

# 論文 粗骨材の吸水量および空隙構造に基づいたコンクリートの体積収縮変化に関する研究

小幡 雄一郎\*1・吉田 亮\*2・矢野 智也\*3・梅原 秀哲\*4

**要旨:** 本研究では、粗骨材の24時間、48時間および煮沸吸水量と空隙測定を基にインクボトル空隙量と細孔直径40nm以下の空隙量を把握した。この結果、インクボトル空隙を持つ高炉スラグおよび人工軽量骨材は粗骨材からセメントペーストへの水分供給が行われるため、コンクリートの自己収縮を低減する効果を有すること、細孔直径40nm以下の空隙量が多い砂岩碎石はコンクリートの乾燥収縮を大きくするが、同程度に細孔直径40nm以下の空隙量が多い高炉スラグはインクボトル空隙も有するため、両空隙の複合的な作用などにより乾燥収縮が抑えられることを確認した。

**キーワード:** 粗骨材, 吸水量, 空隙構造, インクボトル空隙, 体積収縮変化

## 1. はじめに

粗骨材自体の乾燥収縮がコンクリートの乾燥収縮に無視し得ない影響を及ぼす可能性が高いことが指摘されてきている<sup>1)</sup>。これまで一般に、粗骨材がコンクリート中に占める体積割合は70%程度と高く、粗骨材は安価かつセメントペーストの多大な乾燥収縮ひずみを拘束する材料として認識されてきた。しかしながら、それ自体の乾燥収縮ひずみが1000 $\mu$ を超える粗骨材も確認されており、コンクリート構成材料としての粗骨材の役割が懸念されるケースも散見される。

粗骨材を含む骨材自体の乾湿による体積変化に関する研究は古くから行われており、これまでに骨材自体の乾湿による体積変化は骨材の細孔空隙中における表面エネルギー変化が主な駆動力である可能性が高いこと<sup>2)</sup>、表面エネルギーの変化は骨材の細孔空隙を対象とした比表面積をパラメータとした関数化が可能であり、その関数によりコンクリートの体積変化は概ね予測可能であること<sup>3),4)</sup>などが明らかにされている。

一方で、軽量粗骨材を使用した高強度軽量コンクリートの自己収縮は、多大な吸水量を有する軽量粗骨材内部の水分がセメントペースト部分へ供給されることにより低減するため、軽量粗骨材が自己収縮低減効果を有するという指摘<sup>5)</sup>や、粗骨材自体の乾燥収縮ひずみが大きくても、その粗骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみは必ずしも大きくならないという現象も報告されており<sup>6)</sup>、粗骨材がコンクリートの体積収縮変化に与える影響について未だ統一的な見解が得られていないのが実状である。

上記既往の研究から、粗骨材がコンクリートの体積収

縮変化に与える影響には粗骨材中の細孔量、細孔径分布および空隙の連結性といった空隙構造が密接に関係していると考えられる。よって、粗骨材の空隙構造を知ることが、乾湿による粗骨材の体積変化量および粗骨材がコンクリートの体積収縮変化に与える影響の把握のために極めて重要になる。

粗骨材の吸水量は骨材が含むことのできる水分量であるため、吸水量は水分を媒質とした粗骨材中の空隙量を表現していることに他ならない。乾湿による粗骨材の体積変化は粗骨材の実質部分と水分との物理化学的関係性によって生じるものと考えられるため、水分を媒質として測定された粗骨材の空隙量である吸水量は乾湿による粗骨材の体積変化を知るうえで有用な指標である。

そこで本研究では、粗骨材の吸水量を空隙構造評価指標の1つとして取り上げ、吸水量と水銀圧入法による粗骨材の空隙測定から各粗骨材の空隙構造の把握を試みた。また、把握された各粗骨材の空隙構造がコンクリートの体積収縮変化に与える影響について考察した。

## 2. 粗骨材の吸水量測定

### 2.1 24時間、48時間および煮沸吸水量測定

吸水量測定は4種類の粗骨材を対象として行った。測定対象とした粗骨材の諸物性を表-1に示す。

表-1 粗骨材の諸物性

粗骨材種	表乾密度(g/cm <sup>3</sup> )	吸水率(%)
高炉スラグ	2.43	3.17
砂岩碎石	2.56	2.39
石灰碎石	2.70	0.38
人工軽量骨材	1.37	8.63

