

土木研究所資料

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

1993年2月

建設省土木研究所
地質化学部コンクリート研究室

Copyright © (1993) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor 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。

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

コンクリート研究室	室	長	河	野	広	隆
	研	究	森	濱	和	正
	研	究	渡	辺	博	志
	研	究	高	橋	弘	人
	研	究	森	田	良	美 ^{・1}
	部外研究員		松	井		淳 ^{・2}
	部外研究員		山	本		一 ^{・3}

要 旨

近年、本州四国連絡橋等の大規模構造物の建設が増加しつつあり、それにともなって、マスコンクリートの温度ひびわれの防止が重要となってきた。また、最近では低発熱型のセメントが開発されるなど、材料面からの検討も必要となってきた。

本報告は、使用材料や配合などの条件が異なるコンクリートにおいて、温度応力に最も大きく影響するコンクリートの断熱温度上昇ならびに断熱状態での強度発現特性などの基本的性状の検討結果とともに、高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの断熱状態での強度推定方法について述べるものである。

キーワード：断熱温度上昇、高炉スラグ微粉末、強度発現特性、強度推定、温度応力

・¹ 現、関東地方建設局江戸川工事事務所

・² 現、小野田セメント(株)

・³ 現、松尾建設(株)

目 次

	PAGE
1. まえがき	1
2. 目 的	2
3. 実験概要	3
3.1 使用材料	3
3.2 練りませ	5
3.3 コンクリートの配合及びフレッシュコンクリート試験結果	5
3.4 試験方法	8
4. 試験結果	9
4.1 断熱温度上昇試験結果	9
4.2 強度試験結果	12
4.3 断熱温度上昇試験供試体による切り取りコア試験結果	26
4.4 水和熱試験結果	27
5. 試験方法の検討	28
5.1 断熱温度上昇試験方法の検討	28
5.2 断熱温度上昇試験供試体のコア強度試験	34
5.3 微少熱量計と溶解熱法による水和熱の関係	36
6. 解析に用いる諸特性値の検討	38
6.1 現状の諸特性値決定方法	38
6.2 諸特性値が解析結果に及ぼす影響	40
6.3 断熱温度上昇の回帰方法解析結果に及ぼす影響	49
6.4 圧縮強度推定式の検討	60
6.5 引張強度推定式の検討	61
6.6 弾性係数推定式の検討	66
7. 温度履歴の異なるコンクリートの強度推定	71
7.1 実験概要	71
7.2 試験結果並びに考察	71
7.3 養生温度が解析に用いる推定式に及ぼす影響	74
7.4 強度推定方法の検討	78
8. 高炉スラグを用いたコンクリートの温度応力解析	91
8.1 解析条件	91
8.2 解析結果及び考察	93
9. まとめ	99

1. まえがき

近年、本州四国連絡橋、東京港連絡橋をはじめとするビッグプロジェクトの増大により、マスコンクリートは、以前にも増して注目を集めている。そのうえ、三成分系セメントや低熱クリンカーによるセメントの開発が進み、更にマスコンクリート構造物の施工は増え続けていると予想される。

しかし、有限要素法を中心とする解析技術は向上しているものの、コンクリートの温度解析及び温度応力解析に必要な諸定数の選定方法や解析結果を反映する具体的なひび割れ抑制対策は曖昧なものであり、今後、マスコンクリート施工における材料選定方法、試験方法、解析方法、施工方法を提案するひびわれ抑制マニュアルの作成が急務となっている。

本報告は、材料、配合、条件が温度（応力）解析に及ぼす影響を把握し、このマニュアル作成の第一ステップとするものである。

2. 目 的

マスコンクリートのひびわれを予想する温度解析並びに温度応力解析は、2次元から3次元、線形から非線形へと進歩しているが、その解析に用いる熱特性値、強度推定など未解明のものが多く、解析精度が優れていても、結果に疑問が残る場合がある。例えば、土木学会の圧縮強度推定の式は、同一材令であるならばマスコンクリート断面内の強度が一定であるという結果を導く式である。

マスコンクリートの中心部と熱伝達境界付近では温度履歴（積算温度）が異なり、強度が同じでないことは自明の理であり、断面内で強度分布ができるはずである。このような未解明の項目を解決することが温度解析技術の向上につながり、マスコンクリートひびわれ抑制に役立つと思われる。

以下に、マスコンクリートの温度及び温度応力の解析において、特に未解明と思われる事項を示す。

1) 熱伝導率，熱伝達率，熱拡散率，比熱などの熱特性値の選定方法

現状では、これらの熱特性値は文献から一般的な値を用いており、配合条件からの統一性がない。

2) 断熱温度上昇曲線の回帰

①試験をしないで予想する資料が不足（特に高炉スラグの混入率による変化）

②回帰式の選定とその精度

3) 温度履歴の異なるコンクリートの強度発現特性

4) 引張強度，有効弾性係数の推定方法

5) クリープが弾性係数に及ぼす影響

6) 解析結果とひびわれ抑制対策の関係（ひびわれ指数の意味）

7) それぞれの熱特性値を実験的に求める試験方法

解析条件はセメント，骨材，混和材料の種類，配合，施工条件によって異なるものと考えられ、本研究が温度解析および温度応力解析の技術（精度）向上のために、これらの問題点のいくつかをとりあげ説明することによって、これがマスコンクリートのひびわれ抑制対策策定の一資料とすることを目的とする。

3. 実験概要

3. 1 使用材料

3. 1. 1 セメント

セメントは普通ポルトランドセメント及び中熱ポルトランドセメント（大日本セメント㈱製）を用いた。表-3.1にセメントの物理試験結果，表-3.2にセメントの化学分析結果を示す。

表-3.1 セメントの物理試験結果

	比 重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結			安定性	圧縮強さ (kgf/cm ²)			水和熱 (cal/g)	
			水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)		3d	7d	28d	7d	28d
普通セメント	3.16	3250	28.1	2-27	3.47	良	163	260	416	—	—
中熱セメント	3.20	3130	27.2	3-35	5-15	良	122	180	353	67	78

表-3.2 セメントの化学分析結果

	化 学 成 分 試 験 結 果 (%)						
	MgO	SO ₃	ig-loss	C ₃ S	C ₃ A	R ₂ O	Cl ⁻
普通セメント	1.6	2.0	1.4	—	—	0.60	0.006
中熱セメント	1.4	1.9	0.8	47	3	0.57	0.004

3. 1. 2 骨材

細骨材は富士川産川砂，粗骨材は笠間産砂岩碎石を用いた。表-3.3に使用骨材の物性，表3-4に骨材の粒度分布を示す。細骨材はF.M.=3.28とやや粗目であった。

表-3.3 使用骨材の物性

	分 類	産 地	比 重	吸水率	粗粒率	備 考
細骨材	川 砂	富士川	2.63	2.09	3.28	
粗骨材	硬質砂岩	笠 間	2.66	0.69	6.66	5号と6号を1:1で混合

表-3.4 骨材の粒度分布

	ふるい通過百分率 (%)								F. M.
	20	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
細骨材			97	72	52	31	14	5	3.29
粗骨材	98	34	2						6.66

3.1.3 混和材

混和材は高炉スラグ微粉末（新日鐵化学(株)製 エスメント）を用いた。高炉スラグはA（比表面積4000 cm^2/g ），B（比表面積6000 cm^2/g ），C（比表面積8000 cm^2/g ）の3種類をコンクリートに使用した。

表-3.5，表-3.6にそれぞれ高炉スラグの試験成績表，高炉スラグの粒度分布を示す。

表-3.5 高炉スラグの試験成績

高炉スラグの種類	比重	比表面積 (cm^2/g)	化 学 成 分 試 験 結 果 (%)						
			SiO_2	Al_2O_3	FeO	CaO	MgO	SO_3	TOTAL
A	2.89	3960	32.2	13.5	0.3	42.8	6.2	2.0	97.0
B	2.89	5880	32.6	14.0	0.5	41.5	6.4	2.0	97.0
C	2.89	7920	32.9	14.1	0.1	42.5	6.7	2.0	98.3

表-3.6 高炉スラグの粒度分布（通過百分率(%)）

μm	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.5	2	3	4	6	8
A	0.0	0.3	0.8	1.4	2.4	3.2	6.5	11.3	18.2	24.4	32.5	40.8
B	0.3	0.7	1.9	3.3	5.1	6.4	11.7	19.5	30.7	40.9	51.8	59.6
C	0.2	0.6	1.9	3.6	5.3	7.7	15.7	26.5	40.0	52.4	67.7	78.6
μm	12	16	24	32	48	64	96	128	192	平均粒径 (μm)		
A	53.5	65.3	82.5	93.0	100	100	100	100	100	10.9		
B	70.0	78.6	89.4	95.7	100	100	100	100	100	5.7		
C	90.2	96.0	98.6	100	100	100	100	100	100	3.8		

3. 1. 4 混和剤

使用した混和剤を以下に示す。

AE減水剤 ～ ポゾリスNO.70 (標準型・リグニンスルホン酸系 エヌエムビー社製)

AE調整剤 ～ 303A

3. 2 練りませ

練りませは強制パン型ミキサ(公称容量50%)を使用し、図-3.1に示す手順で行った。

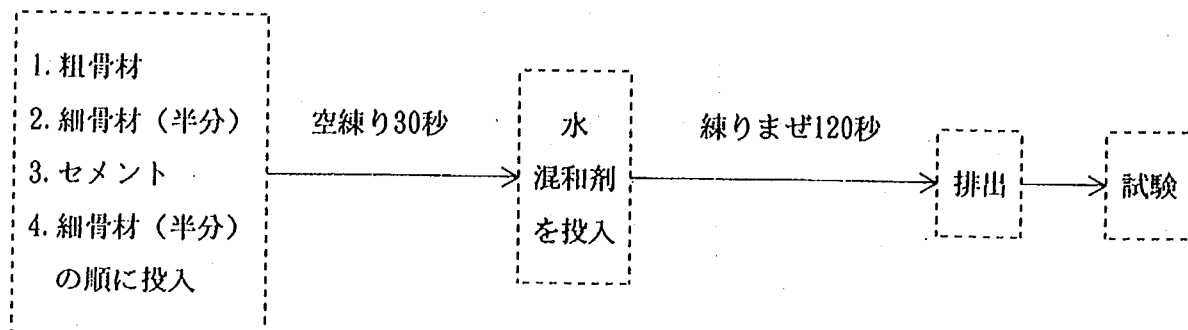


図-3.1 練りませ方法

3. 3 コンクリートの配合及びフレッシュコンクリート試験結果

コンクリートの配合は目標スランプを8cm、目標空気量を4%とし、練り上がり温度は10, 20, 30℃を目標とした。断熱温度上昇試験において比較できるように単位セメント量は300(kg/m³)と一定にし、AE減水剤は標準量(C×0.25%)、AE調整剤を所定の空気量が得られるように添加した。

表-3.7、表-3.8に配合及びフレッシュコンクリートの試験結果を示す。

試験練りの結果、フレッシュコンクリートはセメントの種類、高炉スラグの混入率によって大きく変わらないので、同一の打設温度においては強度の比較を容易にするため、単位水量を一定にした。但し、高炉スラグは粒子表面の平滑性から単位水量が小さくなり、比表面積が大きくなると(高炉スラグ微粉末)さらに単位水量を小さくできるという報告もある。しかし、これはスランプ大の軟練りでありスランプ8cm程度ではこの効果は顕著に現れず、逆にややこわばる傾向にあった。これは練りませ時間の影響、高炉スラグの粒度分布の影響が大きいと考えられる。高炉スラグの混入率が大きくなるとAE調整剤の必要量は多くなった。

以後、配合(セメントの種類)を示す記号として、

N	S 5 0	-	B
セメントの種類	高炉スラグの混入率		高炉スラグの種類

のように表すものとし、高炉スラグの種類がA(比表面積4000cm²/g)の場合は、高炉スラグの種類の記号を省略できるものとする。例えば、

N : 普通セメント100%

MS60 : 中熱セメント40%、高炉スラグ(種類A:比表面積4000cm²/g)60%

NS50-C : 普通セメント50%、高炉スラグ(種類C:比表面積8000cm²/g)50%

のようになる。

表-3.7 配合及びフレッシュコンクリート試験結果(その1) ~目標打設温度20(°C)

配合 記号	セメント の種類	高炉スラグ		W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)						スラ ンプ (cm)	空気 量 (%)	温度 (°C)
		種類	混入率 (%)			W	C	S	G	N070	303A			
N	普通 セメント	A	0	53.3	48.0	160	300	890	975	0.75	3.5A	7.2	3.8	22.5
NS50		A	50	53.3	48.0	160	300	884	969	0.75	4.5A	7.0	4.7	21.6
NS60		A	60	53.3	48.0	160	300	884	968	0.75	4.5A	7.0	4.1	21.7
NS70		A	70	53.3	48.0	160	300	882	967	0.75	5.0A	7.5	4.4	22.2
NS80		A	80	53.3	48.0	160	300	881	965	0.75	5.0A	6.5	4.1	22.4
M	中 熱 セメント	A	0	53.3	48.0	160	300	892	977	0.75	3.0A	8.8	4.2	21.8
MS40		A	40	53.3	48.0	160	300	887	972	0.75	3.5A	7.4	4.2	22.0
MS50		A	50	53.3	48.0	160	300	885	970	0.75	4.0A	8.7	4.2	22.0
MS60		A	60	53.3	48.0	160	300	884	969	0.75	4.5A	6.8	4.1	22.1
MS70		A	70	53.3	48.0	160	300	883	968	0.75	5.0A	7.7	4.5	21.5
NS50-B	普通	B	50	53.3	48.0	160	300	884	969	0.75	5.0A	7.4	4.8	21.9
NS50-C	セメント	B	50	53.3	48.0	160	300	884	969	0.75	5.0A	6.6	4.3	22.1
MS50-B	中 熱	C	50	53.3	48.0	160	300	885	970	0.75	5.0A	9.2	4.5	22.1
MS50-C	セメント	C	50	53.3	48.0	160	300	885	970	0.75	5.0A	7.4	4.3	22.1

表-3.8 配合及びフレッシュコンクリート試験結果(その2)～目標打設温度10, 30(℃)

セメント:普通セメント

配 合 記 号	目標 温度 (℃)	高炉スラグ		W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)						スラ ンプ (cm)	空気 量 (%)	温度 (℃)
		種類	混入率 (%)			W	C	S	G	N070	303A			
N	10	A	0	52.7	48.0	158	300	893	978	0.75	4.0A	8.0	4.8	13.4
NS50	10	A	50	52.7	48.0	158	300	887	972	0.75	4.0A	8.1	4.9	13.0
NS60	10	A	60	52.7	48.0	158	300	886	971	0.75	4.5A	7.8	4.7	13.4
NS70	10	A	70	52.7	48.0	158	300	885	970	0.75	4.5A	9.3	4.9	13.2
NS80	10	A	80	52.7	48.0	158	300	884	969	0.75	5.0A	8.7	4.7	13.4
NS50-B	10	B	50	52.7	48.0	158	300	887	972	0.75	5.0A	8.6	4.6	12.9
NS50-C	10	C	50	52.7	48.0	158	300	887	972	0.75	5.0A	6.5	4.8	13.0
N	30	A	0	56.3	48.0	169	300	879	963	0.75	4.0A	7.6	4.9	32.1
NS50	30	A	50	56.3	48.0	169	300	874	958	0.75	5.0A	9.4	4.7	31.8
NS60	30	A	60	56.3	48.0	169	300	872	956	0.75	5.0A	10.4	5.0	32.0
NS70	30	A	70	56.3	48.0	169	300	871	955	0.75	5.5A	10.8	5.0	31.6
NS80	30	A	80	56.3	48.0	169	300	870	953	0.75	5.5A	9.9	4.8	31.4
NS50-B	30	B	50	56.3	48.0	169	300	874	958	0.75	5.5A	7.7	4.7	31.3
NS50-C	30	C	50	56.3	48.0	169	300	874	958	0.75	5.5A	6.6	4.6	31.6

3. 4 試験方法

コンクリートの試験方法は表-3.9 に示すものとした。

表中の標準養生とは表-3.7～表-3.8に示した配合で、10、20、30℃で打設した供試体を打設温度下のもとで翌日キャッピング、材令2日で脱型し、以後20℃水中養生したものを指す。

表中の断熱養生とは図-3.2に示すように、材令1日まで気中槽で、以後水槽において、そのコンクリートの断熱温度上昇曲線にできるだけ近い温度履歴を与えたものである。

静弾性係数試験はコンプレッソメータを用い、50μひずみ点から最大荷重の2/3までの応力-ひずみ曲線を2次回帰し、50μひずみ点と最大荷重の1/3の点を結んだ直線から静弾性係数を算出した。

なお、大型の断熱温度上昇の試験においては試験終了後にコアを採取して、圧縮強度試験ならびに静弾性係数試験（歪ゲージを使用）を実施した。

表-3.9 コンクリートの試験方法

	供試体寸法など	試験方法	備考
圧縮強度試験	φ10×20cm	JIS A 1108に準ずる	標準養生, 断熱養生
引張強度試験	φ10×20cm	JIS A 1112に準ずる	標準養生, 断熱養生
静弾性係数試験	φ10×20cm	JIS原案に準じ、コンプレッソメータ使用	標準養生, 断熱養生
断熱温度上昇試験	大型 φ30×30cm		住友社製
	小型 3 リットル	3連空気循環式	東京理工社製
微少熱量計	—	3連式(C=20g, w=10g)	東京理工社製
水和熱	—	JIS R 5203に準ずる	—
コア強度試験	φ10×20cm	JIS A 11072に準ずる	圧縮強度, 静弾性係数試験

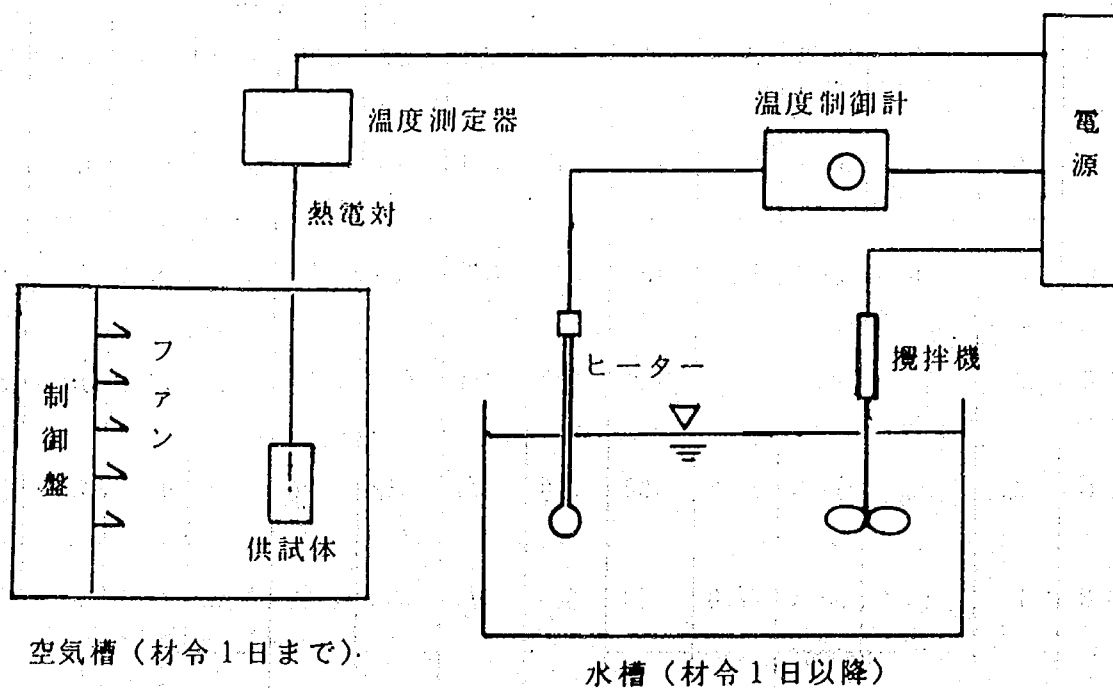


図-3.2 コンクリート供試体断熱養生方法

4. 試験結果

4.1 断熱温度上昇試験結果

断熱温度上昇曲線の回帰方法は30分毎に材令10日まで測定した実測値を以下の2式により、回帰した。

$$T = K (1 - \text{EXP}(-\alpha t)) \quad (4.1)$$

$$T = K (1 - \text{EXP}(-\alpha t^\beta)) \quad (4.2)$$

ただし、 T ：材令 t における断熱温度上昇量（℃）， t ：材令（日）， K, α, β ：定数 とする。

表-4.1に式(4.1)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-4.2に式(4.2)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示す。

表-4.1 コンクリートの断熱温度上昇試験結果（式(4.1)で回帰）

配 合 記 号	打設 温度 (℃)	φ30×30 住友社製			3リットル 東京理工社製		
		K	α	標準偏差	K	α	標準偏差
N	20	48.67	1.142	1.426	47.70	1.211	1.447
NS50	20	50.52	0.586	1.547	47.40	0.686	1.334
NS60	20	48.37	0.612	1.528	44.83	0.651	1.548
NS70	20	39.59	0.696	1.551	41.04	0.669	1.369
NS80	20	31.60	0.819	1.271	32.75	0.810	1.104
M	20	40.08	0.748	1.135	—	—	—
MS40	20	46.01	0.544	0.809	—	—	—
MS50	20	46.80	0.484	1.174	46.24	0.528	0.920
MS60	20	43.62	0.496	1.465	41.60	0.546	1.047
MS70	20	33.55	0.715	1.485	—	—	—
NS50-B	20	51.83	0.869	1.465	51.21	0.770	1.662
NS50-C	20	54.25	0.867	2.248	51.83	0.876	2.231
MS50-B	20	—	—	—	49.71	0.584	1.575
MS50-C	20	—	—	—	49.16	0.697	2.159
NS50	10	52.95	0.376	2.019	50.73	0.391	2.009
NS80	10	34.24	0.412	2.057	33.17	0.391	1.909
NS50	30	48.07	0.958	1.323	43.80	1.282	1.116
NS50-C	30	51.10	1.468	1.363	49.29	1.532	1.443

表-4.2 コンクリートの断熱温度上昇試験結果 (式(4.2)で回帰)

配 合 記 号	打設 温度 (°C)	φ30×30 住友社製				3リットル 東京理工社製			
		K	α	β	標準偏差	K	α	β	標準偏差
N	20	48.19	1.189	1.340	0.885	47.26	1.274	1.403	0.634
NS50	20	49.25	0.511	1.320	0.591	46.56	0.618	1.298	0.478
NS60	20	47.19	0.532	1.346	0.514	43.84	0.556	1.392	0.372
NS70	20	38.65	0.612	1.448	0.760	40.16	0.608	1.319	0.868
NS80	20	30.97	0.763	1.497	0.701	32.27	0.784	1.266	0.897
M	20	39.97	0.745	1.030	1.129	—	—	—	—
MS40	20	45.31	0.513	1.129	0.557	—	—	—	—
MS50	20	45.50	0.427	1.235	0.536	45.35	0.488	1.166	0.545
MS60	20	42.12	0.409	1.359	0.415	40.63	0.486	1.246	0.433
MS70	20	32.85	0.588	1.538	0.357	—	—	—	—
NS50-B	20	—	—	—	—	50.21	0.690	1.455	0.696
NS50-C	20	53.19	0.818	1.555	1.057	50.84	0.821	1.607	0.919
MS50-B	20	—	—	—	—	48.44	0.515	1.314	0.834
MS50-C	20	—	—	—	—	47.88	0.599	1.545	1.009
NS50	10	49.73	0.287	1.419	0.460	47.86	0.295	1.431	0.439
NS80	10	31.77	0.253	1.805	0.654	31.22	0.281	1.743	0.509
NS50	30	47.52	0.944	1.296	0.797	43.53	0.326	1.280	0.349
NS50-C	30	50.60	1.657	1.305	1.012	48.91	1.809	1.441	0.734

表-4.1及び表-4.2の標準偏差の値によると、標準偏差が2より大きくなるのは、K値が大きい時であり、式(4.1)によって回帰した場合だけである。今回の回帰結果では断熱温度上昇曲線の初期は式(4.2)で回帰した方が実測値に近い値をとるが、長期においては、やや、式(4.1)の方が実測値に近い傾向にある。これについては6章において述べる。

以上のことから、温度解析および温度応力解析において、コンクリート断面の温度差によって発生する内部拘束応力を計算する場合には、初期の誤差の少ない、式(4.2)の回帰式を用いる方が精度が良いと思われる。

図-4.1及び図-4.2に高炉スラグの混入率を変化させた場合の断熱温度上昇曲線を示すが、高炉スラグをセメントに添加した場合、混入率50%付近で終局断熱温度上昇量(K値)が最大となる。これは、普通セメント、中庸熱セメントのいずれもこの傾向にあり、普通セメントに高炉スラグを50%混入するとK値が1程度大きくなるだけだが、中庸熱セメントに高炉スラグを40~50%混入するとK値が5程度大きくなる。

高炉スラグを混入すると、初期の温度上昇量は小さくなるが、最終的には温度上昇量が大きくなる場合もあり、マスコンクリートに有利かどうかは解析などで検討する必要がある。

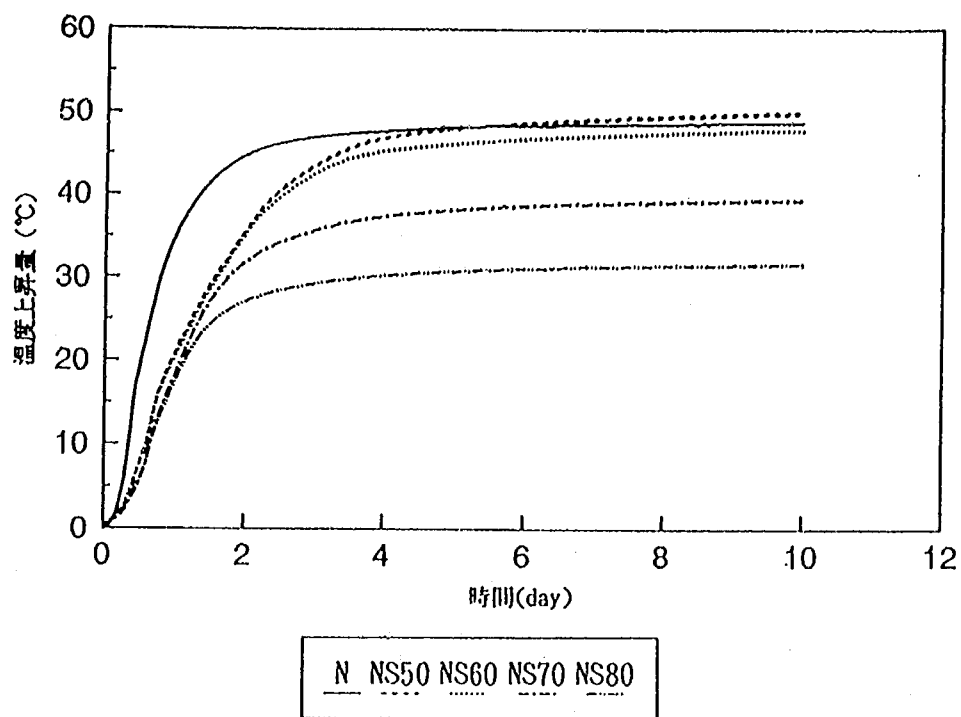


図-4.1 断熱温度上昇試験結果 (その1:普通セメント)

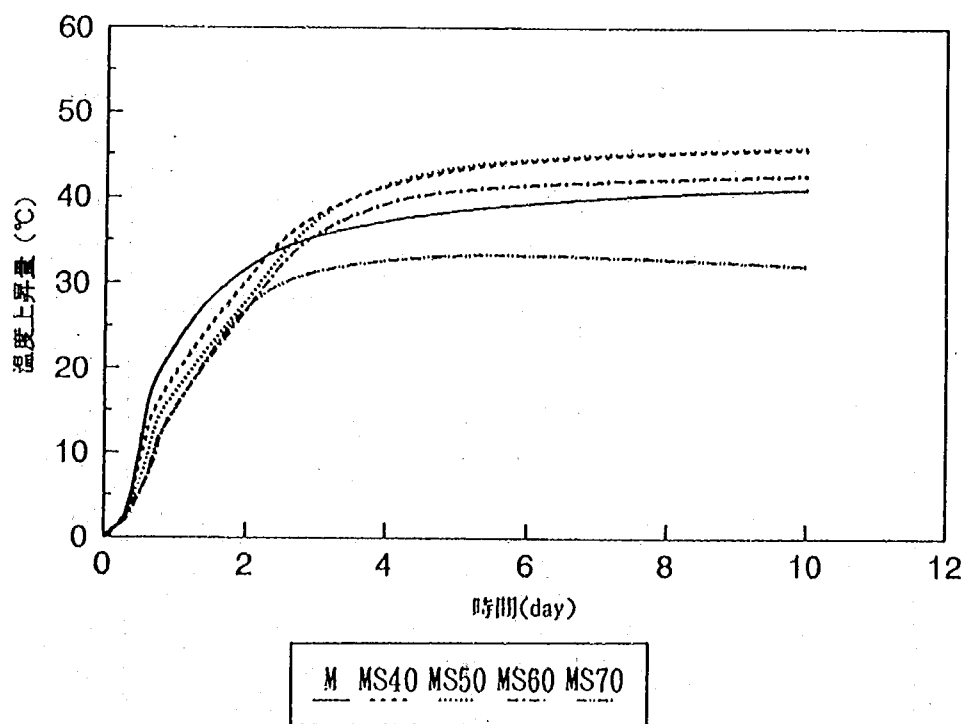


図-4.2 断熱温度上昇試験結果 (その2:中庸熱セメント)

4. 2 強度試験結果

表-4.3～表-4.8 に標準養生、断熱養生の圧縮強度、引張強度及び静弾性係数試験結果を示す。

表-4. 3 圧縮及び引張強度試験結果 (標準養生)

配 合 記 号	打設 温度 (°C)	圧縮強度 (kgf/cm ²)				引張強度 (kgf/cm ²)			
		3 d	7 d	28 d	91 d	3 d	7 d	28 d	91 d
N	20	238	341	445	507	23.4	31.6	34.2	38.8
NS50	20	129	208	391	497	14.2	21.1	37.3	39.9
NS60	20	111	194	393	512	12.2	16.8	34.5	36.5
NS70	20	102	176	363	485	10.0	17.8	33.9	40.0
NS80	20	99.4	195	324	439	11.3	17.3	24.4	30.7
M	20	140	224	420	602	15.1	22.9	30.9	40.8
MS40	20	85.9	150	316	502	9.12	15.0	32.0	35.9
MS50	20	77.4	131	294	525	8.06	13.2	27.1	37.2
MS60	20	69.0	115	291	472	7.50	11.5	25.9	36.2
MS70	20	67.0	141	313	443	6.40	13.2	25.2	34.3
N	10	229	414	510	546	22.9	33.2	36.7	36.2
NS50	10	117	243	493	640	12.5	22.1	34.2	42.1
NS60	10	92.1	224	464	630	10.8	20.2	32.6	41.1
NS70	10	75.1	217	406	587	8.76	19.9	33.5	35.7
NS80	10	56.9	159	326	475	6.05	15.7	29.5	34.6
N	30	242	316	407	466	22.8	25.0	33.1	34.9
NS50	30	134	192	352	460	13.5	19.4	29.3	34.0
NS60	30	118	172	319	429	12.2	15.9	26.1	33.8
NS70	30	111	168	274	356	11.4	15.8	24.3	30.8
NS80	30	124	158	233	304	12.2	15.1	21.1	25.1
NS50-B	20	153	272	454	541	15.6	24.0	36.7	36.0
NS50-C	20	183	301	459	494	16.2	24.0	29.5	33.3
NS50-B	10	117	287	514	589	13.7	26.4	36.4	43.0
NS50-C	10	142	347	580	635	15.5	32.5	40.5	45.0
NS50-B	30	161	224	366	446	15.9	20.6	28.6	35.3
NS50-C	30	197	260	388	423	19.4	19.8	30.3	32.8

表-4.4 静弹性係数試験結果 (標準養生)

配 合 記 号	打設 温度 (°C)	静弹性係数 ($\times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$)				配 合	打設 温度 (°C)	静弹性係数 ($\times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$)			
		3 d	7 d	28 d	91 d			3 d	7 d	28 d	91 d
N	20	2.735	3.154	3.465	3.746	N	10	2.584	3.101	3.490	3.996
NS50	20	1.947	2.365	3.204	3.786	NS50	10	1.865	2.420	3.348	4.146
NS60	20	1.806	2.297	3.234	3.706	NS60	10	1.604	2.248	3.340	4.013
NS70	20	1.693	1.996	3.237	3.866	NS70	10	1.426	2.336	3.150	4.017
NS80	20	1.641	2.157	2.735	3.649	NS80	10	1.240	1.965	2.943	3.822
M	20	2.140	2.822	3.324	3.840	N	30	2.639	2.766	3.183	3.605
MS40	20	1.594	2.122	2.963	3.821	NS50	30	1.907	2.307	3.039	3.736
MS50	20	1.366	1.910	2.609	3.956	NS60	30	1.758	2.094	2.952	3.675
MS60	20	1.301	1.746	2.790	3.796	NS70	30	1.586	2.029	2.743	3.247
MS70	20	1.049	1.634	2.755	3.618	NS80	30	1.365	1.753	2.048	2.809
NS50-B	20	2.109	2.826	3.289	3.712	NS50-B	10	2.101	2.728	3.386	3.995
NS50-C	20	2.060	3.085	3.565	3.713	NS50-C	10	2.216	2.938	3.608	4.025
						NS50-B	30	2.111	2.404	3.051	3.580
						NS50-C	30	2.232	2.753	3.391	3.722

表-4.5 断熱養生コンクリート試験結果 (打設温度 20℃)

配合 記号	材令 (日)	積算温度 (℃・day)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	静弾性係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)
N	3	184.4	366	31.3	3.145
	7	485.2	407	34.7	3.201
	14	1012.4	415	32.8	3.346
	28	2065.2	408	33.4	3.447
NS50	2	96.5	224	22.9	2.402
	3	165.1	337	33.5	2.765
	7	467.6	406	34.7	3.352
	14	995.7	429	33.9	3.579
NS60	2	96.2	215	21.2	2.267
	3	165.9	332	29.1	2.970
	7	465.4	417	34.5	3.572
	14	990.3	425	37.6	3.705
NS70	2	96.9	209	21.1	2.481
	3	161.8	328	31.7	3.343
	7	439.5	386	32.1	3.515
	14	936.5	400	36.6	3.692
NS80	2	93.5	221	20.8	2.685
	3	152.8	289	28.3	3.057
	7	402.5	356	33.0	3.300
	14	846.1	369	32.9	3.457
M	2	108.4	221	21.9	2.676
	3	173.9	278	25.9	2.748
	7	450.9	397	36.3	3.478
	14	933.0	465	41.0	3.585
MS40	2	93.8	152	16.5	2.085
	3	157.6	292	26.8	2.759
	7	449.8	410	35.2	3.595
	14	977.8	431	36.6	3.632
MS50	2	93.8	162	17.0	1.912
	3	157.6	296	26.7	2.776
	7	449.8	410	36.5	3.530
	14	977.8	415	37.7	3.720
MS60	2	94.3	161	14.2	2.155
	3	159.2	281	26.3	2.742
	7	442.8	388	36.6	3.536
	14	962.8	415	36.5	3.721
MS70	2	89.2	150	14.3	1.985
	3	149.9	255	24.4	2.953
	7	404.7	346	31.0	3.264
	14	859.7	386	32.8	3.493

表-4.6 断熱養生コンクリート試験結果 (打設温度10℃)

配合 記号	材令 (日)	積算温度 (℃・day)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	静弾性係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)
N	2	68.9	279	24.8	2.705
	3	127.2	373	32.1	3.187
	7	408.1	458	38.0	3.753
	14	905.1	481	42.0	3.694
NS50	2	68.9	157	15.7	2.024
	3	127.2	340	30.9	2.995
	7	408.1	500	41.6	3.792
	14	905.1	510	45.7	3.916
NS60	2	68.9	136	13.7	1.826
	3	127.2	291	26.4	2.875
	7	408.1	468	37.8	3.862
	14	905.1	504	39.1	3.909
NS70	2	66.3	109	11.2	1.555
	3	121.1	252	24.0	2.793
	7	378.3	428	35.4	3.819
	14	833.3	456	37.8	3.880
NS80	2	61.1	90.9	8.83	1.343
	3	107.4	194	20.5	2.272
	7	318.2	333	31.8	3.367
	14	689.2	361	33.9	3.468

表-4.7 断熱養生コンクリート試験結果 (打設温度30℃)

配合 記号	材令 (日)	積算温度 (℃・day)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	静弾性係数 (×10 ⁶ kgf/cm ²)
N	1	57.2	231	21.9	2.589
	2	134.3	298	26.2	2.863
	3	219.3	304	26.6	2.901
	7	559.3	309	27.0	3.022
NS50	1	52.5	123	13.5	1.726
	2	128.9	253	23.5	2.669
	3	198.0	274	24.2	2.712
	7	528.0	298	25.1	3.080
NS60	1	52.5	123	12.6	1.681
	2	128.9	250	24.2	2.657
	3	198.0	283	24.6	2.828
	7	528.0	288	25.1	2.949
NS70	1	52.7	134	12.8	1.866
	2	124.7	232	24.0	2.736
	3	199.7	232	24.3	2.750
	7	505.9	275	24.1	2.903
NS80	1	52.5	136	12.9	2.010
	2	118.9	201	19.9	2.479
	3	187.9	211	22.2	2.626
	7	467.6	224	22.3	2.713

表-4.8 断熱養生コンクリート試験結果 (高炉スラグ微粉末(BI=6000, 8000)使用)

配合 記号	温度 (°C)	材令 (日)	積算温度 (°C・day)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	静弾性係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)
NS50 -B	20	2	116.5	352	28.4	3.203
		3	196.8	392	30.6	3.499
		7	529.8	395	31.2	3.468
		14	1124.8	397	28.6	3.516
NS50 -C	20	2	116.5	416	30.6	3.301
		3	196.8	422	31.2	3.506
		7	529.8	425	33.7	3.481
		14	1124.8	442	30.9	3.362
NS50 -B	10	2	75.8	287	28.1	2.693
		3	143.3	412	39.4	3.121
		7	446.5	484	41.7	3.595
		14	978.5	494	39.6	3.879
NS50 -C	10	2	76.1	350	30.9	2.758
		3	143.6	477	38.9	3.278
		7	446.8	498	36.7	3.650
		14	978.8	492	42.5	3.800
NS50 -B	30	1	52.6	178	17.2	2.210
		2	135.5	265	22.5	2.863
		3	223.4	257	21.8	2.872
		7	585.9	267	22.0	3.110
NS50 -C	30	1	52.8	234	21.1	2.329
		2	139.5	297	24.0	2.986
		3	229.5	296	24.2	2.996
		7	595.1	302	24.0	3.165
MS50 -B	20	2	103.1	240	24.3	2.541
		3	177.8	323	28.9	3.191
		7	494.2	363	31.7	3.398
		14	1061.2	376	31.0	3.516
MS50 -C	20	2	103.1	335	29.6	3.088
		3	177.8	411	33.1	3.463
		7	494.2	407	33.6	3.518
		14	1061.2	414	34.4	3.614

図-4.3～図-4.5に標準養生の高炉スラグの混入率と圧縮強度の関係を示す。標準養生においては、既往の文献と同様に、初期強度は高炉スラグの混入率が高い程強度が小さく、材令91日になると強度差は少なくなる。

図-4.6～図-4.10に積算温度と圧縮強度の関係を標準養生と断熱養生について示す。

この図によると、打設温度並びに高炉スラグの混入量が異なると積算温度と圧縮強度の関係は違うものとなる。なお、ここで言う積算温度は -10°C を温度の基準点としたものであり、以下の式で表される。

$$\text{積算温度：} M (^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}) = \sum (T + 10) \cdot a_t \quad (4.3)$$

T ：温度 $(^{\circ}\text{C})$ ， a_t ：温度 T の時の日数

図-4.11～図-4.13に打設温度が圧縮強度に及ぼす影響を示す。

今回の配合では打設温度が変わると単位水量（水セメント比）が変化するが、それ以上に打設温度が圧縮強度に与える影響が大きい。普通セメント、高炉セメントにおいては標準養生の91日圧縮強度が打設温度 10°C で $100(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 程度、断熱養生の7日圧縮強度は打設温度 10°C で $50(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 程度差が生じてしまうので、水セメント比の差を割り引いても打設温度がコンクリート強度に与える影響は大きい。

断熱養生マスコンクリート温度（応力）解析において、断熱養生の圧縮強度をマスコンクリート断面の中心部、標準養生の圧縮強度を断面の熱伝達境界と考えると、マスコンクリート施工において、打設温度を下げることは、強度の面からも重要であると言える。

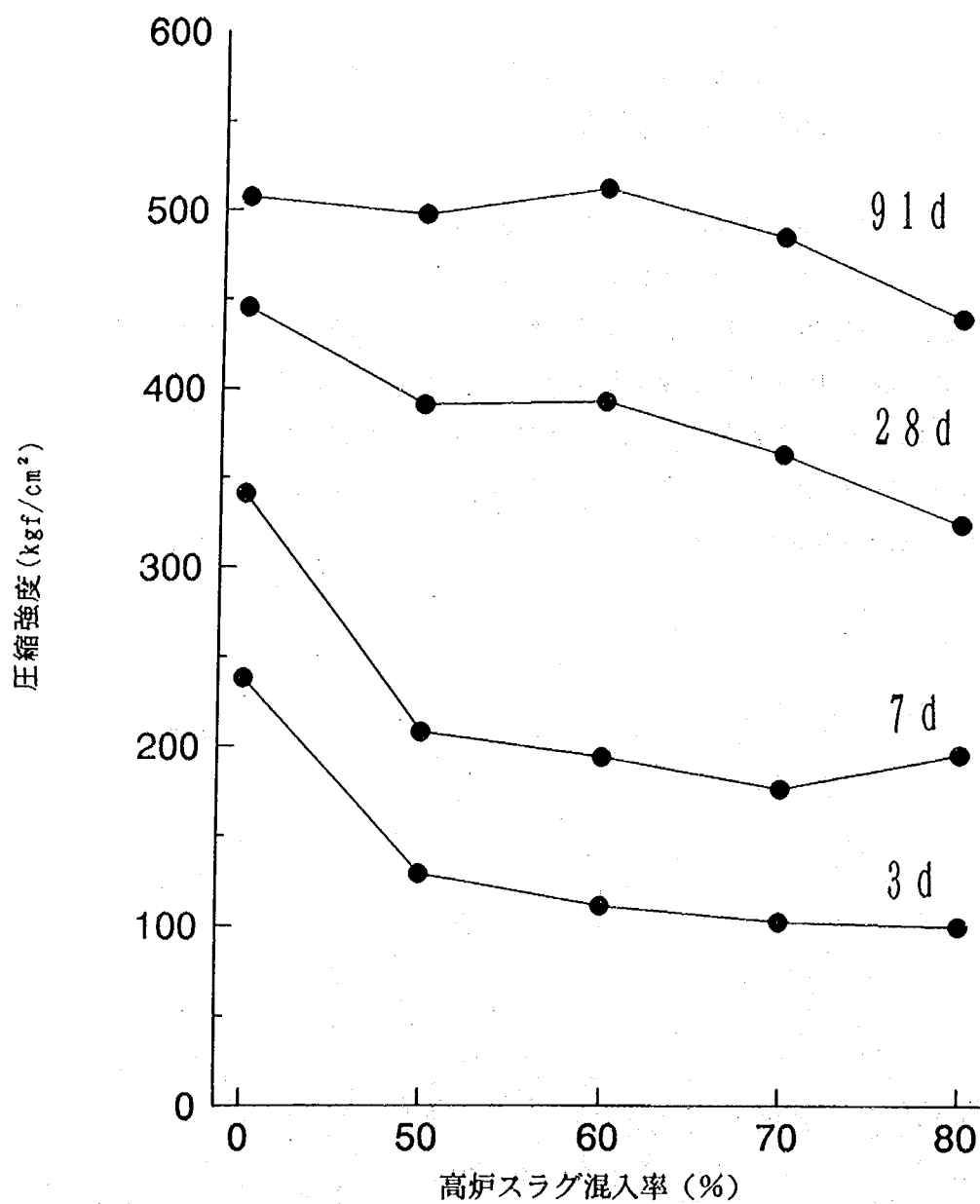


図-4. 3 高炉スラグ混入率が圧縮強度に及ぼす影響 (普通セメント : 打設温度 20℃)

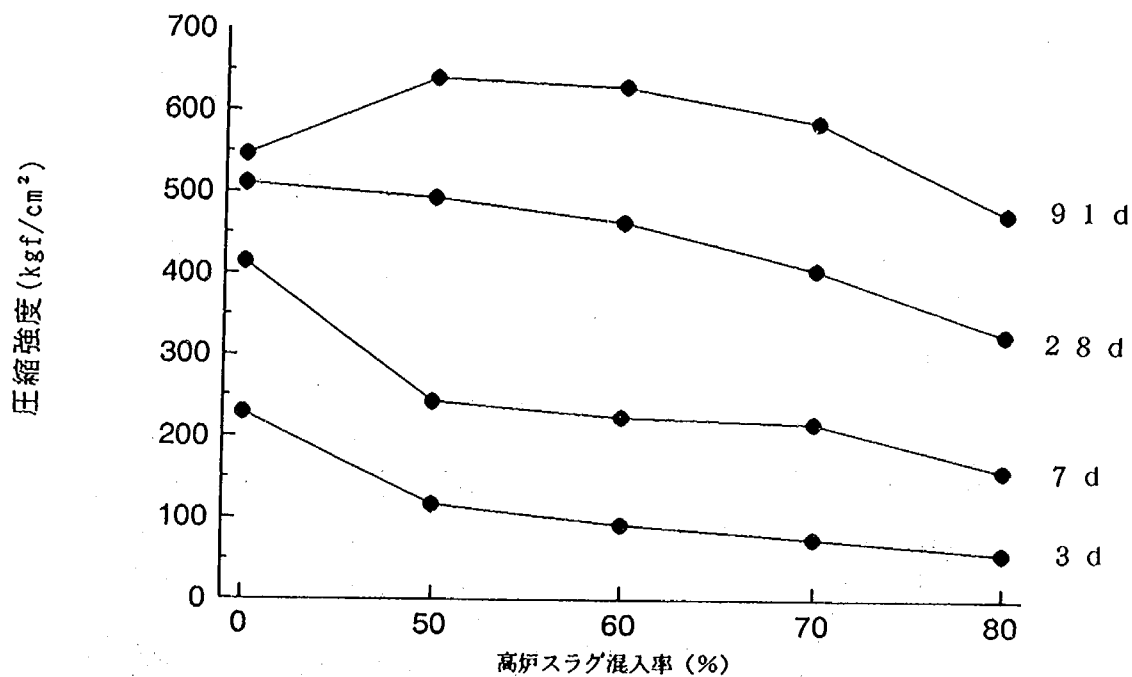


図-4.4 高炉スラグ混入率が圧縮強度に及ぼす影響 (普通セメント：打設温度10℃)

