大断面プレキャストコンクリート部材製造時の温度履歴特性

TEMPERATURE HISTORY IN PRODUCTION OF MASS PRECAST CONCRETE ELEMENTS

杉山 央 —*1 梶田佳寛 —*2
岩井信彰 —*3 中川侑治 —*4

Hisashi SUGIYAMA —*1 Yoshihiro MASUDA —*2
Nobuaki IWAI —*3 Yuji NAKAGAWA —*4

キーワード：
プレキャストコンクリート, 部材厚, セメント水和熱, 加熱養生, 温度履歴

Keywords:
Precast concrete, Section size of elements, Heat of cement hydration, Heat curing, Temperature history

Mass precast concrete elements for columns and beams have been developed in recent years to improve the quality of reinforced concrete structures and simplify their methods of construction. The object of this work was to study the temperature history of mass precast concrete elements in their production process. By heat curing from the outside and internal storage of the heat of cement hydration, the mass precast concrete elements showed different temperature history from the thin precast concrete elements for walls and floor slabs. The temperature history at the center of mass precast concrete elements was different from that at the surface of mass precast concrete elements. A larger section size of elements resulted in larger difference in temperature between the center and the surface of mass precast concrete elements.

1. はじめに

年々、RC造建築物は高層化・大型化の方向に進んでいる。また、安定した品質を確保しつつ工期の短縮ならびに施工の合理化を図るため、プレキャストコンクリート工法を採用するケースが増えており、高層・大型建築物を建設する際にも導入されている。高層・大型建築物に用いられる柱・梁など断面寸法の大きなプレキャストコンクリート部材では製造過程における外部からの加熱のみならず、セメント水和熱の蓄積による内部での温度上昇も作用するため、断面寸法の比較的小さな壁・床などのプレキャストコンクリート部材とは異なった温度履歴を示すことが考えられる。さらに、この特異な温度履歴が強度特性に大きな影響を及ぼすことが予想される。

また、調査計画および品質管理に関しても、断面寸法の比較的小さなプレキャストコンクリート部材に用いられてきた従来の方法を、断面寸法の大きなプレキャストコンクリート部材にそのまま適用できるかどうかについては不明である。一般にプレキャストコンクリート部材に用いるコンクリートの調合を定める場合や品質管理を行う場合には、プレキャストコンクリート部材と同一バッチから採取したコンクリートをプレキャストコンクリート部材と同一の養生条件で養生した円柱供試体(以下、「部材養生供試体」と略記)の強度試験結果を代用している。すなわち、同一の加熱養生槽内で養生したプレキャストコンクリート部材と円柱供試体は、同一の温度履歴特性および同一の強度特性を示すという考えに基づいている。しかし、前記の理由から断面寸法の大きなプレキャストコンクリート部材は、部材養生供試体とは異なる温度履歴特性および強度特性を示すことが予想される。

このような背景のもと、強度特性の検討に先立ち、本報告では温度履歴特性を明らかにすることを目的とした。筆者らは、これまでに断面寸法の大きなプレキャストコンクリート模擬部材の製造実験を行ってきた。本報告では、これまでに報告した実験結果^{1)~4)}に新たな実験結果を加え、断面寸法、使用セメント、調合および加熱養生条件がそれぞれ異なるプレキャストコンクリート部材の製造時における温度履歴特性を総括的に検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

セメントには表1に示す性質の各ポルトランドセメントを使用した。なお、普通ポルトランドセメント(N)としては、表1に示すN1およびN2を等量ずつ混合したものを使用した。細骨材には鬼怒川産川砂(最大寸法5mm, 表乾密度2.58g/cm³, 吸水率2.07%, 粗粒率2.88)を、粗骨材には岩瀬産砕石(最大寸法20mm, 表乾密度2.66g/cm³, 吸水率0.68%, 粗粒率6.64, 実積率59.8%)を使用した。コンクリートの調合を表2に示す。

2.2 試験体の形状および寸法

図1に示すように、断面寸法が異なる3種類のプレキャストコンクリート模擬部材試験体(以下、「模擬部材」と略記)を作製した。模擬部材Aは部材厚600mmの柱部材を、模擬部材Bは部材厚400mmの梁部材を、模擬部材Cは部材厚200mmの壁・床部材をそれぞれ模擬している。なお、模擬部材の断面における短辺方向の寸法を部材厚と定義した。また、それぞれの模擬部材と同一バッチのコンクリートから円柱供試体(φ100×200mm)を作製した。

*1 独立行政法人建築研究所材料研究グループ 主任研究員・工博
(〒305-0802 つくば市立原1)

*2 宇都宮大学工学部建設学科 教授・工博

*3 ㈱新井組技術研究所 主任研究員

*4 東海興業㈱技術開発部 副長

*1 Senior Research Engineer, Dept. of Building Materials and Components, Building Research Institute, Dr. Eng.

