論文　コンクリートの収縮試験方法とそれに及ぼす粗骨材の影響に関する研究

石黒　憲司[*1]・小幡　雄一郎[*2]・梅原　秀哲[*3]・吉田　亮[*4]

要旨：材齢 7 日までの自己収縮ひずみと材齢 7 日以降の乾燥収縮ひずみを同一供試体によって測定できる試験方法を提案し，その妥当性を検討した。また，粗骨材自体の乾燥収縮ひずみを 2 軸計測ひずみゲージにより測定することで，コンクリートの自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみとの関係を検討した。粗骨材の収縮ひずみと質量変化率が概ね比例関係にあることが明らかとなったほか，ひずみの百分率をみかけ含水率と定義し，一定環境下における粗骨材中のみかけ含水率の推移を調べた結果，粗骨材種ごとに異なる挙動を示し，その差がコンクリートの乾燥収縮ひずみに影響を与えていることが明らかとなった。

キーワード：自己収縮，乾燥収縮，試験方法，粗骨材，含水率

1. はじめに

近年，粗骨材の乾湿による体積変化がコンクリートの体積変化に無視できない影響を与えることが明らかになってきた。土木学会コンクリート標準示方書 [1)]では，現在使用実績があるレディーミクストコンクリートは，乾燥収縮ひずみとして 1000 μ 以下であり，これに材齢 7 日までの自己収縮ひずみ 100 μ と 6 ヶ月以降の乾燥収縮ひずみと自己収縮ひずみの和 100 μ を加えて，収縮ひずみを 1200 μ 以下とすることが規定された。ここで，材齢 7 日までのひずみと材齢 6 か月以降のひずみが乾燥収縮と自己収縮に分かれているのは，コンクリートの自己収縮と乾燥収縮を測定する試験方法が異なるためである。

また，コンクリートの収縮と粗骨材の収縮には高い相関があるとの報告がなされているが，粗骨材の収縮の評価方法は未だ試行段階であり，統一的なデータの収集ができているとは言えない。

本研究では，自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみのそれぞれの測定方法を組み合わせ，材齢 7 日までの自己収縮ひずみと材齢 7 日以降の乾燥収縮ひずみを，同一供試体で測定可能な方法の提案を目的とした。併せて，粗骨材自体の収縮挙動を水分量に着目して調べ，コンクリートの収縮ひずみと比較検討することで，粗骨材種の違いがコンクリートの自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみに及ぼす影響の把握を目的とした。

2. 既往の研究

2.1 粗骨材自体の体積変化

粗骨材が乾燥によって収縮することは古くから指摘されている。後藤らは 43 種類の粗骨材を用いて実験を行い，粗骨材自体の体積変化がコンクリートの収縮増大に大きな影響を及ぼすことを明らかにした [2), 3)]。近年では，立松ら [4)]，今本ら [5)]が粗骨材自体の収縮がコンクリートの乾燥収縮に多大な影響を与えるという同様の結論を導いている。また，鈴木ら [6)]はモンモリロナイトを含む安山岩に収縮が大きくなる傾向があることを鉱物学的観点から指摘している。粗骨材自体のひずみ測定は，1 軸計測の電気抵抗線ひずみゲージを粗骨材表面に貼付した方法が多く報告されている [7), 8)]。なお，粗骨材の加工は，最大寸法付近の粗骨材を研削して平滑面を作製し，ひずみゲージをコンクリート・モルタル用接着剤等によって貼付した後に適当な防水処理を施すのが一般的である。

2.2 粗骨材の物性がコンクリートの収縮に及ぼす影響

(1) 粗骨材種 [2), 3), 4), 5)]

配合などその他の条件を同一にして粗骨材種のみ異なるコンクリート供試体を作製し，コンクリートの乾燥収縮ひずみを比較すると，砂岩を用いたコンクリートは比較的大きくなり，石灰岩を用いたコンクリートは小さい傾向にあるなど，粗骨材種の違いによって差が確認される。しかし，同じ粗骨材種であっても収縮の範囲は非常に広く，粗骨材種からコンクリートの乾燥収縮ひずみを予測することは困難と言える。