\*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会工学専攻 大学院生 (正会員)

\*2 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会工学専攻 助教 博(工) (正会員)

\*3 名古屋工業大学大学院 工学研究科創成シミュレーション工学専攻 大学院生

\*4 名古屋工業大学大学院 工学研究科創成シミュレーション工学専攻 教授 Ph.D. (正会員)

測定には、粒度分布が測定値に与える影響を排除するため、15mmふるいを通し、10mmふるいにとどまるものを試料として使用した。また、試料の量は約2kgとした。

吸水量は24時間吸水量、48時間吸水量および48時間吸水後の煮沸吸水量を測定した。測定手順はJISA1110「粗骨材の密度及び吸水率試験方法」、JISA1135「構造用軽量粗骨材の密度及び吸水率試験方法」およびJISA1509-3「陶磁器質タイル試験方法－第3部：吸水率、見掛け気孔率及びかさ密度の測定方法」を参考にした。吸水量測定にあたり、吸水後に表乾質量測定のために吸水性の布で粗骨材試料をぬぐう際、ぬぐい方が表乾質量に与える影響が懸念された。よって、吸水性の布で目に見える粗骨材試料表面の水膜をぬぐった後、試料を温度20℃、湿度60%の恒温恒湿槽内に30分間放置した状態を表乾状態と定義し、表乾質量を測定した。

吸水量測定の作業フローを図-1に示す。

## 2.2 粗骨材種による吸水量特性

吸水量測定の結果を図-2に示す。

人工軽量骨材を除くすべての骨材について、24時間吸水量と48時間吸水量にはほとんど差がないことがわかる。一方、煮沸吸水量は砂岩砕石と石灰砕石では48時間吸水量との差がほとんどないが、高炉スラグと人工軽量骨材では増加が確認された。特に人工軽量骨材の増加量が他の骨材に比べて著しい。これより、骨材種によって静水圧吸水による内部残留空気量に差異が確認された。

煮沸吸水後、表乾質量測定時における粗骨材表面の乾湿状態を観察した。砂岩砕石、石灰砕石は部分的に表面乾燥が確認されたが、高炉スラグ、人工軽量骨材には表面乾燥はまったく確認されなかった。

図-2に用いた吸水量データは静水圧吸水による質量増加量であるため、試料質量を一定とした場合、相対的に密度の小さい試料は質量増加量が大きく評価されやすくなるのは自明である。よって、図-2に用いた吸水量データを表乾体積と煮沸吸水量によって求めた試料の実質体積で除し、試料粗骨材間の体積の違いが吸水量に与える影響を排除した結果を図-3に示す。

図-3より、相対的に密度が低い人工軽量骨材の実質体積あたりの吸水量はいくぶん低下したが、各粗骨材間における大小関係に変化はなく、本測定によって得られた24時間吸水量、48時間吸水量および煮沸吸水量は骨材中の空隙特性を反映していると考えられる。

