

マイクロフィルム用資料

共同研究報告書

整理番号第224号

現場打ち高強度コンクリートの 設計施工法に関する共同研究報告書

－高強度コンクリートの発熱・強度発現特性に関する調査－

平成11年3月

建設省土木研究所
材料施工部コンクリート研究室
(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会

Copyright©(1999) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, or transmitted, or translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

現場打ち高強度コンクリートの 設計施工法に関する共同研究報告書

—高強度コンクリートの発熱・強度発現特性に関する調査—

建設省土木研究所材料施工部コンクリート研究室
(社) プレストレスト・コンクリート建設業協会

要 旨

現場打ち高強度コンクリートは、単位セメント量の多い配合となるため、セメントの水和発熱に起因する温度ひび割れが生じやすいと考えられる。ところが、高強度コンクリートの温度上昇特性等の基礎的な物性が十分に明らかにはなっていないので、温度ひび割れの正確な予想ができないのが現状である。

本報告書は、現場打ち高強度コンクリート部材の温度ひび割れの評価を行う上で必要となる、コンクリートの断熱温度上昇特性、および強度発現特性に関する試験結果についてとりまとめたものである。

キーワード：高強度コンクリート、断熱温度上昇、強度発現、低発熱セメント

現場打ち高強度コンクリートの設計施工法に関する共同研究委員会

コンクリート研究室

室 長	河野 広隆
主任研究員	渡辺 博志
研 究 員	田中 良樹
研 究 員	丁 海文
交流研究員	鈴木 雅博

(社) プレストレス・コンクリート建設業協会

◇徳良 賢一
◇中條 友義
◇手塚 正道
○今井 昌文
竹本 伸一
田中 政章
○中田 順憲
中村 定明
長井 健雄
野村 貞広
藤田 学
府内 洋一
○蓑田 理希

◇： ～平成10年3月

○： 平成10年4月～

はじめに

道路用コンクリート構造物に要求される基本的な性能として、耐荷性能・耐久性が挙げられる。これらの性能に対する要求のレベルは高まっており、より小さな部材断面積で大きな荷重に耐え、かつ、耐久性が高くメンテナンスの負担が小さい構造物が求められている。一方、社会資本整備に対する投資は限られたものとなっており、今後、高性能のコンクリート構造物を、より少ないコストで造ることが重要となる。

高強度コンクリートの実用化は、上記の技術的な課題に対する一つの解答であり、建設省土木研究所コンクリート研究室と（社）プレストレスト・コンクリート建設業協会が共同で、研究開発を行ってきた。

これまでの共同研究の成果は、プレキャストプレストレストコンクリート桁の設計法として、道路橋示方書コンクリート橋編に反映され、現場への適用も徐々に進展しつつある。しかし、現状では高強度コンクリートの適用範囲としては、あくまでも工場で製作される設計基準強度80MPaまでのプレキャスト製品に限定されており、現場打ち施工のコンクリート構造部材への適用は60MPa以下の設計基準強度のコンクリートまでとなっている。

安定した品質の高強度コンクリートを製造するためには、品質管理を厳密に行う必要があるとともに、単位セメント量が大きくなるので温度ひび割れ等の対策が必要となる。高強度コンクリートの現場打ち施工の構造物への利用を現実的なものにするためには、これらの技術的な課題をクリアしなければならないと考えられる。

本報告書は、現場打ち高強度コンクリート構造物の実用化に関する共同研究の中で実施された温度ひび割れに関する検討内容について述べたものである。

目 次

第1章 まえがき	
1. 1 研究の背景	1
1. 2 目的	2
1. 3 初期材齢からの強度発見や発熱特性が温度応力推定に及ぼす影響	3
第2章 高強度コンクリートの物性試験	7
2. 1 試験概要	7
2. 1. 1 使用材料	7
2. 1. 2 コンクリートの配合	8
2. 1. 3 練り混ぜ方法	9
2. 2 コンクリートの凝結試験	10
2. 2. 1 試験方法	10
2. 2. 2 試験結果	10
2. 3 強度発現特性試験	13
2. 3. 1 試験方法	13
2. 3. 2 試験結果及び考察	13
2. 3. 3 PC部材への応用について	25
2. 3. 4 まとめ	25
2. 4 断熱温度上昇試験	26
2. 4. 1 試験方法	26
2. 4. 2 試験結果および考察	26
2. 4. 3 まとめ	40
第3章 結論	41

第1章 まえがき

1.1 研究の背景

道路橋示方書によると、使用するコンクリートの設計基準強度の上限が、プレキャストの部材に対して80MPa、現場打ちコンクリート部材の場合60MPaと定められていて、現場打ちコンクリート部材の方が相対的に低い値に抑えられている。その理由はいくつか考えられるが、高強度コンクリートの温度ひび割れ対策が十分確立していないこともその一つであろう。

高強度コンクリートは単位セメント量が多いため、水和発熱や自己収縮による体積変化が大きく、変形が拘束された場合にコンクリートに発生する応力は大きくなる。コンクリートの引張強度の増加は、圧縮強度の増加に比べると緩やかであるので、結果的に高強度コンクリートの温度ひび割れの危険性は大きくなる。

高強度コンクリートは組織が密実であるので、透過性が小さく耐久性が良好であるとされている。しかし、温度応力に伴うひび割れが発生した場合、ひび割れ幅が大きくなると、ひび割れを通して塩化物イオンや酸素が浸入するため耐久性の向上につながらないおそれがある。このため、高強度コンクリートの特性を活かすためには、温度応力によってひび割れが発生するかどうか、またひび割れが発生するとした場合、ひび割れ幅がどの程度か推定する必要がある。

ところが、高強度コンクリートの温度ひび割れの推定を行うために必要となる発熱特性や強度発現特性に関する実験データの蓄積は必ずしも十分ではないため、温度ひび割れ評価の結果に対する信頼性には疑問が残る。このような背景から、ここでは、高強度コンクリート部材の温度ひび割れ評価精度の向上を図るため、発熱特性や強度発現特性などのコンクリートの基礎的な物性に関する試験を実施することとした。

1. 2 目的

コンクリートの温度ひび割れに対する評価方法では、一般に温度ひび割れ指数が用いられている。温度ひび割れ指数はコンクリートの引張強度と部材内に発生する温度応力との比で表される。したがって、温度ひび割れ指数を正確に評価するためには、部材に生じている温度応力を正確に算定するとともに、コンクリートの引張強度を適切に把握しなくてはならない。

温度応力およびコンクリートの引張応力に影響を及ぼす要因は図-1.1に示すように多岐にわたる。

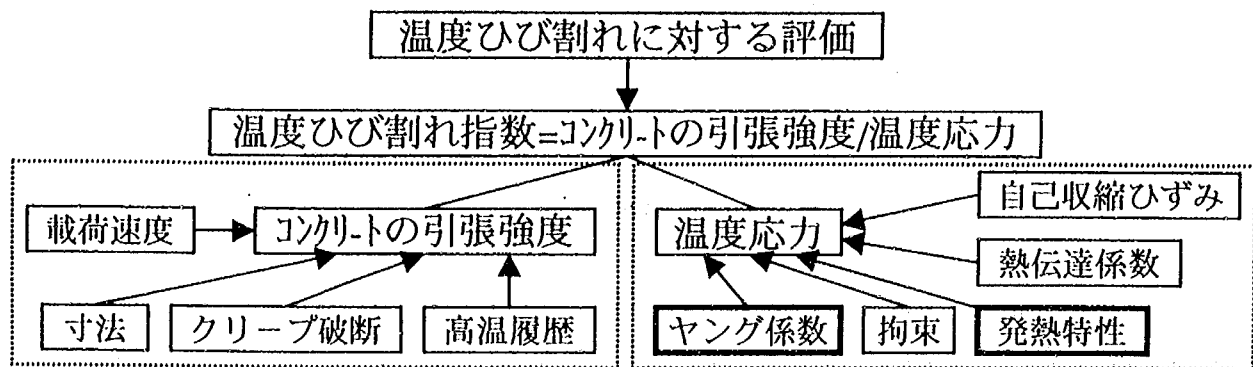


図-1. 1 温度ひび割れ発生の可能性を評価する影響要因

温度ひび割れ発生の可能性を正しく評価するには、これらの物性をすべて把握することが理想的である。これまでも、図-1.1に示すコンクリートの物性については、多くの検討がなされてきたが、高強度コンクリートへの応用を考えると、必ずしもデータの蓄積は十分とはいえない。例えば、高強度コンクリート特有の問題点として、

- 1)単位セメント量が400kg/m³以上と多くなると予想されるが、この場合のコンクリートの発熱特性が明らかでない。
- 2)コンクリートは高温履歴を受ける。高温履歴下における高強度コンクリートの強度・ヤング係数の発現特性が明らかでない。
- 3)高強度コンクリートの自己収縮ひずみは若材齢時期に発生する。若材齢時期では水和熱によるコンクリート温度の変化が大きいと考えられるが、このときの自己収縮ひずみの発現特性が明らかでない。

また、一般的な問題として、

- 4)温度応力の応力速度はJISに定められた応力速度に比べて小さいが、このような小さい応力速度での引張強度が材料試験で得られるものと同一であるとはいえない。

以上のことから、本研究では、1)と2)に示す発熱特性と強度発現特性に着目し、下記に示す材料試験を実施し検討を行った。

- ①. 断熱温度上昇試験
- ②. コンクリートの強度発現特性

なお、P C構造物は早強セメントを用いることが一般的であることから、本研究でも早強セメントを用

いた場合を主に検討している。しかし、高ピーライト系のセメントは温度応力抑制策として有効な材料であると考えられることからあわせて検討を行うこととした。

1.3 初期材齢からの強度発現や発熱特性が温度応力推定に及ぼす影響

温度応力推定の精度向上のためには、材齢初期からの強度発現や発熱特性を正確に把握する必要があると考えられる。特に高強度コンクリートは必要なワーカビリティを確保するために高性能AE減水剤を多量に使用する。そのため、水和反応が遅延し、強度発現や発熱開始点が遅れる可能性がある。しかしながら、温度応力を推定するにあたってはこの水和遅延を無視しているのが一般的である。ここではこの凝結遅延の考慮の有無が、どの程度温度応力推定に影響を及ぼすかを把握するために温度応力解析を行った。図-1.2と図-1.3にケース1とケース2の断熱温度上昇量と圧縮強度の経時変化についてそれぞれ示す。図に示すようにケース1は凝結遅延を考慮しない場合、ケース2は凝結遅延を考慮した場合のコンクリート物性である。ただし、材齢7日での断熱温度上昇量と圧縮強度はほぼ同一としている。

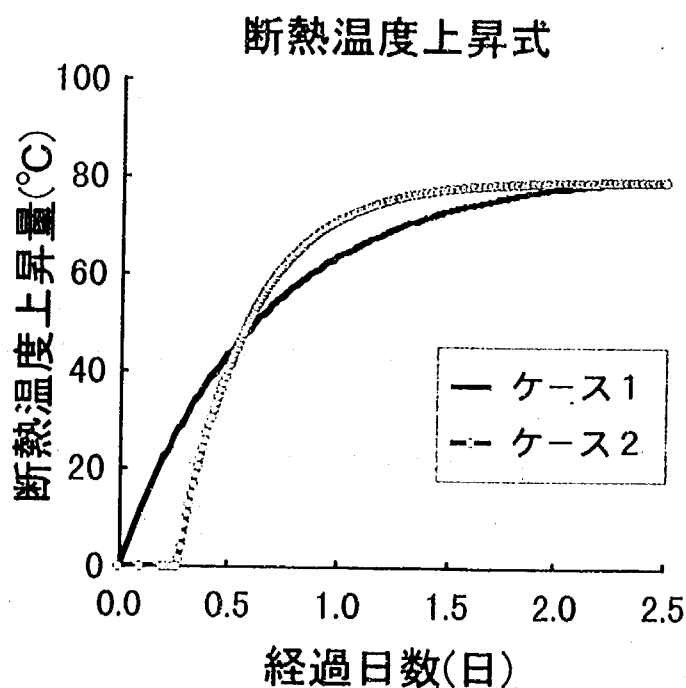
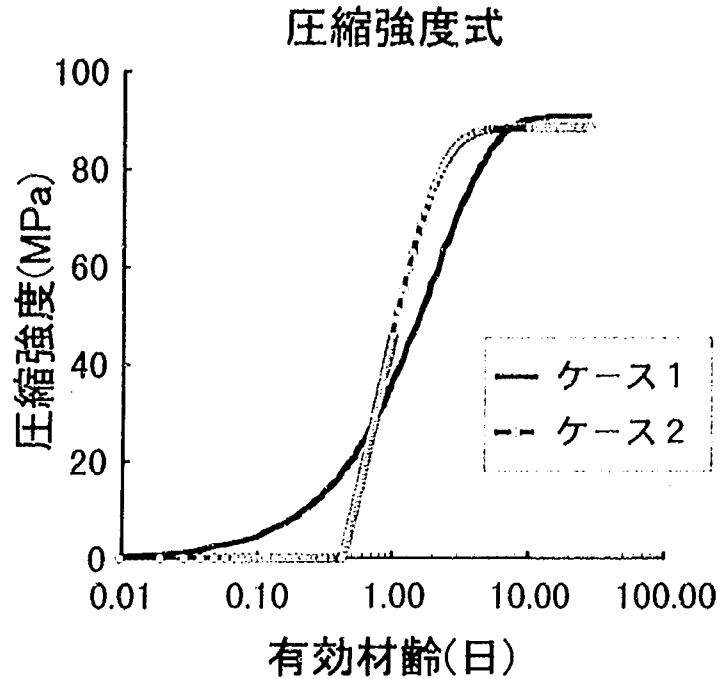


図-1.2 経過日数と断熱温度上昇量の関係



図－１．３ 経過日数と圧縮強度の関係

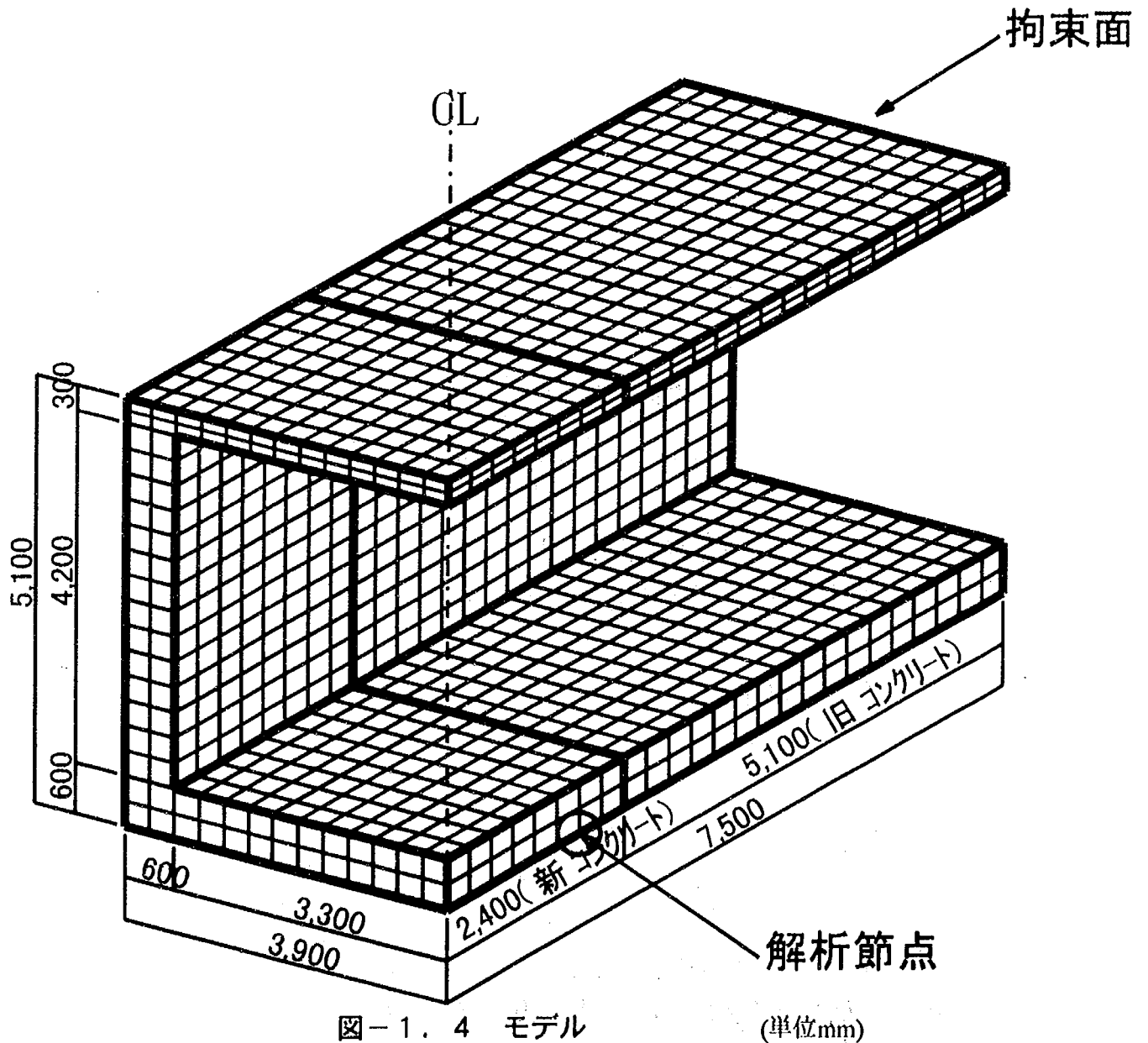
ケース1	断熱温度上昇式	$Q_{\infty} = 81.7 \times (1 - \exp(-1.512 \times \text{材齢}(\text{day})))$
	強度発現式	$f_c = 92.0 \times (1 - \exp(-0.593 \times \text{有効材齢}(\text{day})))$
		$E_c = 4.37 \times f_c^{0.51}$
ケース2	断熱温度上昇式	$Q_{\infty} = 79.5 \times (1 - \exp(-3.106 \times (\text{材齢}(\text{day}) - 0.274)))$
	強度発現式	$f_c = 88.4 \times (1 - \exp(-1.28 \times (\text{有効材齢}(\text{day}) - 0.433)))$
		$E_c = 4.37 \times f_c^{0.51}$

$$\text{有効材齢} = \Sigma \{ (CT + 10) \times \Delta t' \} / 30 \quad (\text{day})$$

ここで、 Q_{∞} :断熱温度上昇量(℃)、 f_c :圧縮強度(MPa)、 E_c :ヤング係数(GPa)、

CT :コンクリートの温度(℃)、 $\Delta t'$:時間ピッチ(day)

図-1.4に解析モデルを示す。温度応力の解析は3次元FEMにより行った。本解析モデルは旧コンクリートを柱頭部とし、新コンクリートを第1ブロックとする張出し架設PC箱桁橋を想定したものである。新コンクリートは前述の強度発現、発熱特性とし、旧コンクリートは圧縮強度90MPaで発熱しないものとした。解析節点は新コンクリートと旧コンクリートの境界から600mmで下床版下面とした。熱伝達境界は旧コンクリートと新コンクリートの上床版上面および下床版上面を空気 $\{12.8\text{kW}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})\}$ とし、新コンクリートのウェブと上床版下面と下床版下面を型枠 $\{8.1\text{kW}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})\}$ とした。なお、雰囲気温度は 20°C 一定とした。拘束条件は旧コンクリートの端面(矢印に示す面)とした。なお、解析にあたり、自己収縮の影響は無視している。



コンクリート温度の計算結果を図-1.5に、温度応力の結果を図-1.6にそれぞれ示す。本ケースの場合、ケース2の温度は最高温度時点でケース1と比較して約8℃大きい結果となり、また、温度下降勾配も大きくなった。このことより、温度応力は材齢7日で約2MPaの差が生じたと推定される。すなわち、コンクリートの初期材齢での物性(温度上昇や強度発現特性)の表現方法を変えると温度応力の計算結果、ひび割れ発生予測結果は大幅に変化する。したがって、材齢初期からのコンクリート物性の変化を正確に表現することは温度応力の推定精度向上に必要であると考えられる。

