

6. 各種収縮低減剤の性能評価および早期判定手法の検討

Consideration of Shrinkage Reduction Agents for Evaluation and Early Judgment Method

立松 和彦*1 山内 衛*2

要 旨

JASS 5-2009 に規定されたコンクリートの乾燥収縮率を遵守するため、収縮低減剤の使用による効果が期待されている。本研究では、各種収縮低減剤の現場適用を想定し、種々の現場条件下を模擬した性能評価を行った。また、コンクリートの乾燥収縮率の早期判定に関して、強制乾燥法について検討した。その結果、別添型、混入型、塗布型のいずれの収縮低減剤も、現場条件下であっても JIS の標準試験条件と同程度の性能が期待できることを確認した。一方、強制乾燥法による早期判定については実用化に課題が残った。

キーワード：収縮低減剤／乾燥収縮率／混入型／別添型／塗布型／早期判定／強制乾燥法

1. はじめに

JASS 5-2009 に規定されたコンクリートの乾燥収縮率を遵守するため、収縮低減剤の使用による効果が期待されている。一方、ひび割れ対策としては脱型後の部材へ収縮低減剤を塗布するほうが費用対効果に優れるとの報告もある。そこで本研究では次の二点について検討を行った。一点目は、各種収縮低減剤の現場適用を想定し、種々の現場条件下を模擬した性能評価を行う。二点目として、コンクリートの乾燥収縮率の判定には 6 ヶ月以上必要となり工事前の確認は容易ではないため、早期判定手法のひとつである強制乾燥法について検討した。文中では一点目の検討を実験 I とし、二点目の検討を実験 II としている。

実験 I では、初期養生を封かん養生とした場合の乾燥収縮への影響を検討するとともに、塗布型・混入型・別添型の各種収縮低減剤の効果について評価するための試験（実験 I a および実験 I b）を行った。実験 II では、ある程度強度が発現し、乾燥収縮が進行した供試体で強制乾燥を行った。強制乾燥温度を主として 65℃で実施したもの（実験 II a）、主として 80℃で実施したもの（実験 II b）とにそれぞれ整理して述べる。

本報告は、(株)浅沼組、安藤建設(株)、大木建設(株)、(株)熊谷組、(株)鴻池組、五洋建設(株)、(株)銭高組、東亜建設工業(株)、東洋建設(株)、飛鳥建設(株)、(株)長谷工コーポレーション、(株)ピーエス三菱、三井住友建設(株)の 13 社による共同研究の成果¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾をとりまとめたものである。

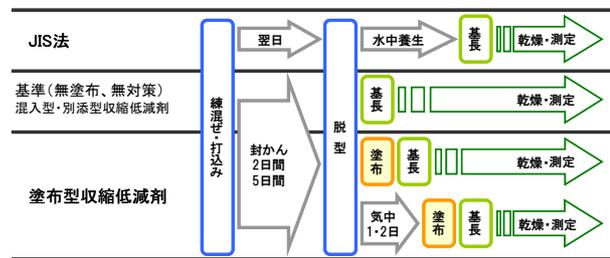


図-1 実験 I の試験フロー

2. 実験 I（各種収縮低減剤の性能評価）

2.1 実験概要および試験水準

収縮低減剤は、その添加方法によって大きく 3 種類に区分できる。硬化後のコンクリートに塗布する「塗布型」、従来のコンクリート用化学混和剤に予め混入して一剤で生コン工場に添加できる「混入型」、練り混ぜ後のコンクリートにアジテータ車に添加する「別添型」の 3 種類である。

試験フローを図-1 に示す。コンクリートの長さ変化試験方法は JIS A 1129 に規定されており、その試験方法は、1 週間の標準養生を行った後に温度 20℃湿度 60%の環境にて乾燥させ、収縮を測定するものである（JIS 法）。一方、現場においてコンクリートが所定の強度に達して湿潤養生を打ち切る場合、コンクリートが置かれる環境は、せき板存置による数日間の封かん養生から大気開放（気中）となるため、長さ変化の進行は JIS 法と異なると考えられる。そこで実験 I では、型枠脱型までの初期養生を封かん養生とした場合の乾燥収縮への影響を検討するとともに、各種収縮低減剤の効果について評価するための試験（実験 I a および実験 I b）を行った。実験 I

*1 技術研究所環境・生産研究グループ

*2 東京本店建築部品質管理室

a では、塗布型の収縮低減剤を用いて脱型までの封かん養生日数(2日・5日)および脱型直後の気中養生期間(2日間)の有無を設けた。比較の基準となる無対策(収縮低減剤を使用しないもの)を“無”、脱型後すぐに塗布するものを“直”、脱型後に気中養生期間を2日間おいてから塗布するものを“2d”と表現している。なお、型枠脱型後2日間の気中養生期間を設けた理由は、実際の現場において、せき板の取り外し直後の塗布剤の塗布は、資材の搬出作業と重なり困難となるためである。実験 I b では、別添型と混入型の収縮低減剤の乾燥収縮低減効果の比較を行った。JIS法の初期養生に対して、初期養生を封かん養生2日間および5日間としている。表-1および表-2に実験 I a および実験 I b の試験水準を示す。

表-1 試験水準(実験 I a)

記号	JIS法	封かん養生2日			封かん養生5日		
		無対策	直後塗布	2日後塗布	無対策	直後塗布	2日後塗布
無	○	○	—	—	○	—	
塗A-直	—	—	A社	—	—	A社	
塗B-直	—	—	B社	—	—	—	
塗A-2d	—	—	—	A社	—	A社	
塗B-2d	—	—	—	B社	—	—	

(—は、供試体を作製していない)

表-2 試験水準(実験 I b)

