

論文 スラグ骨材の乾燥収縮ひずみおよび弾性係数の推定

佐藤 晴香*1・寺西 浩司*2

要旨: 本研究では、モルタル薄片の乾燥収縮試験およびモルタル供試体の静弾性係数試験を行い、各種スラグ骨材の乾燥収縮ひずみおよび弾性係数を推定した。また、スラグ骨材の気乾含水率試験を行った。その結果、(1) スラグ骨材の乾燥収縮ひずみは天然骨材に比べて小さく、特に銅スラグ骨材の乾燥収縮ひずみは小さい、(2) スラグ骨材の弾性係数は天然骨材と同等以上である、(3) スラグ骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、骨材の乾燥収縮ひずみと弾性係数を基に複合理論によりおよそ説明できる、(4) 気乾含水率は、スラグ骨材を含む骨材の乾燥収縮ひずみを把握するための目安となり得る、などの知見を得た。

キーワード: スラグ骨材, 複合理論, 乾燥収縮ひずみ, 乾燥収縮予測式, モルタル, 気乾含水率

1. はじめに

建築研究振興協会の非鉄スラグ骨材委員会および日本建築学会の非鉄スラグ骨材指針改定 WG は、フェロニッケルスラグ骨材および銅スラグ骨材を用いるコンクリートの指針改定のための基礎資料の整備を目的として、これまでに、実験的な検討（以下、委員会実験という）を行っている^{1), 2)}。そして、スラグ骨材を用いると、コンクリートの乾燥収縮ひずみが大きく低減されるケースがあることを明らかにしている。しかし、そのメカニズムは解明されていない。

そこで、筆者らは、各種スラグ骨材を用いたモルタル薄片の乾燥収縮試験を行い、その結果から、既往の研究結果³⁾を踏まえ、スラグ骨材自身の乾燥収縮ひずみを推定した。また、同様に、モルタルの静弾性係数試験を行い、スラグ骨材自身の弾性係数を推定した。そして、これらの推定結果を入力値として、複合理論により、委員会実験で乾燥収縮試験を行ったコンクリートの乾燥収縮ひずみを予測し、実測値との整合性を検討した。

なお、本研究では、スラグ骨材を含む3種類以上の骨材（細骨材+粗骨材）を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみを予測することを目的としているため、筆者らの従来の予測式を拡張し、複合理論の多相モデルに基づく乾燥収縮予測式を新たに誘導した。本報では、この結果も併せて報告する。

2. 委員会実験の結果²⁾

表-1 に、委員会実験でコンクリートの乾燥収縮試験を行った実験ケースを示す。この実験では、表-2 中に網掛けで示した骨材を使用し、ベースとした天然細骨材（砕砂または陸砂）に対して各種のフェロニッケルスラグ細骨材（FNS）または銅スラグ細骨材（CUS）を置換している。また、セメントには、普通ポルトランドセメ

表-1 委員会実験の実験ケース

実験ケース (調合名)	ベース 細骨材	スラグ骨材	混合率 (%)
C-0%	砕砂 (C)	-	0
C-FNS1.2(OS)30%		FNS1.2(OS)	30
C-FNS5(HS)30%		FNS5(HS)	
C-FNS5(HS)50%			50
C-FNS5(HS)100%		100	
C-CUS2.5(MS)30%		CUS2.5(MS)	30
C-CUS2.5(SS)30%	CUS2.5(SS)		
S-0%	陸砂 (S)	-	0
S-FNS1.2(OS)30%		FNS1.2(OS)	30
S-FNS5(HS)30%		FNS5(HS)	
S-CUS2.5(MS)30%		CUS2.5(MS)	
S-CUS2.5(SS)30%		CUS2.5(SS)	

