

1. はじめに

有害となる短期間の多量の土砂流出を防ぎ、無害な土砂を下流へ流すことを目的として、スリット型砂防えん堤が建設されている。スリット型砂防えん堤は自然環境、流出土砂の管理の点から多大な効果が期待される。

今まで、土石流の氾濫シミュレーションは FDM (差分法) による計算が多く行われてきた。一方で、FEM (有限要素法) による解析事例は極めて少ないと思われる。著者らは、任意形状を表現できる FEM は、砂防えん堤を考慮した解析評価に適していると考えた。今回の報告は、(財) 砂防地すべり技術センターによって開発された FDM による土石流・泥流の 2 次元氾濫解析モデル J-SAS と、風上化 (SUPG 法) を施した独自開発の FEM を用いて、計算結果の比較検討を行った。FDM、FEM とともに時間方向は差分近似を用い、陽解法である。そして、FEM の採用が有効である計算事例を紹介する。

2. 現地スケールの計算例

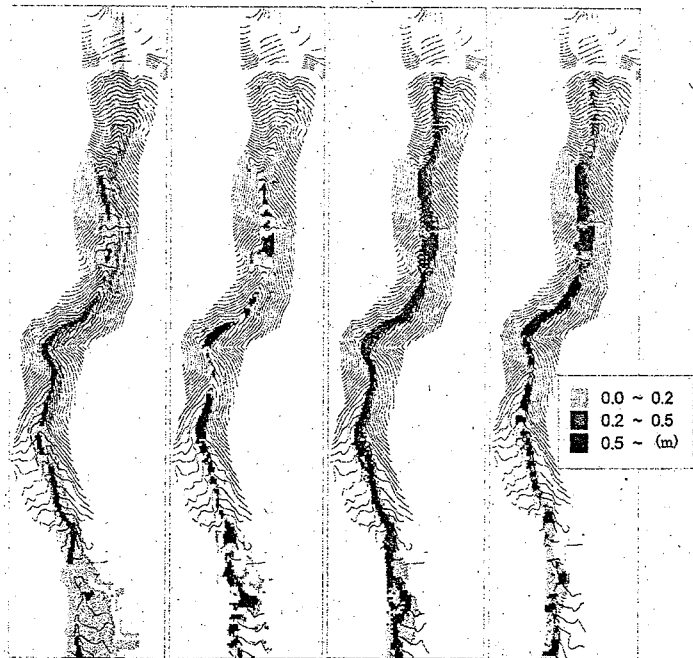
FDM と FEM において、表 1 に示すパラメータを用い、同条件で計算を行った。領域は、河床を固定床とし、実務でよく用いられる等間隔格子を用いた。

計算開始 400s 後の結果を図 1 の (a) ~ (d) に示す。FEM の計算解は FDM の計算解に比べ、氾濫域が大きく、土砂を下流側まで流下、堆積させる結果となった。

メッシュの分割幅を 5m と 1m で計算した場合、FDM は氾濫域に大きな変化は現れなかったが、FEM はメッシュが粗いと氾濫域が全体的に広がった。CPU タイムは CPU3.6GHz、メモリ 2GB を用いて計算し、FDM が約 3 分、FEM が約 30 分となった。理由として、FEM は離散化時の近似式が非構造格子の計算式であること、また、三角形要素のために、FDM のセル数に比べ、要素数が 2 倍近くになることが挙げられる。

表 1 計算パラメータ

流体密度 ρ	1.00g/cm ³	投入土砂濃度	0.3
堆積濃度 C_*	0.6	FEM Δt	0.02s
内部摩擦角 ϕ	34°	FDM Δt	0.05s
反発係数 e	0.85	計算領域	X-140m Y-550m
平均粒径 d	1cm	分割幅 Δx	2m



(a) FEM-水深 (b) FEM-堆積高 (c) FDM-水深 (d) FDM-堆積高

図 1 FEM と FDM による計算解

3. 堰上げ実験値と計算解の比較

FEM の長所である、任意形状の適合性を生かした解析事例を紹介する。長谷川らが行った堰上げ実験を対象とし再現計算を行った。

実験は水路長 10m、幅 30cm の水路を用い、X=8.5m の位置に径 2.5cm の円柱 10 本を設置し堰上げさせる。計算条件は、参照論文を参考に実験① (円柱設置位置の勾配が水路勾配)、実験

