

論文 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの収縮予測式の提案

金子 宝以*1・今本 啓一*2・清原 千鶴*3

要旨: 高炉スラグ細骨材は、コンクリートの収縮低減効果が天然骨材よりも大きい結果が数多く報告されており、収縮低減材料としての有効利用が期待できる。そこで、本研究では高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式について検討を行った。その結果、高炉スラグ細骨材の混合率や比表面積を用いた予測式について提案を行いその適用の可能性について言及した。

キーワード: 高炉スラグ細骨材, 乾燥収縮, 比表面積, 吸湿率, 気乾含水率, 複合則理論

1. はじめに

骨材はコンクリート体積中の7割を占め、その骨材のおよそ半分が細骨材である。よって骨材の特性がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響は無視できない。

一方、コンクリートに高炉スラグ細骨材(以下、BFS)を用いた場合、乾燥収縮ひずみが低減する結果¹⁾が得られており、筆者らの研究^{2,3)}においても室内実験および実環境下での実大壁実験により、天然骨材を使用したコンクリートと比較して収縮低減効果ならびに収縮ひび割れ抑制効果が得られることを確認している。さらに、BFSの収縮ひび割れ低減効果は骨材の内部空隙構造を表す指標の1つである比表面積が天然骨材よりも小さいことが要因の1つであることを示唆した。これらのことからBFSは産業副産物の有効資源化と収縮低減効果の2つを同時に解決できる材料として期待される。BFSを積極的に有効利用するためには、天然骨材と同様に構造物の設計時に検討できる乾燥収縮ひずみの予測式の確立が必要であると考えられる。日本建築学会の高炉スラグ細骨材を使用するコンクリートの調合設計・施工指針⁴⁾では、BFSを単独使用した場合の係数しか考慮されておらず、混合率や使用するBFSの物性値は考慮されていないのが現状である。

そこで、本研究では収縮に影響を及ぼすBFSの物性値として、吸湿率、気乾含水率および比表面積を測定し、これらの物性値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検討を行い、BFSを使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式について検討を行った。

2. 収縮予測手法

コンクリートの乾燥収縮ひずみの実験的な予測式は数多くのものが提案されているが、その提案式は大きく分けて二つのアプローチからなる。一つは、数多くの実験データを基にして得られる経験式である。もう一方は、コンクリートをセメントペーストおよび骨材からなる二相材料と見なし、コンクリートの乾燥収縮のメカニズムに複合則理論を適用するという

ものである。上記2種類のアプローチ方法によりBFSを使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式について検討を行う。

2.1 経験式による予測手法

実験データに基づく経験式は、調査表から読み取れる値から求めることが可能なため、比較的容易に乾燥収縮ひずみを予測できる。一方で、骨材の性質などデータが得られにくい物性値の影響は加味できないために、その予測精度は高いものではない。

前述の日本建築学会の指針⁴⁾に記載されている予測式を以下に示す。

$$\epsilon_{sh}(t, t_0) = k \cdot t_0^{-0.08} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{h}{100} \right)^3 \right\} \cdot \left(\frac{(t-t_0)}{0.16(V/S)^{1.8} + (t-t_0)} \right)^{1.4(V/S)^{0.18}} \quad (1)$$

$$k = (11W - 1.0C - 0.82G + 404) \cdot \gamma_s \cdot \gamma_G \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 \quad (2)$$

ここに、

$\epsilon_{sh}(t, t_0)$: 乾燥開始材齢 t_0 日における材齢 t 日の収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)

W : 単位水量(kg/m^3)

C : 単位セメント量(kg/m^3)

G : 単位粗骨材量(kg/m^3)

h : 相対湿度(%) ($40\% \leq h \leq 100\%$)

V : 体積(mm^3)

S : 外気に接する表面積(mm^2)

V/S : 体積表面積比(mm) ($V/S \leq 300\text{mm}$)

$\gamma_{s,G,2,3}$: それぞれ細骨材, 粗骨材, セメント, 混和材の種類の影響を表す係数

式(1)中の k の式(2)はコンクリートの使用材料および割合により定まる係数となっている。その式(2)中に係数 γ_s としてBFSの影響が考慮されている。しかしながら、BFSを単独使用した場合($\gamma_s = 0.85$)のみしか考慮されておらず、混合率および細骨材の物性値の影響は考慮されていない。よって、ここでは式(2)中の γ_s をBFSの物性値や混合率をパラメータとして検討を行う。