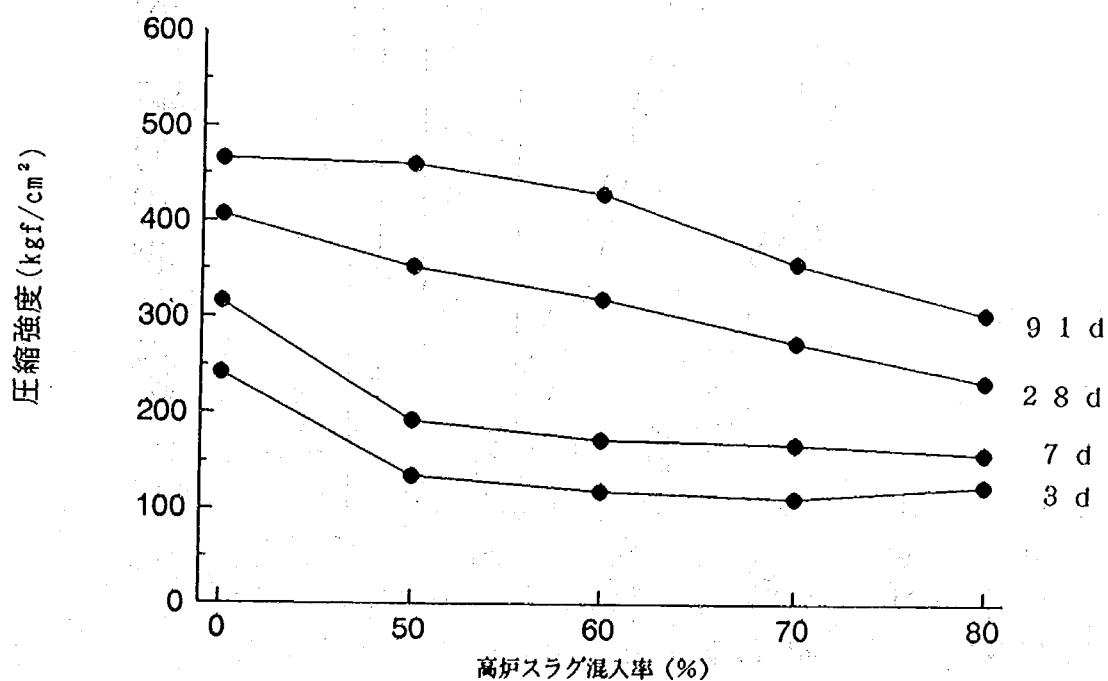


図-4.5 高炉スラグ混入率が圧縮強度に及ぼす影響 (普通セメント：打設温度30℃)

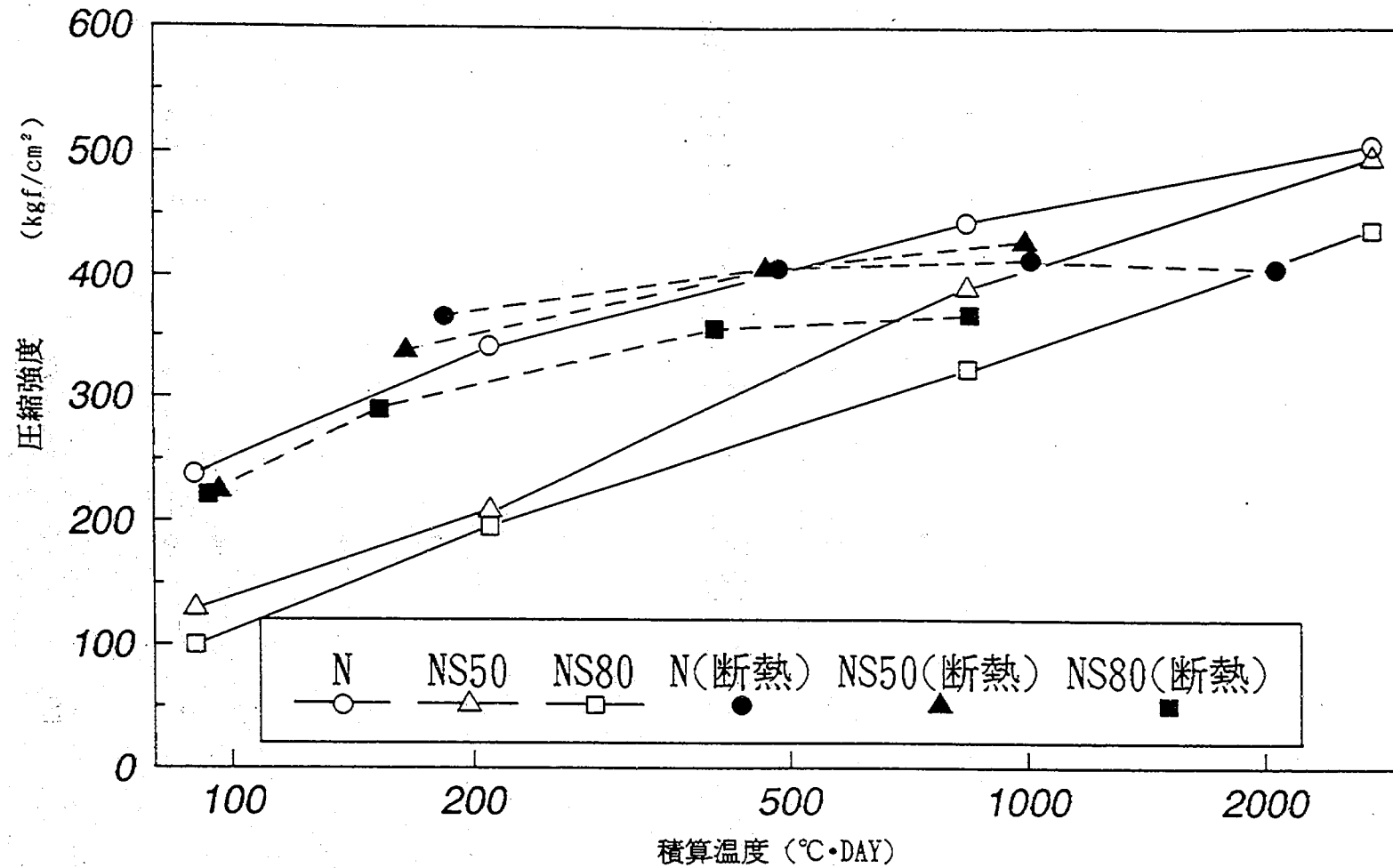


図-4.6 標準養生と断熱養生の圧縮強度と積算温度の関係
(その1: N, NS50, NS80)

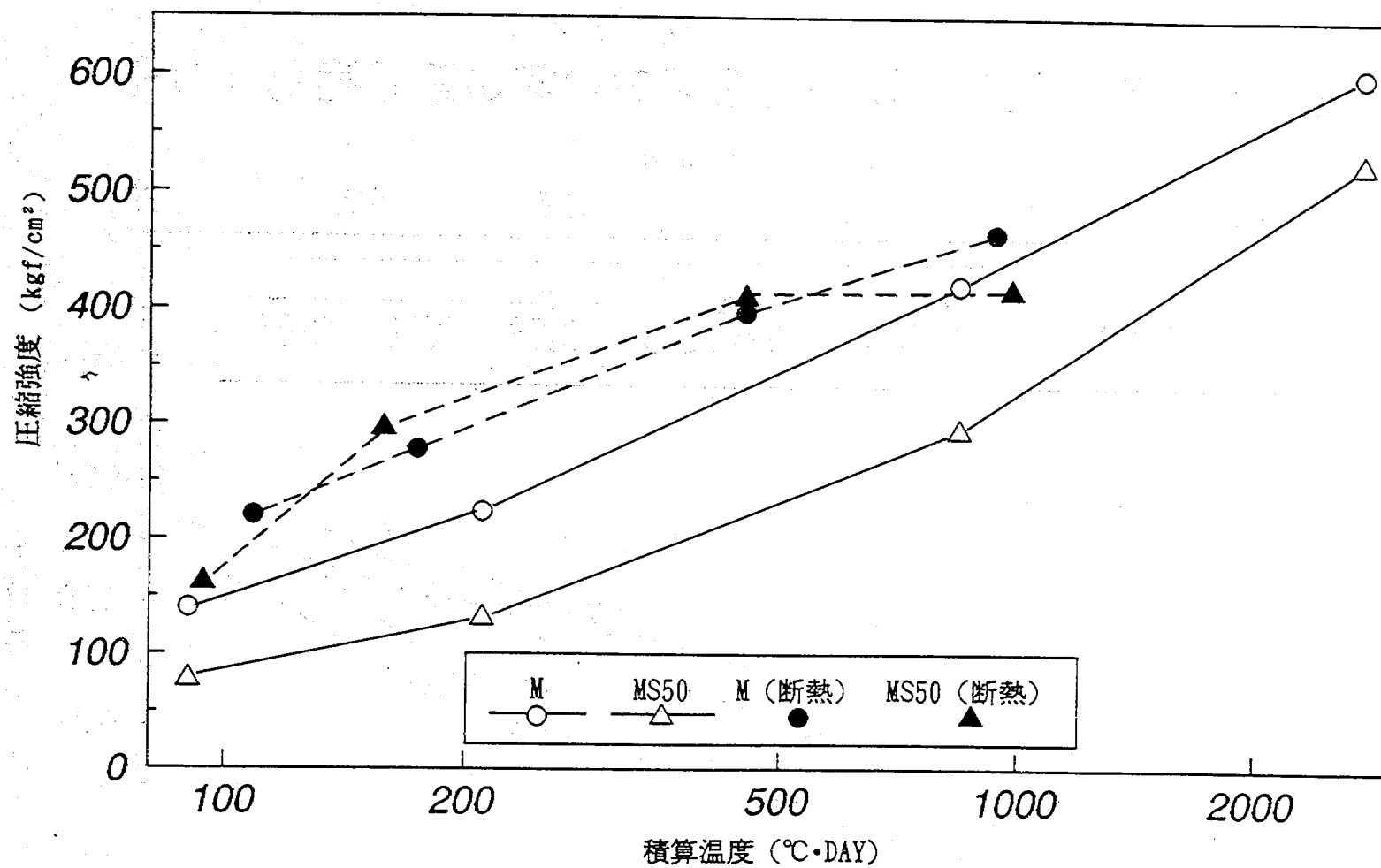


図-4.7 標準養生と断熱養生の圧縮強度と積算温度の関係
(その2 : M, MS50)

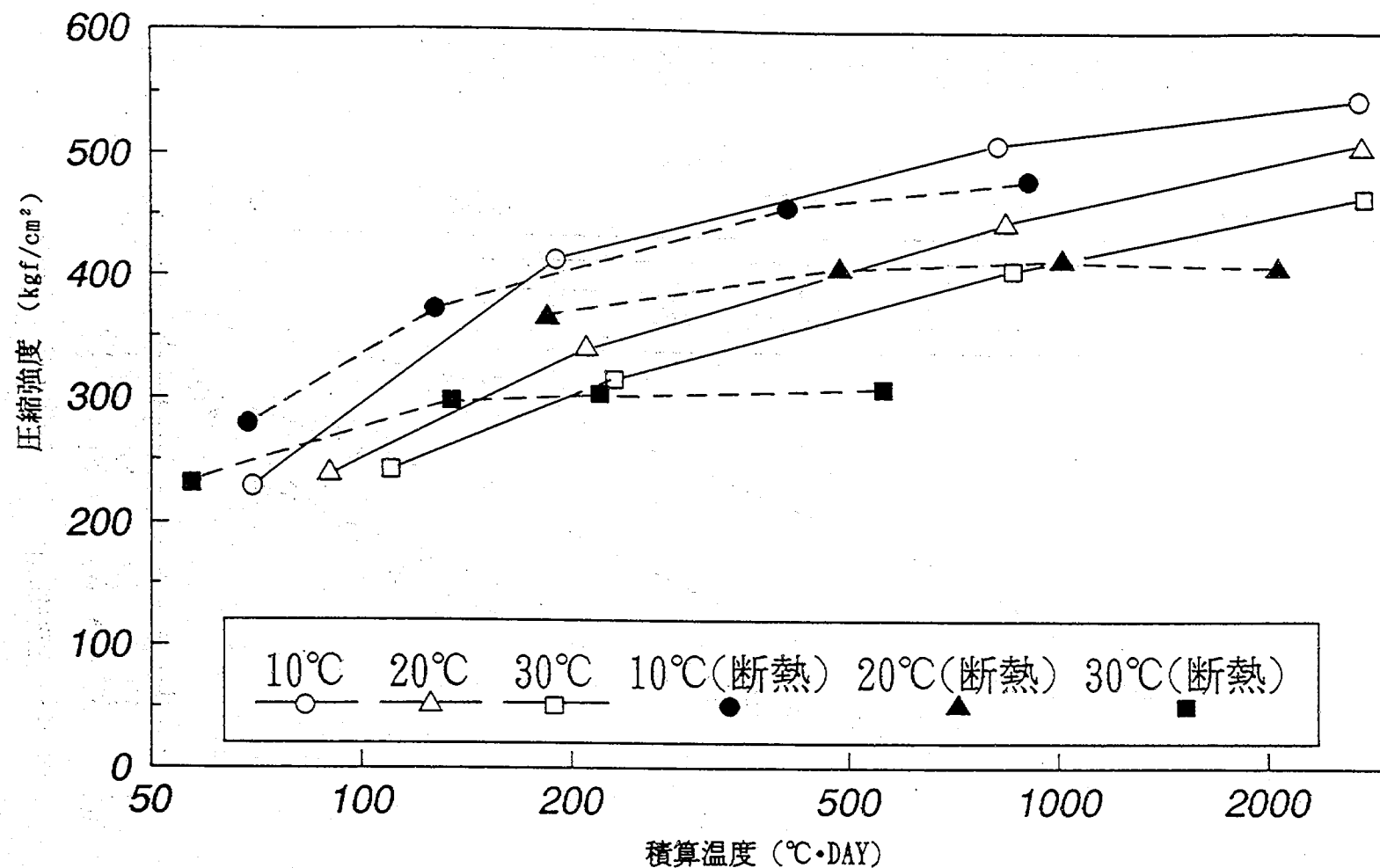


図-4.8 打設温度の違いによる圧縮強度と積算温度の関係
(その1:N)

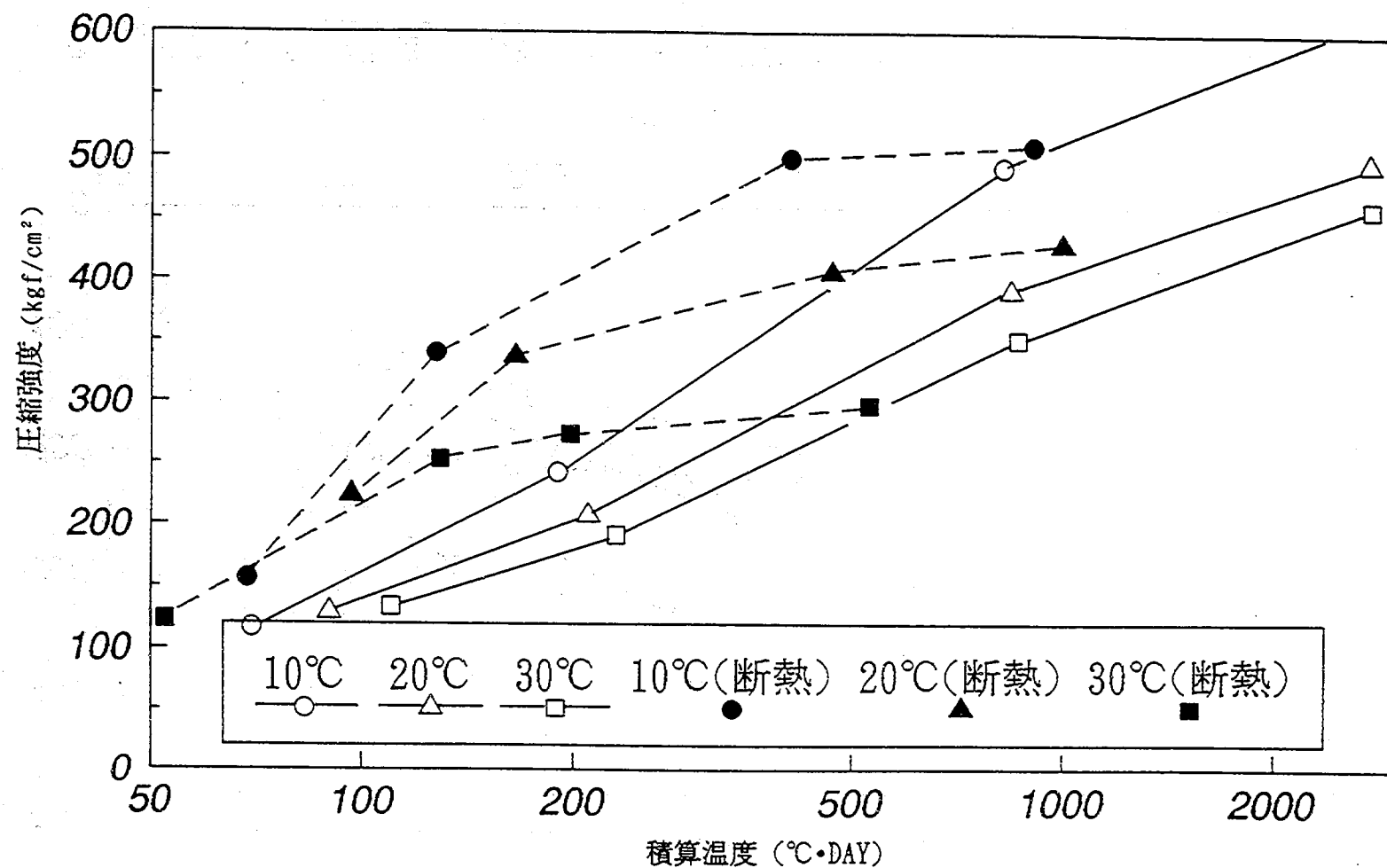


図-4.9 打設温度の違いによる圧縮強度と積算温度の関係
(その2: NS50)

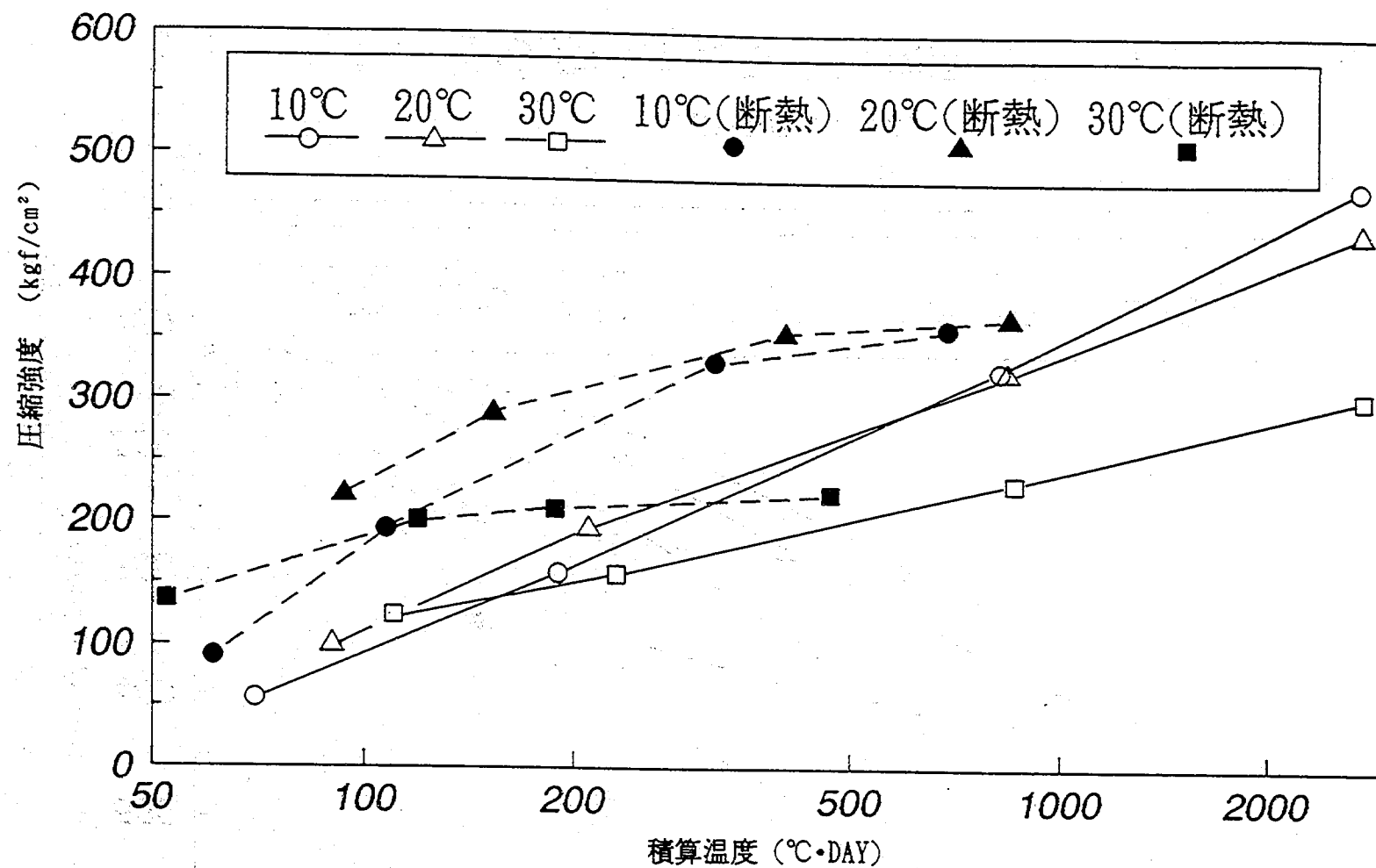


図-4.10 打設温度の違いによる圧縮強度と積算温度の関係
(その3: NS80)

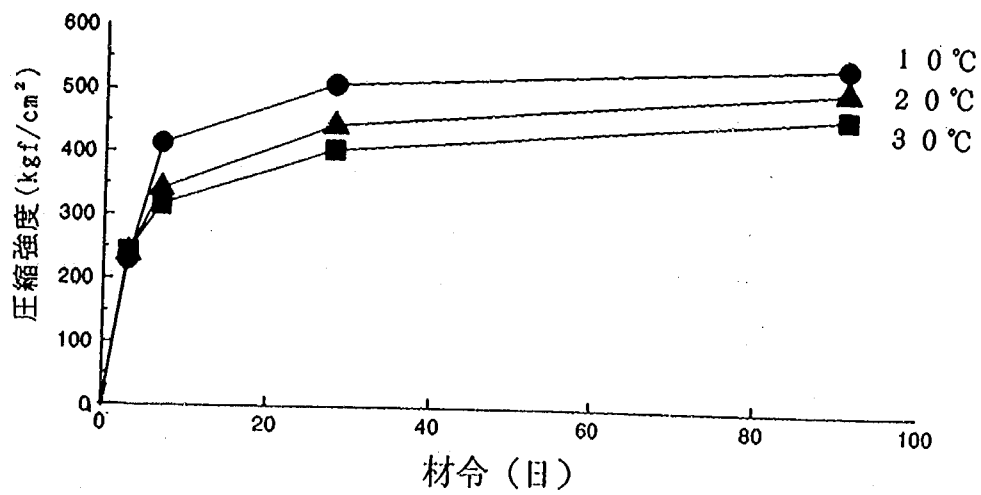


図-4.11 打設温度が圧縮強度に及ぼす影響 (N)

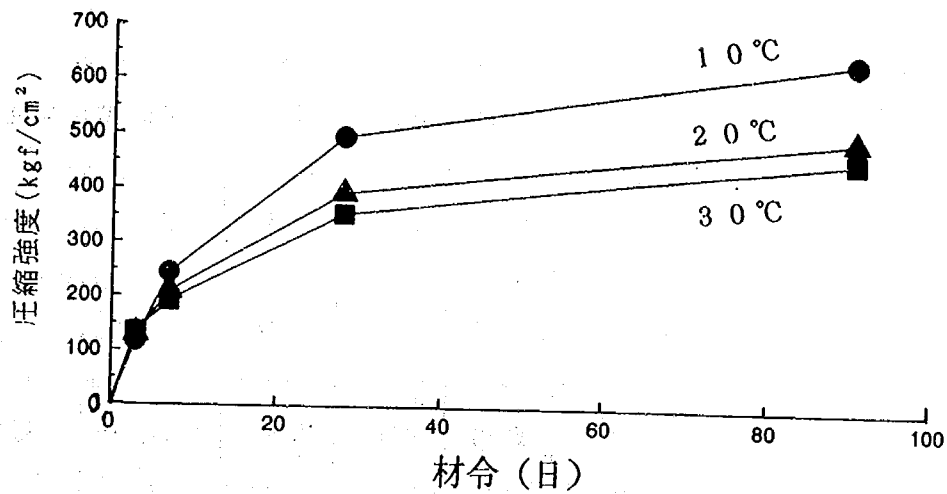


図-4.12 打設温度が圧縮強度に及ぼす影響 (NS50)

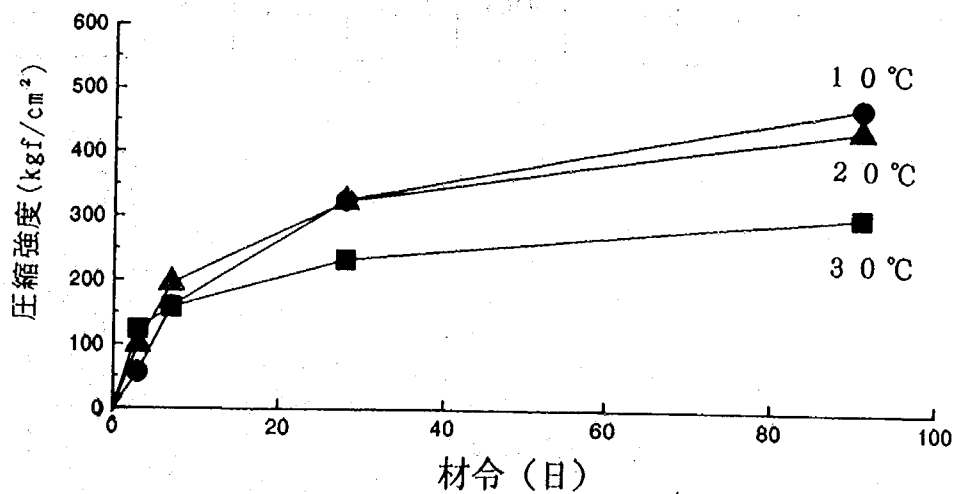


図-4.13 打設温度が圧縮強度に及ぼす影響 (NS80)

4.3 断熱温度上昇試験供試体による切り取りコア強度試験結果

断熱温度上昇試験は今回、材令10日まで測定した。試験終了後、 $\phi 30 \times 30$ cmの断熱温度上昇試験の供試体から $\phi 10 \times 20$ cmのコアを抜き、コアの両面を研磨した後JIS A 1107に準じて圧縮強度試験を行った。また、コアの側面は平滑でないため、歪ゲージを貼りやすいように供試体側面に樹脂を塗布し、歪ゲージによって弾性係数を測定した。

表-4.9に切り取りコア試験結果を示す。

切り取りコア供試体は断熱温度上昇試験により断熱状態で養生されていて、断熱養生の供試体と似た温度履歴であるので、断熱養生の圧縮強度に近い試験結果を示すと考えられる。この相関については5章で述べることとする。

表-4.9 切り取りコア試験結果

配 合	NS50	NS60	NS70	NS80	NS50-10	NS50-30
圧縮強度(kgf/cm ²)	320	385	267	255	379	249
弾性係数($\times 10^6$ kgf/cm ²)	3.79	3.68	3.07	3.16	3.40	2.83
配 合	M	MS40	MS70	N-10	NS80-10	NS50B-30
圧縮強度(kgf/cm ²)	437	391	310	385	305	248
弾性係数($\times 10^6$ kgf/cm ²)	3.48	3.05	3.11	3.27	3.04	2.50

4. 4 水和熱試験結果

セメントの水和熱を以下の2種類の方法で測定した。

1) 微量熱量計 (東京理工社製)

2) 溶解熱法 (JIS R 5203 セメントの水和熱測定方法)

微量熱量計試験における配合はセメント20.0(g)に対して水10.0(g)とし、材令3日まで20℃で測定した。

微量熱量計と溶解熱法による水和熱は表-4.10に示す通りである。

どちらの試験法においても、高炉スラグの混入率が大きいと材令に関係なく水和熱は小さくなる。これは断熱温度上昇試験結果と異なるが、20℃の一定温度下では高炉スラグの活性化エネルギーの影響が小さいためであり、高温下では、高炉スラグの混入率と水和熱の関係も異なった結果になると考えられる。

なお、この2つの試験法の相関については5章で述べることにする。

表-4.10 微量熱量計と溶解熱法による水和熱 (単位: cal/g)

セメント の種類	微量熱量計の水和熱 (cal/g)			溶解熱法による水和熱 (cal/g)			
	1 d	2 d	3 d	3 d	7 d	28 d	91 d
N	37.9	52.4	59.0	65.6	79.4	92.8	99.1
NS50	26.8	44.3	51.7	51.6	67.8	84.3	89.4
NS60	24.3	41.0	48.6	47.0	61.4	76.9	83.2
NS70	21.0	37.3	44.8	42.1	53.6	65.8	72.9
NS80	17.3	32.2	39.2	37.6	46.9	54.8	60.7
M	31.7	47.7	53.9	53.0	64.0	77.2	85.0
MS40	22.3	39.3	44.9	44.4	57.2	77.2	84.8
MS50	19.8	36.0	41.8	41.6	55.6	74.6	81.6
MS60	17.3	33.4	39.9	38.4	50.2	66.6	74.3
MS70	15.7	28.7	33.2	36.7	48.4	61.0	67.1
NS50-B	30.1	46.8	57.3	56.8	70.2	86.3	92.6
NS50-C	31.1	47.6	57.1	61.6	75.0	85.6	
MS50-B	21.2	39.1	48.8	46.6	61.6	77.5	
MS50-C	25.4	42.4	53.2	49.4	64.7	77.0	

注: 空欄は試験中である。

5. 試験方法の検討

5.1 断熱温度上昇試験方法の検討

5.1.1 断熱温度上昇試験装置

マスコンクリートにおいて、セメントの種類、配合から得られる断熱温度上昇曲線を把握することは大変重要であり、施工前に実験で得られた断熱温度上昇曲線を用いて温度解析、温度応力解析を実施し、ひびわれ指数などで、ある程度の安全を確認するのがほとんどである。

しかし、断熱温度上昇試験機は高価であるため、保有している機関も少ない。また、試験機の種類も様々な上（空気循環、水循環など）供試体寸法も一定の決まりがなくデータの信頼性に欠ける。

そこで、本報告は実験に住友社製、東京理工社製の2つの試験機を用い、その関係を検討したものである。

表-5.1にそれぞれの試験機の特徴を示す。

表-5.1 断熱温度上昇試験装置の種類

製造元	機構	試験機の特徴	供試体寸法	備 考
住友社製	油循環	供試体に油（水）が循環しているジャケットを密着させている。	$\phi 30 \times 30 \text{ cm}$ （ $\phi 60 \times 60 \text{ cm}$ も可能）	文献によると他の試験機より大きいK値がでる。 部材実験の温度とも一致。
東京理工社製	空気循環	それぞれの供試体にヒーターを巻いてあり、供試体の内外を同じ温度に保つ。	1リットル×3試料 3リットル×3試料 $\phi 30 \times 30 \text{ cm}$ のいずれかを選択	本来、モルタル、ペースト用の試験機。 少ない試料で3種類測定できる。

5.1.2 断熱温度上昇試験における試験方法（供試体寸法）が試験結果に及ぼす影響

供試体寸法 $\phi 30 \times 30 \text{ cm}$ （約21リットル、住友社製）、3リットル（東京理工社製）の2種類について断熱温度上昇試験を実施し、試験結果を

$$T = K (1 - \text{EXP}(-\alpha t)) \quad (5.1)$$

$$T = K (1 - \text{EXP}(-\alpha t^\beta)) \quad (5.2)$$

T：材令tにおける断熱温度上昇量（℃），t：材令（日），K， α ：定数

の2式で回帰した。

式(5.1)、(5.2)の定数K， α ， β において、 $\phi 30 \times 30 \text{ cm}$ 供試体（住友社製）で試験した結果を K_L ， α_L ， β_L とし、3リットル供試体（東京理工社製）で試験した結果を K_M ， α_M ， β_M とするとそれぞれの回帰式の定数を供試体寸法で比較すると表-5.2の通りとなる。

表-5.2 試験方法と断熱温度上昇回帰定数の関係

回帰式	定数	供試体寸法 $\phi 30 \times 30\text{cm}$ と 3リットルの関係式	相関係数
(5.1)	K	$K_M = 0.859 \cdot K_L + 4.99$	0.976
	α	$\alpha_L = 0.874 \cdot \alpha_M + 0.050$	0.961
(5.2)	K	$K_M = 0.854 \cdot K_L + 5.26$	0.980
	α	$\alpha_L = 0.854 \cdot \alpha_M - 0.052$	0.967
	β	$\beta_L = 0.723 \cdot \beta_M + 0.398$	0.750

注： K_L , α_L , β_L ：住友社製試験機（供試体寸法 $\phi 30 \times 30\text{cm}$ ）における断熱温度上昇曲線の回帰定数
 K_M , α_M , β_M ：東京理工社製試験機（供試体寸法 3リットル）における断熱温度上昇曲線の回帰定数
これらの回帰定数の関係は原点を通る直線となるはずであるから、切片を 0 とすると表-5.3 のようになる。

表-5.3 試験方法と断熱温度上昇回帰定数の関係（切片 0）

回帰式	定数	供試体寸法 $\phi 30 \times 30\text{cm}$ と 3リットルの関係式	相関係数
(5.1)	K	$K_M = 0.964 \cdot K_L$	0.969
	α	$\alpha_M = 1.061 \cdot \alpha_L$	0.961
(5.2)	K	$K_M = 0.968 \cdot K_L$	0.971
	α	$\alpha_M = 1.088 \cdot \alpha_L$	0.967
	β	$\beta_M = 0.988 \cdot \beta_L$	0.722

注： K_L , α_L , β_L ：住友社製試験機（供試体寸法 $\phi 30 \times 30\text{cm}$ ）における断熱温度上昇曲線の回帰定数
 K_M , α_M , β_M ：東京理工社製試験機（供試体寸法 3リットル）における断熱温度上昇曲線の回帰定数
これによると、式(5.2)の定数 β については相関が悪いが、その他の定数については良い相関が認められる。
 K_L と K_M , α_L と α_M の関係は終局の断熱温度上昇量が比較的小さい配合においては近い値を示すが、終局の断熱温度上昇量が大きくなるにつれて、 K_L は K_M より大きくなり、 α_L は α_M より小さくなる。

これを考慮すると、 K_L と K_M , α_L と α_M の関係は弾性係数や引張強度の推定式に類似していることから、定数 c_1' , c_2' を用いて以下の式によっても回帰できる。

$$K_M = c_1' \cdot K_L^{c_2'} \quad (5.3)$$

$$\alpha_L = c_1' \cdot \alpha_M^{c_2'} \quad (5.4)$$

式(5.3), (5.4)の回帰結果を表-5.4に示す。

表-5.4 試験方法と断熱温度上昇回帰定数の関係

断熱温度上昇曲線式		式(5.3), (5.4)の回帰定数		
回帰式	定数	c 1'	c 2'	相関係数
(5.1)	K	1.576	0.873	0.978
	α	0.933	0.959	0.971
(5.2)	K	1.609	0.868	0.982
	α	0.913	0.964	0.974

注: K_L , α_L , β_L : 住友社製試験機(供試体寸法 $\phi 30 \times 30 \text{cm}$)における断熱温度上昇曲線の回帰定数
 K_M , α_M , β_M : 東京理工社製試験機(供試体寸法 3 リットル)における断熱温度上昇曲線の回帰定数
 $c 1'$, $c 2'$: 試験方法(供試体寸法)の差による関係式の回帰定数

これらの回帰結果を図-5.1, 図-5.2に示す。

供試体寸法の差による断熱温度上昇定数の関係式(5.3), (5.4)は、一次式の回帰よりも良い相関を示しているが、図-5.1, 図-5.2に示す通り、一次式の回帰とは大きく回帰線が変わらない。
 一次式の回帰でも十分相関係数は良く、現状では問題がないので、今後データを蓄積した際に再度検討するのが良いと考えられる。

この2種類の試験機によって得られる断熱温度上昇曲線が一致しない原因として、供試体の寸法の影響もあるが、温度勾配の大きい時における試験機の追従性能の影響も考えられる。例えば、温度勾配の大きい時点で供試体外部の温度が追従しきれないと、一時的に断熱状態ではなくなり、温度勾配は真の値より小さく(大きく)なる。これは強制的に定数 α を小さく(大きく)したことと同じであり、温度勾配が小さい場合に供試体外部の追従精度が良好となるならば、 K の値は大きく(小さく)なる。この現象はコンクリート中の SO_2 量を変化させた場合や、コンクリートの打設温度が変化した場合に似ている。

また、式(5.1)の dT/dt を求めて $t=0$ を代入すると、初期温度勾配 $dT/dt(t=0)=K\alpha$ が求めることができる。この値は東京理工社製(供試体寸法 3 リットル)の試験機から得られる結果の方が常に大きくなり、試験において住友社製(供試体寸法 $\phi 30 \times 30 \text{cm}$)を用いた試験結果より熱を多く与えていることを意味している。(但し、追従性能において住友社製が優れているという訳ではなく、真の値にどちらが近いかは定かではない。)つまり、温度勾配の大きい初期における追従性能(温度履歴)が各断熱温度上昇回帰式の係数に影響を与えていて、供試体寸法の違いが2種類の試験結果の差にどの程度影響を与えているかははっきりとしない。

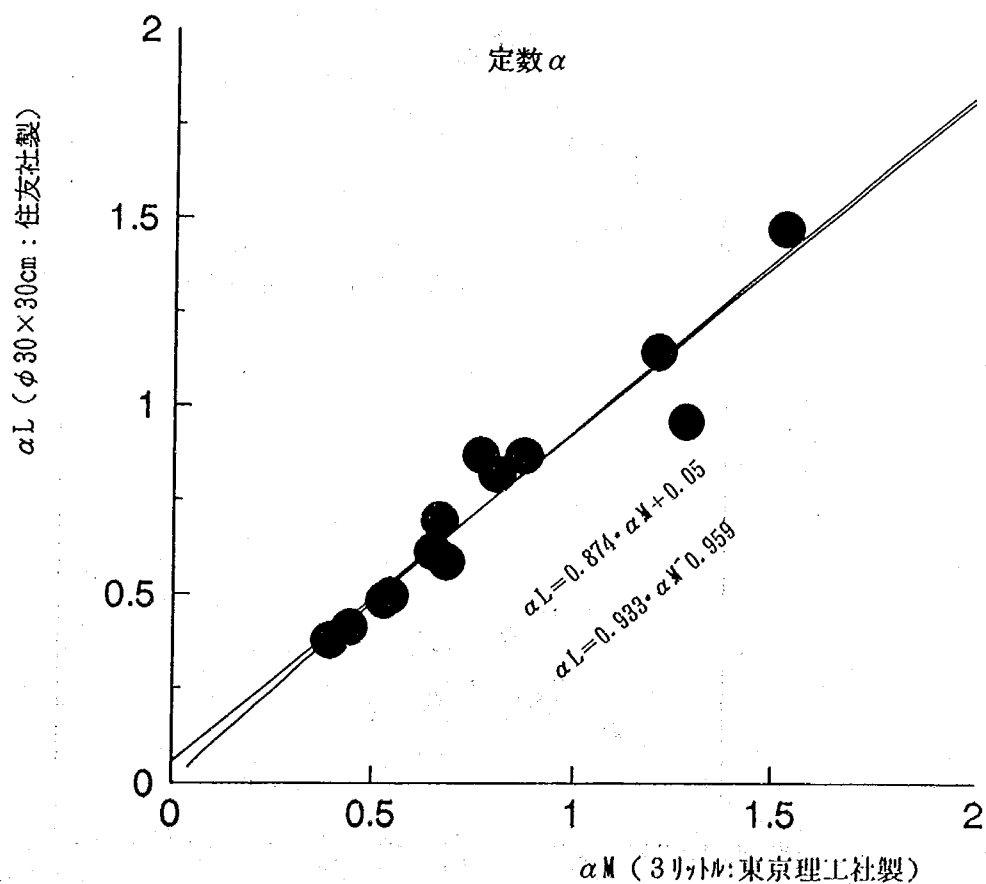
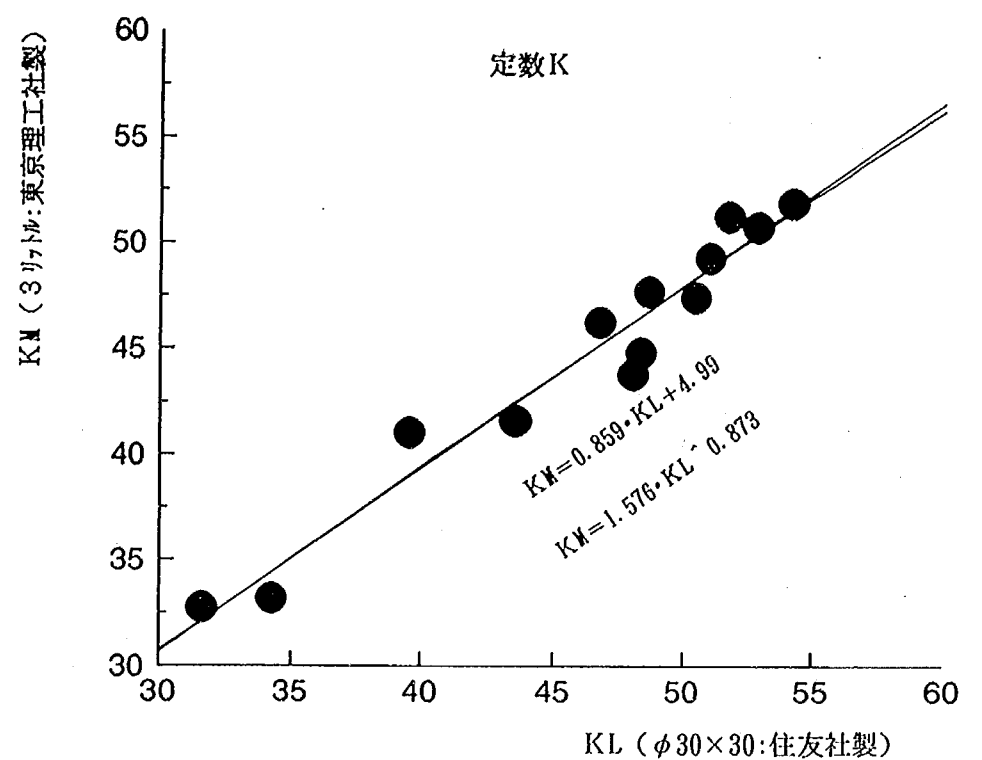


図-5.1 試験方法による断熱温度上昇回帰定数の関係
(式(5.1): $T = K(1 - \text{EXP}(-\alpha \cdot t))$)

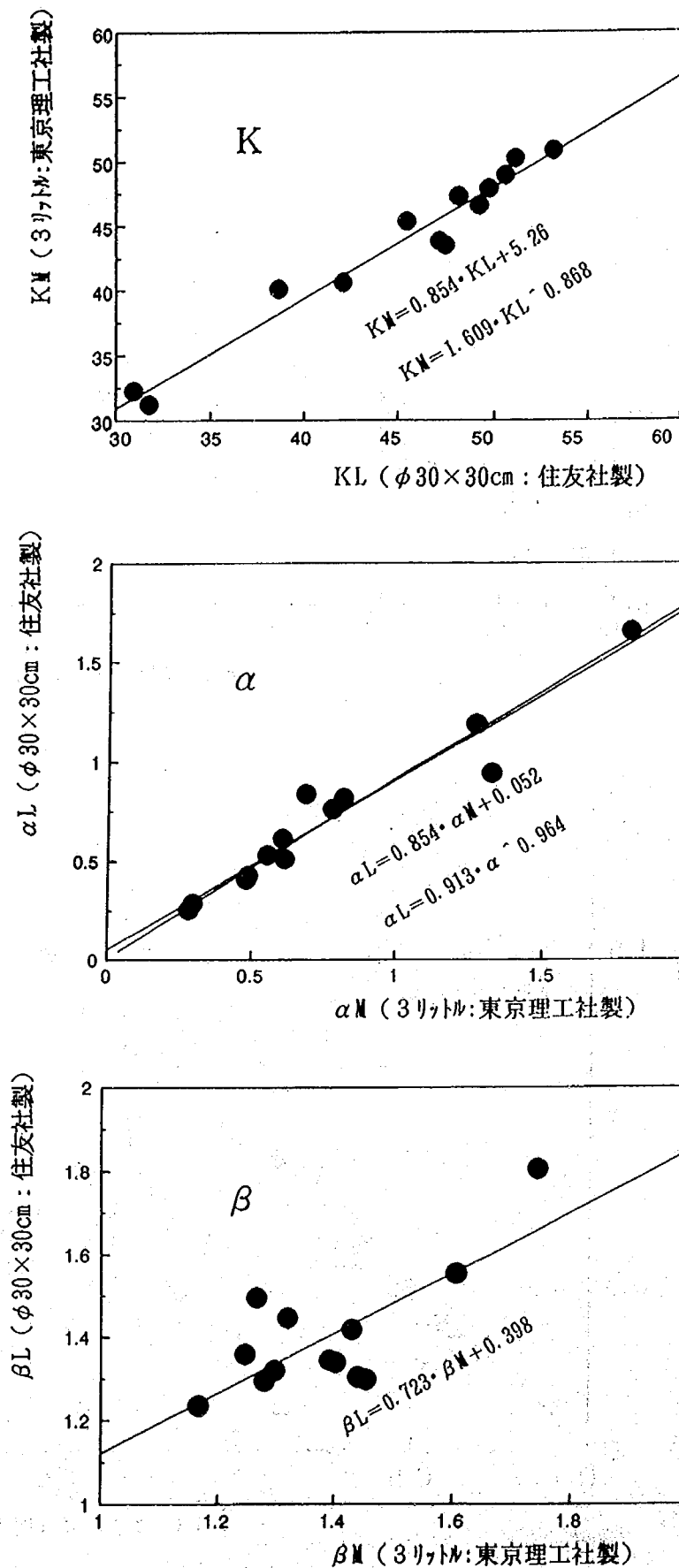


図-5. 2 試験方法による断熱温度上昇回帰定数の関係
(式(5.2): $T = K (1 - \text{EXP}(-\alpha \cdot t^\beta))$)

参考までに、予備試験として行った断熱温度上昇試験結果を表-5.5に示す。

この試験結果も単位セメント量が大きくなる（定数Kの値が大きくなる）と試験方法による差が大きくなる傾向にある。

表-5.5 断熱温度上昇試験結果（予備試験）

製 造 元	東京理工社						住友社	
供試体寸法	1 リットル		3 リットル		$\phi 30 \times 30\text{cm}$		$\phi 30 \times 30\text{cm}$	
単位セメント量(kg/m^3)	K	α	K	α	K	α	K	α
100	—	—	—	—	14.31	0.921	14.86	1.032
200	—	—	31.18	0.935	—	—	31.66	1.019
300	42.73	1.202	41.07	1.073	44.11	1.044	45.39	1.024
400	—	—	51.55	1.237	—	—	56.87	1.204
500	—	—	61.82	1.414	60.67	1.502	65.87	1.369

