

論文 コンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす粗骨材物性および収縮低減材料の影響評価

兵頭 彦次^{*1}・井坂 幸俊^{*2}・谷村 充^{*3}・佐藤 良一^{*4}

要旨：本研究は、物性の異なる骨材がコンクリートの乾燥収縮に与える影響を把握するとともに、骨材の種類が、膨張材、収縮低減剤の作用にどのような影響を与えるか評価することを目的とした。コンクリートの乾燥収縮と骨材の静弾性係数、乾燥収縮ひずみとの高い関連性を確認した。また、これら骨材物性の代替となる簡易指標として、骨材の吸水率、吸湿率、気乾含水率が一定の妥当性を有することを示した。膨張材、収縮低減剤ともに、骨材の種類が異なっても所定の性能を満足することを検証した。

キーワード：乾燥収縮、骨材種類、収縮低減剤、膨張材、複合モデル、収縮予測

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の品質確保の観点から収縮ひび割れ制御の要求が高まってきている。コンクリートの収縮に影響を与える要因は多岐にわたるが、最近、骨材の種類や性質によってコンクリートの乾燥収縮ひずみが大幅に異なることが再認識されてきている。骨材の影響として、それ自体の弾性係数と乾燥収縮がセメントペーストの収縮の拘束に影響を与えているというのが有力な説¹⁾であり、これらの影響を加味した予測手法²⁾も構築されてきている。

一方、コンクリートの乾燥収縮量に応じて、それを制御する手段が提案されている³⁾。材料側からの手段としては、使用骨材の選定や収縮低減材料の使用などが挙げられる。骨材の種類としては、石灰石骨材の利用が挙げられており、筆者らは、既報において石灰石骨材の効果を系統的に把握してきた⁴⁾。収縮低減を期待した代表的な混和材料としては、収縮低減剤、膨張材が挙げられ、既に指針類など^{例えば5)}でその効果が確認されている。しかしながら、物性が異なる骨材を用い、コンクリートの収縮量が異なる場合に、材料の効果がどの程度変化してくるかを検証した事例はほとんどない。

本検討では5種類の物性の異なる粗骨材を用い、基本物性としてその静弾性係数および乾燥収縮ひずみの把握を行った。また、W/C50%の普通コンクリートレベルで、これら骨材物性と乾燥収縮特性との比較検討を行った。さらに実用上の利便性を考慮した簡易な指標を取り上げ、その妥当性を複合モデルによって検証した。次に、物性の異なる粗骨材を用いた場合、収縮低減材料の効果がどのような影響があるか検討した。

表-1 使用した骨材の物理的性質

材料	記号	岩種	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	安定性 (%)
細骨材		混合砂*	2.55	2.07	—
粗骨材	GL	石灰岩	2.69	0.43	1.7
	GS1	硬質砂岩	2.64	0.74	2.5
	GS2	硬質砂岩	2.56	1.88	18.7
	GS3	硬質砂岩	2.64	0.96	12.5
	GS4	硬質砂岩	2.72	0.55	1.0

*硬質砂岩砕砂：山砂=6：4(容積比)

表-2 コンクリートの配(調)合条件

コンクリートの種類	ブレン	膨張材	収縮低減剤	併用	
単位水量(kg/m ³)	170				
W/C(%)	50				
単位粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	0.57				
スランプ(cm)	18±2.5				
空気量(%)	4.5±1.5				
混和剤・材 添加量(kg/m ³)	膨張材	—	20	—	20
	収縮低減剤	—	—	3, 6, 9	6

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1に、本検討で用いた骨材を示す。セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。混和材料には、収縮低減剤(低級アルコールのアルキレンオキシド付加物)および石灰系の低添加型膨張材(標準量 20kg/m³)を用いた。また、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用した。

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 技術企画部 副主任研究員 (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 技術企画部 工修 (正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 技術企画部 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*4 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻教授 工博 (正会員)