*2 Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

*3 Senior Research Engineer, Technical Research Institute, Araigumi Co., Ltd.

*4 Deputy Head, Technical Development Dept., Tokai Kogyo Corporation

2.3 養生条件

加熱養生としては、コンクリート打込み後に屋外で2~3hの前養生を行った後、加熱養生槽（槽内湿度95%RH以上）において温度上昇勾配20℃/h、最高温度継続時間3h、温度下降勾配10℃/h以下の条件を計画した。加熱養生における目標最高温度（以下、「加熱最高温度」と略記）には40、60および80℃の3水準を設定した。また、加熱を行わないコンクリート打込み直後からの屋外養生も計画した。模擬部材は材齢3日に脱型し、その後は屋外での気中養生を行った。また、円柱供試体は成型直後に封かん状態とし、それぞれの模擬部材と同一の加熱養生槽内において同一条件の養生を行い、部材養生供試体とした。

2.4 模擬部材の種類

模擬部材に用いるコンクリートの調合、模擬部材の形状および養生条件の組み合わせを表3に示す。表中で、記号の末尾にWを付した模擬部材は冬期に製造したものであり、春期や秋期に製造した他の模擬部材に比べてコンクリートの打込み温度、前養生温度および脱型以後の養生温度が低かった。このため、Wを付して他の模擬部材と区別した。

2.5 温度測定

図1に示す位置にC-C型熱電対を埋め込み、コンクリート打込み直後から材齢3日までの模擬部材の温度を測定した。同様に、部材養生供試体の中心部の温度を測定した。なお、模擬部材近傍の気温（蒸気温度）を測定し、これを雰囲気温度と定義した。

表1 使用セメントの物理的性質および化合物組成

記号	セメント種類	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結時間(h-min)		化合物組成(%)			
				始発	終結	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
N1	普通	3.16	3330	2-15	3-15	53.7	20.9	8.6	8.8
N2	普通	3.15	3250	2-25	3-58	52.1	22.1	9.5	8.2
H	早強	3.13	4420	2-01	2-53	64.3	10.6	8.2	8.2
L	低熱	3.20	4190	2-25	3-25	34.5	46.9	2.8	8.8

※ 普通セメント(N)としては、N1およびN2を等量ずつ混合して使用した。

表2 コンクリートの調合

記号	使用セメント種類	W/C (%)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 [*] (C×%)	
						W	C	S	G	Ad1	Ad2
N33	普通	33.3	21.0	1.0	47.1	160	480	824	954	1.0	0.1
N40	普通	40.0	18.0	1.0	48.1	160	400	871	970	1.0	0.1
N50	普通	50.0	12.0	1.0	46.6	160	320	877	1035	1.1	0.1
H33	早強	33.3	21.0	1.0	47.0	160	480	820	954	0.9	0.1
H40	早強	40.0	18.0	1.0	48.1	160	400	871	970	0.9	0.1
H50	早強	50.0	12.0	1.0	46.6	160	320	875	1034	0.9	0.1
L33	低熱	33.3	21.0	1.0	47.2	160	480	828	954	0.9	0.1
L40	低熱	40.0	18.0	1.0	48.3	160	400	878	970	0.9	0.1
L50	低熱	50.0	12.0	1.0	46.8	160	320	881	1034	0.9	0.1

※ Ad1: 高性能AE減水剤 Ad2: 空気量調整剤

3. 実験結果および考察

模擬部材の中心部、表面部および部材養生供試体の温度測定結果を表3に示す。それぞれの温度測定部位において履歴した最高温度を履歴最高温度と定義した。また、温度上昇開始から最初の温度ピークに到達するまでの温度測定データをもとに線形回帰計算を行い、算出された勾配値を温度上昇勾配と定義した。なお、温度勾配2℃/h以上の温度上昇が認められた時点温度を温度上昇の開始時期とした。

