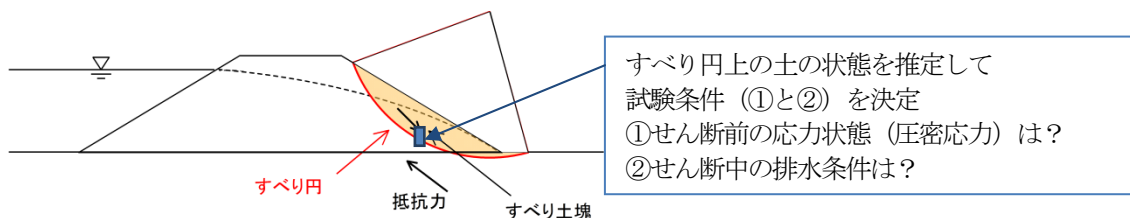


表 5.5.1 三軸試験の試験条件

| 試験条件 | 圧密 | 排水条件 | 対象土・特徴 | 備考 |
|--------|----|------|--|---|
| UU 試験 | 無 | 非排水 | 飽和した粘性土が対象。特に、現地で採取した不攪乱試料の現場強度の推定に使われることが多い。圧密しないので、採取した深度の強度しか分からない。 | |
| CU 試験 | 有 | 非排水 | 飽和した粘性土（不攪乱試料）や砂質土、礫質土（不攪乱・再構成試料）が対象。 | |
| CUB 試験 | 有 | 非排水 | 飽和した粘性土（不攪乱試料）や砂質土、礫質土（不攪乱・再構成試料）が対象。間隙水圧を測定するので、この影響を排除した整理(c' , ϕ')も可能。 | 実務上は c' , ϕ' を c_d , ϕ_d に代用することもできる。 |
| CD 試験 | 有 | 排水 | 飽和した砂質土、礫質土（不攪乱・再構成試料）が対象。 | |

～～試験条件のアルファベット～～

- ・最初の文字が圧密の有無
 - U: 圧密なし (unconsolidated). C: 圧密あり (consolidated)
- ・2つ目がせん断中の排水条件
 - U: 排水なし (undrained). D: 排水あり (drained).
- ・CUB は CU と表現されることもあり、この B または B は間隙水圧を計測することを意味する

5.6 圧密条件とは (すべり面上の拘束圧状態に対応させること)

—視点—

- 三軸試験における圧密とは、土のせん断強度に及ぼす拘束圧 (深度) の影響を調べるために、土の要素 (円柱形が多い) に力をかけ、すべり面上の拘束圧の状態を模擬すること
- 圧密が伴う試験 (CU, CUB, CD)
 - ・ 圧密応力 (拘束圧) を3段階程度変えてせん断強度を求めて破壊応力円の包絡線 (直線) の切片と傾斜角から強度定数を求める。
試験法 [CU, CUB, CD] に対応して
 - : 拘束圧増加に伴う強度増加を表す内部摩擦角 [ϕ_{cu}, ϕ', ϕ_d]
 - : 拘束圧ゼロにおける強度である粘着力 [c_{cu}, c', c_d] (正規圧密粘土の場合, $c'=0$)
- 圧密が伴わない試験 (UU) では、採取した深度の強度しか分からない。
 - ・ (飽和していれば,) 内部摩擦角は0, 不飽和粘土もあるが、設計上は $\phi_0=0$ と見なす

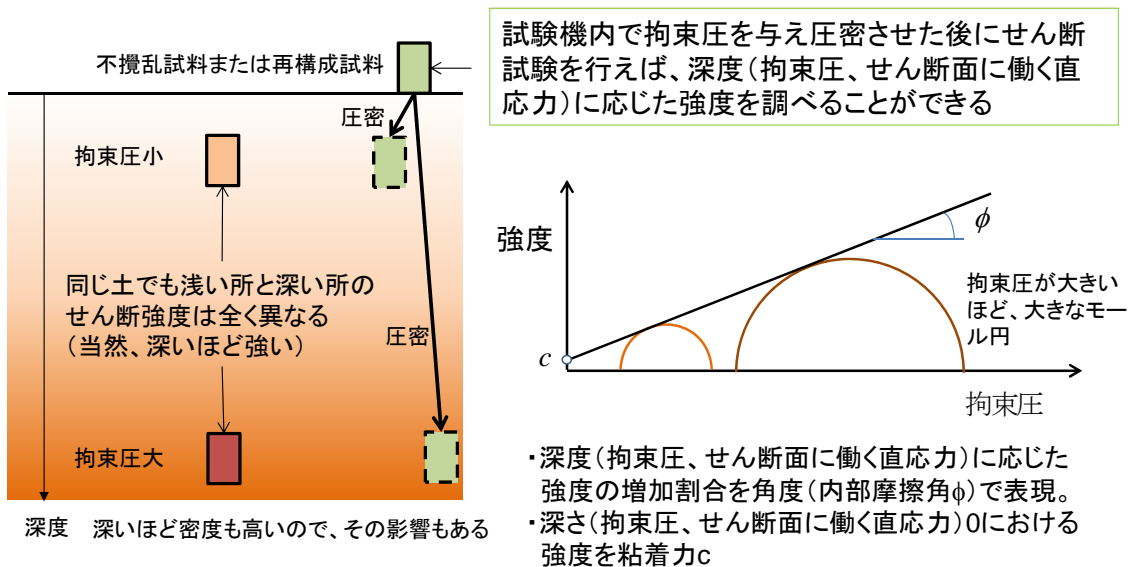


図 5.6.1 圧密と深度, 定数 (c, ϕ) の関係

※ここでは分かり易さを優先したため、拘束圧などの言葉の使い方や CU 条件の強度定数の求め方は厳密ではない。

5.7 排水条件とは

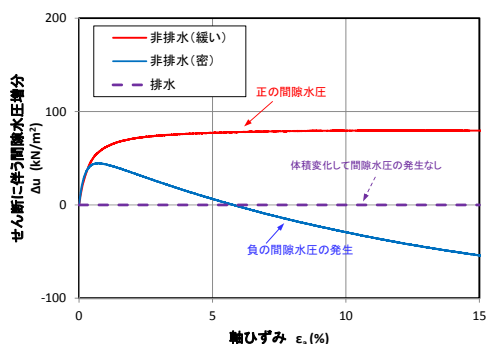
(せん断されるときの間隙水を逃す(排水)か密封(非排水)か
換言すると、体積変化を許すか許さないか)

—視点—

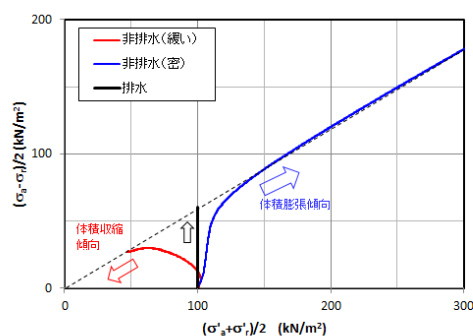
- すべり面が切る堤体内の土層(スライス底面が切る土層)がせん断時に**非排水性**(細粒土)なら UU 試験, CU 試験, CUB 試験, **排水性**(粗粒土)なら CD 試験をそれぞれ適用する(H24.2「構造検討の手引き」改正)
- **排水条件を変える理由**
 - ・ 排水とは, 水の出入りが自由(吸水する場合もある)
 - ・ 排水分だけ体積減(密度と強度が増加),
吸水分だけ体積増(密度と強度が低下)
 - ・ 非排水では, 水の出入りがなく, 密度が変わらない
 - ・ 透水係数が大きい場合(礫質土等)は, 水の出入りが可能→排水条件
 - ・ 透水係数が小さい場合(粘性土)は, 水の出入りが不可能→非排水条件

～～排水条件の奥深い世界～～

一般に土はせん断変形時に体積が変化する。密な砂礫は膨張傾向, 緩い砂礫や粘土は収縮傾向を示す。かなり透水係数の高い砂礫は別にして, 堤体のり面が瞬時に崩れると, 体積変化する時間が十分でないため「非排水条件下」となる。せん断に伴う体積変化は, 土粒子間の水が移動することにより可能となることから, せん断速度に比べて透水係数が大きくなければならない。密な土砂は膨張しようとして過剰間隙水圧が負になり有効応力が増加し, 強度も増加する。緩い土砂は収縮しようとして正の過剰間隙水圧が発生して有効応力が低下し, 強度も低下する。



排水条件による間隙水圧増分の違い



排水条件による有効応力経路の違い

実際の現象と体積変化の関係を考えた場合に, 例えば, ゆっくりとした地すべりであれば比較的透水係数の低い土でも体積変化がある程度可能であるが, 急激なり面の崩壊だと高い透水係数の土でなければ体積変化はできない。このように排水条件は想定する現象と土質の相対的な関係に左右されるものであり, 本来透水係数だけで判断するものではないが, 堤防で想定する現象はり面のすべり崩壊であるため, 透水係数によって排水条件を選定することができる。ただし, **緩い礫質土等で CD 試験を実施するとせん断中に密度が増加し, 強度を過大評価する可能性もあるため, 非排水試験の実施も検討すると良い。**また, 実際にはいくら透水係数が小さくても全く体積変化しないということは有り得ないが, 試験条件としては割り切って排水と非排水の2つの条件のどちらかを適用している。

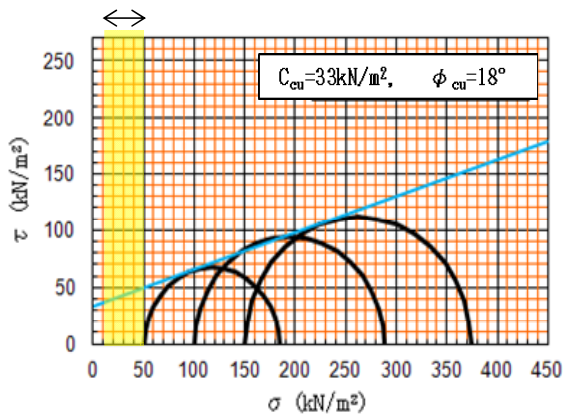
5.8 拘束圧の設定

大きな拘束圧（地盤内の深い位置に相当）での試験が実施されて粘着力が過大に評価される可能性を抑制するため、すべり面に作用する低い応力レベルのせん断試験を実施するべく、H24.2に「構造検討の手引き」を改正した。

一視点一

- 堤防のすべり面に作用する拘束圧 → 大きくても数十～50kN/m²程度
- 想定されるすべり面の拘束圧に応じて試験時の圧密条件を設定
 - 洪水時の堤体内水位の上昇も考慮すること
- 低拘束圧の試験が難しい場合、CUB試験を実施し、 c' 、 ϕ を代用することも検討²⁾

低圧時のせん断強度が重要



低拘束圧のCU試験

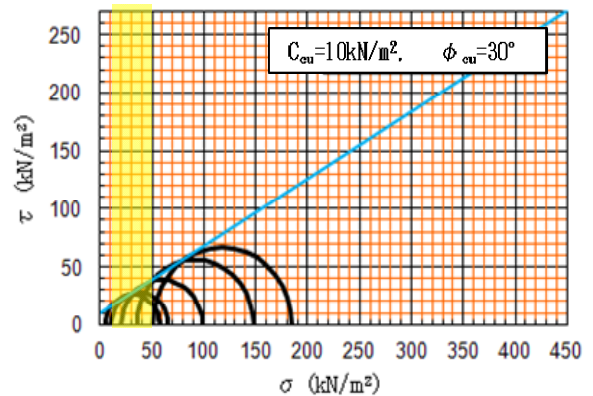


図 5.8.1 CU試験の拘束圧による違い

～～想定されるすべり面の拘束圧～～

拡大

$\tau = c + \sigma_n \tan \phi$

$\sigma_n = N/L$
 $= (W \cdot \cos \alpha) / L$

$\sigma_n = (\text{土被り圧}) \cdot \cos \alpha = \gamma H \cdot \cos \alpha$

τ : すべり面に作用するせん断応力(kN/m²)
 σ_n : すべり面に作用する垂直応力(kN/m²)
 c : 粘着力(kN/m²)
 ϕ : 内部摩擦角(°)

N : 垂直力 (kN/m, 単位奥行き当たり)
 W : すべり土塊スライスの重量(kN/m)
 α : すべり面の傾き(°)

γ : すべり土塊スライスの単位体積重量(kN/m³)
 H : 円弧の深さ(m)

三軸試験で設定する拘束圧の目安(σ_n の算出)

【例題】 高さ8m規模の堤防で、円弧の深さHが3m、円弧の傾き α が15°の位置における垂直応力 σ を算出しよう。ただし、すべり面より上の土塊は一律で単位体積重量 $\gamma = 17\text{kN/m}^3$ (湿潤密度 ρ_h は約1.7g/cm³)とする。

①土被り圧 $= \gamma \times H = 17 \times 3 = 51\text{kN/m}^2$
 ②垂直応力 $\sigma_n = (\text{土被り圧}) \times \cos \alpha = 51 \times \cos 15^\circ = \text{約}49\text{kN/m}^2$ A. 垂直応力 $\sigma_n = \text{約}49\text{kN/m}^2$ (拘束圧の目安)

5.9 強度定数のチェック

—視点—

➤ せん断強度

- 土の強度は、せん断強度（一強さ、一抵抗）とも呼ばれ、図 5.9.1(a) 応力～ひずみ・関係の○印で示されるひずみ 15% までの最大のせん断抵抗がピーク強度か、ひずみが増加しても一定状態の残留強度などで表す。これはある拘束圧（直応力）に対応する強度である。

➤ せん断強度と強度定数の違い

- 強度定数は、拘束圧を 3 種類程度変化させて実施した複数の供試体の試験結果から求めた粘着力 c と内部摩擦角 ϕ のことを言い、特定の拘束圧に対する（供試体 1 本 1 本の）せん断強度とは区別する。

➤ 照査・設計に用いる強度定数のチェック法

以下の手順で行うチェックを行う。

1) 試験した土質試料の採取地点・深さ等の確認

- ①堤体断面・距離標
- ②採取ボーリング番号
- ③深さ
- ④土質名・土層名等

2) 同じ土層の断面内における連続性の確認

（築堤履歴、基礎地盤の成り立ち、密度・ N 値、粒度分布等に基づき）

3) 土層構造の妥当性の確認した上で、強度定数と距離標の関係を図化

- 隣接する断面と土層構造を比較し、築堤履歴（3.3 節）や基礎地盤の成り立ち（3.4 節）から妥当かを確認した上で、各土層、試験条件ごとに強度定数等の縦断距離方向の分布・変化を診る

4) 強度定数がある程度のある数がある場合には分布特性に応じて、小さいバラツキの時は平均化し、大きいバラツキの時は異常値の取捨を行う

5) データが少ない場合のチェック法（次頁下段）

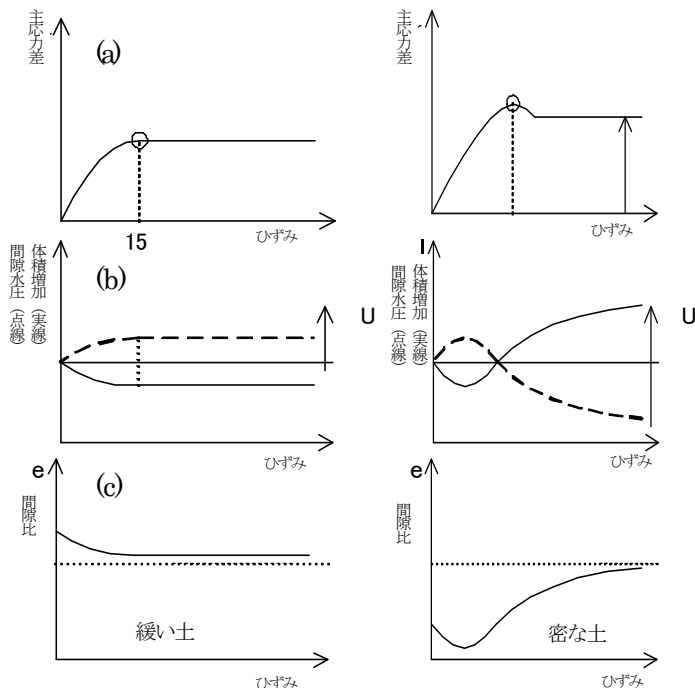


図 5.9.1 緩い土と密な土の“応力～ひずみ～体積変化率 ΔV ”等の関係

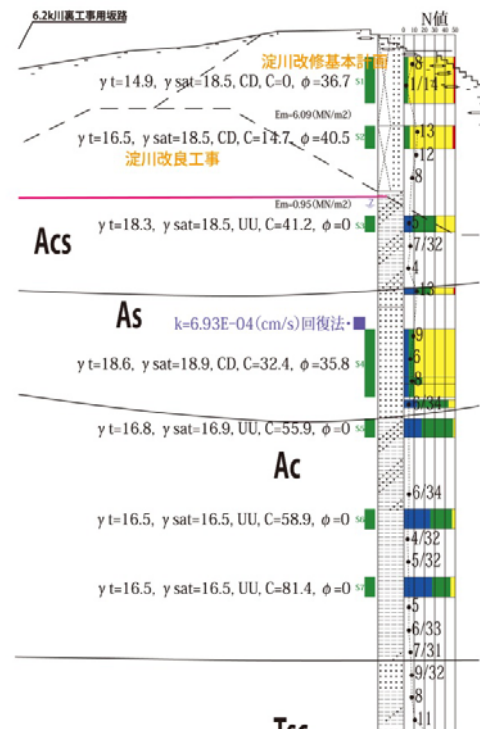


図 5.9.2 地点の柱状図と定数整理例

1), 2)については, 図 5.9.2 のような図を使い, 3), 4)については, 図 5.9.3 のような図を使い検討する. 強度定数だけでなく, 密度や間隙比等についても同様の図を描くと良い. 粘土層の粘着力については図 5.9.4 の整理を行うと, 強度増加率 (5.2 節参照) を算出することができる. バラツキの原因を検討 (粒度分布や細粒分含有率, 粗密の影響, 場合によってはデータシートに戻り図 5.9.6 のような破壊包絡線の引き方も考察する) する. このような方法で信頼性の高い定数を設定することが適正な設計には不可欠である.

