論文 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

金子 宝以*1·今本 啓一*2·清原 千鶴*3·大和田 紗織*4

要旨:高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの収縮ひび割れ特性を明らかにすることを目的とし,強度特性,乾燥収縮,圧縮クリープおよび乾燥収縮ひび割れ実験を行い,高炉スラグ細骨材の使用がこれらの特性に及ぼす影響について実験的に検討を行った。その結果,高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは天然骨材を用いたものより,乾燥収縮ひび割れ抵抗性が高くなる可能性があることを示した。また,得られた実験結果を基に,有効ヤング係数法を用いて収縮応力の計算を行い,天然骨材を使用したコンクリートと同様に収縮応力計算が出来ることを確認した。

キーワード:高炉スラグ細骨材,圧縮強度,圧縮ヤング係数,圧縮クリープ,乾燥収縮ひび割れ,応力解析

1. はじめに

コンクリートの収縮ひび割れは構造物の耐久性に影響を及ぼす要因の1つである。高炉スラグ細骨材を用いた場合,コンクリートの乾燥収縮ひずみが低減する結果¹⁾が得られており,高炉スラグ細骨材は産業副産物の有効資源化と収縮ひび割れ抑制対策の2つを同時に解決できる方法として期待できる。しかしながら,高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの収縮ひび割れ特性に関する研究は少ない。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収縮ひび割れ特性を明らかにすることを目的とし,検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験計画

表-1 に実験項目を示す。本実験では、乾燥収縮ひび 割れ特性を明らかにすることを目的に、強度試験、圧縮 クリープ試験および乾燥ひび割れ試験を計画した。使用 した細骨材を表-2 に示す。標準の天然砂に陸砂、山砂 を用い、高炉スラグ細骨材には産出工場の異なる3つの 骨材を使用した。また、使用した細骨材の組み合わせお よび実験項目について表-3に示す。No.1~3では、BFS-F を用いた高炉スラグ細骨材混合率が乾燥収縮ひび割れ特 性に及ぼす影響を, No.2, No.4 では高炉スラグ細骨材混 合率 30%として産出工場の違いが乾燥収縮に及ぼす影 響について検討した。M 工場の高炉スラグ細骨材 (BFS-M)は,山砂との混合用として製造されている粗目 砂のため混合用の天然砂に山砂を用い(No.5),山砂と砕 砂を用いたコンクリート(No.6)と検討することとした。 コンクリートの調合を表-4 に示す。全てのコンクリー トにおいて,水セメント比を 50%,単位水量 180kg/m³, 単位粗骨材量 1029kg/m³を一定とした。

2.2 実験方法

(1)強度試験

使用する細骨材	天然細骨材との 混合率	実験項	頁目	試験体寸法 (mm)	本数 (本)	試験開始材齢 (日)	
		フレッシ: (スランプ, 空気量,	フレッシュ性状 (スランプ, 空気量, 単位容積質量)		-	-	
		圧縮強度(ヤ	ング係数)	φ 100×200	3	7, 28, 91	
王伏孙/陈孙 山孙)	0, 30, 50	割裂引引	長強度	φ 100×200	3	7, 28, 91	
へぶゆ(座ゆ,山ゆ) 三石マラグ細骨材		乾燥収縮	ひずみ	100×100×400	2	7	
(3 種類)			Basic	φ 100×200	1		
		⊏ 婉 クロニプ	Total	φ 100×200	2	7	
		圧相シリーノ	自己収縮	φ 100×200	2	7	
			乾燥収縮	φ 100×200	2]	
		乾燥収縮び	いび割れ	100×100×1100	2	7	

表-1 実験項目

*1 東京理科大学 工学部建築学科 (学生会員)

*2 東京理科大学 工学部建築学科 准教授 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)

*4 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 (非会員)

(2)乾燥収縮試験

100×100×400mmの角柱試験体を用い,乾燥収縮ひず みの測定には試験体中央部に埋設した埋め込みゲージを 用いた。

(3)圧縮クリープ試験

圧縮クリープでは Basic クリープを1本, Total クリー プを2本の計3本を同時に載荷できるようにした。クリ ープ試験体は、載荷試験体と無載荷試験体の2種類を作 製し, 埋め込みゲージを用いた φ 100×200mm の円柱試 験体とした。クリープの載荷開始材齢は7日とし、載荷 荷重は静的圧縮強度の30%程度とした。

