

論文 高炉スラグと消石灰を結合材に用いた低炭素吹付けコンクリートの基礎物性

水野博貴*1, 岩崎昌浩*2, 樋口隆行*3, 荒木昭俊*4

要旨: 高炉スラグ微粉末と消石灰からなる結合材に、カルシウムアルミネート系急結剤を加えて基礎物性と吹付け性能を評価した。高炉スラグ微粉末と消石灰の粉末度と量を最適化し、高炉スラグ微粉末の割合を 50～75%とする事で、安定した急結性と圧縮強度を両立する環境配慮型吹付けコンクリートを調製できる。粉末度の大きい高炉スラグ微粉末を用いる事で、圧縮強度の発現性が向上する。一方で高炉スラグ微粉末と消石灰からなるベースコンクリートはスランプロスが大きく、普通セメントを用いた配合に比べて材齢 1 日までの初期強度発現性に優れるが、長期強度は低めとなるため、水結合材比を低くして長期強度を確保する必要がある。

キーワード: 低炭素, 吹付け, 高炉スラグ, 消石灰, 急結剤

1. はじめに

脱炭素に向けたセメント系材料およびコンクリートの技術開発は重要性を増している。材料、製造、施工、供用を含め、様々な視点から検討が行われており、その1つとして高炉スラグ微粉末（以下、GGBS）の活用が低炭素化に有効である^{2,4)}。セメントに対する置換率を高める事で材料起因のCO₂排出量を削減でき、それに加えてアルカリ骨材反応抑制効果、遮塩性能の向上、六価クロム溶出対策、水密性の向上やマスコンクリートの水和熱抑制対策にもなり得る。また、更なる低炭素化を目的として、GGBSを主たる結合材とし水ガラスや消石灰で刺激して硬化させるセメントを使用しない環境配慮型コンクリートの開発も行われている⁵⁻⁷⁾。

山岳トンネルの建設で使用される吹付けコンクリートにおいてもGGBSが用いられ、酸性硫酸塩土壌や、放射性廃棄物貯蔵施設にも適用された事例がある⁸⁻¹²⁾。一方で、GGBSを用いた場合、低温環境下において急結性が低下する事が報告¹³⁻¹⁵⁾されている。安全性が最優先されるトンネル現場においては地山や湧水の状況、様々な気温に対応できる様、安全性の確保に必要な急結性や圧縮強度が求められる。今後脱炭素に向けて、GGBSを積極的に活用した吹付けコンクリートを実現するためには、GGBSの物性や刺激剤を検討する必要がある。

そこで本研究では、吹付けコンクリートの更なる低炭素化を目的にセメントを使用せず、GGBSを主たる結合材とした吹付けコンクリートの開発に着手した。吹付けコンクリートの要求性能である急結性や圧縮強度を確保するためにGGBSの刺激剤として消石灰、カルシウムアルミネート系急結剤を用いた。本検討では呼び強度

18N/mm²の一般吹付けで使用可能な吹付けコンクリートを開発目標と定め、GGBSの粉末度や消石灰との配合量に着目して基礎物性や施工性の検討を行った。

2. 試験方法

2.1 使用材料および配合

(1) 使用材料

使用材料を表-1に示す。GGBSはJIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」に適合したブレン比表面積が約4500cm²/gと6000cm²/gの石こう添加品を用いた。カルシウム供給源としてJIS R 9001「工業用石灰、消石灰特号」に適合する消石灰(CHA)を選定した。CHAは、硬化過程や硬化後に悪影響が懸念される塩化物イオンなどの余分な陰イオンを与えずにカルシウムを供給でき、産業副産物としても多く発生しており、CaO/SiO₂比が高く十分な量のC-S-Hを生成させる目的で選定した。本研究では、特号消石灰として市販品を用いた。減水剤(Ad)にはポリエチレングリコール系高分子化合物系を、急結剤には、カルシウムアルミネート系急結剤(CA)を結合材に対して外割で9%使用した。

