論文　コンクリートの乾燥収縮に及ぼす水セメント比および養生条件の影響

郭度連 *1・國府勝郎 *2・宇治公隆 *3・上野敦 *4

要旨：細孔に存在する水分の逸散により生じる乾燥収縮は，そのメカニズムから細孔構造と密接な関係があると考えられる。細孔構造は水セメント比及び養生条件等によって変化する。本研究は，著者らがこれまで検討してきた水セメント比及び養生条件による細孔構造の変化性状をもとに，コンクリートの乾燥収縮に及ぼす水セメント比及び養生条件の影響を検討したものである。

キーワード：細孔構造，逸散水量，毛細管張力

1.　はじめに

気中に位置するコンクリート構造物から水分が蒸発すると乾燥収縮が生じる。この水分の移動は，細孔構造と密接な関係があると考えられ，乾燥収縮を硬化体の構造と関連付けて研究した例は多数あり[1),2)]，また乾燥収縮のメカニズムにおいて毛細管張力説は幅広く受け入れられている[3)]。

本研究は，水セメント比および養生条件を要因として取り上げ，細孔構造，乾燥収縮および逸散水量を測定し，コンクリートの乾燥収縮のメカニズムについて検討したものである。

2.　実験概要

2.1　配合および養生条件

本研究で使用したコンクリートの配合を**表-1**に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、単位水量を171kgの一定として、水セメント比を40，50，60%に変化させた。全ての配合は、目標スランプ8±2cm，空気量4.5±0.5%を満足するように調整した。供試体は、10×10×40cmの角柱供試体を用い，打設後24時間で脱型した後，直ちに乾燥を開始したもの及び材齢3，7および28日まで20±1℃で水中養生したものの4種類を乾燥収縮試験に供した。

2.2　細孔径分布

細孔径分布の測定は，測定範囲6nm～500μmの水銀圧入式ポロシメータを用い，乾燥収縮試験に供する直前，すなわち，材齢1日および水中養生3，7および28日で行った。水中養生直後のコンクリート供試体の細孔径分布は、表面からの位置が異なってもほとんど変化しないと見なせることから[4,)]、試料は断面内の2.5～5mmの大きさのモルタル塊をランダムに採取した。試料はアセトンに浸漬して水和を停止した後，真空乾燥させ，試験に供した。

2.3　乾燥収縮試験

乾燥収縮ひずみは，JIS A 1129のダイヤルゲージ方法に準拠して行った。10×10×40cmの

表-1　コンクリートの配合

W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m³)			
		W	C	S	G
40	42.2	171	428	720	992
50	44.2	171	342	785	999
60	46.2	171	285	843	988

*1　東京都立大学大学院　工学研究科　土木工学専攻　工修　（正会員）
*2　東京都立大学教授　工学研究科　土木工学専攻　工博　（正会員）
*3　東京都立大学助教授　工学研究科　土木工学専攻　工博　（正会員）
*4　東京都立大学助手　工学研究科　土木工学専攻　（正会員）

角柱供試体の端部中央にゲージプラグを埋め込み、所定の水中養生を行った後に基長を設定した。乾燥は20℃,60%R.H.の恒温恒湿室内で行った。供試体数は，各条件につき3本とし，所定の間隔で乾燥収縮ひずみおよび質量変化を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 水セメント比および養生条件による細孔構造の相違

図-1に水セメント比および水中養生日数による細孔構造の変化を示す。グラフの中の第一の文字は水セメント比、第二の文字は水中養生日数を表わしている。各水中養生材齢で細孔径分布は,水セメント比が小さいほど,細孔量のピークを示す径は小さくなり，緻密な組織を有している。たとえば，水中養生材齢3日の場合，細孔量のピークは，水セメント比40%で約40nm，50%で約50nm，60%で約80nmである。コンクリートの単位水量を一定としているため，水セメント比が高いほどセメント粒子間距離が大きくなる。このため、各水セメント比の条件で同等の水和が進行した場合、水セメント比が高いほどポーラスな組織になる。

