

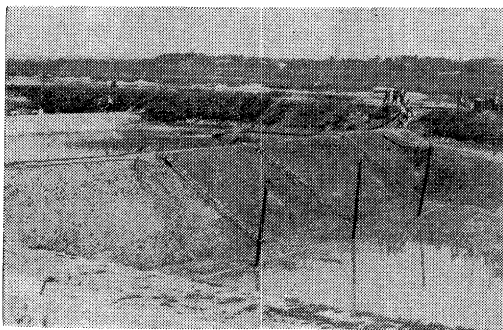
## 試験堤防の破壊実験について

畑 中 次 雄\*  
福 岡 正 巳\*\*

### 1. まえがき

最近進歩した土質工学の立場から、河川堤防の強度を決定することができるかと一般に考えられているようである。このため堤体用土の締固め試験、透水試験、セン断試験、基礎土の透水ならびにセン断試験などが広く行なわれている。このような方法が理くつの上では一応正しいものであっても、どのていどの精度のあるものかはあまりよく知られていないように思われる。だから試験によって土質の常数を決定し、いかほどの安全率をとって設計しなさいということとはできない。建設省土木研究所では土質試験機械と方法の改善をはかるとともに機会あるごとに破壊を起こした盛土や堤防の土質試験を行なって、解析ならびに試験結果の解釈のしかたに検討を加えてきた。また最近数年間建設省直轄技術研究会の研究課題として河川堤防用土のセン断試験をとりあげ、淀川の堤体用土を全国各地建設局の材料試験室、北海道開発局材料試験室、土木研究所砂防研究室に分配し、同一規格の下に試験を行ない、その結果を比較検討し、試験技術の向上をはかってきた。その成果は大いに見るべきものがあるが、まだ完全な成功をおさめるまでにはいたっていない。正しい試験によって破壊例の解析を行なうことはケース レコードと称して、非常に大切な研究方法にはちがいないが、現場の土が不均一質であること、破壊が洪水や豪雨時などに発生するから、実際破壊する直前の土の性質がわからないことなどのために、これだけに頼って問題の解決をはかることは不可能である。このためにどうしても実物大の実験堤防をつくり、あらかじめ

写真-1 実験場全景



\* 正員 建設省淀川工事々務所長  
\*\* 正員 建設省土木研究所機械施工部長

十分な土質試験ならびに破壊の計算を行ない、実験中の土の性質ならびに変形破壊について完全なる測定観測を実施し、試験と破壊を密接につないでみる必要がでてくる。このような実験は数年前から計画されていたが、昭和 34 年末から 35 年春にかけて、第 1 回の実験が終わった。この実験には建設省河川局治水課、ならびに土木研究所、近畿地方建設局河川部、企画室、ならびに淀川工事々務所が共同参加した。また東京・京都・大阪・大阪市立・神戸の各大学の諸先生にご指導をあおいだ。

### 2. 試験堤防の位置

淀川中流右岸大塚地区の引堤箇所は、旧堤の後方に新堤ができ、二重堤防になったところで、新旧両堤の間に平行に 2 本の堤防を直角に取りつけ、その間に水をためるのにつごうよくなっている。基礎は砂質であり、このため新堤には長さ 10~12 m の矢板がろう水防止のために打ってある。ここが試験堤防の位置である。

### 3. 試験堤防の築造

池の底から水がもること、堤体内の流線が複雑になることを防ぐために池ならびに試験堤防の基礎を水平に整地し、十分締固めたのち、アスファルト乳剤で不透水膜をつくった。新旧両堤との取付部にもアスファルト乳剤をぬって浸透流が二次元的に流されるようにした。堤防