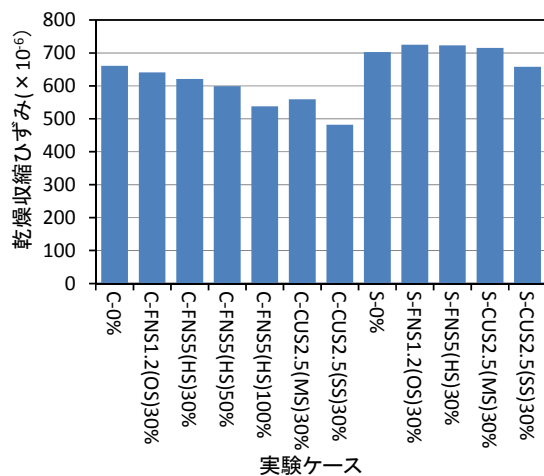


図-1 コンクリートの乾燥収縮試験結果 (委員会実験)

*1 名城大学 理工学研究科建築学専攻 大学院生 (正会員)

*2 名城大学 理工学建築学科教授 博士(工学) (正会員)

ントを使用し、水セメント比は50%としている。

図-1に、委員会実験で得られたコンクリートの乾燥収縮ひずみ（乾燥期間182日）を示す。ベース細骨材を砕砂とし、FNS5(HS)を置換したシリーズでは、スラグ骨材の混合率が大きくなるにつれて、乾燥収縮ひずみが小さくなっている。また、混合率30%のケースのみに着目すると、フェロニッケルスラグ細骨材よりも銅スラグ細骨材を混合した場合の方が乾燥収縮ひずみが小さくなっている。

3. 実験概要

3.1 試料とした骨材

表-2に試料とした骨材を示す。本実験では、委員会実験で用いた天然骨材（陸砂，砕砂，砕石）および非鉄スラグ骨材のほか、参考のために、電気炉酸化スラグ骨材（EFSおよびEFG）や高炉スラグ骨材（BFS）の鉄鋼スラグ骨材なども試料とした。なお、表中の記号における括弧内のアルファベットは、スラグ骨材の生産工場の区別を示す。また、粗骨材（砕石，FNG20-5(HG)およびEFG20-5(CG)）は、ジョークラッシャーで破碎して、細骨材状にして実験に供した。

3.2 モルタル薄片の乾燥収縮試験

筆者らは、過去の研究³⁾において、モルタル薄片の乾

燥収縮試験結果からそのモルタルに使用した骨材の乾燥収縮ひずみを推定できるとの知見を得た。本研究では、それと同一の試験を実施することとし、試料とした各骨材を用いて、図-2に示すような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た。

表-3にモルタルの調合を示す。調合は、過去の研究³⁾と同一とした。供試体の作製にあたっては、JIS R 5201に規定されたモルタル供試体成形用型の鋼板間の幅を5mmに調整し、それを、同JISに規定されたテーブルバイブレータ上に固定して、加振しながらモルタルを鋼板間に打ち込んだ（すなわち、供試体を立てた状態で打ち込んだ）。そして、翌日に脱型後、材齢7日まで標準養生し、ひずみゲージ（ゲージ長30mm）を供試体片面の中央に貼付した。その後、恒温恒湿室内（温度20℃，相対湿度60%）に28日間存置し、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枚ずつとした。

3.3 モルタル供試体の静弾性係数試験

骨材自身の弾性係数を推定するために、試料とした骨材を用い、JIS A 1149に準じて、調合を同一としたモルタルの静弾性係数試験を行った。表-4にモルタルの調合を示す。供試体（φ50×100mm）は各ケース3本ずつとし、28日間標準養生した後に、圧縮試験を行って弾性

表-2 試料とした骨材

記号	種類		製造方法	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	実積率 (%)	粗粒率
陸砂	掛川産川砂		-	2.54	2.07	67.5	2.75
砕砂	硬質砂岩砕砂			2.59	0.98	56.6	2.88
砕石	硬質砂岩砕石			2.62	0.66	58.6	-
FNS1.2(OS)	フェロニッケル スラグ骨材	細骨材	キルン水砕スラグ	3.04	0.51	58.4	1.52
FNS5(HS)			電気炉風砕スラグ	2.96	2.05	64.0	2.62
FNS5(YS)			電気水砕スラグ	2.95	0.81	66.5	2.60
FNG20-5(HG)	粗骨材		電気炉風砕スラグ	2.95	0.90	61.4	6.54
CUS2.5(MS)	銅スラグ骨材		連続製銅法	3.48	0.30	63.2	2.60
CUS2.5(SS)			銅水砕スラグ	3.48	0.68	63.5	2.70
EFS5(CS)	電炉酸化 スラグ骨材	細骨材	風砕スラグ	3.71	0.74	68.1	2.76
EFS5-0.3(TS)			パンスラグ	3.51	0.38	67.0	3.37
EFG20-5(CG)			粗骨材	水冷スラグ	3.60	0.68	57.8
BFS1.2(SS)	高炉スラグ細骨材		水砕スラグ	2.72	0.40	57.7	2.22

