

# 論文 混合骨材コンクリートの乾燥収縮特性

猪口泰彦\*1・佐伯竜彦\*2・川田賢\*3・長瀧重義\*4

**要旨:** 本研究では、単独では使用できない各種の低品質骨材にスラグ骨材等の良質な骨材を混合して用いたコンクリートの乾燥収縮特性を明らかにすることを目的とし、骨材の種類および混合率を変化させたコンクリート供試体により乾燥収縮試験を行った。それらの結果から使用する混合骨材の性質がコンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす影響を検討した。

**キーワード:** 混合骨材, 乾燥収縮, スラグ骨材, 再生骨材

## 1. はじめに

現在、コンクリート用骨材は、その使用量が膨大であるために、環境的な面と資源の枯渇の面で、安定供給にかげりが見え始めている。したがって、単一の骨材のみを使用したコンクリートの製造が困難となること、低品質の骨材を用いざるを得なくなることは想像に難くない。また、コンクリート構造物の解体時に発生したコンクリート塊である再生骨材も利用することが求められているが、再生骨材は一般に密度が小さく、JISに規定されている絶乾密度2.5(g/cm<sup>3</sup>)以上であるものは希である。

一方、電気製鋼副産物である電気炉酸化スラグは、現在、路盤材や整地材として用いられているが、コンクリート用骨材としても用いることが可能であるとされ<sup>1)</sup>、密度も大きく良質なものとなり得る。銅スラグ細骨材は、銅製錬における副産物であり、これまで主としてセメント材料、プラスト材、埋め立て材等に利用されてきたが、コンクリート用骨材としても十分な品質を持つことが確認されている<sup>2)</sup>。

以上の背景から、風化岩および再生骨材等の単独では利用できない骨材に電気炉酸化除冷スラグあるいは銅スラグ骨材といった良質な骨材

を混合したコンクリートを製造し、その乾燥収縮特性について実験的な検討を加え、低品質骨材の有効利用の可能性について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

使用したセメントは普通ポルトランドセメントである。

細骨材には相模川水系産川砂 (VS)、電気炉除冷酸化スラグ細骨材 (ACS)、銅スラグ細骨材 (CUS)、再生細骨材 (RS) を使用した。

表-1 骨材の物理的性質

記号	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	安定性 損失重量 (%)	Gmax
VS	2.56	2.63	4.7	—
ACS	3.81	0.76	1.0	—
CUS	3.56	0.52	0.4	—
RS	<b>2.09</b>	<b>9.86</b>	4.4	—
VC	2.56	0.84	9.4	20
ACG	3.84	0.65	0.8	20
RG	<b>2.28</b>	<b>5.42</b>	<b>36.5</b>	20
WG	2.62	2.89	<b>23.8</b>	20

網掛け太字はJIS規格外

\*1 新潟大学大学院 自然科学研究科 環境システム科学専攻 (正会員)  
 \*2 新潟大学助教授 工学部建設学科 工博 (正会員)  
 \*3 新潟大学 工学部建設学科  
 \*4 新潟大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

粗骨材には青梅産碎石 (VC) , 電気炉除酸化スラグ粗骨材 (ACG) , 再生粗骨材 (RG) , 骨材採取現場表層の風化岩 (WG) を使用した。以後、骨材についてはこれらの括弧内の記号で記し、詳細を表-1に示す。

化学混和剤として、標準型A E減水剤および空気量調整剤を使用した。

水セメント比は55%とし、目標スランプを8cm、目標空気量を4%とした。骨材を混合するにあたり、細骨材を混合骨材とする場合は粗骨材をVCで統一し、粗骨材を混合骨材とする場合は細骨材をVSに統一した。骨材の組み合わせを表-2に示す。骨材の混合率は、容積比とした。

表-2 骨材の組み合わせ

細骨材		粗骨材	混合率
VS	RS	VC	10:00
ACS			5:05
CUS			0:10
VS	ACG	RG	10:0,3:2,5:5
		WG	2:3,0:10

## 2.2 試験方法

乾燥収縮測定用の供試体寸法は、10×10×40cmの角柱供試体とし、長さ変化は標点間隔10cmとなるように貼り付けたコンタクトゲージにより測定した。

打設後1日で脱型し、材齢28日まで20℃水中にて養生を行った。養生終了後、温度20℃、相対湿度60%の恒温恒湿槽内に暴露し、経時的に供試体重量と長さ変化を測定した。

圧縮強度および静弾性係数の測定は、材齢28日において行った。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 混合骨材コンクリートの力学性状