3.1 部材厚の違いによる温度履歴の比較

部材厚別による模擬部材の温度履歴を図2に示す。なお、図中には部材養生供試体の温度履歴も示す。部材養生供試体では、雰囲気温度

表3 模擬部材の種類および温度測定結果

記号	調合	形状	養生方法			温度測定結果					
			加熱の有無	加熱最高温度 ^{*1} (℃)	打込み温度 (℃)	履歴最高温度 (℃)			温度上昇勾配 (℃/h)		
						中心部	表面部	供試体 ^{*2}	中心部	表面部	供試体 ^{*2}
N33-A-60W	N33	A	有	60	17.0	72.7	51.2	68.2	5.1	8.0	14.6
N40-A-80W	N40	A	有	80	13.5	79.7	65.1	82.4	6.0	7.6	13.9
N40-A-60W	N40	A	有	60	13.0	64.5	48.5	65.8	4.1	6.7	12.6
N40-A-40W	N40	A	有	40	13.0	50.9	42.0	44.7	1.9	3.5	10.5
N50-A-60W	N50	A	有	60	14.0	54.8	49.2	62.1	2.6	6.9	11.6
N33-A-80	N33	A	有	80	26.0	97.4	84.4	90.2	7.0	6.5	16.7
N33-A-00	N33	A	無	—	25.0	59.1	43.5	33.7	2.4	1.9	1.7
N40-A-60	N40	A	有	60	24.0	73.8	59.1	66.7	5.5	6.6	15.5
N40-A-00	N40	A	無	—	24.0	51.6	41.7	33.9	2.1	1.3	1.3
N40-B-60	N40	B	有	60	24.0	70.8	61.8	67.8	4.8	9.1	15.9
N40-B-00	N40	B	無	—	25.0	61.4	47.8	38.3	3.5	2.1	1.7
N40-C-60	N40	C	有	60	24.0	68.1	66.3	67.8	5.5	7.0	15.9
N40-C-00	N40	C	無	—	25.0	55.8	54.1	38.3	3.0	3.0	3.9
N50-A-00	N50	A	無	—	24.0	44.1	34.8	31.2	1.0	0.8	0.7
H33-A-80	H33	A	有	80	18.5	96.9	80.9	92.1	8.0	7.7	15.9
H33-A-60	H33	A	有	60	20.0	90.6	66.1	75.3	8.8	8.1	17.2
H33-A-00	H33	A	無	—	20.5	67.3	50.2	24.0	3.1	2.2	0.4
H40-A-80	H40	A	有	80	18.5	87.5	73.0	81.5	7.0	7.2	12.1
H40-A-60	H40	A	有	60	20.0	79.8	62.9	70.6	6.3	8.5	14.7
H40-A-40	H40	A	有	40	23.0	70.2	54.2	48.6	4.0	3.1	11.3
H40-A-00	H40	A	無	—	19.5	52.5	37.5	25.3	1.9	1.7	0.7
H40-B-60	H40	B	有	60	21.0	77.5	64.4	70.5	6.3	8.4	13.4
H40-C-60	H40	C	有	60	19.0	70.8	69.4	71.2	6.5	6.7	12.8
H40-C-00	H40	C	無	—	19.0	40.7	39.5	19.5	1.7	1.7	0.5
H50-A-60	H50	A	有	60	19.0	69.9	61.1	66.6	4.5	8.0	12.5
H50-A-00	H50	A	無	—	21.0	50.9	39.5	24.1	1.8	1.5	0.6
L33-A-80	L33	A	有	80	17.5	72.5	69.8	75.6	4.6	7.0	10.3
L33-A-60	L33	A	有	60	18.5	67.3	59.0	68.2	5.3	7.9	13.1
L33-A-00	L33	A	無	—	21.5	47.9	38.7	27.3	1.5	1.2	0.0
L40-A-80	L40	A	有	80	18.5	70.3	69.9	82.2	5.2	7.6	10.8
L40-A-60	L40	A	有	60	17.5	60.2	58.0	65.8	4.4	7.8	12.4
L40-A-40	L40	A	有	40	22.5	52.0	42.1	45.3	2.9	3.4	11.2
L40-A-00	L40	A	無	—	21.5	39.2	32.4	24.3	1.2	0.7	0.0
L40-B-60	L40	B	有	60	21.0	61.9	59.7	66.1	4.6	7.4	13.3
L40-C-60	L40	C	有	60	18.5	57.1	57.6	67.0	5.4	5.5	13.7
L40-C-00	L40	C	無	—	18.5	21.9	21.7	18.5	0.2	0.4	0.0
L50-A-60	L50	A	有	60	18.0	54.5	56.5	61.8	3.7	7.5	12.7
L50-A-00	L50	A	無	—	18.0	31.6	23.8	18.2	0.7	0.5	0.0

