

# 低温環境下における石灰石微粉末を添加した コンクリートの強度発現性に関する基礎的研究

岩城一郎<sup>1</sup>・三浦尚<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 東北大学講師 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

<sup>2</sup>フェロー 工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

著者らの既往の研究により、石灰石微粉末を混和した高流動コンクリートは低温下において優れた強度発現性を示すことが確認されたため、石灰石微粉末の産地、粉末度、添加量を変化させてモルタル供試体を作製し、様々な養生条件下における強度発現性を調査した。その結果、石灰石微粉末の添加により低温下における強度発現が顕著に増進し、その効果は石灰石微粉末の粉末度及び添加量に依存することが明らかになった。そこで、石灰石微粉末の添加による強度発現機構を解明するため、さらなる検討を行った結果、低温下における石灰石微粉末の添加による強度発現増進効果は、主に石灰石微粉末表面が氷和生成物の析出サイトとして寄与することに起因し、石灰石微粉末の多量添加に伴う強度の増進は、主に石灰石微粉末の空隙充てん効果によるとの結論が導かれた。

*Key Words: limestone powder, strength development, self-compacting concrete, cold weather condition, hydration products, filler effect*

## 1. はじめに

石灰石微粉末は、日本各地に豊富に存在する石灰石を比較的容易に粉砕することにより得られるため、安価で入手しやすい建設材料であると言える。石灰石微粉末をコンクリート用混和材として使用することにより、流動性や材料分離抵抗性の改善、ブリーディングの抑制、初期の強度発現の促進といった効果が期待されるが、さらに水和熱を上昇させることのない粉体としてコンクリート中に添加することが可能なため、近年急速に普及してきた高流動コンクリートの粉体としての使用例が増加している<sup>1)</sup>。

高流動コンクリートのうち、打込み時の振動・締固め作業を行うことなく、型枠の隅々まで充てんすることが可能な自己充てん性を有する高流動コンクリートは、構造物の信頼性を向上させることができるだけでなく、工事現場の省力化、省人化、合理化を図ることができるため<sup>2)</sup>、今後ますます施工例が増加するものと予想される。特に寒冷地において冬期にコンクリート施工を行う場合、氷点下あるいはそれに近い非常に厳しい労働条件下での打込み作業となるため、寒冷地においても自己充てん性を有する高流動コンクリートが普及すれば、現場の施工環境が大幅に改善されるだけでなく、信頼性の高いコンクリート構造物が実現するものと思われる。

高流動コンクリートは一般に、比較的少量の高性能AE減水剤または高性能減水剤を添加し、流動性を高めるとともに、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、石灰石微粉末等の粉体を混和することにより粘性を付与するか、増粘剤を添加し材料分離抵抗性を高める必要がある。このうち、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを高流動コンクリートの粉体として使用する場合、寒冷地のような低温環境下では、これらの混和材の反応性が著しく低下するため、初期の強度発現の遅延や長期強度の低下が懸念される。一方、石灰石微粉末を高流動コンクリートの粉体として使用した場合の低温環境下における強度発現性について調べた研究例は数少ない。

以上の背景から、著者らは低温養生を行った各種高流動コンクリートの強度発現性を調査し、その研究成果を報告している<sup>3)</sup>。実験概要は、高炉スラグ微粉末を混和した粉体系高流動コンクリート、石灰石微粉末を混和した併用系高流動コンクリート、及び増粘剤系高流動コンクリートを想定したモルタル供試体を作製し、20℃及び5℃一定封かん養生を行い、強度発現性を比較検討するというものである。結果の一例を図-1に示す。ここで、粉体系高流動コンクリートは、水結合材比32%、高炉スラグ微粉末6000を置換率70%で混和した配合であり、併用系高流動コンクリートは水粉体比32%（水セメント比52.9%）、プレーン比表面

表-1 セメントの試験成績

種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝結			圧縮強さ (MPa)			MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	L.O.I. (%)	C <sub>3</sub> A (%)
			水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)	3日	7日	28日				
普通ポルトランドセメント	3.15	3380	28.1	2-20	3-30	16.2	26.5	41.6	1.5	1.8	1.8	9

表-2 石灰石微粉末及び安山岩碎石粉の試験成績

種類	記号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	強熱減量 (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)
石灰石微粉末A	La	2.70	3830	42.7	0.1	0.2	0.2	48.7	0.3	0.2
石灰石微粉末B	Lb	2.69	3530	42.6	0.0	0.0	0.1	46.6	0.7	0.2
石灰石微粉末C	Lc	2.69	18870	42.6	0.0	0.0	0.1	46.6	0.7	0.2
安山岩碎石粉	A	2.75	3380	2.0	55.5	12.7	10.6	6.6	3.3	0.2

積3830cm<sup>2</sup>/gの石灰石微粉末を全粉体量の40%内割置換するとともに増粘剤を添加したものである。増粘剤系高流動コンクリートは、水セメント比50%のセメント単味の配合に増粘剤を添加したものである。配合の詳細は文献<sup>9)</sup>を参照されたい。図より、高炉スラグ微粉末を混和した粉体系高流動コンクリートでは、20℃養生と比べ5℃養生で初期の強度発現が著しく遅延し、材齢56日においても両者の強度に大きな差がある。一方、石灰石微粉末を混和した併用系高流動コンクリートでは、材齢初期から5℃養生の強度発現が増進し、材齢14日以降、20℃養生と同程度の強度発現性を示している。増粘剤系高流動コンクリートでは、20℃養生と5℃養生で強度発現に開きがあるものの、両者の強度差は高炉スラグ微粉末を混和した粉体系高流動コンクリートほど大きくはない。また、図には示していないが、増粘剤系高流動コンクリートと増粘剤を添加しない普通コンクリートの強度発現性は、ほぼ等しいことが確認されている。

以上の検討結果のうち、石灰石微粉末を混和した高流動コンクリートが低温下において優れた強度発現性を示すことが立証されれば、寒冷地においても、強度発現性に優れ、経済的で汎用性の高い高流動コンクリートの施工が可能になるものと思われる。そこで本研究では、低温下における石灰石微粉末を混和したコンクリートの強度発現性に及ぼす石灰石微粉末の種類及び添加量、養生条件といった影響を明らかにすることを目的とした。これらの要因がコンクリートの強度発現性に及ぼす影響を調べるのであれば、モルタルによりその傾向を十分に把握することが可能であると判断し、本実験ではモルタル供試体により強度発現性を調べることにした。さらに、以上の検討結果を踏まえて、石灰石微粉末の添加によるセメント硬化体の強度発現機構についても詳細な検討を行った。

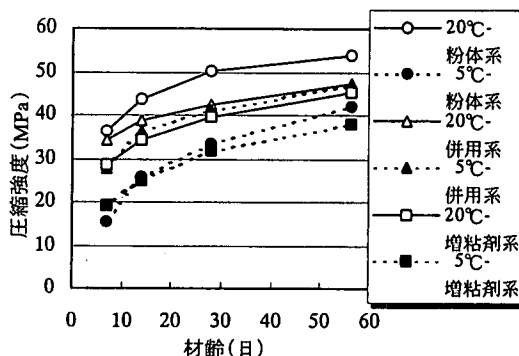


図-1 高流動コンクリートの強度発現性

尚、本論文は著者らによって行われた既往の研究成果<sup>9)</sup>に新たな実験データを加え、取りまとめたものである。

## 2. 実験概要

### (1) 使用材料及び配合

セメントは表-1に示す普通ポルトランドセメントを使用した。石灰石微粉末は、産地や比表面積の異なる3種類を使用した。プレーン比表面積3830cm<sup>2</sup>/gの石灰石微粉末を基本とし、これをLaと記す。またLaとほぼ同じ比表面積で産地の異なる石灰石微粉末をLb、Lbと産地が同じで比表面積が著しく高い石灰石微粉末をLcとする。これら3種類の石灰石微粉末は何れもコンクリート用石灰石微粉末品質規格(案)<sup>1)</sup>を満足するものである。一方、安山岩碎石をボールミルにより粉碎し、La、Lbと同程度の比表面積に調整した安山岩碎石粉(A)についても石灰石微粉末とは構成鉱物の異なる微粉末として実験に供した。石灰石微粉末及び安山岩碎石粉の試験成績及び粒度分布を表-2及び図-2にそれぞれ示す。砂は宮城県大和町産の山砂を

