

コンクリートの乾燥収縮ひずみ制御方法に関する実験的研究

宮野 和樹*1・梶田 秀幸*2

Experimental Study on Method of Control Drying Shrinkage

Kazuki MIYANO, Hideyuki KAJITA

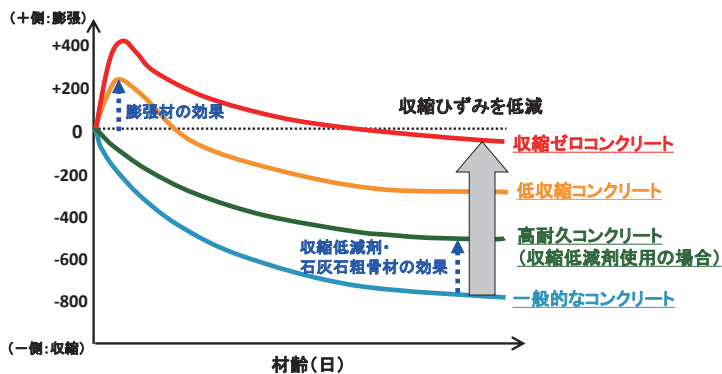


図-1 乾燥収縮ひずみを制御したコンクリートの拘束膨張ひずみを考慮した乾燥収縮ひずみの概念図

表-1 収縮低減したコンクリートの目標乾燥収縮ひずみに対する材料の組合せ

目標乾燥収縮ひずみ*1 ($\times 10^{-6}$)	乾燥収縮ひずみ低減対策材料*2			
	石灰石粗骨材	膨張材	収縮低減剤	低発熱型セメント
-800	-	-	-	-
-600	□	□	□	-
-400	◎	○	○	-
-250	◎	◎	◇	-
0~-100	◎	◎	◎	◎

*1: 拘束膨張ひずみを考慮した乾燥収縮ひずみとし、材齢7日の拘束膨張ひずみにJIS A 1129による乾燥期間182日の乾燥収縮ひずみを加えた値とする

*2: 記号の意味 ◎:使用する, ○:単体使用または併用, □:いずれかを使用, ◇併用する場合あり

研究の目的

鉄筋コンクリート構造物におけるひび割れは、構造物の耐久性の低下に大きな影響を及ぼす要因であることから、コンクリートの乾燥収縮によるひび割れの制御は非常に重要である。その制御方法については、材料・調合面からの対策として石灰石粗骨材の使用や、収縮低減剤および膨張材を適用する事例がみられる。しかし、粗骨材の種類や産地が異なる場合、収縮低減剤と膨張材を併用した場合、および、セメント種類が異なる場合において、コンクリートの乾燥収縮ひずみや圧縮強度に及ぼす影響に不明な点が多い。

そこで、本研究では、目標性能に応じてコンクリートの乾燥収縮ひずみを制御できる技術の開発を目的に、粗骨材種類、収縮低減剤および膨張材の組合せと使用量、セメント種類が、コンクリートの乾燥収縮ひずみおよび圧縮強度に及ぼす影響を実験的に検討した。

技術の説明

石灰石粗骨材、収縮低減剤、膨張材の組合せ、収縮低減剤および膨張材の使用量、ならびに、セメント種類の変更により、コンクリートの乾燥収縮ひずみを $0 \sim 800 \times 10^{-6}$ の範囲で制御することができる技術である。要求性能、コスト、地域性（骨材事情）、工場に供給できる材料を考慮して、使用材料・調合を選択できる。

主な結論

- 石灰石粗骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみは、硬質砂岩砕石を使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみより小さく、粗骨材の産地による差が大きい。
- 収縮低減剤の使用量が増加するとコンクリートの乾燥収縮ひずみは小さく、膨張材の使用量が増加すると拘束膨張ひずみは大きくなり、収縮低減剤と膨張材を併用した場合はそれぞれを単体使用した場合より乾燥収縮ひずみは小さく、拘束膨張ひずみは大きくなる傾向がみられる。
- 膨張材を使用した場合の乾燥収縮ひずみおよび拘束膨張ひずみは、普通ポルトランドセメントや中熱ポルトランドセメントと比較して低熱ポルトランドセメントを使用したコンクリートが大きくなる傾向がみられる。
- コンクリートの乾燥収縮ひずみを $0 \sim 800 \times 10^{-6}$ の範囲で制御することが可能である。

*1 本店 技術研究所

*2 本店 技術研究所 材料研究室

コンクリートの乾燥収縮ひずみ制御方法に関する実験的研究

宮 野 和 樹^{*1} 梶 田 秀 幸^{*2}

要 旨

鉄筋コンクリート構造物におけるひび割れは、構造物の耐久性の低下に大きな影響を及ぼす要因であることから、コンクリートの乾燥収縮によるひび割れの制御は非常に重要である。その制御方法については、材料・調合面からの対策として、石灰石粗骨材の使用や、収縮低減剤および膨張材を適用する事例がみられる。しかし、粗骨材の種類や産地が異なる場合、収縮低減剤と膨張材を併用した場合、および、セメント種類が異なる場合において、コンクリートの乾燥収縮ひずみや圧縮強度に及ぼす影響に不明な点が多い。そこで、本研究では、目標性能に応じてコンクリートの乾燥収縮ひずみを制御できる技術の開発を目的に、粗骨材種類、収縮低減剤および膨張材の組合せと使用量、セメント種類の影響を実験的に検討した。

その結果、石灰石粗骨材、収縮低減剤、膨張材の組合せ、収縮低減剤および膨張材の使用量、ならびに、セメント種類の変更により、コンクリートの乾燥収縮ひずみを $0\sim 800\times 10^{-6}$ の範囲で制御する技術を確立することができた。

キーワード コンクリート／収縮低減／石灰石粗骨材／収縮低減剤／膨張材／セメント種類／
乾燥収縮ひずみ／拘束膨張ひずみ／圧縮強度

目 次

- | | |
|---------------------|------------------------|
| 1. はじめに | 4. 収縮低減剤および膨張材の影響（実験2） |
| 2. 全体概要 | 5. セメント種類の影響（実験3） |
| 3. 石灰石粗骨材種類の影響（実験1） | 6. まとめ |

EXPERIMENTAL STUDY ON METHOD OF CONTROL DRYING SHRINKAGE

Kazuki MIYANO

Hideyuki KAJITA

Synopsis:

The crack of the concrete effects a great deal of influences on the durability of reinforced concrete structures. But the various factors of many materials of concrete make the mechanical behaviors of concrete hard to grasp. The purpose of this research is the technical development which can control the drying shrinkage strain of the concrete. So influences of the type of the coarse aggregate, the amount of shrinkage reducing agent, the amount of expansive additive, and the type of cement are considered experimentally.

