

ISBN 978-4-88175-124-4

コンクリート専門委員会報告
REPORT OF THE TECHNICAL COMMITTEE ON CONCRETE
F-59

各種セメントを用いた
コンクリートの断熱温度上昇に関する研究
A study on the adiabatic temperature rise of concrete
using various cements

2014年3月

(March. 2014)

一般社団法人 セメント協会

JAPAN CEMENT ASSOCIATION

要旨

各種セメントを使用したコンクリートの断熱温度上昇に関する共通試験を実施した。本試験では、委員会を構成する8試験所にて、各社保有の試験装置を用いて、普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を使用した単位セメント量280～550kg/m³のコンクリートに関して、打込み温度10℃、20℃および30℃の条件にて、断熱温度上昇試験を実施した。

本試験を実施するにあたり、普通ポルトランドセメントを使用した単位セメント量が340kg/m³および500kg/m³配合において、全試験所で統一試験を実施した。その結果、2種類の空気循環型の断熱温度上昇試験装置を用いた断熱温度上昇試験における終局断熱温度上昇量Kおよび温度上昇速度の定数 α はいずれも大差なかった。また、試験所間の誤差も小さかった。

セメント種類では、終局断熱温度上昇量Kは、単位セメント量が400kg/m³以下の場合、BB>N>M \approx Lの順となり、単位セメント量が450kg/m³以上の場合、N>M>Lの順となった。温度上昇速度の定数 α はN>BB \approx M>Lの順となった。またこれらの結果は、単位セメント量260～350kg/m³で実施したF-51の結果と概ね同等となることが明らかとなった。打込み温度では、普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種は、打込み温度の上昇に伴い、終局断熱温度上昇量Kは小さくなったが、低熱ポルトランドセメントは単位セメント量500kg/m³において、打込み温度による終局断熱温度上昇量Kの差は明確ではなかった。

さらに本試験で得られた終局断熱温度上昇量Kおよび温度上昇速度の定数 α を各関係学会に提示された式と比較した結果、セメント種類で異なる傾向を示した。普通ポルトランドセメントおよび中庸熱ポルトランドセメントの場合、同一単位セメント量における終局断熱温度上昇量Kは、各関係学会式から求めた値より、それぞれ約3～5℃、約2～4℃小さくなった。ただし、同一単位セメント量における温度上昇速度の定数 α は、各関係学会式から求めた値と同程度となった。また、低熱ポルトランドセメントの場合、各関係学会式に比べ、終局断熱温度上昇量Kは、単位セメント量が多くなると、各関係学会式から求めた値よりも小さくなった。さらに、温度上昇速度の定数 α は、建築学会式とは同程度となるが、土木学会式・JCI式に比べると、単位セメント量340kg/m³以上の場合で0.3程度小さくなった。一方、高炉セメントB種の場合、単位セメント量と終局断熱温度上昇量Kまたは温度上昇速度の定数 α の関係式は、いずれも関係学会式と同程度となった。

序

本委員会では、2011年4月から2年間に亘り、各種セメントを使用した普通コンクリートおよび高強度コンクリートの断熱温度上昇試験を実施してきた。ここに、検討結果がまとまったので報告する。

2014年3月

一般社団法人 セメント協会 コンクリート専門委員会
(敬称略 順不同)

委員長	三菱マテリアル株式会社	中山 英明
委員	日鉄住金高炉セメント株式会社	大塚 勇介
		(植木 康知 2011年4月交替)
	日鉄住金セメント株式会社	小倉 東
	株式会社トクヤマ	加藤 弘義
	太平洋セメント株式会社	田中 敏嗣
		(石川 雄康 2012年4月交替)
	宇部興産株式会社	大和 功一郎
	電気化学工業株式会社	上村 豊
		(川原 正秀 2012年6月交替)
	住友大阪セメント株式会社	草野 昌夫
事務局	一般社団法人セメント協会	佐藤 智泰
		佐々木 健一
		中村 弘典
		(島崎 泰 2012年5月交替)
		(泉尾 英文 2012年5月退任)

目次

1. 緒言	1
2. 実験の概要	2
2. 1 使用材料	2
2. 1. 1 セメント	2
2. 1. 2 骨材	2
2. 1. 3 水	3
2. 1. 4 混和剤	3
2. 2 要因と水準	3
2. 3 試験所分担	4
2. 4 断熱温度上昇試験装置	5
2. 5 コンクリートの配合	5
2. 6 コンクリートの練混ぜ	8
3. 試験結果と考察	9
3. 1 終局断熱温度上昇量および温度上昇速度の定数	9
3. 2 試験装置の違いによる考察	13
3. 3 試験所間の違いによる考察	16
3. 3. 1 空気循環式 Type I のケース	16
3. 3. 2 空気循環式 Type II のケース	17
3. 4 セメントの種類の違いによる考察	18
3. 5 単位セメント量の違いによる考察	21
3. 6 打込み温度の違いによる考察	23
3. 6. 1 終局断熱温度上昇量 K と打込み温度	23
3. 6. 2 温度上昇速度の定数 α と打込み温度	24
3. 7 関係学会式との比較に関する考察	27
3. 7. 1 普通ポルトランドセメント	27
3. 7. 2 中庸熱ポルトランドセメント	30
3. 7. 3 低熱ポルトランドセメント	33
3. 7. 4 高炉セメント B 種	36
3. 7. 5 各種セメントを用いた断熱温度上昇式	39
4. 結言	40
参考文献	41
参考資料 逆解析手法による断熱温度上昇試験結果	42
付録 断熱温度上昇量の実測値	54

1. 緒言

セメントの水和熱に起因する温度ひび割れが問題となるマスコンクリートでは、事前の温度応力解析により、温度ひび割れに対する照査を行い、適切な温度ひび割れ制御対策を実施している。温度応力解析を行うにあたり、コンクリートの熱特性や力学的特性を把握する必要があるが、その中でも、コンクリートの断熱温度上昇特性を適切に評価することが重要となる。

一般に、コンクリートの断熱温度上昇特性は、断熱温度上昇試験により求める方法とセメントの鉱物組成から複合水和発熱モデルにより推定する方法¹⁾があるが、現状では前者による方法が一般的である。しかしながら、断熱温度上昇試験は標準化されておらず、種々の試験装置が用いられているのが現状である。これを踏まえ、セメント協会では、2002年に、統一した試験方法に抛り、普通ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を使用したコンクリートの断熱温度上昇試験を実施した。またその結果を、「F-51 各種セメントを用いたコンクリートの初期強度発現および断熱温度上昇」²⁾に取り纏め、各種セメントの断熱温度上昇式を提案している。

しかしながら、上記実験は、コンクリートの打設温度が20℃で、また単位セメント量が250～340kg/m³と極めて限定的な範囲で検討しており、その成果が関連学協会指針類へ反映される機会が少なく、主としてセメントメーカー各社の技術資料等が参考にされているのが現状である。また当時から既に10年以上経過し、マスコンクリートに高強度コンクリートが適用されるケースや首都圏を中心に建築構造物に中庸熱ポルトランドセメントが使用されるケースが増えており、マスコンクリートに適用されるセメントの種類や単位セメント量が多様化している。

以上のことから、セメント協会では、あらたに、セメントユーザーに活用できるように、各種セメントを使用したコンクリートの断熱温度上昇に関する共通試験を実施することとした。

本共通試験では、委員会を構成する8試験所にて、各社保有の試験装置を用いて、普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を使用した単位セメント量280～550kg/m³のコンクリートに関して、打込み温度10℃、20℃および30℃の条件にて、断熱温度上昇試験を実施した。

本報告はこれらの結果を取り纏めたものである。

さらに、最近、温度制御を行わない自然放熱型の試験装置を用いて、測定データを逆解析することで断熱温度上昇量を求める方法が提案されている。そこで共通試験と併せて一部の配合にて、この試験装置を用いた断熱温度上昇試験を実施した。その結果を巻末に参考資料として併せて添付する。

2. 実験の概要

2. 1 使用材料

2. 1. 1 セメント

セメントは、市販の普通ポルトランドセメント（以下、記号；Nと称す）、中庸熱ポルトランドセメント（以下、記号；Mと称す）、低熱ポルトランドセメント（以下、記号；Lと称す）および高炉セメントB種（以下、記号；BBと称す）の4種類を使用した。なお、N、M、BBはそれぞれ3銘柄、Lは2銘柄のセメントを任意に選定し、それぞれ均一に等量混合したものを試料とした。使用したセメントの化学成分および物理的性質を表-2.1および表-2.2に示す。

表-2.1 セメントの化学成分

セメントの種類	化学成分(%)											
	ig.loss	insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O _{eq}	Cl
N	2.41	0.12	20.44	5.50	2.95	64.32	0.98	2.05	0.22	0.45	0.52	0.016
M	0.66	0.07	24.25	3.50	3.28	63.92	0.95	2.38	0.23	0.33	0.45	0.004
L	0.73	0.07	26.03	2.98	3.12	62.92	0.80	2.50	0.20	0.33	0.42	0.005
BB	1.11	0.10	26.05	8.97	1.97	55.17	3.39	1.87	0.24	0.33	0.46	—

表-2.2 セメントの物理的性質

セメントの種類	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結			安定性	圧縮強さ (N/mm ²)				水和熱 (J/g)		
			水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)		3日	7日	28日	91日	7日	28日	91日
N	3.15	3260	27.8	2-24	3-32	良	30.7	48.0	64.9	—	—	—	—
M	3.21	3470	28.0	3-22	4-46	良	18.4	26.9	57.9	—	257	327	—
L	3.24	3740	27.9	4-00	5-37	良	11.2	16.0	56.5	82.2	201	278	327
BB	3.04	3740	28.8	2-55	4-24	良	20.6	32.8	59.9	—	—	—	—

2. 1. 2 骨材

骨材は、粗骨材に東京都青梅市産の硬質砂岩砕石を、細骨材に千葉県君津市産の山砂を使用した。これらの骨材の粒度および物性を表-2.3および表-2.4に示す。

表-2.3 骨材の粒度

分類	種類	産地	ふるい目の寸法(mm)	ふるい通過量 (%)										粗粒率
				25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
粗骨材	硬質砂岩砕石	東京都青梅市産		100	96	—	39	6	1	—	—	—	—	6.58
細骨材	山砂	千葉県君津市産		—	—	—	100	98	84	64	48	25	3	2.78

表-2.4 骨材の物性

分類	種類	密度 (g/cm ³)		吸水率 (%)
		表乾	絶乾	
粗骨材	硬質砂岩 砕石	2.66	2.64	0.61
細骨材	山砂	2.65	2.62	1.14

2. 1. 3 水

練混ぜ水は、上水道水を使用した。

2. 1. 4 混和剤

混和剤は、単位セメント量 280kg/m³、340kg/m³、400kg/m³ の普通コンクリートについては、AE 減水剤標準形（I種）（ポゾリス No.70、BASF ジャパン（株）製）および AE 剤（I種）（マイクロエア 303A、BASF ジャパン（株）製）を使用した。

また、単位セメント量 450kg/m³、500kg/m³、550kg/m³ の高強度コンクリートについては、高性能 AE 減水剤標準形（I種）（レオビルド SP8SV、BASF ジャパン（株）製）および空気量調整剤（マイクロエア 404、BASF ジャパン（株）製）を使用した。

2. 2 要因と水準

実験は、強度区分を普通と高強度に大別し、要因を単位セメント量、打込み温度、セメントの種類として、表-2.5 に示す水準で実施した。

表-2.5 要因と水準

強度区分	単位セメント量 (kg/m ³)	打込み温度 (°C)	セメントの種類			
			N	M	L	BB
普通	280	10				
		20	○	○	○	○
		30				
	340	10	○	○	○	○
		20	○	○	○	○
		30	○	○	○	○
	400	10				
		20	○	○	○	○
		30				
高強度	450	10				
		20	○	○	○	
		30				
	500	10	○	○	○	
		20	○	○	○	
		30	○	○	○	
	550	10				
		20	○	○	○	
		30				

2.3 試験所分担

実験は、表-2.6 に示すように 8 試験所で分担して行った。

表-2.6 試験所分担一覧

強度区分	単位セメント量 (kg/m ³)	セメントの種類	打込み温度 (°C)	試験所									
				A	B	C	D	E	F	G	H		
				空気循環式 Type I				空気循環式 Type II			オイル循環式		
普通	280	N	20	●	●								
		M	20	●	●			●	●			●	
		L	20		●								
		BB	20	●	●								
	340	N	10	●	●	●	●	●	●				●
			20	●	●	●	●	●	●	●			●
			30	●	●	●	●	●	●				●
		M	10	●	●								
			20	●	●			●	●				●
			30	●	●								
		L	10	●	●								
			20		●								
			30	●	●								
		BB	10	●	●								
			20	●	●								
			30	●	●								
400	N	20	●	●									
	M	20	●	●					●		●		
	L	20	●	●									
	BB	20	●	●									
高強度	450	N	20			●	●						
		M	20			●	●						
		L	20			●	●						
	500	N	10			●	●						
			20	●	●	●	●	●	●	●		●	
			30			●	●						
		M	10			●	●						
			20			●	●						
			30			●	●						
	L	10			●	●							
		20			●	●							
		30			●	●							
550	N	20			●	●							
	M	20			●	●							
	L	20			●	●							

2. 4 断熱温度上昇試験装置

各試験所で使用している断熱温度上昇試験装置の概要を、表-2.7 に示す。

表-2.7 各試験所で使用している断熱温度上昇試験装置の概要

試験所	断熱温度上昇試験装置	
	制御タイプ	容量 (ℓ)
A	空気循環式 Type I	40
B	空気循環式 Type I	40
C	空気循環式 Type I	45
D	空気循環式 Type I	40
E	空気循環式 Type II	45
F	空気循環式 Type II	40
G	空気循環式 Type II	50
H	オイル循環式	20

2. 5 コンクリートの配合

コンクリートの配合を、表-2.8～表-2.14 に示す。

普通コンクリート（単位セメント量；280、340、400kg/m³）については、単位水量を 160kg/m³ とし、空気量が 4.5±1.5%程度になるよう混和剤で調整した。高強度コンクリート（単位セメント量；450、500、550kg/m³）については、単位水量を 175kg/m³ とし、スランプフローが 60cm 程度、空気量が 2.0%以下になるよう混和剤で調整した。なお、1 試験所で基本配合を定めた後、全試験所で、同一配合で練混ぜを行ったため、スランプおよび混和剤使用量は試験所によって異なっている。

練上がり時のコンクリート温度の測定は、JIS A 1156「フレッシュコンクリートの温度測定方法」に従って行った。スランプ試験は、JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」に、スランプフロー試験は、JIS A 1150「コンクリートのスランプフロー試験方法」に従って行った。空気量試験は、JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法－空気室圧力方法」に従って行った。

表-2.8 コンクリートの配合 (N、普通コンクリート)

セメントの種類	単位セメント量 (kg/m ³)	打込み温度 (°C)	試験所	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				AE減水剤 (ml/m ³)	AE剤 (ml/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)	練上がり温度 (°C)						
						W	C	S	G											
N	280	20	A	57.1	46.5	160	340	870	1005	700	6	17.5	4.2	20.8						
			B								0	9.5	5.3	21.1						
	10	A	3	15.0							5.3	12.0								
		B	0	11.0							4.0	12.6								
		C	12	10.5							4.5	11.9								
		D	5	12.0							5.0	11.5								
		E	10	16.5							6.0	10.1								
		F	12	12.0							5.5	10.4								
		G	12	9.5							5.0	10.3								
		H	12	13.5							6.3	22.0								
		20	A	10							12.5	5.5	20.2							
			B	12							11.0	5.0	20.5							
	C		7	11.5							5.0	22.5								
	D		12	12.0							5.0	21.5								
	E		12	14.0							6.1	21.9								
	F		0	5.5							4.1	20.0								
	G		12	12.5							5.0	20.6								
	H		7	13.0							4.3	31.5								
	30	A	14	8.0							6.0	31.3								
		B	12	7.5							3.8	30.2								
		C	9	10.0							4.7	31.0								
		D	12	6.5							4.7	29.5								
		E	12	10.5							5.9	30.9								
		F	13	8.5							4.6	30.1								
		G	8	9.5							4.0	21.8								
		H	8	5.0							5.2	21.6								
	400	20	A	40.0							46.5	160	340	847	978	850	8	9.5	4.0	21.8
			B														8	5.0	5.2	21.6

表-2.9 コンクリートの配合 (N、高強度コンクリート)

セメントの種類	単位セメント量 (kg/m ³)	打込み温度 (°C)	試験所	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				高性能AE減水剤 (ml/m ³)	空気量調整剤 (ml/m ³)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	練上がり温度 (°C)							
						W	C	S	G												
N	450	20	C	38.9	49.0	175	500	881	877	5850	20	66.0	1.3	19.8							
			D								18	63.0	1.5	21.1							
	10	C	5000	20							56.5	1.7	12.0								
		D	5750	25							58.5	1.9	11.5								
		A	5000	9							61.0	0.7	22.3								
		B	5000	50							65.0	1.9	20.9								
		C	4750	20							66.0	1.0	21.0								
		D	5750	20							56.0	1.5	21.8								
		E	6750	20							58.0	0.5	22.1								
		F	6750	20							47.0	1.8	22.1								
		G	5500	0							50.0	1.7	20.0								
		H	6250	9							56.0	1.7	20.9								
	20	C	4750	20							62.5	1.0	29.8								
		D	5750	20							54.5	1.9	31.0								
		550	20	C							31.8	49.0	175	550	797	877	5775	20	62.5	0.8	20.7
				D														22	64.5	0.7	21.1

表-2.10 コンクリートの配合 (M、普通コンクリート)

セメントの種類	単位セメント量 (kg/m ³)	打込み温度 (°C)	試験所	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				AE減水剤 (ml/m ³)	AE剤 (ml/m ³)	スランブ (cm)	空気量 (%)	練上がり温度 (°C)	
						W	C	S	G						
M	280	20	A	57.1	46.5	160	280	872	1007	700	8	16.0	4.3	21.4	
			B								3	11.0	3.7	19.4	
			E								7	11.0	4.2	21.3	
			F								0	8.5	3.0	19.8	
			H								14	11.5	4.0	19.4	
	340	10	A	47.1			7	17.0	4.0	11.5					
			B				3	11.5	4.0	11.8					
			A				10	16.5	4.0	21.5					
			B				10	13.0	4.0	19.8					
		20	E				9	11.0	3.8	21.5					
			F				12	13.5	4.5	20.8					
			H				24	12.5	5.0	20.5					
			A				14	15.0	4.9	30.7					
	30	B	10	9.5			5.2	30.6							
		400	20	A			40.0	400	826	954	1000	12	12.5	4.3	21.2
				B								24	10.0	4.3	20.1
F				8	9.0	4.5						22.0			
H	16			8.0	4.0	19.3									

表-2.11 コンクリートの配合 (M、高強度コンクリート)

セメントの種類	単位セメント量 (kg/m ³)	打込み温度 (°C)	試験所	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				高性能AE減水剤 (ml/m ³)	空気量調整剤 (ml/m ³)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	練上がり温度 (°C)
						W	C	S	G					
M	450	20	C	38.9	50.4	160	450	888	877	3825	18	59.5	1.2	21.2
			D					863	902	5310	23	58.0	0.8	21.0
	500	10	C	35.0			49.2	847	877	4750	20	67.0	1.3	12.0
			D				49.0	843	881	5000	20	58.5	1.5	12.0
			C				49.2	847	877	4250	20	64.0	1.0	19.1
		20	D				49.0	843	881	5600	20	61.5	1.7	21.0
			C				49.2	847	877	4250	20	57.0	1.8	30.0
			D				49.0	843	881	5600	20	68.0	1.3	30.0
	550	20	C	31.8			48.0	806	877	4675	22	67.0	0.8	19.1
			D				49.0	823	860	4950	22	61.0	1.5	20.5

表-2.12 コンクリートの配合 (L、普通コンクリート)

セメントの種類	単位セメント量 (kg/m ³)	打込み温度 (°C)	試験所	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				AE減水剤 (ml/m ³)	AE剤 (ml/m ³)	スランブ (cm)	空気量 (%)	練上がり温度 (°C)
						W	C	S	G					
L	280	20	B	57.1	46.5	160	280	873	1008	700	6	16.8	4.0	19.6
	340	10	A	47.1			14	18.5	4.7	11.5				
			B				3	14.5	4.3	11.3				
		20	B				7	17.0	4.6	19.2				
			A				17	16.5	4.4	31.4				
	30	B	9	10.0			5.1	31.2						
		400	20	A			40.0	20	13.5	5.0	20.5			
				B				12	13.0	3.9	19.4			

表-2.13 コンクリートの配合 (L、高強度コンクリート)

セメントの種類	単位セメント量 (kg/m ³)	打込み温度 (°C)	試験所	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				高性能 AE 減水剤 (ml/m ³)	空気量調整剤 (ml/m ³)	スランプフロー (mm)	空気量 (%)	練上がり温度 (°C)
						W	C	S	G					
L	450	20	C	38.9	50.5	175	450	891	877	3825	18	53.5	1.2	21.7
			D		49.0			865	904	5175	18	62.5	1.1	20.5
	500	10	C	49.3	851			877	5000	20	65.5	1.2	11.0	
			D	49.0	845			883	5000	20	65.5	2.0	12.0	
		20	C	49.3	851			877	4250	20	55.0	1.2	21.0	
			D	49.0	845			883	5000	20	59.0	1.6	20.5	
		30	C	49.3	851			877	4000	20	63.0	1.0	29.0	
			D	49.0	845			883	5000	20	58.0	1.1	30.0	
	550	20	C	31.8	48.1			810	877	4950	22	64.0	1.1	21.6
			D	49.0	825			862	4950	22	61.0	1.6	20.5	

表-2.14 コンクリートの配合 (BB、普通コンクリート)

セメントの種類	単位セメント量 (kg/m ³)	打込み温度 (°C)	試験所	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				AE 減水剤 (ml/m ³)	AE 剤 (ml/m ³)	スランプ (mm)	空気量 (%)	練上がり温度 (°C)
						W	C	S	G					
BB	280	20	A	57.1	46.5	160	280	866	1000	700	11	15.0	4.2	21.5
			B								6	18.0	5.1	19.5
	340	10	A	47.1			340	842	972	850	7	15.5	4.5	11.2
			B	0							7.0	3.5	12.0	
		20	A	14							13.0	4.3	21.6	
			B	7							11.5	4.2	19.3	
		30	A	10							10.5	3.6	30.7	
			B	7							7.0	4.6	31.2	
	400	20	A	40.0			400	818	944	1000	16	10.5	4.4	22.1
			B								12	6.0	3.2	19.7

2. 6 コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜは、JIS A 1138「試験室におけるコンクリートの作り方」に従って行った。粗骨材、細骨材、セメントを投入した後、空練りを 30 秒間行い、その後、混和剤を分散させた練混ぜ水を投入し、60 秒間練り混ぜ、かき落としを行い、さらに 30 秒間練り混ぜて排出した。

なお、高強度コンクリートにおいては、かき落とし後、ミキサ内でコンクリートを 5 分間静置し、30 秒間練り混ぜて排出した。

排出したコンクリートは、スランプ、空気量を測定後、直ちに全量を断熱上昇試験用の型枠に打込み、試験に供した。

3 試験結果と考察

3.1 終局断熱温度上昇量および温度上昇速度の定数

終局断熱温度上昇量 K および温度上昇速度の定数 α の算出には、式 1 および式 2 を用いた。

N は材齢 7 日まで、 M 、 L 、 BB は材齢 12 日まで（ただし、 L を使用した単位セメント量 280kg/m^3 (20°C)、単位セメント量 340kg/m^3 (10°C 、 20°C) については材齢 28 日まで) の測定データについて、回帰計算プログラムを用いて最小二乗法により近似し、終局断熱温度上昇量 K および温度上昇速度の定数 α を求めた。

計算結果を、表-3.1.1～表-3.1.4 に示す。なお、4 章以降の整理については、広く用いられている式 1 で算出した終局断熱温度上昇量 K および温度上昇速度の定数 α で行った。

また、巻末の付録に実測データを示す。

$$Q(t) = K (1 - \exp(-\alpha t)) \quad \dots \text{式 1}$$

$$Q(t) = K (1 - \exp(-\alpha t^\beta)) \quad \dots \text{式 2}$$

ここに、 t : 材齢 (日)

$Q(t)$: 材齢 t 日までの断熱温度上昇量 ($^\circ\text{C}$)

K : 終局断熱温度上昇量 ($^\circ\text{C}$)

α : 温度上昇速度の定数

β : 定数

表-3.1.1 断熱温度上昇試験結果 (N)

セメントの種類	単セメント位量 (kg/m ³)	打込み温度 (°C)	試験所	断熱温度上昇試験装置	回帰結果				
					式1		式2		
					K (°C)	α	K (°C)	α	β
N	280	20	A	空気循環式 Type I	45.4	1.085	44.8	1.113	1.168
			B		43.6	1.095	43.3	1.112	1.098
	10	A	55.7		0.714	53.2	0.674	1.550	
		B	55.6		0.818	54.1	0.805	1.313	
		C	54.7		0.686	52.2	0.628	1.519	
		D	54.9		0.804	53.0	0.772	1.473	
		E	53.4		0.964	53.4	0.870	1.656	
		F	53.9		0.653	51.4	0.605	1.439	
	H	53.9	0.761		52.0	0.724	1.458		
	340	20	A		空気循環式 Type I	52.0	1.246	52.0	1.269
			B	53.5		1.202	53.5	1.220	1.273
			C	51.6		1.100	51.6	1.091	1.321
			D	51.1		1.322	51.1	1.387	1.316
		E	52.1	1.391	52.1	1.507	1.393		
		F	49.6	1.127	49.0	1.172	1.210		
		G	51.7	1.357	52.5	1.271	0.827		
		H	53.0	1.153	52.3	1.206	1.248		
	30	A	空気循環式 Type I	49.8	1.854	49.8	1.947	1.102	
		B		49.9	1.554	49.7	1.625	1.102	
		C		49.1	1.562	49.1	1.687	1.239	
		D	48.0	1.694	48.0	1.890	1.276		
		E	47.1	1.881	47.1	2.211	1.329		
		F	48.8	1.598	48.8	1.598	1.000		
	H	49.2	1.757	49.1	1.856	1.106			
	400	20	A	空気循環式 Type I	57.0	1.443	57.0	1.614	1.449
	B		57.6		1.436	57.6	1.585	1.412	
	450	20	C		61.5	1.238	61.5	1.394	1.857
			D		61.6	1.475	61.6	2.258	2.316
	500	10	C		67.0	1.093	67.0	1.102	2.245
			D		68.2	1.059	68.2	1.034	2.500
		20	A		66.4	1.666	66.4	2.487	1.869
			B		65.1	1.634	65.1	2.483	1.983
			C		65.7	1.453	65.7	2.052	2.050
			D		65.0	1.638	65.0	2.527	1.991
			E	66.7	1.707	66.7	2.781	2.061	
			F	64.8	1.404	63.5	1.925	1.802	
G		71.1	1.341	71.1	1.555	1.558			
H		68.2	1.414	66.9	1.971	1.837			
550	30	C	空気循環式 Type I	61.3	1.940	61.3	3.518	1.989	
		D		63.1	2.108	63.1	4.245	1.995	
	20	C		68.9	1.544	68.9	2.594	2.314	
		D		71.4	1.606	71.4	3.455	2.590	

※) 式1・・・ $Q(t)=K(1-\exp(-\alpha t))$

※) 式2・・・ $Q(t)=K(1-\exp(-\alpha t^\beta))$

表-3.1.2 断熱温度上昇試験結果 (M)

セメントの種類	単セメント位量 (kg/m ³)	打込み温度 (°C)	試験所	断熱温度上昇試験装置	回帰結果					
					式1		式2			
					K (°C)	α	K (°C)	α	β	
M	280	20	A	空気循環式 Type I	40.1	0.587	40.1	0.722	0.732	
			B		38.3	0.596	40.4	0.641	0.728	
			E	空気循環式 Type II	41.3	0.679	41.3	0.768	0.791	
			F		40.5	0.558	44.0	0.597	0.676	
			H	オイル循環式	38.5	0.639	40.6	0.678	0.717	
	340	10	A	空気循環式 Type I	47.9	0.522	48.3	0.536	0.945	
			B		50.0	0.517	50.3	0.529	0.953	
			A		45.3	0.780	45.3	0.844	0.822	
			B		45.7	0.644	46.7	0.678	0.827	
		20	E	空気循環式 Type II	45.1	0.942	45.1	0.943	0.995	
			F		45.4	0.660	47.3	0.697	0.742	
			H	オイル循環式	46.2	0.718	47.4	0.751	0.793	
			30	A	空気循環式 Type I	44.5	1.205	44.5	1.209	0.808
				B		45.8	1.067	45.8	1.082	0.872
			400	20	A	空気循環式 Type I	51.2	0.877	51.2	0.909
	B	49.8			0.807		50.1	0.816	0.926	
	F	空気循環式 Type II			51.5	0.819	52.7	0.835	0.777	
	H	オイル循環式			51.8	0.811	52.3	0.825	0.880	
	450	20	C	空気循環式 Type I	54.8	0.867	54.8	0.858	1.040	
			D		54.6	0.990	54.6	0.977	1.112	
	500	10	C		59.4	0.723	59.4	0.623	1.357	
			D		62.2	0.877	62.2	0.823	1.278	
		20	C		58.8	0.895	58.8	0.862	1.191	
			D		58.6	1.083	58.6	1.080	1.204	
		30	C		56.5	1.311	56.5	1.348	1.167	
			D		56.8	1.563	56.8	1.676	1.204	
	550	20	C		62.4	0.977	62.4	0.944	1.406	
			D		61.8	1.201	61.8	1.257	1.402	

