

# 論文 骨材寸法および微粒分量がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響

樋口 優香\*1・寺西 浩司\*2・齊藤 和秀\*3

**要旨:** 本研究では、骨材寸法がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響について、単一粒度骨材を用いて検討した。その結果、骨材寸法が大きいほどコンクリートの乾燥収縮ひずみが小さくなることが明らかとなった。また、実験結果を基にして乾燥収縮ひずみの推定式を構築し、その推定精度を既往の文献により検証した。このほかに、骨材の微粒分を単に寸法の小さな骨材であると見なし、実験および上記の推定式により、微粒分量がコンクリートの乾燥収縮ひずみに与える影響を検討した。その結果、微粒分量の影響は小さいことが明らかになった。

**キーワード:** 単一粒度骨材, 骨材量, 複合理論, 比表面積, 細骨材率, 微粒分量

## 1. はじめに

最近、骨材の性質が、コンクリートの乾燥収縮ひずみに大きな影響を与えるとの認識が一般に定着してきた。また、単位水量によって実質的に決定される骨材量もコンクリートの乾燥収縮ひずみに影響を与えと言われており<sup>1)</sup>、このことは、複合理論によっても理論的に説明されている<sup>2)</sup>。しかし、骨材寸法がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響については、最近の一部の報告<sup>3)~6)</sup>を除いて、これまでほとんど検討されてこなかった。そこで、本研究では、単一粒度骨材を用いたコンクリートの骨材寸法を変化させ、単純化された条件の基で乾燥収縮ひずみに対する骨材寸法の影響を検討した。そして、得られた実験結果に基づいて、骨材の粒度分布とコンクリートの乾燥収縮ひずみの関係を定式化し、本研究と同様な実験を行っている既往の文献<sup>3)~5)</sup>によりその推定精度を検証した。

また、JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」では、2009年の改正に伴い、砕石および砕砂の微粒分量の最大値が緩和された。この点に関しては、石灰石微粉末を混和材としてコンクリートに添加することで、乾燥収縮低減効果が得られると言われている<sup>7)</sup>。しかし、その一方で、骨材の微粒分量が増えると乾燥収縮ひずみが大きくなるとの報告<sup>8),9)</sup>もある。すなわち、微粒分量がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響は明確にされていないのが現状である。そこで、本研究では、微粒分を単に寸法の小さな骨材であると見なし、コンクリートの乾燥収縮ひずみに対する微粒分量の影響を検討した。また、上述の推定式を用いて考察を行った。

## 2. 骨材寸法の影響を調べるための実験

### 2.1 実験概要

#### (1) 骨材および実験ケース

表-1 および図-1 に物性および粒度分布を示すような、同一工場から入手した砕砂・砕石をふるい分け、表-2中に示す寸法の単一粒度骨材を作製した。また、表-1に示した細骨材および粗骨材を細骨材率が50%となるように混合し、それを連続粒度骨材とした。本実験では、これらの骨材を用い、骨材体積比  $V_a$  (コンクリート中に占める骨材の体積比率) を2水準に変化させたコン

表-1 使用骨材とその性質

種別	産地 (岩種)	表乾 密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水 率 (%)	乾燥収縮 ひずみの 最終値*	ヤング 係数* (kN/mm <sup>2</sup> )
細骨材	春日井産 砕砂 (硬質砂岩)	2.60	1.72	30×10 <sup>-6</sup>	77.9
粗骨材	春日井産 砕石 2005 (硬質砂岩)	2.65	0.56		

\*原石塊から採取したコア(φ35×70mm)に対する試験値

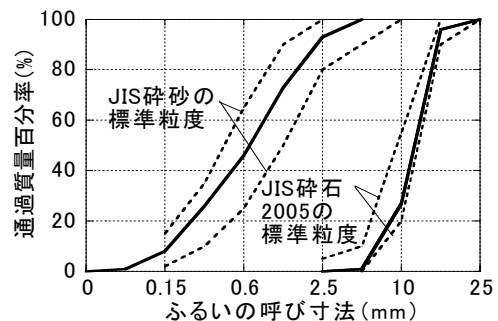


図-1 骨材の粒度分布

\*1 名城大学 理工学研究科建築学専攻 大学院生 (学生会員)

