

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

加藤弘義¹・宮川豊章²・中村明則³・土井宏行⁴

¹正会員 (株)トクヤマ 徳山総合研究所 (〒745-8648 山口県徳山市御影町1-1)

²フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³博士 (工学) (株)トクヤマ 資源環境事業グループ (〒745-8648 山口県徳山市御影町1-1)

⁴(株)トクヤマ 徳山総合研究所 (〒745-8648 山口県徳山市御影町1-1)

高炉スラグ微粉末を使用した粉体系高流動コンクリートの問題点として、自己収縮の増大が指摘されている。本研究では、高炉スラグ微粉末に添加されたセッコウ及び石灰石微粉末が高流動コンクリートの自己収縮特性に与える影響を検討し、その機構について考察を加えた。セッコウの添加により、自己収縮ひずみが低減し、単位引張強度あたりの自己収縮ひずみが減少した。自己収縮の低減は、エトリンガイトの生成による毛細管空隙量の増加によるものと推定した。石灰石微粉末の添加により、初期材齢において自己収縮ひずみの低減ならびに単位引張強度あたりの自己収縮ひずみの減少が認められた。しかし、長期にわたり自己収縮が継続する傾向が認められた。長期にわたる自己収縮の増加は、石灰石微粉末の反応に起因するものと推定した。

Key Words : *autogenous shrinkage, high-flow concrete, ground granulated blast-furnace slag, gypsum, limestone powder, ettringite, monocarbonate*

1. はじめに

粉体系高流動コンクリートには、流動特性の改善を目的として多量の混和材が使用される¹⁾。高炉スラグ微粉末は、代表的な混和材であり、すでに多くの使用実績がある²⁾。一方で、高炉スラグ微粉末を使用した高流動コンクリートの問題点として自己収縮の増大が指摘されている^{3),4),5)}。自己収縮ひずみは、結合材の水和開始とともに急激に増大するため、特に初期材齢におけるひび割れ発生の要因になり得ると考えられる^{6),7)}。高炉スラグ微粉末を使用した場合、初期材齢における自己収縮ひずみが増大する傾向にある。そのため、初期ひび割れ発生を抑制する観点から、特に初期材齢における自己収縮ひずみの低減が重要であると考えられる。

高炉スラグ微粉末には、初期強度の増進を目的としてセッコウが添加される場合がある²⁾。従って、高流動コンクリートに使用される高炉スラグ微粉末にも、セッコウが添加されている場合がある^{2),8)}。セッコウは、セメント中のC₃Aあるいは高炉スラグ微粉末との反応

により、膨張性水和物とされているエトリンガイトを生成することから^{9),10)}、自己収縮の低減効果が期待できる¹¹⁾。

石灰石微粉末は、高流動コンクリート用混和材として広く使用される材料である¹²⁾。セメントあるいは高炉スラグ微粉末に比べて水和反応性の低い材料であるため¹³⁾、自己収縮の低減効果が期待される。筆者らは、石灰石微粉末を普通ポルトランドセメントの内割置換で使用した場合、特に初期材齢において高流動コンクリートの自己収縮が低減することを示している¹⁴⁾。これより、高炉スラグ微粉末を使用した系においても、内割添加により同様の効果が期待される。

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低減について検討された例はいくつかあるが^{4),15),16),17)}、高炉スラグ微粉末に添加されたセッコウあるいは石灰石微粉末が自己収縮特性に与える影響について詳細に検討された例は少ない。汎用性の高いこれらの材料の収縮補償効果について検討することは、実用上重要なことであると考えられる¹⁸⁾。

本研究では、高炉スラグ微粉末を使用した粉体系高

表-3 コンクリートの配合 (セッコウ添加の影響の検討)

略号	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
					W	C	スラグ	S	G	PC		
OPC	65±5	3.0±1.0	33	50.0	165	500	-	250	250	833	880	7.50
Gyp0%				49.4						816		7.50
Gyp2.0%				49.4						813		7.75
Gyp3.5%				49.3						813		7.75
Gyp5.0%				49.3						811		7.75

注) B: 結合材, スラグ: 高炉スラグ微粉末+セッコウ, PC: ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

表-4 コンクリートの配合 (石灰石微粉末添加の影響の検討)

略号	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)										
					W	C	スラグ	LP	S	G	PC				
LP0%	65±5	3.0 ± 1.0	33	49.4	165	250	250	-	816	880	880	7.50			
LP20%				49.3								200	50	813	7.00
LP60%				49.1								100	150	806	5.50

注) P: 粉体 (セメント+スラグ+石灰石微粉末), LP: 石灰石微粉末, PC: ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

表-1 セメントの化学成分 (質量%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
22.1	5.3	2.7	65.0	0.22	0.32	1.9

表-2 高炉スラグ微粉末の化学成分 (質量%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
32.5	14.1	0.4	43.7	0.22	0.56	0.2

表-5 フレッシュコンクリートの性状

略号	スランブフロー (mm)	空気量 (%)
OPC	630	3.5
Gyp0%	670	3.5
Gyp2.0%	650	3.5
Gyp3.5%	645	3.5
Gyp5.0%	645	3.8
LP20%	660	3.5
LP60%	660	3.0

流動コンクリートの自己収縮特性に与えるセッコウおよび石灰石微粉末の影響を検討し、自己収縮の低減効果を把握した。また、空隙構造および水和生成物からセッコウならびに石灰石微粉末が自己収縮特性に与える影響について考察を加えた。

2. 実験概要

(1) 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメントを使用した。セメントの化学成分を表-1 に示す。なお、密度は 3.15g/cm³、ブレン比表面積は 3320cm²/g であった。

高炉スラグ微粉末は、密度 2.91g/cm³、ブレン比表面積 6290cm²/g のものを使用した。化学成分を表-2 に示す。

セッコウは、試薬の二水セッコウをブレン比表面積 6050cm²/g に粉砕したものをを使用した。密度は 2.32 g/cm³ であった。

石灰石微粉末は、密度 2.71g/cm³、ブレン比表面積 5100cm²/g のものを使用した。なお、XRD による

同定の結果、カルサイトであった。

混和剤は、ポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤を使用した。

細骨材は、海砂(表乾密度: 2.58g/cm³, 粗粒率: 2.67, 実積率: 64.0%)を使用した。粗骨材は、硬質砂岩砕石(最大寸法: 20mm, 表乾密度: 2.72g/cm³, 粗粒率: 6.82, 実積率: 59.9%)を使用した。

水は、上水道水を使用した。

(2) セッコウならびに石灰石微粉末の添加量

セッコウは、高炉スラグ微粉末とセッコウとの合計量に対して内割で SO₃ 量が 2.0, 3.5 および 5.0% となるように添加した。石灰石微粉末は、高炉スラグ微粉末と石灰石微粉末との合計量に対する添加率が内割で 20 および 60% となるよう添加した。

(3) コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-3 および表-4 に示す。また、各配合のフレッシュコンクリートの試験結果を表-5 に示す。高炉スラグ微粉末の混合率は、粉体材料の合計質量に対して 50% とした。セッコウあるいは石灰石微

