

論文 分級フライアッシュを使用した高強度コンクリートの力学特性及び耐久性

深川正浩*1・中村成春*2・榊田佳寛*3・阿部道彦*4

要旨: 本研究は、分級フライアッシュを使用した高強度コンクリートの養生別強度・乾燥収縮・中性化を実験検討したものである。その結果、分級フライアッシュを混入したコンクリートは、標準養生を行うと、圧縮強度は長期の強度発現が向上し、引張強度及びヤング係数と圧縮強度の関係は無混入のものと同様な傾向を示した。また、分級フライアッシュを混入しても低水結合材比では、中性化速度は小さくなるが、混入量の増加とともに中性化速度が早まることを示した。

キーワード: 分級フライアッシュ, 高強度コンクリート, 圧縮強度, 乾燥収縮, 中性化

1. はじめに

近年、石炭火力発電所が増設され[1], 石炭灰も多量に発生することになり、環境に配慮した再利用システムのシェア拡大が望まれている。石炭灰のうちフライアッシュは、旧来よりコンクリート用混和材として JIS 化されている。しかしながら、発電所の NO_x 規制, 海外炭への移行, 集塵技術の向上による種々の粒度に分別された分級フライアッシュ (以下, CFA と略す) の製品化等により JIS 制定時から、かなり品質が変化したフライアッシュが発生し[2], コンクリートに及ぼす影響については不明な点が多い。

一方、高性能コンクリートが段階的に実用化され[3], 60 ~ 100MPa 級の高強度コンクリートが製造されている。この製造には、微粉末混和材によるマイクロファイラー及びベアリング等の微粉末特性が重要であり、このためシリカフェーム, 高炉スラグ微粉末, フライアッシュ等の使用が考えられている。高強度コンクリートにフライアッシュを使用した既往の研究では, 文献[4], [5]は, CFA 単味の混入に伴う特性の寄与効果の検討が不十分であり, 文献[6]は, フレッシュコンクリートの性状と強度性状には言及しているが, 耐久性の検討はされていない。

本研究は, CFA を混入した高強度コンクリートの力学特性及び耐久性を実験的に検討し, 強度・変形・耐久性に及ぼす CFA の混入効果を明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

表-1 に実験の要因と水準を示す。CFA は, 高粉末度 (以下 B 種と呼ぶ) と中粉末度 (以下 D 種と呼ぶ) の 2 種類を用い, 水結合材比 W/B を 4 段階に設定し, 2 種類の CFA を各々混入した。混入量の水準は, 低 W/B 条件ほど多段的になるように設定した。また, CFA 無混入のコンクリート (以下 P と略す) と比較することで, CFA の混入効果を検討した。

*1 前田建設工業(株), (正会員)

*2 宇都宮大学助手 工学部建設学科, 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学教授 工学部建設学科, 工博 (正会員)

*4 建設省建築研究所 第2研究部無機材料研究室室長, 工博 (正会員)

2.2 試験項目及び種類

表-2に実験項目及び方法を示す。関連JISにより、フレッシュ、強度、変形、耐久性状を試験した。強度の評価は標準及び気中養生別の圧縮強度ならびに引張強度により、変形評価は標準及び気中養生別のヤング係数ならびに乾燥収縮率により、耐久性の評価は促進中性化によった。

表-3にCFAの品質を示す。B種は粉末度約6000 cm²/g、D種は約4000 cm²/gで、同一プラントで製造したものである。骨材は、鬼怒川産川砂（表乾比重2.60）と岩瀬産硬質砂岩碎石（表乾比重2.66）を使用した。セメントは3社等量混合した普通ポルトランドセメントを使用した。混和剤は、高性能AE減水剤（ポリカルボン酸エーテル系、主剤と略）を使用し、空気量調整剤にAE剤（高アルキルカルボン酸系、助剤と略）を併用した。

2.3 使用コンクリートの調合

表-4にコンクリートの調合を示す。単位水量は、すべての調合で170kg/m³で一定にし、W/B毎に単位粗骨材かさ容積を一定とした。W/B = 26, 31%では、スランプが23 ± 2cm及び空気量が3.0 ± 1.5%に、W/B = 38, 49%では、スランプが21 ± 2cm及び空気量が4.5 ± 1.5%になるよう、混和剤の添加により調整した。以後、各条件の呼び名は、表中の記号に従う。

