

膨張コンクリートを用いた RC スラブのひずみ・応力予測 その1 混練から結合材粒子相互の接触まで

飯田 康介

概 要

本研究の目的は、物流倉庫の床スラブのコンクリートにおいて、時間依存体積変化に伴い発生するひび割れ対策として膨張材を混和したコンクリートを用いた、鉄筋コンクリートスラブのひずみおよび応力を予測することである。そのために、体積変化の要因として水和反応、水分移動、熱移動および外力の4項目を対象とし、コンクリートの応力状態、内部空隙構造、水分状態の相互の影響や外気の温湿度の変化を考慮できる予測手法の構築を試みる。

その1では、水と反応してから始発に至るまでの計算法と計算結果の一部について報告する。

Prediction of strain and stress of RC slabs using an expanding material Part 1: From mixing to contact among all binder particles

Abstract

The purpose of this research is to predict the strain and stress of reinforced concrete slabs using an expanding material to prevent cracking of concrete caused by time-dependent changes in volume in the distribution warehouse. We assume that the factors behind the changing volume of concrete are the hydration reaction, moisture transport, heat transfer, and external forces, and we have formulated a calculation method that can consider the interaction between the stress state, internal pore structure, moisture condition, and the changing temperature and humidity of the outside air.

In Part 1, we reported on the portion of the calculation method from mixing to contact among all binder particles and calculated a sample thereof.

キーワード: 水和反応、膨張材、粒度分布、
粒子間距離、余剰水

§1. はじめに

コンクリートは水と反応してから 1 週間程度の若材齢時、また、硬化してからは年単位の長期間にわたり体積変化を生じる。これは、一般的には①水和反応：水和に伴い発生する水和生成物やセメント硬化体内部の構造が変化することによるもの、②水分移動：乾燥によってコンクリート中の水分が増減することにより全体の体積が変化するもの、③熱移動：温度変化に伴う体積変化、④外力：ある荷重下において体積が変化するクリープ現象等として知られている。現在、これらの現象は日本建築学会等により提案されている予測式で予測することができるが、その多くは室内試験で得られたデータから統計処理によって導かれた式であるため、実躯体に打ち込まれたコンクリートが予測式通りの挙動を示すことは稀であり、バラツキを生じる¹⁾。このことは予測式を構築する際、実務的な利便性を優先するため、考慮できなかった情報があることを意味している。

図 1 に膨張材を混和した RC スラブのひずみの経時変化を、表 1 に各施工段階(フェーズ)においてスラブコンクリートに生じる体積変化とその要因として仮定した項目を示す。本研究ではコンクリートの状態や環境を 5 つの段階に分類して考えるものとした。第 1 フェーズは結合材と水が接触してから膨張を始める時点まで、すなわち、現実の事象としては始発までを想定している。計算モデルとしては結合材の粒子同士が接触し、応力を伝達ようになるタイミングである。第 2 フェーズは膨張を始めてから乾燥を開始するまでとした。この期間は型枠や養生シート等により、外気への水分の逸散がない状況を想定している。第 3 フェーズ以降は乾燥期間、第 5 フェーズはフォークリフトに代表される車両通行に伴う外力が生じる期間である。また、本研究では表 1 に示す因子を考慮し、拘束応力を求める。

本研究は、特に物流倉庫のデッキスラブおよび土間ス

ラブを対象とし、膨張材を混和したコンクリートを使用した鉄筋コンクリート(以降、RC と表記)スラブの応力やひび割れを予測するため、コンクリートの体積変化に影響を及ぼす各因子を連成した計算手法を新たに構築し、実躯体のコンクリートのひずみおよび発生応力の予測を目指すものである。

その 1 では計算手法全体の概要と第 1 フェーズの計算モデルを示す。なお、本研究では温度変化や外力の繰返しに伴い生じている可能性がある疲労については考慮せず、今後の課題とした。