2.2 コンクリートの配(調)合

表-2 に、コンクリートの配(調)合条件を示す。コンクリートの種類によらず、W/C を 50%，単位水量を 170kg/m³，単位粗骨材かさ容積を 0.57m³/m³ 一定とし、高性能 AE 減水剤および AE 剤を用いてスランプ 18±2.5cm，空気量を 4.5±1.5%となるよう調整した。収縮低減剤コンクリートは、添加量 3，6，9kg/m³を単位水量の一部として添加した。膨張コンクリートは、標準量である 20kg/m³をセメントの内割で添加した。併用コンクリートは、収縮低減剤および膨張材をそれぞれ 6kg/m³，20kg/m³ 添加した。

2.3 試験方法

(1) 粗骨材の静弾性係数および乾燥収縮ひずみ

コンクリートの乾燥収縮に支配的な要因として、粗骨材の静弾性係数および乾燥収縮ひずみに着目した。静弾性係数の測定は、粗骨材と同一産地の破砕前の母岩から φ32×64mm のコアを採取し、圧縮載荷時の縦ひずみを電気抵抗線ひずみゲージ(検長 30mm)を用いて行った(n=3)。乾燥収縮ひずみの測定は、粗骨材自体に電気抵抗線ひずみゲージ(検長 2mm)を 1 枚貼り付けて行った(n=5)。貼付けの処理方法は、骨材の一部を滑面にし、ポリエステル系接着剤で下地処理した後ゲージを貼り付け、表面をブチルゴム系のコーティング剤で防水処理した。ひずみゲージの貼付け後、測定を開始まで 20℃-60R.H.%で保管した。測定環境は、20℃水中で 7 日間保管し、以後 20℃-60R.H.%とした。本検討では、水中保管 7 日時点を開始とし、以後の乾燥条件下におけるひずみを乾燥収縮ひずみとした。

(2) 骨材の吸湿率・気乾含水率

細・粗骨材を対象に、2 種類の環境条件における骨材の含水率を測定した。ひとつは、105℃-24 時間炉乾燥した絶乾状態の骨材を 20℃-99R.H.%の恒温恒湿槽で 24 時間保管したときの質量変化率であり、これを吸湿率とする。もうひとつは、20℃水中で 24 時間吸水させた後、表乾状態から 20℃-60R.H.%環境で乾燥し、質量が恒量となったときの含水率であり、これを気乾含水率とする。吸湿率は、藤原⁶⁾が指標として提案しており、骨材中の空隙の表面積に関連するとされている。一方、気乾含水率は、一般的なコンクリートの乾燥収縮試験条件を模擬したときの骨材の平衡含水率にあたる。

(3) コンクリート試験

コンクリートの試験は、乾燥収縮試験および拘束膨張試験を実施した。試験方法はそれぞれ JIS A 1129-2(コンタクトゲージ法)，JIS A 6202 附属書 2(B 法)に準じて行った。なお、乾燥収縮および拘束膨張試験の養生条件は、供試体成形後 7 日まで 20℃水中，以後 20℃-60R.H.%とした。