3. 実験結果及び考察

3.1 フレッシュ性状及び圧縮強度の試験結果

表-4中にフレッシュコンクリートの試験結果及び圧縮強度試験結果を示す。スランプ及び空気量とも所要値が得られている。また、図-1に材齢と養生別の圧縮強度との関係を示す。図-1中a)はW/B = 26, 31%でCFA無混入の場合を、b)は同W/BでB種のCFA混入量200 kg/m³の場合を表す。a)の場合、材齢91日では、組織の緻密化による水分の補給及び乾燥があまりなく、標準養生と気中養生との強度差は見られない。材齢28日では、気中養生の試験結果が低くなっているが、表-4の他の試験結果を鑑みるとばらつきによる影響と考えられる。一方、b)の場合、材齢91日では、十分な水とCFA混入に伴う強度寄与との相乗効果から、気中養生より標準養生の圧縮強度が増加している。材齢28日では、相対的に乾燥に伴う見かけの

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
W/B %	26, 31, 38, 49
CFA	高粉末度; B種, 中粉末度; D種 (CFA無混入条件をPと表記)
CFA混入量 kg/m ³	W/B = 26% 条件; 0, 100, 200, 300 W/B = 31% 条件; 0, 100, 200 W/B = 38% 条件; 0, 100 W/C = 49% 条件; 0

表-2 試験項目及び方法

項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
圧縮強度	JIS A 1108 *1, *2
引張強度	JIS A 1113 *3
ヤング係数	JIS 原案, 1/3 割線 *4
乾燥収縮率	JIS A 1129 コンパレタ *5
促進中性化	建築学会案 *6

表-3 使用CFAの品質

種類	比重	粉末度 cm ² /g	50% 平均粒径 μm	強熱減量 %	フロー値比 %	活性度指数 28日
B	2.42	6610	4.2	3.2	106	99
D	2.29	4030	10.2	2.3	102	91

*1 標準養生, 材齢 7, 28, 91 日に試験

*2 材齢 7 日標準養生後, 20 °C・60%RH 気中保存し, 材齢 28, 91 日に試験

*3 標準養生, 材齢 28 日に試験

*4 材齢 28 日の圧縮強度試験時に併せて実施

*5 材齢 7 日標準養生後, 20 °C・60%RH 気中保存し乾燥期間 7, 14, 28, 56, 91 日に測定

*6 材齢 7 日標準養生後, 28 日間 20 °C・60%RH 気中保存し, 雰囲気 20 °C・CO₂ 濃度 5% にて中性化期間 4, 8, 13 週に測定

表-4 使用コンクリートの調合、フレッシュ及び力学性状試験結果

記号	CFA種類	W/B %	単位量 kg/m ³					混和剤*		スランプ cm	空気量 %	圧縮強度 MPa					引張強度 MPa	ヤング係数 GPa	
			CFA	C	W	S	G	主剤	助剤			標準養生			気中養生			標準	気中
												7日	28日	91日	28日	91日			
P260	P	26	0	650	170	637	928	1.5	1.0	23.0	2.4	75.1	96.4	98.0	86.7	97.0	5.47	36.5	32.7
P310	P	31	0	550	170	689	960	1.0	0.0	21.5	2.2	64.8	84.0	89.8	80.1	87.4	5.41	35.7	35.0
P380	P	38	0	450	170	702	992	0.9	3.0	21.0	4.9	45.0	57.5	66.5	58.6	61.4	4.36	31.4	31.4
P490	P	49	0	350	170	783	992	1.2	3.0	21.5	4.1	35.1	44.7	52.2	51.1	51.6	3.93	29.1	28.9
B261	B	26	100	550	170	601	928	1.2	2.0	23.0	2.2	69.5	88.4	94.5	89.7	93.3	5.73	37.2	36.4
B262	B	26	200	450	170	575	928	1.2	3.5	24.0	2.6	58.5	87.3	99.0	82.9	88.7	4.56	34.3	35.3
B263	B	26	300	350	170	549	928	1.2	4.5	23.0	3.0	47.4	71.8	87.0	71.3	73.9	4.61	31.8	33.1
B311	B	31	100	450	170	653	960	0.8	2.0	22.0	2.1	52.5	71.4	85.6	72.1	73.5	4.94	34.3	36.1
B312	B	31	200	350	170	624	960	0.9	3.0	22.0	2.1	45.1	65.5	77.4	66.8	74.1	4.72	31.8	32.2
B381	B	38	100	350	170	676	992	0.9	10	22.0	3.3	38.3	53.1	68.9	55.2	59.6	3.57	31.9	31.9
D261	D	26	100	550	170	606	928	1.4	1.7	22.5	2.8	71.1	87.1	104	90.6	96.8	5.56	35.3	37.0
D262	D	26	200	450	170	577	928	1.3	3.0	23.5	3.4	59.3	80.4	97.1	80.8	83.9	5.17	33.1	34.7
D263	D	26	300	350	170	543	928	1.3	4.0	25.0	2.8	48.0	67.7	87.5	70.8	76.1	5.04	30.8	31.3
D311	D	31	100	450	170	658	960	1.0	0.0	23.0	2.0	56.1	75.3	88.4	78.4	84.4	5.52	34.3	35.7
D312	D	31	200	350	170	627	960	1.0	0.1	22.5	1.9	43.1	64.2	78.1	65.9	70.8	4.24	31.4	32.2
D381	D	38	100	350	170	668	992	0.9	10	22.0	5.0	35.1	52.6	62.0	54.1	55.6	3.82	30.4	31.4

