

論文 屋外保管した高炉スラグ細骨材を用いたコンクリート実大壁の収縮ひび割れ抵抗性の検討

奥石 悠介*1・田中 章夫*2・清原 千鶴*3

要旨：実現場を模擬して屋外保管した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。屋外保管した高炉スラグ細骨材を用いて柱・梁部材で拘束されたコンクリート部材（実大壁）を作製し、そのひずみ挙動を測定した。その結果、屋外保管した高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートでも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、高炉スラグ細骨材の保管条件がコンクリートのひび割れ抵抗性に与える影響を確認した。

キーワード：高炉スラグ細骨材, 潜在水硬性, 実大壁, 圧縮クリープ, 収縮ひび割れ, 応力解析

1. はじめに

天然骨材の枯渇が懸念されるなか、天然骨材の代替骨材として注目されている産業副産物の高炉スラグ細骨材（以下、BFS）は、環境保護や安定供給に優れる。加えて、天然骨材を利用したコンクリートに比べ、乾燥収縮が低減され、ひび割れ抵抗性が高いことが確認されている¹⁾。

このBFSは潜在水硬性を有しており、保管条件によって変質（固結）といった現象が発生する。この現象によって骨材の物性が変化し、コンクリートの物性に影響を与えることが考えられる。しかし、定量的な物性値が示されておらず、このことが、BFSが積極的に利用されていない一因となっている。そこで筆者らは、様々な温度条件（20～60℃）で保管したBFSを用いたコンクリートから、強度、収縮、収縮ひび割れ特性に関する試験を行い、BFSの保管環境条件がコンクリート物性に与える影響を検討した。その結果、保管温度 20～60℃において、積算温度（保管温度と保管日数の積）1800℃・Dまでは、天然骨材を使用したコンクリートと同等以上のコンクリート物性が得られることを報告されている²⁾。

しかし、このように長期保管したBFSを使用したコンクリートの材料的な評価は示されているが、一方で実構造物スケールでの検討はなされていないため、さらなる検討が必要である。

そこで本研究は、生コン工場での貯蔵を模擬して屋外保管したBFSを用いたコンクリートで実大壁試験を行い、コンクリートの収縮ひび割れ抑制効果に関して実験的な検証を行った。併せて、小型試験体を作製し、屋外保管したBFSを使用したコンクリートの収縮低減効果および収縮ひび割れ抑制効果を実験にて明らかにした。また、それらの結果を用いて実大壁の応力解析を行い、屋外保管したBFSが実構造物に適用可能か検討した。

表－1 BFSの粒度分布

ふるい寸法 (mm)	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15
質量百分率 (%)	100	100	99	85	40	13	5

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究では、表－1に示す粒度区分、表乾密度：2.80g/cm³、吸水率：0.50%、粗粒率：2.58の固結防止剤が添加されたBFSを使用した。コンクリートには、普通ポルトランドセメント(C)（密度：3.16g/cm³）、上水道水(W)、大井川水系陸砂(S)（密度：2.59g/cm³）、高炉スラグ細骨材(BFS)、青梅産砂岩砕石(G)（密度：2.65g/cm³）を使用した。混和剤(Ad)はポリカルボン酸系AE減水剤を用い、助剤としてAE剤および消泡剤を使用した。

2.2 BFSの保管方法および保管期間

これまで、BFSの保管環境条件がコンクリート物性に与える影響の検討は、一定温度での保管のみにとどまっている。しかし、実際に生コン工場では、温度変化のある環境で保管される。そこで本研究では、実際の保管環境を再現し、温度変化のある屋外で保管を行った。

図－1にBFS屋外保管時の温度測定状況、図－2に屋外保管時の容器内温度を示す。プラスチック容器内で保管しているBFSに湿った布を掛け、容器を密閉することで、100%RHを保った。BFSを保管している容器を日当たりの良い屋外で保管し、BFSの中心部1点、表層部（容器内側面から5cm）3点の温度を計測した。なお、湿度については定期的に温湿度計にて100%RHに保たれていることを確認した。図－2に示すように中央部が平均的な温度を示したため、中心部温度を日平均温度の代表値として積算温度を算出した。積算温度1800℃・DまでのBFSを使用したコンクリートは、天然骨材を用いたも

