

# コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす要因と 長期収縮ひずみの早期判定

## Influence of Various Factors on Drying Shrinkage of Concrete and Judgment at Early Stage for Long-Term Shrinkage

谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI  
佐々木 亘 WATARU SASAKI  
斯波 明宏 AKIHIRO SHIBA  
樋口 正典 MASANORI HIGUCHI

各地のレディーミクストコンクリート工場の骨材を使用し、コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす要因を確認した。試験の結果、骨材の相違は他の材料・配合要因に比べて乾燥収縮ひずみに及ぼす影響が大きいこと、単位水量の影響の度合いは、コンクリート標準示方書の予測式とおおむね一致すること、コンタクトゲージで測定した乾燥収縮ひずみは、初期強度が小さいセメントを使用するほど、ダイヤルゲージで測定した値よりも大きくなること、乾燥開始までの前養生期間の検討が重要であることなどがわかった。乾燥材齢 28 日と 182 日の乾燥収縮ひずみの比に及ぼす要因はさまざまで、その影響度も異なるため、それらを十分に考慮すれば、28 日の値によって 182 日の値を精度よく予測が可能であることが確認された。

キーワード：乾燥収縮、骨材、配合、測長方法、養生日数

This report describes the result of the examination in the factor to exert influence on drying shrinkage of concrete. As a result of the examination, the followings were clarified. 1) There exists a relationship between the quality of aggregates and the shrinkage of concrete. 2) Using cement with small initial strength, drying shrinkage value measured with contacting gauge shows higher value than drying shrinkage value measured with dial indicator. 3) Water curing days of the specimen until beginning of dry affects on the value of drying shrinkage. 4) The value of drying shrinkage at 182 days can be predicted according to the value of drying shrinkage at 28th with high accuracy.

**Key Words:** Drying Shrinkage, Aggregate, Mix Proportion, Measurement method of length, Curing Days

### 1. はじめに

最近では、天然骨材の品質低下に起因するコンクリートの収縮量の増加が問題になっている<sup>1)</sup>。これを受け、土木学会コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>の改訂や日本建築学会 JASS 5<sup>3)</sup>の改定においては、コンクリートの収縮に関する内容が大幅に盛り込まれた。また、日本コンクリート工学協会では、この問題の収束に向けて会長特別委員会を発足し、その成果が 2010 年 3 月に報告された<sup>4)</sup>。報告書では、収縮の基準化に対する課題と提案が示されているが、残された課題を解決するため、新たな委員会が発足している。

現状では、レディーミクストコンクリート工場（以

下、工場）で使用される骨材の品質がコンクリートの収縮などの品質に及ぼす影響は必ずしも明らかにはなっていない。既往の研究報告では、工場の室内試験室あるいは実機で製造したコンクリートを用いて供試体を採取し、乾燥収縮などの試験を実施している場合が多いが、コンクリートの製造から試験終了までの諸条件が異なるため、試験値に対してさまざまな要因が複雑に関係し合い、それぞれの影響の度合いを正確に把握することが難しい。そこで、筆者らは、国内各地の工場で常備している骨材を一試験機関に集め、骨材以外の諸条件をなるべく同一としてコンクリートの品質を把握した。骨材の影響を考慮したうえで、骨材以外の使用材料、配合および試験方法が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響を確認した。