(4)乾燥収縮ひび割れ試験

乾燥収縮ひび割れ試験体の詳細を図-1 に示す。乾燥 収縮ひび割れ試験は、日本コンクリート工学会で提案さ れているコンクリートの収縮ひび割れ評価試験方法²⁾に 準拠し、100mm×100mm×1100mmの試験体を1水準に つき2体作製した。拘束体である鉄筋は丸鋼 φ 32mm と し、定着部を M33 相当のネジ加工とし、試験区間の中央 部で対称に2枚のひずみゲージを貼付した。乾燥収縮ひ び割れ試験体の養生条件は、強度試験と同様とし、材齢 7日より乾燥を開始した。

実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

表-5 にフレッシュ性状の一覧を示す。高炉スラグ細 骨材を用いた場合、陸砂を 100%使用したコンクリート と比べて空気を巻き込みやすいため、いずれの調合にお いても空気量調整剤が少なくなっている。スランプは20 ±1.5cm, 空気量は 4.5±1.5%の範囲内に収まっており, いずれもコンクリートにおいてもワーカビリティーは良 好であった。No.1~3 においては 2 バッチずつ混練を行 い,1 バッチ目で乾燥収縮および乾燥収縮ひび割れ試験 用の試験体を、2 バッチ目で強度試験および圧縮クリー プ試験用試験体を作製した。なお, No.1~3 と No.4~6 では打設日が異なっている。

3.2 強度特性

表-6 に強度試験結果の一覧を,図-2 に強度試験結 果を示す。表-5のフレッシュ性状試験の結果に示すよ うに、陸砂と BFS-F を 50%混合した No.3 コンクリート の空気量が3.1%と他のコンクリートに比べて2%程度小 さいために, 混合率の増加とともに圧縮および割裂引張 強度が大きくなる結果となった。高炉スラグ細骨材を使 用したコンクリートは初期強度が小さいことが指摘され ている³⁾が、本実験においては、天然砂を 100%使用し たコンクリートと比較して同等以上の強度発現が得られ ている。なお、強度に及ぼす影響は、高炉スラグ細骨材 の破砕値や高炉スラグ細骨材の周辺に形成される水和生

表-2 使用した細骨材

細骨材の種類		ㅋ모	最大粒径	絶乾密度	表乾密度	吸水率
而有个	りの性知	記方	(mm)	(g/cm^3)	(g/cm^3)	(%)
天然砂	陸砂	NS	5.0	2.54	2.59	2.07
	山砂	MS	5.0	-	2.61	-
	硬質砂岩 砕砂	^更 質砂岩 砕砂 CS		2.67	2.70	1.22
高炉	F工場	BFS-F	5.0	2.62	2.67	1.84
スラグ	K 工場	BFS-K	2.5	2.68	2.72	1.36
細骨材	M 工場	BFS-M	0.3-0.5	2.66	2.68	1.92

表-3 使用細骨材および実験項目の組み合わせ

	細骨材	の種類	泪入变		実	ミ験項目	
No.	天然砂	BFS	施百举 (%)	強度	乾燥 収縮	圧縮 クリープ	乾燥収縮 ひび割れ
1	NS		0	0	0	0	0
2	NS	BFS-F	30	0	0	0	0
3	NS	BFS-F	50	0	0	0	0
4	NS	BFS-K	30	0	0	-	-
5	MS	BFS-M	30	0	0	-	_
6	MS+CS		30	0	0	_	_

混合率とは全細骨材に対しての BFS(No.6 では CS に対する MS の絶 対容積の百分率である。

表-4 コンクリートの調合

No	調会	W/C	混合率	s/a	u 単位量(kg/m ³)						
140.	마이 디	(%)	(%)	(%)	W	С	S_1	S_2	SB	G	
1	Ν	50	0	41.5	180	360	710		0	1029	
2	BFS-F	50	30	41.5	180	360	497	I	219	1029	
3	BFS-F	50	50	41.5	180	360	355	-	366	1029	
4	BFS-K	50	30	41.5	180	360	497	-	223	1029	
5	BFS-M	50	30	41.5	180	360	502	I	221	1029	
6	MS+CS	50	30	41.5	180	360	502	222	0	1029	
	s/a:細骨材率,W:上水道水 C·セメント(普通ポルトランドセメント 密度:3 16a/cm ³)										

G:粗骨材(硬質砂岩砕石,表乾密度:2.66g/cm³,吸水率 0.60%)

