

低放射化コンクリートのマスコンクリートへの適用性に関する基礎的検討

藤倉 裕介 西田 浩和
片寄 哲務 木村 健一
金野 正晴

概 要

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は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/m³であるが、放射化されて放射性廃棄物となると、埋設コストだけで数百倍になると予想されている。コンクリート部分の放射性廃棄物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こと、あるいは低い埋設区分に落とすことは、資源の有効利用やコスト低減の観点から有益であると考えられる。そのような背景から、著者らは残留放射能が普通コンクリートよりも小さい低放射化コンクリートの開発を行ってきた。これまでに“1/10 低放射化コンクリート”および“1/30 低放射化コンクリート”といった 2 種類のコンクリートを提案してきた。本研究では、特に課題として挙げられてきた白色セメントを使用した 1/30 低放射化コンクリートの水和熱の低減化を目的として、低放射化混和材の使用による低発熱化を試み、その有効性を確認した。また、温度応力解析を実施し、マスコンクリート部材となる原子炉遮蔽コンクリートへの適用性を確認した。

Applicability of Low Activation Concrete to Massive Concrete Structure Members

Abstract

When decommissioning nuclear power plants, the shielding concrete around nuclear reactors becomes low level radioactive waste. Concrete is very inexpensive material for radiation shielding. However the disposal cost of activated concrete will be hundreds of times— more expensive than that of non-activated concrete. Therefore, it is necessary to reduce radioactive waste by ensuring such concrete is below the legal “clearance level”. In order to reduce the residual radionuclides in a concrete shield around a reactor, we proposed two types of low-activation concrete, namely, “1/10-low-activation concrete” and “1/30-low-activation concrete”. The purpose of this study is to reduce the heat of hydration of the 1/30 low-activation-concrete using white cement. For this purpose, the low-activation admixture replaced with cement was selected by performing a screening test. The thermal stress analyses were carried out under the assumption of application for a biological shielding wall. As a result, this low-activation concrete can be utilized for a massive structure member of a biological shielding wall.

キーワード：低放射化、混和材、原子力発電所、
残留放射能、クリアランスレベル

§1. はじめに

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/m³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 倍になると予想されている。これらに測定費、解体費、詰替費、被ばく対策の管理費などを加えると、莫大な費用となることが予想される。コンクリート部分の放射性廃棄物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こと、あるいは低い埋設区分に落とすことは、資源の有効利用やコスト低減の観点から有益であると考えられる。

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とすることを目的として、残留放射能が普通コンクリートの 1/10~1/300 になるようなコンクリートの開発²⁾を実施している。これまでに“1/10 低放射化コンクリート”および“1/30 低放射化コンクリート”といった 2 種類のコンクリートを試作し、その基礎物性について紹介してきた³⁾。しかしながら、白色セメントを使用した“1/30 低放射化コンクリート”は、水和熱が大きく、マスコンクリートに適用した場合の温度応力によるひび割れの発生が課題として挙げられていた。そこで、本研究では、主にこの“1/30 低放射化コンクリート”の低発熱化に着目して、低放射化の混和材を使用し、水和熱の低減化を試み、基礎的な物性について調べた。さらに、マスコンクリート部材となる原子炉遮蔽コンクリートへの適用性を確認するため、発熱特性や力学特性などの実験値を反映させた温度応力解析を行い、低放射化の混和材の使用による温度ひび割れ抑制効果について検討することとした。

§2. 試験概要

2.1 使用材料および配合

低放射化コンクリートを実用化した金野らの実施した中性子照射実験²⁾によると、Eu(ユーロビウム)やCo(コバルト)といった元素の含有量の少ない材料(骨材:高純度の石灰岩など、セメント:白色セメント、低熱ポルトランドセメントなど)を選定することにより、 $\Sigma D/C$ ($\Sigma D_i/C_i$, 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)を小さくすることができ、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きた。しかしながら、セメントとして白色セメントを使用した場合、特に水和熱が高いという問題が生じたため、セメントと置換できる低放射化の混和材を選択するためのスクリーニング試験を実施してきた⁴⁾。

表 1 低放射化材料⁴⁾

No.	材料名	$\Sigma D/C^*$
1	タンカル C	1.10
2	シリカフェーム 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
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	普通ポルトランドセメント A	10.0
参考	シリカフェーム H	2.26

