

報告 フライアッシュ多量添加によるコンクリートの水和熱抑制効果に関する検討

細川 大介*1・室野井 敏之*2・竹内 直也*1・溝渕 利明*3

要旨: 近年、環境負荷低減や温度ひび割れ抑制の観点から、フライアッシュを JIS 規格外で添加したコンクリートの施工が増加している。本研究では、フライアッシュを JIS 規格外で添加したコンクリートの強度特性と断熱温度上昇特性を推定するために実験を行った。断熱温度上昇特性の推定では断熱温度上昇試験機に代わり発泡スチロール製の簡易断熱養生容器を用いて推定した。その結果、既往の文献と同様に、フライアッシュを多量添加したコンクリートの断熱温度上昇特性は単位セメント量に依存していることを確認した。さらに、フライアッシュを多量添加したセメントを用いた実構造物の断熱温度上昇特性と比較検討を行った。

キーワード: フライアッシュ, 水和熱, 断熱温度上昇特性

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の大型化・急速施工の増加に伴い、セメントの水和熱によって生じる温度応力が構造物に温度ひび割れ発生を及ぼす場合がある。温度ひび割れはマスコンクリート構造物に限らず、施工条件や使用材料によって、比較的小規模な構造物においても生じていることがあるとの報告がされている。¹⁾

一般に、フライアッシュを添加したコンクリートは一般的なコンクリートに比べ、初期材齢において強度が小さいなど多くの検討項目も指摘されている。そのため、フライアッシュの使用において、多量添加される施工事例は少ない。しかし、フライアッシュにはポズラン反応による長期強度の増進があり、単位セメント量を低減できることから水和熱の抑制効果が期待できる。また、セメント量削減からコンクリートの二酸化炭素排出量原単位を小さくでき、環境負荷低減に有効である。そのため、フライアッシュを多量添加したコンクリートは、ダムコンクリートのように強度よりも水和熱の抑制が要求されるような構造物において有効である²⁾と考えられる。また近年では、フライアッシュを多量に添加した施工事例もある。

そこで本研究では、多量にフライアッシュを使用したコンクリートのデータの蓄積を目指し、フライアッシュを多量添加した場合の断熱温度上昇特性および強度特性を把握することを目的とした。本研究では、断熱温度

上昇特性を把握する際に、断熱温度上昇試験機の代わりに安価な発泡スチロール製の簡易断熱養生容器を用いて簡易断熱温度上昇試験を行い、フライアッシュを多量添加した際の断熱温度上昇特性の推定を行った。

さらに、本研究では簡易断熱養生容器を用いて得られた断熱温度上昇特性とフライアッシュを多量に添加した構造物の断熱温度上昇特性および既往の文献における断熱温度上昇特性とを比較し、フライアッシュを多量添加したコンクリートの発熱抑制効果について検討した。

2. 検討概要

本検討においては、フライアッシュを多量に添加した場合の断熱温度上昇特性と強度特性について室内試験を行った。本検討における要因と水準を表-1に示す。

2.1 簡易断熱温度上昇試験

本検討では、発泡スチロール製の簡易断熱養生容器(900×900×800mm)を用いて簡易断熱温度上昇試験を行い、断熱温度上昇特性の推定を行った。簡易断熱養生容器の中心部には 450×300×200mm のコンクリート供試体を打込みできるようにし、コンクリート供試体の中心温度を測定した。図-1、図-2に簡易断熱養生容器の概略図を示す。本検討の断熱温度上昇特性の推定では水結合材比 50%、単位粉体量を 320kg/m³一定とし、フライアッシュ置換率を 0, 20, 40%および 60%とした。コ

表-1 要因と水準

要因 試験項目	水準	
	簡易断熱温度上昇試験	圧縮強度試験
単位粉体量 (kg/m ³)	320	320
フライアッシュ置換率 (%)	0, 20, 40, 60	0, 20, 60, 70

*1 法政大学大学院 デザイン工学研究科都市環境デザイン工学専攻 (正会員)

*2 鹿島建設株式会社 技術研究所 (正会員)

*3 法政大学 デザイン工学部都市環境デザイン工学科教授 博士(工学) (正会員)

