

水和熱抑制型膨張材を使用したコンクリートの PCタンクへの適用性に関する検討

山田 義博* 藤原 敏弘**
伊藤 文彦*** 木原 太 ***
田中 英紀* 佐藤 善高****

要 旨

水密性が要求される構造物では、温度応力に起因するひびわれを防止するとともに、乾燥収縮に起因するひびわれも防止する必要がある。このような場合のひびわれ防止対策として、低熱ポルトランドセメントを用いて温度応力を低減し、水和熱抑制型膨張材を用いて初期の水和発熱を抑制し、かつ乾燥収縮を低減する方法が考えられる。しかし現状では、低熱ポルトランドセメントと水和熱抑制型膨張材を併用したコンクリートの諸性状に関する報告例は少ない¹⁾。

本検討では、低熱ポルトランドセメント（以下LCと記す）に水和熱抑制型膨張材を適用した場合のコンクリートの諸性状を把握することを目的として室内実験を実施した。なお、比較のために高炉セメントB種（以下BBと記す）に水和熱抑制型膨張材を適用したコンクリートについても同様の実験を行った。これらの室内実験の結果を用いて、PCタンクの温度応力解析²⁾を行い、水和熱による温度ひび割れ抑制効果を、LCを用いた場合とBBを用いた場合で相対比較することにより確認した。

1. はじめに

コンクリート構造物は、耐久性を確保するためにひび割れの発生を抑制することが不可欠である。ひび割れの原因は、フレッシュ性状から供用期間までに様々な外的及び内的因子が複雑に影響しあい生じる場合が多く、原因に応じた対策工法をいくつか組み合わせる必要がある。中でも、フレッシュから硬化過程に生じる水和熱による温度ひび割れは、主要因が温度変化であることから、これまでにプレクーリング工法やパイプクーリング工法など直接コンクリート温度を低減させる方法、超低発熱型セメント等による使用材料に期待する方法など、数多くの対策工法が採用されてきた。また、近年は、低発熱型セメントがJIS化され、現場作業の軽減化から、温度ひび割れ対策の一つとして、セメントの種類を低発熱型に変更するケースも増加傾向にある。さらに、温度ひび割れが体積変化に起因することに着目し、膨張材や収縮低減剤を併用する対策工法も適用されてい

る³⁾⁴⁾。しかし、このような検討事例はまだ少ないのが現状である。

本稿では、水密性が要求されるPCタンク側壁の水和熱による温度応力を低減するために、LCに水和熱抑制型膨張材を適用した場合のフレッシュ性状及び力学特性を室内実験により把握し、この結果を用いてPCタンク側壁の温度応力解析を実施し、ひび割れ抑制対策の検討を行った。なお、解析には高炉セメントB種と水和熱抑制型膨張材を用いたコンクリートの結果も併記している。なお、室内実験及び温度応力解析の結果は「吾妻米軍（11）貯油施設その他土木工事」のPCタンクに反映した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料の概要を表-1に示す。

2.2 配合

検討配合を表-2に示す。コンクリートの練混ぜは容

表-1 使用材料の概要

材料名	記号	備考
低熱ポルトランドセメント	LC	密度3.22g/cm ³ 、比表面積3350cm ² /g
高炉セメントB種	BB	密度3.04g/cm ³ 、比表面積3750cm ² /g
水和熱抑制型膨張材	ExM	石灰系膨張材、密度2.85 g/cm ³ 、比表面積3440cm ² /g
山砂	S	千葉県君津産、表乾密度2.58 g/cm ³ 、吸水率1.92%、粗粒率2.51
砕石（2005）	G	北海道上磯産、表乾密度2.70 g/cm ³ 、吸水率0.41%、粗粒率6.59
流動化剤	SP	メラミンスルホン酸系化合物
AE減水剤	Ag1	リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体
AE剤	Ag2	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

