

[1017] 粉末度の異なる高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの諸性状

正会員 辻 幸和 (群馬大学 工学部)
正会員 ○ 斎藤 等 (群馬大学 工学部)

1. まえがき

高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの性状については、高炉セメントも含めると、これまでに数多くの貴重な研究成果が報告されている。これらの研究で用いられた高炉スラグ微粉末は、ブレーン値が $3000\text{cm}^2/\text{g}$ から $4500\text{cm}^2/\text{g}$ 程度のものに限られており、 $5000\text{cm}^2/\text{g}$ 以上の微粉末なものについての結果は、近年いくつかが公表されはじめてきたにすぎない^{[1][2]}。

本研究では、 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ クラスのブレーン値まで微粉碎したものも含め、粉末度の異なる高炉スラグ微粉末をセメントと置き換えて用いる場合に、高炉スラグ微粉末の置換率が、フレッシュコンクリートのスランプ、空気量、ブリージングおよび硬化コンクリートの圧縮・引張・曲げの各強度等に及ぼす影響について、実験した結果を報告するものである。

2. 実験方法

2. 1 使用材料

高炉スラグ微粉末およびセメントの物理的性質を表-1に示す。高炉スラグ微粉末（以下スラグと略称する）は2銘柄を用いた。そのうちの1銘柄は、ブレーン値を $3290\text{cm}^2/\text{g}$ から $7860\text{cm}^2/\text{g}$ まで変化させている。

セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。コンクリートには、表-1に示すC 1～C 3の3銘柄を均等に混合して、また、モルタルにはC 4をそれぞれ用いた。

コンクリートには、AE減水剤としてポゾリスNo.70を、空気量調整用のNo.303Aと一緒に用いた。

骨材は渡良瀬川産の川砂および川砂利を用いた。比重はそれぞれ2.60および2.66、粗粒率はそれぞれ2.72および7.12（最大寸法25mm）であった。

2. 2 配合

コンクリートの配合は、スラグの種類が表-1に示すB 3, B 4, B 8およびA 4の4種類、セメントとスラグの和である単位結合材量（C + S g）が270,320および $370\text{kg}/\text{m}^3$ の3種類、スラグの結合材に対する重量比であるスラグ置換率S g / (C + S g) が0, 35, 55および70%の4種類の組合せのうち、合計22種類に変化させた。基準配合としては、スラグを用いないコンクリ

表-1 高炉スラグ微粉末およびセメントの物理的性質

種類	ブレーン値 (cm^2/g)	比重
高炉スラグ 微粉末	B 3	2.89
	B 4	2.89
	B 8	2.90
	A 4	2.91
普通ポルトランドセメント	C 1	3.16
	C 2	3.17
	C 3	3.13
	C 4	3.16

表-2 基準コンクリートの配合

配合名	$\frac{W}{C}$ (%)	$\frac{S}{a}$ (%)	単位量 (kg/m^3)						スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G	AE 減水剤 * g	AE 助剤 * g		
a	59.3	40	160	270	783	1204	0.844	0.810	8.5	4.2
b	50.0	36	160	320	692	1258	1.000	0.960	9.0	4.6
c	43.8	34	162	370	637	1266	1.156	1.332	8.0	3.8

* 単位は g/m^3

ートについて、スランプが8 cm、空気量が4%を目標に、単位水量およびAE減水剤等の使用量を表-2のように定めた。

モルタルの配合は、フロー値が 190 ± 10 および 160 ± 10 の2種類を用いた。砂結合材比は2である。スラグ置換率は0, 30, 50および80%の4種類を基本とした。

2.3 練りまぜおよび試験方法

コンクリートの練りまぜには、容量が100ℓの強制練りミキサを用い、約80ℓのコンクリートを3分間練りました。強度試験は、JISの各試験方法に準じて行った。なお供試体は、材令2日で脱型後、主として、湿布を被覆して室内で強度試験時の材令28日まで養生した。材令91日まで湿布養生したもの、その後戸外に材令1年まで放置した後、それぞれ強度試験を行ったものもある。

