

土木研究所資料

第 3 5 1 号

土 砂 堤 越 流 実 験

昭和 4 3 年 3 月

建設省土木研究所

目 次

1. ま え が き.....	1
2. 実験施設と実験方法.....	2
3. 越流による侵蝕の状況.....	9
4. 実験結果に対する若干の考察と 今後の課題	16
5. あ と が き	19

1 ま え が き

河川堤防を洪水から護るための新しい試みについての実験を昭和42年10月19日～11月14日の期間に土木研究所千葉支所構内で実施したのでその概要を報告する。

土で作られた河川堤防は洪水時に越流が起ると堤防裏法面が侵蝕、洗掘されて堤内地側から破壊が進むのが普通である。たとえ越流が生じたとしても堤防の侵蝕を防止し、全面的な欠損にまでいたらしめなければ越水の潜水による被害は僅少であろうしその後の復旧も容易であろうと考えられる。

土で作られた河川堤防の表面には各種の法面保護工がそれぞれの条件に応じて施工されている。このうちもっとも広く適用されているのが芝付けによる法面の保護であるが、このような堤防は一般に越水に対してきわめて弱い。さらに応急復旧堤では工期、使用材料などの制約を受け、一般堤防にくらべて安定性も悪い上に法面保護工も十分に施工されないのではおさらである。

したがって従来一般の堤防に採用されてきた法面保護工以外の安価で早急に効果を発揮する何らかの手段が必要であると考えられる。

このためひとつの案として堤防表面の土羽土の下に高分子布を敷き越流水による侵蝕を土羽土の部分に限定しようということが考えられた。越流による堤防法面の洗掘、侵蝕は越流量（越流水深、速度）、越流経路時間、法勾配、法面保護工、築堤材料など多くの因子によって支配されるが、このような工法が越流水の侵蝕に対してどのような効果を発揮するか検討するために土砂堤の越流実験が行なわれることになった。

この実験についてはすでに概要¹⁾を報告したが、この報告書はこの実験における越流による土砂堤の侵蝕状況をおもに写真によって説明したもので、定性的な著述ではあるがこの種の法面保護工についての調査の参考のための資料としてとりまとめたものである。

なおこの報告と同時に実験の状況ならびに土砂堤の越流による侵蝕の様子が映画に収められていることを付記する。

1) 山村、佐々木、尾林、土砂堤越流実験について 土木技術資料 Vol. 10, No. 1, 1968

2 実験施設と実験方法

実験は千葉支所構内につくられた図-1に示すような堤内地面の半断面を模した実物大の実験堤防を用いて行なった。

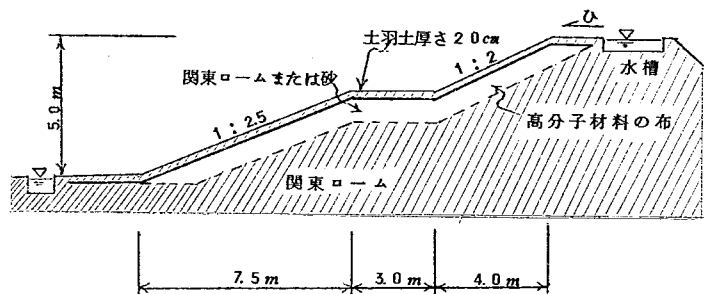


図-1 実験堤防

実験堤防は天端高さ5m、法面の中段に幅3mの小段を有する複断面であり小段から上の斜面の法勾配は1:2、小段から下の法勾配は1:2.5である。天端にはコンクリート製の水槽（1m×4m×0.5m深さ）が設置されてポンプ送水された水がこれから越流するようになっており、実験堤防の幅は4mである。

