

論文

[1024] 低レベル放射性廃棄物貯蔵コンクリートピット充填用モルタルの開発に関する研究

正会員 安部 聡 (原子力環境整備センター)

正会員○岡本修一 (大成建設 技術研究所)

正会員 松岡康訓 (大成建設 技術研究所)

富松政俊 (日本国土開発 原子力部)

1. はじめに

原子力発電所等から発生する低レベル放射性廃棄物は、最終貯蔵施設に安全に埋設かつ長期的に安全な環境で貯蔵することが必要であり、最終貯蔵施設は図-1の概念図に示すようにコンクリートピット内に低レベル放射性廃棄物を内含するドラム缶を設置し、その後空隙部をモルタルで充填する計画である。このモルタルは、材料分離のない均一な品質で、ドラム缶どうしの狭隙を確実に充填し境界部を一体とすることが要求性能としてあげられる。また、温度ひびわれ防止の観点から水和熱をできるだけ低減することが配合選定に於ける重要な条件となる。対象としている貯蔵施設の形態から、当初、プレパックドコンクリートに準拠したモルタルについて検討した。しかしながら、低発熱セメント(3成分系)を使用する場合、充填用モルタルのブリージングを抑制することは極めて難しいことが1セルの1/4モデルでの試験より明かとなった [1]。

すなわち、低発熱セメントの使用によりブリージングは増加する傾向にあるうえ、細骨材の品質変動によりブリージング性状やモルタルの流動性が大幅に影響されるため、材料の厳格な品質管理が要求される。また、ブリージングを押さえるために水セメント比は極力小さくする必要があるが、同時に流動性を確保するには結果として粉体量が増加し、水和発熱に起因する温度応力には不利な状態となる。さらに、ブリージング等による沈下を予測してそれをアルミ粉末により補償することとしたが、この方法ではドラム缶下面および充填後の最上面に脆弱層を形成することが懸念され、1/4セルモデルでの試験ではドラム缶下面にブリージングによる水みちが部分的に観察された。

そこで本研究では、コンクリート用水中不分離性混和剤(以下MC)を用いることでブリージングを防止し、かつ水和発熱量の小さい充填用モルタルの開発を目的とし、配合ならびに物理的性質(特に透水係数)を検討した。

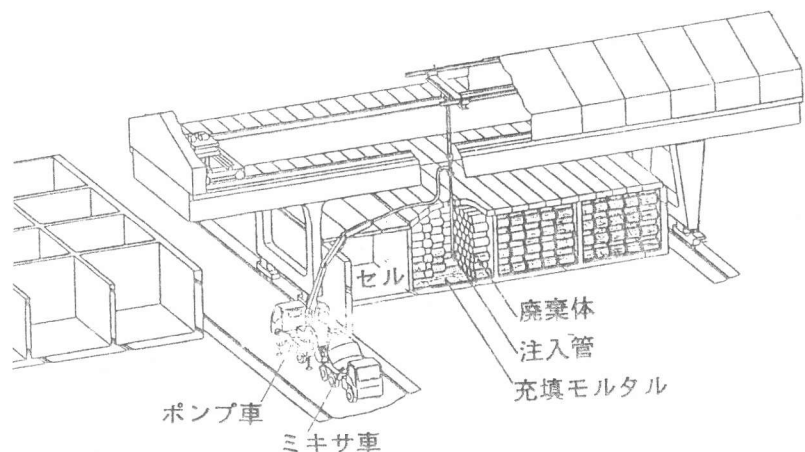


図-1 最終貯蔵施設の概念図

2. 配合試験

2.1 実験概要

使用材料を表-1に示す。練り混ぜには100ℓ強制練りミキサを使用した。モルタルの流動性および充填性の指標には、スランプフローならびにドラム缶フローを用いた。スランプフロー試験は、水中不分離性コンクリートのスランプフロー試験に準拠し行った[2]。ドラム缶フロー試験とは、図-2に示すドラム缶配置時に最小となる隙間を模擬した試験装置に、充填用モルタルを所定量(Pルート法の2倍)入れ、その流下時間を測定するものである。またブリージングの測定は、土木学会基準「プレパックドコンクリートの注入モルタルのブリージング率および膨張率試験方法」に準拠し行った。モルタルの透水性は透水係数で評価するものとし、透水係数はφ15×22cmの円柱供試体の中心にφ2cmの穴を開け、アウトプット方式により透水試験を行い算定した。断熱温度上昇量については、水冷式断熱温度上昇試験装置を用いて測定を行った。

