低収縮高炉セメントコンクリートに関する研究

STUDY ON LOW SHRINKAGE CONCRETE USING BLAST-FURNACE SLAG FINE POWDER BLENDED CEMENT

百瀬晴基 — * 1 石関浩輔 — * 2
関田徹志 — * 3 今本啓一 — * 4
清原千鶴 — * 4

Haruki MOMOSE — * 1 Kohsuke ISHIZEKI — * 2
Tetsushi KANDA — * 3 Kei-ichi IMAMOTO — * 4
Chizuru KIYOHARA — * 4

キーワード：
コンクリート, 高炉スラグ微粉末, 高炉セメント, ひび割れ, 収縮

Keywords:
Concrete, Ground granulated blast-furnace slag, Blast-furnace slag cement, Crack, Shrinkage

The aim of this study is to experimentally investigate shrinkage properties of blast-furnace slag blended cement concrete (BLS-concrete, hereafter). For this purpose, restraint cracking tests for concrete were conducted at three ambient temperatures, 10 °C, 20 °C and 30 °C. The experiments showed that shrinkage cracking resistance of BLS-concrete was better than normal concrete regardless of ambient temperatures, and BLS-concrete had the same concrete strength development as normal concrete.

1. はじめに

高炉セメントコンクリートは、環境負荷低減に大きく寄与することから、RC 造建築物への適用が期待されているが、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート(以下、普通コンクリートと称する)に比べ、特に高温時に収縮ひび割れ抵抗性が低下する現象が認められ^{1),2)}、その原因として、同コンクリートの自己収縮が高温時に増大することなどが挙げられている^{4),5)}。

本研究では、高炉セメントコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性の向上を目指し、低収縮高炉セメントコンクリート(以下、BLS コンクリート)を検討した。高炉セメントコンクリートは、一般的に高炉セメント B 種コンクリート(以下、高炉 B 種コンクリートと称する)が用いられているが、BLS コンクリートは高炉スラグ微粉末の影響を低減するため、高炉スラグ微粉末量を結合材の 5~30%である高炉セメント A 種相当とし、更に低収縮性を付与するため石膏と炭酸カルシウムを添加したコンクリートである。

本論では、BLS コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性を確認することを目的に、30°C, 20°C, 10°Cにおけるひび割れ抵抗性実験を行った。

2. ひび割れ抵抗性実験

2.1 実験水準と試験概要

実験要因と水準の組み合わせを表 1 に示す。シリーズ I では、養生温度が BLS コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に与える影響を確認することを目的に、養生温度 30°C, 20°C, 10°Cにおいて実験を行うこととし、比較対象として一般的な石膏量で炭酸カルシウムを添加しない高炉セメント A 種コンクリート(以下、高炉 A 種コン

クリートと称する)についても実験を行った。これらは、粗骨材に硬質砂岩を使用した。

シリーズ II では、文献 2)において乾燥収縮率の低減対策として挙げられている石灰岩を用いた場合の BLS コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性を把握することを目的として、粗骨材に石灰岩を使用した BLS コンクリート、高炉 B 種コンクリート、普通コンクリートの 3 種について実験を行った。なお、比較対象として、過去に実施した高炉 B 種コンクリートおよび普通コンクリートの実験結果も併記した⁴⁾。

ひび割れ抵抗性実験として、図 1 に示す拘束ひび割れ試験、自由収縮試験、圧縮強度試験、静弾性係数試験、割裂引張強度試験を行った。

2.2 使用材料および調合

使用材料一覧を表 2 に、調合表一覧を表 3 に示す。BLS では、普通ポルトランドセメントと、石膏と炭酸カルシウムを添加した高炉スラグ系混和材を用い、高炉スラグ系混和材は結合材量(B:セメント量+混和材量)に対して、高炉スラグ量B×20.0%, 石膏量B×4.5%, 炭酸カルシウム量 B×3.0%となるように調整した。BA および BB では、普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を用いた。高炉スラグ微粉末量は、BA では B×20.0%, BB では B×42.0%とした。単位水量は 175kg/m³, 水結合材比は 50.0%, 細骨材率は 46.0%とした。

2.3 試験方法

コンクリートの練混ぜは、強制二軸ミキサーを用い、練上り温度は養生温度によらず 20°Cとした。練混ぜ手順は、結合材と骨材を 60 秒間空練り後、水および混和剤を投入し 60 秒間練混ぜ、かき落と

¹⁾ 鹿島建設技術研究所建築生産グループ 主任研究員・博士(工学)
(〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

²⁾ 鹿島建設技術研究所建築生産グループ

³⁾ 鹿島建設技術研究所建築生産グループ 主席研究員・グループ長・Ph.D.

