

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

鈴木好幸^{*1}・安部弘康^{*1}

鉄筋コンクリート構造物におけるひび割れは、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ることから、その制御について従来から多くの検討がなされてきた。制御方法には、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の適用が一般化しつつある。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、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ついては不明な点が多い。そこで本研究では、これらの材料を用いて、コンクリートの調合や各物性について検討し、膨張材、収縮低減剤の添加量・組合せ、粗骨材種類およびセメント種類により、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した。

キーワード：コンクリート、乾燥収縮ひずみ、拘束膨張ひずみ、石灰石粗骨材、収縮低減剤、膨張材

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ており、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) においては、計画供用期間の級が長期および超長期では、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、学会から収縮ひび割れ制御指針等^{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、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、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ついては不明な点が多い。

そこで研究では、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を確立することを目的に、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

本研究では、目標とする乾燥収縮ひずみによって、低収縮コンクリートを表-1に示すように区分した。乾燥収縮ひずみの目標値をそれぞれ、「高耐久コンクリート」は $-400 \times$

表-1 低収縮コンクリートの区分

コンクリートの種類	目標乾燥収縮ひずみ ^{*1}
高耐久コンクリート	-400×10^{-6} 以下
低収縮コンクリート	-250×10^{-6} 以下
収縮ゼロコンクリート	$0 \sim -100 \times 10^{-6}$
標準仕様 ^{*2} コンクリート	$-650 \sim -800 \times 10^{-6}$ 程度

^{*1} 目標乾燥収縮ひずみは、拘束膨張ひずみを考慮した乾燥収縮ひずみ(材齢7日の拘束膨張ひずみと乾燥期間182日の乾燥収縮ひずみを足した値)とする。

^{*2} 参考文献2)による分類

10^{-6} 以下、「低収縮コンクリート」は -250×10^{-6} 以下、「収縮ゼロコンクリート」は $0 \sim -100 \times 10^{-6}$ 以下とした。表には、比較として標準仕様のコンクリートについても示した。

本研究におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみは、膨張材のひずみ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にて評価することとした。これは、材齢7日の拘束膨張ひずみに、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、本報告ではひずみの膨張側を正の値、収縮側を負の値で示す。

2.2 実験概要

本研究では、以下の実験 I ~ III について検討を行った。

(実験 I) 石灰石粗骨材種類の検討

(実験 II) 膨張材および収縮低減剤の影響の検討

(実験 III) セメント種類の影響の検討

実験 I 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使用して長さ変化試験等を実施し、乾燥収縮ひずみを比較し、その影響を確認した。実験 II では、収縮低減剤および膨張材を単体使用および併用し、強度性状および膨張・収縮性状に与える影響を検討した。

*1 建築研究第二部

実験Ⅲでは、セメント種類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および低熱ポルトランドセメントとし、セメント種類が強度性状および膨張・収縮性状に与える影響を検討した。

本報告は、以上の実験Ⅰ～Ⅲを通して、乾燥収縮ひずみを目標性能に応じて制御するための検討結果を整理したものである。

3. 実験Ⅰ（石灰石粗骨材種類の検討）

3.1 実験Ⅰの概要

実験Ⅰでは、異なる産地の石灰石粗骨材が乾燥収縮ひずみに与える影響について検討し、乾燥収縮ひずみを比較し、その影響を確認した。

3.2 使用材料およびコンクリート調合

使用材料を表-2に、粗骨材の物性値を表-3に示す。実験に使用した粗骨材は、関東近辺を中心とした入手可能な9種類の石灰石粗骨材と比較用の硬質砂岩粗骨材である。

コンクリートの調合を表-4に示す。調合条件は、水セメント比を50%、単位水量を170kg/m³とし、粗骨材の絶対容積を356ℓ/m³で統一した。スランプと空気量の目標値は、それぞれ18±2.5cmと4.5±1.5%とした。

3.3 試験項目

試験項目を表-5に示す。乾燥収縮ひずみは、JIS A 1129-3 ダイアルゲージ法にて測定し、同時に重量変化を測定した。フレッシュコンクリートの性状は、調合条件を一定とするため、スランプ値が目標値を外れても供試体作製に支障がなければ使用することとした。

3.4 結果および考察

フレッシュコンクリート試験は、一部の調合（No. 5, 8）のスランプ値が目標値を外れたが、当初の計画通り、供試体作製に支障がないことを確認して供試体に用いた。材齢28日圧縮強度は、45.8～49.0N/mm²の範囲にあり、概ね同等であった。