表-2 配合条件

水結合材比 : 70%	ブリージング : 0
水中不分離性混和剤 : 1.5 kg/m ³	スランプフロー : 80 cm程度
高性能減水剤 : 結合材×1~2%	ドラム缶フロー : 連続的な流下

表-1 使用材料

材 料	適 用
セメント (C)	普通ポルトランドセメント (N) (比重3.16, ブレーン値3230cm ³ /g)
	中熱ポルトランドセメント (M) (比重3.20, ブレーン値3280cm ³ /g)
高炉スラグ微粉末 (B)	比 重 2.90 ブレーン値 4120 cm ³ /g
フライアッシュ (F)	比 重 2.19 ブレーン値 3090 cm ³ /g
細骨材 (S)	鹿島産陸砂; F.M. 2.27 (比重2.62, 吸水率1.02%)
	相模・木更津混合砂; F.M. 2.66 (比重2.60, 吸水率2.44%)
	大井産川砂; F.M. 3.04 (比重2.62, 吸水率1.16%)
膨張材	カルシュームサルホアルミネート系
水中不分離性混和剤	水溶性セルロースエーテル系
A E減水剤	リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体
高性能減水剤	高縮合トリアジン系化合物

配合試験は表-2に示す条件で下記の3シリーズについて表-3に示す配合で検討を行った。

シリーズI : 細骨材の種類および砂・結合材比(S/C)影響についての検討

シリーズII : 膨張材の添加量の検討

シリーズIII : セメントの種類の相違に関する検討

MCの添加量は、図-3に示す予備実験の結果より決定した。すなわち、ブリージングを0とするには最低

1.5kg/m³のMCが必要であった。なお、今回行った全てのシリーズの充填モルタルにおいてブリージングは認められなかった。

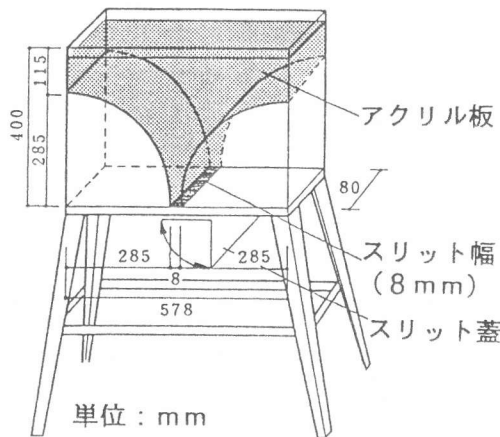


図-2 ドラム缶フロー試験装置

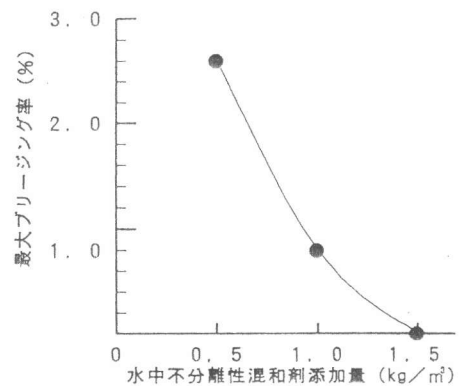


図-3 予備試験結果

表-3 配合表

表中の記号(N, M, B, F, 等)は表-1参照

シリーズ	配合 No.	セメントの種類	砂・結合材比 (%)	砂の種類 F. M.	膨張材添加量 (結合材x%)	高性能減水剤 (結合材x%)	A 減水剤 (結合材x%)	E 減水剤 (結合材x%)	単 位 量 (kg/m ³)					
									W	結 合 材			膨張材	MC
I	1	N-30 B-40 F-30	2.75	鹿島	—	1.0	0.4	295	126	169	126	—	1.5	
	2		3.00											
