

論文 骨材とセメントペーストの収縮およびその空間分布がコンクリートの 変形と応力に及ぼす影響

名古屋 翼*1・阿部 浩示郎*2・下村 匠*3

要旨：セメントペーストの自己収縮，乾燥収縮，骨材の乾燥収縮が生じたコンクリートの収縮挙動，収縮が拘束された際の応力の導入，ひび割れの発生を適切に予測するために，実験と解析の双方から検討を行った。その結果，自己収縮を考慮した解析により，養生中の自己収縮拘束によるひび割れ応力と有効弾性係数の低下が再現された。また，コンクリート中の骨材の収縮をコンクリート内部の各位置における相対湿度の関数として評価することで，収縮性骨材を用いたコンクリートの挙動が良好に再現された。

キーワード：乾燥収縮，自己収縮，収縮性骨材，引張変形特性，ひび割れ

1. はじめに

コンクリートの収縮は，主にコンクリート中のセメントペーストの乾燥収縮と自己収縮によると考えられてきた。従来，コンクリート中の骨材はそれ自身の体積変化が注目されることは少なく，コンクリートの収縮に及ぼすセメントペーストの収縮の影響を低減する役割が主として考えられてきた。従来のコンクリートの収縮に関する力学モデルの多くは，その考え方に対応したものとなっている。

しかし，近年，骨材自身が無視できないほど大きく収縮する場合があると注目されている¹⁾²⁾。一般に使用されている骨材のすべてが大きな収縮をするわけではないが，骨材が収縮する場合にも適用可能なコンクリートの収縮予測モデルを構築しておく必要性は高い。

本研究では，コンクリート内部でのセメントペーストの自己収縮，乾燥収縮，骨材の乾燥収縮をそれぞれの生成機構に基づき表現し，セメントペーストと骨材の複合関係に注意を払った力学モデルによりコンクリートの時間依存性変形・応力解析を行った。モデル中に用いた微視的機構に関する仮定を，持続載荷試験装置を用いた実験と数値解析を並行して行うことで検証し，セメントペーストの乾燥収縮，自己収縮，骨材の収縮が生じた場合であっても，適切にコンクリートの収縮を予測できるモデルの構築を目指した。

コンクリートの自己収縮と乾燥収縮は，原因や発生時期が違うだけでなく，供試体内における空間分布が異なる。すなわち乾燥収縮は，供試体表面付近が卓越するが，自己収縮は比較的一様に進行すると考えられる。また，骨材は，単体とコンクリート中では乾燥の程度が異なるので，収縮の大きさが異なると考えられる。本研究ではこれらの点に着目する。

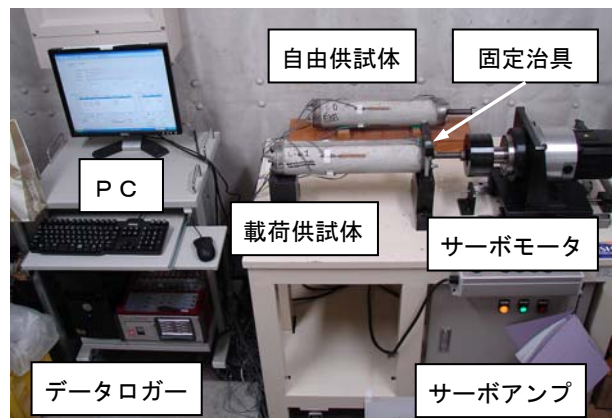


写真-1 持続載荷試験装置

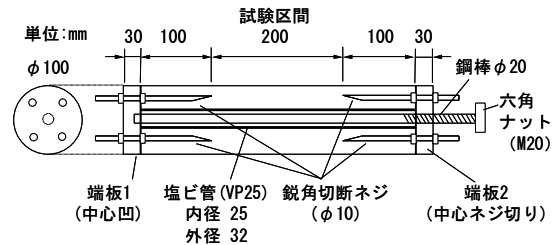


図-1 円筒型供試体寸法

2. 円筒型供試体を用いた持続載荷試験³⁾

2.1 試験装置概要

本研究で使用する持続載荷試験装置を写真-1に示す。本装置は，拘束鋼棒を回転させて載荷を行うため比較的安定した載荷が可能であること，供試体が円筒形なので，内部の水分，応力，ひずみの空間分布を理想的な軸対称型とすることができ，数値解析との比較に適していること，供試体の乾燥，載荷，変形経路を任意に設定して変形，応力を試験できることが特長である。

