論文 スラグ系細骨材を使用したコンクリートの実大壁による収縮ひび割 れ抑制効果の検証

原品 武*1·今本 啓一*2·清原 千鶴*3·山﨑 順二*4

要旨:非鉄スラグ細骨材および高炉スラグ細骨材を用い梁部材で拘束された実大壁を作製し、そのひずみ挙動を測定することにより、非鉄スラグ細骨材および高炉スラグ細骨材の使用が壁部材の収縮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。それらの結果、非鉄スラグ細骨材および高炉スラグ細骨材を用いたっ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拘束応力の算出が可能であることを確認した。

キーワード:非鉄スラグ細骨材,高炉スラグ細骨材,実大壁,圧縮クリープ,乾燥収縮ひび割れ,応力解析

1. はじめに

コンクリートのひび割れは構造物の美観を損ねるだけでなく、その耐久性および防水性を低下させる要因となる。ひび割れの主な原因の一つは乾燥収縮によるものである。そのため収縮を低減させることが、ひび割れを防ぐための有効な手段であると考えられる。

一方,枯渇する天然骨材の代替品として注目されてい る製鉄過程において副産される高炉スラグ(以下,BFS), 非鉄金属を製錬する際に副生するフェロニッケルスラグ

(以下 FNS), 銅スラグ(以下 CUS)は、コンクリート に用いることで収縮が低減されることが報告されている ^{1,2})。筆者らも同様な結果³⁾を得ている。非鉄スラグお よび高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの小型試験 体を使用した室内実験は多く実施されているが、実大壁 を模擬したレベルでのスラグ系細骨材の収縮ひび割れ抑 制効果に関する実験は非常に少ない。

そこで本研究では非鉄スラグおよび高炉スラグ細骨 材を収縮低減材として適用し,梁部材で拘束された実大 壁試験体を作製し,収縮低減効果および乾燥収縮ひび割 れ抑制効果を明らかにした。さらに,得られた実験結果 を基に収縮応力の算出を試みた。

2. 実験概要

使用した骨材の物性 (表-1) およびコンクリートの調 合(表-2) は既報³⁾と同様である。梁および柱部材にお いては, 30-18-20N のレディーミクストコンクリートを 使用した。なお, スラグ系細骨材の混合率は 50%である。

実大壁試験体の形状を図-1 および梁および壁部のダ ミー試験体の形状を図-2 に示す。実大壁試験体の壁中 心部,上下梁中心部および梁,壁部のダミー試験体にそ

表-1 使用した骨材の物性

適用 部位	骨材の種類	記号	表乾 密度 (g/cm ³)	吸水 率 (%)	吸湿 率 (%)	気乾 含水率 (%)	比表 面積 (m²/g)		
	ፒኪፒሌ 1	001	0.64	1 70	0.71	0.54	E E		
壁	「竹砂」	221	Z.04	1./8	0.71	0.54	5.5		
	フェロニッケル スラグ細骨材	FNSS	3.02	2.05	0.13	0.07	0.2		
	銅スラグ 細骨材	CUSS	3.49	0.3	0.08	0.05	0.01		
	高炉スラグ 細骨材	BFSS	2.72	1.36	0.13	0.11	3.22		
	砕石 1	CG1	2.69	0.86	_	—	_		
	砕石 2	CG2	2.70	0.59	_	—	_		
梁·柱	砕砂 2	SS2	2.58	1.95	_	—	_		
	石灰砕砂	LS	2.70	0.69	_	—	—		
	砕石 3	CG3	2.61	0.67			—		
*吸湿率:温度 20℃ 相対湿度 100%での骨材の含水率									

吸血学.温度20℃, イオメ湿度100% C00% C00骨杯のB小学 *気乾含水率:温度20℃, 相対湿度60%での骨杯の含水率 *比表面積:吸着質を水蒸気とした B.E.T.ー点法により測定

