

マスコンクリートにおける温度応力解析の高精度化に関する基礎的研究

井上, 量介 / INOUE, Ryosuke

(発行年 / Year)

2010-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2010-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2009 年度 修士論文

マスコンクリートにおける温度応力解析の
高精度化に関する基礎的研究

指導教員：溝渕 利明 教授

法政大学大学院 工学研究科
建設工学専攻 修士課程

08R5101

イノウエ リョウスケ
井上 量介

マスコンクリートにおける温度応力解析の 高精度化に関する基礎的研究

井上 量介

マスコンクリートにおいては、セメントの水和発熱に起因する温度ひび割れがしばしば問題となる。温度応力解析手法は向上している一方で、解析に用いる入力条件の精度向上が課題となっている。より精度のよい解析結果を得るためには、それぞれの入力条件に対して、あらかじめ実験を行い十分に信頼できる値を解析に用いることが望ましい。しかしながら、解析に用いる入力値は多く、それらすべてに対して十分な検討を行うことは困難であり、ほとんどの場合、既往の研究や施工実績から得られたデータを用いて行うのが現状である。本研究ではセメントの水和発熱に起因する温度ひび割れが問題となっているマスコンクリート構造物を対象とし、温度応力解析の高精度化を目的として、解析に用いる各種設計値に対する材料評価方法の確立を目指し、新たに導入した試験機を用いて実験を行った。また、マスコンクリートである実際のボックスカルバート構造物において施工時の温度応力計測を行い、温度応力解析から得られた解析値と施工時の実測値とを比較することで、より精度のよい温度応力解析を行うための手法やその効果について検討を行った。

その結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) セメントの種別によっては、引張強度に達する前に伸び能力の限界に達する可能性がある。
- (2) 本試験で新たに導入した簡易物性評価試験を用いると、コンクリートの終局断熱温度上昇量をより精度よく推定できる。
- (3) 温度応力解析の入力条件として、本研究で検討した簡易断熱物性評価試験および直接引張強度試験の実験結果を用いることで、コンクリートのひび割れ発生限界を精度よく予測できる可能性がある。

FUNDAMENTAL STUDY ON MAKING HIGHLY ACCURATE OF THERMAL STRESS ANALYSIS IN MASS CONCRETE

Ryosuke INOUE

In the mass concrete, thermal crack that it causes hydration generation of heat of cement often becomes a problem. Technique of thermal stress analysis has improved. It is one side and improvement of accuracy of input value of analysis becomes a problem. To obtain an exact analytical result, it is preferable to use input value that can be trusted enough for analysis. However, the input value used for the analysis is abundant, and it is difficult to those all are investigated enough. So, using data in the past for analysis is a current state in many cases. For the purpose, for mass concrete that thermal crack causes hydration generation of heat of cement often becomes a problem, it aims at making highly accurate of thermal stress analysis, it experimented by using testing machine that examined in present study. Moreover, the thermal and the stress were measured with an actual structure is box culvert. And an analytical value was compared with the actual measurement value aiming to do an exact thermal stress analysis.

The main results obtained in this study are as follows.

- (1) According to the type of cement, concrete has the possibility to reaches the limit of the expansion before reaching tensile strength.
- (2) When simple physical properties evaluation examination that newly introduced by this research is used, final insulated thermal rise amount of concrete can be exactly forecast.
- (3) When simple insulation physical properties evaluation examination and direct tensile strength Examination that examined in present study are used for the input value of the thermal stress analysis, crack generation limit of concrete is exactly predictable.

目 次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
第2章	既往の研究	3
2.1	温度応力解析に関する研究	3
(1)	材料の設計用値がマスコンクリートの温度ひび割れ解析結果に及ぼす影響	3
(2)	初期ひび割れに対する照査	8
(3)	コンクリートの発熱速度	10
2.2	温度応力解析に用いる設計用値に関する研究	11
(1)	熱物性値	11
(2)	断熱温度上昇特性	12
(3)	圧縮強度	14
(4)	引張強度	17
(5)	ヤング係数およびクリープ	18
(6)	自己収縮ひずみ	20
2.3	断熱温度上昇試験に関する研究	21
(1)	収縮を抑制した高炉セメントB種を用いた低発熱コンクリートの特性と実構造物への適用	21
2.4	引張強度試験に関する研究	24
(1)	直接引張試験で測定したコンクリートの引張ヤング係数と引張強度	24
(2)	若材齢時コンクリートの引張特性	27
2.5	一軸拘束試験に関する研究	34
(1)	Thermal Stress Testing Machine	34
(2)	一軸拘束試験装置を用いた温度ひび割れ試験方法に関する検討	39
第3章	研究の概要	44
第4章	簡易断熱物性評価試験	46
4.1	概要	46
4.2	実験および解析方法	46
(1)	断熱温度上昇試験	46
(2)	温度同定解析	51
4.3	使用材料および配合	53
4.4	実験結果	55
(1)	断熱槽部材厚の検討	55
(2)	コンクリート容量の検討	57

(3) 容器寸法の検討.....	59
(4) 容積率と断熱温度上昇特性の関係.....	62
4.5 まとめ.....	63
第5章 直接引張強度試験.....	65
5.1 概要.....	65
5.2 実験方法.....	65
5.3 使用材料および配合.....	67
5.4 実験結果.....	69
(1) 圧縮強度.....	71
(2) 割裂引張強度.....	73
(3) 直接引張強度.....	75
(4) 圧縮ヤング係数.....	77
(5) 引張ヤング係数.....	79
(6) 引張強度の検討.....	82
(7) ヤング係数の検討.....	86
(8) 伸び能力の検討.....	89
5.5 まとめ.....	89
第6章 一軸拘束試験.....	91
6.1 概要.....	91
6.2 実験方法.....	91
6.3 使用材料および配合.....	94
6.4 実験結果.....	96
(1) 温度およびひずみ.....	96
(2) 応力および引張強度.....	98
(3) 線膨張係数.....	101
6.5 まとめ.....	102
第7章 実験結果を用いた高精度化の検討.....	104
7.1 概要.....	104
7.2 対象とした実構造物の概要.....	104
7.3 実験および解析方法.....	107
7.4 使用材料および配合.....	108
7.5 解析に用いた入力条件.....	110
(1) 温度解析.....	110
(2) 応力解析.....	116
7.6 解析結果.....	129
7.7 解析結果の検証.....	134

(1) 外気温.....	134
(2) 温度および応力.....	135
7.8 まとめ.....	140
第8章 結論.....	141

参考文献

謝辞

第1章 序論

1.1 研究背景

コンクリート部材に有害なひび割れが生じた場合、コンクリート構造物の耐久性能などに悪影響を与えるだけでなく、塩害や中性化などのコンクリートの劣化が促進されることは一般的に良く知られている。近年、ダムや長大橋などコンクリート構造物の大型化が進行しており、いわゆるマスコンクリートとなっている。コンクリートの大型化が進行し、コンクリートの容量が大きくなると、部材内部に生じるセメントの水和発熱に起因する温度上昇が大きくなり、部材内部に温度分布が生じることによるひずみや外気との温度差によって生じるひずみ、温度降下時のコンクリート自体の収縮が地盤や既設コンクリートなどの拘束されることによるひずみが発生し、ひび割れへと進展することがある。とりわけ水和熱に起因する温度ひび割れによる影響が大きく、それら起因するひび割れの発生の予測、また、それによる耐久性能などの定量的評価を行うことは重要な課題の1つであるといえる。近年、温度ひび割れ対策として3次元有限要素法を用いた温度応力解析による事前および事後の照査が行われている。温度応力解析は有害なひび割れを抑制するうえで非常に重要な位置づけとされており、その精度が年々向上している。また、解析精度の向上とともに解析への入力条件を決定する基本的な考え方および手順についても継続的に研究がなされており、今後ひび割れ制御を行うにあたり温度応力解析の重要性はさらに高まるとされている。

温度ひび割れに影響する要因は、強度や発熱特性など、コンクリートの配合や使用される材料の諸特性をはじめとして構造物の形状や建設される場所の環境条件など非常に多岐にわたる。そのため、温度応力解析に用いる設計値も同様に非常に多くの条件を考慮しなければならない。より精度よく実際に近い解析結果を得るためには、それぞれの設計値に対して、あらかじめ実験を行い十分に信頼できる値を解析に用いることが望ましい。しかしながら、解析に用いる入力値は前述したように非常に多く、それらすべてに対して十分な検討を行うことは困難であり、ほとんどの場合、既往の研究や施工実績から得られたデータを用いて行うのが現状である。また、土木学会や日本コンクリート工学協会などによって温度応力解析の考え方や手順が示されているものの、採用する文献によって得られる結果が異なる場合があることも倉内らの研究¹⁾等によって報告されている。一方で、より精度のよい評価を行うことを目的とした各種設計値を正しく算定するための試験方法や手順は確立されておらず、実験方法によって異なる設計用値を用いる場合、それらの違いが解析結果へ及ぼす影響についてもほとんど報告されていないのが現状である。

また、近年一般的に用いられている普通ポルトランドセメントに加え、高炉スラグを混合し耐海水性やアルカリ骨材反応の抑制対策として、さらには環境負荷低減を目的として高炉セメントの使用が増加している。しかしながら、初期強度を普通ポルトランドセメントと同等にするために高炉スラグ微粉末の粉末度を大きくしたことなどにより、暑中時に

おいては普通ポルトランドセメントよりも温度上昇量が大きくなり、従来利点のひとつとして言われていた低発熱性が十分発揮できていなくなっている場合がある。それらの問題を改善するために、高炉スラグ微粉末の粉末度を粗くし、スラグ混合率を規格内上限に近くするなどして、セメントの水和熱を抑制し、自己収縮を小さくした低発熱・収縮抑制型高炉セメントが開発され、適用されるようになってきており、その効果が評価されるようになってきている²⁾。ただし、低発熱・収縮抑制型高炉セメントは、粉末度を粗くし、スラグ混合率を大きくしたために、初期強度発現が小さいことや初期養生を十分行わないと長期強度の発現が低下することが懸念されている。低発熱・収縮抑制型高炉セメントは、既往の施工実績が比較的少ないことから現時点では確立された温度応力解析の考え方や手順が示されておらず、実構造物への適応には事前の検討を適切に行う必要がある。

1.2 研究目的

本研究では、セメントの水和発熱に起因する温度ひび割れが問題となっているマスコンクリート構造物を対象とし、温度ひび割れ発生有無の照査のために行われる温度応力解析の高精度化を目的として、解析に用いる各種設計値に対して系統化された材料評価方法の確立を目指し、従来から用いられている各種実験に加え、諸特性を精度よく得るために新たに導入した各種の試験機を用いて実験を行った。また、マスコンクリートである実際のボックスカルバート構造物において施工時の温度応力計測を行い、温度応力解析から得られた解析値と施工時の実測値とを比較することで、より精度のよい温度応力解析を行うための手法やその効果について検討を行った。

また、本研究では、温度ひび割れ抑制対策として新たに開発され、適用されるようになってきている一方で、既往の研究やデータが比較的少なく、現時点では確立された温度応力解析の考え方や手順が示されていない低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いた構造物を対象として検討を行った。

第2章 既往の研究

温度応力解析の高精度化に関する研究は現在までも多くなされており，その成果が数多く発表されている．また，引張強度や発熱特性等，初期ひび割れ照査に必要な諸特性に対する評価方法も数多く研究されている．本章ではマスコンクリートにおける温度応力の高精度化に関連する代表的な既往の研究成果をまとめる．

2.1 温度応力解析に関する研究

(1) 材料の設計用値がマスコンクリートの温度ひび割れ解析結果に及ぼす影響

倉内氏ら¹⁾は土木学会標準示方書および日本コンクリート工学協会が定める設計用値を用いた温度応力解析を実施し，セメントの種類が解析結果に及ぼす影響に着目して検討を行った．

a) はじめに

2007年制定のコンクリート標準示方書（以下，JSCEと略す）では，温度応力解析の物性値の見直しが行われ，高炉セメントB種の断熱温度上昇式の変更，および低熱ポルトランドセメントの断熱温度上昇式が追加された．また，2008年に日本コンクリート工学協会「マスコンクリートのひび割れ制御指針」（以下，JCIと略す）の改定が行われ，最新の知見や新たな実験により材料の設計用値が整備されるとともに，3次元有限要素法による解析手法が提示された．本稿では，JSCEおよびJCIの設計用値を用いた温度応力解析を実施し，セメントの種類が解析結果に及ぼす影響に着目して検討を行った．

b) 解析の概要

解析モデルは，図2-1に示すように，既設底版上に打設される壁状構造物の1/4モデルとした．壁延長：10m，壁高さ：4m，壁厚：1.0，1.5，2.0および2.5mに変化させた．境界条件は，壁側面を型枠，上面を散水養生とし，それぞれの熱伝達率を8および14W/m²°Cとした．脱枠時期はNC：5日，BBおよびLC：7日とした．外気温は東京都の7月1日～8月31日の日平均気温（2006～2008年の平均）とし，打込み温度は外気温に5°Cを加えたものとした（28.7°C）．拘束条件は地盤下面および軸対称断面を拘束面とした．解析期間は打込み後2ヶ月間とした．

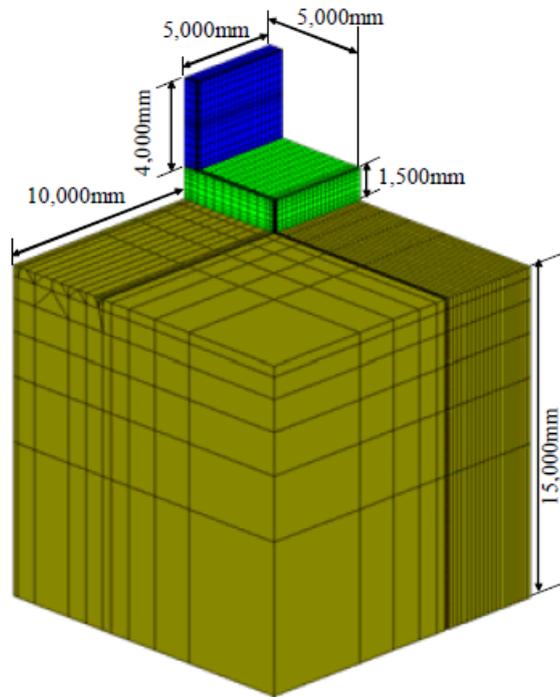


図 2-1 解析モデル

セメントの種類は、普通ポルトランドセメント（NC）、高炉セメント B 種（BB）および低熱ポルトランドセメント（LC）を対象とした。表 2-1 に JSCE および JCI の材料の設計用値を示す。なお、BB については、JSCE2007 年版に加えて JSCE2002 年版の設計用値を用いた場合についても解析を行った。JCI の圧縮強度式は、水セメント比（W/C）の関数となっているため、設計基準強度（ここでは、材齢 28 日・ 30N/mm^2 ）を満たす W/C を設定した。JSCE では、LC の圧縮強度式が提示されていないため、圧縮強度発現式の係数を定めた。自己収縮ひずみについて、JCI はセメントの種類や W/C によらず全てに考慮することとなっている。一方、JSCE では現状、NC についてのみ自己収縮ひずみ予測式の係数が提示されており、また、自己収縮の影響が無視できない場合に考慮することとされている。JSCE による場合、検討した強度レベルでは自己収縮の影響を無視するのが一般的であると考えられるため、これを考慮せずに解析を行った。ただし、NC については自己収縮を考慮したケースについても解析を行い比較した。

表 2-1 設計用値

		JSCE				JCI		
セメント種類		NC	BB ^{*1}	BB ^{*2}	LC	NC	BB	LC
W/C		—	—	—	—	63	60	53
セメント量		300 kg/m ³						
設計基準強度		材齢28日 ; 30 N/mm ²						
打込温度		28.7 °C						
断熱温度特性		$Q = Q_{\infty} (1 - e^{-\alpha t})$				$Q(t) = Q_{\infty} \left[1 - e^{-r(t-t_0)^s} \right]$		
	Q_{∞}	45.1	45	50	39.5	49.9	50.8	40.9
	α, r	1.481	1.327	1.034	0.6	1.709	1.099	0.772
	s	—	—	—	—	1	1	0.512
	t_0	—	—	—	—	0.094	0.033	0.202
圧縮強度 (N/mm ²)		$f'_c(t) = \frac{t}{a + b \cdot t} d \cdot f'_{ck}$				$f'_c(t_e) = \frac{t_e - S_f}{a + b \cdot (t_e - S_f)} f'_c(t_n)$		
	a	4.5	6.2	25.7	—	4.151	7.967	14.466
	b	0.95	0.93	0.72	—	0.849	0.71	0.473
	d	1.11	1.15	1.63	—	—	—	—
	S_f	—	—	—	—	0.37	0.42	0.5
引張強度(N/mm ²)		$f_{tk}(t) = 0.44 \times \sqrt{f'_c(t)}$				$f_t(t_e) = 0.13 \times f'_c(t_e)^{0.85}$		
有効ヤング係数 (N/mm ²)		$E_e(t) = \varphi(t) \times 4700 \times \sqrt{f'_c(t)}$ $\varphi(3d) = 0.73$ $\varphi(5d) = 1.00$				$E_c(t_e) = \varphi(t_e) \times 6300 \times f'_c(t_e)^{0.45}$ $\varphi(T \max) = 0.42$ $\varphi(T \max + 1d) = 0.65$		
自己収縮		考慮する必要がある場合				全てに考慮		
線膨張係数(×10 ⁻⁶)		10				NC,LC: 10 BB:12		

*1:JSCE 2002年版

*2:JSCE 2007年版

a) 解析結果

最小温度ひび割れ指数および最小温度ひび割れ指数発生箇所（壁中央断面の高さ450mm の位置）における最高温度を表 2-2 にまとめて示す。また、最高温度と壁厚および最小温度ひび割れ指数の関係を図 2-2 および図 2-3 に示す。

表 2-2 解析結果一覧

壁厚 (m)	最小温度ひび割れ指数									最高温度 (°C)					
	JSCE					JCI				JSCE				JCI	
	NC①	NC②	BB-02	BB-07	LC	NC	BB	LC	NC	BB-02	BB-07	LC	NC	BB	LC
1.0	0.98 (11)	0.88 (11)	0.98 (12)	0.98 (11)	1.42 (12)	0.58 (10)	0.53 (11)	1.26 (10)	54.9	53.7	54.0	43.2	59.1	55.1	43.6
1.5	0.80 (19)	0.74 (17)	0.83 (18)	0.79 (19)	1.16 (17)	0.56 (17)	0.52 (16)	1.23 (17)	58.9	57.8	58.7	47.2	63.4	59.8	46.2
2.0	0.70 (35)	0.66 (28)	0.73 (27)	0.69 (33)	1.04 (22)	0.54 (31)	0.51 (25)	1.19 (26)	60.9	60.0	61.5	49.9	65.5	62.6	47.8
2.5	0.66 (39)	0.61 (40)	0.68 (38)	0.65 (37)	0.96 (32)	0.55 (38)	0.51 (42)	1.17 (36)	61.8	61.0	62.9	51.6	66.3	63.9	48.8

注) 最小温度ひび割れ指数の欄の()は、その指数が発生した日数を表す。
 NC①は自己収縮を考慮しない場合、NC②は自己収縮を考慮した場合を表す。
 BB-02は2002年版、BB-07は2007年版を表す。

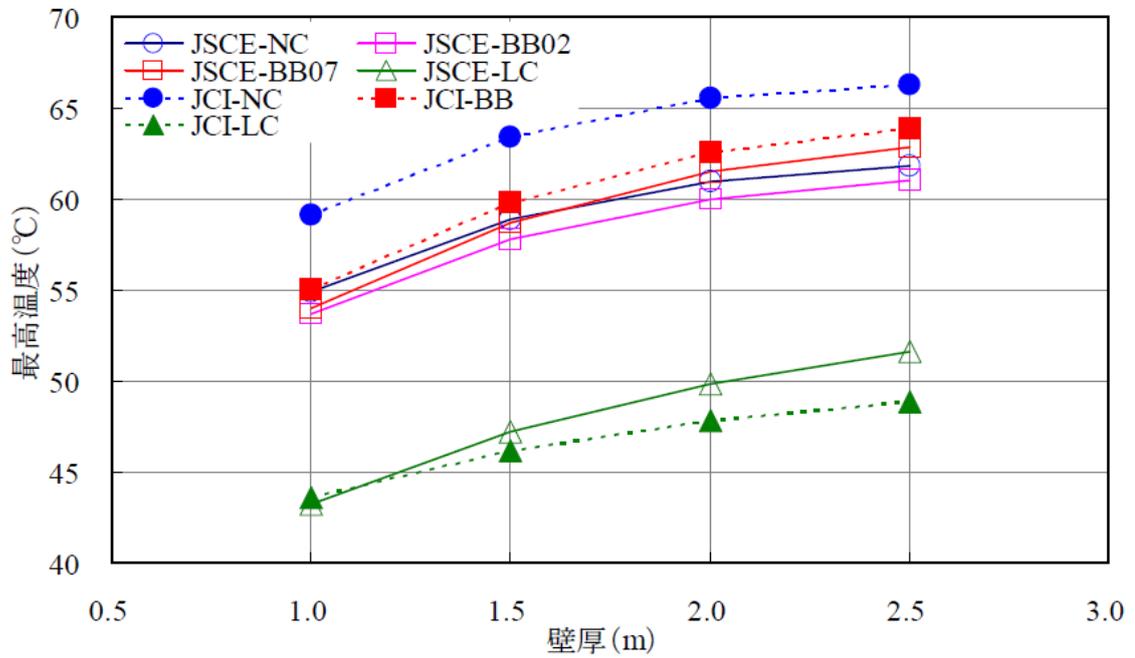


図 2-2 壁厚と最高温度の関係

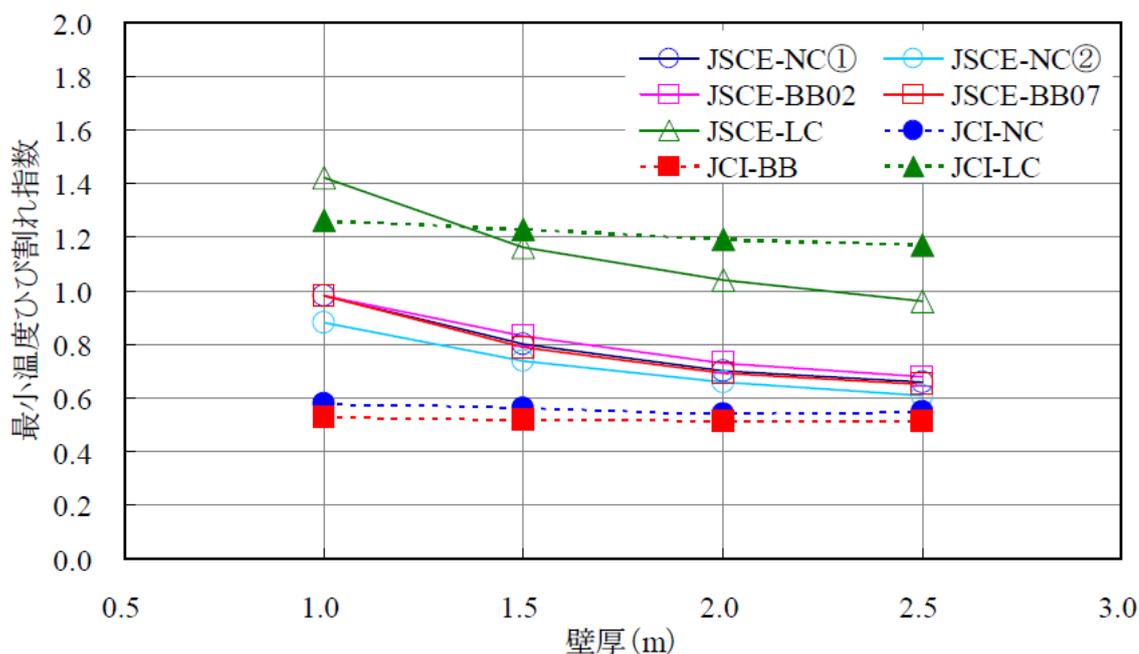


図 2-3 壁厚と最小ひび割れ指数の関係

①最高温度

NC の最高温度は、JCI による場合が JSCE よりも明らかに高く、両者の差は 4.2～4.6℃であった。BB の場合、N と同様に JCI が JSCE を上回ったが、その差は 1.0～1.1℃と小さかった。一方、LC の場合、JSCE が JCI を上回り、壁厚の増大に伴って両者の差が大きくなる傾向となった。これは、両者の断熱温度上昇式の形式が異なることが影響している可能性が考えられる。LC と NC の最高温度差は壁厚に応じ JSCE : 10.2～11.7℃, JCI : 15.5～17.5℃であり、JCI の方がセメント間の差がより大きく現れる結果となった。LC と BB の差についても同様の傾向が認められる (JSCE : 10.8～11.6℃, JCI : 11.5～15.1℃)。

②最小温度ひび割れ指数

NC の最小温度ひび割れ指数は、壁厚が大きくなるほど JSCE と JCI の差が小さくなる傾向となった (JSCE : 0.61～0.88, JCI : 0.55～0.58)。また、JSCE で自己収縮を考慮した場合、JCI との差は自己収縮を考慮しない場合よりも小さくなった。BB の最小温度ひび割れ指数についても NC と同様に、壁厚の増加に伴って JSCE と JCI の差が小さくなった。一方、LC の場合、壁厚 1.5m のときに両者の差が最も小さく、壁厚の増加とともに大きくなった。

NC と BB の最小温度ひび割れ指数は、JSCE では同等もしくは BB の方が幾分大きくなった (最大で 0.03)。一方、JCI の場合、最高温度は BB が NC よりも低くなったが(図 2-2)、最小温度ひび割れ指数は BB の場合が 0.03～0.05 ほど小さくなった。LC と NC の最小温度ひび割れ指数の差は JSCE : 0.30～0.44, JCI : 0.62～0.68 であり、JCI の方がセメント間の差がより大きく現れる結果となった。LC と BB の差についても同様の傾向が認められ

る (JSCE : 0.31~0.44, JCI : 0.66~0.73)。

壁厚が最小温度ひび割れ指数に及ぼす影響は、JSCE ではセメントの種類によらず大きい、JCI の場合、ほとんど認められなかった。温度ひび割れ指数は、体積変化 (温度、自己収縮)、ヤング係数とその低減係数による応力の発現と引張強度の発現の関係より定まるため、一つの要因のみから単純に比較することはできないが、JCI では温度依存性を考慮した有効材齢を用いて強度特性を表現しているのに対して、JSCE の場合は通常材齢で表されていることが影響している可能性が考えられる。双方の違いについては今後、実構造物で生じている現象との対比により、その妥当性に関する調査研究を進めることが期待される。

(2) 初期ひび割れに対する照査

2007 年に制定された土木学会標準示方書設計編³⁾では、初期ひび割れに対する照査としてコンクリートの温度応力解析を以下のように取り扱うよう定めている。

a) 一般

施工段階に発生する主なひび割れとして、こう構えに発生する材料分離や急速な乾燥が主たる要因となるひび割れ、および水和や乾燥に伴うコンクリートの体積変化に起因するひび割れがある。しかし、沈下ひび割れは、骨材の材料分離によって鉄筋上面や編断面部に発生することがあるが、適切な時期にタンピングを施すと一般に防ぐことができる。また、プラスチック収縮ひび割れは、ブリーディング水の上昇速度に比べ、表面からの水分の蒸発量が大きい場合に生じる恐れがあるが、コンクリートを打込んだ後に表面からの急速な乾燥を防止すれば、一般に防ぐことができる。施工編⁴⁾にしたがって施工すれば、問題となるような沈下ひび割れやプラスチック収縮ひび割れの発生を防ぐことができるのでこれらのひび割れの照査を省略してもよい。セメントの水和に起因するひび割れにおいても、安全性、脂溶性、耐久性、美観などの観点を十分に考慮しても問題ないと判断されるようなきわめて微細なひび割れは、照査を省略してもよい。なお、施工編によらない施工を行う場合には、これらのひび割れが構造物に悪影響を与えないことを適切な方法で確認する必要がある。(図 2-4)

また、鉄筋コンクリート構造物のように、同種の構造物が数多く施工される場合、施工段階で発生する初期ひび割れが構造物の所要の性能に影響しないことが既往の施工実績から明らかにされていれば、本章の照査を省くことができる。

セメントの水和に起因するひび割れが懸念され、マスコンクリートとして取り扱うべき構造物の部材寸法は、構造形式、使用材料、施工条件によりそれぞれ異なるため一概には決めにくい、おおよその目安として、広がりのあるスラブについては厚さ 80~100cm 以上、下端が拘束された壁では厚さ 50cm 以上と考えてよい。しかしながら、プレストレストコンクリート構造物のように、富配合のコンクリートが用いられる場合には、より薄い部材でも拘束条件によってはマスコンクリートに準じた扱いが必要になる。

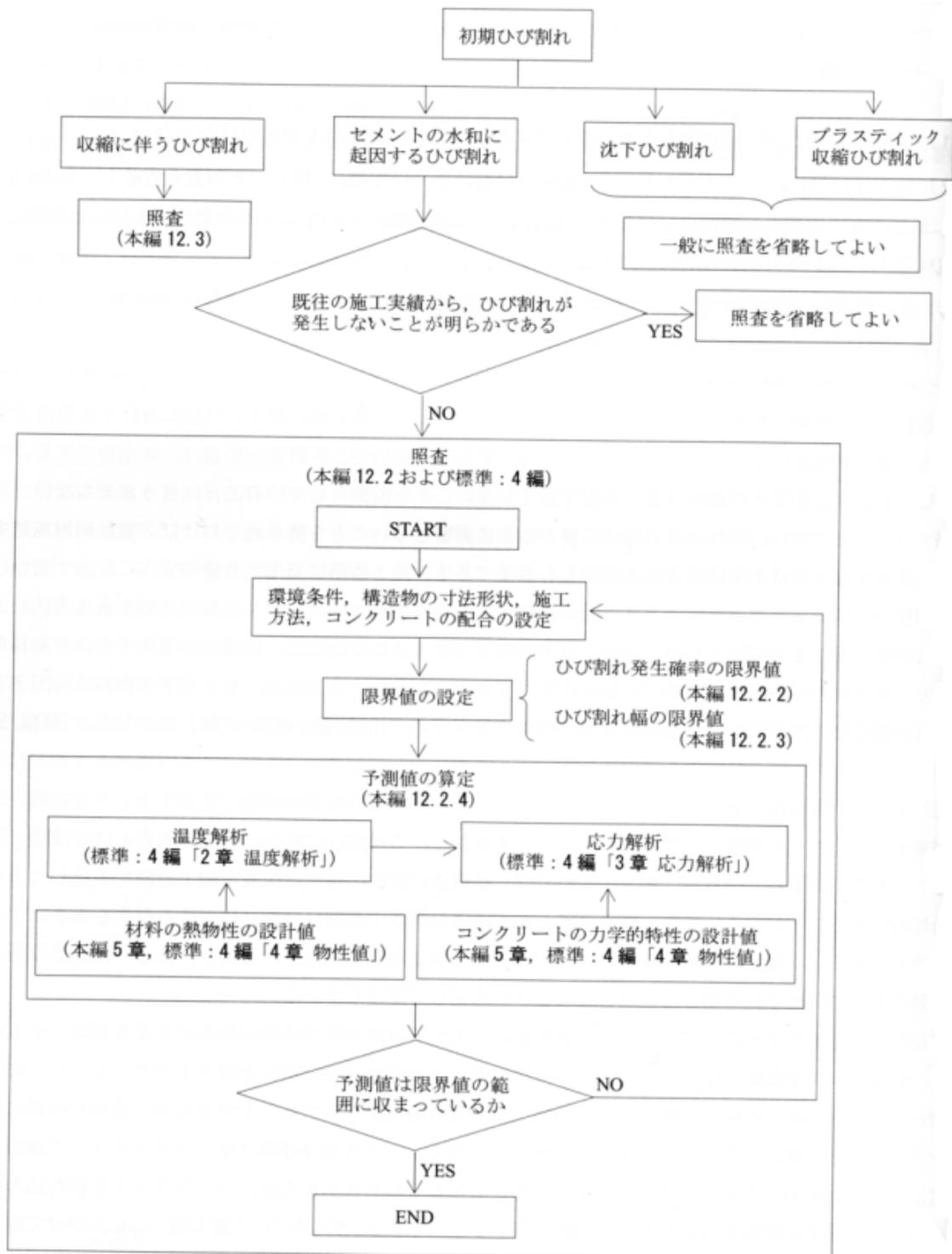


図 2-4 初期ひび割れに対する照査のフロー

b) セメントの水和に起因するひび割れ照査

- ① ひび割れに関する照査では、ひび割れがはっせいしないこと、あるいはひび割れ

幅が原価一以下であることを確認することにより、当該ひび割れにより構造物の所要の性能は損なわれないと判断するものとする。

- ② ひび割れの発生を許容しない場合は、ひび割れ発生確率の限界値を設定し、照査を行うものとする。
- ③ ひび割れの発生を許容するが、ひび割れにより構造物の所要の性能が損なわれなように制限する場合は、ひび割れ幅の限界地を設定し、照査を行うものとする。
- ④ ひび割れに関する照査は、温度解析によって算出される初期状態からの温度変化と自己収縮によるコンクリートの体積変化を求め、これらを取り入れた応力解析によって算出されたコンクリートの応力に基づいて行うものとする。

セメントの水和に起因するひび割れには、環境条件、構造物の寸法形状、材料の熱特性や力学特性、施工方法など各種の要因が相互に関連する。これらの要因を適切に設定して、構造物の所要の性能を損なうひび割れが発生しないことを確認しなければならない。

セメントの水和発熱に起因するひび割れに関する照査では、通常、環境条件、構造物の寸法形状、材料の熱特性、施工方法の詳細などの影響を取り入れた温度解析を最初に行う。ついで、温度解析によって算定される初期状態からの温度変化に基づく体積変化と自己収縮による体積変化を求め、打込まれたコンクリートへの拘束条件や材料の力学特性をモデル化して応力解析を行い、コンクリートの応力を算定する。コンクリートの発現強度と算定された応力との比較から強度／応力比（ひび割れ指数）を求める。ひび割れの発生の有無は、ひび割れ発生確率の限界値から定められるひび割れ指数によって照査する。以上の方法等により、施工段階で発生する初期ひび割れが構造物の所要の性能に影響しないことを確かめるものとした。

(3) コンクリートの発熱速度

2007年に制定された土木学会標準示方書設計編³⁾では、コンクリートの発熱特性について以下のように定めている。

コンクリートの温度解析に使用するコンクリートの発熱特性は、材齢と、場所ごとに異なるコンクリート温度を考慮してモデル化するのがよい。部材最小寸法が0.5m以上であれば、断熱温度上昇特性が構造物のあらゆる部位のコンクリートに共通の発熱特性として、温度解析を行ってよい。

コンクリートの発熱速度は温度の影響を強く受ける。一般に構造物の温度は一様ではないため、部位ごとに発熱速度は異なるのが一般的である。したがって、温度解析では使用するセメントや混和材料の種類、単位セメント量、水セメント比等の配合から熱物性値を求め、あわせて温度依存性を考慮した発熱速度の算定値を用いて温度解析を行うことが望ましいが、現在の段階では上記の点を考慮した温度解析はほとんど行われていない。

部材最小寸法がおおよそ0.5m以上であれば、環境に接する表面部を除き、大部分のコンクリートの発熱速度は断熱状態のそれとほぼ等しい。この場合、打込み温度に対する断熱温

度上昇特性をもってコンクリートの発熱特性とし、これからコンクリートの発熱速度を求め、構造物中のあらゆる部位で同一と仮定しても、温度解析制度は低下しないことが解析的に確かめられている。しかし、現在の段階では0.5m以下でもこれを適用することが多い。

2.2 温度応力解析に用いる設計用値に関する研究

(1) 熱物性値

a) 土木学会の定める熱物性値

2007年に制定された土木学会標準示方書設計編³⁾では、コンクリートの熱物性値を以下のように取り扱うよう定めている。

コンクリートの熱伝導率、熱拡散率、比熱などの熱物性値は、その配合に基づいて定めるのがよい。

セメントペーストの熱物性値は水和の進行と含水率に伴って変化するが、コンクリートの体積の多くを占める骨材の熱物性値は一定なので、コンクリートとしての熱物性値は定数と仮定してよい。コンクリートの熱物性値はコンクリートの配合、特に骨材の性質および単位骨材料、コンクリートの湿潤状態等を考慮して定めるのが望ましい。

一般のコンクリートでは、熱伝導率は2.6~2.8W/m°C、比熱は1.05~1.26kJ/kg°C、熱拡散率は(0.83~1.1)×10⁻⁶m²/s程度である。熱伝導率と密度が求められれば他の熱物性値は次式により推定することができる。

$$h_c^2 = 3.34 \times 10^{-7} \lambda_c \quad (1)$$

$$C_c = 3.03 \times 10^3 / \rho \quad (2)$$

b) 日本コンクリート工学協会の定める熱物性値

2008年に日本コンクリート工学協会より改定されたマスコンクリートのひび割れ制御指針⁵⁾では、コンクリートの熱物性値を以下のように定めている。

コンクリートの熱物性値は、使用材料や配合条件に基づいて定めることを標準とする。

コンクリートの比熱は、水セメント比、骨材種類に大きく影響を受けるが、一般に1.00~1.25(J/g°C)程度である。

コンクリートの熱伝導率は、骨材に用いられる岩石の種類の影響を受けるが、一般に2.6~2.8(W/m°C)程度である。

コンクリートの熱伝達率は表2-3を参考にするか、信頼できる資料または実験により定めるのがよい。

表 2-3 熱伝達率の参考値

養生方法	熱伝達率(W/m ² °C)
メタルフォーム、散水(湛水深さ10mm未満)	14
湛水(湛水深さ10mm以上50mm未満)、むしろ養生を含む	8
湛水(湛水深さ50mm以上100mm未満)、むしろ養生を含む	8
合板	8
シート	6
養生マット、湛水+養生マット、湛水シート含む	5
発泡スチロール(厚さ50mm)+シート	2
エアバッグ(シート付き);2枚;3枚;4枚	6,4,2
コンクリート・地盤・岩盤・の露出面	14

コンクリートの熱膨張係数はポルトランドセメントの場合は $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、高炉セメント B 種の場合には $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ を標準とする。

(2) 断熱温度上昇特性

a) 土木学会の定める発熱特性

2007 年に制定された土木学会標準示方書設計編³⁾では、コンクリートの断熱温度上昇特性を以下のように取り扱うよう定めている。

コンクリートの断熱温度上昇特性は、コンクリートの構成材料とその配合、打込み温度などを考慮して定めるのがよい。

断熱温度上昇特性の設計値は、水和遅延硬化が顕著な混和剤および混和材料を用いない場合には、式(3)で表すことができる。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt}) \quad (3)$$

ここに、 Q_{∞} は終局断熱温度上昇量、 r は温度上昇速度に関する定数で、いずれも実験により定まる定数、 t は材齢 (日)、 $Q(t)$ は材齢 t 日における断熱温度上昇量 ($^{\circ}\text{C}$) である。セメントの種類、単位セメント量および打込み時の温度が与えられれば、一例として表 2-4 に示した回帰式により Q_{∞} および t を推定することができる。

表 2-4 式(3)における Q_{∞} , t の標準値

セメントの種類	打込み時の温度	$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt})$			
		$Q_{\infty} = aC + b^{\text{注1)}$		$r = gC + h^{\text{注1)}$	
		a	b	g	h
普通ポルトランドセメント	10	0.12	11.0	0.0015	0.135
	20	0.11	13.0	0.0038	-0.036
	30	0.11	12.0	0.0040	0.337
中庸熱ポルトランドセメント	10	0.11	6.0	0.0003	0.303
	20	0.10	9.0	0.0015	0.279
	30	0.11	9.0	0.0021	0.299
早強ポルトランドセメント	10	0.13	15.0	0.0016	0.478
	20	0.13	12.0	0.0025	0.650
	30	0.13	10.0	0.0001	7.720
低熱ポルトランドセメント	10	0.11	4.2	0.0006	0.105
	20	0.10	8.0	0.0012	0.071
	30	0.10	9.4	0.0019	0.055
高炉セメント B種 ^{注2)}	10	0.13	13.2	0.0013	0.034
	20	0.13	11.9	0.0018	0.148
	30	0.13	10.9	0.0023	0.396
フライアッシュセメント B種 ^{注3)}	10	0.15	3.7	0.0011	0.107
	20	0.14	4.5	0.0019	0.213
	30	0.14	4.5	0.0030	0.487

注 1) C : 単位セメント量 (kg/m³)

注 2) 高炉スラグの混入率が 40% (ブレン値 : 4200cm²/g) の場合. 混入量が 40%以外の場合については, 既往のデータあるいは試験により求めるのがよい.

注 3) フライアッシュの混入率 18%

b) 日本コンクリート工学協会の定める断熱温度上昇特性

2008 年に日本コンクリート工学協会より改定されたマスコンクリートのひび割れ制御指針⁵⁾では, コンクリートの断熱温度上昇特性を以下のように定めている.

コンクリートの断熱温度上昇特性は, 使用するセメントの種類, 単位セメント量, 打込み温度等に基づいて, 式(4)によって評価するのを標準とする.

$$Q(t) = Q_{\infty}[1 - \exp\{-r(t - t_{0,q})\}] \quad (4)$$

ここに,

t : 材齢 (日)

$Q(t)$: 材齢 t 日までの断熱温度上昇量 (N/mm²)

- Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量 (°C)
 r : 断熱温度上昇速度に関する係数
 $t_{0,Q}$: 発熱開始材齢 (日)

コンクリートの断熱温度上昇特性は、セメントの種類、単位セメント量、打込み温度の影響を考慮して、実験または信頼のおける資料に基づき、式(4)から係数を求めて用いる。

式(4)の係数は表 2-5 から求めるのを基本とするが、実験または信頼の置ける資料に基づいて求めてもよい。

表 2-5 注のポルトランドセメントの係数は各ポルトランドセメントについて平均的なリンカーの鉱物組成を仮定して、複合水和発熱モデルから求めた推定値を実測値の代用として式(4)に当てはめて係数を算定し、さらにその係数を単位セメント量と打込み温度の関数として定式化したものである。

表 2-5 断熱温度上昇式の係数の標準値

セメントの種類	近似式*1	250 kg/m ³ ≤ Wc ≤ 400kg/m ³	
普通ポルトランドセメント	$Q_{\infty} = a + b \times T_a$	$a = 17.5 + 0.113 \times Wc$	$b = -0.146 + 0.000308 \times Wc$
	$r = a + b \times T_a$	$a = -0.426 + 0.00207 \times Wc$	$b = 0.0471 + 0.0000188 \times Wc$
	$t_{0,Q} = a \times \exp(-b \times T_a)$	$a = 0.832 - 0.000531 \times Wc$	$b = 0.0482 + 0.000068 \times Wc$
中庸熱ポルトランドセメント	$Q_{\infty} = a + b \times T_a$	$a = 8.0 + 0.118 \times Wc$	$b = 0.0709 - 0.00016 \times Wc$
	$r = a + b \times T_a$	$a = -0.101 + 0.000811 \times Wc$	$b = 0.00679 + 0.0000631 \times Wc$
	$t_{0,Q} = a \times \exp(-b \times T_a)$	$a = 1.02 - 0.000867 \times Wc$	$b = 0.0493 - 0.0000295 \times Wc$
低熱ポルトランドセメント*2	$Q_{\infty} = a + b \times T_a$	$a = 12.2 + 0.0912 \times Wc$	$b = 0.0946 - 0.000159 \times Wc$
	$r = a + b \times T_a$	$a = 0.218 + 0.0003 \times Wc$	$b = -0.00179 + 0.0000598 \times Wc$
	$s = a + b \times T_a$	$a = 0.302 + 0.00104 \times Wc$	$b = 0.00293 - 0.0000216 \times Wc$
早強ポルトランドセメント	$Q_{\infty} = a + b \times T_a$	$a = 15.9 + 0.135 \times Wc$	$b = -0.106 + 0.0000257 \times Wc$
	$r = a + b \times T_a$	$a = -0.601 + 0.0031 \times Wc$	$b = 0.0989 - 0.0000688 \times Wc$
	$t_{0,Q} = a \times \exp(-b \times T_a)$	$a = 0.607 - 0.000388 \times Wc$	$b = 0.0158 + 0.000188 \times Wc$
高炉セメント B 種	$Q_{\infty} = a + b \times T_a$	$a = 17.9 + 0.115 \times Wc$	$b = -0.149 + 0.000314 \times Wc$
	$r = a + b \times T_a$	$a = -0.325 + 0.00156 \times Wc$	$b = 0.0216 + 0.000039 \times Wc$
	$t_{0,Q} = a \times \exp(-b \times T_a)$	$a = 0.279 + 0.000795 \times Wc$	$b = 0.0693 + 0.0000904 \times Wc$
フライアッシュセメント B 種	$Q_{\infty} = a + b \times T_a$	$a = 3.03 + 0.138 \times Wc$	$b = 0.0741 - 0.00016 \times Wc$
	$r = a + b \times$	$a = -0.0212 + 0.00033 \times Wc$	$b = 0.00762 + 0.00013 \times Wc$
	$t_{0,Q} = a \times \exp(-b \times T_a)$	$a = 0.526 - 0.00022 \times Wc$	$b = 0.0963 - 0.00007 \times Wc$

*1 ; T_a : コンクリートの打込み温度 (°C), Wc : 単位セメント量 (kg/m³) を表す。

*2 ; 低熱ポルトランドセメントを使用する場合、断熱温度上昇曲線は、 $Q(t) = Q_{\infty} [1 - \exp\{-r(t - t_{0,Q})\}]$ で近似する。ただし、 s は断熱温度上昇速度に関する係数である。

(3) 圧縮強度

a) 日本コンクリート工学協会の定める圧縮強度

2008 年に日本コンクリート工学協会より改定されたマスコンクリートのひび割れ制御指針⁵⁾では、コンクリートの圧縮強度を以下のように定めている。

コンクリートの圧縮強度は、材齢、温度依存性を考慮できる式(5)によって評価するのを標準とする。

$$f'_c(t_e) = \frac{t_e - s_f}{a + b \cdot (t_e - s_f)} f'_c(t_n) \quad (5)$$

ここに、

$f'_c(t_e)$: 圧縮強度 (N/mm²)

t_e : 有効材齢 (日)

a, b : セメントの種類および管理材齢に応じた圧縮強度の発言を表す係数

s_f : セメントの種類に応じた硬化原点に対応する有効材齢 (日)

$f'_c(t_n)$: 管理材齢 t_n における圧縮強度 (N/mm²)

コンクリートの強度発現は、温度の影響を等価な材齢として評価する式(6)を用い、式(5)によって求めるのを標準とする。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / T_0} \right] \quad (6)$$

ここに、

t_e : 有効材齢 (日)

Δt_i : ある一定のコンクリート温度が継続する機関 (日)

$T(\Delta t_i)$: Δt_i の間継続するコンクリート温度 (°C)

t_0 : 1°C

式(4.3.2)中の係数 a, b は、セメントの種類および管理材齢に応じて、また係数 s_f は、セメントの種類に応じて表 2-6 より求めるのを標準とする。また、式(5)中の係数 $f'_c(t_n)$ は、セメント水比に応じて表 2-7 より求めるのを標準とする。

表 2-6 圧縮強度発現式の各係数

セメントの種類	管理材齢 t_n (日)	$a = \alpha_1 + \beta_1(C/W)^*$		$b = \alpha_2 + \beta_2(C/W)^*$		S_f
		α_1	β_1	α_2	β_2	
普通ポルトランドセメント	28	6.31	-1.36	0.771	0.0494	0.37
	56	6.94	-1.54	0.875	0.0278	
	91	7.37	-1.67	0.946	0.0138	
中庸熱ポルトランドセメント	28	15.8	-3.44	0.428	0.125	0.42
	56	20.2	-4.79	0.637	0.0862	
	91	24.3	-6.09	0.844	0.0399	
低熱ポルトランドセメント	28	21.9	-3.94	0.203	0.143	0.50
	56	32.8	-6.92	0.410	0.125	
	91	42.0	-9.72	0.612	0.086	
早強ポルトランドセメント	7	3.27	-0.816	0.512	0.122	0.30
	14	3.96	-1.04	0.711	0.0759	
	28	4.39	-1.19	0.841	0.0428	
	91	4.79	-1.32	0.966	0.0096	
高炉セメント B 種	28	14.4	-3.86	0.477	0.140	0.42
	56	17.4	-4.88	0.687	0.0877	
	91	19.2	-5.44	0.787	0.0757	
フライッシュセメント B 種	28	13.4	-3.20	0.514	0.116	0.47
	56	16.2	-4.12	0.708	0.0739	
	91	18.4	-4.80	0.850	0.0456	

*C/W : セメント水比

表 2-7 圧縮強度発現式の各係数

セメントの種類	管理材齢 t_n (日)	$f'_c(t_n) = p_1 + p_2(C/W)$	
		p_1	p_2
普通ポルトランドセメント	28	-14.5	28.1
	56	-12.8	28.7
	91	-11.6	29.1
中庸熱ポルトランドセメント	28	-17.6	27.5
	56	-12.9	28.8
	91	-7.28	29.1
低熱ポルトランドセメント	28	-17.6	25.2
	56	-13.4	28.7
	91	-6.44	29.4
早強ポルトランドセメント	7	-22.6	30.5
	14	-18.2	31.0
	28	-14.9	30.9
	91	-11.5	30.5
高炉セメント B 種	28	-10.2	24.3
	56	-3.38	23.6
	91	-1.43	24.5
フライッシュセメント B 種	28	-27.2	31.8
	56	-24.2	32.9
	91	-22.4	34.0

*C/W : セメント水比

(4) 引張強度

a) 土木学会の定める引張強度

2007年に制定された土木学会標準示方書設計編³⁾では、ひび割れ指数の算定に用いるコンクリートの引張強度を以下のように取り扱うように定めている。

ひび割れ指数の算定に用いるコンクリートの引張強度は、供試体を用いた割裂引張強度試験により定めることにより定めることを標準とする。

構造物中のコンクリートの引張強度は、乾燥状態、載荷速度および寸法の相違等により、小柄で湿潤な供試体を用いた引張試験とは異なり、製造時のばらつきと施工の影響を大きく受ける。この中で、製造時のばらつきはコンクリートの設計基準強度を定める際に考慮されており、それ以外の影響はひび割れ発生確率に関わる安全係数 γ_{cr} によって間接的に考慮される。そこで、ひび割れ指数の算定に用いる引張強度は、JIS A 1113による供試体の割裂引張強度としてよいこととした。

供試体の引張強度の材齢に伴う変化は、一般にその圧縮強度から推定できる。式(7)と式(8)はその例である。式(7)の右辺の f'_{ck} は設計基準強度であるとしているが、構造物完成後の再検討などにおいて、試験などにより圧縮強度が得られている場合にはそれを用いてよい。

なお、ここに示した引張強度と圧縮強度の関係式は、式(8)に示す関係式と一致していないが、これは若材齢時での精度を重視したためである。

$$f'_c(t) = \frac{t}{a+bt} d(i) f'_{ck} \quad (7)$$

$$f_{tk}(t) = c \sqrt{f'_c(t)} \quad (8)$$

ここに、

$f'_c(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

$f_{tk}(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリートの引張強度 (N/mm²)

f'_{ck} : コンクリートの設計基準強度 (N/mm²)

t : 材齢 (日)

i : 設計基準強度の基準材齢 (日)

a, b : セメントの種類によってばらつくが、表 2-8 を標準とする。高炉セメント B 種を用いる場合は、中庸熱ポルトランドセメントと同等の値を用いてもよい。フライアッシュセメント B 種および低熱ポルトランドセメントについては定数を与えられるほどデータが蓄積されていないので、過去の実績を参考にして定めるとよい。

c : コンクリートの乾燥の程度によって異なるが、0.44 を基準とする。

d : 材齢 28 日に対する材齢 91 日の強度の増加率であり、 $d(28)$ は表 2-8 を

基準とする。また、セメントの種類によらず、 $d(91)=1$ とする。

表 2-8 式(7)の定数 a, b, d の値

セメントの種類	a	b	d(28)
普通ポルトランドセメント	4.5	0.95	1.11
中庸熱ポルトランドセメント	6.2	0.93	1.15
早強ポルトランドセメント	2.9	0.97	1.07

b) 日本コンクリート工学協会の定める引張強度

2008 年に日本コンクリート工学協会より改定されたマスコンクリートのひび割れ制御指針⁵⁾では、コンクリートの引張強度を以下のように定めている。

コンクリートの引張強度は、材齢、温度依存性を考慮できる式(9)によって評価するのを基準とする。

$$f_t(t_e) = C_1 \times f'_c(t_e)^{C_2} \quad (9)$$

ここに、

$$\begin{aligned} f_t(t_e) &: \text{引張強度 (N/mm}^2\text{)} \\ f'_c(t_e) &: \text{圧縮強度 (N/mm}^2\text{)} \\ C_1, C_2 &: \text{係数} \end{aligned}$$

コンクリートの引張強度は、式(9)によって求める。式(9)中の係数は $C_1=0.13$ および $C_2=0.85$ を基準とする。これらの係数は、水中養生供試体に基づいて定めたものであるため、水中養生と同等の養生ができない場合には、適切に修正しなければならない。特に、高炉セメントやフライアッシュセメントのような混合セメントの場合には、養生の良否が引張強度の発現に敏感に影響を与えるので、養生条件によっては引張強度を適切に低減することが必要である。