注：この予備実験はセメントに普通セメント（アンデスセメント）を使用している。

以上のように、断熱温度上昇試験は試験機の種類，供試体寸法，練りませ，供試体の締固めによって変動するものであり、ここでは2種類の試験結果の総合的な関係は求められた。しかし、今後試験方法を確立し、更に一般的な回帰定数を提案するためには個々の因子が断熱温度上昇曲線にどのように影響しているかを明確にしていけることが大切である。

5.2 断熱温度上昇試験供試体のコア強度試験

住友社製の断熱温度上昇試験終了後（材令10日）、切取りコアを採取して圧縮強度を測定した。コアは1つの断熱温度上昇供試体から3本（直径約10cm）を抜き取り、両面を研磨。側面の1部に樹脂を塗った後ひずみゲージを貼り、静弾性係数を測定した。圧縮強度はJIS A 1107（コンクリートからのコア及びはりの切取り方法及び強度試験方法）に準じて試験した。なお、試験結果は4章で既に表示している。

図-5.3に切取りコアと供試体の圧縮強度、静弾性係数における関係を示す。

切取りコアは断熱状態下におかれているため断熱養生供試体に近い強度になると予想されたが、圧縮強度、静弾性係数ともに切取りコア供試体の方が小さい値となった。切取りコアと供試体との相関について述べると、圧縮強度の回帰結果においては、材令91日の標準養生の圧縮強度並びに材令7日の断熱養生の圧縮強度との相関係数が他より良く、静弾性係数の回帰結果においてはどのデータとも良い相関を示さず、最高でも図-5.3に示すように相関係数が0.53であった。

一般のコア強度はばらつきが大きく、標準養生の強度の85%程度であるが、今回の試験は断熱状態にあったコンクリートであるため、標準養生の強度とは大きく値が異なったものとなった。

圧縮強度、静弾性係数において良い相関が得られない理由として、

- ・コア採取時において供試体に欠陥が生ずる
- ・供試体側面に樹脂を塗布した影響

などが考えられ、今後さらにデータの蓄積が必要である。

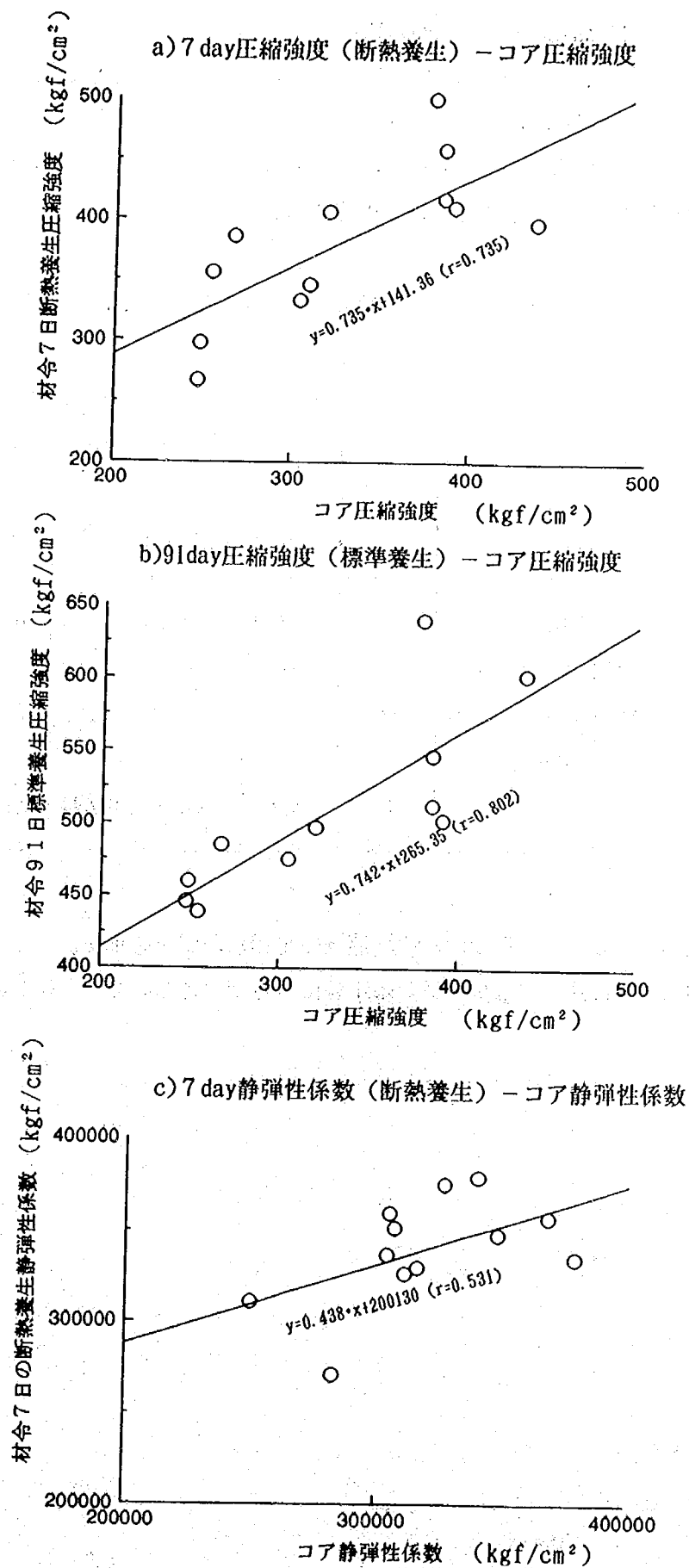


図-5.3 コア供試体の圧縮強度と静弾性係数

5.3 微量熱量計と溶解熱法による水和熱の関係

微量熱量計と溶解熱法による水和熱試験結果は表-4.10に示す通りであり、微量熱量計から求められた材令1, 2, 3日の水和熱と溶解熱法による材令3, 7, 28, 91日における水和熱とを1次回帰した。

その結果、この2つの試験法はいずれの材令においても相関があったが、特に微量熱量計の各材令と溶解熱法の材令3, 7日は表-5.6に示す通り、良い相関を示している。

表-5.6 微量熱量計と溶解熱法における相関係数

	t	Qy(t) : 材令 t (日) の溶解熱法 による水和熱 (cal/g)			
		3	7	28	91
Qb(t) : 材令 t (日) の 微量熱量計による 水和熱 (cal/g)	1	0.971	0.941	0.866	0.872
	2	0.964	0.953	0.904	0.904
	3	0.947	0.949	0.884	0.882

図-5.4に良い相関を示した微量熱量計と溶解熱法の水和熱の関係を示す。

溶解熱法の水和熱試験に比べて微量熱量計は手軽に測定ができるので、今後この2つの試験の相関を検討することは有効である。

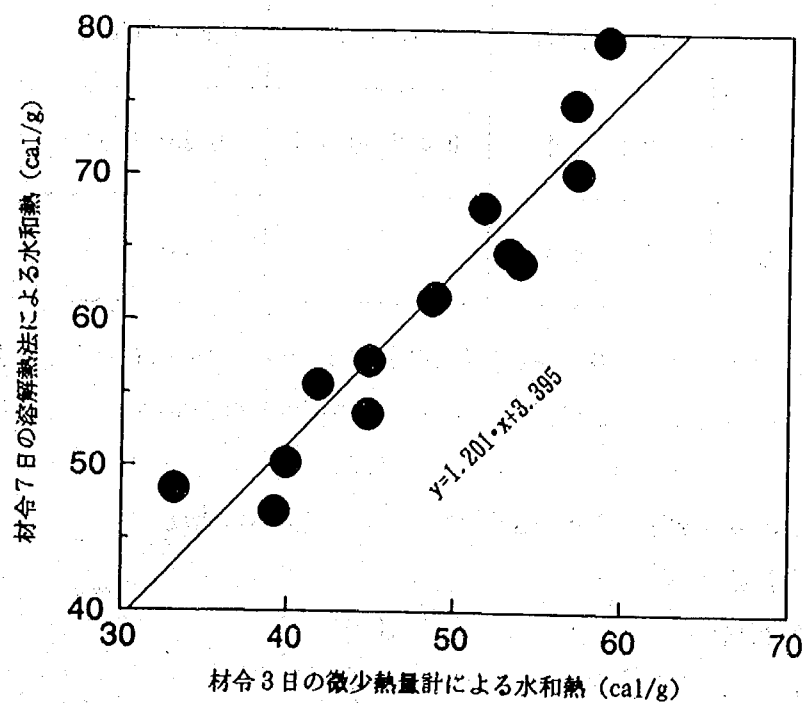
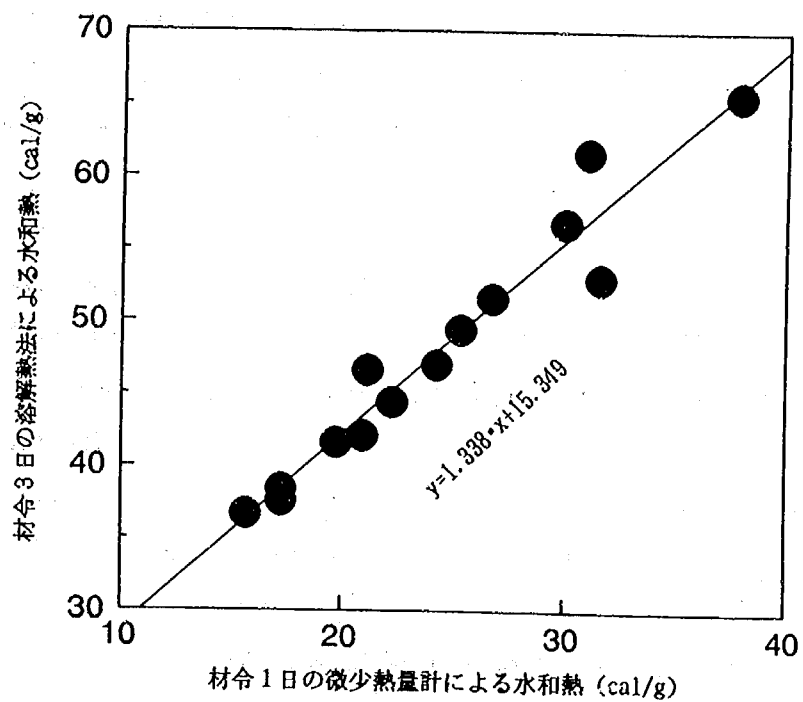


図-5.4 微量熱量計と溶解熱法による水和熱の関係

6. 解析に用いる諸特性値の検討

6. 1 現状の諸特性値決定方法

土木学会のコンクリート標準示方書においては温度解析及び温度応力解析を行う際の熱特性値、強度の推定方法を提案している。一般的にはそれによって求められた値を用いて解析を行っているが、未確立なものが多く今後の検討が必要である。以下にコンクリート標準示方書における現状の熱特性値決定方法について述べる。

(a)断熱温度上昇

$$T = K (1 - \exp(-\alpha t)) \quad (6.1) \quad T: \text{材令 } t \text{ の断熱温度上昇量 } (^{\circ}\text{C})$$

$$T = K (1 - \exp(-\alpha t^{\beta})) \quad (6.2) \quad t: \text{材令 (日)}, K, \alpha, \beta: \text{定数}$$

試験により式(6.1)を求めるのが望ましいが、試験をしない場合は K, α の値を単位セメント量の関数として示している。ただし、高炉セメントについては、高炉スラグの混入率は40%の場合しか示されてなく、最近用いられている高炉スラグ混入率の大きい混合セメントについてはデータがない。また、式(6.2)の方が回帰の精度が良いという報告もあるが、式(6.2)については述べられていない。

(b)熱伝導率、熱拡散率、比熱

熱伝導率、熱拡散率、比熱は表-6.1のように一般的な値が示されている。

表-6.1 コンクリート標準示方書の示す熱特性値

	熱伝導率 (kcal/mh $^{\circ}\text{C}$)	熱拡散率 (m ^{2} /h)	比熱 (kcal/kg $^{\circ}\text{C}$)
コンクリート	2.2~2.4	0.003~0.004	0.25~0.3
岩 盤	1.5~4.5	—	0.17~0.21

熱伝導率、熱拡散率、比熱、コンクリート密度は式(6.3)で関係づけられていて、文献、その他の資料などで明らかでない時にはこれらの熱特性値は計算によって求められる事が多い。

$$hc^2 = \lambda c / (Cc \cdot \rho) \quad (6.3)$$

λc : 熱伝導率, hc^2 : 熱拡散率, Cc : 比熱, ρ : 密度

また、以下の推定式も提案されている。

$$h_c^2 = 0.0014 \cdot \lambda_c \quad (6.4)$$

$$C_c = 715 / \rho \quad (6.5)$$

式(6.5)の係数715は実際はもっと小さく、骨材、配合の種類によって異なり、600~700の値をとるという実験結果もある。

(c) コンクリートの力学的特性（圧縮強度，引張強度，弾性係数）

土木学会のコンクリート示方書ではコンクリートの圧縮強度，引張強度，有効弾性係数の推定に以下の式を提案している。

$$f_c(t) = t \cdot f_c(91) / (a + b t) \quad (6.6)$$

$$f_t(t) = c \cdot \text{SQR} (f_c(t)) \quad (6.7)$$

$$E_e(t) = \phi(t) \cdot 15000 \cdot \text{SQR} (f_c(t)) \quad (6.8)$$

$f_c(t)$: 材令 t 日のコンクリートの圧縮強度(kgf/cm²) , $f_c(91)$: 材令91日のコンクリートの圧縮強度(kgf/cm²)

$f_t(t)$: 材令 t 日のコンクリートの引張強度(kgf/cm²) , $E_e(t)$: 材令 t 日の有効ヤング係数(kgf/cm²)

$\phi(t)$: 温度上昇時におけるクリープの影響が大きいことによるヤング係数の補正係数

a, b, c : 定数

式(6.6)は標準養生の強度発現を推定する式と考えられ、温度履歴が異なっても材令が同じなら一定の圧縮強度を示すものであり、積算温度の考え方に矛盾するものである。また、係数 a, b は普通，中庸熱，早強セメントについて示されているが、高炉セメントについては中庸熱と同等の値を用いても良いとして、具体的な数値は示されていない。高炉スラグの混入率が高いセメント，フライアッシュセメント，3成分系のセメント等のマスコンクリートに用いられている特殊セメントについては今後のデータ蓄積及び検討が必要である。

6. 2 諸特性値が温度解析および温度応力解析結果に及ぼす影響

温度解析および温度応力解析は土木学会規準のコンクリート標準示方書において、解析法や熱特性値及び強度などの解析条件が与えられているが、未解明の部分も多い。

ここでは温度解析および温度応力解析結果に大きな影響を与える特性値について検討した。

なお、温度解析はSchmidt法、応力解析はCompensation Line法を用いた。

図-6. 1に解析モデルを、表-6. 2に解析条件を示す。

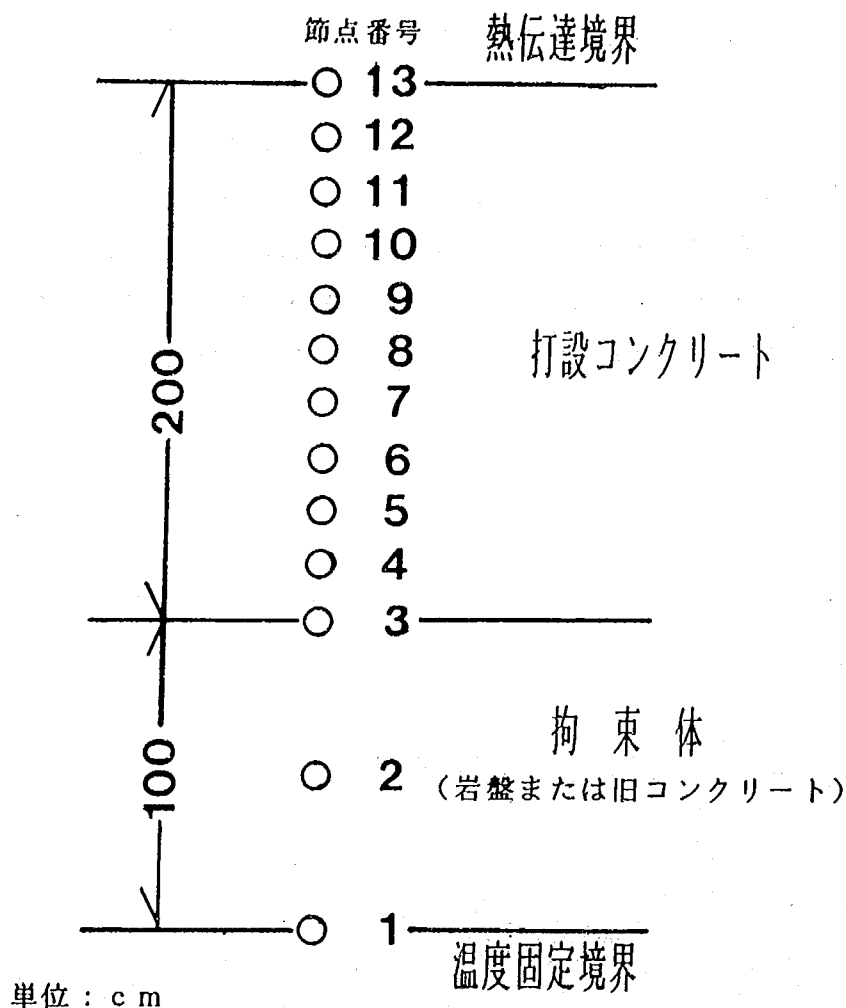


図-6. 1 温度解析及び温度応力解析モデル

拘束係数は表-6. 3に示す通り、拘束体のヤング係数によって大きく異なる。このため、内部拘束応力、外部拘束応力がどちらも卓越しないようにここでは拘束体のヤング係数を 3.0×10^4 (kgf/cm²)と仮定した。

今回の解析モデルでは内部拘束（コンクリート内部の温度差）による引張応力の最大値は熱伝達境界に、外部拘束による引張応力の最大値は部材中央付近部分において発生すると考えられ、この2点を特に注目した。

表-6. 2 温度解析および温度応力解析に用いた解析条件

節点数	1 3	
熱伝導率	0.02	(kcal/cm・h・°C)
熱伝達率	0.001	(kcal/cm ² ・h・°C)
比熱	0.25	(kcal/kg・°C)
コンクリート密度	0.0023	(kg/cm ³)
断熱温度上昇式の係数	K	40.0
	α	0.8
打設温度および外気温	20.0	(°C)
熱膨張係数	1.0×10^{-6}	(1/°C)
解析ステップ	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 14.0, 21.0, 28.0, 56.0, 91.0, 180.0 (day)	
拘束体のヤング係数	3.0×10^4	(kgf/cm ²)
拘束係数 (C L 法)	軸拘束係数 曲げ拘束係数 (ピーク前) 曲げ拘束係数 (ピーク後)	0.17 1.07 1.68
有効弾性係数	土木学会の式 材令 3 日まで $11000 \times (f_c(t))^{0.5}$ (kgf/cm ²) 材令 3 日以降 $15000 \times (f_c(t))^{0.5}$ (kgf/cm ²)	
91日圧縮強度	300	(kgf/cm ²)
圧縮・引張強度推定式	土木学会の提案式 $f_c(t) = f_c(91) \times t / (4.5 + 0.95t)$ $f_t(t) = 1.4 \times (f_c(t))^{0.6}$	

表-6. 3 拘束係数がひびわれ指数に与える影響

拘束体の ヤング係数 ($\times 10^4$ kgf/cm ²)	E_c / E_r * $E_c =$ 3.0×10^4	L / H	軸拘束 係数	曲げ拘束係数		ひびわれ指数最小値	
				ピーク前	ピーク後	内部拘束	外部拘束
1	30.0	5.0	0.06	0.90	1.08	1.20	2.18
3	10.0	5.0	0.17	1.07	1.68	1.38	1.37
5	6.0	5.0	0.25	1.08	1.72	1.60	1.15
10	3.0	5.0	0.45	1.10	1.75	2.53	0.83
20	1.5	5.0	0.50	1.11	1.73	2.87	0.78

表-6.2に示した解析条件を基本型とし、そのうちの1つの解析条件を一般的な値の中で変化させて温度解析及び温度応力解析を行った。

温度解析及び温度応力解析結果を表-6.4～6.6、図-6.2～6.4に示す。

この解析は断熱温度上昇曲線や弾性係数推定式など暫定的な値を用いているため温度応力の絶対値は参考にしかないが、図-6.2、図-6.3によると、解析に用いられる熱特性値のうち、熱伝達境界部分の最大引張応力に及ぼす影響は熱伝導率並びに熱膨張率が大きく、部材中央付近の最大引張応力に及ぼす影響は熱伝導率より熱膨張率の方が大きいことがわかる。また、図-6.4、図-6.5から、熱膨張係数と熱伝導率が最大引張応力に及ぼす影響は打設コンクリートのリフト高さによって異なることがわかる。

熱伝達率はコンクリートの比熱や密度よりは解析結果に対する影響が大きいが、試験法が確立しておらず、養生条件によっても大きく異なるため、今後更に、熱伝達率の選定法に対する検討を必要とする。

比熱、コンクリート密度は温度応力解析結果に及ぼす影響は小さい。これは、比熱、コンクリート密度が直接温度解析の計算に用いられず、これら変動することによって式(6.3)に示した熱拡散率に変化するが、熱伝導率と異なり、比熱とコンクリート密度の一般的な値の範囲内では、熱拡散率が大きく変わらないからである。

参考までに断熱温度上昇曲線の K 、 α 値、外気温の変化がどの程度解析結果に影響を及ぼすかを表-6.4に示したが、一般的にはコンクリートの K 、 α の値が大きくなると圧縮強度、弾性係数も大きくなるので、実際には、初期に熱伝達境界に生じる引張応力は、解析値より大きくなると考えられる。

表-6. 4 解析条件(熱特性値)が解析結果に及ぼす影響(リフト高さ2 m)

解析条件	部材 最高温度 (°C)	熱伝達境界の最大値		部材内部の最大値	
		引張応力 (kgf/cm ²)	ひびわれ 指数	引張応力 (kgf/cm ²)	ひびわれ 指数
1) 基本型	53.05 (3.0)	11.85 (4.0)	1.38	17.65	1.37
2) 熱膨張係数 5×10 ⁻⁶ (1/°C)		5.92 (4.0)	2.77	8.83	2.75
3) 熱膨張係数 15×10 ⁻⁶ (1/°C)		17.75 (4.0)	0.92	26.48	0.92
4) 熱膨張係数 20×10 ⁻⁶ (1/°C)		23.70 (4.0)	0.69	35.30	0.69
5) 熱伝導率 1.0 (kcal/m·h·°C)	56.22 (4.0)	16.63 (4.5)	1.02	20.33	1.19
6) 熱伝導率 3.0 (kcal/m·h·°C)	50.62 (2.5)	8.63 (3.5)	1.85	14.82	1.62
7) 熱伝達率 5.0 (kcal/m ² ·h·°C)	53.45 (3.0)	7.37 (5.0)	2.34	15.34	1.58
8) 熱伝達率 15.0 (kcal/m ² ·h·°C)	52.65 (3.0)	13.27 (3.5)	1.19	18.85	1.29
9) 比熱 0.2 (kcal/kg·°C)	51.57 (3.0)	11.15 (3.5)	1.42	16.94	1.43
10) 比熱 0.3 (kcal/kg·°C)	54.19 (3.5)	12.47 (4.5)	1.34	18.13	1.34
11) コンクリート密度 2200 (kg/m ³)	52.78 (3.0)	11.70 (4.0)	1.39	17.53	1.38
12) コンクリート密度 2400 (kg/m ³)	53.29 (3.0)	11.99 (4.0)	1.37	17.76	1.36
13) 断熱温度上昇 K=50, α=0.8	61.38 (3.0)	14.81 (4.0)	1.14	22.07	1.10
14) 断熱温度上昇 K=30, α=0.8	44.78 (3.0)	8.80 (3.5)	1.84	13.24	1.83
15) 断熱温度上昇 K=40, α=0.6	51.06 (3.5)	12.18 (4.5)	1.40	16.62	1.46
16) 断熱温度上昇 K=30, α=0.6	43.30 (3.5)	9.14 (4.5)	1.87	12.47	1.95
17) 外気温 10 (°C)	51.41 (3.0)	15.04 (3.5)	1.06	23.82	1.02
18) 外気温 15 (°C)	52.23 (3.0)	13.41 (4.0)	1.20	20.74	1.17
19) 外気温 20 (°C)	53.87 (3.0)	10.29 (4.0)	1.61	14.56	1.66

表-6.5 解析条件（熱特性値）が解析結果に及ぼす影響（リフト高さ2.5m）

解析条件	部材 最高温度 (°C)	熱伝達境界の最大値		部材内部の最大値	
		引張応力 (kgf/cm ²)	ひびわれ 指数	引張応力 (kgf/cm ²)	ひびわれ 指数
1) 基本型	55.34 (3.5)	14.03 (4.5)	1.20	18.75	1.29
2) 熱膨張係数 5×10 ⁻⁶ (1/°C)		7.02 (4.5)	2.41	9.38	2.59
3) 熱膨張係数 15×10 ⁻⁶ (1/°C)		21.05 (4.5)	0.80	28.13	0.86
4) 熱伝導率 1.0 (kcal/m·h·°C)	57.79 (4.5)	18.60 (5.0)	0.93	19.01	1.28
5) 熱伝導率 3.0 (kcal/m·h·°C)	53.36 (3.0)	10.78 (4.0)	1.54	16.50	1.47
6) 熱伝達率 5.0 (kcal/m ² ·h·°C)	55.70 (3.5)	9.65 (6.0)	1.85	16.60	1.46
7) 熱伝達率 15.0 (kcal/m ² ·h·°C)	55.08 (3.5)	15.35 (4.0)	1.07	19.94	1.22
8) 比熱 0.2 (kcal/kg·°C)	54.12 (3.5)	13.28 (4.0)	1.24	18.31	1.32
9) 比熱 0.3 (kcal/kg·°C)	56.27 (4.0)	14.70 (5.0)	1.17	18.85	1.29

表-6.6 解析条件（熱特性値）が解析結果に及ぼす影響（リフト高さ1.5m）

解析条件	部材 最高温度 (°C)	熱伝達境界の最大値		部材内部の最大値	
		引張応力 (kgf/cm ²)	ひびわれ 指数	引張応力 (kgf/cm ²)	ひびわれ 指数
1) 基本型	49.46 (2.5)	9.15 (3.5)	1.70	15.58	1.54
2) 熱膨張係数 5×10 ⁻⁶ (1/°C)		4.57 (3.5)	3.39	7.79	3.09
3) 熱膨張係数 15×10 ⁻⁶ (1/°C)		13.72 (3.5)	1.13	23.36	1.03
4) 熱伝導率 1.0 (kcal/m·h·°C)	53.38 (3.0)	13.92 (4.0)	1.16	19.82	1.22
5) 熱伝導率 3.0 (kcal/m·h·°C)	46.83 (2.5)	6.22 (3.0)	2.44	12.57	1.90

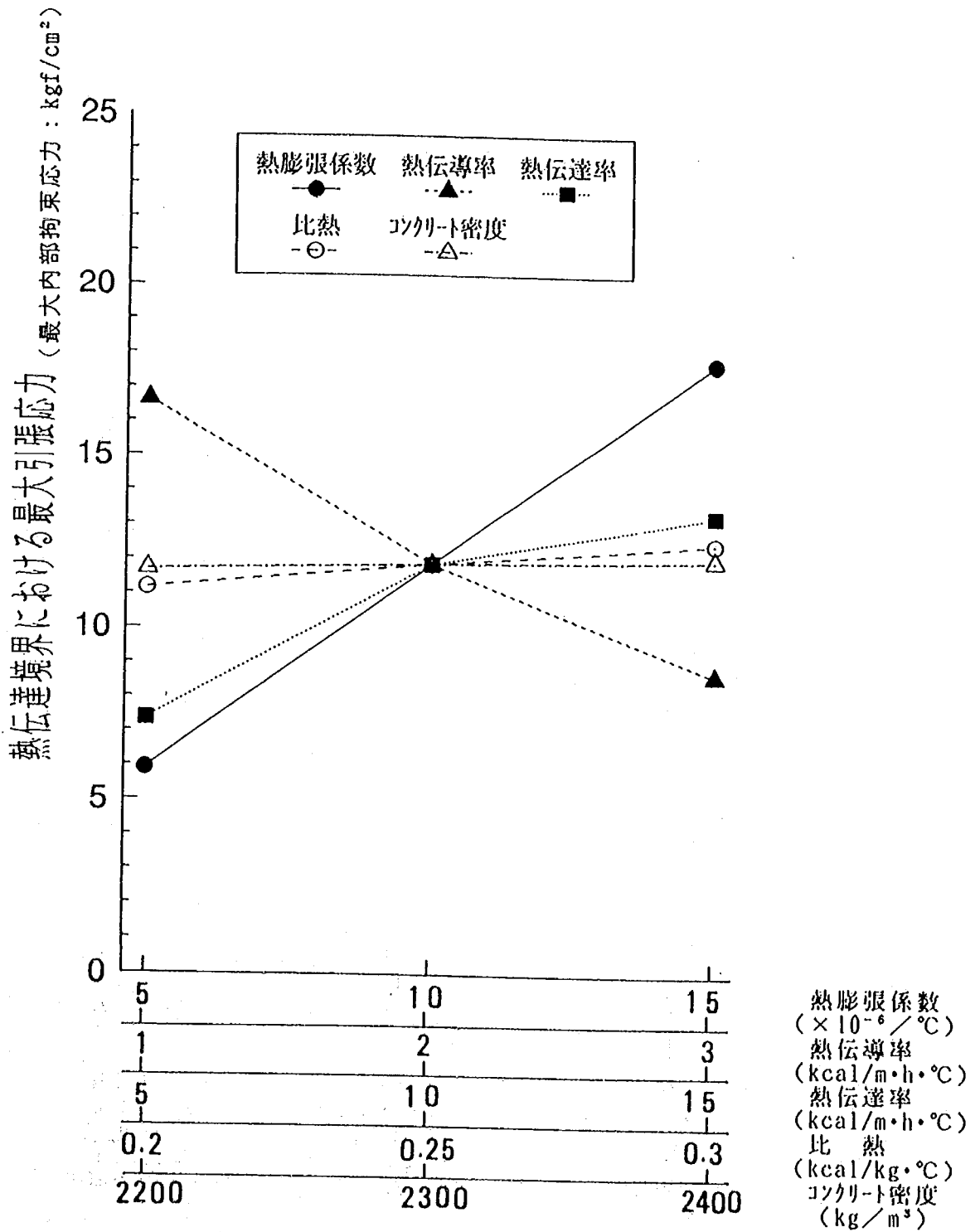


図-6.2 温度応力解析結果 (その1)

～ 解析条件を変化させた時の熱伝達境界における最大引張応力

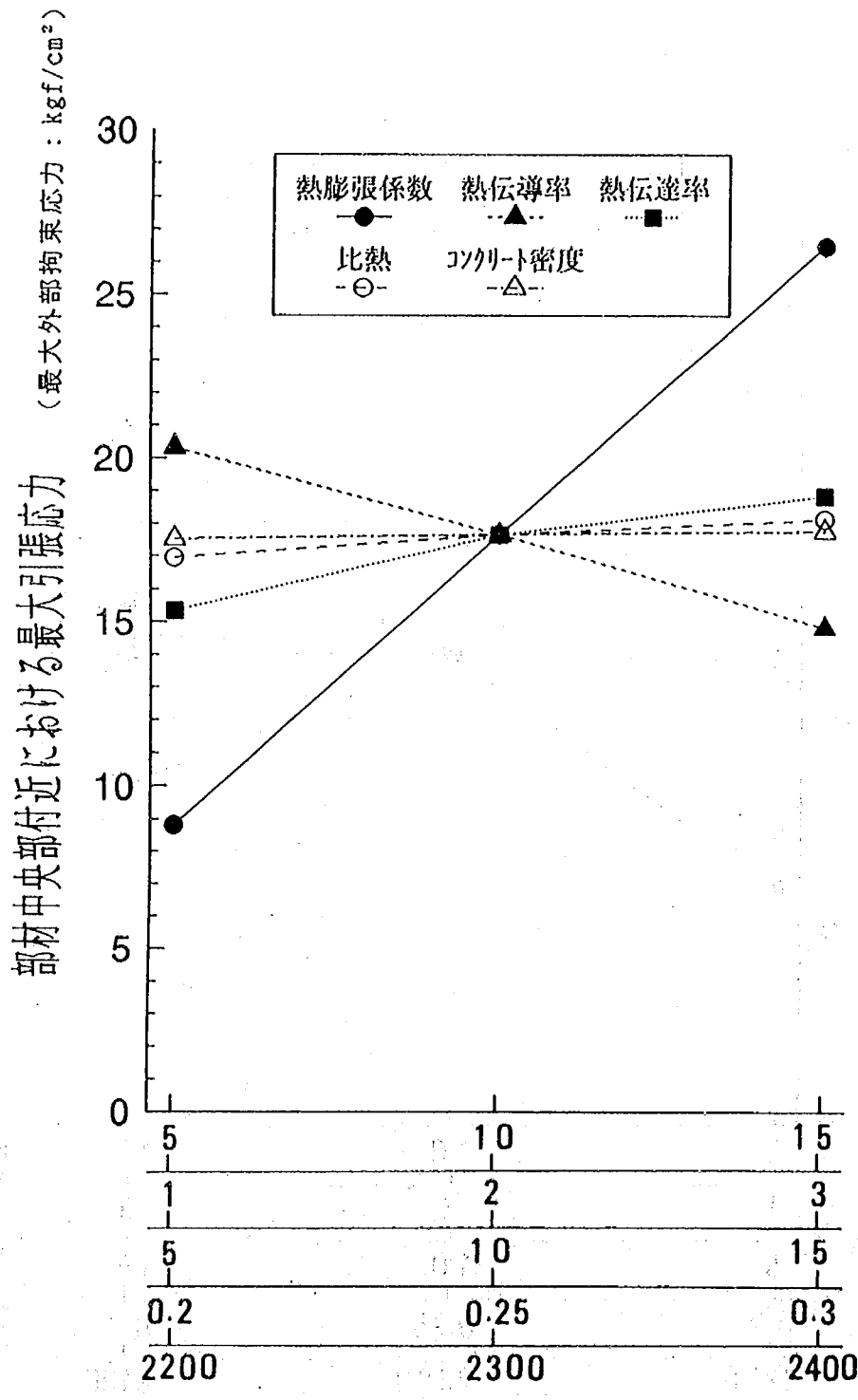


図-6.3 温度応力解析結果 (その2)

～ 解析条件を変化させた時の部材中央部付近における最大引張応力

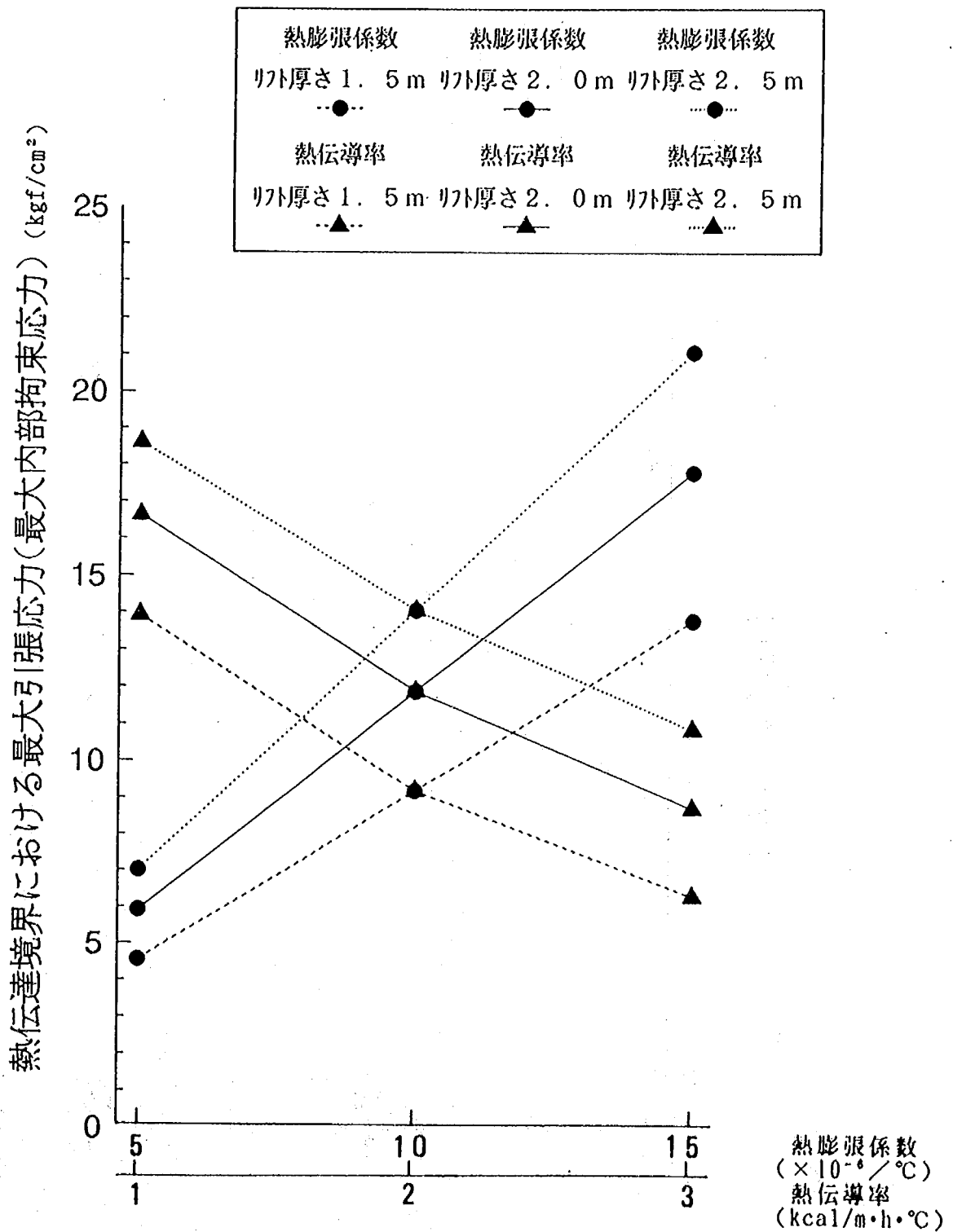


図-6.4 温度応力解析結果 (その3)

～ リフト厚さを変化させた時の熱伝達境界における最大引張応力

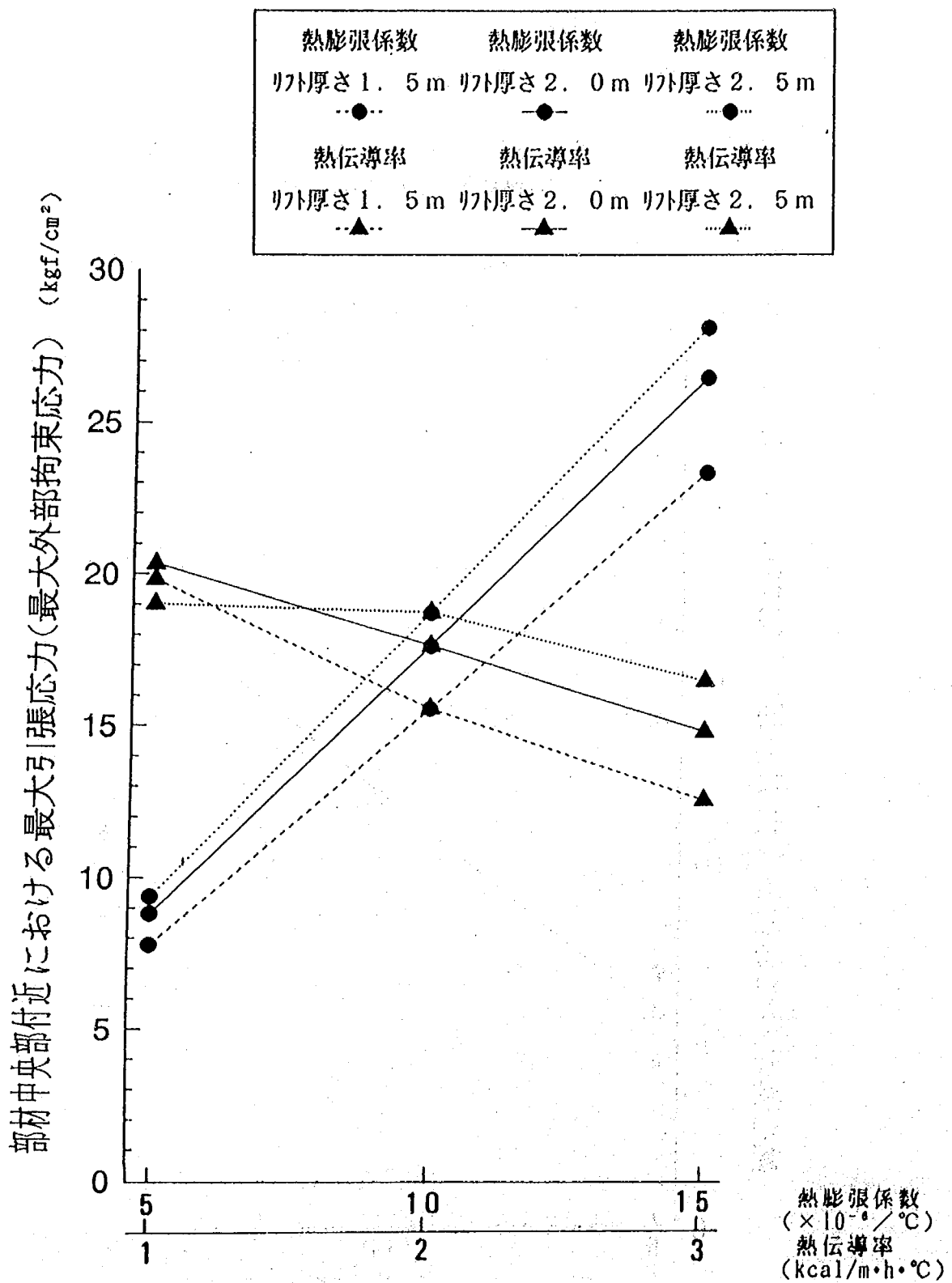


図-6.5 温度応力解析結果 (その4)

～ リフト厚さを変化させた時の部材中央部付近における最大引張応力

6. 3 断熱温度上昇回帰方法が解析結果に及ぼす影響について

現在、断熱温度上昇の回帰式は係数 K 、 α を用いた式(6.1)が多く用いられているが実測値と回帰式を比べると極初期において比較的温度差が生じる。この温度差が解析結果にどのような影響を与えるかを検討した。

Schmidt法及びCompensation Line法により、以下のパターンについて温度解析、温度応力解析を行った。

- 1)断熱温度上昇試験によって得られた実測値を用いる。
- 2)式(6.1)の回帰式を用いる。
- 3)式(6.2)の回帰式を用いる。
- 4)12時間毎の実測値を用いてその間のデータは補間する。
- 5)24時間毎の実測値を用いてその間のデータは補間する。

パターンの4),5)は回帰の精度が良くない場合に数点の断熱温度上昇試験の実測値を用いて、解析できるかどうかを検討したものである。

温度解析及び温度応力解析を行った配合はN, NS50, NS60, NS70, NS80, M, MS40, MS50, MS60, MS70の10種類で断熱温度上昇曲線は実験による実測値並びに回帰式を用いた。有効弾性係数は材令91日圧縮強度の実測値からコンクリート標準示方書に示された式を用いて推定した。また、解析ステップは材令5日まで3時間毎、材令5日以降は5, 6, 7, 14, 28, 91日とした。その他の解析条件は表-6.2に示す通りである。

6. 3. 1 回帰方法が断熱温度上昇量に及ぼす影響

表-6.7に各パターンによって求められた断熱温度上昇量と実測値の最大温度差(最大誤差)を示す。最大温度差はいずれの配合においても材令6~12時間において生じ、実測値の方が小さい値を示す。

図-6.5~図-6.6に実測値との温度差の経時変化を示す。

これによると、以下のことが言える。

- ・4パターン中式(6.1)が一番実測値との誤差が大きい。これは表-6.7の標準偏差からも明らかである。
- ・初期材令で生じる最大温度差(最大誤差)は式(6.1)では4~8(°C)だが、式(6.2)や実測値の補間によって小さくすることができる。
- ・図からも明らかであるが、高炉スラグ無混入のN, M配合が最大温度差(最大誤差)並びに標準偏差が大きい。
- ・実測値を12時間で補間する方法は回帰式より精度が良いが、簡易さには欠けると思われる。
- ・実測値を24時間で補間する方法は式(6.2)程度の標準偏差ではあるが、温度勾配の大きい初期では実測値との温度差がやや大きい。

実測値を補間するのは断熱温度上昇を表現するのに有効かもしれないが、回帰式は K 、 α などの少ない定数でそのコンクリートの発熱特性を表現できる長所もあるので、5章で示したように重みをつけたりして回帰の精度を向上させたり、そのコンクリートの断熱温度上昇曲線に適した回帰式を選択することが大切であると考えられる。

表-6.7 各パターンによって求められた断熱温度上昇曲線と実測値との最大温度差（誤差）

配 合	2) 式 (6.1)		3) 式 (6.2)		4) 12時間毎に補間		5) 24時間毎に補間	
	最大温度 差 (°C)	標 準 偏 差	最大温度 差 (°C)	標 準 偏 差	最大温度 差 (°C)	標 準 偏 差	最大温度 差 (°C)	標 準 偏 差
N	8.0	1.43	4.1	0.89	5.3	0.84	4.6	0.89
NS50	5.8	1.55	2.2	0.59	1.7	0.32	3.6	0.79
NS60	5.5	1.53	1.9	0.51	1.7	0.31	3.2	0.70
NS70	6.0	1.55	2.2	0.76	1.3	0.25	3.5	0.90
NS80	5.2	1.27	1.9	0.70	0.8	0.22	3.3	0.81
M	5.0	1.14	4.7	1.13	3.3	0.67	3.9	0.76
MS40	3.9	0.81	2.6	0.56	2.1	0.46	2.8	0.54
MS50	4.1	1.17	1.8	0.54	1.8	0.33	2.7	0.54
MS60	4.5	1.47	1.4	0.42	1.0	0.20	2.8	0.62
MS70	4.9	1.48	0.8	0.36	0.8	0.21	2.3	0.54

