

降雨による斜面内浸透流の浸透性状

愛知工業大学大学院 (学) ○定岡 直樹
愛知工業大学工学部 (正) 奥村 哲夫・木村 勝行・成田 国朝

1. はじめに

降雨浸透問題を1 G場の模型実験によって調べようとする場合、毛管上昇の影響を小さくするためにガラス球や潤滑油を用いることになるが、遠心場においては毛管上昇高や自重応力の相似性を満たすことができるため、実斜面の材料を使用した縮尺模型実験が可能となる。本研究では、遠心載荷装置を用いた降雨浸透実験を行い、降雨時の斜面内浸透流の浸透性状を把握するとともに、実験模型に対するFEM解析を行って、この種の遠心実験の再現性について検討を加えた。なお、本研究は文部省科学研究費補助金の援助を受けた研究である。

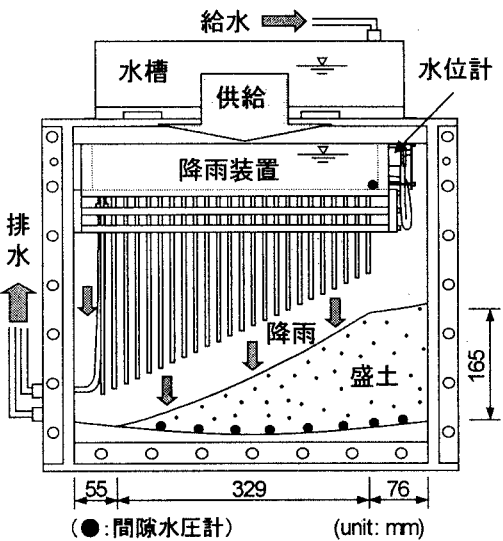
2. 実験概要

実験装置の概略を図－1に示す。実験は締固めて作製した盛土（高さ16.5cm、勾配1:2）の底面に対して30Gの遠心加速度を与えた後、降雨装置への給水を開始して斜面上に雨を降らせ、盛土内の飽和域の成長過程を底部に設置した間隙水压計（8個）の値から決定する方法で行った。実験は r/k （ r ：降雨強度、 k ：飽和透水係数）が $r/k < 1.0$ の条件で2ケース行った。各ケースの r/k 値、堤体の物性値を表－1に示す。降雨装置については降雨実験より均等な降雨が得られることが確認されている¹⁾。

3. 実験結果と考察

図－2は間隙水压計による計測値から推定した浸潤面の経時変化を示したものである。図より、両ケースともに斜面表面から浸入した雨水により、斜面内の飽和域が徐々に高さを増しながら斜面内部へ進行し、 r/k 値の大きいCASE2の方がより高く、速く飽和域が成長しているのが分かる。なお、図には示していないが、飽和域の成長過程は両ケースともに $r/k < 1.0$ の条件で行ったガラス球と潤滑油を用いた1 G場の浸透実験結果と一致している²⁾。

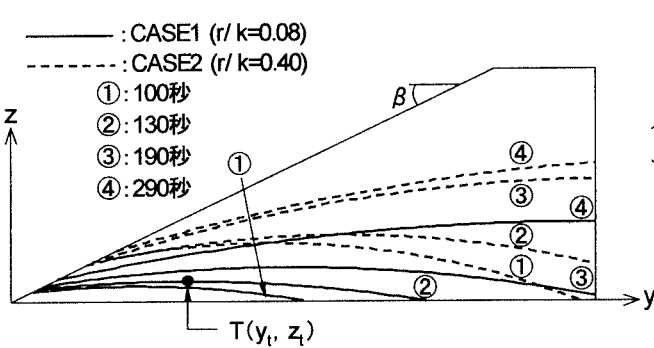
図－3は浸潤面の最高点 $T(y_t, z_t)$ の経時変化を示したもので、次式による計算値と比較している。 $y_t = r t / \{ (\theta_s - \theta_i) \tan \beta \}$ 、 $z_t = r t / (\theta_s - \theta_i)$ 。図より、 y_t 、 z_t は両ケースとも時間の経過に伴って比例的に増大するが、 r/k 値の小さいCASE1の z_t は実験値と計算値には大きな差が見られる。これは



