粗骨材の排水挙動がコンクリートの 乾燥収縮に与える影響

小幡 雄一郎¹・吉田 亮²・梅原 秀哲³

¹学生会員 名古屋工業大学 大学院 博士後期課程 社会工学専攻
(〒466-8155 愛知県名古屋市昭和区御器所町)
E-mail: 17518502@stn.nitech.ac.jp

²正会員 名古屋工業大学助教 大学院 社会工学専攻
(〒466-8155 愛知県名古屋市昭和区御器所町)
E-mail: yoshida.ryo@nitech.ac.jp

³フェロー 名古屋工業大学教授 大学院 創成シミュレーション工学専攻
(〒466-8155 愛知県名古屋市昭和区御器所町)
E-mail: umehara.hidetaka@nitech.ac.jp

粗骨材がコンクリートの乾燥収縮に与える影響を粗骨材の排水挙動に基づいて検討した。実験は長さ変化測定用コンクリートバー内部にひずみゲージを貼り付けた粗骨材を混入し、コンクリート内部の粗骨材のひずみを直接測定した。測定したひずみに、別途実験にて乾湿に伴う粗骨材のひずみと質量変化から求めたひずみと排水率との関係を適用してコンクリート内部の粗骨材の排水挙動を推定した。コンクリートの排水率とコンクリート内部の粗骨材の推定排水率との関係および、粗骨材のひずみと排水率との関係を比較した結果、一般的な天然粗骨材がコンクリートの乾燥収縮に与える影響には粗骨材自身の乾燥収縮が卓越するが、自身の乾燥収縮ひずみが小さい粗骨材ではセメントペーストの乾燥収縮を拘束する効果も顕著となることが明らかとなった。

Key Words : coarse aggregate, strain gauge, drying shrinkage, water vapor, drainage behavior

1. はじめに

粗骨材自身の乾燥収縮がコンクリートの乾燥収縮に与える影響は古くから検討されているが、近年においても垂井高架橋に多数のひび割れが生じた事象¹⁾や土木学会および日本建築学会がコンクリートの乾燥収縮ひずみに設計最大値を規定する^{2) 3)}など活発な研究および議論が行われてきた。

わが国においては天然骨材に人工軽量骨材を加えて統一的な見解を示した後藤・藤原の研究⁴⁾が先駆的であり、粗骨材自身の乾燥収縮ひずみはその内部表面積に比例することを示し、水蒸気の吸脱着による表面エネルギー変化に起因すると指摘している。また同時に人工軽量骨材はその多大な含水性によりコンクリートの乾燥収縮に与える影響が天然骨材とは異なることも示している。

近年では、今本ら⁵⁾が水蒸気吸着によって求めた細骨材および粗骨材の比表面積が材齢1年のコンクリートの乾燥収縮ひずみと良好な相関関係にあることを示し、後

藤らの研究結果を裏付けている。

この他にも粗骨材の各種物性値とコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係性を検討した研究⁶⁾や粗骨材自身の乾燥収縮を考慮したコンクリートの乾燥収縮ひずみ予測式の提案⁷⁾がなされている。

しかしながら、上記に挙げた例を含むこれまでの研究は粗骨材自身の乾燥収縮ひずみを含む諸物性とコンクリートの終局的な乾燥収縮ひずみとの関係を論じたものが多く、フレッシュコンクリートから硬化コンクリートに到る過程で、粗骨材がコンクリートの乾燥収縮に与える影響について検討された例はほとんどない。乾燥過程における粗骨材の影響は粗骨材とセメントペースト間の水分移動現象を考慮する必要がある、この現象の検討は粗骨材がコンクリートの乾燥収縮に与える影響の解明に大きく寄与するものと考えられる。

上記の課題を踏まえ、本研究では乾燥環境下にある硬化過程コンクリート（以降“硬化・乾燥過程コンクリート”と呼ぶ）内部の粗骨材のひずみ挙動を直接的に把握

するため、ひずみゲージを貼り付けた粗骨材を長さ変化測定用コンクリートバー作製時に混入させ、コンクリートの長さ変化測定と同時に粗骨材のひずみを測定した。これに加えて、別途実験によって水分の吸着および脱着による粗骨材のひずみと質量変化からひずみと排水率との関係を求め、この関係をコンクリート内部の粗骨材のひずみに適用した。これにより、コンクリート内部での粗骨材の排水挙動の推定を試みた。なお、本研究では粗骨材への水分の付着を「吸着」、粗骨材からの水分の離脱を「脱着」として定義する。また、「排水率」の定義については後述する。

2. 粗骨材のひずみと排水率の関係

(1) 実験目的

粗骨材がコンクリートの乾燥収縮に与える影響を検討する上で粗骨材自身の乾燥収縮挙動の把握は必要不可欠である。これまでの研究では、乾湿による粗骨材の体積変化メカニズムとして、表面エネルギー変化機構⁹⁾や分離圧機構⁸⁾が提案されているが、いずれの機構も粗骨材の空隙構造を考慮している。したがって粗骨材の空隙構造は乾燥収縮挙動の検討にとって極めて重要な要素である。粗骨材はその岩種や産地によって内部の空隙構造が異なるために水分の吸着および脱着による膨張および収縮挙動が異なると考えられ、水分の吸着および脱着と粗骨材のひずみ挙動の実験的な把握は、粗骨材の乾燥収縮挙動を把握する上で極めて重要である。

本研究では、複数の天然骨材と人工試料を対象に湿度を変化させてひずみおよび質量測定を行い、試料質量の変化は全て水分の吸着および脱着によるとの前提から、相対湿度とひずみおよび飽和度の関係を求める。また質量測定によって得られた飽和度から粗骨材中の全吸水量に対する排水率を算出し、最終的には粗骨材のひずみと排水率との関係の把握を目的とする。なお、「飽和度」の定義は後述する。

(2) 実験方法

試料は8種類の粗骨材に比較試料として2種類のタイルおよびALCを加えた計11種類とした。選定した試料の主な物性値等を表-1に示す。天然骨材は同一岩種・産地でも異なる岩質が含まれるため、岩質の違いを示すと考えられる質感と色合いを主な基準として、岡崎産砂岩からはSO-BとSO-Wの2岩質、勢濃産砂岩からはSS-Y、SS-TおよびSS-Zの3岩質を選定した。