* 主剤；セメント質量に対する添加率（B*%），助剤；セメント質量に対する0.001%添加率（B*0.001%）

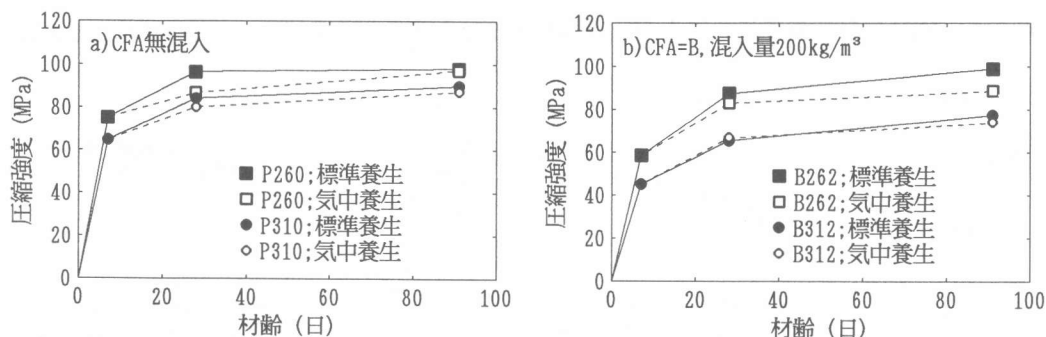


図-1 材齢と養生別の圧縮強度との関係

強度の向上が現れる気中養生の圧縮強度と標準養生の圧縮強度の差がなくなる傾向にある。

図-2 に結合材水比と標準養生の圧縮強度との関係を示す。CFAの種類はB種とし、a)は材齢28日を、b)は材齢91日を表す。各図中には、CFA混入量毎の単回帰分析結果も表記した。B/W値が高くなると、各材齢ともに強度は増加する。また、各B/W値において、a)より、CFA混入量が増加すると単位セメント量が減少するため、強度は低下するが、b)より、長期になるとCFAの混入効果が現れ、強度低下が緩和されている。

図-3 に W/B = 26% 条件における CFA 混入量と CFA 無混入値により除した圧縮強度比との関係を示す。a)は材齢28日を、b)は材齢91日を表す。強度比は、CFA混入量が200kg/m³以上の多大になると低下している。気中養生では、材齢が異なっても同一CFA混入量に対して、ほぼ同じ強度比を示しており、結合材部の水和が期待できない長期の気中養生では、CFAの強度寄与の効果は現れないことがわかる。しかしながら、標準養生では、長期養生での強度比が増大