*網掛けは、委員会実験に使用した骨材。

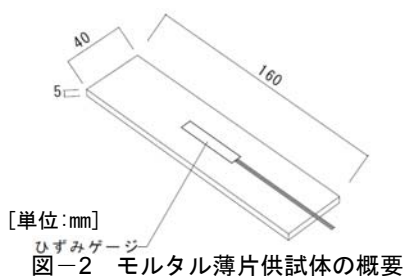


表-3 モルタル薄片の調合

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

表-4 モルタルの調合（静弾性係数試験）

水セメント比 (%)	砂セメント容積比	絶対容積(l/m ³)		
		水	セメント	細骨材
50	2.98	283	180	538

係数を測定した。

3.4 気乾含水率試験

筆者らは、過去の研究³⁾において、骨材の乾燥収縮ひずみと気乾含水率の間に高い相関が見られることから、気乾含水率は、骨材の乾燥収縮ひずみを把握するための目安となり得るとの知見を得た。そこで、本研究では、スラグ骨材に対しても同様の試験を行うこととした。

気乾含水率は、24時間吸水させた骨材試料500gを恒温恒湿室内(温度20℃, 相対湿度60%)に2週間存置し、その後、JIS A 1125に準拠して含水率を測定した。

4. 骨材の乾燥収縮ひずみの推定

図-3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)。乾燥収縮ひずみの測定値は、乾燥期間28日の時点ではほぼ一定になっている。

また、各種岩種の砕石・砕砂を対象とした筆者らの過去の研究³⁾では、骨材(原石コア)とモルタル薄片の乾燥収縮ひずみの間に図-4に示すような密接な関係が得られている。そこで、本研究では、スラグ骨材に対してもこの関係が当てはまるものと考えて、図中に示された以下の回帰式(1)を用いて、モルタル薄片試験の結果から骨材自身の乾燥収縮ひずみを推定した。

$$\varepsilon_{sa} = 0.305 \varepsilon_{sm} - 142 \quad (1)$$

ここに、 ε_{sa} : 骨材の乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)、 ε_{sm} : モルタル薄片の乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)。

図-5にモルタル薄片の乾燥収縮ひずみの最終値(乾燥期間28日)を示す。また、図-6に、上式から求めた骨材の乾燥収縮ひずみの推定値を示す。同図から、スラグ骨材は、全体として、天然骨材に比べて乾燥収縮ひずみが小さく、特に、銅スラグ骨材は、図-4との比較からわかるように、生物岩(石灰岩)と同程度に乾燥収縮ひずみが小さいことがわかる。

5. 骨材の弾性係数の推定

図-7に、モルタル供試体の静弾性係数試験結果を示す。同図より、天然骨材よりもスラグ骨材を用いた場合の方が全体として弾性係数が大きいことがわかる。

また、本研究では、弾性係数に関する複合モデルの一つであるHashin-Hansen式⁴⁾の清原らによる修正式⁵⁾(2)を利用して、実験で得られたモルタルの弾性係数から骨材自身の弾性係数を推定した。

