

大型盛土による浸透模型実験

LARGE-SCALE MODEL TESTS ON SEEPAGE FLOW IN THE EMBANKMENTS

く 久 楽 勝 行* さい 齊 藤 義 章** いし 石 塚 廣 史**

1. ま え が き

道路盛土、河川堤防などの土構造物は水の浸透作用によって、その安定性が著しく低下する。道路盛土などの人工斜面が豪雨時の雨水の浸透によりすべりを生じ、道路交通に支障をきたしたり、近接の構造物に被害を及ぼすことがある。また、豪雨とそれに引き続く洪水によって堤防斜面がすべり、破堤に至った事例もある。

このような災害を防止する有効な対策をたてるためには、豪雨及び外水位の上昇に基づく土構造物内の非定常浸透流の挙動を明らかにし、その影響を定量的に評価して土構造物の安定性に結び付けることが必要である。そこで、当研究室では土構造物への雨水の不飽和浸透、並びに河川水位上昇と降雨とを同時に考慮した場合の堤体内の非定常浸透流などについて検討を加えるために、大型模型を用いた種々の浸透実験を実施している。それらは実物大の盛土に人工降雨を加えて降雨時の盛土の安定性を検討する雨水浸透実験、及び洪水時の堤防の安定問題を対象にした大型模型堤防による非定常の浸透実験などである。更に、地盤から堤体内へ流入する浸透水を軽減する地盤漏水対策工の効果判定する大型浸透実験も実施している。

土木研究所の筑波学園都市の移転に伴い、当研究室に浸透問題を取り扱う大型の特殊実験施設が設置され、上記の一連の大型実験を実施しているが、本報告では主として旧千葉支所で行った大型模型による浸透実験の結果について述べる。

2. 大型模型による浸透実験の意義

雨水の浸透のような不飽和浸透の問題を模型実験によって調べるときには相似性について考えておく必要がある。不飽和浸透流についてレベレット (Leverett) の J 関数が成り立つ¹⁾として、模型と実物との相似則を求めると、次のようになる。

$$\frac{k_m}{q_m} = \frac{k_p}{q_p} \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{1}{L_m} \cdot \sqrt{\frac{n_m}{k_m}} = \frac{1}{L_p} \cdot \sqrt{\frac{n_p}{k_p}} \dots \dots \dots (2)$$

$$t_m = \frac{n_m \cdot L_m \cdot q_p}{n_p \cdot L_p \cdot q_m} \cdot t_p \dots \dots \dots (3)$$

ここで k : 透水係数, q : 表面からの単位面積当たりの浸透流量, L : 盛土幅, 盛土高などの盛土の大きさを示す基準長, n : 間隙率, t : 時間

また、サフィックス m は模型を、サフィックス p は実物をそれぞれ表す。

模型と実物の浸透流が相似であるためには、模型を実物と断面形状、密度分布を幾何学的に相似にして式(1), (2)が成り立つような k_m , n_m を持つ材料を用いて模型を作り、実物の q_p に対応した浸透流量 q_m を模型に与えることが必要となる。そこで、具体的に式(1), (2)を使って相似縮尺を計算すると、次のようになる。すなわち、土の間隙は土によってそれほど大きく変わらないので、いま模型を 1/10 の縮尺で作るとすると透水係数 k も浸透流量 q も、ともに 100 倍にしなければならない。更に模型の時間は、式(3)より実際の時間に比べて 1000 倍の速さで進むことになる。実際の土の透水係数が 1×10^{-4} cm/s とすると、模型の材料には 1×10^{-2} cm/s の透水係数の土を選べばよいことになるが、浸透流量 q_m については実物の降雨量との関係から調整することが困難な場合もでてくる。更に、時間縮尺が大きすぎるため、実験中の含水比の測定時間などを考慮すると、一般にこの縮尺を採用することが難しくなる。また、人工的に材料を調整して築造する盛土であっても、盛土内には通常の場合、不規則性、不均質性が存在し、これが水の浸透に影響を及ぼすことも考えられる。

したがって、雨水の浸透問題のような場合には、小型の模型によってそれを再現するのは相似率のうえから言って無理であり、また満足できる結果を得ることもできないので、できれば実物に近い現寸大の模型で実験をすることが望ましい。しかし、大型模型による浸透実験は多大の労力と費用を要するため、条件を変えた数多くの実験を短時間のうちに実施するのは通常困難である。このため、大型実験を行う場合には実験の目的を明確にし、それに応じた実験計画をたてることが大切である。大型模型による浸透実験の目的を大別すると、次に示すようなものがあげられる。