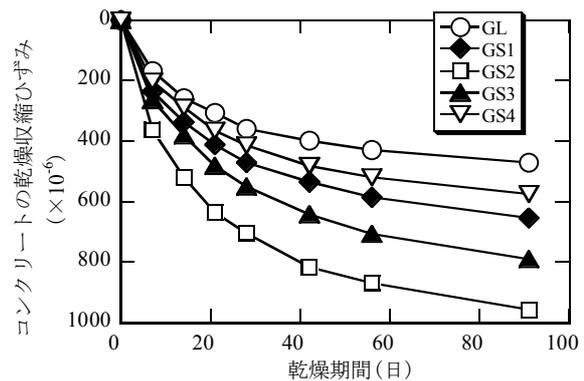


図-1 プレーンコンクリートの乾燥収縮ひずみ

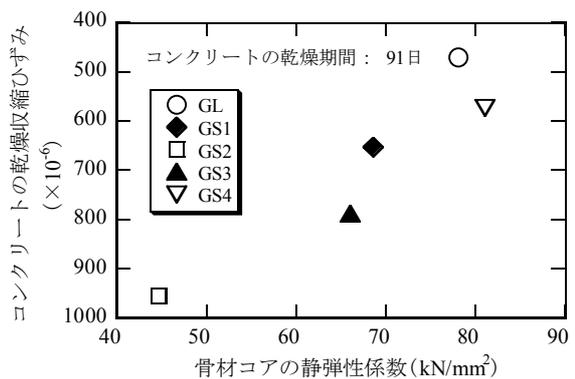


図-2 粗骨材の静弾性係数とコンクリートの乾燥収縮

3. 実験結果および考察

3.1 骨材がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響

(1) プレーンコンクリートの乾燥収縮ひずみ

図-1 に、プレーンコンクリートの乾燥収縮ひずみと乾燥期間の関係を示す。乾燥収縮ひずみは粗骨材の種類によって異なり、GL<GS4<GS1<GS3<GS2 の順に大きくなった。乾燥期間 91 日で比較すると、乾燥収縮が最も小さい GL の場合 470×10⁻⁶ 程度、最も大きい GS2 の場合 950×10⁻⁶ 程度であった。

(2) 粗骨材の静弾性係数および乾燥収縮

図-2 に、粗骨材コアの静弾性係数と乾燥期間 91 日のコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係を示す。骨材コアの静弾性係数は、骨材種類によって大幅に異なり、GS4 の静弾性係数が最大で 81.1kN/mm²，GS2 が最小で 44.7kN/mm² となった。コンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係は、骨材コアの静弾性係数が小さくなるほど乾燥収縮ひずみが増える傾向であった。

図-3 に、粗骨材の吸水過程および乾燥過程でのひずみ変化の一例(GS1)を示す。同図に示すとおり、骨材のひずみは個々に異なり、変動係数は骨材全体で見ると 60%程度と大きかった。ただし個々の骨材では物性がばらつくことが十分に考えられること、また同一骨材で繰返し試験を実施したところ乾燥収縮ひずみの変動は 15%程度以下であったことから、一定の妥当性を持ったデー

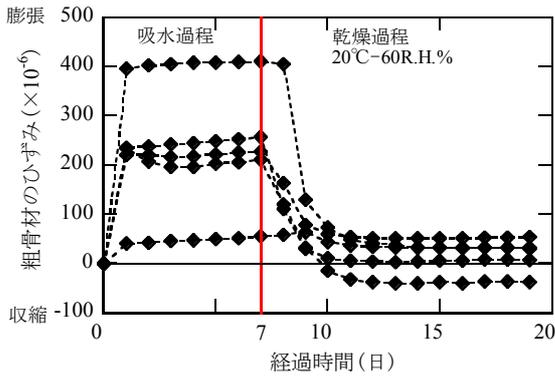


図-3 粗骨材のひずみの一例 (GS1)