※) 式1・・・ $Q(t) = K (1 - \exp(-\alpha t))$

※) 式2・・・ $Q(t) = K (1 - \exp(-\alpha t^\beta))$

表-3.1.3 断熱温度上昇試験結果 (L)

セメントの種類	単セメント位量 (kg/m ³)	打込み温度 (°C)	試験所	断熱温度上昇試験装置	回帰結果				
					式1		式2		
					K (°C)	α	K (°C)	α	β
L	280	20	B	空気循環式 Type I	40.2	0.207	43.2	0.297	0.713
			A		48.0	0.215	50.5	0.291	0.763
	340	10	B		50.5	0.210	55.3	0.306	0.678
			A		46.6	0.272	46.6	0.350	0.840
		20	B		41.7	0.603	41.7	0.715	0.786
			A		42.5	0.530	42.5	0.633	0.805
	30	B	47.0		0.492	48.9	0.536	0.802	
		A	48.0		0.422	50.1	0.456	0.831	
	400	20	B		49.3	0.540	50.1	0.568	0.887
			A		49.6	0.540	49.6	0.565	0.944
	450	20	C		54.4	0.377	53.9	0.365	1.052
			D		54.4	0.480	54.4	0.459	1.049
		10	C		54.8	0.586	54.8	0.627	0.909
			D		52.3	0.634	52.3	0.647	0.970
		20	C		54.0	0.713	54.0	0.756	0.893
			D		53.7	0.818	53.7	0.847	0.917
		30	C		55.4	0.675	55.4	0.678	0.993
			D		56.1	0.698	56.1	0.670	1.080
	550	20	C						
			D						

※) 式1・・・ $Q(t)=K(1-\exp(-\alpha t))$

※) 式2・・・ $Q(t)=K(1-\exp(-\alpha t^\beta))$

表-3.1.4 断熱温度上昇試験結果 (BB)

セメントの種類	単セメント位量 (kg/m ³)	打込み温度 (°C)	試験所	断熱温度上昇試験装置	回帰結果				
					式1		式2		
					K (°C)	α	K (°C)	α	β
BB	280	20	A	空気循環式 Type I	48.1	0.712	47.9	0.698	1.064
			B		48.9	0.614	48.6	0.596	1.071
	340	10	A		57.9	0.507	56.4	0.401	1.390
			B		58.3	0.558	57.2	0.492	1.256
		20	A		55.0	0.830	54.6	0.802	1.181
			B		57.6	0.705	57.0	0.667	1.182
	30	A	53.2		1.265	53.2	1.263	0.982	
		B	53.2		1.091	53.3	1.089	0.978	
	400	20	A		61.5	0.948	61.0	0.935	1.250
			B		63.2	0.814	62.5	0.775	1.283

※) 式1・・・ $Q(t)=K(1-\exp(-\alpha t))$

※) 式2・・・ $Q(t)=K(1-\exp(-\alpha t^\beta))$

3. 2 試験装置の違いによる考察

N を使用した単位セメント量 340kg/m^3 の打込み温度 $10、20、30^\circ\text{C}$ および単位セメント量 500kg/m^3 の打込み温度 20°C での試験装置ごとの結果を整理した。式 1 を用いて算出した終局断熱温度上昇量 K および温度上昇速度の定数 α と各値の変動係数を図-3.2.1～図-3.2.4 に示す。

試験装置ごとにサンプル数が異なっているが、空気循環式 Type I、Type II について変動係数を算出し比較を行った。終局断熱温度上昇量 K に比べて、温度上昇速度の定数 α の変動係数が大きくなったが、空気循環式 Type I と Type II を比較した場合、各値の平均値および変動係数に大きな違いは認められなかった。

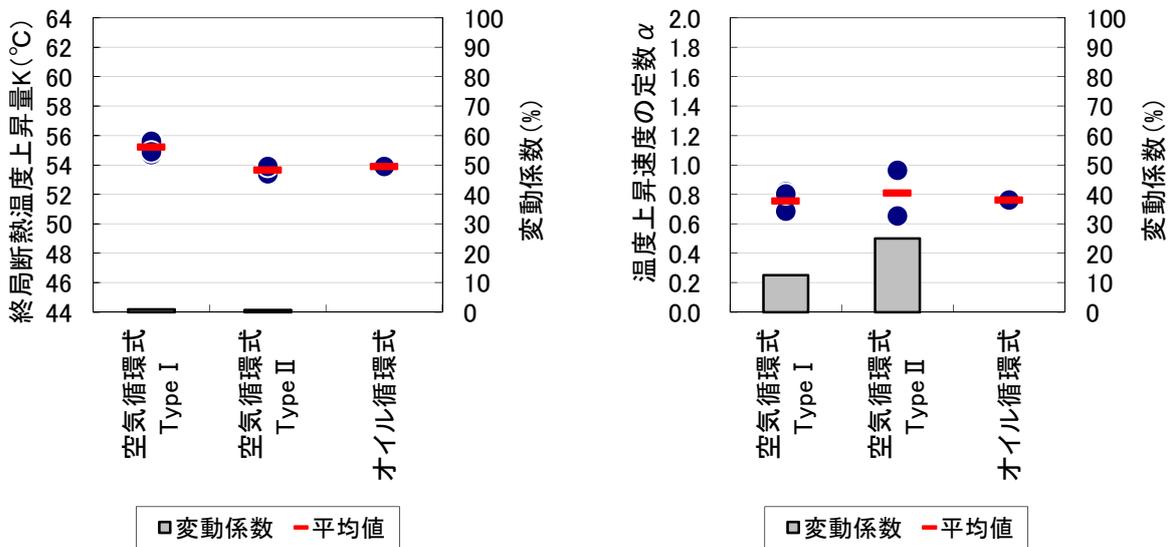


図-3.2.1 試験装置ごとの K および α (N340- 10°C) [左 : K 、右 : α]
 サンプル数 空気循環式 Type I=4、Type II=2、オイル循環式=1

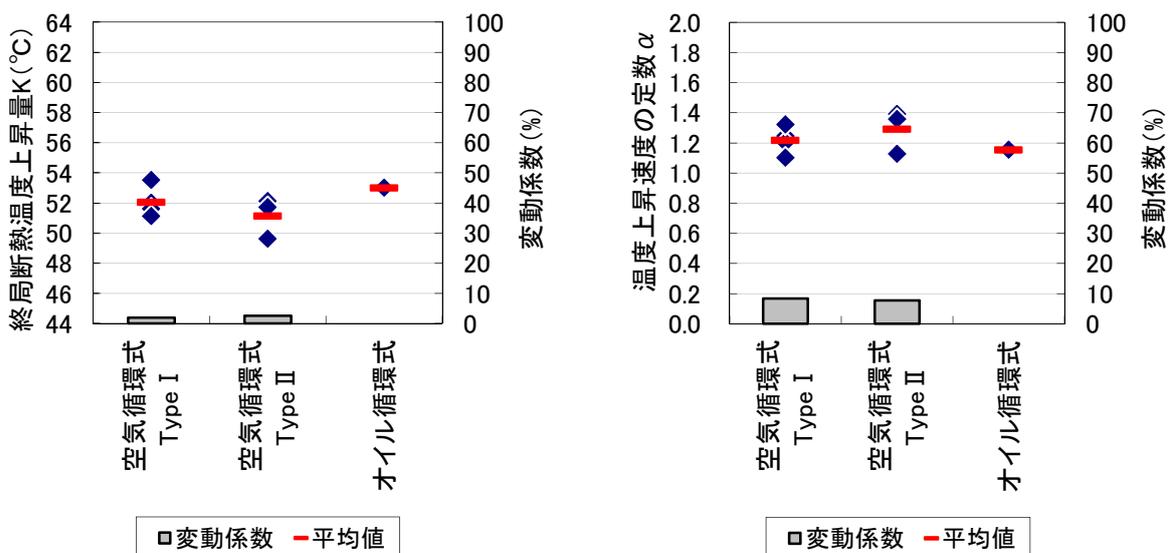


図-3.2.2 試験装置ごとの K および α (N340- 20°C) [左 : K 、右 : α]
 サンプル数 空気循環式 Type I=4、Type II=3、オイル循環式=1

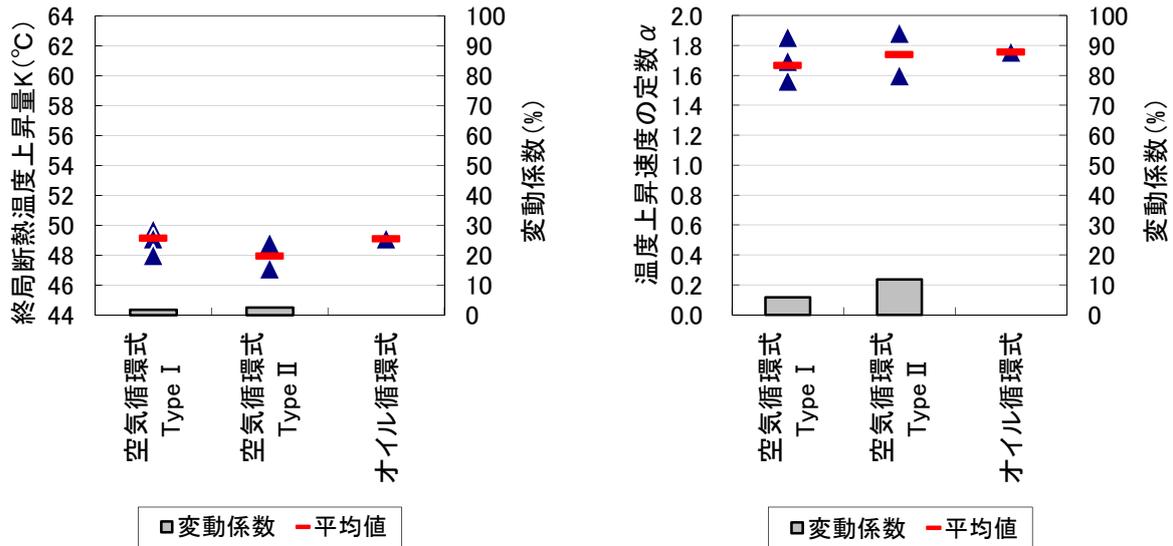


図-3.2.3 試験装置ごとのKおよびα (N340-30°C) [左: K、右: α]
 サンプル数 空気循環式 Type I=4、Type II=2、オイル循環式=1

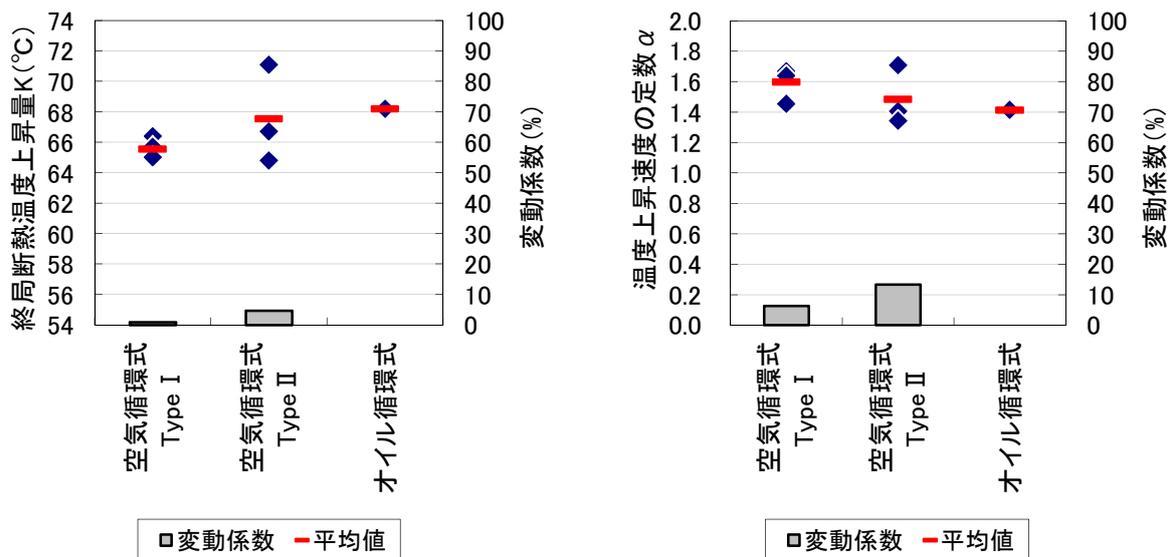


図-3.2.4 試験装置ごとのKおよびα (N500-20°C) [左: K、右: α]
 サンプル数 空気循環式 Type I=4、Type II=3、オイル循環式=1

同様に N を使用した単位セメント量 340kg/m^3 の打込み温度 10、20、 30°C および単位セメント量 500kg/m^3 の打込み温度 20°C での試験装置ごとの平均値とそれらの変動係数を整理した。式 1 を用いて算出した各試験装置の終局断熱温度上昇量 K の平均値と変動係数を図-3.2.5 に、温度上昇速度の定数 α の平均値と変動係数を図-3.2.6 に示す。

単位セメント量、打込み温度が異なる場合についても、いずれの値も変動係数は小さく、試験装置の違いが試験結果へ及ぼす影響は小さかった。

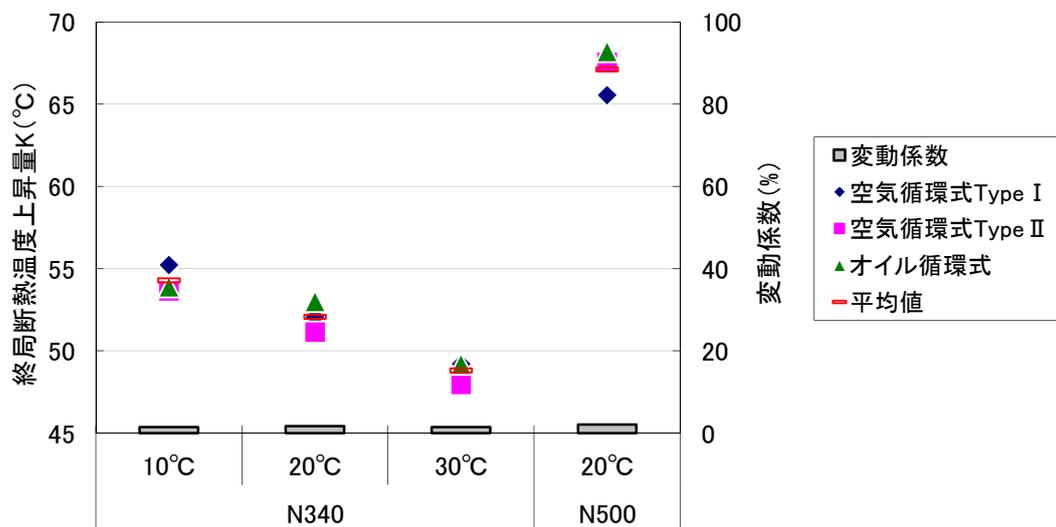


図-3. 2. 5 各試験装置の終局断熱温度上昇量 K の平均値と変動係数

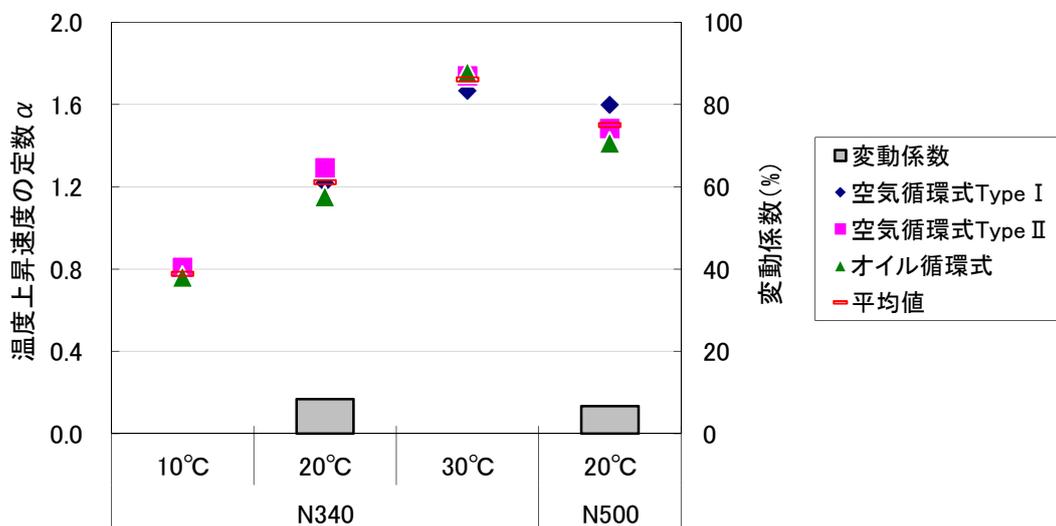


図-3. 2. 6 各試験装置の温度上昇速度の定数 α の平均値と変動係数

3. 3 試験所間の違いによる考察

3. 3. 1 空気循環式 Type I のケース

空気循環式 Type I の装置を用いた場合について、N を使用した単位セメント量 340kg/m^3 の打込み温度 $10、20、30^\circ\text{C}$ および単位セメント量 500kg/m^3 の打込み温度 20°C での結果を整理した。なお、試験所数は 4 試験所となっている。式 1 を用いて算出した各試験所の終局断熱温度上昇量 K の平均値と範囲を図-3.3.1 に、温度上昇速度の定数 α の平均値と範囲を図-3.3.2 に示す。

終局断熱温度上昇量 K は、範囲が $1.0^\circ\text{C}\sim 2.4^\circ\text{C}$ となり、各試験所の値のばらつきは小さかった。温度上昇速度の定数 α においても、範囲は $0.132\sim 0.300$ で、終局断熱温度上昇量 K と同様にばらつきが小さかった。このことから、空気循環式 Type I は、試験所間のばらつきが小さいことが認められた。

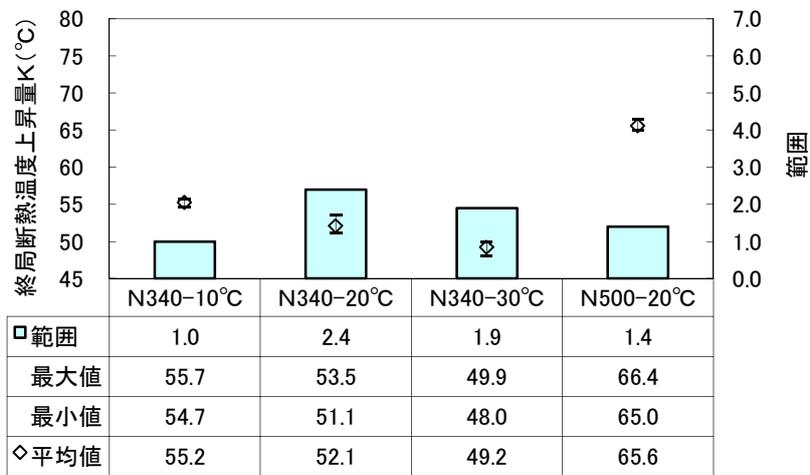


図-3.3.1 各試験所の終局断熱温度上昇量 K の平均値と範囲

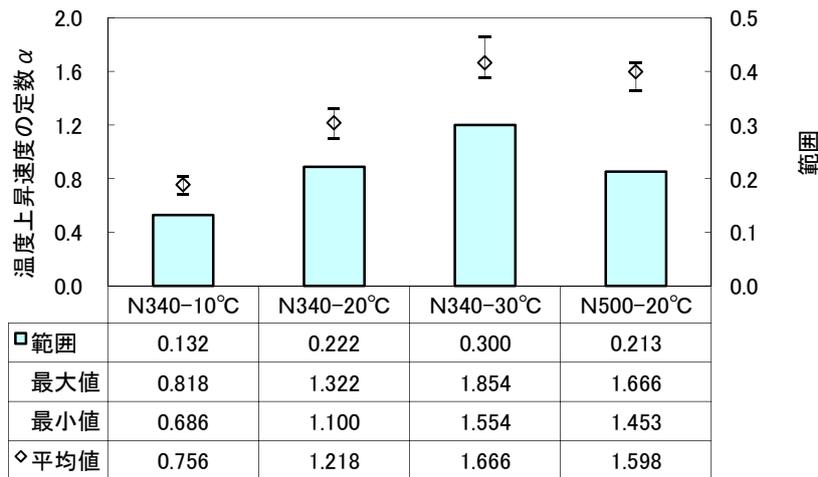


図-3.3.2 各試験所の温度上昇速度の定数 α の平均値と範囲

3. 3. 2 空気循環式 Type II のケース

Nを使用した単位セメント量 340kg/m^3 および単位セメント量 500kg/m^3 の打込み温度 20°C での結果を整理した。なお、試験所数は3試験所となっている。式1を用いて算出した各試験所の終局断熱温度上昇量 K の平均値と範囲を図-3.3.3に、温度上昇速度の定数 α の平均値と範囲を図-3.3.4に示す。

終局断熱温度上昇量 K について、単位セメント量 500kg/m^3 の場合は範囲が 6.3°C となり、空気循環式 Type I と比較して若干大きいものの、単位セメント量 340kg/m^3 の範囲は 2.5°C と小さく、空気循環式 Type I で得られた範囲と概ね同等であった。温度上昇速度の定数 α は、終局断熱温度上昇量 K と傾向的に似ており、単位セメント量 500kg/m^3 では若干大きいものの、単位セメント量 340kg/m^3 では空気循環式 Type I と同程度の範囲を示した。このことから、空気循環式 Type II においても、試験所間のばらつきが小さいことが認められた。

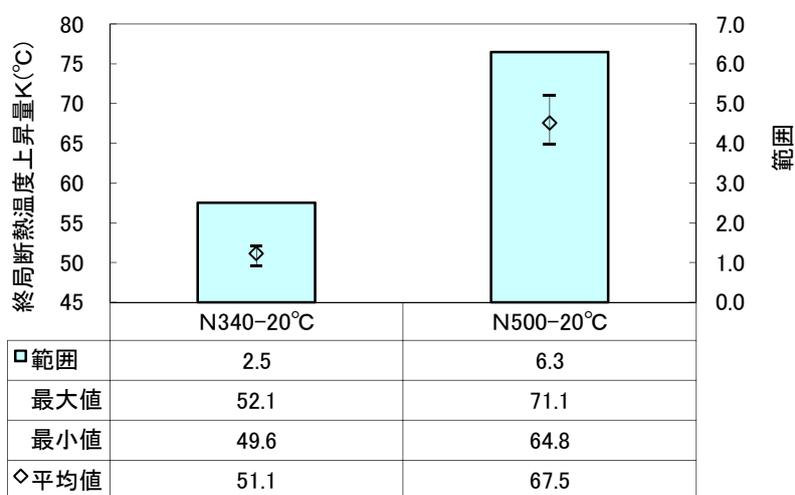


図-3.3.3 各試験所の終局断熱温度上昇量 K の平均値と範囲

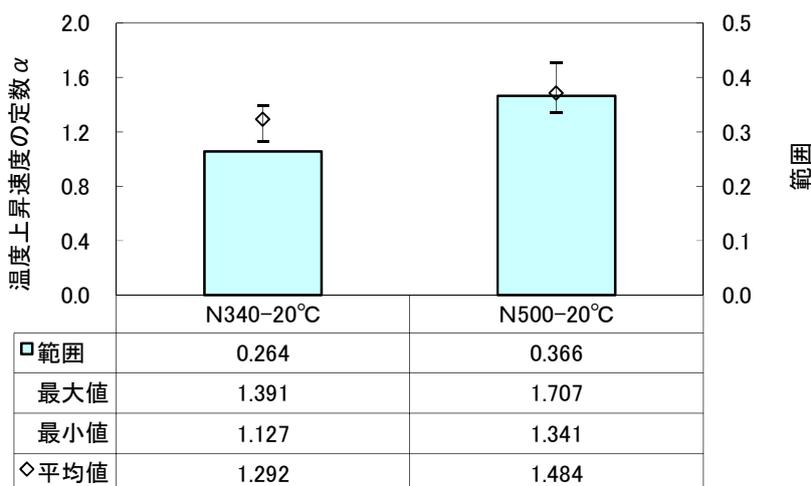


図-3.3.4 各試験所の温度上昇速度の定数 α の平均値と範囲

3. 4 セメントの種類の違いによる考察

各種セメントを使用したコンクリートの終局断熱温度上昇量 K を図-3.4.1 に示す。

単位セメント量 340kg/m^3 の場合、いずれの打込み温度においても、BB の終局断熱温度上昇量 K が最も大きくなった。その他のセメントは、 10°C および 20°C の場合は $N > M \approx L$ の順となり、 30°C の場合は $N > M > L$ の順であった。単位セメント量 500kg/m^3 の場合、N の終局断熱温度上昇量 K が最も大きく、いずれの打込み温度においても、 $N > M > L$ の順であった。

各種セメントを使用したコンクリートの温度上昇速度の定数 α を図-3.4.2 に示す。

単位セメント量 340kg/m^3 の場合、いずれの打込み温度においても、N の温度上昇速度の定数 α が最も大きく、 $N > M \approx BB > L$ の順に小さくなった。単位セメント量 500kg/m^3 の場合、いずれの打込み温度においても N の温度上昇速度の定数 α が最も大きく、 $N > M > L$ の順に小さくなった。BB を除く 3 種類のセメントの順列は、単位セメント量によらず同様の傾向を示した。

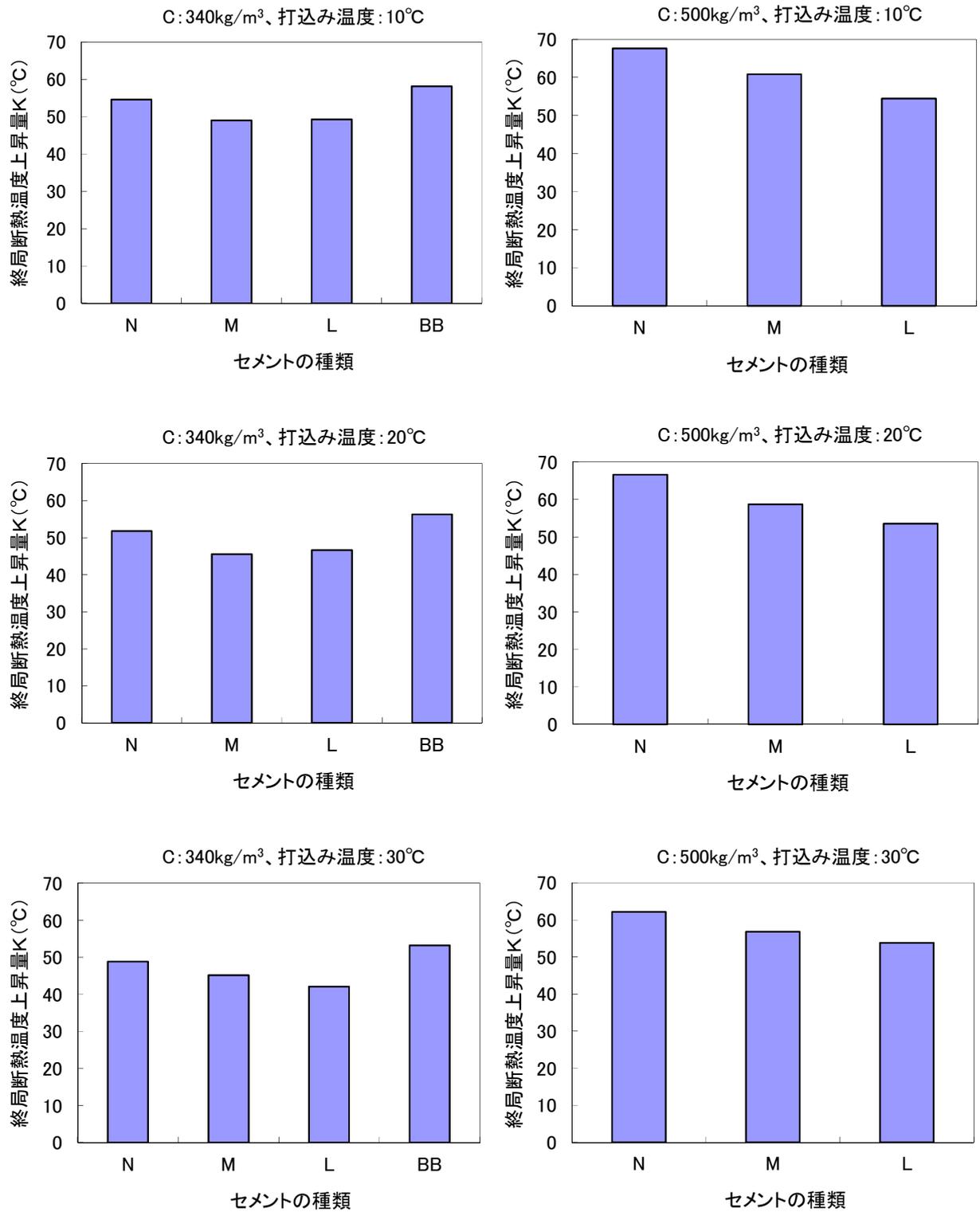


図-3.4.1 コンクリートの終局断熱温度上昇量K (セメントの種類の影響)
 [左: 単位セメント量 340kg/m³、右: 単位セメント量 500kg/m³]

