高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの各種力学特性に及ぼす 石灰石微粉末と湿潤養生の影響

THE EFFECT OF LIMESTONE POWDER AND MOISTURE CURING ON PROPERTIES OF CONCRETE USING GROUND GRANULATED BLAST-FURNACE SLAG

佐藤幸恵*, 野口貴文**, 深尾宙彦***
Sachie SATO, Takafumi NOGUCHI and Tokihiko FUKAO

This paper presents the results of the experimental study on quality improvement of the concrete using ground granulated blast furnace slag by limestone powder. We focused on the influence of limestone powder contents on restraint drying shrinkage and strength development of concrete under several curing conditions.

As the results, the compressive strength of BLP and BLP10 (LSP 10%) are equivalent to that of BB, and that of BLP is insusceptible to demolding time compared with BB. The filling effect of LSP increased young's modulus and splitting tensile strength. The time of crack is affected by rate of decrease in mass of concrete.

Keywords : *Ground granulated blast-furnace slag, Limestone powder, Restraint, Drying shrinkage, Strength development, Demolding time*

高炉スラグ微粉末, 石灰石微粉末, 拘束, 乾燥収縮, 強度発現, 脱型時期

1. はじめに

近年, 持続可能な社会の構築に向けて, 様々な試みがなされている。建築材料の分野に関しては, 様々な産業副産物やリサイクル材料を活用して省資源化を図るといったアプローチがなされており, 高炉セメントなど副産物を利用したコンクリート材料は長い歴史を持っている。だが, 高炉セメントなどの副産物を利用した混合セメントは, 建築分野ではあまり普及が進んでいない。これは, これらの混合セメントを用いたコンクリートは, 初期強度発現が遅いこと, 湿潤養生に対する敏感性により長く湿潤養生期間を取らなければならないこと, 早期にひび割れが生じる場合があることなどから建築物に使用する際に使いにくい問題があるためであり, 利用拡大のためにはこれらの性状を改善する手法を見出す必要がある。

そこで, 本研究では, 混合セメントの建築分野への利用拡大を最終目的として, その性能改善手法について検討することとした。今回は, 最も広く流通している高炉セメント B 種に対して, 他の粉体を混合して, 初期強度の改善やひび割れ抵抗性の改善を試みることを検討することとした。また, 混合する粉体には容易に入手が可能な石灰石微粉末を選定して, 各種物性値について実験を実施した。

石灰石微粉末の添加で見込まれる効果は, 既往の研究報告等^{たとえ1)}により, 初期強度の増進, 緻密化などがある。収縮に関しては, 加藤ら²⁾が, 高炉セメントに石灰石微粉末を添加した高流動コンクリートに自己収縮特性について検討し, 石灰石微粉末の添加により材齢初期の自己収縮ひずみが減少すると報告している。また, Dhir ら³⁾によれば, 乾燥収縮は石灰石微粉末の添加に伴い減少する傾向があると報告している。水和反応に及ぼす影響に関しては, 例えば佐川らによれば, 高炉セメントに石灰石微粉末を添加した場合は, セメント鉱物全体としての反応率はほとんど変化しないが, スラグの反応は促進する効果があり⁴⁾, また, 初期強度の増進が認められるなどの報告^{例えば5)6)7)8)}もある。このことから, 建築部材のように比較的早い時期に脱型される場合に一定の効果があるか検討の余地があると考えられるが, 養生温度を水準とした研究はなされているものの^{例えば9)}, 湿潤養生期間を要因として検討はほとんど行われていない。そこで, 本研究では, 材齢初期の湿潤養生期間および石灰石微粉末の添加率, 添加方法が各種力学特性に及ぼす影響について検討を試みた。

* 東京都市大学工学部建築学科 講師・博士(工学)

** 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻
准教授・博士(工学)

*** 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻
大学院生・修士(工学)

Assistant Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo City University, Ph. D.
Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, Dr. Eng.
Graduate Student, Dept. of Architecture, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, M. Eng.

