

論文 乾燥収縮抑制材料の効果に及ぼすセメント種類・骨材の影響

兵頭 彦次^{*1}・中崎 豪士^{*2}・谷村 充^{*3}・佐藤 良一^{*4}

要旨: 5種類のセメントおよび3種類の骨材を組合せたコンクリートの乾燥収縮特性評価に加え、収縮低減剤、膨張材を使用した場合の収縮抑制効果について系統的な実験検討を行った。その結果、セメント種類が乾燥収縮に及ぼす影響は、骨材に比べ相対的に小さかった。収縮低減剤、膨張材ともに、セメント種類、骨材の組合せによらず所要の性能を発揮することが確認された。また、収縮早期判定式を適用する場合の係数の取り扱いは、膨張コンクリートは無添加の場合とほぼ同等である一方で、収縮低減剤添加コンクリートについては通常よりも大きく設定する必要性が示された。

キーワード: 乾燥収縮, セメント種類, 骨材, 収縮低減剤, 膨張材, 早期判定法

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の品質向上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。土木学会「2007年制定コンクリート標準示方書」¹⁾や日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2009」²⁾では、最近、コンクリートの収縮量の規定化を図るなど、従来よりも踏み込んだ取り扱いが導入された。一方、コンクリートの収縮特性は地域や使用する材料等によって異なる³⁾ことが改めて明らかとなってきている。そのため、目標とする収縮量によっては、具体的な対策手段として収縮低減剤や膨張材といった収縮抑制材料の活用が必要となってくる。

収縮低減剤、膨張材については、既に指針類⁴⁾などでその収縮抑制効果が認められている。しかしながら、今後、コンクリートの収縮性能を保証する体制を構築³⁾していくためには、さまざまな条件に対応できるよう広範なデータの蓄積が求められている。

筆者らは、これまで骨材物性をパラメータとした収縮抑制材料の効果について検討結果⁵⁾を報告した。本稿では、骨材の組合せに加えセメントの種類の影響に着目し、乾燥収縮特性の評価、収縮低減剤、膨張材の収縮抑制効果について系統的な実験検討を行った。さらに、コンクリートの収縮早期判定法²⁾を取り上げ、現在、適用範囲外である収縮抑制材料を使用した場合の取り扱いについて検討を加えた。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に、使用材料を示す。セメントには、普通(N)、中庸熱(M)、早強(H)、低熱(L)の各ポルトランドセメント

表-1 使用材料

材料	記号	種類/物性値
セメント	N	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16g/cm ³
	M	中庸熱ポルトランドセメント, 密度: 3.21g/cm ³
	H	早強ポルトランドセメント, 密度: 3.15g/cm ³
	L	低熱ポルトランドセメント, 密度: 3.22g/cm ³
	BB	高炉セメント B 種, 密度: 3.04g/cm ³
細骨材	MS	山砂, 表乾密度: 2.58g/cm ³ , 吸水率: 3.17%
	SS-1	硬質砂岩砕砂, 表乾密度: 2.62g/cm ³ , 吸水率: 1.34%
	SS-2	硬質砂岩砕砂, 表乾密度: 2.64g/cm ³ , 吸水率: 2.06%
粗骨材	GL	砕石 2005(石灰石), 表乾密度: 2.70g/cm ³ , 吸水率: 0.44%, 実積率: 64.1%
	GS-1	砕石 2005(硬質砂岩), 表乾密度: 2.66g/cm ³ , 吸水率: 0.74%, 実積率: 60.8%
	GS-2	砕石 2005(硬質砂岩), 表乾密度: 2.69g/cm ³ , 吸水率: 0.85%, 実積率: 60.9%
膨張材	EX	石灰系低添加型, 密度: 3.16g/cm ³
収縮低減剤	SRA	低級アルコールアルキレンオキシド付加物
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系)
	AE	空気量調整剤