その 2 以降について、その 2 ではフェーズ 2 の計算モデル構築と膨張ひずみ、ケミカルプレストレス等の解析、その 3 ではその 2 の解析値と実験値との比較を行う。それ以降はフェーズ 3 および 4 における計算モデル(収縮モデル)構築と解析および実験値との比較、外力によるクリープの検討、模擬試験体や実構造物での解析と計測値との検討を順次行っていく予定である。

§2. フレッシュ時のセメント粒子の接触、余剰水の体積に関する既往の研究

2.1 崔のモデル

粒子のオーダーでモデル化を行い(以降、水和反応モデルと表記)、かつ、膨張材を取り扱った例として、崔のモデルがある。崔は丸山が構築した水和反応モデル CCBM をベースに新たに膨張コンクリートに対応した水和反応モデルを提案した²⁾。これは Lokhorst の応力伝達モデル³⁾を膨張コンクリートに適用できるよう更に改良したもので、セメント粒子を単一径の球、水セメント比から 1 個の粒子が存在する空間を立方体と仮定し、粒子の反応厚さから立方体の面への接触を幾何学的に計算するものである。応力を伝達し、弾性およびクリープひずみを表現する要素はバーと呼ばれ、接触面積の増大につれ粒子表面積の 1%単位で挿入される。特に凝結時間との関連

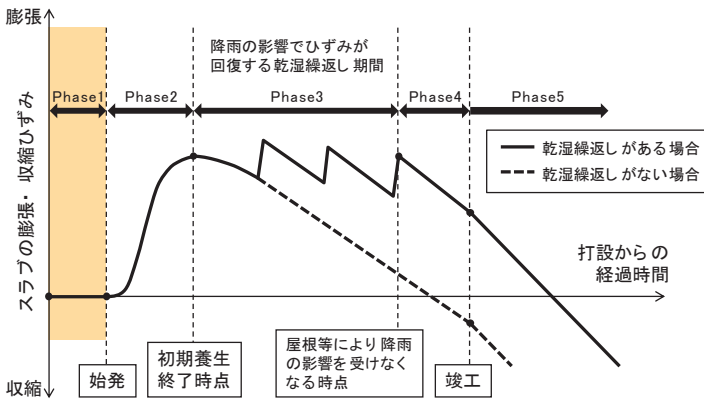


図1 膨張材を混和したスラブの面内ひずみの経時変化

表1 膨張材を混和したスラブコンクリートのひずみ・応力に関する長期的な影響因子

体積変化の要因	Phase				
	1	2	3	4	5
水和生成物 同士が 接触する前					
膨張材の反応 および 散水養生期間					
散水養生終了 後から上階ス ラブ型枠また は屋根が掛か るまでの乾燥 期間					
上階スラブ型 枠または屋根 が掛かってか ら竣工までの 期間					
竣工後					
膨張材の 水和反応	○	○	○	○	○
水分移動	-	-	○	○	○
熱移動	-	○	○	○	○
外力	-	-	-	-	○

は定めていないが、最初のバーが挿入されるまでは応力は生じず、この期間がフェーズ 1 に相当すると考えられ、その時間は立方体の大きさに依存しており、すなわち、水セメント比が考慮されたものとなっている。このモデルの場合、粒子は単一径を想定しているため、結合材の粒度を考慮することができない。また、後述する拘束応力と内部空隙構造とが連成していないため、その点も本研究とは異なる。

2.2 太田らの研究

太田らはセメント粒子の凝集状態とペーストの流動性に着目し、水を粉体充填拘束水、水膜、ブリーディング水に分け、粉体の充填率と比表面積から水膜厚さを計算するモデルを提案し、それが流動性と相関の高い直線関係にあることを実験により確認した⁴⁾。また、ペーストフロー値と水粉体比の関係から水膜の厚さを求め、ブリーディング水の体積を計算する方法を提案している。本研究における余剰水は、太田らのブリーディング水と水膜の一部に相当すると思われる。

§3. 体積変化計算モデルの概要

3.1 全体の概要

予測手法を構築するにあたり、手法は以下の条件を満足するものとした。

- ① 水和初期の膨張ひずみ、ケミカルプレストレスを計算したのち、乾燥収縮ひずみ、収縮に伴って生じる拘束応力を一貫通貫で計算できること。
- ② 外気温度、湿度の変化を考慮できること。
- ③ 拘束条件による圧縮強度などへの影響を考慮できること。
- ④ 膨張材の粒子径、表面積率を考慮できること。