図-1 実験堤一般平面図

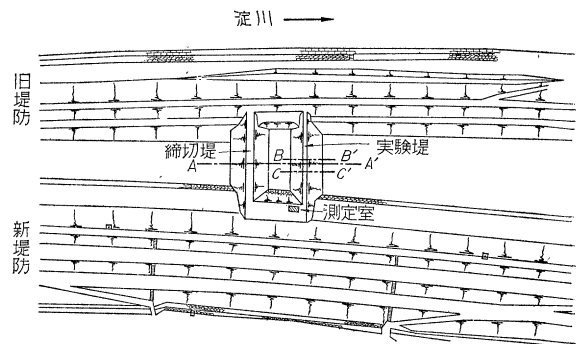
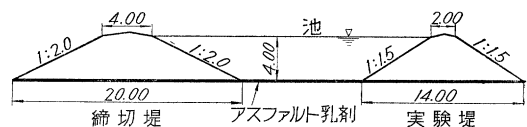


図-2 実験堤断面図  
A-A' 断面 (単位 m)

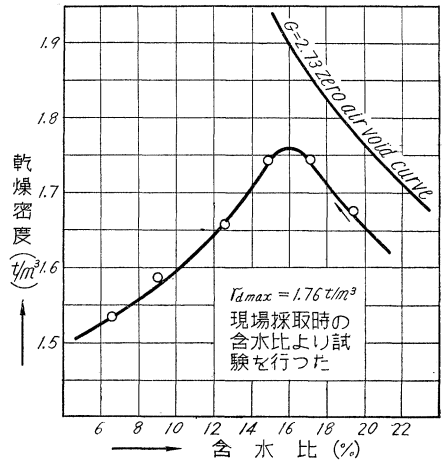


表一 試験堤の貫入ならびに密度試験結果

| 層数 | コーンペネトロメーター |      |      | 衝撃式貫入試験 |         | 含水比 (%) | 湿潤密度 (t/m³) | 乾燥密度 (t/m³) |
|----|-------------|------|------|---------|---------|---------|-------------|-------------|
|    | 50          | 100  | 150  | 10 (cm) | 20 (cm) |         |             |             |
|    | (cm)        | (cm) | (cm) | 回       | 回       |         |             |             |
| 1  | 0.8         | 3.2  | 4.9  | 4.8     | 9.2     | 19.54   | 1.700       | 1.42        |
| 2  | 0.5         | 2.9  | 4.0  | 4.8     | 9.4     | 18.14   | 1.656       | 1.41        |
| 3  | 0.8         | 4.5  | 8.3  | 5.0     | 10.7    | 18.45   | 1.667       | 1.41        |
| 4  | 0.7         | 3.5  | 4.3  | 4.7     | 9.0     | 19.90   | 1.759       | 1.47        |
| 5  | 0.3         | 2.1  | 5.0  | 5.2     | 10.8    | 21.10   | 1.749       | 1.45        |
| 6  | 0.3         | 1.8  | 4.1  | 4.3     | 9.3     | 20.30   | 1.725       | 1.43        |
| 7  | 0.4         | 3.0  | 7.2  | 4.5     | 9.0     | 20.30   | 1.756       | 1.46        |
| 8  | 0.5         | 3.7  | 5.8  | 4.6     | 9.7     | 18.40   | 1.766       | 1.45        |
| 9  | 0.3         | 2.2  | 4.0  | 4.4     | 8.6     | 18.90   | 1.740       | 1.46        |
| 10 | 0.3         | 2.2  | 4.4  | 4.2     | 9.2     | 17.70   | 1.708       | 1.45        |
| 11 | 0.5         | 3.4  | 4.9  | 5.1     | 9.9     | 20.50   | 1.715       | 1.42        |
| 12 | 0.3         | 1.9  | 4.5  | 4.4     | 9.1     | 18.10   | 1.686       | 1.42        |
| 13 | 0.4         | 2.5  | 4.2  | 4.4     | 8.6     | 19.90   | 1.656       | 1.41        |
| 14 | 0.4         | 2.7  | 4.5  | 4.4     | 8.7     | 18.60   | 1.750       | 1.44        |
| 平均 |             |      |      |         |         | 19.25   | 1.714       | 1.44        |

注：表中コーンペネトロメーターの欄の数字はペネトロメーターのダイヤルゲージ指示数 50, 100, 150 のときの貫入深さ、また衝撃式貫入試験の数字は貫入棒を 10 cm, 20 cm 貫入させるのに要した打撃回数