(2) モルタル配合

表-2にモルタル配合を示す。GGBSとCHAの配合割合を変化させ、吹付けコンクリートに必要な短時間の凝結特性、強度発現性を加味した最適なバランスを検討した。

(3) コンクリート配合

表-3にコンクリート配合を示す。前述したモルタル試験を元に、呼び強度18N/mm²相当のコンクリートとなるよう、環境配慮型コンクリートの結合材の構成割合は

*1 デンカ株式会社 特殊混和材部 技術・マーケティンググループ (正会員)

*2 デンカ株式会社 青海インフラ技術研究部

*3 デンカ株式会社 青海インフラ技術研究部 グループリーダー 工博 (正会員)

*4 デンカ株式会社 青海インフラ技術研究部 部長

表-1 使用材料

記号	材料種類	密度(g/cm ³)	粉末度	備考
GGBS4000	JIS A 6206 コンクリート用高炉スラグ微粉末	2.89	4370 cm ² /g	SO ₃ :2.00%
GGBS6000	JIS A 6206 コンクリート用高炉スラグ微粉末	2.87	6030cm ² /g	SO ₃ :3.64%
CHa	JIS R 9001 工業用石灰, 消石灰特号	2.24	6320cm ² /g	CaO:74.8%
OPC	普通ポルトランドセメント	3.15	—	—
CA	カルシウムアルミネート系急結剤	2.65	—	—
S	新潟県糸魚川産姫川水系川砂	2.61	—	—
G	新潟県糸魚川産 6 号砕石	2.66	—	—
Ad	ポリエチレングリコール系高分子化合物	1.04	—	—

表-2 モルタル配合

配合種類	W/(GGBS+CHa) (%)	C/S	GGBS (g)	CHa (g)	S (g)	W (g)	Ad (g)	CA (g)
GGBS/CHa 100/0	50	1/3	700	—	2100	350	7.0	63.0
GGBS/CHa 75/25			525	175			7.0	
GGBS/CHa 50/50			350	350			10.5	
GGBS/CHa 25/75			175	525			17.5	

表-3 吹付けコンクリート配合

配合種類	SL (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							CA
				W	OPC	GGBS	CHa	S	G	Ad	
GGBS-CHa	18	50	60	200	—	200	200	955	649	6.0	C×9%
一般配合	15	60	60	216	360	—	—	1081	681	—	C×9%

GGBS : CHa を 50 : 50, 水結合材比は 50% とした。比較は普通セメントを用いた一般配合とし, 水結合材比は 60% とした。

2.2 試験方法

(1) 凝結試験

結合材, 砂, 水, および減水剤をモルタルミキサーにて混練してベースモルタルを作製した。ベースモルタルのフロー値は GGBS の配合量によって異なり, 試験結果への影響も考えられるため, いずれの配合においても 240 ± 10mm になるよう減水剤で調整した。フロー値を調整したベースモルタルに急結剤を添加してプロクター貫入抵抗試験を実施した。凝結試験の測定は吹付けコンクリート (モルタル) 用急結剤品質規格 (JSCE-D 102-2018) 付属書 3「急結剤を添加したモルタルの貫入抵抗による凝結時間測定方法」に準拠しており, モルタルの作製, 凝結測定は 20℃ 環境下で行った。

(2) 圧縮強度試験

JIS R 5201 に準じて各材齢にて測定した。20℃ 環境下の試験では, モルタルの型枠への詰め込みを容易にするため, 10℃ に冷却した材料を練り混ぜ, 成形後に 20℃ 環

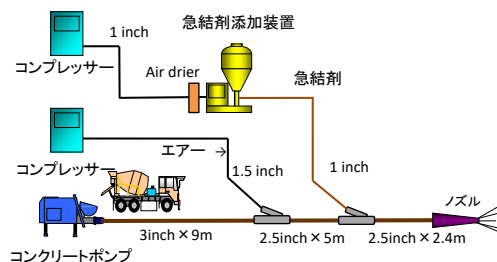


図-1 吹付システムおよび急結剤添加方法

境へ移動した。10℃ 環境下の試験ではそのまま 10℃ で養生した。試験体は 24 時間で脱型し, 以後, 各材齢まで 10℃, 20℃ でそれぞれ水中養生した。

