

赤土等流出防止に関する ろ過型沈砂池の実験および解析

原久夫¹・松原仁²・江戸孝昭³

¹博士（工学）琉球大学准教授、工学部環境建設工学科（〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1）

²博士（工学）琉球大学助教、工学部環境建設工学科（〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1）

³琉球大学大学院 理工学研究科（〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1）

沖縄県において、赤土流出は深刻な環境問題となっており、この問題を防ぐことは急務である。赤土等流出防止対策の中でも経済性に優れ採用実績の多い対策工法であるろ過型沈砂池は、濁水の処理量が増えると砂ろ過層の目詰まりのため有効に機能しなくなる問題が指摘されている。本研究では、ろ過型沈砂池の機能向上に寄与すべく、室内ろ過実験ならびに数値シミュレーションを用いて、ろ過過程を再現し、ろ過層の全断面有効活用の実現可能性を検討した。

Key Words : 国頭まあじ, チービシ砂, ろ過型沈砂池, 数値シミュレーション

1. はじめに

沖縄県本島の北部地域には「国頭まあじ」、一般に「赤土」と呼ばれる赤褐色の変成岩風化残積土が山地から傾斜地にかけて広く分布している¹⁾。昨今では、この赤土の海域への流出がサンゴ礁等の海洋生物に深刻な被害をもたらしており、深刻な問題となっている。これまでに、様々な赤土流出防止対策が行われてきたが、赤土被害はいまだに生じており²⁾、今以上にその対策方法を高度化させることが急務となっている。

本研究では、数多い赤土流出防止対策の中でも、施工性・経済性に優れ、ほとんどの工事現場で用いられ、多くの使用実績を有している、ろ過型沈砂池³⁾⁴⁾に着目した。そして、室内ろ過実験によりろ過過程を再現し、また、数値解析分野で最も広く用いられている有限要素法⁵⁾をろ過型沈砂池内におけるろ過層に適用し、実験同様、数値解析を用いてろ過過程の再現を試みた。本手法の妥当性を示すために、ろ過型沈砂池の室内ろ過実験で得られた流出時間と流出流量（本研究では以下、透過流量と表記する）の実験値と解析値との比較分析を行った。

2. 室内ろ過実験

写真-1に示すような室内ろ過実験を行った。写真-1(a)は室内ろ過実験装置の側面写真であり、写真の右側が濁水貯留部となり、左側がろ過部（砂層）となっている。本研究の解析対象となる領域はこのろ過部である。また、写真-1(b)は実験装置を濁水流出し側から撮った装置の断面であり、図-1は実験装置の概念図を示している。赤土濁水の濁水槽への流入に関しては、図-1に示すような整流円筒を通過させることで流速の乱れを抑えることとした。本実験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、密度 2.67g/cm^3 のチービシ砂⁶⁾とし、濁水を作る赤土は、沖縄県うるま市から採取した、分類上、シルト(MH)である石川土⁶⁾とし、濁水濃度 (SS) は 1000mg/L とした。チービシ砂と赤土の特性値を表-1に示す。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透過流量、ろ過水濁度を測定記録することとした。写真-1(a)からもわかるように、チービシ砂で赤土がろ過されている様子を外観目視できる（詳細は参考文献7)参照）。

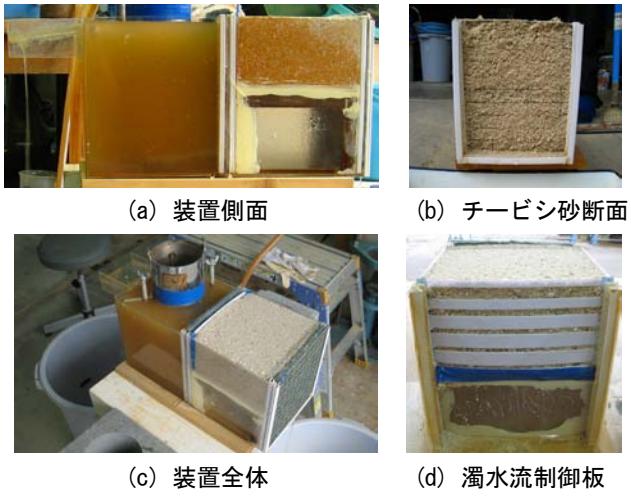


表-1 チービシ砂と赤土の特性値

チービシ砂	
土粒子の密度(g/cm ³)	2.67
最小間隙比 e_{\min}	0.919
最大間隙比 e_{\max}	1.576
石川土（国頭まあじ）	
分類	シルト (MH)
土粒子の密度(g/cm ³)	2.78
液性限界(%)	77.5
塑性限界(%)	35.9