表-1に示す諸物性は、試料20～50g（10粒程度）を対象とした実験で得たものである。本実験では、粗骨材試

表-1 試料の主な物性値等

岩種等	産地等	識別記号	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	インクボトル 空隙量 (cm ³ /g)
輝緑岩	豊橋産	DB	2.92	0.48	0
硬質砂岩	岡崎産	SO-B	2.62	0.49	0
硬質砂岩	岡崎産	SO-W	2.72	1.53	0
硬質砂岩	勢濃産	SS-Y	2.61	1.35	0
硬質砂岩	勢濃産	SS-T	2.68	1.39	0
硬質砂岩	勢濃産	SS-Z	2.65	0.88	0
石灰岩	藤原産	LS	2.72	0.21	0
人工軽量	膨張頁岩	AL	1.53	28.00	0.1024
タイル	調湿タイル	TF	2.06	23.06	0.0032
タイル	磁器質タイル	TS	2.32	4.08	0.0088
ALC	軽量気泡 コンクリート	ALC	1.33	141.83	0.6056

料を“粒”単位で捉え、水分の吸着・脱着に伴うひずみおよび質量変化を測定することにより、粗骨材の吸水膨張および乾燥収縮挙動を精緻に把握することを目的としている。よって、試料数を“粒”単位とし、JIS規格よりも高精度の測定とすることで、より実態に近い試料の物性を得られると考えた。

天然骨材の表乾密度は2.61～2.92g/cm³の範囲で分布し、一般的な天然骨材の表乾密度の範囲にあるといえる。吸水率は0.21～1.53%の範囲で分布し、粗骨材種の違いにより7倍程度の差が生じる結果となった。なお、表乾密度の大きい骨材は内部が緻密であると考えられ、吸水率が小さくなることが予想されたが、表-1より表乾密度と吸水率との間に比例関係を見出すことはできなかった。

タイル2種（TF、TS）は吸水率が大きく異なる。これはTFが調湿効果を有する内装タイルであるのに対して、TSは磁器質外装タイルであることによる。ALCは表乾密度が最も小さい上、吸水率は著しく大きい値を示した。

水分の貯留空間となり得るインクボトル空隙量^{9) 10)}は48時間の常温静水圧吸水量と煮沸吸水量との差から算出した⁹⁾。天然骨材には両者の差がほとんど確認されなかったため、便宜上0とした。一方、ALを含む人工試料にはいずれもインクボトル空隙の存在が確認された。

a) ひずみ測定

天然骨材およびALでは粒径20mm程度で概ね色合いと質感が同じものを12粒選定した。タイルおよびALCは母材をハンマーで砕き、粒径20mm程度となった各12粒を試料として選定した。

選定した試料は水道水にて洗浄し、1日間アセトンに浸漬した。その後、1日間自然乾燥させた上で50℃に設定した乾燥炉中で1日間強制乾燥を行った。アセトンは

図-1 乾湿による粗骨材のひずみ・質量測定作業フロー

水との混和性が高く、沸点が水に比べて低いことから、この工程により熱影響を極力抑えて、粗骨材試料中の空隙に存在する水分を効率よく除去できると考えた。

アセトンによる処理を終えた試料に検長2mmのひずみゲージを専用の接着剤によって貼り付け、ゲージ貼付け部分に防水材を塗布した後、シリコンコーキングで保護した。

ゲージを貼り付けた試料はシリカゲルによって温度20°C、相対湿度約5%に調湿したチャンバー内で2週間程度保管した。チャンバー内の湿度はデジタル湿度計により観察し、相対湿度が上昇傾向にある場合はシリカゲルを取り替えた。

2週間の保管後、温度20°C、相対湿度約15%、約40%、約60%および約80%に調湿したチャンバー内に試料を3粒ずつ移した。調湿は塩化リチウム過飽和水溶液（理論値 RH15%）、炭酸カリウム過飽和水溶液（理論値 RH44%）、亜硝酸ナトリウム過飽和水溶液（理論値 RH66%）および硫酸アンモニウム過飽和水溶液（理論値 RH81%）によって行った。

調湿したチャンバー内に移した試料は4週間保管し、その期間中継続してひずみを測定した。4週間の保管後、全ての試料を20°Cの蒸留水にさらに4週間浸漬させた。この間もひずみの測定は継続した。

4週間の蒸留水浸漬後、浸漬前に保管したチャンバー

内に再度試料を移し、4週間保管した。これら一連の工程により、水分の吸着過程～吸水過程～水分の脱着過程におけるひずみ変化および質量変化を観察できると考えた。各試料のひずみは3粒の測定値の平均値とした。ここで、山田らは、粗骨材のひずみ測定に関する研究¹⁾から、測定個体数が7以上あれば一定の精度を確保した測定になることを指摘している。本研究では測定器の制約から測定個体数を3としたが、山田らによる測定個体数7の場合の測定データのばらつきと、本研究で実施した測定個体数3の場合の測定データのばらつきを比較し、測定データの妥当性を確認した。測定作業フローを図-1に示す。

b) 質量測定

ひずみ測定用試料と同様の選定条件により各試料について30粒程度を選定し、質量測定用の試料とした。

試料はひずみ測定用試料と同様のアセトンによる処理をした後、ランダムに4つの組に分割し、ひずみ測定用試料と同一条件で保管した。保管中は1週間ごとに質量測定を行った。質量測定には目量0.1mgの電子天秤を使用した。ここで、質量測定用試料の量は、JIS A 1203「土の含水比試験方法」に規定された試料質量とはかりの目量との関係に関する記述を参考に、目量0.1mgの電子天秤を使用した水分の増加・減少の測定に対して妥当性を有することを確認した。

図-2 相対湿度変化に伴う粗骨材のひずみ変化

図-3 相対湿度変化に伴う粗骨材の飽和度変化

(3) 乾湿による粗骨材のひずみおよび飽和度変化

相対湿度変化に伴う粗骨材のひずみ変化を図-2に示す。同様に質量変化から求めた飽和度変化を図-3に示す。両関係図のプロットは吸着過程が相対湿度5%, 15%, 40%, 60%, 80%および100% (4週間の吸水過程を相対湿度100%における吸着過程と定義) の6点であり, 脱着過程が相対湿度15%, 40%, 60%, 80%および100%の5点である。ここで, ひずみは4週間の吸水過程終了時点をもとに示すとともに, 飽和度は試料の絶乾質量と煮沸吸水による表乾質量との差を試料の全吸水量として定義し, 全吸水量に対する各相対湿度環境下における水分質量の割合として示した。飽和度の算出式を式(1)に示す。

