

【カテゴリーII】

日本建築学会構造系論文集 第575号, 23-29, 2004年1月
J. Struct. Constr. Eng., AJI, No. 575, 23-29, Jan., 2004

低発熱形セメントを用いたコンクリートの寒中施工に関する研究

STUDY ON COLD WEATHER CONCRETING USING LOW-HEAT CEMENT

浜 幸雄*, 劉 宏 涛**, 友澤 史紀***
Yukio HAMA, Koto RYU and Fuminori TOMOSAWA

In this paper, properties of frost damage at early age and strength development and thermal crack were studied, for purposes of application to the mass concrete of low-heat cement in cold weather, by means of concrete experiments and temperature analysis by finite element method.

The experiments and the analysis result showed that the strength for resistance to frost damage at early age was 5N/mm², the concrete strength correction value in terms of curing temperature was calculated approximately, and was effective in the resistance of thermal crack. And then, the application ranges of construction procedures were investigated.

Keywords: Low-heat cement, Cold weather concreting, Strength development, Early-age curing period, thermal crack index

低発熱形セメント, 寒中コンクリート, 強度増進, 初期養生期間, 温度ひび割れ指数

1. はじめに

原子力発電所施設をはじめとする鉄筋コンクリート構造物の大型化に伴い、コンクリートがマッシブな部材を対象とする場合が増加し、マスコンクリートの水和熱による部材温度上昇により有害な温度ひび割れを発生する恐れがある。その対策として、水和熱を押さえるため中庸熱ポルトランドセメントや、フライアッシュB種セメントなどの低発熱形セメントの利用がなされている。しかし1997年に新しくJISに規格化された低熱ポルトランドセメントをはじめとして、フライアッシュを多量に混入した混合C種セメントなどの低発熱形セメントを用いたコンクリートの低温環境下における強度増進性状及び寒中施工時の所要初期養生期間を定めるための資料は十分に整っていない。

このため、本研究では各種低発熱形セメントを用いたコンクリートの初期凍害に対する抵抗性についての検討と、強度増進性状全体の傾向を把握し、調合を定める場合の強度補正值を試算した。また、低熱ポルトランドセメントと普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートについて有限要素法を用いて温度応力の解析を行い、マスコンクリートの低温環境下における温度・応力を計算し、マスコンクリートの所要初期養生期間及び温度ひび割れ防止の効果について比較して検討した。

2. 初期凍害と圧縮強度増進に関する実験

2.1 実験概要

(1) 使用材料

セメントは低発熱形セメントとして、低熱ポルトランドセメント(LP)、中庸熱ポルトランドセメント(MP)、フライアッシュセメントC種(FC)、及び普通ポルトランドセメントにフライアッシュを外割30%質量比で混合したもの(F0)と、比較のために普通ポルトランドセメント(OP)の5種類を用いた。各種セメントの物理試験結果を表-1に示す。フライアッシュは2種相当のものを使用し、混和剤は高性能AE減水剤標準形、AE減水剤標準形の2種類を用いた。細骨材は勇払産陸砂を、粗骨材は常盤産碎石を使用した。

(2) コンクリートの調合及び試験体の作製

コンクリートの調合は、日本建築学会「コンクリートの調合設計指針・同解説」の参考調合表に基づき、細骨材率、単位水量を試練りによって定めた。調合及び練上がりコンクリートの試験結果を表-2に示す。練混ぜは100%強制練りミキサを用いて行い、練上がりコンクリートについてスランプ、空気量、及び温度を測定した後、Φ10×20cmの円柱供試体を作製し所定の材齢までビニールシートで封かん養生を行った。

* 室蘭工業大学工学部建設システム工学科
助教授・博士(工学)

** 北海道大学大学院工学研究科 外国人研究員・博士(工学)

*** 日本大学理工学部建築学科 教授・工博

Assoc. Prof., Department of Civil Engineering and Architecture, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

Foreign Researcher, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Dr. Eng.

Prof., Department of Architecture College of Science and Technology, Nihon University, Dr. Eng.

表-1 各種セメントの物理試験結果

品質	種類	普通ポルトランドセメント			低熱ポルトランドセメント			中庸熱ポルトランドセメント	
		JIS規格値	OP試験成績	OP' 試験成績	JIS規格値	LP試験成績	LP' 試験成績	JIS規格値	MP試験成績
密度 (g/cm ³)		-	3.16	3.16	-	3.22	3.22	-	3.21
比表面積 (cm ² /g)	2,500以上	3,280	3,350	2,500以上	3,410	3,280	2,500以上	3,030	
凝結	始発	60min以上	2~20	2~20	60min以上	2~30	3~15	60min以上	3~00
	終発	10h以下	3~32	3~35	10h以下	4~05	4~40	10h以下	4~20
圧縮強さ (N/mm ²)	3d	12.5以上	28.9	30.4	-	-	15	7.5以上	21
	7d	22.5以上	43.5	44.2	7.5以上	22.6	22.8	15以上	29.1
	28d	42.5以上	61	61.1	22.5以上	51.0	51.6	32.5以上	53.7
	91d	-	-	-	42.5以上	76.7	80.6	-	-
水和熱 (J/g)	7d	-	321	323	250以下	210	225	290以下	264
	28d	-	376	375	290以下	279	278	340以下	326
三酸化硫黄 (%)	3.0以下	2.00	2.06	3.5以下	2.28	2.21	3.0以下	2.07	
珪酸三カルシウム (%)	-	-	-	-	-	-	50以下	44	
珪酸二カルシウム (%)	-	-	-	40以上	54	53	-	-	
アルミニ酸三カルシウム	-	-	-	6以下	3	3	8以下	3	