① 浸透現象の把握; 実際の浸透現象を把握し、設計・施工に役立てることを目的として行う実験で、大型模型に

*建設省 土木研究所 土質研究室 室長

**建設省 土木研究所 土質研究室

外力条件を加えたときに生ずる浸透流の動きや間隙水圧の上昇などを調べる。合わせて、浸透水による変形や崩壊現象などを観測し、安定性の検討に用いる。

② 浸透解析との比較；浸透解析と実際の現象との適合性を確認する目的で行う実験である。最近、有限要素法などによる浸透解析が多く用いられるようになってきており、かなり複雑な条件下における浸透流についても解析が可能となっている。しかし、入力する土質定数や外力、境界条件の与え方によっては、実際の現象とかなり異なった結果が得られることもあるので、その適用については実験などにより確かめておく必要がある。

③ 対策工の効果・判定；堤体表面及び地盤からの浸透水を遮断する対策工には各種の方法がある。それらの工法の効果を判定、又は確認するために行う実験で、現地実験に比べて単純化したモデルにより効果を判定しやすいという利点をもっている。したがって、大型模型実験によって対策工の効果並びに施工性などについてあらかじめ検討を加え、実際の現場に適用するのがよいと考えられる。

3. 雨水の浸透とのり面の安定に関する大型実験

過去に実施したのり面の実態調査をみると、のり面の崩壊は不均一な地山や、片切り・片盛りの箇所が生じていることが多い。特に基盤がのり面に向かって傾斜しており、その上に土砂が堆積している場合や、傾斜した基盤上に盛土をした箇所では降雨などの浸透水が境界面（強度及び透水性からみた不連続面）に集まるため、すべりが生じやすく、崩壊の危険性も高い。そこで、降雨時の雨水の浸透と基盤上の間隙水圧の上昇及びのり面の変状について検討を加えるために、次に示すような大型盛土による雨水浸透実験を実施した²⁾。

3.1 実験方法

実験は土木研究所千葉支所の盛土実験槽を用いて行った。実験槽は深さ 4 m、広さ 27×27 m のコンクリート製のピットで、上部に降雨装置が取り付けられている。降雨装置は銅パイプに多数の噴霧ノズルを付けたものでポンプで水を圧送し、これを霧状にして実験槽の 20×20 m の範囲に降らせるようになっている。実験では盛土内への浸透水のみを対象としているため、地表面が水滴により浸食されないように水滴を細かくした。

実験槽内に築造した人工基盤、及び盛土は図-1 に示すとおりである。基盤の傾斜角は 10°、15°、20°、25° の 4 種類とし、あらかじめ傾斜をつけて施工した砂の上に 30 cm 厚の関東ロームを巻き出し、パイプロランマーでよく締め固めた後、更にその上部に 20 cm 厚のソイルセメントを施工して人工基盤を築造した。ソイルセメントは、関東ロームの乾燥重量にして 8 % にあたる普通ポルトランドセメントを混合したものを用いた。また、盛土には千葉県浅間山の山砂を利用し、図-1 に示すような高さ 5.5 m、天端幅

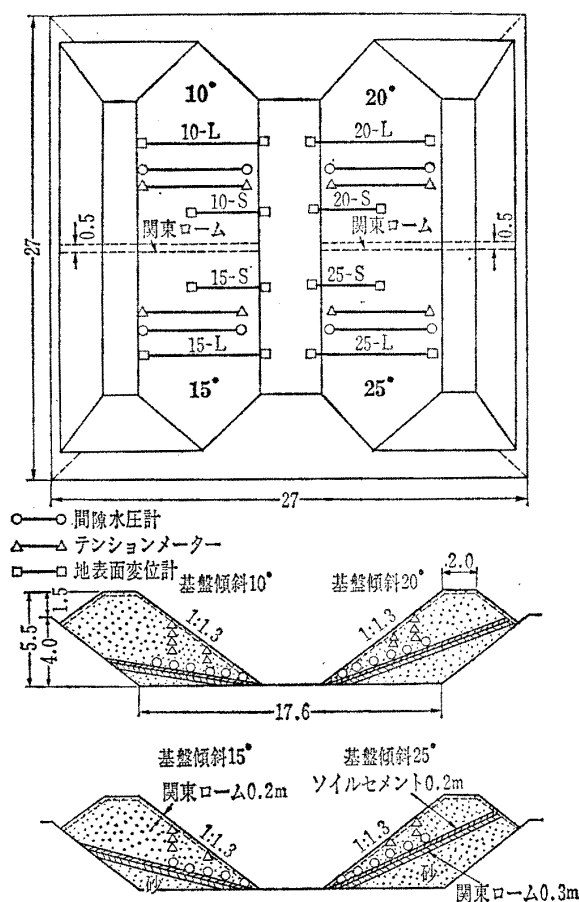


図-1 実験盛土と計器埋設位置 (単位: m)