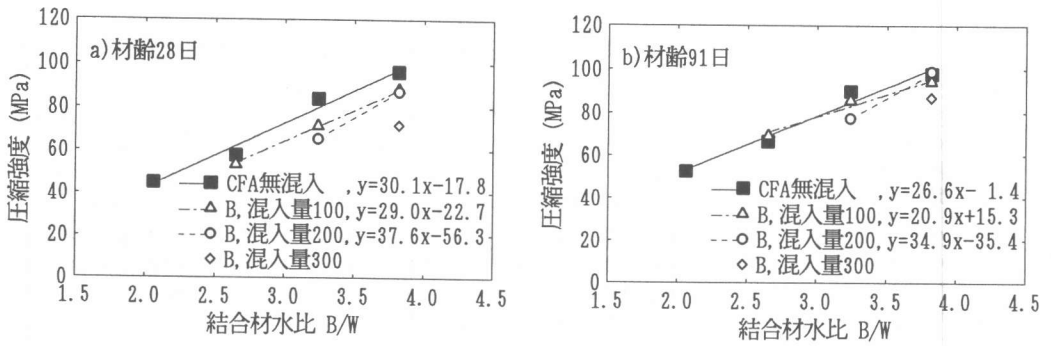


図-2 結合材水比と標準養生圧縮強度との関係

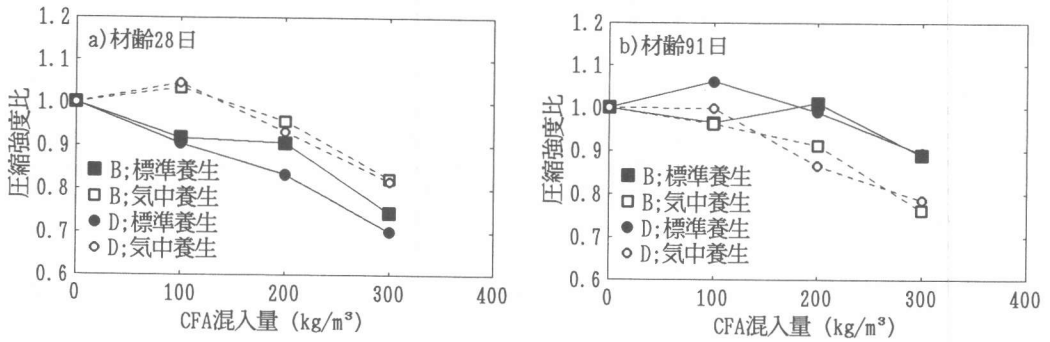


図-3 W/B = 26% 条件における CFA 混入量と CFA 無混入値により除した圧縮強度比との関係

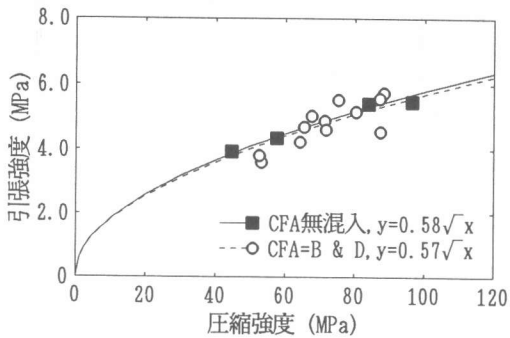


図-4 圧縮強度と引張強度の関係

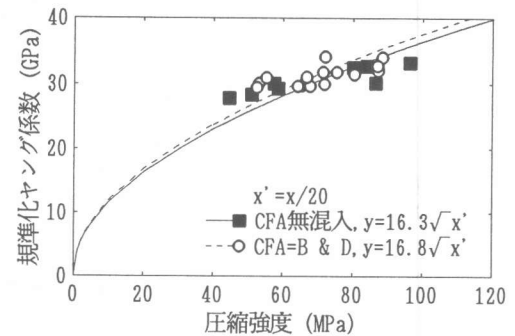


図-5 圧縮強度と規準化ヤング係数の関係

し、CFA の混入効果が見られる。一方、CFA の粉末度の違いによる影響はあまり明確ではない。

3.2 引張強度及びヤング係数

表-4 中に引張強度及び養生別のヤング係数試験結果を示す。また、図-4 に材齢 28 日の圧縮強度と引張強度との関係を示す。本図中には、圧縮強度の平方根を説明変数にした原点を通る単回帰分析結果も表記した。CFA を混入した場合の引張強度は、CFA 無混入時の回帰線上にほぼ重なり、圧縮強度に良く対応している。

図-5 に材齢 28 日の圧縮強度と単位容積質量により除した規準化ヤング係数との関係を示す。規準化ヤング係数とは、建築学会[7]の圧縮強度に対するヤング係数の式において、単位容積質量の 3/2 乗で除したものである。本図中には、原点を通る単回帰分析結果も表記した。CFA を