*熱中性子束 ($E_n < 0.4\text{eV}$) $2 \times 10^5 \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 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、経産省省令第 112 号(2005.12.施行)のものを使用し、⁵⁵Fe, ⁶⁰Co, ¹³⁴Cs, ¹⁵²Eu, ¹⁵⁴Eu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 ³)			W/ (C+SF) (%)	SP (C+SF) ×%	$\Sigma D/C^*$
	C	LP	SF			
L-1*	350	—	—	50	1.0	2.09
L-2	225	125	—	67	0.75	-
L-3	175	150	25	75	1.2	-
WT-1*	316	—	—	50	0.50	0.613
WT-2	250	100	—	60	0.85	0.785
WT-3	200	100	50	60	1.15	0.567
WT-4	133	140	100	69	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/cm³), WT白色セメント(密度 3.05g/cm³)
 LP:石灰石微粉末C(密度 2.71g/cm³)
 SF:シリカフェームB(密度 2.20g/cm³)
 細骨材:石灰石砕砂(密度 2.69g/cm³)
 粗骨材:石灰石砕石(密度 2.70g/cm³)
 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”³⁾を示し、WT-1は、“1/30 低放射化コンクリート”³⁾を示す。

*安山岩コンクリートの $\Sigma D/C=18.8$

表 1 に、主に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 $\Sigma D/C$ を、参考として挙げた普通の材料と比較して示す。各種低放射化コンクリートの配合および $\Sigma D/C$ を表 2 に示す。基準とした安山岩コンクリートの $\Sigma D/C$ は 18.8 である。Lシリーズは低熱ポルトランドセメントと石灰石骨材を使用した“1/10 低放射化コンクリート”と呼ばれるもので、WTシリーズは白色セメントと石灰石骨材を使用した“1/30 低放射化コンクリート”と呼ばれるものである。これらの配合に、低放射化のタンカルCと低放射化のシリカフェームBを置換して、各種の物性試験を

実施した。尚、低熱ポルトランドセメントを使用した“1/10 低放射化コンクリート”に関しては、既往の試験³⁾で課題となったブリーディング率や凝結時間の改良などに注目して性状を調べた。

配合条件は、粗骨材の最大寸法を20mmとし、設計基準強度33N/mm²、スランプ15±2.5cm、空気量4±1%とした。所定のスランプ、空気量が得られるようにAE減水剤、高性能減水剤、AE助剤を使用した。

2.2 試験項目

2.2.1 フレッシュコンクリートの性状

コンクリートの練り上がり温度は20℃に設定し、練上がり直後のスランプ、空気量、コンクリート温度を測定した。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。

2.2.2 力学特性

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、静弾性係数を各JIS基準(JIS A 1108, JIS A 1113, JIS A 1149)に準じてそれぞれ測定した。

2.2.3 長さ変化

100mm×100mm×400mmの鋼製型枠の中央に埋込み型ひずみ計((株)東京測器研究所社製 KM-100BT)を設置し、室温を20℃、湿度を60%とした恒温恒湿の環境下でコンクリートの長さ変化を測定した。試験体は乾燥収縮および自己収縮の2体とした。試験体の養生条件は、打設から材齢7日までは封緘養生とし、材齢7日にて脱型を行い、乾燥収縮測定用の試験体は乾燥(気中)養生し、自己収縮測定用の試験体は乾燥を防ぐ目的で、脱型直後に試験体全面をアルミ箔粘着テープでシールして養生を行った。

2.2.4 発熱特性

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φ410mm、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。計測は材齢14日まで実施した。

§3. 試験結果

3.1 フレッシュコンクリートの性状

練り上がり直後の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、良好な値を示していることが分かる。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、シリカフュームを使用した配合では早く

なる傾向にある。Lシリーズの配合では、混和材の使用によってブリーディング率が小さくなり、改良効果が表れていることが分かる。また、シリカフュームを含む配合(L-3, WT-3, WT-4)では、測定可能なブリーディング水を生じず、ブリーディング率は0%であった。

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	
L-1	13.0	4.6	7 : 08	9 : 46	11.4
L-2	17.0	3.5	4 : 25	7 : 49	1.13
L-3	16.0	4.9	4 : 25	5 : 57	0.00
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

