

論文 海外炭灰を用いた高流動コンクリートの硬化性状について

永松武則*1・平野利光*2・川畑清一郎*3

要旨：フライアッシュを結合材として約50～76%混入した高流動コンクリートの圧縮強度、耐久性について検証した。圧縮強度は、フライアッシュの混入率の増加に伴って低下するが、従来の普通コンクリートの配合設計と同様にセメント水比との関係によって得ることができる。なお、材齢28日から材齢1年にかけての圧縮強度の伸びが約2倍となり、長期材齢での強度増加が大きく期待できる。また、圧縮強度や中性化、塩分浸透性などの耐久性面が十分確保できることを考慮すると、目安となるフライアッシュの混入率は70%程度である。

キーワード：高流動コンクリート、フライアッシュ、圧縮強度、中性化、塩分浸透

1. はじめに

高流動コンクリートの硬化性状が普通コンクリートに比べて同等以上の品質を有していることは、これまでに数多く報告されている。しかしながら、この硬化性状の程度は使用する混和材の種類や混入量などの違いによってそれぞれ異なることも判っている。高流動コンクリートを普及させるためにはこれらの関連性を明らかにしておかねばならない。

本研究では、混和材に多量の海外炭分級灰（以下、フライアッシュという）を使用した高流動コンクリートの圧縮強度と促進中性化、塩分浸透などの耐久性を確認したものである。また、高流動コンクリートで製作した消波ブロックを飛沫帯に暴露して1年が経過したので、圧縮強度などの経年性状についても述べることにする。

表-1 使用材料

材 料	種 類 及 び 品 質
セメント	普通ポルトランドセメント；比重：3.15, 比表面積：3250cm ² /g
フライアッシュ	海外炭分級灰；比重：2.31, 比表面積3680cm ² /g, 密かさ比重1.30
細骨材	海砂；比重：2.55, FM：2.49
粗骨材	葛蒲産玄武岩碎石, 最大寸法20mm, 比重2.78, 実積率69.5%
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体
AE剤	変形アルキルカルボン酸化合物系陰イオン

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験に使用したセメント、フライアッシュ、骨材、混和剤の種類およびその品質を表-1に示す。

セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。フライアッシュは海外炭分級灰とし、使用した炭種はプラトー産（アメリカ）とドレイトン産（オーストラリア）を55：45に混合したものである。粗骨材は葛蒲産の玄武岩碎石（最大寸法20mm）、細骨材は博多港陸揚げの海砂を使用した。

表-2 配合区分および条件

配合区分	配 合 条 件		
	単位セメント量(kg/m ³) (水セメント比(%))	スランブフロー(cm) (スランブ(cm))	空気量 (%)
高流動コンクリート	125	60±2	5±1
	150		
	200		
	250		
普通コンクリート	(45)	(12±1)	5±1

*1 西日本技術開発㈱ 土木試験室 材料試験第2課 課長

*2 九州電力㈱ 総合研究所 土木研究室 主査

*3 九州電力㈱ 総合研究所 土木研究室

2. 2 試験項目および方法

(1) 配合設定の手順

高流動コンクリートの配合は、低強度コンクリートの現場ニーズを考慮し単位セメント量を125, 150, 200, 250kg/m³の4配合とした。なお、比較用として水セメント比45%の普通コンクリート1配合についても行った。それらの配合区分および条件を表-2に示す。

高流動コンクリートの配合設定の手順としては、まずフライアッシュの密かさ比重から単位水量を定め¹⁾、次に所定の流動性や材料分離抵抗性が得られるよう水粉体容積比、高性能AE減水剤量を設定した。なお、普通コンクリート配合では、表-2に示した配合条件で最適細骨材率の検討を行った後、所定のスランプが得られるように単位水量を定めた。

(2) コンクリート試験項目および方法

表-3 試験項目および方法

フレッシュコンクリートと硬化コンクリートの試験項目および方法を、表-3に示す。ただし、練混ぜには、二軸強制ミキサーを使用し、練混ぜ時間は全材料投入後3分間とした。

