

# 論文 コンクリート中の粗骨材が拘束試験体のひび割れに及ぼす影響についての解析的検討

篠野 宏\*1・丸山 一平\*2・中村 光\*3

**要旨:** 粗骨材の乾燥収縮ひずみ量がコンクリートの拘束ひび割れ性状へ影響を及ぼすことが報告されており、本研究では解析によりひび割れ発生プロセスを再現することを目的とする。解析は剛体-バネモデル(RBSM)と水分移動を考慮したトラスモデルを連成した手法を用い、粗骨材、モルタル、それらの界面をモデル化した。結果として、粗骨材の収縮量が大きいほどひび割れが集中し、収縮が小さいほどひび割れが分散し、既往の研究と同様の傾向を再現することができた。

**キーワード:** 剛体バネモデル, 乾燥収縮, ひび割れ, 粗骨材, 拘束試験, メソスケール

## 1. はじめに

コンクリートを構成する骨材とセメントペーストは共に水分の散逸により体積変化を生じる。RC 構造物では、この収縮が拘束される場合に、ひび割れが生じる。この乾燥収縮によるひび割れは構造物の美観や耐久性を低下させるため、ひび割れの発生・進展を予測することは重要である。

コンクリートのひび割れ発生・進展の予測に関する研究は多々行われているが、コンクリートを均一材料とするスケールでの研究が多い<sup>1)</sup>。

一方で、コンクリート中の粗骨材による内部拘束が乾燥収縮拘束試験で生じる微細ひび割れに影響を及ぼすという報告<sup>2)</sup>がある。この研究では、コンクリートの壁面奥行き方向を模擬した拘束試験において、乾燥収縮ひずみが大きい粗骨材を用いると、微細ひび割れが1か所に集中し、逆に、乾燥収縮ひずみが小さい粗骨材を用いた場合は微細ひび割れが分散するということが確認された。これは、収縮の小さい粗骨材を用いた場合、1)コンクリート全体の乾燥収縮ひずみが減少し、拘束による引張応力が減少するため乾燥収縮ひび割れが発生しにくくなることと、2)粗骨材周辺において粗骨材によるモルタルの内部拘束が強くなるため、微細ひび割れが多数発生<sup>3)</sup>することにより、ひび割れが分散するものと考えられた。

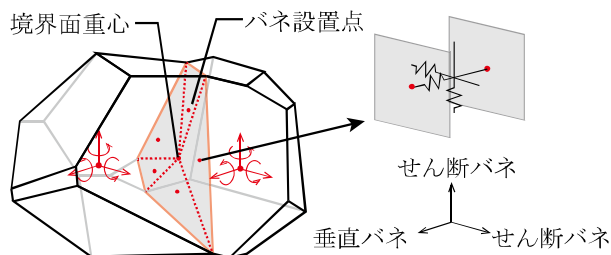


図-1 要素間に設置したバネ<sup>6)</sup>

収縮の大きい粗骨材はその逆となる。

つまり、これらのひび割れを予測するには、コンクリートを均一材料ではなく、モルタルと粗骨材から成る複合材料と見るスケール(メソスケール)を対象とする必要がある。そこで、本研究では、骨材種類が変化したときの乾燥収縮ひび割れの性状を予測することを目的とし、モルタル・粗骨材・その界面から成る要素を用いて、ひび割れを予測する解析手法の構築を行う。解析手法は、剛体バネモデル(以下、RBSM)<sup>4)</sup>と水分移動をトラスモデル<sup>5)</sup>により考慮したモデルを用いた。

## 2. 解析概要

### 2.1 3次元 RBSM(剛体-バネモデル)

RBSMとは各要素を剛体と仮定し、各要素間に設置したバネにより対象を離散化する手法である<sup>4)</sup>。バネに非線形な構成則を与えることで、解析対象の破壊挙動を表現する。本研究では、図-2に示すように、要素境界に表面力の評価点として複数の積分点を設け、積分点1つに対し圧縮と引張を負担するバネを1つ、せん断を負担するバネを直交に2つ設置した<sup>6)</sup>。既往の研究では、要素境界面の重心に回転バネを設けることで曲げモーメントの伝達を表現しているが<sup>7)</sup>、複数の積分点を設けることで回転バネを設けることなく曲げモーメントの伝達を表現可能である。このことから、垂直バネ・せん断バネの軟化を考慮するだけで、回転バネの非線形性に相当する挙動を評価できる。

