

論文 コンクリートの乾燥収縮下における骨材の役割に関する解析的検討

杉江 和*1・篠野 宏*1・丸山 一平*2

要旨: 本研究は、乾燥によりコンクリートに発生する微細ひび割れ性状を明らかにすることを目的とし、コンクリート断面をモルタル、粗骨材、遷移帯に離散化して断面解析モデルを作成し、有限要素解析を行った。まず実験を行った試験体を解析対象とし、解析によるひび割れ図と蛍光エポキシ含浸試験によるひび割れを比較し、良好な対応を確認した。次に粗骨材の偏在の程度がコンクリート断面のひび割れ性状に及ぼす影響を検討するため、偏在の程度が異なる2種類の断面モデルを作成した。解析の結果、粗骨材を分散させた断面モデルの方が断面内に多くひび割れが生じ、コンクリートの巨視的な収縮が小さくなることが確認された。

キーワード: 微細ひび割れ, 乾燥収縮, 有限要素解析, 骨材分布

1. はじめに

コンクリートの欠点の一つは、乾燥収縮によるひび割れが発生しやすいことにある。コンクリート構造物にひび割れが生じると、漏水問題、美観問題、耐久性の低下などの問題が生じることから、乾燥収縮に関する研究は数多くされているが、いまだひび割れの抑制及びひび割れ幅の制御において課題が多く残る現状にある。

近年では、乾燥収縮ひずみの小さい石灰石骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみが一般的に小さくなる¹⁾など、コンクリートに使用する骨材自体の乾燥収縮ひずみがコンクリートの巨視的な乾燥収縮ひずみに影響を及ぼすことが報告されている²⁾。

しかしながら、コンクリートを骨材とセメントペーストマトリクスの複合材料として見ると、コンクリートの巨視的な収縮ひずみに対して両者がどのような役割を担っているかは明らかになっていない。

例えば、乾燥条件を飽水状態から20°C RH60%として乾燥させたセメントペーストマトリクスの乾燥収縮ひずみと、骨材の乾燥収縮ひずみでは、数千マイクロのひずみ差が生じ、結果として骨材がセメントペーストマトリク

スの収縮を拘束し、骨材周囲にひび割れが生じることとなるが³⁾、このことに関する検討は少ない。

本検討では、モルタルと粗骨材の物理的相互作用に着目して、コンクリートをモルタル、粗骨材、遷移帯に離散化し、コンクリート断面内のモルタルが収縮するとした有限要素解析を行った。

本研究ではまず、有限要素法プログラムの妥当性を確認することを目的として、蛍光エポキシ樹脂含浸試験により得たひび割れと、有限要素解析によるひび割れのパターンの相似性を確認した。

次に粗骨材の偏在の程度と粗骨材周囲に生じるひび割れに着目し、粗骨材と粗骨材周囲に生じるひび割れがコンクリートの巨視的な乾燥収縮ひずみとどのような関係があるか考察を行った。

2. 解析概要

2.1 解析モデル

(1) 解析対象

解析対象は筆者らの行った、粗骨材種類及び粗骨材粒径の変化が、乾燥収縮によってコンクリート断面内に生

表-1 コンクリート・モルタル・ペーストの調合

試験体種類	調合								スランプ (cm)	空気量 (%)	練りあがり温度(°C)	乾燥開始材齢 (日)
	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)									
			W	C	S	G	AE	VI				
Concrete	55	51.8	177	322	940	909	3	1.3	11.5	2.8	21	59日以降
Mortar		-	271	492	1432	-	-	2	23	4.9	21	
Paste		-	622	1131	-	-	-	4.5	15.8	0.3	21	

※VI…増粘剤

*1 名古屋大学 大学院環境学研究科都市環境学専攻 大学院生 (学生会員)

*2 名古屋大学 大学院環境学研究科都市環境学専攻 准教授・博士(工学) (正会員)