表-1 工場ごとの骨材の条件と、試し練りで定めた配合の条件

No.	細骨材												粗骨材								PC配合(W/C=40%)			RC配合(W/C=55%)								
	種類	産地	密度	吸水率	種類	産地	密度	吸水率	種類	産地	密度	吸水率	種類	産地	密度	吸水率	種類	産地	密度	吸水率	種類	産地	密度	吸水率	種類	産地	密度	吸水率	種類	産地	密度	吸水率
0	川砂	栃木県	2.57	2.93	砕砂	栃木県	2.64	1.48					砕石2005	栃木県	2.65	0.63									SP		43.8	160	WAE		46.0	165
1	砕砂	栃木県	2.67	1.67	陸砂	茨城県	2.61	1.03					砕石2005	茨城県	2.66	0.60	砕石2005	栃木県	2.68	1.04					SP		43.8	160	WAE		46.0	165
2	砕砂	高知県	2.60	2.17	山砂	千葉県	2.61	1.99					砕石2005	高知県	2.70	0.43									SP		41.8	165	WAE		45.4	165
3	陸砂	青森県	2.58	3.73	陸砂	青森県	2.55	2.57					砕石2005	青森県	2.73	1.70									SP		43.0	165	WAE		46.0	165
4	砕砂	岩手県	2.86	1.22	山砂	宮城県	2.56	2.01					砕石2505	岩手県	2.90	0.45									SP		44.0	165	WAE		46.0	170
5	砕砂	新潟県	2.62	1.95									砕石2505	新潟県	2.66	1.20									SP		44.0	165	WAE		47.0	165
6	陸砂	茨城県	2.66	0.94	砕砂	栃木県	2.73	1.07					砕石2005	栃木県	2.76	0.72									WAE		44.0	155	WAE*		48.0	155
7	山砂	千葉県	2.60	1.55									砕石2005	山口県	2.67	0.48	砕石2005	東京都	2.69	0.46					SP		42.0	160	WAE		46.0	160
8	山砂	千葉県	2.56	3.09	砕砂	東京都	2.59	1.87					砕石2005	東京都	2.65	1.04									SP		41.0	175	WAE		45.0	175
9	砕砂	東京都	2.64	1.72	砕砂	東京都	2.66	1.17	山砂	千葉県	2.61	2.40	砕石2005	東京都	2.66	0.71	砕石2005	神奈川県	2.66	1.03					SP		42.0	160	WAE		45.0	170
10	陸砂	神奈川県	2.64	2.27	山砂	千葉県	2.59	2.23					砕石2005	兵庫県	2.63	1.10	砕石2005	神奈川県	2.67	0.96					SP		41.0	170	WAE		45.0	170
11	砕砂	山梨県	2.63	2.68	山砂	千葉県	2.57	2.67					砕石2005	山梨県	2.62	2.74									SP		43.0	165	WAE		46.0	170
12	川砂	神奈川県	2.64	2.52	山砂	千葉県	2.60	2.47	山砂	神奈川県	2.62	3.43	砕石2005	神奈川県	2.81	1.25									SP		41.0	165	WAE		46.0	165
13	川砂	静岡県	2.63	1.44									川砂利	静岡県	2.65	1.03									WAE		40.0	165	WAE		45.0	160
14	陸砂	静岡県	2.63	1.29	山砂	静岡県	2.63	1.50					陸砂利	静岡県	2.66	1.12									WAE		42.0	165	WAE		45.0	160
15	川砂	山梨県	2.65	1.54									川砂利	山梨県	2.68	1.16									SP		44.0	160	WAE		47.0	160
16	山砂	愛知県	2.57	1.79	スラグ砂	愛知県	2.83	0.82					砕石2005	三重県	3.00	0.70	砕石2005	三重県	2.65	1.64					SP		41.4	170	WAE		46.0	170
17	陸砂	富山県	2.54	1.66									陸砂利	富山県	2.62	1.37									WAE		42.0	165	WAE*		47.0	155
18	山砂	京都府	2.56	2.04	砕砂	大阪府	2.66	2.01					砕石2015	大阪府	2.71	0.63	砕石1505	大阪府	2.70	0.72					SP		41.0	170	WAE		44.0	175
19	山砂	京都府	2.50	1.56									砕石2015	大阪府	2.71	0.70	砕石1505	大阪府	2.66	0.91					SP		42.0	170	WAE		45.0	170
20	砕砂	山口県	2.55	1.34	海砂	山口県	2.47	1.90					砕石2015	愛媛県	2.75	0.48	砕石1505	愛媛県	2.72	0.76					SP		41.0	160	WAE		45.0	170
21	砕砂	広島県	2.70	0.75	砕砂	大分県	2.53	1.02					砕石2015	広島県	2.63	1.46	砕石1505	広島県	2.62	1.67					SP		43.0	170	WAE		48.0	165
22	加工砂	島根県	2.60	1.37									砕石2015	島根県	2.72	1.43	砕石1505	島根県	2.74	1.42					SP		43.0	175	WAE		46.0	175
23	砕砂	福岡県	2.68	1.07	海砂	長崎県	2.61	1.52					砕石2015	山口県	2.74	0.44	砕石1505	山口県	2.72	0.57					SP		43.0	175	WAE		46.0	175
24	砕砂	広島県	2.60	1.09									砕石2015	広島県	2.63	0.54	砕石1505	広島県	2.65	0.65					SP		44.0	165	WAE		47.0	170
25	砕砂	愛媛県	2.55	3.02	海砂	大分県	2.62	1.49					砕石2005	愛媛県	2.56	2.04									SP		43.0	170	WAE		46.0	170
26	砕砂	愛媛県	2.55	1.41									砕石2005	愛媛県	2.63	0.84									SP		43.0	165	WAE		48.0	170
27	砕砂	広島県	2.61	0.72									砕石2015	広島県	2.63	0.44	砕石1505	広島県	2.63	0.57					SP		44.0	165	WAE		47.0	165
28	陸砂	鹿児島県	2.53	2.38	陸砂	宮城県	2.57	2.50					砕石2505	鹿児島県	2.63	1.07									SP		43.0	175	WAE		47.0	170
29	海砂	佐賀県	2.66	0.97	砕砂	大分県	2.59	1.33					砕石2005	大分県	2.71	0.27									SP		42.0	165	WAE		45.0	165
30	海砂	福岡県	2.59	1.06	海砂	福岡県	2.57	2.00					砕石2005	大分県	2.71	0.27									SP		41.0	170	WAE		45.0	165

骨材の密度は表乾密度で、その単位はg/cm<sup>3</sup>である。吸水率の単位は%である。混和剤の種類におけるSPは高性能AE減水剤、WAEはAE減水剤を指す。単位水量の単位はkg/m<sup>3</sup>である。\*は使用量が少ないため、減水率が小さいAE減水剤に変更した方がよい場合があるものを指す。

また、乾燥収縮ひずみは材齢6ヶ月の値によって判定しているため、設計あるいは施工段階において事前に確認するのが難しい場合がある。このため、短期材齢の収縮ひずみもしくは何らかの他の指標によって、材齢6ヶ月の乾燥収縮ひずみを推定できることは、実務上有効である。そこで、本研究では、短期材齢の乾燥収縮ひずみで長期のひずみを推定する場合の影響要因について検討を行っている。

## 2. 各地の骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみの実態把握

### (1) 試験方法

表-1 に示すとおり、国内各地の工場から骨材を収集し、工場ごと（表中の No.）の組合せで骨材を使用して、筆者らの所属する研究機関でコンクリートを製造した。表中の No.1 は筆者らが試験研究用に使用している骨材、No.1 および No.2 は首都圏の建築工事を対象に高強度コンクリートの製造・出荷実績がある工場の骨材、No.3 ~No.30 は地方を中心に土木工事で使用した工場の骨材であることを指す。

コンクリートは、設計基準強度 40N/mm<sup>2</sup> 程度の PC 橋上部構造を対象とした配合（以下、PC 配合と呼ぶ）

と、設計基準強度 24~27N/mm<sup>2</sup> 程度の一般的な RC 構造物を対象とした配合（以下、RC 配合と呼ぶ）とした。使用したセメントは、それぞれ、早強ポルトランドセメント（密度 3.13g/cm<sup>3</sup>）、普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm<sup>3</sup>）である。セメントと骨材の複合要因の影響を排除するため、セメントはすべて同一の銘柄・ロットのものである。

単位水量とスランプ（練り上がり直後で 12~15cm 程度）の調整には、基本的に PC 配合では高性能 AE 減水剤（標準形、ポリカルボン酸エーテル系の化合物、抑泡タイプ）、RC 配合では AE 減水剤（標準形、リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体抑泡タイプ）を使用することとした。空気量（4.5±0.5%）の調整には AE 剤（変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤）を使用した。

水セメント比（W/C）は、PC 配合が 40%、RC 配合が 55%である。単位水量は、コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>で示される標準範囲 155~175kg/m<sup>3</sup>を参考とし、高性能 AE 減水剤あるいは AE 減水剤の使用量が過多あるいは過少にならないようにした。細骨材率は工場の標準配合の値を参考とした。それらは、フレッシュコンクリートの性状をもとに調整した。ただし、単位粗骨材絶対容積（単位粗骨材量）は、コンクリートの収縮量に及ぼす影