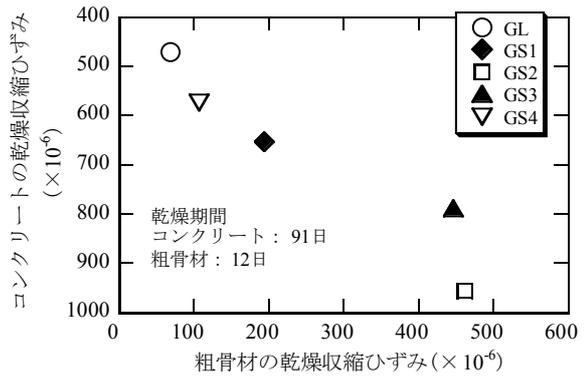


図-4 粗骨材とコンクリートの乾燥収縮ひずみの関係

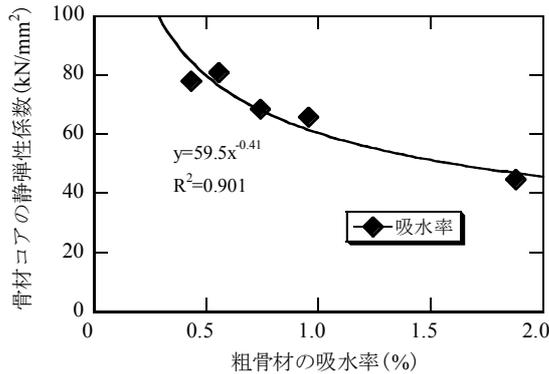


図-5 粗骨材の吸水率と静弾性係数の関係

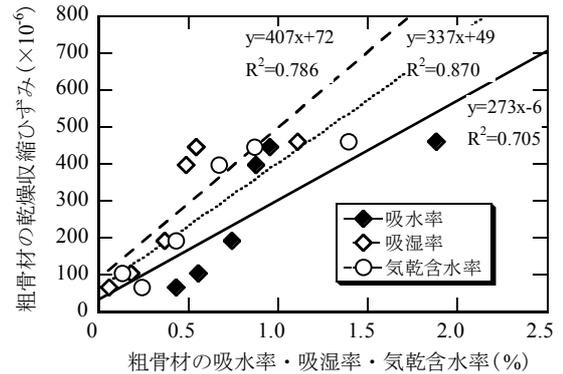


図-6 骨材の乾燥収縮ひずみと物理的性質の関係

タであると判断した。得られた粗骨材の乾燥収縮ひずみとコンクリートの乾燥収縮ひずみの関係を図-4 に示す。なお粗骨材の乾燥収縮ひずみは、ひずみ変化が概ね安定した乾燥期間 12 日のデータ (n=5 の平均値) を用いた。骨材の乾燥収縮ひずみは、骨材種類によって異なり、GS2 が最大 (467×10^{-6})、GL が最小 (56×10^{-6}) となった。コンクリートと粗骨材の乾燥収縮ひずみの大小関係は一致しており、概ね線形関係となった。

(3) 骨材の乾燥収縮・静弾性係数と物理的性質の関係

前述のとおり、骨材の乾燥収縮および静弾性係数とコンクリートの乾燥収縮とは高い関係性が認められている。ここでは、実用上の利便性を考慮し、本研究で得た骨材の乾燥収縮、静弾性係数と一般的な骨材の物理的性質との関係性を検証した。

図-5 に、骨材の吸水率と静弾性係数の関係を示す。これらの関係は、吸水率を指標としたべき乗関数で概ね表現できた。別途、絶乾密度と安定性の相関性も良好であったが、決定係数は、吸水率のほうが大きい結果であった (吸水率: $R^2=0.901$, 絶乾密度: $R^2=0.683$, 安定性: $R^2=0.849$)。

図-6 に、骨材の吸水率、吸湿率および気乾含水率と、骨材の乾燥収縮ひずみの関係を示す。いずれの物理的性質も、値が大きくなるほど粗骨材の乾燥収縮ひずみが大きくなった。吸水率の場合、1%以下の範囲では概ね線形

関係が認められたが、それ以上の骨材 (GS2) では直線の延長上とは乖離する傾向を示した。一方、吸湿率、気乾含水率で整理した場合、それを直線回帰すると、吸水率の場合と比べ相関性が高くなった (吸水率: $R^2=0.705$, 吸湿率: $R^2=0.786$, 気乾含水率: $R^2=0.870$)。気乾含水率については、同様の傾向が報告されている^{7), 8)}。吸湿率についても、別途、吸水率の高い安山岩砕石 (吸水率: 2.47%) を用いたところ、図中の回帰式に概ね整合 (骨材の乾燥収縮ひずみ: 149×10^{-6} , 吸湿率 0.37%) することを確認している。

(4) 複合モデルによる乾燥収縮ひずみの検証

物性の異なる骨材を用いた場合のコンクリートの乾燥収縮予測について、複合モデルに立脚した検討を行った。予測には式(1)、(2)に示す寺西ら²⁾が構築した複合モデル(3相モデル)を用いた。

$$\varepsilon_c = \varepsilon_p \frac{1 - (1 - m_s n_s) V_s - (1 - m_g n_g) V_g}{n_c} \quad (1)$$

$$n_c = 1 + \frac{2(n_s - 1)V_s}{n_s + 1 - (n_s - 1)(V_s + V_g)} + \frac{2(n_g - 1)V_g}{n_g + 1 - (n_g - 1)(V_s + V_g)} \quad (2)$$