$$E_a = -\frac{E_p h - 1 + (h+1)V_a}{\tau h - 1 - (h+1)V_a} \quad (2)$$

ここに、 $h = E_m/E_p$ 、 E : 弾性係数 (kN/mm^2)、 V : モルタル(またはコンクリート)中に占める体積比、 τ : 骨材

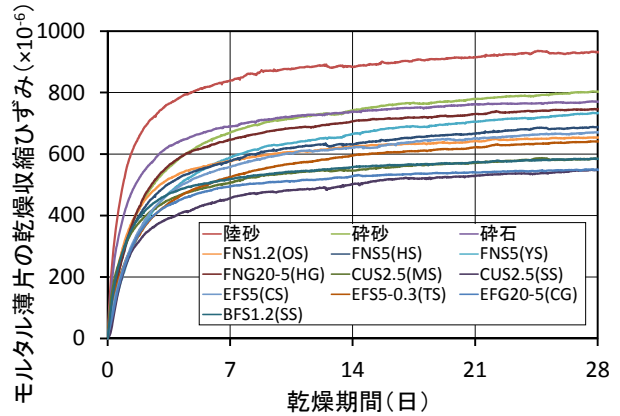


図-3 モルタル薄片の乾燥収縮ひずみ

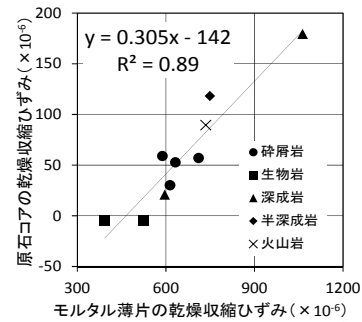


図-4 骨材とモルタル薄片の乾燥収縮ひずみの関係(既往の実験結果³⁾)

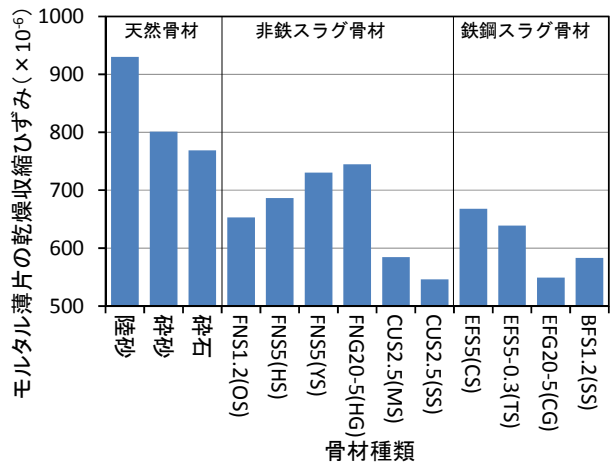


図-5 モルタル薄片の乾燥収縮ひずみの最終値

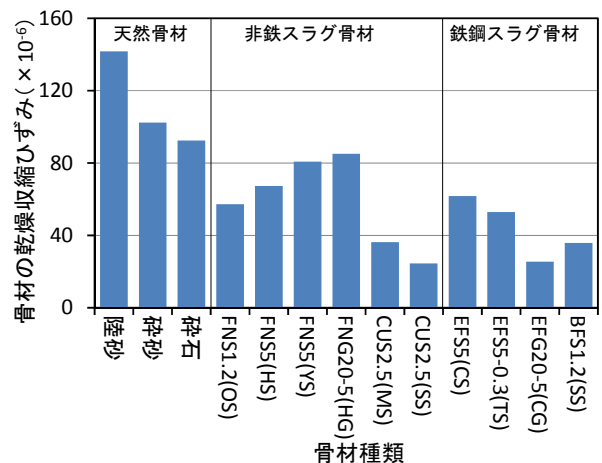


図-6 骨材の乾燥収縮ひずみの推定値

とセメントペーストの間の遷移帯領域を考慮した補正係数 (0.68)。

*添字 m, p, a は、それぞれモルタル、セメントペースト、骨材を表す (以降も同様とする)。

骨材の弾性係数の推定値を図-8 に示す。同図より、スラグ骨材の弾性係数は天然骨材と同等以上であることがわかる。

6. 骨材とコンクリートの乾燥収縮ひずみの関係

6.1 複合理論の多相モデルに基づく乾燥収縮予測式の誘導

本節では、次節でのスラグ骨材を含むコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測に先立ち、まず、これまでに筆者らが提案している複合理論に基づく乾燥収縮予測式⁶⁾を、スラグ細骨材、ベース細骨材、粗骨材などの多種類の骨材を用いたコンクリートに拡張して適用できるような形に修正する。

