

論文 骨材の吸水率がコンクリートの乾燥収縮特性に与える影響に関する実験的研究

井上 裕貴*1・橋本 親典*2・渡辺 健*3・石丸 啓輔*4

要旨: 筆者らは、コンクリートを低温炉乾燥することで乾燥収縮を促進させる急速乾燥収縮試験を提案している。本研究では、吸水率の比較的大きい砕石、砕砂を共通の骨材とし、粗骨材表面を球状化した粗骨材、吸水率の小さい石灰石砕石・砕砂および、逆に吸水率の大きい再生粗骨材との併用によって、コンクリートの乾燥収縮の抑制効果について実験的に検討した。その結果、吸水率の異なる細・粗骨材の平均吸水率とコンクリートの乾燥収縮特性の関係から、ある一定の平均吸水率を超えると乾燥収縮ひずみは減少することが明らかになった。

キーワード: 乾燥収縮, 吸水率, 炉乾燥, 球状化粗骨材, 石灰砕砂, 石灰砕石, 再生骨材

1. はじめに

近年、コンクリートの収縮ひび割れを抑制・制御する合理的な方法の確立が強く求められており^{1,2)}、このひび割れを制御する上で、コンクリートの乾燥収縮ひずみを定量的に評価することは極めて重要である。

コンクリートの乾燥収縮率を評価する方法には、JIS A 1129 の長さ変化試験がある。この方法では通常 20±3℃、RH60±5% の環境下で 6 ヶ月という多大な時間と苦労を要する。一般的なコンクリート工事において、半年以上前にコンクリートの品質を確認することは難しい。コンクリートの乾燥収縮の抑制対策の評価を早く判定する方法の一つとして、長期の乾燥収縮量を短期間で得るため、筆者らは、急速乾燥収縮試験(以後、迅速法と称す)を開発してきた³⁾。

ところで、乾燥に伴い、骨材自体もある程度収縮し、しかも収縮値は骨材によって比較的大きく異なることが、早くに指摘されていた⁴⁾。しかしながら、この指摘が取り上げられる機会はほとんどなく、これまで骨材はほぼ無収縮であると考えられ、コンクリートの乾燥収縮は、セメントペーストの影響にのみ重点が置かれ、骨材自体の収縮は看過されてきた感がある。骨材の岩種や骨材自体の乾燥収縮に関する研究^{5,6)}に対し、骨材の形状に関する研究報告はあまり多くない。

一般に、吸水率の大きい骨材を用いたコンクリートは、質量減少率が大きく乾燥収縮量が大きいと考えられている。しかしながら、再生骨材は吸水率が大きいにも関わらず、乾燥収縮はあまり大きくならない。これは後藤らの研究^{4,5)}によって、軽量骨材コンクリートの特性として証明されている。すなわち、吸水率が大きく骨材に大

きな空隙がある場合、メニスカスの原理から表面張力が小さくなり、乾燥収縮が小さくなるという機構である。

今本ら⁶⁾は、後藤らの研究をさらに発展させ、骨材比表面積(内部比表面積)とコンクリートの乾燥収縮特性に強い相関があることを実験的に報告している。

本研究では、吸水率の比較的大きい砕石、砕砂を共通の骨材とし、物理的に粗骨材表面を球状化することによって内部比表面積の低減を試みた球状化骨材の併用、吸水率の小さい石灰石砕石・砕砂との併用、逆に吸水率の大きい再生粗骨材との併用によって、コンクリートの乾燥収縮の抑制効果について実験的に検討した。

まず、段階ごとに球状化した粗骨材がコンクリートの乾燥収縮に与える影響を JIS 法、迅速法でそれぞれ評価を行い、コンクリートの乾燥収縮特性を迅速法によって安全側に評価することを検証した。次に、迅速法を用いて、球状化粗骨材、石灰石砕石・砕砂及び再生粗骨材による乾燥収縮抑制効果と骨材置換率の関係を検討した。

2. 乾燥収縮ひずみの測定方法

長さ変化試験は、JIS A 1129-2「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法：コンタクトゲージ法」に準じて行った。脱型後 2 週間水中養生したものを乾燥期間 0 日とし、計測を開始した。