また、ろ過型沈砂池において、目詰まりは下端から生じるという事が実験的に知られており、ろ過層全体を有効的に活用できていないと考えられる（写真-1 (a) 参照）。そこで、本実験ではろ過層断面全体を有効活用するために、写真-1 (d) に示す濁水流制御板を用いて有効的ろ過方法の検討も同時にを行うことにした。写真-1 (d) の濁水流制御板の断面形状は、次式を参考にし、決定した。

$$q = Av = A\sqrt{2gH} \quad (1)$$

ここで、 q ：単位時間あたりの流量(mm³/s)、 A ：断面積(mm²)、 v ：流速 (mm/s)、 g ：重力加速度(mm/s²)、 H ：水深(mm)である。

本研究では、濁水の流入側において、濁水流制御板を設けた場合の流量を、設けない場合の流量の30%とし、穴を通過する流量がすべて等しくなるように濁水流制御板の穴の大きさを決定した。すなわち、下端の濁水流制御板の穴の断面を小さくし、上端にいくに従い、この穴の断面を大きく設計した。このようにすることで、ろ過層全体が有効的に活用でき、ろ過機能の向上が可能になると予想できる。なお、濁水流制御板は、濁水の流入側に設けている。

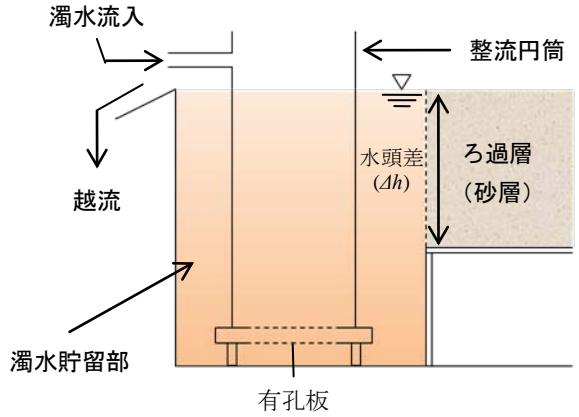
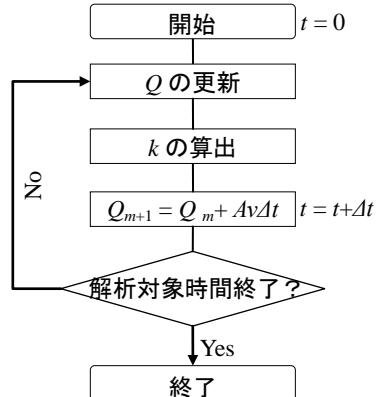


図-1 装置概念図



3. 赤土濁水流解析

(1) 支配方程式

本研究では、砂層中の濁水流がダルシーの法則⁸⁾に従うものと仮定し、支配方程式を次式にて定義する。

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = \nabla(k\mathbf{i}) = \nabla^2(kh) = \nabla^2\phi = 0 \quad (2)$$

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

本研究において、有限要素法を適用することにより、各節点における動水勾配の定量化が可能となる。更に、透水係数の分布を要素ごとに考察できることから、砂層の目詰まりを容易に取り入れることが可能である。