⁴⁾ 東京理科大学

¹⁾ Senior Research Engineer, Building Construction and Materials Group, Kajima Technical Research Institute, Dr. Eng.

²⁾ Research Engineer, Building Construction and Materials Group, Kajima Technical Research Institute

³⁾ Executive Research Engineer / General Manager, Building Construction and Materials Group, Kajima Technical Research Institute

⁴⁾ Tokyo Univ. of Science

し後さらに 60 秒間練混ぜることとした。コンクリートのフレッシュ性状の目標値はスランプ 18±2.5cm, 空気量 4.5±1.5%とし、フレッシュ試験によりこれらの目標値を満足したコンクリートを実験に用いた。

1水準につきφ100×200mmの試験体を27体作製した。21体は、材齢7日までは各温度条件の封かん養生とし、材齢7日以降は各温度条件の気乾養生とした。材齢3, 7, 28, 91日で3体ずつ、圧縮強度試験(JIS A 1108)および静弾性係数試験(JIS A 1149)を行った。また、材齢7, 28, 91日で3体ずつ割裂引張強度試験(JIS A 1113)を行った。6体は、標準養生とし、材齢28日で、圧縮強度試験、静弾性係数試験および割裂引張強度試験を行った。

拘束ひび割れ試験は、文献(6)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に準拠し、図1に示す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けた。拘束ひび割れ試験体は、

打込み直後から封かん養生とし、材齢7日の時点で脱型しR.H.60%の気乾養生とした。試験体の底面および打込み面にアルミテープを貼付し上下面を封かん養生とすることで2面気乾養生とした。自由収縮試験体として、試験体断面の中心部に埋め込みひずみゲージを設置した100mm×100mm×400mmの試験体を1水準につき2体作製した。自由収縮試験体の養生方法は拘束ひび割れ試験と同じとした。

2.4 実験結果

(1) 圧縮強度、静弾性係数および割裂引張強度試験結果

力学特性試験結果を表4に、圧縮強度試験結果を図2に示す。図

図1 ひび割れ抵抗性試験体の詳細

表1 実験要因と水準の組合せ

実験シリーズ	NO	記号	コンクリート 種類	粗骨材	養生 温度
シリーズⅠ (養生温度)	1	BLS-S-30	BLS	硬質 砂岩	30℃
	2	BLS-S-20			20℃
	3	BLS-S-10			10℃
	4	BA-S-30	BA		30℃
シリーズⅡ (石灰岩)	5	BLS-L-30	BLS	石灰岩	30℃
	6	BB-L-30	BB		
	7	N-L-30	N		
比較対象 ³⁾	8	BB-S-30	BB	硬質 砂岩	30℃
	9	BB-S-20			20℃
	10	BB-S-10			10℃
	11	N-S-30	N		30℃
	12	N-S-20			20℃
	13	N-S-10			10℃

* 養生条件: 7日まで封かん養生, 7日以降気乾養生(R.H.60%)

表2 使用材料一覧

大項目	記号	小項目	密度
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.16g/cm ³
混和材	BFS1	高炉スラグ系混和材 ^{*1}	2.89g/cm ³
	BFS2	高炉スラグ微粉末 ^{*2}	2.89g/cm ³
細骨材 ^{*3}	S1	八王子産硬質砂岩	2.64g/cm ³ (表乾)
	S2	千葉県富津産山砂	2.61g/cm ³ (表乾)
粗骨材	G1	奥多摩産硬質砂岩砕石	2.65g/cm ³ (表乾)
	G2	秩父郡横瀬産石灰石砕石	2.70g/cm ³ (表乾)
混和剤	AD	高機能AE減水剤 (リグニン・ポリカルボン酸複合体)	—