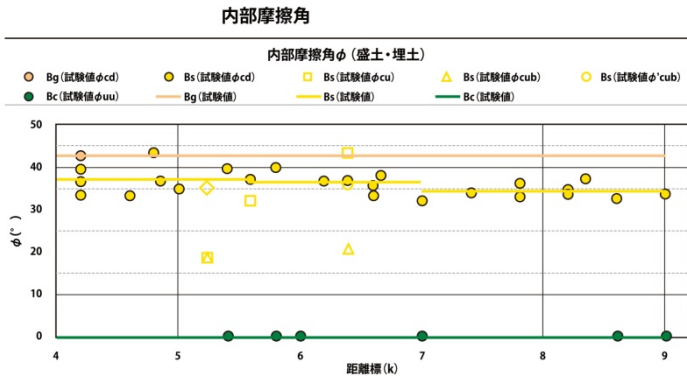


図 5.9.3 内部摩擦角の距離方向分布例

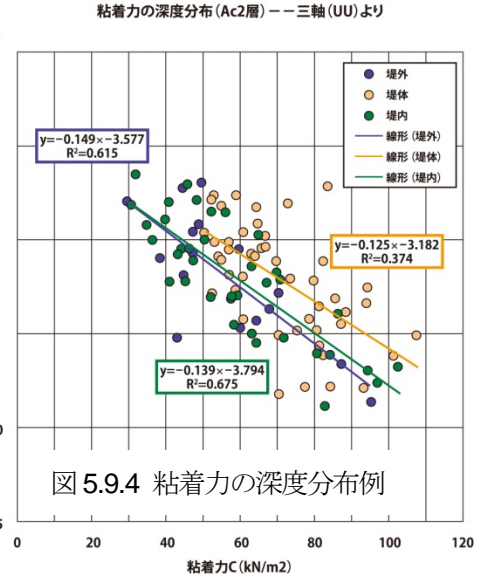


図 5.9.4 粘着力の深度分布例

↑→これらよりバラツキが大きなケースが多い. 個々の堤防でデータの点検を行うことが重要

➤ 特定データのチェック方法

A) UU 試験の破壊包絡線が $\phi_0 \geq 0$ となる場合が図 5.9.5(a)である. 通常は同図(b)のように $\phi_0 = 0$ となるべきである. (a)は土試料が不飽和土のときに間隙空気部分が圧縮して生じやすい. 粗密によっても同様の結果が得られる場合もあるので, まずはデータシートから供試体ごとの飽和度と密度を確認する. 飽和度が十分に高い場合には, 飽和化すると強度が低下することも踏まえ, 低い強度 (飽和度と密度の組み合わせ等にもよるが例えば(a)の破線の切片) として評価すべきである. 3つのモール円の大きさのバラツキが大ききときには, 応力ひずみ関係 (図 5.9.1(a)) も比較すると良い. 一般に供試体ごとの粒度分布試験は実施しないことが多いが, 供試体ごとの粒度分布の違いがバラツキとなって現れる場合もある.

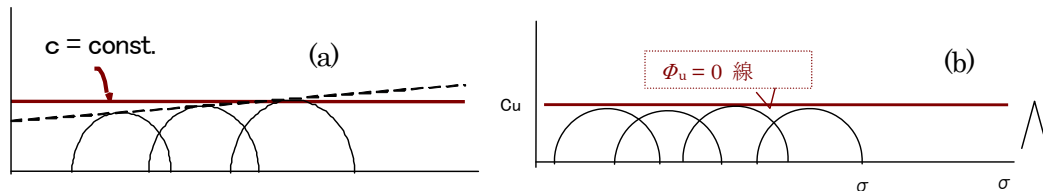


図 5.9.5 UU 試験の典型的な試験結果

B) 低拘束圧の試験 (5.8 節参照) が少ない場合等, 試験値に疑義がある場合を含めて, 堤体土質の強度は低応力レベルを正確に推定すべき. 例えば, 図 5.9.6 のようなモール円が得られた場合には, 破線ではなく, 実線のように最も拘束圧の小さい円を利用すると良い (ただし, 一番低い拘束圧と一番高い拘束圧の円を使えば良いということではない).

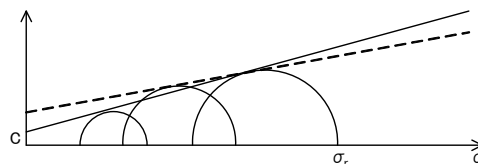


図 5.9.6 CUB または CD 試験結果の破壊線

5.10 安全率と定数の関係

—視点—

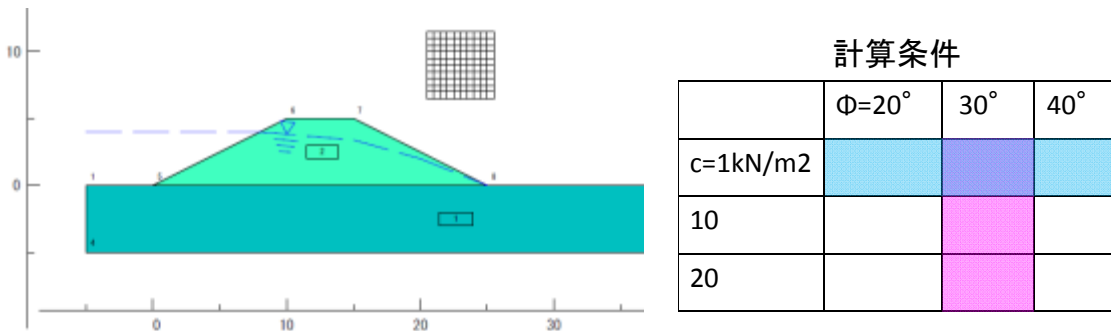
➤ 特に粘着力の設定精度がすべり安全率に大きく影響する。

(一般に)

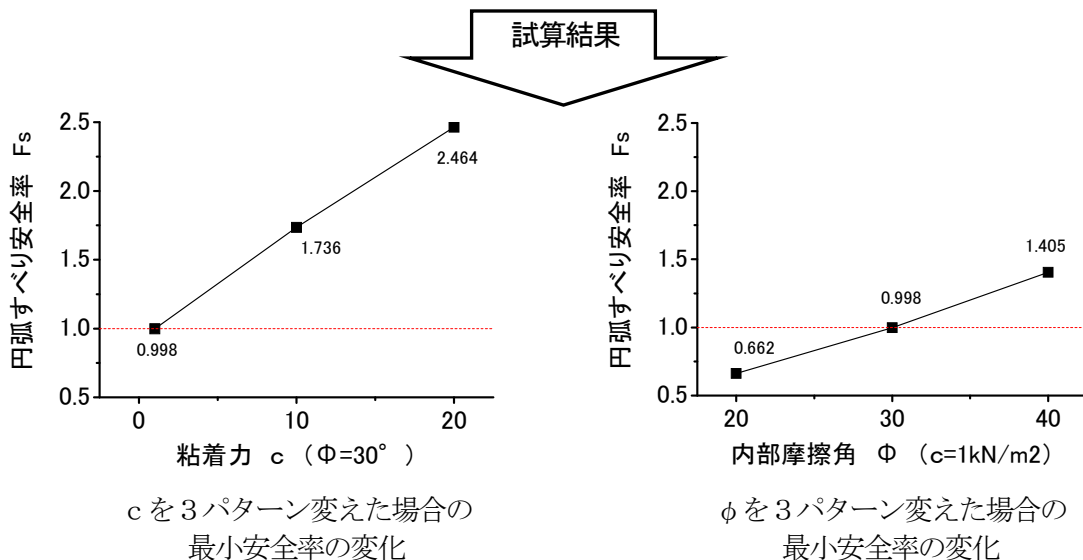
- ・ 細粒分含有率が多い粘性土の場合、粘着力 c が大きく内部摩擦角 ϕ は小さい
 - ・ 砂・礫の含有率が多い砂質土の場合、粘着力 c が小さく内部摩擦角 ϕ は大きい
- 密な砂の粘着力 c_{cu} の値は拘束圧の影響もあり非常に大きくなる場合がある。

—ポイント—

☞ 堤体や基礎地盤の土質と土質定数 (c, ϕ) の組み合わせは妥当か？



c と ϕ をそれぞれ 3 パターン変えてすべり安全率との関係を整理



ϕ より c を大きくする方が安全率は大きくなる

⇒ c を期待できない砂の堤防より、細粒分を適度に含んだ堤防の方が、すべりに対する最小安全率が大きくなる

図 5.10.1 円弧すべり安全率と土質強度の関係 (土木研究所試算)

6. 被災しやすい堤防の見方

6.1 被災しやすい堤防の断面形状

—視点—


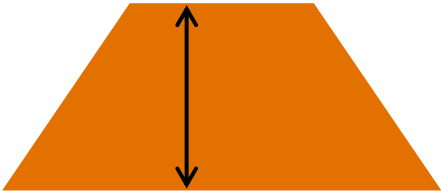

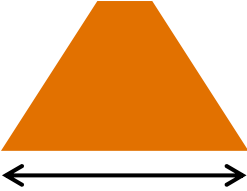


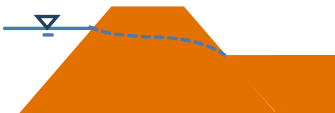
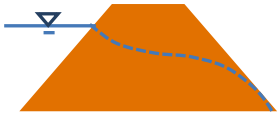
- 堤防の浸透安全性には、断面の形状も影響するため、被災しやすい堤防の断面形状を把握しておくことは重要である。

—ポイント—

- ☞ 代表断面の選定に活かしているか？

ただし、堤体や基礎地盤の土質・その構造によっても被災しやすさは変わるので、総合的に判断すること。

表 6.1.1 堤防の断面形状と浸透安全性の関係

| 被災しにくい堤防 | 浸透安全性 | 被災しやすい堤防 |
|--|-------|--|
|  <p>堤防高さが低い</p> | 大 > 小 |  <p>堤防高さが高い (10m 超など)</p> |
|  <p>堤防敷幅が広い</p> | 大 > 小 |  <p>堤防敷幅が狭い</p> |
|  <p>のり面勾配が緩い</p> | 大 > 小 |  <p>のり面勾配が急</p> |
|  <p>平均動水勾配が緩い (堤内地盤が高いとき)</p> | 大 > 小 |  <p>平均動水勾配が急 (堤内地盤が低いとき)</p> |

6.2 被災しやすい堤防の土層構造のとらえ方

—視点—

- 堤体や基礎地盤の状況に応じて被災のしやすさが異なる。
堤防の土層構造が問題
- 透水性地盤において裏のり尻下や堤内地盤側に粘性土等の難透水層が分布していると、いわゆる行き止り地盤を形成し、湿潤面を押し上げ、漏水やパイピングが発生しやすい。

—ポイント—

- ☞ 以下のような基礎地盤、土層構造を代表断面の選定に活かしているか？

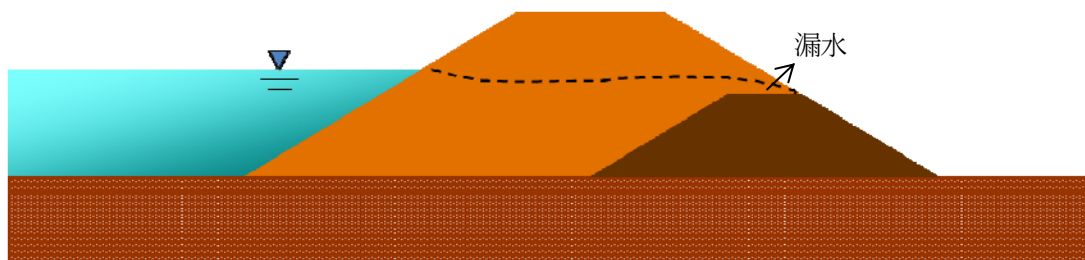


図 6.2.1 難透水性の旧堤防と透水性の高い拡幅部の組み合わせ
(湿潤面の押し上げ)

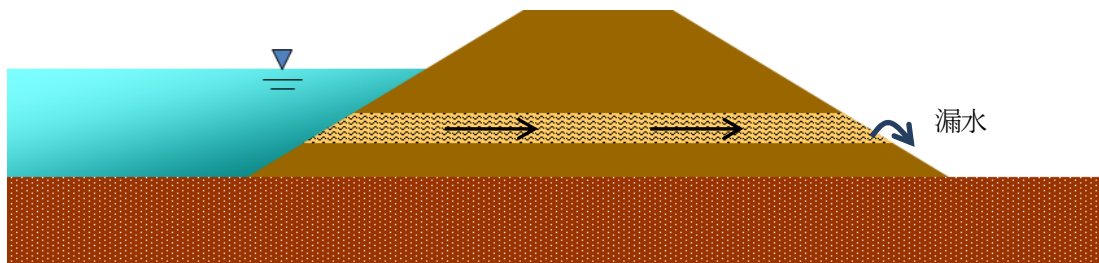


図 6.2.2 難透水性主体の堤体の中に透水性の高い土層がはさまれている場合
このよう構造の断面が存在する場合には築堤履歴や工事記録を調べ、同じような構造の堤防の範囲のあたりをつけること。必要に応じて地盤調査を行うこと。

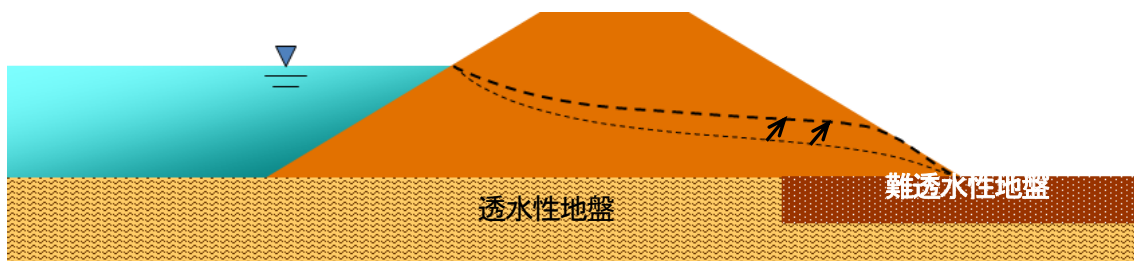
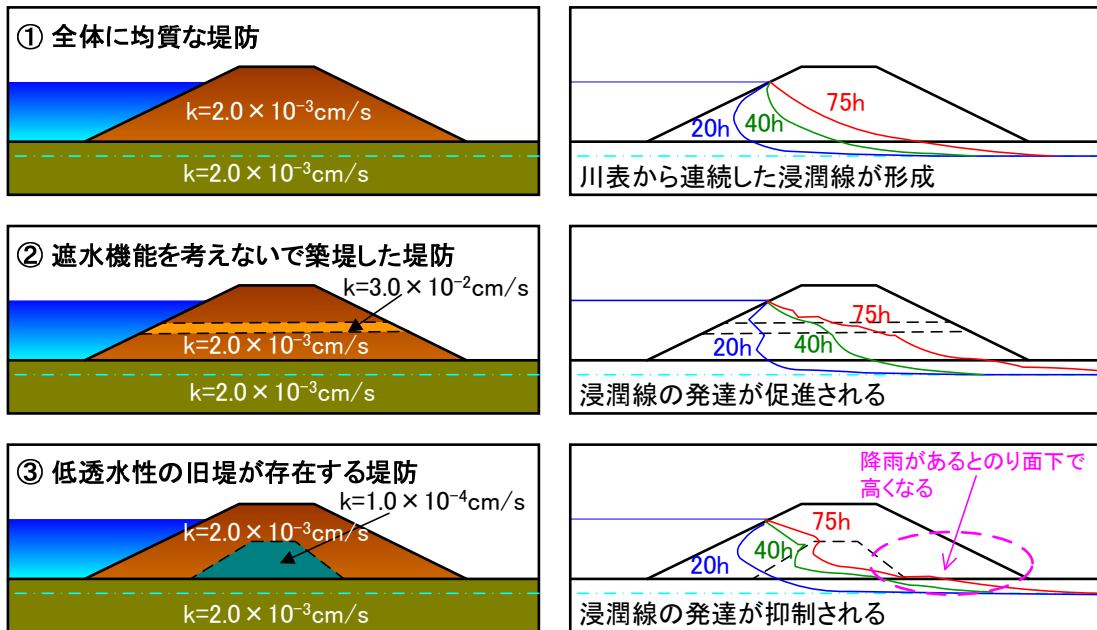


図 6.2.3 基礎地盤の行き止まり構造

～～堤体構造に関する試算（外水位のみ作用）～～



(土木研究所試算)

全体に均質な堤防（①のケース）に比べ、高透水層が存在すると（②のケース）、極端な場合川裏のり面にまで浸潤線が達する。また、透水性の低い旧堤が存在すると浸潤線の発達は抑制され、同程度の外水位が作用しても裏のり側の浸潤線は低い（③のケース）。しかし、降雨がのり面から浸透するときには、裏のり尻部に浸潤線が高く現れて、のり尻で漏水が生じる。対策としてはドレーン工法が有効である。

～～～【堤防の声】「膿（ウミ）、泥濘（ぬかるみ）」は対策が必要か？～～～

小段やのり尻が「ぬかるむ」ことは、図 6.2.1 や図 6.2.2 のように裏のり面から漏水があるときや降雨の後に見られ、堤体土質の排水性が悪い場合が多い。裏のり尻側にドレーン工があり、その上の小段が膿んでいる場合には、ドレーン工の目詰まりによる浸潤面上昇の懸念があるため、ドレーン工から浸透水の流出した跡を確認すること。

一方、表のり面から漏水する場合もある。堤内地盤高が高く地下水が表のり面から出ている場合には、不透水の護岸や表のり被覆工で防ぐことは間違い。

～～～【堤防の声】被災履歴の情報“漏水あり”の意味？～～～

“漏水”の有無情報は多いが、二つの意味があるので何れに属するか留意した対応が必要：① 漏水が清水でパイピング破壊になる恐れがないときのもの。漏水量を計測することにより、堤体土質の透水係数を推定することができ、洪水・雨水に対する耐浸透性の評価に利用できる。② 漏水が清水でなく土砂による濁りがあるとき、堤体土砂のパイピング・内部侵食が懸念される。流出した土砂量の多少により深刻さが異なるが、最悪は堤体内部に空洞（パイピング孔）が生じている恐れがあるため、空洞の規模を確認するための調査が不可欠である。