図一 堤防用土の突固め試験結果



4. 堤防用土の土質試験

表二 土質試験結果

| 土質粒度分析結果              |                | 遠心含水当量 $W_C$                       | 10          | 一面せん断試験<br>(最大密度、最適含水比におけるもの)<br>含水比 16.0%<br>最大密度 1.70 t/m³ | $c = 0.35 \text{ kg/cm}^2$<br>$\phi = 41^\circ$ |
|-----------------------|----------------|------------------------------------|-------------|--|---|
| 三角座標分類<br>Public Road | 砂質ローム<br>A-2-4 | 現場含水当量 $W_F$                       | 27          |  |   |
| 粘土 0.005 mm 以下        | 10.5           | 収縮限界 $W_S$                         | 24.9        |  |   |
| シルト 0.005~0.05 mm     | 17.5           | 収縮比 $R$                            | 1.54        | 最適含水比 $W_{opt} \%$   | 7 × 10 <sup>-5</sup>                            |
| 細砂 0.05~0.25 mm       | 45.0           | 容積変化<br>線収縮                        | 11.0<br>3.4 |  |   |
| 粘砂 0.25~2.0 mm        | 22.5           | 最大密度 $\gamma_{dmax} \text{ t/m}^3$ | 17.6        | 一面せん断試験<br>(含水比 19.3%)<br>乾燥密度 1.44 t/m³                     | $c = 0.09 \text{ kg/cm}^2$<br>$\phi = 21^\circ$ |
| 礫 2.0 mm 以上           | 4.5            | 透水係数 $\text{cm/sec}$               | 19.3%       |  |   |
| コンシステンシー              |                | 湿潤密度                               | 1.44 t/m³   |  |   |
| 液性限界 $W_L$            | 29.2           | 乾燥密度                               | 1.44 t/m³   |  |   |
| 塑性限界 $W_P$            | 20.2           |                                    |             |  |   |
| 塑性指数 $W_I$            | 9.0            |                                    |             |  |   |
| 土粒子の比重 $G$            | 2.73           |                                    |             |  |   |
| A C 分類                | SF             |                                    |             |  |   |

の平面図ならびに断面図は 図一1,2 に示す。この断面の天端高さは新旧両堤の高さなどから制約されたが、ノリ勾配は土質試験、予備試験としての降雨による斜面のすべり実験、付近にある芥川左岸堤の台風 15 号 (昭和 35 年) によるすべりの解析結果などから判断して降雨あるいは水ため実験の結果、ちょうど破壊するように設計した。堤体用土は旧堤の裏小段から採取した。試験堤はドラッグラインを使用してまき出し、厚さ 30 cm の水平層にし、1 t のローラーで 1 回軽く締固めた。土の締固まり方の試験はコーンペネトロメーター、衝撃式貫入試験と密度の測定による。密度試験は各層 4 点、その他の試験は 8 点あて実施した。各層ごとの試験結果の平均値は表一に示す。貫入試験の結果は相当バラツキを示しているが、含水比は ±1%、湿潤密度は ±3%、乾燥密度は ±2% までいどにコントロールすることができた。材料試験結果からわかるように含水比は最適含水比より約 3% 湿潤側にかたより密度は非常にゆるいもので、最大密度の 82% である。

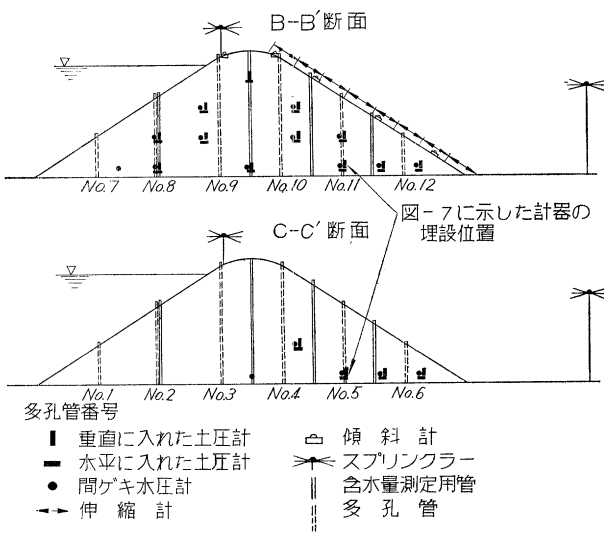
用土の土質試験の結果は表二、図一3 に示す。土質は砂質ロームで堤防用土としては良好なものである。