実験① 勾配4° 堰上げ高の比較

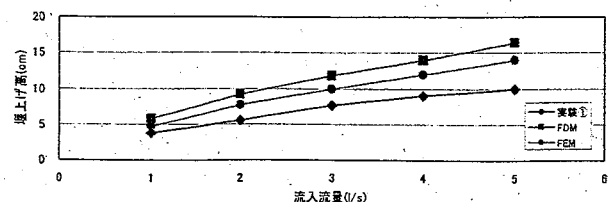


図 2 実験値と計算解の比較

② (円柱設置位置の勾配が水平勾配)、また、それぞれにおいて水路勾配を 4° と 10° 、流入量 10 l/s ~ 50 l/s で計算を行った。

図 2 に堰上げ高のプロット図を示す。実験値と計算解は、流入量を増すほど堰上げ高が高くなるという定性的な一致を示した。全てのパターンで実験値 \rightarrow FEM \rightarrow FDM の順で堰上げ高が大きくなり、計算値は実験値を過大評価する結果となった。

図 4 より、FEM の結果は、射流と常流の境がはっきりする流れとなった。FDM の計算値は上流側でも常流であるため、同様の形状が算出されない。理由として、FDM は FEM より強い粘性、または抵抗が付加されているためと考えられる。堰上げ高が高くなる理由は、同じく粘性に起因する部分と円柱形状の表現による理由が考えられる。実験①勾配 4° の流入量 10 l/s の定常時水面形状を図 3 に示す。FDM は円柱表面を矩形で表現するのに対して、FEM はスムーズな形状が表現されている。

CPU タイムは、FDM の総セル数 43706 に対し、FEM はメッシュに粗密をつけたことにより総節点数 1549、総要素数 2540 となり、FEM が FDM の約 10 倍の速さという大幅な計算時間の短縮が図れた。計算結果より、詳細な形状の表現が望まれる計算領域では FEM が FDM に比べて、有利な手法であることが分かる。

4. 終わりに

本報告では FDM と FEM の計算結果を比較し、FEM が有効である計算例を示した。以上の解析例より、FEM の一番のメリットは、複雑地形を考慮した計算において、計算時間の短縮が図れる点である。広域の氾濫解析においては、構造格子に特化した FDM の方が FEM に比べて計算速度が早く、メッシュ作成も容易である。FDM と FEM のそれぞれの特徴を表 2 にまとめた。長所短所を理解したうえで 2 つの手法を使い分けることで、複雑な地形形状や大規模な問題に対する土石流シミュレーションの適用性が高まると言える。

表 2 FDM と FEM プログラムの特徴

	FDM (J-SAS)		FEM (独自開発ソフト)	
流速(現地スケール計算)	最大 5m/s		最大 10m/s	
計算時間	現地スケール 約 3 分 セル: 18688 $\Delta t: 0.05 \text{ s}$	堰上げ実験 約 30 時間 セル: 43706 $\Delta t: 0.0001 \text{ s}$	現地スケール 約 30 分 節点: 18838 $\Delta t: 0.02 \text{ s}$	堰上げ実験 約 3 時間 節点: 1549 $\Delta t: 0.0001 \text{ s}$
任意形状への適合性	△		○	
メッシュ解像度の影響	小		大 (現状ある程度の細かさが必要)	
メッシュ作成	簡易		多少の手間と時間を要する	
流入方法	領域内セル境界から投入		境界に流入用水路を加える	
主な特徴	同一グリッドでは FEM に比べて CPU タイムが短い。		任意形状の適合性が高い。局所的に密なメッシュを使用することで CPU タイムの削減が図れる。	

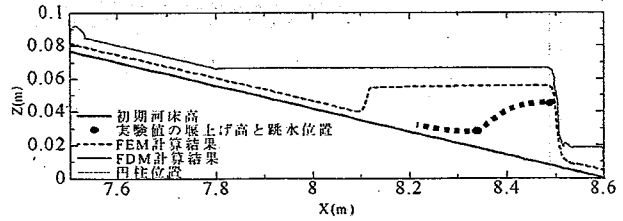


図 3 円柱周りの水面形状 左: FEM 右: FDM

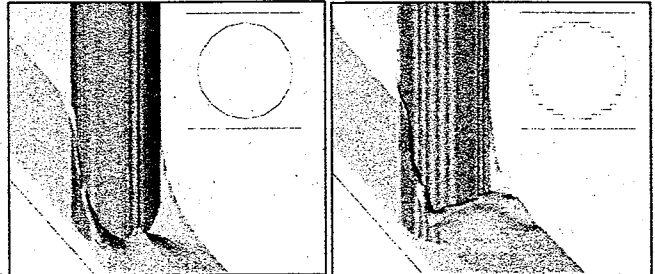


図 4 定常状態における断面図