

論文 超微粉碎高炉スラグを用いた高炉スラグ高含有コンクリートの 中性化および強度特性

中本純次*1・戸川一夫*2

要旨：近年の微粉碎技術の発達により、高炉スラグ微粉末もブレン値 $17000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度のものが入手可能になってきている。本研究は、それら超微粉碎高炉スラグを用いた場合の高炉スラグ高含有コンクリートの強度発現特性ならびに中性化深さについて実験的に検討したものである。本実験の範囲内で、高性能AE減水剤を利用することにより充分にワーカブルな高炉スラグ高含有コンクリートとしての利用が可能であること、スラグ粉末度が高くなればなるほど強度特性の改善ならびに中性化速度の低減効果は高くなることが明らかとなった。

キーワード：超微粉碎スラグ、スラグ高含有コンクリート、高性能AE減水剤

1. はじめに

筆者らは、高炉スラグ微粉末をセメントに多量に置き換えて使用した場合に懸念される強度発現特性の低下ならびに中性化の進行速度の増加等については、スラグ粉末度の増大や高性能AE減水剤の利用などにより改善を検討してきており、スラグ粉末度についてはブレン値 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度までの範囲では、粉末度が高いほどそれらに対する改善効果が高いことを明らかにしてきた [1] [2] [3] [4]。超微粉碎スラグの実用化にあたっては、生産コストなど経済性等考慮されなければならぬことも考えられるが、それら超微粉末スラグを用いたスラグ高含有コンクリートに関する研究報告はほとんどなく、データの集積も重要なことと考えられる。ここではブレン値 8160 、 12000 および $16700\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を用いた高炉スラグ高含有コンクリートの促進中性化特性ならびに圧縮強度特性について報告する。

2. 実験概要

2. 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）を使用した。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。使用に際して20～13mmと13～5mmを50%ずつ混合使用した。使用した高炉スラグは比表面積が8160、12000および16700 cm^2/g である。8160 cm^2/g は、これまでの本研究室における最も粉末度の高いもので、かつ温度ひびわれ抵抗性を高める効果が最も高かったもの、16700 cm^2/g は現在入手できる最も粉末度の高いもの、12000 cm^2/g はその中間的な値として3水

表-1 高炉スラグ微粉末の物理的性質・化学成分

比表面積 (cm^2/g)	比重	化学組成 (%)					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	SO ₃
8160	2.89	33.0	13.6	0.2	42.1	6.0	2.0
12000	2.90	33.6	13.8	0.2	41.7	7.0	2.0
16700	2.89	33.6	13.8	0.2	41.7	7.0	2.0

率1.10%）を使用した。使用に際して20～13mmと13～5mmを50%ずつ混合使用した。使用した高炉スラグは比表面積が8160、12000および16700 cm^2/g である。8160 cm^2/g は、これまでの本研究室における最も粉末度の高いもので、かつ温度ひびわれ抵抗性を高める効果が最も高かったもの、16700 cm^2/g は現在入手できる最も粉末度の高いもの、12000 cm^2/g はその中間的な値として3水

*1 和歌山工業高等専門学校 環境都市工学科助教授（正会員）

*2 和歌山工業高等専門学校 環境都市工学科教授、工博（正会員）

準を選んだ。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、ポリカルボン酸塩エーテル系と架橋ポリマーの複合体の高性能AE減水剤およびリグニンスルホン酸塩系のAE助剤を使用した。

2. 2 コンクリートの配合

スラグ置換率 ($B/(B+C)$) は、0、70、85および95%の4水準とし、水結合材比一定、単位水量一定として、各コンクリートの目標スランプ $8\pm 1\text{cm}$ 、目標空気量 $4.5\pm 0.5\%$ を確保するために、高性能AE減水剤ならびにAE助剤量を調整した。得られた各コンクリートの示方配合を表-2に示す。