乾燥収縮ひずみの結果を表-6および図-1に、乾燥収縮ひずみと重量変化率の関係を図-2に示す。乾燥期間182日の乾燥収縮ひずみをみると、硬質砂岩粗骨材を用いたNo.10は -793×10^{-6} であるのに対して、石灰石粗骨材を用いた調合では、一部のNo.5, 8が -700×10^{-6} を超えているが、その他は $-600 \sim -670 \times 10^{-6}$ の範囲であった。石灰石の平均値を見ると -664×10^{-6} であり、比較用の硬質砂岩と比較して -129×10^{-6} 小さい値となった。乾燥収縮ひずみと重量変化率との関係を見ると、硬質砂岩粗骨材を用いたNo.10に対して、石灰石粗骨材を用いた全ての調合で、重量変化率に対する乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向であった。

表-2 実験Ⅰ 使用材料

種類	詳細
水(W)	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(S)	S1：川砂，密度2.59 g/cm ³ ，吸水率1.88% S2：砕砂，密度2.63 g/cm ³ ，吸水率1.16%
粗骨材(G)	表-3 参照
混和剤(Ad)	AE減水剤，空気量調整剤

表-3 実験Ⅰ 粗骨材の物性値

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-4 実験Ⅰ コンクリートの調合

調合	W/C (%)	s/a (%)	Vg (ℓ/m ³)	単位量(kg/m ³)					Ad* (c%)	
				W	C	S1	S2	G		
1~3, 5	50	47.4	356	170	340	582	249	956	0.6	
4, 6~9										961
10										965

*Adの添加量は一定とした。

表-5 実験Ⅰ 試験項目

試験項目	詳細
スランプ	JIS A 1101 (目標値18.0±2.5cm)
空気量	JIS A 1128 (目標値4.5±1.5%)
コンクリート温度	JIS A 1156
乾燥収縮ひずみ	JIS A 1129-3 (ダイヤルゲージ法)にて測定、同時に重量変化を測定
圧縮強度	JIS A 1108

表-6 実験Ⅰ 乾燥収縮ひずみ測定の結果

No.	種類	乾燥収縮ひずみ (×10 ⁻⁶)				
		7日	28日	57日	91日	182日
1	石灰石	-158	-362	-478	-552	-605
2		-169	-368	-501	-588	-646
3		-161	-350	-470	-556	-610
4		-169	-374	-513	-595	-664
5		-195	-438	-621	-712	-785
6		-156	-367	-516	-596	-651
7		-149	-375	-507	-585	-644
8		-150	-392	-564	-651	-719
9		-164	-383	-531	-593	-655
10	硬質砂岩	-216	-466	-629	-711	-793
石灰石平均		-163	-379	-522	-603	-664

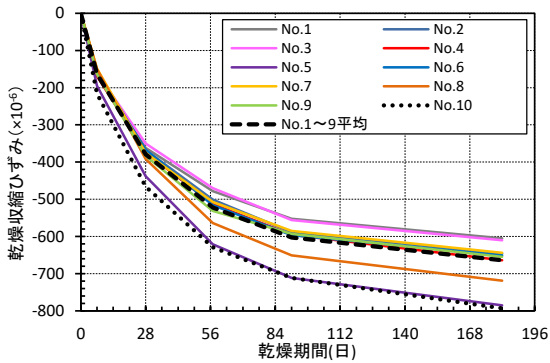


図-1 実験Ⅰ 乾燥収縮ひずみ測定の結果

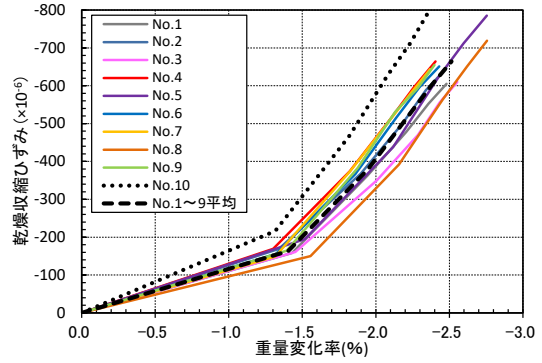


図-2 実験Ⅰ 乾燥収縮ひずみと重量変化率の関係

3.5 実験Ⅰのまとめ

実験Ⅰをまとめると以下のとおりとなる。

- 比較用の硬質砂岩粗骨材の乾燥収縮ひずみ -793×10^{-6} に対して、石灰石粗骨材の乾燥収縮ひずみは、平均で 129×10^{-6} 小さくなっており、石灰石粗骨材使用により乾燥収縮ひずみを低減できる。
- 石灰石粗骨材の乾燥収縮ひずみは、最大値と最小値の差は 180×10^{-6} 程度あり、同じ石灰石粗骨材でも産地によってコンクリートの乾燥収縮ひずみが大きく異なることを確認した。