## 3. 粗骨材の空隙測定

### 3.1 水銀漸次繰返し圧入法による連続空隙とインクボトル空隙の分離抽出

粗骨材の空隙測定は、吉田らが水銀漸次繰返し圧入法

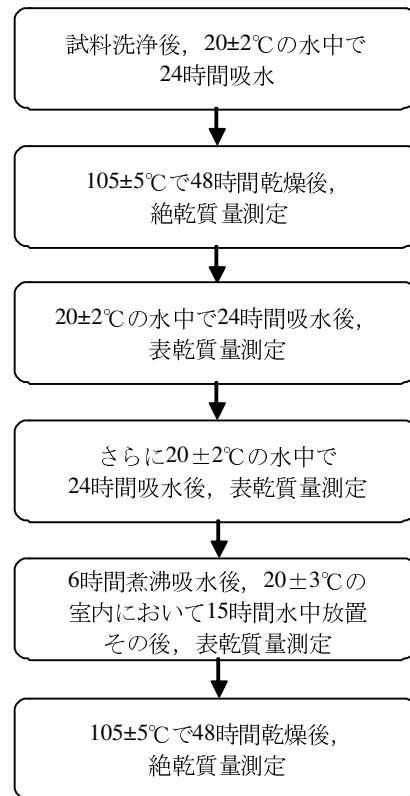


図-1 吸水量測定フロー

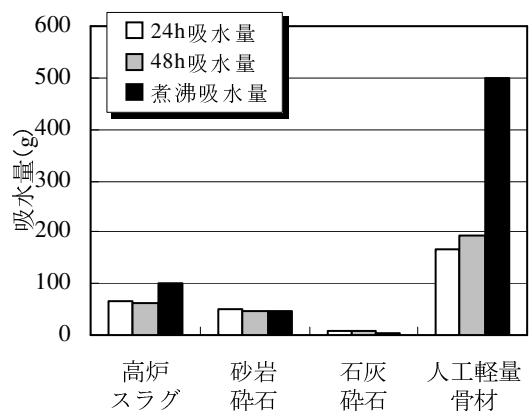


図-2 吸水量測定結果

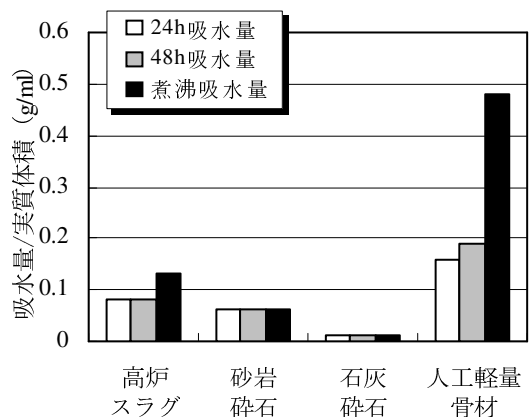


図-3 実質体積を基準とした吸水量

により行い<sup>7),8)</sup>、得られたデータを使用する。本測定方法では、細孔空隙を有する物質中の連続空隙とインクボトル空隙を分離抽出することができる。ここで、“連続空隙”は、水銀の繰返し圧入により水銀が出入りを繰り返す“物質移動経路”を指す。“インクボトル空隙”は、水銀の繰返し圧入により物質内に留まった水銀量であり、“物質貯留空間”を指す。連続空隙量とインクボトル空隙量を足し合わせたものを“総空隙量”と呼ぶ。

前述のように、乾湿による粗骨材の体積変化は粗骨材の実質部分と水分との物理化学的關係性によって生じるものと考えられる。すなわち、水銀漸次繰返し圧入法によって粗骨材中の連続空隙量とインクボトル空隙量を分離抽出することは、粗骨材中の空隙における水分の移動を考えるうえで極めて重要となる。

### 3.2 インクボトル空隙と煮沸吸水量との関係性

各粗骨材の空隙測定結果を図-4(a)(b)(c)(d)に示す。水銀圧入による空隙測定はキャピラリー空隙よりも大きい空隙領域の定量評価に適していると考え、評価対象は直径40nm以上の空隙とした。

図中では、縦軸は水銀圧入量である粗骨材中の累積空隙量を表し、横軸は空隙を円筒と仮定した場合の直径を表す。また、実線は連続空隙量を表し、破線は総空隙量を表す。よって、同一細孔直径における実線と破線の差がインクボトル空隙量を表すことになる。

直径40nm以上の総空隙量は人工軽量骨材、高炉スラグ、砂岩砕石、石灰砕石の順に大きく、人工軽量骨材と高炉スラグにはインクボトル空隙が確認された。砂岩砕石と石灰砕石にはインクボトル空隙は確認されなかった。

煮沸吸水量に増加が確認された高炉スラグと人工軽量骨材にインクボトル空隙が確認されたことは非常に興味深い。高炉スラグと人工軽量骨材におけるインクボトル空隙量と煮沸吸水による吸水増加量を比較すると、完全には一致しないが、オーダーを含めて概ね良好な対応が得られた(表-2)。これにより、煮沸吸水による吸水増加量は主にインクボトル空隙に貯留された水分量であると考えられる。この結果、48時間程度の静水圧による吸水ではインクボトル空隙は液状水により飽和しないともいえ、インクボトル空隙の有無が粗骨材中の水分移動に与える影響は大きいと考えられる。

空隙測定の結果、粗骨材によって連続空隙量とインクボトル空隙量に違いがあることがわかった。粗骨材の空隙構造の違いは、骨材中の水分移動との関係性から乾湿による粗骨材自体の体積変化に大きく影響するものと思われる。また、粗骨材の空隙構造は粗骨材とセメントペースト間の水分収支にも影響を与えとも思われ、この影響とコンクリートの体積変化との関係性が示唆される。