*1 三和石産株式会社 (元 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 修士(工学))

*2 東京理科大学 工学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京理科大学 工学部建築学科 嘱託補手 博士(工学) (正会員)

2.2 複合則理論による予測

複合則理論を用いたモデルによる方法はセメントペーストの乾燥収縮ひずみを骨材が拘束するという観点に基づき、理論的根拠が明快である。また、構成材料の特性が考慮できるためにコンクリートの乾燥収縮ひずみを経験式と比較して、高い精度で予測可能である。しかし、養生条件等の外的要因の影響を加味することができない点や、構成材料の特性自体を直接的に求めることが容易でなく、経験式と比較して実用的でないといえる。

本研究では、細骨材の物性値を考慮するために、提案されている複合則理論式の中でも、精度が高いとされる馬場式⁴⁾から誘導される寺西、佐藤が提案するコンクリートをセメントペースト、細骨材および粗骨材からなる3相材料と見なした3相モデル式⁵⁾を使用した。以下にその式を示す。

$$\epsilon_c = \frac{1 - (1 - m_s \cdot n_s)V_s - (1 - m_g \cdot n_g)V_g}{n_c} \cdot \epsilon_p \quad (3)$$

$$n_c = 1 + \frac{2(n_s - 1) \cdot V_s}{n_s + 1 - (n_s + 1)(V_s + V_g)} + \frac{2(n_g - 1) \cdot V_g}{n_g + 1 - (n_g + 1)(V_s + V_g)} \quad (4)$$

ここに、

$$m_s = \epsilon_s / \epsilon_p, \quad m_g = \epsilon_g / \epsilon_p, \quad n_s = E_s / E_p, \quad n_g = E_g / E_p$$

ϵ : 乾燥収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)

E : ヤング係数(kN/mm²)

V : 骨材容積比

※添え字 c, p, s, g : それぞれコンクリート, セメントペースト, 細骨材, 粗骨材を示す。

この式(3)および(4)に細骨材の物性値である乾燥収縮ひずみおよびヤング係数を入力する。細骨材の乾燥収縮ひずみおよびヤング係数は、試験により直接求めることは困難であるために、BFSの物性値から推定を行う。

3 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性

3.1 混合率の影響

筆者らは既報²⁾³⁾(以下、実験IおよびII)において、BFSを混合使用したコンクリートの乾燥収縮特性を示した。その既報の使用材料、使用骨材の組み合わせ、コンクリートの調合およびフレッシュ性状をそれぞれ表-1から4に示す。なお、表中の記号は都合により変更してある。また、養生条件および乾燥収縮ひずみの測定結果を表-5に示す。表-5より天然骨材のみを用いた試験体の収縮量に対して、BFSを使用した試験体の収縮量の割合である収縮率(以下、収縮低減係数)を算出した。

図-1にBFSの混合率および普通コンクリートに対するBFSを用いたコンクリート収縮低減係数の関係を示す。混合率が高くなるほど収縮低減係数は小さくなっており、相関関係は寄与率がおおよそ0.78と高いが、同じ混合率においてもばら

表-1 使用材料

実験	材料	記号	種類	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
共通	セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.16	-
実験 I	水	W	上水道水	1.00	-
		NS	陸砂	2.59	2.07
		MS	山砂	2.61	-
		HCS	硬質砂岩砕砂	2.70	1.22
		BFSH1	BFS	2.67	1.84
		BFSB1	BFS	2.72	1.36
	BFSH2	BFS	2.68	1.92	
粗骨材	HG1	硬質砂岩砕石	2.66	0.60	
実験 II	水	W	上澄水	1.00	-
		CS	砕砂	2.58	2.87
		LS1	石灰砕砂	2.66	0.89
		PS1	山砂	2.80	1.23
		BFSH2	BFS	2.64	1.88
		CG	砕石	2.61	2.76
	粗骨材	LG	石灰砕石	2.68	0.65

骨材の密度は表乾密度とする。

表-2 使用した骨材の組み合わせ

実験	記号	BFSの混合率(%)	細骨材の種類			粗骨材の種類	
			S ₁	S ₂	S ₃	G ₁	G ₂
実験 I	NI.1	0	NS	-	-	HG1	-
	BFSI.1-30	30		BFSH1			
	BFSI.1-50	50		BFSB1			
	BFSI.2-30	30	CS				
	NI.2	0	MS	BFSH2			
	BFSI.3-30	30		BFSH2			
実験 II	NII	0	CS	LS1	PS1	CG	LG
	BFSII-50	50	BFSH				