RBSMは不連続な要素を用いた解析であるため、ひび割れなどの要素間が不連続な挙動を比較的簡単に再現できる。そのため、円柱試験体の圧縮試験の破壊挙動など、FEMでは解析が困難なものも解析可能であるが、a)ひび割れの発生・進展が要素分割に大きく影響を受け、b)バ

\*1 名古屋大学 大学院環境学研究科 (学生会員)

\*2 名古屋大学 大学院環境学研究科 准教授・博士(工学) (正会員)

\*3 名古屋大学 大学院工学研究科 教授・博士(工学) (正会員)

ネに与える特性値の根拠がないなどのデメリットも有する。本研究では、a)に対しては、要素分割依存性を低減するためボロノイ分割を用いた<sup>8)</sup>。b)に対しては、引張・圧縮・静水圧载荷の既往の試験を再現した解析を行い、実験値と解析値を合うように感度解析を行ったバネの値<sup>9)</sup>を用いることとした。なお、今回の解析ではクリープの影響は考慮していない。

## 2.2 水分移動解析手法

### (1)解析モデル

水分移動解析手法として、RBSMと連成可能なトラスネットワークモデル<sup>5)</sup>を用いた。トラスネットワークモデルは、各ボロノイ分割の母点間を結ぶトラスにより拡散方程式を離散化した1次元のモデルである。トラスの断面積は、トラスが通過するボロノイ面の面積に応じて、トラスの総体積(トラスの断面積とトラス長さの積の和)が試験体全体の体積と同じになるよう与えた<sup>5)</sup>。式(1)に離散化したトラスの拡散方程式を示す。

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{A \cdot K(w)}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \right\} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \\ & + \frac{1}{\omega} \frac{AL}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial t} \\ \frac{\partial u_2}{\partial t} \end{Bmatrix} \\ & + \frac{A \cdot K(w)}{d_{env}} \begin{Bmatrix} 0 \\ u_2 - u_{env} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $A$ ：トラス断面積(mm<sup>2</sup>)、 $L$ ：トラス長(mm)、 $u_1$ 、 $u_2$ ：トラス節点の化学ポテンシャル(J/g)、 $u_{env}$ ：境界条件の化学ポテンシャル、 $w$ ：体積含水率(g/mm<sup>3</sup>)、 $K(w)$ ：水分伝導率(mm<sup>2</sup>/s・g/mm<sup>3</sup>・(J/g)<sup>-1</sup>)、 $d_{env}$ ：境界面と空気間の遷移区間を仮想的にセメント硬化体の長さで換算した値(mm)、 $t$ ：時間(s)、 $\omega$ ：容積換算係数<sup>5)</sup>である。時間の離散化はクランクニコルソン差分によって行った。

本研究では、丸山ら<sup>9)</sup>が提案した化学ポテンシャルを駆動力とする拡散方程式を使用し、水分伝導率は以下の式から算出した。

$$K/K_{60} = \frac{1}{(5.0 - 9.1R + 4.15R^2)} \quad (2)$$

$$K_{60} = 1.47 \cdot 10^{-10} \exp(4.41 \cdot t_w) \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

$$t_w = w_g / \rho_w / S \quad (4)$$

ここで、 $K_{60}$ ：相対含水率60%時の水分伝導率(mm<sup>2</sup>/s・g/mm<sup>3</sup>・(J/g)<sup>-1</sup>)、 $R$ ：相対含水率(-)、 $t_w$ ：統計的吸着厚さ(nm)、 $w_g$ ：105°C脱水基準の質量含水率(g/g)、 $S$ ：水蒸気吸着によるBET比表面積(m<sup>2</sup>/g)である。なお、ポテンシャルの単位J/gは、水1g当たりのエネルギーを示している。これらの値は、文献10)のN55のセメントペーストで使用された値を用いた。これらの式はセメントペーストを用いた実験によるものであるが、モルタルとセメントペーストの乾燥時の拡散係数には大きな差がないという報告<sup>10),11)</sup>があり、本研究でそのまま用いた。式(1)に示すように、外気との水分の拡散は、外気に接する材料に仮想的な厚さを持たせることでモデル化した。そのため、外気的水分伝達率には、各材料の含水率に応じた水分伝導率を用いた。また、 $d_{env}$ の値は3.0mmとした。