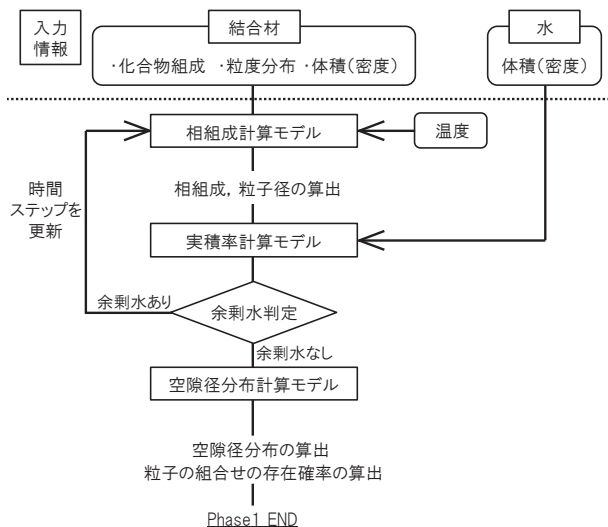


図2 フェーズ 1 の計算フロー

- ⑤ 入力値はコンクリートを作製せずとも分かる情報であること。
- ⑥ 将来的には低水セメント比の配合に対応することも念頭に置いたモデル化とする。

条件③について、膨張コンクリートは、膨張ひずみが拘束されることで内部が緻密になり、圧縮強度が増大することが知られている⁵⁾。これは、拘束力の程度によって内部の空隙構造が変化しているためであり、乾燥収縮挙動にも影響を与えると考えたためである。既往の予測手法や水和反応モデルは、拘束応力と空隙径計算モデルが連成していないため、本計算モデルは同条件を考慮した初の水和反応モデルであると言える。

条件④は、膨張材は粒子の大きさや表面積率によって膨張ひずみが増加することが知られており⁶⁾、その影響を考慮するためである。

以上より、逐次外気の温湿度、また拘束力が空隙構造に与える影響を連成しながら計算できる水和反応モデルを基本とすることにした。以降、本研究にて作成する水和反応モデルを本計算手法と表記する。また、第2フェーズ以降、既往の研究で用いられている方法を参考に、本計算手法においてもペーストと骨材の体積変化を分けて算出し、複合理論により応力分配を行いコンクリートのひずみを求める。

図2に、第1フェーズの計算フローを示す。第1フェーズは大きく分けて相 (=水和生成物) 組成計算モデル、実積率算定モデル、空隙径分布計算モデルで構成している。以降、水和反応により生成する物質を相、また、その組成を相組成と表記する。

次節より、フェーズ 1 の各モデルの概要を説明する。

3.2 相組成計算モデル

本計算手法における相組成モデルの概要を説明する。モデルは藤倉の方法⁷⁾をベースに一部変更加えたものとした。本計算手法は以降の章で説明する通り粒子の接触状態を幾何学的に計算するものであるため、未反応粒子径および生成物の体積から反応粒子径を求める。図3に粒子における各物質の定義を示す。粒子は水と接触した後、初期半径から内部および外部に向かって生成物を構

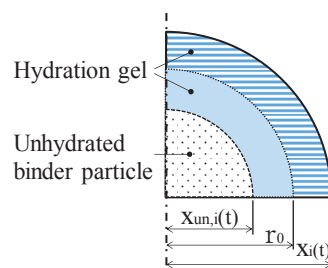


図3 結合材粒子の反応層の定義⁷⁾

築する。反応速度はクリンカー鉱物ごとに異なるため、各鉱物（エーライト(C3S)、ビーライト(C2S)、アルミネート(C3A)、フェライト(C4AF)の 4 種)ごとに水和反応率(以降、水和率と表記)の算出を行う。粒子の最外半径 x は生成物の体積から計算する。なお、本計算手法の相組成モデルにおいても全ての粒子が球形を保ったまま成長していくと仮定している。以下に粒子の最外半径、未反応粒子半径、水和率の関係を示す。

