

高炉スラグ微粉末の活性度の新しい評価方法

A NEW METHOD OF EVALUATING THE ACTIVITY OF GROUND GRANULATED BLAST-FURNACE SLAG

近松 竜一*・山本 泰彦**

By Ryuichi CHIKAMATSU and Yasuhiko YAMAMOTO

Mortar specimens for compressive strength tests were prepared using six kinds of ground granulated blast-furnace slags of various Blaine specific surface areas. Water-cement ratio and sand-cement ratio of base mortar containing no ground slag were fixed at 0.50 and 2.50, respectively. Replacement ratios of cement by ground slag were set at 30, 50 and 70% by volume. Both the preparation and moist-curing of the specimens were conducted at a constant temperature; i. e., 5, 10, or 20°C. The results of compressive strength test were analyzed to derive equations, by which the effects of each influential factor could be quantitatively evaluated. New two indices, which are independent on various factors, were proposed for evaluating the activity of ground slags.

Keywords : activity, ground slag, mortar, new indices, strength estimation

1. 序

コンクリートの品質改善を主たる目的として用いられる高炉スラグ微粉末（以下、スラグ微粉末と略称）は、同時に結合材としての役割も担っている。この結合材としての役割の程度はスラグ微粉末の活性度に大きく依存するので、スラグ微粉末の品質に関する各国の規格では、この活性度に対する規格値を設けており、その指標としては一般に活性度指数（SAI; Slag Activity Index）が用いられている。活性度指数は、「セメントの50%をスラグ微粉末で置換して造ったモルタル（置換率は、アメリカ、日本では重量比、カナダでは体積比）の圧縮強度をセメントのみを用いたモルタルの圧縮強度で割った値（%）」で表わされ、試験条件や使用セメントを同じに保った場合には、その条件下における各種のスラグ微粉末の相対的な活性度の評価を行うことができる。また、限られた条件下では、この活性度指数によって、スラグ微粉末を用いたコンクリートの強度発現性状をある程度予測することも可能である¹⁾。しかしながら、スラグ微

粉末を用いたコンクリートの強度発現性状は、多くの要因の影響を多大に受け、特に、スラグ微粉末によるセメントの置換率や養生温度の影響が大きいことが多くの研究結果に示されているのである^{2),3)}。したがって、スラグ微粉末による置換率を一定（50%）に保ちながら、常温（約20°C）で養生したモルタルの試験結果から求める現在の活性度指数は、各種の条件下で使用されるスラグ微粉末の活性度を一般的に評価する指標であるとはいえない。

本研究では、まず、スラグ微粉末の種類と置換率、養生温度、材令、等を変化させたモルタルの圧縮強度試験を行った。次いで、この試験結果をもとに、モルタルの強度に及ぼす各要因の影響を順次解析して、それぞれの要因の影響を定量的、かつ、総合的に評価できる評価式を導いた。また、この評価式に含まれる2個の係数が、スラグ微粉末による置換率、養生温度、材令などに左右されないスラグ微粉末固有の活性度を表わす特性値であることを見出し、これらをスラグ微粉末の活性度を評価する新たな指標として用いることを提案した。

2. 使用材料

試験には、2種類の水砕スラグ（KOおよびB）を粉砕機構の相違する2つのタイプの粉砕機（ジェットミル

* 正会員 工修 (株)大林組技術研究所
(〒204 清瀬市下清戸4-640)

** 正会員 工博 筑波大学助教授 構造工学系
(〒305 つくば天王台1-1-1)

表—1 スラグ微粉末の物理的性質および化学成分

記号	比重	比表面積 ^{*1} (cm ² /g)	化 学 成 分 (%)											塩基度 ^{*2}	強熱減量(%)
			CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	TiO ₂	S	MnO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O		
KO5	2.90	7000 (5380)	42.9	33.9	13.1	6.5	----	0.75	0.9	0.67	----	0.34	0.45	1.85	+0.48
KO3	2.90	10110 (8180)													
KO1	2.90	11540 (9820)													
B3	2.90	6260 (3650)	42.49	33.23	15.09	6.00	0.13	1.07	0.70	0.74	0.46	0.45	0.23	1.913	+0.26
B5	2.90	10040 (6000)	43.03	32.45	14.77	5.85	0.70	1.05	0.73	0.61	0.51	0.45	0.25	1.961	+0.29
B8	2.90	12530 (7710)	42.75	32.95	15.24	5.89	0.51	1.07	0.73	0.65	0.39	0.45	0.24	1.939	+0.60

*1 レーザー光による粒度分析からの計算値、()内はブレン値 *2 (CaO+MgO+Al₂O₃)/SiO₂

表—2 セメントの物理的性質および化学成分

記号	比重	比表面積 [*] (cm ² /g)	化 学 成 分 (%)								強熱減量(%)
			CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	
C	3.16	2820 (3260)	64.7	22.0	5.2	3.0	1.5	2.0	0.53	0.28	1.0

* レーザー光による粒度分析からの計算値、()内はブレン値

およびボールミル)でそれぞれ3段階の粉末度に粉砕した合計6種類のスラグ微粉末を用いた。このうち、Bシリーズの試料は、土木学会の「コンクリート用高炉スラグ微粉末規格(案)」の作成の際に用いた共通試験用試料の一部である。これらのスラグ微粉末の物理的性質および化学成分を表—1に示す。ただし、KOシリーズの試料の化学成分に関しては、粉砕中に異物が混入するおそれが全くなかったので、粉砕前の水砕スラグの試験結果のみを示した。

セメントには、普通ポルトランドセメントを用いた。このセメントの物理的性質および化学成分を表—2に示す。また、試験の一部には、活性のない鉱物質微粉末として、豊浦標準砂をボールミルで粉砕して作製したケイ砂粉末(比重:2.64, ブレン値:4310 cm²/g)を使用した。細骨材には、鬼怒川産の川砂(比重:2.60, 吸水率:2.17, 粗粒率:2.56)を用いた。

