

ろ過型沈砂池における砂層中の赤土濁水流解析

琉球大学 学 ○江戸孝昭
琉球大学 正 原 久夫

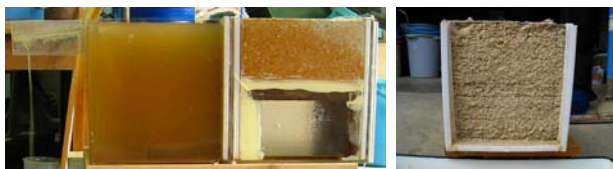
1. まえがき

我が国唯一の亜熱帯性気候に属する沖縄県には、国頭マージなどの多くの特殊土が分布している¹⁾。しかし、1972年ごろから盛んに行われてきた地盤改良や都市開発等により、これらの土壌が侵食され、多くの赤土が河川を通じて周辺海域に流出し、自然環境や水産業、観光産業へ悪影響を及ぼしている。このような状況下において、1995年に「沖縄県赤土等流出防止条例」が施行され、赤土の流出防止対策が行われてきたが、赤土被害は未だに生じており²⁾、今以上に防止対策を向上させる必要がある。

本研究では、様々な赤土流出防止対策の中でも、施工性・経済性に優れているろ過型沈砂池に着目した。そこで、ろ過型沈砂池の機能向上に寄与するために、赤土濁水流の数値シミュレーション手法の確立を目的とし、ろ過型沈砂池の室内ろ過実験と本解析値とを比較検証する。具体的には、ろ過型沈砂池の室内ろ過実験を行い、そこで得られた流出時間と流出流量（本研究では以下、累積流量と表記する）の実験値と解析値とを比較し、本研究で提案する赤土濁水流解析法の妥当性を検証する。

2. 室内ろ過実験

本研究において、ろ過層を構成する砂は、ろ過型沈砂池で一般的に使用されているチービス砂とし、濁水を作る赤土は沖縄県うるま市から採取した石川土とした。本実験においては、写真-1(a)に示すように、濁水槽の水位を一定に保ちながら所定の時間ごとに排水開始時からの累積流量、ろ過水濁度を測定記録することにした。写真-1に示されているように、チービス砂で赤土がろ過されている様子を肉眼視できる（詳細は参考文献³⁾を参照）。



(a) 装置側面 (b) チービス砂断面
写真-1 室内ろ過実験の様子

3. 赤土濁水流解析の支配方程式と解析アルゴリズム

濁水流の支配方程式は次式にて表わすことができる。

$$\nabla v = \nabla(ki) = \nabla^2(kh) = \nabla^2\phi = 0 \quad (1)$$

ここで、流速: v (mm/s)、透水係数: k (mm/s)、水頭: h (mm)、動水勾配: i 、速度ポテンシャル: ϕ (mm²/s) である。

つぎに、有限要素法⁴⁾で離散化するために、式(1)を弱形式化すると、式(2)となる。

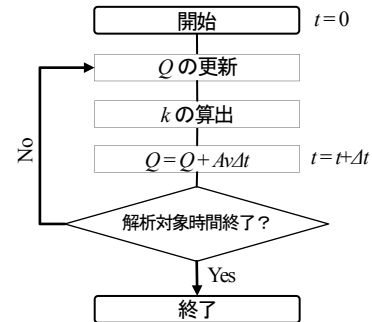


図-1 解析のアルゴリズム

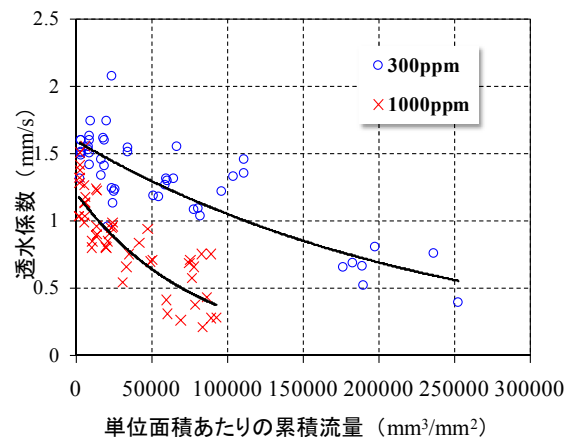


図-2 累積流量と透水係数の関係(Dr = 15%)

$$\int_V (\nabla \phi) \cdot (\nabla \delta \phi) dV = \int_{S_2} \frac{\partial \phi}{\partial n} \delta \phi dS \quad (2)$$

ここで、

$$\forall \delta \phi \in \{\delta \phi \mid \delta \phi = 0 \text{ (on } S_1)\} \quad (3)$$

であり、 S_1 はDirichlet境界、 S_2 はNeumann境界である。式(2)を形状関数 N を用いて離散化すると式(4)となる。

$$\int_V \frac{\partial N^m}{\partial x_i} \frac{\partial N^n}{\partial x_i} \phi^n \delta \phi^m dV = \int_{S_2} \frac{\partial \phi}{\partial n} N^m \delta \phi^m dS \quad (4)$$

ただし、

$$\phi = N^n \phi^n, \delta \phi = N^m \delta \phi^m. \quad (5)$$

本解析のフローチャートを図-1に示す。本研究で取り扱うろ過型沈砂池の解析においては、式(4)を支配方程式とするが、同図に示すように、濁水の累積流量とともに砂層中の透水係数が変化する。したがって、これらの影響を考慮できる解析法が必要となる。そこで、本研究では野瀬⁵⁾によって行われた、濁水の定水位透水試験により得られた実