$$x_{un,i}(t) = r_0 - \sum k_i(r,t) \cdot dt \quad (1)$$

$$k_i(r,t) = \beta_i(t) \cdot k_{i0} \cdot \log(1/\alpha_i(r,t)) \quad (2)$$

$$\alpha_i(r,t) = 1 - (x_{un,i}(t) / r_0)^3 \quad (3)$$

$$x(t) = \{3/4 \pi \cdot (V_{hy} + V_{un})\}^{1/3} \quad (4)$$

ここに x : 粒子の最外半径 [μm]

x_{un} : 未反応粒子の半径 [μm]

r_0 : 粒子の初期半径 [μm]

t : 水と接触してからの経過時間 [hr.]

k_i : クリンカー鉱物 i の反応速度 [$\mu m/hr.$]

k_{i0} : クリンカー鉱物 i の初期反応速度 [$\mu m/hr.$]

β_i : 温度による係数

V_{hy} : 各クリンカー鉱物由来の水和生成物体積の合計 [μm^3]

V_{un} : 各クリンカー鉱物の未反応体積の合計 [μm^3]

水和収縮率の計算はフェーズ1においては初期全体体積から材齢 t における未反応粒子体積、生成物体積および水の体積の合計を差引いた量と定義する。

温度の影響はアレニウスの式により反応速度 k_i を変化させて考慮する。表 2 に計算に用いた中庸熟セメントの鉱物組成を示す。本相組成モデルにおいても全ての粒子において同じ比率で鉱物が含まれているものとした。

本研究では、膨張材は石灰-エトリンガイト複合タイプを取扱う。同タイプの膨張材の場合、まず極初期段階において遊離石灰が体積膨張を起こし、次いでエトリンガイトが生成され更に膨張を付与する。本研究では、全体の予測手法構築の優先のため、現時点においてはセメント粒子の C3A 由来のエトリンガイトの体積を高めることで膨張材を模擬することとし、最外半径を既往の研究データにフィッティングさせた。その結果、セメント種類が中庸熟の場合、膨張材とする粒子のエトリンガイトの体積はセメントの 20 倍程度であった。初期の質量粒度分布は Rosin-Rammler 分布を採用し、粒子径は材料ごとに 32 種の径を設定した。

表2 セメントのクリンカー鉱物の質量割合

C3S	C2S	C3A	C4AF
0.283	0.596	0.040	0.081

次に、実積率計算モデルを説明する。

3.3 実積率計算モデル

本計算手法では粒子の間に存在する水の体積を計算するために、粒子の実積率および余剰水の体積を逐次計算する。各体積の関係を図 4 に示す。粒子と水の体積の関係を式(5)から式(8)に示す。

$$V(t) = V_b(t) + V_w(t) = V_b'(t) + V_{ws}(t) \quad (5)$$

$$V_b(t) = w_{bi}(t) / \rho_{bi} \quad (6)$$

$$V_w(t) = w_w(t) / \rho_w \quad (7)$$

$$V_b'(t) = V_b(t) / a(t) \quad (8)$$

ここに V : 全体(水+粒子)の体積 [mm^3]

V_b' : 粒子のかさ体積 [mm^3]

V_b : 粒子の体積 [mm^3]

V_w : 水の体積 [mm^3]

V_{ws} : 余剰水の体積 [mm^3]

a : 粒子の実積率

ρ_{bi} : 結合材の密度 [dg/mm^3]

ρ_w : 水の密度 [dg/mm^3]

本計算手法では、前述の通り多成分球形粒子としている。多成分球の実積率、すなわち充填率の計算方法は数学的にも難しい問題であるが、本計算手法では鈴木らの方法⁸⁹⁾により求めた。この方法は粒子の面積混合分率、配位数などから空間率(粒子間の隙間の体積率)を推定することができるものである。空間率と実積率の関係を式(9)に示す。

$$b(t) = 1 - a(t) \quad (9)$$

ここに a : 実積率

b : 空間率

推定に際し、単一径の粒子を充填した場合の空間率 ϵ を入力する必要があり、鈴木らは単一粒子径での空間率をガラスビーズとガラス破砕片を用いた実験により計測し、計算値との比較を行っている。

