

5. 高ビーライト系コンクリートを用いた マスコンの温度特性に関する調査研究

高見 錦一 服部 博*¹
崎山 和隆 長谷川茂久*¹

要 旨

マスコンクリートの温度ひび割れを抑制するためには、低発熱型のポルトランドセメント（ビーライトセメント）を用いて、コンクリートの水和熱の発生を少なくする方法が有効である。

この度、実施工においてビーライトセメントを用いたコンクリートを使用した結果、良好な温度特性が得られ、施工性、およびコンクリート強度とも良好な結果が得られた。

本報告は、実施工するにあたり行った温度特性の調査と、実施工での温度計測結果およびコンクリートの品質について述べる。

キーワード

マスコンクリート／ビーライトセメント／温度ひび割れ／温度特性

目 次

1. はじめに
2. 概 要
3. コンクリートの温度応力解析
4. 温度特性室内試験
5. 温度特性調査実機試験
6. 実施に伴う温度計測とコンクリートの品質
7. ま と め

5. STUDY ON THE THERMAL PROPERTIES OF MASS CONCRETE WITH A HIGH CONTENT OF BELITE

Kin-ichi Takami Hiroshi Hattori
Kazutaka Sakiyama Shigehisa Hasegawa

Abstract

An effective way of controlling thermal cracking in mass concrete is to use low-heat portland cement (belite cement), thus reducing the amount of heat of hydration generated.

Upon using concrete with belite cement in an actual construction, its thermal properties were found to be satisfactory, and adequate results were obtained in terms of both workability and concrete strength.

This paper reports on a survey of thermal properties, as well as on the results of measurements of temperature and concrete quality, all conducted during actual construction work.

*1 東京本店建築部工事課

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の大型化、および施工方法の進歩発展に伴い、従来のマスコンクリートより更に規模の大きいマスコンクリートが施工されるようになってきた。

このような大規模のマスコンクリートでは、セメントの水和熱によって温度応力が発生し、構造物にひび割れが発生する。この温度ひび割れを抑制するためには、製造段階でのコンクリートのブリーキングや、施工段階でのパイプクーリングなどの方法があるが、いずれの方法も特殊な装置が必要であり、そのうえ工程がかかって、コストアップにつながるという問題がある。セメントの水和熱による発熱量を抑制するため、中庸熱セメントとか、高炉セメントの使用が検討されているが、絶対的な効果もみられず、近年開発された低発熱セメントがその中でも効果があるものとして脚光を浴びてきている。

低発熱セメントには、スラグやフライアッシュを混合した混合セメントと、セメント成分中のピーライト成分の比率を増加させたピーライトセメントとがある。前者の混合セメントは、材料の配合次第でコンクリートの性状が微妙に影響されるためその品質管理が難しく、その上、中性化など耐久性においても問題がある。後者のピーライトセメントは、品質管理が容易であり、諸物性も安定しているが、比較的新しいセメントであるため使用実績に乏しい。したがって、その使用にあたっては、温度履歴や諸物性に関するデータを収集しておくことが必要である。

本報告は、約5000m³のマスコンクリートにピーライトセメントを採用するにあたり、前もって温度特性の調査を行い、それを基に実施工での温度履歴とコンクリート強度について調査した結果を述べるものである。

2. 概 要

2.1 ピーライトセメント概要

ポルトランドセメントは、クリンカーに3～4%の石膏を混合し、粉碎して製造される。そのセメントクリンカーを構成している化合物は、ケイ酸カルシウムと間隙相に分けられ、クリンカーの70～80%をケイ酸カルシウムが占める。ケイ酸カルシウムは、その組成により短期強度発現性に優れるが、水和熱の大きなエーライト(C₃S)と、長期強度発現性に優れ水和熱の小さなピーライト(C₂S)の2つがある。間隙相にはアルミネート相とフェライト相がある。

ピーライトセメントはセメント成分中のピーライトの比率を上げ、間隙相を極力少なくしたセメントである。そのため初期強度の発現は小さいが、水和に伴う発熱が少なく、特に初期材令での温度上昇速度が小さいのが特徴である。

今回使用したピーライトセメントと中庸熱ポルトランドセメント、普通ポルトランドセメントの成分を表-1に、その物理的性質および水和熱のデータ例を表-2に示す。

表-1 セメント構成化合物

項目 種類	構 成 化 合 物 (%)			
	ケイ酸カルシウム		間 隙 相	
	エーライト C ₃ S	ピーライト C ₂ S	アルミネート相 C ₃ A	フェライト相 C ₄ AF
低 熱	27	58	2	8
中庸熱	44	33	4	12
普 通	52	23	9	9