(2) 粗骨材の吸水率 [2), 3)]

吸水率の大きな粗骨材を用いた場合に乾燥による質量減少率が大きくなり，結果としてコンクリートの乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向にあるという報告がされている。一方，吸水率が大きくなると収縮ひずみが減少するといったケースや，人工軽量骨材では近似的な比例関係が成立しないなどの報告もされているため，吸水率はコ

*1　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　(学生会員)
*2　名古屋工業大学大学院　工学研究科社会工学専攻　(学生会員)
*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　教授　Ph.D　(正会員)
*4　名古屋工業大学大学院　工学研究科社会工学専攻　助教　博士(工学)　(正会員)

ンクリートの乾燥収縮ひずみに影響を与えるものの，統一的な評価指標とは言えない。

(3) 粗骨材の乾燥収縮ひずみ

粗骨材は，セメントペースト等と同様に吸水および乾燥によってひずみを生じることが明らかになっている。粗骨材の乾燥収縮ひずみはコンクリートの乾燥収縮ひずみと高い相関があり，コンクリートの乾燥収縮ひずみを推定するひとつの評価指標に成り得るとして指摘されている。また，粗骨材のひずみは定常状態に至るのが比較的早期であることも報告されている[9)]。

3. 実験概要

3.1 コンクリートの収縮ひずみ測定方法の提案

本研究では，JCI-1996 に準拠するセメントペースト，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（第 1 法:封緘養生することで自己収縮ひずみを測定）と，JIS A 1129-3 に準拠するモルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法（第 2 法:7 日間の水中養生の後，恒温恒湿室での室内養生により材齢 7 日を基準とした乾燥収縮ひずみを測定）の 2 つの方法を組み合わせた第 3 法を提案する。長さ変化測定はダイヤルゲージ法により行った。ダイヤルゲージ法はゲージプラグをコンクリートバー試験体の端面中央から内部に埋め込んでいるため，コンタクトゲージ法に比べて試験体表面において先行する乾燥が収縮ひずみ測定値に与える影響は小さいと考えられる。よって，ダイヤルゲージ法はコンクリートの平均的な収縮量を評価可能と考えられる。各測定法において同一試料から寸法 100×100×400（mm）の供試体を 3 個ずつ作製し，その平均値を測定値とした。なお符号は，収縮側を負とする。

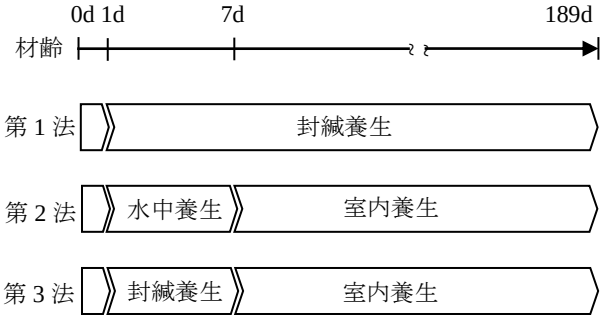
第 3 法では打設後 7 日間封緘養生し，その時点までの自己収縮ひずみを測定し，その後封緘を解いて温度 20℃，湿度 60%の恒温恒湿室に静置し，材齢 7 日を基準として材齢 7 日以降の乾燥収縮ひずみを測定した。3 つの試験方法の概念図を**図－1** に示す。ここで，第 1 法および第 3 法において，自己収縮ひずみは供試体の始発時を起点として求めた。凝結試験はプロクター貫入抵抗試験機を用いて行った。いずれの配合においても、打設後 5 時間程度で始発に至り、その後速やかに基長の測定を行った。

第 2 法の供試体内部は材齢 7 日まで，水中養生による内部湿潤状態となっている。一方，第 3 法の供試体内部はセメントの水和反応で水分が消費されることにより，内部乾燥状態となっていると考えられる。このような供試体内部の乾燥状態の違いが乾燥収縮量に影響を与えないことが確認できれば，第 3 法は材齢 7 日までの自己収縮ひずみと材齢 7 日を基準とした乾燥収縮ひずみが計測できる方法であると判断できる。ここで，第 2 法は JIS A 6204 に規定される一般的なコンクリートバー試験体を対象とした乾燥収縮ひずみ測定方法であり，脱型直後に標準水中養生を行うため，乾燥開始までは一定の湿潤状態を保つと考えられる。