*1 日本工業大学大学院 工学研究科 建築デザイン学専攻 (学生会員)

*2 日本工業大学 建築学部 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 東京理科大学 研究推進機構総合研究院 プロジェクト研究員 博士 (工学) (正会員)

のと同等以上のコンクリート物性が得られることから²⁾、本研究でも屋外保管で積算温度 1800°D・D（記号：屋外-1800）まで保管した BFS を使用し検討を行った。屋外保管は、2024 年 6 月 13 日～2024 年 8 月 13 日までの 2 か月間行った。表-2 に示した通り、屋外保管した BFS は比表面積の減少が確認された。

2.3 試験体概要

2.3.1 コンクリート水準

表-3 にコンクリートの計画調合を示す。コンクリートの調合条件は W/C53%，s/a42%とした。BFS コンクリートは細骨材全容積の 50%を BFS で置換している。使用した BFS は、屋外保管した BFS と比較用に保管開始前の BFS の 2 種類である。

2.3.2 実大壁試験

図-3 に試験体(以降、実大壁試験体)概要図を示す。実大壁試験体は柱・梁部材に拘束された開口部の無い壁部材を模擬した。また、実大壁試験体およびダミー試験体は無配筋とした。実大壁試験体は 2 度に分けて打込みを行った。第一リフトに下梁、その 16 日後に第二リフトの柱、壁部材および上梁の打込みを行った。第一リフトは材齢 4 日、第二リフトは材齢 7 日で脱型を行った。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、アルミテープにより実大壁試験体と外気に触れる曝露面を同じにした。実大壁試験体と壁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した。

BFS を利用したコンクリートでは、実大壁試験体、柱・梁ダミー試験体を作製した。また、基準として、天然砂のみを利用したコンクリート（以下、陸砂コンクリートと略す）で、壁ダミー試験体を作製した。

併せて、小型試験体を作製し、コンクリートの強度・収縮・クリープ・収縮ひび割れ特性に関して実験的な検証を行った。実験に用いたコンクリートは、陸砂、積算温度 1800°D・D まで保管した BFS を使用したコンクリート（以下、屋外-1800 コンクリートと略す）に加えて、保管開始時の BFS を使用したコンクリート（以下、BFS0 コンクリートと略す）である。

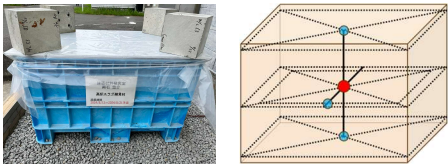


図-1 BFS 屋外保管時の温度測定状況

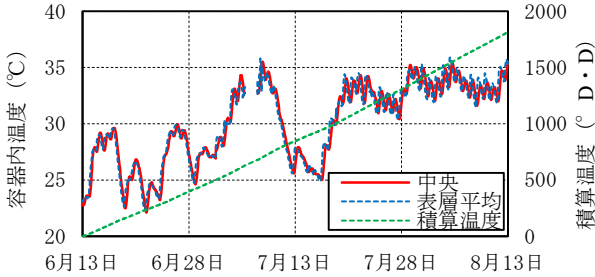


図-2 屋外保管時の容器内温度

表-2 屋外保管した BFS の比表面積

	陸砂	BFS0	屋外-1800
比表面積 (m ² /g)	1.11	0.48	0.28

表-3 コンクリートの計画調合

種別	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	BFS	G
陸砂	53	42	182	343	723	—	1020
BFS	53	42	182	343	361	391	1020

