

高炉スラグ高含有コンクリートの強度発現特性に関する基礎的研究

中本純次¹・戸川一夫²・藤井學³

¹正会員 和歌山工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒644 和歌山県御坊市名田町野島77)

²正会員 工博 和歌山工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒644和歌山県御坊市名田町野島77)

³正会員 工博 京都大学大学院工学研究科教授 土木工学専攻 (〒606 京都市左京区吉田本町)

本研究は、単位セメント量の95%までを高炉スラグ微粉末で置換した、いわゆる高炉スラグ高含有コンクリートの強度発現性状に及ぼすスラグ粉末度、置換率および養生温度の影響について検討したものであり、以下のことが明らかとなった。①スラグセメントペーストおよびコンクリートの始発・終結時間は、4040～8160cm²/gの範囲では粉末度が高くなれば早くなる。また、始発・終結時間は、置換率が増加すれば遅れるが、置換率が85%をこえればむしろ無置換のものより早くなる。このことは、ペーストの水和発熱曲線から説明できる。②使用スラグおよび養生温度が同じであれば、圧縮強度と積算温度の対数値との関係から求めた回帰直線式の傾きと切片は、スラグ置換率にかかわらず一つの直線上にプロットされる。

Key Words : blast furnace slag, high slag content, strength development, setting, hydration

1. はじめに

我が国では、JIS R 5211により高炉セメントは、含有するスラグの量によってA種、B種、C種に分類・規定されてきた。また、高炉セメントの使用量のほとんどがスラグ置換率60%以下の高炉セメントB種であったことから、制限を超えるような範囲での利用に関する研究¹⁾は近年まで比較的少なかった。諸外国ではスラグ高含有セメントの有用性が評価され実績を上げてきていることもあり、近年我が国においても明石海峡大橋等の建設において用いられるなど、高炉スラグ微粉末を多量に含有するセメントコンクリートに関する研究が行われるようになってきている。コンクリートの品質保証の観点からより細部化された厳格な規格の必要性もさることながら、省資源・省エネルギー・地球環境保全を考えたとき、副産物やリサイクル資源の活用を促す必要性からも、その構造物に要求される特性だけを保証するような自由度の高い規格化も今日的な課題であると考えられている。高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの強度発現特性は、スラグ微粉末の品質や置換率、養生温度などにより大きく影響を受けることが報告^{2)・3)}されているが、置換率が70%を超えるような領域(高炉スラグ高含有コン

クリートと呼ぶ)の強度発現性状についての系統的な報告^{1)・4)}は少ない。

本報告は、単位セメント量の95%までを高炉スラグ微粉末で置換した高炉スラグ高含有コンクリートの強度発現特性について、筆者らがすでに発表した報告⁵⁾にその後の追加試験を含めて、以下に示すシリーズ(1)、(2)、(3)について取りまとめたものである。なお、筆者らは高炉スラグ高含有コンクリートを汎用性のある構造用材料として用いることを目的としており、そのためには種々の環境条件における検討が必要であるが、ここでは圧縮強度を評価する場合の標準的な養生方法である水中養生を行った場合について報告するものである。

(1)若材齢(材齢28日)における圧縮強度発現性状

養生温度があまり低いとスラグを用いたコンクリートおよびモルタルの強度発現がきわめて緩慢になることから、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針(案)⁶⁾では、打ち込み時のコンクリートの温度は、原則として10℃以上でなければならないと定めている。これは、これまで粉末度が2750～6000cm²/gのものを用いることを標準としてきたことによるが、近年高微粉碎化されたスラグ微粉末が入手可能となり、高微粉碎化による低温

下での強度発現特性の改善を期待して、スラグ粉末度が強度発現に及ぼす影響について養生温度5℃の場合も検討した。なお、高炉スラグ高含有コンクリートの圧縮強度発現を、強度-マチュリティーの対数値との関係として整理した。

(2)長期材齢(3年)における圧縮強度発現性状

スラグ含有コンクリートは、初期強度発現は遅れるが長期強度は大きいと報告されている²⁾。スラグ粉末度4040、6140および8160cm²/g、置換率0、50、70、85、95%の配合について、養生温度20℃の場合の材齢3年までの強度発現性状について検証した。

(3)初期材齢における凝結特性

コンクリートの初期材齢における強度発現性状は、養生方法の選択や打設サイクルなど施工形態に大きく影響する。ASTM C 403プロクター貫入抵抗によるコンクリートの凝結試験に従い、ウェットスクリーニングしたモルタルの凝結過程について検討した。また、強度発現性状を微少熱量計によるスラグセメントペーストの水和発熱特性と結びつけて考察し、シリーズ(1)の結果と関連づけてコンクリートの脱型時期についても検討した。

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。細骨材は、徳島県那賀川産の川砂(比重2.61, 吸水率1.70%, F. M. 2. 89)を、粗骨材は、和歌山県由良産の硬質砂岩砕石(最大寸法20mm, 比重2.62, 吸水率1.10%)を使用した。粗骨材は使用に際して、分級された20~13mmと13~5mmの骨材をそれぞれ50%ずつ混合使用した。高炉スラグ微粉末には、ブレン比表面積が4040、6000および8160cm²/gの3水準を選んだ。なお、スラグ微粉末を置換したコンクリートの圧縮強度および断熱温度上昇量におよぼす高炉スラグ微粉末中の石こう添加率の影響については、魚本ら⁷⁾および国府ら⁸⁾により報告されており、それらを参考に本研究ではSO₃添加率を2%に調整した。用いた高炉スラグ微粉末の物理的性質ならびに化学組成については表-1に示す。

混和剤は、リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体のを主成分とするAE減水剤および変形アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤のAE助剤を使用した。

(2)コンクリートの配合

スラグ置換率(B/(B+C))は、0、50、70、85および95%の5水準とし、水結合材比57%、単位結合材

表-1 高炉スラグ微粉末の試験成績結果

比重	粉末度 (cm ² /g)	化学成分(%)						
		S ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	SO ₃	TiL
2.89	4040	32.8	13.6	0.2	42.4	5.8	2.0	96.8
2.89	6140	33.2	13.7	0.2	42.1	5.8	2.0	97.0
2.89	8160	33.0	13.6	0.2	42.1	6.0	2.0	96.9

