

論文

[1042] オートクレープ養生を行った高炉スラグ微粉末混和高強度
コンクリートの圧縮強度

福沢公夫*1・沼尾達弥*2・関口寿雄*3・牧野芳久*4

1. 序論

高炉スラグ微粉末は、マスコンクリートの発熱抑制のために用いられることが多い。最近では、高強度コンクリート用の混和材としても検討されている [1]。JIS A 5337 に規定される P H C くい、高強度コンクリート製品の代表的な例である。大部分がオートクレープ養生によって製造される。この P H C くに高炉スラグ微粉末が適用できれば、セメントの節約および耐久性の向上などが期待できる。

高炉スラグ微粉末を用いたモルタルをオートクレープ養生することにより高強度の得られることについての報告はある [2] ものの十分とはいえない。また、コンクリートとするときの圧縮強度に関する報告は見あたらない。

本研究においては、高炉スラグ微粉末を混和材として用いるモルタルあるいはコンクリートにおける石膏置換率、スラグ置換率、粉末度、養生方法および供試体の種類などの影響を実験的に検討した。

2. 使用材料

2. 1 セメントおよび混和材料

セメントは、JIS R 5210に規定される普通ポルトランドセメント（比重 3.15、比表面積 3430 cm²/g）を用いた。実験に用いた高炉スラグ微粉末の比重は、2.92であり、比表面積が4270cm²/g（以下、粉末度4270という）および6040cm²/g（以下、粉末度6040という）を用いた。高炉スラグ微粉末との比較のためにオートクレープ養生を行う P H C くの生産に用いられている、比重2.78、比表面積4200cm²/gの秩父産の珪酸質微粉末を用いた。高炉スラグ微粉末および珪酸質微粉末の化学成分を表-1に示す。高炉スラグ微粉末には、火力発電所の脱硫装置で副産される 2 水石膏を混和した。減水剤として、ナフタリンスルホン酸縮合物系およびポリカルボン酸系の高強度用減水剤を用いた。なお、ポリカルボン酸系の混和剤には、消泡剤を併用して起泡を抑制した。

表-1 スラグ微粉末および珪酸質微粉末の化学成分

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
高炉スラグ微粉末	33.5	15.7	0.7	42.5	5.9	0.1
珪酸質微粉末	94.0	1.8	1.4	0.5	0.3	--

2. 2 骨材

細骨材として、鬼怒川の旧河川敷より採取した比重2.61、粗粒率2.78の天然砂を用いた。粗骨材として、茨城県笠間産の比重2.68、粗粒率6.72の砕石を使用した。

*1 茨城大学教授 工学部都市システム工学科、工博（正会員）

*2 茨城大学助手 工学部都市システム工学科、工博（正会員）

*3 日立セメント(株)営業部技術サービス課係長

*4 住友金属工業(株)地球環境部利材室参事

3. 試験方法

3. 1 圧縮強度試験

モルタルの圧縮強度試験には、直径5cm、高さ10cmの振動締め円柱形供試体を、コンクリートの圧縮強度試験には、直径10cm、高さ20cmの振動締め円柱形供試体および直径20cm、高さ30cm、厚さ4cmの遠心力締め円筒形供試体を用いた。一つの試験値を得るための供試体の数は、円柱供試体の場合3個、円筒形供試体の場合2個とした。

モルタルは、結合材と細骨材の体積比が1：2のものを用いた。体積比を一定としたのは、混和材の置換率を変化させるときの練り混ぜたモルタル中に占める結合材の体積を一定としたいためである。コンクリートは、この1：2モルタル（水を含む）と粗骨材の体積比が56：44となる配合とした。モルタルの練混ぜには容量10ℓの強制練りミキサを、コンクリートの練混ぜには容量100ℓの強制練りミキサを用いた。セメント、混和剤および骨材を投入して3分間練り混ぜた後、混和剤を溶解した水を投入して2分間練り混ぜた。

円柱形供試体は、2層に分けて突き棒により成形した後、テーブル振動機により30秒間締め固めた。円筒形供試体は、供試体を遠心機に取り付け、遠心力による加速度の重力の加速度に対する比が最高で35、遠心時間が計6分の遠心力締めを行った。