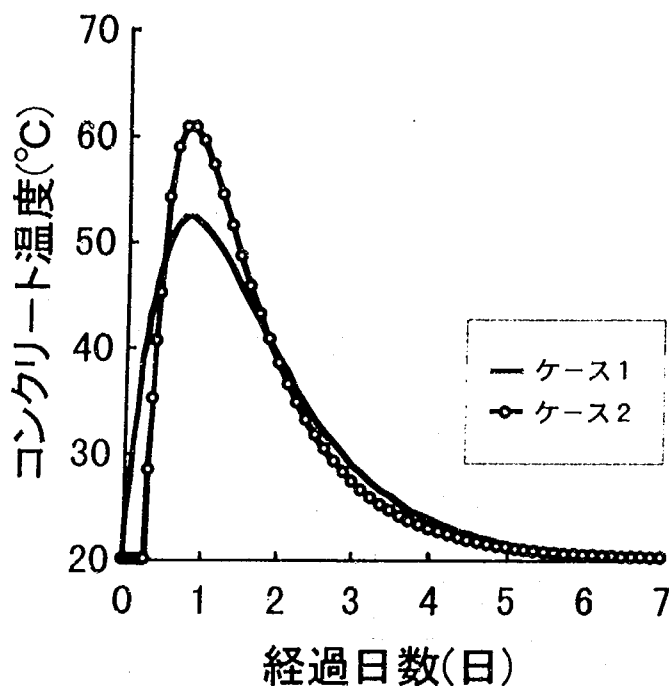


図-1.5 経過日数と温度の関係

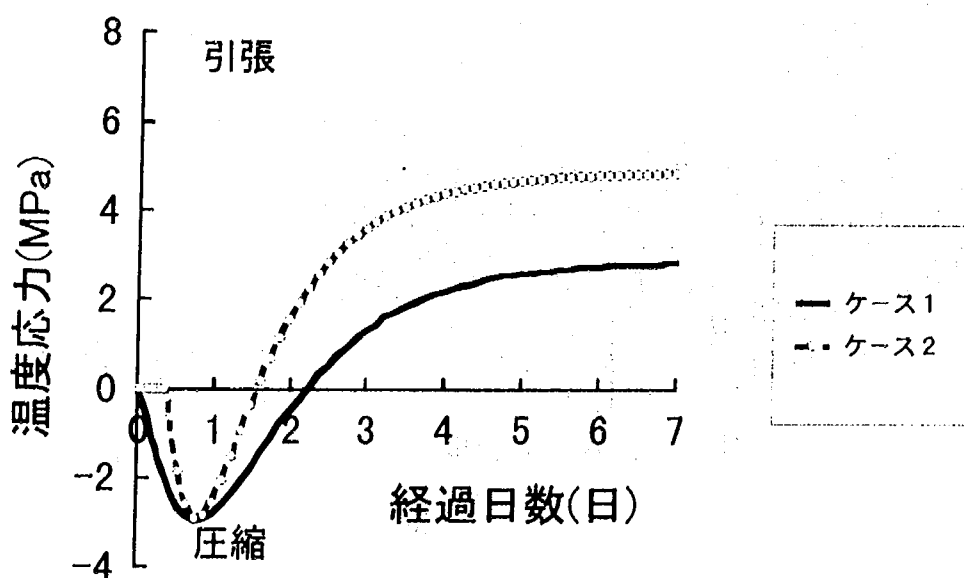


図-1.6 経過日数と温度応力の関係

第2章 高強度コンクリートの物性試験

2. 1 試験概要

温度応力を正確に把握するためには高強度コンクリートの諸物性を明確にする必要がある。ここでは、強度発現特性試験および断熱温度上昇試験結果を述べる。

2. 1. 1 使用材料

セメントは早強セメント、および中庸熱セメントと住友大阪セメント(株)の高粉末度型の高ビーライト系セメント(以下高ビーライトセメントと略す)を使用した。なお、断熱温度上昇試験では上記のセメントの他に太平洋セメント(株)の普通セメントおよび高粉末度型の高ビーライト系セメント(以下高ビーライトセメント(a)と略す)を使用した。表-2.1にセメントの品質を示す。細骨材は静岡県浜岡産の川砂を使用し、粗骨材は茨城県笠間市産の碎石2013と碎石1305を1:1で混合して使用した。細骨材の物理的性質と粒度分布を表-2.2に、粗骨材の物理的性質と粒度分布を表-2.3に示す。混和剤は高性能A E減水剤標準形 (I 種) の(株)エヌエムビー製レオビルトSP8HSを使用した。なお、混和剤の主成分はポリカルボン酸エーテル系である。

表-2. 1 セメントの品質

セメント種類	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	水量 (%)	凝結(h-min)		圧縮強さ(MPa)			
				始発	終結	1d	3d	7d	28d
早強セメント	3.13	4590	30.3	1-40	2-40	26.4	47.8	56.0	64.1
中庸熱セメント	3.21	3400	28.1	3-35	4-45	-	23.0	33.4	59.3
普通セメント	3.15	3210	27.5	2-35	3-40	-	29.2	44.3	58.2
高ビーライトセメント(a)	3.20	4000	28.2	2-10	3-30	-	23.6	35.2	61.8
高ビーライトセメント	3.20	3810	27.1	2-49	4-36	-	21.9	30.4	-

セメント種類	水和熱(J/g)		化学成分(%)					C ₂ S
	7d	28d	MgO	SO ₃	ig.loss	R ₂ O	Cl ⁻	
早強セメント	-	-	1.5	3.1	1.2	0.57	0.007	
中庸熱セメント	278	332	1.4	1.9	0.8	0.52	0.004	
普通セメント	-	-	1.2	2.0	1.9	0.66	0.005	
高ビーライトセメント(a)	260	302	0.8	2.7	0.6	0.43	0.003	46
高ビーライトセメント	265	-	1.0	2.7	0.9	0.58	0.005	42

注1) 早強セメントは平成9年12月17日セメント成績表より抜粋。但し、密度は試験結果

注2) 中庸熱セメントは平成9年11月5日セメント成績表より抜粋。

注3) 普通セメントは平成10年6月3日セメント成績表より抜粋。

注4) 高ビーライトセメント(a)は平成10年6月3日セメント成績表より抜粋。C₂Sは技術資料(H8年11月)

注5) 高ビーライトセメントは平成9年9月17日セメント成績表より抜粋。

表－２．２ 細骨材の物理的性質および粒度分布

表乾比重	絶乾比重	吸水率 (%)	ふるいを通るものの質量百分率(%)						粗粒率
			5mm	2.5mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm	
2.62	2.59	1.24	100	88	56	33	19	5	2.99

表－２．３ 粗骨材の物理的性質および粒度分布

種類	表乾比重	絶乾比重	吸水率 (%)	ふるいを通るものの質量百分率(%)						粗粒率
				25mm	20mm	15mm	10mm	5mm	2.5mm	
2013	2.67	2.65	0.70	100	97	74	4	2	1	6.96
1305	2.66	2.63	0.98	100	100	100	76	18	2	6.04
2005	2.66	2.64	0.84	100	98	87	40	10	2	6.50

注) 種類2005は種類2013と種類1305を1 : 1で混合したもの

2. 1. 2 コンクリートの配合表

W/Cは事前に行った試験練りにおける材齢28日の圧縮強度を参考に決定した。また、表に示すスランプおよび空気量になるように高性能AE減水剤量を決定した。表－2.4にコンクリートの配合表を示す。表に示す供試体名は目標コンクリート圧縮強度(以下配合強度)－セメント種類－練り上がり温度で構成されている。

表-2. 4 コンクリートの配合表

配合条件名	セメント種類	SL (cm)	W/C (%)	空気 量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					練り 上がり 温度 (°C)
						W	C	S	G	混和剤 C×(%)	
40-H-20	早強セメント	18±2.5	60.0	2.0	48.8	150	250	959	1022	2.5	20
70-H-20			40.0	2.0	41.8	150	375	756	1068	1.8	
85-H-20			30.0	2.0	39.8	150	500	699	1073	2.0	
100-H-20			25.0	2.0	38.8	150	600	649	1039	2.6	
40-L-20	高ビークライトセメント	18±2.5	60.0	2.0	48.8	150	250	961	1024	3.0	
70-L-20			40.0	2.0	41.8	150	375	781	1104	2.2	
85-L-20			30.0	2.0	39.8	150	500	699	1073	2.4	
100-L-20			25.0	2.0	38.8	150	600	653	1046	2.6	
70-L1-20	高ビークライトセメント(a)	23±1.5	40.0	2.0	48.3	160	400	880	956	1.5	
85-L1-20			30.0	2.0	45.0	160	533	770	956	1.3	
100-L1-20			25.0	2.0	42.1	160	640	683	956	1.8	
70-N-20	普通セメント	23±1.5	40.0	2.0	48.2	160	400	874	956	2.0	
85-N-20			30.0	2.0	44.8	160	533	763	956	1.8	
100-N-20			25.0	2.0	41.8	160	640	675	956	2.6	
100-M-20	中庸熱セメント	18±2.5	25.0	2.0	38.8	150	600	653	1046	2.2	
100-H-30	早強セメント	18±2.5	25.0	2.0	38.8	150	600	649	1039	3.0	30
100-L-30	高ビークライトセメント	18±2.5	25.0	2.0	38.8	150	600	653	1046	2.8	
100-H-10	早強セメント	18±2.5	25.0	2.0	38.8	150	600	649	1039	2.6	10
100-L-10	高ビークライトセメント	18±2.5	25.0	2.0	38.8	150	600	653	1046	2.4	

注) 配合条件の名前は

コンクリートの配合—使用セメントの種類—練り上がり温度の順に示したものである。

2. 1. 3 練混ぜ方法

練混ぜは50リットルパン型強制練りミキサを用いて行い、1バッチの練混ぜ量を30リットルとした。練混ぜ方法は、粗骨材、セメント、細骨材の順に投入したあと空練り30秒行い、次に混和剤入りの水を投入し90秒間練混ぜを行った。練混ぜから285秒練置きしたのち、15秒再攪拌して排出した。練置きした理由は、練混ぜ直後と練置き後のフレッシュコンクリートの性状を目視観察した結果、練置き後の性状の方が良好であることが認められたからである。

2. 2 コンクリートの凝結試験

高強度コンクリートは所定のワーカビリティを確保するために高性能A E減水剤を多量に使用する。このことにより、極初期材齢でのコンクリート性状が従来の圧縮強度40MPa程度のコンクリートとは異なる可能性がある。そこで、強度発現特性試験、断熱温度上昇試験に先立ち、混和剤による極初期材齢のコンクリート状態を把握するために、コンクリートの凝結試験を実施した。

2. 2. 1 試験方法

JIS A 6204 付属書 1 に準拠して行った。試験材料は採取したコンクリートを、棒状パイプレーターを併用して5mmふるいを通させたモルタルである。また、貫入部分の温度測定を同時に実施した。貫入抵抗および温度測定の開始時間は練混ぜにおいて水を投入した時間とした。

2. 2. 2 試験結果

表-2.5に凝結試験結果を、図-2.1に経過時間と貫入抵抗およびコンクリート温度の関係をそれぞれ示す。図より貫入抵抗3.5MPaの始発時間、貫入抵抗28MPaの終結時間を求めた。図に示すように温度上昇開始時間はセメントの種類によらず練り上がり温度20℃および30℃の高強度コンクリートでは概ね始発時間であり、配合強度強度40MPaおよび70MPaの高ビークライトセメントを用いたコンクリートでは始発時間より若干早い傾向にある。

表-2. 5 凝結試験結果

供試体名	セメント種類	材齢(DAY)		供試体名	セメント種類	材齢(DAY)	
		始発時間	終結時間			始発時間	終結時間
40-H-20	早強セメント	0.410	0.490	100-N-20	普通セメント	0.316	0.438
70-H-20		0.368	0.438	85-N-20		0.375	0.490
100-H-20		0.274	0.417	70-N-20		0.410	0.514
40-L-20	高ビークライトセメント	0.646	0.757	100-M-20	中庸熱セメント	0.667	0.847
70-L-20		0.597	0.691	100-H-30	早強セメント	0.135	0.406
100-L-20		0.465	0.608	100-L-30	高ビークライトセメント	0.583	0.712
100-L1-20	高ビークライトセメント(a)	0.351	0.490	100-H-10	早強セメント	0.326	0.535
85-L1-20		0.319	0.406	100-L-10	高ビークライトセメント	0.524	0.788
70-L1-20		0.333	0.441				

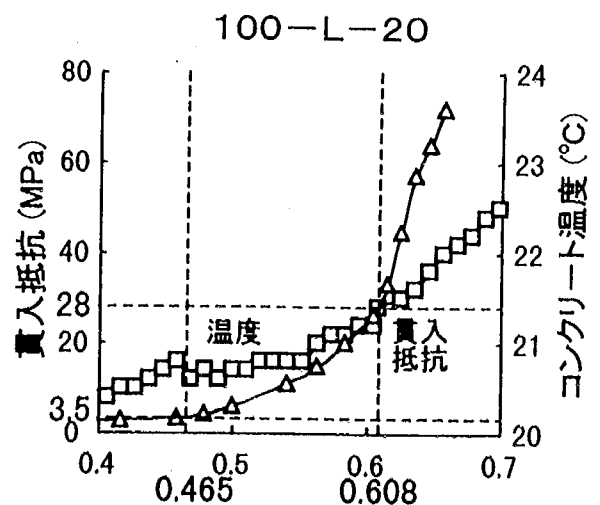
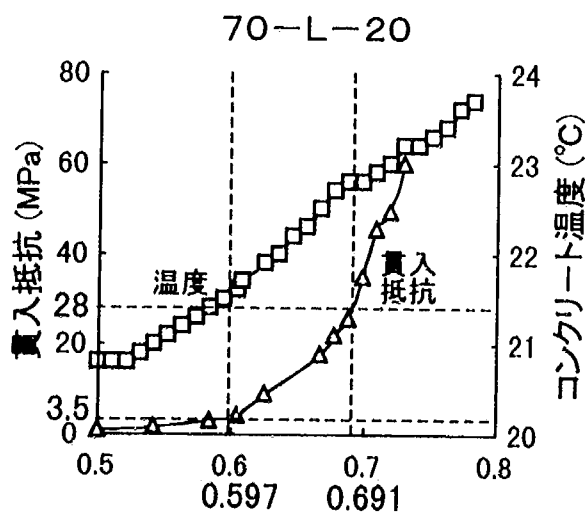
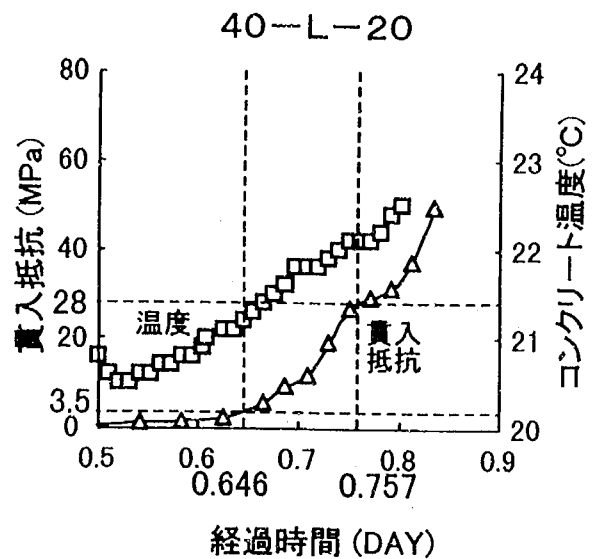
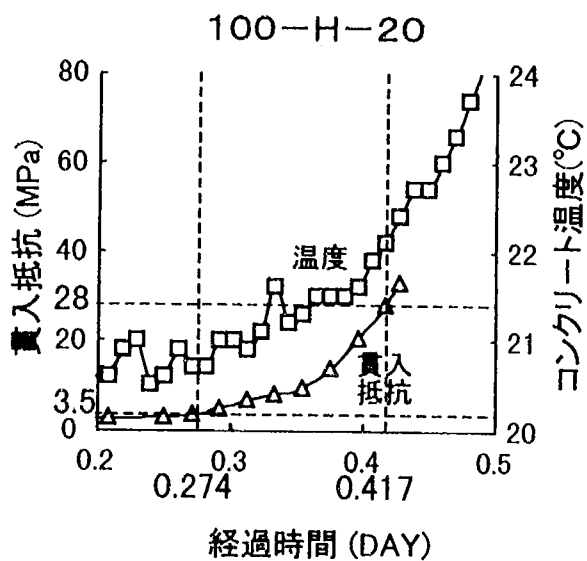
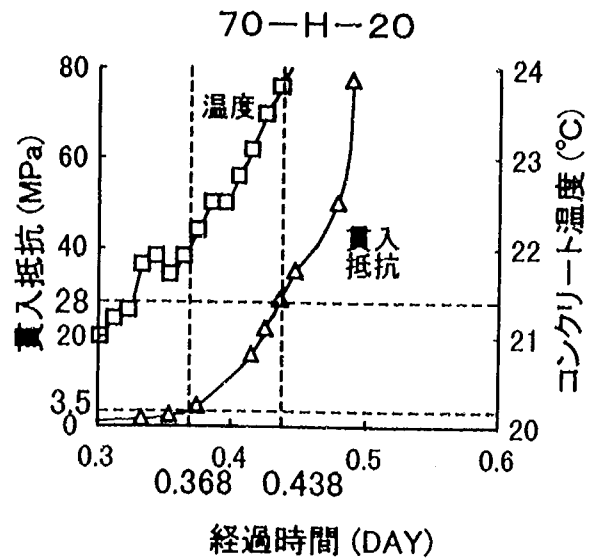
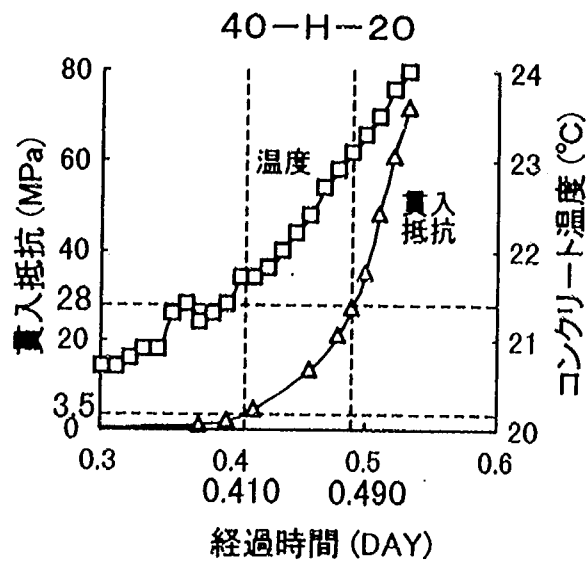