ンクリートの配合を表-2示す。

簡易断熱温度上昇試験より得られた温度履歴から、温度応力解析ソフトを用いて温度履歴と解析値が一致するように同定解析を行い、断熱温度上昇特性の推定を行った。推定に用いた断熱温度上昇式を以下に示す。

$$Q(t)=K[1-\exp\{-\alpha(t-t_0)^\beta\}] \quad (1)$$

t:材齢 (日), Q(t):材齢 t までの断熱温度上昇量 (°C), K:終局断熱温度上昇量 (°C), α :断熱温度上昇速度に関する定数, β :断熱温度上昇速度に関する定数, t_0 :発熱開始材齢 (日)

2.2 圧縮強度試験

本検討では、フライアッシュを多量添加した場合の強度特性を把握するために、水結合材比 50%、単位粉体量を 320kg/m³ 一定とし、フライアッシュ置換率を 0, 20, 60%および 70% (以降置換率 0%を N, 置換率 20, 60, 70%を F20, F60, F70 と称す) と変化したコンクリート供試体 (φ 100×200mm) の圧縮強度試験を行った。コンクリート供試体は打込み後 2 日で脱型したのちに水中養生を行い、材齢 7, 14, 28, 56, 91 日で圧縮強度試験を行った。

2.3 使用材料

本検討では、普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm³, 比表面積 3450cm²/g) を用い、混和材として JIS A 6201 の II 種規格に適合するフライアッシュ (密度 2.35g/cm³) を用いた。

なお、本検討において使用した細骨材および粗骨材は、それぞれ陸砂 (密度 2.59g/cm³, 吸水率 2.06%, 粗粒率 2.47%), 硬質砂岩碎石 (密度 2.66g/cm³, 吸水率 0.50%),

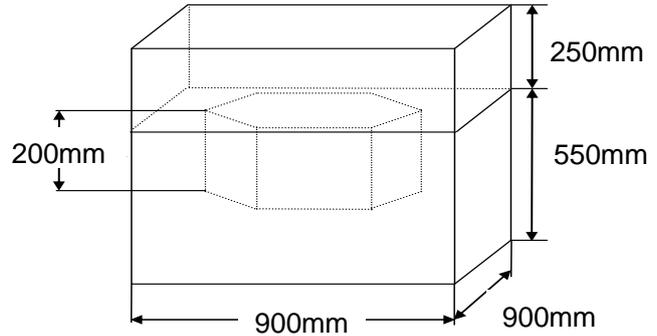


図-1 簡易断熱養生容器全体図

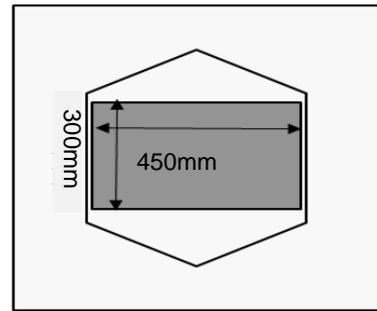


図-2 簡易断熱養生容器平面図

粗粒率 6.75%) を使用した。また、混和剤として AE 減水剤および AE 剤を使用した。AE 減水剤はリグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体を主成分とする AE 減水剤標準型を使用し、AE 剤は変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤を使用した。

表-2 室内試験におけるコンクリートの配合

試験水準	略称	置換率 (%)	単位量 (kg/m ³)					AE減水剤 (ml/m ³)	AE剤 (C×%)
			水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G		
簡易断熱温度上昇試験	N	0	160	320	0	772	1051	800	0.003
	F20	20		256	64	770	1049		
	F40	40		192	128	769	1046		
	F60	60		128	192	767	1044		
圧縮強度試験	N	0	160	320	0	772	1051	800	0.003
	F20	20		256	64	770	1049		
	F60	60		128	192	766	1043		
	F70	70		96	224	766	1042		

表-3 実構造物におけるコンクリートの配合

対象構造物	水結合材比 (%)	単位量 (kg/m ³)							備考
		水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材 (mm)			
						5-10	10-20	20-40	
1	58	180	155	155	886	0	397	622	AE減水剤使用
2	48	168	175	175	879	0	394	618	