表-2 所要AE助剤量

置換率 (%)	AE助剤量(cc)		
	4040(cm ² /g)	6140(cm ² /g)	8160(cm ² /g)
0	2300	2300	2300
50	3300(1.43)	3400(1.48)	3700(1.61)
70	3800(1.65)	3900(1.70)	4200(1.83)
85	4200(1.83)	4300(1.87)	4600(2.00)
95	4600(2.00)	4700(2.04)	5000(2.17)

()の値は、無置換に対する比を示す。

量280kg/m³とした。基準コンクリートのスランプを8±1cmとし、各コンクリートの空気量を4.5±0.5%とするために、リグニンスルホン酸塩系のAE助剤量で調整した。以下、配合を示す記号として、スラグ無置換配合(普通コンクリート)をB0、スラグを置換した配合については、たとえば粉末度4040cm²/gを50%したものについては4B50と表すこととする。所要の空気量を得るために必要なAE助剤量については表-2に示している。スラグ粉末度の増加に伴って、混和剤のスラグ粒子への吸着量が増加するためスラグ置換率の増加につれて連行空気量は少なくなり、必要なAE助剤量は増加⁹⁾する結果となっている。

(3)初期水和発熱量測定

高炉スラグ微粉末の添加による結合材の初期水和発熱性状の変化を検討するため、スラグ粉末度およびスラグ置換率を変化させたスラグセメントペーストについて、コンダクションカロリメータを用いて、試験温度20℃、水-結合材比50%、試料攪拌時間3分の条件で、注水直後から168時間までの発熱量の測定を行った。

(4)ウェットスクリーニングモルタルのプロクター貫入抵抗試験

スラグ高含有コンクリートの凝結特性を把握するために、シリーズ(1)のうち代表的な粉末度-置換率の組み合わせを選び、コンクリート練り混ぜ後ウェットスクリーニングして、プロクター貫入抵抗試験を行った。試験方法は、すべてASTM C 403に準じた。

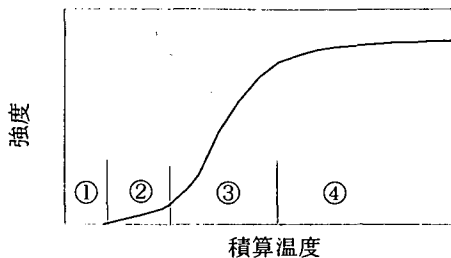


図-1 強度-積算温度関係

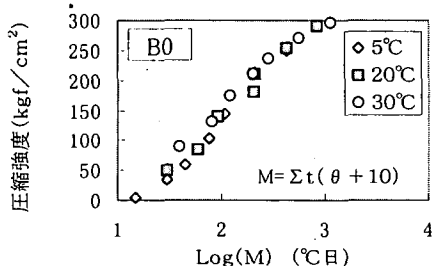


図-2 Log(M)と圧縮強度との関係

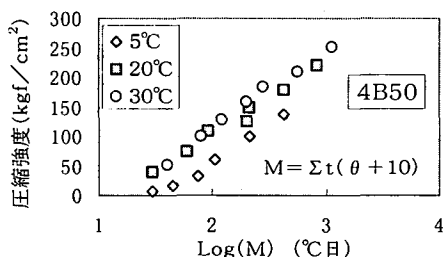


図-3 Log(M)と圧縮強度との関係

(5) コンクリートの圧縮強度試験

圧縮強度用供試体は、打設直後から濡れ布養生を行い、材齢1日で脱型した後、試験材齢まで $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の水中養生を行った。ただし、低温養生の場合において材齢1日で脱型ができない場合には湿潤養生を継続し、脱型できるのを待って水中養生に移行した。試験は、所定の材齢において JIS A 1108 に準じて実施した。

3. 実験結果とその考察

(1) 材齢28日までの圧縮強度発現性状

コンクリートの圧縮強度に及ぼす温度と材齢の影響については、実験的アプローチとして Saul⁽¹⁰⁾により環境温度とその温度下で経過した時間との積として表す積算温度の考え方が提案されており、一般には次式が用いられている。

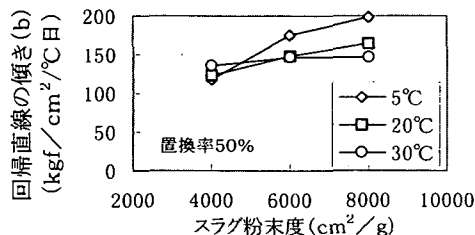


図-4 スラグ粉末度と養生温度別回帰直線の傾きとの関係

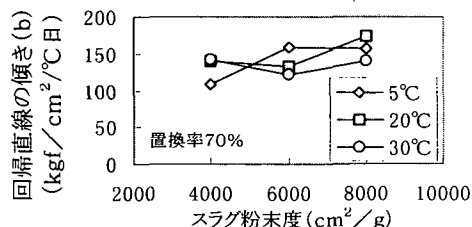


図-5 スラグ粉末度と養生温度別回帰直線の傾きとの関係

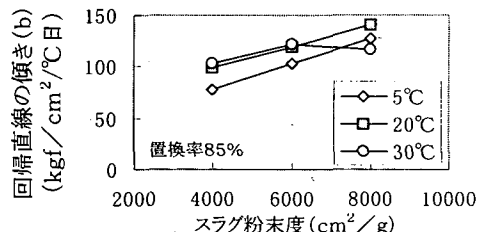


図-6 スラグ粉末度と養生温度別回帰直線の傾きとの関係

$$M = \sum t (\theta + 10) \quad (1)$$

ここに、 t : 材齢 (日)

θ : 養生温度 ($^\circ\text{C}$)

Nicholasら⁽¹¹⁾は、その積算温度と圧縮強度の関係を図-1に示すように①プラスチック領域、②凝結領域、③急速強度発現領域、④発現速度減少収束領域の4つのステージに分けて説明している。