5. 測定器械

測定器械としては土圧計 32 個、間げき水圧計 17 個、傾斜計 6 台、伸縮計 8 台、浸潤線測定用多孔管 12 本、含水量測定用管 8 本を二断面に設置した。計器の配置は図一4 のようである。B-B'、C-C' 断面は図一1 に示す位置の断面である。土圧計、間げき水圧計は坂田電機製の斜柱式土圧計を用いた。傾斜計は気泡管式で、傾斜が 1/1000 までよめるもの。伸縮計は杭間の伸縮をダイヤルゲージで測定するもの。浸潤線測定用管は直径 2.5 cm のパイプに 5 mm の孔をあけたもの。含水量測定用管内の径 3.8 cm のジュラルミン製パイプでアイソトープを用いた中性子線水分計のプロープが入ることができるようになっている。

6. 給排水装置

図-4 測定用計器配置図



降雨装置としては農  
業用スプリンクラーを  
用いた。水の散布量は  
ノズルを取りかえるこ  
とによって 17.97~  
55.65 l/min, 散水距  
離は角度の調節で 7.6  
~10.5m までとどか  
せうる。図-5 はスプ  
リンクラーの頭部であ  
る。池に水をためる  
ためには 20 HP のポン  
プ2台を用いて 1~5  
m<sup>3</sup>/min の水を淀川から引いた。

### 7. 降雨実験

降雨実験は堤防の頂上ならびに裏ノリ先にあるスプリ  
ンクラーを用いて散水することによって行なった。水量  
は雨量に換算すると 10 mm/h で、約 20 時間続した。  
その結果 図-6 にみられるようにクラックを生じすべり  
落ちるような現象をていした。含水比は 19.4% から

写真-2 スプリンクラーの頭部

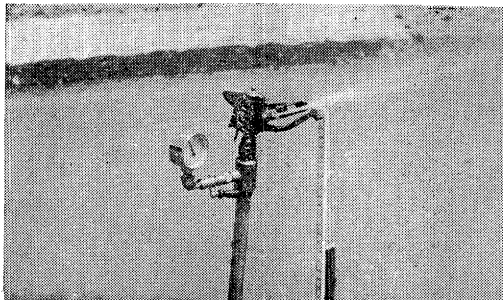


図-5 スプリンクラーの頭部

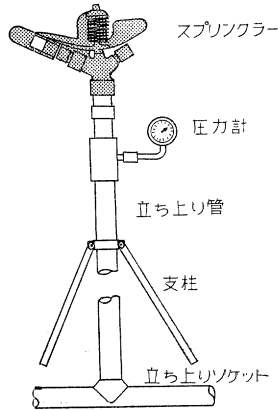


図-6 降雨実験によるクラックと含水比の変化状況

(11 日 14.03~14.20 時における中性子線  
水分計による測定)

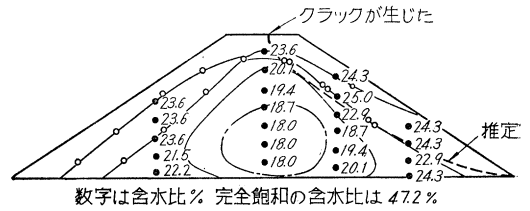
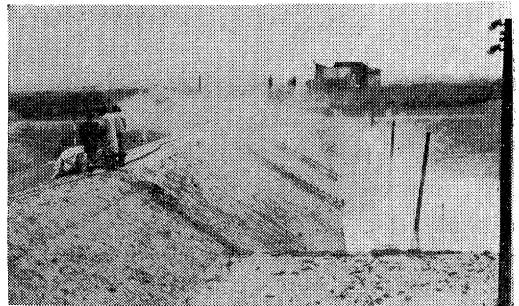