コンクリートの引張強度は、式(9)によらず、信頼できる資料、または割裂引張強度試験によって求めてもよい。ただし、これらのコンクリートの引張強度は、有効材齢の関数として扱う。

(5) ヤング係数およびクリープ

a) 土木学会の定めるヤング係数³⁾

2007 年に制定された土木学会標準示方書設計編では、温度応力を計算するためのコンクリートの有効ヤング係数を以下のように取り扱うよう定めている。

温度応力を計算するためのコンクリートの有効ヤング係数は、材齢や乾燥状態などの影響を考慮して定めるのがよい。

温度応力は、構造物中の温度勾配、拘束体および被拘束体の剛比、コンクリートの不可

逆の剛性変化などによってその大きさが定まるので、硬化途上の被拘束体コンクリートの力学的性質と体積変化を逐次応力解析で評価する必要がある。諏訪の進行に伴う剛性の変化とクリープに伴う応力緩和の両者を平均的に扱う方法として、被拘束体コンクリートの断面内における平均ヤング係数にクリープ、リラクセーション等による剛性低下を考慮した有効ヤング係数を用いて、温度応力計算を行う方法が提案されている。被拘束体コンクリートのヤング係数は材齢の経過に伴って増大する。また、配合によっても影響される。同時に若材齢時においては、コンクリートのクリープあるいはリラクセーションによる応力緩和は顕著である。

既往の研究成果によれば、材齢 28 日に荷重が作用する場合に比べて材齢 2 日で荷重が作用する場合には、クリープ係数が 1.5~2.0 倍大きくなることが報告されている。また、コンクリートの温度が高く保たれている場合にも、クリープ係数は増大する。これらの諸点を考慮し、有効ヤング係数を設定する方法としては、積算温度に基づいて定めた圧縮強度からヤング係数を推定し、対応する材齢におけるクリープあるいはリラクセーションを考慮してヤング係数を低減する簡易法が一般的に用いられている。この場合、クリープ特性は圧縮、引張ともに同じ特性となる。

有効ヤング係数の近似値を簡便に求めたいときには、式(10)を用いてもよい。ただし、設計基準強度が 50N/mm^2 を超えるコンクリートのクリープ特性については現状では不明な点も多いので、別途クリープ試験当を実施して定めることが望ましい。

$$E_e(t) = \varphi(t) \times 4.7 \times 10^3 \sqrt{f'_c(t)} \quad (10)$$

ここに、

$$\begin{aligned}
 E_e(t) &: \text{材齢 } t \text{ 日における有効ヤング係数度 (N/mm}^2\text{)} \\
 \varphi(t) &: \text{温度上昇時におけるクリープの影響が大きいことによるヤング係数の} \\
 &\quad \text{補正係数} \\
 &\quad \left\{ \begin{array}{l} \text{材齢 3 日まで } \varphi = 0.73 \\ \text{材齢 5 日以降 } \varphi = 1.0 \\ \text{材齢 3 日から 5 日までは直線保管してもよい。} \end{array} \right. \\
 f'_c(t) &: \text{式(9)による材齢 } t \text{ 日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

b) 日本コンクリート工学協会の定めるヤング係数

2008 年に日本コンクリート工学協会より改定されたマスコンクリートのひび割れ制御指針⁵⁾では、コンクリートのヤング係数を以下のように定めている。

コンクリートのヤング係数は、材齢、温度依存性等を考慮できる式(11)によって評価するのを標準とする。

$$E_c(t_e) = C_1 \times f'_c(t_e)^{C_2} \quad (11)$$

ここに,

$E_c(t_e)$: ヤング係数 (N/mm²)

$f'_c(t_e)$: 圧縮強度 (N/mm²)

C_3, C_4 : 係数

コンクリートのヤング係数は、圧縮強度の関数である式(11)を用いる。なお、式(11)中の係数は $C_3=6300$ および $C_4=0.45$ を標準とするが、信頼できる資料、または実験によって係数を求めてもよい。コンクリートのポアソン比は 0.2 を標準とするが、信頼できる資料、または実験によって係数を求めてもよい。

b) JCI の定めるクリープの影響⁵⁾

JCI では、コンクリートのクリープの影響を以下のように取り扱うよう定めている。

コンクリートのクリープの影響は、ヤング係数 $E_c(t_e)$ に低減係数を乗じた有効ヤング係数を用いて評価するのを標準とする。その場合には式(12)を用いる。

$$E_e(t_e) = \varphi(t_e) \times E_c(t_e) \quad (12)$$

ここに,

$E_e(t_e)$: 有効材齢 t_e における有効ヤング係数 (N/mm²)

$\varphi(t_e)$: 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

最高温度に達するまでの有効材齢 : $\varphi(t_e)=0.42$

最高温度に達する有効材齢+1 有効材齢 以降 : $\varphi(t_e)=0.65$

最高温度に達する有効材齢後の 1 有効材齢までは直線補間する。

(6) 自己収縮ひずみ

b) JCI の定める自己収縮ひずみ

2008 年に日本コンクリート工学協会より改定されたマスコンクリートのひび割れ制御指針⁵⁾では、コンクリートの自己収縮ひずみを以下のように取り扱うよう定めている。

コンクリートの自己収縮ひずみは、使用するセメントの種類、水セメント比および温度履歴を考慮した以下に示す式(13)、式(14)および(15)から求めるのを標準とする。以下の式は普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を用いた、水セメント比が 30~50% のコンクリートに温度履歴を与えた自己収縮ひずみの測定値に基づき、2007 年版示方書(設計編)³⁾の式に一部修正を加えて、定型化したものである。このため、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種以外のセメントについては、自己収縮ひずみの推定精度が低下する恐れがある。

$$\varepsilon_{sh}(t_e) = \eta_c \varepsilon_{sh,\infty} \beta_{sh}(t_e) \quad (13)$$

ここに,

$\varepsilon_{sh}(t_e)$: 有効材齢 t_e における自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

η_c : セメントの種類が自己収縮ひずみの終局値に及ぼす影響を表す係数

$\varepsilon_{sh,\infty}$: 式(14)に示す自己収縮ひずみの終局値 ($\times 10^{-6}$)

$\beta_{sh}(t_e)$: 式(15)に示す自己収縮ひずみの進行特性を示す関数

※高炉セメントの場合

$$\varepsilon_{sh,\infty} = 2350 \times \exp\{-5.8(W/C)\} + 80 \times [1 - \exp\{-1.2 \times 10^{-6} \times (t_{\max} - 20)^4\}]$$

$$(20^\circ\text{C} \leq T_{\max} \leq 70^\circ\text{C}) \quad (14)$$

$$\beta_{sh}(t_e) = 1 - \exp\{-a_{sh}(t_e - t_{e, \text{set}})^{b_{sh}}\} \quad (15)$$

式(15)の a_{sh} および b_{sh} は自己収縮ひずみの進行特性を表す係数であり、セメントの種類により、式(16)から求める。

※高炉セメントの場合

$$a_{sh} = 3.7 \times [\exp\{-6.8 \times (W/C)\}] \times (0.060T_{\max} - 0.20)$$

$$b_{sh} = 0.25 \times [\exp\{2.5 \times (W/C)\}] \times (-0.0075T_{\max} + 1.15) \quad (16)$$

ここに,

W/C : 水セメント比

T_{\max} : コンクリートの最高温度 ($^\circ\text{C}$)

2.3 断熱温度上昇試験に関する研究

(1) 収縮を抑制した高炉セメントB種を用いた低発熱コンクリートの特性と実構造物への適用

倉内氏ら²⁾は高炉セメントの粉末度と化学成分を JIS に適合する範囲で調整した低発熱・収縮抑制型高炉セメント B 種を用いたコンクリートについて、その施工性能、発熱特性、強度・弾性特性とマスコンクリート構造物を想定した養生温度履歴下での自己収縮特性を、室内実験により確認することで、マスコンクリート構造物への適用性を評価している。

a) はじめに

高炉セメント B 種セメントを用いたコンクリートの CO₂ 排出量は普通ポルトランドセメ

ントを用いた場合の 60%程度であり環境負荷低減が期待できる。また、高炉セメントは一般に、塩化物イオンの固定化能力に優れており、かつアルカリ骨材反応の抑制に有効であることから、コンクリート構造物の耐久性向上に大きく寄与できる材料である。しかしながら、原料の性質や施工条件によっては、普通ポルトランドセメントに比べて発熱量が大きくなったり自己収縮が大きくなったりすることで、ひび割れ抵抗性が小さくなる場合があるという問題点も知られている⁶⁾。

高炉セメントは国内のセメント全使用量の約 25%を占める汎用セメントであり、産業廃棄物を原料の一部として利用するグリーン調達品であることから、地球環境保護の観点からその利用の拡大がさらに期待されるものであり、ユーザーとして、高炉セメントを使用したコンクリートの高性能化を進めることの意義は大きいと考えている。

本研究では、高炉セメントの粉末度と化学成分を JIS に適合する範囲で調整した低発熱・収縮抑制型高炉セメント B 種を用いたコンクリートについて、その施工性能、発熱特性、強度・弾性特性とマスコンクリート構造物を想定した養生温度履歴下での自己収縮特性を、室内実験により確認することで、マスコンクリート構造物への適用性を評価した。

低発熱・収縮抑制型の高炉セメント B 種 (MKCⅡおよび MKCⅢ) のマスコンクリートへの適用性を評価することを目的として、表 2-9 に示す 4 種類の配合を対象に、発熱特性、初期材齢から長期材齢にわたる強度発現・弾性特性、マス養生温度履歴下での自己収縮特性を測定した。

対象としたコンクリートは、スランプ 12cm の水密コンクリート (W/C:55%) である。表 2-9 に示すように、MKCⅡ・MKCⅢでは、所定のスランプを得るための単位水量が BB1・BB2 の場合より 3kg/m^3 減少した。

コンクリートの発熱特性およびマス養生温度履歴下での自己収縮特性は、図 2-5 に示す 1 辺 450mm の断熱マスブロックの中心部の温度履歴と体積変化を測定することにより評価した。断熱温度上昇特性は、測定した中心部の温度履歴から容器の放熱特性を考慮して推定した。自己収縮特性は、中心部で測定された全ひずみからコンクリートの線膨張成分を差し引いて算出した。コンクリートの線膨張係数は、材齢 35 日経過後の $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 供試体(中心部に埋込み型ひずみ計を設置)に温度履歴を与えることにより測定している。測定値は表 2-9 に示すものである。

表 2-9 コンクリート配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					線膨張係数 (×10 ⁻⁵)
			W	C	S	G	Ad	
			BB1	55.0	46.0	162	295	
BB2	55.0	46.0	162	295	832	1012	2.95	0.62
MKC II	55.0	46.4	159	289	845	1012	2.89	0.60
MKC III	55.0	46.2	159	289	839	1012	2.89	0.57

Gmax:20mm,スランプ:12cm,(目標SL:14cm)
 空気量:4.5%(目標空気量:5.5%)
 S:山砂(君津)+石灰石砕砂(上磯),G:石灰石砕石(上磯),
 Ad:AE減水剤標準型

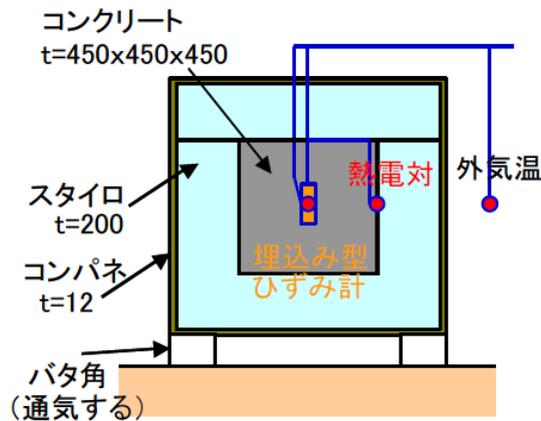


図 2-5 断熱マスブロック

b) 実験内容

強度・ヤング係数の経時変化は、材齢 6 時間から材齢 91 日にわたって測定した。長期材齢でのヤング係数は JIS による方法により測定したが、練上がり 6 時間から 1 日までのヤング係数は、載荷板間の長さ変化量から算出した。またこの時、供試体の側面（高さ 1/2）でのはらみ量からポアソン比を算出した。

c) 発熱特性

図 2-6 には各セメントを使用した場合のマスブロック中心部の温度履歴を、図 2-7 には、この温度履歴から推定した断熱温度上昇特性を示す。マスブロックの中心部の最大温度は、一般の高炉 B 種では 60°C 以上となるが、MKC II では 56°C、MKC III では 52°C と最大温度の低下が認められる。これを断熱温度上昇式で表した場合には、終局の断熱温度上昇量が、一般の高炉 B 種に比較して、MKC II では 15% 程度、MKC III では 30% 程度小さくなる。MKC の発熱抑制の効果が明らかである。

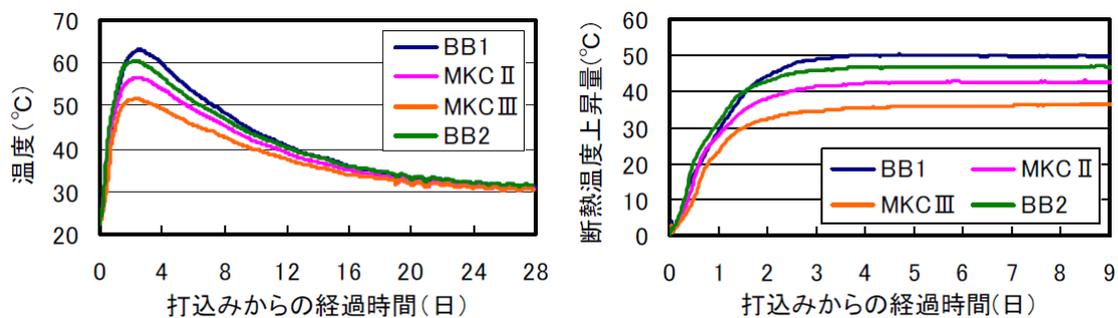


図 2-6 中心部の温度履歴図 2-7 断熱温度上昇特性

表 2-10 断熱温度上昇特性の推定値

	BB1	MKC II	MKC III	BB2
Q_{∞}	50.4	43.1	36.3	47.3
γ	0.90	1.10	1.10	1.15
β	1.30	1.10	1.20	1.15
t_0	0.00	0.03	0.05	0.00
$Q(t) = Q_{\infty} (1 - \text{EXP}(-\gamma (t - t_0)^{\beta}))$				

2.4 引張強度試験に関する研究

(1) 直接引張試験で測定したコンクリートの引張ヤング係数と引張強度

青木氏ら⁷⁾は、供試体作成方法の異なる2種類の簡易型直接引張試験方法を用いてコンクリートの引張ヤング係数と圧縮ヤング係数、直接引張強度と割裂引張強度を比較している。載荷方向と平行に打設する通常の圧縮供試体と直行に打設する圧縮供試体を用いて打接方向の違いによる影響も調べている。

a) 直接引張試験で測定したコンクリートの引張ヤング係数と引張強度

供試体作成方法の異なる2種類の簡易型直接引張試験方法を用いてコンクリートの引張ヤング係数と圧縮ヤング係数、直接引張強度と割裂引張強度を比較した。載荷方向と平行に打設する通常の圧縮供試体と直行に打設する圧縮供試体を用いて打接方向の違いによる影響についても検討を行った。

b) 引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の関係

土木学会や建築学会などの既往の見解より、コンクリートの引張ヤング係数と圧縮ヤング係数については、同等として取り扱うことができるものの、その真偽性については、統一的な見解が得られていない。

試験から、表 2-11 の結果が得られた。表中の割線圧縮ヤング係数 = (圧縮強度の 1/3 点の応力 - 圧縮ひずみ 50 μ 時点の応力) / (圧縮強度の 1/3 点のひずみ - 50 μ) である。表より、各供試体の平均値は同等であり、本実験の範囲内では打設方向の違いによる圧縮ヤング係数の相違は生じないと判断される。

表 2-11 打設方向の異なるコンクリートの圧縮ヤング係数の比較

打設方向	供試体 No.	割線圧縮ヤング係数(N/mm ²)	平均圧縮ヤング係数(N/mm ²)
載荷方向に平行	1	35,951	34,806
	2	32,988	
	3	33,970	
	4	35,033	
	5	36,089	
載荷方向に直行	1	36,569	34,709
	2	33,795	
	3	33,308	
	4	34,728	
	5	35,147	

この結果から、直接引張試験により得られた引張ヤング係数と圧縮試験により得られた圧縮ヤング係数を直接比較することができる。

試験で得られた引張ヤング係数と圧縮ヤング係数を表 2-12 に示す。なお、表中の割線引張ヤング係数 = (引張強度の 1/3 点の応力 - 引張ひずみ 10 μ 時点の応力) / (引張強度の 1/3 点のひずみ - 10 μ) である。直接引張試験により得られた割線引張ヤング係数は、圧縮試験で求めた割線圧縮ヤング係数よりも 10% 大きかった。

従来同等と扱われてきた割線圧縮ヤング係数の算出に用いる実験値の応力レベルの面から考察する。表 2-12 に、圧縮試験における初期圧縮ヤング係数 (= 応力が約 1.3N/mm² に達した時点での応力 / その時点のひずみ) を示す。これと割線引張ヤング係数を比較すると、初期圧縮ヤング係数の方が若干小さいものの、両者の値はほぼ同等になる。このことから、圧縮と引張の違いはあっても、同じ応力レベルの実験地から算出したヤング係数は一致する。すなわち、コンクリートの圧縮ヤング係数と引張ヤング係数は本来同等であるといえる。割線圧縮ヤング係数が 10% ほど小さくなる理由は、その算出に際し、割線引張ヤング係数よりも高い応力レベルの実験値を用いたためだと考えられる。

表 2-12 引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の比較

供試体 No.	シリーズ I			シリーズ II		
	割線引張ヤング係数(N/mm ²)	割線圧縮ヤング係数(N/mm ²)	初期圧縮ヤング係数(N/mm ²)	割線引張ヤング係数(N/mm ²)	割線圧縮ヤング係数(N/mm ²)	初期圧縮ヤング係数(N/mm ²)
1	32,634	28,571	31,003	35,789	31,023	30,004
2	32,971	28,726	31,847	32,384	32,283	35,828
3	33,291	28,738	29,241	31,556	31,946	36,324
4	29,625	28,380	33,741	35,740	30,686	36,821
5	30,882	26,976	27,693	37,570	33,876	30,560
6	33,076	27,541	31,529	37,242	37,901	37,715
7	30,797	28,775	31,768	33,590	32,177	31,288
8	31,706	29,412	32,337	37,976	32,095	29,819
9	29,654	27,810	29,033	34,590	31,219	36,710
10	34,297	29,507	30,449	32,639	28,449	29,797
平均	31,893	28,399	30,864	34,908	32,166	33,487

c) 直接引張強度と割裂引張強度の関係

直接引張試験により得られた直接引張強度と割裂引張強度比較を表 2-13 に示す。表中の直接引張強度は供試体破断時までに経験した最大応力を破断面の断面積で除した値である。直接引張試験により得られた直接引張強度は、割裂引張強度よりも約 15%大きかった。直接引張強度が割裂引張強度よりも大きくなる理由について、割裂引張供試体の載荷面に側方より生じる圧縮応力が、本来の引張強度を低下させている。

表 2-13 直接引張強度と割裂引張強度の比較

供試体 No.	シリーズ I		シリーズ II	
	直接引張強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	直接引張強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
1	2.89	2.58	3.18	2.42
2	2.90	2.55	2.87	2.52
3	2.89	2.51	3.36	2.74
4	2.59	2.11	3.16	2.72
5	3.01	2.64	3.04	2.50
6	2.94	2.45	3.16	2.68
7	2.68	2.63	3.04	2.49
8	2.75	2.45	3.16	2.59
9	3.06	2.40	3.22	2.37
10	2.64	2.53	3.17	2.34
平均	2.84	2.49	3.14	2.54

※網掛けの数字は試験区間外で破断した供試体

d) まとめ

得られた知見を以下にまとめる。

- ① 載荷方向に平行・直行にコンクリートを打設した供試体の圧縮ヤング係数は同等であ

り、打設方向の違いによる圧縮ヤング係数の相違は生じなかった。

- ② 簡易型直接引張試験により測定したコンクリートの割線引張ヤング係数は、圧縮試験により測定した割線圧縮ヤング係数よりも、約 10%大きかった。
- ③ 割線ヤング係数は、圧縮試験における初期圧縮ヤング係数とほぼ等しかった。このことから、割線圧縮ヤング係数が 10%程度小さくなる理由は、その算出に際し、割線引張ヤング係数よりも高い応力レベルの実験値を用いているためである。コンクリートの圧縮ヤング係数と引張ヤング係数は本来同等である。
- ④ 簡易型直接引張試験により測定したコンクリートの直接引張強度は、割裂引張強度より約 15%大きかった。この理由として割裂引張供試体の載荷面に側方より生じる圧縮応力が、本来の引張強度を低下させることが考えられる。

(2) 若材齢時コンクリートの引張特性

セメントの水和熱に起因するマスコンクリートの温度ひび割れは、部材コンクリートの引張応力がその引張強度を超えることによって生じる。米山氏ら⁸⁾は、温度ひび割れ防止ではなくて、温度ひび割れ制御の観点からすれば、これら引張王旅行と引張強度を正しく算定し、温度ひび割れの発生確率を的確に予測することが重要となるとし、若材令時のコンクリートの物性についてとりわけ、引張強度及び引張応力下の有効ヤング係数について、性状を明らかにすることを実験的に試みている。

a) 使用材料

- ① セメント：N社製普通ポルトランドセメントを使用した（表 2-14 参照）。
- ② 細骨材：胎内川産，比重 2.57，吸水率 1.86%，F. M. 2.57 の川砂を使用した。
- ③ 粗骨材：胎内川産，比重 2.59，吸水率 1.67%，の川砂利を，5～15mm60%，15～20mm40% の割合で使用した。
- ④ 減水剤：リグニンスルホン酸塩とポリオール複合体を主成分とするものを使用した。
- ⑤ AE 剤：高アルキルカルボン酸系の界面活性剤を主成分とするもの（陰イオン系）を使用した。

b) セメントの品質

表 2-14 セメントの品質

比重	比表面積(cm ² /g)	凝結			安定性	圧縮強さ(kgf/cm ²)				酸化マグネシウム (%)	二酸化硫黄 (%)	強熱減量 (%)	塩素 (%)	全アルカリR2O (%)
		水量 (%)	終結 (h-min)	始発 (h-min)		1d	3d	7d	28d					
3.16	3180	27.8	2-21	3-29	良	—	148	252	416	1.0	1.9	1.0	0.005	0.63

c) 供試体

- ① 圧縮供試体：φ 10×20cm の円柱供試体である。
- ② 割裂引張供試体：φ 15×約 20cm の円柱供試体である。
- ③ 純引張供試体：図 2-8 に示す如く、その中央に 10×10×30cm の平行部を有する全長 84cm の供試体である。その両端には圧縮と引張のいずれの載荷も可能な載荷板がアンカーボルト

トで固定されている。

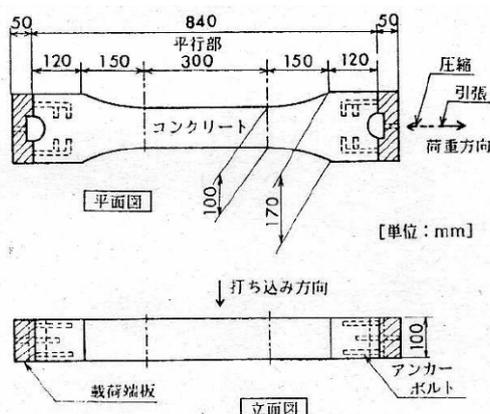


図 2-8 純引張供試体の形状・寸法

d) 供試体の作成

① 配合及び練り混ぜ

配合は表 2-15 に示すもの 1 種類とした。そのスランプ及び空気量は 8 cm 及び 4 % を目標としたが、練り上がり時のそれらの値及びコンクリート温度は表 2-15 に示す範囲であった。

表 2-15 コンクリートの配合

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スランプ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	練りあがり 温度 (°C)	V/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				減水剤 原液 (ml/m ³)	AE剤2% 积液 (ml/m ³)
						W	C	S	G		
25	7.9~9.7	3.2~6.8	10.8~18.8	50	42	150	300	722	1074	750	300~900

② 打ち込みおよび養生

打ち込み時の締め固めには棒状内部振動機を用いた。

圧縮供試体は材令 1 日でキャッピングを行い、試験直前まで湿布養生とした。なお、材令 1 日で試験を行う供試体は材令 6 時間でキャッピングを行い、試験直前に脱型した。

その他の供試体は材令 1 日で脱型し、その後試験直前（割裂引張供試体）または試験終了（純引張供試体）まで湿布養生とした。

各供試体を、打ち込み直後から試験直前（圧縮供試体、割裂引張供試体）または試験終了（純引張供試体）まで、20°Cの恒温室に保管した。

d) 载荷及びひずみ測定

① 圧縮供試体

JIS A 1108-197「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従って圧縮強度を求めた。この際、コンプレッソメーターを用いて同時にひずみ測定も行い、圧縮時の割線ヤング係数を求めた。

② 割裂引張供試体

JIS A 1113-1976「コンクリートの引張強度試験方法」に従って割裂引張強度を求めた。

③ 純引張供試体

この供試体に使用した荷重装置は、スプリングを介してP C鋼棒をジャッキで引っ張ることによって、供試体に引張応力を導入する機構のものである。この場合の導入応力制御はP C鋼棒に貼付した電気抵抗線型ひずみゲージでおこなった。

供試体のひずみ測定はその平行部で行い、標点距離を平行部の長さと同じ 300mm とし、この間の長さを感度 $2000 \times 10^{-6}/\text{mm}$ の変位計で測定した。

供試体への荷重方法は、図 2-9 に示す如く、次の 3 通りとした。

- (a) 静的純引張：所定材令で供試体を破断するまで単純に引っ張る方法。
- (b) 持続純引張：所定材令から毎日 1 回ほぼ定時刻に供試体を引っ張り 25×10^{-6} または 50×10^{-6} の弾性的引張ひずみを加算して行く方法。この場合、前日の荷重終了時から当日の荷重開始直前まで（この間、引張応力は一定）の伸びひずみはクリープひずみとなる。
- (c) 持続圧縮純引張：材令 1 日目に 5 kgf/cm^2 または 10 kgf/cm^2 の圧縮応力を供試体に導入し、1 日間または 4 日間持続する。その後、前記持続純引張と同様の方法で、圧縮応力を減少させ、供試体を引っ張る方法。

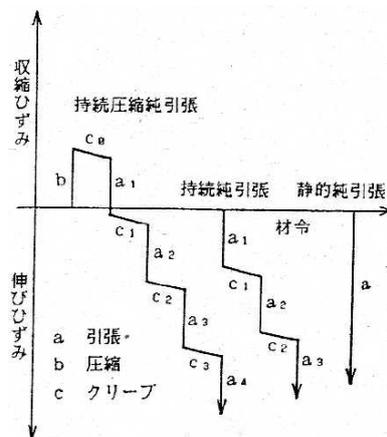


図 2-9 荷重パターン

e) 自由膨張

湿布養生し、床に立てておいた純引張供試体は、材令 1 日から 14 日までに 30×10^{-6} 程度の自由膨張ひずみを生じた（図 2-10 参照）。この現象は温度ひびわれの発生を抑制する方向に働くものと考えられる。

なお、後述の引張有効ヤング係数は、この自由膨張ひずみを差し引いたひずみを用いて計算されている。

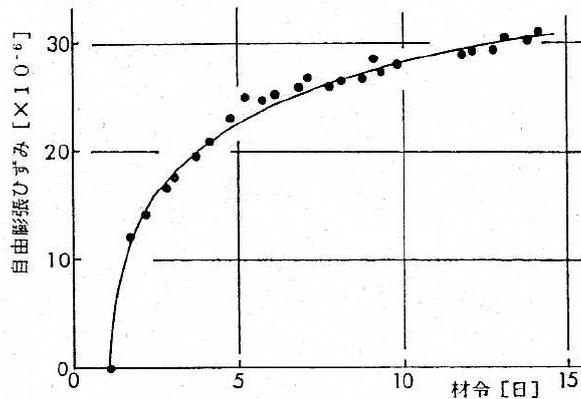


図 2-10 自由膨張ひずみ

f) 圧縮強度および圧縮割線ヤング係数

材令の経過に伴うコンクリートの圧縮強度 (f_c) および強度の 1/3 の応力点を用いた圧縮割線ヤング係数 (E_c) の発現の様子は図 2-11 に示す如くであった。

なお、以下においては、材令の経過に伴うコンクリートの成熟度を圧縮強度で表すことにする。これは、部材コンクリートの引張強度などを評価するのに、一般に圧縮強度から推定する方法が多く用いられるためである。

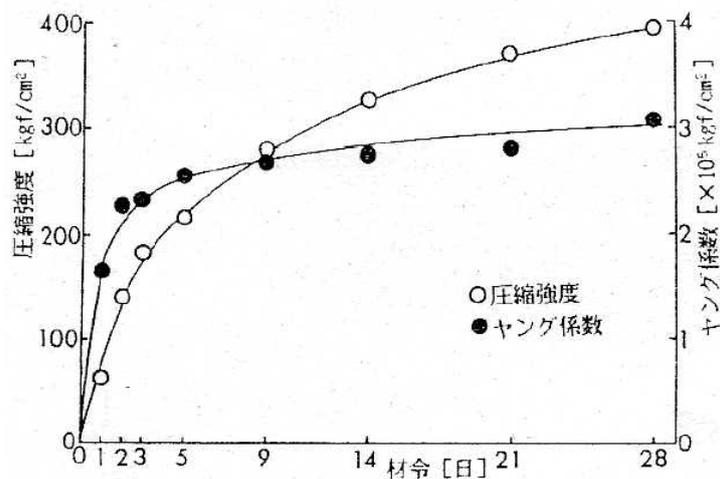


図 2-11 圧縮強度・圧縮割線ヤング係数の発現

g) 引張強度

圧縮強度の発現に伴う静的純引張強度 (f_{tp}) および割裂引張強度 (f_{ts}) の増大の様子は図 2-12 に示す如くであった。この図によれば、圧縮強度が約 300kgf/cm^2 より小さい場合には f_{ts} が f_{tp} より小さくなり、圧縮強度が約 300kgf/cm^2 より大きい場合には逆に f_{ts} の方が大きく

なった。

実験に用いた供試体の形状や寸法が割裂と純引張では異なるけれども、上記の現象は次のように考えられる。すなわち、低強度領域では、弾塑性的コンクリートを完全弾性体として扱うことによる矛盾が卓越して f_{tp} の方が小さくなること、などが考えられる。

したがって、 f_{tp} を基準とした場合、温度ひび割れ指数の算定に際し、 f_{ts} を用いると、低強度領域では過大に評価する恐れがあるものと思われるとしている。

なお、図 2-12 には、圧縮強度から近似的に引張強度を求める土木学会の式の場合も併示する。

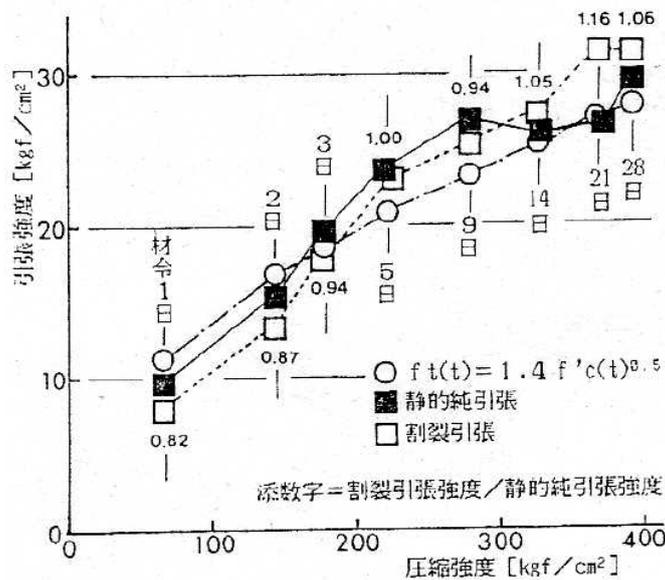


図 2-12 圧縮強度と引張強度の関係

f) 引張割線ヤング係数

コンクリート部材内の温度応力の算定には、有効ヤング係数を用いることが多いが、クリープひずみと割線ヤング係数を個別に評価して算定することも考えられる。

静的純引張載荷時の強度の 1/3 の応力点を用いた割線ヤング係数 (E_c) と 2-11 で示した圧縮ヤング係数 (E_c) との関係を図 2-13 に示す。この図から両者は同等とみなせる。

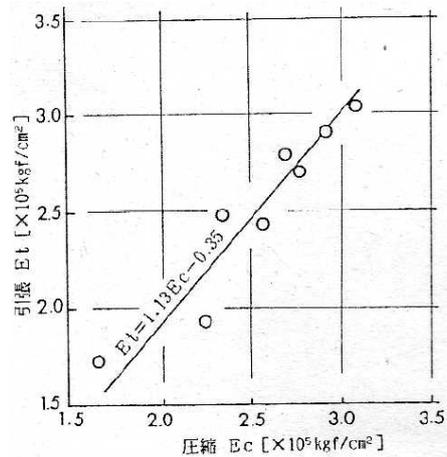


図 2-13 圧縮と引張の割線ヤング係数

h) 引張有効ヤング係数

純引張供試体から得た引張有効ヤング係数 (E_{te}) はクリープひずみも組入れた割線ヤング係数である。持続純引張の場合、応力-ひずみ線図における原点と書く材令のクリープひずみ終了点を結ぶ直線から E_{te} を求めた。一方、持続圧縮純引張の場合は、圧縮時と引張時ではクリープ性状が異なるとされているので、応力が圧縮から引張に転じた点を原点とした。ただし、最初の引張クリープひずみを得るための持続引張応力がそのクリープひずみ終了材令における静的純引張強度の 10% 以下となる場合の E_{te} は採用しなかった。この理由は、計算に用いる応力とひずみの値が小さいために、自由膨張ひずみを補正する差異の誤差や圧縮応力の開放に伴う遅延弾性もどりの誤差が大きく影響し、 E_{te} の計算結果をばらつかせるためである。

① 持続純引張の場合

圧縮強度 (f_c) と E_{te} の関係を図 2-14 に示す。なお、図には土木学会の近似式から得られた関係も併示した。

(a) 载荷開始時の f_c が大きいほど E_{te} は大きな値となったが、载荷後の材令の経過に伴って f_c が大きくなっても E_{te} はほとんど増大しなかった。この理由としては、強度の経時的増加に伴うヤング係数の増大と応力レベルの上昇に伴うヤング係数の減少とが相殺しあうことが考えられるとしている。このことは、部材コンクリートの E_{te} は応力が圧縮から引張に転じた時点における値に支配されているものと思われる。

(b) 応力レベルの相違を考慮せずに、図中の結果全てをひとつの直線で近似すると次のようになった。

$$E_{te} = (0.0038 f_c + 0.67) \times 10^5 \quad [\text{kgf/cm}^2]$$

$$f_c : 140 \sim 270 \quad [\text{kgf/cm}^2]$$

(c) 割線ヤング係数 (EC) に対する E_{te} の比率 (E_{te}/EC) は、この持続純引張の場合約 50%~70% であった。

② 持続圧縮純引張の場合

持続純引張の場合と同様に、 f_c と E_{te} の関係を図 2-14 に示す。

(a) 前記持続純引張の場合の(a)の現象がみられるほか、この場合は載荷速度の相違の影響が現れ、引張載荷速度が大きいと E_{te} が小さくなることが認められた。このことは、応力反転の起こる部材コンクリートの E_{te} は引張応力の増大速度に影響されることを示唆しているものと思われる。

(b) 得られた結果を引張載荷速度別に分けて、 f_c と E_{te} の関係を直線近似すると次のようになった。

載荷速度 25×10^{-6} /日

$$E_{te} = (0.0035f_c + 0.86) \times 10^5 \quad [\text{kgf/cm}^2]$$

$$f_c : 180 \sim 280 \quad [\text{kgf/cm}^2]$$

載荷速度 50×10^{-6} /日

$$E_{te} = (0.0025f_c + 0.84) \times 10^5 \quad [\text{kgf/cm}^2]$$

$$f_c : 180 \sim 260 \quad [\text{kgf/cm}^2]$$

(c) E_{te} が載荷速度に影響されることから、当然 E_{te}/E_C も載荷速度の影響を受ける。

E_{te}/E_C は、載荷速度 25×10^{-6} /日の場合は約 60~70%の範囲であり、 50×10^{-6} /日の場合は約 50~60%の範囲であった。

(d) 持続圧縮応力の大小が E_{te} に及ぼす影響を、図 2-24 及び図 2-25 の結果から判断することはできない。しかしながら、その影響は応力反転時期や載荷速度による影響よりも小さいものと思われる。

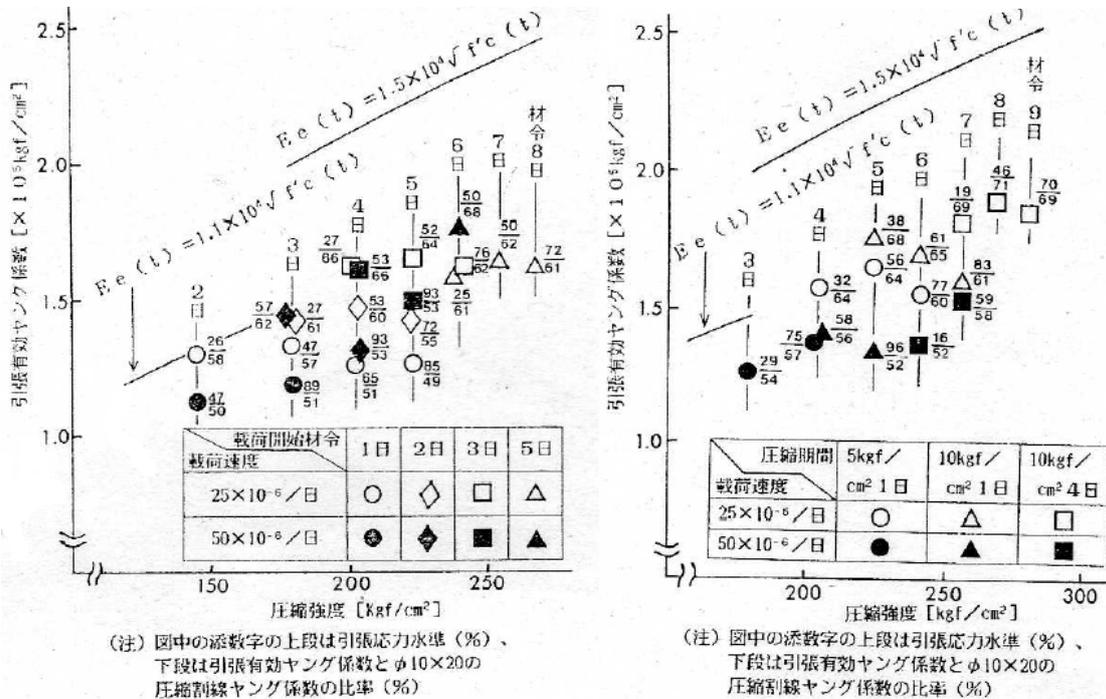


図 2-14 引張有効ヤング係数 (持続純引張載荷/持続圧縮純引張載荷)

i) 結論

若材令コンクリートの引張強度及び有効ヤング係数について、主として純引張供試体を用いて行った実験の範囲内で次の結論が言えるものと思われる。

- ① 湿布養生であっても、コンクリートは若材令において、ある程度の膨張現象を起こす。
- ② コンクリートの圧縮強度が 300kgf/cm^2 を超える領域においては、その引張強度を割裂引張強度で求めると、引張強度を過大評価する恐れがある。
- ③ コンクリートの圧縮強度が $60\sim 400\text{kgf/cm}^2$ の範囲では、その引張割線ヤング係数は圧縮割線ヤング係数にほぼ等しい。
- ④ 引張有効ヤング係数は、引張応力の発生する時点におけるコンクリートの成熟度に強く支配される。
- ⑤ 引張応力の経時的増大過程にあつては、引張有効ヤング係数の経時変化は少ない。
- ⑥ 引張有効ヤング係数は、圧縮履歴を有する場合、応力反転過程における応力変化速度に影響させる。
- ⑦ 引張有効ヤング係数と圧縮割線ヤング係数の比は、応力判定過程における応力変化速度によって異なるが、大体 $50\sim 70\%$ 程度である。

2.5 一軸拘束試験に関する研究

(1) Thermal Stress Testing Machine

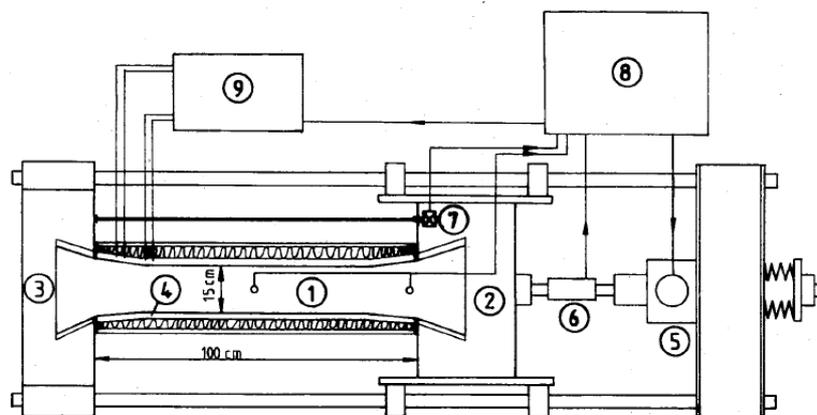
a) 試験機の仕様

水和熱に伴う拘束応力を研究するために、TSTM(Thermal Stress Testing Machine)と呼ばれるひび割れ試験機を初めに開発したのはミュンヘン工科大学の R.Springenschmid⁹⁾である。R.Springenschmidはこの新しい試験機開発の目的を、岩盤とコンクリートの接合面付近におけるダムやその他のマスコンクリートの拘束状態を模擬するためだとしている。

弱材齢時のコンクリート応力進展とリラクセーション特性の理論的及び実験的測定は、試験方法が確立されていなかったために十分な状態ではなかった。そこで温度応力及び温度ひび割れの室内実験装置としてTSTMを開発・提案した。実構造物でのコンクリート内部の実際の温度履歴や拘束条件を設定することにより試験装置内で実構造物を再現し、コンクリートのひび割れ予測や材料評価を可能にした。

この試験機は、全長が 2.6m であり可動式のクロスヘッドはモーター(精度 $0.1\mu\text{m}$)によって動かすことができる。この可動端部にはロードセルが接続されており、制御と荷重の計測が同時に行われる。コンクリート供試体は全長 1m 、幅 150mm 、高さ 150mm であり、両端は dovetail(鳩の尾)形をしている。変位は差動トランス型の変位計により常時計測されている。制御は、変位計で計測するコンクリートの収縮・膨張に伴う変位を一定値に保つように可動式のクロスヘッドを動かすことで行う。コンクリート供試体の温度は、プログラムされた温度履歴となるように内蔵されたヒーターによって制御され、外気温に左右されにくくするよう供試体は断熱材で覆われている。また、TSTMによる試験を行う上で、試験

機周辺の環境温度は大きな影響を及ぼすため、この TSTM 試験機は環境温度 18°C の一定温度内に置かれている。図 2-15 に TSTM の概要図を示す。



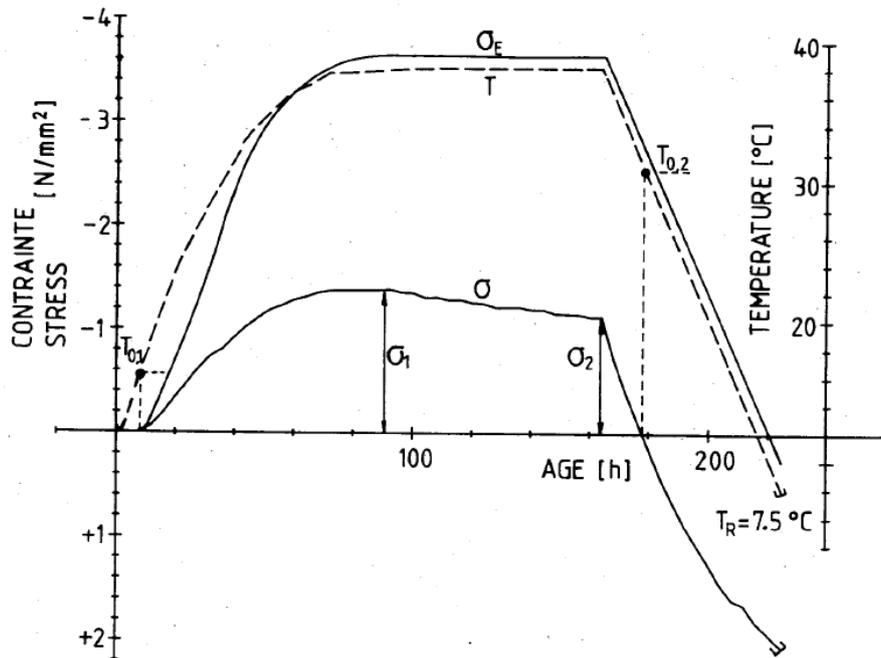
- ① Concrete specimen (コンクリート供試体)
- ② Movable crosshead (可動式クロスヘッド)
- ③ Fixed crosshead (固定式クロスヘッド)
- ④ Temperature regulated mould (温度調節型枠)
- ⑤ Motor and transmission (原動機と変速機)
- ⑥ Dynamometer (動力計)
- ⑦ Length-measuring-system (変位系)
- ⑧ Electronic control and recording units (電気制御と記録部位)
- ⑨ Thermostat (温度自動調節器)

図 2-15 TSTM の概略図

b) 試験結果

このテストで用いられたコンクリートの配合は、低熱ポルトランドセメントを用い、単位セメント量 220kg/m^3 、単位水量 150kg/m^3 であり、使用骨材の最大寸法は 32mm である。また試験が行われる前に打ち込み温度 12°C 、 50l のコンクリートで断熱温度上昇量を算出し、そのデータをもとに高さ 3m の中央部分での断熱温度上昇量および温度進展を算出している。コンクリートは練り上がり温度 12°C で TSTM に打込まれ、その後算出した断熱温度上昇量をもとに温度制御されている。また外気温とコンクリート周りの基礎は 18°C で一定としている。拘束条件はコンクリート供試体の長さに変化が無いように、この試験ではコンクリート供試体の縦方向を完全に拘束している。またコンクリート供試体の含水量も変化が無いようにしている。

TSTM を用いたテストサイクルの典型的な結果として図 2-16 のような測定結果を示す。



T = 温度
 σ = 温度応力
 σ_E = 算出弾性温度応力
 $T_{0,1}$; $T_{0,2}$ = 第1ゼロ応力温度; 第2ゼロ応力温度
 σ_1 = 第1ゼロ応力; 圧縮応力が進展し始める温度
 σ_2 = 第2ゼロ応力; 圧縮応力から引張応力に変化する温度

図 2-16 TSTM を用いた試験結果

c) 得られた知見

ひび割れ発生条件の観点から得られている知見として、セメント種類と混和材の影響を調査するために、同じ骨材・配合でセメントのみが異なる 7 つのケースについて、最高温度、温度上昇中の圧縮応力、リラクセーションの影響を TSTM で評価している。表 2-16 にセメント及びコンクリートの特性を示す。セメントは 7 日間の断熱的な水和発熱の減少に関連してリストアップされている。断熱温度上昇量および温度進展は、各 7 種のセメントで算出された。コンクリートは TSTM に打込まれ、徐々に最高温度に達していったのち、その温度で 72 時間一定となった。そしてコンクリート供試体にひび割れが発生し、縦方向の応力が 0 になるまで 0.5°C/h の速度で冷却された。得られた結果を図 2-17, 2-18, 2-19 に示す。

また、評価に際し、温度下降時に見られる応力がゼロとなる時(second zero-stress)の温度を一つの指標とし、温度上昇時に蓄えられた圧縮応力が温度下降によってキャンセルされた時点の温度が低いほど温度ひび割れに対して耐久性を持つ点に着目している。

以上の結果から、水和発熱による温度ひび割れの危険性を最小限にするには、コンクリ

ートは以下の特性を有する方が良い。

- ①水和発熱による温度上昇が出来るだけ小さいこと
- ②早めの圧縮応力の進展
- ③圧縮応力のリラクセーションの程度が小さいこと
- ④引張応力のリラクセーションの程度が大きいこと
- ⑤引張ひずみ許容量が大きいこと
- ⑥低い熱膨張係数

表 2-16 セメント及びコンクリートの性質

cement		A	B	C	D	E	F	G
type of cement		PZ35F	PZ35Z	PZ35F	PZ(F) ¹	PZ35L-NW ²	HOZ36L-NW ²	HOZ37L-NW ²
SO ₃	m.-%	3.5	2.2	4.0	-	3.2	3.6	2.1
Additives	kind M.-%	-	-	oil-shale-ash 33.0%	fly-ash 33.0%	-	Slag 50.0%	Slag 80.0%
Specific surface (Blaine)	cm ² /g	3112	3033	4960	4519	3286	5060	3978
Initial setting	h/min	2/20	2/42	2/47	3/30	2/00	2/45	5/06
end of setting		3/17	3/35	3/37	4/15	4/50	4/00	5/52
Compressive Strength (DIN1164)	N/mm ²	24.6 43.5 53.3	18.5 34.1 51.8	22.4 36.5 49.5	14.4 28.9 46.3	16.8 31.5 47.5	11.8 23.6 41.3	7.4 22.4 40.8
Flexural Strength 2 d (DIN1164) 7 d 28 d	N/mm ²	5.3 7.6 8.8	4.3 6.3 8.2	3.9 6.0 8.2	3.2 5.4 8.0	3.9 6.6 8.4	2.9 5.1 8.8	2.1 4.7 7.6
Compressive Strength 28 d (DIN1048)+B23	N/mm ²	37.3	33.3	39.2	34.3	37.6	30.7	28.7
Tensile Strength	N/mm ²	2.6	2.2	2.5	1.9	2.2	2.0	2.0
Adiabatic Heat Development	kJ/kg cement	372	342	321	293	288	266	265

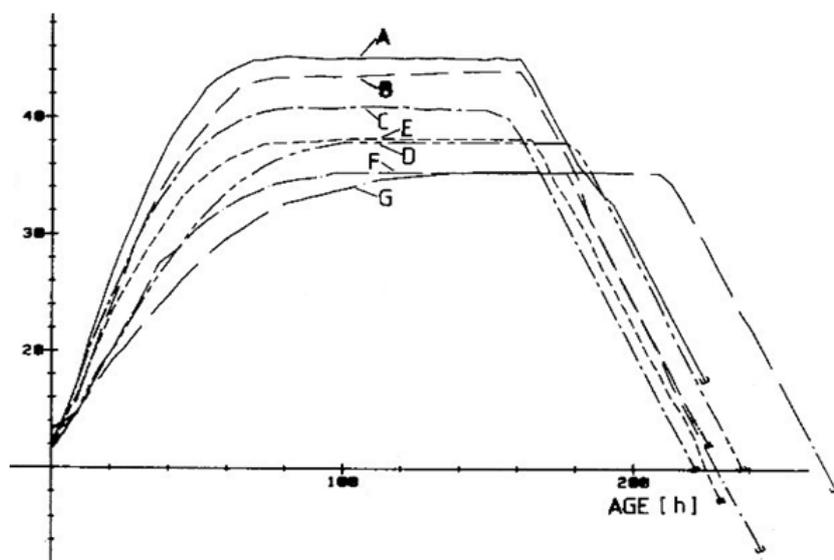


図 2-17 温度履歴図

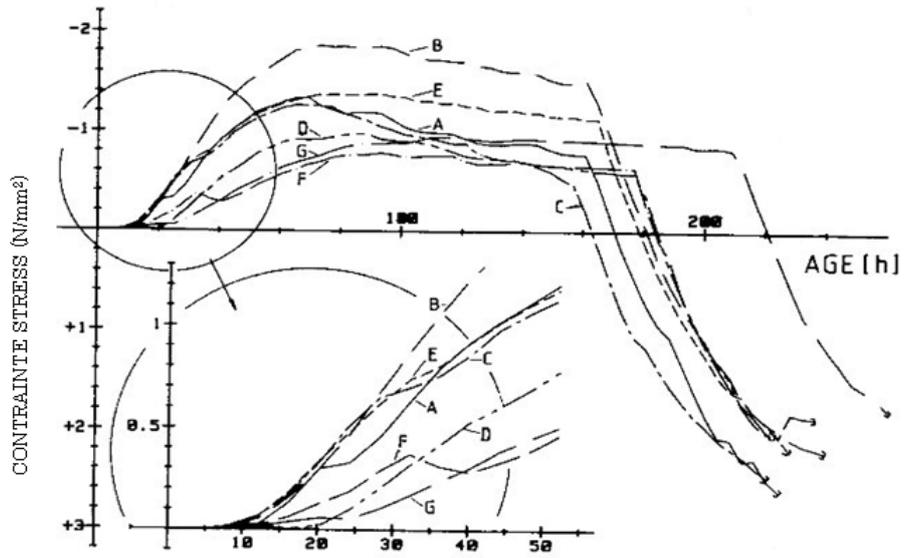
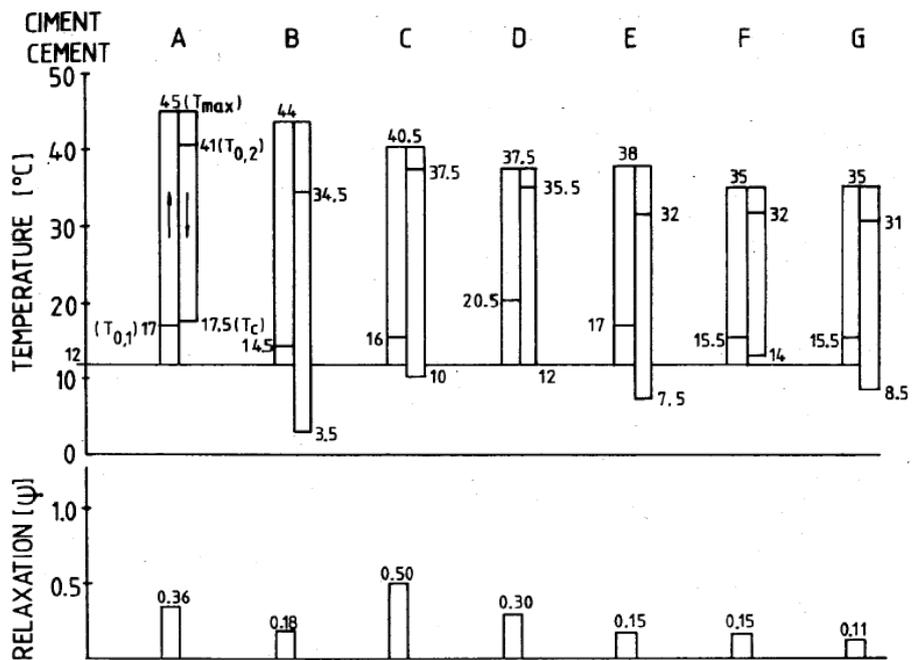