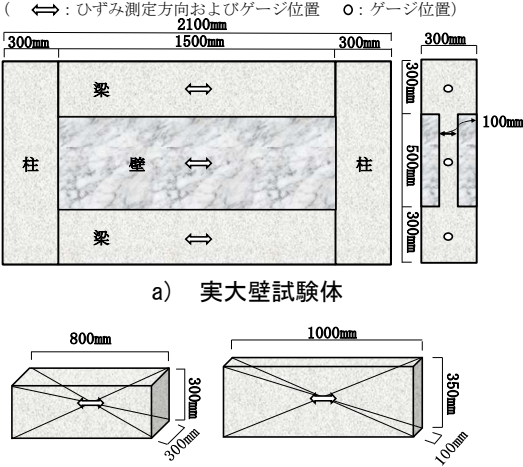


図-3 試験体概要図

表-4 試験項目

コンクリート	実験項目		試験体寸法 (mm)	各試験体数 (体)	試験材齢および 測定開始材齢 (日)
BFS0 陸砂 屋外-1800	圧縮強度および静弾性係数		φ 100×200	3	現場養生: 7, 28, 91 日 (試験) 標準・気中養生: 28 日 (試験)
	割裂引張強度		φ 100×200	3	現場養生: 28 日 (試験)
	自由収縮ひずみ		100×100×400	1	測定開始材齢 : 7 日
	圧縮クリープ		φ 100×200	3	
	鉄筋拘束ひび割れ		100×100×1100	2,3	
屋外-1800	実大壁の収縮挙動	実大下梁/壁および上梁	300×1100×2100	1	測定開始材齢 第一リフト : 4 日 第二リフト : 7 日
陸砂		ダミー下梁/上梁	300×300×800	1	
屋外-1800		ダミー壁	100×350×1000	1	

2.3.3 物性試験

表－４ に試験項目を示す。屋外-1800 コンクリートの実大壁試験に加え、陸砂および BFS0 コンクリートを作製し、強度試験、自由収縮試験、圧縮クリープ試験および鉄筋拘束ひび割れ試験を行った。

(1) 強度試験

圧縮強度試験および静弾性係数試験は JIS A 1149 によった。試験体は実験室にて材齢 7 日まで封緘養生を行い、脱型した。屋外-1800 コンクリートおよび陸砂コンクリートは、実大壁のコンクリート強度を確認するために材齢 7 日の脱型後、実大壁の測定環境と同じ実験室環境にて、現場養生とした。壁試験体を作製していない BFS0 は脱型後、20℃、60%RH の恒温室内で気中養生とした。試験材齢は材齢 7、28、91 日とした。

割裂引張強度試験は JIS A 1113 に準拠し、脱型後、20℃、60%RH の恒温室内で気中養生とした。試験は材齢 28 日および鉄筋拘束ひび割れ発生材齢に実施した。

(2) 自由収縮試験

自由収縮試験の試験体形状は 100×100×400mm とした。ひずみの測定は、コンクリート断面中央部に設置した埋込み型ひずみゲージにより測定した。打込み後、材齢 7 日までは封緘養生（型枠存置）状態とした。その後、型枠側面 2 面を除く 4 面をアルミテープによって封緘した。試験環境は、恒温室内で 20℃、60%RH とした。

(3) 圧縮クリープ試験

圧縮クリープ試験は JIS A 1157 によった。試験体形状は φ100×200mm で載荷試験体と無載荷試験体の 2 種類を作製した。それぞれ試験体の中心部に埋込み型ひずみゲージを埋設し、載荷時ひずみと無載荷ひずみを計測した。試験環境は、恒温室内で 20℃、60%RH とした。

