

報告 低熱ポルトランドセメントと混和材を併用したコンクリートの諸物性

田中 博一^{*1}・平川 芳明^{*2}・庭瀬 一仁^{*3}・秋山 隆^{*4}

要旨：低熱ポルトランドセメントにフライアッシュ、高炉スラグ微粉末などの混和材を併用したコンクリートの諸物性を検討した。その結果、低熱ポルトランドセメントにフライアッシュを併用した場合、併用しない場合と比較して材齢1年の長期的な圧縮強度および乾燥収縮は同等となり、断熱温度上昇量は低減し、水密性は向上した。低熱ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を併用した場合、併用しない場合と比較して断熱温度上昇量は低減し、水密性は向上するが、材齢1年までの長期的な強度増進が小さく、自己収縮が大きくなった。さらに、水の拡散係数は30nm以上の細孔容積と相関関係があることなどを明らかにした。
キーワード：低熱ポルトランドセメント，フライアッシュ，高炉スラグ微粉末，水密性

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の使用目的や環境条件などが多様になるに伴い、コンクリートに要求される性能はより高度になってきている。例えば、地中の地下水位以下に構築される構造物に要求される性能の一つに水密性があげられる。水密性を確保するためには、使用材料や配合により水密性を向上させるだけでなく、温度ひび割れ、乾燥収縮などによるひび割れに対する抵抗性を向上させることが重要となる。

温度ひび割れに対する抵抗性を向上させるためには、低熱ポルトランドセメントの使用が有効であると考えられる。また、硬化体組織の緻密化により水密性を向上させるためには、フライアッシュや高炉スラグ微粉末などの混和材の使用が有効であると考えられる。低熱系のセメントに混和材を併用した場合、断熱温度上昇量の低減¹⁾、硬化体組織の緻密化^{2),3)}、長期的な強度増加⁴⁾などが期待できる。しかし、低熱系のセメントと混和材を併用した場合の水密性に関する研究は少ないのが現状である。

そこで、本報告では低熱ポルトランドセメントにフライアッシュあるいは高炉スラグ微粉末を併用した普通コンクリート、低熱ポルトランドセメントにフライアッシュと石灰石微粉末を併用した高流動コンクリートの水密性について検討した。併せて、強度特性、断熱温度上昇量、乾燥収縮、自己収縮などの諸物性も把握した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料を表-1、配合を表-2に示す。セメントは低熱ポルトランドセメント、混和材はフライアッシュ、高炉スラグ微粉末および石灰石微粉末を使用した。フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末は、結合材による長期的な緻密化を期待して使用した。石灰石微粉末は、高流動コンクリートの流動性と材料分離抵抗性を確保するための粉体として使用した。細骨材は普通コンクリートには石灰砕砂と陸砂の混合砂(表-1中のS1およびS2)、高流動コンクリートには石灰砕砂(表-1中のS3)、粗骨材は石灰岩砕

*1 清水建設(株) 技術研究所 社会基盤技術センター 工修 (正会員)

*2 (株) ニュージェック グループマネジャー 技術開発グループ 工博

*3 日本原燃(株) 副長 埋設事業部 開発設計部 (正会員)

*4 関西電力(株) マネジャー 土木建築室 原子力土木建築グループ

表-2 配合

記号	スランプ° (cm)	スランプ フロー (mm)	W/B (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)							
						W	LC	A	K	LP	S	G	SP
LC	18±2.5	—	45	45.0	4.5	150	333	—	—	—	872	1042	1.7
A30	18±2.5	—	45	44.2	4.5	150	233	100	—	—	845	1042	1.7
K70	18±2.5	—	45	44.4	4.5	150	100	—	233	—	851	1042	1.2
HA30	—	650±50	45	51.7	2.5	160	249	107	—	142	889	837	3.2

B=LC+A(K)

石を使用した。配合条件については、普通コンクリートの場合、スランプ18cm、水結合材比45%、空気量4.5%、単位水量150kg/m³とし、A30はフライアッシュを置換率30%、K70は高炉スラグ微粉末を置換率70%で使用し、それぞれセメントの内割として置換した。高流動コンクリートのHA30は、スランプフロー650±50mm、水結合材比45%、空気量2.5%、単位水量160kg/m³とし、フライアッシュを置換率30%でセメントの内割で置換し、石灰石微粉末をセメントとフライアッシュの合計質量に対して外割40%で使用し、細骨材と置換した。

