

報告 早強性膨張材と高炉スラグ微粉末を併用したコンクリート製品の基礎的検討

金堀 雄伍*1・田中 孝一*2・山本 康雄*3・長塩 靖祐*4

要旨：早強性膨張材の高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート製品に対する適用性を室内試験及び実機試験による製品の製造にて検討した。その結果、早強性膨張材と高炉スラグ微粉末を併用した場合、早強性膨張材無と比較すると、フレッシュ性状は同程度、凝結時間は早くなること、圧縮強度は材齢 17 時間で 10%程度高くなること、膨張量も付与できていることを確認できた。また、実際に製造されたコンクリート製品は所要の品質を満足することを確認できた。本検討により、高炉スラグ微粉末を使用した配合への早強性膨張材の有用性が確認された。

キーワード：早強性膨張材, 高炉スラグ微粉末, 初期強度, 膨張ひずみ, コンクリート製品, 蒸気養生

1. はじめに

日本は人口減少や少子高齢化に伴う働き手の不足に直面しており建設業界においては特に顕著な傾向にある¹⁾。その為、少ない人手で従来と同量の仕事をこなすことが必要とされており、この課題を解決する方策として生産性の向上が挙げられている。国土交通省ではその向上に向けた取組の一つとしてプレキャストコンクリートの活用を提案・推進している²⁾。

他方、環境負荷低減の観点から、二酸化炭素の削減を目的にポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末に置き換えた検討が行われている³⁾。高炉スラグ微粉末を用いることにより、水密性の向上^{4), 5)}、アルカリ骨材反応の抑制^{6), 7)}、塩化物イオン浸透に対する抵抗性の付与⁸⁾などが期待できる。その為、現場打ちコンクリートだけでなく、最近ではコンクリート製品においても高炉スラグ微粉末を適用する事例が増えている。しかしながら、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、その置換率が大きくなった場合には、初期強度低下の恐れがある^{9), 10)}。コンクリート製品への適用を考えた場合には脱型が遅くなり製造サイクルに影響を及ぼすことが推察される。その対処法として蒸気養生の最高温度を高くする方法も考えられるが、脱型時の内外温度差が大きくなり温度ひび割れが懸念される。また、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは自己収縮や乾燥収縮が大きくなる傾向にあり、収縮ひび割れ抵抗性への課題¹¹⁾もある。

これら高炉スラグ微粉末をコンクリート製品へ適用することを考えた場合、前述した課題を解決する材料面からの方策の一つとして、早強性膨張材の使用が考えられる。早強性膨張材とは、適量使用することで強度の早期発現と適度な膨張をコンクリートに付与できるもので

ある。一般的に収縮補償などに使用される膨張材と比較すると、比表面積が大きく水和反応性が高いという特徴がある¹²⁾。例えば、早強性膨張材をコンクリート製品へ使用すると、初期強度発現性の向上や収縮ひび割れの抑制が可能になると考えられ、高炉スラグ微粉末をコンクリート製品へ適用する際の課題を解決できる可能性がある。ところが、早強性膨張材と高炉スラグ微粉末の併用に関する検討は一部報告があるものの¹³⁾、いまだに少ないのが現状である。

そこで本検討では、早強性膨張材と高炉スラグ微粉末を併用した際のコンクリート製品への適用性を把握するために、室内試験による基礎検討、その後、実機によるボックスカルバートの製造を行い、その適用性について評価を実施した。

2. 実験概要（室内試験）

2.1 使用材料・配合

表 - 1 に使用した材料を、表 - 2 に使用した早強性膨張材の品質を、表 - 3 に使用した高炉スラグ微粉末の品質

表 - 1 使用材料

材料名	記号	備考
普通セメント	C	密度 3.15g/cm ³
高炉スラグ微粉末	BF	密度 2.91g/cm ³
早強性膨張材	EX	密度 3.17g/cm ³
海砂	S	福岡県産, 表乾密度 2.59g/cm ³
碎石	G	福岡県産, 表乾密度 2.74g/cm ³
高性能減水剤	AD	ポリカルボン酸系