表-3 細骨材の試験成績

表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	粗粒率	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	洗い試験 (%)	有機不純物
2.55	2.63	2.07	1560	0.40	合格

表-4 配合表(内割シリーズ)

石灰石 微粉末 置換率 (%)	水セメント 比 (%)	水粉体 比 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
			水	セメント	石灰石 微粉末	細骨材	粗骨材	高性能 AE 減水剤
			W	C	L	S	G	
0	30.0	30	168	560	—	820	887	14.56
10	33.3			504	56	812		10.08
20	37.5			448	112	805		8.68
30	42.9			392	168	797		8.68
40	50.0			336	224	790		8.68
60	75.0			224	336	775		8.68
80	150.0			112	448	760		7.84

使用した(表-3参照)。高性能AE減水剤は主成分がポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体で、低空気量タイプのを、また高性能減水剤は主成分がナフタリンスルホン酸・ホルマリン高縮合塩のものを使用した。

配合は、高流動コンクリートを想定した配合と石灰石微粉末(あるいは安山岩砕石粉)の添加が強度発現性に及ぼす影響を調べるための配合の2種類に大別される。高流動コンクリートを想定した配合では、水粉体比を一定とし、石灰石微粉末を粉体量に対して内割置換している。一方、石灰石微粉末の添加が強度発現性に及ぼす影響を調べるための配合では、水セメント比を一定とし、セメントに対して外割で石灰石微粉末を添加し、その分を細骨材と体積置換している。以下、これらの配合を内割シリーズ、外割シリーズと記して区別する。表-4に内割シリーズの実験対象となる高流動コンクリートの配合表を示す。表より内割シリーズでは、石灰石微粉末を混和した粉体系高流動コンクリートを想定し、水粉体比30%一定の条件で、石灰石微粉末の置換率を0、10、20、30、40、60、80%と変化させた。モルタル供試体の配合は、表-4に示す粉体系高流動コンクリートの配合から粗骨材を取り除くことにより設定し、高性能AE減水剤の添加量は、各配合の流動性がほぼ一定となるよう文献<sup>9)</sup>に示されているフロー試験に従い、相対フロー面積比が5.0±0.5となるように調整した。また、置換率40%の配合については、表-4の配合に従い、実際に高流動コンクリートを作製し、モルタル供試体との強度発現性の比較を行った。

一方、表-5には外割シリーズにおける各モルタル材料の質量比を示す。外割シリーズでは、水セメント比50%、水とセメントと細骨材の質量比を0.5:1:2.5とし

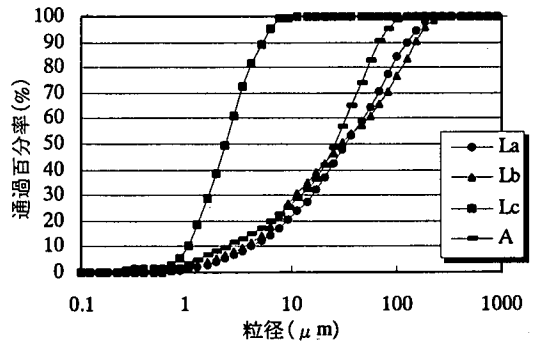


図-2 石灰石微粉末及び安山岩砕石粉の粒度分布

た配合を基本とし、これをO5と記す。石灰石微粉末の種類の違いや安山岩砕石粉の添加が強度発現性に及ぼす影響を調べる実験では、水セメント比一定で、水粉体比が30%となるように石灰石微粉末(あるいは安山岩砕石粉)を添加した。このときの石灰石微粉末の外割置換率は約66.7%となる。また、石灰石微粉末の添加量の影響を調べる実験では、水粉体比が20%(置換率150%)になるまでLaを添加した。以下、これらの配合を例えばO5La3のように表すこととし、この場合、水セメント比50%の基本配合に石灰石微粉末Aを添加し、水粉体比30%とした配合を意味する。高性能減水剤の添加量は、JIS R 5201の方法に従い、モルタルフロー値が170-190となるように調整した。

## (2) 実験方法

モルタルの練混ぜは、20℃一定恒温室内にて10リットルの強制練りミキサーを用いて行った。まず、セメント、石灰石微粉末、細骨材を練り鉢に入れ、30秒間空練りした後、ミキサーを止めて、あらかじめ混和剤を加

えておいた練混ぜ水を投入した。ミキサを再始動させ、30秒間練り混ぜた後、20秒間休止させて、その間に練り鉢の表面などに付着したモルタルをかき落とし、再び120秒間練り混ぜた。モルタルは練混ぜ後、圧縮強度試験用供試体を作製するため、φ5×10cmの円柱型枠に打ち込み、所定の養生を行った。養生温度は20℃及び5℃を基本とした。ここで、20℃は標準的な養生温度であり、5℃は寒冷地における日平均気温を想定した温度である。ただし、一部の試験ではさらに低温にさらされた場合を想定し、0℃においても試験を行った。キャッピングは原則として打込みの翌日に行い、脱型はさらにその翌日に行った。基本となる養生方法は、寒冷地において望ましいと判断される封かん養生を採用した。その理由は、寒冷地でコンクリート施工を行う場合、気中養生では十分な強度発現が得られないことがわかっており<sup>7)</sup>、また、寒冷地における実際の現場で長期にわたり水中養生を継続することは難しいと考えられるためである。ただし、一部の試験では強度発現性に及ぼす養生方法の影響を調べるため、水中養生及び気中養生についても試験を行った。封かん養生では、モルタル打ち込み後、直ちに型枠上面を食品用ラップフィルムと輪ゴムで密封し、型枠脱型後、ラップフィルムで供試体を巻いて、さらにチャック付きポリエチレン袋に入れ、養生中の水分の出入りを遮断した。一方、水中養生は、所定の温度に管理された恒温水槽及び恒温室内に設置した水槽により行った。気中養生では、各温度に設定された平均湿度約70%の恒温室に供試体をそのまま放置した。圧縮強度試験は、JIS A 1108に従い、原則として材齢3日、7日、14日、28日、56日、91日で行うこととした。

次に、石灰石微粉末の添加の有無や粉末度の違いが低温下におけるセメントペーストの初期の水和反応性に及ぼす影響を調べるため、水セメント比70%のセメントペースト (O7) と、水セメント比70%、石灰石微粉末La, Lcを添加し、水粉体比を50%としたペースト (O7La5, O7Lc5) を用意し、コンダクションカロリメータを用いて接水後48時間までの20℃及び5℃環境下における水和発熱速度を測定した。

また、石灰石微粉末の添加の有無や添加量の違いが材齢7日以降の水和の進行や細孔組織の緻密性に及ぼす影響を調べるため、結合水量及び細孔径分布の測定を行った。このうち結合水量測定用試料の作製は以下の手順に従って行った。材齢7日及び91日まで封かん養生を行ったモルタル及びペースト供試体を乳鉢で粉末状になるまで粉碎し、直ちにアセトンに浸漬して24時間以上静置し水和反応を停止させた。その後、アセトンの上澄み液を除去し、105℃の乾燥炉内で24時間以上乾燥させてアセトンを揮発させ、これを結合水量

表-5 配合表 (外割シリーズ)

配合名	水セメント比 W/C	水粉体比 W/P	質量比				高性能減水剤 P×%
			水 W	セメント C	微粉末 L (A)	細骨材 S	
O5	0.5	0.5	0.5	1.0	—	2.500	—
O5La3		0.3			0.667	1.870	0.9
O5Lb3						1.868	0.9
O5Lc3						1.868	1.7
O5La2		0.2			1.500	1.083	1.4
O5A3		0.3			0.667	1.882	1.7