記号	収縮対策		圧縮強度 20°C水中	長さ変化試験		
	タイプ	生産者		JIS法	封かん養生	
			2日間		5日間	
無	無対策	—	○	○	○	—
混A	混入型	A社	○	○	○	○
混C	混入型	C社	○	○	○	○
別A	別添型	A社	○	○	○	—

(○は、試験体を作製)

2.2 使用材料およびコンクリートの調合

使用材料を表-3に、コンクリートの調合およびフレッシュ試験結果を表-4に示す。コンクリートの調合は、呼び強度30-18-20Nを想定して目標スランプ18±2.5cm、目標空気量4.5±1.5%とし、水セメント比および単位水量を決定した。混入型の収縮低減剤(記号「混A」「混C」)

表-4 コンクリートの調合およびフレッシュ試験結果

実験区分	記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				化学混和剤 (C×%)	収縮低減剤外割 (C×%)	フレッシュ試験結果				20°C水中養生 圧縮強度 (N/mm ²) 材齢28日
				W	C	S	G			スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	単位容積質量 (kg/L)	
実験 I a	無	50.0	43.6	180	360	743	988	1.0	—	19.5	4.0	19.0	2.25	44.8
								1.0	—	19.5	4.1	20.5	2.24	43.5
	1.5							—	19.0	3.8	21.0	2.25	44.5	
	1.6							—	20.5	3.5	21.0	2.25	45.9	
	1.0							6.0	19.5	4.8	21.0	2.21	39.5	

表-3 使用材料

材料	種類	生産者等	記号	物性等
セメント	普通ポルトランドセメント	3社	C	3社等量混合、平均密度3.16g/cm ³
細骨材	山砂	掛川	S	表乾密度2.58g/cm ³ 、吸水率2.11%、FM 2.63
粗骨材	硬質砂岩砕石2005	青梅	G	表乾密度2.65g/cm ³ 、吸水率0.78%、実積率60.1%
化学混和剤	AE減水剤	A社	AE	オキカルボン酸塩とホリカルボン酸系化合物
	収縮低減剤混入型AE減水剤	A社	混A	ホリカルボン酸系とホリグリコール誘導体
		C社	混C	オキカルボン酸・ホリカルボン酸系とグリコールエーテル系誘導体
	別添型収縮低減剤	A社	別A	炭化水素系化合物とグリコールエーテル系誘導体
塗布型収縮低減剤		A社	塗A	グリコールエーテル系誘導体
		B社	塗B	低級アルコールのアルキルオキソ付加物

では、化学混和剤の使用量は記号「無」の約5割増しであった。使用量の増加分が収縮低減成分であると仮定すると、混Aの収縮低減成分は1.8kg/m³となる。

コンクリートの練り混ぜは、公称容量1000のパン型ミキサを用いてモルタル先練りで60秒、粗骨材投入後90秒間練り混ぜた。別添型では、コンクリートが練り上がった後で収縮低減剤を添加し、さらに30秒間練り混ぜた。

2.3 供試体作製および試験方法

写真-1に収縮低減剤の塗布状況および長さ変化試験での測定状況を示す。予め型枠両端中央部にセラミックス板を張り付けてコンクリートを打ち込んだ10×10×40cmの供試体全面に、所定量の塗布型収縮低減剤を塗りむらがないように最初に液垂れが生じない程度までハケ



写真-1

(上) 収縮低減剤塗布状況
(下) 長さ変化測定状況

で塗布し、乾燥後、同様に残りの剤を塗布した。塗布量は、生産者の推奨使用量（A社、B社とも100~150g/m²）の中間値である125g/m²とした。コンクリートの長さ変化試験はJIS A 1129に準拠しレーザ変位センサを用いて供試体両端中央部の長さを測定した。

2.4 実験結果および考察

(1) 初期養生の異なる供試体の乾燥収縮率（実験 I a）

塗布型収縮低減剤を塗布していない供試体の乾燥収縮率を図-2左に示す。なお、本報告における材齢とは、コンクリート打ち込み後の日数としている。材齢と乾燥収縮率の関係より、それぞれの養生方法で各材齢時の乾燥収縮率は異なるが、乾燥開始材齢（JIS法では材齢7日、封かん2日では材齢2日、封かん5日では材齢5日）を基点とすれば、材齢約60日までの収縮率は概ね同値と判断される。しかし、材齢60日以降、徐々にJIS法による乾燥収縮率が封かん養生した場合よりもやや大きくなる傾向を示した。

質量減少率と乾燥収縮率の関係を図-2右に示す。JIS法および封かん養生5日では概ね同様の結果を示したが、封かん養生2日の乾燥収縮率は、同じ質量減少率において、特に材齢初期に小さくなった。このことは、乾燥開始材齢や養生が異なるため、硬化初期の活発な水和反応に伴うセメント硬化体の状態および自由水の量などが影響しているものと考えられる。

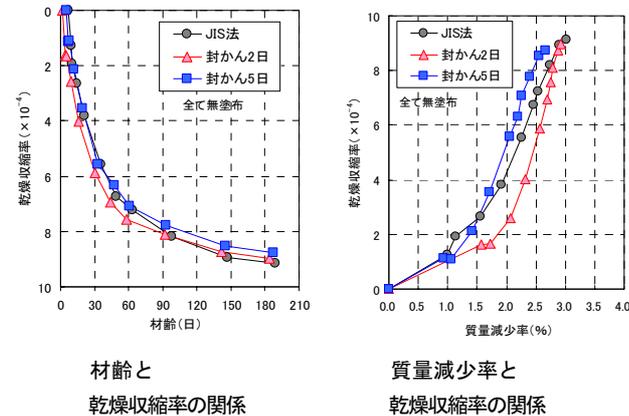


図-2 初期養生の異なる供試体の乾燥収縮率

(2) 塗布型収縮低減剤による乾燥収縮率（実験 I a）

封かん養生2日で脱型した場合の材齢と質量減少率および乾燥収縮率の関係を図-3に、封かん養生5日で脱型した場合の材齢と質量減少率および乾燥収縮率の関係を図-4に示す。“無”と“直”の比較から、塗布型収縮低減剤を塗布することにより、供試体の質量減少が抑制され、封かん養生2日、5日とも材齢150日で60μ程度の