図-2および図-3は、スラグ無置換コンクリート(B0)およびプレーン粉末度 $4040\text{cm}^2/\text{g}$ のスラグ微粉末をセメント量の50%置換したコンクリート(4B50)について、積算温度の計算に式(1)を用いた場合の積算温度の対数(Log(M))と圧縮強度との関係をそれぞれ示している。B0配合について、Log(M)が大きくなれば圧縮強度は、わずかにS字(反曲線)⁽¹²⁾を描きながらも直線的に増加するとして評価できそうである。すなわち、スラグ無置換のコンクリートについては、養生温度が $5^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ の範囲では、Log(M)と圧縮強度との関係は、次式で表されることがわかる。

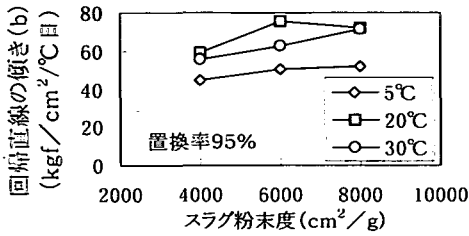


図-7 スラグ粉末度と養生温度別回帰直線の傾きとの関係

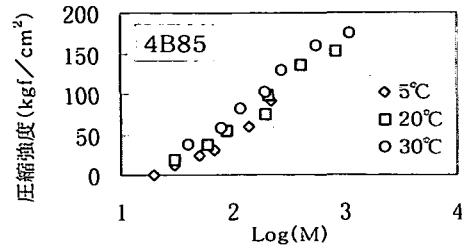


図-10 Log(M)と圧縮強度との関係

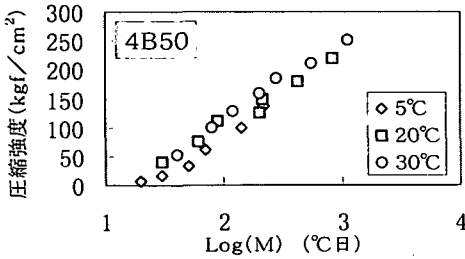


図-8 Log(M)と圧縮強度との関係

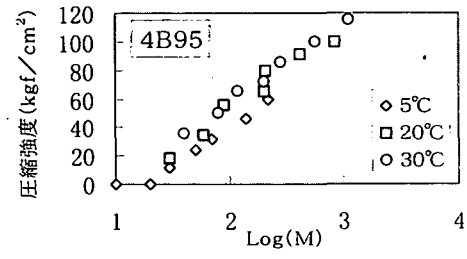


図-11 Log(M)と圧縮強度との関係

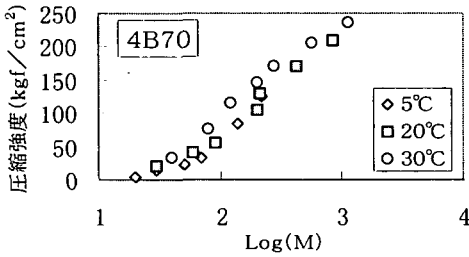


図-9 Log(M)と圧縮強度との関係

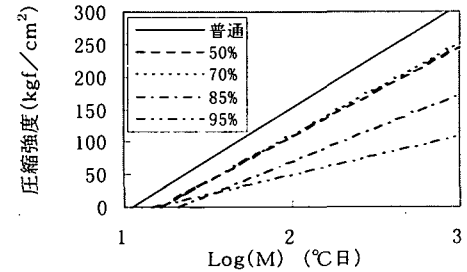


図-12 圧縮強度の回帰直線

$$f c = b \cdot \text{Log}(M) + a \quad (2)$$

ここで、 a および b はコンクリートの強度レベルにより異なり^{1,2)}、それぞれ強度発現時期および強度発現速度を表す指標であると考えられる。4B50配合の場合については、図-3に示すように20°Cおよび30°Cの場合には、ほぼ一つの直線上にプロットされている。しかしながら、5°Cの場合には傾きはほぼ同じであるが積算温度の大きい方に平行移動していることが明らかである。これらのことは、スラグ微粉末の強度発現におよぼす活性度（寄与率）が養生温度（特に低温度）によって影響を強くうけることを示すものであり、スラグの温度依存性に関する国府ら⁸⁾やRoyら¹³⁾の報告と一致する。

図-4～図-7には、養生温度（5、20および30°C）別の回帰直線の傾き（ b ）をスラグ置換率別に示している。置換率が85%および95%の場合には、5°Cの直線の傾きは20°C、30°Cの場合より小さいことが認められるが、置換率が50%、70%の場合にはむしろ大きな値を示すことがわかる。また、傾きは、粉末度が大きくなれば大きくなることは認められるが、養

生温度やスラグ置換率によっては傾向は必ずしも一定でない。国府ら⁸⁾は、材齢3日および7日の水和熱について、置換率70%の場合を除いて、養生温度が10～35°Cでは普通セメント単味よりも大きく、ほぼ一定の変化割合を示すが、置換率70%の場合には、養生温度が低くなるにしたがって変化割合が大きくなることを示している。本研究では置換率が95%までと非常に高く、また養生温度が5°Cまでと低いことから特に養生温度の影響を強く受けていると考えられる。

そこで、スラグ微粉末の活性度の温度依存性をできるだけ単純に評価するために、温度の影響を強く受けることが認められた養生温度5°Cの場合のみ平行移動させ、20°Cおよび30°Cの一群に同化させてみた。すなわち、養生温度5°Cの場合のみ積算温度算定式中の養生温度の仮想原点を変化させ、母集団の傾きを変えることなく、圧縮強度に対して相関の最も高いところをさがしたところ、いずれの粉末度、置換率にかかわらず、