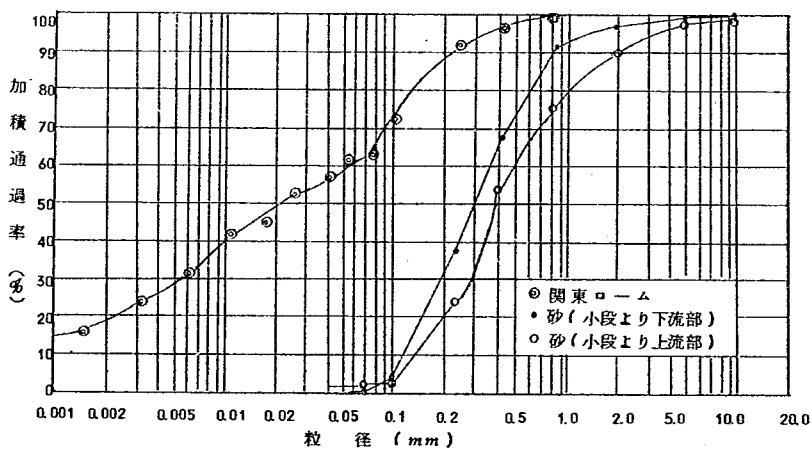


図-2 堤体材料の粒度

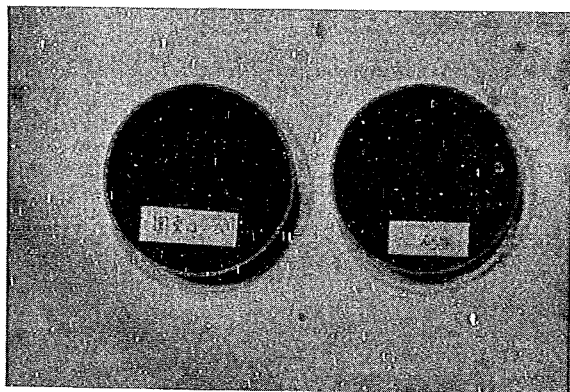


写真-1 堤体材料

実験堤防の築堤材料には図-2に示すような粒度分布の関東ロームおよび砂が用いられた。このうち関東ロームの締固め曲線を示すと図-3のようになる。

越流実験は3回行なわれた。実験Ⅰ、Ⅱでは関東ロームを堤体材料に用いた均質型の堤防の実験が行なわれ、実験Ⅲでは土羽土の下が前述の砂で構成されている実験堤防による越流実験が行なわれた。なお砂で構成されている堤防は砂を盛って造った応急復旧堤を模したものである。

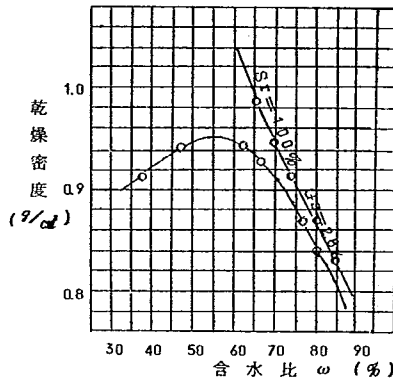


写真-2 実験堤防の築堤

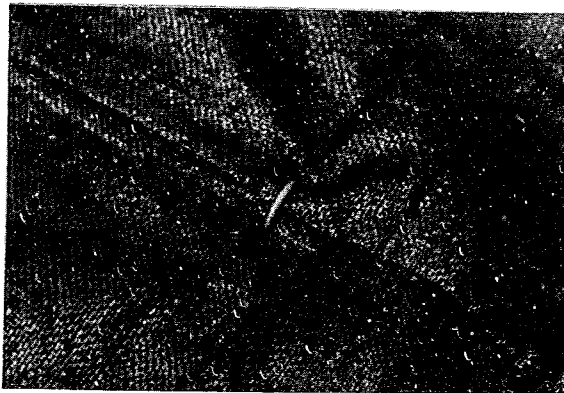
(高分子布を敷設し終えて、
その上の土羽打ちの施工状況)

自然含水比の堤体土を30cm 厚ごとの層に分けてタロを用いて締固めた後に法面の整形を行なって、この上に隔5m長さ20mの高分子布を敷きつめた。高分子布は写真一三に示すように長さ約20cmのピンを用いて堤体にとめた。さらにこの上に厚さ約20cmの土羽(材料は実験I、II、IIIとも関東ローム)が施工された。土羽打ちはやはり人力によるもので土羽板を用いて普通堤防と同様に施工された。

用いられた高分子材料布は穀類を入れる麻袋の代用として広く用いられ始めているもの



図一三 堤体材料(関東ローム)の締固め特性



写真一三 高分子材料布

(写真中央部に布をとめたピンがみえる)

表一 高分子布の物性

引張り強さ (5cm幅当り)	縦 100 Kg	横 82 Kg
引裂き強さ	縦 15 Kg	横 14 Kg
伸び	縦 11%	横 15%
乾湿応力比(濡れた時の強さ)	100%	
軟化温度	145℃	