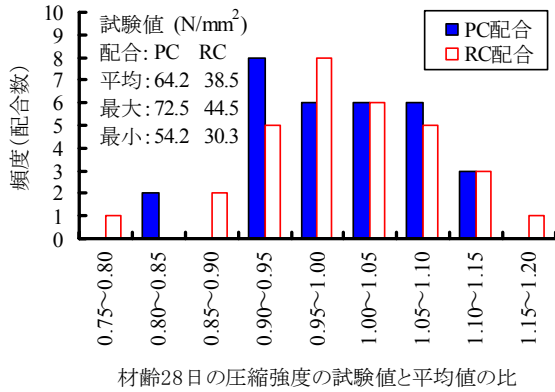


図-1 圧縮強度の分布

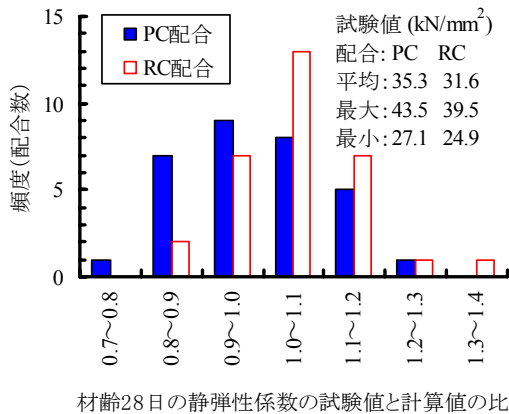


図-2 静弾性係数の分布

響を考慮し、一部を除き、 $0.375 \pm 0.015 \text{m}^3/\text{m}^3$  の範囲とした。

本研究では、コンクリートの品質として、圧縮強度、静弾性係数（ヤング係数）および乾燥収縮ひずみを確認した。圧縮強度および静弾性係数は、それぞれ、JIS A 1108, JIS A 1149 に準拠し、標準水中養生を材齢 28 日まで行った円柱供試体（ $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ ）の値である。乾燥収縮試験は、JIS A 1129-2（コンタクトゲージ法）によるもので、ゲージプラグには埋込み型のものを使用した。供試体は  $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$  の直方体であり、材齢 7 日間の水中養生を行った後、恒温恒湿室（温度  $20^\circ\text{C}$ 、相対湿度 60%）内で 182 日まで供試体 6 面を乾燥させた。測定者の影響を排除するため、同一の試験員が測定を行った。

(2) 試験結果および考察

圧縮強度および静弾性係数の結果を、それぞれ、図-1, 図-2 に示す。圧縮強度は試験値と配合種別ごとの全試験値の平均値との比、静弾性係数は試験値と計算値との比を表している。ここで、静弾性係数の計算値は、コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>の構造計算に用いる標準値に対して累乗式で回帰し、圧縮強度の試験値を代入して求め

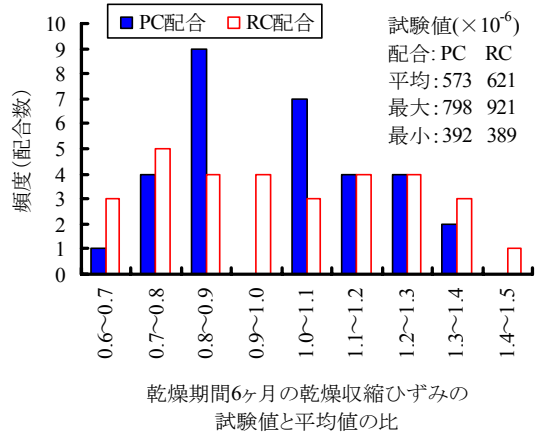


図-3 乾燥収縮ひずみの分布

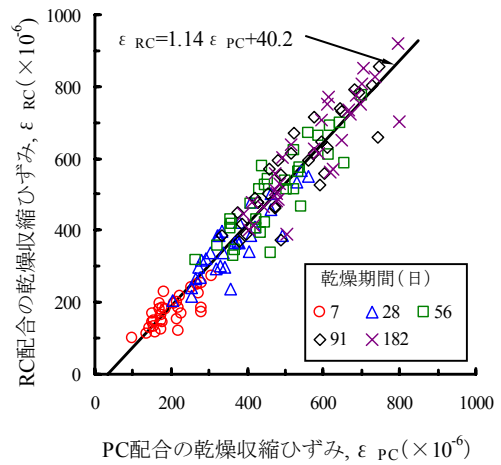


図-4 配合種別による乾燥収縮ひずみの比較

たものである。すなわち、圧縮強度と静弾性係数の標準値の関係を基準とし、これに対する比率で骨材の品質が静弾性係数に及ぼす影響を把握している。これらの結果から明らかなように、骨材以外のさまざまな条件をほぼ同一にしても、圧縮強度および静弾性係数は、それぞれ、 $\pm 20\%$ 程度、 $\pm 30\%$ 程度の範囲を有する。一方、図-3に示すとおり、乾燥収縮ひずみ（図中では試験値と平均値の比）は圧縮強度および静弾性係数に比べるとばらつきが大きく、その範囲は $\pm 40\%$ 程度に拡大する。いずれもばらつきの程度に差異はあるが、試験によって確認しなければ精度良く把握できないことは明白であり、圧縮強度および静弾性係数と同様に、各工場で使用している骨材を用いてコンクリートの乾燥収縮試験を実施しておく必要があると言える。

図-4 は、同一の骨材の組合せ（表-1 中の同一 No.）による PC 配合と RC 配合のコンクリートの乾燥収縮ひずみ（乾燥期間 7~182 日）を比較したものである。図中の直線は、両試験値に対して一次式で回帰を行ったものである。両配合は、セメントの種類および水セメント