図 2-18 応力履歴図



$T_{0,1}$; $T_{0,2}$ = 第1ゼロ応力温度; 第2ゼロ応力温度

第1ゼロ応力; 圧縮応力が進展し始める温度

第2ゼロ応力; 圧縮応力から引張応力に変化する温度

T_{max} = 最高温度 T_c = ひび割れ温度

図 2-19 温度及びリラクゼーション係数

(2) 一軸拘束試験装置を用いた温度ひび割れ試験方法に関する検討

溝渕氏ら¹⁰⁾は2.5(1)で前述の R.Springenschmid 氏らが開発した TSTM⁹⁾を参考にし、外部拘束応力、特に軸拘束力が卓越する構造物を対象とした温度応力をシミュレートするための一軸拘束試験装置を開発し、ひび割れ発生を計測範囲内でできる限り発生させる工夫などの改良を行った。同一配合において拘束度を変化させた場合及び拘束度を固定し、セメントの種類を変更した場合での各種試験測定を行った。

a) 条件及び検討ケース

①配合条件

配合に関しての基本条項を示し、コンクリート配合を表 2-17, 使用材料を表 2-18 に示す。

スランプ：12cm

空気量：4.5%

単位セメント量：300kg/m³

水セメント比：55%

②解析条件

解析条件は壁厚 1 m, 高さ 5 m としている。

③検討ケース

試験測定において行っている検討ケースを表 2-19 に示す。

表 2-17 コンクリート配合

セメントの種類	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)			
			水	セメント	細骨材	粗骨材
普通ポルトランド	55.0	44.0	165	300	795	1034
早強ポルトランド	55.0	43.8	165	300	794	1034
高炉B種	55.0	43.5	165	300	783	1034

表 2-18 使用材料

項目	摘要
セメント	普通ポルトランド、比重;3.16
	早強ポルトランド、比重;3.01
	高炉B種、比重;3.01
細骨材	川砂、最大寸法;20mm 吸水率;1.61%、粗粒率;2.51
粗骨材	硬質砂岩、最大寸法;20mm 表乾比重;2.65、吸水率;0.65%
AE減水剤	主成分;リグニンスルホンサン化合物

表 2-19 検討ケース

ケースNo.	検討項目	セメントの種類	拘束度
1	拘束度の違いが応力に及ぼす影響	普通ポルトランド	1.0
2			0.5
3			0.2
4	セメントの違いの影響に関する検討	早強ポルトランド	1.0
5		高炉B種	1.0

b) 温度制御に関する検討

以下に示す図 2-20 は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートにおいて拘束度を変化させた場合の温度制御に関する検討である。また、図 2-21, 22 に温度履歴において設定値と比較的一致する結果となった 0.5 のケースでの温度設定値と拘束供試体及び無拘束供試体との偏差及び変動幅に示されている。

この結果より、設定温度に対する温度制御は、打ち込み温度が設定温度と一致している場合に関しては制御可能であると思われる。ただし、拘束供試体の温度上昇での温度制御に関しては改善の必要がある。

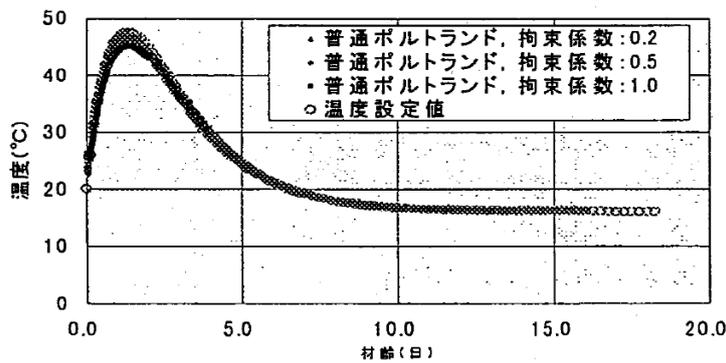


図 2-20 温度履歴（拘束度を変化させた場合の検討）

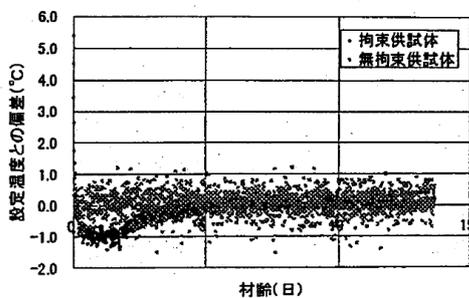


図 2-21 温度設定値との偏差

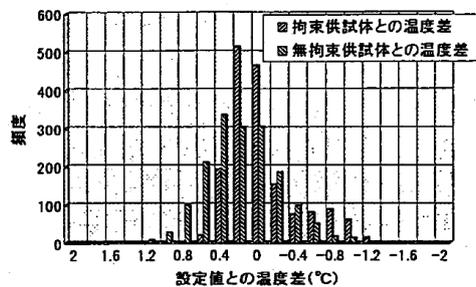


図 2-22 設定値と温度差のヒストグラム

c) 線膨張係数の検討

無拘束供試体において普通ポルトランドセメントを用いた5ケースの温度変化とひずみ変化量との関係を図 2-23 に、各ケースでの温度上昇時及び下降時の線膨張係数を図 2-24 に示す。

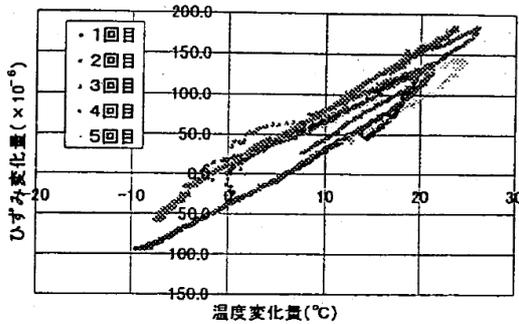


図 2-23 温度変化量とひずみ変化量の関係

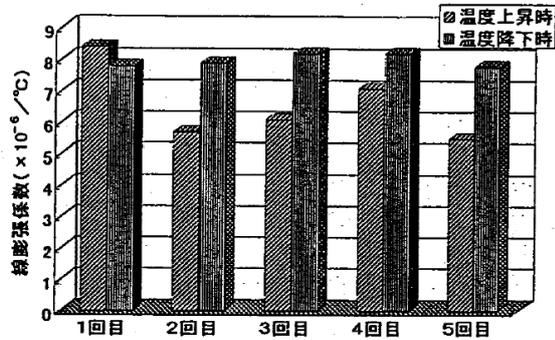


図 2-24 コンクリートの線膨張係数

d) 拘束度が応力に及ぼす影響

同一配合において拘束度を 1.0, 0.5, 0.2 の 3 ケースに変化させた場合の応力履歴を図 2-25 に示す。拘束度 1.0 では、材齢約 4 日でひび割れが生じる結果となっている。拘束度 0.5 では試験期間中にひび割れが生じることはなく、材齢 14 日で約 1.7N/mm^2 であった。拘束度 0.2 においては材齢約 14 日で約 0.65N/mm^2 となり、拘束度 0.5 のほぼ 4 割程度となった。これは同一配合で材齢 3 日以降の強度発現がほぼ同じであったためとしている。一方圧縮域においては、拘束度 0.5 の場合が最も小さい値を示し、拘束度 0.2 及び 1.0 がほぼ同等の値を示す結果となっている。

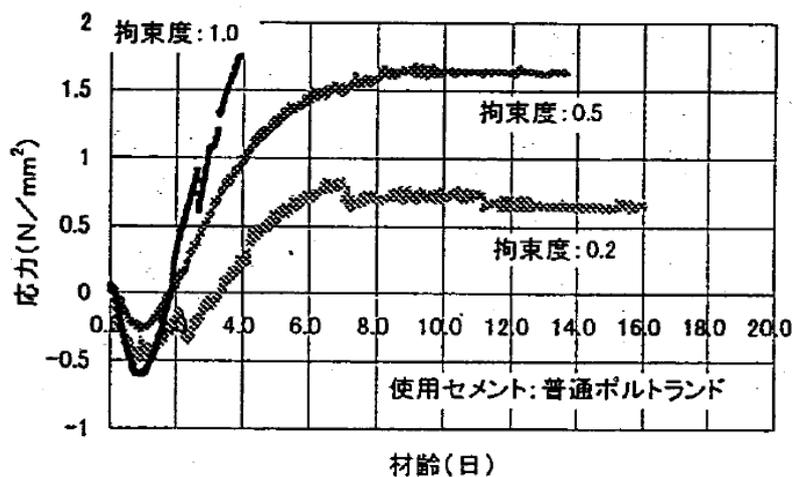


図 2-25 応力履歴 (拘束度の違いの検討)

e) セメントの違いが温度応力に及ぼす影響

セメントの種類の違いが発生応力及びひび割れ発生時期に及ぼす影響について検討するために、対象構造物、拘束度等と同じにして実験を行っている。その結果を図 2-26～30 に示す。温度履歴は図 2-26 に示すように最高温度に達する材齢、最高温度及び温度降下速度が各セメントによって異なり、最高温度が最も大きい早強ポルトランドセメントで 53℃、最も低い高炉B種セメントで 38℃であった。最高温度からひび割れ発生までの温度降下量は、早強ポルトランドセメントが最も大きく 22℃で普通ポルトランドセメントが 15℃、高炉B種セメントが 14.5 度であった。また、ひび割れ発生材齢は早強ポルトランドセメントが最も早く 3.8 日、普通ポルトランドセメントが 3.9 日、高炉B種セメントが最も遅く 4.8 日であった。

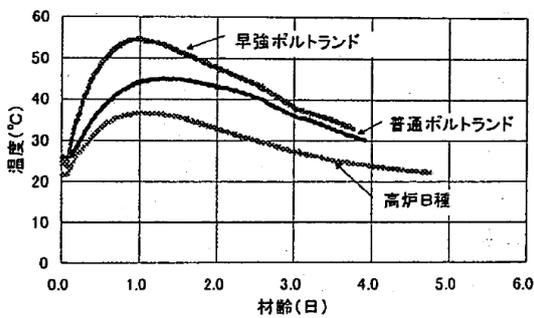


図 2-26 温度履歴(セメントの種類の違い)

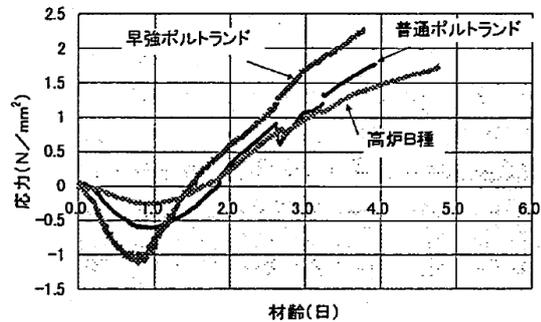


図 2-27 応力履歴(セメントの種類の違い)

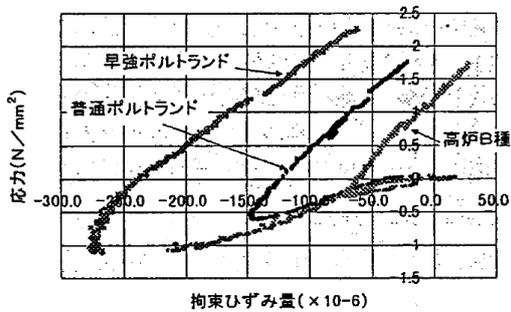


図 2-28 応力とひずみの関係

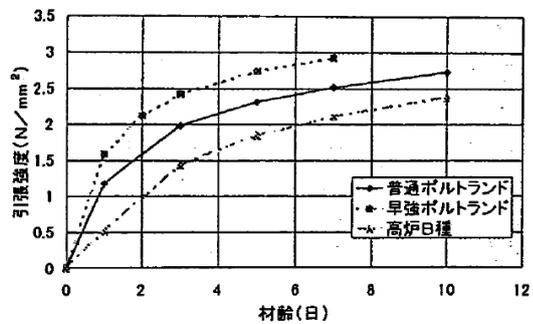


図 2-29 引張強度試験結果

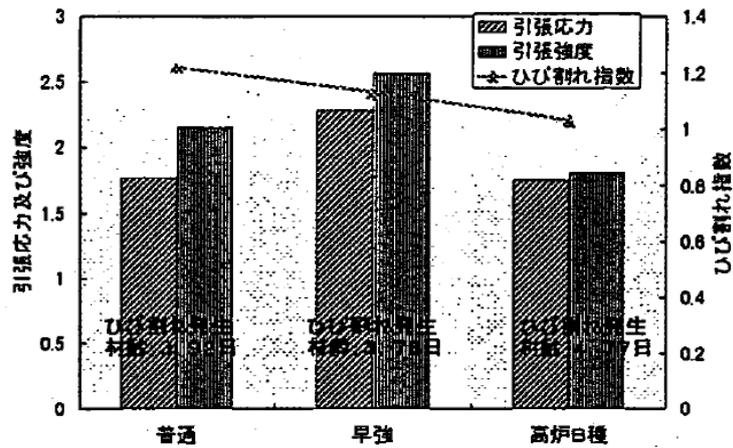


図 2-30 ひび割れ指数の算定

以上の結果より、早強ポルトランドセメントは普通ポルトランドセメントに比べて伸び能力が高いものの、発生応力も大きいことからひび割れ抵抗性において他のセメントよりも劣ることが示されている。また、普通ポルトランドセメントと高炉B種セメントを比べた場合、ひび割れ発生応力及び引張限界ひずみともほぼ同等であったことから、ひび割れ抵抗性の点ではほぼ同等であると思われる。

次に、図 2-30 に示される引張試験及び試験から測定されたひび割れ発生応力より算定したひび割れ指数は、各セメントとも引張強度のほうがひび割れ発生応力よりも大きい結果となっている。

f) まとめ

以上の結果より、想定した温度をほぼ制御することが可能であり、拘束度の変化やセメントの種類の違いに対しても定量的に評価することが可能であることが確認できている。ただし、圧縮域での端面押さえ材の影響など実際の減少をシミュレートするためには、いくつかの改良が必要である。

第3章 研究の概要

本研究は、温度ひび割れ発生有無の照査のために行われる温度応力解析の高精度化を目的として、解析に用いる各種設計値に対して系統化された材料評価方法の確立を目指し、従来から用いられている実験に加え、諸特性を精度よく得るために新たに導入した各種の試験装置を用いて実験を行うとともに、実構造物における施工時の実測データと比較することで、高精度化の手法およびその効果について検討を行った。本章では、本研究の概要を述べる。図 3-1 に本研究の概要図を示す。

温度ひび割れに影響を及ぼす要因として、コンクリートの熱伝導率、密度、比熱、断熱温度上昇特性などの発熱特性やヤング係数、圧縮強度、引張強度、ポアソン比、線膨張係数などがある。さらにクリープや自己収縮の影響についてもひび割れに影響を及ぼす。温度ひび割れ照査のための温度応力解析の入力値として、以上の物性について適切に設定しなければならない。温度応力解析に用いる入力として信頼できる資料を用いてもよいとされている項目が多く、実際ほとんどが既往のデータを元にした解析が行われている。

本研究では、千葉県市川市に建設中の掘割式の道路トンネルである東京外環自動車道国分地区南掘割部試験工事を対象とし、温度ひび割れに影響を及ぼす前述の各物性のうち、特に影響の大きいと思われるものに対して実構造物に用いられるコンクリートと同一配合のコンクリートを用いて各種の実験を行った。対象とした工事では、温度ひび割れ抑制効果を確認するために、施工時温度応力の計測が行われている。工事は、幅 26.1m~28.8m、長さ 60m、高さ 12.5m のボックスカルバートを地上で築造したのち、ニューマチックケーソン工法にて地下約 18m まで沈下させるものであり、ひび割れが発生した場合、沈設時に漏水する可能性があることから、極力ひび割れを抑制する必要がある。本研究では高さ 7.6m、壁厚 1.3m のマスコンクリート部材であることから特にセメントの水和熱に起因して生じる温度応力によってひび割れの生じる可能性が高い部位である側壁を対象とした。

第 4 章では簡易断熱試験についてまとめた。簡易的にマスコンクリート部材中央部に生じる温度履歴を再現できる簡易断熱試験機を用いて実験を行い、コンクリートの温度ひび割れに影響を及ぼす要因のうち、断熱温度上昇特性および圧縮強度、ヤング係数、ポアソン比を測定した。

第 5 章では直接引張試験についてまとめた。コンクリートの引張強度を求める方法として従来から用いられている割裂引張強度試験に加え、コンクリート供試体に把持部を設けコンクリートに直接引張力を作用することのできる直接引張強度試験機を用いて実験を行った。直接引張強度試験では、引張強度を求めるのと同時に、供試体左右にひずみゲージを貼ることでひずみを測定し、ヤング係数を算出した。

第 6 章では Thermal Stress Testing Machine (温度応力試験機、以後 TSTM と略す) を用いた試験についてまとめた。TSTM はコンクリートの打設直後からセメントの水和熱による発熱過程を再現するとともに、一軸方向に対して任意の拘束条件を与えることができる試験機であり、

コンクリート内部に生じる応力履歴およびひび割れ発生限界について推定した。

第7章では、本章では第4章から第6章までに得られた結果をふまえ、対象工事の事前検討を想定してさらに各試験機を用いて実験を行い、それらの結果を温度応力解析の設計用値として入力して解析を行った。また、各実験の効果を検証するために2008年に日本コンクリート工学協会より改定されたマスコンクリートのひび割れ制御指針に定められている手順に従って既往のデータのみを用いた解析を行い、それらの解析結果と対象工事における施工時温度応力の計測値と比較検討することで、マスコンクリートにおける温度応力解析の高精度化の手法について検証を行った。

第8章では本研究の結論を示す。

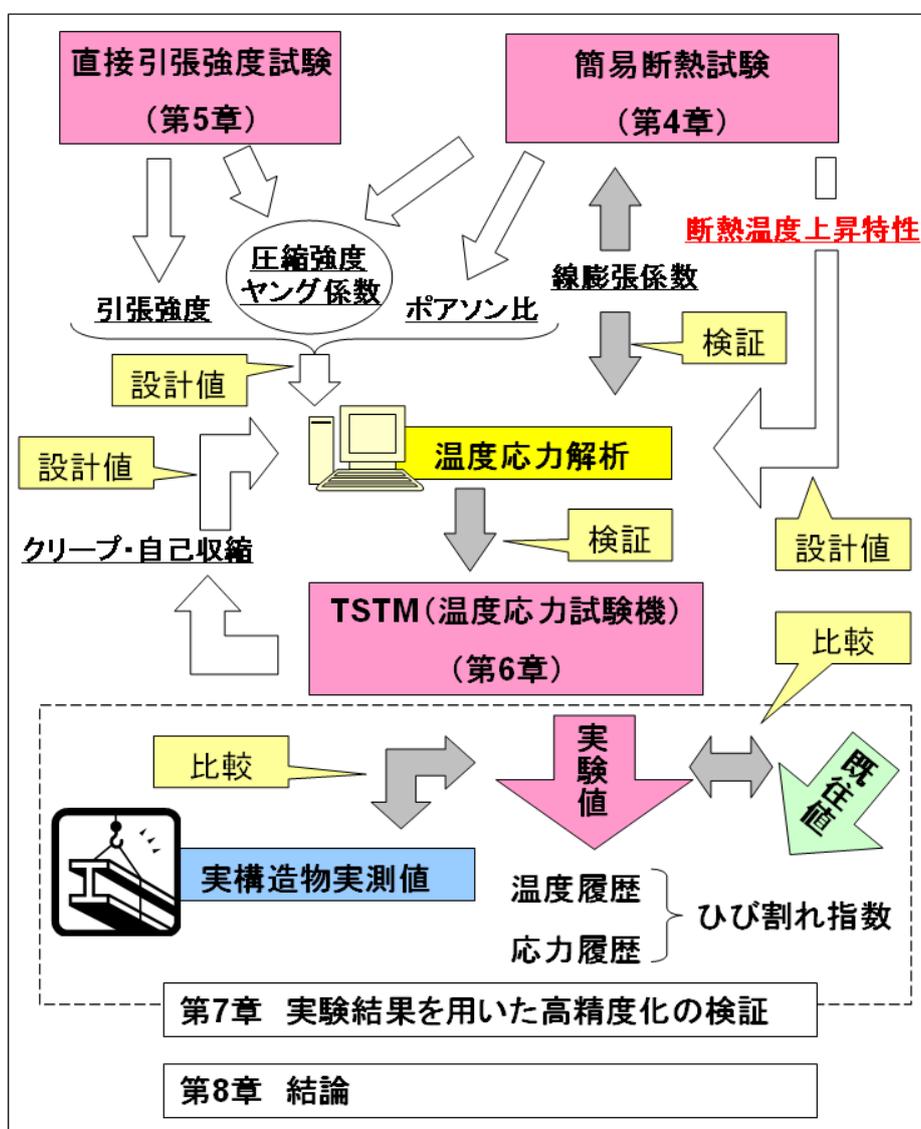


図 3-1 研究概要図

第4章 簡易断熱物性評価試験

4.1 概要

一般的に温度応力解析による正確な温度ひび割れ発生予測を行うには、まず初めに温度解析を行い、コンクリート部材内部の温度分布や温度履歴を正確に求める必要がある。断熱温度上昇特性は、温度解析結果に影響を及ぼす要因のひとつであり、特に終局断熱温度上昇量は、温度解析結果に最も影響を及ぼすとされている¹²⁾。そのため、断熱温度上昇特性は現在までに多くの研究がなされているものの、現状においては、その試験方法に統一性がなく、同一の条件下でも試験方法によって異なる結果となる場合があることが懸念されている。また、通常断熱温度上昇特性を把握するためには高価で大型な断熱温度上昇試験機を用いる場合があるが、施工現場で断熱温度上昇試験機の適用は不向きといえる。

そこで本章では、実構造物の断熱温度上昇特性を推定するのに最適な簡易断熱養生槽の形状を把握することを目的として、異なる形状の断熱養生槽ならびにコンクリート寸法を用いて簡易断熱試験を行った。初期強度発現が小さいことや初期養生を十分行わないと長期強度の発現が低下することが懸念されている低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いて実験をおこなった。

4.2 実験および解析方法

本試験で用いた簡易断熱養生槽は、比較的安価な発砲スチロール製で、コンクリートの力学特性ならびに変形特性の把握のために一般的に用いられているφ100×200mmのコンクリート供試体を配置可能な設計としており、温度依存性を考慮したコンクリートの力学特性ならびに変形特性の把握が可能である。

本検討では、異なる形状の2種類の簡易断熱養生槽を用いて、断熱養生槽の断熱材の部材厚ならびに断熱養生槽内部に配置するコンクリート容器の容量、寸法および配置を変えて実験を行い、それぞれが断熱温度上昇特性の推定に及ぼす影響について検討を行った。

また、各ケースにおいて、養生槽の中心に配置したコンクリートの中心部の温度履歴をもとに3次元有限要素法を用いた温度解析によって同定を行い、断熱温度上昇式を算定した。

(1) 断熱温度上昇試験

a) 簡易断熱試験

本試験で使用した簡易断熱養生槽を写真4-1～4-9、概要を図4-1～4-11に、本試験における検討ケースを表4-1に示す。

2種類の簡易断熱養生槽内に各種の型枠を配置し、熱電対を用いて温度を計測した。計測位置は養生槽中央に配置した供試体の中心部とした。計測間隔は30分とし、計測期間は1週間程度とした。低発熱・収縮抑制型高炉セメントを使用し、水セメント比は50%とした。温度依存性を考慮したコンクリートの力学特性ならびに変形特性を把握できるようにするた

め、各ケースともにφ100×200mmの供試体を配置した。また、型枠には断熱性の高い紙製のものを使用した。構造物の部材中央部を再現することを考慮し、供試体をビニールシートにより密閉し封緘状態とし、水分の逸散がないようにした。

簡易断熱養生槽において、断熱槽の部材厚が断熱温度上昇式の推定に及ぼす影響の検討ではφ100×200mmの供試体を5本ずつ3列の15本を配置したA-1の断熱養生槽およびA-1断熱槽の両側側面に厚さ10mmの断熱材を接合したもの(A-2)を用いて簡易断熱試験を行った。また、コンクリート容量の影響を検討するため、A-1の中央よりの9本の供試体を配置できる空間(380×380×200mm)にコンクリートを打設して試験を行った(A-3)。

また、円柱供試体の寸法、とりわけ直径に着目してコンクリートの寸法が断熱温度上昇式の推定に及ぼす影響の検討するため、図4-5に示す供試体を13本配置できる、タイプBの簡易断熱養生槽(B-1)に直径がそれぞれ100mm、150mm、300mm、高さはすべて200mmである供試体を1本ずつ配置したものをを用いて試験を行った(B-2～B-4)。供試体を入れた後養生槽内の空隙には断熱性をもつ発泡ビーズを入れた。

また、実験結果の検証のため、図4-10に示すタイプCの断熱養生槽を作製し、実験を行った。

また各ケースにおいて、コンクリートの養生槽に対する体積の比率として定義した容積比を算出し、定量的評価を行った。表4-1に各ケースにおける容積率を示す。

表 4-1 検討ケース

養生槽	No.	使用供試体		養生槽の幅 (mm)	容積率 (%)
		寸法	本数		
タイプA	A-1	φ100×200mm	15	-	3.35
	A-2	φ100×200mm	15	A-1 +200	2.72
	A-3	φ100×200mm	6	-	4.30
380×380×200mm		1			
タイプB	B-1	φ100×200mm	13	-	3.38
	B-2	φ100×200mm	1	-	0.13
	B-3	φ150×200mm	1	-	0.28
	B-4	φ300×200mm	1	-	1.13
タイプC	C	φ100×200mm	12	-	6.55
		φ300×450mm	1		

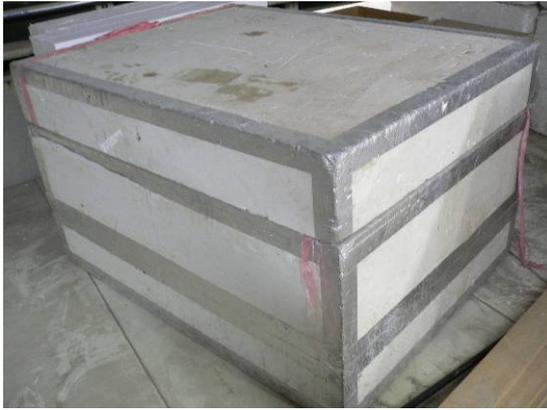


写真 4-1 簡易断熱試験機外観(タイプ A)



写真 4-2 簡易断熱試験機内部(タイプ A)

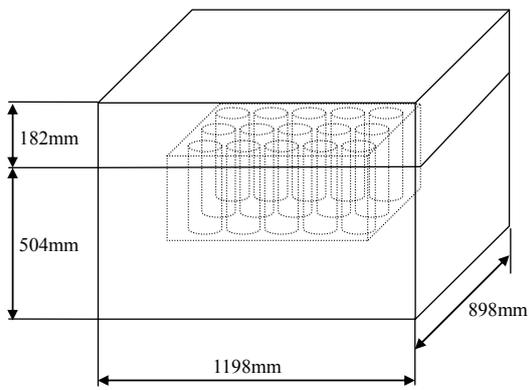


図 4-1 簡易断熱試験機概略(タイプ A)

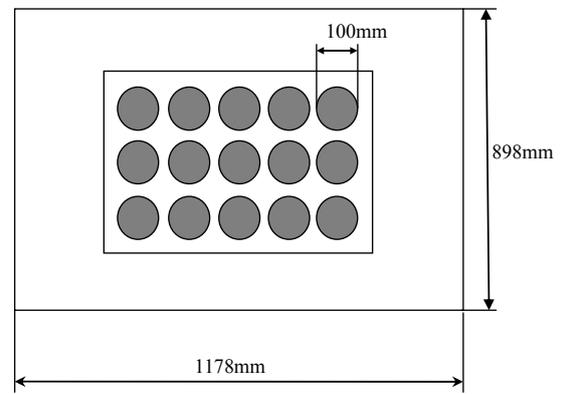


図 4-2 簡易断熱試験機概略(A-1)

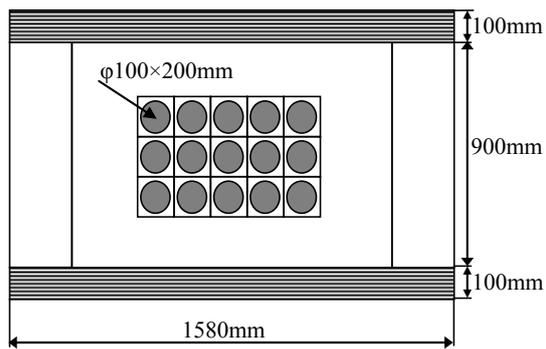


図 4-3 簡易断熱試験機概略(A-2)

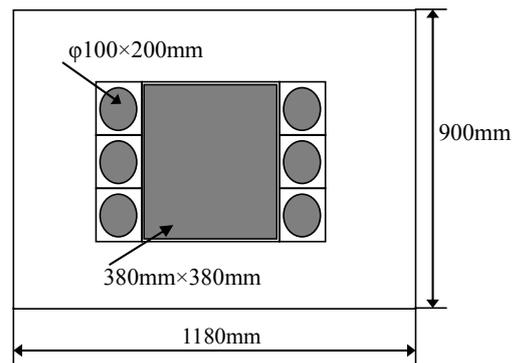


図 4-4 簡易断熱試験機概略(A-3)

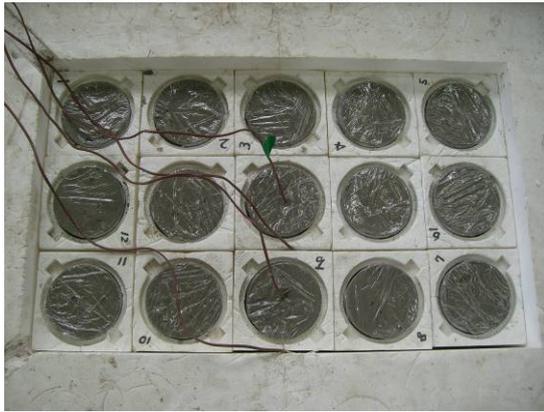


写真 4-3 打設後状況 (A-1)

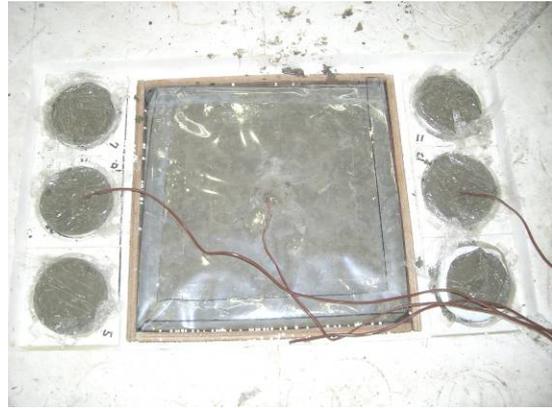


写真 4-4 打設後状況 (A-3)



写真 4-5 簡易断熱試験機外観 (タイプ B)



写真 4-6 簡易断熱試験機内部 (タイプ B)

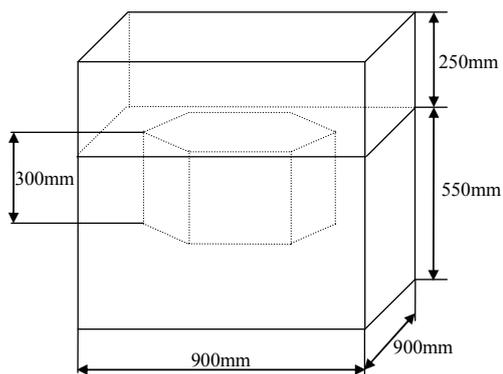


図 4-5 簡易断熱試験機概略 (タイプ B)

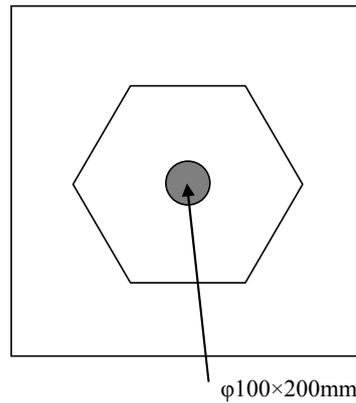
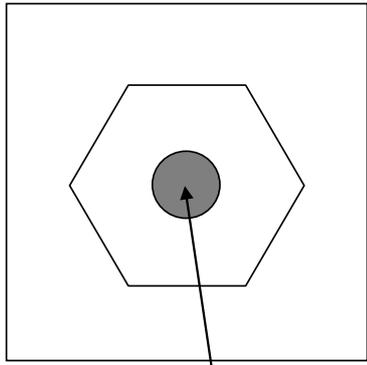
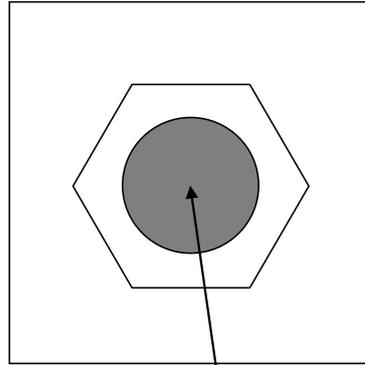


図 4-6 簡易断熱試験機概略 (B-1)



φ150×200mm

図 4-7 簡易断熱試験機概略 (B-2)



Φ300×200mm

図 4-8 簡易断熱試験機概略 (B-3)



写真 4-7 簡易断熱試験機概略 (B-2)



写真 4-8 簡易断熱試験機内部 (タイプ C)

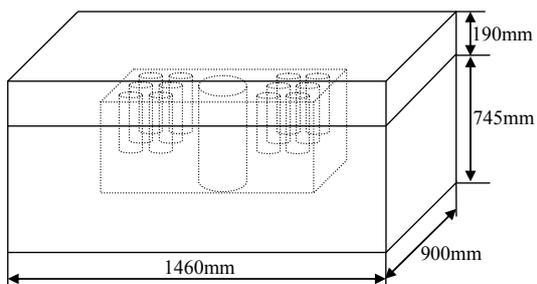


図 4-9 簡易断熱試験機概略 (タイプ C)

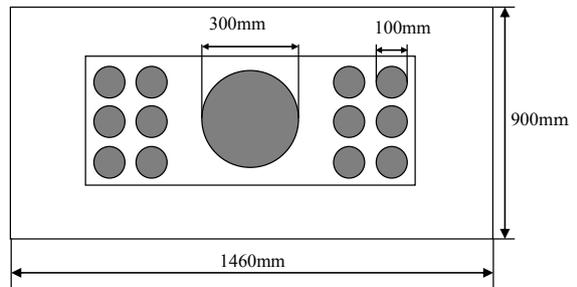


図 4-10 簡易断熱試験機概略 (C)

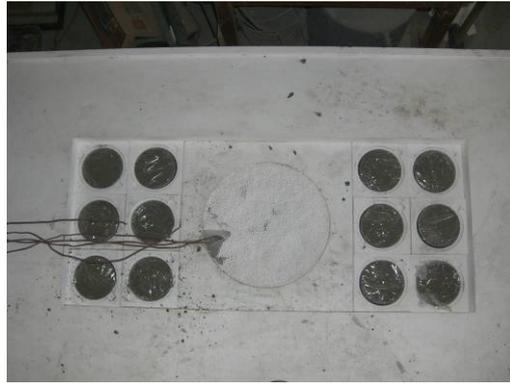


写真 4-9 埋込型ひずみ計

a) 大型断熱試験

本試験では簡易断熱試験とともにコンクリートの断熱温度上昇式の算定に一般的に用いられている断熱温度上昇試験機を用いた断熱試験を行った。以後簡易断熱試験と区別のため、大型断熱試験機と称する。大型断熱試験機は外気温の影響を受けない状態における温度上昇を測定するため、試験体の温度に追従して試験体周辺の温度を制御している。

供試体寸法は内径 $\phi 345 \times 540\text{mm}$ である。測定間隔は断熱温度上昇試験機についても 30 分間隔とした。本研究で用いた大型断熱試験機を写真 4-10 に示す。



写真 4-10 検討ケース

(2) 温度同定解析

各ケースにおいて、養生槽の中心に配置したコンクリートの中心部の温度履歴をもとに 3 次元有限要素法を用いた温度解析によって同定を行い、断熱温度上昇式を算定した。

コンクリートの断熱温度上昇式は本論 2.2.(2) に示す、日本コンクリート工学協会マスコンクリートのひび割れ制御指針に示されている式を用いて算定した。用いた断熱温度上昇式

を以下に示す.

$$Q(t) = K[1 - \exp\{-\alpha(t - t_{0,q})^\beta\}] \quad (17)$$

ここに,

- t : 材齢 (日)
- $Q(t)$: 材齢 t 日までの断熱温度上昇量 (N/mm²)
- K : 終局断熱温度上昇量 (°C)
- α : 断熱温度上昇速度に関する係数 (1/日)
- β : 断熱温度上昇速度に関する係数 (1/日)
- $t_{0,q}$: 発熱開始材齢 (日)

また, 同定解析によって得られた断熱温度上昇式の各係数と, コンクリートの養生槽に対する体積の比率として定義した容積率との, その関係について検討した.

タイプ A タイプ B において温度解析に使用した解析モデルをを図 4-12~4-14 に示す.

温度解析におけるコンクリートおよび断熱材の物性値を表 4-2 に示す.

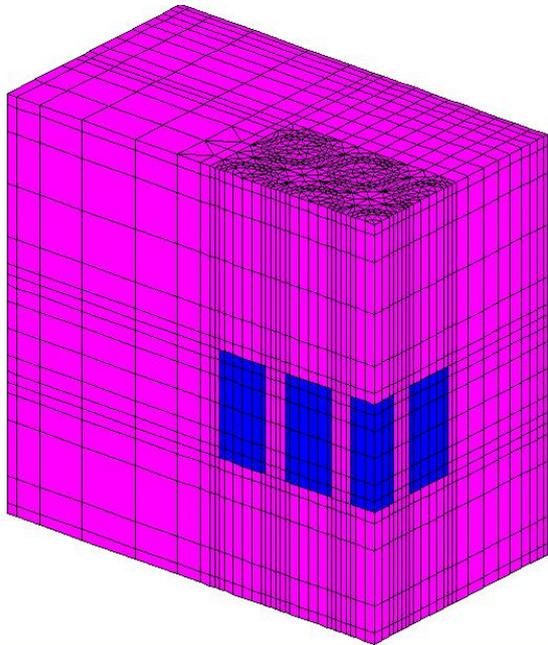


図 4-11 解析モデル (タイプ A)

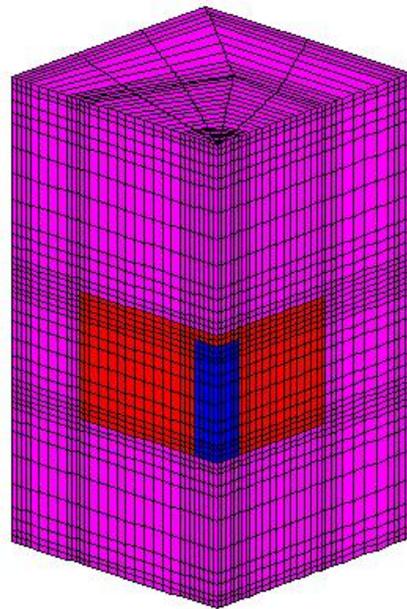


図 4-12 解析モデル (タイプ B)

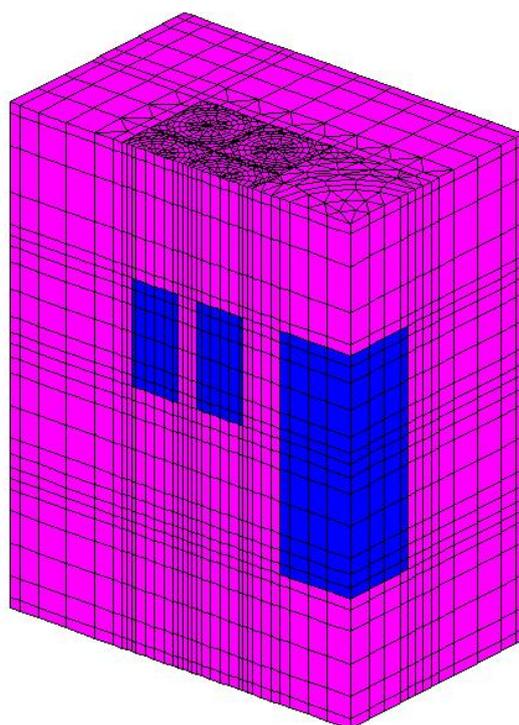


図 4-13 解析モデル解析モデル (タイプ C)

表 4-2 解析条件

	コンクリート	断熱材	発砲ビーズ
熱伝導率(W/m°C)	2.7	0.06	0.05
密度(kg/m ³)	2400	11	12
比熱(kJ/kg°C)	1.2	1.25	1.25

4.3 使用材料および配合

本試験で使用した低発熱収縮抑制型高炉セメントの物理的性質を表 4-3 に示す。細骨材は市原産の山砂と青梅産の砕砂であり、使用にあたり 5mm ふるいでふるい分けを行い、通過したものを表面水率 1%程度になるように調整し、木製茶箱に詰め、水分の蒸発を防ぐために湿布ならびビニールシートをかぶせ保管したものである。使用時には砕砂：山砂（7：3）の混合砂とした。[JIS A 1109 細骨材の密度及び吸水率試験方法]による細骨材の試験結果を表 4-4 に、[JIS A 1102 骨材のふるい分け試験方法]による粒度分布曲線を図 4-11 に示す。粗骨材は青梅産の碎石であり、5～15mm、15～20mm の 2 種類にふるい分けしたものと、5～10mm、10～15mm、15～20mm の 3 種類にふるい分けしたものである。分級時は、表面乾燥状態となるまで乾燥させ細骨材と同様に保管している。練り混ぜ時は 15～20mm：5～15mm（6：4）の割合で混合した場合と 15～20mm：10～15mm：5～10mm（4：3：3）の割合で混合した場合の 2 通りで行った。[JIS A 1110 粗骨材の密度及び吸水率試験方法]による 2 通りの粗骨材の試験結果を表 4-4 に、粒度分布曲線を図 4-15 に示す。AE 剤は、BASF ポ

ゾリス株式会社製のマイクロエア 202 を使用した。主成分および物性を表 4-5 に示す。AE 減水剤は、BASF ポゾリス株式会社製のポゾリス 15Sc を使用した。主成分および物性を表 4-6 に示す。

コンクリート配合を表 4-7 に示す。

表 4-3 使用セメントの物理的性質

		高炉セメントB種 JIS R 5211	
		JIS規格値	MKC TYPEⅢ 試験成績
密度 (g/cm ³)		-	2.98
比表面積 (cm ² /g)		3000以上	3370
凝結	水量 (%)	-	26
	始発 (h-min)	60min以上	3-47
	終結 (h-min)	10h以下	5-13
安定法	パット法	良	良
圧縮強さ (N/mm ²)	3日	10.0以上	13.8
	7日	17.5以上	23.1
	28日	42.5以上	45
	91日	-	61.8
化学成分 (%)	酸化マグネシウム	6.0以下	4.28
	三酸化硫黄	4.0以下	3.39
	強熱減量	3.0以下	0.62
	全アルカリ	-	0.44
	塩化物イオン	-	0.009
スラグ混入量 (%)		-	58

表 4-4 細骨材の物性値

	密度(g/cm ³)	吸水率(%)	粗粒率
混合砂(市原産・青梅産)	2.58	2.34	2.63
硬質砂岩碎石(東京都青梅産)	2.66	0.5	6.75

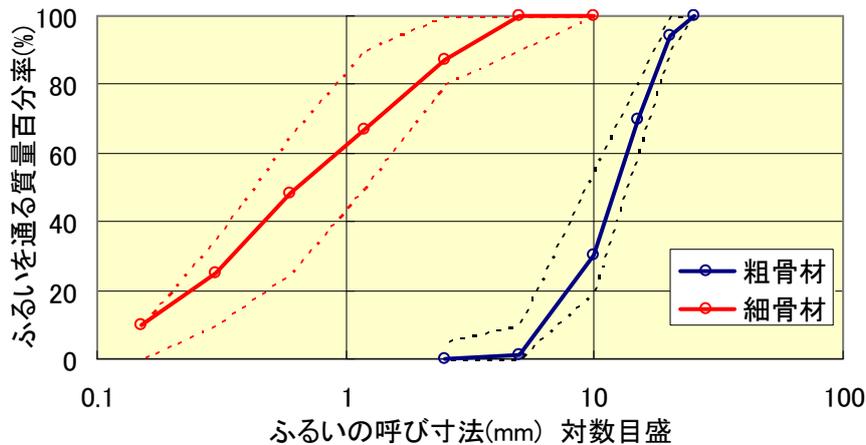


図 4-14 細骨材および粗骨材の粒度曲線

表 4-5 AE 減水剤の特性

主成分	外観	密度 (g/cm ³ 、20°C)	全アルカリ量 (%)	塩化物イオン量 (%)
変性ロジン酸化合物系 陰イオン界面活性剤	茶褐色液体	1.02~1.06	1.7	0.01

表 4-6 AE 剤の特性

主成分	外観	密度 (g/cm ³ 、20°C)	全アルカリ量 (%)	塩化物イオン量 (%)
リグニンスルホン酸化合物と ポリカルニボン酸エーテルの複合体	暗褐色液体	1.08~1.14	1	0.02

表 4-7 コンクリート配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ の範囲 (mm)	空気量 の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AE減水剤
20	13.5±1.0	5.0±0.5	50	47.7	164	328	852	947	4.264

4.4 実験結果

(1) 断熱槽部材厚の検討

検討ケース A-1 および A-2 における中央供試体中心部の温度履歴を図 4-16 に、各ケースにおける温度履歴と同定解析で算出した温度履歴を図 4-17~4-18 に、同定解析により得られた断熱温度上昇特性を図 4-19 に示す。また、同定解析により得られた各ケースにおける断熱温度上昇式の各係数を表 4-8 に示す。

図 4-16 および図 4-19 より、断熱温度上昇特性で場合、終局断熱温度上昇量に約 3°C の差がみられたものの、実測値では最高温度に達するまでの期間および放熱期間ともにほぼ同等の履歴を示した。このことから、断熱材の部材厚を大きくすることで放熱が若干抑えら

れるものの、断熱温度上昇式の推定に断熱材の部材厚が及ぼす影響は極めて小さいことが考えられる。

表 4-8 同定解析より得た断熱温度上昇特性式の各係数

	A-1	A-2
K	31	34
α	1.3	1.5
β	2	1.3
t0	0	0.2

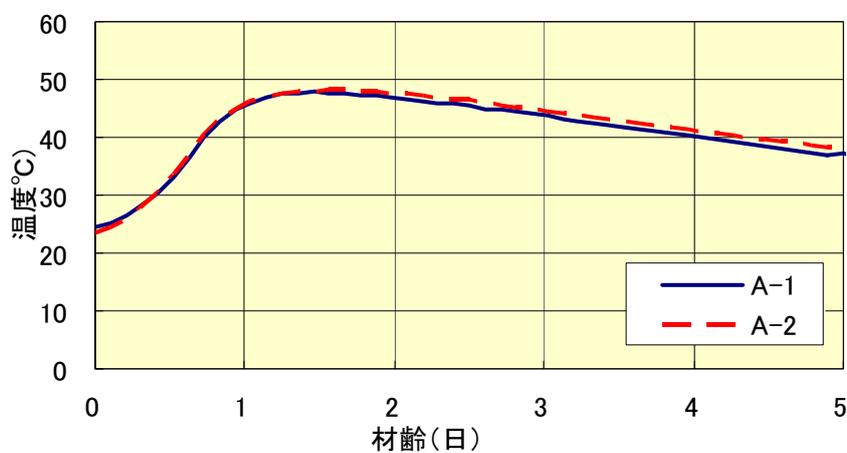


図 4-15 温度測定結果

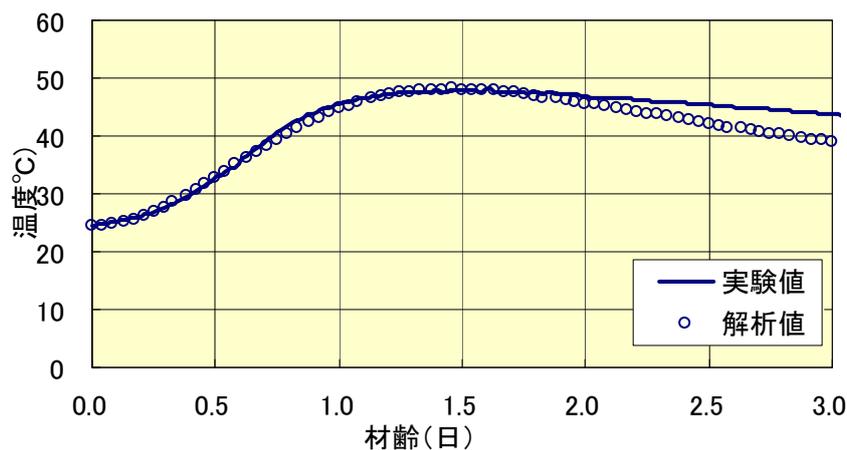


図 4-16 温度同定結果 (A-1)

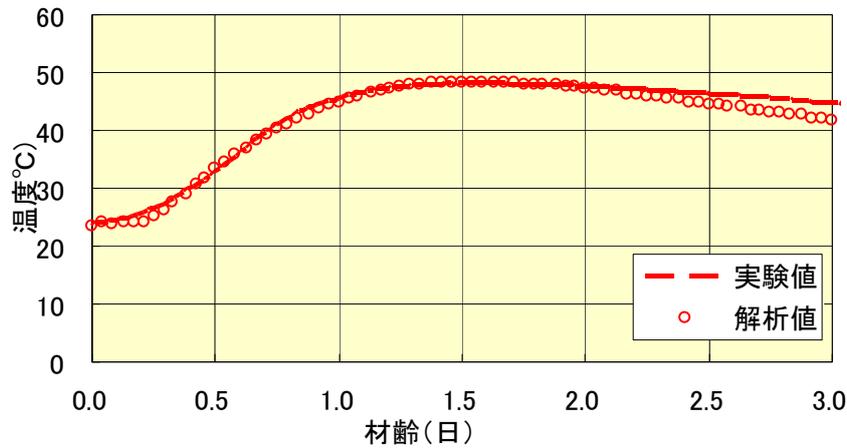


図 4-17 温度同定結果 (A-2)

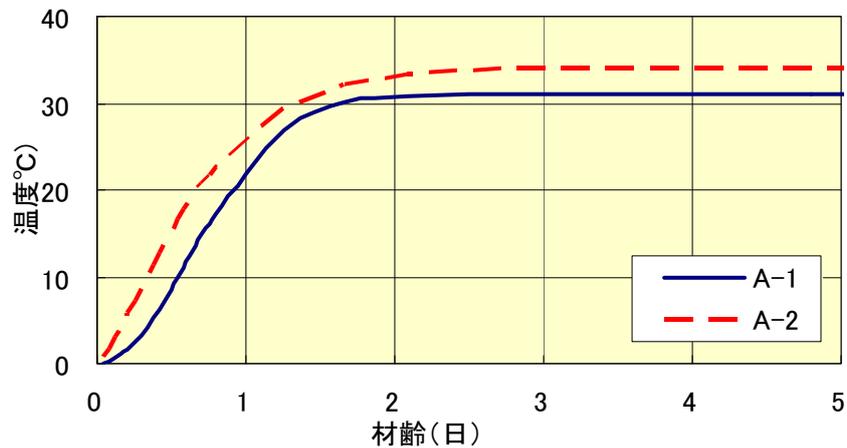


図 4-18 断熱温度上昇特性

(2) コンクリート容量の検討

検討ケース A-1 および A-3 における中央供試体中心部の温度履歴を図 4-20 に、A-2 において得られた温度履歴と同定解析で算出した温度履歴を図 4-21 に、同定解析により得られた断熱温度上昇特性を図 4-22 に示す。また、同定解析により得られた各ケースにおける断熱温度上昇式の各係数を表 4-9 に示す。