2. 実験概要

2.1 実験計画

(1) 実験の要因と水準

今回実施した実験は、各種結合材について湿潤養生条件を変化させた場合の強度発現性とひび割れ抵抗性を対象としたもの（シリーズⅠ）、および石灰石微粉末を混合した場合の強度発現性とひび割れ抵抗性の改善効果を検討したもの（シリーズⅡ）の２つのシリーズから成る。具体的な調査条件は、水粉体比を 55%一定とし、シリーズⅠでは、普通ポルトランドセメント（N）、高炉セメント B 種相当として普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を 42%内割混合したもの（BB）、BB に石灰石微粉末を 10%内割混合したもの（BLP）の 3 種類の調査とし、シリーズⅡでは、シリーズⅠと同様の BB と、BB 中の普通ポルトランドセメントに対して内割で石灰石微粉末を 10%混合したもの（BLP10）、同様に内割で 20%混合したもの（BLP20）の 3 水準とした。実験の要因と水準を表 1 に示す。作製した円柱供試体は、コンクリート打込み後、直ちに封かん状態で静置し、水中養生供試体は材齢 2 日で脱型後水中養生を開始した。その他の供試体は所定の材齢で脱型し、試験材齢まで 20℃60%RH の養生室内で気中養生とした。

(2) 実験項目および実験方法

実験項目は、圧縮強度試験（JIS A 1108）、割裂引張強度試験（JIS A 1113）、ヤング係数試験（JIS A 1149）、および拘束ひび割れ試験であり、圧縮強度試験、割裂引張試験、ヤング係数試験に用いた供試体は、φ100×200mm の円柱とし、ヤング係数はコンプレッソメータを用いて計測した。強度試験材齢は、各脱型材齢および材齢 28 日、91 日で実施した。拘束ひび割れ試験は、（社）日本コンクリート工学協会（現：日本コンクリート工学会）の「自己収縮検討委員会報告書」¹⁰⁾、「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報告書」¹¹⁾で提案されている、鉄筋を埋設した鉄筋拘束試験方法、および丸山らの研究¹²⁾を参考に試験条件を設定し、各水準ごとに 2 体ずつ試験体を作製して試験を実施した。その試験体概要を図 1 に示す。コンクリートの寸法は 100×100×1100mm とし、長さ 1200mm の異形棒鋼中央部に図に示すようにひずみゲージを貼り付け防水加工して埋設した。コンクリート打込み後から脱型までは打込み面をポリエステルフィルムで覆い封かんするとともに、湿布で覆い乾燥を防いだ。その後、所定の材齢で型枠を取り外し 20℃60%RH の養生室内で気中養生を開始した。打込み後から継続して埋設鉄筋に貼りつけた鋼材のひずみを計測し、その計測値を、平面保持

表 1 実験の要因と水準

要因		水準
結合材・粉体種類	I	OPC : OPC BB : OPC(0.58)+BS(0.42) BLP : OPC(0.522)+BS(0.378)+LSP(0.10)
	II	BLP20 : OPC (0.464) +BS (0.42) +LSP20 (0.116) BLP10 : OPC (0.522) +BS(0.42)+LSP10(0.058)
水結合材比 (%) (水粉体比)		55
養生方法		20℃水中養生, 20℃封かん養生, 気中養生 (20℃, 60%RH)
脱型材齢 (気中養生供試体)		OPC : 7 日 BB : 3,7,14 日 BLP : 3,7 日 BLP20 : 3,7 日 BLP10 : 3 日

表 2 使用材料の品質

材料	品質
普通ポルトランドセメント(OPC)	密度 3.16 g/cm ³ , SO ₃ 量:2.44% 比表面積 3440cm ² /g
高炉スラグ微粉末 (BS)	高炉スラグ微粉末 4000, SO ₃ 量:2.00% 粉末度 3920cm ² /g, 密度 2.88 g/cm ³
石灰石微粉末 (LP)	密度 2.69g/cm ³
細骨材 (S)	大井川水系陸砂 密度 2.60 g/cm ³ , 吸水率 1.86%
粗骨材 (G)	青梅産砕石 密度 2.64 g/cm ³ , 吸水率 0.58%
AE 減水剤 標準形 (AD1)	リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
AE 剤 (AD2)	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

表 3 計画調査およびフレッシュコンクリートの性状

調査名	W/C (W/P*) (%)	BS/ (C+BS)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						化学混和剤		スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度(℃)
				W	C	BS	LSP	S	G	AD1 (P*×wt%)	AD2 (P*×wt%)			
OPC	55	-	47.9	175	318	-	-	839	942	1.0	0.0010	20.8	4.6	21.0
BB	55	0.42	47.5	175	183	135	-	828	942	1.0	0.0018	23.0	4.8	20.5
BLP	55	0.42	47.4	175	165	122	32	824	942	1.0	0.0036	21.0	4.5	19.5
BLP10	55	0.45	47.5	175	165	135	18	828	942	0.8	0.0040	20.0	4.0	20.0
BLP20	55	0.48	47.4	175	146	135	36	823	942	0.8	0.0040	20.5	3.7	20.0