水セメント比40%の場合，水中養生3日目にある程度の細孔構造が形成され、7日と28日における細孔径分布の変化は顕著ではない。一方，水セメント比60%の場合，7日から28日にかけて水和による細孔構造の変化が大きく，細孔径のピークも小さい方へ移行している。このことは、水セメント比が高いほど、セメント粒子間距離が大きく，湿潤養生期間を長くすることによる組織の緻密化が重要であることを意味している。

このような水セメント比および水中養生日数によって変化する細孔構造は[5],乾燥を受ける前のコンクリート供試体の初期条件,すなわち,水分の分布,逸散可能水量を支配すると考えられ,乾燥収縮の考察において，有益な情報を与えると言える。

3.2 細孔構造と乾燥収縮

図-2に乾燥期間による単位ペースト体積当りの長さ変化率を示す。乾燥収縮の大部分を支配するセメントペーストの体積を一定として表わすことにより，配合の異なるコンクリートの長さ変化率および質量変化率を比較検討することができる。なお，実験に用いたコンクリートの粗骨材量はほぼ同じである。

長さ変化率は,水セメント比が小さいほど,小さくなることが分かる。この傾向は，水セメント比40%の場合に顕著である。

水中養生日数による影響は，それほど大きな差は見当たらないが,水中養生日数が長いほど,長さ変化率は若干小さくなる傾向を示している。既往の研究から，長期間湿潤養生すると収縮現象の発生が遅くなるものの，一般に収縮量に及