### (2)解析に用いた特性値

表-1に式(2)、(3)、(4)から算出された飽水状態の水分伝導率と拡散解析に使用した材料特性を示す。

モルタルの特性値は、解析対象実験で用いられているものと同じ調査、養生条件のモルタルから測定した値を用いた。

粗骨材も含水率と $dw/du$ は、解析対象実験で用いられている粗骨材の値<sup>12)</sup>を用いたが、水分伝達率については、参考となる資料が少ないので、式(2)、(3)、(4)から算出した値を10倍した値を用いた。これは、粗骨材はセメントペーストと同程度の透水係数を持つ<sup>13)</sup>ことや、一般的にモルタルよりも含水率が平衡状態となる速度が速い<sup>14)</sup>ことから、モルタルよりも水分伝達率は大きい、値がかけ大きく異なる訳ではないと考えたためである。

骨材-モルタル界面に接するトラス要素も遷移帯の影響により水分移動の速度が速いため、水分伝導率を10倍とした。なお、ひび割れ部では水分伝導率が大きくなることが予想されるが、本研究では特に考慮していない。

## 2.3 材料構成則

材料の構成則は、モルタル要素・粗骨材要素・モルタルと粗骨材の界面に分けてモデル化した。また、本研究は十分水和した状態のコンクリートを対象としており、解析中の水和による物性の変化はないものとした。

表-1 水分移動解析と乾燥収縮に関する材料パラメータ

	体積含水率 $w(\text{g}/\text{cm}^3)$	飽水時の水分伝導率 (mm <sup>2</sup> /s・g/mm <sup>3</sup> ・(J/g) <sup>-1</sup> )	$dw/du^{10)}$	乾燥収縮係数		
				大(-500μ)	中(-200μ)	小(0μ)
モルタル	0.2505	$8.5 \times 10^{-9}$	0.0016	$4000 \times 10^{-6}(-1800\mu)$		
粗骨材	0.00765	$8.5 \times 10^{-8}$ (モルタルの10倍)	0.00005	大(-500μ)	中(-200μ)	小(0μ)
				$1132 \times 10^{-6}$	$453 \times 10^{-6}$	0
界面	0.129(※ <sub>1</sub> )	$8.5 \times 10^{-8}$	0.000825(※ <sub>1</sub> )	※ <sub>1</sub>		

※<sub>1</sub>：モルタルと粗骨材の平均値

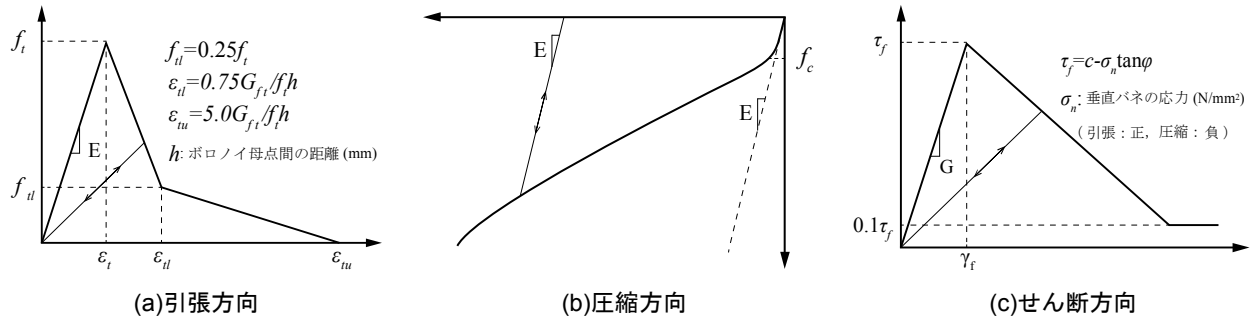


図-2 モルタル・粗骨材要素の材料構成則

表-2 材料の力学的特性

	垂直バネ				せん断バネ		
	ヤング率 $E$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	破壊エネルギー $G_{f1}$ (N/m)	圧縮強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	粘着力 $c$ (N/mm <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (degree)	$\eta = G/E(-)$ ( $G$ :せん断剛性)
モルタル	17	3.0	70	40	5.6	37	0.35
粗骨材	65	200	—	200	200		
界面	※ <sub>2</sub>	1.5	7	40	5.6		