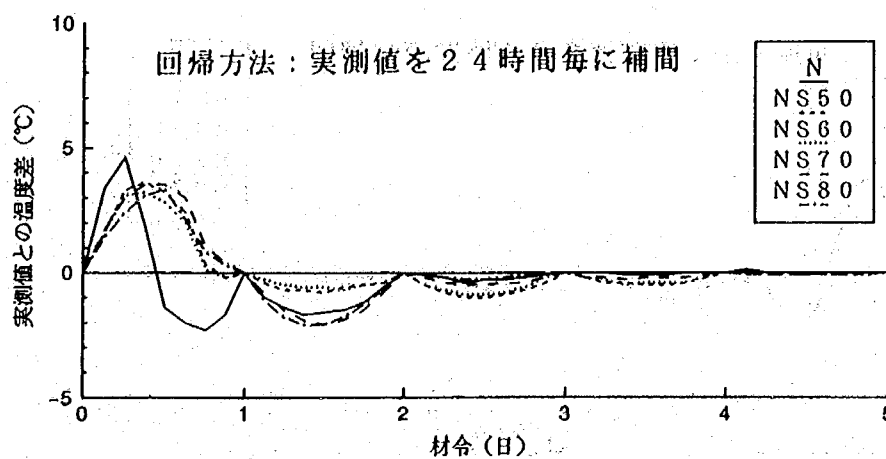
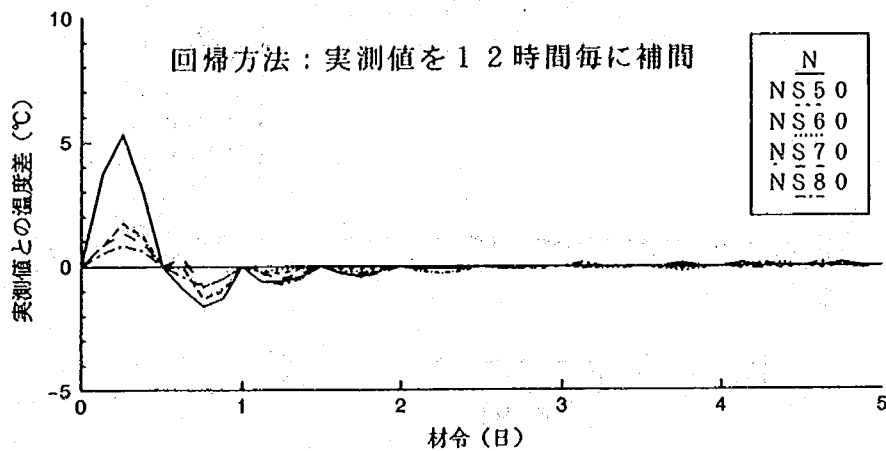
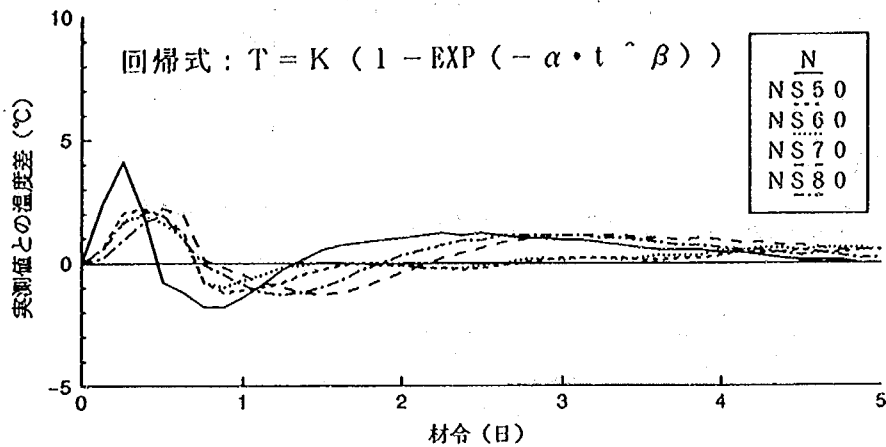
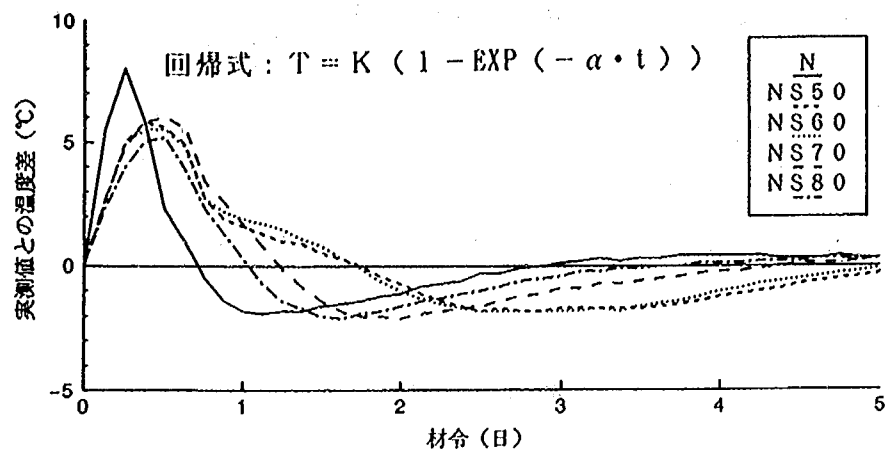


図-6.6 断熱温度上昇回帰値と実測値の差 (普通セメント)

注: 図中の値は 回帰値-実測値 である。

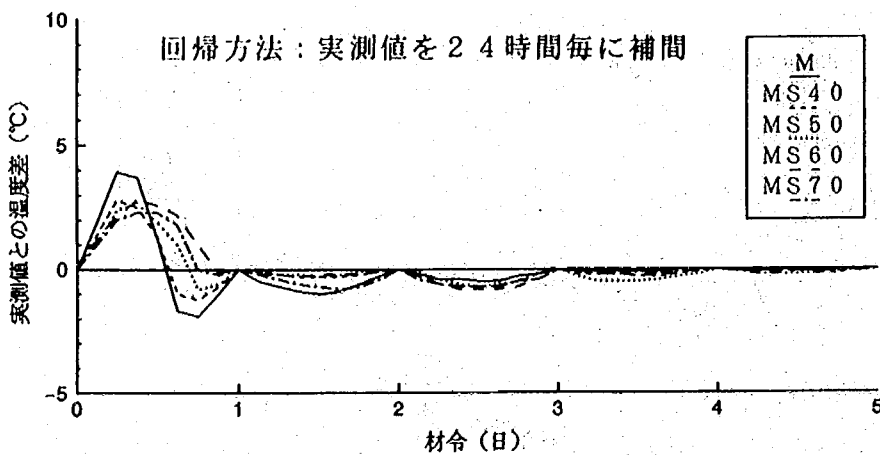
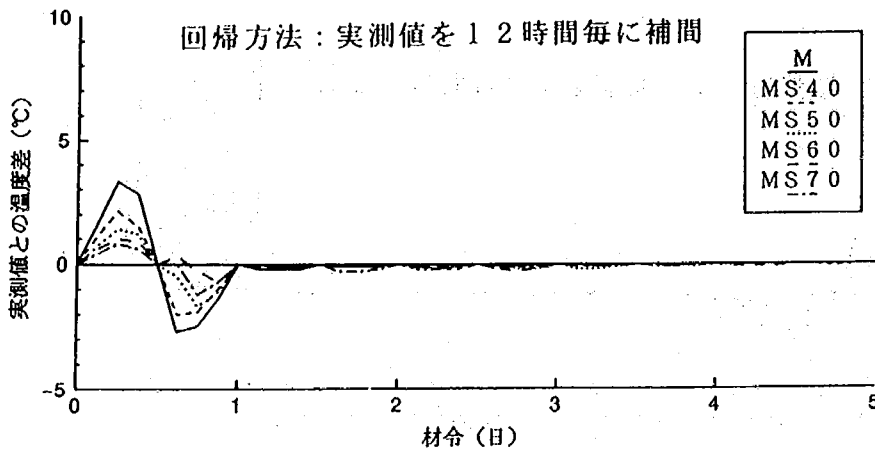
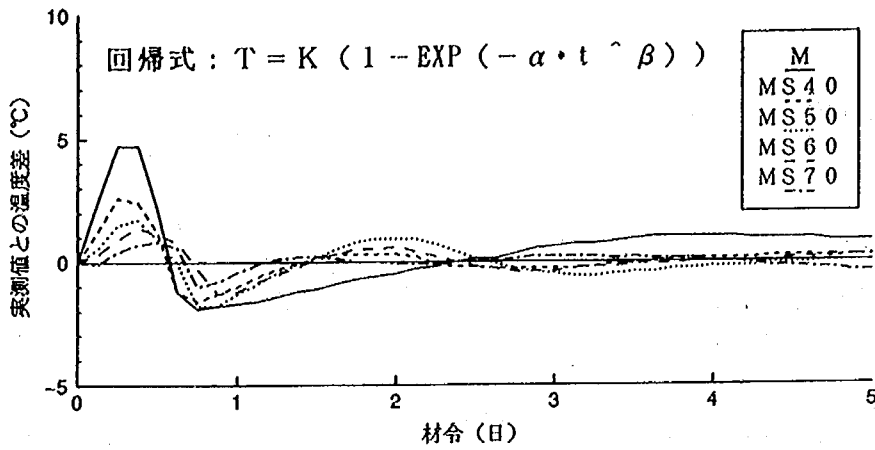
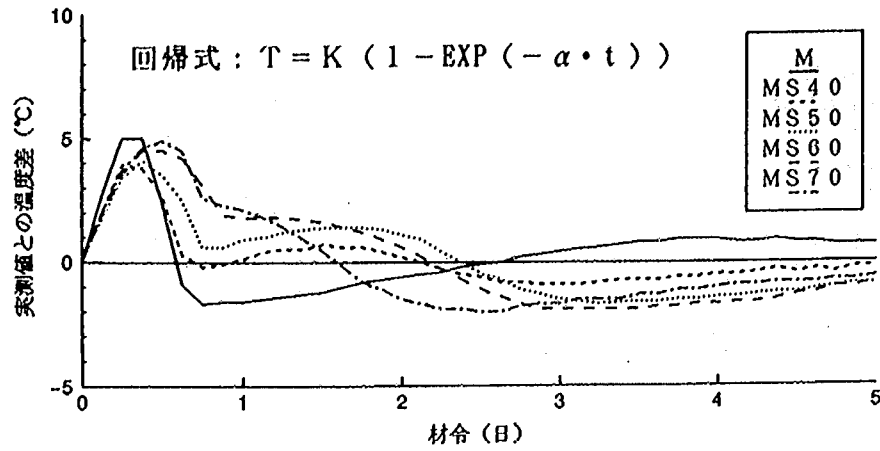


図-6.7 断熱温度上昇回帰値と実測値の差 (中庸熱セメント)

注: 図中の値は 回帰値-実測値 である。

6.3.2 回帰方法が温度解析結果に及ぼす影響

6.3.1で求められた温度データを基に温度解析を行った。

温度解析結果において、実測値で解析した場合とリフト中央部の温度を比べると、最大温度差（最大誤差）はどのパターンにおいても表-6.7の値と全く同じである。これは、リフト中央部では、最大温度差がほとんど断熱状態になっている初期材令に生じるためである。

日本コンクリート工学協会のマスコンクリートのひびわれ制御指針には最高温度がリフト中心部に発生すると仮定して、内部拘束応力を求める簡易法として式(6.9)を示している。

$$\sigma_{l,max} = (2/3) \cdot (\alpha_c \cdot E_c / (1 - \nu)) \cdot T_{g,max} \quad (6.9)$$

$\sigma_{l,max}$:材令 t における内部拘束応力(kgf/cm²) α_c :熱膨張率(1/°C)

E_c :材令 t における有効弾性係数(kgf/cm²) ν :コンクリートのポアソン比

$T_{g,max}$:材令 t における中心部と熱伝達境界との温度差(°C)

この $T_{g,max}$ は図-6.1に示した今回の解析モデルでは節点番号8と節点番号13の温度差である。

そこで、リフト中央部が最高温度に達した時の T_g (節点番号8の温度－節点番号13の温度) が各パターンで解析した場合と実測値で回帰した場合とどれくらい異なるかを表-6.8に示した。

温度差 T_g の誤差は式(6.1)を用いて解析した場合、大きい配合で約1.4(°C)であり、この解析モデルにおける $T_{g,max}$ の発生する材令は、リフト中央部が最高温度に達する材令より少し早い。

そこで、圧縮強度を300(kgf/cm²)と仮定すると有効弾性係数 E_c は約 1.9×10^5 (kgf/cm²) となり、誤差の最大値 $T'_{g,max} = 1.4$, $\alpha_c = 1.0 \times 10^{-5}$, $\nu = 0.2$ を式(6.9)に与えると、内部拘束応力誤差 $\sigma'_{l,max}$ は約3.3(kgf/cm²)となる。

しかし、式(6.9)は本来ならば式(6.10)のように有効弾性係数が経時的に変化するものであるから、実際には $\sigma'_{l,max}$ は約3.3(kgf/cm²)より小さくなる。

$$\sum_{i=0}^t d\sigma_l/dt = (2/3) \cdot (\alpha_c \cdot E_c(t) / (1 - \nu)) \cdot dT_g/dt \quad (6.10)$$

つまり、表-6.8において、式(6.1)を用いて解析した場合を除くと温度応力の誤差はほとんど1(kgf/cm²)以内となり、式(6.2)を用いて回帰して解析しても、その温度誤差が温度応力に与える影響は小さいと予想される。

表-6.8に示した標準偏差は断熱状態に最も近いリフト中央部において、実測値で解析した温度との標準偏差である。表-6.7と比較すると断熱温度上昇曲線の時より標準偏差が大きくなっている。図-6.7～図-6.8に示したリフト中央部の温度差（温度誤差）も図-6.5～図-6.6とあまり変化はない。しかし、熱伝達境界との温度差が比較的小さいため、初期材令においてコンクリート内部の温度差によって支配されている温度応力（内部拘束応力）にはさほど影響がないと考えられる。

表-6.8 断熱温度上昇曲線が温度解析結果に及ぼす影響

(リフト中央部が最高温度に達した時のTgの誤差)

配 合	2) 式 (6.1)		3) 式 (6.2)		4) 12時間毎に補間		5) 24時間毎に補間	
	Tgの温度 差 (°C)	標 準 偏 差	Tgの温度 差 (°C)	標 準 偏 差	Tgの温度 差 (°C)	標 準 偏 差	Tgの温度 差 (°C)	標 準 偏 差
N	0.66	1.90	0.65	1.07	0.14	1.13	0.30	1.18
NS50	1.34	2.09	0.06	0.70	0.02	0.42	0.40	1.07
NS60	1.38	2.09	0.05	0.60	0.06	0.42	0.38	0.95
NS70	0.88	2.12	0.60	0.93	0.06	0.33	0.24	1.22
NS80	0.86	1.70	0.46	0.80	0.03	0.30	0.31	1.09
M	0.18	1.44	0.06	1.41	0.08	0.89	0.36	1.01
MS40	0.58	1.09	0.07	0.72	0.02	0.60	0.23	0.73
MS50	1.16	1.57	0.22	0.70	0.07	0.44	0.22	0.73
MS60	1.41	1.97	0.08	0.50	0.01	0.26	0.21	0.84
MS70	1.32	1.94	0.10	0.32	0.01	0.28	0.14	0.74

注：標準偏差はリフト中央部の温度についてである。

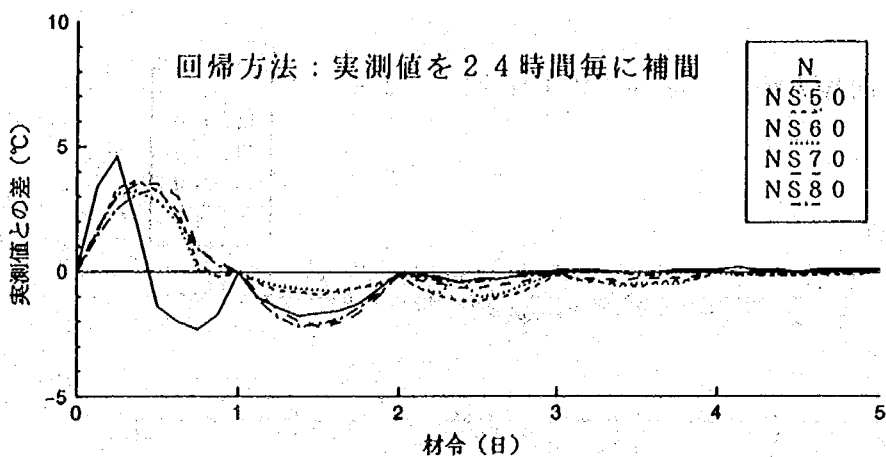
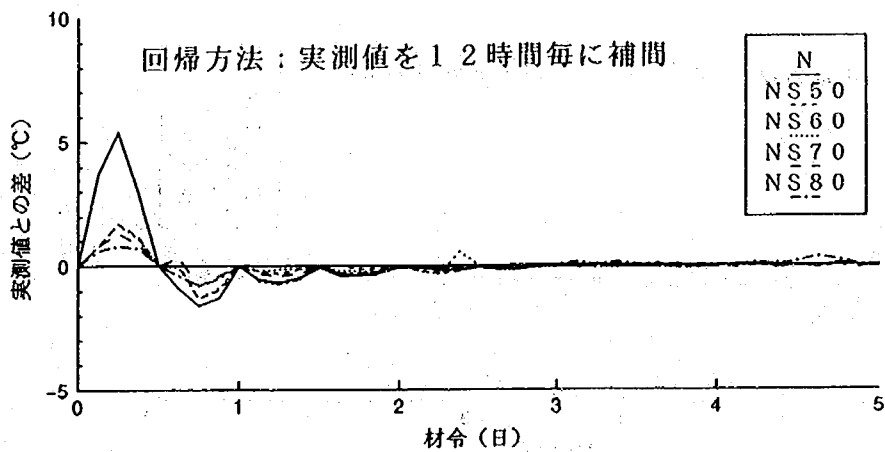
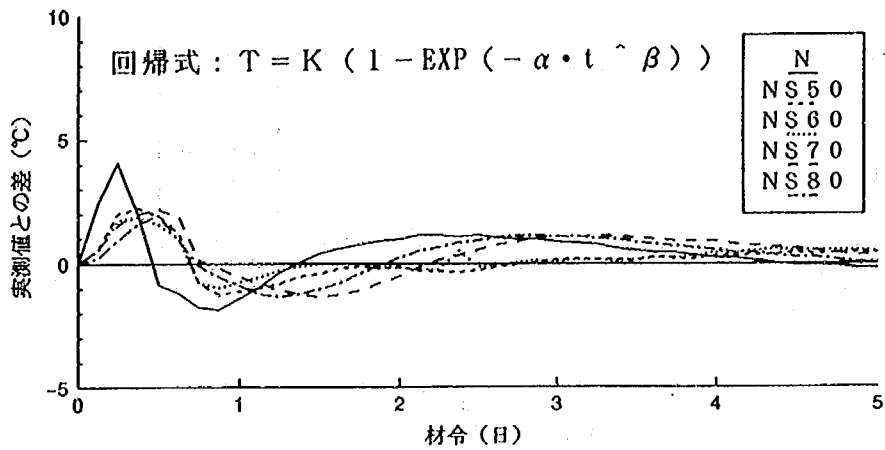
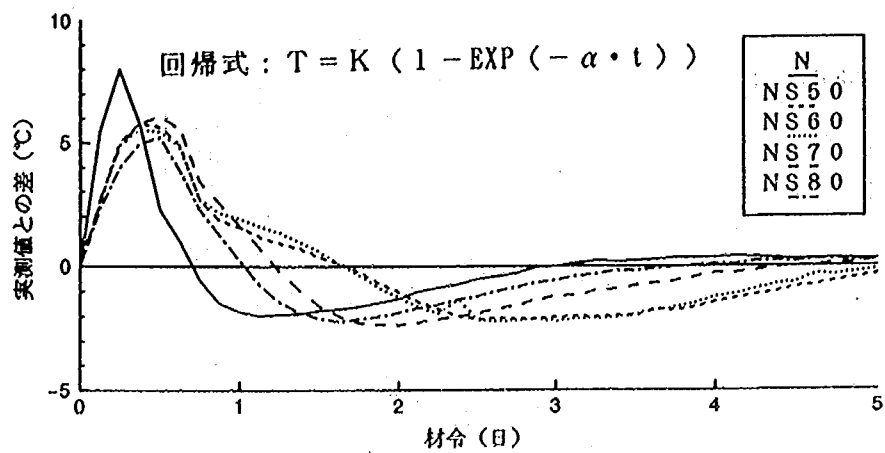


図-6.8 断熱温度上昇回帰値と実測値による温度解析結果の差

(普通セメント, 節点番号8:リフト中央部)

注: 図中の値は 回帰値-実測値 である。

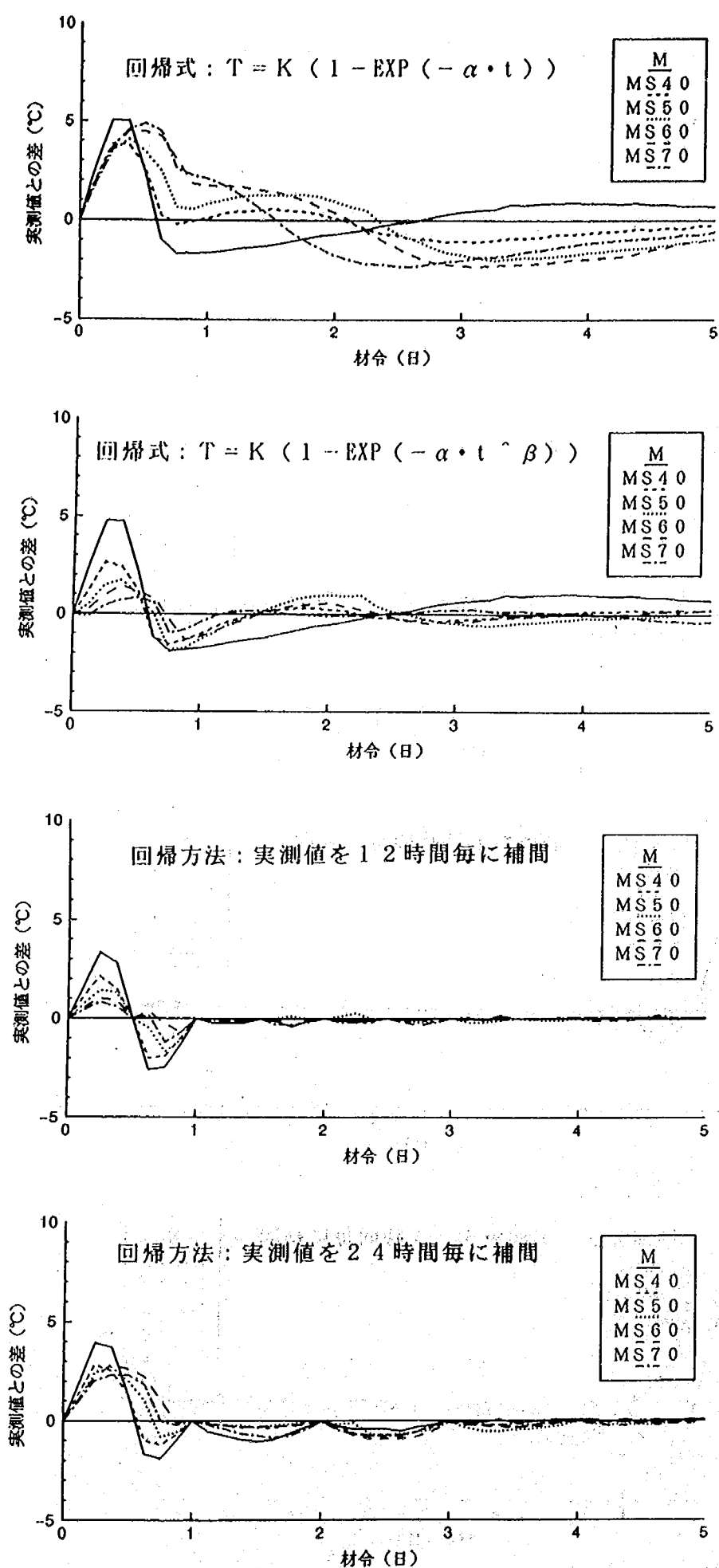


図-6.9 断熱温度上昇回帰値と実測値による温度解析結果の差

(中麻熱セメント, 節点番号8:リフト中央部)

注: 図中の値は 回帰値-実測値 である。

6. 3. 3 回帰方法が温度応力解析結果に及ぼす影響

温度応力解析結果を表-6. 9及び図-6. 13に示す。

前項で予想した通り式(6. 1)を用いて解析した場合を除いて最大引張応力差（温度応力誤差）は1 (kgf/cm²)以下となった。標準偏差は式(6. 1)を用いて解析した場合は1 (kgf/cm²)程度だが、それ以外は0. 5 (kgf/cm²)以内である。つまり、回帰方法が温度応力解析の最大引張応力に及ぼす影響は小さく、多くても1 (kgf/cm²)程度である。これは、温度誤差が大きい初期材令においては有効弾性係数の値が小さく、引張応力にはあまり影響を及ぼさないためだと考えられる。しかし、リフト厚のさらに大きい解析モデルや有効弾性係数の設定などによってはこの温度応力の誤差もさらに大きくなるので、やはり、回帰精度の良い方法で断熱温度上昇曲線を求めることは大切である。

表- 6. 9 断熱温度上昇曲線が温度応力解析結果に及ぼす影響
引張応力誤差の最大値（単位：kgf/cm²）

	2) 式 (6. 1)		3) 式 (6. 2)		4) 12時間毎に補間		5) 24時間毎に補間	
	引張応力誤差の最大値	標準偏差	引張応力誤差の最大値	標準偏差	引張応力誤差の最大値	標準偏差	引張応力誤差の最大値	標準偏差
N	1. 3 4	0.79	0. 6 8	0.32	0. 6 7	0.42	0. 8 4	0.40
NS50	1. 7 4	1.11	0. 3 8	0.21	0. 3 7	0.13	0. 7 9	0.47
NS60	1. 8 1	1.11	0. 3 0	0.20	0. 3 7	0.20	0. 7 2	0.43
NS70	1. 7 6	0.97	0. 5 6	0.32	0. 3 3	0.13	0. 9 6	0.49
NS80	1. 1 5	0.66	0. 4 2	0.26	0. 2 0	0.08	0. 8 4	0.38
M	0. 8 3	0.49	0. 7 8	0.48	0. 7 5	0.24	0. 6 1	0.36
MS40	0. 8 8	0.55	0. 4 4	0.21	0. 5 1	0.17	0. 4 8	0.29
MS50	1. 4 4	0.86	0. 4 8	0.20	0. 4 3	0.11	0. 5 0	0.31
MS60	1. 7 5	1.08	0. 3 6	0.15	0. 2 1	0.09	0. 6 4	0.37
MS70	1. 4 4	0.92	0. 2 3	0.12	0. 2 8	0.07	0. 4 9	0.28

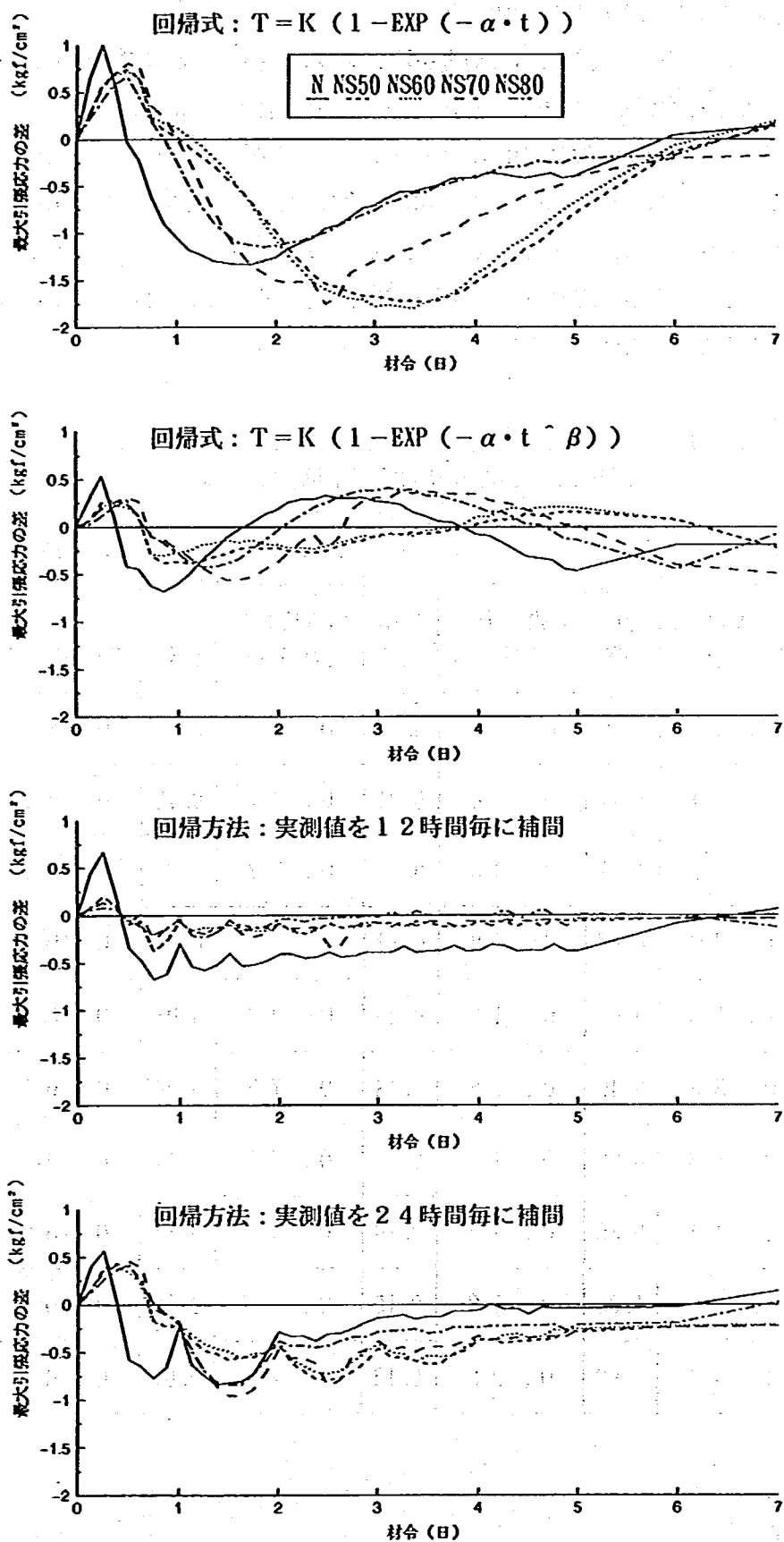


図-6. 10 断熱温度上昇回帰値と実測値による温度応力解析結果の差

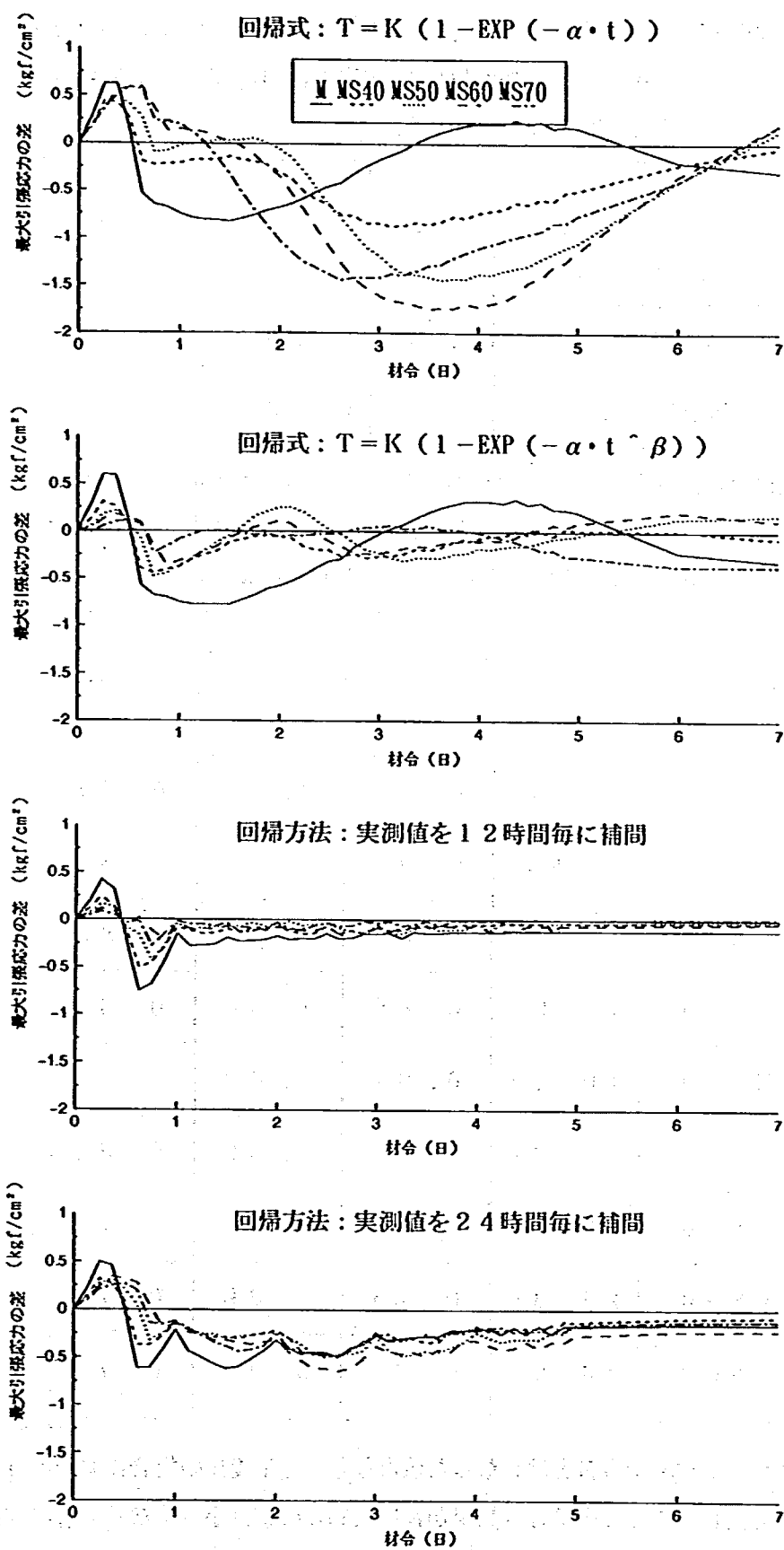


図-6. 11 断熱温度上昇回帰値と実測値による温度応力解析結果の差

6.4 圧縮強度推定式について

解析に用いる圧縮強度の推定は式(6.6)を用いるか、積算温度により強度を求める方法が一般に採用されている。土木学会のコンクリート標準示方書では式(6.6)の定数 a 、 b は表-6.10のような値を示している。

表-6.10 定数 a 、 b の値

	a	b
早強セメント	2.9	0.97
普通セメント	4.5	0.95
中熱セメント	6.2	0.93

ここでは、回帰式による強度と実測値の標準偏差が最小となるような a 、 b を求め、土木学会のコンクリート標準示方書の値と比較した。実験によって求められた a 、 b の値を表-6.11に示す。

表-6.11 実験によって求められた定数 a 、 b の値

配 合	標準養生		断熱養生	
	a	b	a	b
N	3.55	0.98	0.39	0.97
NS50	9.97	0.90	1.66	0.85
NS60	12.04	0.87	1.73	0.83
NS70	12.99	0.86	1.56	0.85
NS80	10.43	0.91	1.40	0.87
M	12.99	0.88	2.58	0.81
MS40	16.89	0.85	2.75	0.75
MS50	23.39	0.75	2.39	0.77
MS60	20.99	0.81	2.60	0.77

回帰結果はコンクリート標準示方書とは異なった値となり、標準養生の場合においては a の値が高炉スラッグの混入率とともに増大し、断熱養生は強度発現が良いため a の値は小さくなる。この式は初期材令において変動係数が大きくなる傾向にあるので、内部拘束卓越の構造物を解析する際に、材令と圧縮強度の関係式は他の式を用いることも検討すると良いと思われる。

6.5 引張強度推定式について

土木学会において引張強度は式(6.7)に示すように、圧縮強度の関数として与えられ、定数 c は 1.4 を標準としている。ここでは、回帰式による強度と実測値の標準偏差が最小となるような c を求め、土木学会の値と比較した。実験値によって求められた c の値を表-6.12, 表-6.13に示す。

日本コンクリート工学協会の温度応力解析プログラムでは圧縮強度と引張強度は回帰定数を2つ用いて次のようにべき乗の式で表している。

$$f_t(t) = c_1 \cdot (f_c(t))^{c_2} \quad (6.9)$$

式(6.9)の方が式(6.7)より回帰精度が良く、標準偏差も当然小さくなる。

実験値を用いて式(6.9)の c_1, c_2 を回帰した結果を表-6.14, 表-6.15に示す。

表-6.12 実験値を用いて回帰した定数 c の値 (標準養生)

配 合	c			標準偏差			$c=1.4$ の時の標準偏差		
	10℃	20℃	30℃	10℃	20℃	30℃	10℃	20℃	30℃
N	1.59	1.66	1.55	0.949	1.455	0.848	3.974	5.268	3.410
NS50	1.54	1.71	1.50	2.774	3.717	2.320	3.919	6.551	2.842
NS60	1.52	1.55	1.45	2.718	3.750	3.023	3.935	4.758	3.127
NS70	1.49	1.66	1.44	2.888	4.489	2.993	3.271	6.205	3.050
NS80	1.50	1.36	1.33	3.447	1.791	1.852	3.845	1.912	2.138
M	—	1.56	—	—	2.179	—	—	3.619	—
MS40	—	1.56	—	—	4.015	—	—	4.763	—
MS50	—	1.50	—	—	3.607	—	—	3.923	—
MS60	—	1.49	—	—	3.832	—	—	4.090	—
MS70	—	1.36	—	—	3.646	—	—	3.677	—
NS50-B	1.64	1.53	1.51	2.696	2.759	2.566	5.301	3.600	1.369
NS50-C	1.70	1.53	1.47	2.655	2.518	2.507	6.767	3.447	1.778

表-6.13 実験値を用いて回帰した定数cの値 (断熱養生)

配 合	c			標準偏差			c=1.4の時の標準偏差		
	10℃	20℃	30℃	10℃	20℃	30℃	10℃	20℃	30℃
N	1.74	1.66	1.51	2.990	0.826	0.592	7.413	4.483	1.739
NS50	1.81	1.71	1.43	4.455	1.728	1.283	10.09	5.718	1.374
NS60	1.65	1.67	1.44	3.257	2.387	1.870	5.668	5.582	1.970
NS70	1.64	1.69	1.47	3.504	2.311	2.454	5.448	5.832	2.683
NS80	1.63	1.66	1.41	3.975	2.173	2.058	5.342	4.992	2.064
M	—	1.74	—	—	3.169	—	—	6.986	—
MS40	—	1.66	—	—	2.513	—	—	5.269	—
MS50	—	1.70	—	—	3.230	—	—	6.289	—
MS60	—	1.68	—	—	4.231	—	—	6.438	—
MS70	—	1.66	—	—	2.513	—	—	4.027	—
NS50-B	1.83	1.52	1.35	2.045	1.012	0.490	1.369	2.487	0.972
NS50-C	1.76	1.53	1.39	2.395	1.292	0.183	1.778	2.987	0.949

表-6.14 実験値を用いて回帰した定数c1, c2の値 (標準養生)

配 合	10℃		20℃		30℃		標準偏差		
	c1	c2	c1	c2	c1	c2	10℃	20℃	30℃
N	1.133	0.555	0.748	0.633	0.468	0.702	0.893	1.068	1.098
NS50	0.448	0.702	0.298	0.798	0.377	0.739	0.577	1.684	0.835
NS60	0.479	0.690	0.311	0.772	0.276	0.791	0.286	1.987	0.317
NS70	0.412	0.715	0.164	0.897	0.201	0.855	2.477	1.358	0.208
NS80	0.208	0.843	0.515	0.669	0.245	0.813	1.888	0.305	0.352
M	—	—	0.630	0.651	—	—	—	1.042	—
MS40	—	—	0.250	0.817	—	—	—	3.096	—
MS50	—	—	0.247	0.811	—	—	—	1.725	—
MS60	—	—	0.225	0.829	—	—	—	0.708	—
MS70	—	—	0.158	0.898	—	—	—	0.232	—
NS50-B	0.529	0.686	0.359	0.745	0.337	0.758	1.117	1.370	0.683
NS50-C	0.513	0.694	0.425	0.714	0.358	0.742	1.725	1.326	1.466

表-6.15 実験値を用いて回帰した定数 c_1 , c_2 の値 (断熱養生)

配 合	10℃		20℃		30℃		標準偏差		
	c_1	c_2	c_1	c_2	c_1	c_2	10℃	20℃	30℃
N	0.134	0.926	1.113	0.566	0.454	0.712	0.782	0.752	0.042
NS50	0.188	0.875	0.738	0.641	0.421	0.722	1.182	1.822	0.449
NS60	0.263	0.807	0.299	0.792	0.240	0.824	0.582	0.968	0.818
NS70	0.218	0.843	0.329	0.781	0.110	0.978	0.587	1.485	1.711
NS80	0.114	0.972	0.156	0.910	0.0474	1.142	0.902	0.803	0.530
M	—	—	0.207	0.862	—	—	—	0.350	—
MS40	—	—	0.353	0.764	—	—	—	0.645	—
MS50	—	—	0.238	0.836	—	—	—	0.697	—
MS60	—	—	0.0775	1.028	—	—	—	1.039	—
MS70	—	—	0.168	0.891	—	—	—	0.756	—
NS50-B	0.576	0.691	1.823	0.469	0.621	0.641	1.721	1.008	0.444
NS50-C	0.500	0.705	41.631	-0.046	1.126	0.537	1.939	0.624	0.149

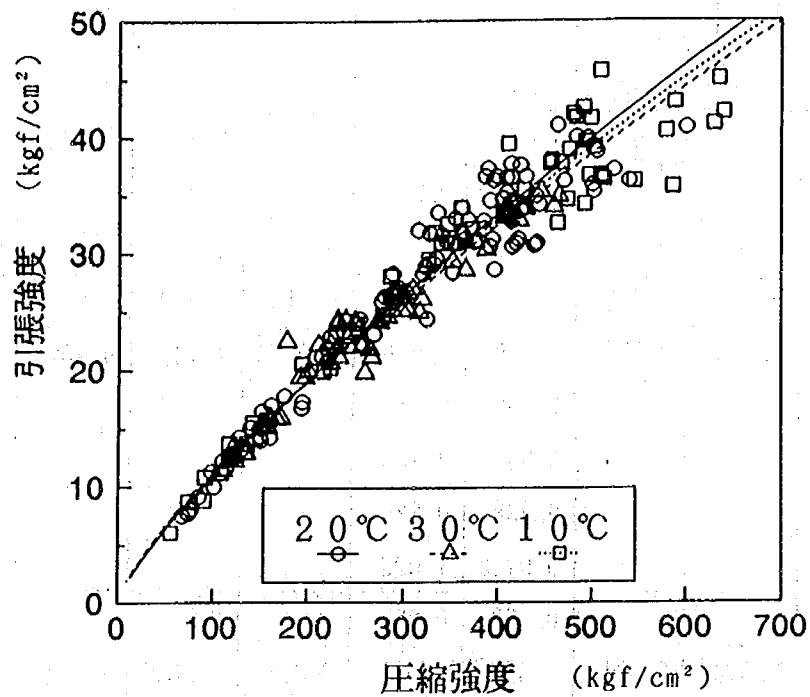
表-6.12, 表-6.13の回帰結果から、コンクリート標準示方書の式は今回の回帰結果から求められた定数より小さいことから、引張強度をいずれの配合においても安全側に評価しているのがわかる。引張強度は温度解析及び温度応力解析で用いられるのはひびわれ指数の計算だけである。よって、引張強度推定式の定数が変わることによって、ひびわれ指数以外の解析結果に与える影響はない。

式(6.9)の回帰結果は定数を2つ用いることから、回帰の精度は良い。表-6.14, 表-6.15の定数は養生方法、高炉スラグの混入率、打設温度などによって一定の傾向があるように思われるが、図-6.12～図-6.14に示すように高強度では若干変わるものの、これらの影響は小さいものであり、引張強度は圧縮強度の関数と考えて良い。

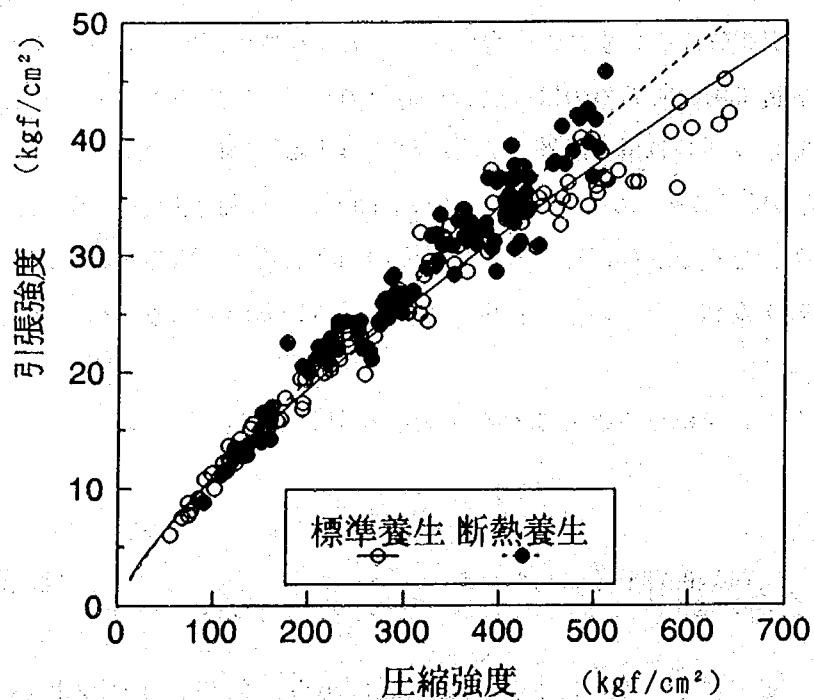
全データを回帰した結果は以下の通りであり、図-6.15に示す。

$$f_t(t) = 0.285 \cdot f_c(t)^{0.793} \quad (6.10)$$

ここに、 $f_t(t)$: 引張強度(kgf/cm²), $f_c(t)$: 圧縮強度(kgf/cm²)