試験項目	方 法	
フレッシュ性 状	スランプフロー	土木学会規準「コンクリートのスランプフロー試験方法(案)」
	Vロート流下時間	『ハイパフォーマンスコンクリート』 ²⁾ (付録3)「Vロート試験方法(案)」
	スランプ	JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」
	空気量	JIS A 1128「まだ固まらないコンクリートの空気量の圧力による試験方法」
硬化性 状	圧縮強度	JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」標準水中養生 JIS A 1107「コンクリートからのコア及びはりの切り取り方法並びに強度試験方法」
	促進中性化	材齢28日まで標準水中養生、以後材齢42日まで風乾養生 二酸化炭素濃度5%、温度40℃、湿度80%
	凍結融解	土木学会規準「コンクリートの凍結融解試験方法(案)」
	塩分浸透試験	材齢28日まで標準水中養生、以後3日風乾(50℃)、4日海水浸漬(20℃)
	塩分含有量	日本コンクリート工学協会-SC5「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」

3. 試験結果及び考察

3. 1 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-4に示す。高流動コンクリートの単位水量については、フライアッシュの密かさ比重(1.30)を基に160kg/m³¹⁾とした。

最適な流動性や材料分離抵抗性が確保できる時のフライアッシュの混入率(F/(C+F))は、単位セメント量が125, 150, 200, 250kg/m³の場合それぞれ76.2, 71.9, 61.2, 50.2%となり、C125配合ではフライアッシュ使用量が400kg/m³にも達している。高性能AE減水剤の使用量については、概ねフライアッシュの増加に伴い減少する傾向にある。

単位セメント量と単位粉体容積(Pd)の関係を図-1に示す。単位粉体容積は単位セメント量が減少するにつれ多く必要とするが、210ℓ/m³程度が上限となっており、これ以上増

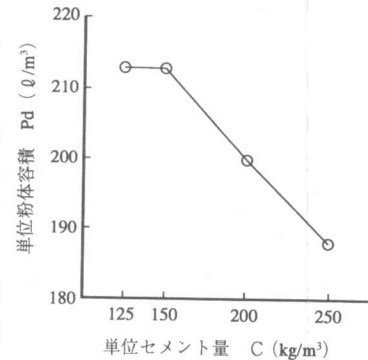


図-1 単位セメント量と粉体容積量の関係

表-4 コンクリートの配合

配合番号	水粉体容積比 W/Pd(%) 粉体容積 Pd (ℓ)	水セメント比 W/C 水粉体比 W/(C+F) (%)	細骨材率 S/a (%)	フライアッシュ混入率 F/(C+F) (%)	単 位 量 (kg/m ³)					高性能AE減水剤 (C+F)×% 単 位 量 (kg/m ³)	AE剤 (C+F)×%	フレッシュ性状		
					水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G			スランプフロー [スランプ] (cm)	空気量 (%)	Vロート流下時間 (秒)
C125	75 [213]	128 [30.5]	42.8	76.2	160	125	400	630	917	1.75 [9.19]	0.023	61.0	5.0	11.1
C150	75 [213]	107 [30.0]	42.8	71.9	160	150	383	630	917	1.70 [9.06]	0.018	61.0	4.9	10.2
C200	80 [200]	80 [31.0]	44.1	61.2	160	200	316	663	917	1.80 [9.29]	0.018	59.5	4.5	9.8
C250	85 [188]	64 [31.4]	45.2	50.2	160	250	252	694	917	1.90 [9.54]	0.020	60.0	5.6	9.6
PC	- [126]	45 [-]	44.0	0	179	398	0	724	1004	(0.25) [0.99]	0.005	[12.5]	5.6	-

加すると粘性が強くなり、所定の流動性を確保できない。なお、普通コンクリートの配合は、水セメント比45%の条件で単位水量179kg/m³、単位セメント量398kg/m³、細骨材率44%となった。