4. 実験Ⅱ (収縮低減剤および膨張材の影響の検討)

4.1 実験Ⅱの概要

実験Ⅱでは、収縮低減剤および膨張材を単体使用ならびに併用したコンクリートの強度性状および膨張・収縮性状について比較検討した。

4.2 使用材料およびコンクリート調査

実験Ⅱの使用材料を表-7に示す。実験に使用したコンクリートの調査および使用材料は、実験Ⅰで示した石灰石粗骨材を用いたNo.4を基準調査Nとし、表-7に示した収縮低減剤および膨張材を単体使用または併用した。

4.3 要因、水準および試験項目

実験の要因と水準を表-8に示す。調査は、Nを基準調査とし、収縮低減剤 (6, 10, 14kg/m³) を単体使用した調査、膨張材 (20, 25kg/m³) を単体使用した調査および収縮低減剤 (14kg/m³) と膨張材 (20, 25kg/m³) を併用した調査の計9調査とした。収縮低減剤は単位水量の一部として計量し、膨張材は単位セメント量の一部として内割置換した。

試験項目を表-9に示す。コンクリートの乾燥収縮ひずみの測定は、JIS A 1129-3ダイヤルゲージ法に準拠し、拘束膨張ひずみの測定は、膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法 JIS A 6202 付属書 2 B 法 (以下、B 法と略記) に準拠して実施した。な

表-7 実験Ⅱ 使用材料

種類	詳細
収縮低減剤 (Sr)	ポリエーテル誘導体
膨張材 (Ex)	Exa: 石灰系 (低添加型)
	Exb: エリガト・石灰複合系 (低添加型)

*水、セメント、細骨材等の材料は、実験Ⅰと同様。

*粗骨材は、実験ⅠのNo.4を使用した。

表-8 実験Ⅱ 実験の要因と水準

No.	分類	調査記号	収縮低減剤量 (kg/m ³)	膨張材量 (kg/m ³)
1	基準	N	0	0
2	収縮低減剤 単体	Sr6	6	0
3		Sr10	10	0
4		Sr14	14	0
5	膨張材 単体	Exb20	0	20
6		Exb25	0	25
7	併用	Exa20-Sr14	14	20
8		Exb20-Sr14	14	20
9		Exb25-Sr14	14	25

表-9 実験Ⅱ 試験項目

試験項目	詳細
圧縮強度	JIS A 1108 測定材齢: 1, 4, 13 週
乾燥収縮ひずみ	JIS A 1129-3 ダイヤルゲージ法 測定材齢: 脱型時, 基長, 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
拘束膨張ひずみ および乾燥収縮ひずみ	JIS A 6202 付属書 2 B 法 測定材齢: 打込み前, 脱型時, 2, 7 日, 乾燥開始後 1, 4, 8, 13, 26 週