表-2 各種コンクリートの配合

No.	スラグ 粉末度 (cm^2 /g)	W/ C+B (%)	B/ C+B (%)	s/a (%)	C+B (kg)	水 W (kg)	セメント C (kg)	スラグ B (kg)	細骨材 S (kg)	粗骨材 (kg)		混和剤(cc)	
										5~13 (mm)	13~20 (mm)	高性能AE 減水剤 ※	AE助剤 ※※
1	—	46.4	0	42	306	142	306	0	791	546	546	3672	0
2	8160	46.4	70	42	306	142	92	214	784	541	541	3825	1500
3		46.4	85	42	306	142	46	260	782	540	540	3825	3000
4		46.4	95	42	306	142	15	291	781	539	539	3825	10000
5	12000	46.4	70	42	306	142	92	214	784	541	544	4192	2000
6		46.4	85	42	306	142	46	260	782	540	540	4192	3750
7		46.4	95	42	306	142	15	291	781	539	539	4192	14000
8	16700	46.4	70	42	306	142	92	214	784	544	544	6120	2800
9		46.4	85	42	306	142	46	260	782	540	540	6120	5500
10		46.4	95	42	306	142	15	291	781	539	539	6120	17000

※ 原液使用 ※※ 100倍液使用

2. 3 促進中性化試験方法

促進中性化試験は、温度 20°C 、相対湿度60%、炭酸ガス濃度7%の環境下で行った。促進中性化試験用供試体は $10\times 10\times 40\text{cm}$ の角柱供試体であり、打設後24時間で脱型したのち、材令28日まで水中養生 (20°C) を行った。供試体打設上面、底面および端面には炭酸ガスの進入を遮断するため樹脂系塗料を塗布し、打設一側面からのみ炭酸ガスが進入するようにした。中性化深さの測定は、所定の材令において供試体をコンクリートカッターで切断して、その切断面にフェノールフタレイン1%エタノール水溶液を吹きつけ、非発色部分を中性化部として測定した。1種類の供試体は2本作成し、中性化深さは2本の平均値である。

3. 実験結果とその考察

3. 1 フレッシュコンクリートの性質

表-2に示しているように、スラグ置換率の増加に伴って、同一のスランプを得るために必要なAE助剤量が大幅に増加した。スラグ粉末度にかかわらず置換率85%および95%のAE助剤量は、70%の場合のそれぞれ2倍および6~7倍であった。またスラグ置換率が同じ場合でもスラグ粉末度が大きくなれば多量の高性能AE減水剤およびAE助剤を必要とすることが示された。粉末度が $8000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度までの範囲についての報告では、スラグ粉末度の増加にともなって混和剤のスラグ粒

子への吸着量が増加するために、スラグ置換率の増加につれて連行空気量が少なくなり、必要なAE助剤は非常に増加するとされているが[5]、本実験では、 $8160\text{cm}^2/\text{g}$ と $16700\text{cm}^2/\text{g}$ の場合を比べると、1.7~1.9倍の量が必要である。これらは、比表面積の大幅な増加によるAE助剤の吸着などによる起泡力の阻害、さらには水溶性アルカリの少ないスラグの多量置換による低アルカリ環境下での表面張力の低下に起因する気泡力の低下[6]のためと考えられる。しかしながら、必要AE助剤量は大幅に増加するが、AE助剤量を増加させることによって所定の空気量を連行することは可能であり、また同じスラグ粉末度の配合については高性能AE減水剤量を一定として、AE助剤量のみを調整することにより所定のスランプが確保できた。

3. 2 圧縮強度特性

図-1から図-3には、各種コンクリートの圧縮強度と材令との関係を示している。また、図-4にはスラグを置換したコンクリートとスラグ無置換コンクリート (f'_{28} を1とする)の圧縮強度比との関係の一例を示している。

スラグ粉末度が $8000\text{cm}^2/\text{g}$ 以下の場合について、高炉スラグをセメントに70%以上内割りで置き換えると置換率が高くなるに従って圧縮強度は低下することがわかっている。これは、同一水結合材比・同一単位水量について、通常のAE減水剤あるいは高性能AE減水剤を用いた場合につ

いても同じ結果が得られている[1][4]。今回の実験においても、粉末度 $8160\text{cm}^2/\text{g}$ の場合、置換率70%については材令28日でスラグ無置換コンクリートの圧縮強度の95%程度の強度が得られているが、置換率が85%さらに95%と増加すればその値は77%および44%と大きく低下する。ブレーション値