表-3 コンクリートの調合

実験	記号	単位量 (kg/m ³)						
		W	C	S ₁	S ₂	S ₃	G ₁	G ₂
実験 I	NI.1	180	360	710	0	-	1029	-
	BFSI.1-30	180	360	497	219	-	1029	-
	BFSI.1-50	180	360	355	366	-	1029	-
	BFSI.2-30	180	360	497	223	-	1029	-
	NI.2	180	360	502	221	-	1029	-
	BFSI.3-30	180	360	502	222	-	1029	-
実験 II	NII	182	298	427	171	255	459	471
	BFSII-50	182	298	436	171	252	466	461

表-4 フレッシュ性状

実験	記号	混和剤使用量(C×%)			スランブ (cm)	空気量 (%)	
		AE減水剤	AE剤	消泡剤			
実験 I	NI.1	1.0	0.0075	-	21.0	5.6	
	BFSI.1-30		0.003		19.5	5.1	
	BFSI.1-50		0.003		19.0	5.2	
	BFSI.2-30		0.005		20.5	5.0	
	NI.2		0.003		19.5	5.5	
	BFSI.3-30		0.004		19.5	4.9	
実験 II	NII (1回目*)	1.1	0.002	-	18.5	5.3	
	NII (2回目*)				18.0	5.3	
	BFSII-50 (1回目)				0.01	19.0	4.5
	BFSII-50 (2回目)					21.0	4.2

*実験IIでは、2回の実機練りを行っている

つきがある。また、BFSを単独使用した場合の収縮低減係数は0.85とされていたのに対して、混合率が30%および50%の試験体において収縮低減係数はそれぞれ0.8~0.9および0.6~0.85程度であり、推奨される収縮低減係数よりも収縮低減効果が高い結果となった。これは、BFS自体の物性値や、比較対象となる天然骨材の物性値の違いが要因の1つと考えられる。この結果からも骨材の物性値を考慮した収縮低減係数の必要性があるといえる。

3.2 高炉スラグ細骨材の物性値の影響

BFS の物性値が BFS を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響を検討するために、表-6に示す骨材について検討を行った。検討を行った細骨材は天然骨材として、陸砂、山砂、砕砂および同じく収縮低減効果があるとされる石灰砕砂を用いた。また、BFS の 2 つの産出工場(H 工場および B 工場)においては、1~2 か月の期間を空けて異なる生産ロットの骨材を複数入手し、同一産出工場での骨材の品質のばらつきについても検討を行った。

なお、骨材を絶乾状態にする際には 105±5℃下の乾燥炉にて 48 時間以上乾燥させた。

(1) 試験項目および方法

収縮に影響を及ぼす物性値として、気乾含水率、吸湿率および比表面積について検討を行った。これらの試験方法は以下のとおりである。

a) 気乾含水率: 表乾状態にした細骨材を約 400g 計量した後、質量減少が平衡するのが確認できるまでコンクリートの乾燥収縮を測定する同一環境下の温度 20±2℃、相対湿度 60±5%の恒温恒湿室に静置した。最後に、乾燥炉にて乾燥させ絶乾質量を測定し、次式(5)より気乾含水率を算出した。

$$\text{気乾含水率}(\%) = \frac{(W_e - W_z)}{W_z} \times 100 \quad (5)$$

ここに、

W_e : 温度 20±2℃、相対湿度 60±5%環境下の平衡時における細骨材の質量(g)

W_z : 細骨材の絶乾質量(g)

b) 吸湿率: 乾燥炉にて絶乾状態にさせた細骨材約 400g を相対湿度 100%の環境下にした簡易チャンバーを用いて水蒸気を吸着させ、平衡状態になるまで静置した。最後に、気乾含水率同様に絶乾質量を測定し、次式(6)より吸湿率を算出した。なお、試験は温度 20±2℃の恒温環境下で行った。

$$\text{吸湿率}(\%) = \frac{(W_m - W_z)}{W_z} \times 100 \quad (6)$$

ここに、

W_m : 温度 20±2℃、相対湿度 100%環境下の平衡時における細骨材の質量(g)