馬場は、乾燥収縮の発生機構として毛細管張力説を採用し、コンクリート中の細孔に作用をする毛細管張力を Laplace-Kelvin 式 (3) により表している⁷⁾。

$$\Delta p = - \frac{RT \rho}{M} \ln \left(\frac{p_o}{p} \right) \quad (3)$$

ここに、 Δp : 毛細管張力 (N/m²)、 p : 蒸気圧 (N/m²)、 p_o : 飽和蒸気圧 (N/m²)、 R : 気体定数 (J/K・mol)、 T : 絶対温度 (K)、 ρ : 水の密度 (kg/m³)、 M : 水の分子量 (kg/mol)。

また、一つの細孔における毛細管張力に伴う収縮ひずみを厚肉球殻の弾性理論に基づいて次式のように解いている。

$$\varepsilon_{sc} = \frac{3(1-\mu_c)}{2E_c} W_{ec} \cdot \Delta p \quad (4)$$

ここに、 ε_s : 乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)、 μ : ポアソン比、 W_e : 体積含水率。

*添字 c は、コンクリートを表す (以降も同様とする)。

そして、上式は、セメントペースト、コンクリート中に k 種類存在する骨材のうちの i 番目の種類の骨材に対しても同様に成立する。

$$\varepsilon_{sp} = \frac{3(1-\mu_p)}{2E_p} W_{ep} \cdot \Delta p \quad (5)$$

$$\varepsilon_{si} = \frac{3(1-\mu_i)}{2E_i} W_{ei} \cdot \Delta p \quad (6)$$

*添字 i は、コンクリート中の i 番目の種類の骨材を表す (以降も同様とする)。

さらに、式(4)~(6)中の体積含水率 W_e については、次式が成り立つ。

$$W_{ec} = W_{ep} \left(1 - \sum_{i=1}^k V_i \right) + \sum_{i=1}^k W_{ei} V_i \quad (7)$$

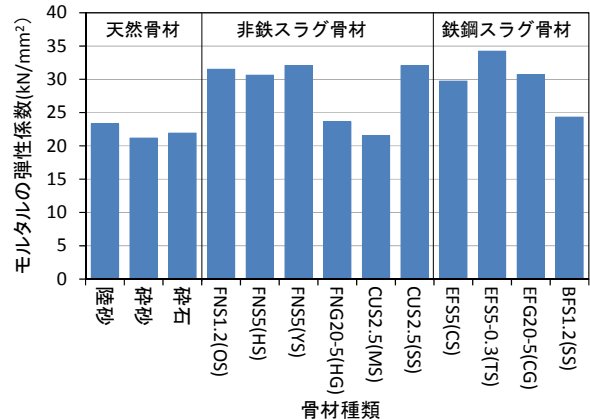


図-7 モルタル供試体の弾性係数

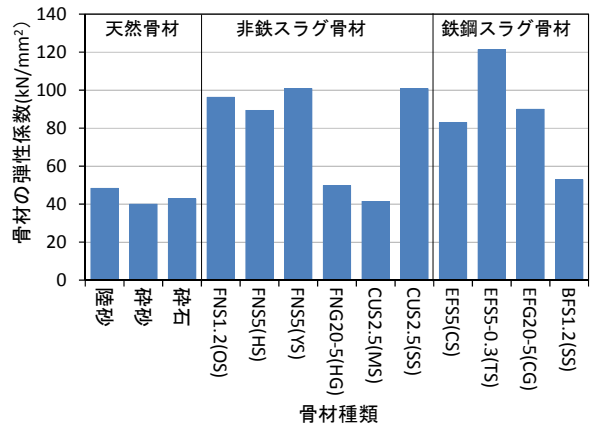


図-8 骨材の弾性係数の推定値

ここで、式(4)~(7)より W_{ec} 、 W_{ep} および W_{ei} を消去して整理すると、次式のようになる。

$$\varepsilon_{sc} = \varepsilon_{sp} \frac{1 - \sum_{i=1}^k \left(1 - m_i n_i \frac{1 - \mu_p}{1 - \mu_i} \right) V_i}{\frac{(1 - \mu_p) E_c}{(1 - \mu_c) E_p}} \quad (8)$$