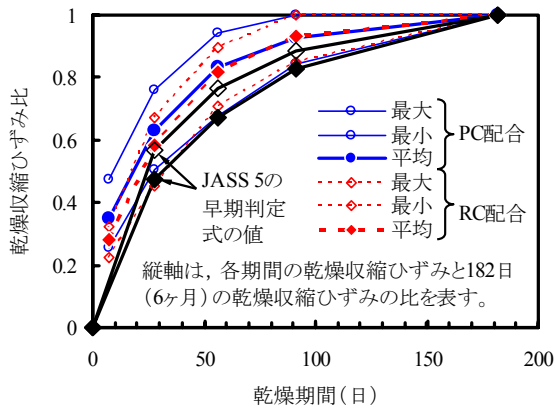


図-5 乾燥期間と乾燥収縮ひずみ比の関係

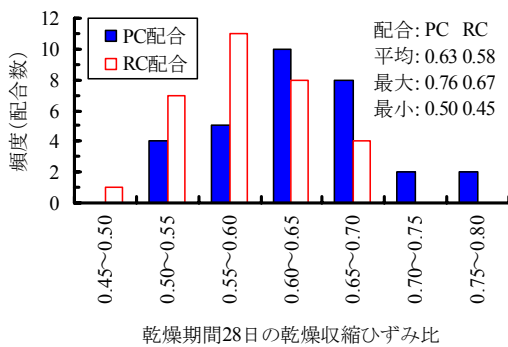


図-6 乾燥期間 28 日の乾燥収縮ひずみ比の分布

比が異なるが、RC 配合の乾燥収縮ひずみが PC 配合の乾燥収縮ひずみよりも若干大きくなる程度で、両者は比較的相関がある。今回の条件におけるセメントの種類および水セメント比の相違が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は骨材の組合せの相違に比べて小さい。このため、暫定的な配合であっても、工場の骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定値が存在すれば、その値によって設計・施工上の対策の必要性を検討し、方針を決定した後、諸要因の影響を調整してもよいと考えられる。図-5 は、乾燥期間 182 日（6ヶ月）の乾燥収縮ひずみを基準とし、各乾燥期間の乾燥収縮ひずみとの比（図中では乾燥収縮ひずみ比と表現）を求めたものである。

図-6 は、乾燥期間 28 日の乾燥収縮ひずみ比の分布である。JASS 5 では、乾燥収縮ひずみの早期判定を目的に、ここで示した乾燥収縮ひずみ比に相当する係数の値（JASS 5 では逆数）を与えており、図-5 中の◆印が 4%不良率を許容した値、◇印が平均値である。今回の試験結果では、乾燥収縮ひずみ比は、JASS5 の 4%不良率を許容した値がほぼ最小値に相当する。JASS5 の平均値は、RC 配合の乾燥期間 28 日の試験結果と一致するが、それ以外の乾燥期間および PC 配合の結果はいずれも JASS5 の平均値よりも大きい。このため、JASS5 で示された値と今回の試験条件における短期の乾燥収縮ひ

ずみを用いて推定を行うと、乾燥期間 182 日（6ヶ月）の乾燥収縮ひずみは試験結果よりも大きくなる可能性がある。乾燥収縮ひずみ比は、骨材の種類によって大きく異なるほか、配合種別によっても異なるので、早期判定にあたってはそれらの要因を十分に考慮して実施する必要がある。

### 3. コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす要因

2. の結果を踏まえ、骨材の影響を考慮したうえで、骨材以外の使用材料、配合および試験方法が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響を確認した。断りがない限り、試験の基本条件は、2. と同一である。

#### (1) 単位水量

一般にコンクリートの単位水量が多いほど、乾燥収縮ひずみは大きくなる傾向があるが、両者の関係は研究報告によって異なることが多い。そこで、表-1 の中から 7 種類（No.0, No.2, No.13, No.14, No.15, No.23 および No.28）を選び、表中の PC 配合に対して水セメント比および単位粗骨材絶対容積を一定とし、単位水量を変化させた場合の単位水量と乾燥収縮ひずみの関係を調べた。No.0 については、RC 配合における両者の関係も調べた。単位水量の変化量は、コンクリートが製造できる範囲で任意とし、高性能 AE 減水剤と AE 減水剤の選択、ならびにそれらの使用量の調整によって行った。

図-7(a) は、それぞれの骨材の組合せ・配合における単位水量と乾燥収縮ひずみの関係を表したものである。図-7(a)に示すとおり、それぞれの骨材の組合せ・配合によって両者の関係は異なる。しかし、コンクリート標準示方書の予測式で求めた値を結んだ線と、これを 0.7 ~ 1.2 倍の範囲で変化させた点線を示すことにより、骨材の組合せ・配合ごとの乾燥収縮ひずみの大小程度を把握できる。また、個々の組合せ・配合における両者の関係は、おおよそ、コンクリート標準示方書の予測式の傾向と一致することが分かる。すなわち、単位水量が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響に対しては、コンクリート標準示方書の予測式が適用できる。なお、図中の OPC や 14PC などにおいて、高性能 AE 減水剤の使用量を標準使用量よりも増やして単位水量を大幅に減じた場合には、かえって乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向も認められる。図-7(b) は、単位水量と乾燥収縮ひずみ比（ここでは、乾燥期間 28 日と 182 日の乾燥収縮ひずみの比）の関係を示している。乾燥収縮ひずみ比の値あるいは影響因子との何らかの傾向は、長期材齢の乾燥収縮ひずみを早期に判定するうえで重要な役割を果たす。いずれの乾燥収