6.3 過去の堤防の詳細点検結果の活用

－視点－

➤ 堤防の詳細点検結果を整理・分析

- ・ 各河川における浸透安全性が不足する堤防区間（要対策区間）の現状を把握する
- ・ 要対策区間に、堤防整備状況や流下能力、外力等、各河川の特徴が表れるため、様々な観点から要対策区間の現状を分析する必要がある。

－ポイント－

☞ 管理する河川堤防の要対策区間の現状は？

- ・ 全国的に要対策の理由として多いのは、裏のりすべり、裏のり尻パイピング破壊である。しかも地域、河川、流域毎に特徴がある。下図は全国の直轄堤防の破壊形式を整理した結果である。各担当者が管理する河川の堤防で想定される破壊形態の特徴を把握して、対策の効果（工法によって適不適がある）を理解するよう努めるべきである。なお、既往文献²²⁾にも幾つかの地整、河川データの概略の傾向が記述されているので対策工法の絞込みの参考になろう。

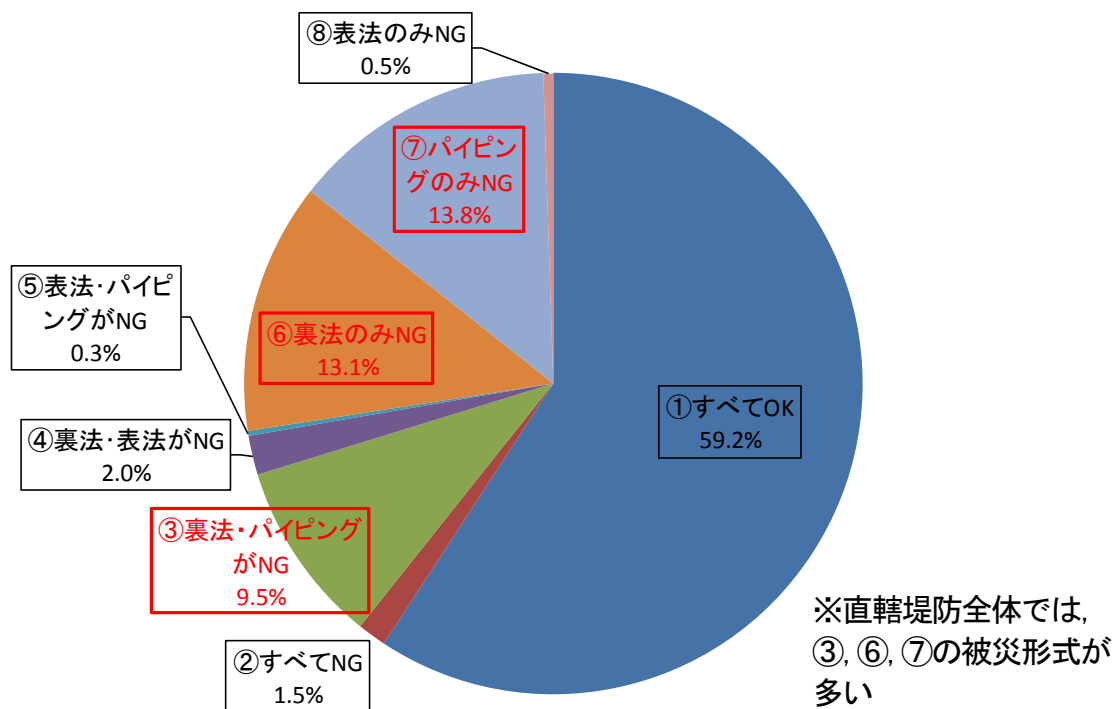


図 6.3.1 直轄河川堤防の総延長約 1 万 km 中の詳細点検結果
(治水課調べ H23.1 時点)

7. 堤防の浸透対策

7.1 破壊形態に対応した対策の考え方

－視点－

- 破壊形態に対応した工法を選択すること
- 対策工施工後はモニタリングにより効果を確認するとよい

－ポイント－

- ☞ 基礎地盤や堤体の土層構造，照査結果，被災履歴から想定される被災形態に対応した対策工法を選定しているか？
- ☞ 対策工のモニタリング，維持管理方法は検討したか？

表 7.1.1 破壊形態に応じた対策の考え方

| 章 | 工法 | のり面すべり | 盤ぶくれ・パイピング |
|----|------------------|---|----------------|
| 8 | 断面拡大工法 | ①浸透路長の延長(動水勾配の低下) ②のり面を緩くすることによる安定性の向上 | |
| 9 | ドレーン工法 | ①裏のり面下部の堤体内水位の低下 ②せん断強度の大きい材料への置き換え | ①裏のり尻部の動水勾配の低減 |
| 10 | 表のり面被覆工法 | ①浸透路長の延長 ②裏のり面下部の堤体内水位の低下 | |
| 11 | 川表遮水工法 (矢板工法) | ①基礎地盤の浸透水量を低減 ②裏のり尻近傍(基礎地盤)の水圧を低減 | |
| 12 | ブランケット工法 | ①浸透路長の延長 ②裏のり尻近傍(基礎地盤)の水圧を低減 | |
| 13 | 堤内基盤排水工法 | - | ①裏のり尻部の揚圧力の低下 |
| 14 | 天端舗装工 | ①堤体内への浸透水量低減 | |

7.2 浸透流計算結果の確認

－視点－

- 例えば、ドレーンがある場合にドレーン内の水位が上昇するのは不適當。
- 詳しく確認したい場合は、浸潤線とともに、流速ベクトル分布をチェックする（透水係数が大きい層で流速ベクトルが大きいか、など）
- さらに、浸潤線の上昇過程などをチェックする（すべり・パイピングの照査は高水位継続時間終了時点で実施）のがよい

－ポイント－

- ☞ 浸潤線は、堤体材料や対策工法を勘案して異常な形になっていないか？

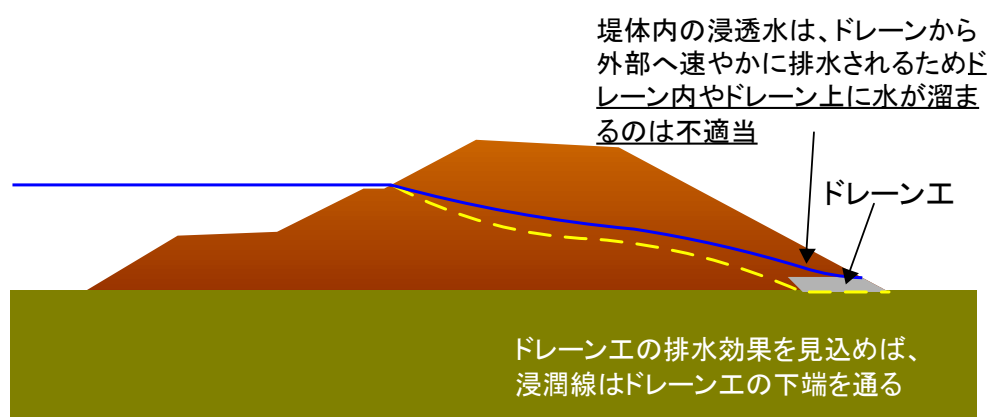


図 7.2.1 ドレーン工がある場合の浸透流計算結果の確認例

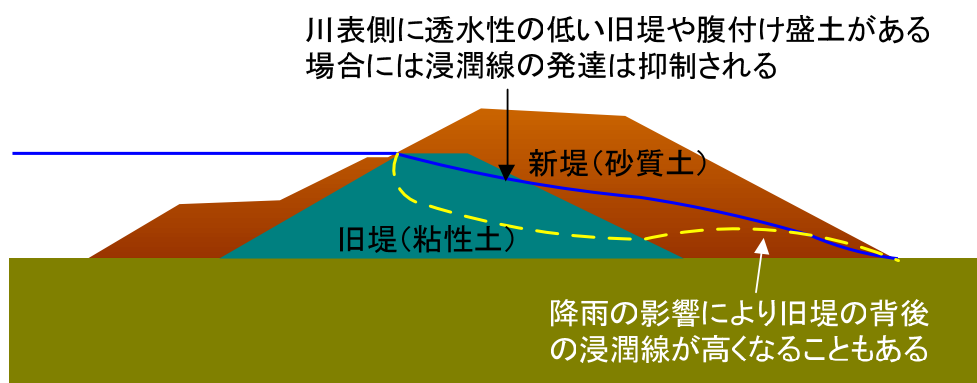


図 7.2.2 旧堤がある場合の浸透流計算結果の確認例 (6.3 節参照)

注： 浸透流計算プログラムの中には降雨を土要素内に強制的に注入するものも存在する。降雨の影響が計算結果に強く現れ、裏のり尻部の浸潤面が高くなり、過剰に不安定な（設計上は過剰に安全側の）評価を与える結果になる。このような懸念がある場合には、プログラム内の堤体表面の境界条件設定が妥当かの判断ができる専門家の助言を受けるべき。

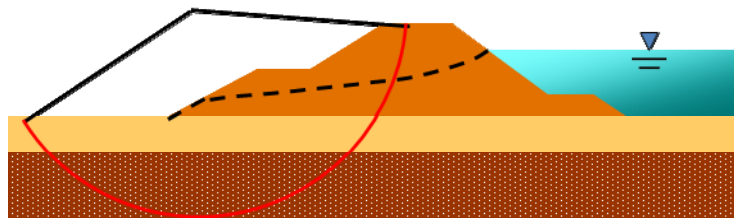
7.3 すべり円弧の形状等の確認

—視点—

- 円弧すべり計算で最小安全率が得られた円弧の形状、位置を確認

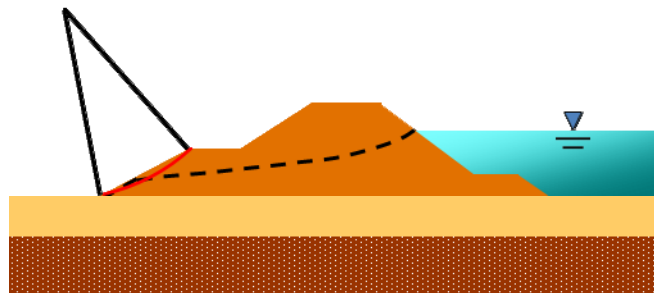
—ポイント—

- ☞ 下図のような円弧の形状・位置になっていないか？



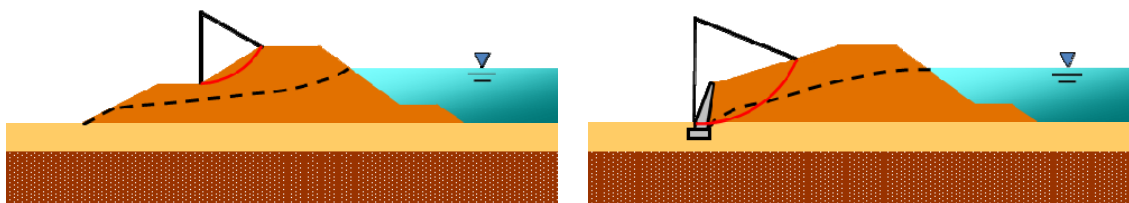
円弧が深すぎる例

(下の粘土層の強度が弱いことが原因. 浸透問題ではなく、軟弱地盤の問題 (盛土できるか、盛土の施工速度は、圧密沈下の周辺への影響は。) として検討 (5.2 節の強度増加率を参照). 既設堤防では、深いすべりが発生することは考えづらいため、強度定数の設定を再検討すべき.)



円弧が浅すぎる例

(表層がすべる程度であれば、堤防の機能は大きく低下するわけではない。砂質土では粘着力が小さく浅いすべりが発生し易く計算される。ただし、浅いすべりを端緒として大きなすべりに発展する進行性の崩壊も.)



円弧は浸潤線を切るように

円弧は擁壁を切らないように

(計算条件の設定に問題)

図 7.3.1 すべり円弧形状の確認

7.4 局所動水勾配の照査位置の確認

—視点—

- のり尻部の条件（構造物・浸潤線）と合致した評価が重要
- 局所動水勾配の値は、浸透流計算の要素の大きさによって変化

—ポイント—

- ☞ 下図のような位置で局所動水勾配を算出していないか？
- ☞ 浸透流計算の要素の大きさは堤防高さの1/10程度以下になっているか？

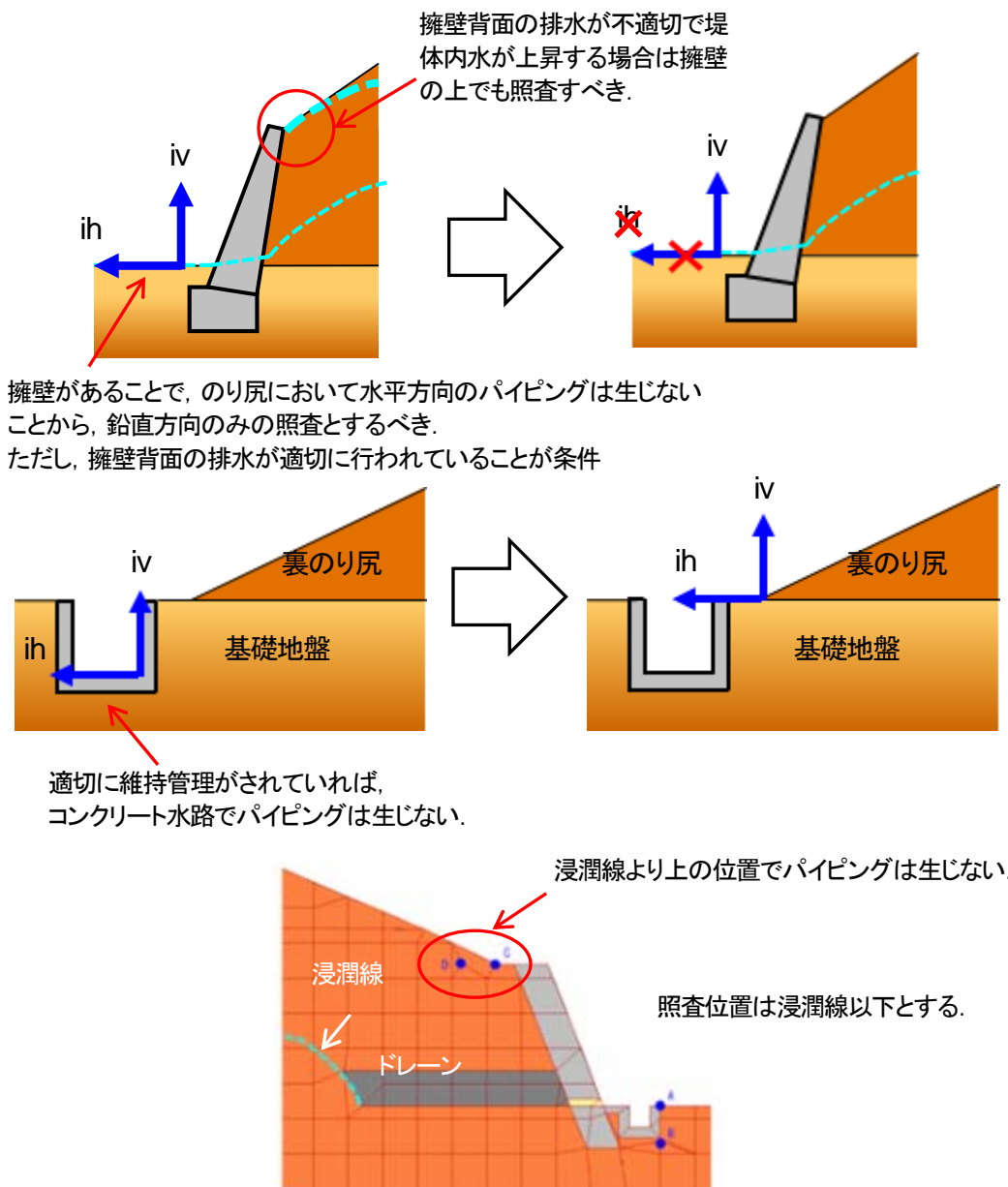


図 7.4.1 局所動水勾配の確認

7.5 GWの照査位置の確認

－視点－

- 堤防高が10m以下で、被覆土層厚が3m程度以上の場合や粘性土地盤の場合にはパイピング破壊・盤ぶくれに対する安全性の照査は原則的に不要²⁾
- のり先（基礎地盤）に分布する粘性土の物性も確認のこと
 - ・ 基礎地盤の粘性土が有機質土（腐植物を混入する場合や泥炭など）の場合、被覆土層の重量Gが小さくなるため注意が必要
- 対策の基本は、押さえ盛土
 - ・ 用地費次第ではあるが工事費だけを考えれば非常に安価。また、特別な維持管理は必要ない

－ポイント－

- ☞ 最も盤ぶくれが起りやすい（GWの最も小さな）位置で照査しているか？

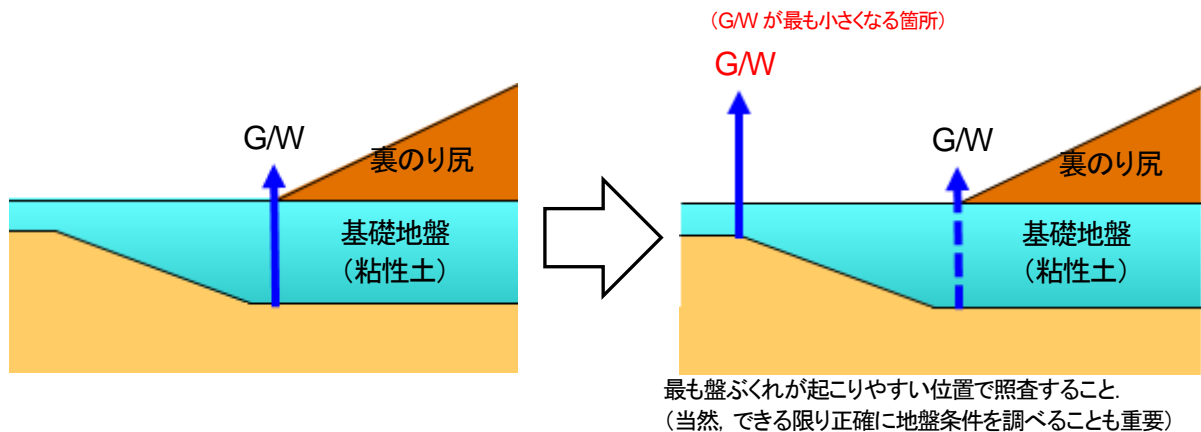


図 7.5.1 GWの照査位置の確認

8. 断面拡大工法

8.1 断面拡大工法の設計

—視点—

- 堤体断面の拡大およびのり面を緩傾斜化
 - ・ 浸透路長の延長（動水勾配の低減）と緩勾配
 - ・ のり面すべりと盤ぶくれ・パイピングに対する安全性向上
- 堤防強化については、断面拡大工法の採用を基本とすること
- 「川表側では河積の確保」, 「川裏側では用地の確保」に留意のこと
- 堤体への影響にも留意が必要
 - ・ 部分的な拡幅によって、境界部に亀裂が発生する恐れがある。点検を入念に行い、亀裂を見つけた場合には切返しや充填を行う（図 8.2.1 参照）
 - ・ 一枚のり化など比較的広い範囲に盛土を行う場合には亀裂だけでなく天端を含めた全体的な沈下（図 8.2.2 参照）
 - ・ 小段が逆勾配とならないよう圧密沈下を見込んだ勾配を小段につけるなど小段からの排水に注意する。点検で逆勾配の小段を確認した場合には、速やかに補修を行う。小段から堤体への浸透を抑制するため、管理用通路と併せて舗装等を敷設することもある。