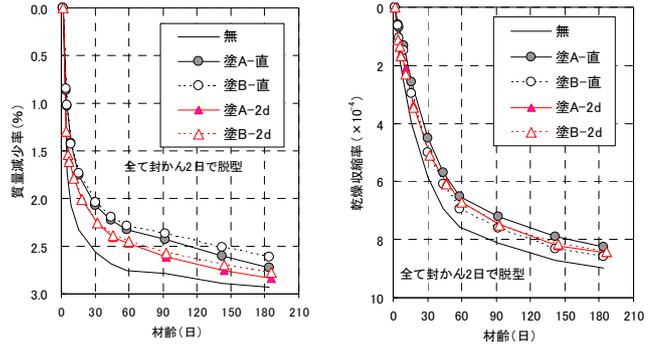


図-3 封かん2日で脱型した場合の材齢と質量減少率・乾燥収縮率

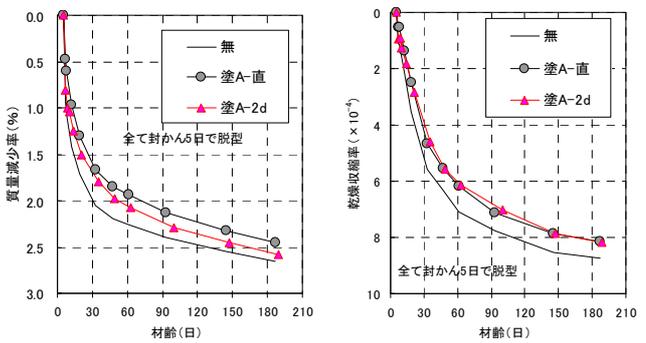


図-4 封かん5日で脱型した場合の材齢と質量減少率・乾燥収縮率

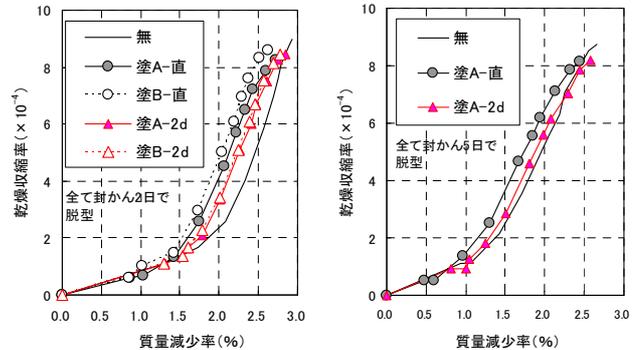


図-5 質量減少率と乾燥収縮率の関係

収縮率を低減する効果が得られた。塗布時期については、質量減少率においては“直”の方が“2d”よりも0.2~0.4%小さくなる傾向であったが、乾燥収縮率への影響は確認されなかった。

質量減少率と乾燥収縮率の関係を図-5に示す。質量が減少する過程では、封かん養生2日、5日とも“無”と比較すると、同一の質量減少率において、特に“直”の乾

乾燥収縮率が大きい結果となった。

(3) 混入型および別添型収縮低減剤による乾燥収縮率（実験 I b）

実材齢約 270 日（乾燥 39 週）までの質量減少率と乾燥収縮率の推移について、質量減少率を図-6に、乾燥収縮率を図-7に示す。封かん 5 日条件の無対策は実験 I a の結果による。

質量減少率をみると、封かん 2 日条件では 2 週間程度で急激に質量が減少するが材齢 50 日以降は緩やかになる。封かん 5 日条件での質量減少は、封かん 2 日と同様に初期に急激に進むもののやや緩やかで減少率自体も小さい。一方、JIS 法は長期にわたり質量減少が進行し、乾燥 20 週で封かん 2 日条件と同等になった。収縮対策法別にみると、混入型はどちらも無混入に比べて質量減少率が小さくなったが、別添型は無混入とほとんど変わらなかった。

乾燥収縮率の推移をみると、全条件とも乾燥 20 週でも収縮は進行途中にあると考えられる。封かん 2 日条件では、若材齢における急激な質量減少に対して、乾燥収縮の進行は緩やかな反面、長期では緩やかな質量減少に対し乾燥収縮は進行している。収縮対策法別にみると、別添型の低減効果は大きく、乾燥 20 週の乾燥収縮率は JIS 法では 230μ 程度、封かん 2 日条件でも 190μ 程度無対策に比べて低減された。混入型についても、一定の低減効果がみられ、乾燥 20 週において無対策に対し $50 \sim 100 \mu$ 程度低減された。封かん 5 日条件の乾燥 20 週における乾燥収縮率は $750 \sim 800 \mu$ 程度で封かん 2 日条件と大差なかった。実験 I a における無対策の収縮率と比較すると 100μ 前後の低減効果があったと推察される。

質量減少率と乾燥収縮率の関係を図-8に示す。両者の関係は、JIS 法と封かん 5 日条件が類似し封かん 2 日とは異なっている。ここで、無対策と混入型では試験条件ごとに同一の曲線上にあることから、混入型は収縮低減成分が 1.8 kg/m^3 と少