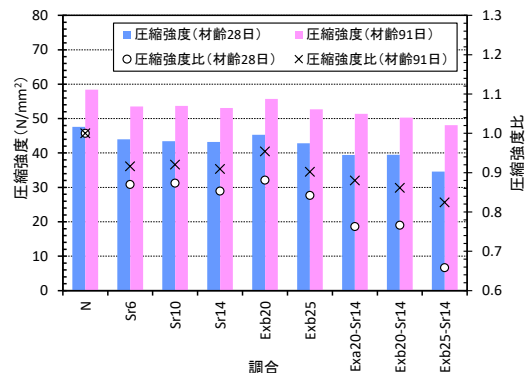


図-3 実験Ⅱ 圧縮強度試験の結果

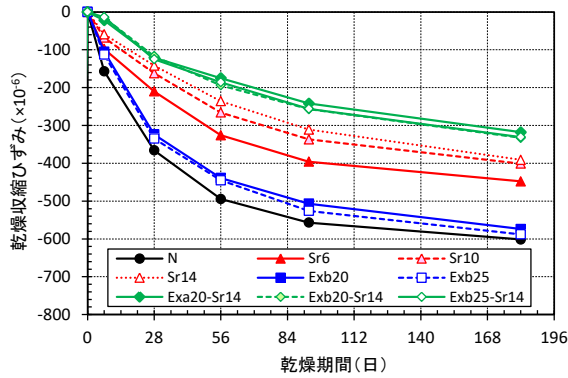


図-4 実験Ⅱ 乾燥収縮ひずみ測定の結果

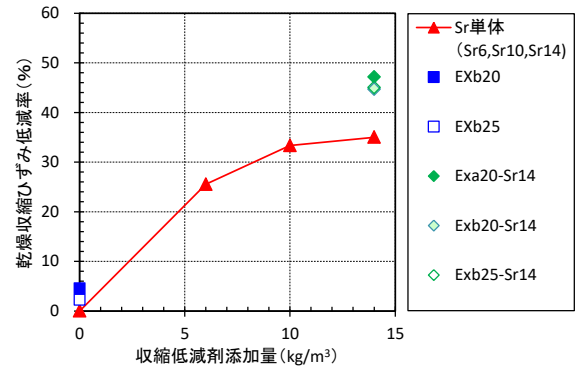


図-5 実験Ⅱ 収縮低減剤添加量と乾燥収縮ひずみ低減率の関係

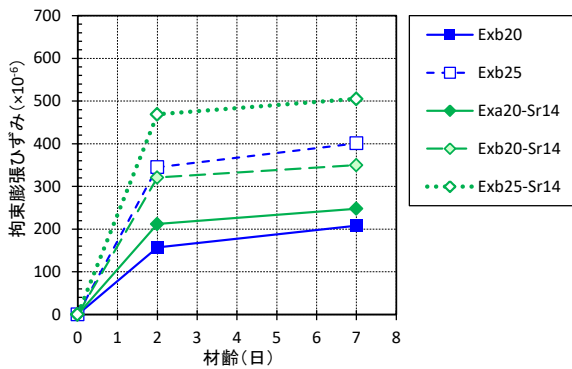


図-6 実験Ⅱ 拘束膨張ひずみ測定の結果

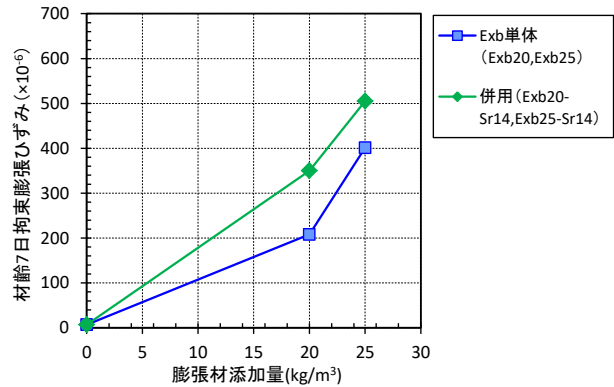


図-7 実験Ⅱ 膨張材の影響

お、B法では拘束された状態での乾燥収縮ひずみも測定した。

4.4 結果および考察

圧縮強度試験の結果を図-3に示す。図中に、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%程度の強度低下が見られた。さらに、収縮低減剤と膨張材を併用すると24～34%程度強度が低下している。材齢91日では、いずれの調合も材齢28日よりNに対する強度低下は小さくなる傾向がみられた。収縮低減剤の使用量による強度低下は、6～14kg/m³の範囲では10%程度であり、大きな差異はなかったが、膨張材は、20kg/m³と比較して25kg/m³の強度低下が5%程度大きくなっている。膨張材を内割として、収縮低減剤を併用した場合には、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、適切な強度管理を行う必要がある。その際に、セメント量を一定以上確保するために、膨張材を外割とすることも有効な手段となり得ると考えられる。

JIS A 1129-3による乾燥収縮ひずみ測定の結果を図-4に示す。収縮低減剤や膨張材を使用しない基準調合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EXb20, EXb25では -580×10^{-6} 程度、収縮低

減剤を単体使用した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Exa20-Sr14, Exb20-Sr14, Exb25-Sr14では、 $-320 \sim -330 \times 10^{-6}$ 程度となり、収縮低減剤や膨張材による収縮低減効果が確認された。収縮低減剤添加量と乾燥収縮ひずみ低減率の関係を図-5に示す。ここで、乾燥収縮ひずみ低減率とは、乾燥期間182日におけるNに対する各調合の乾燥収縮ひずみ低減の割合を表す。収縮低減剤は、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確認され、14kg/m³では35%程度となった。ただし、6～14kg/m³の範囲における乾燥収縮ひずみ低減率の増加傾向は、10kg/m³程度からやや緩やかになる傾向を示した。一方、膨張材を単体で使用した場合は、乾燥収縮ひずみ低減率に明確な関連性は確認されず、20～25kg/m³の範囲では2～5%となり、低減効果がほとんど確認されなかった。収縮低減剤を14kg/m³添加し膨張材を併用した調合では、45%程度の乾燥収縮ひずみ低減率となっている。収縮低減剤と膨張材を併用した調合は、収縮低減剤の単体使用より大きな乾燥収縮ひずみ低減効果を得られることがわかった。