As the results, it has become possible to establish the technique which controls the drying shrinkage strain of the concrete at the reach of $0\sim 800\times 10^{-6}$ by the combination of limestone coarse aggregate, shrinkage reducing agent and expansive additive, amount of shrinkage reducing agent and expansive additive, and type of cement.

* 1 本店 技術研究所

* 2 本店 技術研究所 材料研究室

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮による収縮ひび割れは、建築物の耐久性の低下や美観に大きな影響を及ぼす要因であり、従来から様々な取り組みがなされ、その制御についての社会的要請は年々高まっている。また、2009年に改定された日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事¹⁾（以下、JASS 5 と略記する）においては、計画供用期間の級が長期および超長期では、コンクリートの乾燥収縮率を 8×10^{-4} 以下に規定しており、その規定を満足するコンクリートを使用する必要がある。その対応については、日本建築学会から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）・同解説等²⁾³⁾が示され、最近では、材料、調合面からの対策として、石灰石粗骨材の使用や、収縮低減剤および膨張材を適用する事例が多くみられる。しかしながら、粗骨材の種類や産地が異なる場合、収縮低減剤と膨張材を併用した場合、あるいはセメント種類が異なる場合に、これらの使用材料がコンクリートの乾燥収縮ひずみや圧縮強度に及ぼす影響に不明な点が多い。

そこで本研究ではコンクリートの乾燥収縮ひずみを $0 \sim 800 \times 10^{-6}$ の範囲で制御する技術の開発を目的に、粗骨材種類、収縮低減剤および膨張材の使用量、セメント種類の影響を実験的に検討した。

2. 全体概要

2.1 コンクリートの乾燥収縮ひずみ

本研究におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみは、膨張材の影響を加味するために、拘束膨張ひずみを考慮した乾燥収縮ひずみ（以下、拘束膨張・乾燥収縮ひずみと略記する）にて評価することとした。これは、材齢 7 日の拘束ひずみに、JIS A 1129-3 による各乾燥期間の乾燥収縮ひずみを加えた値と定義した。なお、本報告では、これ以降、ひずみの膨張側を正、収縮側を負で示す。

収縮を低減したコンクリートの種類と目標乾燥収縮ひずみを表 1 に示す。表には、比較として一般的なコンクリートについても併せて示す。

2.2 実験概要

本研究は、以下の 3 つの実験について検討した。

実験 1：石灰石粗骨材種類の影響

実験 2：収縮低減剤および膨張材の影響

実験 3：セメント種類の影響

実験 1 では、関東地方のレディーミクストコンクリート工場で使用されているものを中心に異なる産地の複数の石灰石粗骨材を用いて乾燥収縮ひずみを比較し、その影響を確認した。また、硬質砂岩砕石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみとの比較も実施した。

実験 2 では、収縮低減剤および膨張材を単体または併用した場合の強度性状および膨張・収縮性状に与える影響を確認した。

実験 3 では、セメントを普通ポルトランドセメント、中熱ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメントとし、収縮低減剤および膨張材を単体または併用した場合の強度性状および膨張・収縮性状に与える影響を確認した。

本報告は、これらの実験結果^{4)~6)}をまとめ、コンクリートの乾燥収縮ひずみの制御技術を整理したものである。

3. 石灰石粗骨材種類の影響（実験 1）

3.1 実験 1 の概要

要因と水準を表 2 に示す。実験に使用した粗骨材は、関東地方のレディーミクストコンクリート工場で使用されているものを中心に異なる産地の 9 種類の石灰石粗骨材と比較用の硬質砂岩砕石 1 種類とした。

使用材料を表 3 に、粗骨材の物性値を表 4 に示す。粗骨材以外の材料は同一とした。コンクリートの調合を表 5 に示す。水セメント比 50%、単位水量 170 kg/m^3 、粗骨材

表 1 コンクリートの種類と目標乾燥収縮ひずみ

コンクリートの種類	目標乾燥収縮ひずみ ^{*1}
一般的なコンクリート	-800×10^{-6} 程度
高耐久コンクリート	-400×10^{-6}
低収縮コンクリート	-250×10^{-6}
収縮ゼロコンクリート	$0 \sim -100 \times 10^{-6}$

^{*1}: 拘束膨張・乾燥収縮ひずみとし、材齢 7 日の拘束膨張ひずみに JIS A 1129-3 による乾燥期間 182 日の乾燥収縮ひずみを加えた値とする。

表 2 要因と水準（実験 1）

要因	水準
粗骨材の種類	石灰石粗骨材 No.1~9 硬質砂岩粗骨材 No.10

表 3 使用材料（実験 1）

材料	記号	種類・主成分・物性等
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント、密度 3.16 g/cm^3
細骨材	S1	川砂、表乾密度 2.59 g/cm^3 、吸水率 1.88%
	S2	砕砂、表乾密度 2.63 g/cm^3 、吸水率 1.16%
粗骨材	G	表 4 参照
混和剤	Ad	高性能 AE 減水剤、ポリカルボン酸系

表 4 粗骨材の物性値

粗骨材 No.	種類	表乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	粒形判定実積率 (%)	粗粒率
1	石灰石	2.69	0.55	60.7	6.71
2		2.69	0.47	60.0	6.65
3		2.69	0.47	60.0	6.64
4		2.70	0.31	61.3	6.41
5		2.69	0.79	59.8	6.58
6		2.70	0.38	59.3	6.63
7		2.70	0.37	59.5	6.65
8		2.70	0.56	59.1	6.61
9		2.70	0.56	59.1	6.60
10	硬質砂岩	2.72	0.56	59.2	6.69

表5 調査（実験1）

試料 No.	粗骨材 No.	W/C (%)	s/a (%)	Vg (l/m ³)	単位量(kg/m ³)					Ad (C×%)
					W	C	S1	S2	G	
1	1	50	47.4	356	170	340	582	249	956	0.6
2	2								956	
3	3								956	
4	4								961	
5	5								956	
6	6								961	
7	7								961	
8	8								961	
9	9								961	
10	10								965	