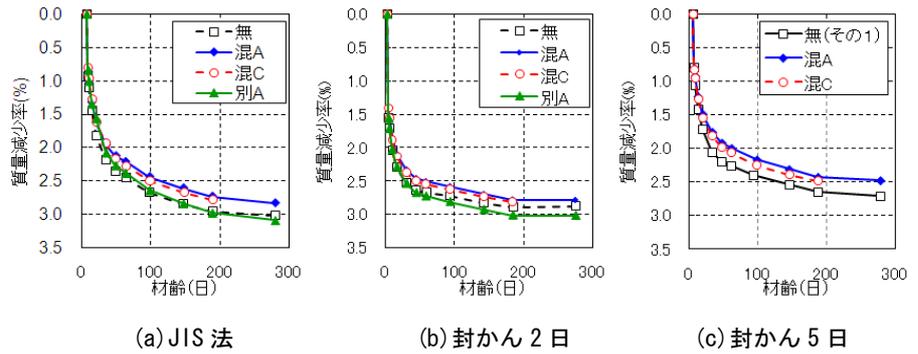


図-6 実験 I b における質量減少率

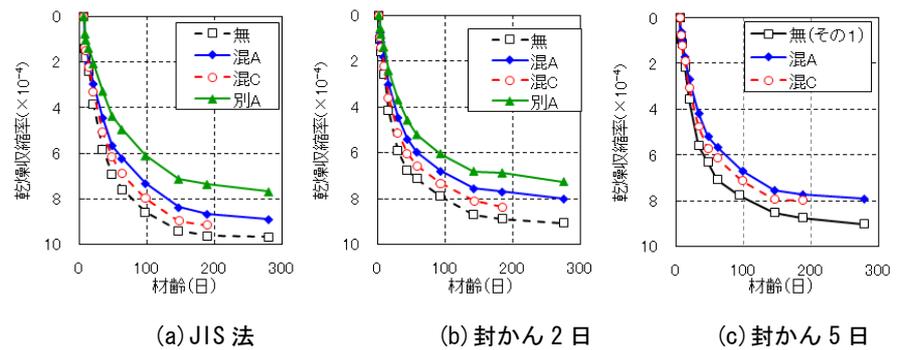


図-7 実験 I b における乾燥収縮率

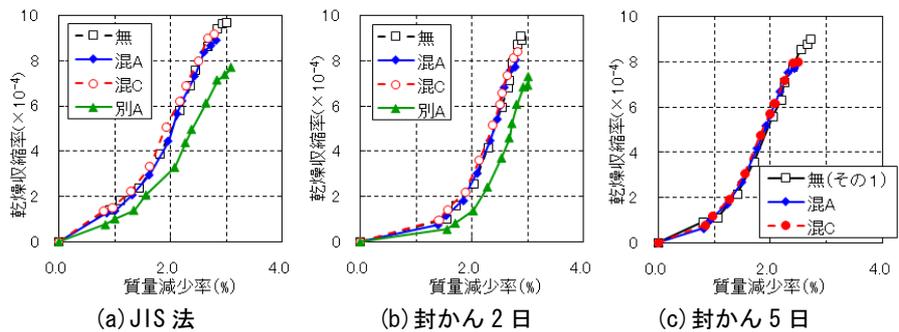


図-8 実験 I b における質量減少率と乾燥収縮率

ないことから無対策の関係と同じになったと考えられる。一方、別添型については初期養生条件にかかわらずその他と大きく異なり、別添型は質量減少が増加しても乾燥収縮率は小さい。この理由として、添加に伴い粗大な細孔量の増加と微細な細孔量の減少という細孔構造の変化がおり、収縮に直接的に寄与しない粗大な細孔からの水分がより多く拡散した結果と考えられる⁶⁾。

同一乾燥材齢における JIS 法と封かん条件との乾燥収縮率の関係を図-9に示す。いずれも、若材齢では 1:1 に近い関係にあるが、材齢が進み収縮が増大するにつれ JIS 法の乾燥収縮率は封かん条件に比べ大きくなる傾向が認められた。このことから、JIS 法による乾燥収縮率は実際の現場に近い封かん

条件に比べて安全側の評価となることがわかる。

乾燥収縮対策を行ったコンクリートの無対策に対する収縮率の推移を図-10に示す。別添型の乾燥収縮率は、初期では無対策の約50%であったが、乾燥140日では80%程度になった。混入型では、若材齢において低減効果が小さい時期もみられるが、乾燥材齢14日までに80%前後となり、その後は90%前後まで徐々に増加した。いずれも、引張強度が小さい若材齢での収縮低減効果が大きいことがわかる。このことから、収縮低減剤の使用はひび割れ対策において有効と考える。

2.5 実験Ⅰのまとめ
 初期養生方法や収縮低減剤の種類をパラメータとした乾燥収縮試験を行った結果、以下の知見が得られた。

2.5 実験Ⅰのまとめ

初期養生方法や収縮低減剤の種類をパラメータとした乾燥収縮試験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 初期養生が実施工に近い封かん養生の場合、乾燥収縮および質量減少率の進行過程はJIS法と異なり、長期材齢ではJIS法の方が大きい収縮率を示す。
- 2) 封かん養生を施したコンクリートへの塗布型収縮低減剤の塗布は、無対策と比べて乾燥収縮率及び質量減少率が小さくなることを確認できた。収縮比率は、材齢初期や型枠脱型後の塗布が早いほど小さい。
- 3) 混入型と別添型のどちらも初期養生条件にかかわらず収縮低減効果が確認できた。
- 4) 収縮低減剤を混入した時の低減効果は若材齢時に比べ長期材齢では低下するが、長期材齢においても混入型で90%前後に、別添型で80%以下に低減された。

