

堤防の耐越水化に関する実験的研究

Experimental Study on Levee Reinforcement against Failure by Overtopping

建設省土木研究所 正員 加藤 善明
建設省土木研究所 正員 橋本 宏
建設省土木研究所 正員 藤田 光一

1. はじめに

越水堤防とは、土堤を補強することによりある程度の越水に耐えられるようにした堤防のことである。既存の堤防のほとんどは土で造られている。これらの土堤は越水に対して非常に弱く、堤防破壊の原因の8割は越水によると言われている。こうした土堤に耐越水性が加われば、氾濫量の大幅な減少、洪水被害の分散化、水防・避難活動を行なう時間の増加という3つの面で洪水被害が大幅に軽減され、堤内地の安全度が高まる。本研究は、こうした越水堤防のすぐれた機能に着目し、越水堤防を開発することを目的として行なった一連の実験¹⁾²⁾の成果をとりまとめたものである。

2. 越水堤防の性格と要求される機能

本研究では、越水に対する危険性の大きい区間に、その付近の堤内地の安全度を向上させるために導入される越水堤防を対象としている。越水堤防導入の根拠としては、堤防をかさ上げるよりも耐越水能力を加えた方が長期的には被害軽減効果が大きいという超過洪水対策の重要性の認識に基づくもの、土地利用等の問題からかさ上げよりも耐越水化の方がはるかに費用・労力が少なく済み未完成堤に対する暫定措置として有効であるとの認識に基づくものが考えられる。いずれにしても、一般的な土堤防に耐越水機能を付加し防災施設としての能力を高めることを目的としており、調節池に設けられる越流堤のようにあらかじめ越流することを計画して造られる性質の構造物は対象としていない。このような越水堤防に対する認識に基づいて越水堤防に要求される機能を考えると以下の3点があげられる。①ある程度の越水に耐えること、②安価で現地堤防への設置が容易なこと。③長期間機能を失わないこと。①の条件としては実河川の越水データに関する既往の研究から単位幅当たりの総越流量 $9000 \text{ m}^3/\text{m}$ (越流水深 60 cm で3時間の越水に相当) を1つの目安とする。②、③に関する具体的な条件は個々の状況によって大きく変わると考えられる。また①についても、要求される強度が状況により異なると考えられ、厳密な強度の基準を設定する意味はあまりない。そこで本研究では、実大堤体模型を用いた越流実験によって、上記の①～④の条件を勘案しながら数種類の異なる特徴を持つ越水堤防の開発を行なった。

3. 実験設備及び測定方法

実験に用いた大型特殊水路(図1)は土木研究所内の実験場に設置されており、最大単位幅流量 $0.87 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ を通水できるものである。水路内に設置する堤体模型の標準断面形は、堤体高 2.5 m 、天端幅 4.0 m 、表裏法勾配 2 割である。実験内容は、所定の流量で通水した後、堤体形状と水位の時間変化を測定し、浸食形状の観察を行なうものである。堤体形状の測定は水路側壁上に 1 m 間隔で張られた糸からスケールを垂直に降ろして行なった。また下流側からビデオカメラを用いて破壊形状を記録した。前期降雨及び川表側の水位上昇に伴う浸透水による強度低下を考慮するために、上流側に3～7日間湛水した後実験を行なった。

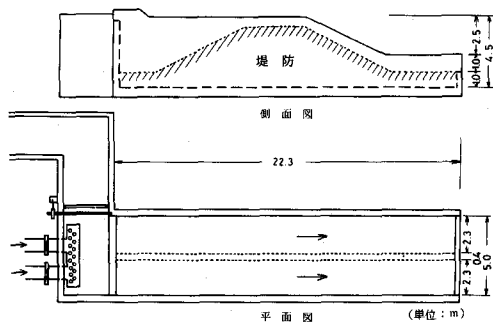


図1 実験に用いた大型特殊水路

4. 越水による堤防の破壊機構

保護工を施さない裸堤及び芝張堤についての実験から以下の結論が得られた。(i)図2に示す裸堤・芝張堤に関する累積越流量と浸食量との関係からわかるように、保護工を施さない通常の土堤は、多くても800 m³/mに達すると破堤する。(ii)土堤の破壊は、図3に示すように裏法浸食過程—天端崩壊過程の順に進む。裏法浸食の原因は流水による直接の力なのに対し、天端崩壊の主因は裏法が浸食された後の堤体自身の不安定性にある。(iii)浸食が始まる場所は、堤体表面が浸食に対して強い程、裏法面の下部に移る。これは、裏法面に作用するせん断力が下部に行く程²⁾大きくなり、浸食はせん断力が土を浸食しうる大きさになった所から下部で生じるからである。(iv)堤体表面の植生は、図2に示す通り浸食が始まる時期をかなり遅らせる効果を持つ。ただし一ヶ所浸食を受けると以後ほとんど耐浸食性を示さない。また植生の浸食に対する強さは、生育状態に大きく影響される。