モルタルの練りまぜには、容量が5ℓのオムニミキサを用い、JIS R 5201に準じて行った。フロー値は、練りまぜ直後に測定した。フロー値の経時変化を検討した場合には、手練りで約1分間練直した後に、フロー試験を行った。静置期間中は、湿布で練りはちを覆った。ブリージング試験は、練りまぜ直後に試料を採取し、JIS A 1104の容積が2ℓの容器を用いて、JIS A 1123のコンクリートのブリージング試験方法に準じて行った。

3. コンシステンシーおよび空気量

コンクリートのスランプとスラグ置換率の関係を図-1に示す。スランプは、一般に、いずれのスラグをセメントと置き換えて用いても、低下することはほとんどなく、むしろ、スラグの置換率とともに増加している。しかしながら、ブレーン値が $8000\text{cm}^2/\text{g}$ クラスのB 8を用いると、置換率が55%では増加するものの、70%にスラグの使用量を増やすと、用いない場合とほぼ等しいスランプとなっている。

図-2は、スラグ置換率が70%の場合のスランプを、単位結合材量を横軸にとって示している。ブレーン値が $4000\text{cm}^2/\text{g}$ クラスのB 4を用いると、スラグをセメントの70%置き換えて、単位結合材量が $270\text{kg}/\text{m}^3$ から $370\text{kg}/\text{m}^3$ のいずれの場合とも、ほぼ等しいスランプの値を示す。これらの値は、スラグを用いない黒丸印に比べ約2 cm大きくなっている。これに対し、B 8を70%置き換えて用いると、単位結合材量が多くなるほど、スランプは小さくなっているのである。

空気室圧力方法で測定したコンクリートの空気量とスラグ置換率の関係を図-3および図-4に示す。これら

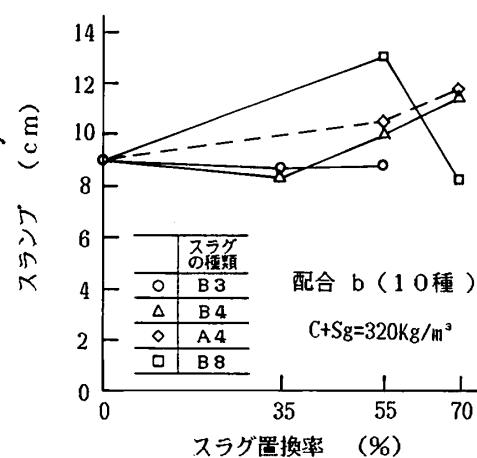


図-1 スランプとスラグの種類

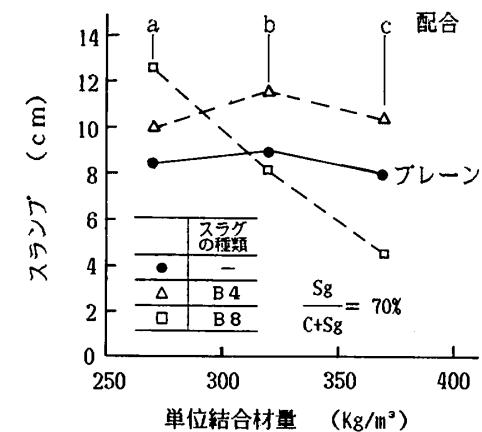


図-2 スランプと単位結合材量

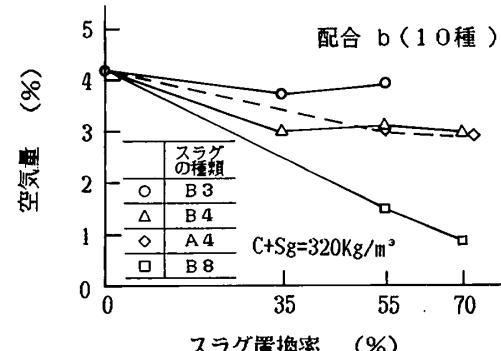


図-3 空気量とスラグの種類

の図から、コンクリートの空気量は、一般に、スラグ置換率の増加とともに減少している。そして、粗いスラグのB3では、その減少傾向がほとんど認められないが、ブレーン値の大きいスラグを用いると空気量の減少の程度は顕著となる。そして、B8を用いると、約1%の空気量にまで低下しているのである。