表6 試験項目および試験方法（実験1）

試験項目		試験方法・測定方法・備考	
フレッシュ コンク リート	スランブ	JIS A 1101	目標18±2.5cm
	空気量	JIS A 1128	目標4.5±1.5%
	コンクリート温度	JIS A 1156	
硬化 コンク リート	圧縮強度	JIS A 1108	標準養生材齢28日
	乾燥収縮ひずみ	JIS A 1129-3	供試体の成形・養生・保存はJIS A 1129-3 付属書Aによる

の絶対容積 356 l/m³、混和剤の添加率を C×0.6%一定とした。

試験項目および試験方法を表 6 に示す。目標値は、スランブを 18±2.5cm、空気量を 4.5±1.5%とした。ただし、調査条件を一定とするため、スランブは目標値を満足しない場合であっても供試体作製が可能であれば、採用することとした。コンクリートの乾燥収縮ひずみの供試体の成形・養生・保存方法は、JIS A 1129-3 付属書 A により実施し、測定は JIS A 1129-3 によった。

3.2 実験1の結果および考察

フレッシュコンクリートおよび圧縮強度試験結果を表 7 に示す。スランブは一部において目標値を満足しなかったが、供試体作製が可能であったため供試体および試験体を採取した。空気量は目標値を満足した。また、圧縮強度は、44.5～49.8N/mm² となり、すべて同程度となった。

コンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を図 1 に、乾燥期間 182 日の乾燥収縮ひずみを表 8 に示す。乾燥期間 182 日のコンクリートの乾燥収縮ひずみは、硬質砂岩粗骨材を用いた試料 No.10 が-793×10⁻⁶、石灰石粗骨材を用いた試料 No.5 および No.8 が-700×10⁻⁶ 台となり、それ以外の試料は-600～-670×10⁻⁶ の範囲となった。石灰石粗骨材の平均値は-664×10⁻⁶ となり、硬質砂岩粗骨材と比較すると-130×10⁻⁶ 程度小さい値となった。

3.3 実験1のまとめ

異なる産地の複数の石灰石粗骨材、および、硬質砂岩碎石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみを比較した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 石灰石粗骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみは、硬質砂岩碎石を使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみより小さくなる。
- 2) 石灰石粗骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮ひず

表7 フレッシュコンクリートおよび圧縮強度試験結果

試料 No.	スランブ (cm)	空気量 (%)	コン リート 温度(°C)	標準養生 材齢28日 圧縮強度 (N/mm ²)
1	18.0	3.1	22.0	48.9
2	18.0	3.5	22.5	44.5
3	19.0	3.2	22.0	45.8
4	18.5	3.6	22.5	48.3
5	8.5	3.7	22.5	49.0
6	16.5	3.7	22.0	49.8
7	18.5	3.5	22.5	49.1
8	10.5	3.7	22.5	48.0
9	18.0	3.4	22.5	47.9
10	17.0	3.2	22.0	46.1

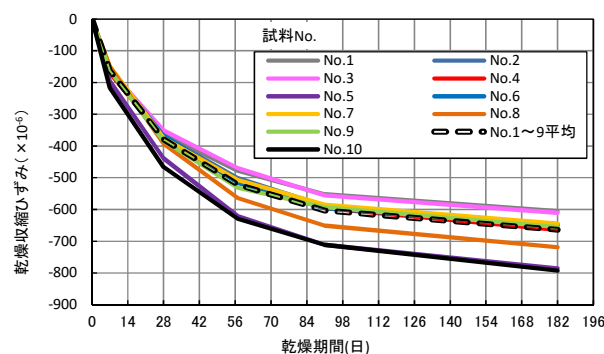


図1 コンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果（実験1）

表8 乾燥期間 182 日のコンクリートの乾燥収縮ひずみ

試料 No.	乾燥期間182日の 乾燥収縮ひずみ(×10 ⁻⁶)
1	-605
2	-646
3	-610
4	-664
5	-785
6	-651
7	-644
8	-719
9	-655
10	-793

表9 要因と水準（実験2）

要因	水準
収縮低減剤の使用量(kg/m ³)	0, 6, 10, 14
膨張材の使用量(kg/m ³)	0, 20, 25
膨張材種類	・石灰系(Ex①) ・エトリンガイト・石灰複合系(Ex②)

表10 要因と水準の組合せ（実験2）

組合せ No.	分類	試料名	収縮 低減剤 使用量*1 (kg/m ³)	膨張材 使用量*1 (kg/m ³)	膨張材 種類
2-1	基準	N	0	0	—
2-2		Sr6	6	0	—
2-3		Sr10	10	0	—
2-4		Sr14	14	0	—
2-5	膨張材 単体	Ex②20	0	20	Ex②
2-6		Ex②25	0	25	Ex②
2-7	収縮低減剤 と膨張材の 併用	Ex①20-Sr14	14	20	Ex①
2-8		Ex②20-Sr14	14	20	Ex②
2-9		Ex②25-Sr14	14	25	Ex②

*1: 収縮低減剤は水と置換、膨張材はセメントと置換する

みは、粗骨材の産地による差が大きい。

4. 収縮低減剤および膨張材の影響（実験 2）

4.1 実験 2 の概要

要因と水準を表 9 に、要因と水準の組合せを表 10 に示す。実験の要因は、収縮低減剤の使用量、膨張剤の使用量、膨張材種類とし、それらを組み合わせ、9 調合について比較検討した。

使用材料を表 11 に示す。水、セメント、細骨材、混和剤は実験 1 と同様のものを、粗骨材は実験 1 の No.4 の粗骨材を用いた。実験 2 の基準調合を表 12 に示す。収縮低減剤、膨張材を使用する場合は、収縮低減剤は水と置換し、膨張材はセメントと置換した。

試験項目および試験方法を表 13 に示す。目標値は、スランプを $18 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量を $4.5 \pm 1.5\%$ とした。コンクリートの乾燥収縮ひずみの測定は実験 1 と同様の方法で実施し、拘束膨張ひずみは JIS A 6202 付属書 2「膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法」B 法（以下、B 法と略記する）により実施した。