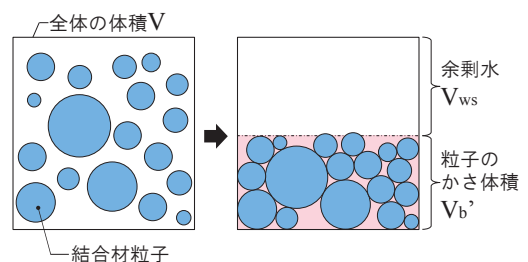


図4 余剰水体積の定義

以上より、余剰水体積を計算し、その値が 0 になった時刻を計算始発時間と呼称する。なお、本計算手法においては全ての粒子が同時に接触すると仮定している。

次に、空隙径分布計算モデルを説明する。

3.4 空隙径分布モデル

以上までに示した相組成および粒子径の計算、また、余剰水体積の計算を逐次繰り返し、余剰水体積が 0 になった時点において粒子が完全に接触したものとみなし、そのときの空隙径分布および空隙径を構成する粒子の各組合せ、発生確率の計算を行う。

空隙径の計算方法であるが、藤倉は水和生成物に粒度分布を与え、3 個ないし 4 個の径の異なる粒子の中に内接する円の半径を空隙径としており、空隙径分布としてはいわゆるゲル空隙を対象としている。本計算手法の対象は生成物内部に生じるゲル空隙を含んでいないが、本計算手法においても最密充填構造を仮定し、4 個の粒子が接触し、その内部に内接する球の径を空隙径と仮定する。この空隙は水和初期に水で満たされている空間に生じるものであるため、毛細管空隙に相当すると考える。空隙径は岩田の解¹⁰⁾により求める。これは、4 個の径の異なる球に内接する球の半径を求めるものである。図 5 に粒子の構成と空隙径のイメージを示す。

次に 4 個の粒子の組合せが生じる確率を各径の粒子の個数から計算する。粒子の組合せのパターンは表 3 に示す 5 種類のパターンが存在する。

粒子径 r の粒子の個数を $n(r)$ 、全ての粒子の総数を N_{total} とすると、各径の粒子の存在確率 $p(r)$ は以下の式で表せる。

$$p(r) = n(r) / N_{total} \quad (10)$$

本計算手法では全ての粒子が同時に接触すると仮定したため、各パターンの組合せの発生確率は以下のようになる。

- ① $p(r_a)^4$
- ② $p(r_a)^3 \times p(r_b) \times 4$

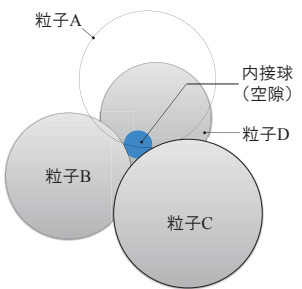


図5 粒子の構成と算定対象の空隙のイメージ⁷⁾

- ③ $p(r_a)^2 \times p(r_b)^2 \times 6$
- ④ $p(r_a)^2 \times p(r_b) \times p(r_c) \times 12$
- ⑤ $p(r_a) \times p(r_b) \times p(r_c) \times p(r_d) \times 24$

以上より、各組合せの発生確率が求まり、また、岩田の解により各組合せにおける内接球の半径、すなわち空隙径も求まる。なお、1 個の粒子が他の 3 個の粒子に対し小さすぎて 4 個の粒子が接触できない場合、および 3 個の粒子径が同一であり、かつ、全ての粒子が同一平面に接する場合には内接球が存在しないため、その組合せについては発生確率を 0 とし、全ての組合せの発生確率の合計が 1 になるよう割戻しを行った。空隙径は組合せごとに異なる数値であるため、基準となる空隙径(以降、基準空隙径と表記)分布を定め、基準空隙径ごとに存在確率を積算する。式(11)から式(12)に、空隙径の基準空隙径への変換に用いた式を示す。