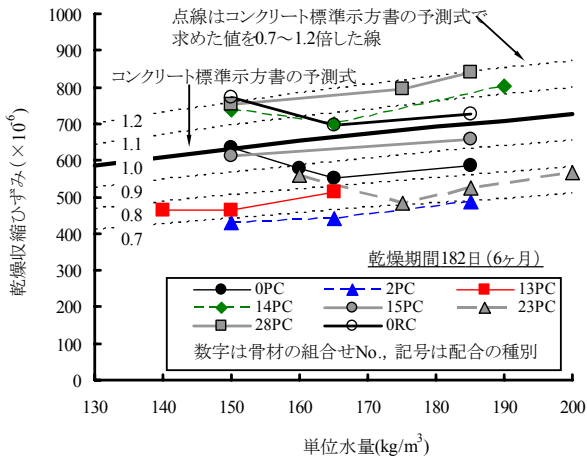


図-7(a) 単位水量と乾燥収縮ひずみの関係

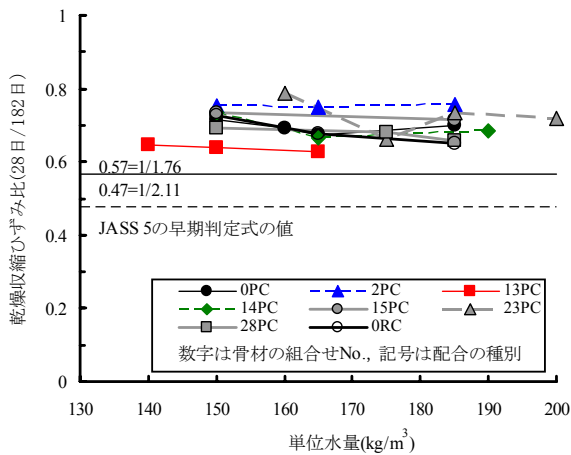


図-7(b) 単位水量と乾燥収縮ひずみ比の関係

縮ひずみ比も、前述の JASS5 で示された値とは大きく異なり、JASS5 の値に比べて大きいことがわかる。単位水量は、乾燥収縮ひずみには影響を及ぼすが、乾燥収縮ひずみ比に及ぼす影響は小さいことが分かる。すなわち、一部のばらつきが大きい試験値を除き、同一の骨材およびセメントを使用し、水セメント比を一定として単位水量を変化させても、乾燥収縮ひずみ比はほとんど変化しない。ただし、骨材の種類ごとに乾燥収縮ひずみ比が異なるため、他の骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみを推定する場合には注意する必要がある。配合 2PC と配合 13PC では、乾燥収縮ひずみ比が 0.15 程度異なる。また、単位水量の変化により、乾燥収縮ひずみが若干変化しているものもあるため、精度よく推定しようとする場合には、そのような微増減にも着目する必要がある。

(2) 単位粗骨材量 (単位粗骨材絶対容積)

コンクリート中の骨材量が多いほど、一般に乾燥収縮ひずみは小さくなると言われている。そこで、表-1 の中から 4 種類 (No.0, No.2, No.15, No.28) を選び、

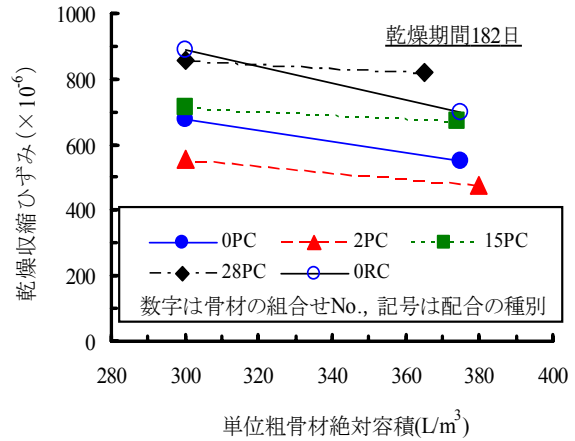


図-8(a) 単位粗骨材絶対容積と乾燥収縮ひずみの関係

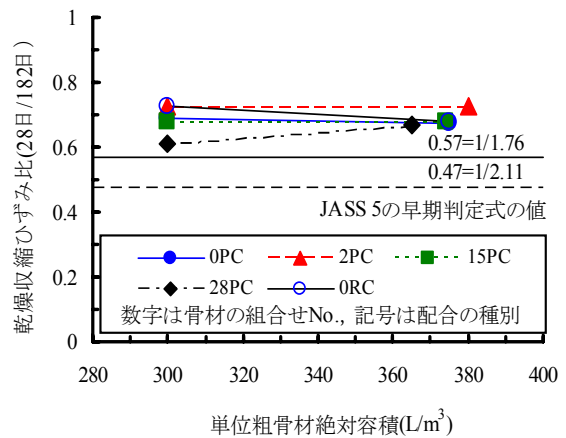


図-8(b) 単位粗骨材絶対容積と乾燥収縮ひずみ比の関係

表中の PC 配合の条件を基準に、水セメント比および単位水量を一定とし、単位粗骨材絶対容積を 300L/m³ まで減じて乾燥収縮ひずみへの影響を確認した。No.2 については、RC 配合における両者の関係も調べた。

図-8(a) は、単位粗骨材絶対容積と乾燥収縮ひずみの関係を示したものである。単位粗骨材絶対容積が減少すると、骨材の相違によって乾燥収縮ひずみが増大するもの (No.0, No.2) と、ほとんど変化しないもの (No.15, No.28) が存在することが分かる。水セメント比および単位水量が一定であるため、単位粗骨材量の減少に伴い、単位細骨材量が増加することになる。粗骨材、細骨材のいずれも、コンクリートの乾燥収縮ひずみに影響を及ぼすが、それぞれの影響の度合いが骨材の種類によって異なるようである。

図-8(b) は、単位粗骨材絶対容積と乾燥収縮ひずみ比 (乾燥期間 28 日と 182 日の乾燥収縮ひずみの比) の関係を示すものである。単位粗骨材絶対容積は、乾燥収縮ひずみ比に及ぼす影響は小さく、配合 28PC を除き、本実験の単位粗骨材絶対容積の範囲では、ほぼ一定とみな

すことができる。配合 28PC に関しては、単位粗骨材絶対容積が大きいほど、乾燥収縮ひずみ比も大きくなる傾向があるが、単位粗骨材絶対容積が 365L/m<sup>3</sup>における乾燥収縮ひずみ比は他の配合とほぼ一致している。今回の実験では、単位水量および水セメント比を一定としているため、単位粗骨材絶対容積を減じると、単位細骨材絶対容積が増えることになる。粗骨材のみならず、細骨材も乾燥収縮ひずみ比に影響を及ぼすものが存在すると言える。

(3) セメントの種類と水セメント比

図-4 において、セメントの種類と水セメント比の双方が異なる PC 配合と RC 配合の乾燥収縮ひずみを比較し、RC 配合の乾燥収縮ひずみが PC 配合よりも若干大きくなる傾向が認められた。そこで、図-9(a)では、骨材 No.0 を用いて、セメントの種類と水セメント比の影響を調べた。単位水量を 165kg/m<sup>3</sup>、単位粗骨材絶対容積もほぼ一定（水セメント比が 40, 55%では 375L/m<sup>3</sup>、30%ではフレッシュ性状を考慮して 370L/m<sup>3</sup>に微調整）とした。セメントとしては、前述の早強ポルトランドセメントおよび普通ポルトランドセメント以外に、低熱ポルトランドセメント（密度 3.24g/cm<sup>3</sup>）を比較した。図-9(a)に示すとおり、セメント水比が大きくなるほど、早期に強度を発現するセメントを使用するほど、乾燥収縮ひずみは小さくなることが明らかである。

図-9(b)は、セメント水比と乾燥収縮ひずみ比（乾燥期間 28 日と 182 日の乾燥収縮ひずみの比）の関係を示したものである。セメント水比は、乾燥収縮ひずみ比にはあまり影響を及ぼさないが、早強ポルトランドセメントおよび普通ポルトランドセメントを使用した場合、セメント水比が 2.5 以下では乾燥収縮ひずみ比が若干小さくなっている。セメント水比が小さいほど、単位セメント量が少なくなり、その代わりに単位細骨材絶対容積が増加することになるため、この結果は、セメント組織の緻密性と細骨材の品質の双方に起因するものとして考える必要がある。