4.2 実験 2 の結果および考察

(1) フレッシュコンクリート試験および圧縮強度

フレッシュコンクリート試験結果を表 14 に示す。スランプ、空気量は、すべての調合において目標値を満足した。

コンクリートの圧縮強度試験結果を図 2 に示す。図 2 には、試料名 N に対する各調合の圧縮強度比を併せて示す。材齢 28 日では、収縮低減剤単体使用で 13～15%程度、膨張材単体使用で 12～16%程度の強度低下が確認された。さらに、収縮低減剤と膨張材を併用すると 24～34%程度の強度低下が確認された。材齢 91 日では、いずれの調合も材齢 28 日より試料名 N に対する強度低下は小さくなる傾向が認められた。

収縮低減剤の使用量による強度低下は、使用量 $6 \sim 14\text{kg/m}^3$ の範囲では大きな差異は確認されなかったが、膨張材では、使用量 20kg/m^3 に比べて 25kg/m^3 の強度低下が 5%程度大きくなることが確認された。

膨張材を内割で、かつ収縮低減剤と併用した場合には、強度低下が大きくなる傾向にあるため、実際の運用にあたっては、事前に試験練りにより性状を確認したうえで、W/B を変更するなどの対応を行う必要がある。

(2) 乾燥収縮ひずみ

JIS A 1129-3 によるコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を図 3 に示す。収縮低減剤や膨張材を使用しない試料名 N の乾燥収縮ひずみは、 -600×10^{-6} 程度となった。膨張材を単体使用した試料名 Ex②20, Ex②25 では -580×10^{-6} 程度、収縮低減剤を単体使用した試料名 Sr6, Sr10, Sr14 では、使用量に応じて差はあるが $-390 \sim -450 \times 10^{-6}$ 程度、収縮低減剤と膨張材を併用した試料名 Ex①20-Sr14, Ex②20-Sr14, Ex②25-Sr14 では、 $-320 \sim -330 \times 10^{-6}$ 程度と

表 11 使用材料（実験 2）

材料	記号	種類・主成分・物性等
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm^3
細骨材	S1	川砂、表乾密度 2.59g/cm^3 、吸水率 1.88%
	S2	砕砂、表乾密度 2.63g/cm^3 、吸水率 1.16%
粗骨材	G	石灰石、表乾密度 2.70g/cm^3 、吸水率 0.31%
混和剤	高性能 AE 減水剤	Ad ポリカルボン酸系
	収縮低減剤	Sr ポリエーテル誘導体
混和材	膨張材	Ex① 石灰系（低添加型）
		Ex② エトリンガイト・石灰複合系（低添加型）

表 12 調合（実験 2）

W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				
		W	C	S1	S2	G
50	48.3	170	340	583	252	961

表 13 試験項目および試験方法（実験 2）

試験項目		試験方法・測定方法・備考	
フレッシュコンクリート	スランプ	JIS A 1101	目標 $18 \pm 2.5\text{cm}$
	空気量	JIS A 1128	目標 $4.5 \pm 1.5\%$
	コンクリート温度	JIS A 1156	
硬化コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108	標準養生材齢 7, 28, 91 日
	乾燥収縮ひずみ	JIS A 1129-3	測定時期：脱型時、乾燥開始時、乾燥開始後 1, 4, 8, 13, 26 週 供試体の成形・養生・保存は JIS A 1129-3 付属書 A による
	拘束膨張及び収縮ひずみ	JIS A 6202 付属書 2 B 法	測定時期：打込み前、脱型時、材齢 2, 7 日、乾燥開始後 1, 4, 8, 13, 26 週

表 14 フレッシュコンクリート試験結果（実験 2）

試料名	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)
N	16.5	4.7	22.0
Sr6	18.5	4.7	22.0
Sr10	19.5	5.0	22.0
Sr14	18.5	4.4	22.0
Ex②20	17.5	5.1	22.0
Ex②25	19.0	5.5	22.0
Ex①20-Sr14	20.0	4.6	22.0
Ex②20-Sr14	19.5	4.8	22.0
Ex②25-Sr14	19.5	4.6	22.0

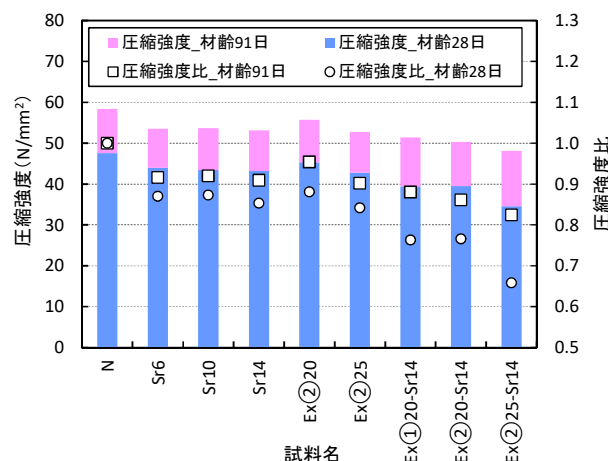


図 2 コンクリートの圧縮強度試験結果（実験 2）

なり、収縮低減剤や膨張材による収縮低減効果が認められた。

収縮低減剤・膨張材の使用量とコンクリートの乾燥収縮ひずみの低減率（以下、乾燥収縮ひずみ低減率と略記する）の関係を図 4 に示す。図 4 の収縮低減剤使用量の図における乾燥収縮ひずみ低減率について、膨張材を併用しない調合（□）は各調合の試料名 N に対する乾燥収縮ひずみ減少量の割合とし、膨張材を使用した調合（◇、△）は同一膨張材使用量で収縮低減剤を併用していない調合に対する乾燥収縮ひずみ減少量の割合とした。収縮低減剤の使用量が増加すると乾燥収縮ひずみ低減率も大きくなる傾向が確認され、 14kg/m^3 では 35～45% 程度となった。膨張材を併用しない調合の場合、 $6\sim 14\text{kg/m}^3$ の範囲における乾燥収縮ひずみ低減率の増加傾向は、 10kg/m^3 程度からやや緩やかになる傾向を示した。

図 4 の膨張材使用量の図における乾燥収縮ひずみ低減率について、収縮低減剤を併用しない調合（●）は各調合の試料名 N に対する乾燥収縮ひずみ減少量の割合とし、収縮低減剤を併用した調合（◆）は同一収縮低減剤使用量で膨張材を使用していない調合に対する乾燥収縮ひずみ減少量の割合とした。膨張材のみを使用した場合、乾燥収縮ひずみ低減率は、2～5% 程度となり、低減効果がほとんど確認されなかった。収縮低減剤と併用した場合、乾燥収縮ひずみ低減率は、15% 程度となり、膨張材のみを使用した場合より低減効果が大きいことが確認された。

