# 論文 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

金子 宝以\*1・今本 啓一\*2・清原 千鶴\*3・石川 あゆこ\*1

要旨:高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートで両端を梁部材で拘束された部材(実大壁)を作製し,そのひずみ挙動 を測定することにより,高炉スラグ細骨材の使用が壁部材の収縮挙動や応力性状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,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可能であることを確認した。

キーワード:高炉スラグ細骨材,実大壁,一軸拘束試験,乾燥収縮ひび割れ,引張クリープ,応力解析

### 1.はじめに

コンクリートのひび割れは構造物の耐久性に影響を及ぼ す要因の1つであり、その中でも収縮ひび割れはその代表 的なものだと言える。一方、コンクリートに高炉スラグ細骨材 を用いた場合、乾燥収縮ひずみが低減する結果<sup>1)</sup>が得られ ており、筆者らの研究<sup>2)</sup>においても小型試験体を用いた実験 より、天然骨材を使用したコンクリートに比べて、ひび割れ抵 抗性があることを確認するとともに、BFSの収縮ひび割れ抑 制効果については、BFS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砂よりも小さいことが要因であることを 示唆した。

これらのことから,高炉スラグ細骨材は産業副産物の有効 資源化および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されている。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実構造物での収縮ひび割れ 特性はほとんど明らかになっていない。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実大壁の収縮挙動を 明らかにすることを目的とし,検討を行った。

# 2. 実験概要

**表−1** に実験項目を示す。本実験では、高炉スラグ細骨材 の使用による実大壁の収縮挙動および応力性状を明らかに することを目的とし、普通コンクリート(以下,N)および高炉ス ラグ細骨材の混合率が 50%のコンクリート(以下,BFS)を対 象に、強度試験、乾燥収縮試験、乾燥収縮ひび割れ試験、 一軸拘束試験<sup>3)</sup>、引張クリープ試験、および実大壁試験を計 画した。使用骨材を表-2 に示す。また、コンクリートの調合を 表-3 に示す。砕砂を高炉スラグ細骨材に置換することにより、 高炉スラグ細骨材の割合を全細骨材の 50%とした。また、実 構造物に適用した場合を想定して N および BFS ともに調合 強度 25.2N/mm<sup>2</sup> およびスランプ 20±2cm、空気量 4.5±1%と なるように試し練りを行い、調合を決定した。なお、本実験で はプラントによる実機練りを行っており、打ち込みを二回に分 けて行った。

# 2.1 室内実験

室内実験で用いる試験体は打ち込み直後から恒温恒湿 室内(温度 20℃,相対湿度 60%)にて封緘養生を行い,材齢 4 日または 7 日で脱型し,気中養生とした(以下,室内養生)。 (1)強度試験

φ100×200mmの円柱試験体を用い, 圧縮強度試験(JIS A 1108), 弾性係数試験(JIS A 1149)および割裂引張強度試験(JIS A 1113)を行った。強度試験は表-1 に示す試験材齢において実施した。なお, 材齢 28 日にて標準水中養生を行った試験体においても実施している。

コンクリート 種類	実験項目		養生条件	試験体寸法 <sub>(mm)</sub>	各試験体数 (体)	試験材齢および 測定開始材齢(日)			
フレ		/ッシュ性状	_	_	_	-			
	圧縮強度およびヤング係数		室内および屋外	φ 100×200	3	室内:3,7,14,28,56,91			
N,BFS	割裂引張強度		室内および屋外	φ 100×200	3	屋外:7,28,91 標準:28			
	乾燥収縮ひずみ		室内および屋外	100×100×400	2	4,7			
	乾燥収縮ひび割れ		室内	100×100×1100	2	7			
	一軸拘束試験		室内	100×100×1000	1	7			
Nのみ	引張クリープ		室内	100×100×1000	1	7			
	実大壁の 収縮挙動	実大下梁/壁および上梁	屋外	400×1800×2300	1	4/7			
N,BFS		ダミー壁	屋外	200×900×1200	1	7			
		ダミー下梁/上梁	屋外	400×400×800	1	4/7			
		無筋ダミー柱	屋外	800×800×600	1	7			
BFSのみ	乳滞収陥ひりみ	無筋ダミー壁	屋外	100,200,400×900×1200	1	7			

表-1 実験項目

\*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

\*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)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。材齢4日または7日に脱型し, 実大壁試験体と同様 の乾燥状態にするために100×400mmの試験体側面2面を 乾燥面とし, その他の面をアルミ箔テープによりシールした。