	3		3.25											
	4		3.00											
	5		3.25											
	6		3.50											
	7		3.25											
	8		3.50											
	9		3.75											
II	1	N-30	3.25	相模 木更津 2.66	4.0	1.0	0.4	295	121	162	121	17	1.5	
	2	B-40							119	159	119	25		
	3	F-30							116	156	116	33		
III	1	N-30 B-40 F-30	3.25	相模 木更津 2.66	6.0	1.0	0.4	295	119	159	119	25	1.5	
	2	M-30 B-40 F-30							20	377	—	25		
	3	N-5 B-95												
	4	N-10 B-90							40	357	—	25		
	5	N-20 B-80							79	318	—			
	6	M-20 B-80												

2.2 実験結果および考察

(1) 細骨材の種類およびS/Cの影響について (シリーズI)

図-4にS/Cとスランプフローならびにドラム缶フローの関係をしめす。この図より、S/Cが増大し単位体積当りの砂の量が増えれば、充填モルタルの流動性は悪くなる傾向にあり、スランプフローを配合条件である80cm程度とするには、F.M.が2.27, 2.66, 3.04と大きい砂ほど、S/Cも3.00, 3.25, 3.50と大きくする必要があることがわかる。当初は、MCを使用しモルタルの見掛けの粘性を高めれば、細骨材の種類が流動性に与える影響は小さくできると予想されたが、今回の実験ではその影響は顕著に現われた。この結果は、細骨材の品質管理が重要であるということと同時に、細骨材の品質変動による流動性の変動にはS/Cを変化させることである程度対応できることも示唆するものと考えられる。図-5にスランプフローとドラム缶フローの関係を示す。両者はF.M.に関係なく良い相関関係にあることがわかる。また、モルタルはスランプフローが75cm程度と小さくてもドラム缶どうしの狭隙を流れるが、良好な流動性(連続的な流下)を得るにはスランプフローを80cm程度以上とする必要があることがわかった。

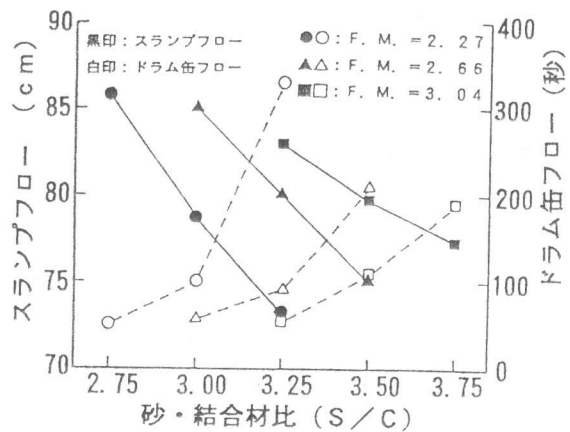


図-4 細骨材の種類およびS/Cの影響

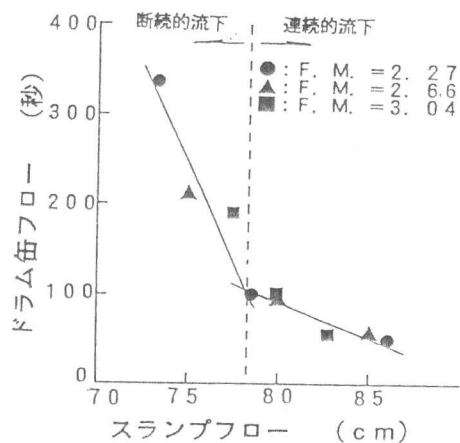


図-5 スランプフローとドラム缶フローの関係

(2) 膨張材添加量について (シリーズII)