2 m、のり勾配 1 割 3 分の盛土を築造した。盛土は、小型のブルドーザーによって約 50 cm の層厚に巻き出し、パイプロランマーによって締め固めた。各層ごとに締め固めた土の含水比、湿潤密度を測定し盛土内の乾燥密度を求めたが、その結果、平均値として乾燥密度 $\rho_d = 1.65 \text{ g/cm}^3$ 、締固め度 94 % 程度の比較的ばらつきの少ない値のものが得られた。盛土表面には降雨による浸食を防ぐために 20 cm 厚の関東ロームによる土羽土を施工した。また、降雨の浸透による盛土内の含水量の変化、並びにのり面の変形などを測定するために、図-1 に示す位置にテンションメーター、間隙水圧計、地表面変位計などを設置した。

実験は基盤の傾斜の異なる 4 種類の盛土に、約 26 時間にわたって全降雨量 440 mm、平均降雨強度で 18 mm/h の降雨を一律に加え、設置した計器によりのり面の変位並びに盛土内の間隙水圧の変化などを継続して測定した。

3.2 実験結果と考察

(1) 降雨量とのり面の変状

降雨量とのり面の変位量との関係を図-2 に示す。図から明らかなように各ケースののり面とも降雨量が増大するに従い、変位量も大きくなっている。特に、のり面の崩壊前では各ケースとも変位量が著しく増大しており、写真-1 に示す崩壊が生じた時の降雨量は基盤の傾斜角が 25° の場合で 220 mm、20° の場合には 260 mm であった。また

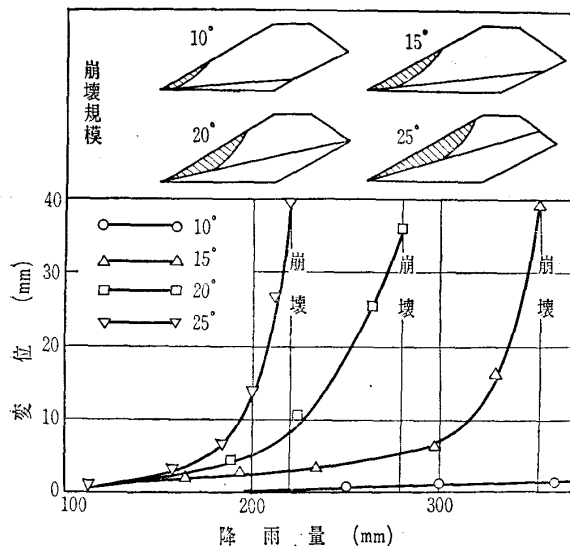


図-2 降雨量と地表面変位の関係

基盤の傾斜角が 15° の場合には、降雨量が 350 mm に達した時点でのり面崩壊が生じた。傾斜角が 10° の場合は、降雨量が 440 mm に達してもり尻付近に小崩落が起こる程度で、のり面にはあまり大きな変状は認められなかった。

次に、のり面の崩壊規模についてみると図-2 の上図に示すように、基盤の傾斜角が 10° 、 15° 、 20° 、 25° となるに従って崩壊の規模も大きくなっている。このことから、基盤の傾斜角がきついものほど崩壊が早期に生じ、しかも規模の大きい崩壊が生じやすいといえる。

(2) 間隙水圧とのり面崩壊の関係

図-3 は降雨時の基盤上の間隙水圧の分布を各ケースごとに示したものである。一般に雨水の浸透はのり面から内部へと進行するため、土かぶりの薄いのり尻部にまず自由水面が形成される。今回の実験においても傾斜角が 10° の場合には、降雨量が 90 mm を越えるところからのり尻部付近の間隙水圧がまず上昇し始め、降雨量が増すに従い盛土内部へと間隙水圧の上昇が進行している。傾斜角が 15° の場合も同様の現象が認められる。したがって、基盤の傾斜角が緩い場合には降雨時の盛土内の間隙水圧はのり尻付近から次第に内部へと上昇していき、のり尻部で高く内部で低い、いわゆる山の形をした水圧分布になる。これに対し