$$\text{if } \phi_n \leq \phi_{cn} < \phi_{n+1}$$

$$\phi_{cn} = \begin{cases} \phi_n & \text{if } \phi_{cn} < (\phi_n + \phi_{n+1}) / 2 \\ \phi_{n+1} & \text{if } \phi_{cn} \geq (\phi_n + \phi_{n+1}) / 2 \end{cases} \quad (11)$$

$$\phi_{cn} = \begin{cases} \phi_n & \text{if } \phi_{cn} < (\phi_n + \phi_{n+1}) / 2 \\ \phi_{n+1} & \text{if } \phi_{cn} \geq (\phi_n + \phi_{n+1}) / 2 \end{cases} \quad (12)$$

ここに ϕ_n : 基準空隙径[μm]
 ϕ_{n+1} : ϕ_n の次に大きい基準空隙径[μm]
 ϕ_{cn} : 組合せごとに求まる空隙径[μm]

§4. 計算結果

表 4 に本計算手法で計算した水和率、 k_{i0} の設定値およびセメント協会の報告書に記載されている水和率と藤倉による k_{i0} の値を示す。材齢 7 日時点において、水和率はセメント協会の実験値と比べて 1 割程度小さく設定した。この理由は、計算は常時温度を 20°C 一定としているが、実験では練混ぜ直後の温度上昇により水和初期の反応速度が速くなっている可能性があることを考慮したためである。今後、実験結果を用いて再度修正を行う。

図 6 に初期の粒子半径 11 μm および約 21 μm の粒子の最外半径の経時変化を示す。同図には崔による膨張材粒子の反応厚さも併せて示す。本計算手法と崔の計算

表3 粒子の組合せパターン一覧

パターン No.	構成粒子				備考
	A	B	C	D	
①	粒子a	粒子a	粒子a	粒子a	全て同じ粒子
②	粒子a	粒子a	粒子a	粒子b	3個が同じ粒子
③	粒子a	粒子a	粒子b	粒子b	2個ずつ同じ粒子
④	粒子a	粒子a	粒子b	粒子c	2個が同じ粒子
⑤	粒子a	粒子b	粒子c	粒子d	全て異なる粒子

表4 クリンカー鉱物の水和率と水和反応速度の初期値

クリンカー 鉱物	水和率%						k_{i0} ($\mu\text{m}/\text{hr}$)	
	セメント協会			本計算手法			藤倉	本計算手法
	1日	3日	7日	1日	3日	7日		
C3S	49	63	74	26.2	47.9	67.1	0.01040	0.02407
C2S	10	18	27	6.1	13.5	23.9	0.00042	0.00269
C3A	56	75	80	32.3	54.6	73.0	0.01462	0.03181
C4AF	25	39	47	12.7	25.9	41.7	0.00208	0.00732

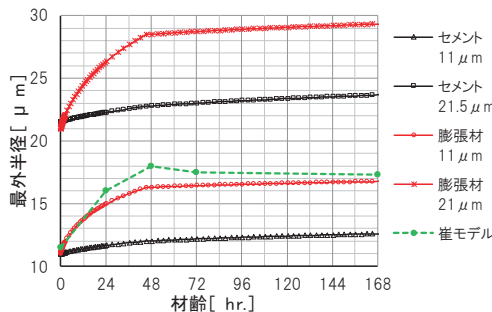


図6 結合材粒子の外部半径の経時変化例

値はほぼ同じ値を示す。

図 7 に水結合材比 50%、セメントを膨張材に質量比 5.7%置換したペーストの実積率および余剰水体积の経時変化を示す。 ϵ を 0.30 から 0.32 としたとき、計算始発時間はそれぞれ 4 時間 12 分から 12 時間 19 分となった。