また，本研究では測定方法の提案と同時に，粗骨材種の違いが収縮ひずみに与える影響を調べるため，供試体は粗骨材種をパラメータとして作製した。使用した粗骨材種と主な物性を**表－1** に示す。供試体の呼称は粗骨材種によるものとする。例えば，砂岩 A コンクリート，石灰岩コンクリート等である。**表－2** にコンクリートの配合を示す。いずれの供試体も水セメント比は 40%とし，高性能 AE 減水剤（SP）を使用した。空気量が測定値に与える影響を極力抑えるため消泡剤（AFK）の使用により空気量が 2%以下になるよう設計した。**表-2** に示す消泡剤量であれば空気量が 2%以下になることを別途実験により確認した。スランプなどその他のフレッシュ性状は測定していないが，これは粗骨材以外の単位量を一定にすることが本質的に重要であり，測定は不要と考えたためである。粗骨材の最大寸法は 20 mm，粗骨材かさ容積は 0.60 m^3/m^3，粗骨材の粗粒率は 6.74 に固定した。

3.2 粗骨材のひずみと質量の測定

粗骨材の乾燥過程におけるひずみと質量測定を行った。測定に用いた粗骨材種は 3.1 と同様である。ひずみの測定は 2 軸計測ひずみゲージにより，各種粗骨材で 3 個ずつ測定した。2 軸計測ひずみゲージを用いたのは，収縮方向が 1 方向ではないことが予想され，可能な限り実際のひずみに近い値を計測するには，2 方向以上のひずみの平均値によって評価するのが適当と考えたためで



図－1　試験方法の概念図

表－1　粗骨材種と主な物性

分類	岩種	絶乾密度(g/cm^3)	吸水率(%)
砕石	砂岩 A	2.73	0.86
	砂岩 B	2.68	1.54
	輝緑岩	2.93	0.72
	石灰岩	2.76	0.41

表－2　コンクリートの配合表

				単位量（kg/m^3）					
No.	粗骨材種	セメント種	W/C（%）	W	C	S	G	SP	AFK
1	砂岩 A	N	40	155	388	865	981	1.94	3.88
2	砂岩 B	N	40	155	388	865	965	1.94	3.88
3	輝緑岩	N	40	155	388	865	1055	1.94	3.88
4	石灰岩	N	40	155	388	865	1027	1.94	3.88

ある。1 個の試料の測定値は 2 軸それぞれにおける測定値の平均とした。試料 3 個の測定値の平均値を，その粗骨材種の測定値とした。ここで各測定時において 3 個の試料測定値のうち，他の 2 個の試験体に比べて 1 個のみ突発的に上下した場合の試験値は人為的過誤による異常値と判断した。各時点での測定値の乾燥開始時点での測定値からの変化量をその時点での乾燥収縮ひずみと定義した。なお符号は，収縮側を負とする。質量変化は，試料ごとの大きさの違いを考慮して，質量変化率により評価した。なお符号は，減少側を負とする。

試料を十分に吸水させた後，20℃，　R.H. 60%の環境で静置した状態での測定を乾燥過程とした。試料の乾燥は、吸水後に水中から取り出し、ウエスで表面水を軽く拭き取った状態から始めた。乾燥期間は 3 日間である。

実験に先立って，絶乾状態でのひずみ・質量測定を行った。80℃の乾燥炉で 3 日間乾燥させた状態を絶乾状態とした。ここで，絶乾状態でのひずみの測定は試料を乾燥炉内に入れた状態で行ったため，計測されたひずみは温度膨張ひずみを含んでいると考えられる。粗骨材種ごとに別途, 線膨張係数を測定したところ, 線膨張係数は, 砂岩 A は 6.7 μ/℃, 砂岩 B は 5.7 μ/℃, 輝緑岩は 5.3 μ/℃, 石灰岩は 4.6 μ/℃であったため，これを用いてひずみの温度補正を施した。