使用したコンクリートの材齢28日における圧縮強度を図-1に、静弾性係数を図-2示す。

骨材を単独で使用した場合、密度の大きな骨材ほど高強度が得られている。また、静弾性係数に関しても密度の大きな骨材を用いたコンク

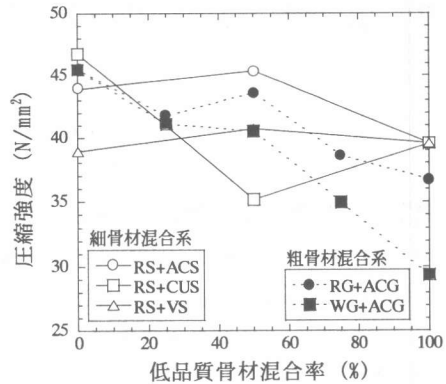


図-1 圧縮強度

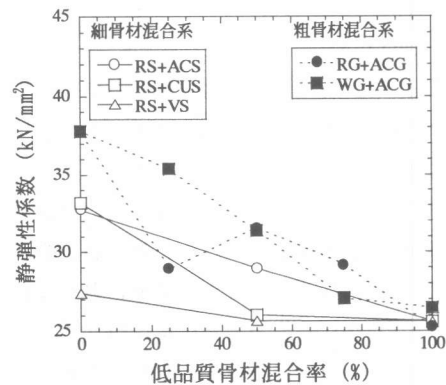


図-2 静弾性係数

リートほど大きな値が得られた。

骨材を混合したことの影響を見てみると、多少のばらつきはあるが、単独で用いた場合に強度の大きなものの混合率が高くなるほど圧縮強度、静弾性係数ともに大きくなる傾向にあることが読み取れる。

### 3.2 混合骨材コンクリートの乾燥収縮

#### 3.2.1 骨材の混合と乾燥収縮の関係

乾燥収縮ひずみの経時変化を図-3に示す。骨材を単独で用いた場合、再生骨材を用いたものは、細骨材 (RS100%) , 粗骨材 (RG100%) とともに大きな収縮を示した。逆に、スラグ骨材を用いたもの (ACS100% , CUS100% , ACG100%) は川砂と碎石を用いたもの (VS100%) よりも収縮量が少なく、乾燥収縮に関して、きわめて良質な骨材であることが確認された。

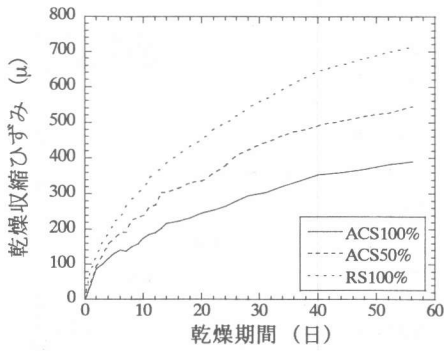


図-3 (a) 乾燥収縮ひずみの経時変化  
(ACS+RS)

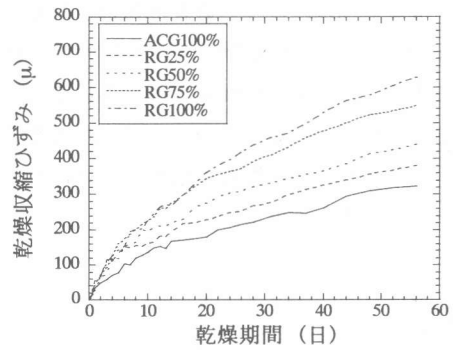


図-3 (d) 乾燥収縮ひずみの経時変化  
(ACG+RG)

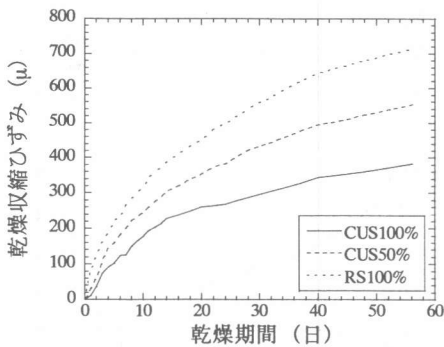


図-3 (b) 乾燥収縮ひずみの経時変化  
(CUS+RS)

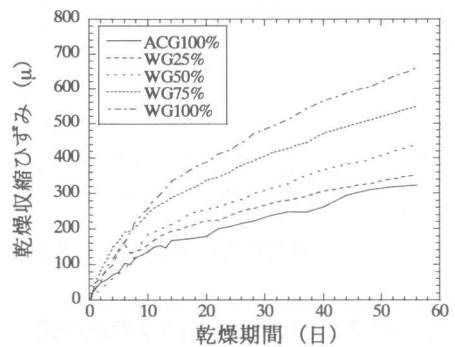


図-3 (e) 乾燥収縮ひずみの経時変化  
(ACG+WG)