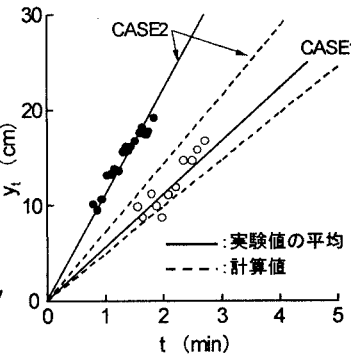
図－1 実験装置の概略

表－1 実験条件

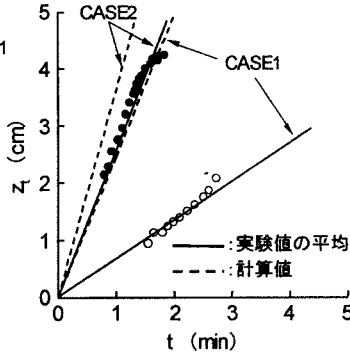
	CASE 1 ¹⁾	CASE 2
降雨強度 r (mm/h)	8.37	15.78
飽和透水係数 k (cm/s)	2.9×10^{-3}	1.1×10^{-3}
r/k	0.08	0.40
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.60	2.62
初期含水比 w (%)	8.0	7.1
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.80	1.73
初期体積含水率 θ_i	0.14	0.12
飽和体積含水率 θ_s	0.31	0.34



図－2 r/k 値による浸潤面の比較



図－3(a) y_t の経時変化



図－3(b) z_t の経時変化

計算値が、斜面表面からの水の排出がないと仮定して得られたためと考えられる。また (a) 図では実験値が計算値より大きく、(b) 図では小さくなっているが、これはコリオリ力の影響が関係していると推察される。

4. FEM 解析結果と考察

有限要素法による定式化には Galerkin 法による重み付き残差法を採用し、時間項には中央差分法を適用して計算時間刻みごとに解（圧力水頭）が許容収束条件を満たすまで反復計算した。解析堤体（遠心模型の実物堤体：盛土高 4.95m）は鉛直方向を 33 分割、水平方向を 40 分割し、三角形要素で構成した。これにより解析領域は 833 節点、1551 要素となる。堤体材料の不飽和透水特性は得られていないので図-4 のような関係を仮定した。なお、計算時間刻み $\Delta t = 18000$ 秒、圧力水頭値の許容収束誤差 $\Delta E = 0.01\text{m}$ とした。

図-5 は CASE1 についての実験結果と FEM 解析結果の浸潤面を比較したものである。実験値の実物への換算は、時間を 30^2 倍、浸潤面高さを 30 倍した。図より、 $t = 40\text{h}$ までの両浸潤面はよく一致しているといえる。通常の 1 降雨の継続時間は 40 時間程度まで考えれば十分であるので、この一致は遠心模型実験および FEM 浸透解析の信頼性と遠心実験の実物に対する再現が可能であることを意味する。60 h および 100 h の浸潤面は斜面先付近では FEM 解析の方が高く、内部に向かうにしたがって実験の方が高くなる傾向にある。これは斜面表面からの浸入水のコリオリ力による偏向が時間とともに大きくなっていくためと推察される。

図-5 の計算は、 $\Delta t / \Delta E = 18000\text{s} / 0.01\text{m} = 1.8 \times 10^6 \text{ s/m}$ とした場合であるが、ここで対象としたような、飽和域拡大のための補給水分の大部分が不飽和域から供給される非定常一飽和・不飽和浸透問題に対する FEM 解析においては、 $\Delta t / \Delta E$ 値を、それぞれの問題に応じたある $\Delta t / \Delta E$ の値より大きい値に設定した場合には正解が得られ、小さい値に設定した場合には正解より小さな解が得られることが指摘されている³⁾。参考として $\Delta t / \Delta E = 1800\text{s} / 0.01\text{m} = 1.8 \times 10^5 \text{ s/m}$ と $\Delta t / \Delta E = 180\text{s} / 0.01\text{m} = 1.8 \times 10^4 \text{ s/m}$ とした場合の浸潤面の比較を図-6 に示した。図より、 $\Delta t / \Delta E = 1.8 \times 10^4 \text{ s/m}$ とした浸潤面の進行の遅れは明らかであり、先の指摘が確かめられる。以上から、この種の浸透問題の FEM 解析結果には Δt および ΔE の記述は必須といえる。