密閉空間をモルタルで充填しようとした場合、被充填物とモルタルの界面にできる空隙は、充填された系全体の性状、例えば透水性、透気性などにマイナスの影響を及ぼすことが懸念される。この空隙発生の主な原因として、充填モルタルのブリージングおよび硬化収縮が考えられる。本充填モルタルでは、ブリージングに関してはMCを使用することで0とすることが可能となったので、膨張材を添加することで後者によるモルタルの収縮を補償の対象として考えた。図-6に、膨張材添加量と充填モルタルの膨張量の関係を示す。供試体は材令2日で脱型し基長測定後、標準養生を行いながら膨張が安定するまで約91日間コンパレータで測定を行った。硬化収縮量に関しては、測定が極めて困難なためもあって見解が一致していないのが現状である。H. E. Davis によれば、マスコンクリート内部に生ずる硬化収縮量は材令1か月で約 40×10^{-6} であると報告されている [3]。そこで、この値を基に、モルタルであるということとを考慮し、膨張材最適添加量は膨張量が約 100×10^{-6} となる結合材×6%と設定した。

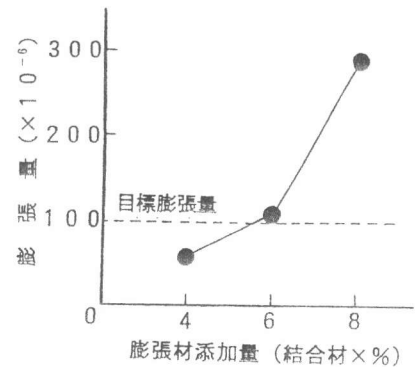


図-6 膨張材添加量と充填モルタルの膨張量の関係

(3) セメントの種類の相違に関する検討 (シリーズIII)

本検討では、使用実績を参考に主に流動性の観点から3成分系低発熱セメントを使用しているが、良質フライアッシュの大量確保が困難となってきている現状を考えると、今後の実績如何では2成分系低発熱セメントの使用も考えられる。現在までの低発熱セメントに関する研究より3成分系、2成分系いずれにしても素材のキャラクターや混合比率がコンクリートやモルタルの性状に影響することが明かとなってきている [4] [5]。そこで、高炉スラグ微粉末の添加量を変えた場合およびポルトランドセメントを中庸熱に変更した場合について、充填モルタルの流動性、断熱温度上昇量、圧縮強度ならびに透水係数におよぼす影響について検討を行った。

表-4にスランプフロー、ドラム缶フローに関する試験結果を示す。これらの結果より、流動性はM20%+B80%のセメントを使用した場合が最も優れていることがわかる。2成分系においては、高炉スラグ微粉末混入量が増大するほど、4時間後の低下量は大きくなった。また、3成分系の方が相対的には2成分系より流動性が良い傾向にある。

表-4 スランプフロー、ドラム缶フローに関する試験結果

配合 No.	セメントの種類	スランプフローの経時変化 (cm)				4時間の低下量 (cm)	ドラム缶フローの経時変化		4時間の低下量
		練上り	1時間後	2時間後	3時間後		練上り	4時間後	
1	N-30	80.0	75.0	75.0	77.0	6.2	1' 52"	5' 05"	3' 13"
	B-40	x	x	x	x				
	F-30	80.0	75.0	75.0	75.0				
2	M-30	79.5	77.0	75.0	74.0	7.2	2' 14"	4' 31"	2' 17"
	B-40	x	x	x	x				
	F-30	79.0	75.0	74.5	73.5				
3	N-5	79.0	78.0	73.0	71.5	12.5	2' 07"	6' 34"	4' 27"
	B-95	x	x	x	x				
4	N-10	79.0	78.0	77.0	75.0	8.5	2' 38"	6' 47"	4' 09"
	B-90	x	x	x	x				
		78.0	77.0	76.0	74.0				
5	N-20	77.0	76.0	75.0	70.0	6.5	2' 22"	6' 33"	4' 11"
	B-80	x	x	x	x				
		77.0	76.0	73.0	70.0				
6	M-20	79.0	80.0	78.5	78.0	2.7	3' 06"	4' 11"	1' 05"
	B-80	x	x	x	x				
		79.0	80.0	78.0	78.0				