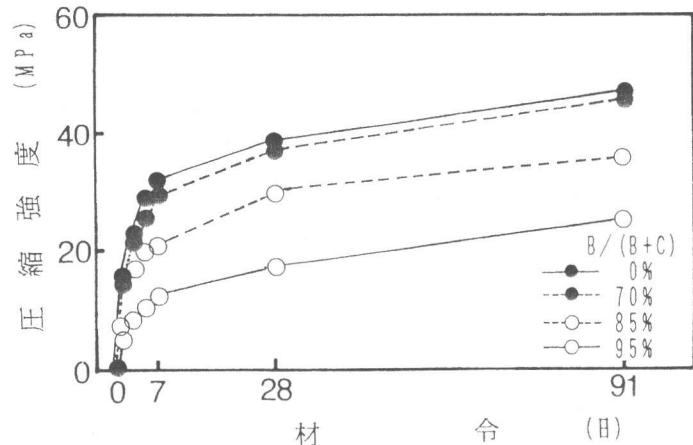


図-1 圧縮強度と材令との関係
(B: $8160\text{cm}^2/\text{g}$)

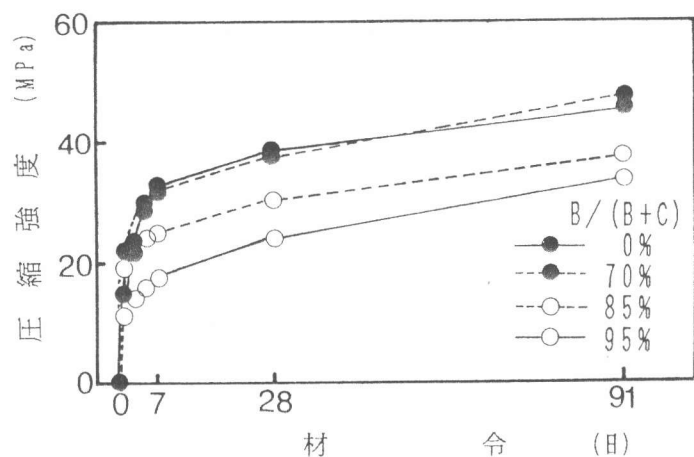


図-2 圧縮強度と材令との関係
(B: $12000\text{cm}^2/\text{g}$)

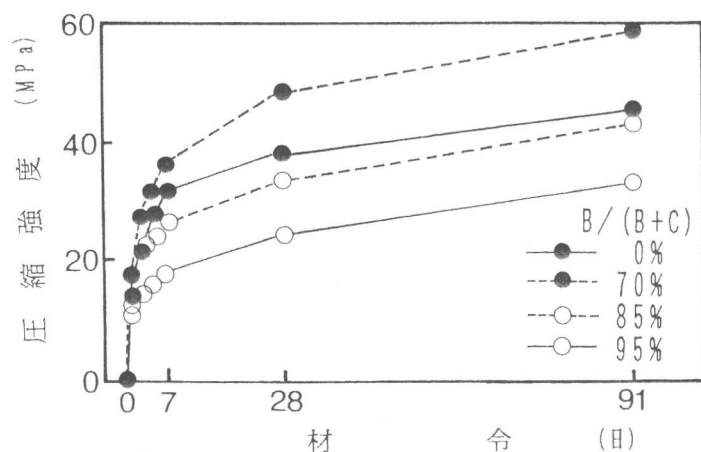


図-3 圧縮強度と材令との関係
(B: $16700\text{cm}^2/\text{g}$)

12000cm²/gの場合、それらの値はそれぞれ99%、80%および63%であり、置換率95%の場合を除いて、8160cm²/gの場合と同様である。16700 cm²/gの場合、それぞれ126%、88%および65%である。従って12000cm²/gあるいは16700cm²/gのような超微粉砕スラグを用いると普通コンクリートと水結合材比、単位水量およびスランプを同一とした配合についても、強度特性を大幅に改善することが可能であることがわかった。混合セメントペーストから求めたスラグ反応率は、スラグの粉末度が高くなれば高くなるが、材令の経過とともに粉末度の違いによる反応率の差は小さくなることが報告されている [7] [8]。スラグ粉末度が增加すれば、圧縮強度の発現が著しくなっている。これは初期においてスラグの反応速度が大きいためと考えられる。また、本コンクリート配合については、材令91日においても粉末度あるいは置換率に関係なく大きな強度増加が認められている。これはスラグ粉末度の増加による平均空隙径の減少とより微細な水和物の生成、緻密な組織の形成 [1] のためと考えられる。