図 4-20 および図 4-22 より、温度上昇速度に関してはほぼ同等となったものの、コンクリート容量を大きくした A-3 は A-1 と比較して最高温度が約 4°C 大きくなる結果となった。また、温度降下域において A-3 の放熱速度が A-1 よりも小さくなる結果となった。以上のことより、コンクリートの容量が断熱温度上昇特性、とりわけ終局断熱温度上昇量に影響を与えることが考えられる。また、コンクリート容量が大きいほど放熱速度も幾分か小さくなると考えられる。

表 4-9 同定解析より得た断熱温度上昇特性式の各係数

	A-1	A-3
K	31	33
α	1.3	1.6
β	2	1.3
t0	0	0.2

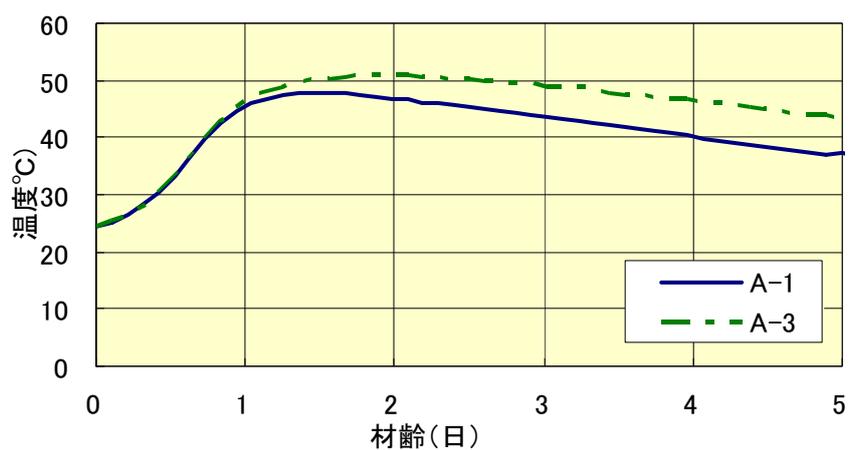


図 4-19 温度測定結果

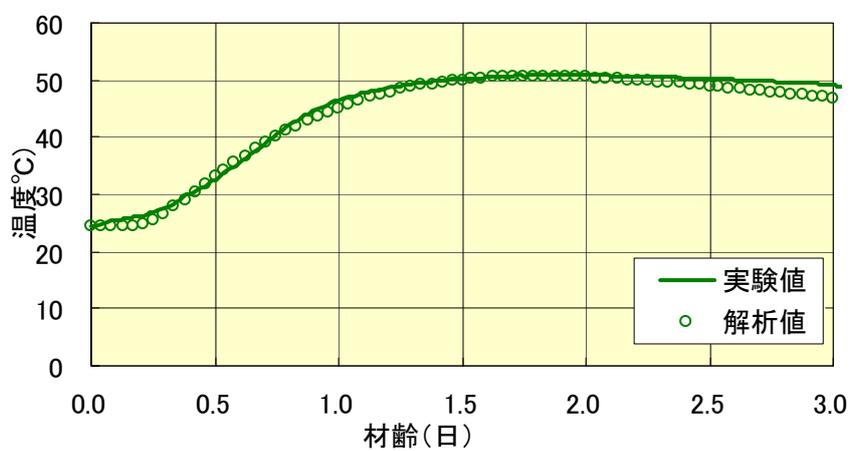


図 4-20 温度同定結果 (A-3)

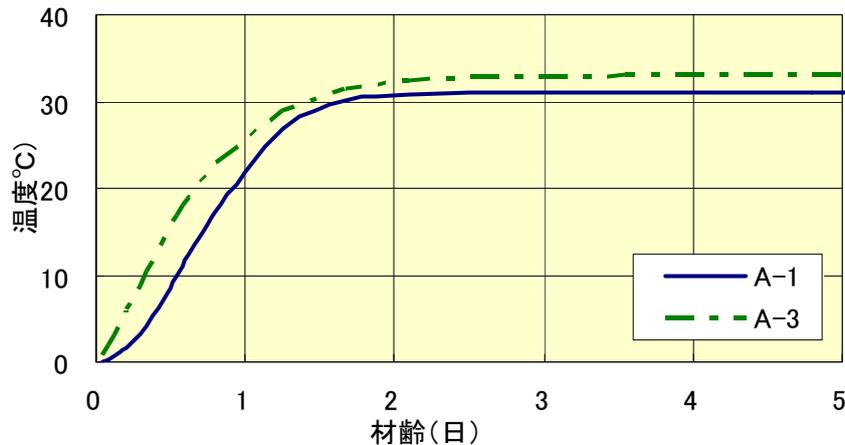


図 4-21 断熱温度上昇特性

(3) 容器寸法の検討

本項では 4.4(2)において得られた知見を検証するために、コンクリート容器の寸法に着目してコンクリート容量が得られる断熱温度上昇特性に及ぼす影響について検討を行った。

大型断熱試験より得られた温度履歴および検討ケース B-2, B-3, B-4 における中央供試体中心部の温度履歴を図 4-23 に、各ケースにおいて得られた温度履歴と同定解析で算出した温度履歴を図 4-24～4-26 に、同定解析により得られた断熱温度上昇特性を図 4-27 に示す。また、同定解析により得られた各ケースにおける断熱温度上昇式の各係数を表 4-10 に示す。

図 4-23 および図 4-27 より、計測値で考えた場合、供試体の寸法が大きくなるほど、最高温度が高くなる結果となった。断熱温度上昇特性でみた場合についても、供試体の寸法が大きくなるほど、終局断熱温度上昇量が大きくなる結果となった。また、供試体の寸法が大きくなるほど大型断熱試験機から得られた結果との差も小さくなり、これらのことから大型断熱試験機による温度履歴を真値と仮定した場合、供試体の寸法が大きくなるほど、すなわち、養生槽に対するコンクリートの容量が大きくなるほどより実際に近い断熱温度上昇特性が得られると考えられる。

一方で、大型断熱試験機から得られた結果と比較した場合、本研究の範囲内では終局断熱温度上昇特性に約 12°C と大きな差がみられることや、大型断熱試験機がどの程度実際の断熱温度上昇特性を評価できているかは定かではないため、この点を十分に考慮した上で簡易断熱試験を行う必要がある。

表 4-9 同定解析より得た断熱温度上昇特性式の各係数

	B-2	B-3	B-4
K	16	17.2	19.5
α	0.7	1.13	1.14
β	1.95	2.27	1.98
t0	0	0	0

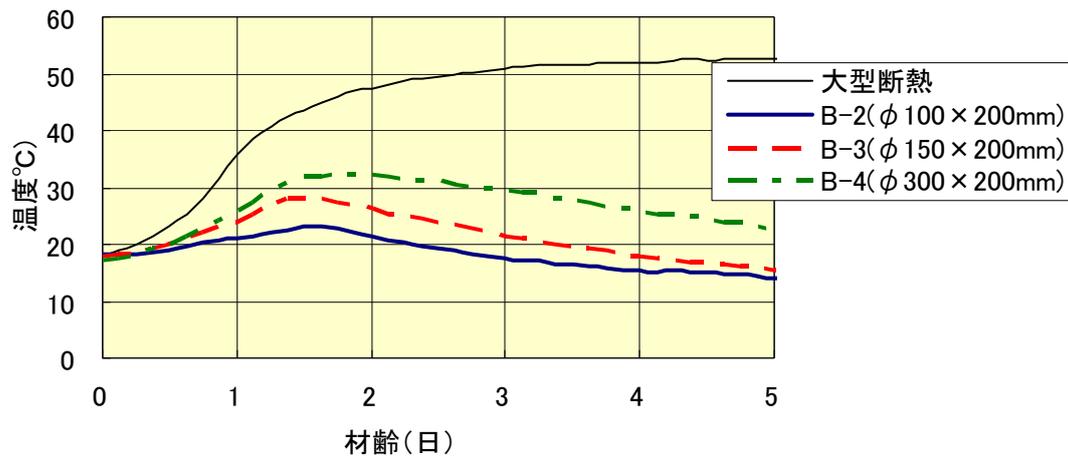


図 4-22 温度測定結果

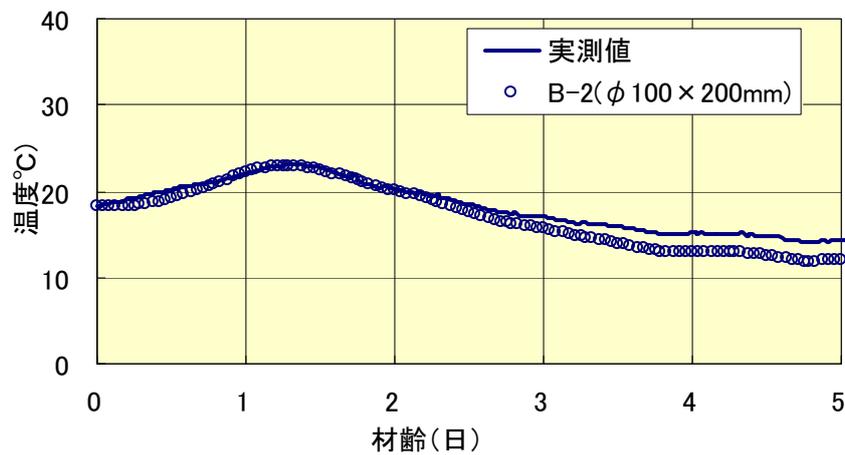


図 4-23 温度同定結果 (B-1)

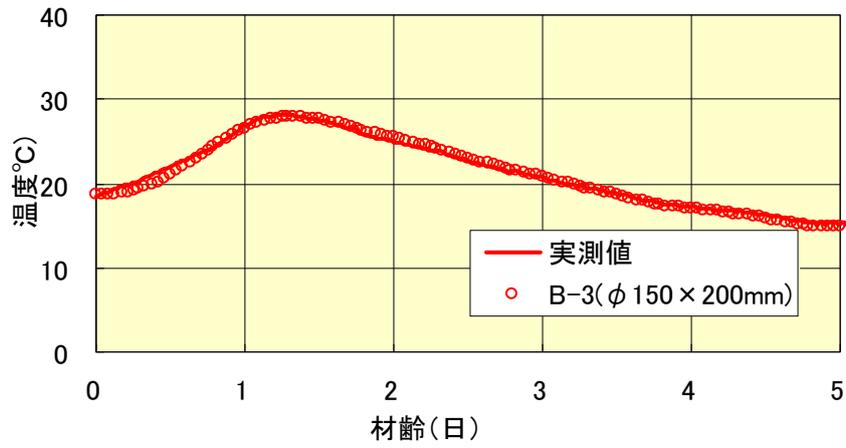


図 4-24 温度同定結果 (B-2)

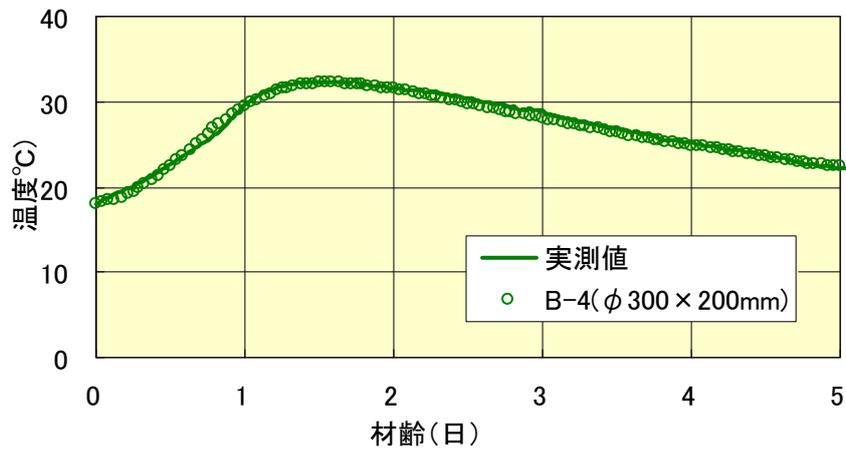


図 4-25 温度同定結果 (B-3)

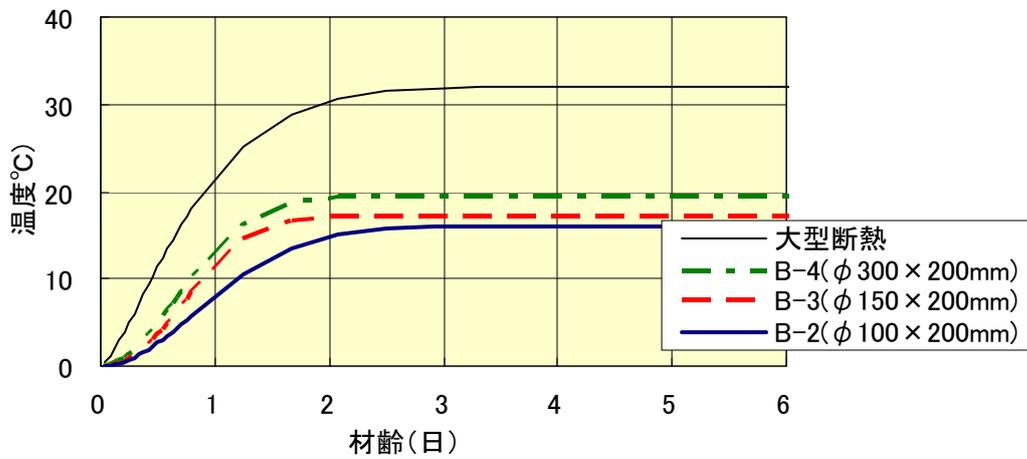


図 4-26 断熱温度上昇特性

(4) 容積率と断熱温度上昇特性の関係

4.4(1)～4.4(3)で得られた知見をさらに検証するため、各ケースにおける容積率と得られた断熱温度上昇式の各係数の関係を終局断熱温度上昇量、上昇速度に関する定数 α および β それぞれの係数ごとに示したものを図4-28～4-30に示す。

図4-28より、容積率が大きくなるに伴い、終局断熱温度上昇量が大型断熱試験から得られた値に近似していく傾向がみられる結果となった。また、容積率が約5%で大型断熱試験から得られた終局断熱温度上昇量とほぼ同等となった。このことから、簡易断熱試験機の容積率を大きくしていくことで、コンクリートの終局断熱温度上昇量を推定できると考えられる。また、その値は約5%程度と推察される。

図4-29より、容積率と上昇速度に関する定数 α の間には相関がみられなかった。このことから簡易断熱試験機の容積率は上昇速度に関する定数 α に関しては簡易断熱試験機の容積率に依存しないと考えられる。

図4-30より、容積率が大きくなるに伴い、上昇速度に関する定数 β が大型断熱試験から得られた値に近似していく傾向がみられる結果となった。また、容積率が約4%で大型断熱試験から得られた終局断熱温度上昇量とほぼ同等となった。このことから、簡易断熱試験機の容積率を大きくしていくことで、コンクリートの上昇速度に関する定数 β の値を推定できると考えられる。また、その値は約4%程度と推察される。

以上のことから、簡易断熱試験機の容積率を大きくしていくことで、終局断熱温度上昇量および上昇速度に関する定数 β を推定できると考えられる。また、その値は終局断熱温度上昇量で約5%、上昇速度に関する定数 β では約4%程度となり、簡易断熱試験機の容積率を約5%以上とすることが望ましいと推察される。コンクリートの断熱温度上昇特性を精度よく評価することが可能であることが確認できた。

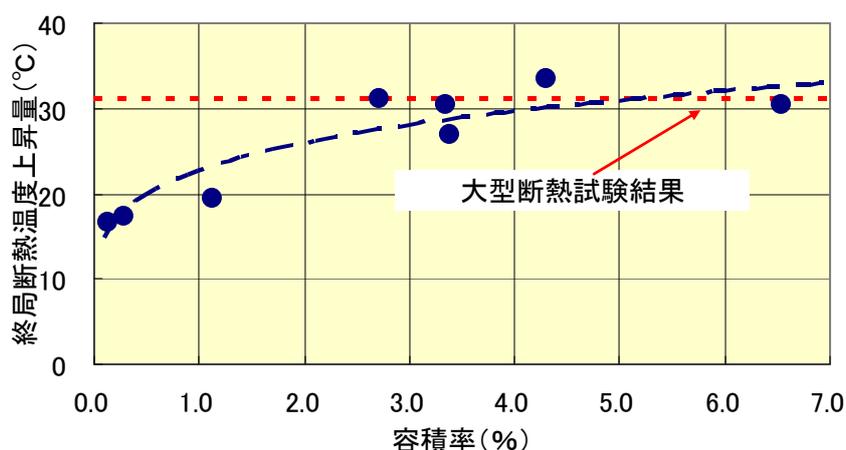


図4-27 容積率と終局断熱温度上昇量の関係

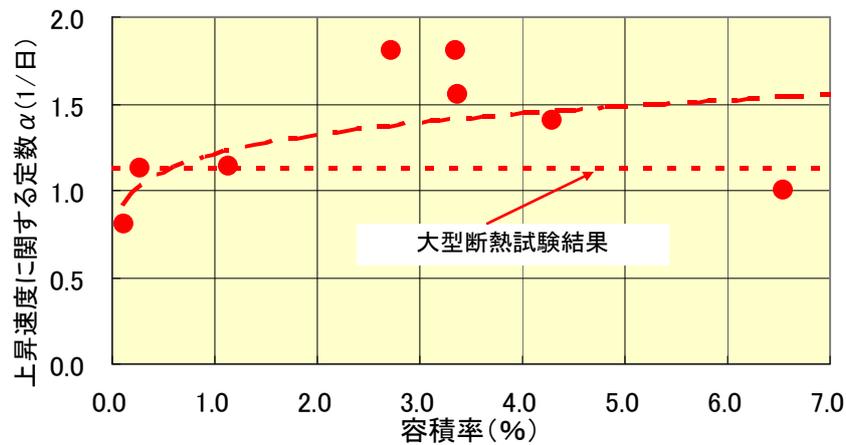


図 4-28 容積率と上昇速度に関する定数 α との関係

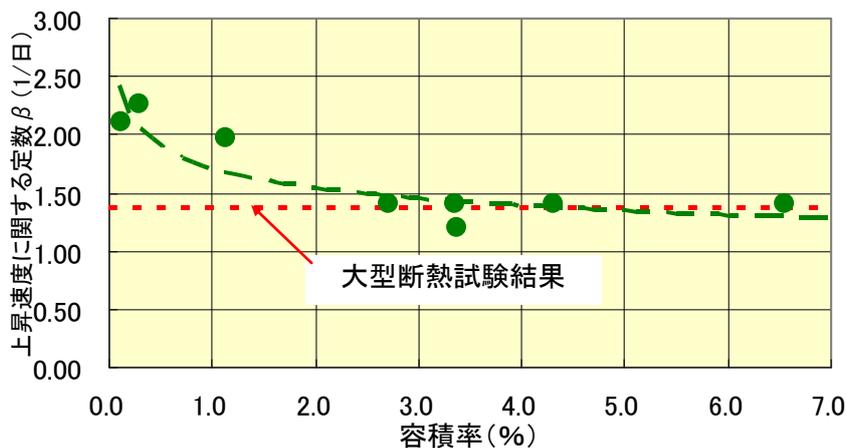


図 4-29 容積率と上昇速度に関する定数 β との関係

4.5 まとめ

本章では、実構造物の断熱温度上昇特性を推定するのに最適な簡易断熱養生槽の形状を把握することを目的として、異なる形状の断熱養生槽ならびにコンクリート寸法を用いて簡易断熱試験を行った。本章で得られた知見を以下にまとめる。

断熱材の部材厚を大きくすることで放熱が若干抑えられるものの、断熱温度上昇式の推定に断熱材の部材厚が及ぼす影響は極めて小さいことが考えられる。

コンクリートの容量が断熱温度上昇特性、とりわけ終局断熱温度上昇量に影響を与えることが考えられる。また、コンクリート容量が大きいほど放熱速度も幾分か小さくなると考えられる。

大型断熱試験機による温度履歴を真値と仮定した場合、供試体の寸法が大きくなるほど、すなわち、養生槽に対するコンクリートの容量が大きくなるほどより実際に近い断熱温度上昇特性が得られると考えられる。

簡易断熱試験機の容積率を大きくしていくことで、終局断熱温度上昇量および上昇速度に関する定数 β を推定できると考えられる。また、その値は終局断熱温度上昇量で約 5%、上昇速度に関する定数 β では約 4%程度となり、簡易断熱試験機の容積率を約 5%以上とすることで比較的高精度に断熱温度上昇特性を得ることができると考えられる。

第5章 直接引張強度試験

5.1 概要

コンクリート構造物に発生する収縮ひび割れは、誘発要因が大きい程、また抵抗要因が小さい程生じやすい。誘発要因としては、水和熱や熱膨張係数、自己収縮、乾燥収縮等に起因する収縮ひずみ、ヤング係数などが挙げられ、抵抗要因としては、引張強度や伸び能力、破壊エネルギーなどが挙げられる。

これらのコンクリートの特性値は、ひび割れ発生やひび割れ幅の検討を行う上で欠かすことのできない重要なパラメータであり、精度よい推定を行うことが、収縮ひび割れの予測・制御を行う上で非常に重要である。

本章では、収縮ひび割れを精度よく予測することを目的とし、若材齢コンクリートの特性値のうち、とりわけ引張特性および変形特性を正しく算定することを試みた。

コンクリートの引張強度は、一般に円柱供試体を用いた割裂引張強度試験によって間接的に求められる。しかし、割裂引張強度試験は円柱供試体の側面に圧縮荷重を加えているため、載荷点付近で圧縮応力が作用し、一様な引張応力が生じない場合があり、粗骨材とモルタル境界における付着力を十分に考慮していない等の問題点があることが知られている。また、割裂引張強度試験は引張によるコンクリートの変形を測定できないため、引張ヤング係数や伸び能力の限界値を得ることができないことも挙げられる。

一方、直接引張強度試験は、引張強度と引張変形を同時に得られるという利点があり、試験方法について各種提案されているものの¹⁾、供試体への引張力の伝達が難しく、試験結果の安定性・再現性などに問題点があることなどから統一された試験方法は未だに確立されていないのが現状である。

以上のような背景を踏まえ、本研究では直接引張試験機を用い、低発熱収縮抑制型高炉セメントを含めた各種セメントを用いて、若材齢時コンクリートにおける引張特性及び変形特性について検討を行った。

5.2 実験方法

本研究では、コンクリートの力学特性を正しく評価することを目的として、各検討ケースに対し、直接引張強度試験、割裂引張強度試験、圧縮強度試験を行った。これらの試験を行う際、材料特性に影響を及ぼす因子としては、コンクリートの使用材料および配合の違いによる影響や養生方法の違いおよび乾燥による影響、載荷速度の違いなどがある。これらに対し、本研究ではコンクリートの使用材料および配合の違いによる影響、および養生方法の違いによる影響について検討を行うこととした。

使用材料および配合の違いによる影響に対する検討は、普通ポルトランドセメント、早強セメント、高炉セメント B 種、低発熱収縮抑制型高炉セメントの計 4 種類のセメントを対象とし、水セメント比 60%、50%、40%、30%の 4 水準について実験を行った。なお、養

生はすべて水中養生とした。

養生方法の違いおよび乾燥による影響に対する検討は、前述の高炉セメント B 種について、同一配合にて気温 20℃、湿度 60%における気中養生を水準に加えて行った。

検討ケースを表 5-1 に示す。なお、試験材齢はいずれのケースにおいても 3 日、7 日、14 日、28 日とした。

試験対象は、図-2 に示すように拘束治具で把持されている部分を除く長さ 220mm の部分である。拘束治具で把持する部分は、供試体の引張領域での拔出しやすさを極力少なくするために、試験対象区間の幅から扇状に広げた形状にしており、試験対象区間と拘束治具との境界部分で応力集中が生じないように緩やかな曲線とした。型枠は、打込み後、試験部位が膨張により広がらないように写真-3 の金具で試験部位中心から 100mm 以内のところを固定した。直接引張試験は、写真 5-1~5-2 に示す試験機および型枠を使用した。図 5-1 に試験機の概要を示す。载荷は、1 回転 0.3mm のスクリージャッキによって手動で行い、ロードセルで荷重の測定を行った。また、引張ヤング係数測定は供試体試験部の中心部の左右に 60mm のひずみゲージを貼り測定した。ジャッキ側の装置型枠はユニバーサル・ジョイントとし、载荷時に偏心が起らないように供試体の位置を調整するようにした。また、試験装置の供試体下部が接する部分はローラーとし、極力摩擦を軽減するようにした。

割裂引張強度試験は、φ150×200mm の円柱供試体、圧縮強度試験は φ100×200mm の円柱供試体を用いた。

表 5-1 検討ケース

ケース表記	セメント	養生方法	水セメント比 (%)
N30-W	普通ポルトランドセメント	水中養生	30
N40-W		水中養生	40
N50-W		水中養生	50
N60-W		水中養生	60
H(W/C)-W	早強ポルトランドセメント	水中養生	30,40,50,60
BB(W/C)-W	高炉セメント B 種	水中養生	30,40,50,60
BB(W/C)-A		気中養生	30,40,50,60
LBB(W/C)-W	低発熱・収縮抑制型高炉セメント	水中養生	30,40,50,60



写真 5-1 直接引張試験機

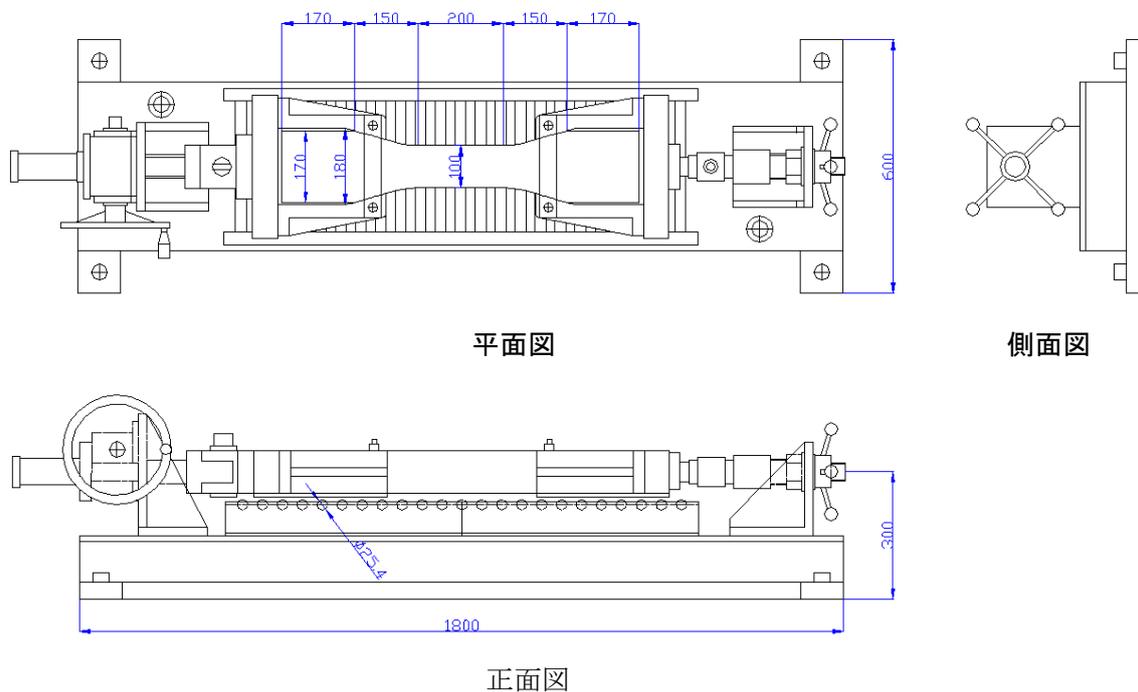


図 5-1 試験機概要



写真 5-2 直接引張強度試験供試体型枠

5.3 使用材料および配合

本試験で使用したセメントの物理的性質を表 5-2 に示す。目標とするスランプは 8cm、空気量は 4.5%とした。AE 減水剤については、標準型のポゾリス No.70 を使用した。なお、いずれのセメントにおいても、水セメント比 30%のものについては、所定のスランプを得るために、JIS A 6204 の高性能 AE 減水剤標準形(I 種)規定に適合するレオビルド SP8N を使用した。また、いずれの水準においても許容値をスランプで $12 \pm 2\text{cm}$ 、空気量で $4.5 \pm 1\%$ をとして配合を決定した。

表 5-3 に本試験で使用したセメントの化学成分、表 5-4 に、細骨材および粗骨材の物性値、表 5-5～5-6 および図 5-2 にふるい分け試験結果、表 5-7 に、各ケースにおけるコンクリート

配合を示す.

表 5-2 セメントの物理的性質

セメントの種類	区分	密度	比重面積	凝結		
		(g/cm ³)	(cm ² /g)	水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)
普通 ポルトランドセメント	品質例	3.15	3300	27.5	2-10	3-20
	JIS規格値	-	2500以上	—	60分以上	10時間以下
早強 ポルトランドセメント	品質例	2.98	3300	26.1	3-45	5-25
	JIS規格値	-	3000以上	—	60分以上	10時間以下
高炉セメントB種	品質例	3.04	3850	28.8	3-0	4-15
	JIS規格値	-	3000以上	—	60分以上	10時間以下
低発熱・収縮抑制型 高炉セメント	品質例	3.13	4550	29.5	1-55	2-50
	JIS規格値	-	3300以上	—	45分以上	10時間以下

表 5-3 セメントの化学成分

セメントの種類	化学成分 (%)				
	強熱減量	酸化マグネシウム	三酸化硫黄	全アルカリ	塩化物イオン
普通 ポルトランドセメント	1.7	1.45	1.95	0.58	0.015
早強 ポルトランドセメント	1	1.3	2.9	0.53	0.006
高炉B種セメント	1.69	3.08	2.25	-	0.011
低発熱・収縮抑制型 高炉セメント	0.6	4.7	3.9	-	-

表 5-4 骨材の物性値

	密度(g/cm ³)	吸水率(%)	粗粒率
陸砂(大井川水系)	2.58	2.34	2.63
硬質砂岩碎石(東京都青梅産)	2.66	0.5	6.75

表 5-5 細骨材(大井川水系陸砂)のふるい分け結果

ふるいの呼び寸法	10 mm	5 mm	2.5 mm	1.2 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm
各ふるいにとどまる量の累計百分率(%)	0	0	13	33	52	75	90

表 5-6 粗骨材(東京都青梅産硬質砂岩碎石)のふるい分け結果

ふるいの呼び寸法	30 mm	25 mm	20 mm	15 mm	10 mm	5 mm	2.5 mm
各ふるいにとどまる量の累計百分率(%)	0	0	6	30	70	99	100

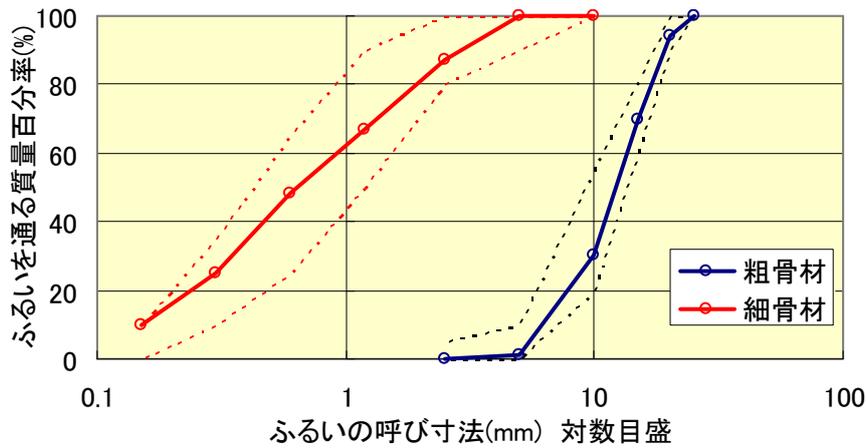


図 5-2 細骨材および粗骨材の粒度曲線

表 5-7 コンクリート配合

検討ケース	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				単位量 (/m ³)		
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE剤 (C×%)	AE減水剤 (ml/c=100kg)	高性能AE減水剤(g)
N30-W	30	37	166	533	592	1039	0.005	-	3731
N40-W	40	39	162	405	668	1074	0.004	250	-
N50-W	50	41	156	312	740	1094	0.004	250	-
N60-W	60	43	156	260	795	1082	0.004	250	-
H30-W	30	37	178	593	561	984	0.005	-	4151
H40-W	40	39	172	430	650	1044	0.005	250	-
H50-W	50	41	156	312	740	1093	0.005	250	-
H60-W	60	43	165	275	779	1065	0.005	250	-
BB30-W/A	30	37	163	543	585	1028	0.005	-	3258
BB40-W/A	40	39	163	408	662	1063	0.005	250	-
BB50-W/A	50	41	165	330	721	1069	0.005	250	-
BB60-W/A	60	43	158	263	788	1077	0.005	250	-
LBB30-W	30	40	152	507	653	1011	0.005	-	2535
LBB40-W	40	42	152	310	733	1040	0.005	250	-
LBB50-W	50	44	150	300	800	1048	0.005	250	-
LBB60-W	60	46	150	250	857	1035	0.005	250	-

5.4 実験結果

直接引張強度試験によって得られた結果を以下にまとめる。

破断後の供試体を写真 5-3～5-4 に示す。破断位置に関しては、図 5-3 に示すように、供試体全 204 本のうち、192 本が試験区間内で破断し、区間外で破断したものは全体の約 4% という結果となった。なお、破断位置は供試体の試験区間 220mm を 5 等分にして評価を行った。

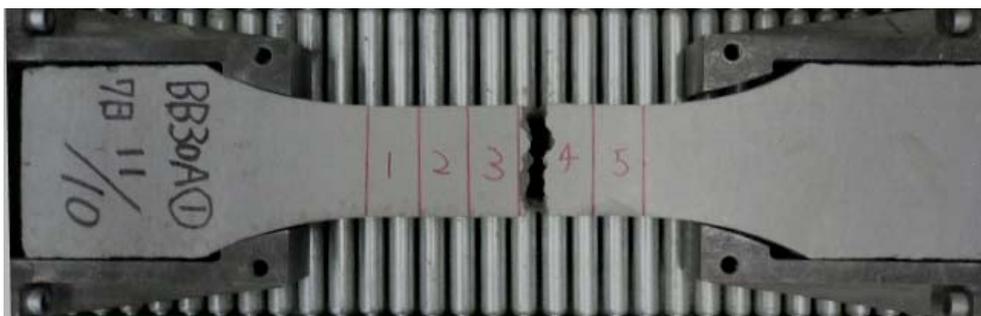


写真 5-3 供試体破断状況



写真 5-4 供試体破断面

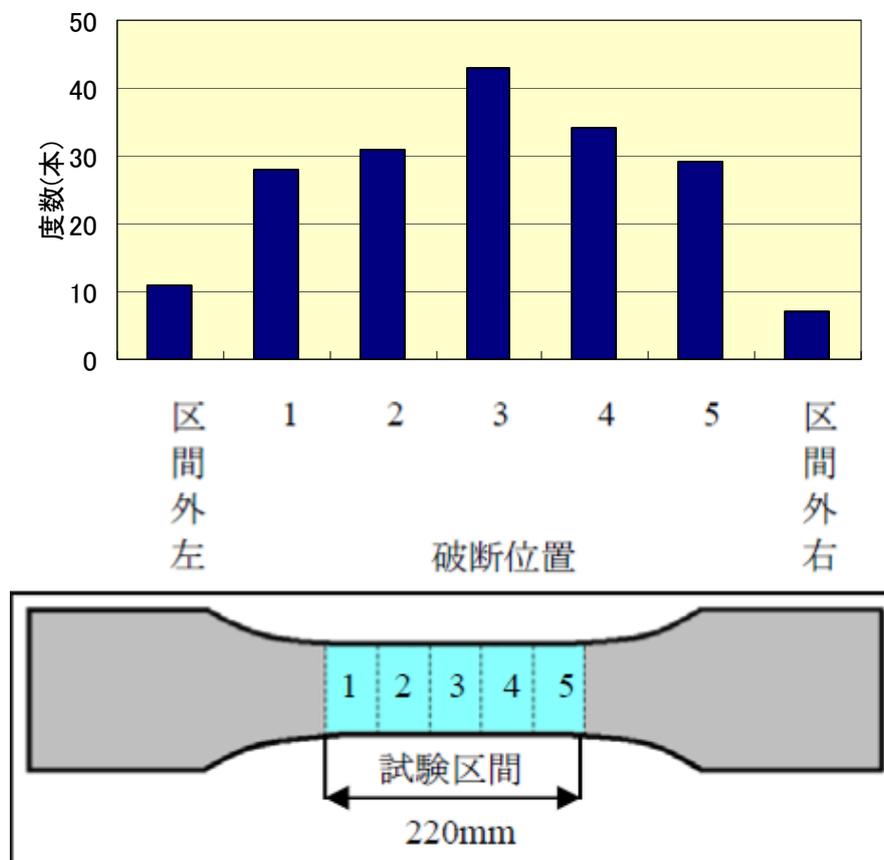


図 5-3 細骨材および粗骨材の粒度曲線

(1) 圧縮強度

図 5-4 から図 5-8 に材齢と直接引張強度試験と共に行った圧縮強度試験により得られた圧縮強度との関係をセメント別に示す。各供試体の値をマークによって示し、同一材齢 3 本の平均値を各材齢でつないだ直線によって示す。

図 5-4～5-8 より各ケースともに材齢の増進とともに、また、水セメント比が小さくなるごとに圧縮強度が大きくなる結果となった。

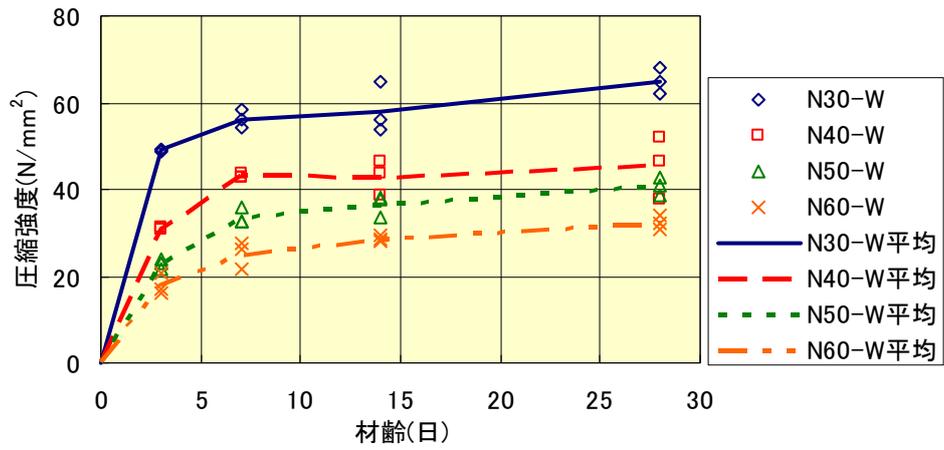


図 5-4 圧縮強度(普通ポルトランドセメント)

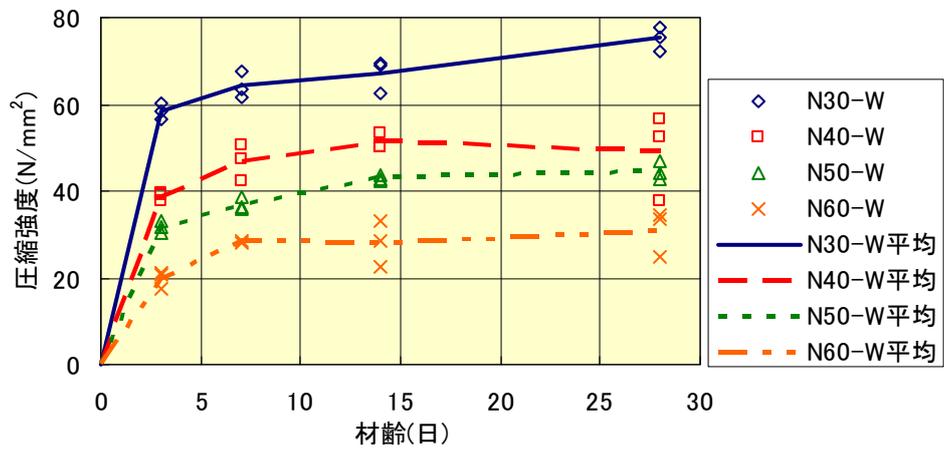


図 5-5 圧縮強度(早強ポルトランドセメント)

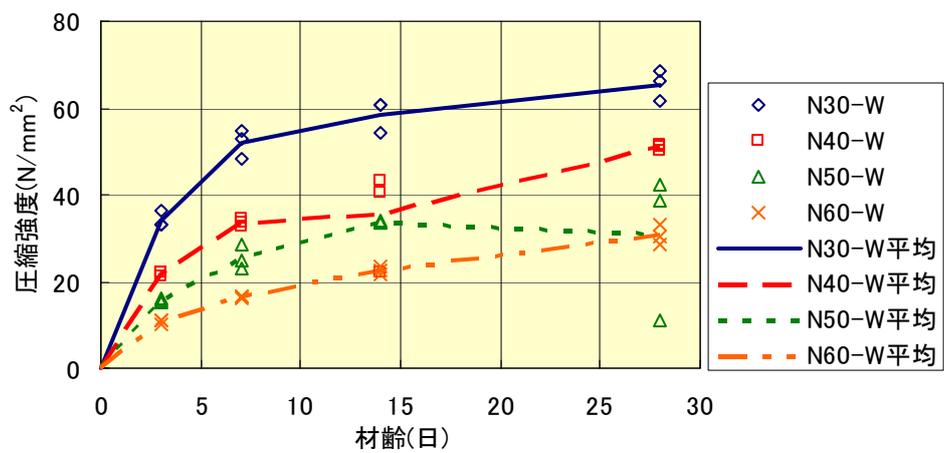


図 5-6 圧縮強度(高炉セメントB種-水中)

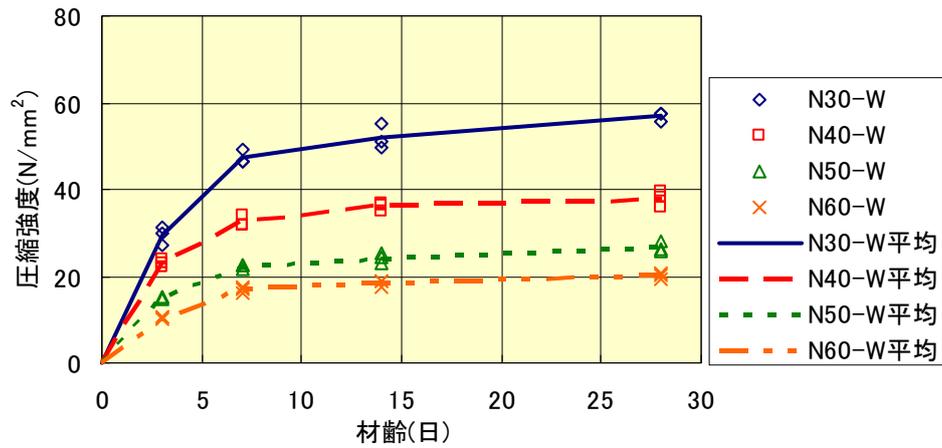


図 5-7 圧縮強度(高炉セメントB種-気中)

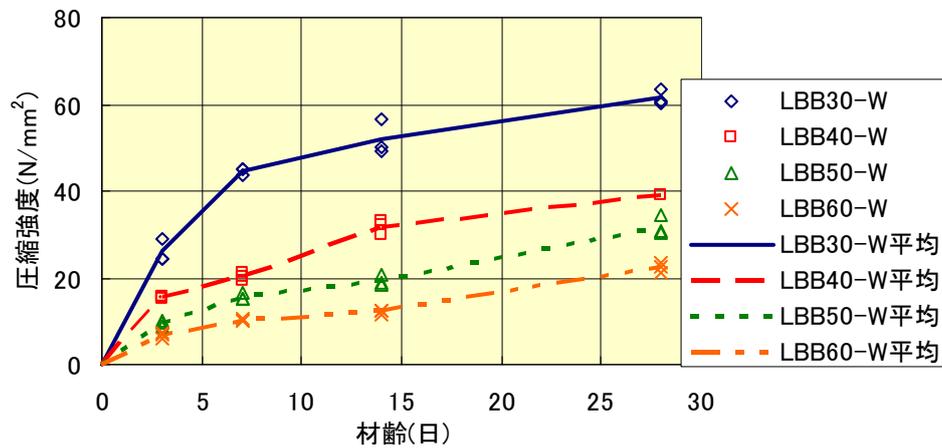


図 5-8 圧縮強度(低発熱収縮抑制型高炉セメントB種)

(2) 割裂引張強度

図 5-9 から図 5-13 に材齢と直接引張強度試験と共に行った割裂引張強度試験により得られた引張強度との関係をセメント別に示す。各供試体の値をマークによって示し、同一材齢 3 本の平均値を各材齢でつないだ線によって示す。

図 5-9～5-13 より圧縮強度と同様、全体に材齢の増進とともに、また、水セメント比が小さくなるごとに圧縮強度が大きくなる結果となった。B-W に関しては材齢が大きくなるにつれ、水セメント比ごとの差が小さくなる結果となった。

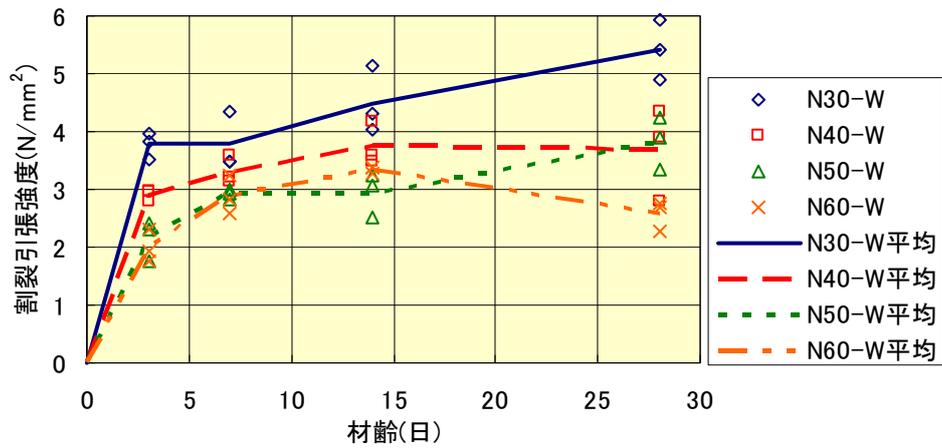


図 5-9 割裂引張強度(普通ポルトランドセメント)

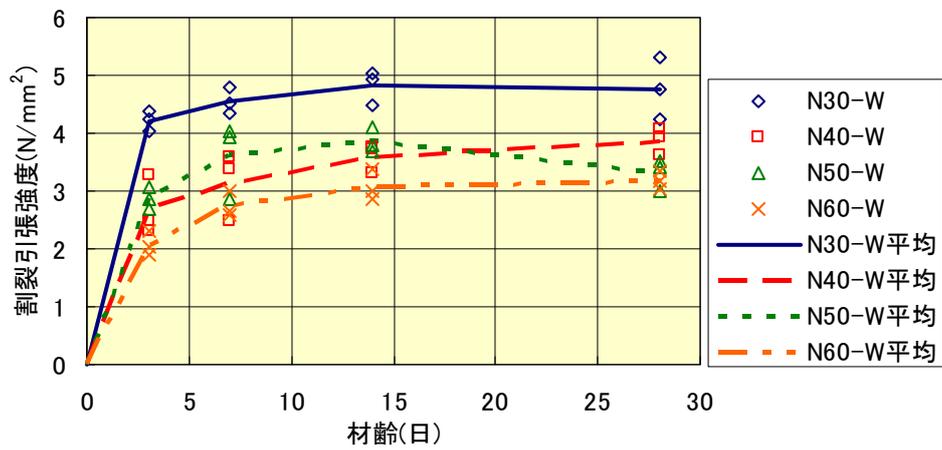


図 5-10 割裂引張強度(早強ポルトランドセメント)

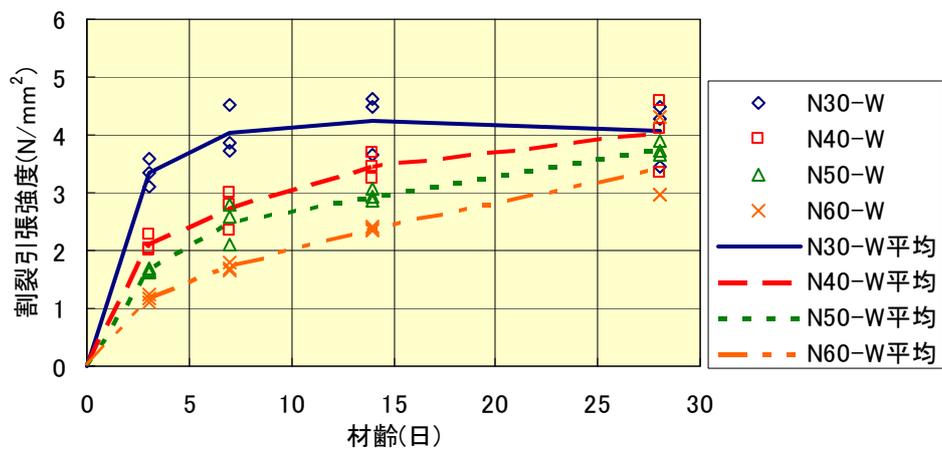


図 5-11 割裂引張強度(高炉セメントB種-水中)

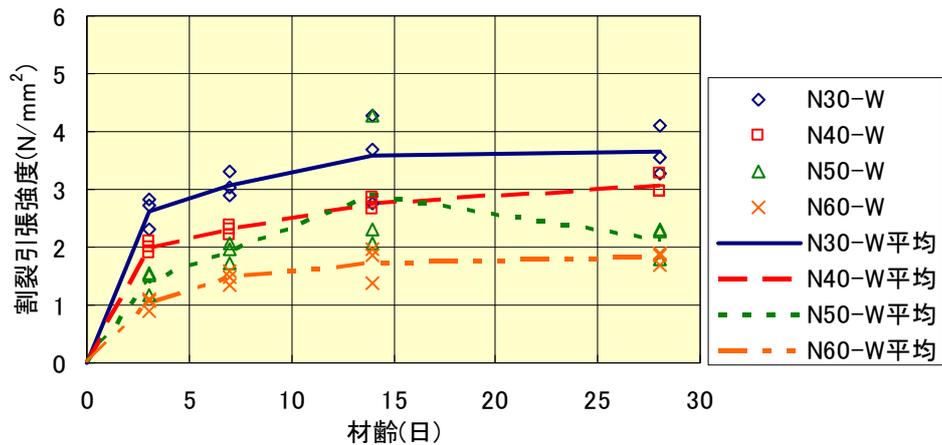


図 5-12 割裂引張強度(高炉セメントB種-気中)

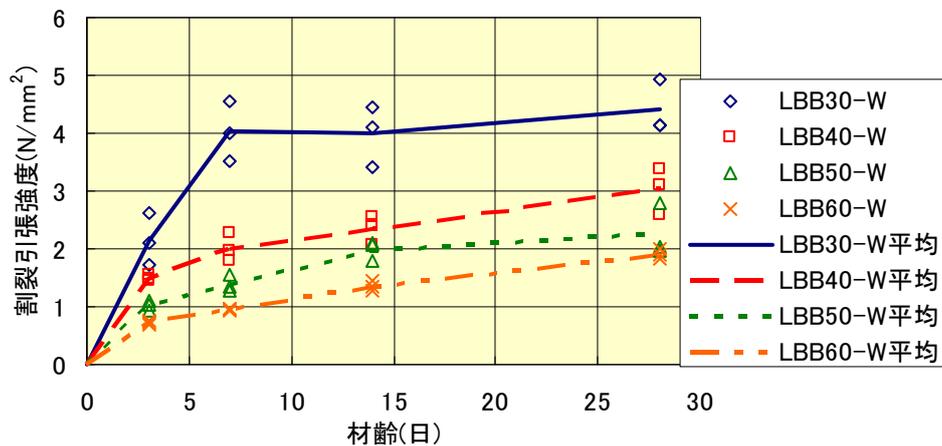


図 5-13 割裂引張強度(低発熱収縮抑制型高炉セメントB種)

(3) 直接引張強度

図 5-14 から図 5-18 に材齢と直接引張強度との関係をセメント別を示す。各供試体の値をマークによって示し、同一材齢 3 本の平均値を各材齢でつないだ線によって示す。

図 5-14~5-18 より全体に材齢の増進とともに、また、水セメント比が小さくなるごとに圧縮強度が大きくなる結果となつ傾向を示したものの、直接引張強度に関しては、検討ケースによっては大きくばらつく結果となった。このことは、複合材料であるコンクリートは強度特性についても不均一であることが考えられ、また直接引張強度試験では理論上試験区間内の最も小さな引張強度をえることが起因していると推察される。

