

### 若材齢時のコンクリートの引張挙動に関する 基礎的研究

伊藤, 裕貴 / ITO, Yuki

---

(発行年 / Year)

2008-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2008-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2007 年度 修士論文

若材齡時のコンクリートの引張挙動に関する  
基礎的研究

法政大学大学院 工学研究科  
建設工学専攻 修士課程

06R5101 イトウ ユウキ  
伊藤 裕貴

(指導教員：溝渕 利明教授)

# 若材齢時のコンクリートの引張挙動に関する 基礎的研究

法政大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 修士課程  
06R5101 伊藤 裕貴

2008年2月20日

## 概要

コンクリート構造物にひび割れが生じてしまった場合、そのひび割れはコンクリート構造物の耐久性能などを評価していくうえで重要な要因になる。したがってひび割れを予測・制御していく技術を確立することは非常に重要な課題である。そのためにはひび割れを定量的に評価する必要があり、温度応力解析など行わなければならない。また精度の高い解析には若材齢時コンクリートのヤング係数などの力学的特性値が必要となる。しかし実構造物での温度応力等の資料はまだ少なく、若材齢時のコンクリートの挙動などはまだ明らかになっていない状態である。

そこで本研究は、コンクリートの初期ひび割れの一要因である若材齢時のコンクリートの挙動メカニズムを明らかにする研究の一環として、実構造物で生じるそれらの挙動を室内でシミュレートできる装置(Thermal Stress Testing Machine)及び、2種類の引張強度試験装置を用いて、若材齢時のコンクリートの引張挙動など力学的特性値の資料を得ることを目的として測定を行った。その結果、試験方法の有用性及び、ひび割れ発生応力・材齢についてある程度予測可能であることを示せた。

# BASIC RESEARCH ON TENSILE BEHAVIOR OF EARLY AGE CONCRETE

By

06R5101 Yuki ITO

Graduate Course of Civil and Environmental Engineering , Hosei University ,

20th February , 2008

## ABSTRACT

When the crack occurs in a concrete structure, the crack becomes a major factor to evaluate the endurance performance etc. of a concrete structure. Therefore, it is a very important problem to establish the technology that forecasts and controls the crack. It is necessary to evaluate the crack quantitatively for that, and to do the thermal stress analysis etc. Moreover, the dynamic characteristic value of early age concrete Yong's modulus etc. is needed for the analysis with high accuracy. However, the data of the thermal stress in a real structure is still little and early age concrete dynamic characteristic values etc. are not clarified yet. Then, this research was done as part of the research that clarified a early age concrete behavior mechanism one factor of first stage crack of concrete. Measurements were made using laboratory equipment (TSTM Thermal Stress Testing Machine) which can simulate the above behavior expected to occur in actual structure and two tensile strength testing machine for the purpose of obtaining the data of the behavior of early age concrete and (the data)of the dynamic characteristic value. As a result, the utility of the test method was able to be shown. Moreover, it was able to be shown that it was predictable to some degree about the stress when crack is caused and the age.

# 目次

	ページ
第1章 序論 .....	- 1 -
1.1 研究背景 .....	- 1 -
1.2 目的 .....	- 2 -
第2章 既往の研究の調査 .....	- 3 -
2.1 R. SPRINGENSCHMID氏ら <sup>(2)</sup> による研究 .....	- 3 -
2.2 Sander Lokhorst氏ら <sup>(3)</sup> による研究 .....	- 9 -
2.3 K. SCHÖPPEL氏ら <sup>(4)</sup> による研究 .....	- 11 -
2.4 Bumbachstr氏 <sup>(5)</sup> による研究 .....	- 14 -
2.5 溝渚氏ら <sup>(6)</sup> による研究 .....	- 15 -
2.6 小田部氏ら <sup>(7)</sup> による研究 .....	- 19 -
2.7 溝渚氏ら <sup>(8)</sup> による研究 .....	- 22 -
2.8 米山氏ら <sup>(9)</sup> による研究 .....	- 24 -
2.9 青木氏ら <sup>(10)</sup> の研究 .....	- 24 -
2.10 尾畑氏ら <sup>(11)</sup> の研究 .....	- 26 -
第3章 Thermal Stress Testing Machine .....	- 30 -
3.1 概要 .....	- 30 -
3.2 温度設定方法及び温度制御方法 .....	- 32 -
3.3 外部荷重による変位制御 .....	- 37 -
3.4 TSTMで用いる供試体 .....	- 37 -
3.5 試験条件 .....	- 38 -
3.6 試験測定方法 .....	- 39 -
3.7 使用コンクリート配合及び材料 .....	- 39 -
第4章 円柱型直接引張強度試験 .....	- 41 -
4.1 概要 .....	- 41 -
4.2 治具接着・養生方法 .....	- 41 -
4.3 強度試験 .....	- 41 -
4.3.1 円柱型直接引張強度試験 .....	- 42 -
4.3.2 割裂引張強度試験 .....	- 43 -
4.3.3 圧縮強度試験 .....	- 43 -
4.4 使用コンクリート配合及び材料 .....	- 44 -
第5章 角柱型直接引張強度試験 .....	- 45 -
5.1 概要 .....	- 45 -
5.2 角柱型直接引張強度試験機・供試体 .....	- 47 -
5.3 強度試験 .....	- 48 -
5.3.1 角柱型直接引張強度試験 .....	- 48 -
5.3.2 割裂引張強度試験 .....	- 49 -
5.3.3 圧縮強度試験 .....	- 49 -

5.4	使用コンクリート配合及び材料	- 50 -
第6章	TSTM試験結果	- 51 -
6.1	温度制御結果	- 51 -
6.2	温度制御結果考察	- 64 -
6.3	変位測定結果	- 64 -
6.4	変位制御考察	- 67 -
6.5	熱膨張係数	- 68 -
6.6	応力測定結果	- 71 -
第7章	直接引張強度試験結果	- 74 -
7.1	ひずみ測定結果	- 74 -
7.2	円柱型直接引張強度試験	- 80 -
7.2.1	円柱型直接引張強度試験結果	- 80 -
7.2.2	割裂引張強度試験結果	- 83 -
7.2.3	円柱型直接引張強度と割裂引張強度の関係	- 86 -
7.2.4	円柱型直接引張強度と圧縮強度の関係	- 86 -
7.2.5	円柱型直接引張ヤング係数と圧縮ヤング係数関係	- 88 -
7.3	角柱型直接引張強度試験	- 89 -
7.3.1	角柱型直接引張強度試験結果	- 89 -
7.3.2	割裂引張強度試験結果	- 91 -
7.3.3	角柱型直接引張強度と割裂引張強度の関係	- 94 -
7.3.4	角柱型直接引張強度と圧縮強度の関係	- 95 -
7.3.5	角柱型直接引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の関係	- 96 -
第8章	試験結果まとめ	- 97 -
8.1	直接引張強度	- 97 -
8.1.1	割裂引張強度との比較	- 97 -
8.1.2	圧縮強度との比較	- 98 -
8.2	円柱型直接引張強度と角柱型直接引張強度	- 99 -
8.3	ヤング係数の比較	- 99 -
8.4	TSTM試験結果との関係	- 101 -
第9章	結論	- 104 -

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ひび割れが生じてしまった場合，有害なものであればそのひび割れ自体が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はなく，塩害や中性化などの2次的なコンクリートの劣化を促進してしまうことは一般的に良く知られている．これらのコンクリートの劣化はコンクリート構造物の根幹である強度や耐久性をはじめとして，施工の計画・実行・管理，施工後の管理に少なくない影響を与えることになる．このことから，ひび割れ発生の有無がコンクリート構造物のライフサイクルに関し，耐久性能などを評価・予測・管理していくうえで重要な要因であるといえる．したがって，セメントの水和反応が活発である若材齢時のコンクリートの挙動に伴う初期欠陥，とりわけ温度応力によるひび割れをはじめとする初期ひび割れの発生の予測及び，それによる耐久性能などの定量的評価を行うこと，また予測されたひび割れの制御方法・技術を確立すること，そしてそれらを応用し劣化要因に対し適切で迅速な対策を行えるようにしていくことは非常に重要な課題の1つであるといえる．

ひび割れの発生は，その部位に発生する引張応力がその部位の引張強度を越えた場合に起こるものであるが，ダムや長大橋梁基礎・タンク底版等のマスコンクリート構造物においては，セメントの水和発熱に起因するコンクリート部材内部の温度分布が不均一になる状態や外気との温度差，温度降下時のコンクリート自体の収縮がコンクリート自身，基礎や既設コンクリートなどからの拘束により応力(温度応力)が発生しひび割れへと進展することがある．また，若材齢時のコンクリートの挙動に伴う初期欠陥には，自己収縮や乾燥収縮によるひび割れなどがあり問題となることがある．

一方，コンクリートの引張挙動等を把握するための試験方法には，円柱供試体を使用する割裂引張試験が簡便であり一般的に多く用いられている．しかしながら，割裂引張試験の場合，コンクリート供試体の打込み方向と試験時の供試体への載荷方向が直交する向きとなるためにセメントと骨材の界面の付着強度の影響を十分に考慮しているとは言えないことや，粗骨材自体の品質の影響を受けることもありコンクリートの引張強度を過大に評価してしまうという研究成果も報告<sup>(1)</sup>されている．しかし，割裂引張強度試験に代わるコンクリートの引張強度試験方法が確立していないのが現状である．

以上のような課題に対して，マスコンクリート構造物の打設時からの水和発熱による内部温度変化に関しては実構造物での温度計測は比較的容易に行えることから，実構造物に即した温度データは計測されており，それらを基にした事後解析によるコンクリートの熱特性の評価は行われている．また，断熱温度上昇式や比熱，熱伝導率等の熱定数は室内実験・解析で得ることが可能である．したがって，マスコンクリート構造物内部の施工時からの水和発熱による温度変化の予測に関しては，既存の計測データや温度解析に必要な熱特性値を基に比較的高精度で予測することが可能であり，事前に構造物の形状や打設時期，打設環境が明らかであれば使用する材料・配合に対して，内部温度変化に及ぼす影響の評価が可能となっている．しかしセメントの水和発熱に起因する温度応力に関しては実構造物での計測が上述の温度に比べ困難であることから，計測データは多くない．また，若材齢時のコンクリートのヤング係数や引張強度，クリープ係数等の力学的特性値はセメントの水和反応の進行過程にあり大きく変化することから，明確に把握できていないのが現状である．したがって実構造物におけるひび割れ発生時の応力状態などを定量的

に評価することは困難であるといえる。

また近年使用頻度が高まっている高炉スラグセメントを用いたコンクリートの場合、材齢初期の養生方法の違いが引張挙動に大きな影響を与えているといわれており、セメントの種類が若材齢時のコンクリートの引張挙動に及ぼす影響を評価することも重要であるといえる。

## 1.2 目的

本研究では、若材齢時のコンクリートの挙動及びその評価方法についての資料を得ることを目的とし、割裂引張試験とは異なる水和発熱に起因する温度変化や熱膨張、乾燥収縮・自己収縮等の複合した挙動を室内でシミュレートできる装置「Thermal-Stress-Testing-Machine(TSTM)」を用いた試験法及び、2種類のコンクリート引張強度試験法を用いて比較・検討を行った。

## 第2章 既往の研究の調査

### 2.1 R. SPRINGENSCHMID氏ら<sup>(2)</sup>による研究

#### 2.1.1 Thermal Stress Testing Machine の開発

現在まで、初期材齢コンクリートの応力進展及びリラクゼーションの特性の理論的及び実験的な測定は試験方法(装置)の不足のために、満足のいく状態ではなかった。そこで R. SPRINGENSCHMID 氏らは、この分野の研究のために新しい試験機(Thermal Stress Testing Machine：以下 TSTM と称す)を開発した。この TSTM では実構造物でのコンクリート内部の実際の温度履歴や実際の拘束条件を設定することで再現して、コンクリートのひび割れリスクを研究することができる。これはひび割れに対するコンクリートの安全性のより現実的な評価を可能にするとしている。

#### 2.1.2 TSTM 概要

R.Springenschmid 氏らが用いた試験装置である TSTM の概略図を図 2.1 に示す。また、概略中の各部位の名称に関しては下記のとおりである。

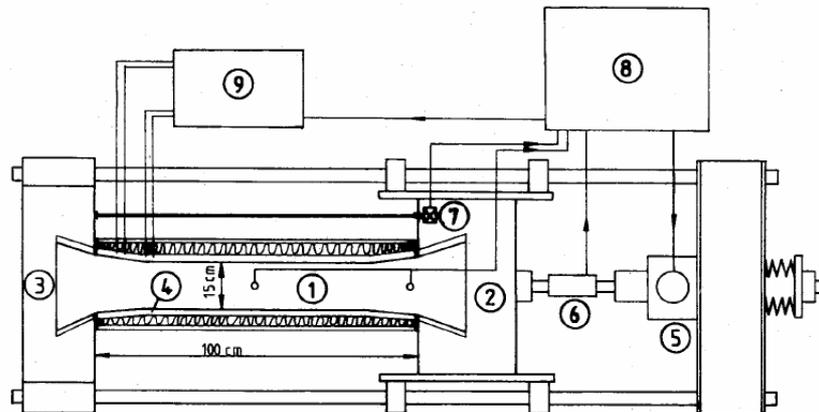


図 2.1 TSTM の概略図

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

### 2.1.3 Thermal Stress Testing Machine を使った試験の典型的な結果

このテストで用いられたコンクリートの配合は、使用セメントは低熱ポルトランドセメントPZ 35 L-NW (DIN 1164), 単位セメント量 220kg/m<sup>3</sup>, 単位水量 150 kg/m<sup>3</sup>であり, 使用骨材の最大寸法は 32mmである。またテストが行われる前に打ち込み温度 12 , 500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G.W.A alexandrovskによって提案された方法で, 高さ 3mの中央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 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 で一定であると仮定している。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, 今回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されている。

TSTM を用いたテストサイクルの典型的な結果として図 2.2 のような測定結果を示している。

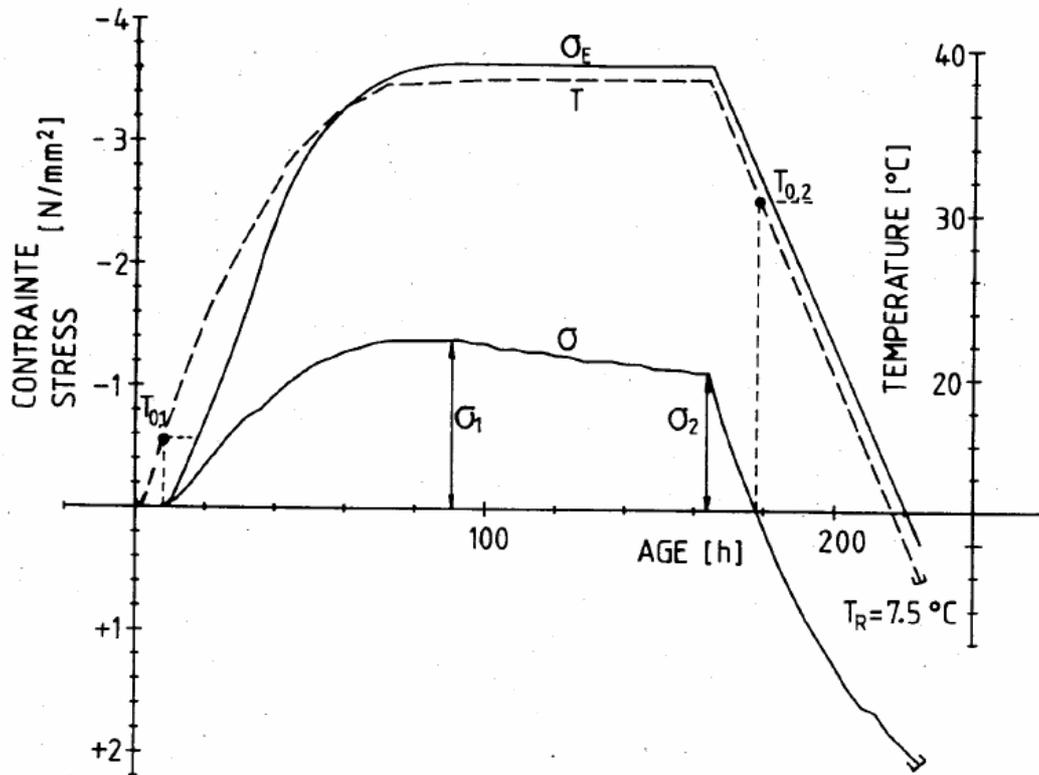


図 2.2 TSTM を使用した試験の典型的な結果

X軸 = 材齢 (日)

第 1 Y 軸 = 拘束応力(N/mm<sup>2</sup>)

第 2 Y 軸 = 温度 ( )

T = 温度

= 温度応力

$\sigma_E$  = 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

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

材齢が 96 時間のときに最高温度に達し、その後 72 時間一定に保たれている。その後ひび割れが発生するまで 0.5 /h の割合で冷却が行われている。水和発熱による温度上昇は打込み 2 時間後には既に始まったが、圧縮応力は試験開始 9 時間後に上昇し始めている。これらの応力の進展は、リラクセーションによって最初の段階から低下させられていると考えられ、最高温度に達する前に既に減少し始めている。T<sub>0.2</sub>よりさらに冷却を続けると引張応力は増加する。ひび割れは打込み温度より 4.5 低い 7.5 で発生した。このひび割れ温度(T<sub>c</sub>)は温度ひび割れに対する安全性を評価するために測定されるべきであり、低いひび割れ温度は温度ひび割れに対する高い抵抗性を示すと考えられる。

最初の 2 日間ではリラクセーションの程度は正確に判断するのは難しい。それは熱膨張係数がフレッシュコンクリートの約  $20 \times 10^{-6} K^{-1}$  から硬化コンクリートの約  $10 \times 10^{-6} K^{-1}$  に減少することと、他の応力誘発要因、例えば化学反応によって体積変化が拘束されるといったようなものがあるからである。図 2.2 に示されている算出弾性温度応力  $\sigma_E$  は、リラクセーションや他の応力誘発要因を考えず、完全拘束状態で算出されたものであるが、この理論的な弾性温度応力と測定された温度応力との差異は実際のリラクセーションの程度を近似的に示していると考えられる。

このようなことより圧縮応力の緩和はひび割れ温度に対して重要であり、長期におよぶ圧縮力および高程度リラクセーションは好ましくないひび割れ温度の上昇を引き起こすと考えられる

#### 2.1.4 異なるセメントと混和材の影響

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・配合でセメントだけが違う 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程度を TSTM で測定した。表-2.1 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 2.1.3 と同じ方法で各 7 種のセメントで算出された。断熱温度上昇量を図 2.3 示す。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 時間保たれた。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 /h で冷却された。図 2.4, 2.5, 2.6 で示すような結果を得ている。