写真-1 のり面の崩壊状況

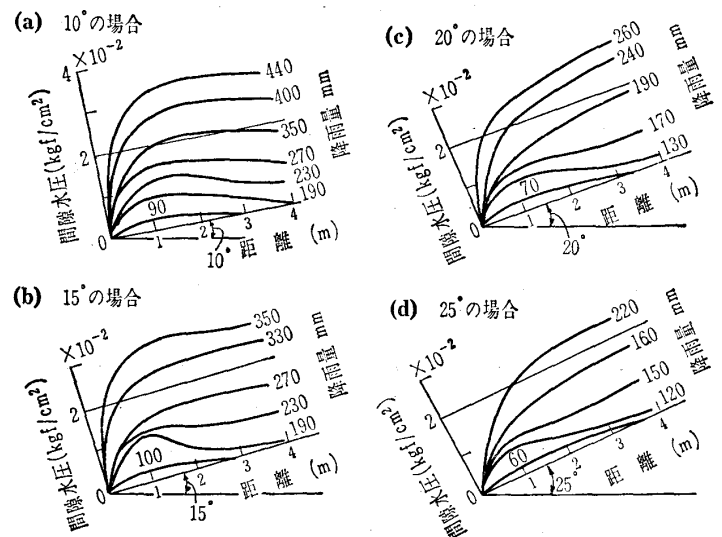


図-3 降雨量と間隙水圧との関係

て基盤の傾斜角がきつい 20° 、 25° の場合には、降雨初期においては傾斜角の緩い場合と同様に間隙水圧の上昇はのり尻部付近で起きるが、降雨量が増大するとおり面全体の土かぶりの厚さが薄いために、のり尻部の間隙水圧の増大とともに盛土内部の間隙水圧も雨水の浸透によって急上昇する。このため、のり尻部よりもむしろ内部の方が間隙水圧が大きくなるような基盤の傾斜角が緩い場合と異なった水圧の分布を示す。

図-4 はのり尻部から基盤に沿った 4 m の位置における間隙水圧の上昇と降雨量の関係を示したもので、図からも盛土内部における間隙水圧は傾斜角のきついものほど、早期にしかも急上昇することが分かる。このことが、のり面の崩壊時期と規模に関係していると考えられる。すなわち、基盤の傾斜角が緩い場合には盛土内の間隙水圧はのり尻部で高く、内部で低い山の形をした分布となるため、のり面の崩壊は最初のにり尻部で小崩落が起こり、これが上部のり面に次第に及ぶ、いわゆる進行性破壊を呈する。一方、基盤の傾斜角がきつい場合には降雨によってのり面内部の飽和度が早く上昇し、基盤に沿った間隙水圧の上昇が早期に大きくなるため、大きなりすべりが突発的に起こりやすいといえる。

以上述べたのり面勾配を一定にし、基盤の傾斜角を変えた大型盛土による雨水浸透実験の結果から、基盤の傾斜角によって崩壊の形態並びに発生機構に違いのあることが認められたので、今後現地のり面を利用した現場計測を行う

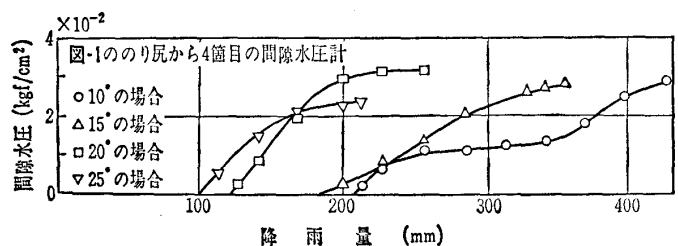


図-4 基盤傾斜と間隙水圧の関係

などして更に検討を加えていきたいと考えている。

4. 浸透解析との比較実験

河川堤防のような土でできた構造物は浸透水の影響を受けると、その安定性は著しく低下する。特に、堤防の場合には、出水時の外水位の上昇と降雨によって堤体内の浸潤面が著しく上昇し、そのために堤体裏のり部でのりすべりを起こすことがある。そこで、堤防の安定性に大きな影響を及ぼす堤体内の非定常浸透流を解析によって求める方法を検討した。解析方法は後で述べるような雨水浸透解析と有限要素法を用いた非定常浸透流解析とを重ね合わせたもので、この方法によって出水時の堤体内の非定常浸透流を求めることができる。しかし、重ね合わせの段階で実際の現象と異なることも考えられるので、次に示すような大型模型堤防による浸透実験を実施し、実験結果との比較から浸透解析の適合性について検討を加えた。