3. 実験方法

モルタルの配合に関しては、結合材としてセメントのみを用いたモルタル(以下、基準モルタルとよぶ)の水セメント比を0.50, 砂セメント比を2.50とした。この配合は、代表的なコンクリート中のモルタル部分の配合にほぼ等しく、土木学会規準「コンクリート用高炉スラグ微粉末規格(案)」の試験に用いる基準モルタルの配合でもある。微粉末を用いる場合には、この基準モルタル中のセメントの体積の30, 50, あるいは70%を、これと同体積のスラグ微粉末あるいはケイ砂粉末で置換した。したがって、結合材、水および細骨材の量は、いずれのモルタルの場合も体積比で一定となっている。

試験の温度条件は、5, 10および20°Cの3種類とし、使用前24時間以上の材料の貯蔵、モルタルの練りませ、供試体の養生、等は、すべて同一温度条件下で行った。ただし、混和材としてケイ砂粉末を用いたモルタルの試験は、5°Cおよび20°Cで行った。モルタルの練りませ

には容量約5 lのモルタルミキサを用い、1回の練りませ量は1.2~2.3 lとした。なお、セメントの一部を微粉末で置換する場合には、所定量のスラグ微粉末またはケイ砂粉末を所定量のセメントとともにポリエチレン袋の中に入れ、両者をあらかじめ十分に混合してから用いた。

圧縮強度試験には、φ5×10 cmの円柱供試体を用いた。また、各試験材令における圧縮強度試験には、2バッチから作製した3個の供試体を用いた。これらの供試体のセメントペーストによるキャッピングおよび脱型は、各供試体の積算温度がそれぞれ15および30 DDとなる時期に行った。脱型した供試体は、ただちにそれぞれの試験温度に保った水槽の中に入れ、所定の材令まで養生した。モルタルの圧縮強度試験材令には、3, 7, 28および91日の4水準を選んだ。

4. 実験結果および実験結果の解析

表—3に、スラグ微粉末を用いたモルタル(以下、スラグモルタルと略称)の圧縮強度試験結果を一覧表にして示した。また、図—1は、表—3の中から代表的な試験結果を選び、スラグモルタルの材令と圧縮強度の関係を例示したものである。この例にも示されているように、スラグモルタルの強度が、使用するスラグ微粉末の粉末度や置換率、材令、養生温度、等の違いにより著しく相違することが本研究の実験でも確認された。このような強度の差異は、主として、モルタル中の結合材の水和反応(あるいはペースト部分の硬化性状)が各種の要因の影響を受けた総合的な結果としてもたらされたものと考えられる。本研究では、この点に着目して、試験結果を要因別に順次解析していくことにした。なお、配合を3.で述べたように定めたモルタルの試験結果を用いるため、以下の解析と考察は、基準モルタルの水セメント比がある値(たとえば、50%)に固定されていると想定して行う。

表-3 モルタルの圧縮強度試験データ*1

(単位: kgf/cm²)

高炉スラグ微粉末			20°C				10°C				5°C			
種類	比表面積 (cm ² /g)	置換率 (%) *4	3日	7日	28日	91日	3日	7日	28日	91日	3日	7日	28日	91日
なし *2	2820 *3	0	202	327	459	542	117	258	436	526	77	204	414	505
K O 5	7000	50	97	199	448	570	38	123	327	473	21	79	282	459
		70	85	220	405	—	—	—	—	—	13	67	266	—
K O 3	10110	30	—	308	529	—	—	212	459	—	—	147	421	—
		50	153	313	533	642	58	190	476	571	33	127	403	571
		70	156	325	542	—	—	180	419	—	24	110	382	—
K O 1	11540	30	—	327	533	—	—	218	453	—	—	150	427	—
		50	176	353	546	640	65	221	473	571	32	137	440	586
		70	—	369	562	—	—	217	459	—	—	130	435	—
B 3	6260	30	—	212	396	—	—	155	331	—	—	112	303	—
		50	87	159	377	508	38	107	265	383	23	76	225	364
B 5	10040	50	124	250	438	544	53	163	399	525	28	109	370	513
B 8	12530	50	164	364	559	598	67	220	487	533	34	139	460	569
		70	—	343	509	—	—	213	458	—	—	128	431	—

*1 各データは、供試体3個についてもとめた値の平均を示した。
 *2 基準モルタルの配合は、水セメント比: 0.50、砂セメント比: 2.50とした。
 *3 セメントの比表面積 *4 スラグ微粉末は、基準モルタル中のセメントを体積換算で置換した。

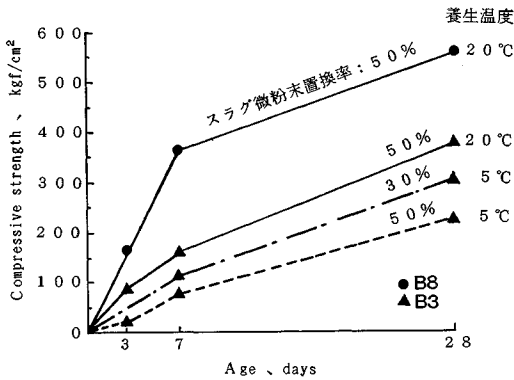


図-1 スラグモルタルの強度試験結果の一例

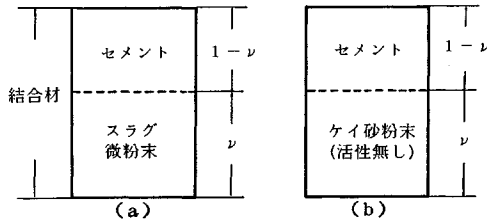


図-2 モルタル中の結合材の模式図

(1) スラグ微粉末による置換率の影響の定式化

セメントの一部をスラグ微粉末で置換したモルタルあるいはコンクリート中の結合材は、スラグ微粉末による体積置換率を ν とすると、模式的に図-2 (a)のように表わすことができる。そして、これらの結合材による強度発現は、各結合材の強度増進効果が総合された形でもたらされると考えられる。しかしながら、セメントおよびスラグ微粉末が強度発現に寄与する効果に関しては、単に個々の寄与効果が不明であるだけでなく、それぞれの結合材の効果を総合して評価する手法も確立されていないのが現状である。そこで、まず、図-2 (a)