表-2 セメントの物理的性質と水和熱

項目 種類	比 重	比重面積 (cm ² /g)	圧縮強度 (kgf/cm ²)				水和熱 (cal/g)		
			3日	7日	28日	91日	7日	28日	91日
低 熱	3.22	3350	76	115	322	609	48.3	63.6	74.7
中庸熱	3.21	3040	116	170	365	526	64.6	76.3	84.0
普 通	3.16	3250	151	257	423	491	78.0	89.2	95.8

2.2 調査概要

ビーライトセメントの温度特性を調査するために、普通セメントと高炉セメントB種との比較を行う試験を実施した。その後、実施工で $H=3\text{ m}$ 、 $W=7\text{ m}$ 程度の基礎部分のマスコンクリートにビーライトセメントを用いたコンクリートを打設し、その温度履歴を計測すると共に温度追従養生を行ってコンクリート強度を調査した。各試験の実施日を表-3に示す。

3. コンクリートの温度応力解析

3.1 概要

実施工における地中梁、およびこれと一体にして打設したウエイト用中詰めコンクリートについて、ビーライトセメントを使用した場合と高炉セメントB種を使用した場合について、それぞれコンクリート温度上昇量（最高温度－フレッシュコンクリート温度）、およびひび割れの発生確率に関してシミュレーションを実施した。シミュレーションを行うにあたっては、(社)日本コンクリート工学協会 マスコンクリートの温度応力研究委員会によって作成されたFEM（2次元）温度解析プログラムとCP法による温度応力解析プログラムを使用した。

3.2 解析条件

解析対象構造物は、図-1のように地中梁とウエイト用中詰めコンクリートを一体にして打設した部材とし、この後打設される床スラブは除いて考えた。

解析にあたって、地中梁は4月下旬～5月上旬にコンクリートを打設する工程としていたので、外気温は、平均して 16.2°C と仮定した。コンクリートの調合は一般的な調合とし、打設時のコンクリート温度は 20°C と仮定した。また、養生については灌水などの特別な養生は行わないものとし、コンクリート側面については材令5日まで合板型枠内で養生されるものと仮定した。

断熱温度上昇量に関しては、高炉セメントB種は計算値とし、ビーライトセメントは表-4に示すメーカーの実験値を採用した。その他の諸係数については、表-5に示す一般値を使用した。

表-3 各試験の実施日

試 験 名	実 施 日
調査調査用パイロット試験	94/12/26
温度特性調査用小試験	95/01/13
温度特性調査用実機試験	95/02/18
実施工 2工区	95/04/19
” 5工区	95/04/24

