

ASR 作用を受けた一軸拘束供試体の固液二相物理化学モデルによる膨張解析

東京大学大学院 正会員 ○高橋 佑弥

東京大学大学院 柴田 洸希

東京大学大学院 フェロー会員 前川 宏一

1. はじめに

多方向の拘束を受ける鉄筋コンクリート構造において、アルカリシリカ反応(以下、ASR)による異方的な膨張劣化挙動を予測するためには、活発な化学反応・体積変化とひび割れ発生との相互作用を考慮することが不可欠である。本研究は、材料-構造応答連成解析が可能な解析システム¹⁾のもと、微視的物理解析現象に基づいてASRによる体積変化およびひび割れ発生をモデル化し、一軸拘束供試体の膨張試験についての再現解析を試みたものである。

2. 固液二相モデルのASR解析への適用

アルカリ X (X は K または Na) についての ASR ゲルの生成速度 R_X を、化学反応式を参考にして式(1)に示すように定式化した。

$$\begin{cases} R'_X = k \cdot C_X \cdot F_w \cdot V_{RA} \cdot 1.0E-9 \\ R_X = \exp(-1500 \cdot (1.0 - RH)^{5.0}) \cdot R'_X \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 k : 係数 (本研究では 0.1×10^{-7} 一定とした)、 C_X : 液相中 X 濃度[mol/l], F_w : 自由水量[kg/m³], V_{RA} : 反応性骨材量[m³/m³], RH : 相対湿度であり、 C_X , F_w , RH はセメント水和反応・空隙構造形成・水分保持・アルカリ拡散モデルによる熱力学解析より自動的に計算される値を用いた。吸水後の ASR ゲルの分子量を $X_2Si_2O_5(H_2O)_{8.4}$ ²⁾ と仮定して水やアルカリの消費量を計算し、それぞれの物理量を計算する質量保存則に計上した。

計算される生成 ASR ゲル量のもと、第三著者らによる、ひび割れ中液状水の圧力変動を考慮可能な固液二相修正 Biot モデル³⁾を ASR ゲルへと適用することで、コンクリートと ASR ゲルの二相系の圧力場計算を可能とした。この際、ひび割れ中へのゲルの浸透をモデル化することで、拘束条件下の異方的なゲルの移動とそれに伴う応力方向の変化を考慮した。

同時に、粗大な毛細管空隙への ASR ゲルの吸収を Washburn 式に基づいて考慮することとした(式(2))。

$$r = \frac{-2\gamma \cos \theta}{P} = \frac{2Z}{P} \quad (2)$$

ここで、 r : ゲルが浸透可能な最大空隙径[m], γ : 表面張力, θ : 接触角, P : ゲル圧力[Pa], Z : ゲルの浸透性に関する定数パラメー

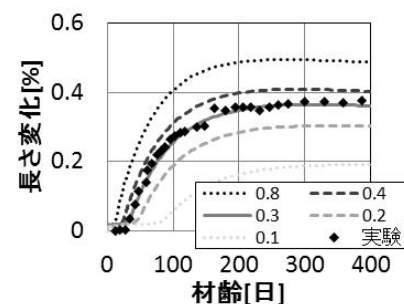


図-1 Zに関する感度解析結果

タである。圧力 P のもと、毛細管空隙のうち r よりも大きい空隙に ASR ゲルが浸透し、浸透した ASR ゲル分は圧力に寄与しないこととした。ASR ゲルの物性(γ , θ の値)については現時点で不明なため、後述する一軸拘束試験(Test A)の自由膨張のケース²⁾を用いて感度解析(図-1に示す)を行い、 Z の値を0.3と推定した。

以上のモデル化により、拘束条件下における ASR ゲルの生成と圧力形成および異方的な膨張挙動が考慮可能となると考えた。

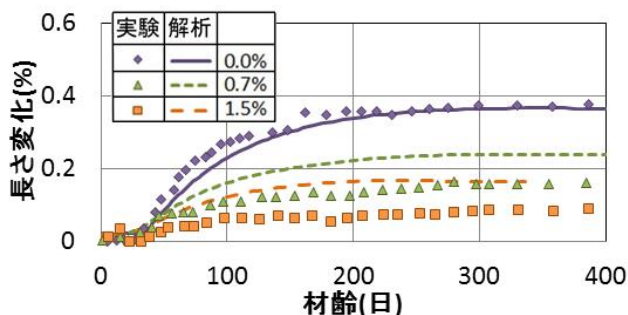
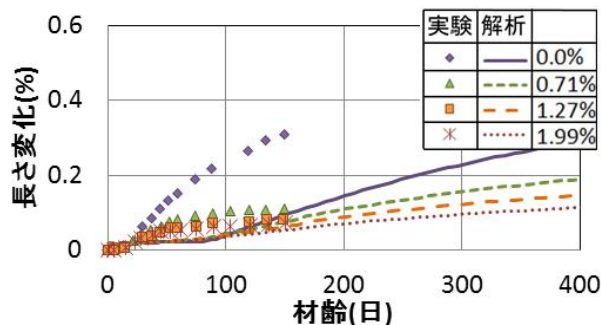
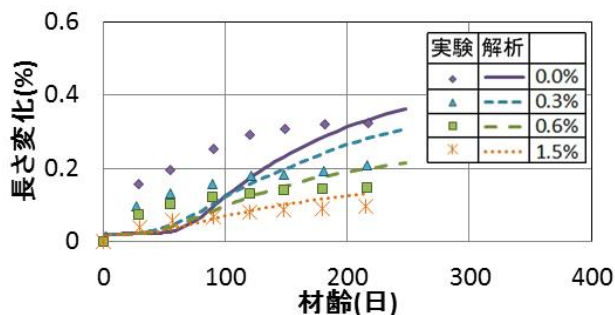
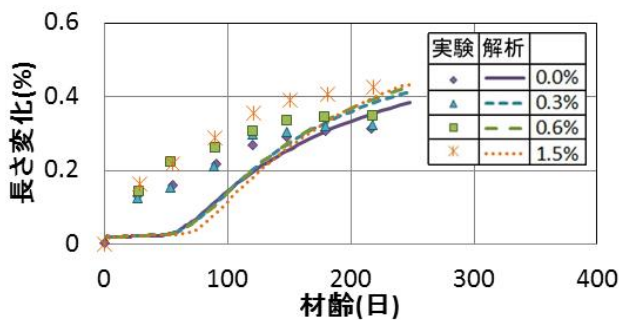
3. 一軸拘束供試体の再現解析