供試体は、水中養生、蒸気養生後気中静置および蒸気養生後オートクレーブ養生を行った。水中養生を行う供試体は、成形後約48時間後に脱型し、直ちに20±3℃の水中にて材齢28日まで養生した。蒸気養生は、5時間の前置きの後、10℃/hの割合で昇温し、最高温度75℃にて6時間保持した後、蒸気の供給を停止し降温し、合計16時間の養生を行った。脱型後、温度20℃、相対湿度60%の恒温室に材齢28日まで保管した（以下、蒸気養生および気中静置期間を含めて蒸気養生という）。オートクレーブ養生を行う供試体は、蒸気養生後1～7日後に、最高温度180℃、保持時間4時間、計20時間のオートクレーブ養生を行った（以下、蒸気養生およびオートクレーブ養生を含めて、オートクレーブ養生という）。

4. 各種要因がモルタルあるいはコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響

4. 1 石膏添加率がモルタルの圧縮強度に及ぼす影響

ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を混和する場合、石膏の添加がモルタルの圧縮強度に影響するといわれている [3]。適切な石膏添加量は、使用する材料、養生方法等により変化するので、本研究に用いた材料によって石膏使用がモルタルの圧縮強度に及ぼす影響を検討した。

石膏置換率（高炉スラグ微粉末における石膏の体積置換率）を6水準、高炉スラグ微粉末の粉末度を2水準とし、総ての組み合わせについて試験を行い、それを3回繰り返した。養生方法は、水中養生、蒸気養生およびオートクレーブ養生の3とおりである。

結合材中、高炉スラグ微粉末と石膏の合計が占める割合を体積比で30%とした。水結合材体積比は100%とした。質量比で表した水結合材比は、石膏の比重が高炉スラグ微粉末と異なるため一定ではないが、約33%である。

図-1に試験結果を示す。図より、蒸気養生およびオートクレーブ養生を行う場合の石膏添加率の圧縮強度に及ぼす影響が類似していることがわかる。ただし、粉末度の相違により石膏添加率の圧縮強度に及ぼす影響は異なっており、粉末度が4270の場合は4%添加の場合に高強度となるのに対し、粉末度6040の場合は2%および6%において強度が高くなり、4%にて強度が低下する。

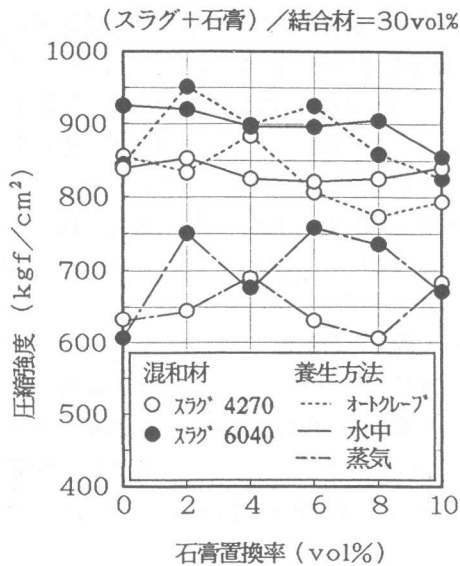


図-1 スラグ置換率とモルタル強度の関係

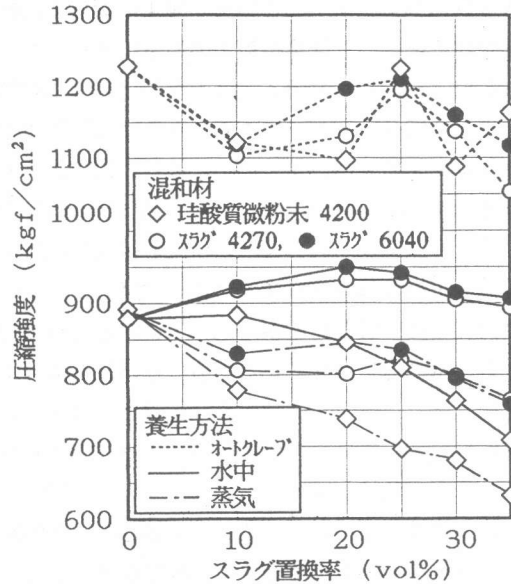


図-2 スラグ置換率とモルタル強度の関係

4. 2 高炉スラグ微粉末の粉末度および置換率がモルタルの圧縮強度に及ぼす影響

オートクレーブ養生における高炉スラグ微粉末の置換率がモルタルの圧縮強度に及ぼす影響を、養生方法および混和材の種類を要因として、実験的に検討した。混和材の種類3水準、置換率5水準とし、総ての組み合わせについてモルタルの圧縮強度試験を行った。繰り返しは2回である。オートクレーブ養生用混和材として一般的な珪酸質微粉末を用い、高炉スラグ微粉末との比較を行った。石膏置換率は、4. 1の結果をもとに粉末度4270のスラグ微粉末については4 vol%、粉末度6040については2 vol%とした。なお、混和材を用いない場合（置換率0%）についても試験を行った。養生方法は、4. 1と同様である。