粉末度の細かいB8をセメントの70%と多量に置き換えたコンクリートのスランプが小さくなつた一つの原因としては、空気量が少なくなったことが挙げられる。

しかしながら、空気量は、単位結合材量にかかわらず約1%と一定値に減少したのに対して、スランプは単位結合材量が多くなるほど低下していることから、空気量の低下だけとは考えられないである。また、B8を55%置き換えると、図-3より、空気量は1.5%に低下しているにもかかわらず、図-1より、スランプはむしろ増加している。このように、スラグを用いないコンクリートにおけるスランプと空気量との関係が、スラグを用いると、必ずしも成立しないケースも出てきた。

モルタルのフロー値に及ぼすスラグの混入の影響についても、スランプの変化と類似した傾向が、図-5より認められる。特に、B8を使用すると、スラグ置換率が30%あるいは50%の場合には、フロー値は若干大きくなり、細かい粉末にもかかわらずB3およびB4より少し大きいフロー値を示している。しかしながら、80%と多量に用いるとフロー値の低下が大きくなる。

図-6に示すように、練りませ後90分経過する間のフローロスは、一般に、スラグ置換率の増加に伴い、いずれの種類のスラグを用いた場合にも、また、基準のフロー値が 190 ± 10 と 160 ± 10 のいずれの場合にも、フローロスは大きくなる。特に、スラグ置換率が50%から80%へ増加した場合におけるフローロスの増加が顕著である。

スラグは、一般に反応が遅く、時間経過に伴うスランプの減少は、スラグを置き換えない場合より小さいとの報告がされている^{[33],[44]}。しかしながら、図-6に示した結果は、スラグを特に多量に置き換えて用いる場合には、コンクリートの運搬、打込みおよび仕上げの際に留意しなければならないことを示すものである。

4. ブリージング

モルタルのブリージング率を、図-7に示す。スラグの粉末度の違いにより、スラグ置換率がブリージング率に及ぼす影響は異なる。ブレーン値が $3000\text{cm}^2/\text{g}$ クラスのB3を用いた場合は、これまで報告したように^[55]、スラグを30%置換すると、スラグを用いないモルタルより少し

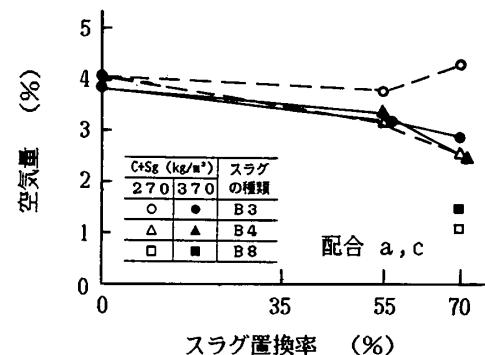


図-4 コンクリートの空気量
(単位結合材量も変化)