W_z : 細骨材の絶乾質量(g)

c) 比表面積: 細骨材の比表面積の測定においては、広範囲の相対圧力(5~99%)に亘って等温吸着曲線が得られる自動試験機(Hydrosorb)を用いた水蒸気等温吸着試験を行い、BET1 点法において相対圧力 30%の吸着量から算定した。また、粗骨材の比表面積の測定においては、相対湿度 32.5% (調湿剤: CaCl₂) の環境下にした簡易チャンバーを用いて、約 700g の絶乾状態にした粗骨材の水蒸気吸着量を測定し、同様に BET 一点法により、次式(7)を用いて算出した。また、細骨材および粗骨材いずれも試験は温度 20±2℃の恒温環境下で行った。

表-5 養生条件および終局ひずみ

記号	V/S (mm)	t ₀ (日)	打設回	t-t ₀ (日)	収縮ひずみ (×10 ⁻⁶)	収縮低減係数
NL1	22	7	同時	182	870	—
	25				797	—
BFSI.1-30	22				721	0.83
	25				697	0.87
BFSI.1-50	22				745	0.85
	25				676	0.85
BFSI.2-30	22	790	0.91			
NL2	22	7	同時	182	773	—
BFSI.3-30					705	0.91
NII	50	7	1 回目	182	855	—
		4			892	—
		7			834	—
BFSII-50	50	7	1 回目	182	522	0.60
		4			598	0.72
		7			637	0.72

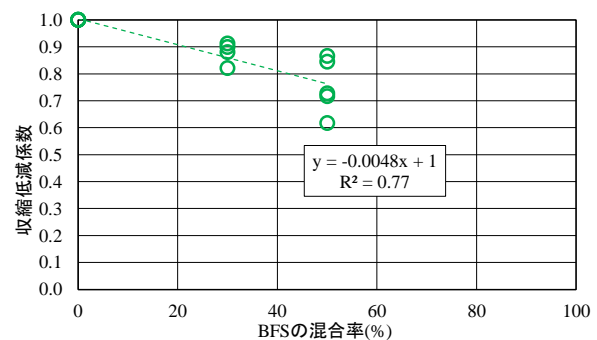


図-1 BFS の混合率と収縮低減係数

表-6 使用骨材

骨材種別	記号	種類	粗粒率 (%)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
天然骨材 (細骨材)	NS	陸砂	2.37	2.59	2.07
	CS	砕砂	3.02	2.58	2.87
	PS2	山砂	1.58	2.60	2.05
	PS1	山砂	2.07	2.60	1.23
	LS1	石灰砕砂	3.57	2.66	0.89
	LS2	石灰砕砂	3.44	2.66	0.81
高炉スラグ細骨材	BFSH1	BFS:H 工場	3.03	2.67	1.84
	BFSH2	BFS:H 工場	2.59	2.65	1.88
	BFSH3	BFS:H 工場	2.61	2.74	1.70
	BFSH4	BFS:H 工場	2.64	2.71	1.76
	BFSH5	BFS:H 工場	2.57	2.68	1.39
	BFSB1	BFS:B 工場	3.01	2.72	1.36
	BFSB2	BFS:B 工場	2.64	2.63	1.44
	BFSB3	BFS:B 工場	2.57	2.70	1.16
	BFSB4	BFS:B 工場	2.54	2.74	0.78
	BFSB5	BFS:B 工場	2.50	2.76	0.78
BFST	BFS:T 工場	-	2.68	1.92	
天然骨材 (粗骨材)	HG1	硬質砂岩碎石	-	2.66	0.60
	HG2	硬質砂岩碎石	-	2.65	0.66
	CG	碎石	-	2.61	2.76
	LG	石灰碎石	-	2.68	0.65

$$ASP = (1-0.325)V_m \times \frac{6.023 \times 10^{23}}{18.015} \times 10.8 \times 10^{-20} \quad (7)$$

ここに、

ASP : 粗骨材の比表面積(m²/g)

V_m : 骨材の絶乾質量に対する水蒸気吸着質量(g/g)