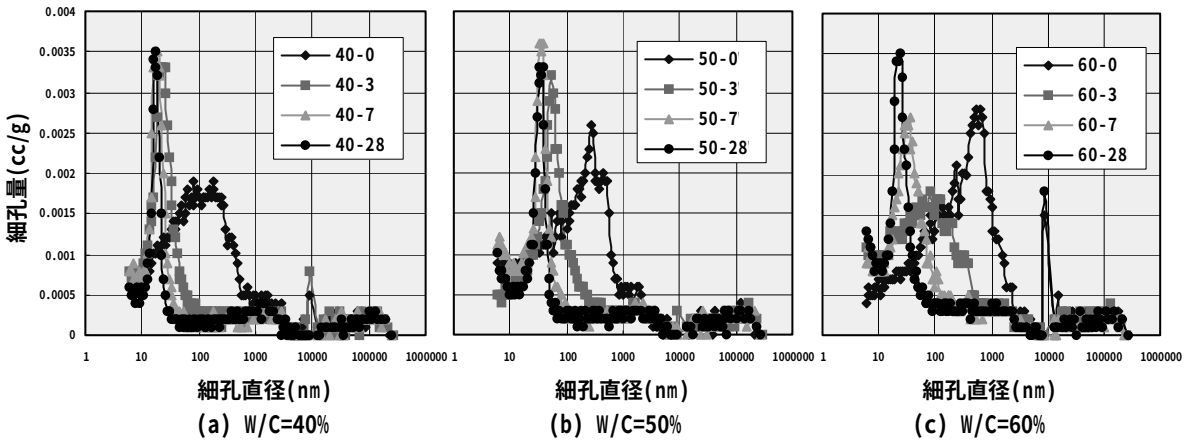
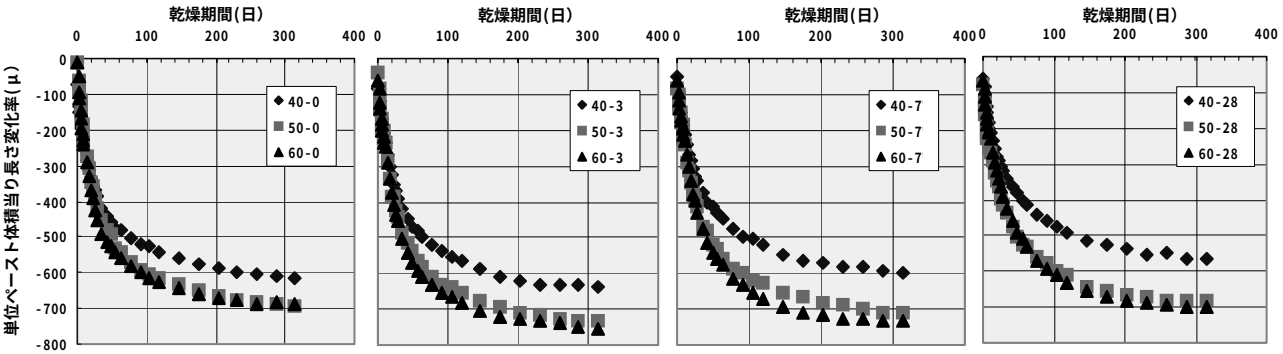
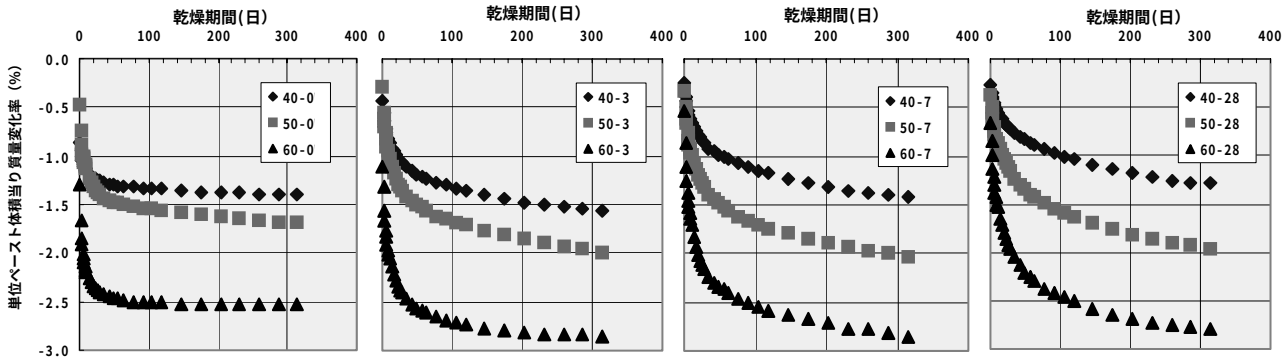


図 - 1 水セメント比および養生による細孔構造の変化



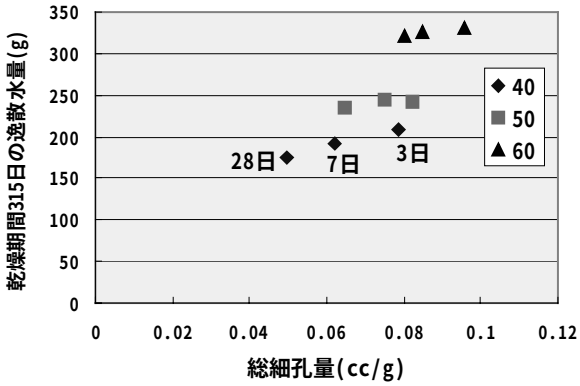
(a) 脱型直後　(b) 水中養生3日　(c) 水中養生7日　(d) 水中養生28日