～～相似形の堤防であれば安全率は同じ？～～

戦後に発達した地盤工学に基づけば間違いであり、Taylor の安定図表²³⁾（図 8.1.1）からも明らかとなる。図中の記号とその利用法を説明し、計算例を示す。

（Taylor の図表）平地に築造された、斜面勾配 β (°)で高さ H の単純な斜面盛土（土質は均質で単位体積重量 γ 、粘着力 c_d (tf/m²), 内部摩擦角 ϕ (°)の安全率 F_s を求める。安定図表に記載されている記号の関係式は以下のとおり。

$$c = c_d / F_s, \tan(\phi) = \tan(\phi_0) / F_s$$

（問い） $H = 6.7\text{m}$, $\beta = 40^\circ$, $\gamma = 1.70\text{tf/m}^3$,
 $c = 2.0\text{tf/m}^2$, $\phi = 10^\circ$ の安全率を求めよ。

（使い方） $F_s = 1.5$ を仮定すると、

$\phi = \tan^{-1}[(\tan(10^\circ)/1.5)] = 6.7^\circ$ をパラメータにして $\beta = 40^\circ$ の横座標に対する縦座標値を読むと安定数は 0.118。

$$\therefore 0.118 = c / (\gamma H^*) = 2 / 1.5 / (1.7 H^*)$$

$$\therefore H^* = 6.67\text{ m.}$$

これはすでに6.7mに近く、 $F_s = 1.5$ と近似しても良いくらいであるが、真の F_s 値は少し小さい筈なので、 $F_s = 1.4$ を仮定して、同様の試算をすると $H^* = 7.31\text{m}$ を得る。従って、内挿法で $F_s = 1.4 + 0.1 \times (7.31 - 6.7) / (7.31 - 6.65) = 1.49$ を得る。

小段があるのり面は直線で近似し、直線斜面で試算することも可能である。その他に有用な手段を巻末付録に掲載したので参考にされたい。

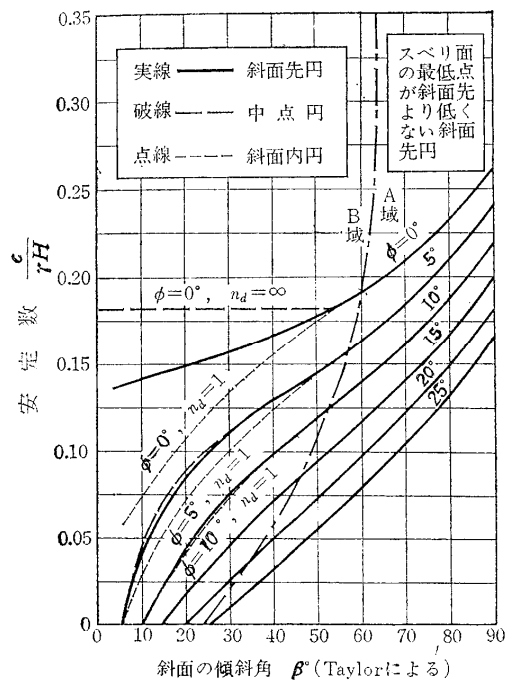


図 8.1.1 Taylor の安定図表

8.2 近隣への影響の回避

—視点—

➤ 基礎地盤が軟弱な箇所では断面拡大工法を用いる場合には、下記の近隣への影響に留意が必要

- ・ 基礎地盤の圧密沈下 → 近接民家を引き込み沈下する恐れ (図 8.2.1 参照)
- ・ 基礎地盤の側方流動 → 近接民家や堤内地の構造物が変形する恐れ
(図 8.2.2 参照)
- ・ 観測施工, 引き込み沈下対策 (矢板工法による地盤の縁切りなど), 変形対策 (緩速施工・変位吸収トレンチなど) を検討すること

： 引き込み沈下対策として矢板工法などの地下水流を阻害する恐れのある工法を使用する場合には、透水性矢板などにより一定の地下水流を確保できる工法を検討すること (11 章参照)

—ポイント—

☞ 軟弱地盤か？

- ・ 軟弱地盤の場合には、既設堤防や近隣への圧密沈下の影響について十分配慮すること。圧密沈下が特に大きな地域では、拡幅 (一枚のり化含む) 以外の対策工法も検討するとよい。

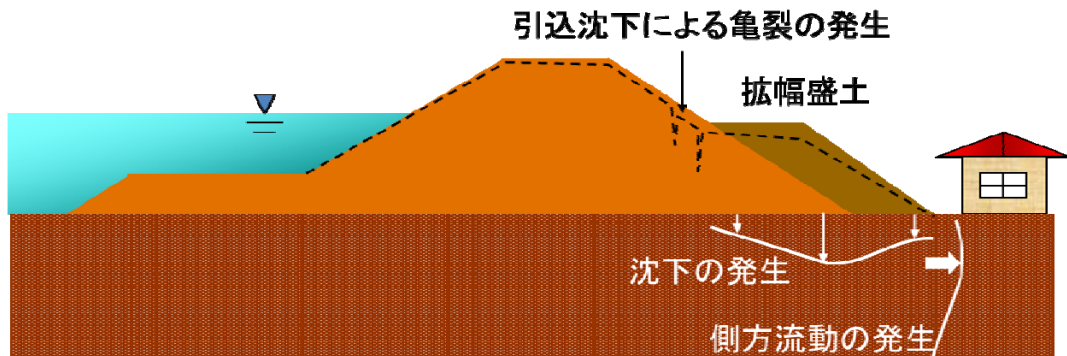


図 8.2.1 断面拡大による近隣への影響

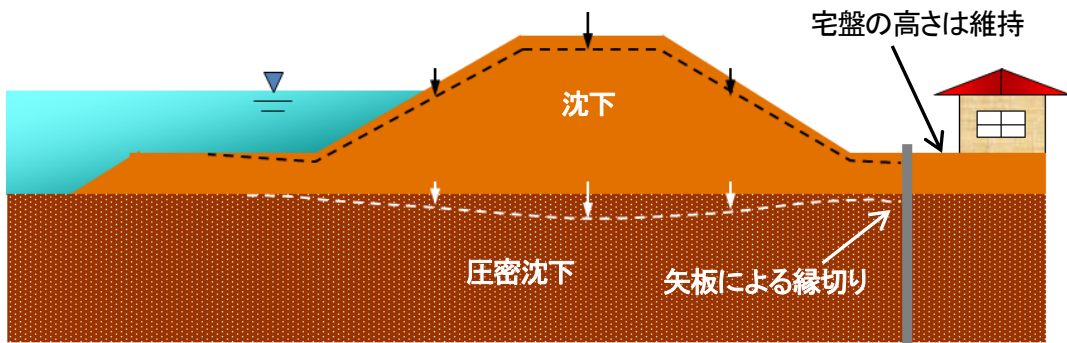


図 8.2.2 断面拡大による圧密沈下の影響対策

8.3 断面拡大工法に適した材料

—視点—

➤ 基本的な土質材料

- ・ 川表（堤外）： 既存堤体より透水性の低い土質材料
- ・ 川裏（堤内）： 既存堤体より透水性の高い土質材料

➤ 施工

- ・ 締固めが容易でせん断強度の高い材料を使用
(締固めづらい現場条件となりやすいため、ブレンドや改良も検討.)

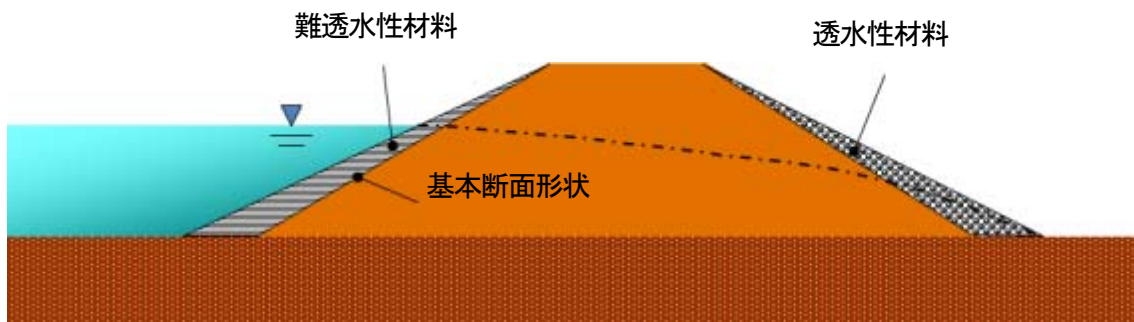


図 8.3.1 断面拡大材料の土質

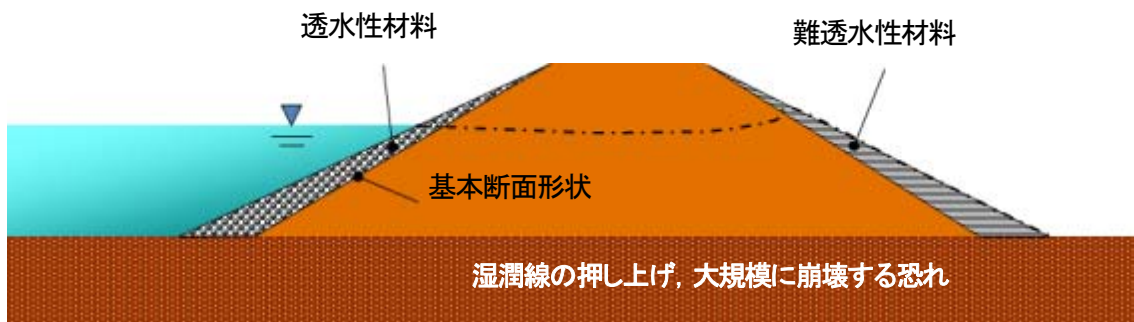


図 8.3.2 断面拡大材料の土質（表と裏の透水性が逆の場合）

〜〜【堤防の声】断面拡大に伴う築堤技術に関して、

土堤原則に反しない研究例〜〜

今後の調査研究成果により、砕石の効用が再評価される可能性がある。後述のドレーン工は裏のり尻の水位低下が主な狙いであるが、のり尻の安定化のために構造によっては擁壁的な抵抗を期待する側面がある。フィルダムにおいては砕石の混入割合が 30~40 %以上の場合には一般の土工でよく採用される礫補正が適用できないことから大型締固め試験等を実施するように、同じ「土」でも砕石の混入割合等により「土」の挙動は大きく変化する。堤防を作ってきた先人はこのような「土」の挙動の変化を十分に理解せずに、砕石を利用していたかも知れない。主に砕石が使われるドレーン工も挙動が大きく異なることからすれば異種材料であり、タブー化される面があるが、河川堤防砂礫の変形・挙動特性に関する調査研究^{例えは²⁴⁾25)}が始められており嬉しい。

8.4 断面拡大工法の施工

—視点—

- 基礎地盤が軟弱な箇所では断面拡大工法を用いる場合には、施工において下記に留意が必要。
- 施工過程で基礎地盤のすべり破壊の恐れがあるため、**施工前と施工中の基礎地盤の強度を確認**
- 一般には施工管理により**強度増加の発現を確認しながら嵩上げを実施**
 - ・ 施工管理（動態観測）によって沈下と変位を監視し、既設堤体の安定・周辺地盤への影響を把握して施工すること。
 - ・ 施工にあたっては既設堤防とのなじみのための**段切りなどが必要**
 - ・ できるだけ**大型の施工機械が入る幅を確保**（締固められるよう）
 - ・ のり面近傍の締固め度を上げるためには、**余分に盛って大型の施工機械で締固め、後に余盛部分を削り取り、のり面成形**することが有効

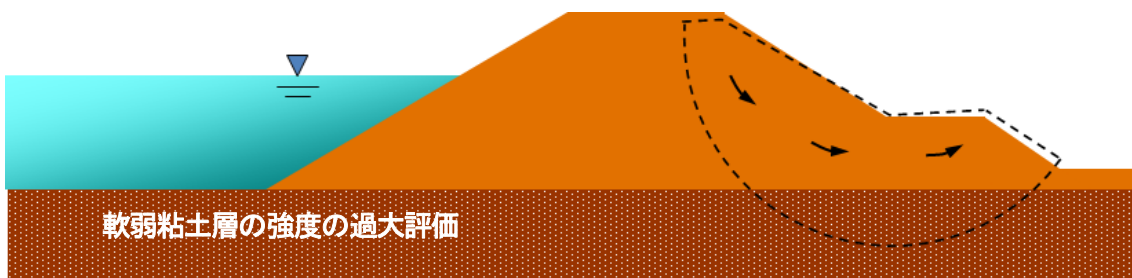


図 8.4.1 嵩上げによる軟弱粘土層のすべり

～～～【堤防の声】 乾いた堤防と湿った堤防～～～

堤防の強さは、湿り具合（含水状態）によって大きく変わる。

砂質土では湿った状態では、サクシオンという力が働き（拘束圧と同じ働きをする）、完全に飽和した状態よりも大きな強度を発揮する。サクシオンはわずかに湿った状態で最も大きく、含水状態が飽和に近づくにつれ小さくなり、完全に飽和した状態でゼロとなる。また、完全に乾燥した状態もゼロである。粘性土の場合には砂質土に比べれば含水状態は変化しにくいものの、同様の傾向であり、乾くと石のようになることもある。しかし、ある程度乾いてくると乾燥収縮のために亀裂が入ることもあり、乾けば良いとは限らない。

また、含水比が大きいほど透水係数も大きくなる。乾いた土に水をかけると弾いてなかなか染み込まないが、一旦、水が染みて土の色が変わるとみるみる水を吸い込むようになるということは誰も経験をしているだろう。洪水が来る前の堤防の含水状態が低ければ（乾燥していると）、洪水時に河川水は染み込みにくくなる。

さらに、東日本大震災では堤体液状化による被害も多く見られたように、多くの場合、堤防は乾いていた方（堤体内の水位は低い方）が強いと言える。

一方で、設計においては、浸透流計算では事前降雨により十分に高い含水状態となったところに河川水位を作用させ、円弧すべり計算では完全飽和状態の強度定数を使っている。これは、実際の状態に比べ安全側の評価になっている場合が多いと考えられるが、現実には含水状態をコントロールすることは難しい。

ただし、コントロールは難しいとは言え、維持管理や対策工の設計において、含水状態に配慮する（湿りやすい箇所はどこか、できるだけ浸透させない・速やかに排水させる）ことは重要である。

9. ドレーン工法

9.1 ドレーン工法の設計

—視点—

- 裏のり尻部にドレーン工（高透水ゾーン）を設置
 - ・ 裏のり部の水位低下とせん断強度の増大，のり尻部の動水勾配低減
 - ・ のり面すべりとパイピングに対する安全性の向上
- ドレーン工設計時の留意事項
 - ・ ドレーン工の厚みは，0.5m 以上（沈下しても排水阻害が生じない厚み）
 - ・ ドレーン工の幅は，平均動水勾配が0.3 未満（深く入れすぎない）
 - ・ ドレーン材料は，透水性が高く，かつせん断強度の大きい材料を選定
 - ・ ドレーン工の堤防側にはフィルター材（吸出し防止材）を敷設
 - ： フィルター材は，堤体土の吸出し防止ができて（開孔径が過大にならない）かつ長期的に目詰まりを起こさない（開孔径が過小にならない）要件をみたすこと
 - ： フィルター材（粒状フィルター，ジオテキスタイル）には多くの種類・製品があり，またフィルター材の透水係数を推定する試験法が施工現場の土圧に対応していない懸念などがあるため，ドレーン工の効果を検証したモニタリング事例の蓄積と情報交換が望まれる。
 - ・ ドレーン工末端の堤脚水路の位置は2H ルール

—ポイント—

- ☞ 堤脚水路，流末処理の検討は行ったか？
- ☞ ドレーン工は深く入れすぎているか？
- ☞ ドレーン工を設置するために良質の堤体土を大きく切り取ることになっていないか？（土質定数が適切に設定できないのではないか？）

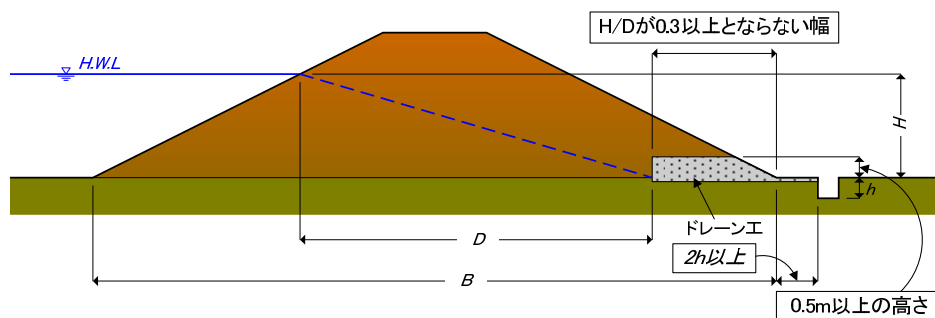


図 9.1.1 ドレーン工の断面形状

—参考資料—

- ドレーン工設計マニュアル²⁶⁾
 - ・ 本マニュアルには，吸出し防止シートの規格として， $0.1 \text{ mm} \leq O_{95} \leq D_{85}$ （ O_{95} はジオテキスタイルの95%開孔径， D_{85} は堤体土の85%粒径）が示されているが，河川土工マニュアルでは， $O_{95} \leq D_{85} \leq 1.0$ である。（一般的な粒状フィルターについては，Terzaghiの規準： $5 F_{15} < D_{15} < 5 F_{85}$ などがある。 F_{15} は粒状フィルターの15%粒径， F_{85} は粒状フィルターの85%粒径）