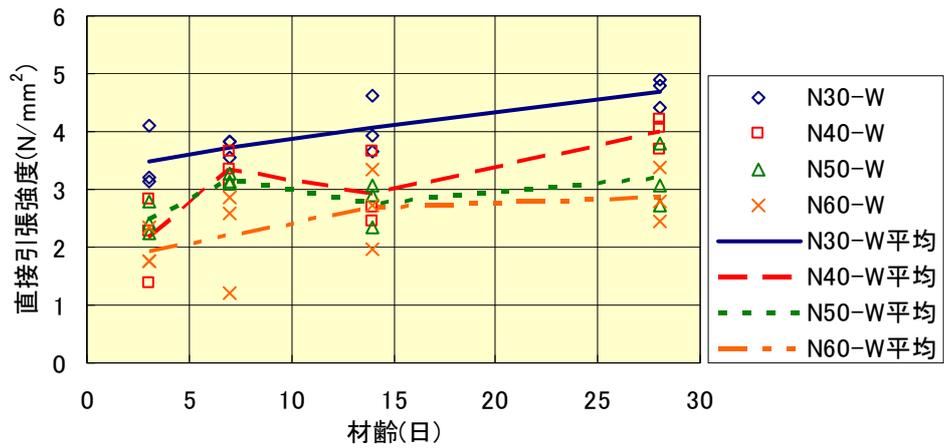


図 5-14 直接引張強度(普通ポルトランドセメント)

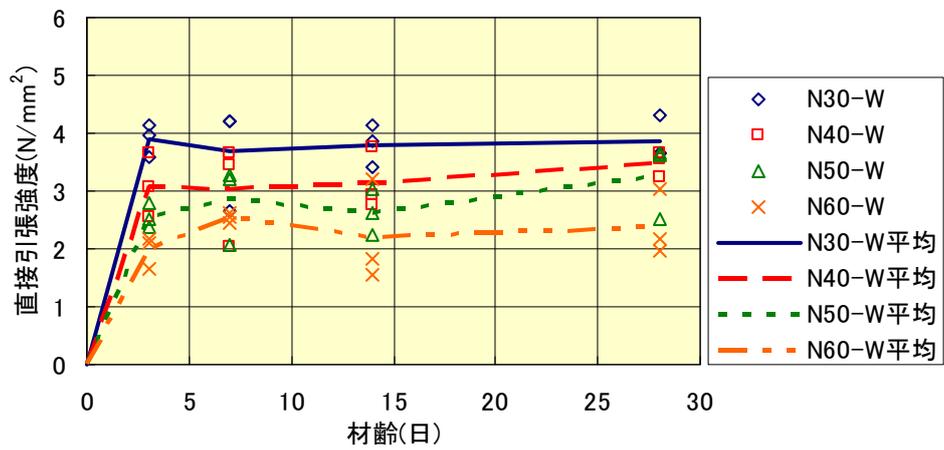


図 5-15 直接引張強度(早強ポルトランドセメント)

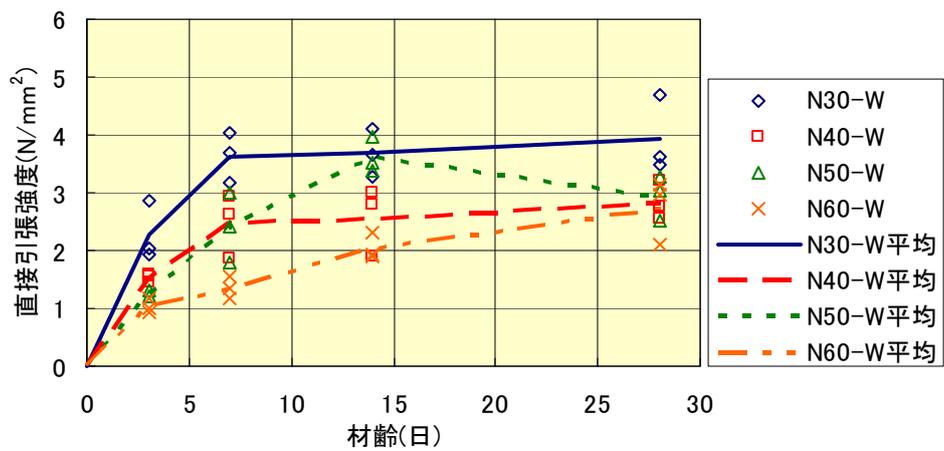


図 5-16 直接引張強度(高炉セメントB種-水中)

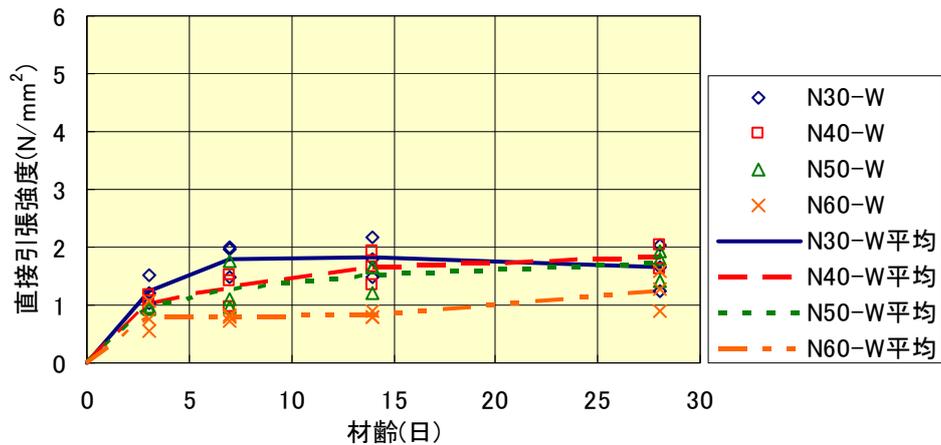


図 5-17 直接引張強度(高炉セメントB種-気中)

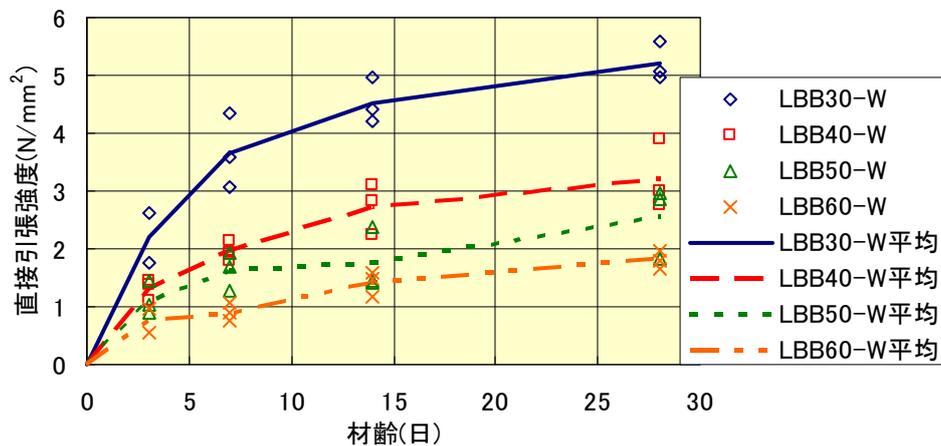


図 5-18 直接引張強度(低発熱収縮抑制型高炉セメントB種)

(4) 圧縮ヤング係数

図 5-19 から図 5-23 に材齢と圧縮強度試験により得られたヤング係数との関係をセメント別に示す。各供試体の値をマークによって示し、同一材齢 3 本の平均値を各材齢でつないだ線によって示す。

なお、以降、圧縮強度試験から求めたヤング係数を圧縮ヤング係数と称す。

図 5-19～5-23 より、各ケースともに材齢の経過とともに圧縮ヤング係数が大きくなる傾向を示したものの、材齢 3 日時点からの圧縮ヤング係数の伸びは小さくなる結果となった。このことから、圧縮ヤング係数は若材齢時に急激に増進することが考えられる。若材齢時の特性を評価する場合、圧縮ヤング係数の特性について考慮することが重要であると思われる。

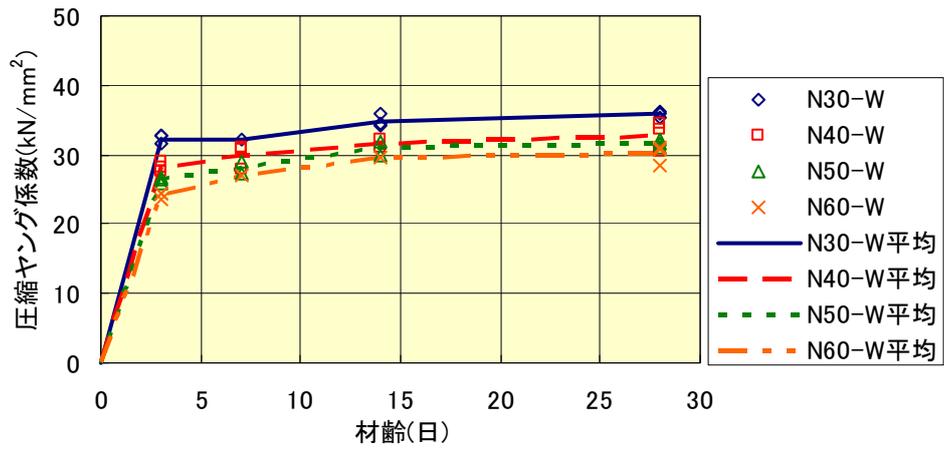


図 5-19 圧縮ヤング係数 (普通ポルトランドセメント)

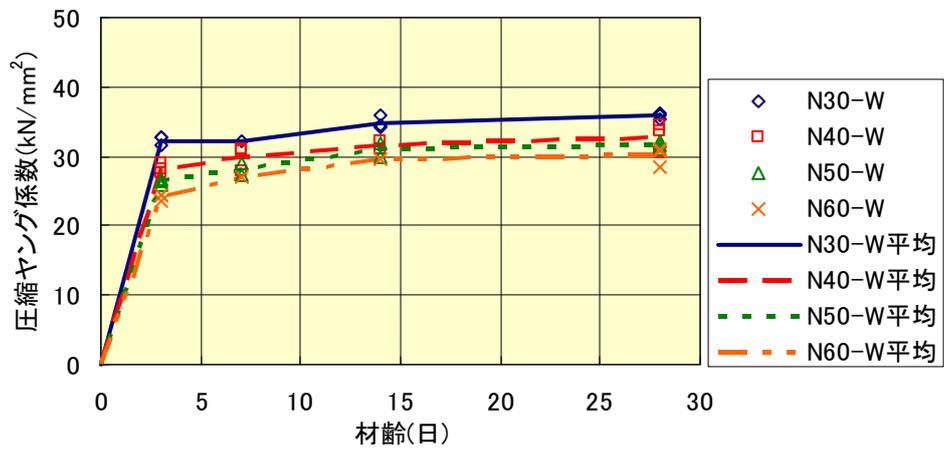


図 5-20 圧縮ヤング係数 (早強ポルトランドセメント)

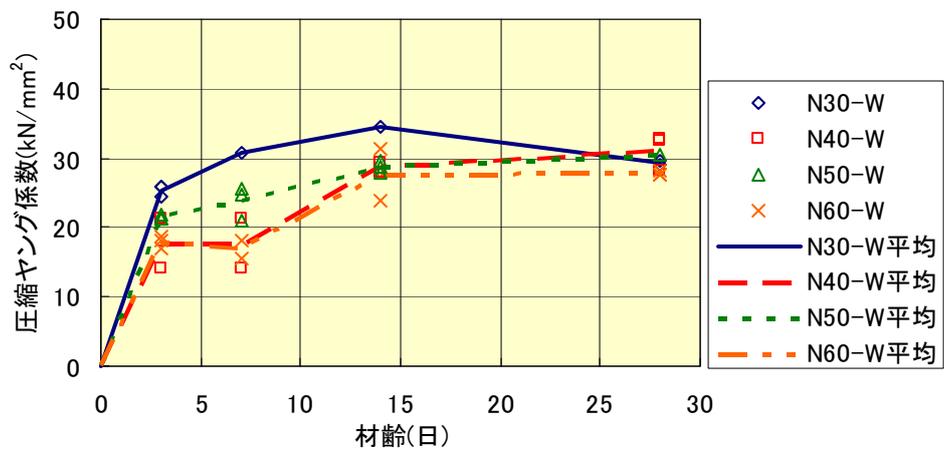


図 5-21 圧縮ヤング係数 (高炉セメントB種-水中)

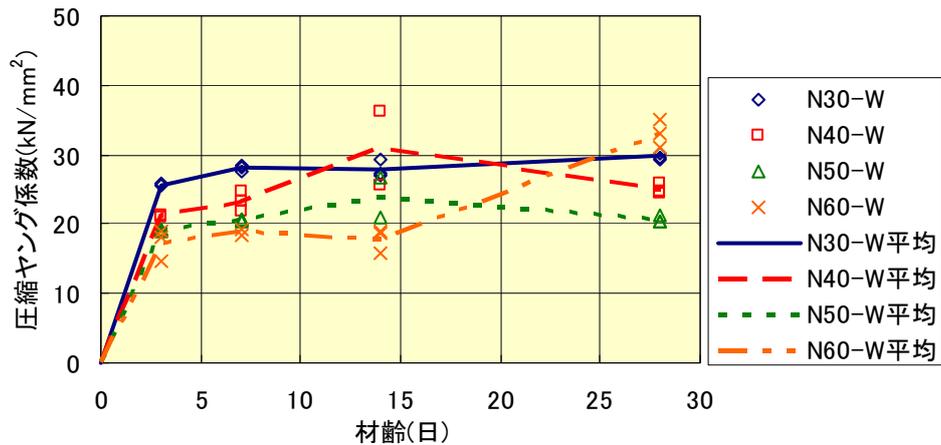


図 5-22 圧縮ヤング係数(高炉セメントB種-気中)

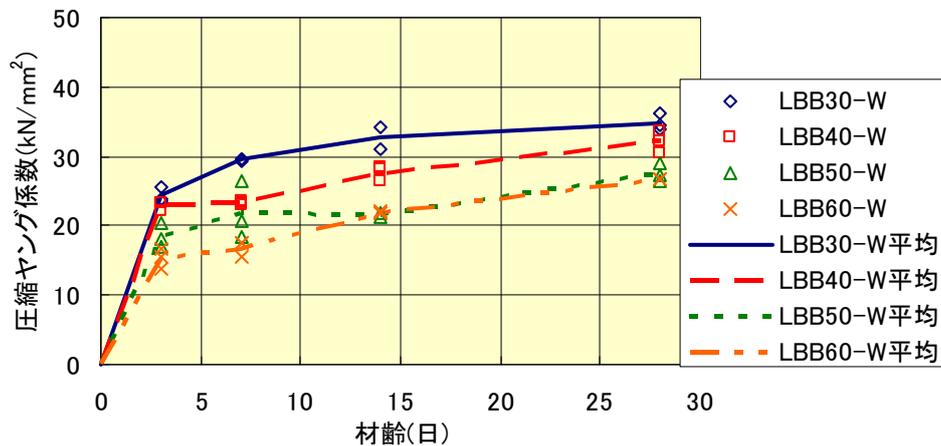


図 5-23 圧縮ヤング係数(低発熱収縮抑制型高炉セメントB種)

(5) 引張ヤング係数

本研究では、左右のひずみの平均を求めた場合、どの水準においても応力とひずみの関係が試験開始から破断にいたるまではほぼ線形関係にあったことから、試験開始から破断にいたるまでの応力と左右のひずみの平均のひずみの関係から示される分布図を線形近似し、その傾きからヤング係数を算出した。図 5-24 に供試体左右に取り付けたひずみゲージから得られたひずみ履歴の一例(検討ケース: N50-W, 材齢: 28 日, 供試体番号: No.2)を示す。左右のひずみともに破断にいたるまで同一線上に分布していることから、供試体に曲げが作用することなく純粋な引張力が作用していると思われる。

なお、以降圧縮ヤング係数との区別のため、直接引張強度試験から求めたヤング係数を引張ヤング係数と称す。

図 5-25 から図 5-29 に直接引張強度試験により得られた引張ヤング係数をセメント別に示す。各供試体の値をマークによって示し、同一材齢 3 本の平均値を各材齢でつないだ線に

よって示す。

図 5-25～5-29 より，圧縮ヤング係数と同様，各ケースともに材齢の経過とともに引張ヤング係数が大きくなる傾向を示したものの，材齢 3 日時点からの圧縮ヤング係数の伸びは小さくなる結果となった。

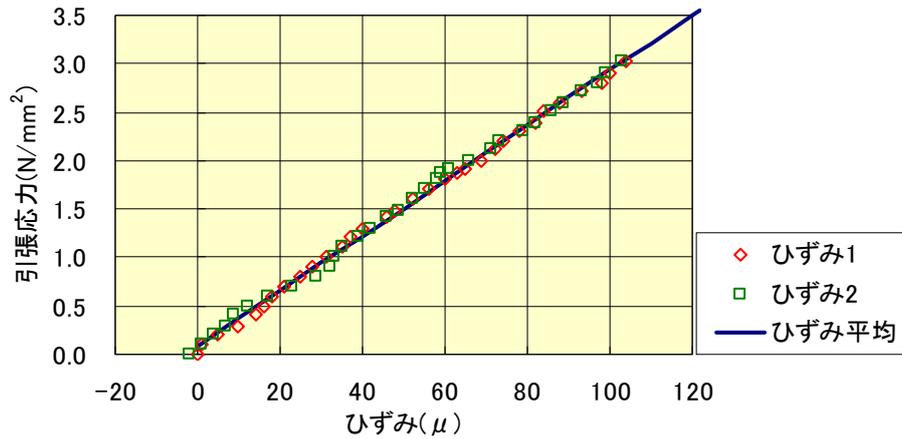


図 5-24 ひずみと引張応力の関係 (N50-d28-No. 2)

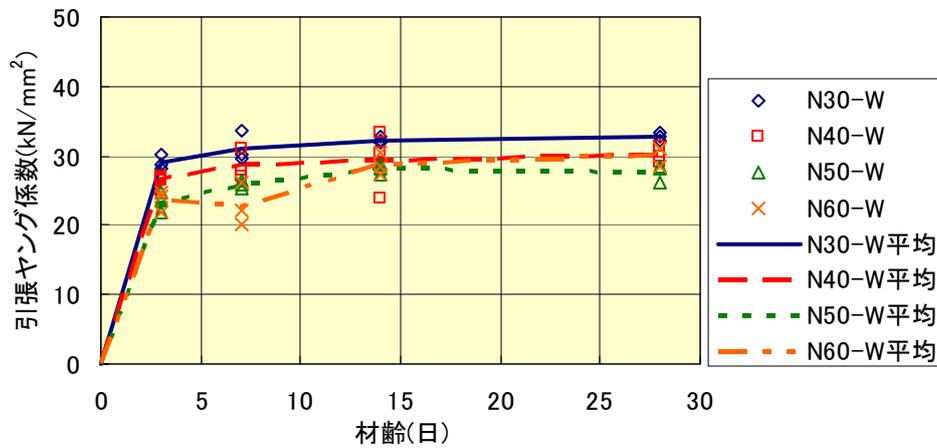


図 5-25 引張ヤング係数 (普通ポルトランドセメント)

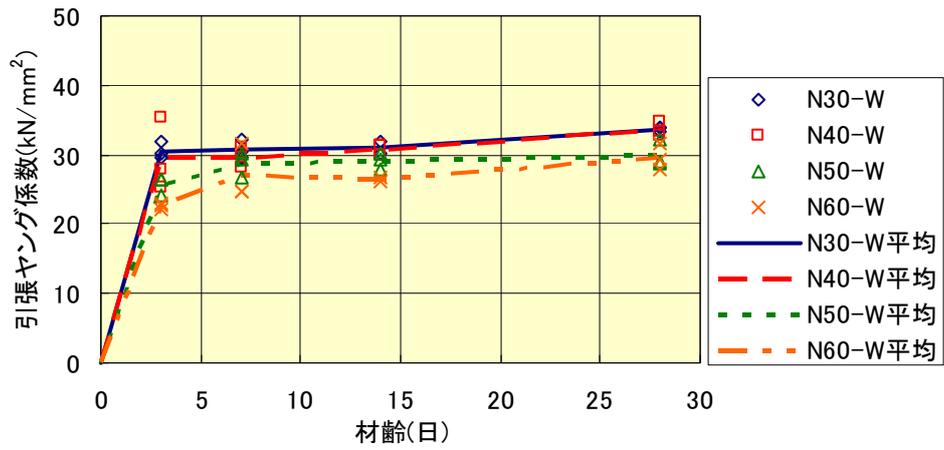


図 5-26 引張ヤング係数(早強ポルトランドセメント)

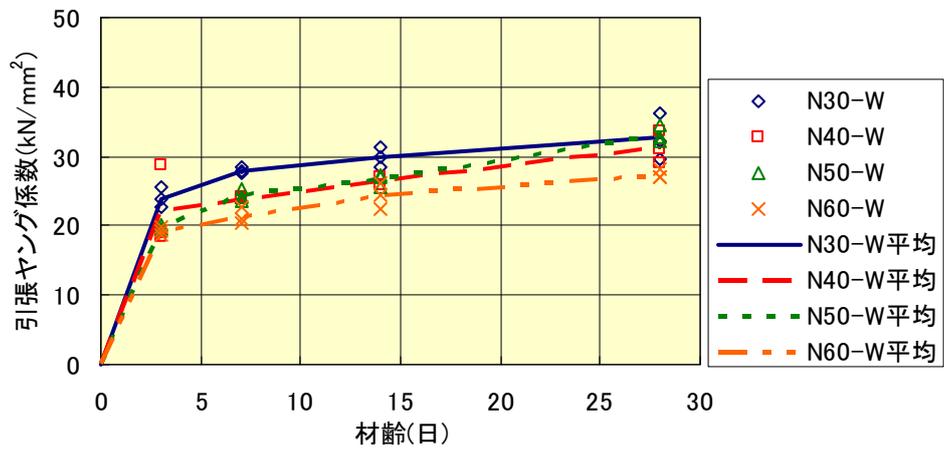


図 5-27 引張ヤング係数(高炉セメントB種-水中)

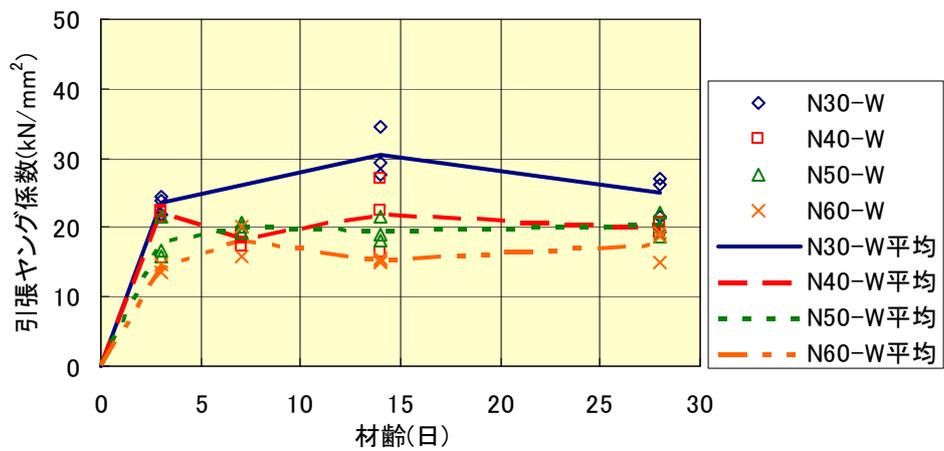


図 5-28 引張ヤング係数(高炉セメントB種-気中)

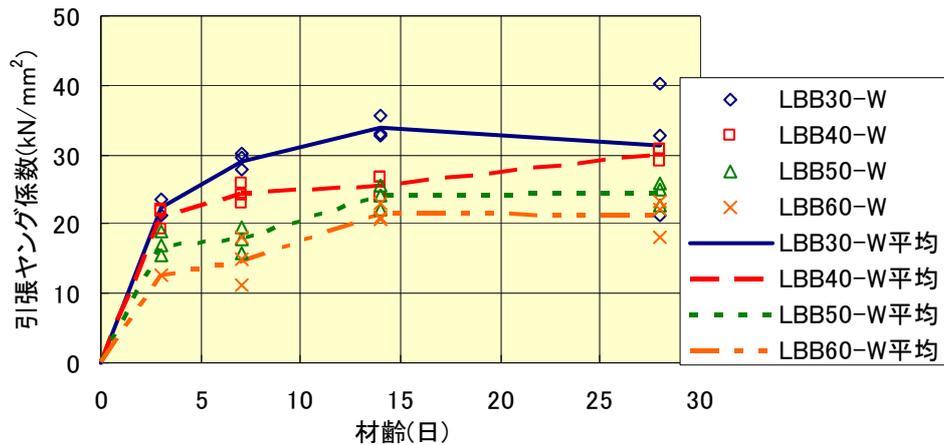


図 5-29 引張ヤング係数(低発熱収縮抑制型高炉セメントB種)

(6) 引張強度の検討

各種セメントごとにグループ化した直接引張強度と割裂引張強度の関係を図 5-30、養生別にグループ化した直接引張強度と割裂引張強度の関係を図 5-31 に示す。また、圧縮強度と割裂引張強度および直接引張強度との関係を図 5-32～図 5-36 に示す。なお、図中のひび割れ制御 08 は、日本コンクリート工学協会マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008 の算定式³⁾を用いた。

図 5-30 より、水中養生した場合、割裂引張強度は直接引張試験よりも約 8%、気中養生した場合は約 67%、全体としては約 12%大きくなる結果となった。

割裂引張強度が直接引張強度よりも大きくなる理由としては、粗骨材とモルタルとの付着の影響が考えられる。これは、コンクリート中に様な引張力が作用している状況下において、粗骨材とモルタルとの境界面が最弱点であると仮定するならば、割裂引張試験では、境界面での付着力を十分に考慮することができないためである。つまり、割裂引張試験では、ひび割れが生じる断面がある程度限定されているのに対し、直接引張試験では、理論上最も強度の小さい断面を選択し得る自由度を有していることが原因であると考えられる。今後は、ひび割れ断面における、粗骨材の面積とモルタルとの面積割合が引張強度に及ぼす影響についても考慮していく必要があるのではないかと考えられる。

図 5-32 より、普通セメントを用いた場合には、割裂引張強度は直接引張強度より約 8%大きく、圧縮強度の発現に伴う割裂引張強度の増加はひび割れ制御指針 08 とほぼ同等であった。

図 5-33 より、早強セメントを用いた場合には、割裂引張強度は直接引張強度より約 14%大きく、圧縮強度の発現に伴う引張強度の増加傾向が、直接引張では小さいことから、早強セメントの引張強度は、材齢初期に強度が発現すると、その後ほとんど増加しないと考えられる。

図 5-34 より、低発熱収縮抑制型高炉セメントを用いた場合には、割裂引張強度と直接引

張強度はほぼ同等であり、両者ともひび割れ制御指針 08 にきわめて近い結果となった。

図 5-35 より、高炉セメント B 種を用い水中養生した場合には、割裂引張強度は直接引張強度より約 13%大きく、圧縮強度の発現に伴う引張強度の増加傾向は両者ともにほぼ線形に近い結果となった。また、割裂引張強度はひび割れ制御指針 08 にきわめて近い結果となった。

図 5-36 より、高炉セメント B 種を用い気中養生した場合には、直接引張強度の進展が著しく低下し、水中養生した時の 50%程の強度にしかならない結果となった。このことは、高炉セメント B 種を用いた場合、初期養生を十分に行わないと、強度増進が期待できないことを示すものであり、構造設計を行う際に、割裂引張試験の実験値を用いる際には、許容値・設計値の定め方に十分注意する必要があると思われる。また、圧縮強度の増進に伴って、割裂引張強度と直接引張強度の差が顕著になった理由としては、気中養生することにより、供試体の表面から水分が蒸発し、表面部における引張強度の低下が大きくなるからではないかと考えられる。つまり、割裂引張試験は乾燥の影響を受ける円柱供試体の表面から離れた位置でひび割れが起こるのに対し、直接引張試験は、乾燥の影響を受ける供試体表面の中で、ひび割れの生じる断面位置の自由度が高いため、強度差が顕著に現れたと考えられる。

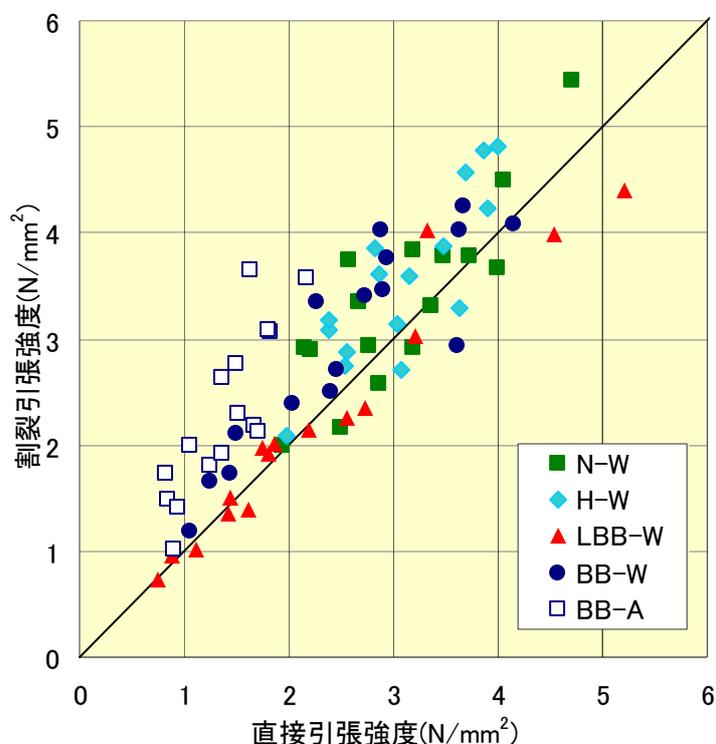


図 5-30 直接引張強度と割裂引張強度の関係（全ケース）

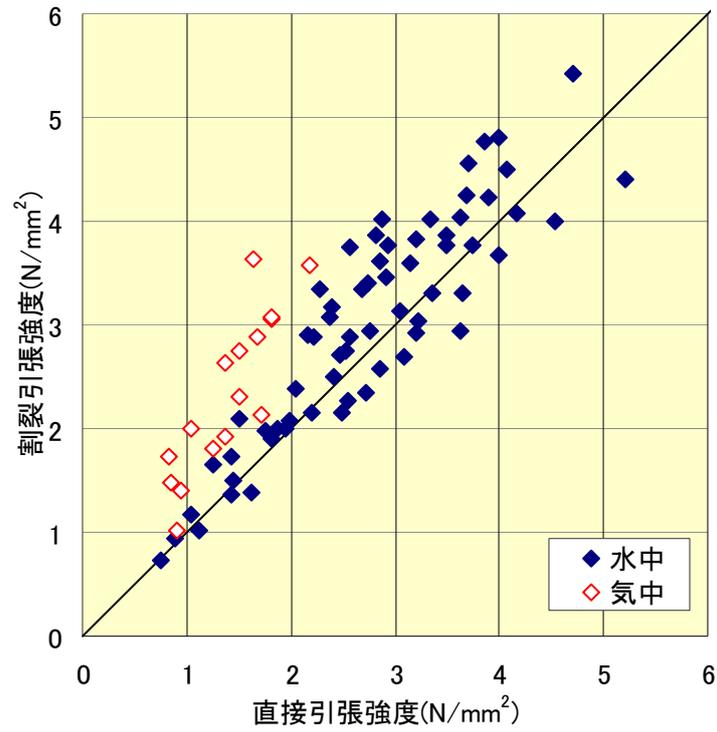


図 5-31 直接引張強度と割裂引張強度の関係(養生別)

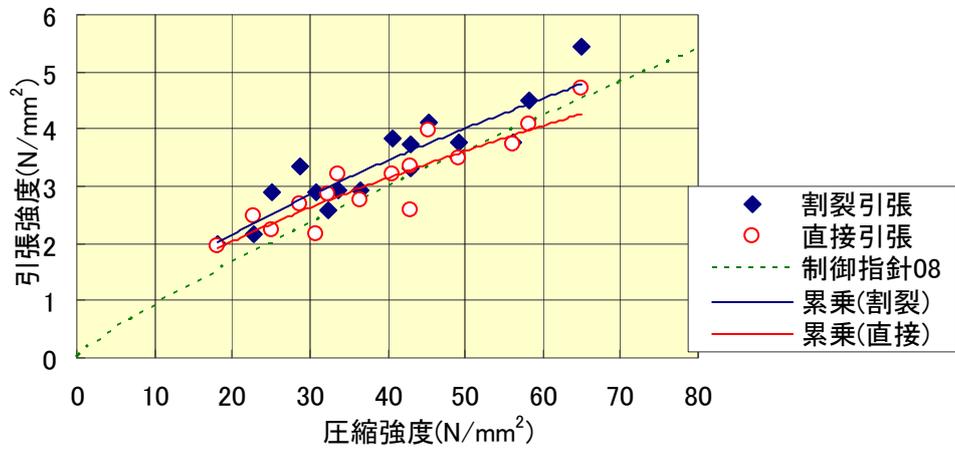


図 5-32 圧縮強度と引張強度の関係(普通ポルトランドセメント)

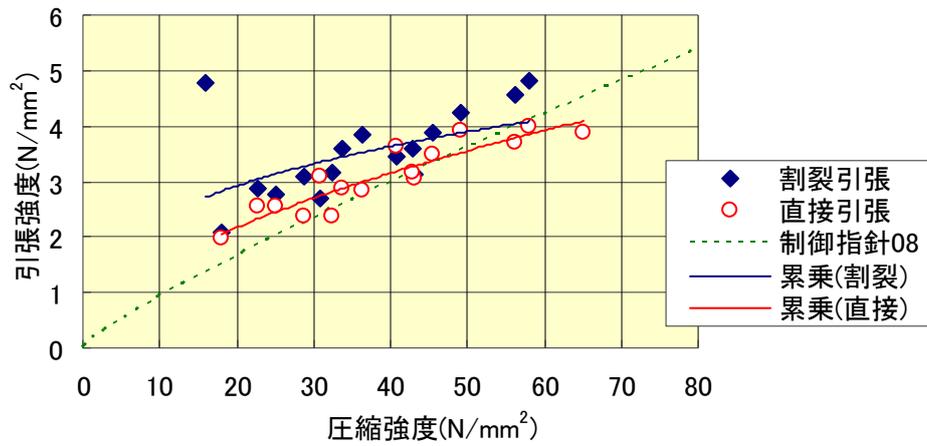


図 5-33 圧縮強度と引張強度の関係(早強ポルトランドセメント)

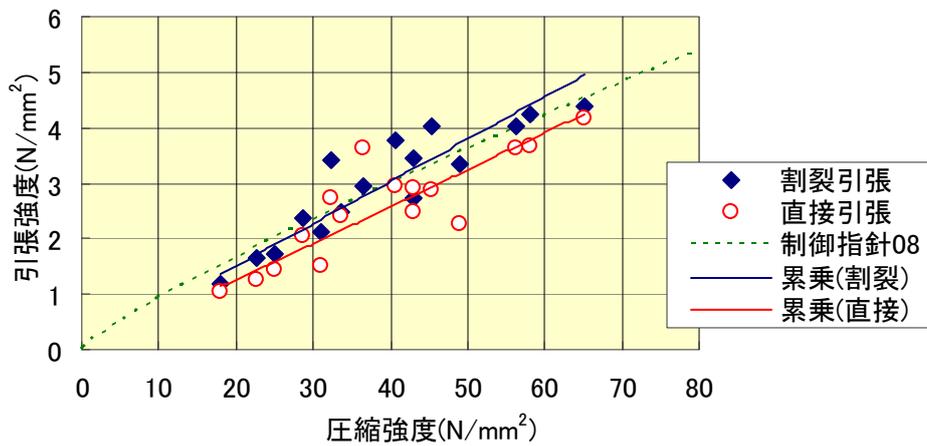


図 5-34 圧縮強度と引張強度の関係(高炉セメントB種, 水中)

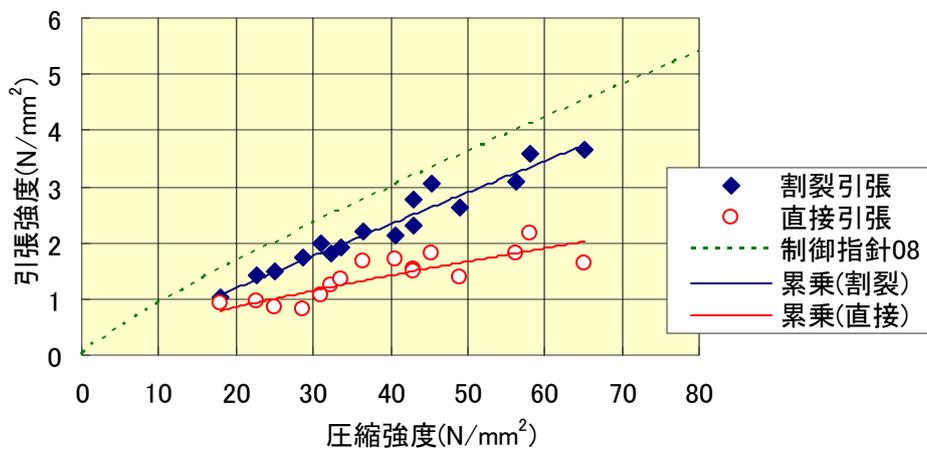


図 5-35 圧縮強度と引張強度の関係(高炉セメントB種, 気中)

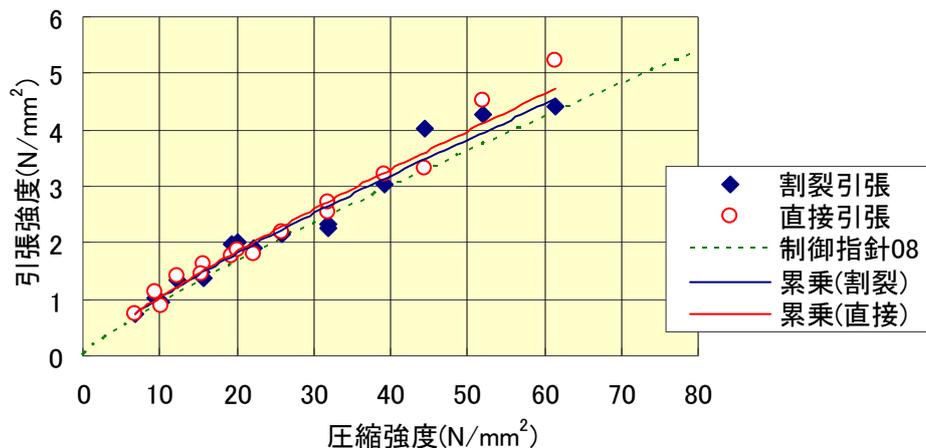


図 5-36 圧縮強度と引張強度の関係(低発熱収縮抑制型高炉セメント)

(7) ヤング係数の検討

直接引張試験によって得られた接線引張ヤング係数と圧縮強度試験により得られた割線圧縮ヤング係数を図 5-37～図 5-41 に示す。

図 5-37 より、普通セメントを用いた場合には、圧縮ヤング係数は、引張ヤング係数よりも約 7%大きい結果となった。

図 5-38 より、早強セメントを用いた場合には、圧縮ヤング係数は、引張ヤング係数よりも約 4%大きく、ヤング係数の増加割合は両者とも、土木学会式 4)によるヤング係数の増加割合よりも小さい結果となった。

図 5-39 より、MKCⅢを用いた場合には、圧縮ヤング係数と引張ヤング係数はほぼ同等であり、ヤング係数の増加割合は、土木学会式によるヤング係数の増加割合にきわめて近い結果となった。

図 5-40 より、高炉セメントを用いた場合には、圧縮ヤング係数と引張ヤング係数はほぼ等しい結果となった。ヤング係数の算定方法が、引張ヤング係数と圧縮ヤング係数で異なることによる影響や、ヤング係数を算定する際の応力レベルが異なることによる影響は明らかでないが、現状では、養生を十分に行った場合であれば、収縮応力を予測する際に、圧縮ヤング係数を用いても問題はないと考えられる⁵⁾。

また、図-40 および図-41 より、気中養生した場合の高炉セメントのヤング係数は、水中養生したときに比べ圧縮ヤング係数がわずかに小さくなっているのに対し、引張ヤング係数は著しく低下している。さらに、圧縮強度レベルが高くなっても、引張ヤング係数がほぼ一定となる結果となった。

養生条件が引張ヤング係数に大きな影響を及ぼした理由としては、引張強度と同様に、遷移領域の影響が考えられる。コンクリートのヤング係数に影響する因子として骨材、モルタルマトリックス、遷移領域の三相材料としてのモデル化が適切であると仮定するならば、他の相よりも脆弱である遷移領域が、乾燥の影響を大きく受けたことにより、養生条

件が引張ヤング係数に影響を及ぼしたものと考えられる。

また、圧縮強度レベルが高くなっても、引張ヤング係数がほぼ一定となることについては、低下の違いはあるものの、下村ら⁶⁾が行った角柱型一軸直接引張の試験結果において、引張ヤング係数が乾燥開始 1.6 日で 10%程度低下し、それ以上乾燥を継続させても低下率は増大しないとする報告と同じ傾向であった。収縮拘束応力等を予測する際に、ヤング係数を使用する場合には、養生条件に注意する必要があると思われる。

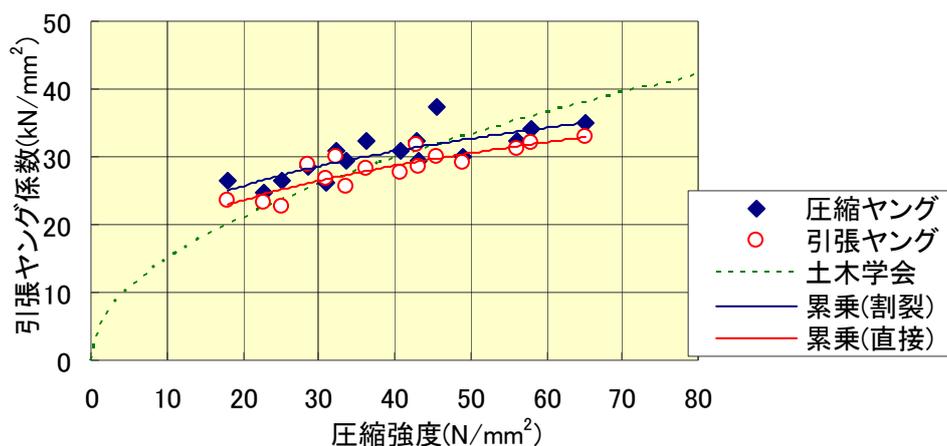


図 5-37 圧縮強度とヤング係数の関係(普通ポルトランドセメント)

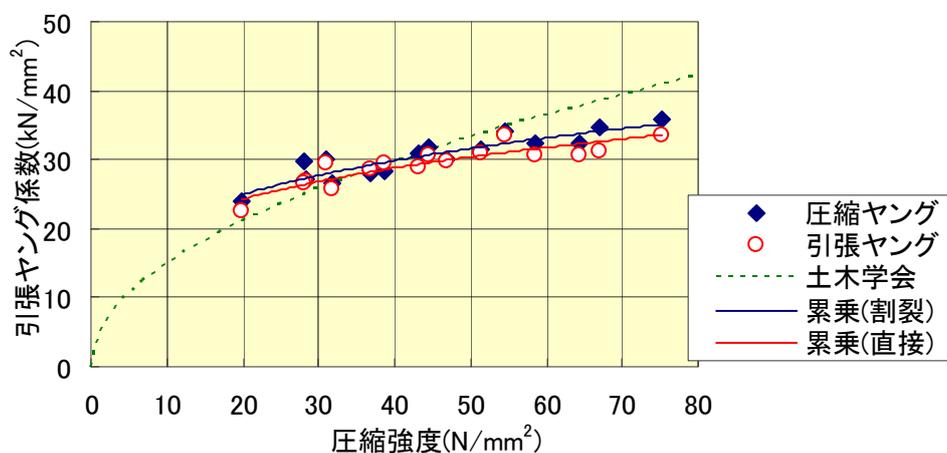


図 5-38 圧縮強度とヤング係数の関係(早強ポルトランドセメント)

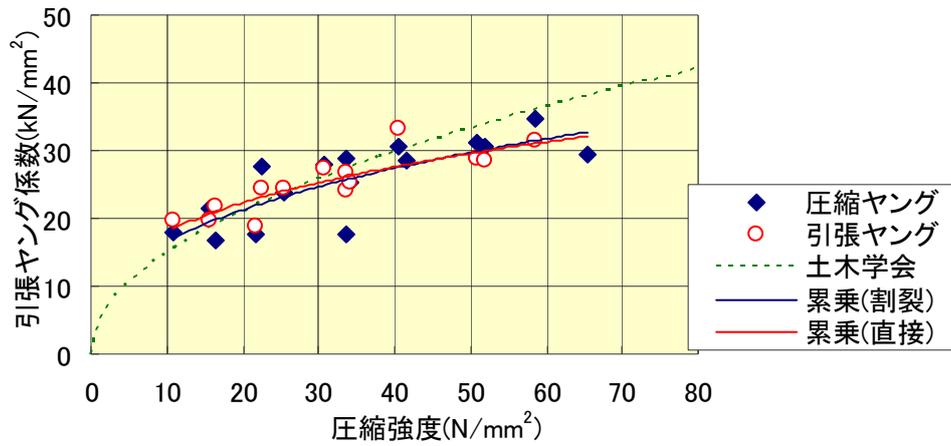


図 5-39 圧縮強度とヤング係数の関係 (高炉セメントB種, 水中)

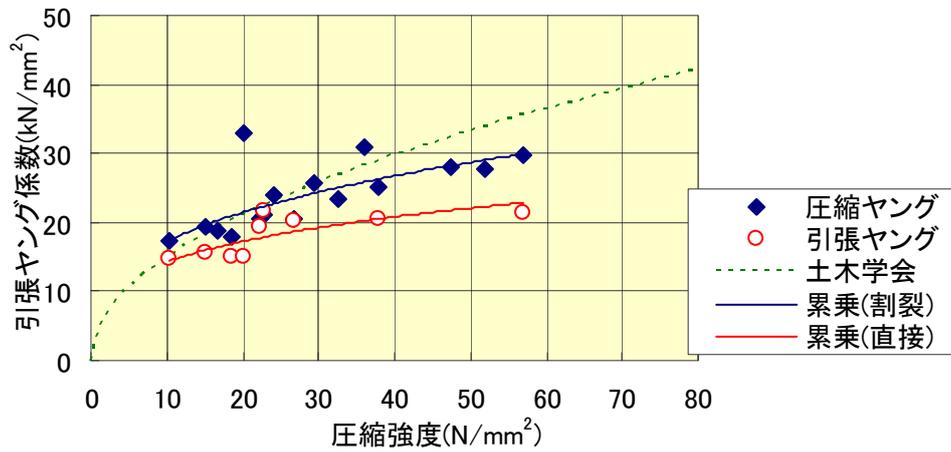


図 5-40 圧縮強度とヤング係数の関係 (高炉セメントB種, 水中)

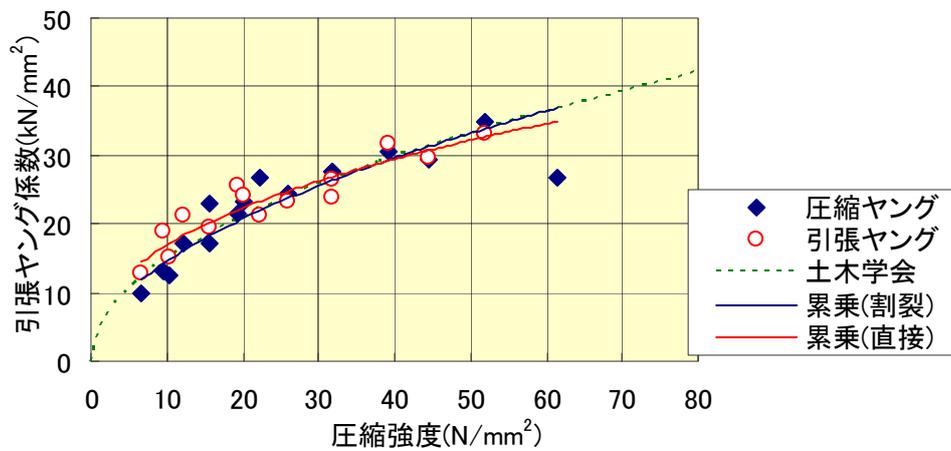


図 5-41 圧縮強度とヤング係数の関係 (低発熱収縮抑制型高炉セメント)

(8) 伸び能力の検討

直接引張試験における破壊時の引張ひずみと引張強度との関係を図 5-42 に示す。

図 5-42 より、早強セメントおよび高炉 B 種セメントにおいては、引張ひずみが 130μ 前後に達すると、引張強度の増進に伴う引張ひずみの増進が小さくなる結果となった。このことは、コンクリートの破断が引張強度よりも低い応力で発生する可能性があることを示すものであり、静的な短時間強度試験下においてよく適用されている引張応力が引張強度を超えた場合にひび割れ発生が生じるというだけで、ひび割れ発生基準とするので破壊時のひずみも考慮したひび割れ発生の評価を行う必要があると思われる。

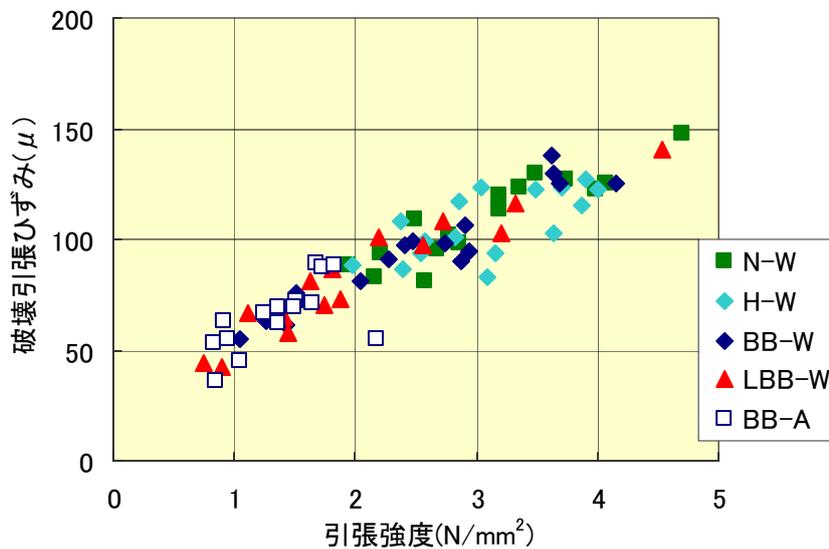


図 5-42 引張強度と破壊引張ひずみの関係

5.5 まとめ

本章では、若材齢コンクリートの引張特性および、ひび割れ発生条件について、主として直接引張試験装置を用いて実験的検討を行った。検討を行う際には、使用するセメントの種類、養生条件、圧縮強度レベルの影響に着目した。本章で得られた知見を以下にまとめる。

水中養生したコンクリートの割裂引張強度は直接引張強度より約 5%大きい。

高炉セメントは初期乾燥を受けることにより、直接引張強度の発現が著しく低下し、圧縮強度 40N/mm^2 以上の領域では、水中養生した場合と比べ、50%程の強度しか出ない結果となった。

水中養生をした場合のヤング係数は、圧縮強度が 70N/mm^2 以下の範囲内であれば、引張ヤング係数と圧縮ヤング係数はほぼ同等である。

初期乾燥を受けた高炉セメントは、引張ヤング係数が低下し、その後、圧縮強度が増進

してもほぼ一定である。

セメントの種別によっては、引張強度に達する前に伸び能力の限界に達する可能性があり、ひび割れ発生条件に用いる場合はこの点に注意する必要がある。

第6章 一軸拘束試験

6.1 概要

若材齢時コンクリートは水和の進行速度が速く、コンクリートの諸物性が時々刻々と変化するため、精度の高い試験データを得ることが必要となる。このような試験装置としては、R.Springenschmid¹⁾らが提案した Thermal-Stress Testing Machine (TSTM) が最も適していると思われる。TSTM は打設直後からセメントの水和熱による発熱過程を忠実に再現するとともに、一軸方向に対して任意の拘束条件を与えることができる試験機であり、脱型後に載荷する一般的に行われている試験法とは異なるものである。また、従来の試験機や実構造物では計測が難しいとされている、若材齢時のクリープや自己収縮についても測定も可能である。

本章では、若材齢時のコンクリートを対象とし、TSTM を用いた試験および割裂引張試験から、異なる拘束条件下における応力の発生やひび割れ発生挙動を把握することを目的として実験を行った。

6.2 実験方法

TSTM は、コンクリート供試体に任意の拘束度を与える拘束試験装置と、ひずみ制御のもととなる際の自由ひずみを測定する無拘束試験装置からなる。拘束試験装置及び無拘束試験装置外観および概要、ならびに両供試体の概要を写真 6-1～6-2 および図 6-1～6-4 に示す。両試験装置には供試体の左右に変位計を設置されており、ひずみの測定を行うとともに、型枠内に設置した通水パイプに温水あるいは冷水を通水させることにより、事前に任意に設定した温度履歴を与え、セメントの水和発熱によるコンクリート内部の温度上昇及び温度降下の過程を再現することができる。図 6-3～6-4 に示す、拘束試験装置で 5 点、無拘束試験装置で 3 点において温度を測定した。このうち両供試体の中央部の温度を基にして温度制御が行われる。本検討では過去に行われたマスコンクリートである橋脚の施工時の温度計測データを用い、実構造物の内部に生じる温度状態を再現した。両コンクリート供試体に与えた温度制御用の温度履歴を図 6-5 に示す。