*1 新潟県 工修 (正会員)

*2 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (非会員)

*3 長岡技術科学大学 工学部 環境・建設系 准教授 工博 (正会員)

試験体は、無載荷状態の自由供試体と載荷供試体を同時に作製し、試験中は両者を常に同じ乾燥条件下に置く。載荷試験では、自由供試体のひずみ、載荷供試体のひずみ、拘束鋼棒のひずみより算出される載荷供試体の応力をリアルタイム計測し、載荷供試体の応力、またはひずみ、または有効ひずみがプログラミングされたその時点における制御目標値になるようにサーボモータにより載荷供試体の拘束鋼棒を回転移動させる。

2.2 供試体

供試体は図-1に示すように外径100mm、内径32mm、全長400mmの円筒型である。円筒の内側は塩ビ管を配し、その中に直径20mmの鋼棒を配している。全長400mmのうち両端から100mmずつには直径10mmのネジを4本ずつ埋め込み定着区間とし、中央の200mmを試験区間としている。載荷は、ナットを回転させることにより、端板2と鋼棒のネジ切り部で回転から鋼棒の移動へと変換し、鋼棒と端板1との間の接触反力により行う。載荷供試体は、端板2をボルトにより台座に固定する。自由収縮供試体の場合は、鋼棒を端板1に接触させない。

2.3 測定項目

自由供試体および載荷供試体のコンクリートひずみは、試験区間中央部4箇所に着着したひずみゲージの平均値を、載荷供試体の拘束鋼棒のひずみは2箇所に着着したひずみゲージの平均値を採用する。載荷供試体のコンクリート応力 σ_c は式(1)により算出する。

$$\sigma_c = -\frac{A_s}{A_c} \times E_s \varepsilon_s \quad (1)$$

ここに、 A_s ：鋼棒断面積、 A_c ：試験区間コンクリート断面積、 E_s ：鋼棒弾性係数、 ε_s ：鋼棒ひずみである。

載荷供試体の有効ひずみ ε_e は式(2)より算出する。

$$\varepsilon_e = \varepsilon_c - \varepsilon_{sh} \quad (2)$$

ここに、 ε_c ：載荷供試体のコンクリートひずみ、 ε_{sh} ：自由収縮（自由供試体のコンクリートひずみ）である。なお、実験により測定されるコンクリートの応力、ひずみ、有効ひずみ、自由収縮は、試験区間の断面内の平均値である。数値解析では、供試体内部の水分移動解析、応力解析に基づき局所的な応力、ひずみ等の諸量を計算し、その所産として供試体の応力、ひずみを評価する。

3. 時間依存性応力解析法

図-2に供試体の時間依存性変形と応力の数値解析フローを示す。コンクリート内部の水分移動解析と各時間における応力解析を行う。実験で用いた円筒供試体の場合、水分移動解析は軸方向と垂直な半径方向の移動のみ考慮する。数値解法は差分陰解法を用いる。供試体の応力解析では、軸方向の応力、ひずみ成分のみを考慮し、平面保持を仮定する。

