

報告 原子力発電所における高流動コンクリートに関する基礎的検

大池 武*1・櫻井 和夫*2・牧野 浩保*2・中根 淳*1

要旨：中庸熱ポルトランドセメントを主材料とした高流動コンクリートの原子力発電の建屋改造工事への実用化を目的とし、室内試験による適用性の検討を加えた。実用に必要な性能として充填性、経時変化、基本的な硬化後の物性を調査した。この結果次のことがわかった。①. 充填性の確保は、粉体の構成材料に応じた高性能AE減水の添加量によって可能である。②. 経時変化は、混和材としてフライアッシュを用いることが有効である。③. 混和材の活性度によって高流動コンクリートの強度発現が異なる。④. 乾燥収縮は、比較の対象とした従来調合のものに比べ同等かやや小さい。

キーワード：原子力発電所、中庸熱ポルトランドセメント、高流動コンクリート

1. はじめに

原子力発電所における建屋改造工事において、高流動コンクリートは、復旧コンクリートでの合理化・省力化と作業環境の改善が図れ、放射線管理区域内での作業員および持ち込ブレーター等の資機材が減少でき、放射線管理が容易になることが期待できる。

本研究は、最近の原子力発電所建設工事で実績が多い中庸熱ポルトランドセメントを主とした高流動コンクリートの建屋改造工事への実用化を目的とし、室内試験による適用性の行なっている。

2. 実験概要

使用材料の組合わせは、表-1に示す通り、セメント種類、混和材料、増粘剤の有無お材料種類を組合わせた。高流動コンクリートは粉体系のものを中心とし一部に増粘剤系のものた。高性能AE減水剤は、

材料の組合わせによるフレッシュ時の性状を比較検討するため1種類とした。

高流動コンクリートの目標性能は、練り上がり時でスランプフローを 650 ± 50 mm、空気量を 4.5 ± 1 %とした。このため、材料の組合わせに応じて高性能AE減水剤の添加量を変化させるとともに、単位水量、粉体量も一部で変化させた。

表-1 材料の組合わせ

調合 ケース	セメント	粗骨材	混和材				混和剤	
			高炉 スラグ 微粉末	フライ アッシュ	石灰 石 石粉	膨張 材	高性能 AE 減水剤	増粘剤
1	中庸熱	常用 骨材	(従来調合コンクリート)				●	
2			●				●	
3				●			●	
4					●		●	
5			●			●	●	
6							●	
7							●	●
8			低熱		●			
9							●	
10	中庸熱	高比重			●			
11	低熱	骨材	●					●

*1 大林組 技術研究所

*2 関西電力 土木建築室

使用材料は一覧にして表-2に示した。また、試験項目と試験方法は、一覧にして表-3に示した。実用化に必要な性能として、充填性、経時変化、基本的な硬化後の物性ならびに一体性を調査した。

3. コンクリートの調査

粉体系高流動コンクリートの粉体量は500 kg/m³とし、混和材の内割り量は重量比で20%とした。増粘剤系のもは剤の増粘効果を期待して450kg/m³とした。さらに、膨張材の使用量は30kg/m³、収縮低減剤の使用量は70/m³、増粘剤の使用量は1 kg/m³とした。単位水量は160kg/m³を基本としたが、高比重骨材のもは160kg/m³では分離傾向がみられることから150 kg/m³とした。これによって、常用骨材を用いた粉体系のもは水粉比が32%、増粘剤系のもは35.5%となり、高比重骨材を用いたもはの水粉比は30%とった。