試験区間(付着除去) 定着区間(ネジきり) 定着区間(ネジきり)

mm	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	m		
50mm	400mm		400mm	50mm

図-1 乾燥収縮ひび割れ試験体概要

表-5 フレッシュ性状一覧

_							
	細骨材(の種類	混合率	AE	空気量	スー・ノプ	空氛量
No.	天然砂	BFS	(%)	減水剤 (C×%)	ヱス重 調整剤	(cm)	エズ重 (%)
1	NC	_	0		7.5A	21.5	5.3
1	INS				7.5A	20.5	5.9
2	NC	DECE	30		3A	19.5	5.1
2	INS	ргэ-г			3A	20.0	5.1
2	NC	DECE	50	1.0	3A	19.0	5.2
3	INS	ргэ-г	50		3A	20.0	3.1
4	NS	BFS-K	30		5A	20.5	5.0
5	MS	BFS-M	30		3A	19.5	5.5
6	MS+CS	_	30		4A	19.5	4.9
					$A:C \times 0.00$	01%	

成物などが考えられる。

また、材齢7日より乾燥を受けたことによる影響を見 てみると, 圧縮強度および割裂引張強度においては材齢 28日以降, 強度の増加が見られず, ヤング係数において は材齢7日以降,値の増加が見られない結果となり,乾

	細骨材	の毎粘			圧縮	強度			ヤング	ブ係数			割裂引	張強度	
No			混合率	(N/mm^2)			(kN/mm^2)				(N/mm^2)				
INO.	工好功	DEC	(%)	7日	28日	91日	28日	7日	28日	91日	28日	7日	28日	91日	28日
	人公司	ргэ		(水中)	(気中)	(気中)	(水中)	(水中)	(気中)	(気中)	(水中)	(水中)	(気中)	(気中)	(水中)
1	NS		0	30.6	44.9	43.8	37.2	28.5	32.1	27.1	33.5	2.31	3.09	2.85	3.04
2	NS	BFS-F	30	33.2	45.0	47.3	42.9	31.3	35.3	28.1	31.1	2.61	3.48	3.38	3.45
3	NS	BFS-F	50	35.2	49.6	51.2	46.3	29.2	32.4	28.4	33.8	3.11	3.97	3.29	4.09
4	NS	BFS-K	30	29.0	39.7	42.2	42.0	28.9	28.6	29.7	30.2	2.79	3.44	2.98	3.33
5	MS	BFS-M	30	27.5	41.1	42.6	39.8	30.4	29.5	31.7	36.2	2.35	3.06	2.88	2.95
6	MS+CS	_	30	27.8	40.8	39.2	38.8	28.5	30.9	31.5	34.3	2.78	2.56	3.06	3.44

30

表-6 強度試験結果一覧







No.1 No.2 No.3 No.4 No.5 No.6

燥の影響により強度およびヤング係数の増進が停滞する 結果となり、その傾向はヤング係数において顕著に見ら れた。既往のモルタル実験²⁾でも同様な傾向が見られて いる。

3.3 乾燥収縮特性

図-3 に乾燥収縮ひずみの測定結果を示す。これによ ると、陸砂100%を使用した No.1 コンクリートに比べ高 炉スラグ細骨材を混合使用したコンクリートの方が乾燥 収縮ひずみの値が小さくなっており, BFS-F を混合使用 した場合は 17%程度, BFS-K を混合使用した場合は, 8% 程度低減している。山砂と混合した MS+BFS-M コンク リートにおいても MS+CS コンクリートより 10%程度低 減している。このことからコンクリート試験体において も高炉スラグ細骨材を使用することにより乾燥収縮低減 効果が得られることが確認できた。

産出工場の違いによる影響を見てみると、BFS-Kより も BFS-F の方が乾燥収縮低減効果が高い結果となった。 高炉スラグ細骨材比表面積が小さいほど乾燥収縮ひずみ が小さくなる傾向にあることを確認⁴⁾している。今回使 用した高炉スラグ細骨材の比表面積は, BFS-F が 0.19m²/g, BFS-K が 3.22m²/g であったことからも高炉ス ラグ細骨材の比表面積が小さい方が乾燥収縮低減効果が 高いことが確認できた。

なお、本実験の範囲内においては高炉スラグ細骨材混 合率の影響は明確に見られなかった。既往の研究におい ては、混合率の増加とともに乾燥収縮が小さくなる結果 が示されていることから、今後継続して測定を行いデー タの蓄積を行う予定である。