2.2 測定項目

測定項目を表-3に示す。強度特性を評価するために圧縮強度、水密性を評価するために水の拡散係数（以下、拡散係数とする）、ひび割れ抵抗性を評価するために断熱温度上昇量、乾燥収縮および自己収縮、空隙特性を評価するために細孔径分布を測定した。

拡散係数はインプット法の透水試験より算出した。試験体は、形状をφ150×75mmとし、所定の材齢まで標準養生を行った。透水試験を実施する前には恒温恒湿室（20℃、RH60%）にて14日間気中養生した。気中養生終了後、試験体を圧力容器内に設置して注水した後、窒素ガスを用いて0.2MPaの圧力を14日間加えた。透水試験終了後の試験体を割裂して表面からの水の浸透深さを測定し、式(1)により拡散係数を算出した⁶⁾。

$$\beta i^2 = \alpha \times \frac{D_m^2}{4 \times t \times \xi^2} \quad (1)$$

表-1 使用材料

材料	記号	仕様
セメント	LC	低熱ポルトランドセメント 密度3.22g/cm ³
細骨材	S1	石灰砕砂1 密度2.68g/cm ³ FM3.00
	S2	陸砂 密度2.82g/cm ³ FM2.09
	S3	石灰砕砂2 密度2.66g/cm ³ FM2.44
粗骨材	G	石灰岩砕石 密度2.70g/cm ³ FM6.95
フライアッシュ	A	Ⅱ種 密度2.42g/cm ³ 比表面積3,700cm ² /g程度
高炉スラグ微粉末	K	密度2.90g/cm ³ 比表面積4,000cm ² /g程度
石灰石微粉末	LP	密度2.71g/cm ³ 比表面積6,000cm ² /g程度
高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸系

表-3 測定項目

評価項目	測定項目	試験方法
強度特性	圧縮強度	JIS A 1108に準拠 標準養生 試験材齢7, 28, 91, 365日
水密性	拡散係数	透水試験（インプット法）
ひび割れ抵抗性	断熱温度上昇量（発熱特性）	JCI-SQA3に準拠（空気循環式断熱温度上昇試験装置による）
	乾燥収縮	JIS A 1129に準拠
	自己収縮	JCI-1996メントベ-スト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮及び自己膨張試験方法（案）に準拠
空隙特性	細孔径分布	水銀圧入法による

ここで、βi²：拡散係数(m²/sec)

D_m：平均浸透深さ(m)

t：水圧を加えた時間(sec)

α：水圧を加えた時間に関する係数

(14日間の場合、404.4)

ξ：水圧の大きさに関する係数

(0.2MPaの場合、1.386)

断熱温度上昇量の測定は、JCI-SQA3 に準拠し、空気循環式試験装置を用いて行い、1日の温度変化がほとんど認められなくなった材齢14日まで継続した。得られた断熱温度上昇曲線に対して、初期の発熱量が少ない場合の近似に適するとされている式(2)⁷⁾を用いて、断熱温度上昇特性を推定した。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - \exp(-\alpha t^{\beta})) \quad (2)$$

ここで、 $Q(t)$: 材齢 t での断熱温度上昇量 (°C)

Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量 (°C)

α, β : 温度上昇速度に関する定数

t : 材齢 (日)

乾燥収縮の測定は、試験体の形状を $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ とし、JIS A 1129 に準拠し乾燥期間1年まで実施した。

自己収縮の測定は、試験体の形状を $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ とし、JCI セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮及び自己膨張試験方法(案)に準拠し、ひずみの測定は埋込み型ひずみ計を用いて行った。

細孔径分布の測定は、水銀圧入法により実施した。所定の材齢まで標準養生した $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の試験体の中央部を厚さ 10mm 程度に円盤状にスライスし、粗砕して粗骨材を除去した。その後、アセトン処理して水和を停止させ、D-dry で1週間乾燥させた後、試験に供した。