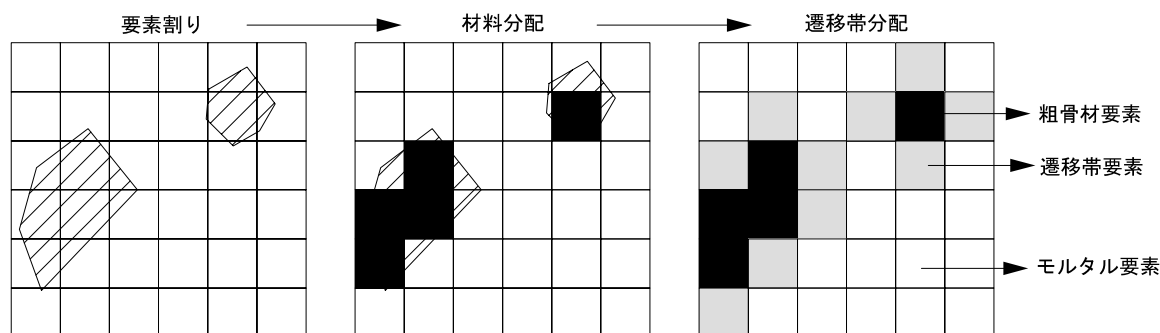


図-1 離散化の概要

じる微細ひび割れ及びコンクリートの巨視的な収縮ひずみに及ぼす影響を評価した実験とした^{4), 5)}。解析を行う試験体は、粗骨材に粒度を15mmから20mmに調整した石灰石砕石を使用したものとした。同実験において、モルタル試験体とペースト試験体を作成した。モルタル試験体の調合は、ペーストと細骨材の体積の比率をコンクリート試験体と同一とした。コンクリート、モルタル、ペーストの調合を表-1に示す。

試験体寸法はφ100×200mmの供試体をダイヤモンドカッターで厚さ9mmに切断し、φ100×9mmとしたものである。乾燥条件は20℃RH60%で、乾燥による24時間の試験体の質量変化が、全体の質量の0.03%/day以下になった時点で水分移動と試験体の巨視的なひずみが平衡状態に達したと判断した。試験体の巨視的なひずみは、試験体直径の長さ変化から算出したひずみとした。

その後、蛍光エポキシ樹脂を含浸し⁶⁾、紫外線探傷灯を照射し、肉眼による微細ひび割れの観察とデジタルカメラでの撮影を行った。

(2) コンクリート断面の離散化

要素分割数は円柱試験体直径を200要素とした(1要素0.5mm×0.5mm)。図-1に離散化の概要を示す。乾燥開始以前に撮影した断面の写真から粗骨材位置を特定し、粗骨材要素とモルタル要素に割り当てた。この時1要素を占める粗骨材量が少ないとき、その要素は粗骨材要素とはせず、モルタル要素とした。また、コンクリートのように骨材を有するセメント系複合材料には、セメントペーストマトリクスと骨材間に不連続な遷移帯領域が生じることが知られている⁷⁾。本解析ではモルタル要素と粗骨材要素の境界に遷移帯要素を設けた。遷移帯要素は、

モルタル要素のうち上下左右のいずれかに粗骨材要素が存在した時にそのモルタル要素を遷移帯要素とした。

解析に用いたパラメータを表-2に示す。モルタル要素のパラメータの値は、コンクリートの巨視的な乾燥収縮ひずみの実験結果と解析結果が最も近い値となる値とした。解析におけるコンクリートの巨視的なひずみは、コンクリート断面においてひずみが出力されるすべての点のひずみの平均値とした。