### (3) 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 4)に準拠し、 100×100×1100mm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 φ32mm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。材齢7日に脱型し、乾燥収縮試験と同様 に100×1100mmの試験体側面2面を乾燥面とした。

### (4)一軸拘束試験

ー軸拘束試験機は自由収縮ひずみと拘束収縮試験体の 実ひずみとの関係により表される拘束度(式(1))を一定に制 御することが可能であり、その際に発生する荷重を逐一計測 できる。今回は実大壁試験体において上下梁部材および壁 部材の断面積と壁部材の断面積比より算出される拘束度0.6 に設定した。試験体は材齢7日に脱型を行い、乾燥収縮ひ び割れ試験同様の2面乾燥状態で実験を行った。

### (5) 引張クリープ試験

埋め込みゲージを用いた 100×1000mm の角柱試験 体を用い,脱型およびクリープの載荷開始材齢は 7 日とし, 載荷荷重は載荷時静的圧縮強度の30%程度で一軸拘束試 験機により行った。乾燥収縮ひび割れ試験同様の 2 面乾燥 状態で実験を行った。

### 2.2 屋外実験

屋外実験で用いる試験体は打ち込み直後から屋外暴露 環境下(神奈川県茅ケ崎市)にて封緘養生を行い,材齢4日 または7日で脱型し,屋外暴露環境下に存置したものとする (以下,屋外養生)。

### (1) 強度試験

# (2)乾燥収縮試験

2 面乾燥の 100×100×400mm の角柱試験体には埋め込み ゲージを用い, その他の試験体には測温機能付き埋め込み ゲージを用いた。材齢 4 日または 7 日に脱型を行い, 強度 試験体同様に屋外養生とした。 無筋ダミー壁および無筋ダミ ー柱は, 900×1200mm の 2 面および 600×800mm の 4 面以

表-2 使用骨材

	記号	種類	最大粒径 (mm)	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)
細骨材	SC	砕砂	5.0	2.58	2.87
	SL	石灰砕砂	5.0	2.66	0.89
	SP	山砂	5.0	2.80	1.23
	SB	高炉スラグ 細骨材	5.0	2.64	1.88
粗骨材	GC	砕石	20.0	2.61	2.76
	GL	石灰砕石	20.0	2.68	0.65

表-3 コンクリートの調合

	s/a	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							
	(%)	W	С	SC	SL	SP	SB	GC	GL
Ν	48.4	182	298	427	171	255	-	459	471
BFS	47.4	182	298	-	171	252	436	466	479
s/a:細骨材率,W:上澄水									

C:セメント(普通ポルトランドセメント, 密度:3.16g/cm<sup>3</sup>)

定着区間(ネジきり) 試験区間(付着除去) 定着区間(ネジきり)

#### 図−1 乾燥収縮ひび割れ試験体概要



図-2 実大壁試験体およびダミー試験体

表-4 フレッシュ性状一覧

	打ち込み	混和	剤使用量(	スランプ	空気量		
種類	時期	AE 減水剤	AE 剤	消泡剤	(cm)	(%)	
ΝI	Ι		0.002	- 0.01	18.5	5.3	
NII	Ш				18.0	5.3	
BFS I	Ι	1.1			19.0	4.5	
BFS II	Ш				21.0	4.2	
C:セメントの単位量(kg/m <sup>3</sup> )							

外をアルミ箔テープによりシールした。

# (3) 実大壁収縮試験

試験体概要を図-2 に示す。実大壁試験体は打ち込み一回目(I)に下梁,その12日後の打ち込み二回目(I)に柱,





壁部材および上梁に打ち込みを行った。脱型日はそれぞれ 4 日および 7 日とした。また、実大壁試験体とともにダミー試 験体を作製した。ダミー試験体の下梁,壁および上梁は実 大壁試験体と同配筋および同断面とし, 乾燥状態を等しくす るために適宜アルミ箔テープでシールした。実大壁試験体と ダミー試験体を比較することにより,壁部材が両端の梁から 受ける拘束による挙動を検討する。また、ダミー試験体にア ルミ箔テープを貼り、実大壁試験体と同様の乾燥状態にした うえで、ダミー壁のみに屋根を設け、雨掛かりの条件を実大 壁部材と揃えた。