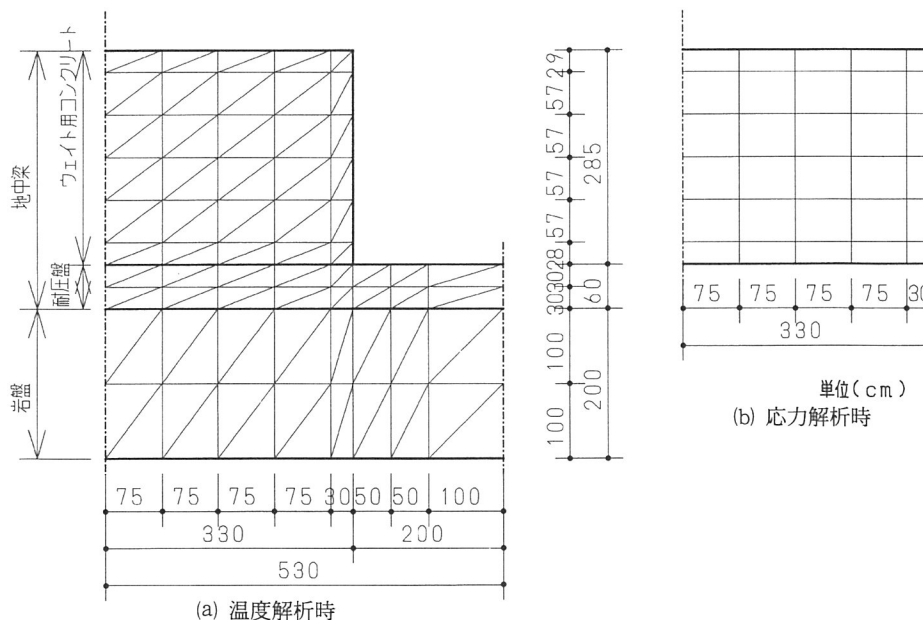


図-1 解析用メッシュと節点番号

表－４ コンクリートの断熱温度上昇量

セメント 種 類	材令（日）																	
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0	9.0	11.0	14.0	17.0	21.0	28.0	35.0	42.0	56.0
高炉B	11.8	20.6	27.2	32.1	35.8	38.6	42.2	44.2	46.0	46.5	46.7	46.8	46.8	46.8	46.8	46.8	46.8	46.8
低 熱	7.0	15.7	18.3	19.9	21.3	22.5	24.5	26.4	29.8	32.6	35.1	37.6	39.2	40.6	41.4	41.4	41.4	41.4

※高炉B種の断熱温度上昇量は $T=46.8 \cdot (1 - e^{-0.58t})$ から算出

低熱の断熱温度上昇はメーカー実験値

3.3 解析結果

解析した結果を表－６および表－７に示す。

高炉セメントB種を使用した場合、部材中心部の最高温度は材令4日で60.4℃まで上昇するのに対し、ビーライトセメントを使用した場合には最高温度は、材令7日で43.9℃にとどまるため、ビーライトセメントを用いれば、温度上昇量を16℃程度低減できることになる。

また、ひび割れの発生確率を示すひび割れ指数は、一般に、0.7以上であれば有害なひび割れは発生しないとされているが、高炉セメントB種を使用した場合、内部拘束によるひび割れが懸念される初期材令で1.36、外部拘束がひび割れの主因となる長期材令においては0.66となるのに対し、ビーライトセメントの場合はひび割れ指数が初期材令で2.13、長期材令においても0.84であり、高炉セメントB種を使用した場合に比べて、温度ひび割れの発生をかなり抑制できることが分かった。

4. 温度特性室内試験

4.1 実験概要

ビーライトセメントの温度特性を普通セメント・高炉セメントB種と比較調査するために室内試験を行った。使用した材料と調合を表－８および表－９に示す。温度特性調査用の供試体は、300×300×300mmの立方体とし、その全周に厚さ200mmの発砲スチロールを張り付けた。その供試体の中央部に熱電対を設けてコンクリートの温度を計測した。

表－５ 材料特性値

特 性 項 目		物性値または計算式	
コ ン ク リ ー ト	熱伝導率(kcal/cm・hr・℃)	0.020	
	比熱(kcal/kg・℃)	0.22	
	密度(kg/cm ³)	0.00231	
	上面の熱伝導率(kcal/cm ² ・hr・℃)	0.0010	
	側面の熱伝導率(kcal/cm ² ・hr・℃)	0.0007	
リ ン グ	熱膨脹係数(/℃)	0.00001	
	圧縮強度 (kgf/cm ²)	セメントの種類	高炉B種 低 熱
		材令7日	190 63.4
		材令28日	300 196
ト ラ ン ク	材令56日	—	(300)
	引張強度 F_t (kg f /cm ²)	$F_t = 1.4\sqrt{F(t)}$	
	ヤング係数 E_c (kg f /cm ²)	$E_c = 15000\sqrt{F(t)}$	
地 盤	熱伝導率(kcal/cm・hr・℃)	0.009	
	比熱(kcal/kg・℃)	0.400	
拘 束 係 数	密度(kcal/cm ³)	0.0015	
	軸拘束係数 R_N	0.650	
	曲げ拘束係数 R_{M1}	1.180	
拘 束 係 数	曲げ拘束係数 R_{M2}	1.600	

表－６ 温度上昇

セメント 種 類	最高 温度 (℃)	上昇量 (℃)	材 令 (日)
高炉B種	60.4	40.4	4.0
低 熱	43.9	23.9	7.0

表－７ 最小温度ひび割れ指数

セメント 種 類	初期(内部拘束主因)		長期(外部拘束主因)	
	指 数	材令(日)	指 数	材令(日)
高炉B種	1.36	6.0	0.66	56.0
低 熱	2.13	4.0	0.84	56.0

4.2 試験結果

フレッシュコンクリートの性状は、表-10に示すとおり3種類とも同様の結果が得られた。

材令と圧縮強度との関係を図-2に、ヤング係数の関係を図-3に示す。標準養生を行った供試体では、普通セメントと高炉セメントB種は、材令4週目には調合強度が発現するが、ピーライトセメントは材令8週で調合強度を満足している。しかし、普通セメントと高炉セメントB種は、4週目以降の強度発現は少なく、それに対しピーライトセメントでは8週目以降も強度の上昇が望める勾配を示している。各コンクリートの温度履歴を図-4に示す。最高温度は普通セメントが24℃、高炉セメントB種が21℃、ピーライトセメントでは17℃であった。