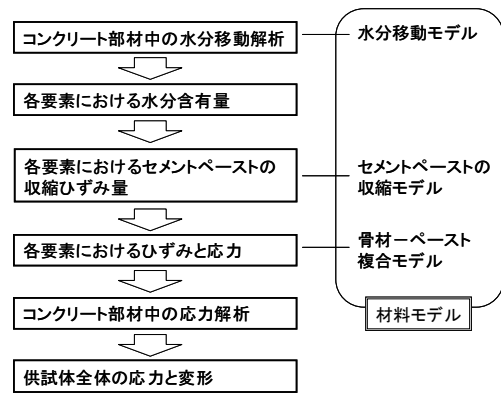


図-2 数値解析フロー

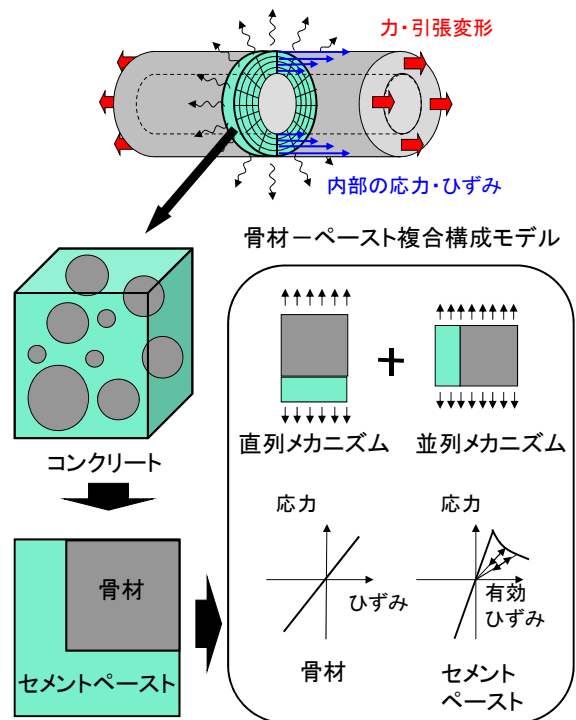


図-3 骨材-ペースト複合モデル

計算に用いる材料モデルは、著者らが開発したセメントペースト中の細孔組織中における水分の微視的挙動に基づく水分移動と乾燥収縮モデル⁴⁾、コンクリート中の骨材とセメントペーストの複合関係を直並列にモデル化した複合構成モデル⁵⁾である。複合構成モデルは、収縮におけるコンクリート中の骨材の役割を、骨材がセメントペーストを体積希釈する効果（直列効果）と骨材が近傍のセメントペーストの収縮を力学的に拘束する効果（並列効果）との組み合わせにより表現したものである（図-3）。なお、骨材とセメントペーストの界面での剥離は生じないと仮定する。

本応力解析は、連続体を仮定したものであるため、変形と応力導入過程は計算できるが、巨視的なひび割れの発生は直接表現できない。解析では、供試体の引張応力

(荷重)に極大点が見られる。一方実験では、多くの場合その近辺で巨視的ひび割れが発生しているため、計算される供試体の引張応力が極大となった時点までひび割れ発生として判定する。

今回は、コンクリート中の骨材自身が収縮する場合、およびセメントペーストが乾燥収縮だけでなく自己収縮もする場合への、解析法の拡張を検討する。

4. セメントペーストの乾燥収縮と自己収縮がコンクリートの収縮挙動に及ぼす影響の検討

4.1 実験概要

普通コンクリートよりも収縮に占める自己収縮の割合が大きいとされる低水セメント比のコンクリートを用いて供試体を作製し、持続荷重試験を行った。配合、試験条件を表-1, 2に示す。

乾燥開始前の養生中に自己収縮が拘束されることにより導入される引張応力と、それが乾燥開始後の引張変形挙動に及ぼす影響を確認するため、養生中の拘束の有無を試験水準とした。養生中の拘束は、端板に拘束鋼棒を接触させるバネ拘束とした。

打設後1日に脱型し、ひずみゲージを貼付した。その際、ゲージを水分から保護するためにコーティング処理を行った。ゲージ貼付後は、すぐにポリエチレン袋により封緘養生を行った。その後、材齢28日に乾燥を開始し、0.135 (MPa/day)の荷重速度で引張応力を導入した。荷重速度は、手動による制御が精度良く行え、かつ最も緩やかな速度となるように決定した。毎日所定の時間に応力が所定の値になるように調節した。試験はすべて、恒温恒湿室(室温 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$)で行った。