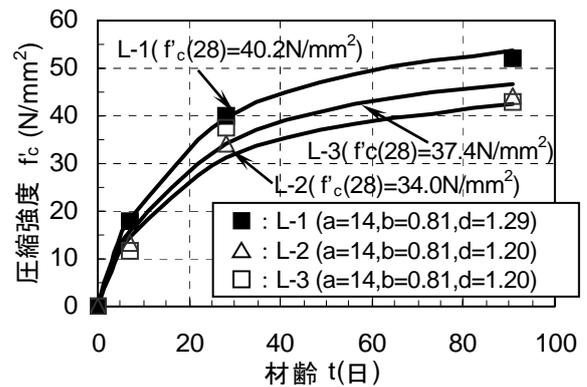


図1 材齢と圧縮強度の関係(L-1, 2, 3)

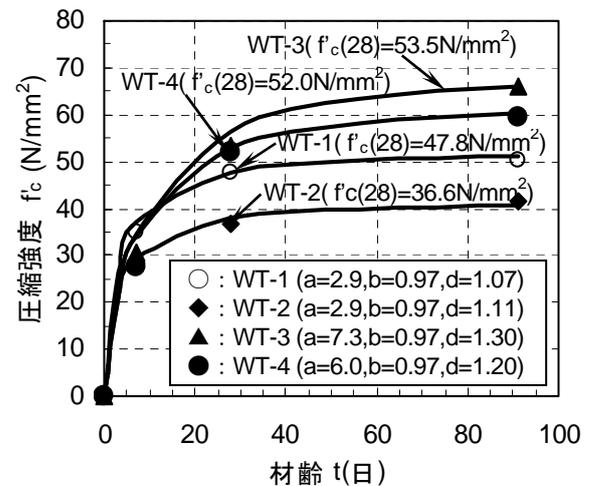


図2 材齢と圧縮強度の関係(WT-1, 2, 3, 4)

3.2 力学特性

標準養生における材齢と圧縮強度の関係を図 1, 2 に示す。図中には式(1)で表される土木学会の提案式⁵⁾で近似した曲線を示し、各係数の算定結果を図 1, 2 中にそれぞれ示す。

$$f'_c(t) = \frac{t}{a + bt} \cdot f'_c(28) \cdot d \quad (1)$$

ここで、 $f'_c(t)$ は材齢 t 日のコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)、 $f'_c(28)$ は材齢 28 日のコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)、 a , b , d は係数を示す。

単位セメント量が少なく、混和材を使用した配合では、タンカルやシリカフェームによる空隙充填効果、各反応による水和組織の生成による強度増進の効果により、十分な強度が得られていることが分かる。しかし、WT-3、やWT-4 の配合では水酸化カルシウムの生成量とシリカフェームの反応率⁶⁾から推察すると、セメントと置換した多くのシリカフェームは未水和となる。すなわち、シリカフェームは充填効果を有するものの、多くは水和反応には寄与していないと考えられる。

図 3 は、圧縮強度と静弾性係数の関係を示し、図 4 は、圧縮強度と割裂強度の関係を示す。両図中には、それぞれ土木学会で提案されている圧縮強度からの推定式⁵⁾を示す。静弾性係数、割裂強度ともに圧縮強度に対して土木学会で提案されている値よりも大きくなる傾向にある。今回の試験の範囲では、セメントの種類、混和材の置換率などの配合条件によらず、図 3, 4 中に示す式で近似した。

3.3 長さ変化

図 5 に各配合における材齢 150 日までの乾燥収縮ひずみを示す。シリカフェーム含有量の多いWT-3 およびWT-4 の配合に関して自己収縮ひずみを同図中に示す。ちなみに、WT-3 とWT-4 以外の配合における自己収縮ひずみは 100μ 以下であった。土木学会では、乾燥に伴うひび割れによって構造物の所要の性能が失われるひずみの限界値として、一般に $500\sim 700\mu$ としている⁵⁾。シリカフェームを多く含有し、自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみの比較的大きなWT-3 やWT-4 の配合においては、構造物の形状や鉄筋量などの影響について検討の余地を残すが、いずれの配合においても一般的な構造物に十分に適用できるものと考えられる。