(3) 拘束膨張ひずみ

拘束膨張ひずみの測定結果を図 5 に示す。膨張材を使用した各調合の膨張ひずみは、膨張材単体使用 20kg/m^3 で 200×10^{-6} 程度、 25kg/m^3 で 400×10^{-6} 程度と膨張材使用量による差が確認された。収縮低減剤 14kg/m^3 と膨張材を併用したものは、膨張材単体使用に比べて膨張ひずみが大きくなる傾向がみられ、試料名 Ex②25-Sr14 では 500×10^{-6} 程度の膨張ひずみとなることが確認された。

(4) 拘束膨張・乾燥収縮ひずみ

拘束膨張・乾燥収縮ひずみの測定結果（実験 2）を図 6 に示す。膨張材を単体使用した試料名 Ex②20 は -366×10^{-6} となり、表 1 に示す「高耐久コンクリート」に、試料名 Ex②25 は -187×10^{-6} となり「低収縮コンクリート」に分類できる。収縮低減剤と膨張材を併用した試料名 Ex①20-Sr14, Ex②20-Sr14, Ex②25-Sr14 は、いずれも -100×10^{-6} 以下となっていることから「収縮ゼロコンクリート」となるよう制御できる。なお、試料名 Ex②20-Sr14, Ex②25-Sr14 は、乾燥期間 182 日の乾燥収縮ひずみよりも、初期に導入された膨張ひずみのほうが大きく、乾燥期間中も常時膨張側で収縮ひずみが推移していたことがわかる。

4.3 実験 2 のまとめ

収縮低減剤および膨張材を単体または併用して用いたコンクリートの強度性状および膨張・収縮性状に与える影響を確認した結果、以下のことが明らかとなった。

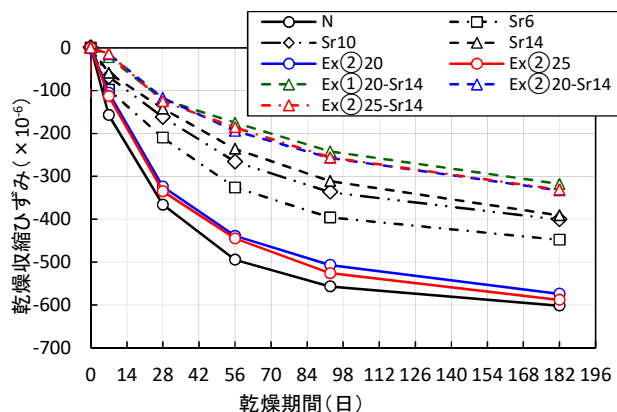


図 3 コンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果（実験 2）

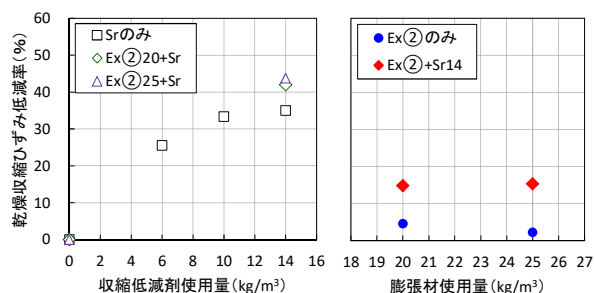


図 4 収縮低減剤・膨張材の使用量とコンクリートの乾燥収縮ひずみ低減率の関係

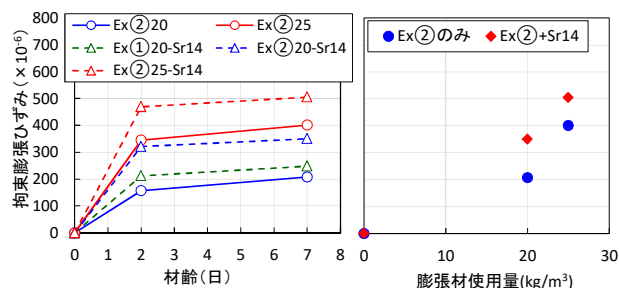


図 5 拘束膨張ひずみの測定結果（実験 2）

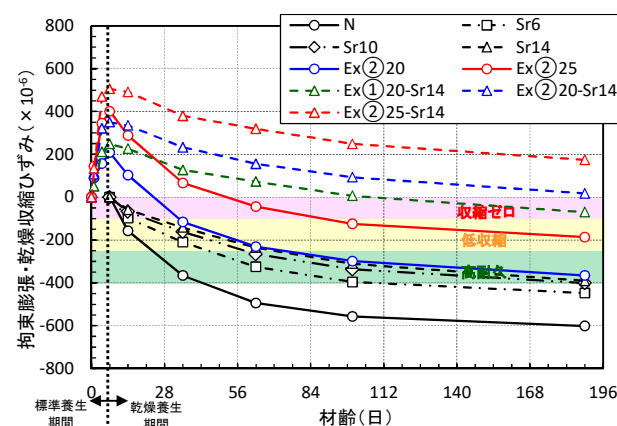


図 6 拘束膨張・乾燥収縮ひずみの測定結果（実験 2）

- 1) 圧縮強度は、収縮低減剤単体使用、膨張材単体使用、いずれの場合も、使用しない場合より 15% 程度低下する傾向が認められる。また、収縮低減剤と膨張材を併用した場合、使用しない場合より 24～34% 程度低下す

る傾向が認められる。

- 2) コンクリートの乾燥収縮ひずみは、収縮低減剤の使用量が増加すると乾燥収縮ひずみ低減率は大きくなる傾向が認められる。また、膨張材単体を使用した場合、膨張材の使用量が増加しても乾燥収縮ひずみ低減率は同程度となり、低減効果が認められない。ただし、膨張材と収縮低減剤を併用した場合、膨張材のみを使用した場合より乾燥収縮ひずみ低減率が大きくなる傾向が認められる。
- 3) 拘束膨張ひずみは、膨張材単体を使用した場合、使用量 20kg/m^3 で 200×10^{-6} 程度、 25kg/m^3 で 400×10^{-6} 程度となる。また、膨張材と収縮低減剤を併用した場合、膨張材単体使用と比較して拘束膨張ひずみが大きくなる傾向が認められる。
- 4) 拘束膨張ひずみを考慮した乾燥収縮ひずみは、収縮低減剤と膨張材の使用量を変化させることにより、 $-400 \sim 200 \times 10^{-6}$ 程度に制御することが可能である。