(2) 解析アルゴリズム

本研究では、図-2に示すように、任意の要素において、時間 t までに通過した透過流量 Q_t は次のように計算することにした。第 m ステップまでの透過流

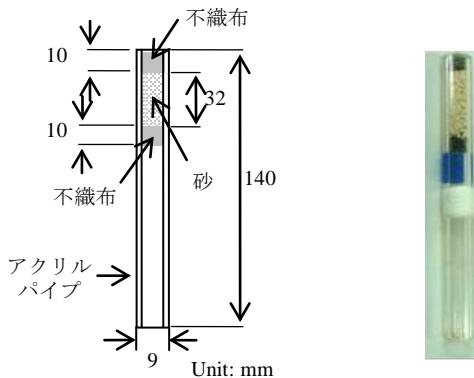


図-3 要素実験の供試体 写真-2 要素実験の供試体

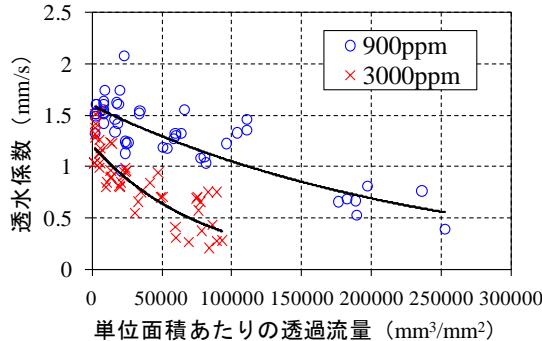


図-4 透過流量と透水係数の関係

量を $Q_m (t = t_m)$ とした時、微少時間（本研究では、ステップ間隔時間： Δt と表記する）後の第 $(m+1)$ ステップの透過流量 $Q_{m+1} (t = t_{m+1})$ は次式にて表わされる。

$$Q_{m+1} = Q_m + \Delta Q_{m+1} \quad (3)$$

本解析法は、この繰り返し計算によって透過流量 Q を求めるものであり、 ΔQ_{m+1} は定常流として求められる。なお、第 $(m+1)$ ステップにおける、着目要素の透水係数は、透過流量 $Q_m (t = t_m)$ により決定される。

本研究で取り扱うろ過型沈砂池の解析においては、式(2)を支配方程式とするが、実際は、濁水の透過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⁹⁾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（透過時間と透水係数、透過時間と透過流量の関係）を参照し、透過流量と透水係数（ $Q - k$ の関係）の関係をそれぞれ導いた。野瀬⁹⁾は図-3 および写真-1 に示す供試体を用いて、透過流量と透過時間、透水係数と透過時間の関係をそれぞれ実験で導いている（詳細は参考文献⁹⁾を参照）。この実験結果では、図-4 に示すように、濁水濃度（SS）は、900 ppm と 3000 ppm の両方で検討されており、本研究においてもこれ

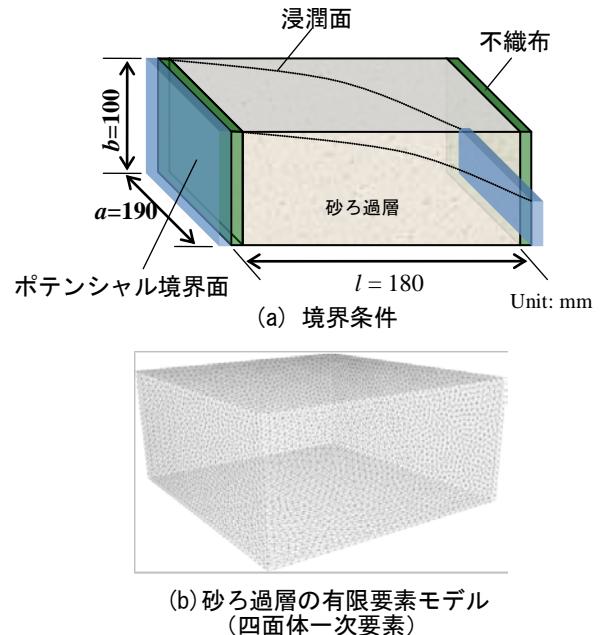


図-5 解析モデル（濁水流制御板「なし」）

ら 2 つのパターンについて、それぞれ、式(4)および式(5)のように回帰モデル化した。

$$k_{900} = 1.6 \exp((-4.0 \times 10^{-6})Q) \quad (4)$$

$$k_{3000} = 1.2 \exp((-10.0 \times 10^{-6})Q) \quad (5)$$

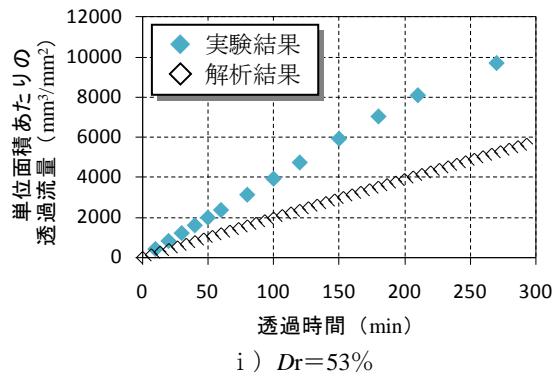
ここで、単位面積あたりの透過流量： Q (mm^3/mm^2)、透水係数： k (mm/s) である。また k の右下添え字は、濁水濃度を表わしている。