(3) 実験方法

1) 初期凍害実験

表-3に初期凍害実験の実験計画を示す。ここでは、前養生、空気量及び凍結融解時の吸水の有無の条件を変化させた実験を行った。作製した供試体を、温度20℃及び5℃で圧縮強度5N/mm²をはさむように定めた4材齢まで前養生を行った後、凍結融解開始時の圧縮強度試験を行うとともに、+10℃～-18℃の気中凍結水中融解を4サイクル(6h/cycle)繰り返した。その後20℃で所定の材齢まで封かん養生し圧縮強度試験を行い、凍結融解作用を受けたコンクリートと受けないコンクリートの同一積算温度における圧縮強度を比較することにより初期凍害の有無を判断した¹⁾。

表-3 初期凍害実験の計画

セメント種類	W/C (%)	空気量 (%)	前養生 (℃)	凍結融解時の吸水の影響	圧縮強度試験材齢	
					前養生の確認	初期凍害の確認
OP LP MP FC FO	50	3.5	5	なし (封かん)	840°D-D (OP, LPは2,730°D-D)	初期4材齢 (5N/mm ² 前後)
			20		840°D-D 2,730°D-D	
		3.5	5		840°D-D	
	OP' LP'	1.0	5			5 20
			あり (吸水)			

2) 強度増進実験

表-4に強度増進実験の実験計画を示す。作製した供試体を温度20℃及び5℃で所定の材齢まで封かん養生を行い、圧縮強度を測定した。圧縮強度試験の材齢は、初期凍害実験での凍結融解開始時の4材齢に加えて、210、420、840、1,680、2,730°D-Dの合計9材齢とした。

2.2 実験結果及び考察

(1) 初期凍害に対する初期養生条件の検討

図-1に凍結融解開始時の圧縮強度と凍結融解作用を受けないコンクリートに対する凍結融解作用を受けたコンクリートの強度比の関係を示す。ここでは、初期凍害の判断基準として、840°D-D、2,730°D-Dでの強度比が0.9以上のものを初期凍害を受けていないと判断した。

表-4 強度増進実験の計画

セメント種類	W/C (%)	空気量 (%)	養生温度 (℃)	養生条件	圧縮強度試験材齢
OP LP' MP FC FO	50	3.5	5 20	封かん養生	初期4材齢(5N/mm ² 前後)+ 210, 420, 840 1,680, 2,730°D-D

表-2 コンクリートの調合及び練上がりコンクリートの試験結果

記号	化 學 混和材	セメント種別	W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	質量調合 (kg)					AE剤 (C×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)
							W	C	S	G	FA				
OP-HP	高性能 AE減水剤	普通ポルトランドセメント	50	21	48.0	168	336	877	956	-	1.1	0.001 0.003 0.040 0.040	21.5 21.0 21.5 19.0 20.0 12.5	4.5 4.1 3.2 3.3 1.6 3.8	19.0 18.0 20.0 19.0 17.5 19.5
		低熱ポルトランドセメント			47.8	168	337	879	958	-	1.1		22.0	3.3	20.0
		中庸熱ポルトランドセメント			47.8	168	337	879	958	-	1.1		19.0	3.7	19.5
		フライアッシュセメントC種			46.9	168	235	840	956	101	1.0		21.5	3.9	19.0
		フライアッシュ外割置換			44.2	168	336	756	956	101	0.8		19.5 20.0	1.7 1.6	19.5 17.5
		普通ポルトランドセメント			48.9	160	320	912	956	-	250ml/C=100kg		10.0 10.5	3.5 3.7	19.5 17.5
LP-SP	AE減水剤	低熱ポルトランドセメント	50	3.5	48.7	160	321	914	958	-	250ml/C=100kg	0.001 0.003 0.040 0.040	14.0 13.5 12.5 10.5	3.8 3.9 3.8 4.3	20.0 19.5 19.0 16.5
		中庸熱ポルトランドセメント			48.7	160	321	914	958	-	250ml/C=100kg		9.0	2.6	18.5
		フライアッシュセメントC種			48.3	157	220	890	956	94	250ml/(C+F)=100kg		6.0	4.0	19.5
		フライアッシュ外割置換			45.1	163	326	781	956	98	250ml/(C+F)=100kg		12.5 10.5	3.8 4.7	18.0 16.5
		普通ポルトランドセメント			48.9	160	320	912	956	-	250ml/C=100kg		8.5	3.1	20.0
		低熱ポルトランドセメント			48.7	160	321	914	958	-	250ml/C=100kg		16.5	4.4	18.5
OP'-nAE	-	普通ポルトランドセメント	1.0	12	47.4	188	376	857	956	-	-	11.0 18.0	1.7 1.1	23.0 19.0	
		低熱ポルトランドセメント			47.6	188	376	864	956	-	-		-	-	