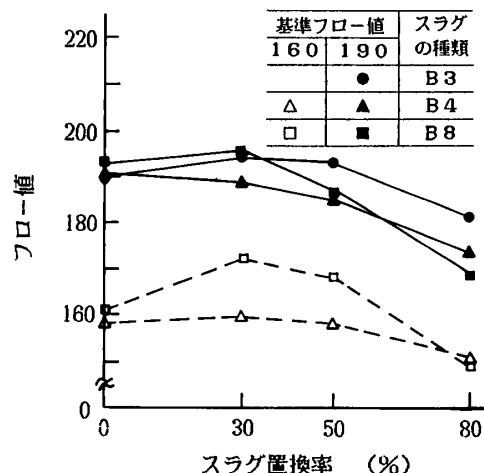


図-5 モルタルのフロー値

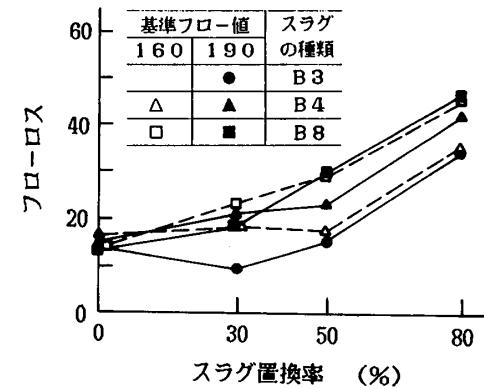


図-6 90分間のフローロス

大きいブリージング率を示し、50%, 80%と置換率が増加するに従い、ブリージング率は低下する傾向が認められる。B 4 の場合は、30%の置換率でも用いない場合とほぼ等しいブリージング率

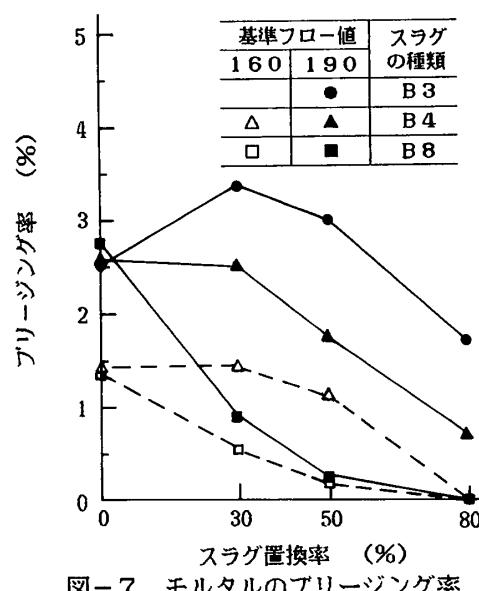


図-7 モルタルのブリージング率

を示し、スラグ置換率が増加するとブリージングは減少する。また、ブリージング率の値はB 3に比べ小さい。B 8 を用いた場合は、スラグ置換率の増加に伴いブリージング率は著しく低下する。そして、80%をスラグに置き換えると、ブリージングはほとんど生じなかった。なお、ブリージングの継続時間に及ぼすスラグの影響については、ブリージング率の場合とほぼ同様となつた。

5. 圧縮・引張・曲げ強度

コンクリートの圧縮強度を図-8に示す^[6]。ブレン値が $3000\text{cm}^2/\text{g}$ と $4000\text{cm}^2/\text{g}$ クラスのスラグを用いた場合には、スラグ置換率の増加に伴い、一般に材令28日における圧縮強度は低下し、その低下の程度にほとんど相違が認められない。しかしながら、単位結合材量が 370kg/m^3 と富配合のものは、B 4 を55%のセメントと置き換えても、材令28日の圧縮強度は低下しなかった。そして、B 8 を用いると、単位結合材量が 320kg/m^3 で置換率が55%の場合でも、圧縮強度は低下せず、むしろ少し増加している。

粒度の粗いB 3を用いたコンクリートの圧縮強度を、材令をパラメータにとって示したのが図-9である。材令28日におけるスラグの置き換えによる強度低下は、材令の経過とともに改善されている。そして改善の程度は、単位結合材量が少ない、すなわち水結合材比の大きいコンクリートのほうが顕著である。そして、戸外に材令1年まで放置した単位結合材量が 270kg/m^3 のコンクリートでは、スラグ置換率が55%のものは、スラグを用いないものと同程度の強度を示し、70%のものでも、90%以上の圧縮強度を示すまでになった。