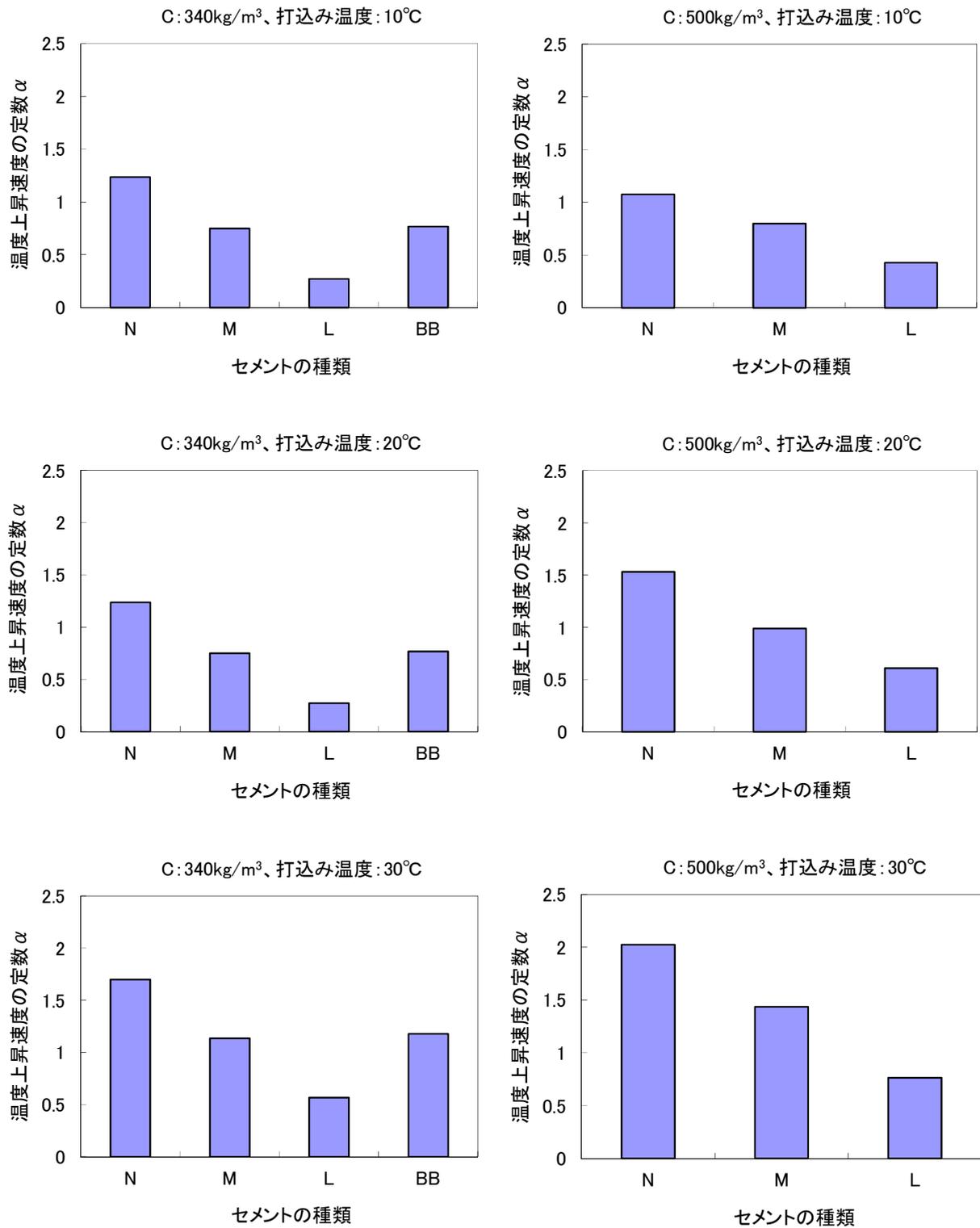


図-3.4.2 コンクリートの温度上昇速度の定数 α （セメントの種類の影響）
 [左：単位セメント量 340kg/m³、右：単位セメント量 500kg/m³]

3.5 単位セメント量の違いによる考察

単位セメント量と式1を用いて算出した終局断熱温度上昇量 K および温度上昇速度の定数 α との関係を図-3.5.1 に示す。図-3.5.1 には、コンクリート専門委員会報告 F-51 「各種セメントを用いたコンクリートの初期強度発現および断熱温度上昇」の結果を併せて示した。

終局断熱温度上昇量 K は、セメント種類に係らず、単位セメント量が多いほど大きくなる傾向が認められた。単位セメント量が 450kg/m^3 以上の場合、 $N > M > L$ の順に断熱温度上昇量が大きくなり、単位セメント量が 400kg/m^3 以下の場合、 $BB > N > M \approx L$ の順であった。

温度上昇速度の定数 α は、セメントの種類に係らず、単位セメント量が多いほど大きくなる傾向が認められた。セメントの種類の影響については、単位セメント量に係らず、 $N > BB \approx M > L$ の順であった。

本試験と F-51²⁾ を比較すると、F-51 で実施した単位セメント量は、概ね $260 \sim 350\text{kg/m}^3$ であり、本試験よりも単位セメント量の範囲が狭いが、終局断熱温度上昇量 K 、温度上昇速度の定数 α のいずれも、ほぼ同等であった。

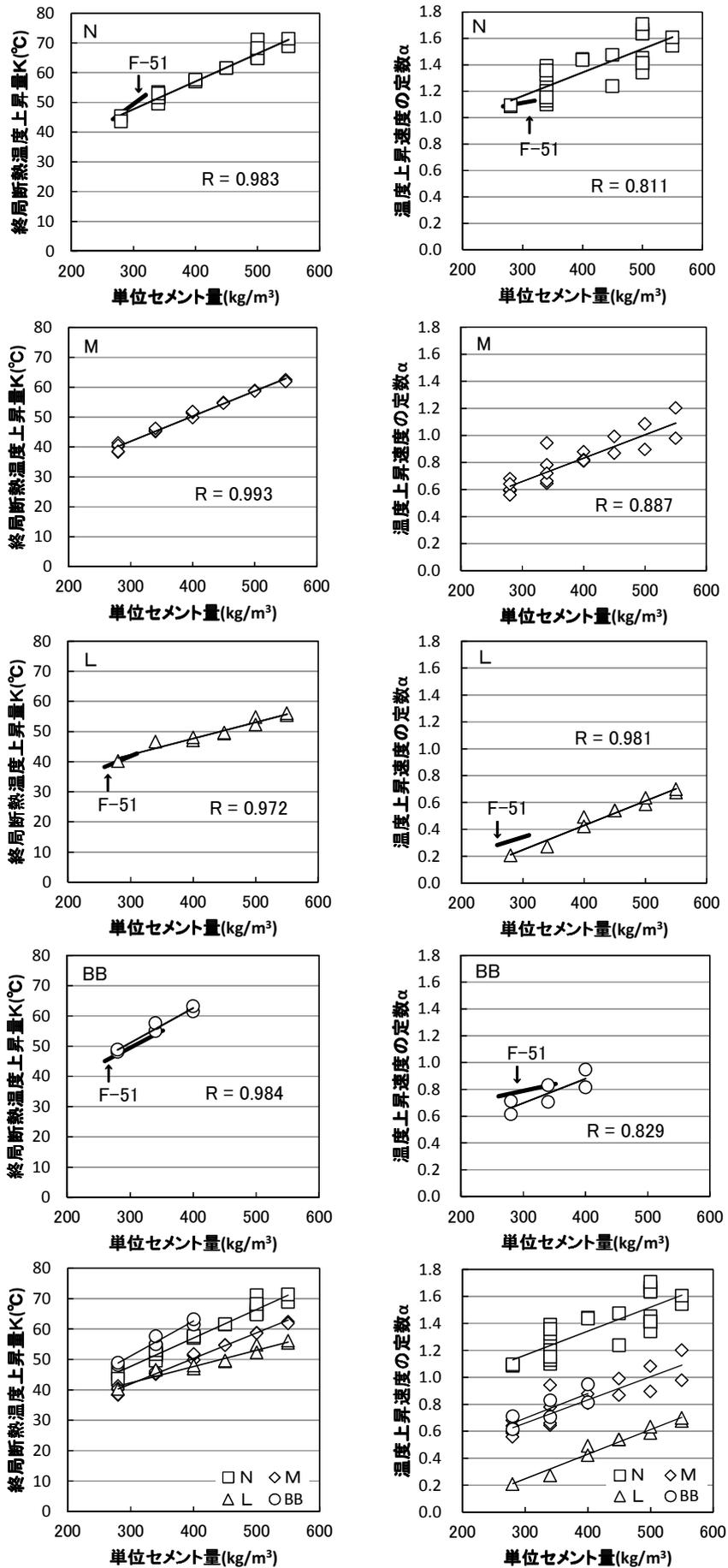


図-3.5.1 単位セメント量と終局断熱温度上昇量K、温度上昇速度の定数 α との関係 (20°C)

3.6 打込み温度の違いによる考察

3種類のポルトランドセメント(N、M、L)を用いた単位セメント量 340kg/m^3 および 500kg/m^3 のコンクリートについて、打込み温度を10、20、 30°C と変え、断熱温度上昇試験を実施した。また、BBは単位セメント量 340kg/m^3 のみ実施した。

3.6.1 終局断熱温度上昇量Kと打込み温度

セメントの種類ごとに、打込み温度と式1を用いて算出した終局断熱温度上昇量Kとの関係を、図-3.6.1に示す。

N、MおよびBBでは、いずれの単位セメント量においても、打込み温度の上昇に伴い、終局断熱温度上昇量Kは小さくなる傾向を示した。

一方、Lの単位セメント量 340kg/m^3 では、N、MおよびBBと同様の傾向を示すものの、単位セメント量 500kg/m^3 においては、打込み温度による終局断熱温度上昇量Kの差は明確でなかった。

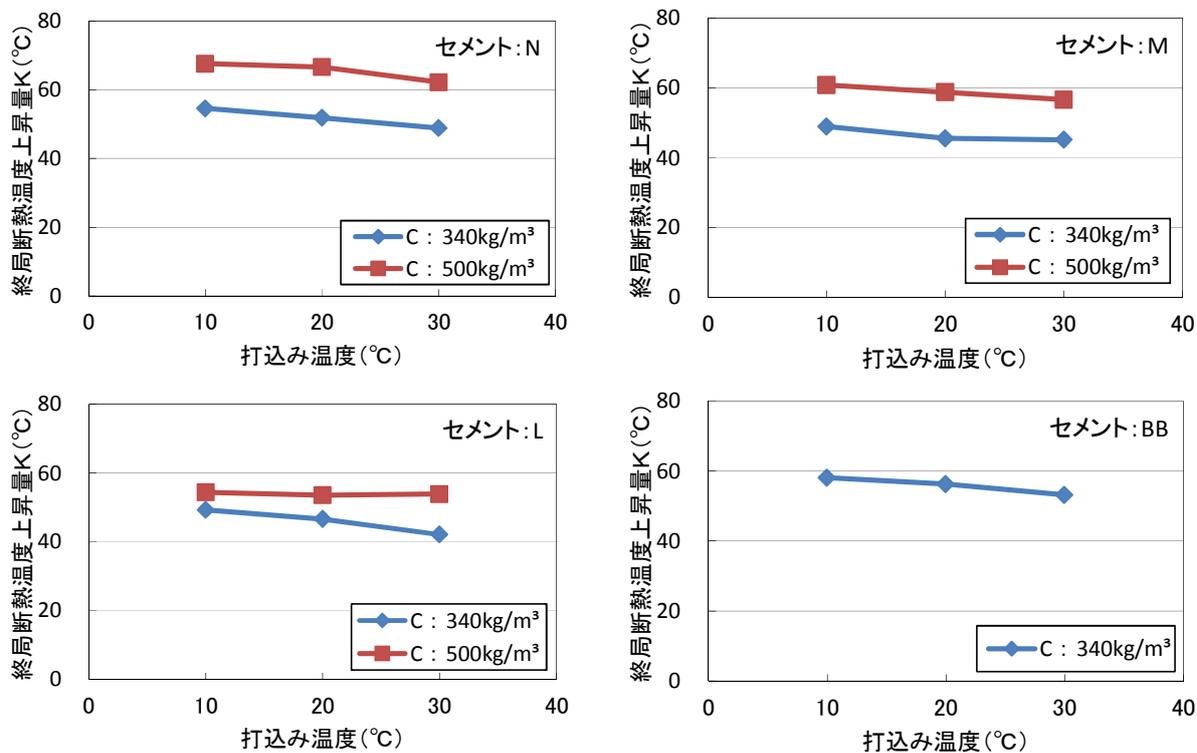


図-3.6.1 打込み温度と終局断熱温度上昇量Kとの関係

式1について、セメントの種類ごとに、打込み温度 20°Cにおける終局断熱温度上昇量 K を 1 とした場合の各打込み温度における終局断熱温度上昇量 K の比を、図-3.6.2 に示す。図には、コンクリート標準示方書【設計編】2012年制定版³⁾（以下、土木学会式と記述）、マスコンクリートのひび割れ制御指針2008年度版⁴⁾（以下、JCI式と記述）およびマスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説⁵⁾（以下、建築学会式と記述）での比を併せて示す。なお、土木学会式およびJCI式では、いずれも単位セメント量が 340kg/m^3 の場合を示した。

総じて、単位セメント量が 340kg/m^3 の場合、単位セメント量が 500kg/m^3 の場合に比べて、打込み温度の影響を受けやすい傾向が認められた。

また、単位セメント量 340kg/m^3 に関し、本実験で得られた N、M および L は、各関係学会式に比べて打込み温度の影響を受けやすい傾向が認められた。

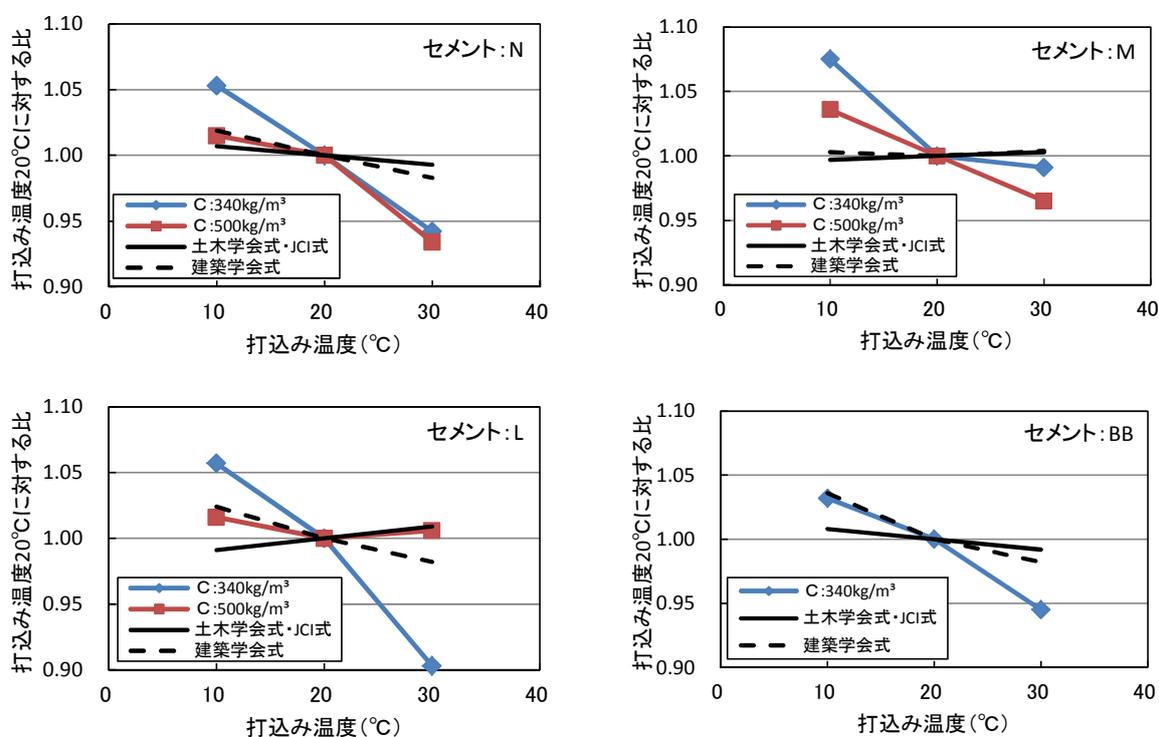


図-3.6.2 打込み温度 20°Cの終局断熱温度上昇量 K を 1 とした場合の比

3.6.2 温度上昇速度の定数 α と打込み温度

セメントの種類ごとに、打込み温度と式1を用いて算出した温度上昇速度の定数 α との関係を、図-3.6.3に示す。

いずれのセメント、単位セメント量においても、打込み温度が高くなるに従い、温度上昇速度の定数 α は大きくなる傾向を示した。打込み温度が高いほど水和速度が速くなるので、温度上昇速度の定数 α もこれを反映した結果になったと考えられる。

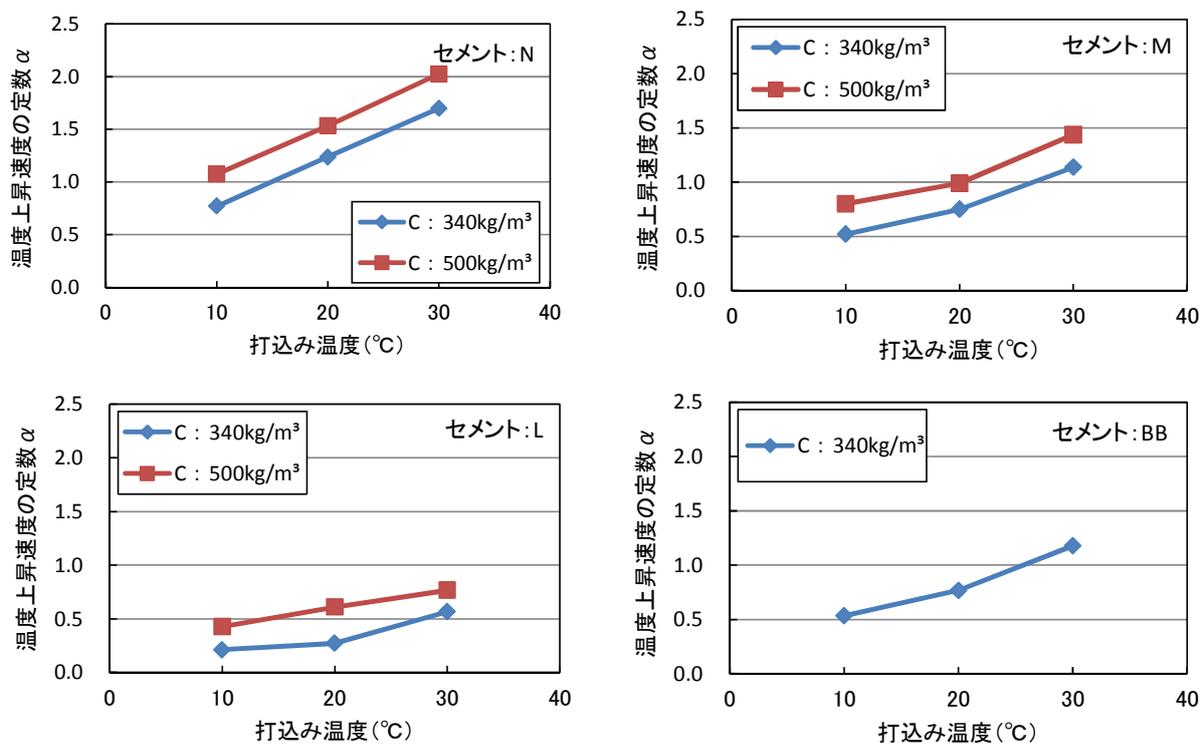


図-3.6.3 打込み温度と温度上昇速度の定数 α との関係

式1について、セメントの種類ごとに、打込み温度20℃における温度上昇速度の定数 α を1とした場合の各打込み温度における温度上昇速度の定数 α の比を、図-3.6.4に示す。図には、コンクリート標準示方書【設計編】2012年制定版³⁾(以下、土木学会式と記述)、マスコンクリートのひび割れ制御指針2008年度版⁴⁾(以下、JCI式と記述)およびマスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説⁵⁾(以下、建築学会式と記述)での比を併せて示す。なお、土木学会式およびJCI式では、いずれも単位セメント量が340kg/m³の場合を示した。

Lの単位セメント量500kg/m³で、打込み温度30℃の場合を除くと、単位セメント量が340kg/m³の場合と単位セメント量が500kg/m³の場合で、概ね同等の比を示し、また、各関係学会式とも概ね一致した。

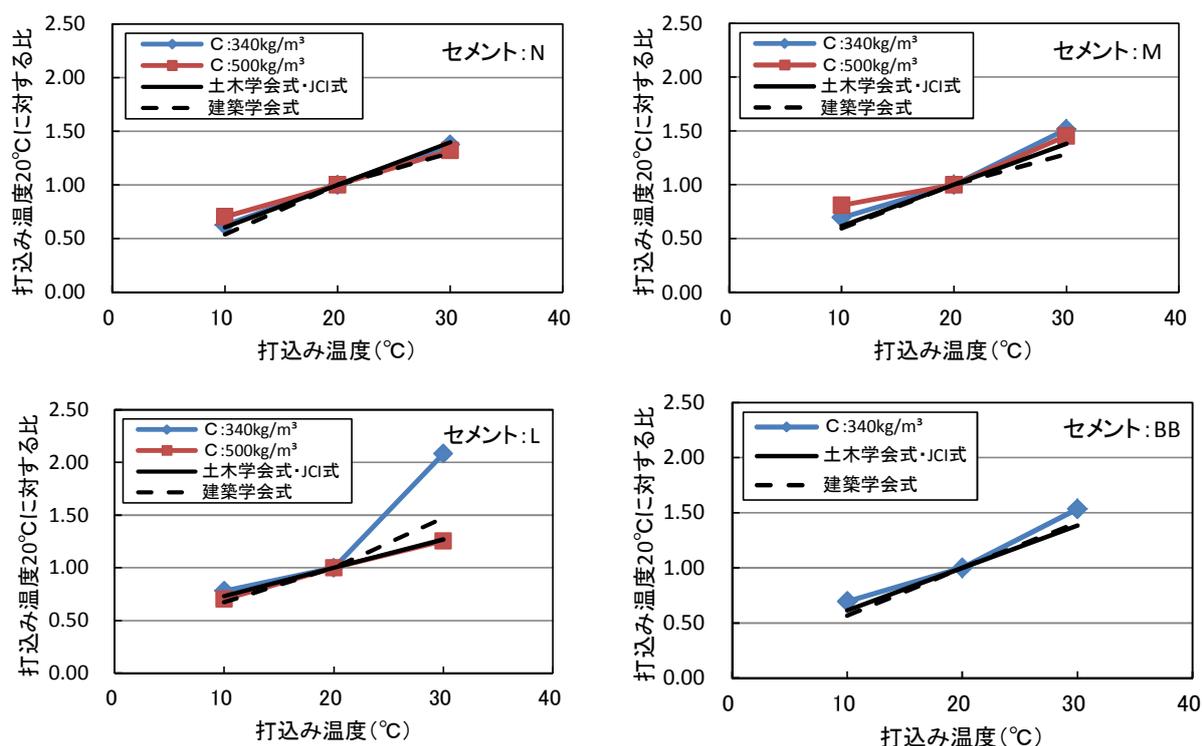


図-3.6.4 打込み温度20℃の温度上昇速度の定数 α を1とした場合の比

3. 7 関係学会式との比較に関する考察

本実験で得られた断熱温度上昇試験結果から式 1 を用いて算出した終局断熱温度上昇量 K および温度上昇速度の定数 α の平均値と、土木学会式³⁾、JCI 式⁴⁾および建築学会式⁵⁾の値の比較を行った。

各推定式の単位セメント量の適用範囲は、土木学会式および JCI 式は単位セメント量が 250～400kg/m³、建築学会式は単位セメント量の上限值が 450kg/m³ となっている。

3. 7. 1 普通ポルトランドセメント

打込み温度 10、20 および 30℃における単位セメント量ごとの終局断熱温度上昇量 K を表-3.7.1～3.7.3 および図-3.7.1 に、温度上昇速度の定数 α を表-3.7.4～3.7.6 および図-3.7.2 に示す。

本試験での終局断熱温度上昇量 K は、打込み温度 20℃での同一単位セメント量においては、各関係学会式より約 3～5℃小さい結果となった。単位セメント量と終局断熱温度上昇量 K は普通強度から高強度域まで直線関係となっており、その直線の傾きは、各関係学会式に比べて小さかった。単位セメント量 340kg/m³における打込み温度 10℃は、各関係学会式とほぼ同程度、30℃は約 5℃小さかった。

温度上昇速度の定数 α は、打込み温度 20℃においては、各関係学会式と同程度となった。単位セメント量と温度上昇速度の定数 α は普通強度から高強度域まで直線関係となっており、その直線の傾きは、各関係学会式に比べて若干小さかった。単位セメント量 340kg/m³における打込み温度 10℃、30℃は、各関係学会式とほぼ同程度となった。

表-3.7.1 関係学会式 K との比較 (N、打込み温度 : 20℃)

項目	終局断熱温度上昇量 K					
	280	340	400	450	500	550
単位セメント量 (kg/m ³)	280	340	400	450	500	550
本実験 (式 1)	44.5	51.8	57.3	61.6	66.6	70.2
土木学会式・JCI 式	47.9	55.1	62.2	—	—	—
建築学会式	47.5	54.7	62.0	68.1	—	—

表-3.7.2 関係学会式 K との比較 (N、打込み温度 : 10℃)

項目	終局断熱温度上昇量 K	
	340	500
単位セメント量 (kg/m ³)	340	500
本実験 (式 1)	54.6	67.6
土木学会式・JCI 式	55.5	—
建築学会式	55.8	—

表-3.7.3 関係学会式 K との比較 (N、打込み温度 : 30℃)

項目	終局断熱温度上昇量 K	
	340	500
単位セメント量 (kg/m ³)	340	500
本実験 (式 1)	48.8	62.2
土木学会式・JCI 式	54.7	—
建築学会式	53.8	—

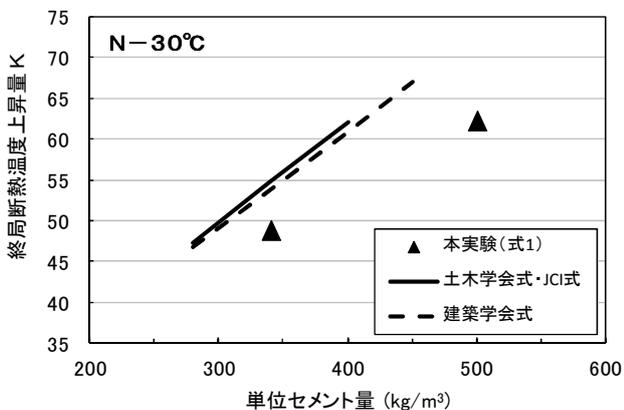
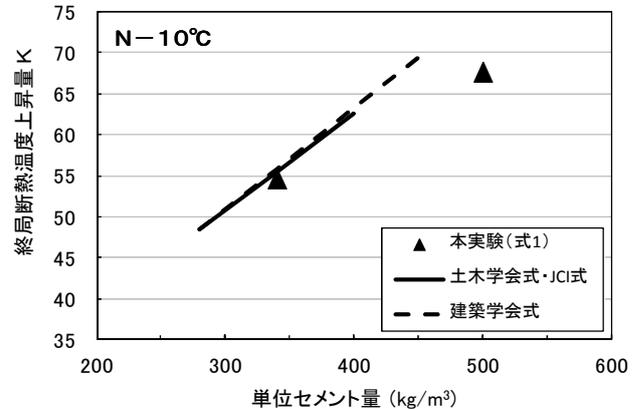
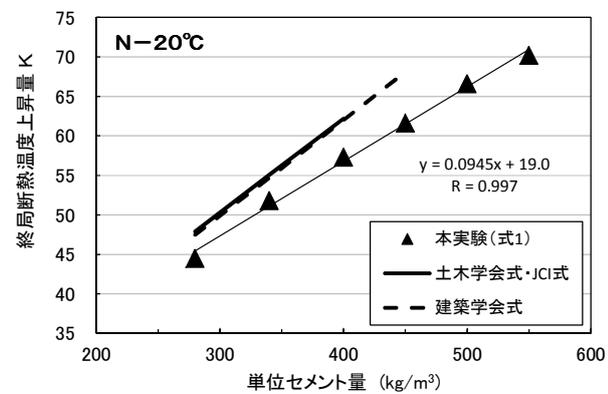