粉末を添加した場合は、セッコウあるいは石灰石微粉末と高炉スラグ微粉末との合計質量が粉体材料中の50%となるように混合した。

(4) 検討項目および方法

a) 割裂引張強度

JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準拠した。供試体は $\phi 15 \times 20\text{cm}$ 円柱供試体とし、養生条件は20°C密封養生とした。試験材齢は、1, 3, 7, 28および91日とした。

b) 自己収縮ひずみ

日本コンクリート工学協会「超流動コンクリート研究委員会報告書(II) [付録1]高流動コンクリートの自己収縮試験方法」に準拠した¹⁹⁾。供試体は $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 角柱供試体とし、供試体全面をアルミ箔粘着テープでシールし、水分の逸散を防いだ。供試体中央部に埋め込み型ひずみ計を埋設し、ひずみを測定した。同時に供試体中央部の温度を測定し、コンクリートの線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/\text{C}$ として温度によるひずみの変化を補正した。測定は、20°C、60%RHの雰囲気において行い、供試体2本の平均値を測定値とした。自己収縮の基点は、凝結の始発時間とした。凝結時間は、JIS A 6204「コンクリート用化学混和剤 附属書1 コンクリートの凝結時間試験方法」に準拠した。

c) 空隙構造

日本コンクリート工学協会「超流動コンクリート研究委員会報告書(II) [付録3]細孔径分布の測定方法」に準拠した²⁰⁾。自己収縮ひずみ測定用の供試体と同様にシールし、20°C密封養生を施した $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱供試体の中心部から、所定の材齢に試料を採取した。試料は1片が約5mmとなるようダイヤモンドカッタで切断し、48時間D-dry後、水銀圧入式ポロシメータにより空隙径分布を測定し、50nm以下の平均空隙径、毛細管空隙量及びゲル空隙量を算出した。供試体は3体とし、3体の平均を測定値とした。測定材齢は割裂引張強度試験と同一とした。

d) ペースト硬化体による水和物の観察

ペースト硬化体により結合水量の測定およびXRDによる水和物の評価を行った。ペーストの水粉体比は33%、高性能AE減水剤の添加量は粉体質量の1.0%とした。セッコウならびに石灰石微粉末の添加量は、コンクリート試験に準じた。ホバート型ミキサにより3分間練り混ぜた後、プラスチック容器により20°C密封養生を行った。所定の材齢において、硬化体を粉砕し、アセトン浸漬により水和を停止した後、温度40°C、相対湿度15%雰囲気において恒量となるまで(16時間)乾燥処理を行い¹⁶⁾、以下の通り測定を行った。なお、測定材齢は割裂引張強度試験と同一とした。

結合水量は、熱分析700°Cまでの強熱減量から、二水セッコウの結合水として初めから固相中に存在していた水量の脱水による減量を差し引いたものを結合水量とした^{21),22)}。水和物の評価は、XRDの内部標準法により行なった。内部標準物質として塩化カリウムを5%内割添加し、相対積分強度比を求めた。水和物の生成量が増加するとXRDの回折ピークが大きくなり、標準物質との相対積分強度比も大きくなる。

3. 自己収縮特性に与えるセッコウの影響

(1) 自己収縮ひずみとセッコウ添加量

材齢4日までの自己収縮ひずみを図-1に、材齢14日までの自己収縮ひずみを図-2に、材齢91日までの自己収縮ひずみを図-3にそれぞれ示す。

Gyp0%の場合、材齢2日近辺でOPCよりも自己収縮ひずみが大きくなり、材齢14日まで自己収縮ひずみは増加し続けている。高炉スラグ微粉末を使用することにより、初期の自己収縮が増大することは既に示されており^{4),5)}、本研究の結果も同様の傾向である。材齢14日以降の自己収縮ひずみの増加はわずかであるが、材齢91日においてもOPCに比べて 50×10^{-6} 程度自己収縮ひずみが大きくなっている。

Gyp2.0%は、Gyp0%に比べて材齢1日以前の膨張量が大きくなる傾向にある。しかし、収縮に転じてからはGyp0%と同様に自己収縮ひずみが増加する傾向にある。Gyp3.5%では、材齢1日まで膨張が継続しており、最大の膨張ひずみはGyp2.0%の約2倍である。材齢1日以降は収縮に転じており、材齢6日近辺でOPCより自己収縮ひずみが大きくなっている。その後も自己収縮は継続しており、材齢14日の時点ではGyp0%に比べて収縮ひずみは小さくなっているものの、材齢40日近辺でほぼ同等のひずみとなっている。セッコウ添加量をさらに増やしたGyp5.0%では、材齢3日まではGyp3.5%とほぼ同様の挙動を示している。材齢3日以降は、Gyp3.5%に比べて自己収縮ひずみの増加が小さい傾向にあり、材齢91日においてもGyp0%に比べて約 100×10^{-6} 、OPCと比べても約 50×10^{-6} 、自己収縮ひずみが減少していることがわかる。

セッコウ添加量がSO₃量換算2.0%では、自己収縮の低減効果は認められなかったが、3.5%まで添加量を増やすと、材齢7日近辺までは、セッコウ無添加の場合に比べて自己収縮が低減する傾向にあった。さらに、5.0%まで添加量を増やすと、長期材齢においても自己収縮の低減効果が認められ、高炉スラグ微粉末を混合しない場合よりも自己収縮ひずみが小さくなった。高炉スラグ微粉末に一定量以上のセッコウを添加するこ

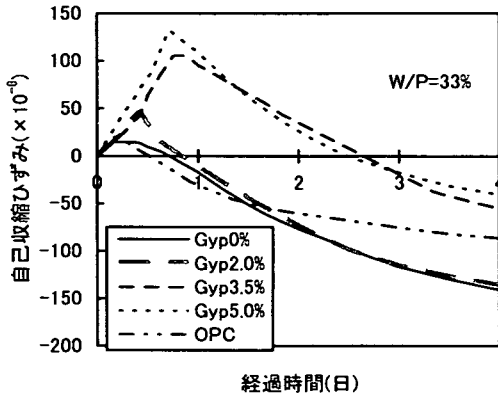


図-1 材齢と自己収縮ひずみの関係 (材齢 4 日まで)

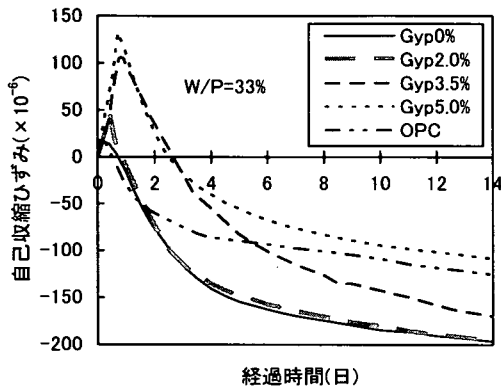


図-2 材齢と自己収縮ひずみの関係 (材齢 14 日まで)

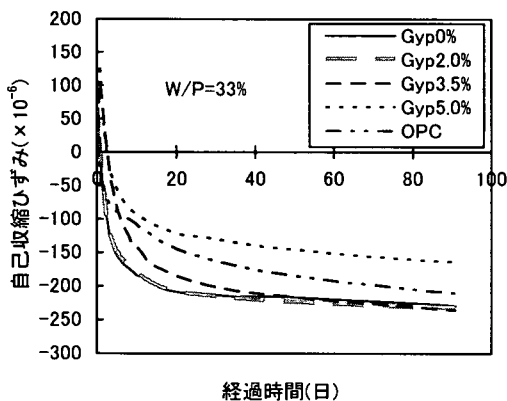


図-3 材齢と自己収縮ひずみの関係 (材齢 91 日まで)