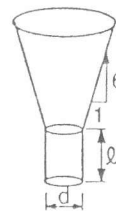
また、粗骨材量は分離抵抗性、間隙通過性を考慮して、ここでは、

表-2 使用材料

種類	材料名	備考
セメント	中庸熱ポルトランドセメント 低熱ポルトランドセメント	比重 3.22 比表面積 3110cm ² /g 比重 3.22 比表面積 3400cm ² /g (ビーライト系)
骨材	常用骨材 碎石 高比重骨材 磁鉄鋼 細骨材 粗砂 細砂	滋賀県今津産 比重 2.88、粗粒率 6.89、Gmax25mm 韓国産 比重 4.67、粗粒率 6.82、Gmax20mm 京都府舞鶴市産 比重 2.71、粗粒率 3.22 福井県三国町産 比重 2.55、粗粒率 1.88
混和材	高炉スラグ微粉末 フライアッシュ 石灰石粉 膨張材	比重 2.91、比表面積 6420cm ² /g 比重 2.29、比表面積 4070cm ² /g 比重 2.70、比表面積 3860cm ² /g 比重 2.93、比表面積 2280cm ² /g
混和剤	高性能A E減水剤 収縮低減剤 増粘剤	ポリカルボン酸エーテル系、架橋ポリマー複合体 低級アルコールアルキレンオキッド付加物 多糖類天然高分子

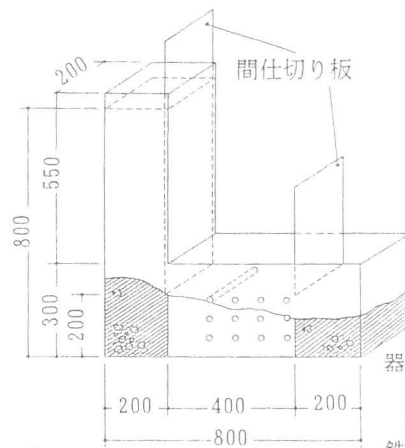
表-3 試験項目と試験方法

項目	試験項目	試験方法
充填性	流動性	スランブフロー (スランブ試験時の広がり) フロー速度 フロー40cm、50cm、60cmまでの時間、 およびフロー停止までの時間 ロート流下試験 図-1に示す器具を使い、流下時間の測定と閉塞の有無。 空気量 JIS A 1128
	間隙充填性・ 材料分離抵抗性	有筋L型フロー試験 図-2に示す器具を使い、鉄筋間の充填性の観察、流動時間、流動先充填高さ、流動元と充填高さの差から流動勾配の算出および流動元と流動先のコンクリート中の粗骨材量の割合から分離抵抗性の評価。
経時変化	フレッシュ性状の経時変化	低速(4rpm)傾胴型ミキサを用い、練り上がり後90分までの経時変化を30分毎に測定。測定項目は、スランブフロー、ロート流下時間、空気量。
基本物性	圧縮強度 弾性係数 乾燥比重 乾燥収縮	JIS A 1108。試験材令は3日、5日、7日、14日、28日および91日。養生は標準水中養生。 コンプレッソメーター法。試験材令は28日。 JASS 5N T-601 JIS A 1129 測定期間は材令6ヶ月間。
一体性	鉄筋との付着	J C I試験方法案による付着強度試験。試験体の製作時のコンクリート打設方法は横打ち、試験材令は28日。試験は調査No1、No2とNo8とする。



d(mm)	l(mm)	V(ℓ)
75	150	10

図-1 ロート流下試験器具



器具の材質
フレーム：鋼製
側面部：アクリル板
鉄筋 種類：D13
間隔：50mm

図-2 有筋L型フロー試験器具

310ℓ/m³ と固定した。

高性能AE減水剤は、目標とするスランプフローが得られるように調合種類毎に予備試験練りを行ない定めた。この調合を表-4に示した。表から、調合により高性能AE減水剤の添加量が異なることがわかる。最も少ない添加量であるのは混和材にフライアッシュを用いたものであり、粉体量の1.7%の添加量である。また、最も添加量が多く必要としたものは増粘剤を用いたものであり2.3%となっている。単位水量を150kg/m³とした高比重骨材のものの添加量は2.3%程度になっている。

表-4 コンクリートの調合

調合 No	W/C (%)	W/B (%)	S/a (%)	重量 (kg/m ³)			高性能AE減水剤 (C*) (%)
				水	*1セメント	*1混和材	
1	50.0	50.0	44.8	164	328	...	1.00
2	40.0	32.0	51.3	160	400	100	1.85
3	40.0	32.0	50.6	160	400	100	1.70
4	40.0	32.0	51.1	160	400	100	1.80
5	43.2	32.0	52.0	160	370	100+30	2.10
6	32.0	32.0	51.5	160	500	...	2.05
7	35.5	35.5	52.7	160	450	...	2.30
8	40.0	32.0	51.3	160	400	100	1.90
9	32.0	32.0	51.5	160	500	...	2.05
10	37.5	30.0	56.7	150	400	100	2.30
11	37.5	30.0	56.7	150	400	100	2.25