材令28日におけるコンクリートの引張強度を、圧縮強度と関連して示したのが、図-10である。図中には、土木学会昭和61年制定のコンクリート標準示方書設計編（RC示方書）で与えられている関係式も、破線で示している。図-10より、スラグを70%置き換えたコンクリ

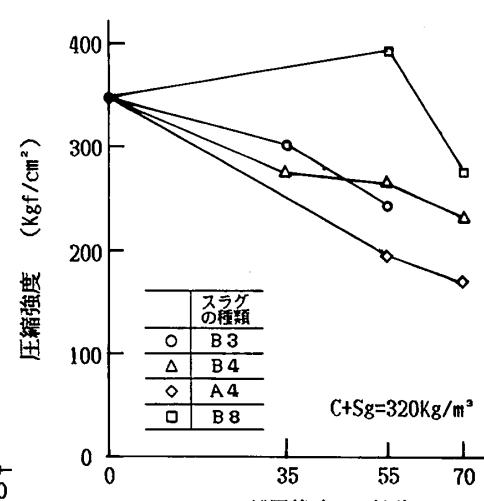


図-8 コンクリートの圧縮強度(材令28日)

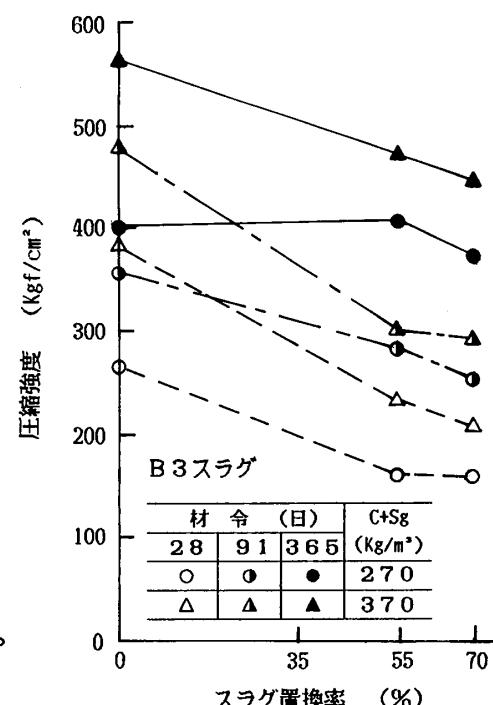


図-9 コンクリートの各材令における圧縮強度

ートも含め、いずれの場合も、引張強度は、RC示方書で示された関係式より大きくなっている。このことは、スラグの置き換えによる引張強度の低下率として、スラグを用いないコンクリートの場合の圧縮強度の低下に伴う値を用いれば、一般に安全側であることを示すものである。

曲げ強度と圧縮強度の関係を図-11に示す。破線はRC示方書で与えられている関係式を示すが、スラグを用いないコンクリートで、圧縮強度が高い場合には、RC示方書の関係式より大きな曲げ強度が得られている。しかしながら、スラグを多量に用いて圧縮強度が著しく低下したコンクリートの曲げ強度は、RC示方書の関係式より小さい値を示しているのである。曲げ強度が重要な材令初期におけるコンクリート舗装などの設計および施工には、注意が必要である。

なお、単位結合材量が320kg/m³で、ブレーン値が4000cm²/gクラスについては、A4とB4の2種類のスラグを用いた。圧縮強度ではスラグの種類の相違の影響が認められたものの、引張強度および曲げ強度については2種類ともほぼ等しい値を示した。このことは、図-10および図-11にも示しているように、A4を用いたコンクリートの引張強度および曲げ強度の低下率は、B4を用いた場合に比べて小さくなっていることに対応している。