注: 練上がりコンクリートの試験結果は上段が5°C養生、下段が20°C養生のものとする。

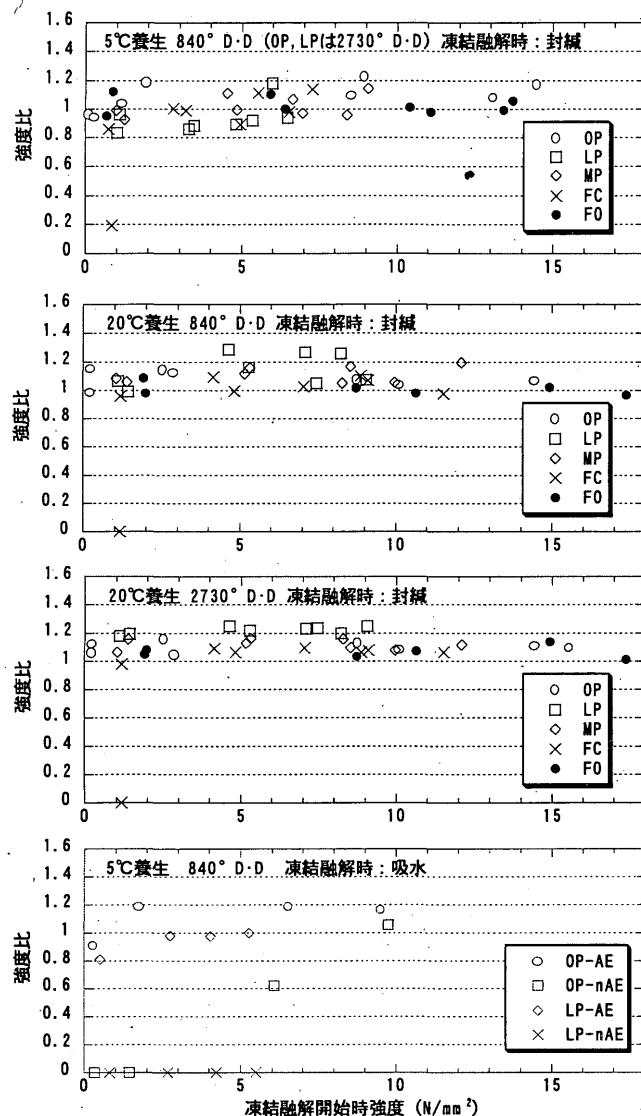


図-1 凍結融解開始時の強度と凍結融解の有無による強度比の関係

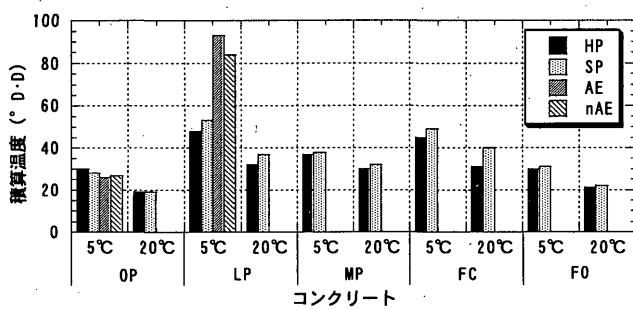


図-2 セメント種別ごとの圧縮強度 5N/mm²を得る積算温度

凍結融解を封かん状態で行った場合のコンクリートでは、初期のFCの一点を除いて大幅な強度低下を示しておらず、特に凍結融解開始時の強度が5N/mm²以上での強度比はほとんど0.9以上になっており、低発熱形セメントにおいても普通ポルトランドセメントと同様の傾向を示し、初期凍害を受けていないと判断できる。ここで、FCでは、コンクリートの空気量が1.7、1.6%と小さいことが、初期凍害を受けた理由の一つと考えられる。

さらに、凍結融解時に、コンクリートに吸水の影響があるものでも、LP、OPともにAEコンクリートとしたLP-AE、OP-AEは初期凍

害を受けていないが、nonAEコンクリートでは凍結融解時の強度が小さいと840°D-D時においても強度回復が認められず初期凍害を受ける結果となった。この結果から、既往の研究の結論^{2),3)}と同じように、適切な空気量を混入することが初期凍害に対して有効であることが確認できた。

図-2に圧縮強度5N/mm²を得るのに必要な積算温度を示す。セメント種別によらず5°Cで養生した場合、20°Cと比べると5N/mm²を得るのに必要な積算温度は大きくなっている。低発熱形セメントでは初期の強度発現が遅く、普通ポルトランドセメントに比べ長い期間