4.2 自己収縮の表現方法

自己収縮を考慮するため、解析プログラムの改良を行った。その方法は、図-4に示すように、各場所のコンクリート要素内のセメントペーストの収縮ひずみを自己収縮と乾燥収縮の和とするものである。このうち、乾燥収縮は従来のモデルによりセメントペーストの水分量より求め、自己収縮は、宮澤らの予測式⁶⁾を修正して算定した。オリジナルの自己収縮予測式はコンクリートの自己収縮ひずみを予測するものであるため、セメントペーストの体積率で除して複合構成モデル中のセメントペーストの自己収縮に適用した。

乾燥収縮は各位置の水分量に応じた空間分布が考慮され、自己収縮は時間の関数としてコンクリート中のセメントペーストに一樣に与えることとなる。

4.3 実験結果と解析結果

供試体のひずみの経時変化の実験結果と解析結果を図-5に示す。自由供試体、拘束供試体ともに自己収縮による養生中のひずみが概ね表現されている。本実験では、

表-1 示方配合(自己収縮シリーズ)

W/C	s/a	Air(%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	SP
0.3	0.5	5	170	567	805	796	17.0

G:最大骨材寸法13mm SP:高性能AE減水剤

表-2 試験条件(自己収縮シリーズ)

供試体名	養生日数(day)	養生中の拘束条件	荷重速度(MPa/day)	荷重方法
HC28-F	28	非拘束	自由収縮	—
HC28			0.135	自動
HC28-R		拘束	—	手動

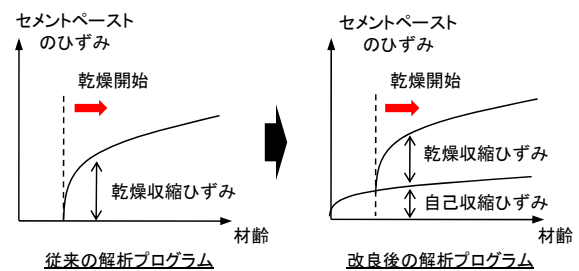


図-4 自己収縮の表現方法の概念図

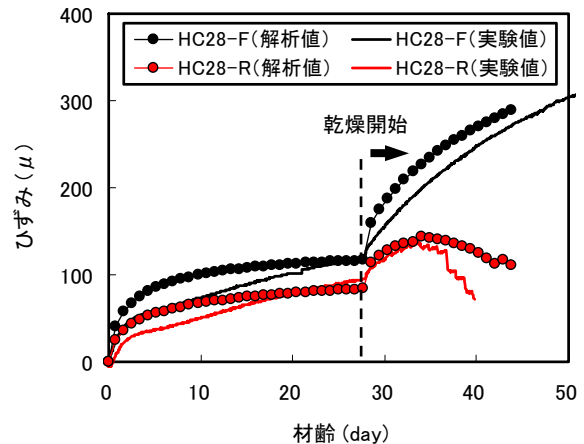


図-5 ひずみの経時変化(自己収縮シリーズ)