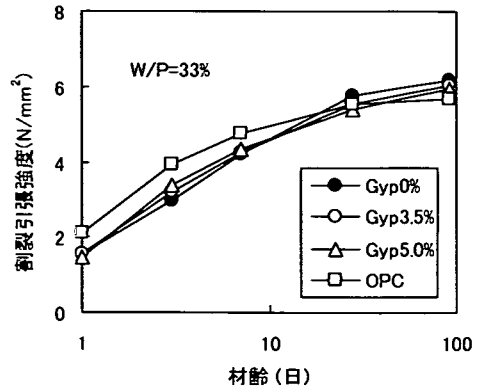


図-4 材齢と割裂引張強度の関係

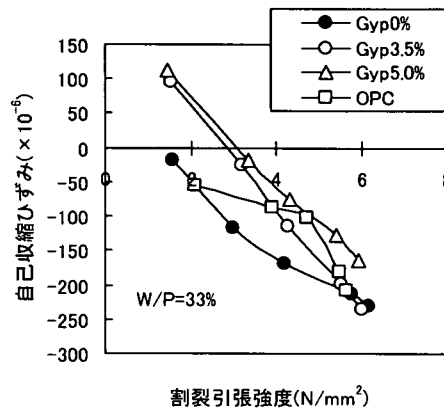


図-5 割裂引張強度と自己収縮ひずみの関係

とにより、高炉スラグ微粉末による自己収縮の増大を抑制することができるものと考えられる。

(2) 割裂引張強度と自己収縮ひずみの関係

以下の検討は、自己収縮の低減効果が認められた Gyp3.5%ならびに Gyp5.0%を中心に行なう。

a) 割裂引張強度に与えるセッコウの影響

材齢と割裂引張強度の関係を図-4 に示す。高炉スラグ微粉末を混合することにより、OPC に比べて初期の強度が低下し、長期の強度が向上する傾向にある。セッコウ添加量の影響についてみると、Gyp5.0%の場合、長期強度が Gyp0% に比べてわずかに低下する傾向にあるが、その他の場合、大きな変化は認められない。高炉スラグ微粉末に添加されたセッコウが、割裂引張強度に与える影響は小さいものと考えられる。

b) 割裂引張強度と自己収縮ひずみの関係

割裂引張強度と自己収縮ひずみの関係を図-5 に示す。

Gyp0%は、材齢7日までの初期材齢に相当する領域において、OPCに比べて同一割裂引張強度に対する自己収縮ひずみが大きくなる傾向にある。Gyp3.5%は、初期材齢に相当する領域においては、同一割裂引張強度に対するひずみがGyp0%およびOPCに比べて小さくなっている。しかし、長期材齢に相当する領域では、OPCとほぼ同等の値を示している。Gyp5.0%では、初期材齢だけでなく、長期材齢に相当する領域においても、OPCに比べて同一割裂引張強度に対するひずみが小さくなる傾向にある。

高炉スラグ微粉末に一定量以上のセッコウを添加することにより、自己収縮ひずみの増大を抑制できるだけでなく、単位引張強度あたりの自己収縮ひずみも小さくなるものと考えられる。セッコウ添加量をSO₃量換算で5.0%程度まで増加すると、長期にわたり単位引張強度あたりの自己収縮ひずみが小さくなる。この傾向から、一定量以上のセッコウを添加することにより、自己収縮に起因するひび割れに対する抵抗性が向上する可能性があるものと推定される。ただし、ひび割れ抵抗性の評価には、拘束ひび割れ試験やクリープ特性を考慮した議論が必要である。セッコウを添加した場合についても、今後より詳細な検討が必要であると考えられる。

(3) 自己収縮特性に与える空隙構造および水和特性の影響

自己収縮は、硬化体の自己乾燥の進行にともない増大する毛細管張力を駆動力として生じると考えられている^{23),24)}。すなわち、硬化体の空隙構造と自己乾燥状態の変化が重要となる。さらに、水和生成物の変化と自己収縮の関連についても指摘されている²⁵⁾。高炉スラグ微粉末に添加したセッコウが自己収縮特性に与える影響について、空隙構造および水和特性の変化から考察する。

a) 結合水量の影響

結合水量の大小は、硬化体の乾燥状態をそのまま反映するものではない。しかし、同一単位水量であり密封条件にある本研究の場合、結合水量が同じであれば、自由水の消費量も同じであり、硬化体に残っている水分量もほぼ同様であると考えられる。すなわち、結合水量が同等であれば、同様な乾燥状態にあるものと推定できる¹⁴⁾。ここでは、結合水量を硬化体の自己乾燥進行の指標として議論する。なお、ここで示す結合水量は、ペースト硬化体により測定したものである。

材齢と結合水量の関係を図-6に示す。セッコウ添加の有無に関わらず、いずれの材齢においても結合水量はほぼ同等となっている。SO₃量換算で5.0%程度までの添加量であれば、セッコウの添加は結合水量に影響

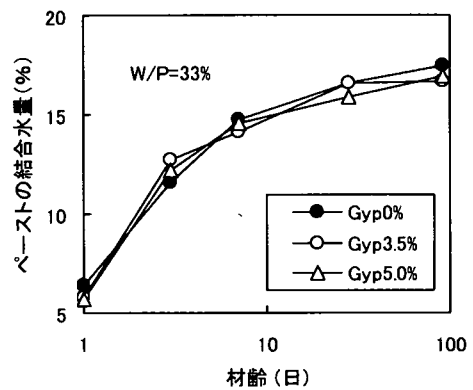


図-6 材齢とペーストの結合水量の関係

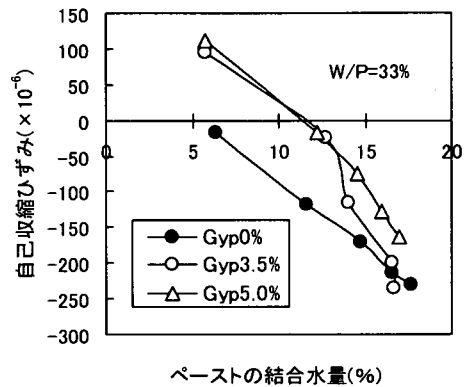


図-7 ペーストの結合水量と自己収縮ひずみの関係

を与えないと考えられる。すなわち、セッコウは自己乾燥の進行に大きな影響を与えないものと推定される。

結合水量と自己収縮ひずみの関係を図-7に示す。セッコウ添加の有無に関わらず、結合水量の増加にともない自己収縮ひずみが増加する傾向にある。いずれの場合も、自己乾燥の進行にともない、自己収縮ひずみが増大しているものと推定される。しかし、同一結合水量における自己収縮ひずみは、セッコウの添加量により異なっている。Gyp3.5%は、結合水量が小さい領域において、同一結合水量における自己収縮ひずみがGyp0%に比べて小さくなっている。結合水量6%近辺においては、同一結合水量であっても、Gyp0%の場合は収縮側にあるが、Gyp3.5%では膨張側にある。Gyp5.0%では、結合水量の挙動はGyp0%とほぼ同等であったが、全てのポイントにおいてGyp0%に比べて自己収縮ひずみが小さくなっている。

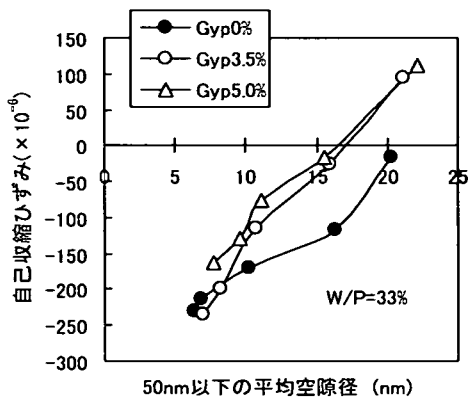


図-8 50nm 以下の平均空隙径と自己収縮ひずみの関係

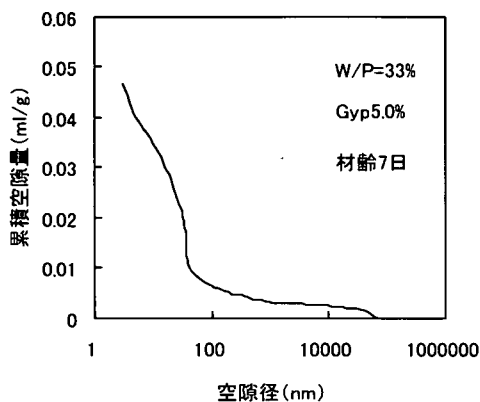


図-9 空隙径分布 (Gyp5.0%, 材齢 7 日)

以上より、高炉スラグ微粉末に添加したセッコウは、結合水量すなわち自己乾燥状態に大きな影響を与えないにも関わらず、自己収縮特性を大きく変化させていることがわかる。すなわち、セッコウが自己収縮特性に与える影響を、自己乾燥状態の変化から説明することは困難であると考えられる。

b) 空隙構造の影響

毛細管張力は、硬化体の空隙径が小さいほど大きくなる²⁶⁾。従って、空隙の小径化、空隙量の変化により、自己収縮特性が変化するものと考えられる。空隙構造の変化から、セッコウが自己収縮特性に与える影響を考察する。