3. 結果および考察

3.1 圧縮強度

材齢1年までの圧縮強度を図-1に示す。普通コンクリートについては、材齢28日では、混和材を混入していないLCより、フライアッシュを混入したA30および高炉スラグ微粉末を混入したK70の方が圧縮強度は小さくなったが、A30については、長期的に強度が増進し、材齢1年における圧縮強度はLCと同等となった。一方、K70については、長期的な強度の増進が小さく、材齢1年の圧縮強度は、LCやA30より 20N/mm^2

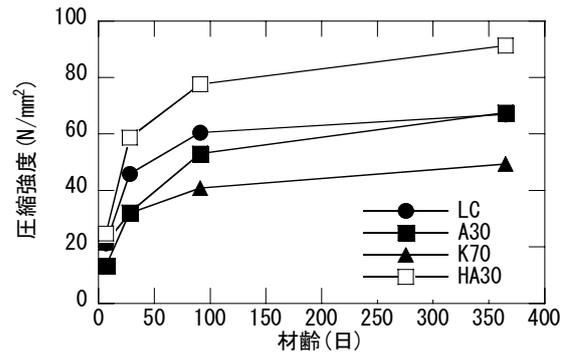


図-1 圧縮強度

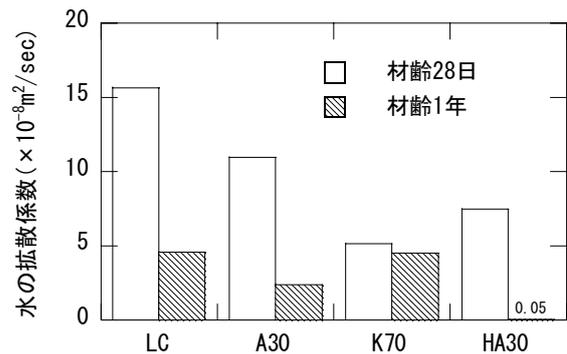


図-2 水の拡散係数

程度小さくなった。高流動コンクリートのHA30については、材齢7日ではLCと同等であったが、材齢28日以降では、LCより大きくなり、材齢1年の圧縮強度は、LCより 25N/mm^2 程度大きくなった。これは、普通コンクリートより空気量が小さく、石灰石微粉末による分散効果⁷⁾によりセメントおよび混和材の反応が効率的に行われたためと考えられる。

3.2 水密性

材齢28日および材齢1年における拡散係数を図-2に示す。材齢28日では、LCと比較して混和材を混入することにより拡散係数が小さくなったが、材齢1年では、LCと比較してHA30は小さくなったがA30およびK70はほぼ同等となった。また、材齢1年の拡散係数は、材齢28日に比べLCでは約70%小さくなり、フライアッシュを用いたA30では約80%、HA30では約98%と大幅に小さくなったが、高炉スラグ微粉末を用いたK70では同等であった。したがって、LC、A30およびHA30の場合では、硬化体組織が緻密化することにより、材齢が経つにつれて水密

性が向上するものと考えられる。しかし、K70の場合では、硬化体組織が緻密化する傾向が認められないため、材齢経過に伴う水密性向上は小さいものと考えられる。

3.3 断熱温度上昇量

断熱温度上昇量の結果を図-3および表-4に示す。普通コンクリートの場合、終局断熱温度上昇量は、混和材を混入していないLCと比較すると、フライアッシュを混入したA30の場合で6°C程度、高炉スラグ微粉末を混入したK70の場合で12°C程度小さくなった。温度上昇速度に関する定数は、A30はLCより小さくなったが、K70はLCより大きくなった。したがって、フライアッシュを用いたA30は、終局断熱温度上昇量および温度上昇速度ともに温度ひび割れに対してLCより有効であるが、高炉スラグ微粉末を用いたK70は、終局断熱温度上昇量は小さくできるが温度上昇速度は遅くならないことが明らかになった。高流動コンクリートのHA30の場合、普通コンクリートより結合材量が多くなったが、LCと比較して終局断熱温度上昇量は3°C程度小さくなった。