図-5には、圧縮強度と静弾性係数との関係をプロットしている。図より、超微粉砕スラグを用いた高炉スラグ高含有コンクリートの圧縮強度-静弾性係数はスラグ含有量に無関係に1つの曲線で表される。

3. 3 中性化特性

高炉スラグ高含有コンクリートの促進中性化深さについて、中性化深さ (C) は時間 (t) の平方根の関数 ($C = A\sqrt{t}$) として表され、それぞれの配合について中性化係数 (A) を用いて評価可能であることを報告してきた [3]。図-6 から図-8には、本実験における各コンクリートの促進中性化深さと \sqrt{t} 材令との関

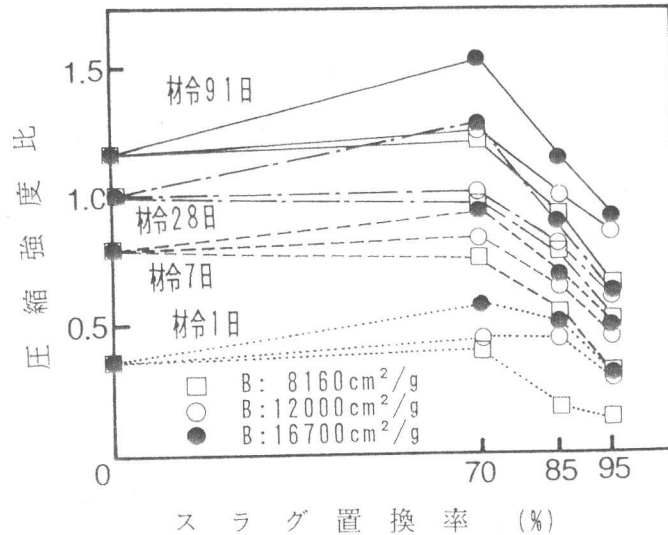


図-4 スラグ置換率と圧縮強度比との関係

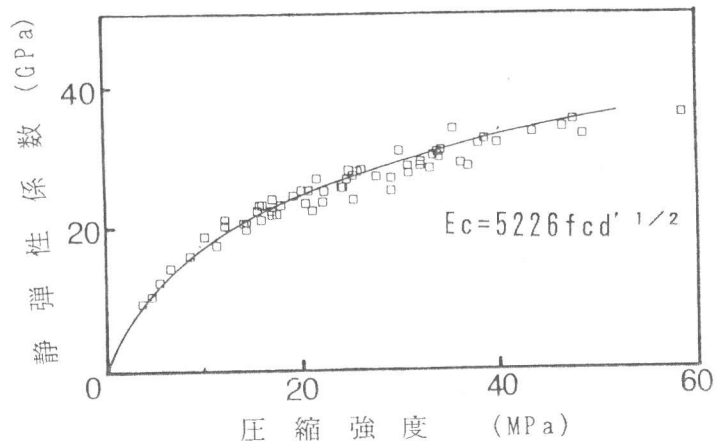


図-5 圧縮強度と静弾性係数との関係

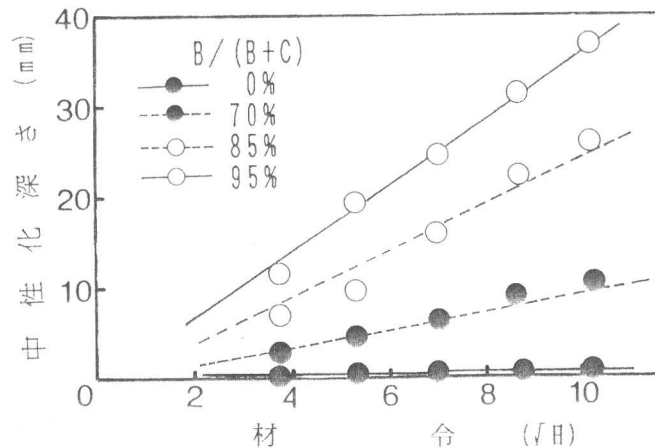


図-6 中性化深さと材令との関係 (B: 8160 cm²/g)