図-3.7.1 関係学会式 K との比較 (N)

表-3.7.4 関係学会式 α との比較 (N、打込み温度：20℃)

項目	温度上昇速度の定数 α					
	280	340	400	450	500	550
本実験 (式1)	1.090	1.237	1.440	1.357	1.532	1.575
土木学会式・JCI式	1.201	1.348	1.494	—	—	—
建築学会式	1.009	1.183	1.357	1.502	—	—

表-3.7.5 関係学会式 α との比較 (N、打込み温度：10℃)

項目	温度上昇速度の定数 α	
	340	500
本実験 (式1)	0.771	1.076
土木学会式・JCI式	0.813	—
建築学会式	0.636	—

表-3.7.6 関係学会式 α との比較 (N、打込み温度：30℃)

項目	温度上昇速度の定数 α	
	340	500
本実験 (式1)	1.700	2.024
土木学会式・JCI式	1.883	—
建築学会式	1.534	—

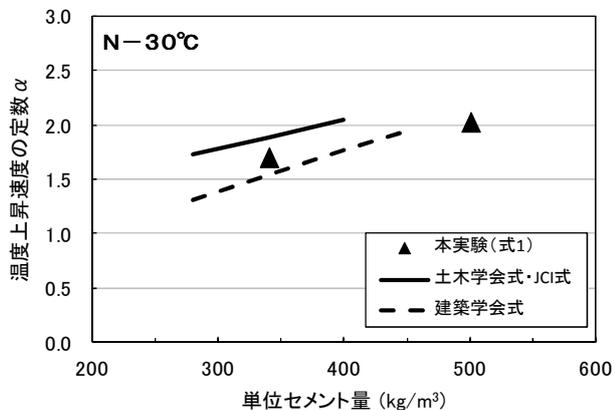
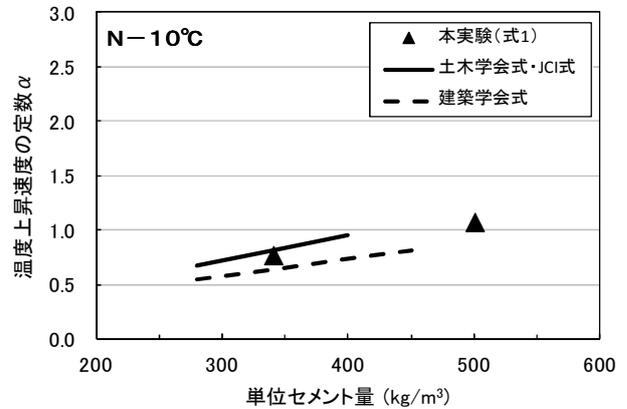
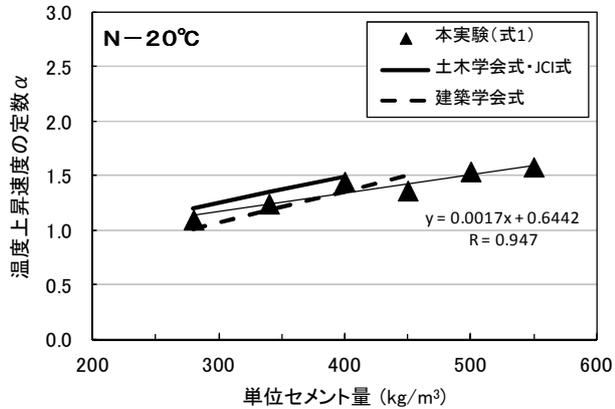


図-3.7.2 関係学会式 α との比較 (N)

3. 7. 2 中庸熟ポルトランドセメント

打込み温度 10、20 および 30°C における単位セメント量ごとの終局断熱温度上昇量 K を表-3.7.7 ~3.7.9 および図-3.7.3 に、温度上昇速度の定数 α を表-3.7.10~3.7.12 および図-3.7.4 に示す。

本試験での終局断熱温度上昇量 K は、打込み温度 20°C においては、各関係学会式より約 2~4°C 小さい結果となった。単位セメント量と終局断熱温度上昇量 K は普通強度から高強度域まで直線関係となっており、その直線の傾きは、各関係学会式と比べて小さかった。単位セメント量 340kg/m³ における打込み温度 10°C は各関係学会式とほぼ同程度、30°C は若干小さかった。

温度上昇速度の定数 α は、打込み温度 20°C においては、各関係学会式と同程度となった。単位セメント量と温度上昇速度の定数 α は、普通強度から高強度域まで直線関係となっており、各関係学会式と直線の傾きは同程度となった。単位セメント量 340kg/m³ における打込み温度 10°C は、各関係学会式と同程度、30°C は各関係学会式より大きくなった。

表-3.7.7 関係学会式 K との比較 (M、打込み温度 : 20℃)

項目	終局断熱温度上昇量 K					
	280	340	400	450	500	550
本実験 (式 1)	39.7	45.5	51.1	54.7	58.7	62.1
土木学会式・JCI 式	41.6	48.5	55.3	—	—	—
建築学会式	42.2	48.2	54.1	59.1	—	—

表-3.7.8 関係学会式 K との比較 (M、打込み温度 : 10℃)

項目	終局断熱温度上昇量 K	
	340	500
本実験 (式 1)	49.0	60.8
土木学会式・JCI 式	48.0	—
建築学会式	48.3	—

表-3.7.9 関係学会式 K との比較 (M、打込み温度 : 30℃)

項目	終局断熱温度上昇量 K	
	340	500
本実験 (式 1)	45.2	56.8
土木学会式・JCI 式	47.8	—
建築学会式	48.4	—

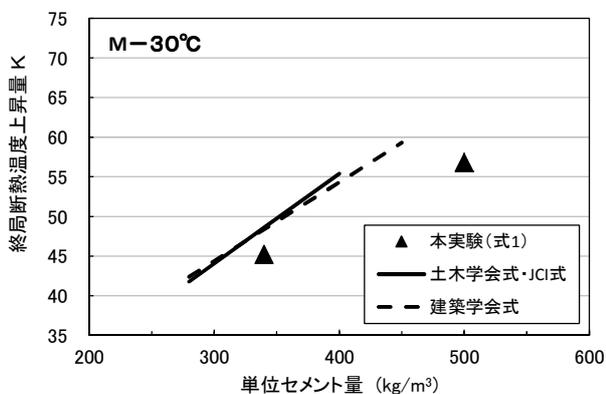
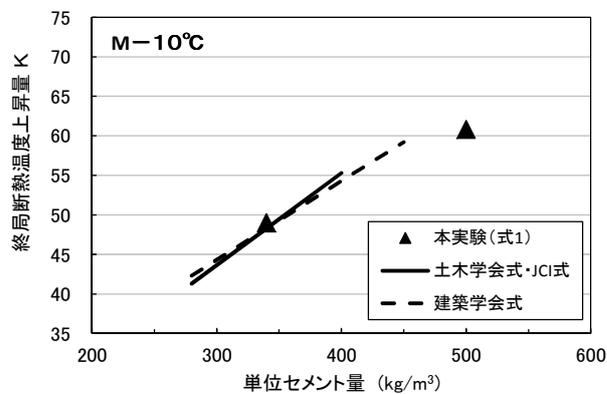
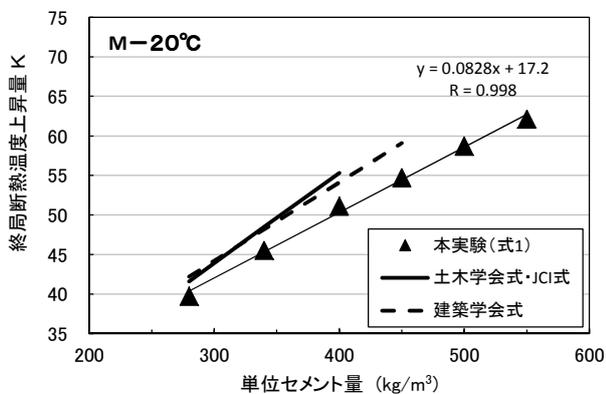


図-3.7.3 関係学会式 K との比較 (M)

表-3.7.10 関係学会式 α との比較 (M、打込み温度：20℃)

項目	温度上昇速度の定数 α					
	280	340	400	450	500	550
単位セメント量 (kg/m ³)	280	340	400	450	500	550
本実験 (式1)	0.612	0.749	0.829	0.929	0.989	1.089
土木学会式・JCI式	0.615	0.740	0.864	—	—	—
建築学会式	0.567	0.705	0.843	0.958	—	—

表-3.7.11 関係学会式 α との比較 (M、打込み温度：10℃)

項目	温度上昇速度の定数 α	
	340	500
単位セメント量 (kg/m ³)	340	500
本実験 (式1)	0.520	0.800
土木学会式・JCI式	0.340	—
建築学会式	0.419	—

表-3.7.12 関係学会式 α との比較 (M、打込み温度：30℃)

項目	温度上昇速度の定数 α	
	340	500
単位セメント量 (kg/m ³)	340	500
本実験 (式1)	1.136	1.437
土木学会式・JCI式	0.670	—
建築学会式	0.906	—

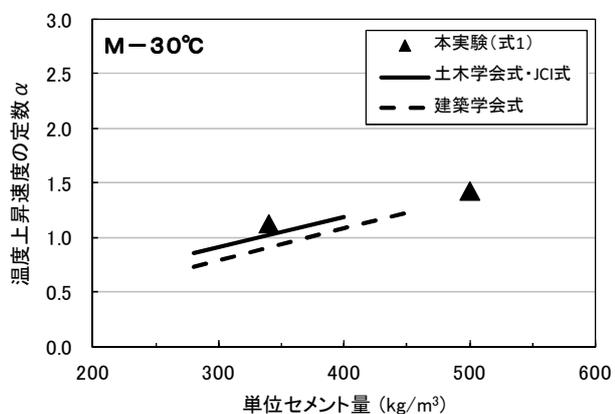
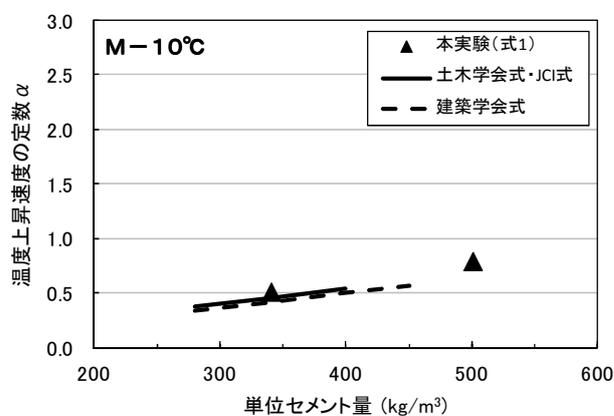
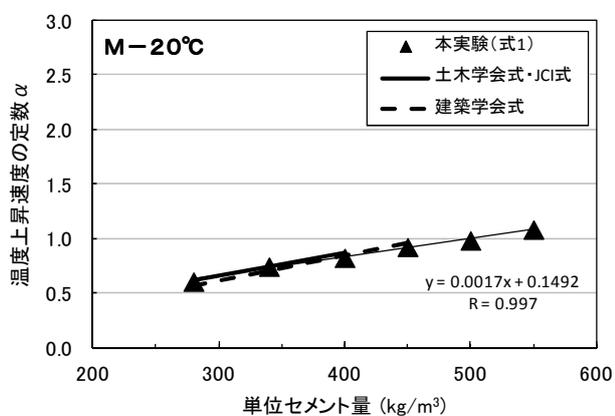


図-3.7.4 関係学会式 α との比較 (M)

3. 7. 3 低熱ポルトランドセメント

打込み温度 10、20 および 30℃における単位セメント量ごとの終局断熱温度上昇量 K を表-3.7.13~3.7.15 および図-3.7.5 に、温度上昇速度の定数 α を表-3.7.16~3.7.18 および図-3.7.6 に示す。

本試験での終局断熱温度上昇量 K は、打込み温度 20℃においては、各関係学会式と比べて単位セメント量で異なる傾向となっており、単位セメント量が小さい場合は大きく、単位セメント量が大きくなるに従い小さくなった。単位セメント量と終局断熱温度上昇量 K は普通強度から高強度域まで直線関係となっており、その直線の傾きは、各関係学会式に比べて小さかった。単位セメント量 340kg/m³における打込み温度 10℃は各関係学会式より大きく、30℃は同程度になった。

温度上昇速度の定数 α は、打込み温度 20℃での同一単位セメント量においては、土木学会式・JCI 式より小さく、建築学会式とは同程度となった。単位セメント量と温度上昇速度の定数 α は普通強度から高強度域まで直線関係となっており、その直線の傾きは、各関係学会式と同程度になった。単位セメント量 340kg/m³における打込み温度 10℃および 30℃は、土木学会式・JCI 式より小さく、建築学会式と同程度になった。

表-3.7.13 関係学会式 K との比較 (L、打込み温度 : 20℃)

項目	終局断熱温度上昇量 K					
	280	340	400	450	500	550
本実験 (式 1)	40.2	46.6	47.5	49.5	53.6	55.8
土木学会式・JCI 式	38.7	44.0	49.3	—	—	—
建築学会式	38.7	44.1	49.4	53.9	—	—

表-3.7.14 関係学会式 K との比較 (L、打込み温度 : 10℃)

項目	終局断熱温度上昇量 K	
	340	500
本実験 (式 1)	49.3	54.4
土木学会式・JCI 式	43.4	—
建築学会式	45.1	—

表-3.7.15 関係学会式 K との比較 (L、打込み温度 : 30℃)

項目	終局断熱温度上昇量 K	
	340	500
本実験 (式 1)	42.1	53.9
土木学会式・JCI 式	43.7	—
建築学会式	43.3	—

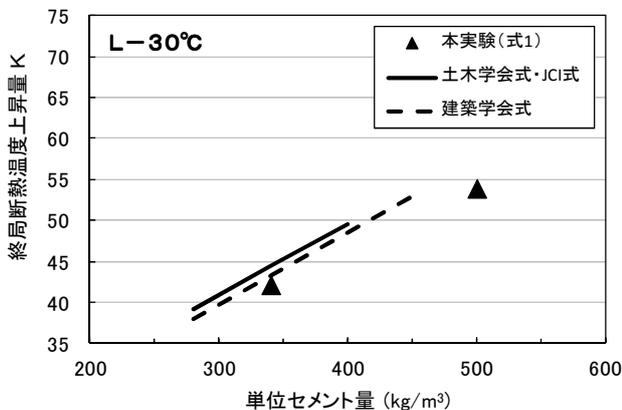
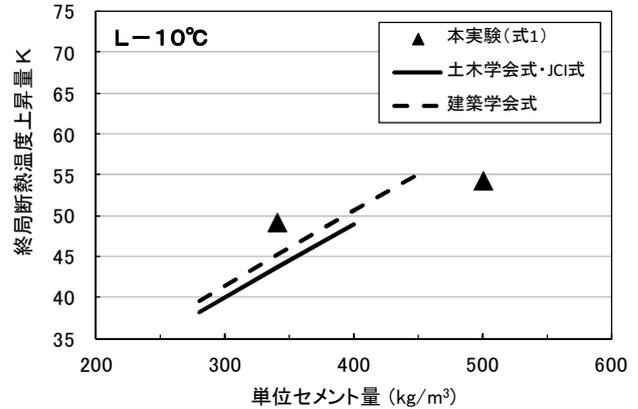
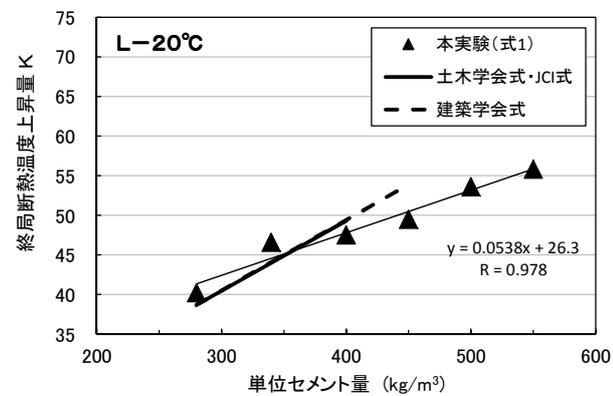


図-3.7.5 関係学会式 K との比較 (L)

表-3.7.16 関係学会式 α との比較 (L、打込み温度：20℃)

項目	温度上昇速度の定数 α					
	280	340	400	450	500	550
本実験 (式1)	0.207	0.272	0.457	0.540	0.610	0.687
土木学会式・JCI式	0.601	0.691	0.781	—	—	—
建築学会式	0.298	0.382	0.466	0.536	—	—

表-3.7.17 関係学会式 α との比較 (L、打込み温度：10℃)

項目	温度上昇速度の定数 α	
	340	500
本実験 (式1)	0.213	0.429
土木学会式・JCI式	0.505	—
建築学会式	0.257	—

表-3.7.18 関係学会式 α との比較 (L、打込み温度：30℃)

項目	温度上昇速度の定数 α	
	340	500
本実験 (式1)	0.567	0.766
土木学会式・JCI式	0.876	—
建築学会式	0.563	—

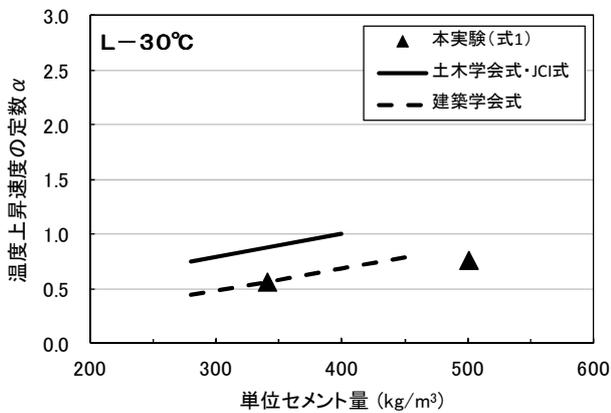
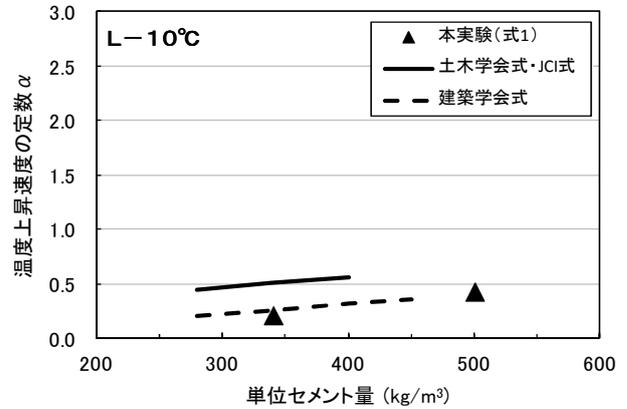
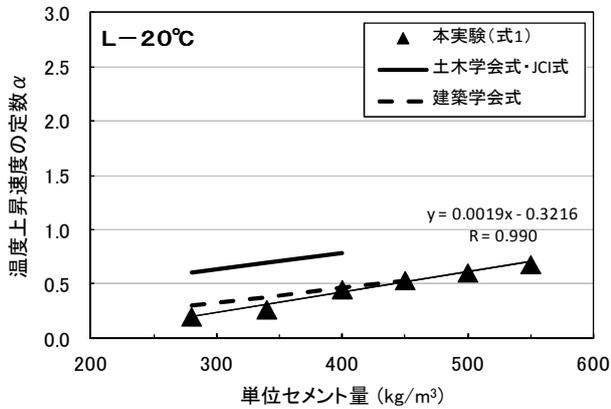


図-3.7.6 関係学会式 α との比較 (L)

3. 7. 4. 高炉セメントB種

打込み温度 10、20 および 30℃における単位セメント量ごとの終局断熱温度上昇量 K を表-3.7.19～3.7.20 および図-3.7.7 に、温度上昇速度の定数 α を表-3.7.21～3.7.22 および図-3.7.8 に示す。

本試験での終局断熱温度上昇量 K は、打込み温度 20℃においては、各関係学会式と同程度となっている。単位セメント量と終局断熱温度上昇量 K は直線関係となっており、その直線の傾きは各関係学会式と同程度になった。単位セメント量 340kg/m³における打込み温度 10℃は、各関係学会式より若干大きく、30℃は建築学会と同程度になった。

温度上昇速度の定数 α は、打込み温度 20℃において、各関係学会式と同程度となった。単位セメント量と温度上昇速度の定数 α は直線関係となっており、その直線の傾きも各関係学会式と同程度になった。単位セメント量 340kg/m³における打込み温度 10℃、30℃は、各関係学会式と同程度となった。

表-3.7.19 関係学会式 K との比較 (BB、打込み温度 : 20℃)

項目	終局断熱温度上昇量 K			
	280	340	400	450
本実験 (式 1)	48.5	56.3	62.4	—
土木学会式・JCI 式	48.9	56.2	63.4	—
建築学会式	47.6	54.2	60.8	66.3

表-3.7.20 関係学会式 K との比較 (BB、打込み温度 : 10℃、30℃)

項目	終局断熱温度上昇量 K	
	10℃	30℃
単位セメント量 (kg/m ³)	340	
打込み温度	10℃	30℃
本実験 (式 1)	58.1	53.2
土木学会式・JCI 式	56.6	55.7
建築学会式	56.2	53.2

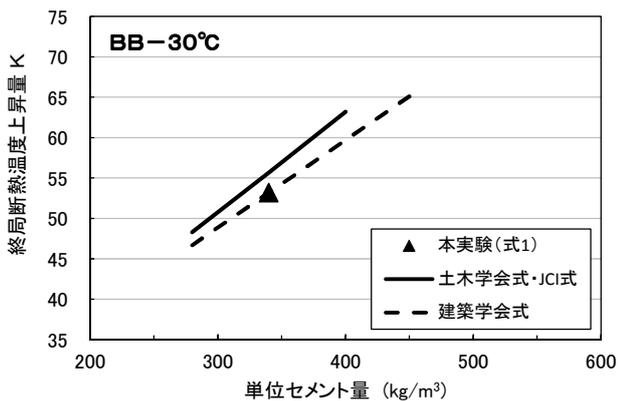
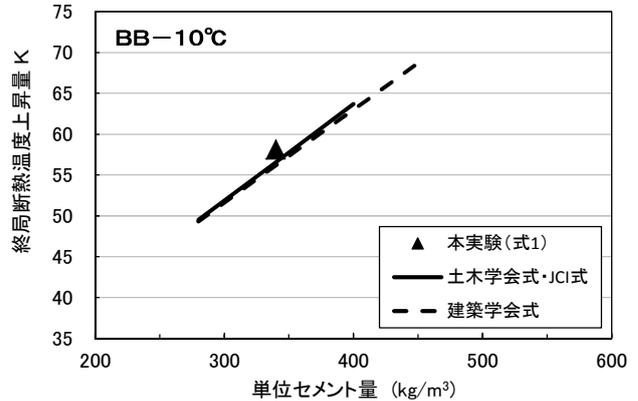
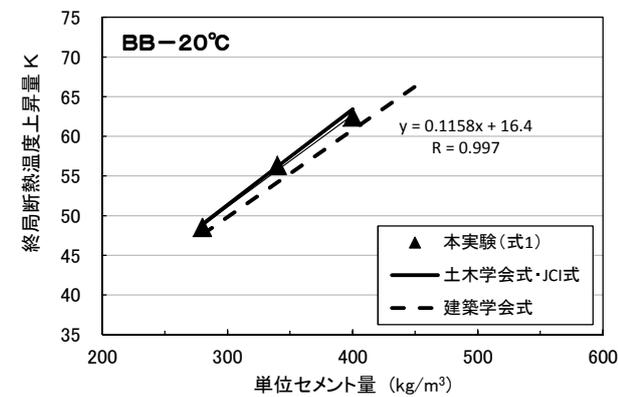


図-3.7.7 関係学会式 K との比較 (BB)

表-3.7.21 関係学会式 α との比較 (BB、打込み温度 : 20℃)

項目	温度上昇速度の定数 α			
	280	340	400	450
本実験 (式1)	0.660	0.768	0.881	—
土木学会式・JCI式	0.762	0.903	1.043	—
建築学会式	0.738	0.846	0.954	1.044

表-3.7.22 関係学会式 α との比較 (BB、打込み温度 : 10℃、30℃)

項目	温度上昇速度の定数 α	
	340	
打込み温度	10℃	30℃
本実験 (式1)	0.533	1.178
土木学会式・JCI式	0.554	1.251
建築学会式	0.503	1.192

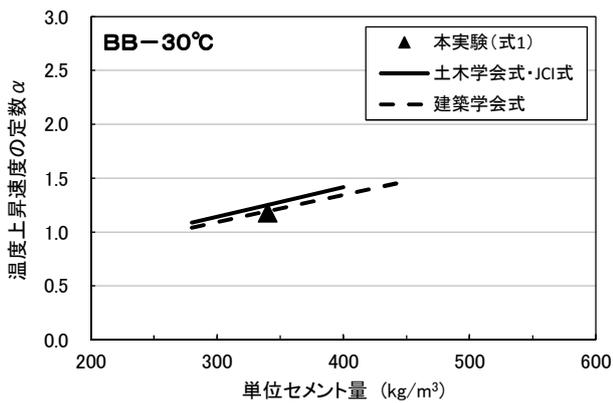
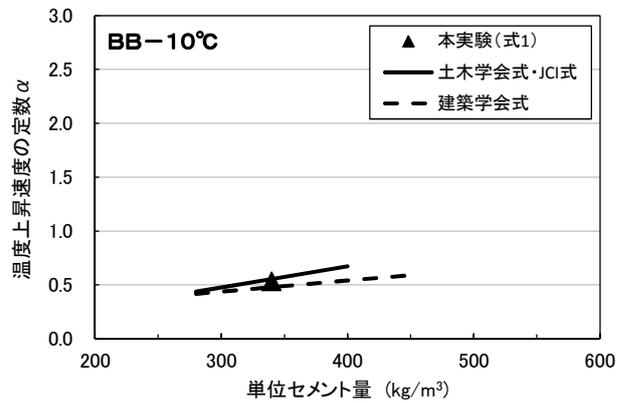
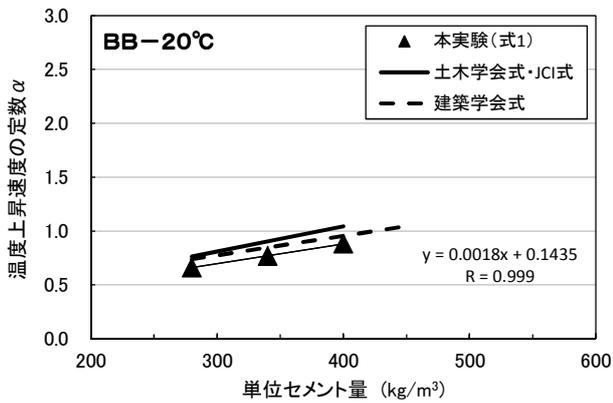


図-3.7.8 関係学会式 α との比較 (BB)

3. 7. 5. 各種セメントを用いた断熱温度上昇式

本実験結果から式 1 を用いて算出した終局断熱温度上昇量Kおよび温度上昇速度の定数 α を、セメントの種類ごとに単位セメント量で整理した。その結果、打込み温度 20°Cについて表-3.7.23 に示す関係が得られた。

$$Q(t)=K (1 - \exp (- \alpha t)) \quad \dots \text{式 1}$$

$$K=aC+b, \quad \alpha =gC+h$$

ここに、t : 材齢 (日)

Q(t) : 材齢 t 日までの断熱温度上昇量 (°C)

K : 終局断熱温度上昇量 (°C)

α : 温度上昇速度の定数

C : 単位セメント量 (kg/m³)

a、b、g、h : K および α を求めるための係数

表-3.7.23 打込み温度 20°CにおけるKと α の実験式*)

セメント種類	K=aC+b		$\alpha =gC+h$	
	a	b	g	h
普通ポルトランドセメント (N)	0.0945	19.0	0.0017	0.6442
中庸熱ポルトランドセメント (M)	0.0828	17.2	0.0017	0.1492
低熱ポルトランドセメント (L)	0.0538	26.3	0.0019	0.3216
高炉セメント B 種 (BB)	0.1158	16.4	0.0018	0.1435

*実験式を得るために検討した単位セメント量の値

N、M、L : 280、340、400、450、500、550kg/m³

BB : 280、340、400kg/m³

4. 結言

普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を使用した単位セメント量 $280\sim 550\text{kg/m}^3$ のコンクリートに関して、打込み温度 10°C 、 20°C および 30°C の条件にて、断熱温度上昇に関する共通試験を実施した。