JIS 法、迅速法それぞれに角柱供試体(100*100*400mm)を 2 本ずつ作製し、表面と裏面に、中央部分と左右 100mm の間隔でコンタクトチップを 3 枚ずつ貼り付け、測定のための標点とし、1 供試体につき表面 2 か所、裏面 2 か所の合計 4 か所の 2 点間の長さ変化を測定した。最小目盛 1000 分の 1 まで読み取り、4 か所の乾燥収縮ひずみの

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部知的力学システム工学専攻 博士前期課程 1 年 (正会員)

*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門教授 工博 (正会員)

*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門准教授 博(工) (正会員)

*4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン (正会員)

表-1 使用材料および物理特性

使用材料	種類	岩種	密度(g/cm ³)	表乾密度(g/cm ³)	吸水率(%)	実積率(%)	
セメント	普通ポルトランドセメント	-	3.16	-	-	-	
(A)	細骨材	徳島県阿南市	-	2.57	1.77	63.8	
	粗骨材	徳島県鳴門市		Lv0	2.60	1.72	58.7
				Lv2	2.62	1.16	61.8
				Lv4	2.62	1.14	62.2
(B)	細骨材	香川県善通寺市	-	2.57	2.56	63.8	
	粗骨材	香川県善通寺市		Lv0	2.65	1.96	62.4
				Lv1	2.65	2.07	64.8
				Lv2	2.66	1.91	65.6
混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系					
	AE剤	アルキルエーテル系					

表-2 示方配合

配合	W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m ³)					
			W	C	S	G	高性能AE減水剤	AE剤
(A)	50	43	175	350	740	992	1.05	0.007
(B)						1011	1.4	0.011



写真-1 球状化粗骨材の外観

平均を求めることで、精度向上を図った。

JIS法は室温20℃、相対湿度60%の環境下で保管し182日まで測定した。迅速法は温度40℃、湿度0%で低温炉乾燥させ56日あるいは収束するまで測定を実施した。迅速法では常温での計測のため、40℃炉乾燥から供試体を取り出し、24時間20℃の試験室に放置した後に、長さ変化を計測した。炉乾燥温度40℃は、エトリングライトの結晶水が消失する温度以下ということから決定した。なお、両試験とも、前回の収縮ひずみと今回の収縮ひずみの差が全体の収縮ひずみの5%以下になった時、収縮は収束したものとみなす。

3. 粗骨材の球状化による実験

3.1 使用材料および示方配合

岩種の異なる2種類の骨材に、それぞれ縦型遠心整粒機処理を複数回行い、表面を球状化させた。これにより、吸水率を小さく、実積率を大きくすることで、乾燥収縮を抑制することを目的とし、実験を行った。

(A) 本実験のコンクリートにおける使用材料および物理特性を表-1に示す。Lv0(無加工), Lv2(2回処理),

表-3 フレッシュ試験結果

		Lv0	Lv2	Lv4
(A)	スランプ(cm)	14	18	20
	空気量(%)	4.5	4.5	5
(B)	スランプ(cm)	18.5	20	19
	空気量(%)	5.8	6.5	5

Lv4(4回処理)の順に球状化している。加工レベルに応じて、実積率は大きくなり、吸水率は小さくなっていることが確認できる。粗骨材形状の外観を写真-1に示す。表面形状は無加工のものとは加工したものでは角ばりが取れ、丸みを帯びていることが分かる。

(B) 本実験のコンクリートにおける使用材料および物理特性を表-1に示す。Lv0(無加工), Lv1(1回処理), Lv2(2回処理)の順に球状化している。加工レベルに応じて、実積率は大きくなっているが、吸水率にはあまり差が見られない。

示方配合を表-2に示す。両試験とも、粗骨材粒形は5mm~20mmである。粗骨材の違いによる影響を検討するため、粗骨材形状以外の配合は全て同一とした。

3.2 実験結果および考察

3.2.1 フレッシュ性状

両実験において、練り混ぜ直後のコンクリートを用いてスランプ試験、空気量試験を行った。結果を表-3に示す。両配合とも、W/C=50%, s/a=43%としている。

(A)の結果において、加工レベルに応じて、スランプは増加していく傾向が見られた。これは、球状化粗骨材の実積率が大きくなり、同一スランプに対する単位水量が減少するためである。それに対して、(B)の結果では、スランプにはあまり変化が見られない。これは、実積率に大きな差がないことによる。両実験ともに、材料分離も起こさない施工性能の良好なコンクリートが得られた。