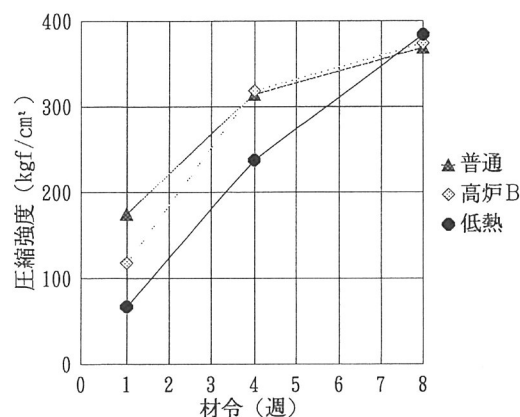


図-2 圧縮強度

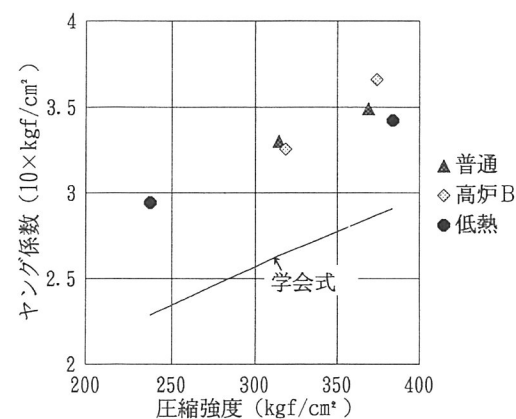


図-3 ヤング係数

表-8 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント	比重	3.16
	高炉セメントB種	比重	3.05
	低熱ポルトランドセメント	比重	3.22
細骨材	栃木県鬼怒川産川砂	比重	2.60
粗骨材	栃木産碎石	比重	2.93
混和剤	ポゾリス Na70		

表-9 調合表

セメント種別	強度	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)
普通	240	18.0	4.5	60.0	47.0
高炉B	240	18.0	4.5	60.0	47.0
低熱	240	18.0	4.5	60.0	47.0
セメント種別	単位重量 (kgf/m³)				
	水量	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
普通	174	290	842	1070	0.953
高炉B	174	290	838	1065	0.953
低熱	172	287	848	1078	0.942

表-10 フレッシュコンクリートの性状

セメント種別	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	フロー (cm)
普通	19.5	5.0	11.0	34*33
高炉B	20.5	5.1	10.0	38*38
低熱	20.0	4.9	9.0	34*34

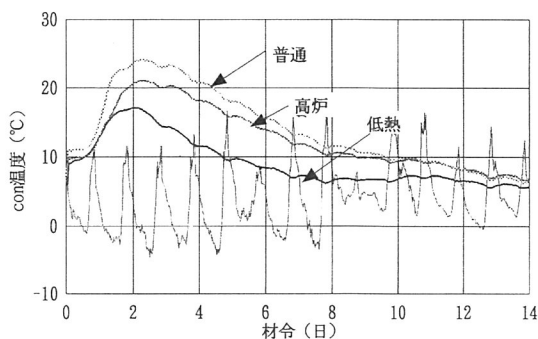


図-4 コンクリート温度履歴

5. 温度特性調査実験試験

5.1 試験概要

実際の施工を想定して、ある程度大きな容量で実験プラントで製造されたコンクリートを打設・締め固めた場合でも室内試験と同様の特性および傾向を示すかどうかを調査するため、以下の試験を行った。材料および調合は室内試験と同じものとした。供試体は600×700×800mmの大きさとし、側面の2面を合板型枠で、他の面は厚さ200mmの発泡スチロールで覆った。温度計測は熱電対を用いて、各々部材端部と断熱側と、その中間の3点を計測した。供試体形状と温度測定位置を図-5に示す。

5.2 実験結果

フレッシュコンクリートの性状は表-11に示すとおり、3種類ともスランプ・空気量・フローは、同程度の数値を示した。分離抵抗性・ワーカビリティも同等の感触であった。

断熱側のコンクリートの温度履歴は、3種類のコンクリートとも図-6に示すとおり室内試験と同様の結果が得られた。ビーライトセメントの3カ所の温度履歴を図-7に示す。

温度上昇量は、普通セメントが最も大きく、次いで高炉セメントB種、最も小さいのがビーライトセメントであった。躯体内の温度差も同様であった。ビーライトセメントを使用した場合、普通セメントの約50%まで低減している。