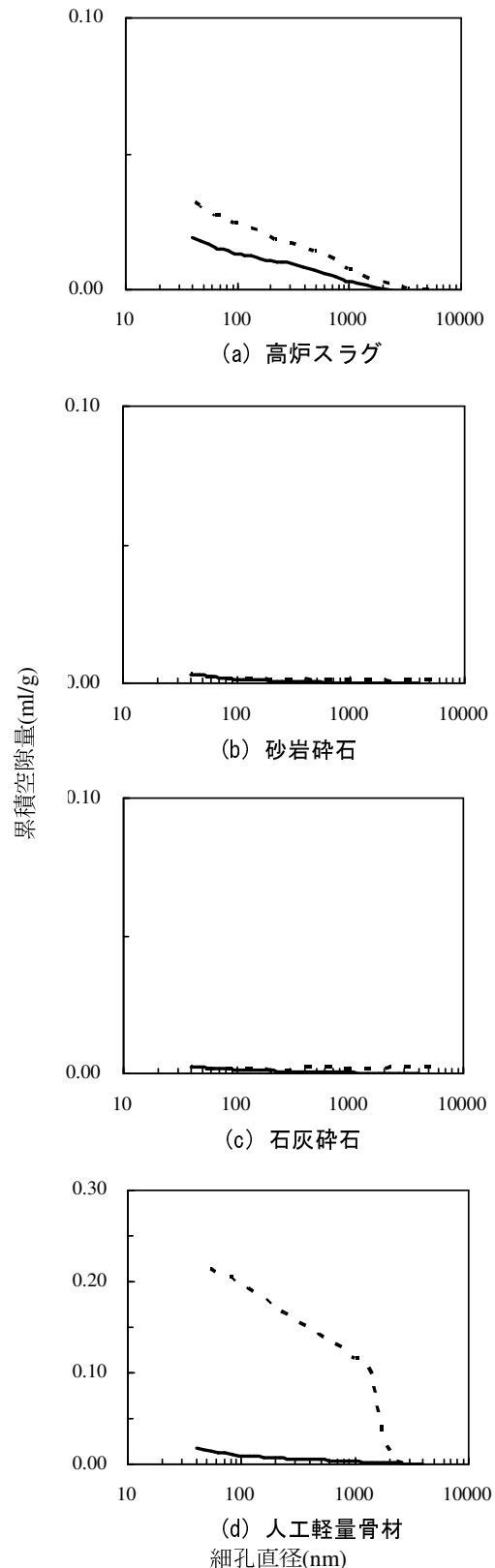


図-4 空隙測定結果<sup>8)</sup>

表-2 インクボトル空隙と煮沸吸水増加量の関係

(単位: ml)	インクボトル空隙量	煮沸吸水増加量
高炉スラグ	39	27
人工軽量骨材	306	396

表-4 配合および試験結果

粗骨材種	W/C (%)	粗骨材かさ容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	セメント	水	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				スランブ (cm)	空気量 (%)	材齢28日圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
							細骨材	粗骨材	高性能AE減水剤	AE助剤			
高炉スラグ	40	0.6	8±2.5	4.5±1.5	375	150	799	899	3.750	4.125	8.5	4.5	58.8
砂岩砕石							830	916	4.125	4.500	7.0	3.1	61.6
石灰砕石							842	953	3.750	5.250	8.5	4.3	56.9
人工軽量骨材							694	659	4.500	1.500	6.0	6.0	48.8

4. コンクリートの体積収縮変化測定

4.1 自己収縮および乾燥収縮ひずみの測定

粗骨材がコンクリートの体積収縮変化に与える影響を知るために、自己収縮および乾燥収縮ひずみを測定した。自己収縮ひずみは JCI 法「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法(案)」によった。乾燥収縮ひずみは JISA6204「コンクリート用化学混和剤」によった。測定方法は JISA1129-3「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法-第3部：ダイヤルゲージ法」によった。

配合計画にあたり、粗骨材量がコンクリートの体積収縮変化に与える影響を排除するため、粗骨材かさ容積を一定とした。

コンクリート練上り後、ただちにスランブ試験と空気量測定試験を実施し、JISA5308「レディーミクストコンクリート」に規定された範囲内であることを確認した。スランブと空気量の調整は高性能 AE 減水剤と AE 助剤により行った。