$$M = \sum t (\theta + 5) \quad (3)$$

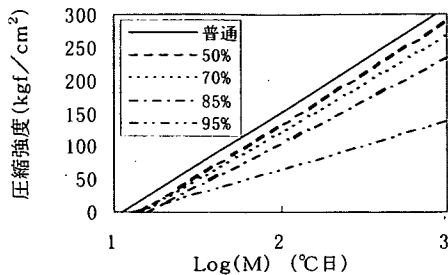


図-13 圧縮強度の回帰直線

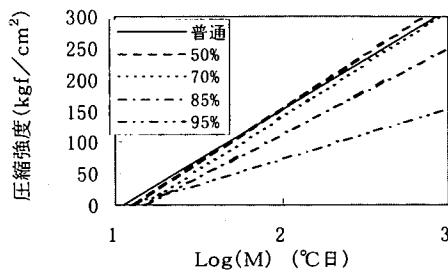


図-14 圧縮強度の回帰直線

表-3 各種コンクリートの回帰直線

粉末度 (cm ² /g)	置換率 (%)	回帰直線式 (kgf/cm ²)	相関係数 (%)
スラグ無置換		159Log(M)-167	93
4040 (4B)	50	138Log(M)-169	93
	70	142Log(M)-173	92
	85	103Log(M)-136	92
	95	60Log(M)-70	92
6140 (6B)	50	158Log(M)-184	88
	70	147Log(M)-173	92
	85	131Log(M)-158	91
	95	73Log(M)-81	91
8160 (8B)	50	174Log(M)-196	92
	70	170Log(M)-201	92
	85	138Log(M)-164	95
	95	80Log(M)-87	93

とした付近がもっとも相関が高いことが認められた。そこで、20℃および30℃の場合は式(1)を、5℃の場合については式(3)を用いて積算温度を求め、圧縮強度をLog(M)に対してプロットしたのが、図-8～図-11(4040cm²/g)である。6140cm²/g、8160cm²/gについても上記と同様の結果が得られており、それらの関係を最少自乗法で直線回帰した結果が、図-12～図-14および表-3である。6B50の場合を除いて、いずれの回帰直線も90%以上の高い相関が得られている。

図-15と図-16は、回帰直線の傾きbおよび切片aとスラグ粉末度あるいは置換率との関係を示し

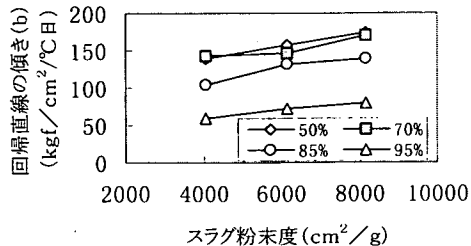


図-15 回帰直線の傾きとスラグ粉末度との関係

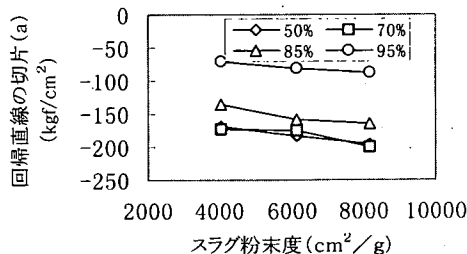


図-16 回帰直線の切片とスラグ粉末度との関係

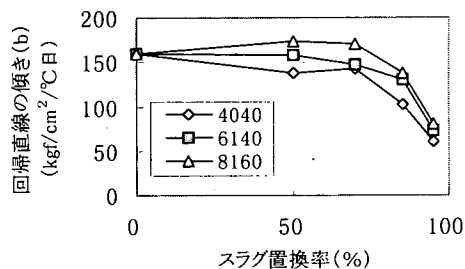


図-17 傾き(b)とスラグ置換率との関係

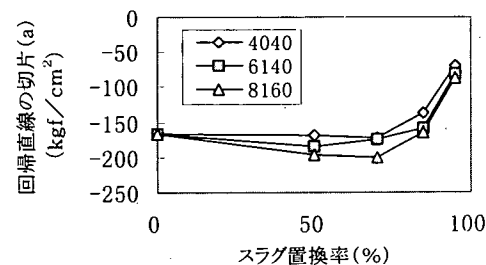


図-18 切片(a)とスラグ置換率との関係

たものである。b, aともにスラグ置換率にかわりなく、粉末度の増加につれてほぼ直線的に変化している。そして、スラグ置換率が50%と70%についてはよく似た傾向を示している。換言すれば、図-17、図-18に示すようにb, aはスラグ置換率が70%を超えると急激な変化を示すことになる。図-19には、それら回帰直線から求めた、圧縮強度の推定値と実測値との関係を示している。養生温度の違

表-4 スラグ粉末度および養生温度別のcとdの値

養生温度 (°C)	4040 cm ² /g		6140 cm ² /g		8160 cm ² /g	
	傾き c	切片 d	傾き c	切片 d	傾き c	切片 d
5	-0.660	5.4	-0.691	5.8	-0.705	6.3
20	-0.728	10.3	-0.756	14.8	-0.797	18.5
30	-0.770	12.5	-0.820	20.9	-0.882	25.6