一方、乾燥収縮ひずみ比に及ぼす影響は、セメント水比よりもセメントの種類がよりも大きく、乾燥収縮ひずみ比は、低熱ポルトランドセメント、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントの順に小さくなる。すなわち、早期に強度発現を示し、セメント組織が緻密となるセメントを使用するほど、乾燥収縮ひずみ比は小さくなると言える。前述のセメント水比の影響は、この結果と相反するものであるため、セメント水比 2.5 以下の傾向は細骨材の品質に起因するものである可能性が高い。

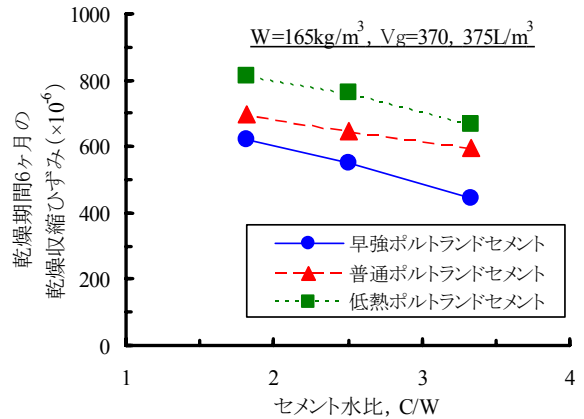


図-9(a) セメントの種類およびセメント水比と乾燥収縮ひずみの関係

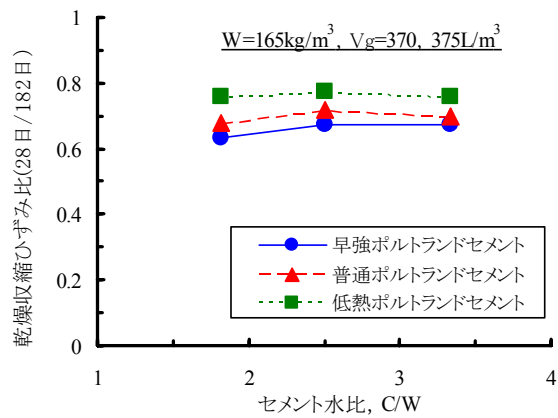


図-9(b) セメントの種類およびセメント水比と乾燥収縮ひずみ比の関係

(4) 測定方法

これまでの検討は、乾燥収縮ひずみの測定をコンタクトゲージで行ったものである。しかし、図-5 に示すように、今回の試験結果は、JASS5 で提案された乾燥収縮ひずみの早期判定の係数とかなり異なり、また JASS5 の結果よりも乾燥収縮ひずみの進行が早いことが分かった。乾燥環境条件は JASS5 と同一であるため、測長方法に起因するものと推測された<sup>5)</sup>。そこで、供試体の側面にゲージを取り付けるコンタクトゲージ法と、供試体中心部の長さを測定する方法であるダイヤルゲージ法（JIS A 1129-3）の乾燥収縮ひずみを比較することとした。

図-10 は、コンタクトゲージとダイヤルゲージを用いた乾燥収縮ひずみを比較したものである。図中の記号はセメントの種類と水セメント比を表す。セメントには、早強ポルトランドセメント (H)、普通ポルトランドセメント (N)、低熱ポルトランドセメント (L) および高炉セメント B 種 (BB, 密度 3.04g/cm<sup>3</sup>) を使用した。水セメント比は 40% (BB を除く) と 55%とした。使用し

た骨材は No.0 である。いずれの水セメント比においても、初期強度が小さいセメントを使用するほど、コンタクトゲージで測定した乾燥収縮ひずみは、乾燥の初期から長期にまでダイヤルゲージで測定した値よりも大きくなるのが分かる。早強ポルトランドセメントを使用し、水セメント比 40% の H40 については、両測定方法の結果が一致している。すなわち、初期材齢より強度が高い条件のコンクリートにおいては測定方法による乾燥収縮ひずみの相違は生じにくい。

図-11 は、それらのコンクリートに対してコンタクトゲージとダイヤルゲージで乾燥収縮ひずみを測定し、各乾燥期間と 182 日（6 ヶ月）の乾燥収縮ひずみ比で表したものである。図-11 中の◆印および◇印は、図-5 と同様である。コンタクトゲージの結果は、図-5 とほぼ一致するが、ダイヤルゲージで測定した乾燥収縮ひずみ比の平均値は、JASS5 の平均値と比較的に近い値になった。したがって、JASS5 の値は、ダイヤルゲージで測定した乾燥収縮ひずみ、もしくはこれが多く含まれる条件の試験値をもとに定められた可能性がある。測定方法が記載されていない乾燥収縮試験の研究報告があるが、乾燥収縮ひずみへの影響要因やその早期判定の検討に当たっては、測定方法を明らかにすることが重要である。

(5) 前養生（標準水中養生）の期間

前述の結果を踏まえ、乾燥環境下におけるコンクリートの品質変化に着目することとした。図-12 は、乾燥開始までの前養生（標準水中養生）の期間を変化させ、材齢と圧縮強度の関係を示したものである。セメントは、(4) で検討した 4 種類で、水セメント比は 55% とした。早強ポルトランドセメントを使用した場合には、通常の 7 日間の前養生であっても、長期にわたって標準水中養生を行ったものとの強度差が小さい。しかし、低熱ポルトランドセメントを使用すると、7 日間の前養生では、乾燥開始から 7 日以降の強度増進が極めて小さく、長期強度は標準水中養生の半分程度となる。前養生期間の延長に伴い、強度発現性は高まり、28 日間の前養生を行った場合には標準水中養生の圧縮強度とほぼ一致する。低熱ポルトランドセメントと同様の傾向は、高炉セメント B 種を使用した場合にも顕著に認められる。普通ポルトランドセメントに関しても、早強ポルトランドセメントに比べると、7 日間の前養生では乾燥を開始した後の強度発現は、標準水中養生を施した場合に比べてやや小さくなる傾向がある。すなわち、乾燥収縮試験の前養生期間は一般に 7 日間としているが、強度発現の遅いセメントを使用するほど、乾燥がコンクリートの水和反応に及ぼす影響が大きくなる傾向があり、本来の想定