また、無拘束供試体に生じる自由ひずみを基に、外部アクチュエータによって拘束供試体に荷重を加え、拘束供試体のひずみを完全拘束状態(拘束度=1.0)から無拘束状態(拘束度=0.0)の間の任意の拘束条件下での制御が可能である。以上のようにして、実構造物に生じる温度状態および拘束状態を再現し、マスコンクリート内部に生じる応力履歴を推定するものである。試験測定の開始は、コンクリートの凝結始発開始時間とした。コンクリートは凝結始発開始時間前から発熱するが、ひずみ測定用に埋め込んだ標点棒がコンクリートと同調するには、ある程度コンクリートが自立するまで待つ必要があるためである。コンクリートの凝結始発開始時間の判断は「コンクリートの凝結時間試験方法(JIS A 1147-2001)」に従った。

本試験では、T S T Mによる試験とともに割裂引張強度試験を行い、引張強度と発生応力との関係についても検討をおこなった。割裂引張強度試験の試験材齢は3, 5, 7, 14日を原則としたが、T S T Mにおけるひび割れ発生時における引張強度を得るために適宜試験材齢を変更して行うものとした。

本検討では、拘束度 0.8, 0.6, 0.4 の3水準にて試験を行った。また、拘束度 0.4 の試験において制御に用いている変位計に加え、供試体中央部に埋設ひずみ計を設置し、コンクリート内部に生じるひずみの測定を行った。検討ケースを表 6-1 に示す。

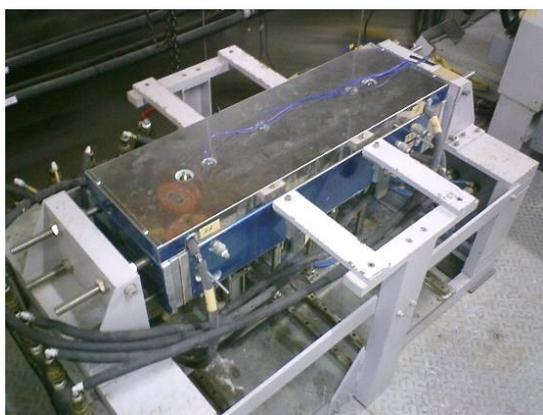


写真 6-1 拘束試験装置

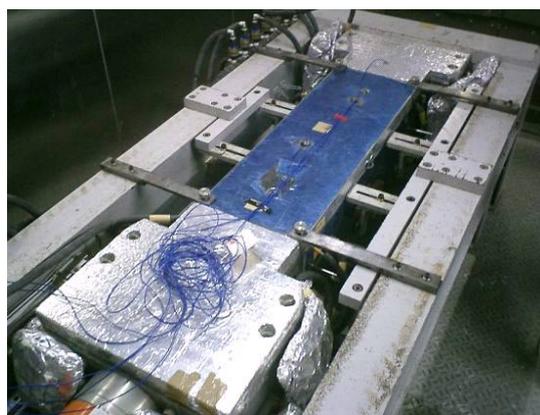


写真 6-2 無拘束試験装置

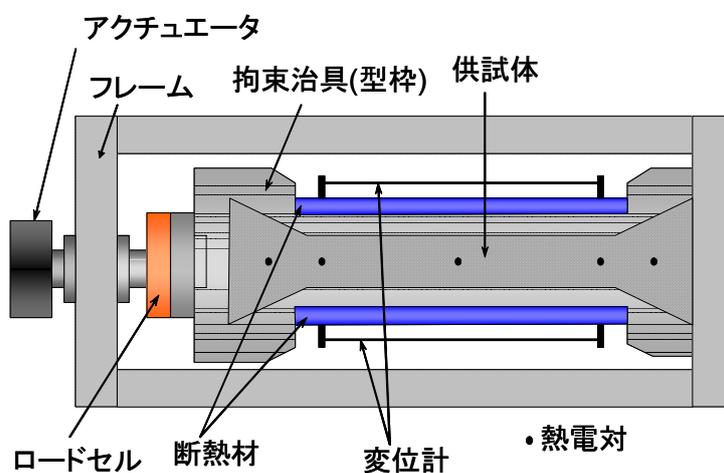


図 6-1 拘束試験装置概要

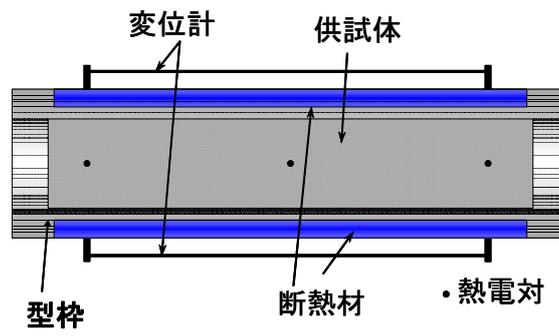


図 6-2 無拘束試験装置概要

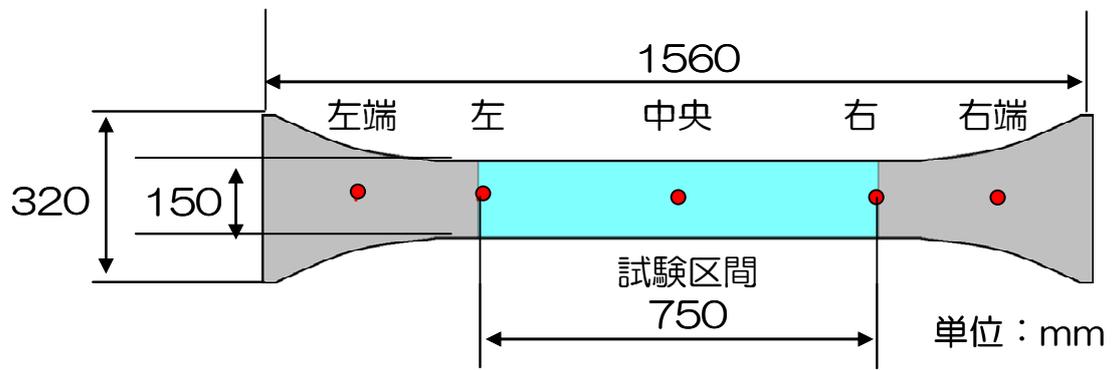


図 6-3 拘束供試体

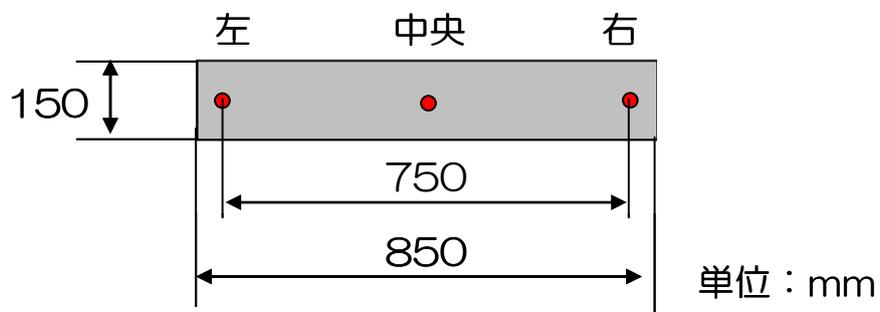


図 6-4 無拘束供試体

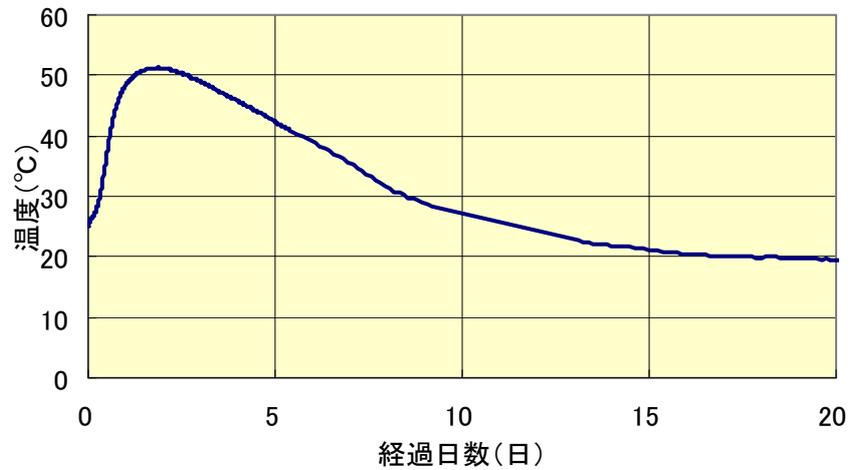


図 6-5 温度制御用温度履歴

表 6-1 検討ケース

ケースNo.	拘束度	埋設型 ひずみ計
1	0.8	
2	0.6	
3	0.4	○

6.3 使用材料および配合

本試験では低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いて検討を行った。セメントの物性的性質を表 6-2 に示す。

表 6-3 に、細骨材および粗骨材の物性値、表 6-4～6-5 および図 6-6 にふるい分け試験結果、表 6-7 にコンクリート配合を示す。

表 6-2 使用セメントの物理的性質

		高炉セメントB種 JIS R 5211	
		JIS規格値	MKC TYPEⅢ 試験成績
密度 (g/cm ³)		-	2.98
比表面積 (cm ² /g)		3000以上	3370
凝結	水量 (%)	-	26
	始発 (h-min)	60min以上	3-47
	終結 (h-min)	10h以下	5-13
安定法	パット法	良	良
圧縮強さ (N/mm ²)	3日	10.0以上	13.8
	7日	17.5以上	23.1
	28日	42.5以上	45
	91日	-	61.8
化学成分 (%)	酸化マグネシウム	6.0以下	4.28
	三酸化硫黄	4.0以下	3.39
	強熱減量	3.0以下	0.62
	全アルカリ	-	0.44
	塩化物イオン	-	0.009
スラグ混入量 (%)		-	58

表 6-3 骨材の物性値

	密度(g/cm ³)	吸水率(%)	粗粒率
陸砂(大井川水系)	2.58	2.34	2.63
硬質砂岩碎石(東京都青梅産)	2.66	0.5	6.75

表 6-4 細骨材(大井川水系陸砂)のふるい分け結果

ふるいの呼び寸法	10 mm	5 mm	2.5 mm	1.2 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm
各ふるいにとどまる量の累計百分率(%)	0	0	13	33	52	75	90

表 6-5 粗骨材(東京都青梅産硬質砂岩碎石)のふるい分け結果

ふるいの呼び寸法	30 mm	25 mm	20 mm	15 mm	10 mm	5 mm	2.5 mm
各ふるいにとどまる量の累計百分率(%)	0	0	6	30	70	99	100

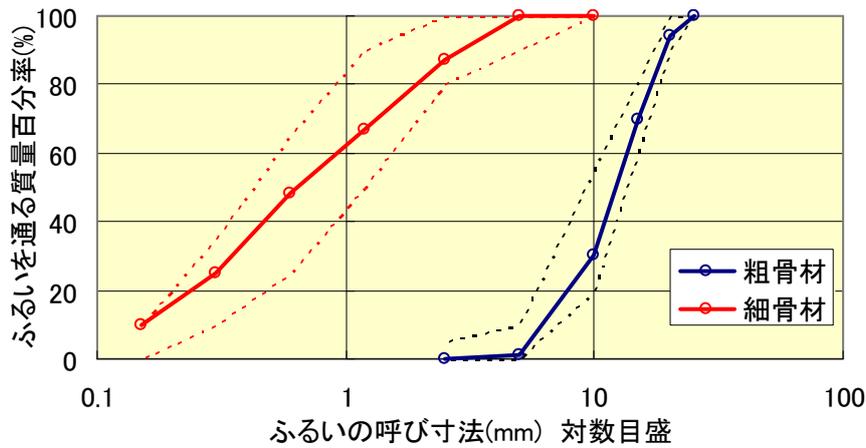


図 6-6 細骨材および粗骨材の粒度曲線

表 6-6 コンクリート配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				AE剤 (C×%)	AE減水剤 (ml/c=100kg)
		水	セメント	細骨材	粗骨材		
W/C	s/a	W	C	S	G		
50.0	44.0	150	300	799.5	1050	0.003	600

6.4 実験結果

(1) 温度およびひずみ

試験の制御状況の一例として、制御拘束度を 0.6 とした試験によってに得られた各供試体の温度履歴および左右のひずみの平均値を図 6-7~6-9 に示す。図 6-7~図 6-9 より、供試体端部の最高温度が中心部の温度よりも約 5℃程度低い結果となったものの、温度およびひずみともに概ね良好な制御ができていると思われる。供試体中央部の温度によって履歴を与えているため、供試体端部の最高温度が中心部のよりも小さくなったことによる影響は少ないものと判断されるものの、供試体内部に温度勾配が生じることによる応力の発生等が懸念されるため、精度のよい結果を得るためには供試体内の温度差を極力小さくする必要がある。

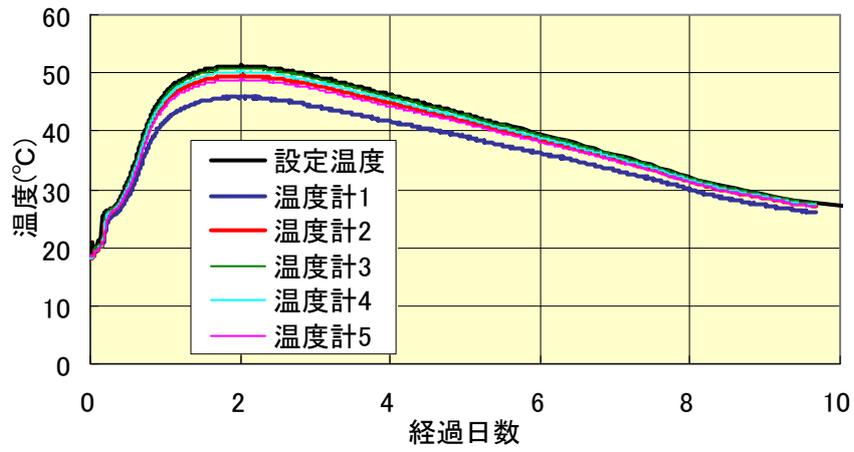


図 6-7 温度履歴 (拘束供試体)

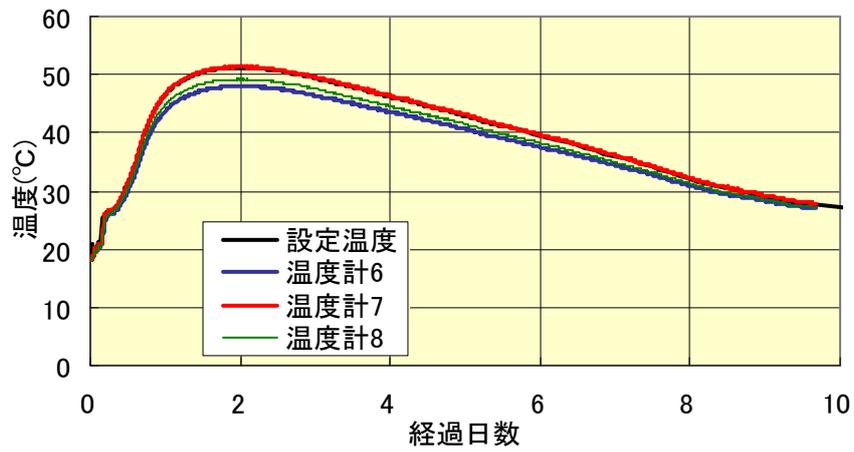


図 6-8 温度履歴 (無拘束供試体)

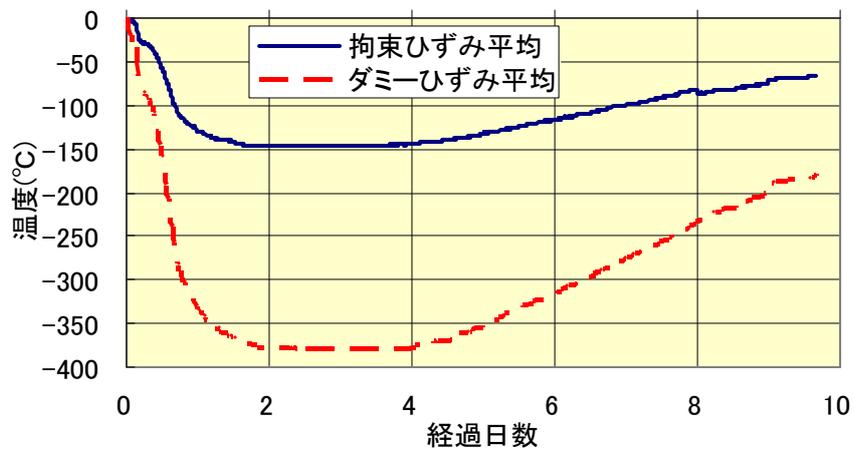


図 6-9 細骨材および粗骨材の粒度曲線

(2) 応力および引張強度

各ケースにおける経過日数と応力および割裂引張強度の関係を図 6-10～図 6-12 に、全 3 ケースにおける応力履歴を図 6-13 に示す。各材齢 3 本の供試体について割裂引張強度試験を行ったが、図 6-10～図 6-12 では 3 本の平均値の結果を示したものである。拘束度が小さくなるとともに、発生する応力が小さくなり、ひび割れ発生までの日数が長くなると考えられるのが一般的だが、本検討の範囲では図 6-13 に示すように、そのような傾向が見られず、拘束度の違いがひび割れ発生限界およびひび割れ発生までの日数に及ぼす影響は見られなかった。

材齢と TSTM におけるひび割れ発生限界および割裂引張強度の関係を図 6-10 に示す。また図 6-10 の結果から割裂引張試験における材齢と割裂引張強度との関係式を算定した。材齢と引張強度との関係を図 6-11 および図 6-12 に示す。本論第 4 章でも述べたとおり、一般的に割裂引張強度はコンクリートの引張強度を過大評価している可能性があり、温度応力解析に割裂引張強度を用いた場合危険側の判断となる場合があることが懸念されているが、図 6-11 に示すように、本試験の範囲では割裂引張強度はマスコンクリート部材を再現した TSTM により得られたひび割れ発生限界とほぼ同等の値が得られたことから、解析条件への割裂引張強度の使用は妥当であると推察される。ただし、いずれの結果も本研究の範囲内に限って考えられることであり、今後もデータを蓄積し検討していく必要がある。

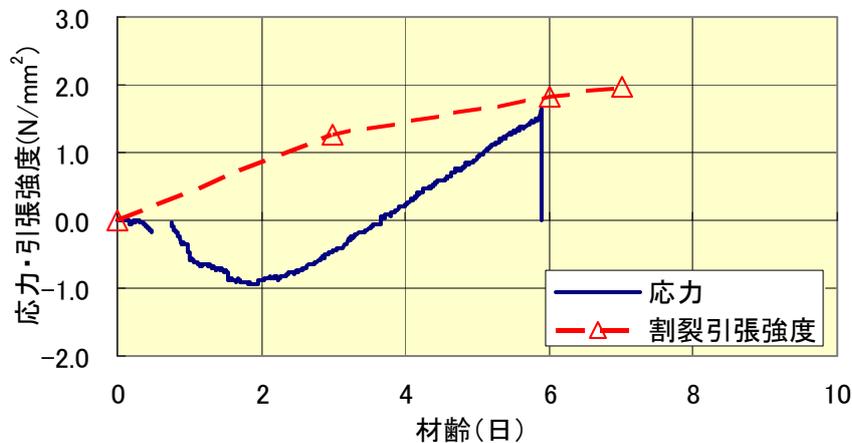


図 6-10 材齢と応力および割裂引張強度の関係 (0.8)

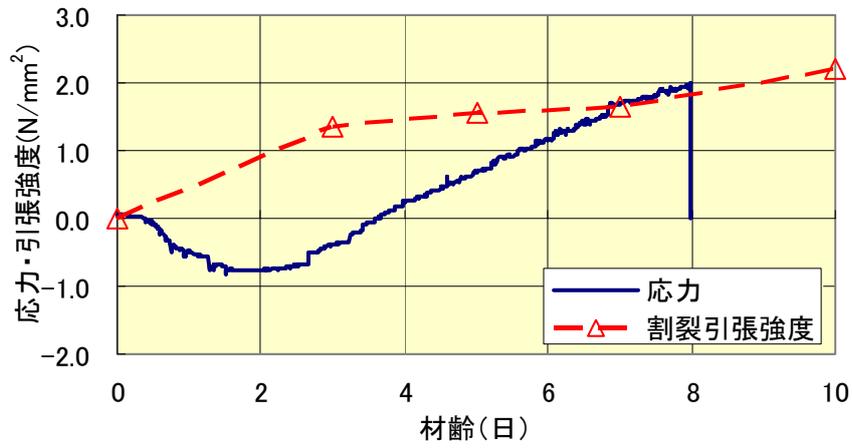


図 6-11 材齢と応力および割裂引張強度の関係(0.6)

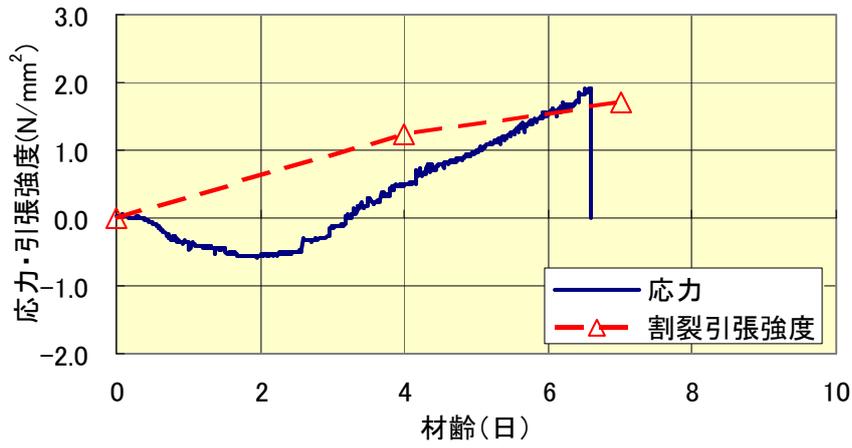


図 6-12 材齢と応力および割裂引張強度の関係(0.4)

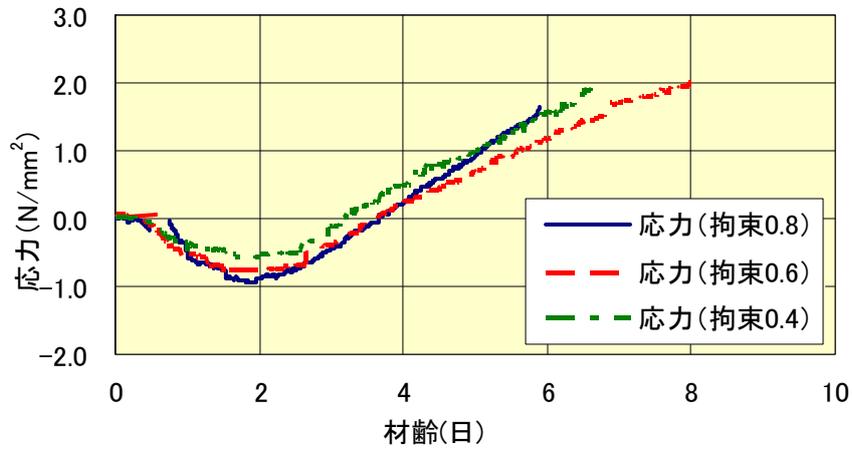


図 6-13 材齢と応力(全ケース)

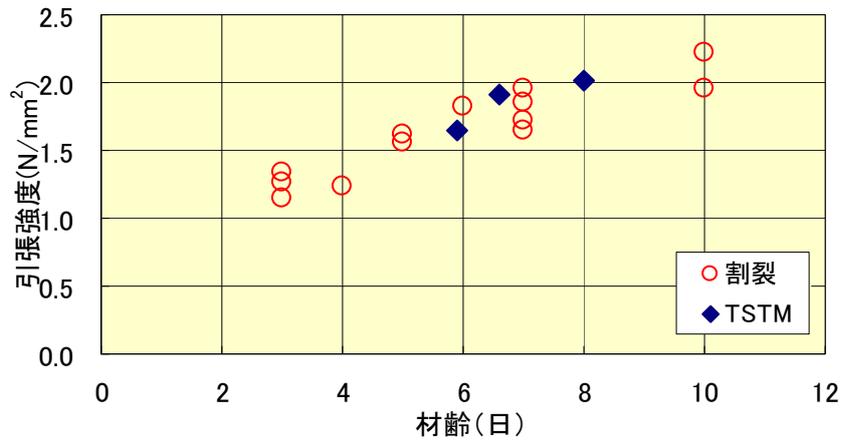


図 6-14 材齢と引張強度の関係

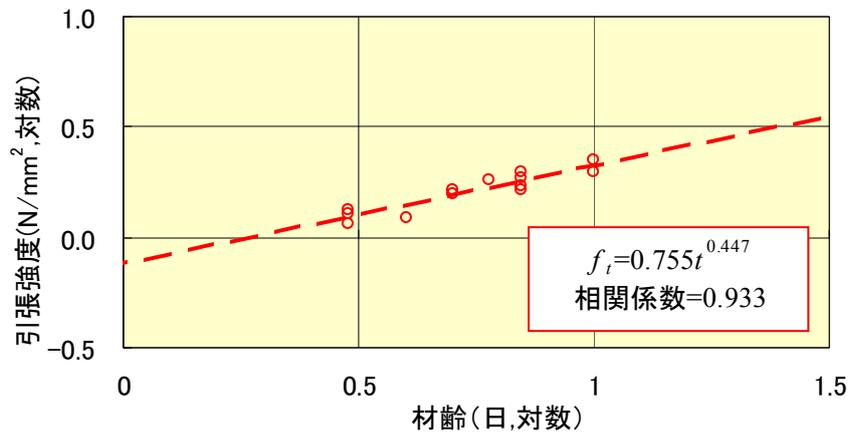


図 6-15 材齢と引張強度の関係

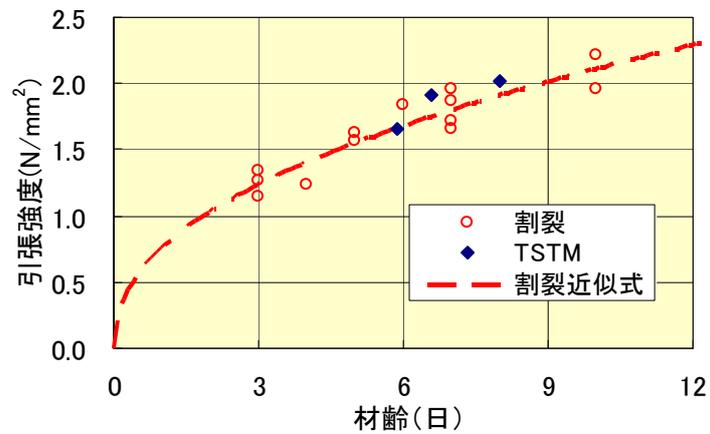


図 6-16 材齢と引張強度の関係

(3) 線膨張係数

拘束度 0.4 とした試験において、制御に用いる変位計に加え、コンクリート供試体中に埋設型ひずみ計を設置して試験を行った。試験から得られた変位計および埋設型ひずみ計による温度変化量とひずみの関係を図 6-17 に示す。この結果から温度上昇時、温度下降時それぞれにおいて単位温度変化量に対するひずみ変化量の比率である線膨張係数の算出を行った。それぞれの履歴を図 6-18～図 6-19 に示す。

図 6-18～図 6-19 のうち、温度上昇時における線膨張係数および変位計を用いた場合の温度降下時の値は温度の変化とひずみに線形関係はなく、必ずしも実際のものとは一致しない。ただし、温度降下時における埋設ひずみ計を用いて算定した線膨張係数に関しては相関係数が 1.0 と正しい線膨張係数を算定していると思われる。また、その値は $11.6 \mu / ^\circ\text{C}$ と日本コンクリート工学協会マスコンクリートのひび割れ制御指針で示される高炉セメント B 種を用いた場合の線膨張係数である $12 \mu / ^\circ\text{C}$ とほぼ同等の値を得た。

また、以上と同様の方法で他のケースにおいても温度変化量と変位計によるひずみと関係から線膨張係数を算定した。各ケースにおける温度上昇時および温度降下時の線膨張係数を表 6-7 に示す。ばらつきはあるものの、各ケースともに温度上昇時の値が温度降下時よりも約 2°C 程度大きくなる結果となった。

線膨張係数は温度応力解析を行う上で必要なパラメータであり、TSTM によるひずみと温度の関係から実際のコンクリートの線膨張係数を求めることができることが確認できた。ただし、先にも述べたとおり、温度変化量とひずみに線形関係はなく、また、この熱膨張係数は自己収縮による体積変化の影響を含む見掛けの値であることから、必ずしも実際のものとは一致しないため、温度応力解析にこの値を用いる場合はその点を十分に考慮する必要がある。

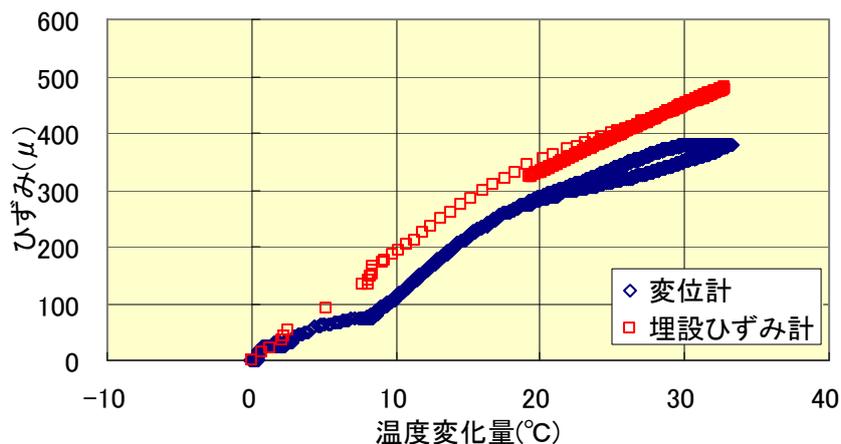


図 6-17 温度変化量とひずみの関係

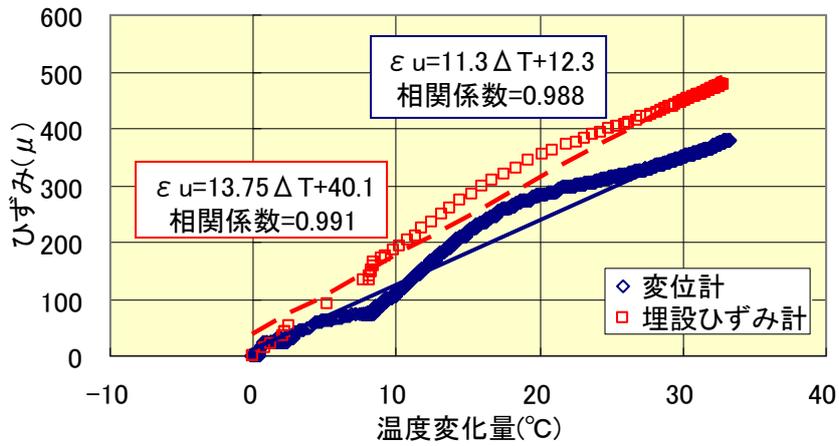


図 6-18 温度変化量とひずみの関係（温度上昇時）

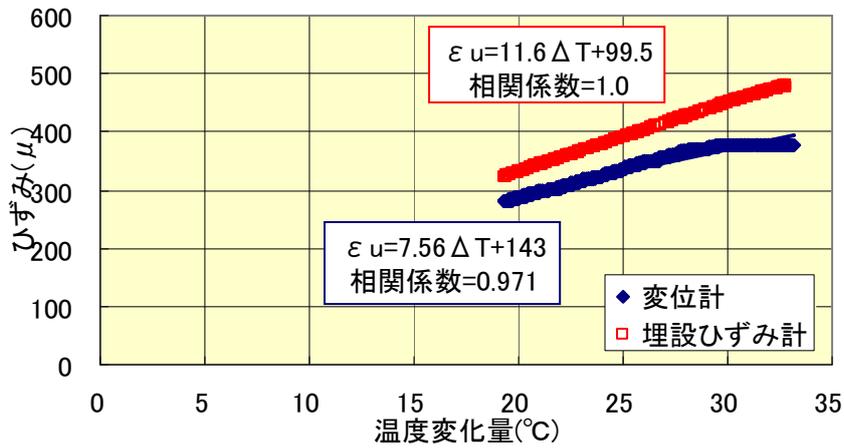


図 6-19 温度変化量とひずみの関係（温度下降時）

表 6-7 線膨張係数

検討ケース	計器	線膨張係数($\mu/^\circ\text{C}$)	
		上昇時	下降時
0.8	変位計	10.96	8.03
0.6	変位計	11.26	7.86
0.4	変位計	11.34	7.56
	埋設ひずみ計	13.75	11.63

6.5 まとめ

本研究では、若材齢時のコンクリートを対象とし、TSTM を用いた試験および割裂引張試験を用いて、異なる拘束条件下における応力の発生やひび割れ発生挙動の検討を行った。その結果、以下に示すような知見を得た。

本試験の範囲では割裂引張強度はマスコンクリート部材を再現した TSTM により得られたひび割れ発生限界とほぼ同等の値が得られたことから、解析条件への割裂引張強度の使用は妥当であると思われる。

TSTM によるひずみと温度の関係から実際のコンクリートの線膨張係数を求めることができることが確認できた。ただし、温度変化量とひずみが線形関係にはなく、また、この熱膨張係数は自己収縮による体積変化の影響を含む見掛けの値であり、必ずしも実際のものとは一致しないため、温度応力解析にこの値を用いる場合はその点を十分に考慮する必要がある。

第7章 実験結果を用いた高精度化の検討

7.1 概要

本章では第4章から第6章までに得られた結果をふまえ、対象工事の事前検討を想定して各試験機を用いた実験を行い、それらの結果を温度応力解析の設計用値として入力して解析を行った。また、各実験の効果を検証するために2008年に日本コンクリート工学協会より改定されたマスコンクリートのひび割れ制御指針に定められている手順に従って既往のデータのみを用いた解析を行い、それらの解析結果と対象工事における施工時温度応力の計測値と比較検討することで、マスコンクリートにおける温度応力解析の高精度化の手法について検証を行った。

7.2 対象とした実建造物の概要

本検討で対象としたのは、建造物の概要を図7-1～図7-2に示す。対象部位はボックスカルバート側壁部である。コンクリート配合を表7-1に示す。底版は、長さ60m×幅26.1m～28.8m×厚さ1.3mからなる。側壁は、壁厚が1.3m、壁高7.35mとなっている。中壁については、壁厚が1.0mである。各部位ともマスコンクリート部材であり、セメントの水和熱に起因する温度ひび割れ発生の可能性が高い建造物といえる。

側壁で実施した施工時温度応力の計測は、図7-4に示すようにケーソンの長さの約1/3の断面で実施した。計測は、高炉セメントB種を用いた側壁及び低発熱・低収縮高炉セメントB種を用いた側壁の両方で行われ、底版（第1ロット）についても温度計測を行った。側壁は、3リフトに分割して施工されるが、そのうち第1リフト（第2ロット）及び第2リフト（第3ロット）で計測を行い、図-12に示すように各リフト高のほぼ中央で、表面部及び中央部において、温度計（熱電対）、ひずみ計、コンクリート有効応力計を設置した。また、第2リフト中央部には、無応力計を設置するとともに、第1、2リフトの中央不表面部に鉄筋計を設置した。各計器の設置数を表7-2に示す。この他、側壁の気温の測定も併せて行っている。

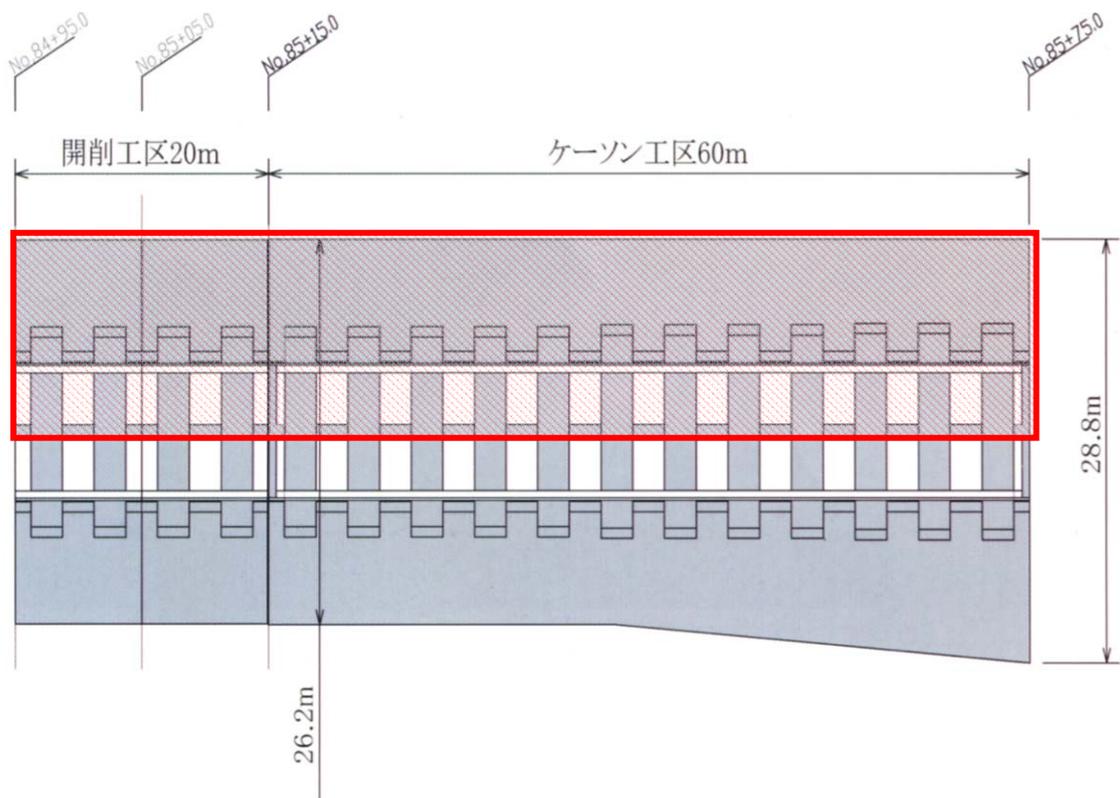


図 7-1 検討対象部位（平面図）

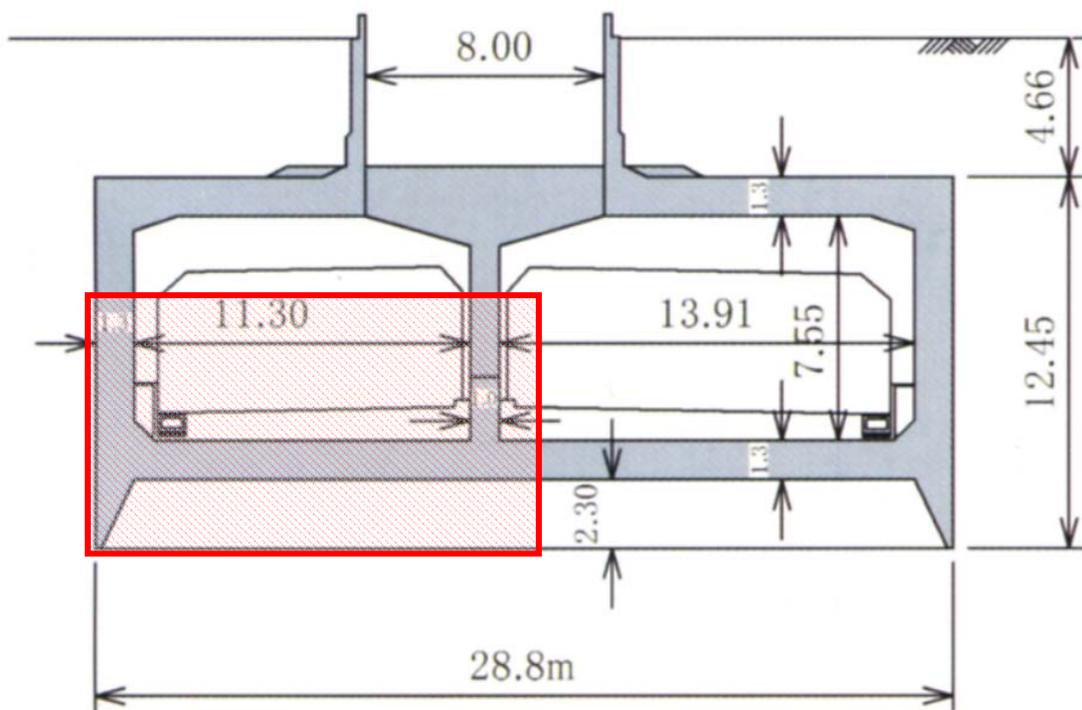


図 7-2 検討対象部位（断面図）

表 7-7 コンクリート配合

水セメント比 (%)	単位量(kg/m ³)				
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材
50.0	155	310	821	1034	2.48

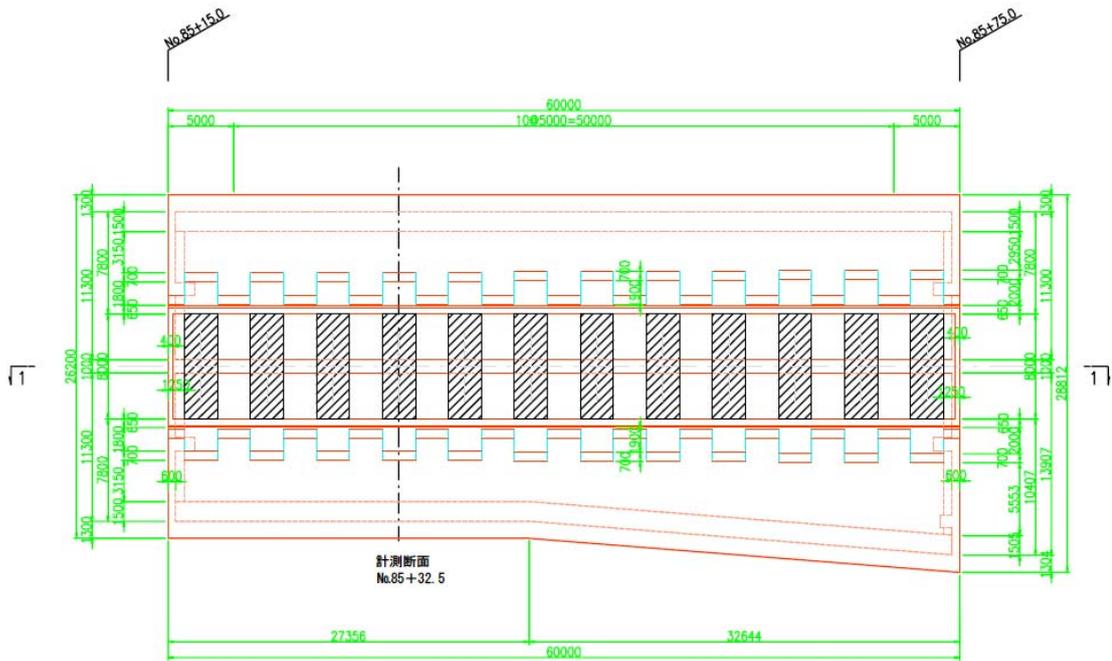


図 7-3 計測場所の概要（平面）

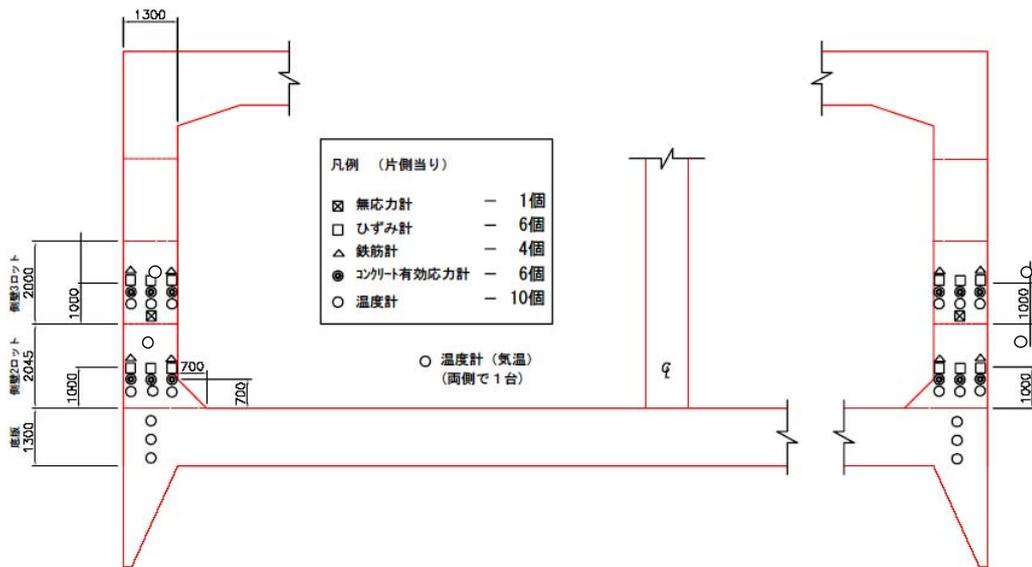


図 7-4 各計測器の設置位置の概要（ケーソン断面）

表 7-8 各計測器の数量と測定期間

計器種別	分類	総括数量	備 考	観測期間	観測頻度
ひずみ計		12 台	6箇所*両側=12 台 コンクリート打設時に埋設	4ヶ月	30分 1回
無応力計		2 台	1箇所*両側=2 台 コンクリート打設時に埋設 外部コンクリートと応力的に絶縁できる構造		
鉄筋計		8 台	4箇所*両側=8 台 鉄筋に沿わせて設置		
コンクリート有効応力計		12 台	6箇所*両側=12 台 コンクリート打設時に埋設		
温度計		19 台	・コンクリート埋設 9箇所×両側=18台 ・気温測定 1箇所=1台 コンクリート温度測定用はコンクリート打設時に埋設 気温測定用は別途設置		
データロガー		2 台	65ch対応		

※観測期間：底版コン打設～側壁3ロットコン打設後1ヶ月間

7.3 実験および解析方法

本研究で行った温度応力解析の検討ケースを表 7-9 に示す。入力条件として用いるデータが解析結果に及ぼす影響を検討するため、日本コンクリート工学協会、マスコンクリートのひび割れ制御指針に示されている高炉セメント B 種の値を用いた場合およびセメントメーカーの技術資料に基づき整理した値を用いた場合、使用されるコンクリート配合を用いて第 4 章～第 6 章に述べた各種試験を行った実験結果を用いた場合について検討を行った。以降日本コンクリート工学協会、マスコンクリートのひび割れ制御指針に示されている高炉セメント B 種の値を用いたものを JCI、セメントメーカーの技術資料に基づき整理した値を用いたものを文献値、使用される各種試験を行った実験結果を用いたものを、実験値と称してまとめることとする。

表 7-9 検討ケース

検討ケース	入力条件として用いた資料
JCI	日本コンクリート工学協会 「マスコンクリートのひび割れ制御指針2008」
文献値	低発熱・収縮抑制型高炉セメント技術資料
実験値	本論第4章～第6章による試験に基づく実験結果

a) 解析モデル

解析は、対象とする側壁に加え、底版、地盤および軸方向の刃口を含めたモデルとし、温度及び応力解析ともに 3 次元有限要素法を用いて行った。解析モデルを図 7-5 に示す。

e) 地盤の諸物性

地盤のヤング係数、線膨張係数、ポアソン比は、日本コンクリート工学協会、マスコンクリートのひび割れ制御指針に示されている値に準拠し、以下の値を用いた。

ヤング係数：6000N/mm²

線膨張係数：10 μ/°C

ポアソン比：0.25

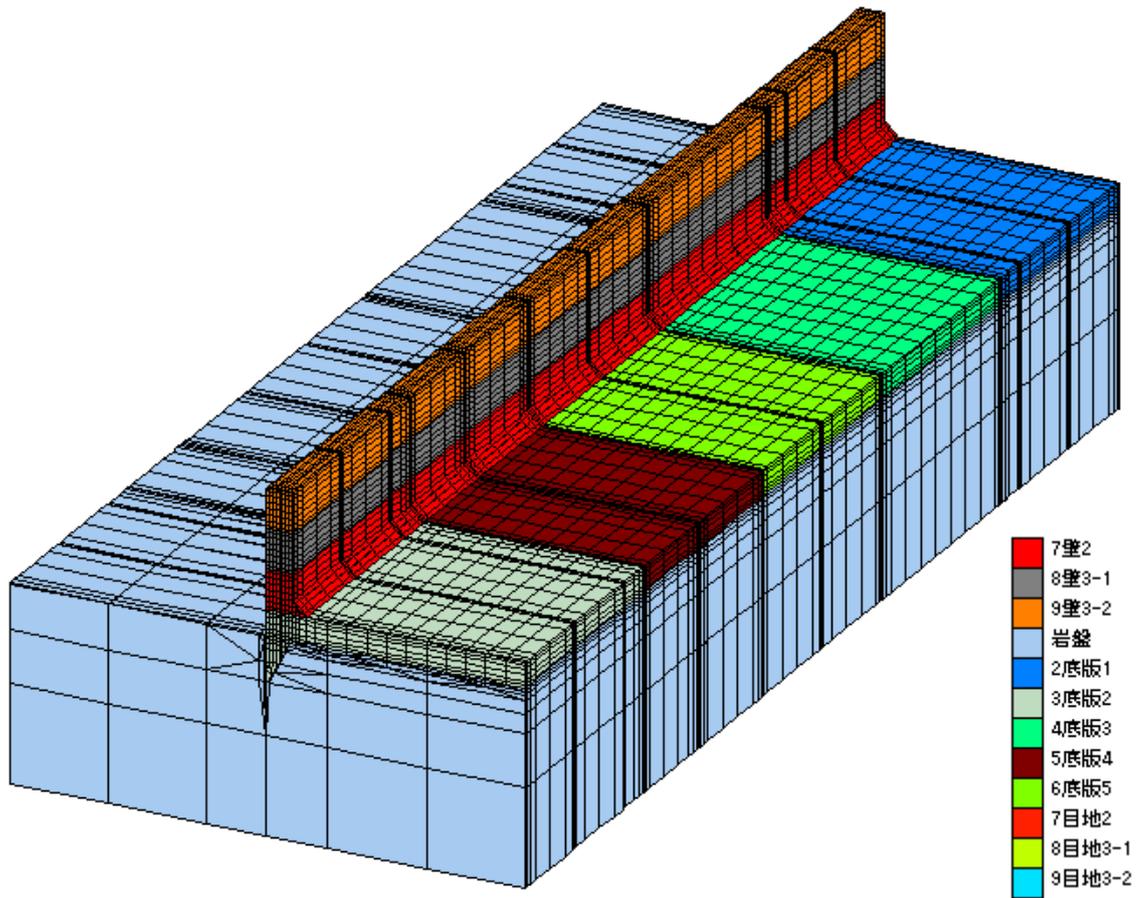


図 7-5 解析モデル

7.4 使用材料および配合

本試験では各試験において低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いた。セメントの化学成分を表 7-1 に、物性的性質を表 7-2 に示す。

細骨材および粗骨材の物性を表 7-3 に、ふるい分け試験結果を表 7-4～7-5 および図 7-6 に、コンクリート配合を表 7-6 に示す。

表 7-1 セメントの化学成分

セメントの種類	化学成分(%)		
	強熱減量	酸化マグネシウム	三酸化硫黄
低発熱・収縮抑制型高炉セメント	0.6	4.7	3.9

表 7-2 セメント物性値

セメントの種類	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結			安定性 (パット法)	圧縮強さ(N/mm ²)		
			水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)		3日	7日	28日
MKC TYPEⅢ	3.13	4550	29.5	1-55	2-50	良	28	47	68
日本工業規格	-	3300 以上	-	45分以上	10時間以下	良	20 以上	32.5 以上	47.5 以上

表 7-3 骨材の試験結果

	密度(g/cm ³)	吸水率(%)	粗粒率
陸砂(大井川水系)	2.58	2.34	2.63
硬質砂岩碎石(東京都青梅産)	2.66	0.5	6.75

表 7-4 細骨材(大井川水系陸砂)のふるい分け結果

ふるいの呼び寸法	10 mm	5 mm	2.5 mm	1.2 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm
各ふるいにとどまる量の累計百分率(%)	0	0	13	33	52	75	90

表 7-5 粗骨材(東京都青梅産硬質砂岩碎石)のふるい分け結果

ふるいの呼び寸法	30 mm	25 mm	20 mm	15 mm	10 mm	5 mm	2.5 mm
各ふるいにとどまる量の累計百分率(%)	0	0	6	30	70	99	100

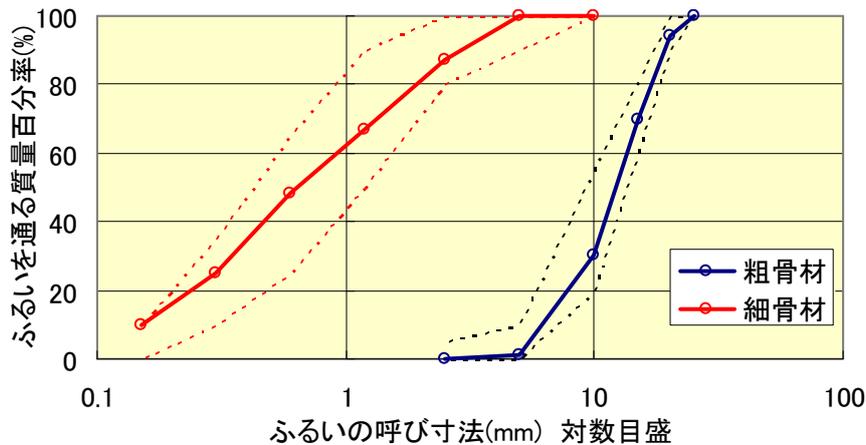


図 7-6 細骨材および粗骨材の粒度曲線

表 7-6 コンクリート配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	最骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材
20	50.0	45.0	155	310	821	1034	2.48