既往の一軸拘束膨張試験(Test A²⁾, B⁴⁾, C⁵⁾)の再現解析を行った。表-1に各試験の示方配合を、表-2に実験条件を示す。それぞれの試験で、様々な鉄筋比条件で実験が行われている。

図-2から図-4にそれぞれ Test A, B, C の軸方向膨張量についての実験と解析の結果を比較した図を示す。結果を見ると、膨張速度については試験によっては大きく異なるものがあるものの、最終自由膨張量と鉄筋拘束による膨張の減少量は、概ね倍半分の精度で再現されていると考えられる。本研究では

キーワード アルカリシリカ反応, 膨張, ひび割れ, 一軸拘束, 熱力学連成解析

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 工学部 1 号館 329 室 TEL 03-5841-6104

図-2 Test A²⁾の軸方向膨張量の経時変化図-4 Test C⁵⁾の軸方向膨張量の経時変化図-3 Test B⁴⁾の軸方向膨張量の経時変化図-5 Test B⁴⁾の軸直角方向膨張量の経時変化

ASR ゲル生成速度

に関する係数 k を一定として計算を行ったが、実際には骨材の反応性は骨材種類等によって大きく異なると考えられるため、今後、膨張速度についての検討が必要であると考える。また、図-5にTest Bの軸直角方向膨張量について実験と解析の結果を比較した図を示す。図-3と同様、膨張速度に差異はあるが、鉄筋拘束によって拘束と直角方向に膨張が促進される実験の傾向が、解析でも示されている。

4. 結論

本研究では、材料・構造応答連成解析システムを用いて、ASR作用を受けた鉄筋コンクリートの三次元膨張挙動を追跡することを試みた。微視的物理化学メカニズムに基づいてモデル化を行い、既往の一軸拘束試験体を用いた検証を行ったところ、最終自由膨張量、拘束が及ぼす三次元的影響がおおまかに再現されることが示された。今後は、反応速度に関する検討と共に、三次元配筋下の膨張・ひび割れ挙動および劣化が生じた部材の構造性能についての検討が必要と考えている。

表-1 示方配合^{2),4),5)}

	W/C [%]	単位体積重量[kg/m ³]						
		W	C	S (非反応性)	S (反応性)	G (非反応性)	G (反応性)	Na ₂ O eq
Test A ²⁾	45	169	376	775	0	0	925	8.0
Test B ⁴⁾	55	165	300	416	434	502	503	7.2
Test C ⁵⁾	45	203	450	660	0	912	101	9.0

表-2 実験条件^{2),4),5)}

	供試体諸元	養生条件	鉄筋比[%]
Test A ²⁾	100×100×400mm	1日封緘→40℃ RH100%	0.0, 0.7, 1.5
Test B ⁴⁾	150×150×530mm	28日湿布→40℃ RH≥ 95%	0.0, 0.3, 0.6, 1.3
Test C ⁵⁾	100×100×400mm	7日封緘→0℃ RH100%	0.0, 0.71, 1.27, 1.99

謝辞 本研究は JSPS 科研費 23226011 の助成を受けたものです。ここに謝意を表します。

参考文献

1. Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T.: MULTI-SCALE MODELLING OF STRUCTURAL CONCRETE, Taylor and Francis, 2008
2. 村中誠, 田中泰司: 反応機構に立脚した ASR 膨張挙動に関する物理-化学モデルの構築, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.1, pp.1-15, 2013
3. 前川宏一, 藤山知加子, 石田哲也: ひび割れ間に捕捉される水分の動的挙動とコンクリート構造の累積損傷, 耐久性力学に基づく収縮影響評価研究委員会報告書, pp.1-12, 2012
4. 塚田孝則ほか: アルカリシリカ反応により劣化したコンクリート構造物の膨張拘束に関する基礎的研究, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演要旨, pp.551-552, 2010
5. 矢村潔ほか: 鉄筋拘束がアルカリ骨材反応に及ぼす影響に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, No.11, vol.1, pp.135-140, 1989