3.4 圧縮クリープ特性

(1) 無載荷収縮ひずみ





無載荷試験体のひずみである自己収縮ひずみ、乾燥収 縮ひずみおよびその差をとった純乾燥収縮ひずみを図ー 4 に示す。自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみ共に高炉ス ラグ細骨材を混合したコンクリートの方が値が低い。陸 砂を100%使用したNo.1 コンクリートに対してBFS-Fの 混合率が 30%, 50%の No.2, 3 コンクリートでは自己収 縮ひずみの低減率はいずれも30%程度となり、自己収縮 ひずみでは混合率の影響は明確に見られなかった。また, 陸砂を100%使用した No.1 コンクリートに対して BFS-F の混合率が30%, 50%のNo.2, 3 コンクリートでは乾燥 収縮ひずみの低減率は乾燥材齢70日の時点で,それぞれ 9%, 13%程度となり, 3.3 項の結果とは異なり, 混合率 の増加に伴い乾燥収縮が低減している。乾燥材齢28日の 値から文献³⁾に示される収縮ひずみの予測式(1)によって 収縮ひずみの終局値を算出した。その結果を表-7 に終 局ひずみの値を示す。

$$\boldsymbol{\mathcal{E}}_{sh}(\boldsymbol{t}_{s}) = \boldsymbol{\mathcal{E}}_{\infty} \cdot \left(\frac{\boldsymbol{t}_{s}}{\boldsymbol{t}_{s} + \alpha}\right)^{\beta}$$
(1)

ここに、t_s:乾燥材齢(日)、E_{sh}(t_s):収縮ひずみ(×10⁻⁶) ε_ω:終局乾燥収縮ひずみ(×10⁻⁶)

α, β:体積表面積をパラメータとする関数



図-5 クリープひずみ (左から Basic クリープ, Total クリープ, Drying クリープ)

この結果では、陸砂を100%使用した No.1 コンクリートに対して BFS-F の混合率が30%、50%の No.2、3 コン クリートでは、乾燥収縮ひずみの低減率はそれぞれ13%、 20%程度である。日本建築学会の指針⁶では、高炉スラ グ細骨材単独使用のコンクリートにおいて乾燥収縮低 減率は0.85 とされている。本実験でも同様に高炉スラグ 細骨材を用いると乾燥収縮低減効果が得られることが 確認できた。

乾燥収縮ひずみと自己収縮ひずみの差をとった純乾 燥収縮ひずみは、陸砂を100%使用したNo.1 コンクリー トの値が乾燥材齢35日程度で下降し始めている。これは 乾燥収縮ひずみの進行が自己収縮ひずみに比べて緩やか になっているためであると考えられる。乾燥材齢30日程 度までを見ると純乾燥収縮ひずみはBFS-Fの混合率に伴 って低減している。また、全材齢ではBFS-Fの混合率が 30%のNo.2 コンクリートよりも50%のNo.3 コンクリー トの方が純乾燥収縮ひずみが8%程度低減している。こ のことから純乾燥収縮ひずみはBFS-Fの混合率に伴って 低減していると考えられるが、自己収縮ひずみの挙動も 含め今後も継続してデータを蓄積する必要がある。

(2) 圧縮クリープ

Basic クリープ, Total クリープおよびその差をとった Drying クリープを図-5 に示す。なお, クリープひずみ は単位応力値のひずみであるスペシフィッククリープひ ずみで表してある。Basic クリープでは陸砂を 100%使用

表-7	終局乾燥収縮	ひずみ値
-----	--------	------

	NS	NS+BFS-F(30%)	NS+BFS-F(50%)
$\mathcal{E}_{sh}(28) (\times 10^{-6})$	574	498	460
€ ∞ (×10 ⁻⁶)	1115	968	893

表-8	回帰	係数 CR の値	
		NS+BFS-F	NS-

	NS	NS+BFS-F (30%)	NS+BFS-F (50%)
C(28, 7) (10 ⁻⁶ /(N/mm ²))	61.8	60.1	51.5
CR (10 ⁻⁶ /(N/mm ²))	20.0	19.4	16.7

した No.1 コンクリートが最も低い値となっている。こち らも自己収縮ひずみ同様に混合率の影響は見られなかっ た。陸砂を 100%使用した No.1 コンクリートに対して BFS-F の混合率が 30%, 50%の No.2, 3 コンクリートで は Basic クリープは 55%程度増加した。