5. 保護工の具体的な考え方

5.1 保護工の基本的な考え方

保護工として2つのタイプが考えられる。第一は、天端だけを保護するものである。この方法だと裏法は保護されていないので浸食される

が、天端の崩壊が保護工により防がれるため裏法が全面浸食された段階で堤体が越水に耐える。この工法は本来裏法面が持っている植生の存在による耐浸食性を生かし、かつ外力の小さい天端において破堤を防ごうとの考えに基づかれている。第二は、天端、裏法とも保護工でおおい、堤体の浸食を一切許さないとする方法である。第一の方法にくらべ安全度は高まるが、外力の大きい裏法をも保護するため、相当強固な保護工が要求される。本研究ではこれら2つのタイプの保護工について実験を行なった。前者のタイプについての結果を4. 2. 1で、後者のタイプの結果を4. 2. 2～4で述べる。

5.2 越流時の保護工の効果

以下に紹介する各種保護工の概略と構造を表1に示す。それぞれ数ケースずつ改良を加えながら実験を行なった。

5.2.1 天端アスファルト

アスファルト保護工は、先ず碎石を数層に分けて敷設し、粗粒度アスファルト、密粒度アスファルトの順で天端と法肩を覆ったものである。図4に破壊過程を示す。越水が始まると裏法面から小段にかけて浸食が起こり、裏法面がほぼ直壁になるまで削

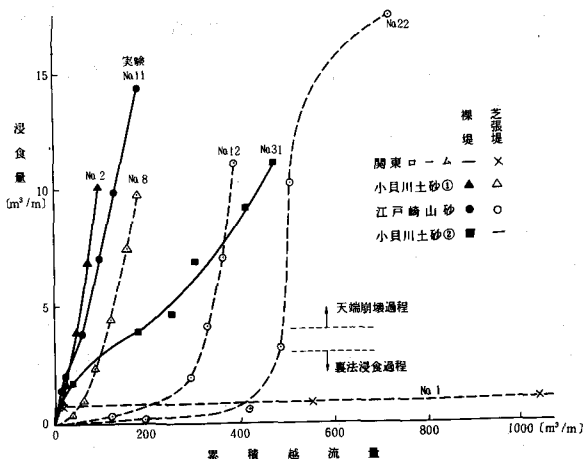


図2 累積越流量と浸食量の関係

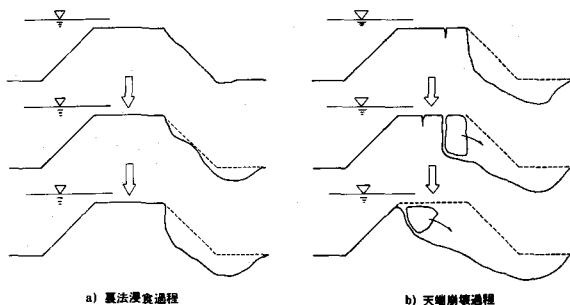
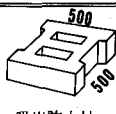


図3 土堤の破壊過程

保護工	構造一般図	材料項目一般	摘要
天端アスファルト (10 ケース)		密粒度アスファルト 粗粒度アスファルト 碎石	遮水壁の設置、 ロープの埋設の 効果の検討
連節ブロック (4 ケース)		吸出防止材 改良土	鉄線、ロープに よる連結、改良 土を用いた場合 の検討

られる。その後越流水は直接裏法面に当たらなくなるため浸食が速度は小さくなるが、天端アスファルト末端部の下の水分を多量に含んだ土が徐々に崩れていく。この崩壊により支持層を失なった天端アスファルトは沈下し始め垂れ下がる形となり、自重と流水による引っ張り力のため折れ曲がった部分に亀裂が生じ欠け落ちる。これらの過程が繰り返されて次第に天端幅は減少していく。最後に保護工と側壁、堤体と側壁の間に隙間が発生し、そこからの浸入水によって保護工下部が水みちとなって破堤する。