3.4 乾燥収縮

乾燥収縮測定結果を図-4に示す。普通コンクリートの場合、混和材を混入しないLCと比較して、フライアッシュを混入したA30は小さくなり、高炉スラグ微粉末を混入したK70は若干大きくなる傾向が認められた。高流動コンクリートのHA30の場合、普通コンクリートより単位水量が10kg/m³多いにもかかわらず、最も小さい結果となった。しかし、その差は小さく、乾燥期間1年での乾燥収縮量は配合にかかわらず400~500μ程度となった。したがって、混和材の混入が乾燥収縮に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

3.5 自己収縮

自己収縮測定結果を図-5に示す。普通コンクリートの場合、自己収縮は、混和材を混入していないLCが最も小さく、フライアッシュを混入したA30、高炉スラグ微粉末を混入したK70の

表-4 断熱温度上昇試験結果

記号	結合材量 (kg/m ³)	$Q(t)=Q_{\infty}(1-\exp(-\alpha t^{\beta}))$		
		Q_{∞}	α	β
LC	333	46.2	0.532	0.790
A30		40.0	0.482	0.775
K70		34.2	0.576	1.15
HA30	356	42.8	0.417	0.867

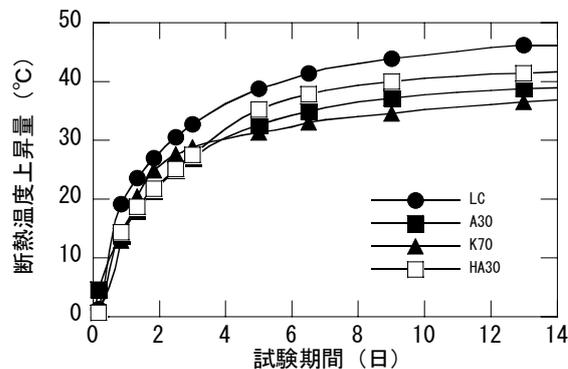


図-3 断熱温度上昇量

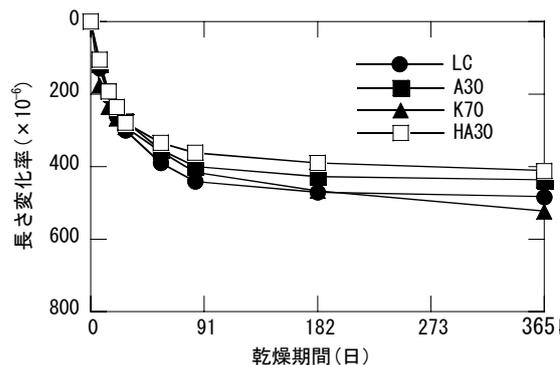


図-4 乾燥収縮測定結果

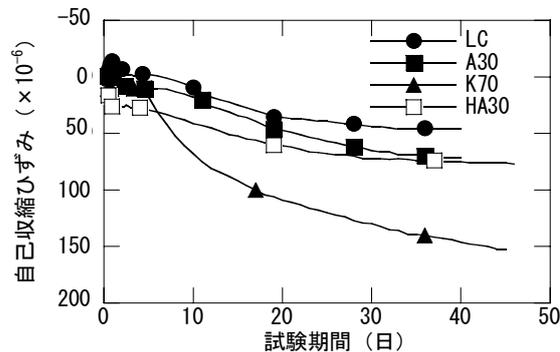


図-5 自己収縮測定結果

順で大きくなる結果となった。LCおよびA30は試験期間30日程度でほぼ一定となっているがK70については、まだ進行している段階である。試験期間30日の自己収縮は、LCと比較して

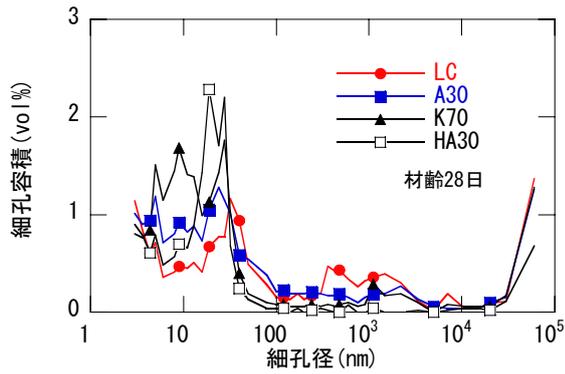


図-6 細孔径分布測定結果 (材齢 28 日)