3. 2 硬化コンクリート

フライアッシュを多量に混入した高流動コンクリートの圧縮強度、促進中性化、凍結融解および促進塩分浸透試験の結果を表-5に示す。

表-5 硬化コンクリートの性状

配合番号	圧縮強度(N/mm ²)				促進中性化(cm)			耐久性指数DF	塩化物イオン含有量(%)					
	材齢(日)				促進材齢				全塩分			可溶性塩分		
	3	7	28	91	30日	60日	90日		0~10mm	20~30mm	40~50mm	0~10mm	20~30mm	40~50mm
C125	5.7	9.3	15.1	26.4	3.6	4.7	5.0	87.1	0.56	0.14	0.07	0.51	0.11	0.05
C150	8.3	12.7	20.4	33.7	1.9	2.5	3.0	88.5	0.58	0.12	0.04	0.51	0.09	0.02
C200	12.5	19.1	29.5	46.1	1.1	1.5	1.6	93.0	0.65	0.05	0.04	0.59	0.04	0.03
C250	16.8	24.8	37.9	55.4	0.5	0.8	1.0	95.1	0.64	0.05	0.04	0.57	0.03	0.03
PC	19.5	27.7	37.9	43.6	0.4	0.7	1.0	98.3	0.65	0.21	0.10	0.54	0.17	0.08

(1) 圧縮強度

フライアッシュの混入率と圧縮強度の関係を図-2に示す。圧縮強度は、いずれの材齢においてもフライアッシュの混入率が増加するに伴って低下する。材齢間の伸び率でみると、フライアッシュ混入率の少ないC250配合は $\sigma_7/\sigma_3=1.48$ 、 $\sigma_{28}/\sigma_7=1.53$ 、 $\sigma_{91}/\sigma_{28}=1.46$ であるが、混入率が増せばその割合は段々大きくなり、最も多いC125配合ではそれぞれ1.63、1.62、1.75となっている。なお、C250配合程度のものが、今回比較用で用いた普通コンクリートと同水準の圧縮強度を示している。

土木コンクリート構造物で要求される配合強度は、変動係数を20%程度とすれば、設計基準強度21N/mm²の場合が25N/mm²程度、24N/mm²の場合が29N/mm²程度となる。今回の試験結果をみると、これらに対応する圧縮強度を確保する場合、フライアッシュ混入率はそれぞれ約66%、61%がほぼ上限と考えられる。ただし強度をそれほど必要としない構造物や長期材齢で対応可能なコンクリートでは70%前後の混入が可能である。

図-3は、セメント水比と圧縮強度の関係を示したものである。高流動コンクリートの配合は、いずれの材齢においてもセメント水比と圧縮強度との間には図中に示す一次回帰式が得られ、従来の普通コンクリートの配合設計と同様、セメント水比と圧縮強度の関係