測定用試料とした。結合水量の測定は、電気炉を用いた強熱減量試験により行った。試料を105℃及び1000℃まで加熱した際に測定される質量からその減量を求め、これにセメント、石灰石微粉末、細骨材の各強熱減量を差し引き、残りを結合水量であると仮定した。結合水量は単位セメント量に対する結合水量の質量比を百分率で表すこととした。完全水和時の理論結合水量は約23%であると推察される<sup>8)</sup>。

細孔径分布の測定は、O5, O5La3, O5Lc3, O5La2の4種類のモルタルに対して、20℃及び5℃一定封かん養生を行い、材齢7日、28日、91日で試料を作製し、水銀圧入式ポロシメータにより測定を行った。測定用の試料は、モルタル円柱供試体をダイヤモンドカッターにより薄く切断し、ニッパーを用いて更に5mm程度の小割にしたものを使用した。試料は直ちにアセトンに24時間以上浸漬して水和を停止させ、40℃で20時間以上真空乾燥を行い、細孔径分布測定用試料とした。試料を40℃で20時間以上乾燥させた理由は、当研究室における既往の研究結果<sup>9)</sup>により、この方法を用いれば、短期間に試料が十分に乾燥し、温度による細孔径分布の変化も殆ど見られないことが確認されているためである。

### 3. 結果及び考察

#### (1) 石灰石微粉末の添加が強度発現性に及ぼす影響 a) 内割シリーズ

図-1より、石灰石微粉末を混和した併用系高流動コンクリートは低温下において強度発現が顕著に増進し、20℃養生と同程度の強度発現性を示すことが確認された。しかしながら、この結果は、石灰石微粉末を置換率40%で混和した配合に対して得られた結果であり、その他の置換率で石灰石微粉末を混和した場合にも同様の傾向が見られるか確認しておく必要がある。そこで本研究では、石灰石微粉末の置換率を変化させたモルタル供試体を作製し、20℃及び5℃一定封かん養生を行い、その強度発現性を調べた。図-3に置換率0%、20%、40%、60%、80%の各配合に対する強度発

現結果を示す。図より、置換率0%の石灰石微粉末を混和しないプレーンな配合では、水セメント比が30%と本実験で用いた配合中最も低いいため、各養生温度に対して最も優れた強度発現性を示している。しかしながら、20℃と5℃の強度発現に着目すると、20℃養生に比べ5℃養生で明らかに強度発現が低下しており、材齢に関わらず約10MPaの差が生じている。これに対して、石灰石微粉末を混和した場合、材齢7日においては5℃養生の強度が20℃養生の強度を下回るものの、材齢14日以降では、20℃と5℃で同等の強度発現性を示しており、置換率20%と40%の配合では、材齢91日においてわずかに5℃養生の強度が20℃養生の強度を上回る結果となった。つまり、石灰石微粉末を混和した配合では、これを混和しないプレーンな配合と比較して、20℃と5℃で強度発現に明確な違いが現れないことが確認された。

図-4に置換率40%の配合に対して、モルタル供試体とコンクリート供試体で、強度発現性を比較した結果を示す。図より、コンクリート供試体はモルタル供試体と比較し、わずかに強度発現が上回っているものの、養生温度の違いが強度発現性に及ぼす影響はほとんど同じである。つまり、コンクリート供試体においても、石灰石微粉末を混和した場合、低温下において優れた強度発現性を発揮し、比較的早い材齢で20℃養生の強度発現に追いつくことが確認された。また、本実験結果より、養生温度の違いがコンクリートの強度発現性に及ぼす影響を調べるのであれば、モルタル供試体によりその影響を十分に調べることが可能であるとの見通しが得られた。

図-5は各材齢における石灰石微粉末の置換率と強度発現率との関係を示したものである。ここで、強度発現率とは、ある材齢における5℃養生を行った供試体の圧縮強度を同じ材齢の20℃養生を行った場合の圧縮強度で除して百分率で表した値である。すなわち、強度発現率が高いほど低温下での強度発現性に優れていることになる。図より、石灰石微粉末の置換率を10%とした場合、他の置換率と比較して材齢7日の強度発現率が高い値を示しており、低温下における初期の強度発現性を改善する効果があると判断される。その後材齢が経過するに従い、強度発現率の値が徐々に増加し、材齢91日においては置換率20%から40%の範囲で強度発現率が100%を上回り、10%から60%の範囲で95%を上回ることが確認された。一方、石灰石微粉末を混和していない置換率0%の配合や石灰石微粉末を多量に混和した80%の配合では、材齢が経過しても強度発現率の増加が少ないことから、低温下において石灰石微粉末の混和により優れた強度発現性を示すのは、置換率10%から60%の範囲であると判断される。

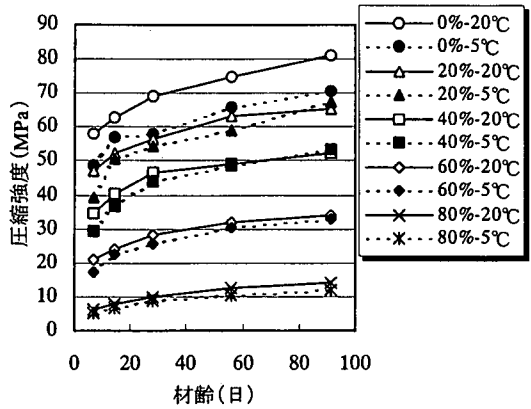


図-3 石灰石微粉末の添加が強度発現に及ぼす影響

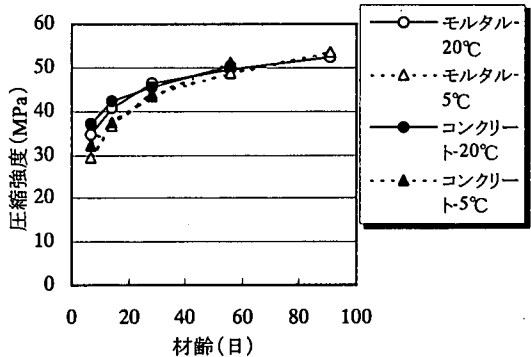


図-4 モルタル供試体とコンクリート供試体の比較 (置換率40%一定)

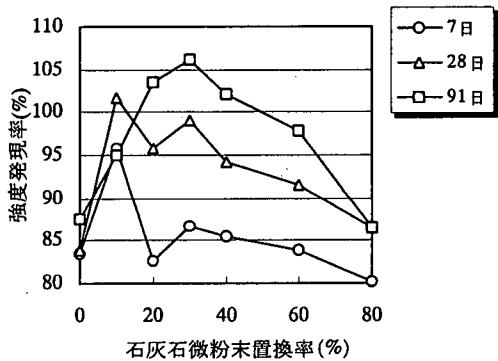


図-5 石灰石微粉末の置換率と強度発現率との関係

既往の文献より、実際の高流動コンクリートに用いられる石灰石微粉末の使用量は100~250kg/m<sup>3</sup>とされていることから、仮に高流動コンクリートに必要な単位粉体量を500kg/m<sup>3</sup>と仮定すると、石灰石微粉末を混和したほとんどの高流動コンクリートが、置換率10%から60%の範囲に入ることがわかる。このことから、実施工で使用されている石灰石微粉末を混和した高流動コンクリートの多くは、低温下において優れた強度発現性を有していると判断される。

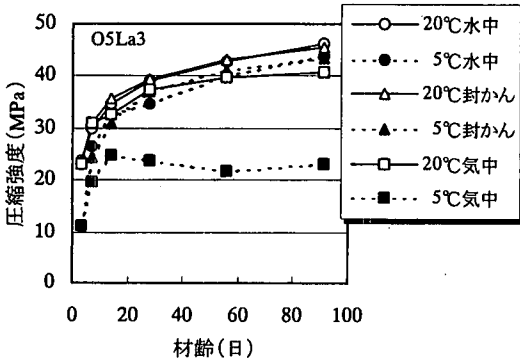
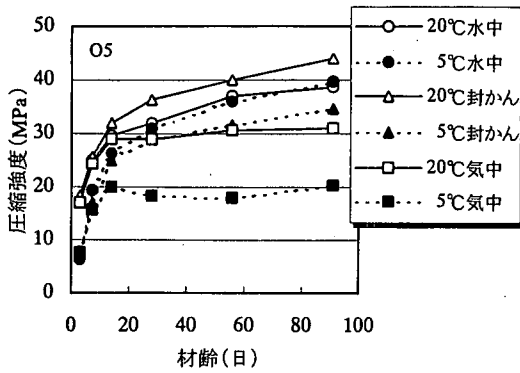