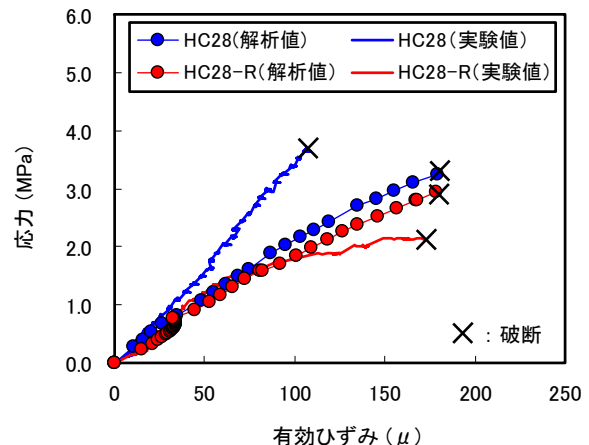


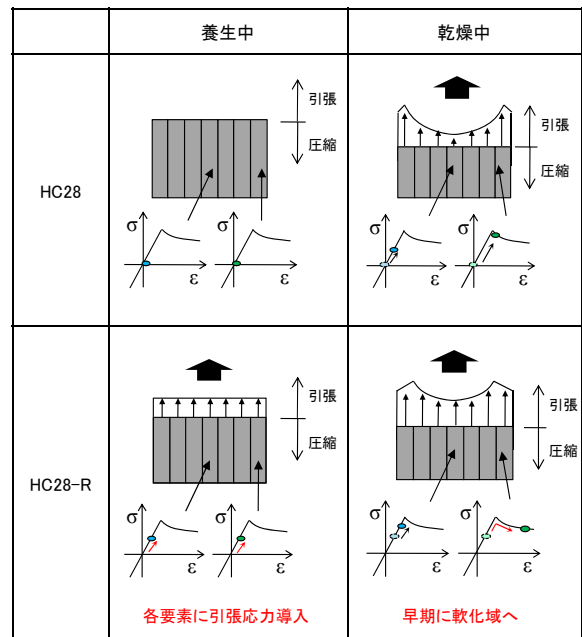
図-6 応力-有効ひずみ関係(自己収縮シリーズ)

養生期間中にポリエチレン袋で封緘養生を行っている。過去の研究³⁾において、この方法により非乾燥状態が保たれることを確認しているため、養生期間中のひずみは自己収縮であるといえる。その値は28日で約120 μ であった。乾燥開始後の収縮も良好に表現できている。

供試体の応力-有効ひずみ関係を図-6に示す。実験結果より、養生中の自己収縮が拘束されることで、ひび割れ応力、有効弾性係数（応力-有効ひずみ関係を直線近似したときの傾き）が低下する傾向が認められる。この傾向は、青木らの研究⁷⁾でも確認されている。

解析結果では、実験結果ほど明瞭な違いではないが、養生中の自己収縮応力によるひび割れ応力の低下と多少ではあるが有効弾性係数の低下が表現されている。これは、表-3に示すように、養生中の自己収縮が拘束された場合、乾燥開始時に各要素のセメントペーストがすでに一様に引張られた状態にあるので、乾燥開始後に乾燥収縮の拘束により引張ひずみが加算されると表面付近のセメントペーストがより早く軟化域に入るためである。

表-3 コンクリートの応力分布と各要素の応力-有効ひずみ関係



ここに、 σ : セメントペーストの応力
 ϵ : セメントペーストの有効ひずみ

5. 骨材の収縮がコンクリートの収縮挙動に及ぼす影響の検討

5.1 実験概要

収縮性骨材を用いたコンクリートの持続載荷試験を行った。使用する骨材の物性値を表-4に示す。収縮性骨材の物性値は、普通骨材と大きな違いがないことがわかる。収縮性骨材は、別途、直径45mmの円柱コア供試体を飽水状態から恒温恒湿室（室温20 \pm 1 $^{\circ}$ C、相対湿度60 \pm 5%）で乾燥させ、骨材単体の収縮特性を試験した。

配合、試験体水準を表-5、6に示す。試験パラメータは、骨材の種類と乾燥の有無および載荷の有無である。

コンクリート打設後に恒温恒湿室（室温20 \pm 1 $^{\circ}$ C、相対湿度60 \pm 5%）にて28日間封緘養生し、その後、脱型とともに試験を開始した。非乾燥供試体(SCN)は、脱型後にひずみゲージを貼付した後に、全体をポリエチレン袋で包むことで非乾燥状態とした。試験開始後は、毎日所定の時間に0.135(MPa)ずつ引張応力を増加させた。

5.2 コンクリート中における骨材の収縮のモデル化

コンクリート中では、骨材単体で乾燥させるよりも乾燥の進行が遅いため、同じ乾燥時間における収縮が小さいことが予想される。また、コンクリート供試体の表面付近と内部とは同じ時間における乾燥の程度が異なるので、骨材の収縮量が位置により異なると考えられる。

骨材自身の水分量と収縮の関係を収縮特性として定式化すべきであるが、本研究における解析では骨材中の水分移動を直接求めていない。そこで、コンクリート中の各場所の骨材は、周辺のセメントペーストと常に水分平衡の状態にあると仮定し、水分移動解析の結果より求

