

論文 乾燥下における高強度モルタルの収縮挙動に関する研究

蔵本 修^{*1}・森脇 拓也^{*2}・綾野 克紀^{*3}・阪田 憲次^{*4}

要旨 : PC 構造物における設計自由度の拡大, 部材の軽量化, 高耐久性などを目的として高強度コンクリートはますますその重要性を高めている。しかしながら, コンクリートの高強度化に伴い, 若材令時の収縮によるひびわれが問題となっている。高強度コンクリートの収縮ひずみを予測する場合, 自己収縮の影響が大きくなる。本研究では, 高強度モルタルの自己収縮ひずみの挙動を把握し, 高強度コンクリートにも適用できる収縮ひずみ予測手法を提案する。

キーワード : 高強度モルタル, 乾燥収縮, 自己収縮, 拡散係数

1. はじめに

コンクリート構造物の高耐久性と高性能化がますます要求されてくる中, 高強度コンクリートのニーズも大きくなってきている。すなわち, 高強度コンクリートの自己収縮ひずみは構造物の設計において解決すべき重要な課題となっている。もし, 自己収縮を過小に評価すれば構造物に致命的なひびわれが生ずるだろうし, 過大に評価すれば高強度コンクリートの性能を最適に活かさない構造設計となる。

乾燥収縮によるコンクリートの変形問題を拡散方程式を用いて数值的に解析する場合, 拡散係数とフィルム係数¹⁾が必要となる。これらの係数より, 任意時間, 任意場所での水分分布(相対湿度分布)を得ることができる。さらに, 相対湿度と収縮量の関係を表す収縮係数を用いて, 拘束されない条件下における乾燥収縮ひずみが計算される。

コンクリートが高強度化し, 自己収縮が無視できない場合には, コンクリートの水分分布を求める拡散方程式に, 水和によって生じる水分損失を表す項がさらに必要となる。乾燥による収縮係数と水和による収縮係数が同じ値の時,

拡散方程式を用いる方法は, 自己収縮ひずみを含む乾燥下における収縮ひずみを予測する有効な手段になるものと思われる。しかし, 現状では水和による収縮係数と乾燥による収縮係数が同じであるか確認はされていない。

本研究は, 自己収縮および乾燥収縮を含む高強度コンクリートの収縮ひずみ予測を, 拡散方程式に基づき行うために必要な拡散係数, フィルム係数および収縮係数を実験的に求めるための手法を提案するものである。また, 乾燥条件下における自己収縮ひずみをコンクリート中の結合水量を用いて表すことで, 自己収縮ひずみを含む乾燥条件下での収縮ひずみ挙動を精度良く予測することが可能であることを明らかにした。

2. 実験概要

2.1 モルタルの配合

本実験に用いたモルタルの配合を表-1に示す。実験には水セメント比の異なる3種類のモルタルを用いた。セメントは, 普通ポルトランドセメント(密度: 3.15g/cm^3 , ブレーン値: $3,200\text{cm}^2/\text{g}$)を使用した。細骨材は, 海砂(表

*1 ㈱ピーエス三菱 大阪支店PC事業部技術部長 工修(正会員)

*2 岡山大学大学院 自然科学研究科環境システム学専攻 (非会員)

*3 岡山大学大学院 自然科学研究科地球・環境システム科学専攻助教授 工博 (正会員)

*4 岡山大学大学院 自然科学研究科地球・環境システム科学専攻教授 工博 (正会員)

表－１ モルタルの配合

Air(%)	W/C	S/C	Unit weight per volume (kg/m ³)			
			W	C	S	Ad.*
2.0±0.5	0.20	0.76	240	1200	916	48.0
2.0±0.5	0.30	1.55	240	800	1239	8.00
2.0±0.5	0.50	3.12	240	480	1498	0.00

Ad*:HRWRA(High-range water reducing admixtures)