に加え、高炉セメント B 種(BB)の計 5 種類を用いた。細骨材には、産地の異なる 2 種類の硬質砂岩砕砂(SS-1, SS-2)と山砂(MS)を用いた。粗骨材には、石灰石砕石(GL)および産地の異なる 2 種類の硬質砂岩砕砂(GS-1, GS-2)を用いた。これら粗骨材の物性について、別途、原石コア(φ32×64mm)で測定した静弾性係数は GL, GS-1, GS-2 の順にそれぞれ 78.1kN/mm², 68.6kN/mm², 64.5kN/mm² であった。また同様に、電気抵抗線式ひずみゲージで測定した粗骨材粒(寸法: 15~20mm)の乾燥収縮ひずみ⁵⁾ (20℃水中 7 日保管したときのひずみを起点とし、12 日間 20℃-60%R.H.で乾燥したときのひずみ変化量)は、GL, GS-1, GS-2 の順にそれぞれ -50×10⁻⁶, -214×10⁻⁶, -400×10⁻⁶ であった。

収縮抑制材料として、低添加型膨張材(石灰系)と収縮低減剤(低級アルコールのアルキレンオキシド付加物)を

*1 太平洋セメント (株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 (正会員)

*2 太平洋セメント (株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 工修 (正会員)

*3 太平洋セメント (株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 博士(工学) (正会員)

*4 広島大学大学院 工学研究科 教授 工博 (正会員)

用いた。また混和剤として高性能 AE 減水剤および空気量調整剤を用いた。

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。セメント・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 減水剤および空気量調整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。細・粗骨材の組合せは、粗骨材が GL、GS-1 の場合、山砂(MS)と硬質砂岩砕砂(SS-1)を容積比 4:6 で混合した細骨材を、粗骨材が GS-2 の場合、硬質砂岩砕砂(SS-2)を細骨材とした。収縮低減剤は 6kg/m³ を単位水量の一部として、膨張材は標準量である 20kg/m³ をセメントの内割で使用した。

表-3 に、フレッシュコンクリートの性状および化学混和剤(SP, AE)の使用量を粗骨材別に整理する。GS-2 の場合、GL、GS-1 と比べ SP の使用量が小さくスランプが小さい傾向が認められた。これは、細骨材の違いが影響したと思われる。空気量については、骨材の影響は小さかった。AE の使用量は、収縮低減剤を使用した場合(0.007~0.011%)、無添加の場合(0~0.002%)と比べ増加した。

2.3 試験方法

表-4 に、実施した試験項目を示す。乾燥収縮試験は、寸法 100×100×400mm の角柱供試体を用い、JIS A 1129-2(コンタクトゲージ方法)および附属書 A(参考)に準拠して行った。保管条件は、供試体成型後 7 日間 20℃水中養生し、以後、20℃-60%R.H.の恒温恒湿室で 6 か月まで気乾養生した。拘束膨張・収縮試験は、JIS A 6202 附属書 2(B 法)に準拠し、基準コンクリート(PL)と膨張コンクリート(EX)について実施した。保管条件は乾燥収縮試験と同様とした。供試体の脱型は注水後 24±1 時間で実施し、Lセメントを用いたコンクリートについては 48±1 時間で行った。

表-2 コンクリートの配(調)合条件

検討シリーズ	基準 PL	収縮低減剤 SRA	膨張材 EX
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		
使用量 (kg/m ³)	SRA	0	6
	EX	0	0
細骨材/粗骨材	GL	MS+SS-1/GL	
	GS-1	MS+SS-1/GS-1	
	GS-2	SS-2/GS-2	

表-3 フレッシュコンクリートの性状と混和剤(SP, AE)量

粗骨材	GL	GS-1	GS-2	
スランプ(cm)	19.0~20.5 (20.2)	17.0~20.5 (19.3)	15.5~19.0 (17.2)	
空気量(%)	3.2~5.3 (4.4)	3.4~6.0 (5.0)	3.5~6.0 (5.3)	
混和剤量 (C×質量%)	SP	0.6~0.8 (0.7)	0.8 (0.8)	1.1~1.2 (1.1)
	AE	0~0.011	0~0.010	0.001~0.009