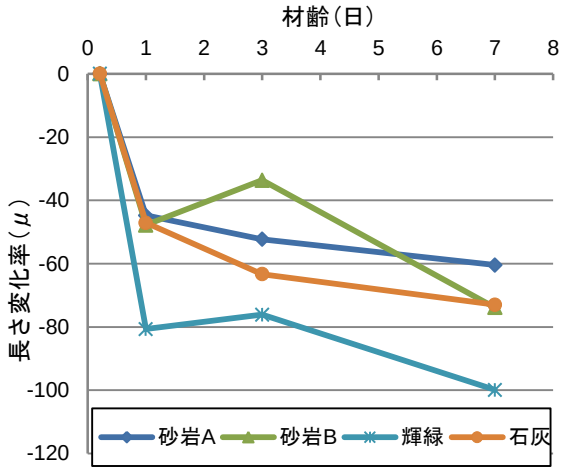
また，それらの測定とは別に各種粗骨材試料を第 2 法用のコンクリート供試体と同様の養生条件とした場合の 6 か月間の乾燥過程におけるひずみ測定も行った。

4. 実験結果

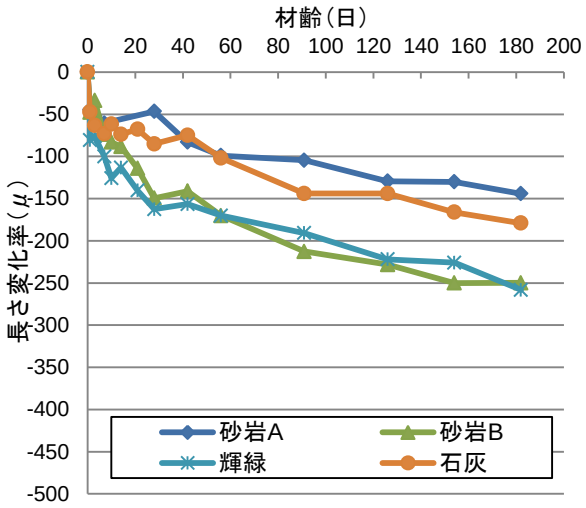
4.1 自己収縮ひずみ

自己収縮ひずみの測定結果を材齢 7 日以前と全材齢に分けてそれぞれ図－2，3 に示す。材齢 7 日以前の測定値は，いずれの粗骨材種においてもひずみは 100 μ を下回っている。これより，標準示方書 [1]に記載されている見込値 100 μ は妥当な値であると言える。最終的な自己収縮ひずみは、砂岩 A コンクリートは 200 μ 程度，砂岩 B コンクリートは 300 μ 程度と, 粗骨材種の違いにより 100 μ 以上の差がみられた。

4.2 乾燥収縮ひずみ



図－2　自己収縮ひずみ（材齢 7 日以前）



図－3　自己収縮ひずみ（全材齢）

第 2 法，第 3 法における乾燥収縮ひずみの測定結果をそれぞれ図－4，5 に示す。図－4，5 を比較すると，いずれの粗骨材種においても第 2 法と第 3 法で最終的な収縮ひずみおよび収縮挙動に大きな差はみられないことがわかる。これは，材齢 7 日までの養生状態の違いがその後の乾燥収縮ひずみに影響を与える影響が小さいことを示している。

一方，粗骨材種の違いは図－4，5 より，コンクリートの乾燥収縮に大きく影響を及ぼしていることがわかる。

また，砂岩 A コンクリートと砂岩 B コンクリートでは 50 μ以上の差が生じた。同じ砂岩砕石であっても，産地の違いによってコンクリートの収縮が異なることがわかる。さらに，石灰岩コンクリートは収縮が小さく，輝緑岩コンクリートは最も収縮の大きい砂岩 B コンクリートと同程度の収縮となった。