表-5に圧縮強度、断熱温度上昇試験ならびに透水試験結果を示す。2成分系セメントの断熱温度上昇量は、高炉スラグ微粉末の混入量が増大するほど小さくなり、3成分系セメントと比べかなり低減できる。

表-5 圧縮強度、断熱温度上昇試験ならびに透水試験結果

配合 No.	セメントの種類	圧縮強度 (kgf/cm ²)			断熱温度上昇量 ΔT (°C)	透水係数 (×10 ⁻¹¹ cm/sec)	
		材令 7日	材令 28日	材令 91日		材令 28日	材令 91日
1	N-30 B-40 F-30	69	186	299	43.0	6.75	3.09
2	M-30 B-40 F-30	52	146	271	41.4	2.26	4.83
3	N-5 B-95	68	134	217	17.4	2.35	2.80
4	N-10 B-90	90	180	270	24.9	—	1.80
5	N-20 B-80	122	244	355	40.6	1.84	1.36
6	M-20 B-80	98	215	355	35.4	—	1.60

しかし、断熱温度上昇量が小さくなるに従い圧縮強度発現も小さくなる。また、基準となるポルトランドセメントを中庸熱に変更することも、ある程度の断熱温度上昇量低減効果が期待できる。透水係数に関しては、3成分系よりも2成分系の方が良い結果になっている。特に高炉スラグ微粉末の置換率80%が最も良く、また断熱温度上昇量、強度発現も大きいことから、この比率におけるセメントの水和反応の効率が最良となっていることが推察される。

3. 1/4モデル実験

3.1 実験概要

配合試験より定めた充填モルタル実際の品質および施工性を確認するため、図-7に示す実規模低レベル放射性廃棄物最終貯蔵施設の1セルの1/4モデルで充填試験を行った。モルタルは実際の充填方法と同様な方法（生コン工場で練りませ、アジテータ車で運搬し、ポンプ圧送しトレミー管で一カ所から充填）で行った。充填モルタルの配合を表-6に示す。材料は配合試験と同様のものを使用した。水結合材比、砂・結合材比は、生コン工場ミキサ（傾胴式）の練りませ性能および細骨材の採取時期などの違いを考慮し試験練りを行い決定した。

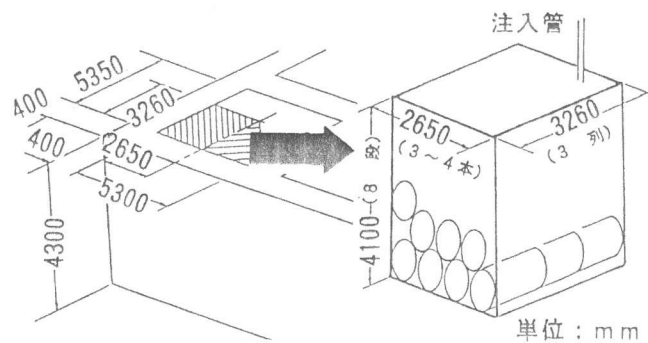


図-7 モデル概略図

表-6 充填モルタルの配合

セメントの種類	砂・結合材比 (%)	膨張材添加量 (配合材%)	高性能減水剤 (配合材%)	単 位 量 (kg/m ³)					
				結 合 材				膨張材	MC
W	C	B	F						
N-30									
B-40	3.50	6.0	0.5	274	117	156	117	25	1.5
F-30									