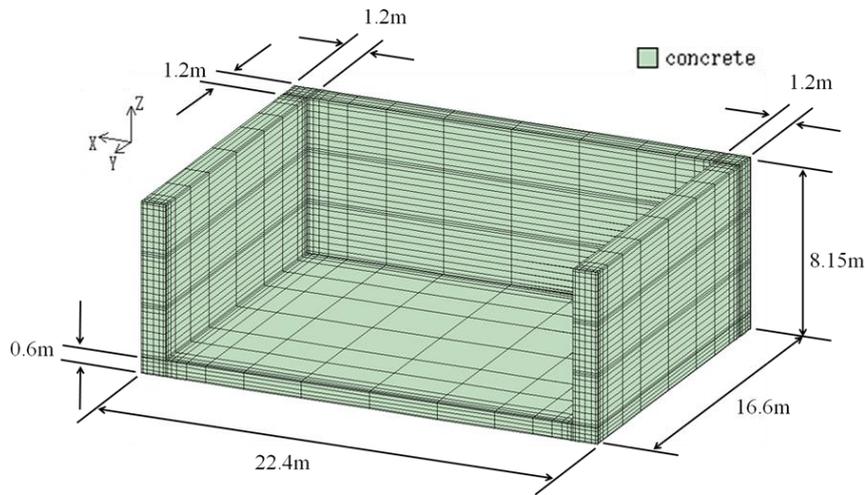


図-3 解析用メッシュレイアウト(対象構造物 1)

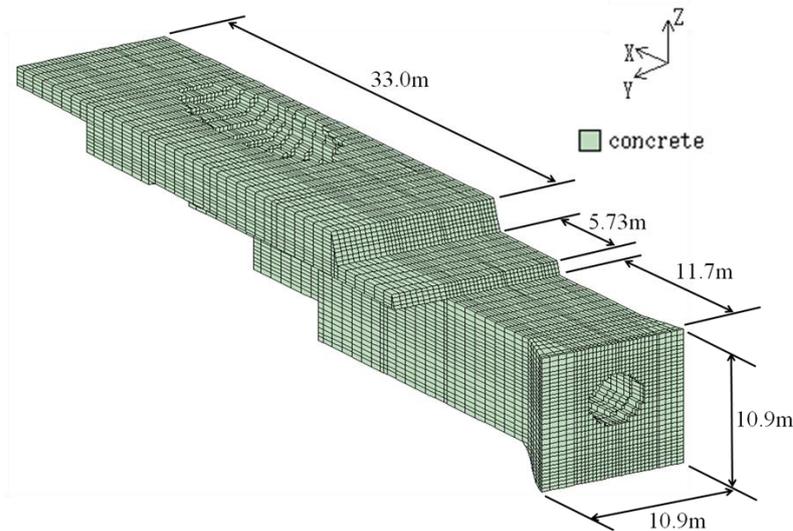


図-4 解析用メッシュレイアウト(対象構造物 2)

室内試験におけるフライアッシュコンクリートの配合を表-2に示す。

3. 温度解析

3.1 温度解析の概要

本検討では、実構造物より得られた温度の測定値をもとに同定解析を行った。簡易断熱温度上昇試験における断熱温度上昇特性の推定時と同様に温度応力解析ソフトを用いて同定解析を行い、実構造物における断熱温度上昇特性の推定を行った。その際、実測温度測定点の位置が明確ではなかったため、推定される測定位置により同定解析を行った。断熱温度上昇式は上式(1)とした。

3.2 温度解析対象構造物

本検討では、フライアッシュを多量添加していること、単位セメント量が発熱特性に与える影響を把握することとし、単位セメント量が異なる2つの対象構造物を選定した。温度解析対象構造物は、ある重力式RCCダムの一部であり、各解析の対象となる構造物はフライアッシュを内割で50%置換して使用している。

選定した構造物の配合を表-3に示す。また構造物毎における発熱特性のばらつきを把握するため、各々3リフト分の同定解析を行った。対象構造物1の解析用メッシュレイアウトを図-3、対象構造物2の解析用メッシュレイアウト図-4に示す。

4. 試験結果および考察

4.1 簡易断熱温度上昇特性

簡易断熱養生容器を用いた温度測定結果をもとに推定した断熱温度上昇特性の結果を図-5、図-6に示す。

また、近年、資源の有効利用の観点から、国内においてもフライアッシュを多量添加した場合の物性についての研究がなされており、その中から、吉岡・吉田らの簡易試験¹⁾を基に、室内試験との比較・検討を行った結果についても示す。