保護工	構造一般図	材料項目一般	摘要
かみ合せブロック (2ケース)		 吸出防止材	かみ合せ効果の検討
防水シート (2ケース)		1mm厚合成ゴムシート	シートの設置方法の検討
改良土 (4ケース)		砂質土：消石灰 1 : 10 (重量比) 粘性土：アスファルト乳剤 1 : 10 (重量比)	改良剤、施工方法の検討

以上の実験結果から、引張り力、曲げに弱いために起こるアスファルトの欠落とアスファルト下の土の崩壊を防ぐことがアスファルト保護工の耐越水性を向上させるための最も有効な対策であることがわかる。そこで以下のような改良を行なった。先ずアスファルトの欠落対策として粗粒度アスファルトと密粒度アスファルトの間にテトロンロープを狭み込み、引張りに強く柔軟性をもった構造とした。一方、アスファルトの下土の崩壊対策としてはアスファルトの下層を水密化させる目的で、碎石を数層に分けて、瀝青剤を散布しながら転圧した。以上の改良後の形状を図5に示す。実験を行なったところ、崩壊途中

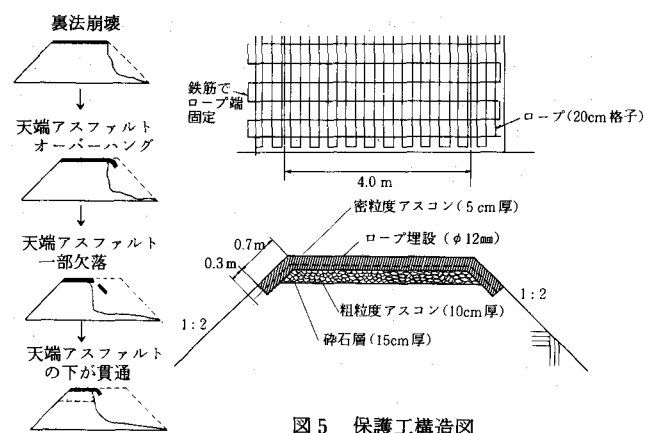


図5 保護工構造図

図4 破壊形状図

で天端アスファルトが欠け落ちることもなく、裏法面を覆う形となって長い間浸食を防ぎ良好な結果であった。但し、天端アスファルトが崩壊途中で堤体を覆った状態で維持されるためには、堤体自体が保護工の重さを維持すべき強度が最低限必要である。

5. 2. 2 連節ブロック

連節ブロックは、裏法肩から裏小段にかけて堤体を被覆したものである。連節に鉄線を用い、法尻と小段には横断方向に3点鉄筋を打ち込み固定した。又、ブロック下に吸出防止材を敷設した。図6に破壊過程を示す。通水初期は、越流水が保護工上を滑らかに流れる。しかし、法尻から小段の部分は越流水によって引張り力が加えられ、次第にブロックに不整が生じる。次に、ブロックの隙間から堤体土が徐々に吸い出され、法尻から小段にかけてブロック下に空洞ができる。小段部分のブロックが持ち上がるように下流側に移動し、連節に用いている鉄線が切れて法尻から下流側のブロックが流出す