3.2.2 乾燥収縮試験結果

JIS法、迅速法の測定結果を図-1、図-2に示す。水分の逸散の多い初期材齢ほど収縮速度が大きく、材齢の経過とともに収縮速度は小さくなる。JIS法では、(A)において、3種類の供試体はどれも乾燥期間56日で収縮は収束し、収縮量は900 μ 程度であった。(B)においては乾燥期間182日で、収縮量は700 μ 程度であった。

迅速法では、(A)において、3種類の供試体はどれも乾燥期間56日で収縮は収束している。(B)においては乾燥期間35日で収縮は収束している。

一方、球状化粗骨材による乾燥収縮の抑制効果に関しては、今回の球状化による比表面積の低減効果はほとんどないと判断できる。すなわち、(A)においては、形状加工後の粗骨材を使用したコンクリートの方がJIS法、迅速法どちらの試験においても小さめの収縮量を示したのに対し、(B)においては、形状加工後の粗骨材を使用したコンクリートの方が、大きめの収縮量を示した。

また、(A)と(B)の無処理粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみが、JIS法で300 μ 程度、迅速法で400 μ 程度、(A)の方が大きい。吸水率は、(A)より(B)の方が0.2%前後大きい。吸水率の大きさと比較して、乾燥収縮ひずみの差が著しく大きい。これは、粗骨材自体の弾性係数等の骨材の力学的性質によるものと思われる。

3.2.3 JIS法と迅速法の比較

乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係をそれぞれ図-3、図-4に示す。コンクリート中の水分が失われることによる質量減少と乾燥収縮には高い相関性があり、この関係は材齢に依存しない。つまり、乾燥期間の短縮が狙いである迅速法を用いることで、JIS法における長期乾燥収縮ひずみを質量減少率から予測することができる。その程度は、通常JIS法で乾燥期間13週~6ヶ月程度で収縮が収束することを考慮すると、約1/3程度の乾燥期間の短縮になる。

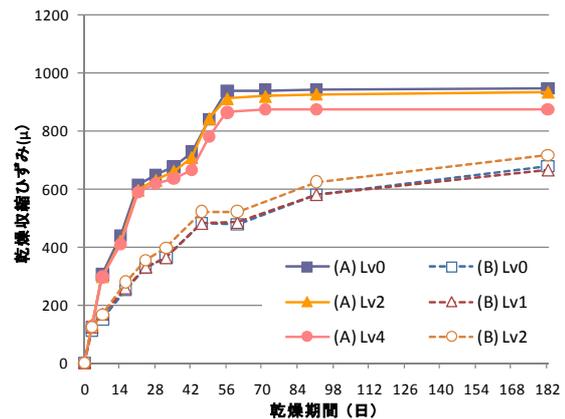


図-1 乾燥収縮ひずみ(JIS法)

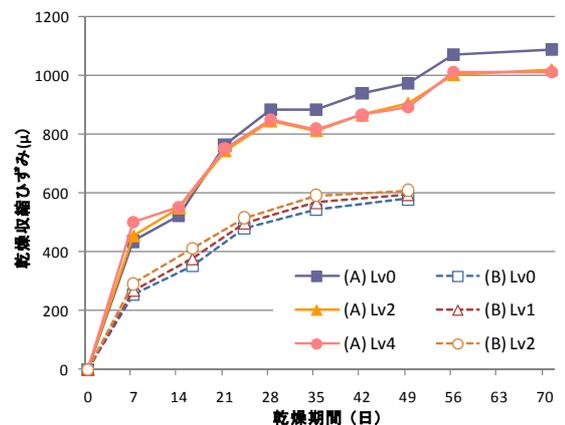


図-2 乾燥収縮ひずみ(迅速法)