*技術研究所 **名古屋支店 ***横浜支店 ****土木部

表 - 2 検討配合

配合名	W/(C+ExM) (%)	s/a (%)	単体量(kg/m ³)					混和剤(ml/m ³)		
			W	C	ExM	S	G	Ag1	Ag2	SP
LC1-S	51.0	42.4	150	294	0	782	1110	14.7	735	1588
LC1-E	51.0	42.4	150	264	30	779	1108	14.7	735	0
LC1-ES	51.0	42.4	150	264	30	779	1108	14.7	735	2117
LC2	48.0	41.7	150	312	0	761	1115	15.6	780	0
LC2-E	48.0	41.7	150	282	30	759	1112	15.6	780	0
LC2-ES	48.0	41.7	150	282	30	759	1112	21.8	780	1114
BB	48.0	40.8	155	323	0	730	1110	16.2	808	0
BB-S	48.0	40.8	155	323	0	730	1110	16.2	808	1938
BB-E	48.0	40.8	155	293	30	730	1107	14.7	808	0
BB-ES	48.0	40.8	155	293	30	730	1107	16.2	808	1357

表 - 3 試験項目および方法⁵⁾

試験項目	試験方法	目標管理値	
		流動化前	流動化後
スランプ	JIS A 1101に準拠	8.0±2.5 (cm)	12.0±2.5 (cm)
空気量	JIS A 1128に準拠	4.5±1.5 (%)	
外気温度	棒状温度計で測定	-	
コンクリート温度	棒状温度計で測定	-	
圧縮強度	JIS A 1108に準拠	36N/mm ² 管理材齢はLCで56日BBで28日とした	
凝結時間	JIS A 6204を参照	-	
ブリーディング率	JIS A 1123を参照	-	
拘束膨張率	JIS A 6202付属書2 のB法を参照	材齢7日において150～250×10 ⁻⁶ 程度	

量 50 リットルの強制 2 軸ミキサを使用した。流動化剤を添加しないコンクリートは、全材料を一括投入して 60 秒間練り混ぜた。流動化剤を添加する場合は、流動化剤を添加しない場合の練混ぜを完了してから 10 分経過後に流動化剤を投入して 60 秒間練り混ぜた。

室内実験は、空調設備がない生コン工場内の試験室で実施した。

2.3 試験項目

試験項目および方法⁵⁾の一覧と、スランプ、空気量、圧縮強度、拘束膨張率の目標管理値を表 - 3 に示す。スランプ及び空気量は流動化剤を添加した配合について、流動化剤添加前、添加直後、添加後 15 分、30 分、45 分の経時変化を測定した。圧縮強度試験は、膨張材を使用した配合について、材齢 3、7、14、28、56、91 日にそれぞれ実施した。拘束膨張率測定用供試体は、打設から 1 日後に脱型し、材齢 7 日まで 20±1 の水槽に入れて養生した。その後、20±2、R.H.60±5%の恒温室で養生した。供試体は脱枠直後、材齢 3、7、14、21、28 日に測長した。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状

流動化コンクリートである配合 LC1-S 及び LC1-ES のスランプの経時変化を図 - 1 に、BB-S 及び BB-ES のスランプの経時変化を図 - 2 示す。スランプ測定時のコンクリート温度は、26.0～27.0 であった。水和熱抑制型膨張材を使用した配合 LC1-ES は、膨張材を使用しない配合 LC1-S と比較して、流動化剤添加から 45 分間のスランプロスが 3.5cm 少なかった。BB を使用した場合についても同様に水和熱抑制型膨張材の使用により、使用しない配合と比較してスランプの経時保持性が 7.5cm 向上した。これは、水和熱抑制型膨張材がコンクリートの初期における水和反応を抑制したためと考えられる。水和熱抑制型膨張材を用いることにより、流動化コンクリートの経時保持性が向上することが確認された。その効果は LC よりも BB を使用した場合の方がより顕著にみられた。

3.2 圧縮強度

圧縮強度試験はそれぞれの配合について行っているが、ここでは水和熱抑制型膨張材と LC 及び BB を使用した配合 LC2-E、BB-E の圧縮強度試験結果を図 - 3 に示す。また、それぞれの強度発現の近似式を図中にあわせて示す。LC2-E、BB-E 共に近似式の相関関係が高い。BB-E の方が LC2-E と比較して材齢初期の強度発現が良好なことが見て取れる。一方 LC2-E は長期材齢で強度の伸びが大