ここで、B法による拘束膨張ひずみ測定の結果を図-6に示す。膨張材を使用した各調合の膨張ひずみは、膨張材20kg/m³の単体使用で 200×10^{-6} 程度、膨張材25kg/m³の

表-10 実験II 膨張ひずみ・乾燥収縮ひずみのまとめ

調合	拘束膨張ひずみ 材齢7日 ($\times 10^{-6}$)	乾燥収縮ひずみ 乾燥期間182日 ($\times 10^{-6}$)		拘束膨張ひずみを 考慮した乾燥 収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)
	B法	JIS A 1129-3	B法	B法+ JIS A 1129-3
N	7	-602	-324	-595
Exb20	208	-574	-436	-366
Exb25	401	-588	-476	-187
Exa20-Sr14	248	-318	-248	-70
Exb20-Sr14	350	-333	-304	17
Exb25-Sr14	505	-331	-293	174

単体使用で 400×10^{-6} 程度となっており、膨張材使用量による差が見られた。膨張材と収縮低減剤を併用した場合は、膨張材単体使用と比較して膨張ひずみが大きくなる傾向があり、Exb25-Sr14では 500×10^{-6} 程度であった。

膨張ひずみ・乾燥収縮ひずみのまとめを表-10に示す。B法による乾燥収縮ひずみは、拘束体の影響により、JIS A 1129-3による測定方法と比較して小さい値を示すことから、本実験では、前述したとおり、拘束膨張ひずみを考慮した乾燥収縮ひずみを、JIS A 1129-3による乾燥期間182日の乾燥収縮ひずみに、B法による材齢7日の拘束膨張ひずみを足し合わせた値を用いて評価した。これより、表-1で示した低収縮コンクリートの区分により評価すると、膨張材を単体使用したExb20は、 -366×10^{-6} となり「高耐久コンクリート」に、Exb25は -187×10^{-6} となり「低収縮コンクリート」に区分される。収縮低減剤と膨張材を併用した3つの調合は、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」に区分される。なお、Exb20-Sr14、Exb25-Sr14は、乾燥期間182日の乾燥収縮ひずみよりも、初期に導入された拘束膨張ひずみの方が大きく、乾燥期間中は常時膨張側で収縮ひずみが推移していた。

4.5 実験IIのまとめ

実験IIをまとめると以下のとおりとなる。

表-12 実験III コンクリート調合

調合	W/B (%) ^{*1}	単位量 (kg/m ³)						Sr (kg/m ³)	Ad (C×%)
		W	C	S1	S2	G	Exb		
N	50	170	340	582	249	958	—	—	0.85
M		170	340	586	251	958	—	—	0.90
L		170	340	586	251	958	—	—	0.80
N-Ex20		170	320	582	249	958	20	—	0.85
M-Ex20		170	320	586	251	958	20	—	0.75
M-Ex25		170	315	586	251	958	25	—	0.75
L-Ex20		170	320	586	251	958	20	—	0.60
L-Ex25		170	315	586	251	958	25	—	0.60
L-Exb20-Sr6		170	320	586	251	958	20	6	0.60
L-Exb25-Sr14		170	315	586	251	958	25	14	0.60

*1 結合材は、セメント+膨張材とする。
*2 収縮低減剤および混和剤は、単位水量に含む。

- 膨張材を内割で使用し、収縮低減剤を併用した場合には、強度低下が大きくなる傾向にあるため、事前に試験練りにより性状を確認したうえで、適切な強度管理を行う必要がある。
- 収縮低減剤と膨張材を併用したExa20-Sr14、Exb20-Sr14、Exb25-Sr14の膨張ひずみを考慮した乾燥収縮ひずみをB法の拘束膨張ひずみとJIS A 1129-3の乾燥収縮ひずみの和により評価すると、いずれも -100×10^{-6} 以下となり、いずれも「収縮ゼロコンクリート」に区分される。

5. 実験III (セメント種類の影響の検討)

5.1 実験IIIの概要

実験IIIでは、セメント種類を要因とした場合の圧縮強度、膨張・収縮性状に及ぼす影響について検討した。

5.2 使用材料およびコンクリート調合

使用材料を表-11に示す。粗骨材は、実験Iで選定した産地の石灰石粗骨材、他の材料は実験IIで使用した材料とした。コンクリートの調合を表-12に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(N)、中庸熱ポルトランドセメント(M)、低熱ポルトランドセメント(L)の3種類とした。調合は、各セメントの基準調合、各セメントに膨張材