*:P=C+BS+LSP

図1 拘束ひび割れ試験供試体概要

を仮定した釣り合い式(1)に代入してコンクリート断面に生じる平均的な収縮拘束応力を算出した¹³⁾。

$$\sigma_c = -(E_s \times \varepsilon_s \times A_s) / A_c \quad (1)$$

ここに、

σ_c : コンクリートの拘束収縮応力 (N/mm²)

E_s : 鋼材の弾性係数 (N/mm²)

ε_s : 鋼材のひずみ

A_s : 鋼材の中央部断面積 (mm²)

A_c : コンクリートの純断面積 (mm²)

なお、用いた鋼材の弾性係数は、同じロットの試験片を用いて予め JIS Z 2241(金属材料の引張試験方法)に準じて引張試験を行い、応力ひずみ曲線から弾性係数を求めた。

2.2 使用材料およびコンクリートの性質

(1) コンクリート用材料

コンクリートに使用した材料の品質を表2に示す。また、表3に、計画調合とフレッシュコンクリートの試験結果を示す。表3中には結合材量に対する高炉スラグ微粉末の混合比 (BS/Binder: OPC と BSを Binder とする) をあわせて示した。普通ポルトランドセメントには、予め5%以下の副産物材料が混合されているが、調合上の混和材料の混合比を求める際には便宜上計算外とした。なお、本研究で使用了普通ポルトランドセメントに含まれる副産微粉は石灰石微粉末であり、TG-DTA による化学分析 (昇温速度 10℃/min, N₂ 雰囲気下) の結果では 3.3% 添加されていることがわかっている。国内で市販されている普通ポルトランドセ

図2 強度発現の経時変化

メントには 5%の範囲内で石灰石微粉末以外に高炉スラグ微粉末などが添加されているものがある。今後それらの成分の違いによる検証が必要であるが、本研究では、このセメントを使用した結果について示す。

(2)鋼材

使用した鋼材は、JIS G 3112(鉄筋コンクリート用棒鋼)に規定される異形棒鋼 SD345, D32 (公称断面積 7.942cm²) を使用した。また、同ロットの試験片を用いて実施した引張試験による弾性係数は 200kN/mm²であったので、この値を用いて収縮応力を算出した。

3.実験結果と考察

3.1 強度発現特性

図 2 に、強度発現の経時変化を示す。また、図 3 に、封かん養生における結合材ごとの比較を示す。図 2 より、強度発現性状は、OPC と比較すると、材齢 28 日では他の調査では約 5N/mm²程度低くなった。材齢 91 日では、BB および BLP でほぼ同等の強度発現を示したものの、BLP10、BLP20 では材齢 28 日時点と同様 5N/mm²程度の強度差が生じた。また、図 3 より、石灰石微粉末を添加した場合、材齢 3 日では BB に比べて強度がわずかに高くなったが、材齢 7 日以降では、BLP のみが BB を上回る結果となった。

次に、封かん養生強度と各調査の BS/Binder 比の関係を図 4 に示す。図 4 中の BS/Binder 比が小さいものから BLP、BLP10、BLP20 となる。LP を添加した場合で比較すると、BS/Binder 比の小さいものが強度発現は高い傾向がみられたが、BB と比べるとその差は小さかった。このことから、石灰石微粉末の添加効果が、結合材を減らさずに充填性を高めることによって得られるとすると、外割的な置換についても検討する必要があると考えられる。また、単位結合材量では、BLP10 が多いものの、強度が BLP を下回った要因としては、高炉スラグ微粉末量が多いためと考えられ、セメント量と混和材量の組み合わせにより効果が異なり、これらについても今後の検討が必要と考えられる。

一方、湿潤養生に対する敏感性を検討するため、材齢 3 日脱型供試体の脱型から材齢 28 日までの質量減少率と材齢 28 日の圧縮強度を比較した (図 5)。図より、質量減少率の大きい BLP20 で最も圧縮強度が小さい。封かん養生強度と気中養生 3 日脱型強度は、調査ごとに同じ大小順となった。気中養生 7 日脱型とあわせて、質量減少率との関係を表したものが図 6 である。図 6 から、供試体の質量減少率と圧縮強度には高い相関性がみられ、乾燥条件に対する敏感性は、供試体の水分逸散量を小さくすることにより低減できたと考えられる。