図‐2 単位ペースト体積当り長さ変化率

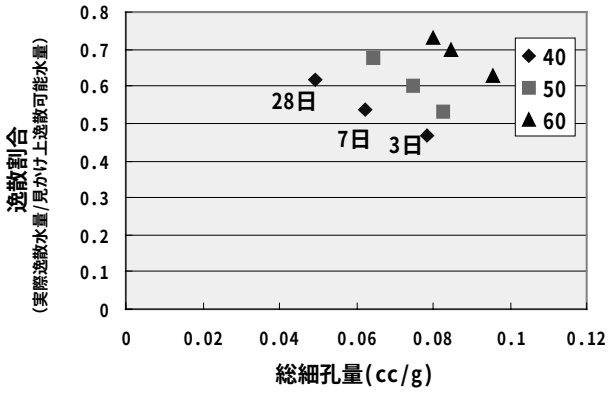


(a) 脱型直後　(b) 水中養生3日　(c) 水中養生7日　(d) 水中養生28日

図‐3 単位ペースト体積当り質量変化率



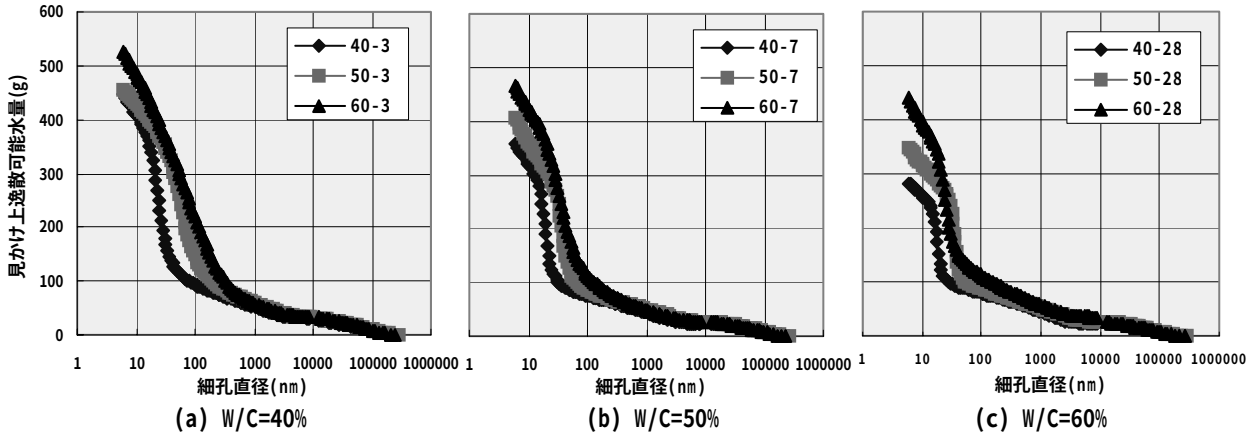
図‐4 総細孔量と逸散水量の関係



図‐5 総細孔量と逸散割合の関係

ぼす養生の効果は重要な因子ではないことが知られており[6], 本実験結果からも同様のことが明らかとなった。

図-3に乾燥期間による単位ペースト体積当り質量変化率を示す。水セメント比が小さいほど, また, 水中養生日数が長いほど, 質量変化率は小さくなる。水和反応が進むにつれて, セメントペースト中の大きい細孔は水和生成物で埋められ, 小さい細孔の割合が増加し, 総細孔量は減少する。また, 細孔組織が緻密になるにつれて, 内部に存在する水の移動速度も遅くなる。このため, 質量変化率は, 水セメント比が小さいほど, また水中養生日数が長いほど, 小さくなっている。したがって, 質量変化率は, 細孔構造と直接的な関連があると考えられる。水中養生によって空隙は水で飽和されていると考えると,