※<sub>2</sub>: 図-3 参照

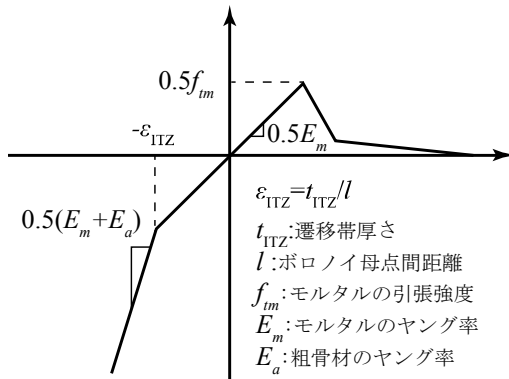


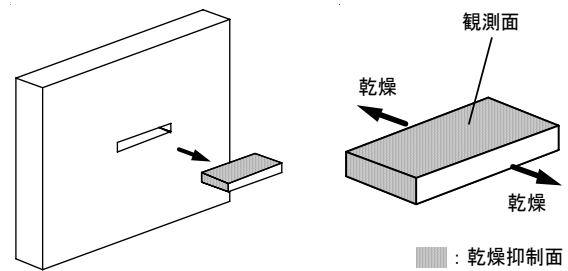
図-3 粗骨材・モルタル界面の構成則

(1) モルタル要素・粗骨材要素

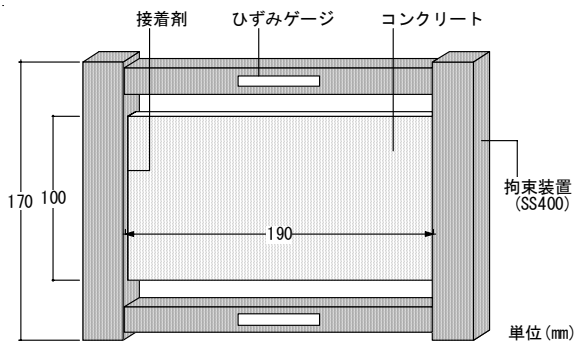
図-2 にモルタル要素・粗骨材要素の垂直バネ、せん断バネの構成則を示す。また、表-2 にモルタル要素と粗骨材要素、モルタル-粗骨材界面に用いた材料の力学的特性を示す。なお、図-2 中の記号は表-2 の記号と同様の意味を示す。引張の挙動は破壊エネルギーを考慮した原点指向の 1/4 引張軟化モデルであり、圧縮の挙動は、静水圧試験の応力-体積ひずみ関係から得られた逆 S 字の曲線でモデル化した。

せん断バネは破壊基準をモール・クローン型とし、破壊後の軟化係数は垂直バネの応力に依存するものとした。また、ひび割れ面(垂直バネが引張強度に達した面)に関しては、せん断剛性の低減及び軟化モデルを導入した。なお、これら応力ひずみ関係の決定に必要な係数は、文献 6) で使用されているものを用いた。

(2) モルタル-粗骨材界面



(a) 実験で想定している状況



(b) 実験状況

図-4 解析対象実験<sup>2)</sup>

図-3 に界面の構成則を示す。引張のヤング率と強度はモルタルの 1/2<sup>15)</sup>、破壊エネルギーは界面に関する情報が少ないため単純に 1/10 とし、図-2(a) と同じ軟化・履歴特性とした。圧縮側の挙動は、遷移帯がつぶれ、粗骨材とモルタルが接触する変形に相当するひずみ ( $-\epsilon_{ITZ} = t_{ITZ}/l$ ,  $t_{ITZ}$ : 遷移帯の厚さ(mm),  $l$ : ボロノイ母点間の長さ(mm)) に達するまではモルタルの 1/2 のヤング率