得られたひずみからクリープひずみ、式 (1)、(2) よりクリープ係数を算出した。算出式を以下に示す。

$$\varepsilon_{ct} = \varepsilon_{at} - \varepsilon_e - \varepsilon_{st} \quad (1)$$

$$\varphi_{ct} = \varepsilon_{ct} / \varepsilon_e \quad (2)$$

ここに、

ε_{ct} : クリープひずみ

ε_{at} : 全ひずみ

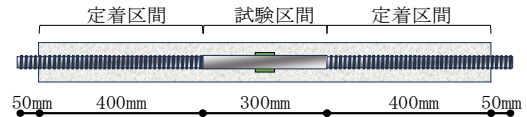
ε_e : 載荷時弾性ひずみ

ε_{st} : 載荷後の乾燥収縮ひずみ

φ_{ct} : クリープ係数

(4) 鉄筋拘束ひび割れ試験

図－４ 鉄筋拘束ひび割れ試験体の概要図³⁾を示す。100×100×1100mm の試験体を 1 水準につき 3 体作製した。内部拘束体として、φ32mm、全長 1200mm、両端 450mm にねじ切りのある鉄筋を使用した。中央部の 300mm は、テフロンシートで鉄筋の付着を除去し、鉄筋中央部に貼



図－４ 鉄筋拘束ひび割れ試験体の概要図³⁾

表－５ コンクリートのフレッシュ性状

種類	混和剤量(C×%)			スランブ (cm)	空気量 (%)
	AE 減水剤	AE 剤	消泡剤		
陸砂	0.5	0.0085	0.00035	19.3	3.9
BFS0	0.75	0.0065	0.00045	19.5	4.8
屋外-1800				20.5	4.5

付したひずみゲージによりひずみを計測した。

自由収縮試験と同様に打込み後、材齢 7 日までは封緘養生（型枠存置）状態とした。その後、型枠側面 2 面を除く 4 面をアルミテープによって封緘とした。試験環境は、恒温室内で 20℃、60%RH とした。

得られた鉄筋の平均ひずみよりコンクリートの拘束収縮応力を算出（式(3)）した。また、鉄筋拘束応力が急激に低下した点をひび割れ発生材齢とし、ひび割れ発生材齢にて割裂引張強度試験を行い、ひび割れ拘束応力と割裂引張強度の比で比較をした。

$$\sigma_c = \frac{E_s \times \varepsilon_s \times A_s}{A_c} \quad (3)$$

ここに、

σ_c : コンクリートの拘束収縮応力 (N/mm²)

E_s : 拘束鉄筋の弾性係数 (N/mm²)

ε_s : 拘束鉄筋のひずみ

A_s : 拘束鉄筋の中央部断面積 (mm²)

A_c : コンクリートの純断面積 (mm²)

3. 結果・考察

3.1 フレッシュ性状

表－５ にコンクリートのフレッシュ性状を示す。BFS は角ばった形状により、練混ぜ時に空気を巻き込みやすいため、エントラップトエアが多くなる傾向にある⁴⁾。そこで、ワーカビリティを確保するために、混和剤を併用した。その結果、スランブは 18±2.5cm、空気量は 4.5±1.5% の範囲内に収まっており、良好なワーカビリティが得られた。

3.2 強度特性

図－５ に BFS の保管条件が圧縮強度に与える影響を示す。BFS を使用したコンクリートは、初期強度の低さが指摘される⁴⁾が、材齢や保管条件を問わず、陸砂コンクリートと同等の圧縮強度が得られた。このことから、BFS を温度変化のある環境で保管しても、積算温度 1800°D・D までは、圧縮強度に影響を及ぼさないと考える。

図-6 に BFS の保管条件が静弾性係数に与える影響を示す。BFS を使用したコンクリートは保管条件によらず陸砂コンクリートと同等の静弾性係数が得られた。いずれのコンクリートも材齢 7 日以降は、静弾性係数があまり伸びない結果となったが、これらは、養生中の乾燥の影響により、強度および静弾性係数の増進が停滞する結果となったと推測される。

図-7 に BFS の保管条件が割裂引張強度(材齢 28 日)に与える影響を示す。割裂引張強度を比較すると、BFS を使用したコンクリートは保管条件によらず、陸砂コンクリートよりも高い割裂引張強度が得られた。これは、BFS の形状や BFS 周辺に形成される反応層²⁾の影響が考えられるが詳細な検討は今後の課題としたい。