図-6 養生方法が強度発現に及ぼす影響

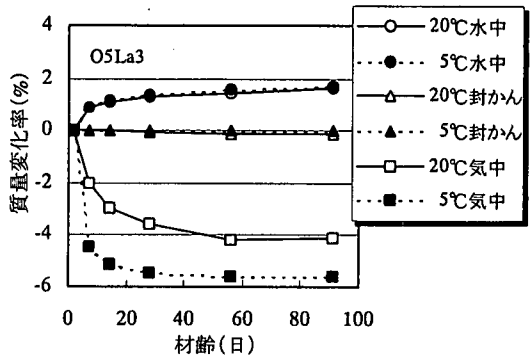
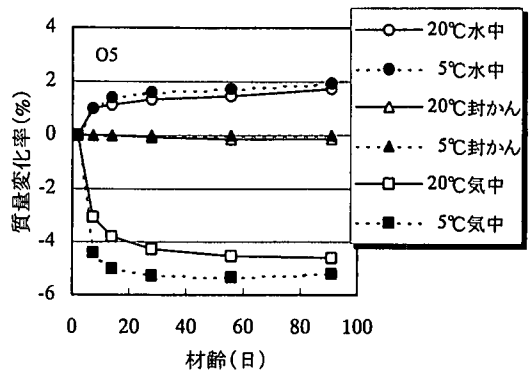


図-7 養生方法が質量変化率に及ぼす影響

### b) 外割シリーズ

内割シリーズの実験結果より、石灰石微粉末を適量混和した高流動コンクリートは、石灰石微粉末を混和しないプレーンな配合と比較して、低温下における強度発現性に優れていることが確認されたが、高流動コンクリートを想定した配合では、石灰石微粉末の置換率に変化するに従い、水セメント比も変化するため、石灰石微粉末の添加による圧縮強度の増加分を正しく評価することができない。そこで、本実験では、水セメント比一定の条件で、石灰石微粉末の添加の有無による強度発現性を比較検討することとした。はじめに石灰石微粉末を添加し水粉体比を30%とした配合 (O5La3) と石灰石微粉末を添加しないプレーンな配合 (O5) について、養生方法の違いが強度発現性に及ぼす影響を調べた。結果を図-6に示す。図より、材齢3日においては、各配合の養生温度が同じであれば養生方法の違いによらず圧縮強度の値はほぼ同じであることがわかる。また、O5では、養生条件によって強度発現性がそれぞれ異なる傾向を示しているのに対して、O5La3では、5°C気中養生を除いて、水中養生と封かん養生、20°C養生と5°C養生で強度発現に顕著な差が見られない。特にO5では、20°C封かん養生と5°C封かん養生で、長期においても強度発現にかなりの開きがあるのに対して、O5La3では、20°C封かん養生と5°C封かん養生で両者の強度発現にほとんど

差が現れない結果となった。このことから、石灰石微粉末を添加したコンクリートは、これを添加しないコンクリートと比較して、養生方法や養生温度の影響を受けにくい特性を有していると思われる。ただし、低温気中養生を行った場合には、他の養生方法と比較し、著しく強度発現が低下するため、寒冷地においては気中養生を避けるべきであると判断される。図-7に、図-6で示した各養生条件に対する供試体の質量変化率を示す。質量変化率は、型枠脱型時の質量を基準とし、その後の質量の増減を百分率で表したものである。図より、O5、O5La3ともに、水中養生を行った場合外部から供試体中に水分が供給されるため、質量が増加し、気中養生では逆に供試体中から水分が蒸発するため、質量が顕著に減少している。封かん養生では、質量がほとんど変化していないことから、供試体の封かん状態はほぼ完全に保たれていると判断される。低温下で気中養生を行った場合、常温で気中養生を行った場合と比較し、質量変化率の低下が一層顕著に現れているが、この理由は、低温下では水和反応が遅れるため、細孔中の自由水が水和によってなかなか消費されず、細孔組織の緻密化も進まないことから、水分が蒸発しやすい状態が続いたためであると考えられる。その結果、水和が十分に進行しないうちに乾燥によって水和に必要な水分が失われ、図-6に示すように低温気中養生を行った場合、他の養生条件と比べ大幅な強度低下

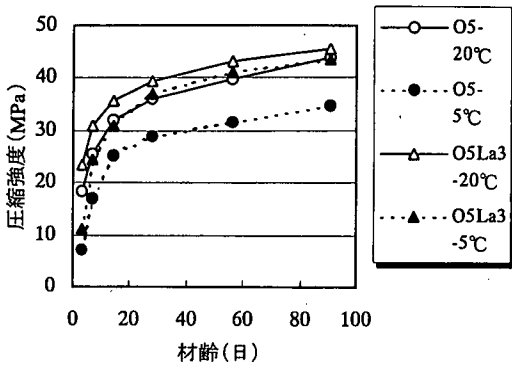


図-8 石灰石微粉末の添加の有無が強度発現に及ぼす影響

を引き起こしたと考察される。図-8に、図-6で示したデータに基づいて、20℃及び5℃一定封かん養生を行ったO5とO5La3の強度発現性を比較した結果を示す。図より、O5La3では、O5と比較して、20℃一定封かん養生を行った場合、材齢初期の強度発現が多少増進するものの、材齢91日における両者の強度に大きな違いは見られない。この結果は、石灰石微粉末をセメントに対して外割置換した場合、コンクリートの初期の強度発現が促進するとして既往の研究成果<sup>9)</sup>と同様の傾向を示している。一方、5℃養生を行った場合、O5の強度発現は長期で停滞する傾向を示しているのに対して、O5La3では長期にわたり強度発現が増進しており、材齢28日以降、20℃養生と同等の強度発現性を示している。

以上の検討結果より、石灰石微粉末をセメントに対して外割で添加すると、同一水セメント比の石灰石微粉末を混和しないプレーンな配合と比較して、低温下での強度発現が大きく増進することが確認された。

c) 石灰石微粉末の産地、粉末度、添加量の影響

次に、石灰石微粉末の産地、粉末度、添加量といった要因が強度発現性に及ぼす影響を検討する。ここで、石灰石微粉末の産地の違いが強度発現性に及ぼす影響を調べるため、O5La3とO5Lb3の強度発現性を比較し、粉末度の違いによる影響を調べるため、O5Lb3とO5Lc3の強度発現性を比較した。さらに、添加量の影響については、O5、O5La3、O5La2の強度発現性を比較した。このうち、石灰石微粉末の産地及び粉末度が強度発現性に及ぼす影響を調べる実験では、20℃と5℃で養生を行った供試体の強度発現性を調べているが、石灰石微粉末の添加量の影響を調べた実験では、20℃養生と0℃養生の強度発現性を比較している。結果を図-9に示す。まず、石灰石微粉末の産地の違いが強度発現性に及ぼす影響を調べた結果(上段)、20℃、5℃ともに、O5La3と比較し、O5Lb3でわずかに強度