\*2 名城大学 理工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

\*3 竹本油脂(株) 第三事業部 (正会員)

クリートに対して実験を行った。このほかに、セメントペーストも実験ケースとした。

(2) 調合

表-3 に調合を示す。本実験では、セメントペースト成分を同一とし、骨材体積比を所定値とした調合に対して、骨材を変化させた。また、寸法の大きい単一粒度骨材を用いたコンクリートの分離抑制を目的として、セルロース系増粘剤を使用した。なお、調合設計にあたっては、すべてのケースで粗骨材の表乾密度を用いて骨材の質量を計算した。また、セメントには、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm<sup>3</sup>）を用いた。

(3) コンクリートの練混ぜ

寸法が 2.5mm より小さい単一粒度骨材の場合は、骨材を練混ぜ水の一部に前日から浸しておいて、それをコンクリートの練混ぜに供した。また、S-20 のケースでは、骨材の沈下を防ぐため、練上がりから 1 時間後に練り返しを行ったコンクリートを供試体の型枠に詰めた。

(4) 試験項目

JIS A 1129-3 に準拠してコンクリートの乾燥収縮試験を行った。その際、供試体は 10×10×40cm とし、材齢 7 日まで標準水中養生した後に、温度 20℃、相対湿度 60% の環境下で乾燥収縮ひずみを測定した。このほかに、骨材の内部空隙の比表面積を今本らの実験<sup>10)</sup>に倣って測定した。この試験では、相対湿度 32.5% の環境下で、表-2 中に示した骨材の水蒸気吸着量をそれぞれ測定し、BET 一点法によって比表面積を求めた。

2.2 実験結果

図-2 に、コンクリートの乾燥収縮ひずみと骨材寸法の関係を示す。ここで、乾燥収縮ひずみは、乾燥期間 182 日の値である（以降も同様）。単一粒度骨材を用いたケースでは、いずれの骨材体積比の場合も、骨材寸法が大きいくほど乾燥収縮ひずみが小さくなっている。また、連続粒度骨材を用いたケースの乾燥収縮ひずみは、単一粒度骨材の一連の測定値の中間的な値となっている。

2.3 複合理論に基づく考察

図-3 に、乾燥収縮ひずみと骨材体積比の関係を示す。ここで、図中の曲線は、以下に示すような複合理論の一つである馬場式<sup>2)</sup>による理論線であり、骨材（原石コア）の乾燥収縮ひずみおよびヤング係数の測定値を基に計算したものである。

$$\frac{\varepsilon_{sc}}{\varepsilon_{sm}} = \frac{[1 - (1 - mn)V_a][n + 1 - (n - 1)V_a]}{n + 1 + (n - 1)V_a} \quad (1)$$

ここに、 $n = E_a/E_m$ ,  $m = \varepsilon_{sa}/\varepsilon_{sm}$ ,  $\varepsilon_s$ : 乾燥収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ ),  $E$ : ヤング係数 (kN/mm<sup>2</sup>),  $V_a$ : 骨材体積比。

添字 c, a, m は、それぞれコンクリート、骨材、セメントペーストを示す。

表-2 実験ケース

記号	骨材体積比 (%)	骨材種別	骨材寸法 (mm)
30S-20	30	単一粒度(S)	20~10
30S-2.5			2.5~1.2
30S-0.3			0.3~0.15
30S-0.075			0.075 以下
30C	55	連続粒度(C)	20~0
55S-20			20~10
55S-2.5			2.5~1.2
55S-0.3			0.3~0.15
55C	0	—	20~0
P			—

表-3 調合

骨材体積比 (%)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	絶対容積 (l/m <sup>3</sup> )		増粘剤 (C×%)	消泡剤 (C×%)
				セメント	骨材		
30	0	50	429	271	300	0.3	0.005
55			276	174	550		
0			334	666	—		

