骨材の乾燥収縮ひずみの評価指標に関する研究

STUDY ON EVALUATION INDEX OF DRYING SHRINKAGE STRAIN OF AGGREGATE

寺西 浩 司*

Kohji TERANISHI

In this study, the investigation to find out the evaluation index of drying shrinkage strain of aggregate was carried out. The following findings were obtained as the results. (1) Air-dried moisture content and specific surface area of fine and coarse aggregates, direct measurements of drying shrinkage strain of coarse aggregate etc. correlate highly with the drying shrinkage strain of law stone of aggregate. Therefore, these values can be used as the evaluation index of drying shrinkage strain of aggregate. (2) Some aggregates not corresponding well to drying shrinkage of aggregate are invariably to be found in case of all evaluation indexes. Consequently this fact should be taken into consideration in estimating the drying shrinkage strain of aggregate. (3) The drying shrinkage strain of aggregate has a direct effect on that of concrete.

Keywords : Composite theory, X-ray diffraction, Rock type, Limestone, Specific surface area,
Moisture content

複合理論, X線回折, 岩種, 石灰岩, 比表面積, 含水率

1. はじめに

コンクリートの収縮ひび割れに関しては、日本建築学会「JASS 5」の2009年版に、長期および超長期供用級に区分されるコンクリートの乾燥収縮率の上限値 (8×10^{-4}) が記載された。また、このことが契機となって、コンクリートの乾燥収縮に対する関心が高まり、最近、レディーミクストコンクリート工場に対する乾燥収縮ひずみの実態調査や収縮低減対策の検討が活発に行われている。

全国生コンクリート工業組合連合会の平成21~22年度の調査結果¹⁾によると、全国のレディーミクストコンクリート工場のうちの約1割の工場において、乾燥収縮ひずみがJASS 5の上限値を超えている。一方で、レディーミクストコンクリート工場で採用可能な効果的な収縮低減対策は、実質的に、コンクリートの乾燥収縮ひずみを小さくできる骨材の使用と、収縮低減剤や膨張材などの収縮低減材料の使用の2種類にほぼ限定されるものと考えられる。特に、骨材に関しては、古くから、石灰石骨材を用いた場合にコンクリートの乾燥収縮ひずみが小さくなることが経験的に知られており²⁾、最近、収縮低減効果を期待してこの種の骨材が選択的に使用される事例が多くなっている。

さらに、このことに関連して、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及ぼすとの認識も一般に定着してきており、乾燥収縮ひずみに対する石灰岩以外の骨材の影響を調べた結果も筆者ら³⁾や他の研究者^{4), 5)}から報告されている。そして、収縮低減効果の高い骨材は石灰岩だけに限らないが、そのような骨材の岩種のみによる識別は困難なことが明らかにされつつある⁶⁾。これらのことを踏まえると、乾燥収縮を考慮して合理的に骨材を選定するためには、個々の骨材の乾燥収縮ひずみを直接的に評価する手法を確立することが重要と考えられる。

一方で、コンクリートの乾燥収縮ひずみは調査によっても変化する。したがって、レディーミクストコンクリート工場で1つの調査の乾燥収縮ひずみを確認したとしても、それは、工場で標準化されている全ての調査の乾燥収縮ひずみが小さいことを担保したことにはならない。さらに、コンクリートの乾燥収縮ひずみは使用骨材の品質の変動によっても日々変動するものと考えられる。しかし、これらのことを全てコンクリートの乾燥収縮試験により確認することは、レディーミクストコンクリート工場にとって、費用その他の面から不可能に近い。この点に関して、筆者らは、これまでに、複合理論に基づくコンクリートの乾燥収縮予測式を提案している⁷⁾。細・粗骨材の乾燥収縮ひずみの値が得られれば、この予測式によ

* 名城大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Engineering, Meijo Univ., Dr. Eng.

り、それらの骨材を用いたあらゆる調合のコンクリートの乾燥収縮ひずみを推定することができる。

なお、骨材の乾燥収縮ひずみを調べる手段としては、碎石・砕砂の場合、単純には、骨材原石からコアを採取してその乾燥収縮ひずみを測定するという方法が考えられる。しかし、この方法は実施に手間が掛かるため、レディーミクストコンクリート工場での受入れ検査や骨材製造工場での品質管理試験などの手段には適さない。一方で、最近、骨材の乾燥収縮ひずみをより簡便に評価することを目的とした研究が多数報告されているが^{(8)~(13)}、現時点では、標準的な試験・検査方法が確立されるまでには至っていない。

以上の背景から、本研究では、種々の岩種の骨材を試料とし、骨材に関する様々な特性値や試験値と骨材の乾燥収縮ひずみの関係を調べた。そして、その結果を踏まえ、骨材の乾燥収縮ひずみの評価指標を見出すための検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試料とした骨材

本実験では、表1に示すような、広範な岩種の細・粗骨材を試料とした。その際、粗骨材は、碎石2005を中心に収集したが、川砂利や山砂利も試料に加えた。また、可能な場合は、粗骨材と同一の工場から砕砂も同時に入手したが、入手できない場合は、スクリーニングスなどを入手するか、または、粗骨材をジョークラッシャーで破碎し、それらを粒度調整して細骨材とした。

