

セメント系材料に関するマルチフィジクスモデルを導入したメソスケール解析による気密性解析の構築

名古屋大学 学生会員 ○八田 諒輔

名古屋大学 正会員 三浦 泰人, 中村 光, 法政大学 正会員 山本 佳士

1. はじめに

コンクリートが経験する多様な物理・力学現象のメカニズムを適切に理解するためには、ある現象において支配的な物理現象と力学現象の相互作用を評価可能なスキームが求められる。さらに、コンクリートにひび割れが生じる場合、力学特性が変化することだけでなくひび割れを介した物質移動が生じることで劣化メカニズムがより複雑になる。著者らは、物理・力学現象の相互作用が存在する現象のメカニズムを理解するため、コンクリート構造物のひび割れ挙動を再現する剛体バネモデル (RBSM) とひび割れを介した物質移動をシミュレーションできるトラスネットワークモデル (TNM) の開発を進めている。

本研究では、これまで提案した様々な物理モデルを統合し、より複雑な現象を評価可能なマルチフィジクスモデルを導入した RBSM-TNM の妥当性を検証する解析を実施した。解析対象はコンクリート格納容器の気密性を評価した Picandet らの実験¹⁾とし、異なる湿潤環境下、かつ、圧力作用下におけるコンクリート中の空気の流れ (Air Leakage Flow) を評価可能な気密性解析を RBSM-TNM によって実施した。

2. 解析概要

気密性解析のフローを以下の図-1 に示す。本解析は、水分移動・熱伝導解析、構造解析、気密性解析を連成することで、気密性解析を実施した。

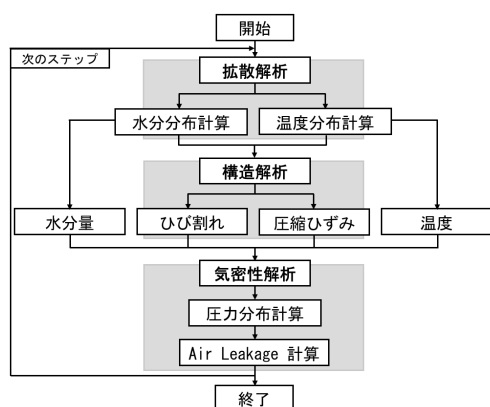


図-1 本解析のフロー図

2.1 RBSM (Rigid Body Spring Model)

RBSM は、コンクリート材料のひび割れのような離散的な挙動も再現が可能な手法である。要素は、voronoi 分割された剛体要素で、要素境界面に配置された力学バネに材料非線形が考慮されている。詳細は参考文献²⁾を参照されたい。

2.2 TNM (Truss Network Model)

TNM では、voronoi 要素の母点と要素境界面の中心点を通るトラス要素および境界面を通るトラス要素によって、物質移動を考慮した。後者は、RBSM によってひび割れが生じると生成されるトラス要素である。RBSM によって算出されたひび割れ情報を基に TNM によって水分・温度分布を算出し、これらの情報をインプットとして Air Leakage Flow を評価した。気密性解析で扱う Air Leakage Flow は、コンクリートおよびひび割れ中の流れの二種類に分けて考え、いずれも圧縮性流体の流れに基づいてモデル化した。

2.2.1 コンクリート中の気密性

コンクリート中を通過する流体の流れは孔表面と流体間の摩擦と、粘性に直接的に依存する。TNM のトラス要素に基づき導入する Air Leakage Flow の支配方程式は式 1 で表され、TNM 上の直線管路を流れるフラックスを仮定すると、式 2 のようなマトリックス形式で表すことができる。

$$q_m = \frac{M}{RT} \frac{k_a}{2\eta} \alpha_s k_{rg} \nabla(P^2) \quad (1)$$

$$\frac{M}{RT} \frac{1}{\eta} \frac{A k_a}{L} \alpha_s k_{rg} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_1^2 \\ P_2^2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 q_m : Air Leakage の質量流束 ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、 M : 空気の実質質量 ($\text{Kg} \cdot \text{mol}^{-1}$)、 R : 気体定数 ($\text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$)、 T : 熱伝導解析で得られた温度分布を考慮した温度 (K)、 η : 気体の動粘性係数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)、 k_a : コンクリートの見かけの透気係数 (m^2)、 α_s : 応力効果率、 k_{rg} : 相対ガス透気係数、 P : コンクリート内の圧力 (Pa)、 A : トラス要素の断面積 (m)、 L :

キーワード マルチフィジクスモデル, RBSM-TNM, 気密性解析, Air Leakage Flow

連絡先 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町工学部 9 号館 525

表-1 各種係数

	圧縮強度 f_c (MPa)	弾性係数 E (GPa)	引張強度 F_t (MPa)	空隙率 (%)	動粘性係数 η (Pa · s)	固有透気係 数 k_{im} (m ²)	Klinkenberg 係数, β	リダクション ファクター, ξ
OPC	65	42	4.8	12.1	1.76×10^{-5}	2×10^{-17}	2.0×10^{-5}	0.02
HPC	110	45	6	9.6		1×10^{-17}	2.5×10^{-5}	