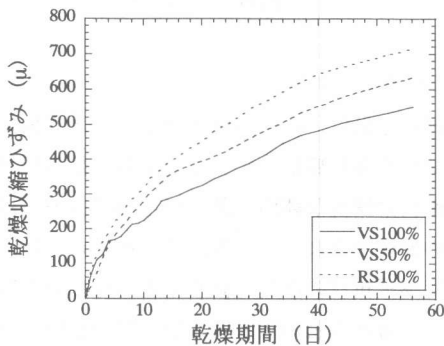


図-3 (c) 乾燥収縮ひずみの経時変化  
(VS+RS)

細骨材を混合骨材とした場合、RS混合率に比例して収縮量が増加している（図-3 (a) , 図-3 (b) , 図-3 (c) ）。また、粗骨材を混合骨材とした場合も細骨材の場合と同様に、低品質骨材の混合率が大きいほど収縮量が大きくなっている（図-3 (d) , 図-3 (e) ）。

細骨材と粗骨材の影響を比べると、細骨材に低品質骨材を用いた方が収縮量が大きくなっている。コンクリートは一般にその約6割がモルタルマトリックスによって占められている。また、モルタルは粗骨材よりも弾性係数が小さい。そのため、乾燥収縮に対して支配的なのはモルタル部分であり、粗骨材を混合することの影響は細骨材を混合することの影響よりも小さいのではないかと考えられる。このことは、乾燥収縮に対しては粗骨材よりも細骨材のほうが大きく影響するという既往の研究と一致している<sup>3)</sup>。また、粗骨材混合系のみデータではあるが、低品質なものでも25%程度までの混合であれば、良質な粗骨材を単独で用いた場合と比較して、その乾燥収縮ひずみを5~10%程度の増加に抑えることができた。

再生骨材を使用した場合、乾燥収縮ひずみが

大きくなることは、多くの研究で報告されていることである<sup>4)</sup>。本研究においても再生骨材を混合することにより乾燥収縮ひずみは増大している。これは、付着しているモルタルあるいはセメントペーストの弾性係数が小さいことの影響であると考えられる。

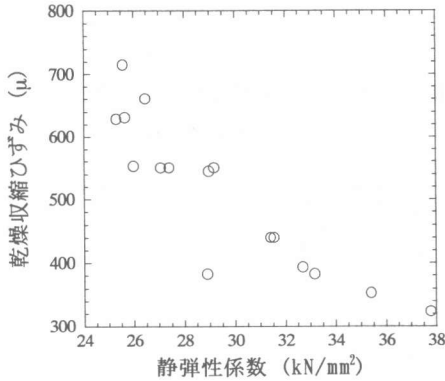


図-4 静弾性係数と乾燥収縮ひずみの関係

### 3.2.2 乾燥収縮に影響を及ぼす各種要因

#### (1) 静弾性係数との関係

乾燥56日における乾燥収縮ひずみと材齢28日における静弾性係数との関係を図-4に示す。静弾性係数が小さいほど乾燥収縮ひずみは大きくなる傾向にあり、既往の研究結果<sup>5)</sup>と一致している。この傾向は静弾性係数が小さいほど顕著に表れ、特に静弾性係数が30kN/mm<sup>2</sup>以下の領域となるコンクリートにおいてはきわめて大きな収縮を示している。

#### (2) 平均密度との関係

乾燥収縮ひずみと骨材の平均密度との関係を図-5に示す。この平均密度は、各骨材の密度を全細・粗骨材量に対する容積比で平均した値である。乾燥収縮ひずみは静弾性係数とは負の相関関係にあったが、平均密度とも負の相関関係にある。ここで、細骨材混合系と粗骨材混合系を比較してみても相違は見られない。したがって、配合の段階で骨材の密度からある程度乾燥収縮ひずみの予測を行うことも可能であると考えられる。