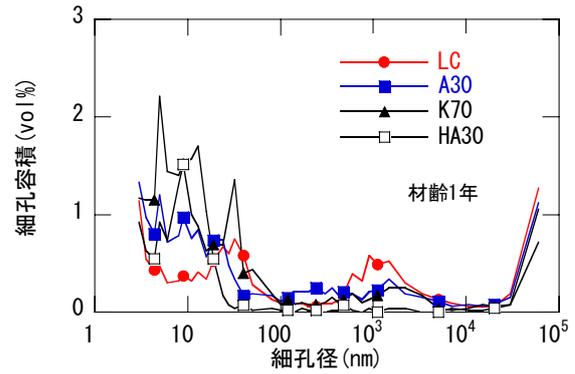


図-7 細孔径分布測定結果 (材齢 1 年)

A30 で 1.5 倍程度, K70 で 3 倍程度となった。高流動コンクリートの HA30 の場合, 普通コンクリートの A30 とほぼ同等となった。

以上の結果より, 自己収縮については, 混和材を併用することにより小さくすることは困難であるが, フライアッシュを用いた方が高炉スラグ微粉末を用いた場合より自己収縮が小さくなることが明らかとなった。

3.6 細孔径分布

材齢 28 日および材齢 1 年での細孔径分布を図-6, 図-7 に示す。混和材を混入していない LC より, 混和材を混入した A30, K70 および HA30 の方が, 細孔径 100nm 程度以上の細孔容積は少なくなる傾向が認められる。分布の特徴としては, 細孔径 10~50nm に細孔容積のピークがみられ, 混和材を混入した場合には, 50nm 程度以下の細孔容積が多くなる傾向が認められる。

細孔径 3~10nm, 10~30nm, 30~100nm および 100nm 以上の範囲の各細孔容積を図-8 に示す。K70 を除いて, 材齢 28 日と比較して材齢 1 年での 3nm 以上の細孔容積が小さくなっており, 長期的な硬化体組織の緻密化が認められた。混和材を併用した場合には, 材齢 28 日と比較して材齢 1 年では, 100nm 以上の粗大な細孔容積はほぼ同じであるが, 3nm 以上の細孔容積が少なくなるとともに, 10~100nm の範囲の細孔容積が少なくなり, 3~10nm の範囲の細孔容積が多くなる傾向が認められた。

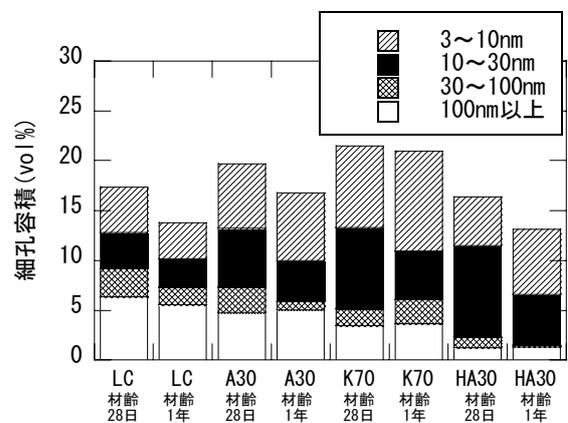


図-8 細孔径ごとの細孔容積

3.7 細孔容積と拡散係数の関係

水の拡散係数については硬化体の全細孔容積とではなく, 100nm 程度以上の連続している細孔容積との相関が高く, 100nm 程度以上の細孔容積が多いほど透水性は大きくなると報告されている⁸⁾。図-8 より, 材齢 28 日と材齢 1 年における 100nm 以上の細孔容積を比較すると, いずれにおいてもほぼ同等であるが, 水の拡散係数については K70 を除いて材齢 28 日と比較して材齢 1 年では大幅に小さくなっていることから, 本研究の範囲においては 100nm より小さい細孔容積の影響も大きいと考えられる。3nm 以上, 30nm 以上の細孔容積と拡散係数の関係を図-9 に示す。3nm 以上の細孔容積と拡散係数の関係は相関関係が小さい結果となったが, 30nm 以上の細孔容積と拡散係数の関係には概ね良好な相関関係が認められ, 30nm 以上の細孔容積が大き