ここで、 ε_c , ε_p : コンクリート, セメントペーストの乾燥収縮ひずみ, m_s , m_g : 細・粗骨材とセメントペーストの収縮ひずみ比, n_s , n_g : 細・粗骨材とセメントペー

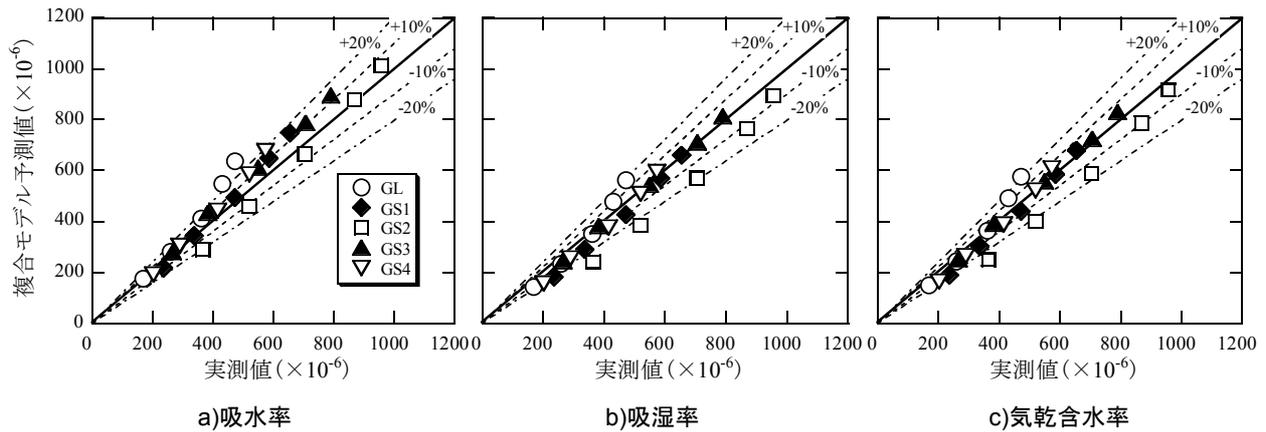


図-7 複合モデルによるコンクリートの乾燥収縮予測結果(乾燥期間 7, 14, 28, 56, 91 日)

ストの静弾性係数比, V_s, V_g : 細・粗骨材体積比

セメントペーストの乾燥収縮ひずみについては、既存の係数より求めた(乾燥期間 91 日のペーストの収縮量: 2795×10^{-6})。複合モデルに入力する粗骨材の静弾性係数と乾燥収縮ひずみは実測値を用いた。細骨材のそれらについては、粗骨材の静弾性係数・乾燥収縮ひずみと物理的性質との関係性に準ずるものと仮定し、図-5、図-6 に示した回帰式から求めた。すなわち、細骨材の静弾性係数は吸水率(2.07%)との関係から 44.3 kN/mm^2 、乾燥収縮ひずみは吸水率(2.07%)、吸湿率(0.71%)、気乾含水率(1.06%)の関係から、それぞれ 572×10^{-6} 、 362×10^{-6} 、 406×10^{-6} と設定した。

図-7 に、乾燥期間 7, 14, 28, 56, 91 日におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみの実測値と複合モデルによる予測値の関係を、吸水率、吸湿率、気乾含水率で細骨材の乾燥収縮ひずみを求めた場合についてそれぞれ示す。吸水率から求めた場合、予測値は実測値を上回る傾向であり、乾燥期間 91 日では+4%~+33%大きくなった。同様に吸湿率の場合-8%~+18%、気乾含水率の場合-5%~+22%となり、吸水率の場合と比べ予測精度の向上が認められた。これは、骨材の収縮量を評価する指標として全空隙量ではなく、その空隙分布がより適切であることを裏付けるものと言え、骨材の乾燥収縮ひずみ予測する簡易指標として、吸湿率、気乾含水率が一定の妥当性を有することが確認された。予測値と実測値の傾きの変化を見ると、いずれの条件の場合も乾燥期間にともなって傾きが大きくなり、予測値のほうが経時的に収縮発現速度が大きくなる傾向であった。