屋外-1800 コンクリートは、陸砂コンクリートと同等以上の圧縮強度、静弾性係数、引張強度が得られた。以上の結果から、強度特性の観点では、屋外で保管した BFS でも、積算温度 1800°D・D までならコンクリート用骨材として使用可能であると考えられる。

3.3 自由収縮ひずみ

図-8 に自由収縮ひずみの経時変化を示す。保管条件によらず、BFS を使用したコンクリート自由収縮ひずみは陸砂コンクリートに比べ小さくなった。加えて、屋外-1800 コンクリートの自由収縮ひずみが BFS0 コンクリートに比べ小さくなったことから、屋外保管した BFS でも収縮低減効果があると考えられる。BFS0 コンクリートに対する屋外保管した BFS-1800 コンクリートの収縮低減効果の要因は判明していないが、BFS の収縮低減効果は BFS に形成される反応層や弾性係数が高い BFS の拘束効果の影響が大きいと推測される。以上より、収縮特性の観点では、屋外保管した BFS でも、積算温度 1800°D・D まではコンクリート用骨材として使用可能であると考えられる。

3.4 圧縮クリープ

図-9 にクリープ係数の経時変化を示す。BFS を使用したコンクリートのクリープ係数は、載荷初期で陸砂コンクリートを下回る値となったが、載荷 40 日以降では上回る値となった。載荷初期ではクリープ係数に差がみられたが、材齢 40 日以降ではどの水準も同等のクリープ係数が得られた。以上より、屋外保管した BFS でも、積算温度 1800°D・D までなら、コンクリートのクリープ性状に影響を及ぼさないと考えられる。

3.5 鉄筋拘束ひび割れ

図-10 に乾燥材齢と収縮拘束応力の関係、表-6 に鉄筋拘束ひび割れ試験結果を示す。BFS0 コンクリートは、陸砂コンクリートに比べ、ひび割れ材齢が延び、ひび割れ発生応力も高くなったことから、BFS を使用することでコンクリートのひび割れ抵抗性が高くなると考える。