乾密度: 2.55g/cm³, 吸水率: 1.68%, 単位容積質量: 1,514kg/m³, 粗粒率: 2.54)を使用した。水は、水道水（密度: 1.00g/cm³）である。混和剤は、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を用いた。

2.2 水分量測定用供試体

任意の時間での蒸発可能な水分量および結合水量を求めるために、円柱供試体と角柱供試体を用いた。円柱供試体はφ50×100mmのものを、角柱供試体は40×40×160mmのものをを用いた。円柱供試体はすべての面をアルミニウムシートで封緘し、角柱供試体はすべての面を乾燥面とした。供試体は、すべて温度20℃、湿度60%の恒温恒湿度室内に設置した。円柱供試体および角柱供試体とも蒸発可能水分量を求めるために105℃の乾燥炉で乾燥させた。さらに、結合水量を求めるために、950℃の電気炉で乾燥させた。

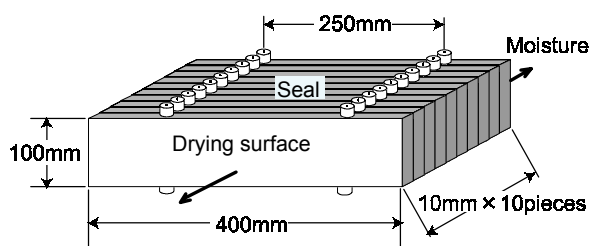
供試体の乾燥期間は、105℃の乾燥では14日間以上、また、950℃の乾燥では24時間以上乾燥させても供試体の質量に変化がみられなかった。従って、蒸発可能水分量および結合水量を求めるための乾燥期間はそれぞれ14日間および24時間とした。

2.3 収縮ひずみ用供試体

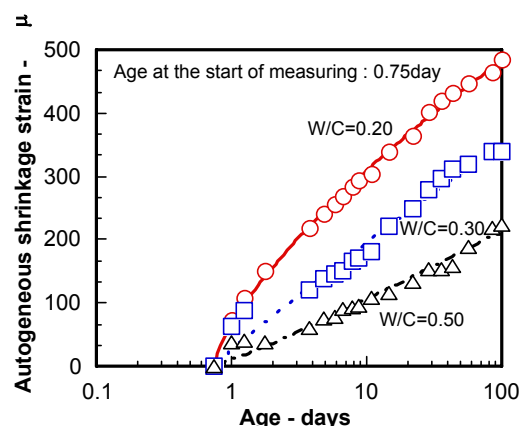
自己収縮ひずみの経時変化および乾燥収縮ひずみの最終値を求めるために40×40×160mmの角柱供試体を用いた。自己収縮ひずみを測定するための供試体は、すべての面をアルミニウムシートで封緘し、材令0.75日より測定を開始した。自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみともに、98日間測定を行った。

2.4 収縮ひずみ分布測定用供試体

図－1は、100×400×10mmの型枠内に打設



図－1 収縮ひずみ分布測定用供試体



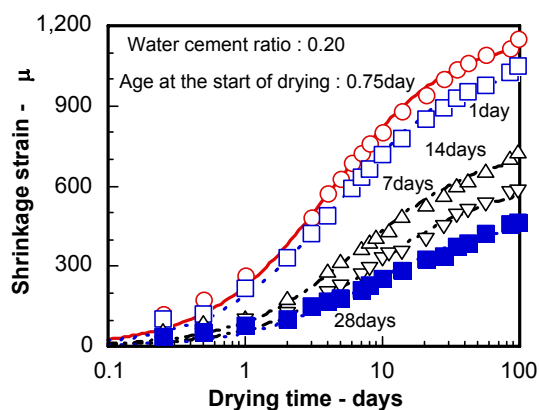
図－2 封緘状態の自己収縮ひずみ

した供試体を10枚束ねて作成した、収縮ひずみ分布測定用供試体である。供試体は、乾燥面の2面以外の4面をアルミニウムシートでシールしている。収縮ひずみの測定には、最小目盛1/1,000mmのホイットモア式ひずみ計（検長250mm）を用いた。供試体は、温度20℃、湿度60%の恒温恒湿度室内に設置した。