()は平均値

表-4 試験項目

検討シリーズ	PL	SRA	EX
圧縮強度 (JIS A 1108)	○	○	○
静弾性係数 (JIS A 1149)	○	○	○
乾燥収縮ひずみ (JIS A 1129)	○	○	○
拘束膨張/収縮ひずみ (JIS A 6202)	○	-	○

3. 実験結果

3.1 コンクリートの力学特性

(1) 圧縮強度

図-1 に圧縮強度の試験結果を示す。セメント種類別の圧縮強度の大小は、材齢 7, 28 日でおおむね H>N, BB, M>L の関係が、材齢 91 日では L, BB, M が N, H よりもやや大きくなる結果であった。この傾向は EX および SRA シリーズによらず同様であり、収縮抑制材料の添加にかかわらず各セメントの強度発現性が反映される結果であった。収縮抑制材料による圧縮強度への影響を材

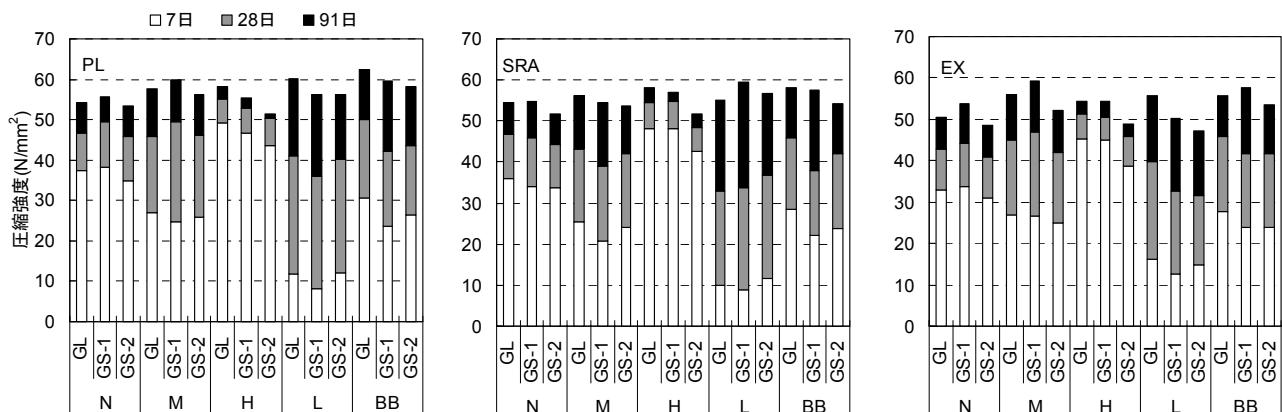


図-1 圧縮強度試験結果

齢 91 日の圧縮強度比(EX, SRA シリーズの圧縮強度/PL シリーズの圧縮強度)で見ると, EX シリーズは 0.99~0.84, SRA シリーズは 1.06~0.91 であり, 一部では圧縮強度が 10%以上小さくなるものも認められた。骨材の組合せにともなう強度の大小については, 明確な傾向は認められなかった。

(2) 静弾性係数

図-2 に, 圧縮強度と静弾性係数の関係(材齢 28 日)を示す。また, 土木学会¹⁾および日本建築学会²⁾の設計式を併記する。静弾性係数は圧縮強度の大小におおむね準じる傾向であった。収縮抑制材料の添加による静弾性係数への影響を材齢 91 日の静弾性係数比(EX, SRA シリーズの静弾性係数/PL シリーズの静弾性係数)で見ると, EX シリーズは 1.02~0.90, SRA シリーズで 1.06~0.96(全配(調)合平均 0.99)であり±10%の範囲であった。一方, 骨材の組合せによって静弾性係数は GL>GS-1>GS-2 の明確な大小関係が認められ, 粗骨材の原石コアによる静弾性係数の大小関係と一致した。さらに GS-2 を用いた場合, 圧縮強度の増加に対する静弾性係数の増加割合が, そのほかの骨材の場合よりも小さく, 併記した学会式とも乖離する傾向であった。

3.2 セメント・骨材の影響(PL シリーズ)