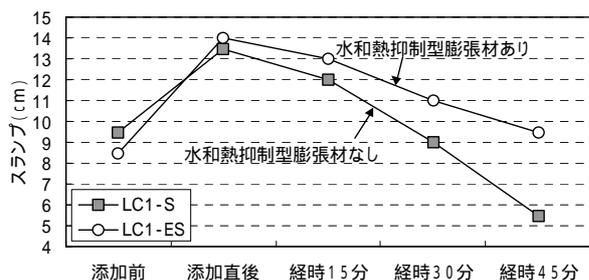


図 - 1 スラップの経時変化 (L C)

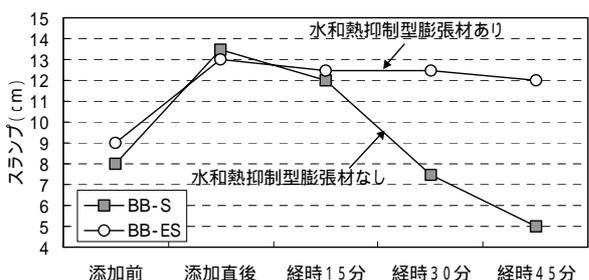


図 - 2 スラップの経時変化 (B B)

きい。材齢 7 日における BB-E に対する LC2-E の圧縮強度の比は 0.7 程度であるのに対して材齢 91 日では 0.95 と BB-E との差は小さくなる傾向にある。

3.3 凝結時間

LC と BB を使用した場合の凝結時間の測定結果を図 - 4 に示す。凝結時間を測定した期間の外気温度は 20.0 ~ 23.0 であった。LC と水和熱抑制型膨張材を使用した配合 LC2-E は、水和熱抑制型膨張材を使用しない配合 LC2 より始発時間で 100 分、終結時間で 80 分遅延した。また、LC と水和熱抑制型膨張材を併用したコンクリートに流動化剤を添加した配合 LC2-ES は、流動化剤を添加しない配合 LC2-E より始発時間で 30 分、終結時間で 40 分遅延した。同様に BB と水和熱抑制型膨張材を使用した配合 BB-E は、水和熱抑制型膨張材を使用しない配合 BB より始発時間で 135 分、終結時間で 155 分と大きく遅延した。また、BB と水和熱抑制型膨張材を併用したコンクリートに流動化剤を添加した配合 BB-ES は、流動化剤を添加しない配合 BB-E より始発時間、終結時間共に 35 分遅延した。

これら凝結の遅延は水和熱抑制型膨張材の使用によって初期の水和反応が抑制されたことによる影響と、流動化剤を添加することによって凝結が若干遅延する⁶⁾ためであると考えられる。

3.4 拘束膨張率

LC と水和熱抑制型膨張材を併用した配合 LC1-E、および、LC と水和熱抑制型膨張材を併用したコンクリ

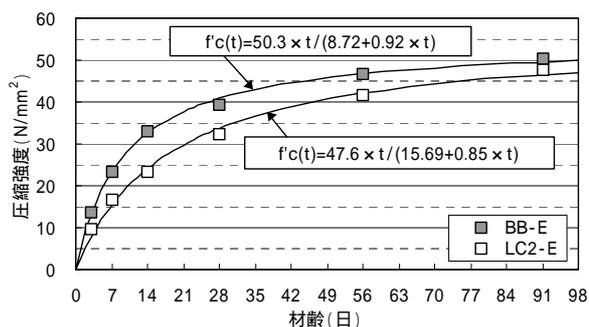


図 - 3 圧縮強度試験結果

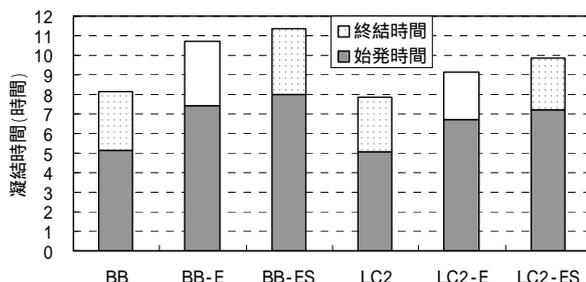


図 - 4 凝結時間

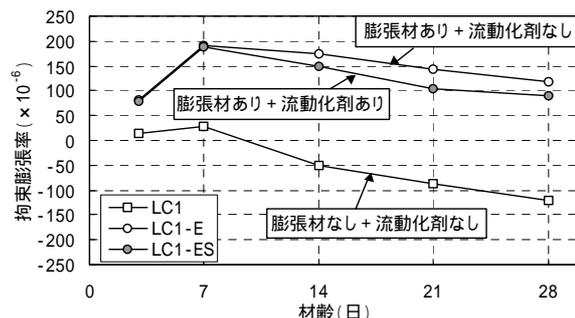


図 - 5 拘束膨張率 (L C)