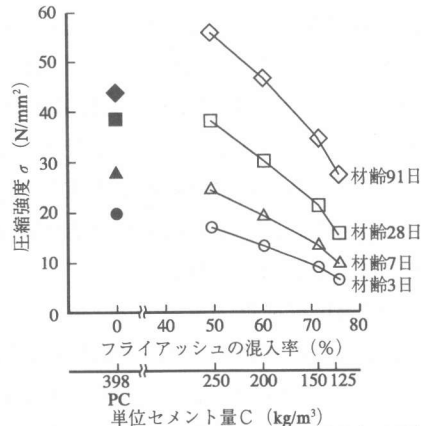


図-2 フライアッシュの混入率と圧縮強度の関係

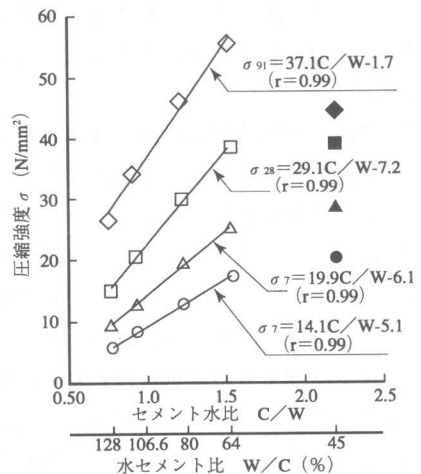


図-3 セメント水比と圧縮強度の関係

を適用することは実用上差し支えない。

(2) 促進中性化

二酸化炭素濃度5%、温度40℃、湿度80%の条件下での促進中性化試験結果を図-4に示す。この図は促進材齢90日におけるフライアッシュの混入率と平均中性化深さの関係を表したもので、中性化はフライアッシュ混入率が50%を超えると急激に進行することが判った。しかしながら、一般環境における土木コンクリート構造物の最小かぶり3cmまで中性化の進行を許容できるとすれば、フライアッシュ混入は70%までが一つの目安となる。なお、促進材齢90日はP C配合の結果から岸谷式を用いて推定すると約60年が経過したことに相当している。

(3) 凍結融解

凍結融解試験におけるサイクル数と相対動弾性係数の関係を図-5に示す。フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートは、凍結融解作用を300サイクル経過しても相対動弾性係数が73.8~93.0%の範囲にある。フライアッシュの混入率が多いものほど相対動弾性係数は小さくなっているものの、いずれも十分な凍結融解抵抗性を有することが認められた。

(4) 促進塩分浸透試験

促進塩分浸透試験は、材齢28日間の標準水中養生後2週間の風乾養生を行った後、室温20℃の海水に4日間浸漬と3日間の風乾(50℃)を20回繰り返した。試験終了後供試体表面から0~10, 20~30, 40~50mm深さで試料を採取して塩分量を測定した。

図-6は、供試体表面からの深さと可溶性塩化物イオン量との関係を示したものである。フライアッシュを多量に混入した高流動コンクリートの塩分浸透量は、普通コンクリートとほぼ同水準であり、0~10, 20~30, 40~50mmでそれぞれ0.51~0.59, 0.03~0.11, 0.02~0.05%となり、表面部分が大きく内部までの浸透はほとんどみられない。これまで、フライアッシュを混入するとコンクリートの塩分浸透性は改善されるといわれており、本試験結果からもこのことは検証された。