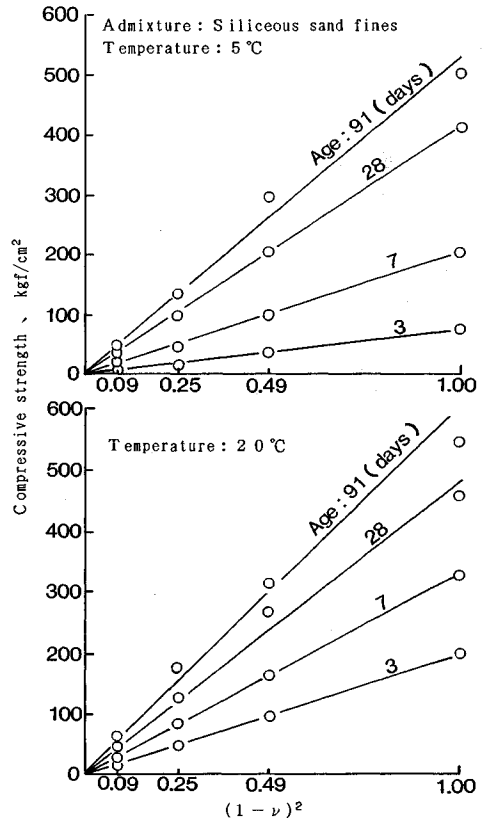


図-3 $(1-\nu)^2$ と圧縮強度の関係

に示されているセメント部分のみが強度発現に寄与する効果を調べることにし、図-2 (b)のように、スラグ微粉末の代わりに活性のないケイ砂粉末でセメントの一部を置き換えたモルタルの圧縮強度を試験した。

図-3は、結合材中のセメントの体積割合 $(1-\nu)$ をパラメーターとして、この二乗を横軸にとり、ケイ砂粉

末を用いたモルタルの圧縮強度試験結果を養生温度別にプロットしたものである。この図を参照すると、長期材令の場合にはやや適合性が悪くなる傾向にあるものの、各材令ごとの両者の関係は、いずれの温度で養生した場合も、原点を通る直線で近似できることが認められる。この結果より、スラグ微粉末の代わりに活性のないケイ砂粉末を用いたモルタルの圧縮強度 (f_0) は、結合材中のセメントの体積割合 ($1-\nu$) を用いて、式 (1) で表わし得ると考えることにした。

$$f_0 = [K_c(1-\nu)]^2 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 K_c ：セメントが強度増進に寄与する効果を表わす係数 (温度や材令により異なる)

なお、山崎の研究⁴⁾によれば、活性を有しない微粉末であっても、これをコンクリートに添加すると、「微粉末効果」によりセメントの水和の程度が若干増加することが示されているが、ケイ砂粉末を用いた実験から得られた式 (1) にはこの影響も含まれていると考えることができる。

式 (1) で $\nu=0$ とおけば、 f_0 は基準モルタルの強度 (f_0) となり、 K_c は次式で表わされる。

$$K_c = \sqrt{f_0} \dots \dots \dots (2)$$

スラグモルタルの圧縮強度は、式 (1) 中の [] の中にスラグ微粉末の使用による強度増加に関する項を付け加えることで表わせると考えられる。また、この場合に付加する項は、セメントの場合と同様に、結合材中の

スラグ微粉末の割合 (ν) の関数であると推測される。そこで、次に、スラグ微粉末の使用による強度増加に関する項を K_{sv} として、この場合のモルタルの圧縮強度 (f_m) を表わす式を式 (3) のように仮定した。そして、この式を変形した式 (4) 中に図-3 あるいは式 (2) より求まる K_c および表-3 の圧縮強度データ (f_m) を代入して、 K_{sv} を逆算し、 K_{sv} の値と結合材中のスラグ微粉末の割合 (ν) との関係について調べてみた。

$$f_m = [K_c(1-\nu) + K_{sv}]^2 \dots \dots \dots (3)$$

$$K_{sv} = \sqrt{f_m} - K_c(1-\nu) \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 f_m ：スラグモルタルの圧縮強度

$1-\nu$ ：結合材中のセメントの体積割合

図-4 は、この結果を各スラグ微粉末ごとに示したものである。これらの図によれば、いずれのスラグ微粉末の場合にも、それぞれの養生温度および材令における K_{sv} と ν との関係は、原点を通る一次式で近似できることが認められる。したがって、両者の関係は式 (5) で表わすことができる。

$$K_{sv} = K_s \nu \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 K_s ：スラグ微粉末が強度増進に寄与する効果を表わす係数 (温度や材令により異なる)