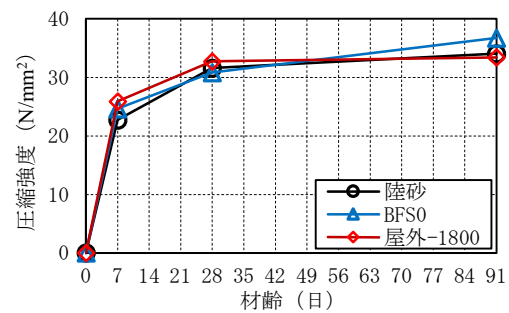


図-5 BFS の保管条件が圧縮強度に与える影響

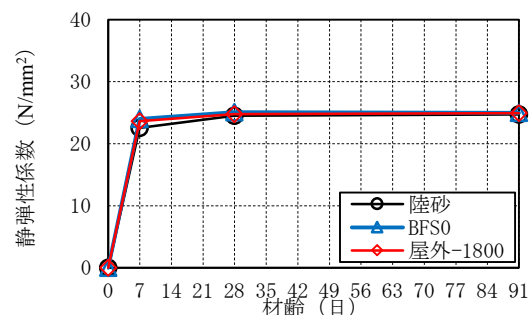


図-6 BFS の保管条件が静弾性係数に与える影響

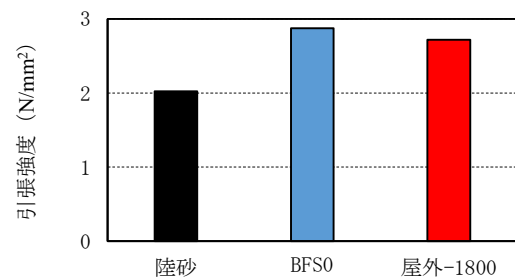


図-7 BFS の保管条件が割裂引張強度に与える影響

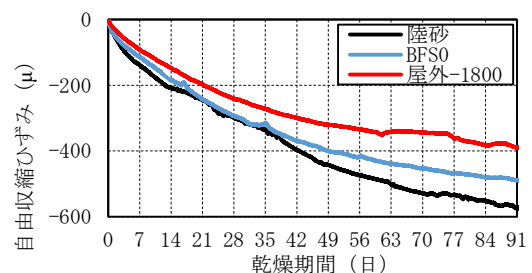


図-8 自由収縮ひずみの経時変化

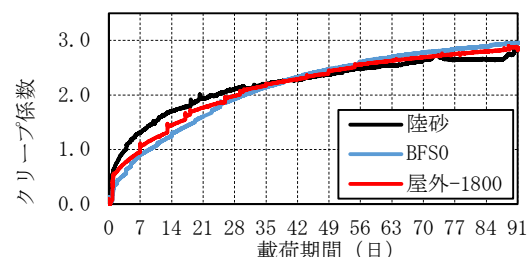


図-9 クリープ係数の経時変化

屋外-1800 コンクリートは、BFS0 コンクリートに比べ、ひび割れ材齢が短く、ひび割れ発生応力も小さい結果となった。しかし、ひび割れ発生材齢、ひび割れ発生応力、強度比が陸砂コンクリートと同等の値を示した。以上の結果から、屋外で保管した BFS でも、積算温度 $1800^{\circ}\text{D} \cdot \text{D}$ までなら、天然骨材を使用したコンクリートと同等のひび割れ抵抗性が期待できると考える。

3.6 実大壁の収縮挙動

図-11 に実大壁の試験環境、図-12 に実大壁試験体およびダミー試験体のひずみを示す。図-12 では、実大壁試験体とダミー試験体の比較を行い、壁部材の拘束状態を確認した。上・下梁試験体において、ダミー試験体に比べ実大壁試験体のひずみが大きくなった。これは、実大壁の壁部材が梁部材よりも V/S が小さいため、同材齢で収縮量が大きくなり、梁部材が圧縮力を受けるからである。一方、実大壁の壁部材は、上下梁の拘束によって引張力を受けるため、拘束を受けない壁ダミー試験体のひずみは大きくなった。

また、乾燥材齢 110 日程度までにひび割れは発生していない。BFS を 100% 置換したコンクリート実大壁の収縮ひび割れ抑制効果を検討した研究では、天然砂を使用した実大壁は乾燥材齢 39 日でひび割れが発生したが、BFS を使用したものは乾燥材齢 250 日時点でもひび割れが発生していないことが確認されている⁵⁾。本研究でも現時点でひび割れが発生していないこと、陸砂コンクリートに比べて強度が同等以上、収縮が小さい、クリープ係数が同等であった。以上の物性がひび割れ抵抗性の向上につながると考えられることから、屋外で積算温度 $1800^{\circ}\text{D} \cdot \text{D}$ まで保管した BFS を 50% 置換して使用した場合においても、天然骨材を使用したコンクリートよりもひび割れ抵抗性が高くなることが示唆された。

4. 応力解析

4.1 拘束応力の算出

実大壁試験の解析には有効ヤング係数法(式 4, 5)⁶⁾を用いた。収縮ひずみは、図-8 に示す収縮ひずみを基に、静弾性係数およびクリープ係数は、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱試験体を用いた実験結果を基に近似式を得た。

$$\sigma(t_i) = \sum_{j=1}^i \left(\frac{E(t_i)}{1 + \Phi(t_i, t_j)} \right) \cdot \lambda(t_j) \{ 2\Delta\epsilon_f(t_j) - \Delta\epsilon'_f(t_j) - \Delta\epsilon''_f(t_j) \} \quad (4)$$

$$\lambda(t_j) = \frac{2S'(t_j, t_i) \cdot S''(t_{j+d}, t_{i+d})}{S_{(t_j, t_i)} \{ S'(t_j, t_i) + S''(t_{j+d}, t_{i+d}) \} + 4S'(t_j, t_i) \cdot S''(t_{j+d}, t_{i+d})} \quad (5)$$