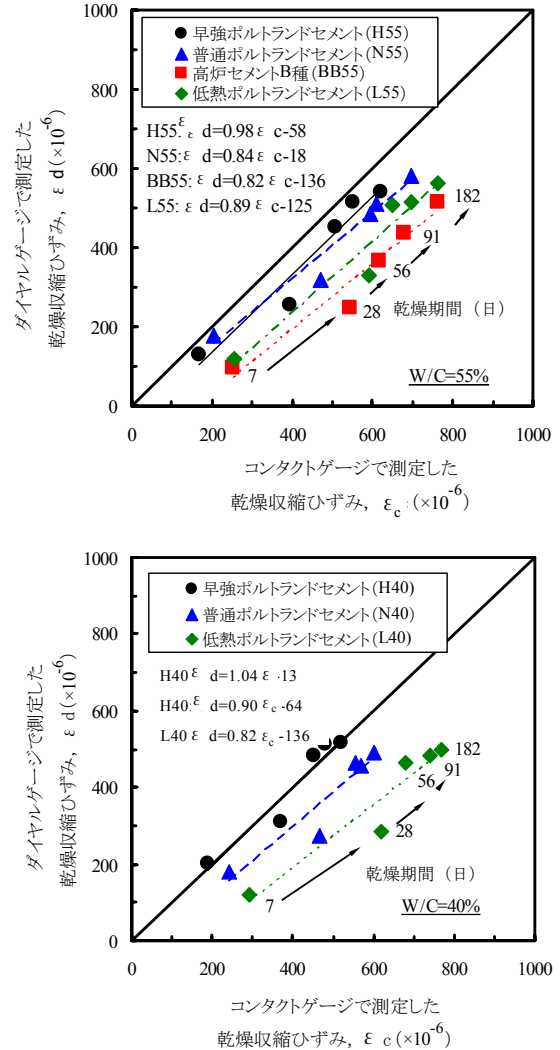


図-10 コンタクトゲージとダイヤルゲージによる乾燥収縮ひずみの比較

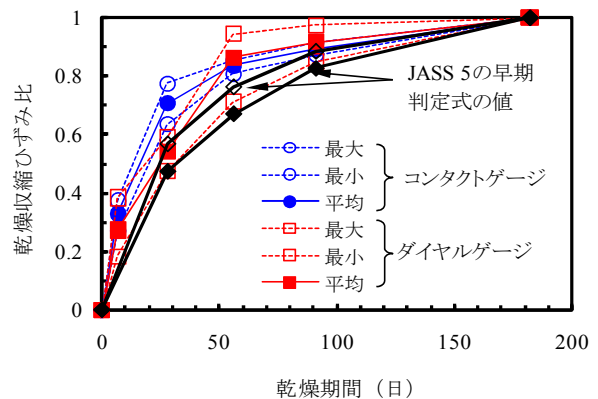
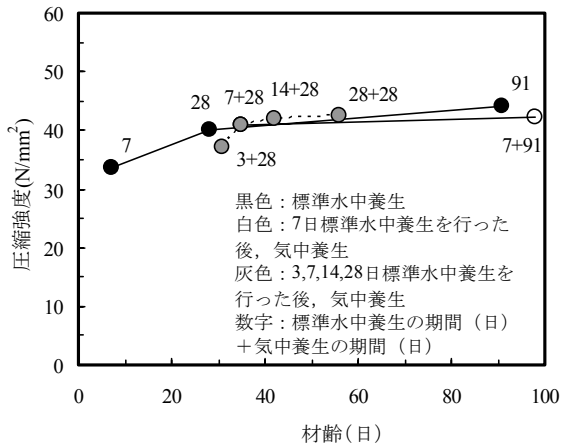
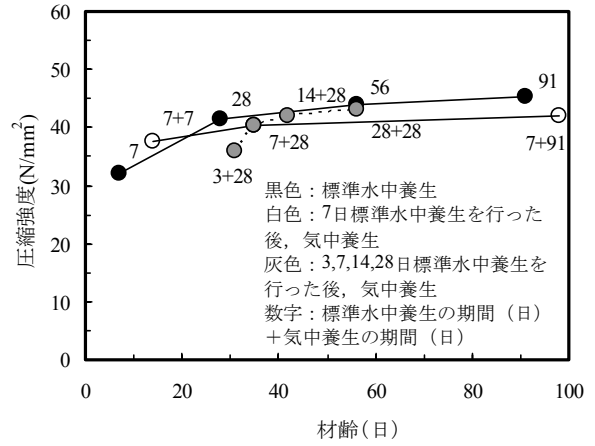


図-11 乾燥期間と乾燥収縮ひずみ比の関係

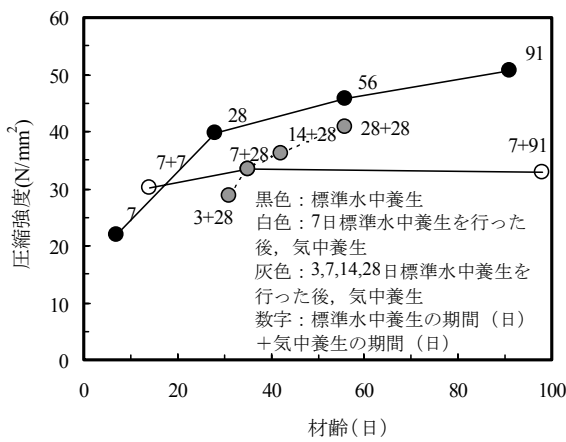
した品質とは異なるコンクリートの乾燥収縮ひずみを測定している可能性がある。コンクリート構造物の湿潤養生期間や凍結融解試験の前養生期間と同様に、乾燥収縮試験においても養生期間の検討が必要であると考えられる。



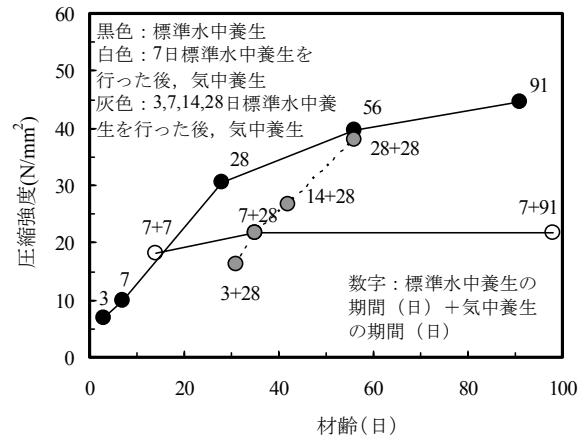
(a) 早強ポルトランドセメント



(b) 普通ポルトランドセメント



(c) 高炉セメントB種



(d) 低熱ポルトランドセメント

図-12 材齢と圧縮強度の関係(水セメント比 55%の場合)