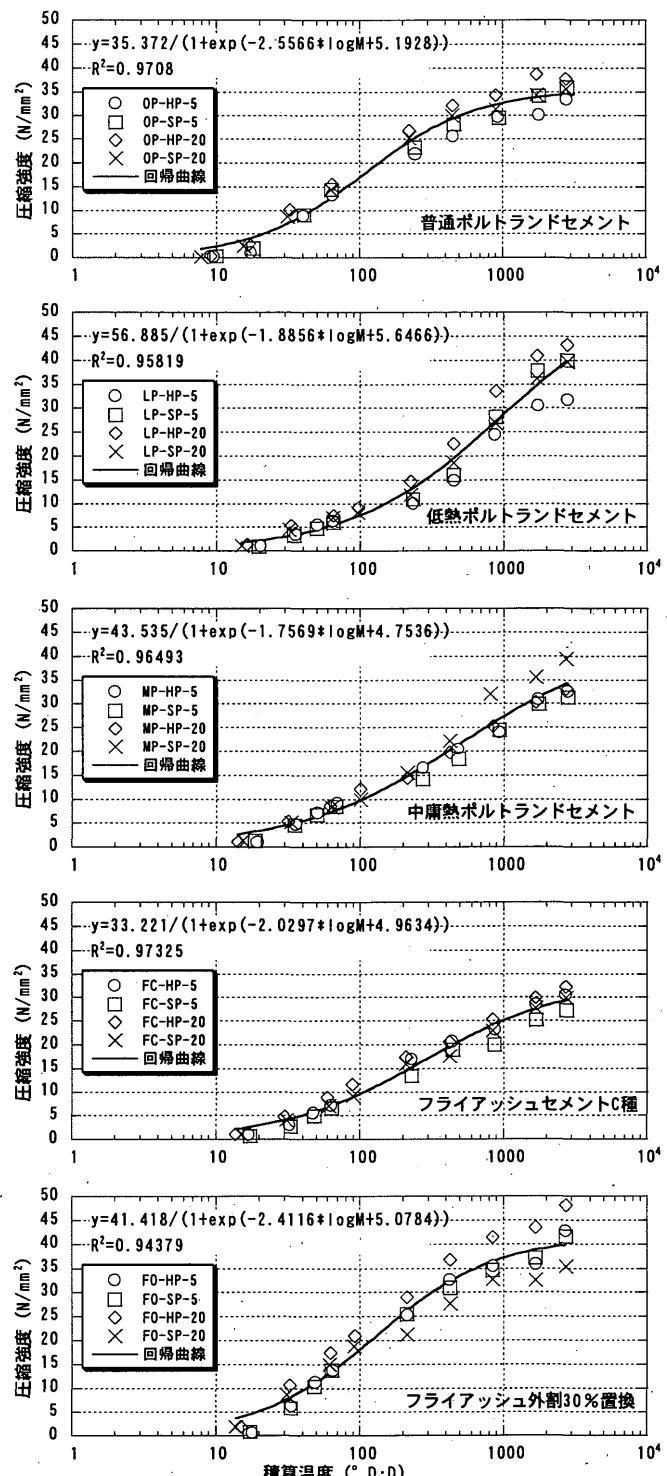


図-3 セメント種別ごとの強度増進性状

が必要となり、LP、FC は OP の約 2～4 倍程度必要になっている。しかし、フライアッシュを外割で 30% 混合したものでは普通ポルトランドセメントとほぼ同程度の積算温度で 5N/mm^2 が得られる。

また、AE、nonAE シリーズは、HP、SP シリーズとセメントの製造ロットが異なっているが、普通ポルトランドセメントでは両シリーズで 5N/mm^2 を得る積算温度に差がないにもかかわらず低熱ポルトランドセメントでは HP、SP シリーズで $50^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 程度、AE、nonAE シリーズで $90^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 程度と大きな差が見られる。この理由については、セメント、混和剤、単位セメント量及び空気量等の違いの影響も考えられ、明らかではないが、表-1 に示した物理試験結果においても、両シリーズのセメントの比表面積及び凝結時間に差が見られ、AE、nonAE シリーズのセメントの比表面積が小さく、凝結時間も遅くなっています。特に 5°C という低温環境では、元来初期強度発現の遅い低熱ポルトランドセメントではこれらの性状が 5N/mm^2 を得る積算温度に大きな影響を及ぼしている可能性がある。今後さらに検討する必要があると考えている。

以上より、低発熱形セメントを用いたコンクリートにおいても、普通コンクリートと同様に AE コンクリートを用いて圧縮強度 5N/mm^2 が得られるまで凍結させないという初期凍害防止の基本⁴⁾は同様に扱うことができるが、初期の強度増進の遅れを考慮して初期養生期間の延長と初期強度管理が重要であると言える。

(2) 強度増進性状の把握

図-3 にセメント種別ごとの積算温度と圧縮強度の関係を示す。また、図中にはロジスティック曲線による回帰式と相関係数をあわせて示している。本実験で用いたいずれの低発熱形セメントにおいても、既往の研究⁵⁾と同様に、積算温度関数式を用いたロジスティック曲線により比較的精度よく強度増進性状が表わされている。しかし、混和剤の違いにより、特に $840^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 付近から強度のバラツキが大きくなっています。F0 でその傾向が強くなっています。

JASS 5N-2001⁶⁾では、強度補正值として普通ポルトランドセメント、フライアッシュ B 種セメント、中庸熱ポルトランドセメント及び中庸熱とフライアッシュの混合のものの場合について示されているが、フライアッシュ C 種セメント、低熱ポルトランドセメントの場合には示されていない。そこで本研究では、各種低発熱形セメントを用いたコンクリートに対して予想平均養生温度による強度補正值を試算した。図-4 に品質基準強度を 30N/mm^2 、調合強度を定める材齢を 56 日（普通ポルトランドセメントでは 28 日）と想定した場合のセメント種別によるコンクリートの強度増進性状を図-3 より得られたロジスティック曲線の係数を用いて算出して示す。低発熱形セメントを用いたコンクリートでは若材齢における強度発現は小さいものの、長期材齢での強度増進が大きく、特に低熱ポルトランドセメントでその傾向が顕著である。ここでは、調合強度を定める材齢を 28、42、56 及び 91 日とし、品質基準強度を 30N/mm^2 と想定した場合の強度増進曲線から、管理材齢までの予想平均養生温度から求まる積算温度に対応する強度を算出し、その値と品質基準強度との差を求め、予想平均養生温度と強度差の関係から 3N/mm^2 きざみの強度補正值を定めた。なお、強度差が 1.5N/mm^2 までは強度補正值は 0N/mm^2 、 $1.5 \sim 3.0\text{N/mm}^2$ で 3N/mm^2 、 $3.0 \sim 6.0\text{N/mm}^2$ で 6N/mm^2 とした。例として図-5 に低熱ポルトランドセメントで調合を定める材齢を 56 日とした場合の管理材齢 56 日、91 日での予想平均養生温度