式 (5) を式 (3) に代入すると、次式が得られる。

$$f_m = [K_c(1-\nu) + K_s \nu]^2 \dots \dots \dots (6)$$

以上のようにして求まった式 (6) は、スラグ微粉末による置換率とスラグモルタルの圧縮強度の関係を表わ

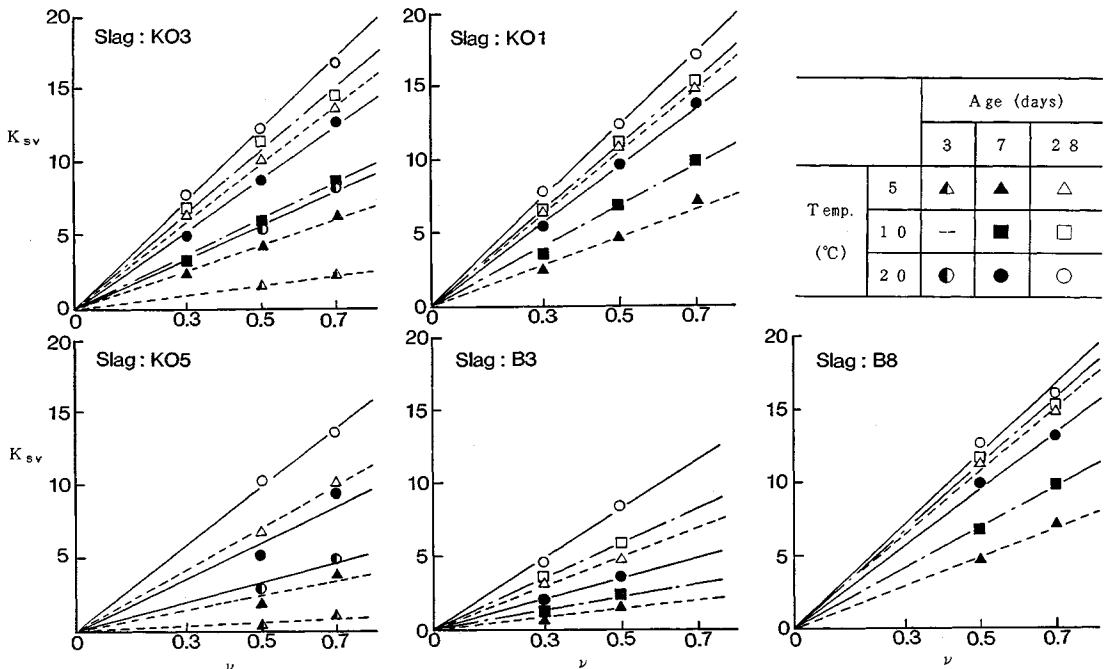


図-4 K_{sv} と ν の関係 (K_{sv} の単位： $\sqrt{\text{kgf/cm}^2}$)

す一般式と考えることができ、養生温度や材令の影響は、式中の K_c および K_s の中で考慮されることになる。また、 K_c および K_s は、それぞれ、セメントおよびスラグ微粉末が全体の強度に寄与する効果の程度を表わす係数であって、各結合材の活性度にも関連した量であると考えることができる。

(2) 養生温度および材令の影響の定式化

表—4 は、本研究で用いたすべての結合材について、上述してきた関係式を利用して求めた K_c および K_s の値を示したものである。これらの値は、当然のことながら、結合材の種類、養生温度、材令などによって相当に相違している。そこで、次に、養生温度と材令が K_c および K_s の値に及ぼす影響を積算温度の考え方を適用して検討してみた。積算温度 (M) は、材令と養生温度の要因を組み合わせた関数であり、一般には式 (7) により表わされる。

$$M = \sum t(\theta + 10) \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 t : 材令 (日)

θ : 養生温度 ($^{\circ}\text{C}$)

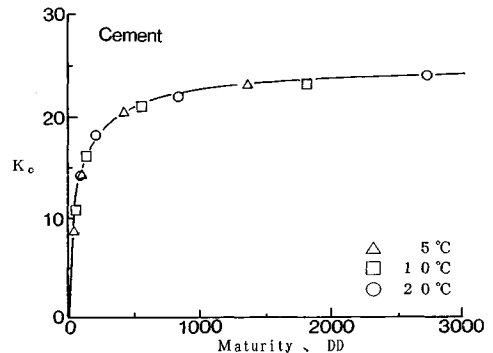
図—5 は、表—4 に示した各養生温度および材令における K_c の値を、式 (7) で計算したそれぞれの積算温度 (M) に対してプロットしたものである。また、図—6 は、図—5 と同じ関係を各スラグ微粉末別に示したものである。まず、図—5 を参照すると、両者の関係は、養生温度に関係なく、1本の曲線で表わされることが認められる。そして、 K_c の値は、積算温度のごく小さい範囲で急激に増加しているが、その増加率は積算温度の増大とともに漸減する傾向にある。一方、図—6 に示した各スラグ微粉末の K_s と積算温度の関係は、上記の K_c の場合と同様な曲線で近似できるものの、養生温度の違いによって曲線が若干相違することが認められる。また、いずれのスラグ微粉末を用いた場合も、 20°C 養生に対する曲線が原点を通っているのに対し、 5°C および 10°C の低温度下で養生した場合の曲線は、原点よりも若干右へシフトした位置で横軸と交わる傾向にある。これらの養生温度の違いによる曲線の相違は、スラグ微粉末の活性の温度依存性がセメントよりも大きいことを示唆するものと考えられる。

図—5 および図—6 に認められる K_c あるいは K_s の値 (以下、これらを総称する場合は K 値と称す) と積算温度 (M) の関係は、一般的には図—7 に示すような曲線モデルで表わすことができると考えられる。本研究では、このモデルの定式化にあたって、式 (8) の適用を試みることにした。この式は、Carino および Lew⁵⁾ による強度-積算温度の関係式を、 K 値-積算温度関係に準用したものである。

$$K = \frac{M - M_0}{\frac{1}{a} + \frac{M - M_0}{b}} \dots \dots \dots (8)$$

式 (8) は、初期の接線勾配 a 、縦軸上の極大値 b 、および横軸との交点 M_0 によって決定される双曲線を表わす式である。したがって、式 (8) を適用することの妥当性が確認されれば、この式は結合材の活性度を評価するためにきわめて都合の良い式といえる。すなわち、 a は、積算温度のごく小さい範囲で K 値が増大する程度を示す値であるので、結合材がモルタルの初期の強度発現に寄与する効果を表わす特性値になり得ると考えられる。また、 b は、積算温度がきわめて大きくなった場合の K 値の最大値に対応することから、結合材がモルタルの最終的な強度の大きさに寄与する効果を表わす特性値と考えることができる。