図－6. 1 2 圧縮強度と引張強度の関係（その1）
打設温度の影響



図－6. 1 3 圧縮強度と引張強度の関係（その2）
養生方法による相違

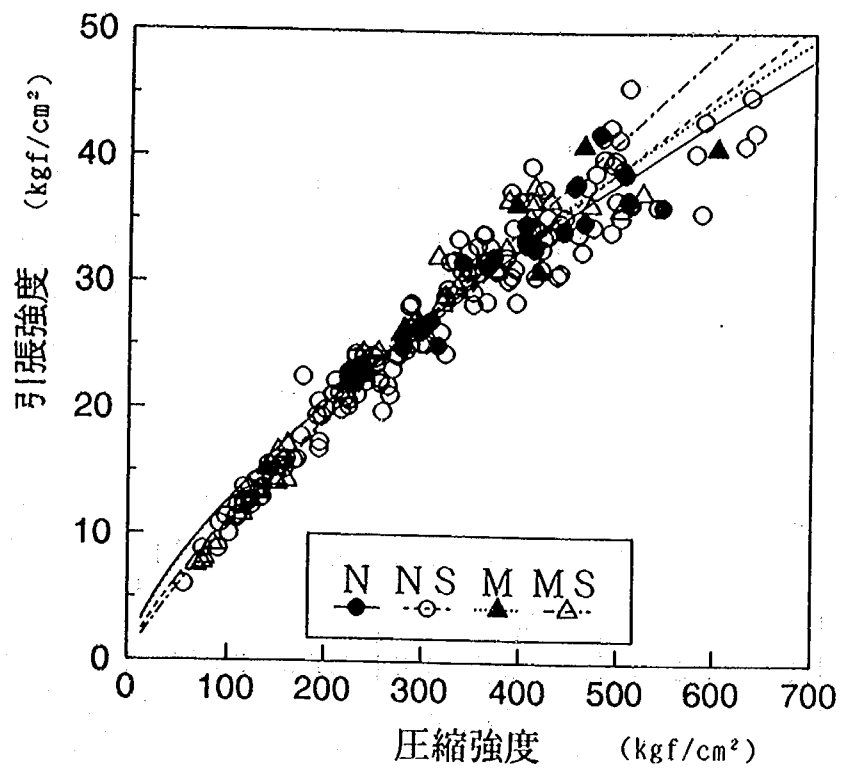


図-6. 14 圧縮強度と引張強度の関係 (その3)
配合の種類による相違

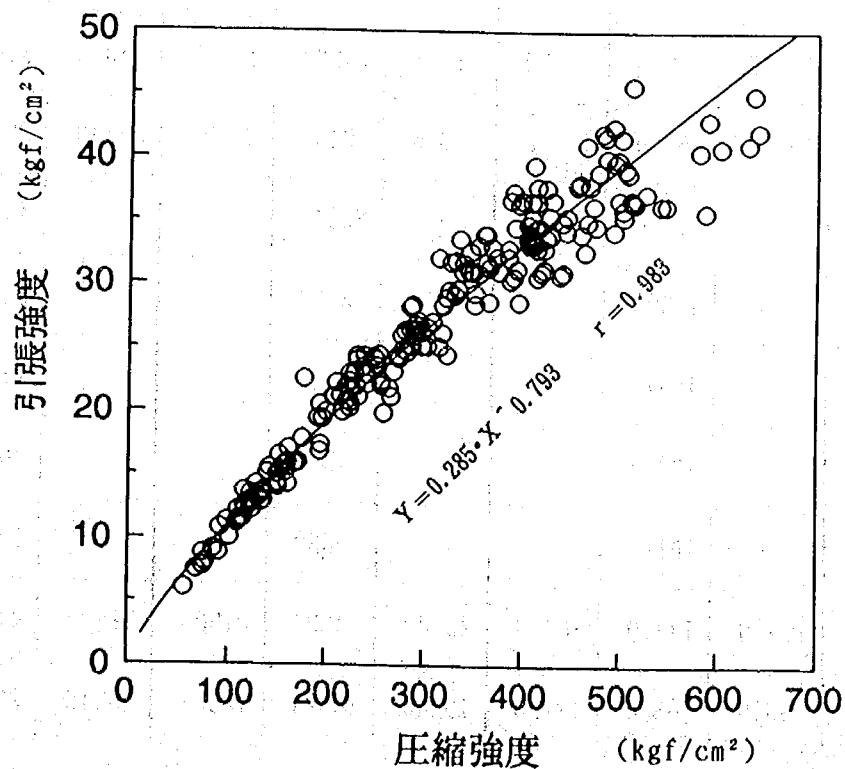


図-6. 15 圧縮強度と引張強度の関係 (その4)
全データによる回帰

6. 6 静弾性係数推定式について

土木学会において静弾性係数は式(6. 8)で与えられているが、実験においてはクリープの影響を考慮しないで $\phi(t)=1$ であると考えられるので、ヤング係数推定式は以下の式となる。

$$E_e(t) = 15000 \cdot \text{SQR}(f_e(t)) \quad (6. 11)$$

この式中の定数15000を d とすると、ここでは回帰式による強度と実測値の標準偏差が最小となるような d を求め、土木学会の値と比較した。実験によって求められた d の値を表-6. 16, 表-6. 17に示す。

また、引張強度推定式と同様に式(6. 12)に示すべき乗の式でも回帰した。回帰定数 d_1 , d_2 を用いて回帰した結果を表-6. 18, 表-6. 19に示す。

$$E_e(t) = d_1 \cdot (f_e(t))^{d_2} \quad (6. 12)$$

表-6. 16 実験値を用いて回帰した定数 d の値 (標準養生)

配 合	d			標準偏差			d=15000の時の標準偏差		
	1 0℃	2 0℃	3 0℃	1 0℃	2 0℃	3 0℃	1 0℃	2 0℃	3 0℃
N	16150	16840	16230	17887	8730	10706	29690	37080	25620
NS50	15880	16650	16800	13508	6660	8980	21750	29650	31670
NS60	15720	16450	16900	8175	3982	11826	19600	27140	32840
NS70	16150	16910	16470	7786	14300	11530	22060	35070	25010
NS80	16770	16280	14340	12055	16483	20699	30740	26570	23680
M	—	16590	—	—	22648	—	—	40790	—
MS40	—	16990	—	—	3723	—	—	32490	—
MS50	—	16470	—	—	14744	—	—	27850	—
MS60	—	16850	—	—	9857	—	—	30160	—
MS70	—	16120	—	—	9839	—	—	17980	—
NS50-B	16100	17470	16440	22732	4594	7805	31220	44650	15910
NS50-C	15810	16320	17280	19480	16324	12932	25710	29570	29850

表-6. 17 実験値を用いて回帰した定数dの値 (断熱養生)

配 合	d			標準偏差			d=15000の時の標準偏差		
	10℃	20℃	30℃	10℃	20℃	30℃	10℃	20℃	30℃
N	16850	16450	16850	9761	8561	4429	38150	21830	29690
NS50	16840	16360	16840	9083	15678	11808	36890	29840	21750
NS60	17270	17040	16770	11966	17120	10331	44150	41680	19600
NS70	17870	18090	17560	17134	8585	9658	53540	56820	22060
NS80	17550	17860	17790	21427	4150	5084	45270	50400	30740
M	—	17060	—	—	10473	—	—	39410	—
MS40	—	17200	—	—	11187	—	—	38420	—
MS50	—	17100	—	—	19873	—	—	42490	—
MS60	—	17570	—	—	13470	—	—	47320	—
MS70	—	17660	—	—	11214	—	—	42850	—
NS50-B	16360	17470	17890	16204	4592	13095	32130	48630	44110
NS50-C	15900	16530	17150	20603	9397	17591	28170	32990	42370

表-6. 18 実験値を用いて回帰した定数d1, d2の値 (標準養生)

配 合	10℃		20℃		30℃		標準偏差		
	d1	d2	d1	d2	d1	d2	10℃	20℃	30℃
N	22618	0.444	29897	0.404	19610	0.468	17952	3237	10851
NS50	20539	0.457	18018	0.486	14439	0.526	14189	6944	5238
NS60	18003	0.477	19475	0.471	11549	0.567	9271	2359	6565
NS70	16620	0.495	12773	0.547	8755	0.614	8174	10639	1014
NS80	14457	0.525	14827	0.515	3890	0.741	10007	15874	11098
M	—	—	33829	0.381	—	—	—	9687	—
MS40	—	—	18203	0.488	—	—	—	3565	—
MS50	—	—	13774	0.530	—	—	—	12830	—
MS60	—	—	12869	0.547	—	—	—	5027	—
MS70	—	—	9934	0.590	—	—	—	772	—
NS50-B	35110	0.371	20025	0.477	15749	0.507	16985	4444	7623
NS50-C	33513	0.378	28272	0.407	7817	0.637	12267	14667	5877

表-6.19 実験値を用いて回帰した定数d1, d2の値 (断熱養生)

配 合	1 0℃		2 0℃		3 0℃		標準偏差		
	d1	d2	d1	d2	d1	d2	1 0℃	2 0℃	3 0℃
N	8621	0.611	15504	0.510	20935	0.462	6363	7658	4294
NS50	12336	0.552	9414	0.594	8835	0.617	5431	13271	7760
NS60	9982	0.592	5070	0.706	7592	0.644	4378	5594	3133
NS70	7653	0.645	10378	0.595	7983	0.646	6240	5790	6303
NS80	5794	0.697	21762	0.466	10838	0.594	3238	3624	2871
M	—	—	24060	0.441	—	—	—	9370	—
MS40	—	—	13438	0.542	—	—	—	9389	—
MS50	—	—	5781	0.686	—	—	—	7527	—
MS60	—	—	11268	0.576	—	—	—	9666	—
MS70	—	—	10591	0.590	—	—	—	9951	—
NS50-B	8130	0.615	3791	0.757	4724	0.742	13492	1846	8124
NS50-C	2578	0.797	410794	-0.031	523.6	1.117	14569	8425	4543

静弾性係数は一般的には同一の骨材であれば圧縮強度の関数になると言われている。表-6.17, 表-6.18の今回の実測値から求められた式はコンクリート標準示方書より静弾性係数は大きい値をとる。これは、温度応力解析において、初期材令の内部拘束応力はコンクリート標準示方書の式を用いると安全側の値になる。但し、長期材令も勘案すると静弾性係数が大きい方が危険側であるとは一概には言えない。

表-6.18, 表-6.19に示した定数d1, d2は、引張強度推定式と同様に打設温度、高炉スラグの混入率の影響があるように思えるが、これも図-6.16～図-6.18で回帰定数が異なっても静弾性係数の値は大きく変わらないことがわかるので、これらの条件が静弾性係数に及ぼす影響は小さいと考えられる。

これらのすべてのデータを回帰すると以下の通りとなる。

$$E_e(t) = 14545 \cdot f_c(t)^{0.524} \quad (6.13)$$

ここに $E_e(t)$: 静弾性係数(kgf/cm²), $f_c(t)$: 圧縮強度(kgf/cm²)

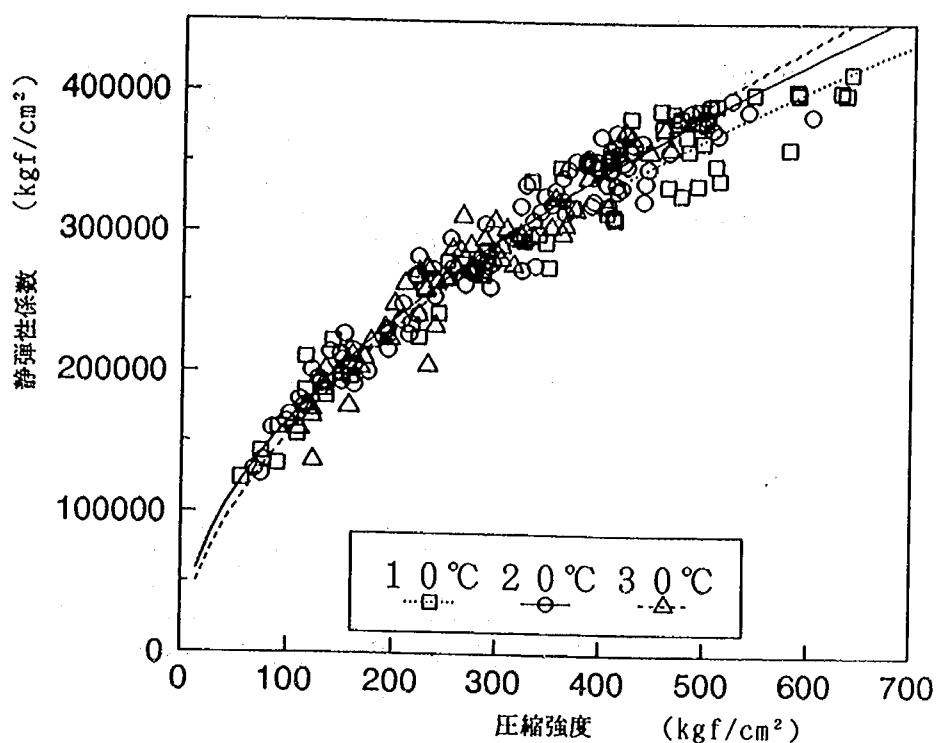


図-6. 16 圧縮強度と静弾性係数の関係 (その1)
打設温度の影響

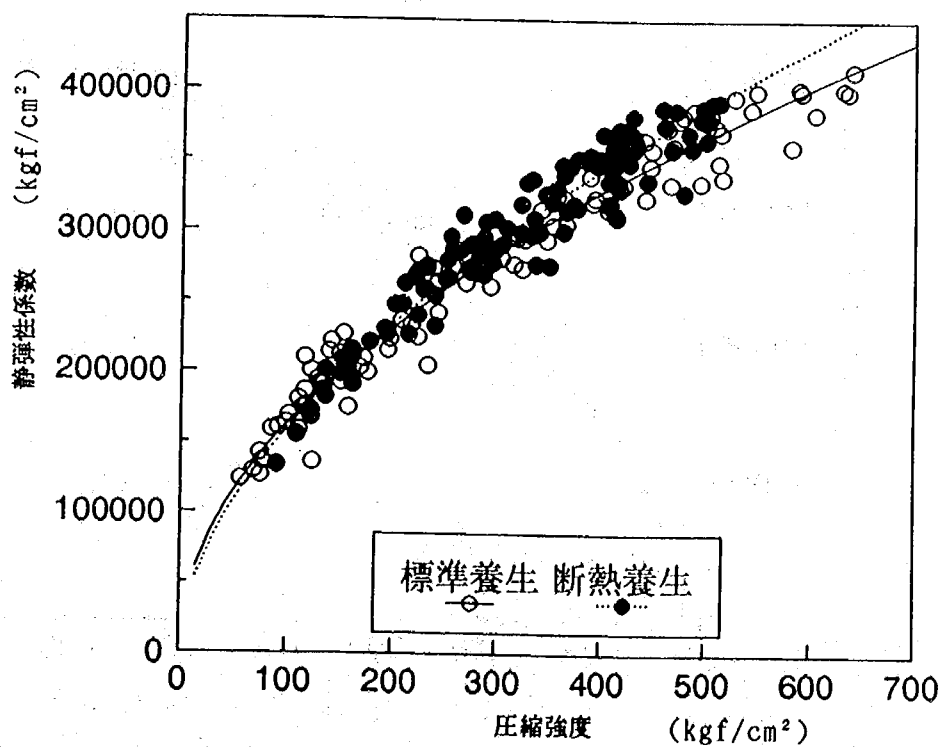


図-6. 17 圧縮強度と静弾性係数の関係 (その2)
養生方法の影響

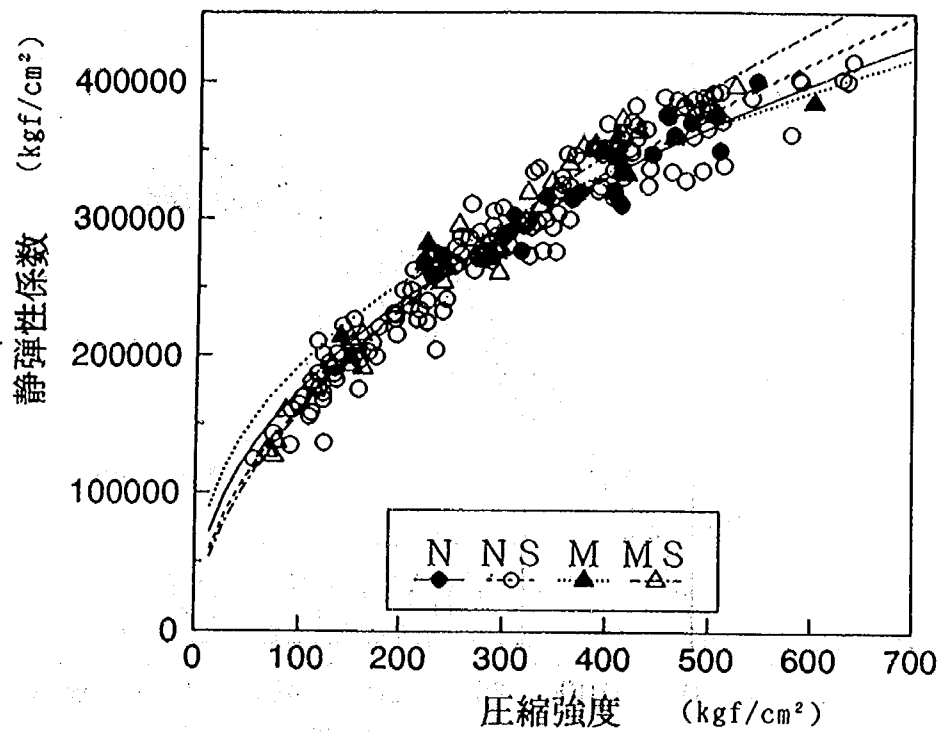


図-6. 18 圧縮強度と静弾性係数の関係 (その3)
配合の種類による相違

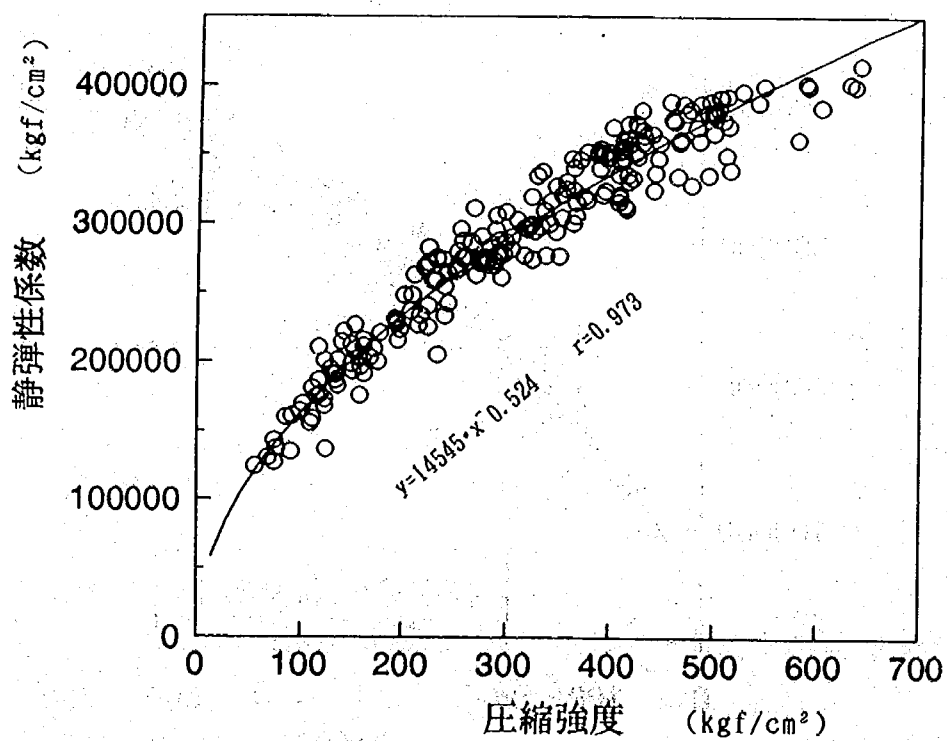


図-6. 19 圧縮強度と静弾性係数の関係 (その4)
全データによる回帰

7. 温度履歴の異なるコンクリートの強度推定法の提案

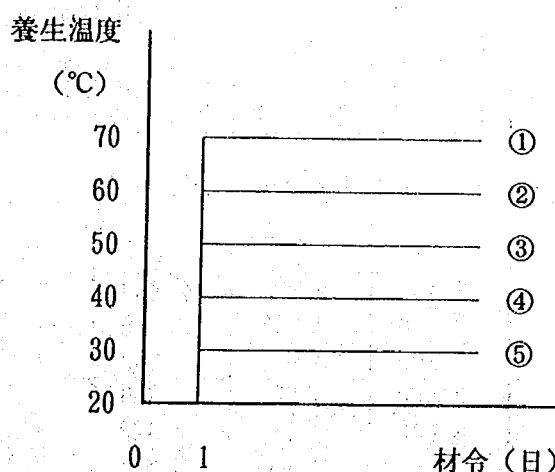
同一のコンクリートでも温度履歴が異なると、積算温度と強度の関係は異なったものとなることは図-4.6～図-4.10からもわかるが、ここでは養生温度を数点変化させて、異なった温度履歴の強度を推定した。

7.1 実験概要

コンクリートの配合はN, NS50, NS80（打設温度20℃）とした。

打設したコンクリートは材令約18時間で早強セメントを用いてキャッピングし、材令1日で脱型した。その後は図-7.1に示すように所定の恒温水槽で養生した。

材令は打設から2, 3, 4, 7, 14日であり、圧縮強度試験、引張強度試験、静弾性係数試験を行った。



7.2 試験結果

コンクリート試験結果を表-7.1～表-7.3に示す。

図-7.1 コンクリートの温度履歴

表-7.1 圧縮強度試験結果

配 合	養生温度 (°C)	材 令 (日)				
		2	3	4	7	14
N	20	201	268	289	387	414
	30	234	308	343	406	441
	40	250	349	358	415	463
	50	298	353	368	399	437
	60	307	366	376	412	434
	70	322	358	355	392	380
NS50	20	106	137	157	214	320
	30	118	174	221	310	396
	40	144	235	294	378	475
	50	197	295	357	420	451
	60	244	340	395	414	426
	70	293	352	372	380	404
NS80	20	63.0	97.6	125	186	264
	30	88.3	158	189	263	301
	40	150	219	244	304	327
	50	195	241	256	277	281
	60	207	231	234	246	266

表-7.2 引張強度試験結果

配 合	養生温度 (°C)	材 令 (日)				
		2	3	4	7	14
N	20	19.9	26.5	27.2	31.9	34.3
	30	22.2	26.8	31.4	34.8	38.5
	40	23.5	28.6	32.3	35.6	38.7
	50	26.4	30.4	29.4	38.2	36.5
	60	26.1	33.7	30.9	32.7	37.7
	70	27.8	28.3	31.1	30.3	33.8
NS50	20	10.4	13.9	16.5	20.3	29.2
	30	12.3	18.2	21.0	29.3	35.8
	40	13.4	21.3	27.5	30.6	42.9
	50	18.0	28.2	30.4	32.2	37.5
	60	23.3	30.2	33.1	35.3	39.3
	70	27.8	30.1	31.6	29.7	31.7
NS80	20	6.34	9.79	11.9	17.7	22.8
	30	8.64	14.7	17.9	23.7	27.2
	40	13.3	22.7	23.9	26.8	29.2
	50	18.3	23.0	22.5	25.8	25.1
	60	19.3	22.1	22.3	22.6	22.0

表-7.3 静弾性係数試験結果

配 合	養生温度 (°C)	材 令 (日)				
		2	3	4	7	14
N	20	2.485	2.839	2.933	3.194	3.443
	30	2.670	2.913	3.186	3.313	3.563
	40	2.806	3.046	3.302	3.468	3.669
	50	3.000	3.082	3.366	3.504	3.679
	60	3.040	3.187	3.328	3.620	3.571
	70	3.143	3.139	3.311	3.307	3.405
NS50	20	1.837	1.998	1.972	2.454	2.913
	30	1.851	2.041	2.478	2.903	3.415
	40	2.047	2.502	2.970	3.231	3.793
	50	2.380	2.837	3.246	3.632	3.862
	60	2.658	3.028	3.565	3.782	3.770
	70	2.905	3.163	3.430	3.544	3.474
NS80	20	1.235	1.429	1.602	2.072	2.439
	30	1.523	1.803	2.294	2.696	2.695
	40	1.958	2.704	2.777	3.172	3.210
	50	2.427	2.958	2.953	3.066	3.155
	60	2.319	2.804	2.867	3.035	3.086

圧縮強度と積算温度の関係を図-7.2～図-7.4に示す。これによると、同一積算温度において養生温度が異なると積算温度と圧縮強度の関係が異なったものとなるのは明らかである。特に、高炉スラグを用いたコンクリートは差が大きく、高炉セメントは温度依存性が高いことがわかる。

このことから、温度分布ができるマスコンクリートでの強度は材令や積算温度で一義的に推定できないとも言えるので、温度履歴（養生温度）から強度を推定することは、温度応力解析において、今後重要な検討項目となる。

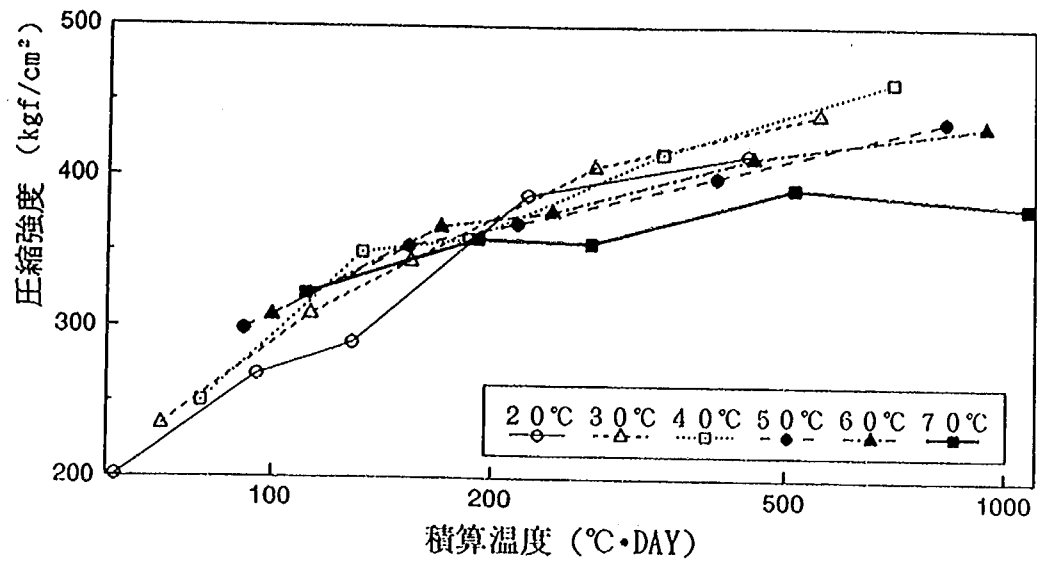


図-7. 2 養生温度が圧縮強度と積算温度の関係に及ぼす影響 (その1 : N)

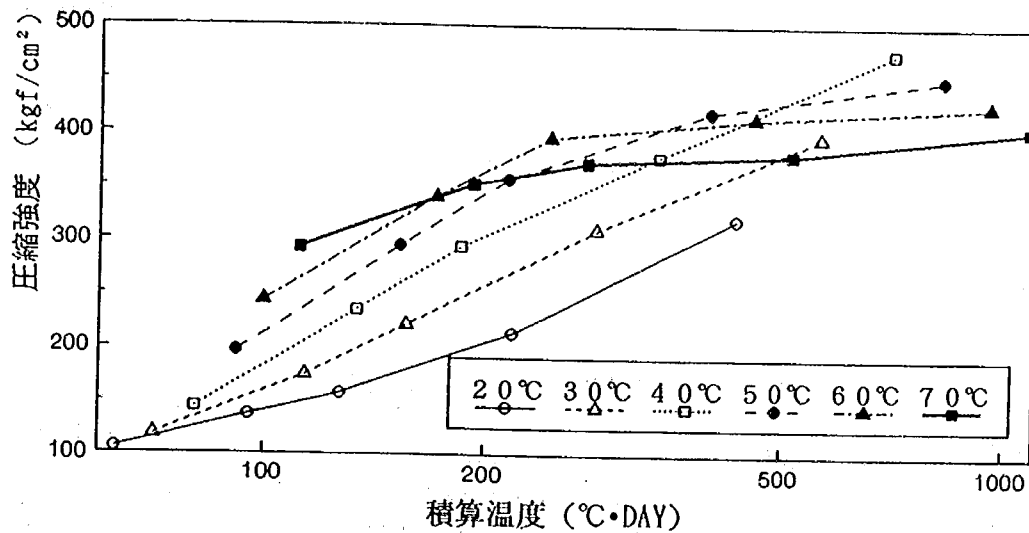


図-7. 3 養生温度が圧縮強度と積算温度の関係に及ぼす影響 (その2 : NS 50)

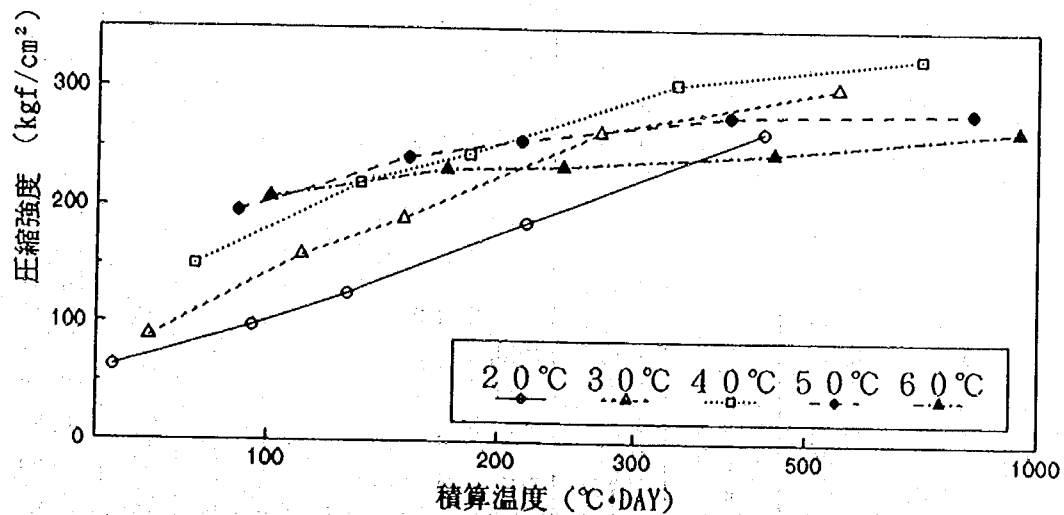


図-7. 4 養生温度が圧縮強度と積算温度の関係に及ぼす影響 (その3 : NS 80)

7. 3 養生温度が解析に用いる推定式に及ぼす影響

6章と同様にコンクリート標準示方書の各推定式の定数が温度履歴によって異なるかどうかを検討した。

$$f_c(t) = f_c(91) \cdot t / (a + b \cdot t) \quad (7.1)$$

$$f_t(t) = c \cdot \text{SQR} (f_c(t)) \quad (7.2)$$

$$E_c(t) = d \cdot \text{SQR} (f_c(t)) \quad (7.3)$$

$f_c(t)$: 圧縮強度(kgf/cm²) , $f_t(t)$: 引張強度(kgf/cm²) , $E_c(t)$: 静弾性係数(kgf/cm²)

t : 材令(日) , $f_c(91)$: 材令91日の圧縮強度(kgf/cm²) , a, b, c, d : 定数

また、圧縮強度と材令の関係は以下の式によっても回帰した。

$$f_c(t) = \sigma_{LIM1} \cdot (1 - \text{EXP} (-\alpha_1 \cdot t)) \quad (7.4)$$

$$f_c(t) = \sigma_{LIM2} \cdot (1 - \text{EXP} (-\alpha_2 \cdot t^{\beta_2})) \quad (7.5)$$

$\sigma_{LIM1}, \sigma_{LIM2}, \alpha_1, \alpha_2, \beta_2$: 定数

式(7-4), 式(7-5)は断熱温度上昇を求める回帰式と同じ形であるが、強度発現と断熱温度上昇曲線が類似形であるので回帰できると考えた。

これらの回帰式は実測値を用いて、標準偏差が最小となるように回帰した。ただし、式(7-3)において、材令91日の圧縮強度の代わりに材令14日の圧縮強度を用いた。

回帰結果を表-7.4に示す。

表中の標準偏差によると、式(7.1)は式(7.4), 式(7.5)より回帰精度がやや劣っている。

表-7.4 圧縮強度推定式の回帰結果

配 合	養生 温度 (°C)	式(7.1)		式(7.4)		式(7.5)			標準偏差		
		a	b	σ_{LIM1}	α_1	σ_{LIM2}	α_2	β_2	式 7.1	式 7.4	式 7.5
N	20	2.30	0.81	421.9	0.320	422.2	0.321	0.998	13.41	9.10	9.10
	30	1.84	0.85	440.2	0.385	442.2	0.395	0.966	9.78	4.09	3.91
	40	1.68	0.87	453.7	0.420	462.1	0.461	0.877	14.79	14.76	14.14
	50	1.03	0.93	419.9	0.592	444.4	0.758	0.606	5.71	11.98	6.50
	60	0.886	0.93	423.4	0.631	434.0	0.763	0.731	6.83	8.80	6.11
	70	0.443	0.94	381.0	0.905	385.4	1.095	0.728	9.42	8.98	7.89
NS50	20	5.44	0.63	359.1	0.147	700.3	0.100	0.679	8.65	11.18	3.54
	30	4.80	0.64	438.9	0.170	415.7	0.157	1.120	8.56	4.91	2.07
	40	4.12	0.69	507.0	0.200	484.5	0.180	1.135	15.91	12.73	11.17
	50	2.26	0.80	463.0	0.328	444.4	0.230	1.392	23.40	14.85	6.37
	60	1.31	0.86	433.7	0.483	420.8	0.277	1.640	25.73	16.31	4.00
	70	0.74	0.94	395.3	0.694	393.8	0.655	1.079	10.82	7.43	7.35
NS80	20	6.47	0.53	328.3	0.117	300.6	0.115	1.102	3.99	2.91	1.81
	30	3.83	0.69	324.7	0.211	300.4	0.148	1.381	16.27	12.76	6.20
	40	2.23	0.81	333.4	0.331	326.5	0.288	1.158	12.66	6.87	5.21
	50	0.920	0.90	281.4	0.610	279.9	0.564	1.099	8.66	2.63	2.18
	60	0.619	0.97	253.7	0.804	278.8	1.076	0.384	3.82	7.81	3.71

表-7.5に式(7.2)及び式(7.3)の定数 c , d を回帰した結果を示す。

また、6章と同様にべき乗の式(7.6), 式(7.7)の定数 c_1 , c_2 , d_1 , d_2 を回帰した結果を表-7.6に示した。
 ここでも、養生温度、配合によって回帰定数に違いがあるものの、図-7.5, 図-7.6に示した通り、引張強度
 及び静弾性係数は圧縮強度の関数となる。

$$f_c(t) = c_1 \cdot (f_c(t))^{c_2} \quad (7.6)$$

$$E_c(t) = d_1 \cdot (f_c(t))^{d_2} \quad (7.7)$$

なお、6章、7章で示した全データを用いた圧縮強度と引張強度の関係、圧縮強度と静弾性係数の関係を
 図-7.7, 図-7.8に示す。

表-7.5 引張強度および弾性係数推定式の回帰結果

配 合	養生 温度 (°C)	c	標準偏差		d	標準偏差	
			回帰結果	$c=1.4$		回帰結果	$d=15000$
N	20	1.61	1.49	2.85	16960	8151	23400
	30	1.68	2.48	4.32	16890	6608	27100
	40	1.68	2.27	6.14	17080	8625	35600
	50	1.68	2.81	4.65	17310	8600	46500
	60	1.66	2.24	6.38	17240	7476	54700
	70	1.59	1.69	3.72	17160	8188	47300
NS50	20	1.39	2.85	3.93	16600	8355	35600
	30	1.57	3.40	5.69	16650	8610	35800
	40	1.63	4.63	5.75	16440	18294	40700
	50	1.61	2.57	6.09	17440	11002	45400
	60	1.71	2.47	5.58	17760	15159	44200
	70	1.59	0.78	4.04	17440	9438	41800
NS80	20	1.21	2.42	3.32	14920	4598	4700
	30	1.37	2.80	2.83	15910	11714	17400
	40	1.50	2.49	2.95	17740	10822	44600
	50	1.46	1.25	1.55	18480	8356	55600
	60	1.41	0.80	0.88	18390	16735	54800

表-7.6 引張強度および弾性係数推定式の回帰結果

配 合	養生 温度 (°C)	c1	c2	標準偏差	d1	d2	標準偏差
N	20	0.480	0.709	0.789	27320	0.417	5227
	30	0.193	0.867	0.697	23464	0.444	5402
	40	0.248	0.822	1.026	24667	0.438	8026
	50	0.104	0.968	2.077	11796	0.565	8006
	60	0.133	0.924	1.640	14673	0.527	7357
	70	0.546	0.682	1.263	45399	0.335	5862
NS50	20	0.157	0.909	0.545	23230	0.436	7121
	30	0.192	0.875	0.435	14898	0.520	7912
	40	0.126	0.939	1.511	15687	0.514	6966
	50	0.254	0.814	1.547	10718	0.583	7057
	60	0.222	0.844	1.323	7059	0.656	10627
	70	3.095	0.387	0.689	7819	0.636	8266
NS80	20	0.156	0.900	0.409	15449	0.493	4764
	30	0.132	0.933	0.194	15218	0.508	11670
	40	0.111	0.969	1.406	8273	0.637	8240
	50	0.168	0.890	0.644	6818	0.680	6003
	60	1.161	0.535	0.801	473	1.169	9815

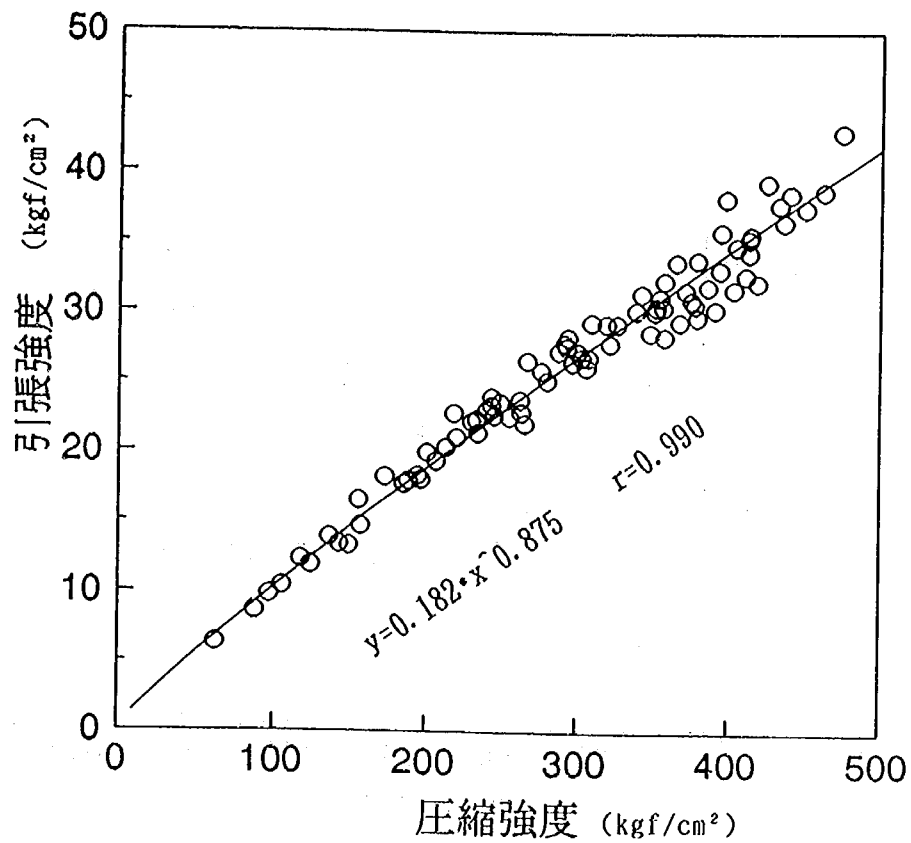


図-7. 5 圧縮強度と引張強度の関係

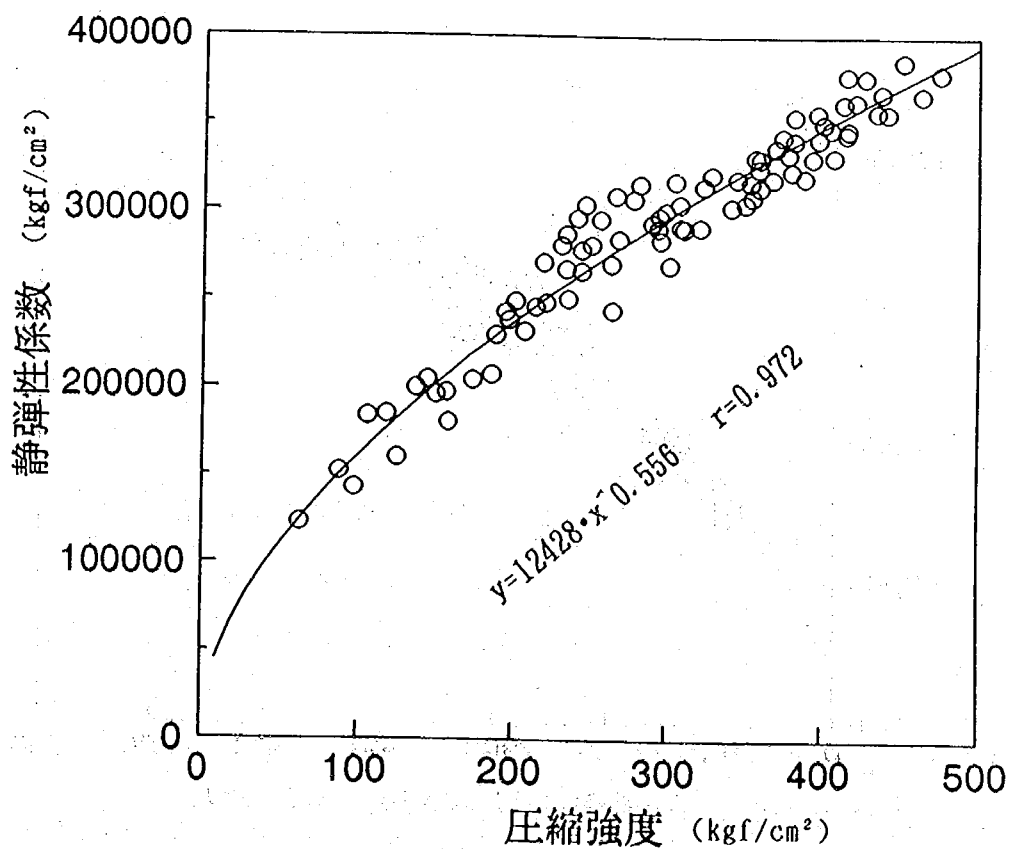
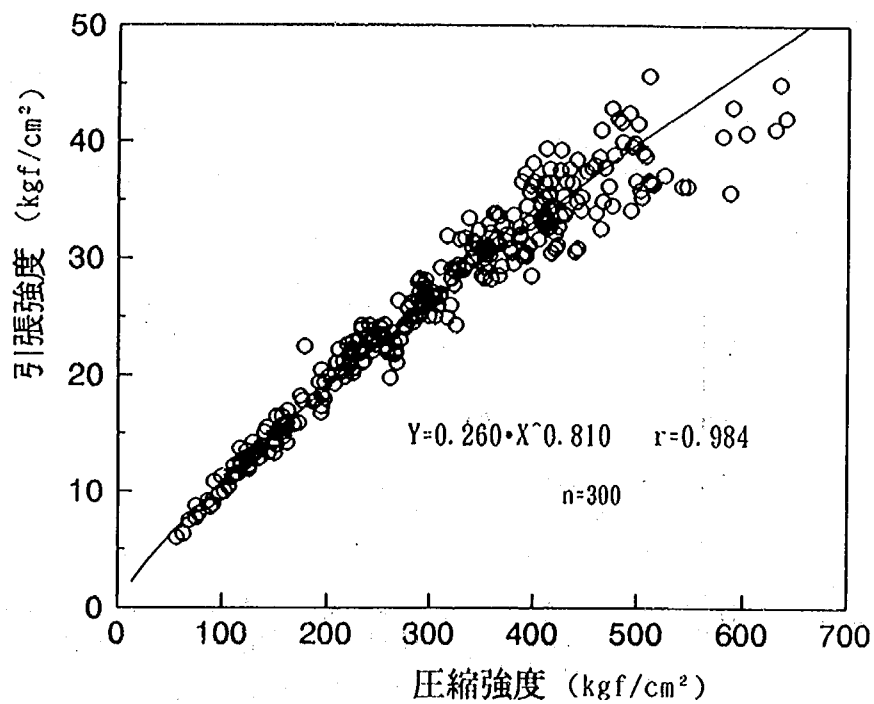
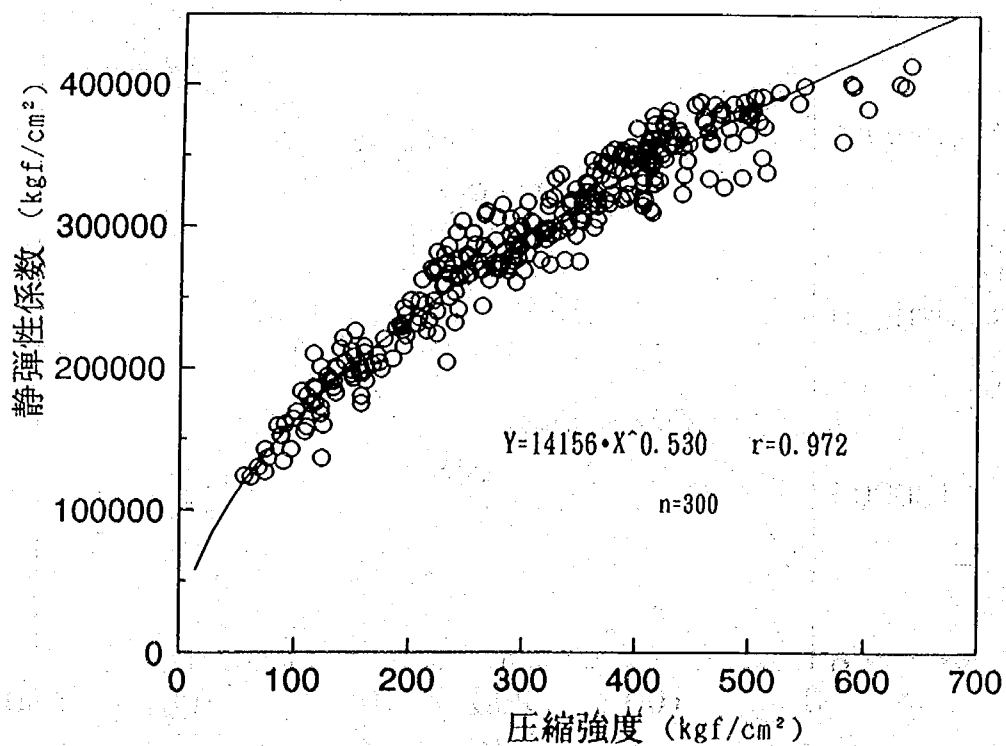


図-7. 6 圧縮強度と静弾性係数の関係



図－7. 7 圧縮強度と引張強度の関係（平成3年度全データ）



図－7. 8 圧縮強度と静弾性係数の関係（平成3年度全データ）

7. 4 強度推定方法の提案

高炉スラグを用いたセメントは温度依存性が大きいことは今回の実験結果からも明らかであり、セメントの水和熱においては活性化エネルギーを用いた温度活性を考慮した式が提案されている。コンクリートの強度発現は水和発熱に類似した特性を持つと思われるので、ここでは、水和熱の水和発熱速度と温度活性の関係式を応用して強度推定を行った。

式(7.8)並びに式(7.9)は水和熱の水和発熱速度と温度活性の関係式で、反応工学においては一般的にアレニウスの式(アレニウス則)と呼ばれている。

$$H = H_{LIM}(q) \cdot \exp(-E(q)/(R \cdot T)) \quad (7.8)$$

H : 単位セメント量当たりの水和発熱速度で材令 t の関数(cal/g/day)

$H_{LIM}(q)$: 温度 T が無限大の時の水和発熱速度(cal/g/day), $E(q)$: 活性化エネルギー

T : 絶対温度(°C), q : 単位重量当たりのセメントの積算発熱量(cal/g), R : 気体定数

$$\ln H = \ln H_{LIM}(q) - E(q)/(R \cdot T) \quad (7.9)$$

式(7.9)は式(7.8)の両辺の対数をとったものであり、これは $\ln H$ と $1/T$ が傾き $-E(q)/R$, 切片 $\ln H_{LIM}(q)$ のもとに直線関係を示すものである。

式(7.8), 式(7.9)の H を $d\sigma/dt$, $H_{LIM}(q)$ を $d\sigma/dt_{LIM}(\sigma)$, $E(q)$ を $E(\sigma)$ に置き換えると、次の式になる。

$$d\sigma/dt = (d\sigma/dt_{LIM}(\sigma)) \cdot \exp(-E(\sigma)/(R \cdot T)) \quad (7.10)$$

$$\ln(d\sigma/dt) = \ln(d\sigma/dt_{LIM}(\sigma)) - E(\sigma)/(R \cdot T) \quad (7.11)$$