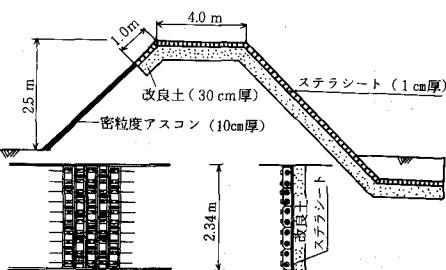


図7 保護工構造図

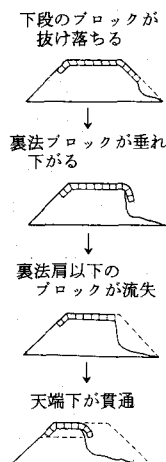


図6 破壊形状図

る。その後ブロックが鉄線から抜け落ちるのを防止して通水を続けたが、ブロックの隙間からの浸入水によってブロック下が浸食され水みちができて破堤した。

以上の実験結果から疲労に強くブロックが上下に変動しても切れない連節材を用い、切れた場合でもブロックが抜け落ちない工夫が必要となった。又法尻から小段部分に作用する水の衝撃を低減する対策が必要と考えられた。そこで連節にテトロンロープを用い、ブロックの間に結び目を設けて抜け落ちないようにした。小段部の流水の減勢は、ブロックを小段の堤体土の下まで伸ばして埋め込み、さらに改良土を吸出防止材の下層に設けてできる限り吸い出しによる浸食を防ぐこととした。図7にその概略図を示す。通水を行なって見ると、小段部分の堤体土は初期に洗掘されブロックが露出したが、ブロック下の改良土の浸食速度は遅く法尻部分の吸い出しによる浸食も少なかった。又、越流水の引張りによってロープが伸びてブロックに不整が生じては抜けたり、切れることもなかった。しかしながら、法尻から水段にかけて吸い出しによる浸食が起り徐々に崩壊が進み破堤した。したがって、ロープによる連節及び改良土の設置は有効であるものの法尻から小段部分の一層強力な吸い出し防止対策が耐越水性の向上に不可欠であると考えられる。

5. 2. 3 かみ合せブロック保護工

かみ合せブロック保護工は、堤体天端から裏小段にかけて1個約50kgのブロックを図8のようにかみ合せて被覆したものである。ブロック下には吸い出し防止材を敷き、法肩のブロックを鉄筋にて固定し、ブロックの空洞には砂を詰めた。図9に破壊過程を示す。越流を始めると、かみ合せブロックも連節ブロックと同様越流水の保護工上の流れは非常に滑らかであった。しかし、裏法面中央部から法尻にかけてブロックの空洞やそれぞれの隙間からの浸入水によって次第に堤体土が洗い出され、吸い出し防止材の下が空洞化していった。かみ合せブロックは、それぞれが互いに強くかみ合っているために、堤体変形に追従したブロックの沈下は生じず空洞は増々大きくなっていった。最後に空洞化した上部のブロックが数個沈下して流体力をまともに受け、次々に連鎖反应的にブロックが流出し破堤した。かみ合せブロックは、越流水に対して個々の重量とかみ合せによって抵抗しているためにその中1個でも流出すると瞬間に被害が全体に及んでしまう欠点がある。かみ合せブロックの形状が空洞から侵入水を許す構造となっており、浸入水による洗い出しを防ぐことはできない。従って、ブロック下を浸入水によって浸食されない構造とするか、堤体変形に追従できる連結方法にして急激な崩壊を食い止める手立が必要と考えられる。

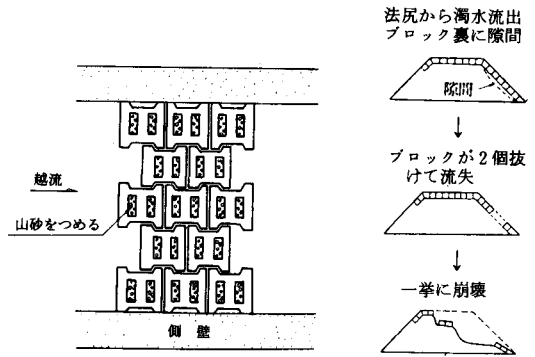


図8 設置平面図

図9 破壊形状図

5. 2. 4 防水シート保護工

図10に示す厚さ1mmの防水シートにより堤体を被覆した場合について述べる。シートの側壁への立ち上げ部分はシート専用の接着剤により全面着着し、水路下流端では堤体下へシートを埋め込みモルタルにより固定した。さらに通水してみると水路下流端に縦断方向の裂け目ができ、その拡がりとともに裂けた部分の堤体土が徐々に吸い出されていったが、裂け目の進行は遅くかなり長期間越水に耐えた。防水シート

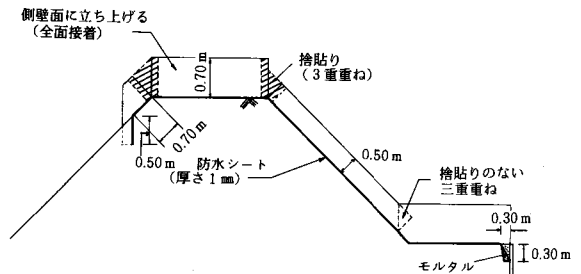


図10 保護工設置図

トが流れによる引張力に耐えたかどうかは側壁にシートを接着して結果的に引張力をもたせため本実験から

判断することができないが、十分な引張強度のあるシートを用いれば引張力に耐えることは可能であるとの印象を受けた。しかし、引張りに強くても裂けると弱いなどのやや脆弱な点を補うとともに、耐久性の問題を解決する必要がある。