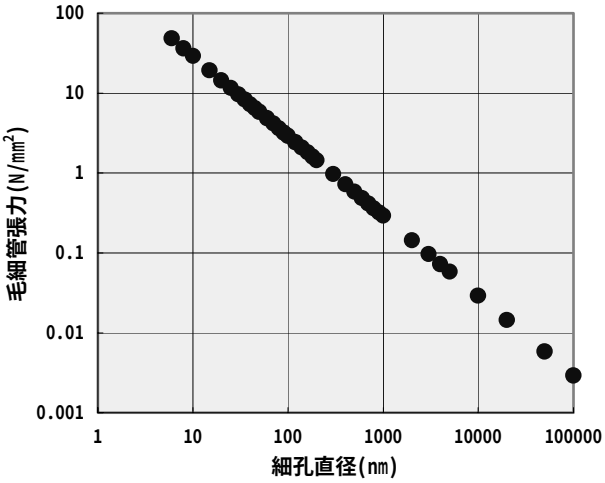


図‐6 見かけ上逸散可能水量と細孔直径の関係

総細孔量と水分の蒸発量には良好な相関が得られる必要がある。なお，総細孔量から見かけ上の逸散可能水量を求めることができる。全ての細孔は水で飽和されており、粗骨材からの水の逸散はないと仮定し，総細孔量に供試体のモルタル重量を乗じれば逸散可能な水量を求めることができる。全ての細孔が実際に水分で満たされている可能性は低いが，ある程度の傾向を反映していると考えられ，水中養生直後の総細孔量のみを用いた。なお，乾燥を受ける間に水和で消費される水分および細孔直径6nm以下のゲル空隙は考慮していない。

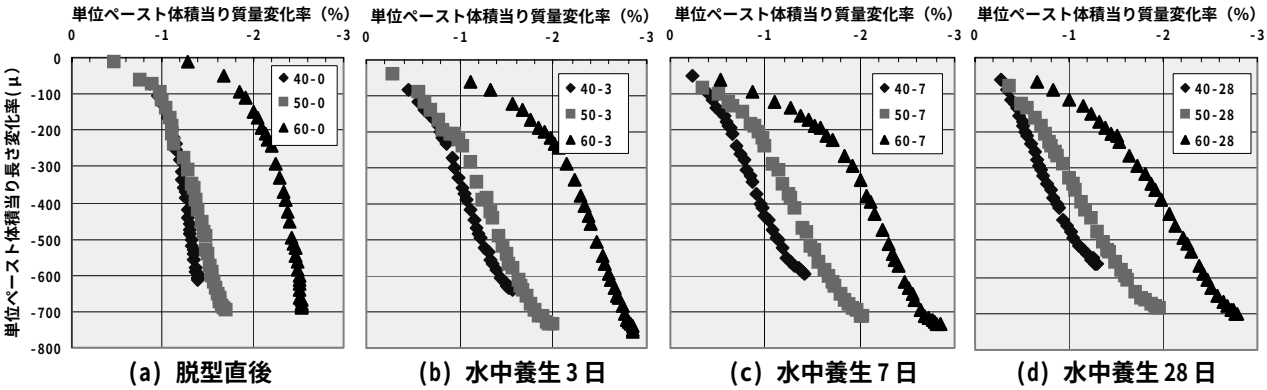
図‐4に総細孔量と乾燥期間315日における逸散水量の関係を示す。水セメント比が大きいほど，水中養生日数が短いほど，すなわち，総細孔量が多いポーラスなコンクリートほど，蒸発量は多くなっている。しかし，**図‐5**の逸散割合と総細孔量の関係は，若干異なる傾向を示している。総細孔量が少ないほど，見かけ上逸散可能水量に対する実際の逸散水量の割合は大きくなっている。すなわち，逸散水量の絶対値は少ないが，見かけ上逸散可能水量に対する相対的な逸散水量は多い。したがって，緻密なコンクリートほど，蒸発しにくいが，予想より小さい空隙まで乾燥している可能性はあると考えられる。

見かけ上逸散可能水量と細孔直径の関係を**図‐6**に示す。水分の蒸発は大きな細孔から順次に起こると考え，細孔径分布から求めたものである。同量の蒸発が生じた場合，水セメント比が小さいほど，また，水中養生日数が長いほど，より小さい細孔まで乾燥が進んでいることが分かる。たとえば，3日間水中養生を行った供試体で、蒸発量200gが生じた場合，水セメント比40%の場合は約27nm，50%は68nm，60%は115nmまで乾燥していることになる。また，水セメント比が60%のコンクリートでは、7日水中養生の場合44nm，28日水中養生の場合29nmである。言い換えれば，ある毛細管張力を生じさせる細孔直径まで乾燥するのに必要な蒸発量は，水セメント比が大きいほど，水中養生日数が短いほど，多くなる。