筆者らは、高強度コンクリートの自己収縮と空隙構造との関係を検討し、50nm 以下の空隙の小径化にともない自己収縮ひずみが増加する傾向にあることを示した²⁷⁾。ここでも、50nm 以下の空隙の平均空隙径を

硬化体の緻密さを表す指標として用いることとする。

50nm 以下の空隙の平均空隙径と自己収縮ひずみとの関係を図-8 に示す。なお、平均空隙径は式(1)により算出した。

$$D_{av} = 4V/A \quad (1)$$

ここに、 D_{av} : 50nm 以下の空隙の平均空隙径、 V : 50nm 以下の空隙の全空隙量、 A : 50nm 以下の空隙の全表面積である。また、空隙径分布の例として、材齢 7 日における Gyp5.0%の空隙径分布を図-9 に示す。

いずれの配合についても、空隙径の減少にともない自己収縮ひずみが増加する傾向にある。セッコウ添加の有無に関わらず、空隙の小径化による毛細管張力の増加が自己収縮増大の要因となっているものと推定される。しかし、同一平均空隙径における自己収縮ひずみは、セッコウ添加の方がセッコウ無添加の場合に比べて小さくなっている。50 nm 以下の平均空隙径のみからセッコウ添加による自己収縮特性の変化を説明することは困難であると考えられる。図-8 の結果から、平均空隙径だけでなく、空隙量や空隙径分布の変化についても検討する必要があるものと推定された。

高炉スラグ微粉末を混合した系では、C-S-H に相当すると考えられるゲル空隙量の増加と自己収縮ひずみの増大との相関が指摘されている⁵⁾。また、膨張材による膨張機構の検討においては、硬化体の膨張により毛細管空隙量が増加するとの考察がなされている²⁸⁾。ここでは、ゲル空隙量と毛細管空隙量に与えるセッコウの影響を検討し、自己収縮との関連について考察する。なお、毛細管空隙は空隙径 6nm~2 μ m の範囲、ゲル空隙は空隙径 3~6 nm の範囲の空隙とした⁵⁾。

材齢とゲル空隙量の関係を図-10 に示す。Gyp5.0%の場合、いずれの材齢においても、セッコウ添加の有無に関わらずゲル空隙量はほぼ同等となっている。高炉スラグ微粉末に添加されたセッコウは、ゲル空隙の生成に大きな影響を与えないものと推定される。ゲル空隙の挙動からは、セッコウによる自己収縮の低減を説明することは困難であると考えられる。

材齢と毛細管空隙量の関係を図-11 に示す。セッコウを添加することにより、初期材齢から Gyp0%に比べて毛細管空隙量が増加する傾向を示している。Gyp5.0%の場合は、材齢 7 日ならびに 28 日において毛細管空隙量の増加が認められ、材齢 91 日においても、わずかではあるが Gyp0%に比べて毛細管空隙量が多くなる傾向を示している。Gyp3.5%の場合は、材齢 7 日以降は、Gyp5.0%に比べて毛細管空隙量は少なくなる傾向にある。毛細管空隙量の変化は、セッコウによる自己収縮の低減効果と連動している。Gyp5.0%では、

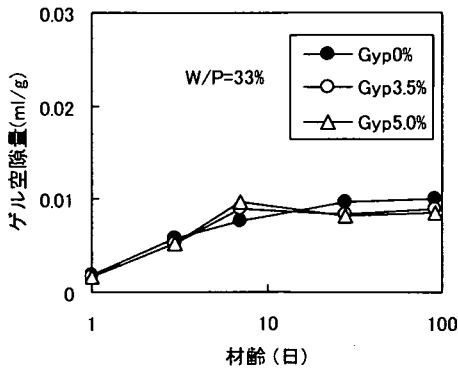


図-10 材齢とゲル空隙量の関係

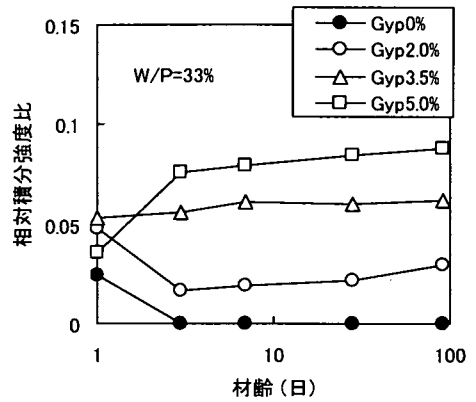


図-12 XRDによるエトリンガイトの相対積分強度比

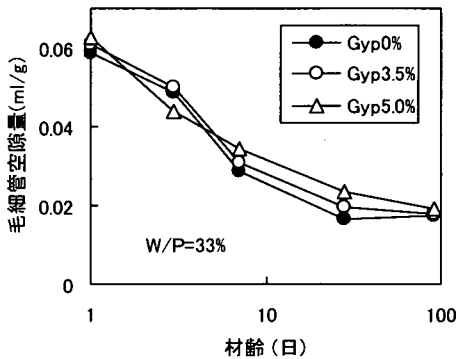


図-11 材齢と毛細管空隙量の関係

初期材齢において収縮低減効果が認められるが、この時期に毛細管空隙量が増加している。また、長期材齢においても、Gyp0%に比べて自己収縮ひずみが小さくなる傾向を示したが、毛細管空隙量もやや多くなっている。Gyp3.5%では、長期材齢においてはGyp0%とほぼ同等の自己収縮ひずみとなったが、毛細管空隙量もGyp0%とほぼ同等になっている。これらの傾向は、高炉スラグ微粉末にセッコウを添加することにより、硬化体が膨張し、毛細管空隙量が増加することを示唆している²⁸⁾。この膨張挙動が、セッコウによる自己収縮低減の大きな要因になっているものと推定される。ただし、材齢3日以前に認められる膨張傾向については、毛細管空隙量との相関性が低いことから、空隙構造の変化のみからの説明は困難であると思われる。

c) エトリンガイト生成との関連

セッコウは、セメント中のC₃Aあるいは高炉スラグ微粉末との反応により、膨張性を有すると考えられて

いるエトリンガイト(C₃A・3CaSO₄・32H₂O)を生成する^{9,10)}。セッコウによる自己収縮の低減効果の要因として、エトリンガイトの生成状態の変化が考えられる。ここでは、ペースト硬化体によりセッコウがエトリンガイトの生成に与える影響を検討し、自己収縮特性との関連について考察する。

材齢とエトリンガイトのXRDによる相対積分強度比との関係を図-12に示す。Gyp0%の場合、材齢1日においてはエトリンガイトの生成が認められるが、材齢3日以降は認められない。Gyp2.0%では、材齢1日から3日にかけてエトリンガイト生成量は減少し、材齢3日以降は生成量に大きな変化はみられない。Gyp3.5%では、材齢1日における生成量はGyp2.0%の場合と同等であるが、材齢の経過にともなう生成量の変化は認められず、長期にわたり生成量を維持している。Gyp5.0%の場合は、材齢1日の生成量はGyp2.0%およびGyp3.5%とほぼ同等であるが、材齢1日から3日にかけて生成量が増加し、その後材齢91日まで微増する傾向にある。高炉スラグ微粉末にセッコウを添加することにより、エトリンガイトの生成量が増加する傾向にあり、SO₃量換算で3.5%程度以上添加すると、長期にわたりエトリンガイトの生成を維持することが示された。

エトリンガイト生成量と自己収縮ひずみを、材齢に従い対比する。Gyp0%では、自己収縮ひずみが増大する材齢1日以降、エトリンガイトの生成が認められなくなっている。Gyp2.0%も、自己収縮ひずみはGyp0%と類似した挙動を示しているが、エトリンガイトは材齢1日から3日にかけて大幅に減少している。Gyp3.5%は、自己収縮ひずみが増大する材齢3日付近においてもエトリンガイトが存在しており、この時期セッコウの添加による自己収縮の低減効果が認められる。長期材齢においては、エトリンガイトの生成は維