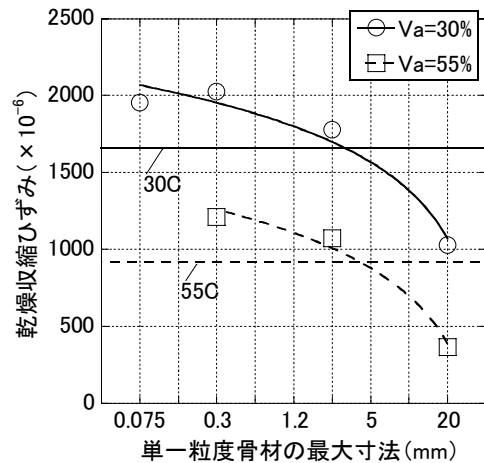


図-2 乾燥収縮ひずみと骨材寸法の関係

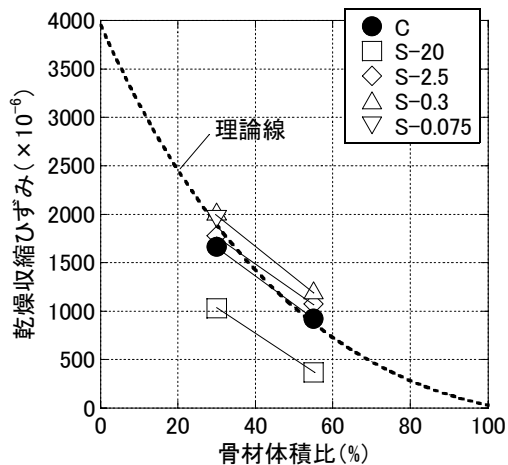


図-3 乾燥収縮ひずみと骨材寸法の関係

同図によると、乾燥収縮ひずみの測定値は、連続粒度骨材を用いたケースでは理論線とほぼ一致しているのに対し、単一粒度骨材を用いたケースでは理論線から逸脱する傾向となっている。

図-4 に、骨材の比表面積と寸法の関係を示す。比表面積は、骨材寸法が小さくなるに従って大きくなっている。一方で、小山田ら<sup>11)</sup>は、骨材の岩種が変化した場合に、骨材内部の比表面積が大きいほど骨材の乾燥収縮ひずみが大きくなると報告している。このことが、骨材寸法が変化した場合に対しても当てはまるとすると、骨材寸法が小さいほどコンクリートの乾燥収縮ひずみが大きくなるのは、図-3 中の骨材体積比 100%の値の増加に伴って、複合理論の理論線が上昇することが一因であると考えられる。また、そのほかにも、原因として、骨材のヤング係数の影響<sup>4)</sup>なども考えられ、この点に関しては、今後さらなる検討が必要である。

#### 2.4 粒度分布の影響の定式化

図-5 に、骨材寸法 0mm のときの乾燥収縮ひずみの回帰値に対する測定値の比率と骨材寸法の関係を示す。ここで、図の縦軸の値は、図-2 に示したデータを、それらを基に骨材体積比ごとに描いた回帰曲線により計算された骨材寸法 0mm のときの値で除して求めた。同図によると、両者の関係は、骨材体積比にかかわらず一つの曲線ではほぼ表されている。ここで、一般的な粒度分布の骨材中に含まれる各粒度群の骨材に対するコンクリートの乾燥収縮ひずみが、それぞれ図-5 中の回帰式により表されると仮定する。そして、骨材全体に対するコンクリートの乾燥収縮ひずみを、それらの体積割合の重み付き平均値として求めると、その値は次式により表すことができる。

$$\varepsilon_{sc} = \varepsilon_{s0} \sum_i \left( \frac{1 - 0.0295D_i}{1 - 0.0295D_0} \right) \frac{V_i}{100} \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon_{sc}$ :コンクリートの乾燥収縮ひずみ( $\times 10^{-6}$ )、 $D_i$ : $i$ 番目の粒度の寸法(mm)、 $D_0$ :基準粒度の寸法(mm)、 $\varepsilon_{s0}$ :基準粒度の単一粒度骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみ( $\times 10^{-6}$ )、 $V_i$ : $i$ 番目の粒度の体積割合(%)。

表-4 に、S-0.3 のケースを基準粒度とし、30C および 55C のケースの乾燥収縮ひずみを式(2)により試算した結果を示す。計算値は実測値に近い値を示しており、このことから、同式により、連続粒度骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみをある程度の精度で計算できることがわかる。