図-3 に, PL シリーズの乾燥収縮ひずみと乾燥期間の関係を示す。セメント種類によって収縮の進行度等がやや異なる傾向も認められるが, 骨材の組合せが乾燥収縮ひずみの大小の主な影響因子であることがわかる。乾燥期間 6 か月におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみについてセメント種類によらず平均すると, GL 配合が -517×10^{-6} , GS-1 配合が -796×10^{-6} , GS-2 配合が -1051×10^{-6} であった。

図-4 に, Nセメントの乾燥収縮ひずみを基準とし, その他のセメントと比較した結果(乾燥期間 6 か月)を示す。同図より, セメント種類の影響は小さいことがわかる。Nセメントに対するその他のセメントの乾燥収縮ひずみは-5.2%~4.1%の範囲であった。セメント種類間の大小関係は, 骨材の組合せに応じて異なり, 必ずしも一定の関係は認められなかった。ただし, Hセメントの乾燥収縮ひずみは, 骨材の組合せによらず他のセメントより幾分小さく(全セメント平均に対し 2~4%), 最近の報告と同様の傾向⁶⁾を示した。

3.3 収縮低減剤の影響評価(SRA シリーズ)

図-5 に, PL シリーズおよび SRA シリーズの乾燥収縮ひずみと乾燥期間の関係を例示する。SRA シリーズでは, セメント種類間でやや収縮量の違いが認められた。収縮の進行速度は, 乾燥期間初期において SRA シリーズが PL シリーズよりも緩慢であったが, 長期的には両者ともほぼ並行となった。これらの傾向は, 骨材の組合せによ

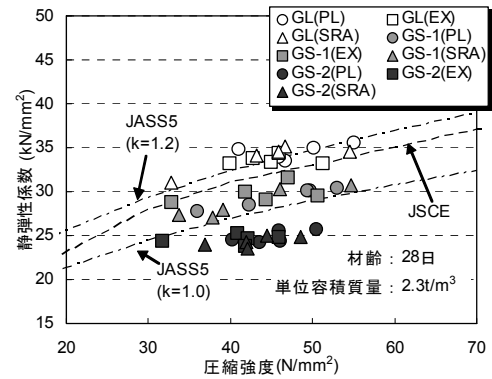


図-2 圧縮強度と静弾性係数の関係

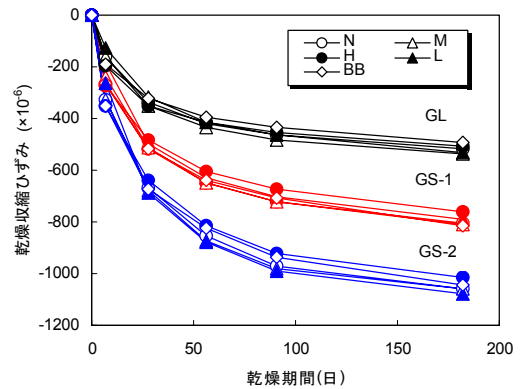


図-3 PL シリーズの乾燥収縮ひずみ

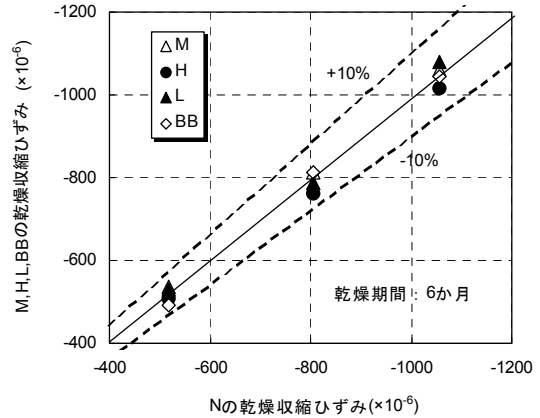


図-4 セメント種類間の乾燥収縮ひずみの関係

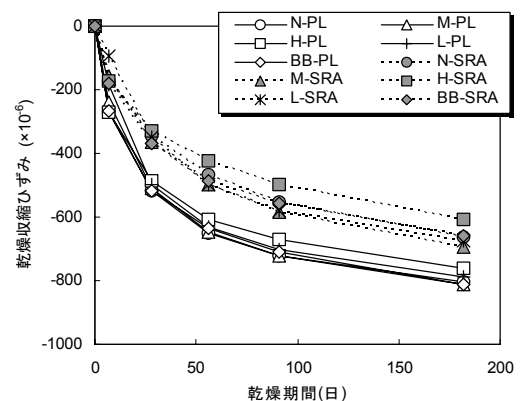


図-5 SRA シリーズの乾燥収縮ひずみの一例 (GS-1)