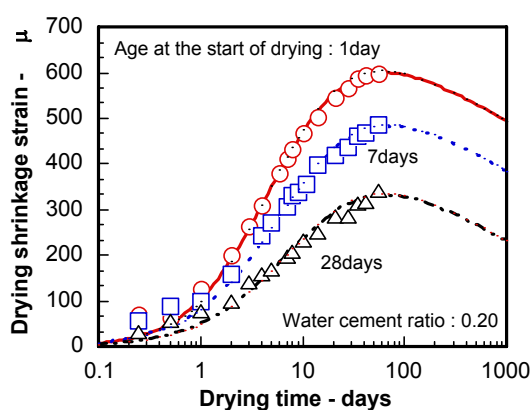
3. 実験結果と考察

3.1 乾燥条件下における自己収縮ひずみ

図－2に封緘状態で測定された角柱供試体の自己収縮ひずみを示す。この図より、自己収縮ひずみの経時変化を対数関数で回帰すると、実験値と一致することがわかる。一方、乾燥状態の角柱供試体の収縮ひずみは図－3に示すように、双曲線関数で回帰することができる。すなわち、本実験の範囲では、自己収縮ひずみは対数関数で表されるため、時間とともに増加するが、乾燥下における収縮ひずみはコンクリート内部の相対湿度が外気の相対湿度と平衡状態に



図－３ 乾燥状態の総収縮ひずみ



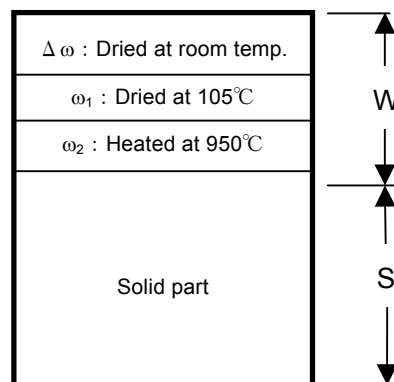
図－４ 自己収縮ひずみが乾燥状態に無関係とした場合の乾燥収縮ひずみ

達したときに収束する。もし、自己収縮ひずみが乾燥に無関係に生じるとすれば、対数曲線によって回帰された自己収縮ひずみは、乾燥状態においても増加し続けることになる。従って、全収縮ひずみから自己収縮ひずみを差し引いた乾燥収縮ひずみは、図－４のようにある時間以降は減少する。この現象は乾燥下における自己収縮ひずみが乾燥と無関係ではなく、独立した時間の関数で表現できないことを示している。

3.2 結合水と自己収縮ひずみの関係

図－５はコンクリート中の水分構成の概念を示したものである。コンクリート中には 100℃で蒸発可能な水分と 950℃まで熱しないと分解されないセメントと結合した結合水が存在する。

図－６は、φ 50×100mmの封緘状態の円柱供試体から求めた蒸発可能な水分量(ω_1)と結合水量(ω_2)の関係を示したものである。この図から



図－５ コンクリート中の水分構成

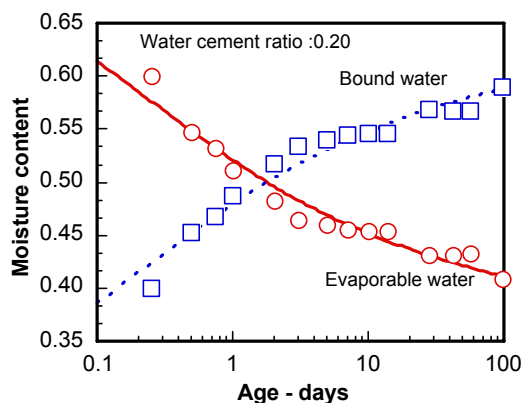
W : 乾燥開始前の全水量

S : 固体部分 (950℃時の残存質量)