#### 2.5 細骨材率の影響の検討

図-6 に、30C および 55C のケースで、細骨材率が変化した場合の乾燥収縮ひずみを式(2)により試算した結果を示す。試算結果によると、細骨材率が高くなるほど、

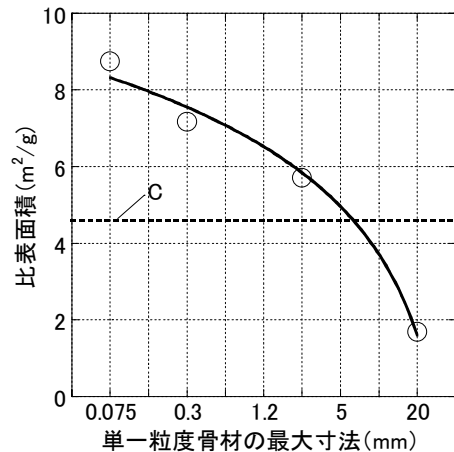


図-4 骨材の比表面積と寸法の関係

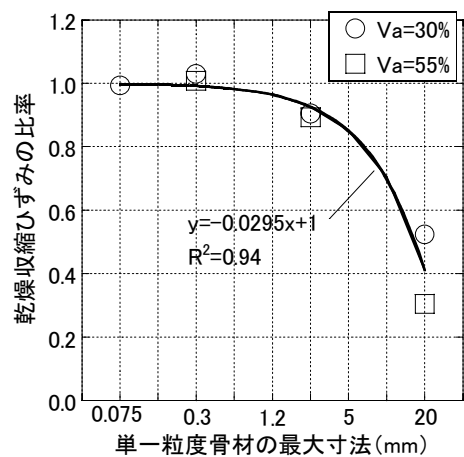


図-5 乾燥収縮ひずみの比率と骨材寸法の関係

表-4 乾燥収縮ひずみの計算結果

記号	乾燥収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	
	実測値	計算値
30C	1661	1495
55C	920	895

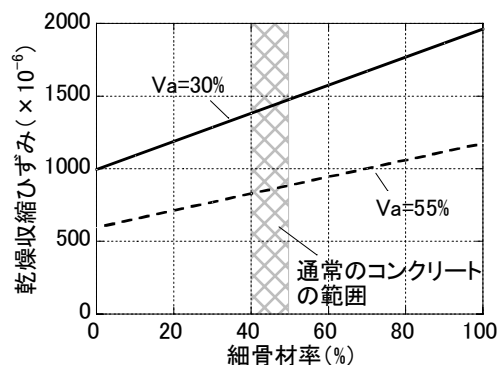


図-6 細骨材率が変化した場合の乾燥収縮ひずみ

すなわち骨材寸法の小さな細骨材の割合が増えるほど、乾燥収縮ひずみが大きくなっている。また、骨材体積比55%の場合、コンクリートの乾燥収縮ひずみは、細骨材率1%につき $5.5 \times 10^{-6}$ 大きくなっている。ただし、通常コンクリートにおける細骨材率の変動範囲(40~50%程度)を考えると、その影響は大きいとはいえない。

## 2.6 既往の文献による推定式の検証

骨材寸法とコンクリートの乾燥収縮ひずみの関係を調べた過去の3つの実験結果<sup>3)-5)</sup>により、筆者らの提案した推定式(2)の精度を検証した。各実験の概要を表-5に示す。骨材の粒度分布は、筆者らの調査とある程度の仮定を基に、表-6に示すように設定した。

### (1) 実験Aによる検証

図-7に、実験Aにおける乾燥収縮ひずみの計算値と実測値の関係を示す(計算にあたっては、5~2.5mmを基準粒度とした)。同図によると、式(2)により、骨材岩種にかかわらず、寸法の異なる骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみをある程度の精度で推定できている。ただし、単一に近い粒度のケースに着目すると、骨材寸法の小さい領域では、計算値は実測値よりもやや小さくなっている。これは、実験Aにおける骨材寸法の小さい領域でのコンクリートの乾燥収縮ひずみが本研究の実験よりも大きく測定されたためであり、この点に関しては、今後、さらにデータの蓄積が必要と考えられる。