9.2 ドレーン工法の効果が高い堤防・低い堤防

－視点－

- 裏のり尻を透水性の大きい材料で置換し、浸透した水を速やかに排水
- 堤体の透水係数が、 $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{cm/s}$ 程度の場合に特に高い効果
- 堤体の透水性が高い場合、および逆に透水性が低い場合は、ドレーン工法の効果が発揮されにくい。
 - ・ 試算結果によると堤体の透水係数が高く ($5 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$)、ドレーンの透水係数との差異が少ない場合、ドレーン工法の効果が発揮されにくい。また、堤体の透水係数が低く ($5 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$) になると、ドレーン工法による水位低下効果はドレーンのごく近傍に限られてしまう。

－ポイント－

☞ ドレーン工を設置する堤体の透水係数は？

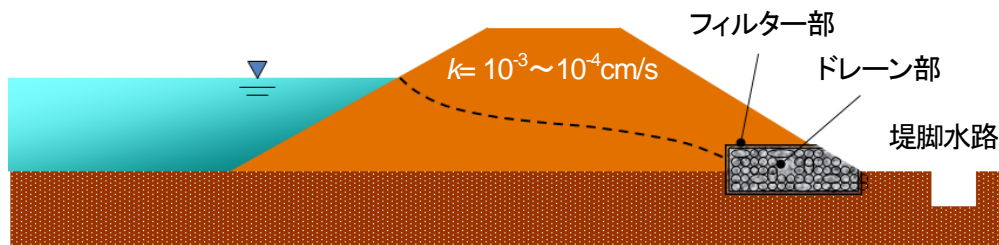


図 9.2.1 ドレーン工法の効果が高い堤防

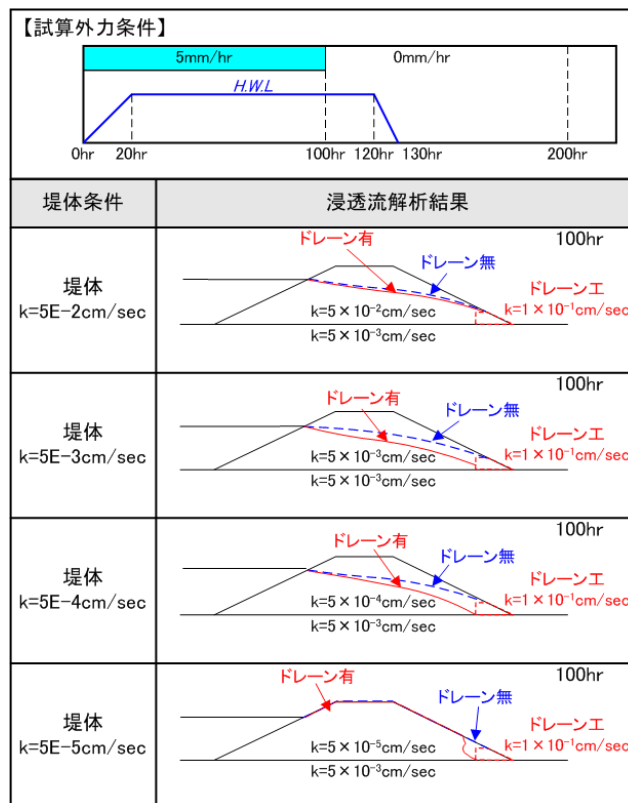


図 9.2.2 堤体の透水係数に応じた浸潤線の差異（土木研究所試算）

9.3 ドレーン設置時の既設堤防の掘削範囲

—視点—

- 既設堤防にドレーンを設置する場合、堤防の掘削が必要。掘削範囲が過大にならないよう留意
- 堤体のせん断強度や透水係数によっては、ドレーンの規模を大きくしないと安全率を満足できない場合がある。そのような場合には、埋戻し部分の土質や締固め度を精査することにより、ドレーンの規模を小さくでき、既存堤防の掘削範囲を小さくできる可能性もある。

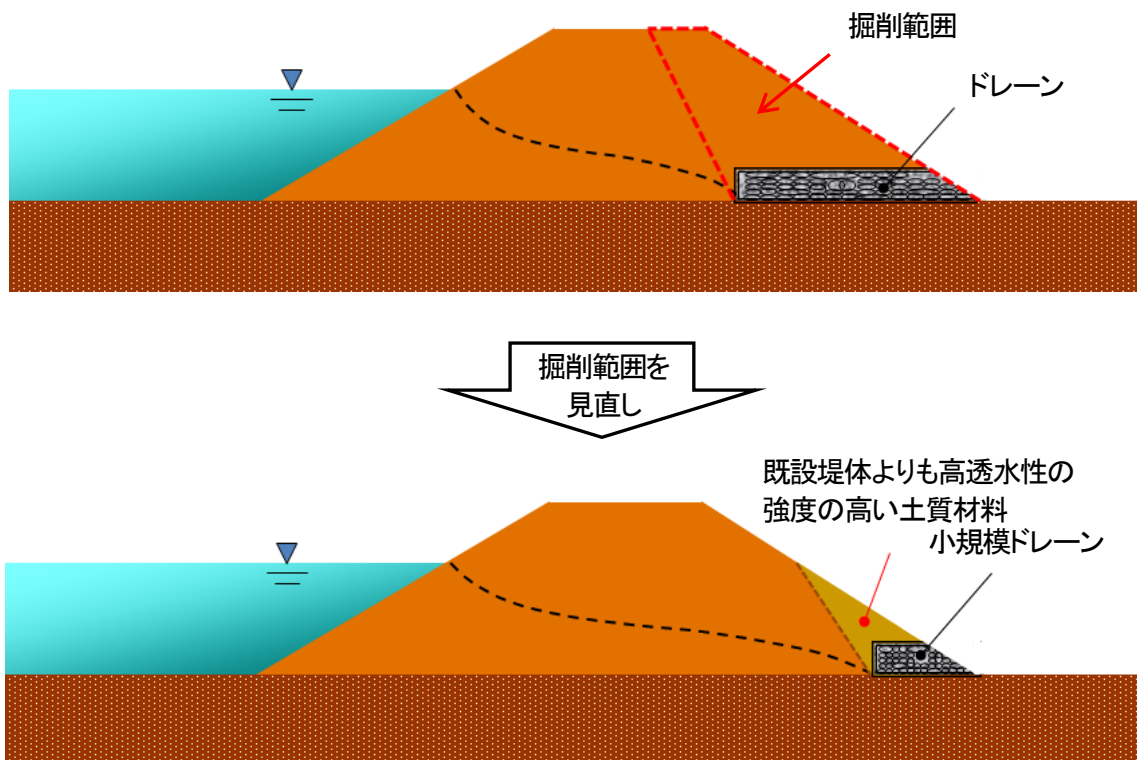


図 9.3.1 既設堤防の掘削範囲

〜〜【堤防の声】パイプドレーン工法²⁷⁾〜〜

ドレーン工の工費が高いため考慮されたのは、新幹線や道路盛土の排水工法として使用されているパイプドレーン工法がある。裏のり尻部から水平に挿入した排水管から浸透水を抜く工法である。中規模の河川堤防で 1 例実施例があるが、吸出し防止フィルターを挿入する。そのモニタリング成果は情報交換し確認するべきである。

10. 表のり面被覆工法

10.1 表のり面被覆工法の設計

—視点—

- 表のりを遮水シート等の難透水性材料で被覆
 - ・ 浸透路長の延長による堤体内水位の低下
 - ・ のり面すべりとパイピングに対する安全性向上
- 堤体が、透水性の高い礫質土や砂質土の場合に効果が大きい
- 被覆範囲は、のり尻から天端のり肩まで

—ポイント—

- ☞ 被覆材料（遮水シート、覆土・護岸ブロック等）のすべりは検討したか？
 - ・ 遮水シートの摩擦抵抗，護岸ブロックの利用，覆土の締固め，下記の残留水圧等に留意する必要がある。
- ☞ 遮水シートを用いる場合には，河川水位の低下時に，シート背後の残留水圧による浮き上り対策を講じているか？

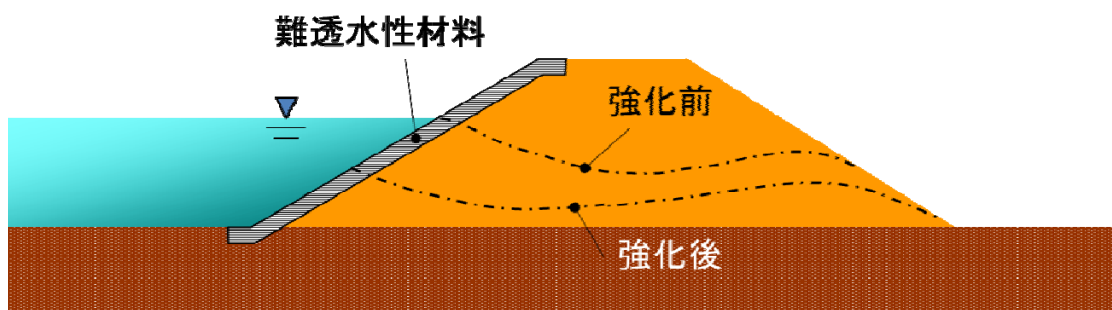


図 10.1.1 表のり面被覆工法

基礎地盤の透水係数や降雨，のり面勾配によっても効果が変わる【次頁参照】

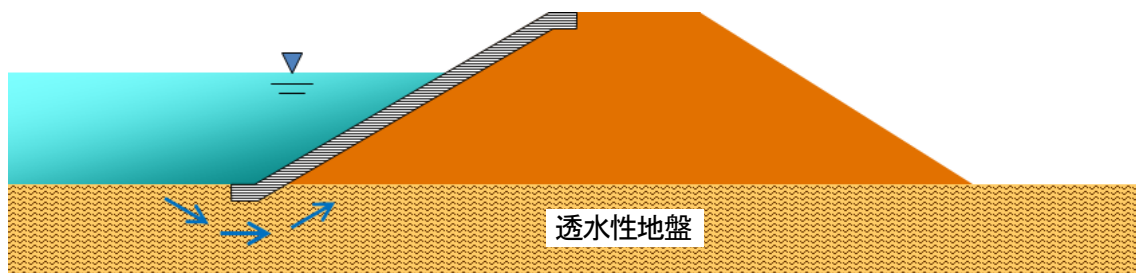
10.2 表のり面被覆工法の効果が低い堤防土質構造

—視点—

- 基礎地盤の透水性が高い場合
 - ・ 浸透水が基礎地盤から回り込む。基礎地盤の対策の併用を検討する必要あり
- 降雨の影響で裏のり尻付近の堤体内水位が上昇する場合はドレーンの併用を検討

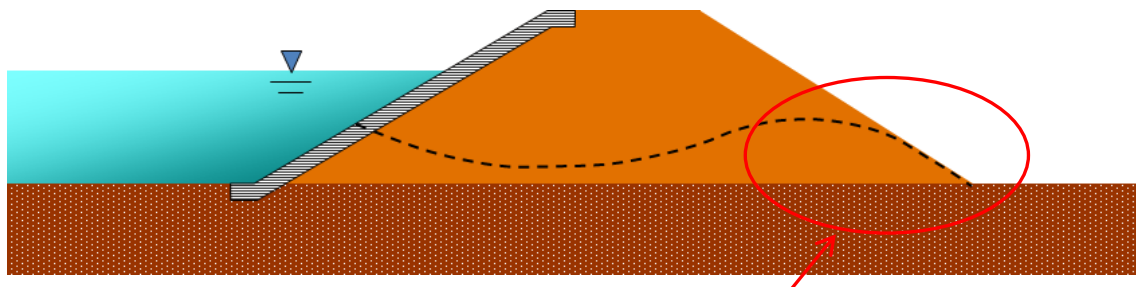
—ポイント—

- ☞ 表のり面被覆工法を設置する基礎地盤の透水係数は？



浸透水の回り込み
⇒ 矢板との併用等の検討

基礎地盤の透水性が高い場合



川表で遮水しても降雨の影響で裏のり尻付近の堤体内水位が上昇
⇒ ドレーンとの併用等の検討

降雨の影響が大きい場合

図 10.2.1 表のり面被覆工法が不適な堤防土質構造

11. 川表遮水工法

11.1 川表遮水工法の設計

—視点—

- 川表のり尻に遮水矢板等による遮水壁を設置
 - ・ 基礎地盤への浸透流量を低減
 - ・ 盤ぶくれ・パイピングに対する安全性を向上
- 裏のり尻の局所動水勾配を低減させるためには、貫入深度は少なくとも透水層厚の90%以上必要（透水層があまりに厚い場合、現実的ではない場合もある）

—ポイント—

- ☞ 遮水壁の種類・打設方法は、施工箇所の状況に応じて検討したか？（打設時の振動や設置後の腐食など）.
- ☞ 平常時の地下水流の阻害（地下水位の低下や堰上げ）などの影響について十分に検討したか？

遮水壁（鋼矢板、地中連続壁等）

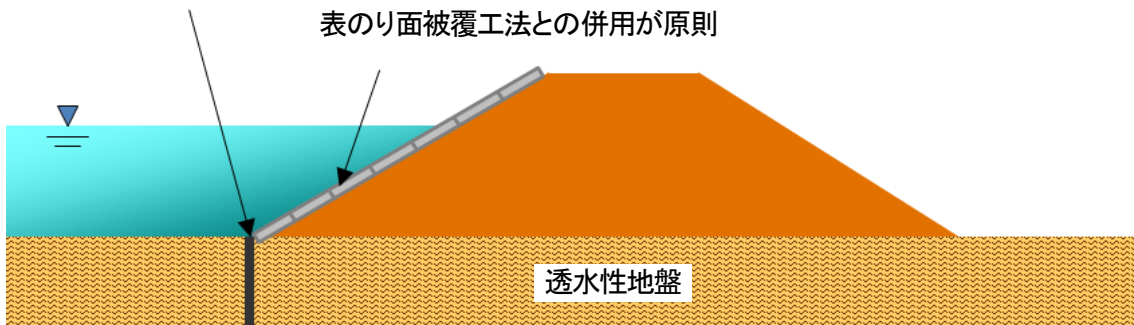
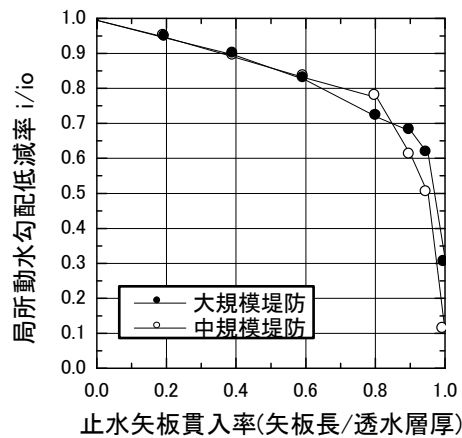


図 11.1.1 川表遮水工法（矢板工法）



矢板を透水性地盤厚の90%以上貫入すると局所動水勾配が大幅に低下

図 11.1.2 矢板貫入率と局所動水勾配の関係²⁾

11.2 川表遮水工法の効果が低い基礎地盤

—視点—

- 径の大きい礫や玉石が基礎地盤に分布する場合、貫入時に矢板が変形し、遮水性が保てない懸念がある
- 基礎地盤の透水性地盤が広域に分布している場合、遮水矢板の上下流端から浸透水が回り込む²⁸⁾ことにより、遮水効果が確保できない可能性がある

—ポイント—

- ☞ 求める性能を満足するよう遮水壁の設置範囲について堤防縦断方向にも検討したか？

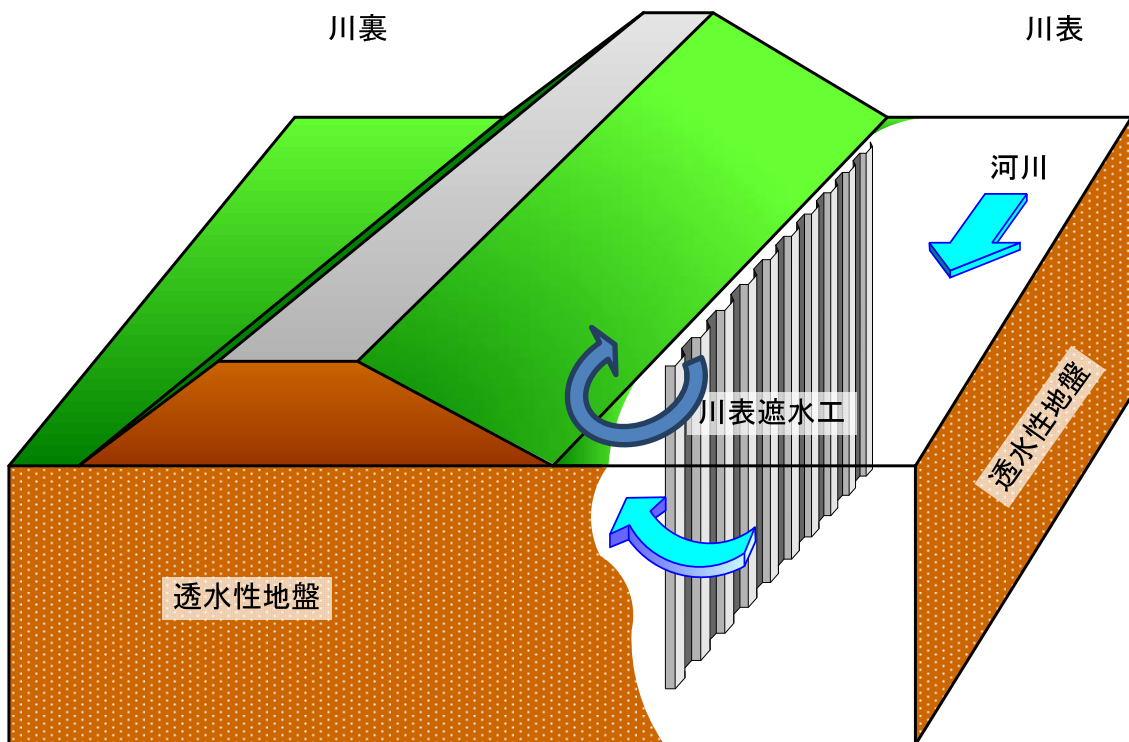


図 11.2.1 遮水矢板上下流端からの浸透水の回り込み（見取り図）

12. ブランケット工法

－視点－

- 高水敷を難透水性材料で被覆
 - ・ 浸透路長の延長
 - ・ 盤ぶくれ・パイピングに対する安全性向上
- ブランケット工法の留意点
 - ・ 高水敷が礫質土や砂質土など、透水性の高い土質の場合に効果が期待
 - ・ ある程度の効果を発揮するには、30m以上の幅が必要とされる
 - ・ 堤体の透水性が高い場合は、ブランケット工法を単独で使用しても効果が低い。表のり面被覆工法との併用が原則となる。
 - ・ ブランケットに土質材料を用いる場合は、洗掘防止のため50cm以上の厚さとする。