図‐7 毛細管張力と細孔直径の関係

毛細管張力と細孔半径，あるいは水蒸気圧（相対湿度）と凝縮の生じるメニスカスの半径との

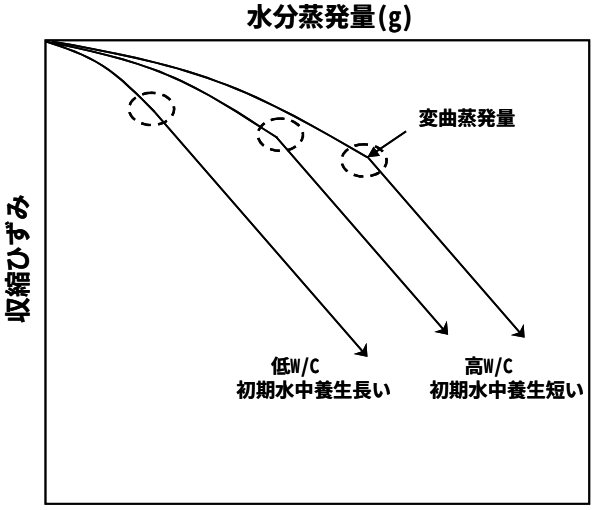


図‐8 単位ペースト体積当り長さ変化率と質量変化率の関係

関係は，式(1)に示すKelvin式によって表わされ，その関係を**図‐7**に示す。

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} = -\frac{RT\rho}{M\cos\theta}\cdot\ln\frac{P}{P_0} \qquad (1)$$

ここに，P：蒸気圧，　Po：飽和蒸気圧，
T：絶対温度(K)，
γ：水の表面張力(20℃で0.07275N/m)，
θ：接触角(0℃)，r：水面の曲率半径
M：水の分子量(0.01802kg/mol)，
R：気体定数(8.31441J/mol･k)，
ρ：水の密度(1000kg/m³)



図‐9 収縮ひずみと水分蒸発量の関係

細孔直径が大きいほど，細孔に働く毛細管張力は小さくなる。細孔直径が小さくなるほど，毛細管張力は大きくなる。水分の蒸発はより大きな細孔から順次起こり，より小さい細孔へ進み，毛細管張力も大きくなる。したがって，ある細孔直径とそこに働く毛細管張力の積によって乾燥収縮応力は生じると考えられる。このことから，乾燥収縮は，どのぐらいの水分が逸散したかではなく，どの大きさの細孔径からどれだけの水分が逸散したかを考えることが重要であると考えられる。

蒸発量が収縮におよぼす影響を検討するため，単位ペースト体積当り長さ変化率と質量変化率の関係を**図‐8**に，その関係をもとに、収縮ひずみと水分蒸発量の概念図を**図‐9**に示す。同一質量変化率における長さ変化率は，水セメント比が小さいほど，また，水中養生期間が長いほど大きくなる。これは，細孔構造の緻密なコンクリートほど，同量の蒸発量が生じた場合，より小さい細孔まで乾燥し，生じる毛細管張力も大きいことに起因する。

乾燥初期の急激な蒸発，すなわち，比較的大きな細孔からの蒸発は，収縮にそれほど影響を及ぼさない。しかし，ある蒸発量を超えると質量変化率に対して長さ変化率が直線的に増加する点（ここでは、変曲蒸発量と称する）が存在する。言い換えれば，乾燥収縮に影響を及ぼす細孔径が存在すると考えられる。

変曲蒸発量は，水セメント比が大きいほど，また，水中養生日数が短いほど，多くなる。これは，細孔径分布を考えると容易に推測される。水セメント比が大きいほど，また，水中養生期間