2.2 解析手法

本研究では、4点アイソパラメトリック要素を用いた非線形2次元有限要素法プログラムを構築し解析を行った。

(1) モルタル要素の構成則

モルタル要素のひび割れは分布ひび割れモデルを採用した。本来ひび割れは変位の不連続面であり、数値解析においては離散ひび割れモデルを用いる方が、直接的で明快である。しかし、離散ひび割れモデルを用いる場合には、ひび割れ経路が既知でない限りひび割れの進展に伴い要素の再分割の作業が必要となる。これに対して、分布ひび割れモデルではひび割れ後もモルタル要素を連続体として扱い、ひび割れを要素の材料特性の変化として計算可能であるため、初期に設定した幾何学条件を変更することなくひび割れの進展を追跡することができる。本解析ではひび割れの進展経路を実験結果と比較することを目的としたため、分布ひび割れモデルを採用することとした。

モルタル要素においては、引張軟化特性を考慮したモデルとして、図-2に示す1/4モデルを採用した。破壊力学を考慮したモルタルのひび割れモデルには、図-3

表-2 解析に用いたパラメータ

全要素数	骨材率(%)	骨材要素		モルタル要素			
		ヤング率 (MPa)	ポアソン比 (-)	ヤング率 (MPa)	ポアソン比 (-)	引張強度 (MPa)	破壊エネルギー (N/mm)
31741	51.7	58900.0	0.30	23800.0	0.26	15.0	0.05

に示すひび割れ帯モデルを用いた。ひび割れは、モルタル要素の最大主応力が引張強度に達すると最大主応力と直行方向に生じることとした。ひび割れ発生後の応力-ひずみ関係は固定ひび割れモデルとし、図-3 に示す局所座標系 $n-t$ に対して式(1)を用いた。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_t \\ \tau_{nt} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_{cr} & 0 & 0 \\ 0 & E_c & 0 \\ 0 & 0 & \beta G \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_t \\ \gamma_{nt} \end{Bmatrix} = [D_{cr}] \{\varepsilon\} \quad (1)$$

ここで、 E_c : ヤング係数(MPa), E_{cr} : ひび割れ後のヤング係数(MPa), G : せん断剛性係数 (MPa), β : せん断剛性低減係数である。

せん断剛性低減係数は、ひび割れを含むコンクリートのせん断剛性と、ひび割れのないコンクリートのせん断剛性の比であり、次式を採用した⁸⁾。

$$\beta = G_{cr} / G = \frac{1}{1 + 4447\varepsilon_{cr}} \quad (2)$$

ここで、 G_{cr} : ひび割れ発生後のせん断剛性係数(MPa), ε_{cr} : ひび割れに垂直なひずみ(-)である。

また、ひび割れた要素の剛性マトリクス $[K_{cr}]_e$ は全体座標系から局所座標系への応力、ひずみ座標変換マトリクス $[T_\sigma]$, $[T_\varepsilon]$ を用いて X-Y 座標系に変換した式(3)を用いた。

$$[K_{cr}]_e = \int_V [B]^T [T_\sigma]^{-1} [D_{cr}] [T_\varepsilon] [B] dV \quad (3)$$

ここで、 $[B]$: 座標変換マトリクスである。

$$[T_\sigma]^{-1} = \begin{Bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -2\cos \theta \sin \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 2\cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & -\cos \theta \sin \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$[T_\varepsilon] = \begin{Bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -\cos \theta \sin \theta \\ -2\cos \theta \sin \theta & 2\cos \theta \sin \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{Bmatrix} \quad (5)$$

(2) 遷移帯要素の構成則

遷移帯の厚さは数十マイクロであるとされているが⁹⁾、本解析において 1 要素の寸法は $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ であり、遷移帯厚さとして厚すぎると言える。そこで本解析では、遷移帯要素に図-4 に示す構成則を採用した。構成則に用いた ε_r は次式のように定義する。本解析では、遷移帯厚さは $5\mu\text{m}$ とした。

$$\varepsilon_r = \frac{\text{遷移帯厚さ}}{\text{要素寸法}} \quad (6)$$

遷移帯はポーラスであり、コンクリートの脆弱部分であるとされている^{7), 9)}。そのため、遷移体要素が遷移帯として機能する場合(図-4A)、すなわち以下の2つの条件のどちらかを満たす場合、遷移体要素のヤング係数は健全なモルタル要素の $1/10$ の値とした。