3.2 収縮低減材料が乾燥収縮に与える影響

(1) 膨張材の影響

図-8 に、膨張材単独で用いた場合および収縮低減剤と膨張材を併用した場合の材齢 7 日の拘束膨張ひずみを、粗骨材種類別に示す。いずれの水準も $150 \times 10^{-6} \sim 250 \times 10^{-6}$

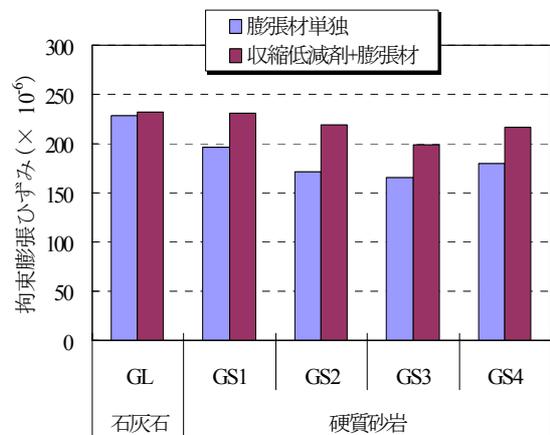


図-8 膨張コンクリートの拘束膨張ひずみ

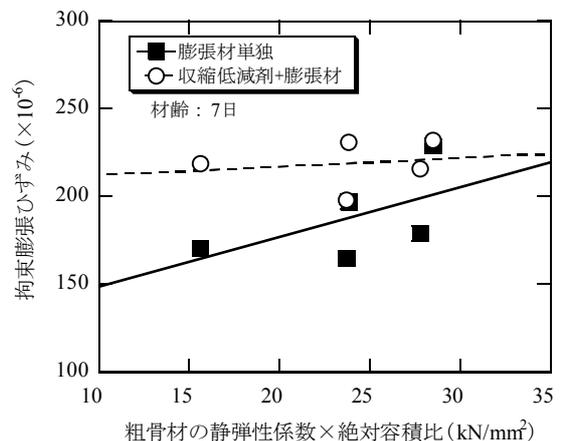


図-9 拘束膨張ひずみと粗骨材の静弾性係数の関係

10^{-6} の範囲であり、所定の膨張ひずみ量⁹⁾が発現していることが確認された。また、骨材種類によらず収縮低減剤と膨張材を併用したほうが、膨張材単独で用いた場合よりも大きな膨張ひずみが発現した。骨材種類別に見ると、膨張材単独、併用の場合ともに GL の拘束膨張ひずみが最も大きくなった。骨材種類間の拘束膨張ひずみの変動係数は、膨張材単独の場合 13.5% (平均値: 188×10^{-6})、

併用した場合 6.3% (平均値 : 219×10^{-6}) であり, 併用したほうが骨材間の変動が小さくなった。

拘束膨張ひずみは, 拘束棒とコンクリートの弾性係数比が関与する。そのため, 拘束膨張ひずみの変動に骨材の静弾性係数が影響を与えたことが考えられる。図-9に, 粗骨材の静弾性係数に絶対容積比を乗じた値と拘束膨張ひずみを比較した結果を示す。粗骨材の静弾性係数が大きくなるとともに, 拘束膨張ひずみがやや大きくなる傾向が認められた。しかしながら, 必ずしも相関は高くなく, 骨材の物性だけでなく複数の要因が拘束膨張ひずみの変動に影響しているものと考えられる。

図-10に, プレーンコンクリートと膨張コンクリートの乾燥期間 28 日, 91 日での乾燥収縮ひずみを粗骨材種類別に示す。乾燥期間, 粗骨材種類によらず, 膨張コンクリートの乾燥収縮ひずみはプレーンコンクリートよりも 10%程度小さくなった。この原因は定かではないが, 膨張材を混和すると空隙構造が粗大に変化することが知られており¹⁰⁾, これが収縮の変化に影響したのではないかと考えられる。一方で, 拘束下においては膨張コンクリートの空隙構造が緻密になることも確認されている¹¹⁾。本データは無拘束条件下での結果であり, 実際の膨張コンクリートが使用される拘束条件下において, これが有意な収縮低減効果であるかどうかは更に検討する必要があると考える。