表 2-1 セメント(DIN1164)及びコンクリート(DIN1048)の性質

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

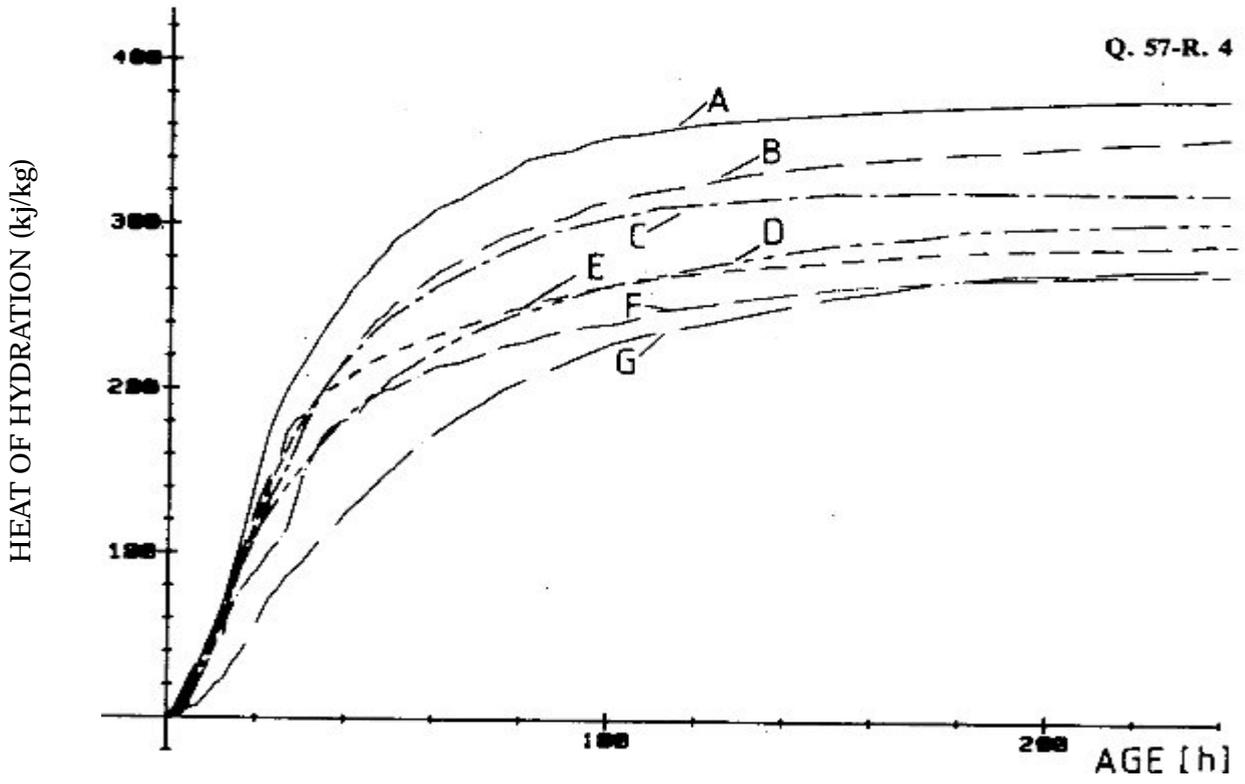


図 2.3 各種セメントの断熱温度上昇量

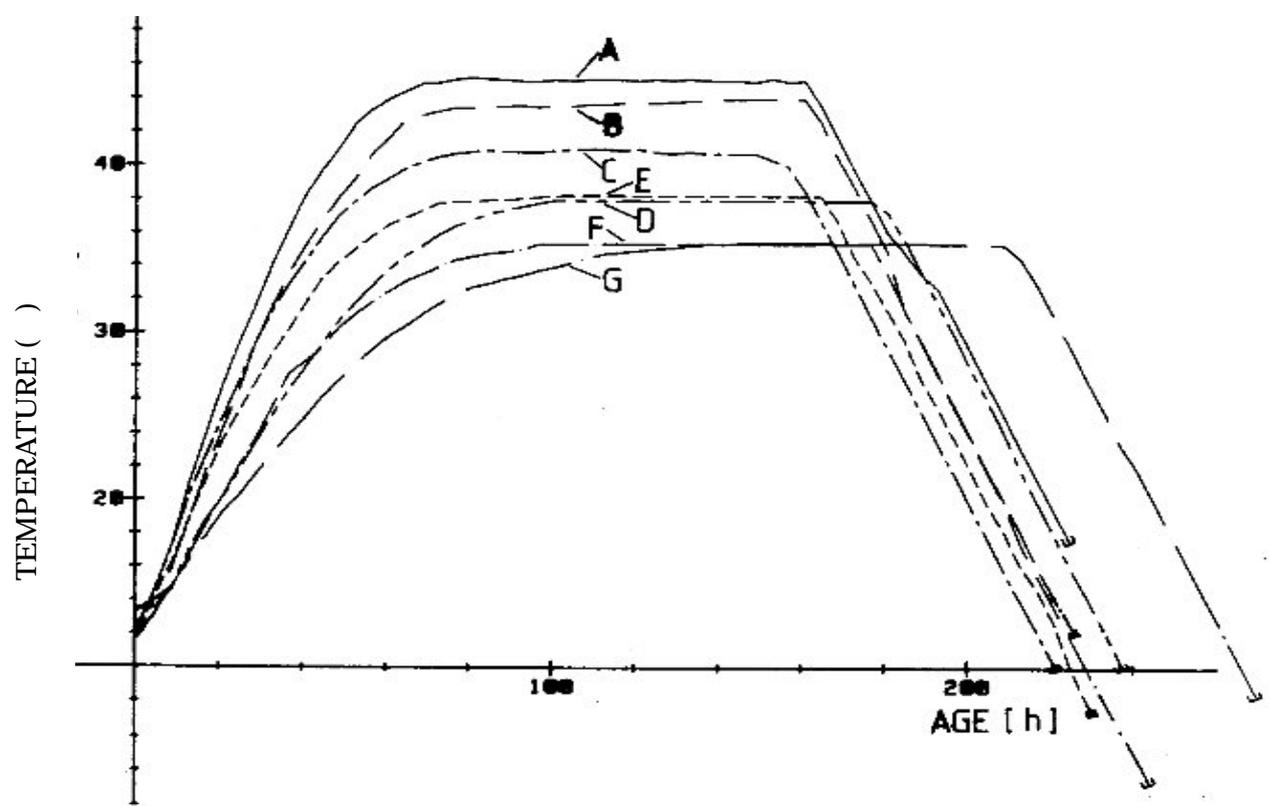


図 2.4 温度測定結果

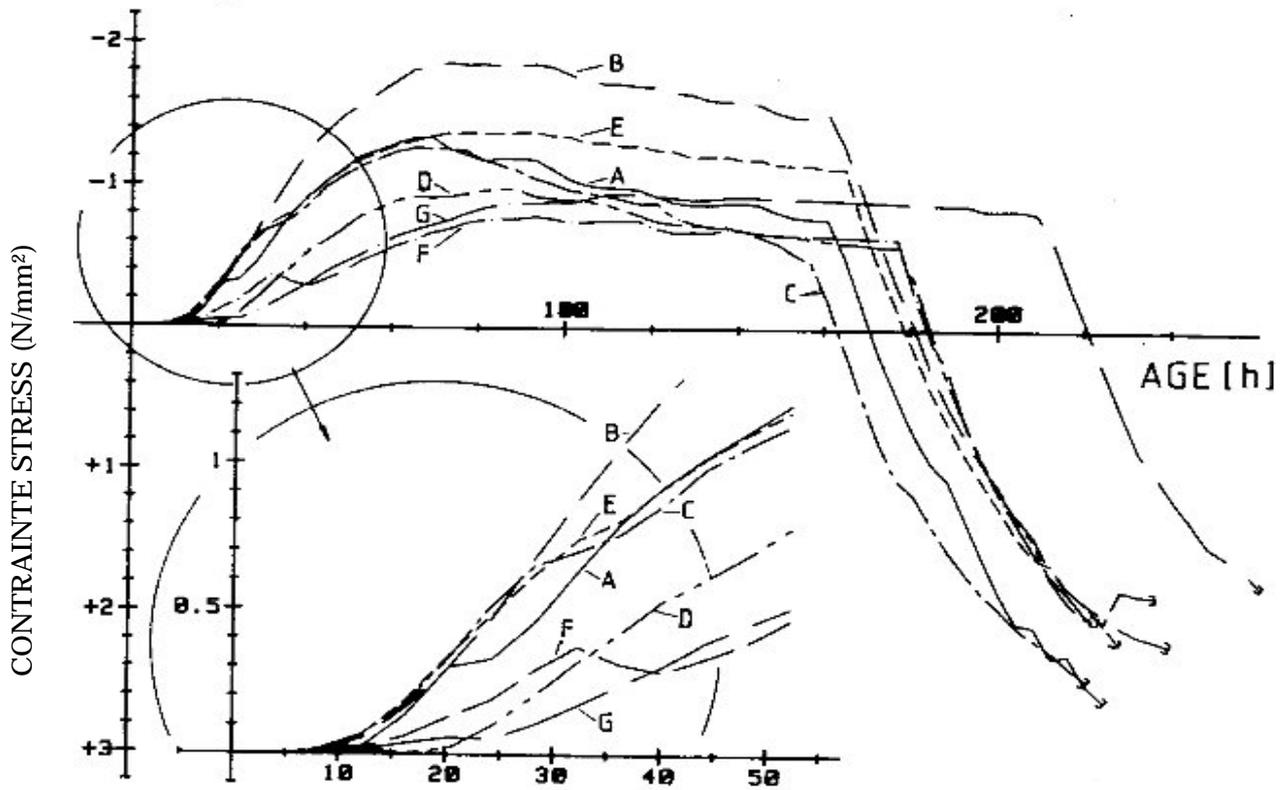
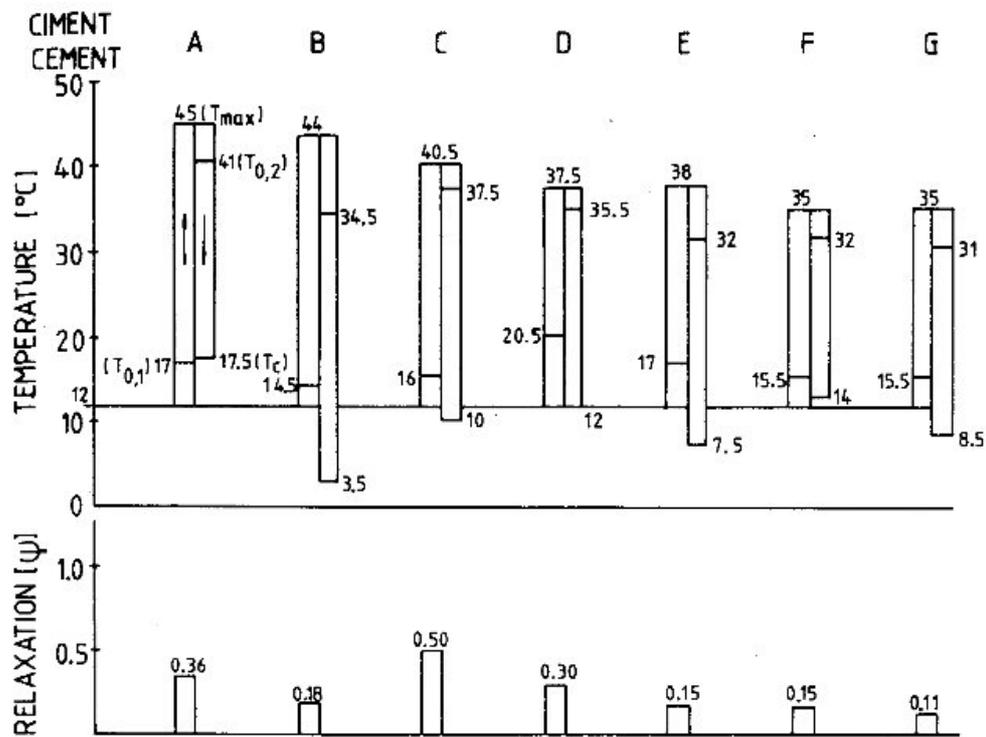


図 2.5 応力測定結果



T<sub>0,1</sub>; 第1ゼロ応力温度  
T<sub>0,2</sub>; 第2ゼロ応力温度  
T<sub>max</sub>; 最高温度  
T<sub>c</sub>; ひび割れ温度

図 2.6 重要となるポイントでの温度及びリラクゼーション係数

### 2.1.5 打込み温度の影響

表-2.1 のセメントFを用いて 2.14 と配合等は全て同じで打込み温度が 12 から 24 に変更された場合のテストも行った(以後( )内は打込み温度が 12 のときの結果) .温度進展は 2.1.3 と同じ方法で算出されている .最高温度は 46.5 (35 )に上がって , $T_{0.2}$ は最高温度から 4 (3 )下がったところであった .最大圧縮応力は 1.24N/mm<sup>2</sup>(0.78 N/mm<sup>2</sup>)であった .ひび割れ温度は 27 (14 )であった .これらの結果が示していることは ,このセメントFに関しては打込み温度の上昇量はひび割れ温度を同程度上昇させる結果となった .

### 2.1.6 まとめ

以上の結果より ,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 .

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

互いに影響を及ぼさずにこれらの特徴を変えることは出来ない .しかしひび割れはそれらすべての特性に依存して発生する .

コンクリートのリラクゼーションと引張ひずみの許容量は ,温度履歴 ,コンクリートの材齢及びコンクリートに応力が課せられた時間に依存している .したがって ,ひび割れ温度は材料で一定にならず ,この実験によって決定することはできない .このテストは好ましくない圧縮応力によるリラクゼーションを減少させるためにマスコンクリートはできるだけ速く冷やさなければならぬことを示している .また式 2.1 で示す早期材齢における温度  $T$  はできれば下げるべきである .コンクリートはその材齢で課された引張応力をリラクゼーションで高程度減少させ ,引張ひずみの要領は増加するだろう .硬化初日のセメントの圧縮応力の減少を引き起こす体積減少が小さいならば ,それは有利になる .セメント B はこの点でも最も良い結果を出している .

$$T = \frac{T_{0.2} + T_c}{2} \dots\dots\dots (2.1)$$

## 2.2 Sander Lokhorst氏ら<sup>(3)</sup>による研究

Sander Lokhorst 氏らは、打込み温度が応力進展に与える影響を測定するために、上述 2-1 の R. SPRINGENSCHMID 氏らが開発した TSTM を使用した実験を行っている。

実験条件は、低熱ポルトランドセメント(CEM-I 32.5)、単位セメント量  $350\text{kg/m}^3$ 、水セメント比 50%、使用骨材最大寸法 16mm の配合が使用された。コンクリートの材齢は練り混ぜのためにセメントを添加したときから測定された。混合物の温度はセメント添加の前に測定された。また TSTM は全ての変形が完全に拘束できる型枠拘束条件で行われている。図 2.7、2.8 にその結果を示す。

図 2.7、2.8 はコンクリート打込み温度が違う 3 種類の片面準断熱状態の供試体の温度進展及び応力進展を示している。この結果より、最大圧縮応力はほぼコンクリート打込み温度の影響を受けないということがいえる。またコンクリート打込み温度が低いならば圧縮応力が引張応力に変化する材齢が遅くなることを示している。

ここで言う片面準断熱状態は、図 2.9 に示す同論文内の別の試験の結果を参考にされている。図 2.9 の温度履歴にコンクリートの温度変化がなるように断熱状態を変化させることができる、または恒温状態にできる型枠での実験である。図 2.9 内の片面準断熱状態(single insulation)の温度履歴になるような断熱条件を TSTM の型枠に与えて実験を行っている。

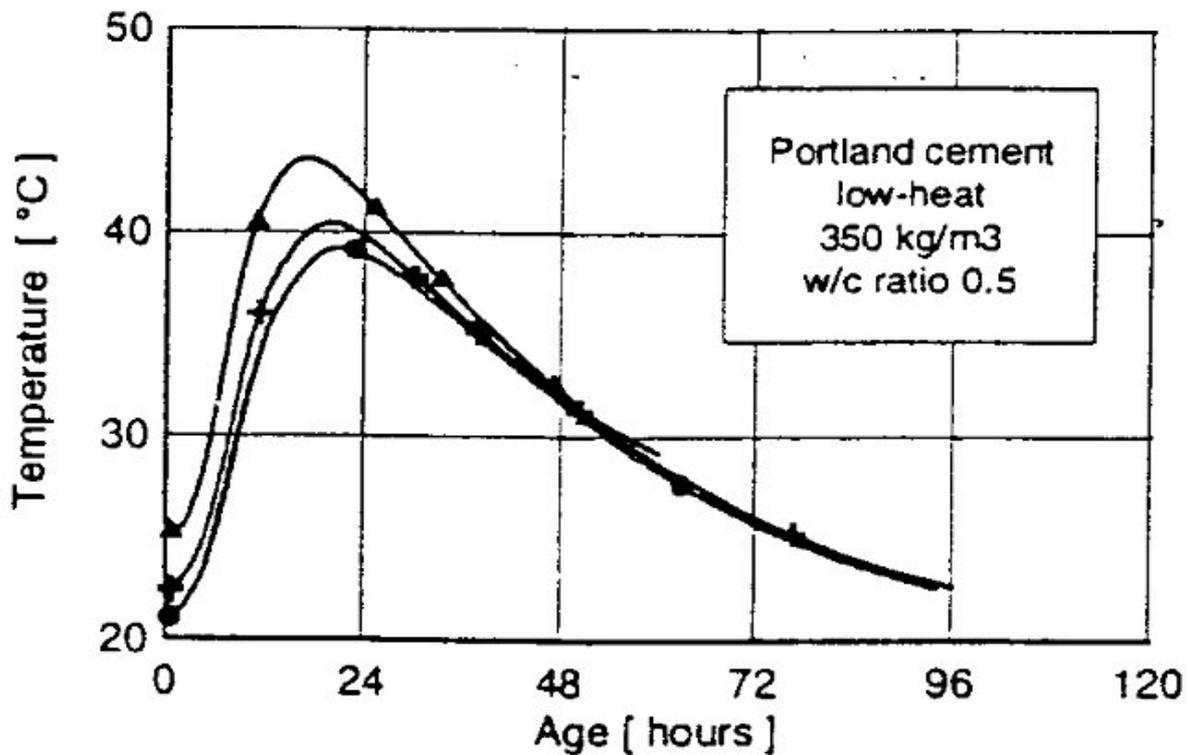


図 2.7 温度履歴

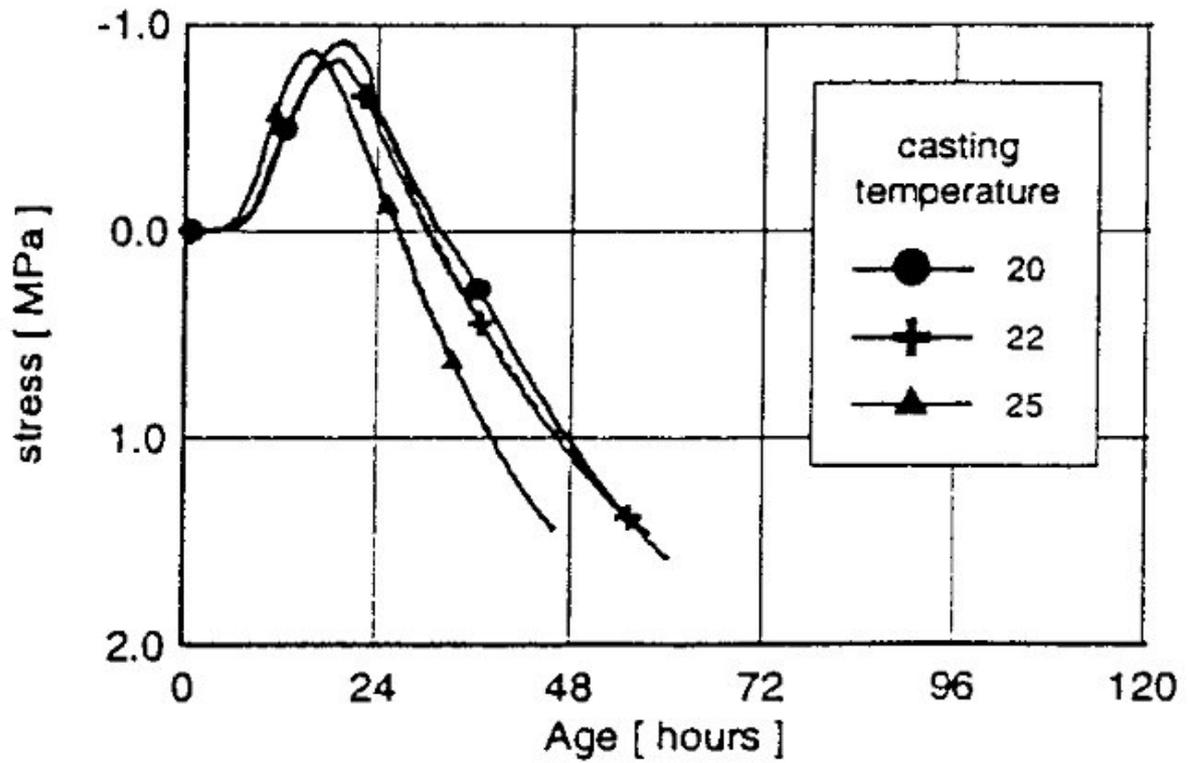


图 2.8 应力履歴

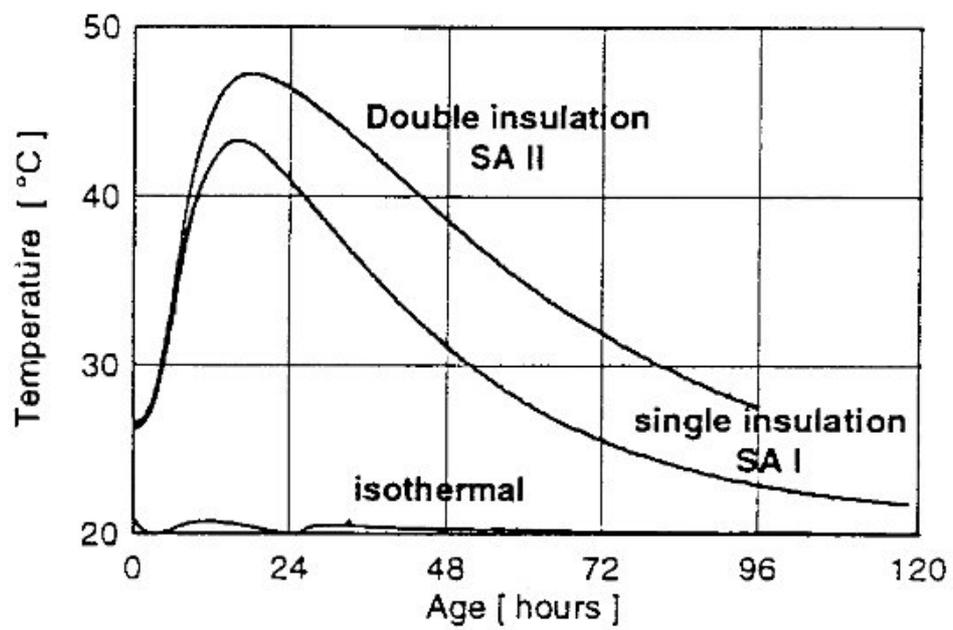


图 2.9 温度履歴

### 2.3 K. SCHÖPPEL氏ら<sup>(4)</sup>による研究

K. SCHÖPPEL氏らはR. SPRINGENSCHMID氏らが開発したTSTMを使用した実験を行い、いくつかの典型的な結果を示している。以下にその結果を示す。

図 2.10 は 1m厚壁の左が準断熱条件下、右が等温条件下での温度履歴及び拘束応力の測定結果を示している。また図 2.11 は準断熱条件下及び等温条件下での典型的な無拘束状態での温度及び応力の測定結果である。コンクリート配合はともに単位セメント量  $340\text{kg/m}^3$ 、水セメント比 50% である。

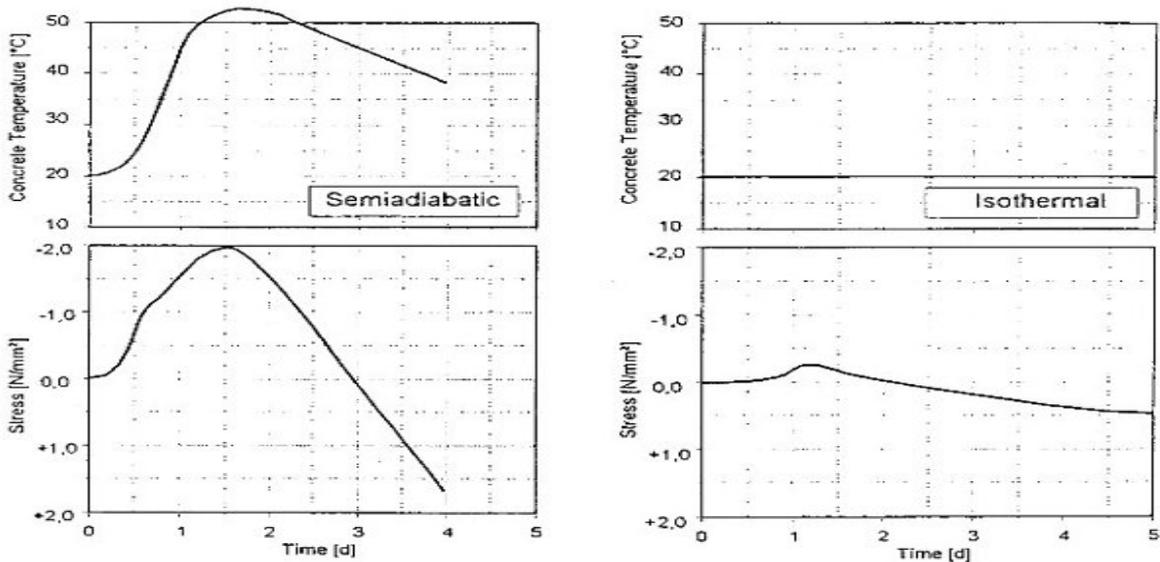
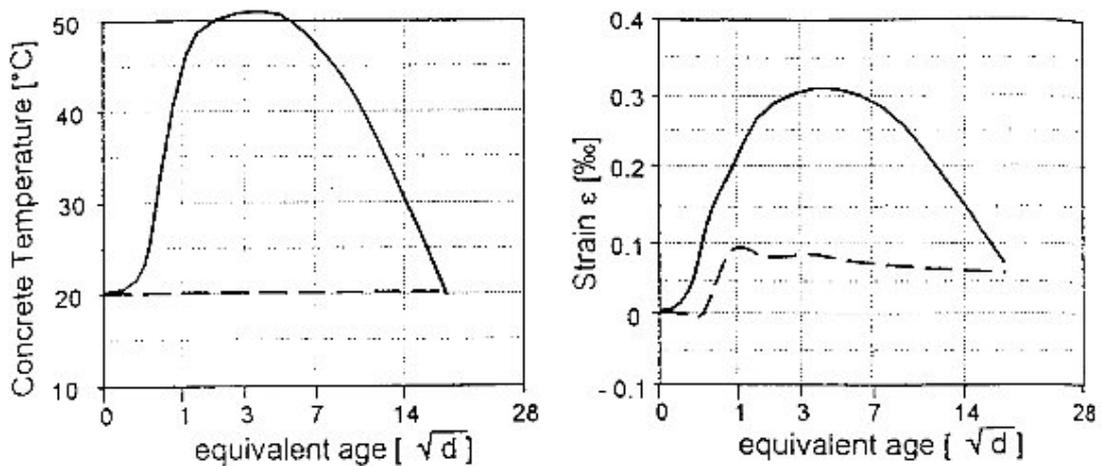


図 2.10 準断熱・等温条件下で温度及び応力の測定結果



実線；準断熱条件      破線；等温条件下

図 2.11 準断熱条件下及び等温条件下での無拘束状態の温度及び応力の測定結果

図 2.12 に様々な試験方法によるヤング係数の進展測定結果を示す。TSTM で測定しているヤング係数は、応力-ひずみ曲線の接線によって求めたヤング係数と同等である。図 2.12 が示すように、TSTM 測定による接線ヤング係数は、ドイツ標準試験方法(DIN 1048)による割線ヤング係数よりもいくらか大きい。超音波試験法によって求めたヤング率はさらに大きい。TSTM のひずみ制御ステップの間の変形がとても小さいので(0.002%)、重荷弾性変形が起こる。したがってヤング係数の進展は TSTM で試験されるなら最初の数日間はより速い。