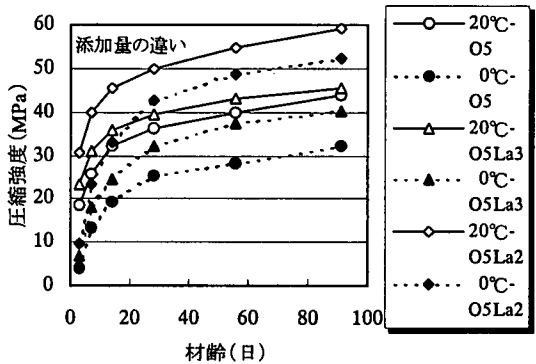
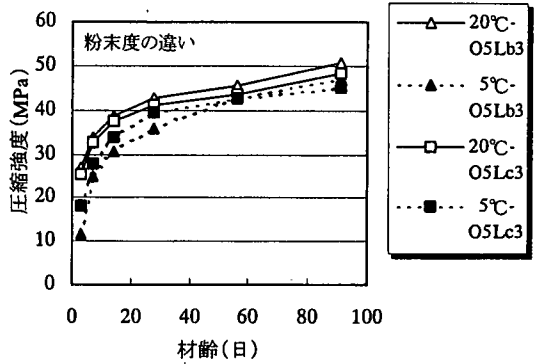
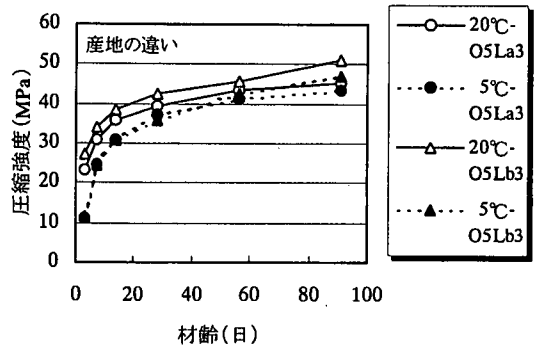


図-9 石灰石微粉末の産地、粉末度、添加量が強度発現に及ぼす影響

発現が上回っているものの、各配合の20℃養生と5℃養生の相対的な強度発現の関係はほぼ同じで、初期においては5℃養生の強度発現が20℃養生と比較し多少遅延するものの材齢の経過とともに、5℃養生の強度発現が増進し、長期においては20℃養生と同等の強度発現性を示すことが確認された。つまり、石灰石微粉末の添加による低温下における強度発現増進効果は、石灰石微粉末の産地によらず期待できる効果であると判断される。次に、石灰石微粉末の粉末度が強度発現性に及ぼす影響を調べた結果(中段)、粉末度の著しく高い石灰石微粉末を添加した場合(O5Lc3)、プレーン比表面積3000cm<sup>2</sup>/g程度の石灰石微粉末を添加した場合(O5Lb3)と比較して、低温下における初期

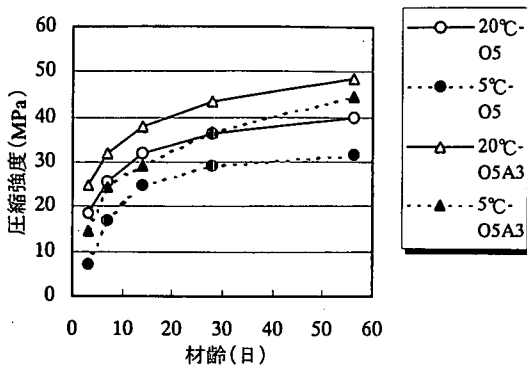


図-10 安山岩砕石粉の添加が強度発現に及ぼす影響

の強度発現は多少促進するものの、長期においては、両者の強度発現に大きな違いが見られないことから、石灰石微粉末の粉末度は材齢長期の強度発現性にはほとんど影響を及ぼさないと考えられる。石灰石微粉末の添加量が強度発現性に及ぼす影響を調べた結果(下段)、20℃養生を行った場合、O5に比べ、O5La3の初期の強度発現が促進し、さらに水粉体比20%まで石灰石微粉末を添加した場合(O5La2)、長期にわたり強度発現が大きく増進する傾向を示した。一方、5℃養生を行った場合には、石灰石微粉末添加量の増加に従い、長期にわたる強度発現の増進が一層顕著に現れており、結果として、20℃養生の強度発現に0℃養生の強度発現がかなり近づく結果となった。このように、多量の石灰石微粉末を添加すると、低温下だけでなく常温においても長期にわたり強度発現が増進することが確認された。

#### d) 安山岩砕石粉を添加した場合

石灰石微粉末のような反応性の低い無機質鉱物微粉末を添加することにより、低温下における強度発現が増進するのであれば、石灰石微粉末以外の不活性な鉱物微粉末を添加しても同様の効果が期待できる可能性があると思われる。そこで、本研究では、石灰石微粉末とは全く構成鉱物の異なる安山岩砕石(表-2参照)を採取し、ボールミルを用いてLaと同程度のブレン比表面積に達するまで粉碎し、安山岩砕石粉(A)を添加したモルタル供試体の低温下における強度発現性を調べた。また、既往の研究<sup>13)</sup>により、石灰石微粉末の主成分である炭酸カルシウム(CaCO<sub>3</sub>)はセメント中のC<sub>3</sub>Aと反応し、モノカーボネートを生成することが知られているが、安山岩砕石粉の添加により、低温下における強度発現増進効果が確認されれば、炭酸カルシウムをほとんど含まない微粉末においても同様の効果が確認されたことになり、この効果のメカニズムは、微粉末中の炭酸カルシウムの反応性によるものではないと判断される。結果を図-10に示す。

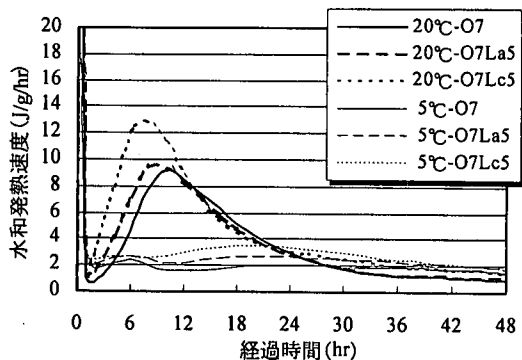


図-11 石灰石微粉末の添加が水和発熱速度に及ぼす影響

図より安山岩砕石粉を添加した場合(O5A3)、安山岩砕石粉を添加しないプレーンな配合(O5)と比較して、5℃養生に対する強度発現が材齢の経過とともに顕著に増進し、材齢56日においては20℃養生を行った場合の圧縮強度にかなり近づくことが確認された。このように、石灰石微粉末とは構成鉱物が全く異なる安山岩砕石粉を添加した場合においても、低温下における顕著な強度発現増進効果が確認されたことから、この効果は、反応性の低い無機質微粉末を混和した場合に共通に発揮される可能性があり、少なくとも石灰石微粉末中の炭酸カルシウムの化学反応性が主因となって発揮されたものではないことが明らかにされた。

#### (2) 石灰石微粉末の添加による強度発現機構

これまでの検討結果により確認された石灰石微粉末の添加による低温下における強度発現増進効果や石灰石微粉末の多量添加による強度増進効果について、その機構を検討するため、初期の水和反応性、長期の水和の進行と細孔組織の緻密性に着目し、さらなる検討を行った。

##### a) 水和発熱速度

既往の研究<sup>12)</sup>より、石灰石微粉末の添加によりセメント成分中のエーライトの反応を促進させることが明らかにされている。この効果が、低温下においても発揮されるか確認し、さらに石灰石微粉末の添加による低温下における強度発現増進効果とどのような結びつきがあるかを検討するため、20℃及び5℃環境下において石灰石微粉末の添加の有無や粉末度の違いがペーストの水和発熱速度に及ぼす影響を調査した。結果を図-11に示す。図より、20℃環境下においては、既往の研究結果と同様に、石灰石微粉末の添加により、エーライトの活発な水和反応に対応する水和発熱速度の第2ピークの出現時期が早まるとともにピーク値が増加しており、粉末度が非常に高い石灰石微粉末を



添加した場合、その傾向がより顕著に現れている。第2ピーク出現後は水和発熱速度が急速に減少し、その後は停滞している。一方、5℃環境下においては、20℃で見られた明確なピークは示さず、石灰石微粉末を添加した場合、水和発熱速度全体が一様に増加する傾向を示している。また、時間の経過に伴う水和発熱速度の著しい減速傾向も示さないことから、水和反応はこの後も安定して継続的に進行するものと予想される。

このように、石灰石微粉末の添加により、20℃環境下だけでなく5℃環境下においてもエーライトの水和反応を促進させることが明らかになったが、その傾向は20℃と比べ5℃で特に顕著に現れているとは言い難い。従って、石灰石微粉末の添加による低温下における強度発現増進効果は、これ以降の水和反応性に依存していると推察される。