*1 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 土木・混和材料グループ 研究員 修士 (工) (正会員)

*2 株式会社ヤマウ 技術研究所 主任研究員

*3 株式会社ヤマウ 技術研究所 副所長

*4 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 土木・混和材料グループ 副主席研究員 博士 (工) (正会員)

表 - 2 早強性膨張材の品質

比表面積 (cm ² /g)	強熱減量 (%)	全アルカリ (%)	塩化物イオン (%)	酸化マグネシウム (%)
5070	1.50	0.14	0.005	0.71

表 - 3 高炉スラグ微粉末の品質

比表面積 (cm ² /g)	強熱減量 (%)	塩化物イオン (%)	酸化マグネシウム (%)	三酸化硫黄 (%)
5740	0.10	0.003	5.70	3.18

表 - 4 配合表 (室内試験)

配合水準	目標SL・SLF (cm)	目標空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
					W	結合材 (略号, B)			S	G	AD
						C	BF	EX			
普通-無	18±2.5	2.0±1.5	39.0	44.0	165	296	127	-	772	1041	1.91
普通-有						279	119	25			1.90
高流動-無	60±10		35.0	47.0	170	291	195	-	785	938	3.17
高流動-有						277	184	25			3.16

を示す。早強性膨張材は JIS A 6202 の 30 型に適合する石灰系のものを用いた。高炉スラグ微粉末は JIS A 6206 の 6000 適合品のものを用いた。

表 - 4 に配合表 (室内試験) を示す。配合は普通配合 (スランプ: 略号, SL), 高流動配合 (スランプフロー: 略号, SLF) の 2 水準とした。目標圧縮強度は材齢 17 時間で 12N/mm² 以上, 材齢 14 日で 40N/mm² 以上とし, それを満足するように配合設計した。早強性膨張材の使用量は既往の研究¹⁴⁾ を参考に, 普通セメントと高炉スラグ微粉末の内割りで 25kg/m³ とした。なお, 高炉スラグ微粉末の混合率は, 普通セメントと高炉スラグ微粉末の合計質量に対して, 普通配合で 30%, 高流動配合で 40% とした。

2.2 養生条件

養生は下記の 2 パターンとした。蒸気養生については, 実機製造を模擬した養生パターンとした。なお, 練混ぜは 20°C 環境下で実施した。

1) 標準養生

打設後, 材齢 24 時間にて脱型し, 20°C 水中環境下にて所定の材齢まで養生を実施した。

2) 蒸気養生

20°C にて前置 1 時間, 昇温速度 20°C/h, 最高温度 60°C で保持 1 時間, 降温速度 3.1°C/h とし, 材齢 17 時間にて脱型を行い, 20°C 気中環境下にて所定の材齢まで養生を実施した。

2.3 試験項目

表 - 5 に室内試験の試験項目を示す。拘束膨張及び収縮試験は, 標準養生は拘束膨張試験 A 法 (材齢 1, 2 及び 7 日), 蒸気養生は拘束膨張収縮試験 B 法 (材齢 1, 2, 7 及び 14 日) を実施した。なお, 蒸気養生を実施した試

表 - 5 試験項目 (室内試験)

試験項目	規格
スランプ試験	JIS A 1101
スランプフロー試験	JIS A 1150
空気量試験	JIS A 1128
コンクリート温度	JIS A 1156
塩化物量	JASS 5 T-502
凝結試験	JIS A 1147
拘束膨張及び収縮試験 (A 法・B 法)	JIS A 6202
圧縮強度試験	JIS A 1108

表 - 6 フレッシュ性状試験結果 (室内)

配合水準	SL・SLF (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	塩化物量 (kg/m ³)
普通-無	19.5	3.5	22	0.04
普通-有	20.0	3.5	22	0.04
高流動-無	63.0 ×62.5	1.7	22	0.06
高流動-有	65.0 ×65.0	1.8	22	0.06