(3) セメントペーストによる水和試験

急結性や強度発現性を考察するため水和解析を実施した。水結合材比や急結剤の添加率はモルタル試験と同じとし, モルタルから砂を除いたセメントペーストを試料に用いた。各材齢でアセトンを用いて水和を停止し, 粉末 X 線回折 (XRD) による定性分析によって水和生成物を同定した。

(4) 吹付け性状評価

表-3 にコンクリートの配合を示す。GGBS は

GGBS6000 を用いた。図-1 に示す吹付コンクリートシステムを用いて、コンクリートの圧送性、急結剤との混合性、付着性、施工速度、強度発現性を評価した。コンクリートの吐出量は $10\text{m}^3/\text{h}$ とし、急結剤は圧縮空気を用いて定量供給し、吹付ノズル先端でコンクリートと混合した。吹付けコンクリートの強度は、JSCE-G561-1999「引抜き方法による吹付けコンクリートの初期強度試験方法（プルアウト試験）」に準じて実施し、測定材齢 3 時間、24 時間で測定した。また、材齢 7、28 日は JIS A 1107 に準拠し、直径 50 mm、高さ 100 mm の円柱供試体を木製型枠に吹き付けたコンクリートからコア抜き後、 20°C の水中養生を行った。供試体の載荷面は研磨機による研磨仕上げを実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 高炉スラグと消石灰の配合割合の影響

急結剤の添加量を 9% に固定し、GGBS6000 と CHa の配合比率を変えて、モルタルの急結性や強度発現性に及ぼす影響を検討した。図-2 に凝結試験の結果を示す。いずれの配合も時間経過に貫入抵抗値が増加する。GGBS の配合割合に着目すると、GGBS100% が最も早く貫入抵抗値が増加し、約 1 分で凝結の終結時間(貫入抵抗値 $28\text{N}/\text{mm}^2$)を迎えた。次いで GGBS75% が約 5 分、次に 50%、25% が約 8 分で終結を迎えた。

図-3 に GGBS と CHa の各配合比において、急結剤添加 10 分後に測定したペーストの XRD 測定結果を示す。GGBS の配合量に従って Ettringite($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$)のピーク強度が強くなり生成量が多くなる結果となった。Ettringite の水/固相質量比は 0.85 で、水和物中に多くの水を結合しており、Ettringite の生成が急結性に大きく寄与していると考えられる。本検討では、石こうを添加した GGBS を使用しているため、GGBS 比率が高いほど Ettringite の生成量が増加し良好な急結性を示したと考えられるが、GGBS の反応率なども加味した詳細な検討が今後必要である。

図-4 に強度発現性の結果を示す。GGBS 配合量に着目すると GGBS の配合量が 50%、75% は材齢に伴って強度が増進し、28 日ではそれぞれ約 $30\text{N}/\text{mm}^2$ の圧縮強度を示した。一方、GGBS の配合量が 25% や 100% では材齢 1 日強度が小さく、材齢経過に伴う強度増進も小さい結果となった。GGBS は単に水を混ぜただけでは硬化しないが、CHa のような刺激剤と一緒に存在すると難溶性の水和物を生成して硬化する潜在水硬性を有する¹⁶⁾。このため CHa と GGBS が適度に共存する GGBS50% や 75% では強度発現性が良好となり、CHa を含まない GGBS100% では潜在水硬性が発現せず強度が小さくなったと考えられる。一方、CHa はすでに水和物であり、