表-4 骨材の物性値

名称		備考
普通骨材	細骨材	表乾密度2.68g/cm ³ , 吸水率1.63% 粗粒率2.58
	粗骨材	表乾密度2.65g/cm ³ , 吸水率1.10% 粗粒率5.88, 実積率61.40%
収縮性骨材	細骨材	表乾密度2.60g/cm ³ , 吸水率1.97% 粗粒率3.10
	粗骨材	表乾密度2.69g/cm ³ , 吸水率1.00% 粗粒率6.55, 実積率60.98%

表-5 示方配合(収縮性骨材シリーズ)

試験シリーズ	W/C	s/a	Air(%)	単位量(kg/m ³)						
				W	C	S	G	Ad1	Ad2	Ad3
NC	0.5	0.5	5	170	340	891	908	0.51	6.8	0.41
SC, SCN	0.5	0.5	5	170	340	874	904	0.51	6.8	0.41

Ad1:分離低減剤 Ad2:高性能AE減水剤 Ad3:消泡剤

表-6 試験条件(収縮性骨材シリーズ)

供試体名	使用骨材	乾燥条件	載荷速度(MPa/day)	載荷方法
NC-F	普通骨材	乾燥	自由収縮	-
NC			0.135	手動
SC-F			自由収縮	-
SC	収縮性骨材	非乾燥	0.135	手動
SCN-F			自由収縮	-
SCN			0.135	自動

まるコンクリート中の各位置のセメントペーストの相対湿度から、コンクリート中の各位置の骨材の収縮量を推定することにする。

相対湿度と骨材の収縮の関係として、式(3)を仮定する。

$$\epsilon_{agsh} = C(RH - 1) \quad (3)$$

ここに、 ϵ_{agsh} ：骨材の収縮ひずみ(μ)、 C ：骨材の収縮特性を表す材料定数($C=-3500$)、 RH ：相対湿度である。式(3)は、飽水状態(空隙中の相対湿度 100%($RH=1$))の状態を原点として、骨材中の空隙湿度と収縮ひずみとの間に線形関係を仮定したものである。骨材の水分状態とひずみの関係は、まだ一般的な傾向を論じるほど知見が十分でなくデータも蓄積されていないので、今回の検討では最も単純な線形関係を採用した。

式(3)の C の値は次のようにして定めた。今回用いた収縮性骨材単体の相対湿度 60%のもとでの収縮試験の結果を、式(4)により曲線近似した(図-8)。

$$\epsilon_{agsh} = \alpha \{1 - \exp(-\beta t^\gamma)\} \quad (4)$$

ここに、 α ：骨材の収縮量の最終値(1400 μ)、 t ：乾燥開始からの時間(日)、 β, γ ：骨材収縮の進行特性を表す係数($\beta=0.3, \gamma=0.85$)である。この曲線により推定された相対湿度 60%における収縮の最終値が約 1400 μ であったことから、式(3)の直線がこの点を通るように $C=-3500$ とした(図-9)。なお、パラメータ決定に用いた実験値が飽水状態と相対湿度 60%の2点であるので、式(3)は相対湿度 60~100%の範囲で用いるものとする。

このように骨材の収縮を水分状態の関数として表現することの妥当性を検証するために、本研究では、式(4)を用いてコンクリート中の各位置の骨材に単体の乾燥収縮試験結果と同じ収縮量を一樣に与えた場合についても解析を行い、比較する。

5.3 実験結果と解析結果

図-10は、各試験シリーズの自由収縮ひずみの実験結果と、収縮性骨材の収縮を時間の関数と相対湿度の関数として扱った解析結果である。

普通骨材を用いたNC-Fと収縮性骨材を用いたSC-Fの実験結果を比較すると、収縮性骨材によりコンクリートの収縮量が増大することが確認できる。また、非乾燥供試体のSCN-Fはほとんどひずみが生じておらず、非乾燥状態が保たれていることと、今回の実験ではセメントペースト、骨材ともに収縮の原因が乾燥収縮であることがわかる。

解析結果と実験結果を比較すると、NC-Fの実験結果は、従来の複合モデルを用いた解析結果と概ね一致している。しかし、SC-Fの実験結果と各位置の骨材に時間の関数により一樣な収縮を与えた解析結果を比較すると、