2.2 試験項目および試験方法

図1に、本研究で想定したコンクリートの乾燥収縮ひずみの推定フローと各試験の位置付けを示す。同図からわかるように、本研究では、より本質的な推定方法を構築するために、コンクリートの乾燥収縮ひずみを骨材に関する特性値や試験値（骨材の乾燥収縮評価指標）から直接的に推定するのではなく、次の2段階のアプローチにより推定することを想定した。すなわち、①骨材の乾燥収縮評価指標から、まず、骨材自身の乾燥収縮ひずみを推定する。②上記①で得られた結果から、各種調合・セメント種類のコンクリートの乾燥収縮ひずみを複合理論によりさらに推定する。ここで、乾燥収縮の複合理論とは、コンクリートをマトリックスセメントペーストと骨材からなる2相材料と見なし、各相の乾燥収縮ひずみ、弾性係数および体積比率によってコンクリートの乾燥収縮ひずみを表示しようと考えた理論である⁽¹⁴⁾。

表2に、試験項目および試験方法を示す（図1に示した項目のほかにも試験を行っている）。本実験では、骨材に対する試験項目として、先行研究^{(8)~(13)}において、コンクリートの乾燥収縮ひずみと密接

表1 試料とした骨材

記号	分類	岩種	産地	種別
HS1	堆積岩	硬質砂岩	愛知県	碎石，砕砂
HS2		硬質砂岩	三重県	碎石，砕砂*1
SS		砂岩	岐阜県	碎石，砕砂
ST		粘板岩	岐阜県	碎石，砕砂
LS1		石灰岩	三重県	碎石，砕砂
LS2		石灰岩	滋賀県	碎石，砕砂
MS	火成岩	チャート	岐阜県	山砂利，砕砂*2
AS		安山岩	福井県	碎石，砕砂
RS		安山岩	富山県	川砂利，砕砂*2
DB		輝緑岩	愛知県	碎石，砕砂*1
PT		かんらん岩	三重県	碎石，砕砂
DR		閃緑岩	三重県	碎石，砕砂*1
GN		花こう岩	三重県	碎石，砕砂*2

*1 スクリーニングスなどを粒度調整して作製

*2 粗骨材を破碎し、さらに粒度調整して作製

表2 試験項目および試験方法

試験対象	試験項目	試験方法
骨材の 原石コア	乾燥収縮ひずみ	コアの乾燥収縮試験
	圧縮強度	コアの圧縮試験 （静弾性係数は、地盤工学会基準JGS 2521）
	静弾性係数	
	ポアソン比	
細骨材， 粗骨材	粒度分布	JIS A 1102
	密度	JIS A 1109，JIS A 1110
	吸水率	
	気乾含水率	JIS A 1125
	安定性	JIS A 1122
	比表面積	文献 ⁹⁾ を参考に実施
粗骨材	含有する鉱物	粉末X線回折分析
	乾燥収縮ひずみ	文献 ⁹⁾ を参考に実施
細骨材	乾燥収縮ひずみ	モルタル薄片の乾燥収縮ひずみを測定
コンク リート	乾燥収縮ひずみ	JIS A 1129-3
	質量減少率	
	圧縮強度	JIS A 1108
	静弾性係数	JIS A 1149
	超音波伝播速度	超音波試験器による測定

な関係があると報告されたことのある特性値を主に取り上げた。また、このほかに、骨材の乾燥収縮ひずみの評価を目的とした試験も試行した。さらに、補足的な試験として、上述の2段階のアプローチではなく、コンクリートの乾燥収縮ひずみを直接的に推定することの可能性を探るために、既往の研究^{(10),(11)}を参考に、コンクリートの静弾性係数などを測定した。以下に、本実験で実施した標準的ではない試験の詳細を示す。

(1) 原石コアに対する試験

①乾燥収縮試験

各骨材の製造工場から人頭大の原石塊を3個ずつ入手し、それらからコア（φ35×70mm）をそれぞれ1本ずつ採取した。そして、それらを3週間吸水させた後に、コアの相対する2面にひずみゲージ（長さ

図1 各試験の位置付け

30mm)を貼付し、恒温恒湿室内(温度20℃、相対湿度60%)でひずみを一定値になるまで測定した。

②圧縮試験

上記①の試験終了後の原石コアに対して圧縮試験を行い、圧縮強度、静弾性係数およびポアソン比を測定した。その際、横ひずみは、コアの軸方向に垂直に、ひずみゲージ(長さ20mm)2枚を新たに貼り増して測定した。

(2) 細・粗骨材に対する試験

(a) 骨材の特性値を調べるための試験

①気乾含水率試験

細・粗骨材に対して気乾含水率⁹⁾を測定した。この試験では、吸水させた細・粗骨材を恒温恒湿室内(温度20℃、相対湿度60%)に2週間放置した後に、JIS A 1125に準拠して含水率を測定した。その際、試料は細骨材500g、粗骨材5kgとし、試験は1回のみとした。