水の分子量: 18.015, 相対湿度: 0.325,

アボガドロ数: 6.023×10²³, 水分子の断面積: 10.8 Å²

d) 粗骨材の収縮ひずみ: 粗骨材の乾燥収縮ひずみの測定には 15mm のふるいに留まる骨材を 1 種類につき 7~10 個

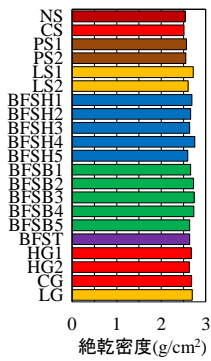


図-2 絶乾密度

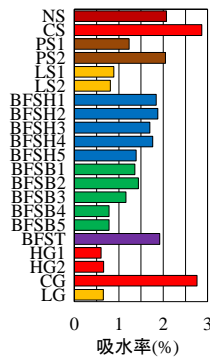


図-3 吸水率

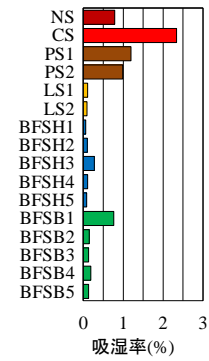


図-4 吸湿率

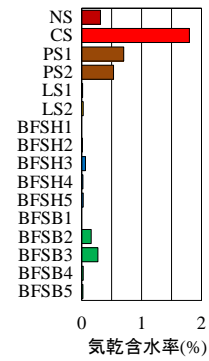


図-5 気乾含水率

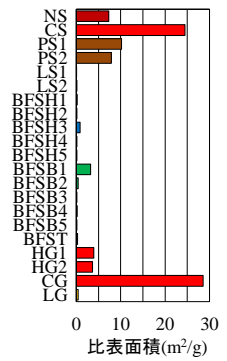


図-6 比表面積

ずつ用いた。測定のために粗骨材の表面をやすりで研磨し、平滑面を得た後、骨材表面に 5mm のひずみゲージを貼付け、防水処理を施した。ひずみが平衡状態に至るまでのおよそ 14 日間水温 20℃の水中に浸漬させ、粗骨材を水中から取り出して恒温恒湿室に静置してひずみを測定した。骨材の乾燥収縮ひずみは乾燥開始直後から収縮ひずみが平衡するまでの変化量とし、骨材の異方性を考慮し各骨材の平均値を算出した。

(2) 結果および考察

表-7に骨材試験の結果一覧を示し、それぞれの物性値を図-2から6に示す。

a) 絶乾密度および吸水率: 絶乾密度は天然骨材と BFS との間に遜色なく、異なる生産ロットにおいても絶乾密度は安定しているといえる。一方、吸水率は BFS の種類により異なるが、一般的な骨材に求められる 3%の範囲内であった。しかし、異なる生産ロットにおいて吸水率はいずれの工場も安定していなかった。

b) 吸湿率: BFS の吸湿率は BFSB1を除いて、天然骨材の中でも収縮低減効果があるとされる石灰砕砂と同程度の値であり、その他の天然骨材と比較して非常に小さい値となった。異なる生産ロットにおいても吸湿率は安定しているといえる。

c) 気乾含水率: 吸湿率と同様の傾向が見られ、天然骨材と比較して非常に小さい値となった。異なる生産ロットにおいても気乾含水率は安定しているといえる。

d) 比表面積: 吸湿率および気乾含水率と同様に、天然骨材と比較して非常に小さい値となった。異なる生産ロットにおいても比表面積は安定しているといえる。ここで図-7に、表-5に示す BFS を使用したコンクリートの収縮低減係数とコンクリートの細骨材の比表面積比の関係を示す。また、比表面積比とは、BFS コンクリート中の細骨材の比表面積を天然骨材のみを用いたコンクリート中の細骨材の比表面積で除した値である。細骨材を混合使用しているため、合算した比表面積比は以下の式(8)により算出した。

$$ASP_{total} = \frac{S_{D1} \times ASP_1 + S_{D2} \times ASP_2}{S_{D1} + S_{D2}} \quad (8)$$

ここに、

表-7 骨材試験結果一覧

記号	吸湿率 (%)	気乾含水率 (%)	比表面積 (m²/g)	粗骨材の収縮ひずみ (×10 ⁻⁶)
NS	0.79	0.31	7.31	-
CS	2.34	1.80	24.47	-
PS1	1.20	0.70	10.21	-
PS2	0.98	0.53	7.90	-
LS1	0.11	0.02	0.08	-
LS2	0.09	0.03	0.17	-
BFSH1	0.06	-	0.19	-
BFSH2	0.10	0.01	0.11	-
BFSH3	0.28	0.06	0.84	-
BFSH4	0.11	0.02	0.17	-
BFSH5	0.09	0.02	0.15	-
BFSB1	0.76	-	3.22	-
BFSB2	0.15	0.43	0.41	-
BFSB3	0.14	0.51	0.14	-
BFSB4	0.19	0.02	0.20	-
BFSB5	0.13	0.02	0.15	-
BFST	-	-	0.29	-
HG1	-	-	3.95	205
HG2	-	-	3.65	350
CG	-	-	28.57	1254
LG	-	-	0.45	40