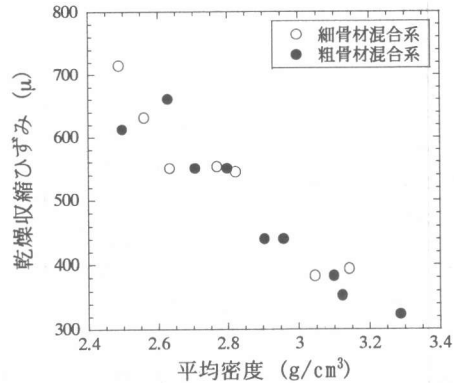


図-5 平均密度と乾燥収縮ひずみの関係

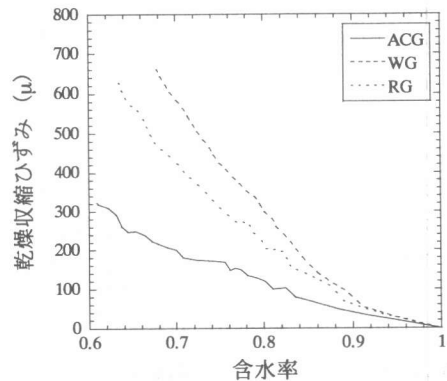


図-6 (a) 含水率と乾燥収縮ひずみの関係  
(粗骨材単独使用)

#### (3) 含水率との関係

乾燥収縮量は、乾燥の程度と発生した収縮応力に対する弾性係数によって決まる。静弾性係数や密度は簡便な評価であるが、乾燥収縮には両者の影響が含まれているため、収縮応力に対する変形抵抗性のみを評価するために乾燥収縮ひずみと含水率との関係について検討を行った。ここで用いる含水率は、飽水状態の含水量に対するその時点の含水量とした。

乾燥収縮ひずみと含水率との関係を図-6に示す。図より、同じ含水率での収縮量は低品質骨材とスラグ骨材で大きな差があることがわかる。本研究では、この関係を次式にて近似した。

$$\varepsilon = \alpha(1 - c^\beta) \quad (1)$$

ここに、 $c$  : 含水率,  $\alpha$ ,  $\beta$  : 実験定数

### 3.3 数値計算による検討

供試体による実験結果のみでは、適用範囲が限られるため、本研究では乾燥収縮現象の簡単なモデル化を行い解析的な検討を試みた。モデルの概要は以下の通りである。細骨材を混合骨材とした場合は、各骨材の混合率を重みとして単独の骨材の含水率－収縮量曲線（図-6 (b)）を平均し、対象とする配合の含水率－収縮量曲線を求めた。

粗骨材を混合した場合、計算対象領域を最大寸法20mmの粗骨材を1個含む大きさの要素に等分割し、各要素はそこに含まれる粗骨材を単独で用いたコンクリートと乾燥収縮に関して同じ性質を持つものと仮定した。ここで、計算領域は実験に用いたコンクリート供試体の端部から1/8すなわち5×5×20cmの領域であり、各要素は一辺1.25cmの立方体とした。各要素に含まれる粗骨材は一樣乱数によってランダムに配置し、全体としては粗骨材を1個ずつ含むコンクリートの集合体と考えた。含水率に応じて拘束の無い場合の収縮量を計算し、その後拘束の影響を考慮することとした。

ここでいう拘束とは、下記のような要素の連続性を考慮した拘束である。隣接する要素が異なる粗骨材を有している場合、その境界辺には要素ごとに異なる収縮ひずみが生じる。この場合、ひび割れの生じない限り、その境界辺を構成する節点は、分割されることなく生じた収縮量だけ供試体中心方向に座標を移動する。供試体中心部に近い要素から節点のこの移動を順次計算し、全体での乾燥収縮ひずみを求める。

要素境界辺のひずみは式(2)に基づいて計算した。また水分の逸散は、式(3)により計算した。

$$\epsilon = \frac{\sum(EA\alpha(1-c^\beta))}{\sum(EA)} \quad (2)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \text{div}(D \cdot \text{grad}(c)) \quad (3)$$

ここに、 E：静弾性係数， A：断面積，  
 $\alpha, \beta$ ：式(1)の係数，  
 c：相対湿度， D：拡散係数

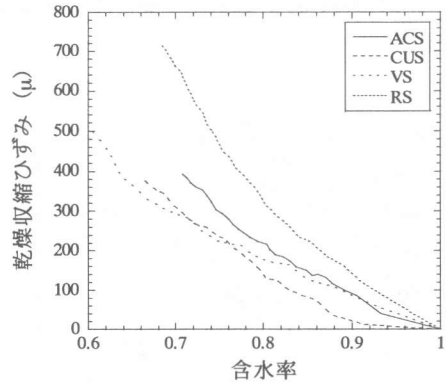


図-6 (b) 含水率と乾燥収縮ひずみの関係 (細骨材単独使用)