本実験により得られた結果を以下に示す。

- (1) 2 種類の空気循環型の断熱温度上昇試験装置を用いて普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの断熱温度上昇試験を実施した結果、終局断熱温度上昇量 K および温度上昇速度の定数 α の装置種類による差異は小さかった。
- (2) 8 箇所の試験所にて普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの断熱温度上昇試験を実施した結果、終局断熱温度上昇量 K および温度上昇速度の定数 α の各試験所間のばらつきは小さかった。
- (3) 単位セメント量が多いほど終局断熱温度上昇量 K および温度上昇速度の定数 α は大きくなった。セメント種類では、終局断熱温度上昇量 K は、単位セメント量が 400kg/m^3 以下の場合、 $BB>N>M\approx L$ 、単位セメント量が 450kg/m^3 以上の場合、 $N>M>L$ の順となった。また温度上昇速度の定数 α は $N>BB\approx M>L$ の順となった。
- (4) 単位セメント量 $280\sim 550\text{kg/m}^3$ で実施した今回の共通試験結果と単位セメント量 $260\sim 350\text{kg/m}^3$ で実施した F-51 の結果を比較すると終局断熱温度上昇量 K 、温度上昇速度の定数 α は概ね同等となった。
- (5) 普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種は、いずれの単位セメント量においても、打込み温度の上昇に伴い、終局断熱温度上昇量 K は小さくなったが、低熱ポルトランドセメントは単位セメント量 500kg/m^3 おいて、打込み温度による終局断熱温度上昇量 K の差は明確ではなかった。
- (6) 本実験で得られた終局断熱温度上昇量 K および温度上昇速度の定数 α を各関係学会に提示された式と比較した。その結果、普通ポルトランドセメントの場合、打込み温度 20°C での同一単位セメント量における終局断熱温度上昇量 K は、各関係学会式から求めた値より約 $3\sim 5^\circ\text{C}$ 小さくなった。また、同一単位セメント量における温度上昇速度の定数 α は、各関係学会式から求めた値と同程度となった。
- (7) 中庸熱ポルトランドセメントの場合、打込み温度 20°C での同一単位セメント量における終局断熱温度上昇量 K は、各関係学会式から求めた値より約 $2\sim 4^\circ\text{C}$ 小さくなり、また同一単位セメント量における温度上昇速度の定数 α は、各関係学会式から求めた値と同程度となった。
- (8) 低熱ポルトランドセメントの場合、単位セメント量と終局断熱温度上昇量 K の関係式は、各関係学会式に比べ、傾きが小さくなり、単位セメント量 400kg/m^3 以上では、終局断熱温度上昇量 K は各関係学会式から求めた値よりも小さくなった。また、同一単位セメント量における温度上昇速度の定数 α は、建築学会式とは同程度となるが、土木学会式・JCI 式に比べると、単位セメント量 340kg/m^3 以上の場合で 0.3 程度小さくなった。
- (9) 高炉セメント B 種の場合、単位セメント量と終局断熱温度上昇量 K または温度上昇速度の定数 α の関係式は、いずれも関係学会式と同程度となった。

参考文献

- 1) 嶋毅、鈴木康範、小田部裕一、岸利治：コンクリートの断熱温度上昇および強度発現の標準値の提案、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.2、pp.181-186、2007
- 2) (社)セメント協会：各種セメントを用いたコンクリートの初期強度発現および断熱温度上昇、コンクリート専門委員会報告 F-51、2002
- 3) (公社)土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編]、2012
- 4) (社)日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008、2008
- 5) (社)日本建築学会：マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針 (案)・同解説、2008

参考資料 逆解析手法による断熱温度上昇試験結果

1. はじめに

近年、簡易断熱温度上昇試験の温度データを逆解析することで、断熱温度上昇を求める方法が開発された¹⁾。ここでは、従来の空気循環式断熱温度上昇試験機（以下、断熱型）を用いた場合と、逆解析による断熱温度上昇試験の結果を比較し、その適用性について検討した。

2. 試験概要

2. 1 使用材料

2. 1. 1 セメント

セメントは、市販の普通ポルトランドセメント（以下、記号；N と称す）および高炉セメント B 種（以下、記号；BB と称す）の 2 種類を使用した。なお、N および BB はそれぞれ 3 銘柄を任意に選定し、それぞれ均一に等量混合したものを試料とした。使用したセメントの化学成分および物理的性質を資料表-2.1 および資料表-2.2 に示す。

資料表-2.1 セメントの化学成分

セメントの種類	化学成分(%)											
	ig.loss	insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O _{eq}	Cl
N	2.41	0.12	20.44	5.50	2.95	64.32	0.98	2.05	0.22	0.45	0.52	0.016
BB	1.11	0.10	26.05	8.97	1.97	55.17	3.39	1.87	0.24	0.33	0.46	—

資料表-2.2 セメントの物理的性質

セメントの種類	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結			安定性	圧縮強さ (N/mm ²)				水和熱 (J/g)		
			水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)		3日	7日	28日	91日	7日	28日	91日
N	3.15	3260	27.8	2-24	3-32	良	30.7	48.0	64.9	—	—	—	—
BB	3.04	3740	28.8	2-55	4-24	良	20.6	32.8	59.9	—	—	—	—

2. 1. 2 骨材

骨材は、粗骨材に東京都青梅市産の硬質砂岩砕石を、細骨材に千葉県君津市産の山砂を使用した。これらの骨材の粒度および物性を資料表-2.3 および資料表-2.4 に示す。

資料表-2.3 骨材の粒度

分類	種類	産地	ふるい目の寸法(mm)	ふるい通過量 (%)										粗粒率
				25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
粗骨材	硬質砂岩砕石	東京都青梅市産		100	96	—	39	6	1	—	—	—	—	6.58
細骨材	山砂	千葉県君津市産		—	—	—	100	98	84	64	48	25	3	2.78

資料表-2.4 骨材の物性

分類	種類	密度 (g/cm ³)		吸水率 (%)
		表乾	絶乾	
粗骨材	硬質砂岩 砕石	2.66	2.64	0.61
細骨材	山砂	2.65	2.62	1.14

2. 1. 3 水

練混ぜ水は、上水道水を使用した。

2. 1. 4 混和剤

混和剤は、単位セメント量 340kg/m³ の普通コンクリートについては、AE 減水剤標準形 (I 種) (ポゾリス No.70、BASF ジャパン (株) 製) および AE 剤 (I 種) (マイクロエア 303A、BASF ジャパン (株) 製) を使用した。

また、単位セメント量 500kg/m³ の高強度コンクリートについては、高性能 AE 減水剤標準形 (I 種) (レオビルド SP8SV、BASF ジャパン (株) 製) および空気量調整剤 (マイクロエア 404、BASF ジャパン (株) 製) を使用した。

2. 2 要因と水準

資料表-2.5 に実験の要因と水準を示す。セメントには、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を用い、単位セメント量は 340 および 500kg/m³ とした。また、打込み温度は、10、20 および 30℃ とした。

資料表-2.5 要因と水準

単位セメント量 (kg/m ³)	打込み温度 (℃)	セメントの種類	
		N	BB
340	10	○	—
	20	○	○
	30	○	—
500	20	○	—

2. 3 配合

資料表-2.6 にコンクリートの配合を示す。普通コンクリート (単位セメント量 ; 340kg/m³) については、単位水量を 160kg/m³ とし、空気量が 4.5±1.5% 程度になるよう混和剤で調整した。高強度コンクリート (単位セメント量 ; 500kg/m³) については、単位水量を 175kg/m³ とし、スランプフローが 60cm 程度、空気量が 2.0% 以下になるよう混和剤で調整した。

練上がり時のコンクリート温度の測定は、JIS A 1156 「フレッシュコンクリートの温度測定方法」に従って行った。スランプ試験は、JIS A 1101 「コンクリートのスランプ試験方法」に、スランプフロー試験は、JIS A 1150 「コンクリートのスランプフロー試験方法」に従って行った。

空気量試験は、JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法—空気室圧力方法」に従って行った。

資料表-2.6 コンクリートの配合

セメントの種類	単位セメント量 (kg/m ³)	打込み温度 (°C)	試験所	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				AE減水剤/高性能AE減水剤 (ml/m ³)	AE剤 (ml/m ³)	スランプ/スランプフロー** (cm)	空気量 (%)	練じがりの温度 (°C)
						W	C	S	G					
N	340	10	A	47.1	46.5	160	340	847	978	850	3	15.0	4.7	12.2
		20									12	12.5	5.5	21.9
		30									7	13.0	4.1	31.5
	500	20		35.0	49.0	175	500	839	877	5000*	9	58.5**	0.9	22.3
BB	340			47.1	46.5	160	340	842	972	851	14	14.5	4.7	20.1

2.4 コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜは、JIS A 1138「試験室におけるコンクリートの作り方」に従って行った。粗骨材、細骨材、セメントを投入した後、空練りを30秒間行い、その後、混和剤を分散させた練混ぜ水を投入し、60秒間練り混ぜ、かき落としを行い、さらに30秒間練り混ぜて排出した。

なお、高強度コンクリートにおいては、かき落とし後、ミキサ内でコンクリートを5分間静置し、30秒間練り混ぜて排出した。

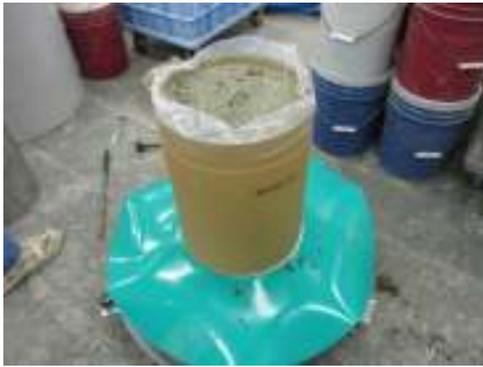
排出したコンクリートは、スランプ、空気量を測定後、直ちに全量を（断熱型試験（空気循環式 Type I）の型枠または）以下に示す簡易断熱型試験の容器に打込み、試験に供した。

2.5 逆解析による断熱温度上昇試験方法

逆解析による断熱温度上昇試験では、装置自体の熱特性（容器の熱伝導率など）を把握した簡易断熱容器（以下、簡易断熱型）を用いて温度測定を行い、FEM（有限要素法）によって測定データを逆解析することで断熱温度上昇量を算出する。そのため、装置の温度制御が不要で、従来の断熱型の様に大型の固定設備やキャリブレーションを不要とした新しい断熱温度上昇試験方法である。

試験方法は以下に示す通りである。

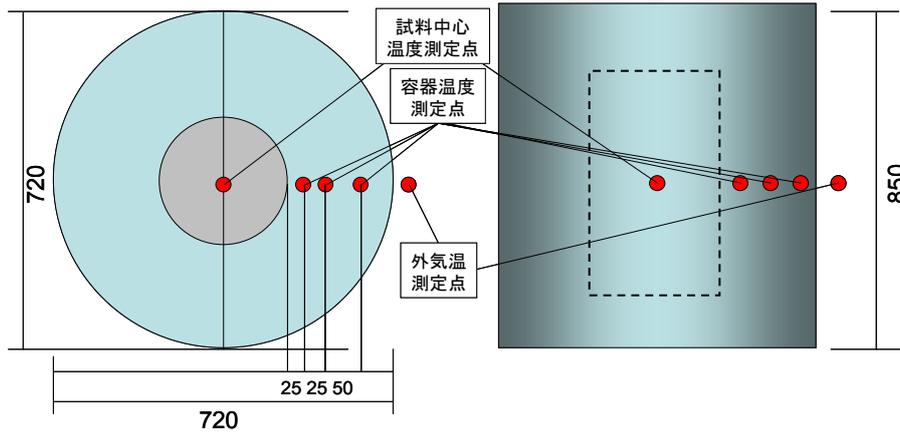
- ① 専用紙製容器にビニール製の内袋（資料図-2.1）を入れ、30ℓのコンクリートを2層に分けて打ち込んだ。まず、1層目を打ち込んだ後に棒状バイブレータを使用してコンクリートを締め固め、試料中心に熱電対を設置した。その後、2層目を打込み、1層目と同様に棒状バイブレータを使用し、締め固めた。
- ② 打込み完了後、容器中の空気を抜きながら、ビニール製の蓋を被せ、密閉した後に断熱材で造られた容器を被せた。（資料図-2.2）
- ③ 装置は、コンクリートの打込み温度に応じて、10、20 および 30°Cに設定された温度変化の少ない室内に設置し、測定は30分間隔で14日間行った。測定点は試料中心温度1点、断熱容器内温度3点、外気温1点の5点とした。（資料図-2.3）
- ④ 測定データを専用ソフトで逆解析し、断熱温度上昇量を算出した。



資料図-2.1 試験容器



資料図-2.2 試験装置外観

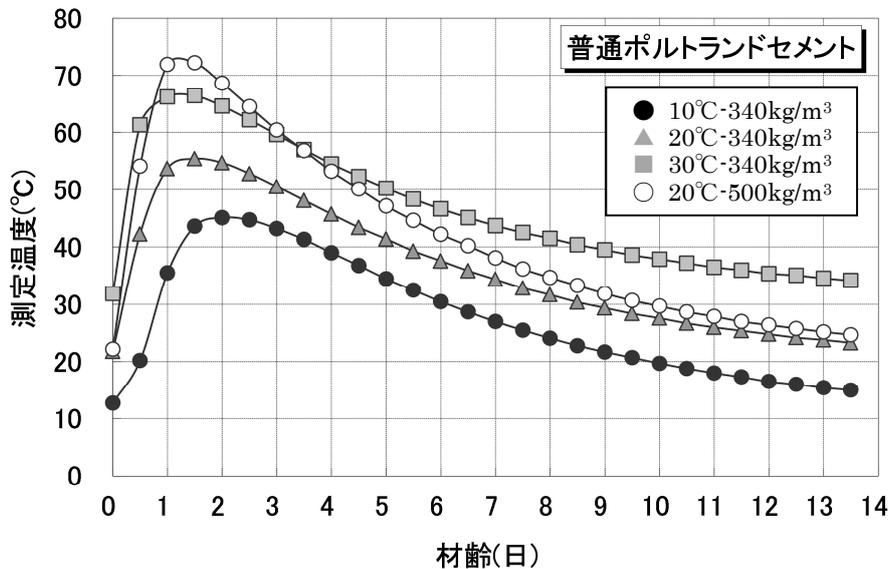


資料図-2.3 各温度測定点概略 (mm)

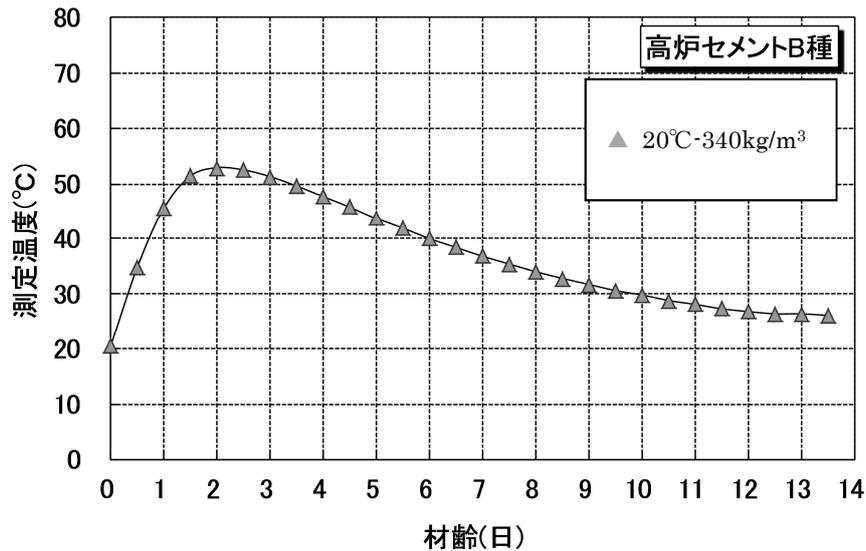
3. 試験結果

3.1 コンクリートの温度変化の測定結果

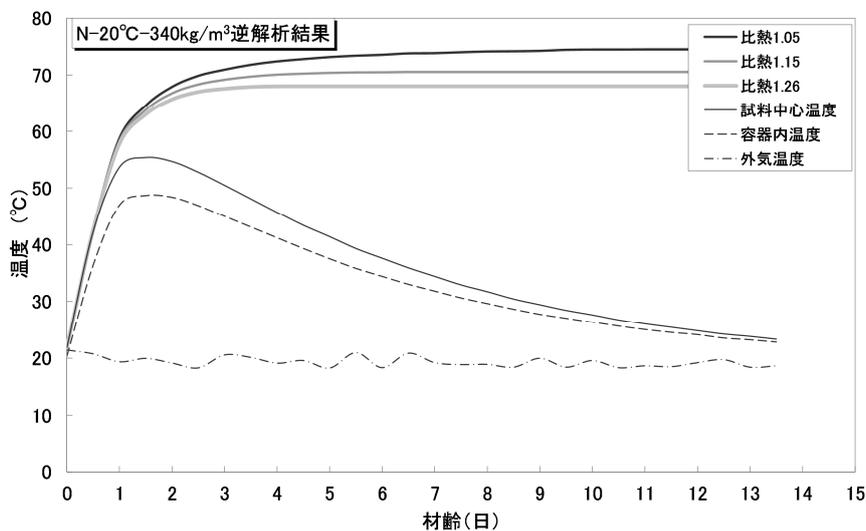
普通ポルトランドセメントを用いた各打込み温度での試料中心温度履歴を資料図-3.1 に、高炉セメント B 種を用いた打込み温度 20°C での試料中心温度履歴を資料図-3.2 に示す。また、N-20°C-340kg/m³ の水準の測定データを用いて逆解析を行った結果を例として資料図-3.3 に示す。



資料図-3.1 普通ポルトランドセメントの各打込み温度における中心温度履歴



資料図-3.2 高炉セメントB種の打込み温度20°Cでの中心温度履歴

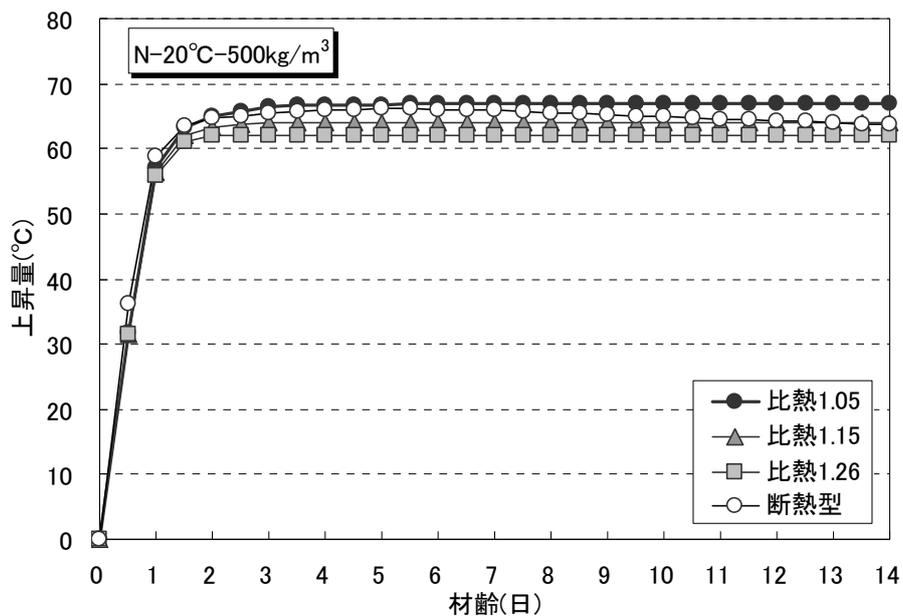


資料図-3.3 逆解析結果(N-20°C-340kg/m³)

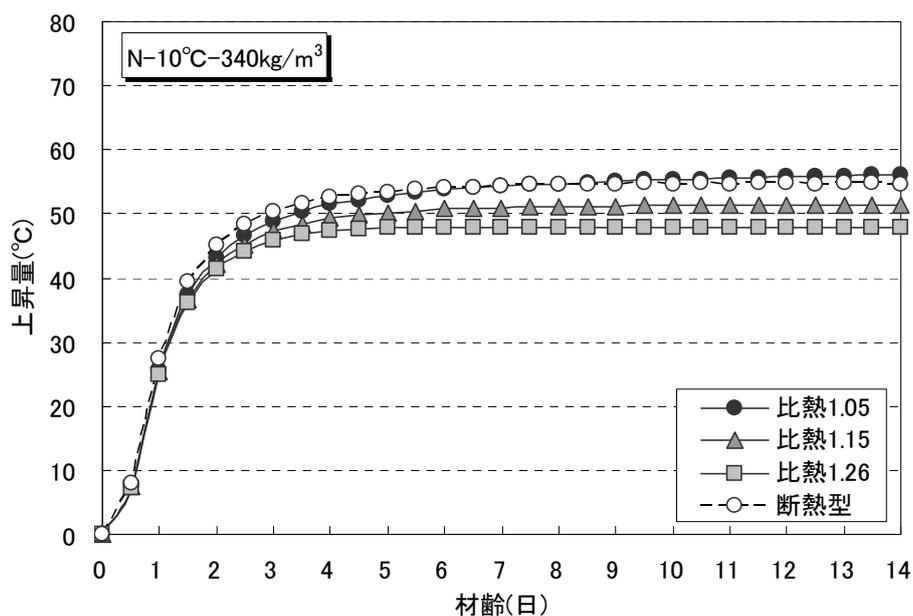
4. 逆解析による断熱温度上昇の推定結果

(1) 普通ポルトランドセメント (N)

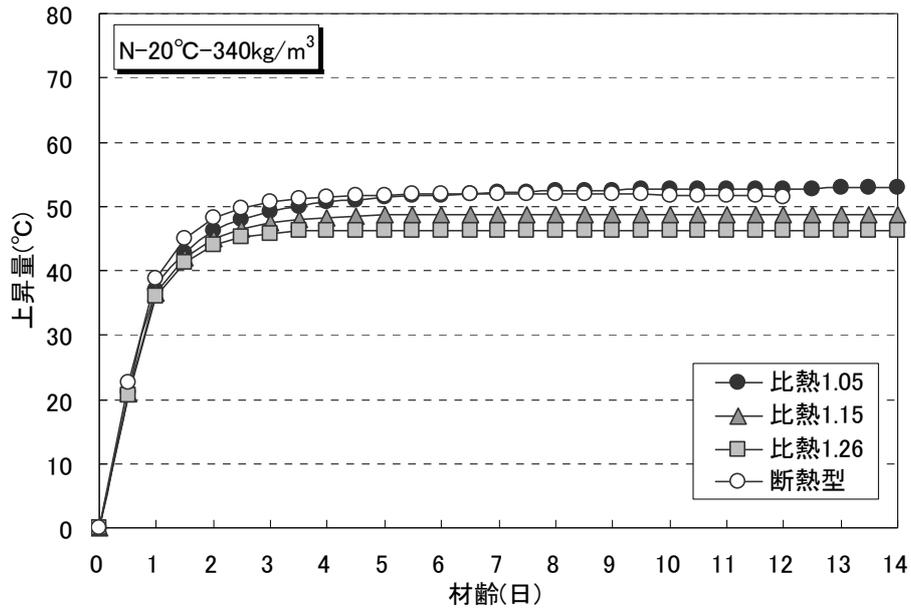
逆解析に必要なコンクリートの物性値は、熱伝導率、比熱および密度である。熱伝導率および比熱は、使用したコンクリートの実測値を用いるのが望ましいが、本実験では土木学会コンクリート標準示方書²⁾を参考に定めた。すなわち、熱伝導率は、一般のコンクリートでは2.6～2.8(W/m°C)とされているため、中間値として2.7(W/m°C)を用いた。比熱については、一般のコンクリートでは1.05～1.26(kJ/kg°C)とされているため、1.05、1.15および1.26(kJ/kg°C)として、解析結果への影響を確認した。密度については配合より算出した値を用いた。資料図-4.1～4.4に逆解析により算出した比熱ごとの断熱温度上昇量を示す。なお、比較のため、断熱型を使用した断熱温度上昇の実測値も併記した。



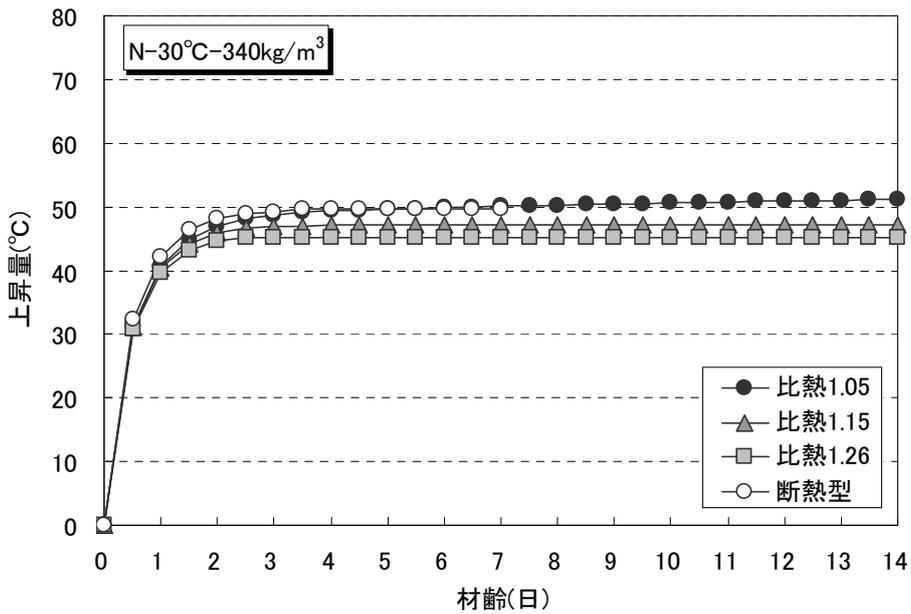
資料図-4.1 逆解析により算出した比熱ごとの断熱温度上昇量と断熱温度上昇量の実測値 (N-20°C-500kg/m³)



資料図-4.2 逆解析により算出した比熱ごとの断熱温度上昇量と断熱温度上昇量の実測値 (N-10°C-340kg/m³)



資料図-4.3 逆解析により算出した比熱ごとの断熱温度上昇量と断熱温度上昇量の実測値 (N-20°C-340kg/m³)



資料図-4.4 逆解析により算出した比熱ごとの断熱温度上昇量と断熱温度上昇量の実測値 (N-30°C-340kg/m³)

資料表-4.1 に逆解析による結果における最高温度上昇量、逆解析による結果を用いて回帰計算した終局断熱温度上昇量 (K) と温度上昇速度の係数 (α) を示す。また、比較のため断熱型を用いて測定した同一配合の回帰結果を併記した。

今回使用した比熱 1.05、1.15 および 1.26 の中では、全試験水準において、1.05 を用いた場合に断熱型の結果に最も近い値となることが認められた。また、比熱と最高温度上昇量、終局温度上昇量の関係から、断熱型の結果に最も近づく比熱を推定すると 1.07 であった。

資料表-4.1 逆解析により算出した比熱ごとの断熱温度上昇量 (N)

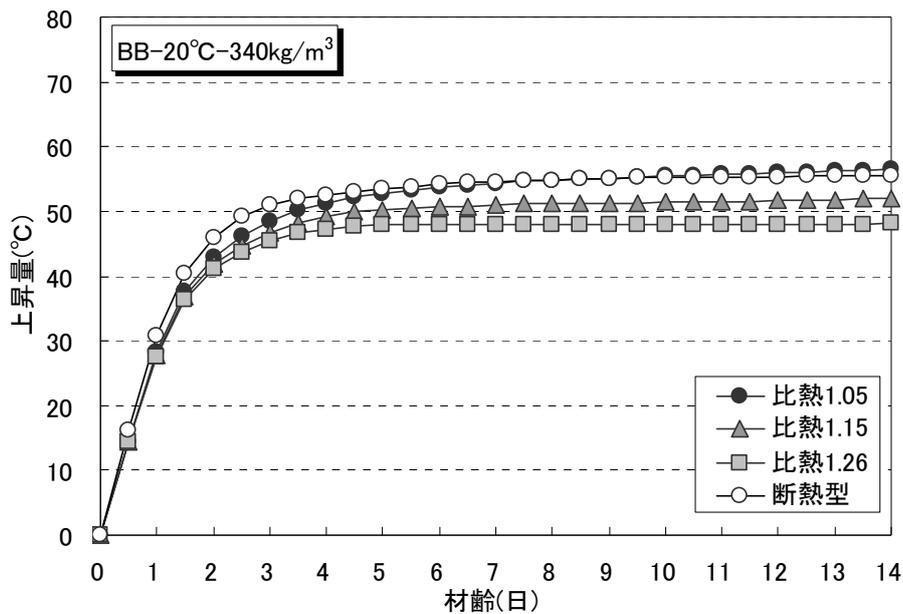
単位 セメント量 (kg/m ³)	打込み 温度 (°C)	逆解析に 用いた 比熱 (kJ/kg°C)	最高温度 上昇量 △ Tmax(°C)	逆解析により算出した断熱温度 上昇量から求めた回帰係数*1	
				終局温度上昇量 K(°C)	速度係数 α
340	10	1.05	56.0	55.4	0.664
		1.15	51.4	51.5	0.741
		1.26	47.9	48.4	0.812
		断熱型		54.6	0.771
	20	1.05	52.8	52.2	1.076
		1.15	48.8	48.8	1.225
		1.26	46.2	46.4	1.331
		断熱型		51.8	1.237
	30	1.05	51.2	50.1	1.666
		1.15	47.3	47.1	1.922
		1.26	45.2	45.2	2.061
		断熱型		48.8	1.700
500	20	1.05	67.1	67.2	1.502
		1.15	63.9	64.2	1.605
		1.26	62.1	62.4	1.661
		断熱型		66.6	1.532