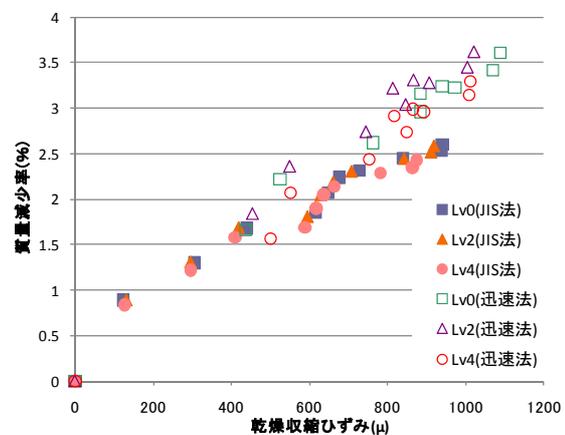


図-3 (A) 乾燥収縮ひずみと質量減少率との関係

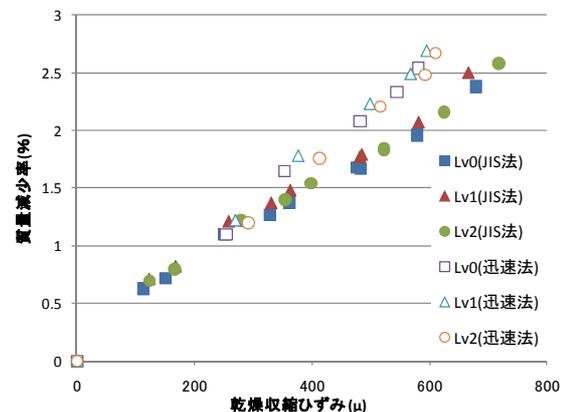


図-4 (B) 乾燥収縮ひずみと質量減少率との関係

表-4 示方配合

	置換率	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)							
				W	C	S		G		AE減水剤	AE剤
						石灰砕砂	砕砂	石灰砕石	砕石		
無混和	0%	8.0	2.2	175	350	0	768	0	936	4.2	0.007
石灰砕砂	20%	9.0	2	175	350	157	615	0	940	0.7	0.007
	40%	17.0	5.5			314	461				
	50%	14.0	5			396	387				
	60%	21.0	4.5			472	307				
	75%	20.5	5.5			594	193				
100%	23.5	5.5	792	0							
石灰砕石	25%	15.0	4.5	175	350	0	768	247	701	4.2	0.007
	50%	18.0	5			493	468				
	75%	16.5	5			740	234				

表-5 使用材料および物理特性

使用材料	種類		岩種	密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率 (F.M.)
セメント	普通ポルトランドセメント		-	3.16	-	-	-
細骨材	石灰砕砂	大分県津久見市	石灰岩	-	2.63	0.29	2.88
	砕砂	徳島県阿波市	安山岩		2.57	1.77	2.63
粗骨材	石灰砕石	大分県津久見市	石灰岩		2.70	1.02	6.63
	砕石	徳島県鳴門市	安山岩		2.56	2.16	7.03

4. 石灰砕砂、石灰砕石を用いた実験

4.1 使用材料および示方配合

本実験の石灰砕砂および石灰砕石を用いた示方配合を表-4に示す。石灰砕砂の置換率による影響を検討するため、細骨材以外の配合は全て同一とし、砕砂の一部を石灰砕砂に置換(20, 40, 50, 60, 75, 100%)した。石灰砕石の置換率による影響を検討するため、粗骨材以外の配合は全て同一とし、砕砂の一部を石灰砕砂に置換(20, 50, 75%)した。両配合とも W/C=50%, s/a=45%とした。使用材料および物理特性を表-5に示す。石灰砕砂、石灰砕石の吸水率が小さい。

4.2 実験結果および考察

4.2.1 乾燥収縮試験結果

迅速法を用い、1週間毎に乾燥収縮量を計測した。測定結果を図-5、図-6に示す。水分の逸散の多い初期材齢ほど収縮速度が大きく、材齢の経過とともに収縮速度は小さくなってゆく傾向は両結果ともにみられた。石灰砕砂における実験の7種類の供試体は乾燥期間49日で収縮は収束しており、石灰砕石における実験の4種類の供試体は42日で収束している。

4.2.2 乾燥収縮抑制効果

最終収集データにおける石灰無混和の収縮ひずみを基準とし、各置換率における最終乾燥収縮ひずみの差を乾燥収縮抑制効果と定義する。その結果を図-7に示す。置換率が大きくなるにつれ、抑制ひずみ量も大きくなっている。これは、石灰石の吸水率が小さく、普通骨材より石灰石骨材の収縮が小さいことによると考えられる。また、抑制ひずみ量が石灰砕砂より石灰砕石の方が大きくなった理由として、単位量が大きいためであると考えられる。