材令と圧縮強度の関係を図-8に示す。室内試験と同様、ビーライトセメントは初期強度の発現が小さいが、他のセメントが4週以降の強度増加が少ないのに対して、8週まで直線的に強度が増進している。ヤング係数と圧縮強度の関係を図-9に示すが、3種類とも同じ傾向を示している。

材令8週で、温度履歴を計測した供試体の、上・中・下の3カ所よりコアを採取して、圧縮強度を調べた。その結果を図-10に示す。コア強度は下部の方が上部と比べて若干高めとなっているが、問題となるほどの差異ではなく、気中養生のシリンドラ供試体とほぼ同じ数値を示した。

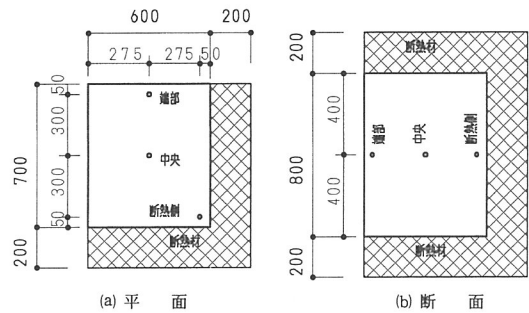


図-5 供試体形状と温度測定位置

表-11 フレッシュコンクリートの性状

セメント 種 別	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)	フロー (cm)
普 通	19.5	5.2	8.0	31.5×30.5
高炉B	19.0	5.3	8.0	33.5×31
低 熱	19.0	4.8	8.0	34.5×36.5

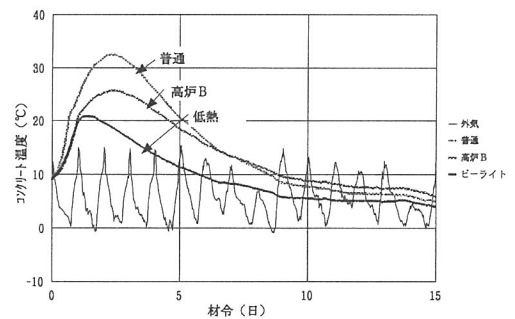


図-6 各コンクリートの温度履歴

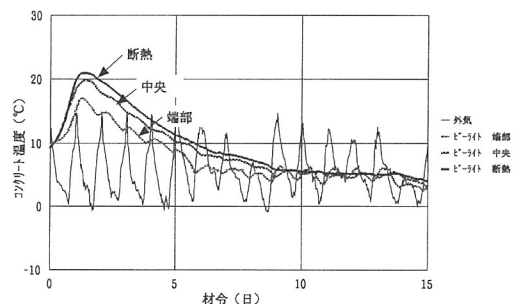


図-7 ビーライトコンクリートの各部温度履歴

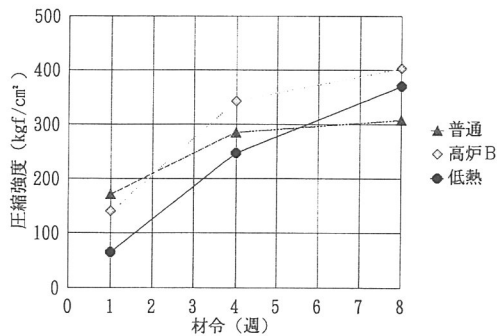


図-8 強度発現状況

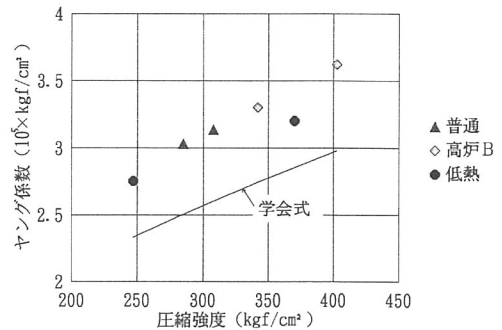


図-9 ヤング係数

6. 実施工に伴う温度計測とコンクリートの品質

6.1 工事概要

実施工では、作業場を5工区に分割して、耐圧盤を普通コンクリートで打設した後、地中梁とウェイト用中詰めコンクリートをビーライトセメントを用いたコンクリートで同時に打設した。その後、上端スラブに普通コンクリートを打設した。この結果、地中梁は幅約7m、高さ約3mのマスコングリートとなった。それぞれの部分におけるコンクリート打設日を表-12に、使用した材料を表-13に示す。なお、コンクリートの調査は室内試験と同一で行った。