表 15 要因と水準（実験 3）

要因	水準
セメント種類	・普通ポルトランドセメント ・中庸熱ポルトランドセメント ・低熱ポルトランドセメント
収縮低減剤の使用量(kg/m^3)	0, 6, 14
膨張材の使用量(kg/m^3)	0, 20, 25
圧縮強度試験用供試体の型枠脱型時期	1日後, 3日後

表 16 要因と水準の組合せ（実験 3）

組合せ No.	試料名	セメント種類	収縮低減剤使用量 ^{*1} (kg/m^3)	膨張材使用量 ^{*1} (kg/m^3)	圧縮強度試験用供試体の型枠脱型時期
3-1	N	普通	0	0	1日後
3-2	M	中庸熱	0	0	1日後
3-3	L	低熱	0	0	1日後
3-4	N-Ex20	普通	0	20	1日後 3日後
3-5	M-Ex20	中庸熱	0	20	1日後 3日後
3-6	M-Ex25	中庸熱	0	25	1日後 3日後
3-7	L-Ex20	低熱	0	20	1日後 3日後
3-8	L-Ex25	低熱	0	25	1日後 3日後
3-9	L-Ex20-Sr6	低熱	6	20	1日後 3日後
3-10	L-Ex25-Sr14	低熱	14	20	1日後 3日後

*1: 収縮低減剤は水と置換、膨張材はセメントと置換する

表 17 使用材料（実験 3）

材料	記号	種類・主成分・物性等	
水	W	上水道水	
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	
	L	低熱ポルトランドセメント, 密度 3.22g/cm^3	
細骨材	S1	川砂, 表乾密度 2.59g/cm^3 , 吸水率 1.88%	
	S2	砕砂, 表乾密度 2.63g/cm^3 , 吸水率 1.00%	
粗骨材	G	石灰石, 表乾密度 2.69g/cm^3 , 吸水率 0.57%	
混和剤	高性能 AE減水剤	Ad	ポリカルボン酸系
	収縮低減剤	Sr	ポリエーテル誘導体
混和材	膨張材	Ex	エトリンガイト・石灰複合系 (低添加型)

5. セメント種類の影響（実験 3）

5.1 実験 3 の概要

要因と水準を表 15 に、要因と水準の組合せを表 16 に示す。実験の要因は、セメント種類、収縮低減剤の使用量、膨張材の使用量、圧縮強度試験用供試体の型枠脱型時期とし、それらを組合せ、10 割合について比較検討した。

使用材料を表 17 に示す。中庸熱ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメント以外は、実験 2 と同様の材料を用いた。割合を表 18 に示す。

試験項目および試験方法を表 19 に示す。目標値は、ス

表 18 割合（実験 3）

試料名	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)					Sr ^{*1} (kg/m^3)
			W	C	S1	S2	G	
N	50	47.3	170	340	582	249	958	0
M		47.5		340	586	251		0
L		47.5		340	586	251		0
N-Ex20		47.3		320	582	249		20
M-Ex20		47.5		320	586	251		20
M-Ex25		47.5		315	586	251		25
L-Ex20		47.5		320	586	251		20
L-Ex25		47.5		315	586	251		25
L-Ex20-Sr6		47.5		320	586	251		20
L-Ex20-Sr14		47.5		320	586	251		20

*1: 収縮低減剤は水と置換する

表 19 試験項目および試験方法（実験 3）

試験項目		試験方法・測定方法・備考	
フレッシュコンクリート	スランブ	JIS A 1101	目標 $18 \pm 2.5\text{cm}$
	空気量	JIS A 1128	目標 $4.5 \pm 1.5\%$
	コンクリート温度	JIS A 1156	
硬化コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108 供試体型枠脱型時期1,3日後 標準養生材齢28, 91日	
	乾燥収縮ひずみ	JIS A 1129-3 測定時期: 脱型時, 乾燥開始時, 乾燥開始後1, 4, 8, 13, 26週 供試体の成形・養生・保存はJIS A 1129-3 付属書Aによる	
	拘束膨張及び収縮ひずみ	JIS A 6202 付属書2 B法 測定時期: 打込み前, 脱型時, 材齢4, 7, 14日	

表 20 フレッシュコンクリート試験結果（実験 3）

試料名	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
N	17.0	4.5	20.0
M	19.5	4.3	20.0
L	20.0	4.1	19.5
N-Ex20	20.5	4.1	19.5
M-Ex20	19.0	4.2	21.0
M-Ex25	18.5	4.8	21.0
L-Ex20	18.0	5.3	20.5
L-Ex25	17.5	4.9	20.5
L-Ex20-Sr6	18.0	4.6	21.0
L-Ex20-Sr14	18.0	3.0	21.5

ランプを $18 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量を $4.5 \pm 1.5\%$ とした。圧縮強度は、膨張材を用いた調合については、供試体型枠の脱型時期を1日後と3日後の2水準とした。

5.2 実験3の結果および考察

(1) フレッシュコンクリート試験および圧縮強度試験

フレッシュコンクリート試験結果を表20に示す。スランプ、空気量は、すべての調合において目標値を満足した。

材齢28日の圧縮強度試験結果を図7に、材齢91日の圧縮強度試験結果を図8に示す。圧縮強度比は、同一種類のセメントおよび同一材齢で比較し、各調合の圧縮強度を試料名N, M, Lの1日後脱型の圧縮強度に対する比で示した。

材齢28日の1日後脱型の圧縮強度について、試料名N-Ex20の強度低下は2%程度となり、膨張材による圧縮強度への影響はほぼ認められなかった。それに対して、試料名M-Ex20, M-Ex25はそれぞれ7, 14%, 試料名L-Ex20, L-Ex25はそれぞれ31, 44%の強度低下となり、膨張材による圧縮強度低下の影響が認められ、使用量が多くなると強度低下が大きくなり、試料名Mより試料名Lが強度低下は大きく、セメント種類による違いも認められた。また、試料名L-Ex20-Sr6, L-Ex20-Sr14はそれぞれ39, 38%の強度低下となり、膨張材および収縮低減剤による圧縮強度への影響が認められた。