部位	記号	W/C (%)	細骨	す 材の 種類	混合率	S/a (%)	単位量 (kg/m³)							混和剤量	空気量調整剤
			S ₁	S ₂	(%)		W	С	S ₁	S ₂	G1	G ₂	G₃	(C × %)	
	CS	50	SS1	—	0	46.9	180	360	826	0	374	564	—	0.80	2.5A
壁 FNS CUS BFS	FNS			FNSS	50	46.9	180	360	413	473	374	564		0.60	0.5A
	CUS			CUSS	50	47.5	180	360	413	546	374	564		0.50	
	BFS			BFSS	50	41.5	180	360	413	426	374	564		0.65	0.5A
梁	È∙柱		SS2	LSS	—	47.4	180	360	485	337	_		912	0.81	
C:セメント(普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³), 混和剤:高性能 AE 減水剤(標準形), A:C×0.001%															

表一2 調合表

*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 修士(工学) (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助教 博士(工学) (正会員)

*4(株) 淺沼組 技術研究所材料研究グループリーダ 博士(工学) (正会員)



れぞれ埋め込みゲージ(KM 埋め込み型ひずみゲージ, 測定長 120mm)を設置している。壁の厚さは 100mm と し,端面をアルミ箔テープでシールすることにより,見 掛け上,体積表面積比が同じとなるようにした。壁部材 の配筋は横筋 D10@200 シングル,縦筋 D10@200 シング ルとし,鉄筋比は 0.28%とした。梁および柱部材におい ては主筋を 4-D19,せん断補強筋を D10@200 とした。梁 および柱部材における鉄筋のかぶり厚さは 20mm とした。

コンクリートの打込みについては、壁部打設の1週間 前に下梁および柱部を先行して打設し、その後、壁部お よび上梁の順に行った。脱型は壁部打設から7日後(下 梁および柱打設からは14日後)に行い、降雨の影響を避 けるために雨かかりのない屋外と同一の温度環境下にお いて測定を行った。梁ダミー試験体においては、上梁打 設時に作製した.また壁ダミー試験体および梁ダミー試 験体は、実大壁試験体と同様の乾燥条件にするため端面 にシールを施している。

図-3 に測定期間中の温湿度変化を示す。測定期間中の平均気温は18.4℃,平均相対湿度は63.5%であった。

3. 測定結果

3.1 ダミー部材の収縮ひずみ

ダミー部材の収縮ひずみの経時変化を図-4 に示す。 既往の室内実験³⁾の100×100×400mm 試験体と同様に, 脱型時を原点としている。室内実験と同様に,壁ダミー 試験体においてもスラグ系細骨材を使用したコンクリー トは CS コンクリートに比べて収縮が低減することが確 認できた。図-5 に乾燥期間 240 日における CS コンク リートに対するスラグ系細骨材を使用したコンクリート の収縮ひずみ比を示す。図中には室内実験結果³⁾も示し ている。これによると,実環境下で実施した壁ダミー試 験体においてはスラグ系細骨材を 50%混入することで,









収縮ひずみが 25%程度低減している。またこの傾向は, スラグ系細骨材の種類に関わらず同様であり,スラグ系 細骨材は収縮低減材料として有効であると考えられる。





3.2 ひび割れ発生状況

図-6 に実大壁におけるひずみの測定結果を示す。図 中は脱型時を原点として示している。CS コンクリートを 用いた実大壁試験体においては、乾燥期間 39 日におい て目視にてひび割れ発生が確認できた。スラグ系細骨材 を用いた実大壁試験体においては乾燥期間 350 日以上経 過した現在においてもひび割れは確認できていない。各 壁試験体のひずみ変化に着目すると壁ダミー試験体>実 大壁ひずみ、実大壁梁ひずみ>梁ダミー試験体となって いる。これは、実大壁部材は上下梁の拘束を受け、梁部 材は壁の収縮によって圧縮力が生じ、収縮ひずみが大き くなっているためと考えられる。下梁部材は上梁部材よ りも先行して打設しており、剛性が大きく自由収縮ひず みも小さいためひずみは小さくなっている。