4.1 実験方法

実験には透水性地盤上の堤防を想定し、図-5に示す人工地盤及び模型堤防を盛土実験槽内に築造した。材料として人工地盤には砂を、堤体にはシルト質砂をそれぞれ用いた。施工方法は小型ブルドーザーにより巻き出し、約30cm層厚ごとにパイプロランマーで締め固めた。各層ごとに測定した堤体土の含水比、湿潤密度及び乾燥密度は平均値でそれぞれ25.1%、 1.76 g/cm^3 、 1.42 g/cm^3 であり、比較的ばらつきの少ない値のものが得られた。また、堤内地側に地盤漏水及びクイックサンドを防止するために、関東ロームを透水性地盤上に巻き出した。

堤体には降雨及び外水位による浸透水の挙動並びにのり面の変形を観測するために、テンションメーター、RI測定用パイプ、水位計、地表面変位計などの諸計器を取り付けた。

実験は透水性地盤を飽和させた後、堤体表面に一定降雨を加えると同時に透水性地盤上の高さ2.5mまでたん水させた。降雨強度は表面浸食が起こらないように 15 mm/h 程度に調整した。また、外水位は13時間を要して所定の2.5mまで上昇させ、その後一定の水位を保つようにした。

4.2 実験結果

実験によって観測した堤体内の水分の変化を整理し、飽和度によって示したものが図-6である。図中の破線は水位計によって観測した堤体内の浸潤面である。

外水位が上昇するに従い、堤体内の浸潤面は表のりから

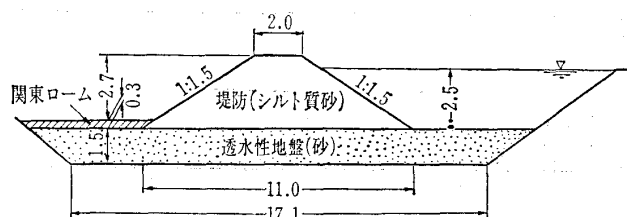
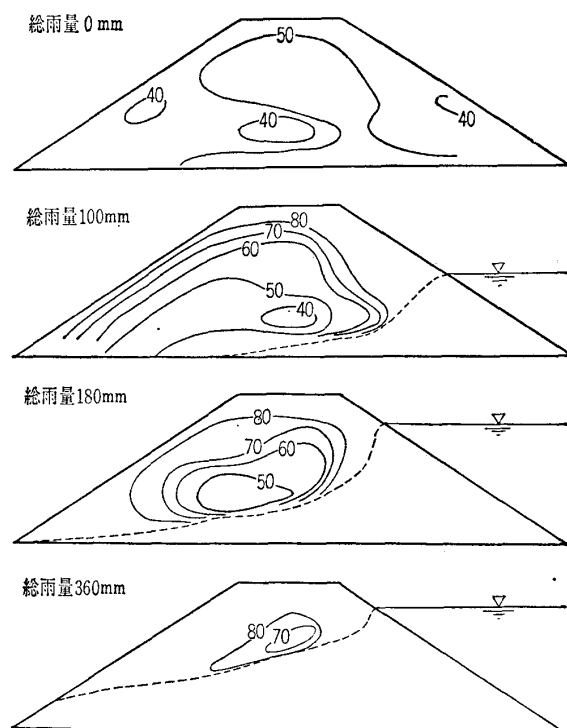


図-5 実験堤防断面図



(注) 破線は浸潤線を示す

図-6 堤体内の飽和度及び浸潤線の変化

の浸透水によって次第に堤体中央部へ進み、更に高水位が持続すると裏のりへと進行する。一方、降雨の浸透は堤体表面から次第に内部へ進行していくため、まず表面付近の飽和度が上昇する。その後、降雨量の増大に伴い飽和度の上昇も内部へと進む。したがって、図-6に示すように降雨開始前に50%前後であった堤体内の飽和度が、総降雨量180mmになると堤体表面及びのり尻部では飽和度80%以上になり、浸潤面ものり尻付近に達している。更に、総降雨量360mmでは降雨と高水位の影響により堤体内の飽和度は80%以上となり、堤体全体が飽和に近い状態になったが、内部の中心部では飽和度が容易に上昇しないことが認められた。