験体の拘束膨張試験の材齢 1 日の測定については, 試験体の温度が 20°C で安定した材齢 24 時間にて実施した。圧縮強度試験については材齢 17 時間, 14 日にて実施し, 材齢 17 時間については 12N/mm² 以上, 材齢 14 日については 40N/mm² 以上得られることを目標とした。

3. 試験結果 (室内試験)

3.1 フレッシュ性状

表 - 6 にフレッシュ性状の結果を示す。スランプ, スランプフロー及び空気量はいずれの配合についても目標

の範囲内であり、膨張材無の場合と同程度となった。また、塩化物量についてもその有無による違いは確認されなかった。

3.2 凝結試験

図-1に凝結試験の結果を示す。凝結時間はいずれの配合においても、早強性膨張材を使用することで始発時間が40分程度、終結時間が75分程度早くなる結果となった。早強性膨張材は比表面積が $5070\text{cm}^2/\text{g}$ と大きく水和反応性が高い¹²⁾ことから、セメントの水和を促進し凝結時間を早めたのではないかと考えられる。

3.3 拘束膨張及び収縮試験

図-2に標準養生時における拘束膨張試験(A法)の結果を示す。材齢7日における拘束膨張量は、普通-無で -5×10^{-6} 、普通-有で 243×10^{-6} 、高流動-無で 3×10^{-6} 、高流動-有で 186×10^{-6} となった。本検討内では膨張材の使用量は $25\text{kg}/\text{m}^3$ であるが、この拘束膨張量の値は収縮補償コンクリート($150 \sim 250 \times 10^{-6}$)^{15), 16)}の範囲内の結果となった。

図-3に蒸気養生時における拘束膨張収縮試験(B法)の結果を示す。早強性膨張材を用いていない配合においては、材齢1日で普通-無が -22×10^{-6} 、高流動-無が -20×10^{-6} となり収縮側の結果となった。その後も収縮挙動を示し材齢14日では、普通-無が -252×10^{-6} 、高流動-無が -188×10^{-6} となった。一方、早強性膨張材を用いた配合では、材齢1日で普通-有が 406×10^{-6} 、高流動-有が 218×10^{-6} となり、材齢14日では普通-有が 71×10^{-6} 、高流動-有が -58×10^{-6} となった。普通配合と高流動配合でその膨張収縮量にやや差が見受けられる結果となったが、これはW/B、高炉スラグ微粉末量の影響を受けたものではないかと考えられる。しかしながら、早強性膨張材を用いることで蒸気養生を実施した場合においても、材齢初期に膨張が付与されることが確認され、その有用性が示されたものと考えられる。

3.4 圧縮強度試験

図-4に標準養生時における圧縮強度試験の結果を示す。材齢14日における圧縮強度は、普通-無で $57.9\text{N}/\text{mm}^2$ 、普通-有で $57.3\text{N}/\text{mm}^2$ 、高流動-無で $64.8\text{N}/\text{mm}^2$ 、高流動-有で $66.7\text{N}/\text{mm}^2$ となった。

図-5に蒸気養生時における材齢17時間の圧縮強度試験の結果を、図-6に蒸気養生時における材齢14日の圧縮強度試験の結果を示す。材齢17時間については、普通-無で $28.8\text{N}/\text{mm}^2$ 、普通-有で $31.6\text{N}/\text{mm}^2$ 、高流動-無で $43.8\text{N}/\text{mm}^2$ 、高流動-有で $48.4\text{N}/\text{mm}^2$ となり、早強性膨張材を用いた配合の圧縮強度は10%程度高くなった。これは早強性膨張材によりセメントの水和反応が促進され、強度発現を早めたものと考えられる。材齢14日の圧縮強度については、普通-無で $41.7\text{N}/\text{mm}^2$ 、普通-有で