(1) 遷移帯要素のひずみが膨張を示す場合。

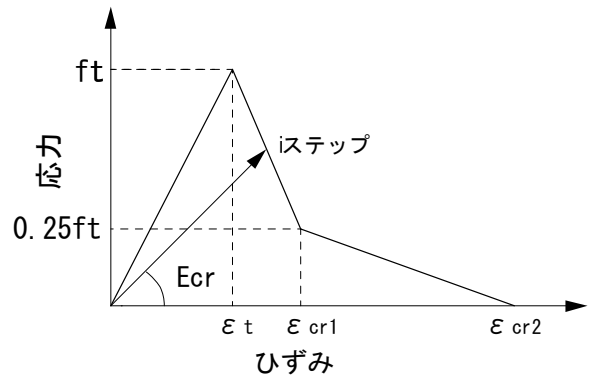


図-2 引張軟化 1/4 モデル

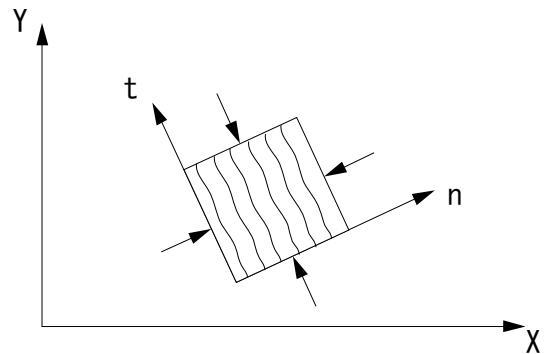


図-3 ひび割れ帯モデル

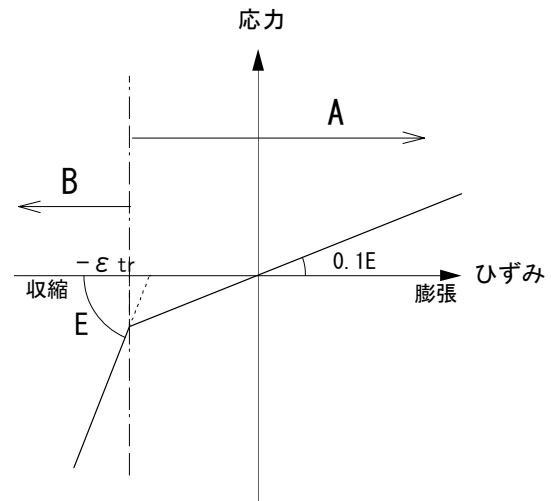


図-4 遷移帯構成則

表-3 乾燥収縮ひずみ

	収縮量 (μ)
モルタル試験体(実験値)	-1605
解析入力ひずみ	-2484
ペースト試験体(実験値)	-3899

(2) ひずみの絶対値が ε_r 以下である場合。

対して、遷移体要素がモルタルとして機能する場合(図-4B)、遷移帯要素のひずみが収縮を示し、かつひずみの絶対値が ε_r よりも大きい場合は、健全なモルタル要素のヤング係数とした。これは、遷移体要素のひずみが ε_r よりも大きくなった場合、遷移帯は収縮により潰れ、モル