図-2. 1 経過時間と貫入抵抗およびコンクリート温度の関係

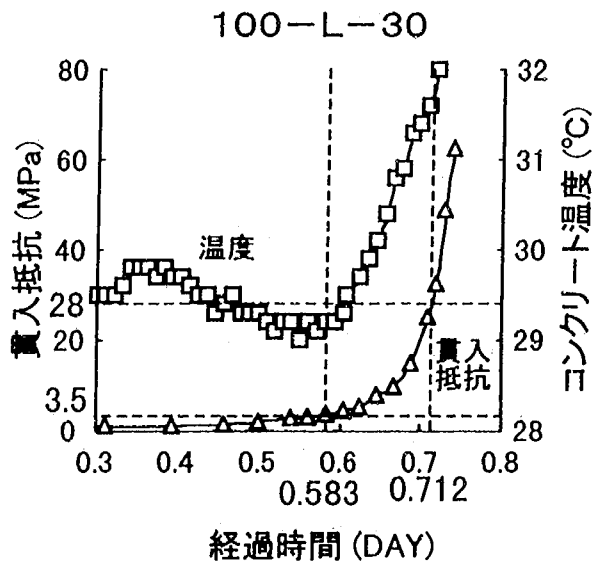
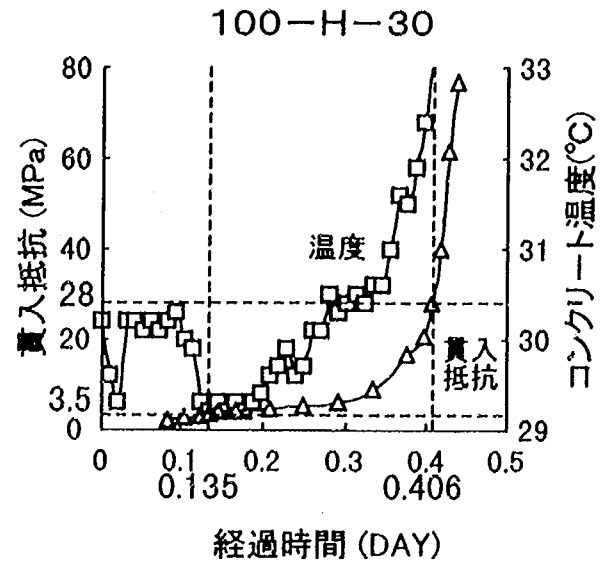
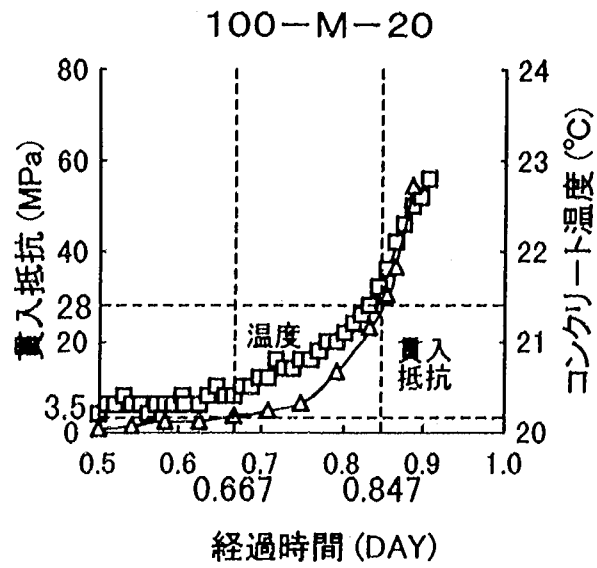


図-2. 2 経過時間と貫入抵抗およびコンクリート温度の関係

2.3 強度発現特性試験

ここでは、コンクリートの若材齢時からの強度・ヤング係数の変化に及ぼす、①養生温度、②セメントの種類、③W/Cの影響を把握するために実施した強度発現特性試験の結果について報告する。

2.3.1 試験方法

圧縮強度は10φ×20cmの供試体を3本を使用し、JIS A 1108に準じて試験を行った。割裂引張強度試験は15φ×20cmの供試体を3本を使用し、JIS A 1113に準じて試験を行った。試験を実施した材齢は1、3、7、28日である。圧縮強度は材齢1日以前についても実施した。供試体は材齢2日で脱枠し、所定の材齢まで水中養生(水温は打ち込み温度と同一)を行った。

2.3.2 試験結果および考察

(1) 圧縮強度と材齢の関係

図-2.3に配合条件40-H-20、70-H-20、100-H-20の場合の材齢の進行にともなう圧縮強度の変化を示す。また、図中の破線は100-H-20の場合の凝結終結時間である。図-2.3の100-H-20の場合については、材齢1日までの強度発現は材齢28日を100%としたとき67%となり、急激な強度発現が認められた。図-2.4に養生温度20℃における材齢と高ビーライトセメントを用いたコンクリートの圧縮強度の関係を示す。また、図中の破線は100-L-20の場合の凝結終結時間である。高ビーライトセメントの場合においても凝結終結時間以後に強度発現が認められたが、早強セメントの場合と比べ、凝結終結時間から材齢1日までの強度発現は小さく、材齢1日から材齢3日までの強度発現が大きい特徴が認められた。その強度発現は凝結終結時間から材齢3日までの強度発現は材齢28日を100%としたとき62%であった。

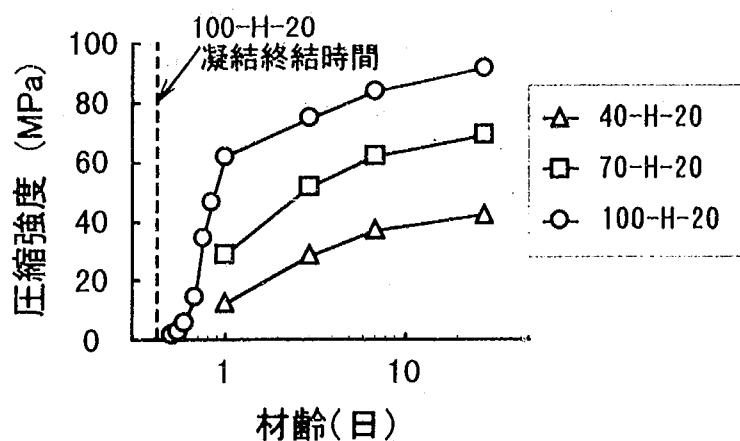


図-2.3 材齢と圧縮強度の関係(早強セメントを使用した場合)

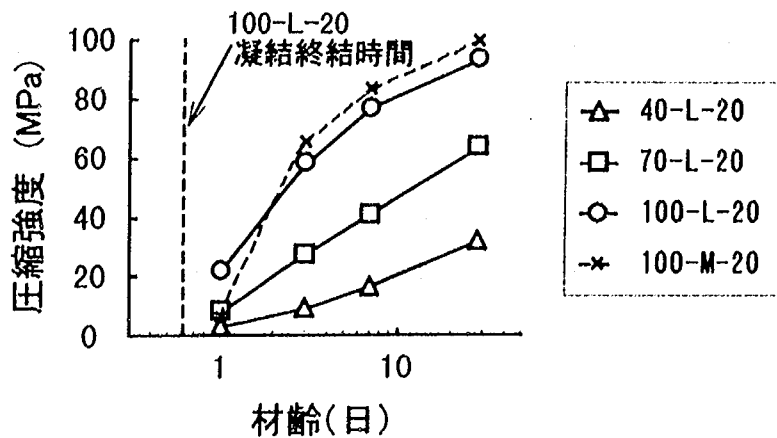


図-2. 4 材齢と圧縮強度の関係(高ビーライトセメントおよび中庸熱セメントを使用した場合)

(2)養生温度の異なるコンクリートの強度発現評価

ここでは、養生温度の異なるコンクリートの強度発現評価の検討を行う。

1)積算温度を用いた有効材齢と圧縮強度の関係

図-2.5と図-2.6に早強セメントおよび高ビーライトセメントを用いたコンクリートの養生温度の差による有効材齢と圧縮強度の関係をそれぞれ示す。ここで用いた有効材齢は式(2.1)のように定義した。

$$\text{有効材齢} = \sum \{(C_T + 10) \times \Delta t'\} / 30 \quad \text{--- 式(2.1)}$$

ここで C_T :コンクリート温度($^{\circ}\text{C}$)、 $\Delta t'$:温度が C_T である期間の日数(日)

式の中の温度については、あらかじめコンクリート中心に埋め込んだ熱電対により測定されたものを用いた。圧縮強度と材齢の関係で述べたように、強度発現は凝結終結時間以後に発生していることから、ここでは図中の有効材齢原点は各配合の凝結終結時間とし、積算温度は凝結終結時間以後の温度変化を用いて算出した。図より、初期材齢で多少のばらつきがあるものの、養生温度 10°C 、 20°C 、 30°C と変化させても有効材齢に換算することにより、概ね有効材齢と圧縮強度の関係は一つの推定曲線で表せる結果となった。

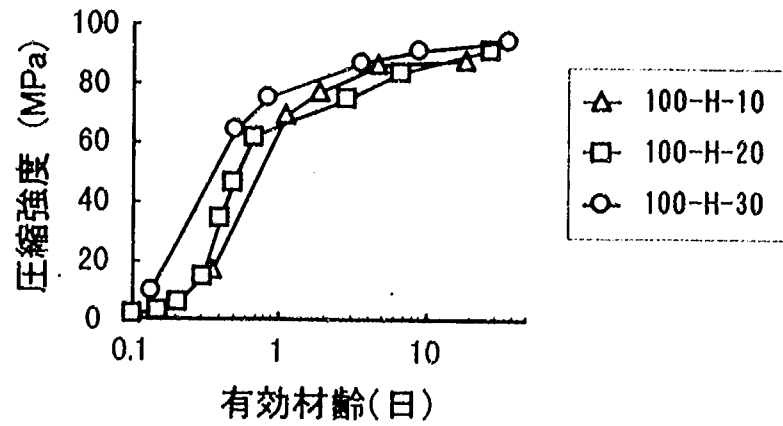


図-2. 5 式(2.1)を用いた有効材齢と圧縮強度の関係(早強セメントの場合)

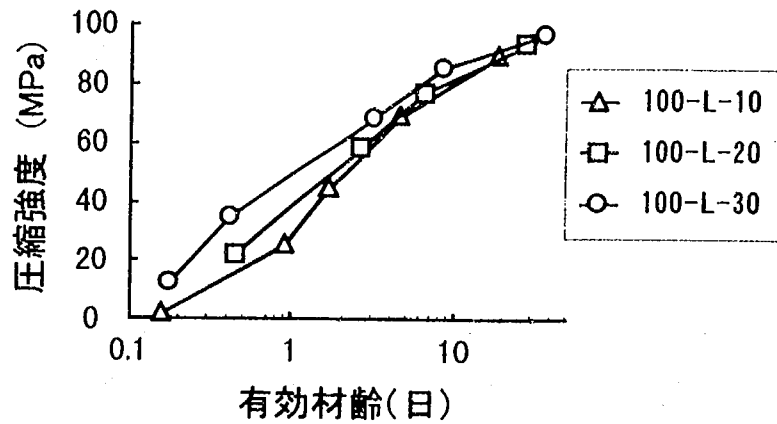


図-2. 6 式(2.1)を用いた有効材齢と圧縮強度の関係 (高ビーライトセメントの場合)

2) Arrhenius式を用いた有効材齢の検討

Arrhenius式を用いた有効材齢は、反応工学を用いて温度依存に伴う硬化速度を評価したものである。この式は異なる温度条件による影響やセメント種類による影響について強度発現を評価できる。この考えに基づき、MC90では有効材齢の式として、式(2.2)を提案している。

$$\text{有効材齢} = \sum \Delta t' \exp\left[13.65 - \frac{4000}{273 + C_T}\right] \quad \text{--- 式(2.2)}$$

ここで C_T :コンクリート温度(°C)、 $\Delta t'$:温度が C_T である期間の日数(日)

水和発熱速度と温度活性の関係であるArrhenius式を強度発現式に置き換えると式(2.3)となる。

$$d\sigma/dt = \{d\sigma/dt_{LIM}(\sigma)\} \cdot \exp[-E(\sigma)/\{R \cdot (C_T + 273)\}] \quad \text{--- 式(2.3)}$$

ここで、 σ :応力、 E :活性化エネルギー、 R :気体定数(一定)、 $d\sigma/dt_{LIM}(\sigma)$:温度 C_T が無限大のときの強度発現速度

式(2.2)は式(2.3)で $E(\sigma)/R=4000$ とし、 $d\sigma/dt_{LIM}(\sigma)$ 一定とする仮定に基づき、温度20°Cの強度に換算した式になっている。このことは、式(2.3)において強度発現速度を一定にしていることを意味する。しかしながら、前述の圧縮強度と材齢の関係に示すようにセメントの種類により材齢進行に伴う強度発現速度は異なる。ここでは、式(2.3)を用いて早強セメントと高ビーライト系セメントを用いたコンクリートの強度と $E(\sigma)/R$ の関係を比較した。

式(2.3)を両辺lnで置き換えると式(2.4)となる。

$$\ln(d\sigma/dt) = \ln\{d\sigma/dt_{LIM}(\sigma)\} - E(\sigma)/(R \cdot T) \quad \text{--- 式(2.4)}$$

$$T = C_T + 273$$

σ を固定したとき $\ln(d\sigma/dt)$ は $\ln\{d\sigma/dt_{LIM}(\sigma)\}$ を切片とし、 $-E(\sigma)/R$ を傾きとする $1/T$ の一次関数となる。この性質を使い、 $-E(\sigma)/R$ と σ の関係を導くこととする。具体的には下記とする。

- ①各配合の実験から得られた圧縮強度と材齢の関係を近似回帰式にする--- $\sigma(t, T)$
- ② $d\sigma/dt$ の関数を算出--- $F(\sigma, T)$
- ③ σ を固定(例えば10MPa)としたときの $\ln F(\sigma, T)$ を算出。本試験では養生温度10, 20, 30°Cとしているので $\ln F(\sigma, 283)$, $F(\sigma, 293)$, $F(\sigma, 303)$ を算出する。
- ④ $\ln F(\sigma, T)$ と $1/T$ の関係から傾き $k(\sigma)$ をもとめる。この傾きが $-E(\sigma)/R$ となる
- ⑤ σ を変えて、③と④を行い、 σ と $-E(\sigma)/R$ の関係を求める。

ここで、圧縮強度と材齢の近似式は、 $\sigma(t) = \sigma_n(t-a)/\{b+c(t-a)\}$ とした。ここで、 σ_n は早強セメントを用いたコンクリートにおいては材齢7日で最大荷重にほぼ到達することから材齢7日の圧縮強度(実験値)とし、高ビーライト系セメントを用いたコンクリートは材齢28日の圧縮強度(実験値)を用いた。 a, b, c は係数である。表-2.6に圧縮強度推定式の回帰結果を示す。

表-2.6 圧縮強度推定式の回帰結果

供試体名	σ_n	a	b	c
100-H-10	86.2	0.92	0.33	0.95
100-H-20	83.5	0.52	0.34	0.93
100-H-30	91.0	0.49	0.08	1.01
100-L-10	89.8	0.97	2.40	0.91
100-L-20	93.8	0.48	1.73	0.94
100-L-30	96.7	0.66	0.82	0.99

注)早強セメント用いたコンクリート σ_n 高ビーライト系セメントを用いたコンクリ

ート σ_{28}

次に早強セメントを用いた場合と高ビーライトセメントを用いた場合について $\ln(d\sigma/dt)$ と $1/T$ の関係を
図-2.7と図-2.8にそれぞれ示す。なお、 $d\sigma/dt$ は式(2.5)となる。

$$d\sigma/dt = \sigma_n b / \{b + c(t-a)\}^2 \quad \text{---式(2.5)}$$

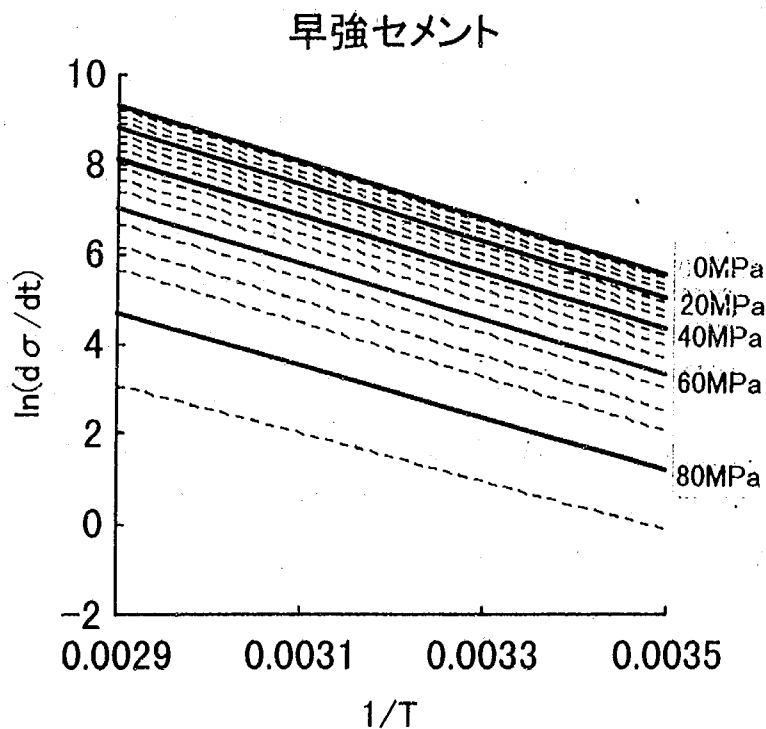


図-2.7 $\ln(d\sigma/dt)$ と $1/T$ の関係(早強セメント)

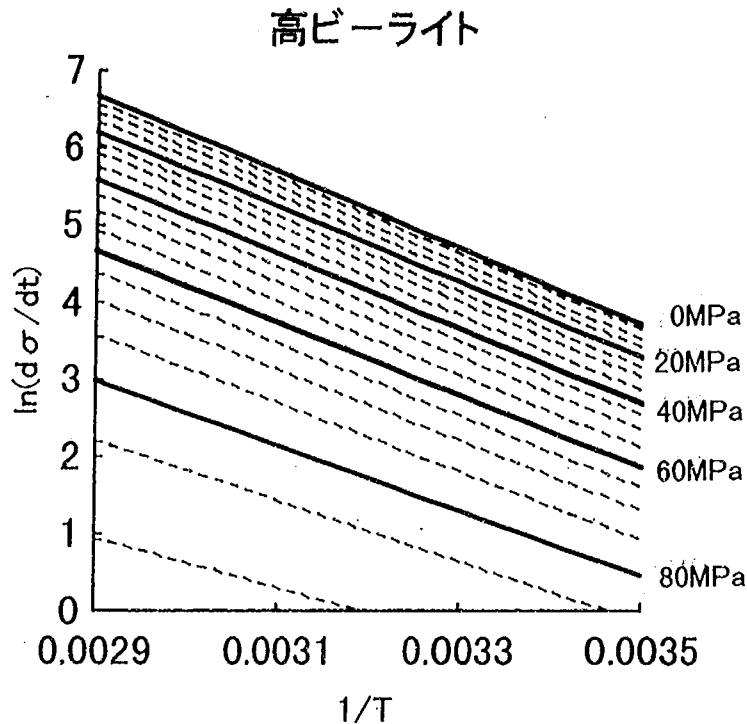


図-2. 8 $\ln(d\sigma/dt)$ と $1/T$ の関係(高ビーライト)

図-2.9に圧縮強度と $-E(\sigma)/R$ の関係を示し、図-2.10に圧縮強度と $\ln\{d\sigma/dt_{Lim}(\sigma)\}$ の関係を示す。また、それぞれの図に普通セメントを用いた配合強度40MPaのコンクリートの試験結果⁹⁾を示す。図-2.10から、早強セメントを用いたコンクリートの $-E(\sigma)/R$ は高ビーライトセメントを用いたコンクリートと比較して大きい結果を示した。 $-E(\sigma)/R$ が $1/T$ の傾きであることから、早強セメントを用いたコンクリートは高ビーライトセメントを用いたコンクリートに比較して温度差による影響が大きいと考えられる。図-2.9と図-2.10から配合強度の差による $-E(\sigma)/R$ を比較すると、配合強度100MPaのコンクリートではほとんど80MPaとなる付近まで初期の値をほぼ持続しているのに対して、配合強度40MPaのコンクリートでは低い圧縮強度からの低減が認められた。また、この傾向は $\ln\{d\sigma/dt_{Lim}(\sigma)\}$ についても同様である。以上より、 $-E(\sigma)/R$ および $\ln\{d\sigma/dt_{Lim}(\sigma)\}$ と圧縮強度の関係は配合強度、セメント種類により大きく異なることから、 $-E(\sigma)/R$ を一定としたArrhenius式を用いる場合には、どの時点での強度発現を必要とするかを明確にし、その適用範囲での補正係数を決定することも必要であると考えられる。