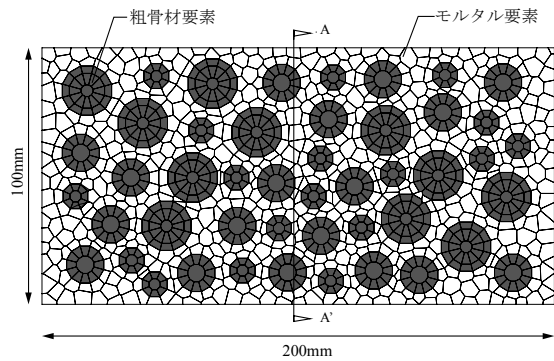


図-5 解析モデル

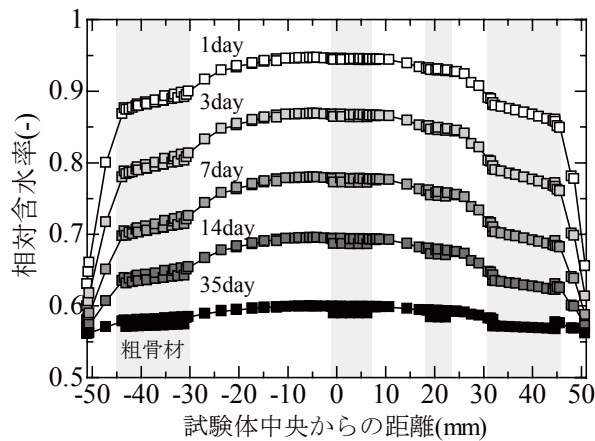


図-6 相対含水率の経時間変化

	解析結果(変形倍率×20)
骨材 収縮 小 (0μ)	
骨材 収縮 中 (-20 0μ)	
骨材 収縮 大 (-50 0μ)	

図-7 乾燥 35 日後のひび割れ性状

ング率をモルタルと骨材の平均とし、図-2(b)と同じ応力ひずみ履歴を与えた。なお、遷移帯の厚さ( $t_{TZ}$ )は様々な値が測定されている<sup>16),17)</sup>が、今回の研究では10μとした。

せん断バネはモルタル要素と同じ構成則、物性とした。これは、本研究の解析対象が拘束により引張ひずみ、ひび割れ(垂直バネの破壊)が卓越する状態であり、影響は小さいと考えたためである。

### (3)収縮ひずみの導入

モルタル・粗骨材の収縮ひずみは相対含水率に線形の関数であると仮定して、式(5)のように与えた。

$$\epsilon_{sh} = \alpha_{sh} \cdot \Delta R \quad (5)$$

ここで、 $\epsilon_{sh}$ :乾燥収縮ひずみ、 $\alpha_{sh}$ :乾燥収縮係数、 $\Delta R$ :相対含水率の変化量(-)である。

粗骨材、モルタル、界面の乾燥収縮係数を表-1へ示す。括弧内の値は、表-1に示す乾燥収縮係数を用いた時の20°C RH60%で平衡時の乾燥収縮ひずみである。収縮ひずみは、等価節点力として、垂直バネへ与えた。

## 3. 拘束試験体を対象としたひび割れ進展挙動評価

### 3.1 解析対象

図-4に解析対象を示す<sup>2)</sup>。RC壁の厚さ方向を模擬し、試験体長辺2辺のみから乾燥させ、ひび割れの進展を観察したものである。本研究では、粗骨材の物性を変化させた際のひび割れ性状の変化を評価する。

図-5に解析に用いた要素を示す。要素分割は三次元で行っているが、図-5表面に見えている要素の断面にそのまま厚さを持たせた疑似二次元要素である。短辺を体積のないプレート要素により完全固定し、長辺を水分移動の境界条件とした。要素の直径は平均5mmである。粗骨材は図中の灰色の部分であり、対象実験の粗骨材の体積比と同じく、面積比で38%とした。また、その形状は円形で、粒径は20mm、15mm、10mmの3種類とし、ランダムに粒径や配置を決定した。表-1に示すように、粗骨材の収縮ひずみの大小を変化させた3種類の試験体で解析を行った。