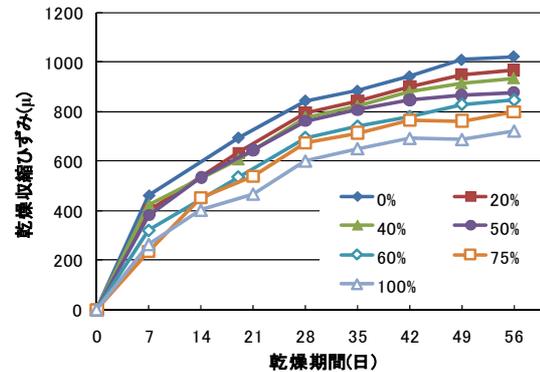


図-5 乾燥収縮ひずみ(石灰砕砂)

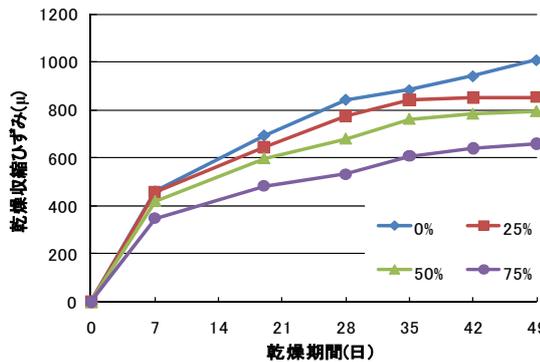


図-6 乾燥収縮ひずみ(石灰砕石)

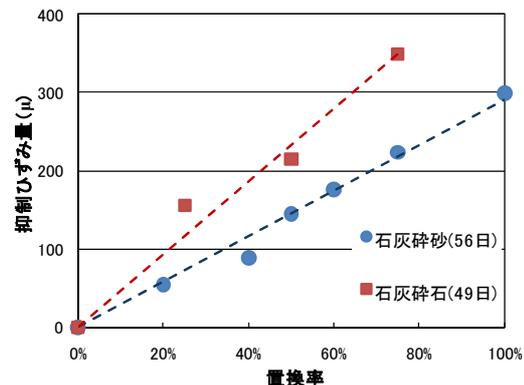


図-7 乾燥収縮抑制効果

表-6 示方配合

置換率	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					AE減水剤	AE剤
			W	C	S	G			
						砕砂	再生骨材		
0%	10.0	5	175	350	768	0	936	4.2	0.011
25%	15.0	5.5				223	701		
50%	14.0	6				446	468		
75%	15.0	5				669	234		

表-7 使用材料および物理特性

使用材料	種類		岩種	密度(g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率(%)	粗粒率(F.M.)
セメント	普通ポルトランドセメント		-	3.16	-	-	-
細骨材	砕砂	徳島県阿波市	安山岩	-	2.57	1.77	2.63
粗骨材	再生骨材	L級	-		2.44	5.12	6.56
	碎石	徳島県鳴門市	安山岩		2.56	2.16	7.03

5. 再生骨材を用いた実験

5.1 使用材料および示方配合

本実験の示方配合を表-6に示す。再生骨材の置換率による影響を検討するため、粗骨材以外の配合は全て同一とし、砕砂の一部を再生骨材に置換(20, 50, 75%)した。使用材料および物理特性を表-7に示す。再生骨材の吸水率は相当に大きい。W/C=50%, s/a=45%は、3章と4章の配合条件と同じとしている。

5.2 乾燥収縮試験結果

迅速法を用い、1週間毎に乾燥収縮量を計測した。測定結果を図-8に示す。水分の逸散の多い初期材齢ほど収縮速度が大きく、材齢の経過とともに収縮速度は小さくなってゆく傾向は同様にみられた。4種類の供試体はどれも乾燥期間35日で収縮は収束していることが分かる。乾燥収縮ひずみの差は微小ではあるが、置換率0%のものが一番大きく、順に50%, 25%, 75%となっている。吸水率の大きい再生骨材を併用しても、乾燥収縮ひずみは大きくならない。

6. 平均吸水率による乾燥収縮ひずみの評価

6.1 乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係

吸水率の大きさによる乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係について検討した。石灰砕石の置換率別および再生骨材の置換率別における乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係を図-9, 図-10に示す。