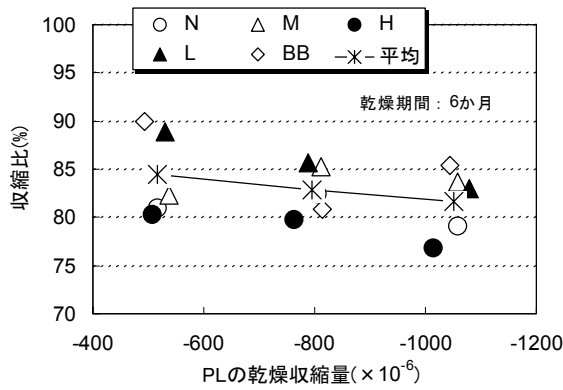


図-6 PL シリーズの収縮量と収縮比

らず同様であった。

図-6 に、乾燥期間 6 か月における収縮比(SRA の乾燥収縮ひずみ/PL の乾燥収縮ひずみ)について、PL の乾燥収縮ひずみとの関係を示す。PL の乾燥収縮ひずみが大きくなるとともに、収縮比がわずかながら小さくなる傾向であった。収縮低減剤の効果が骨材の収縮挙動にも及んだ可能性も考えられるが、収縮比への影響は 5%以内であり小さい。絶対値でみると、収縮比はおおむね 85%以下であり、「少なくとも 15%程度以上の収縮低減効果を有する」とする指針に示される性能⁴⁾を満足する結果であった。

図-7 は、乾燥期間 6 か月の収縮比をセメント種類別に整理したものである。Hセメントの収縮比は、相対的に他のセメントより小さい傾向がある一方で、L、BBはやや大きい傾向が認められた。さらにデータを拡充し、セメント種類と収縮比の関係性について検証が必要であると考えられる。

3.4 膨張材の影響評価(EX シリーズ)

(1) 拘束膨張ひずみ

図-8 に、材齢 7 日までの拘束膨張ひずみと材齢の関係を例示(GS-2 配合)する。拘束膨張ひずみの発現は、材齢 2 日でおおむね収れんした。ただし、Lセメントについては、材齢 2 日以降も膨張発現が継続し、他のセメントと異なる傾向であった。これらの挙動は、他の骨材を組み合わせた場合でも同様であった。

図-9 に、材齢 7 日の拘束膨張ひずみをセメント、骨材種類別に示す。セメント種類によって大小の違いがやや認められるものの、いずれも標準的な拘束膨張ひずみ⁷⁾⁸⁾(150×10^{-6} ~ 250×10^{-6})を発現した。骨材種類別にみると、GLの平均 215×10^{-6} 、GS-1の平均 221×10^{-6} 、GS-2の平均 223×10^{-6} であり明確な傾向は認められなかった。戸川らは、人工軽量骨材や碎石を対象とした検討によって、膨張材の効果に及ぼす骨材の影響として骨材自身の拘束力の違い⁹⁾に言及しているが、本検討で用いた骨材物性の範囲ではその影響は限定的であったものと考えられる。