②比表面積試験

今本らの実験⁸⁾に倣い、相対湿度32.5%の環境下での、絶乾状態とした細・粗骨材の水蒸気吸着量を測定した。そして、BET法(一点法)により、次式¹⁵⁾を用いて骨材の内部空隙の比表面積を計算した。

$$S = (1 - 0.325)v \times \frac{6.023 \times 10^{23}}{18} \times 10.8 \times 10^{-20} \quad (1)$$

ここに、S: 骨材の比表面積 (m²/g), v: 水蒸気吸着量 (cc/g)。

③粉末X線回折分析

粗骨材を粉末状にした試料に対して粉末X線回折分析を行い、各骨材の含有する鉱物を同定した。その際、測定は、X線CuKα/40kV/30mA、計測時間2deg/min、測定範囲2θ=5~60°、サンプリング幅0.02degの条件下で行った。

(b) 骨材の乾燥収縮ひずみの評価を目的とした試験

①粗骨材の乾燥収縮試験

田中らの実験⁹⁾を参考にして、粗骨材の乾燥収縮ひずみの直接的な測定を試みた。この試験では、まず、粗骨材表面の一部を削って平滑にし、その面にひずみゲージ(長さ2mm)を貼付して防水処理を行った。そして、その粗骨材を2週間吸水させた後に恒温恒湿室内(温度20℃、相対湿度60%)に存置し、ひずみを経時的に測定した。なお、試料は各ケースにつき5個とした。

②モルタル薄片の乾燥収縮試験

試料とした各細骨材を用いて薄片状のモルタル供試体(長さ160×幅40×厚さ5mm)を作製し、その乾燥収縮ひずみを測定して、細骨材の乾燥収縮ひずみを間接的に評価した。表3にモルタルの調合を示す。供試体は材齢7日まで標準水中養生し、その後、ひずみゲージ(長さ30mm)を供試体片面の中央に手早く貼付した。そして、供試体を恒温恒湿室(温度20℃、相対湿度60%)に存置し、ひずみを経時的に測定した。なお、供試体は各ケースにつき3枚とした。

(3) コンクリートに対する試験

①乾燥収縮試験

コンクリートの使用骨材を、同一工場の細・粗骨材をセットとして変化させて乾燥収縮試験を行った。調合は、HS1のケースを基準として表4に示すように定めた。また、他のケースでは、空気量は、コンクリートの乾燥収縮ひずみに対する影響が小さい¹⁶⁾ことから調整せず(測定値は0.6~6.4%の範囲にあった)、スランブも同様に調整

表3 モルタルの調合

水セメント比 (%)	砂セメント比	絶対容積 (l/m ³)		
		水	セメント	細骨材
50	3.59	256	162	582

[使用材料] セメント: 普通ポルトランドセメント (密度3.16g/cm³)

表4 コンクリートの調合 (基準ケース: HS1)

スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (l/m ³)			AE減水剤 (g/m ³)
					セメント	細骨材	粗骨材	
18 ±2.5	4.5 ±1.5	50	40	181	114	264	396	1355

[使用材料] セメント: 普通ポルトランドセメント (密度3.16g/cm³)
AE減水剤: リグニンスルホン酸系

表5 原石コアに対する試験結果

記号	乾燥収縮ひずみ [39日] (×10 ⁻⁶)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
HS1	30	250	81.3	0.196
HS2	53	144	74.9	0.213
SS	59	152	67.6	0.193
ST	57	114	68.7	0.213
LS1	-5	89.9	77.4	0.272
LS2	-4	89.9	75.3	0.316
MS	—	—	—	—
AS	154	161	64.3	0.299
RS	90	219	68.7	0.210
DB	118	189	89.4	0.334
PT	9	157	102	0.278
DR	180	70.0	45.7	0.185
GN	21	96.5	47.7	0.196

* MSのケースでは試験を実施せず。

図2 原石コアの乾燥収縮ひずみ

しなかった(試験値は2~20cmの範囲にあり、いずれのケースにおいても、スランブ試験後のコンクリートの状況に材料分離は見られなかった)。なお、供試体は10×10×40cmとし、標準水中養生期間は7日間、乾燥条件は温度20℃、相対湿度60%とした。

②圧縮試験・超音波伝播速度の測定

上記①と同一のコンクリートに対して圧縮試験を行い、圧縮強度および静弾性係数を測定した。供試体(φ10×20cm)は標準水中養生とし、試験材齢は28日とした。また、圧縮試験の直前に、超音波測定器(使用周波数20~500kHz)を用いて供試体の軸方向の超音波伝播速度を測定した。

3. 原石コアに対する試験結果

3.1 原石コアの乾燥収縮ひずみ

表5に、原石コアに対する試験結果の一覧を示す。また、図2に、ほぼ一定値に収束した時点での原石コアの乾燥収縮ひずみを示す(乾燥期間39日)。同図から、石灰岩LS1およびLS2の乾燥収縮ひずみが非常に小さいことがわかる。