表-11 実験III 使用材料

種類	詳細
水(W)	水道水
セメント (C)	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(S)	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:1.00%)
粗骨材(G)	石灰石碎石 (表乾密度:2.69 g/cm ³ , 吸水率:0.57%)
収縮低減剤 (Sr)	ポリエーテル誘導体
膨張材(Exb)	エトリンサイト・石灰複合系 (低添加型)
混和剤(Ad)	高性能AE減水剤, ポリカルボン酸系

表-13 実験III 試験項目

試験項目	詳細
スランプ	JIS A 1101 (目標値 18.0±2.5cm)
空気量	JIS A 1128 (目標値 4.5±1.5%)
圧縮強度	JIS A 1108 (測定材齢: 4, 13 週) 基準調合 N, M, L: 供試体脱型時期 翌日 その他の調合: 供試体脱型時期 翌日, 3 日脱型後, 標準養生
長さ変化	JIS A 1129-3 (ダイヤルゲージ法) 測定材齢: 脱型時, 基長, 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
拘束膨張ひずみ	JIS A 6202 付属書 2 B 法 測定材齢: 打込み前, 脱型時, 4, 7, 14 日

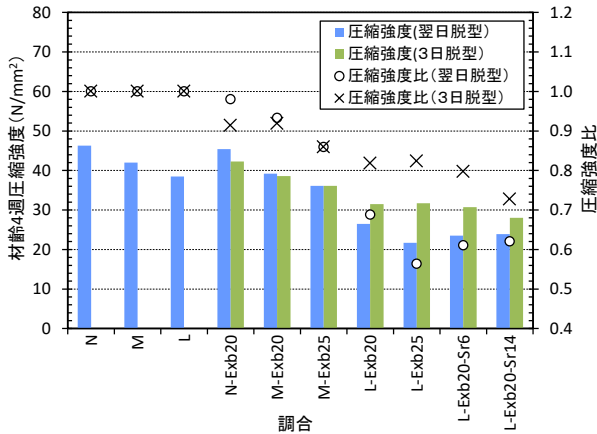


図-8 実験Ⅲ 圧縮強度試験の結果 (材齢 4 週)

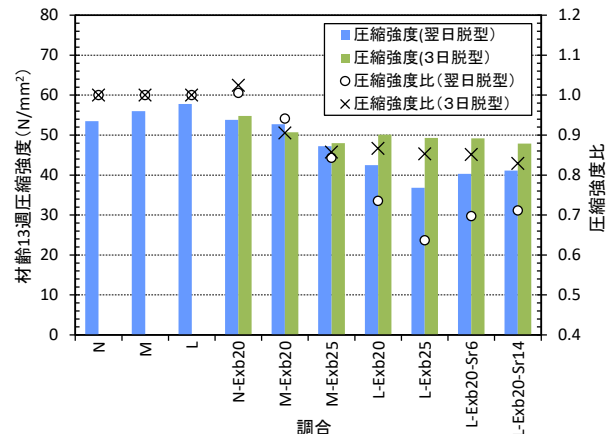


図-9 実験Ⅲ 圧縮強度試験の結果 (材齢 13 週)

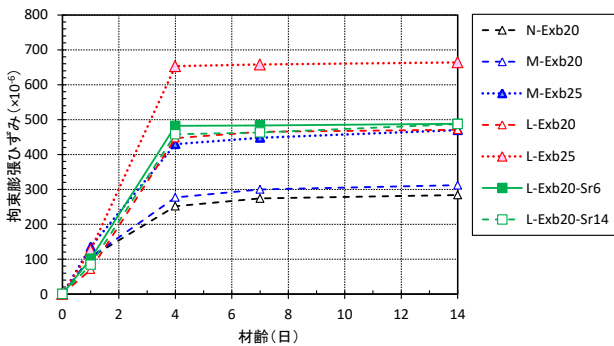


図-10 実験Ⅲ 拘束膨張ひずみ測定の結果

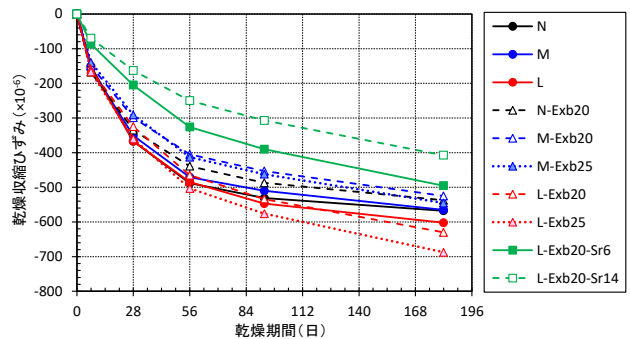


図-11 実験Ⅲ 乾燥収縮ひずみ測定の結果

を単体使用した調合，低熱ポルトランドセメントに膨張材と収縮低減剤を併用した調合の計 10 調合とした。

5.3 試験項目

試験項目を表-13 に示す。圧縮強度試験は，測定材齢を 4, 13 週とし，膨張材を入れた調合については，翌日脱型の供試体に加えて，脱型時期を変えた 3 日脱型の供試体も作製した。