圧縮強度に関しては、BLP の場合において脱型材齢の影響を小さく出来、強度発現にも寄与が認められたが、その効果の範囲は限定的であると考えられる。

次に、図 7 に圧縮強度と割裂引張強度との関係を示す。圧縮強度に対する割裂強度の比はおおむね 1/12 程度となった。野口らによる高強度コンクリートの場合の圧縮強度と引張強度との関係式¹³⁾を図中の点線に示す。また、BB における回帰式を図中に実線に示す。2つの関係式の相関係数 R はいずれも 0.93 であったが、野口ら¹³⁾による式では、低強度域で実測値から外れる傾向がみられ、今回の結果から算出した式は、低強度域では相関性が高いものの、高強度

図 3 封かん養生における強度発現

図 4 BS/Binder 比と圧縮強度の関係

図 5 調査別質量減少率と気中養生強度 (3 日脱型)

図 6 質量減少率と気中養生強度

図 7 質量減少率と気中養生強度

域で相関性が低下したことが要因と考えられる。割裂引張強度は、材齢初期の低強度域では結合材種類による差はみられなかった。材齢28日以降ではBLP、BLP10、BLP20がBBと同程度の圧縮強度にと比較して割裂引張強度が高くなる傾向がみられた。ただし、石灰石微粉末の添加量や添加率との明確な関係は見いだせなかった。

3.2 ヤング係数

圧縮強度とヤング係数の関係を図8に示す。また、次式に示すNewRC式¹³⁾を用いてヤング係数を算出し、図中に示した。また、OPCに関しては(2)式の±20%を示す線も同時に図示した。

$$E = k_1 \times k_2 \times 3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{2.4} \right)^2 \times \left(\frac{\sigma_B}{60} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

ここに、

E :コンクリートのヤング係数 (N/mm²)

γ :コンクリートの単位容積質量 (t/m³)

σ_B :コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

k_1 :粗骨材の種類により定まる修正係数

k_2 :混和材の種類により定まる修正係数

なお、 $\gamma=2.3$ 、OPCについては $k_1=k_2=1.0$ 、BB、BLP、BLP10、BLP20については $k_1=1.0$ 、 $k_2=0.95$ を用いた。

図8より、ヤング係数は概ね式(2)を上回り、圧縮強度が高くなるほど、図8中に示した(2)式の+20%より大きくなる傾向がみられた。石灰石微粉末を使用した場合は、BBと比較すると同一強度においてヤング係数が高くなる傾向がみられた。これは既往の研究報告⁵⁾と同様の傾向となり、圧縮強度の高い範囲で顕著となった。圧縮強

度が高いのは水中養生および封かん養生で、水和反応が十分に進行したためと考えられる。ただし、平田ら⁸⁾は、石灰石微粉末の置換率の増加に伴い、ヤング係数が低下する減少を報告しており、さらに広範囲な置換率での検討と長期的な強度発現性状をあわせて評価する必要があると考えられる。

3.3 拘束収縮応力

図9に、拘束ひび割れ試験による拘束収縮ひずみの経時変化を示す。なお、今回は試験体2体で行ったが、試験体間の差がほとんど無かったため、水準ごとの平均値を用いて考察した。図より、脱型材齢が長い方が拘束収縮ひずみは大きくなり、また、ひび割れ発生に伴う収縮緩和までの期間が長い傾向がみられた。BLPでは、拘束収縮ひずみの最大値は、3日脱型と7日脱型で小さくなった。高炉スラグ微粉末を混合した調査では、目視でのひび割れ確認が難