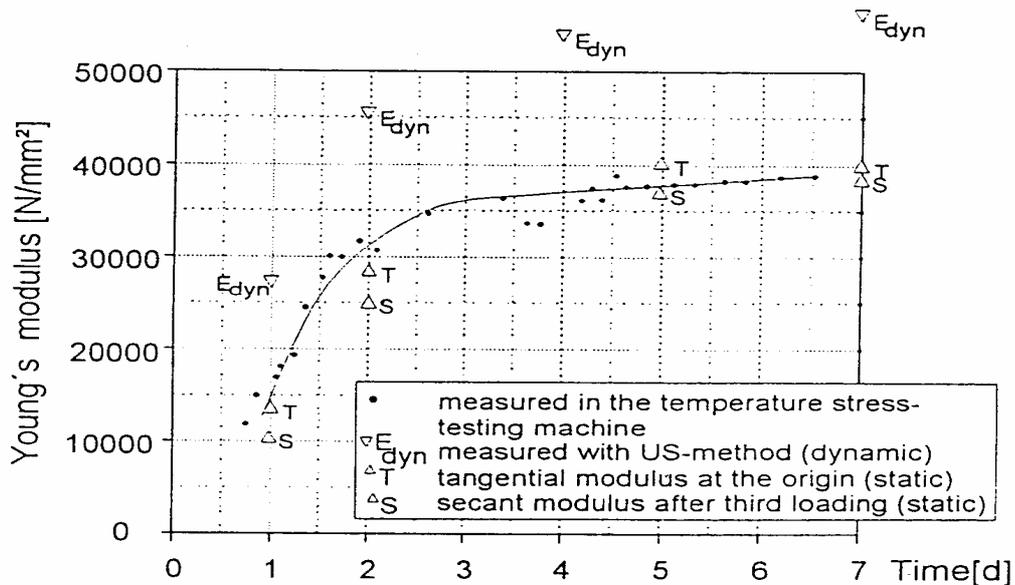


図 2.12 ヤング係数進展測定結果

温度とヤング係数の進展によって、時間の関数として弾性拘束応力  $\sigma_{(t)elast}$  を計算することができる。

$$\sigma_{(t)elast} = T \cdot dT/dt \cdot E(t) \quad (2.2)$$

ここに、 $T$ ；熱膨張係数  $E(t)$ ；時間 $t$ におけるヤング係数  $dT/dt$ ；時間に関する温度変化

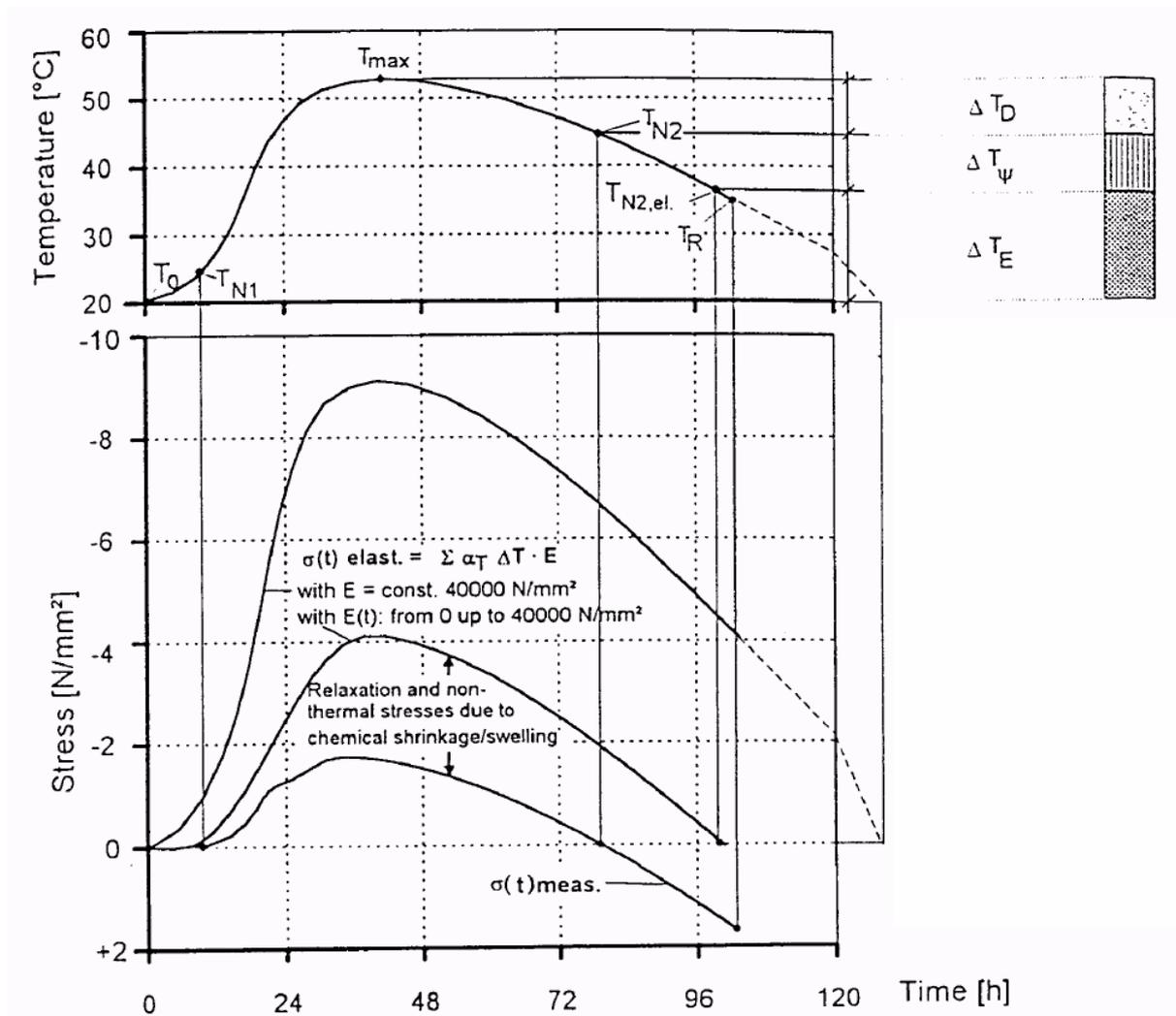
計算された弾性拘束応力  $\sigma_{(t)elast}$  は、高い程度のリラクゼーション  $\epsilon_{(t)}$  や化学収縮・膨張によって引き起こされる非温度応力によって測定応力  $\sigma_{(t)means}$  と非常に異なる。以下の公式は若材齢時コンクリートの中で非温度効果も含めて拘束熱応力の進展について示す。

$$\sigma_{(t)means} = ( T \cdot dT/dt + d_{s,sw}/dt ) E(t) [1 - \epsilon_{(t)}] \quad (2.3)$$

ここに  $\epsilon_{(t)}$ ；時間 $t$ におけるリラクゼーション

$d_{s,sw}/dt$ ；時間に関する化学的収縮(s)及び(又は)膨張(sw)による非温度変形

図 2.13 はコンクリートの温度進展 , 熱膨張係数及びヤング係数に基づいて計算された弾性応力曲線と若材齢時コンクリートの応力進展の測定値を図式的に表したものである . また比較のために  $E=40000 \text{ N/mm}^2$  の効果コンクリートの計算された弾性応力を示す .



- $T_D$  = 圧縮応力を引き起こす温度差
- $T_\psi$  = リラクセーションと非温度効果による圧縮応力を引き起こさない温度差
- $T_E$  = ゆっくりと進展するヤング係数による圧縮応力を引き起こさない温度差
- $T_0$  = フレッシュコンクリート温度(打込み温度)

図 2.13 厚さ 1m のコンクリート壁の温度進展とそれに対応する測定又は計算された応力

ヤング係数が大きくなっている若材齢時コンクリートで , 小さい圧縮応力が最高温度で発生する . 同じ温度上昇が硬化コンクリートに適用されるならば , 圧縮応力は  $9 \text{ N/mm}^2$  ぐらいになるだろう . したがって若材齢時硬化コンクリートで温度変形のおよそ 50% 以上は , ゆっくりとしたヤング係数の増加による圧縮応力をもたらすことが出来ない . 測定された増加しているヤング係数の若材齢コンクリートの計算された弾性応力曲線と測定応力曲線の違いは , 応力リラクセーション

ンと非温度硬効果に依存する。

全温度上昇のほんの一部だけがコンクリートの中に圧縮応力を発生させる。この部分は温度差  $T_D = T_{max} - T_{n2}$  に同等であり、通常 1m厚さの構造物での全温度上昇の 20%を超えない。リラクゼーションは高く、ヤング係数はゆっくりと進展するので残っている温度上昇は圧縮応力を導かない。温度差  $T_E = T_{n2,el} - T_0$  は、ゆっくりと進展しているヤング係数による圧縮応力を導かない温度差を示す。残っている温度差  $T = T_{N2} - T_{N2,el}$  は圧縮応力生成におけるリラクゼーションの効果を示す。化学的収縮の場合のような非温度効果でもまた圧縮応力減少した。

## 2.4 Bumbachstr氏<sup>(5)</sup>による研究

Bumbachstr 氏は TSTM と同じ目的で作られている CRACKING FRAME を使用した研究を行う上での条件、基準となるもの、結果として残すべきものを示している。

### 2.4.1 テスト条件

外気温度  $20 \pm 2$  , 相対湿度  $65 \pm 5\%$  で実行されるべきとしている。

### 2.4.2 基準とすべきコンクリート配合

骨材；	DIN 1045 より A/B 32mm
セメント；	340kg/m <sup>3</sup>
水；	162kg/ m <sup>3</sup>
コンシステンシー；	最高の可塑剤の添加によって規定される ENV 206 による F3

### 2.4.3 結果として残すべきもの

- フレッシュコンクリートの温度(打込み温度)
- First zero stress temperature
- (拘束状態における温度。塑性から粘弾性的挙動への変化について示す)
- First zero stress temperature に達したときの材齢
- 温度度上昇中の最大圧縮応力
- 最大圧縮応力に達したときの材齢
- 最高温度
- 最高温度に達したときの材齢
- Second zero stress temperature
- (圧縮応力が完全に 0 になり引張応力が進展し始める温度)
- Second zero stress に達したときの材齢
- 材齢 96 時間の温度
- 材齢 96 時間の応力
- ひび割れしたときの最大引張応力
- ひび割れしたときの温度
- ひび割れしたときの材齢

## 2.5 溝淵氏ら<sup>(6)</sup>による研究

溝淵氏らは R. SPRINGENSCHMID らが開発した TSTM に改良を加えた一軸拘束試験装置(温度応力シミュレーション装置)を開発した。この研究では一軸拘束試験装置の、コンクリートの温度ひび割れ試験法への適用の可能性を検討している。そこで同一配合で拘束度を变化させた場合、配合条件及び拘束度を同じとしてセメントの種類を变化させた場合についての各種測定を行っている。

### 2.5.1 条件及び検討ケース

用いたコンクリートはスランプ 12cm，空気量 4.5%，単位セメント量 300kg/m<sup>3</sup>及び水セメント比 55%の配合条件を満足するものである。コンクリート配合を表-2.2，検討ケースを表-2.3 に示す。一軸拘束試験装置に用いた温度履歴は，使用する配合について温度解析をしてもとめたものである。解析条件は，壁厚 1mで高さ 5mとしている。解析に用いている熱特性値は土木学会コンクリート標準仕方書に準拠している。

表-2.2 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 <sup>3</sup> )			
			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-2.3 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

### 2.5.2 温度制御に関する検討

以下に示す図 2-14 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变化させた場合の温度制御に関する検討である。また，図 2-15，2-16 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を示す。

図 2.14～2.16 より，設定温度に対する温度制御は，打込み温度が設定温度とほぼ一致している場合十分可能であり，設定値に対しては変動が約 1 で制御可能だと思われるとしている。ただし拘束供試体の温度上昇時での温度制御に対してはさらに改善の必要があるとしている。

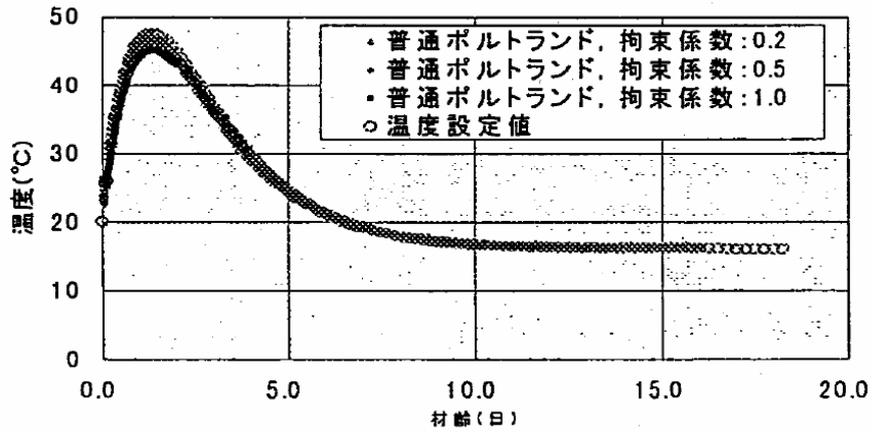


図 2.14 温度履歴(拘束度を変化させた場合の検討)

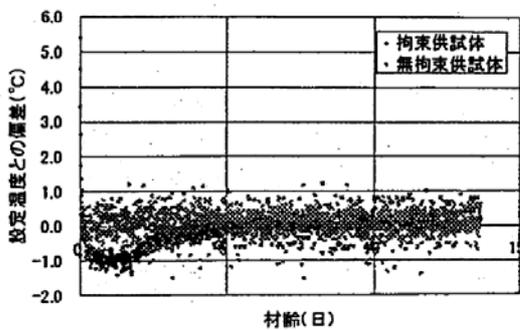


図 2.15 設定温度との偏差

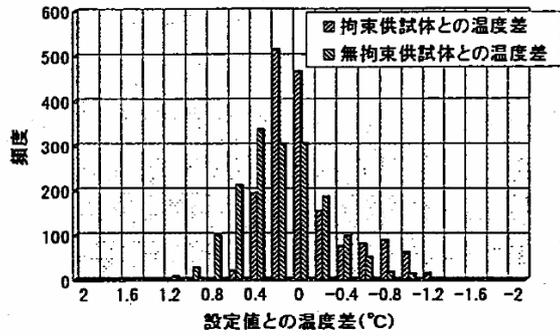


図 2.16 設定値との温度差のヒストグラム

### 2.5.3 線膨張係数の算定

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 2.17 で示す。また各ケースの温度上昇時及び温度降下時の線膨張係数を図 2.18 に示す。

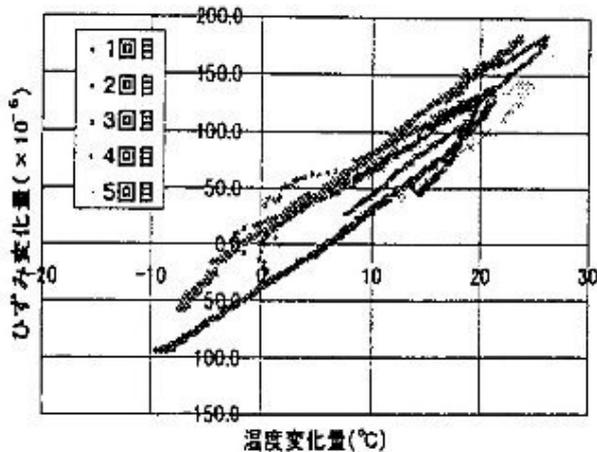


図 2.17 温度変化量とひずみ変化量との関係

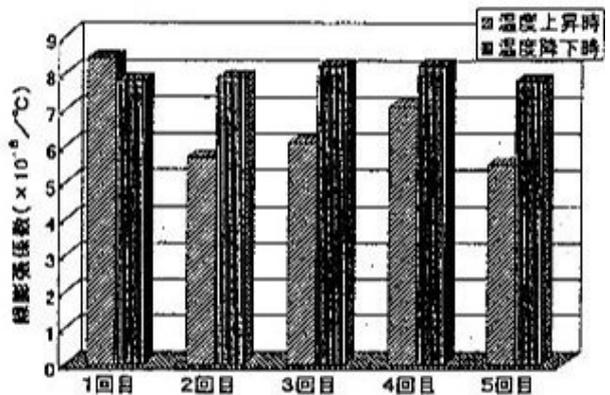


図 2.18 コンクリートの線膨張係数

### 2.5.4 拘束度の違い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 に変化させた場合の応力履歴を図 2.19 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  $1.7\text{N/mm}^2$  であった。拘束度 0.2 においては材齢約 14 日で約  $0.65\text{N/mm}^2$  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。

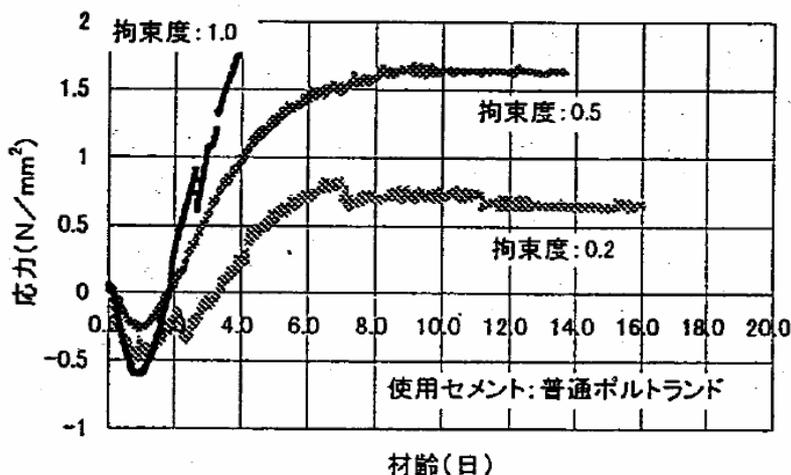


図 2.19 温度応力履歴(拘束度の違いの検討)

### 2.5.5 セメントの種類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、拘束度等を同じにして実験を行っている。その結果は図 2.20～24 に示される。温度履歴は図 2-13 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℃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。

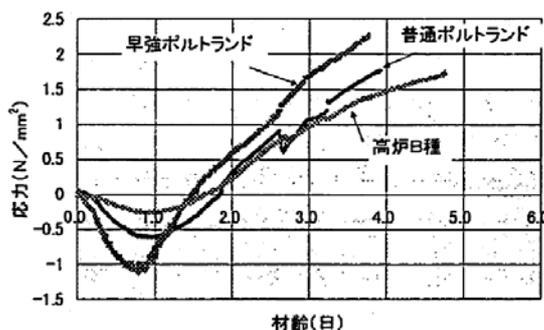
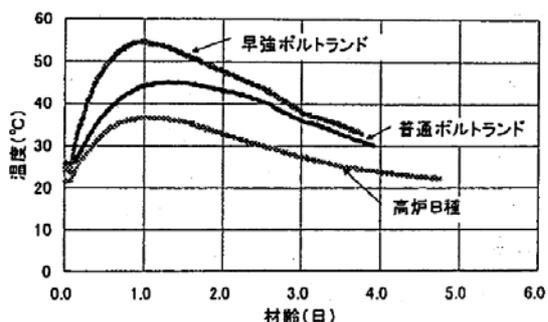


図 2.20 温度履歴(セメントの種類の違い) 図 2.21 応力履歴(セメントの種類の違い)

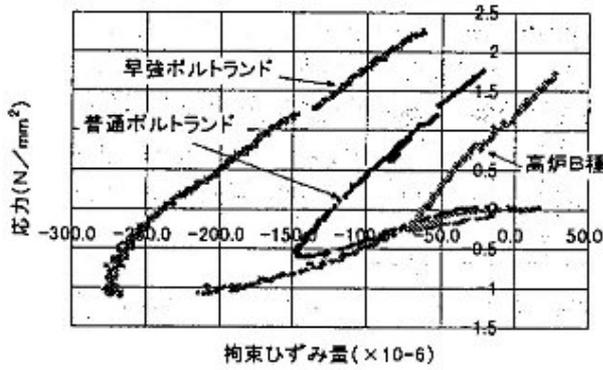


図 2.22 応力とひずみとの関係

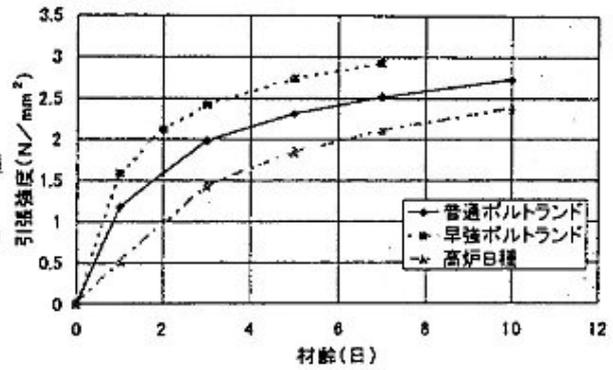


図 2.23 引張強度試験結果

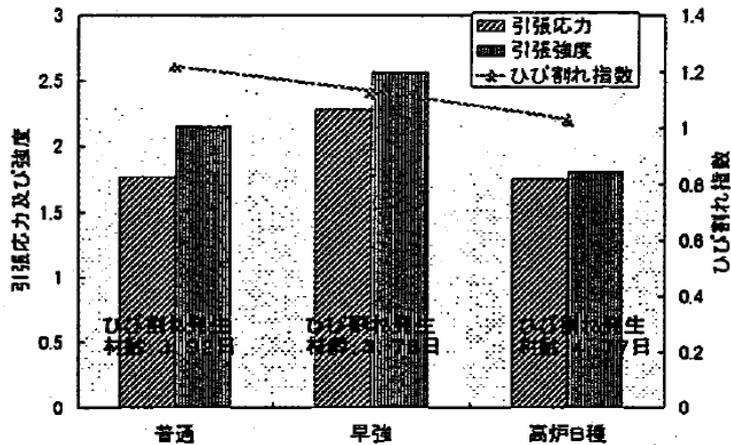


図 2.24 ひび割れ指数の算定

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や高炉 B 種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の点では他のセメントと同等以下であ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ひずみともほぼ同等であったことから，本検討での条件の場合には，ひび割れ抵抗性の点でほぼ同等であると思われるとしている．

ひび割れ指数は，一軸拘束試験装置でひび割れが生じた時点での応力と図 2.23 の試験結果を基に引張強度と材齢との関係式から求めた強度から算定されている．その結果各セメントとも引張強度の方がひび割れ発生応力よりも大きい結果となっている．

### 2.5.6 まとめ

以上のような結果より，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の可能性があることを確認できた．ただし，圧縮域での端面押さえ材の影響など実際の現象をシミュレートするためには，まだいくつかの改良が必要である．

## 2.6 小田部氏ら<sup>(7)</sup>による研究

小田部氏らは一軸拘束試験装置(温度応力シミュレーション装置)を用いて、温度応力や収縮による体積変化に起因するひび割れ抑制について、低熱セメントに膨張材または収縮低減剤を加えた場合のひび割れ抑制効果について材料の観点から定量的に評価を行っている。またそれらの試験結果を基に温度応力解析に用いる見かけのヤング係数の算定を試行した結果についても報告している。表-2.4 に検討ケースを表-2.5 にコンクリート配合を示す。

表-2.4 検討ケース

ケース No. (記号)	検討項目	セメントの種類	膨張材料	収縮低減剤量
			(kg/m <sup>3</sup> )	(B × %)
1 (L)	低熱セメントの効果	低熱	0	0
2 (L+Ex)	膨張材の効果		15	0
3 (L+SRA)	収縮低減剤の効果		0	0.5
4 (BB)	比較対象	高炉 B 種	0	0

表-2.5 コンクリート配合

No.	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
		w	c	E	S	G	SRA	Ad
1	50	150	300	0	818	1069	0	0.75
2			285	15	818	1069	0	0.75
3			300	0	818	1069	1.5	0.75
4			300	0	818	1069	0	0.75

### 2.6.1 強度特性

強度特性値は温度応力解析に用いる重要なデータである。しかし、これらのデータは標準養生供試体によるものを用いることが多いが、圧縮強度や割裂引張強度の関係は、材料、乾燥状態、材齢及び温度の影響によって変化するとの指摘があり、温度応力解析に用いるデータとして、材料(膨張材や収縮低減剤の影響)や温度履歴を受けた場合の影響を適切に評価する必要がある。よって、ここでは各ケース間の標準養生供試体と温度履歴供試体それぞれの圧縮強度と引張強度とヤング係数の関係を式(2.4)、(2.5)の近似式を用いて比較している。

$$f_t(t) = a \cdot f_c(t)^b \dots\dots\dots (2.4)$$

$$E(t) = c \cdot f_c(t)^d \dots\dots\dots (2.5)$$

ここに  $f_c(t)$  ; 材齢 t 日の圧縮強度

$f_t(t)$  ; 材齢 t 日の引張強度

$E(t)$  ; 材齢 t 日のヤング係数(a, b, c, d は定数。ただし b=0.8, d=0.5)