### (2) 実験BおよびCによる検証

図-8に、実験BおよびCにおける、乾燥収縮ひずみの実測値および計算値と細骨材率の関係を示す。ここで、乾燥収縮ひずみは、各シリーズの実験における骨材岩種ごとの細骨材率100%(モルタル)の値に対する比率として表してある。実験に用いられた細骨材および粗骨材の粒度分布は、骨材ごとにやや異なっているが、同図からわかるように、計算値を示す直線にはほとんど差が見られない。また、実験Bの細骨材率50%付近の実測値に

ややばらつきがあるものの、水セメント比や骨材体積比、骨材岩種にかかわらず、実測値は計算値の直線上にほぼ分布している。したがって、式(2)により、コンクリートの乾燥収縮ひずみに対する細骨材率の影響を精度よく表せるものと判断される。

表-5 検証のための実験の概要

実験*	要因	水準		
		骨材岩種	石灰岩, 輝緑岩	
A	骨材粒度	20~13mm, 13~5mm, 5~2.5mm, 2.5~0.6mm, 0.6~0.15mm, 粒度M		
	骨材体積比(%)	45		
	水セメント比(%)	30	40	50
B	細骨材率(%)	40.8, 100	44.1, 100	48.4, 100
	骨材体積比(%)	50, 55, 60		
	骨材岩種	硬質砂岩	石灰岩	
C	細骨材率(%)	0, 50, 100	0, 100	
	骨材体積比(%)	50		

\*A: 鶴飼ら<sup>3)</sup>の実験, B: 筆者ら<sup>4)</sup>の実験, C: 齊藤ら<sup>5)</sup>の実験

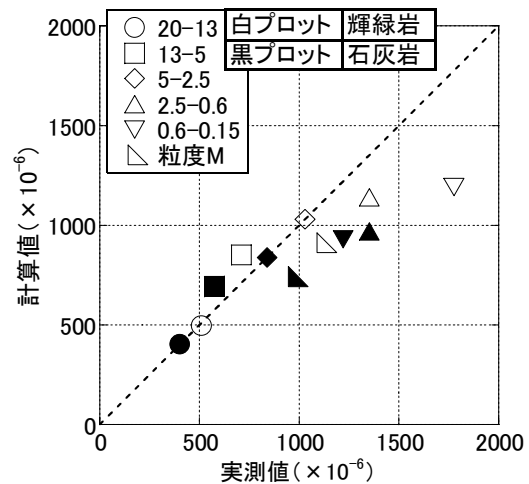


図-7 式(2)の推定精度の検証結果(実験A)

表-6 骨材の粒度構成

実験	種別	粒度分布(%)										
		粒度(mm)										
		25~20	20~10	10~5	5~2.5	2.5~1.2	1.2~0.6	0.6~0.3	0.3~0.15	0.15~0.075	0.075以下	
A	20~13mm		100									
	13~5mm			100								
	5~2.5mm				100							
	2.5~0.6mm					50	50					
	0.6~0.15mm							50	50			
	粒度M		25	25	5	11.3	11.3	11.3	11.3			
B	硬質砂岩	細骨材				8	32	30	17	7	3	3
		粗骨材	4	70	24	2						
C	硬質砂岩	細骨材				10	37	26	11	7	9	
		粗骨材	2	76	20	1	1					
	石灰岩	細骨材				10	40	19	10	11	10	
		粗骨材	5	69	26							

### 3. 微粒分量の影響を調べるための実験

#### 3.1 実験概要

##### (1) 要因とその水準

骨材（細骨材+粗骨材）に占める微粒分の混入率（微粒分量）を0（微粒分なし）、2および4%に変化させた。

##### (2) 使用材料

表-7 に示すような石灰石砕砂・砕石を、微粒分を十分に洗い流した状態で使用した。これらの粒度分布を図-9 に示す。また、粗骨材の一部をジョークラッシュなどで粉碎し、それを0.075mmふるいでふるって通過したものを微粒分とした。セメントには、普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm<sup>3</sup>）を用いた。