写真-3 降雨実験



25% ていどまで増加したが、完全に飽和するには至ら  
なかった。クラックの発生原因は表面の土の重量増加・  
吸水軟化によるものと思われる。

### 8. 湛水実験

降雨実験のあと 5 日間乾燥させてクラックを修理した  
のち池に水をためる実験を行なった。水位上昇一時間の  
関係は 図-7 に示す。C-C' 断面の多孔管中の水位も図

写真-4 降雨により生じた天端のクラック



写真-5 降雨により生じたノリ崩れ

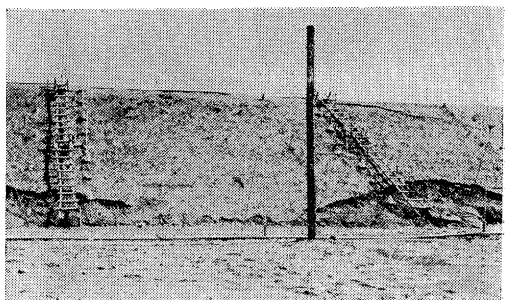
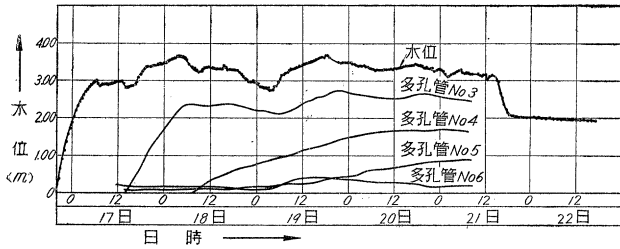


図-7 水位時間曲線および多孔管水位  
(多孔管位置は図-4に示す。なお多孔管 No. 1, No. 2 は)  
水位上昇のため観測不能)



面に書き加えた。多孔管内の水位の時間的変化を横断面中  
に書き入れたものが図-8である。下の図には時間と距離との  
関係が書き加えてある。この図から浸潤線の到達距離は時間  
の平方根にほぼ比例することがわかる。比例常数などについては  
目下検討中である。湛水後天端はしだいに沈下した。堤防天端  
中央部断面の沈下状況は図-9に示す。水に対して表側の杭が  
大きく沈下したのは図に示すようなすべり面に沿ってすべり  
おちるような現象を起こしたからである。すべりは非常にゆる  
やかな速度でおこったため急激な破壊を生ずることなく、クラ  
ックが発達し、裏ノリの勾配がゆるくなり、天端がさがる  
というような状態になった。

水位は天端の沈下にとまって低下させ、越流が生じ  
ないようにした。越流が起これば当然破損したものと思  
う。

図-8 多孔管内の水位の時間的変化  
(C-C' 断面)

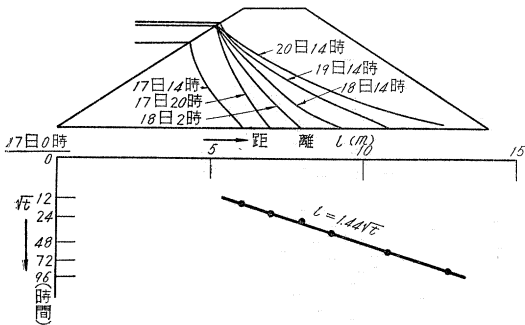
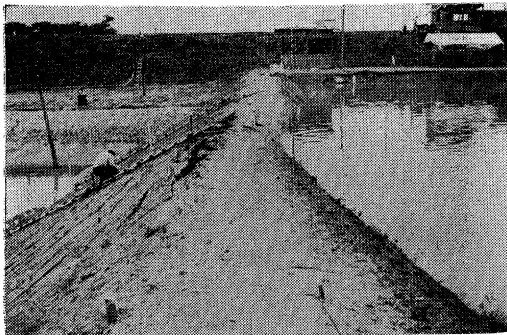