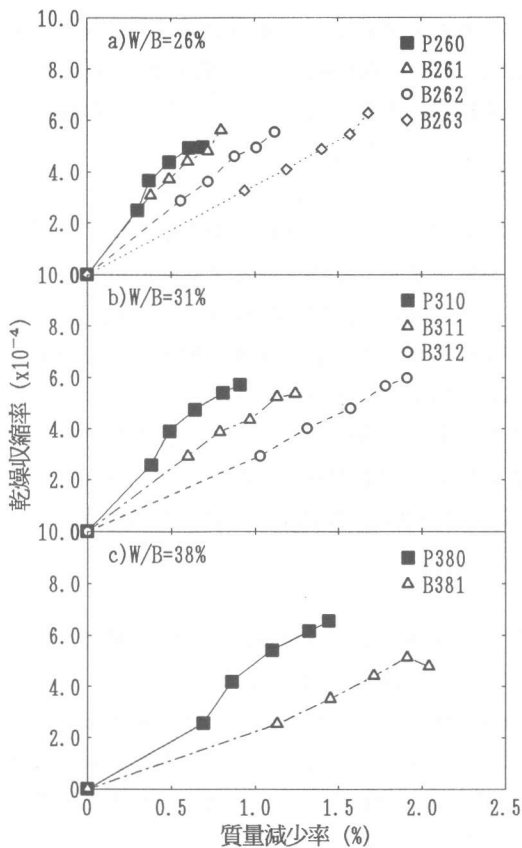


図-6 質量減少率と乾燥収縮率との関係

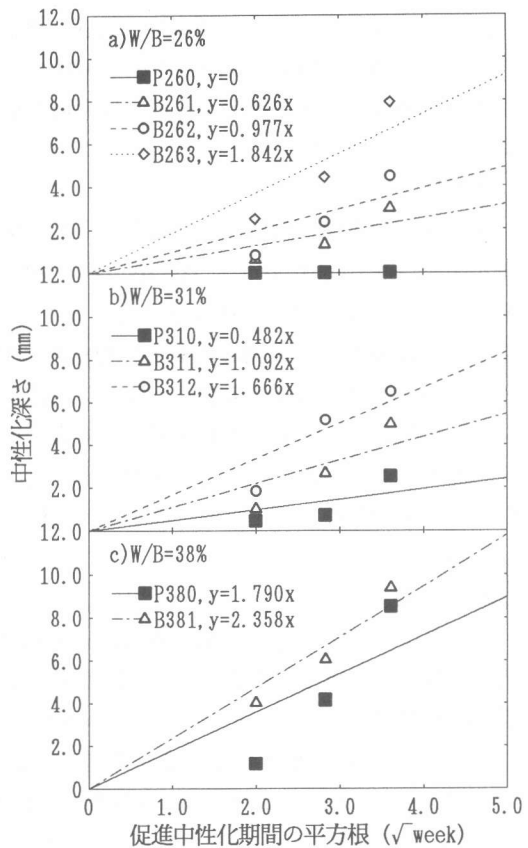


図-8 促進中性化期間の平方根と中性化深さとの関係

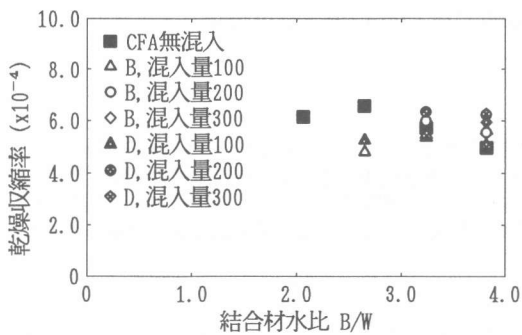


図-7 結合材水比と乾燥期間91日の乾燥収縮率との関係

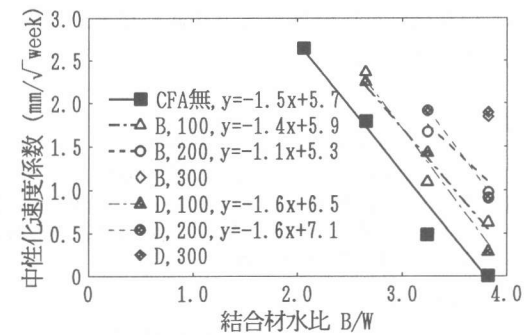


図-9 結合材水比と中性化速度係数との関係

混入した場合の規準化ヤング係数は、引張強度と同様にCFA無混入時の回帰線上に重なり、養生条件に関係なく圧縮強度に良く対応している。

3.3 乾燥収縮

図-6に質量減少率と乾燥収縮率との関係を、図-7に結合材水比と乾燥期間91日の乾燥収縮率との関係を示す。図-6のCFAの種類はB種とし、a)が $W/B = 26\%$ を、b)が $W/B = 31\%$ を、c)が $W/B = 38\%$ を表す。すべての W/B 条件の同一乾燥期間において比較した場合には、CFA