図-13 は、水セメント比 55%において、4 種類のセメントを使用したコンクリートの乾燥期間 28 日の乾燥収縮ひずみ差と前養生期間の関係である。乾燥収縮ひずみ差とは、コンタクトゲージの試験値からダイヤルゲージの試験値を差し引いたものである。乾燥収縮ひずみ差は、前養生期間を 14 日間以上で小さくなり、また 28 日ではセメントの種類の違いも相当に小さい。今後、前養生期間が長期の乾燥収縮ひずみに及ぼす影響についても確認していく予定である。

#### 4. 長期材齢の乾燥収縮ひずみの早期判定

筆者らは、2. および 3. の検討結果に基づき、各地のコンクリート構造物の建設工事で使用するレディーミクストコンクリートの乾燥収縮ひずみの早期判定を行っている。図-14 には、その一例として A 橋における実施結果を示した。また、A 橋で実施した乾燥収縮試験の条件を、表-2 に示す。コンクリートの使用材料は、2.

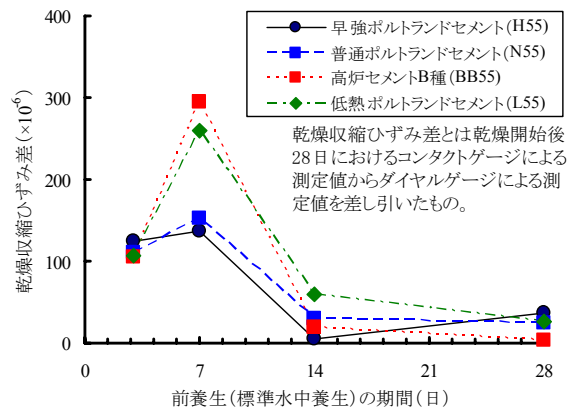


図-13 前養生期間と乾燥収縮ひずみ差の関係

および 3. で使用したものとは異なる。現地で供試体が製作され、比較的近くの生コン協同組合共同試験場で乾燥収縮試験が実施されている。図-14 中には、材齢 28 日までの試験値、この試験値を用いて予測した値および予測を行った後に確認された材齢 182 日までの試験値を示



表-2 A橋における乾燥収縮試験の条件

レディーミクストコンクリートの呼び方	40-15-20H
セメント	早強ポルトランドセメント
細骨材	陸砂, 砕砂 (島根県産)
粗骨材	砕石 (島根県産)
混和剤	高性能 AE 減水剤
水セメント比	39%
単位水量	175kg/m <sup>3</sup>
単位粗骨材絶対容積	334L/m <sup>3</sup>
供試体の製作	現地の生コン工場
測定機関	生コン協同組合共同試験所
供試体の形状	100×100×400mmの角柱
測定方法	ダイヤルゲージ法
前(水中)養生期間	7日間
乾燥時の環境条件	20℃, 60%

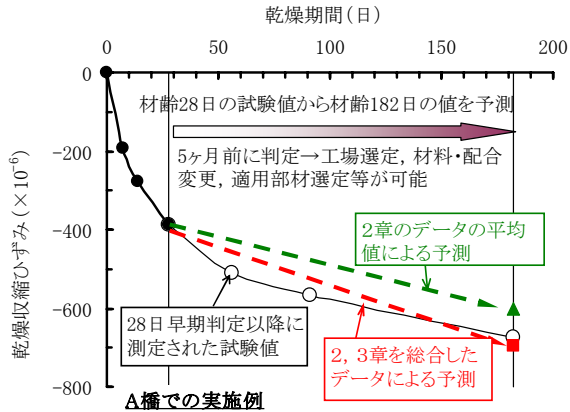


図-14 A橋における乾燥収縮ひずみの早期判定

した。また、予測値としては、2.の全国調査データをもとに、比較的配合に近いPC配合の平均値を用いた場合と、2.および3.を総合的に検討し、表-2に示す条件と照らし合わせて補正を行った場合の2通りの結果を示した。乾燥収縮試験の条件を吟味したうえで予測を行うことにより、材齢28日の段階において材齢182日の乾燥収縮ひずみを精度よく推定できることが分かる。乾燥収縮ひずみの早期判定を行う場合には、乾燥収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみ比に及ぼす要因の影響度を事前に調べ、分析を行うとともに、表-2に示すような項目を十分に確認したうえで、その影響を検討することが重要である。

## 5. まとめ

本研究では、コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす要因を確認し、その結果をもとに長期材齢の乾燥収縮ひずみの早期判定に適用した。それらによって、以下のことが明らかになった。

- ① 骨材の相違は他の材料・配合要因に比べて乾燥収縮ひずみに及ぼす影響が大きいいため、暫定配合であっても工場で使用する骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみを測定しておくことは重要である。
- ② 単位水量の増減が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響の度合いは、コンクリート標準示方書の予測式とおおむね一致する。
- ③ 単位粗骨材絶対容積が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響の度合いは、骨材によって異なる。

- ④ セメント水比が大きくなるほど、早期に強度を発現するセメントを使用するほど、小さくなる。
- ⑤ コンタクトゲージで測定した乾燥収縮ひずみは、初期強度が小さいセメントを使用するほど、ダイヤルゲージで測定した値よりも大きくなる。
- ⑥ 強度発現の遅いセメントを使用した場合には、乾燥がコンクリートの水和反応に及ぼす影響を考慮し、乾燥開始までの前養生期間の検討が必要である。
- ⑦ 乾燥収縮ひずみに及ぼす要因と影響度を調べ、適切に評価すれば、乾燥材齢28日の乾燥収縮ひずみの結果から乾燥材齢182日の乾燥収縮ひずみを精度よく推定できる。

## 参考文献

- 1) 例えば、土木学会：垂井高架橋損傷対策特別委員会中間報告書，2005.9
- 2) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書，2008.3
- 3) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説JASS 5，2009.2
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの収縮問題とその対応委員会報告書，2010.3
- 5) 松村仁夫，黒井登起雄，宮澤伸吾：各種測定方法によるコンクリートの乾燥収縮ひずみの信頼性，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.691-696，2009.7