10mm 20mm

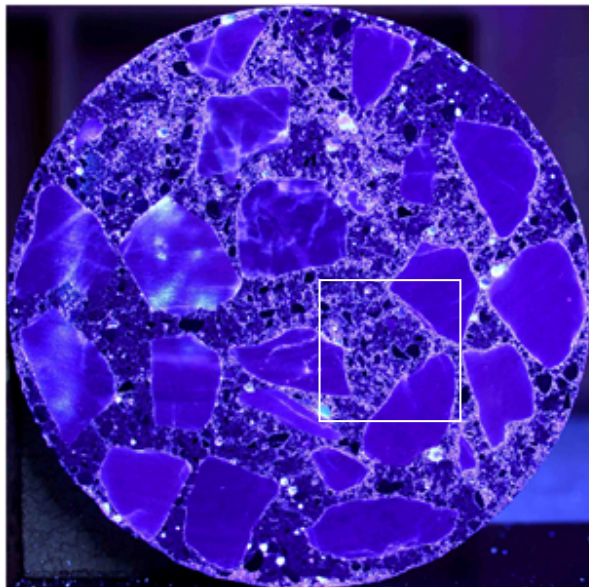


図-5 蛍光エポキシ樹脂含浸試験結果

10mm 20mm

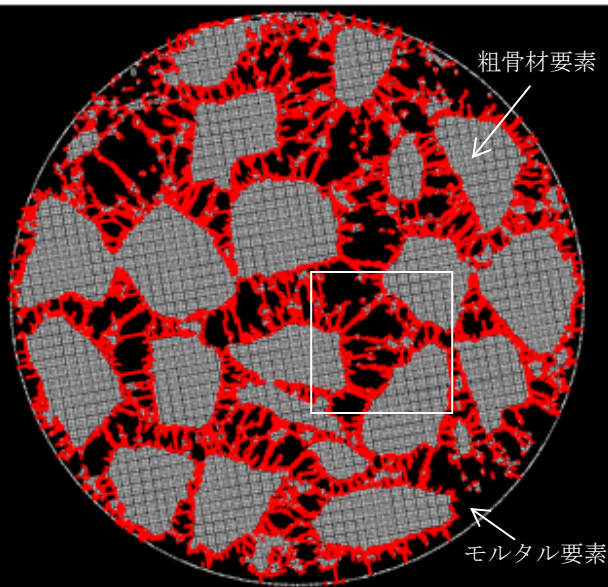


図-6 解析結果ひび割れ図

タル要素と一体となって機能する事を想定した。

(3) 収縮ひずみ

本検討で解析対象とした試験体に使用した石灰石砕石は事前の検討で、飽水状態から20℃RH60%まで乾燥させた時の乾燥収縮ひずみが -30μ であり、乾燥収縮ひずみが小さいことが確認されている。そのため、乾燥収縮ひずみについてはモルタル要素、遷移帯要素のみを考慮することとし、粗骨材は収縮しないものとした。

解析で用いたモルタル要素と遷移帯要素に入力した乾燥収縮ひずみは、コンクリートの巨視的な乾燥収縮ひずみの実験結果と解析結果が最も近い値となる値とした。表-3に解析で用いた入力ひずみ、およびモルタル試験体とペースト試験体のレーザー変位計で測定した乾燥収縮ひずみを示す。解析で用いた乾燥収縮ひずみは、ペースト試験体とモルタル試験体の乾燥収縮ひずみの間の値となったが、これはコンクリート断面の離散化において一部の細骨材が粗骨材要素となっていることが原因であると考えられる。

乾燥収縮ひずみは等価節点力として解析に導入した。モルタル要素がひび割れを生じた以降、乾燥収縮ひずみの等価節点力への換算に用いるヤング係数は、ひび割れにより軟化したヤング係数を用いた。

3 解析結果

図-5に実験で得た蛍光エポキシ樹脂含浸試験の結果、図-6に解析においてひび割れが生じた箇所を赤く描写したひび割れ図を示す。事前の検討において飽水状態の試験体に対して蛍光エポキシ樹脂含浸試験を行った結果、粗骨材周囲に蛍光エポキシが含浸しなかったことから、図-5の粗骨材まわりの蛍光エポキシは、遷移帯ではな

1mm 10mm

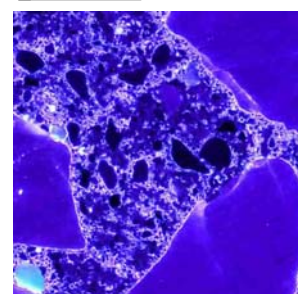


図-7 蛍光エポキシ樹脂含浸試験結果(拡大図)