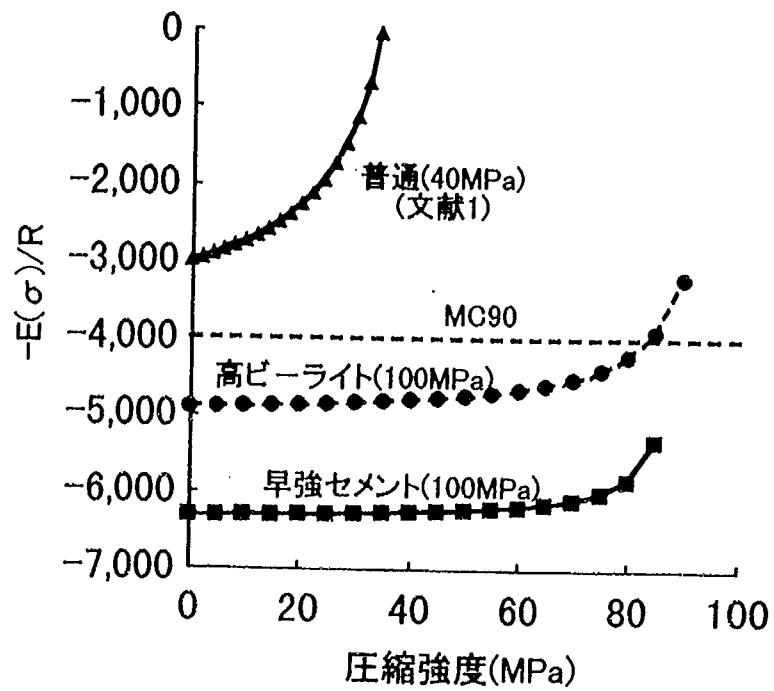


図-2.9 圧縮強度と $E(\sigma)/R$ の関係

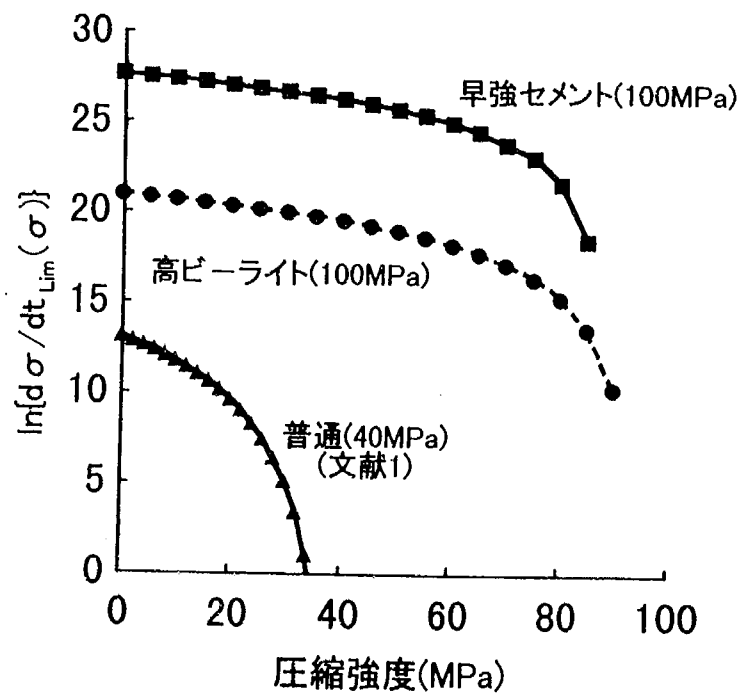


図-2.10 圧縮強度と $\ln\{d\sigma/dt_{Lim}(\sigma)\}$ の関係

3) 各種セメントの強度発現の比較

図-2.11に早強セメントと高ビーライトセメントと中庸熱セメントを用いたコンクリートの強度発現特性を示す。同図より、材齢1日までの強度発現はセメントの種類によって大きく異なり、早強セメントでは非常に大きくなっている。また、高ビーライトセメントの方が、中庸熱セメントよりも強度発現は早いことがわかる。材齢7日以降の強度発現性状は次の通りである。圧縮強度は材齢7日で各セメントともほぼ等しくなり、材齢7日から材齢28日までの圧縮強度の伸び量は早強セメントが一番小さい結果となった。

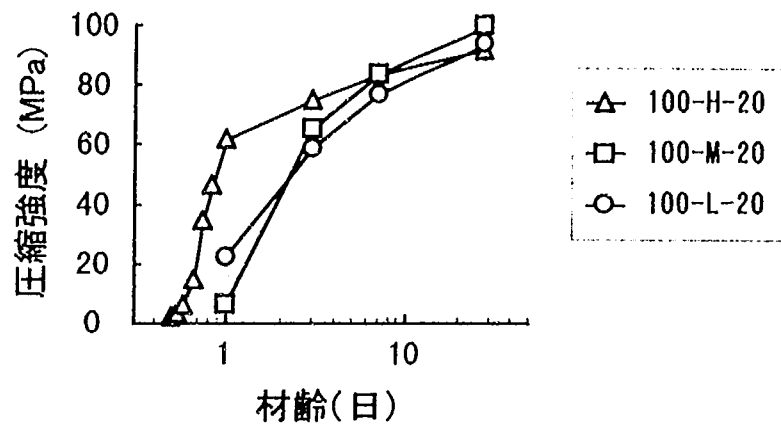


図-2.11 各種セメントの材齢と圧縮強度の関係

(3) 割裂引張強度と材齢の関係

本研究は温度ひび割れに対する評価精度の向上を目的としている。従って、コンクリートの引張強度発現を知る必要がある。図-2.12に養生温度20℃における材齢と早強セメントを用いたコンクリートの割裂引張強度の関係をそれぞれ示す。割裂引張強度も圧縮強度と同様に100-H-20の配合条件では材齢1日までの強度発現が大きい。ただし、それ以後の強度発現は小さくなる。材齢28日強度を100%としたときの材齢1日強度は割裂引張強度の場合約85%(圧縮強度の場合約67%)となっている。20℃の養生温度であっても85%の強度が1日で到達している。これは早強セメントを用いた高強度コンクリートの特徴であり、これ以外の場合では、配合強度40MPaでの材齢1日までの強度発現は約55%であり、配合強度70MPaでの材齢1日までの強度発現は約65%を示して、配合強度100MPaの場合ほど強度発現速度は大きくない。このように高強度コンクリートの引張強度特性は通常の強度(40MPa程度)のコンクリートとは異なっていて、初期材齢(コンクリート温度が20℃の場合で材齢1日まで)でほとんど28日強度に達している。このことから、コンクリートの発熱により20℃よりも高い高温履歴を受ける場合、中・長期にわたる引張強度の増加をほとんど考慮する必要がないことを示しているものと考えられる。

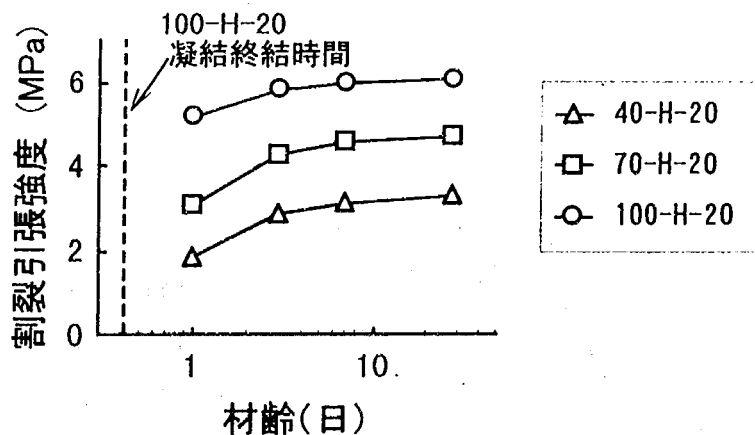


図-2. 12 材齢と割裂引張の関係(早強セメントの場合)

図-2.13に高ピーライトセメントを用いたコンクリートの場合の材齢と割裂引張強度の関係を示す。図に示すように、材齢1日までの強度発現は配合強度にかかわらず小さいが、100-L-20の材齢1日から材齢3日までの割裂引張強度の増加量は70-L-20と40-L-20と比較してかなり大きいことが認められた。

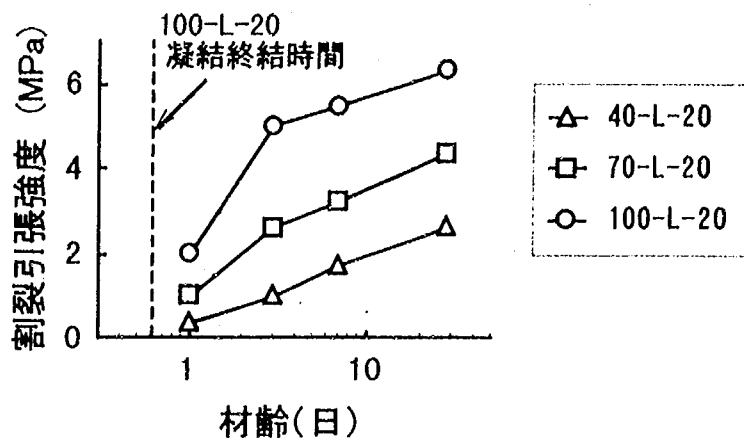


図-2. 1 3 材齢と割裂引張強度の関係 (高ピーライトセメントの場合)

早強セメントおよび高ピーライトセメントを用いたコンクリートの有効材齢と割裂引張強度の関係を図-2.14および図-2.15にそれぞれ示す。図-2.14と図-2.15より、圧縮強度と同様に割裂引張強度の発現特性は有効材齢で表現できると考えられる。有効材齢は式(2.1)を用いて算出した。

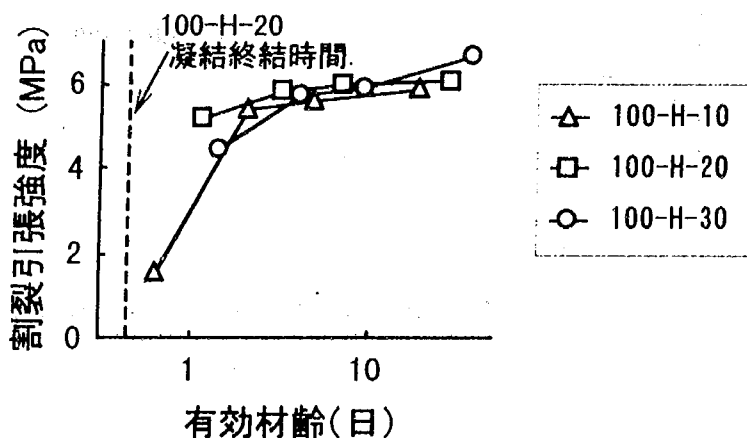


図-2. 1 4 材齢と割裂引張強度の関係 (早強セメントの場合)

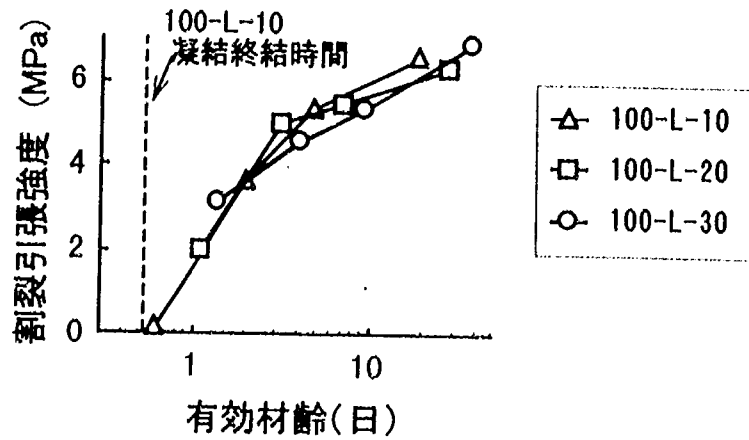


図-2. 15 有効材齢と割裂引張強度の関係(高ビーライトセメントの場合)

図-2.16に配合強度100MPaの場合の各種セメントを用いたコンクリートの割裂引張強度の発現特性を示す。早強セメントを用いたコンクリートの材齢1日での強度発現はかなり大きい。中庸熱セメントと高ビーライトセメントを用いたコンクリートの割裂引張強度は材齢7日で早強セメントを用いたコンクリートの割裂引張強度とほぼ等しくなる。中庸熱セメントと高ビーライトセメントを用いたコンクリートの材齢7日以降の強度増加量は早強セメントを用いたコンクリートと比較して大きい。

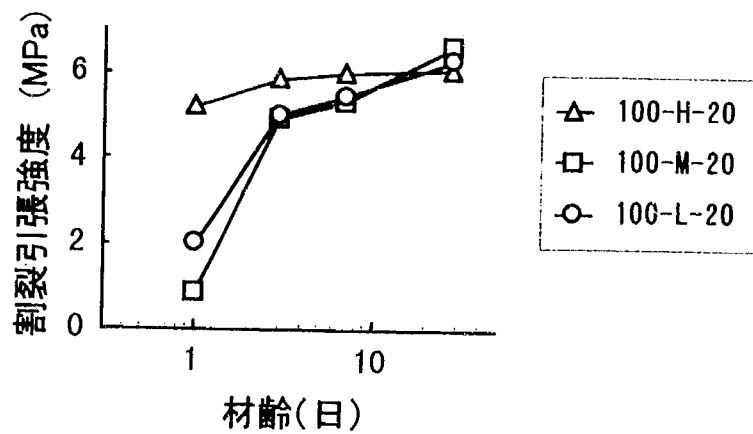


図-2. 16 各種セメントの割裂引張強度と材齢の関係

(4) 圧縮強度とコンクリートのヤング係数の関係

図-2.17に早強セメントと高ビーライトセメントを用いたコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係をそれぞれ示す。また、同図に早強セメントと高ビーライトセメントの全データを用いた近似曲線を示す。図より、コンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係はセメントの種類および配合強度によらずほぼ一定の曲線で示せる。したがって、コンクリートのヤング係数は用いた骨材が同じであれば圧縮強度の関数となる。

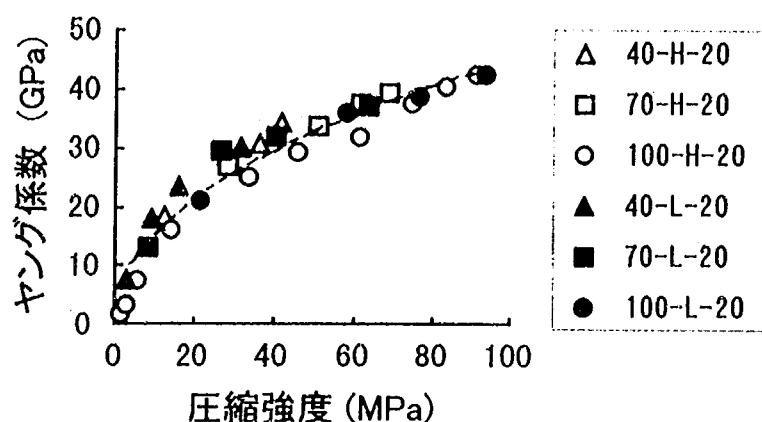


図-2.17 圧縮強度とヤング係数の関係(早強セメントの場合)

早強セメントと高ビーライトセメントの全データでの近似式を下記に示す。

$$E_c = 5.29 \times F_c^{0.465} \quad \text{相関係数} \quad R^2 = 0.943$$

(5) 圧縮強度と割裂引張強度の関係

早強セメントと高ビーライトセメントを用いたコンクリートの圧縮強度と割裂引張強度の関係を図-2.18に示す。同図に示す回帰式の係数は早強セメントと高ビーライトセメントの全データを回帰した結果の値である。割裂強度は圧縮強度の関数として表現できる。

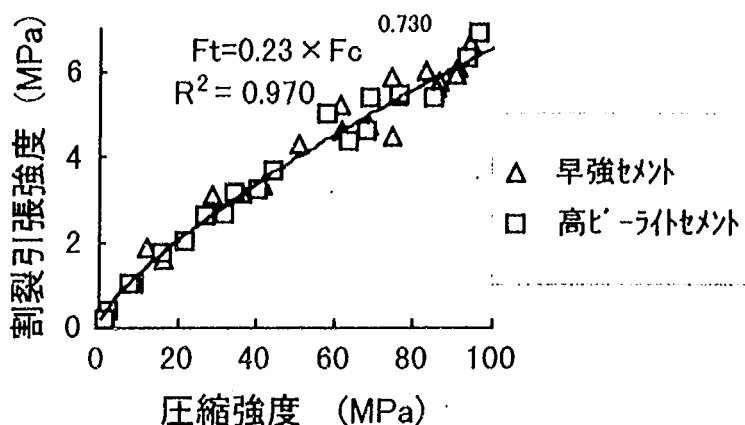


図-2.18 圧縮強度と割裂引張強度の関係

2.3.3 PC部材への応用について

PC部材への応用を考えた場合、プレストレッシング時のコンクリートの圧縮強度は、プレストレッシング直後にコンクリートに生じる最大圧縮応力度の1.7倍以上でなければならない。したがって、初期強度の発現特性によってはプレストレス導入材齢が変化するものと考えられる。

2.3.4 まとめ

本研究の範囲において以下のことが認められた。

- 1) コンクリートがプラスチックな状態から弾性的な性質をもち始める(今回の実験では圧縮強度1.74MPa以上の強度)のは、凝結終結時間以後である。
- 2) 配合強度100MPaで、早強セメントを用いたコンクリートは凝結終結時から材齢1日までの期間で急激に強度発現している。一方、中庸熱セメントと高ビーライトセメントを用いたコンクリートは材齢1日までの期間よりはむしろ材齢1日から材齢3日までの期間で大きく強度発現している。
- 3) 養生温度10℃、20℃、30℃と変化させても、有効材齢に換算することにより、有効材齢と圧縮強度の関係は1つの推定曲線で表せる。
- 4) 使用している骨材が同じであれば、コンクリートのヤング係数、割裂引張強度ともにセメントの種類によらずコンクリートの圧縮強度の関数で表せる。

2. 4 断熱温度上昇試験

ここでは、材齢とコンクリートの断熱温度上昇量におよぼす①単位セメント量、②コンクリートの練り上がり温度、③セメントの種類の影響を正確に把握するために実施した断熱温度上昇量の結果について報告する。

2. 4. 1 試験方法

断熱温度上昇試験装置はオイル循環制御方式とした。供試体寸法は $\phi 30 \times 30 \text{cm}$ (約21リットル)である。温度測定を開始時間は練混ぜにおいて水を投入した時間とした。

2. 4. 2 試験結果および考察

(1) 試験結果

図-2.19にコンクリートの練り上がり温度 20°C における各種セメントを用いたコンクリートの断熱温度の上昇がほぼ止まったと考えられる材齢7日の単位セメント量と断熱温度上昇量の関係を示す。図に示すように同一の単位セメント量とした場合には、材齢7日の断熱温度上昇量は早強セメント、普通セメント、中庸熱セメント、高ビーライトセメントおよび高ビーライトセメント(a)(以下高ビーライト系セメントと呼ぶ)の順に大きくなっている。高ビーライト系セメントを用いたコンクリートの材齢7日の終局断熱温度上昇量は単位セメント量の一次関数として示せる。早強セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇量は、単位セメント量 500kg/m^3 までは終局断熱温度上昇量は単位セメント量の一次関数として示せるが単位セメント量 500kg/m^3 以上では横ばいとなっている。材齢7日の断熱温度上昇量は早強セメントおよび普通セメントを用いたコンクリートともに約 80°C であった。この点についての検討は後述の終局断熱温度上昇の検討で述べる。また、本試験の範囲内では、早強セメント、普通セメント、高ビーライト系セメントを用いたコンクリートの単位セメント量と終局断熱温度上昇量の関係による傾きはほぼ同一である。このこ

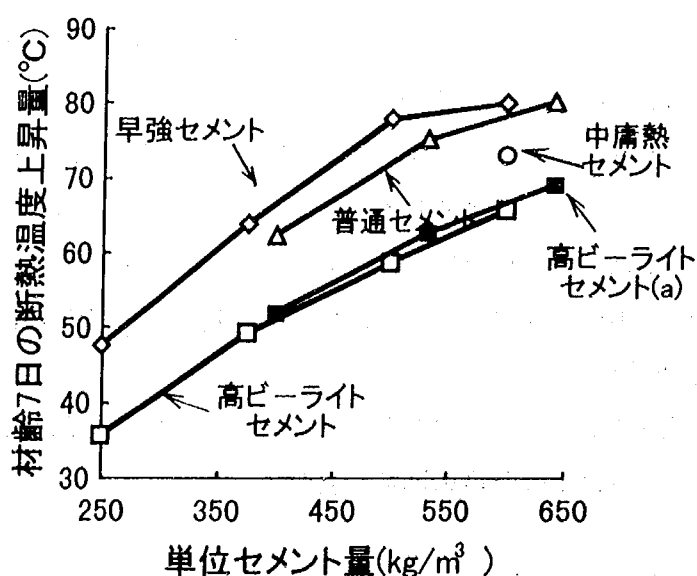


図-2. 1 9 単位セメント量と材齢7日の断熱温度上昇量の関係

とはセメントの種類によらず、単位セメント量の減少量が同じであれば、ほぼ同じ温度減少量となることを意味する。

図-2.20に配合強度100MPaにおける材齢7日のコンクリートの練り上がり温度と断熱温度上昇量の関係を示す。図に示すように、材齢7日の断熱温度上昇量は高ビーライトセメントを用いたコンクリートではコンクリートの練り上がりとともに増加する傾向にあったが、早強セメントを用いたコンクリートではコンクリートの練り上がり温度30℃で減少を示した。また、コンクリートの練り上がり温度30℃の早強セメントと高ビーライトセメントを用いたコンクリートの材齢7日の断熱温度上昇量はほぼ同じであった。

