

非定常一飽和・不飽和浸透流のFEM解析結果と併記事項

愛知工業大学 学生員 ○口石 孝幸

愛知工業大学 正 員 木村 勝行

1. まえがき

非定常一飽和・不飽和浸透流を有限要素法(FEM)によって解析を行うと、計算時間ステップ(時間きざみ)ごとに解が収束する安定な場合でも、時間きざみ、メッシュサイズ(空間きざみ)および許容誤差の組み合わせによって、得られた解に差がでることがある。どのような条件を満たすときに正解が得られるかについては、まだ明らかとなっていない。筆者ら^{1)・2)}は、数値計算結果が正解であることが確かめられている浸透流を例に、FEMによる非定常一飽和・不飽和浸透流解析結果の1整理法を示した。

ここでは、降雨によって斜面内に生じる浸透流を取り上げ、実験によって得られた浸潤面とFEM解析による浸潤面とを対比して、この種の浸透問題のFEM解析にみられる解の差と時間きざみ、メッシュサイズおよび許容誤差との関係を調べ、FEM解析結果に記載すべき計算条件について言及する。

2. 実験

実験斜面の概略を図-1に示した。実験斜面は斜面勾配 1:2、底面長 100cm、斜面高 50cm、幅 10cm でガラスビーズで作成した。降雨には潤滑油を使用した。ガラスビーズと潤滑油の組み合わせにより、飽和透水係数 $k_s=0.0178\text{cm/s}$ 、飽和体積含水率 $\theta_s=0.347$ 、初期体積含水率 $\theta_i=0.031$ に相当する斜面となる。降雨強度に相当する潤滑油の供給強度は $R=0.00177\text{cm/s}$ である。図中、斜面内に示した浸潤面は降雨開始 35分後($t=35\text{min}$)の浸潤面形状である。 $x=30\text{cm}$ の位置における浸潤面高を H_p とすると、 $H_p \approx 7.0\text{cm}$ であった。この値は、後にFEM解析によるものと比較される。なお、実験装置および実験方法の詳細は参考文献3)を参照されたい。

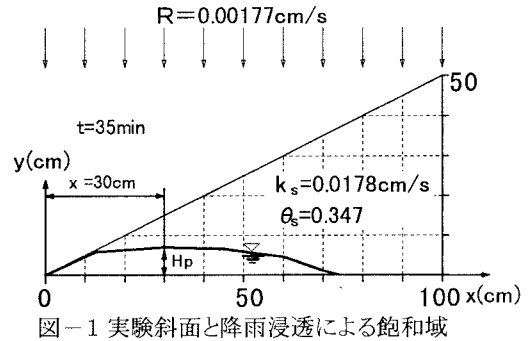


図-1 実験斜面と降雨浸透による飽和域

3. FEM解析

FEM解析モデルは上記の実験斜面である。領域内は全て等分割し、三角形要素で組み立てた。等分割数、要素の大きさを表す Δx と Δy を表-1に示した。FEM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、各時間区間に対して許容誤差以下になるまで反復計算した。計算時間きざみ Δt (s) は 7 通り、許容誤差 ΔE (cm) は 12 通りとし、これらも表-1に示してある。解析は表-1の3種の分割法それぞれに対し、 Δt と ΔE を種々組み合わせで行った。解析に用いた不飽和透水特性、すなわち飽和度 θ/θ_s と圧力水頭 h の関係および θ/θ_s と相対透水係数比 k/k_s の関係を図-2に示した。これらの関係は Case. 2 の要素分割に対して、不飽和透水特性を仮定してFEM解析を行い、計算浸潤面が実験浸潤面と合致するように不飽和透水特性に修正を加えていき、決めたものである。

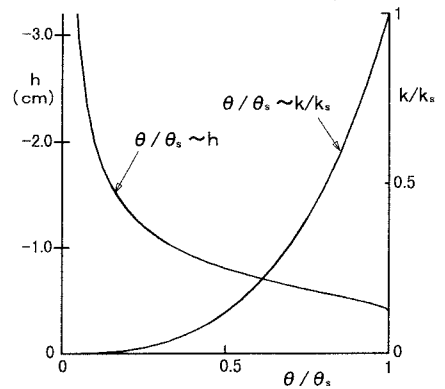


図-2 不飽和透水特性(仮定)

表-1 要素サイズ、計算時間きざみおよび許容誤差

分割 case	x,y方向の 等分割数	Δx (cm)	Δy (cm)	Δt (s)	ΔE (cm)
1	40	2.5	1.25	120 5	0.5 0.02 0.0005
2	20	5.0	2.5	60 3	0.2 0.01 0.0002
3	10	10.0	5.0	30 1	0.1 0.005 0.0001
				10	0.05 0.002

4. FEM解析結果および検討

図-1に示した実験結果との比較検討のため、FEM解析結果についても降雨開始35分後の $x=30\text{cm}$ の位置における浸潤面高を H_p とし、 H_p についての整理を進める。