1mm 10mm

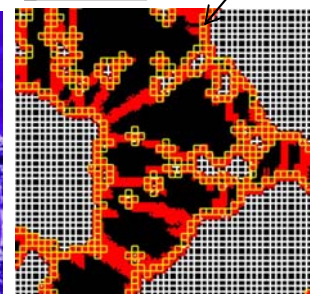


図-8 解析結果ひび割れ図(拡大図)

くひび割れに含浸したものと考えられる。図より、蛍光エポキシ樹脂含浸試験のひび割れと同様に、解析のひび割れ図においても粗骨材周囲にひび割れが生じていることが確認できる。また、図-5に見られるひび割れの中には、粗骨材界面から放射状に垂直に生じるひび割れがある。このひび割れは、粗骨材周囲のモルタルが収縮しようとする際、モルタルは粗骨材により拘束を受けるため、垂直方向にひび割れが生じたと考えられる。図-6より解析においても粗骨材界面に垂直方向に生じるひび割れが多く確認できる。

図-7、図-8は図-5、図-6の四角で囲んだ部分をそれぞれ拡大したものである。図-8において遷移帯要素は黄色で描画した。図-8より粗骨材周囲のひび割れは、遷移帯要素に多く見られ確認できる。また、図-7、図-8より、ひび割れの位置もよく対応していることが確認できる。したがって本解析手法により、コンクリート断面内に生じるひび割れの分布を再現することができることが確認できた。