表6 粉末X線回折で同定された各骨材の含有する鉱物

ケイ酸塩鉱物の構造群	鉱物名	砕屑岩				生物岩			火山岩		半深成岩	深成岩		
		HS1	HS2	SS	ST	LS1	LS2	MS	AS	RS	DB	PT	DR	GN
テクトケイ酸塩	シリカ鉱物	石英	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	長石	曹長石	○	○					○	○	○	○	○	○
		中性長石							○					
		灰長石												○
フィロケイ酸塩	雲母族	正長石								○				
		白雲母			○	○				○				
		黒雲母	○	○								○		○
		金雲母	○											
イノケイ酸塩	緑泥石	クリノクロア			○				○	○	○		○	○
	粘土鉱物	イライト							○					
	輝石族	透輝石									○			
ケイ酸塩以外の造岩鉱物	角閃石族	クロス閃石											○	
	方解石					○	○				○			
	苦灰石					○								

図3 原石コアの乾燥収縮ひずみとクリノクロア含有量の関係

表7 コンクリートに対する試験結果

記号	乾燥収縮ひずみ [182日] ($\times 10^{-6}$)	質量減少率 [182日] (%)	圧縮強度 [28日] (N/mm ²)	静弾性係数 [28日] (kN/mm ²)	超音波伝播速度 [28日] (km/s)
HS1	454	1.67	38.6	31.3	4.76
HS2	510	1.81	35.3	30.5	4.72
SS	520	1.56	34.8	37.2	4.95
ST	626	1.76	44.2	37.5	4.87
LS1	364	1.58	39.2	37.6	5.16
LS2	513	1.32	39.2	36.6	5.06
MS	519	1.88	37.4	29.9	4.54
AS	798	1.74	40.4	27.5	4.66
RS	—	—	—	—	—
DB	699	2.13	44.0	34.9	4.99
PT	585	1.79	43.1	41.3	5.23
DR	962	2.45	41.1	28.8	4.77
GN	526	1.79	40.1	27.5	4.76

* RSのケースでは試験を実施せず。

図4 コンクリートの乾燥収縮ひずみ (乾燥期間182日)

図5 コンクリートと原石コアの乾燥収縮ひずみの関係

3.2 骨材の含有する鉱物

表6に、粉末X線回折で同定された各骨材の含有する鉱物を示す。同表からわかるように、骨材によっては、緑泥石やイライトなどの粘土鉱物を含んでいる。ただし、石灰岩LS1およびLS2はこれらの粘土鉱物を含有していない。ここで、本実験において比較的多くの骨材で同定された、緑泥石の一種であるクリノクロア (clinochlore) に着目し、その相対的な含有量を骨材間で比較するために、クリノクロアの最も強いピーク強度 ($2\theta = 12.421$ におけるX線強度) を調べた。図3に、その結果と原石コアの乾燥収縮ひずみの関係を示す (クリノクロアが同定されなかった骨材のピーク強度は0とした)。同図によると、クリノクロアのピーク強度が高いほど原石コアの乾燥収縮ひずみが増える傾向となっており、このことは、粘土鉱物の種類が同一の場合、その含有量が多いほど骨材の乾燥収縮ひずみが大きくなることを示唆している。

なお、図3において、安山岩ASのプロットは回帰直線から外れた位置にあるが、その原因としては、ASが、粘土鉱物として、クリノクロアのほかにイライトも含んでいることが考えられる。

4. コンクリートに対する試験結果

表7に、各骨材を用いたコンクリートに対する試験結果の一覧を示す。また、図4に、コンクリートの乾燥収縮ひずみを示す (乾燥期間182日)。同図によると、これまでの多数の報告と同様に、石灰石骨材を用いたコンクリート (LS1およびLS2) の乾燥収縮ひずみが小さ

(a) E_s および E_g に原石コアの試験値を入力した場合

(b) E_s および E_g に一定値を入力した場合

図6 式(2)によるコンクリートの乾燥収縮ひずみの推定値と実測値の関係

くなっている。

4.1 コンクリートと原石コアの乾燥収縮ひずみの関係

図5に、コンクリートと原石コアの乾燥収縮ひずみの関係を示す。同図によると、両者の間に高い相関が見られ、このことから、骨材の乾燥収縮ひずみは、コンクリートの乾燥収縮ひずみに直接的な影響を及ぼすことがわかる。

4.2 コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式による推定

図6に、筆者らが過去に提案した、複合理論に基づく乾燥収縮予測式⁷⁾ (日本建築学会「ひび割れ制御指針」の付録2¹⁷⁾に掲載されている式) によるコンクリートの乾燥収縮ひずみの推定値と実測値の関係を示す。ここで、推定値は、筆者らの提案式を、JIS乾燥収縮試験の乾燥期間182日における試験結果のみを推定する形に特化して表示した次式により計算した。