図-3(a), (b), (c)は表-1の3種類の大きさの要素分割に対するFEM解析結果を $H_p \sim \Delta t / \Delta E$ 関係によって整理したものである。(a), (b), (c)いずれの図においても、 $\Delta t / \Delta E (\text{s/cm})$ の値が50~50,000と大きくなるのに対応して $H_p (\text{cm})$ の値が約1~3.5cmから6.5~9cmまで変化しており、解に差がでているのが明らかである。

図中に書き入れた実験の $H_p (\approx 7.0\text{cm})$ の値との比較から、FEM解析による正解は、 H_p の値が約7.0cmに収束する、 $\Delta t / \Delta E$ の値の大きい計算条件下で得られるといえる。同様の結果は、筆者ら^{1), 2)}が別の非定常・飽和・不飽和浸透問題に対して行ったFEM解析によっても得られている。これらのことから、図-3(a), (b), (c)に見られるような $H_p \sim \Delta t / \Delta E$ 関係は、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この種の非定常・飽和・不飽和浸透問題に対するFEM解析解の特性の一つといえよう。

ところで、図-3(a), (b), (c)のFEM解析による H_p の収束値と実験の H_p 値とを比較すると、(c)の両値の隔たりが(a), (b)のものより大きめである。この相違を浸潤面形状全体で見ると図-4

のようである。図中の浸潤面は、(a), (b), (c)の3種の分割要素の大きさそれぞれに対し、すべて $\Delta t = 10\text{s}$ 、 $\Delta E = 0.001\text{cm}$ の条件下のFEM解析結果である。図から認められるように、 $\Delta x = 10\text{cm}$ とした分割要素の場合の浸潤面形状は実験のそれと一致しているとはいえない。

5. おわりに

非定常・飽和・不飽和浸透問題のFEM解析に対するこれまでの検討から、解析結果を示す場合には、計算条件としての分割要素の大きさ、計算時間きざみおよび許容誤差の併記が必要と思われる。正解を得る要素サイズ、計算時間きざみ、許容誤差等の決め方は今後の課題である。

【参考文献】

1) 木村勝行、口石孝幸(1996): FEMによる非定常・飽和・不飽和浸透流の計算条件、平成7年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集、pp. 423-424。

2) 木村勝行(1996): 第31回地盤工学研究発表会発表講演集、pp. 2111-2112。

3) 木村勝行、山本浩昭(1995): 降雨による斜面内浸透流の実験、平成6年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集、pp. 393-394。

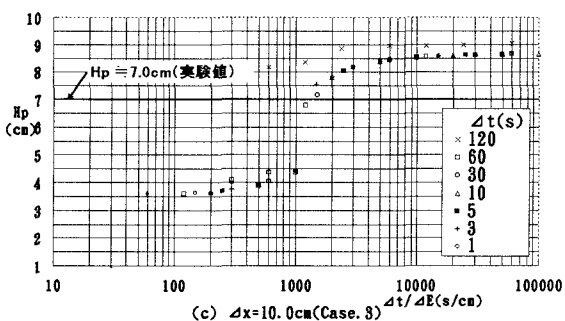
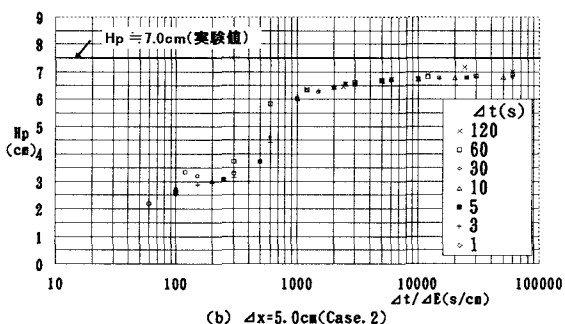
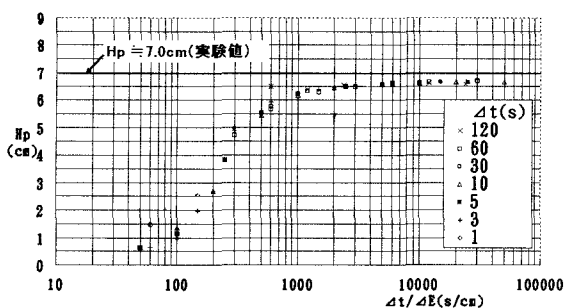


図-3 $H_p \sim \Delta t / \Delta E$ ($t = 35\text{min}$, $x = 30\text{cm}$)

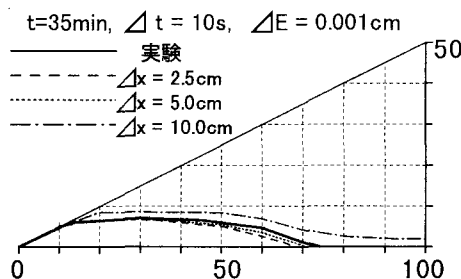


図-4 要素サイズと浸潤面形状