－ポイント－

- ☞ ブランケット工を設置する堤体の透水係数は？

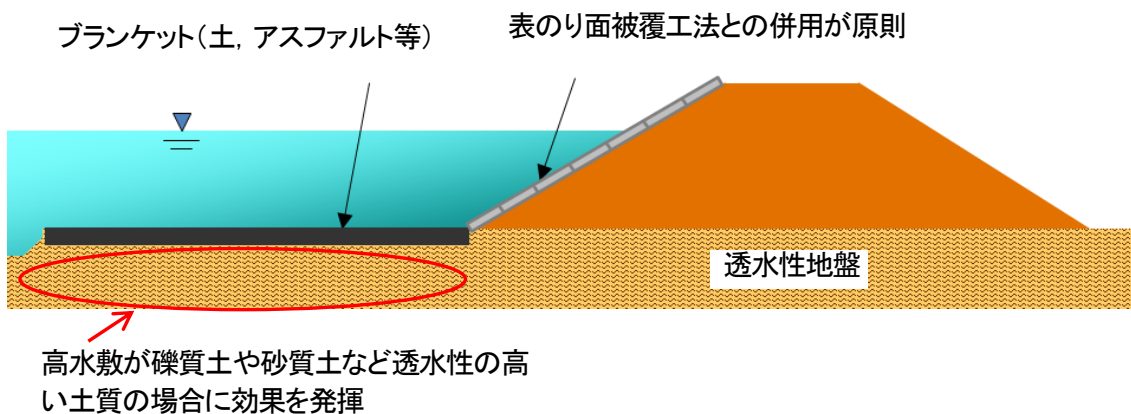


図 12.1.1 ブランケット工法

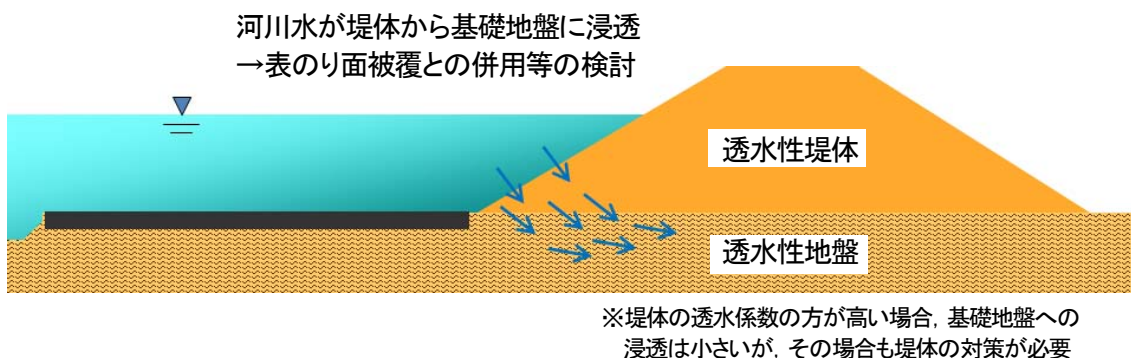


図 12.1.2 ブランケット工法が不適な堤防土質構造

13. 堤内基盤排水工法

－視点－

- 透水性基礎地盤から被覆層下面に作用する揚圧力の低下を目的とする工法（トレンチ工法，リリースウェル工法，ウェルドレーン工法など）
 - ・ 盤ぶくれに対する安全性向上
- 採用事例が少なく，設計法は確立されていない
- 基盤（透水性地盤）の透水性が高い場合は排水量が増大するため，川表側の遮水工法（表のり被覆工法，川表遮水工法，ブランケット工法など）との併用を検討すること
- 堤内基盤排水工の規模が不足すると，堤内基盤排水工周辺から漏水が発生する懸念がある．漏水による堤体損傷を抑えるために，できるだけ対策工を裏のり尻から離すこと．難しい場合には設計の中で十分な安全性を確保すること

－ポイント－

- ☞ 対策効果や長期劣化を検証するための堤体・基盤の水位やドレーンからの流量などのモニタリング計画は立てたか？
- ☞ 基礎地盤の透水係数の設定は安全を考慮して十分に大きな値を設定したか？
 - ・ 浸透流計算は基礎地盤の透水係数に大きく依存．一方で想定を超えた場合の挙動が不明

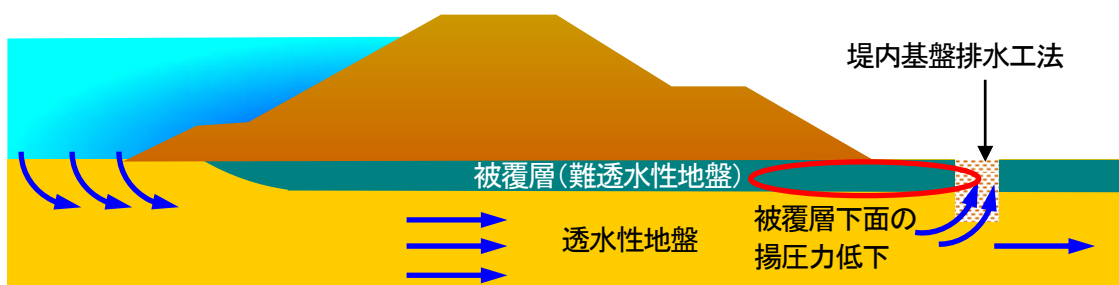


図 13.1.1 堤内基盤排水工法

14. 天端舗装工

—視点—

- 雨水の堤体への浸透を抑制するため堤防天端を舗装²⁹⁾
- 舗装のクラック等は適切に維持管理²⁹⁾
- 堤防のり面にガリ侵食等が発生しないようにアスカーブ及び排水処理工を設置²⁹⁾
- 図 14.1.1 のようにのり肩に張芝等を施し、天端に降った雨水を分散してのり面に流下させることで、のり面のガリ侵食等を防止する構造もあり得る。
- 舗装した場合には、天端に発生した亀裂を発見しづらくなる点に注意
- 縦断方向に堤防高さが変化する部分（橋梁などへの取り付け）では雨水が縦横断勾配に応じて集中しやすくなる。

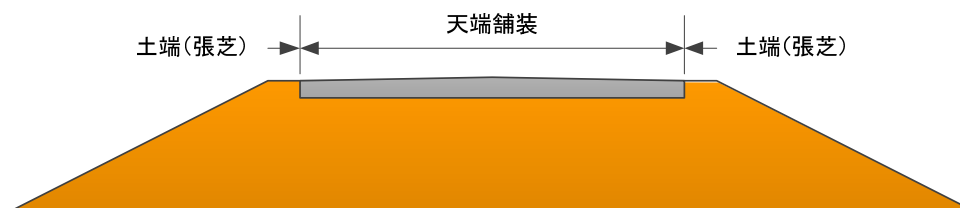


図 14.1.1 天端舗装する場合の舗装構造の例

～～～【堤防の声】集中豪雨が頻発する近年、天端に期待されること～～～

- 1) 天端舗装は、雨水浸透を防止し、のり面の崩壊（のり肩やのり尻を通る様々なすべり面）やパイピングに対して効果がある。
- 2) 地震時に天端に発生した亀裂が確認できない欠陥がある。例えば、縦断距離（10 m～20 m）毎に舗装面に横断方向の切れ目を設けることによって堤体に発生した縦断亀裂を把握できるような工夫は考えられないか？

あとがき

本資料は、行政の現場ニーズの高まりに呼応し、国土交通省水管理・国土保全局治水課において企画され、国土交通省、(独)土木研究所および国土技術研究センターの関係者とともに執筆したものであり、現場での課題については河川保全企画室長に、技術面では堤防技術研究委員会の委員の皆様にご意見を伺い初版として作成した。現象の解明や技術の進歩などの必要に応じて改訂することは今後に委ねるものである。

将来の堤防技術の進展や堤防技術に対しより多くの読者に興味を持っていただけることを期待し、ここでは敢えて、堤防技術として体系的に確立しているか否かは評価しがたい事柄や希望的なコメント等を記した箇所もある。本資料の内容に関する疑問、批判、将来の堤防技術の確立・進展に向けた意見は、執筆者または土木研究所にお寄せ下されれば幸いである。また、本文では言及できていないものの、堤防の浸透対策を始めとした堤防技術に関して重要な課題について今後への期待を込めて以下に触れておく。

- 堤防は延長の長い構造物で、弱部が決壊すればその機能を失う。このため、堤防に生じる変状や変形を捉えることにより、決壊しそうな弱部をできるだけ速やかに効率的に見出す方法としての各種技術（たとえば、堤防のリモート監視システム、漏水や変形・亀裂などの観測手法（observation method））の導入
- 現場の地域特性に応じた維持管理を行うために必要とされる、流域や河川の特性を踏まえた堤防の構造上の特徴を分析する方法
- 一連区間の設定や代表断面の選定、堤体土質や基礎地盤のモデル化の精度向上へ活用が期待される物理探査手法は、高い必要性に係わらず、精度と調査目的、調査手法の関係が不明確である。限定された目的に応じた探査精度を向上するための検討が不可欠と思慮
- 土堤原則の下で築造されてきた堤防は水の浸透に弱い特性を持つ。緩い土層、構造物周りの境界部、地震時等に生じた亀裂の残存などは、降雨洪水時の浸透現象により内部侵食やコーラス（構造崩壊）により空洞をもたらす候補位置になり得る。このような浸透破壊の発生候補とも言える弱部を如何に発見し、見極めるかが重要
- すなわち、浸透に対する安全性の照査で想定している「すべり破壊」、「パイピング破壊」に関しては、学術的にも混乱している面があり、破壊実態や破壊メカニズムにより則した分析手法に関する研究開発が必要
- 温暖化に伴う気象条件の変化を踏まえた外力（豪雨・台風・地震の規模）及び堤防の浸透破壊に関する外力の設定に関する検討

平成 25 年 6 月

岐阜大学名誉教授 宇野 尚雄
(堤防技術研究委員会座長)

参考資料

- 1) 治水課：河川堤防設計指針，2002. 7(最終改正 2007. 3)
- 2) 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き(改訂版)，2012. 2
- 3) 九州地方整備局：http://www.qsr.mlit.go.jp/chikugo/torikumi/01-plan_course/tyosa/index.html
- 4) 国土技術研究センター：護岸の力学設計法，1998. 2
- 5) 河川環境課：堤防等河川管理施設及び河道の点検要領，2012. 5
- 6) 治水課：河川構造物の耐震性能照査指針・解説，2012. 2
- 7) 治水課：レベル2地震動に対する河川堤防の耐震点検マニュアル，2012. 2
- 8) 河川構造物地震対策技術検討委員会：河川構造物地震対策技術検討委員会 報告書，1996. 3
- 9) 国土技術政策総合研究所，土木研究所：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報，2011. 6
- 10) 治水課：樋門等構造物周辺堤防詳細点検要領，2012. 5
- 11) 建設省関東地方建設局下館工事事務所：小貝川洪水の記録一昭和61年・台風10号一
- 12) 国土技術研究センター編：改定 解説・河川管理施設等構造令，山海堂，2000. 1
- 13) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，2009. 11
- 14) 地盤工学会：土質試験 基本と手引き 第一回改訂版，2001. 3
- 15) 宮尾：江戸川における河川堤防の変遷と補強対策
(http://www.mlit.go.jp/river/trash_box/paper/pdf_japanese/21.pdf)
- 16) 中島秀雄：国土技術研究センター 第1回堤防委員会資料
(<http://www.jice.or.jp/jishu/t1/201301100.html>)
- 17) 国土地理院地図・空中写真閲覧サービス：<http://mapapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do>
- 18) 産業技術総合研究所地質調査総合センター：<http://iggis1.muse.aist.go.jp/ja/top.htm>
- 19) 日本道路協会，道路土工-軟弱地盤対策工指針(平成24年度版)，2012. 10
- 20) 久楽，三木，関：締固め度がレキ混り粘性土の工学的性質に及ぼす影響(第2報)，土木技術資料24-3，1982. 3
- 21) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，2013. 3
- 22) 宇野尚雄：河川堤防の現状と照査から見た対策の方向性，基礎工，456号，2011. 7
- 23) 土質工学会編：土質工学ハンドブック，pp. 205~208，1965. 10
- 24) 吉国，宇野，柳沢：土の力学(II) [特殊土・締固め・土と水]，技報堂出版，pp. 175-178，1984
- 25) 小高，板橋，中島，牧田，李，上村，坪田，加藤：河川堤防砂礫の変形・強度特性の評価手法に関する考察，地盤工学ジャーナル，Vol. 5，No. 2，2010
- 26) 治水課：ドレーン工設計マニュアル，2013
- 27) 太田・宇野：堤防の浸透破壊を防止するパイプドレーンの設計マニュアル案，第55回地盤工学シンポジウム論文集，2010
- 28) 増山，齋藤，森，佐々木：河川堤防の浸透対策に関する現地モニタリングと三次元浸透流解析，河川技術論文集，Vol. 17，pp. 275-280，2011. 7
- 29) 建設省河川局水政課長，建設省河川局河川計画課長，建設省河川局治水課長通達：河川管理施設等構造令及び同令施行規則の運用について，H11. 10. 15 建設省河政発第74号，建設省河計発第83号，建設省河治発39号
- 30) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，2002. 3
- 31) 福田，宇野：透水係数に関係する粒度分布と間隙指標，土木学会論文集，No. 561/iii-38，1997
- 32) 福田，宇野：粒度評価径の提案とそれに基づく日本統一土質分類法の分析，土木学会論文集，No. 561/iii-38，1997

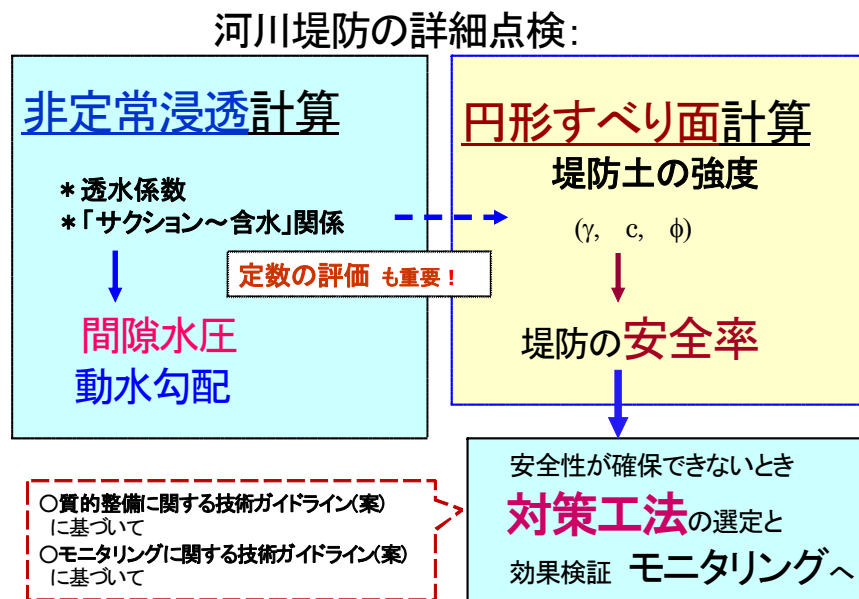
巻末資料

A1. 土質定数と必要な土質試験法

表 A1.1 土質定数と必要な土質試験法

| 土質定数 | 必要な土質試験 |
|-------------------------|--|
| 湿潤密度 ρ_t | ・ 土の湿潤密度試験 (JIS A 1225) |
| 飽和密度 ρ_{sat} | ・ 土粒子の密度試験 (JIS A 1202) ・ 土の含水比試験 (JIS A 1203) ・ 土の湿潤密度試験 (JIS A 1225) |
| 粘着力 c 内部摩擦角 ϕ | ・ 土の三軸圧縮試験 (JGS 0520~0524) |
| 飽和透水係数 k_s | ・ 土の透水試験 (JIS A 1218) |

A2. 河川堤防の詳細点検フロー



注) 「浸透」に限定した詳細点検

図 A2.1 河川堤防の詳細点検フロー

A3. 単位体積重量 γ の一般値

表 A3.1 我が国における土の密度のおおよその範囲¹³⁾

| | 沖積層 | | 洪積層 | 関東 | 高有機 |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 粘性土 | 砂質土 | 粘性土 | ローム | 質土 |
| 湿潤密度 $\rho(g/cm^3)$ | 1.2~1.8 | 1.6~2.0 | 1.6~2.0 | 1.2~1.5 | 0.8~1.3 |
| 乾燥密度 $\rho_d(g/cm^3)$ | 0.5~1.4 | 1.2~1.8 | 1.1~1.6 | 0.6~0.7 | 0.1~0.6 |
| 含水比 $w(\%)$ | 30~150 | 10~30 | 20~40 | 80~180 | 80~1200 |

表 A3.2 土質分類と単位重量, 平均粒径, 細粒含有率の概略値³⁰⁾

| 土質分類 | 地下水位面下の単位重量 $\gamma_d(kN/m^3)$ | 地下水位面上の単位重量 $\gamma_{d1}(kN/m^3)$ | 平均粒径 $D_{50}(mm)$ | 細粒含有率 $FC(\%)$ |
|--------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------|----------------|
| 表土 | 17.0 | 15.0 | 0.02 | 80 |
| シルト | 17.5 | 15.5 | 0.025 | 75 |
| 砂質シルト | 18.0 | 16.0 | 0.04 | 65 |
| シルト質細砂 | 18.0 | 16.0 | 0.07 | 50 |
| 微細砂 | 18.5 | 16.5 | 0.1 | 40 |
| 細砂 | 19.5 | 17.5 | 0.15 | 30 |
| 中砂 | 20.0 | 18.0 | 0.35 | 10 |
| 粗砂 | 20.0 | 18.0 | 0.6 | 0 |
| 砂れき | 21.0 | 19.0 | 2.0 | 0 |

A4. 飽和透水係数 k の一般値

| 透水性 | 透水係数 $k(m/s)$ | | | |
|-----------------|---------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------|
| | 10^{-11} | 10^{-10} | 10^{-9} | 10^{-8} |
| 実質上不透水 | 非常に低い | 低い | 中位 | 高い |
| 対応する土の種類 | 粘土性 (C) | 微細砂, シルト, 砂-シルト-粘土混合土 (SF)(S-P)(M) | 砂及びれき(礫) (GW)(GP) (SW)(SP) (G-F) | 清浄なれき (GW)(GP) |
| 透水係数を直接測定する方法 | 特殊な変水位透水試験 | 変水位透水試験 | 定水位透水試験 | 特殊な変水位透水試験 |
| 透水係数を間接的に測定する方法 | 圧密試験結果から計算 | なし | 清浄な砂及びれきは, 粒度と間隙比とから計算 | |

図 A4.1 透水性と試験方法との適用性¹³⁾

A5. Hazen の式

$$k = C_k (0.7 + 0.03 \times t) D_{10}^2$$

ここに、透水係数 k : cm/s, 10%粒径 D_{10} : cm, 係数 C_k : 均等な粒子で 150, 緩い細砂で 116, 良く詰った細砂で 70, 大小粒子が混じっている砂で 60, 汚れた粒子で 46.