持されているが、自己収縮ひずみは増加する傾向にある。Gyp5.0%は、材齢1日から3日にかけてエトリンサイト生成量が増加する傾向にある。これに連動するように、自己収縮の低減効果はGyp3.5%に比べて高くなっている。長期材齢においても自己収縮の低減効果が認められるが、エトリンサイトの生成量も微増する傾向にある。

以上から、セッコウの添加による自己収縮の低減効果は、エトリンサイトの生成と密接な関係があると考えられる。すなわち、初期材齢においてエトリンサイトの生成量が減少しない場合、初期材齢における自己収縮の低減効果が認められ、生成量が増加し生成が継続する場合は長期にわたり自己収縮の低減効果が認められる。寺野らは¹⁵⁾、高炉スラグ微粉末を使用した高強度コンクリートの自己収縮低減の手段としてセッコウの添加について検討し、セメントと高炉スラグ微粉末との合計量に対するSO₃量が4.0%となるよう添加した場合、材齢28日における自己収縮ひずみがセッコウ無添加の場合に比べて若干大きくなると報告している。本研究のように、エトリンサイトの生成が継続するようにセッコウの添加量を調整すると、長期にわたり自己収縮の低減が可能であると考えられる。ただし、所要添加量は水結合材比や高炉スラグ微粉末の混合割合により異なると思われるので、確認が必要である。

エトリンサイトによる硬化体の膨張機構については諸説あり、明確ではない¹⁶⁾。本研究の場合、エトリンサイトの生成量増加の傾向は、毛細管空隙量の変化に対応している。すなわち、SO₃量3.5%ならびに5.0%の場合、エトリンサイトの生成が継続することにより、毛細管空隙量が増加したものと考えることができる。エトリンサイト生成量が多いSO₃量5.0%の場合、毛細管空隙の増加量も大きく、長期にわたってその効果が認められる。盛岡は、膨張材による膨張機構の検討において、エトリンサイトの生成はC-S-Hの凝集構造を押し広げ毛細管空隙の増加をもたらすと考察している¹⁶⁾。本研究の場合も、セッコウの添加によりエトリンサイトの生成量が増加し、毛細管空隙量が増加したものと考えられる。

以上より、高炉スラグ微粉末に一定量以上のセッコウを添加した場合、エトリンサイトの生成が継続することにより硬化体中の毛細管空隙量が増加し、自己収縮の増大を抑制しているものと推定される。

4. 自己収縮特性に与える石灰石微粉末の影響

(1) 自己収縮ひずみと石灰石微粉末添加量

材齢14日までの自己収縮ひずみを図-13に、材齢91

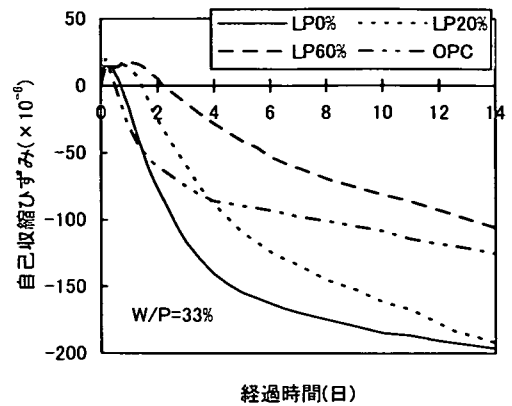


図-13 材齢と自己収縮ひずみの関係 (材齢14日まで)

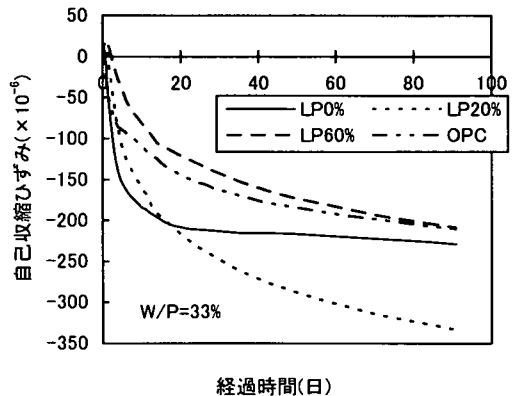


図-14 材齢と自己収縮ひずみの関係 (材齢91日まで)

日までの自己収縮ひずみを図-14にそれぞれ示す。

LP0%は、図-1、図-2および図-3に示したGyp0%と同一である。高炉スラグ微粉末の20%を石灰石微粉末で置換したLP20%の場合、材齢14日付近までは、LP0%に比べて自己収縮ひずみが減少している。しかし、材齢14日以降は、LP0%の自己収縮の増加が緩やかになるのに対し、LP20%は長期にわたり自己収縮が継続する傾向を示しており、材齢91日の自己収縮ひずみはLP0%に比べて約 100×10^{-6} 大きくなっている。長期にわたり自己収縮が継続する傾向は、普通ポルトランドセメントに石灰石微粉末を内割添加した高流動コンクリートの場合と類似している¹⁴⁾。しかし、石灰石微粉末無添加に対する自己収縮ひずみの増加量は、普通ポルトランドセメントに添加した場合より大きくなる傾向を示した。高炉スラグ微粉末の60%を石灰石微粉末で置換したLP60%では、LP0%あるいはOPC

に比べて初期の自己収縮ひずみが大幅に減少していることがわかる。しかし、LP20%の場合と同様に、長期にわたり自己収縮が継続する傾向にあり、材齢91日における自己収縮ひずみはLP0%とほぼ同等になっている。

石灰石微粉末を高炉スラグ微粉末の内割添加することにより、初期材齢において自己収縮の低減効果が認められた。しかし、石灰石微粉末無添加に比べて長期にわたり自己収縮が継続する傾向にあり、添加率20%の場合は自己収縮の大幅な増大が認められた。長期材齢において自己収縮の増大が認められることから、石灰石微粉末の少量添加は好ましくないと考えられる。

石灰石微粉末を使用した高流動コンクリートの自己収縮に関する報告例では、結合材を含む粉体材料に対する混合率が、内割で30~50%の場合が多い^{17,29)}。この場合、石灰石微粉末を混合しない場合に比べて、自己収縮の低減やひび割れ抵抗性の向上が認められている。本研究のLP20%は、粉体材料の内割混合率が10%であり、従来の報告例に比べて石灰石微粉末の混合率が少ない領域での検討となっている。石灰石微粉末を内割混合率10%程度の領域で使用した場合、混合率が多い場合に比べて長期材齢における自己収縮の挙動が異なり、ひずみの増加が顕著になったものと思われる¹⁴⁾。

(2) 割裂引張強度と自己収縮ひずみの関係

a) 割裂引張強度に与える石灰石微粉末の影響

材齢と割裂引張強度の関係を図-15に示す。材齢3日までは、石灰石微粉末添加による引張強度の顕著な変化は認められない。しかし、材齢7日以降は、石灰石微粉末の添加による引張強度の低下が認められ、添加率が大きいほどその傾向が顕著であった。図-4においても示されているように、高炉スラグ微粉末を混合することにより長期強度が増大する。本研究では、石灰石微粉末を高炉スラグ微粉末の内割添加としているため、特に長期材齢において石灰石微粉末添加による強度発現性の低下が顕著になったものと考えられる。

b) 割裂引張強度と自己収縮ひずみの関係

割裂引張強度と自己収縮ひずみの関係を図-16に示す。LP20%は、材齢7日までの初期材齢に相当する領域においては、石灰石微粉末無添加の場合と同等の関係にあるが、長期材齢に相当する領域においては、LP0%に比べて同一引張強度における自己収縮ひずみが著しく大きくなる傾向を示している。これは、LP20%は、長期材齢においてLP0%に比べて自己収縮ひずみが著しく増大すること、割裂引張強度が低下する傾向にあることを反映している。LP60%では、初期材齢に相当する領域では、OPCおよびLP0%に比べて