※ 1 加熱養生槽内の目標最高温度を示す。 ※ 2 部材養生供試体（φ100×200mm）を示す。

図1 模擬部材の形状・寸法および温度測定位置

図2 模擬部材の温度履歴 (部材厚による比較)

と大差ない温度履歴が認められた。すなわち、加熱開始と同時に急激な温度上昇が生じ、履歴最高温度は雰囲気中の最高温度を若干上回るが、加熱終了と同時に温度降下が始まった。他方、模擬部材の温度履歴は、雰囲気温度や部材養生供試体の温度履歴とは大きく異なるものであった。すなわち、部材養生供試体に比べて温度上昇勾配および加熱終了後の温度下降勾配が緩やかであった。

図2において模擬部材の中心部と表面部の温度履歴を比較すると、部材厚が大きいくほど中心部と表面部の温度履歴の差異が大きいくことがわかる。模擬部材Cでは中心部と表面部の温度履歴がほぼ等しい。これに対して、模擬部材AおよびBでは中心部と表面部の温度履歴の差異が大きいく、中心部では表面部より2~4h遅れて緩やかに温度上昇を開始するが、温度上昇量が大きく、12h以降では表面部より高温となった。また、履歴最高温度についても、中心部では表面部よりも高い値を示した。

H40における模擬部材の部材厚と温度履歴要因の関係を図3に示す。中心部では、部材厚が大きくなるほど履歴最高温度および温度上昇量が増加する。これは、部材厚が大きくなるほど部材内部のセメント水和熱が外部に放出されず、内部に蓄積される傾向が著しくなることに起因している。部材厚200~600mmの範囲において、部材厚が100mm大きいことによる中心部の履歴最高温度の上昇量は、N40で約1.4℃、H40で約2.3℃、L40で約0.8℃であった。他方、表面部では部材厚が大きくなるほど履歴最高温度および温度上昇量が減少する傾向が認められた。これは、部材厚が大きいくほど部材の単位長さあたりの熱容量も大きくなり、加熱養生により表面部に加えられた熱がより多く内部に伝導することに起因している。

図3 部材厚と温度履歴要因の関係 (H40)

図4 部材厚と部位間に生じた温度差の範囲 (H40)

図5 模擬部材の温度履歴 (水セメント比による比較)

模擬部材中心部、表面部および部材養生供試体の温度を同一測定時刻において比較し、それぞれの間に生じた温度差を部材厚との関係から検討した。H40におけるそれぞれの部位間に生じた温度差の範囲を部材厚との関係から検討したものを図4に示す。図中で+の符号は前者の温度の方が高い場合における両者の温度差を、また、-の符号は後者の温度の方が高い場合における両者の温度差をそれぞれ示している。模擬部材中心部と部材養生供試体の間には大きな温度差が認められ、部材厚が大きくなるほど両者には大きな温度差が生じる。また、部材厚が大きくなるほど模擬部材中心部と表面部の温度差も大きくなり、温度差の範囲は部材厚200mmで $-2.5 \sim +2.7^{\circ}\text{C}$ であるのに対して、部材厚600mmでは $-29.6 \sim +20.3^{\circ}\text{C}$ であった。