4. 解析結果

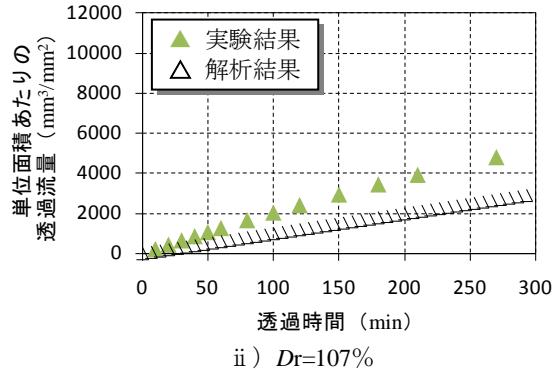
濁水流制御板を設けない場合の解析値と第 2 章で述べた実験値の比較を行い、解析の妥当性の検証を行い、次に濁水流制御板を設けた場合を比較することによって、制御板の効果についての考察を行う。

(1) 濁水流制御板「なし」の場合

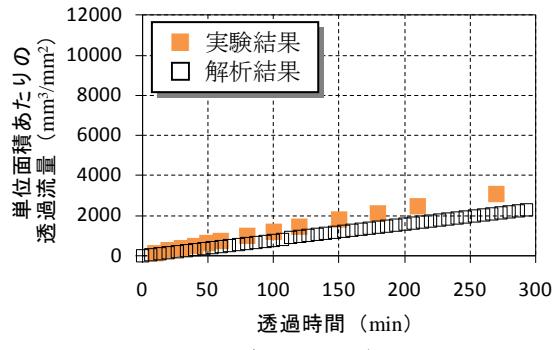
図-5 は、室内ろ過実験⁷⁾（水頭差： $\Delta h = 100 \text{ mm}$ ）の境界条件および砂ろ過層をモデル化したものを表わしている。有限要素解析においては、要素を四面体一次要素に仮定し、要素数は 160,921、節点数は 29,385、要素幅は 約 5.12 mm とした。なお、図-5(a) に示すように、濁水の流出側の浸出点の位置については、Casagrande, L¹⁰⁾ が実験的に算出した浸潤面の決定方法をもとに定めた。また、図-6 には、透過時間と透過流量の関係について、各相対密度における解析値および実験値を示しており、図-7 には、実験結果において最も密な場合の砂層内部の x 方向流速を、