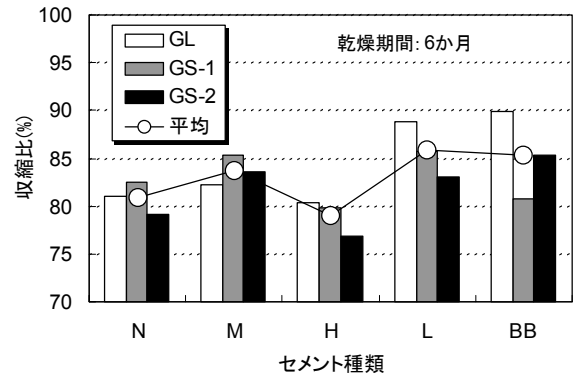


図-7 セメント種類別の収縮比

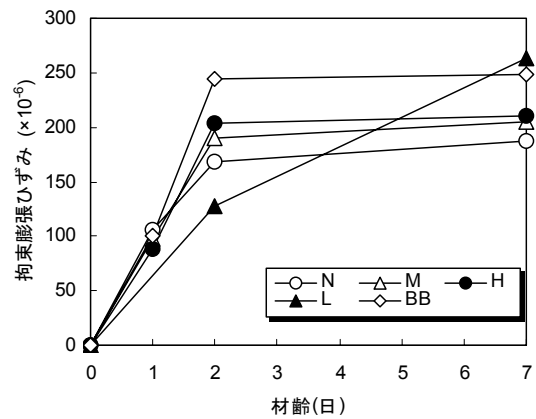


図-8 拘束膨張ひずみの一例(GS-2)