注) *1: 材料種類は表-1参照。

4. フレッシュコンクリート

有筋L型フロー試験に用いたコンクリートのフレッシュ性状と試験結果を一覧にして図-3に示した。

図から、スランプフローは、目標とした650 ± 50mmにすることができた。フレッシュ性状のうち、スランプフローとフロー速度との間には相対的な傾向が認められた。しかし、スランプフローとロート流下時間、コンクリート先端部の到達時間および流動勾配の間には調合による明確な差がなかった。

一方、高流動コンクリートの目視による鉄筋間通過性、充填性は、常用骨材を用いたものは良好であった。しかし、高比重骨材のものはコンクリートの先端部が到達後、モルタル分の多いものが鉄筋間を通過し、流動している様子が見られた。これは、図-3に示す流動元と流動先のコンクリート中の粗骨材量の差にも顕著に表われている。

スランプフローの経時変化を図-4に示す。

図から、粗骨材に常用骨材を用いた場合、今回

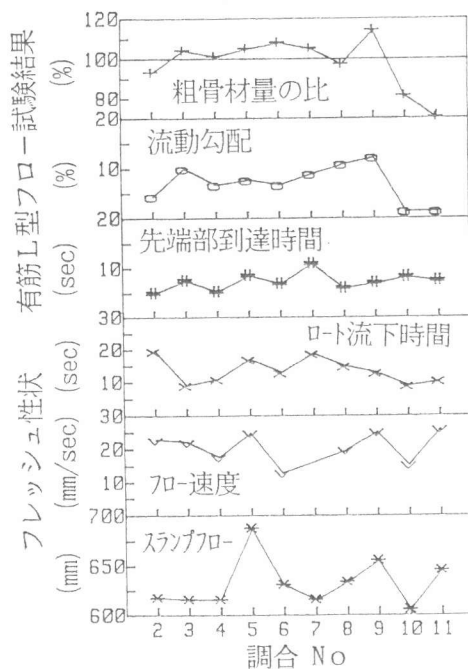


図-3 有筋L型フロー試験結果

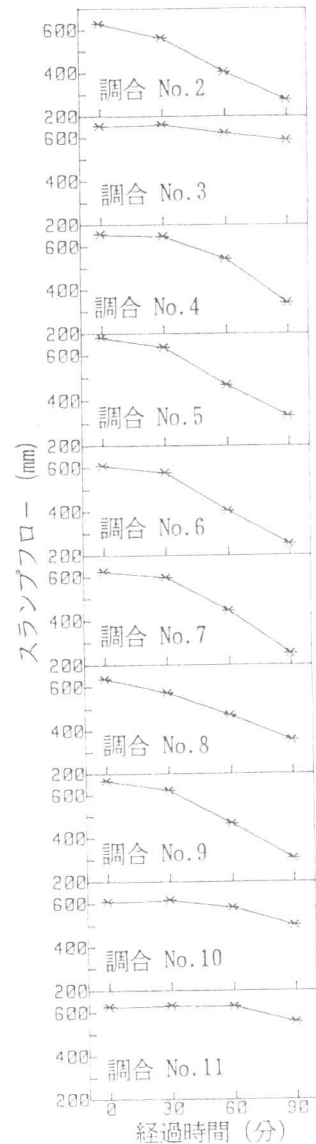


図-4 経時変化試験結果

用いた調合の組合わせでは、混和材としてフライアッシュを用いたものがスランプフローロスが最も少なかった。他のものは、増粘剤を用いたものも含めて経時によるスランプフローロスが見られた。これは、フライアッシュの化学成分のうちアルミナ分による初期の凝結遅延が主な原因であると考えられる。また、調合No.3以外のものには経時の流動性の維持に問題があり、今後、高性能AE減水剤のタイプを変更するなどし、改善の検討が必要である。一方、高比重骨材を用いたものは経時に伴い材料分離傾向が見られ、スランプフローの先端部にはモルタルのみが流動し、スランプフローが大きくなったため、見掛け上フローロスが小さい結果となった。