ートに流動化剤を添加した配合 LC1-ES の拘束膨張率測定結果を図 - 5 に示す。なお、供試体作成時のコンクリート温度は 26.0 ~ 27.0 であった。材齢 7 日での拘束膨張率は、流動化剤添加の有無にかかわらず 190×10^{-6} 程度となり、表 - 3 に示す目標管理値⁷⁾に適合した膨張率が得られた。材齢 28 日での拘束膨張率は、配合 LC1-E で 91×10^{-6} 、配合 LC1-ES で 119×10^{-6} 、となった。水和熱抑制型膨張材の収縮補償性能が十分であることが確認された。

今回の実験では、水和熱抑制型膨張材を使用したコンクリートで良好な膨張性を確保できた。また、流動化剤の添加が、水和熱抑制型膨張材を使用したコンクリートの膨張性に与える影響は小さかった。

4. 温度応力解析

以下では室内実験より得られた結果を用いて温度応力

解析を行った。

4.1 解析対象

解析対象は「吾妻米軍(11)貯油施設その他土木工事」のPCタンクの側壁1~4リフトとした。解析は温度応力汎用プログラムを用いて行い、対称性を考慮し、軸対称1/2モデルで実施した。解析モデルを図-6に示す。

4.2 解析条件

解析は室内実験の結果をもとにLC2-EとBB-Eのそれぞれの配合を用いた場合の2ケース(以下LC、BBとする)について実施した。各リフトの打設日と打設時の外気温度を表-4に、解析条件を表-5に示す。ここで、圧縮強度については室内実験の結果を用い、圧縮強度以外については標準示方書(施工編)²⁾に準拠した。また、各セメントの打込み温度20における断熱温度上昇曲線を図-7に示す。図-7においてBBについては標準示方書(施工編)²⁾の式を、LCについては太平洋セメント株式会社の技術資料「低熱ポルトランドセメントの概要」による式を参照した。

4.3 解析結果

各リフトの解析結果を表-6に示す。また、各リフトの最小ひび割れ指数となる節点における、温度、応力、温度ひび割れ指数^{注2)}の経時変化を図-8~13にそれぞれ示す。なお、最小ひび割れ指数となる節点は各リフトとも壁断面の中央付近であった。

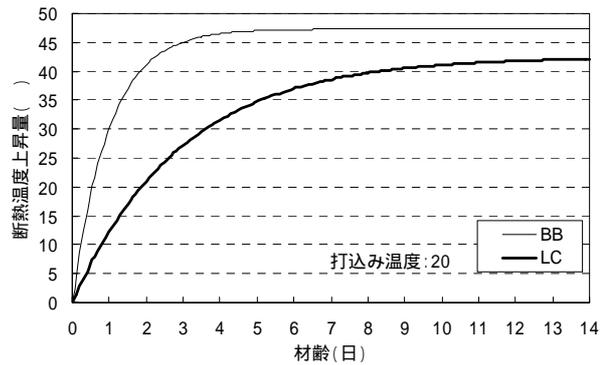


図-7 断熱温度上昇曲線

表-4 打設間隔

部位	打設日	外気温度()
側壁1リフト	5月7日	17.5
側壁2リフト	5月18日	19.7
側壁3リフト	5月29日	21.3
側壁4リフト	6月9日	22.0

表-5 解析条件

項目	解析ケース	
	BB	LC
圧縮強度推定式	$f'_c(t)=50.3t/(8.72+0.92t)$	$f'_c(t)=47.6t/(15.69+0.85t)$
引張強度推定式	$f_t(t)=0.35 f'_c(t)$	
静弾性係数推定式	$E_e(t)= (t) \times 4700 f'_c(t)$	
線膨張係数	10×10^{-6} 注1)	