以上のような断面寸法の大きな模擬部材の特異な温度履歴特性は、外部からの加熱に加えて、部材厚が大きいことによるセメント水和熱の内部蓄積に起因している。すなわち、表面部の温度履歴は雰囲気温度に大きな影響を受け、中心部の温度履歴はセメント水和熱に大きな影響を受ける。このため、同一部材における中心部と表面部の温度履歴の差異は、セメント水和熱量の大きな早強セメントを用いた模擬部材において大きく、反対に、セメント水和熱量の小さな低熱セメントを用いた模擬部材においては比較的小さい。

3.2 調合の違いによる温度履歴の比較

水セメント比別による模擬部材および部材養生供試体の温度履歴を図5に示す。模擬部材表面部および部材養生供試体の温度履歴には、調合の違いによる大きな差異は認められなかった。しかし、模擬部材中心部の温度履歴には調合の違いによる大きな差異が認められ、水セ

図6 単位セメント量と温度履歴要因の関係 (H-部材A)

図7 単位セメント量と部位間に生じた温度差の範囲 (H-部材A)

図8 模擬部材の温度履歴（加熱養生条件による比較）

メント比が小さい模擬部材ほど、すなわち単位セメント量が多い模擬部材ほど中心部の履歴温度が高かった。特に、この傾向は早強セメントを用いた模擬部材において顕著であった。

早強セメントを用いた模擬部材Aにおける単位セメント量と温度履歴要因の関係を図6に示す。表面部では、単位セメント量が増加しても履歴最高温度、温度上昇量および温度上昇勾配に大きな差異が認められない。これに対して、中心部では単位セメント量が多くなるほど履歴最高温度、温度上昇量および温度上昇勾配が著しく増加することがわかる。単位セメント量320～480kg/m³の範囲において、単位セメント量が10kg/m³増加することによる模擬部材Aの履歴最高温度の上昇量は、普通セメントを用いた場合では表面部で約0.1℃、中心部で約1.1℃、早強セメントを用いた場合では表面部で約0.3℃、中心部で約1.3℃、低熱セメントを用いた場合では表面部で約0.2℃、中心部で約0.8℃であった。また、履歴最高温度および温度上昇量の中心部と表面部による差は、単位セメント量が多くなるほど増加することがわかる。

早強セメントを用いた模擬部材Aにおけるそれぞれの部位間に生じた温度差の範囲を単位セメント量との関係から検討したものを図7に示す。模擬部材中心部と部材養生供試体の間には、単位セメント量が多くなるほど大きな温度差が生じることがわかる。また、単位セメント量が多くなるほど模擬部材中心部と表面部の温度差も大きくなり、温度差の範囲は単位セメント量320kg/m³で-26.5～+15.3℃であるのに対して、単位セメント量480kg/m³では-31.6～+26.6℃であった。

3.3 加熱養生条件の違いによる温度履歴の比較

加熱最高温度別による模擬部材および部材養生供試体の温度履歴を図8に示す。加熱最高温度が高い模擬部材ほど中心部と表面部の履歴温度は高くなった。H40の模擬部材Aの中心部では、いずれの加熱養生条件においても履歴最高温度が加熱最高温度を上回った。これに対して、L40の模擬部材Aの中心部では、加熱最高温度80℃において履歴最高温度が加熱最高温度に達しなかった。また、N40、H40およびL40の模擬部材Aの表面部では、加熱最高温度80℃において履歴最高温度が加熱最高温度に達しなかった。加熱最高温度40～80℃の範囲において、加熱最高温度が10℃高いことによる模擬部材Aの履歴最高温度の上昇量は、N40の場合では表面部で約5℃、中心部で約6℃、H40の場合では表面部および中心部で約5℃、L40の場合では表面部で約7℃、中心部で約5℃であった。

3.4 高強度プレキャストコンクリート部材および屋外養生プレキャストコンクリート部材の温度履歴

近年、コンクリートは高強度化への方向に進展しているが、今後プレキャストコンクリート部材についても高強度化への進展が予想される。そこで、加熱養生した高強度プレキャストコンクリート部材の温度履歴特性について検討した。水セメント33.3%、加熱最高温度80℃における模擬部材Aの温度履歴を図9に示す。これらは、本実験の範囲内で最も高い温度を履歴するための条件を備えたものである。中心部の履歴最高温度は、N33-A-80では97.4℃、H33-A-80では96.9℃、L33-A-80では72.5℃であった。初期材齢に高温履歴を受けたコンクリートの強度発現性には特異な傾向が認められ、特に初期材齢で