材齢28日と材齢91日の1日後脱型の圧縮強度について、セメント種類をLとし膨張材や収縮低減剤を用いたコンクリートの圧縮強度は、材齢28日では31~44%, 材齢91日では26~36%の強度低下となり、材齢91日のほうが強度低下は小さくなった。セメント種類をNやMとしたコンクリートの材齢28日と材齢91日の圧縮強度比は同程度であった。

セメント種類をLとし膨張材や収縮低減剤を用いたコンクリートの材齢28日の圧縮強度は、1日後脱型が31~44%強度低下、3日後脱型が18~27%強度低下しており、3日後脱型のほうが強度低下は小さかった。セメント種類をNやMとしたコンクリートは強度低下が同程度であった。

(2) 乾燥収縮ひずみ

JIS A 1129-3によるコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を図9に示す。乾燥期間182日の乾燥収縮ひずみについて、試料名N, M, Lは、それぞれ -568×10^{-6} 、 -565×10^{-6} 、 -602×10^{-6} となり、膨張材を 20kg/m^3 とした試料名N-Ex20, M-Ex20, L-Ex20は、それぞれ -538×10^{-6} 、 -525×10^{-6} 、 -630×10^{-6} となり、膨張材を 25kg/m^3 とした試料名M-Ex25, L-Ex25は、それぞれ -545×10^{-6} 、 -688×10^{-6} となった。試料名N, Mと比較して試料名Lを使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみが大きくなった。また、試料名L-Ex20-Sr6, L-Ex20-Sr14は、それぞれ -495×10^{-6} 、 -407×10^{-6} となり、試料名L-Ex20と比較すると130~200

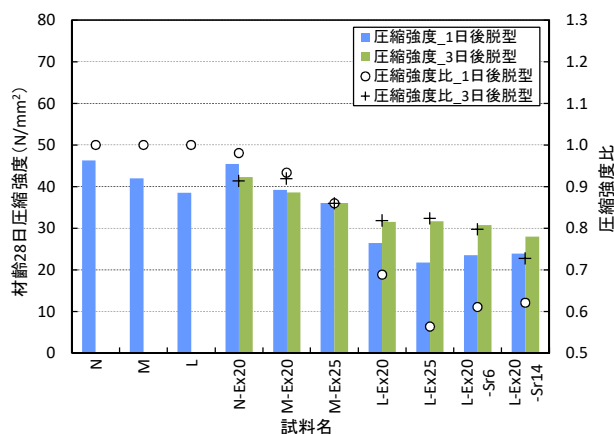


図7 材齢28日の圧縮強度試験結果

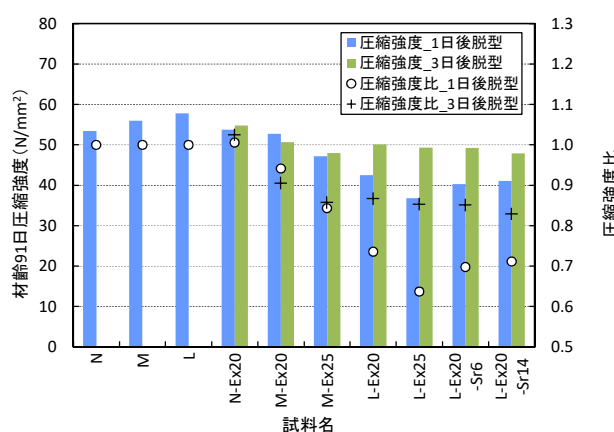


図8 材齢91日の圧縮強度試験結果

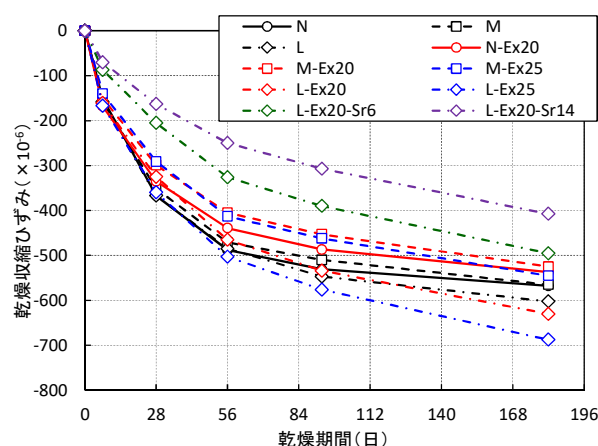


図9 コンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果 (実験3)

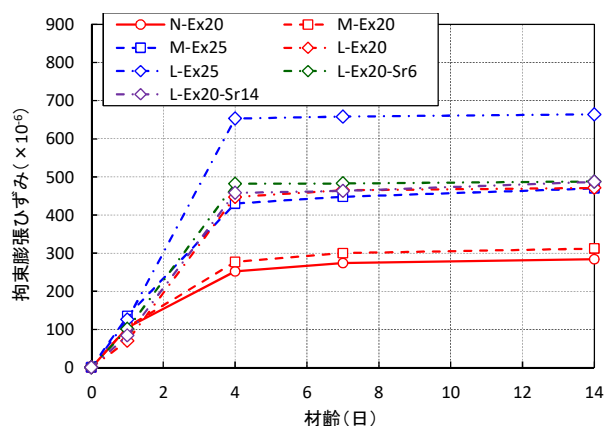


図10 拘束膨張ひずみの測定結果 (実験3)

$\times 10^{-6}$ 程度乾燥収縮率が小さく、膨張材と併用した場合でも収縮低減剤の効果が認められた。

(3) 拘束膨張ひずみ

拘束膨張ひずみの測定結果を図 10 に示す。材齢 7 日の拘束膨張ひずみについて、試料名 N-Ex20, M-Ex20, L-Ex20 は、それぞれ 274×10^{-6} , 300×10^{-6} , 465×10^{-6} となり、膨張材を 25kg/m^3 とした試料名 M-Ex25, L-Ex25 は、それぞれ 448×10^{-6} , 658×10^{-6} となった。試料名 N と M は同程度となり、試料名 L は拘束膨張ひずみが大きくなった。また、試料名 L-Ex20-Sr6, L-Ex20-Sr14 は、それぞれ 483×10^{-6} , 463×10^{-6} と、試料名 L-Ex20 と同程度となり、収縮低減剤による拘束膨張ひずみへの影響は認められなかった。