3. 実験Ⅱ（強制乾燥法による早期判定の検討）

3.1 実験概要および試験水準

(1) 強制乾燥温度 65℃（実験Ⅱa）

実験Ⅱaの試験水準は、粗骨材の種類を石灰砕石としたもの（記号 LG）、硬質砂岩砕石としたもの（記号 SG）、化学混和剤をAE減水剤と収縮低減剤混入型AE減水剤としたもの（記号 SR）を組み合わせ、表-5に示すようにコンクリートの調合を3種類とした。乾燥収縮の測定は、図-11に示すように、JIS法と、65℃の強制乾燥開始を①乾燥期間2週後と、②乾燥期間4週後の計3条件とした。強制乾燥は写真-2に示す循環式の乾燥炉で行った。

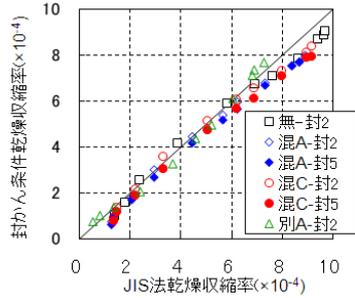


図-9 JIS法と封かん条件の関係

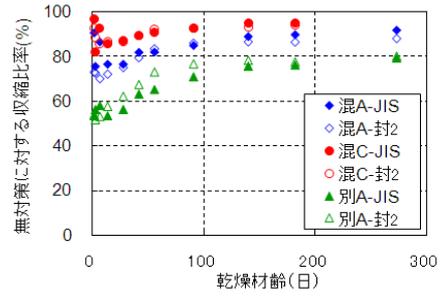


図-10 収縮比率の推移

強制乾燥開始後の供験体の温度変化は図-12に示すように4時間程度で所定の65℃となった。65℃から20℃への自然冷却は約7時間を要した。なお①の乾燥期間2週後の試験、②の乾燥期間4週後の試験とも、65℃で強制乾燥させる期間の目安として、質量減少率が約4%または6%近くとなってほぼ安定するまでとした。

表-5 コンクリートの調合（実験Ⅱa・Ⅱb）

実験区分	記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				化学混和剤 (C×%)	20℃水中養生圧縮強度 (N/mm ²) 材齢28日
				W	C	S ^{*1}	G		
実験Ⅱa	LG	50.0	43.6	180	360	751	1107 ^{*2}	1.0 ^{*4}	43.1
	SG					744	987 ^{*3}	1.0 ^{*4}	41.2
	SR					744	987 ^{*3}	1.5 ^{*5}	43.6
実験Ⅱb						744	987 ^{*3}	1.0 ^{*4}	41.2

*1: 山砂 *3: 硬質砂岩砕石2005
 *2: 石灰砕石2005 (津久見産、表乾密度2.72g/cm³、吸水率0.29%、実積率59.7%)
 *4: AE減水剤
 *5: 収縮低減剤混入型AE減水剤(ケリコテル系誘導体)

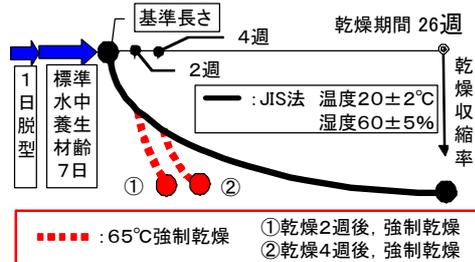


図-11 実験Ⅱaにおける65℃強制乾燥の概要



写真-2 強制乾燥炉

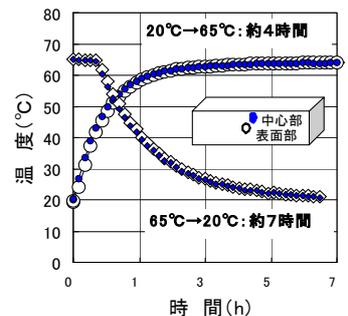


図-12 供試体の温度追従

(2) 強制乾燥温度 80℃ (実験 IIb)

実験 IIb の試験水準は、初期養生温度、前乾燥期間、80℃ 強制乾燥の期間を要因とし、表-6 のように設定した。組合せは、JIS 法を含めて 20 通りとした。脱型後の初期養生温度では、20℃ の標準養生に加え、初期硬化の促進を図る目的で 40℃ の温水養生も要因に取り入れた。強制乾燥前の 20℃ による前乾燥期間は 0、1、2 および 4 週間の 4 水準、80℃ による強制乾燥期間は 1、2 および 4 週間の 3 水準とした。強制乾燥に用いた乾燥炉は、実験 IIa と同様に循環式のものである。強制乾燥開始後の供験体の温度変化は、20℃ から 80℃ へ上昇するには約 4 時間、80℃ から 20℃ への自然冷却は約 20 時間を要した。コンクリートの調合は表-5 の記号 SG で示した硬質砂岩碎石および AE 減水剤を用いた調合と同じである。

表-6 実験 IIb における供試体乾燥条件の組合せ

記号	養生・乾燥条件		
	初期養生温度	前乾燥期間	80℃強制乾燥期間
1	20℃-JIS	1週間	-
2	20℃-0W-1W	0週間	1週間
3	20℃-0W-2W		2週間
4	20℃-0W-4W		4週間
5	20℃-1W-1W		1週間
6	20℃-1W-2W	1週間	2週間
7	20℃-1W-4W		4週間
8	20℃-2W-1W	2週間	1週間
9	20℃-2W-2W		2週間
10	20℃-2W-4W	4週間	1週間
11	20℃-4W-1W		2週間
12	20℃-4W-2W	4週間	1週間
13	20℃-4W-4W		4週間
14	40℃-JIS	1週間	-
15	40℃-0W-1W	0週間	1週間
16	40℃-0W-2W		2週間
17	40℃-0W-4W		4週間
18	40℃-1W-1W	1週間	1週間
19	40℃-1W-2W		2週間
20	40℃-1W-4W	4週間	