*1: BLSに使用する混和材, SO₃量・CaCO₃量を調整

*2: BA, BBに使用する混和材

*3: ブレンド(砕砂: 山砂=8:2)

表3 調査表一覧

実験シリーズ	NO	記号	結合材の組成の割合(%)			W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
			BFS	SO ₃	CaCO ₃			W	C	BFS1	BFS2	S1	S2	G1	G2
シリーズⅠ (環境温度)	1	BLS-S-30	20.0	4.5	3.0	50.0	46.0	175	265	85	—	648	162	954	—
	2	BLS-S-20	20.0	4.5	3.0	50.0	46.0	175	265	85	—	648	162	954	—
	3	BLS-S-10	20.0	4.5	3.0	50.0	46.0	175	265	85	—	648	162	954	—
	4	BA-S-30	20.0	1.8	—	50.0	46.0	175	280	—	70	648	162	955	—
シリーズⅡ (石灰岩)	5	BLS-L-30	20.0	4.5	3.0	50.0	46.0	175	265	85	—	648	162	—	972
	6	BB-L-30	42.0	1.3	—	50.0	46.0	175	203	—	147	646	161	—	951
	7	N-L-30	—	2.2	—	50.0	46.0	175	350	—	—	646	161	—	958

表4 力学特性試験結果

実験シリーズ	NO	記号	圧縮強度(N/mm ²)					静弾性係数(kN/mm ²)					割裂強度(N/mm ²)				
			ひび割れ試験同一養生				標準養生	ひび割れ試験同一養生				標準養生	ひび割れ試験同一養生				標準養生
			3日	7日	28日	91日		3日	7日	28日	91日		7日	28日	91日	28日	
シリーズⅠ (環境温度)	1	BLS-S-30	26.7	36.9	48.2	48.9	50.8	25.7	28.4	31.5	31.6	32.1	3.42	3.90	3.70	4.02	
	2	BLS-S-20	23.2	32.4	44.9	49.1	49.6	24.3	27.9	32.4	32.3	33.5	2.94	3.72	3.97	4.03	
	3	BLS-S-10	12.0	26.5	43.8	48.2		18.9	25.2	29.7	30.0		2.43	3.66	3.90		
	4	BA-S-30	29.8	38.9	46.2	46.4	51.8	26.8	29.6	30.9	29.5	33.1	2.98	3.96	3.54	3.97	
シリーズⅡ (石灰岩)	5	BLS-L-30	30.8	38.4	46.3	47.3	48.5	30.7	32.3	34.4	33.5	34.7	3.20	3.32	3.76	3.96	
	6	BB-L-30	28.9	38.4	45.1	43.4	46.5	30.1	33.2	31.8	29.5	37.2	2.75	3.64	3.52	4.29	
	7	N-L-30	30.3	38.2	42.8	42.2	44.9	31.7	34.0	32.8	31.4	34.8	3.36	3.45	3.25	4.23	
比較対象 ³⁾	8	BB-S-30	24.8	34.6	43.1	43.1	44.4	25.1	28.0	30.6	31.0	31.9	3.08	3.62	3.61	3.80	
	9	BB-S-20	19.5	28.0	39.1	41.2		23.7	25.1	28.2	28.2		2.74	3.19	3.23		
	10	BB-S-10	11.7	22.7	37.0	42.2		22.2	25.1	30.7	30.7		2.03	2.73	3.72		
	11	N-S-30	29.0	38.1	48.6	—	—	26.0	29.6	30.6	—	—	2.83	2.99	—	—	
	12	N-S-20	24.8	36.1	47.8	—		22.9	30.4	29.7	—		2.62	3.04	—		
	13	N-S-10	17.3	33.9	44.8	—		21.0	26.0	29.6	—		1.80	2.67	—		