4.3 粗骨材のひずみと質量の関係

粗骨材のひずみは，ひずみゲージの軸方向によって値が異なる場合が多かった。よって，収縮ひずみはそれらの平均値により評価するのが適当であると確認できた。粗骨材の乾燥収縮ひずみと質量変化率の関係を**図－6** に示す。この時，乾燥開始直後は乾燥が急激に進行し，値のばらつきが大きいと考えられるため棄却した。**図－6** より，いずれの粗骨材種においても乾燥収縮ひずみと質量変化率には概ね比例関係があることが明らかとなった。

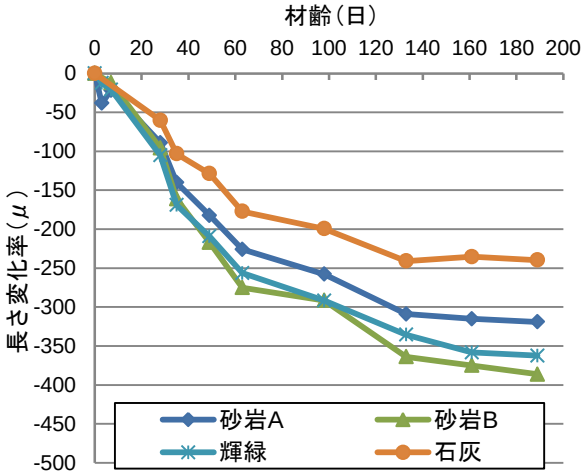
5. 考察

5.1 粗骨材の乾燥過程におけるみかけの含水率の推移

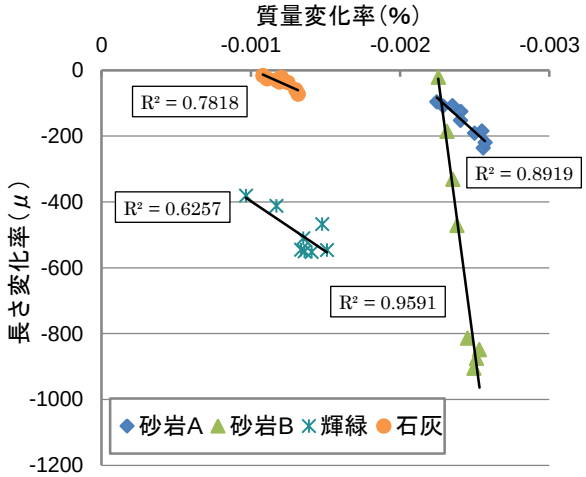
4.3 より，粗骨材の乾燥収縮ひずみと質量変化率には概ね比例関係があることがわかった。また，粗骨材の収縮は水分の逸散によって生じるものであると考えられるため，ひずみ測定結果を用いた粗骨材中の水分量の評価を試みた。粗骨材の絶乾状態でのひずみを 0%，飽水状態でのひずみを 100%として，ひずみの百分率をみかけ含水率と定義し，乾燥過程における各時点での粗骨材のみかけ含水率を評価した。経時による粗骨材のひずみ変化を**図－7** に，みかけ含水率の推移を**図－8** に示す。

図－7 より，石灰岩が特徴的な収縮挙動を示していることがわかる。乾燥期間 30 日を超えたあたりで急激にひずみの増加が進行している。このような挙動を示した原因は明らかではないが，石灰岩の特徴的な空隙構造により毛細管張力による負圧が卓越した可能性があるが，詳細は今後の課題としたい。また，粗骨材種により 140 μ程度の差がみられた。

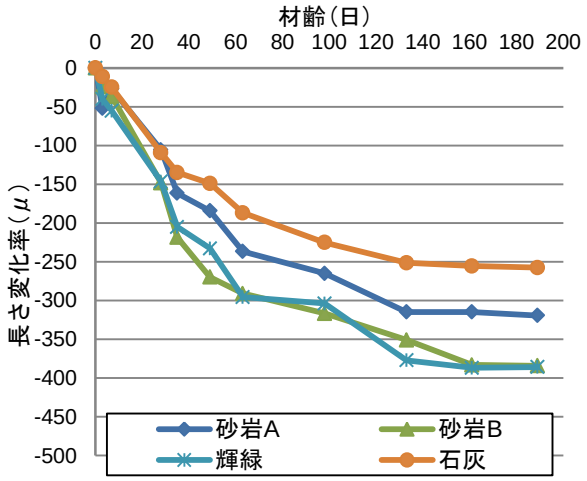
既往の研究[9]では粗骨材の乾燥ひずみは 4 日程度で定常状態に至ることが報告されている。しかしながら，今回の測定では乾燥期間が 1 週間を超えても収縮ひずみの増加がみられた。これは粗骨材種が異なるとその空隙構造