3.4 発熱特性

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 6, 7 に示す。また、式(2)中の終局断熱温度上昇量 Q_{\max} および係数 α , β の算出結果をそれぞれ図 6, 7 中に示す。

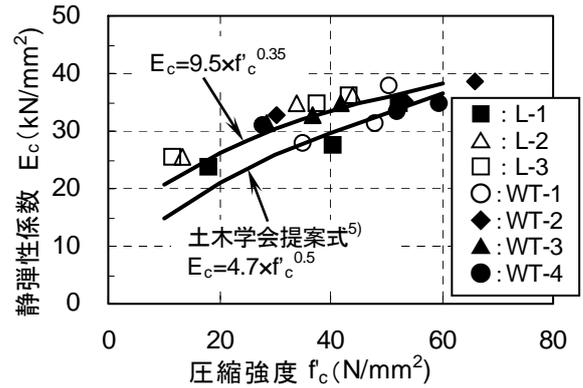


図 3 圧縮強度と静弾性係数の関係

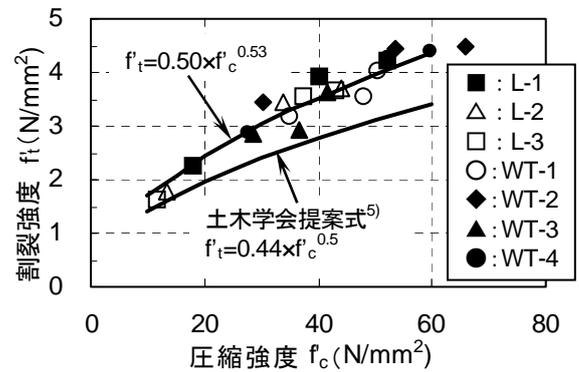


図 4 圧縮強度と割裂強度の関係

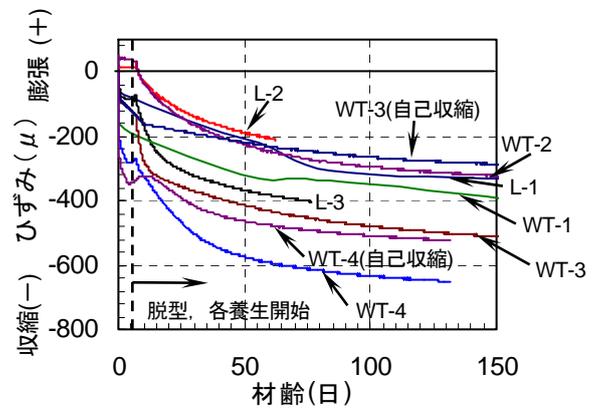


図 5 材齢と長さ変化の関係

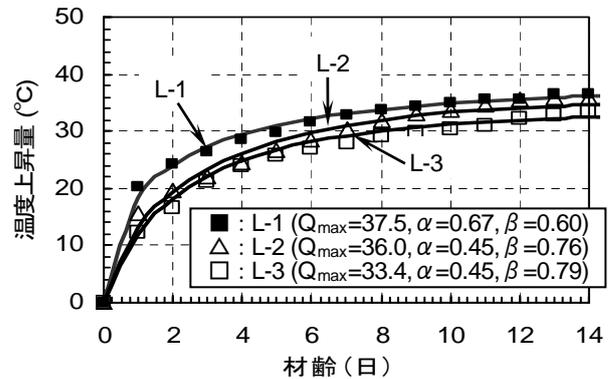


図 6 断熱温度上昇試験結果

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

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)、 α 、 β : 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することが分かる。大幅に単位セメント量を減少させたWT-4の配合では終局断熱温度上昇量に差がみられるが、その他の配合ではセメント単体の配合と比較して大きな差がみられない。これは、終局断熱温度上昇量は単位セメント量が少なくてもシリカフェームのポゾラン活性とタンカルの水和への影響²⁾によって緩やかに増加すると考えられるが、既述のとおりWT-4の配合では、水酸化カルシウムの生成量が少なく、シリカフェームを多く含んでも、その多くは水和に寄与していないことによるものと考えられる。