# 3. 結果·考察

# 3.1フレッシュ性状

表-4 にフレッシュ性状の一覧を示す。高炉スラグ細骨材 は天然砂と比べて角張った形状をしているため、練り混ぜ時 に空気を巻き込みやすくなり、エントラップドエアが多くなる ため 5, 消泡剤により空気量の調整を行った。スランプは 20±2cm, 空気量は 4.5±1%の範囲内に収まっており, いず れの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。 3.2 強度特性

28 日標準試験体強度試験結果および打ち込み二回目の コンクリートの強度試験結果を図-3 に示す。材齢 28 日では いずれの試験体も調合強度を上回っているが室内養生では, それ以降の強度の増進は見られなかった。高炉スラグ細骨 材は初期強度の低さが指摘される5が,本実験においては, N および BFS は 91 日まで室内および屋外の養生条件によ らず同程度の強度が発現している。また材齢7日では屋外 試験体の強度が室内試験体よりも高くなっていたが、材齢28 日では同程度の値となった。これらの結果より, 普通強度の コンクリートにおいて高炉スラグ細骨材の混合率 50%までは Nとほぼ同様の調合で、同様の強度発現性能が得られること が確認できた。

ヤング係数においては材齢7日以降,値の増加が見られ ない結果となった。混合率 50%の高炉スラグ細骨材のヤン グ係数は普通コンクリートのおよそ 1.06 倍高くなることが知ら れている 5が, 材齢 28 日以降の室内養生の試験体には差 が見られなかった。割裂引張強度も圧縮強度同様に室内養 生の 28 日以降の強度の増進は見られない。N および BFS

表−5   谷部材の V/3	表-5	各部材の	V/S
----------------	-----	------	-----

打ち込み回 (脱型日数)	部本	招	V/S (mm)	Ν	BFS
A7	屋外 100×100×400		50		
ΞC	室内 100×100×400		50	•••••	•••••
打ち込み I (4)	ダミー	-下梁	160		
打ち込み I (7)	無筋ダミー柱		200		
	無筋	厚 100	50		
	ダミー	厚 200	100		
	壁 厚 400		200		
打ち込みⅡ(7)	ダミー上梁		133		
	ダミー壁		100		



-417-



によらず, 乾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。

### 3.3 乾燥収縮

屋外の気象変化,室内の乾燥収縮試験および屋外試験 体の乾燥収縮の経時変化を脱型日ごとに図-4 に示し,凡例 とその試験体の体積表面積比(以下 V/S)を表-5 に示す。室 内の試験体に対して,屋外試験体は外気温や湿度の変化 を受けて膨張と収縮を繰り返していることがわかる。さらに、 ひずみが降雨後に膨張側に向かうことが確認できた。これは, 降雨により水分が供給されたことから, 乾燥により生じた収縮 ひずみが元に戻るためだと考えられる。このことから暴露試 験体は降雨の影響を顕著に受けることが分かった。打ち込 みⅠおよびⅡともに養生条件や養生期間の違いによらず BFS の収縮が大幅に低減している。BFS の混合により室内 試験体では約32%,屋外試験体では約44%も収縮が低減し ている。暴露環境下においても BFS をコンクリートに使用す ることにより収縮低減効果が確認できた。V/S の大きい試験 体は収縮の進行が緩やかであり、NとBFSの差がほとんど見 られなかったため今後ともデータを蓄積する必要がある。

# 3.4 乾燥収縮ひび割れ試験

ひび割れ試験結果を表-6に、拘束応力の経時変化を図-5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。Nが2体とも乾燥期間20日程度でひび割れているのに対して、BFSは100日を過ぎてもひび割れは発生しなかった。

拘束応力がピークを迎えた後,N は拘束応力が下がると すぐにひび割れたのに対して,BFS は最大拘束応力を迎え ても,その後緩やかに拘束応力が下降している。筆者らの研 究<sup>2)</sup>でも同様の傾向を確認しており,拘束応力の低下は,微 細ひび割れなどの影響が考えられるが本実験では,乾燥期 間 100 日においてアセトンを含浸させても微細ひび割れは 視認できなかった。

また,最大拘束応力をその材齢の引張強度で除した応力

強度比は一般に 0.7 程度となる <sup>9</sup>。最大拘束応力時の引張 強度は 3.2 項の室内の気中養生試験体の結果を N は 28 日 まで, BFS は 56 日までの対数近似によって算出した。 N が 0.63 程度でひび割れが起きたのに対して, BFS-2 は 0.97 に 至ってもひび割れが発生せず, ひび割れ抵抗性が高いこと が確認できた。