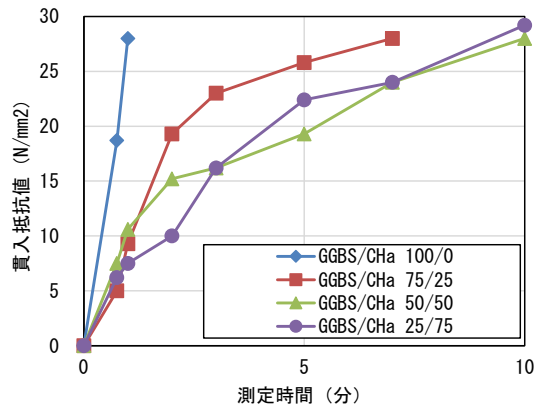


図-2 高炉スラグ配合率と凝結性

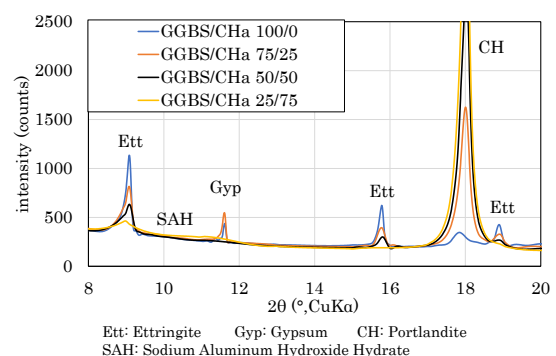


図-3 急結剤添加 10 分後の XRD 測定結果

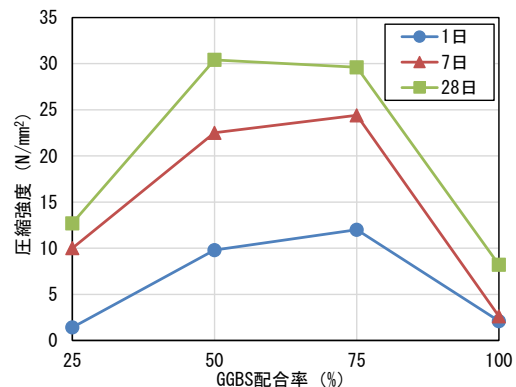


図-4 高炉スラグ配合率と圧縮強度

OPC や GGBS のように水和反応によって結合水量の更なる増加が期待できない。GGBS25% の配合は CHa を 75% も含み、強度に寄与する GGBS が少ないことから、長期強度が低くなったと推察される。

3.2 高炉スラグ微粉末の粉末度の影響

GGBS の粉末度が急結性や強度発現性におよぼす影響を検討した。GGBS と CHa の配合比率は強度発現性が良好であった、50 : 50 および 75 : 25 から試験体作製に必要な可使時間が十分確保できる 50 : 50 に固定した。

凝結試験の結果を図-5 に、強度発現性の結果を図-6 に示す。急結性は GGBS の粉末度によらず時間経過にと

もなって貫入抵抗値が増加した。粉末度別には GGBS4000 が GGBS6000 と同等以上の急結性を示す結果となった。一方で強度発現性は GGBS4000 と比較すると GGBS6000 が各材齢で高い強度を示した。

一般的に粉末度が高くなるほど反応性が高くなる¹⁵⁾ため、急結性、圧縮強度ともに粉末度 6000 が 4000 を上回ることが考えられるが、本検討では急結性と圧縮強度で異なる傾向を示した。急結性、圧縮強度には粉末度のほかに化学成分、SO₃ 量や水和生成物なども大きく影響すると考えられる。今後は使用する GGBS や CHa においてもこれらを加味して物性確認をする必要がある。

3.3 低温性状

GGBS は温度依存性が大きく、OPC と GGBS を用いたコンクリートでは低温時の急結性や強度発現性が低下する^{14), 15), 17), 18)}。そこで 10℃環境での急結性および強度発現性を評価し、20℃環境と比較を行った。GGBS には GGBS6000 を、消石灰には CHa を用いた。