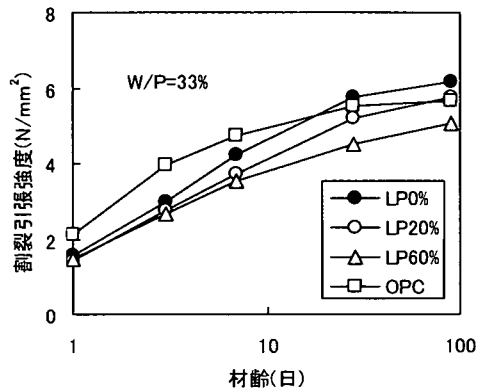


図-15 材齢と割裂引張強度の関係

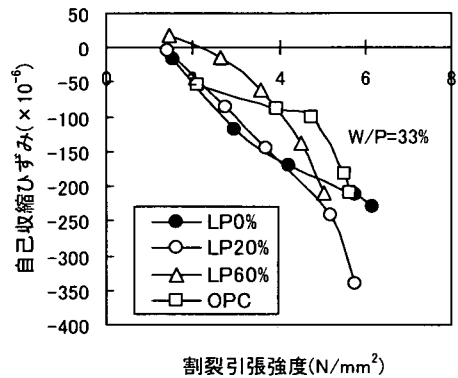


図-16 割裂引張強度と自己収縮ひずみの関係

同一引張強度における自己収縮ひずみが小さくなっている。しかし、長期材齢に相当する領域ではOPCおよびLP0%に比べて同一引張強度における自己収縮ひずみがやや大きくなっている。これも、LP20%同様、長期にわたり自己収縮が継続すること、ならびに割裂引張強度の低下によるものである。

石灰石微粉末を高炉スラグ微粉末の内割で60%程度添加することにより、初期材齢において単位引張強度あたりの自己収縮ひずみが小さくなった。しかし、添加率が20%程度の場合は、単位引張強度あたりの自己収縮ひずみの減少は認められなかった。また、長期材齢においては、石灰石微粉末の添加率に関わらず単位引張強度あたりの自己収縮ひずみは増加する傾向にあり、添加率が少ない場合に著しい増加を示した。自己収縮に起因するひび割れへの抵抗性の観点からは、高炉スラグ微粉末への石灰石微粉末の少量添加は好ましくないものと推定される。ただし、セッコウ添加の影響に関する議論と同様に、拘束ひび割れ試験による

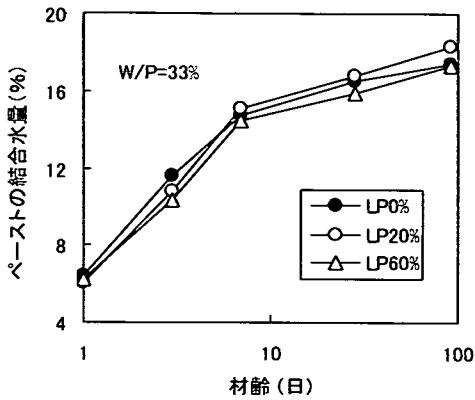


図-17 材齢とペーストの結合水量の関係

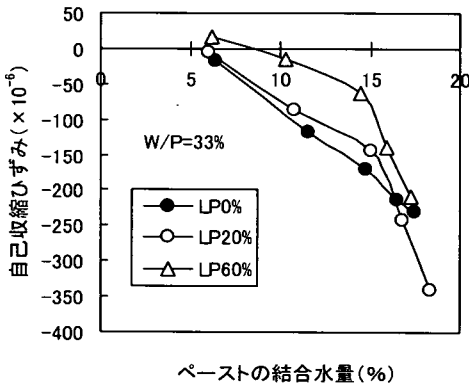


図-18 ペーストの結合水量と自己収縮ひずみ

確認やクリープ特性を考慮した解析が必要である。

(3) 自己収縮特性に与える空隙構造および水和特性の影響

石灰石微粉末が自己収縮特性に与える影響を、硬化体の空隙構造および水和特性の変化から考察する。

a) 結合水量の影響

セッコウ添加の影響の検討と同様に、結合水量を硬化体の自己乾燥進行の指標とし議論する。

材齢とペーストの結合水量の関係を図-17 に示す。LP20%は、材齢7日まではLP0%に比べて結合水量が小さいが、7日以降はLP0%に比べて結合水量が大きくなっている。材齢28日から91日にかけての増加率も、わずかではあるがLP0%に比べて大きくなる傾向を示している。LP60%は、材齢の経過にともなう結合

水量の変化はLP20%とほぼ同様の傾向を示しているが、各材齢における結合水量はわずかではあるがLP20%に比べて少なくなっている。石灰石微粉末を添加することにより、わずかではあるが初期材齢における自己乾燥の進行が緩和されるものと考えられる。これは、自己乾燥の緩和が初期材齢における石灰石微粉末の添加による自己収縮の低減の要因となっていることを示唆している。また、石灰石微粉末無添加の場合に比べて、緩やかではあるが長期にわたり自己乾燥が継続するものと推定される。

ペーストの結合水量と自己収縮ひずみの関係を図-18 に示す。石灰石微粉末添加の有無に関わらず、結合水量の増加、すなわち自己乾燥の進行にともない自己収縮が増加する傾向にあることがわかる。LP20%は、結合水量が約15%以下の領域においては、同一結合水量における自己収縮ひずみは、LP0%とほぼ同等である。これは、材齢7日までの初期材齢に相当する領域である。しかし、結合水量が15%を超える領域においては、LP20%のみ、結合水量のわずかな変化に対して自己収縮ひずみが著しく増加している。これは、図-14 に示した長期材齢における自己収縮の増大に相当する。ここでは、自己乾燥の進行は緩やかになっているが、自己収縮の増大は継続しているものと考えられる。

LP60%は、結合水量が約15%以下の領域においては、LP0%およびLP20%よりも同一結合水量における自己収縮ひずみが小さくなっている。図-17 に示したように、初期材齢において自己乾燥が緩和される傾向にあるので、自己乾燥の緩和がLP60%の自己収縮低減の一因になっているものと考えられるが、図-18 の関係から自己乾燥の緩和以外の要因も大きな影響を与えていると考えられる。結合水量が15%を超える領域では、LP20%と同様に結合水量のわずかな変化に対して自己収縮ひずみが著しく増加している。

石灰石微粉末の添加による初期材齢における自己収縮の低減効果は、自己乾燥の緩和を一因とするものと考えられる。しかし、LP60%については、空隙構造の変化についても考慮する必要があると考えられる。

b) 空隙構造の影響

セッコウ添加の影響の検討と同様に、50nm以下の空隙の平均空隙径と自己収縮との関係を検討する。材齢と50nm以下の空隙の平均空隙径の関係を図-19 に示す。また、空隙径分布の例として、材齢7日におけるLP60%の空隙径分布を図-20 に示す。LP20%は、いずれの材齢についてもLP0%とほぼ同等の平均空隙径となっている。LP60%は、材齢3日以降、いずれの材齢においてもLP0%に比べて平均空隙径が小さい傾向にある。これは、LP60%における自己収縮の低減効果が、石灰石微粉末の添加による硬化体の緻密化の緩