$\Delta \omega$: 乾燥による逸散水量

ω_1 : 蒸発可能水量 (105℃時の損失水量)

ω_2 : 結合水量 (950℃時の損失水量)



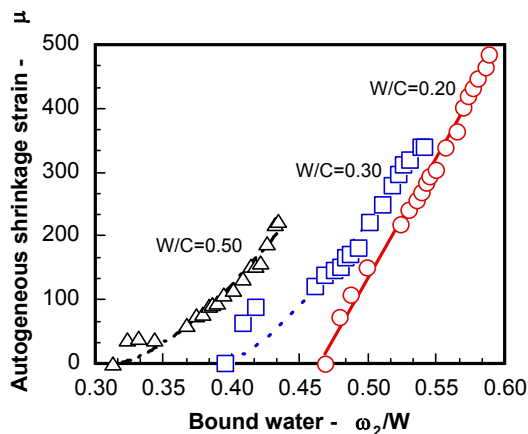
図－６ 結合水と蒸発可能水の関係

明らかなように結合水量は時間とともに増加し、逆に蒸発可能水量は減少している。そして、ある時間において結合水量と蒸発可能水分量は等しくなり、その後は全水量に占める結合水量の割合の方が大きくなるとともに、その増加速度は緩やかになっている。

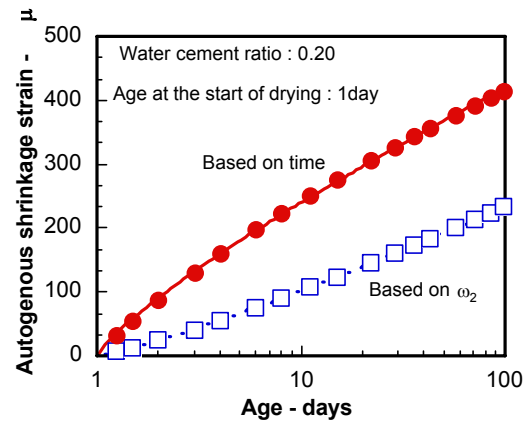
図－７は、材令 0.75 日より測定を開始した自己収縮ひずみと結合水量の関係を表したものである。水セメント比が 0.30 および 0.50 の場合では、べき乗式で、水セメント比が 0.20 の場合では、ほぼ直線で表されることがわかる。