本試験においては、水結合材体積比を78%とした（水結合材比約25%）。混和剤としてナフタリン系高強度用減水剤を無混和モルタルのセメント質量比で1%となる量を総ての配合に用いた。

圧縮強度試験の結果を図-2に示す。図-2より、次のことが観察される。

- (1) 養生方法の相違により、混和材置換率および混和材の種類が圧縮強度に及ぼす影響は異なっている。
- (2) 水中養生を行う場合、スラグ置換率の増加とともに圧縮強度が増加し、20%の置換率の時に最大となり、以後置換率の増加とともに圧縮強度が低下している。珪酸質微粉末については、添加率10%で無混和の場合と同一で、添加率がさらに増加すると、添加率の増加とともに圧縮強度の低下がみられる。
- (3) 蒸気養生を行う場合は、混和材の種類にかかわらず、添加率の増加とともに圧縮強度の低下がみられる。圧縮強度の低下は、珪酸質微粉末を用いる場合の方が、高炉スラグ微粉末を用いる場合よりも顕著である。
- (4) オートクレーブ養生を行う場合は、混和材の種類による圧縮強度の差はみられない。置換率の増加とともに一旦減少し、再び増加する傾向を示す。置換率25%のとき、混和材無混和のモルタルとほぼ同等の強度となった。

本実験の場合、オートクレーブ養生における珪酸質微粉末の効果が小さい結果となった。使用する骨材、配合、珪酸質微粉末の純度によっては、珪酸質微粉末の置換による強度増進効果が得られないことは起こり得ることである [4]。本試験の結果をさらに検討すると、オートクレーブ養生を行う場合の方が、水中養生あるいは蒸気養生を行う場合に比べて珪酸質微粉末の置換率の増加に対する効果は大きい。このことは、オートクレーブ養生における珪酸質微粉末の置換が強度増進を示す迄には至らないものの反応には影響しているものと思われる。また、試験体とは別に作ったセメントペーストの粉末X線回折試験を行った。SiO₂を示す26.7度のX線強度は、珪酸質微粉末のX線強度5840cpsに比べて著しく小さくなっており、この点からもオートクレーブ養生において珪酸質微粉末が反応していることが裏付けられよう。

4. 3 水結合材比を変化させるときの高炉スラグ微粉末置換率の影響

長滝らは、フライアッシュを混和材として用いたコンクリートのオートクレーブ養生に関する実験において、水結合材比の相異によりフライアッシュの置換率が圧縮強度に及ぼす影響が異なることを明らかにしている [5]。それによると、水結合材比が40%のモルタルについては、本実験と同様の傾向を示しているが、水結合材比が65%の場合には、置換率が増加すると圧縮強度が増加し、さらに置換率が増加すると強度が低下している。

高炉スラグ微粉末を用いる場合の影響を実験的に検討するため、粉末度2水準、置換率5水準および水結合材比2水準とするモルタルの強度試験を行った。総ての組み合わせについて試験を行い、それを2回繰り返した。なお、養生方法はオートクレーブ養生であり、水結合材体積比78%（水結合材比約25%）の場合の強度は、4. 2の試験結果を用いることにした。水結合材体積比が200%の配合の水結合材比は、約65%となる。

水結合材体積比が200%の場合には、置換率が増加するとともに若干ではあるが圧縮強度が増加傾向を示した。ここでは、圧縮強度が大きく異なるために、強度による直接的な比較では判断しにくいので、混和材を用いない配合の強度に対する強度比で表した結果が図-3である。

図-3より、次のことが観察される。

(1) 水結合材体積比が78%の場合と、200%の場合で、高炉スラグ微粉末の置換率に対する効果が異なっている。すなわち、水結合材体積比78%では粉末度、置換率によらず、高炉スラグ微粉末を混入したものは無混和のもの強度を上回ることがないのに対し、水結合材比200%では、粉末度6040の場合に顕著であるが、無混和の強度を上回る場合がある。