飽和度＝

$$\frac{\text{試料の質量} - \text{絶乾質量}}{\text{煮沸吸水による表乾質量} - \text{絶乾質量}} \times 100(\%) \quad (1)$$

ひずみ変化では一部を除き天然骨材と人工試料で挙動が分かれた。LSを除く天然骨材は吸着曲線と脱着曲線が概ね一致しており, 乾湿によるひずみ変化が可逆的であることがわかる。また粗骨材種の違いによって大きな差が確認され, SS-Tは相対湿度5%と100%の間で2000 μ mを超えるひずみが生じた。LSは相対湿度80%以下で吸着曲線と脱着曲線に差が生じた。この原因は明らかではないが, 脱着によるひずみが小さいことから, 細孔空隙中の微量な残留水分が影響を与えた可能性が考えられる。一方, ALCを除く人工試料では, LSと同様に吸着曲線と脱着曲線に差が確認された。人工試料はインクボトル空隙を有するため, 吸着過程と脱着過程では湿度が同じであっても試料中の含水状態が異なる⁹⁾ためにこのようなヒステリシスを描いたと考えられる。

飽和度変化では, 全ての天然骨材について吸着曲線と脱着曲線が概ね一致している。LS以外の天然骨材はひずみ変化も同様の挙動を示したことから, 相対湿度変化による水分の吸着および脱着が可逆的に生じるといえる。一方, 人工試料も天然骨材と同様に吸着曲線と脱着曲線が概ね一致したが, AL, TSおよびALCでは4週間の吸水量が全吸水量を下回った。

人工試料はひずみ変化においてヒステリシスを描いたのに対して飽和度変化が可逆的になった原因は明らかではないが, ALについては吉田らの研究¹⁰⁾によりALを構成する表層の空隙構造と内部の空隙構造が異なることが一因として考えられる。煮沸吸水の結果, ALは多くのインクボトル空隙を有する。しかし表層の空隙は比較的緻密であり, 多くのインクボトル空隙は内部に存在する。よって水中浸漬による表層からの吸水により, インクボトル空隙中の空気が骨材内部に閉じ込められ, 吸水の進

行が停滞すると予想される。図-3よりALの4週間の吸水による飽和度は60%程度であり, 内部の多くの空隙が飽水状態にない。これより, 相対湿度変化による水分の吸着および脱着は主に比較的緻密な表層の空隙で行われ, 微量な水分の吸着および脱着によってひずみ変化が生じたと推察される。

SO-B, SO-W, SS-Y, SS-Z, LSおよび全ての人工試料について相対湿度80%と100%の間で飽和度の急激な変化が確認された。この現象は水分の吸着および脱着は緩やかに進行するのに対し, 流体としての水分による吸水および排水は急激に進行することを意味すると考えられる。

相対湿度変化に伴う粗骨材のひずみ変化と飽和度変化との関係から, それぞれの関係を示す曲線が粗骨材種によって特徴的となることがわかった。これは, 粗骨材の表層から内部に到る大小の空隙の連結性や, 細孔径分布といった空隙構造が, 粗骨材種によって特徴的であることが影響していると推察される。

(4) 粗骨材のひずみと排水率の関係

前項で示した相対湿度変化による試料のひずみと飽和度から求めた排水率との関係を図-4に示す。排水率は試料の全吸水量に対する排水量の割合として (100－飽和度) によって求め, 吸水過程4週間時点の表乾状態を排水率0%と定義した。また, ひずみと排水率の関係の近似曲線を求めた際に試料によっては対数近似が適当な場合があり, 便宜上ひずみは正符号で表記した。ここで, ひずみ変化がヒステリシスを描いた試料については相対湿度変化を基準にした場合, 水分の吸着および脱着によるひずみ変化が可逆的ではないため, 吸着過程と脱着過程におけるひずみ変化および排水率変化を一組のデータとして評価することは適切ではないと判断し, 吸着過程と脱着過程のプロットおよび近似曲線を区別して表示した。これら近似曲線の回帰式および決定係数 (R^2) は吸着過程を実線枠, 脱着過程を破線枠で囲んで識別した。

天然骨材では粗骨材種によってひずみと排水率との関係の傾向が分かれた。DB, SS-Tは直線近似が適当であるのに対して, その他の天然骨材は対数近似が適当となった。これは相対湿度80%と100%の間のひずみと飽和度との関係が大きく影響した結果といえる。

後藤・藤原は, 乾湿に伴う粗骨材の体積変化を対象とした研究¹²⁾において, 吸水膨張に関する実験を実施し, 霧室 (RH100%) 中に静置した試料では水中に浸漬した場合に匹敵する膨張ひずみが確認されたと報告し, 粗骨材の体積変化には骨材の実質を覆う水分が主として関連し, 他の大部分の水分の影響は本質的でない¹³⁾と結論している。この研究結果を考慮すれば, ひずみ変化と排水

図-4 粗骨材のひずみと排水率の関係

率との関係を示す曲線が直線近似と対数近似に分かれたことは、粗骨材中の粗大空隙量が影響したものと考えられ、この結果は、乾湿に伴う粗骨材の体積変化機構を検討する上で極めて重要である。

天然骨材では直線関係となったDB、SS-Tはひずみ変化と排水率変化が概ね比例するため、乾燥環境下では排水に伴った収縮ひずみが生じると考えられる。SO-B、SO-W、SS-YおよびSS-Zは相対湿度80%と100%の間の飽和度変化が比較的大きいために対数曲線による近似が適当となっているが、その他の相対湿度間におけるひずみと排水率との関係は連続的である。この結果は、これら粗骨材の内部は連続した空隙で構成されるが、粗大空隙の量がDB、SS-Tに比べて多いことが影響したと考えられる¹³⁾。特にSO-Wは相対湿度5%から80%の間ではひずみと排水率との関係が比例していることから、内部空隙はDB、SS-Tと同様の構造を有するものと予想される。これらの粗骨材は乾燥環境における初期段階では、表乾状態からの排水が進行するが、それに伴うひずみ変化は比較的小さい。しかし、その後は徐々に増進する排水に伴い、乾燥初期段階に比べると大きなひずみ変化が生じると考えられる。