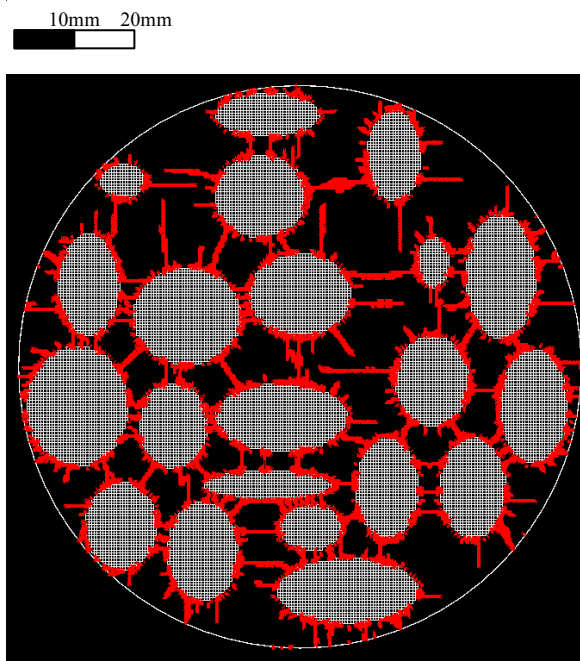


図-9 粗骨材分散モデルひび割れ図

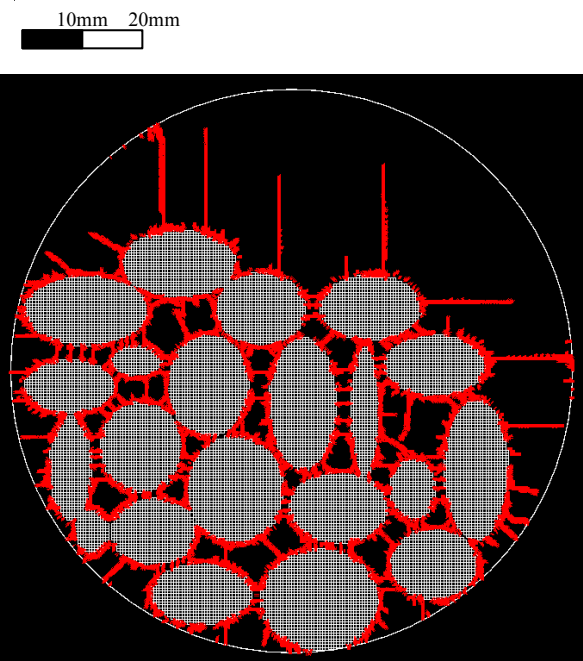


図-10 粗骨材集約モデルひび割れ図

4 粗骨材の偏在の程度を考慮した解析

4.1 解析目的

筆者らはこれまでに、2.1 節(1)項で述べた試験体に加え、粗骨材粒径及び粗骨材種類を変化させた試験体を対象に、画像相関法を用いて、乾燥を受けたコンクリート断面内に生じる微細ひび割れとコンクリートの巨視的な乾燥収縮ひずみに関する検討を行った^{4), 5)}。その結果、ひび割れが生じた面積とひずみをかけたものをコンクリートの全断面積で割り、コンクリートの断面積あたりのひび割れの開口の程度を示す値として定義した損傷度と、コンクリートの巨視的な乾燥収縮ひずみは負の相関の関係にあることが明らかになった。

そこで本章では、コンクリート断面内の粗骨材の偏在の程度がコンクリート断面中のひび割れ性状に影響を及ぼすと考え、粗骨材位置を分散させた断面と、粗骨材を集約させた断面の二種類のコンクリート断面モデルを作成し、3 章においてコンクリート断面内のひび割れの分布を良好に再現した有限要素法プログラムを用いて、粗骨材位置の偏在の程度が、ひび割れ性状及びコンクリートの巨視的な収縮ひずみへ及ぼす影響を検討した。

2 種類のコンクリート断面モデルの粗骨材率は 51.6% で同様とした。その他の解析に用いた材料のパラメータは表-2 と同様である。

4.2 解析結果

図-9 に粗骨材を分散させた断面モデルのひび割れ図を、図-10 に粗骨材を集約させた断面モデルのひび割れ図を、図-11 に粗骨材の配置によるコンクリートの乾燥収縮ひずみの差、図-12 に損傷度と乾燥収縮ひずみの関係を示す。

図-11 より粗骨材を分散させた断面モデルのほうが、

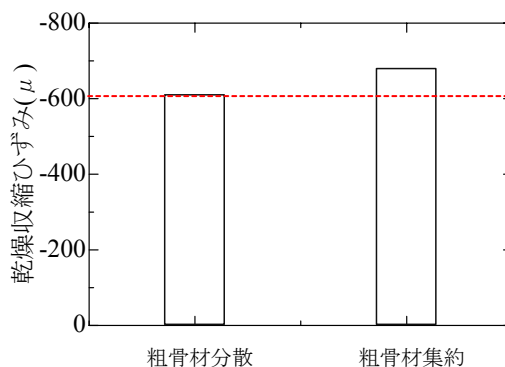


図-11 骨材配置による乾燥収縮ひずみの比較

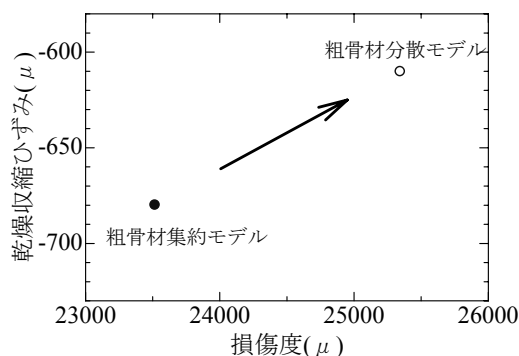


図-12 損傷度と乾燥収縮ひずみの関係

粗骨材を集約させた断面モデルよりもコンクリートの巨視的な収縮ひずみが小さくなることを確認できる。

更に、図-12 より骨材を分散させた場合、断面における平均的なひび割れ開口量である損傷度が、粗骨材を集約させたものよりも大きくなったことわかる。このこと

は、図-9、図-10 からわかるように、粗骨材を集約させた場合、粗骨材周囲のモルタルに生じる粗骨材同士を繋ぐ放射状のひび割れの進展が、近隣の粗骨材によって妨げられたためであると考えられる。そのため、粗骨材を集約モデルでは粗骨材の拘束を受けず、ひび割れが生じないまま収縮するモルタルの量が多くなり、結果としてコンクリートの巨視的なひずみが大きくなったと解釈できる。