各実大壁試験体の拘束ひずみは実大壁中央部のひず みから壁ダミーのひずみを差し引くことによって求めた。 その結果を図-7 に示す。これによると、乾燥初期にお いて CS コンクリートを用いた実大壁試験体の拘束ひず みが大きくなっている。スラグ系細骨材を用いた試験体 は乾燥期間 100 日以降でその値が収束しており、250 日 の時点で FNS>CUS>BFS の順で小さくなっている。

図-8 に乾燥期間 200 日の時点におけるひび割れ発生 状況の図を示す。ひび割れ幅は0.05~0.1mm 程度であり, 壁部材の両面の同位置に発生する貫通ひび割れであった。



図-7 拘束ひずみの経時変化



図-8 CS コンクリートのひび割れ発生状況

4. 応力解析

実大壁試験体に生じる応力挙動を解析的に追随する。 解析には有効ヤング係数法 ⁴⁾を用いた。自由収縮ひずみ については,図-4 に示すダミー試験体の自由ひずみを 用いた。なお,脱型材齢 14 日の下梁の自由収縮ひずみ は、日本建築学会の予測式 ⁴⁾における乾燥開始材齢の影 響係数を基に、上梁と同時に打設し測定した脱型材齢 7 日の梁ダミー試験体の結果に0.946を乗じた値を用いた。

ヤング係数およびクリープ係数については, **Φ100×200mm**の円柱試験体を用いた既往の実験結果を 基に近似式を得た。

$$\sigma(t_i) = \sum_{j=1}^{i} \left(\frac{E(t_i)}{1 + \Phi(t_i, t_j)} \cdot \lambda(t_j) \left\{ 2\Delta \varepsilon_f(t_j) - \Delta \varepsilon'_f(t_j) - \Delta \varepsilon''_f(t_j) \right\} (1)$$

$$\lambda(t_j) = \frac{2S'_{(t_j,t_i)} \cdot S^{"}_{(t_j,d_i,t_{i+d})}}{S_{(t_j,t_i)} \left\{ S'_{(t_j,t_i)} + S^{"}_{(t_j+d_i,t_{i+d})} \right\} + 4S'_{(t_j,t_i)} \cdot S^{"}_{(t_j+d_i,t_{i+d})}}$$

$$= \sum l \zeta,$$

 $\sigma(t_i): 材齢 t_i における収縮拘束応力の予測値(N/mm²)$ $<math>E(t_i): 材齢 t_i におけるヤング係数(N/mm²)$ $<math>\Phi(t_i, t_j): 材齢 t_j で除荷した材齢 t_i におけるクリープ係数$ $<math>\lambda(t_i): 載荷材齢 t_i における拘束度$

 $\Delta \varepsilon f(t_i)$: 材齢 t_i における壁部材の増分自由ひずみ $\Delta \varepsilon'_f(t_i), \Delta \varepsilon''_f(t_i)$: 材齢 t_i における上下梁の増分自由ひずみ $S(t_i, t_j) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{Ee}(t_i, t_j)$: 壁部材の断面剛性(N/mm) $S'(t_i, t_j), S''(t_i, t_j)$: 上下梁部材の断面剛性(N/mm)

4.1 物性値の算出

①ヤング係数

既往の室内実験³の圧縮強度試験より得られたヤング 係数の経時変化を CEB-FIP Model Code 1990(式(2))の予測 式⁵によって近似した結果を用いた。そこで得られたヤ ング係数の経時変化を図-9に示す。

$$\mathbf{E}(\mathbf{t}) = \sqrt{\exp\left\{s\left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{0.5}\right]\right\}} \cdot E_{28}$$
(2)