LSは相対湿度変化に伴うひずみ変化がヒステリシスを描いたが、ひずみと排水率との関係では吸着過程と脱

着過程の近似曲線が極めて近似している。これは相対湿度80%から100%間を除く相対湿度間におけるひずみ変化が比較的小さい排水率変化によって生じたためと考えられる。特に吸着過程の低相対湿度範囲ではほとんど飽和度が変化しないが、ひずみは100μm以上の変化を示している。これは乾燥環境では表乾状態からの排水率変化が大きく、その後の排水はほぼ横ばいであるが、ひずみ変化は微量な排水に伴って増進することを示唆するものである。また、LSの吸水率は他の天然骨材と比べて小さいことから、吸水量も小さく、乾燥に伴う排水量は相対的に小さくなると考えられる。

天然骨材のひずみと排水率との関係は直線近似と対数近似の大きく2種類に区分することができた。これまでも述べたように、この結果は、粗骨材の空隙構造が大きく影響したと考えられる。ここでは、これまでに筆者らが行った粗骨材の空隙構造に関する研究結果を基に、本研究の実験結果を考察する。

筆者らによる既往の研究⁹⁾では、硬質砂岩と石灰岩を対象とした水銀圧入法による再圧入履歴を用いて得た粗骨材中の連続した空隙の抽出結果、および煮沸吸水による空隙測定結果を報告している。これによれば、メソ孔とマクロ孔との境界付近に定義付けられる¹⁴⁾細孔直径である40nmを閾値とした場合、細孔直径40nm以上の空隙

量は硬質砂岩と石灰岩との間において大きな差は確認されなかった。一方、煮沸吸水によって得られた吸水量を粗骨材の全空隙量と仮定し、全空隙量から水銀圧入法によって得られた細孔直径40nm以上の空隙量を減じて求めた細孔直径40nm以下の空隙量は、石灰岩では近似的に0となり極めて少ないのに対し、硬質砂岩では細孔直径40nm以上の空隙量の6倍程度であった。この実験結果が硬質砂岩と石灰岩の異なる生成過程によって生じた特徴的な空隙構造に起因するとすれば、硬質砂岩と石灰岩の空隙構造の主要な違いは、一般に細孔空隙量にあるといえる。

上記の実験に使用した粗骨材試料は、本研究で使用した粗骨材試料と同一のものではないため、本研究で使用した粗骨材試料の詳細な空隙構造は明らかではないが、粗骨材の生成過程に由来する空隙構造の違いは、本研究で使用した粗骨材試料にも適用可能であると考えられる。すなわち、岩種の違いによってその生成過程が異なるために空隙構造に違いが生じ、その結果として、乾湿に伴うひずみ変化と排水率変化の関係を示す曲線が特徴的になったとするのが妥当であろう。前述した後藤らの研究や、表面エネルギー変化機構⁴⁾、分離圧機構⁸⁾および毛管凝集現象¹⁴⁾といった乾湿に伴う粗骨材の体積変化機構として有力な説を考慮すると、粗骨材中の粗大空隙量は主に高湿度領域での乾湿に伴う粗骨材のひずみ変化および排水率変化に影響する一方、粗骨材中の細孔空隙量は主に低湿度領域での乾湿に伴う粗骨材のひずみ変化および排水率変化に影響すると考えられる。以上のことから、粗骨材中の空隙を構成する粗大空隙と細孔空隙の分布の違いが、乾湿に伴う粗骨材のひずみ変化と排水率変化の関係を特徴付けたと考えられる。

人工試料では全てにおいて対数近似が適当となった。これは相対湿度変化に伴うひずみ変化はほとんどの試料がヒステリシスを描いたが、飽和度との関係を示す曲線では相対湿度80%と100%間の変化が著しく大きいことが原因と考えられる。特にALは相対湿度80%から100%間の排水率変化が著しいが、ひずみ変化が対応しないために吸着過程、脱着過程ともに近似曲線の初期勾配が適切に表現されず、決定係数 (R^2) はやや小さい。

3. コンクリートの乾燥収縮およびコンクリート内部の粗骨材のひずみ挙動

(1) 目的

粗骨材種の違いがコンクリートの乾燥収縮ひずみに大きく影響することはこれまで多くの研究によって示されているが、硬化・乾燥過程コンクリート内部の粗骨材の実際のひずみ挙動は明確でない。コンクリート内部の粗骨材のひずみ挙動は粗骨材自身の乾燥収縮に加え、粗骨材に比べてワンオーダー大きいひずみ量を示すセメントペーストの乾燥収縮⁹⁾により粗骨材に発生する収縮応力にも影響を受けることが予想される。よって本研究では、ひずみゲージを貼り付けた粗骨材をコンクリート内部に混入し、コンクリートの長さ変化と同時に粗骨材のひずみを測定することで、硬化・乾燥過程コンクリート内部の粗骨材のひずみ挙動について直接的な把握を試みた。混入前の粗骨材試料は表乾状態と絶乾状態の2種類を設定し、粗骨材の初期乾湿状態の違いがひずみ挙動に与える影響の観察も試みた。これまでこのような検討はほとんどなされておらず、本実験は粗骨材がコンクリートの乾燥収縮に与える影響の実態解明に大きく寄与できると考える。

(2) 実験方法

実験に使用した粗骨材は前章の実験で使用した試料の内、DB、SO-W、SS-Z、LSおよびALの計5種類とした。これら粗骨材試料は一般的なコンクリート製造の材料として使用されていること、岩種・産地が異なること、同一岩種・産地での占有率が高いことを主な基準として選

表-3 コンクリートに使用した材料の主な物性

品目	銘柄等	主な物性
セメント	普通 ポルトランドセメント	密度：3.16g/cm ³
水	水道水	
細骨材	山砂	表乾密度：2.53g/cm ³ 吸水率：2.18% 粗粒率：2.79
高性能 AE減水剤	ポリカルボン酸系	密度：1.060～1.120g/cm ³
消泡剤	ポリエーテル系	比重：0.97～1.01

表-2 コンクリートの配合

種類	産地等	識別記号	W/C (%)	計画 スランプ (cm)	計画 空気量 (%)	粗骨材 絶対体積 (L/m ³)	単位量 (kg/m ³)					
							セメント	水	細骨材	粗骨材	高性能 AE減水剤	消泡剤
輝緑岩	豊橋産	DB	40	8	2以下	360	388	155	865	1037	1.94	3.88
硬質砂岩	岡崎産	SO-W								965		
硬質砂岩	勢濃産	SS-Z								940		
石灰岩	藤原産	LS								968		
人工軽量	膨張頁岩系	AL								493