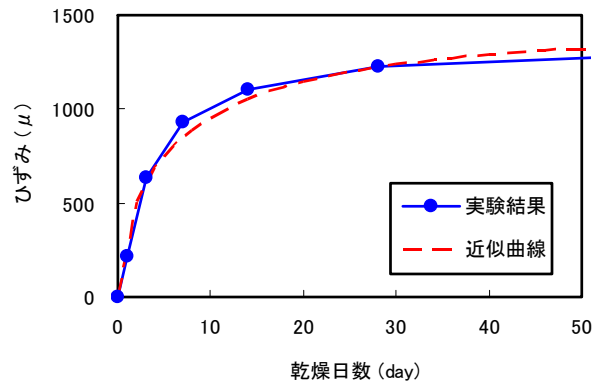


図-8 骨材単体の長さ変化

骨材収縮量 $\epsilon_{agsh}(\mu)$

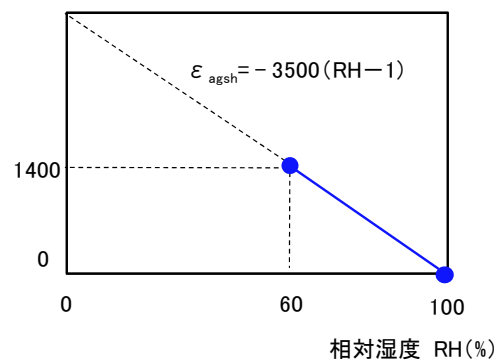


図-9 相対湿度による骨材収縮の表現方法

乾燥期間全体を通じて解析値の方が収縮量が大きくなっている。

一方、骨材の収縮を相対湿度の関数として表し、その位置の相対湿度に応じた収縮を与えた解析結果を見ると、乾燥後期において実験結果よりもやや大きくなっているが、乾燥初期から後期まで全体を通じて実験結果を比較的良く再現している。したがって、収縮性骨材を用いた場合であっても、コンクリート中では骨材の乾燥が緩慢となるため、骨材単体の収縮試験よりも収縮の程度は小さいことが推察される。すなわち、単体で見られた骨材の収縮が、ただちにコンクリートの収縮に影響するわけではないといえる。

上述のモデル化により概ね収縮挙動を再現できたが、乾燥後期ではなお実験結果のほうが解析結果よりも収縮が小さい傾向が見られる。これは、今回用いた骨材の収縮モデルの精度が十分でないことに起因するのか、今回考慮した他にも収縮性骨材を用いたコンクリートの収縮が低減されるメカニズムが存在していることを表すのか、検討が必要である。

図-11に供試体の応力-有効ひずみ関係を示す。骨材の収縮を考慮したことにより、かなり精度良く実験値を再現できている。NCよりSCの有効弾性係数が小さくなった理由は、収縮性骨材によりコンクリートの収縮が大

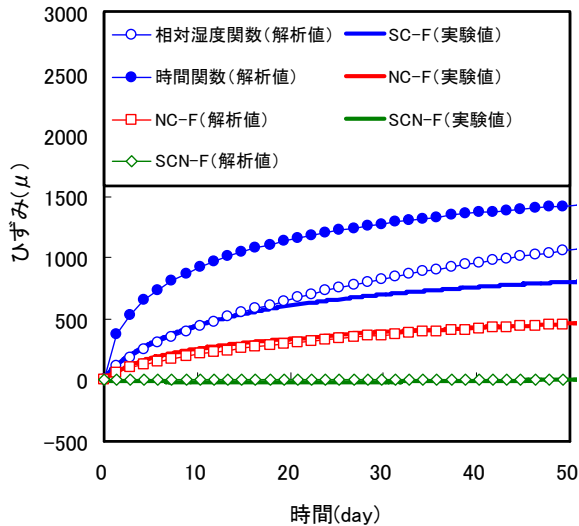


図-10 ひずみの経時変化
(収縮性骨材シリーズ)