次に、図-7は各水位計で測定した堤体内の水位と経過

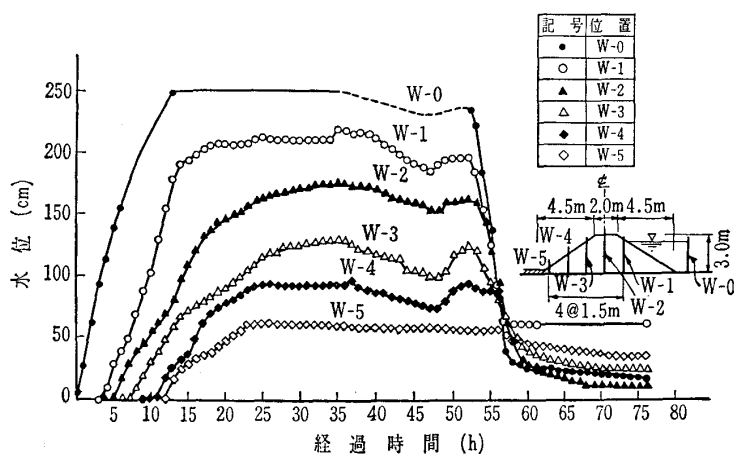


図-7 水位計による堤体内の水位観測結果

時間の関係を示したものである。外水位の上昇に伴い表のり側から各測点の水位が順次上昇しているが、裏のり尻付近の W-4 と W-5 についてみると、水位の上昇がほぼ同時期に生じている。これは、外水位の上昇による浸透水のほかに降雨の影響が関係していると考えられる。すなわち、裏のり尻の土かぶりの薄い部分では降雨による浸透水が早期に自由水面に達し、浸潤面を押し上げる働きをしたためと考えられる。したがって、出水時には豪雨を伴うのが通常であるから、堤体内の浸潤面を求める場合には河川水の上昇とともに降雨の影響についても考慮する必要があると思われる。

なお、裏のりの崩壊は実験開始後 17 時間、総降雨量 260 mm 前後でり尻付近に小崩落が生じ、浸潤面が上昇するにつれて上部のり面に及ぶ、いわゆる進行性破壊を呈した。このことは、図-7 のり尻部に設置した W-5 の計器で観測した堤体内水位の挙動からも推定でき、浸潤面がのり尻部に達し、上昇を始めた時間とほぼ合致している。

4.3 浸透流解析結果との比較

出水時の堤体内の非定常浸透流を解析により求める方法として、次に示すような方法を考えた。すなわち、

① 最初に、外水位の変動のみによる堤体内の非定常浸透流を有限要素法を用いた非定常浸透流解析から求める³⁾。

② 次に、降雨の浸透による堤体内の飽和度の変化を雨水浸透解析から求める⁴⁾。

③ ①と②の解析結果を図-8 のように重ね合わせ、各時間ごとに降雨による浸透水が堤体内の自由水面に影響を及ぼす範囲 x_r を決める。

④ ③で求めた x_r の範囲で各飽和度に応じて雨水による浸透水が自由水面に流入する速度を各時間ごとに求める。流入速度は各点の動水勾配に不飽和土の透水係数を乗じたものに等しいとする。