図-5 ひずみゲージを貼り付けた粗骨材試験体の混入位置

定した。ALについては多くの既往の研究からコンクリートの乾燥収縮に与える影響が天然骨材とは異なることが明らかとなっており、比較試料の位置付けとして試料に含めた。粗骨材の主な物性は表-1の通りである。以降、粗骨材種および使用粗骨材の異なるコンクリートは表-1中の識別記号により識別する。

コンクリートの配合を表-2に、粗骨材以外の使用材料の主な物性を表-3に示す。粗骨材量および粗骨材の粒径分布の違いが測定値に与える影響を考慮し、粗骨材絶対体積を $360\text{L}/\text{m}^3$ に固定するとともに、粗粒率を6.74に統一した。またコンクリート中の気泡が測定値に与える影響を排除するため、複数回の予備実験によって確実に空気量測定値が2%以下となる消泡剤量を把握し、使用した。細骨材は全て同一の山砂を使用した。

コンクリート内部に混入させる粗骨材試験体は、1つの粗骨材種について代表的な外観を有する粒径20mm程度のものを8粒選定し、ディスクグラインダーによって表面の一部を平滑に整形した後に専用の接着剤によって2軸ひずみゲージを貼り付けた。ひずみゲージへの水分の影響を排除するため、防水材として2種類のブチルゴム系粘着テープを重ねて貼り付けた。ここで2軸ひずみゲージとしたのは粗骨材のひずみが異方性を有する¹¹⁾ことや、コンクリート内部への混入時に粗骨材試験体の精緻な固定が困難であったため、コンクリートバー試験体の長・短軸方向とひずみゲージの測定軸方向との関係が測定値に与える影響を排除するためである。上記方法によって作製した粗骨材試験体のコンクリート内部でのひずみは、予め実施した実験により正常に測定可能であることを確認した。

コンクリート練混ぜに先立ち、ひずみゲージを貼り付けた粗骨材試験体を各粗骨材種について4粒ずつ表乾状態と絶乾状態を1日程度継続した。表乾状態は1日間の静水圧による吸水により確保した。一方、絶乾状態はブチルゴム系粘着テープの使用上推奨される温度範囲の上限が 80°C であり、これを超える高温環境に長時間晒すことは、

防水材の機能低下を招くことが懸念されたため、 80°C に設定した乾燥炉での1日間の強制乾燥を「絶乾」と定義し、確保した。

コンクリート練混ぜ終了後ただちに $10\times 10\times 40\text{cm}$ のコンクリートバー試験体作製用型枠に試験体を詰め、上面を均して静置した。この工程中、同一粗骨材を対象に作製した3本の試験体の内1本にひずみゲージを貼り付けた表乾状態の粗骨材を混入させた。残る2本の試験体の内1本にひずみゲージを貼り付けた絶乾状態の粗骨材を混入させた。混入位置は深さ方向および短手方向の中央部かつ長手方向の片端部から5cm, 15cm, 25cmおよび35cm離れた4点(図-5参照)とした。1日間の静置後に脱型してコンクリートバー試験体を取り出し、 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ に保った水中に浸漬し、6日間の水中養生を行った。

水中養生終了後ただちにコンクリートバー試験体の長さおよび質量を測定し、温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $60\pm 5\%$ の室内に静置保管した。以降、乾燥期間7日から182日まで必要な材齢においてコンクリートバー試験体の長さ、質量およびコンクリート内部に混入した粗骨材のひずみを測定した。なおコンクリートバー試験体の長さ測定はJIS A 1129-3「ダイヤルゲージ方法」によって行い、質量測定は1g単位とした。

各粗骨材種を対象に作製したコンクリートバー試験体の長さ変化および質量変化は、ひずみゲージを貼り付けた粗骨材試験体の有無によらず同程度であったため、3本の測定平均値を用いるとともに、乾燥開始時の試験体長さに対する長さ変化の割合(ひずみ)として示した。またコンクリート内部に混入した粗骨材のひずみは、4粒の試験体の2方向について得られた全てのひずみについて同程度であったため、全てのひずみの測定平均値を用いた。

(3) コンクリートのひずみおよび質量変化挙動

乾燥期間におけるひずみの推移を図-6に、ひずみと質量変化の関係を図-7に示す。質量変化は全て水分の変動によると仮定し、粗骨材種の違いによる比較を容易にするため、乾燥開始時の試験体質量に対する質量変化の割合(質量変化率)で表した。

ここで、今回の実験に使用したコンクリートの水セメント比は40%であり、自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみの両者の発生を想定している。これは、本研究での議論とは別に、粗骨材種が材齢初期におけるコンクリートの自己収縮ひずみに与える影響の確認を目的としたためである。本研究ではコンクリートの乾燥収縮を検討対象としているため、粗骨材種の違いが自己収縮ひずみに著しい影響を与える場合、本実験結果を使用して粗骨材の排水挙動とコンクリートの乾燥収縮との関係性を論じるこ

図-6 コンクリートのひずみの推移

図-7 コンクリートのひずみと質量変化率の関係

とは困難である。この問題の解消を目的として、コンクリートバー試験体作製後に始発時点を経長として6日間水中養生期間中における自己収縮ひずみを測定した結果、比較試料としたALを除く4種類の天然骨材を使用したコンクリートでは90～100 μ 程度の収縮ひずみを示した。したがって、粗骨材種の違いによるコンクリートの自己収縮ひずみへの影響は小さく、本実験結果の使用は妥当であると判断した。

ひずみでは乾燥期間182日時点において粗骨材種の違いにより最大で200 μ 程度の差が確認され、粗骨材種はコンクリートの乾燥収縮ひずみに影響を与えるといえる。各粗骨材種ではSS-Zが最も大きく、以下DB, SO-W, AL, LSの順であった。この結果はALを除けば前章で示した乾湿による粗骨材のひずみ変化の大小関係と概ね一致しており、粗骨材自身の乾燥収縮ひずみがコンクリートの乾燥収縮ひずみに影響を与えることがわかる。一方、ALは乾燥初期に比較的大きな膨張が確認されたことや、乾燥期間182日時点においても収縮が増進傾向にあることから、コンクリートの乾燥収縮に与える影響が天然骨材と異なることが示唆される。