と同類であり、高分子材料でできた平糸を織って作られている。その物理的な諸性質は表一に挙げておいてある。

このように高分子布の敷設を除いては普通堤防の築立て状況をできるだけ再現するよう注意して施工した実験堤防を築立て後約1週間放置した後には越流実験を行なった。実験に際してはまず堤防天端の水槽に水を満した後に送水ポンプをほぼ全開にして越流を開始した。越流を開始すると同時に16mm 撮影機3台、36mm カメラ2台を用いて堤防の表面侵蝕、堤体の変形などの状況を記録するとともに堤防表面の侵蝕状況を観察記録した。

堤防天端の水槽に送られる水は実験堤防付近の防火水槽から供給され写真-4に示すようなポンプが送水に使用された。ポンプの型式、仕様は表-2に示すとおりである。

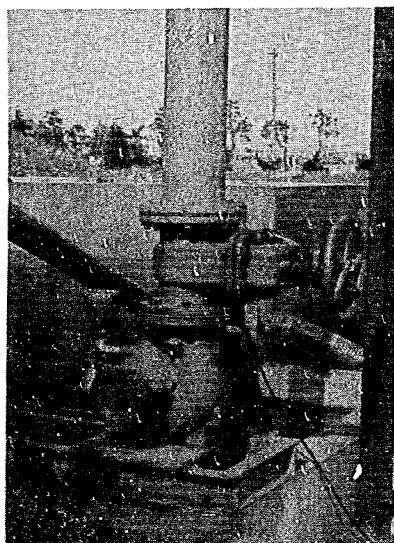


写真-4 送水ポンプ

表-2 ポンプ仕様

型 式	斜流うずまきポンプ 160SZ型
能 力	7.5KW (1750 rpm)
容 量	3 ^{m³} /min (揚程 9m) 3.8 ^{m³} /min. (揚程 7.5m)

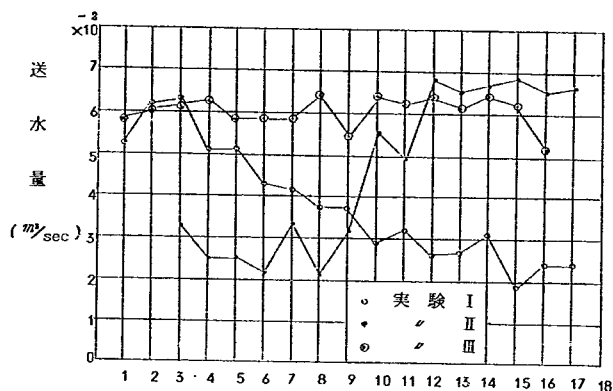


図-4 送水量

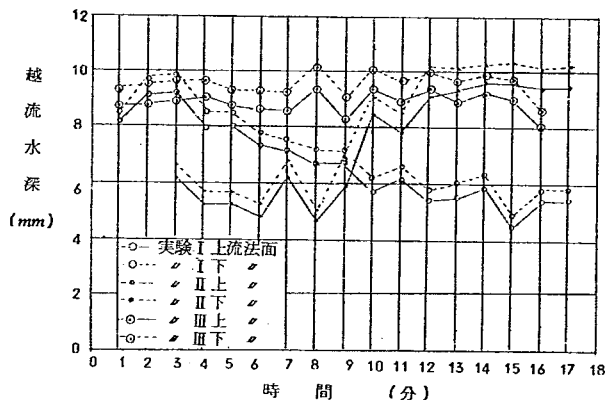


図-5 越流水深

前記防火水槽における水位低下量から送水量を読みとってプロットしたのが図-4である。

実験堤において越流水深、速度を実測することは、堤防法面が越流時間の経過と共に洗掘されて、越流水の流路底面の形状が変化するため困難であるので前述の送水量からマンニングの平均流速公式を用いて水深、流速を求めると図-5、6のようであった。流速は流路断面を越流幅4mの矩形と仮定し粗度係数 $n=0.018$ として、小段より上の法面と下の法面に分けてそれぞれの勾配を用いて算出したものである。表面侵蝕による流路断面ならびに粗度係数の変化、および流下に要する時間的遅れは考慮していない。