なお、水分移動解析は乾燥期間3日までは0.1時間ごと、3日から7日までは0.5時間ごと、それ以降は2時間ごとに行った。応力解析は、乾燥期間2日までは0.1日ごと、その後は21日まで1日ごと、21日後は7日ごとに行い、それらの期間に生じた等価節点力の増分を与え、35日まで行った。

### 3.2 解析結果

#### (1)水分移動解析

図-6に図-5のA-A'で切断した面の相対含水率の経時変化を示す。背景が灰色の部分は粗骨材の部分を表

$\varepsilon_i \leq \varepsilon_{face} < \varepsilon_{il}$      $\varepsilon_{il} \leq \varepsilon_{face} < \varepsilon_{tu}$      $\varepsilon_{tu} \leq \varepsilon_{face}$  (図-2 参照)

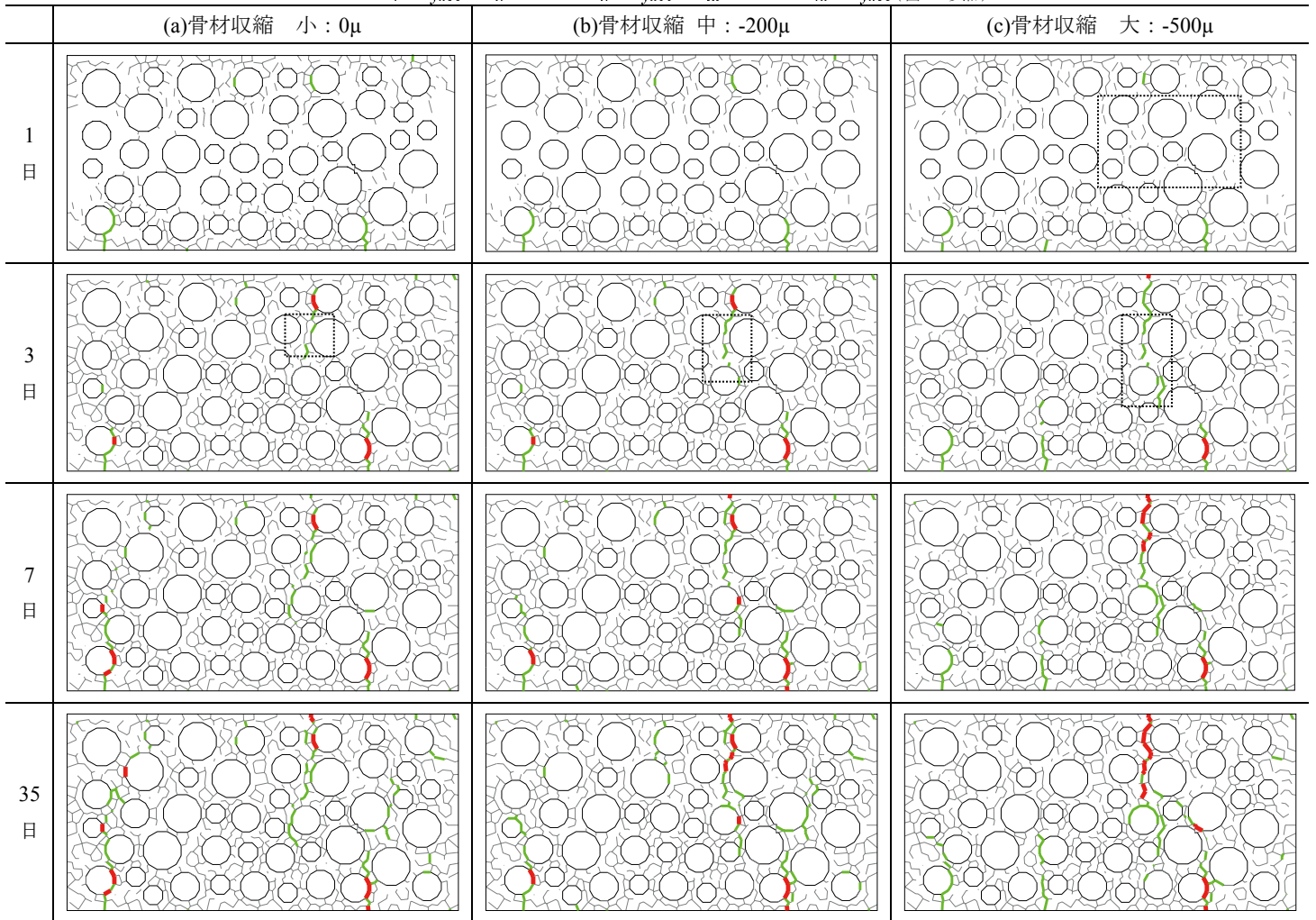


図-8 垂直バネの損傷進展過程

している。粗骨材の拡散係数はモルタルの 10 倍であるため、相対含水率の低下速度が速い。また、乾燥面から試験体中央にかけて生じる相対含水率の分布は、乾燥初期が最も差が大きく、乾燥 35 日で含水率の分布はほぼ均一となった。

### (2)乾燥期間 35 日におけるひび割れ性状

図-7 に乾燥 35 日後のひび割れを示す。図中の四角で囲った部分はひび割れ幅が最大の箇所を示す。乾燥 35 日後において最大のひび割れ幅は、骨材収縮 0 $\mu$  では 0.14mm、-200 $\mu$  で 0.20mm、-500 $\mu$  で 0.25mm であり、骨材収縮が大きい場合、ひび割れ幅も大きくなった。また、ひび割れの数は骨材収縮 0 $\mu$  が最も多く、骨材収縮が大きくなるにつれ減少した。これらのひび割れの幅と数の傾向は、解析対象の実験<sup>1)</sup>で確認された傾向と同様であり、解析によっても粗骨材の収縮量がコンクリートのひび割れ性状へ与える影響が確認された。