2 から、BLS の圧縮強度は、養生温度によらず、普通コンクリートと同程度の結果であり、BA よりも高い結果となった。文献 7)では、高炉 B 種コンクリートに炭酸カルシウムを添加することにより、初期の圧縮強度や長期の曲げ強度が増加することが報告されており、強度が向上するメカニズムとして、セメント中の C_3A 、 C_4AF と $CaCO_3$ との反応によってカルシウムカーボアルミネート水和物が生成されることを挙げている。またたとえば文献 8)では、セメントペーストの水和反応解析により、石灰石微粉末を添加したセメントにおいて生成されたカーボアルミネート水和物の定量分析を行っている。これらのことから、BLS の強度が高い一因として、炭酸カルシウムの添加が考えられる。なお、BB の圧縮強度は、養生温度によらず全ての調合の中で最も低い結果となった。

静弾性係数試験結果を図 3 に、割裂引張強度試験結果を図 4 に示す。図 3 から、本実験ではコンクリート種類および養生温度が静弾性係数に与える顕著な影響は認められなかった。図 4 から、BLS の

割裂引張強度は、N よりも高く、BB の割裂引張強度が最も低い結果となった。

なお、図 2 より養生温度が高いほど圧縮強度も高い傾向が確認できるが、一方で図 3 より、養生温度と静弾性係数の間には明確な傾向は確認できなかった。従って本実験の範囲では、養生温度によって圧縮強度と静弾性係数の関係が変化している可能性がある。

(2) 自由収縮試験および拘束ひび割れ試験結果

自由ひずみ試験結果を図 5 に、拘束ひび割れ試験結果を図 6 に、自由収縮試験および拘束ひび割れ試験結果を表 5 に示す。

図 5(a)(b)および図 6(a)(b)から、BLS の自由ひずみは硬化初期に 70 μ 程度膨張しており、拘束ひび割れ試験においても硬化初期に 0.3N/mm² 程度の圧縮応力が生じる結果となった。この挙動は、ほかのコンクリートと異なる BLS コンクリートの特徴的な挙動であり、これは石膏の添加によるものであると考えられる。

図 6(b)から、BB-L-30②の拘束ひび割れ試験体は、明確な貫通ひ

図 2 圧縮強度試験結果

図 3 静弾性係数試験結果

図 4 割裂引張強度試験結果

図 5 自由ひずみ試験結果

図 6 拘束ひび割れ試験結果

び割れの挙動を示さず、材齢 25 日程度を境に緩やかに収縮拘束応力が低減する結果となった。微細なひび割れや計測不良などが原因として考えられるが、確かな原因を特定できなかったため、BB-L-30 については、BB-L-30②の結果を除外し、BB-L-30①の結果により評価することとした。

図 6 から、全ての水準の中で、材齢 91 日までにひび割れが生じなかったのは石灰岩を使用した BLS-L-30 および N-L-30 の 2 水準

であり、これらのひび割れ抵抗性が最も高いことが確認された。

(3) シリーズ I 養生温度の影響

養生温度が自由ひずみに与える影響を図 7 に示す。図 7 から、養生温度が乾燥開始時の自由ひずみに与える影響は、N では顕著な差がないのに対し、BB および BLS では養生温度が高いほど自由ひずみが収縮側に大きい結果となった。乾燥開始時までの自由ひずみは自己収縮に起因するものであり、高炉セメントコンクリートにおい