が短いほど，細孔径分布はポーラスであり，ある毛細管張力を生じさせる細孔まで乾燥するのに必要な蒸発量は多くなる。したがって，質量変化率と長さ変化率の関係は，蒸発量は多いが収縮は少ない初期の曲線部分と，変曲蒸発量を超え，蒸発量と収縮量がほぼ比例関係を示す直線部分とに大別することができる。なお、直線部は，水セメント比，水中養生期間にかかわらず，ほぼ同じ傾きを示している。すなわち、同量の蒸発量に対して同量の収縮が生じている。

この現象について以下で検討する。同量の蒸発量でも蒸発が生じる細孔は異なることから，毛細管張力は異なる。水セメント比が小さい，あるいは初期水中養生が長い方が毛細管張力による収縮応力は大きくなると考えられる。一方，材料自体の収縮に対する抵抗性，すなわち弾性係数は，細孔組織の緻密さ，圧縮強度から，水セメント比が小さい，また初期水中養生期間が長い方が大きくなる。つまり，毛細管張力が大きいものほど，弾性係数も大きくなり，両者が相殺された結果，傾きがほぼ等しくなっているものと考えられる。

本研究は，乾燥収縮のメカニズムを毛細管張力説に基づいて説明したものである。乾燥収縮は，細孔に存在する水分の逸散により発生する毛細管張力によって生じる。したがって，乾燥によって空になる空隙とそこに作用する毛細管張力の積算によって収縮応力が求められる。その収縮応力と水セメント比および養生条件により決まるコンクリートの収縮抵抗性，すなわち弾性率との兼ね合いによって収縮が説明されると考えられる。

4. まとめ

水セメント比及び養生条件による細孔構造の変化をもとに，コンクリートの乾燥収縮に及ぼす水セメント比及び養生条件の影響を検討し，以下の知見を得た。

1) 緻密なコンクリートほど，水分は蒸発しにくいが，ポーラスなコンクリートより小さい空隙まで乾燥している可能性はある。

2) ある毛細管張力を生じさせる細孔直径まで乾燥するのに必要な蒸発量は，水セメント比が大きいほど，水中養生日数が短いほど，多くなる。

3) 質量変化率と長さ変化率の関係において，蒸発量は多いが，収縮は少ない初期の曲線部分と，変曲蒸発量を超え，蒸発量と収縮量がほぼ比例関係にある直線部分とに大別することができる。直線部分の傾きは，作用する毛細管張力と弾性係数とが相殺することによって、水セメント比や水中養生期間に拘らず、ほぼ等しくなる。

参考文献

1) 田沢榮一，米倉亜州夫，寺本尚夫，森下全人：細孔構造の相違がコンクリートの乾燥収縮およびクリープに及ぼす影響，セメント技術年報，38，pp.409-412，1985

2) 小西正芳，浅賀喜与志，大門正機，後藤誠史:各種セメント硬化体の乾燥収縮の測定，セメント技術年報，42，pp.411-414，1988

3) 羽原俊祐，沢木大介，内川浩：硬化モルタルの組織，空隙構造と乾燥収縮との関係(水セメント比と前養生期間の影響)，セメント・コンクリート論文集，No.45，pp.280-285，1991

4) 郭度連，宇治公隆，國府勝郎，上野敦：乾燥によるコンクリート組織の不均質化，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.711-716，2002

5) 郭度連，宇治公隆，國府勝郎，上野敦：養生条件によるコンクリートの組織変化と中性化を支配する細孔径の評価，土木学会論文集，No.718，V-57，pp.59-68，2002. 11

6) A.M.Nevile：Properties of Concrete, Pitman Paperbacks，pp.286-299，1970

7) セメント硬化体研究委員会報告書：Report of committee on properties and micro structure of hardened cement，セメント協会，2001. 5