係を示している。いずれのスラグ粉末度、スラグ置換率についても中性化深さの回帰式の相関係数は85%以上であり、超微粉碎高炉スラグ微粉末と高性能AE減水剤を用いた高炉スラグ高含有コンクリートの中性化深さは、いわゆる \sqrt{t} 則に従うと考えてよい。

図-9から、中性化係数は、スラグ粉末度にかかわらず置換率の増加につれて直線的に大きくなり、高炉スラグ高含有コンクリートは中性化に対して不利となることはこれまでの報告[3]と同一である。これは高炉スラグ高含有コンクリートは、普通コンクリートに比べて Ca(OH)_2 が減少すること、ならびに平均空隙径は小さいものの全空隙量が増加すること[3]、さらに中性化することによって平均空隙径が著しく大きくなるため[6]と考えられる。しかしながら、高性能AE減水剤を用いて、粉末度の大きなスラグ微粉末を用い、さらにその置換率を85%程度までにするなら中性化係数を大幅に小さくすることができる。それは本実験において強度特性が改善可能なスラグ置換率の限界、すなわち85%と一致している。

図-10には中性化係数と圧縮強度の逆数との関係を粉末度別にプロットしている。本実験では、中性化係数は圧縮強度の逆数のみを指標として表すことができないようである。和泉ら[9]は、各種コンクリートの中性化速度の推定式として圧縮強度の逆数の関数を提案している。また

Looら[10]は、圧縮強度の他に炭酸ガス濃度、温度などのパラメーターを取り込んだ推定式を提案している。特に高炉スラグ高含有コンクリートについては、スラグ粉末度、水分供給、反応速度などの違いによるスラグセメントの水和率のちがいを中性化係数の算定に適切に組込めるよう

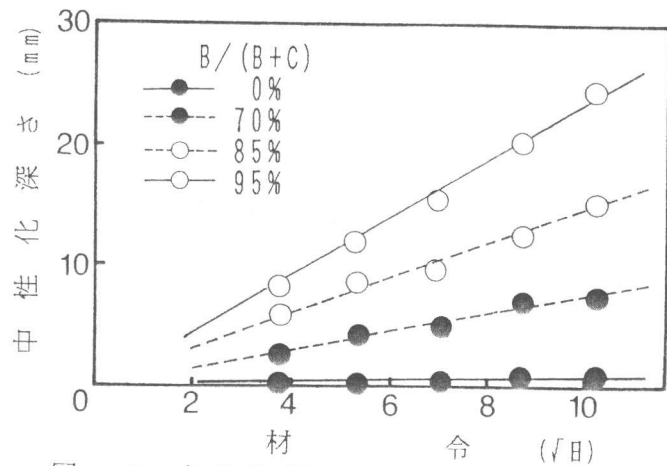


図-7 中性化深さと材令との関係
(B: 12000 cm²/g)

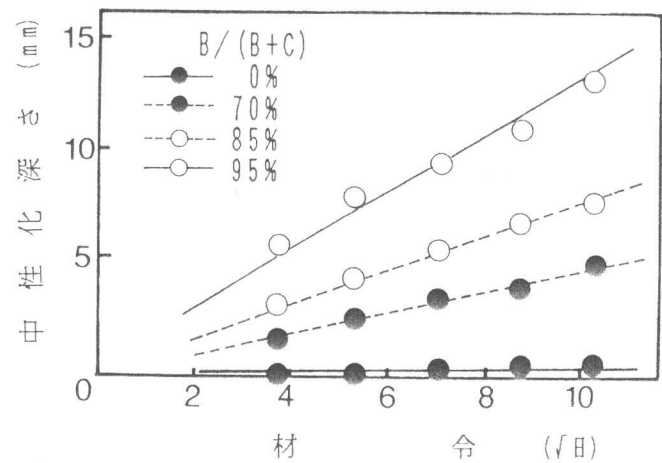


図-8 中性化深さと材令との関係
(B: 16700 cm²/g)