5. 2. 5 改良土被覆保護工

改良土被覆保護工は、砂質土と消石灰、粘性土とアスファルト乳剤を混合した改良土を用いてそれぞれ2ケースずつ行なった。改良土の被覆厚は50 cmとし、実験前の改良土の固結度は消石灰の方が高かったが、両方ともに表層は容易には変形しない状態であった。越水開始後まもなく、乾燥収縮によって発生した細かい亀裂が越流水によって拡大された。その後亀裂が深くなって堤体土までとどくと、改良土がその亀裂からいくつかに分離し、そこから越流水が侵入して吸い出しが始まり越流水が濁り始める。最後に、丁度板チョコを割るように改良土がバラバラになって流出し破堤した。固結度の高い消石灰改良土ではその固まりが大きく、アスファルト乳剤改良土では小片となって崩壊する傾向が認められた。

以上の結果より、改良土は引張りに弱く亀裂が生じ易い。乾燥収縮による亀裂の発生は、混合方法や施工後の養生方法を改良したとしても、長大な堤防での一様な管理は難しく、その発生を防ぐことは不可能と考えられた。したがって、改良土は単独の保護工材として用いるより、流水の力を直接受けないブロック下層の吸い出し防止層などとして用いる方が有効と思われる。

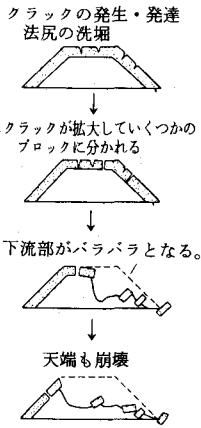


図 11 破壊形状図

5. 3 保護工の条件

これまでの各種保護工の実験結果と考察から、耐越水化のための保護工に備わるべき条件を列挙する。

- (i) 保護工設置後に長期間それ自体の材質、強度等の変化の少ないこと。
- (ii) 保護工上の越流水による引張力に耐え得る設置方法及び材質であること。流れの力をまともに受けない形状であること。
- (iii) ひび割れ、亀裂等の発生が比較的少ない材質であること。
- (iv) 堤体変化に追従できる柔軟性及び屈撓性を有した構造であること。
- (v) 一部欠壊しても、ある程度耐越水機能が保たれる構造であること。
- (vi) 法尻から小段にかけて流水を減勢する終端の処理がなされていること。
- (vii) 保護工下の浸入水の流下によって浸食されない構造であること。強力な吸い出し防止対策が保護工と合せて施工されていること。

5. 4 保護工の評価

保護工の耐越水性の評価は、実際に現地に設置され越水を受けてはじめて与えられるものであるが、現地に設置する前に何らかの評価基準が必要であらう。そこでここでは、本実験で得られた知見の範囲で耐越水機能・耐久性・コストの3項目について保護工の評価を行なうことにする。

5. 4. 1 耐越水機能

図 12 に各保護工の失敗ケースを除いた破堤までの総越流量とそれぞれの平均的な総越流量を折線で結んだものを示す。単純に比較すると、連節ブロック>防水シート>天端アスファルト>かみ合せブロック>改良土の順の総越流量となっている。ところが、天端アスファルトはバラツキが大きく、工夫次第では総越流を大きくできる可能性がある。一方改良土は全体に小さな値となり保護工としては有用でないことがわかる。次に図 13 に越流量の増加に伴う崩壊状況を、横軸に総越流量、縦軸に平均的な崩壊範囲をとったものを示す。例えば、2000 m³/m 程度の越流ではかみ合せブロッ

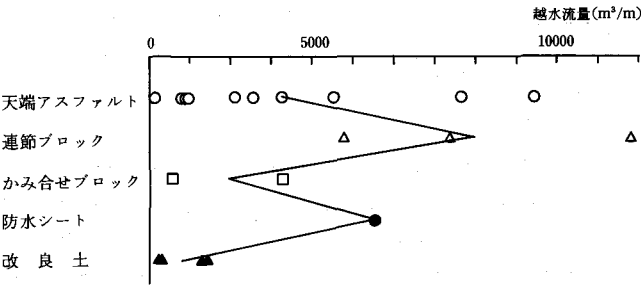


図 12 破堤までの総越水流量

な値となり保護工としては有用でないことがわかる。次に図 13 に越流量の増加に伴う崩壊状況を、横軸に総越流量、縦軸に平均的な崩壊範囲をとったものを示す。例えば、2000 m³/m 程度の越流ではかみ合せブロッ