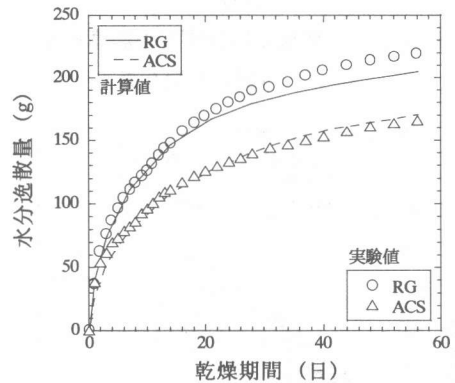


図-7 水分逸散量の計算結果

また、相対湿度から含水率への変換は、既往の文献<sup>6)</sup>の関係を用了。

水分逸散量の計算結果を図-7に示す。図より、実験値と計算値は良く一致しており、乾燥収縮量予測のための計算としては十分な精度を有していると考えられる。

図-8に乾燥収縮量の計算結果の一例を示す。

図より、細骨材を混合した場合には（図-8 (a)）、実験値と計算値は比較的良く一致している。これに対して粗骨材を混合した場合には（図-8 (b)）、乾燥初期においては計算値が実験値を上回る傾向が見られるが、乾燥期間50日程度では概ね両者は一致している。また、用いた骨材種類による収縮量の違いは計算結果に反映されている。したがって、混合骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性は、本研究で

検討した解析方法によっても一応の評価は可能であると考えられる。

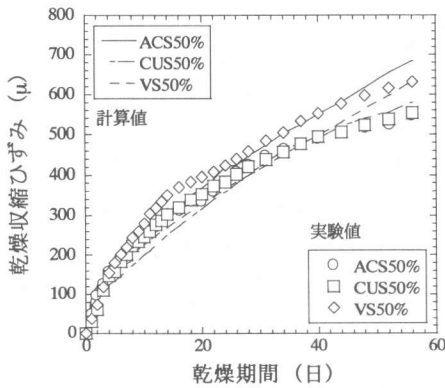


図-8 (a) 乾燥収縮ひずみの計算結果  
(細骨材混合系)

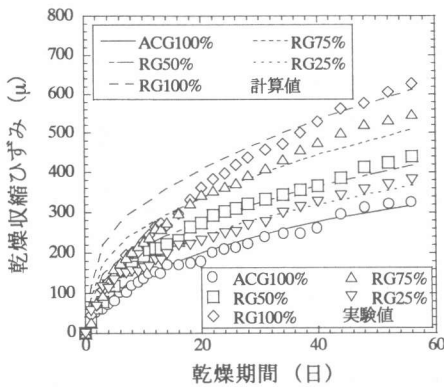


図-8 (b) 乾燥収縮ひずみの計算結果  
(粗骨材混合系)

#### 4. まとめ

本研究では、現在のところ使用されていない低品質な骨材とスラグ骨材を混合し、コンクリート用骨材として使用することの適否についての基礎的知見を得るため、混合率を変化させたコンクリート供試体を作成し、乾燥収縮特性について検討した。本研究の範囲で得られた結論は以下の通りである。

(1) スラグ骨材の混合は、低品質骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮量を低減することに有効であり、単独で用いた場合、通常の川砂および碎石を用いたものよりも収縮量を小さくす

ることが可能となる。

(2) 粗骨材の混合において、低品質なものでも25%程度までであれば影響が少なく、良質なものととの混合により収縮量の増加を抑制することが可能となりうる。

(3) 細・粗骨材の如何を問わず、コンクリート中の全骨材の密度を容積比によって平均化した平均密度と乾燥収縮ひずみとの間には相関が見られ、収縮量について一応の予測が可能である。

#### 謝辞

本研究は、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「ライフサイクルを考慮した建設材料のリサイクル方法の開発」(プロジェクトリーダー：長瀧重義，研究プロジェクト番号：96R07601)の一環として行われたものである。

#### 参考文献

- 1) 森野奎二，淵上榮治，服部裕治：電気炉酸化スラグのコンクリート用骨材としての適用性について，セメント・コンクリート論文集，No.48，pp.310-315，1994
- 2) 長瀧重義，佐伯竜彦：銅スラグ砂および低品質砂を用いたコンクリートの諸特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.19-24，1998.7
- 3) 藤原忠司，帷子国茂：低品質の砂利を用いたコンクリートの諸特性，セメント技術年報，No.40，pp.134-137，1986
- 4) たとえば，岩崎孝：再生骨材の現状と将来，セメント・コンクリート，No.609，pp.1-6，1997.11
- 5) 河野清，向井恒好：低品質碎石を用いた硬練りコンクリートの諸特性に関する検討，セメント技術年報，No.38，pp.710-173，1984
- 6) 佐伯竜彦，大賀宏行，長瀧重義：コンクリートの中性化の機構解明と進行予測，土木学会論文集，第414号，pp.99-108，1990.2