図8 圧縮強度とヤング係数の関係

図9 拘束収縮ひずみの経時変化

図10 拘束応力の経時変化

しく、経時的な収縮ひずみの経時変化と比較しながら判定を行った。結果として生じたひび割れは、表面に微細なひび割れが多数発生する結果となった。そのため、ひび割れ発生による応力緩和が緩慢となり、ひび割れの進展が緩やかに進行する様子が確認された。次に、(1)式を用いて拘束収縮応力を算出したものを図 10 に示す。図中の□は、材齢と割裂引張強度の関係から求めたひび割れ発生時の引張強度の計算値である。BB では、脱型材齢が遅くなるにつれ、ひび割れ発生材齢および拘束収縮応力は増加するが、7 日と 14 日ではその差は小さくなっており、BB を使用する場合は、7 日以上湿潤養生期間があればひび割れ抵抗性を向上させるものと考えられる。BLP においても脱型材齢が長くなると同様の傾向がみられたが、3 日脱型と 7 日脱型の差が小さく、BB と BLP の 3 日材齢を比較すると、BLP の方が拘束応力が大きく、かつ、ひび割れ発生材齢も長くなったことから、材齢初期の脱型に対する改善効果が認められた。図 11 に、各結合材の 3 日脱型の場合を比較した結果を示す。BB に対して、BLP20 は拘束応力およびひび割れ発生材齢ともに小さくなっている。また、BLP10 は BLP とひび割れ発生までの拘束応力変化は同等であるが、ひび割れ発生材齢が早く、ひび割れ発生時の拘束応力は BB と同等となった。

石灰石微粉末を用いた場合の乾燥収縮に関しては、Dhir ら³⁾、大原ら¹⁴⁾は添加量が多いほど乾燥収縮は小さいとしているが、セメント種類によっては石灰石微粉末の添加により乾燥収縮率が大きくなる場合、セメント量の増加により乾燥収縮率が大きくなる場合があること¹⁵⁾が報告されているが、今回の実験水準の範囲では、BLP についてのみがひび割れ抵抗性に対して改善効果が認められた。さらに、石灰石微粉末の添加量の影響と湿潤養生期間の影響を比較すると、今回の実験水準の範囲では、調査要因よりも湿潤養生期間を長くする方が明確にひび割れ抵抗性を改善できたと考えられるため、今後これらの相互関係に基づく検討が必要と考えられる。

表 4 に発生材齢、ひび割れ発生時の拘束応力および引張強度、応力/強度比を示す。また、図 12 にひび割れ発生材齢と応力強度比の関係を示す。応力/強度比は BLP20 を除いて 0.7 から 0.9 に分布し、既往の調査¹⁶⁾と同等の結果となった。また、既往の研究では、脱型材齢と材齢とひび割れ発生材齢との関係が明確となっていない報告もあるが¹¹⁾、今回の結果では、脱型材齢が長くなるとひび割れ発生材齢も長くなる傾向がみられた。また、結合材に対して石灰石微粉末の量が多い BLP20 ではひび割れ発生材齢が早まり、応力強度比も小さくなる傾向を示した。

図 13 応力強度比と質量減少率の関係

図 11 材齢と拘束応力の関係 (材齢 3 日脱型)

図 12 ひび割れ発生材齢と応力強度比の関係

表 4 ひび割れ発生材齢、引張強度、ひび割れ発生応力

結合材および脱型材齢	ひび割れ発生材齢 (日)	ひび割れ発生応力 (N/mm ²)	ひび割れ発生時の引張強度 (N/mm ²)	応力/強度比
OPC 7 日	31.7	2.14	2.71	0.79
BB 3 日	19.2	1.38	1.75	0.79
BB 7 日	31.3	1.65	2.04	0.81
BB 14 日	37.3	1.54	2.14	0.72
BLP 3 日	21.5	1.68	1.83	0.92
BLP 7 日	31.4	1.71	2.05	0.83
BLP10 3 日	21.5	1.67	1.88	0.89
BLP20 3 日	13.4	1.08	2.01	0.54

図 14 質量減少率とひび割れ発生材齢の関係

乾燥状態と応力/強度比の関係を図 13 に示す。図より、曲線で囲まれた範囲では、結合材種類に関わらず質量減少率の増加に伴い応力強度比も大きくなる傾向が見られたが、BB および BLP20 の 3 日脱型のような、組織の緻密化が十分でないうちに脱型した供試体では応力強度比が小さくなる傾向がみられた。これは、乾燥しやすく、組織の緻密化や強度発現が十分でない場合は表層部に多くのひび割れが生じやすく、ひび割れ抵抗性が低下するためと考えられる。また、図 14 にひび割れ発生材齢と質量減少率の関係を示す。図より、今回実施した実験水準では、両者の関係は結合材種類に関わらず直線性を持つ傾向がみられた。また、質量減少率が高いほど早期にひび割れを生じる結果となった。

4. まとめ

本研究では、高炉セメントを用いたコンクリートの強度発現性、ひび割れ抵抗性に対する石灰石微粉末の効果ならびに湿潤養生の影響について検討を行った。得られた結果を以下に記す。