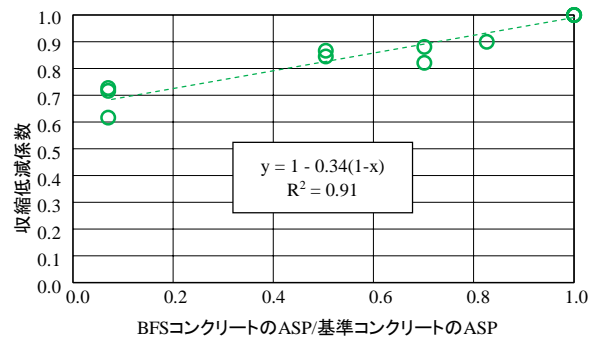


図-7 比表面積比と収縮低減係数

S_{D1}, S_{D2} : コンクリート 1m³ 当たりの細骨材 1, 2 の絶乾質量(g/m³)

ASP_1, ASP_2 : 細骨材 1, 2 の比表面積(m²/g)

既往の研究⁶⁾によるとコンクリートの乾燥収縮および骨材の比表面積には高い相関性が見られ、骨材の比表面積はコンクリートの乾燥収縮特性を示す一つの指標とされる。また、モルタル実験により筆者らは BFS を使用したモルタルの収縮量と比表面積の間に高い相関性がある⁷⁾ことを示した。

図-7より、BFS を用いたコンクリートにおいても乾燥収縮ひずみと細骨材の比表面積の相関関係が非常に高いことが確認できた。

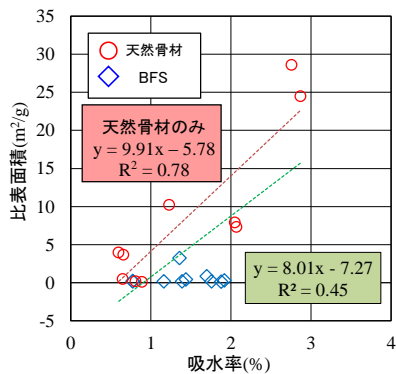


図-8 吸水率と比表面積

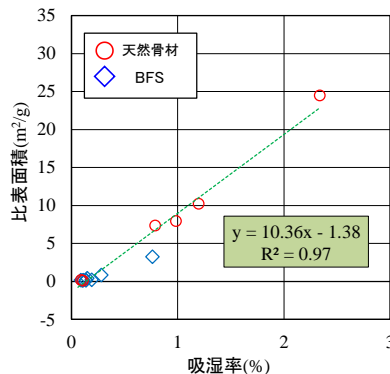


図-9 吸湿率と比表面積

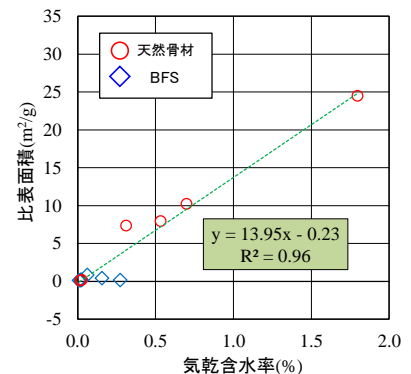


図-10 気乾含水率と比表面積

また、比表面積とその他の骨材物性値の関係を示す。吸水率、吸湿率および気乾含水率との関係をそれぞれ図-8、9および10に示す。図-8では、天然骨材には相関性がみられたが、BFSには相関は全く見られなかった。よって、吸水率からBFSの収縮量を求めるのは難しいと考える。

図-9および図-10では、高い相関性が見られる。特に吸湿率は、骨材によらず一義的に求められる。比表面積の測定は特別な装置または恒湿にするための薬品等が必要となる。BFSにおいても比表面積と同等の簡易的な指標として、吸湿率や気乾含水率が有用であることが確認できた。