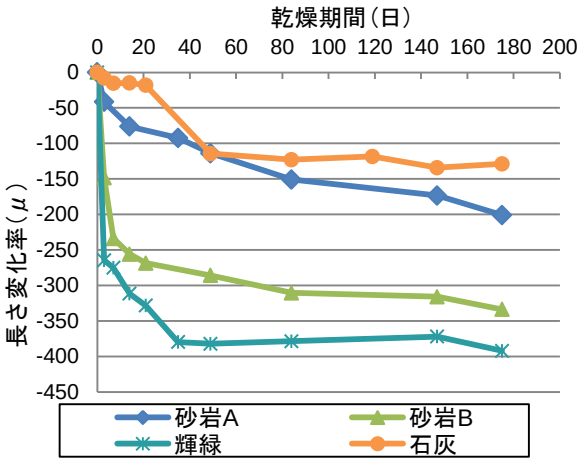
図－4　コンクリートの乾燥収縮ひずみ（第 2 法）



図－6　粗骨材の乾燥収縮ひずみと質量変化率の関係



図－5　コンクリートの乾燥収縮ひずみ（第 3 法）



図－7　粗骨材の乾燥収縮ひずみ

も異なり，粗骨材の排水挙動に影響を与えたためと考えられる。

図－8 より，20℃，R.H. 60%でのみかけ含水率の推移およびみかけ含水率の終局値が粗骨材種によって異なることがわかる。これより，水分移動メカニズムに違いがあることが示唆される。一般的に，粗骨材として使用した時にコンクリートの乾燥収縮ひずみが小さくなる石灰岩は，20℃，RH 60%の環境で他の粗骨材よりも大きい割合で岩石中に水分が残っていることがわかる。一方，砂岩 B では粗骨材中に 50%程度しか水分が残っていない。このようなみかけ含水率変化挙動の違いが，コンクリートの収縮に影響を与えている可能性が考えられる。

ここで，**図－7**，8 より，砂岩 A の乾燥収縮ひずみと輝緑岩の乾燥収縮ひずみを比較すると，最終的な乾燥収縮ひずみは 2 倍程度の差があるが，みかけ含水率を比較すると 10%程度しか差がないことがわかる。このような収縮特性の違いが，コンクリートの乾燥収縮にどのような影響を及ぼすのか今後検討する必要がある。

5.2 コンクリートの乾燥収縮ひずみと粗骨材のみかけ含水率の関係

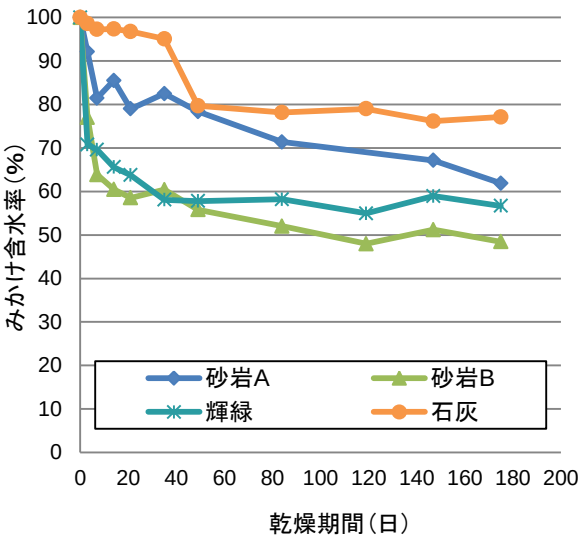
コンクリートの乾燥収縮ひずみと，粗骨材のみかけ含水率のそれぞれの終局値を用いて，両者の関係を**図－9** に示す。**図－9** より，両者は強い相関関係にあることがわかる。これより，コンクリートの乾燥収縮ひずみが，粗骨材自体のみかけ含水率の影響を受けたことが考えられるが，今回の検討では粗骨材種の数が少ないため結論付けることはできない。今後，より多くの粗骨材種を用いてこの関係を検討することが必要である。両者の関係に相関が確認できれば，粗骨材を一定の環境に静置した後のみかけ含水率により，コンクリートの乾燥収縮ひずみを評価できるものと考えられる。