##### (3) コンクリートの調合および練混ぜ

表-8 に、コンクリートの調合を示す。微粒分量0%のコンクリートを基準とし、細・粗骨材の質量のそれぞれ2または4%を微粒分に置換した。また、AE減水剤および消泡剤を用いて、スランプを18cm、空気量を4.5%に調整した。なお、コンクリートの練混ぜにあたっては、微粒分を、予め練混ぜ水の一部を用いてスラリー状にして投入した。

##### (4) 試験方法

2.1(4) に示した方法で、コンクリートの乾燥収縮試験を行った。

#### 3.2 実験結果とその考察

図-10 に、コンクリートの乾燥収縮ひずみの試験結果を示す（乾燥期間182日）。同図からわかるように、試験結果（実測値）に微粒分の影響はほとんど見られなかった。同様の傾向の試験結果は、石灰石砕業協会<sup>12)</sup>や辻ら<sup>13)</sup>によっても報告されている。

また、図-10 には、微粒分の増加を単純に骨材の粒度分布の変化であると見なし、乾燥収縮ひずみを式(2)により計算した結果も示してある。ここで、計算値は、微粒分量0%のときに値が実測値と一致するように基準粒度の値を定めて算出したものである。図-5 に示したように、骨材寸法の小さい領域では、骨材寸法によるコンクリートの乾燥収縮ひずみの変化が小さい。このことにより、微粒分が増加しても、乾燥収縮ひずみはほとんど変化しないものと考えられる。

なお、コンクリート用砕石および砕砂に含まれる微粒

分量の最大値は、JIS A 5005 により、それぞれ3.0%および9.0%と定められている。本研究の考察結果によると、石灰石砕砂および砕石の微粒分量が JIS の最大値（骨材全体としての微粒分量6%程度）であった場合でも、このことがコンクリートの乾燥収縮ひずみに与える影響は小さいものと判断される。

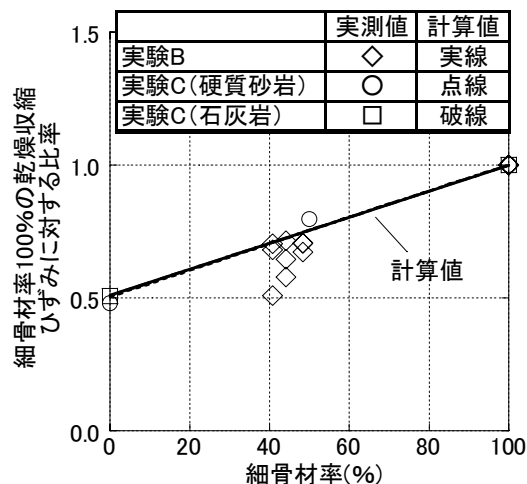


図-8 乾燥収縮ひずみと細骨材率の関係（実験BおよびC）

表-7 使用骨材

	産地・岩種	表乾密度 (g/m <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	粗粒率
細骨材	藤原産 石灰石砕砂	2.70	0.76	2.90
粗骨材	藤原産 石灰石砕石 2005	2.68	0.75	6.73

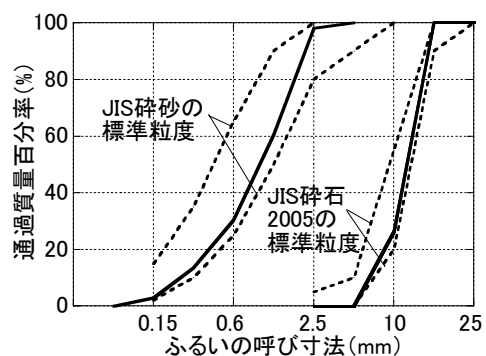


図-9 骨材の粒度分布

表-8 調合

微粒分量 (%)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	絶対容積 (l/m <sup>3</sup> )				AE減水剤 (g/m <sup>3</sup> )	消泡剤 (g/m <sup>3</sup> )
					セメント	細骨材	粗骨材	微粒分		
0	50	4.5	43.4	185	117	282	371	0	777	111
2						275	363	35		
4						271	356	70		