### (3)垂直バネの破壊過程

図-8 に垂直バネの状態の経時変化を示す。図-8 の

灰色の線で囲まれた部分は粗骨材を示しており、バネのひずみの値に応じて、凡例に示すようにバネの状態を示した。なお、ポロノイ面には複数のばねが存在するため、式(6)のように、重みづけ平均化して評価した。

$$\varepsilon_{face} = \sum_N \varepsilon_i \cdot A_i / A_{face} \quad (6)$$

ここで、 $\varepsilon_{face}$  : ポロノイ面の平均ひずみ( $\mu$ )、N : ポロノイ面に存在するバネの個数、 $A_i$  : バネ 1 つが負担する面積 ( $\text{mm}^2$ )、 $\varepsilon_i$  : バネ 1 つのひずみ( $\mu$ )、 $A_{face}$  : ポロノイ面全体の面積( $\text{mm}^2$ )である。

図-8 から、乾燥 1 日では、粗骨材収縮 0 $\mu$  と -200 $\mu$  はひび割れに差が見られない。一方、-500 $\mu$  の試験体は図中に四角で示した部分のように、紙面と並行方向に乾燥面から試験体の中央部(乾燥面から垂直に 50mm の箇所)まで、ひび割れが他のものより進展している。乾燥 3 日では、乾燥 1 日にバネの破壊が生じた箇所のひび割れが連結、幅を拡大した。特に、ひずみが  $\varepsilon_{il}$  以上の面は、四角で示す部分のように、粗骨材収縮が大きいほど試験体



中央部へ進展しており、ひび割れ性状の差が生じた。試験体の含水率分布は骨材収縮量の変化に関わらず同様であるため、乾燥 1 日、3 日のひび割れ性状の変化は、粗骨材の収縮量の変化により生じたものと考えられる。また、乾燥 1 日、3 日において、ひび割れ性状の差がより明確に生じた部分(図中に四角で示した個所)は、乾燥 35 日において最も大きなひび割れとなった。

以上から、乾燥 1 日、3 日の乾燥初期の段階から粗骨材の収縮がひび割れに影響していることが確認され、この差異は最も大きなひび割れが生じる部分に顕著であることが確認された。