表8 式(2)における定数の値（普通ポルトランドセメントの場合）⁷⁾

α	β	λ	δ	γ	η
0.322	4.77	86.3	54	5.9	4.2

図7 コンクリートの乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係

図8 コンクリートの乾燥収縮ひずみと静弾性係数の関係

図9 コンクリートの乾燥収縮ひずみと超音波伝播速度の関係

表9 細・粗骨材に対する試験結果

記号	粗粒率		絶乾密度 (g/cm ³)		吸水率 (%)		気乾含水率 (%)		損失質量分率 (%)		比表面積 (m ² /g)		粗骨材乾燥収縮ひずみ [14日] (×10 ⁻⁶)	モルタル薄片乾燥収縮ひずみ [28日] (×10 ⁻⁶)
	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材		
HS1	3.11	6.70	2.65	2.67	0.92	0.55	0.53	0.20	2.4	4.5	2.58	3.47	32	614
HS2	3.49	6.80	2.58	2.68	2.25	0.66	0.45	0.30	3.8	4.4	4.20	3.42	126	632
SS	3.12	6.83	2.63	2.67	0.91	0.37	0.32	0.15	6.1	3.9	6.55	3.02	47	588
ST	3.13	7.01	2.53	2.68	2.88	0.74	0.71	0.33	2.7	2.3	3.92	3.17	119	711
LS1	2.90	6.42	2.64	2.69	1.38	0.35	0.22	0.08	2.0	1.8	0.38	0.56	9	393
LS2	2.35	6.73	2.67	2.70	0.61	0.21	0.20	0.05	1.3	1.0	0.36	0.27	14	526
MS	3.02	7.10	2.54	2.52	1.71	1.23	0.46	0.28	—	2.6	1.38	2.32	57	633
AS	2.38	6.66	2.62	2.62	1.24	0.83	0.44	0.30	—	2.6	3.26	2.64	135	655
RS	—	6.67	2.54	2.58	1.97	1.21	0.62	0.42	1.6	—	1.35	2.88	102	735
DB	3.14	6.49	2.78	2.97	2.59	0.56	0.51	0.27	1.8	1.9	4.81	3.80	116	749
PT	3.13	6.81	2.86	3.00	1.70	0.68	0.75	0.41	4.7	2.2	5.56	5.37	-65	728
DR	2.61	6.44	2.55	2.68	3.67	1.09	1.16	0.64	3.6	12.8	6.89	5.90	178	1063
GN	3.09	6.93	2.66	2.65	0.77	0.68	0.45	0.28	—	2.7	2.67	1.96	141	596

図10 粗骨材の乾燥収縮ひずみの測定例 (DR)

図11 モルタル薄片の乾燥収縮ひずみ

それに基づいて、コンクリートの乾燥収縮ひずみを、同式によりある程度の精度で推定できるといえる。

4.3 コンクリートの乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係

図7に、コンクリートの乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係を示す。同図からわかるように、両者の間には相関が見られ、コンクリートの質量減少率が大きいほど乾燥収縮ひずみが大きくなっている。すなわち、骨材の違いが、コンクリートの乾燥収縮ひずみと水分逸散量のいずれに対しても影響を及ぼしている。

なお、図7において、安山岩ASのプロットは、回帰直線からやや外れた位置にあるが、その理由としては、3.2節に前述したように、ASが、他の骨材とは異なる種類の粘土鉱物を含んでいることが考えられる。

4.4 コンクリートの乾燥収縮ひずみと弾性係数の関係

図8および9に、コンクリートの乾燥収縮ひずみと静弾性係数および超音波伝播速度の関係を示す。片平ら¹⁰⁾は、骨材を砕屑岩とそれ以外の岩種に層別すれば、これらの間に高い相関が見られると報告している。しかし、本実験では、そのような結果になっておらず、コンクリートの静弾性係数やそれに関連する試験値からコンクリートの乾燥収縮ひずみを推定することは困難と判断される。ただし、このような結果になったことに対しては、本実験において、コンクリートの空気量を一定に調整しなかったことも影響しているものと考えられる。

5. 細・粗骨材に対する試験結果

5.1 骨材に関する特性値および試験値

表9に、細・粗骨材に対する試験結果の一覧を示す。また、図10

$$\varepsilon_{sc} = \varepsilon_{sp} \frac{1 - (1 - m_s n_s) V_s - (1 - m_g n_g) V_g}{n_c} \quad (2)$$

ここに、

$$n_c = 1 + \frac{2(n_s - 1)V_s}{n_s + 1 - (n_s - 1)(V_s + V_g)} + \frac{2(n_g - 1)V_g}{n_g + 1 - (n_g - 1)(V_s + V_g)}$$

$$\varepsilon_{sp} = \frac{182}{2.31(\alpha W/C + \beta) + 182} (\lambda W/C + \delta)$$

$$E_p = \frac{100}{W/C} \gamma + \eta$$

ここに、 $n_s = E_s/E_p$ 、 $n_g = E_g/E_p$ 、 $m_s = \varepsilon_{ss}/\varepsilon_{sp}$ 、 $m_g = \varepsilon_{sg}/\varepsilon_{sp}$ 、 ε_s ：乾燥収縮ひずみ (×10⁻⁶)、 E ：弾性係数 (kN/mm²)、 V ：骨材体積比、 W/C ：水セメント比 (%)、 α 、 β 、 λ 、 δ 、 γ 、 η ：セメントの種類に関わる定数 (表8による)。

