

論文 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

岩城一郎^{*1}・大村英昭^{*2}・三浦尚^{*3}

要旨：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を把握するため、強度発現に及ぼす養生温度、石灰石微粉末の産地、粉末度、添加率の影響を調査した。また、添加する鉱物微粉末の種類やセメント中の C_3A 含有量の違いが低温下におけるセメント硬化体の強度発現に及ぼす影響について検討した。さらに、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と水和発熱速度との関係についても検討を行った。研究の結果、石灰石微粉末の添加により、低温下でセメント硬化体の強度発現が増進し、その効果は、石灰石微粉末の粉末度や添加率に依存することが確認された。

キーワード：石灰石微粉末、強度発現、低温養生、封かん養生、安山岩砕石粉

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。石灰石微粉末は、コンクリートの流動性の改善、ブリーディングの低減といった効果が期待できる上、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、粉体系あるいは併用系高流動コンクリートとしての実用例が増加している¹⁾。また、既往の研究²⁾により、石灰石微粉末を添加したコンクリートは、材齢初期の強度発現を促進することが明らかにされている。さらに、著者らの研究^{3,4)}より、石灰石微粉末を添加したコンクリートは、低温養生下で優れた強度発現を発揮し、5℃一定封かん養生を行った場合でも、20℃一定封かん養生と同程度の強度発現が得られることが報告されている。

一般に、高炉スラグ微粉末やフライアッシュといった汎用性のある混和材を混和したコンクリートを寒冷地で施工する場合、養生温度が低温となり、強度発現の低下を引き起こすため、場合によっては給熱養生等の対策が必要となる

ことが指摘されている⁵⁾。従って、石灰石微粉末を添加したコンクリートが低温環境下での強度発現に優れていることが明らかになれば、寒冷地においても強度発現に優れ、経済的で汎用性の高いコンクリート（特に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、石灰石微粉末を添加したコンクリートの低温環境下における強度発現性を把握するため、石灰石微粉末の産地、粉末度、添加率を変化させたモルタル供試体を作製し、これらの要因や養生温度が強度発現に及ぼす影響を調査することとした。また、石灰石微粉末の代わりに岩種の異なる安山岩砕石粉を添加した場合や、普通ポルトランドセメントの代わりに C_3A 含有量の少ない耐硫酸塩ポルトランドセメントを使用した場合の強度発現について調査を行い、鉱物微粉末とセメントの化学的作用の見地から、低温下における強度発現増進メカニズムについて検討を行った。さらに、石灰石微粉末を添加したセメントペーストの水和発熱速度を測定し、石灰石微粉末の添加による初期水和の促進効果と低温下における強度発現増進効果との関係について考察を加えた。

*1 東北大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻 工修（正会員）

*2 東北電力（株）大曲技術センター土木課 工修

*3 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 工博（正会員）

表-1 セメントの試験成績

種類	記号	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結			圧縮強さ (MPa)			MgO (%)	SO ₃ (%)	L.O.I. (%)	C ₃ 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	O	3.15	3380	28.1	2-20	3-30	16.2	26.5	41.6	1.5	1.8	1.8	9
耐硫酸塩ポルトランドセメント	S	3.22	3160	26.5	3-00	4-30	23.2	33.0	53.0	1.0	2.0	0.9	2

表-2 石灰石微粉末と安山岩砕石粉の試験成績

種類	記号	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	L.O.I. (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)
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
安山岩砕石粉	A	2.75	3380	2.0	55.5	12.7	10.6	6.6	3.3	0.2

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

セメントは基本的に普通ポルトランドセメントを使用し、一部の試験で耐硫酸塩ポルトランドセメントを用いた。石灰石微粉末は基本となるタイプ A (La)、タイプ A とブレン比表面積が同等で産地の異なるタイプ B (Lb)、タイプ B と産地が同じでブレン比表面積が非常に高いタイプ C (Lc) の 3 種類を使用した。また、安山岩砕石をボールミルにより粉碎し、石灰石微粉末 A、B と同等のブレン比表面積に調整した試料 (A) についても実験を行った。細骨材は山砂 (宮城県大和町産、密度 2.55g/cm³、粗粒率 2.63) を使用した。高性能減水剤はナフタリンスルホン酸系のものを使用した。表-1 にセメント、表-2 に石灰石微粉末と安山岩砕石粉の試験成績結果を示す。