5. 硬化コンクリート

圧縮強度、静弾性係数、乾燥収縮ならびに乾燥比重の試験結果を表-5に一覧にして示した。

5.1 圧縮強度

図-5には、調合No.1、No.2、No.3、No.4およびNo.6の強度発現性状を示した。図から、従来調合のコンクリートに比べ高流動コンクリートは水粉体比が小さくなることから、当然、圧縮強度も大きくなっている。高流動コンクリートのうち、中庸熱ポルトランドセメント（以後、中庸熱セメント）単味のもの（No.6）と同等の強度発現を示したものは混和材として高炉スラグ微粉末を用いたもの（No.2）である。フライアッシュを用いたもの（No.3）は、初期の強度発現は遅れるものの長期的な強度の伸が大きい

なっている。石灰石粉を用いたもの（No.4）は初期の強度発現は調合No.2、6と遜色はないが長期的な強度の伸びは見られないことなどがわかる。これより、これらの混和材が強度発現への寄与の割合は異なるものの、高流動コンクリート用材料として活用することができると考える。

図-6には、調合No.2、No.6、No.8およびNo.9の強度発現性状を示した。図から、ピ

表-5 硬化コンクリートの試験結果

調合No	圧縮強度 (kgf/cm ²)						静弾性係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)	乾燥収縮 材令 6ヶ月 (μ)	乾燥比重 (kg/m ³)
	材令								
	3日	5日	7日	14日	28日	91日	28日		
1	113	174	201	309	424	539	3.37	764	2,331
2	312	383	440	600	770	931	3.76	644	2,442
3	195	282	309	462	592	798	3.45	657	2,352
4	263	367	427	538	643	782	3.65	797	2,357
5	215	335	407	528	738	935	3.83	376	2,436
6	278	407	460	597	767	912	3.80	649	2,389
7	281	379	435	501	670	812	3.53	766	2,364
8	133	190	213	300	432	726	3.02	578	2,309
9	208	311	326	511	717	978	3.76	604	2,390
10	244	313	355	549	699	837	3.96	627	3,112
11	143	167	207	304	439	707	3.03	437	2,945

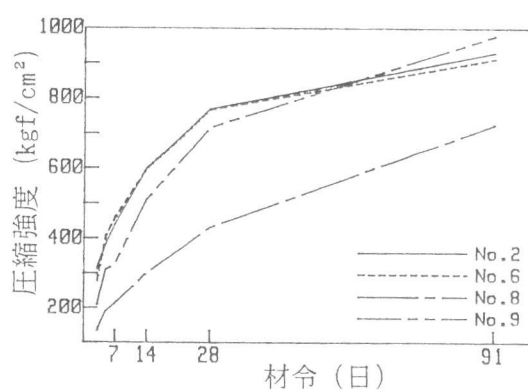
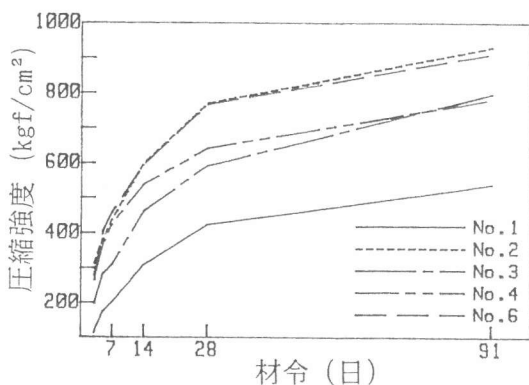


図-5 強度発現性状 (調合No.1, 2, 3, 4, 6)

図-6 強度発現性状 (調合No.2, 6, 8, 9)