i) $Dr=53\%$



ii) $Dr=107\%$



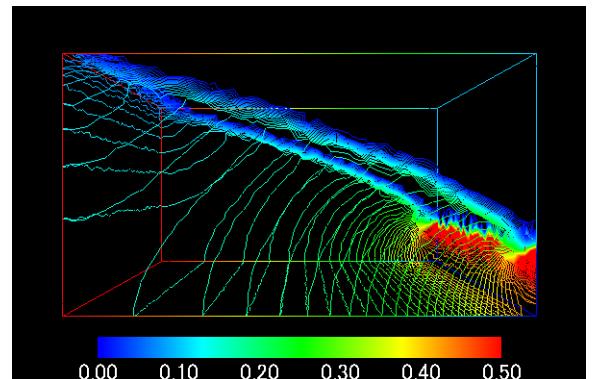
iii) $Dr=127\%$

図-6 解析値と実験値との比較（制御板「なし」）

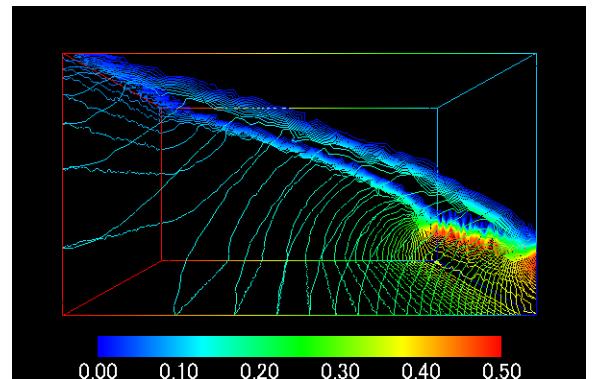
等値線を用いて示す。なお、流速の大きさは色で表わしている。

図-6 より、本手法によって得られた結果は、砂ろ過層中の透過時間と透過流量の関係を比較的よく再現できていることがわかる。しかし、相対密度の違いにより、実験値と解析値との誤差が生じる結果となった。この原因として砂の不均質性の影響や、浸潤面の仮定の影響等、原因の要因は考えられるが明確な原因がはっきりとしていない。

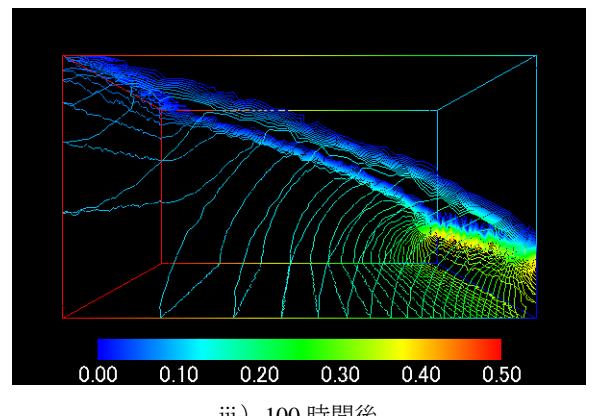
一方、図-7 に示すように、本研究では、砂層中の赤土濁水流が初めて可視化された。同図では、砂層内部の x 方向流速が等値線にて表わされており、時間が経つにつれて内部の流速が徐々に変化していく様子を視覚的にとらえることができる。



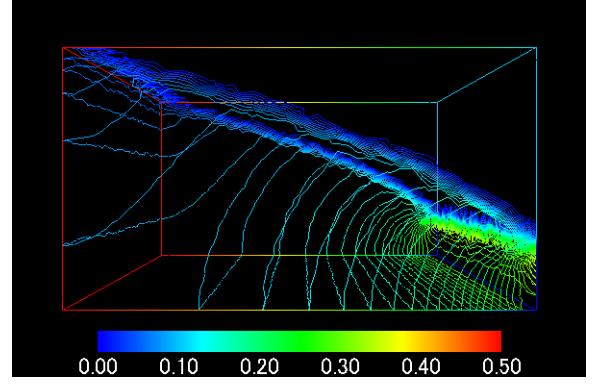
i) 開始直後



ii) 50 時間後



iii) 100 時間後

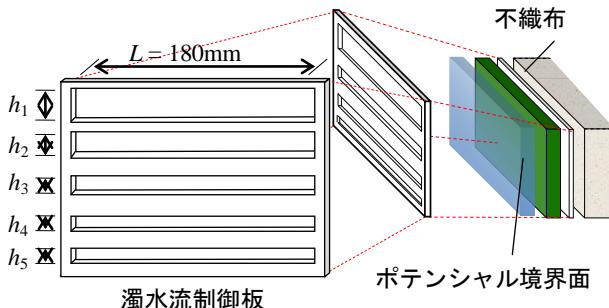


iv) 150 時間後

図-7 濁水流制御板を設けない場合の

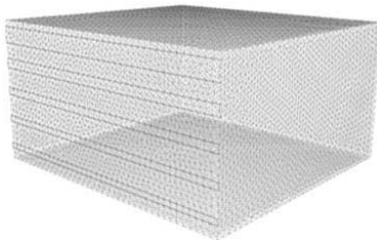
砂層内部の流速の様子

(等値線) $Dr=127\%$: mm/s



$h_1: 11.6\text{mm}, h_2: 6.7\text{mm}, h_3: 5.2\text{mm}, h_4: 4.4\text{mm}, h_5: 3.9\text{mm}$.