5. まとめ

遠心実験と同条件の下で FEM 解析を行った結果、実験結果と解析結果は良く一致した。これにより両結果の信頼性および遠心模型実験の実物への再現性が確認できた。降雨による斜面内浸透流の浸透性状については、今後 r/k 値をさらに変化させた実験を行い、より明確にする予定である。

<参考文献> 1) 定岡・奥村・木村・成田：降雨による斜面内浸透流に関する遠心模型実験，平成 10 年度土木学会中部支部研究発表会，pp301-302，1999。2) 木村勝行・大根義男：降雨による斜面内浸透流の模型実験，第 23 回土質工学研究発表会発表講演集，pp.1835-1836，1988。3) 口石孝幸・木村勝行：非定常一飽和・不飽和浸透流に対する有限要素の解，愛知工業大学「研究報告」，No.32，pp.103-110，1997。

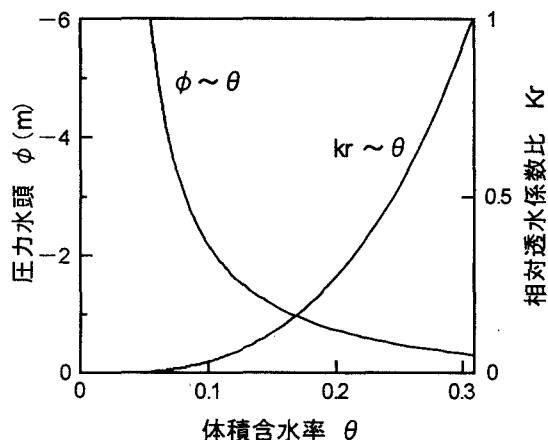


図-4 CASE1の不飽和透水特性(仮定)

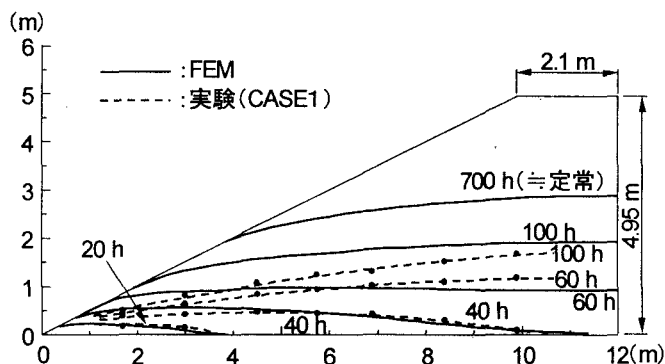


図-5 実験とFEM解析の浸潤面比較

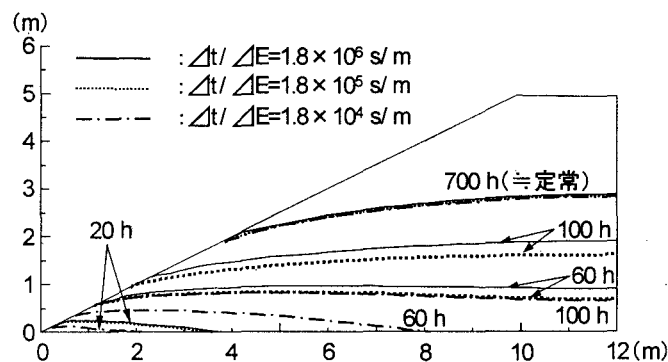


図-6 $\Delta t / \Delta E$ による解の差