### 3.5 一軸拘束試験

拘束応力の経時変化および拘束ひずみと拘束応力の関係を図-6 に示す。N はおよそ乾燥材齢 30 日で破断に至ったが、BFS は 100 日経過しても破断に至ってはいない。

拘束ひずみと拘束応力の曲線の傾きは, 拘束度 0.6 の場 合のクリープひずみや微細なひび割れを考慮した有効ヤン グ係数と見なせる。拘束ひずみがおよそ 140×10<sup>-6</sup>までは N と BFS の拘束応力は同程度だが, 拘束ひずみが大きくなると N の応力のほうが大きく, 拘束条件および拘束ひずみが同 様であれば, BFS に発生する応力は N よりも小さくなると考 えられる。

### 3.6 引張クリープ試験

図-7 に引張クリープの経時変化および一軸拘束試験から 算出した引張クリープの値を示す。本研究では BFS の引張 クリープ試験を行っていないので,以下の式(2)によって一軸 拘束試験結果より算出した。

$$\varepsilon_{cr} = (\varepsilon_f - \varepsilon_m) - \varepsilon_e \tag{2}$$

ここに,  $\mathcal{E}_{cr}$  : クリープひずみ(×10<sup>-6</sup>)

*E*<sub>f</sub> : 自由収縮ひずみ(×10<sup>−6</sup>)

- €m :実ひずみ(×10<sup>-6</sup>)
- *E*<sub>e</sub> : 弾性ひずみ(×10<sup>-6</sup>)

弾性ひずみは試験機により制御される荷重および 3.2 項 の室内養生の試験体のヤング係数の結果をNは28日まで, BFS は 56 日までの対数近似により算出した。算出したクリー プひずみを試験体に発生させる応力で除することにより,ス ペシフィッククリープを算出した。

N の引張クリープおよび一軸拘束試験からの算出値を比

較すると非常に近似している結果が得られている。また, 一 軸拘束試験からの算出値を見ると BFS は N よりも平均して 5%程度低い。よって後述する応力解析では BFS の引張クリ ープはこの比率から N の引張クリープの値に係数 0.95 を乗 じたものから算出することとした。

### 3.7 実大壁収縮挙動

# (1) 収縮挙動

図-8 に実大壁試験体およびダミー試験体に生じるひずみの経時変化を示す。実大壁試験体およびダミー試験体の収縮の差が周辺部材の拘束によるひずみであり、収縮拘束応力を発生させる原因である。いずれの上下梁試験体において、ダミー試験体よりも実大壁試験体の収縮が大きくなった。これは、実大壁試験体において、壁部材の方が梁部材よりも V/S が小さいため、同材齢において収縮量が大きく、梁部材は圧縮力を受けるためである。一方、実大壁部材は引張力を受けるためである。一方、実大壁部材は引張力を受けるのでダミー壁の方が収縮すると考えられるが、乾燥期間 100 日の範囲内において BFS のダミー壁の収縮が壁部材より小さくなっている。この理由として、BFS の方が N よりも収縮ひずみが小さい上に、降雨により試験体が膨張する際に実大壁部材が周辺の部材に拘束された可能性が考えられる。降雨の影響および V/S が大きいため、ひずみの進行があまり見られていないので今後も継続して測定を行う。

### (2) 応力発生

図-9 に実大壁部材に発生する拘束応力を示す。拘束応 力は、3.5 項の一軸拘束試験結果より求めた有効ヤング係数 をそれぞれ N および BFS の実大壁部材とダミー壁の収縮の 差である拘束ひずみに乗じて求めた。また、ひび割れ発生 強度は、屋外試験体の引張強度の結果を対数近似により算 出し、3.4 項の乾燥収縮ひび割れ試験の最大拘束応力時の 応力強度比を乗じて算定した。

拘束応力がひび割れ発生強度と交差する点がひび割れ 材齢であるが,試験体の乾燥収縮の進行が降雨により妨げ られているため,乾燥材齢 100 日までにひび割れは発生し ていない結果となった。これは目視でも確認している。また, ひび割れ発生強度およびそれぞれの壁部材に発生している 収縮拘束応力を比較すると,Nよりも BFS の方が両者の差 が大きく,ひび割れの危険性が低いために BFS のひび割れ 抵抗性は高いと考えられる。Nと比較して強度が同程度であ り,収縮量が少ないため実大壁においても BFS はNよりもひ び割れ抵抗性が高いことが確認できた。