⑤ 外水位の変動による川表からの浸透水に、更に④で求めた降雨による浸透水が加わるとして①と同じ方法で堤体内の非定常浸透流を解く。

上記の解析方法の実際への適用性を検討するために、降雨と外水位の上昇を同時に与えた浸透実験の結果と比較したものを、次に述べる。

解析条件は浸透実験と同じ断面にし、解析に必要な土質定数は土質試験から求めた。まず、雨水浸透解析に必要な飽和度と毛管水頭の関係は図-9 に示す値のものを用いた。

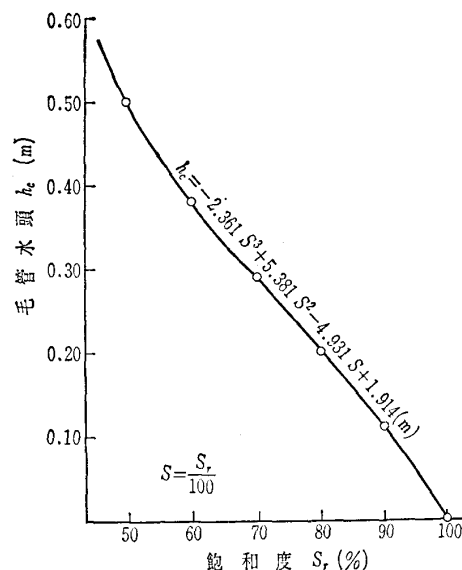


図-9 飽和度と毛管水頭との関係

また、堤体内の初期飽和度は50%、間隙率 n は0.57とした。更に、有限要素法による非定常浸透流解析では堤体、透水性地盤、難透水性地盤の透水係数として、それぞれ土質試験から求めた 2×10^{-3} 、 5×10^{-3} 、 1×10^{-6} cm/s の値を用いた。堤体内の飽和度は降雨の浸透により変化するため、堤体内の有効間隙率も異なったものになる。そこで、雨水浸透解析から時間ごとに求めた堤体内の飽和度に応じて有効間隙率も0.26~0.07の範囲で変化させて解析を行った。

解析結果を図-10に示す。図中の破線は実測値で、実線が計算値である。実測値と計算値とを比較すると、経過時間18時間までは両者が比較よく合致する傾向を示している。経過時間が長くなると、計算値の方が実測値よりもやや高い浸潤面となっている。これは、実験において裏のりの浸潤面の上昇によって進行性破壊が生じ、断面形状が変化したことなどが原因ではないかと考えられる。したがって、全体的にみると、解析結果は実測値と比較してほぼ満足できる結果が得られたと判断してもよさそうである。

以上のことから、ここに示した有限要素法による非定常浸透流解析は、降雨と外水位の変動が同時に作用した場合の堤体内の非定常浸透流を求める解析手法に適用してもよいと考えられる。したがって、現地での詳細な土質調査並びに土質試験の結果から堤防及び地盤の土質定数を決定し、これを用いて上記の浸透解析を行えば、洪水時の堤体内の

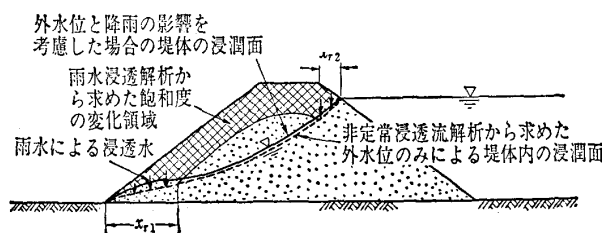


図-8 重ね合わせによる堤体内の非定常浸透流解析

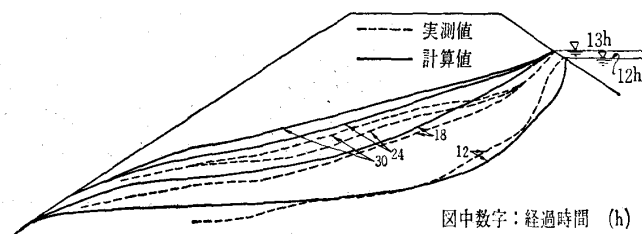


図-10 有限要素法による数値解析結果と実測値との比較

非定常浸透流を計算により求めることも可能である。更に、その解析結果を用いて有効応力法による円弧すべり計算から洪水時の堤防のり面の安全率を求めることもでき、各種の浸透条件、すなわち降雨特性及び洪水波形、洪水継続時間などが堤体の安定性に及ぼす影響を具体的に評価することもできると考えられる。

5. 対策工の効果・判定を目的とした実験

対策工の効果・判定のための実験として、河川堤防の漏水地盤の対策工を検討した例を紹介する。

河川堤防における漏水地盤は、一般に河川沿岸の中・下流部の沖積平野に多く存在し、透水層は粒径が大きく、しかも均等係数の小さい比較的単一粒径の砂又は礫からなっており、厚さは10m程度のものが多い⁵⁾。このような地盤の漏水を防止する工法には各種のものがあるが、一つの試みとしてベントナイト液を用いたスラリートレンチ工法によって漏水地盤に溝を掘り、掘削した土にベントナイト液とセメントを加えた混合土で埋戻しを行い、ソイルセメント止水壁を築造する工法を考えた。この工法の施工性と止水効果を確認するために、図-11に示した盛土実験槽内に中粒砂を投入して作った深さ3.2mの人工砂地盤に幅0.5m、長さ21m、深さ3.2mのソイルセメント止水壁をスラリートレンチ工法によって築造し、施工後に浸透実験を実施した⁶⁾。なお、埋戻し材料として、セメントと砂の混合率を1:9にしたものに濃度10%のベントナイトスラリーを加えてかくはん、混合したものを用いた。