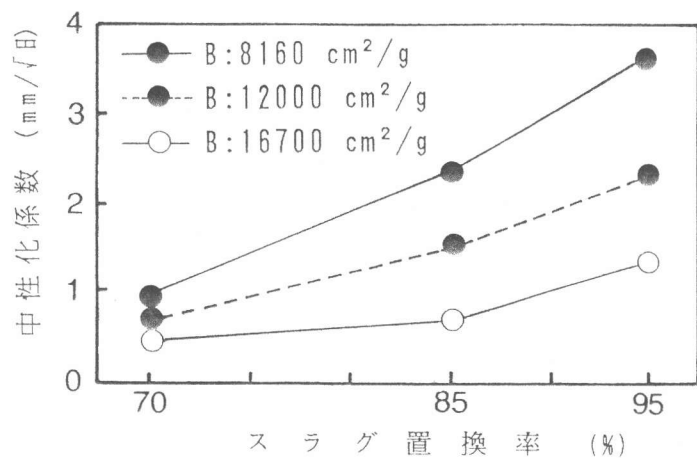


図-9 中性化係数とスラグ置換率との関係

な方法を見つけることが必要だと考えている。

4. まとめ

本実験は、現在入手可能な範囲で高粉末度の高炉スラグ微粉末を用いた高炉スラグ高含有コンクリートの諸特性について検討を行ったものである。16700 cm^2/g というような超微粉碎スラグを使用する場合でも、高性能AE減水剤を利用することにより十分にワーカブルな高炉スラグ高含有コンクリートの作成が可能であること、スラグ粉末度が高くなればなるほど強度特性の改善ならびに中性化速度の低減効果は高くなることが明らかとなった。

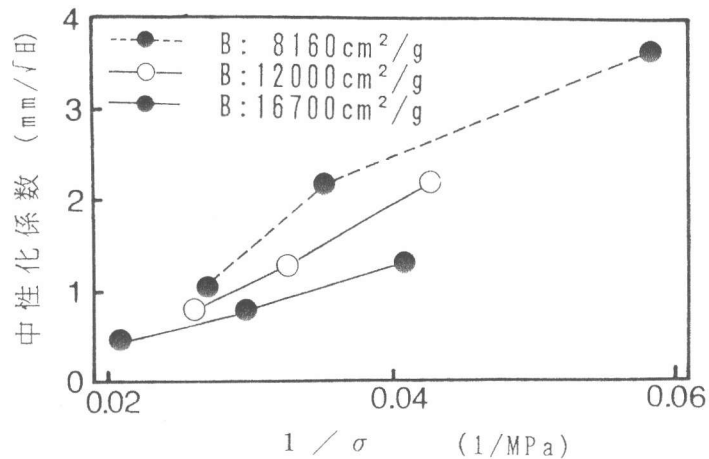


図 - 10 中性化係数と $1/\sigma$ との関係

謝辞

本実験を実施するにあたり、高炉スラグは新日鐵化学(株)に提供していただいた。また、実験は本校の真田・谷岡技官にお世話になりました。付記して深謝いたします。

参考文献

- [1] 中本純次ほか：高炉スラグ高含有コンクリートの強度・発熱特性に関する研究、セメントコンクリート論文集、No.47、PP.396~401、1993
- [2] 中本純次ほか：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
- [3] 中本純次ほか：高炉スラグ高含有コンクリートの中性化に関する研究、コンクリートの炭酸化に関するシンポジウム論文集、JCI-C31、PP.23~30、1993
- [4] 中本純次ほか：高性能AE減水剤を用いた高炉スラグ高含有コンクリートの中性化および発熱特性、コンクリート工学年次論文報告集、第16巻、PP.307~312、1994
- [5] 加賀谷誠ほか：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
- [6] 冨沢年道：高粉末度スラグ・高含有セメントに関する基礎的研究、京都大学学位論文、1994、11
- [7] 本田欽也ほか：粉末度の異なる高炉スラグ微粉末を用いた高強度モルタルの強度発現性、セメントコンクリート論文集、No.46、PP.174~179、1992
- [8] 井上和久ほか：微粉碎高炉スラグを用いた混合セメントの水和特性、セメントコンクリート論文集、No.47、PP.124~129、1993
- [9] 和泉意登志ほか：コンクリートの中性化に及ぼすセメント種類、調合および養生条件の影響について、第7回コンクリート工学年次講演論文集、PP.117~120、1985
- [10] Loo, Y.H., et al.: A carbonation prediction model for accelerated carbonation testing of concrete, Magazine of Concrete Research, No.168, pp.191~200, Sep., 1994