くなると拡散係数は大きくなる傾向となった。材齢 28 日の HA30 などの結果の傾向が異なるのは、3nm 以上の細孔容積や 3~10nm の範囲の細孔容積が影響している可能性も考えられる。

4. まとめ

本報告で得られた知見を以下に示す。

- 1) 低熱ポルトランドセメントにフライアッシュを併用した場合、併用しない場合と比較して、材齢 1 年の長期的な圧縮強度および乾燥収縮は同等となり、水密性は向上し、断熱温度上昇量は低減した。
- 2) 低熱ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を併用した場合、併用しない場合と比較して、水密性は向上し、断熱温度上昇量は低減したが、材齢 1 年までの長期的な強度増進が小さく、自己収縮が大きくなった。
- 3) 混和材を併用することにより、長期的に 100nm 以上の細孔容積の変化は小さいが、10~100nm の範囲の細孔容積が減少し、3~10nm の範囲の細孔容積が増加する傾向が認められた。
- 4) 30nm 以上の細孔容積と水の拡散係数との関係には概ね良好な相関関係が認められ、30nm 以上の細孔容積が大きくなると水の拡散係数は大きくなる傾向となった。

なお、本研究は電力共通研究として実施したものである。

参考文献

- 1) 松永篤，山根昌浩，竹田宣典，十河茂幸：温度ひび割れ抵抗性に及ぼす低熱セメントおよび混和材の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.1145-1150，1995
- 2) 狩野和弘，秋山達志，松井淳，五十畑達夫：ポゾラン高含有低熱ポルトランドセメントの相組成と空隙率，セメント・コンクリート論文集，No.55，pp.75-82，2001
- 3) 吉田行，田口史雄，名和豊春，渡辺宏：高炉スラグ微粉末を用いた改質ビーライト系セ

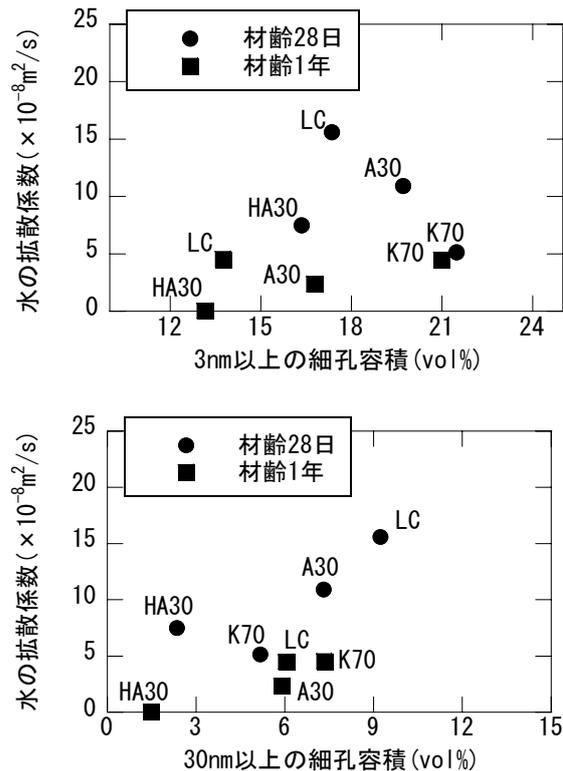


図-9 各細孔容積と水の拡散係数の関係

メントコンクリートの塩分浸透に及ぼす諸要因の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.777-782，2004

- 4) 五十畑達夫，秋山達志，狩野和弘，松井淳：ポゾラン高含有セメントの水和特性，セメント・コンクリート論文集，No.56，pp.50-57，2002
- 5) 村田二郎：コンクリートの水密性とコンクリート構造物の水密性設計，技報堂出版，pp.40-44，2002.5
- 6) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書，1985
- 7) 平田隆祥，川島宏幸，十河茂幸：石灰石微粉末を粉体の増量材として使用したコンクリートの強度特性について，セメント・コンクリート論文集，No.51，pp.352-357，1997
- 8) 内川浩：セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響，コンクリート工学，pp.5-17，Vol.33，No.9，1995.9