図-11は止水壁を築造して4週間後に、35日間にわたって湛水実験を行い、その結果を砂地盤の中央断面における浸潤線の変化で示したものである。図から、ソイルセメント止水壁の前後で大きな水頭差が認められ、ソイルセメント壁が止水の役目を十分果たしていることが分かる。

実験の結果、砂地盤での掘削も容易であり、比較的均一な止水壁を築造することができ、しかも止水効果もあることが認められたので、スラリートレンチ工法による地盤漏水防止工法は対策工として十分期待できる工法であるといえる。また、埋戻し材料の混合比並びに止水壁の厚さを変えることによって、現地の条件に応じた止水効果を期待することもできると考えられる。

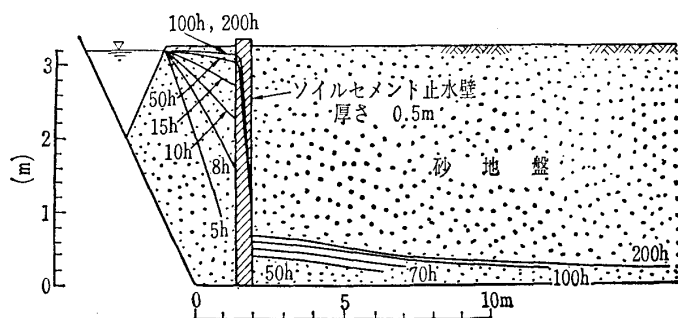


図-11 ソイルセメント壁の止水効果に関する実験結果

なお、今後洪水時においても安定性の高い堤防にするための具体的な堤防補強工法を提案し、その効果についても検討していきたいと考えている。

6. ま と め

土で作られた構造物は平常の、いわゆる乾いた状態では安定性は高いが、豪雨や洪水などによる浸透水によって強度が低下し、のり面崩壊を起こすことは過去においてしばしば経験されている。したがって、豪雨や洪水のような酷な条件における土構造物内の浸透現象について十分な解明を加え、安定性の高い構造物にしていくことが大切であり、そのために種々の大型模型による浸透実験をこれまでに実施してきている。

本報告では、まず大型模型による浸透実験の意義について説明を加え、続いて浸透現象を把握するための実験例として不連続面をもつり面の雨水浸透実験の結果を示した。また、降雨と水位上昇とを同時に作用させた時の堤体内の非定常浸透流について、大型模型実験の結果を示すとともに、解析結果とも比較し浸透流解析の適合性についても検討を加えた。更に、スラリートレンチ工法による地盤漏水対策工の止水効果を大型模型実験によって検討した例を示した。

浸透問題に関して、最近電子計算機の普及に伴い有限要素法などによる浸透解析が多く用いられるようになってきているが、外力や境界条件、及び土質定数の与え方などによっては解析結果が実際の浸透現象とかなり違ったものになることがある。したがって、浸透解析を用いる場合には、前もって実験結果などと比較し、その適合性について検討しておくことが大切である。また土構造物の中には通常、不規則性や不均一性が存在するために、実際の浸透現象は更に複雑な挙動を示すことが考えられる。このため、現地もののり面などに諸計器を埋設して実際の浸透現象を把握する観測調査を合わせて進めていく必要があると思われる。

最後に、大型模型実験を実施するにあたってご協力いただいた土木研究所土質研究室の諸氏並びに関係の方々に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Leverett, M.C.: Capillary Behavior in Porous Solids, Trans. AIME, Vol. 142, pp. 152~163, 1941
- 2) 久楽・斉藤・石塚：不連続面をもつり面の安定性に関する実験，第13回日本道路会議一般論文集，1979. 10
- 3) 久楽・斉藤・石塚：洪水時における河川堤防内の非定常浸透流解析，土木技術資料，Vol. 22, No. 1, 1980. 1
- 4) 山村・久楽：堤防への浸透と堤体の安定性，土木研究所報告，第145号，1974. 2
- 5) 山村・久楽：堤防の地盤漏水に関する研究，土木研究所報告，第145号，1974. 2
- 6) 久楽・中村・加藤：スラリートレンチ工法による地盤漏水防止に関する実験，土木技術資料，Vol. 16, No. 12, 1974. 12
(原稿受理 1980. 2. 6)