3.3 乾燥下における結合水と自己収縮の関係

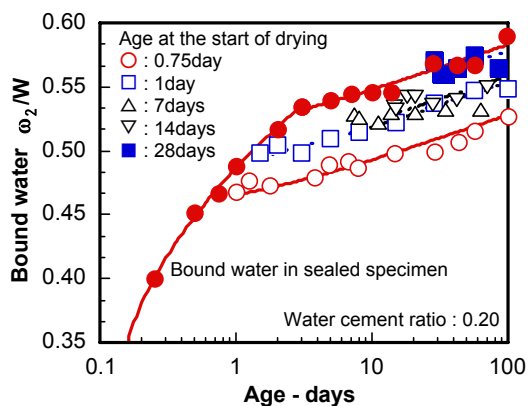
図－８は封緘状態での結合水量の経時変化と



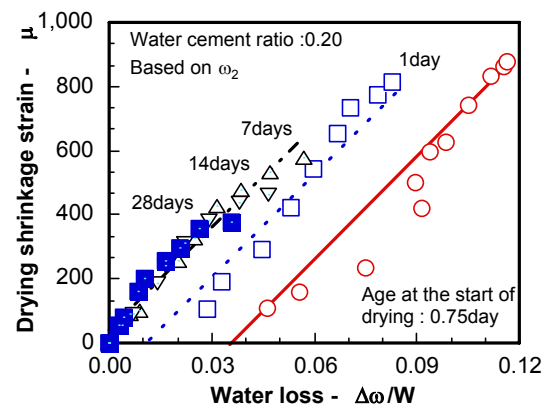
図－７ 結合水と自己収縮ひずみ



図－９ 結合水に基づく自己収縮ひずみ



図－８ 結合水と乾燥開始材令の関係



図－１０ 逸散水量と乾燥収縮の関係

乾燥状態での結合水量の経時変化を示したものである。●が封緘状態，その他の記号は乾燥状態での結合水量を示す。この図から，封緘状態での結合水量の経時変化は二つの直線で表されることが分かる。この変化点は結合水量がほぼ50%を超えたところから生じている。

また，乾燥を開始した供試体の結合水量は，乾燥開始材令によらず，封緘状態の材令3日以降の勾配とほぼ一致していることが分かる。封緘状態の材令3日以降の結合水量の経時変化を対数で回帰し，求めた勾配を用いた式(1)で各乾燥開始材令の結合水量の経時変化を表した。

$$\omega_2/W = 0.016 \cdot \log(t+1) + c \quad (1)$$

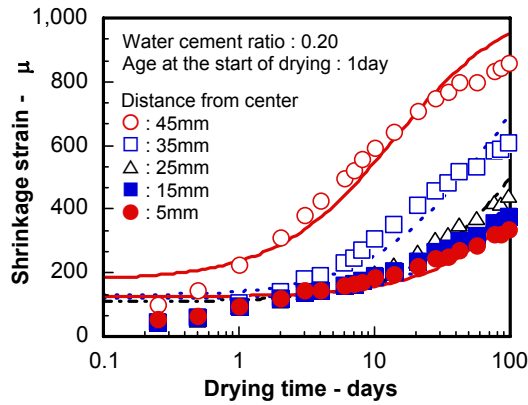
ここで， t は材令（日）である。また，乾燥開始材令 0.75, 1, 7, 14 および 28 日の時， c の値は，それぞれ 0.45, 0.48, 0.49, 0.49 およ

び 0.51 となった。

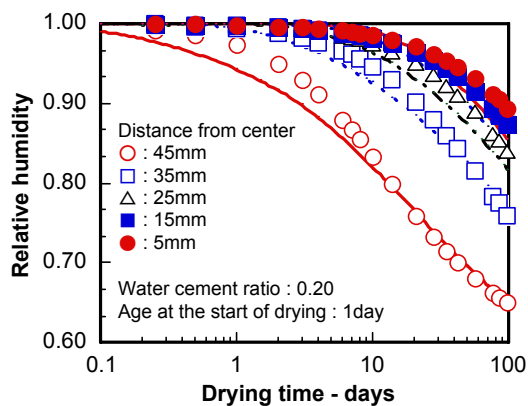
図－9は，図－8でモデル化した乾燥状態下における結合水量の経時変化を用いて自己収縮ひずみを表したものである。□が，図－7に示す封緘状態下で求められた自己収縮ひずみと結合水量の関係と，図－8に示す乾燥条件下での結合水量から求めた自己収縮ひずみを示している。一方，●は，乾燥条件下における供試体と同じ材令において，封緘状態の供試体より得られた自己収縮ひずみを示したものである。結合水量に基づく自己収縮ひずみは，材令の同じ封緘状態の供試体の自己収縮ひずみよりも小さなものとなる。

3.4 乾燥収縮ひずみと逸散水量の関係

図－10は，乾燥下における総収縮ひずみから結合水量に基づき求めた自己収縮ひずみを差し引いた乾燥収縮ひずみと，乾燥による逸散水量との関係を示したものである。図－10と図