写真-6 湛水実験



傾斜計・伸縮計による裏ノリ面の運動状況は  
図-10に示す。傾斜計の傾斜角はすべりの初期  
においては裏ノリが単純に回転運動をするとい  
うのではなく、非常に複雑な運動をしながら、結局  
全体として回転するというようになる。間げき  
水圧計は前にも述べたように土圧計の受圧板  
の上に孔のあいた円板をかぶせたものを用いた。  
間げき水圧計と多孔管内の水位、水分計の  
読みをまだ詳細に比較検討していないが、  
浸透水がある点に到達しても完全に飽和した  
流れにならず、しばらく

図-9 堤防天端中央断面の沈下

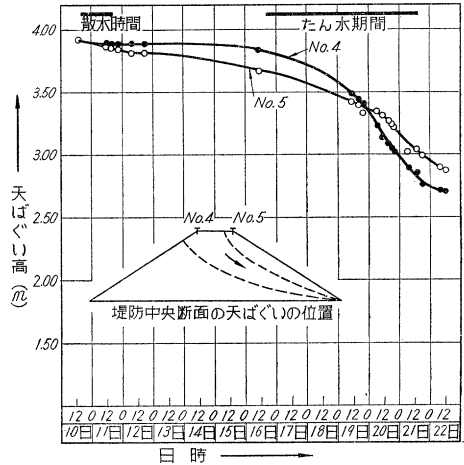


写真-7 堤体の変形(実験終了後)その1

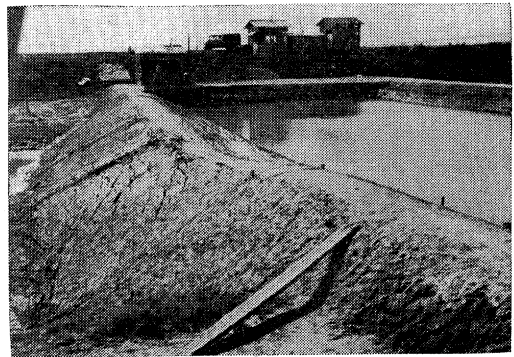


写真-8 堤体の変形(実験終了後)その2

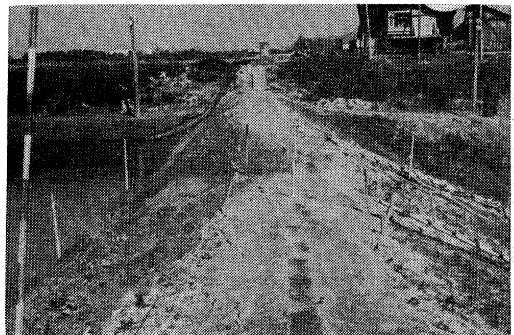
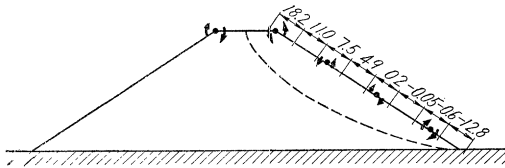


図-10 裏ノリ面の運動状況

(矢印は傾斜計により測定した地表面の回転方向  
また数字は伸縮計により測定した5月18日10時  
～19日6時の間の伸び (mm))



は不飽和流になっているようである。不飽和流でも間げき水圧計はまず圧力を感じはじめ、続いて多孔管の水位も上昇する。土圧計のうち1個は水平に、他は垂直においた。もう1個なめにおけば1点の応力が完全にわかったのだが、全体の個数が少なかったので、1点の水平と垂直の両土圧の測定にとどめた。垂直においた土圧計の読みが間げき水圧計の読みより大きくなるはずであるが、実際には逆になることがあった。これは土圧計の埋め込み方にもっと工夫を要することを示すもので、目下検討中である。水平においた土圧計もやはり同様な意味で検討しなければならないと思う。図-11は土圧計と間げき水圧計の読みの一例である。これらのものは B-B および C-C' 断面のノリ尻側の底部(図-4参照)におかれたものである。湛水が進むとともにクラックが発達し、すべりの現象をていしたが、クラックの発達状況は図-12に示す。図-9に示したように天端は沈下するから、まず最初のクラックは新旧両堤との接続点付近の天端にあらわれた。これとほぼ相前後して裏ノリの下部のふくれ出しとすべりの現象が見られた。