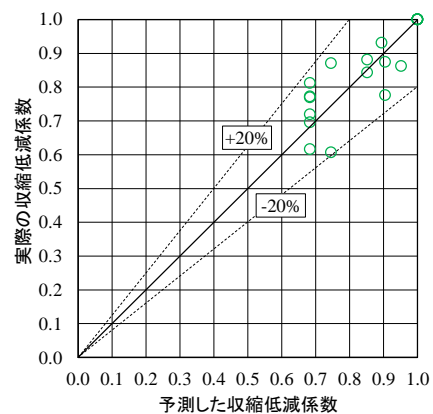


図-11 経験式による提案式の検証

4 収縮予測式の提案

4.1 経験式による予測式

図-7に示す通り、骨材の比表面積がコンクリートの乾燥収縮と高い相関にあることがBFSにおいても確認できた。よって、式(2)に示す γ_s を新たに収縮低減係数 γ_s' とし、比表面積比を用いて以下の式(9)で表すこととする。

$$\gamma_s' = 1 - 0.34 \times (1 - \text{ASP}_{\text{BFS}} / \text{ASP}_N) \quad (9)$$

ここに、

γ_s' : 収縮低減係数

ASP_N: 基準コンクリートの細骨材比表面積(m²/g)

ASP_{BFS}: BFSコンクリートの細骨材比表面積(m²/g)

BFSを使用したコンクリートの乾燥収縮試験⁸⁾およびBFSの骨材特性の既往の研究⁷⁾を参考に上式(9)を用いて、提案式の検証を行った。その結果を図-11に示す。予測値と実測値は20%の誤差の範囲内に収まった。誤差の原因としては骨材のヤング係数や細孔量等の収縮に影響を及ぼす要因が考慮できない点にあると考えられる。しかし、この提案式によりBFSを使用したコンクリートの収縮低減係数をおおよそ評価可能であることが確認できた。

4.2 複合則理論式による予測式

複合則理論の予測式の提案をするにあたり、各物性値の予測方法を示す。

a)セメントペーストの物性値の推定:セメントペーストの終局ひずみおよびヤング係数は既往の文献⁹⁾を参考とした。

b)骨材の物性値の推定:粗骨材の収縮ひずみと比表面積

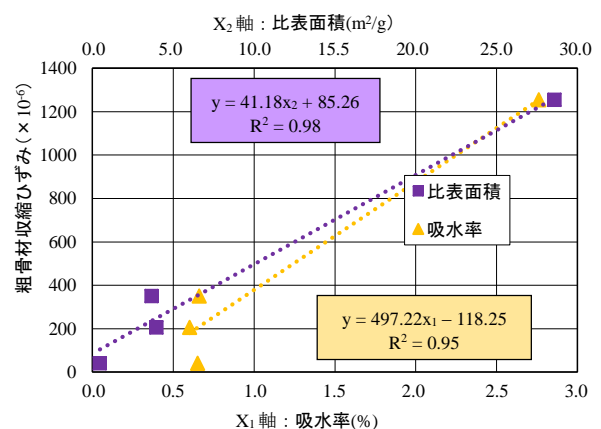


図-12 粗骨材の収縮ひずみと物性値

および吸水率の関係を図-12に示す。両者ともに相関性が見られるが、粗骨材の収縮ひずみが 400×10^{-6} 以下の部分においては、比表面積の方が吸水率よりも精度が良い結果となった。よって骨材の収縮ひずみは図-12に示す近似式を用いて骨材の比表面積から算出することとした。

また、骨材のヤング係数は、既往の文献^{例えは10)}から骨材の岩石コア等の強度試験結果の近似式を用いて算出し、骨材のヤング係数と吸水率には関連がある¹¹⁾とされているため、近似式には骨材の吸水率を変数として用いた。図-13に吸水率とヤング係数の関係を示す。近似式と実際の値には多くのばらつきが見られるが、複合則理論式において骨材の収縮ひずみと比較して骨材のヤング係数の影響が小さいこと¹²⁾を考慮し、図中の関係式を用いた。

c)乾燥条件の推定:セメントペースト同様に既往の文献⁹⁾を参考とした。

3.1 項と既往文献^{6),12),13)}から得られた結果を用い、複合則理論による予測式の適用を検討した。なお、粗骨材の収縮ひずみが直接的に得られている場合には、比表面積から算出せずその値を用いた。結果を図-14に示す。セメントペーストと骨材界面の反応や微細なひび割れを考慮していないために、全体的に予測値が実測値より大きい、予測したBFS コンクリートの値が、一般に求められる天然骨材による予測と概ね同等の範囲内にあることが確認できる。その一方で、BFS コンクリートの収縮の予測値の精度が普通コンクリートと比較して、低いものも存在する。これは、BFS とセメントペースト界面との間に反応(ゲーレナイトの析出)が生じていること¹⁴⁾や骨材の細孔量等の影響が推測される。しかしながら、本研究では、これらの現象を定量的に評価するまでには至っておらず、この現象の発生条件を含めて骨材界面の微視的観察等によるメカニズムの検証が必要であると考えられる。

5. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1)BFS の吸水率と比表面積には相関はみられないが、BFS の吸湿率、気乾含水率および比表面積との間には高い相関が見られた。
- 2)BFS を使用したコンクリートの収縮低減係数は以下の式で表すことが可能である。

$$\gamma_s' = 1 - 0.34 \times (1 - ASP_{BFS} / ASP_N)$$
ここに、 ASP_N : 基準コンクリートの細骨材比表面積(m²/g)
 ASP_{BFS} : BFS コンクリートの細骨材比表面積(m²/g)
- 3)BFS の骨材収縮ひずみは比表面積により評価が可能であり、複合則理論により一般のコンクリートと同様に乾燥収縮を概ね予測することが可能である。

謝辞

本研究は、鉄鋼スラグ協会の補助を受け実施しました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 高炉スラグ細骨材を使用するコンクリートの調査設計・施工指針・同解説, 2013.2
- 2) 金子宝以, 今本啓一, 清原千鶴, 大和田紗織: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ特性, コンクリート工学年次論集, vol.36, No.1, pp.520-525, 2014
- 3) 金子宝以, 今本啓一, 清原千鶴, 石川あゆこ: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリート実大壁における収縮挙動, コンクリート工学年次論集, vol.37, No.1, pp.415-420, 2015
- 4) 馬場明生: 建築材料の乾燥収縮機構とその応用に関する研究, 東京大学学位論文, 1975
- 5) 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, 第 602 号, pp.21-28, 2006.4

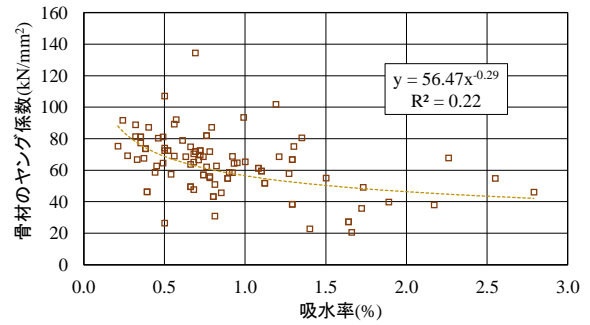


図-13 骨材の吸水率とヤング係数

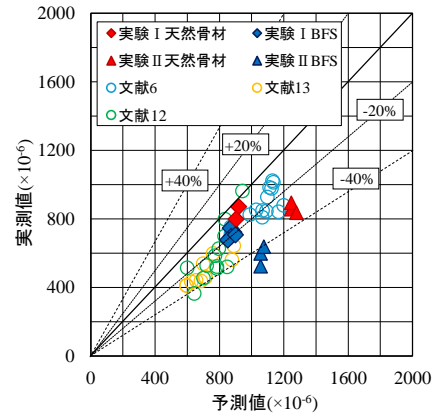


図-14 複合則理論による提案式の検証

- 6) 今本啓一, 石井寿美江, 荒井正直: 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, 第 606 号, pp.9-4, 2006.8
- 7) 清原千鶴, 今本啓一, 真野孝次: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす骨材比表面積の影響, 学術講演梗概集, 2012(材料施工), pp275-276, 2012.9
- 8) 真野孝次, 阿部道彦, 榎田佳寛, 浅野研一, 鹿毛忠継: 高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮に関する実験, 学術講演梗概集 2012(材料施工), pp267-268, 2012.9
- 9) 清原千鶴, 永松静也, 佐藤嘉昭, 三橋博三: 複合則理論を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式: 終局乾燥収縮ひずみの評価方法, 日本建築学会構造系論文集, 第 590 号, pp.9-16, 2005.4
- 10) 立松和彦ほか: 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, 第 549 号, pp.1-6, 2001.11
- 11) 荻野正二, 渡辺久夫: 日本鋳業会講演要旨, 1972
- 12) 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, 第 687 号, pp.905-912, 2013
- 13) 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
- 14) 露木尚光, 木之下光男, 吉澤千秋, 齊藤和秀: 高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの収縮低減メカニズムの考察, 土木学会第 66 回年次学術講演会, p1045-1046, 2011