フレッシュ性状確認後、10×10×40cm の長さ変化用試験体、材齢 28 日圧縮強度用供試体（標準養生）および凝結時間測定用試験体を作製した。なお、凝結時間測定用試験体には温度測定用センサーを埋め込み、温度によるコンクリートの長さ変化補正を行った。

自己収縮ひずみの基長は凝結時間測定試験により、試験料が発発時間に達した時点で測定した。

使用材料を表-3 に、コンクリートの配合、および各試験結果を表-4 示す。

なお、人工軽量骨材を使用したコンクリートは自己収縮ひずみのみ材齢 133 日まで測定した。それ以外の粗骨材を使用したコンクリートは自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみともに材齢 182 日まで測定した。

4.2 粗骨材種がコンクリートの収縮体積変化に与える影響

自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみ測定結果をそれぞれ図-5、図-6 に示す。なお、図-6 に示した乾燥収縮ひずみは自己収縮ひずみを除いたデータを使用した。

図-5 から、人工軽量骨材には前述した自己収縮低減効果が確認されたとともに、高炉スラグも人工軽量骨材

表-3 使用材料

材料	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント 密度3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	山砂 表乾密度2.53g/cm <sup>3</sup> , 吸水率2.18%
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系 密度1.060~1.120g/cm <sup>3</sup>
AE助剤	樹脂酸塩系 密度1.030~1.070g/cm <sup>3</sup>

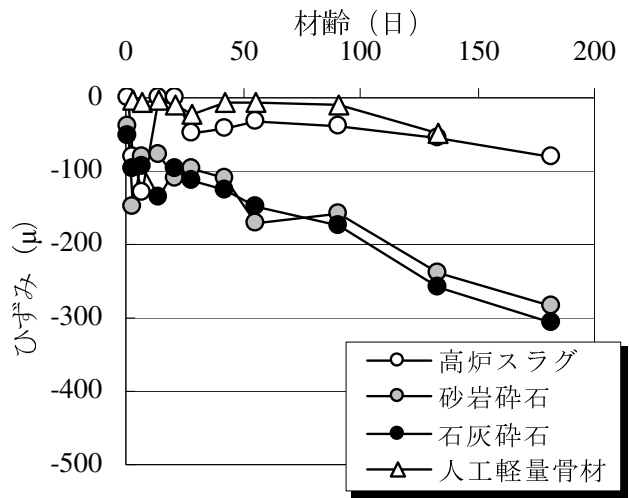


図-5 自己収縮ひずみ

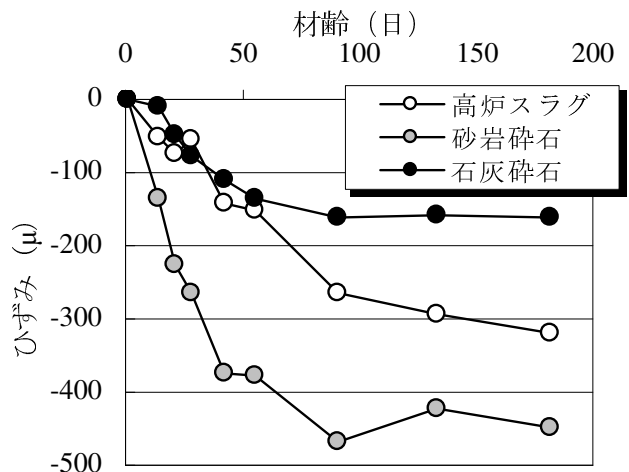


図-6 乾燥収縮ひずみ

と同程度の自己収縮ひずみとなった。

これは、高炉スラグも人工軽量骨材のような自己収縮低減効果を有する可能性を示唆するものである。一方、砂岩砕石と石灰砕石の自己収縮ひずみは同程度となり、材齢 133 日では人工軽量骨材および高炉スラグの 3 倍程度となることが確認された。

乾燥収縮ひずみは砂岩砕石、高炉スラグ、石灰砕石の順に大きくなった。砂岩砕石は材齢初期から他の骨材に比べて大きなひずみを示しており、高炉スラグと石灰砕石は材齢 50 日程度まで同程度のひずみを示した後、急激に両者のひずみ差が拡大した。