表-3 に配合表を示す。配合名は、使用セメント、添加した鉱物微粉末とその種類、水粉体比 W/P の順に表している。例えば、表中の SLa3 は、耐硫酸塩ポルトランドセメントを使用し、タイプ A の石灰石微粉末を添加した水粉体比 0.3 の配合を表す。

本実験の基本となる配合 (O5) は、水セメント比 0.5、水とセメントと細骨材の質量比を 0.5:1:2.5 に設定したものである。強度発現に及ぼす石灰石微粉末の産地や粉末度の影響、及び

表-3 配合表

配合名	W/C	W/P	質量比			SP剤 P*×%	
			W	C	L(A) S		
O5		0.5			—	2.500	—
OLa3		0.3	0.5	1	0.667	1.870	0.9
OLb3						1.868	0.9
OLc3		0.2	0.5	1	1.500	1.083	1.4
OLa2						0.667	1.882
OA3		0.5			—	2.500	—
S5		0.3			0.667	1.875	0.6

※ P=C+LまたはC+A

安山岩砕石粉や耐硫酸塩ポルトランドセメントを使用した影響を調べる実験では、水セメント比を 0.5 一定とし、水粉体比が 0.3 となるように石灰石微粉末 (または安山岩砕石粉) をセメントに対して外割で細骨材の一部と体積置換した。石灰石微粉末の添加率の影響を調べる実験では、水粉体比が 0.2 になるまでセメントに対して外割で石灰石微粉末 La を添加した (OLa2)。高性能減水剤の添加量は、JIS R 5201 の方法に従い、全ての配合でモルタルフロー値が 170~190 となるように調整した。

また、配合表には示していないが、水セメント比 0.7 のセメントペースト (O7) と、水セメント比 0.7、石灰石微粉末 La、Lc を添加し、水粉体比を 0.5 としたペースト (OLa5、OLc5) の水和発熱速度を測定した。

2.2 実験方法

モルタルは 20℃恒温室内で練混ぜ、φ5×10cm の円柱型枠に打設した後、標準的な養生温度である 20℃一定と、寒冷地における日平均気温を想定した温度である 5℃一定の恒温室内にそれぞれ静置した。一部の配合については 0℃一定養生についても実験を行った。圧縮強度試験は原則として材齢 3 日、7 日、14 日、28 日、56 日、91 日で行うこととした。

水和発熱速度を調べる実験ではコンダクションカロリメータを使用し、試料容器内の温度を 20℃一定あるいは 5℃一定に管理し、測定を行った。

養生方法は、寒冷地における現場の状況を想定し、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を施工する場合、気中養生では十分な強度が得られないことがわかっており、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。供試体は脱型直後に食品用ラップフィルム及びチャック付きポリエチレン袋で二重に密封し、水分の出入りを遮断した。脱型時（材齢 2 日）に対する材齢 91 日における供試体の質量減少率を測定した結果、その値は 0.2%程度と十分に小さく、養生中に水分損失がほとんど生じていないことが確認された。

3. 実験結果及び考察

図-1 に石灰石微粉末を添加していない配合 (O5) の 20℃、5℃、0℃一定封かん養生を行った場合の圧縮強度試験結果を示す。図より、20℃に比べ、5℃、0℃で封かん養生を行った場合、材齢初期から長期にわたり、強度発現が明らかに低下していることが分かる。材齢 91 日における 5℃養生の圧縮強度は、20℃養生の圧縮強度に対して 20%以上低下しており、強度発現がほぼ頭打ちの傾向を示している。

図-2 に石灰石微粉末 La を添加した配合 (OLa3) の圧縮強度試験結果を示す。図より、

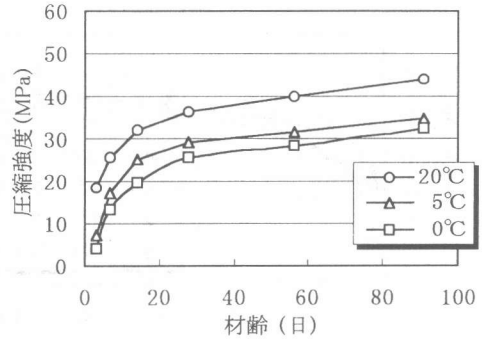


図-1 養生温度が強度発現に及ぼす影響 (O5)