6.2 調査概要

コンクリート内部の温度計測は、2工区と5工区で実施した。各工区での熱電対の取り付け位置を図-12に示す。コンクリートの圧縮強度試験は、その養生方法を標準、気中封緘および温度追従養生の3種類とし、5工区のコンクリートで供試体を採取して、それぞれ1週毎に材令8週まで調査した。また、ヤング係数は材令4週以後のものについて調査した。

表-12 コンクリート打設日

	打設月日	プラント	呼び強度	セメント種類
1工区耐圧	95/03/28	日立押上	270	N
2工区耐圧	95/04/06	日立押上	270	N
3工区耐圧	95/04/12	日立押上	255	N
4工区耐圧	95/04/13	日立押上	255	N
1工区基礎	95/04/15	上陽東京	240	L
2工区基礎	95/04/19	上陽東京	240	L
3A工区基礎	95/04/20	上陽東京	240	L
4工区基礎	95/04/21	上陽東京	240	L
3B工区基礎	95/04/22	上陽東京	240	L
5工区基礎	95/04/24	上陽東京	240	L
B3F床1	95/04/27	上陽東京	255	N
B3F床2	95/04/28	上陽東京	255	N

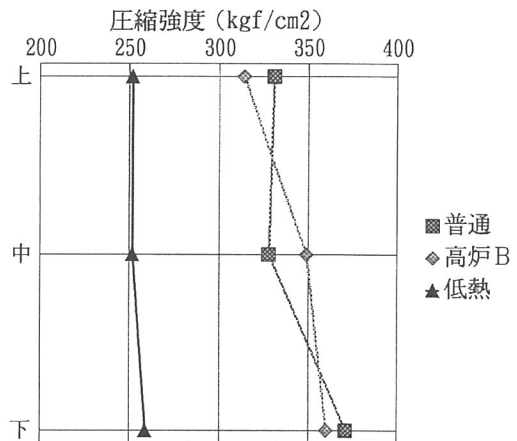


図-10 コア強度

表-13 使用材料

セメント	低熱ポルトランドセメント	比重	3.22
細骨材	木更津・葛生混合	比重	2.60
粗骨材	津久見(砕石2005)	比重	2.71
混和剤	ボゾリス Na70		

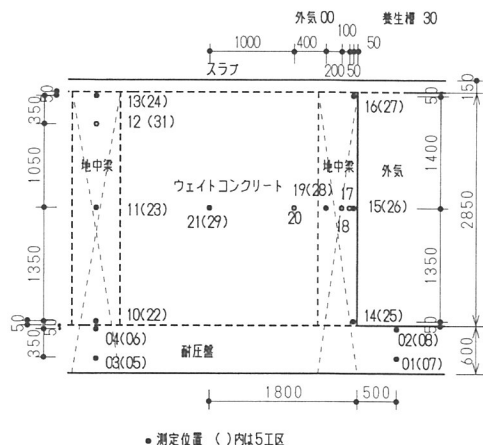


図-12 温度測定位置

6.3 調査結果

6.3.1 フレッシュコンクリートの性状

表-14にフレッシュコンクリートの試験結果一覧を示す。各試験結果に大きなばらつきはなく、良好な状態を示している。

6.3.2 コンクリート温度

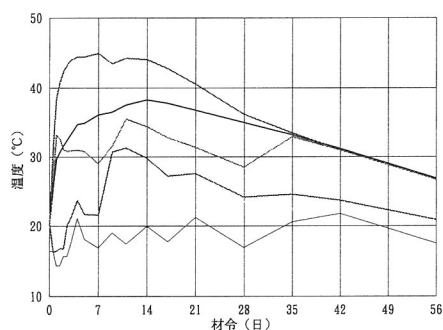
主要な部材内コンクリートの温度履歴を図-13に示す。上端スラブコンクリートの影響や、スラブを架けることによってピット部分が密閉され、そのため地中梁側面から放熱が十分に行われなかったために、解析値と若干異なっているが、全体としては非常に似た温度履歴を示している。部材内のコンクリート最高温度は、部材中央部で材令6日に45℃程度、温度上昇量としては約25℃となった。また、外気との最高温度差は、約29℃であった。