の混入量が増えると、質量減少率は大きくなる。高 W/B 条件では、CFA を混入した場合の乾燥収縮率は、無混入時よりも小さくなる傾向にあるが、 $W/B = 30\%$ 程度以下の低 W/B 条件下では、混入時と無混入時との差がなくなりほぼ同じ値となる。CFA の粉末度の違い及び CFA の混入量による違いは明確ではない。

3.4 促進中性化

図-8 に促進中性化期間の平方根と中性化深さとの関係を示す。CFA の種類は B 種で、a) が $W/B = 26\%$ を、b) が $W/B = 31\%$ を、c) が $W/B = 38\%$ を表す。原点を通る単回帰分析結果も表記した。中性化深さは、低 W/B になるほど小さくなり、CFA の混入量の増加に伴い増加する。これは、低 W/B では組織が緻密化し CO_2 の浸透が少なくなるが、CFA を混入すると単位セメント量の減少に伴う組織の粗雑化とポゾラン反応が起こり $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が消費されたためと思われる。

図-9 に結合材水比と中性化速度係数との関係を示す。本図中には、各 CFA 混入毎の単回帰分析結果も表示した。各 CFA 混入量において、低 W/B になるほど中性化速度は低下しているが、CFA 混入量が増加すると回帰式の傾きからわかるように中性化速度は徐々に早まる傾向にある。

4. 結 論

分級フライアッシュ (CFA) を使用した高強度コンクリートの養生別強度・乾燥収縮・中性化を実験的に検討した結果、本研究の範囲で以下のことが明らかとなった。

- 1) 圧縮強度は、 $W/B = 30\%$ 程度以下の条件下の材齢 28 日では、気中養生と標準養生との強度差は見られず、CFA の混入量が増加すると強度は低下する。しかし、長期間標準養生を行うと CFA の混入効果が現れ、強度発現率が無混入の場合より向上し、強度低下が緩和される。
- 2) 引張強度及びヤング係数は、CFA を混入しても圧縮強度に対応した値を示す。
- 3) 乾燥収縮率は、CFA を混入すると高 W/B 条件では小さくなる。しかしながら、低 W/B 条件では CFA 無混入とあまり差がなく、CFA の粉末度及び混入量による違いは明確ではない。
- 4) 中性化深さは低 W/B ほど小さくなるが、同一 W/B では CFA の混入量の増加とともに中性化速度が早くなる。

謝 辞

本研究は、日本フライアッシュ協会の委託により、日本建築学会に設けられたフライアッシュ調査研究小委員会の一環として行ったものである。本研究の実施にあたりまして、建設省建築研究所第 2 研究部無機材料研究室 主任研究員の鹿毛忠継氏、同 部外研究員の大下昭三氏、藤田克巳氏、宇都宮大学大学院 手島則夫氏、宇都宮大学 卒論生 新井 暢氏、押谷式子氏、大野吉昭氏、梶原伸悟氏、高橋祐一氏、大久保敏彦氏に御協力を賜りました。ここに記して厚く謝意を表します。

参考文献

- [1] 大賀宏行：フライアッシュや石炭灰を用いたコンクリート、コンクリート工学, Vol. 34, No. 6, pp. 69-74, 1996. 6
- [2] 畑元浩樹, 平野利光：海外炭専焼発電所から発生する石炭灰を用いたコンクリートの性状について、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, pp. 413-418, 1994. 6
- [3] ACI 1994 International Conference on HIGH-PERFORMANCE CONCRETE : November 15-18, 1994, Singapore
- [4] 石井光裕, 浮田和明, 東 邦和, 山本和夫：分級フライアッシュを混入した高強度コンクリートの諸特性、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, pp. 263-268, 1991. 6
- [5] 丸山武彦, 伊藤幸雄, 土田伸治, 金井孝夫：シリカフェームと分級フライアッシュを用いた超高強度コンクリートの研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp. 285-290, 1992. 6
- [6] 船本憲治, 村上英治, 黒羽健嗣, 並木 哲：フライアッシュが高強度コンクリートの流動性および強度発現に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 1, pp. 357-362, 1996. 7
- [7] 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 丸善, 1991