注1) 既往の研究から膨張材を使用した場合の線膨張係数は使用しない場合と比較して2~3割程度減じることができると言われている³⁾が、現段階では不明な点もあるため、本解析では従来からの値を用いた。

注2) 温度ひび割れ指数 I_{cr} は、コンクリートの引張強度 $f_t(t)$ を発生する温度応力 $\sigma(t)$ で除した値 $I_{cr}=f_t(t)/\sigma(t)$ で表される²⁾。

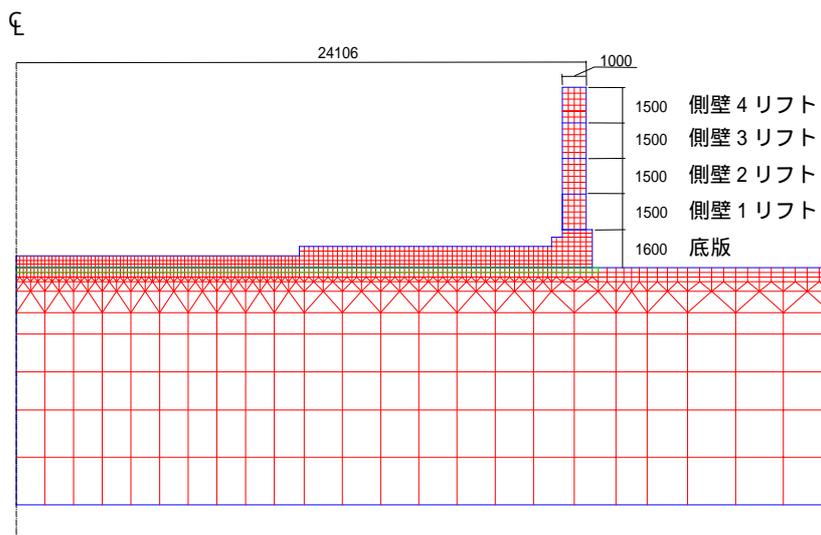


図-6 解析モデル

表 - 6 解析結果の一覧

部位	最小ひび割れ指数		最大応力 (N/mm ²)		材齢 (日)	
	B B	L C	B B	L C	B B	L C
側壁1リフト	0.70	1.21	2.61	1.34	11.9	13.6
側壁2リフト	0.75	1.32	2.43	1.22	11.9	12.9
側壁3リフト	0.77	1.32	2.39	1.22	12.1	13.1
側壁4リフト	1.03	1.76	1.90	1.15	8.5	13.5

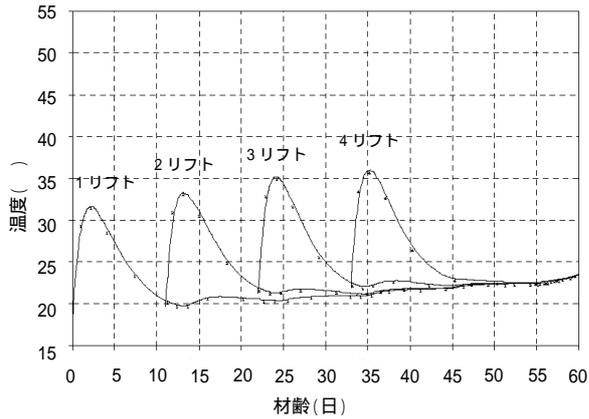


図 - 8 温度の経時変化 (L C)

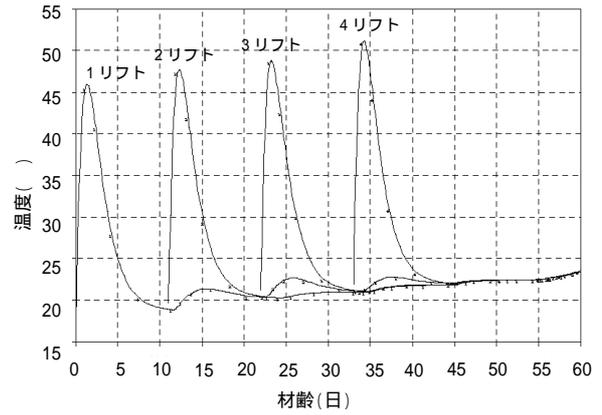


図 - 11 温度の経時変化 (B B)