3.2 供試体および試験方法

実験 IIa、実験 IIb ともコンクリートの目標スランブは 18±1.5cm、目標空気量は 4.5±0.5%、目標コンクリート温度は 20±2℃ とした。

コンクリートは、公称容量 1000 のパン型ミキサを用いて 80 l を練り混ぜた。乾燥収縮率測定用の供試体は 10×10×40cm とし、予め型枠両端中央部にセラミックス板を張り付けてコンクリートを打ち込んだ。実験 IIa は各 3 体、実験 IIb は各 2 体とした。翌日に型枠を脱型し、初期養生として材齢 7 日まで標準養生とし(実験 IIb では初期養生を 20℃ 水中と 40℃ 水中の 2 水準)、その後温度 20℃、湿度 60%R.H. の室内において長さ質量を測定した。

長さ変化の測定は実験 I と同様に、JIS A 1129 に準拠し、供試体両端中央部間の長さをレーザ変位センサを用いて測定した。なお強制乾燥時の乾燥収縮率は温度ひずみを除去するために一旦温度 20℃、湿度 60%R.H. の室内で 1 日保管後に測定した。実験 IIb では同条件で保管した φ10

×20cm の円柱供試体の圧縮強度およびヤング係数を測定した。

3.3 実験 IIa の実験結果および考察(強制乾燥温度 65℃)

(1) JIS 法の試験結果

JIS 法による乾燥収縮率および質量減少率を図-13 および図-14 に示す。JIS 法による乾燥期間 26 週における乾燥収縮率および質量減少率は、それぞれ石灰碎石コンクリート(以下、LG)が 605μ、2.56%、硬質砂岩碎石コンクリート(以下、SG)が 998μ、2.90%、収縮低減タイプ AE 減水剤を使用したコンクリート(以下、SR)が 889μ、2.75%であった。収縮低減に石灰碎石の使用や収縮低減剤混入型 AE 減水剤の使用効果が認められる。

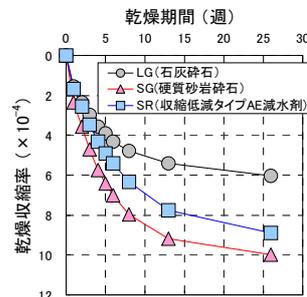


図-13 JIS 法の乾燥収縮率

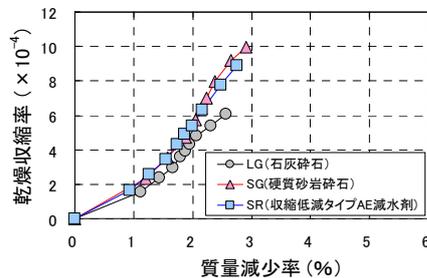


図-14 JIS 法による質量減少率と乾燥収縮率の関係

(2) 20℃乾燥 2 週後に 65℃強制乾燥した結果

20℃乾燥 2 週後に 65℃強制乾燥した結果を図-15 および図-16 に示す。強制乾燥前の 2 週における 20℃乾燥時の乾燥収縮率および質量減少率は、それぞれ LG が 220μ、1.39%、SG が 332μ、1.54%、SR が 276μ、1.43%に対し、3 日間の 65℃強制乾燥の結果のそれらは、LG が 247μ、3.12%、SG が 417μ、3.37%、SR が 346μ、3.20%であった。強制乾燥 3 日間で質量減少率が JIS 法 26 週と同等の 3%程度に達したが、乾燥収縮の進行は少なかった。このため、引き続き 65℃強制乾燥による測定を継続した。その結果、質量減少率が 5.5%程度まで進行してほぼ安定したが、乾燥収縮率は LG と SG は JIS 法 26 週と比較して 100μ

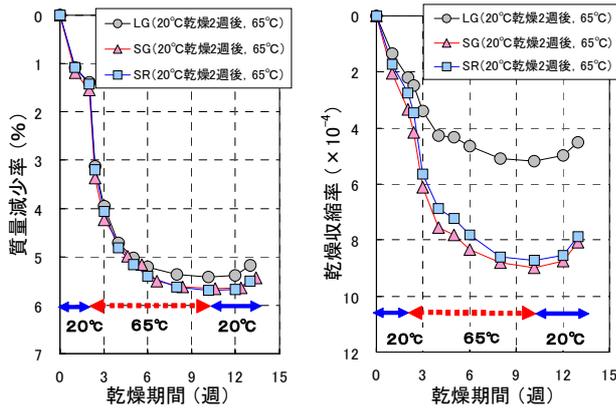
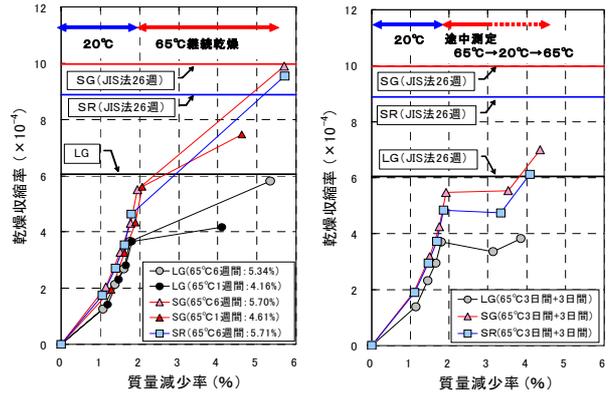


図-15 20°C乾燥2週後の65°C強制乾燥 (実験 I a)



65°C継続乾燥での測定

65°C→20°C→65°C乾燥での測定

図-17 質量減少率と乾燥収縮率 (20°C乾燥4週後、65°C)