ク、改良土は崩壊してしまうが、天端アスファルトでは天端が一部崩壊する程度で、連節ブロックではほとんど変化がないことがわかる。したがって、破堤までの総越流量でのみ保護工の有用性を評価するのではなく、保護工毎の崩壊特性を考慮した上で評価を与えることが重要と考えられる。

5. 4. 2 耐久性

保護工は、長い区間に設置するものであるから、その機能が長期間すべての区間で保たれることが必要である。天端アスファルト、連節ブロック、かみ合せブロックは、材質的には問題ないものの、堤体の凹凸により天端アスファルトでは亀裂の発生、連節ブロックではブロック間の隙間の発生が考えられる。また天端アスファルトでは、埋設ロープが亀裂発生部分で露出し、紫外線により劣化することが考えられる。一方防水シート、改良土は、長期間の使用にあたっては劣化、風化、人為的損傷などが考えられ、他の保護工と比較して機能低下の割合が大きいと思われる。したがって、防水シート、改良土については他の保護工と組合せて用いたり、耐久性を確保するための特別な処置（防水シートの上に盛土をするなど）を取る必要があろう。

5. 4. 3 設置コスト

まず、現況堤防への設置、導入しやすさについて考える。天端アスファルトは、現在でも管理用道路として天端が舗装されており、その導入について問題はない。連節ブロック、かみ合せブロックでは、改良土を下層に用いる場合は養生期間などの問題がある。またブロックを用いる場合、そのまま天端部分を道路にすることはできない。防水シート、改良土については、それぞれ設置法や施工性について問題が多い。次に、実験での各保護工の設置価格に対する平均的な越流量を比較してみる。(図 14) 図から、単独では使わないであろう防水シートを除くと、天端アスファルトが価格の割に高強度を示す結果となっている。連節ブロックは、価格の面で天端アスファルトに比べやや不利になっている。

5. 4. 4 総合評価

現段階で実用性が充分あるのは、天端アスファルトと連節ブロックであると考えられる。天端アスファルトは、連節ブロックに比べ耐越水機能の確実性の面でやや劣るが、コスト、設置の容易さ、多目的利用が可能といった面で優れている。このように 2つの工法はそれぞれ異なる特徴を有しており、これらを使い分ければ種々の状況に応じた堤防耐越水化が可能になると考えられる。

6. おわりに

本研究によって越水堤防に関する技術面の展望は開けたと考えられる。しかし、これをどのような根拠で設置するかという問題に対しては明確な答が出ていない。しかし、現に危険な状況にある堤防を放置しておくわけにはいかず、またいくら土堤という特殊性があるにせよ越水すれば破壊されるという特性は防災施設として問題があろう。越水堤防そのものではなくても、その考え方が生かされることが重要だと著者らは考えている。

- 〈参考文献〉 1) 須賀・石川・葛西, 越流水による堤防の破壊特性 その 3, 第 25 回水理講演会論文集, 1981.
2) 藤田・橋本・加藤, 越流水による堤防の破壊特性 (その 4), 第 39 回年講, 1984.

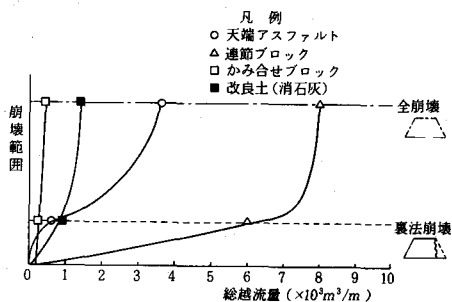


図 13 越流量による崩壊範囲

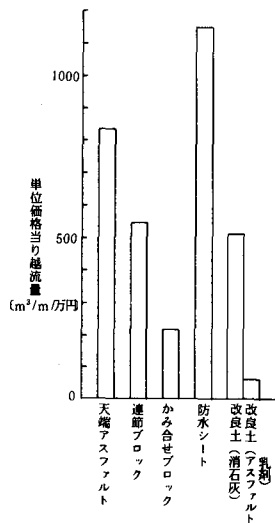


図 14 価格当りの越流量