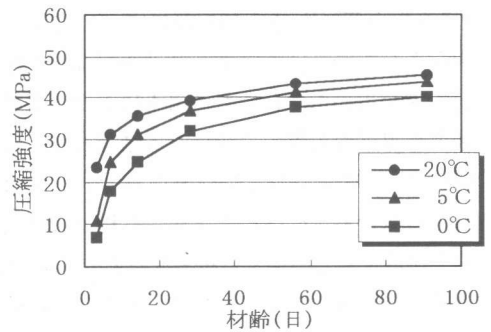


図-2 養生温度が強度発現に及ぼす影響 (OLa3)

20℃と 5℃、0℃の圧縮強度を比較すると、材齢 3 日では低温養生を行った供試体の圧縮強度が顕著に低下しているが、5℃養生を行った場合、材齢 28 日で 20℃養生を行った強度にほぼ追いついており、0℃養生を行った場合にも材齢 91 日において、かなり 20℃養生を行った強度に近づいている。5℃一定封かん養生に対する結果は、既往の研究結果^{3),4)}と良く一致しており、また 0℃という非常に厳しい低温環境下においても、石灰石微粉末の添加によりセメント硬化体の強度発現が増進することが確認された。

図-3 に粉末度がほぼ等しく、産地の異なる石灰石微粉末 La, Lb を添加した場合の強度発現を比較する。図より、OLb3 では OLa3 と比較し、20℃、5℃ともに強度の絶対値が若干高いものの、20℃と 5℃の強度発現の相対的な関係は非常に似ており、20℃養生を行った強度に

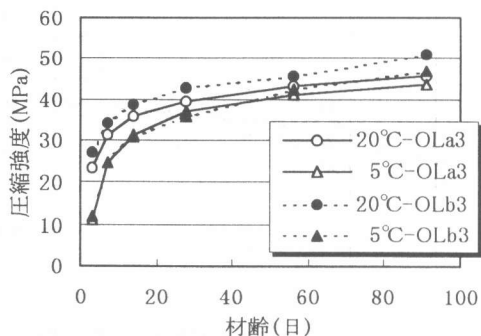


図-3 OLa3とOLb3の強度発現比較

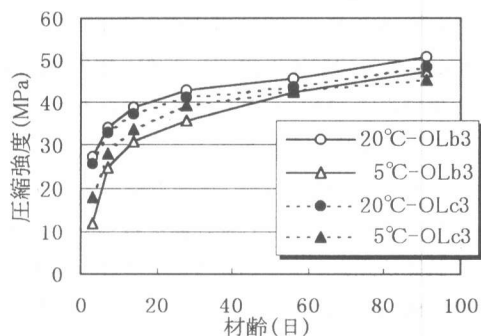


図-4 OLb3とOLc3の強度発現比較

5°C養生を行った強度が次第に近づいていく傾向を示している。つまり、産地の異なる石灰石微粉末を用いた場合にも低温下における顕著な強度発現増進効果が期待できる結果となった。図-4 に、産地が同じで粉末度が大きく異なる石灰石微粉末 Lb, Lc を添加した場合の強度発現を比較する。図より、粉末度の著しく高い Lc を添加した場合、Lb を添加した場合と比較して、20°Cでの強度発現はさほど変わらないものの、5°C養生を行った材齢 3 日における圧縮強度が大きく増加していることがわかる。しかし、その後の材齢では、強度発現が次第に低下し、材齢 56 日以降で、5°C-OLb3 と 5°C-OLc3 の圧縮強度がほぼ等しくなっている。つまり、粉末度の高い石灰石微粉末を添加した場合、材齢初期において低温下での強度発現が顕著に改善されるが、材齢長期においては粉末度による影響は顕著に現れないことが確認された。

図-5 に 20°C及び 0°C一定封かん養生を行った石灰石微粉末を添加していない配合 (O5) の圧縮強度に対する OLa3, OLc3, OLa2 の圧縮強度の比 (圧縮強度比) で表した結果を示す。図より、これらの配合では、0°Cで養生を行った場合、20°Cで養生を行った場合と比べ、圧縮強度比が明らかに増加しており、その傾向は材齢初期で特に顕著に現れている。0°C養生を行った場合、材齢の経過に伴って、圧縮強度比は急速に減少するが、材齢 14 日以降では、ほぼ一定の値に落ち着く。つまり、石灰石微粉末を