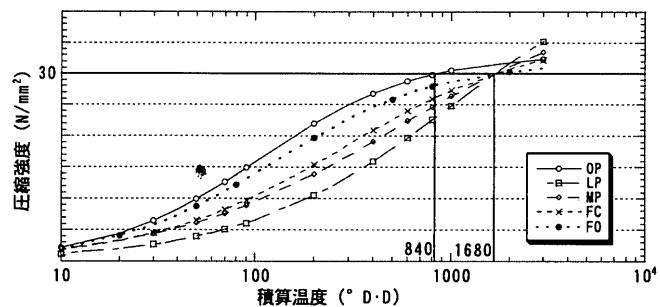


図-4 品質基準強度 30N/mm^2 で調合を定める材齢 56 日とした場合のセメント種別による強度増進性状の比較

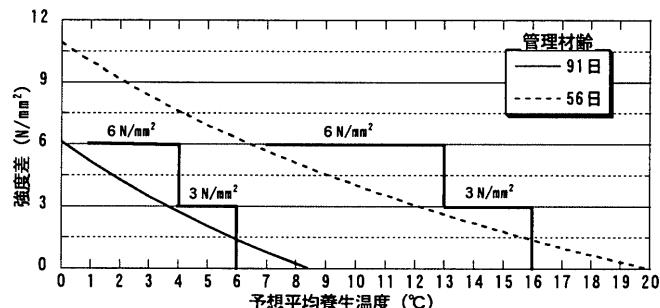


図-5 予想平均養生温度と強度差の関係の一例
(低熱ポルトランドセメントの調合を定める材齢 56 日)

表-5 予想平均養生温度によるコンクリート強度補正值の試算

セメントの種類	調合を定める材齢(日)	管理材齢(日)	コンクリート打ち込みから管理材齢までの期間の予想養生温度の範囲(°C)
LP	28	28	17 以上 14 ~ 17 9 ~ 14
		42	8 以上 6 ~ 7 3 ~ 6
		56	4 以上 2 ~ 3 0 ~ 2
		91	0 以上 - -
	42	42	17 以上 13 ~ 17 8 ~ 13
		56	10 以上 8 ~ 10 4 ~ 8
		91	3 以上 1 ~ 3 0 ~ 1
		56	16 以上 13 ~ 16 7 ~ 13
	56	91	6 以上 4 ~ 6 1 ~ 4
		91	15 以上 11 ~ 15 5 ~ 11
		28	16 以上 12 ~ 16 6 ~ 12
		42	8 以上 5 ~ 8 1 ~ 5
	MP	56	3 以上 1 ~ 3 0 ~ 1
		91	0 以上 - -
		42	15 以上 11 ~ 15 5 ~ 11
		56	9 以上 6 ~ 9 1 ~ 6
		91	2 以上 0 ~ 2 -
		56	15 以上 10 ~ 15 4 ~ 10
		91	5 以上 3 ~ 5 0 ~ 3
		91	13 以上 8 ~ 13 1 ~ 8
		28	15 以上 11 ~ 15 5 ~ 11
		42	7 以上 4 ~ 7 0 ~ 4
		56	3 以上 1 ~ 3 0 ~ 1
		91	0 以上 - -
FC	28	42	14 以上 9 ~ 14 3 ~ 9
		56	8 以上 4 ~ 8 0 ~ 4
		91	1 以上 0 ~ 1 -
		56	13 以上 7 ~ 13 1 ~ 7
	42	91	4 以上 1 ~ 4 0 ~ 1
		91	10 以上 5 ~ 10 0 ~ 5
		28	12 以上 7 ~ 12 1 ~ 7
		42	5 以上 1 ~ 5 0 ~ 1
	56	56	1 以上 0 ~ 1 -
		91	0 以上 - -
		42	9 以上 4 ~ 9 0 ~ 9
		56	5 以上 1 ~ 5 0 ~ 1
FO	56	56	7 以上 2 ~ 7 0 ~ 2
		91	1 以上 0 ~ 1 -
		91	4 以上 0 ~ 4 -
		91	91 0 ~ 4 -
予想平均養生温度によるコンクリートの強度補正值 (N/mm^2)			0 3 6

と強度差の関係を示す。この場合、管理材齢を 56 日としたものは予想平均養生温度が 16°C 以上の時で温度補正值が 0N/mm²、13 ~ 16°C で 3N/mm²、7 ~ 13°C で 6N/mm² と求められる。同様の方法で、本研究で用いた各低発熱形セメントについて予想平均養生温度によるコンクリートの強度補正值を求めた結果を表-5 に示す。なお、MP については、JASS 5N-2001⁶⁾に示された強度補正值の標準値^{6),7)}と比較すると約 1°C 小さな値を示しているが、全体的に同様な傾向を示している。

3. 温度解析によるマスコンクリートの温度ひび割れ防止効果の検討

一般に、低発熱形セメントは低温による強度増進が遅れるなど、寒中コンクリートに利用することは得策ではないとされてきた。しかし低温養生したマスコンクリートや、高強度コンクリート等、水

和熱によって温度ひび割れの発生の恐れがある場合、これらを利用すると温度ひび割れ防止には効果的なものと考えられる。そこで、本研究では、低発熱形セメントを寒中マスコンクリートへ適応することを想定して、実施困難な実大実験のかわりに有限要素法の温度解析手法を用いて低熱ポルトランドセメントを使用した寒中マスコンクリートの温度・応力を解析を行い、普通ポルトランドセメントを使用した同一条件のコンクリートと比べて、その温度ひび割れ防止効果を検討することとした。