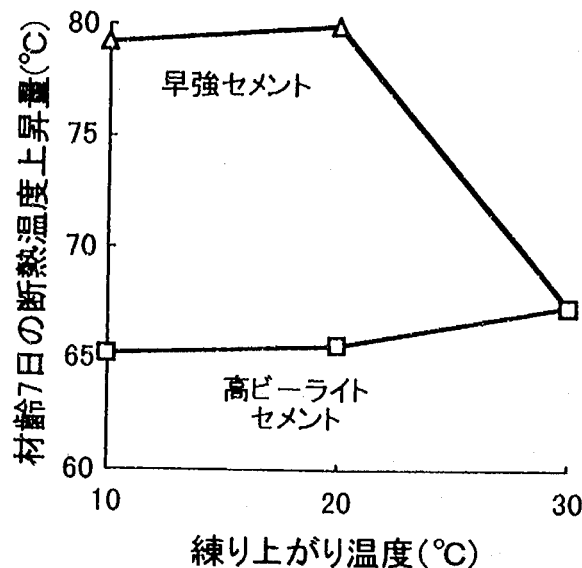


図-2.20 練り上がり温度と材齢7日の断熱温度上昇量の関係

図-2.21にコンクリートの練り上がり温度20℃における単位セメント量と $Q_{\infty} \cdot r$ の関係を示す。 Q_{∞} と r は後述の断熱温度上昇量の近似式である式(2.8)の各係数である(表-2.7参照)。 $Q_{\infty} \cdot r$ は経過日数 t_0 における断熱温度上昇量速度を示す。図に示すように初期の断熱温度上昇速度はセメントの種類によらず、単位セメント量の増加にともない早くなる傾向を示した。また、図-2.19と図-2.21から中庸熱セメントを用いたコンクリートは高ビーライト系セメントを用いたコンクリートと比較して温度上昇量は高くなるが、初期の温度上昇速度はほぼ同じとなる結果を示した。

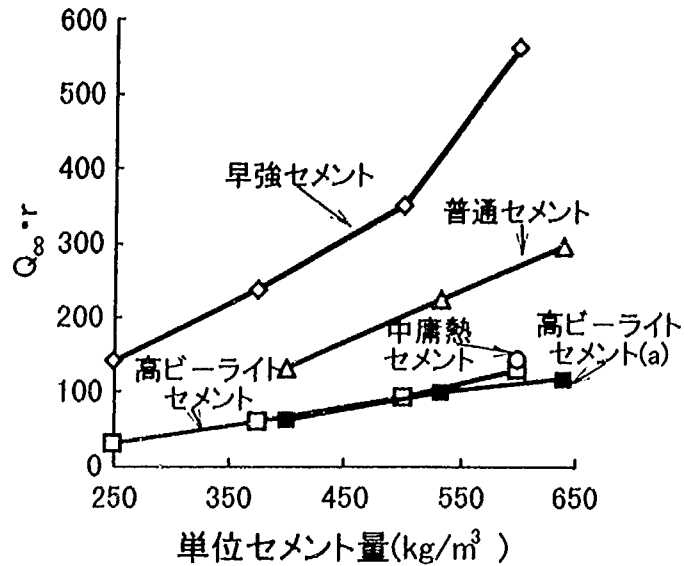


図-2. 21 単位セメント量と $Q_{\infty}r$ の関係

(2) 断熱温度上昇試験の近似式の検討

2変数で説明できる現象を $Y=f(x)$ で表現することを考えた場合に、 $f(x)$ 中の各係数は最小2乗法を用いて算出する方法がある。この算出方法により求めた $f(x)$ が回帰式である。したがって、データの抽出方法により回帰式が異なる。本試験の近似式の検討では、特に初期材齢の断熱温度上昇曲線の精度をあげることを目的としたので、データは初期材齢時では時間間隔を短くして抽出した。ここでは、時間間隔を経過日数0～2日までは3時間ピッチ、経過日数2～4日までは6時間ピッチ、経過日数4～7日までは12時間ピッチとなるようにデータの抽出を行った。ただし、早強セメントおよび普通セメントを用いた配合強度100MPaのコンクリートは初期の発熱速度が速いため、時間間隔を経過日数0～1日までは45分ピッチ、経過日数1～2日までは3時間ピッチ、経過日数2～4日までは6時間ピッチ、経過日数4～7日までは12時間ピッチとなるようにデータの抽出を行った。この抽出したデータをもとに回帰を行った。回帰は式(2.6)～式(2.8)を用いて行った。

$$T = Q_{\infty} \{1 - \exp(-rt)\} \quad \text{---式(2.6)}$$

$$T = Q_{\infty} \{1 - \exp(-rt^{\beta})\} \quad \text{---式(2.7)}$$

$$T = Q_{\infty} [1 - \exp\{-r(t-t_0)\}] \quad \text{---式(2.8)}$$

ここで、 Q_{∞} 、 r 、 t_0 は係数。 t は経過日数

表-2.6に式(2.6)と式(2.7)を用いて回帰したコンクリートの断熱温度上昇試験結果を、表-2.7に式(2.8)を用いて回帰したコンクリートの断熱温度上昇試験結果をそれぞれ示す。100-H-20と100-L-20を例として、回帰結果と実験結果の経過日数と断熱温度上昇量の関係を図-2.22と図-2.23にそれぞれ示す。図より温度上昇は時間軸原点(練混ぜにおいて水を投入した時間)から遅れて上昇を開始している。これは、今回のように高性能AE剤を多く添加した場合においてコンクリートの凝結遅延が生じたためであると考えられる。この場合、温度上昇初期の断熱温度上昇量の経時変化は式(2.6)では適切に評価できないが、式(2.7)と式(2.8)では評価できる。

表-2. 6 コンクリートの断熱温度上昇試験結果(その1)

供試体名	式(2. 6)			式(2. 7)			
	Q_{∞}	r	相関係数	Q_{∞}	r	β	相関係数
40-H-20	49.1	1.140	0.922	46.3	1.898	2.750	0.993
70-H-20	64.9	1.379	0.898	61.6	5.612	4.085	0.995
85-H-20	77.2	1.448	0.902	73.0	11.874	4.647	0.988
100-H-20	84.1	1.359	0.910	76.3	31.685	6.117	0.996
40-L-20	39.0	0.417	0.957	33.5	0.392	1.695	0.986
70-L-20	50.7	0.628	0.948	45.7	0.631	1.907	0.984
85-L-20	60.2	0.728	0.931	54.8	0.770	2.287	0.984
100-L-20	66.7	0.753	0.919	60.3	0.858	2.578	0.979
100-M-20	78.4	0.587	0.889	68.2	0.469	3.481	0.986
100-H-30	76.8	2.173	0.909	72.0	728.7	7.318	0.998
100-L-30	68.4	0.770	0.911	61.1	1.020	3.021	0.973
100-H-10	83.3	0.972	0.926	74.5	4.059	4.286	0.993
100-L-10	68.3	0.636	0.935	61.5	0.584	2.309	0.992
70-L1-20	50.8	0.834	0.983	48.2	0.913	1.412	0.989
85-L1-20	61.2	0.948	0.978	57.7	1.135	1.608	0.987
100-L1-20	68.4	0.903	0.971	63.5	1.134	1.896	0.986
70-N-20	64.2	0.891	0.960	59.6	1.069	2.598	0.997
85-N-20	75.4	1.084	0.959	70.1	2.152	3.063	0.992
100-N-20	83.8	1.078	0.935	75.6	3.937	3.577	0.993

表-2. 7 コンクリートの断熱温度上昇試験結果(その2)

供試体名	式(2.8)			
	Q_{∞}	r	t_0	相関係数
40-H-20	46.9	2.987	0.429	0.997
70-H-20	62.5	3.762	0.377	0.980
85-H-20	73.8	4.727	0.369	0.970
100-H-20	77.9	7.216	0.425	0.990
40-L-20	34.4	0.839	0.542	0.991
70-L-20	46.8	1.255	0.464	0.988
85-L-20	56.0	1.623	0.488	0.986
100-L-20	61.4	2.092	0.558	0.972
100-M-20	69.9	2.029	0.736	0.988
100-H-30	72.8	10.673	0.306	0.986
100-L-30	62.5	2.393	0.568	0.956
100-H-10	76.3	4.115	0.473	0.988
100-L-10	62.8	1.496	0.573	0.992
70-L1-20	48.7	1.254	0.249	0.991
85-L1-20	58.3	1.675	0.301	0.984
100-L1-20	64.7	1.788	0.359	0.985
70-N-20	60.7	2.128	0.475	0.998
85-N-20	71.2	3.117	0.444	0.986
100-N-20	77.4	3.797	0.409	0.992

注) 回帰分析にあたり経過日数 t_0 以下のデータは除外

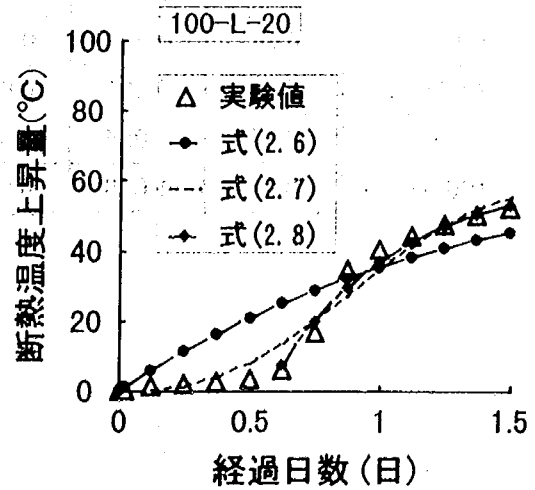
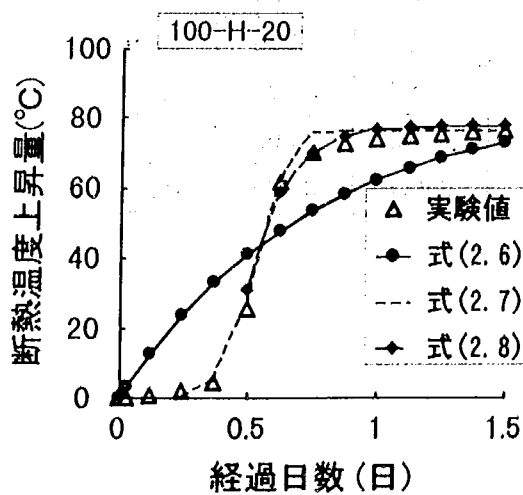


図-2. 2 2 100-H-20 断熱温度上昇試験結果

図-2. 2 3 100-L-20 断熱温度上昇試験結果

(2) 断熱温度上昇試験の近似式の1提案

温度上昇開始が時間軸原点(練混ぜにおいて水を投入した時間)から遅れて開始する場合の断熱温度上昇量と時間の関係は式(2.7)と式(2.8)で評価できることを述べた。これまで $Q = Q_{\infty}\{1 - \exp(-rt)\}$ であらわされてきた。ここで、 Q_{∞} と r は単位セメント量の一次関数である。ところが高性能AE減水剤を多量に用いた場合などでは初期の遅延があるため、 $Q_{\infty}\{1 - \exp(-rt)\}$ だと初期の温度上昇を過大に評価する問題点があった。そのため、 $Q = Q_{\infty}\{1 - \exp(-rt^{\beta})\}$ や $Q = Q_{\infty}[1 - \exp\{-r(t-t_0)^{\beta}\}]$ が使われる。しかし、 β や t_0 の意味から考えて、 Q_{∞} や r と異なり、 β や t_0 は単位セメント量の一次関数になるとは考えにくい。また、多変数の式では β や t_0 を決めるための資料が少なく、適切な値が与えられない。したがって、ここでは、 t_0 として、簡易な実験(凝結試験)より与えることを考えた。式(2.8)は式(2.6)で温度上昇開始の時間軸原点の遅れを t_0 として評価している。式(2.6)の Q_{∞} や r は一般に単位セメント量の一次関数で評価できる。そこで、式(2.8)のシフト量を評価するために凝結試験結果を用いることとした。コンクリートの凝結始発時間および凝結終結時間から各供試体の式(2.8)の回帰により求めた t_0 を差し引いた値を図-2.24にそれぞれ示す。図-2.24より、若干の例外はあるが、おおむね t_0 はコンクリートの凝結始発時間から凝結終結時間の間になっている。したがって、式(2.8)におけるシフト量 t_0 は、凝結始発時間から終結時間までの間に設定すればよい。ただし、凝結終結時間として t_0 を定義すると、 t_0 までの間にも発熱が生じる場合があり、これが把握できない可能性がある。

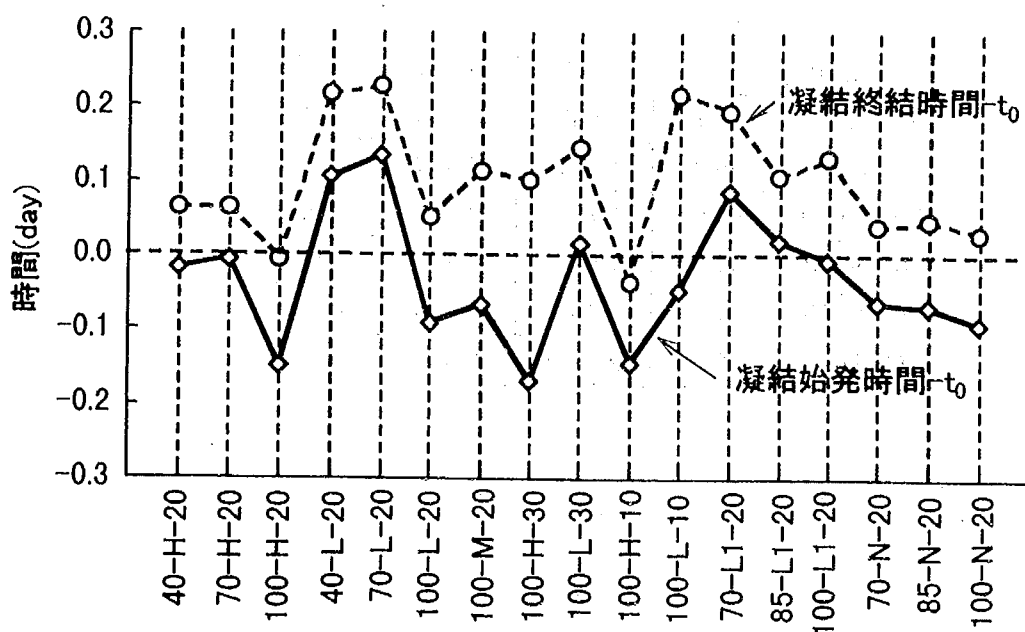


図-2.24 各供試体の t_0 と凝結始発時間および凝結終結時間の関係

そこで、式(2.8)においてシフト量を凝結始発時間とする式(2.9)を提案する。

$$T = 0 \quad t < t_1$$

$$T = Q_{\infty}[1 - \exp\{-r(t-t_1)\}] \quad t \geq t_1 \quad \text{---式(2.9)}$$

ここで、 Q_{∞} 、 r は係数。 t は経過日数、 t_1 は凝結始発時間

表-2.8に式(2.9)で回帰した結果を示す。回帰結果を100-H-30と100-L-30について図-2.25と図-2.26にそれぞれ示す。図中の破線は凝結始発時間と凝結終結時間である。表および図より、初期の断熱温度上昇の経時変化は式(2.7)、式(2.8)より予測精度が劣るものの式(2.9)のようにシフト量を凝結始発時間とすることにより、概ね把握できる。

表-2.8 コンクリートの断熱温度上昇試験回帰結果

供試体名	式(2.9)			
	Q_{∞}	r	t_1	相関係数
40-H-20	47.0	2.801	0.410	0.966
70-H-20	62.5	3.643	0.368	0.979
100-H-20	80.6	3.070	0.274	0.953
40-L-20	33.8	0.980	0.646	0.984
70-L-20	45.9	1.625	0.597	0.968
100-L-20	62.2	1.657	0.465	0.972
100-M-20	70.6	1.710	0.667	0.978
100-H-30	75.3	3.449	0.135	0.923
100-L-30	62.4	2.518	0.583	0.956
100-H-10	78.5	2.228	0.326	0.965
100-L-10	63.2	1.362	0.524	0.989
70-L1-20	48.1	1.480	0.333	0.985
85-L-20	58.2	1.751	0.319	0.984
100-L1-20	64.8	1.751	0.351	0.985
70-N-20	61.2	1.821	0.410	0.993
85-N-20	71.9	2.454	0.375	0.988
100-N-20	78.5	2.523	0.316	0.981

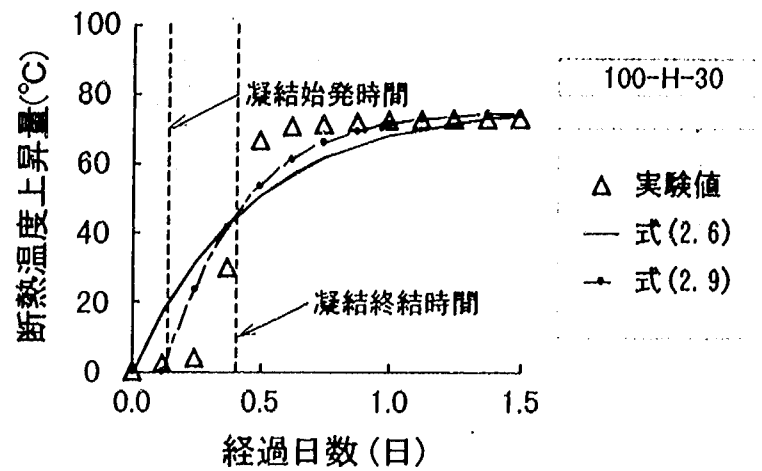


図-2. 25 温度上昇速度の経時変化(100-H-30)

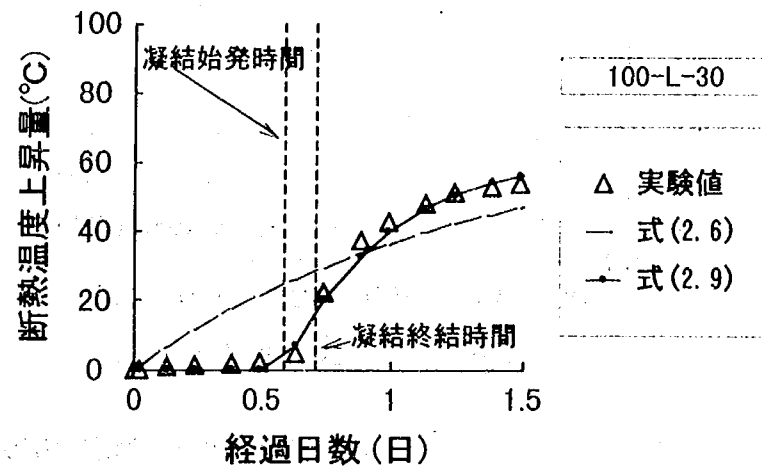


図-2. 26 温度上昇速度の経時変化(100-L-30)

(3) 終局断熱温度上昇量の検討

コンクリートの練り上がり温度 20°C における断熱温度の上昇がほぼ止まったと考えられる材齢7日の単位セメント量とコンクリート温度の実験値との関係を図-2.27に示し、図-2.28に単位セメント量 600kg/m^3 の場合の練り上がり温度と材齢7日のコンクリート温度の実験値の関係を示す。図-2.27および図-2.28に示すようにコンクリート温度が約 100°C 程度までは単位セメント量の一次関数として示せるが、コンクリート温度が約 100°C を超える場合には頭打ちの現象が認められた。