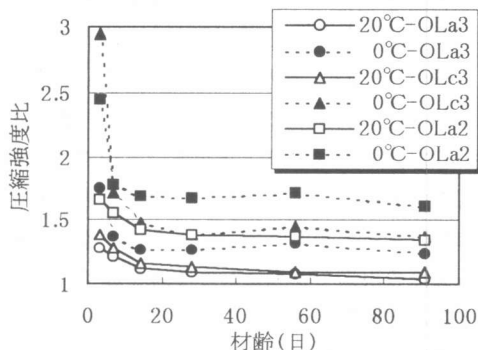


図-5 各配合のO5に対する圧縮強度比

添加した場合、添加しない場合と比較して、低温下における材齢初期の強度が著しく増加し、その後も一定のレベルを保って強度が増加していると判断される。また、粉末度の高い石灰石微粉末を添加した場合 (0°C-OLc3), 材齢初期の圧縮強度比が著しく高い値を示しているのに対して、石灰石微粉末の添加量を増加させた場合 (0°C-OLa2), 材齢長期にわたり圧縮強度比が高い値を示す結果となった。図には示していないが、5°C養生を行った場合、0°C養生の結果と比較して多少圧縮強度比が低い値を示すものの、ほぼ同様の傾向を示すことが確認された。

既往の研究より、石灰石微粉末の主成分である炭酸カルシウム (CaCO_3) とセメント成分中のカルシウムアルミネート相 (C_3A) が反応し、モノカーボネート相 (AFm) を生成することが知られている¹⁾。そこで、このような化学的作用が低温環境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にどのような影響を及ぼすか確認することとした。本研究では、石灰石微粉末の代わりに岩種の異なる安山岩砕石粉を添加したり、普通ポルトランドセメントの代わりにセメント中の C_3A 成分が極端に少ない耐硫酸塩ポルトランドセメントを使用することにより、各配合の強度発現性を調査した。

図-6 にこれらの配合に対する強度発現結果を示す。まず、安山岩砕石粉の添加の有無が強度発現に及ぼす影響について考察する。20℃一定封かん養生を行った材齢 56 日における O5 と OA3 の圧縮強度を比較すると、20℃-OA3 が 20℃-O5 の圧縮強度を 8MPa 程度上回っている。一方、材齢 56 日における 5℃-O5 と 5℃-OA3 の圧縮強度を比較すると、5℃-OA3 が 5℃-O5 の圧縮強度を 13MPa 以上も上回っており、結果として O5 に比べ、OA3 で、20℃と 5℃の圧縮強度差が明らかに小さくなるという結果を示した。このような傾向は、程度の違いはあるものの石灰石微粉末を添加した場合と同様であり、岩種の異なる微粉末を添加しても常温と比べ低温下で強度発現が増進することが確認された。

次に、耐硫酸塩ポルトランドセメントと石灰石微粉末を組み合わせた場合の強度発現について検討を行う。図-6 より、20℃、5℃ともに、石灰石微粉末の添加により圧縮強度が増加しており、その傾向は 5℃でより顕著に現れている。材齢 56 日における S5 の 20℃と 5℃の圧縮強度差は、約 8MPa であるのに対して、SLa3 では、その差が約 4MPa と小さい値を示している。つまり、 C_3A 含有量の著しく低いセメントを用いても、石灰石微粉末の添加により、低温下での強度発現増進効果が期待できることが確認された。

以上のことから、炭酸カルシウムを含まない鉱物微粉末や C_3A 成分の著しく少ないセメントを用いても、鉱物微粉末の添加により、低温下で強度発現が顕著に増進することが確認された。従って、炭酸カルシウムとセメント中の C_3A 成分との反応は低温下での強度発現増進効果の