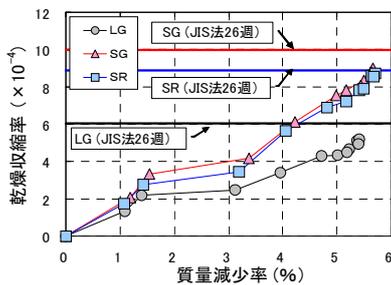


図-16 質量減少率と乾燥収縮率 (20°C乾燥2週後、65°C)

程度小さい結果となり、SRは同程度となった(図-16)。その後温度20°C、湿度60%R.H.で保管を続けると収縮から膨張へ転じる現象が捉えられた(図-15)。

(3) 20°C乾燥4週後に65°C強制乾燥した結果

20°C乾燥4週後に65°C強制乾燥した結果を図-17に示す。図-17左図は、20°C乾燥4週後の質量減少率約2%の供試体について、途中20°Cに戻すことなく65°Cを継続した状態で質量減少率が目標の約4%および6%近くを確認後、20°Cに戻した場合の質量減少率と乾燥収縮率の関係を示したものである。

質量減少率が4.7%以下(強制乾燥期間1週間)の乾燥収縮率は、図中に示したJIS法26週の値と比べてかなり小さかった。一方、質量減少率5.3~5.7%(同6週間)の場合の乾燥収縮率はLGが581μ(JIS法26週の値の96%)、SGが990μ(同99%)でJIS法とほぼ一致したものの、SRは955μ(同107%)とやや大きい結果となった。

図-17右図は、20°C乾燥4週後の質量減少率約2%の供試体LG,SG,SRについて、65°C強制乾燥3日間後に20°Cに戻して測定し、再び65°C強制乾燥3日間の後に20°Cに戻して測定した。同図に示すように、ここでも質量減少率が2%から3%弱の強制乾燥の間で乾燥収縮がほとんど進行していない現象が捉えられ、既往の文献と同様に質量減少率と乾燥収縮率は線形でない結果となった⁷⁾⁸⁾。十分に質量減少率を進行させた状態で乾燥収縮率を測定しな

いとばらつきの要因となると考えられる。

3.4 実験IIbの実験結果および考察(強制乾燥温度80°C)

(1) 乾燥収縮率と質量減少率の推移

質量減少率と乾燥収縮率を図-18に示す。凡例の20°C乾燥は、JIS法の乾燥材齢8週までの測定値(試験途中経過)と強制乾燥前の測定値をプロットしたものである。20°C乾燥後の質量減少率と乾燥収縮率の関係は、強制乾燥後の値に比べて相関が高く、実験IIaと同様に80°C強制乾燥法でも20°C乾燥の延長線上に分布していない。

初期養生20°Cおよび40°Cの乾燥収縮率の推移を図-19に示す。初期養生20°Cでは、全体的に乾燥収縮率は、前乾燥期間が短いと80°C強制乾燥期間を延ばしても増大しにくいものの、ある程度の水和反応で硬化した後に80°C強制乾燥させると、その期間に比例して増大する傾向を示した。これは、前乾燥期間が短いとその後の強制乾燥による水分の蒸発が過大となって、微細なひび割れが生じやすくなることが考えられるが明らかではない。初期養生40°Cの場合、20°Cの同一前乾燥期間と比較すると乾燥収縮率はほとんど差がなく、質量減少率は若干大きくなる傾向を示したものの、40°Cで強度発現を促進させて強制乾燥させる利点は見出せなかった。

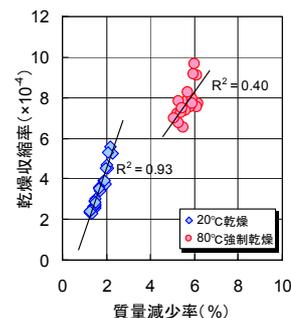


図-18 質量減少率と乾燥収縮率 (実験IIb)

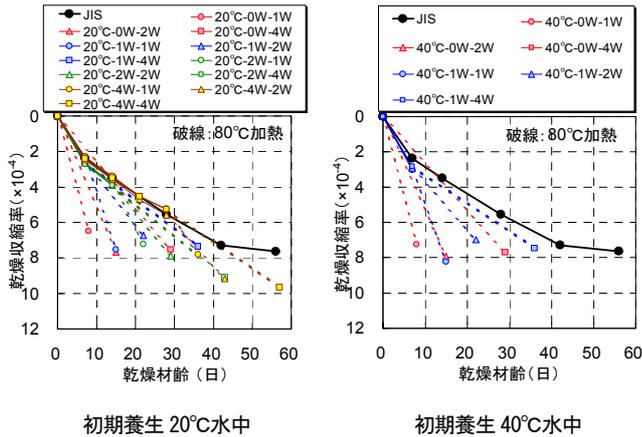


図-19 乾燥収縮率の推移 (初期養生 20°C、40°C)

(2) 前乾燥および強制乾燥期間と収縮率、強度性状

強制乾燥後の乾燥収縮率および質量減少率を図-20に示す。図-20 左図では JIS 法 26 週の乾燥収縮率が比較基準であるが、ここでは実験Ⅱa で得られた JIS 法 26 週の乾燥収縮率に対する 8 週の倍率 (1.25 倍) を本試験 (実験Ⅱb) での 8 週の実測値に乗じて (8 週 : 763 μ × 1.25 = 955 μ)、その値を JIS 法 26 週の推定値として図示している。なお、各測定データのプロットは、初期養生および前乾燥期間に対して 80°C 強制乾燥 1 週間、同 2 週間、同 4 週間の測定データが連続したプロットとなっている。

前乾燥 4 週間後 80°C 強制乾燥 4 週間の乾燥収縮率 (図中では◆) の実測値は 966 μ であり、JIS 法 26 週の推定値と比較すると前者の方が約 1% 大きい概ね等しい値であった。このことから、80°C 強制乾燥法による乾燥収縮率は乾燥材齢 8 週 (前乾燥 4 週間後 80°C 強制乾燥 4 週間) で JIS 法 26 週の値と同程度となるが、それ以前では小さい値となっており、乾燥材齢 8 週よりも早い段階での乾燥収縮率の推定では補正が必要であることが示唆された。