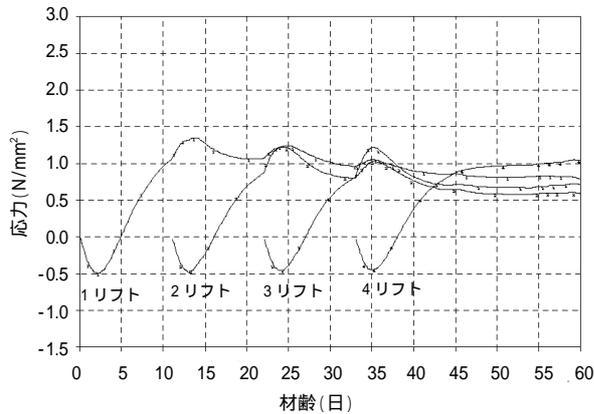


図 - 9 応力の経時変化 (L C)

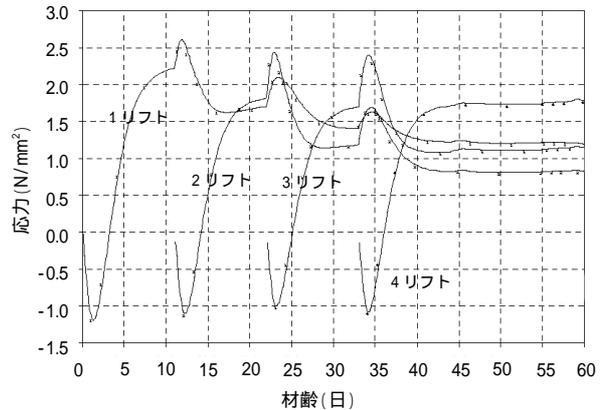


図 - 12 応力の経時変化 (B B)

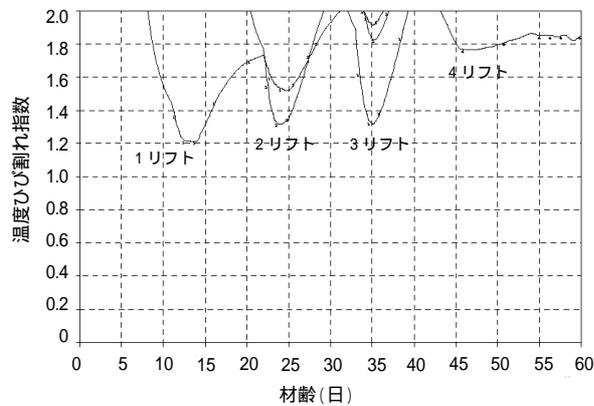


図 - 10 温度ひび割れ指数の経時変化 (L C)

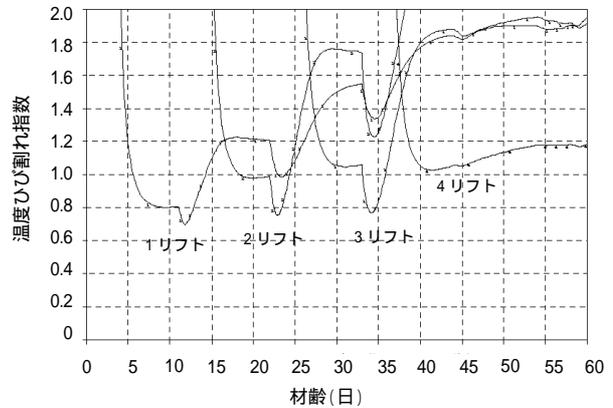


図 - 13 ひび割れ指数の経時変化 (B B)

4.4 解析結果の考察

発生する応力の経時変化を見ると、各ケース、各リフトとも、コンクリート打設直後に圧縮応力が発生し、材齢 3~5 日に引張応力に転じていることから外部拘束型のひび割れが卓越する結果となった。このことから、ひび割れが発生した場合、貫通ひび割れとなる可能性が高いと考えられる。しかし、本解析の PC タンクのように水密性が要求される構造物においては貫通ひび割れを抑制しなければならない。そのため、温度ひび割れ指数をできるだけ大きくする必要はある。