図－１１ 収縮ひずみ分布

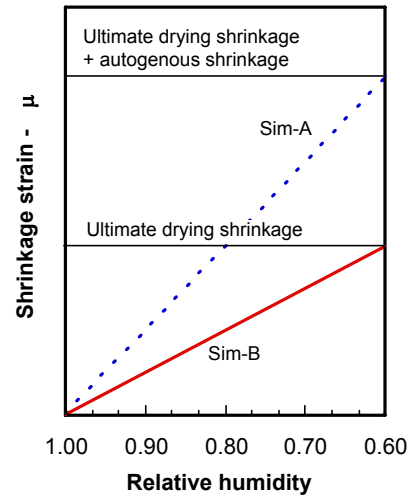


図－１２ 相対湿度分布

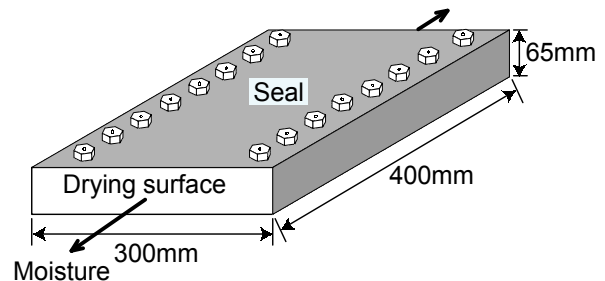
－７を比較すると、水和によって失われる水分と乾燥によって失われる水分量が収縮ひずみに及ぼす影響は異なることが分かる。

3.5 モルタル内の相対湿度分布

図－１１に、図－１に示した収縮ひずみ分布測定用供試体を用いて計測した収縮ひずみ分布を示す。各収縮ひずみ分布測定用供試体において収縮ひずみの大きさが０のときコンクリート内部の相対湿度が１００％で、収縮ひずみが終局値に達したときに、外気の相対湿度と等しくなるとすれば、図－１１に示したひずみ分布より、図－１２に示す相対湿度分布が求まる。任意の時間、任意の位置での相対湿度が明らかとなるため、逆解析^{１)}によって拡散係数およびフィルム係数を求めることが可能である。図中の曲線は逆解析によって求められた拡散係数およびフィルム係数を用いて解析を行った結果であり、実験値とよく一致していることが分かる。



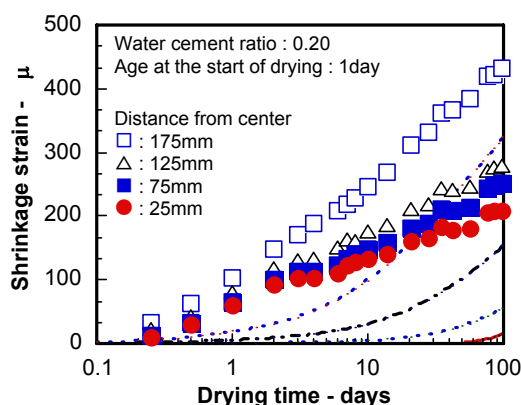
図－１３ 収縮係数



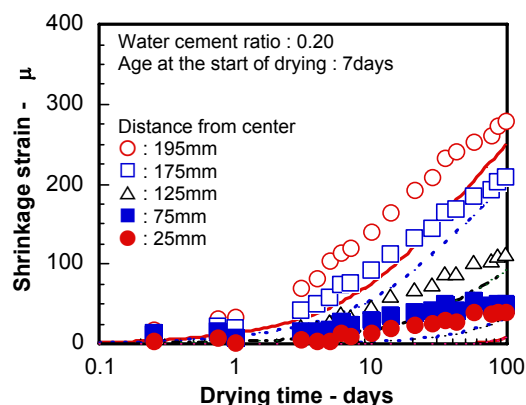
図－１４ 検証用供試体

収縮係数は、図－１３に示すように２通りの方法で求めた。すなわち、Sim-A は、自己収縮を含む総収縮ひずみはコンクリート内の相対湿度が外気の相対湿度と平衡状態に達したとき、終局値となると仮定するもので、Sim-B は、乾燥収縮ひずみのみがコンクリート内部の相対湿度が外気の相対湿度と平衡状態となったときに終局値に達し、自己収縮ひずみは、結合水の変化に伴って生じるとするものである。