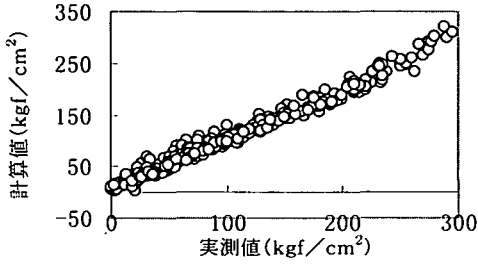


図-19 圧縮強度の実測値と推定値の関係

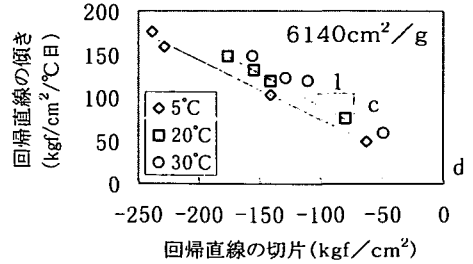


図-21 回帰直線の切片と傾きとの関係

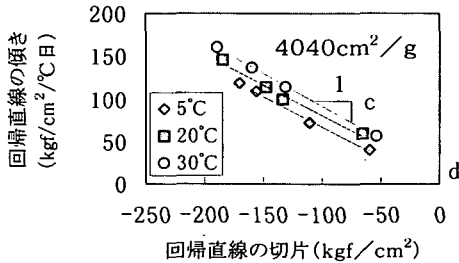


図-20 回帰直線の切片と傾きとの関係

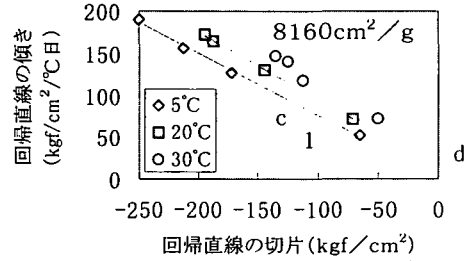


図-22 回帰直線の切片と傾きとの関係

いによる圧縮強度への寄与の違いを、積算温度の関数として処理をした。すなわち、20°Cおよび30°Cの場合は、実測材齢における積算温度を式(1)で求め、回帰直線式に代入して推定値を求めた。同様に5°Cについては、式(3)で求めた積算温度を用いたものである。同図から、前述したように強度-積算温度関係は反曲線を描くことから、材齢初期には若干大きめの値を予測し、後期においては若干小さめの値を推定することにはなるが、スラグ微粉末の強度発現に対する寄与を単純に水和反応が起こる最低温度の違いであるとして積算温度式を変化させるのも一つの方法と考えられる。本研究では、スラグコンクリートにおいては-5°Cを水和反応が起こる養生温度の仮想原点と考えた $M = \sum t (\theta + 5)$ の場合に最も高い相関が得られたので、いずれの配合についても同式を用いた。

前述したように、スラグ粉末度、置換率、養生温度が変化すれば、それぞれの回帰直線式は異なり、係数b、aは粉末度と比例関係を示すが、置換率や養生温度については必ずしも一定の傾向は認められない。そこで、粉末度や養生温度の違いによる圧

縮強度に対するスラグ微粉末の添加の効果を評価するために、各回帰直線の傾きと切片の関係をプロットしたものが、図-20~図-22である。同図からいずれの粉末度の場合についても、傾きと切片の関係は置換率にかかわらず一つの直線上にプロットされるという興味ある結果が得られた。それらの示す直線の傾きcおよび切片dを表-4に示している。なお、スラグ粉末度および置換率の違いによる初期配列状態ならびに水和生成物と生成速度等の違いを取り入れた高炉スラグ高含有コンクリートの強度発現モデルならびに強度推定については今後さらに検討する考えである。

(2) 長期材齢における圧縮強度発現性状

図-23~図-25は、材齢3年まで20°Cの水中養生を継続した場合の高炉スラグ高含有コンクリートの圧縮強度発現性状を示している。スラグ微粉末を置換したコンクリートの圧縮強度に関して、これまでの研究^{2), 3), 14)}から、無置換コンクリートに比べて材齢初期においては低下するが、材齢の経過とともに強度の低下が改善され、長期材齢では無置換

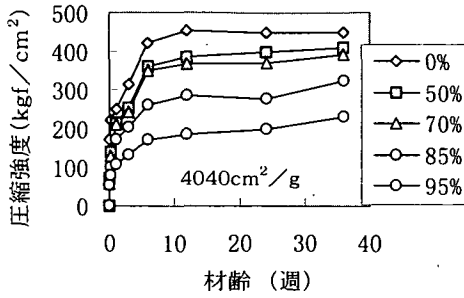


図-2 3 材齢と圧縮強度との関係

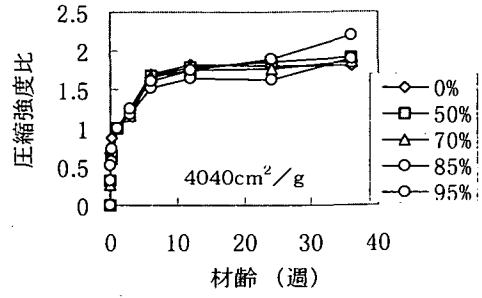


図-2 6 材齢と圧縮強度との関係

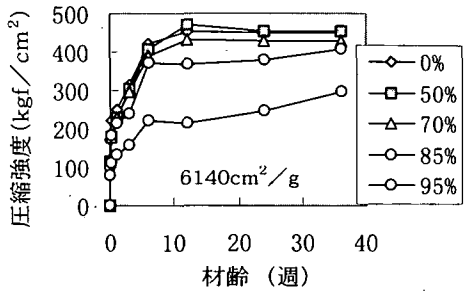


図-2 4 材齢と圧縮強度との関係

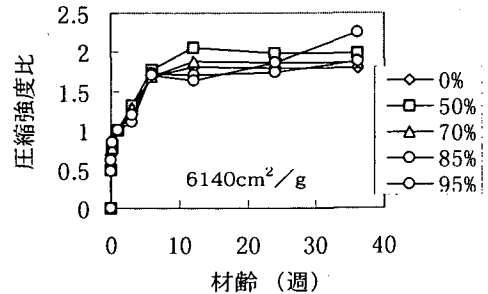


図-2 7 材齢と圧縮強度との関係

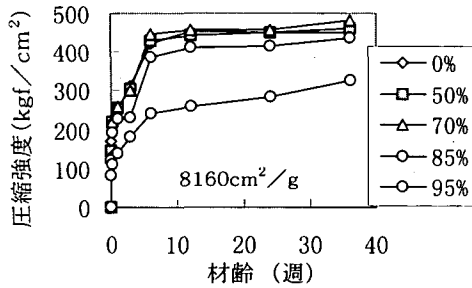


図-2 5 材齢と圧縮強度との関係

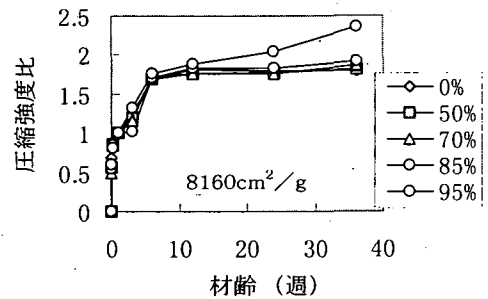


図-2 8 材齢と圧縮強度との関係

のものに比べ上回ることも、また置換率が70%以下では、それらの傾向は置換率が大きいほど顕著であること、粉末度が大きくなれば圧縮強度が大きくなるが、粉末度の影響は長期材齢では短期材齢における影響ほど顕著ではないことが明らかにされている。