圧縮強度と引張強度の関係を図 2.25，圧縮強度とヤング係数の関係を図 2.26 で示す。

図 2.25 より今回の結果において圧縮強度と引張強度の関係は，材料や養生条件の影響は少ない。なお定数 a の値は 0.17～0.19 の範囲の値である。次に図 2.26 より，圧縮強度と引張強度の関係とは異なり，圧縮強度とヤング係数の関係には各ケースで違いが見られる。ここで各ケースの定数 c を表-2.5 で示す。

表-2.5 より，養生条件の影響は比較的少ないが，材料の影響が大きい結果になった。特に低熱セメントと低熱セメントに膨張材を加えたケースとの差異は大きくなっており，膨張材を混和することによって，同一圧縮強度に対するヤング係数が小さくなっている。ヤング係数は，応力算定に重要なパラメータであり，温度応力解析の入力値としての確な条件設定が必要である。なお，膨張材の混和により圧縮強度が 10N/mm<sup>2</sup>以上に相当するヤング係数が無混和に比べて小さくなることから，引張応力の緩和も期待できる。

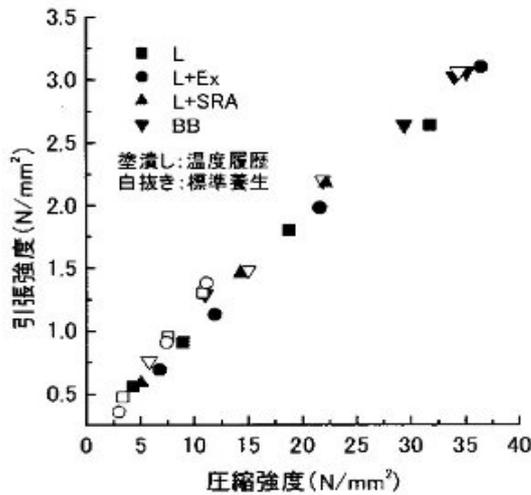


図 2.25 圧縮強度と引張強度の関係

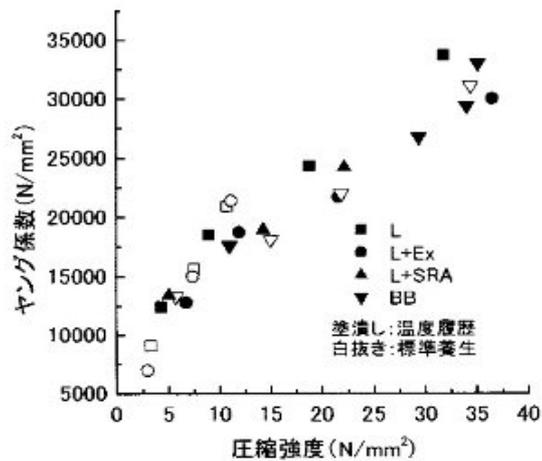


図 2.26 圧縮強度とヤング係数の関係

表-2.6 式(2)の c の値

ケース	温度履歴	標準養生
L	5893	5905
L+Ex	4950	-
L+SRA	5207	-
BB	5211	5026

## 2.6.2 応力測定結果

一軸拘束試験装置による応力測定を図 2.27, 拘束ひずみと応力の関係を図 2.28 に示す。結果より, 温度応力抑制に対する材料評価の観点から, 高炉セメント B 種の使用に比べて, 低熱セメントの使用は有効であるといえる。また, 低熱セメントをベースとして膨張材または収縮低減剤を組み合わせることによって, 温度応力抑制, ひび割れ抑制効果がさらに高まることが確認できる。

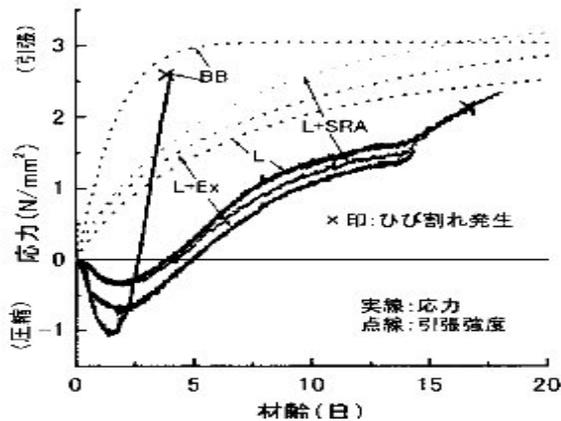


図 2.27 応力測定結果

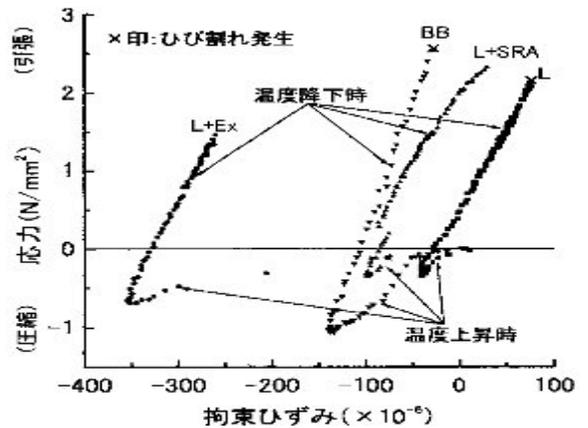


図 2.28 応力とひずみの関係

## 2.6.3 クリープを考慮した有効ヤング係数

温度解析においては, 強度, 線膨張係数, ヤング係数, クリープ特性が必要である。そこで温度応力シミュレーションで得られた温度変化量とひずみ変化量から線膨張係数を求め(図 2.29 に示す), その線膨張係数を用いて応力解析と応力測定値が合致する解析に用いる上での見掛けのヤング係数を同定している。図 2.30 に示すように, 応力の測定値と解析値はほぼ一致する結果を得ることができた。次に見かけのヤング係数と実測のヤング係数の比較を図 2.31 に示す。また図 2.32 に実測のヤング係数に対する解析ヤング率の変化率を示す。

低熱セメントを用いた場合, 解析上用いる見掛けのヤング係数は, 高炉セメント B 種に比べて, 特徴的な結果を示した。特に引張応力が卓越する時期では, 図 2.32 の変化率からも分かるように実測値に対して見かけのヤング係数が大きく減少する結果となっている。

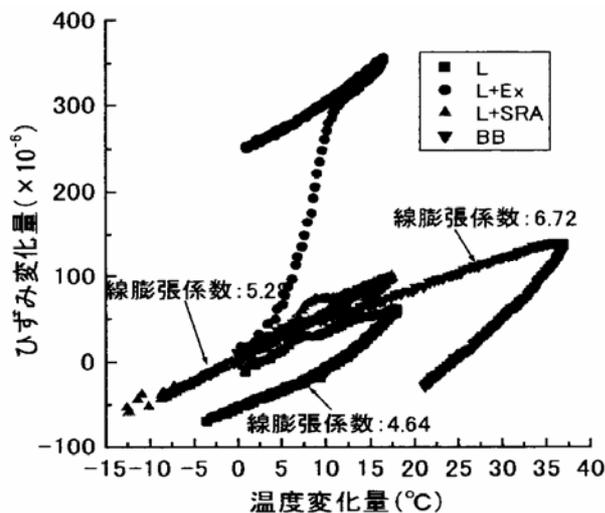


図 2.29 温度とひずみの関係

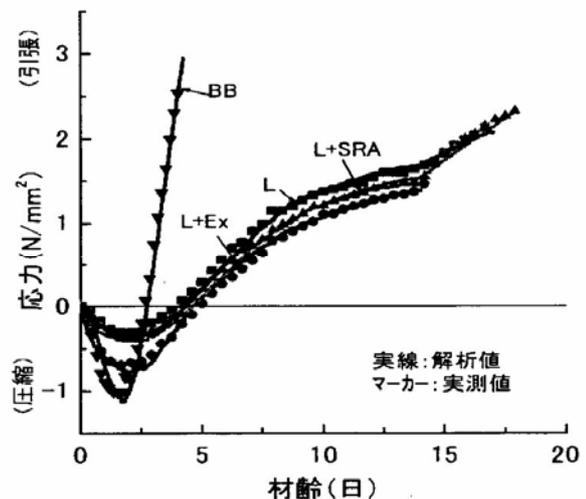


図 2.30 応力解析結果

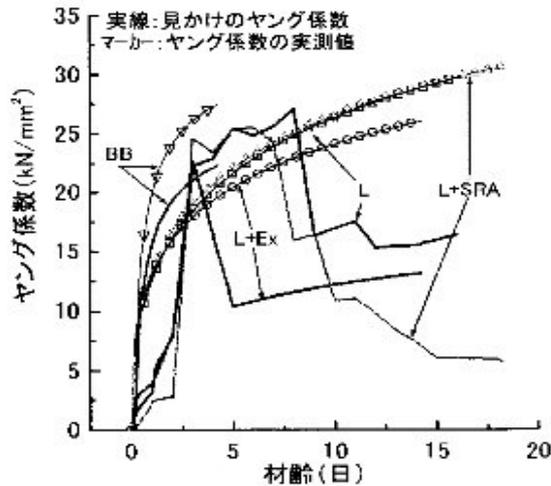


図 2.31 ヤング係数の比較

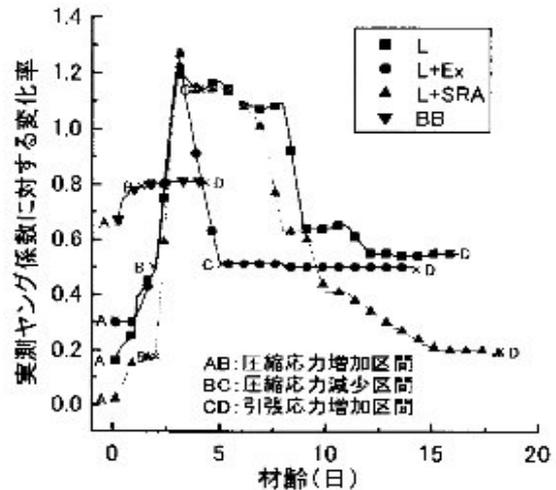


図 2.32 ヤング係数の変化率

## 2.7 溝渕氏ら<sup>(8)</sup>による研究

溝渕氏らは一軸拘束試験装置(温度応力シミュレーション装置)を用いて、膨張材の効果について壁状構造物を対象に実験を行っている。本検討で用いているコンクリート配合は表-2.7 に示すとおり、目標スランプ 12cm、設計基準強度 24N/mm<sup>2</sup>、単位セメント量 270kg/m<sup>3</sup>で高炉B種セメントを用いている。また膨張材混和量はセメント内割りで 30kg/m<sup>3</sup>としている。温度応力シミュレーション装置に用いた温度履歴は、使用する配合について事前に断熱温度上昇試験を行い、その結果を用いて解析して求めた壁中央部のものである。その他の熱特性は土木学会コンクリート標準仕方書に準拠している

表-2.7 コンクリート配合

ケース No.	水セメント比 (%)	最骨材率 (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )					
			水	セメント	膨張材	最骨材	粗骨材	AE 減水剤
1	53.7	48.0	145	270	-	925	1021	C×1.45%
2	53.7	48.0	145	240	30	926	1022	C×1.46%

### 2.7.1 試験結果

図 2.33 より無拘束供試体及び拘束供試体の温度履歴は、入力した温度履歴データに追従し、両者にほとんど差異は無かった。

図 2.34 より各ケースの温度効果時の線膨張係数を算定した結果、膨張材を添加しないケース 1 で  $8.23 \times 10^{-6}$ 、添加したケース 2 で  $8.01 \times 10^{-6}$ であり、膨張材の有無に関係なくほぼ同じ値であった。

図 2.35 より、膨張材を混和しないケース 1 では材齢 4.7 日において引張応力 1.75N/mm<sup>2</sup>でひび割れが発生した。一方、膨張材を混和したケース 2 では、打設後 14 日までの実験期間中にひび割れは発生しなかった。ケース 1 でひび割れが生じた時点でのケース 2 の引張応力は 1.93 N/mm<sup>2</sup>

であり、約 10%大きい。本実験ではこれまで言われているように、初期膨張によってケミカルプレストレスが導入され、引張応力が軽減される効果は見られず、圧縮応力が增大するものの引張域に達する材齢が膨張材を混和しない場合とほぼ同様であり、かつ引張応力の増進も混和しない場合に比べて早くなる傾向にある。これは、膨張材の混和が初期のケミカルプレストレスの導入による効果よりも、コンクリートの引張性能が改善されたものと考えられる。

発生応力と拘束ひずみとの関係は図 2.36 に示すように膨張材を混和した場合には、材齢 1 日までの温度乗上昇期間(A区間)に  $580 \times 10^{-6}$  の圧縮ひずみが生じた。膨張材を混和しない場合が約  $60 \times 10^{-6}$  であり、膨張材の混和によって混和しない場合に比べて約 10 倍の圧縮ひずみが生じた。温度降下期間(B区間)では、ケースの曲線の傾きは膨張材の有無に関係なくほとんど同じであった。

膨張材を混和していないケースでは、ひび割れ発生時のひずみが  $28 \times 10^{-6}$  であり、引張応力領域でのひずみ変化量が焼く  $90 \times 10^{-6}$  であった。膨張材を混和した場合には、引張応力領域でのひずみ変化量が約  $130 \times 10^{-6}$  であった。上記の引張応力領域でのひずみ変化量をコンクリートの引張限界ひずみとして考えた場合、膨張材を混和することで混和しない場合に比べて引張限界ひずみが 1.4 倍以上増加することとなる。これは今まで言われているように膨張材の混和がひび割れ抵抗性を向上させる効果があることを示す。

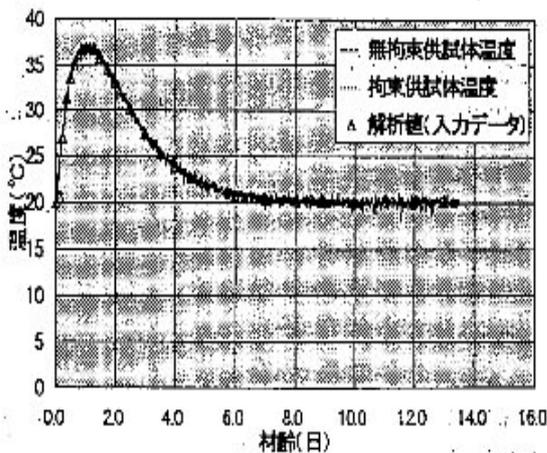


図 2.33 温度履歴

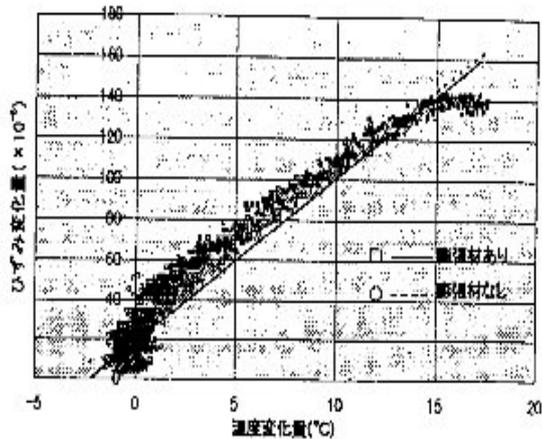


図 2.34 温度変化とひずみとの関係

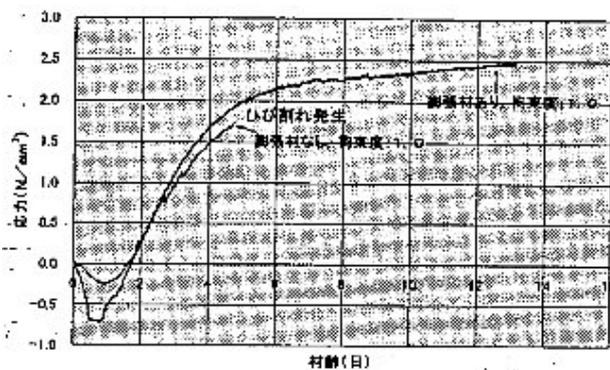


図 2.35 応力履歴

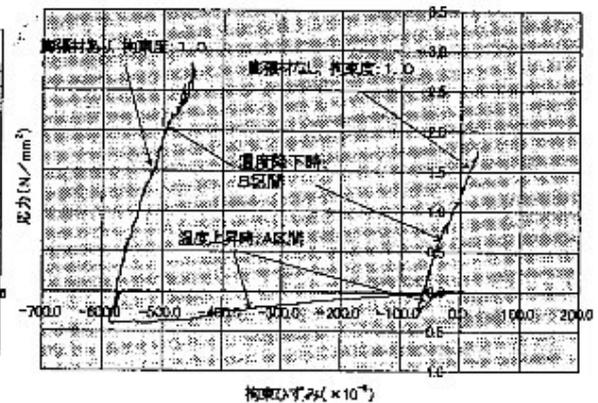


図 2.36 拘束ひずみと発生応力との関係

## 2.8 米山氏ら<sup>(9)</sup>による研究

米山氏らは若材令時のコンクリートの物性について、とりわけ引張強度およ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、以下のような結論を導き出している。

- (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約 300kgf/cm<sup>2</sup> を超える領域においては、その引張強度を割裂引張試験で求めると、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 60～400kgf/cm<sup>2</sup> の範囲では、その引張割線ヤング係数は圧縮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っては、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れる。
- (7) 引張有効ヤング係数と圧縮割線ヤング係数の比は、応力反転過程における応力変化速度によって異なるが、大体 50～70%程度である。

## 2.9 青木氏ら<sup>(10)</sup>の研究

青木氏らは、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。

### 2.9.1 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り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-2.8 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  $\mu$  時点の応力 ) / ( 圧縮強度の 1/3 点のひずみ - 50  $\mu$  ) 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。

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 2-9 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  $\mu$  時点の応力 ) / ( 引張強度の 1/3 点のひずみ - 10  $\mu$  ) 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している。表-2.9 には、圧縮試験における初期圧縮ヤング係数 ( = 応力が約 1.3N/mm<sup>2</sup> に達した

時点での応力 / その時点のひずみ) も示している。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察している。

表-2.8 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 <sup>2</sup> )	平均圧縮ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )
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	

表-2.9 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			シリーズ		
	割線引張ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	割線圧縮ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	初期圧縮ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	割線引張ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	割線圧縮ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	初期圧縮ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )
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

### 2.9.2 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-2.10 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としている。

表-2.10 直接引張強度と割裂引張強度の比較

供試体 No.	シリーズ		シリーズ	
	直接引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	直接引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
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

### 2.9.3 まとめ

得られた知見を以下にまとめる。

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。

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。

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。

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。

### 2.10 尾畑氏ら<sup>(11)</sup>の研究

尾畑氏らは 一軸圧縮強度、割裂強度、直接引張試験による引張強度(以下、直接引張強度と呼ぶ)の関係、荷重載荷速度と直接引張強度および弾性係数の関係、直接引張強度のばらつきについて検討をしている。

コンクリートの引張強度を求める方法としては割裂強度試験が一般的であるが、厳密な引張強度を求めるには直接的な試験方法が必要となる。そこで、本研究においては、直接引張強度試験によって検討を行っている。試験数量は、各配合に対して、一軸圧縮強度試験、割裂強度試験については各 12 本、直接引張試験については 1 荷重載荷速度あたり 12 本とした。なお、直接引張強度試験の荷重載荷速度は、0.067、2.0、20.0、200.0、600.0kgf/cm<sup>2</sup>/secの 5 速度を設定した。

試験に用いたコンクリートの配合を表-2.11 に示す。G 配合は重力式コンクリートダム of の内部コンクリートを想定した配合、A 配合はアーチ式コンクリートダム of の内部コンクリートを想定した配合である。

表-2.11 試験配合

配合	粗骨材 最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	スランブ (cm)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
G	40	60	40	4 ± 1	157	262	760	1034
A	40	45	37	4 ± 1	156	317	675	1171

### 2.10.1 一軸圧縮強度，割裂強度，直接引張強度の関係

一軸圧縮強度と割裂引張強度および直接引張強度の関係を図 2.37 に示す．ここで，図中の実線は一軸圧縮強度と割裂強度，破線は一軸圧縮強度と直接引張強度の関係を表したものである．図によると，G 配合の割裂強度は一軸圧縮強度の 1/10 程度となっているものの，A 配合の割裂強度は一軸圧縮強度の 1/10 よりも小さくなっている．また，直接引張強度においてはこの傾向はより顕著になり，G 配合においても一軸圧縮強度の 1/10 以下になっている．このことから，コンクリートの引張強度と圧縮強度の比は必ずしも一定とはならず，圧縮強度が増加しても，割裂強度および直接引張強度はこれに比例して増加しないといえる．

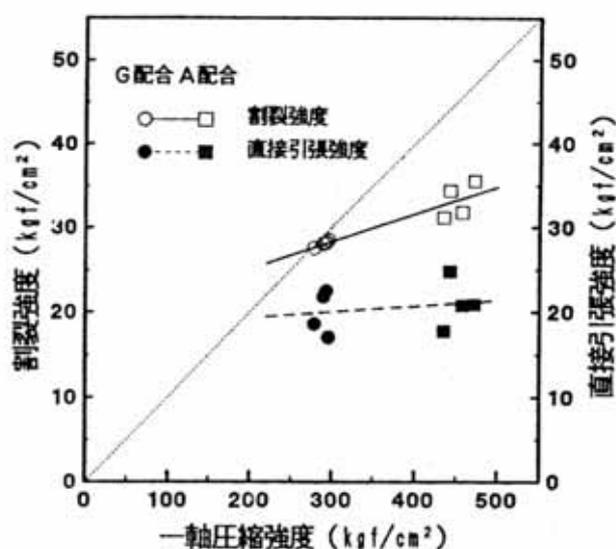


図 2.37 各強度の関係

### 2.10.2 荷重載荷速度と直接引張強度および弾性係数の関係

荷重載荷速度と直接引張強度の関係を図 2.38 に，荷重載荷速度と弾性係数の関係を図 2.39 に示す．ここで，図中の強度は 12 本の供試体の平均値である．図 2.38 によると，荷重載荷速度が 200kgf/cm<sup>2</sup>/secから 600 kgf/cm<sup>2</sup>/secに増加する点においては強度が低下しているが，全体としては，直接引張強度は荷重載荷速度が速くなるにつれて大きくなる傾向を示している．一方，図 2.39 によると弾性係数はA配合の荷重載荷速度 0.067 kgf/cm<sup>2</sup>/secの場合にやや大きな値を示しているが，これを除くと，荷重載荷速度が増加しても弾性係数はほとんど変化していないといえる．

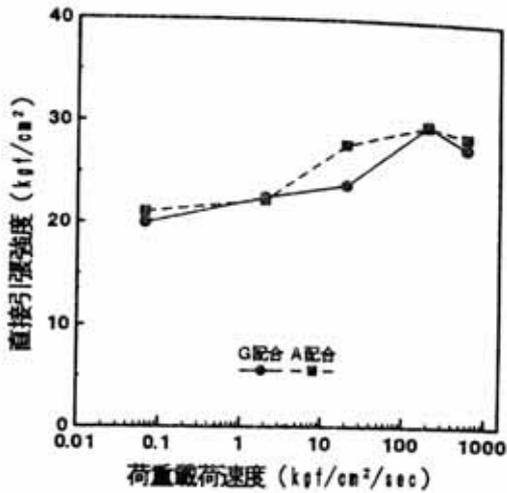


図 2.38 荷重載荷速度と直接引張強度

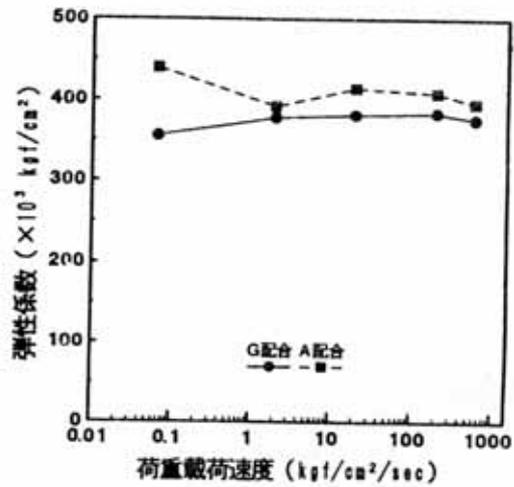


図 2.39 荷重載荷速度と弾性係数

### 2.10.3 直接引張強度のばらつきに対する検討

本試験において、直接引張強度は他の強度に比較して大きなばらつきを示していることが明らかとなった。そこで、この原因について考察するため、直接引張強度と破壊ひずみの関係について検討している。図 2.40 に荷重載荷速度 0.067 kgf/cm<sup>2</sup>/secにおける各配合の破壊ひずみと直接引張強度の関係を示す。図より、破壊時のひずみと直接引張強度の間には高い相関性があり、直接引張強度の小さな供試体は破壊ひずみも小さいことがわかる。また、供試体の弾性係数のばらつきは直接引張強度のばらつきに比べて小さく、コンクリートの性質は供試体全体を通じてほぼ一定であったといえる。したがって、各供試体の直接引張強度は、供試体内の平均的な強度を示しているのではなく、供試体内に存在する構造的な欠陥部の強度を示し、その強度のばらつきは欠陥部の分布やその特性を与えているものと考えられる。