3.1 FEM による温度応力解析の概要

日本コンクリート工学協会のマスコンクリートの温度・応力計算用パソコンプログラムの有限要素法による方法を用いて、既設コンクリートの上に打込まれたスラブ状マスコンクリート部材を想定して、低温環境下の温度及び応力解析を行った。解析は普通ポルトランドセメントと低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートについて、外気温 5°C、コンクリートの単位セメント量 300kg/m³、打込み温度 10°C とし、スラブ部材の厚さを 0.5 m ~ 3.1 m まで変化させて解析を行った。解析の概要を表-6 に、対象としたスラブ状部材の解析モデルを図-6 に示す。なお、部材は左右対称な形状であるため右半分だけを解析した。また、解析に用いた諸係数は土木学会標準示方書⁸⁾を参考に定め、低熱ポルトランドセメントについては既往の文献⁹⁾を参考にして定めた。表-7 に解析に用いた諸係数を示す。

3.2 所要初期養生期間の検討

解析結果の一例として、厚さ 1.7m のスラブ部材の表面部の積算温度と材齢の関係を図-7 に示す。LP 部材では、OP 部材より発熱量が小さいために傾きが小さい。ここで、初期凍害防止に必要な 5N/mm²を得る積算温度として、図-2 に示した初期凍害実験における 5°C 養生の場合の OP と LP の値を用いて、初期凍害防止のために必要な養生期間を図-7 によって求めた。なお、低熱ポルトランドセメントの製造ロットによるバラツキについては、最も積算温度の大きな LP-AE の値を用いることで安全側の対応をした。また、マスコンクリートの場合でも、LP 部材では、発熱が小さいために同一材齢で得られる積算温度が小さいうえに、低温での強度発現が遅いことにより 5N/mm² を得る積算温度が OP 部材に比べてかなり大きく、所要初期養生期間として、本例の場合、OP 部材では約 1 日であるのに対して、LP 部材では約 3.7 日必要との結果となった。

表-6 温度応力解析の概要

コンクリートの条件		打込 温度 (°C)	養生 温度 (°C)	基礎条件	部材条件		
セメント 種類	単位セ メント量 (kg/m ³)				種類	厚さ (mm)	養生条件及び養生材の熱伝導率 (W/m ² K)
普通ポルトランド セメント(OP)	300	50	10	5	既設コンクリート基礎	スラブ (図-6に 参照) 500 ~ 3100	側表面: 合板型枠 8.14
低熱ポルトランド セメント(LP)						上表面: シート	5.81

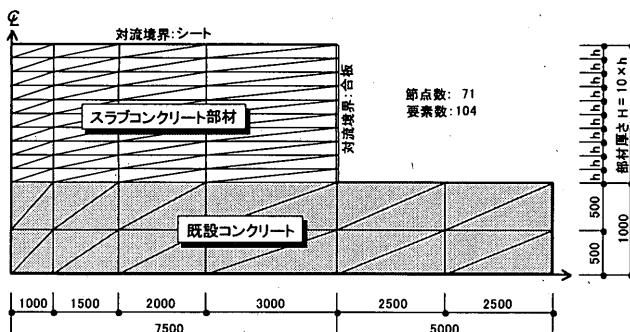


図-6 解析モデル

表-7 各種材料の諸係数

	普通ポルトランドセメント	低熱ポルトランドセメント
$Q(t)=Q_{\infty}(1-\exp(-\gamma t^{\delta}))$		
終局断熱温度上昇量 Q_{∞} (°C)	47	43
係数 γ	0.59	0.35
係数 δ	1.00	0.63
比熱 (J/kg°C)	1,150	
熱伝導率 (W/m°C)	1.98	
密度 (kg/m ³)	2,300	
熱損失係数 (W/m ² °C) [合板]	8.14	
[シート]	5.81	
引張強度式	$f_t(t) = c f_c(t)^d$	
係数 c	0.35	0.19
係数 d	0.50	0.79
ヤング係数式	$E(t) = c \alpha A f_c(t)^B$	
A	0.4427	
B	0.5	
ボアソン比	0.2	
熱膨張係数 (°C)	10×10^{-6}	

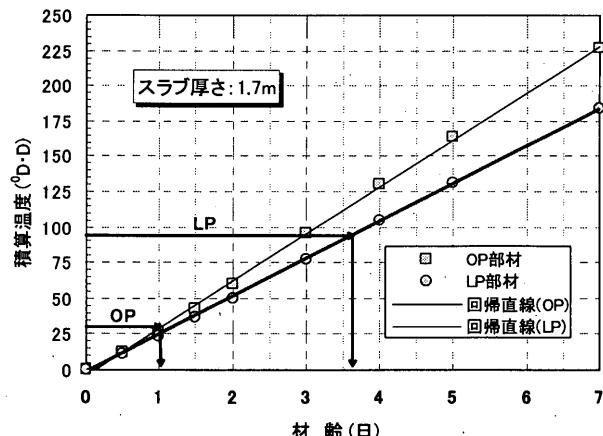
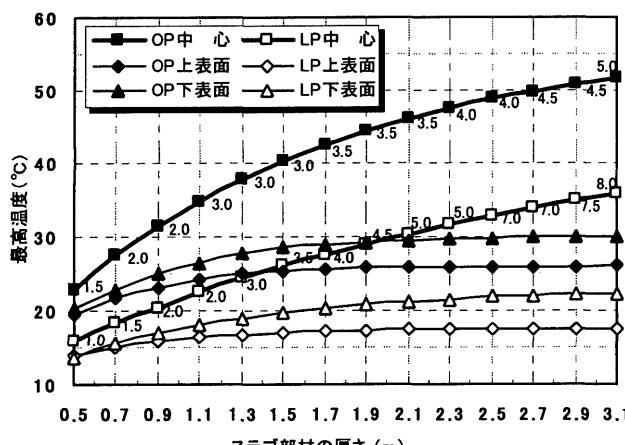
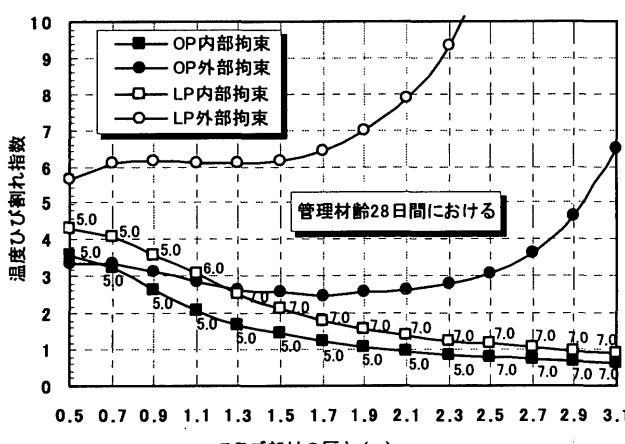