(2) 収縮低減剤の影響

図-11に, 収縮比(収縮低減剤を用いたコンクリートの乾燥収縮/プレーンコンクリートの乾燥収縮)と収縮低減剤添加量の関係を乾燥期間 91 日について示す。収縮比は, 収縮低減剤添加量の増加にもなって小さくなった。また, 収縮低減剤単独で用いた場合よりも, 膨張材と併用したほうが同一添加量において収縮比が小さくなった。乾燥期間 91 日の収縮低減率で整理すると, 添加量 3kg/m^3 で 12%~15%, 添加量 6kg/m^3 で 15%~20%, 添加量 9kg/m^3 で 27%~34%, 併用した場合 30%~37% であり, いずれの組合せにおいても概ね 15%程度以上の効果が認められた。ただし, 骨材種類が異なると収縮比がやや変動する傾向が認められた。

収縮比の変動要因については, 直接, 骨材が影響を与えているかどうかを確認することは難しいと考えられる。収縮低減剤が, 骨材自体の乾燥収縮ひずみに影響を与える可能性は原理上考えられるが, 練混ぜ水中にある収縮低減剤がコンクリート内でどのような挙動を示し, 骨材にどの程度関与するかが現状では不明なためである。一方, 複合モデルの原理に立脚すれば, セメントペーストの収縮量が増えた場合, それ自体の収縮変化だけでなく, 骨材との収縮比である m_s, m_g という形で拘束度の変化に寄与し, コンクリートの乾燥収縮にも影響を