この結果は、材料分離を生じたコンクリートの収縮が大きくなる直接的な原因を解析的に明らかにしたと言える。

これらの事実は、粗骨材に周囲を取り囲まれたモルタルは、巨視的なコンクリートの収縮に大きく寄与しないことを示唆している。なぜなら、ひび割れ発生以降のモルタルの収縮は、ひび割れ開口にのみ影響を及ぼし、コンクリートを巨視的に収縮させる駆動力にはならないと考えられるためである。

そのため、粗骨材に取り囲まれた以外のモルタル、すなわち流動性分野における余剰モルタル(コンクリートの全量から骨材のかさ容積を引いた残りの体積のモルタル)がコンクリートの収縮に寄与すると言える。

実施工においては実積率が異なると、コンクリートの調合も異なるため、実積率のみで収縮量の評価を行う事は難しいと考えられる。しかしながら、調合が同様であり、骨材量を同一としたとき、実積率の小さい骨材を用いたコンクリートの方が収縮量は小さくなると推察される。

5 まとめ

本検討では筆者らの行った実験を対象として有限要素解析を行い、コンクリート断面に生じるひび割れ性状において、実験と解析結果の比較を行った。加えて、粗骨材の偏在の程度がコンクリート断面内のひび割れ性状及びコンクリートの巨視的なひずみに及ぼす影響についても検討を行った。これらの検討により得た知見は以下の通りである。

- 1) 解析で得たひび割れ図と、蛍光エポキシ樹脂含浸試験によるひび割れは良好な対応を示すことが確認できた。
- 2) 粗骨材の偏在の程度によるひび割れ性状への影響を検討した結果、粗骨材を分散させた断面モデルは粗骨材を集約させた断面モデルに比べ、ひび割れが広範囲におよぶことが確認できた。
- 3) ひび割れが広範囲におよび、モルタルに生じるひび割れが多く発生すると、コンクリートの巨視的な乾燥収縮ひずみは低減されることが確認できた。

謝辞

本研究の一部は、平成 24 年度高経年化技術評価高強度事業の一環として実施した。

参考文献

- 1) 兵頭彦次, 谷村充, 藤田仁, 番地成朋: 石灰石骨材がコンクリートの収縮特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.571-576, 2009.6
- 2) 今本啓一, 石井寿美江, 荒井正直: 各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性と骨材比表面積の影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.606, pp.9-14, 2006.8
- 3) H.Ropper, J.E.Cox, B.Erlin: Petrographic studies on concrete containing shrinking aggregate, Journal of the PCA Research and Development Laboratories, Vol.6, No.3, pp.2-18, 1964.9
- 4) 篠野宏, 堀口直也, 丸山一平: コンクリートの乾燥により生じるひずみ分布と微細ひび割れ性状の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.454-459, 2012.7
- 5) 篠野宏, 丸山一平: 乾燥を受けるコンクリート中のひずみ分布と骨材周辺の微細ひび割れの評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.715-716, 2012.9
- 6) 手塚喜勝, 朝倉啓仁, 中村眞一, 佐々木元茂: 蛍光エポキシ樹脂含浸法によるコンクリートコアサンプルの微細ひび割れの可視化手法, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.61, No.2, 2005
- 7) 内川宏: 組織と構造の観点から見た硬化セメントペースト, モルタルおよびコンクリートの類似点と相違点, セメントコンクリート, No.507, pp.33-46, 1989
- 8) Walraven J.C. and Keuser W.: The shear retention factor as a compromise between numerical simplicity and realistic material behavior, Darmstadt Concrete. 2, pp.221-234, 1987
- 9) 内川浩, 羽原俊祐, 沢木大介: 硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移体厚さと強度の関係の検討, コンクリート工学論文集, Vol.4, No.2, pp.1-8, 1993