※添字 c 、 p 、 s 、 g は、それぞれコンクリート、セメントペースト、細骨材、粗骨材を表す。

上式は、細・粗骨材の乾燥収縮ひずみおよび弾性係数の値を入力する形になっており、図 (a) は、これらに原石コアの試験値を入力した場合である。同図によると、推定値は、実測値より全体的にやや小さくなっているものの、骨材の乾燥収縮ひずみの相違を明確に反映した値となっている。また、図 (b) は、骨材の弾性係数の値が試験で得られないケースを想定し、これらに、平均的な骨材の値⁷⁾として $E_s = E_g = 60$ (kN/mm²) を入力した場合である。この場合、推定値は、弾性係数に試験値を入力した場合よりやや平均化するが、全体的な傾向は図 (a) の場合とほぼ同様となっている。いずれにしても、以上のことから、骨材の乾燥収縮ひずみの値が得られれば、

図12 原石コアの乾燥収縮ひずみとの間の回帰分析における標準化残差

に、粗骨材の乾燥収縮試験結果の一例を示す (DRの場合)。図10からわかるように、5個の試料の測定値には大きなばらつきが見られ、このことは他のケースでも同様であった。すなわち、骨材粒子間には乾燥収縮ひずみのかなり大きなばらつきが内在し、その原因としては、骨材粒子間の岩質のばらつきが考えられる。また、西岡¹⁸⁾は、骨材の乾燥収縮ひずみに異方性が見られると報告しており、このこともばらつきの原因となるものと考えられる。なお、図10によると、粗骨材の乾燥収縮ひずみは、乾燥期間14日の時点でほぼ一定値に収束している。

また、表9によると、かんらん岩PTの粗骨材の乾燥収縮ひずみは比較的大きな負の値となっている。この原因は定かではないが、一つの可能性としては、かんらん岩中に含まれている繊維状・板状の蛇紋岩鉱物であるクリソタイルやアンティゴライトの間に入り込んだ水分が、乾燥開始後も長く骨材中に残留し、乾燥環境下での粗骨材の膨張変形を促したことが考えられる。さらに言えば、図2において、PTの原石コアの乾燥収縮ひずみがかなり小さな値となっていることも、このような理由によると解釈することが可能である。

図11に、モルタル薄片の乾燥収縮試験結果を示す (ケースごとの平均値)。同図によると、乾燥収縮ひずみの測定値は、乾燥期間28日の時点でほぼ一定になっている。

5.2 原石コアの乾燥収縮ひずみと骨材の特性値・試験値の関係

これまでに示したように、骨材に関する何らかの特性値や試験値を骨材の乾燥収縮ひずみと関連付けることができれば、その値を指標として、コンクリートの乾燥収縮ひずみを式 (2) などにより推定することが可能となる。そこで、ここでは、骨材の乾燥収縮ひずみの評価指標を見出すための検討を行った。具体的には、原石コアの乾燥収縮ひずみを骨材の真の乾燥収縮ひずみと見なし、この値と骨材に関する特性値や試験値との間の線形回帰分析を行った。

ただし、事前の予備的な検討として、回帰分析における標準化残差を計算したところ、その絶対値は、図12に示すように、ASおよびPTの場合に、多くの分析ケースで大きな値となり、外れ値の目安である2に近いかそれ以上の値となった。すなわち、これら2つの骨材のデータが相関を著しく低下させる原因となった。そのため、以下の考察では、これらのデータを特異と見なし、回帰分析の対象から除いた。また、図中では、ASおよびPTのデータを白抜きのプロットで、その他のデータを黒塗りのプロットで表示した。なお、安山岩ASのデータが特異となったことに対しては、3.2節および4.3節の考察においてもこのデータが特異であったことが関係している可能性がある。また、かんらん岩PTのデータが特異となったことに対しては、5.1節の考察に示したように、この骨材の収縮機構が他の骨材と

図13 原石コアの乾燥収縮ひずみと骨材の絶対乾密度の関係

図14 原石コアの乾燥収縮ひずみと骨材の吸水率の関係

図15 原石コアの乾燥収縮ひずみと骨材の気乾含水率の関係

図16 原石コアの乾燥収縮ひずみと骨材の安定性との関係

やや異なると考えられることが関係している可能性がある。

(1) 骨材の吸水率・気乾含水率との関係

図13～15に、原石コアの乾燥収縮ひずみと骨材の絶対乾密度、吸水率および気乾含水率の関係を示す。これらの中で、細・粗骨材の吸水率には、原石コアの乾燥収縮ひずみとの間にある程度の相関が見られる。しかし、図15によると、細・粗骨材の気乾含水率には、吸水率よりもさらに高い相関が見られる。また、以上と同様な傾向は、兵頭¹¹⁾によっても報告されている。