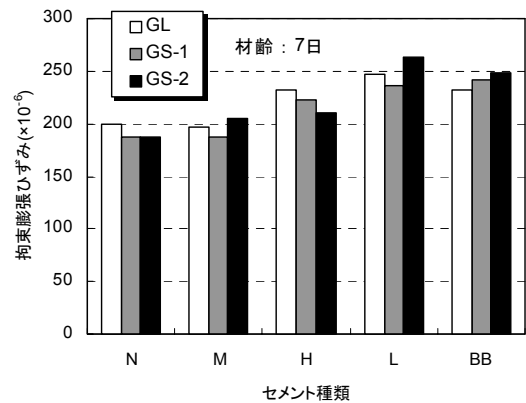


図-9 拘束膨張ひずみ

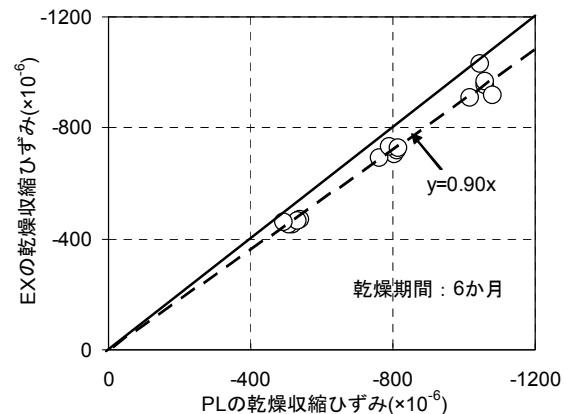


図-10 PLおよびEXシリーズの乾燥収縮ひずみ

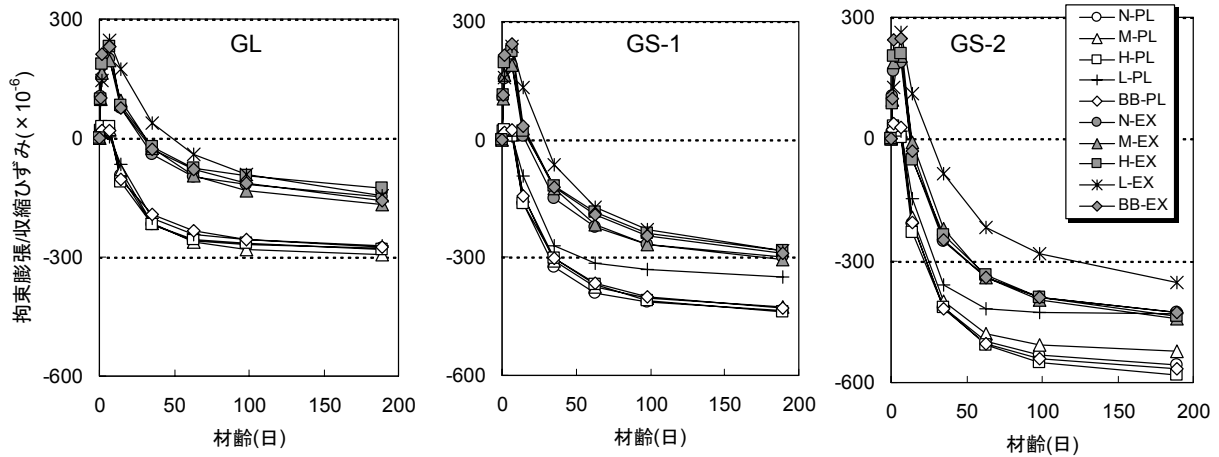


図-11 拘束膨張・収縮ひずみと材齢の関係

相対的にセメント種類の影響が大きく、平均で N が 192×10^{-6} 、M が 197×10^{-6} 、H が 222×10^{-6} 、L が 249×10^{-6} 、BB が 241×10^{-6} となり、L および BB が他のセメントよりやや大きな拘束膨張ひずみを発現した。

(2) 乾燥収縮ひずみ

図-10 に、PL シリーズと EX シリーズの乾燥収縮ひずみ(乾燥期間：6 か月、ひずみの起点：材齢 7 日)の比較を示す。EX シリーズの乾燥収縮ひずみは、セメント、骨材種類によらず PL シリーズに比べて 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⁹⁾ことが知られており、これが両シリーズの収縮量の違いに影響したのではないかと考えられる。

(3) 拘束膨張・収縮ひずみ

図-11 に、PL シリーズと EX シリーズについて、拘束膨張・収縮ひずみと材齢の関係を示す。材齢 7 日以前の水中養生期間では、PL シリーズも膨潤と考えられる膨張ひずみを生じ、その範囲は $4 \sim 29 \times 10^{-6}$ であった。材齢 7 日以降の乾燥条件下での挙動は、EX シリーズの場合、L セメントの拘束収縮ひずみの初期発現性がその他のセメントよりも明らかに緩慢であった。前掲の図-8 に示したように、L セメントの膨張発現性はその他よりも遅れて生じている傾向が認められており、乾燥条件下においても膨張発現を継続したのではないかと推測される。一方、PL シリーズの場合、骨材の組合せによって異なる傾向を示した。GL を用いた場合、セメント種類間の差はほとんど認められなかったが、GS-1 では、拘束収縮ひずみが -300×10^{-6} を超えたあたりで L セメントと他のセメントとが乖離する傾向であった。さらに GS-2 を用いた場合は、L セメントの乖離に加え、長期材齢でその他セメント間の差異も大きくなる傾向を示した。これらは、辻の検討結果における指摘¹⁰⁾と同様に、コンクリート-鋼材間

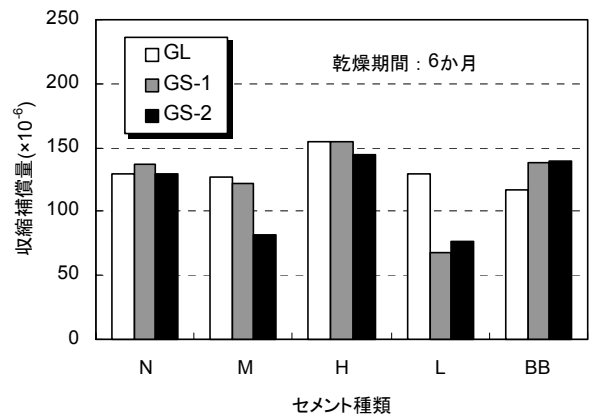


図-12 収縮補償量

ですべりを生じているためと考えられる。そのため、強度発現が緩やかであったり、収縮量が大きいコンクリートを同試験によって適正に評価する場合、定着長を長くするなどの改善を施す必要があると考えられる。

図-12 に、材齢 6 か月における PL シリーズに対する EX シリーズの収縮補償量(PL-EX の拘束膨張・収縮ひずみの差分値)をセメント、骨材種類別に示す。前述のすべりが生じたと考えられる一部の配(調)合を除けば、収縮補償量は $117 \times 10^{-6} \sim 154 \times 10^{-6}$ の範囲にあり、材料の組合せによる有意な差は認められなかった。