石灰砕石の場合、同等の質量減少率で、置換率が大きいほうが、乾燥収縮ひずみが小さい。これは、普通砕石と石灰砕石全体の吸水率が小さく、骨材自体の収縮が小さくなったためである。よって、吸水率が小さいほど、収縮が低減する。一方、再生骨材の場合においても、同等の質量減少率で、置換率の大きく吸水率の大きいほうが、乾燥収縮ひずみが小さい。これは、収縮におけるメニスカスの原理により空隙の大きい骨材の方が表面張力は小さく、収縮量が低下したためと考えられる。

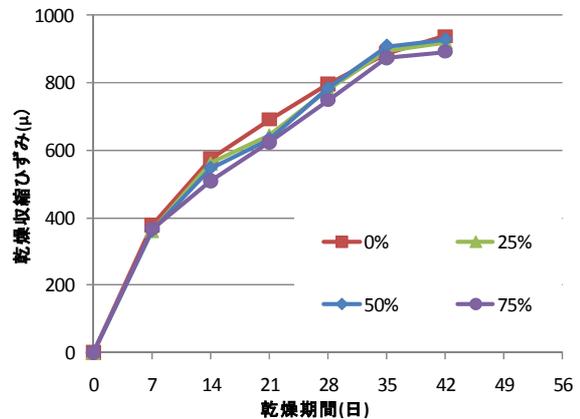


図-8 乾燥収縮ひずみ

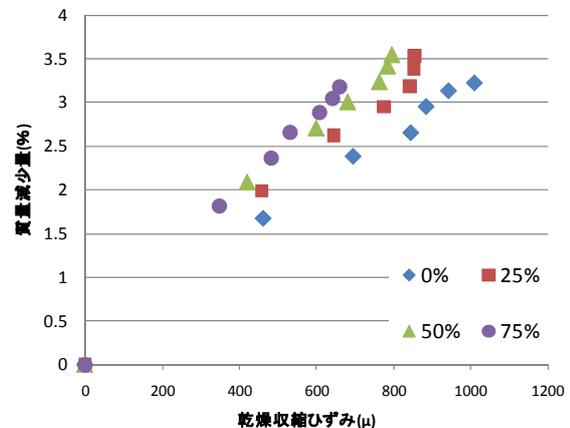


図-9 乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係(石灰砕石)

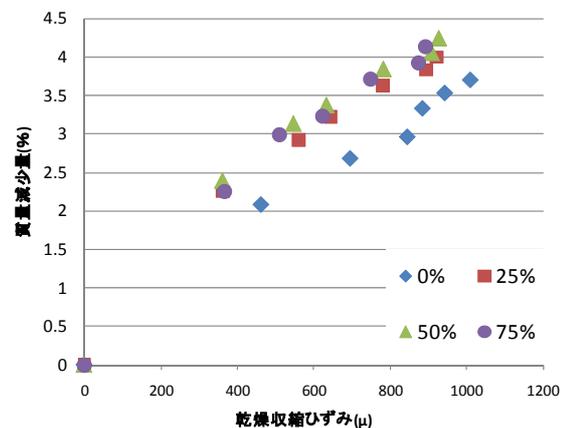


図-10 乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係(再生骨材)

つまり、乾燥収縮ひずみの抑制は、吸水率の大きさに
より、骨材自体の収縮量の低下機構と、骨材の空隙の表
面張力による収縮量の低下機構が存在すると考えられ
る。

6.2 吸水率と乾燥収縮ひずみの関係

吸水率と乾燥収縮ひずみの関係を見るため、配合にお
ける骨材全体の吸水率を平均し、それを平均吸水率と定
義する。なお、平均吸水率は次式(1)を用いて算出した。

$$\rho_{ave} = \frac{\sum V_n \rho_n}{\sum V_n} \left(\begin{array}{l} \rho_n: \text{各骨材の吸水率 (\%)} \\ V_n: \text{各骨材の容積 (l)} \end{array} \right) \quad (1)$$

求めた結果を表-8 に示す。平均吸水率と最終乾燥収
縮ひずみの関係を図-11 に示す。球状化(B)のデータ
を除くと、近似曲線は上に凸の形状を表しており、平均吸
水率が、約 2.5%をピークに収縮ひずみは一定の傾向を
示している。ただし、平均吸水率が 2.5%以上のデータ
は再生骨材しかないため、骨材の種類は考えず、平均吸
水率だけに着目する。このことから、骨材自体の収縮に
より、ある一定まで乾燥収縮ひずみは増加するが、その
境界を超えるとメニスカスの理論⁴⁾により、収縮を抑制
できることが考えられる。