ここに, E(t): 材齢t日におけるヤング係数(N/mm²) s:定数(CS:0.38, FNS:0.38, CUS:0.40, BFS:0.59) *E*₂₈: 材齢 28日のヤング係数(N/mm²)

②クリープ係数

クリープの載荷時材齢は7日であり、載荷応力は同材 齢の圧縮強度の1/3としている。クリープ係数について は、既往の予測式⁵⁾を参考にし、双曲線関数で近似した。 予測した結果を図-10に示す。

$$\Phi(\mathbf{t},\mathbf{t}') = \Phi' \cdot \{(\mathbf{t},\mathbf{t}') / (\alpha + (\mathbf{t} - \mathbf{t}'))\}$$
(3)

Φ(t,t'):載荷材齢t'日における材齢t 日のクリープ係数 ③割裂引張強度

割裂引張強度の経時変化は圧縮強度から推定する野 ロ式のを用いた。なお、圧縮強度の経時変化については、 CEB-FIP Model Code 1990の予測式⁷⁰から得られた値を用 いている。得られた割裂引張強度の経時変化を図-11 に 示す。

$$F_t(t) = \alpha \times 0.291 \times Fc^{0.6377}$$

$$Fc(t) = \exp\left\{\beta \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{0.5}\right]\right\} \cdot Fc_{28}$$
(4)

ここに, Ft(t):材齢 t 日における割裂引張強度(N/mm²), α:材料定数(CS:0.94, FNS:0.915, CUS:0.95, BFS:0.915) Fc(t): 材齢 t 日における圧縮強度(N/mm²),

β:材料定数(CS:0.18, FNS:0.15, CUS:0.26, BFS:0.23)



図-9 ヤング係数の経時変化



図-10 クリープ係数の経時変化



図-11 割裂引張強度の経時変化

4.2 応力算出結果

図-12 に応力算出結果を示す。図中に示す赤色の実線 は既往の研究³⁾を参考にひび割れ発生強度として図-11 に示した割裂引張強度×0.75 とした値を示している。 また,点線は,図-7 に示す拘束ひずみを用いて式(1)に 示す有効ヤング係数を乗じて算出した値を示している。

これによるとスラグ系細骨材を用いた実大壁の拘束 応力は、CS コンクリートの応力発現性が低く、CS およ び BFS コンクリートの拘束応力はそれぞれ材齢 40 日, 150 日においてひび割れ発生強度を超える結果となった。 CSコンクリートにおいては図-6に示すように乾燥期間 39日(材齢46日)においてひび割れが目視にて確認でき ていることから応力算出結果はほぼ実験現象を現してい るものと思われる。一方, BFS コンクリートにおいては, ひび割れは確認されていない。これは、図-10に示すク リープ係数が最も小さいため拘束応力が大きく算出され たものと考えられる。FNS および CUS コンクリートに おいては、図-10 に示すようにクリープ係数が CS コン クリートに比べて大きいことや図-4 に示すようにスラ グ系細骨材を用いたコンクリートの収縮ひずみ抑制効果 が CS コンクリートに比べて卓越していることが収縮応 力が小さく算出された一因であると考えられる。

拘束ひずみの実験値より算出した値と応力算出値を 比較してみると,材齢 50 日までは概ね実験値と同様な 傾向を示している。応力算出値は時間の経過とともに拘 束応力が増大しているのに対して,拘束ひずみの実験値 より算出した応力値が時間とともに漸減しているのは高 応力下における引張りクリープが,内部のマイクロクラ ックの卓越などの影響⁸⁰によって,本研究時で実施した 応力 1/3 下での圧縮クリープよりも大きくなったため考 えられる。なお,FNS コンクリートにおいては図-6 に 示す実測値の変動が他の調合より大きいために算出した 拘束応力の変動も大きくなっている。