5.4 結果および考察

フレッシュコンクリートの試験結果は，スランプ，空気量ともに目標値の範囲内であった。

材齢 4 週，13 週の圧縮強度試験の結果を図-8, 9 に示す。圧縮強度は，同一セメント種類で比較し，圧縮強度比は，各調合の圧縮強度を N, M, L の圧縮強度に対する比で示した。翌日脱型の材齢 4 週の強度比を見ると，N-Ex20 は 0.98 であり，膨張材による強度への影響はほとんどないのに対して，M-Ex20, M-Ex25 は，それぞれ 0.93, 0.86, L-Ex20, L-Ex25 はそれぞれ 0.69, 0.56 となっており，膨張材使用量が多くなると強度低下が大きくなり，セメント種類による差も見られた。低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリート (L-Ex20, L-Ex25, L-Ex20-Sr6, L-Ex20-Sr14) において，材齢 4 週の圧縮強度比は 0.56 ~

0.69 となったが，材齢 13 週では 0.63 ~ 0.73 となり，材齢 4 週と比較して強度低下は小さくなった。また，材齢初期の膨張ひずみを拘束するために，3 日脱型とした場合には，材齢 13 週で，L を用いたコンクリートの圧縮強度比は 0.83 ~ 0.87 となり，圧縮強度の改善が見られた。

拘束膨張ひずみ測定の結果を図-10 に示す。材齢 7 日における膨張材単体使用の拘束膨張ひずみは，N-Ex20, M-Ex20, L-Ex20 ではそれぞれ 274×10^{-6} , 300×10^{-6} , 465×10^{-6} となり，N, M, L の順に大きくなり，M-Ex25, L-Ex25 の拘束膨張ひずみは，それぞれ 465×10^{-6} , 658×10^{-6} となっており，セメント種類と膨張材使用量による影響が見られた。低熱ポルトランドセメントに膨張材と収縮低減剤を併用した L-Ex20-Sr6, L-Ex20-Sr14 の拘束膨張ひずみは，それぞれ 483×10^{-6} , 463×10^{-6} となり，膨張材 20kg/m³ を単体で使用した調合の L-Ex20 とほぼ同等であり，収縮低減剤の影響は見られなかった。

乾燥収縮ひずみ測定の結果を図-11 に示す。N, M, L の乾燥収縮ひずみは，それぞれ -568×10^{-6} , -565×10^{-6} , -602×10^{-6} となった。また，N, M に膨張材を単体使用した調合は， -525×10^{-6} ~ -545×10^{-6} となったのに対して，L に膨張材 20, 25kg/m³ を単体使用した調合は，それぞれ

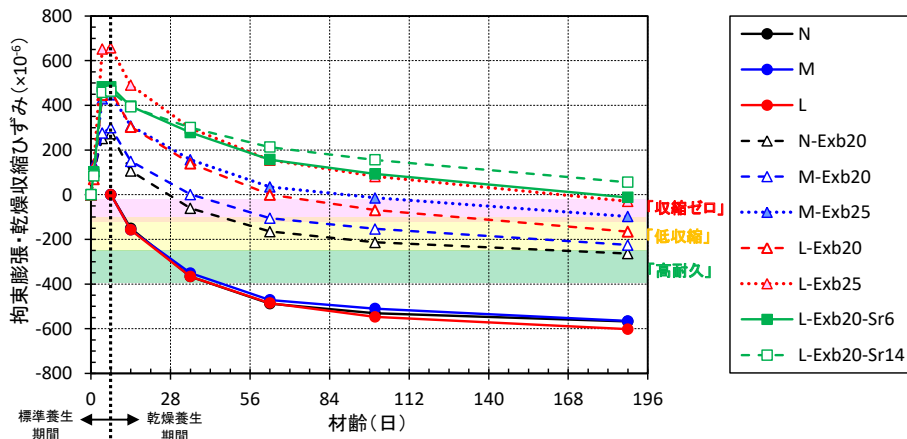


図-12 実験Ⅲ 拘束膨張ひずみを考慮した乾燥収縮ひずみ

表-14 低収縮コンクリートの調合メニュー

目標 乾燥収縮 ひずみ ($\times 10^{-6}$)	コンクリートの乾燥収縮ひずみ低減対策*			
	石灰石 粗骨材	膨張材	収縮 低減剤	セメント
-800	—	—	—	—
-600	□	□	□	—
-400	◎	○	○	—
-250	◎	◎	◇	—
0~-100	◎	◎	◎	◎