7.5 解析に用いた入力条件

本節では、前述の実構造物の温度応力解析に用いる解析条件を示すとともに、参考とする資料の違いが各種の入力条件に及ぼす影響について検討を行った。

(1) 温度解析

a) コンクリートおよび地盤の熱定数

コンクリートおよび地盤の比熱、熱伝導率、密度は日本コンクリート工学協会、マスコンクリートのひび割れ制御指針に示されている範囲で適切と思われる値を用いた。各ケースともに同等の値を用いた。表 7-10 にコンクリートおよび地盤の熱定数を示す。

表 7-10 コンクリートおよび地盤の熱定数

	比熱 (kJ/kg°C)	熱伝導率 (W/m°C)	密度 (kg/m ³)
コンクリート	1.15	2.7	2400
地盤	1.15	2.7	2650

b) 外気温

外気温は工事が行われる年の過去 3 年間の気象庁の日別平均気温の平均値を用いて行った。構造物が建設される場所の最寄りの観測所のデータを用いた。図 7-7 に日別平均気温を示す。

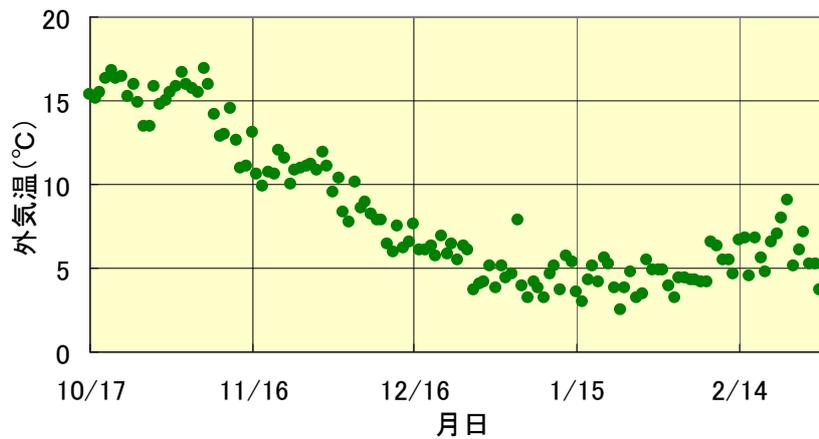


図 7-7 外気温

c) コンクリートの打込み時期と打込み温度

コンクリートの打込み温度は日本コンクリート工学協会，マスコンクリートのひび割れ制御指針に示されている通り打込み日の平均気温に 5°Cを加えた値とした。図 7-8 に対象部位における打込み区分，表 7-10 に打込み日および打込み温度を示す。

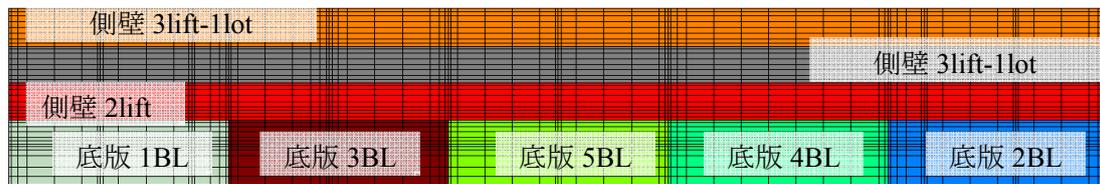


図 7-8 打込み区分

表 7-10 打込み日および打込み温度

打込み区分	打込み日	外気温 (°C)	打込み温度 (°C)
底版1BL	2006/10/19	15.5	20.5
底版2BL	2006/10/20	16.3	21.3
底版3BL	2006/10/26	14.9	19.9
底版4BL	2006/11/1	15.5	20.5
底版5BL	2006/11/2	15.8	20.8
側壁2R	2006/12/8	8.2	13.2
側壁3-1R	2007/1/31	4.9	9.9
側壁3-2R	2007/2/8	4.2	9.2

d) 断熱温度上昇式

コンクリートの断熱温度上昇式は本論 2.2(2)に示す日本コンクリート工学協会マスコンクリートのひび割れ制御指針に示されている式を用いて算定した。用いた断熱温度上昇式

を以下に示す.

$$Q(t) = K[1 - \exp\{-\alpha(t - t_{0,q})^\beta\}] \quad (18)$$

ここに,

- t : 材齢 (日)
 $Q(t)$: 材齢 t 日までの断熱温度上昇量 (N/mm²)
 K : 終局断熱温度上昇量 (°C)
 α : 断熱温度上昇速度に関する係数 (1/日)
 β : 断熱温度上昇速度に関する係数 (1/日)
 $t_{0,q}$: 発熱開始材齢 (日)

低発熱・収縮抑制型高炉セメントは高炉セメント B 種に適合するため、コンクリートの断熱温度上昇式は、日本コンクリート工学協会、マスコンクリートのひび割れ制御指針に示されている高炉セメント B 種を用いた場合の定数を用いて解析を行った。これを用いたものを検討ケース JCI として解析を行った。

また、メーカーの技術資料には既往の施工実績における断熱温度上昇式の定数が示されており、それを元に単位セメント量および打込み温度と定数との関係式を算定した。そこから求められた定数を用いて解析を行った。この断熱温度上昇式を文献値として解析を行った。算定された関係式を以下に示す。

$$Q_\infty = 0.0748C - 0.0516T_c + 12.93 \quad (19)$$

$$\gamma = -1.50 \cdot 10^{-3} C + 0.0421T_c + 0.452 \quad (20)$$

ここに,

- T_c : 打込み温度 (°C)
 C : 単位セメント量 (kg/m³)

また、室内試験として第 3 章で述べた結果より、中央部に温度測定専用の $\phi 300 \times 450\text{mm}$ の供試体を配置し容積率を 6.6%確保した簡易断熱養生槽を用いて、簡易断熱試験および従来から用いられている大型断熱試験を行い、得られた供試体中心部の温度履歴からそれぞれの試験に対して温度同定解析を実施し、断熱温度上昇式の定数を算定した。各試験から得られた温度履歴と、同定解析で得られた温度履歴を図 7-9～図 7-10 に示す。また、それぞれから得られた断熱温度上昇式を図 7-11 に示す。本検討では、簡易断熱試験から算定された断熱温度上昇式を実験値として解析を行った。算定した断熱温度上昇式を以下に示す。

$$Q(t) = 26.7[1 - \exp\{-1.2(t - 0.33)^{1.25}\}] \quad (21)$$

以上で算定した断熱温度上昇式を打込み温度 10°C, 20°C, 30°C ごとに図 7-12 から図 7-14 に示す。

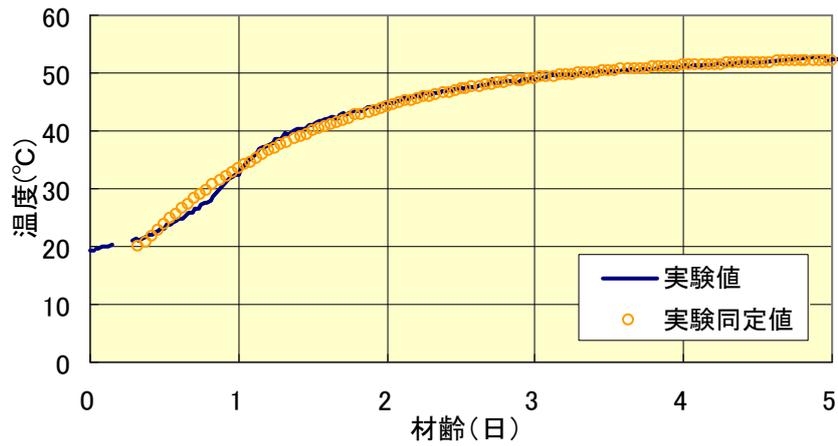


図 7-9 同定解析結果 (大型断熱試験)

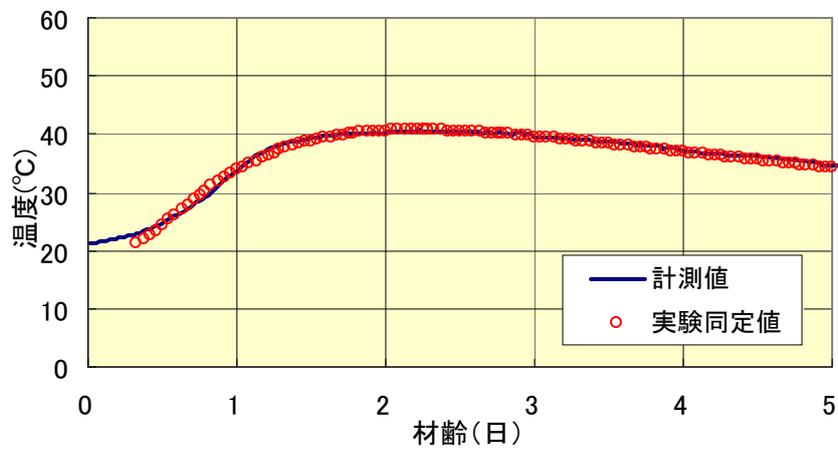


図 7-10 同定解析結果 (簡易断熱試験)

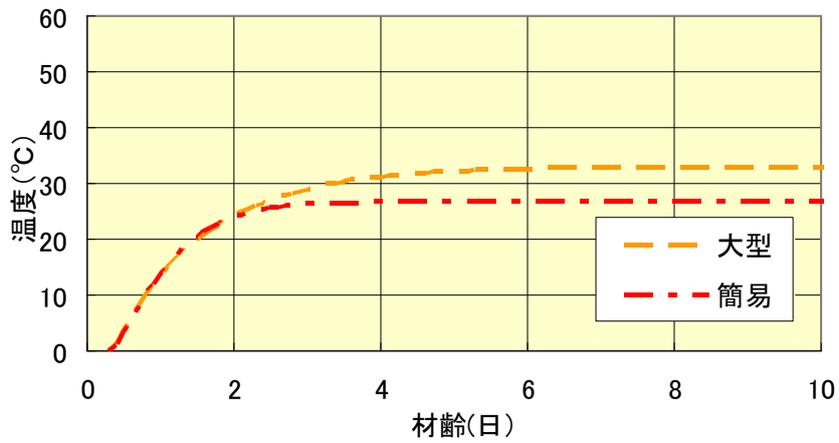


图 7-11 断熱温度上昇式

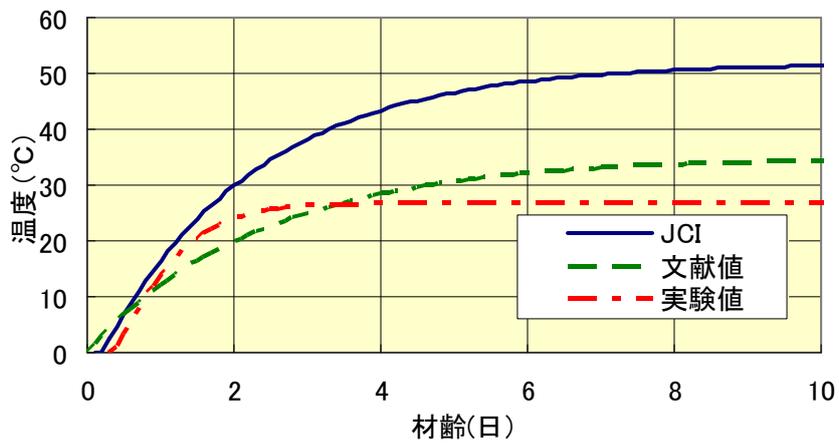


图 7-12 断熱温度上昇式 (打込み温度 : 10°C)

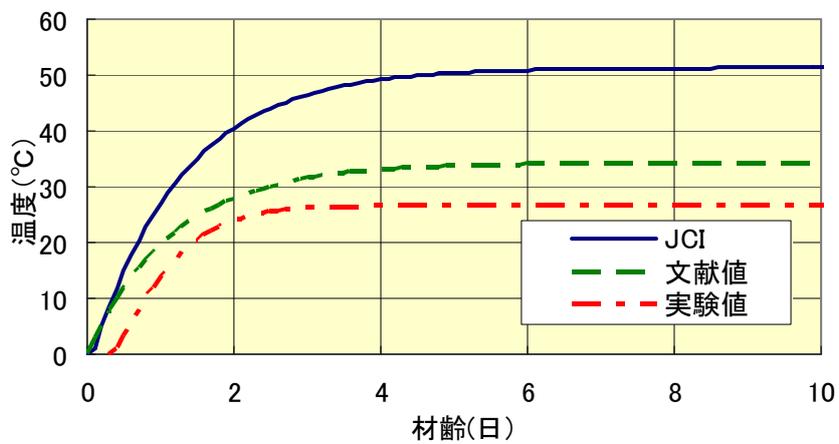


图 7-13 断熱温度上昇式 (打込み温度 : 20°C)

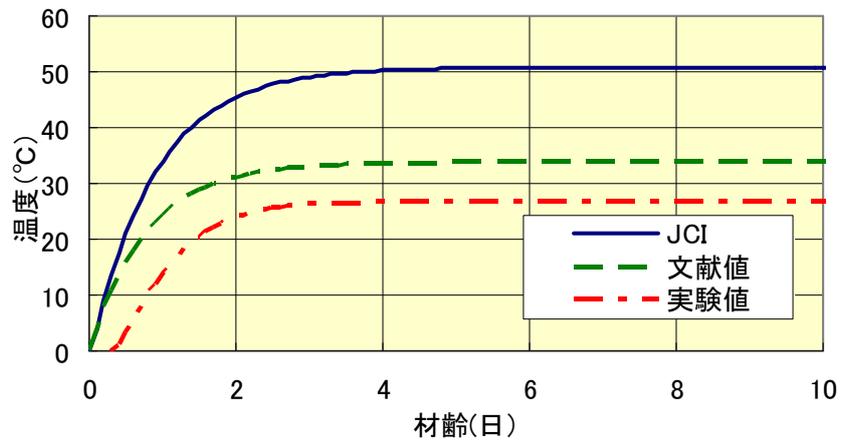


図 7-14 断熱温度上昇式 (打込み温度 : 30°C)

e) 表面熱伝達率

表面熱伝達率は、本コンクリート工学協会マスコンクリートのひび割れ制御指針に準拠した。各部位での表面熱伝達率の設定状況を図 7-15 に示す。

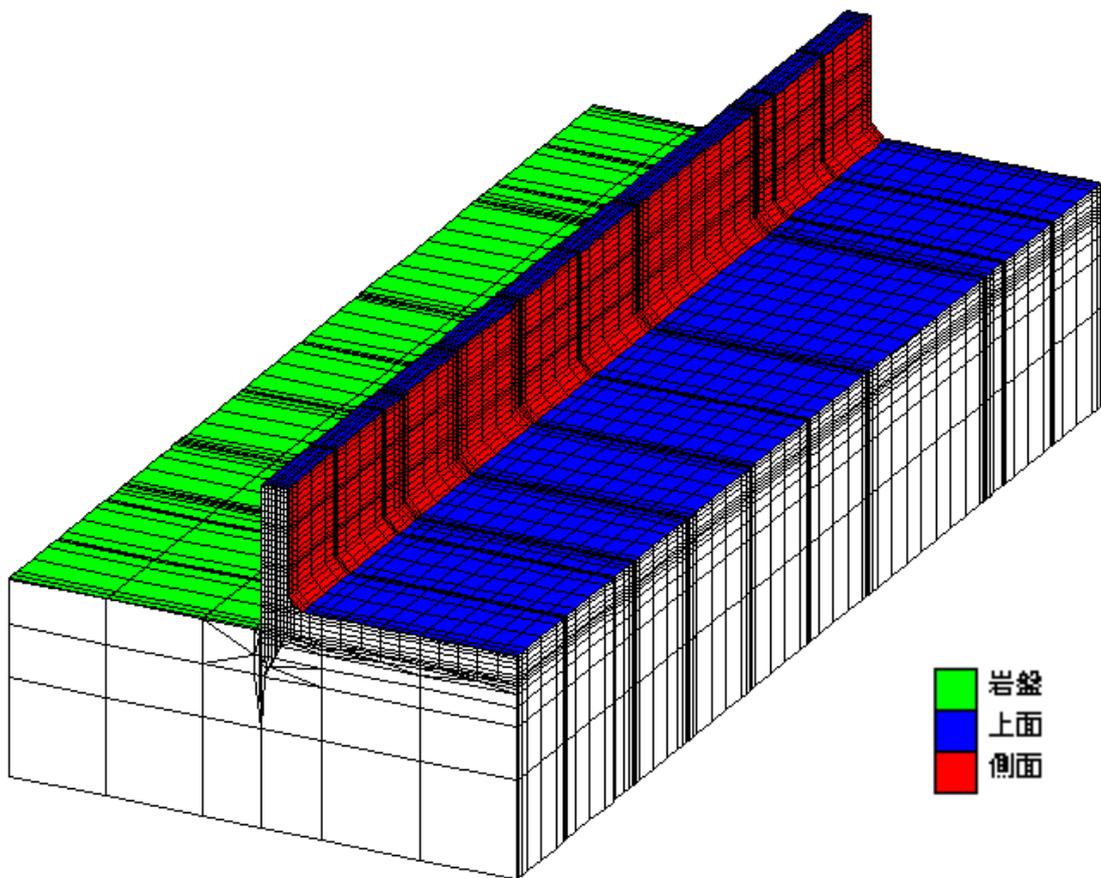


図 7-15 境界条件設定状況

上面および側面： $8\text{W}/\text{m}^2\text{C}$

地盤上面： $14\text{W}/\text{m}^2\text{C}$

e) 地盤の初期温度

地盤の初期温度は、建設場所における解析開始日（底版 1BL 打込み 3 ヶ月前）の日平均気温の過去 3 年間の平均値の 26.8C を用いた。

(2) 応力解析

a) 圧縮強度

コンクリートの圧縮強度は断熱温度上昇式と同様に本論 2.2.(3)に示す日本コンクリート工学協会、マスコンクリートのひび割れ制御指針に示されている高炉セメント B 種を用いた場合の圧縮強度発現式を用いたものを検討ケース JCI として解析を行った。

また、圧縮強度に関しても、メーカーの技術資料に既往の施工実績におけるデータが示されており、それらを元に積算温度との関係式を算定した。この強度発現式を文献値として解析を行った。技術資料に示されている材齢と圧縮強度の関係を図 7-16 に、図 7-16 の平均値を用いて算定した関係式を図 7-17 および図 7-18 に示す。算定した関係式を以下に示す。

$$f'c = 1.13M^{0.333} \quad (22)$$

ここに、

$$\begin{aligned} f'c & : \text{圧縮強度}(\text{N}/\text{mm}^2) \\ M & : \text{積算温度}(\text{hr}\text{C}) \end{aligned}$$

ここで、強度発現に積算温度を用いたのは、温度応力解析を行う場合、部材内で温度履歴が異なり、強度発現も異なってくるためである。積算温度は経過日数とその期間内での温度履歴の席で表されるものであり、部材内の水和発熱による温度変化を考慮できるものである。

また、室内試験として簡易断熱試験を行い、それから得られた結果および第 5 章で行った直接引張試験より本検討と同一配合の実験結果から同様に積算温度と圧縮強度の関係式を算定した。この関係式を用いたものを実験値として解析を行った。算定した関係式を以下に示す。

$$f'c = 0.159M^{0.534} \quad (23)$$

以上で算定した圧縮強度発現式を図 7-21 に示す。

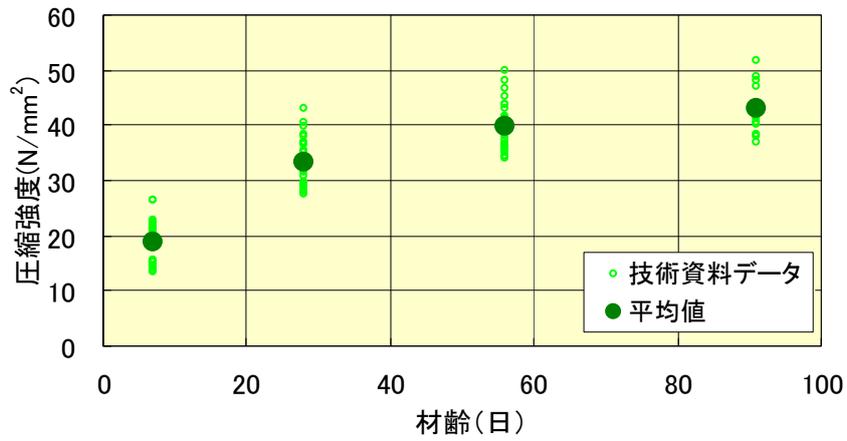


図 7-16 技術資料に示される材齢と圧縮強度の関係

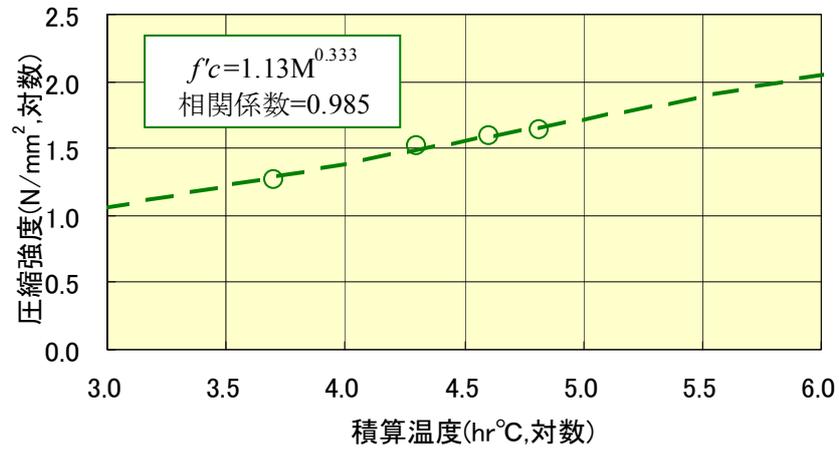


図 7-17 積算温度と圧縮強度の関係（文献値）

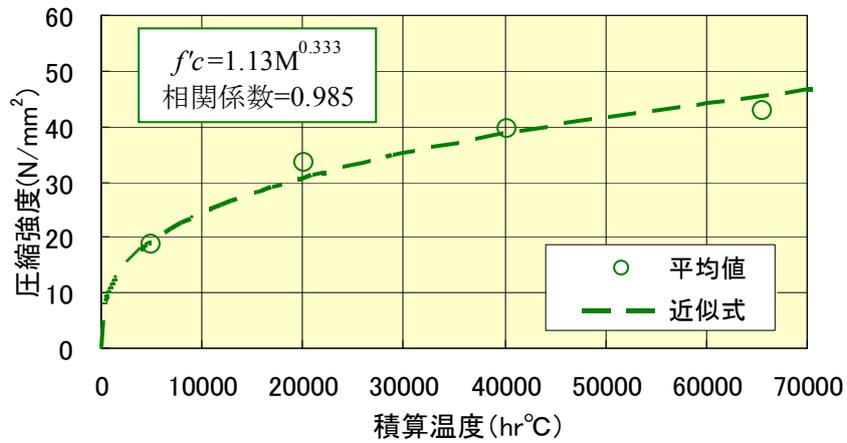


図 7-18 積算温度と圧縮強度の関係（文献値）

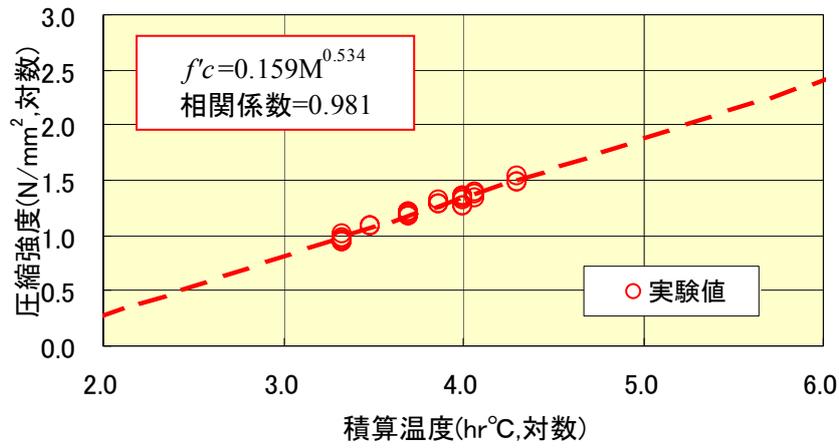


図 7-19 積算温度と圧縮強度の関係（実験値）

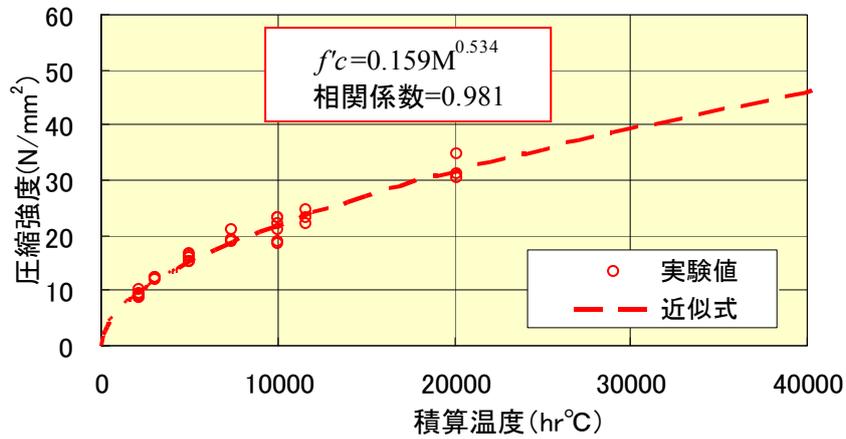


図 7-20 積算温度と圧縮強度の関係（実験値）

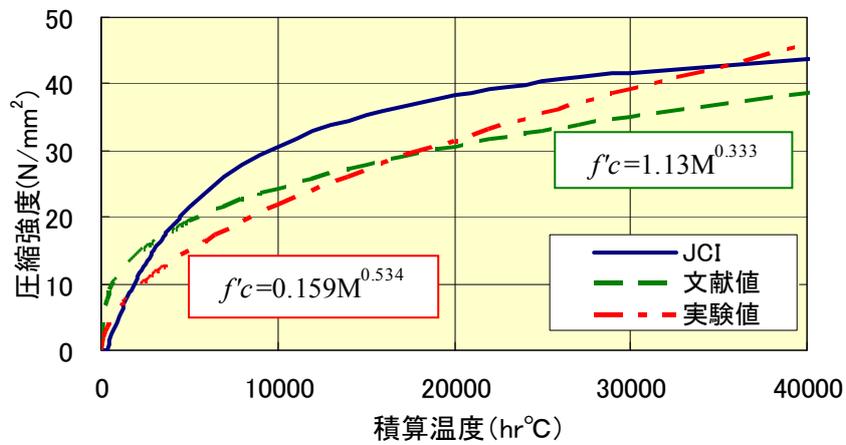


図 7-21 積算温度と圧縮強度の関係

b) 引張強度

コンクリートの引張強度は本論 2.2.(4)に示す日本コンクリート工学協会、マスコンクリートのひび割れ制御指針に示されている引張強度発現式を用いたものを検討ケース JCI とし解析を行った。引張強度に関しては、メーカーの技術資料に既往の施工実績におけるデータが十分に示されていないことから、検討ケース文献値では、JCI の値を用いることとした。

また、室内試験として第 5 章で行った直接引張強度試験より本検討と同一配合の実験結果から圧縮強度と引張強度の関係式を算定した。この関係式を用いたものを実験値として解析を行った。室内試験より得られた圧縮強度と引張強度の関係を図 7-25 に、割裂引張強度と直接引張強度の関係を図 7-23 および図 7-24 に示す。本論第 4 章でも述べたとおり、一般的に直接引張強度は割裂引張強度よりも幾分小さくなるかとされているものの、本検討では直接引張強度試験より得られた割裂引張強度と直接引張強度はほぼ同等となったため、割裂引張強度と直接引張強度を同等に取り扱い、強度発現式を算定した。算定した関係式を図 7-25 および図 7-26 に示す。また、関係式を以下に示す。

$$f_t = 0.224 f_c^{0.691} \quad (22)$$

ここに、

f_t : 引張強度(N/mm²)

以上で算定した引張強度発現式を図 7-27 に示す。

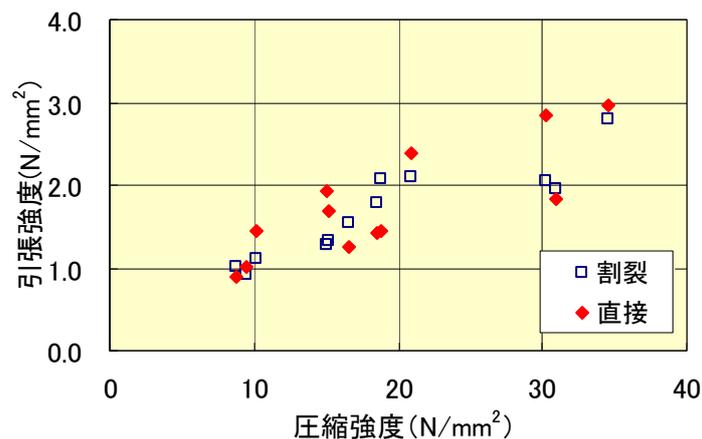


図 7-22 圧縮強度と引張強度の関係

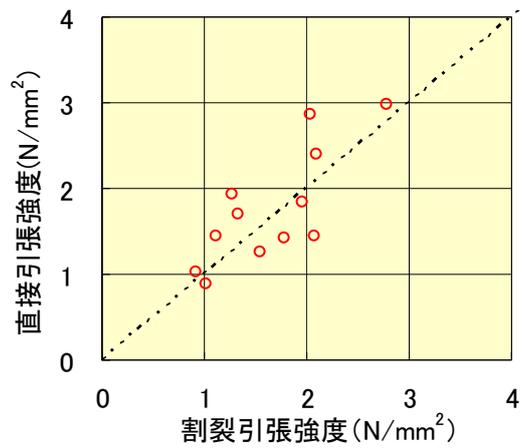


図 7-23 割裂引張強度と直接引張強度の関係

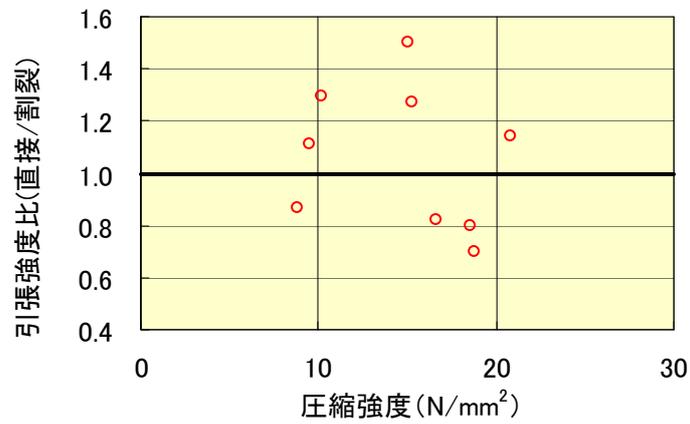


図 7-24 引張強度比の分布

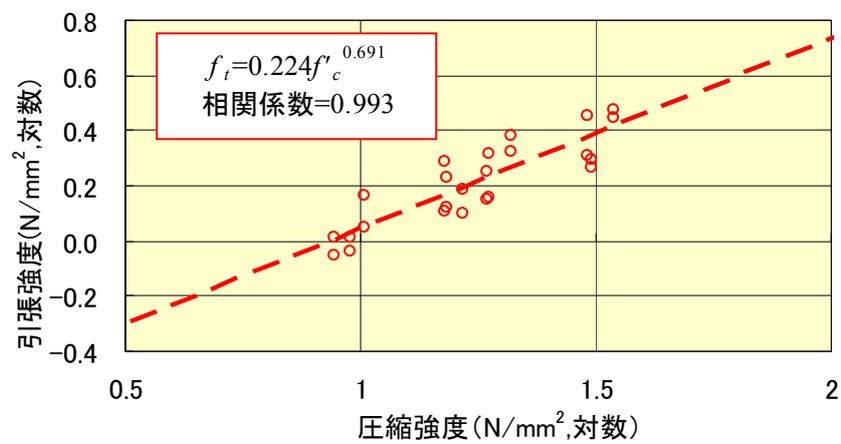


図 7-25 圧縮強度と引張強度の関係 (実験値)

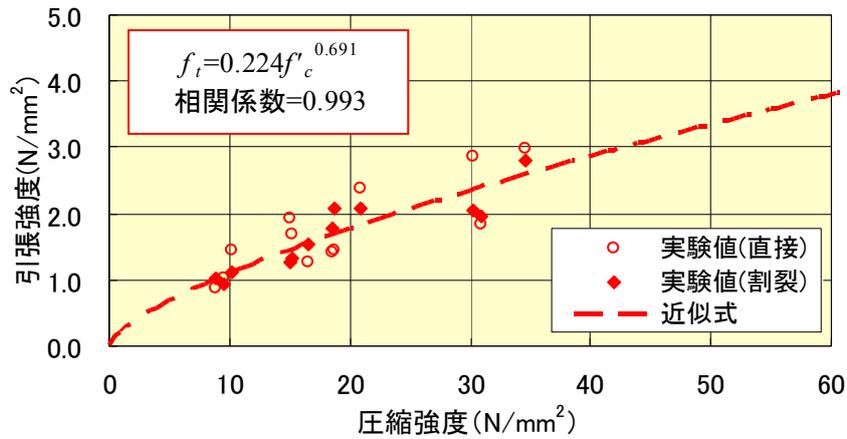


図 7-26 圧縮強度と引張強度の関係（実験値）

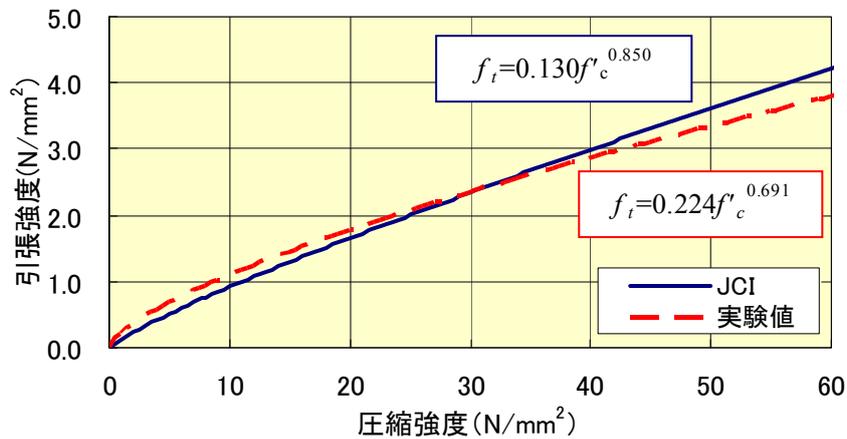


図 7-27 圧縮強度と引張強度の関係

c) ヤング係数

コンクリートのヤング係数は引張強度の場合と同様に本論 2.2.(5)に示す日本コンクリート工学協会，マスコンクリートのひび割れ制御指針に示されているヤング係数発現式を用いたものを検討ケース JCI として解析を行った。

ヤング係数に関しては，引張強度と同様にメーカーの技術資料に既往の施工実績におけるデータが十分に示されていないことから，検討ケース文献値では，JCI の値を用いることとした。

また，室内試験として第 5 章で行った直接引張強度試験より本検討と同一配合の実験結果から圧縮強度とヤング係数の関係式を算定した。この関係式を用いたものを実験値として解析を行った。室内試験より得られた圧縮強度とヤング係数の関係を図 7-28 に，圧縮ヤング係数と引張ヤング係数の関係を図 7-29 および図 7-30 に示す。圧縮ヤング係数と引張ヤング係数はほぼ同等となったため，本検討では圧縮ヤング係数と引張ヤング係数を同等に

取り扱い，強度発現式を算定した．算定した圧縮強度とヤング係数の関係式を図 7-31 および図 7-32 に示す．また，算定した関係式を以下に示す．

$$E_c = 8.56 f_c^{0.320} \quad ()$$

ここに，

E_c : ヤング係数(N/mm²)

以上で算定した引張強度発現式を図 7-33 に示す．

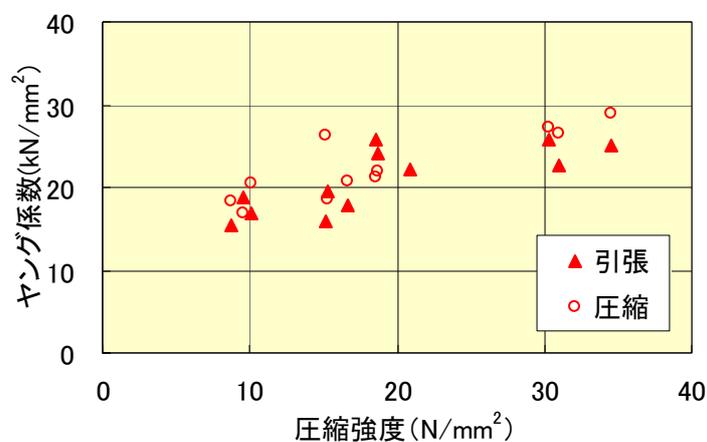


図 7-28 積算温度と圧縮強度の関係

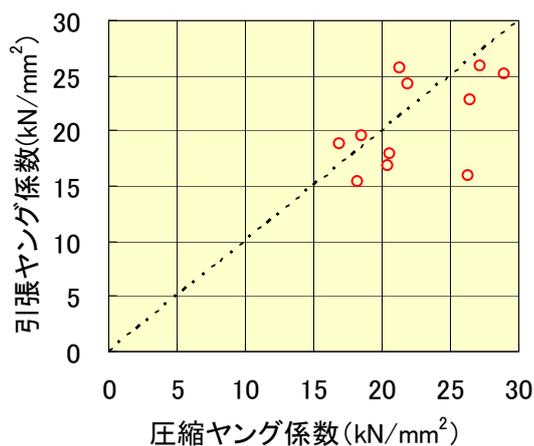


図 7-29 圧縮ヤング係数と引張ヤング係数の関係

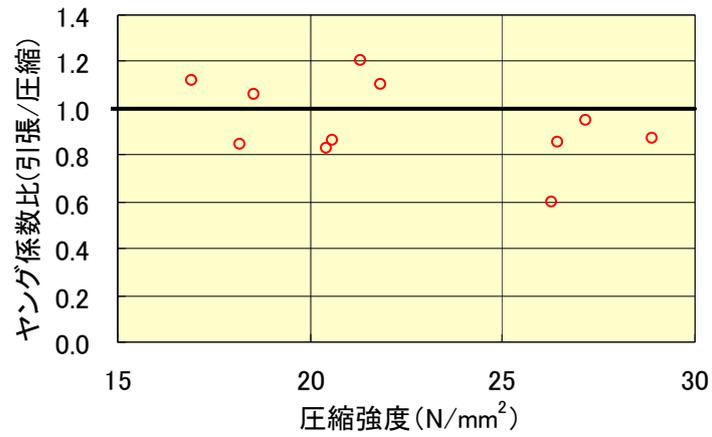


図 7-30 ヤング係数比の分布

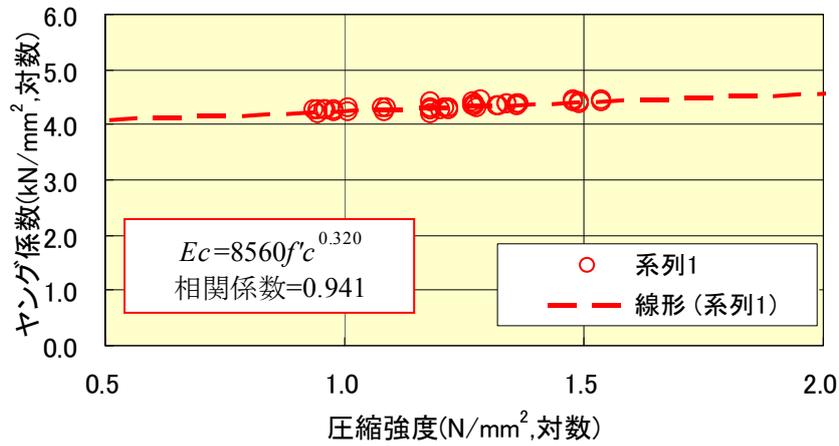


図 7-31 圧縮強度とヤング係数の関係

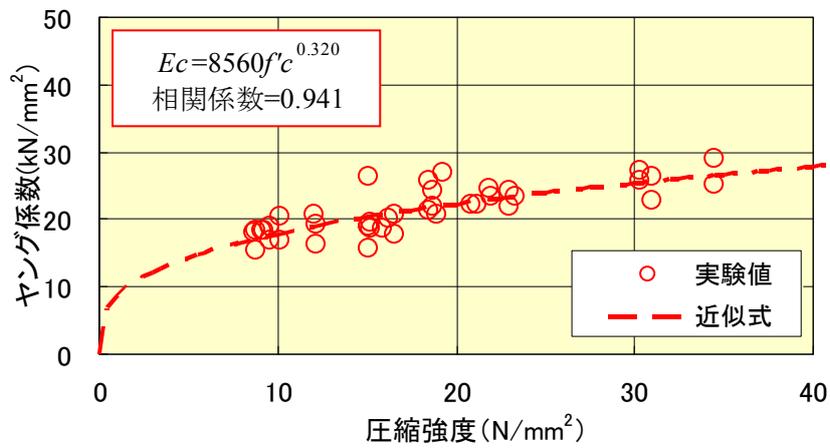


図 7-32 圧縮強度とヤング係数の関係

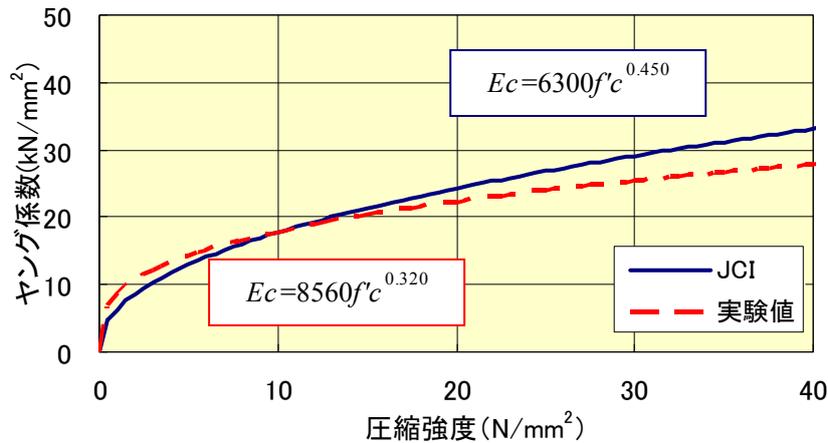


図 7-33 圧縮強度とヤング係数の関係

d) ポアソン比

検討ケース JCI では、コンクリートのポアソン比を日本コンクリート工学協会、マスコンクリートのひび割れ制御指針に示されている値である 0.2 として解析を行った。検討ケース文献値についてもこの値を用いた。

また、室内試験として第 3 章で行った簡易断熱試験において圧縮強度試験を行う際、横ひずみおよび縦ひずみを測定し、ポアソン比の算出を行った。ポアソン比の算出は縦ひずみおよび横ひずみのそれぞれの平均値の直線区間の傾きから求めた。応力とひずみの関係の一例を図 7-34 および図 7-35 に示す。また、積算温度とポアソン比の関係を図 7-36～図 7-37 に示す。積算温度が 5000hr°C を超えたあたりまでは積算温度の増進に伴い、ポアソン比も大きくなったことから関係式を算定したものの、それ以降は一定の値を示さず、結果的に相関係数が 0.63 と積算温度とポアソン比の間に相関は見られなかった。このことから、本検討では計測したすべての供試体のポアソン比の平均値である 0.178 を実験値として用いることとした。

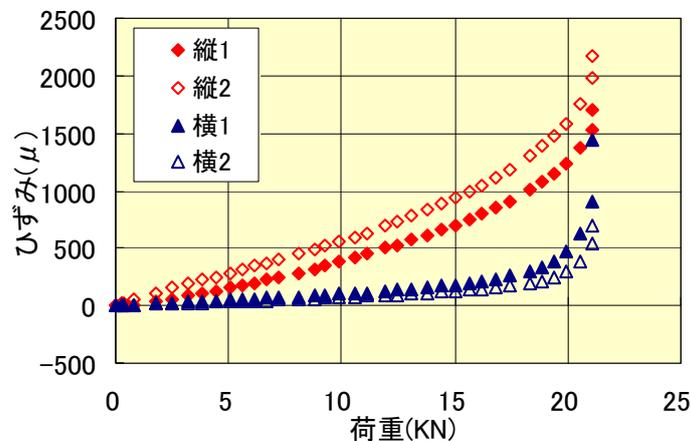


図 7-34 応力とひずみの関係

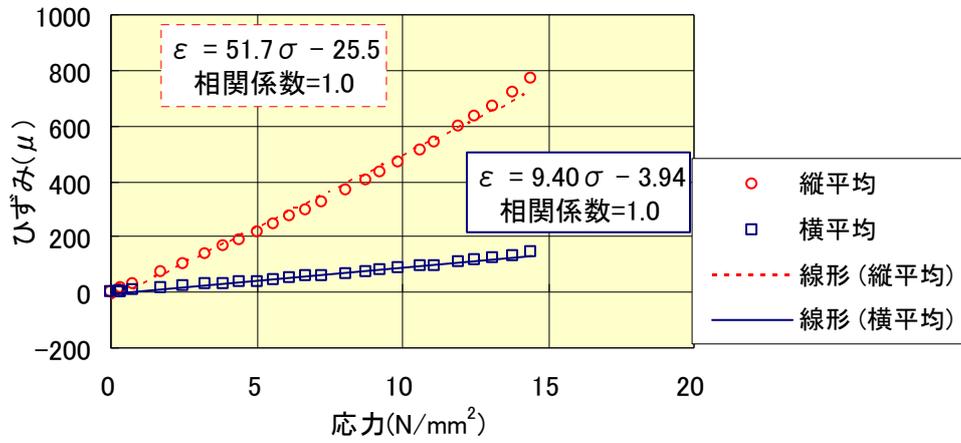


図 7-35 応力とひずみの関係

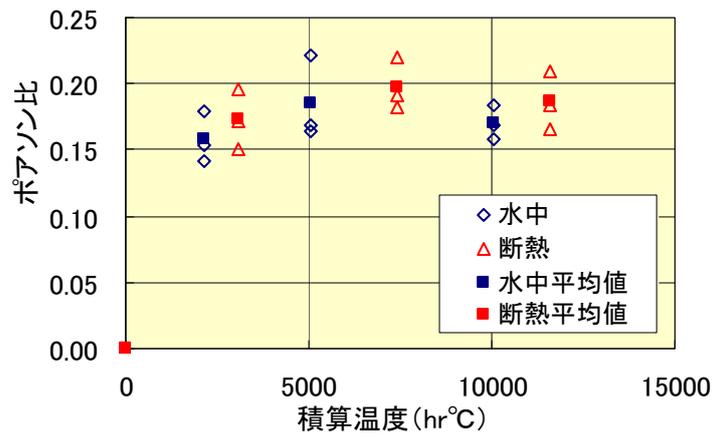


図 7-36 積算温度ポアソン比の関係

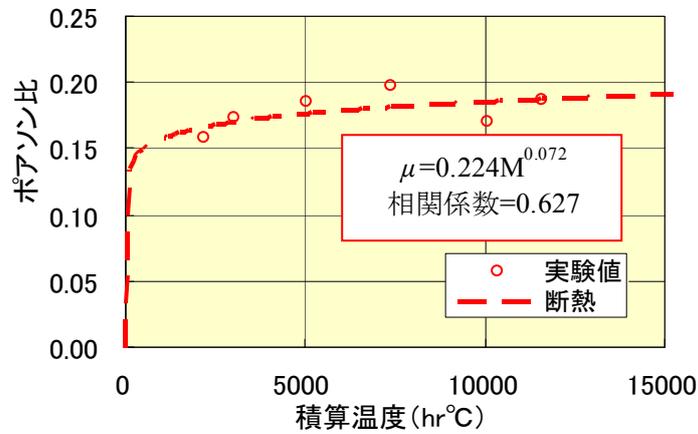


図 7-37 積算温度とポアソン比の関係

e) 線膨張係数

検討ケース JCI においては、コンクリートの線膨張係数（単位温度変化量に対するひずみ変化量の比率）を日本コンクリート工学協会，マスコンクリートのひび割れ制御指針に示されている高炉セメントを用いた場合の値である $12 \mu / ^\circ\text{C}$ として解析を行った．検討ケース文献値についてもこの値を用いた．

また，室内試験として第 3 章で行った簡易断熱試験において温度測定用の供試体の中心部に鉛直方向に埋設型ひずみ計を設置し，ひずみを計測した．打込み時の温度を基準とした場合の温度変化量とひずみの関係を図に示す．図 7-38 に示すとおり，線膨張係数は温度上昇時及び温度降下時で傾きが異なることから，温度上昇時及び温度降下時で傾きがほぼ同様な 5 つの部位に分けて，それぞれ熱膨張係数を算定することとした．各分割での温度変化量とひずみとの関係を図 7-39～図 7-43 に示す．

各区間での熱膨張係数を解析に用いる場合，特に若材齢時においてひずみの不連続性を生じる可能性がある．また，今回求めた熱膨張係数の時間関数は自己収縮及び低発熱収縮低減型高炉セメント B 種の膨張ひずみも含まれたものとなっていることに留意する必要がある．

若材齢時特に温度上昇時には熱膨張係数は大きく変化することは，添付資料の既往の研究⁶⁾でも確認されており，本検討結果も既往の研究成果と同様の傾向を示した．ただし，前述したように低発熱収縮低減型高炉セメント B 種の場合には，若材齢時に膨張するために，その膨張ひずみを含んで熱膨張係数を算定していることから，既往の研究成果と若干異なり，温度降下時での熱膨張係数よりも小さくなる期間が存在している．実際にどの程度の膨張ひずみが生じるか明確ではないため，本検討では温度変化と自己収縮を含んだ熱膨張係数と分離することができていないので，上記の式を温度履歴が異なる他の部位などに直接適用することは難しく，別途膨張ひずみのみを測定する方法を検討する必要がある．また，上記の式は自己収縮ひずみも含んでいることから，温度のみの熱膨張係数を算定するためには，自己収縮ひずみを除く必要もある．今回の検討ではこれらの評価を行うことが難しいことから，以後の同定解析では，温度上昇時の熱膨張係数の変化を無視し，温度降下時の熱膨張係数である区間⑤の値である $10.9 \mu / ^\circ\text{C}$ を用いることとした．

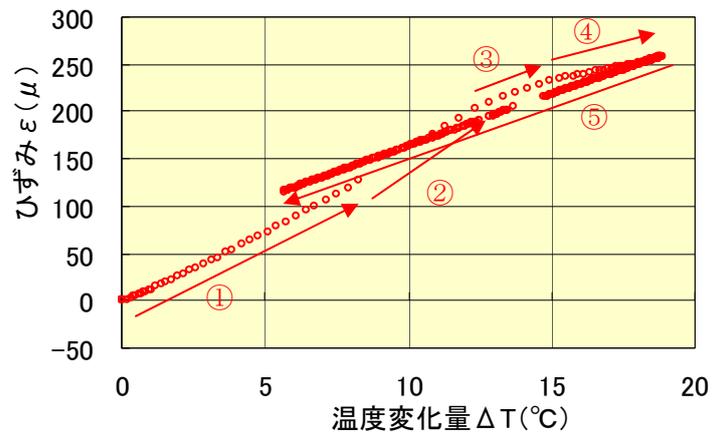


図 7-38 温度変化量とひずみの関係

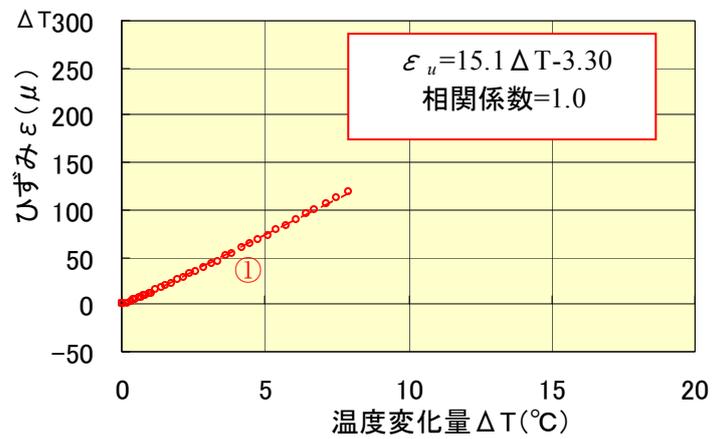


図 7-39 熱膨張係数の算定 (区間①)

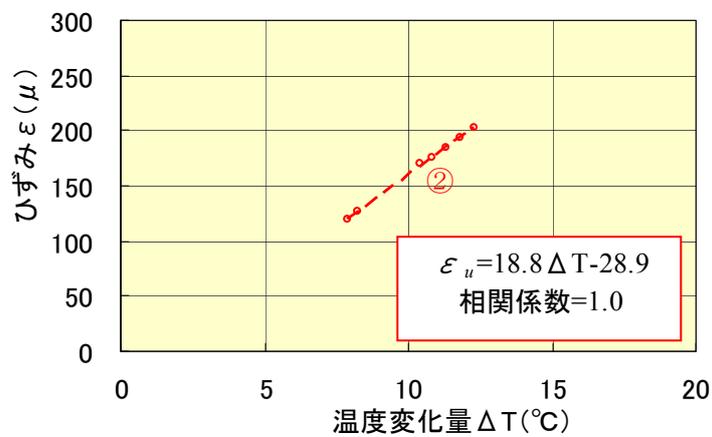


図 7-40 熱膨張係数の算定 (区間②)