一方、 M_0 は、各結合材が強度発現に実質的に寄与し始める時点までの積算温度を示す量と考えられる。この M_0 の概略値は、図—5 および図—6 から読み取ること



図—5 積算温度 (M) と K_c の関係 (K_c の単位: $\sqrt{\text{kgf}/\text{cm}^2}$)

表—4 セメントの K_c および各スラグ微粉末の K_s

(単位: $\sqrt{\text{kgf}/\text{cm}^2}$)

K	結合材の種類	20 $^{\circ}\text{C}$				10 $^{\circ}\text{C}$				5 $^{\circ}\text{C}$			
		3日	7日	28日	91日	3日	7日	28日	91日	3日	7日	28日	91日
K_c	C	14.21	18.16	21.91	23.90	10.82	16.06	20.88	22.93	8.64	14.21	20.35	22.96
	KO5	6.56*	12.27*	19.72*	23.85	1.49	6.12	15.29	20.57	1.13*	4.91*	14.12*	19.89
K_s	KO3	11.34*	17.55*	24.17*	26.78	4.42	11.92*	21.30*	24.86	3.10*	8.55*	19.57*	24.83
	KO1	12.32	19.40*	24.72*	26.70	5.32	13.75*	22.01*	24.86	2.62	9.62*	21.27*	25.45
	B3	4.40	6.82*	16.46*	21.18	1.44	4.46*	11.75*	16.21	0.95	2.93*	9.88*	15.20
	B5	8.06	13.46	19.95	22.75	3.77	9.47	19.07	22.90	1.91	6.67	18.12	22.34
	B8	11.40	19.12*	23.70*	25.01	5.51	13.85*	22.18*	23.24	3.04	9.83*	21.48*	24.75

* 置換率の異なる場合について最小二乗法により求めた値を示した。

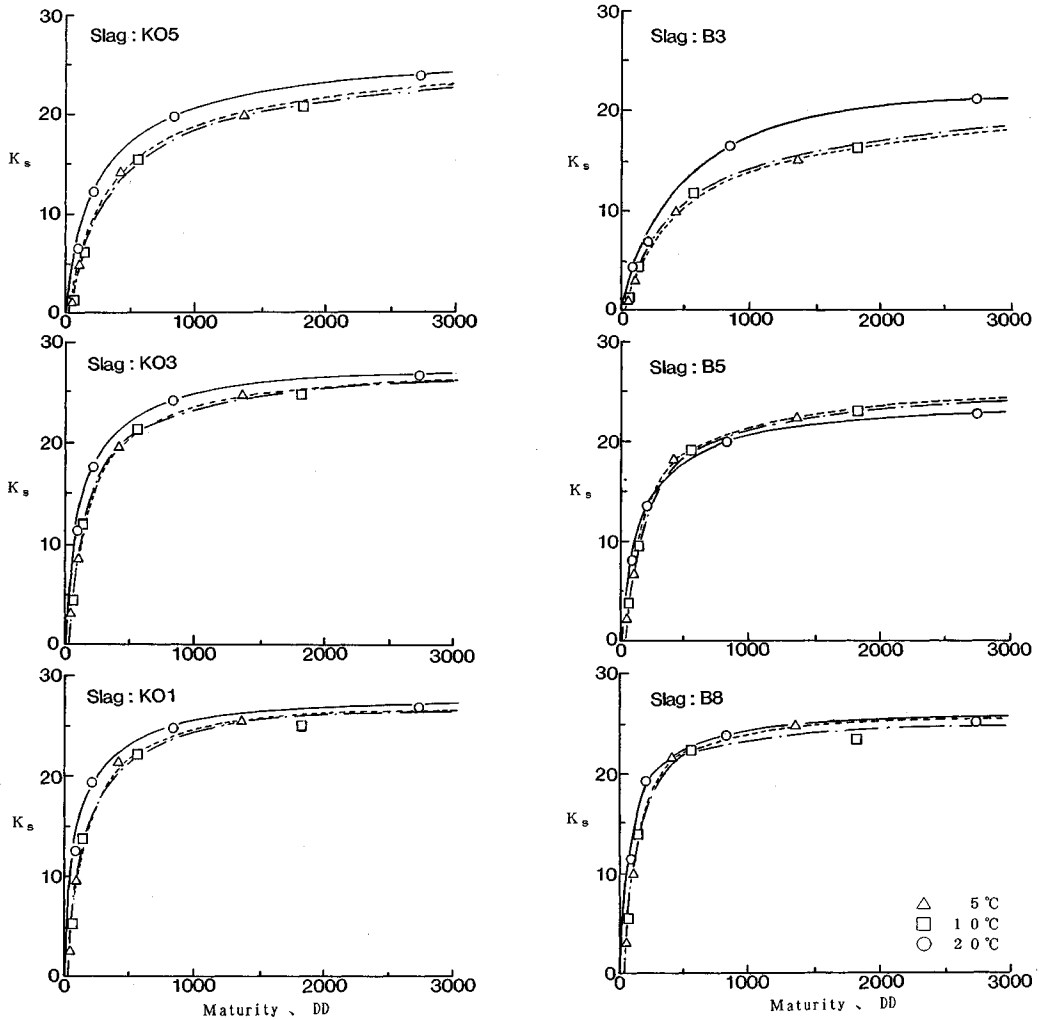


図-6 積算温度 (M) と K_s の関係 (K_s の単位: $\sqrt{\text{kgf/cm}^2}$)