ここに、

$\sigma(t_i)$: 材齢 t_i における収縮拘束応力の予測値(N/mm²)

$E(t_i)$: 材齢 t_i におけるヤング係数(N/mm²)

$\Phi(t_i, t_j)$: 材齢 t_j で除荷した材齢 t_i におけるクリープ係数

$\lambda(t_j)$: 載荷材齢 t_j における拘束度

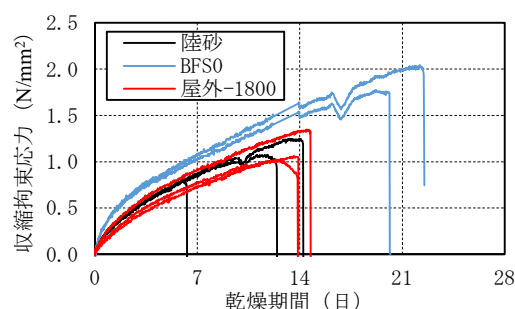


図-10 乾燥材齢と収縮拘束応力の関係

表-6 鉄筋拘束ひび割れ試験結果

水準	ひび割れ材齢 (日)	ひび割れ発生応力 (N/mm ²)	強度比
陸砂	11.0	1.0	0.52
BFS0	21.3	1.9	0.64
屋外-1800	14.2	1.1	0.57

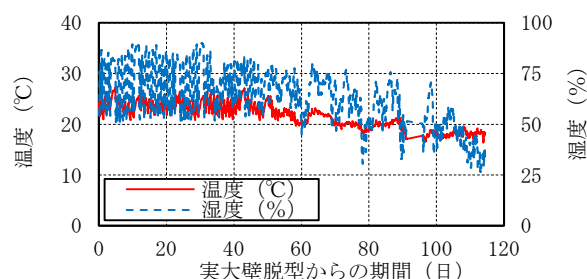


図-11 実大壁試験の試験環境

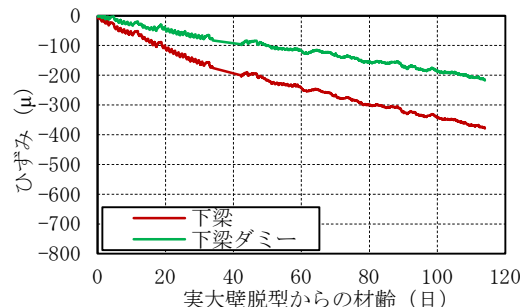
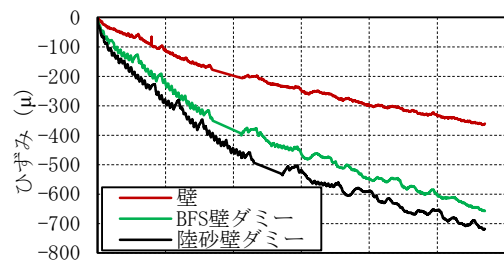
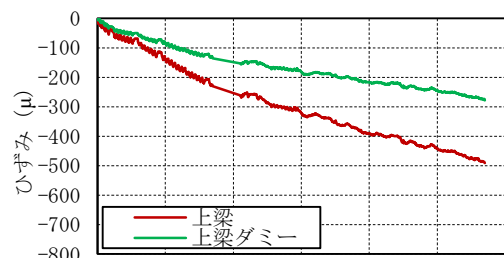


図-12 実大壁試験体およびダミー試験体のひずみ

$\Delta \varepsilon_f(t_i)$: 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

$S(t_i, t_j) = A \cdot E_c(t_i, t_j)$: 壁部材の断面剛性(N/mm)

4.2 拘束応力の算出結果

図-13 に屋外-1800 の拘束応力算出結果を示す。応力強度比は、最大拘束応力をひび割れ発生時の割裂引張強度で除した値であり、一般的には 0.7 程度とされている⁹⁾。そこで、図中に示すひび割れ強度は、図-7 に示す割裂引張強度の結果を対数近似により算出し、0.7 を乗じた値を示している。また、屋外-1800 コンクリートの実大壁試験で得られた、拘束ひずみに有効ヤング係数を乗じた値を拘束ひずみからの算出値として図中に示した。