§4. 温度応力解析

4.1 解析モデルおよび条件

表 2 に示す各配合に関し、原子炉遮蔽コンクリートへの適用を想定した 3 次元の温度応力解析を実施した。原子炉遮蔽コンクリート部分の解析モデルおよび境界条件を図 8 に示す。解析に用いた熱物性値を表 4 に示す。力学特性は、部材内で異なる温度履歴、有効ヤング係数やクリープなどを考慮した値を用いることが望ましいと考えられるが、本解析では配合の違いによる発熱特性と強度発現がひび割れ抵抗性へ与える影響を確認することを目的としたため、図 1～図 4 にて得られた実験値に基づく近似式を用いた。発熱特性は図 6、7 に示す断熱温度上昇履歴から得られた各係数を用いた。コンクリートの打設温度、地盤の初期温度は 20°C とし、外気温度は 20°C 一定の条件とした。ベースコンクリートの打設から 28 日後に遮蔽壁コンクリートの第 1 リフトを打設し、さらに 28 日後に第 2 リフトを打設する設定とした。第 1 リフト、第 2 リフトともに、壁の上面はコンクリート打設からコンクリート表面を露出するものとし、壁の側面は打設から 7 日後に脱型し、その後はコンクリート表面を露出するように熱伝達率を与えた。

4.2 解析結果

温度応力解析の結果として、図 8 中に丸印で示す遮蔽壁部分の各打設リフト中央部の断面 A、B の中心および壁の内側表面の節点に着目した。解析結果に関し、材齢とコンクリート温度の関係、材齢とひび割れ指数の関係を調べた結果、各打設リフト断面の中心の節点で最高温度を示した。また、壁の内側表面の節点において内部拘束により引

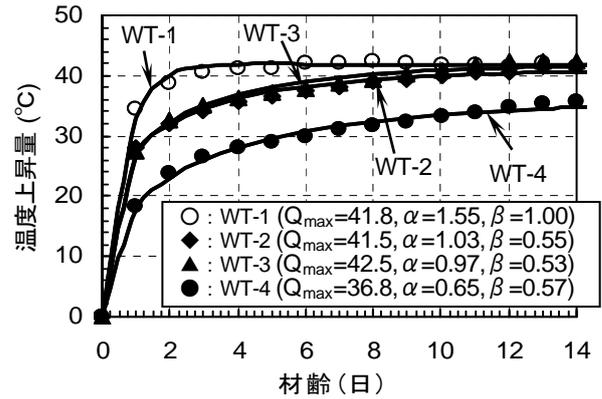


図 7 断熱温度上昇試験結果

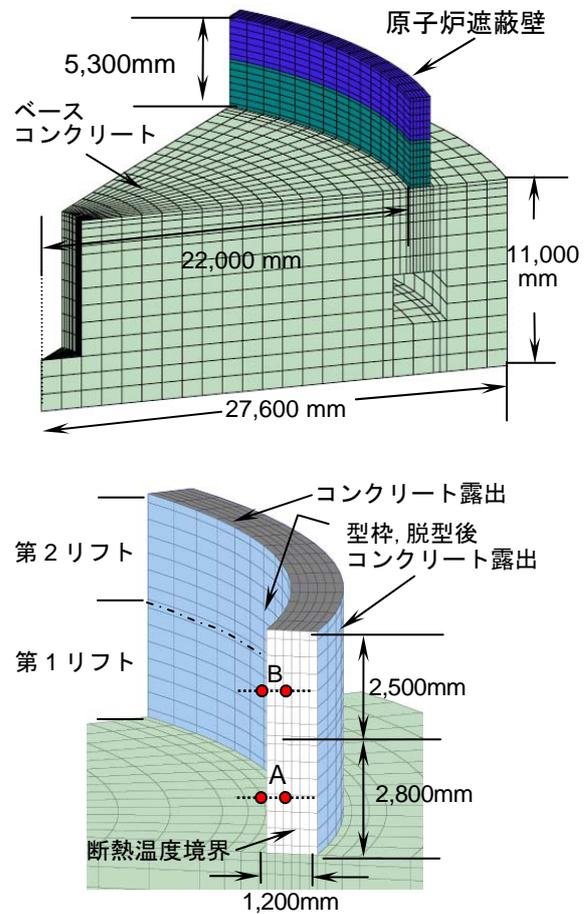


図 8 解析モデルおよび境界条件³⁾

表 4 解析に用いた熱物性値

材料	比熱 (kJ/kg°C)	熱伝導率 (W/m°C)	密度 (kg/m³)	熱伝達率 (W/m²°C)	
				露出	型枠
コンクリート	1.15	2.7	2400	12.0	8.0
地盤	0.80	1.7	2600	—	—