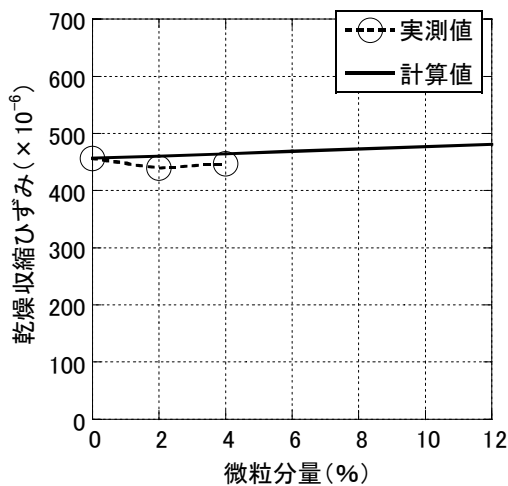


図-10 乾燥収縮ひずみと微粒分量の関係

#### 4. まとめ

本研究では、単一粒度骨材を用いたコンクリートの骨材寸法を変化させ、乾燥収縮ひずみに対する骨材寸法の影響を検討した。また、実験結果を基にして乾燥収縮ひずみの推定式を構築した。さらに、微粒分を単に寸法の小さな骨材であると見なし、コンクリートの乾燥収縮ひずみに対する微粒分量の影響を検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 単一粒度骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、骨材寸法が大きいくほど小さくなる。ただし、骨材寸法の小さな領域での乾燥収縮ひずみの変化は小さい。
- (2) 粒度分布を変化させた骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、式(2)によりある程度計算することができる。
- (3) 細骨材率が高くなると、コンクリートの乾燥収縮ひずみは大きくなる。ただし、通常のコンクリートにおける細骨材率の変動の範囲内では、その影響は大きいとはいえない。
- (4) 石灰石砕砂・砕石中の微粒分がコンクリートの乾燥収縮ひずみに与える影響は小さい。

#### 参考文献

- 1) 寺西浩司：コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす要因－骨材や単位水量の影響をどのように考えるか－，コンクリート工学，Vol.46，No.12，pp.11-19，2008.12
- 2) 岸谷孝一，馬場明生：建築材料の乾燥収縮機構，セメント・コンクリート，No.346，pp.30-40，1975.12

- 3) 鶴飼貴史，齊藤和秀，吉田亮，梅原秀哲：骨材の寸法および種類がセメント硬化体の乾燥収縮に及ぼす影響に関する研究，土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.307-308，2010.9
- 4) 寺西浩司：コンクリートとモルタルの乾燥収縮ひずみの違い，日本建築学会東海支部研究報告集，No.49，pp.53-56，2011.2
- 5) 齊藤和秀，丸山一平，小林竜平，寺西浩司：骨材量と骨材寸法がコンクリートの乾燥収縮に与える影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.915-916，2010.9
- 6) 松村宇，桂修，吉野利幸：細骨材率の違いがコンクリートの乾燥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，A-1，pp.905-906，2010.9
- 7) 鶴田昌宏，小島明，中村秀三：細骨材の一部を石灰石微粉末で置換したコンクリートの諸物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.99-104，2004.7
- 8) 小島明，鶴田昌弘，中村秀三：石灰石砕石の磨砕により増加した微粒分がコンクリートの諸性状に及ぼす影響，土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.497-498，2004.9
- 9) 石森正俊，名和豊春，胡桃澤清文：石灰石砕砂を用いたモルタルの強度発現と乾燥収縮に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.109-114，2009.7
- 10) 今本啓一，荒井正直：比表面積の観点から見た骨材の収縮特性，セメント・コンクリート，No.729，pp.64-69，2007.11
- 11) 小山田哲也，小田島悠弥，越谷信，藤原忠司：コンクリートの乾燥収縮に対する石灰石骨材の有効性，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.359-364，2010.7
- 12) 石灰石鉱業協会，コンクリート骨材研究会：石灰石骨材の微粒分量が汎用強度および高強度コンクリートの諸物性に及ぼす影響，コンクリートテクノ，Vol.30，No.5，pp.18-27，2011.5
- 13) 辻幸和，清水昭之，真野孝次，飛坂基夫：砕石粉を用いたコンクリートのフレッシュ性状および硬化性状，コンクリート工学，Vol.42，No.8，pp.22-29，2004.8