

浸透流ボクセル解析における地下施設通過流量の評価法

清水建設（株）技術研究所 正会員 桜井 英行，正会員 白石 知成，後藤 高志

1. はじめに

放射性廃棄物地層処分の地下施設を計画する上で、候補地周辺の地下水流動場や地下施設建設による地下水流動場の変化を予測することは極めて重要である。計画の進捗においては、入念な地質調査が進められると予想されるが、調査計画の立案・修正、調査データの解釈、更には地下施設の最適配置の検討など、FEM（有限要素法）に代表される数値解析の果たすべき役割も大きい。ところが、通常のFEMでは、入力データとなる三次元メッシュ・モデルの作成が足かせとなり、地質調査の進展に迅速に追従できないことや、反対に効率的なメッシュ作成のために大胆な簡略化が行われることが予想され、期待される役割を十分に果たしてくれるかは疑問である。

こうした状況を打開し、地下施設計画における浸透流解析の根本的な効率化を計ることを目的として、著者らは、ボクセル解析法を用いた浸透流解析システムを開発した¹⁾。ボクセル解析法とは、一般にはFEMにおいて、単一の立方体要素（ボクセル、Voxel：Volume Pixelの略）のみを使う代わりに、計算機性能ギリギリまで細かく分割したメッシュを用いて解析を行う手法である。形状が非常に複雑でも、确实、かつ、高速にモデリングできるのが利点である。節点座標データが必要ないこと、要素形状が単一なこと等を利用して、うまくプログラムすると、記憶容量を大幅に削減でき、数千万自由度といった通常のFEMより格段に細かいメッシュによる解析が可能になる。

ボクセル解析法では、形状近似の凸凹が結果の精度に影響を及ぼすことが短所といわれているが、飽和浸透流解析においては、境界条件や物性値を工夫することで実用上は問題がないことを数値実験で確認した¹⁾。一方、地層処分の地下施設の性能を評価する上で、それを通過する地下水流量が一つの重要な指標となるが、地下施設の透水性が周辺の地層に比べて低い場合には、ボクセル解析で得られる流量の精度に問題があることも確認している¹⁾。本報告では、そのボクセル解析で得られる地下施設通過流量の問題を解決する方法を提案する。

2. ボクセル解析の有効性

ソリッド・モデルは、FEMメッシュ生成用三次元幾何形状定義として広く用いられているモデルである。地質構造を対象とする場合は、断層や地層境界面での分割パターンを一致させるため、図-1のように隣接する地層が面を共有するようにソリッド・モデルを作成する必要がある。これが三次元浸透流解析用のメッシュ作成を困難にする大きな要因の一つとなっている。ボクセル解析では、その制約はなく、各地層（断層、地層境界面等で囲まれたソリッド・モデル）ごとに独立に作成できる。その差は大きく、作業の手間が1/3以下になると見込まれる。また、図-2のように、新たな地層が発見された場合や地下施設の最適配置の検討の場合は、それらのソリッド・モデルを別途作成・配置し、その位置のボクセルの物性番号を変更するだけで済む。同様の検討を従来型のFEMで行う場合、メッシュ変更作業には多大な時間とコストを要することは明白である。地下施設の配置検討や調査進展に伴う解析メッシュの変更を必要とする地下施設計画において、ボクセル解析法は、強力なツールとして期待できる。

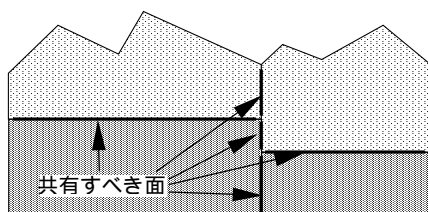


図-1 FEメッシュ用のソリッド・モデルの制約

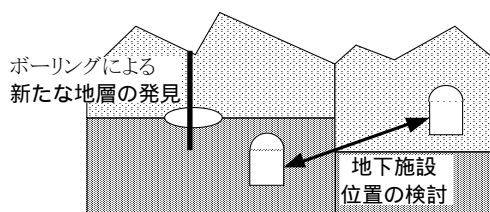


図-2 地質構造の修正と地下施設位置の検討

3. 地下施設通過流量の評価法

矩形領域内に球体施設を考え、施設の透水性が周辺岩盤の10倍の場合と1/10の場合の施設通過流量を検討した。境界条件は、モデルの両端を全水頭拘束とし、その他の側面は不透水条件とした。解析領域は対称性を考慮して、1/4の領