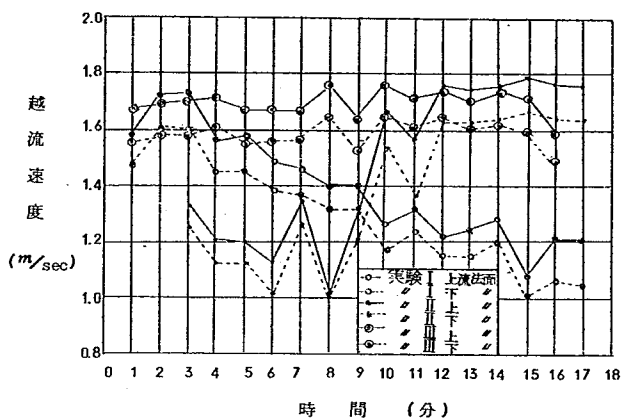


図-6 越流速度

実験ⅡおよびⅢにおいては高分子材料布の下にまわる浸透水の有無をチェックするため図-7
および表-3に示すような低容量型圧力計を用いて堤体内の間隙水圧の測定を試みた。堤体に埋
め込まれたポーラスチップおよびフレキシブルパイプには充分に水を送って気泡の除去に努めた

表-3 圧力計仕様

型 式	非 貼 付 型 抵 抗 線 ひ ず み 計 式
定 格 容 量	0.1 kg/cm ²
分 解 能 力	0.1% 以上
等 価 歪	約 3,000 × 10 ⁻⁸ strain

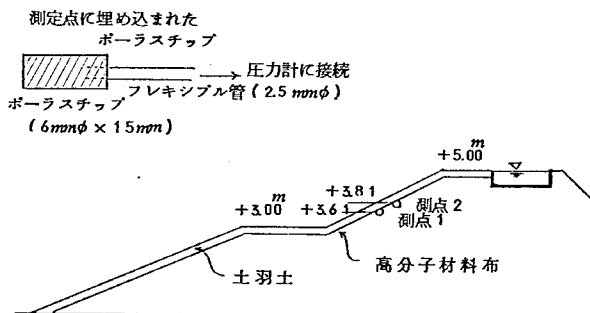
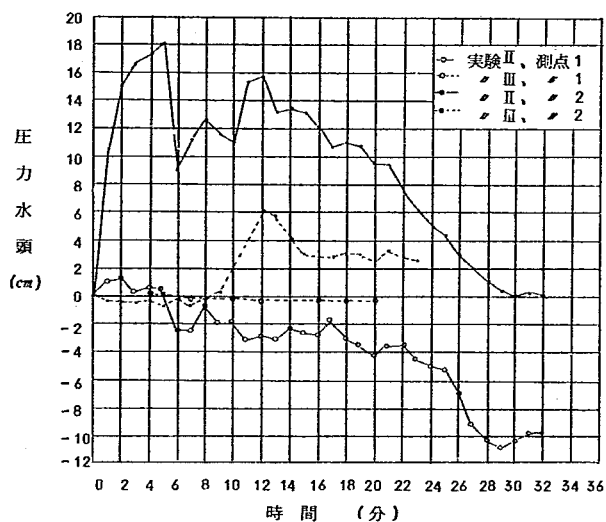


図-7 浸透水の測定

が、両者とも土中にあるためその確認は難かしく、測定結果図一8に見るように満足を測定は行なわれなかった。



図一8 圧力計の測定値

土羽土の下への浸透量が増大した後にには問題とならないが浸透初期には測定間隙水圧の値には時間的遅れを考慮しなくてはならない。が、この測定結果によれば3～5分程度で圧力水頭が低下し始めているのが認められる。この原因としては速度水頭の増加、および土羽土の流失によって越流水面が低下するための圧力水頭の減少が考えられるが、いずれの原因によるものかははっきりしない。

なお表一4には行なった実験の番号と諸条件を挙げた。

表一4 実験一覽

実験番号	実験日時	堤体材料	越流経続時間	最大流量	総流量
I	42-10-19	関東ローム	54分	64 l/sec	— ※
II	42-11-1	関東ローム	20分	70 l/sec	約56m³
III	42-11-14	砂	16分	66 l/sec	約59m³