(2) 骨材の安定性との関係

図16に、原石コアの乾燥収縮ひずみと骨材の損失質量分率 (安定性試験の結果) の関係を示す。同図によると、細骨材の場合、両者

の間に相関は見られない。一方、粗骨材の場合、寄与率は0.60であり、ASおよびPTのほかにさらに半深成岩の1ケースのデータを除いた場合には寄与率のさらなる大幅な向上が見込まれる。片平¹⁰⁾らは、調合一定のコンクリートの乾燥収縮ひずみと骨材の安定性との間に相関が見られると報告しており、このことを考え合わせても、原石コアの乾燥収縮ひずみと粗骨材の安定性には関連性があるものと判断できる。

(3) 骨材の比表面積との関係

図17に、原石コアの乾燥収縮ひずみと骨材の内部空隙の比表面積の関係を示す。この両者の間に密接な関係があることは小山田¹²⁾によって報告されており、また、コンクリートの乾燥収縮ひずみと骨材の比表面積の関連性が高いことも今本⁸⁾や片平¹⁰⁾によって報告されている。それに対し、本実験では、粗骨材を試料とした場合に、既往の研究と同様に、両者の間に高い相関が見られた。なお、堀口¹⁹⁾は、本実験と一部共通する粗骨材試料を用いて同様の趣旨の実験を行っており、その実験においても、粗骨材の乾燥収縮ひずみと比表面積の間に高い相関が見られることが確認されている。

(4) 粗骨材の乾燥収縮ひずみとの関係

図18に、原石コアと粗骨材の乾燥収縮ひずみの関係を示す。同図によると、両者の値は、ほとんどの骨材においてほぼ一致している。すなわち、粗骨材にひずみゲージを貼付して乾燥収縮ひずみを測定すれば、原石コアに対する場合とほぼ同一の測定結果が得られるといえる。ただし、中には対応の悪い骨材もあり、本実験の範囲では、その原因は明らかにならなかった。

(5) モルタル薄片の乾燥収縮ひずみとの関係

図19に、原石コアとモルタル薄片の乾燥収縮ひずみの関係を示す。寄与率は0.89であり、両者の相関は高いといえる。したがって、使用する細骨材を用いてモルタル薄片を作製し、その乾燥収縮ひずみを測定すれば、骨材の乾燥収縮ひずみを比較的高い精度で推定できるものと考えられる。

5.3 骨材の乾燥収縮評価指標

表10に、前節の考察で、原石コアの乾燥収縮ひずみとの間に比較的高い相関が得られた骨材の特性値および試験値を、試験方法の特徴などと併せて整理して示す。

これらの試験を、レディーミクストコンクリート工場での受入れ検査や骨材製造工場での品質管理試験として実施することを想定した場合、比較的簡単に実施可能なのは、表中の①気乾含水率試験および②比表面積試験である。また、直接的に骨材の乾燥収縮ひずみの測定値が得られるという点で、③粗骨材の乾燥収縮試験には高い精度が期待できる。ただし、いずれの特性値や試験値の場合も、前述のように、骨材（原石コア）の乾燥収縮ひずみとの対応の悪い骨材が必ず一部に存在する。また、現時点では、それがどのような骨材かを特定することも難しい。したがって、骨材の乾燥収縮ひずみの推定にあたっては、このことに対する配慮が必要となる。

6. まとめ

本研究では、コンクリートの乾燥収縮を考慮して合理的に骨材を選定する方法の確立を目的として、骨材に関する様々な特性値や試験値と骨材の乾燥収縮ひずみの関係を調べた。また、その結果を基

図17 原石コアの乾燥収縮ひずみと骨材の比表面積の関係

図18 原石コアと粗骨材の乾燥収縮ひずみの関係

図19 原石コアとモルタル薄片の乾燥収縮ひずみの関係

表10 骨材の乾燥収縮ひずみを評価し得る試験方法とその特徴

試験方法	対象 骨材	試験方法の特徴			試験に要 する期間
		推定精度*	骨材粒子間のば らつきの影響の 受けにくさ	試験実施 の容易さ	
①気乾含水率試験	細骨材	△ (0.72)	◎	○	2週間 程度
	粗骨材	△ (0.75)			
②比表面積試験	粗骨材	○ (0.80)	○	○	2週間 程度
③粗骨材の乾燥収 縮試験	粗骨材	◎	△	△	4～6週間 程度
④モルタル薄片の 乾燥収縮試験	細骨材	◎ (0.89)	○	△	4週間 程度