5.3 コンクリートの乾燥収縮ひずみと粗骨材の乾燥収縮ひずみの関係

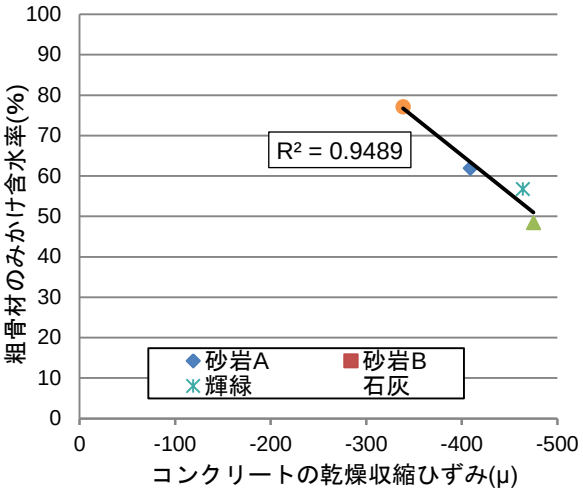
コンクリートの乾燥収縮ひずみと粗骨材の乾燥収縮ひずみの終局値を用いて，両者の関係を**図－10** に示す。**図－10** より，既往の研究どおりコンクリートの乾燥収縮ひずみと粗骨材の乾燥収縮ひずみには高い相関が確認された。これにより，粗骨材の乾燥収縮ひずみが，コンクリートの乾燥収縮ひずみを推定するためのひとつの評価指標に成り得ることが確認できた。しかし，粗骨材の乾燥収縮ひずみについては 5.1 で述べたように既往の研究と異なる傾向がみられたため，粗骨材の収縮ひずみの統一的な測定方法の確立が必要である。

5.4 提案するコンクリートの収縮試験方法の妥当性に関する検討

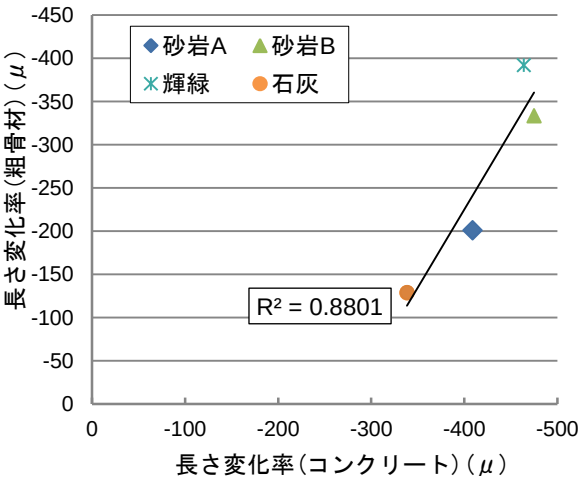
4.2 において，材齢 7 日以前の養生状態の違いがその後の乾燥収縮に影響を与えないことから，本研究で提案



図－8　乾燥過程における粗骨材のみかけ含水率の推移



図－9　コンクリートの乾燥収縮ひずみと粗骨材のみかけ含水率の関係



図－10　コンクリートの乾燥収縮ひずみと粗骨材の乾燥収縮ひずみの関係

したコンクリートの収縮試験方法(第3法)の妥当性を示した。しかしながら，あらゆる粗骨材種についてこの結果が適用できるかの検討が必要である。第3法の適用可能性は，粗骨材種ごとの水分移動メカニズムの違いによる影響が大きいと考えられる。これは，材齢7日までの封緘養生においてコンクリート供試体内部がセメントの水和反応により内部乾燥状態となったとき，ペースト部分への粗骨材からの水分供給力が，粗骨材種ごとの水分移動メカニズム(水分の抜けやすさ)に影響されると考えられることによる。すなわち，ペースト部分への粗骨材からの水分供給力の高低にかかわらず，材齢7日以前の養生状態の違いがその後の乾燥収縮に影響を与えないことが明らかになれば，あらゆる粗骨材種において第3法が適用できると言える。