3.5 早期判定法の検討

図-13 に、乾燥期間 4 週と 6 か月の乾燥収縮ひずみの関係を PL, SRA, EX シリーズについてそれぞれ示す。また、シリーズごとにセメントおよび骨材種類によらず直線回帰した線を併記する。同図より、同一シリーズであればセメント種類、骨材種類によらずおおむね直線的に評価できることがわかる。PL シリーズと EX シリーズの回帰直線の傾きは同等であり 1.57 であった。一方、SRA シリーズは 1.87 と PL, EX シリーズよりも傾きが大きくなり、収縮発現挙動が異なることが確認された。既報¹¹⁾

では、Nセメントについて報告したが、セメント種類が異なる場合でも同様の傾向を示すことが新たに明らかとなった。表-5に、乾燥期間8週、13週についての傾きをまとめて示す。収縮早期判定式を適用する場合、膨張コンクリートは無添加の場合とほぼ同等に取り扱える一方で、収縮低減剤を使用したコンクリートについては係数を通常よりも大きく設定する必要があると考えられる。

4. まとめ

5種類のセメント(普通, 中庸熟, 早強, 低熱ポルトランドセメント, 高炉セメントB種)および3種類の骨材を組み合わせたコンクリートの乾燥収縮特性評価に加え、収縮低減剤, 膨張材を添加した場合の収縮抑制効果について系統的な実験検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) セメント種類が乾燥収縮に及ぼす影響は小さく、骨材の組合せが相対的に大きな影響を及ぼした。
- (2) 収縮低減剤, 膨張材ともに、セメント種類, 骨材の組合せによらず所要の性能を発揮することが確認された。
- (3) 収縮早期判定式を適用する場合、膨張コンクリートは無添加の場合とほぼ同等に取り扱える一方で、収縮低減剤を使用したコンクリートについては係数を通常よりも大きく設定する必要性が示された。

参考文献

- 1) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2008.3
- 2) 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 2009，2009.2
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの収縮問題検討委員会・報告書，2010.3
- 4) 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
- 5) 兵頭彦次，井坂幸俊，谷村 充，佐藤良一：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剤の影響評価，コンクリート工学年次論

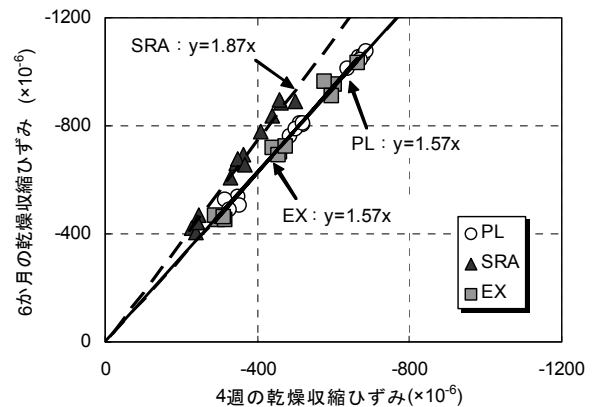


図-13 乾燥期間4週と6か月の乾燥収縮ひずみ

表-5 回帰直線の傾き

乾燥期間	4週	8週	13週
PL	1.57	1.24	1.11
SRA	1.87	1.37	1.16
EX	1.57	1.29	1.13

文集, Vol.32, No.1, pp.377-382, 2010.6

- 6) セメント協会：各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究(コンクリートの乾燥収縮に関する実験結果)，コンクリート専門委員会報告 F-55(追補)，2011.3
- 7) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書[施工編]，2008.3
- 8) 日本建築学会：膨張材を使用するコンクリートの調査設計・施工指針案・同解説，1978.2
- 9) 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
- 10) 辻 幸和：膨張コンクリートの一軸拘束膨張および収縮試験方法に関する研究，土木学会論文集，第378号，pp.283-286，1987.2
- 11) 谷村 充，兵頭彦次：膨張材・収縮低減剤を用いたコンクリートの長さ変化特性，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，pp.467-468，2011.7