※ 実験Iの総流量は防火水槽に水を途中から補給したため水位の観測値からは求められない。

3 越流による侵蝕の状況

次にそれぞれの実験について侵蝕の状況を簡単に述べてみよう。

堤体材料に関東ロームを用いた場合（実験Ⅰ、Ⅱ）

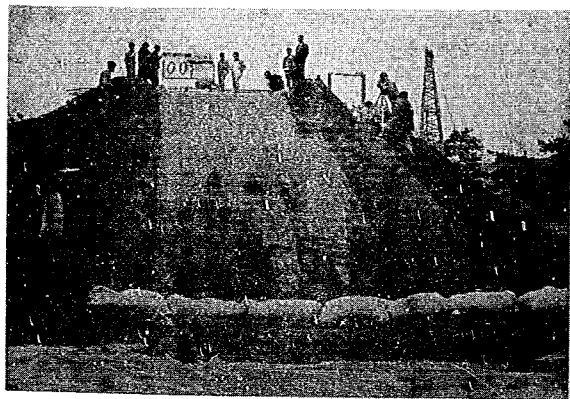


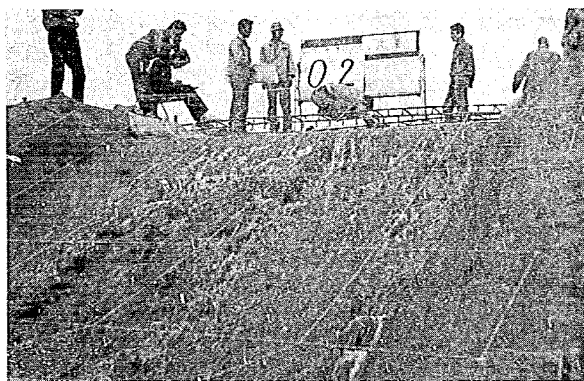
写真-5 越流開始



写真-6 実験Ⅱ 1分

（法面中央右寄りの上部に布が露出し始めている）

越流開始後約1〜3分経過した頃に小段より上の法面（勾配1：2）に侵蝕が始り小さな穴がいくつかでき、写真一六にみられるようにこのうちの1つが次第に発達してさらに30秒〜1分後には高分子布が露出するにいたった。この露出部分はさらに発達して大きく土羽土が流失すると共に他の位置にも同様な経過をたどって布の露出部分ができてきた。実験Ⅰでは越流開始後約



写真一七 実験Ⅱ 2分



写真一八 実験Ⅱ 3分

7分経過した頃に小段より上の法面のうち約1/3程度の面積の布が露出するにいたり、流出した土砂は写真-10のように小段にその一部が堆積した。実験Ⅱでは小段より上の法面の土羽土は越流開始後6分にはほとんど流失した。

実験ⅠおよびⅡにおいては、土羽土が流失しても露出した布は堤体にとっており、堤体はほと



写真-9 実験Ⅰ 7分



写真-10 実験Ⅱ 6分

んど変形していないことを表わしていた。実験終了後注意深く布を切り開いてみると布の下の堤体はほとんど損傷を受けていないことが認められた。

しかしながら写真-9、10に示したように土羽土が流失した後、小段の所で高分子布が膨れ上ってきており布の裏側に水がまわり始めていることが推察される。写真-11は実験Ⅰの47分の状況を示したものであり、このような布の膨れ上がりははっきり現れている。