域とした(図-3). サイズの異なるボクセル・メッシュを3通り用意し,十分に細かい四面体要素で分割したFEMによる結果と比較した. 施設通過流量は,施設部分のメッシュのみで構成される有限要素方程式を再度組み立て,計算結果の節点全水頭に対応する反力ベクトルを求め,その正負それぞれの総和(流入,流出)を取ることで算出した.表-1の淡いハッチが算出結果である. 数値は,参照FEMの結果で正規化している. 地下施設の透水性が周辺地盤より大きい場合は,流量は精度よく計算されており,ボクセルの細分化に伴う収束性も良好である.ところが,地下施設の透水性が小さい場合は,FEMより20%以上も大きい値となっており,ボクセルの細分化に伴う収束性も認められない.施設の透水性が低い場合には,施設表面に沿う流れが発生し,ボクセルの凹凸による細かな出入りを加算しているためと考えられる.また,ボクセルの表面積は,3方向の座標軸平面への投影面積の和となり,真値の1.5倍に収束するため,ボクセルを細かくする効果も現れ難いものと考えられる.ここで,著者らは,メッシュの凹凸が全水頭分布に及ぼす影響は,施設表面の極近傍に限られること¹⁾に着目し,結果を補正することを試みた.それは,図-4に示すように地下施設とその周辺の極近傍の地層については,施設の形状を精度良く表現した従来型のFEMメッシュを別途作成し,ボクセル解析の結果を境界条件として,FEMで再解析する方法である.表-1の濃いハッチ部分に,施設を取り巻く地層の厚さ t を0~20mまで変化させた結果を示す.数値は,全体をFEMで解いた参照FEMの結果で正規化している. $t=0m$ (地層なし)の場合を除き,いずれの結果も参照FEMの結果と良好な一致を示している.紙面の都合で省略した他の結果も踏まえると,厚さ t は,概ねボクセルサイズと同程度にすれば十分であろうと結論した.

4. おわりに

浸透流ボクセル解析における地下施設通過流量の評価法を提案した.ボクセル解析結果を境界条件とし,地下施設とそれを取り巻く極近傍の地層をFEMで再解析する方法である.メッシュを別途作成する必要があるが,著者らの経験では,地下施設は比較的単純な形状が多く,また,メッシュもその位置に依らず一つだけ準備すればよいので施設位置検討の全体から見ればさほど大きなワークではない.地下施設の位置の違いによる施設通過流量の相対比較を目的とする場合は,ボクセル解析だけでも十分であるが,特に施設の透水性が周辺地盤より小さい場合,より精度の高い流量の算出や施設の形態の違いによる通過流量の比較には有効な評価法であると考えられる.

引用文献

- 1)桜井英行ほか:地下施設計画のための地下水浸透流ボクセル解析,土木学会論文集,投稿中.

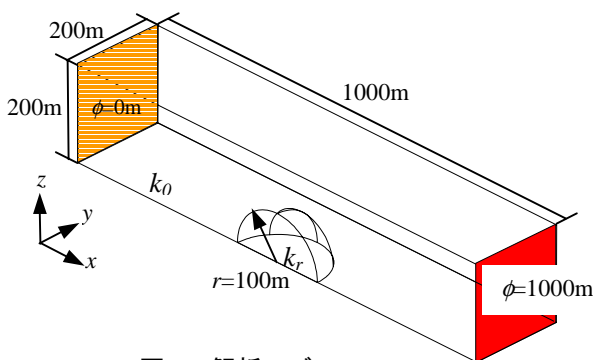


図-3 解析モデル

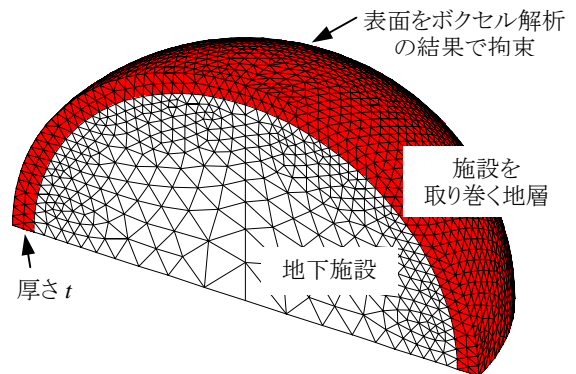


図-4 ボクセル解析の結果から流量を算出するモデル

表-1 地下施設の通過流量(施設の体積比/表面積比は球の真値で正規化,流量比は参照FEMの結果で正規化)

メッシュ	要素数	施設体積比	施設表面積比	施設流量比		施設流量比(ボクセル結果を境界条件としたFEM)				
				($k_r=10k_0$)	($k_r=0.1k_0$)	($k_r=0.1k_0$)				
参照FEM	87,070	0.999	1.000	1	1	$t=0m$	$t=2m$	$t=4m$	$t=10m$	$t=20m$
10m Voxel	40,000	1.008	1.509	1.028	1.248	0.497	1.003	1.005	1.008	1.007
4m Voxel	625,000	1.005	1.509	1.010	1.266	0.746	1.007	1.007	1.006	1.005
2m Voxel	5,000,000	1.001	1.501	1.001	1.254	0.861	1.004	1.005	1.004	1.004

キーワード:ボクセル,浸透流解析,地下水解析,地層処分,放射性廃棄物

〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17 清水建設(株)技術研究所 TEL(03)3820-5476, FAX(03)3820-5959