*1 : $Q(t)=K(1-e^{-\alpha t})$

(2) 高炉セメント B 種 (BB)

資料図-4.5 に逆解析により算出した比熱ごとの断熱温度上昇量を示す。なお、比較のため断熱型を使用した断熱温度上昇量も併記した。資料表-4.2 に逆解析による結果における最高温度上昇量、逆解析による結果を用いて回帰計算した終局温度上昇量 (K) と温度上昇速度の係数 (α) を示す。また、比較のため断熱型を用いて測定した同一配合の回帰結果を併記した。

高炉セメント B 種の場合も、普通ポルトランドセメントの場合と同様に、今回使用した比熱 1.05、1.15 および 1.26 の中では、1.05 を用いた場合に断熱型の結果に最も近い値となることが認められた。なお、本結果は打込み温度 20°C の条件での結果であり、高炉セメントは水和反応の温度依存性が比較的高いため、今後打込み温度の影響についても評価する必要がある。



資料図-4.5 逆解析により算出した比熱ごとの断熱温度上昇量の実測値 (BB-20°C-340kg/m³)

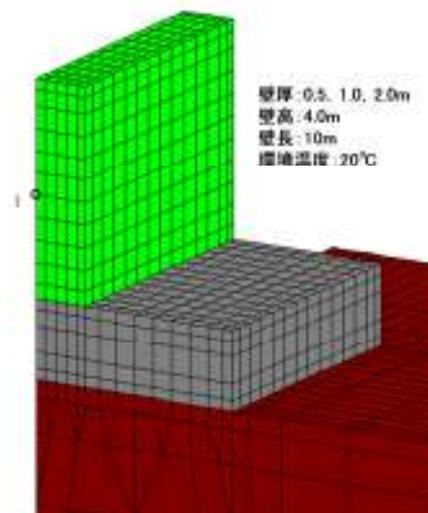
資料表-4.2 逆解析により算出した比熱ごとの断熱温度上昇量 (BB)

単位 セメント量 (kg/m³)	打込み 温度 (°C)	逆解析に 用いた 比熱 (kJ/kg°C)	最高温度 上昇量 ΔT_{max} (°C)	逆解析により算出した断熱温度 上昇量から求めた回帰係数*1	
				終局温度上昇量 K(°C)	速度係数 α
340	20	1.05	56.5	55.4	0.695
		1.15	52.0	51.5	0.782
		1.26	48.1	48.3	0.870
		断熱型		56.3	0.768

*1 : $Q(t) = K(1 - e^{-\alpha t})$

5. 温度解析結果に及ぼす逆解析に用いるコンクリートの比熱の影響

前章までの試験結果から、逆解析により断熱温度上昇量を求める場合、使用するコンクリートの比熱の設定値によって、結果に差が生じることが認められた。コンクリートの断熱温度上昇試験結果は構造物の温度解析をする際に使用されるため、逆解析に用いた比熱を温度解析に用いた場合、温度解析結果に与える影響を確認した。温度解析には FEM を使い、資料図-5.1 に示すような解析モデルを使用した。すなわち、環境温度 20°C、壁厚 0.5、1.0、2.0m、壁高 4.0m、壁長 10m の 1/4 モデルを使用した。セメントは普通ポルト



資料図-5.1 逆解析モデル

ランドセメントとし、終局温度上昇量 (K) および温度上昇速度の係数 (α) は資料表-4.1 の 20°C、単位セメント量 340kg/m³ の値を使用し、比熱 1.05、1.15 および 1.26 に対して解析を行った。熱伝導率は、2.7(W/m°C)を用いた。部材中心部の最高温度を資料表-5.1 に、部材中心部の温度履歴を資料図-5.1~5.3 に示す。

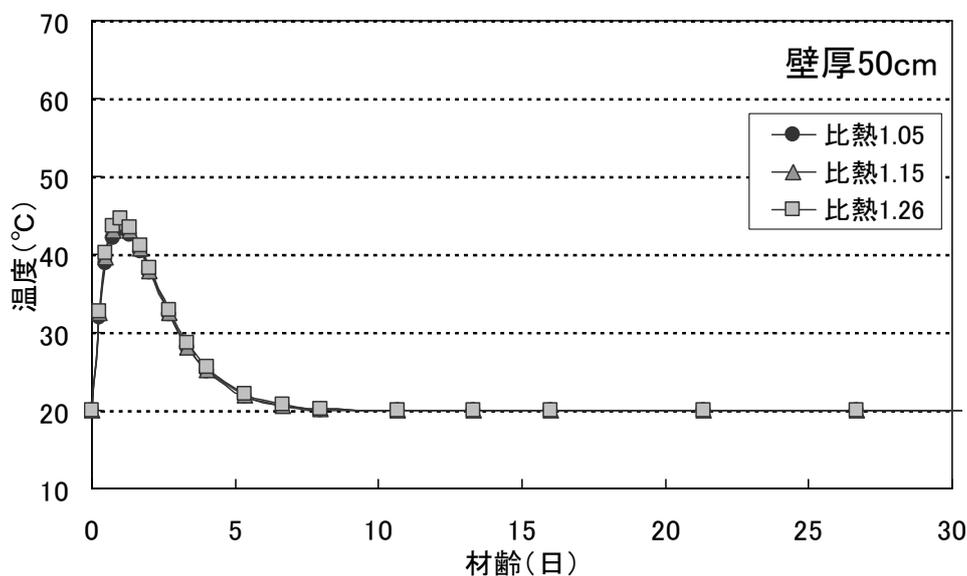
これより、壁厚 2m の場合、比熱 1.05 と 1.26 では最高温度には 2.6°C の差が認められたが、壁厚 1.0、0.5m の場合には比熱による最高温度の差はほとんど認められなかった。

使用するコンクリートの比熱の測定値がない場合、逆解析には比熱の仮定値を用いることになるが、用いる値により断熱温度上昇の解析結果が異なるため、本試験方法は材料試験としての適用性は必ずしも十分とは言えない。しかしながら、逆解析で用いた比熱の値が部材の温度解析結果に及ぼす影響は比較的小さいことから、温度解析に使用するデータを得る上では、有用な方法であると考えられる。また、温度制御が不要なことなどから、比較試験や品質管理試験に適していると考えられる。

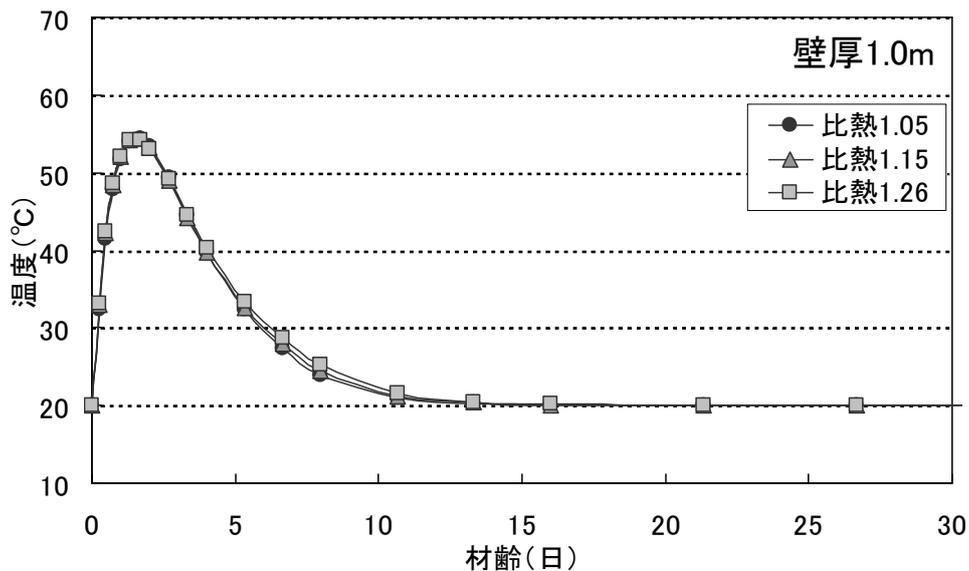
資料表-5.1 部材中心最高温度 Tmax (°C)

比熱 (kJ/kg°C)	終局温度 上昇量*1 K(°C)	壁厚(m)		
		2.0	1.0	0.5
1.05	52.2	65.2	54.4	43.3
1.15	48.8	63.8	54.5	44.0
1.26	46.4	62.6	54.4	44.5

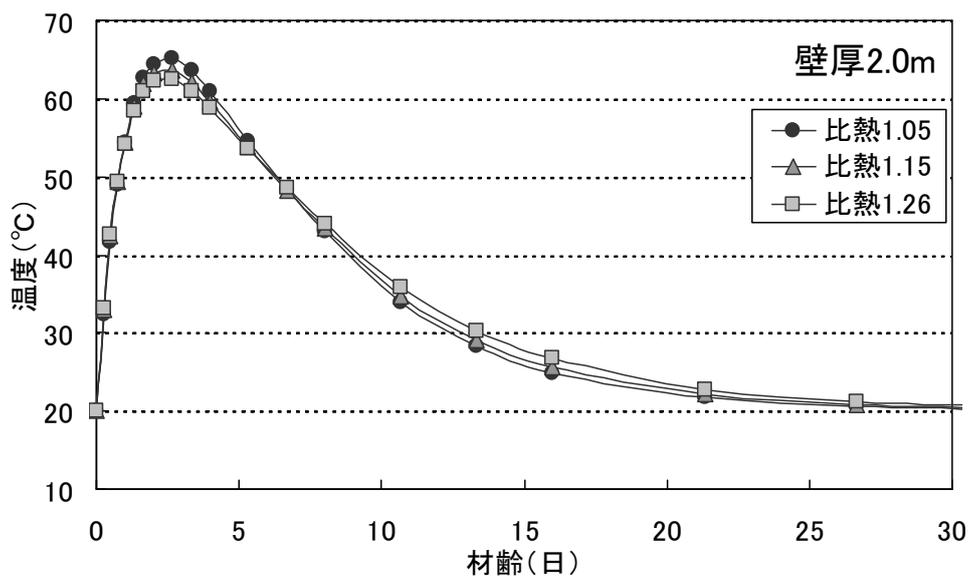
*1 : $Q(t)=K(1-e^{-\alpha t})$



資料図-5.1 部材中心部の温度履歴 (壁厚 50cm)



資料図-5.2 部材中心部の温度履歴 (壁厚 1.0m)



資料図-5.3 部材中心部の温度履歴 (壁厚 2.0m)

6. まとめ

温度制御を行わない簡易断熱温度上昇試験の温度データを用い、逆解析により断熱温度上昇量を推定する方法について、従来の空気循環式断熱温度上昇試験機を用いた場合と比較した。本実験の範囲で得られた結論を要約すると以下ようになる。

- (1) 逆解析に必要なコンクリートの熱的特性である熱伝導率および比熱は、本実験では実測値を用いず、土木学会コンクリート標準示方書を参考に定め、熱伝導率を $2.7(\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C})$ と一定として、比熱の値が解析結果へ及ぼす影響を確認した。その結果、逆解析により得られる断熱温

度上昇量は、用いるコンクリートの比熱の影響を大きく受けることが認められた。

- (2) 普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートでは、打込み温度が 10～30℃の範囲においては、比熱を 1.05(kJ/kg℃)とした場合、従来の空気循環式断熱温度上昇試験機を用いた結果とよく一致した。
- (3) 高炉セメント B 種を用いたコンクリートでは、打込み温度 20℃の条件では、比熱を 1.05(kJ/kg℃)とした場合、従来の空気循環式断熱温度上昇試験機を用いた結果とよく一致した。
- (4) 逆解析手法による断熱温度上昇試験は、使用するコンクリートの熱的特性の測定値がない場合には、逆解析に熱的特性の仮定値を用いるため、材料試験としての適用性は必ずしも十分ではない。しかしながら、部材の温度解析結果に及ぼす比熱の影響は比較的小さいことから、温度解析に使用するデータを得る上では、有用な方法と思われる。また、温度制御が不要なことから、品質管理試験等への適用も考えられる。

【参考文献】

- 1) 石田知子、人見尚、近松竜一、十河茂幸：逆解析手法によるコンクリートの断熱温度上昇量の推定、セメント・コンクリート論文集、第 61 号、pp.197-203、2008
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書「設計編」、pp.316-317、2012

付録 断熱温度上昇量の実測値

◎セメントの種類：N

◎強度区分：普通強度

◎単位セメント量：280、340、400kg/m³

◎打込み温度：20℃

付録表-1 断熱温度上昇量の経時変化 (N、普通強度、20℃)

材齢 (日)	断熱温度上昇量 (℃)											
	試験所											
	A	B	A	B	C	D	E	F	G	H	A	B
	C=280kg/m ³		C=340kg/m ³								C=400kg/m ³	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	2.8	3.7	3.8	4.1	2.3	3.2	3.4	2.6	11.3	3.1	3.4	3.9
0.4	13.9	14.1	17.6	15.2	11.2	17.1	18.0	15.4	22.0	14.0	20.4	20.4
0.6	21.3	20.6	27.1	26.4	23.0	27.6	28.6	23.4	30.3	25.1	33.1	32.9
0.8	27.6	26.6	34.8	34.7	31.2	34.8	36.5	31.1	35.2	33.5	40.8	40.9
1.0	31.9	30.5	38.8	39.2	36.2	39.1	41.1	35.4	38.7	38.1	45.6	45.7
1.2	34.4	33.1	41.6	42.3	39.5	42.0	43.9	38.0	41.1	40.7	48.9	49.4
1.4	36.3	34.9	43.9	44.8	42.1	44.2	46.2	40.4	43.3	43.4	51.6	52.0
1.6	37.8	36.2	45.6	46.8	44.2	46.1	47.9	42.1	44.9	45.4	53.3	53.6
1.8	39.2	37.5	47.1	48.3	45.8	47.3	49.1	43.6	46.2	47.0	54.4	54.8
2.0	40.2	38.6	48.2	49.6	47.1	48.4	49.9	44.7	46.9	48.2	55.1	55.6
2.2	41.0	39.3	48.9	50.4	48.0	49.0	50.5	45.5	47.5	49.0	55.4	55.9
2.4	41.8	40.1	49.4	51.1	48.7	49.5	50.9	46.2	48.0	49.7	55.9	56.3
2.6	42.4	40.6	50.0	51.4	49.2	49.9	51.3	46.7	48.5	50.3	56.2	56.6
2.8	42.9	41.1	50.3	51.9	49.7	50.2	51.5	47.1	48.9	50.7	56.4	56.8
3.0	43.3	41.6	50.6	52.2	50.0	50.4	51.7	47.5	49.2	51.1	56.5	57.0
3.2	43.7	41.9	50.7	52.5	50.3	50.6	51.9	47.8	49.5	51.3	56.7	57.2
3.4	44.0	42.3	51.0	52.8	50.5	50.7	51.8	48.1	49.8	51.6	56.7	57.3
3.6	44.3	42.5	51.1	52.8	50.7	50.9	51.9	48.3	50.0	51.8	56.8	57.4
3.8	44.6	42.7	51.3	53.0	50.8	50.9	51.9	48.4	50.3	52.0	56.9	57.4
4.0	44.7	43.0	51.3	53.1	51.0	51.0	51.9	48.6	50.6	52.1	57.0	57.6
4.2	44.6	43.0	51.4	53.1	51.1	51.0	51.9	48.8	50.7	52.2	56.8	57.4
4.4	44.7	43.3	51.5	53.2	51.2	51.1	51.9	48.9	51.0	52.4	56.7	57.6
4.6	44.8	43.4	51.6	53.3	51.2	51.0	51.8	49.0	51.2	52.5	56.7	57.6
4.8	45.0	43.4	51.6	53.4	51.3	51.1	51.7	49.2	51.4	52.6	56.8	57.6
5.0	45.1	43.6	51.8	53.3	51.3	51.1	—	49.3	51.6	52.6	56.8	57.6
5.2	45.1	43.7	51.8	53.3	51.4	51.0	—	49.4	51.8	52.7	56.7	57.6
5.4	45.2	43.6	51.7	53.3	51.4	51.0	—	49.5	52.0	52.7	56.8	57.5
5.6	45.3	43.6	51.8	53.3	51.5	51.0	—	49.6	52.7	52.8	56.7	57.5
5.8	45.3	43.7	51.9	53.4	51.5	51.0	—	49.7	53.3	52.8	56.6	57.5
6.0	45.4	43.8	51.9	53.5	51.5	51.0	—	49.8	53.4	52.9	56.6	57.4
6.2	45.4	43.7	51.9	53.5	51.5	50.9	—	49.8	53.6	52.9	56.6	57.4
6.4	45.5	43.8	51.8	53.4	51.6	50.9	—	49.9	53.8	53.0	56.5	57.4
6.6	45.5	43.8	51.9	53.5	51.6	50.8	—	49.9	53.8	53.0	56.4	57.3
6.8	45.5	43.9	51.9	53.4	51.6	50.8	—	50.0	54.0	53.0	56.4	57.4
7.0	45.5	44.0	51.9	53.5	51.5	50.7	—	50.1	54.2	53.0	56.4	57.4

- ◎セメントの種類：N
- ◎強度区分：普通強度
- ◎単位セメント量：340kg/m³
- ◎打込み温度：10℃

付録表-2 断熱温度上昇量の経時変化 (N、普通強度、10℃)

材齢 (日)	断熱温度上昇量 (°C)						
	試験所						
	A	B	C	D	E	F	H
	C=340kg/m ³						
0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	1.7	3.3	1.7	2.2	1.4	1.7	1.6
0.4	4.9	8.0	4.6	6.3	5.8	4.6	5.2
0.6	11.8	17.2	10.6	14.7	16.5	10.2	13.0
0.8	20.9	25.4	19.5	23.1	25.2	18.4	21.4
1.0	27.1	31.7	25.2	29.8	32.4	23.8	27.8
1.2	33.5	36.8	30.8	35.6	38.6	28.8	32.9
1.4	37.9	39.9	35.8	39.4	42.2	34.0	37.4
1.6	41.0	42.4	38.9	42.1	44.9	37.1	40.3
1.8	43.2	44.4	41.4	44.1	46.9	39.6	42.5
2.0	45.1	46.1	43.4	46.0	48.4	41.6	44.3
2.2	46.6	47.5	44.9	47.4	49.7	43.2	45.5
2.4	47.8	48.7	46.3	48.5	50.9	44.6	46.8
2.6	48.9	49.7	47.4	49.5	51.7	45.6	47.8
2.8	49.7	50.4	48.3	50.2	52.2	46.6	48.7
3.0	50.4	51.3	49.1	50.9	52.5	47.5	49.3
3.2	51.0	51.7	49.7	51.4	52.8	48.1	49.8
3.4	51.5	52.2	50.2	51.8	53.0	48.7	50.3
3.6	51.8	52.5	50.7	52.2	53.2	49.1	50.7
3.8	52.2	53.0	51.0	52.4	53.3	49.5	51.0
4.0	52.6	53.2	51.4	52.7	53.3	49.9	51.3
4.2	52.7	53.4	51.7	52.9	53.3	50.2	51.5
4.4	53.0	53.7	51.9	53.0	53.3	50.5	51.7
4.6	53.2	53.9	52.1	53.2	53.4	50.8	51.9
4.8	53.3	54.1	52.3	53.3	53.2	51.1	52.1
5.0	53.5	54.3	52.4	53.4	53.1	51.3	52.2
5.2	53.7	54.3	52.6	53.5	53.0	51.4	52.3
5.4	53.7	54.6	52.7	53.5	53.1	51.6	52.5
5.6	53.8	54.7	52.8	53.6	53.2	51.8	52.5
5.8	54.0	54.6	52.9	53.6	53.1	52.0	52.6
6.0	54.1	54.8	53.0	53.7	52.9	52.1	52.7
6.2	54.2	54.9	53.0	53.7	52.9	52.3	52.8
6.4	54.3	55.0	53.1	53.7	53.0	52.4	52.8
6.6	54.2	55.1	53.2	53.7	53.1	52.6	52.9
6.8	54.2	55.2	53.2	53.7	53.1	52.7	52.9
7.0	54.4	55.2	53.2	53.7	53.3	52.8	53.0

- ◎セメントの種類：N
- ◎強度区分：普通強度
- ◎単位セメント量：340kg/m³
- ◎打込み温度：30℃

付録表-3 断熱温度上昇量の経時変化 (N、普通強度、30℃)

材齡 (日)	断熱温度上昇量 (°C)						
	試験所						
	A	B	C	D	E	F	H
	C=340kg/m ³						
0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	9.2	6.5	4.5	4.9	5.6	7.4	6.4
0.4	27.1	23.2	21.8	22.2	22.8	24.0	24.0
0.6	35.3	32.2	31.5	32.2	33.2	32.0	33.3
0.8	39.3	36.8	36.6	36.9	37.7	36.3	37.9
1.0	42.1	39.8	39.8	40.1	40.5	39.3	41.0
1.2	44.3	42.2	42.3	42.4	43.2	41.3	42.9
1.4	45.9	44.2	44.2	44.1	44.5	43.1	44.7
1.6	46.9	45.5	45.6	45.4	45.8	44.2	46.0
1.8	47.6	46.5	46.5	46.2	46.4	45.1	46.9
2.0	48.2	47.2	47.2	46.8	46.6	45.8	47.4
2.2	48.5	47.8	47.6	47.2	46.8	46.3	47.8
2.4	48.8	48.2	48.0	47.4	47.1	46.7	48.1
2.6	49.1	48.5	48.2	47.6	46.9	47.0	48.4
2.8	49.2	48.7	48.4	47.7	46.8	47.3	48.6
3.0	49.2	48.9	48.6	47.9	46.8	47.6	48.8
3.2	49.4	49.1	48.7	47.9	46.7	47.8	48.9
3.4	49.5	49.3	48.8	47.9	46.6	48.0	49.0
3.6	49.6	49.5	48.9	48.0	46.4	48.2	49.1
3.8	49.6	49.5	49.0	48.0	46.0	48.3	49.2
4.0	49.6	49.7	49.0	47.9	46.0	48.5	49.2
4.2	49.8	49.8	49.0	47.9	46.0	48.6	49.3
4.4	49.7	49.8	49.0	47.8	45.7	48.8	49.3
4.6	49.7	50.0	49.1	47.8	45.2	48.9	49.3
4.8	49.7	50.0	49.1	47.8	44.9	49.0	49.3
5.0	49.7	50.0	49.1	47.7	44.6	49.1	49.3
5.2	49.7	50.1	49.0	47.6	44.3	49.2	49.3
5.4	49.7	50.1	49.0	47.5	44.1	49.3	49.4
5.6	49.7	50.2	49.0	47.4	43.7	49.4	49.4
5.8	49.7	50.3	49.0	47.3	43.3	49.5	49.4
6.0	49.7	50.3	49.0	47.2	—	49.6	49.4
6.2	49.8	50.2	49.0	47.1	—	49.7	49.4
6.4	49.6	50.3	48.9	47.1	—	49.8	49.4
6.6	49.6	50.4	48.9	47.0	—	49.9	49.4
6.8	49.6	50.4	48.9	46.9	—	50.0	49.4
7.0	49.7	50.4	48.8	46.8	—	50.1	49.4

◎セメントの種類：N

◎強度区分：高強度

◎単位セメント量：450、500、550kg/m³

◎打込み温度：20℃

付録表-4 断熱温度上昇量の経時変化 (N、高強度、20℃)

材齢 (日)	断熱温度上昇量 (°C)											
	試験所											
	C	D	A	B	C	D	E	F	G	H	C	D
	C=450kg/m ³		C=500kg/m ³								C=550kg/m ³	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	1.7	1.7	3.3	2.8	2.3	2.9	3.5	2.2	1.8	3.0	2.1	2.2
0.4	8.1	9.4	24.9	22.2	12.9	21.5	24.0	19.6	15.0	13.6	12.5	13.1
0.6	26.5	33.0	44.3	41.9	37.2	42.4	44.2	36.4	39.0	38.3	40.8	47.5
0.8	39.9	46.7	53.5	51.7	49.2	51.8	54.4	47.3	50.7	50.2	53.8	59.5
1.0	46.9	53.3	58.9	57.7	56.0	57.8	60.6	53.4	57.7	56.7	61.3	65.1
1.2	51.6	57.1	61.8	61.1	60.0	60.7	63.3	57.1	61.2	60.2	64.5	66.7
1.4	55.1	59.0	63.1	62.3	61.8	62.0	64.4	59.2	63.4	62.4	65.8	67.5
1.6	57.1	60.0	63.9	63.1	62.7	62.7	65.1	60.1	64.7	63.5	66.5	68.1
1.8	58.3	60.5	64.3	63.5	63.3	63.2	65.4	60.9	65.6	64.2	66.9	68.6
2.0	59.1	60.9	64.6	63.8	63.7	63.6	65.8	61.4	66.2	64.7	67.3	69.1
2.2	59.6	61.1	64.7	64.0	64.0	63.8	66.1	61.7	66.7	65.0	67.5	69.5
2.4	60.0	61.3	64.4	64.3	64.3	64.0	66.1	62.1	67.4	65.4	67.7	69.9
2.6	60.3	61.4	65.3	64.4	64.4	64.2	66.2	62.4	68.0	65.7	67.9	70.4
2.8	60.5	61.5	65.4	64.5	64.6	64.3	66.4	62.6	68.5	66.0	68.1	70.7
3.0	60.7	61.6	65.6	64.6	64.8	64.5	66.4	62.8	69.1	66.2	68.3	70.9
3.2	60.9	61.6	65.7	64.7	64.9	64.6	66.6	63.0	69.6	66.4	68.4	71.1
3.4	61.0	61.6	65.7	64.8	65.0	64.7	66.6	63.2	70.0	66.6	68.5	71.2
3.6	61.1	61.6	65.8	64.8	65.1	64.8	66.6	63.4	70.6	66.8	68.6	71.3
3.8	61.2	61.6	66.1	64.9	65.2	64.8	66.5	63.5	70.9	67.0	68.7	71.3
4.0	61.3	61.6	66.0	64.9	65.3	64.9	66.5	63.7	71.0	67.2	68.8	71.4
4.2	61.3	61.6	66.0	65.1	65.3	64.9	66.3	63.8	71.1	67.3	68.9	71.3
4.4	61.3	61.6	66.0	65.1	65.3	64.9	66.1	64.0	71.2	67.5	68.8	71.3
4.6	61.3	61.6	66.2	65.0	65.4	64.9	66.1	64.1	71.0	67.6	68.8	71.3
4.8	61.4	61.6	66.1	65.0	65.4	64.9	65.9	64.2	71.0	67.7	68.8	71.3
5.0	61.4	61.6	66.1	64.9	65.5	64.9	—	64.3	70.9	67.9	68.8	71.3
5.2	61.5	61.6	66.1	64.9	65.6	65.0	—	64.5	70.9	68.0	68.8	71.2
5.4	61.5	61.5	65.9	65.0	65.6	64.9	—	64.6	70.8	68.1	68.7	71.2
5.6	61.4	61.5	66.1	64.9	65.6	64.9	—	64.7	70.8	68.1	68.7	71.1
5.8	61.4	61.4	66.1	65.0	65.6	64.8	—	64.8	70.8	68.2	68.7	71.1
6.0	61.4	61.4	66.1	64.9	65.6	64.8	—	64.8	70.7	68.3	68.6	71.0
6.2	61.4	61.4	66.0	64.9	65.6	64.7	—	64.9	70.7	68.3	68.5	70.9
6.4	61.4	61.3	66.0	64.8	65.6	64.7	—	65.0	70.7	68.4	68.5	70.9
6.6	61.4	61.3	66.0	64.7	65.6	64.6	—	65.1	70.7	68.4	68.4	70.8
6.8	61.4	61.2	65.8	64.7	65.6	64.6	—	65.1	70.7	68.5	68.3	70.7
7.0	61.4	61.2	65.9	64.7	65.6	64.4	—	65.2	70.7	68.5	68.2	70.7

- ◎セメントの種類：N
- ◎強度区分：高強度
- ◎単位セメント量：500kg/m³
- ◎打込み温度：10、30℃

付録表-5 断熱温度上昇量の経時変化 (N、高強度、10・30℃)