最小ひび割れ指数は各リフトとも LC が BB の 1.7 倍程度大きい値を示した。これについては、各リフトに発生する最高温度と外気温平衡時の温度との差が大きな影響を及ぼしているものと思われる。つまり、最高温度と外気温平衡時の温度との差が BB は LC の 2 倍程度大きく、それだけ温度低下時のコンクリートの収縮量も大きいため、発生する応力も大きくなったと考えられる。

最小ひび割れ指数の発生する材齢は LC の方が BB よりも 1 日程度遅くなっているが、これは断熱温度上昇曲線の傾きからもわかるように、LC の発熱速度が BB よりも小さいことによる影響と考えられる。

また、最小ひび割れ指数の発生する材齢は各リフトとも上のリフトを打ち継いだ影響が大きいことが経時変化図より見られる。

リフト間での最小ひび割れ指数はより上のリフトになるに従い大きくなる傾向となっているが、このことは、リフト高が高くなるほど拘束が小さくなることに起因している。従って、LC、BB ともに側壁 1 リフトが最も小さい温度ひび割れ指数を示す結果となった。

5. まとめ

今回の室内実験及び温度応力解析の結果から以下の知見が得られた。

- (1) 水和熱抑制型膨張材は、低熱ポルトランドセメントを使用した流動化コンクリートのスランプ保持性を向上させる。
- (2) 低熱ポルトランドセメントと水和熱抑制型膨張材を併用したコンクリートでは、水和熱抑制型膨張材を使用しない場合と比較して、始発時間が 100 分遅延し、終結時間が 80 分遅延した。
- (3) 低熱ポルトランドセメントと水和熱抑制型膨張材を併用したコンクリートで目標とする拘束膨張率を得ることができた。また、流動化剤の添加が低熱ポルトランドセメントと水和熱抑制型膨張材とを併用したコンクリートの膨張性に与える影響は小さかった。部位によってコンクリートに流動性

が要求される場合には、流動化コンクリートとして用いても問題は無いと考えられる。

- (4) 低熱ポルトランドセメントは高炉セメント B 種と比べて初期の水和発熱が少なく温度応力に起因するひび割れを抑制することが期待できる。従って、低熱ポルトランドセメントと水和熱抑制型膨張材とを併用したコンクリートは、水密性が要求される構造物のひび割れ防止対策の一つとして適用が可能であることがわかった。

今回の検討から、低熱ポルトランドセメントの使用は水和熱による温度ひび割れ低減対策の有効な手段の一つとして実施工への適用性は非常に高いと考えられる。今後は、水和熱抑制型膨張材がコンクリートの線膨張係数に与える影響を定量的に把握することも必要である。

本施工では側壁に熱電対、有効応力計、無応力計を設置し計測管理も行っている。計測結果は低熱ポルトランドセメントと膨張材を併用した温度応力の資料とするとともに、解析結果との比較を行い、マスコンクリート対策の有用なデータとしていく考えである。

【参考文献】

- 1) 竹田典典ほか：低熱ポルトランドセメントと膨張材を用いた低収縮コンクリートに関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20、No.2、pp.997-1002、1998
- 2) (社)土木学会：平成 8 年制定 コンクリート標準示方書（施工編）、1996
- 3) 藤田正樹ほか：大規模高度高度浄水施設における 20 万 m³ の低発熱型高流動コンクリートの適用、土木学会論文集、No.592、V-39、pp.147~154、1998
- 4) 中村時雄ほか：高ピーライト系低発熱セメントと水和熱抑制型膨張材を併用した高度浄水処理施設の側壁部マスコンクリート対策、コンクリート工学、Vol.36、No.9、pp.28~34、1998
- 5) (社)土木学会：平成 11 年制定 コンクリート標準示方書（規準編）、1999
- 6) (社)日本建築学会：流動化コンクリート施工指針・同解説、pp.152~153、1989
- 7) (社)土木学会：コンクリートライブラリー第 75 号 膨張コンクリート設計施工指針、pp.5~6、1993