$d\sigma/dt$: 強度発現速度(kgf/cm²/day)

$d\sigma/dt_{LIM}(\sigma)$: 温度 T が無限大の時の強度発現速度(kgf/cm²/day)

$E(\sigma)$: 強度における活性化エネルギー

σ : コンクリートの圧縮強度(kgf/cm²)

式(7.11)は $\ln(d\sigma/dt)$ と $1/T$ が直線関係になることを示し、以後この法則を仮定して述べる。

圧縮強度と材令の関係は表-7.4に示した式(7.1), 式(7.4)を用いて計算を行った。

式(7.1), 式(7.4)から $d\sigma/dt$ を求めると次のようになる。

$$\text{式(7.1)} : d\sigma/dt = a \cdot \sigma_{14} / (a + b \cdot t)^2 \quad (7.12)$$

$$\text{式(7.4)} : d\sigma/dt = \sigma_{LIM} \cdot \alpha_1 \cdot \exp(-\alpha_1 \cdot t) \quad (7.13)$$

また、養生温度は一定であることから養生温度20, 30...°Cは式中の絶対温度 T に直すと、 $1/(273+20)$, $1/(273+30)$...°Cとなる。これらを考慮して、表-7.4で回帰した定数を式(7.12)及び式(7.13)に用いて、 $\ln(d\sigma/dt)$ と $1/T$ の関係を図-7.9~図-7.14に示した。

この結果、式(7.11)の通り $\ln(d\sigma/dt)$ と $1/T$ は直線で回帰すると良い相関を示すことが判明したが、強度が大きくなると次第に相関が悪くなっている。これは、比較的初期材令の強度を用いて回帰しているため、長期材令の強度の精度があまり良くないことが原因である。

次に、圧縮強度と $-E(\sigma)/R$ の関係、圧縮強度と $\ln(d\sigma/dt_{LIM}(\sigma))$ の関係を3次式で回帰した結果を表-7.7に、式(7.1)における回帰結果を図-7.15に示す。(注：1次式または2次式では精度良い強度推定

ができなかった。)これを式(7.10)に代入して積分すると圧縮強度を求めることができる。この計算結果を表-7.8に示すが、材令7日までは実測値を回帰した結果と一致する。圧縮強度の実測値と計算値の関係を図-7.16~図-7.21に示す。

このように、式(7.10)を用いると、いかなる養生温度における強度も一つの式で表すことができ、マスコンクリートの温度応力解析などに有効であると予想できる。長期材令の適応性においても長期強度を含めた回帰であれば、長期にわたって強度の推定ができると考えられる。

表-7.7 圧縮強度と $-E(\sigma)/R$, $\ln(d\sigma/dt_{\text{lim}}(\sigma))$ の回帰結果

式の種類		セメントの 種類	$a \cdot \sigma^3 + b \cdot \sigma^2 + c \cdot \sigma + d$ の係数			
			a	b	c	d
式(7.1)	$-E(\sigma)/R$	N	$2.250 \cdot 10^{-4}$	$-8.290 \cdot 10^{-2}$	11.19	-3131
		NS50	$1.574 \cdot 10^{-4}$	$-5.993 \cdot 10^{-2}$	8.868	-4653
		NS80	$1.296 \cdot 10^{-3}$	-0.3127	31.85	-6192
	$\ln d\sigma/dt_{\text{lim}}(\sigma)$	N	$-7.662 \cdot 10^{-7}$	$2.759 \cdot 10^{-4}$	$-4.139 \cdot 10^{-2}$	15.79
		NS50	$-5.359 \cdot 10^{-7}$	1.990	-3.311	19.80
		NS80	$-4.325 \cdot 10^{-6}$	$1.036 \cdot 10^{-3}$	-0.1104	24.83
式(7.4)	$-E(\sigma)/R$	N	$6.126 \cdot 10^{-5}$	$-1.950 \cdot 10^{-2}$	2.391	-1844
		NS50	$-6.540 \cdot 10^{-5}$	$2.010 \cdot 10^{-2}$	-2.204	-3345
		NS80	$7.187 \cdot 10^{-4}$	-0.1693	13.73	-4292
	$\ln d\sigma/dt_{\text{lim}}(\sigma)$	N	$-2.278 \cdot 10^{-7}$	$6.841 \cdot 10^{-5}$	$-1.077 \cdot 10^{-2}$	11.20
		NS50	$1.081 \cdot 10^{-7}$	$-3.169 \cdot 10^{-5}$	$1.354 \cdot 10^{-3}$	15.41
		NS80	$-2.435 \cdot 10^{-6}$	$5.653 \cdot 10^{-4}$	$-4.913 \cdot 10^{-2}$	18.37

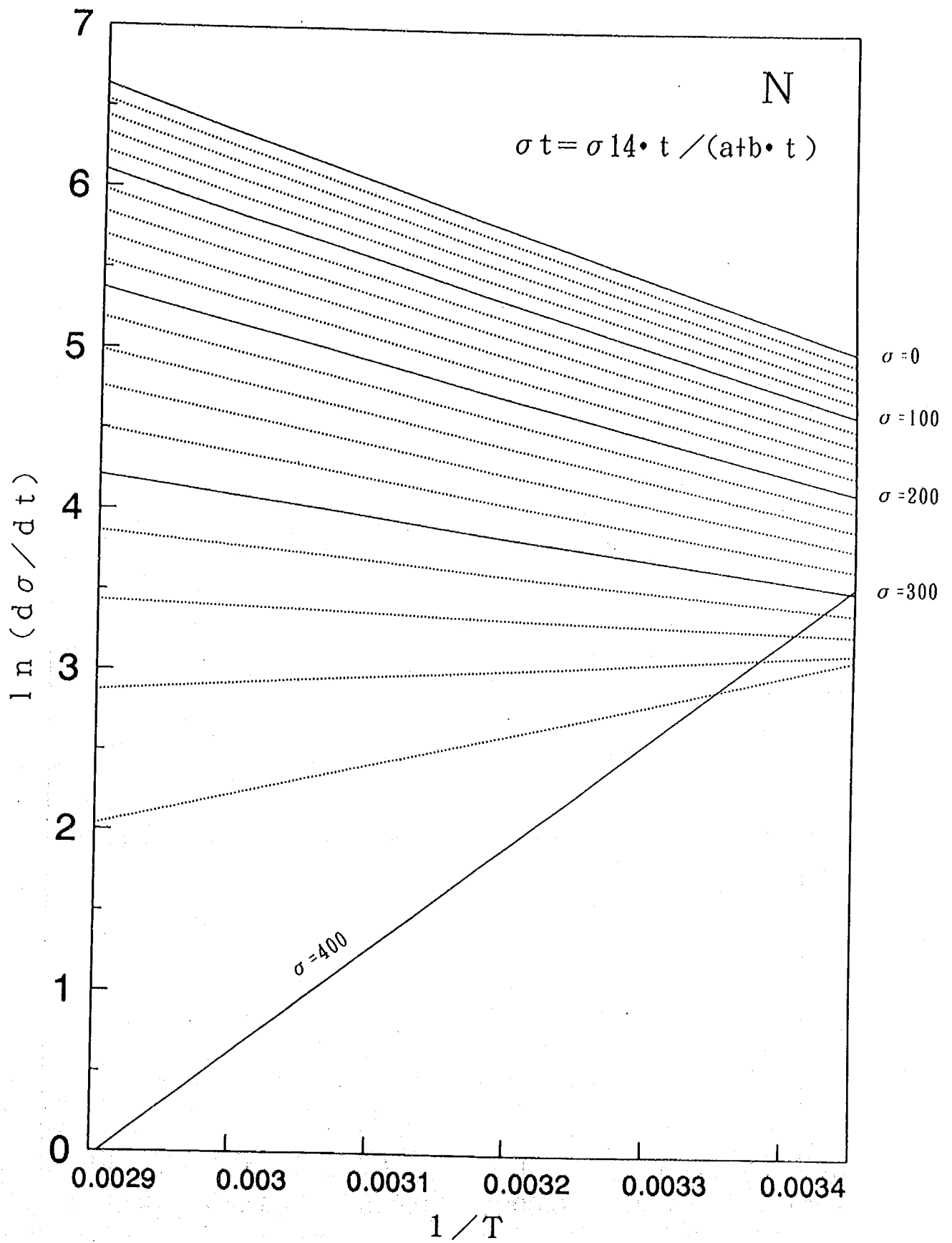


図-7.9 $\ln(d\sigma/dt)$ と $1/T$ の関係

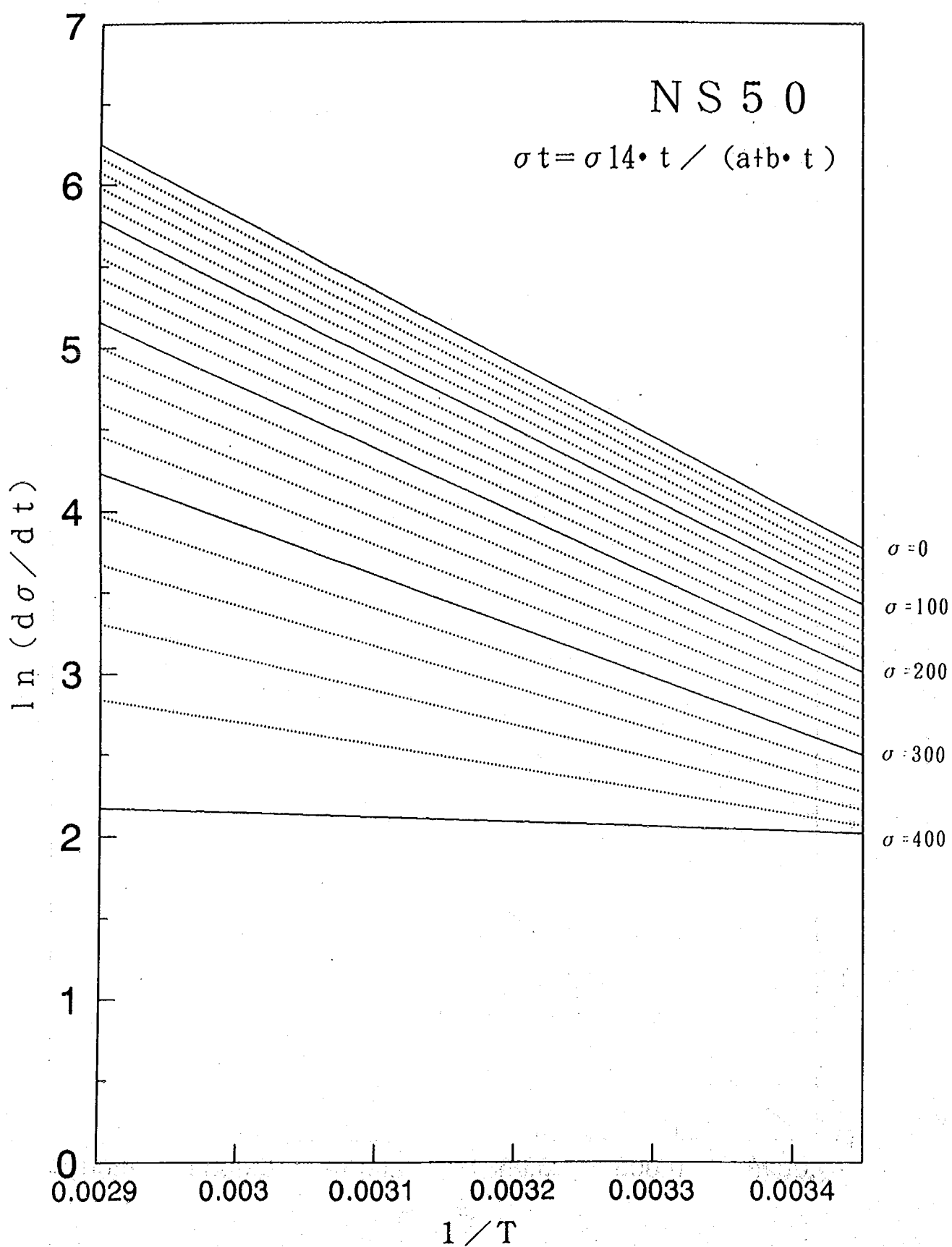


図-7. 10 $\ln(d\sigma/dt)$ と $1/T$ の関係

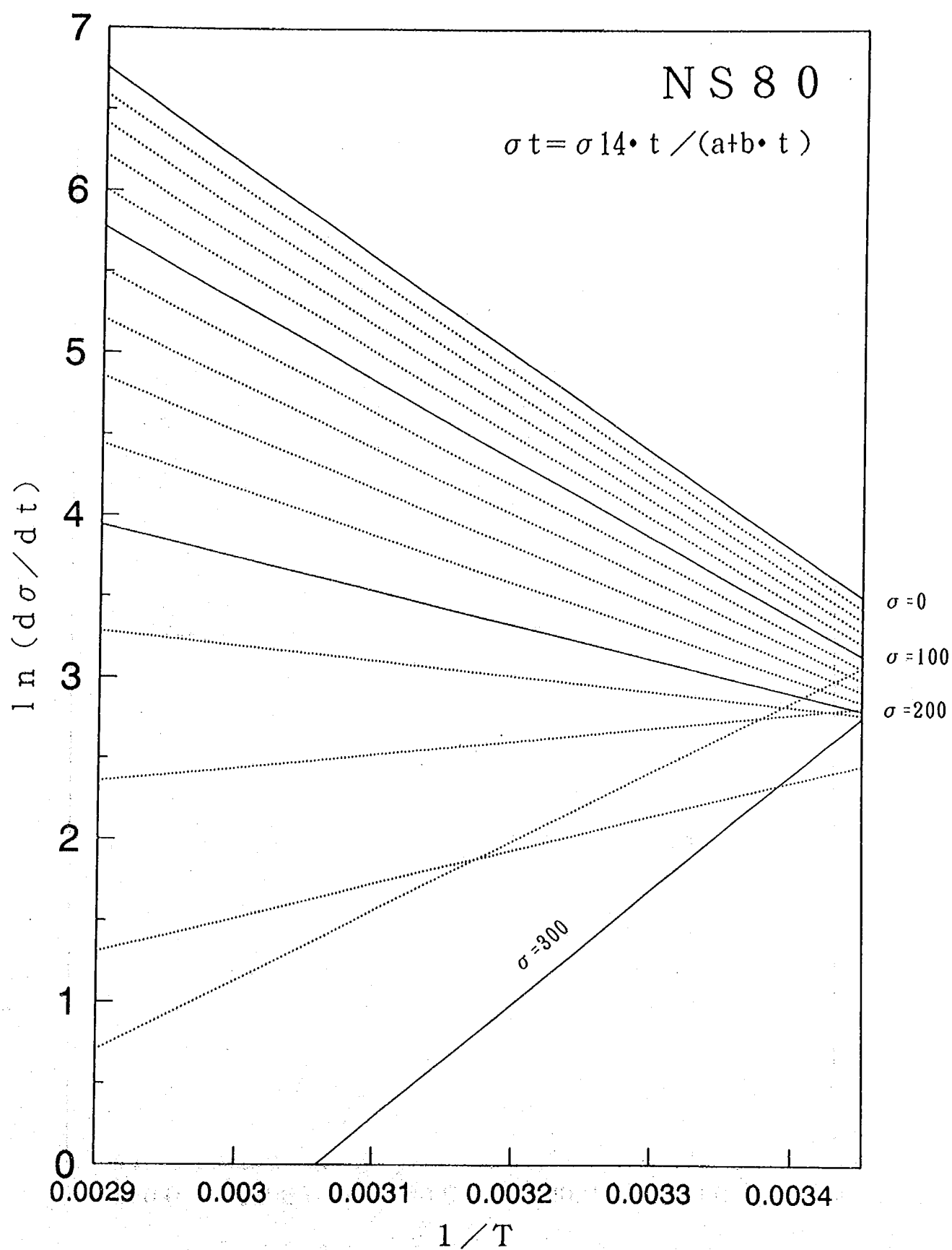


図-7. $\ln(d\sigma/dt)$ と $1/T$ の関係

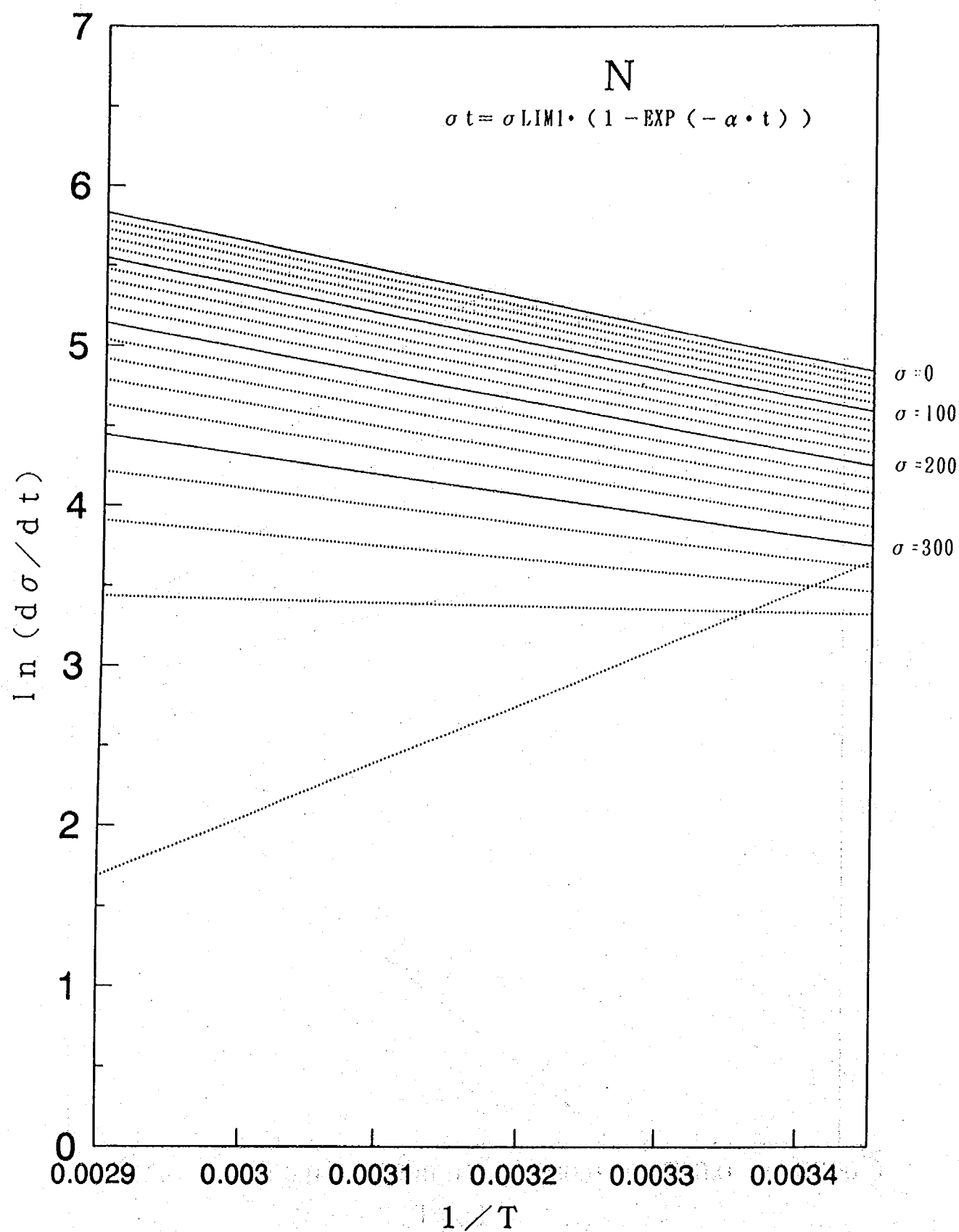


図-7. 12 $\ln(d\sigma/dt)$ と $1/T$ の関係

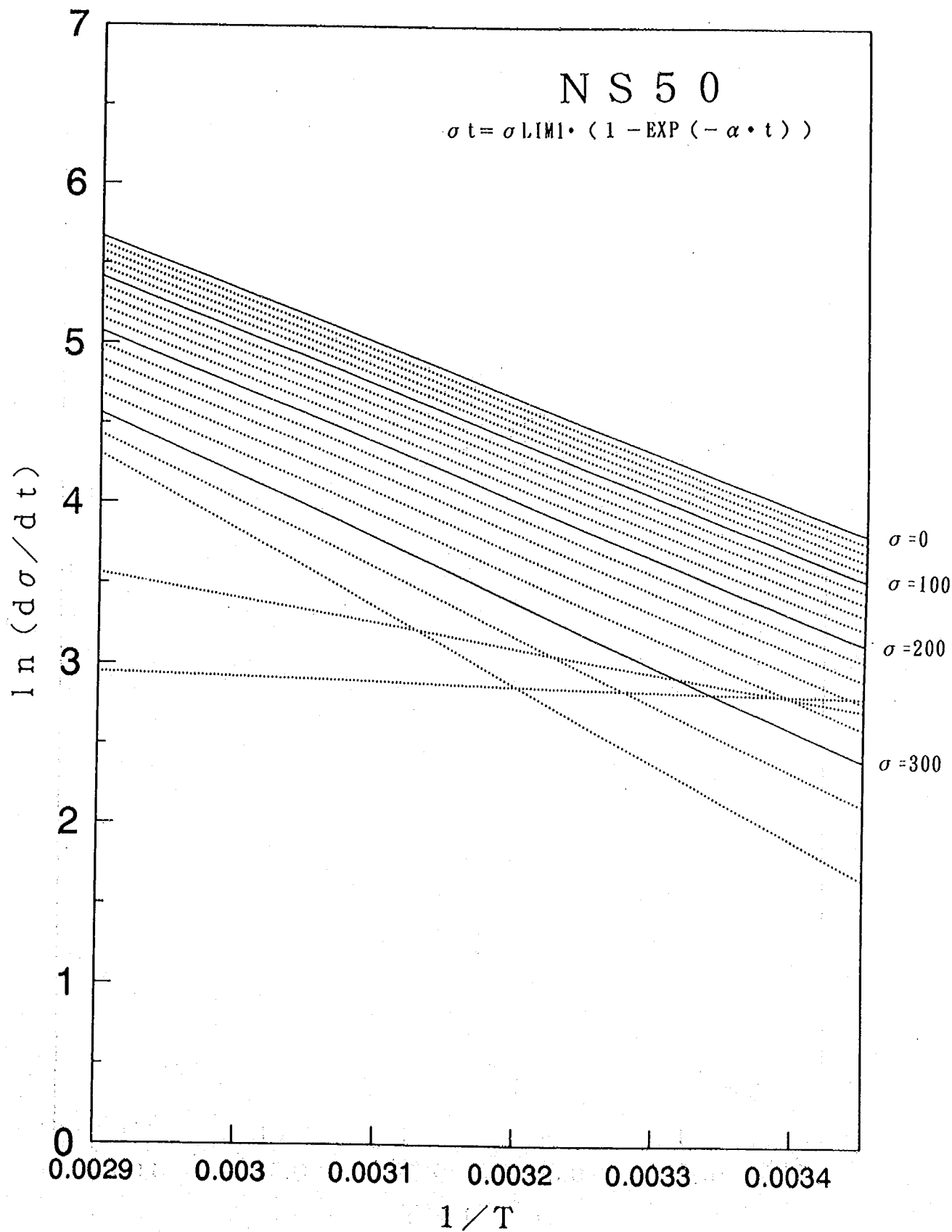


図-7. 13 $\ln(d\sigma/dt)$ と $1/T$ の関係

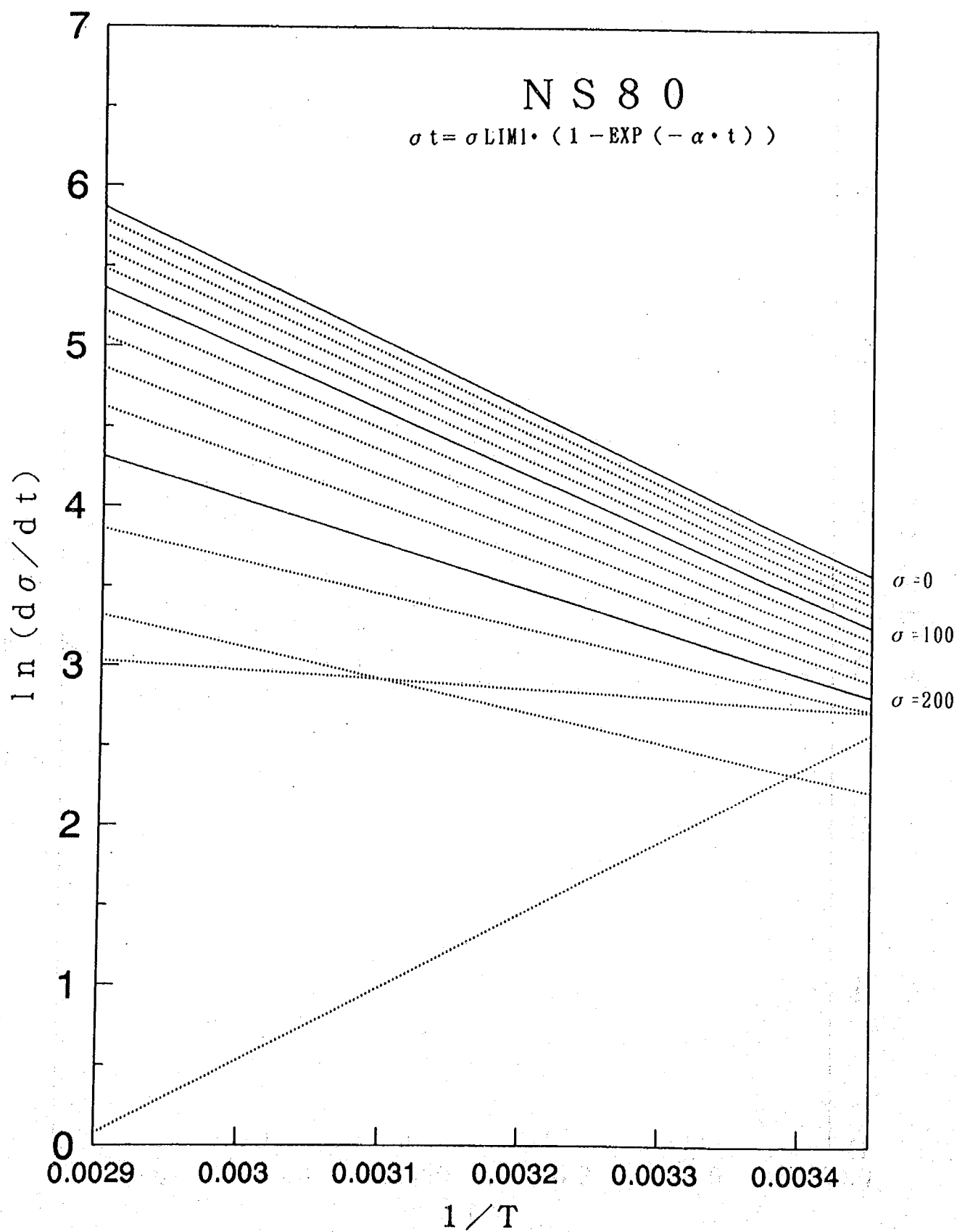


図-7. 14 $\ln(d\sigma/dt)$ と $1/T$ の関係

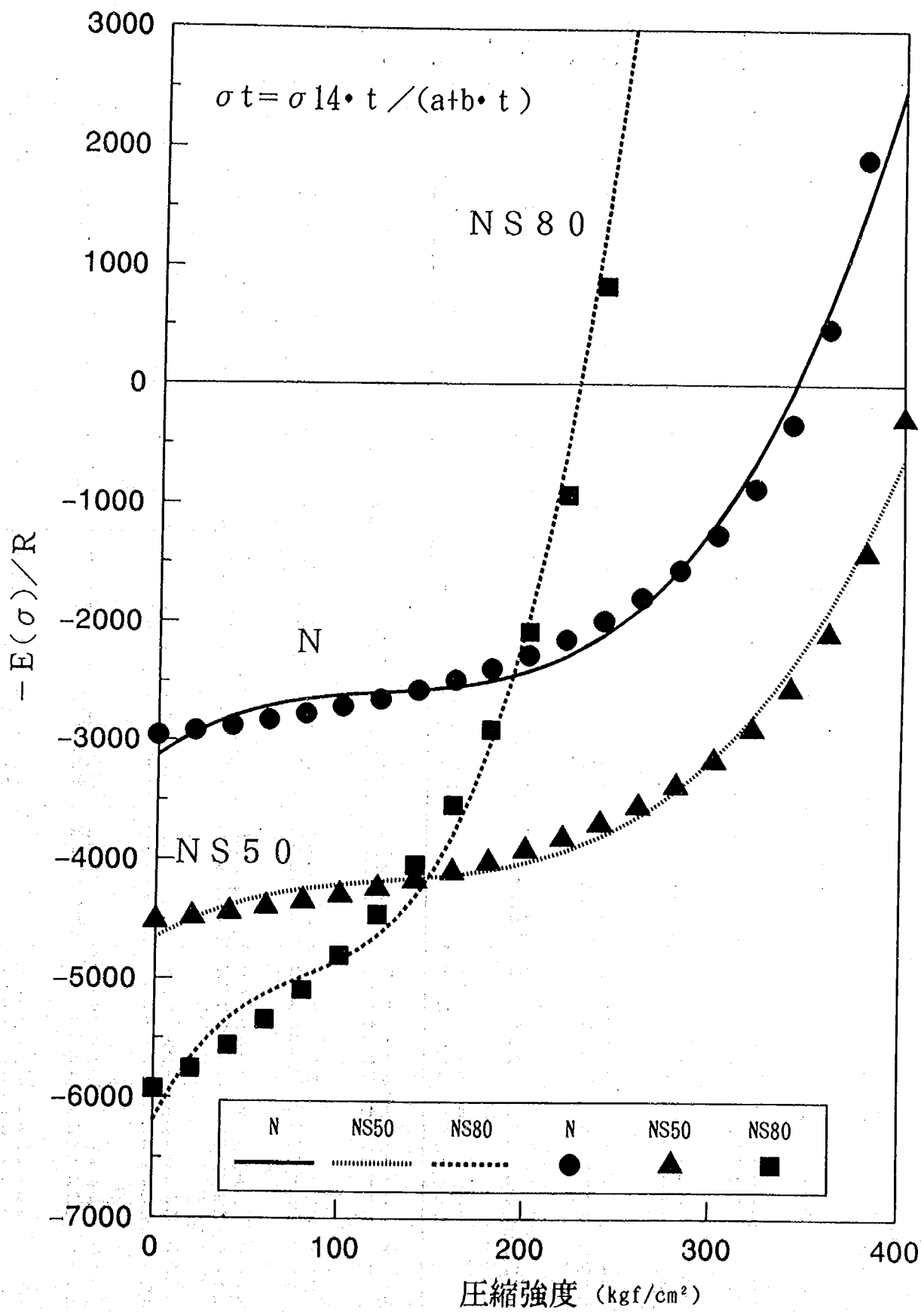


図-7. 15 圧縮強度と $-E(\sigma)/R$ の関係

表-7. 8 圧縮強度の実測値と計算結果 (kgf/cm²)

	材分(円)	式(7.1)						式(7.4)					
		20℃	30℃	40℃	50℃	60℃	70℃	20℃	30℃	40℃	50℃	60℃	70℃
実 測 値	N												
	1	133	164	182	223	239	275	116	141	156	188	198	227
	2	211	249	271	302	316	327	199	236	258	291	304	319
	3	263	301	324	343	354	349	260	302	325	349	360	356
	4	299	337	359	368	377	362	305	346	369	381	389	371
	5	326	362	384	385	392	369	337	376	398	398	405	377
	6	347	381	403	397	403	375	360	397	417	408	414	379
	7	364	396	417	406	411	379	377	410	430	413	418	380
	NS50												
	1	52.7	72.8	98.8	147	196	240	49.1	68.6	91.9	129	166	198
	2	95.5	130	173	234	281	308	91.5	127	167	223	269	297
	3	131	177	230	290	329	340	128	175	229	290	332	346
	4	161	215	276	330	359	359	160	217	279	338	371	371
	5	186	248	314	360	380	371	187	251	320	373	395	383
	6	208	275	345	383	395	380	210	281	354	398	410	389
	7	227	299	372	402	407	386	231	305	382	416	419	392
	NS80												
	1	37.7	66.6	108	154	167		36.2	61.8	94.0	129	140	
	2	70.1	116	170	207	208		68.5	112	161	198	203	
	3	98.3	153	211	233	226		97.2	152	210	236	231	
	4	123	183	239	249	236		123	185	245	257	244	
	5	145	207	260	259	243		145	212	270	268	249	
	6	164	227	277	267	248		166	233	288	274	252	
	7	182	243	290	272	251		184	251	301	277	253	
計 算 値	N												
	1	128	160	192	223	250	272	116	137	159	182	205	226
	2	207	244	276	301	318	330	202	231	259	284	306	324
	3	261	296	321	338	348	355	265	295	321	341	357	369
	4	301	331	349	360	367	370	312	339	360	376	388	396
	5	332	356	369	376	379	381	348	371	387	399	408	414
	6	357	376	384	388	389	389	375	394	408	417	423	428
	7	379	391	396	397	396	395	397	413	423	430	435	438
	NS50												
	1	46.9	73.6	108	150	196	241	47.9	67.5	92.6	124	162	205
	2	87.4	131	181	235	283	319	88.7	124	167	216	266	311
	3	123	176	234	287	328	355	126	173	226	278	322	358
	4	153	213	273	322	355	376	160	215	269	316	353	384
	5	180	244	303	346	374	391	191	248	300	341	373	401
	6	204	270	326	364	388	402	217	274	321	358	387	413
	7	226	292	345	378	398	410	240	295	337	371	398	422
	NS80												
	1	38.5	67.6	105	146	179		39.3	59.9	86.7	119	155	
	2	72.3	117	164	200	218		74.2	109	149	188	217	
	3	102	154	200	224	235		105	149	192	225	243	
	4	127	184	223	239	245		132	181	222	246	258	
	5	150	207	238	249	252		156	206	242	260	268	
	6	170	226	250	256	257		178	227	257	270	275	
	7	190	242	259	262	261		198	244	268	278	281	
変 動 係 数 (%)	N												
	1	-3.85	-2.40	5.75	0.02	4.61	-1.01	0.40	-2.61	2.19	-2.99	3.47	-0.38
	2	-2.00	-2.07	1.94	-0.47	0.60	0.87	1.29	-2.28	0.45	-2.54	0.81	1.68
	3	-0.60	-1.78	-0.86	-1.51	-1.75	1.61	1.78	-2.16	-1.23	-2.24	-0.73	3.72
	4	0.70	-1.68	-2.76	-2.17	-2.63	2.31	2.43	-1.97	-2.48	-1.20	-0.38	6.80
	5	1.85	-1.68	-3.88	-2.26	-3.31	3.13	3.35	-1.33	-2.80	0.22	0.65	9.85
	6	2.90	-1.38	-4.62	-2.19	-3.41	3.78	4.15	-0.63	-2.20	2.24	2.22	12.83
	7	4.23	-1.33	-5.06	-2.15	-3.59	4.29	5.31	0.62	-1.56	4.06	3.99	15.16
	NS50												
	1	-11.04	1.11	9.36	1.77	-0.16	0.22	-2.43	-1.63	0.76	-4.23	-2.49	3.63
	2	-8.50	0.57	4.79	0.57	0.64	3.44	-3.03	-1.98	-0.09	-3.03	-0.98	4.84
	3	-6.08	-0.44	1.65	-1.15	-0.16	4.27	-1.61	-1.34	-1.20	-4.11	-2.97	3.46
	4	-4.85	-1.03	-1.15	-2.54	-1.04	4.70	0.22	-0.71	-3.65	-6.60	-4.82	3.59
	5	-3.36	-1.41	-3.42	-3.95	-1.50	5.30	2.19	-1.32	-6.39	-8.62	-5.56	4.70
	6	-2.04	-1.82	-5.52	-5.03	-1.79	5.81	3.11	-2.36	-9.40	-10.12	-5.56	6.13
	7	-0.62	-2.25	-7.14	-5.89	-2.17	6.12	4.00	-3.40	-11.77	-10.90	-5.00	7.59
	NS80												
	1	2.08	1.51	-2.39	-5.44	6.93		8.42	-3.02	-7.72	-7.39	10.59	
	2	3.11	1.26	-3.46	-3.20	4.86		8.33	-2.49	-7.70	-5.20	6.96	
	3	3.80	0.62	-4.99	-3.81	3.92		8.04	-2.16	-8.52	-4.77	5.21	
	4	3.31	0.71	-6.74	-3.89	3.60		7.58	-2.21	-9.27	-4.23	5.94	
	5	3.64	0.13	-8.58	-3.94	3.62		7.29	-2.67	-10.27	-3.01	7.57	
	6	3.57	-0.26	-9.66	-4.04	3.69		7.49	-2.64	-10.65	-1.52	9.27	
	7	4.66	-0.54	-10.61	-3.83	3.85		7.87	-2.62	-10.83	0.19	11.16	

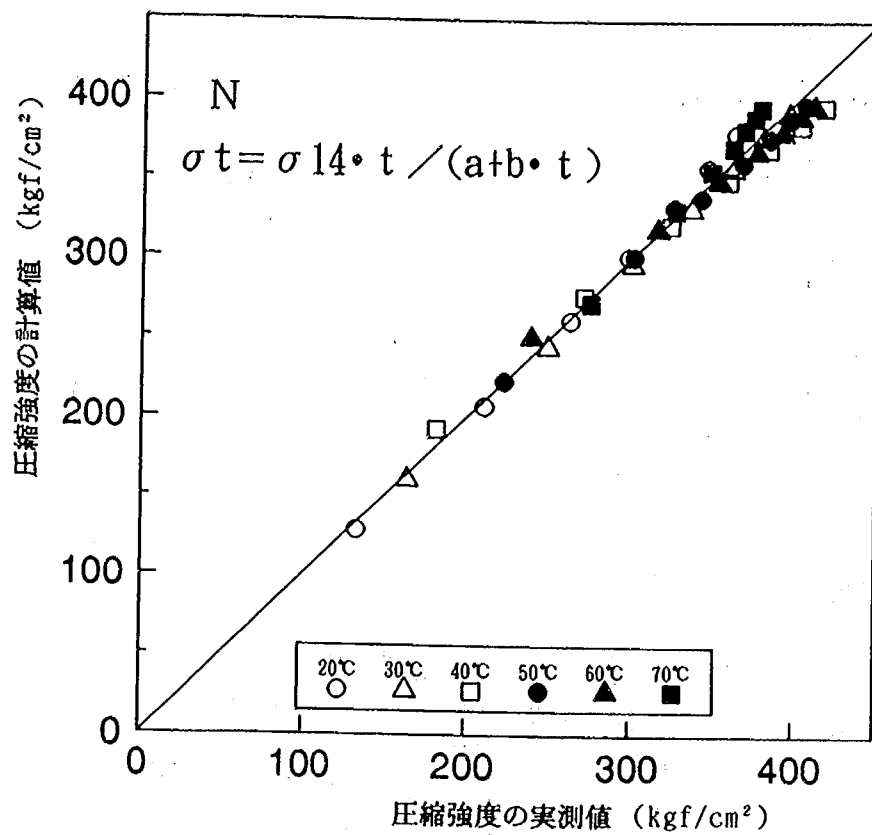


図-7. 16 圧縮強度の実測値と計算値の関係 (N: 式(7.1))

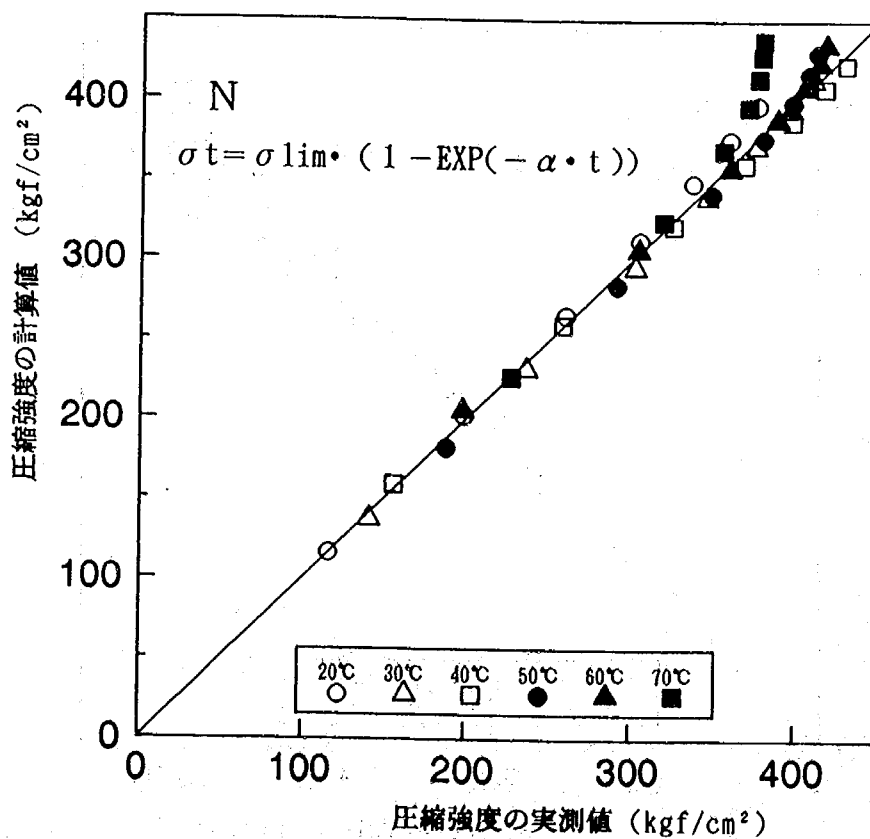


図-7. 17 圧縮強度の実測値と計算値の関係 (N: 式(7.4))

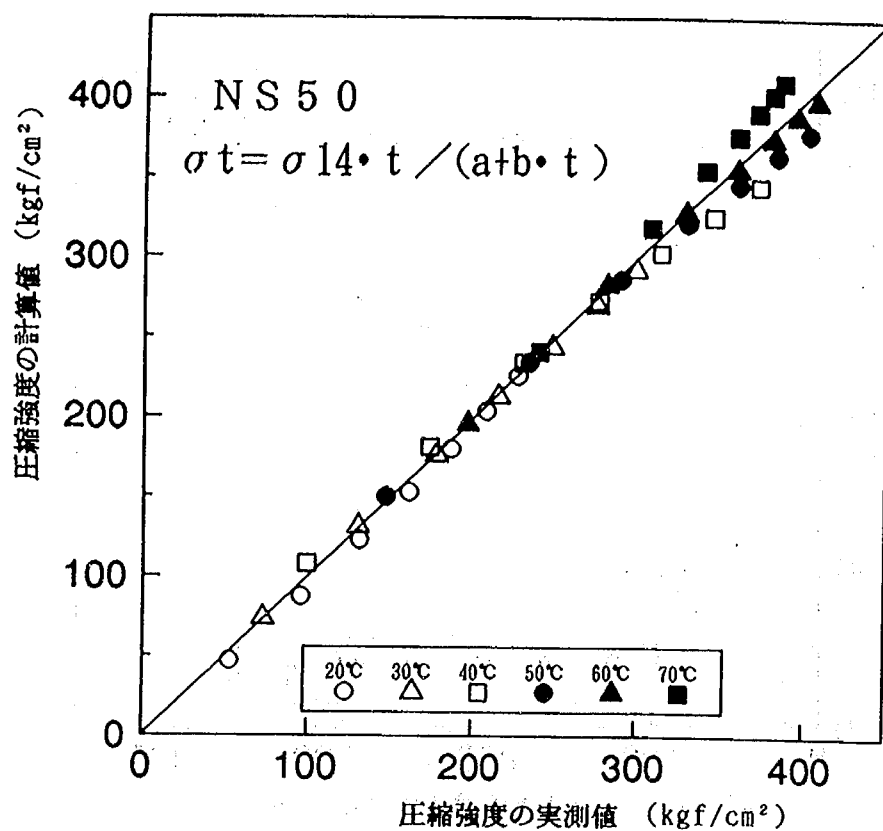


図-7.18 圧縮強度の実測値と計算値の関係 (NS50 : 式(7.1))

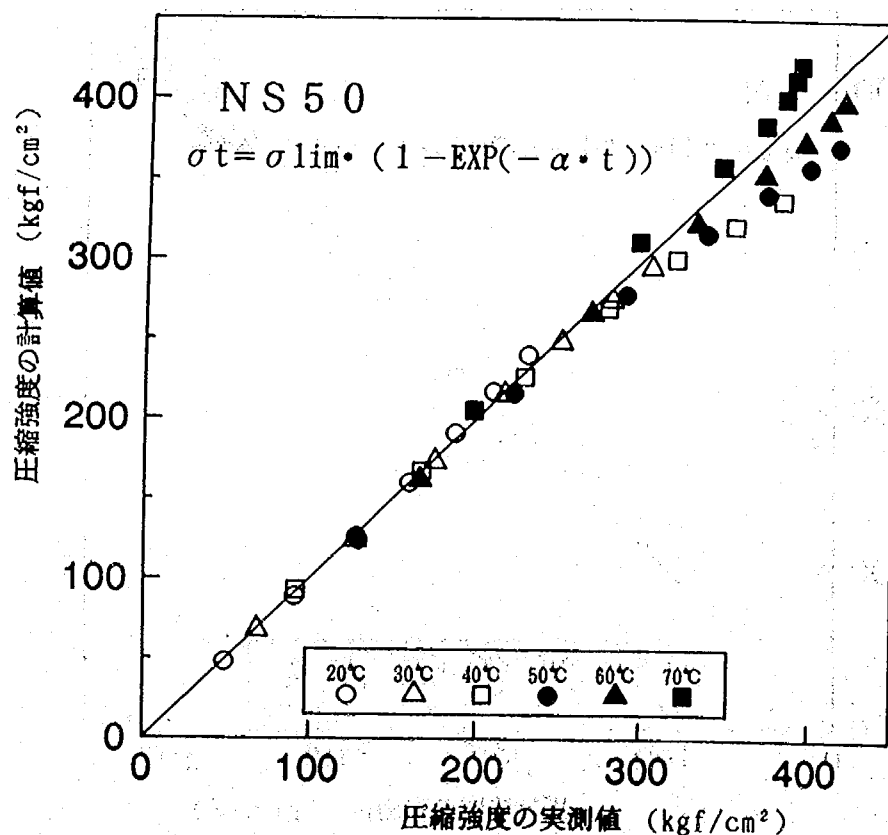


図-7.19 圧縮強度の実測値と計算値の関係 (NS50 : 式(7.4))

