

Multi-physics mechanical model を導入した RBSM-TNM によるコンクリートの気密性の評価

名古屋大学 学生会員 ○八田諒輔

名古屋大学大学院 正会員 三浦 泰人, 中村 光

法政大学大学院 正会員 山本 佳士

1. はじめに

コンクリート材料は、水和反応や様々な環境因子の影響を受けることで、その力学特性や材料安定性が経時的に変化する。コンクリートにひび割れが生じる場合、力学特性が変化だけでなく、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。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。著者らは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) を開発しており、物理・力学現象の相互作用が存在する現象のメカニズムの解明を試みてきた。

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 Multi-physics mechanical model を導入した RBSM-TNM の妥当性を検証する解析を実施した。対象は、原子力発電所におけるコンクリート格納容器の閉じ込め性能である。本論文では、コンクリート格納容器の気密性を、Picandet らの実験¹⁾ を対象として、空気、水分の TNM による物質移動解析とコンクリートに作用する圧力およびひび割れを評価する RBSM を統合して、気密性解析を実施し、Multi-physics mechanical model の妥当性を評価した。

2. 解析概要

図-1 に示す解析フローの各解析を説明する。

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。

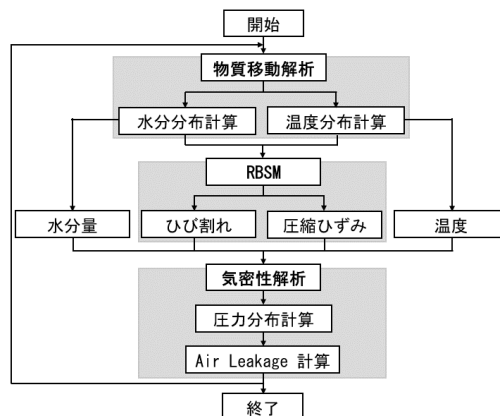


図-1 本解析のフロー図

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、物質移動を考慮している。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から TNM で水分・気体移動解析と熱伝導解析を統合した気密性解析を行う。気密性解析で扱う空気の流れ (Air Leakage Flow) は、コンクリートおよびひび割れ中の流れの 2 種類に分けて考える。いずれも圧縮性流体の流れに基づいてモデル化することができる。

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 Rate の支配方程式は式 2.1 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 2.2 のようなマトリックス形式で表すことができる。

$$q_m = \frac{M}{RT} \frac{k_a}{2\eta} \alpha_s k_{rg} \nabla(P^2) \quad (2.1)$$

$$\frac{M}{RT} \frac{1}{\eta} \frac{Ak_a}{L} \alpha_s k_{rg} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_1^2 \\ P_2^2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

ここで、 q_m : Air Leakage の質量流束 ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、 M : 空気のモル質量 ($\text{Kg} \cdot \text{mol}^{-1}$)、 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

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 H(Pa・s)	固有ガス 透気係数 (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 E-05	2 E-17	2.0 E05	0.08
HPC	110	45	6	9.6		1 E-17	2.5 E05	0.2

した気温 (K°), η: 気体の動粘性係数 (Pa・s), k_a: コンクリートの見かけの透気係数 (m²), 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: 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 Model により計算した。

$$k_{rg} = (1 - S_l)^q (1 - S_l^2) \quad (2.4)$$

ここで, S_l: コンクリート中の水分飽和度, q: 適合パラメータである。

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から, ひび割れの幅, 屈曲度, 形状などが影響する。本解析では, 実際の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 の法則によって再現した。(式 2.5, 式 2.6)

$$q_m = \frac{M w^2}{RT 24\eta} \xi \nabla(P^2) \quad (2.5)$$

$$\frac{M w^3}{RT 24\eta} \xi \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_1^2 \\ P_2^2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.6)$$

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。

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。割裂引張試験によってひび割れを導入し, このひび割れ幅を LVDT による横方向変位として測定した。除荷後に, 透気試験を行って, Air Leakage Flow Rate 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。

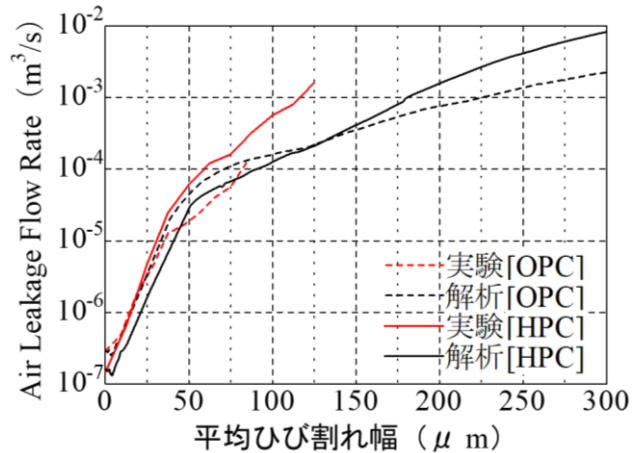


図-2 Air Leakage Flow Rate の解析値と実験値

3. 実験結果

図-2 に, ひび割れの進展に伴う Air Leakage Flow Rate の解析値と実験値を示す。実験では Air Leakage Flow Rate がひび割れ幅 50μm 程度で増加勾配が低下する傾向があり, 本解析においても同様の傾向を示していることが確認できる。実験では HPC の方がひび割れ幅の増大に伴って Air Leakage Flow Rate が早期に増加する。解析ではひび割れ幅が小さいとき OPC の方が大きい, ひび割れ幅の増大に伴って HPC が大きくなる傾向が確認できる。このような違いはあるものの, 本解析によって実験の傾向を捉えているといえる。

4. まとめ

Multi-physics mechanical model 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することを確認した。

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.