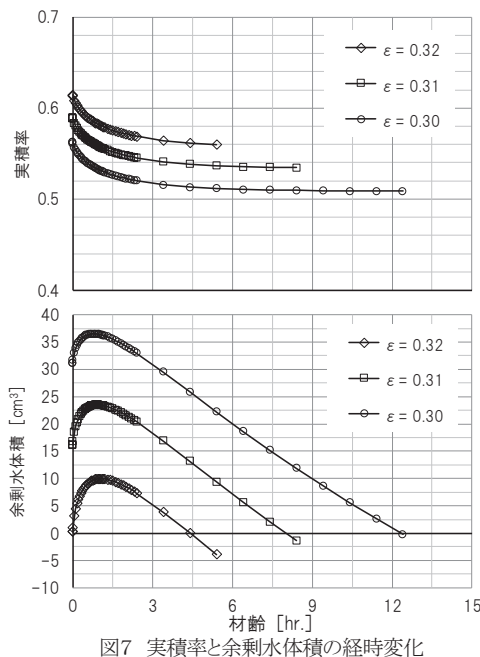
図 8 に粒子の計算始発時刻における粒度分布、図 9 に各配合における粒子接触時点の空隙径分布を示す。同図には、藤倉の材齢 1 日における計算結果も併せて示す。構成粒子が生成物に比べ大きいため、藤倉の結果に比べ径の大きい空隙の立上がりが大きくなっている。積算空隙容積が小さい原因として、空隙容積を初期の全体体積と水和生成物と未反応粒子体積の合計の差分と定義しており、セメントに対して膨張材の体積膨張が大きいため、小さくなったと考える。膨張材の水分消費量も含め、計算法の修正が必要と思われる。

フェーズ 2 以降は、4 個の粒子によって構成される組合せ＝四面体に着目し、各四面体ごとに計算を行う。その際、拘束力による粒子相互の接触面積の変化や、粒子間距離の変化を考慮した計算を行っていく。

§5. 結論

結合材の鉱物組成、粒度分布を考慮した、粒子相互の接触時間およびそのときの粒子の組合せ、各組合せにおける空隙径とその発生確率を求める計算モデルを構築した。

単一径粒子のときの空間率 ϵ を 0.30 から 0.32 としたとき、粒子の接触時間は水セメント比 50%、中庸熱セメントを膨張材に 5.7%置換した配合のペーストにおいて 4 時間から 12 時間程度であった。



参考文献

- 1)日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形に関するシンポジウム委員会報告書・論文集, pp.101-121, 2001年7月
- 2)崔亨吉・濱幸雄・伊藤瞬:クリープ解析による膨張モルタルの拘束応力予測に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, 2016年
- 3)SIMULATION OF THE EFFECT OF GEOMETRICAL CHANGES OF THE MICROSTRUCTURE ON THE DEFORMATIONAL BEHAVIOR OF HARDENING CONCRETE, Cement and Concrete Research, Vol.27, No.10, pp.1465-1479, 1997
- 4)太田顕・名和豊春・大沼博志:セメント粒子の凝集構造とセメントペーストの流動性の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, 2001年
- 5)盛岡実・萩原宏俊・坂井悦郎・大門正機:組成や粒度の異なる膨張材を混和したモルタルの膨張特性と強度発現性, 材料, Vol.48, No.8, pp.848-852, 1999年8月
- 6)国分正胤・ほか:膨張性セメント混和材を用いたコンクリートに関するシンポジウム講演概要, 土木学会, 1972年
- 7)藤倉裕介・大下英吉:水和反応と構成相の粒度変化に基づくセメント硬化体の空隙構造モデル, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.1, pp.38-52, 2010年2月
- 8)鈴木道隆・八木章・渡辺球夫・大島敏男:3成分球形粒子ランダム充填層の空間率の推定, 化学工学論文集, 第10巻, 第6号, pp.721-727, 1984年
- 9)鈴木道隆・市場久貴・長谷川勇・大島敏男:粒度分布のある多成分粒子ランダム充填層の空間率, 化学工学論文集, 第11巻, 第4号, pp.438-443, 1985年
- 10)岩田至康編:幾何学大辞典, 第2巻, p.253, 槇書店, 1974年



ひとこと

ひび割れの正確な予測は、材料の無駄やお客様の不安を減らすことにつながります。引き続き開発を進めて参ります。

飯田康介