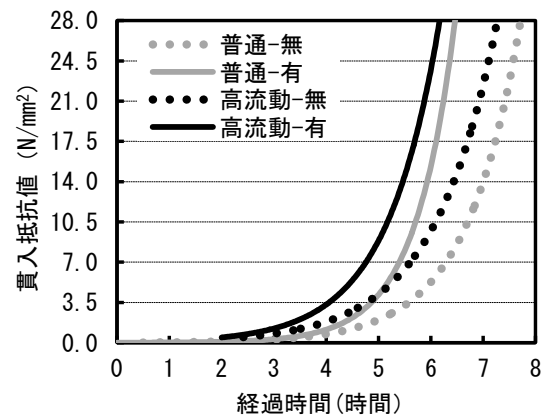


図-1 凝結試験結果(室内)

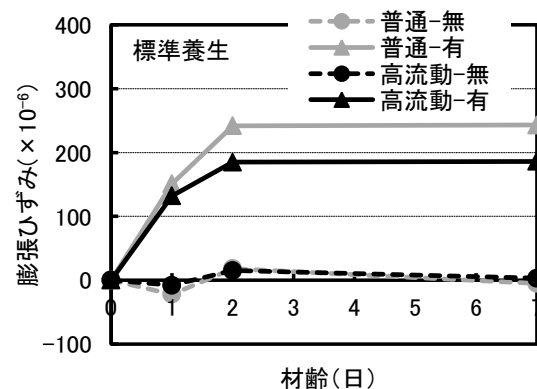


図-2 拘束膨張試験(A法)結果(室内)

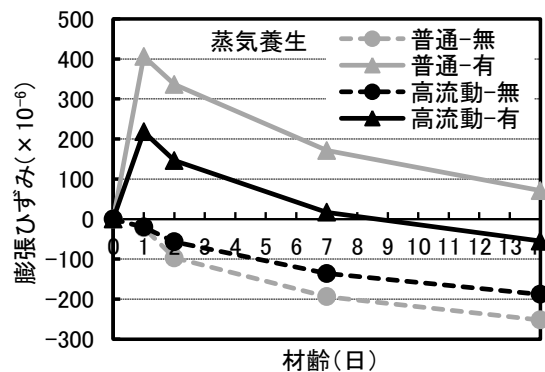


図-3 拘束膨張収縮試験(B法)結果(室内)

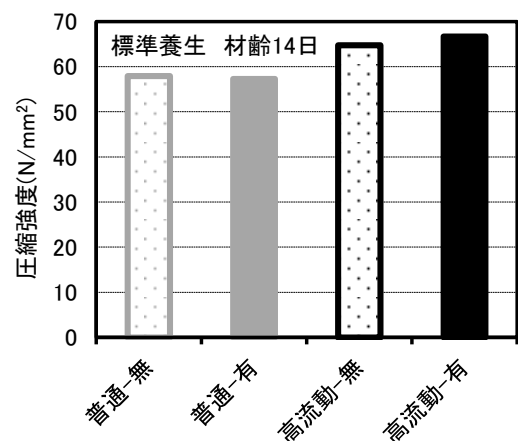


図-4 圧縮強度試験結果(室内)

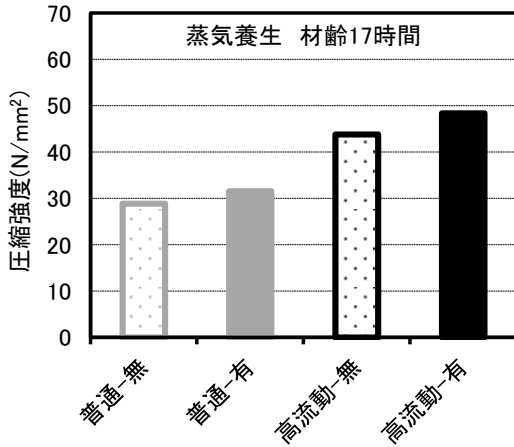


図 - 5 圧縮強度試験結果 (室内)



