# 琉球石灰岩中の塩水挙動に関する空隙スケールモデルでの数値解析

大成建設株式会社 正会員 〇増岡 健太郎,山本 肇

# 1. はじめに

環礁島における淡水貯留技術として、帯水層に建設された遮水壁により海への淡水流出をせき止めて淡水レ ンズ厚さを増大させるフローティング型地下ダム<sup>1)</sup>が考案されている.しかし、石灰岩層における塩淡境界 の挙動は、複雑な空隙構造に起因すると考えられる特異な挙動を示すことが多い.たとえば、石田らは<sup>2)</sup>、淡 水の過剰取水により一度塩水を井戸へ引き込むと、上昇した塩分濃度の復元が困難になることを指摘している. これは、石灰岩中の空隙にトラップされた塩水は容易に淡水と入れ替わらないことを示しており、フローティ ング型地下ダムの淡水貯留時には塩水濃度低下の遅延(テーリング)によって水利用の開始時期が大きく遅れ る可能性を示唆する.一方、環礁島の石灰岩中の塩水挙動に関する研究事例は少なく、詳細なプロセスについ ては不明な点が多い.著者らは、塩水飽和した琉球石灰岩に淡水を注入する室内試験<sup>3)</sup>を実施し、排出水中 の濃度低下の遅延を確認した.今回は、濃度遅延のプロセスを詳細に考察することを目的とし、X線CTによ り琉球石灰岩のコア供試体を三次元可視化し、空隙部と基質部の二つの領域に分けた空隙スケールモデルを作 成し、琉球石灰岩中の塩水挙動の数値解析を行ったので、ここに報告する.

### 2. 計算条件

### 1) 計算格子の作成

図-1 にモデルの作成方法の概要を示す.沖縄県伊江島で採取 された琉球石灰岩の供試体(直径 47mm,高さ 48mm の円柱形) を島津製作所製 X線 CT 装置『inspeXio SMX-225CT』を使用し て解像度 55µm で撮影した(図-1a).本装置では,CT 画像は被 写体の X線吸収率に応じた 256 階調のモノクロ画像で出力され, X線吸収率の低い空隙部ほど黒く表示される.得られた CT 画像 に対して,目視によって明瞭に判別できる空隙部形状を元に, 供試体内部を空隙部分と基質部分の二つの領域に分離する階 調の閾値を求めて二値化画像を作成した(図-1b).解像度 55 µm の場合,格子数は約6億格子と膨大になり,数値解析が困 難となる.そこで,計算可能な格子数となるように,はじめに 撮影した CT 画像の解像度を 880µm まで下げ(図-1c),前で求

めた閾値を与えて三次元空隙スケールモデル(計 算格子数142,253)を作成した(図-1d). 2)計算ケースおよび入力パラメータ

計算では、塩水密度流を考慮できる解析コード TOUGH2-MP<sup>4)</sup> (EOS7)を用いた.表-1にケース一覧 を示す.ケース0は、供試体部分に一様の物性値



(解像度 880 μm)
(解像度 880 μm)
(解像度 880 μm)
図−1 空隙スケールモデル作成方法の概要

表-1 ケース一覧と主な入力物性値

ケース	0		1	2-1	2-2	2-3
モデル分類	均質モデル	空隙スケールモデル				
空隙の 連結性		上端—下端 不連続		上端下端 連続		
空隙率	0.14	0.999(空隙部) 0.067(基質部,全体空隙率より計算)				
絶対浸透率	$7.8  imes 10^{-13}$	空隙部	新 1.0×10 <sup>-10</sup>			
[m <sup>2</sup> ]	(他試験より)	基質部	$1.0  imes 10^{-14}$	$1.0  imes 10^{-13}$	$1.0 \times 10^{-14}$	$1.0  imes 10^{-15}$

を与えた均質モデルの場合である.ケース 1, 2-1~2-3 は、供試体内部を空隙部と基質部に分けた空隙スケールモデルである.空隙部は有効空隙率 99.9%、透水性 1×10-10m<sup>2</sup>の多孔質高透水部、基質部は画像で検出できない小さな空隙からなる低透水部とし、いずれも多孔質媒体としてモデル化した.ここで、ケース1モデルの空隙部は上端から下端まで連結していない.これは解像度を下げる過程で連結性のある空隙部が基質部に丸