ここに、 $n_i = E_i / E_p$ 、 $m_i = \varepsilon_i / \varepsilon_p$ 。

そして、 $\mu_c = \mu_p = \mu_i = 0.2$ とすると、次式が得られる。

$$\varepsilon_{sc} = \frac{\varepsilon_{sp}}{n_c} \left\{ 1 - \sum_{i=1}^k (1 - n_i m_i) V_i \right\} \quad (9)$$

ここに、 $n_c = E_c / E_p$ 。

次に、上式から E_c を消去して完全な複合モデルとするために、Hashin の多相材料の体積弾性係数の複合モデル⁸⁾を利用して、多相材料の弾性係数の複合モデルを誘導する。Hashin によれば、 k 種類の内包物を含む複合材料の体積弾性係数は、次式のように求められる。

$$\frac{K_C}{K_M} = 1 + 3(1 - \mu_M) \sum_{i=1}^k \frac{\left(\frac{K_p^{(i)}}{K_M} - 1 \right) V_i}{2(1 - 2\mu_M) + (1 + \mu_M) \left[\frac{K_p^{(i)}}{K_M} - \left(\frac{K_p^{(i)}}{K_M} - 1 \right) V \right]} \quad (10)$$

ここに、 $V = \sum_{i=1}^k V_i$ 、 K_C ：複合材料の体積弾性係数

(kN/mm²)、 K_M ：マトリックスの体積弾性係数 (kN/mm²)、 $K_P^{(i)}$ ： i 個目の内包物の体積弾性係数 (kN/mm²)、 μ_M ：マトリックスのポアソン比。

ここで、上式に $K=E/3(1-2\mu)$ を代入して弾性係数について整理し、さらに $\mu_c=\mu_p=\mu_i=0.2$ とすると、次式のような弾性係数の多相モデルが得られる。

$$n_c = \frac{E_c}{E_p} = 1 + \sum_{i=1}^k \frac{2(n_i - 1)V_i}{1 + n_i - (n_i - 1)V_a} \quad (11)$$

以上により、式(9)および(11)から成る多相モデルの乾燥収縮予測式が得られたことになる。また、これらの式中のセメントペーストの乾燥収縮ひずみ ε_{sp} および弾性係数 E_p に関しては、筆者らの過去の研究⁹⁾により次の実験式が得られている。

$$\varepsilon_{sp} = \frac{t}{2.31(\alpha W/C + \beta) + t} (\lambda W/C + \delta) \quad (12)$$

$$E_p = \frac{100}{W/C} \gamma + \eta \quad (13)$$

ここに、 W/C ：水セメント比 (%)、 α 、 β 、 λ 、 δ 、 γ 、 η ：セメント種類に関わる定数 (表-5 による)。

6.2 コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測

図-9に、6.1節で得られた予測式(式(9)、(11)、(12)および(13)の一連の式)により求めたコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測値を、委員会実験で得られた実測値との関係において示す(乾燥期間 182 日)。ベース細骨材を陸砂としたケースでは、予測値と実測値が近い値になっていることがわかる。一方で、ベース細骨材を砕砂としたケースでは、予測値が実測値よりやや大きくなっているが、予測値と実測値の間に高い相関が見られる。これらのことから、スラグ骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、骨材の乾燥収縮ひずみと弾性係数の推定値を基に、複合理論によりおよそ説明できるといえる。

7. 骨材の乾燥収縮ひずみと気乾含水率の関係

図-10に、骨材の乾燥収縮ひずみの推定値と気乾含水率の関係を示す。図中には、全骨材とスラグ骨材のみに対する回帰直線をそれぞれ示してある。スラグ骨材のみに着目すると、気乾含水率の範囲が狭いことから、寄与率は必ずしも高いとはいえないものの、両者の間に関係性が見られ、その回帰直線は全骨材に対する回帰直線とほぼ一致している。また、天然骨材とスラグ骨材を合わせると、既往の研究結果³⁾と同様に、骨材の乾燥収縮ひずみと気乾含水率の間に高い相関が認められる。これらのことから、気乾含水率は、スラグ骨材の場合であっても、骨材自身の乾燥収縮ひずみを把握するための一つの