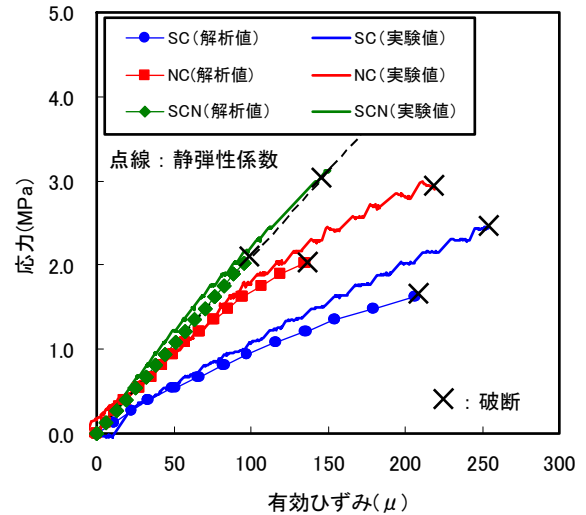


図-11 応力—有効ひずみ関係
(収縮性骨材シリーズ)

きくなったからである。

非乾燥のSCNの実験結果を見ると、静弾性係数とほぼ同等の有効弾性係数であるため、持続荷重の影響のみによるひずみの増大である引張基本クリープは小さいことが確認された。これは従来の知見に符合する。

実験結果のSCとSCNの剛性の違いは乾燥の有無の影響による。解析結果においても両者の違いが良好に再現されている。解析では引張基本クリープを考慮していないため、荷重速度による剛性の違いは現れない。乾燥させた供試体では乾燥収縮の内部拘束により表面から徐々に軟化が生じ、これが経時的な剛性の低下すなわち見かけの乾燥クリープとなって現れる。

6. まとめ

本研究により以下の知見を得ることができた。

- (1) 養生中に自己収縮応力履歴を受ける場合、ひび割れ応力、有効弾性係数の低下が見られる。
- (2) 自己収縮を考慮した解析により、養生中に拘束された供試体のひび割れ応力低下と有効弾性係数の低下が再現された。これは、自己収縮の拘束により、コンクリート中のセメントペーストに養生終了時点ですでに引張応力が導入された状態にあるためである。
- (3) 収縮性骨材を用いたコンクリートの収縮は、骨材単体の収縮試験の結果と同じだけコンクリート中の骨材が収縮するとして推定されるよりも小さい。この理由は、コンクリート中では骨材の乾燥が緩慢であるので骨材の乾燥収縮が単体試験ほど進行しないためであると考えられる。
- (4) 収縮性骨材を用いたコンクリートの有効弾性係数は、普通場合を用いたコンクリートよりも小さい。これ

は、収縮性骨材によりコンクリートの収縮が大きくなったためである。

- (5) 収縮性骨材を用いたコンクリートが乾燥と持続荷重を受ける際の引張変形特性は、普通骨材を用いたコンクリートに対する従来の知見と同様、引張基本クリープは小さいこと、乾燥による剛性低下があることが確認された。

参考文献

- 1) 岩清水隆ほか：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，日本建築学会大会梗概集 A, pp1079-1080, 1989.9
- 2) 浅本晋吾ほか：骨材特性との連関を考慮した複合構成モデルによるコンクリートの収縮解析，土木学会論文集 E, vol.63, No.2, pp.327-340, 2007.6
- 3) 齋藤明幸ほか：中空円筒供試体を用いたコンクリートの拘束収縮試験装置の開発，コンクリート工学年次論文集, Vol.31, 2009.7
- 4) 下村 匠：細孔容積分布密度関数に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル，東京大学学位論文, 1993.9
- 5) 小幡浩之ほか：骨材—ペースト複合モデルによるコンクリート部材の乾燥収縮応力解析，コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.781-786, 1999.6
- 6) 宮澤伸吾ほか：コンクリートの自己収縮に及ぼすセメントの種類の影響，コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.429-434, 2002.6
- 7) 青木優介ほか：一軸線拘束されたコンクリートにおける乾燥収縮応力の導入過程の解析とひび割れ発生予測，土木学会論文集, No.732/V-59, pp.149-162, 2003