*1 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，◇：使用する場合あり

-630×10^{-6} 、 -688×10^{-6} となり、N、Mと比較して、Lを使用した調合の乾燥収縮ひずみは大きくなった。

拘束膨張ひずみを考慮した乾燥収縮ひずみを図-12に示す。拘束膨張ひずみを考慮した乾燥収縮ひずみは、乾燥期間182日の乾燥収縮ひずみに材齢7日の拘束膨張ひずみを足した値を用いて評価した。表-1に示した低収縮コンクリートの区分により拘束膨張ひずみを考慮した乾燥収縮ひずみを評価すると、N-Ex20は、 -264×10^{-6} で「高耐久コンクリート」に、M-Ex20、L-Ex20は、それぞれ -225×10^{-6} 、 -165×10^{-6} であり「低収縮コンクリート」となる。また、M-Ex25、L-Ex25、L-Ex20-Sr6、L-Ex20-Sr14は、それぞれ -97×10^{-6} 、 -30×10^{-6} 、 -12×10^{-6} であり、「収縮ゼロコンクリート」となる。

5.5 実験Ⅲのまとめ

実験Ⅲをまとめると以下のとおりとなる。

- 膨張材および収縮低減剤を使用した調合の圧縮強度は低下する傾向にあるが、脱型材齢を3日とし材齢初期の膨張を拘束することで強度低下は小さくなった。
- セメントの種類により、拘束膨張ひずみ、乾燥収縮ひずみおよび圧縮強度に及ぼす影響を把握した。
- 石灰石粗骨材、膨張材、収縮低減剤の組合せおよび使用量とセメント種類により、拘束膨張ひずみを考慮した乾

燥収縮ひずみを制御し、「高耐久コンクリート」、「低収縮コンクリート」、「収縮ゼロコンクリート」となるコンクリートを開発した。

6. まとめ

実験Ⅰ～Ⅲを通して、収縮低減剤と膨張材の組合せおよび添加量、セメント種類による影響を実験により確認し、コンクリートの乾燥収縮ひずみ制御について検討した。

実験結果をもとにして作成した低収縮コンクリートの調合メニューを表-14に示す。コンクリートの乾燥収縮ひずみ低減対策として、石灰石粗骨材、膨張材、収縮低減剤を使用し、これらの組合せおよび使用量によって乾燥収縮ひずみを制御する。コンクリートは、製造する地域やレディーミクストコンクリート工場などによって、供給できる材料が異なり、これらの事情、コスト、要求性能を考慮して調合を選択できるようになった。また、今回開発した乾燥収縮ひずみをほぼゼロまで低減した「収縮ゼロコンクリート」を使用することで、コンクリート構造物に発生する乾燥収縮ひび割れを大幅に低減することが期待できる。

今回開発した乾燥収縮ひずみ制御技術により、要求

性能とコストを考慮しつつ、長期にわたり構造体コンクリートの性能や美観を維持した高品質で付加価値の高いコンクリートを提供できるようになった。今後は、工場・倉庫などの床、打放し仕上げのRC造施設などを施工する際に、コンクリートの乾燥収縮ひずみ制御技術を適用していく。

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7社共同研究（安藤ハザマ、熊谷組、佐藤工業、戸田建設、西松建設、フジタ、前田建設工業）での成果である。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：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，2009
- 2) 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指針（案）・同解説，2006
- 3) 日本建築学会：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，2013

Experimental Study on the Method of Controlling Drying Shrinkage

Yoshiyuki SUZUKI, Hiroyasu ABE

The authors have studied the preparation and physical properties of concrete, for the purpose of developing a technology to control the drying shrinkage strain of concrete in the range from 0×10^{-6} to 800×10^{-6} . Through the experiment, the influence of the kind of limestone gravel, the combination, the amount of shrinkage-reducing agent with an expansion material, and the cement type was confirmed, and the drying shrinkage strain control of concrete was investigated.

As a result, we have developed a technique for controlling the drying shrinkage strain by these combinations and usage. It is possible using this drying shrinkage strain control technology to provide a high-value-added concrete.