6. 結合材水比と圧縮強度

図-12は、結合材水比と圧縮強度の関係を示している。セメントのみの場合には、セメント水比の法則がほぼ成立して、直線的に圧縮強度が増加しているのに対して、スラグを置き換えて用いた場合には、結合材水比の増加に伴う圧縮強度の増加が緩やかである。図中には、標準養生を行ったコンクリートも示している。室内で湿布養生を行った場合と同様に、結合材水比の増加に伴う圧縮強度の増加率は小さい。

同様の傾向は、図-13に示すように、B3を用いたコンクリートについても、また、材令91日および1年の圧縮強度についても認められるのである。なお、材令28日においては、スラグ置換率が55%よりは70%と、スラグを多量に用いたコンクリートほど、結合材水比の増加に伴う強度の増加は小さくなっている。しかしながら、材令が経過した場合には、スラグ置換率が結合

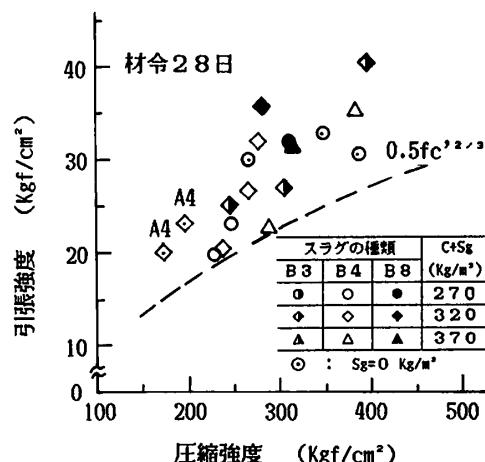


図-10 引張強度と圧縮強度の関係

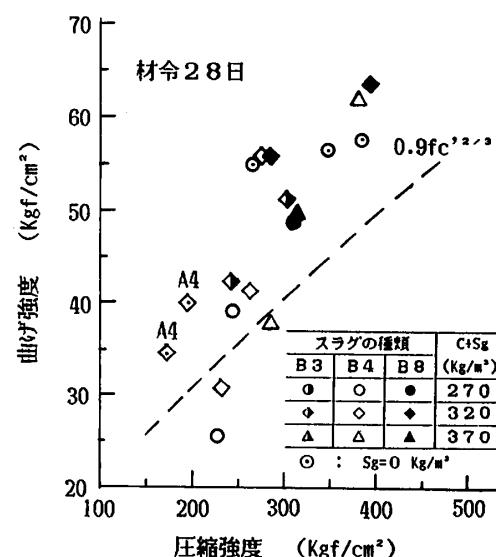


図-11 曲げ強度と圧縮強度の関係

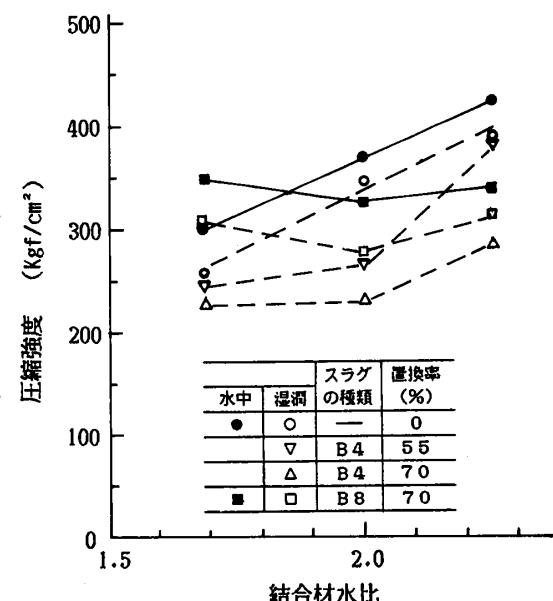


図-12 結合材水比と圧縮強度の関係

材水比と圧縮強度の関係に及ぼす影響は明瞭でない。
今後の実験の蓄積を待ちたい。

7. 結論

プレーン値で $8000\text{cm}^2/\text{g}$ クラスまで微粉碎したものも含め、高炉スラグ微粉末の粉末度および混入量が、コンクリートのコンシスティンシー、空気量、ブリージングおよび強度に及ぼす影響を実験的に検討した。本研究の範囲内で、次のことがいえると思われる。