ーライト系低熱ポルトランドセメント（以後、低熱セメント）単味のもの（No.9）は、初期の強度発現は小さいものの材令28日以降の長期的な強度の伸びは大きく材令91日では最も大きい強度を示している。一方、低熱セメントに混和材として高炉スラグ微粉末を用いたもの（No.8）は、材令28日までの強度発現はやや小さいが、28日以降91日までに約300kgf/cm²程度の強度の伸びがみられる。

表-5から、中庸熱セメントに混和材として高炉スラグ微粉末、さらに膨張剤と収縮低減剤を加えたもの（No.5）は、中庸熱セメント単味のもの（No.6）とほぼ同等の強度発現を示している。また、増粘剤系のもの（No.7）は材令28日、および91日で中庸熱セメント単味のものに比べ約kgf/cm²程度小さくなっていることがわかる。これは、増粘剤系の水粉体比と中庸熱セメントの水粉体比が異なっていることが原因の一つであると考えられる。これより、膨張材、収縮低減剤ならびに増粘剤は、高炉スラグ微粉末などと同様に高流動コンクリート材料として活用することができると思われる。

5.2 静弾性係数

RC規準式ならびにNew RC施工標準式の推定値と比較した結果を図-7に示した。図から、高流動コンクリートの静弾性係数は、RC基準式の推定値に比べ0.5 ~ 0.7 × 10⁵ kgf/cm²程度小さくなっている。一般に、コンクリート強度が高強度になるほど静弾性係数はRC規準式より小さくなるということが知られているが、今回の試験結果はその差が若干大きい結果となった。一方、New RC施工標準式による推定値とは良い対応関係を示した。

5.3 乾燥収縮

図-8には、調合No.1、No.2、No.3、No.4およびNo.6の乾燥収縮の測定結果を示す。図から、混和材として石灰石粉を用いたもの（No.4）は、従来調合のコンクリート（No.1）より若干乾燥収縮が大きい、ほぼ同等と言える。一方、中庸熱セメント単味（No.6）、あるいは混和材として高炉スラグ微粉末（No.2）、フライアッシュ（No.3）を用いたものはほぼ同じ乾燥収縮量であり、従来調合のものに比べるとやや小さくなっている。これから、高流動コンクリートの乾燥収縮量は、この報告で扱った従来調合のものに比べ同等かそれ以下であると言える。

図-9には、調合No.2、No.6、No.8およびNo.9の乾燥収縮測定結果を示す。低熱セメント単味のもの（No.9）と低熱セメントに混和材とし

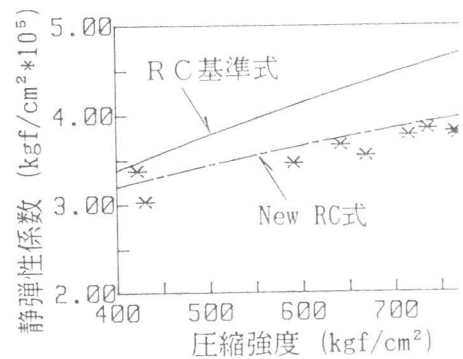


図-7 圧縮強度と静弾性係数の関係

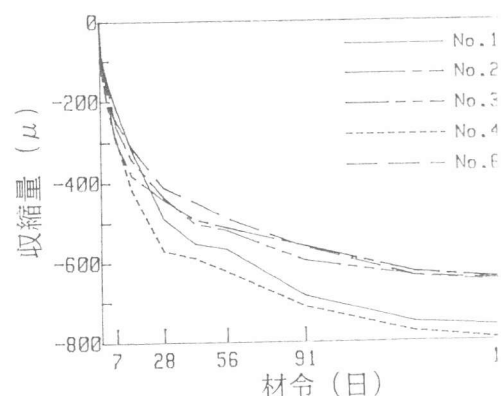


図-8 乾燥収縮測定結果 (調合No.1, 2, 3, 4, 6)