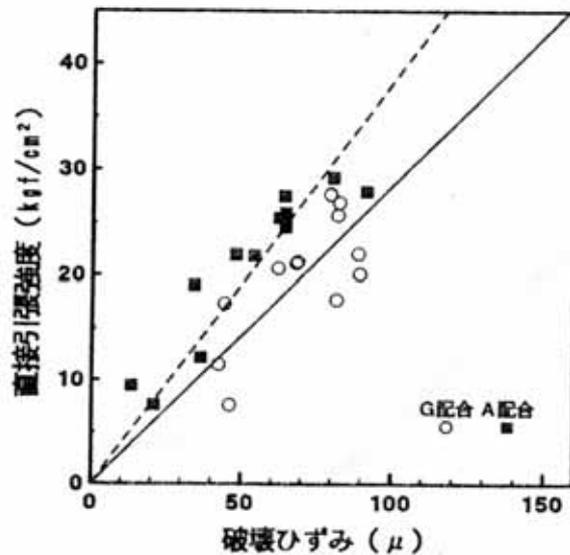


図 2.40 破壊ひずみと直接引張強度

#### 2.10.4 まとめ

本研究の結果をとりまとめると次のようになる。

コンクリートの割裂強度，直接引張強度は，圧縮強度の場合と同様に水セメント比は小さいほど大きくなる。しかし，増加の割合は圧縮強度のそれより小さく，引張強度と圧縮強度の比は必ずしも一定の割合にはならない。また，直接引張強度においてはその傾向は特に顕著である。

コンクリートの直接引張強度は荷重載荷速度の増加に伴い大きくなるが，弾性係数においてはその傾向は認められない。

コンクリートの直接引張強度はコンクリート内に存在する欠陥によって支配される。

## 第3章 Thermal Stress Testing Machine

### 3.1 概要

Thermal Stress Testing Machine(以後 TSTM と称す)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，拘束を全くしない無拘束試験装置からなる．TSTM の特徴は，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事前に設定した温度履歴通りに制御することができる．また無拘束供試体に生じる温度上昇時の熱膨張や温度降下時の収縮による自由ひずみを基に，外部アクチュエータから荷重を加えることにより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制御することが可能である．それにより温度変化やひずみを制御し，指定した期間，指定した間隔で，拘束供試体及び無拘束供試体に生じる温度変化・ひずみ及び拘束供試体の拘束条件を制御するために外部から加えた荷重を測定することができる．また TSTM は恒温室内に設置されており，供試体に対する外気温・湿度も任意に設定することができる．拘束試験装置及び無拘束試験装置を写真 3.1,3.2 に，図 3.1,3.2，写真 3.3～3.5 に概要を示す．

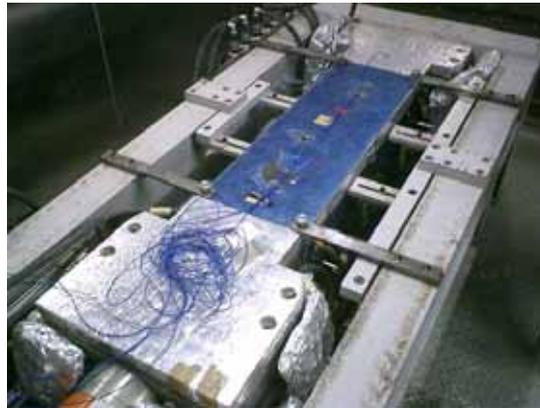


写真 3.1 拘束試験装置



写真 3.2 無拘束試験装置

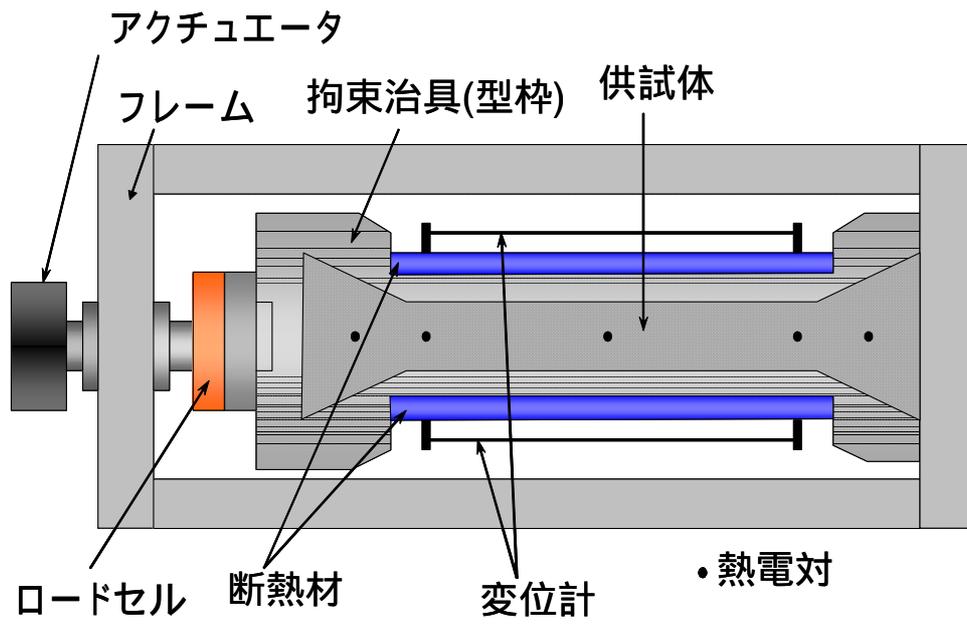


図 3.1 拘束試験装置概要



写真 3.3 拘束試験装置概要(ロードセル・アクチュエータ)



写真 3.4 拘束試験装置概要(右部型枠)

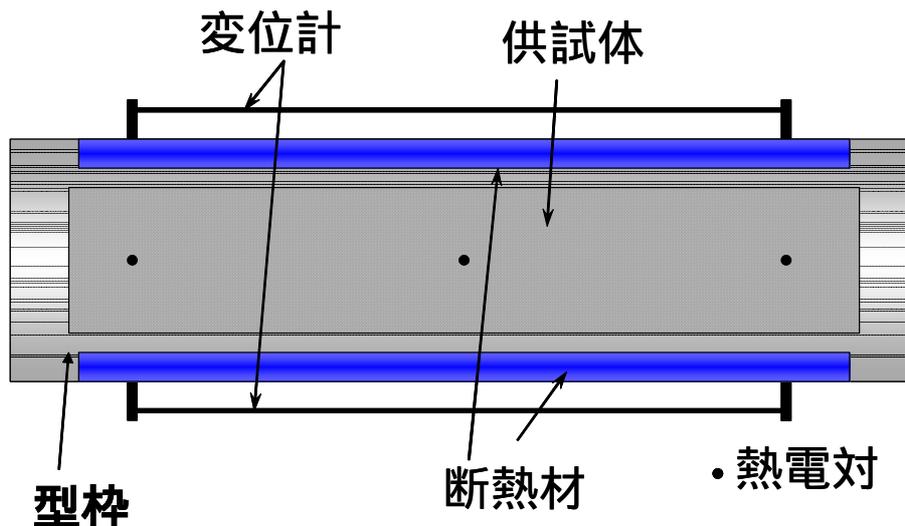


図 3.2 無拘束試験装置概要



写真 3.5 無拘束試験装置概要

### 3.2 温度設定方法及び温度制御方法

#### (1) 温度設定方法

温度設定は、事前に対象となる構造物などの温度測定や温度解析を行い、その結果の温度履歴を TSTM の制御コンピュータに材齢と温度の関係で入力する。入力の材齢間隔は任意に設定することができるが、急激な温度変化が生じないように、入力された材齢間の温度はコンピュータ内で線形補間して与える。

#### (2) 温度制御方法

供試体周囲の型枠内に設置した通水パイプに温水または冷水を通水させることにより、両試験装置内に打設されたコンクリート供試体の内部温度変化を入力設定された温度履歴通りに制御する。通水パイプの一例を写真 3.6 に示す。また型枠内の通水パイプの配置図を図 3.3～3.8 に示す。コンクリート供試体及び通水用水が外気の影響を受けないようにするため、また内部からの熱の逸散が無いようにするために両試験装置及び通水パイプの一部は断熱材で覆っている。拘束供試体内部及び無拘束供試体内部の温度変化が設定温度履歴通りになっているかどうか確認、制御するために拘束供試体に 5 点、無拘束供試体に 3 点温度測定点を設置している。測定点位置を図 3.9、3.10 に示す。このうち両供試体の中央部の温度を基にして温度制御を行っている。試験時は、中央部の温度を約 2 秒間隔でスキャンを行い、その時点での設定温度との差異が無いかどうか

を確認する．差異が生じていた場合はパイプ内に通水する温度を変化させて，温度履歴，供試体内温度が一致するように制御する．



写真 3.6 通水パイプ

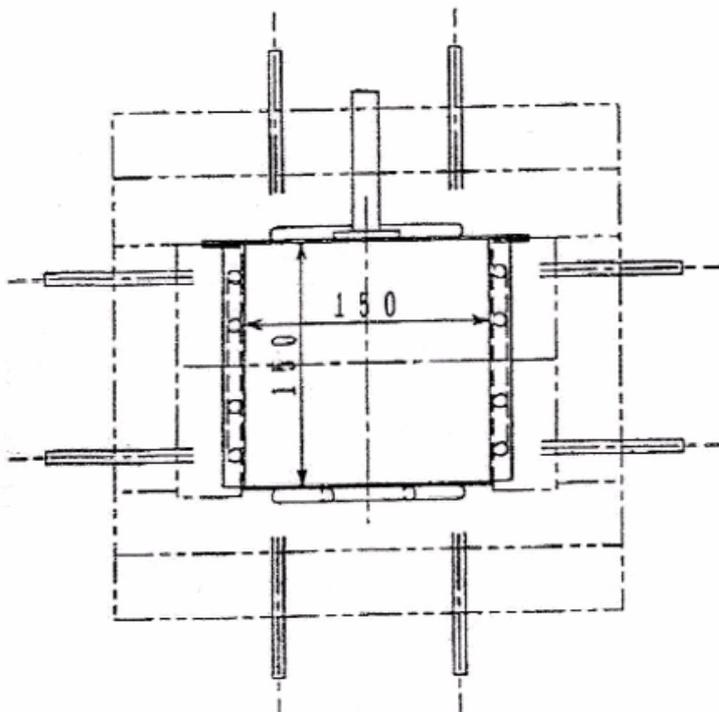


図 3.3 拘束装置通水パイプ配置図（一軸方向）

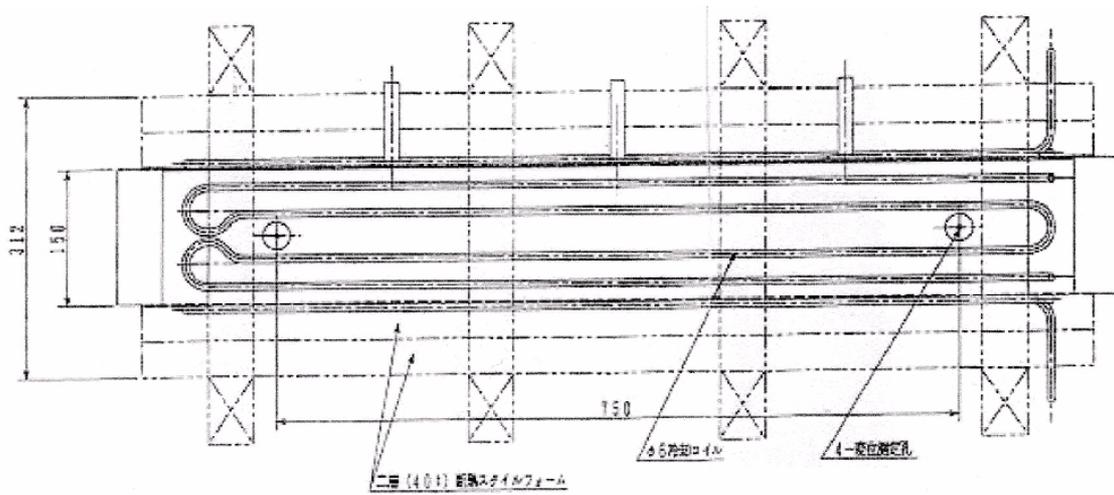


図 3.4 拘束装置通水パイプ配置図 (左右型枠)

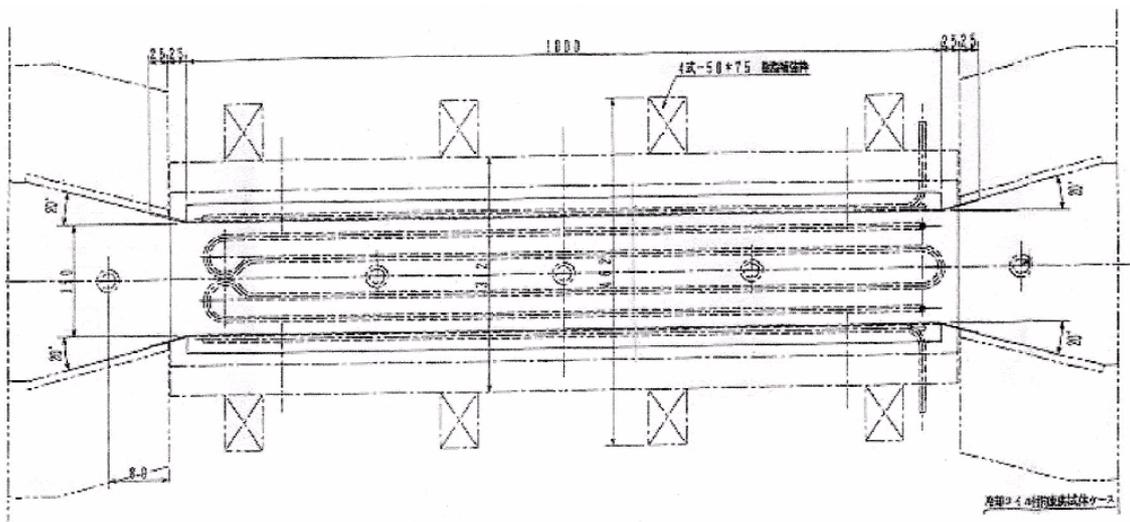


図 3.5 拘束装置通水パイプ配置図 (上下型枠)

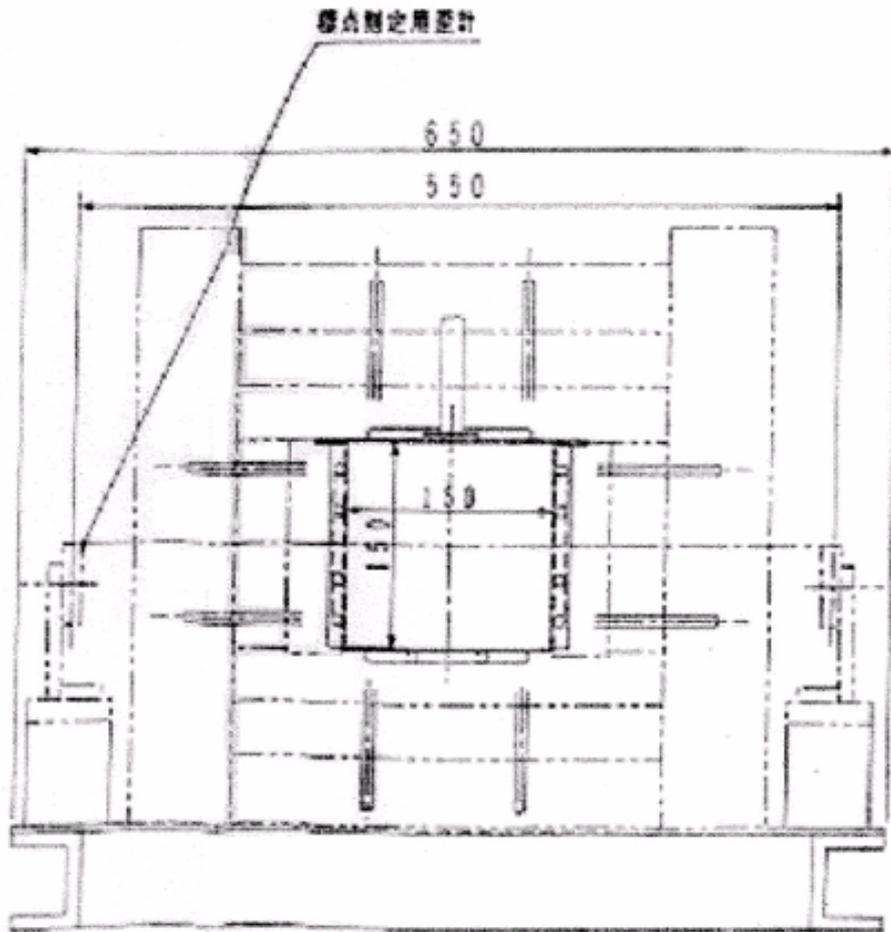


図 3.6 無拘束装置通水パイプ配置図（一軸方向）

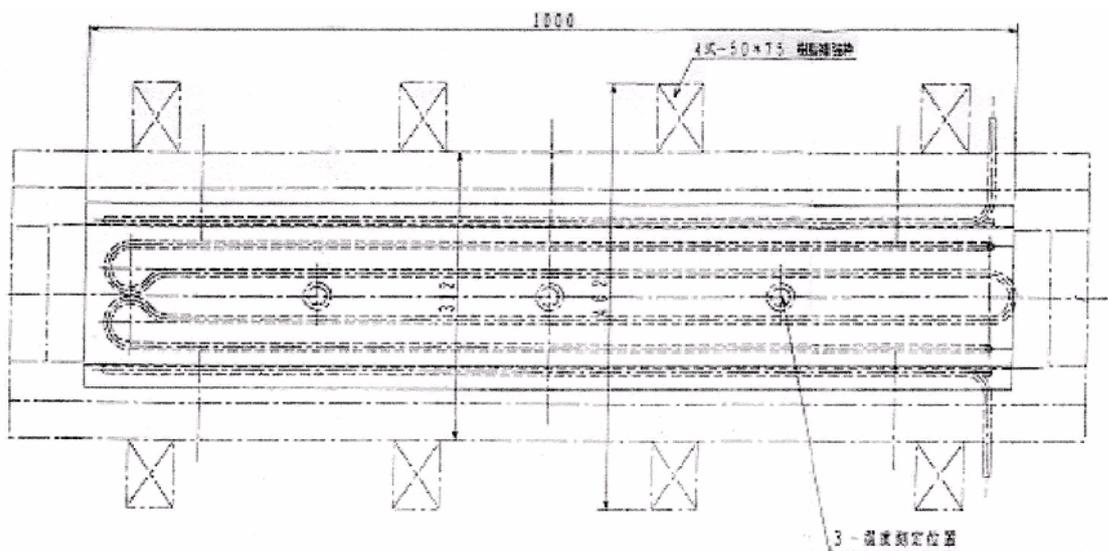


図 3.7 無拘束装置通水パイプ配置図（左右型枠）

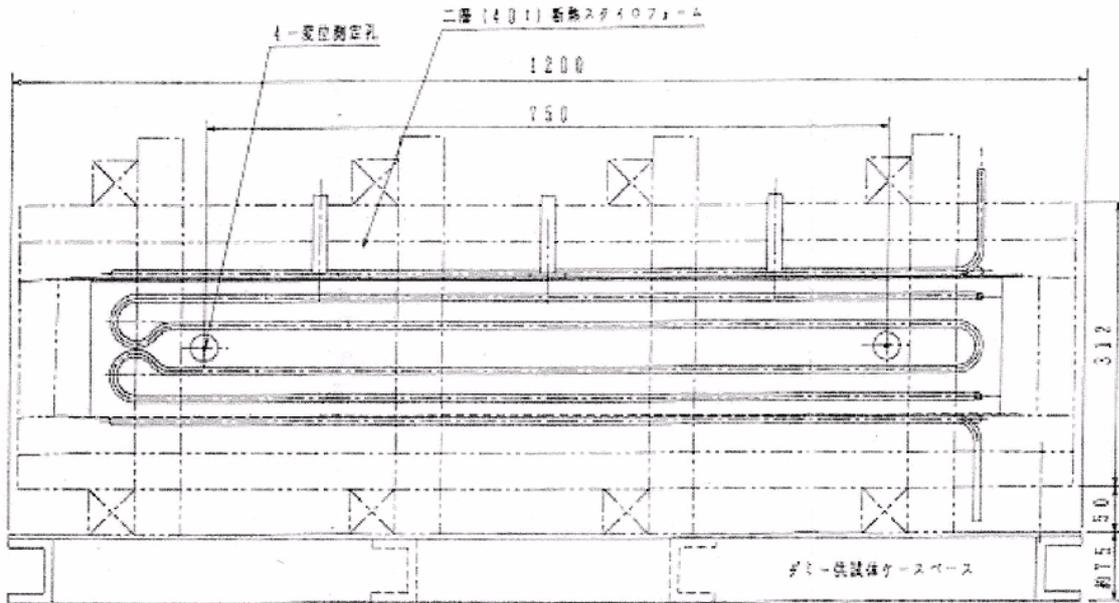
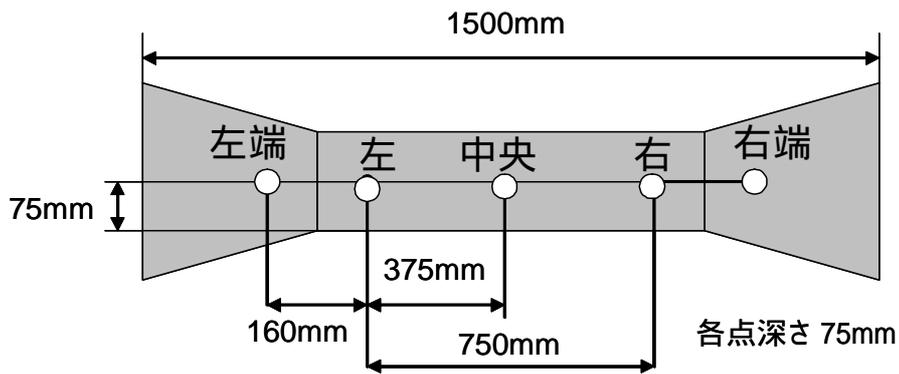
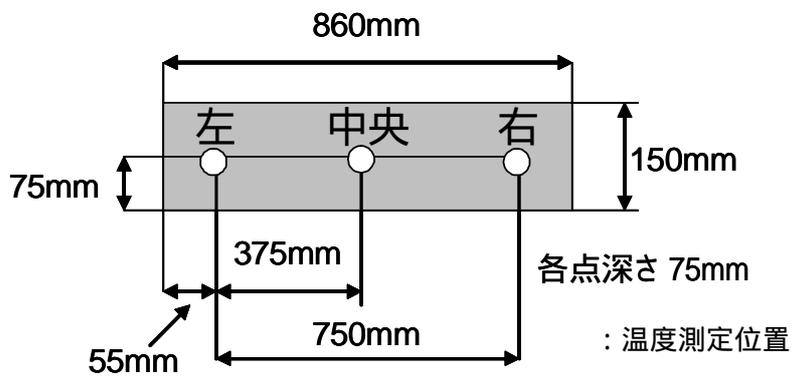