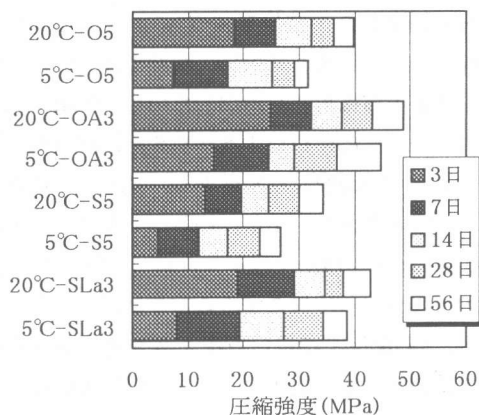


図-6 安山岩砕石粉や耐硫酸塩ポルトランドセメントを用いた場合の強度発現

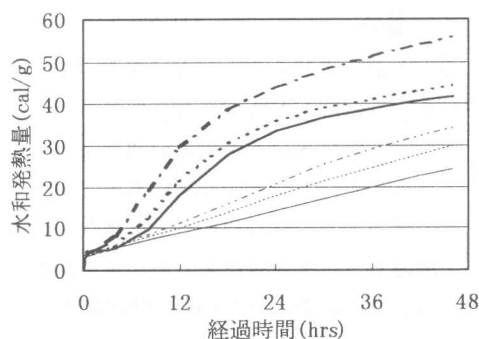
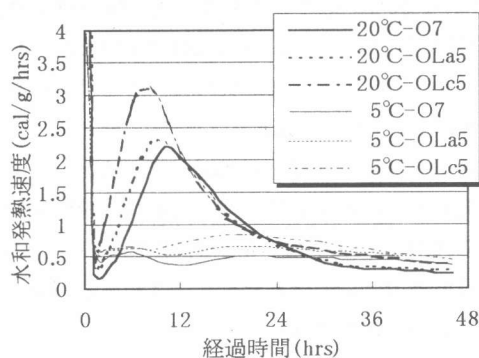


図-7 各配合の水和発熱速度と水和発熱量

支配的な要因にはなっていないと判断される。

既往の研究⁹⁾より、石灰石微粉末はセメント成分中のエーライト (C_3S) の反応を促進させる作用があることが知られている。この作用が、低温環境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とどのような関係にあるか確認するため、20℃及び 5℃環境下で、石灰石微粉末を添加したセメントペーストの水和発熱速

度を測定した。結果を図-7に示す。図より、既往の研究結果と同様に、20℃ではO7と比較して石灰石微粉末を添加した場合(OLa5)、C₃Sの活発な反応に相当する水和発熱速度曲線の第2ピークの出現時期が促進し、ピークの値も若干増加する傾向を示している。さらに、粉末度が著しく高いLcを添加した場合(OLc5)、C₃Sの反応が著しく促進することが確認された。一方、5℃環境下では、石灰石微粉末の添加の有無に関わらず、明確なピークが現れていない。石灰石微粉末を添加することにより、水和発熱速度全体が増加し、粉末度の高い石灰石微粉末Lcを添加することにより、その傾向はより顕著に現れているが、特に低温で常温と比べ、著しい水和反応の促進が現れているとは言い難い。ただし、20℃環境下では第2ピーク出現後、水和発熱速度が著しく減速するのに対し、5℃環境下では水和発熱速度の顕著な減速傾向は見られない。水和発熱量の測定結果からも、5℃環境下ではこの後も安定して水和反応が継続するものと推察される。

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封かん養生を行ったセメント硬化体の強度発現が増進する。また、粉末度の高い石灰石微粉末を添加すると、材齢初期の強度発現が顕著に増進し、石灰石微粉末の添加量を増加させると材齢長期にわたり強度発現が増進する。
- (2) 石灰石微粉末の代わりに安山岩砕石粉を添加したり、普通ポルトランドセメントの代わりに耐硫酸塩ポルトランドセメントを使用した実験結果においても、低温環境下における強度発現増進効果が確認された。従って、炭酸カルシウムとセメント中のC₃A成分との反応は、この効果の支配的な要因にはなっていないものと推察される。
- (3) 石灰石微粉末の添加により、セメントペーストの水和反応が常温、低温ともに促進す

ることが確認された。ただし、その傾向は、常温と比べ低温でより顕著に現れているとは言い難い。

参考文献

- 1) 石灰石微粉末研究委員会：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，委員会報告書，日本コンクリート工学協会，1998.5
- 2) 例えば山崎寛司：鉱物微粉末がコンクリートの強度に及ぼす効果に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.85，pp.15-46，1962.9
- 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.520-523，1996.12
- 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.265-270，1997.6
- 5) Miura, T. and Iwaki, I. : Effects of Curing Methods in Cold Regions on Strength of Concrete Incorporating Ground Granulated Blast Furnace Slag, Fourth CANMET/ACI/JCI International Symposium on Advances in Concrete Technology, ACISP-179, pp.815-829, Jun. 1998
- 6) 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和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，セメント協会，No.50，pp.62-67，1996.12
- 7) 大門正機他：わかりやすいセメント科学，セメント協会，1993.3