#### b) 低温下における強度発現増進効果

水和発熱速度の測定結果より、接水後48時間までの5℃環境下における水和反応速度は、石灰石微粉末の添加により多少促進される程度であることが確認された(図-11参照)。また、石灰石微粉末の添加の有無が強度発現性に及ぼす影響を調べた実験結果(図-8参照)より、5℃養生を行ったO5とO5La3の強度発現性を比較すると、各材齢における両者の圧縮強度の差は材齢の経過とともに徐々に開く傾向を示している。つまり、低温下における石灰石微粉末の添加による強度発現増進効果は、材齢初期よりもむしろ材齢の経過とともに発揮される効果であると考えられる。そこで本研究では、水和反応後期の拡散律速段階における水和の進行に着目し、モルタルの結合水量を測定するとともに、既往の研究結果を参考にし、低温下における石灰石微粉末の添加による強度発現増進メカニズムについて検討を行った。

図-12は、O5、O5La3に対して20℃及び5℃一定封かん養生を行ったモルタルの材齢7日と91日における結合水量の測定試験結果を示したものである。図より、材齢7日では、O5、O5La3ともに20℃の結合水量が5℃の結合水量を上回っているが、その差は、O5La3の方が少なく、また、5℃養生に対する結合水量は、O5に比べ、O5La3の方が明らかに高い値を示している。一方、材齢91日においては、O5では20℃の結合水量と比較し、5℃の結合水量が低い値を示しているのに対し、O5La3では20℃と5℃で結合水量がほぼ同じ値を示している。結合水量の結果には多少のばらつきが含まれていると考えられるが、以上の結果より、石灰石微粉末を添加した場合、これを混和しないプレーンな配合と比較して、低温下において初期の水和反応を促進するとともに、その後も安定した水和反応が継続し、長期において20℃養生を行った場合

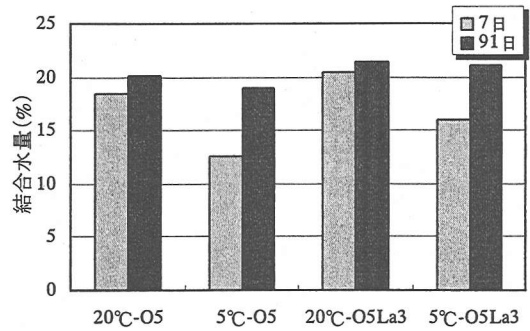


図-12 石灰石微粉末の添加が結合水量に及ぼす影響(モルタル)

と同等の水和度に達することが確認された。このような結果が得られた理由について、以下に考察を行う。

一般に、低温養生を行ったコンクリートの強度発現は初期で遅延するものの材齢長期においては常温養生を行ったコンクリートに追いつくと考えられている。しかしながら、本実験結果(図-8参照)では、O5に対して封かん養生を行った場合、20℃に比べ5℃で明らかに強度発現が低下する傾向を示した。また本実験結果と同様の傾向が、既往の研究においても多数確認<sup>13)</sup>されている。コンクリートの強度発現は主にセメントの水和反応速度に依存し、水和反応速度は、温度、水分状態、水和度の影響により大きく変化すると考えられる。すなわち、温度が低く、細孔中の自由水量が少なく、水和度が高いコンクリートほど、水和反応速度は低下する。これらの要因は、反応が進行している1個のセメント粒子に着目した場合、水和環境温度、セメント粒子反応面近傍の水分状態、水和物層の厚さ及び緻密性に置き換えて考えることが可能である。既往の文献<sup>14)</sup>においても、セメントの水和反応速度に影響を及ぼす要因として、水和反応面近傍の水分状態と水和生成層の厚さの重要性が指摘されている。つまり、セメント粒子近傍の環境温度が低く、セメント粒子反応面近傍の自由水が不足し、セメント粒子周りの水和物層の厚さがある程度厚くなると(あるいは緻密化すると)、水和反応速度の著しい減速につながると考えられる。本実験において、低温封かん養生を行ったO5の強度発現が20℃で封かん養生を行った場合の強度発現に追いつかなかった理由は、低温と封かんという、水和反応にとって厳しい2つの条件が相乗作用したためであると推察される。すなわち、封かん養生では外部からの水分の供給がないため、水和の進行とともに細孔中の自由水が消費され、水分とセメント粒子中の反応面の接触機会が減少し、さらに、低温養生下では、常温養生と比べ、セメント粒子周りの水和物層を介した水分やイオンの拡散速度が著しく低下するため、水和物層がある程度厚くなると、水和反

応速度が停滞し、今回の実験結果に見られるような強度発現の低下を引き起こしたと推察される。

一方、石灰石微粉末を混和した場合（O5La3）、封かん養生を行っても、20℃養生と比べ、5℃養生の強度発現の低下は見られない。強度発現性に及ぼす石灰石微粉末の添加による効果として、これまで石灰石微粉末がセメントブロック中に入り込み、水和物の析出空間を増加させる効果<sup>19)</sup>や石灰石微粉末表面が水和生成物の析出サイトとして寄与する効果<sup>19)</sup>が報告されているが、このうち後者については走査型電子顕微鏡写真及びEDAXの分析結果より、石灰石微粉末表面にC-S-Hが生成していることが確認されている<sup>17)</sup>。石灰石微粉末表面に水和生成物が析出すると、その分セメント粒子回りの水和物層の厚さあるいは緻密さが減少するため、水和物層を介したイオンや水の移動抵抗が軽減すると予想される。常温環境下では、その影響が初期の強度発現の促進として現れるが、低温環境下においては、その効果がより顕著に現れ、長期にわたる強度発現の増進につながったと推察される。

以上のことから、石灰石微粉末の添加による、低温下における強度発現増進効果は、主に石灰石微粉末が水和生成物の析出サイトとして寄与したことにより、セメント粒子周りの水和反応の環境が改質し、水和物層を介したイオンや水分の移動抵抗が軽減されたた

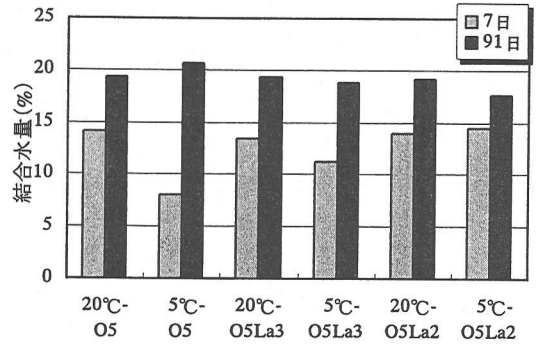


図-13 石灰石微粉末の添加が結合水量に及ぼす影響（ペースト）

めであると判断される。その結果、低温封かん養生という強度発現にとって不利な養生条件下においても、早期にポテンシャル近くまで水和が進行し、常温養生と同等の強度発現が得られたと考察される。

### c) 石灰石微粉末の多量添加による強度増進効果

石灰石微粉末の添加量の違いが強度発現性に及ぼす影響を調べた実験結果（図-9下段参照）より、石灰石微粉末をセメントに対して外割で150%と多量に添加した配合（O5La2）では、養生温度に関わらず、石灰石微粉末を添加しないプレーンな配合（O5）と比較して長期にわたり大幅に強度発現が増進すること