図 3.8 無拘束装置通水パイプ配置図 (上下型枠)



: 温度測定位置

図 3.9 拘束供試体温度測定位置



: 温度測定位置

図 3.10 無拘束供試体温度測定位置

### 3.3 外部荷重による変位制御

図 3.1 に示したアクチュエータによって外部から拘束供試体に荷重を加えることにより、拘束度を完全拘束状態(拘束度 1.0)から無拘束状態(拘束度 0.0)まで任意に設定・制御できるようになっている。供試体のひずみの測定は同じく図 3.1 に示したように両供試体の両側に 750mm 間隔での埋め込んだ標点棒に変位計を設置して行う。測定感度は  $10^{-3}$ mm である。ひずみ制御の場合は、無拘束供試体の変位計による計測を行い、それに対して設定した拘束度を満足するように制御用コンピュータを通じてアクチュエータで外部荷重を制御する。

拘束度の設定は、下図 3.11 に示すように拘束供試体の 750mm の標点棒間と同間隔の無拘束供試体標点棒間のひずみ変化量の割合となっている。例えば、拘束度 0.4 とは、自由ひずみの 60%を与えることとなり、残りの 40%が拘束ひずみとなる。この場合無拘束供試体に 100mm の変位が発生したとするならば、拘束供試体には 60mm の変位が発生するように制御する。

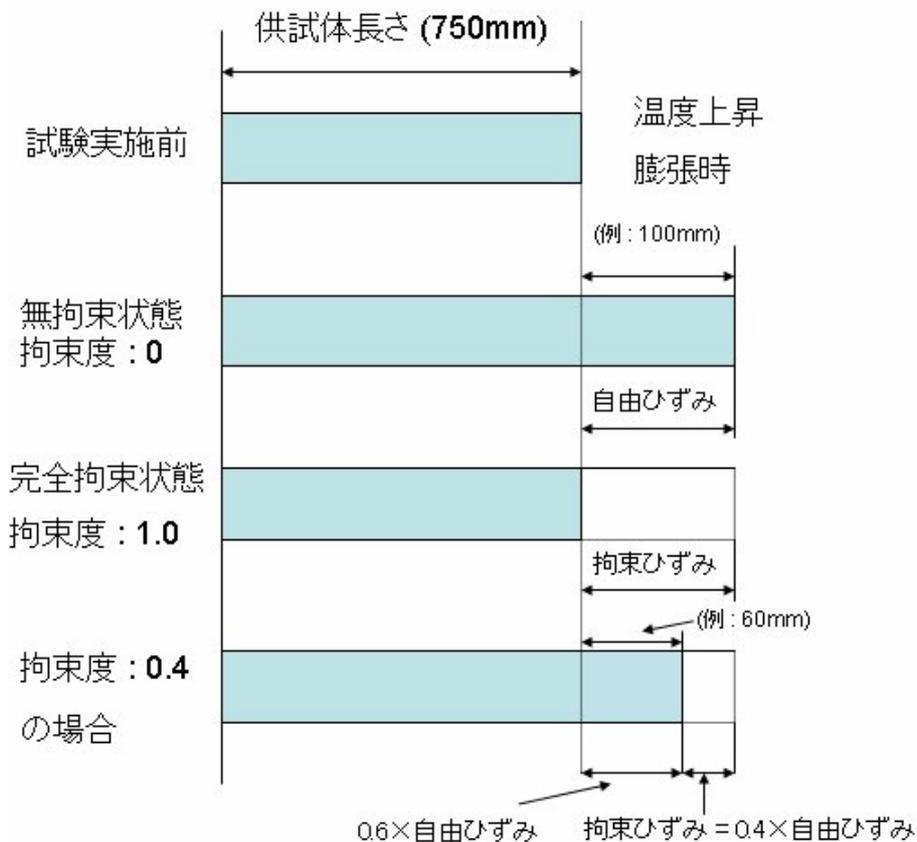


図 3.11 拘束度とひずみの関係

### 3.4 TSTM で用いる供試体

TSTM に用いる供試体は、上記概要でも記したように任意の拘束度を与える拘束供試体及び無拘束状態の無拘束供試体との 2 体である。拘束供試体の寸法は、 $150 \times 150 \times 1500$ mm で、試験対象となるのが、拘束治具で把持されている部分を除く長さ 1000mm 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抜け出しや滑りを極力少なくするために、試験対象区間の幅から  $20^\circ$  で扇状に広げた形状にされており、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ゆるやかなカーブ状になっている。また供試体からの水分逸散が無いように供試体周

囲はシートで覆い試験を行う。無拘束供試体は 150×150×860mm であり，同じく水分逸散が無いように供試体周囲はシートで覆う。写真 3.7 で脱型後の両供試体を示す。写真上が無拘束供試体，写真下が拘束供試体である。



写真 3.7 脱型後の各供試体

### 3.5 試験条件

本研究では，TSTM を試験に導入してから間もないことから主に拘束度 1.0 の完全拘束で試験を行い再現性を確認しながら試験を進めた。以後試験結果には拘束度を添えて示すようにする。また恒温室の環境条件は一般的な温度 20℃，湿度 60%とした。ま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は，図 3.12 に示すような一般的な水和発熱の過程のものとし，全ケースで同一のものを用いた。

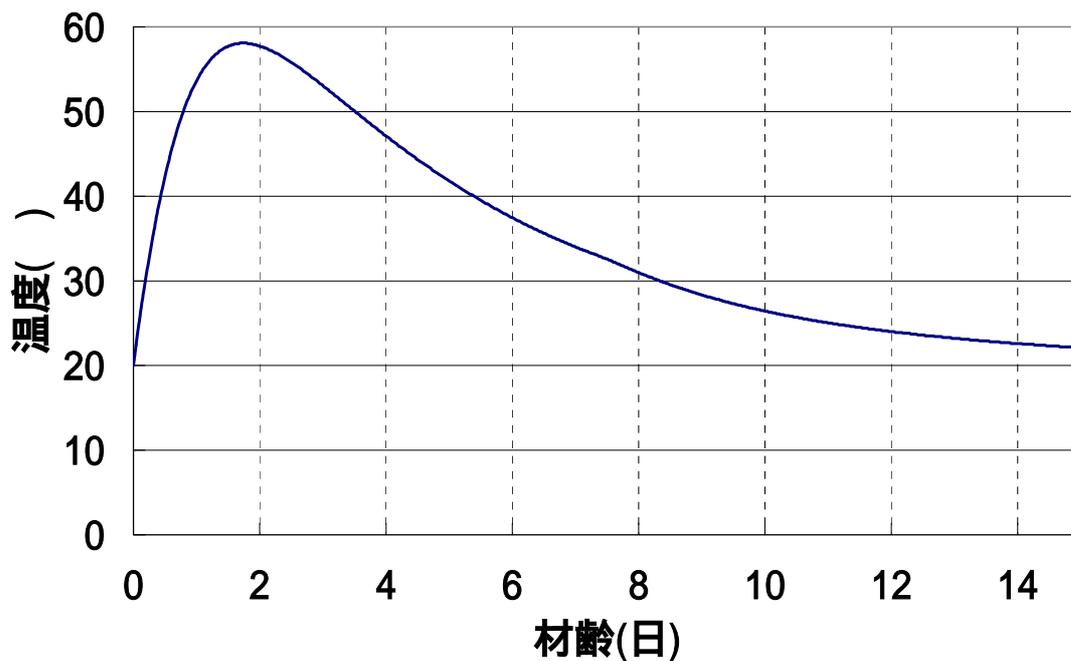


図 3.12 温度制御用温度履歴

### 3.6 試験測定方法

恒温室内に設置された両試験装置に供試体となるコンクリートを打設し、制御用コンピュータにコンクリート内部の温度制御用温度履歴及び拘束供試体用の拘束度の値を与える。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からである。コンクリートが凝結始発時間に達した後に与えた値どおりに温度及び拘束度を制御させる。またそれと同時にコンクリート内部の温度(拘束供試体は5点、無拘束供試体は3点)と変位(拘束・無拘束供試体共に左右1点ずつ)、及び拘束供試体に拘束度を制御するために加えた荷重の測定を開始する。なお温度制御は試験開始時に設定温度で開始が出来るように試験前から行うこともできる。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)」に従う。試験・測定の終了は、供試体にひび割れが生じた時点としている。また同時に圧縮強度試験・割裂引張強度試験を行った。

### 3.7 使用コンクリート配合及び材料

TSTM で用いたセメントは大阪住友セメント社製の普通ポルトランドセメントを使用し、本試験に用いたコンクリート配合は水セメント比 55%、目標スランプ 12cm、目標空気量 4.5%とした。コンクリートの配合を表-3.1、セメントの化学成分を表-3.2、セメントの物性的性質を表-3.3に示す。また本試験に用いた細骨材は 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、使用時には表面水率の測定を行い、使用推量と細骨材率の補正を行う。細骨材の物性値を表-3.4、ふるい分け結果を表-3.5、粒度分布曲線を図 3.13 に示す。粗骨材は、5~15mm、15~20mm とふるい分けしたものである。分級時は、同時に水洗いを行っており、表面乾燥状態となるまで乾燥させる。細骨材の物性値を表-3.6 に、ふるい分け結果を表-3.7 に、粒度分布曲線を前記図 3.13 に示す。混和剤は AE 剤として「マイクロエア 303」、AE 減水剤として「ポゾリス No.70」を使用した。練り混ぜ水は法政大学土木材料実験室の上水道水である。

表-3.1 コンクリート配合表

細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				単位量 (g/m <sup>3</sup> )	
	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE剤	AE減水剤
	W	C	S	G		
47.5	180	327	836	936	9	981

表-3.2 セメント化学成分

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

表-3.3 セメント物性値

セメントの種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝結			安定性 (バット法)	圧縮強さ (N/mm <sup>2</sup> )		
			水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)		3日	7日	28日
普通ポルトランドセメント	3.15	3300	27.5	2時間10分	3時間20分	良	29	44	61.5
日本工業規格 (JIS R 5210)	-	2500以上	-	60分以上	10時間以下	良	12.5以上	22.5以上	42.5以上

表-3.4 細骨材の試験結果

密度(g/cm <sup>3</sup> )	吸水率(%)	粗粒率
2.62	1.63	3.08

表-3.5 細骨材のふるい分け結果

ふるいの呼び寸法	10mm	5mm	2.5mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm
各ふるいにとどまる量の累計百分率(%)	0	0	10	45	69	86	98

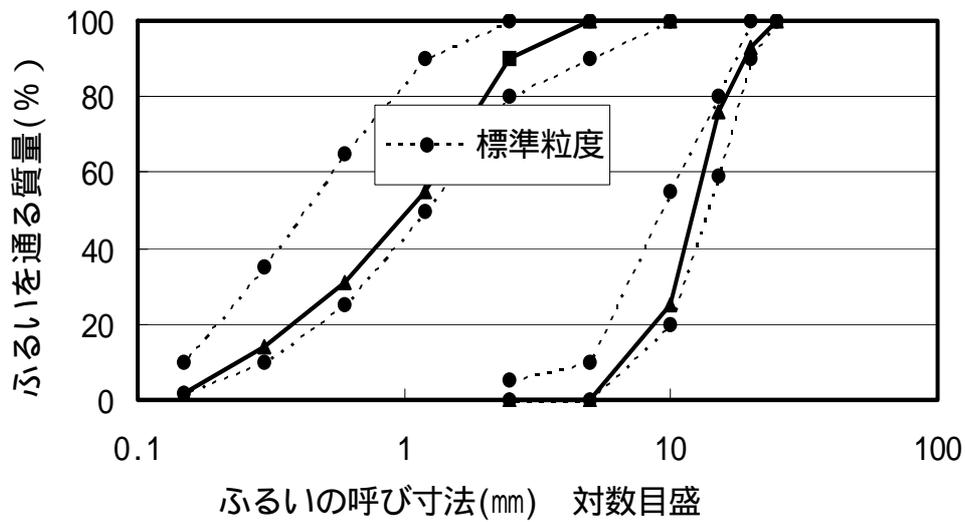


図 3.13 細骨材の粒度曲線

表-3.6 粗骨材の試験結果

密度(g/cm <sup>3</sup> )	吸水率(%)	粗粒率
2.66	0.78	6.82

表-3.7 粗骨材のふるい分け結果

ふるいの呼び寸法	30mm	25mm	20mm	15mm	10mm	5mm	2.5mm
各ふるいにとどまる量の累計百分率(%)	0	0	7	24	75	100	100

## 第4章 円柱型直接引張強度試験

### 4.1 概要

本研究で行った円柱型直接引張強度試験は、写真 4.1 に示すように試験機にフックを固定し、予め治具を接着しておいた円柱型直接引張供試体を鉛直方向に設置し、荷重を加えた。このとき、中心軸とフックの中心が一致するようにして、曲げが発生しないようにした。また、円柱型直接引張供試体中心部の両面にひずみゲージを貼り、ひずみの測定も同時に行った。

本研究では、普通ポルトランドセメント・高炉セメント B 種 3 種類の計 4 種類のセメントを用いたコンクリート供試体に対し、それぞれ水中・気中で養生することにより計 8 種類のケースについて各々円柱型直接引張強度試験・割裂引張強度試験・圧縮強度試験を行った。検討ケースを表-4.1 に示す。

### 4.2 治具接着・養生方法

治具の接着は、養生方法及び養生期間で接着剤の硬化時間に差異が生じたために、水中養生で3日間、気中養生で2日間の接着期間とした。なお、接着期間は試験材齢を一致させるために養生期間内に行った。ただし、水中養生の場合3日間の接着期間中は水中に供試体を浸ける事ができないことから、十分濡らした布を巻きつけビニール袋で密閉する湿布養生とした。図 4.1 に強度試験までのフローを示す。なお本研究ではコンクリートの若材齢時に注目するため、試験材齢は材齢 5・7・10・14・28 日とした。

### 4.3 強度試験

強度試験については、円柱型直接引張強度試験、割裂引張強度試験及び圧縮強度試験を行った。写真 4.2 に供試体を示す。左から圧縮強度試験供試体・割裂引張強度試験供試体・円柱型直接引張強度試験供試体である。また、円柱型直接引張強度試験については電気抵抗型のひずみゲージを、圧縮強度試験についてはコンプレッソメータを用いてひずみ測定を行った。



写真 4.1 円柱型直接引張強度試験概要

表-4.1 検討ケース

セメントの種類	養生方法	ケース記号
普通ポルトランドセメント:N	水中養生:W	N-W
	気中養生:A	N-A
高炉セメントB種:B	水中養生:W	B-W
	気中養生:A	B-A
低収縮高炉セメントB種:L	水中養生:W	L-W
	気中養生:A	L-A
ダム用高炉セメントB種:D	水中養生:W	D-W
	気中養生:A	D-A

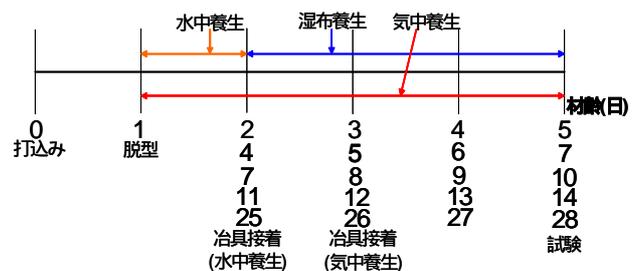


図 4.1 養生・試験フロー図



写真 4.2 強度試験用供試体

#### 4.3.1 円柱型直接引張強度試験

本研究で用いたコンクリート供試体寸法は、写真 4.2 に示したように 100×400mm の円柱供試体とした。また図 4.1 に示したように、材齢 1 日で脱型を行い水中・気中でそれぞれ養生を行い、材齢 5・7・10・14・28 日で試験を行った。なお供試体上下面は、新旧コンクリート打継接着用エポキシ樹脂系接着剤で治具を接着し、直径等は接着時に測定した。

試験実施時は、試験機にフックを固定し、あらかじめ接着しておいた供試体と治具をセットし、この時中心軸とフックの中心が一致するようにして曲げが発生しないようにした。載荷の際は供試体に衝撃を与えないように一様な速度で荷重を加えた。

円柱型直接引張強度は以下の式により求めた。

$$f_{c-e} = \frac{P}{\pi(d/2)^2} \text{----- (4.1)}$$

ここで、 $f_{c-e}$ ：円柱型直接引張強度(N/mm<sup>2</sup>) P：破壊荷重(N)

$$d = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + d_4}{4} \text{----- (4.2)}$$

ここで、d：供試体の直径(mm) ,  $d_1, d_2, d_3, d_4$ ：4方向の直径

また、円柱型直接引張強度試験と並行して荷重 500N おきに、ひずみゲージを用いてひずみの測定を行った。

#### 4.3.2 割裂引張強度試験

割裂引張強度試験は(JIS A 1113)に準拠して行った。供試体は 150×h200mm の鋼製型枠にて作製し、図 4.1 に示すように材齢 1 日で脱型を行い、水中・気中でそれぞれ養生を行い、材齢 5・7・10・14・28 日において試験を行った。

割裂引張強度は以下の式により求めた。

$$f_t = \frac{2P}{\pi dl} \text{-----} (4.3)$$

ここで、 $f_t$  : 割裂引張強度(N/mm<sup>2</sup>) P : 破壊荷重(N) l : 供試体長さ(mm)

d : 供試体の直径(mm)

$$d = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + d_4}{4} \text{-----} (4.4)$$

ここで、 $d_1, d_2, d_3, d_4$  : 4 方向の直径

#### 4.3.3 圧縮強度試験

強度試験は(JIS A 1108)に準拠して行った。供試体は 100×h200mm の鋼製型枠にて作製し、図 4.1 に示すように材齢 1 日で脱型を行い、水中・気中でそれぞれ養生を行い、材齢 5・7・10・14・28 日において試験を行った。

圧縮強度は以下の式により求めた。

$$f'_c = \frac{P}{\pi(d/2)^2} \text{-----} (4.5)$$

ここで、 $f'_c$  : 圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>) P : 破壊荷重(N)

$$d = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3} \text{-----} (4.6)$$

ここで d : 供試体の直径(mm)  $d_1, d_2, d_3$  : 3 方向の直径

また、圧縮強度試験と並行してコンプレッソメータを用いて、ひずみの測定を行った。

#### 4.4 使用コンクリート配合及び材料

円柱型直接引張強度試験で用いたセメントは住友大阪セメント社製普通ポルトランドセメント，新日鐵高炉セメント株式会社製高炉セメント B 種及びダム用高炉セメント B 種，株式会社デイ・シイ製の低収縮高炉セメント B 種（MKC TYPE ）を用いた．本試験で用いたコンクリート配合は水セメント比 55%，目標スランプ 12cm，目標空気量 4.5%とした．コンクリート配合を表-4.2，セメントの化学成分を表-4.3，セメントの物性的性質を表-4.4 に示す．細骨材・粗骨材・混和剤は 3 章 7 節で示した物と同一である．

表-4.2 コンクリート配合

	細骨材率	単位量				単位量	
		(kg/m <sup>3</sup> )				(g/m <sup>3</sup> )	
	%	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 剤	AE 減水剤
普通ポルトランドセメント	45.8	180	327	808	948	17	981
高炉セメント B 種	46.6	179	325	824	938	21	935
ダム用高炉セメント B 種	44.1	152	276	829	1040	14	966
低収縮高炉セメント B 種	45.8	159	289	845	993	14.15	1012

表-4.3 セメント化学成分

セメント	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
高炉セメント B 種	1.70	3.80	2.00	-	-
ダム用高炉セメント B 種	1.30	4.00	2.50	-	-
低収縮高炉セメント B 種	-	-	3.90	-	-

表-4.4 セメントの物性値

セメントの種類	区分	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝結水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)	安定性 (パット法)	圧縮強さ (N/mm <sup>2</sup> )		
								3日	7日	28日
普通ポルトランドセメント	品質例	3.15	3300	27.5	2時間10分	3時間20分	良	29	44	61.5
	日本工業規格 (JIS R 5210)	-	2500以上	-	60分以上	10時間以下	良	12.5以上	22.5以上	42.5以上
高炉セメント B 種	品質例	3.02	3920	29.5	2時間40分	3時間45分	良	20.5	32.7	58.6
	日本工業規格 (JIS R 5210)		3000以上		60分以上	10時間以下	良	10.0以上	17.5以上	42.5以上
ダム用高炉セメント B 種	品質例	3.00	3320	29.5	3時間20分	4時間50分	-	12.5	22.4	50
	日本工業規格 (JIS R 5210)		3000以上		60分以上	10時間以下	-	10.0以上	17.5以上	42.5以上
低収縮高炉セメント B 種	品質例	2.98	3400	-	3時間45分	5時間25分	-	14.2	23.6	44.4
	日本工業規格 (JIS R 5210)		3000以上		60分以上	10時間以下	-	10.0以上	17.5以上	42.5以上

## 第5章 角柱型直接引張強度試験

### 5.1 概要

円柱型直接引張強度試験では、コンクリートの打込み方向や試験時の載荷方向がTSTMと異なる。その点をTSTMに関連させるため、円柱型直接引張強度試験とは異なる角柱型直接引張強度試験を用いた。角柱型直接引張強度試験機は、TSTMとコンクリート供試体の打込み方向、載荷方向が同じであり、また供試体自体の形状も似たものになっている。角柱型直接引張強度試験機を写真5.1に示す。また概要図を図5.1、5.2に示す。