断熱温度上昇特性における各係数とともに、単位セメント量の増加に伴って大きくなる結果となった。また、各係数とともに、相関係数が0.9以上であり、高い相関関係

が得られた。

以上の結果から、断熱温度上昇特性は単位セメント量に比例していると考えられる。これは、フライアッシュが材齢初期においてほとんど反応しないため、初期発熱に影響しなかったためと考えられる。

図-5から、簡易断熱温度上昇試験結果および文献¹⁾から得られた終局断熱温度上昇量を比較した場合、両者間の勾配は概ね一致する結果となり、単位セメント量の増加に伴う終局断熱温度上昇量の増進は、文献値¹⁾とほぼ同様の傾向を示す結果となった。また、簡易断熱試験から得られた終局断熱温度上昇量は文献値よりも5℃程度低い結果となった。これは、断熱温度上昇特性の推定方法の違いや使用材料の違いが原因であると考えられるが、概ね同等の値を示す結果が得られたといえる。図-6より、室内試験結果と文献値¹⁾を比較すると、両者間の勾配には差異が生じ、文献値¹⁾と比べ簡易断熱温度上昇試験結果における勾配は低い結果となった。この差異が生じた原因は、断熱温度上昇特性の推定方法が異なるためと考えられる。

室内試験および文献値¹⁾との比較を行った結果、断熱温度上昇特性は単位セメント量にほぼ比例していることを確認した。したがって、同一粉体量のコンクリートにおける発熱特性については、普通コンクリートに代わりフライアッシュコンクリートを用いることで、水和熱の発熱抑制効果が期待できると思われる。

4.2 圧縮強度特性

各材齢の置換率と圧縮強度の関係を図-7に示す。図-7に示すように、フライアッシュコンクリートでは置換率の増加に伴い、圧縮強度が低下する結果となった。また、F20のフライアッシュコンクリートにおいては、材齢28日以降で普通コンクリートよりも強度が高い結果となった。また、F60のフライアッシュコンクリートにおいては材齢91日において、圧縮強度が約27N/mm²であった。また、F70のフライアッシュコンクリートにおいては材齢91日において、約18N/mm²であった。

以上の結果から同一粉体量において、フライアッシュコンクリートは普通コンクリートに比べ、単位セメント量の減少に伴い、圧縮強度が低下することが確認された。また、設計基準強度を長期材齢において設定できるダムコンクリート等の構造物では、フライアッシュを60%および70%添加したフライアッシュコンクリートの適用は可能となる場合もあると考えられる。