材令毎の部材内温度分布を図-14に示す。

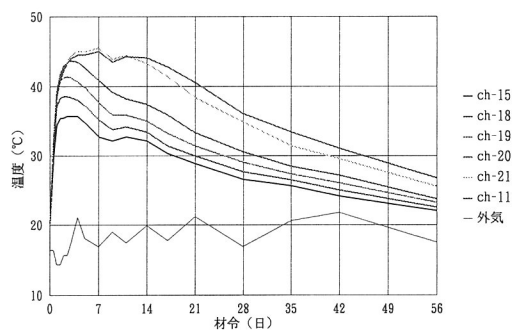
表-14 コンクリートの性状

		スラブ (cm)	空気量 (%)	温 度 (℃)	フロー (cm)
1 工区	1	16.0	3.3	18.0	26×26
	2	16.5	3.1	20.0	27×27
	3	18.5	3.3	21.0	32×30
2 工区	1	16.5	3.9	18.0	27×26
	2	18.5	4.5	21.0	31×30
	3	17.5	4.8	24.0	29×29
3 A工区	1	19.0	5.2	17.0	32×31
	2	19.5	5.3	19.0	34×32
	3	18.0	4.9	19.0	31×39
3 B工区	1	18.5	5.1	19.0	31×30
	2	20.0	4.5	19.0	35×33
	3	19.5	4.8	19.5	33×32
4 工区	1	18.5	3.7	19.0	30×29
	2	20.0	4.3	21.0	34×33
	3	20.0	3.8	21.0	32×30
5 工区	1	18.5	4.5	19.0	31×30
	2	18.0	5.2	21.0	30×29
	3	19.0	5.0	21.0	32×31

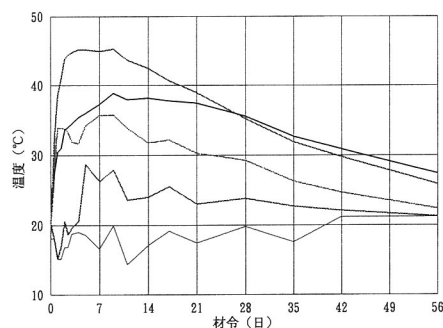
図-13 部材内コンクリート温度履歴



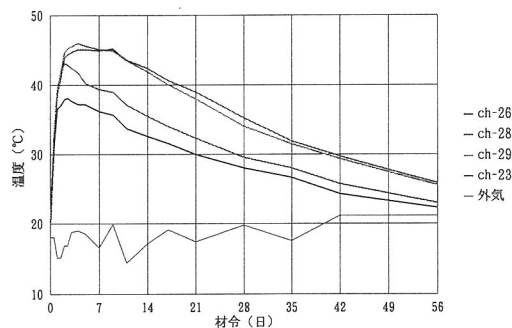
(a) 2 工区縦断面



(b) 2 工区横断面



(c) 5 工区縦断面



(d) 5 工区横断面

図-13 部材内コンクリート温度履歴

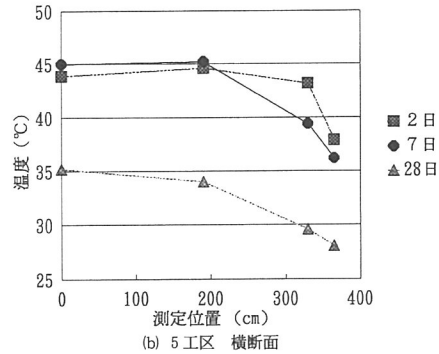
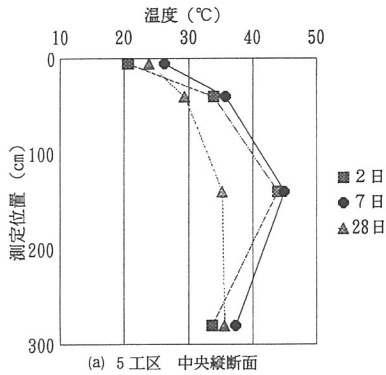


図-14 各材令毎の部材内温度分布

6.3.3 圧縮強度とヤング係数

現場で行った圧縮強度の試験結果を図-15に示す。大きなばらつきもなく、十分に設計強度を満足している。各養生での強度発現状況を図-16に示す。標準養生と気中封緘養生を行ったものでは材令8週まで直線的に強度が増進し、また、温度追従養生を行ったものでは、材令4週で設計基準強度である 240kgf/cm^2 以上の値を示した。積算温度と圧縮強度の関係を図-17に示す。