実験Ⅰでは流速が余り大きくないため小段より上の法面の土羽土がほとんど流失しても小段よ

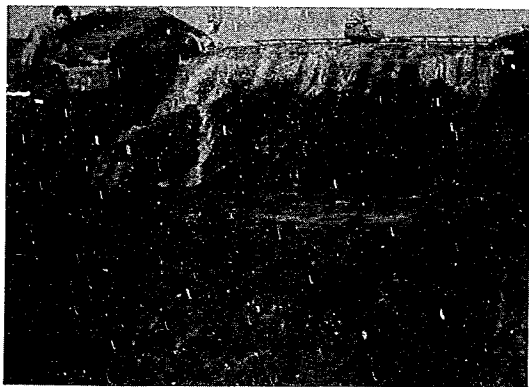


写真-12 実験Ⅱ 14分

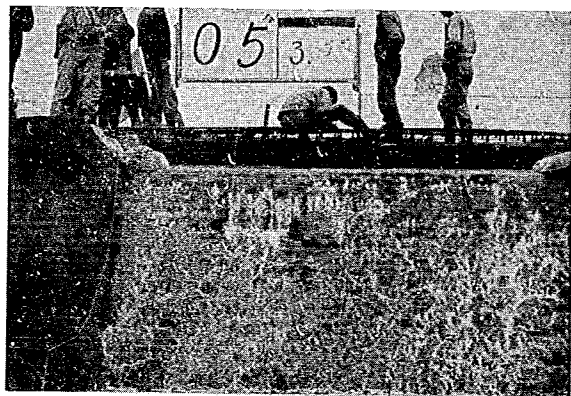
り下の法面では高分子布が露出するほど法面の侵蝕は発達しなかった。しかし、実験Ⅱにおいては越流開始後5分経過した頃には下の法面でも侵蝕が始り、法尻部の布が露出し始めた。また実験Ⅱの堤防の越流部が多少傾斜していたため特に小段より下の法面では流れが片よって、流路の側壁の崩壊が生じた。側壁の崩壊状況を示したのが写真一12である。

堤体材料に砂を用いた場合（実験Ⅲ）

土羽土表面の侵蝕の初期の状況は堤体に関東ロームを用いた場合とほとんど同様で、越流開始



写真一13 実験Ⅲ 3分



写真一14 実験Ⅲ 5分

後2分経過した頃から法面には洗掘による小さな穴が発達し始めた。これらの穴は次第に発達して、越流開始後5分には小段より上の法面の一部に布が露出し始め、また小段より下の法面でもこれより少し早くから

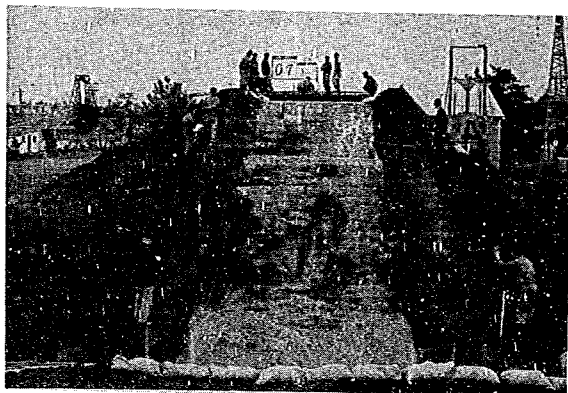


写真-15 実験Ⅲ 7分

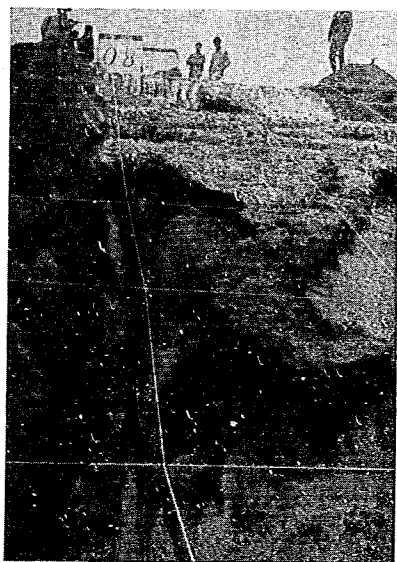


写真-16 実験Ⅲ 8分

布が露出し始めた。

実験Ⅰ、Ⅱでは小段より上の法面の侵蝕の発達の方が下の法面より著しかったのにくらべて実験Ⅲでは下の法面の方がいくらか早く始まった。これは後述するよう布の露出面および小段あたりから堤体に浸透した水の影響によるものと思われる。

布が露出した後には実験Ⅰ、Ⅱでは土羽土が流失し布の露出面積が増

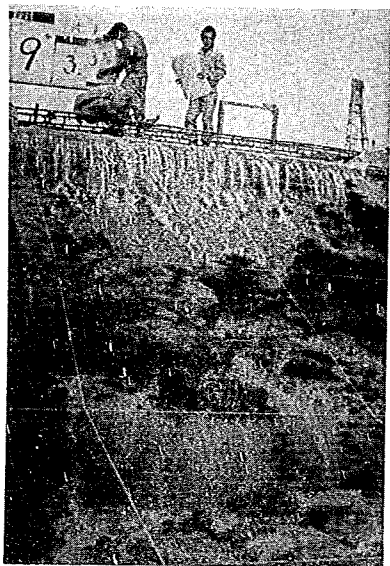


写真-17 実験Ⅲ 9分
(小段より上)