温湿度等の試験環境の変化により実測値は変動しており、実測値からの算出値と予測値を比較すると算出値が予測値より小さく、実測値のピーク値が概ね予測値と同様の値を示している。予測値は試験環境の温湿度の影響を考慮しておらず、実測値のような振幅は再現されないが、実測値の挙動を概ね表していると考えられる。そこで、陸砂、BFS0 および屋外-1800 コンクリートの拘束応力を算出し、比較を行った。図-14 に BFS の保管条件による拘束応力を示す。拘束応力を比較すると、陸砂に比べ BFS0、屋外-1800 コンクリートの拘束応力は小さくなった。応力解析においても、BFS を使用したコンクリートは天然骨材を使用したものに比べひび割れ抵抗性が高い結果となった。また、BFS0 コンクリートに比べ屋外-1800 コンクリートの拘束応力が小さい傾向を示す。これは、BFS0 コンクリートに比べ、屋外-1800 コンクリートの収縮ひずみが小さいことが起因したと考える。本研究で得られた、強度、収縮、クリープ試験の結果から屋外環境で長期保管した BFS を使用したコンクリートでも、保管期間の短い BFS を使用したものと同等のひび割れ抵抗性があると考えられる。

5. まとめ

温度変化のある屋外環境で積算温度 $1800^{\circ}\text{D} \cdot \text{D}$ まで保管した BFS を用いたコンクリートで実大壁試験および応力解析を行った結果、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) 天然骨材を使用したコンクリートに比べ、屋外保管した高炉スラグ細骨材を使用したものは、強度特性は同等であり、収縮低減効果が期待できる。
- (2) 屋外保管した高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートを使用しても、実大壁にひび割れは発生せず、ひび割れ抑制効果が期待できる。
- (3) 応力解析の結果、屋外保管した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いことが推測される。

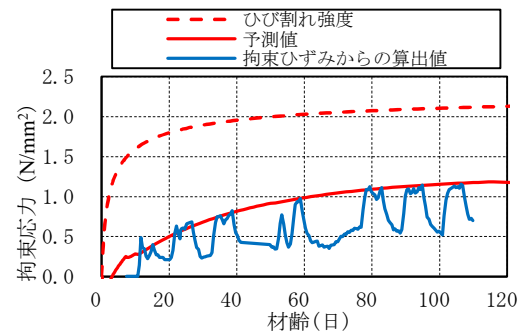


図-13 屋外-1800 の拘束応力算出結果

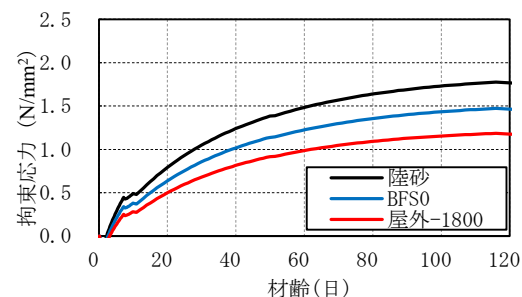


図-14 BFS の保管条件による拘束応力

以上の結果から、積算温度 $1800^{\circ}\text{D} \cdot \text{D}$ 程度までの保管であれば、高炉スラグ細骨材は天然骨材と同様にコンクリート用骨材として使用できることを実験的かつ応力解析により示した。

謝辞

本研究の遂行にあたり、JSPS 科研費(課題番号 22K04399)の助成を得ました。また、鐵鋼スラグ協会のご協力を得ました。関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 金子宝以ほか：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文集，Vol.37，No.1，pp.415-420，2015
- 2) 奥石悠介ほか：高炉スラグ細骨材の保管環境条件が硬化コンクリートの諸性状に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.319-324，2024
- 3) 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委員会報告書，2010.9
- 4) 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，2013.2
- 5) 原品武ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.329-334，2020
- 6) 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，2007，10