(2) 水結合材体積比が、78%の場合は粉末度にかかわらず、両者でほぼ等しい強度となるが、水結合材体積比が200%では粉末度6040の方が高い。

4. 4 高炉スラグ微粉末の置換率がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響

4. 2で示したように、モルタルにおいてはスラグ置換率は25%とするのがよいとされた。コンクリートとする場合の高炉スラグ微粉末置換の影響を検討するため、混和材2水準、置換率4水準とする圧縮強度試験を行った。各組み合わせごとに、

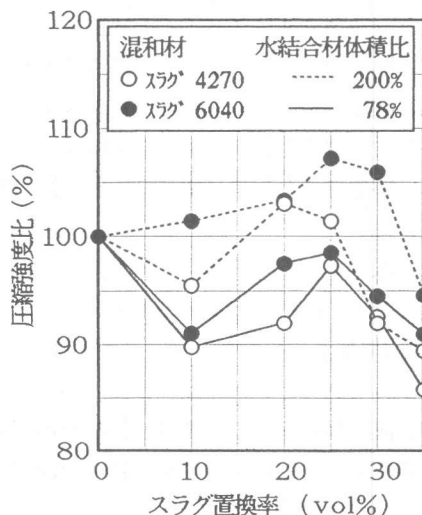


図-3 水結合材比の影響

振動締固め円柱供試体については、蒸気養生脱型時、水中養生材齢28日およびオートクレーブ養生後の圧縮強度を測定し、遠心力締固め円筒形供試体についてはオートクレーブ養生後の圧縮強度を測定した。総ての組み合わせについて、試験を行い、それを2回繰り返した。高炉スラグ微粉末無混和（置換率0%）についても2回試験した。

試験に用いた配合の水結合材体積比は78%（水結合材比約25%）であり、水量119ℓ/m³、結合材体積152ℓ/m³、細骨材体積292ℓ/m³、粗骨材体積438ℓ/m³である。高炉スラグ微粉末無混和の配合を質量で表すと、水量119kg/m³、セメント量480kg/m³、細骨材量761kg/m³および粗骨材量1174kg/m³となる。混和剤として、ポリカルボン酸系の高強度用減水剤を、高炉スラグ微粉末を用いない場合でセメント質量比0.45%となる量を総ての配合に添加した。コンクリートのスランブは、0.5~2.5cmであった。また、空気量は、2.9~4.5%であった。

実験の結果を図-4に示す。図-4より以下のことが確認された。

(1) 一部を除いて、高炉スラグ微粉末添加量が10~30%の範囲のコンクリート強度は、置換率20あるいは25%の時に最大となっている。分散分析の結果、置換率は有意となり、20%の時に最大値が得られることが示された。最大値を与える置換率の値は異なるものの、モルタルの場合と同様の傾向である。

(2) 遠心力締固め供試体の強度は、振動締固め供試体の強度より大きい結果となった。遠心力締固め時に高炉スラグ微粉末の分離が心配されたが、スランブが小さく分離が起きにくかったためと思われる。

5. セメントペーストの各種試験結果

4.3において、水結合材体積比の相違により、スラグ置換の効果が異なることが確認された。その理由を検討するためオートクレーブ養生を行ったセメントペーストについて、水銀圧入式ポロシメーターによる細孔分布測定、熱分析(TG-DTA)および粉末X線回折試験を行った。その結果に基づき細孔体積、平均細孔径、Ca(OH)₂量およびCa(OH)₂消費率として整理した結果を表-2に示す。Ca(OH)₂消費率は、普通ポルトランドセメントが水和したときに生成するCa(OH)₂量を一定量と仮定してCa(OH)₂量を求め、Ca(OH)₂量の実測値との差がスラグとの