ひずみと質量変化率の関係ではALのみが著しく大きい質量変化率を示すとともに曲線の形状も天然骨材とは異なる。一方、天然骨材は粗骨材種の違いによらず概ね同一の曲線形状を示した。これは一般的な天然骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮はセメントペーストの乾燥収縮による影響が最も大きいと考えられ、本研究での実験の範囲では、粗骨材種によらず、コンクリートの乾燥収縮ひずみと水分蒸発による質量変化率との間に比例関係が確認された。

(4) コンクリート内部の粗骨材のひずみ挙動

硬化・乾燥過程コンクリート内部に混入させた表乾状態および絶乾状態の粗骨材のひずみの推移をコンクリートのひずみの推移とともに図-8に示す。粗骨材のひずみは水中養生6日間での変化を把握するため、表乾状態、絶乾状態ともにコンクリート内部への混入時点を基準とした。コンクリート内部の粗骨材のひずみは粗骨材種間で大きな差が確認された。DBは粗骨材の収縮ひずみがコンクリートの乾燥収縮ひずみを上回った。コンクリートの乾燥収縮ひずみに比べてコンクリート内部の粗骨材の収縮ひずみが大きくなった原因として、測定対象としたひずみゲージを貼り付けた粗骨材試料の個体差による影響や、初期乾湿状態を同一として、ひずみゲージを貼り付けた粗骨材試料を混入したコンクリートバー試験体は1本であるのに対して、コンクリートの乾燥収縮ひずみは3本のコンクリートバー試験体のひずみの平均値として求めていることから、試験体間の若干のひずみ差の影響等の可能性が考えられる。その他の粗骨材では粗骨材の収縮ひずみがコンクリートの乾燥収縮ひずみに比べてやや小さいか、小さい結果となった。

DB, SO-WおよびSS-Zについてはひずみ曲線の形状がコンクリートと粗骨材で概ね一致した。これは、コンクリートの乾燥収縮ひずみ曲線とコンクリート内部の粗骨材のひずみ曲線の形状が概ね一致したことを示しており、これらの粗骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮とコンクリート内部の粗骨材の収縮との密接な関係が示唆される。一方、LSは乾燥の経過に伴って緩やかな粗骨材の収縮が確認されるが、その程度は小さく、乾燥初期にコンクリートと粗骨材のひずみ曲線の形状が一致しない。これは上記3種類の粗骨材とは異なり、LSを使用

図8 コンクリートのひずみとコンクリート内部の粗骨材のひずみの推移

したコンクリートの乾燥収縮は、コンクリート内部の粗骨材の収縮との関係が弱いことを示唆するものである。

ALは乾燥期間初期に粗骨材の収縮ひずみはほとんど確認されないが、乾燥期間154日から182日の間で収縮ひずみが増進した。これはALは含水量が著しく大きいために乾燥期間初期では粗骨材が乾燥状態に到らず乾燥期間後期になって乾燥収縮が生じたとも考えられるが、ALは天然骨材に比べて剛性が著しく小さいことも影響した可能性がある。

コンクリート内部混入時の粗骨材の乾湿状態の違いによるひずみの推移はDB、LSでは表乾状態と絶乾状態の曲線が概ね一致した。これは各粗骨材の空隙構造によるものと考えられる。DBの乾湿に伴う飽和度変化は、図-3に示したように強い比例関係が確認された。よって、絶乾状態でコンクリート内部に混入された試料は、比較的スムーズに吸水が進行すると考えられ、6日間の水中養生によって内部空隙がほぼ飽水状態に近づいたと推察される。一方LSは、吸水率は比較的小さいが、田中・橋田の指摘¹⁵⁾のように、気乾含水率が小さいことから、粗大空隙の占有率が大きいことが予想される。よって、絶乾状態の試料は、吸水の進行が容易であると考えられ、6日間の水中養生によって内部空隙がほぼ飽水状態になったと推察される。

SO-W、SS-Zでは両曲線にやや差が確認された。これはSO-W、SS-Zは図-4に示した乾湿に伴うひずみ変化と排水率変化との関係から、一定量の粗大空隙を有すると

考えられる。これより、6日間の水中養生によって粗大空隙は飽水状態となるが、細孔空隙も一定量有すると考えられることから、細孔空隙の一部が飽水状態に到らず、乾燥開始時点では絶乾状態の試料と表乾状態の試料の含水状態に差が生じたためと推察される。しかし両曲線の形状はほぼ同一であることから、一部の細孔空隙の含水状態の差は乾燥初期のひずみに差を生じさせるが、以降のひずみの推移には大きく影響しないことがわかる。

ALは天然骨材と異なり骨材の乾湿状態の違いによって大きなひずみの差が確認された。これは絶乾状態の粗骨材が6日間の水中養生期間では十分に吸水せず乾燥初期においてもコンクリート内部の水分によって吸水膨張したことが原因と考えられる。吸水膨張は乾燥期間91日程度まで継続し、その後は表乾状態の粗骨材と同様なひずみ曲線を描いた。

実験の結果、粗骨材種によって、コンクリートの乾燥収縮ひずみ曲線とコンクリート内部の粗骨材のひずみ曲線との形状が異なった。これより、粗骨材種によってコンクリートの乾燥収縮とコンクリート内部の粗骨材の収縮との関係が異なると考えられる。また、粗骨材の初期乾湿状態の違いがコンクリート内部の粗骨材のひずみに与える影響では、粗骨材種によって初期乾湿状態の違いによるそれぞれのひずみ曲線が概ね一致するものと、差が生じるものに分かれた。この結果は、各粗骨材の特徴的な空隙構造に由来する吸水特性が影響したものと推察される。

4. 粗骨材の排水挙動がコンクリートの乾燥収縮に与える影響

前章(4)では硬化・乾燥過程コンクリートの乾燥収縮ひずみとその内部の粗骨材のひずみとの関係が粗骨材種によって異なることを示した。コンクリートの乾燥収縮の主要因となるセメントペーストの乾燥収縮挙動、およびコンクリート内部の粗骨材の収縮挙動は、ともにコンクリート内部の水分移動に大きく影響を受けると考えられる。コンクリート内部の水分移動はコンクリートの乾燥収縮機構の解明において極めて本質的な問題であり、コンクリート内部の粗骨材の排水挙動とコンクリートの乾燥収縮との関係性の検討は非常に重要である。