Total クリープでは陸砂を 100%使用した No.1 コンク リートと混合率が 30%のコンクリートでは明確な差が 見られないが, BFS-F の混合率が 50%においては陸砂を 100%使用した No.1 コンクリートと比較して Total クリ ープが 12%程度小さい。

材齢 28 日の値から文献⁵⁾ に示されるクリープひずみ の予測式(2)によってクリープひずみの回帰係数を算出 し,**表-8**に示す。

$$C(t,t') = CR \cdot \log(t-t'+1)$$

ここに, t: 材齢(日), t': 載荷開始材齢(日)

C(t,t'): Total クリープひずみ(×10⁻⁶/ (N/mm²)) CR:回帰分析により定まる係数(×10⁻⁶/ (N/mm²))

(2)

No.		ひび割れ材齢 (日)	平均值	拘束度	平均值	最大拘束応力 (N/mm²)	平均值	応力強度比	平均值
NC	1	13.2	12.5	0.62	0.62 2.65 2.35	2.50	0.93	0.00	
NS	2	11.9	12.5	0.63		2.35	2.50	0.84	0.00
NG. DEC E(300/)	1	16.9	15.2	0.58	0.57	2.84	2.79	0.85	0.84
N3+DF3-F(30%)	2	13.6	15.2	0.55	0.57	2.73		0.84	
NS+BFS-F(50%)	1	20.5	16.0	0.67	0.65	2.63	2.40	0.74	0.71
	2	13.3	10.9	0.63	0.65	2.34	2.49	0.69	0.71

表-9 ひび割れ試験結果

この結果では,陸砂を 100%使用した No.1 コンクリートに対して BFS-F の混合率が 50%の No.3 コンクリートでは, Total クリープひずみは 17%程度の低減率となる。

Total クリープと Basic クリープの差をとった Drying ク リープでは,陸砂を 100%使用した No.1 コンクリートに 対して BFS-F の混合率が 30%, 50%の No.2, 3 コンクリ ートではそれぞれ 23%, 40%低い値であり, Drying クリ ープでは混合率の影響が見られた。

3.5 乾燥収縮ひび割れ

拘束応力の経時変化を図-6 に示す。いずれの試験体 も乾燥開始から3日程度まで急速に拘束応力が増加し, その後緩やかに増加している。また,BFS-Fの混合率が 30%,50%のNo.2,3コンクリートはそれぞれ途中まで 陸砂を100%使用したNo.1コンクリートと同程度の拘束 応力であったが,より高い応力までひび割れが発生して いない。高炉スラグ細骨材を用いた場合の収縮拘束時の 破断時応力が高い⁴ことと関連していると考える。

ひび割れ試験結果を表-9 に示す。なお、拘束応力が ピークを迎えた後、瞬間的に下がった材齢をひび割れ材 齢とした。

ひび割れ材齢は陸砂を100%使用した No.1 コンクリー トが最も短く,BFS-Fの混合率が30%,50%と増えるに つれて延びている。さらに,拘束度(式(3))を加味してひ び割れ材齢を比較すると,BFS-Fの混合率が50%の No.3 コンクリートの方が陸砂を100%使用した No.1 コンクリ ートより拘束度が高く,ひび割れ材齢に不利な状況にも かかわらずひび割れ材齢が延びているため,同一拘束度 下では BFS を使用したコンクリートのひび割れ抵抗性 はより高くなると考えられる。

(拘束度) = (自由収縮ひずみ) – (実ひずみ) (3) (自由収縮ひずみ)

応力強度比とは、最大拘束応力をひび割れ発生時の引 張強度で除した値であり、一般的には0.7程度となる³⁾。 ひび割れ発生時の引張強度は3.2項の結果を対数近似で 求めた。なお、BFS-F50%混合率では、乾燥収縮ひび割 れ試験体作製時より強度試験用試験体作製時のコンクリ ートの空気量に比べて2%程度大きくなった。一般的に、 空気量が1%増加すると圧縮強度は4~6%程度低下する ことが言われていることから算出された引張強度から 10%値を低減したものを用いた。陸砂を 100%使用した