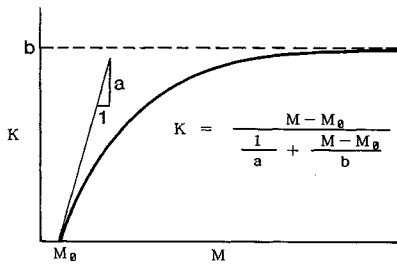


図-7 K 値-積算温度 (M) 関係の模式図

可能である。しかし、ここでは、式(8)の適用を試みているため、この式に最小二乗法を適用して、すべての場合に対する M_0 の値を求めてみた。その結果、セメントに対する M_0 の値は、養生温度に関係なく、すべて 0 DD であった。また、スラグ微粉末に対する M_0 は、そ

の種類に関係なく、20°C で養生した場合にはほぼ 0 DD、低温度下 (5 および 10°C) で養生した場合は、約 30 DD となった。これらの結果を考慮に入れ、セメントおよびスラグ微粉末に対する K 値を求める式を表わすと、それぞれ、式(9)および(10)のようになる。

$$K_c = \frac{M}{\frac{1}{a_c} + \frac{M}{b_c}} \dots\dots\dots (9)$$

$$K_s = \frac{M - M_0}{\frac{1}{a_s} + \frac{M - M_0}{b_s}} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、

a_c : セメントが初期の強度発現に寄与する効果を表わす特性値

a_s : スラグ微粉末が初期の強度発現に寄与する効果を表わす特性値

b_c : セメントが最終的な強度に寄与する効果を表わす特性値

b_s : スラグ微粉末が最終的な強度に寄与する効果を表わす特性値

M_0 : 0 (DD) 20°C 養生の場合
 30 (DD) 5°C および 10°C 養生の場合

図-7の曲線モデルに適用した式(8)を式(11)のように変形すると、 $(M - M_0)/K$ と $(M - M_0)$ の関係は図-8に示すような直線になり、この直線の縦軸との切片と勾配から a および b の値を容易に求めることができる。

$$\frac{M - M_0}{K} = \frac{1}{a} + \frac{M - M_0}{b} \dots\dots\dots (11)$$

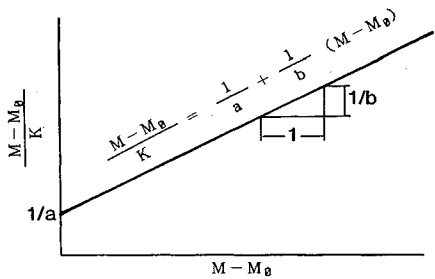


図-8 [(M - M₀)/K] と (M - M₀) の関係

そこで、式(8)の適用性と上記の M_0 の値の妥当性を調べるために、式(9)および(10)を式(11)の形に変形し、各結合材ごとに示した先の K 値と積算温度 (M) の関係を、 M/K_c と M の関係ならびに $(M - M_0)/K_s$ と $M - M_0$ の関係で整理し直してみた。この結果を図-9および図-10に示す。これらの図によれば、いずれの結合材の場合も、図-6に示されたような養生温度の違いによる相関関係の相違はなく、両者の関係は1本の直線で表わせることが認められる。また、個々の値は、最小二乗法によって求めた図中の直線ときわめて良く一致していることも認められる。これらは、本研究の試験結果のモデル化にあたって適用を試みた前記の式(8)がきわめて適切な式であることを証明するとともに、

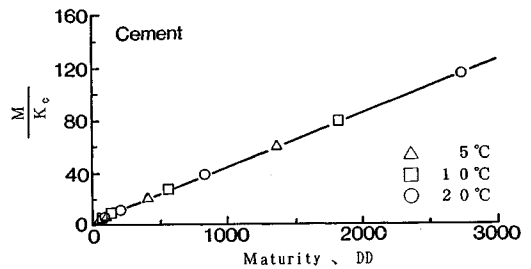


図-9 M/K_c と M の関係 (M/K_c の単位: $DD/\sqrt{\text{kgf/cm}^2}$)

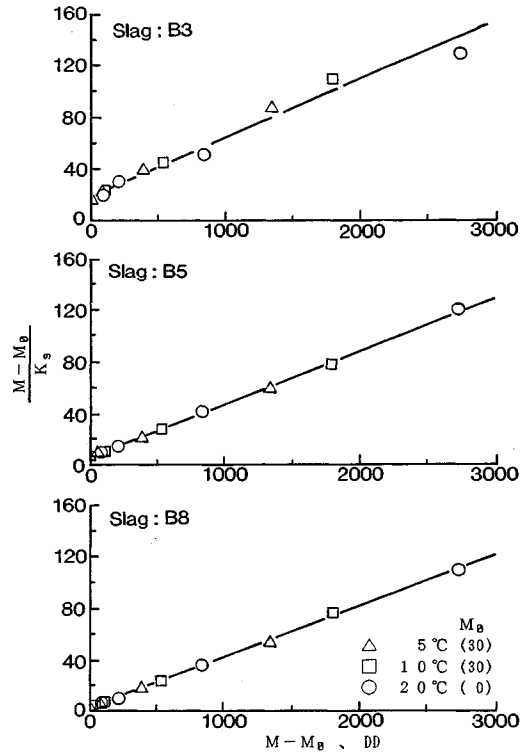
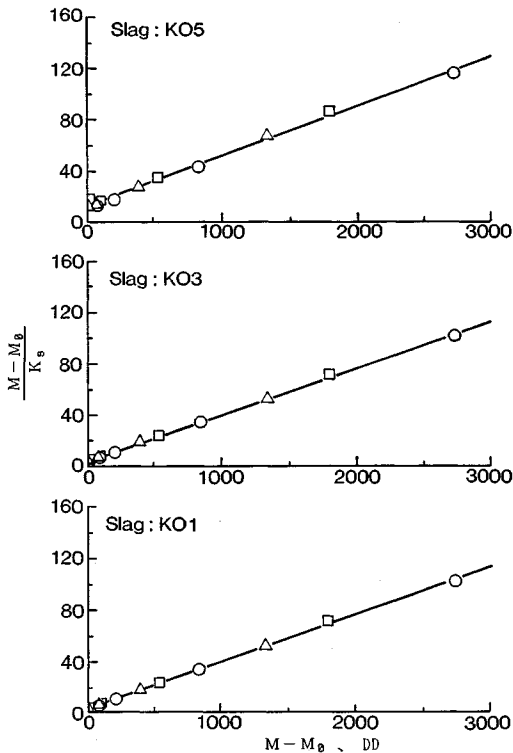