本実験では、スラグ置換率および粉末度にかかわらず、材齢182日までに強度発現はほとんど終了し、以後強度増加割合は小さいことが認められる。しかしながら、用いたスラグ粉末度の違いによって、得られる圧縮強度の大きさはかなり相違している。すなわち、置換率が50および70%の場合についてスラグ無置換のものを100として材齢3年において比較した場合、粉末度4040cm²/gについては、93および87、6140cm²/gについては100および96、8160cm²/gについては104および107となり、粉末度が小さい

場合にはスラグ無置換のものより若干小さくなるが、粉末度を高めれば無置換のものよりも高い圧縮強度が得られることが認められた。従って、長期材齢における圧縮強度発現におよぼすスラグ添加の効果は、他者の報告^{23), 31), 41)}と同様の傾向が得られたと考える。

圧縮強度の増進については、スラグ置換率85%および95%を除いて、いずれの粉末度においても材齢182日においては、材齢3年において得られる圧縮強度の90%以上の圧縮強度が得られている。しかしながら、置換率95%については73~75%、85%については87~88%の強度発現であり、材齢半年以降の材齢長期においてもかなりの強度増加があることがわかった。

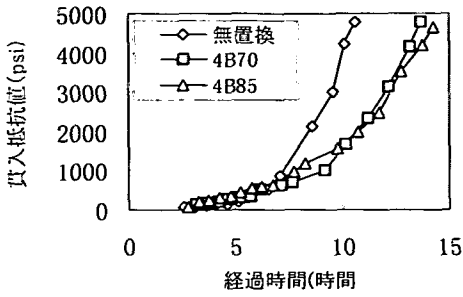


図-2-9 プロクター貫入抵抗試験結果

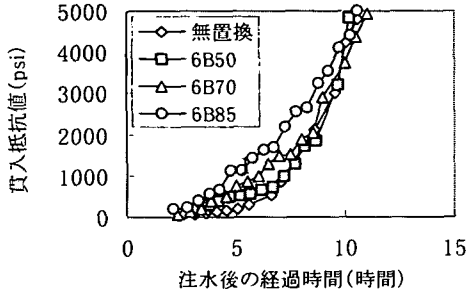


図-3-0 プロクター貫入抵抗試験結果

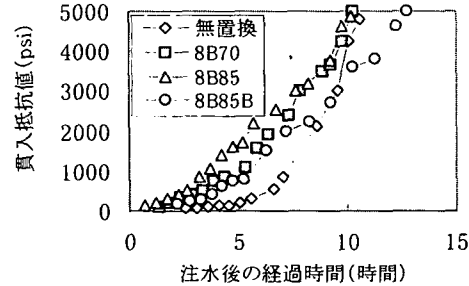


図-3-1 プロクター貫入抵抗試験結果

材齢28日における圧縮強度に対する各材齢での圧縮強度の比を図-26~図-28に示している。置換率が大きいと強度の増加割合も大きく、その傾向は粉末度が小さい場合において顕著である。すなわち、粉末度の小さいものの方が材齢長期における強度の増加は大きいことが認められる。置換率が95%の場合、いずれの粉末度についても材齢半年以降の圧縮強度比は、ほぼ一定の割合で増加していくようである。これは、初期(材齢28日)の圧縮強度発現が小さいことから圧縮強度比が大きくなったと考えられる。

(3) 初期材齢における凝結特性

高炉スラグ高含有コンクリートの凝結過程におよぼすスラグ置換率および粉末度の影響について明らかにするために、ここではウェットスクリーニングモルタルの貫入抵抗値により評価することと

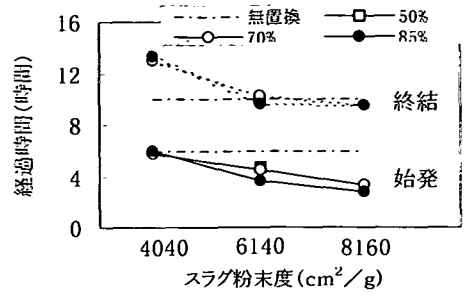


図-3-2 スラグ粉末度と始発・終結時間との関係

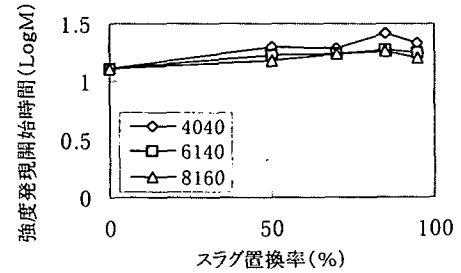


図-3-3 回帰直線から求めた強度発現開始時のLog(M)

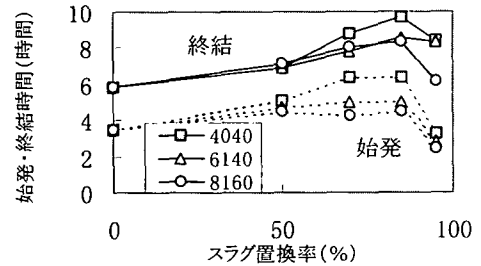


図-3-4 スラグセメントペーストの凝結試験結果

した。

図-29~図-31にスラグ置換率が85%までのプロクター貫入試験結果について示している。図より、コンクリートの凝結特性は、粉末度、置換率によりかなり変化することが明らかである。コンクリートの凝結・硬化の開始については明確な定義はなく¹⁵⁾、ここでは、始発・終結を500psi(3.5Mpa)および4000psi(27.6Mpa)で表すことにした。図-32に、各配合の始発および終結時間を示している。スラグ置換率、粉末度が増加すれば、始発・終結ともに早くなるといえる。スラグ無置換のものと比較すると、始発時間は4040cm²/gの場合ほぼ同じで、粉末度が増加するに従い早くなる。終結時間は6140cm²/gの場合がほぼ等しく、4040cm²/gになると遅くなる。始発から終結に要する時間は、スラグを置換すると無置換のものに比べて長くなるが、粉末度が増加すればその差は若干減少する。

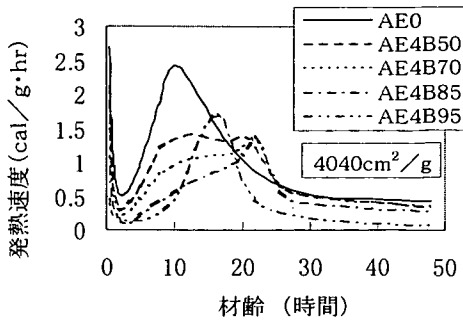


図-35 スラグ置換率が水和発熱速度におよぼす影響(4040cm²/g)