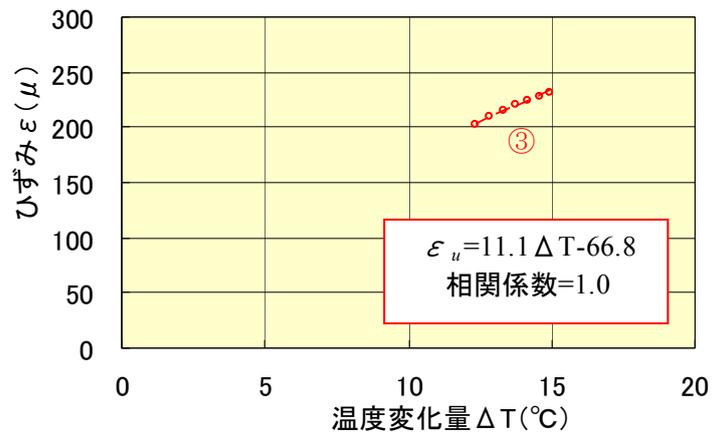


図 7-41 熱膨張係数の算定 (区間③)

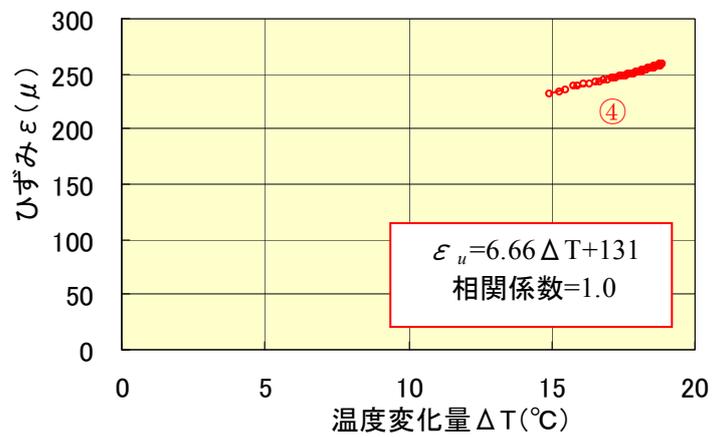


図 7-42 熱膨張係数の算定 (区間④)

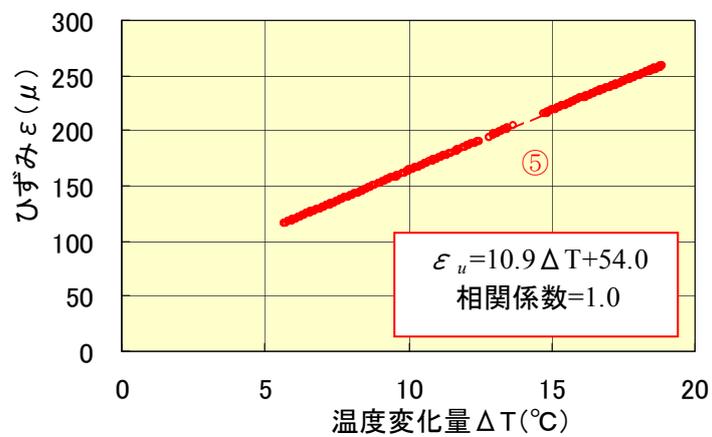


図 7-43 熱膨張係数の算定 (区間⑤)

7.6 解析結果

温度応力解析結果から図 7-4 に示す計測位置 3 点における温度履歴，応力履歴，ひび割れ指数履歴をそれぞれ算出した．各部位における温度履歴を図 7-44～図 7-46 に，応力履歴を図 7-47～図 7-49 に，ひび割れ指数履歴を図 7-53～図 7-54 に示す．

図 7-44～図 7-46 より，各部位においても日本コンクリート工学協会マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008 に示される高炉セメント B 種の値を入力条件として用いた場合，室内試験やメーカーの技術資料から得た入力条件を用いた場合に比べ，最高温度が 10℃程度大きくなる結果となった．また，最高温度からの温度降下量についても JCI に示される値を用いた場合が最も大きく，約 30℃となった．また JCI に示される値を用いた場合と技術資料を用いた場合において最高温度のピークがほぼ同時期となったものの，最高温度に最大 10℃程度の差があることから，温度降下速度に関しては，技術資料を用いた場合に比較的遅くなった．実験値を用いた場合の最高温度のピークは他のケースと比較して 0.7 日程度早くなる結果となった．

コンクリート部材の最高温度，最高温度のピークの時期，温度変化量，とりわけコンクリート部材に引張応力を生じさせる温度降下時の変化量はコンクリートの温度ひび割れに大きく影響することから，以上の結果より，解析への入力条件に用いる資料の違いが解析結果に及ぼす影響は大きいと考えられる．

コンクリートに生じるひび割れは理論上，コンクリートの応力が引張強度を超えたときすなわち，引張応力の引張強度に対する比を示すひび割れ指数が 1.0 を下回るときに生じるものである．図 7-47～図 7-51 より，ひび割れ指数が 1.0 のときにひび割れが発生するとした場合，ひび割れ発生材齢は，実験値を用いた場合が最も早く 4.8 日程度であり，続いて JCI に示される値を用いた場合が約 5.2 日，技術資料を用いた場合が約 6.3 日となり，入力条件に用いる資料の違いがひび割れ発生時期に影響を及ぼすことが考えられる．ただし，ひび割れ指数が 1.0 の時点における応力は JCI の値を用いた場合が約 2.2 N/mm²，技術資料を用いた場合が約 1.8 N/mm²，実験値を用いた場合約 1.4 N/mm² と，異なる結果となった．この差は解析に用いる引張強度に起因しており，応力を精度よく推定できたとしても，適切に引張強度を設定しないと，ひび割れ発生限界およびひび割れ発生材齢に大きく与えてしまうことを示している．

いずれの結果からも，各部位ともに JCI に示される値を用いた場合に他と大きく異なる結果となった．

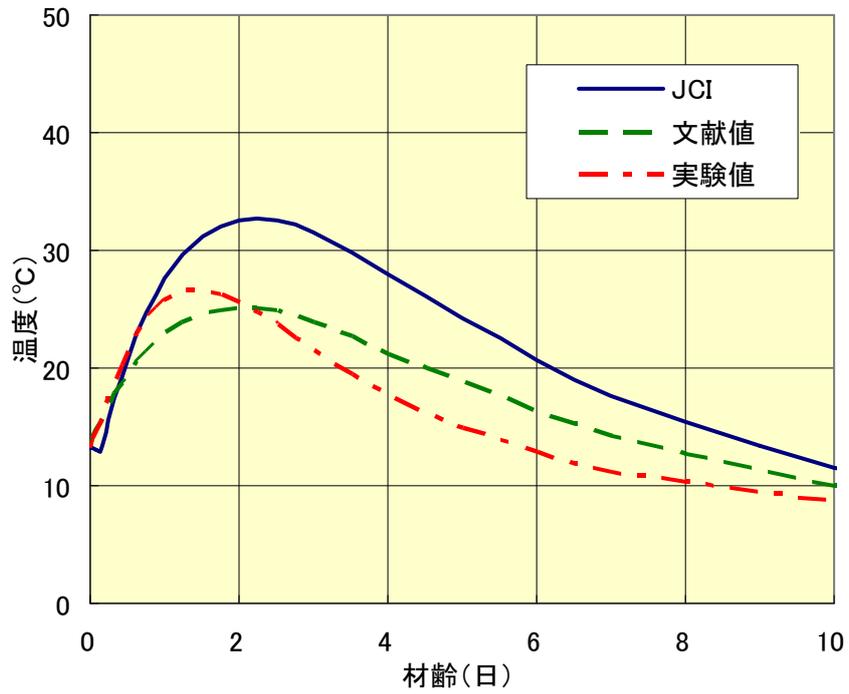


图 7-44 温度履歴図（側壁外側部）

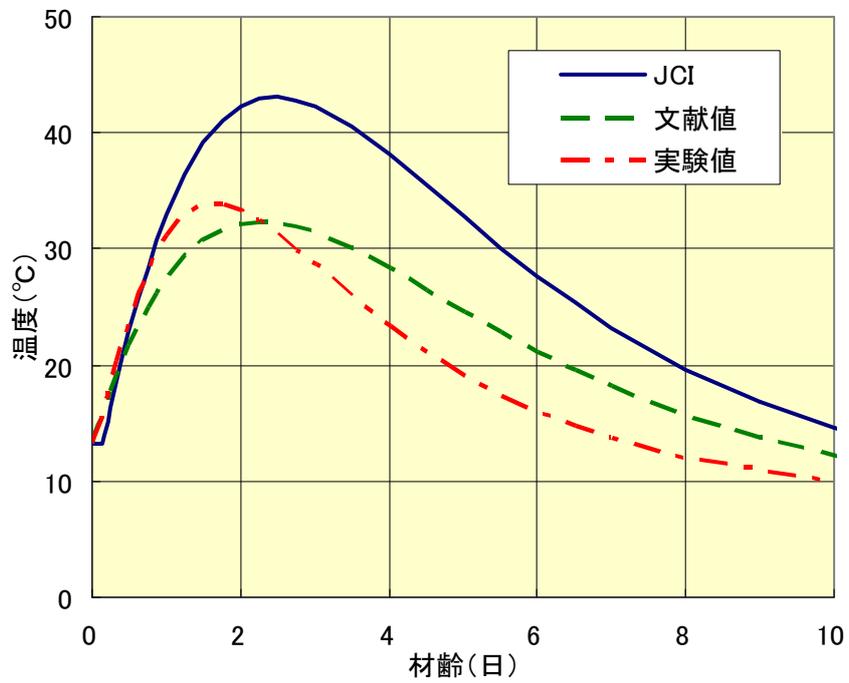


图 7-45 温度履歴図（側壁中央部）

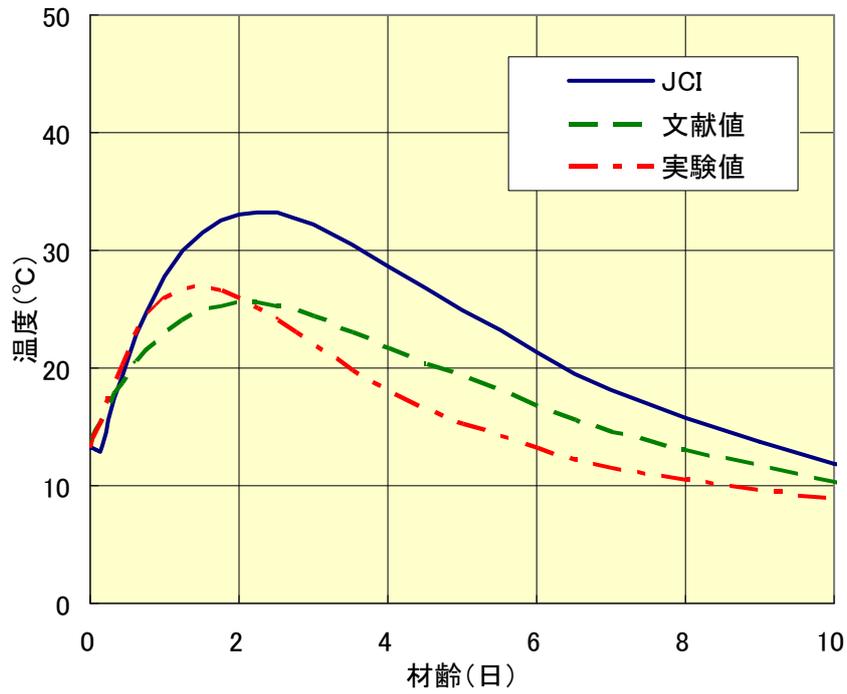


图 7-46 温度履歴図（側壁中央部）

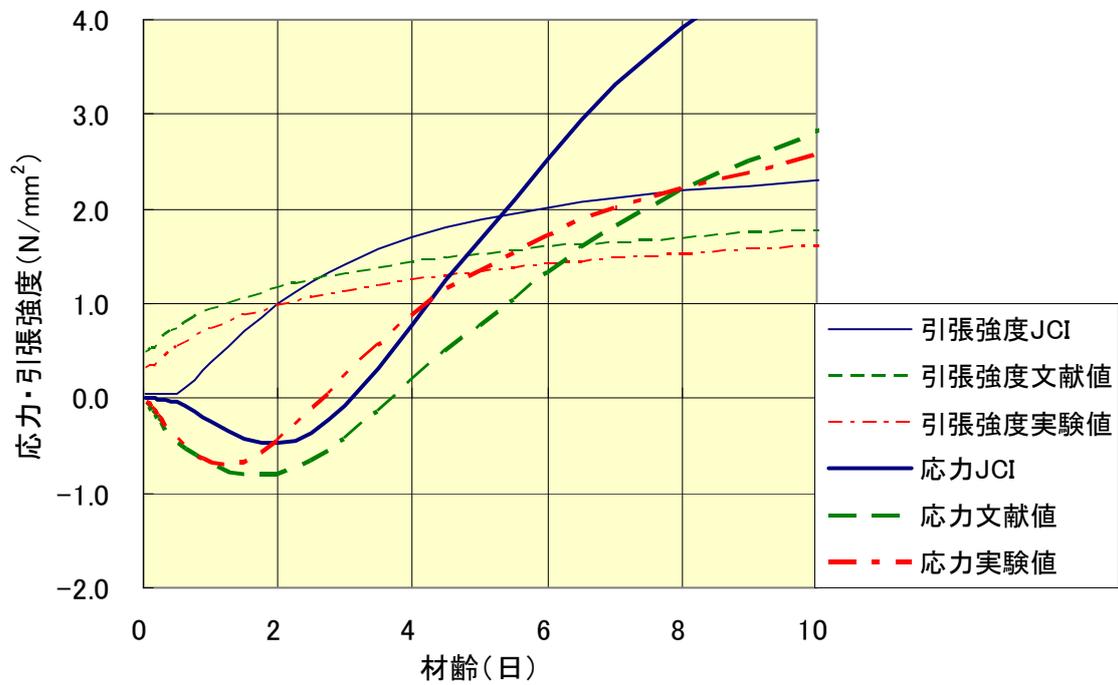


图 7-47 応力履歴図（側壁外側部）

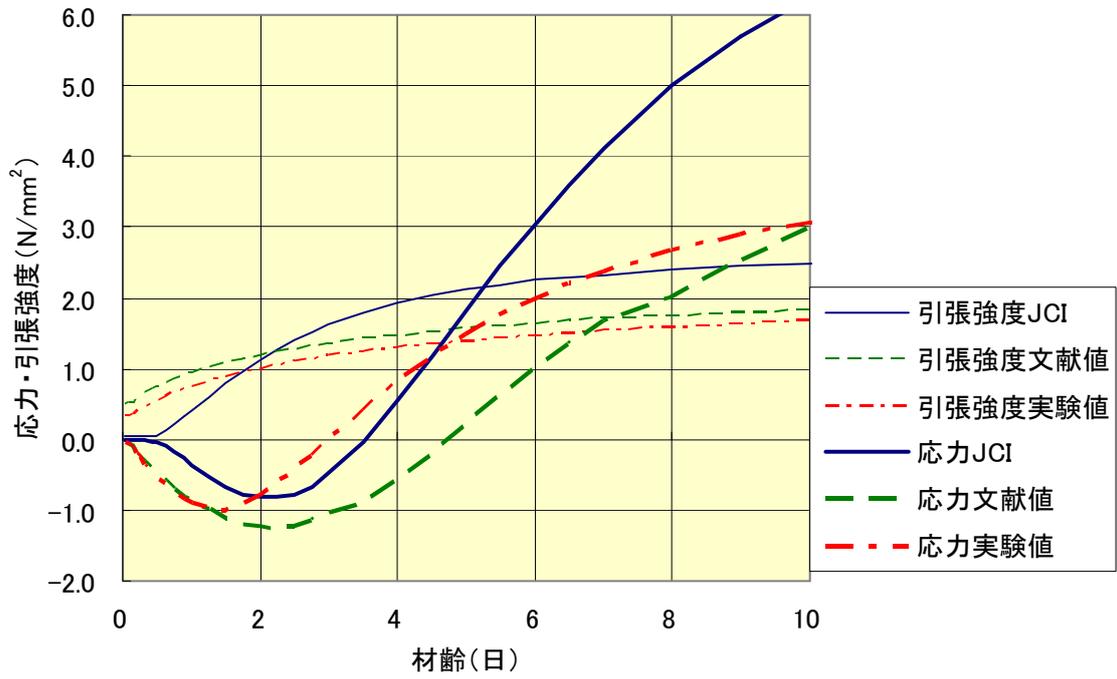


图 7-48 応力履歴図（側壁中央部）

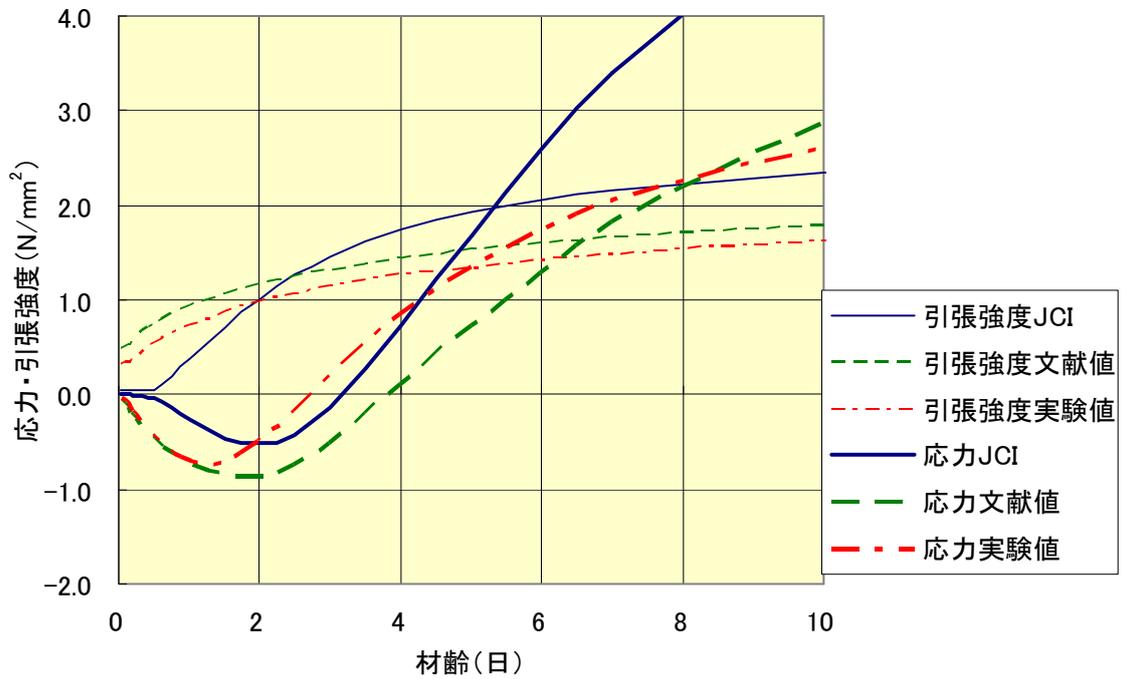


图 7-49 応力履歴図（側壁内側部）

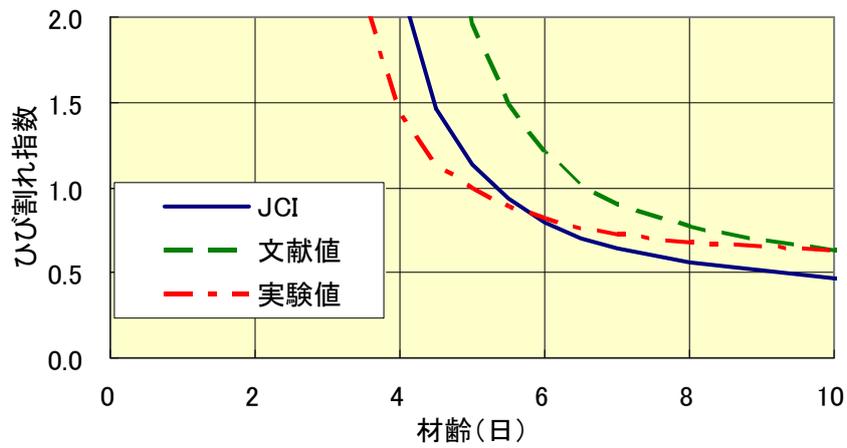


図 7-50 ひび割れ指数履歴図 (側壁外側部)

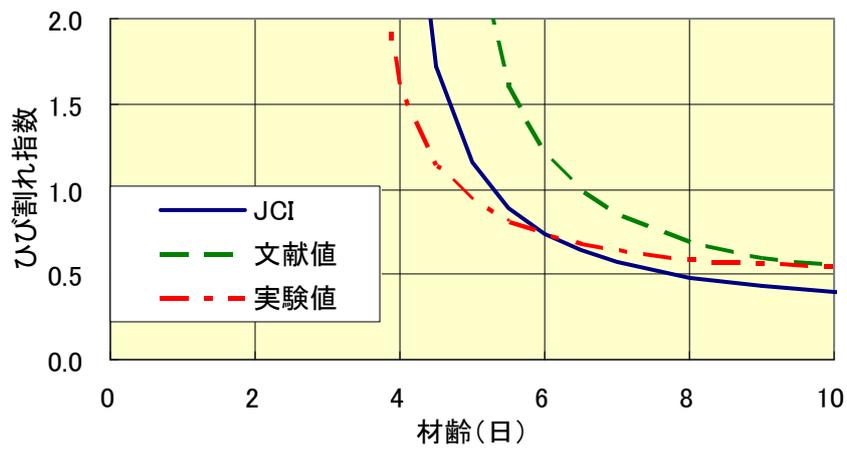


図 7-51 ひび割れ指数履歴図 (側壁中央部)

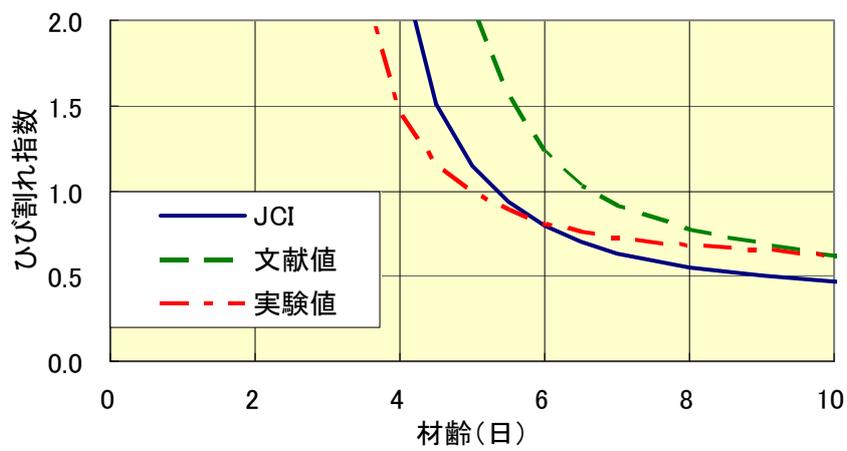


図 7-52 ひび割れ指数履歴図 (側壁内側部)

7.7 解析結果の検証

本節では、各ケースの解析結果と実際の施工時に計測された計測値との比較を行い、温度応力解析の高精度化の手段について検証を行った。

(1) 外気温

解析に用いた外気温として、各ケースともに、工事が行われる年から起算して過去 3 年間における気象庁の日別平均気温の平均値を用いた。解析に入力した外気温と実際の施工現場における外気温の計測値を図 7-53 に、外気温の設定値と計測値の日別平均気温を図 7-54 に、外気温の設定値と計測値の偏差を図 7-55 に示す。設定する外気温によってコンクリートに生じる温度が大きく異なり、算出される応力も大きく変化することから、設定する外気温は温度応力解析結果に大きな影響を及ぼすものである。図 7-53～図 7-55 より、容易に入手することのできる気象庁のデータから外気温を設定することで、施工現場における外気温変化を概ね推定することが可能であることが確認できる。ただし、設定値と計測値との偏差を見た場合、解析期間を通じた偏差の平均は、計測値が約 1.5°C 高い結果となった。これは近年の温暖化の影響によるものと思われるが、コンクリートの温度ひび割れは、外気温が高いほど起こりやすいため、設定する外気温に古いデータを用いる場合には建設される構造物の過去の環境条件にも配慮する必要があることを示している。本研究においても、実際は設定値よりも幾分厳しい温度条件であると思われる。

また、設定値には日平均気温を用いているものの、実際には図 7-53 に示すように、一日の間で多いところで 20°C 程度の気温差が生じている。日平均気温を用いた解析ではこの影響を十分に考慮できていないとはいえない。このことから、より精度の高い解析を行うためには、建設される場所の温度を事前にできれば建設時期の 1 年前以上から計測を行うとともに、それらのデータをできる限り細かく設定することが望ましいと考えられる。

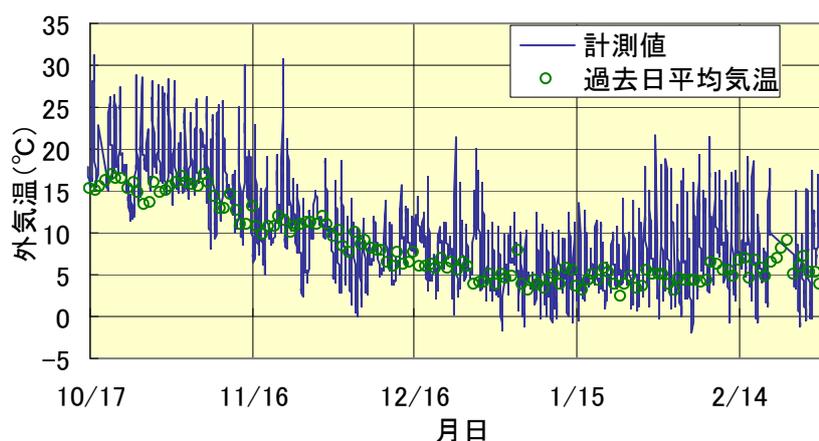


図 7-53 外気温の設定値と計測値の比較

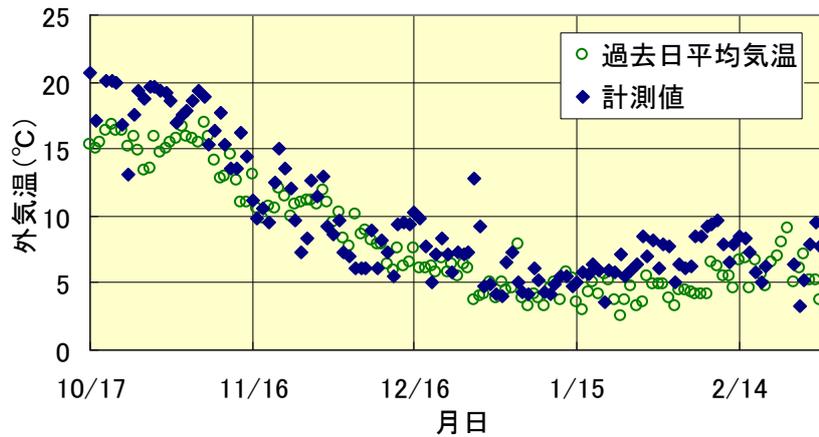


図 7-54 外気温の設定値と計測値の比較（日別平均気温換算）

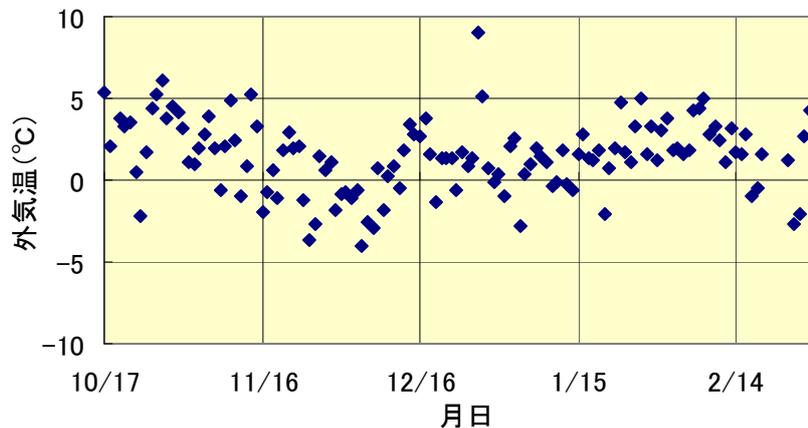


図 7-55 日別平均気温換算時の設定値と計測値との外気温偏差

(2) 温度および応力

計測された応力履歴を用いて本検討で行った応力解析の検証を行うことを目的とし、本章 7.6 図 7-48 に示す側壁中央部におけるひび割れ指数が 1.0 の時点においてひび割れが生じるように各ケースにコンクリートに適切な引張強度を与えて再度解析を行った。

各計測位置における温度解析から得られた温度履歴と計測された温度履歴を図 7-56～図 7-58 に、応力解析から得られた応力履歴と計測された応力履歴を図 7-59～図 7-61 に示す。図 7-59～図 7-61 より本検討で対象とした構造物では、計測位置において材齢が約 6.5 日の時点でひび割れが発生した。ひび割れ発生限界は約 1.3 N/mm^2 となっている。各ケースのひび割れ発生限界およびひび割れ発生材齢を表 7-11 に示す。また、解析により得られたひび割れ発生限界の計測されたひび割れ発生限界に対する割合をひび割れ発生限界比として定義し、各ケースにおけるひび割れ発生限界比を表 7-11 に併記するとともに図 7-62 に示した。

図 7-56～図 7-58 より、側壁中央部における最高温度は室内試験における簡易断熱試験か

ら算定した断熱温度上昇式を用いた実験値を用いた場合、ほぼ一致した。一方、JCI の値を用いた場合の最高温度は計測値より 8℃程度高くなる結果となり、技術資料を元にしたデータを用いた場合の最高温度は、計測値よりも 3℃ほど低い値を示した。以上のことから、解析への入力条件に用いる資料によってコンクリート部材内部に生じる最高温度の予測に大きく影響すると考えられる。ただし、最高温度のピーク時期は JCI を用いた場合および技術資料を用いた場合において 2.0 日程度と計測値とほぼ一致したものの、実験値を用いた場合については最高温度のピークが約 1.6 日と異なる結果となった。この要因として、使用した簡易断熱養生槽の断熱性能が影響していると思われる。この点に関しては簡易断熱試験方法および養生槽の形状など、さらに検討を行い、改良することにより改善されると思われる。以上のことから、本試験で導入した中央部に温度測定専用の $\phi 300 \times 450\text{mm}$ の供試体を配置し容積率を 6.6%確保した簡易断熱養生槽を用いた断熱温度上昇式を入力値とした場合、最高温度のピークの時期は若干速くなるものの、コンクリートの最高温度をより高精度に推定できることが考えられる。

図 7-59～図 7-62 および表 7-11 より、JCI の値を用いた場合のひび割れ発生限界は約 2.3 N/mm^2 、技術資料を用いた場合 1.8 N/mm^2 、実験値を用いた場合 1.5 N/mm^2 となった。計測値におけるひび割れ発生限界は 1.3 N/mm^2 であり、実験値を用いた場合にひび割れ発生限界比が 1.2 と最も計測値に近い値を示した。このことから解析への入力条件として、本検討で提案した各種室内試験を用いた実験値を用いることでコンクリートに生じるひび割れ発生限界をより高精度に推定できると思われる。一方で、ひび割れ発生時期については JCI の値を用いた場合 5.3 日、技術資料を用いた場合 6.5 日、実験値を用いた場合 4.9 日となり、実際にひび割れが生じた 6.9 日とは室内試験による実験値を用いた場合でも、一致しない結果となった。このことは、図 7-57 に示すように、実験値を用いた場合に得られる温度履歴が計測値よりも早い段階で発熱し、さらに温度降下の時期も早いことが影響していると思われる。このことから、簡易断熱試験方法改良によってより精度のよい解析結果を得ることができると思われる。

いずれの結果からも、各部位ともに JCI に示される値を用いた場合に計測値と大きく異なる結果となり、温度応力解析への入力条件として JCI に示される値を用いた場合に得られる解析結果は、実際と大きく異なる可能性があると思われる。この要因として、今回用いた低発熱収縮抑制型高炉セメントは高炉 B 種に規定されているものの、JCI に示される高炉セメント B 種の値を算定する既往のデータで用いられたものは一般的な高炉セメント B 種であり、低発熱収縮抑制型高炉セメントとは異なることが考えられる。また、今回対象として検討を行った低発熱収縮抑制型高炉セメント B 種以外にも、既往のデータから外れると思われるような特殊なセメントを用いた照査を行う際には、その点を十分に考慮することが重要である。

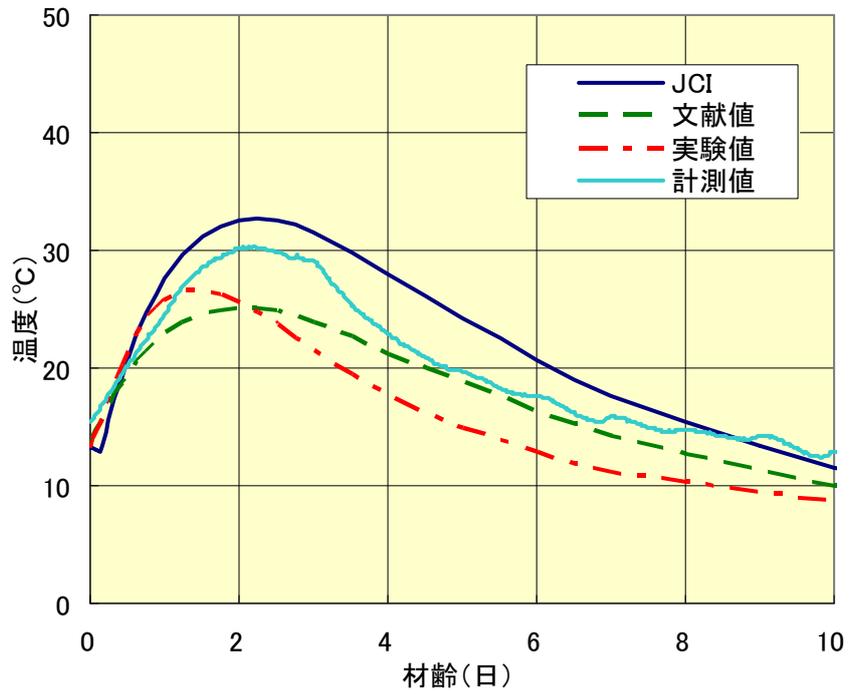


図 7-56 解析結果と計測値との比較（温度，側壁外側部）

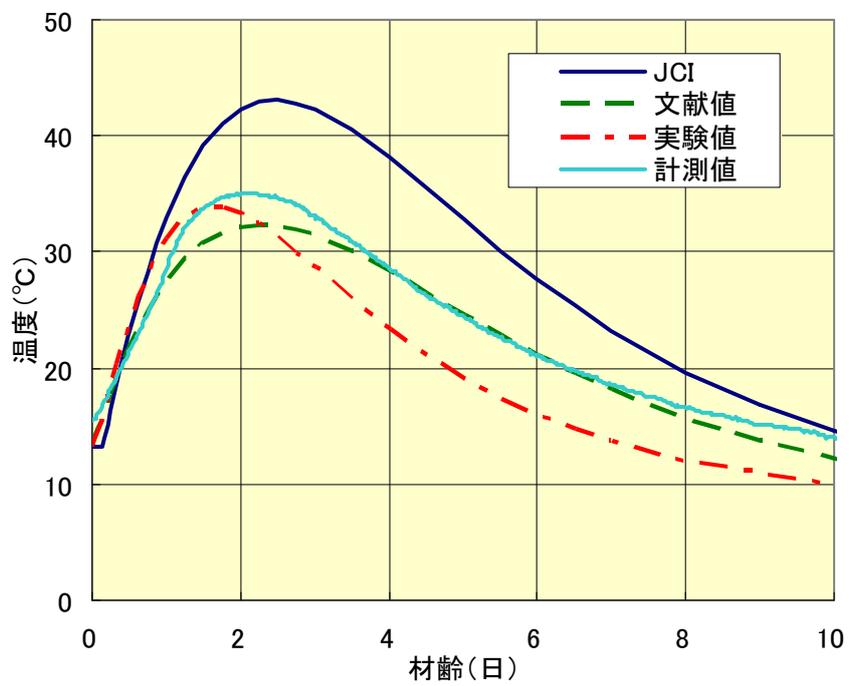


図 7-57 解析結果と計測値との比較（温度，側壁中央部）

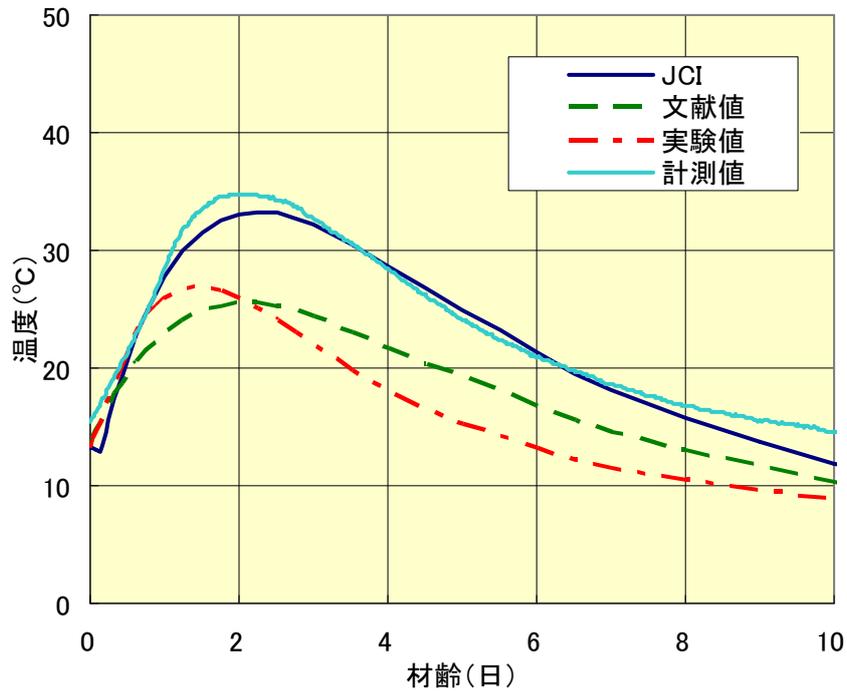


図 7-58 解析結果と計測値との比較（温度，側壁内側部）

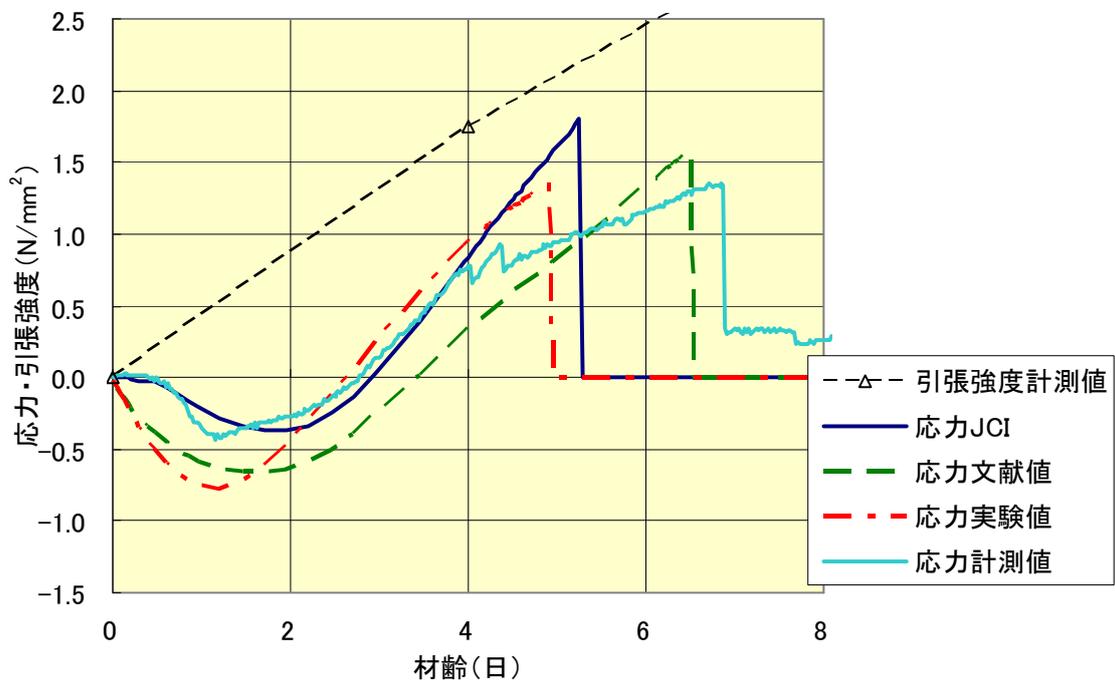


図 7-59 解析結果と計測値との比較（応力，側壁外側部）

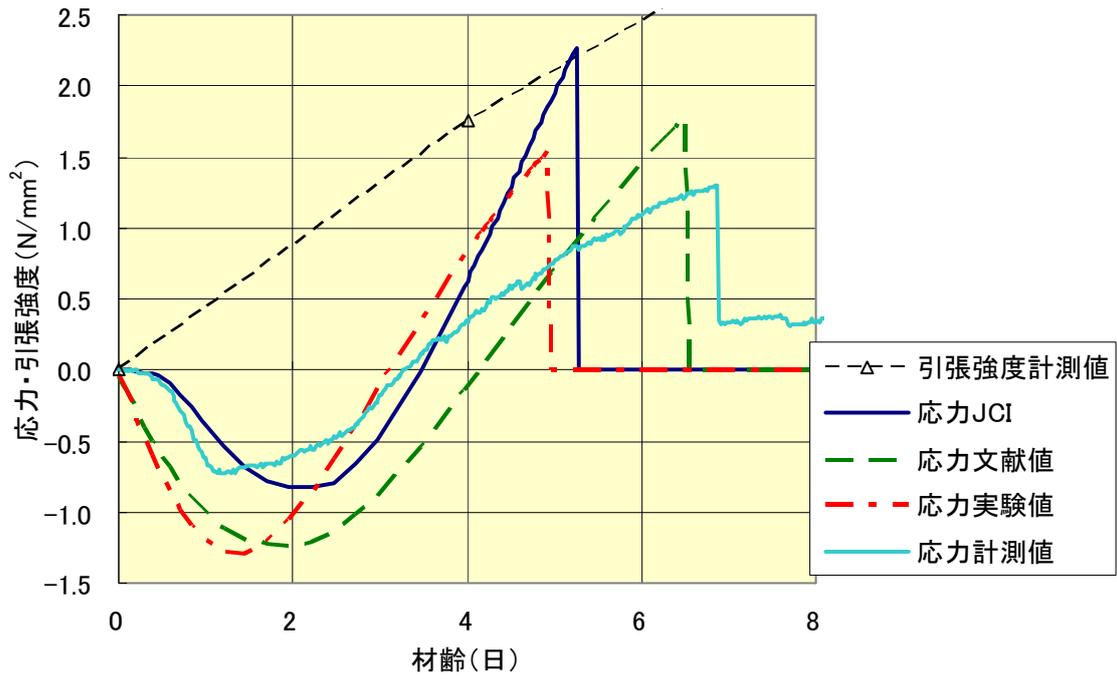


図 7-60 解析結果と計測値との比較（応力，側壁中央部）

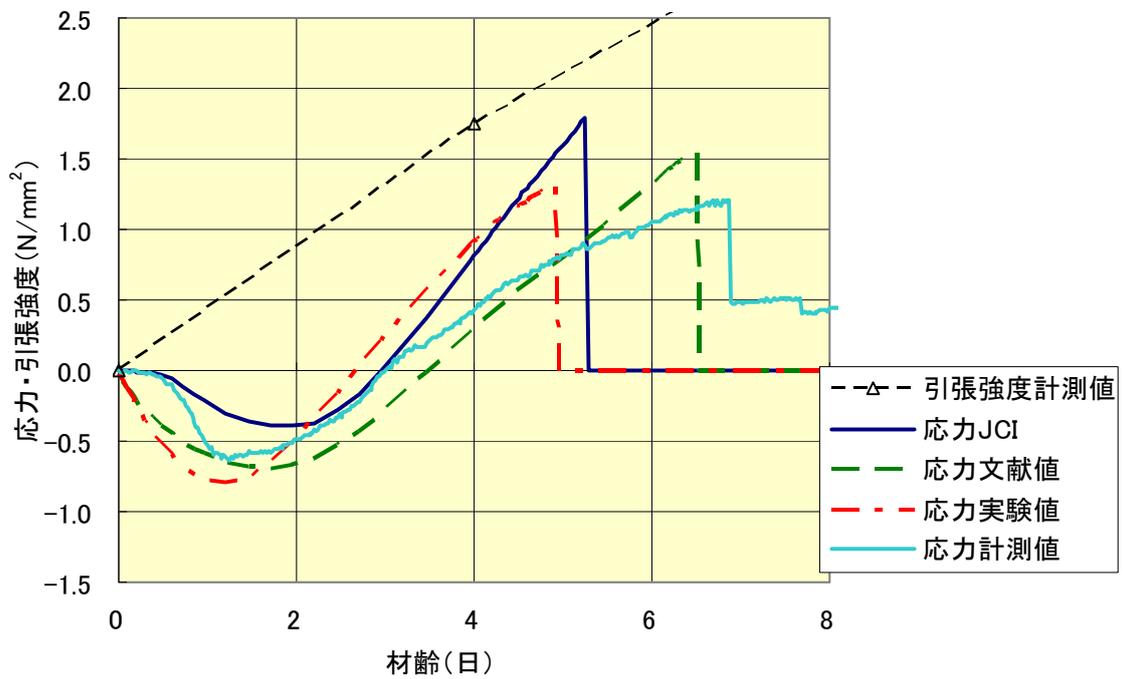


図 7-61 解析結果と計測値との比較（応力，側壁内側部）

表 7-11 各ケースおよび実測値におけるひび割れ発生限界およびひび割れ発生材齢

検討ケース	ひび割れ発生限界 (N/mm ²)	ひび割れ発生材齢 (日)	ひび割れ発生限界比 (解析値/計測値)
JCI	2.3	5.3	1.7
文献値	1.8	6.5	1.4
実験値	1.5	4.9	1.2
計測値	1.3	6.9	1.0

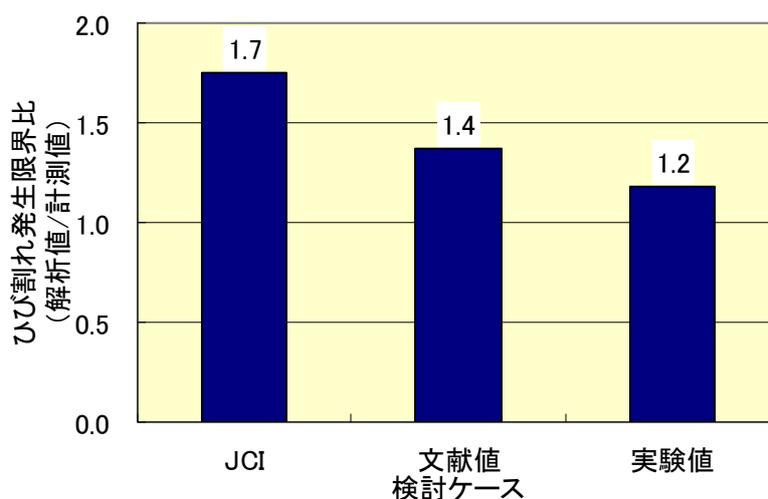


図 7-62 各ケースのひび割れ発生限界比 (解析値/計測値)

7.8 まとめ

本章では第4章から第6章までに得られた結果をふまえ、対象工事の事前検討を想定してさらに各試験機を用いて実験を行い、それらの結果を温度応力解析の設計用値として入力して解析を行った。また、各実験の効果を検証するために2008年に日本コンクリート工学会より改定されたマスコンクリートのひび割れ制御指針に定められている手順に従って既往のデータのみを用いた解析を行い、それらの解析結果と対象工事における施工時温度応力の計測値と比較検討することで、マスコンクリートにおける温度応力解析の高精度化の手法について検証を行った。その結果、以下に示すような知見を得た。

(1)本試験で新たに導入した中央部に温度測定専用のφ300×450mmの供試体を配置し容積率を6.6%確保した簡易断熱養生槽を用いた断熱温度上昇式を入力値とした場合、最高温度のピーク時期は若干早くなるものの、コンクリートの最高温度をより高精度に推定できることが確認できた。

本検討で提案した各種室内試験を用いた実験値を用いることでコンクリートに生じるひび割れ発生限界をより高精度に推定できると思われる。

JCIに示される値を用いた場合に得られる解析結果は実際と大きく異なる可能性があることが確認できた。

第8章 結論

マスコンクリートにおいては、セメントの水和発熱に起因する温度ひび割れがしばしば問題となる。温度応力解析手法は向上している一方で、解析に用いる入力条件の精度向上が課題となっている。より精度のよい解析結果を得るためには、それぞれの入力条件に対して、あらかじめ実験を行い十分に信頼できる値を解析に用いることが望ましい。しかしながら、解析に用いる入力値は多く、それらすべてに対して十分な検討を行うことは困難であり、ほとんどの場合、既往の研究や施工実績から得られたデータを用いて行うのが現状である。本研究ではセメントの水和発熱に起因する温度ひび割れが問題となっているマスコンクリート構造物を対象とし、温度応力解析の高精度化を目的として、解析に用いる各種設計値に対する材料評価方法の確立を目指し、新たに導入した試験を用いて実験を行った。また、マスコンクリートである実際のボックスカルバート構造物において施工時の温度応力計測を行い、温度応力解析から得られた解析値と施工時の実測値とを比較することで、より精度のよい温度応力解析を行うための手法やその効果について検討を行った。

その結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) セメントの種別によっては、引張強度に達する前に伸び能力の限界に達する可能性がある。
- (2) 本試験で新たに導入した、十分なコンクリートの容積を確保した簡易断熱養生槽を用いると、コンクリートの終局断熱温度上昇量をより精度よく推定できる。
- (3) 温度応力解析の入力条件として、本研究で検討した簡易断熱物性評価試験および直接引張強度試験の実験結果を用いることで、コンクリートのひび割れ発生限界を精度よく予測できる可能性がある。

参考文献

- 1) 倉内 英敏, 谷村 充, 兵頭 彦次, 金津 努: 材料の設計用値がマスコンクリートの温度ひび割れ解析結果に及ぼす影響, 土木学会第 64 回年次学術講演会概要集, pp.814-815, 2009.
- 2) 大友 健, 府川 徹, 安藤 公一, 柳 栄治, 廣島 明男, 宮澤 伸吾: 収縮を抑制した高炉セメントB種を用いた低発熱コンクリートの特性と実構造物への適用, 大成建設技術センター報 第 38 号, pp26-1-26-10, 2005.
- 3) (社)土木学会:2007 年制定コンクリート標準示方書設計編, pp177-184, pp331-345, 2007.
- 4) (社)土木学会:2007 年制定コンクリート標準示方書施工編, pp1-16, 2007.
- 5) (社)日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, pp55-78, 2008.
- 6) ライフサポート研究会: ひび割れ指数を用いた温度ひび割れの評価—事例紹介—, 月刊下水道, Vol.27, No.14, 2004.
- 7) 青木優介, 平野雄大, 鈴木孝治, 嶋野慶次: 直接引張試験で測定したコンクリートの引張ヤング係数と引張強度, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, 2007.
- 8) 米山紘一, 川瀬清孝, 武田光明: 若材令時コンクリートの引張特性, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.8, 1988.
- 9) R. Springenschmid: Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, E&FN SPON Inc, pp.137-144, 1994.
- 10) 溝渕利明, 横関康祐, 信田佳延: 一軸拘束試験装置を用いた温度ひび割れ試験方法に関する検討, コンクリートの品質評価試験方法に関するシンポジウム論文集, pp61-68, 1998.
- 11) 秋田宏ほか: コンクリートの直接引張試験における実験的方法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.643-648, 1999.
- 12) 吉武勇, 中村秀明, 谷本俊夫, 浜田純夫: 現場利用可能なマスコンクリートの簡易断熱温度上昇測定法の提案, 土木学会論文集, No.606/V-41, pp103-110, 1998.
- 13) (社)土木学会:2003 年制定コンクリート標準示方書施工編, p41-54, 2007.
- 14) コンクリート構造物の収縮ひび割れの予測と制御, 温度変化, コンクリート工学, Vol.43, No.5, 2005.

謝 辞

本研究を行うに際しまして、終始御丁寧なるご指導を賜りました法政大学の溝渕利明教授、満木泰郎教授に厚く御礼を申し上げます。

また、実験を行うに際し多大なるご協力及び助言を頂きました山本幸雄様、日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂いた小俣貴洋様、綱島隆将様、室野井敏之様をはじめとする2009年度の法政大学土木材料実験室の皆様に変感謝致しております。

本論文をまとめるにあたり、多くの方々からの御指導、御鞭撻、ご協力を頂きましたことを深く感謝申し上げます。

2010年2月19日

法政大学大学院工学研究科建設工学専攻

08D5101 井上量介