乾燥期間 250 日におけるスラグ系細骨材を用いた実大 壁の収縮応力強度比は,FNS:0.78,CUS:0.62,BFS: 0.78,拘束ひずみの実験値から算出した収縮応力強度比 はFNS:0.61,CUS:0.34,BFS:0.53 となっている。ま た,図-13 および既往の研究⁹からもひび割れ発生材齢 が長くなるほど収縮応力強度比も高くなることが示され ていることから,スラグ系細骨材を用いた実大壁試験体 においてはひび割れが発生する確率は低いことが考えら れる。

図-14 にひび割れ発生材齢と拘束ひずみの関係を示している。CS コンクリートのひび割れ発生時の拘束ひず



c) CUS

a) CS



b) FNS



d) BFS



図-12 拘束応力の算出結果 - 333 - みは室内実験試験体とほぼ同等の値であるが、ひび割れ 発生材齢が長くなっている。一方、スラグ系細骨材を用 いた実大壁試験体の拘束ひずみは、乾燥期間 250 日にお いて、FNS: 282×10⁻⁶、CUS: 166×10⁻⁶、BFS: 186×10⁻⁶で あった。

以上のことから,実大壁試験体においてもスラグ系細 骨材を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抑制効果が高 いことが確認できた。

5. 結論

本研究では、FNS,CUS および BFS コンクリートの収 縮低減効果および実大壁のひび割れ挙動の検討を行った。 その結果,本実験の範囲内においては、CS コンクリート 試験体と比較して以下の知見が得られた。

- スラグ系細骨材を用いたコンクリートのダミー試験体の自由ひずみは、CS コンクリートよりも 12~ 18%程度小さくなり、収縮低減効果が確認できた。
- 2) スラグ系細骨材を用いたコンクリートのクリープ 係数は、CSコンクリートと比較して、大きくなって おり、同等か30%程度増加する。スラグ系細骨材を 用いたコンクリートは、CSコンクリートよりひび割 れ発生材齢が遅延し、収縮ひび割れ抑制効果がある ことが確認できた。
- 3) 実大壁壁部材に働く発生応力は、CS コンクリートと 比較して FNS,CUS および BFS コンクリートの方が 小さく、ひび割れ抵抗性が向上することが確認でき た。実大壁試験体においてスラグ系骨材を用いたコ ンクリートは CS コンクリートに比べてひび割れ抑 制効果が高いことが確認できた。

謝辞

本研究の実施においては、大阪広域生コンクリート共 同組合:安田慎吾氏、株式会社関西宇部 生コン工場の 皆様、(株)淺沼組 建築部の皆様および鉄鋼スラグ協会 の協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- ř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
- 真野孝次,鹿毛忠継,兼松学,今本啓一: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,87(I),pp45-48,2017,2
- 原品武,今本啓一,清原千鶴,山崎順二:スラグ系 細骨材を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抑制



図-13 ひび割れ発生材齢と応力強度比



効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論 集, vol.41, No.1, pp.431-436, 2019.7

- 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)・解説,2006,2
- 5) 今本啓一,山本俊彦:鉄筋コンクリート部材のクリ ープ乾燥収縮特性(その1:コンクリートのクリープ・ 乾燥収縮予測式),日本建築学会東海支部研究報告, 第 39 号, pp. 105-108, 2001
- 野口貴文,友澤史紀:高強度コンクリートの圧縮強 度と各種力学特性との関係,日本建築学会構造系論 文集, No.472, pp. 11-16, 1995.6
- Comite Euro-International Du Beton : CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford, 1991
- 8) 熊野知司,西林新蔵,井上正一:微細ひび割れ挙動 に基づくコンクリートの引張クリープモデル,土木 学会第 52 回年次学術講演会講演概要集/V,pp.1040-1041,1997.
- 大野俊夫,魚本健人:コンクリートの収縮ひび割れ 発生予測に関する基礎的研究,土木学会論文集 No.662, V-49,pp.29-44,2000.11