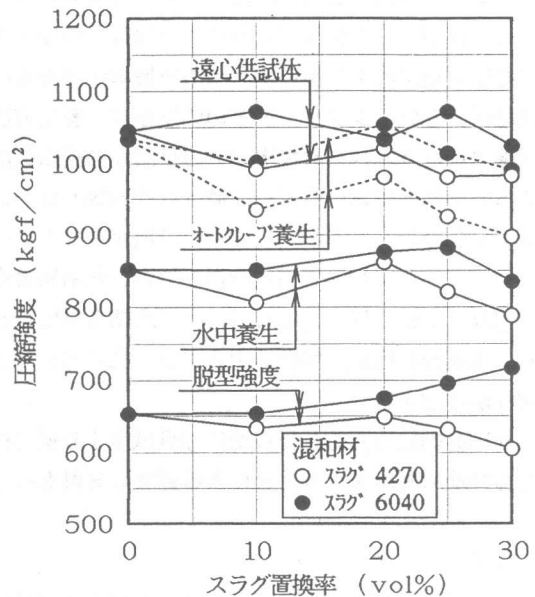


図-4 スラグ置換率とコンクリート強度の関係

表-2 セメントペーストの試験結果

項目	水結合材体積比 (%)	スラグ置換率 (vol%)			
		0	10	25	35
全細孔体積 (x10 ⁻⁴ cc/g)	78	862	862	865	888
	200	2037	2684	2460	---
平均細孔直径 (Å)	78	180	157	149	157
	200	305	323	307	---
Ca(OH) ₂ 量 (%)	78	15.6	13.2	9.9	8.2
	200	23.0	18.9	14.8	---
Ca(OH) ₂ 消費率 (%)	78	0	6	15	19
	200	0	9	16	---

反応に消費されたものとして求めた。従って、この値の大きい方がスラグとの反応による生成物が多いものと考えられる。

Ca(OH)₂量およびCa(OH)₂消費率の結果は、スラグ微粉末の置換率の大きくなるほど前者は減少し後者は増加しており、置換率の増加するほどスラグとCa(OH)₂との反応が進むことを示している。

長滝らは、フライアッシュをセメントに置換して用いる場合に、ある範囲の置換率における圧縮強度の低下を全細孔量の増加によるものと推定している [5]。本実験の場合、全細孔量と置換率の間に関係はみられない。また、平均細孔径が10%置換の時に大きくなるが、その量はわずかであり、かつ、置換率0%の場合よりも小さく強度低下の原因を説明できなかった。

6. 結論

(1) 蒸気養生あるいはオートクレーブ養生を行う場合に石膏置換の影響があり、高炉スラグの粉末度4270の場合は石膏置換率4%で、6040の場合は2%で高強度が得られる。

(2) 高炉スラグ微粉末を混和する場合、モルタル、コンクリートの別、粉末度の大小および養生方法の種類にかかわらず、体積置換率が20あるいは25%のときに最大値となる。ただし、混和材を用いないコンクリートとの強度差は、養生方法および粉末度により変化する。オートクレーブ養生を行う場合、置換率10%の供試体の圧縮強度は無混和(置換率0%)に比較して低下し、20あるいは25%におけるピーク値はほぼ同等となる。それに対し、水中養生では、10%置換において低下しないか、あるいはしてもその量が少なく20あるいは25%で最高強度となる。

(3) オートクレーブ養生を行う場合、体積置換率の圧縮強度に及ぼす影響は、水結合材体積比が200% (水結合材比約65%) と78% (水結合材比約25%) の場合で異なった結果が得られた。すなわち、水結合材体積比200%の場合には、(2)で述べた強度低下がなく、スラグ微粉末の混和とともに強度が増加する。

(4) 振動締め固めを行った円柱供試体より遠心供試体のほうが若干高い圧縮強度が得られた。遠心力締め固めを行うことによる顕著な分離もみられなかった。

謝辞

本研究は、茨城大学、日立セメント(株)および住友金属工業(株)との共同研究として行われた。卒業研究として、実験を担当された卒業生、各種試験を行って頂いた日立セメント(株)椎野宏明氏および堀部 忍氏をはじめとする多くの方々の協力を頂いた。付記して、謝意を表する次第である。

【引用文献】

- 1) Nakamura, N. et al.: Properties of High-Strength Concrete Incorporating Very Finely Ground Granulated Blast Furnace Slag, ACI SP-91, pp.1361-1380, 1986
- 2) 大濱嘉彦・出村克宣・木村正尚: 高炉スラグ微粉末を用いた超高強度モルタルの製造、セメント・コンクリート研究討論会研究報告集, Vol.17, pp.51-56, Nov.1990
- 3) 伊藤 裕敏・河野嗣寿・鈴木一孝: 繊維補強セメント硬化体の強度に及ぼす添加物と養生条件の効果、セメント技術年報、Vol.42, pp.459-462, 1988
- 4) Menzel, C. A.: Studies of High Pressure Steam Curing of Tamped Hollow Concrete Block, ACI Journal, Vol.32, pp.621-640, May-June, 1936
- 5) 長滝重義・坂井悦郎・竹内 徹: 高温高圧養生下におけるフライアッシュセメント系結合材の水和とコンクリートの力学性状、セメント技術年報、Vol.35, pp.301-305, 1981