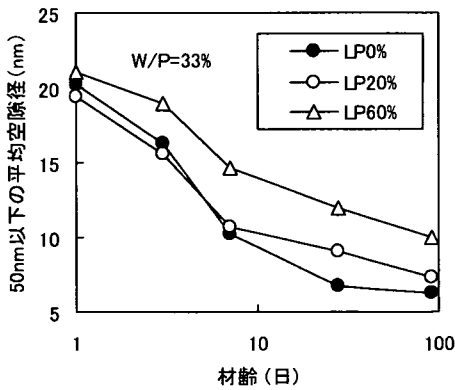


図-19 材齢と50nm以下の平均空隙径の関係

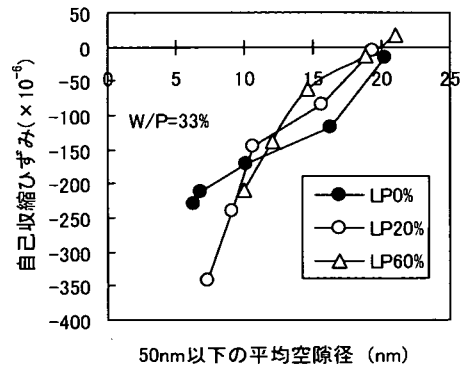


図-21 50nm以下の平均空隙径と自己収縮ひずみの関係

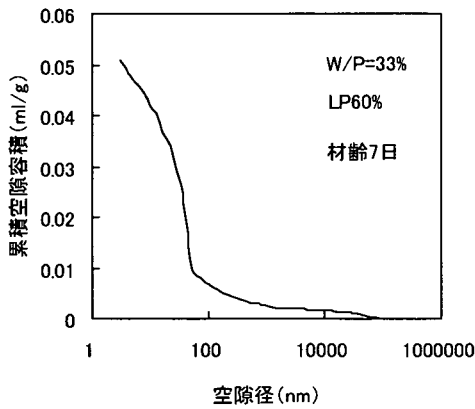


図-20 空隙径分布 (LP60%, 材齢7日)

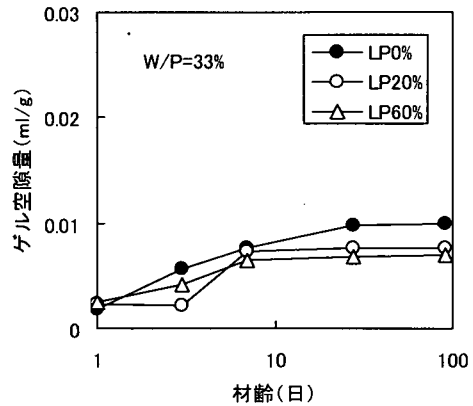


図-22 材齢とゲル空隙量の関係

和に起因することを示唆している。50nm以下の空隙の平均空隙径と自己収縮ひずみとの関係を図-21に示す。石灰石微粉末の添加量に関わらず、空隙構造の小径化にともない自己収縮ひずみが増加している。石灰石微粉末添加の有無に関わらず、毛細管張力が自己収縮の駆動力となっているものと考えられる。同一空隙径における自己収縮ひずみは、平均空隙径が約10nm以上の領域では石灰石微粉末添加の有無に関わらずほぼ同等であるが、平均空隙径が小さい領域においては、石灰石微粉末を添加した場合、無添加に比べて同一空隙径における自己収縮ひずみが著しく増加する傾向にある。これは、図-14に示した長期にわたり継続する自己収縮に相当するものである。平均空隙径の変化が小さいにも関わらず自己収縮ひずみが増加していることから、毛細管空隙より微細な空隙の構造変化^{5),26)}

水和生成物の変化²⁵⁾等に起因する収縮についても考慮する必要があると推定される。

材齢とゲル空隙量の関係を図-22に示す。ゲル空隙は空隙径3~6nmの範囲の空隙とした⁵⁾。石灰石微粉末の添加により自己収縮が増大する長期材齢において、ゲル空隙量の増大は認められない。筆者らは、シリカフェームを混合した高強度コンクリートにおいて観察された長期材齢における自己収縮の増大について、ゲル空隙量の増加の影響を受け生じるものと推定した²⁷⁾。本実験では、石灰石微粉末の添加によりゲル空隙量はわずかではあるが減少する傾向にあることから、ゲル空隙の挙動から長期材齢における自己収縮の増加について議論することは難しいと思われる。

c) 石灰石微粉末の反応と自己収縮の関係

図-22に示した様に、長期材齢においてはC-S-Hの

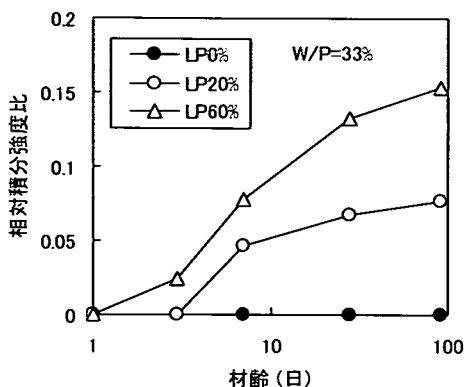


図-23 XRDによるカルシウムモノカーボネートの相対積分強度比

生成によるものと考えられるゲル空隙量に大きな変化が認められないことから、C-S-H 以外の水和生成物の挙動について検討する必要があると考えられる。石灰石微粉末は、セメント中の C_3A と反応しカルシウムカーボネートを生成することが示されている^{30),31),32)}。石灰石微粉末添加により自己収縮が増大していることから、石灰石微粉末の反応が影響を与えているものと推定される。ここでは、ペースト硬化体においてカルシウムモノカーボネート ($C_3A \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$) の挙動を検討し、自己収縮特性との関連について考察する。なお、 C_3A の反応生成物として $C_4A \cdot 13H_2O$ ($C_3A \cdot Ca(OH)_2 \cdot 12H_2O$) も考えられるが、本研究では確認されなかった。セッコウを添加したポルトランドセメントの水和反応における AFm 相はモノサルフェート ($C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$) が生成するため、 $C_4A \cdot 13H_2O$ の生成は非常に難しいと考えられる^{33),34)}。

材齢とカルシウムモノカーボネートの XRD による相対積分強度比との関係を図-23 に示す。石灰石微粉末を添加することにより、無添加の場合には認められないカルシウムモノカーボネートの生成が認められる。LP20%では材齢7日から、LP60%では材齢3日から生成を開始しており、いずれの場合も材齢91日まで生成は継続している。すでに推定されているように、石灰石微粉末の反応は、セメント中のセッコウが消費された後、長期にわたり緩やかに進行する³²⁾。図-23の結果は、普通ポルトランドセメント-高炉スラグ微粉末-石灰石微粉末混合系においても、石灰石微粉末の反応が長期にわたり継続していることを示すものである。これより、石灰石微粉末の反応が、図-17 に示した長期材齢における結合水量の微増の要因になっているものと考えられる。従って、石灰石微粉末を添加した場

合に認められる長期材齢における自己収縮の増加は、石灰石微粉末の反応にともなう自己乾燥の進行により生じるものと推定される。これは、普通ポルトランドセメントに石灰石微粉末を内割混合した場合の検討結果と同様の傾向である¹⁴⁾。ただし、図-19 および図-21 の考察で述べた様に、長期材齢における自己収縮の増加については、毛細管張力による収縮以外の要因について考慮する必要があると考えられる。

セメント系硬化体の収縮機構については、毛細管張力以外に分離力、層間水の移動等の影響についても指摘されている²⁶⁾。これらの機構による収縮は、水和生成物の構造変化および微量な水分変化の影響を受けると考えられる。長期材齢における結合水量の増加は初期材齢に比べて微量であること、石灰石微粉末の水和反応による水分の消費量はセメントあるいは高炉スラグ微粉末の水和による消費量に比べて微量であると考えられることから、長期材齢における自己収縮の増加の機構においては、上述した様な毛細管張力による収縮以外の要因についても考慮する必要があると推定される。

石灰石微粉末の水和反応が長期材齢における自己収縮増加の要因であると推定したが、石灰石微粉末とセメント中の C_3A との反応により生成するカルシウムモノカーボネートについては、硬化体の収縮を補償するとの指摘もなされているので³⁵⁾、今後詳細な検討が必要である。さらに、石灰石微粉末添加による長期材齢における自己収縮ひずみの増加量は、普通ポルトランドセメント-石灰石微粉末系よりも、普通ポルトランドセメント-高炉スラグ微粉末-石灰石微粉末系の方が大きくなる傾向を示したことから¹⁴⁾、石灰石微粉末と高炉スラグ微粉末との反応性についても今後検討する必要があると考える。

5. まとめ

高炉スラグ微粉末を使用した粉体系高流動コンクリートの自己収縮特性に与えるセッコウならびに石灰石微粉末の影響について検討し、空隙構造あるいは水和特性からその機構について考察を行った。得られた結果を以下に示す。