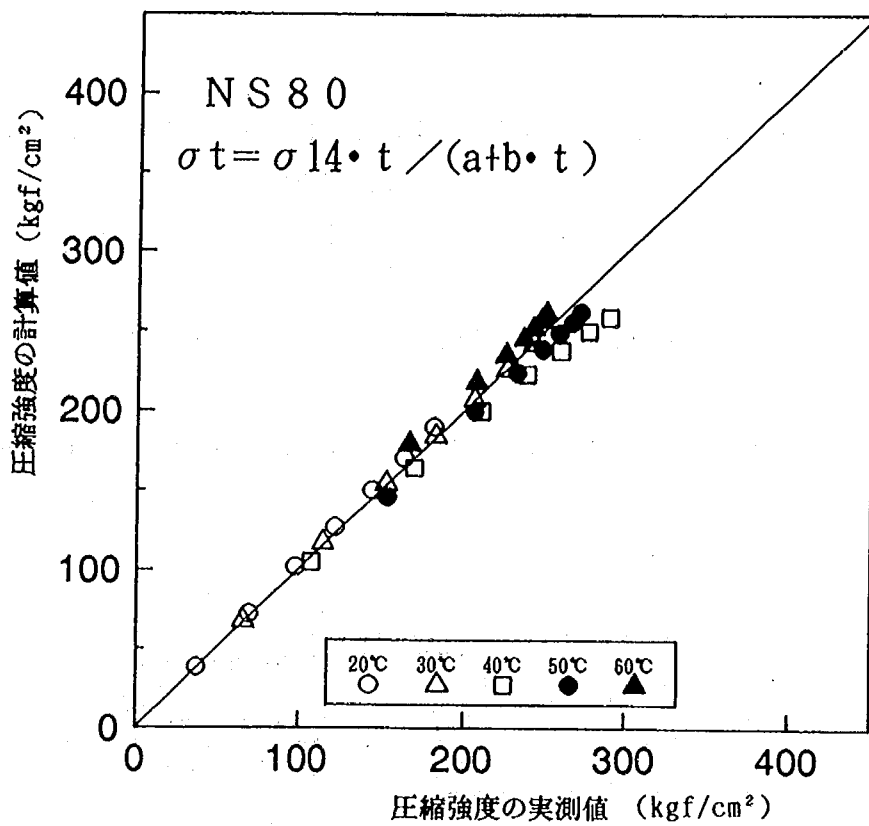


図-7. 20 圧縮強度の実測値と計算値の関係 (NS80 : 式(7.1))

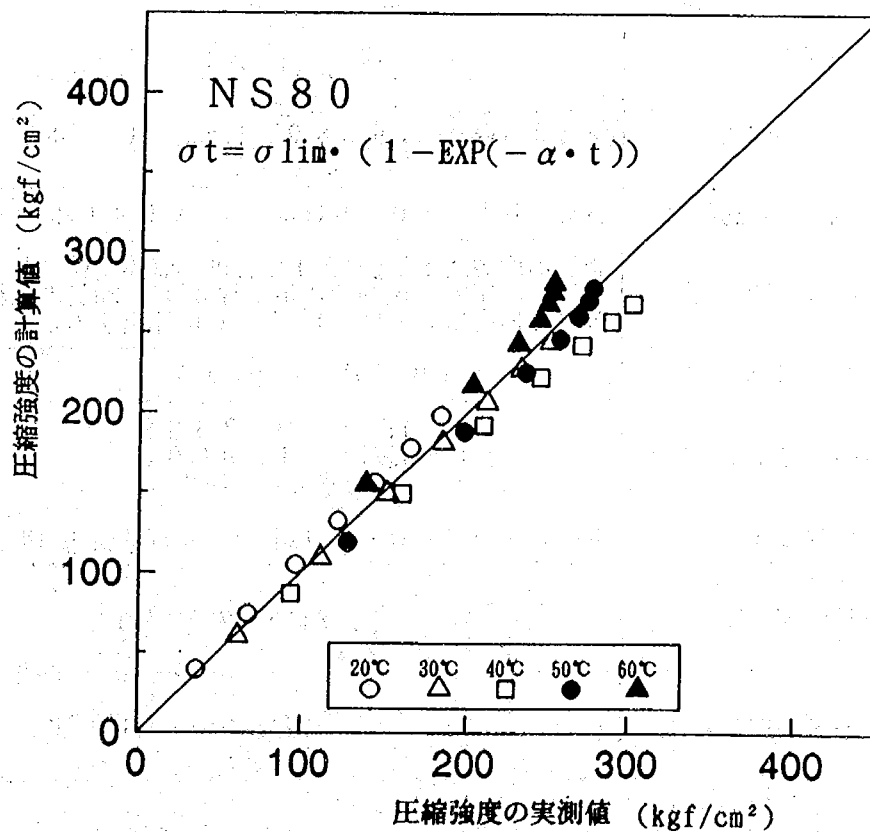


図-7. 21 圧縮強度の実測値と計算値の関係 (NS80 : 式(7.4))

8. 高炉スラグを用いたコンクリートの温度応力解析

8. 1 解析条件

高炉スラグを混入したセメントを用いたコンクリートはマスコンクリート構造物においてどの程度有利かを温度解析及び温度応力解析によって検討した。解析は2次元有限要素法で、平面ひずみ問題として解析した。図-8.1, 表-8.1にそれぞれ解析モデル及び解析条件を示す。

表-8.1 温度解析および温度応力解析に用いた解析条件

配 合	N, NS50, NS60, NS70, NS80, M, MS40, MS50, MS60, MS70
節点数	54
要素数	78
熱伝導率	0.02 (kcal/cm・h・°C)
熱伝達率	0.001 (kcal/cm ² ・h・°C)
比熱	0.25 (kcal/kg・°C)
コンクリート密度	0.0023 (kg/cm ³)
断熱温度上昇曲線	$T = K (1 - \text{EXP}(-\alpha \cdot t^\beta))$; 定数は表-4.2
打設温度および外気温	20.0 (°C)
熱膨張係数	1.0×10^{-5} (1/°C)
解析ステップ (温度解析)	材令5日まで: 0.25日毎 材令5日以降: 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 10, 14, 28, 91(day)
解析ステップ (温度応力解析)	材令7日まで: 0.5日毎 材令91日
圧縮強度の推定方法	積算温度方式: logMと圧縮強度が直線関係になるという設定で、表-4.3に示す材令3日と28日の圧縮強度の値を用いてFEMの各要素毎に算出する。
拘束体のヤング係数	3.0×10^4 (kgf/cm ²)
弾性係数の低減率: $\phi(t)$	材令3日まで 0.7333 材令5日以降 1.0000 材令3~5日までは補間する。
有効弾性係数	$E_e(t) = \phi(t) \cdot d1 \cdot (f_c(t))^{d2}$; 定数は表-6.18
91日圧縮強度	表-4.3に示す標準養生の実測値
圧縮・引張強度推定式	$f_t(t) = c1 \times (f_c(t))^{c2}$; 定数は表-6.14に示す。

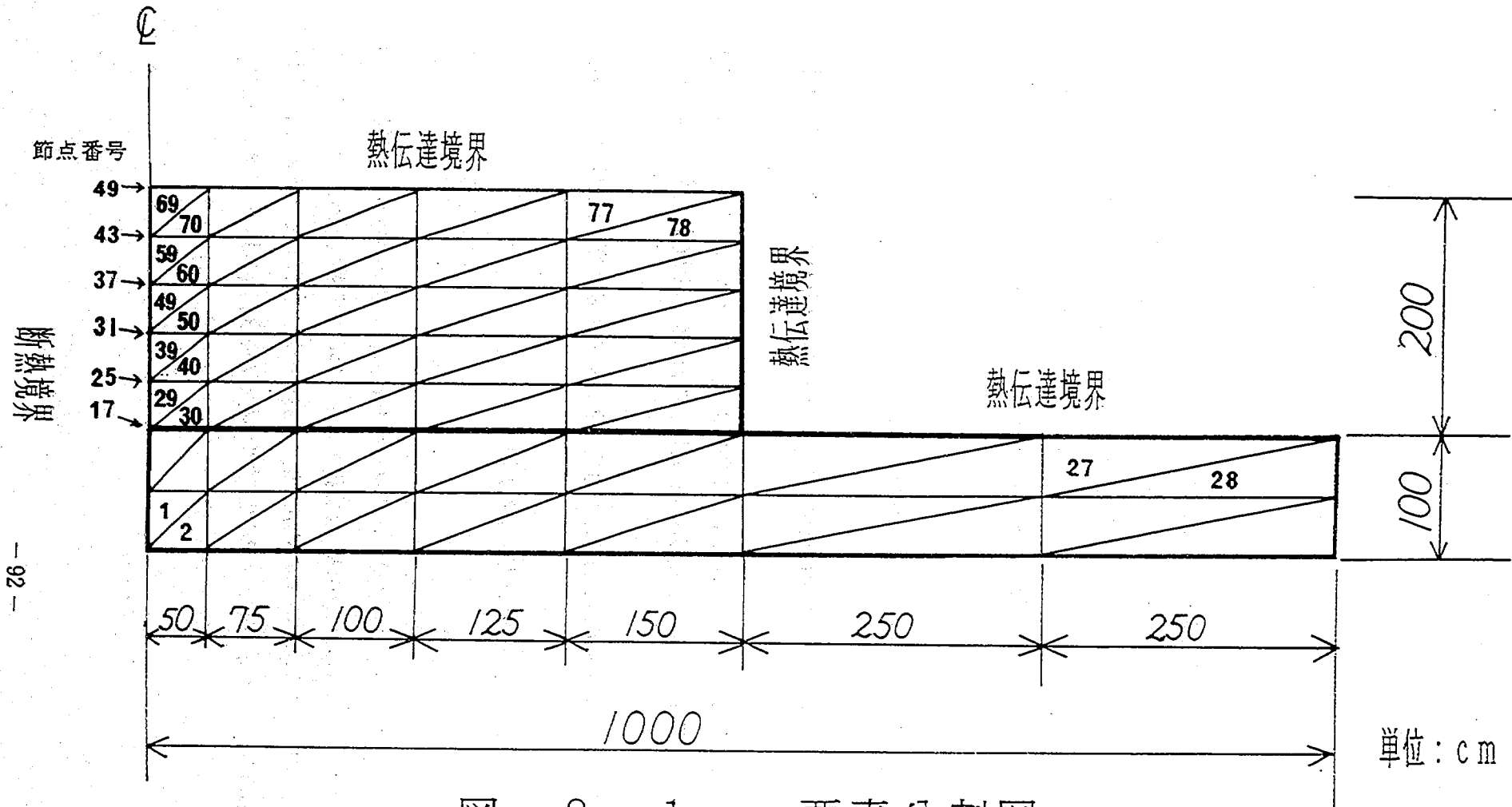


図 - 8. 1 要素分割図

8.2 解析結果及び考察

今回の解析モデルにおいて、高炉スラグの効果を検証するために温度解析は節点NO. 31の温度を比較した。温度応力解析はコンクリート部材中の最大引張応力及びひびわれ指数最小値で比較した。これらの結果を表-8.2～表-8.4並びに図-8.2～図-8.7に示す。

温度解析結果は断熱温度上昇曲線におけるK値が大きい配合ほど、解析結果の温度上昇量が大きく、 α の値が大きいほど初期の温度上昇速度が大きくなった。

部材内の最大引張応力は普通セメント及び中熱セメントに高炉スラグを混入すると引張応力の低減には効果があるが、図-8.6及び図-8.7によると、高炉スラグを40～60%混入してもひびわれ指数は高炉スラグ無混入の場合に比べて安全側の結果にならないため、今回の解析条件においては、高炉スラグを普通セメントまたは中熱セメントに70%混入しないとマスコンクリートの温度ひびわれ有効ではないという結果になった。なお、最大引張応力の発生する位置は材令0.5～1.0日までは要素番号38であるが、それ以降は要素番号73であった。

なお、この解析モデルではどの配合を用いてもひびわれが発生する結果になったが、この理由として以下のことが考えられる。

- ・単位セメント量 $300(\text{kg}/\text{m}^3)$ のデータを用いたが、これはマスコンクリート配合としては大きい単位セメント量である。
- ・6章で述べたが、圧縮強度と弾性係数の関係は配合条件によって大きく変わらないが、ここでは少ないデータで回帰した結果を用いたことの影響（有効弾性係数の値は温度応力解析結果に及ぼす影響が大きい。）
- ・材令3, 28日の圧縮強度実測値を用いて積算温度方式で各要素の圧縮強度を推定したことの影響
- ・解析モデルにおいて要素分割が荒かったことによる影響

今回の結果によると、高炉スラグを70%以上混入すれば温度ひびわれ抑制に効果がありそうだが、上述したように圧縮強度、有効弾性係数などの強度特性の他、熱膨張率をはじめとする熱特性値、マスコンクリート構造物の寸法並びに拘束体の弾性係数など多くの要因が温度応力解析結果に影響しているので、今回の結果だけでは高炉スラグ混入率が温度ひびわれ抑制にどの程度効果があるかを知るには、更に検討が必要である。

表-8.2

FEMによる温度解析結果(節点31, 単位: °C)

材令 (日)	N	NS50	NS60	NS70	NS80	M	MS40	MS50	MS60	MS70
0.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
0.25	28.17	23.88	23.74	23.06	22.83	26.55	24.62	23.38	22.54	22.22
0.50	38.05	29.11	28.91	27.76	27.33	32.21	29.47	27.55	26.21	26.02
0.75	46.63	34.48	34.26	32.80	32.08	36.93	33.99	31.73	30.15	30.31
1.00	53.30	39.60	39.36	37.60	36.44	40.85	38.07	35.72	34.07	34.53
1.25	58.09	44.24	43.97	41.87	40.13	44.05	41.68	39.40	37.77	38.36
1.50	61.26	48.29	47.97	45.46	43.02	46.60	44.79	42.69	41.14	41.61
1.75	63.17	51.71	51.32	48.33	45.14	48.60	47.43	45.58	44.11	44.22
2.00	64.13	54.52	54.02	50.51	46.58	50.13	49.62	48.05	46.67	46.19
2.25	64.40	56.74	56.12	52.06	47.44	51.24	51.40	50.12	48.80	47.58
2.50	64.22	58.42	57.68	53.08	47.86	52.02	52.82	51.82	50.53	48.47
2.75	63.72	59.64	58.76	53.65	47.95	52.50	53.89	53.17	51.89	48.94
3.00	63.02	60.44	59.43	53.87	47.79	52.76	54.69	54.21	52.90	49.10
3.25	62.20	60.90	59.76	53.81	47.46	52.82	55.23	54.97	53.61	49.01
3.50	61.31	61.07	59.82	53.55	47.02	52.73	55.56	55.49	54.05	48.73
3.75	60.38	61.00	59.66	53.13	46.51	52.51	55.71	55.79	54.27	48.33
4.00	59.44	60.74	59.31	52.60	46.00	52.20	55.70	55.92	54.30	47.84
4.25	58.51	60.34	58.84	52.00	45.40	51.81	55.56	55.89	54.17	47.30
4.50	57.59	59.82	58.27	51.36	44.80	51.36	55.32	55.73	53.92	46.72
4.75	56.70	59.21	57.62	50.69	44.22	50.86	54.99	55.46	53.56	46.13
5.00	55.83	58.54	56.93	50.02	43.65	50.34	54.59	55.11	53.12	45.54
5.50	54.17	57.10	55.46	48.67	42.56	49.24	53.64	54.22	52.08	44.37
6.00	52.63	55.60	53.97	47.38	41.53	48.11	52.57	53.15	50.92	43.26
6.50	51.21	54.11	52.52	46.16	40.57	47.00	51.43	52.00	49.71	42.22
7.00	49.89	52.67	51.13	45.03	39.69	45.92	50.27	50.82	48.51	41.26
10.00	43.77	45.69	44.47	39.72	35.57	40.57	44.10	44.44	42.40	36.75
14.00	38.90	40.06	39.15	35.51	32.31	36.14	38.73	38.93	37.39	33.18
28.00	31.22	31.62	31.12	29.08	27.25	29.38	30.72	30.79	29.98	27.71
91.00	22.00	22.08	21.99	21.62	21.29	21.68	21.93	21.94	21.80	21.38

表-8.3 温度応力解析結果(部材内の最大引張応力)

材令 (日)	N	NS50	NS60	NS70	NS80	M	MS40	MS50	MS60	MS70
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	13.91	4.63	4.24	3.19	3.01	7.60	3.99	2.67	2.05	1.54
1.00	30.14	10.92	9.99	7.70	7.17	14.84	8.20	5.79	4.83	4.83
1.50	40.84	17.56	16.11	12.63	11.38	20.51	12.47	9.39	8.07	7.96
2.00	45.65	22.88	20.95	16.29	14.10	24.30	15.86	12.45	11.00	10.49
2.50	46.73	26.80	24.48	18.68	15.48	26.65	18.50	15.02	13.48	12.18
3.00	45.82	29.25	26.60	19.82	15.83	27.50	20.35	16.98	15.37	12.98
3.50	43.78	30.44	27.51	19.92	15.44	28.16	21.52	18.37	16.65	13.04
4.00	41.09	30.48	27.32	19.20	14.57	27.72	21.99	19.11	17.22	12.47
4.50	38.04	29.52	26.22	17.86	13.37	26.66	21.81	19.20	17.11	11.46
5.00	34.76	27.79	24.41	16.11	11.98	25.10	21.03	18.69	16.39	10.16
5.50	31.60	25.65	22.28	14.24	10.58	23.30	19.85	17.75	15.27	8.77
6.00	28.59	23.28	19.98	12.34	9.20	21.38	18.40	16.50	13.88	7.37
6.50	25.73	20.84	17.63	10.47	7.86	19.41	16.78	15.05	12.34	5.98
7.00	23.03	18.39	15.30	8.67	6.58	17.44	15.06	13.49	10.73	5.46

表-8.4 温度応力解析結果(部材内の最小ひびわれ指数)

材令 (日)	N	NS50	NS60	NS70	NS80	M	MS40	MS50	MS60	MS70
0.50	1.36	2.29	2.06	2.30	2.86	1.62	1.74	2.30	2.65	3.52
1.00	0.72	1.14	1.02	1.14	1.37	0.95	1.00	1.24	1.31	1.32
1.50	0.57	0.77	0.69	0.76	0.92	0.73	0.71	0.83	0.86	0.88
2.00	0.53	0.62	0.56	0.63	0.78	0.64	0.59	0.66	0.67	0.71
2.50	0.55	0.60	0.55	0.63	0.77	0.64	0.58	0.63	0.62	0.71
3.00	0.58	0.62	0.58	0.70	0.84	0.67	0.62	0.65	0.66	0.81
3.50	0.62	0.65	0.62	0.78	0.93	0.71	0.65	0.68	0.70	0.93
4.00	0.68	0.70	0.67	0.89	1.05	0.76	0.69	0.71	0.74	1.08
4.50	0.75	0.76	0.74	1.02	1.20	0.83	0.75	0.75	0.81	1.27
5.00	0.84	0.84	0.84	1.19	1.39	0.91	0.81	0.82	0.89	1.52
5.50	0.93	0.95	0.95	1.42	1.63	1.01	0.90	0.90	1.01	1.86
6.00	1.05	1.08	1.10	1.70	1.93	1.13	1.01	1.01	1.16	2.32
6.50	1.18	1.24	1.28	2.07	2.31	1.27	1.15	1.14	1.36	2.97
7.00	1.33	1.43	1.52	2.59	2.83	1.45	1.31	1.32	1.60	3.50

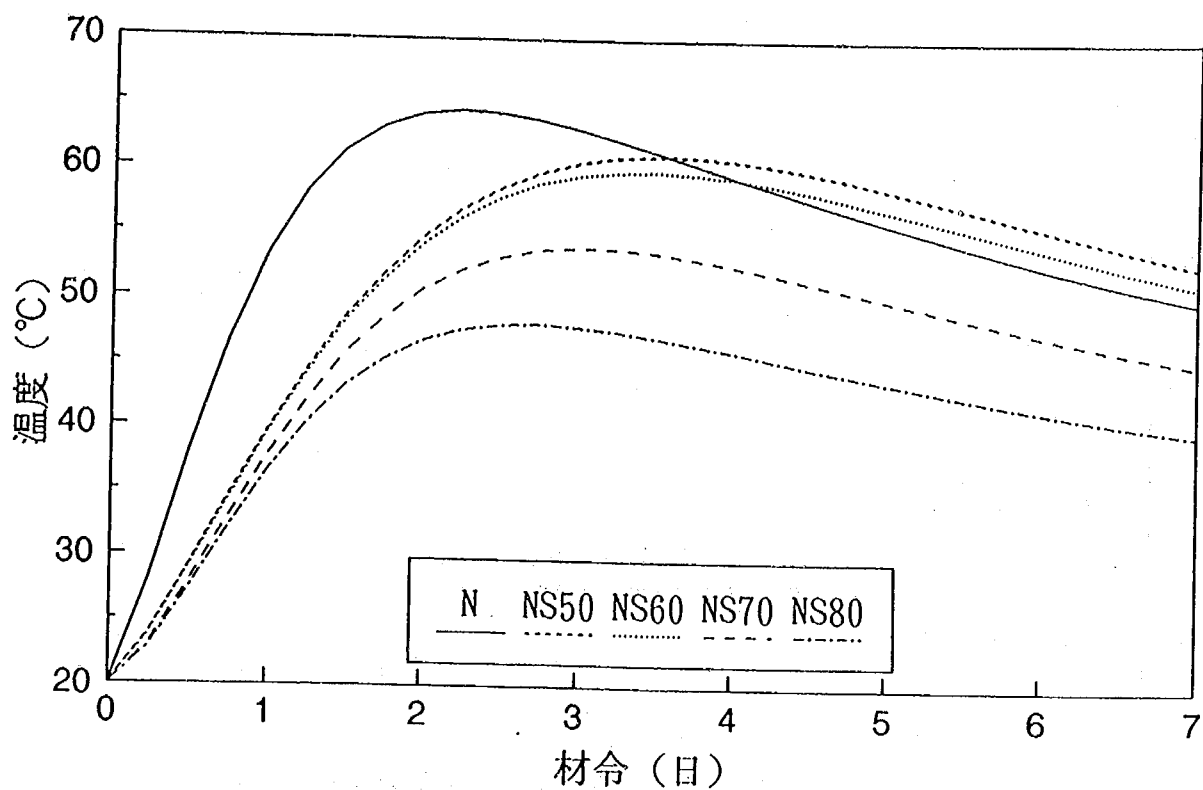


図-8. 2 温度解析結果（その1：節点31）

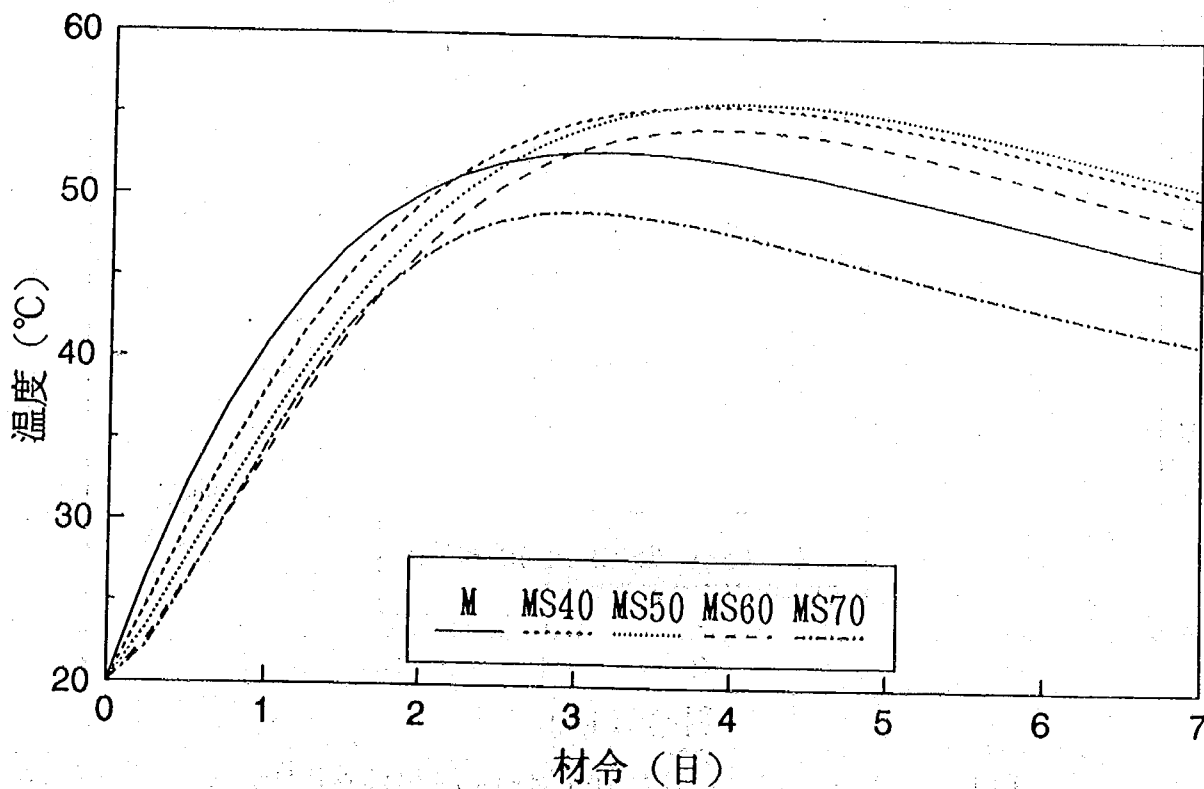
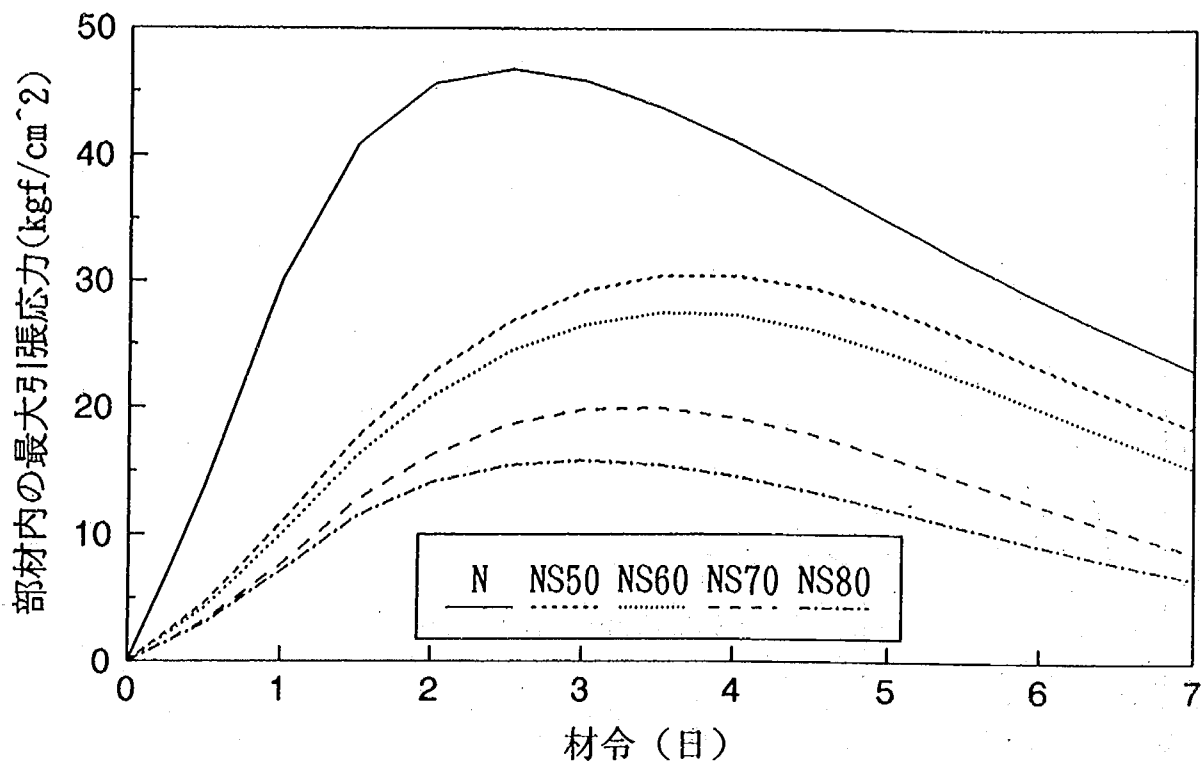
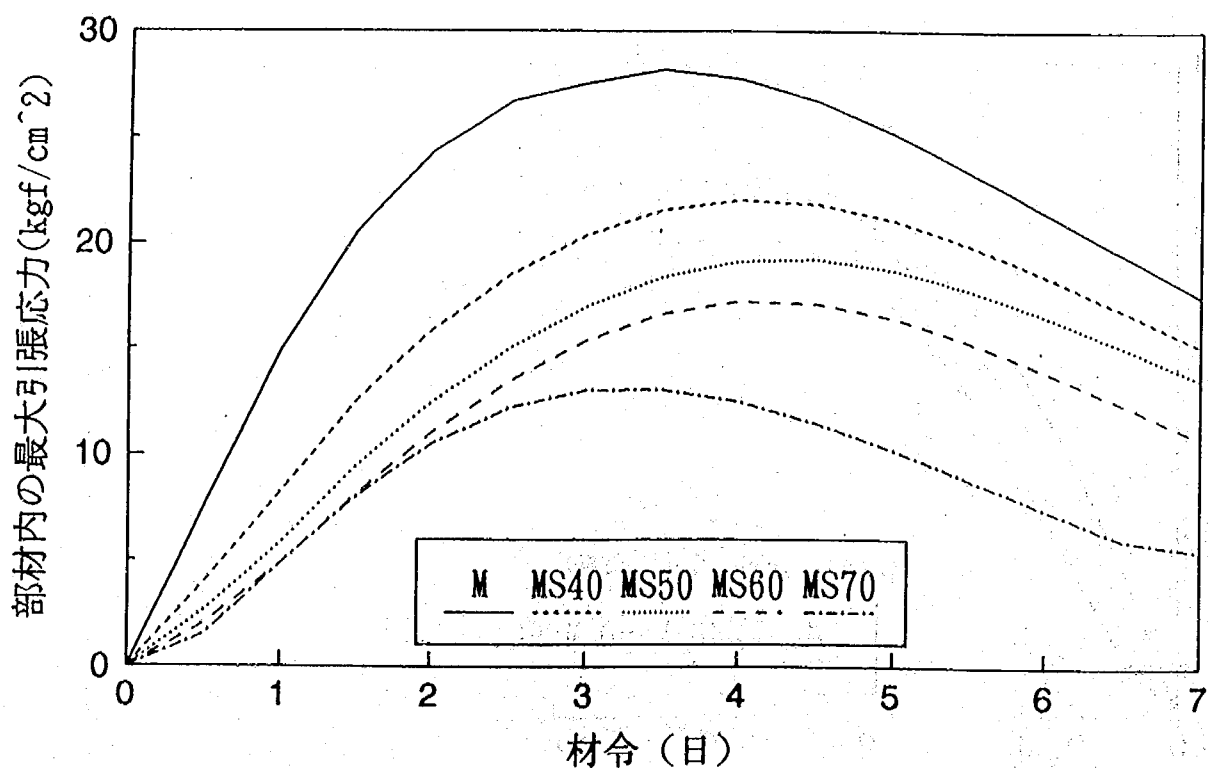


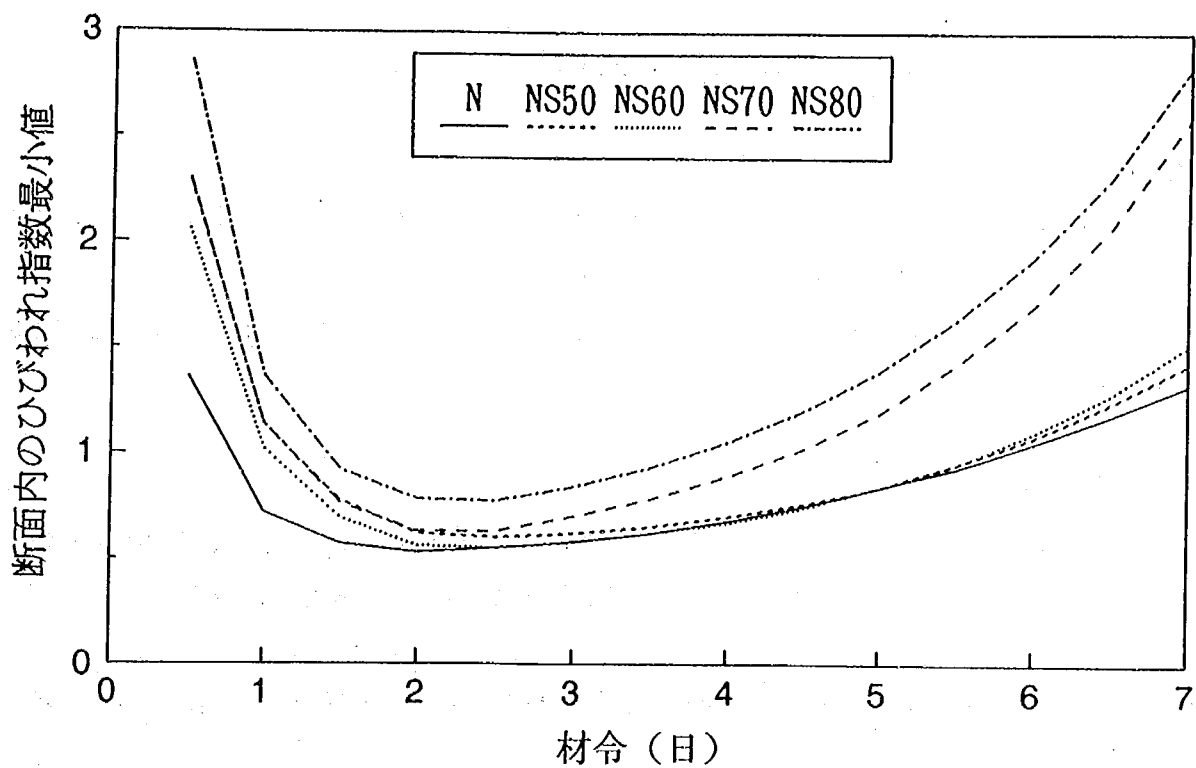
図-8. 3 温度解析結果（その2：節点31）



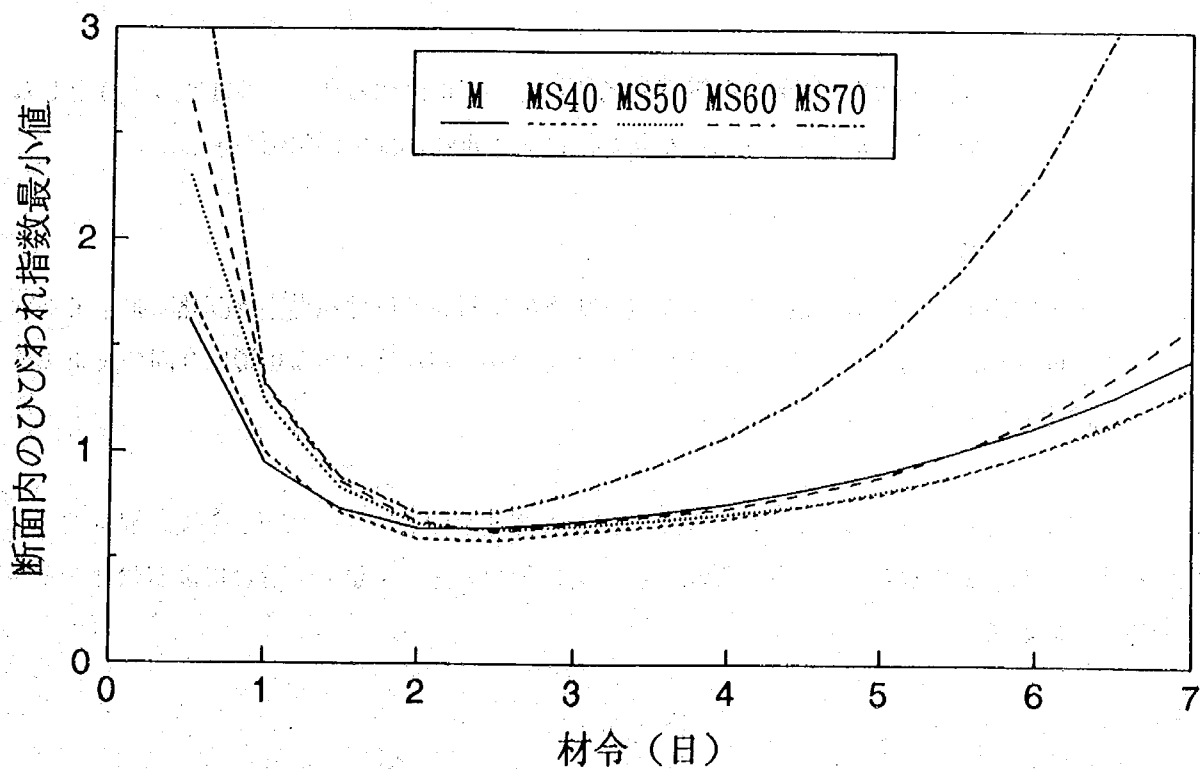
図－8. 4 温度応力解析結果
(その1：部材内の最大引張応力)



図－8. 5 温度応力解析結果
(その2：部材内の最大引張応力)



図－8. 6 ひびわれ指数最小値の経時変化（その1）



図－8. 7 ひびわれ指数最小値の経時変化（その2）

8. まとめ

今回のコンクリート試験結果並びに解析結果から判明した主な事項を以下に示す。

1) 断熱温度上昇

- ・高炉スラグを普通セメント，中庸熱セメントに混入率70%以上混入すると、終局温度上昇量（K値）が小さくなり、マスコンクリート断面の温度上昇量低減に有効である。
- ・断熱温度上昇回帰式は式(4.1)より式(4.2)のほうが誤差が小さく、回帰式に変わって実測値を数点補間する方法もある。

2) 強度（圧縮強度，引張強度，静弾性係数）

- ・異なる温度履歴（養生温度）による圧縮強度は積算温度の関数とならないことが、断熱養生と標準養生の強度試験結果（図-4.6～図-4.10），養生温度を変化させた強度試験結果（図-7.2～図-7.4）から明らかとなった。
- ・引張強度，静弾性係数の推定式の定数は配合，養生条件によってやや異なるが、図によると圧縮強度の関数となる。
- ・アレニウスの式を強度に応用すると、その計算値と実測値はよい相関を示し、いかなる養生温度における強度も1つの式で表すことができる。

3) 試験方法

- ・2種類の断熱温度上昇試験結果には良い相関が認められるが、供試体の寸法の差ははっきりとしない。
- ・材令3日までの微少熱量計と材令3，7日の溶解熱法による水和熱は良い相関を示した。

4) 温度解析及び温度応力解析

- ・一般的な値の範囲内では、解析結果に及ぼす影響が大きい解析条件は熱伝導率及び熱膨張率である。
- ・断熱温度上昇回帰式は初期において実測値との差が大きいが、温度応力への影響は今回の解析モデルによると比較的小さい結果となった。

本報告は断熱温度上昇特性並びに温度履歴の異なる強度の特性を中心に述べたが、今後、解析結果に影響を及ぼす熱伝導率，熱膨張係数の選定方法、配合条件（特に単位セメント量）の違いによる強度発現特性，発熱特性の検討が課題である。

添 付 資 料

圧縮強度試験データ	-----	1 0 0
引張強度試験データ	-----	1 0 6
静弾性係数試験データ	-----	1 1 2
7 章試験データ（圧縮強度，引張強度，静弾性係数）	-----	1 1 8
再試験強度データ	-----	1 2 4
断熱養生供試体温度データ	-----	1 2 5

付表1 圧縮強度試験結果 (打設温度20℃, 標準養生)

配 合 NO.	セメント の種類	高炉スラグ の種類	高炉スラグの 混入率 (%)	圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)			
				3 d	7 d	28 d	91 d
N	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	0	243.8	355.5	445.0	504.2
				234.7 238	343.4 341	441.2 445	499.7 507
				234.4	323.7	448.4	516.3
NS50	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	127.1	210.1	404.9	514.4
				129.7 129	208.9 208	376.0 391	495.9 497
				129.5	204.1	393.3	480.0
NS60	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	60	108.0	198.5	362.2	536.0
				112.2 111	191.1 194	426.5 393	488.3 512
				114.2	191.4	391.6	511.8
NS70	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	70	100.8	176.6	366.6	513.1
				100.7 102	177.7 176	358.8 363	481.3 485
				105.6	172.3	363.3	459.6
NS80	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	80	98.0	196.6	311.7	441.3
				100.1 99.4	195.1 195	334.5 324	450.6 439
				100.1	194.0	324.4	425.1
M	中庸熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	0	138.3	220.1	409.6	595.2
				139.0 140	218.2 224	421.8 420	604.8 602
				141.5	234.8	427.8	606.1
MS40	中庸熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	40	84.3	151.3	321.7	513.8
				85.4 85.9	149.5 150	309.5 316	513.8 502
				87.9	148.1	317.0	478.7
MS50	中庸熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	78.8	135.0	291.3	—
				76.6 77.4	129.1 131	302.1 294	546.2 525
				76.9	129.9	287.2	503.6
MS60	中庸熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	60	67.6	115.0	298.8	459.5
				68.5 69.0	112.7 115	282.7 291	478.7 472
				70.8	116.2	292.0	478.7
MS70	中庸熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	70	67.7	143.2	326.8	433.2
				69.1 67.0	142.6 141	300.6 313	446.3 443
				64.0	137.4	311.4	450.7

付表2 圧縮強度試験結果

(打設温度10, 30℃, 標準養生)

配合 NO.	セメント の種類	高炉スラグ の種類	高炉スラグの 混入率 (%)	圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)			
				3 d	7 d	28 d	91 d
N (10℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	0	222.9	405.0	502.3	530.3
				235.8	426.7	512.5	561.5
				226.8	411.3	515.7	546.9
NS50 (10℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	117.9	242.6	512.5	652.5
				113.1	239.1	501.0	634.1
				119.7	246.4	466.6	632.8
NS60 (10℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	60	91.5	216.5	454.4	629.0
				92.4	231.1	468.7	606.1
				92.4	223.1	468.0	654.4
NS70 (10℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	70	74.1	222.6	388.1	595.2
				74.5	218.7	414.8	577.4
				76.6	209.2	415.3	588.2
NS80 (10℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	80	55.6	155.3	349.8	459.8
				56.5	164.0	305.6	470.5
				58.7	157.8	323.0	493.4
N (30℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	0	241.7	323.8	397.9	467.3
				241.2	309.9	407.7	465.4
				244.6	315.3	416.9	464.7
NS50 (30℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	130.3	199.3	363.4	464.1
				139.4	185.4	345.0	457.7
				131.7	191.6	348.0	457.7
NS60 (30℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	60	118.3	172.5	323.3	415.1
				118.2	170.6	326.7	438.6
				118.0	172.3	307.6	434.2
NS70 (30℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	70	110.8	169.6	276.9	354.2
				110.1	173.2	274.4	352.9
				111.3	162.1	270.6	359.8
NS80 (30℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	80	121.0	161.1	234.9	304.2
				124.3	149.0	228.0	306.9
				126.2	164.0	236.1	299.7

付表3 圧縮強度試験結果

配 合 号	セメント の種類	高炉スラグ の種類	高炉スラグの 混入率 (%)	圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)			
				3 d	7 d	28 d	91 d
NS50-B (10°C)	普 通 セメント	比表面積 6000 (cm ² /g)	50	117.1	284.2	510.6	594.0
				116.4	290.3	514.4	591.4
				116.9	285.5	516.9	582.5
NS50-C (10°C)	普 通 セメント	比表面積 8000 (cm ² /g)	50	142.6	349.8	587.0	619.4
				141.3	343.5	574.2	629.0
				141.2	346.8	578.7	655.7
NS50-B (20°C)	普 通 セメント	比表面積 6000 (cm ² /g)	50	154.7	264.6	451.4	568.5
				152.9	276.8	459.6	563.4
				150.4	274.4	450.7	490.8
NS50-C (20°C)	普 通 セメント	比表面積 8000 (cm ² /g)	50	183.3	304.6	459.0	492.7
				179.8	306.2	476.2	504.2
				186.5	293.2	443.1	486.4
NS50-B (30°C)	普 通 セメント	比表面積 6000 (cm ² /g)	50	164.5	224.0	365.2	451.4
				155.6	227.9	359.9	463.5
				163.9	221.5	373.1	424.6
NS50-C (30°C)	普 通 セメント	比表面積 8000 (cm ² /g)	50	186.7	260.2	385.7	415.7
				207.4	262.0	378.9	433.5
				195.4	256.6	398.8	420.2
1 2	中庸熱 セメント	比表面積 6000 (cm ² /g)	50	96.5	189.8	382.4	522.0
				95.5	194.3	392.3	525.2
				98.3	190.6	370.9	476.8
1 4	中庸熱 セメント	比表面積 8000 (cm ² /g)	50	143.0	258.7	453.3	522.0
				139.7	260.8	456.7	506.7
				139.4	270.7	462.6	505.5

付表4 圧縮強度試験結果 (打設温度20℃, 断熱養生)

配 合 NO.	セメント の種類	高炉スラグ の種類	高炉スラグの 混入率 (%)	圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)							
				3 d	7 d	14 d	28 d	3 d	7 d	14 d	28 d
N	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	0	375.4	402.7	428.2	397.2				
				364.4	413.8	409.1	395.7	366	407	415	408
				359.3	403.0	406.7	430.5				
NS50	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	222.1	331.0	412.7	351.4				
				222.9	342.6	407.8	424.4	224	337	406	403
				226.9	337.8	397.6	433.3				
NS60	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	60	215.0	320.5	414.1	427.3				
				214.9	337.2	418.0	440.5	215	332	417	425
				214.9	338.2	419.0	406.8				
NS70	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	70	207.3	341.6	383.2	411.1				
				211.0	323.1	387.6	418.3	209	328	386	400
				207.4	317.9	385.9	370.5				
NS80	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	80	217.7	293.2	366.6	375.2				
				222.1	302.9	342.4	362.7	221	289	356	369
				224.5	270.1	360.3	369.0				
M	中庸熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	0	216.2	271.3	398.0	463.8				
				219.6	278.3	412.7	463.3	221	278	397	465
				227.7	283.7	381.1	469.2				
MS40	中庸熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	40	151.5	290.4	400.4	425.4				
				154.7	290.9	415.6	433.7	152	292	410	431
				149.4	293.2	413.8	433.5				
MS50	中庸熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	160.2	292.2	415.1	409.6				
				162.1	294.1	412.7	408.1	162	296	410	415
				165.1	300.4	401.8	427.3				
MS60	中庸熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	60	161.4	280.5	388.6	424.6				
				161.1	280.7	393.0	421.7	161	281	388	415
				159.8	280.4	382.6	399.3				
MS70	中庸熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	70	146.7	262.9	349.8	393.0				
				152.7	257.4	345.4	383.6	150	255	346	386
				150.1	244.6	342.2	381.7				

付表5 圧縮強度試験結果 (打設温度10, 30℃, 標準養生)

配合 NO.	セメント の種類	高炉スラグ の種類	高炉スラグの 混入率 (%)	圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)			
				2 d	3 d	7 d	14 d
N (10℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	0	280.7	378.3	458.4	473.0
				276.3	366.4	452.0	476.2
				279.7	373.1	462.2	492.7
NS50 (10℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	157.1	346.8	502.3	498.5
				155.7	333.0	494.0	509.3
				157.1	338.9	504.8	522.0
NS60 (10℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	60	131.7	284.4	482.4	492.1
				135.7	296.5	455.1	504.8
				142.0	290.8	465.2	513.8
NS70 (10℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	70	111.5	256.0	426.4	464.7
				110.8	251.7	424.1	450.7
				105.9	248.9	433.0	453.3
NS80 (10℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	80	89.1	197.4	318.9	376.9
				92.9	193.4	335.1	342.5
				90.7	192.0	343.9	364.8
N (30℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	0	234.8	297.2	293.2	302.8
				231.2	311.8	314.9	315.1
				225.9	283.7	302.5	309.3
NS50 (30℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	125.0	247.9	273.9	296.8
				121.8	252.4	276.2	298.3
				121.1	258.8	271.8	299.1
NS60 (30℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	60	119.0	267.9	284.6	281.5
				125.8	239.8	275.7	285.6
				122.9	242.7	242.7	296.4
NS70 (30℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	70	132.0	239.1	222.7	271.7
				133.3	235.3	232.7	280.2
				135.6	222.7	240.0	272.0
NS80 (30℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	80	135.1	206.0	219.0	224.7
				137.8	196.2	207.4	218.1
				136.0	200.3	206.3	229.7