表 5 自由収縮試験および拘束ひび割れ試験結果

実験シリーズ	NO	記号	自由収縮試験結果		拘束ひび割れ試験結果								
			自由ひずみ (μ)		乾燥開始時の収縮拘束応力 (N/mm ²)			ひび割れ時の収縮拘束応力 (N/mm ²)			ひび割れ材齢 (日)		
			乾燥開始時	材齢91日	①	②	平均	①	②	平均	①	②	平均
シリーズ I (環境温度)	1	BLS-S-30	-30	-487	0.41	0.38	0.40	2.72	2.75	2.74	39.8	53.6	46.7
	2	BLS-S-20	-25	-518	0.30	0.20	0.25	3.16	3.39	3.28	46.5	71.1	58.8
	3	BLS-S-10	40	-512	-0.08	-0.07	-0.08	3.10	3.32	3.21	54.6	62.4	58.5
	4	BA-S-30	-112	-578	0.74	0.59	0.67	2.81	1.86	2.34	37.6	32.7	35.1
シリーズ II (石灰岩)	5	BLS-L-30	8	-315	0.14	0.12	0.13	2.34	2.30	2.32	91.0*2	91.0*2	91.0*2
	6	BB-L-30	-121	-501	0.75	*1	0.75	2.34	*1	2.34	46.9	*1	46.9
	7	N-L-30	-51	-411	0.37	0.27	0.32	2.35	2.29	2.26	91.0*2	91.0*2	91.0*2
比較対象 ³⁾	8	BB-S-30	-130	-656	0.65	0.68	0.67	1.79	1.91	1.85	17.4	17.0	17.2
	9	BB-S-20	-96	-575	0.66	0.76	0.71	1.59	2.53	2.06	16.3	36.3	26.3
	10	BB-S-10	-50	-488	0.20	0.18	0.19	2.23	2.48	2.36	28.1	43.1	35.6
	11	N-S-30	-64	-659	0.32	0.39	0.36	2.66	2.51	2.59	40.8	32.8	36.8
	12	N-S-20	-53	-684	0.34	0.37	0.36	3.00	2.99	3.00	42.8	41.2	42.0
	13	N-S-10	-46	-669	0.32	0.33	0.33	3.06	2.32	2.69	56.1	30.9	43.5

*1: BB-L-30の拘束ひび割れ試験について、1体は測定不良と判断
*2: 91日間の試験期間でひび割れ無し

図 7 養生温度が自由ひずみに与える影響

図 8 養生温度が乾燥開始時応力に与える影響

図 9 養生温度がひび割れ材齢に与える影響

図 10 骨材種類が自由ひずみに与える影響

図 11 骨材種類がひび割れ材齢に与える影響

図 12 収縮拘束応力とひび割れ強度の比

て、高温時に自己収縮が大きくなる知見と合致する結果である。一方で、養生温度が 91 日時点の自由ひずみに与える影響は、N および BLS では小さく、BB では養生温度が高いほど自由ひずみが大きい結果となった。また、BLS の自由ひずみは、養生温度によらず、N および BB に対して小さく、BLS の低収縮性が確認された。

養生温度が乾燥開始時の収縮拘束応力に与える影響を図 8 に示す。図 8 から、養生温度が乾燥開始時応力に与える影響は、N では顕著な差がないのに対し、BB および BLS では養生温度が高いほど収縮拘束応力が引張側に大きい結果であり、上述の乾燥開始時の自由ひずみと同様の傾向が確認された。また、BLS の乾燥開始時の収縮拘束応力は、30℃では N と同程度であり、20℃および 10℃では N に比べて小さいことが確認された。

養生温度がひび割れ材齢に与える影響を図 9 に示す。図 9 から、養生温度が高いほど早期にひび割れが生じており、特に BB においてその傾向は顕著であった。また、BLS のひび割れ材齢は、養生温度によらず、N および BB に対して長い結果となった。このことから、季節によらず、BLS コンクリートは普通コンクリートを超越する収縮ひび割れ抵抗性を有していることが確認された。さらに、BA のひび割れ材齢は、養生温度 30℃において BB に対して長く、N と同程度の結果となった。このことから、高炉 A 種コンクリートは高温時でも普通コンクリートとほぼ同等の収縮ひび割れ抵抗性を有していることが確認された。

(4) シリーズⅡ 石灰岩使用の影響

骨材種類が自由ひずみに与える影響を図 10 に示す。図 10 から、骨材種類が乾燥開始時の自由ひずみに与える影響は小さいことが確認された。また、石灰岩を用いた場合、91 日時点の自由ひずみは、コンクリートの種類によらず小さい傾向にあり、硬質砂岩を用いた場合の 65%程度であった。

骨材種類がひび割れ材齢に与える影響を図 11 に示す。図 11 から、コンクリートの種類によらず、石灰岩を使用することにより、ひび割れ材齢は長くなる結果となった。本試験条件では、石灰岩を用いた場合においても、BB では 45 日程度でひび割れが生じているのに対し、BLS および N は 91 日時点でひび割れが生じない結果となった。

