

## 混和材を使用した低放射化コンクリートの低発熱化の効果

(株)フジタ技術センター 正会員 ○藤倉 裕介

(株)フジタ技術センター 非会員 金野正晴, 木村健一

(株)フジタ技術センター 非会員 西田浩和, 片寄哲務

### 1. はじめに

原子力発電所の廃止措置時, 原子炉周りの遮蔽コンクリート, 鋼材, 配管などの材料の多くは, 残留放射能の存在により低レベルの放射性廃棄物となる. コンクリートの建設時の価格は約 1.2 万円/m<sup>3</sup>であるが, 放射化されて放射性廃棄物となると, 埋設コストだけで, L1 区分で約 2800 倍, L2 区分で約 460 倍, L3 区分で約 65 倍に化けると予想されている<sup>1)</sup>. このような背景から, 著者らは原子炉周りのコンクリート部分の全てをクリアランスレベル以下にし, 一般廃棄物として再利用可能なものにするを目的として, 残留放射能が普通コンクリートの 1/10~1/300 になるような低放射化コンクリートの開発<sup>2)</sup>を実施している. 本報告では, これまでに提案してきた“1/30 低放射化コンクリート”<sup>3)</sup>の低発熱化および温度ひび割れの抑制を目的として, 低放射化の混和材を使用した低放射化コンクリートの力学特性, 発熱特性について調べた結果について示す. また, 低発熱化の効果について考察する.

### 2. 試験概要

低放射化コンクリートを実用化した金野らの報告<sup>2)</sup>によると, Eu や Co といった元素の含有量の少ない材料を選定することにより,  $\sum D/C$  ( $\sum D_i/C_i$ ,  $D_i$ : 核種 i の放射能濃度,  $C_i$ : 核種 i のクリアランスレベル) を小さくでき, 普通コンクリートと比べて残留放射能の少ないコンクリートを製造できることが示されている. 表-1 にスクリーニング試験の結果<sup>4)</sup>から低熱化のために選択した低放射化の混和材と本試験で使用した骨材およびセメントの $\sum D/C$ を, 参考として挙げた普通の材料と比較して示す. 低放射化コンクリートの配合および $\sum D/C$ を表-2 に示す. 基準とした安山岩コンクリートの $\sum D/C$ は 18.8 である. 表-2 中の WT シリーズは, 本研究で着目する白色セメントを使用した“1/30 低放射化コンクリート”である. これらの配合に, 低放射化の石灰石微粉末 C と低放射化のシリカフューム B を置換した. これらの比較として, 低熱ポルトランドセメント A を使用した L-1, 普通ポルトランドセメントを使用した N-1 の配合を表-2 中に示す. 配合条件は, 粗骨材の最大寸法を 20mm とし, 目標強度 33N/mm<sup>2</sup>, スランプ 15 ± 2.5cm, 空気量 4 ± 1%とした. 練り上がり温度は 20°C とし, 所定のスランプ, 空気量が得られるように高性能減水剤, AE 助剤を使用した.

試験項目は, まず練り上がり時のスランプ, 空気量を測定した. また, 凝結時間を JIS A 1147 に準じて測定し, JIS A 1123 に準じてブリーディング試験を実施した. 力学特性は, 標準(水中)養生にて材齢 7 日, 28 日, 91 日における圧縮強度, 割裂強度を各 JIS 基準 (JIS A 1108, JIS A 1113) に準じてそれぞれ測定した. 発熱特性は, JCI SQA3 に準じ, 空気循環式(二槽式)の断熱温度上昇試験機を用いて, コンクリートの断熱温度上昇量を測定した. 上部φ 410mm, 下部 300mm × 高さ 420mm の金属製円錐台形容器にコンクリートを打設して試験体とした.

表-1 低放射化材料<sup>4)</sup>

No.	材料名	$\sum D/C^*$
1	石灰石微粉末 C	1.10
2	シリカフューム B	0.65
3	石灰岩骨材 D	0.106
4	白色セメント A	4.19
5	低熱ポルトランドセメント A	5.39
6	普通ポルトランドセメント A	10.0
参考	玄武岩 JB-1	25.8
参考	安山岩 JA-1	16.1
参考	流紋岩 JR-1	4.70
参考	シリカフューム H	2.26

\*熱中性子束 ( $E_n < 0.4eV$ )  $2 \times 10^7 \text{ ncm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  のみと仮定し, 40 年運転, 6 年冷却として計算した. 日本の原子炉に対するクリアランスレベルとしては, 経産省省令 112 号 (2005.12. 施行) のものを使用し, <sup>55</sup>Fe, <sup>60</sup>Co, <sup>134</sup>Cs, <sup>152</sup>Eu, <sup>154</sup>Eu で評価した.