キーワード 空隙スケールモデル,X線CT,琉球石灰岩,テーリング,塩淡境界 連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1 大成建設(株)技術センター TEL045-814-7237 め込まれたためである.そこで,高解像度画像上で空隙部の連結性を慎重に確認しながら,基質部の一部(全体12万格子中の40格子のみ)を空隙部に変更する補正を施した.そして,基質部に設定する浸透率の大きい順からケース 2-1, 2-2, 2-3 とした.計算で使用した主な水理パラメータは表-1 のとおりである.また本計算では,実験<sup>3)</sup>で用いたヨウ化カリウム水溶液を同密度の塩水(1.53g/cm<sup>3</sup>)で模擬することとした.塩水の有効拡散係数として,実験時の濃度測定の対象イオンである K<sup>+</sup>の 25℃の水中分子拡散係数 1.96×10<sup>-9</sup>m<sup>2</sup>/s を与えた.

#### 3) 初期条件および境界条件

初期条件として、モデル全体を塩水で飽和した.境界条件は、モデル下端は排水部として大気圧固定境界とし、モデル上端から実験時と同じ流量 0.34mL/min で淡水を注入した.その他の側面および上下端面は不透水境界とした.

## 3.計算結果と考察

図-2に下流側における塩分の相対濃度(初期との濃度比)変化を示す.図 中の赤丸のプロットは実験値<sup>3)</sup>を示す.均質モデル(ケース0)では1PV(ポ アボリューム)位から急激な濃度低下が生じ,実験で得られたようなテーリ ングは生じていない.空隙スケールモデルのうち,空隙部の連結性が不十分 なケース1も,ケース0と同様にテーリングは生じない結果となった.これ から,高い透水性を有する空隙部の連結性が無いと,全体としては均質な多 孔質媒体としてふるまう結果になることが確認される.すなわち,ある程度 細かな空隙の連結性もモデル全体の挙動に影響する場合がある.一方,空隙



の連結性が存在するケース 2-1~2-3 では、基質部に与える透水性が低いほどテーリングが大きくなる結果が 得られた.今回の結果の中では、基質部の透水性が最も小さいケース 2-3 が最も実験結果に近い.

図-3 はケース 2-2 と 2-3 の PV=6.1 における供試体内部の相対濃度の分布である. 図中の黒線は空隙部を示 す.いずれも流路となる空隙部分で速やかに濃度低下が生じるが,基質部分に塩水が残留している.計算結果 に見られるテーリングは,基質部分に残留した塩水が空隙部分へ移行する結果生じたと考えられる.なお,ケ

ース 2-2 では流路となる空隙周辺の基質部の濃度低下が比較的大 きい(青色)のに対し,ケース 2-3 では小さい(赤色).これは, 基質部の透水性が高いケース 2-2 では,基質部での移流の影響が 大きくなり,基質部分から空隙部分へより多くの塩分が移行した ためであり,その結果,テーリングの濃度レベルが 2-3 よりもケ ース 2-2 の方が高くなったと考えられる.



#### 4. まとめ

琉球石灰岩中の塩分残留性を検討するため、X線 CT を用いて空隙スケールモデルを構築し、モデルによる 解析結果をトレーサー試験結果と比較した.その結果、今回対象とした琉球石灰岩中の塩水挙動には、数 10 μm オーダーの細い空隙の連続性や透水性の低い基質部からの拡散過程が大きく寄与していることを確認し た.今後は、空隙スケールモデルの解像度を高めた検討を行うとともに、原位置での塩分残留性を評価・解析 する技術にも取り組んでいく所存である.

#### 参考文献

- 1) 農林水産省農村振興局企画部資源課,内閣府沖縄総合事務局農林水産部土地改良課:淡水レンズを活用した水源開発を目指して,「淡水レンズ開発調査」「淡水レンズ強化技術実証調査」調査成果の概要,2008.
- 2) 石田聡, 吉本周平, 小林勤, 幸田和久, 土原健雄, 万福裕造: マーシャル諸島共和国マジュロ環礁における地下水の塩水化について, 地盤 工学会誌, 58-5, pp. 22-25, 2010.
- 3) 増岡健太郎,山本肇,青木智幸:フローティング型地下ダムにおける淡水貯留シミュレーション一石灰岩中の残留塩分の効果と周辺淡水レンズへの影響の検討一,大成建設技術センター報,第46号,2013.
- 4) Keni Zhang, Yu-Shu Wu, and Karsten Pruess: User's guide for TOUGH2-MP A Massive Parallel Version of the TOUGH2 Code, Report, LBNL-315E. LBNL, Berkeley, CA. 2008.