表-5 セメント種類に関わる定数
(普通ポルトランドセメント)

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

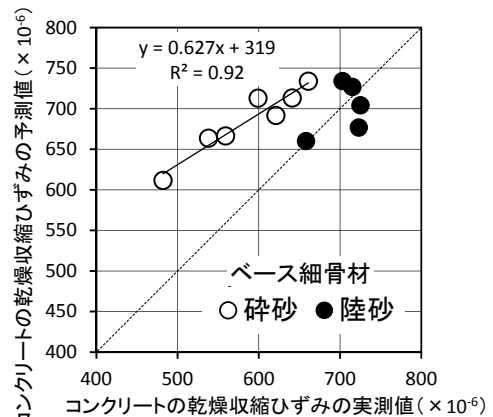


図-9 コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測値と実測値の関係

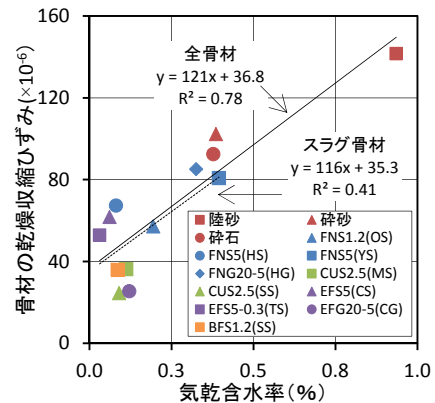


図-10 骨材の乾燥収縮ひずみと気乾含水率の関係

目安となり得るものと考えられる。

8. まとめ

本研究では、モルタル薄片の乾燥収縮試験を行い、各種スラグ骨材の乾燥収縮ひずみを推定した。また、モルタル供試体の静弾性係数試験から各種スラグ骨材の弾性係数を推定した。さらに、スラグ骨材の気乾含水率試験を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) スラグ骨材の乾燥収縮ひずみは、天然骨材に比べて小さく、特に銅スラグ骨材の乾燥収縮ひずみは小さい。
- (2) スラグ骨材の弾性係数は、天然骨材と同等以上である。
- (3) スラグ骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、骨材の乾燥収縮ひずみと弾性係数を基に複合理論によりおよそ説明できる。
- (4) 気乾含水率は、スラグ骨材を含む骨材の乾燥収縮ひずみを把握するための目安となり得る。

参考文献

- 1) 阿部道彦, 野口貴文, 鹿毛忠継, 真野孝次: 非鉄スラグ骨材を使用したコンクリートに関する研究 その 1 ~3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.103-108, 2016.8
- 2) 真野孝次, 鹿毛忠継, 兼松学, 松田拓, 今本啓一, 阿部道彦: 非鉄スラグ骨材を使用したコンクリートの圧縮強度・乾燥収縮, 日本建築学会関東支部研究報告集, No.87, I, pp.45-48, 2017.2
- 3) 寺西浩司: 骨材の乾燥収縮ひずみの評価指標に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.687, pp.905-912, 2013.5
- 4) T.C.Hasen: Influence of Aggregate and Voids on Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar, and Cement Paste, Journal of the ACI, pp.193-216,1965.2
- 5) 清原千鶴ほか: コンクリートの力学特性に関する基礎的研究 (その1および2), 日本建築学会研究報告, 九州支部, Vol.38, pp.85-88, 1999.3
- 6) 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考慮—, 日本建築学会構造系論文集, No.602, pp.21-28, 2006.4
- 7) 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
- 8) Z.Hashin: The Elastic Moduli of Hererogeneous Materials, Journal of Applied Mechanics, Vol.29, pp.143-150, 1962.4
- 9) 江口清, 寺西浩司: 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, 日本建築学会構造系論文集, No.557, pp.15-22, 2013.5