大するだけであったのに対し、実験Ⅲでは土羽土の流失のみならず高分子布の下で堤体の砂が変形するため布の露出面積がそれ程増大しないうちに露出した布が陥没し始めた。写真-15は越流開始後7分の状況を撮影したものであるが小段より下の法面中央部で布が大きく陥没しているのが認められる。

これは布の下にまわった水によって堤体の砂が洗い出されるように破壊したことによるもので、越流を起させている流路の両側で、布を押えている側壁のつけ根から水と共に砂が噴出した。

写真-17、18は小段より上の法面の布の形れ上りと堤体の砂の噴出を写したもので写真-18の状態は写真-17の直後の状態を示すものである。

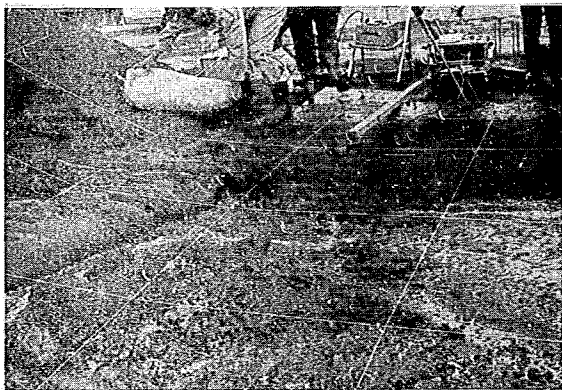


写真-18 堤体砂の噴出

この後急遽土のうを積んで高分子布を押さえ砂の流失を防いだ。

写真-19には越流停止後の堤体の変形状況を示してある。この実験においては布の下にまわった浸透流によって流動する砂が法面の流路側壁のつけ根から噴出する現象を生じたが、実際の越流のように流路幅が広がれば（つまり二次元状態を再現していれば）様子はもっと異り、あるいは堤体の変形はもっと小さかったかも知れない。

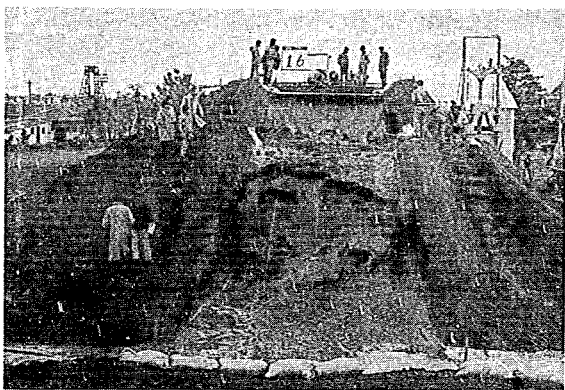


写真-19 実験Ⅲ 16分

4 実験結果に対する若干の考察と今後の課題

i) 実験施設について

実験堤防の大きさは天端高5mとほぼ実物大であり相似性の面からは満足すべきであったと考えられるが、実験Ⅲの法面侵蝕の状況の説明でも述べたように天端高さにくらべて越流部の幅が少しせまかったようにも思われる。

越流量が防火水槽の大きさならびにポンプの容量によって限定されるためこのような実験では越流量、越流継続時間に関して充分満足な実験を行えなかった。

さらに越流量の測定に関しても法面を流下する流速、水深などの測定と合わせて、浸透水の測定を行なうことがこの種の実験においては必要と考えられる。

しかしながらこのような高分子布を施した土砂堤の越流実験によって定性的ではあるがその効果をいくらか明らかにし得たと考えられるのでこの点について次に述べてみる。

ii) 越流実験結果について

関東ロームのような粘性土で作られた土砂堤ではこのような布を土羽土の下に施すことによ

って小規模の起流に対してはある程度堤体を護り得るものと考えられる。越流によって土羽土の表面からの侵蝕が起り、次いで布の一部が露出してそこから水が浸透するようであり、土羽土が布との境界ですべり始めたり、露出部の近傍からの流失が助長されるが、布の下で堤体の侵蝕、あるいは破壊の進行は布が極してない場合に比べて緩慢になると考えられる。

この事について少し考えてみる。もし土羽土が堤体と同一の土であり布に沿う浸透流もないと仮定すれば、土羽土の一部が流失して布が露出した状態は図-9のように模式化される。比較のために図-10には堤体を砂で作った場合の模式図を挙げてある。

このときの浸透水の流れは非定常であってかつ不飽和流であるためはなほ複雑であるがそれぞれの場合の流線網は最終的に定常状態になったときには図中に示したようなものになると考えられる。ただし堤体の侵蝕は進行しないものと仮定する。