(1) 高炉スラグ微粉末に一定量以上のセッコウを添加することにより、自己収縮ひずみが低減するとともに、単位引張強度あたりの自己収縮ひずみが減少した。セッコウ添加による自己収縮の低減は、エトリンタイトの生成にともなう毛細管空隙量の増加によるものと推定される。自己収縮の低減効果を高めるためには、自己収縮が増大する初期材齢においてエトリンタイトの

生成量が増加するとともに、長期にわたり生成が維持されるようにセッコウの添加量を調整する必要があると言える。

(2) 石灰石微粉末を高炉スラグ微粉末に添加することにより、初期材齢において自己収縮ひずみが低減するとともに、単位引張強度あたりの自己収縮ひずみが減少した。長期材齢においては、石灰石微粉末の添加量に関わらず、自己収縮ひずみの増加が継続する傾向が認められた。特に石灰石微粉末の添加率が少ない場合は、長期材齢における自己収縮ひずみが増大する可能性があるもので注意が必要である。

(3) 石灰石微粉末の添加による初期材齢の自己収縮ひずみの減少は、自己乾燥ならびに硬化体の緻密化の緩和による毛細管張力の低下に起因するものと推定される。長期にわたり継続する自己収縮は、石灰石微粉末の反応による微量な水分変化や水和生成物の構造変化の影響を受け生じるものと推定される。

参考文献

- 1) 土木学会：高流動コンクリート施工指針，pp.44-45，1998。
- 2) 日本建築学会：高炉スラグ微粉末を使用するコンクリートの調査設計・施工指針(案)・同解説，pp.119-127，1996。
- 3) 田澤榮一，宮澤伸吾：セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響，土木学会論文集，No.502/V-25，pp.43-52，1994。
- 4) 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。
- 5) 平尾 宙，内川 浩，羽原俊祐：硬化セメントペーストの湿度及び硬化体構造の変化と自己収縮，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.705-710，1996。
- 6) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp.81，1996。
- 7) 土木学会：コンクリート構造の時間依存性変形・ひび割れ評価—現状と今後の課題—，pp.61-66，2000。
- 8) 加藤弘義，中村明則，吉岡一弘，宮川豊章：高炉スラグ微粉末を使用した高流動コンクリートの流動性に与えるセッコウの影響，材料，Vol.49，pp.1109-1114，2000。
- 9) 荒井康夫：セメントの材料化学，pp.131-137，大日本図書，1990。
- 10) 近藤連一，大沢栄也：高炉水砕スラグの定量およびセメント中のスラグの水和反応速度に関する研究，窯業協会誌，No.77，pp.11-18，1969。
- 11) セメント協会：セメント硬化体研究委員会報告，pp.186-188，2001。
- 12) 例えば 保田雅彦，古屋信明，糸日谷淑光，有馬 勇：1,900m³/日を可能にしたアンカレイジの施工，セメント・コンクリート，No.558，pp.60-64，1993。
- 13) 坂井悦郎，中川晃次，三原敏夫，大門正機：ファイラーセメント，わかりやすいセメント科学，セメント協会，pp.54-60，1993。
- 14) 加藤弘義，中村明則，土井宏行，宮川豊章：石灰石微粉末を使用した高流動コンクリートの強度ならびに自己収縮特性，材料，Vol.50，pp.543-549，2001。
- 15) 寺野宜成，小田部裕一，安本礼持，鈴木康範：収縮低減剤の使用および石膏量が自己収縮ひずみに及ぼす影響について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.1，pp.727-732，1999。
- 16) 盛岡 実：セメント系膨張材の水和反応と材料設計，東京工業大学学位論文，1999.9。
- 17) 横井謙二，新藤文文，横田和直：低発熱型高流動コンクリートの収縮特性，土木学会第51回年次学術講演会講演概要集第V部門，pp.698-699，1996。
- 18) 和泉意登志：高流動コンクリート(建築)，コンクリート工学，Vol.49，No.11，pp.41-43，1998。
- 19) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書(II)，pp.209-210，1994。
- 20) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書(II)，pp.216-221，1994。
- 21) 大門正機，宋 宗澤，西田明生，山口 修，金 昌殷：高炉水砕スラグ—硫酸カルシウム系水和反応の液相分析による検討，Gypsum & Lime，No.178，pp.24-29，1982。
- 22) 近藤連一，宋 宗澤，後藤誠史，大門正機：種々の刺激剤による高炉水砕スラグの潜在水硬性，鉄と鋼，Vol.65，No.13，pp.1825-1829，1979。
- 23) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp.43-50，1996。
- 24) 石田哲也，Rajesh P.CHAUBE，岸利治，前川宏一：微視的機構に基づくコンクリートの自己収縮，乾燥収縮及びその複合に関する解析的検討，土木学会論文集，No.578/V-37，pp.111-121，1997。
- 25) 高橋俊之，中田英喜，吉田孝三郎，後藤誠史：セメントペーストの自己収縮に及ぼす水和反応の影響，コンクリート工学論文集，Vol.7，No.2，pp.137-142，1997。
- 26) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp.51-54，1996。
- 27) 加藤弘義，牛山宏隆：高強度コンクリートの自己収縮に及ぼす空隙構造の影響，セメント・コンクリート論文集，No.52，pp.968-973，1998。
- 28) 樋口隆行，盛岡 実，坂井悦郎，大門正機：膨張材を

- 混和したセメントペーストの膨張挙動におよぼす膨張材混和時期の影響, セメント・コンクリート論文集, №54, pp.105-109, 2000.
- 29) 安本礼持, 枝松良展, 水越睦視, 長岡誠一: 高流動コンクリートの収縮ひびわれにおける結合材種類の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, №1, pp.133-138, 1997.
- 30) 真鍋敏雄, 川田尚哉, 西山雅也: カルシウム・カルボアルミネートについての2, 3の実験, セメント技術年報, №15, pp.54-61, 1961.
- 31) 坂井悦郎, 中村明則, 大場陽子, 李 琮揆, 大門正機: カルシウムアルミネートの水和反応におよぼす石灰石微粉末の影響, 無機マテリアル, Vol.4, pp.126-131, 1997.
- 32) 李 琮揆, 大場陽子, 坂井悦郎, 大門正機: C_3A - $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ - $CaCO_3$ 系の水和反応におよぼす $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ の添加率の影響, 無機マテリアル, Vol.5, pp.290-295, 1998.
- 33) セメント協会: わかりやすいセメント科学, pp.61-62, 1993.
- 34) 李 琮揆, 大場陽子, 坂井悦郎, 大門正機: 石灰石微粉末を多量に添加した C_3A - $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 系の水和反応, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, №2, pp.13-18, 1998.
- 35) 大原 功, 岩瀬俊次, 岳上広光, 竹内昭治: 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.
- (2001. 8. 22 受付)

INFLUENCE OF GYPSUM AND LIMESTONE POWDER ON AUTOGENOUS SHRINKAGE OF HIGH-FLOW CONCRETE WITH GROUND GRANULATED BLAST-FURNACE SLAG

Hiroyoshi KATO, Toyoaki MIYAGAWA, Akinori NAKAMURA and Hiroyuki DOI

The influence of gypsum and limestone powder on autogenous shrinkage of high-flow concrete made with ground granulated blast-furnace slag (BFS) were investigated. Gypsum or limestone powder was added to BFS. Addition of gypsum reduced autogenous shrinkage strain and improved the resistance to cracking due to autogenous shrinkage strain. It was suggested that the increase of the capillary pore volume due to the addition of gypsum related to the reduction of autogenous shrinkage. Addition of limestone powder reduced autogenous shrinkage strain and improved the resistance to cracking due to autogenous shrinkage strain at early ages, but autogenous shrinkage kept increasing at long ages with addition of limestone powder. It was suggested that the reaction of limestone powder caused the increase of autogenous shrinkage at long ages.