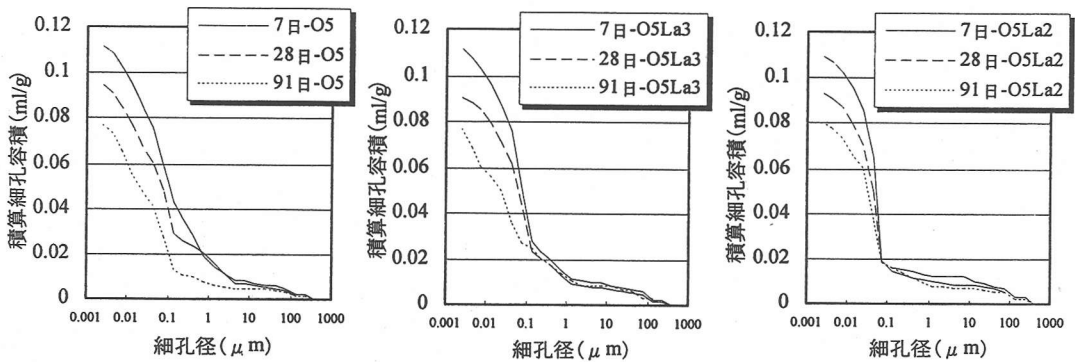


図-14 積算細孔容積

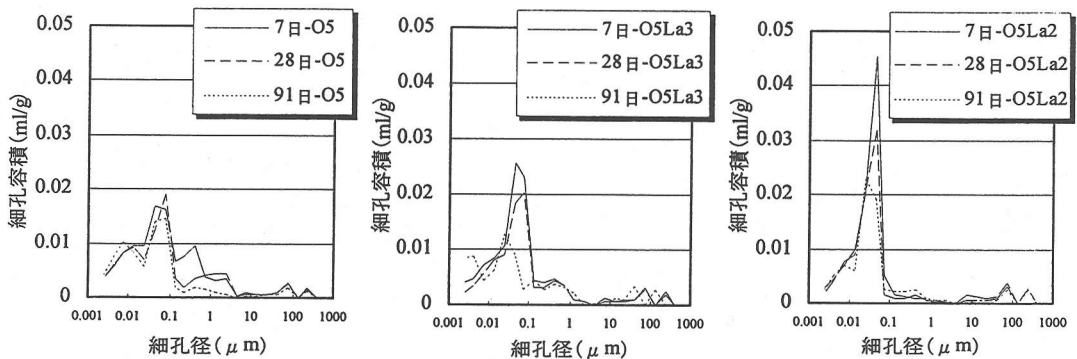


図-15 細孔径分布

が確認された。また、既往の研究<sup>18),19)</sup>においても、石灰石微粉末をセメントに対して外割で多量に添加した場合、初期だけでなく長期においても強度が増加することが確認されている。そこで本研究では、石灰石微粉末の多量添加が強度発現性に及ぼす機構を解明するため、材齢の経過に伴う水和の進行と細孔組織の緻密性に着目し、検討を行った。図-13に石灰石微粉末の添加量を変化させたO5, O5La3, O5La2のペースト試料について、材齢7日及び91日で結合水量を測定した結果を示す。図より、5℃養生を行った場合、材齢7日において、石灰石微粉末を添加した配合では、石灰石微粉末を添加していないプレーンな配合と比較して、明らかに水和が促進しているが、材齢91日においては、配合や養生温度の違いによらず、結合水量に大きな違いは見られない。すなわち、材齢91日の段階では、すべての条件に対して、水和反応がポテンシャル近くまで達しており、石灰石微粉末を多量に添加した場合（O5La2）においても、他の配合と比較して、水和反応が著しく増進することはないと判断される。従って、石灰石微粉末の多量添加による圧縮強度の増加は、反応性によるものではないと判断される。

続いて、図-14及び図-15に5℃養生を行ったO5, O5La3, O5La2に対する材齢7日、28日、91日における積算細孔容積と細孔径分布の測定結果をそれぞれ示す。図より、材齢の経過に伴う積算細孔容積は、配合の違いによらず大きな差は見られない。一方、細孔径分布に着目すると、O5では毛細管空隙に相当する空隙が比較的広い範囲にわたって分布し、材齢の経過と共に約0.1 μm以上の比較的粗い空隙が緻密化される傾向を示している。一方、石灰石微粉末を添加した場合（O5La3）、材齢7日時点で早くも比較的粗い空隙に相当する細孔量（約0.1 μm以上）が減少している。この傾向は、石灰石微粉末の添加率を150%とした場合（O5La2）、より顕著に現れており、材齢7日時点で約0.1 μm以上の毛細管空隙がほとんど存在していない。このような傾向が現れた理由は、石灰石微粉末の多量添加による空隙充てん効果と、低温下における水和反応促進効果により、細孔組織が早期に緻密化されたためであると推察される。

一般に、セメント硬化体中の全細孔量と圧縮強度との間には負の相関があり、全細孔量の増加に伴い圧縮強度が直線的に減少することが知られている。本研究では、同一材齢で比較した場合、石灰石微粉末を添加した配合の圧縮強度が明らかに高いにもかかわらず、全細孔量は配合によらずほぼ同じ値を示している。図-16の上段にO5, O5La3, O5Lc3, O5La2に対する全細孔量と圧縮強度との関係を示す。図より、全細孔量と圧縮強度の間には一応負の相関（相関係数 $R=0.711$ ）

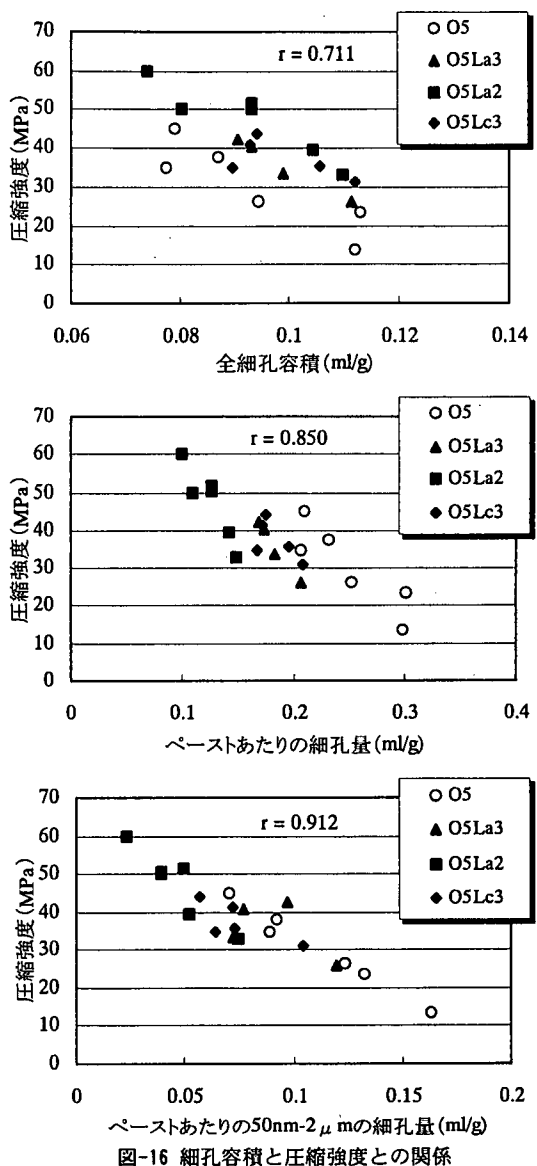


図-16 細孔容積と圧縮強度との関係

が見られるものの、ばらつきが大きく、同じ全細孔量で比較した場合、O5に比べ、石灰石微粉末を添加した配合（O5La3, O5Lc3, 及びO5La2）で明らかに高い圧縮強度を示している。この理由として、石灰石微粉末をセメントに対して外割で置換しているため、石灰石微粉末を含めたモルタル中のペースト量が大きく異なることが影響していると考えられる。一般に、良質な（緻密な）細骨材を使用していれば、モルタルの圧縮強度はペースト部の細孔組織に依存すると考えられる。本実験に使用した細骨材の細孔組織を測定したところ、ペースト部の細孔組織に比べ十分に緻密であることが確認されたため、モルタル中の細骨材は強度に寄与しないと仮定し、単位ペースト量当たりの細孔量と圧縮強度との関係について調べた。結果を図

