

江戸川堤防実規模実験について ―堤防委員会における特定課題から―

佐古 俊介
河川政策グループ
上席主任研究員



1. はじめに

河川堤防は、洪水・高潮による水災害防御の根幹的施設として古くから整備が進められてきており、人々の安全・安心な暮らしと社会経済活動を推進するにあたっての最も重要な社会基盤施設の一つです。

現在、国土交通省では、河川堤防の信頼性確保に向け、河川堤防に係る安全性照査を実施し、計画的、効果的な堤防強化を推進しているところであり、これらを支援する堤防技術の開発等が望まれています。

JICE では、設立以来、河川堤防の計画、設計、安全性評価、管理技術に係る調査研究を研究の柱として継続的に実施してきており、その成果は、国の堤防に係る基準書類に反映されています。また、平成 20 年度より新たに JICE の常設委員会として「堤防委員会」を立ち上げ、18 名の学識経験者からなる委員により、河川工学、土質工学、地形・地質学等の視点から河川堤防の抱えている技術的課題と課題解決に向けた方策等について継続的な議論がされているところです。

(詳細は <http://www.jice.or.jp/jishu/t1/201010040.html> に掲載されています。)

2. 江戸川堤防実規模実験の概要

本稿は「堤防委員会」の活動の一貫として、過去の堤防実規模実験（江戸川堤防実験）の成果のとりまとめと、得られた知見が、現在の「堤防設計指針」や「河川堤防構造検討の手引き」等にどのように反映されたかについて整理を行いましたので、概要を紹介します

河川堤防は土を材料として作られているため、その破壊要因は主として河川水や降雨の浸透によるものが挙げられます。江戸川堤防実規模実験は、河川水や降雨の浸透作用により堤防が破壊する過程を検証することを目的として、昭和 61 年～平成 2 年に実施されたものであり、併せて浸透に対する強化工法としてのドレーン工の効果検証についても実施しています。

実験堤防は、江戸川左岸 58.5k（関宿橋上流）における引堤工事によって不要となる旧堤と新堤の間の高水敷に築造さ

れました。

形状は江戸川堤防の平均的なものとするために堤防高は 7 m、のり勾配は 2 割となっています。表のり（湛水池側ののり面）は張芝としたタイプ（図-1 平面図の下側）と、コンクリートブロック張護岸としたタイプ（図-1 平面図の上側）の 2 種類築造しました。

また、この実験で画期的だったのは、不確実性を排除する観点から、基礎地盤への浸透を極力抑制し、堤体への浸透だけを観測するために、堤敷に 30cm の粘性土のブランケット（不透水層）を敷設した点にあります。



写真-1 江戸川堤防実規模実験サイトの全景

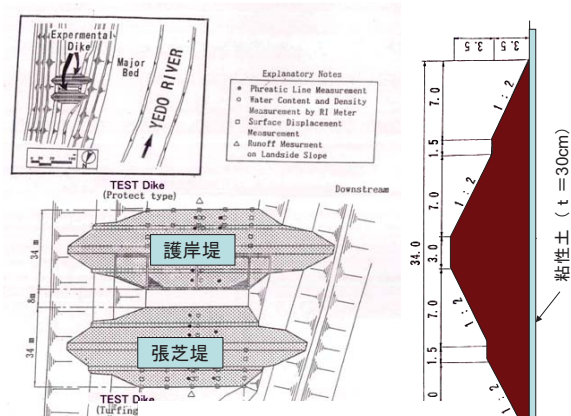


図-1 実験堤防平面図及び断面図

築堤にあたり、実験堤防の材料は実験場の下流の旧堤防の堤体土（粒度組成は砂質シルトに相当）を用い、締固め度 80% 程度を目標（既設堤防には転圧の不十分な緩い堤防が存在することから）にできるだけ均質で密度の緩い堤防を作ること

としました。そのため転圧は最小限とし、クラムシェルで盛り立てた後、湿地ブルドーザーで2回走行する程度としました。

外力となる河川水と降雨ですが、使用する水は江戸川からポンプで給水し、貯留タンクを介してバルブ調整により量を調整しました。なお、人工降雨はスプリンクラーにより散水しました。