圧縮強度とヤング係数の関係は、図-18に示すように、いずれの養生方法によっても、建築学会式の値とほぼ一致している。

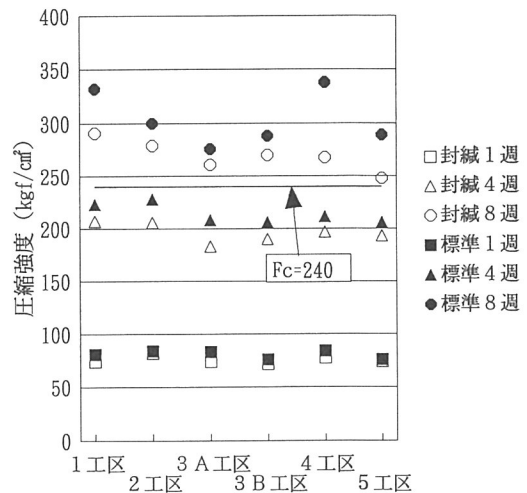


図-15 圧縮強度試験結果

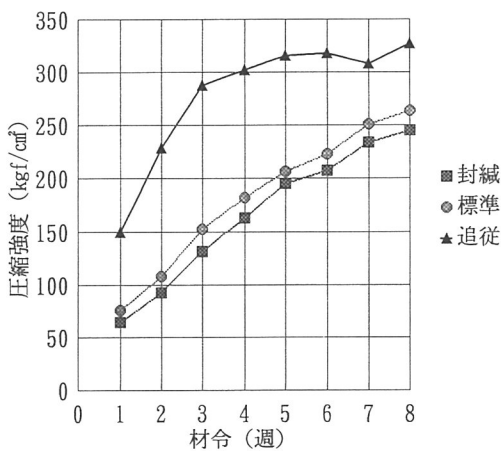


図-16 養生方法別の強度発現状況

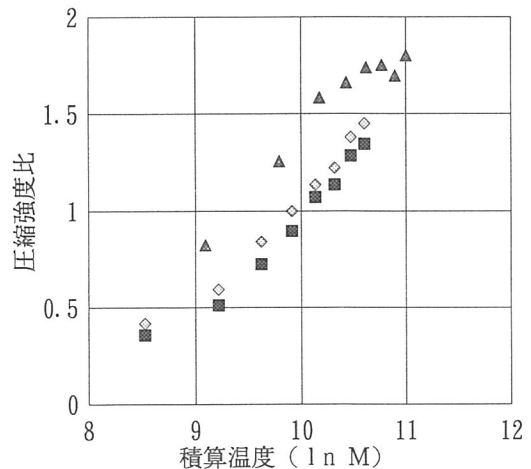


図-17 積算温度と圧縮強度比

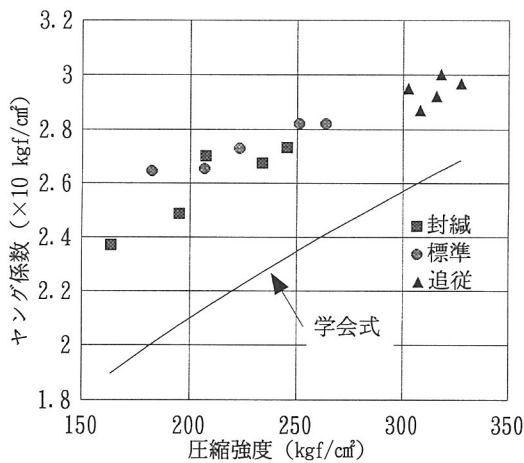


図-18 ヤング係数

7. まとめ

今回の調査によって以下のことが分かった。

- ・ ビーライトセメントを使ってコンクリートを調合する場合、特別な配慮は必要でなく、普通セメントを使った場合の調合から単位水量を2kg減ずることで、普通セメントと同様の性状のコンクリートを得ることができる。
- ・ ビーライトセメントを使用した場合、初期強度の発現は少ないが、材令8週まで直線的に強度が増進する。
- ・ 強度管理は材令8週（56日）で行うことが必要である。供試体は封緘養生で行う。
- ・ 実施工のコンクリートは、約3m×7mという大きなマスコンクリートであったにも関わらず、コンクリートの最高温度を45℃程度に押さえることができた。また、温度上昇勾配も緩やかであり、材令7日目で最高温度を示した。その後の温度降下も緩やかであった。
- ・ ビーライトセメントを使用することによって、コンクリートの水和熱による発熱は、他のセメントを使用するときよりも低く押さえることができる。その発熱速度は緩やかなため、放熱が十分に期待できるような場合は、温度ひび割れの抑制には有効な手段といえよう。