図-7 に急結性の結果を示す。10℃では急結剤添加後に貫入抵抗値が増加し、約 8 分で終結した。20℃と対比すると、約 5 分までの急結性はやや低下するが、終結時間は約 15 分で 20℃とほぼ同等であった。セメント鉱物系の急結剤による急結作用や強度発現を考える上で、結合材の水和反応は重要である事が示されている⁸⁻¹¹⁾。OPC 系や GGBS-CHa 系では、急結剤は OPC を構成するユーライト(以下 C₃S)の反応にも作用し、C₃S の反応を促進している。C₃S の水和は Ca(OH)₂ を生成し GGBS の潜在水硬性にも寄与するが、一方で温度の影響も受ける。それに対して、本検討の GGBS-CHa 系では、C₃S の反応によらず Ca(OH)₂ が存在している特徴があり、GGBS の潜在水硬性や、カルシウムアルミネートと硫酸塩との反応による Ettringite の生成が安定化し、低温環境での急結性確保に寄与した可能性がある。今後、水和解析によって詳細な検討が必要である。

図-8 に強度発現性の結果を示す。10℃環境の圧縮強度は 20℃環境と比較すると低くなるものの、材齢経過に伴って強度が増進し、目標強度の 18N/mm² を上回る結果となった。

3.4 吹付けコンクリートの物性

(1) ベースコンクリート

模擬トンネル坑内での吹付け試験を実施した。水結合材比を 60%にした普通コンクリートを比較とした。コンクリートの練り混ぜ量は 2.0m³ とした。表-5 にコンクリートのフレッシュ性状および温度を示す。GGBS6000 と CHa を用いた試験配合に着目すると、生コンプラント出荷時 18.0cm に対して、練り混ぜから約 20 分後に現場へ到着した時点で 4.5cm となりスランプロスが確認された。GGBS の刺激剤である CHa を練り混ぜ時点で多量に

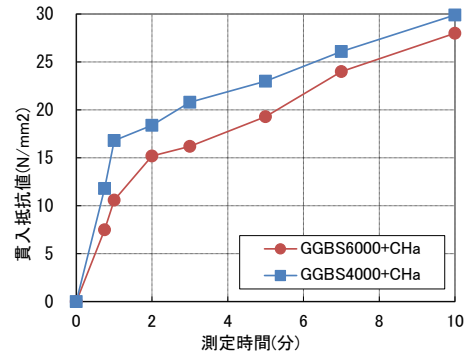


図-5 高炉スラグの粉末度と凝結性

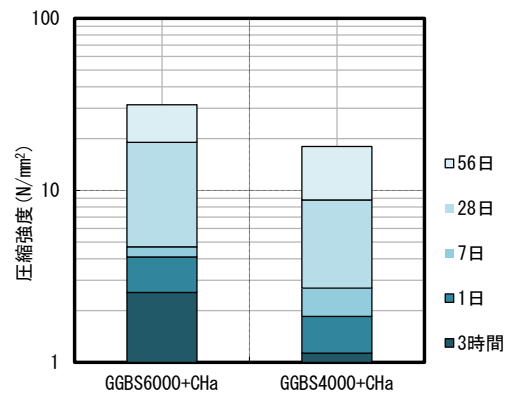


図-6 高炉スラグの粉末度と圧縮強度

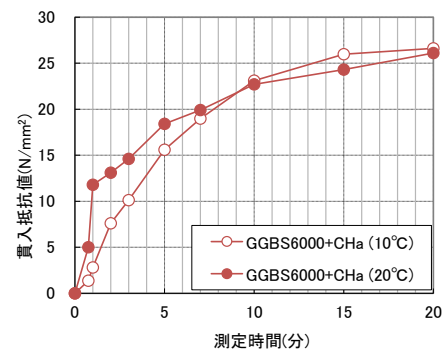


図-7 低温時の急結性

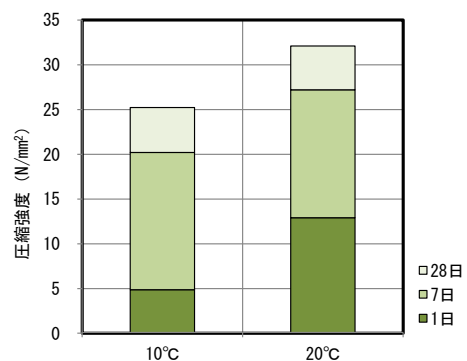


図-8 低温時の強度発現性

表-5 吹付けベースコンクリート物性

配合	出荷時	現着時	調整後	空気量	CT
	スランプ	スランプ	スランプ		
	cm	cm	cm	%	℃
GGBS-CHa	18.0	4.5	15.0	3.1	21.0
一般配合	17.0	17.0	-	2.3	19.0