図9 模擬部材の温度履歴 (水セメント比33.3%, 加熱最高温度80°C)

図10 模擬部材の温度履歴 (加熱なし)

の90°Cを超える高温履歴はコンクリートの長期強度の増進性に大きな影響を及ぼすことが報告されている^{5)~9)}。従って、断面寸法が大きく、高強度すなわち単位セメント量の多いプレキャストコンクリート部材を加熱養生することにより製造する場合には、著しい高温履歴が強度特性や耐久性に及ぼす影響を明らかにしておく必要がある。

他方、加熱養生することなく、コンクリート打込み直後から屋外養生した模擬部材Aの温度履歴を図10に示す。中心部の履歴最高温度は、N40-A-00では51.6°C、H40-A-00では52.5°C、L40-A-00では39.2°Cであった。外気温の高い夏期には履歴最高温度がさらに高くなり、断面寸法が大きなプレキャストコンクリートでは加熱養生することなく初期材齢での強度発現が促進されることが考えられる。

4. まとめ

- 1) 部材養生供試体すなわち部材と同一の養生条件で養生した円柱供試体では、雰囲気温度と大差ない温度履歴を示す。他方、断面寸法の大きなプレキャストコンクリート部材では、雰囲気温度や部材養生供試体とは大きく異なる温度履歴を示す。
- 2) 断面寸法の大きなプレキャストコンクリート部材では、中心部と表面部の温度履歴が異なり、部材厚が大きくなるほど中心部と表面部の温度差は大きくなる。これは、表面部の温度履歴は外部からの加熱すなわち雰囲気温度に大きな影響を受け、中心部の温度履歴はセメント水和熱の内部蓄積に大きな影響を受けることによる。
- 3) 単位セメント量が多いプレキャストコンクリート部材ほど中心部の履歴最高温度、温度上昇量および温度上昇勾配が大きくなる。特に、この傾向は早強セメントを用いたプレキャストコンクリート部材において顕著である。

参考文献

- 1) 杉山 央, 樹田佳寛, 阿部道彦, 安田正雪ほか: 高強度プレキャストコンクリートの促進養生条件と強度性状 (その1. 冬期実験の計画および温度履歴), 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp. 1089-1090, 1993. 9
- 2) 白石清隆, 樹田佳寛, 阿部道彦, 杉山 央ほか: 高強度プレキャストコンクリートの促進養生条件と強度性状 (その2. 冬期実験における強度性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp. 1091-1092, 1993. 9
- 3) 杉山 央, 樹田佳寛, 阿部道彦, 前田弘美ほか: 高強度プレキャストコンクリート製造時の温度履歴と強度発現性状の関係 (その4. 早強ならびに低発熱型セメントを用いた模擬部材の温度履歴), 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp. 757-758, 1996. 9
- 4) 前田弘美, 樹田佳寛, 阿部道彦, 杉山 央ほか: 高強度プレキャストコンクリート製造時の温度履歴と強度発現性状の関係 (その5. 早強ならびに低発熱型セメントを用いた模擬部材の強度性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp. 759-760, 1996. 9
- 5) 地濃茂雄, 杉山 央: マッシュなコンクリートの強度発現傾向 (セメントの水和熱の蓄積による高温履歴の影響), 日本建築学会構造系論文報告集, 第436号, pp. 1-12, 1992. 6
- 6) 杉山 央, 樹田佳寛: 初期高温履歴を受けたコンクリートの長期強度発現性, 日本建築学会構造系論文集, 第515号, pp. 23-30, 1999. 1
- 7) 杉山 央, 樹田佳寛: 早強および低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの強度発現性に及ぼす初期高温履歴の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第520号, pp. 9-16, 1999. 6
- 8) H. Sugiyama, Y. Masuda and M. Abe: Strength Development of Concrete Cured Under High-temperature Conditions at an Early Age, Proceedings of 5th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete (SPAIN), pp. 965-982, 2000. 6
- 9) 杉山 央: 高強度マスコンクリートの温度履歴特性と強度発現性, コンクリート工学, Vol. 38, No. 7, pp. 3-9, 2000. 7

[2001年4月11日原稿受理 2001年7月27日採用決定]