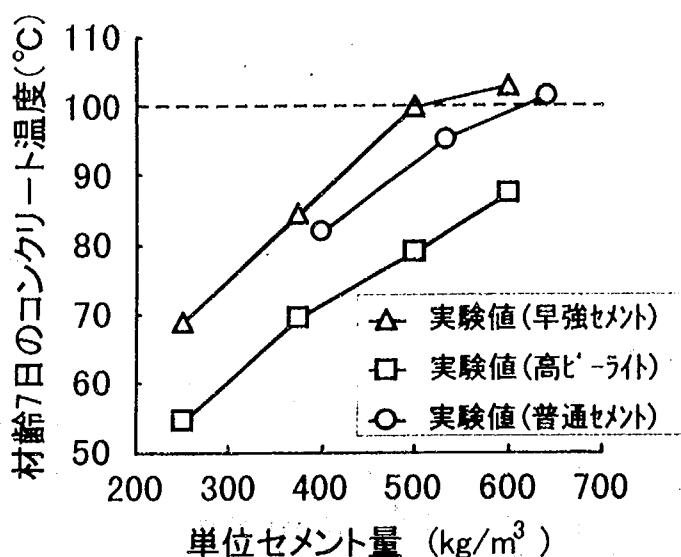


図-2. 27 練り上がり温度とコンクリート温度の関係

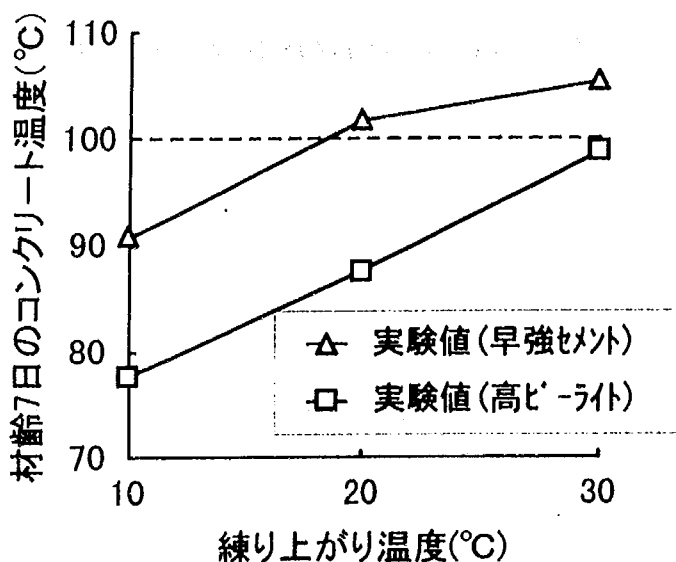


図-2. 28 練り上がり温度とコンクリート温度の関係

(4) 温度上昇速度の検討

コンクリート温度が約100℃を超える場合の r について検討を行う。図-2.29にコンクリートの練り上がり温度20℃の単位セメント量と式(2.8)の回帰結果 r の関係を示す。 r はコンクリート温度100℃を超える場合についても単位セメント量の増加にともない大きくなる。

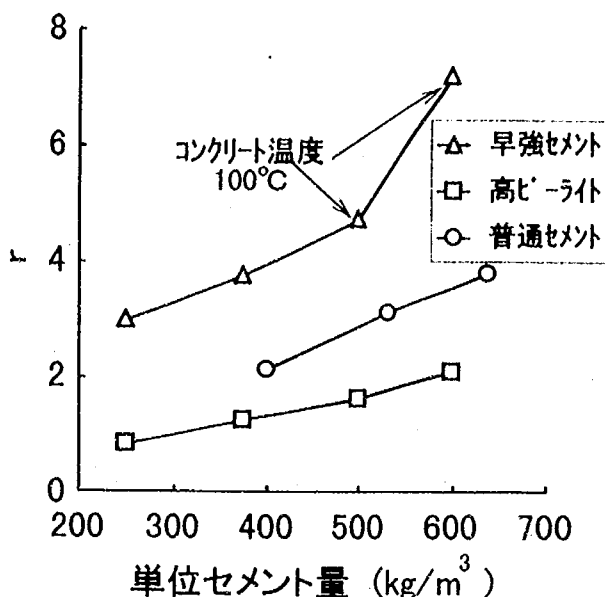


図-2. 29 単位セメント量と r の関係

図-2.30に単位セメント量600kg/m³の場合の練り上がり温度と式(2.8)の r の関係を示す。図-2.30より、コンクリート温度100℃を超える場合については、 r は練り上がり温度の上昇により大きくなることが認められた。

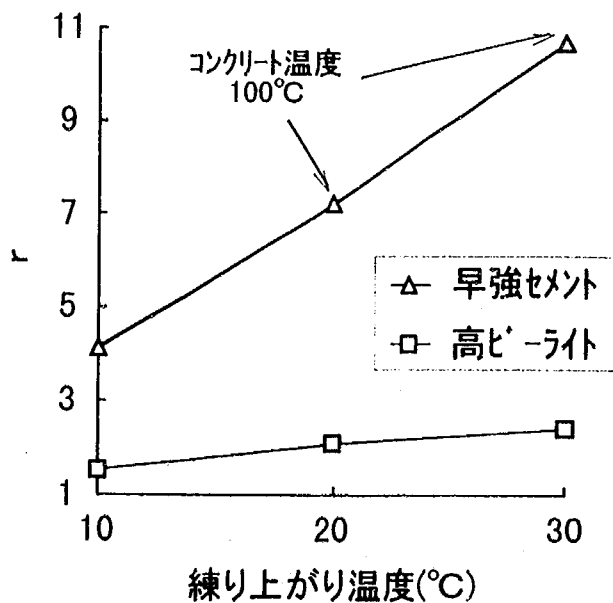


図-2. 30 練り上がり温度と r の関係

(4)ブロック供試体での検証

前述したように、断熱温度上昇量はコンクリート温度100℃を超える場合には頭打ちとなった。ところが、実構造物の場合においては、断熱温度上昇試験とは異なり型枠などからの熱伝達境界を通して熱の逸散があるのでコンクリート温度が100℃を超えることはないと考えられる。そのため、実構造物の温度解析で熱逸散のない断熱温度上昇試験結果を適用できるかは不明確である。ここでは、断熱温度上昇試験でコンクリート温度が100℃を超える配合において、熱逸散のあるコンクリートブロックを作製して、実験値と解析値を比較することにより終局断熱温度上昇量についての検討を行った。

1)試験方法

供試体寸法は400×400×400mmとした。試験はこの供試体に厚さ400mmの発泡スチロールで覆って行った。使用材料は普通セメントを用いた。ブロック供試体の配合は100-N-20と同一とした。ブロック供試体の温度測定位置は供試体中心である。

2)試験結果および考察

図-2.31に単位セメント量と Q_{∞} の関係を示す。単位セメント量640kg/m³においてコンクリート温度100℃となっており、単位セメント量533kg/m³、400kg/m³においてコンクリート温度100℃以内となった。また、図中に示す点線は Q_{∞} がセメントの1次関数としたときの想定線である。ブロック供試体のようにコンクリート温度100℃を超えない範囲内では水和反応が止まることなく進行することが考えられる。そのため、図-2.31に示す想定線での係数となる可能性も考えられる。そこで、ブロック供試体の温度解析に用いる断熱温度上昇式の係数は断熱温度上昇試験の回帰値と想定線上の単位セメント640kg/m³の値とする2ケースとした。具体的には下式となり、図-2.32に経過日数と断熱温度上昇量の関係を示す。ただし、今回の検討では r については2ケースとも表2.8に示す値とした。

$$\text{断熱温度上昇量} = 78.5[1 - \exp\{-2.523(t - 0.316)\}] \quad \text{---式(2.10)} \quad (\text{試験結果})$$

$$\text{断熱温度上昇量} = 85.7[1 - \exp\{-2.523(t - 0.316)\}] \quad \text{---式(2.11)} \quad (Q_{\infty} \text{は単位セメント量の1次式})$$

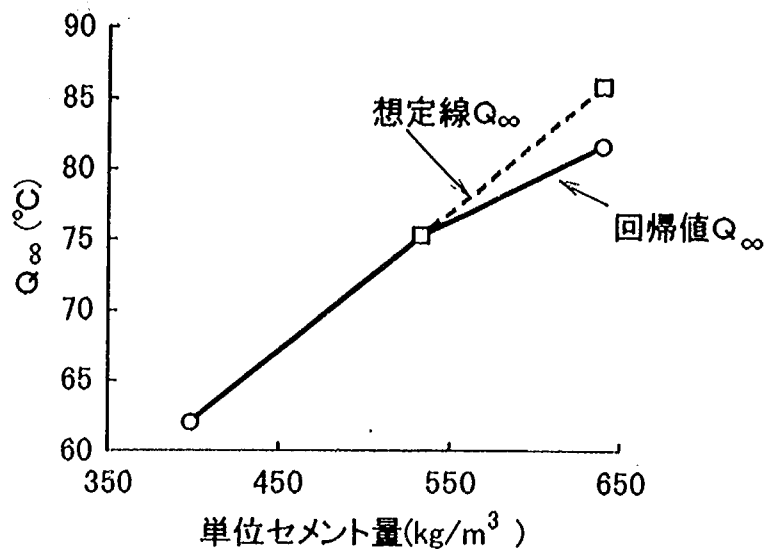


図-2. 3 1 単位セメント量と Q_∞ の関係

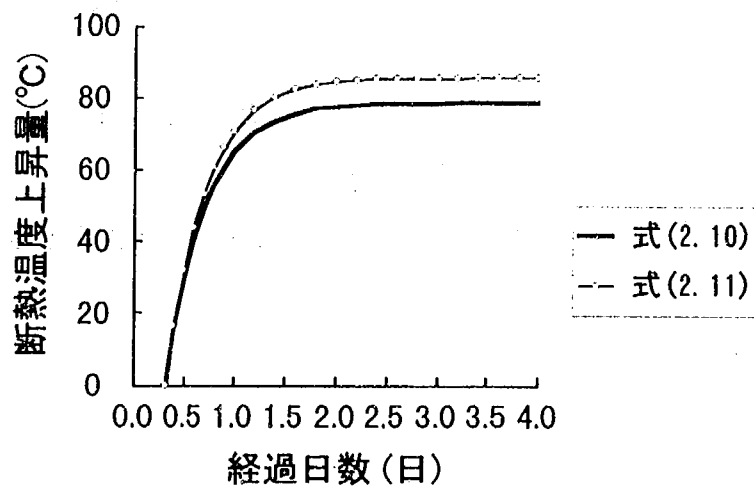


図-2. 3 2 経過日数と断熱温度上昇量の関係

図-2.33にブロック供試体の測定結果と式(2.10)および式(2.11)を用いた場合の解析結果を示す。図に示すように測定結果は断熱温度上昇試験から得た回帰値を用いた式(2.10)の方がよく一致する結果となった。このことから、実構造物のような熱逸散のある場合においても、断熱温度上昇式を示す式(2.7)の Q_{∞} は、コンクリート温度（練り上がり温度+終局断熱温度上昇量）が100℃を超えることが推定される場合については値を小さくする必要があると考えられる。

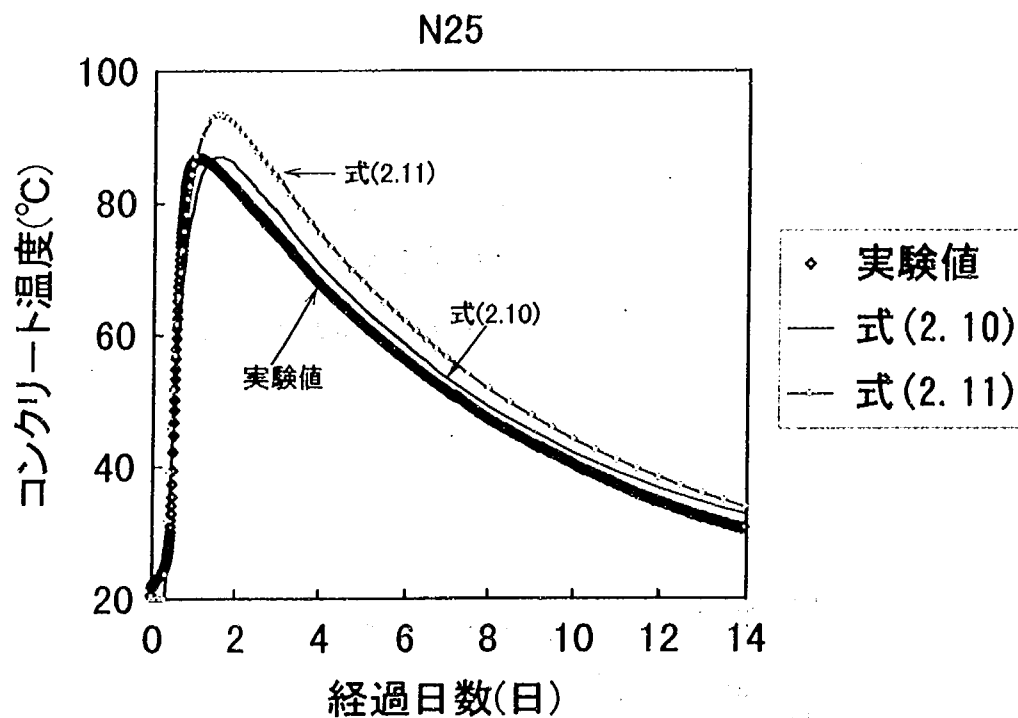


図-2.33 経過日数とコンクリート温度の関係

(5) 割裂引張強度と断熱温度上昇量との比

温度ひび割れ抵抗性を概略把握する方法に割裂引張強度と断熱温度上昇量との比を比較する方法がある。この比が大きいほど温度ひび割れ抵抗性が大きいことが考えられる。図-2.34に各配合の材齢1, 3, 7日の割裂引張強度と材齢7日の断熱温度上昇量との比を示す。図に示すように配合強度100MPaでセメント

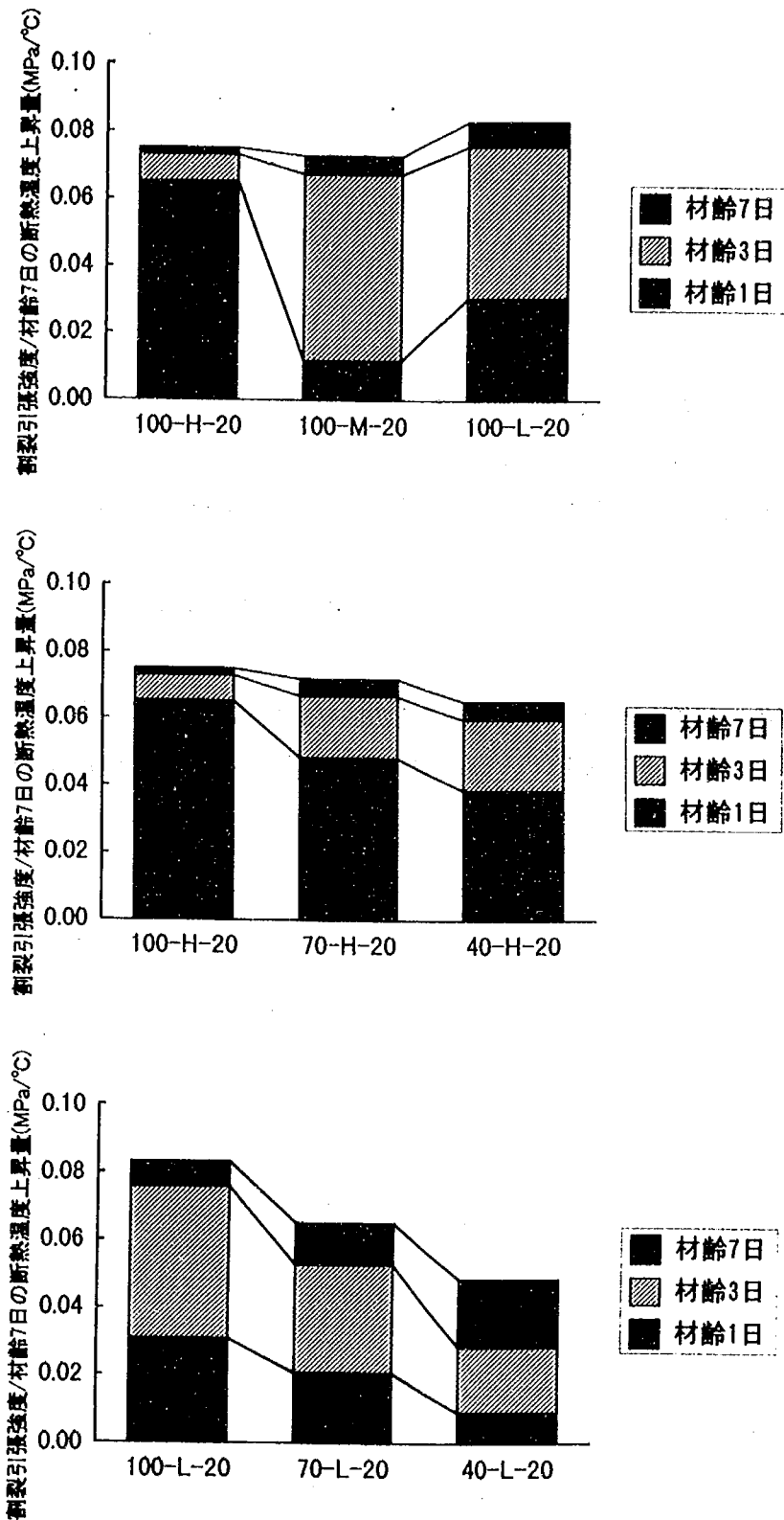


図-2.34 各配合の割裂引張強度と断熱温度上昇量との比

種類による比較をすると、材齢1日では早強セメント、高ピーライトセメント、中庸熱セメントの順に大きい値を示し、材齢3日では高ピーライトセメント、早強セメント、中庸熱セメントの順に大きい値を示した。第1章で示した解析結果の1例(図-1.6)では、温度応力による引張応力は材齢4日から5日時点でほぼ最大となる値を示した。従って、本試験の範囲内では解析例で示した構造物でのひび割れ抵抗性は高ピーライトセメントを用いたコンクリートの優位性が考えられる。配合強度の差による比較では、早強セメント、高ピーライトセメントを用いたコンクリートともに断熱温度上昇の増加があるものの配合強度が大きいほど初期の割裂引張強度発現が大きいために割裂引張強度と断熱温度上昇量との比は大きくなる結果を示した。

2. 4. 3 まとめ

本研究の範囲では以下のことが認められた。

- 1) 打ち込み温度一定でかつコンクリートの温度が100℃以内の条件において、終局断熱温度上昇量は単位セメント量の1次式で表せる。
- 2) 温度上昇開始が時間軸原点(練混ぜにおいて水を投入した時間)から遅れる場合については $T = Q_{\infty}[1 - \exp\{-r(t - t_1)\}]$ 中の t_1 にコンクリートの凝結始発時間をあてはめることにより断熱温度上昇量を正確に把握することができることが認められた。
- 3) 練り上がり温度一定の条件下では、断熱温度上昇速度はコンクリート温度100℃を超える場合には頭打ちとなる。
- 4) 本試験の範囲内では高ピーライトセメントを用いたコンクリートは早強セメントや中庸熱セメントを用いたコンクリートと比較して、ひび割れ抵抗性が高くなることが認められた。

第3章 結論

高強度コンクリートの温度ひび割れ評価の向上のために行った各物性試験の結果以下の知見を得た。

1. 強度発現特性試験

セメントの種類によらず、高強度コンクリートのように多量の混和剤を使用する場合には強度発現開始時間は時間軸原点(注水時)から遅れる。そのコンクリートの強度発現が発生する時間は概ねコンクリートの凝結終結時間直後であると考えられる。温度一定の養生条件(10℃、20℃、30℃)では、有効材齢に換算することにより同一の関数で表せる。また、高強度コンクリートをP C構造物に用いる場合のセメント種類の選択はプレストレス導入材齢での圧縮強度が1要素となる。本試験の範囲では、材齢3日でプレストレス導入を考えた場合には早強セメント、中庸熱セメント、高ビーライトセメントを用いたコンクリートはほぼ同一の圧縮強度が認められ、プレストレス導入時の許容圧縮応力度を満足すると考えられる。但し、プレストレス導入材齢を3日より早めた場合には中庸熱セメント、高ビーライトセメントを用いたコンクリートはこの間の強度発現が遅いために導入材齢を考慮した施工計画の作成が必要であると考えられる。