材齡 (日)	断熱温度上昇量 (℃)			
	試験所			
	C	D	C	D
	C=500kg/m ³			
	10℃		30℃	
0	0	0	0	0
0.2	1.8	2.2	2.8	3.7
0.4	5.1	4.7	28.3	33.3
0.6	16.1	12.5	45.1	49.7
0.8	34.2	31.7	52.8	56.4
1.0	47.0	47.2	57.0	59.3
1.2	53.5	54.5	58.7	60.4
1.4	58.5	59.7	59.5	61.1
1.6	61.9	63.4	60.0	61.7
1.8	63.8	65.2	60.3	62.1
2.0	64.9	66.1	60.6	62.5
2.2	65.4	66.7	60.8	62.7
2.4	65.9	67.1	61.0	62.9
2.6	66.2	67.4	61.0	63.0
2.8	66.4	67.7	61.1	63.1
3.0	66.6	67.8	61.2	63.1
3.2	66.7	68.0	61.3	63.1
3.4	66.8	68.0	61.3	63.0
3.6	66.9	68.1	61.3	63.0
3.8	67.0	68.1	61.2	62.9
4.0	67.0	68.2	61.2	62.8
4.2	67.0	68.2	61.2	62.7
4.4	67.0	68.2	61.0	62.6
4.6	67.0	68.2	61.0	62.5
4.8	67.0	68.2	60.9	62.3
5.0	67.0	68.1	60.8	62.3
5.2	66.9	68.1	60.7	62.1
5.4	66.9	68.1	60.6	62.0
5.6	66.8	68.0	60.5	61.9
5.8	66.8	68.0	60.4	61.8
6.0	66.7	68.0	60.3	61.7
6.2	66.6	67.9	60.2	61.5
6.4	66.6	67.9	60.1	61.4
6.6	66.5	67.9	60.0	61.3
6.8	66.5	67.8	59.8	61.1
7.0	66.4	67.8	59.7	61.0

- ◎セメントの種類：M
- ◎強度区分：普通強度
- ◎単位セメント量：280、340、400kg/m³
- ◎打込み温度：20℃

付録表-6 断熱温度上昇量の経時変化 (M、普通強度、20℃)

材齢 (日)	断熱温度上昇量 (℃)													
	試験所													
	A	B	E	F	H	A	B	E	F	H	A	B	F	H
	C=280kg/m ³					C=340kg/m ³					C=400kg/m ³			
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.4	10.5	8.6	9.8	9.4	8.2	12.5	9.0	9.8	10.9	10.2	14.0	9.7	15.1	10.6
0.8	20.0	18.7	21.0	19.0	19.6	25.0	22.1	25.3	22.9	24.1	29.3	27.2	28.7	28.3
1.2	23.9	22.2	25.5	22.9	23.2	29.5	26.9	31.5	27.5	28.8	35.2	32.9	34.5	34.1
1.6	26.6	24.7	28.6	25.7	26.0	33.0	30.5	34.7	30.7	32.4	39.2	37.1	38.5	38.5
2.0	28.4	27.0	30.8	27.9	28.0	35.3	33.1	37.7	33.4	35.0	41.9	40.0	41.0	41.5
2.4	29.8	28.5	32.4	29.5	29.4	37.1	35.2	39.9	35.3	36.9	43.7	41.9	42.8	43.3
2.8	31.0	29.9	33.8	30.8	30.7	38.5	37.3	41.2	36.8	38.4	45.0	43.5	44.2	44.9
3.2	32.1	31.0	35.0	32.0	31.7	39.6	38.6	42.1	38.0	39.6	46.2	44.6	45.2	46.0
3.6	33.3	32.0	35.9	33.0	32.7	40.6	39.7	43.1	39.0	40.7	47.1	45.5	46.3	47.1
4.0	34.1	32.9	36.6	34.0	33.5	41.4	40.7	43.3	40.0	41.7	47.8	46.4	47.1	48.0
4.4	34.9	33.7	37.5	34.8	34.2	42.1	41.6	43.9	40.8	42.4	48.4	47.1	47.8	48.7
4.8	35.5	34.4	38.0	35.6	34.9	42.6	42.2	44.4	41.5	43.2	48.9	47.6	48.5	49.4
5.2	36.0	35.0	38.5	36.3	35.5	43.0	42.9	44.7	42.2	43.7	49.3	48.1	49.1	49.9
5.6	36.6	35.6	39.0	36.9	36.0	43.5	43.4	44.8	42.8	44.3	49.7	48.5	49.6	50.4
6.0	37.0	36.2	39.3	37.6	36.5	43.8	43.9	44.9	43.3	44.7	50.0	48.9	50.1	50.8
6.4	37.4	36.7	39.8	38.1	37.0	44.1	44.4	45.0	43.7	45.2	50.2	49.2	50.6	51.2
6.8	37.8	37.1	39.9	38.7	37.5	44.4	44.8	45.1	44.2	45.6	50.5	49.5	50.9	51.5
7.2	38.2	37.4	40.2	39.2	37.8	44.6	44.9	44.7	44.5	45.9	50.6	49.5	51.3	51.7
7.6	38.5	37.8	40.3	39.6	38.2	44.7	45.3	45.0	44.9	46.2	50.7	49.8	51.6	52.0
8.0	38.7	38.1	40.4	40.0	38.5	44.9	45.5	44.7	45.3	46.4	50.9	50.0	51.8	52.1
8.4	39.0	38.5	40.6	40.4	38.8	44.8	45.8	44.8	45.6	46.7	50.9	50.2	52.1	52.3
8.8	39.2	38.6	40.8	40.8	39.1	45.0	46.0	44.6	45.9	46.9	51.0	50.2	52.3	52.5
9.2	39.4	38.9	40.7	41.1	39.3	45.1	46.3	44.7	46.2	47.0	51.0	50.5	52.5	52.6
9.6	39.5	39.2	40.7	41.4	39.5	45.2	46.5	45.0	46.4	47.2	51.1	50.6	52.8	52.7
10.0	39.6	39.3	40.5	41.7	39.7	45.2	46.6	45.0	46.7	47.3	51.1	50.7	53.0	52.8
10.4	39.7	39.4	40.7	41.9	39.9	45.2	46.8	44.5	46.9	47.4	51.1	50.8	53.2	52.9
10.8	39.8	39.6	40.6	42.2	40.1	45.3	46.8	44.8	47.2	47.5	51.1	50.8	53.4	53.0
11.2	39.9	39.7	40.4	42.5	40.2	45.3	47.0	44.4	47.4	47.6	51.2	50.9	53.5	53.1
11.6	39.9	39.8	40.3	42.7	40.4	45.3	47.1	44.5	47.6	47.7	51.1	51.0	53.7	53.1
12.0	40.1	39.8	40.3	42.9	40.5	45.3	47.2	44.6	47.8	47.7	51.1	51.0	53.8	53.1

- ◎セメントの種類：M
- ◎強度区分：普通強度
- ◎単位セメント量：340kg/m³
- ◎打込み温度：10、30℃

付録表-7 断熱温度上昇量の経時変化 (M、普通強度、10・30℃)

材齡 (日)	断熱温度上昇量 (°C)			
	試験所			
	A	B	A	B
	C=340kg/m ³			
	10℃		30℃	
0	0	0	0	0
0.4	5.0	5.2	21.2	18.6
0.8	18.7	19.1	29.5	28.8
1.2	24.1	24.9	33.8	34.0
1.6	28.5	29.7	36.6	36.8
2.0	31.8	33.0	38.5	39.0
2.4	34.5	35.8	40.0	40.6
2.8	36.7	38.1	41.1	41.9
3.2	38.5	39.9	42.0	42.7
3.6	39.9	41.5	42.7	43.5
4.0	41.1	42.9	43.3	44.1
4.4	42.1	44.0	43.7	44.5
4.8	43.1	44.9	44.0	44.9
5.2	43.8	45.7	44.1	45.1
5.6	44.5	46.4	44.3	45.3
6.0	45.1	46.9	44.4	45.4
6.4	45.6	47.6	44.5	45.5
6.8	46.1	48.0	44.5	45.7
7.2	46.5	48.6	44.5	45.7
7.6	46.8	48.9	44.4	45.6
8.0	47.1	49.2	44.4	45.6
8.4	47.4	49.3	44.4	45.7
8.8	47.5	49.7	44.4	45.7
9.2	47.8	49.8	44.3	45.7
9.6	48.0	50.1	44.3	45.6
10.0	48.2	50.3	44.2	45.7
10.4	48.3	50.2	44.1	45.7
10.8	48.3	50.3	44.0	45.7
11.2	48.5	50.4	44.0	45.6
11.6	48.7	50.5	44.0	45.6
12.0	48.7	50.7	43.9	45.4

◎セメントの種類：M

◎強度区分：高強度

◎単位セメント量：450、500、550kg/m³

◎打込み温度：10、20、30℃

付録表-8 断熱温度上昇量の経時変化 (M、高強度、10・20・30℃)

材齢 (日)	断熱温度上昇量 (°C)									
	試験所									
	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D
	C=450kg/m ³		C=500kg/m ³		C=550kg/m ³		C=500kg/m ³			
	20℃						10℃		30℃	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.4	8.7	9.7	6.8	10.9	6.1	11.6	3.9	7.0	21.7	26.5
0.8	30.5	32.6	32.5	36.7	36.1	40.7	23.6	31.3	39.2	42.4
1.2	38.0	40.2	41.8	45.2	46.8	50.0	35.4	42.8	45.9	48.8
1.6	42.7	44.6	47.1	49.5	52.2	54.2	43.1	49.6	49.5	52.1
2.0	45.6	47.2	50.1	51.9	54.9	56.9	48.3	53.5	52.0	54.0
2.4	47.5	48.8	52.0	53.6	56.9	58.6	51.3	55.7	53.6	55.1
2.8	48.9	50.2	53.4	55.1	58.5	59.8	53.1	57.2	54.6	55.8
3.2	50.0	51.2	54.5	56.2	59.7	60.4	54.5	58.3	55.2	56.3
3.6	51.0	52.1	55.5	57.0	60.5	60.9	55.5	59.2	55.7	56.6
4.0	51.7	52.8	56.4	57.5	61.1	61.2	56.2	59.9	56.0	56.7
4.4	52.4	53.3	57.0	57.9	61.5	61.4	56.9	60.5	56.2	56.8
4.8	52.9	53.8	57.4	58.2	61.8	61.7	57.4	60.9	56.3	56.8
5.2	53.4	54.1	57.8	58.4	62.0	61.7	57.9	61.3	56.4	56.6
5.6	53.7	54.3	58.1	58.5	62.2	61.8	58.2	61.6	56.4	56.5
6.0	54.0	54.4	58.3	58.6	62.3	61.8	58.5	61.8	56.4	56.3
6.4	54.2	54.5	58.5	58.6	62.4	61.8	58.7	62.0	56.3	56.2
6.8	54.4	54.6	58.7	58.6	62.4	61.7	58.9	62.1	56.2	55.9
7.2	54.5	54.6	58.7	58.6	62.4	61.7	59.0	62.1	56.2	55.7
7.6	54.6	54.6	58.8	58.5	62.4	61.6	59.2	62.1	56.0	55.5
8.0	54.6	54.5	58.8	58.5	62.4	61.5	59.3	62.1	55.9	55.3
8.4	54.7	54.5	58.8	58.4	62.3	61.4	59.3	62.1	55.7	55.0
8.8	54.7	54.4	58.8	58.3	62.3	61.2	59.4	62.1	55.6	54.8
9.2	54.7	54.3	58.8	58.2	62.2	61.1	59.4	62.1	55.4	54.6
9.6	54.7	54.2	58.7	58.1	62.1	60.9	59.4	62.0	55.3	54.3
10.0	54.7	54.2	58.7	58.1	62.1	60.8	59.3	61.9	55.1	54.1
10.4	54.6	54.0	58.7	57.9	62.0	60.7	59.4	61.9	54.9	53.9
10.8	54.6	53.9	58.6	57.8	62.0	60.5	59.3	61.8	54.7	53.6
11.2	54.6	53.8	58.6	57.7	61.9	60.3	59.3	61.7	54.6	53.4
11.6	54.5	53.7	58.6	57.6	61.8	60.2	59.2	61.6	54.4	53.2
12.0	54.4	53.6	58.5	57.5	61.7	60.0	59.2	61.5	54.3	52.9

◎セメントの種類：L

◎強度区分：普通強度

◎単位セメント量：280、340、400kg/m³

◎打込み温度：10、20、30℃

付録表-9 断熱温度上昇量の経時変化 (L、普通強度、10・20・30℃)

材齢 (日)	断熱温度上昇量 (℃)							
	試験所							
	B	B	A	B	A	B	A	B
	C=280kg/m ³	C=340kg/m ³	C=400kg/m ³		C=340kg/m ³			
	20℃				10℃		30℃	
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.8	12.7	15.3	20.3	18.5	10.7	14.6	20.4	19.4
1.6	16.4	20.6	26.9	25.5	19.8	21.4	26.4	25.4
2.4	18.8	24.0	31.9	30.4	22.9	24.4	30.6	30.0
3.2	20.8	26.9	35.8	34.4	25.4	26.6	33.9	33.3
4.0	22.4	29.7	38.9	37.7	27.7	28.8	36.3	35.9
4.8	24.2	32.4	41.3	40.4	30.0	31.1	38.1	37.8
5.6	26.0	34.9	43.2	42.5	32.1	33.5	39.4	39.2
6.4	27.8	37.4	44.5	44.2	34.2	35.7	40.3	40.2
7.2	29.6	39.4	45.4	45.5	36.1	37.7	40.9	40.9
8.0	31.0	40.7	46.3	46.4	37.8	39.5	41.3	41.5
8.8	32.6	42.0	46.8	47.3	39.4	40.9	41.5	41.8
9.6	33.8	42.9	47.2	47.8	40.9	42.3	41.7	42.2
10.4	34.9	43.7	47.5	48.3	42.0	43.5	41.7	42.2
11.2	35.7	43.9	47.7	48.4	43.0	44.4	41.7	42.3
12.0	36.3	44.3	47.7	48.6	43.8	45.3	41.7	42.3
12.8	37.1	44.8	—	48.9	44.5	46.0	41.7	42.5
13.6	37.6	45.1	—	49.0	45.1	46.7	41.6	42.4
14.4	38.0	45.3	—	49.1	45.7	47.2	—	42.4
15.2	38.4	45.5	—	49.2	46.1	47.8	—	42.4
16.0	38.7	45.7	—	49.3	46.4	48.2	—	42.4
16.8	39.0	45.8	—	49.3	46.8	48.6	—	42.4
17.6	39.3	45.9	—	49.4	47.1	49.0	—	42.4
18.4	39.4	46.0	—	49.4	47.3	49.3	—	—
19.2	39.7	46.0	—	49.5	47.5	49.6	—	—
20.0	39.9	46.2	—	49.5	47.6	50.0	—	—
20.8	39.9	46.2	—	49.5	47.8	50.2	—	—
21.6	40.1	46.2	—	49.5	47.9	50.4	—	—
22.4	40.2	46.3	—	49.5	48.0	50.7	—	—
23.2	40.3	46.3	—	49.4	48.2	51.0	—	—
24.0	40.3	46.3	—	49.3	48.3	51.2	—	—
24.8	40.4	46.4	—	49.4	48.4	51.5	—	—
25.6	40.5	46.4	—	49.4	48.5	51.6	—	—
26.4	40.4	46.3	—	49.4	48.5	51.8	—	—
27.2	40.5	46.3	—	49.4	48.6	51.9	—	—
28.0	40.7	46.4	—	49.4	48.6	52.0	—	—

◎セメントの種類：L

◎強度区分：高強度

◎単位セメント量：450、500、550kg/m³

◎打込み温度：10、20、30℃

付録表-10 断熱温度上昇量の経時変化 (L、高強度、10・20・30℃)

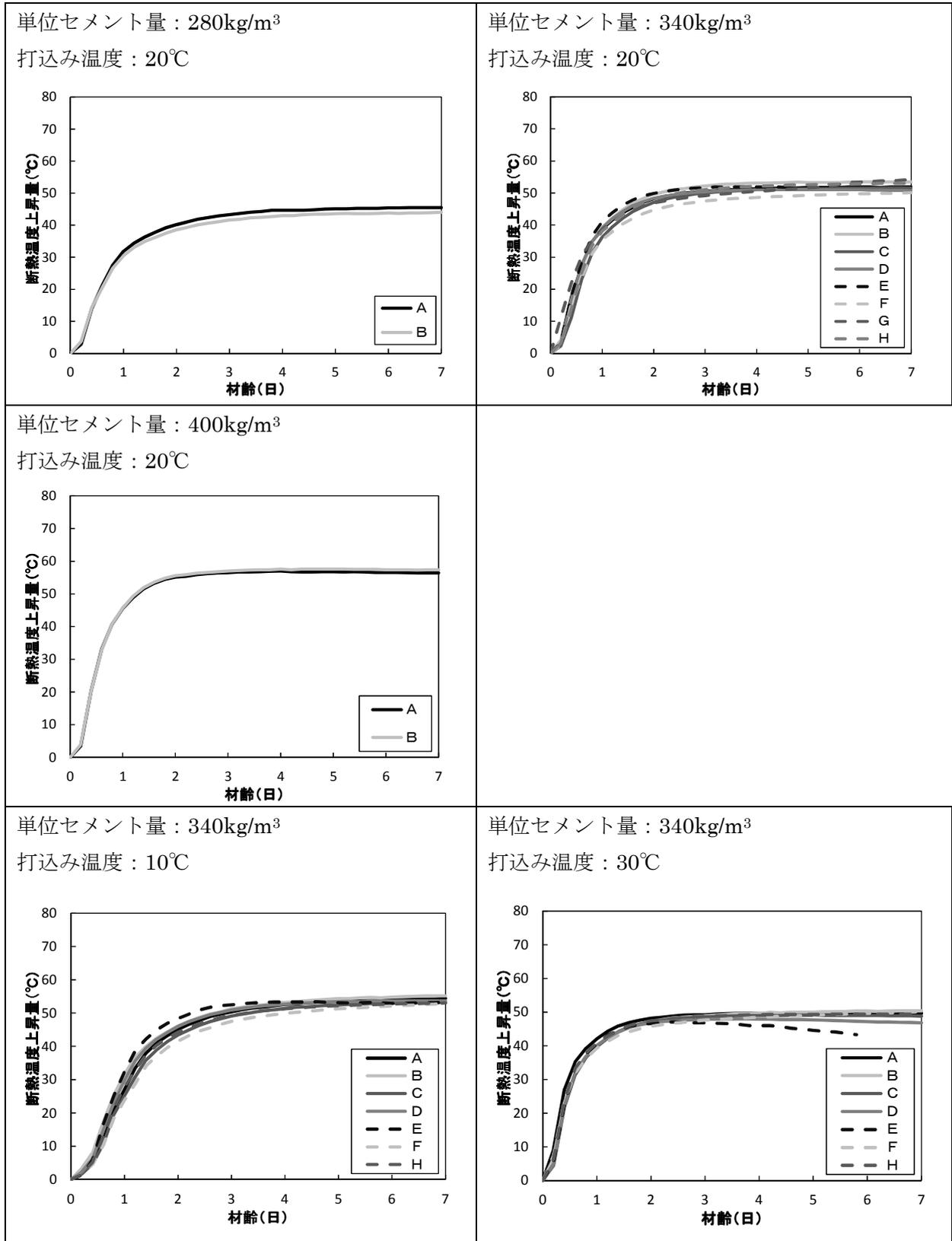
材齡 (日)	断熱温度上昇量 (°C)									
	試験所									
	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D
	C=450kg/m ³		C=500kg/m ³		C=550kg/m ³		C=500kg/m ³			
	20℃						10℃		30℃	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.4	5.8	4.3	7.1	5.7	6.3	4.1	2.5	3.6	11.8	13.5
0.8	21.7	21.1	25.1	24.1	26.6	26.1	9.9	14.5	28.0	29.3
1.2	26.5	26.5	30.7	30.0	33.1	33.7	22.3	25.8	33.4	35.1
1.6	29.9	30.2	35.1	34.3	37.9	39.1	26.6	30.6	37.4	39.2
2.0	33.0	33.3	38.5	37.8	41.6	42.9	30.0	34.3	40.5	42.2
2.4	35.4	35.8	41.2	40.4	44.2	45.6	32.8	37.5	43.0	44.5
2.8	37.5	38.0	43.4	42.7	46.3	47.7	35.6	40.3	45.0	46.6
3.2	39.4	39.8	45.2	44.4	48.1	49.5	38.2	42.6	46.7	48.3
3.6	41.0	41.4	46.8	46.0	49.5	50.9	40.3	44.6	48.1	49.8
4.0	42.3	42.8	48.1	47.3	50.7	52.1	42.3	46.2	49.4	51.0
4.4	43.5	44.0	49.2	48.2	51.6	53.2	43.9	47.5	50.5	51.7
4.8	44.5	45.0	50.2	49.1	52.4	54.0	45.3	48.7	51.4	52.3
5.2	45.4	45.8	50.9	49.8	53.1	54.6	46.5	49.7	52.0	52.7
5.6	46.2	46.5	51.6	50.4	53.7	55.1	47.5	50.5	52.5	53.1
6.0	46.9	47.2	52.1	50.8	54.1	55.5	48.5	51.2	52.9	53.3
6.4	47.4	47.7	52.6	51.2	54.5	55.7	49.3	51.8	53.2	53.4
6.8	47.8	48.1	53.1	51.5	54.8	55.8	50.0	52.3	53.5	53.6
7.2	48.2	48.4	53.4	51.7	55.0	56.0	50.6	52.7	53.6	53.6
7.6	48.6	48.6	53.7	52.0	55.1	56.0	51.2	53.1	53.7	53.7
8.0	48.9	48.9	54.0	52.1	55.3	56.1	51.6	53.4	53.8	53.6
8.4	49.1	49.1	54.2	52.1	55.3	56.0	52.1	53.6	53.9	53.6
8.8	49.3	49.2	54.3	52.3	55.3	56.0	52.5	53.8	53.9	53.6
9.2	49.5	49.3	54.4	52.3	55.3	56.0	52.7	54.0	53.9	53.5
9.6	49.6	49.4	54.6	52.3	55.3	55.9	53.0	54.1	54.0	53.4
10.0	49.7	49.5	54.7	52.3	55.2	55.8	53.3	54.2	53.9	53.3
10.4	49.8	49.5	54.7	52.2	55.2	55.8	53.5	54.3	53.9	53.2
10.8	49.8	49.5	54.8	52.2	55.1	55.7	53.7	54.3	53.9	53.1
11.2	49.9	49.5	54.8	52.0	55.0	55.6	53.8	54.3	53.9	52.9
11.6	49.9	49.6	54.8	52.0	54.8	55.5	54.0	54.3	53.9	52.8
12.0	50.0	49.5	54.8	52.0	54.8	55.4	54.2	54.3	53.8	52.7

- ◎セメントの種類：BB
- ◎強度区分：普通強度
- ◎単位セメント量：280、340、400kg/m³
- ◎打込み温度：10、20、30℃

付録表-11 断熱温度上昇量の経時変化 (BB、普通強度、10・20・30℃)

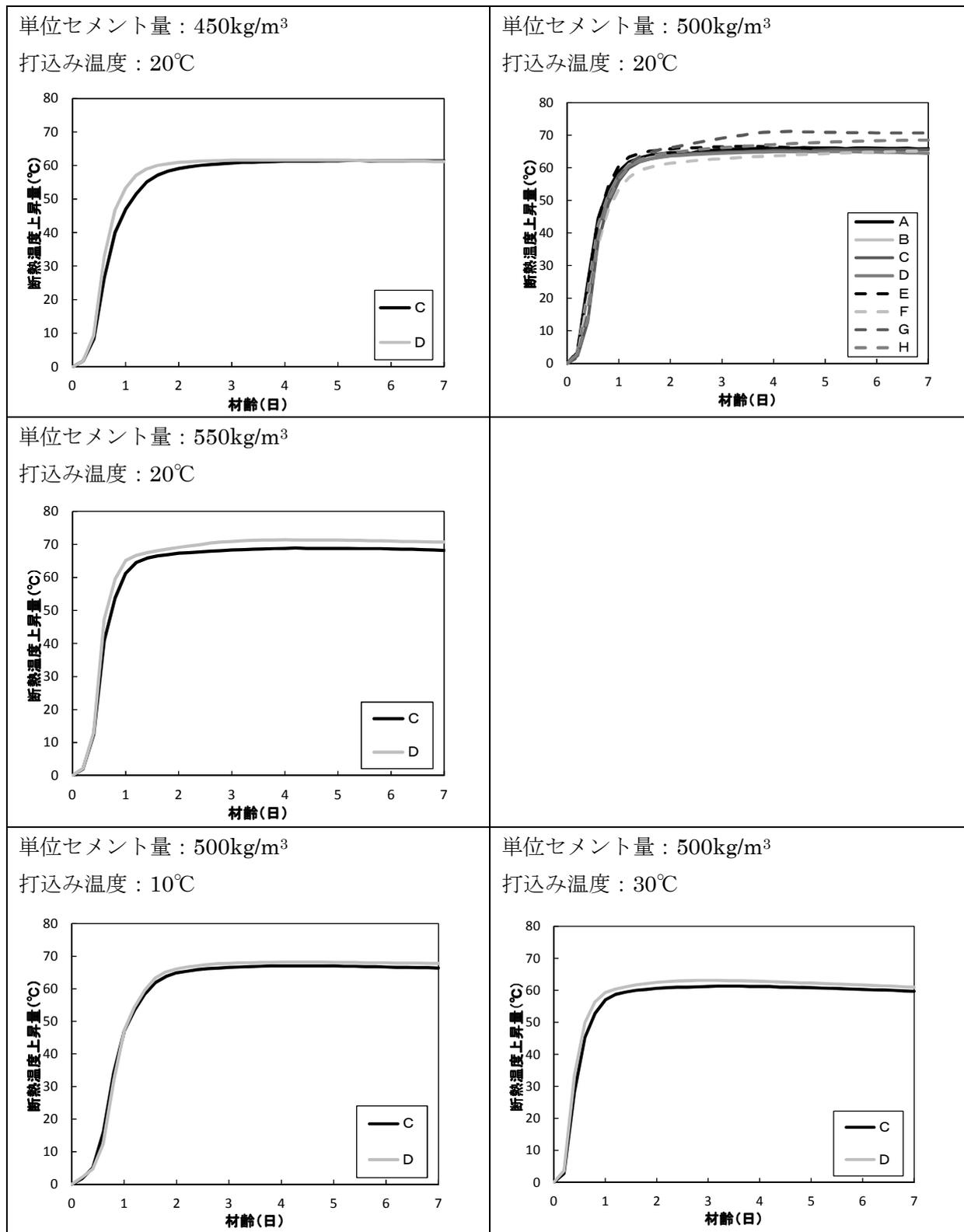
材齡 (日)	断熱温度上昇量 (°C)									
	試験所									
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
	C=280kg/m ³		C=340kg/m ³		C=400kg/m ³		C=340kg/m ³			
	20℃						10℃		30℃	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.4	9.4	7.6	10.7	7.8	13.0	9.0	3.8	5.1	20.7	17.9
0.8	20.4	18.4	25.3	22.7	32.0	27.8	15.0	17.6	35.4	33.2
1.2	28.0	25.2	35.8	33.4	43.6	41.0	22.9	26.3	42.1	40.2
1.6	33.4	30.9	41.7	40.5	50.3	48.5	30.5	34.9	46.2	44.5
2.0	37.0	35.1	45.8	45.1	54.2	53.6	37.2	40.8	48.4	46.8
2.4	39.8	38.2	48.8	48.6	56.1	56.2	42.0	45.0	49.6	48.3
2.8	41.9	40.6	50.4	50.7	57.3	57.5	46.1	48.0	50.5	49.3
3.2	43.5	42.5	51.3	52.1	58.1	58.6	48.9	50.4	51.1	50.2
3.6	44.4	44.1	52.1	53.2	58.8	59.5	51.1	52.1	51.6	50.8
4.0	45.1	44.8	52.5	53.6	59.2	59.9	52.7	52.8	51.9	51.3
4.4	45.6	45.7	53.0	54.6	59.7	60.6	53.5	53.6	52.2	51.7
4.8	46.0	46.2	53.4	55.0	60.0	61.0	54.2	54.2	52.4	52.0
5.2	46.3	46.4	53.7	55.3	60.3	61.3	54.5	54.7	52.5	52.3
5.6	46.6	46.8	54.0	55.6	60.6	61.5	54.9	55.2	52.7	52.5
6.0	46.8	46.8	54.2	55.7	60.7	61.7	55.3	55.4	52.8	52.7
6.4	47.0	47.5	54.3	56.4	60.9	62.1	55.6	56.0	52.8	52.9
6.8	47.3	47.3	54.5	56.2	61.0	62.1	55.8	56.1	52.9	53.0
7.2	47.4	47.6	54.6	56.4	61.2	62.4	56.0	56.6	53.0	53.1
7.6	47.6	48.2	54.7	57.1	61.3	62.8	56.2	56.9	53.0	53.4
8.0	47.8	48.1	54.8	56.9	61.4	62.8	56.3	57.1	53.0	53.5
8.4	47.9	48.1	54.9	57.0	61.5	62.9	56.4	57.2	53.0	53.7
8.8	48.0	48.2	54.9	57.1	61.7	63.0	56.5	57.5	53.1	53.8
9.2	48.1	48.5	55.1	57.4	61.7	63.2	56.6	57.7	53.2	53.8
9.6	48.2	49.1	55.2	58.1	61.8	63.7	56.8	57.9	53.1	54.0
10.0	48.3	49.0	55.2	57.9	61.9	63.7	57.0	58.0	53.1	54.1
10.4	48.4	49.2	55.2	58.2	62.0	63.9	57.0	58.2	53.1	54.2
10.8	48.4	49.1	55.3	58.0	62.0	63.9	57.0	58.3	53.1	54.4
11.2	48.5	49.6	55.3	58.5	62.1	64.2	57.1	58.5	53.1	54.4
11.6	48.7	49.7	55.3	58.6	62.2	64.4	57.2	58.7	53.0	54.5
12.0	48.7	49.2	55.3	58.0	62.2	64.1	57.3	58.7	53.1	54.5