5.1 では，一定の環境下で乾燥させた後，粗骨材中のみかけ含水率が粗骨材種によって異なることを示し，石灰岩は水分が抜けにくく，砂岩等は水分が抜けやすいということが判明した。そして，それらの水分移動メカニズムの違いにかかわらず，第3法によるコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定が妥当な結果であったことから，粗骨材種の違いにかかわらず本節で目的とした妥当性が確認されたと考えられる。

6. まとめ

本研究では，既存のコンクリートの自己収縮試験方法と乾燥収縮試験方法を組み合わせ，同一供試体で材齢 7 日までの自己収縮ひずみと，材齢7日以降の乾燥収縮ひずみを測定する試験方法を提案した。併せて，粗骨材種によるコンクリートの自己収縮ひずみ, 乾燥収縮ひずみ, 一定環境下での粗骨材自体の乾燥収縮ひずみを測定した。本研究で実施した実験の範囲において得られた知見を以下に示す。

(1) コンクリートの自己収縮ひずみは粗骨材種により異なり，100μ以上の差がある場合が確認された。材齢 7 日時点での自己収縮ひずみはいずれの粗骨材種においても100μを下回った。

(2) 粗骨材自体の乾燥収縮ひずみと質量変化率は比例関係にあることが明らかとなった。これにより，絶乾状態を0%，飽水状態を100%としたときのひずみの百分率により粗骨材中のみかけ含水率を表すことができ，十分に吸水させた粗骨材を20℃，R.H. 60%で静置した場合，粗骨材の乾燥に伴うみかけ含水率の推移は，粗骨材種によって異なることが明らかとなった。

(3) コンクリートの乾燥収縮ひずみと粗骨材の乾燥収縮ひずみには高い相関関係が確認された。一方，粗骨材中のみかけ含水率もコンクリートの乾燥収縮ひずみとの相関が高く，評価指標と成り得る可能性が示唆された。

(4) コンクリートの乾燥収縮ひずみは粗骨材種によって大きく異なったが，第 2 法と第 3 法それぞれによる測定結果に大きな差はなく，材齢 7 日までの養生条件がその後のコンクリートの収縮挙動に与える影響が小さいことがわかった。これより，粗骨材種の違いにかかわらず，材齢 7 日までの自己収縮ひずみと材齢 7 日以降の乾燥収縮ひずみを同一供試体によって測定できる試験方法(第3法)の妥当性が示された。

参考文献

1) 2007 年版コンクリート標準示方書　改定試料，土木学会，コンクリートライブラリー129，p.16
2) 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
3) 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
4) 今本啓一，石井寿美江，新井正直：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
5) 立松和彦，新井正直，石清水隆：関西地域における骨材原石の乾燥収縮および細孔径分布に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 549 号，pp.1-6，2001.11
6) 鈴木哲也，小長井宜夫，朝倉悦郎：収縮性骨材のコンクリートに及ぼす影響，骨材資源，No.79，pp.127-135，1988
7) 後藤貴弘，高尾昇，成瀬浩康：骨材の細孔構造とコンクリートの乾燥収縮, 日本コンクリート工学協会, JCI-C77，pp.7-12，2010
8) 兵頭彦次，谷村充，井坂幸俊，佐藤良一：コンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす骨材物性の影響とその予測，日本コンクリート工学協会，JCI-C77，pp.17-24，2010.12
9) 山田宏，片平博，渡辺博志：コンクリートの乾燥収縮率と骨材の乾燥収縮率の関係, 日本コンクリート工学協会，JCI-C77，pp.13-16，2010.12