## 5. 粗骨材の空隙構造とコンクリートの体積収縮変化との関係

### 5.1 煮沸吸水量と空隙測定結果による空隙構造の把握

前述したように、本研究では水銀漸次繰返し圧入法によって測定された粗骨材の空隙量は、直径 40nm 以上の空隙を評価対象とした。しかし、粗骨材中にはより小さい直径を有する空隙が存在しており、粗骨材中の水分移動を考えるためには、直径 40nm 以下の空隙量を評価する必要がある。

吸水量測定の結果、48 時間吸水では水分に満たされなかった粗骨材中の空隙は、煮沸吸水によって満たされると考えられるため、煮沸吸水量は粗骨材中のより多くの空隙にまで水分が行きわたった状態の吸水量を表現しているといえる。よって、煮沸吸水量から空隙測定によって得られた直径 40nm 以上の空隙量を差し引くことにより粗骨材中の直径 40nm 以下の空隙量を求めることができる。このようにして求めた 40nm 以下の空隙量および水銀圧入による空隙測定によって得られた総空隙量、連続空隙量およびインクボトル空隙量を表-5 に示す。

直径 40nm 以下の空隙量は人工軽量骨材、砂岩砕石、高炉スラグ、石灰砕石の順に大きい。この内、石灰砕石の値が負になった。これは誤差範囲であると考えられ、実際的には石灰砕石中において直径 40nm 以下の空隙はほとんど存在しないものと考えられる。

インクボトル空隙量が高炉スラグと人工軽量骨材のみに確認され、インクボトル空隙量と煮沸吸水による実質体積あたりの質量増加量は概ね良い対応であることは先

に述べた。砂岩砕石、石灰砕石では実質体積あたりの煮沸吸水量の伸びがなく、インクボトル空隙量が 0 であることをあわせて考えると、実質体積あたりの 24 時間または 48 時間吸水量と煮沸吸水量によりインクボトル空隙量を概ね評価可能であると考えられる。

### 5.2 粗骨材の空隙構造がコンクリートの体積収縮変化に与える影響

自己収縮ひずみは外部との水分の出入りを遮断された試験体によって測定されるため、試験体中の主な水分移動はセメントの水和反応による消費と、粗骨材からセメントペーストへの供給であると考えられる。自己収縮はセメントの水和反応により形成される空隙に外部より水分が補給されない場合に生じる自己乾燥に起因する<sup>9),10)</sup>。よって、粗骨材からセメントの水和反応により形成される空隙に水分が供給されれば、自己乾燥もしくは自己収縮を低減させることができる。高炉スラグおよび人工軽量骨材を使用したコンクリートに確認された自己収縮ひずみの低減は、両粗骨材からセメントペーストに対して水分供給が行われたものと考えられる。この水分供給は、吸水量測定において表乾質量測定時に表面乾燥が確認されなかった高炉スラグおよび人工軽量骨材では、骨材内部から骨材表面への水分移動が生じており、この現象が大きく影響しているものと考えられる。この水分供給メカニズムは、インクボトル空隙を有しない砂岩砕石と石灰砕石の自己収縮ひずみが、粗骨材種に関係なく同程度であることから裏付けられる。

乾燥収縮ひずみは温湿度一定の環境下で外部との水分の出入りを許す状態で測定される。既往の研究では、粗骨材の比表面積と粗骨材自体の乾燥収縮量は比例関係にあると指摘されている<sup>2)</sup>。すなわち、試験体のパラメータが粗骨材を除き同一であれば、コンクリートの乾燥収縮ひずみは粗骨材自体の乾燥収縮ひずみに大きく影響される<sup>3),4)</sup>。比表面積は同一体積内であれば、直径の小さい空隙量が多いほど大きくなることは自明であるため、表-5 に示した直径 40nm 以下の空隙量は粗骨材自体の乾燥収縮と密接に関係していると考えられる。

石灰砕石は直径 40nm 以下の空隙量がほとんど存在せず比表面積が小さいため、乾燥収縮ひずみが小さくなったと考えられる。砂岩砕石は直径 40nm 以下の空隙量が

表-5 空隙測定結果および直径 40nm 以下の空隙量

(単位 : ml/g)	総空隙量	連続空隙量	インクボトル空隙量	直径40nm以下の空隙量
高炉スラグ	0.0329	0.0199	0.0130	0.0158
砂岩砕石	0.0037	0.0037	0.0000	0.0187
石灰砕石	0.0025	0.0025	0.0000	-0.0001
人工軽量骨材	0.2205	0.0170	0.2035	0.0385