図-10 [(M - M₀)/K_s] と (M - M₀) の関係 [(M - M₀)/K_s の単位: $DD/\sqrt{\text{kgf/cm}^2}$]

K_c および K_s の算定に式(9)および式(10)が精度良く適用できることを示すものと考えられる。

以上の解析を通じて、セメントおよびスラグ微粉末がモルタルの強度に寄与する効果を表わす K_c および K_s は、材令と養生温度の関数である積算温度(M)を用いて整理でき、それぞれ式(9)および式(10)で表示できることが明らかとなった。なお、本研究で対象としなかった温度範囲における M_0 の値に関しては、試験結果がないので断定はできないが、少なくとも 20°C 以上の場合には0(DD)で良いと考えられる。また、温度(θ)が $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ の間の場合には、 $M_0=60-3\theta$ の式で比例近似しても結果に大きな差異は生じないと思われる。

(3) スラグ微粉末の活性度の評価指標

前記の式(9)および(10)中の a_c, b_c, a_s および b_s は、基準とするモルタルの水セメント比が変われば、変化する値である。しかし、基準モルタルの水セメント比が変わっても、これらが初期材令と長期材令の双方における強度発現に寄与する結合材の効果を表わす特性値であることには変わりがない。また、これらの特性値は、スラグ微粉末の置換率、材令、養生温度、などによって変化しない特徴を有している。さらに、これらの値を前記の式(9)および(10)に代入して K 値を求めれば、式(6)によって、任意の材令、養生温度あるいはスラグ微粉末の置換率に対しても、モルタルの強度が算出できる量でもある。これらの諸点を考慮すると、上記の特性値は、それぞれの結合材に固有な活性を表わす量と考えることができるとと思われる。このような特性値を、すべての結合材について求めた結果をまとめて示したのが表-5である。

上記のように、 a_c, b_c, a_s, b_s 、等が各結合材に固有の値であると仮定すると、同じ原料を粉砕して作製した各スラグ微粉末の a_s の値は、それぞれの比表面積の値に比例すると考えられる。この点を確認するために、各スラグ微粉末の a_s と比表面積の値をセメントの値に対する比($a_s/a_c, S_{vs}/S_{vc}$)で表わし、両者の関係をプロットしてみた。この場合の比表面積の値としては、

表-5 各結合材の活性を表わす特性値
(単位： a は $\sqrt{\text{kgf}/\text{cm}^2}/\text{DD}$
 b は $\sqrt{\text{kgf}/\text{cm}^2}$)

セメント	a_c	b_c
C	0.308	24.33
スラグ微粉末	a_s	b_s
KO5	0.076	28.04
KO3	0.188	27.78
KO1	0.228	27.55
B3	0.049	22.88
B5	0.145	24.51
B8	0.266	25.71

レーザー光法による粒径分布の測定結果から計算した値を用いた。これは、原材料や粉砕方法が相違する微粉末あるいは比表面積が非常に大きい微粉末の比表面積を評価する場合には、ブレン法の適用は不適であって、レーザー光法を採用した方が実際に近い値が得られるという著者らの研究結果⁶⁾に基づくものである。 a_s/a_c と S_{vs}/S_{vc} の関係を示した図-11を参照すると、 a_s/a_c は S_{vs}/S_{vc} の増加とともに直線的に増大しており、予期した比例関係が認められる。なお、 a_s/a_c の値は、いずれのスラグ微粉末の場合も1.0より小さい範囲にあり、モルタルあるいはコンクリートのごく初期の強度発現に寄与する効果をセメントの場合と同等にするためには、スラグ微粉末の比表面積をセメントの値の約4.5倍にも増大させる必要のあることも認められる。

一方、同一原料から作製したスラグ微粉末の b_s の値は、この値の性格上、比表面積の大小にかかわらずほぼ一定の値となるのが自然といえる。表-5の b_s の値を参照すると、各シリーズ(KOおよびB)内では互いにほぼ同じ値になっており、妥当な結果が示されている。また、 b_s の値は、全般的にセメントの値(b_c)より大きくなっており、スラグ微粉末の使用が長期強度の増進に役立つという一般の試験結果を裏付けてもいる。これらの結果は、 a_s および b_s が、単に各スラグ微粉末に固有な値であるだけでなく、スラグ微粉末の活性特性を表わす合理的な優れた指標であることを示すものと思われる。

上記のような有用な特性値は、基準モルタルおよびスラグモルタルについて、それぞれ3~4材令で強度試験を行い、図-10のような直線関係を利用して容易に求めることができる。この場合、($M-M_0$)の値ができるだけ広範に分布するように試験温度と材令を選定することが望ましいが、基準モルタルとスラグモルタルの強度を同じ積算温度(M)で試験することさえ注意すれば、