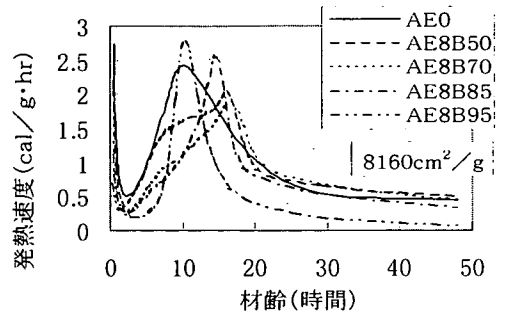


図-37 スラグ置換率が水和発熱速度におよぼす影響(8160cm²/g)

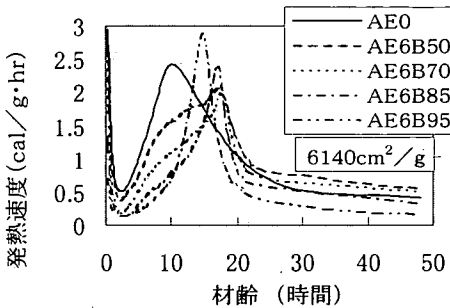


図-36 スラグ置換率が水和発熱速度におよぼす影響(6140cm²/g)

図-33にはシリーズ(1)における回帰直線式から求めた強度発現を開始するのに要する積算温度の対数値とスラグ置換率の関係を示している。また、図-34には、スラグセメントペーストの凝結試験結果を示している。コンクリートの強度発現開始時間あるいはペーストの始発時間は、いずれの場合も置換率70%までは、置換率の増加につれて遅くなるが、70%から85%にかけては大きな変化はなく、95%になるとむしろスラグ無置換のものよりも早くなることが認められる。養生温度の異なるコンクリートの凝結特性を単一の温度条件におけるスラグセメントペーストの水和発熱速度曲線から論じることが若干無理があることも考えられるが、温度条件ならび置換率を変化させたスラグセメントペーストの水和発熱速度に関する国府ら⁸⁾およびRoyら¹³⁾の報告から、水和発熱速度は養生温度の影響を強く受けるが、養生温度の違いによる水和発熱速度の違いは一連の連続した傾向の変化として捉えることが出来ると考えられることから、ここでは20℃におけるスラグセメントペーストの水和発熱速度曲線を図-35～図-37に示している。スラグ粉末度および置換率が変化すれば、水和発熱速度曲線はかなり変化することが認められる。置換率が70%以下の場合、セメントとスラグの複合的な第3のピークが存

表-5 圧縮強度10kgf/cm²発現時間(Log(M))

置換率 (%)	スラグ粉末度 (cm ² /g)		
	4040	6140	8160
0	1.11	1.11	1.11
50	1.30	1.23	1.18
70	1.29	1.24	1.24
85	1.42	1.28	1.26
95	1.33	1.25	1.21

在する複雑な水和発熱曲線となるが、置換率が85%および95%になるとスラグの影響が支配的な発熱速度曲線となる。そして、粉末度および置換率が増加すればピーク高さは高く、またピーク出現時間は早くなりながらセメント単味のものに漸近することが認められる。内川ら¹⁰⁾は、セメントの水和発熱曲線において、第2ピークは注水直後の発熱を経てその後の水和停滞後に現れるピークで、エーライトが活発な水和を開始することによるものであり、セメントの凝結の開始時間および終結時間は、それぞれ第2ピークの立ち上がり時期および発熱量が極大となる時期によく対応すると報告している。スラグセメントペーストの水和発熱曲線とコンクリートの凝結特性を直接結びつけることは難しいが、前述したようにコンクリートの始発・終結時間はスラグ置換率および粉末度が増加すれば早くなることは、第2ピークの極大となる位置がスラグ粉末度が増加すれば、またスラグ置換率が増加すれば早くなることから説明される。しかしながら、スラグ無置換のものと比較して、粉末度6140および8160cm²/gのスラグを置換したコンクリートの方が早くなることについては、同図から説明することは困難であり、ピーク出現時間だけでなく水和生成物の生成量や組成から検討することも必要であろう。表-5には、各種コンクリートの回帰直線式から求めた圧縮強度10kgf/cm²(0.98MPa)が得られる時間を示している。脱型時の強度を10kgf/cm²(0.98MPa)とすれば、置換率85%の時が最も時間がかかり、95%の時は

85%の時より短くなり、むしろ70%と同じ時間となる。

5. まとめ

アルカリ刺激剤としてのセメントを若干残して、高炉スラグ微粉末を単位セメント量の95%まで置換した高炉スラグ高含有コンクリートの強度発現特性について、検討した結果を要約すると以下のとおりである。

(1) 材齢28日までの圧縮強度発現は、スラグ粉末度および置換率にかかわらず、養生温度が5℃～30℃の範囲では、 $\log(M)$ と圧縮強度との関係は、 $f_c = b \cdot \log(M) + a$ の関係式で求めることができる。その際、スラグ高含有コンクリートの強度発現は、養生温度（特に低温）の影響を強く受けることからその影響を積算温度の違いとして単純化して考えた。すなわち、20℃～30℃については $M = \Sigma t(\theta + 10)$ 、5℃については、 $M = \Sigma t(\theta + 5)$ として扱ってよい。

(2) 強度と $\log(M)$ の関係を示す回帰直線の傾きは強度発現速度を表す指標と考えられるが、スラグ置換率が増加すれば小さくなり、置換率が70%をこえると著しく小さくなる。しかしながら、粉末度を8000 cm^2/g 程度とすることにより、70%までの範囲であればスラグ無置換のものと同等の傾きとすることができる。

(3) 各種コンクリートの回帰直線式 $f_c = b \cdot \log(M) + a$ における、 b および a は、スラグ種類とセメント種類が同じであれば、置換率にかかわらず1つの直線上にプロットされる。また、スラグ種類や温度が異なれば、直線式は異なるが、粉末度および養生温度の違いによるその直線式の異なりは、強度発現に対する寄与率の違いを表すと考えられる。