3.2 実験結果

(1) 充填状況

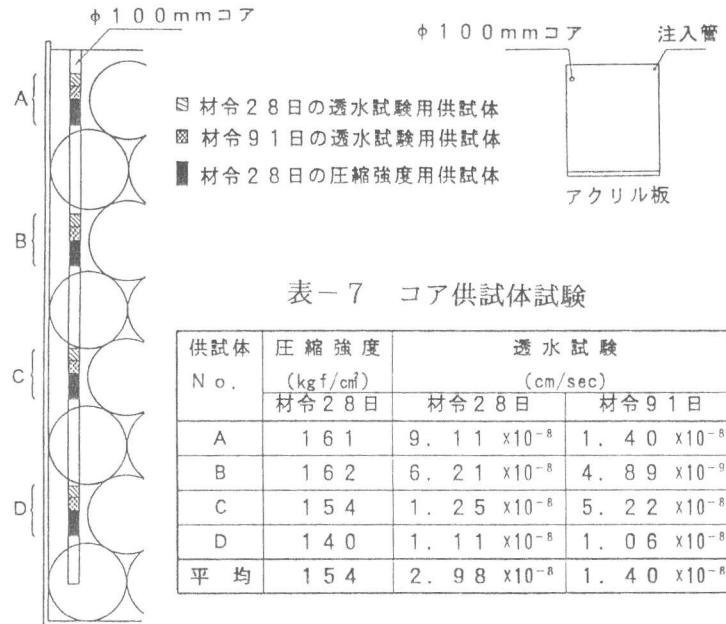
モルタル注入時の充填状況は、透明アクリル板からの目視観察によったが、充填モルタルはドラム缶どうしの狭い間隙にも確実に充填されていく様子が確認された。また、ブリージング等の材料分離も全く認められず、平均流動勾配は3.54%でありセルフレベリング性が認められた。

(2) 温度計測結果

平均外気温約18℃、打設温度約22℃で、モデルの中央の温度は打設後7日でピークとなり、最大温度上昇量 ΔT は18℃であった。この値は配合試験での断熱温度上昇量4.3℃に比べるとかなり低くなっている。これは発生した熱が非発熱体である周囲のドラム缶廃棄体に吸収され、温度上昇が抑制されたものと思われる。この効果は、温度応力に対して有利であり実構造物においても期待できることが予想される。

(3) 充填確認試験結果

材令28日で採取した $\phi 30 \times 410$ cmの2本のボーリングコア観察結果では、ドラム缶どうしの狭小な部分にもモルタルが密実に充填されていることが確認された。表-7は $\phi 10$ cmのボーリングコア供試体による圧縮強度ならびに透水試験結果である。圧縮強度、透水係数ともに高さ方向における変動はあまり認められず、ブリージングを無くすことによる充填モルタルの品質の均一性確保は達成できたと考えられる。



4. まとめ

低レベル放射性廃棄物最終貯蔵施設用の充填モルタルの開発に当たり、3成分系の低発熱セメントを使用して水和発熱を低減し、コンクリート用水中不分離性混和剤を用いることで流動性は確保しながらブリージングを0とし、膨張材により硬化収縮を補償することで、高品質、高流動、低発熱という充填モルタルとしての要求性能を満足することができた。

今回対象とした構造物に限らず、セメント系充填材料で空隙を充填しようとした場合、材料分離等による被充填物と充填材境界部に発生する空隙が問題となる場合が多い。そういう点において今回示したような配合の考え方や充填モルタルは他構造物へ種々応用できるものと思われる。

[参考文献]

- 1) 財団法人 原子力環境整備センター：低レベル放射性廃棄物施設貯蔵安全性実証試験報告書 昭和62年度、1988.3
- 2) 財団法人 沿岸開発技術研究センター、財団法人 漁港漁村建設技術研究所：水中不分離性コンクリート・マニュアル、1990.1.30
- 3) Davis, H. E. : Autogenous volume changes of concrete, Proc. A. S. T. M., 40, pp. 1103-10, 1940
- 4) 杉 正：マスコンクリートの対策実施例、コンクリート工学、Vol. 22、No. 3、pp. 81-86、1984.3
- 5) 中川良隆・大友 健・中平 淳・松岡康訓：低発熱高流動性特殊水中コンクリートに関する基礎研究、コンクリート工学論文集、Vol. 1、No. 1、pp. 95-108、1990.1