また、堤体内の水位は、ボーリング削孔により塩ビ有孔管を設置し、水位計による自動計測及び手測りによる観測を実施しました。さらに、堤体内に浸透した後、のり尻部から浸出してきた水の量についても、ピットに集めて計測しています。



写真-2 実験施設
(左：給排水施設 右：人工降雨の状況)

3. 実験結果の概要

実験は、以下の5種類について実施しています。

- ①降雨のみが表面から堤防へ浸透した場合の堤体内浸潤状況について計測する“降雨実験”
- ②河川水のみが表のりから堤防へ浸透した場合の堤体内浸潤状況について計測する“湛水実験”
- ③降雨と河川水が堤防に浸透した場合の堤体内浸潤状況について計測する“降雨＋湛水実験”
- ④浸透に対する強化工法としてのドレーン工の効果検証を行った“ドレーン工実験”
- ⑤堤防破壊実験

各実験は、堤体内の水位や飽和度等の初期条件をできるだけ同一の条件とするため、各実験の時間間隔をあけ、年度ごとに1種類の実験を行うようにしました。

1. 降雨実験

最初の降雨実験では、時間雨量15～18mmの降雨を与えました。総降雨量が105mmに達したところで、裏のり部に小規模なクラックが発生したため、実験はそこで中止しました。

少ない降雨でクラックが発生するという予想と異なる結果ではありましたが、降雨浸透によって、のり尻付近に山形の浸潤面が形成されること、浸潤面が小段高さの半分程度まで上昇した後に、すべりが発生することなどの知見が得られました。また、護岸堤では護岸施工面の浸潤線の発達が遅く、降雨をはじく効果が確認できました。

2. 湛水実験

湛水実験では、堤体内の浸潤面は湛水位上昇開始後170時間（高水位継続時間140時間）で裏のり尻に到達し、その後おおむね300時間（約12日）で定常状態に達しました。

浸潤線を見ると分かるように、護岸堤でも張芝堤でもほとんど変わらない結果となっており、護岸が耐浸透効果をもっていないことを示しています。

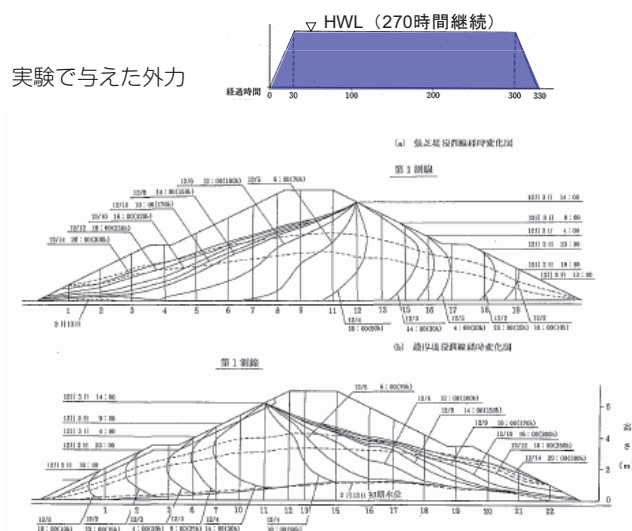


図-2 長期湛水実験結果
(上側は護岸無、下側は護岸有)

S51年の河川管理施設等構造令・同解説では、護岸は耐浸透効果があるとしていましたが、本実験の結果を受けてH10年の構造令・同解説の改訂においては、護岸の耐浸透効果は見込まないものとしています。なお、護岸については、長時

間たつと表面の劣化（ブロックの目地の割れ等）が生じるため、現状では降雨に対しても河川水に対しても耐浸透効果を見込んでいません。

また、湛水位上昇開始後 300 時間（高水位継続時間 270 時間）経過後、裏小段直下の堤体内水位が 2.7m の高さになった時点で裏小段に亀裂が生じ、すべり破壊が発生しました。

すべり面の形状がおおむね円弧をなすところから、飽和・不飽和条件の二次元浸透流解析（FEM）で堤体内水位を計算し、最も浸潤線が高い時点で円弧すべり法による安定計算を適用、破壊時の安全率を $F_s=1.0$ とし、粘着力を $C=0$ と仮定して堤体土の内部摩擦角 ϕ を逆算してみると、室内の三軸試験で求められた実験堤防の ϕ と同程度の値になったことから、堤防の安全性照査にあたって、飽和・不飽和条件の二次元浸透流解析と円弧すべり解析を適用できることが分かりました。