球状化(B)の粗骨材は、骨材自体の性能が良好であり、
球状化の有無に関係なく吸水率が大きい割に、コンクリ
ートの乾燥収縮が小さい粗骨材であり、この原因は、粗
骨材自体の弾性係数の違いではないかと思われる。

7. 結論

本研究で明らかになったことを以下に記す。

- 1) 乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係は乾燥期間に
依存しなく、迅速法を用いることで、JIS 法におけ
る長期乾燥収縮ひずみを質量減少率から予測する
ことができる。これにより、約 1/3 程度の乾燥期間
の短縮になる。
- 2) 平均吸水率と乾燥収縮ひずみの関係において、ある
一定の平均吸水率まで乾燥収縮ひずみは増加する
が、その境界を超えると乾燥収縮ひずみは減少、ま
たは増加しない傾向がある。よって、吸水率の大き
い再生骨材を併用することで、コンクリートの乾燥
収縮を抑制できる可能性がある。

【謝辞】本研究の一部は、JCI 四国支部「四国の骨材に
関する研究委員会（委員長 堺孝司 香川大学教授）第4
分科会：コンクリートの乾燥収縮に関する対策検討委員
会」の活動において実施され、各委員から試料を提供し
て頂きました。ここに付記し、深く感謝の意を表します。

表-8 平均吸水率値および最終乾燥収縮ひずみ

配合	平均吸水率 (%)	最終収集データ	
		乾燥収縮ひずみ(μ)	乾燥期間
球状化(A)	Lv0	1.74	1071
	Lv2	1.42	1004
	Lv4	1.41	1010
球状化(B)	Lv0	2.22	544
	Lv1	2.28	568
	Lv2	2.19	592
石灰砕砂	0%	1.98	1009
	20%	1.85	950
	40%	1.72	914
	50%	1.65	847
	60%	1.59	829
	75%	1.48	764
	100%	1.32	693
石灰砕石	0%	1.98	942
	25%	1.82	852
	50%	1.66	783
	75%	1.50	640
再生骨材	0%	1.98	887
	25%	2.39	893
	50%	2.80	909
	75%	3.21	875

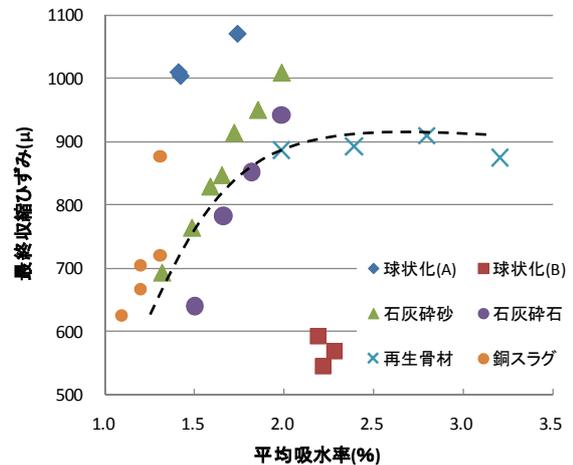


図-11 平均吸水率と最終乾燥収縮ひずみの関係

【参考文献】

- 1) 二村誠二：鉄筋コンクリート造建物のひび割れ対策
—ひび割れ問題に対する相互理解に向けて—, 日本
建築学会大会研究協議会資料, pp.1-7 (2005)
- 2) 三橋博三ほか：収縮ひび割れの予測と制御の現状,
コンクリート工学, Vol.43, No.5, pp.4-10 (2005)
- 3) 井上裕貴ほか：低温炉乾燥による急速乾燥収縮試験
法と長さ変化試験法(JIS A 1129)の比較, 土木学会
四国支部技術研究発表会講演概要集, Vol.16,
269-270 (2010)
- 4) 後藤幸正, 藤原忠司：乾湿に伴う骨材の体積変化,
土木学会論文報告集, Vol.247, pp.97-108 (1976)
- 5) 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, 土木学会論文報告集, Vol.286,
pp.125-137 (1979)
- 6) 今本啓一ほか：各種骨材を用いたコンクリートの乾
燥収縮特性と骨材比表面積の影響, 日本建築学会構
造系論文集, Vol.606, pp.9-14 (2006)