写真 5.1 角柱型直接引張強度試験機

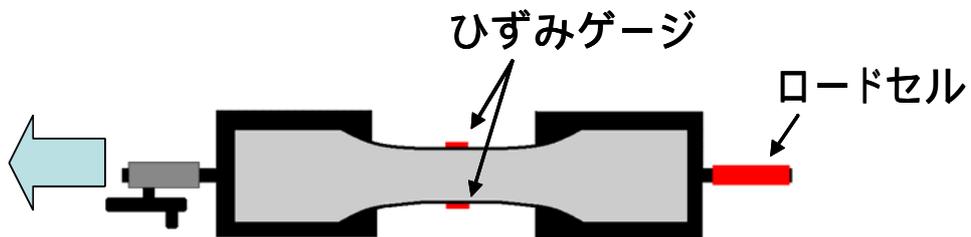


図 5.1 角柱型直接引張強度試験機概要図

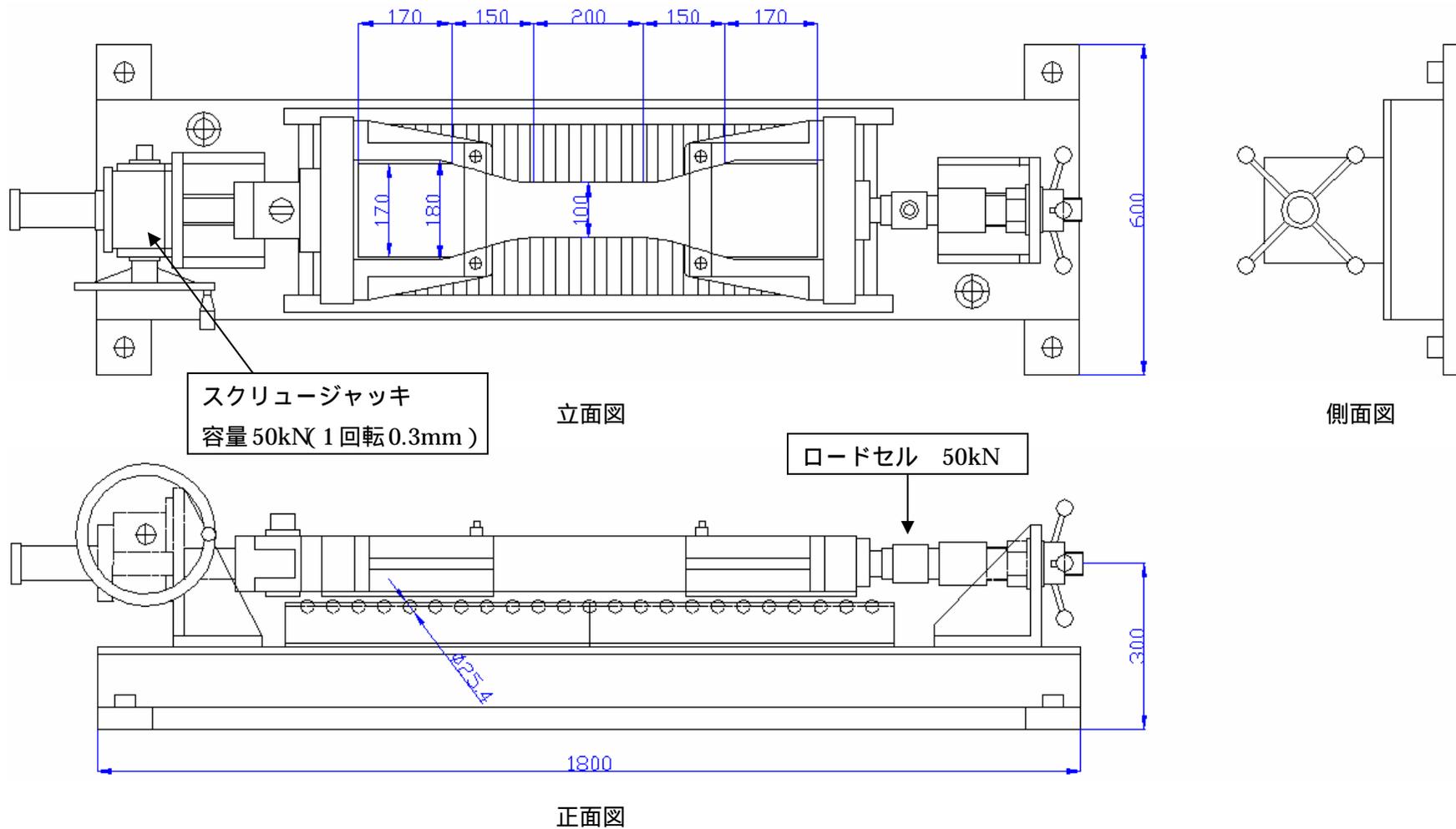


図 5.2 角柱型直接引張強度試験機

また本研究では、普通ポルトランドセメント・高炉セメント 2 種類の計 3 種類のセメントを用いたコンクリート供試体に対し、それぞれ気中・水中で養生することにより計 6 種類のケースについて各々角柱型直接引張強度試験・割裂引張強度試験・圧縮強度試験を行った。検討ケースを表-5.1 に示す。本研究ではコンクリートの若材齢に注目するために、試験材齢は材齢 1・3・5・7 日とした。打込みから試験日までのフローを図 5.3 に示す。

表-5.1 検討ケース

セメントの種類	養生方法	ケース記号
普通ポルトランドセメント:N	水中養生:W	N-W
	気中養生:A	N-A
高炉セメントB種:B	水中養生:W	B-W
	気中養生:A	B-A
低収縮高炉セメントB種:L	水中養生:W	L-W
	気中養生:A	L-A



図 5.3 打込み・試験フロー図

## 5.2 角柱型直接引張強度試験機・供試体

先の写真 5.1 に示したような試験機及び写真 5.2 に示すような専用の型枠を使用した。角柱型直接引張強度試験に用いる供試体の概要を図 5.4 に示す。寸法は 100×100×840mm で、試験対象となるのが、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抜け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されており、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カーブ状になっている。型枠はその試験機に合う形であり、打込み後試験部位が膨張により広がらないように金具で試験部位中心から 100mm 以内のところを固定した。载荷装置は 1 回転 0.3mm のスクリージャッキとし、ロードセルで荷重を測定する。また供試体試験部中心部の左右にひずみゲージを貼りひずみを測定した。ジャッキ側の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。また供試体下部が接する部分はローラーとし出来る限り摩擦を軽減するようになっている。



写真 5.2 専用型枠

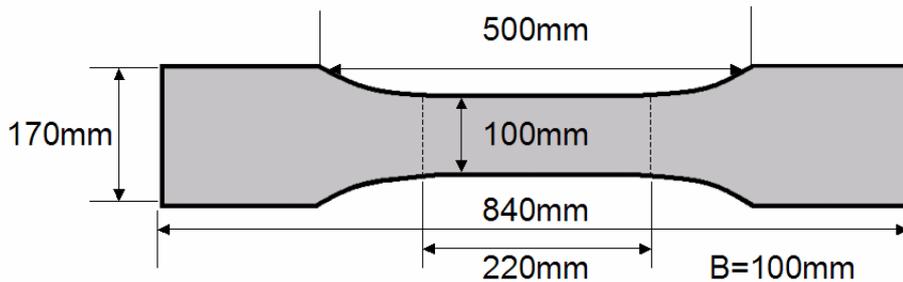


図 5.4 角柱型直接引張強度試験供試体概要

### 5.3 強度試験

強度試験については、角柱型直接引張強度試験、割裂引張強度試験、圧縮強度試験を行った。また角柱型直接引張強度試験時には上述のように電気抵抗型のひずみゲージを、圧縮強度試験時にはコンプレッソメータを用いてひずみの測定を行った。

#### 5.3.1 角柱型直接引張強度試験

角柱型直接引張強度試験で用いた供試体は上述したとおりである。図 5.3 に示したように、材齢 1 日で脱型を行い水中・気中でそれぞれ養生を行い、材齢 1・3・5・7 日で試験を行った。試験実施に関して、供試体運搬時に曲げやその他の影響を与えないように慎重に行った。

角柱型直接引張強度は以下の式により求めた。

$$b = \frac{b_1 + b_2}{2}, h = \frac{h_1 + h_2}{2} \text{----- (5.1)}$$

ここで、 $b$ ：供試体の幅(mm)  $h$ ：供試体の高さ(mm)  $b_1, b_2$ ：2 方向の幅  
 $h_1, h_2$ ：2 方向の高さ

$$f_t = \frac{P}{bh} \text{----- (5.2)}$$

ここで、 $f_t$ ：円柱型直接引張強度(N/mm<sup>2</sup>)  $P$ ：破壊荷重(N)

また、角柱型直接引張強度試験と並行して、ひずみゲージを用いてひずみの測定を行った。

### 5.3.2 割裂引張強度試験

割裂引張強度試験は(JIS A 1113)に準拠して行った。供試体は 150×h200mm の鋼製型枠にて作製し、図 5.3 に示すように材齢 1 日で脱型を行い、水中・気中でそれぞれ養生を行い、材齢 1・3・5・7 日において試験を行った。

割裂引張強度は以下の式により求めた。

$$f_t = \frac{2P}{\pi dl} \text{-----} (5.3)$$

ここで  $f_t$  : 割裂引張強度(N/mm<sup>2</sup>) P : 破壊荷重(N) l : 供試体長さ(mm)

d : 供試体の直径(mm)

$$d = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + d_4}{4} \text{-----} (5.4)$$

ここで d : 供試体の直径(mm)  $d_1, d_2, d_3, d_4$  : 4 方向の直径

### 5.3.3 圧縮強度試験

強度試験は(JIS A 1108)に準拠して行った。供試体は 100×h200mm の鋼製型枠にて作製し、図 5.3 に示すように材齢 1 日で脱型を行い、水中・気中でそれぞれ養生を行い、材齢 1・3・5・7 日において試験を行った。

圧縮強度は以下の式により求めた。

$$f'_c = \frac{P}{\pi(d/2)^2} \text{-----} (5.5)$$

ここで、 $f'_c$  : 圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>) P : 破壊荷重(N)

$$d = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3} \text{-----} (5.6)$$

ここで d : 供試体の直径(mm)  $d_1, d_2, d_3$  : 3 方向の直径

また、圧縮強度試験と並行してコンプレッソメータを用いて、ひずみの測定を行った。

#### 5.4 使用コンクリート配合及び材料

角柱型直接引張強度試験で用いたセメントは住友大阪セメント社製普通ポルトランドセメント，太平洋セメント社製高炉セメント B 種 株式会社デイ・シイ製の低収縮高炉セメント B 種 (MKC TYPE) を用いた。本試験で用いたコンクリート配合は水セメント比 55%，目標スランプ 12cm，目標空気量 4.5%とした。コンクリート配合を表-5.2，セメントの化学成分を表-5.3，セメントの物性的性質を表-5.4 に示す。細骨材・粗骨材・混和剤は 3 章 7 節示した物と同一である。

表-5.2 コンクリート配合

使用セメント	細骨材率 s/a (%)	単体量 (k g / m <sup>3</sup> )				単体量 (g / m <sup>3</sup> )	
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 剤	AE 減水剤
		W	C	S	G		
普通ポルトランドセメント	47.5	180	327	831	931	9	981
高炉セメント B 種	46.5	180	327	809	950	9	981
低収縮高炉セメント B 種	46.5	180	327	806	947	9	981

表-5.3 セメント化学成分

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
高炉セメント B 種	1.69	3.08	2.25		0.011
低収縮高炉セメント B 種	0.6	4.7	3.9	-	-

表-5.4 セメントの物性値

セメントの種類	区分	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝結水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)	安定性 (パット法)	圧縮強さ (N/mm <sup>2</sup> )		
								3日	7日	28日
普通ポルトランドセメント	品質例	3.15	3300	27.5	2時間10分	3時間20分	良	29	44	61.5
	日本工業規格 (JIS R 5210)	-	2500以上	-	60分以上	10時間以下	良	12.5以上	22.5以上	42.5以上
高炉セメント B 種	品質例	3.02	3920	29.5	2時間40分	3時間45分	良	20.5	32.7	58.6
	日本工業規格 (JIS R 5210)		3000以上		60分以上	10時間以下	良	10.0以上	17.5以上	42.5以上
ダム用高炉セメント B 種	品質例	3	3320	29.5	3時間20分	4時間50分	-	12.5	22.4	50
	日本工業規格 (JIS R 5210)		3000以上		60分以上	10時間以下	-	10.0以上	17.5以上	42.5以上
低収縮高炉セメント B 種	品質例	2.98	3400	-	3時間45分	5時間25分	-	14.2	23.6	44.4
	日本工業規格 (JIS R 5210)		3000以上		60分以上	10時間以下	-	10.0以上	17.5以上	42.5以上

## 第 6 章 TSTM試験結果

### 6.1 温度制御結果

図 6.1, 6.2 に示す供試体温度測定点での温度制御結果及びその制御誤差, 温度分布を図 6.4 ~ 図 6.26 に示す. また凡例を図 6.3 に示す. なお, 各試験について区別をするために 1 から通し番号を付けることとする.

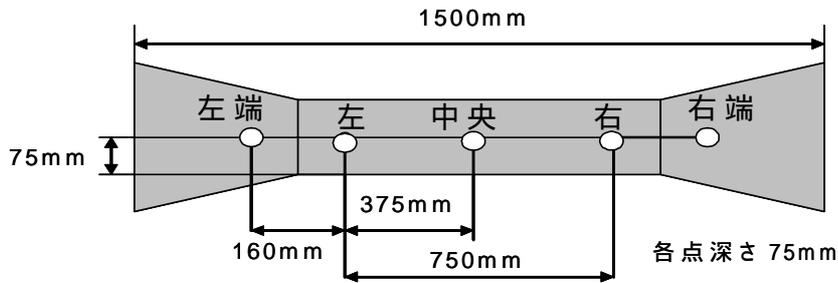


図 6.1 拘束供試体温度測定位置 : 温度測定位置

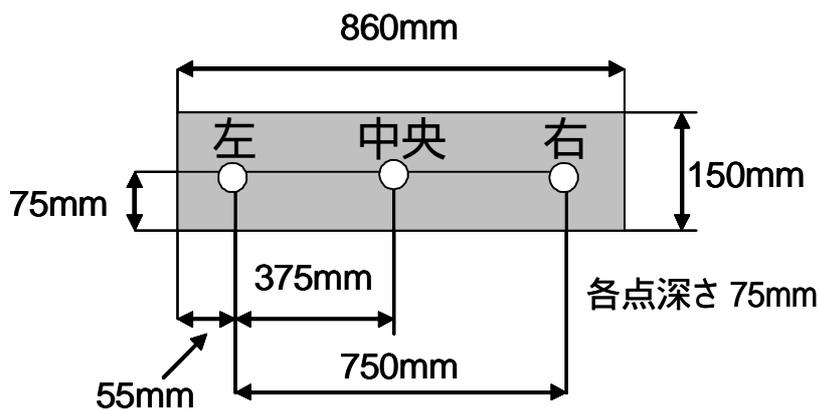


図 6.2 無拘束供試体温度測定位置 : 温度測定位置

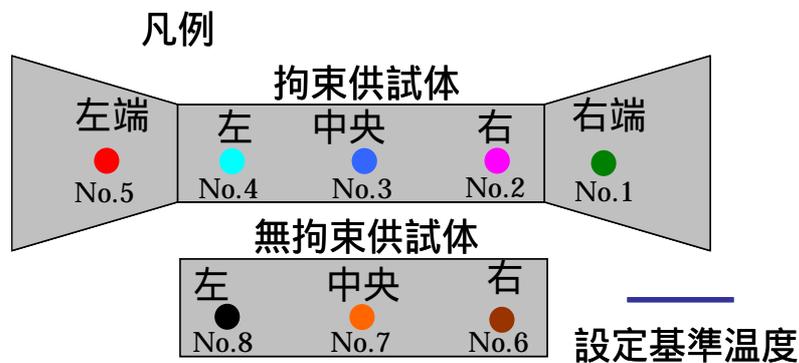


図 6.3 温度測定位置凡例

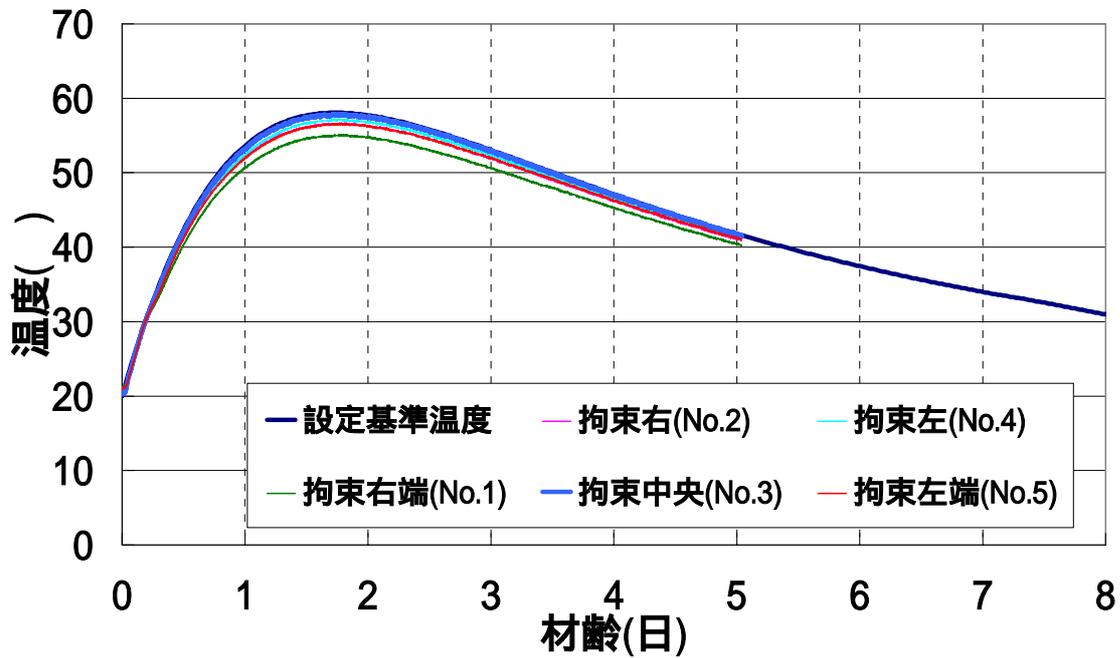


图 6.4 温度制御結果-1(拘束供試体：拘束度 1.0)

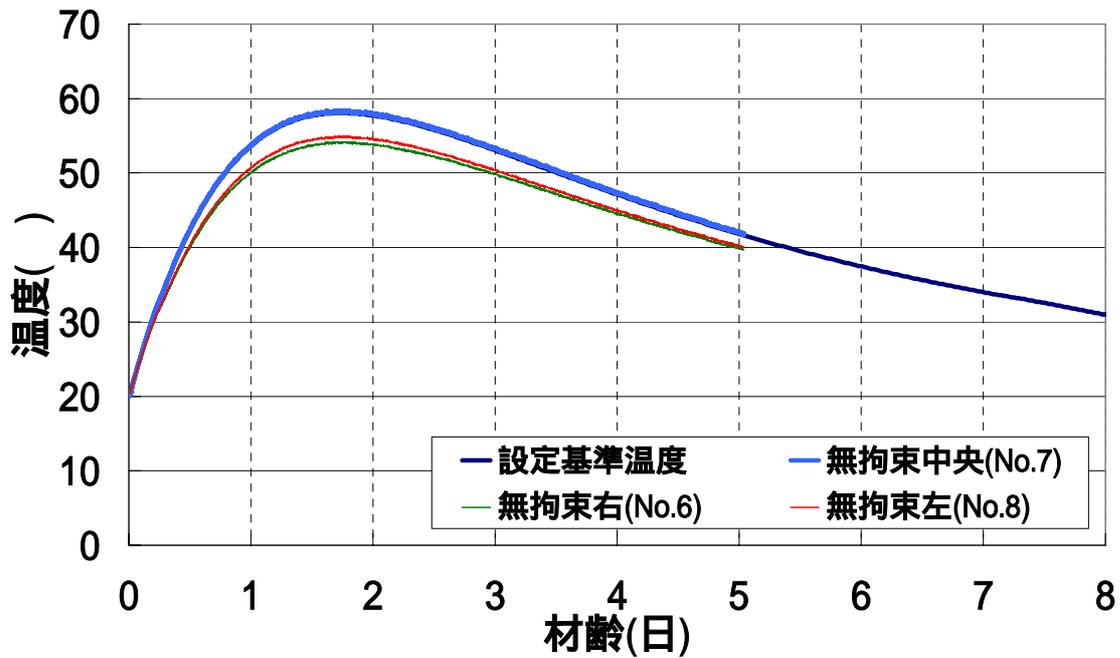


图 6.5 温度制御結果-1(無拘束供試体：拘束度 1.0)

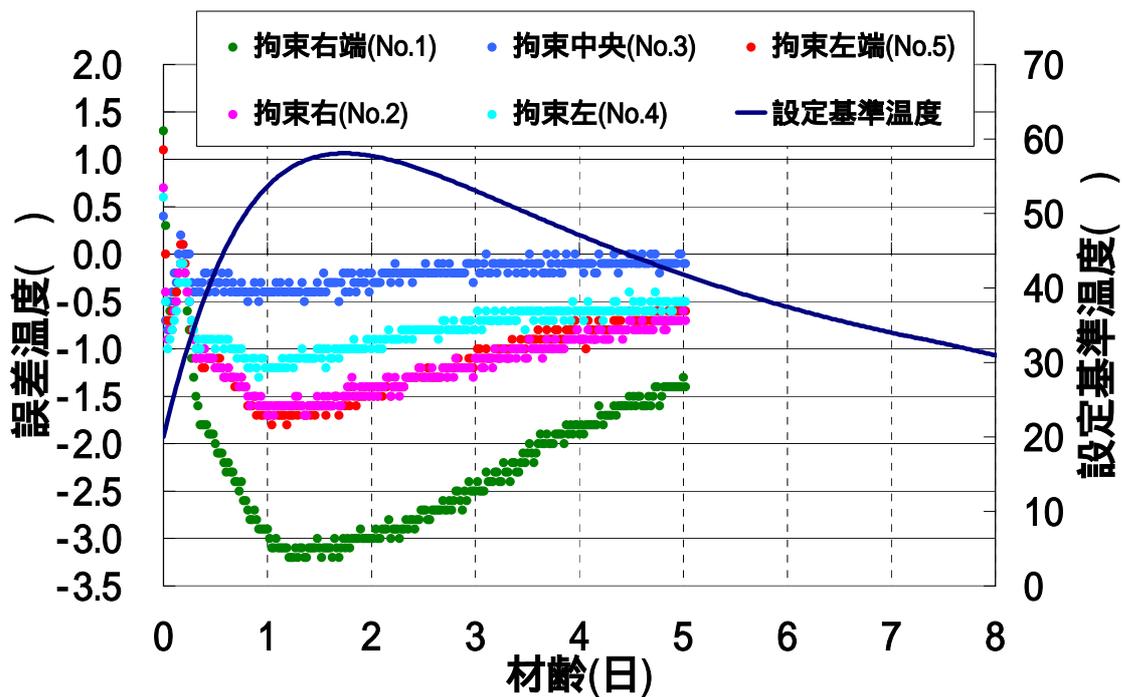


図 6.6 温度制御誤差-1(拘束供試体：拘束度 1.0)

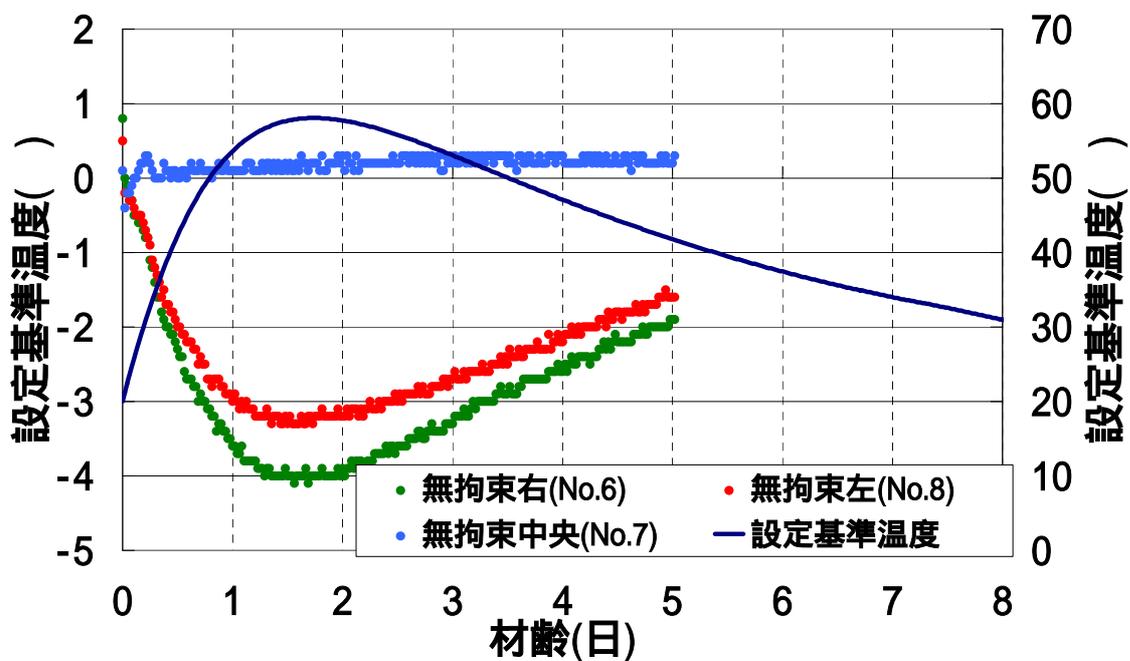


図 6.7 温度制御誤差-1(無拘束供試体：拘束度 1.0)