-16中段に示す。圧縮強度とペースト当たりの細孔量との関係は、圧縮強度と全細孔量との関係に比べ、ばらつきが少なくなっているものの、同一ペースト当たりの細孔量で比較した場合、今度は石灰石微粉末を添加した配合で、O5と比較して圧縮強度が低くなる傾向を示した。この理由は、文献<sup>19)</sup>に示されているように、石灰石微粉末とセメント水和物の結合力はセメント水和物同士の結合力に比べ弱いため、石灰石微粉末をセメントペースト中の固相と見なすことは出来ないためであると考えられる。しかしながら、石灰石微粉末を多量に添加した場合、ペースト当たりの細孔量が明らかに減少しており、このことが圧縮強度の増加を引き起こした要因であると考えられる。細孔径分布と圧縮強度との関係を調べた多くの研究成果<sup>20)</sup>より、50nm~2μm程度のマクロポアと呼ばれる毛細管空隙量と圧縮強度との間に良好な相関があることが確認されている。そこで、ペースト中のマクロポアに相当する細孔量と圧縮強度との関係を調べた。結果を図-16下段に示す。図より、マクロポアと圧縮強度との間には、良好な相関があり、石灰石微粉末を多量に添加したO5La2では、このマクロポアに相当する空隙量が著しく減少している。一般にマクロポアにはペーストと骨材界面の遷移帯に発生する空隙が多く含まれていると言われているが、石灰石微粉末を多量に添加した場合、相対的な骨材量の減少に伴い、遷移帯に相当する空隙量が減少したことも影響している可能性があると思われる。

以上の結果より、石灰石微粉末を多量に添加したことによる養生温度と無関係な強度発現の増進効果は、石灰石微粉末の添加による物理的な空隙充てん作用により細孔構造が変化し、圧縮強度に影響を及ぼす粗大な空隙径が緻密化されたためであると推察される。

#### 4. 結論

本研究により得られた主な結果を以下に示す。

1. 石灰石微粉末の添加により、低温下におけるセメント硬化体の強度発現が増進し、常温養生を行った場合と同等の強度発現が期待できる。
2. 粉末度の高い石灰石微粉末を添加すると低温下における初期の強度発現が促進し、多量の石灰石微粉末を添加すると、養生温度に関わらず、長期にわたり強度発現が増進する。
3. 石灰石微粉末を混和した高流動コンクリートの場合、石灰石微粉末の置換率を10%から60%の範囲とすることにより低温下において優れた強度発現性が期待できる。

4. 石灰石微粉末を混和したコンクリートの強度発現性は、石灰石微粉末を混和しないコンクリートと比較して、温度や水分状態といった養生条件による影響を受けにくい。
5. 石灰石微粉末とは構成鉱物の異なる安山岩砕石粉を混和した場合にも低温下における強度発現増進効果が確認された。
6. 初期の水和発熱速度を調べた結果から、低温下においても石灰石微粉末の添加による水和反応の促進効果が確認された。ただし、この効果は、常温と比べて特に顕著に現れているとは言えない。
7. 石灰石微粉末の添加による低温下における強度発現増進効果は、主に石灰石微粉末が水和生成物の析出サイトとして寄与し、水和反応環境を改質したことに伴い、水和反応が長期にわたり安定して継続的に進行したためであると推察される。
8. 石灰石微粉末の多量添加による強度の増進効果は、石灰石微粉末の空隙充てん作用により細孔構造が変化し、特に強度に悪影響を及ぼす粗大径の空隙が緻密化されたことに起因すると考えられる。

謝辞:本研究の一部は土木学会吉田研究奨励賞の研究奨励金によるものであることを付記し、感謝いたします。また、本研究の実験に際し、多大な協力を得た当時東北大学大学院博士課程前期2年(現JR東日本)の関紀宏君、同博士課程前期2年の澤井洋介君に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 石灰石微粉末研究委員会：委員会報告書、石灰石微粉末の特性とコンクリートへの利用に関するシンポジウム、日本コンクリート工学協会、1998。
- 2) 土木学会コンクリート委員会：高流動コンクリート施工指針、コンクリートライブラリー93、土木学会、1998。
- 3) 三浦尚、日向哲朗、鈴木一利：寒冷地における高流動コンクリートの強度発現に関する基礎的研究、セメント・コンクリート論文集、No.50、pp.520-523、1996。
- 4) 岩城一郎、日向哲朗、三浦尚：石灰石微粉末を添加したコンクリートの強度発現性に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 19、No.1、pp. 265-270、1997。
- 5) 岩城一郎、大村英昭、三浦尚：寒冷地における石灰石微粉末を添加したコンクリートの強度発現性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 21、No.2、pp.169-174、1999。
- 6) 岡村甫、前川宏一、小澤一雅：ハイパフォーマンスコンクリート、技報堂出版、1993。

- 7) Miura, T. and Iwaki, I. : Effects of curing methods in cold regions on strength of concrete incorporating ground granulated blastfurnace slag, *Fourth CANMET/ACI/JCI International Symposium on Advances in Concrete Technology, ACISP-179*, pp.815-829, 1998.
- 8) Neville, A. M. : *Properties of Concrete, Fourth Edition*, longman, 1995.
- 9) 堀宗朗, 多田浩治, 斎藤裕, 三浦尚 : 細孔構造の変化に着目したコンクリートの低温劣化の診断法の基礎的研究, *コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13*, pp. 723-728, 1991.
- 10) 例えば, 小林孝一, 服部篤史, 宮川豊章, 藤井學 : 石灰石微粉末の混和がセメントの初期水合に与える影響, *セメント・コンクリート論文集, No.50*, pp.570-575, 1996.
- 11) 例えば, 李琮撰, 大場陽子, 坂井悦郎 :  $C_3A-CaCO_3-H_2O$  系の水合反応, *セメント・コンクリート論文集, No.51*, pp.38-43, 1997.
- 12) 例えば, 久我比呂志, 浅賀喜与志 : ポルトランドセメントの水合反応に及ぼす無機質微粉末の影響, *セメント・コンクリート論文集, No.50*, pp.62-67, 1996.
- 13) 例えば, 林正道, 鮎田耕一 : *コンクリート工学, 耐久性・寒中コンクリート詳説*, 山海堂, 1995.
- 14) 岸利治, 前川宏一 : 高炉スラグ及びフライアッシュを用いた混合セメントの複合水合モデル, *土木学会論文集, No.550/V-33*, pp.131-144, 1996.
- 15) 例えば, 山崎寛司 : 鉱物微粉末がコンクリートの強度におよぼす効果に関する基礎研究, *土木学会論文集, No.85*, pp.15-46, 1962.
- 16) 植松敬治, 岸利治 : セメントの水合発熱過程に及ぼす石灰石微粉末の影響, *土木学会第52回年次学術講演会*, pp.180-181, 1997.
- 17) 後藤孝治, 星野清一, 小澤尚志 : エーライトの水合に及ぼす鉱物微粉末の影響, *セメント・コンクリート論文集, No.52*, pp.42-47, 1998.
- 18) 平田隆祥, 川島宏幸, 十河茂幸 : 石灰石微粉末を粉体の増量材として使用したコンクリートの強度特性について, *セメント・コンクリート論文集, No.51*, pp.356-361, 1997.
- 19) 大賀宏行, 平石剛紀, 上野敦, 国府勝郎 : 石灰石微粉末を用いたモルタルの諸特性に及ぼす配合条件及び養生条件の影響, *セメント・コンクリート論文集, No.52*, pp.356-361, 1998.
- 20) 例えば, Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M. : *コンクリート工学, 微視構造と材料特性*, 田澤榮一, 佐伯昇監訳, 技報堂出版, 1998.

(1999. 10. 15受付)

## STRENGTH DEVELOPMENT OF CONCRETE INCORPORATING LIMESTONE POWDER AT LOW CURING TEMPERATURES

Ichiro IWAKI and Takashi MIURA

In this study, the strength development of mortar specimens incorporating limestone powder is investigated varying the source, the specific surface area, and the dosage of limestone powder. The experimental results demonstrate that concrete incorporating limestone powder remarkably improves the strength development at low curing temperature. The effect of improving the strength development by limestone powder greatly depends on the specific surface area and the dosage of limestone powder. Finally, it is concluded that the mechanisms of the strength development by limestone powder are mainly based on contributing the surface of limestone powder to the site for forming C-S-H and the filler effects to macro pores in capillary pores.