3. 降雨＋湛水実験

図-3 は降雨と湛水を同時に与えた実験での浸潤線の発達過程を示したものです。これをみると、表のり側から裏のり側に傾斜した浸潤線となり、かつ裏のり尻部の堤体内水位の高さが長期湛水実験と同程度になるのは、外水位上昇開始後 60 時間（高水位継続時間 30 時間）を経過した時点でした。これより、降雨が加わると、湛水のための約 5 倍の速さで浸透していくことがわかりました。

また、最初は降雨によりのり尻で浸潤線の山がで、その後それらがつながると一気に浸潤線が発達することがわかりました。

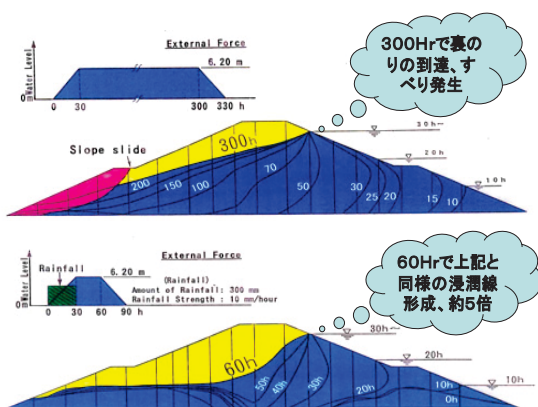


図-3 降雨＋湛水実験結果
（上段は湛水実験、下段は降雨＋湛水実験）

4. ドレーン工実験

次に、浸透対策としてのドレーン工の効果を検証するために、裏のり尻部にドレーン工を設置して実験を行いました。ドレーン工は全面ドレーン工と縦・横ドレーン工、縦ドレーン工の 3 種類を設置し、ドレーン工の幅は、すべり面の形状等を考慮して小段下までとし 7m としました。ドレーン材料は単粒碎石とし、堤体土との接触部分には吸出し防止材を敷設しました。

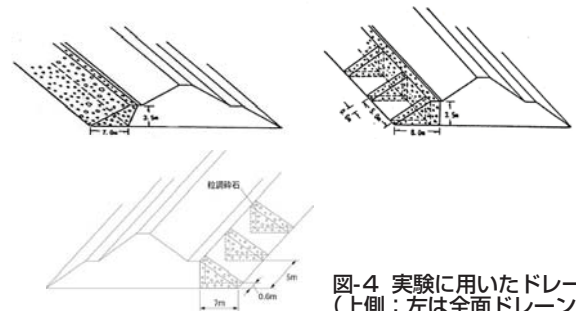


図-4 実験に用いたドレーン工
（上側：左は全面ドレーン工
右は縦横ドレーン工
下側：縦ドレーン工）

図-5 は、全面ドレーン工を設置した箇所での堤体内浸潤線の発達状況を示したものです。外力は、降雨＋湛水実験と同じものを用いています。

青色の領域が 70 時間後の浸潤面を表していますが、ドレーン工は十分な排水効果を発揮し、裏のり尻付近の堤体内浸潤線が低く維持されていることがわかりました。

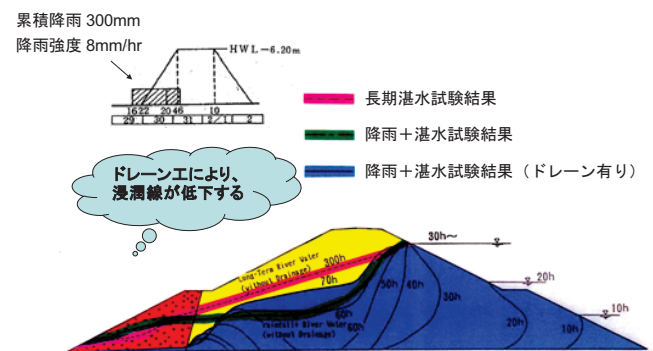


図-5 ドレーン工実験結果

また、3 種類のドレーン工の効果の違いについて、ドレーン工を配置した下部小段の縦断方向の湿潤線の経時変化を比

較したところ、全面ドレーンでは排水効果が最も高く、縦＋横ドレーンでは横ドレーンに挟まれた区域で高さ 1～1.5m 程度、浸潤線の高まりが見られ、やや排水効果が悪いことがわかります。一方、縦ドレーンでは、縦ドレーンに挟まれた区域の短時間（6 h）での浸潤線の高まりが見られ（1～3 m）、排水効果がほとんど認められないことが分かりました。