含むためと考えられるが、今後更なる解析を行って対策を講じる必要がある。本検討では、現場で練り混ぜ水量を 20 kg/m³ 追加して混合し、普通セメントを用いた一般配合と同等のスランプ 15.0cm に調整して吹付け試験を実施した。

(2) 吹付性状

写真-1 および写真-2 に吹付け状況を示す。GGBS と CHa を用いた配合は、トンネル内面やコアリング用型枠への付着が良く、吹付け後の硬化は一般配合に比べてやや緩やかではあるが、ダレや剥離は見られなかった。コンクリート吐出速度も 10.6m³/h で、一般配合 10.3m³/h と同程度の速度で吹付け施工できる事を確認した。

図-9 にプルアウト試験で実施した短時間強度の結果を示す。GGBS と CHa を用いた試験配合は、材齢 3 時間では一般配合の約 3 倍、材齢 1 日でも一般配合よりも高い値を示し、良好な初期強度発現性を示した。

図-10 に吹付けコンクリートからコアリングした円柱供試体の強度を示す。材齢 7 日における圧縮強度は約 15N/mm²、材齢 28 日では 20N/mm² を超え、目標強度を確保した。しかし、多くのトンネル現場で使用されている OPC を用いた一般配合では、材齢 7 日で 24N/mm²、材齢 28 日で 30N/mm² が得られている。今後、減水剤の最適化によって単位水量の低減を図る事で長期強度の底上げを図る事や、コンクリートの長期耐久性を詳細に調査する必要があると考えられる。

4. まとめ

吹付けコンクリートの低炭素化を目的に、セメントを使用しない GGBS と消石灰からなる結合材に、カルシウムアルミネート系急結剤を用いて基礎物性を検討し、次の結果が得られた。

- (1) 20℃環境において、GGBS と消石灰の割合を最適化する事で、急結性と強度発現性を両立するセメントを使用しない環境配慮型吹付けコンクリートを調製できる。
- (2) GGBS の割合が高いほど急結性に優れ、50~75%の配合割合で安定した圧縮強度が得られる。
- (3) 粉末度の大きい GGBS を用いる事で、圧縮強度の発



写真-1 試験体採取状況



写真-2 天端付近の状況

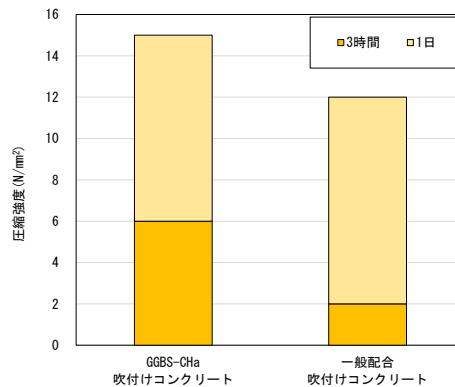


図-9 吹付けコンクリートの強度発現性 (プルアウト)

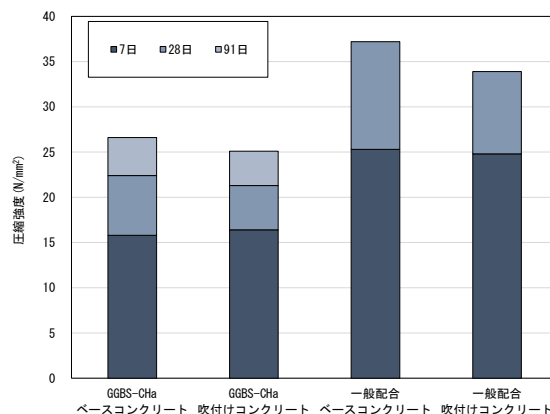


図-10 コンクリートの強度発現性 (コア圧縮)