図-7 部材表面部の積算温度と材齢の関係



注：図中の数字は部材中心部の最高温度の到達時の材齢を示すものである。

図-8 部材の最高温度の比較



注：図中の数字は部材の温度ひび割れ指数の最小時の材齢を示すものである。

図-9 部材の温度ひび割れ指数の比較

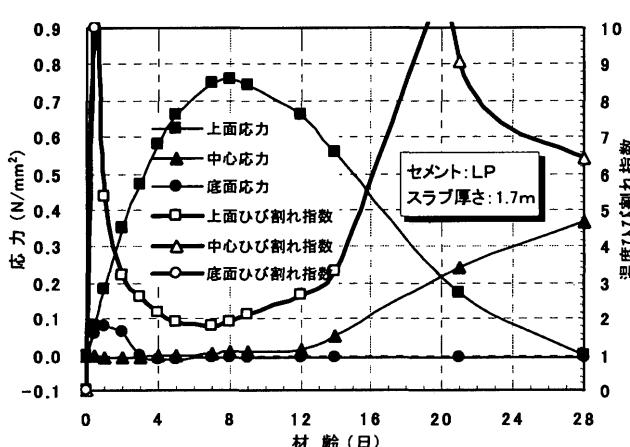


図-10 部材の温度応力・温度ひび割れ指数の経時変化

3.3 温度ひび割れ防止効果の検討

まず、スラブ部材の厚さを変化させて解析した最高温度の結果を図-8に示す。同図によると、部材の中心部の最高温度は厚さが厚いほど高く、到達する材齢も長い。また、LP部材は、OP部材より中心部最高温度が部材の厚さが厚くなるにつれて温度の上昇量が小さくなつた。このことからコンクリート部材が厚いほどLPの温度上昇を低減する効果が大きいことが分かった。なお、部材表面部の最高温度は、中心部よりかなり小さく、部材の厚さがある程度(1.5m)以上になると、温度の上昇はほとんど見られない。これは、部材表面部の対流境界の大きい熱損失係数に依存する結果になったと考えられる。

次に、管理材齢28日における部材の内外拘束応力に起因した温度ひび割れ指数の比較を図-9に示す。ここで温度ひび割れ指数は

$$\text{温度ひび割れ指数} = \text{引張強度} / \text{温度応力}$$

で表されるもので、温度ひび割れ指数が小さくなるほど温度ひび割れが発生しやすいことを意味する。同図によれば、LP部材はOP部材より温度ひび割れ指数が大きい。また、部材の厚さが厚くなるほど外部拘束より、内部拘束による温度ひび割れ指数のほうが小さくなる。そして部材の厚さが厚くなるとともに温度応力の最大時の材齢も次第に推移するのに対して、内部拘束温度ひび割れ指数の最小値時の材齢が5~7日に集中していることが判明した。このことから、マスコンクリート部材は初期材齢における表面部のひび割れの発生の確率が大きいと言える。

一例としてLPを用いた厚さ1.7mのスラブ部材の温度応力・ひび割れ指数の経時変化を図-10に示す。同図では、管理材齢の28日においては、温度応力が材齢8日における部材の上表面に最大となり、温度ひび割れ指数は材齢6日における部材の上表面で最小となっている。これは、初期材齢の部材では、急激に上昇する温度によって生じた大きな温度応力に対して、低い外気温に曝されている表面部の初期強度(引張り強度)がまだ弱いため、ひび割れ指数は最も小さい値となると考えられる。このことから、寒中マスコンクリートの施工の際、低熱ポルトランドセメントを使用したコンクリートの初期温度ひび割れの防止が非常に重要であることと思われる。また、材齢の進行に伴い、中心部付近の外部拘束による温度応力が増加していく傾向にある。

また、LP部材とOP部材の中心部と表面部の温度差と、温度ひび割れ指数の関係及び両者間の比較を図-11に示す。同図によれば中心部と表面部の温度差が大きくなるにつれて、温度ひび割れ指数も小さくなる。同一温度差に対してLP部材の温度ひび割れ指数はOP部材より小さい値を示している。これはLP部材では温度応力が小さくても強度が十分に発現していないためと考えられる。