2. 断熱温度上昇試験

材齢7日の断熱温度上昇量は同一のセメント量とした場合には早強セメント、普通セメント、中庸熱セメント、高ビーライトセメントを用いたコンクリートの順に大きくなる。また、本試験の範囲内では、同一の単位セメント量の減少量による温度降下の効果はセメントの種類によらずほぼ同じであることが認められた。断熱温度上昇量と時間の近似式では、① Q_{∞} と r は単位セメント量の関数で表現できること、②温度上昇開始時間が若干の例外となる配合があるもののコンクリートの凝結始発時間であることを考慮して、 $T = Q_{\infty}[1 - \exp\{-r(t - t_1)\}]$ (t_1 はコンクリートの凝結始発時間)を提案した。この近似式を用いることにより、概ね断熱温度上昇量と時間の関係を表現できることが確認された。また、終局断熱温度上昇量は打ち込み温度が一定の場合には単位セメント量の1次関数で表現できるが、コンクリート温度(終局断熱温度上昇量+練り上がり温度)が約100℃を超える場合には小さくする必要がある。

本報告は高強度コンクリートの温度ひび割れ評価の精度向上のためにコンクリートの強度発現や発熱特性を明らかにした。今回の検討では高強度コンクリートの自己収縮の検討を行わなかったが、温度ひび割れの可能性を検討するには不可欠であると考えられる。また、コンクリートの体積変化に起因して構造物に発生する引張応力の速度は、JIS引張強度試験に規定されている応力速度と比較して遙かに遅い。したがって、この条件での載荷速度が引張強度に及ぼす影響について検討する必要があると考えられる。今後は自己収縮の影響や引張強度特性を検討するとともに、実験で得られた諸物性を用いて、実物大での応力解析を行い整合性を確認するとともに、最終的には簡易な形での温度ひび割れ判定方法の確立を検討する予定である。

謝 辞

本試験を実施するにあたり、住友大阪セメント(株)の鈴木康範氏、(株)オーテックの松井淳氏、太平洋セメント(株)田中秀和氏のご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

1)河野広隆、森濱和正、渡辺博志他：マスコンクリートの配合条件が強度及び発熱特性に及ぼす影響、土木研究所資料、第3182号、1993年2月

資 料

1. 強度発現

表-1 強度発現性試験結果 その1

	圧縮強度(MPa)				割裂引張強度(MPa)				コンクリートのヤング係数(GPa)			
	1d	3d	7d	28d	1d	3d	7d	28d	1d	3d	7d	28d
40-H-20	12.5	28.6	36.7	42.1	1.84	2.85	3.11	3.31	18.2	28.3	30.5	34.0
70-H-20	28.9	51.4	61.8	69.1	3.07	4.26	4.59	4.71	26.8	33.5	37.4	39.1
100-H-20	61.6	74.7	83.5	91.5	5.19	5.84	5.98	6.06	32.7	37.4	39.3	42.2
100-H-30	74.9	86.8	91.0	94.4	4.45	5.73	5.90	6.65	36.6	40.1	40.7	45.8
100-H-10	16.7	76.6	86.2	87.7	1.56	5.40	5.59	5.58	18.8	37.1	40.6	41.5
40-L-20	3.06	9.32	16.3	32.0	0.358	1.00	1.72	2.63	7.50	17.8	23.3	29.9
70-L-20	8.40	27.3	40.8	63.8	1.01	2.59	3.21	4.34	12.9	29.3	31.8	37.0
100-L-20	22.0	58.4	76.7	93.8	2.00	4.98	5.45	6.31	20.8	35.8	38.5	42.3
100-L-30	34.7	68.4	85.4	96.7	3.13	4.58	5.36	6.89	28.9	37.9	39.5	45.0
100-L-10	1.97	44.7	69.4	86.8	0.171	3.65	5.36	6.59	3.64	32.8	38.4	41.1
100-M-20	5.97	65.1	83.4	99.8	0.850	4.91	5.31	6.62	7.53	37.1	40.0	43.1

表-2 強度発現性試験結果 その2

	圧縮強度(MPa)						コンクリートのヤング係数(GPa)					
	0.5d	0.542d	0.583d	0.667d	0.75d	0.833d	0.5d	0.542d	0.583d	0.667d	0.75d	0.833d
100-H-20	1.74	2.88	5.78	14.3	34.10	46.30	1.62	3.12	7.28	16.0	24.9	29.1
100-H-30	0.5d	0.667d	—	—	—	—	0.5d	0.667d	—	—	—	—
	9.46	64.2	—	—	—	—	10.1	32.9	—	—	—	—
100-L-30	0.833d	—	—	—	—	—	0.833d	—	—	—	—	—
	12.5	—	—	—	—	—	15.4	—	—	—	—	—
100-H-10	2d	—	—	—	—	—	2d	—	—	—	—	—
	69.1	—	—	—	—	—	34.8	—	—	—	—	—
100-L-10	2d	—	—	—	—	—	2d	—	—	—	—	—
	25.4	—	—	—	—	—	24.7	—	—	—	—	—

2. 断熱温度上昇試験

表-3 断熱温度上昇試験結果(その1)

40-H-20		70-H-20		85-H-20		40-L-20		70-L-20		85-L-20		100-L-20	
時間 (day)	温度 (度)	時間 (day)	温度 (度)	時間 (day)	温度 (度)	時間 (day)	温度 (度)	時間 (day)	温度 (度)	時間 (day)	温度 (度)	時間 (day)	温度 (度)
0.00	21.1	0.00	20.6	0.00	21.9	0.00	19.0	0.00	20.1	0.00	20.3	0.00	21.8
0.02	21.1	0.03	20.6	0.03	21.9	0.04	19.0	0.02	20.1	0.02	20.3	0.02	21.8
0.12	21.8	0.13	21.5	0.13	22.8	0.12	19.8	0.12	21.1	0.12	21.5	0.12	23.1
0.24	22.3	0.25	22.2	0.26	23.8	0.24	20.2	0.25	21.6	0.24	22.1	0.24	23.7
0.37	23.5	0.38	24.6	0.38	26.7	0.37	20.5	0.37	22.0	0.37	22.7	0.37	24.3
0.49	28.8	0.50	36.3	0.51	52.2	0.49	20.8	0.50	22.9	0.49	23.5	0.49	25.1
0.62	42.1	0.63	59.7	0.63	78.8	0.62	21.2	0.62	25.9	0.62	26.8	0.62	27.7
0.74	49.8	0.75	70.9	0.76	86.9	0.74	22.6	0.75	31.6	0.74	36.0	0.74	38.2
0.87	55.7	0.88	76.5	0.88	89.4	0.87	25.5	0.87	41.3	0.87	48.6	0.87	56.1
0.99	59.4	1.00	78.9	1.01	90.5	0.99	31.5	1.00	44.4	0.99	53.7	0.99	61.9
1.12	61.9	1.13	80.0	1.13	91.1	1.12	34.5	1.12	47.4	1.12	57.9	1.12	65.7
1.24	63.6	1.25	80.5	1.26	91.6	1.24	35.7	1.25	50.3	1.24	61.0	1.24	68.9
1.37	64.7	1.38	80.9	1.38	92.0	1.37	36.9	1.37	52.7	1.37	63.4	1.37	71.8
1.49	65.5	1.50	81.2	1.51	92.4	1.49	38.1	1.50	54.7	1.49	65.8	1.49	73.7
1.62	66.0	1.63	81.4	1.63	92.7	1.62	39.3	1.62	56.3	1.62	67.6	1.62	75.0
1.74	66.4	1.75	81.6	1.76	93.0	1.74	40.5	1.75	57.5	1.74	68.8	1.74	75.9
1.87	66.7	1.88	81.8	1.88	93.3	1.87	41.8	1.87	58.6	1.87	69.6	1.87	76.7
1.99	66.9	2.00	81.9	2.01	93.5	1.99	42.9	2.00	59.5	1.99	70.3	1.99	77.4
2.24	67.3	2.25	82.1	2.26	94.1	2.24	45.0	2.25	61.0	2.24	71.4	2.24	78.6
2.49	67.5	2.50	82.3	2.51	94.6	2.49	46.6	2.50	62.0	2.49	72.4	2.49	79.5
2.74	67.7	2.75	82.5	2.76	95.1	2.74	47.7	2.75	62.8	2.74	73.2	2.74	80.3
2.99	67.8	3.00	82.6	3.01	95.7	2.99	48.7	3.00	63.5	2.99	73.9	2.99	81.0
3.24	67.9	3.25	82.8	3.26	96.2	3.24	49.4	3.25	64.1	3.26	74.1	3.24	81.7
3.49	68.0	3.50	82.9	3.51	96.6	3.49	50.0	3.50	64.6	3.51	74.6	3.49	82.2
3.74	68.1	3.75	83.0	3.76	97.0	3.74	50.5	3.75	65.1	3.76	75.2	3.74	82.8
3.99	68.2	4.00	83.1	4.01	97.4	3.99	51.0	4.00	65.6	4.01	75.6	3.99	83.2
4.49	68.3	4.50	83.3	4.51	98.0	4.49	51.8	4.50	66.5	4.51	76.4	4.49	84.1
4.99	68.4	5.00	83.5	5.01	98.4	4.99	52.4	5.00	67.3	5.01	77.0	4.99	84.9
5.49	68.5	5.50	83.8	5.51	98.8	5.49	53.0	5.50	67.9	5.51	77.6	5.49	85.5
5.99	68.6	6.00	84.0	6.01	99.2	5.99	53.6	6.00	68.5	6.01	78.1	5.99	86.2
6.49	68.6	6.50	84.2	6.51	99.5	6.49	54.1	6.50	69.0	6.51	78.6	6.49	86.8
6.99	68.7	7.00	84.4	7.01	99.8	6.99	54.6	7.00	69.4	7.01	79.0	6.99	87.4

表-4 断熱温度上昇試験結果(その2)

100-I-30		100-M-20		100-H-30		100-H-20		100-H-10		100-N-20	
時間 (day)	温度 (度)	時間 (day)	温度 (度)	時間 (day)	温度 (度)	時間 (day)	温度 (度)	時間 (day)	温度 (度)	時間 (day)	温度 (度)
0.00	31.5	0.00	21.7	0.00	32.2	0.00	22.9	0.00	13.5	0.00	21.3
0.02	31.5	0.04	21.7	0.00	32.2	0.03	22.9	0.03	13.5	0.02	21.3
0.13	32.2	0.13	22.3	0.04	33.3	0.04	22.9	0.04	13.6	0.04	21.7
0.24	32.7	0.25	22.7	0.08	33.7	0.08	23.0	0.08	13.8	0.08	22.1
0.38	33.1	0.38	23.0	0.10	34.2	0.10	23.4	0.10	14.3	0.10	22.5
0.49	33.5	0.50	23.4	0.12	34.5	0.12	23.6	0.12	14.5	0.12	22.6
0.63	36.1	0.63	24.0	0.16	34.9	0.16	24.0	0.16	14.9	0.16	22.9
0.74	53.8	0.75	25.9	0.18	35.1	0.18	24.1	0.18	15.1	0.18	23.1
0.88	68.8	0.88	34.5	0.22	35.6	0.22	24.5	0.22	15.5	0.22	23.4
0.99	74.3	1.00	51.7	0.24	36.0	0.25	24.7	0.25	15.8	0.24	23.6
1.13	79.4	1.13	62.3	0.29	37.4	0.29	25.2	0.29	16.3	0.29	24.1
1.24	82.5	1.25	68.9	0.31	38.9	0.31	25.6	0.31	16.6	0.31	24.4
1.38	84.2	1.38	74.4	0.35	48.0	0.35	26.5	0.35	17.3	0.35	25.2
1.49	85.2	1.50	78.7	0.37	62.1	0.37	27.2	0.37	17.7	0.37	25.7
1.63	86.1	1.63	81.0	0.41	83.0	0.41	29.5	0.41	18.6	0.41	27.3
1.74	86.8	1.75	82.3	0.43	90.1	0.43	31.5	0.43	19.2	0.43	28.5
1.88	87.4	1.88	83.3	0.47	96.9	0.47	39.7	0.47	20.9	0.47	32.5
1.99	88.0	2.00	84.2	0.49	98.8	0.50	48.3	0.50	22.0	0.49	36.3
2.24	89.1	2.25	85.6	0.54	101.0	0.54	67.9	0.54	25.4	0.54	48.8
2.49	90.0	2.50	86.9	0.56	101.7	0.56	73.6	0.56	28.1	0.56	53.4
2.74	91.0	2.75	88.1	0.60	102.5	0.60	81.8	0.60	37.6	0.60	62.0
2.99	91.9	3.00	89.1	0.62	102.7	0.62	84.6	0.62	45.0	0.62	65.7
3.24	92.8	3.25	89.9	0.66	103.0	0.66	88.6	0.66	57.6	0.66	71.4
3.49	93.7	3.50	90.6	0.68	103.1	0.68	90.1	0.68	62.4	0.68	73.9
3.74	94.4	3.75	91.1	0.72	103.3	0.72	92.3	0.72	67.9	0.72	77.6
3.99	95.1	4.00	91.6	0.74	103.4	0.75	93.0	0.75	69.6	0.74	79.1
4.49	96.0	4.50	92.4	0.79	103.6	0.79	94.2	0.79	72.2	0.79	81.9
4.99	96.8	5.00	93.0	0.81	103.7	0.81	94.6	0.81	73.2	0.81	83.1
5.49	97.5	5.50	93.5	0.85	103.9	0.85	95.3	0.85	74.9	0.85	85.2
5.99	98.0	6.00	93.9	0.87	104.0	0.87	95.6	0.87	75.6	0.87	86.0
6.49	98.4	6.50	94.3	0.91	104.1	0.91	96.0	0.91	77.0	0.91	87.3
6.99	98.8	7.00	94.6	0.93	104.2	0.93	96.3	0.93	77.6	0.93	87.8
				0.97	104.4	0.97	96.6	0.97	78.7	0.97	88.7
				0.99	104.4	1.00	96.8	1.00	79.2	0.99	89.0
				1.12	104.7	1.12	97.6	1.12	81.4	1.12	90.5
				1.24	104.9	1.25	98.2	1.25	83.1	1.24	91.6
				1.37	105.0	1.37	98.7	1.37	84.4	1.37	92.5
				1.49	105.1	1.50	99.2	1.50	85.4	1.49	93.3
				1.62	105.1	1.62	99.6	1.62	86.2	1.62	94.2
				1.74	105.2	1.75	100.0	1.75	86.9	1.74	95.0
				1.87	105.2	1.87	100.4	1.87	87.4	1.87	95.8
				1.99	105.2	2.00	100.8	2.00	87.9	1.99	96.6
				2.24	105.2	2.25	101.3	2.25	88.7	2.24	97.7
				2.49	105.2	2.50	101.7	2.50	89.3	2.49	98.4
				2.74	105.1	2.75	101.9	2.75	89.7	2.74	99.0
				2.99	105.2	3.00	102.0	3.00	90.1	2.99	99.4
				3.24	105.2	3.25	102.1	3.25	90.4	3.24	99.7
				3.49	105.2	3.50	102.2	3.50	90.7	3.49	100.0
				3.74	105.2	3.75	102.3	3.75	91.0	3.74	100.3
				3.99	105.1	4.00	102.3	4.00	91.2	3.99	100.5
				4.49	105.1	4.50	102.4	4.50	91.5	4.49	100.9
				4.99	105.0	5.00	102.5	5.00	91.8	4.99	101.1
				5.49	105.0	5.50	102.5	5.50	92.1	5.49	101.3
				5.99	105.0	6.00	102.6	6.00	92.3	5.99	101.4
				6.49	105.0	6.50	102.7	6.50	92.5	6.50	101.4
				6.99	105.0	7.00	102.8	7.00	92.7	7.00	101.5

表-5 断熱温度上昇試験結果(その3)

100-L1-20		85-L1-20		70-L1-20		100-L-10		85-N-20		70-N-20	
時間 (day)	温度 (度)	時間 (day)	温度 (度)	時間 (day)	温度 (度)	時間 (day)	温度 (度)	時間 (day)	温度 (度)	時間 (day)	温度 (度)
0.00	19.8	0.00	21.1	0.00	21.0	0.00	12.4	0.00	20.1	0.00	19.6
0.03	19.8	0.03	21.1	0.03	21.0	0.02	12.4	0.03	20.1	0.03	19.6
0.13	20.8	0.12	21.8	0.13	21.7	0.12	14.2	0.13	21.3	0.13	20.4
0.26	21.5	0.24	22.6	0.25	22.4	0.24	15.2	0.26	22.1	0.26	21.0
0.38	22.8	0.37	25.5	0.38	25.2	0.37	16.3	0.38	23.6	0.38	21.8
0.51	28.7	0.49	34.1	0.50	31.5	0.49	17.5	0.51	30.7	0.51	24.7
0.63	44.9	0.62	47.2	0.63	40.0	0.63	19.5	0.63	52.1	0.63	35.6
0.76	57.4	0.74	55.4	0.75	47.0	0.76	24.1	0.76	66.6	0.76	45.4
0.88	63.2	0.87	60.2	0.88	50.4	0.88	37.0	0.88	74.7	0.88	54.3
1.01	67.1	0.99	63.6	1.00	52.9	1.01	41.9	1.01	80.1	1.01	61.4
1.13	70.0	1.12	66.1	1.13	55.0	1.13	47.0	1.13	83.1	1.13	65.9
1.26	72.1	1.24	67.8	1.25	56.8	1.26	52.6	1.26	84.4	1.26	69.5
1.38	73.4	1.37	69.1	1.38	58.3	1.38	57.0	1.38	85.3	1.38	72.3
1.51	74.4	1.49	70.1	1.50	59.5	1.51	60.6	1.51	85.8	1.51	74.3
1.63	75.3	1.62	70.9	1.63	60.5	1.63	63.8	1.63	86.3	1.63	75.5
1.76	76.1	1.74	71.6	1.75	61.3	1.76	66.1	1.76	86.8	1.76	76.3
1.88	76.9	1.87	72.3	1.88	62.0	1.88	67.4	1.88	87.2	1.88	76.9
2.01	77.5	1.99	72.9	2.00	62.6	2.01	68.2	2.01	87.6	2.01	77.3
2.26	78.7	2.24	74.1	2.25	63.7	2.26	69.3	2.26	88.4	2.26	77.9
2.51	79.9	2.49	75.0	2.50	64.7	2.51	70.2	2.51	89.1	2.51	78.4
2.76	81.0	2.74	75.9	2.75	65.5	2.76	71.0	2.76	89.9	2.76	78.8
3.01	82.1	2.99	76.7	3.00	66.3	3.01	71.8	3.01	90.6	3.01	79.1
3.26	83.0	3.24	77.5	3.25	67.0	3.26	72.4	3.26	91.3	3.26	79.3
3.51	83.7	3.49	78.3	3.50	67.7	3.51	73.0	3.51	91.9	3.51	79.5
3.76	84.4	3.74	79.0	3.75	68.3	3.76	73.5	3.76	92.4	3.76	79.8
4.01	85.0	3.99	79.6	4.00	68.8	4.01	74.0	4.01	92.8	4.01	80.0
4.51	85.9	4.49	80.7	4.50	69.8	4.49	74.8	4.51	93.4	4.51	80.3
5.01	86.7	4.99	81.6	5.00	70.6	4.99	75.6	5.01	93.8	5.01	80.7
5.51	87.3	5.49	82.2	5.50	71.3	5.49	76.2	5.51	94.2	5.51	81.0
6.01	87.9	5.99	82.8	6.00	71.9	5.99	76.8	6.01	94.5	6.01	81.3
6.51	88.4	6.50	83.3	6.50	72.5	6.49	77.2	6.51	94.9	6.51	81.6
7.01	88.8	7.00	83.7	7.00	72.9	6.99	77.6	7.01	95.2	7.01	81.9