写真 - 1 製品製造状況

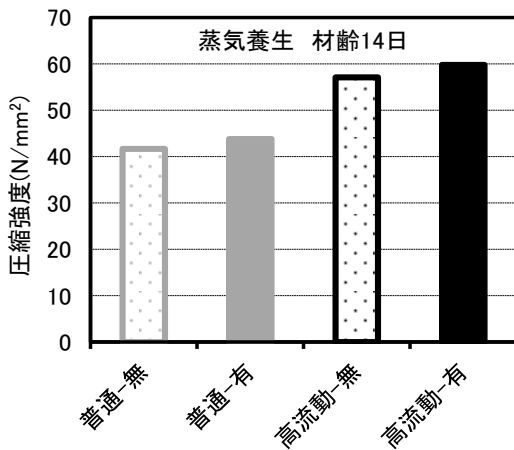


図 - 6 圧縮強度試験結果 (室内)



写真 - 2 製品外観

43.8N/mm², 高流動-無で 57.1N/mm², 高流動-有で 59.8N/mm² となり, 早強性膨張材の有無に関わらず圧縮強度は同程度となった。材齢初期で比較的大きな拘束膨張量を示す結果が得られたものの, 材齢 14 日の圧縮強度は早強性膨張材の有無による違いが見受けられない結果となった。また, いずれの水準についても目標値以上の圧縮強度を得られた。

以上の室内試験の結果から, 早強性膨張材と高炉スラグ微粉末を併用した場合, 膨張材無と比較すると, フレッシュ性状は同程度, 凝結時間は早くなること, 圧縮強度は材齢 17 時間で 10%程度高くなること, 膨張量も付与できていることが確認できた。この結果を踏まえ実機による製品の製造を行った。

4. 実験概要 (実機試験)

4.1 配合・使用材料

表 - 7 に配合表 (実機試験) を示す。実機試験では, 早強性膨張材を用いた普通配合, 高流動配合の 2 水準とした。早強性膨張材の使用量は室内試験と同様に普通セメントと高炉スラグ微粉末の内割りで 25kg/m³ 使用した。材料については, 室内試験と同様のものを使用した。なお, 実機試験における普通配合の s/a は室内試験の配合より低減したものとした。なお, 実機によるコンクリート練りは, 室内試験の際よりも外気温が高い 9 月下旬の屋外環境下にて行なった。AD 添加量は目標とする SL・SLF, 及び, 空気量を得られるように事前に確認し, 配合表に示す単位量とした。

表 - 7 配合表 (実機試験)

配合水準	目標 SL・SLF (cm)	目標空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
					W	C	BF	EX	S	G	AD
普通-有	18±2.5	2.0±1.5	39.0	38.0	165	279	119	25	666	1156	2.33
高流動-有	60±10		35.0	47.0	170	277	184		785	938	3.89

表 - 8 フレッシュ性状試験結果 (実機)

配合種類	SL・SLF (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	塩化物量 (kg/m ³)	外気温 (°C)
普通-有	20.0	1.5	27	0.04	27
高流動-有	63.0×62.0	0.9	28	0.02	25

4.2 製品条件

製造した製品は、JIS A 5372「プレキャスト鉄筋コンクリート製品」の付属書C(規定)暗きょ類に規定される鉄筋コンクリートボックスカルバート2種とし、呼び寸法2000×2000×2000mmのものを各配合で1体ずつ作製した。写真-1に製品製造状況を、写真-2に製品外観を示す。

4.3 養生条件

蒸気養生は、普通配合では室内試験と同様とした、高流動配合では、工場における実際の製造状況を考慮し、前置1時間、昇温速度20°C/h、最高温度45°Cで保持1時間、降温速度1.8°C/hとした。脱型は室内試験と同様に材齢17時間とした。その後は屋外にて所定の材齢まで養生を実施した。