A6. Creager の方法

表 A6.1 Creager による D_{20} と透水係数 k ¹⁴⁾

| D_{20} (mm) | k (cm/sec) | 土 質 | D_{20} (mm) | K (cm/sec) | 土 質 |
|------------------|-----------------------|-------|------------------|-----------------------|-----|
| 0.005 | 3.00×10^{-6} | 粗粒粘土 | 0.18 | 6.85×10^{-3} | 細砂 |
| 0.01 | 1.05×10^{-5} | 細粒シルト | 0.20 | 8.90×10^{-3} | 〃 |
| 0.02 | 4.00×10^{-5} | 粗粒シルト | 0.25 | 1.40×10^{-2} | 〃 |
| 0.03 | 8.50×10^{-5} | 〃 | 0.30 | 2.20×10^{-2} | 中砂 |
| 0.04 | 1.75×10^{-4} | 〃 | 0.35 | 3.20×10^{-2} | 〃 |
| 0.05 | 2.80×10^{-4} | 〃 | 0.40 | 4.50×10^{-2} | 〃 |
| 0.06 | 4.60×10^{-4} | 微細砂 | 0.45 | 5.80×10^{-2} | 〃 |
| 0.07 | 6.50×10^{-4} | 〃 | 0.50 | 7.50×10^{-2} | 〃 |
| 0.08 | 9.00×10^{-4} | 〃 | 0.60 | 1.10×10^{-1} | 粗粒砂 |
| 0.09 | 1.40×10^{-3} | 〃 | 0.70 | 1.60×10^{-1} | 〃 |
| 0.10 | 1.75×10^{-3} | 〃 | 0.80 | 2.15×10^{-1} | 〃 |
| 0.12 | 2.6×10^{-3} | 細砂 | 0.90 | 2.80×10^{-1} | 〃 |
| 0.14 | 3.8×10^{-3} | 〃 | 1.00 | 3.60×10^{-1} | 〃 |
| 0.16 | 5.1×10^{-3} | 〃 | 2.00 | 1.8 | 細礫 |

A7. 福田・宇野の方法^{31), 32)}

均等係数と間隙比も用いた透水係数・算出式

1) 均等係数 U_c を粒度分布から求めて次の粒度の標準偏差を算出する.

$$\ln(\sigma_w) = 0.484 + 0.420 \times \ln(U_c) \dots\dots\dots (1)$$

2) 土粒子の密度を水の密度で除した比 $\rho_s / \rho_w = G_s$ (真比重ともいう), 50%粒径 d_{50} , 間隙比 e を与えて次式により平均間隙径深 h を求める.

$$h = 0.3d_{50} \times (e/G_s) / \exp[0.5 \times \ln^2(\sigma_w)] = d_c \times (e/G_s) \dots\dots\dots (2)$$

ただし, d_c : 粒度評価径(mm), h : 平均間隙径深(mm)

3) 飽和透水係数 k_s は次式で与えられる.

$$\log(k_s) = 2.87 \times [1 + \log(h)] \dots\dots\dots (3)$$

ただし, k_s : cm/s, h : mm, のとき.

A8. 粘着力 c の一般値

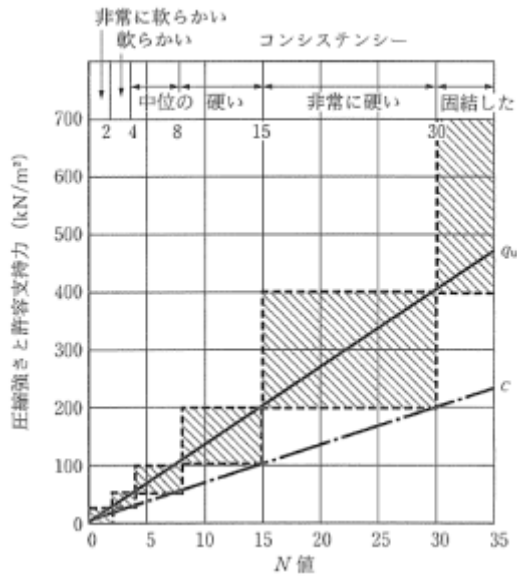


図 A8.1 N 値と粘土のコンシステンシー
と一軸圧縮強さの関係²¹⁾

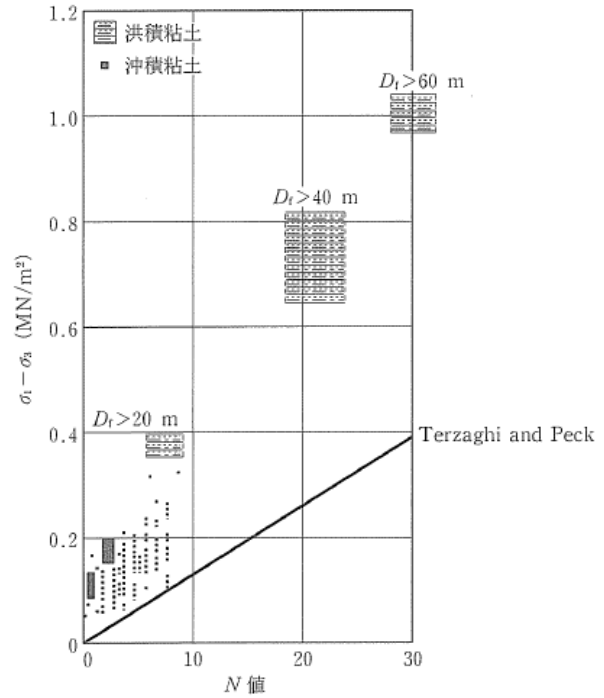


図 A8.2 N 値と $\sigma_1 - \sigma_3$ の関係²¹⁾

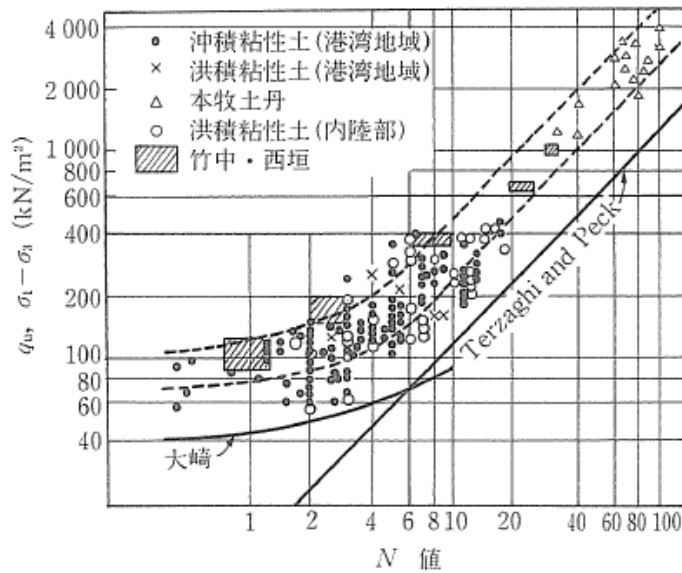


図 A8.3 q_u , $\sigma_1 - \sigma_3$ 値と N 値の関係²¹⁾

A9. 内部摩擦角 ϕ の一般値²⁾

Peck(1953) $\phi = 0.3N + 27$

大崎(1959) $\phi = \sqrt{20N} + 15$

Meyerhof(1956) $\phi = (5/6)N + 26.7 \quad (4 \leq N < 10)$
 $\phi = (1/4)N + 32.5 \quad (10 \leq N \leq 50)$

Dunham(1954) ① $\phi = \sqrt{12N} + 25$ (角張った粒子で、粒度配合がよい)
 ② $\phi = \sqrt{12N} + 20$ (丸くて良配合・角張って悪配合)
 ③ $\phi = \sqrt{12N} + 15$ (丸い粒子で、粒度配合悪い)

道路橋示方書・同解説 下部構造編(2002)

$$\phi = 4.8 \log \left[\frac{170N}{\sigma_v' + 70} \right] + 21$$

鉄道構造物等設計標準・同解説—土構造物(2007)

$$\phi = 1.85 \log \left[\frac{N}{\sigma_v' / 100 + 0.7} \right]^{0.6} + 26$$

σ_v' :有効上載圧(kN/m²)

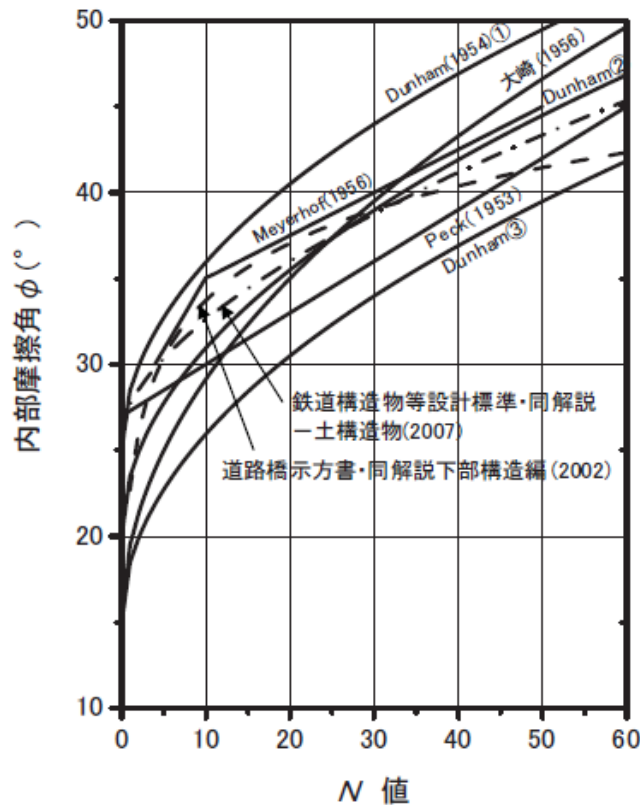


図 A9.1 N 値と内部摩擦角 ϕ の関係

A10. 強度試験結果の集計

(1) UU 試験によるせん断強度

- ・粘着力 c の分布は, 20~50kN/m²程度が多い.
- ・内部摩擦角 ϕ の分布は, 0~2.5° が多い.

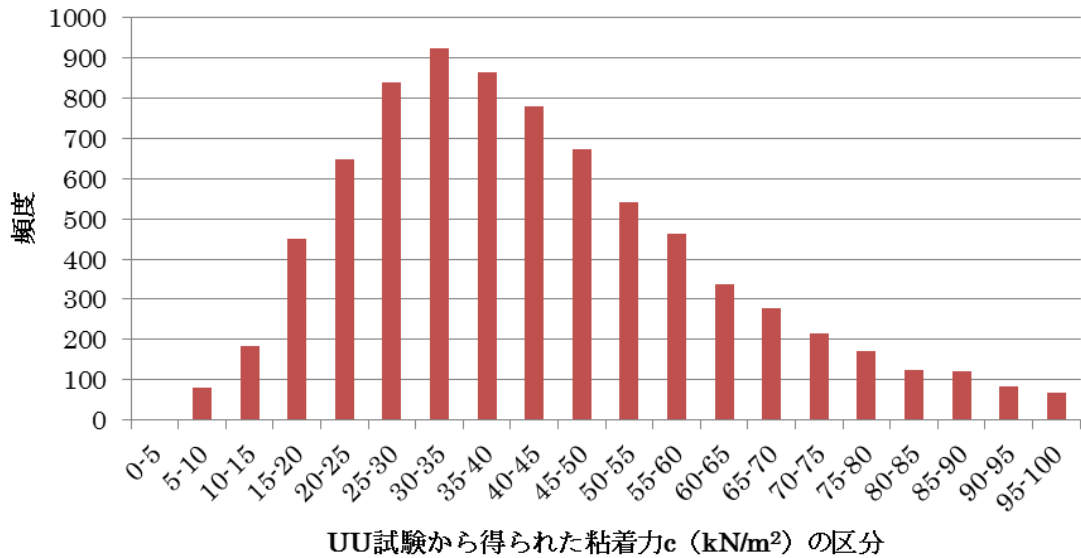


図 A10.1 UU 試験から得られた粘着力 c

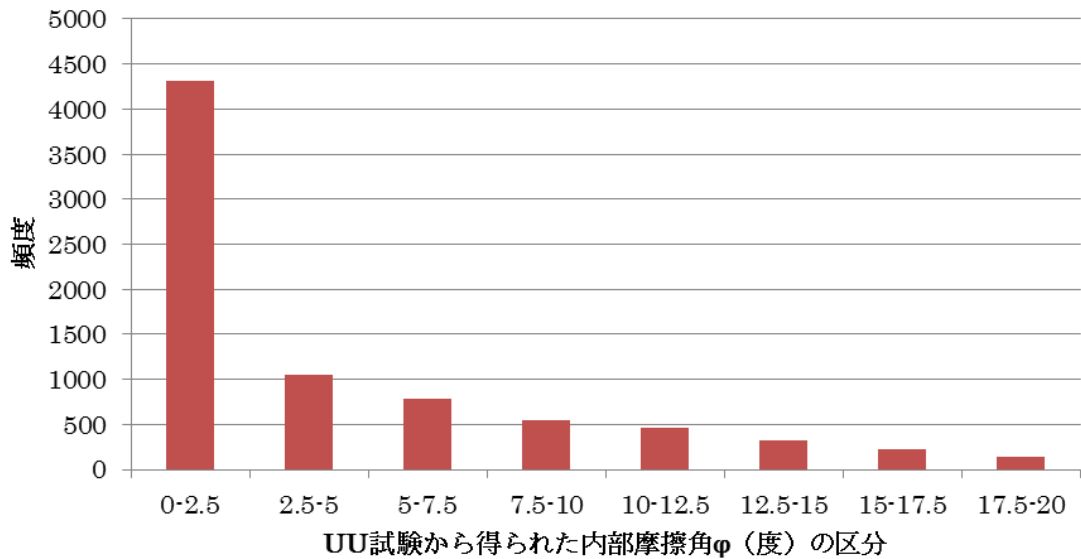


図 A10.2 UU 試験から得られた内部摩擦角 ϕ

(2)CU 試験によるせん断強度

- ・粘着力 c の分布は、 $0\sim 2.5\text{kN/m}^2$ が比較的多いが、広く分布。
- ・内部摩擦角 ϕ の分布は、 $15\sim 40^\circ$ が比較的多いが、バラツキが大きい。