表-2 低放射化コンクリートの配合

記号	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			W/ (C+SF) (%)	s/a (%)	SP (C+SF) ×%	$\sum D/C^*$
	C	LP	SF				
N-1	350	—	—	50	50	0.35	—
L-1*	350	—	—	75	47	1.2	2.09
WT-1*	316	—	—	50	46	0.50	0.613
WT-2	250	100	—	60	46	0.85	0.785
WT-3	200	100	50	60	46	1.15	0.567
WT-4	133	140	100	69	46	2.10	0.294

C: セメント, L 低熱ポルトランドセメント (密度 3.22g/cm<sup>3</sup>), WT 白色セメント (密度 3.05g/cm<sup>3</sup>)  
LP: 石灰石微粉末 C (密度 2.71g/cm<sup>3</sup>), SF: シリカフューム B (密度 2.20g/cm<sup>3</sup>), 細骨材: 石灰石砕砂 (密度 2.69g/cm<sup>3</sup>), 粗骨材: 石灰石砕石 (密度 2.70g/cm<sup>3</sup>), SP: ポリカルボン酸系高性能減水剤

\*L-1 は“1/10 低放射化コンクリート”<sup>3)</sup>を示し, WT-1 は, “1/30 低放射化コンクリート”<sup>3)</sup>を示す. \*安山岩コンクリートの $\sum D/C=18.8$

キーワード: 低放射化コンクリート, 混和材, 原子力発電所, 残留放射能, クリアランスレベル

連絡先: 〒243-0125 神奈川県厚木市小野 2025-1 (株)フジタ技術センター TEL 046-250-7095 yfujikura@fujita.co.jp

3. 試験結果および考察

フレッシュコンクリートの性状を表-3に示す。スランプおよび空気量は、良好な値を示した。凝結時間は、低熱ポルトランドセメント単体での配合(L-1)が最も遅く、シリカフュームを含む配合では早い。シリカフュームを含む配合では、ブリーディング率は0%であった。

材齢と圧縮強度の関係を図-1に示す。図中には式(1)で表される土木学会の提案式<sup>5)</sup>で近似した曲線を示し、図-1中に各係数を示す。

$$f'_c(t) = (t/(a+bt)) \times f'_c(28) \cdot d \quad (1)$$

ここで、 $f'_c(t)$ は材齢  $t$  日の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $f'_c(28)$ は材齢 28 日の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $a$ 、 $b$ 、 $d$  は係数を示す。シリカフュームを使用したWT-3、やWT-4の配合では、単位セメント量が少なくても、混和材を含まない配合と比較して、高い強度が得られている。これは、WT-3やWT-4の配合では水酸化カルシウムの生成量が少なく多くのシリカフュームは未水和となることから推察されるが、充填効果によって高い強度が得られたものと考えられる。図-2は、圧縮強度と割裂強度の関係を示す。図-2中には、土木学会の圧縮強度からの推定式<sup>5)</sup>を示すが、混和材を用いた配合では推定値を上回る傾向にある。

断熱温度上昇試験の結果および式(2)による近似曲線を図-4に示し、 $Q_{max}$  および係数  $\alpha$ 、 $\beta$  の算出結果をそれぞれ図-4中に示す。

$$Q(t) = Q_{max} \times (1 - \exp(-\alpha \times t^\beta)) \quad (2)$$

ここで、 $Q$  は断熱温度上昇量(°C)、 $Q_{max}$  は終局断熱温度上昇量(°C)、 $t$  は材齢(日)、 $\alpha$ 、 $\beta$  は発熱速度に関する係数を示す。単位セメント量の低下、混和材の置換により、若材齢時における発熱は緩やかに上昇し、低発熱となることが分かる。

マスコンクリートにおける温度ひび割れを抑制するには低発熱とし、温度上昇量を低減することが有効であるが、温度応力が発生しても、これに耐え得る強度が十分に発現することが大切であり、水和熱と圧縮強度の比が小さいことが有利である<sup>6)</sup>。図-4は、図-1,2の配合ごとに得られた係数から算定した材齢と断熱温度上昇量/圧縮強度の関係を示す。各配合ともに材齢の増加に伴って断熱温度上昇量/圧縮強度は減少する。混和材を用いた配合は、断熱温度上昇量/圧縮強度の値が小さく、温度ひび割れの抵抗性が高いことが分かる。