- ◎セメントの種類：N
- ◎強度区分：普通強度
- ◎単位セメント量：280、340、400kg/m³
- ◎打込み温度：10、20、30℃



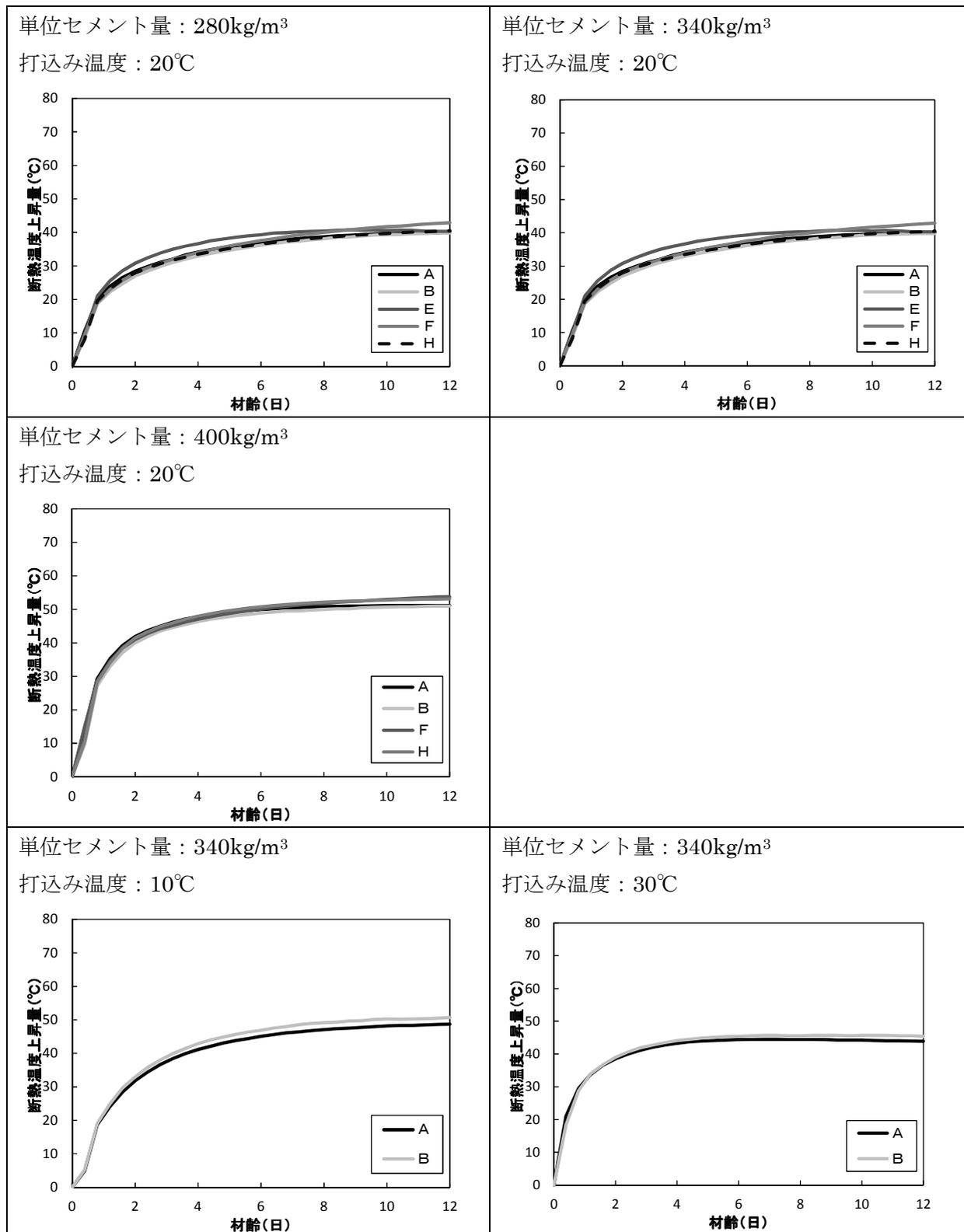
付録図-1 断熱温度上昇量の経時変化 (N、普通強度)

- ◎セメントの種類：N
- ◎強度区分：高強度
- ◎単位セメント量：450、500、550kg/m³
- ◎打込み温度：10、20、30℃



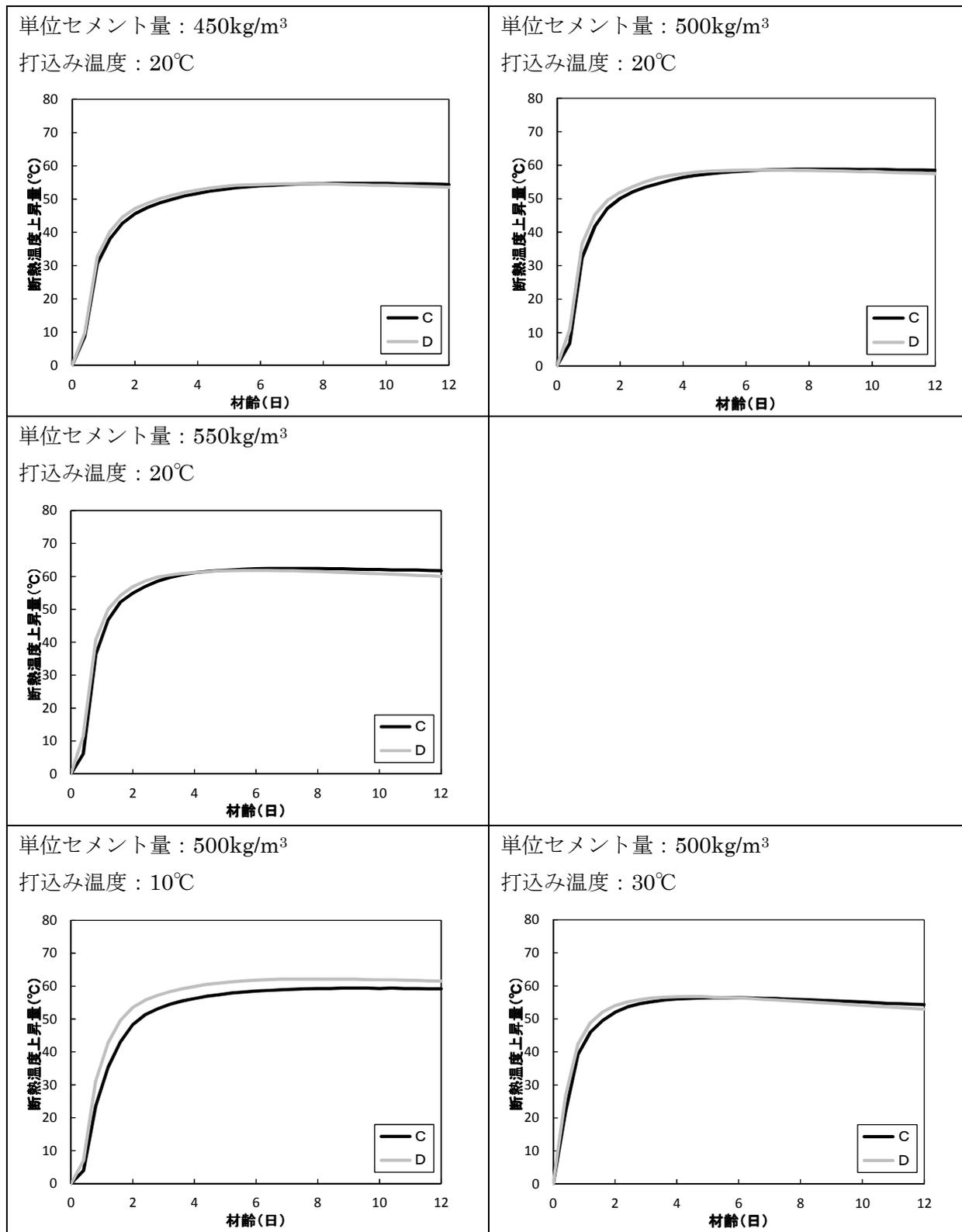
付録図-2 断熱温度上昇量の経時変化 (N、高強度)

- ◎セメントの種類：M
- ◎強度区分：普通強度
- ◎単位セメント量：280、340、400kg/m³
- ◎打込み温度：10、20、30℃



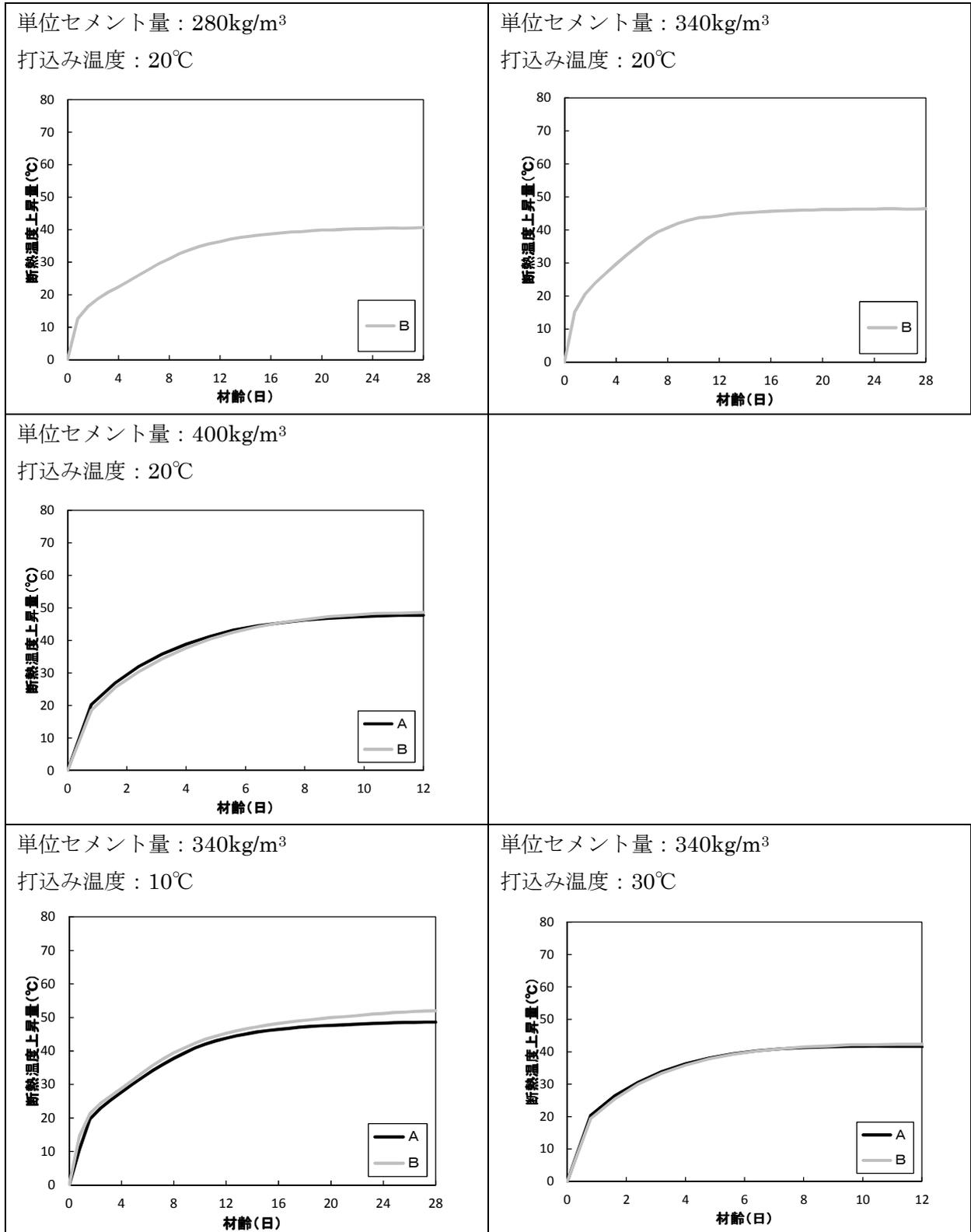
付録図-3 断熱温度上昇量の経時変化 (M、普通強度)

- ◎セメントの種類：M
- ◎強度区分：高強度
- ◎単位セメント量：450、500、550kg/m³
- ◎打込み温度：10、20、30℃



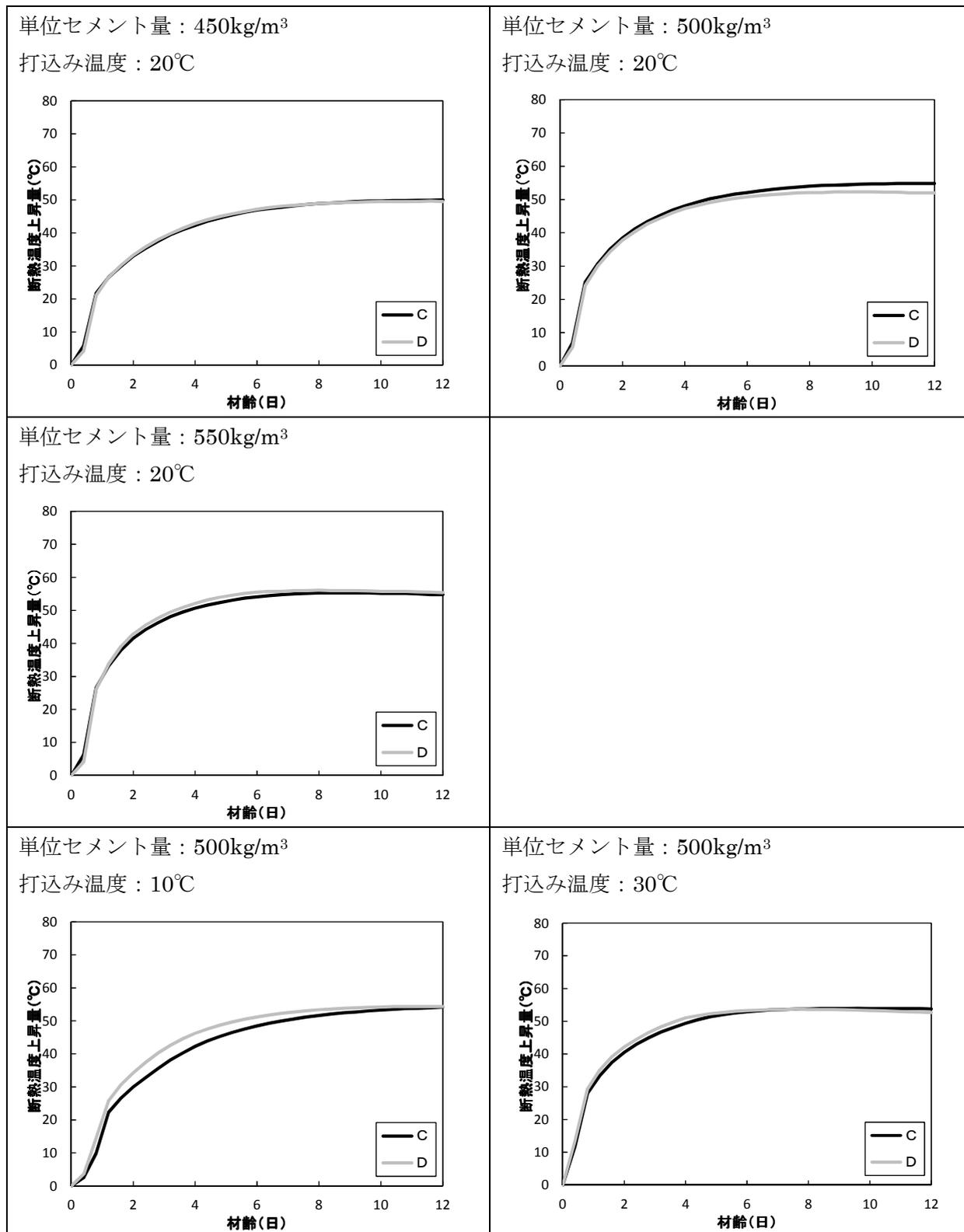
付録図-4 断熱温度上昇量の経時変化 (M、高強度)

- ◎セメントの種類：L
- ◎強度区分：普通強度
- ◎単位セメント量：280、340、400kg/m³
- ◎打込み温度：10、20、30℃



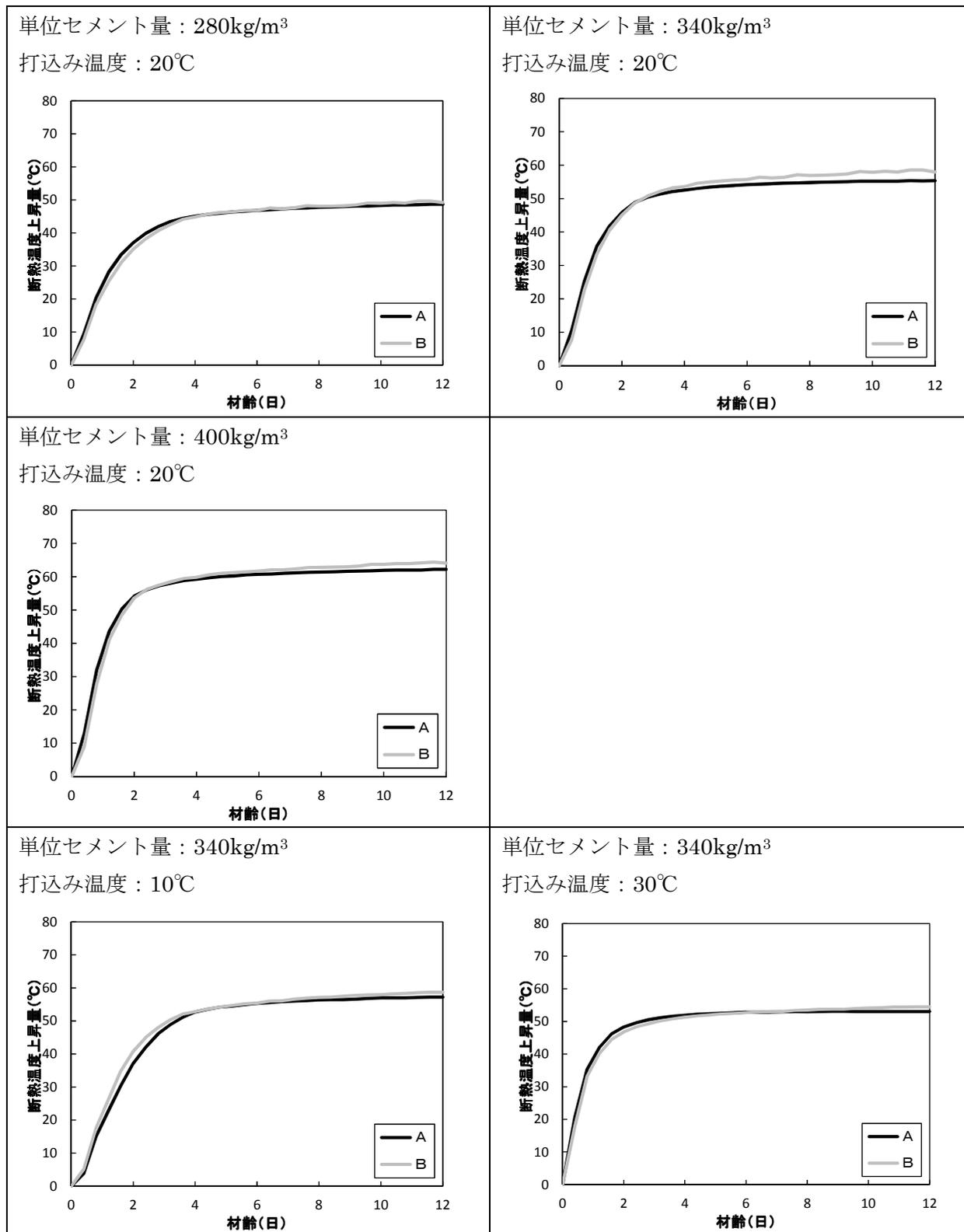
付録図-5 断熱温度上昇量の経時変化 (L、普通強度)

- ◎セメントの種類：L
- ◎強度区分：高強度
- ◎単位セメント量：450、500、550kg/m³
- ◎打込み温度：10、20、30℃



付録図-6 断熱温度上昇量の経時変化 (L、高強度)

- ◎セメントの種類：BB
- ◎強度区分：普通強度
- ◎単位セメント量：280、340、400kg/m³
- ◎打込み温度：10、20、30℃



付録図-7 断熱温度上昇量の経時変化 (BB、普通強度)

関係報告

報告書番号	発行年月	専門委員会報告名
F-1	昭和28年5月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係に関する報告(I)
F-2	昭和29年5月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水重量比と圧縮強さの関係に関する報告(II)
F-3	昭和30年5月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水重量比と圧縮強度の関係に関する報告(III)
F-4	昭和31年5月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水重量比と曲げおよび圧縮強さとの関係に関する報告
F-5	昭和32年5月	最近のポルトランドセメントを用いたコンクリートのセメント水重量比と圧縮強度および引張強さ係数との関係に関する報告
F-6	昭和33年5月	最近のポルトランドセメントを用いた舗装用コンクリートを対象とするAEコンクリートのセメント水重量比と曲げおよび圧縮強度との関係に関する報告
F-7	昭和34年5月	各種セメントを用いた舗装用AEコンクリートのセメント水重量比と強度との関係に関する報告(その2 早強および中庸熟ポルトランドセメント)
F-8	昭和35年4月	各種セメントを用いた舗装用AEコンクリートのセメント水重量比と強度との関係に関する報告(その3 高炉セメント)
F-9	昭和36年4月	各種セメントを用いた舗装用AEコンクリートのセメント水重量比と強度との関係に関する報告(その4 シリカセメントおよびフライアッシュセメント)
F-10	昭和36年4月	コンクリート強度におよぼす細骨材の影響に関する共同試験報告
F-11	昭和36年4月	コンクリート圧縮強度におよぼす試験方法の影響に関する共同試験報告
F-12	昭和37年5月	コンクリート圧縮強度におよぼす試験方法の影響に関する共同試験報告(その2)
F-13	昭和38年3月	コンクリート圧縮強度におよぼす試験方法の影響に関する共同試験報告(その3)
F-14	昭和39年6月	各種のセメントを用いたコンクリートの圧縮強度に関する共同試験報告(その1)
F-15	昭和40年8月	各種のセメントを用いたコンクリートの圧縮強度に関する共同試験報告(その2)
F-16	昭和41年9月	スランプの相違をも含めたコンクリートのセメント水比と圧縮強度との関係に関する報告
F-17	昭和42年4月	各種のセメントを用いたコンクリートの長期強度に関する共同試験報告
F-18	昭和42年9月	硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告
F-19	昭和43年5月	富配合かた練りコンクリートのセメント水比と圧縮強度および引張強度との関係に関する報告
F-20	昭和43年10月	砕石を用いた舗装用コンクリートの圧縮強度および曲げ強度に関する報告
F-21	昭和44年9月	砕石を用いた軟練りコンクリートの配合および強度に関する報告
F-22	昭和45年9月	舗装用コンクリートの曲げ強度および引張強度に関する共同試験報告
F-23	昭和46年3月	硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告(その2)
F-24	昭和47年9月	コンクリートの強度試験方法に関する共同試験報告(その1) I 圧縮強度試験におけるキャッピング材料およびキャッピング方法 II 引張強度試験における支承材の有無および支承材の材質 III 曲げ強度試験における供試体の寸法および載荷方法
F-25	昭和48年10月	レデーミクストコンクリート工場の回収水を用いたコンクリートに関する共同試験報告

報告書番号	発行年月	専門委員会報告名
F-26	昭和50年9月	レデーミクストコンクリート工場の回収水を用いたコンクリートに関する共同試験報告(II) 1.回収水使用コンクリートの性質に及ぼす温度の影響 2.減水剤を用いたコンクリートに及ぼす回収水の影響 3.スラッジの経過日数がコンクリートの性質に及ぼす影響 4.回収水とスラッジの品質調査
F-27	昭和50年9月	レデーミクストコンクリート工場の回収水を用いたコンクリートに関する共同試験報告(III) 回収水使用コンクリートの性質に及ぼすスラッジ組成の影響 (付)F-25における中性化試験の中間報告
F-28	昭和51年12月	細骨材の品質調査報告
F-29	昭和52年10月	粗骨材の品質調査報告
F-30	昭和52年9月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する促進試験報告
F-25 追加報告	昭和53年4月	レデーミクストコンクリート工場の回収水を用いたコンクリートに関する共同試験 コンクリートの中性化試験結果
F-31	昭和54年6月	粗骨材の品質がコンクリートの諸性質におよぼす影響
F-32	昭和56年3月	細骨材の品質がコンクリートの諸性質におよぼす影響
F-33	昭和56年3月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 -材齢5年中間報告(その1)-
F-34	昭和57年5月	最近のセメントによるコンクリートの初期強度に関する共同試験報告(その1) -普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントを用いた場合-
F-35	昭和57年7月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 -材齢5年中間報告(その2)-
F-36	昭和58年2月	最近のセメントによるコンクリートの初期強度に関する共同試験報告(その2) -高炉セメントB種およびフライアッシュセメントB種を用いた場合-
F-37	昭和59年3月	コア供試体の圧縮強度におよぼす各種試験要因の影響
F-38	昭和60年7月	初期の乾燥がコンクリートの諸性質におよぼす影響
F-39	昭和61年6月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 -材齢10年中間報告(その1)-
F-40	昭和62年8月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 -材齢10年中間報告(その2)-
F-41	昭和63年4月	コンクリートによる高炉スラグ微粉末の混合率に関する研究
F-42	昭和63年1月	コンクリートによるアルカリ反応性骨材の膨張特性に関する研究(その1) -40℃湿空条件における試験結果-
F-43	1989年8月	コンクリートによるアルカリ反応性骨材の膨張特性に関する研究(その2) -屋外暴露および20℃海水反復浸漬条件における試験結果-
F-44	1989年9月	コンクリートによるアルカリ・シリカ反応の防止に関する研究
F-45	1991年6月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 -材齢15年中間報告-
F-46	1992年10月	石灰石骨材コンクリートに関する研究
F-47	1994年3月	石灰石骨材のアルカリ炭酸塩岩反応に関する調査・研究

報告書番号	発行年月	専門委員会報告名
F-48	1998年4月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 材齢20年最終報告
F-49	1999年3月	海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究 ーセメントの種類, 養生条件および海洋暴露条件の影響(材齢10年試験)ー
F-50	1999年3月	コンクリートの断熱温度上昇試験方法に関する研究
F-51	2002年3月	各種セメントを用いたコンクリートの初期強度発現および断熱温度上昇
F-52	2006年3月	各種低発熱セメントを用いたコンクリートの海洋環境下での鉄筋の腐食に関する研究 材齢5年報告
F-53	2006年3月	蒸気養生条件がコンクリートの強度発現に及ぼす影響
F-54	2008年3月	寒冷地に暴露したAEコンクリートの耐凍害性 - 材齢20年報告 -
F-55	2008年3月	各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究
F-56	2010年3月	各種低発熱セメントを用いたコンクリートの海洋環境下での鉄筋の腐食に関する研究 材齢10年最終報告
F-55 (追補)	2011年3月	各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究 (コンクリートの乾燥収縮に関する実験結果)
F-57	2012年6月	各種セメントを用いた暑中コンクリートの諸性質に関する研究
F-58	2013年3月	コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に関する試験報告

コンクリート専門委員会報告 F-59

平成 26 年 3 月 31 日 発行

一般社団法人セメント協会
東京都中央区日本橋本町 1 丁目 9 番 4 号

Daiwa 日本橋本町ビル 7 階

電話 03 (5200) 5051 (代)

発行所 一般社団法人セメント協会 研究所

東京都北区豊島 4 丁目 17 番 33 号

電話 03 (3914) 2691 (代)