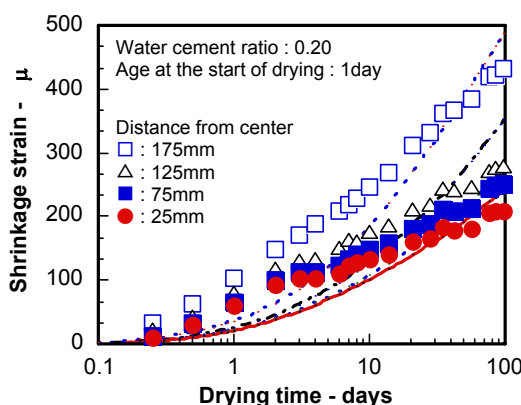
図－１４に示す供試体を想定し解析した結果と実際に測定されたひずみの実験値を図－１５～図－１８に示す。図中の曲線は解析を行った結果を、記号は実験値を示している。図－１５および図－１６より、乾燥開始材令１日では Sim-B に基づく解析結果の方が、実験値とよく一致している。しかし、乾燥開始材令７日では Sim-A に基づく解析結果の方が実験値とよく一致していることがわかる。これは乾燥開始材令１日のように若材令では、自己収縮の影響が大



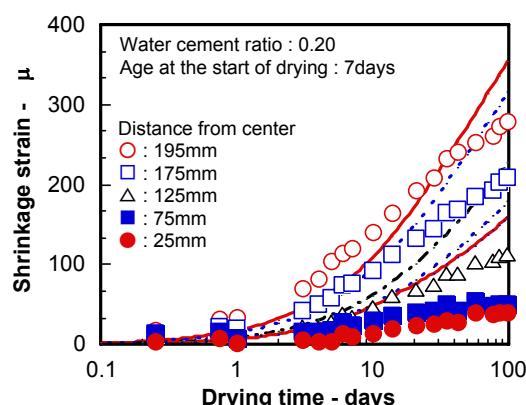
図－１５ 収縮ひずみ分布（乾燥材令１日）
（方法：Sim-A）



図－１７ 収縮ひずみ分布（乾燥材令７日）
（方法：Sim-A）



図－１６ 収縮ひずみ分布（乾燥材令１日）
（方法：Sim-B）



図－１８ 収縮ひずみ分布（乾燥材令７日）
（方法：Sim-B）

きいため、乾燥収縮と自己収縮を分離することで、実験結果と解析結果がよく一致したものと思われる。一方、乾燥開始材令が７日程度になると、材令とともに結合水が若干増加しても、自己収縮ひずみはほとんど生じていないものと思われる。従って、高強度モルタルの収縮ひずみを予測する場合、乾燥開始材令が若材令の場合は、乾燥収縮と自己収縮の影響を分けて予測すべきであり、乾燥開始材令が７日以上経つような場合は、自己収縮と乾燥収縮ひずみを分けて考慮する必要のないことが分かる。

4. まとめ

本論文では高強度モルタルの収縮ひずみ挙動を予測する際の自己収縮ひずみの取り扱いに関

する方法を提案した。自己収縮ひずみは乾燥による影響を受けるため、封緘状態と乾燥状態ではその挙動が異なる。従って、高強度モルタルの収縮ひずみを予測する際、自己収縮ひずみを時間の関数としてではなく、結合水量の関数として解析する手法を提案した。また、本論文で提案する手法を用いれば、乾燥条件下における高強度コンクリートの収縮挙動を、ほぼ妥当な範囲で予測することが可能であることを示した。

参考文献

- 1) T.Ayano, K.Sakata and H.Wittmann: Moisture Distribution, Diffusion Coefficient and Shrinkage of Cement-Based Material, JSCE, No.634/Vol.45, pp.387-401, Nov.1999