5. 温度解析結果および考察

実構造物における温度履歴の実測値と解析上の温度履歴が一致するように解析条件を変化させ同定解析を

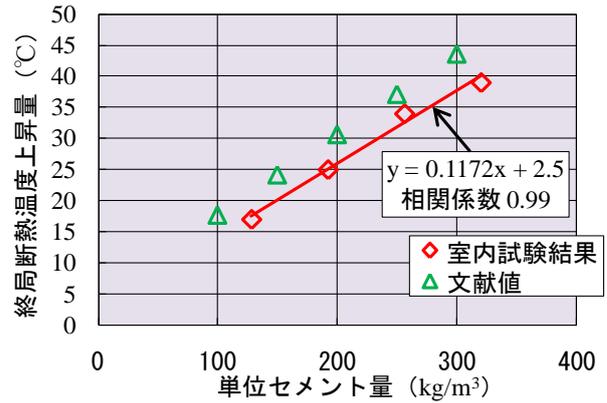


図-5 終局断熱温度上昇量と単位セメント量の関係

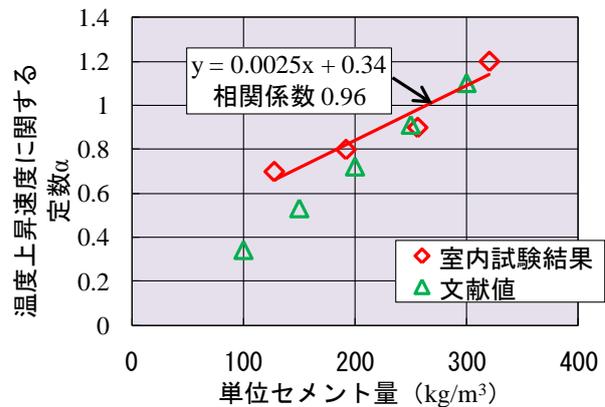


図-6 温度上昇速度に関する定数αと単位セメント量の関係

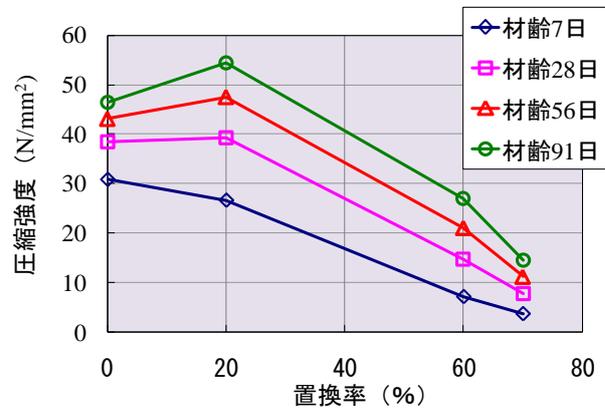


図-7 材齢と圧縮強度の関係

行った。同定解析は、初期発熱速度および最高温度、温度収束速度を同定することでダムコンクリートの断熱温度上昇特性を推定した。同定解析結果を図-8、図-9に示す。図-8、図-9から、実測値と解析値を一致させることでダムコンクリートの断熱温度上昇特性をある程度推定できたと思われる。また、対象構造物の各リフトでの解析値は、各係数ともに解析結果にばらつきがみられた。この原因としては、解析に用いた際の使用材料の物性値の違いや環境条件の違いが考えられる。

そこで、図-10、図-11に示すように、実構造物の各

リフトの解析値の平均値を用いて断熱温度上昇特性の各係数と単位セメント量の関係と比較した。図-10、図-11 から、実構造物の断熱温度上昇特性の平均値は、簡易断熱温度上昇試験結果および文献値¹⁾における断熱温度上昇特性の各係数と同様に、単位セメント量にほぼ比例する傾向がみられた。また、実構造物の断熱温度上昇特性の平均値と簡易断熱温度上昇試験および文献¹⁾における断熱温度上昇特性との間に差異が生じた原因としては、使用材料や環境条件の違い、断熱温度上昇特性の推定方法の違いが考えられる。しかしながら、フライアッシュを多量に添加した構造物における断熱温度上昇特性は、単位セメント量によって推定することができると思われる。

6. まとめ

本研究では、フライアッシュを多量に添加したコンクリートの強度特性と断熱温度上昇特性を推定するために実験を行った。以下に、室内試験における簡易断熱温度上昇特性試験、圧縮強度試験の2つの試験結果およびダムコンクリートの温度解析により得られた結果を示す。

- 1) フライアッシュコンクリートの断熱温度上昇特性は、単位セメント量にほぼ依存している結果を示した。
- 2) フライアッシュコンクリートの圧縮強度特性は、F20であれば材齢 28 日以降において、普通コンクリートと同程度以上の強度発現を示した。また、F60 のフライアッシュコンクリートにおいては材齢 91 日において、圧縮強度が約 27N/mm²であった。また、F70 のフライアッシュコンクリートにおいては材齢 91 日において、約 18 N/mm²であった。
- 3) フライアッシュを多量添加したダムコンクリートでも単位セメント量によって断熱温度上昇特性を推定することができると考えられる。

以上の結果を受け、フライアッシュコンクリートの断熱温度上昇特性は、単位セメント量にほぼ依存していることが確認できた。また、フライアッシュを添加することによる水和熱抑制効果は、フライアッシュを多量添加することで期待できると考えられ、温度ひび割れ抑制にも有効であると考えられる。次に、水結合材比が一定の場合のフライアッシュコンクリートの圧縮強度特性を確認することができた。その結果、設計基準強度を長期材齢において設定できるダムコンクリート等の構造物では、フライアッシュを多量添加したコンクリートの適用が可能となる場合も考えられる。今後は水結合材比を変化させた圧縮強度特性を確認する必要があると考えられる。