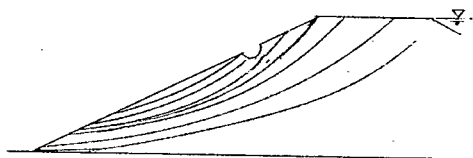


図-9 一様な堤体に等速浸透する場合の流線

関東ロームのような粘性土の場合には透水係数が小さいため浸透流が図に示すような定常状態になるまでかなりの時間を要すると思われる。したがって粘性土の場合には浸透流による堤体の安定が問題となるまでの時間は砂質土より長いと考えられる。

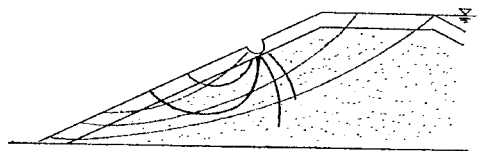


図-10 土羽土と堤体土の透水係数が異なる場合の浸透初期の流線

それで堤体が関東ロームのような粘性土で造られた堤防では土羽土が流失しても、布は流水による堤体の露出部からの侵蝕を防ぐ作用を持ち、堤体の全面的欠損を防ぐわけである。このような作用は実験Ⅰ、Ⅱの結果から充分期待され、実験後の布の下で堤体の損傷がほとんど認められなかったことは先述したとおりである。

これに対して堤体材料が砂のように比較的透水係数が大きくまた粘着力が小さくて、水に

よって流動するような材料で造られた堤防の場合には流水による表面侵蝕を防ぐ作用と共に砂の流失を防ぐフィルターの役目もあると考えられる。

実験Ⅲでは法面勾配の緩い、小段より下の法面の方に早くから堤体の変形が生じ始めたがその理由の1つは、たまたま土羽土の流失による布の露出面が下の法面で早く生じたためと考えられる。この他に、上の法面および小段あたりから浸透した水の流れが下の法面に出てくるため特にこの部分が早くから侵襲し始めたものと考えられる。また布が露出して堤体への浸透が増大した初期の状態は図-14に太線で示した様な状態になると考えられるがこのような流れによって露出面近傍の堤体の破壊が生じて土羽土の広範囲を流失以前に布の陥没が生ずるものと思われる。

このように浸透水によって堤体が熟んできて破壊すると高分子布はフィルターとして砂の流失を防ぐ作用を発揮すると同時に、その張力によって堤体の変形に抵抗すると考えられる。小段の土羽土重量はこのような状態においては張力の反力として作用し、また小段を設けることによって法面の長さが短かく区切られることになるので、ある程度の幅を持った小段を法面の中途に設けることは、布を敷設する場合にも有効であると考えられる。

なお実際の堤防に生ずる越流が狭い幅で起る場合には土羽土が高分子布の押さえとして作用するものと考えられる。

したがって、砂のような材料で造られた堤防においても高分子布の施工と小段の設置を併用する他に、布の堤体への固定をもっと強固な方法（この実験では長さ30cm程度のピンで押さえただけであった。）で行えば多少の越流量と越流継続時間に対して耐えられるものと考えられる。

iii) 今後の課題について

このような工法を実際に用いるに当っては、降雨などの浸透によって生ずる表面のすべりが布の境界で誘発される惧れがあり、また布があるために土羽の表面に植えられた芝の発育が妨げられるのではないかと恐れ、このような点について明らかにしておく必要がある。

今後引き続き検討を要する問題を列挙すると以下のようである。

- 布の下へまわる浸透量の大小
- 堤体土質と布の効果の関係
- 堤内地側からの浸透によって生じた堤体内の浸透流の影響
- 表面の植生の発育に必要な土羽土内の毛管水上昇に及ぼす布の影響
- 布と土羽土とのまさつ特性（特にすべりの誘発に関して）
- 布と土との境界に沿う透水特性

などで今後一層の努力が必要である。

5 あとがき

この実験によって定性的ではあるが高分子布による表面侵蝕の防止効果と布の張力による堤体の破壊防止効果について検討しその効果と問題点のいくつかが明らかにされた。

この実験によってこの調査が終了したのではなく、むしろ始まったわけで、この種の法面保護工について土質工学的立場からさらに検討をすすめることが必要と思われる。