(4) いずれの粉末度についても置換率70%以下のコンクリートの材齢半年における圧縮強度は、材齢3年における圧縮強度の90%以上が発現しており、半年以降の強度発現はわずかである。置換率が85%および95%については、材齢1年以降においても強度発現割合は大きく、後者において特に顕著である。また、材齢長期における強度発現割合は、粉末度の小さいものの方が大きい。さらに、スラグ粉末度を高めることによる強度発現特性の改善効果は、短期材齢だけではなく材齢長期においても認められる。

(5) スラグセメントペーストの水和の進行速度は、スラグ粉末度および置換率が変化すれば、かなり相違する。置換率が70%以下の場合、セメントとスラグの複合的な第3のピークが存在する複雑な水和発熱曲線となるが、置換率が85%および95%になるとスラグの影響が支配的な発熱速度曲線となる。そして、粉末度および置換率が増加すればピーク高さは高く、またピーク出現時間は早くなりながらセメン

ト単味のものに漸近することが認められる。

(6) 始発・終結時間と水和発熱曲線におけるピーク発現時間との関係は、始発・終結時間が早くなればピーク発現時間が早くなり、比例関係が認められる。

(7) スラグセメントペーストおよびコンクリートの凝結試験において、始発時間はいずれの粉末度の場合も置換率70%までは、置換率の増加につれて遅くなるが、70%から85%にかけては大きな変化はなく、95%になるとむしろスラグ無置換のものよりも早くなる結果となった。また、いずれの置換率においても、粉末度が大きくなれば始発・終結時間は早くなるが、6000 cm^2/g 以上になると凝結時間に大きな差は見られなくなり、凝結特性の改善を図るためには粉末度を6000 cm^2/g 以上とすればよい。

(8) コンクリートの強度とスラグ置換率の関係は、材齢数日を経れば、スラグ置換率が増加すれば圧縮強度は低下するが、材齢極初期においては上記(7)のように、スラグ置換率が増加しても必ずしも圧縮強度は低くならない。脱型時の強度を10 kgf/cm^2 (0.98MPa)とすれば、粉末度を8000 cm^2/g 程度に高めることにより、スラグ微粉末を95%用いた場合でも、むしろ70%の時より早く脱型することが可能となる。

参考文献

- 1) 柳田力、大田実：高炉水砕スラグ粉末を用いたコンクリートの品質に関する一実験、コンクリート工学、Vol. 15, No. 4, pp. 20-26, 1977.
- 2) 遠藤裕悦、児玉和巳、中川脩、高田誠：高炉スラグ微粉末がコンクリートの配合と強度におよぼす影響について、土木学会・高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集、pp. 73-80, 1987.
- 3) 今井益隆、大橋猛、斉藤敦志：高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの諸性質、土木学会・高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集、pp. 67-72, 1987.
- 4) 冨沢年道、近田孝夫、壇康弘、後藤政勝：スラグ高含有セメントの水和・強度発現機構について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14, No. 1, pp. 251-256, 1992.
- 5) 中本純次、戸川一夫、藤井學：高炉スラグ高含有コンクリートの強度発現特性におよぼす養生温度の影響、セメントコンクリート論文集、No. 48, pp. 358-363, 1994.
- 6) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針（案）：土木学会、1988.
- 7) 小林一輔、魚本健人、嶋文雄：コンクリート混和材としての高炉水砕スラグ粉末の品質がコンクリートの圧縮強度ならびに乾燥収縮に及ぼす影響、コンクリート工学論文、No. 79, 5-1, pp. 87-95, 1979.
- 8) 国府勝郎、村田芳樹、高橋茂、安斎浩幸：高炉スラグ

- 微粉末を用いたコンクリートの断熱温度上昇と水和性状に関する研究, 土木学会論文集, 第396号/V-9, pp. 39-48, 1988
- 9) 加賀谷誠, 得田弘, 川上学: 高炉スラグ微粉末と高性能AE減水剤を併用したコンクリートの配合および圧縮強度, セメントコンクリート論文集, No. 48, pp. 352-357, 1994.
- 10) Saul, A.G.A.: Principle Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure, *Magazine of Concrete Research*, Vol.2, No.6, pp.127-140, 1951.
- 11) Nicholas J. Carison and Lew, H.S.: Temperature Effect on Strength-Maturity Relation of Mortar, *Journal of A.C.I.*, Vol.80, No.3, pp.177-182, 1983.
- 12) J.M. Plowman: Maturity and the Strength of Concrete, *Magazine of Concrete Research*, Vol.8, No.22, pp.13-22, 1956.
- 13) X.Wu, D.M.Roy, and C.A.Langton: Early Stage Hydration of Slag-Cement, *Cement and Concrete Research*, Vol.13, pp.277-286, 1983.
- 14) 依田彰彦, 横室隆, 木村正尚: 微粉末化した高炉スラグを混和材として用いたコンクリートの性質, セメント技術年報, No. 41, pp. 142-145, 1987.
- 15) 笠井芳夫: コンクリートの初期性状, コンクリートジャーナル, Vol. 11, No. 10, pp. 1-14, 1973.
- 16) Uchilawa, H., Ogawa, K. and Uchida, S.: Influence of Character of Clinker on the Early Hydration Process and Rheological Property of Cement Paste, *Cement and Concrete Research*, Vol.15, pp.561-572, 1985.

(1996. 4. 1受付)

A STUDY ON THE STRENGTH DEVELOPMENT OF HIGH BLAST-FURNACE SLAG CONTENT CONCRETE

Junji NAKAMOTO, Kazuo TOGAWA and Manabu FUJII

The purpose of this study is to clarify the influence of the fineness and the content of ground granulated blast-furnace slag and curing temperature on the strength development of high blast-furnace slag content concrete. The slag content in cement ranged 50 to 95 percent by weight of total cementitious material and the fineness of slag ranged 4040 to 8160 cm^2/g . In this study, a large number of the compressive strength tests, the heat of hydration tests and the penetration resistance tests were carried out.