断熱温度上昇試験 断熱温度上昇図

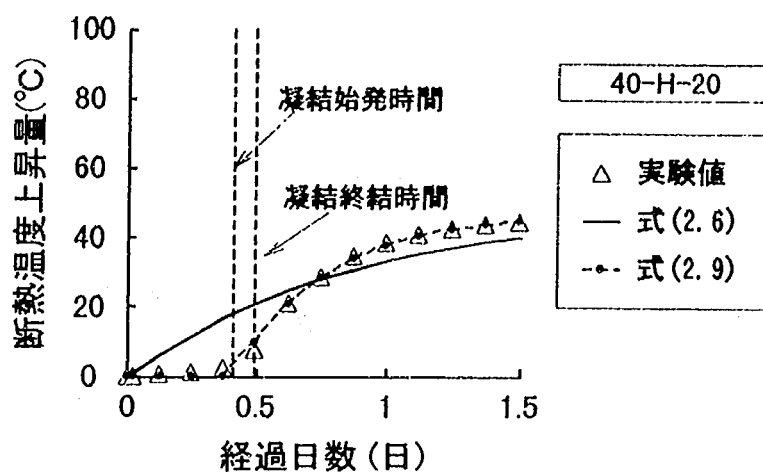
$$T = Q_{\infty} \{1 - \exp(-rt)\} \quad \text{--- 式 (2.6)}$$

$$T = 0 \quad t < t_1$$

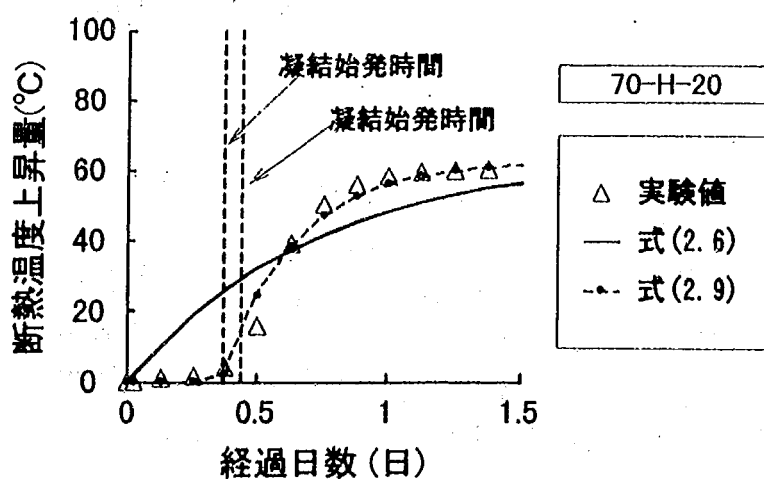
$$T = Q_{\infty} [1 - \exp\{-r(t - t_1)\}] \quad t \geq t_1 \quad \text{--- 式 (2.9)}$$

ここで、 Q_{∞} 、 r は係数。 t は経過日数、 t_1 は凝結始発時間

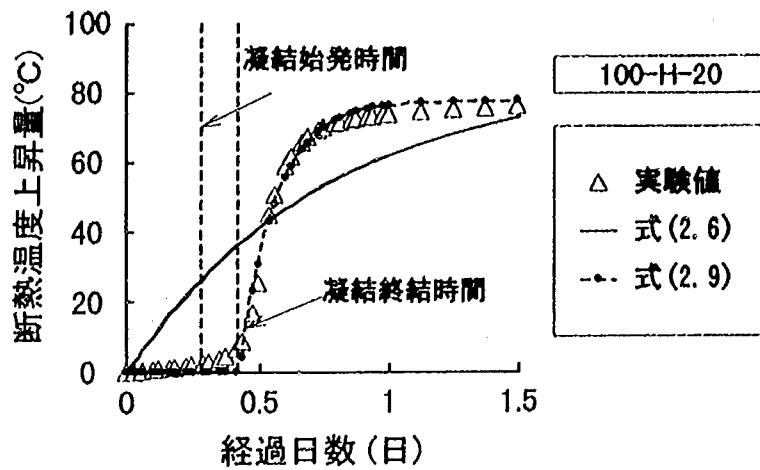
40-H-20 断熱温度上昇試験結果



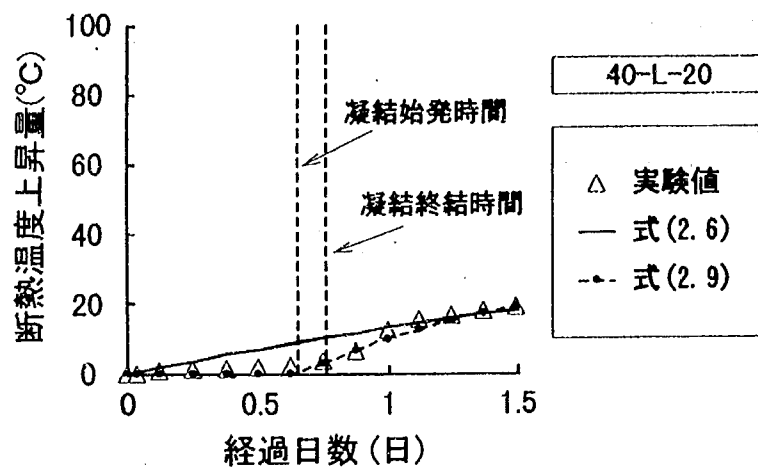
70-H-20 断熱温度上昇試験結果



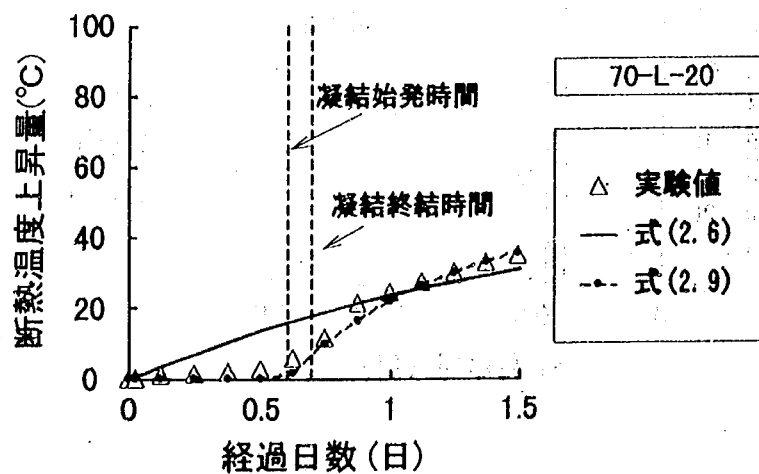
100-H-20 断熱温度上昇試験結果



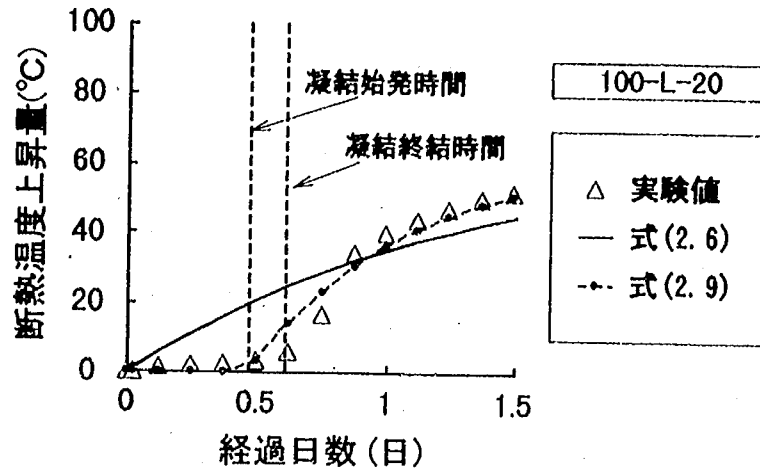
40-L-20 断熱温度上昇試験結果



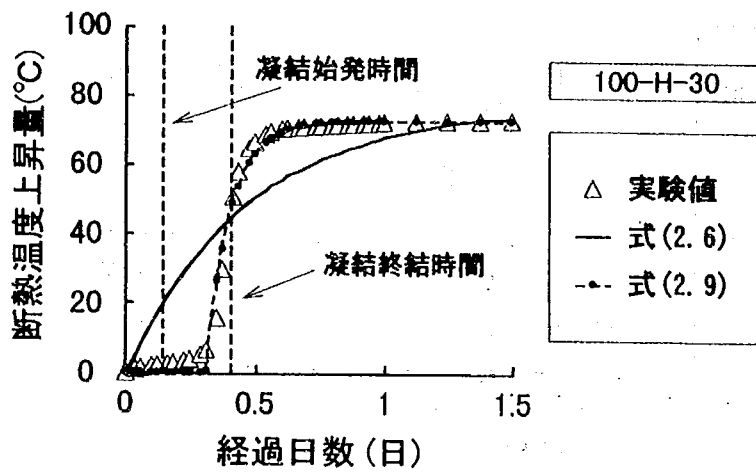
70-L-20 断熱温度上昇試験結果



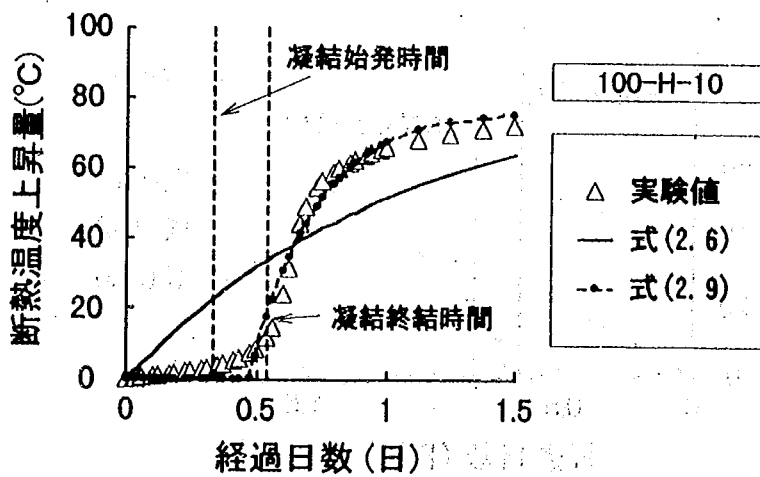
100-L-20断熱温度上昇試験結果



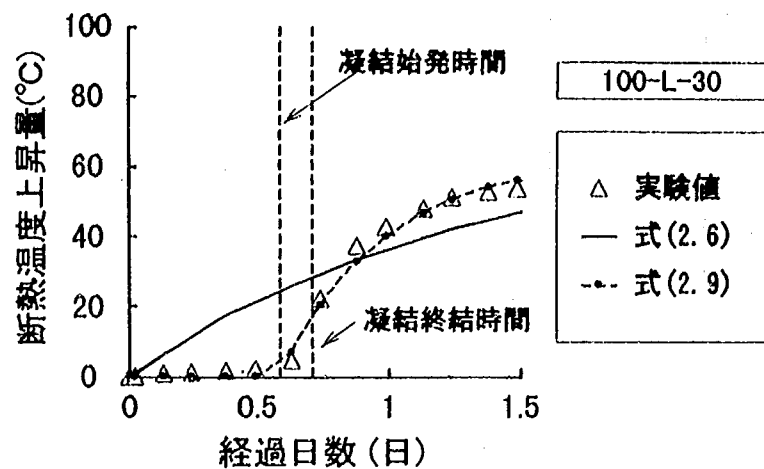
100-H-30断熱温度上昇試験結果



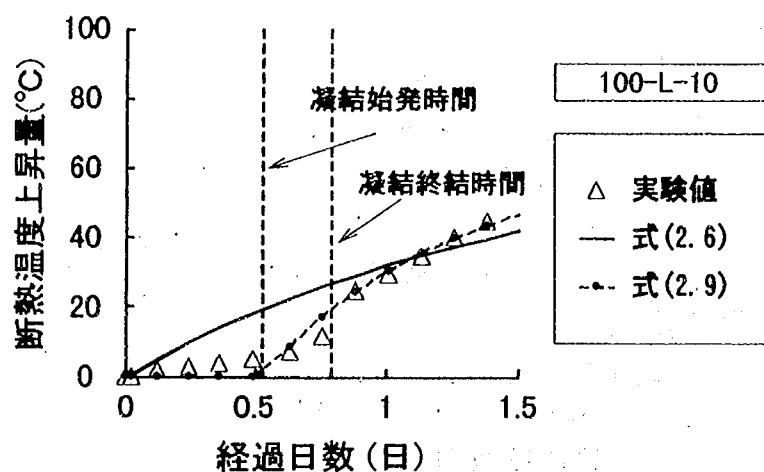
100-H-10断熱温度上昇試験結果



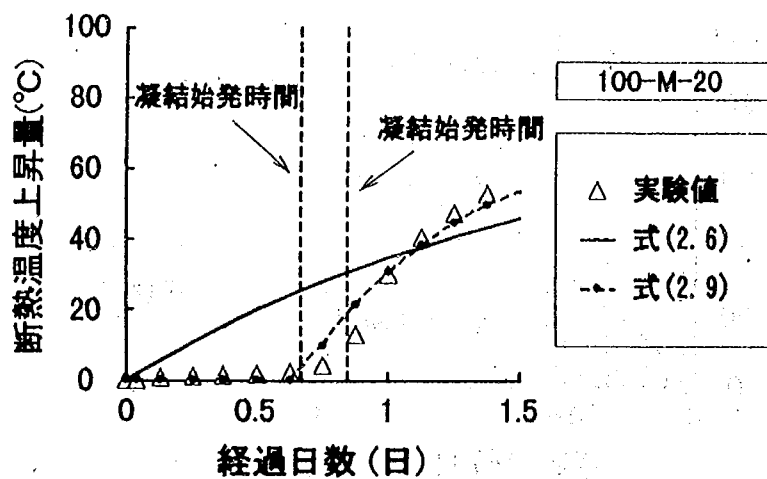
100-L-30 断熱温度上昇試験結果



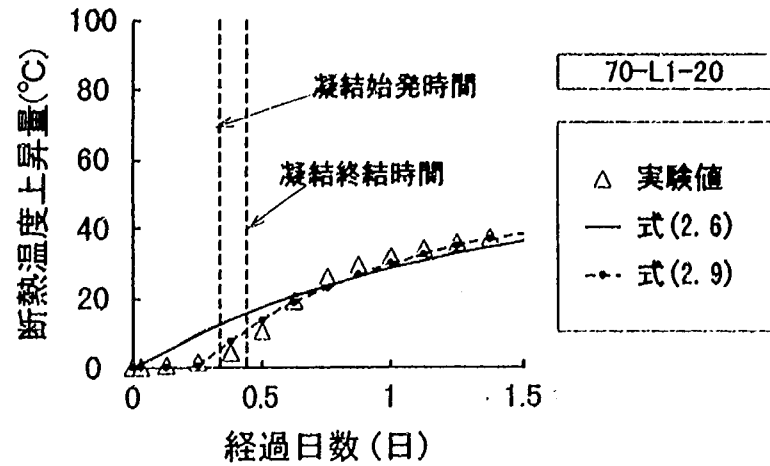
100-L-10 断熱温度上昇試験結果



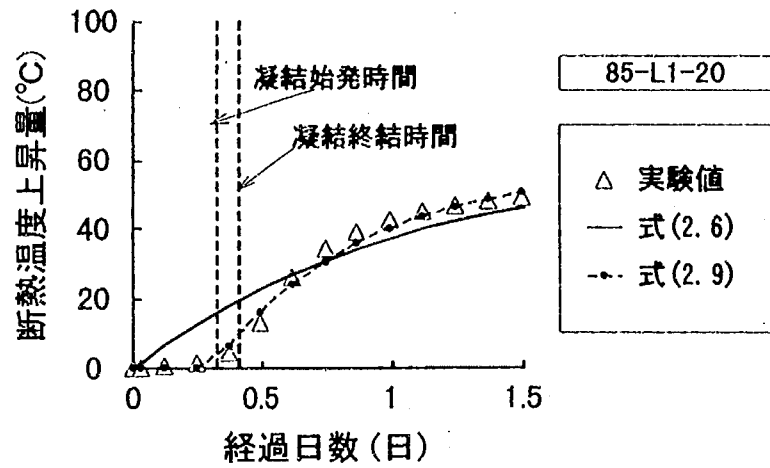
100-M-20 断熱温度上昇試験結果



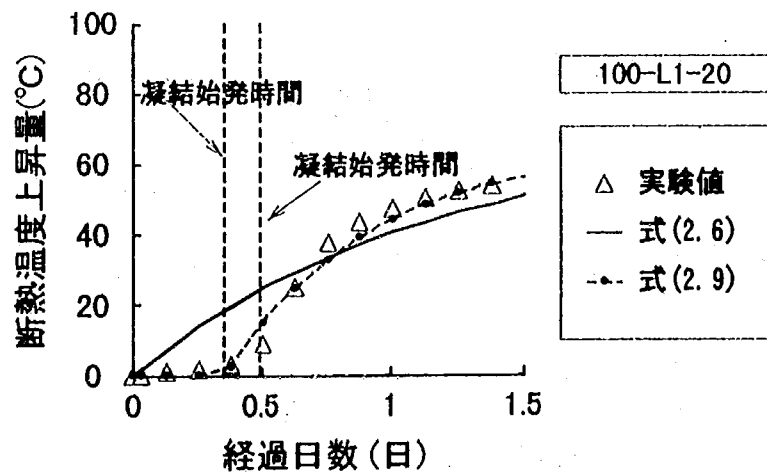
70-L1-20 断熱温度上昇試験結果



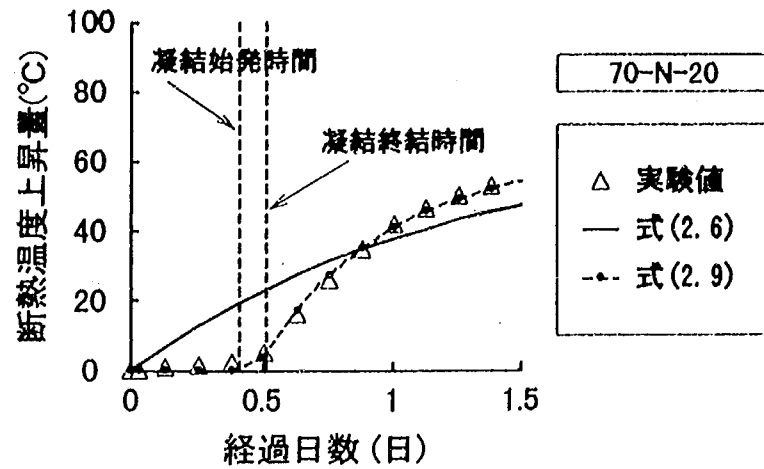
85-L1-20 断熱温度上昇試験結果



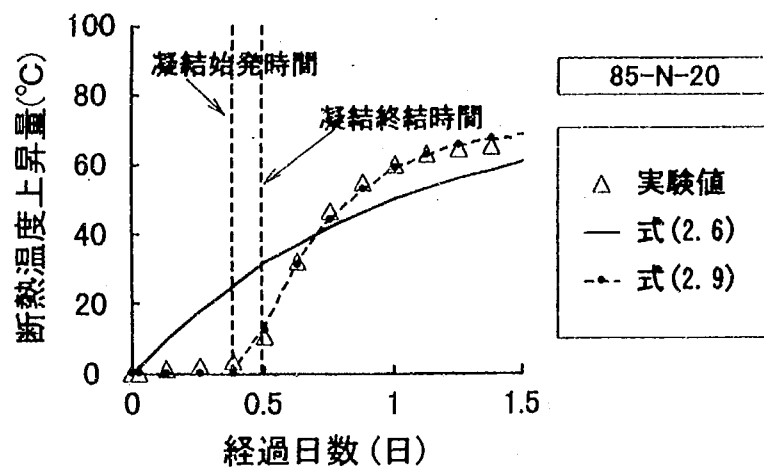
100-L1-20 断熱温度上昇試験結果



70-N-20 断熱温度上昇試験結果



85-N-20 断熱温度上昇試験結果



100-N-20 断熱温度上昇試験結果