4.4 試験項目

試験項目は室内試験と同様にスランプ・スランプフロー試験、空気量試験、コンクリート温度、塩化物量、圧縮強度試験を実施した。圧縮強度試験については材齢17時間、14日、28日及び91日にて実施し、材齢17時間については12N/mm²以上、材齢14日については40N/mm²以上得られることを実機試験においても目標とした。また、製品を用いた試験としては、外観調査及び曲げ耐力試験を材齢14日にて実施した。曲げ耐力試験については、JIS A 5372に準じて実施し、その可否としては155kN載荷時にひび割れ発生に至らないこととした。

5. 試験結果 (実機試験)

5.1 フレッシュ性状

表-8に実機製造時におけるフレッシュ性状試験の結果を示す。室内試験と比較すると、外気温及びコンクリート温度が高かった影響によりAD添加量をやや増やす必要があったが、目標の範囲内のフレッシュ性状を得ることができた。早強性膨張材は比表面積が大きく水和活性が高いことから、環境温度が高くなった場合、AD添加量が極端に多くなることも懸念されたが、その増加量も小さく、AD添加量を調整すれば所要の性状が得られることも確認できた。

5.2 圧縮強度試験

図-7に実機製造時における普通-有配合の圧縮強度試験結果を、図-8に実機製造時における高流動-有配合の圧縮強度試験結果を示す。材齢17時間における圧縮強度は、普通-有で30.3N/mm²、高流動-有で34.1N/mm²とな

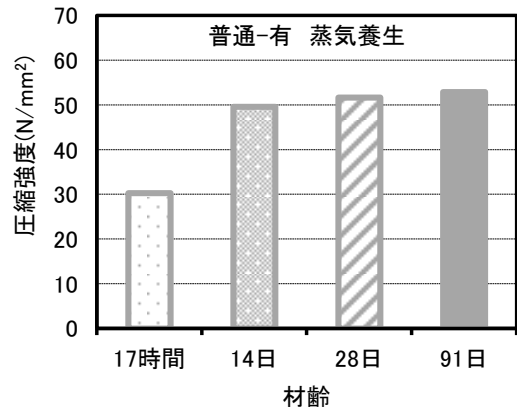


図 - 7 圧縮強度試験結果 (実機)

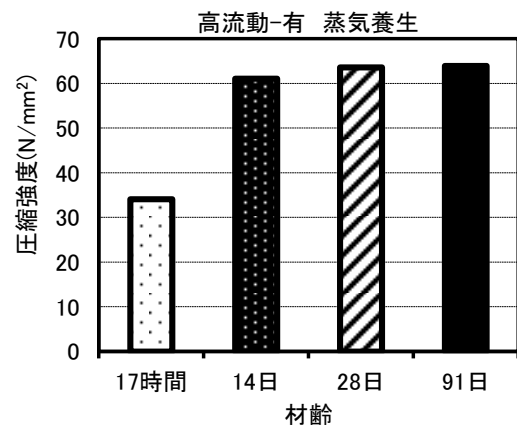


図 - 8 圧縮強度試験結果 (実機)

表 - 9 製品の曲げ耐力試験結果 (実機)

配合水準	JIS A 5372 による規格値	試験値
普通-有	155kN 以上	220kN
高流動-有		183kN

った。材齢14日における圧縮強度は、普通-有で49.6N/mm²、高流動-有で61.1N/mm²となった。実機製造時においても、材齢17時間及び14日ともに目標値以上の圧縮強度が得られる結果となった。また、材齢28日における圧縮強度は、普通-有で51.7N/mm²、高流動-有で63.5N/mm²、材齢91日における圧縮強度は、普通-有で52.9N/mm²、高流動-有で63.9N/mm²となった。材齢14日以降の強度発現は小さいものの、長期的な圧縮強度も問題ないことが確認された。

5.3 外観調査

いずれの配合についても、材齢 14 日におけるひび割れの発生は確認されなかった。既往の研究¹⁷⁾では暴露材齢 1 年においても早強性膨張材のひび割れ抑制効果が確認されており、長期的なひび割れ抵抗性の向上が期待できると考えられる。