最後に、部材の中心部と表面部の温度差及び温度ひび割れ指数

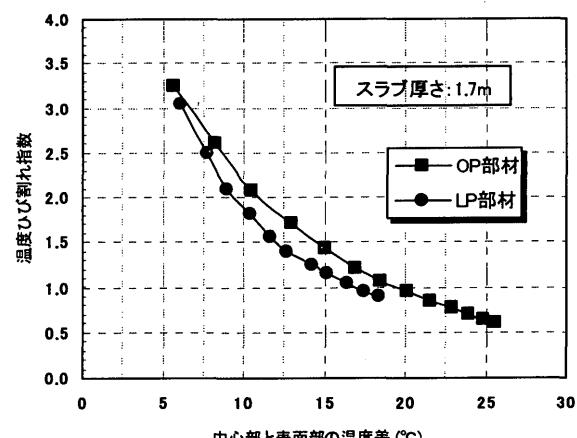


図-11 部材の中心部と表面部の温度差と温度ひび割れ指数の関係

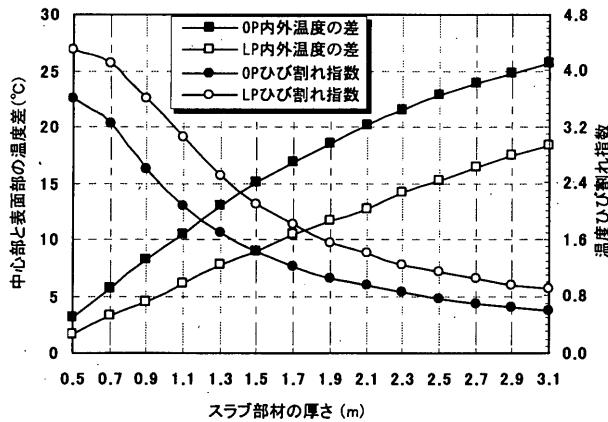


図-12 温度ひび割れ指数の評価による適用範囲の検討

と、スラブ部材の厚さとの関係を図-12に示す、同図に示すように、LP部材はOP部材より中心部と表面部の温度差が小さく、温度ひび割れ指数が大きいことから、低熱ポルトランドセメントの温度ひび割れ防止に対する有効性を確認することができた。なお、本検討の範囲では、低熱ポルトランドセメントを利用することによる効果は、部材の中心部と表面部の温度差で1.5～7.3°C程度の低減、温度ひび割れ指数で0.3～0.9程度の低減となった。

4 まとめ

- (1) 低発熱形セメントを用いた場合でも、普通コンクリートと同様に、AEコンクリートとして圧縮強度5N/mm²が得られるまで凍結させないことが初期凍害防止の基本となる。
- (2) 低発熱形セメントを用いたコンクリート初期の強度発現については、フライアッシュの外割で混合したセメント（普通ポルトランドセメントにフライアッシュを外割30%質量比で混合したもの）は、普通ポルトランドセメントとほぼ同等であったが、低熱ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント及びフライアッシュC種セメントは、初期強度の発現が遅く所要初期養生期間が長くなるため、十分な初期養生期間の確保と初期強度発現の管理が重要である。
- (3) 各種低発熱形セメントを用いたコンクリートの強度増進性状を把握し、調合計算に必要とする予想平均養生温度による強度補正值を試算して提案した。
- (4) 有限要素法によるスラブコンクリート部材の温度応力解析を行い、その結果は、本検討の範囲では、低温環境下に施工する低熱ポルトランドセメントを用いたマスコンクリート部材は、普通ポルトランドセメントを用いた同一条件下の部材と比べて、温度ひび割れ防止に有効であることが確認できた。ただし、低熱ポルトランドセメントを利用したコンクリートでは、強度発現は遅いため、温度応力が小さくてもひび割れの発生する可能性があることに注意しなければならない。

謝 辞

本研究は日本建築学会：原子力発電所鉄筋コンクリート工事小委員会（主査：嵩英雄）寒中・暑中コンクリートWG（主査：和美廣喜）の活動の一部として行ったものであり、研究の遂行にあたり、須川史崇氏（当時大学院生、現大林組株）の協力を得た。

ここに、謹んで関係諸氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 明石峰子：コンクリートの凝結性状と初期凍害耐力に及ぼす耐寒用混和材の効果、北海道大学卒業論文、1993.11
- 2) 金武漢、横山隆、田畠雅幸、鎌田英治、洪悦郎：コンクリートの初期凍害耐力に及ぼす空気量の効果に関する研究（第1報 普通コンクリートの場合）、日本建築学会論文報告集No.266, pp.1～9, 1978.4
- 3) 横山隆：コンクリートの初期凍害に及ぼす空気量の影響、北海道大学修士論文、1977.2
- 4) 日本建築学会：寒中コンクリートの施工指針・同解説, pp.1～6, 1998.2
- 5) 洪悦郎、鎌田英治、田畠雅幸、浜幸雄：ロジスティック曲線を応用了したコンクリート強度推定式の提案、日本建築学会構造系論文報告集No.367, pp.1～7, 1986.9
- 6) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事, pp.119～124, 2001.5
- 7) 桧田佳寛、佐藤幸恵、中村成春、嵩英雄：低発熱形セメントを用いたコンクリートの予想平均養生温度による強度補正值、日本建築学会構造系論文集No.535, pp.7～12, 2000.9
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書 施工編, pp.184～191, 1996.3
- 9) 小田部裕一、寺野宜成、鈴木康範：高ビーライトセメントの発熱特性、セメントコンクリート論文集No.51, pp.334～339, 1997.12

(2003年3月24日原稿受理, 2003年10月1日採用決定)