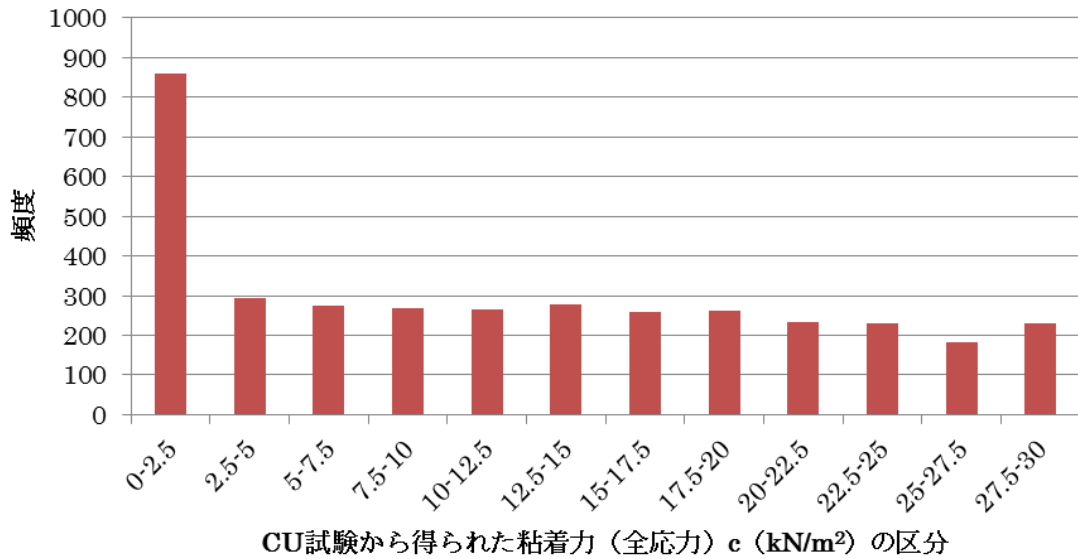


図 A10.3 CU 試験から得られた粘着力 c

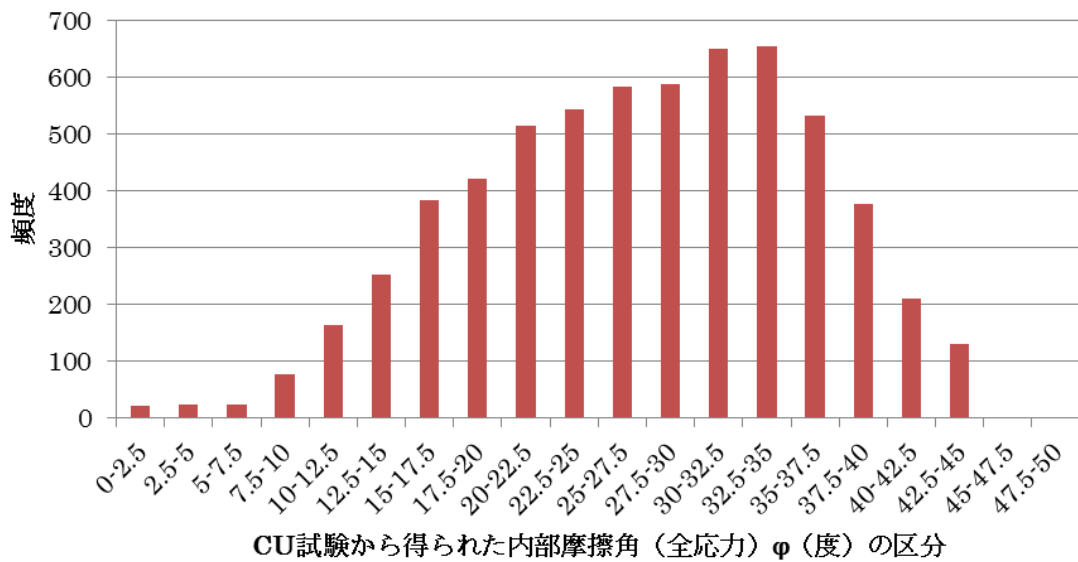


図 A10.4 CU 試験から得られた内部摩擦角 ϕ

(3) CUB 試験によるせん断強度

- ・有効応力で整理した粘着力 c の分布は、 $0\sim 2.5\text{kN/m}^2$ が多い。
- ・有効応力で整理した内部摩擦角 ϕ の分布は、 $32.5\sim 40^\circ$ 程度が多い。CD 試験の内部摩擦角に比べ小さな範囲の頻度が相対的に高い。

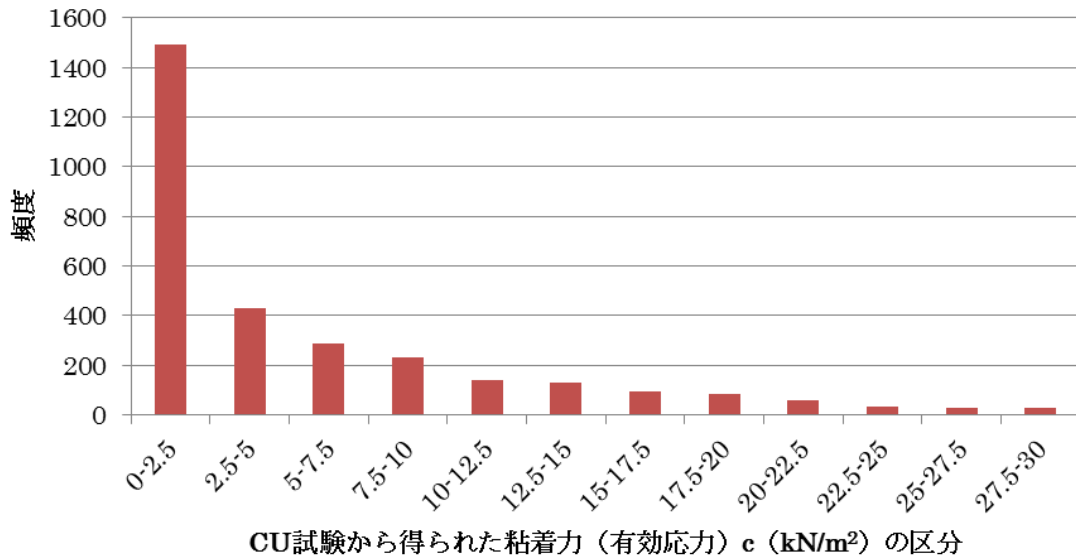


図 A10.5 CUB 試験から得られた粘着力 ϕ (有効応力)

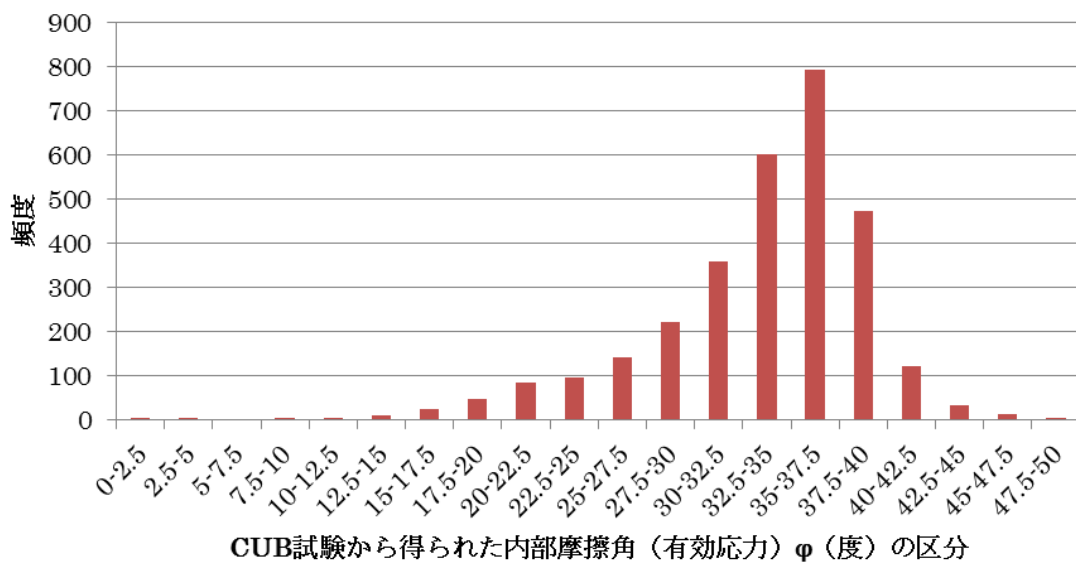


図 A10.6 CUB 試験から得られた内部摩擦角 ϕ (有効応力)

(4) CD 試験によるせん断強度

- ・粘着力 c の分布は, $0\sim 2.5\text{kN/m}^2$ 程度が多い.
- ・内部摩擦角 ϕ の分布は, $32.5\sim 40^\circ$ 程度が多い.

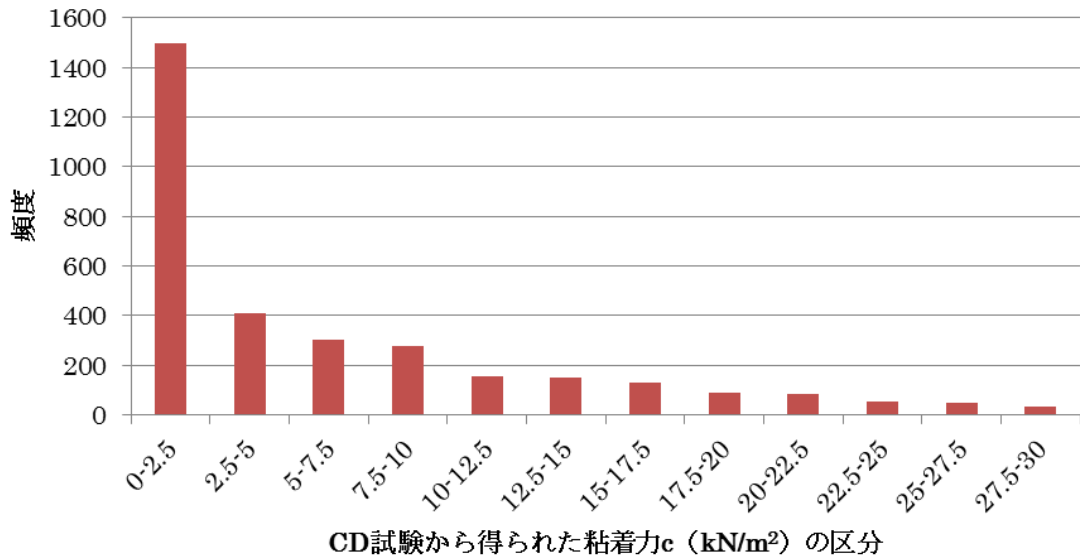


図 A10.7 CD 試験から得られた粘着力 c

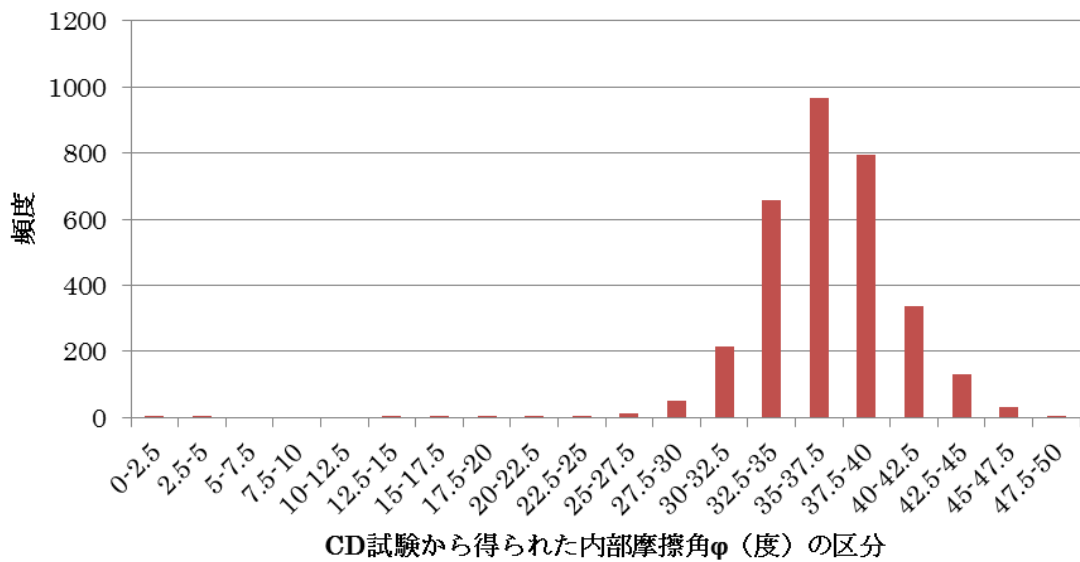


図 A10.8 CD 試験から得られた内部摩擦角 ϕ

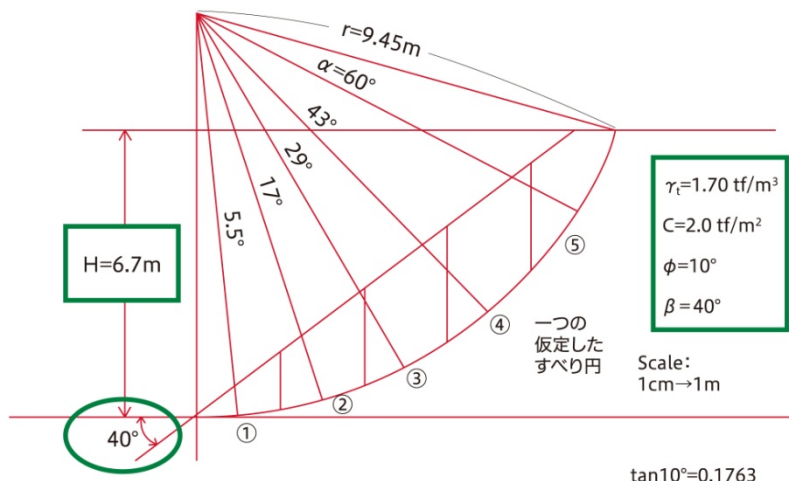
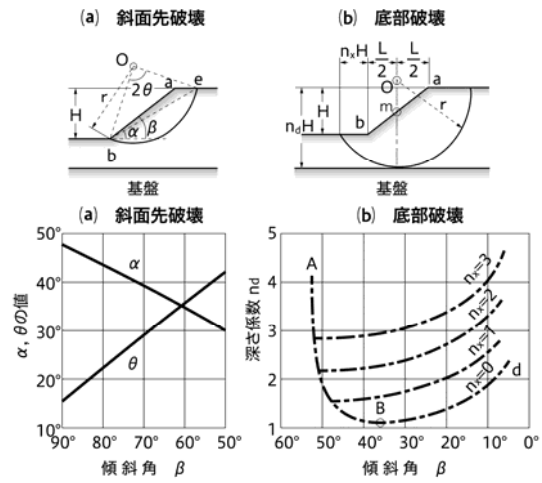
A11. Taylor 安定図表の補足説明(8.1 節参照)

1) 図 8.1.1 の図中の **A 域**, **B 域** の区別は右図の斜面先破壊か底部破壊かの破壊形式によるもの。

2) 図表解法は勾配が一定の単純斜面に対するもので、堤防のような小段あるとき法面を直線で近似するには抵抗感があるが、数ケース試算すると感度が解る。

3) 浸透水で間隙水圧があるときの計算： 別途提示されている間隙水圧の発生時の図表を利用。一方、間隙水圧がない時の図 8.1.1 を利用した試算では安全率は約半減する。数例試算すれば、既往の照査結果とどの程度近似しているかを確認することができる。

注) 下記のすべり面計算例は、本文 p.39 で試算した斜面の 1 円弧に対する計算である。



| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) | (12) |
|---|------|------|------|--------------------------------|-----|--------|-------|---------|-----------|-------|-------------------------|---------------|
| | b(m) | α(°) | h(m) | W=γ _s ·bh (tf/m) | u | sin α | cos α | W sin α | ℓ=b/cos α | c ℓ | (W cos α - u ℓ) × tan φ | = (10) + (11) |
| 1 | 1.8 | 5.5° | 0.6 | 1.836 | 0 | 0.0958 | 0.995 | 0.1759 | 1.808 | 3.616 | 0.3221 | 3.9381 |
| 2 | 1.8 | 17° | 1.8 | 5.508 | 0 | 0.2924 | 0.956 | 1.6103 | 1.882 | 3.764 | 0.9285 | 4.6925 |
| 3 | 1.8 | 29° | 2.5 | 7.650 | 0 | 0.4848 | 0.875 | 3.7088 | 2.058 | 4.116 | 1.1802 | 5.2962 |
| 4 | 1.8 | 43° | 2.65 | 8.109 | 0 | 0.6820 | 0.731 | 5.5303 | 2.461 | 4.922 | 1.0452 | 5.9672 |
| 5 | 1.8 | 60° | 1.9 | 5.814 | 0 | 0.8660 | 0.500 | 5.0351 | 3.600 | 7.200 | 0.5125 | 7.7125 |
| 計 | | | | | | | | 16.0604 | | | | 27.6065 |

●この問題は「単斜面」であるのでテイラーの図表法で安全率を求めることができる!

$$\sum W_s \sin \alpha = 16.0604 \text{ (tf/m)}$$

$$\sum (\text{分子}) = 27.6065 \text{ (tf/m)}$$

$$F_s = \frac{B}{A} = 1.72$$

Taylor 図表法によると

Ps = 1.6 と仮定すると $\phi_d = \tan^{-1} \left(\frac{1}{1.6} \tan 10^\circ \right) = 6.3^\circ$ のとき 図 B の $i = \beta = 40^\circ$ に相当するのは $\frac{c_d}{\gamma_s H} = 0.121 = \frac{2.0/1.6}{1.7H}$
 $H = 6.08 \text{ m}$

Ps = 1.4 // $\phi_d = \tan^{-1} \left(\frac{1}{1.4} \tan 10^\circ \right) = 7.2^\circ$ のとき 図 B の $i = 40^\circ \rightarrow 0.115 = \frac{2/1.4}{1.7H}$ $H = 7.307 \text{ m}$

Ps = 1.5 // $\phi_d = \tan^{-1} \left(\frac{1}{1.5} \tan 10^\circ \right) = 6.7^\circ$ // // $\rightarrow 0.118 = \frac{2/1.5}{1.7H}$ $H = 6.65 \text{ m}$

H = 6.7m に対応する安全率は $F_s = 1.4 \sim 1.5$ の間にあり、比例分配すると $F_s = 1.4 + 0.1 \times \frac{7.307 - 6.7}{7.307 - 6.65} = 1.49$

執筆者一覧（五十音順）

| | |
|-----------|-------------------------------|
| 石原 雅規 | （独）土木研究所地質・地盤研究グループ主任研究員 |
| 井上 悟士 | （一財）国土技術研究センター河川政策グループ |
| （監修）宇野 尚雄 | 岐阜大学名誉教授（堤防技術研究委員会座長） |
| 小俣 篤 | 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課河川保全企画室長 |
| 川井 正彦 | （独）土木研究所地質・地盤研究グループ交流研究員 |
| 齋藤由紀子 | 元（独）土木研究所地質・地盤研究グループ主任研究員 |
| 佐古 俊介 | （一財）国土技術研究センター河川政策グループ上席主任研究員 |
| 佐々木哲也 | （独）土木研究所地質・地盤研究グループ上席研究員 |
| 長田 仁 | 国土交通省水管理・国土保全局治水課課長補佐 |
| 森 啓年 | 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究室主任研究官 |

河川堤防の浸透に対する照査・設計のポイント
平成 26 年 7 月版

（独）土木研究所

地質・地盤研究グループ 土質・振動チーム

〒305-0035 茨城県つくば市南原 1-6

Tel : 029-879-6771, Fax : 029-879-6735

本資料に対するご意見や不明な点については、執筆者あるいは土木研究所にお寄せ下さい。

新たに得られた知見とともに皆様方からのご意見を踏まえ、更新していきます。