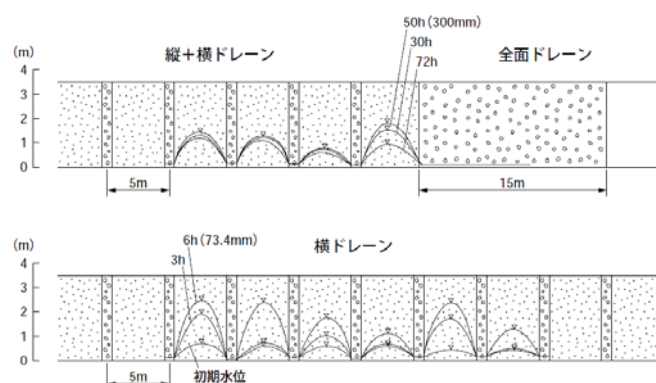


図-6 ドレーン工を配置した下部小段の縦断方向の浸潤線の経時変化

5. 堤防破壊実験

一連の実験が終了後、大きな降雨量（当初の実験計画では 1,000mm）を与えて堤防を崩壊させる実験を行いました。その結果、累積降雨量が約 800mm に達した時点で護岸部を除く堤防のり面全体にすべり崩壊が発生しました。

堤体内はおおむね堤防断面の 70%～80%が飽和した状態になり、堤防表面を歩くと水まくらの上を歩いているような状態になりました。

その後の堤体開削調査の結果、地中変位計の変状状況から、



写真-3 堤防破壊実験の状況

幅 50～60cm のせん断ゾーンのヒズミ変位によってすべりが生じていることが確認されました。

4. 手引きへの反映

江戸川堤防実験から得られた知見、並びに現在の「堤防設計指針」や「河川堤防構造検討の手引き」等に反映された内容をまとめると、以下になります。

①堤防の浸透メカニズムの解明

降雨実験や湛水実験の成果によって、河川水や降雨の浸透による堤防の破壊過程が、1) 降雨による堤体の飽和度上昇とのり尻付近の浸潤線上昇→2) 飽和度上昇に伴う堤体土のせん断強度低下、及び透水性増加→3) 河川水位の上昇に伴う浸潤線の発達→4) 堤体の透水性増大と、さらなる浸潤線上昇、裏法尻の水位上昇→5) 裏法尻からの漏水、崩れ、と進むことが明らかになりました。

②浸潤線発達過程における降雨の関与

湛水実験と湛水＋降雨実験の結果を比較することによって、降雨が加わると、湛水のための約5倍の速さで浸透していくこと、また、最初は降雨によりのみで浸潤線の山がで、その後それらがつながると一気に浸潤線が発達することが明らかになりました。これより、「河川堤防設計指針」や「河川堤防構造検討の手引き」の外力設定方法においては、降雨を与えた後に河川水を外力として与えることとしました。

③浸透流計算手法の適用性

各種実験の検証のために、飽和・不飽和条件の二次元浸透流解析（FEM）により得られた結果と、実験時に測定された結果を比較したところ、計算結果は実測値と比較的よく一致していることがわかりました。これより、「河川堤防設計指針」や「河川堤防構造検討の手引き」においては、本計算手法に基づく安全性照査方法が採用されました。

④ドレーン工の最適形状と適用性

ドレーン工を浸透対策の一つとして位置付けました。さらに、ドレーン形状は全面ドレーンが最も効果的であり、以降、本形状がドレーン工の標準的な形状となりました。

今後、「河川堤防構造検討の手引き」等の改訂を行う際には、これらの成果を基礎資料とし、新たな知見を取り入れて検討を行う予定です。