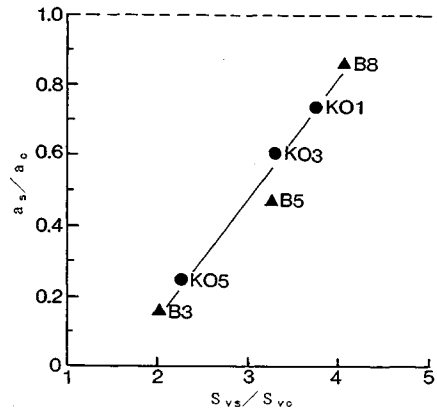


図-11 S_{vs}/S_{vc} と a_s/a_c の関係

試験材令と試験温度は任意に設定して良いのである。また、スラグ微粉末による置換率も、50%程度が望ましいと思われるが、任意に設定できる。このような試験の簡便さと前述の合理的な特性を考慮して、本研究では、 a_s をスラグ微粉末の初期活性係数、 b_s をスラグ微粉末の長期活性係数と呼称し、これらの係数をスラグ微粉末の活性度を評価するための新たな指標として用いることを提案する。なお、これらの係数が使用するセメントによって若干相違することも予想されるが、この点に関しては、現在各国で用いられている活性度指数の場合も同じである。

以上に述べてきたスラグ微粉末の活性度評価方法は、単にスラグ微粉末だけでなく、フライアッシュやシリカフェームなどの混和材や各種セメントの相対的な活性度を評価するための有用な方法ともなり得ると考えられる。また、本研究の手法をさらに発展させれば、任意の条件下におけるモルタルあるいはコンクリートの強度を推定できる方法が確立できる可能性もある。これらの諸点については、今後さらに検討していく予定である。

5. 結 論

本研究の範囲内で次のことがいえると思われる。

(1) 基準とするモルタル中のセメントの一部を、これと同体積のスラグ微粉末で置換したスラグモルタルの圧縮強度 (f_m) は、一般に次式で表わすことができる。

$$f_m = [K_c(1-\nu) + K_s\nu]^2$$

ここで、

K_c : セメントが強度増進に寄与する効果を表わす係数

K_s : スラグ微粉末が強度増進に寄与する効果を表わす係数

ν : スラグ微粉末による体積置換率

(2) 上記の K_c および K_s は、任意の養生温度 (θ) と材令 (t) に対し、次式で表わすことができる。

$$K_c = \frac{M}{\frac{1}{a_c} + \frac{M}{b_c}}$$

$$K_s = \frac{M - M_0}{\frac{1}{a_s} + \frac{M - M_0}{b_s}}$$

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

ここで、

a_c : セメントが初期の強度発現に寄与する効果を表わす特性値

a_s : スラグ微粉末が初期の強度発現に寄与する効果を表わす特性値

b_c : セメントが最終的な強度に寄与する効果を表わす特性値

b_s : スラグ微粉末が最終的な強度に寄与する効果を表わす特性値

M_0 : 0 (DD) $20^\circ\text{C} \leq \theta$ の場合

60-3 θ (DD) $10^\circ\text{C} < \theta < 20^\circ\text{C}$ の場合

30 (DD) $5^\circ\text{C} \leq \theta \leq 10^\circ\text{C}$ の場合

(3) 基準モルタルの水セメント比を固定し、このセメントの一定量を、これと同じ体積のスラグ微粉末で置換した配合を選定すれば、 a_c 、 b_c 、 a_s 、 b_s 、等の特性値は、次のように簡単に求めることができる。

まず、基準モルタルおよびスラグモルタルについて、積算温度 (M) の値ができるだけ広範に分布するように配慮しながら、それぞれに共通した3~4材令で圧縮強度試験を行い、各材令に対する K_c および K_s を下記の式で計算する。次いで、各材令ごとに M/K_c および M の値あるいは $(M - M_0)/K_s$ および $(M - M_0)$ の値を計算し、これらをそれぞれ縦軸および横軸の量として直交座標系上にプロットする。これらの関係に最小二乗法を適用して求まる一次式の縦軸との交点の逆数および勾配の逆数が、それぞれ、 a_c または a_s 、 b_c または b_s である。

$$K_c = \sqrt{f_b}$$

$$K_s = [\sqrt{f_m} - K_c(1-\nu)]/\nu$$

ここで、 f_b : 基準モルタルの圧縮強度

(4) a_c 、 b_c 、 a_s 、 b_s 、等の特性値は、スラグ微粉末の置換率、材令、養生温度、などによって変化しない特徴を有し、それぞれの結合材に固有な活性を表わす量でもある。このような合理性を有する a_c および a_s を初期活性係数、 b_c および b_s を長期活性係数と呼称し、スラグ微粉末の活性度を評価する場合には、従来の活性度指数に代わる新たな指標として a_s および b_s を用いることを提案する。

謝 辞: 本研究の実施にあたり、住友金属工業(株)より助成金を賜り、その大半を近松の学資の一部として使わせて頂いた。また、試料の粉碎およびレーザー光による粒度分布の測定は、(株)セイシン企業の方々のご意により行うことができた。さらに、実験にあたっては、筑波大学構造工学系技官 飯高 稔氏にご援助を頂いた。ここに付記し、厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 山本泰彦: 高炉スラグ微粉末の品質規格について、コンクリートライブラリー、第63号、土木学会、pp. 107~112、1988。
- 2) たとえば、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、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、土木学会、pp. 73~80、

- 1987.
- 3) たとえば、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，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，土木学会，pp. 67～72，1987.
 - 4) 山崎寛司：鉍物質微粉末がコンクリートのウォーカビリティおよび強度におよぼす効果に関する基礎研究，コンクリートライブラリー，第8号，土木学会，1963.
 - 5) Carino, N.J. and Lew, H.S. : Temperature Effect on Strength-Maturity Relations of Mortar, Journal of ACI, Vol. 80, No. 3, May-June, pp.177～182, 1983.
 - 6) 近松竜一・山本泰彦：高炉スラグ微粉末の粉末度評価法に関する研究，土木学会論文集に投稿中
(1989.4.6・受付)
-