図-6 拘束応力の経時変化



図-7 解析モデル

No.1 コンクリート対して BFS-F の混合率が 50%の No.3 コンクリートでは2割程度低い値であるが, 混合率 30% では差が1割未満であった。

4.応力解析

ここでは、図-7 に示すような両端を梁部材で拘束さ れた部材に生じる応力について検討を行う。収縮応力の 算出には、文献⁵⁰に示される有効ヤング係数法を用いた。

$$\sigma(t) = \sum_{t'}^{t} \frac{E(t')}{(1 + \phi(t, t'))} \lambda(t') \Delta \varepsilon(t')$$
⁽⁴⁾

ここに, t: 材齢(日), t': 載荷材齢(日)

 σ(t): 材齢 t における収縮拘束応力の予測値 (N/mm²)

E(t'): 材齢 t'におけるヤング係数(N/mm²)

- λ(t'): 材齢 t'における拘束度
- △ ε (t'): 材齢 t'における自由ひずみの変化量 φ(t,t'): 材齢 t'に載荷された材齢 t におけるク

壁・梁部材にはそれぞれ本実験で行ったコンクリート と同様の調合のコンクリートが使用されているとした。 上梁と壁は同時に打設を行ったものとし,脱型材齢は7



図-8 任意の載荷の Total クリープひずみと7日載荷の実測値

日とした。なお、本解析では温度による影響は考慮して いない。

E(t')は 3.2 項の結果を圧縮強度に関する CEB-FIP1990 モデルコードに代入したものから RC 規準式を用いて算 出した。また,自由収縮ひずみ は,表-7に示す終局値 を用い,文献 ⁵示されている予測式を用いてそれぞれの 部材の V/S(体積表面積比)を考慮した。 $\phi(t,t')$ については 表-8 と式(2)から任意の載荷材齢におけるクリープひず みにより求め(図-8参照),自由収縮ひずみと同様にそれ ぞれの部材の V/S(体積表面積比)を考慮した。収縮ひび割 れ発生強度は,圧縮強度から推定した引張強度 ⁵ に 0.7 倍を乗じて算定した。

算出した拘束応力とひび割れ発生強度を図-9 に示す。 拘束応力がひび割れ発生強度と交差する点がひび割れ材 齢であり、陸砂を 100%使用した No.1 コンクリートと BFS-F の混合率が 30%, 50%の No.2, 3 コンクリートで は、ひび割れ材齢が 80 日程度も遅延し、高炉スラグ細骨 材を用いることで、収縮ひび割れ抵抗性が高くなること が解析においても確認できた。なお、本解析結果では混 合率の影響は見られなかった。

5. 結論

BFSを使用したコンクリートの乾燥収縮ひび割れ特性 を明らかにするため強度試験,圧縮クリープ試験および 乾燥収縮ひび割れ試験について検討を行った。その結果, 天然骨材を 100%使用したコンクリートと比較して以下 の知見が得られた。

- 1)強度特性は同程度である。
- 2)混合率に伴い乾燥収縮が低減する。
- 3)Basic クリープは 55%程度増加する。
- 4)Total クリープは混合率 50% だと 15% 程度減少する。
- 5)Drying クリープは混合率に伴い減少する。
- 6)混合率に伴いひび割れ抵抗性が高くなる傾向にある。



図-9 壁部材の拘束応力とひび割れ発生強度

謝辞

本研究は, 鐵鋼スラグ協会の補助を受け実施しました。 乾燥収縮ひび割れ試験の実施には, 電源開発株式会社: 石川嘉崇氏ならびに日鉄住金高炉セメント株式会社: 康弘氏の協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 齊藤和秀,木之下光男,井原俊樹,吉澤千秋:高炉 スラグ細骨材を使用した耐久性向上コンクリート の性質,コンクリート工学年次論集,vol.32,No.1, pp.139-144,2009
- 日本コンクリート工学会:混和材料から見た収縮ひ び割れ低減と耐久性改善研究委員会,2010.9
- 日本建築学会:高炉スラグ細骨材を用いるコンクリートの施工についての調査(その3)報告書,2012.3
- 4) 清原千鶴, 今本啓一, 佐藤嘉昭, 蒋海燕:高炉スラ グ細骨材を用いたモルタルの乾燥収縮および乾燥 収縮ひび割れ, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.49-54, 2001.6
- 5) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造建築の収縮ひ び割れ制御設計・施工指針(案)・解説, 2006,2
- 6) 日本建築学会:高炉スラグ細骨材を使用するコンク
 リートの調合設計・施工指針・同解説, 2013, 2