もっとも多いため、乾燥収縮ひずみが大きくなったと考えられる。高炉スラグは直径 40nm 以下の空隙量を考慮すれば乾燥収縮ひずみの測定値は過小評価とも考えられる。しかし、高炉スラグがインクボトル空隙を有し、セメントペーストに緩やかな水分供給が行われたため、他の粗骨材を使用したコンクリートに比べて内部湿度低下が遅延されたことや、高炉スラグの実質部分を形成する物質が天然骨材のそれとは異なり、弾性が低いため変形抵抗性が大きくなったことにより乾燥収縮ひずみが小さくなったと推察される。また、材齢 50 日程度経過後に高炉スラグと石灰砕石を使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみ差が大きくなったのは、材齢 50 日付近における高炉スラグのインクボトル空隙からの水分逸散量の減少に関連すると推察される。

## 6. まとめ

本研究では、24 時間、48 時間および煮沸吸水量と水銀漸次繰返し圧入法によって粗骨材のインクボトル空隙量と直径 40nm 以下の空隙量を把握し、粗骨材の空隙構造がコンクリートの体積収縮変化に与える影響について考察を行った。本研究により得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 水銀漸次繰返し法によって得られたインクボトル空隙量と吸水量測定によって得られた 48 時間吸水量と煮沸吸水量との差は良く対応する。この結果、粗骨材中のインクボトル空隙は 48 時間程度の静水圧吸水では飽和せず、煮沸吸水による圧力下において空気と液状水の置換が生ずることで飽和すると考えられる。
- (2) コンクリートの自己収縮は、使用した粗骨材がインクボトル空隙を有する場合、粗骨材からセメントペーストへの水分供給による自己収縮低減効果により小さくなる傾向がみられた。
- (3) コンクリートの乾燥収縮は、使用した粗骨材中の直径 40nm 以下の空隙量に影響を受けるが、インクボトル空隙の有無などの複合的な作用を考慮する必要がある。

本研究では、粗骨材の空隙構造を直径 40nm を閾値として大きく 2 つに分けて検討を行った。乾湿による粗骨材自体およびコンクリートの体積変化はその空隙構造と密接に関係していると考えられる。今後は粗骨材の空隙構造を対象として直径 40nm 以下の空隙構造や空隙の連続性についてさらに詳細な実験と分析を行い、空隙構造と乾湿による体積変化との関係を明らかにする必要がある。

## 謝辞

本研究における水銀漸次繰返し圧入試験の実施にあたり、東京大学生産技術研究所 岸利治教授には特段の御配慮と御指導を頂きました。また、実験実施にあたり、元名古屋工業大学学部生 井上のぞみ氏、名古屋工業大学学部生 鶴飼貴史氏、上田仁氏、(株) 愛建総合設計研究所 関建祐氏には多大なご協力を頂きました。ここに記して深く謝意を示します。

## 参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会垂井高架橋損傷対策特別委員会：垂井高架橋損傷対策特別委員会中間報告書，土木学会，2005.
- 2) 後藤幸正，藤原忠司：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響，土木学会論文報告集，第 286 号，pp.125-137，1979.6
- 3) 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，第 606 号，pp.9-14，2006.8
- 4) 浅本晋吾，石田哲也，前川宏一：骨材特性との関連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
- 5) 裴 晟哲，早野博幸，野口貴文，長井宏憲：軽量骨材の自己収縮ひび割れ低減効果に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.565-570，2009
- 6) 田中博一，橋田 浩：骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.553-558，2009
- 7) 吉田 亮，岸 利治：水銀の漸次繰返し圧入による空隙の連続性抽出と有効圧力範囲に関する研究，東京大学生産技術研究所研究速報，60 巻，5 号，pp.126-129，2008
- 8) 吉田 亮，小幡雄一郎，齊藤和秀，梅原秀哲：インクボトル空隙関係を内包する人工骨材および天然骨材の空隙構造に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，2010
- 9) 田澤栄一：委員会報告「自己収縮研究委員会報告」，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.29-38，1996
- 10) 田澤栄一：委員会報告「自己収縮研究委員会報告」，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.1-10，1997