5.4 曲げ耐力試験

表 - 9 に実機製造製品の曲げ耐力試験結果を示す。普通配合では 220kN 載荷時にひび割れが発生し、規格値の約 1.4 倍の曲げ耐力を有していた。高流動配合では、183kN 載荷時にひび割れが発生し、規格値の約 1.2 倍の曲げ耐力を有していた。早強性膨張材と高炉スラグ微粉末を併用したコンクリート製品においても、十分な曲げ耐力を有していることを確認できた。

実機製造による試験結果から、早強性膨張材と高炉スラグ微粉末を併用したコンクリート製品は所要の品質を満足する結果となった。高炉スラグ微粉末を使用した配合への早強性膨張材の有用性が確認できたのではないかと考えられる。

今後、その有用性を明確にするために、製品の暴露試験を実施し、長期的なひび割れ抵抗性について確認する予定である。

6. まとめ

早強性膨張材と高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート製品に対する適用性を、室内試験及び実機試験における製品の製造にて検討した。

その結果、早強性膨張材と高炉スラグ微粉末を併用した場合、膨張材無と比較すると、フレッシュ性状は同程度、凝結時間は早くなること、圧縮強度は材齢 17 時間で 10%程度高くなること、膨張量も付与できていることを確認できた。また、実際に製造されたコンクリート製品は所要の品質を満足することを確認できた。

参考文献

- 1) 一般社団法人 日本建設業連合会：生産性向上推進要綱，2016.4.28
- 2) 国土交通省：【平成27年度 官民による重点的な取組事項】建設業における担い手の確保・育成と生産性向上，第10回 建設産業活性化会議 資料1，2015.5
- 3) 長尾之彦：高炉スラグ微粉末によるコンクリートのCO₂削減効果について，コンクリート工学，Vol.48，No.9，pp.62-65，2010.9
- 4) 町田篤彦：高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの水密性に関する研究，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集，土木

学会，pp.115-120，1987.3

- 5) 檀康弘，近田孝夫，永浜一孝：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの蒸気養生特性，セメントコンクリート論文集，No.45，pp.222-227，1991.12
- 6) 小林茂敏，河野広隆，沼田晋一，近田孝夫：高炉スラグ微粉末のアルカリ骨材反応抑制効果について，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.155-162，1987.3
- 7) 銀山巧，川村政喜，田代芳文，山本親志：AARに及ぼすアルカリ量，スラグ量及び締固め条件等の影響に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.1，pp.585-590，1987.6
- 8) 大即信明，森好生，関博：海洋環境におけるコンクリート中の塩素に関する一考察，土木学会論文報告集，第332号，pp.107-118，1983.4
- 9) 山本泰彦，竹内徹：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの配合と耐凍害性，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.129-134，1987.3
- 10) 遠藤裕悦，児玉和巳，高田誠：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの長期強度に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11，No.1，pp.361-366，1989.6
- 11) 三浦智哉，田澤榮一，宮澤伸吾，保利彰宏：コンクリートの自己収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.359-364，1995.6
- 12) 佐久間隆司，鈴木修，佐竹紳也，渡邊斉：早強型膨張材の諸特性とコンクリート製品への適用性，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.131-136，2003.6
- 13) 長谷川聖史，佐久間隆司，伊達重之：蒸気養生を施した高炉スラグ配合コンクリートへの早強型膨張材の適用，土木学会第62回年次学術講演会，pp.1109-1110，2007.9
- 14) 辻幸和，佐久間隆司，保利彰宏：高性能膨張コンクリート，15.3 大型コンクリート製品の温度ひび割れの防止，pp.217-220，技報堂出版，2008.11
- 15) 土木学会：膨張コンクリートの設計施工指針，コンクリートライブラリー75，1993.7
- 16) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書[施工編]，pp.255-264，2018.3
- 17) 伊達重之，長谷川聖史，小林一博，佐久間隆司：高炉スラグ配合コンクリート二次製品の品質向上に関する研究，土木学会第62回年次学術講演会，pp.477-478，2007.9