本章では2章に示した粗骨材のひずみと排水率との関係をコンクリート内部の粗骨材のひずみに適用することにより、コンクリート内部の粗骨材の排水率を推定する。推定された排水率とコンクリートの水分蒸発との関係を把握し、コンクリート内部の水分移動の観点から粗骨材がコンクリートの乾燥収縮に与える影響を検討する。ここで、これまでの実験結果から、ALはコンクリート内部の粗骨材のひずみとコンクリートの質量変化率との関係を示す曲線が天然骨材と著しく異なることや、天然骨材に比べて多大なインクボトル空隙を有するために乾燥に伴う排水挙動が本質的に天然骨材と異なることが予想されるため、同列に比較検討を行う意義は低いと判断し、検討対象から除外した。

コンクリート内部の粗骨材の排水率の推定には、粗骨材のひずみと排水率との関係式が必要不可欠である。ここで、コンクリート内部の粗骨材のひずみには、セメントペーストの乾燥収縮による収縮応力と粗骨材自身の乾燥収縮との2つの要因が影響すると考えられる。この内、セメントペーストの乾燥収縮による収縮応力については2章で示した粗骨材の排水率とひずみの関係性の検討で考慮していないことから、この要因による粗骨材のひずみへの影響が大きい場合には、2章で得た粗骨材の排水率とひずみとの関係式を用いたコンクリート内部の粗骨材の排水率の推定は困難である。

しかし、小野・下村の研究¹⁰⁾では、コンクリートの収縮現象における骨材の役割に関して力学モデルによる検討を行い、骨材のヤング係数を変化させた場合、通常範囲の骨材ではセメントペーストに対する体積希釈効果が著しく卓越する結果が示されている。これは、一般的な粗骨材を使用した場合、粗骨材種の違いによる影響を除けば、コンクリート内部の粗骨材がコンクリートの乾燥収縮に与える影響には、セメントペーストの変形を拘束する効果よりもセメントペーストの体積を希釈する効果が著しく卓越することを意味する。

本研究で検討対象とした天然骨材は一般に使用されている粗骨材であるが、上記研究結果の適用可能性を評価するため、粗骨材試料のヤング係数を測定した。測定は、母岩コアではなく、粗骨材粒を試験体とした。具体的には、各粗骨材種から粒径20mm程度で代表的な形状の試料を10粒選定し、ディスクグラインダーによって長方体に加工した試験体を使用した。これにより、コンクリート製造材料としての粗骨材のヤング係数を、より実態に近く把握できると考えた。加工した試験体の長手方向に2章で示した粗骨材のひずみ測定に使用したのと同様のひずみゲージを貼り付け、圧縮試験機により载荷を行い、圧縮応力とひずみとの関係からヤング係数を算出した。なお、すべての粗骨材種について、10粒の試験体の測定結果は概ね同程度であった。

上記実験方法によって得られた粗骨材のヤング係数は、27.7～60.9GPaの範囲であり、DBが最も大きく、以下LS、SS-Z、SO-Wの順であった。この結果は、小野・下村が通常範囲として想定した弾性係数に比べて遜色のないものであり、セメントペーストの乾燥収縮による収縮応力によってコンクリート内部の粗骨材はほとんど収縮しないものとした。これより、2章で得た粗骨材の排水率とひずみとの関係式を用いて、コンクリート内部の粗骨材のひずみからコンクリート内部の粗骨材の排水率を推定可能であると判断した。

コンクリート内部の粗骨材の排水率の推定は図-4に示す粗骨材のひずみと排水率との関係の近似曲線式にコンクリート内部の粗骨材のひずみ測定値の絶対値を代入して求めた（以降この排水率を“粗骨材の推定排水率”と呼ぶ）。ここでLSについては相対湿度変化に伴うひずみ変化がヒステリシスを描いたため、脱着過程を対象とした近似曲線式（ $y=11.428\ln(x)+30.493$ ）を使用した。コンクリートの質量変化は乾燥期間182日において概ね収束しているものと判断し、粗骨材種間の比較を容易にするため、乾燥期間182日時点の質量変化率に対する各乾燥期間の質量変化率の割合、すなわち乾燥期間中の全水分蒸発量に対する各乾燥期間における水分蒸発量の割合を評価指標とした。この指標は乾燥期間182日時点のコンクリートバー試験体の質量減少量を本実験で設定した乾燥環境におけるコンクリートバー試験体の水分蒸発量の最大値と定義した場合、コンクリートバー試験体の排水率とみなすことができる（以降この指標を単に“コンクリートの排水率”と呼ぶ）。コンクリートの排水率と粗骨材の推定排水率との関係を図-9に示す。

全ての粗骨材種についてコンクリートの排水率と粗骨材の推定排水率との関係を示す近似曲線の形状が、対象となる粗骨材のひずみと排水率との関係を示す曲線の形状（図-4参照）と一致した。

図-9 コンクリートの排水率と粗骨材の推定排水率との関係

DBでは、縦軸とした推定排水率の最大値が80%を超えており、図-3に示した相対湿度と飽和度との関係との乖離が確認された。これは、前章に示したコンクリート内部のDBのひずみがコンクリートの乾燥収縮ひずみを超える値を示したことから、推定排水率が大きく算出された結果である。しかしながら、図-9の本質的な意義は、両軸の値よりも、その関係が図-4と一致したことにあるといえ、以下ではその意義について考察する。

図-9と図-4の曲線形状の一致は、コンクリート内部の粗骨材のひずみがコンクリートの乾燥に伴って進行し、コンクリート内部の粗骨材のひずみと乾燥の関係が、粗骨材のひずみ変化と排水率変化との関係に対応することを意味する。すなわち、コンクリート内部の粗骨材がコンクリートの乾燥収縮に与える影響には、その高い剛性によってセメントペーストの収縮を拘束する効果よりも、自身の乾燥収縮によるセメントペーストの乾燥収縮の進行の緩和が卓越するといえ、前述の小野らの研究を実験的に裏付ける結果が得られたと考える。ここで、粗骨材の剛性がセメントペーストの乾燥収縮を拘束する効果が粗骨材自身の乾燥収縮と同程度に発揮されると仮定すれば、コンクリートの乾燥収縮には図-4に示した粗骨材の乾燥収縮特性に加えて、剛性の程度による変形特性が影