線膨張係数=0.00001/°C

表 5 断面 A, Bにおける最高温度上昇量と最小ひび割れ指数

配合	1 st リフト 断面A				2 nd リフト 断面B			
	断面中心の最高温度上昇量		表面の最小ひび割れ指数 ic		断面中心の最高温度上昇量		表面の最小ひび割れ指数 ic	
	温度(°C)	材齢(日)	指数	材齢(日)	温度(°C)	材齢(日)	指数	材齢(日)
L-1	18.60	4.8	1.47	4.0	18.54	6.6	1.52	5.9
L-2	15.64	5.5	1.75	4.5	15.49	7.3	1.85	6.5
L-3	14.84	5.5	1.88	4.6	14.68	7.3	1.99	6.5
WT-1	30.83	4.4	0.93	4.1	32.82	6.4	1.00	6.1
WT-2	25.40	4.4	1.22	3.8	25.42	6.3	1.28	5.8
WT-3	25.11	4.4	1.20	3.8	25.13	6.3	1.25	5.8
WT-4	27.67	4.4	1.80	4.0	17.62	6.6	1.89	5.9

張応力が発生し、ひび割れ指数の低下がみられ、最小ひび割れ指数を示した。各配合におけるコンクリートの最高温度上昇量、最小ひび割れ指数、またそのときの各リフト打設後の材齢を表5に示す。終局断熱温度上昇量の最も小さいL-3の配合が最も高いひび割れ指数を示していることが分かる。終局断熱温度上昇量の最も大きなWT-1の配合では、ひび割れ指数が1.0を下回っており、ひび割れの発生確率が高い。図6、図7より、WT-4では、L-2やL-3と同等程度の終局断熱温度上昇量を示しているが、特に若材齢時の発熱速度は若干速い傾向にある。しかしながら、WT-4ではL-1やL-2と比較して高いひび割れ指数を示していることが表5より分かる。これは、L-1やL-2と同様に低発熱であるにも関わらず、図2に示すように若材齢時の強度発現が大きく、高いひび割れ抵抗性を有したものと推察できる。

§5. まとめ

- (1) 低放射化混和材を使用して、“1/30 低放射化コンクリート”の配合試験および基礎物性試験を行った結果、良好な性状が得られるとともに低発熱化が可能であることが分かった。
- (2) 白色セメントと低放射化混和材を使用した配合では、低熱ポルトランドセメントを使用した場合と同程度の低発熱特性を示し、十分な強度発現も得られることが分かった。
- (3) 温度応力解析を行った結果、適切な低放射化混和材の置換により、低発熱化と十分な強度発現で高いひび割れ抵抗性を示すことが分かった。
- (4) 低放射化混和材を使用して、“1/10 低放射化コンクリート”の配合試験および基礎物性試験を行った結果、ブリーディング率などの大幅な改善が見られた。
- (5) 今後は、これら低放射化コンクリートの耐久性に関して検討を行うとともに、さらに性能の高い低放射化コンクリートの開発に取り組む予定である。

謝辞 本報告は、「資源エネルギー庁・平成18年度革新的実用原子力技術開発費補助事業」の成果の一部である。

参考文献

- 1) 経済産業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公開資料, 1997
- 2) 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
- 3) Fujikura, Y. et al. : Feasibility Study on Application of Low-activation-concrete to Biological Shielding Wall in Light Water Reactor, Proceedings of 2nd ACF International Conference, pp.175-182, 2006.11
- 4) 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
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書2002年版【施工編】, 2002
- 6) 小菅啓一, 坂井悦郎, 大門正機, 浅賀喜与志: シリカフュームのポズラン反応と反応率測定方法, 土木学会, コンクリート技術シリーズ No.4, pp.1-6, 1993
- 7) Kishi T., and Saruul D. : Hydration Heat Modeling for Cement with Limestone Powder, IABSE COLLOQUIUM PHUKET, pp.133-138, 1999



藤倉 裕介

ひとこと

今後、より実用的で高性能な低放射化コンクリートの開発に努めていきたいと思っております。