#### 4. まとめ

本研究は、乾燥収縮量の異なる粗骨材を用いたコンクリートの一軸拘束試験における、ひび割れ発生プロセスを解析により再現することを目的とした。解析手法は、剛体バネモデルを用いた。粗骨材とモルタル、その界面をそれぞれモデル化し、粗骨材要素に与える収縮量をパラメータとして解析を行った。なお、今回の解析では、クリープ、ひび割れ部の水分伝導率の変化の影響を考慮していない。結果として、以下の知見を得た。

- 1) RBSM を用いた解析により、粗骨材の収縮が小さいほどひび割れが分散し、粗骨材の収縮が大きいほどひび割れが集中した。この傾向は、既往の文献と同じ傾向であり、RBSM により実験で確認されていた傾向を再現することができた。
- 2) 今回の解析では、粗骨材の収縮量の変化の影響により、乾燥 1 日目からひび割れ性状に差が生じていることが確認された。この骨材収縮量によるひび割れ性状の差異は、乾燥 35 日において最もひび割れ幅が拡大する部分で顕著であった。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006.3
- 2) 北口将弘, 篠野宏, 丸山一平：拘束条件下における乾燥によるひび割れ進展に関する基礎研究, 日本建築学会東海支部研究報告書, Vol.51, pp.61-64, 2013.2
- 3) I.Maruyama, H.Sasano : Strain and crack distribution in concrete during drying, *Material and Structures*, 2013.8, DOI : 10.1617/s11527-013-0076-7
- 4) Kawai, T. : New discrete models and their application to seismic response analysis of structure , *Nuclear Engineering and design*, Vol.48, pp.207-229, 1978
- 5) H.Nakamura, W.Srisoros, R.Yashiro, M.Kunieda : Time-Dependent Structural Analysis Considering Mass Transfer to evaluate Deterioration Process of RC Structures, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.4, No.1, pp.147-158, 2006.2
- 6) 山本佳士, 中村光, 黒田一郎, 古屋信明 : 3 次元剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析, *土木学会論文集 E*, Vol.64, No.4, pp.612-630, 2008
- 7) S.Saito, H.Hikosaka : Numerical analysis of reinforced concrete structures using spring network models, *Journal of Materials, Concrete Structure Pavements*, Japan Society of Civil Engineers, No.627 V-44, pp.289-303, 1999.8
- 8) J.E.Bolander, S.Saito: Fracture analyses using spring networks with random geometry, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.61, No.5-6, pp.569-591, 1998
- 9) 丸山一平, 五十嵐豪, 岸直哉 : セメント硬化体中の水分移動に関する基礎研究, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.76, No.668, pp.1737-1744, 2011.10
- 10) G.Hedenblad : Moisture Permeability of Mature Concrete, Cement Mortar and Cement Paste, Doctor thesis. Lund Institute of Technology, Report -TVBM 1014, 250 pp, 1993
- 11) M.Lin, H.Sasano, I.Maruyama : Fundamental study on water diffusion coefficient of cement based material, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.35, No.1, pp.595-600, 2013
- 12) 堀口直也, 五十嵐豪, 丸山一平 : 含水率の変化による骨材の体積変化に関する基礎研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.33, No.1, pp.131-136, 2011
- 13) T.C.Powers : Structure and physical properties of hardened Portland cement paste, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.41, No.1, pp.1-5, 1958
- 14) 岩清水隆, 米澤敏男, 井上和政, 松本竹史 : コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材品質の影響に関する実験, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, A-1, 材料施工, pp.1079-1080, 1998.9
- 15) Jianzhuang Xiao, Wengui Li, David A.Lange, Surendra P.Shah : Properties of interfacial transition zone in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation, *Cement and Concrete Composites*, Vol.37, pp.276-292, 2013.3
- 16) J.P.Ollivier, J.C.Maso, B.Bourdette : Interfacial Transition Zone in Concrete, *Advanced Cement Based Materials*, Vol.2, No.1, pp.20-38, 1995.1
- 17) S.Diamond, S.Mindess : SEM investigation of fracture surface using stereo pairs : I Fracture surfaces of rock and cement paste, *Cement and Concrete Research*, Vol.22, No.1, pp.67-78, 1992.7