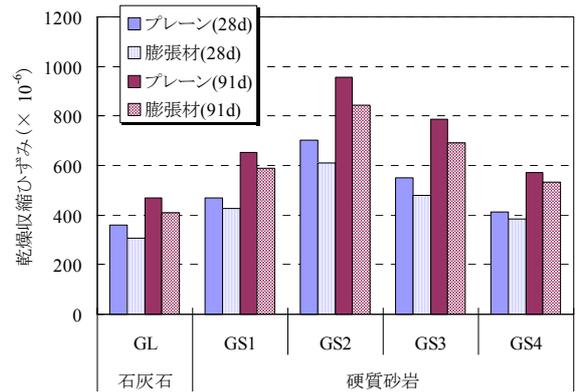


図-10 膨張コンクリートの乾燥収縮ひずみ

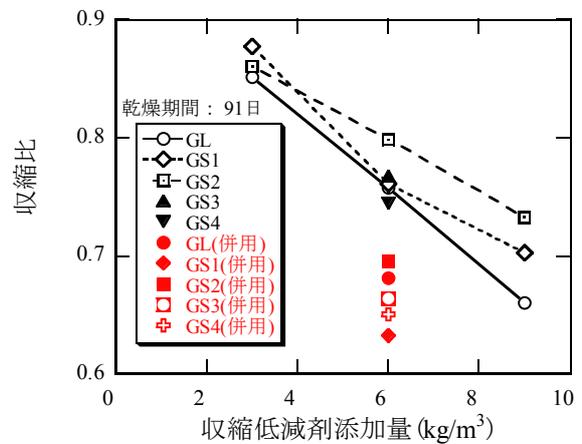


図-11 収縮低減剤量と収縮比の関係

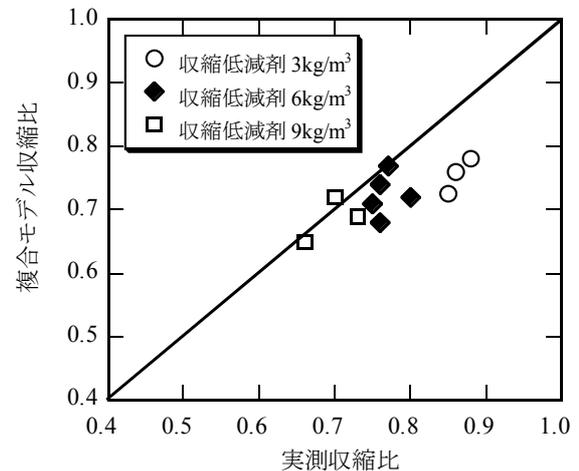


図-12 収縮比の実測値と予測値の比較

を与える。そこで, 収縮低減剤を添加した場合および無添加の場合のセメントペーストの収縮量を設定し, 複合モデルによって両者のコンクリートの乾燥収縮ひずみを予測した。ペーストの収縮比は, 後藤ら¹²⁾の検討結果を参考に, コンクリートの収縮比の 0.7 倍になると仮定した。これより, 収縮低減剤の添加量毎にプレーンペーストに対する収縮比は, 3kg/m^3 で 0.60, 6kg/m^3 で 0.54,

9kg/m³で0.49とし、その他のパラメータは、プレーンコンクリートの場合と同一とした。

図-12に、乾燥期間91日における複合モデルから求めた収縮比および実測の収縮比の関係を示す。同図より、ペースト収縮量の仮定や複合モデルの精度から絶対値の差異は生じたが、定性的には実際の収縮比の変動傾向を表現できていることがわかる。すなわち、骨材物性が異なることによって収縮比が変動した要因のひとつとして、収縮低減剤を添加したことで、セメントペーストと骨材の乾燥収縮比が変化した影響が含まれている可能性が考えられた。

今後は、膨張材の作用を含め、収縮低減材料の効果について複合モデルを利用した評価を進めるとともに、同評価に必要な物性データを拡充していきたいと考える。

4. まとめ

物性の異なる5種類の粗骨材を用いて、コンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす影響および収縮低減剤、膨張材の効果に与える影響を評価した。本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 粗骨材の静弾性係数は、吸水率と良好な関係性が認められた。また、骨材の乾燥収縮ひずみは、吸水率よりも吸湿率および気乾含水率との相関性が高くなった。
- (2) 複合モデルによってコンクリートの乾燥収縮ひずみ予測したところ、細骨材の乾燥収縮ひずみを本研究で提示した吸湿率、気乾含水率から設定することで予測精度が向上した。
- (3) 膨張材の効果は、物性が大きく異なる粗骨材を用いた場合でも所定の拘束膨張ひずみ量を満足した。
- (4) 収縮低減剤の効果は、添加量3kg/m³以上で15%程度以上の効果が得られた。その効果は、骨材によって異なる傾向が認められたが、複合モデルを用いて収縮低減剤の影響を考慮することで変動傾向を説明できる可能性が示された。

参考文献

- 1) 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, 土木学会論文集, 第286号, pp.125-137, 1979.6
- 2) 寺西浩司, 佐藤嘉昭: 複合モデルを基盤としたコンクリートの乾燥収縮予測式, 日本建築学会構造系論文集, 第602号, pp.21-28, 2006.4
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006.2
- 4) 兵頭彦次, 谷村 充, 藤田 仁, 番地成朋: 石灰石骨材がコンクリートの収縮特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.571-576, 2009.7
- 5) 日本建築学会: 膨張材を使用するコンクリートの調合設計・施工指針案・同解説, 1978.2
- 6) 藤原忠司: 低品質の粗骨材を用いたコンクリートの諸性質, セメント・コンクリート, No.481, 1987.3
- 7) 中村秀三, 酒井英司: 各種砕石を用いたコンクリートの乾燥収縮, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.431-432, 2006.9
- 8) 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, 2009.7
- 9) 土木学会: 2007年制定コンクリート標準示方書[施工編], 2008.3
- 10) 戸川一夫, 中本純次: 膨張コンクリートの拘束膨張, 収縮特性に及ぼす使用材料の影響, 土木学会論文集, 第326号, pp.129-140, 1982.10
- 11) 盛岡 実, 樋口隆行, 中島康宏, 坂井悦郎: 拘束条件下における膨張材混和ペーストの微細構造, 第55回セメント技術大会講演要旨, pp.82-83, 2001
- 12) 後藤孝治, 酒井公式, 佐藤 健: セメント硬化体の乾燥収縮を低減する有機質混和剤, セメント・コンクリート, No.442, pp.9-15, 1984.12