# 4. 応力解析

乾燥収縮ひび割れ試験の結果を基に文献<sup>の</sup>に示される有 効ヤング係数法(式(3)~(6))を用いて収縮拘束応力解析を 行った。なお,本解析は雨,日射および温度等の環境要因 を既存の予測式で考慮できないために収縮ひずみは実験 値を用いた。

![](_page_4_Figure_9.jpeg)

![](_page_4_Figure_10.jpeg)

図-9 壁部材の拘束応力と解析値

$$\sigma(t) = \sum_{t'}^{t} E_{e}(t,t') (\Delta \varepsilon(t') - \Delta \varepsilon_{f}(t'))$$
(3)

$$\sigma(t) = \sum_{t'}^{t} E_{\epsilon}(t,t') \lambda(t')$$

$$\cdot \left\{ 2\Delta\varepsilon_{f}(t') - \Delta\varepsilon_{f}^{*}(t') - \Delta\varepsilon_{f}^{**}(t') \right\}$$
(4)

$$\lambda(t') = \frac{2S*S**}{S\{S*+S**\}+4S*S**}$$
(5)

$$E_{e}(t,t') = \frac{E(t')}{1 + \phi(t,t')}$$
(6)

- 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/mm<sup>2</sup>)
  - *E(t')*: 材齢 t'におけるヤング係数(N/mm<sup>2</sup>)
  - λ(t') : 材齢 t'における拘束度
  - ∠*€(t')*: 材齢 t'における実大壁部材ひずみの変化量
  - ∠E<sub>f</sub>(t'): 材齢 t'におけるダミー壁,(下梁\*),(上梁\*\*)ひず みの変化量

式(3)および(6)を用いた解析(以下ケース 1)は実大壁の壁 部材およびダミー壁の収縮量の差である拘束ひずみの増分 を実験値から用いた。一方,式(4),(5)および(6)を用いた解 析(以下ケース 2)は,実大壁の壁部材のひずみの測定値を 用いず,それぞれのダミー試験体のひずみの実測値から収 縮ひずみを算出する。

*E(t')*は下梁では3.2項の標準水中試験体の結果を圧縮強 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, 材齢 28 日のヤング係数の値が 3.2 項の結果と合うように係数を乗じている。一方, 上梁およ び壁部材では3.2 項の屋外試験体のヤング係数の結果を対 数近似し算出した。 *φ(t,t')*の N については3.6 項の結果か ら任意の載荷材齢におけるクリープひずみにより求め, 部材 の V/S を考慮した。BFS は N および BFS の一軸拘束試験 から算出されるスペシフィッククリープの比率を係数とし, N で行った引張クリープ試験の結果に乗じて算出した。

算出した拘束応力を図-9 に示す。ケース1の解析結果は 実大壁の壁部材とダミー壁の差である拘束ひずみの実測値 を直接用いたために、NおよびBFSともに3.7項(2)で求めた 応力とおおよそ近似した結果となった。一方、ケース 2 の場 合はダミー試験体からの予測値となるので、ケース1よりも精 度が低くなる。本解析結果においては、ケース2 でのNの解 析結果は良好であったが、BFS の解析結果は精度よく算定 されなかった。よりひずみが進行してから再度検討し、今後 の課題としたい。

### 5.結論

高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの実大壁の収縮 挙動を明らかにすることを目的に,強度試験,乾燥収縮試験, 乾燥ひび割れ試験,一軸拘束試験および実大壁試験につ いて検討を行った。その結果,天然骨材を使用したコンクリ ートと比較して以下の知見が得られた。

1) 暴露環境下においても強度特性は同程度である。

- 2) 暴露環境下においても乾燥収縮が低減する。
- 3) 乾燥材齢100日の暴露環境下において実大壁試験体の拘束応力は小さい。

以上のことから, 天然骨材を使用したコンクリートと比較し て, 高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートのひび割れ抵 抗性は高くなることが期待できる。

# 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:檀康弘氏 の協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

実大壁試験の実施には, HCC 株式会社八洋コンサルタン ト:田中章夫氏ならびに東京理科大学工学部建築学科:谷 内友輝氏, 割野拓己氏のご助力を得ました。ここに感謝の意 を表します。

### 参考文献

- 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) 濱永康仁,佐藤嘉昭,上田賢司,清原千鶴:ひずみ制 御機能を備えた収縮ひび割れ試験装置の開発,コンク リート工学年次論集,vol.26,No.1,pp.519-524,2004
- 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
- 5) 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
- 6) 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