1) プレーン値が $8000\text{cm}^2/\text{g}$ クラスのB 8を、スラグ置換率が70%と多量に用いた場合を除けば、いずれのスラグを用いても、スラグ置換率が70%の範囲において、コンクリートのスランプが、スラグの置き換えにより低下することはほとんどない。

2) 空気量は、スラグの置換率の増加とともに一般に減少し、その減少の程度は、細かい粒度のスラグを用いるほど顕著となる。

3) モルタルのフローロスは、スラグの置き換えにより増加する。増加の程度は、粒度が細かいスラグを多量に用いた場合に著しい。

4) モルタルのブリージングに及ぼすスラグの影響は、スラグ置換率だけでなく、スラグの粉末度によっても異なる。

5) 材令28日におけるコンクリートの圧縮強度、引張強度および曲げ強度のいずれもが、スラグ置換率の増加にともない、一般に低下する。低下の程度は、引張強度、圧縮強度、曲げ強度の順に大きくなるようである。これらの強度低下も、材令の経過とともに改善されるが、改善の程度は、水結合材比の大きいコンクリートのほうが著しい。

6) スラグを多量に置き換えると、結合材水比の増加に伴う圧縮強度の増加を示す直線の勾配が緩やかになる。

本研究は、土木学会、コンクリート委員会、高炉スラグ混和材研究小委員会の委員会活動の一環として実施したものである。

参考文献

- [1] 今井、大橋、福井：高炉スラグ粉末を用いたコンクリートの諸性質、土木学会第41回年次学術講演会 講演概要集, pp.443-444.1986.
- [2] 梅木、長滝、大賀：高炉スラグ微粉末のコンクリート用混和材としての適用性、土木学会 第41回年次学術講演会 講演概要集, pp.445-446.1986
- [3] 阪本好史：高炉水碎スラグ粉末、コンクリート工学, Vol.16, No.3, pp.54-57. March 1978.
- [4] 鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用について、昭和61年版、鉄鋼スラグ協会
- [5] 辻、諱佐、福沢：高炉水碎スラグ粉末を用いた流動化モルタルの性状、セメント技術年報 37, pp.183-186. 昭和58年
- [6] 辻 幸和：高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリートはりの力学的性状、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（投稿中）, 1987年.3月.

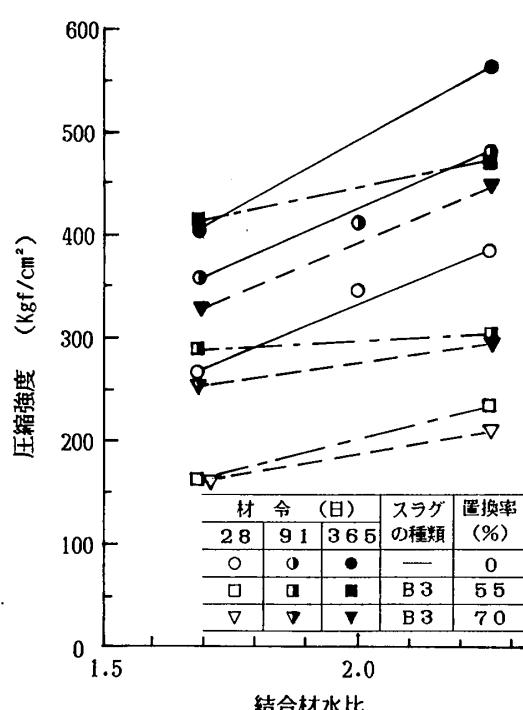


図-13 各材令における結合材水比と圧縮強度の関係