現性が向上する。

(4) GGBS と消石灰からなるベースコンクリートはスランプロスが大きい。

(5) 普通セメントを用いた配合に比べて材齢 1 日までの初期強度発現性に優れるが、長期強度は低めとなるため、水結合材比を低くして長期強度を確保する必要がある。

参考文献

- 1) 坂井悦郎：脱炭素に向けたセメント系材料の技術開発と研究の継続，*Journal of the society of inorganic materials Japan*, 29, 301-303, 2022
- 2) 野畑健志：高炉セメントの CO₂ 削減効果について，*コンクリート工学*, Vol.48, No.9, pp.58-61, 2010.
- 3) 和地正浩，米澤敏男，三井健郎，井上和政：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの性質，*コンクリート工学年次論文集*, Vol.32, No.1, pp.485-490, 2010
- 4) 米澤敏夫ほか：エネルギー・CO₂ ミニマム (ECM) セメント・コンクリートシステム，*コンクリート工学*, Vol.48, No.9, pp.69-73, 2010
- 5) 上原元樹，東原実，横川勝則：ジオポリマー法による環境負荷低減 PC まくら木の作成，*土木学会第 64 回年次学術講演会公演概要集*, V-369, pp.735-736, 2009
- 6) 宮原茂禎，荻野正貴，岡本礼子，丸屋剛：高炉スラグ微粉末とカルシウム系刺激材を使用した環境配慮型コンクリートの水和反応と組織形成，*コンクリート工学年次論文集*, Vol.35, No.1, pp.1969-1974, 2013
- 7) 吉田行，田口史雄，山中重泰，佐藤秀人：高炉セメントを用いた吹付けコンクリートの適用性，*日本コンクリート工学協会論文集*, Vol.JCI-C65 Page.309-314, 2005
- 8) K. Nakagawa et al., *RILEM Symp.*, 5, 1990
- 9) 中川晃次，平野健吉：急結剤・セメント・コンクリート，*No.427*, 95, 1982

10) 坂井悦郎：“新コンクリート用混和材”，*シーエムシー* 69, 1988

11) 平野健吉，寺島勲：急結混和材の材料設計と商品開発，*Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan* 12, 352-362, 2005

12) 近藤光明，富沢年道，永淵強近，田孝夫：急結剤を添加した場合の高炉セメントの凝結，硬化性状，第 6 回，*コンクリート工学年次講演会論文集*, pp.141-144, 1984.

13) 岩崎昌浩ほか：低アルカリ性瞬結吹付けコンクリートの坑道における吹付け試験(その 2 配合試験，試験練り，実機ミキサ試験練り試験結果)，*土木学会年次学術講演会講演概要集*, Vol.69th VI-166, 2014

14) 山本賢司，盛岡実，寺村悟，坂井悦郎：環境負荷の小さい吹付けコンクリートの配合設計，*セメント・コンクリート論文集*, No.56 Page.148-155, 2002

15) 中島康宏，石田積，高橋光男，安藤哲也：高炉スラグ粉末が急結性に及ぼす影響，*コンクリート工学年次論文集*, Vol.25 No.1 Page.173-178, 2003

16) Salvador Renan P. : On the use of blast-furnace slag in sprayed concrete applications, *Construction and Building Materials*, Vol.218 Page.543-555, 2019

17) セメント協会：エンサイクロペディア，pp.94-103, 1996.7

18) 坂井悦郎，相川豊，西村幸恵，二戸信和：高炉スラグ高含有セメントの水和に及ぼす養生温度の影響，*Cement Science and Concrete Technology*, Vol.70, pp.119-126, 2016

19) 大橋 英紀，土師康一，田中徹，椎名 貴快：高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの低温環境下でのフレッシュ性状と強度に関する実験的検討，*コンクリート工学年次論文集*, Vol.40, No.1, pp.159-164, 2018