(a) 境界条件



(b) 砂ろ過層の有限要素モデル
(四面体一次要素)

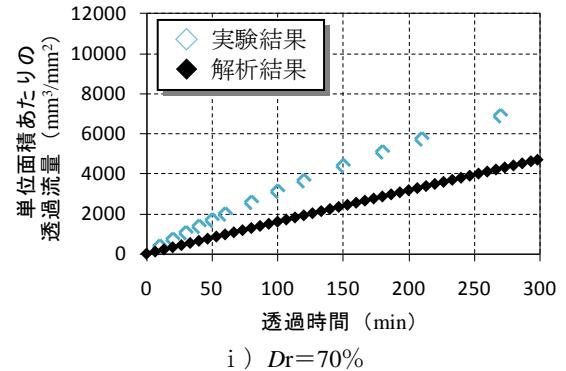
図-8 解析モデル（濁水流制御板「あり」）

(2) 濁水流制御板「あり」の場合

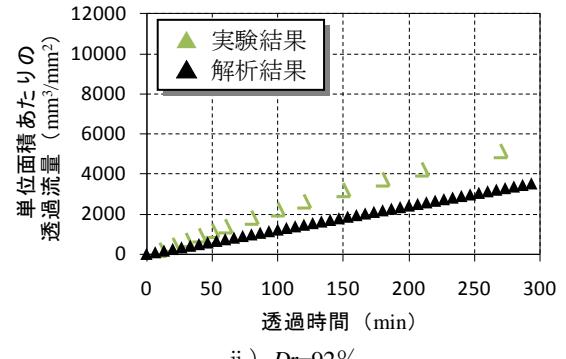
図-8 は、濁水流制御板を設けた場合の室内ろ過実験⁷⁾（水頭差： $\Delta h=100\text{mm}$ ）の境界条件および砂ろ過層をモデル化したものを表わしている。濁水流制御板は、濁水の流入側の砂層に設けた。有限要素解析においては、前節と同様に、要素を四面体一次要素に仮定し、要素数は 171,681、節点数は 33,224、要素幅は 約 5.00mm とした。図-9 には濁水流制御板設けた場合の透過時間と透過流量の関係について、各相対密度の解析値および実験値を示す。図-10 には、濁水流制御板設けた場合の実験結果において最も密な砂層内部の x 方向流速を、等值線を用いて示した。

図-9 より、濁水流制御板「なし」の場合同様に、解析値は相対密度の増加に伴って実験値に近づいている。これも、砂の不均質性の影響や、浸潤面の仮定の影響等、原因の要因は考えられるが明確な原因がはっきりとしていない。

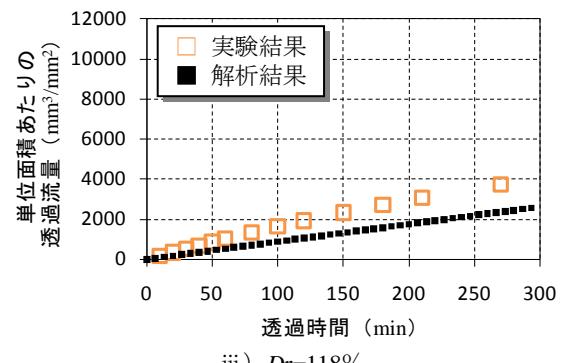
砂層内部の可視化を行うと、図-10 に示すように、開始直後は濁水流制御板の下端で流速が最も早く、徐々に濁水流制御板全体で流速が一様になっていく様子が分かる。このことから、濁水流制御板の断面形状は、ろ過層内部の流速を変化させる効果があると考えられる。つまり、濁水流制御板の断面形状を変化させることで、砂層全体を有効に活用させる断面形状が存在することを意味している。



i) $Dr=70\%$



ii) $Dr=92\%$



iii) $Dr=118\%$

図-9 解析値と実験値との比較（濁水流制御板「あり」）

5. まとめ

本解析では、砂層中の赤土濁水流解析の数値シミュレータを開発し、その結果、砂層中の透過時間と透過流量の関係を比較的よく再現できた。しかしながら、砂層中の砂の相対密度が小さい場合、解析値の誤差が大きくなることがわかった。今後は、この誤差の原因を明確にし、より本質的な赤土濁水流解析に近づけることが課題である。