(4) 拘束膨張・乾燥収縮ひずみ

拘束膨張・乾燥収縮ひずみの測定結果を図 11 に示す。試料名 N, M, L の $-565 \sim -602 \times 10^{-6}$ 程度に対して、試料名 N-Ex20 は -264×10^{-6} となり表 1 に示す「高耐久コンクリート」に、試料名 M-Ex20, L-Ex20 は、それぞれ -225×10^{-6} , -165×10^{-6} となり「低収縮コンクリート」に、試料名 M-Ex25, L-Ex25, L-Ex20-Sr6, L-Ex20-Sr14 は、それぞれ -97×10^{-6} , -30×10^{-6} , -12×10^{-6} , 56×10^{-6} となり「収縮ゼロコンクリート」となるよう制御できる。

5.3 実験 3 のまとめ

セメントを普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメントとし、収縮低減剤および膨張材を単体または併用して用いたコンクリートの強度性状および膨張・収縮性状に与える影響を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 1 日後脱型の圧縮強度について、膨張材による圧縮強度への影響は普通ポルトランドセメントではほとんどみられず、中庸熱ポルトランドセメントおよび低熱ポルトランドセメントでは 7~44% 程度の強度低下が認められる。さらに、低熱ポルトランドセメントを使用し、膨張材および収縮低減剤を併用した場合も 40% 程度の強度低下が認められる。
- 2) 1 日後脱型と 3 日後脱型の圧縮強度を比較すると、セメント種類を普通ポルトランドセメントや中庸熱ポルトランドセメントとした場合、膨張材の使用による強度低下率が同程度である。低熱ポルトランドセメントを使用した場合、膨張材および収縮低減剤を単体または併用した場合の強度低下率は、3 日後脱型のほうが小さい。
- 3) 膨張材単体使用の場合、普通ポルトランドセメントや中庸熱ポルトランドセメントと比較して低熱ポルトランドセメントを使用したコンクリートのほうが $100 \sim 140 \times 10^{-6}$ 程度、乾燥収縮ひずみが大きい傾向が認められる。
- 4) 膨張材単体使用の場合の拘束膨張ひずみは、普通ポルトランドセメントと中庸熱ポルトランドセメントは同

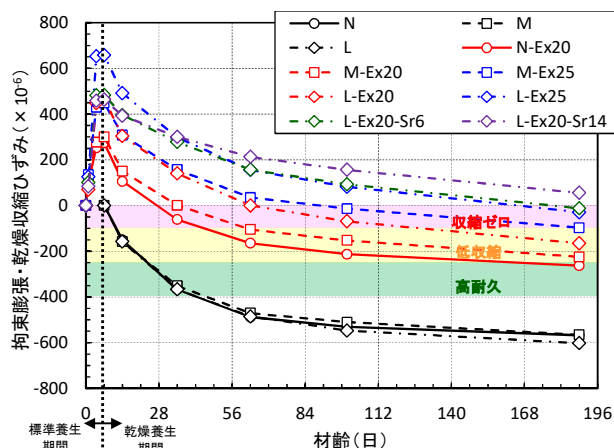


図 11 拘束膨張・乾燥収縮ひずみの測定結果（実験 3）

表 21 収縮低減したコンクリートの
目標乾燥収縮ひずみに対する材料の組合せ

目標 乾燥収縮 ひずみ ^{*1} ($\times 10^{-6}$)	乾燥収縮ひずみ低減対策材料 ^{*2}			
	石灰石 粗骨材	膨張材	収縮 低減剤	低発熱型 セメント
-800	-	-	-	-
-600	□	□	□	-
-400	◎	○	○	-
-250	◎	◎	◇	-
0~-100	◎	◎	◎	◎

*1: 拘束膨張ひずみを考慮した乾燥収縮ひずみとし、材齢 7 日の拘束膨張ひずみに JIS A 1129 による乾燥期間 182 日の乾燥収縮ひずみを加えた値とする

*2: 記号の意味 ◎: 使用する, ○: 単体使用または併用,
□: いずれかを使用, ◇: 併用する場合あり

程度となり、低熱ポルトランドセメントはそれらより $160 \sim 200 \times 10^{-6}$ 程度大きい傾向が認められる。また、収縮低減剤による拘束膨張ひずみへの影響は認められない。

- 5) 拘束膨張ひずみを考慮した乾燥収縮ひずみは、セメント種類、収縮低減剤および膨張材の使用量を変化させることにより、 $-300 \sim 50 \times 10^{-6}$ 程度に制御することが可能である。

6. まとめ

本研究ではコンクリートの乾燥収縮ひずみを制御できる技術の開発を目的に、粗骨材種類、収縮低減剤および膨張材の使用量、セメント種類の影響を実験的に検討した。

その結果、コンクリートの乾燥収縮ひずみを $0 \sim 800 \times 10^{-6}$ の範囲で制御する技術を確認することができた。収縮を低減したコンクリートの目標乾燥収縮ひずみに対する材料の組合せは表 21 のように示すことができ、要求性能、コスト、骨材事情などの地域性、レディーミクストコンクリート工場に供給できる材料等を考慮して、使用材料・調合を選択することが可能となった。

謝辞

本研究の実験を行うにあたり、竹本油脂、デンカ、BASF ジャパンにご協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

なお、本研究は、前田建設工業と、安藤ハザマ、熊谷組、佐藤工業、戸田建設、西松建設、フジタの共同研究成果の一部である。多大なご協力をいただいた関係各位の皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，日本建築学会，2009.2
- 2) 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御指針(案)・同解説，日本建築学会，2006.2
- 3) 膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する技術の現状，日本建築学会，2013.7
- 4) 浦川和也，安部弘康，野中英，梅本宗宏，木村仁治，塩田博之，梶田秀幸：コンクリートの乾燥収縮ひずみ制御方法に関する実験的研究（その 1 研究概要および粗骨材比較実験），日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），A-1，pp.671-672，2015.9
- 5) 鈴木好幸，三谷和裕，浦川和也，井戸康浩，木村仁治，飯田康介，宮野和樹，山田人司：コンクリートの乾燥収縮ひずみ制御方法に関する実験的研究（その 2 収縮低減剤および膨張材を使用したコンクリートの強度性状および膨張・収縮性状），日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），A-1，pp.673-674，2015.9
- 6) 木村仁治，浦川和也，安部弘康，野中英，梅本宗宏，塩田博之，梶田秀幸：コンクリートの乾燥収縮ひずみ制御方法に関する実験的研究（その 3 セメント種類の違いが圧縮強度および膨張・収縮性状に及ぼす影響），日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），A-1，pp.153-154，2016.8