浸透水が裏ノリに達する頃からクラックは急激に発達し、天端においては堤軸方向に多少の傾きをもったクラックがおこった。このクラックはしだいに延びて池側の表ノリ面の天端に近い部分を走る堤軸とほぼ平行なクラックとつらなり、天端は沈下しながら池側が低く、裏ノリ側が高いような傾斜をおこした。裏ノリのクラックは下方から上方に発達し、最後にはほとんど全面にわたった。クラックの中も大きいものは 20 cm にもなった。

図-11 土圧計および間げき水圧計測定値の一例  
(図-4 に位置を示す)

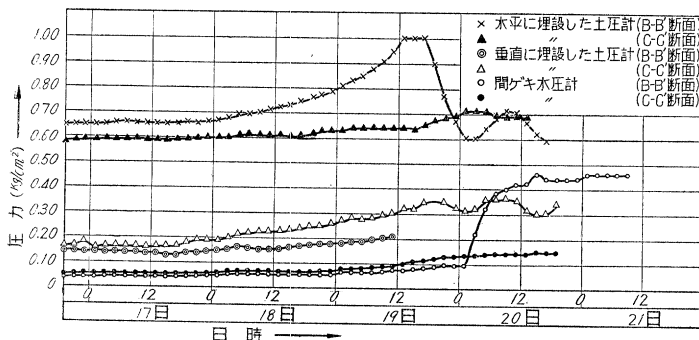
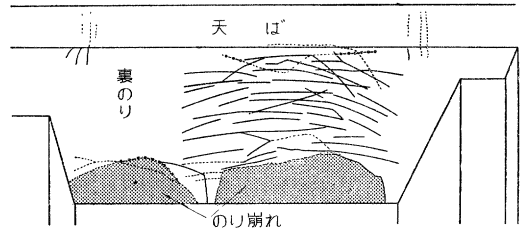


図-12 クラックの発達状況

..... 5月18日20時  
- - - - - 5月19日6時  
————— 5月19日17時



ノリ先の方は水がわき出して大きくすべり落ちた。

### 9. すべりの安定計算法に対する考察

土質試験の結果と安定計算を合理的に組み合わせることによって土質試験ならびにすべりの安定計算法を確立したいという念願から実験を行なったが、この点についてはまだ慎重に検討中であるから、いずれ機会を改めて報告したい。方法としては表ノリ天端と裏ノリ先をとおるすべり面に沿って円形に近いすべりが起こったとして、この面に沿う土圧、間げき水圧を計上し、土質試験の結果にもとづいて、すべりに対する抵抗力を求める。一方、すべり体のすべり力は水をふくんだ土の重さによって生ずるもので、この重さの計算には水分計によって測定された含水比が考慮されることになろう。セン断試験については一面セン断と三軸圧縮試験があり、供試体の密度、含水量を変化させ、三軸圧縮試験については間げき水圧の取り扱い方に注意しなければならない。このようにいろいろな種類の試験を行ない、すべりの解析結果と比較してどの方法が最もよくあるかをしらべなくてはならない。浸透流が裏ノリに達した頃からすべり活動が活発になったことからみると、浸透流の進行状況は安定が破れる時期を知る上に非常に重要である。浸透流については堤体の初期含水比、初期浸透流の不飽和の程度、これがいかなる時期に飽和流になるか、不飽和流ならびに飽和流の透水係数などのいろいろな問題がある。これらについても検討を加えたい。

### 10. むすび

淀川堤防実験の経過についてのべたが、まだ資料取りまとめ中のこととして、この実験についての成果を完全な形で報告することはできない。今後この種の実験が継続されたならば将来試験にもとづいて設計ができるようになるであろう。また安定度をます工法、経済的な断面についても論ずることができるようになるであろう。最後にこの実験に関係した多くの人々に対して深く感謝する次第である。  
(原稿受付: 1960.9.9)