謝辞：本研究は、社団法人沖縄建設弘済会「平成 21 年度技術開発支援事業」による支援を受けて行ったものである。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土質工学会九州支部編：九州・沖縄の特殊土, pp.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) 沖縄県総合事務局開発建設部 赤土等流出防止対策検討会:赤土流出等流出防止対策, 2001.
- 4) 沖縄県環境保健部:赤土流出防止対策の手引き, 1991.
- 5) O.C.Zienkiewitz, R.L.Taylor : The finite element method – Fourth Edition McGrow-Hill College(UK), 1991.
- 6) 原久夫:赤土濁水処理を目的とした過型沈砂池の新設計法とその計算例, 第 15 回沖縄地盤工学研究発表会, pp.21-24, 2002.
- 7) 原久夫, 江戸孝昭:赤土濁水のろ過に関する実験的研究, 平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.339-340, 2010.
- 8) 山口柏樹:土質力学(講義と演習), 技術堂, 1969.
- 9) 野瀬晴生, 原久夫:砂ろ過層を想定した赤土の目詰まりに関する実験・研究, 第 19 回沖縄地盤工学研究発表会, pp.33-36, 2006.
- 10) Casagrande, A. : Seepage Through Dams, Contributions to Soil Mech. Boston Soc. Civil Engrs, pp. 1925-1940, 1937

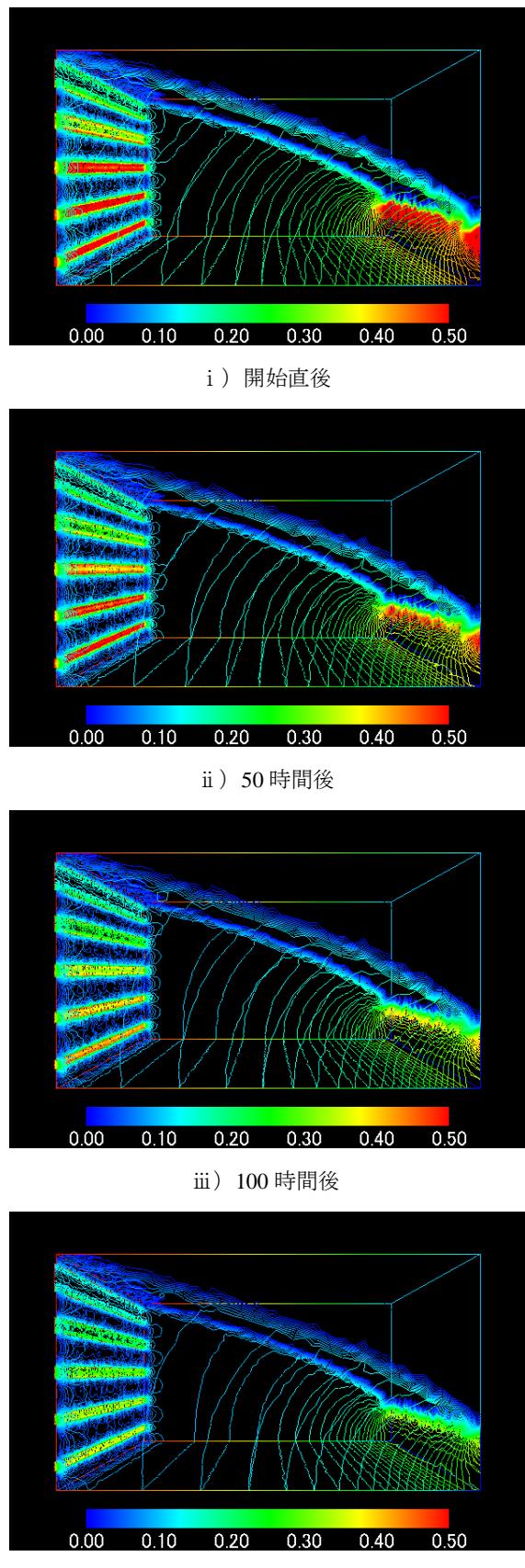


図-10 濁水流制御板を設けた場合の

砂層内部の流速の様子

(等価線) $Dt=127\% : \text{mm/s}$