験結果 ($k-Q$ の関係) を参照し、累積流量と流出時間、透水係数と流出時間の関係をそれぞれ導いた。具体的には、図-2 に示すように、本実験における濁水濃度 (SS) は、300ppm と 1000ppm の両方にて検討されており、本研究においてもこれら 2 つのパターンについて、それぞれ、式(6) および式(7)のように回帰モデル化した。

$$k = 1.2 \exp((-4.0 \times 10^{-6})Q) \quad (6)$$

$$k = 1.6 \exp((-10.0 \times 10^{-6})Q) \quad (7)$$

ここで、単位面積あたりの累積流量： Q (mm^3/mm^2)、透水係数： k (mm/s) である。

4. 数値解析例および考察

図-3 は、室内ろ過実験³⁾ ($\Delta h=100 \text{ mm}$) の境界条件および砂ろ過層をモデル化したものを表わしている。有限要素解析においては、要素を四面体一次要素に仮定し、要素数は 160,921、節点数は 29,385、要素幅は 約 5.12mm とした。なお、図-3(a)に示すように、濁水の流出側の浸出点の位置については、Casagrande, L⁶⁾ が実験的に算出した浸潤面の決定方法を元に定めた。

図-4 は室内ろ過実験の実験値と解析値との比較を示している。同図より、本手法によって得られた結果は、砂ろ過層中の排水時間と累積流量の関係を比較的良好に再現できている。しかしながら、これらの値は、砂の相対密度によって大きく異なり、それに伴って解析値と実験値との乖離がみられた。これは砂の相対密度と透水係数とが深く関係していると思われ、本研究で仮定した透水係数と累積流量の関係式に対しても相対密度の影響を何らかの形で取り入れる必要があると考えられた。

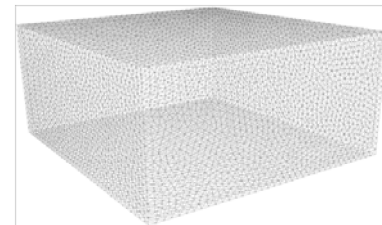
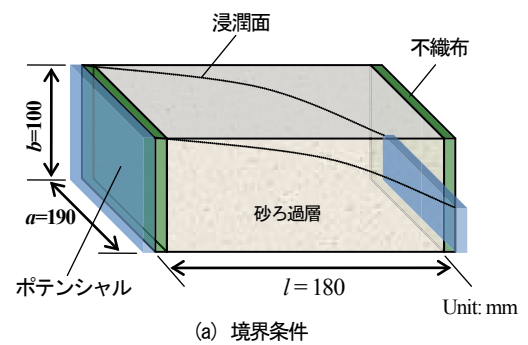
5. まとめ

本研究では、ろ過型沈砂池における砂層中の濁水流を対象として、濁水流解析を行い、その結果と実験値を比較検討した。濁水流解析は、赤土濁水の透過による目詰まりを考慮したものである。その結果、砂層中の排水時間と累積流量の関係を比較的良好に再現した解析結果となった。しかしながら、砂層中の砂の相対密度が大きくなると解析値の誤差が大きくなることがわかった。これは、それぞれの相対密度に対して初期透水係数が異なることが原因だと思われる。また、本研究では、濁水の流出側の浸出点の位置は、常に一定とし解析を行ったが、現実的には砂層中に目詰まりが生じてくると、浸出点が徐々に上部へ移動していくことから、この浸出点の移動現象を考慮することが必要であると考えられる。

今後の展開

本研究の今後の展開について以下に列記する。

- ・ 初期透水係数と相対密度の関係を明らかにし、赤土濁水流解析へ導入する
- ・ 濁水の流出側の浸出点の位置決定に関して、浸出点の移動現象が考慮可能な解析手法を開発し、より精度の高い赤土濁水流解析を実現する



(b) 砂ろ過層の有限要素モデル
(四面体一次要素)

図-3 解析モデル

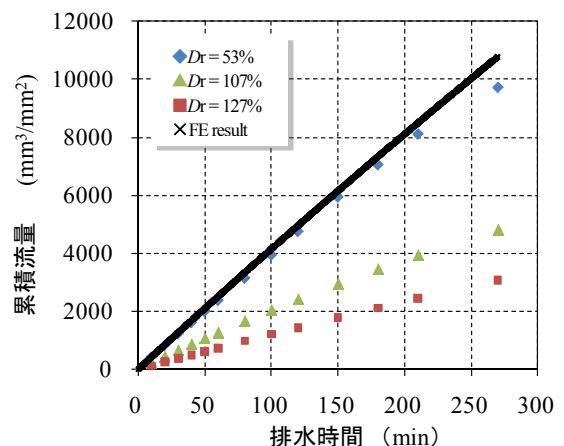


図-4 解析モデルによる解析値と実験値の比較

- ・ 濁水流解析手法を利用し、濁水流制御板等を設けた条件下で解析する
- ・ ろ過層の断面をより有効に活用でき、ろ過機能を向上できる方法に関して、実験的考察ばかりでなく数値解析的な視点からも検討する

参考文献

- 1) 土質工学会九州支部編：九州・沖縄の特殊土，221-225，1983
- 2) 金城孝一，上原睦男：海域における赤土汚染モニタリング，平成 17 年度赤土等流出防止交流集会事例集，1-9，2005
- 3) 原久夫，江戸孝昭：赤土濁水のろ過に関する研究：土木学会西部支部 2010.3 (投稿中)
- 4) Zienkiewicz, O.C. ・ Taylor, R.L. (共著，矢川・大坪・三好監訳)：マトリックス有限要素法 I, II，科学技術出版，1969
- 5) 野瀬晴生：赤土濁水をろ過する砂ろ過層の機能低下に関する実験・研究 (平成 18 年度，琉球大学卒業研究)，2006
- 6) 山口柏樹：土質力学(講義と演習)，技術堂出版，1969