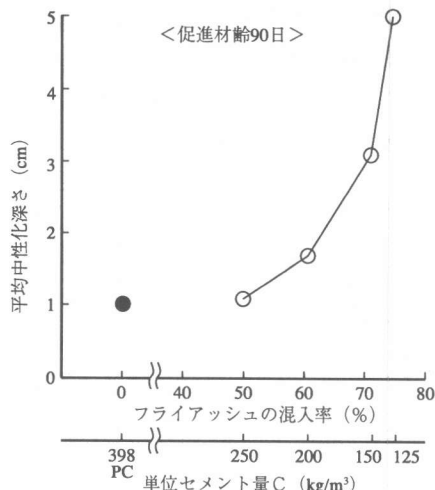


図-4 フライアッシュの混入率と平均中性化深さの関係

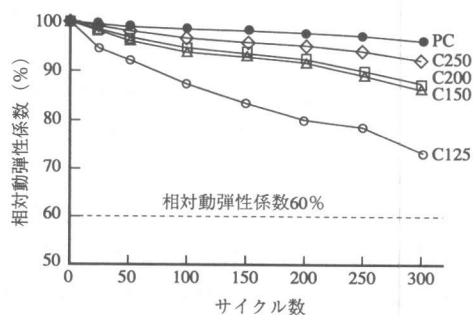


図-5 サイクル数と相対動弾性係数の関係

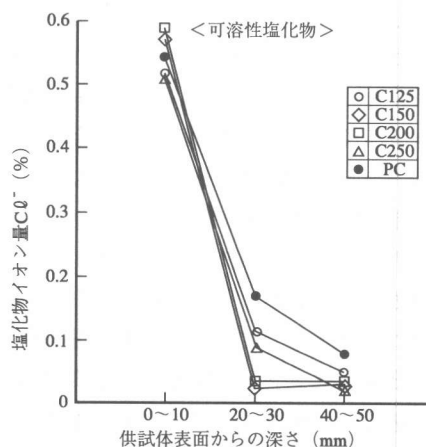


図-6 供試体表面からの深さと塩化物イオン量の関係

4. 暴露試験

4. 1 コンクリートの配合

消波ブロックの実施工時の制約条件は、脱枠強度が材齢3日で8 N/mm²、材齢28日では21 N/mm²である。このため、高流動コンクリートの配合を設計するにあたっては、打設に先立ち予備配合試験を行い、これらを確認した。この結果、水セメント比の上限は85%となり、これに水セメント比65%と75%を加えた3水準の配合で暴露試験を行った。これらの配合を表-6に示す。なお比較用の消波ブロックとして通常使われている配合のものも追加している。

使用したセメントは、いずれも高炉セメントB種とし、各配合におけるフライアッシュの混入率 (F/(C+F))は水セメント比65, 75, 85%でそれぞれ54.7, 60.2, 64.4%である。

消波ブロックは打設後3日で脱型し所定の材齢に達するまで気中養生を施した後、干満の影響を受ける位置に設置してすでに1年が経過している。表-6には圧縮強度の経時変化と塩分浸透量を表している。

表-6 暴露試験配合

配合 番号	粗骨材 寸法 (mm)	水粉体 容積比 W/Pd (%) (粉体容積 Pd (ℓ))	水セメント 比 W/C (水粉体比 W/(C+F) (%))	細骨材 率 S/a (%)	フライアッシュ 混入率 F/(C+F) (%)	単 位 量 (kg/m ³)					スラン プフロー [スタン プ] (cm)	圧縮強度 σ_c (N/mm ²)						塩化物イオン量Cℓ ⁻ (%)		
						水 W	セメント C	フライ アッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G		高性能 A E 減水剤	材 齢 (日, 年)						全塩分	可溶性塩分
													3日	7日	28日	91日	1年	1年(コア)		
T65	40	75	65 [29.5]	45	54.7	160	246	297	686	864	7.87	63.9	17.9	22.4	39.1	52.0	68.7	67.2	0.185	0.181
T75			75 [29.9]		60.2	160	213	322	686	864	7.22	63.2	13.3	16.5	31.6	44.9	63.3	61.4	0.241	0.235
T85			85 [30.3]		64.4	160	188	340	686	864	6.34	58.0	11.6	14.2	25.5	37.9	56.9	55.7	0.236	0.233
BB58	40	-	58.5 [-]	42.9	0	161	275	-	792	1154	0.79	[12.7]	10.1	14.7	26.2	34.7	36.2	34.7	0.526	0.431

4. 2 圧縮強度

高流動コンクリートの圧縮強度は、材齢3日で11.6~17.9 N/mm²、材齢28日で25.5~39.1 N/mm²となり、制約条件である $\sigma_3=8$ N/mm²と $\sigma_{28}=21$ N/mm²を満足している。

図-7は、材齢と圧縮強度の関係を示したものである。この図より、フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートの圧縮強度は、通常使用されているコンクリートに比べて長期強度の伸びが著しいことが判る。例えば、高流動コンクリートの圧縮強度は、水セメント比65, 75, 85%でそれぞれ材齢91日が52.0, 44.9, 37.9 N/mm²、材齢1年が68.7, 63.3, 56.9 N/mm²となり、材齢28日の強度に比べて材齢91日で約1.3~1.5倍、材齢1年で約1.8~2.2倍の伸びが認められ、長期材齢での強度増加が大きく期待できる。