* ( ) 内の値は図13～19中に示した寄与率。

に、骨材の乾燥収縮ひずみの評価指標を見出すための検討を行った。本研究で得られた知見は、以下の通りである。

- (1) 粘土鉱物の含有量が多いほど、骨材の乾燥収縮ひずみが大きい傾向となる。
- (2) 骨材の乾燥収縮ひずみは、コンクリートの乾燥収縮ひずみに直接的な影響を及ぼす。また、細・粗骨材の乾燥収縮ひずみの値が得られれば、それに基づいて、複合理論を基盤とした乾燥収縮予測式により、各種調合のコンクリートの乾燥収縮ひずみのある程度の精度で推定することが可能である。
- (3) 本研究で得られた実験結果からは、コンクリートの弾性係数やそれに関連する試験値からコンクリートの乾燥収縮ひずみを推定することは困難といえる。
- (4) 本研究の範囲内では、細・粗骨材の気乾含水率および比表面積、粗骨材の乾燥収縮ひずみの直接的な測定値、ならびに細骨材を用いて作製したモルタル薄片供試体の乾燥収縮ひずみと、骨材原石の乾燥収縮ひずみとの間に高い相関が見られる。したがって、これらの骨材に関する特性値や試験値は、骨材の乾燥収縮ひずみの評価指標となり得る。
- (5) レディーミクストコンクリート工場での受入れ検査や骨材製造工場での品質管理試験を想定した場合、上記の中で比較的簡単に実

施可能なのは、気乾含水率試験および比表面積試験である。また、試験実施にやや手間が掛かるものの、測定結果に高い精度が期待されるのは、粗骨材の乾燥収縮試験である。ただし、これらのいずれの特性値や試験値にも、骨材の乾燥収縮ひずみとの対応の悪い骨材が必ず一部に存在する。したがって、骨材の乾燥収縮ひずみの推定にあたっては、このことに対する配慮が必要となる。

謝辞

本研究は、コンクリート技術支援機構（ASCoT）「収縮ひび割れ研究委員会」^{20), 21)}への協力を前提として実施したものである。

本研究の実施に際し、森野奎二愛知工業大学名誉教授に粉末X線回折について、東京理科大学・今本啓一准教授に骨材の比表面積試験についてそれぞれご教授頂いた。また、東亜開発（株）三重総合試験センターに実験の一部を実施して頂いた。ここに付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) コンクリート工学会：コンクリートの収縮問題検討委員会報告書，pp. 13-23，2010. 3
- 2) セメント協会：耐久性専門委員会ひび割れ分科会報告H-23，pp. 23-36，1992. 10
- 3) 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
- 4) 立松和彦，荒井正直，岩清水隆，木村芳幹，浦野英男，今本啓一，元木亮：関西地域における骨材原石の乾燥収縮および細孔径分布に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No. 549，pp. 1-6，2001. 11
- 5) 大野義照，片岡宏治，熊野知司，高見新一，麓隆行：近畿地方の骨材需給の現況と近畿産骨材を使用したモルタルの乾燥収縮 ―近畿支部「性能評価型コンクリートに向けた骨材調査研究委員会」の報告―，コンクリート工学，Vol. 50，No. 6，pp. 524-532，2012. 6
- 6) 閑田徹志，百瀬晴基：乾燥収縮ひずみに注目した天然骨材選定例，コンクリート工学，Vol. 46，No. 5，pp. 24-29，2008. 5

- 7) 寺西浩司，佐藤嘉昭：複合モデルを基盤としたコンクリートの乾燥収縮予測式 ―3相モデルへの展開および外的要因の影響の考慮―，日本建築学会構造系論文集，No. 602，pp. 21-28，2006. 4
- 8) 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
- 9) 田中博一，橋田浩：骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31，No. 1，pp. 553-558，2009. 7
- 10) 片平博，渡辺博志：コンクリートの乾燥収縮率を推定するための簡易評価指標に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 32，No. 1，pp. 467-472，2010. 7
- 11) 兵頭彦次，井坂幸俊，谷村充，佐藤良一：コンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす粗骨材物性および収縮低減材料の影響評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 32，No. 1，pp. 377-382，2010. 7
- 12) 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
- 13) 真野孝次，中村則清：砕石の品質がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関する実験的研究（その1～2），日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp. 933-936，2010. 7
- 14) 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
- 15) 慶伊富長：吸着，共立全書，pp. 95-131，1965. 11
- 16) 竹内毅典，寺西浩司，林伸嘉，前田大介：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の影響，日本建築学会東海支部研究報告集，No. 42，pp. 73-76，2004. 2
- 17) 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設計・施工指針（案）・同解説，pp. 190-194，2006. 2
- 18) 西岡由紀子，丸山一平：砂岩系および石灰石骨材の乾燥収縮ひずみの異方性と線膨張係数に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp. 373-374，2012. 9
- 19) 堀口直也，五十嵐豪，丸山一平：含水率の変化による骨材の体積変化に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33，No. 1，pp. 131-136，2011. 7
- 20) コンクリート技術支援機構（ASCoT）：コンクリートの収縮ひび割れ研究委員会報告書，2011. 5
- 21) 寺西浩司，丸山一平，齊藤和秀，平岩陸，森堅太郎：コンクリートの乾燥収縮ひずみの推定と収縮ひび割れ対策の選定 ―ASCoT「コンクリートの収縮ひび割れ研究委員会」の成果報告―，コンクリート工学，Vol. 49，No. 11，pp. 8-16，2011. 11

（2012年9月10日原稿受理，2013年1月18日採用決定）