付表6 圧縮強度試験結果 (断熱養生)

配合 NO.	セメント の種類	高炉スラグ の種類	高炉スラグの 混入率 (%)	圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)			
				2 d	3 d	7 d	14 d
NS50-B (10°C)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	282.4	405.4	487.0	509.3
				293.2	398.0	477.5	478.1
				286.1	431.5	486.4	494.0
NS50-C (10°C)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	350.9	457.1	506.7	485.7
				343.3	473.4	481.3	473.0
				355.2	501.7	505.5	499.1
NS50-B (20°C)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	345.0	382.0	396.2	424.1
				340.7	399.8	385.2	385.2
				369.5	369.5	402.7	381.7
NS50-C (20°C)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	431.4	407.4	425.4	444.1
				420.0	420.8	423.7	436.8
				395.6	438.6	424.8	444.4
NS50-B (30°C)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	179.5	269.9	261.7	264.1
				183.3	263.7	247.6	286.7
				170.4	262.5	261.7	250.6
NS50-C (30°C)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	232.6	306.9	299.0	294.6
				235.7	293.0	297.0	310.8
				233.6	290.0	292.0	299.2
MS50-B (20°C)	中庸熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	238.6	308.1	365.4	364.9
				242.2	330.5	350.1	381.0
				239.9	331.3	373.1	383.2
MS50-C (20°C)	中庸熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	327.9	420.8	401.7	412.4
				338.7	418.9	415.7	416.3
				337.7	392.2	403.6	413.3

付表7 引張強度試験結果 (打設温度20℃, 標準養生)

配合 NO.	セメント の種類	高炉スラグ の種類	高炉スラグの 混入率 (%)	引 張 強 度 (kgf/cm ²)			
				3 d	7 d	28 d	91 d
N	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	0	23.13	30.41	29.35	38.56
				25.79	32.09	34.48	39.30
				21.42	32.44	38.80	38.41
NS50	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	14.05	20.42	34.34	39.56
				13.87	21.79	40.22	38.29
				14.57		37.37	41.94
NS60	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	60	12.24	15.17	32.39	37.11
				11.76	16.83	36.26	31.66
				12.52	18.43	34.74	35.91
NS70	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	70	10.08	16.95	36.83	38.21
				10.32	17.54	36.23	39.33
				9.73	18.81	28.75	42.54
NS80	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	80	11.36	17.06	24.83	29.71
				12.50	16.81	24.35	30.12
				9.96	18.16	24.07	32.39
M	中 庸 熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	0	14.76	23.84	33.85	44.80
				14.89	23.55	27.23	38.90
				15.58	21.45	31.59	38.72
MS40	中 庸 熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	40	9.23	14.46	33.93	34.52
				8.95	16.59	31.32	28.87
				9.18	13.95	30.61	44.46
MS50	中 庸 熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	7.25	13.18	27.02	37.21
				8.52	13.74	25.14	36.44
				8.42	12.74	29.26	37.86
MS60	中 庸 熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	60	7.36	12.01	26.67	39.18
				7.87	11.05	26.99	34.25
				7.28	11.47	24.09	35.15
MS70	中 庸 熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	70	6.58	13.57	26.15	29.76
				6.24	12.95	25.59	34.91
				6.37	12.96	23.75	38.34

付表8

引張強度試験結果

(打設温度10, 30℃, 標準養生)

配 合 NO.	セメント の種類	高炉スラグ の種類	高炉スラグの 混入率 (%)	引 張 強 度 (kgf/cm ²)							
				3 d		7 d		2 8 d		9 1 d	
N (10℃)	普 通 セメント	比表面積 4 0 0 0 (cm ² /g)	0	22.04	22.9	32.65	33.2	36.55	36.7	35.70	36.2
				23.36		32.97		38.07		35.73	
				23.35		34.05		35.56		37.23	
NS50 (10℃)	普 通 セメント	比表面積 4 0 0 0 (cm ² /g)	5 0	13.18	12.5	23.96	22.1	32.87	34.2	43.38	42.1
				12.06		21.92		37.41		43.44	
				12.27		21.32		32.37		39.44	
NS60 (10℃)	普 通 セメント	比表面積 4 0 0 0 (cm ² /g)	6 0	11.09	10.8	21.13	20.2	31.20	32.6	39.84	41.1
				10.36		20.15		35.42		40.70	
				10.87		19.41		31.22		42.66	
NS70 (10℃)	普 通 セメント	比表面積 4 0 0 0 (cm ² /g)	7 0	9.07	8.76	19.11	19.9	34.72	33.5	35.94	35.7
				8.86		20.42		31.75		43.14	
				8.36		20.31		34.05		27.95	
NS80 (10℃)	普 通 セメント	比表面積 4 0 0 0 (cm ² /g)	8 0	6.19	6.05	16.09	15.68	31.35	29.48	35.74	34.55
				5.98		15.87		29.86		32.98	
				5.98		15.08		27.24		34.94	
N (30℃)	普 通 セメント	比表面積 4 0 0 0 (cm ² /g)	0	25.64	22.8	27.58	25.0	33.25	33.1	36.25	34.9
				21.08		21.64		30.42		36.34	
				21.63		21.63		35.63		32.14	
NS50 (30℃)	普 通 セメント	比表面積 4 0 0 0 (cm ² /g)	5 0	14.17	13.5	18.03	19.4	29.60	29.3	34.63	34.0
				12.76		19.62		29.63		35.69	
				13.63		20.42		28.68		31.56	
NS60 (30℃)	普 通 セメント	比表面積 4 0 0 0 (cm ² /g)	6 0	13.93	12.2	16.15	15.9	26.00	26.1	31.85	33.8
				11.67		16.55		26.80		32.36	
				11.10		14.86		25.64		37.17	
NS70 (30℃)	普 通 セメント	比表面積 4 0 0 0 (cm ² /g)	7 0	10.74	11.4	15.53	15.8	24.36	24.3	32.62	30.8
				11.51		15.82		24.14		28.44	
				11.98		16.19		24.46		31.47	
NS80 (30℃)	普 通 セメント	比表面積 4 0 0 0 (cm ² /g)	8 0	12.75	12.2	15.27	15.1	21.71	21.1	24.73	25.1
				11.26		14.95		20.19		25.53	
				12.54		15.06		21.32		24.96	

付表9 引張強度試験結果 (標準養生)

配 合 NO.	セメント の種類	高炉スラグ の種類	高炉スラグの 混入率 (%)	引 張 強 度 (kgf/cm ²)							
				3 d		7 d		2 8 d		9 1 d	
NS50-B (10°C)	普 通 セメント	比表面積 6 0 0 0 (cm ² /g)	5 0	13.65	13.7	24.77	26.4	37.49	36.4	35.59	43.0
				13.30		24.59		33.83		45.45	
				14.14		29.92		37.96		47.97	
NS50-C (10°C)	普 通 セメント	比表面積 8 0 0 0 (cm ² /g)	5 0	14.55	15.5	34.24	32.5	39.49	40.5	48.96	45.0
				16.02		30.28		42.27		42.04	
				15.96		32.93		39.87		44.06	
NS50-B (20°C)	普 通 セメント	比表面積 6 0 0 0 (cm ² /g)	5 0	15.02	15.6	24.56	24.0	32.50	36.7	38.42	36.0
				16.11		23.36		39.37		35.78	
				15.78		24.16		38.11		33.87	
NS50-C (20°C)	普 通 セメント	比表面積 8 0 0 0 (cm ² /g)	5 0	15.09	16.2	24.90	24.0	26.22	29.5	35.30	33.3
				16.78		20.75		33.04		35.66	
				16.82		26.44		29.11		28.97	
NS50-B (30°C)	普 通 セメント	比表面積 6 0 0 0 (cm ² /g)	5 0	15.28	15.9	20.26	20.6	28.69	28.6	31.72	35.3
				15.25		20.02		28.16		35.99	
				17.25		21.48		29.03		38.21	
NS50-C (30°C)	普 通 セメント	比表面積 8 0 0 0 (cm ² /g)	5 0	19.34	19.4	20.00	19.8	31.24	30.3	34.18	32.8
				20.23		18.79		28.07		31.49	
				18.73		20.62		31.62		—	
MS50-B (20°C)	普 通 セメント	比表面積 6 0 0 0 (cm ² /g)	5 0	9.83	9.69	17.48	18.9	28.52	29.6	41.02	37.8
				9.63		19.34		31.25		35.10	
				9.62		19.88		28.98		37.30	
MS50-C (20°C)	普 通 セメント	比表面積 8 0 0 0 (cm ² /g)	5 0	14.04	14.3	24.15	23.0	29.48	32.4	32.86	33.7
				13.07		20.51		32.68		38.07	
				15.82		24.22		35.03		30.29	

付表10 引張強度試験結果 (打設温度20℃, 断熱養生)

配 合 NO.	セメント の種類	高炉スラグ の種類	高炉スラグの 混入率 (%)	引 張 強 度 (kgf/cm ²)							
				3 d	7 d	14 d	28 d				
N	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	0	32.36	36.64	32.80	29.93				
				30.69	35.04	33.50	33.88				
				30.89	32.33	32.04	36.46				
NS50	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	22.95	36.21	35.17	36.19				
				23.57	31.93	34.71	33.53				
				22.17	32.26	34.24	31.95				
NS60	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	60	22.27	28.42	41.60	47.55				
				22.00	28.80	34.63	37.50				
				19.24	30.09	34.37	35.67				
NS70	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	70	19.31	29.44	28.53	35.50				
				22.30	34.09	33.54	36.68				
				21.64	31.53	34.15	36.61				
NS80	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	80	19.92	30.49	30.59	30.47				
				21.46	25.70	34.40	32.19				
				21.10	28.77	33.93	35.97				
M	中 庸 熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	0	19.23	23.60	37.13	42.87				
				20.65	28.56	34.20	41.02				
				25.81	25.59	37.50	39.05				
MS40	中 庸 熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	40	18.60	26.18	31.74	31.82				
				16.23	19.25	36.09	38.21				
				14.74	25.03	37.88	35.03				
MS50	中 庸 熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	17.07	26.24	35.91	39.29				
				16.79	28.93	40.53	39.42				
				17.16	24.91	33.15	34.36				
MS60	中 庸 熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	60	14.61	26.76	36.26	36.89				
				14.14	28.58	—	38.68				
				13.93	23.64	37.04	34.00				
MS70	中 庸 熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	70	13.75	26.91	31.11	29.35				
				14.36	23.59	32.91	34.41				
				14.80	22.77	29.02	34.70				

付表11 引張強度試験結果

(打設温度10, 30℃, 断熱養生)

配合 NO.	セメント の種類	高炉スラグ の種類	高炉スラグの 混入率 (%)	引 張 強 度 (kgf/cm ²)							
				2 d		3 d		7 d		14 d	
N (10℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	0	25.41	24.8	28.12	32.1	37.95	38.0	40.47	42.0
				24.93		32.81		39.33		40.38	
				24.13		35.39		36.76		45.20	
NS50 (10℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	14.10	15.7	30.63	30.9	43.61	44.7	45.80	45.7
				16.97		28.76		39.59		46.37	
				16.05		33.37		50.77		45.01	
NS60 (10℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	60	13.55	13.7	27.31	26.4	37.88	37.8	35.77	39.1
				13.39		28.44		37.79		39.31	
				13.67		23.52		44.08		42.36	
NS70 (10℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	70	11.17	11.2	23.93	24.0	34.47	35.4	38.35	37.8
				11.00		24.18		34.79		34.94	
				11.35		24.00		37.05		40.12	
NS80 (10℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	80	7.65	8.83	21.15	20.5	32.80	31.8	34.65	33.9
				8.89		19.43		30.57		29.80	
				9.96		20.83		32.17		37.36	
N (30℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	0	20.53	21.9	26.40	26.2	26.39	26.6	26.84	27.0
				22.55		27.58		27.40		27.48	
				22.53		24.63		25.93		26.74	
NS50 (30℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	50	14.26	13.5	24.71	23.5	23.84	24.2	25.55	25.1
				12.90		21.54		26.46		25.39	
				13.44		24.23		22.35		24.30	
NS60 (30℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	60	12.69	12.6	23.07	24.2	25.87	24.6	24.69	25.1
				12.27		25.03		24.96		22.65	
				12.80		24.39		22.82		27.89	
NS70 (30℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	70	12.52	12.8	25.55	24.0	24.78	24.3	24.88	24.1
				13.14		26.20		23.88		22.32	
				12.82		20.39		24.19		25.22	
NS80 (30℃)	普 通 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	80	12.56	12.9	19.85	19.9	23.26	22.2	23.97	22.3
				13.14		19.88		22.32		22.04	
				12.96		20.04		21.10		20.93	

付表12 引張強度試験結果 (断熱養生)

配 合 NO.	セメント の種類	高炉スラグ の種類	高炉スラグの 混入率 (%)	引 張 強 度 (kgf/cm ²)			
				2 d	3 d	7 d	1 4 d
NS50-B (10°C)	普 通 セメント	比表面積 4 0 0 0 (cm ² /g)	5 0	28.29	41.83	42.61	42.62
				29.71	38.95	41.37	36.67
				26.21	37.46	41.10	32.43
NS50-C (10°C)	普 通 セメント	比表面積 4 0 0 0 (cm ² /g)	5 0	28.95	37.90	35.08	45.00
				30.61	46.31	36.7	42.19
				33.02	39.89	38.36	40.22
NS50-B (20°C)	普 通 セメント	比表面積 4 0 0 0 (cm ² /g)	5 0	28.27	31.52	30.40	29.90
				29.63	30.95	31.58	27.14
				27.43	29.37	31.47	28.69
NS50-C (20°C)	普 通 セメント	比表面積 4 0 0 0 (cm ² /g)	5 0	27.77	29.82	34.59	35.49
				31.45	31.58	34.95	28.19
				32.71	32.04	31.42	29.15
NS50-B (30°C)	普 通 セメント	比表面積 4 0 0 0 (cm ² /g)	5 0	17.35	23.94	19.63	21.80
				18.06	20.17	24.09	21.01
				16.27	23.26	21.80	23.19
NS50-C (30°C)	普 通 セメント	比表面積 4 0 0 0 (cm ² /g)	5 0	21.63	24.55	24.97	25.22
				20.76	24.85	23.69	23.52
				20.92	22.56	23.93	23.31
MS50-B (20°C)	中庸熱 セメント	比表面積 4 0 0 0 (cm ² /g)	5 0	23.85	30.20	33.83	29.75
				26.36	28.10	30.52	31.61
				22.62	28.32	30.87	31.77
MS50-C (20°C)	中庸熱 セメント	比表面積 4 0 0 0 (cm ² /g)	5 0	29.70	29.28	33.71	39.11
				31.70	30.24	33.54	32.17
				27.34	39.77	34.61	31.91

付表 13 静弹性系数试验结果 (標準養生)

配 記 合 号	静 弹 性 係 数 (× 1 0 ⁵ kgf/cm ²)							
	3 d		7 d		2 8 d		9 1 d	
N	2.764	2.735	~~2.500~~	3.154	3.375	3.465	3.767	3.746
	2.782		3.203		3.436		3.751	
	2.658		3.104		3.585		3.719	
N S 5 0	3 d		7 d		2 8 d		9 1 d	
	1.901	1.947	2.431	2.365	3.226	3.204	3.736	3.786
	1.999		2.431		3.292		3.722	
1.940	2.233		3.094		3.900			
N S 6 0	3 d		7 d		2 8 d		9 1 d	
	1.528	1.806	2.265	2.297	3.317	3.234	3.597	3.706
	1.954		2.328		3.205		3.834	
1.936	2.296		3.178		3.687			
N S 7 0	3 d		7 d		2 8 d		9 1 d	
	1.721	1.693	1.968	1.996	3.254	3.237	3.923	3.866
	1.668		1.955		3.183		3.728	
1.691	2.065		3.272		3.946			
N S 8 0	3 d		7 d		2 8 d		9 1 d	
	1.656	1.641	2.206	2.157	2.720	2.735	3.679	3.649
	1.560		2.138		2.778		3.675	
1.707	2.128		2.706		3.594			
M	3 d		7 d		2 8 d		9 1 d	
	2.117	2.140	2.877	2.822	~~3.327~~	3.324	3.898	3.840
	2.125		2.805		3.337		3.823	
2.177	2.784		3.310		3.799			
M S 4 0	3 d		7 d		2 8 d		9 1 d	
	1.522	1.594	2.119	2.122	2.927	2.963	3.821	3.821
	1.671		2.098		2.855		3.767	
1.590	2.149		3.108		3.874			
M S 5 0	3 d		7 d		2 8 d		9 1 d	
	1.467	1.366	1.944	1.910	2.598	2.609	4.070	3.956
	1.231		1.802		2.771		3.842	
1.399	1.984		2.458		—			
M S 6 0	3 d		7 d		2 8 d		9 1 d	
	1.443	1.301	1.737	1.746	2.835	2.790	3.813	3.796
	1.193		1.693		2.859		3.806	
1.267	1.807		2.675		3.769			
M S 7 0	3 d		7 d		2 8 d		9 1 d	
	1.072	1.049	1.633	1.634	2.945	2.755	3.648	3.618
	1.048		1.546		2.934		3.587	
1.027	1.724		2.385		~~3.000~~			

付表 14 静弹性系数试验结果 (標準養生)

配 合 号 記 号	静 弹 性 係 数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)							
	3 d		7 d		28 d		91 d	
N (10℃)	2.601	2.584	3.107	3.101	3.535	3.490	4.177	3.996
	—		3.035		3.645		3.886	
	2.567		3.162		3.290		3.925	
N S 5 0 (10℃)	1.826	1.865	2.403	2.420	3.408	3.348	4.206	4.146
	1.857		2.425		3.375		4.054	
	1.911		2.432		3.262		4.178	
N S 6 0 (10℃)	—	1.604	2.362	2.248	3.260	3.340	4.191	4.013
	1.485		2.213		3.353		3.987	
	1.723		2.169		3.406		3.860	
N S 7 0 (10℃)	1.431	1.426	2.317	2.336	3.196	3.150	4.222	4.017
	1.422		2.327		3.208		3.936	
	~~1.524~~		2.365		3.045		3.894	
N S 8 0 (10℃)	1.240	1.240	1.776	2.336	2.886	2.943	4.083	3.822
	1.155		2.327		2.935		3.803	
	1.324		2.365		3.008		3.581	
N (30℃)	2.611	2.639	2.874	2.766	3.274	3.183	3.641	3.605
	2.681		2.742		3.136		3.551	
	2.624		2.681		3.139		3.623	
N S 5 0 (30℃)	1.862	1.907	2.268	2.307	3.037	3.039	3.395	3.736
	1.969		2.293		2.959		3.746	
	1.890		2.360		3.121		3.766	
N S 6 0 (30℃)	1.657	1.758	2.191	2.094	2.992	2.952	3.759	3.675
	1.859		2.067		3.053		3.624	
	1.758		2.023		2.812		3.641	
N S 7 0 (30℃)	1.732	1.586	1.997	2.029	2.838	2.743	3.289	3.247
	1.495		2.124		2.718		3.143	
	1.531		1.965		2.673		3.308	
N S 8 0 (30℃)	1.234	1.365	1.717	1.753	1.967	2.048	2.819	2.809
	1.553		1.818		2.021		2.777	
	1.309		1.724		2.154		2.819	

付表 15 静弹性系数试验结果 (标准发生)

配 合 号	静 弹 性 係 数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)							
	3 d		7 d		28 d		91 d	
NS50-B (10℃)	2.163	2.101	2.766	2.728	3.385	3.386	4.190	3.995
	1.953		2.652		3.373		3.869	
	2.188		2.766		3.401		3.925	
NS50-C (10℃)	2.282	2.216	2.835	2.938	3.539	3.608	4.320	4.025
	2.185		2.899		3.663		3.935	
	2.183		3.079		3.622		3.829	
NS50-B (20℃)	2.103	2.109	2.907	2.826	3.263	3.289	3.788	3.712
	2.125		2.733		3.332		3.695	
	2.100		2.840		3.270		3.654	
NS50-C (20℃)	1.991	2.060	3.041	3.085	3.583	3.565	3.631	3.713
	2.134		3.094		3.541		3.727	
	2.055		3.120		3.570		3.780	
NS50-B (30℃)	2.130	2.111	2.476	2.404	3.093	3.051	3.555	3.580
	2.102		2.281		3.102		3.690	
	2.102		2.457		2.960		3.495	
NS50-C (30℃)	2.338	2.232	2.804	2.625	3.412	3.391	3.699	3.722
	2.230		2.640		3.408		3.022	
	2.127		2.814		3.352		3.745	
MS50-B (20℃)	1.923	1.737	2.282	2.406	3.299	3.211	3.735	3.630
	1.602		2.528		3.255		3.660	
	1.687		2.408		3.077		3.495	
MS50-C (20℃)	2.080	2.091	2.632	2.737	3.497	3.539	3.689	3.847
	2.113		2.712		3.543		3.744	
	2.082		2.868		3.577		4.108	

付表 16 静弾性係数試験結果 (断熱養生)

配 合 号	静 弾 性 係 数 (× 1 0 ⁶ kgf/cm ²)							
	2 d		3 d		7 d		1 4 d	
N	3.215	3.145	3.270	3.201	3.341	3.346	3.480	3.447
	3.084		3.250		3.266		3.263	
	3.137		3.082		3.431		3.599	
N S 5 0	3 d		7 d		2 8 d		9 1 d	
	2.481	2.402	2.765	2.765	3.339	3.352	3.396	3.579
	2.349		2.783		3.390		3.760	
2.375	2.747		3.327		3.581			
N S 6 0	3 d		7 d		2 8 d		9 1 d	
	2.334	2.267	2.968	2.970	3.487	3.572	3.719	3.705
	2.258		2.947		3.589		3.571	
2.208	2.995		3.638		3.825			
N S 7 0	3 d		7 d		2 8 d		9 1 d	
	2.489	2.481	3.394	3.343	3.525	3.515	3.716	3.692
	2.459		3.381		3.579		3.815	
2.494	3.254		3.441		3.545			
N S 8 0	3 d		7 d		2 8 d		9 1 d	
	2.651	2.685	3.057	3.057	—	3.300	3.549	3.457
	2.692		3.087		3.239		3.345	
2.710	3.025		3.360		3.477			
M	3 d		7 d		2 8 d		9 1 d	
	2.713	2.676	—	2.748	3.429	3.478	3.615	3.585
	2.600		2.750		3.436		3.554	
2.715	2.746		3.568		—			
M S 4 0	3 d		7 d		2 8 d		9 1 d	
	2.025	2.085	2.747	2.759	3.713	3.595	3.643	3.632
	2.196		2.725		3.541		~~3.372~~	
2.035	2.804		3.532		3.874			
M S 5 0	3 d		7 d		2 8 d		9 1 d	
	1.836	1.912	2.778	2.776	3.575	3.530	3.676	3.720
	1.921		2.705		3.427		3.797	
1.978	2.845		3.587		3.687			
M S 6 0	3 d		7 d		2 8 d		9 1 d	
	2.161	2.155	2.775	2.742	3.452	3.536	3.795	3.721
	2.082		2.749		3.552		3.590	
2.223	2.701		3.603		3.778			
M S 7 0	3 d		7 d		2 8 d		9 1 d	
	2.012	1.985	3.078	2.953	3.354	3.264	3.569	3.493
	2.034		2.897		3.164		3.381	
1.910	2.885		3.275		3.529			

付表 17 静弾性係数試験結果 (断熱養生)

配 合 号	静 弾 性 係 数 ($\times 10^6$ kgf/cm ²)							
	3 d		7 d		28 d		91 d	
N (10℃)	2.682	2.705	3.219	3.187	3.763	3.753	3.664	3.694
	2.717		3.210		3.722		3.674	
	2.715		3.131		3.775		3.744	
N S 5 0 (10℃)	1.996	2.024	2.953	2.995	3.859	3.792	3.906	3.916
	2.046		2.989		3.632		3.864	
	2.029		3.044		3.884		3.979	
N S 6 0 (10℃)	1.709	1.826	2.895	2.875	3.897	3.862	3.904	3.909
	1.878		2.745		3.816		3.942	
	1.893		2.985		3.872		3.881	
N S 7 0 (10℃)	1.679	1.555	2.782	2.793	3.822	3.819	3.846	3.880
	1.615		2.702		3.925		3.853	
	1.371		2.894		3.708		3.940	
N S 8 0 (10℃)	1.241	1.343	2.224	2.272	3.202	3.367	3.417	3.468
	1.390		2.208		3.386		3.560	
	1.400		2.385		3.511		3.427	
N (30℃)	2.572	2.589	2.901	2.863	2.929	2.901	3.021	3.022
	2.600		2.827		2.895		3.067	
	2.594		2.859		2.880		2.977	
N S 5 0 (30℃)	1.786	1.726	2.550	2.669	2.601	2.712	2.918	3.080
	1.699		2.700		2.783		3.184	
	1.692		2.757		2.752		3.139	
N S 6 0 (30℃)	1.672	1.681	2.697	2.657	2.808	2.828	3.153	2.949
	1.758		2.544		2.801		2.900	
	1.613		2.730		2.874		2.795	
N S 7 0 (30℃)	1.980	1.866	2.899	2.736	2.689	2.750	2.941	2.903
	1.882		2.634		2.709		2.865	
	1.735		2.674		2.852		~~3.106~~	
N S 8 0 (30℃)	1.909	2.010	2.464	2.479	2.706	2.626	2.501	2.713
	2.047		2.565		2.545		2.708	
	2.074		2.410		~~2.806~~		2.930	

付表18 静弾性係数試験結果 (断熱養生)

配 合 号	静 弾 性 係 数 ($\times 10^6$ kgf/cm ²)							
	2 d		3 d		7 d		14 d	
NS50-B (10℃)	2.768	2.693	2.790	3.121	3.553	3.595	4.125	3.879
	2.673		3.230		3.646		3.865	
	2.637		3.343		3.587		3.648	
NS50-C (10℃)	2.924	2.758	3.248	3.278	3.575	3.650	3.638	3.800
	2.788		3.339		3.710		3.856	
	2.563		3.246		3.665		3.905	
NS50-B (20℃)	3.215	3.203	3.533	3.499	3.457	3.468	3.577	3.516
	3.150		3.463		3.511		3.250	
	3.245		3.500		3.435		3.497	
NS50-C (20℃)	3.242	3.301	3.666	3.506	3.461	3.481	3.338	3.362
	3.368		3.435		3.499		3.250	
	3.293		3.418		3.484		3.497	
NS50-B (30℃)	2.784	2.210	2.695	2.863	2.923	2.872	2.772	3.110
	2.245		2.831		2.834		3.090	
	2.175		3.062		2.860		3.131	
NS50-C (30℃)	2.284	2.329	2.981	2.986	3.012	2.996	3.275	3.165
	2.398		2.948		3.039		3.135	
	2.305		3.029		2.939		3.086	
MS50-B (20℃)	2.415	2.541	3.221	3.191	3.252	3.398	3.697	3.516
	2.569		3.075		3.473		3.411	
	2.640		3.279		3.470		3.440	
MS50-C (20℃)	3.129	3.088	3.466	3.463	3.432	3.518	3.600	3.614
	3.156		3.423		3.555		3.626	
	2.978		3.500		3.566		3.618	

付表19 圧縮強度試験結果

(打設温度 20℃)

配 記 号	試験の 種 類	養生温度 (℃)	2 d		3 d		4 d		7 d		14 d	
N	圧縮強度 kgf/cm ²	20	105.3	106	273.6	268	299.2	289	399.3	387	411.9	414
			103.4		263.6		268.7		384.1		401.7	
			108.1		265.9		298.7		378.4		428.4	
		30	119.4	118	297.6	308	341.7	343	408.6	406	438.0	441
			114.7		317.0		347.3		401.2		426.5	
			121.1		308.1		339.8		407.7		457.1	
		40	145.5	144	337.8	349	368.1	358	417.0	415	479.4	463
			142.7		359.2		342.1		411.5		443.1	
			142.7		349.1		362.5		417.6		467.3	
		50	194.8	197	359.4	353	364.8	368	376.8	399	428.4	437
			196.8		345.8		372.8		412.5		442.4	
			198.6		355.1		365.8		407.7		440.5	
		60	236.1	244	359.4	366	375.6	376	404.9	412	421.4	434
			242.4		361.3		382.0		424.1		411.3	
			252.2		376.0		371.1		406.5		469.8	
		70	293.6	293	358.4	358	354.2	355	392.2	392	375.6	380
			287.1		357.1		349.1		405.7		390.9	
			297.9		358.4		360.3		378.2		373.1	
N	引張強度 kgf/cm ²	20	9.88	10.4	27.15	26.5	25.51	27.2	30.51	31.9	32.66	34.3
			10.74		26.47		28.04		33.32		34.98	
			10.74		25.99		28.15		31.75		35.33	
		30	12.29	12.3	23.75	22.2	32.84	31.4	33.73	34.8	40.05	38.5
			13.64		21.87		30.06		36.29		36.78	
			10.85		21.11		31.16		34.49		38.75	
		40	13.26	13.4	23.07	23.5	28.66	32.3	33.08	38.2	39.60	38.7
			12.83		23.91		33.89		35.36		43.06	
			14.17		23.44		34.46		38.32		33.43	
		50	17.66	18.0	26.90	26.1	28.36	29.4	36.44	38.2	37.46	36.5
			19.49		26.17		28.16		39.77		37.50	
			16.82		25.86		31.78		38.51		34.65	
		60	22.33	23.3	29.08	26.1	33.03	30.9	32.39	32.7	36.16	37.7
			24.58		27.38		28.10		30.97		38.76	
			23.15		26.79		31.66		34.83		38.30	
		70	25.97	27.8	29.08	27.8	31.89	31.1	26.90	30.3	37.07	33.8
			27.88		27.38		31.90		30.00		33.00	
			29.42		26.79		29.52		34.01		31.18	

付表20 圧縮強度試験結果 (打設温度20℃)

配 合 号	試験の 種 類	養生温度 (°C)	2 d		3 d		4 d		7 d		14 d	
NS50	圧縮強度 kgf/cm ²	20	203.5	201	138.7	137	156.9	157	216.2	214	317.2	320
			196.1		134.5		158.1		204.4		321.4	
			203.8		139.3		155.5		220.3		320.5	
		30	232.7	234	176.5	174	221.8	221	307.4	310	385.2	396
			240.8		176.3		218.6		302.4		388.3	
			227.8		170.1		222.3		321.4		415.1	
		40	263.1	250	229.1	235	286.4	294	386.6	378	482.3	475
			269.0		240.0		284.3		368.3		475.6	
			218.4		236.6		311.1		378.5		467.9	
		50	314.1	298	297.0	295	353.5	357	403.0	420	458.7	451
			289.9		282.8		366.1		426.9		439.3	
			289.3		303.9		352.4		428.8		453.9	
		60	305.1	307	341.9	340	394.2	395	394.2	414	446.0	426
			309.7		331.7		401.2		422.1		389.4	
			307.0		345.2		389.9		427.0		441.2	
NS50	引張強度 kgf/cm ²	20	20.00	19.9	13.60	13.9	25.51	27.2	20.12	20.3	29.38	29.2
			20.77		14.02		28.04		20.29		28.61	
			19.07		14.02		28.15		20.39		29.74	
		30	23.75	22.2	17.95	18.2	32.84	31.4	27.85	29.3	33.87	35.8
			21.87		18.95		30.06		31.24		38.20	
			21.11		17.68		31.16		28.71		35.235	
		40	23.07	23.5	19.67	21.3	28.66	32.3	26.01	30.6	42.33	42.9
			23.91		21.40		33.89		32.01		46.81	
			23.44		22.94		34.46		33.87		39.64	
		50	26.90	26.4	28.50	28.2	28.36	29.4	29.93	32.2	36.39	37.5
			24.99		28.50		28.16		36.70		35.78	
			27.42		27.67		31.78		30.00		40.43	
		60	26.38	26.1	27.75	30.2	33.03	30.9	32.41	35.3	39.55	39.3
			26.17		33.15		28.10		38.65		39.10	
			25.86		29.75		31.66		34.94		39.17	
		70	29.08	27.8	31.85	30.1	31.89	31.1	31.20	29.7	28.93	31.7
			27.38		27.63		31.90		28.88		33.21	
			26.79		30.69		29.52		28.97		32.83	

付表21 圧縮強度試験結果 (打設温度 20℃)

配 合 号	試験の 種 類	養生温度 (℃)	2 d		3 d		4 d		7 d		1 4 d	
NS80	圧縮強度 kgf/cm ²	2 0	70.8	6 3.0	106.2	9 7.6	131.3	1 2 5	196.0	1 8 6	279.7	2 6 4
			60.6		101.2		124.3		180.7		252.6	
			57.7		85.4		118.4		180.4		259.7	
		3 0	98.9	8 8.4	165.8	1 5 8	204.7	1 8 9	271.2	2 6 3	292.7	3 0 1
			87.3		156.7		183.9		263.3		304.4	
			78.9		152.4		178.3		253.1		305.4	
		4 0	156.4	1 5 0	222.1	2 1 9	252.5	2 4 4	300.0	3 0 4	340.0	3 2 7
			148.0		220.9		237.6		297.8		320.3	
			145.4		215.2		242.6		313.2		320.1	
		5 0	201.7	1 9 5	262.9	2 4 1	264.8	2 5 6	298.3	2 7 7	295.4	2 8 1
197.7	230.5		258.8		266.7		283.7					
189.6	230.2		244.3		265.6		262.7					
6 0	213.9	2 0 7	254.3	2 3 1	246.8	2 3 4	259.1	2 4 6	282.4	2 6 6		
	211.7		218.1		237.6		242.9		263.6			
	194.9		222.1		218.6		235.8		252.1			
NS80	引張強度 kgf/cm ²	2 0	6.69	6.34	10.63	9.79	12.46	11.9	17.02	17.7	22.00	22.8
			6.48		10.11		12.86		17.81		23.61	
			5.85		8.63		10.37		18.14		22.93	
		3 0	9.15	8.97	14.62	14.7	17.11	17.9	21.99	23.7	26.73	27.2
			8.32		14.76		19.88		25.26		27.83	
			9.44		14.75		10.37		23.77		27.06	
		4 0	14.02	13.3	22.83	22.7	23.64	23.9	25.67	26.8	28.91	29.2
			13.42		23.05		25.36		27.70		31.25	
			12.55		22.38		22.72		27.13		27.38	
		5 0	18.92	18.3	24.16	23.0	22.30	22.5	26.18	25.8	24.52	25.1
19.46	23.58		22.92		25.54		25.87					
16.51	21.38		22.28		25.73		24.94					
6 0	20.08	19.3	23.92	22.1	20.58	22.3	23.74	22.6	21.96	22.0		
	19.27		20.98		25.58		22.68		22.75			
	18.66		21.36		20.87		21.31		21.16			

付表22 静弾性係数試験結果

配 合 号 記 号	養生温度 (°C)	静 弾 性 係 数 ($\times 10^6$ kgf/cm ²)					
		2 d	3 d	4 d	7 d	1 4 d	
N	2 0	2.598	2.794	2.906	3.248	3.483	
		2.273	2.845	2.853	3.141	3.478	3.443
		2.584	2.878	3.039	3.192	3.369	
N	3 0	2.676	2.822	3.214	3.302	3.664	
		2.681	3.043	3.203	3.390	3.476	3.563
		2.652	2.875	3.140	3.248	3.549	
N	4 0	2.755	2.986	3.277	3.408	3.610	
		2.858	3.056	3.261	3.540	3.676	3.669
		2.456	3.095	3.367	3.457	3.722	
N	5 0	3.006	3.086	3.366	3.580	3.694	
		3.030	3.149	3.382	3.435	3.751	3.679
		2.963	3.010	3.349	3.497	3.592	
N	6 0	2.991	3.272	3.350	3.596	3.682	
		3.145	3.138	3.295	3.485	3.513	3.571
		2.983	3.152	3.338	3.779	3.518	
N	7 0	3.270	3.101	3.343	3.364	~~3.380~~	
		3.218	3.190	3.311	3.619	3.441	3.405
		2.941	3.126	3.280	3.238	3.369	

付表23 静弾性係数試験結果

配 合 号 記 号	養生温度 (°C)	静 弾 性 係 数 ($\times 10^6$ kgf/cm ²)									
		2 d		3 d		4 d		7 d		14 d	
NS50	20	1.961		2.061		1.815		2.508		2.914	
		1.629	1.837	2.138	2.065	2.064	1.972	2.357	2.454	2.903	2.913
		1.922		1.998		2.037		2.497		2.922	
NS50	30	1.932		1.991		2.468		2.905		3.442	
		1.816	1.851	2.239	2.041	2.446	2.478	2.920	2.903	3.355	3.415
		1.804		1.983		2.520		2.885		3.447	
NS50	40	2.154		2.567		3.101		3.288		3.691	
		1.986	2.047	2.488	2.502	2.952	2.970	3.068	3.231	3.864	3.793
		2.000		2.451		2.857		3.336		3.823	
NS50	50	2.324		2.946		3.293		3.696		3.890	
		2.362	2.380	2.714	2.837	3.325	3.246	3.622	3.632	3.832	3.862
		2.452		2.851		3.120		3.578		3.864	
NS50	60	2.651		3.169		3.680		3.772		3.860	
		2.703	2.658	3.006	3.028	3.503	3.565	3.800	3.782	3.650	3.770
		2.618		2.910		3.511		3.775		3.799	
NS50	70	2.863		3.197		3.424		3.475		3.552	
		2.969	2.905	3.192	3.163	3.517	3.430	3.648	3.544	3.501	3.474
		2.882		3.101		3.347		3.507		3.368	

付表24 静弾性係数試験結果

配 合 号	養生温度 (°C)	静 弾 性 係 数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)					
		2 d	3 d	4 d	7 d	14 d	
NS80	20	1.398	1.541	1.722	1.944	2.562	
		1.242	1.522	1.372	2.202	2.557	2.439
		1.065	1.225	1.713	2.070	2.197	
NS80	30	1.524	1.897	2.516	2.715	2.621	
		1.522	1.978	2.769	2.717	2.842	2.695
		~~1.001~~	1.533	3.046	2.657	2.622	
NS80	40	2.020	2.750	2.993	3.194	3.324	
		1.921	2.778	3.076	3.317	3.242	3.210
		1.933	2.585	2.791	3.005	3.065	
NS80	50	2.666	3.214	3.144	3.113	3.240	
		2.492	3.087	2.901	3.040	3.069	3.155
		2.427	2.573	2.556	3.045	~~2.518~~	
NS80	60	2.278	2.653	3.680	3.229	3.161	
		2.556	2.787	3.503	3.118	3.010	3.086
		2.123	2.973	3.511	2.758	~~2.881~~	

付表25 再試験強度試験結果 (打設温度20℃, 標準養生)

配合 NO.	セメント の種類	高炉スラグ の種類	高炉スラグの 混入率 (%)	圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)			
				3 d	7 d	28 d	91 d
MS70 再試験	中庸熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	70	67.7	143.2	326.8	433.2
				69.1 67.0	142.6 141	300.6 313	446.3 443
				64.0	137.4	311.4	450.7
NS50-B 再試験	普 通 セメント	比表面積 6000 (cm ² /g)	50	154.7	264.6	451.4	568.5
				152.9 153	276.8 272	459.6 454	563.4 541
				150.4	274.4	450.7	490.8
NS50-C 再試験	普 通 セメント	比表面積 8000 (cm ² /g)	50	183.3	304.6	459.0	492.7
				179.8 183	306.2 301	476.2 459	504.2 494
				186.5	293.2	443.1	486.4
MS50-B 再試験	中庸熱 セメント	比表面積 6000 (cm ² /g)	50	96.5	189.8	382.4	522.0
				95.5 96.8	194.3 192	392.3 382	525.2 508
				98.3	190.6	370.9	476.8
MS50-C 再試験	中庸熱 セメント	比表面積 8000 (cm ² /g)	50	143.0	258.7	453.3	522.0
				139.7 141	260.8 263	456.7 458	506.7 511
				139.4	270.7	462.6	505.5
配 合 NO.	セメント の種類	高炉スラグ の種類	高炉スラグの 混入率 (%)	引 張 強 度 (kgf/cm ²)			
				3 d	7 d	28 d	91 d
MS70 再試験	中庸熱 セメント	比表面積 4000 (cm ² /g)	70	6.58	13.57	26.15	29.76
				6.24 6.40	12.95 13.2	25.59 25.2	34.91 34.3
				6.37	12.96	23.75	38.34
NS50-B 再試験	普 通 セメント	比表面積 6000 (cm ² /g)	50	15.02	24.56	32.50	38.42
				16.11 15.6	23.36 24.0	39.37 36.7	35.78 36.0
				15.78	24.16	38.11	33.87
NS50-C 再試験	普 通 セメント	比表面積 8000 (cm ² /g)	50	15.09	24.90	26.22	35.30
				16.79 16.2	20.75 24.0	33.04 29.5	35.66 33.3
				16.82	26.44	29.11	28.97
MS50-B 再試験	中庸熱 セメント	比表面積 6000 (cm ² /g)	50	9.83	17.48	28.52	41.02
				9.63 9.69	19.34 18.9	31.25 29.6	35.10 37.8
				9.62	19.88	28.98	37.30
MS50-C 再試験	中庸熱 セメント	比表面積 8000 (cm ² /g)	50	14.04	24.15	29.48	32.86
				13.07 14.3	20.51 23.0	32.68 32.4	38.07 33.7
				15.82	24.22	35.03	30.29

付表-26 断熱養生供試体温度管理表

(20℃)

材令(日)	N	NS50	NS60	NS70	NS80	M	MS40	MS50	MS60	MS70	NS50-B & NS50-C	MS50-B & MS50-C
0.000	22.3	22.0	21.5	21.5	22.4	21.7	21.8	21.8	22.0	21.0	21.6	22.1
0.125	22.3	22.0	21.5	21.5	22.8	21.9	21.8	21.8	22.0	21.0	21.6	22.1
0.250	24.8	23.1	23.9	22.9	23.8	23.3	22.2	22.2	24.5	21.5	22.9	22.1
0.375	31.6	25.6	28.6	25.0	27.8	30.1	24.0	24.0	26.9	22.6	26.3	23.5
0.500	38.6	30.2	30.4	29.5	31.3	34.8	29.0	29.0	31.5	27.4	31.4	29.0
0.625	43.9	33.9	31.1	30.7	32.7	36.3	31.6	31.6	34.0	30.7	36.1	32.7
0.750	48.2	34.0	31.9	31.0	33.1	36.4	32.6	32.6	34.7	31.9	37.9	34.5
0.875	51.9	35.6	32.8	37.1	34.2	38.5	35.5	35.5	35.8	32.2	48.4	40.1
1.000	51.9	40.2	38.8	39.8	35.7	41.2	40.3	40.3	37.3	35.0	53.1	44.0
1.125	53.3	44.9	40.5	42.0	43.8	40.2	43.8	43.8	42.2	38.0	57.0	47.0
1.250	57.5	48.5	45.0	47.0	44.9	48.0	45.4	45.4	42.2	39.6	63.3	47.0
1.375	57.3	48.6	46.1	47.0	44.7	61.5	45.6	45.6	46.0	43.0	63.3	49.0
1.500	57.3	52.0	48.5	47.0	44.7	66.1	45.6	45.6	45.9	43.0	63.3	57.0
1.750	60.5	59.0	48.6	53.0	44.6	65.7	45.3	45.3	45.9	45.0	67.5	57.0
2.000	62.3	59.3	56.2	53.0	48.9	54.0	50.0	50.0	50.1	48.0	69.0	62.0
2.250	62.8	59.2	56.3	53.0	49.2	54.0	50.0	50.0	55.6	51.0	70.0	64.0
2.500	62.7	62.4	61.2	56.0	49.1	56.1	55.0	55.0	55.7	51.0	70.0	64.0
2.750	64.8	64.9	61.4	56.0	49.2	56.3	55.0	55.0	55.5	51.0	71.0	66.5
3.000	64.8	65.5	63.7	56.0	50.6	56.8	60.0	60.0	55.5	52.0	71.0	66.5
3.500	65.2	65.4	64.9	59.0	52.5	59.2	60.0	60.0	60.2	52.0	73.0	68.0
4.000	65.1	66.1	64.9	59.0	52.7	58.7	63.0	63.0	60.2	53.0	73.0	68.0
4.500	65.3	66.0	65.0	59.0	52.7	58.8	63.0	63.0	60.1	53.0	73.0	68.0
5.000	65.9	66.2	65.0	59.0	52.5	57.2	64.0	64.0	61.7	54.0	73.0	70.0
5.500	66.0	66.3	64.9	59.0	52.4	60.3	64.0	64.0	61.4	54.0	73.0	70.0
6.000	66.2	66.5	64.9	61.0	52.5	60.4	64.0	64.0	61.4	55.0	74.0	70.0
6.500	65.8	64.7	65.1	61.0	52.5	60.7	64.0	64.0	63.0	55.0	74.0	70.0
7.000	64.9	64.5	65.0	61.0	52.6	60.6	65.0	65.0	63.0	55.0	75.0	71.0
8.000	65.2	65.0	64.9	61.0	53.1	60.2	65.0	65.0	63.0	55.0	75.0	71.0
9.000	65.2	65.0	65.0	61.0	53.5	58.4	66.0	66.0	64.0	55.0	75.0	71.0
10.000	65.2	65.0	65.0	61.0	53.5	53.5	66.0	66.0	64.0	55.0	75.0	71.0
11.000	65.2	65.0	65.0	61.0	53.5	53.5	66.0	66.0	65.0	55.0	75.0	71.0
12.000	65.2	65.0	65.0	61.0	53.5	62.5	65.0	65.0	65.0	55.0	75.0	71.0
13.000	65.2	65.0	65.0	61.0	53.5	62.5	65.0	65.0	65.0	55.0	75.0	71.0
14.000	65.2	65.0	65.0	61.0	53.5	62.5	65.0	65.0	65.0	55.0	75.0	71.0

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

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3182号
平成5年2月 (1993)

河野広隆・森濱和正・渡辺博志・
高橋弘人・森田良美・松井 淳・
山本 一

要 旨 : 近年、本州四国連絡橋等の大規模構造物の建設が増加しつつあり、それによら
って、マスコンクリートの温度ひびわれの防止が重要になってきている。また、最近では低発
熱型のセメントが開発されるなど、材料面からの検討も必要となっている。

本報告は、使用材料や配合などの条件が異なるコンクリートにおいて、温度応力に最も大き
く影響するコンクリートの断熱温度上昇ならびに断熱状態での強度発現特性などの基本的性状
の検討結果とともに、高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの断熱状態での強度推定方法
について述べるものである。

キーワード：断熱温度上昇、高炉スラグ微粉末、強度発現特性、強度推定、温度応力

郵便はがき

3 0 5 - □ □

切手をは
いて下さ
い。

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

コンクリート研究室御中

No. 017

No. 017

配布先氏名

配布先住所

○

土木研究所資料第3182号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印

○