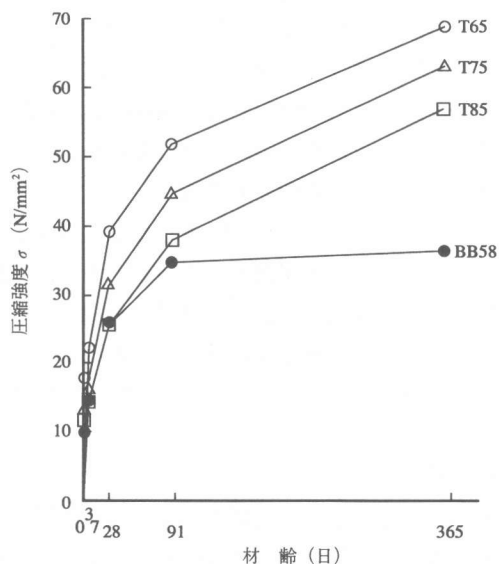


図-7 材齢と圧縮強度の関係

4. 3 塩分浸透性

現地暴露供試体から、コアを採取して塩化物イオン量を測定し、試験体表面からの塩分浸透量を把握した。試験体表面からの深さと可溶性塩化物イオンでの関係を図-8に示す。

塩分浸透量は、いずれも試験体表面からの深さ0~20mm程度までであり、50mm以降の浸透は認められなかった。0~20mmまでの可溶性塩化物イオン量は、0.18~0.23%であり、通常使用されているBB58配合の塩化物イオン量(0.43%)の約1/2程度となった。フライアッシュを多量に使用しても高流動コンクリートの塩分浸透に対する抵抗性は、通常のコンクリートに比べて優れているものと判断できる。

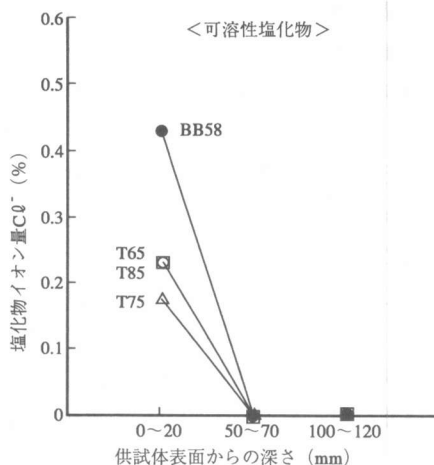


図-8 供試体表面からの深さと塩化物イオン量の関係

5. まとめ

フライアッシュを結合材として50~76%使用した高流動コンクリートの硬化性状について検討した。その結果をまとめると以下ようになる。

- ① 圧縮強度はフライアッシュ混入率の増加に伴って低下する。材齢間の伸び率では、フライアッシュ混入率が増せばその割合は大きくなる。
- ② 土木構造物で要求される配合強度25N/mm²や29N/mm²程度を確保する場合、フライアッシュの混入率は約66%, 61%がほぼ上限となる。ただし、強度をそれほど必要としない構造物や長期材齢で対応できるコンクリートではフライアッシュを70%程度混入できる。
- ③ フライアッシュを用いた高流動コンクリートは、従来の普通コンクリートの配合設計と同様にセメント水比と圧縮強度の関係が適用できる。
- ④ 中性化深さはフライアッシュの混入率(F/(C+F))が50%を超えると急激に進行するが、約60年で3cm程度の中性化深さを許容範囲とすれば混入率70%までが目安となる。
- ⑤ フライアッシュの混入率が多いものほど相対動弾性係数は小さくなるものの、混入率76%でも十分な凍結融解抵抗性を有する。
- ⑥ フライアッシュを多量に混入した高流動コンクリートの塩分浸透量は、水セメント比45%の普通コンクリートとほぼ同水準である。また、暴露材齢1年での塩分浸透量は、通常使用されている消波ブロック配合の約1/2程度となった。
- ⑦ フライアッシュを多量に混入した高流動コンクリートの圧縮強度は、材齢28日から材齢1年で約2.0倍の伸びが認められ、長期材齢での強度増加が大きく期待できる。

<参考文献>

- 1) 平野, 川畑, 永松: 品質の異なる海外炭灰を用いた高流動コンクリートの配合について, 土木学会, 高流動コンクリートシンポジウム論文報告集, PP55~58, 1996. 3
- 2) 岡村, 前川, 小澤: ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, PP191~192, 1993. 3