91 日収縮拘束応力とひび割れ強度の比を図 12 に示す。91 日時点でひび割れが生じていない BLS-L-30 と N-L-30 の収縮ひび割れ抵抗性を比較するため、91 日収縮拘束応力とひび割れ強度の比を算定した。収縮ひび割れは、収縮拘束応力がひび割れ強度に達した時点で生じると考えることができ、ひび割れ強度は割裂引張強度の 0.7 倍程度であることが報告されている²⁾。拘束ひび割れ試験により得られた 91 日収縮拘束応力を 0.7×91 日割裂引張強度で除した値を収縮ひび割れ抵抗性の指標とした。即ち、この値は 1.0 の時点でひび割れが生じ、値が小さいほどひび割れ強度に対する応力が小さく、収縮ひび割れ抵抗性が高いことを意味する。図 12 から、91 日収縮拘束応力とひび割れ強度の比は、N-L-30 では 0.99 であるのに対し、BLS-L-30 は 0.88 であり、N よりも小さい値となった。以上のことから、乾燥収縮率の低減が図れる石灰岩を用いた場合においても、BLS コンクリートは普通コンクリートよりも高い収縮ひび割れ抵抗性を有していることが確認された。

3. おわりに

本論では、BLS コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性を確認することを目的に、30℃、20℃、10℃におけるひび割れ抵抗性実験を行った。検討の結果、下記の事項が明らかとなった。

- ① BLS の自由ひずみは硬化初期に 70μ程度膨張しており、拘束ひび割れ試験においても硬化初期に 0.3N/mm² 程度の圧縮応力が生じる結果となった。この挙動は、ほかのコンクリートと異なる BLS コンクリートの特徴的な挙動であり、これは石膏の添加によるものであると考えられる。
- ② BLS のひび割れ材齢は、養生温度によらず、N および BB に対して長いことから、季節によらず、BLS コンクリートは普通コンクリートを超越する収縮ひび割れ抵抗性を有していることが確認された。
- ③ BA のひび割れ材齢は、養生温度 30℃において BB に対して長く、N と同程度であることから、高炉 A 種コンクリートは高温時でも普通コンクリートとほぼ同等の収縮ひび割れ抵抗性を有していることが確認された。
- ④ 91 日収縮拘束応力とひび割れ強度の比は、N では 0.99 であるのに対し、BLS は 0.88 であり、N よりも小さい値となったことから、乾燥収縮率の低減が図れる石灰岩を用いた場合においても、BLS コンクリートは普通コンクリートよりも高い収縮ひび割れ抵抗性を有していることが確認された。

4. 謝辞

本実験の実施にあたり、株式会社デイ・シイより高炉スラグ系混和材のサンプルを提供いただいた。ここに記して感謝の意を表す。また、本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B)「高炉スラグ高含有セメントコンクリートの温度ひび割れ制御技術の確立」(課題番号：15H04084、研究代表者：関田徹志)の一環として実施した。

参考文献

- 1) 新谷彰，関田徹志，百瀬晴基，今本啓一，小川亜希子：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの拘束ひび割れ実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.947-948，2008
- 2) 関田徹志，百瀬晴基，依田和久，今本啓一，小川亜希子：高炉セメント B 種コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に及ぼす各種要因の影響および向上対策に関する実験検討，日本建築学会構造系論文集，Vol.79，No.695，pp.9-18，2014.1
- 3) 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)・同解説，2006
- 4) 百瀬晴基，関田徹志，石関浩輔，今本啓一：高炉セメント B 種コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に関する実験検討，鹿島技術研究所年報，Vol.61，pp.111-118，2013
- 5) 宮澤伸吾，佐藤良一，杉山淳司：高温履歴を受ける高炉セメントコンクリートの自己収縮予測式，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.465-470，2008
- 6) 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，pp.209-211，2010
- 7) 大原功，岩淵俊次，岳上広光：高炉セメントの諸特性におよぼす石灰石粉末の影響，セメント技術年報，No.32，pp.104-107，1978
- 8) 星野清一，平尾宙，山田一夫：X 線回折/リートベルト法によるセメントペーストの水和反応解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.41-46，2006

[2016 年 10 月 4 日原稿受理 2016 年 11 月 16 日採用決定]