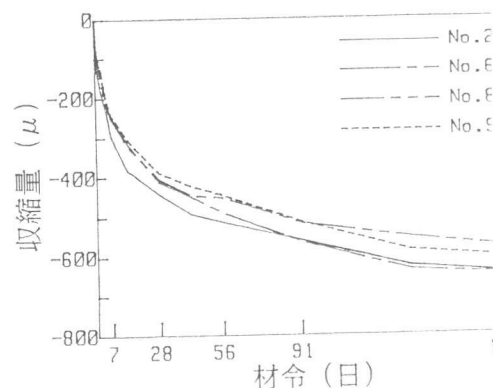


図-9 乾燥収縮測定結果 (調合No.2, 6, 8, 9)

て高炉スラグ微粉末を用いたもの (No. 8) はほぼ同等の乾燥収縮量であり、かつ、中庸熱セメントを用いたものに比べると乾燥収縮量は若干小さくなると言える。

表-5から、中庸熱セメントに混和材として高炉スラグ微粉末、さらに膨張材と収縮低減剤を加えたもの (No. 5) は、中庸熱セメント単味のもの (No. 6) に比べ、乾燥収縮量はほぼ半分になっており、膨張材、収縮低減剤の効果が顕著に表われている。また、増粘剤を用いたもの (No. 7) は、中庸熱セメント単味のものに比べやや大きい、図-7に示した従来調合のもの (No. 1) と比べるとほぼ同等である。

5.4 乾燥比重

表-5から、低熱セメントに混和材として高炉スラグ微粉末 (no. 8) を用いたものが従来調合のもの (No. 1) より小さくなっている以外は、常用骨材を用いた高流動コリートの乾燥比重は、一例を図-10に示すように、従来調合のものより大きく、乾燥比重を確保しやすいと言える。また、高比重骨材を用いたものは、骨材の比重が4.67と大きいことの影響があらわれており、乾燥比重で 3ton/m^3 程度になっている。

5.5 鉄筋の付着強度

今回の実験では、調合No. 1、No. 2およびNo. 8について付着強度試験を行なっている。このを表-6に示す。

表から、コンクリートの圧縮強度が大きくなると付着強度も大きくなることが知られてが、今回の結果もこの傾向と同じであることがわかる。試験体製作時に高流動コンクリートは締固め作業を行なっていないことを考えると、高流動コンクリートの施工において流動充填性が確保できるならば締固めを行なわなくても鉄筋とコンクリートの一体性は確保でき言える。

6. まとめ

以上の結果から、次のことがわかった。

- ①. 流動性の確保は、粉体の構成材料に応じた高性能A E減水剤の添加量の選択によって可能である。
- ②. また、充填性の確保は、粗骨材とモルタル部との総体的な比重差が小さく、少なくともスランプフロー試験によって材料分離が認められないことが必要である。
- ③. さらに、経時変化は、混和材としてフライアッシュを用いることが有効な手段であることがわかった。
- ④. 高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、石灰石粉を混和材として用いた場合、当然、これらの材の割合によって高流動コンクリートの強度発現が異なる。
- ⑤. 静弾性係数、付着強度は、圧縮強度と一般的な対応関係にある。
- ⑥. 乾燥収縮は、今回、比較の対象とした従来調合のコンクリートと比べると同等かやや小さい。
- ⑦. 乾燥比重は、高流動コンクリートとすることによって、従来調合のものに比べると同等か、より大きな値を確保できる。

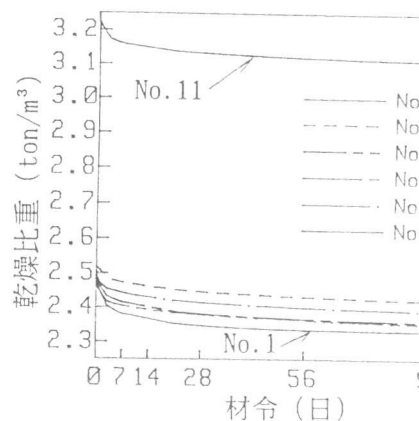


図-10 乾燥比重試験結果 (調合No. 1, 2, 3, 4, 6)

表-6 付着強度試験結果

調合 No	付着強度 (kgf/cm ²)	
	すべり量 0.002D時 付着強度	最大付着強度
1	66	155
2	138	215
8	110	165