80°C 強制乾燥した後の硬化性状について、図-21 に示す。80°C で強制乾燥した供試体のヤング係数は、圧縮強度に比べて強制乾燥の影響を受け、小さくなることが確認された。

3.5 実験Ⅱのまとめ

乾燥収縮率の早期判定法について検討するために強制乾燥温度を 65°C とした実験 (実験Ⅱa)、強制乾燥温度を 80°C とした実験 (実験Ⅱb) を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 20°C 乾燥 2 週間および 4 週間後に 65°C 強制乾燥した供試体の乾燥収縮率は、JIS 法 26 週と比較して強制乾燥が不十分な場合や 65°C と 20°C を繰り返した場合は小さくなるが、質量減少率が十分大きくなれば SR を除きほぼ同程度であった。

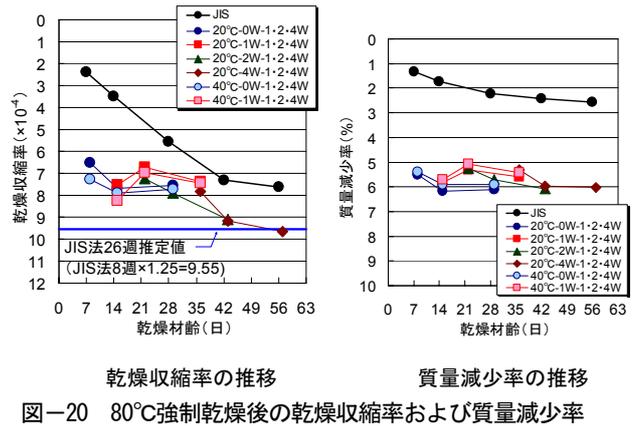


図-20 80°C 強制乾燥後の乾燥収縮率および質量減少率

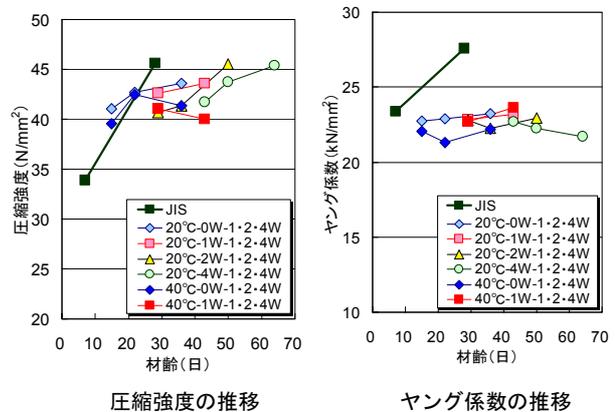


図-21 80°C 強制乾燥後の圧縮強度・ヤング係数

- 2) 質量減少率が十分大きくなるためには、65°C 強制乾燥期間が長く必要であった。
 - 3) 前乾燥期間が短いと 80°C 強制乾燥後の収縮は増大せず、前乾燥期間が長いと比例して増大する傾向を示す。
 - 4) JIS 法 26 週 (推定値) に対して、前乾燥 4 週間後 80°C 強制乾燥 4 週間の乾燥収縮率は同程度の値を示したが、それ以前に推定する場合には補正が必要である。
- 今後 26 週の実測値との比較検証を行うとともに、さらにセメント種類や粗骨材種等での実験検証が必要である。

4. まとめ

収縮低減型のコンクリート用化学混和剤などの評価実験については、別添型、混入型、塗布型のいずれの収縮低減剤も、現場条件下であっても JIS の標準試験条件と同程度の性能が期待できることを確認した。

一方、コンクリートの乾燥収縮率の早期判定法の検討については、ある程度強度発現し乾燥した供試体を 65°C や 80°C で十分強制乾燥することで、収縮率は JIS 試験方

法の値に漸近することが確認できた。しかし早期判定のためには補正が必要であり、実用化に課題が残った。

[謝 辞]

本研究における実験は(株)フローリックの協力を得て実施したものであり、ここにあらためて謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 小池晶子ほか：初期養生の違いが各種収縮低減剤の効果へ及ぼす影響（その1 塗布型収縮低減剤）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.449-450、2011.8.
- 2) 河上浩司ほか：初期養生の違いが各種収縮低減剤の効果へ及ぼす影響（その2 混入型および別添型）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.451-452、2011.8.
- 3) 安田正雪ほか：強制乾燥によるコンクリートの乾燥収縮特性（その1 65℃強制乾燥における収縮性状）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.491-492、2011.8.
- 4) 山田雅裕ほか：強制乾燥によるコンクリートの乾燥収縮特性（その2 80℃強制乾燥における収縮性状）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.493-494、2011.8.
- 5) 安田正雪ほか：強制乾燥によるコンクリートの乾燥収縮特性（その3 乾燥収縮に及ぼす前乾燥および強制乾燥期間の影響）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.713-714、2012.9.
- 6) 西ほか：水溶性収縮低減剤が乾燥収縮および凍結融解に与える影響、コンクリート工学年次論文集、vol.31,No.1、pp.1099-1104、2009.
- 7) 足立、千歩、長谷川：強制乾燥による長期材齢コンクリートの乾燥収縮率の評価方法の検討、日本コンクリート工学年次論文集、vol.28,No.1、pp.503-508、2006.
- 8) 三橋、沼尾：セメント硬化体の水分逸散と乾燥収縮に及ぼす温度の影響に関する研究、セメント・コンクリート論文集、vol.46、pp.702-707、1992.