(1) 石灰石微粉末を添加した場合、10%の場合は高炉セメント B 種相当と比較して強度発現の差は小さく、20%添加するとやや強度の低下がみられた。また、BS/Binder 比は小さいほうが強度発現は大きい。

(2) 圧縮強度に対する脱型時期の影響で比較すると、BLP は BB よりも脱型時期の影響を受けにくくなる傾向がみられ、石灰石微粉末による充填効果があったと推察された。

(3) ヤング係数、割裂引張強度は、同程度の圧縮強度の場合、石灰石微粉末添加によって大きくなる傾向が見られた。

(4) 石灰石微粉末の添加は、10%までの置換率では、最大収縮ひずみあるいは拘束応力の大きさにはあまり影響しないが、湿潤養生期間を長くすることによりひび割れ発生材齢を遅くする効果が認められた。

(5) 今回の実験水準において、質量減少率とひび割れ発生材齢との関係は、結合材種類に関わらず、乾燥による質量減少率が大きいほど早期にひび割れが発生し、脱型材齢が早いと応力強度比が低下する。

謝辞

本研究の実施に際し、鉄鋼スラグ協会より材料提供に関して協力を得た。ここに記して謝意を表す。また、実験の遂行にあたり、林千晴さん（株式会社山下設計、当時東京都市大学卒論生）、並木桃子さん（大和ハウス工業株式会社、当時東京都市大学卒論生）、西尾悠平君（東京大学大学院生）の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国府勝郎, 兼安真司, 黒沢世雄: 鉱物微粉末を用いたコンクリートの乾燥収縮とひび割れ性状, セメント・コンクリート論文集, No.49, pp.620-625, 1995.12
- 2) 加藤 弘義, 宮川 豊章, 中村 明則, 土井 宏行: 高炉スラグ微粉末を使用した高流動コンクリートの自己収縮に与えるセッコウ及び石灰石微粉末の影響, 土木学会論文集, 711, V-56, pp.111-124, 2002.8
- 3) R. K. Dhir, M. C. Limbachiya, M. J. McCarthy, A. Chaipanich: Evaluation of Portland Limestone Cements for Use in Concrete Construction, Materials and

Structures, volume40, Issue5, pp. 459-473, 2007.6

- 4) 佐川孝広, 名和豊春: 高炉セメントの水和反応に及ぼす石灰石微粉末の影響, 日本コンクリート工学協会年次論文集, Vol.29, No.1, pp.93-98, 2007.8
- 5) 王鉄成, 長岡誠一, 中野錦一: セメントの一部を石灰石微粉末で置換したコンクリートの強度特性, セメント・コンクリート論文集 No.49, pp.564-569, 1995.12
- 6) 原田裕治, 志澤三明, 小谷博: 高炉セメントの諸物性におよぼすスラグ微粉末および石灰石微粉末の影響, セメント技術年報 40, pp.64-70, 1986.12
- 7) セメント協会: 石灰石微粉末専門委員会報告書, 2001.10
- 8) 平田隆祥, 竹田宣典, 十河茂幸: 石灰石微粉末の多量添加がコンクリートの強度特性に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集 No.49, pp.204-209, 1995.2
- 9) E.F. Irassar et al.: Influence of limestone content, gypsum content and fineness on early age properties of Portland limestone cement produced by inter-grinding, Cement & Concrete Composites, 33-2, pp.192-200, 2011.2
- 10) (社) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの自己収縮研究委員会報告書 2002
- 11) (社) 日本コンクリート工学協会: 混和材料からみたひび割れ低減と耐久性改善委員会報告書 2010
- 12) 丸山一平, 亀田昭一, 鈴木雅博, 佐藤良一: RC プリズムにおける自己収縮による微細ひび割れ発生と収縮応力挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.587-592, 2006.7
- 13) 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, 第 472 号, pp.11-16, 1995.6
- 14) 大原功: 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 32, pp.104-107, 1978.12
- 15) Peter Hawkins, Paul Tennis and Rachel Detwiler: The Use of Limestone in Portland Cement: A State-of-the-Art Review, Portland Cement Association, 2003
- 16) 濱永康仁: コンクリート部材に生じる収縮ひび割れ発生条件に関する研究, 大分大学学位請求論文, 2007.3

(2012年5月10日原稿受理, 2012年10月15日採用決定)