トラス要素の長さ(m)である。水分による透気係数の減少率は TNM の水分移動解析で得られた水分分布を用いて、Van-Genuchten Mualem Model³⁾により計算した。ここで、 S_l ：水分飽和度、 q ：適合パラメータ(本解析では 3.5 とした)である。

$$k_{rg} = (1 - S_l)^q (1 - S_l^2) \quad (3)$$

2.2.2 ひび割れ中の気密性

コンクリートのひび割れ中を通る空気の透気係数はひび割れの幅、屈曲度、形状などが影響する。本解析では、ひび割れの影響を考慮するリダクションファクターを用いて、Navier-Stoke 方程式から導かれる Hagen-Poiseuille の法則¹⁾によって再現した(式 4, 5)。ここで、 w ：ひび割れ幅(m)、 ξ ：リダクションファクターである。

$$q_m = \frac{M}{RT} \frac{w^2}{24\eta} \xi \nabla(P^2) \quad (4)$$

$$\frac{M}{RT} \frac{w^3}{24\eta} \xi \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_1^2 \\ P_2^2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

2.3 解析対象の実験と解析条件

Picandet ら¹⁾は、普通コンクリート(OPC)と、高性能コンクリート(HPC)を用い、直径 110mm、厚さ 50mm のコンクリートディスクを用いてひび割れを有するコンクリートの透気試験を実施した。割裂引張試験による繰返し漸増载荷を実施してひび割れを導入し、载荷中の横方向変位を測定した。除荷後に透気試験を実施して Air Leakage Flow Rate (m³/s)を測定した。解析では表-1 に示す各種係数を用いて、実験と同様のプロセスを再現した。

3. 実験結果

図-2 に、強度の異なる供試体に対するひび割れの進展に伴う Air Leakage Flow Rate を示す。HPC、OPC の結果ともに、本解析によって実験の傾向を捉えているといえる。HPC と OPC の差をみると、実験値に比べて解析値はその差が過小評価されている。これは、強度の異なる供試体のひび割れ分布の再現性が低いことが原因として考えられる。また、水分

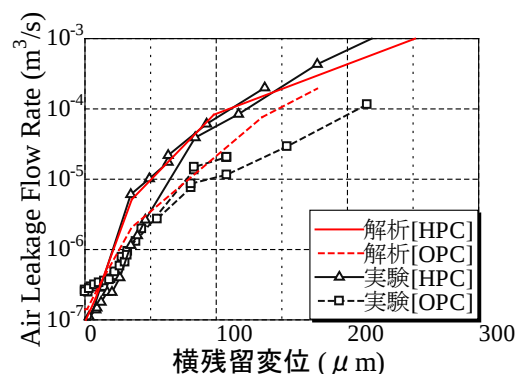


図-2 強度の異なる供試体の Air Leakage Flow Rate

飽和度の異なる供試体について比較した図を図-3 に示す。実験値から横残留変位の比較的小さい範囲について、水分の影響によって Air Leakage Flow Rate が減少することが確認された。相対ガス透気係数(k_{rg})によって水分の影響を考慮した解析値は実験値の傾向を捉えているといえる。

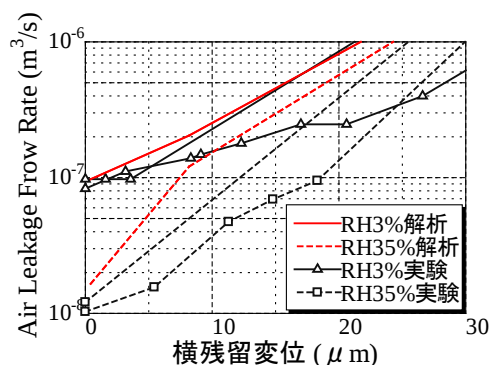


図-3 水分飽和度の異なる供試体の Air Leakage Flow Rate

4. まとめ

マルチフィジクスモデルを導入した RBSM-TNM によってひび割れを有するコンクリートの気密性を再現可能であることを確認した。

参考文献

- 1) Picandet V., Khelidj, A. and Bellegou, H.: Crack effects on gas and water permeability of concretes, Cement and Concrete Research, Vol.39, pp. 537-547, 2009.
- 2) Miura T., Nakamura H., Yamamoto Y.: Reduction mechanism of the compressive properties of concrete with primary crack of different widths and angles evaluated by 3D-RBSM, Engineering Fracture Mechanics, Vol.276, 108877, 2022.
- 3) Kameche, Z.A., Ghomari, F., Choinska, M. and Khelidj, A. (2014): Permeability to Gas of Partially saturated Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 50, No.2, pp. 115-121.