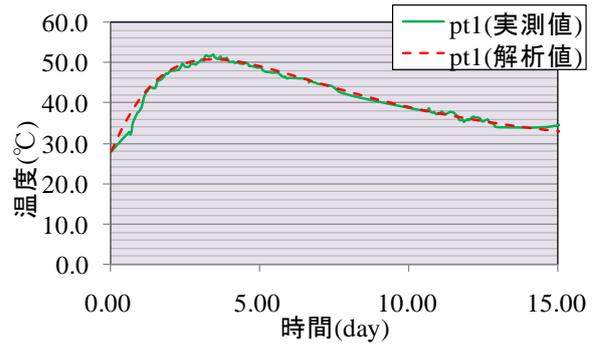


図-8 対象構造物 1 における同定解析結果

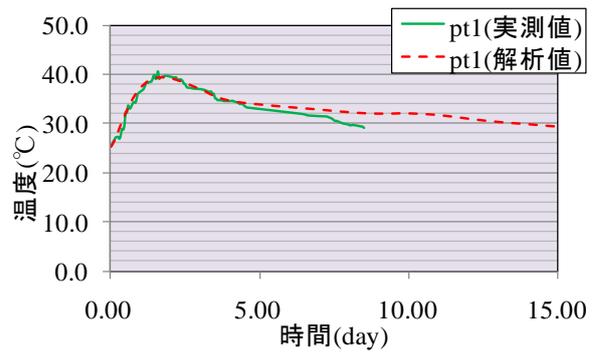


図-9 対象構造物 2 における同定解析結果

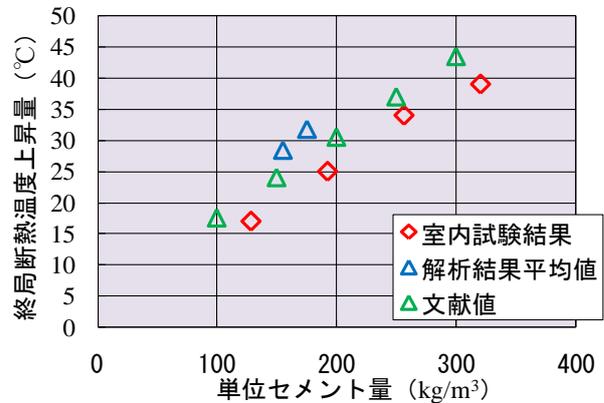


図-10 終局断熱温度上昇量と単位セメント量の関係

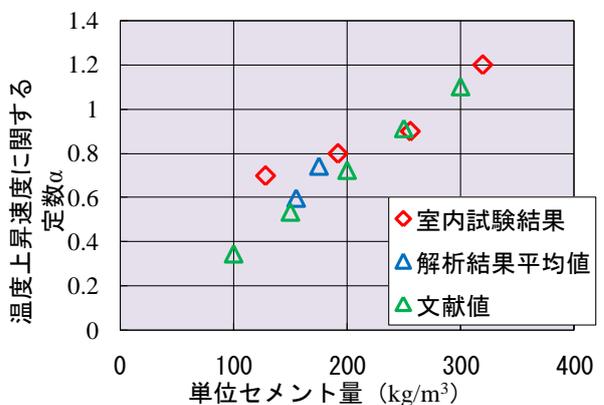


図-11 温度上昇速度に関する定数 α と単位セメント量の関係

参考文献

- 1) 吉岡慧, 吉田和隆, 吉武勇, 浜田純夫, 北原敦志 : 簡易試験による HVFA コンクリートの断熱温度上昇量の推定, *Journal of Society of Materials Science*, Vol.57, No.5, pp.509-514, 2008.5
- 2) 山口温朗, 原身稔明, 自閑茂治, 加藤宏基 : フライアッシュを混入したダムコンクリートの諸特性に関する実験的考察, *コンクリート工学年次論文報告集*, Vol.12, No.1, pp.879-884, 1990.6
- 3) JCI 社団法人 日本コンクリート工学協会 : マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, pp47-52, pp104-114, 2008
- 4) 西澤邦男, 上村均, 江前耕一, 吉田勝美 : フライアッシュを多量に混入したコンクリートの温度特性, *土木学会年次学術講演会講演概要集第 5 部*, Vol.51, No.5, pp.200-201, 1996.9
- 5) 三田正和, 河野清, 川口修宏 : フライアッシュを多量に使用したコンクリートの圧縮強度, 断熱温度上昇および乾燥収縮, *土木学会年次学術講演会講演概要集第 5 部*, Vol.51, No.5, pp.202-203, 1996.9
- 6) 鍵本広之, 土田茂, 三宅淳一 : フライアッシュを用いたハイペースト型ダムコンクリートについて, *土木学会年次学術講演会講演概要集第 5 部*, Vol.51, No.5, pp.206-207, 1996.9