4. まとめ

低放射化の混和材を使用することで、低発熱化ができることが分かった。また、低発熱であっても混和材を用いない配合よりも高い強度が得られ、ひび割れ抵抗性を有する結果が得られた。

参考文献

- 経産省総合エネルギー調査会原子力部会廃止措置対策小委員会資料, 1997
- 金野正晴: 低放射化コンクリートの開発の現状, コンクリート工学, Vol.42, No.6, pp.3-10, 2004.6
- Fujikura, Y. et al. : Feasibility Study on Application of Low-activation-concrete to Biological Shielding Wall in Light Water Reactor, Proceedings of 2<sup>nd</sup> ACF International Conference, pp.175-182, 2006.11
- 長谷川晃ほか: クリアランスレベル以下にするための低放射化設計法に関する技術開発, 資源エネルギー庁・平成17年度革新的実用原子力技術開発費補助事業報告書, 2006.3
- 土木学会: コンクリート標準示方書 2002年版【施工編】, 2002
- 小出儀治, 小川智弘, 早川直見: セメントの〈水和熱/圧縮強さ〉をコントロールできるか, セメント・コンクリート, No.533, pp.22-31, July 1991

表-3 フレッシュコンクリートの性状

記号	SL (cm)	Air (%)	凝結時間(hr: min)		ブリーディング率(%)
			始発	終結	
N-1	13.0	5.0	6:19	9:28	8.74
L-1	13.0	4.6	7:08	9:46	11.4
WT-1	12.5	4.0	4:31	6:11	2.26
WT-2	14.5	5.0	3:11	4:33	0.57
WT-3	16.5	3.5	2:51	4:23	0.00
WT-4	17.0	3.8	3:25	5:29	0.00

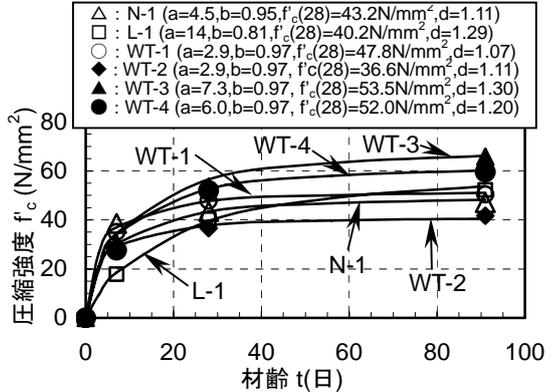


図-1 材齢と圧縮強度の関係

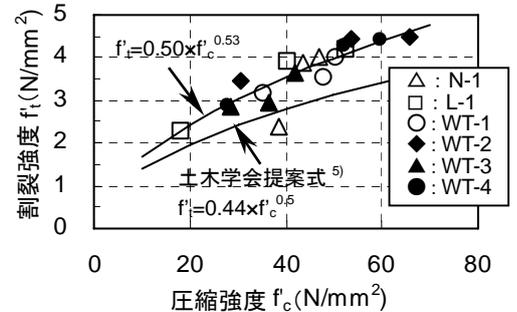


図-2 圧縮強度と割裂強度の関係

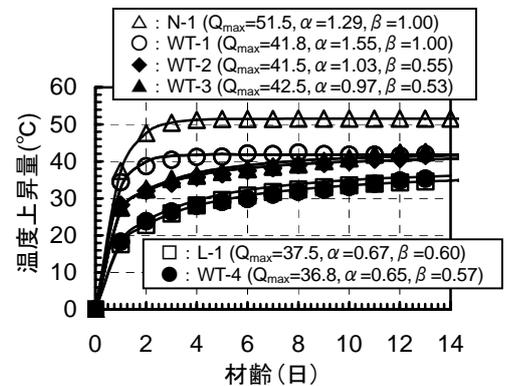


図-3 断熱温度上昇試験結果

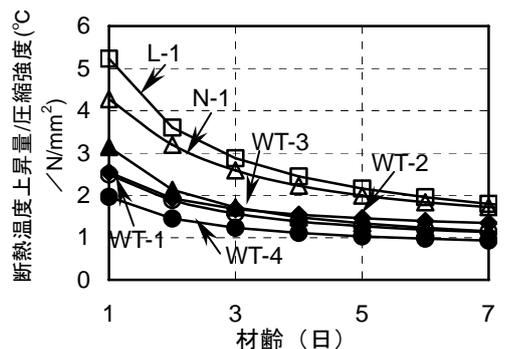


図-4 材齢と断熱温度上昇量/圧縮強度