響することになる。この場合、4種類全ての骨材種で、図-9と図-4の曲線形状が高い相関関係をもって一致する可能性は低いと考えられる。

図-9には曲線の近傍に決定係数 (R^2) を示したが、DB、SO-WおよびSS-Zは0.8以上であり、非常に高い相関関係である一方、LSは0.6程度であり、相関関係は確認されるが、他の骨材種に比べて低い決定係数 (R^2) であった。これは、LSでは図-8に示したコンクリートの乾燥収縮ひずみとコンクリート内部の粗骨材のひずみが、乾燥初期に乖離したことが影響したものと考えられる。すなわち、LSはコンクリート内部では粗骨材自身の乾燥収縮ひずみがコンクリートの乾燥収縮ひずみに対して影響を与えるが、相対湿度60%程度では自身の乾燥収縮ひずみが比較的小さいため、他の3種類の天然骨材に比べて、セメントペーストの乾燥収縮を拘束する効果が顕著になったと考えられる。

上記の結果から、一般的な天然粗骨材を使用した場合、粗骨材がコンクリートの乾燥収縮に与える影響には、粗骨材自身の乾燥収縮が卓越するが、自身の乾燥収縮ひずみが小さい粗骨材では、粗骨材の高い剛性により、セメントペーストの乾燥収縮を拘束する効果も顕著となることが明らかとなった。

5. まとめ

粗骨材がコンクリートの乾燥収縮に与える影響を粗骨材の排水挙動の観点から検討した。本研究の実験の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) LSを除く天然骨材では相対湿度変化に伴うひずみ変化および飽和度変化は可逆的であった。LSは脱着過程におけるひずみが吸着過程におけるひずみに比べて小さくなった。
- (2) 天然骨材を対象としたひずみと排水率との関係は粗骨材種によって直線近似が適当になるものと対数近似が適当になるものに分かれた。これは粗骨材の空隙構造によって相対湿度80%と100%の間の飽和度の変化が異なることが主に影響したと考えられる。
- (3) ひずみゲージを貼り付けた粗骨材試料をコンクリート内部に混入し、コンクリートの乾燥収縮ひずみと同時にコンクリート内部の粗骨材のひずみを測定した結果、粗骨材種によって、コンクリートの乾燥収縮ひずみ曲線とコンクリート内部の粗骨材のひずみ曲線との形状が異なった。これより、粗骨材種によってコンクリートの乾燥収縮とコンクリート内部の粗骨材の収縮との関係が異なると考えられる。
- (4) 粗骨材の初期乾湿状態の違いがコンクリート内部の粗骨材のひずみに与える影響では、粗骨材種によって初期乾湿状態の違いによるそれぞれのひずみ曲線が概ね一致するものと、差が生じるものに分かれた。この結果は、各粗骨材の特徴的な空隙構造に由来する吸水特性が影響したものと推察される。
- (5) 4種類の天然粗骨材種についてコンクリートの排水率と粗骨材の推定排水率との関係を示す近似曲線の形状が、対象となる粗骨材のひずみと排水率との関係を示す曲線の形状と一致した。これより、一般的な天然粗骨材を使用した場合、粗骨材がコンクリートの乾燥収縮に与える影響には、粗骨材自身の乾燥収縮が卓越するが、自身の乾燥収縮ひずみが小さい粗骨材では、粗骨材の高い剛性により、セメントペーストの乾燥収縮を拘束する効果も顕著となることが明らかとなった。

謝辞：本論文の作成にあたり、多くの実験を実施した。実験には、(株)愛建総合設計研究所 関征世氏(故人)、同 関建祐氏、名古屋工業大学 石黒憲司氏、

同 NGUYEN THI PHUONG THAO氏に多大なご協力をいただいた。ここに記して、深甚の謝意を示します。

参考文献

- 1) 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) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，pp.45-49, 2007.
- 3) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，pp.185-187, 2009.
- 4) 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.
- 5) 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，No.606，pp.9-14, 2006.8.
- 6) 後藤貴弘，中村俊彦，高尾 昇，鳴瀬浩康：コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす骨材の物性について，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.89-94, 2010.7.
- 7) NPO法人コンクリート技術支援機構(ASCoT) コンクリートの収縮ひび割れ研究委員会：コンクリートの収縮ひび割れ研究委員会報告書，pp.1-15, 2011.5.
- 8) 丸山一平，岸 直哉：セメント硬化体の収縮理論，日本建築学会構造系論文集，第74巻，第642号，pp.1395-1403, 2009.8.
- 9) 小幡雄一郎，吉田 亮，矢野智也，梅原秀哲：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.371-376, 2010.7.
- 10) 吉田 亮，小幡雄一郎，齊藤和秀，梅原秀哲：インクボトル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，No.1，pp.107-112, 2010.7.
- 11) 山田 宏，片平 博，渡辺博志：粗骨材の収縮特性の評価に関する検討，土木学会論文集E2（材料・コンクリート構造），Vol.68，No.1，pp.63-71, 2012.3.
- 12) 後藤幸正，藤原忠司：乾湿に伴う骨材の体積変化，土木学会論文報告集，第247号，pp.97-108, 1976.3.
- 13) L'Hermite, R. G. : Volume Changes of Concrete, *Chemistry of Cement*, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Monograph 43-Volume II, pp. 659-694, 1960.
- 14) 粉体工学会：粉体の基礎物性，日刊工業新聞社，pp.96-99, 2011.4.
- 15) 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.
- 16) 小野秀晃，下村 匠：コンクリートの収縮現象における骨材の役割，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.457-462, 2005.7.

(2013.3.14 受付)

EFFECT OF DRAINAGE BEHAVIOR ON COARSE AGGREGATE TO DRYING SHRINKAGE OF CONCRETE

Yuichiro OBATA, Ryo YOSHIDA and Hidetaka UMEHARA

In this study the effect of drainage behavior on coarse aggregate to drying shrinkage of concrete was investigated in two experiments. In the first experiment the strain and weight of several kinds of coarse aggregate were measured in the conditions of six types of relative humidity and relationship between strain and drainage of coarse aggregate was obtained. In the second experiment drying shrinkage of concrete and strain of coarse aggregate inserted into the same concrete were measured and drainage rate of coarse aggregate inserted into concrete was presumed using the result of first experiment.

Comparing water vapor behavior of concrete with drainage behavior of coarse aggregate, it is clear that relationship between water vapor of concrete and drainage of coarse aggregate influences on drying shrinkage of concrete.