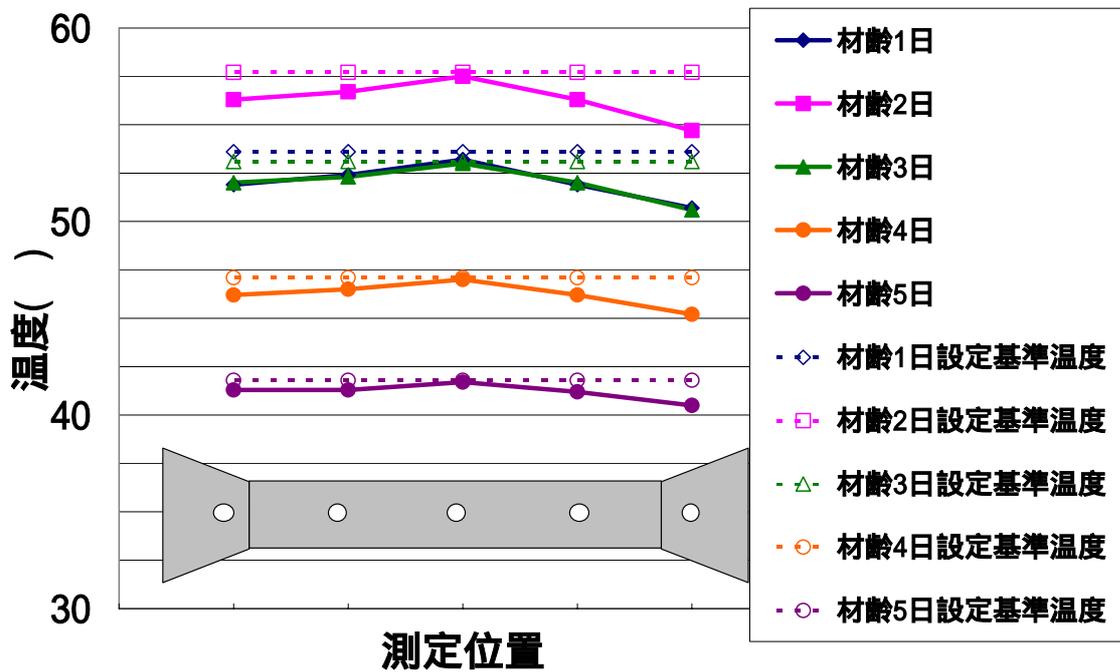


圖 6.8 溫度分布-1(拘束供試體：拘束度 1.0)

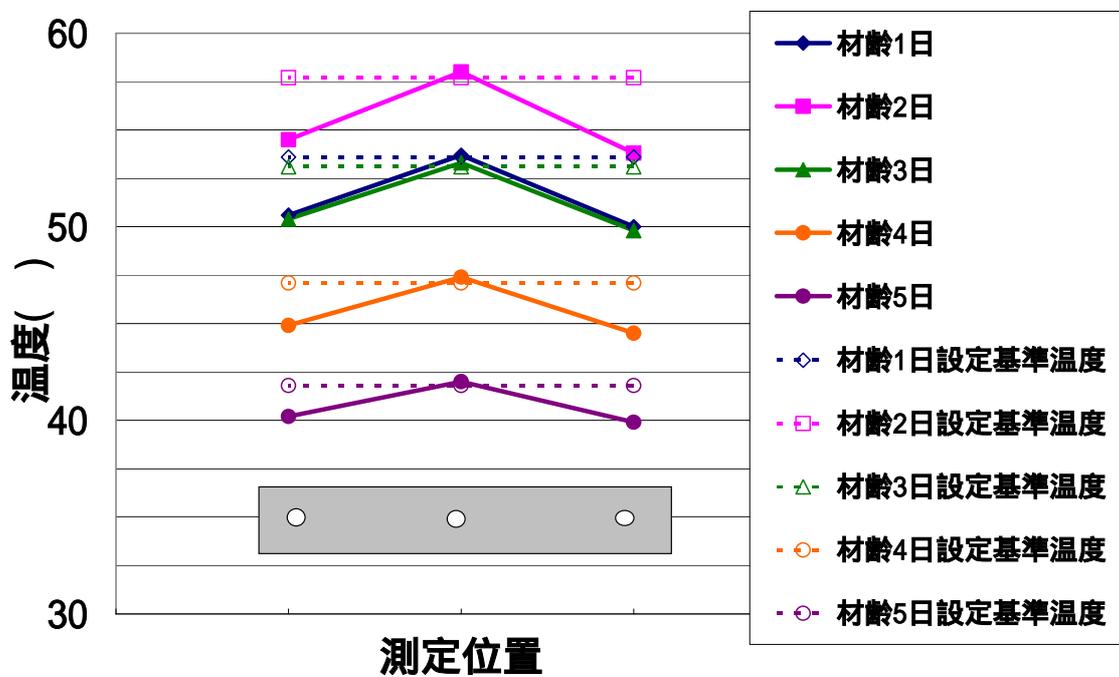


圖 6.9 溫度分布-1(無拘束供試體：拘束度 1.0)

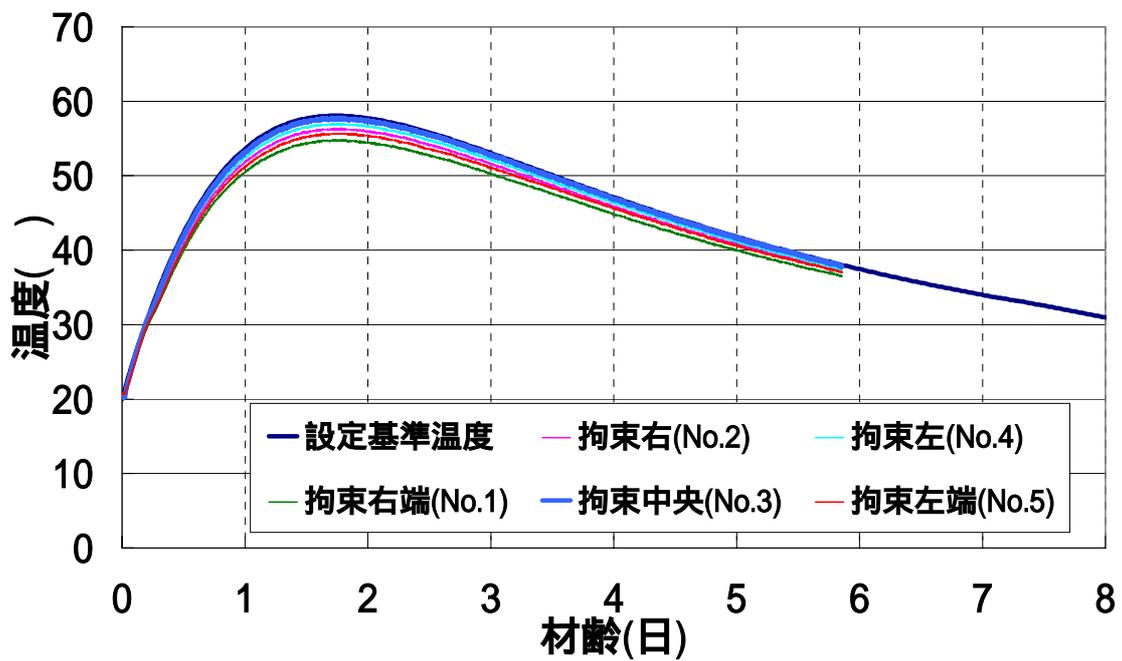


圖 6.10 溫度制御結果-2(拘束裝置：拘束度 0.8)

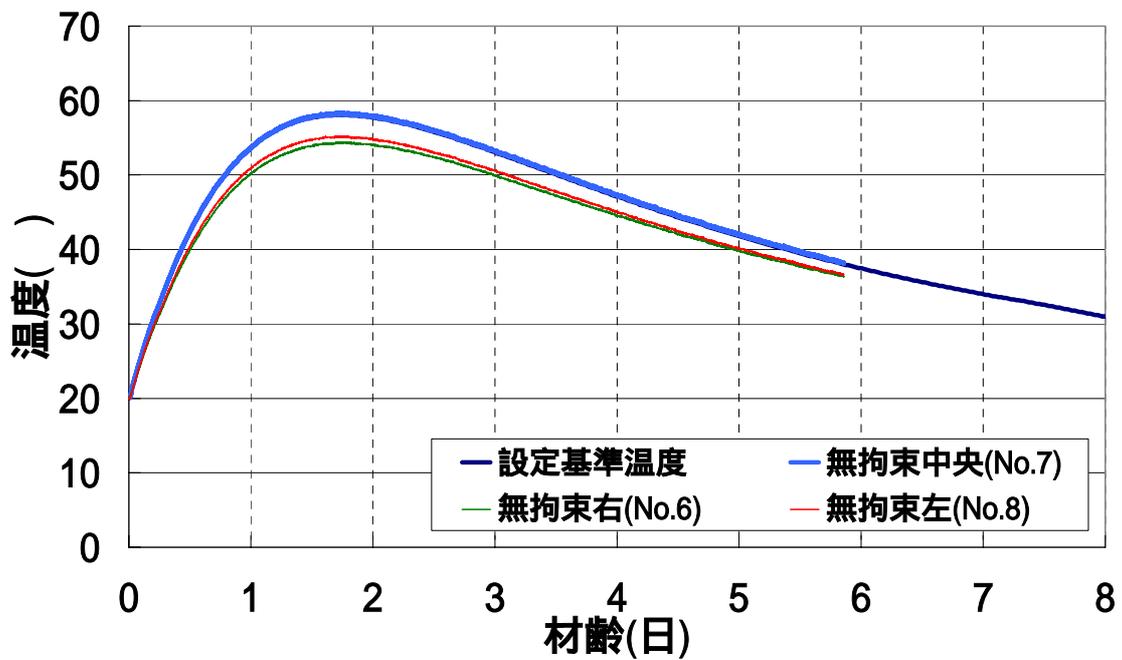


圖 6.11 溫度制御結果-2(無拘束裝置：拘束度 0.8)

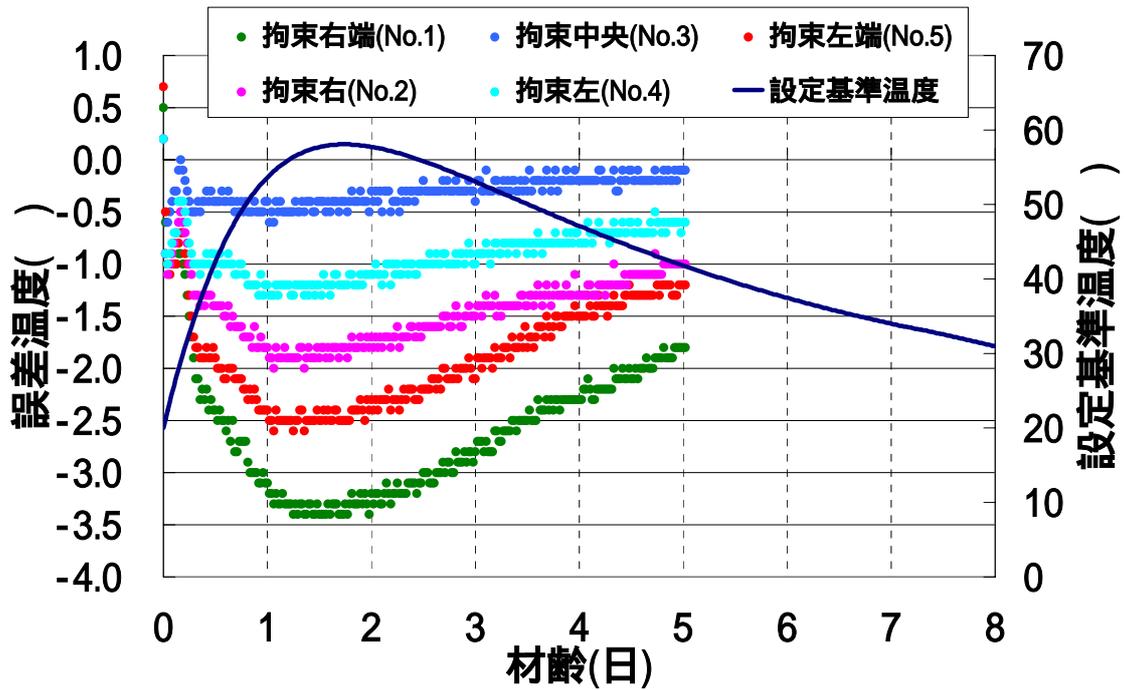


图 6.12 温度制御誤差-2(拘束装置：拘束度 1.0)

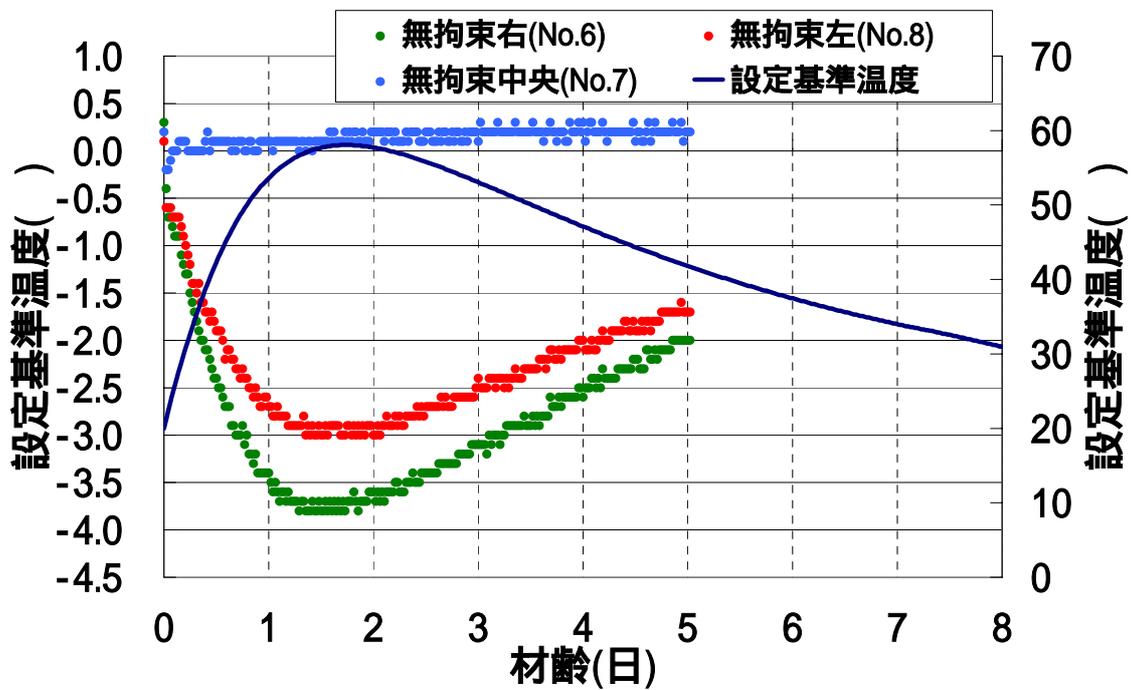


图 6.13 温度制御誤差-2(無拘束装置：拘束度 1.0)

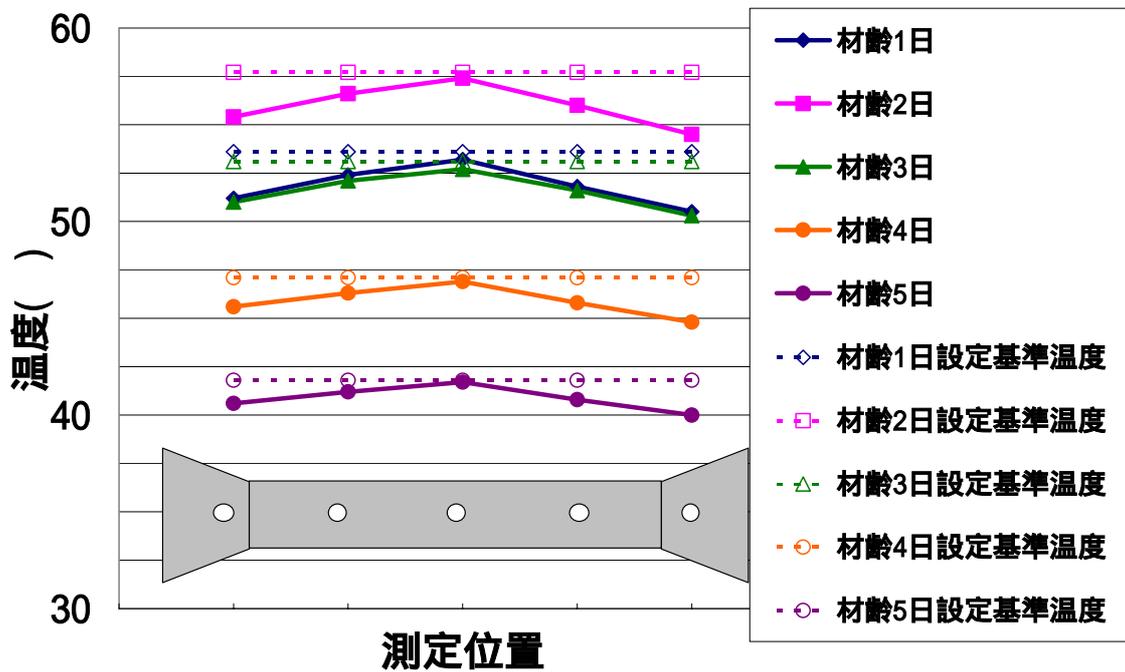


図 6.14 温度分布-2(拘束装置：拘束度 1.0)

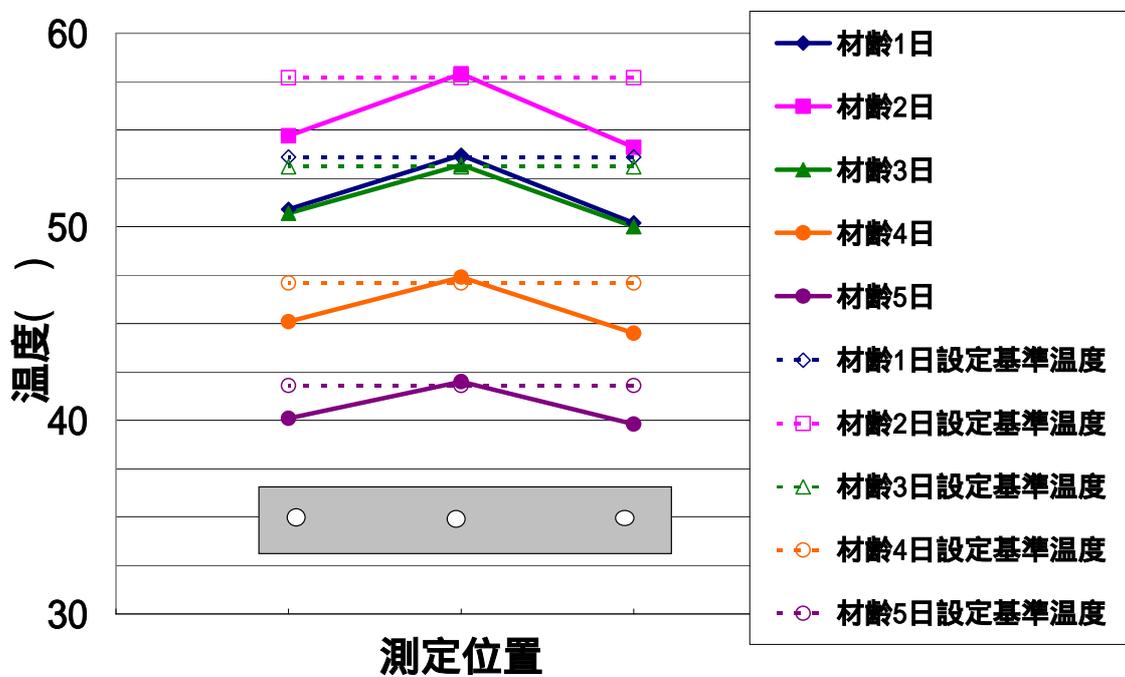


図 6.15 温度分布-2(無拘束装置：拘束度 1.0)

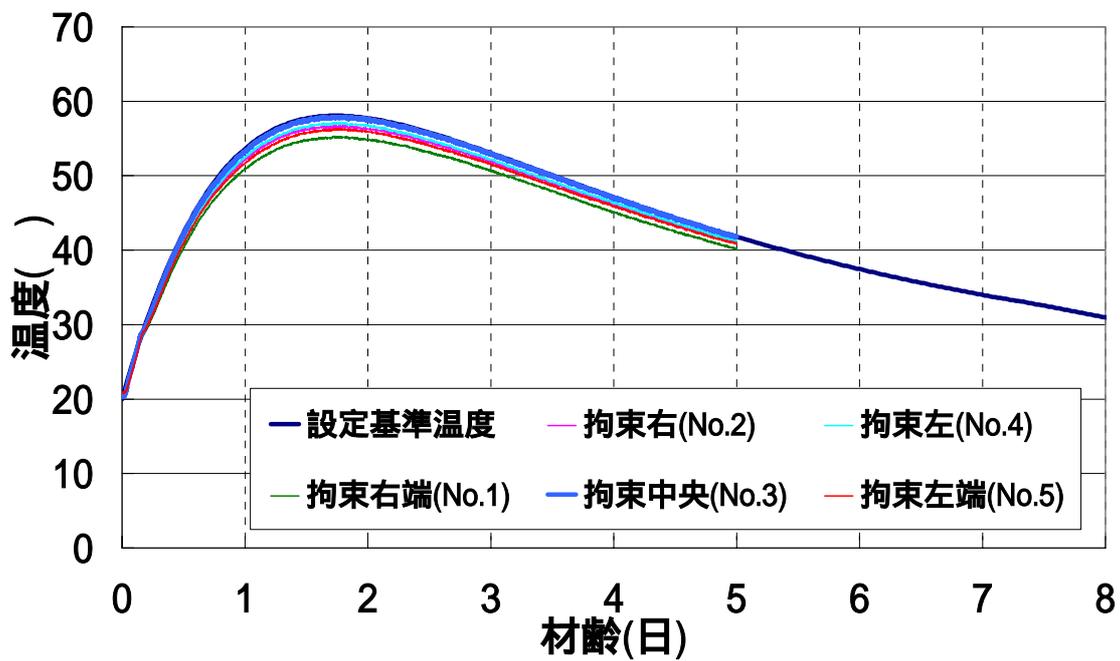


图 6.16 温度制御結果-3(拘束装置：拘束度 0.9)

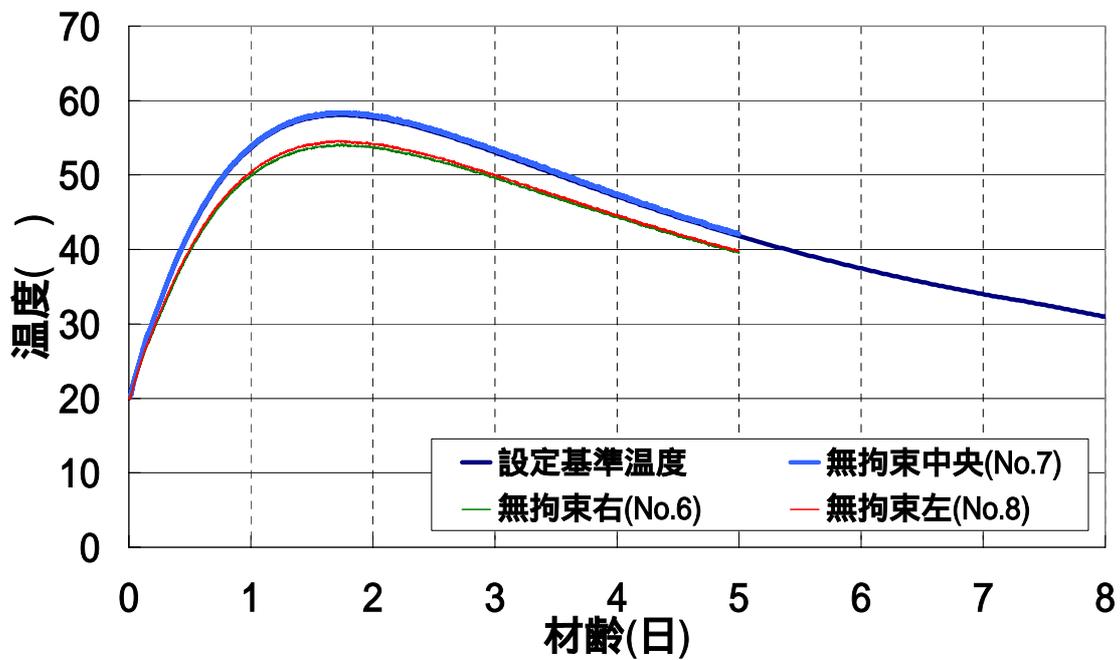


图 6.17 温度制御結果-3(無拘束装置：拘束度 0.9)

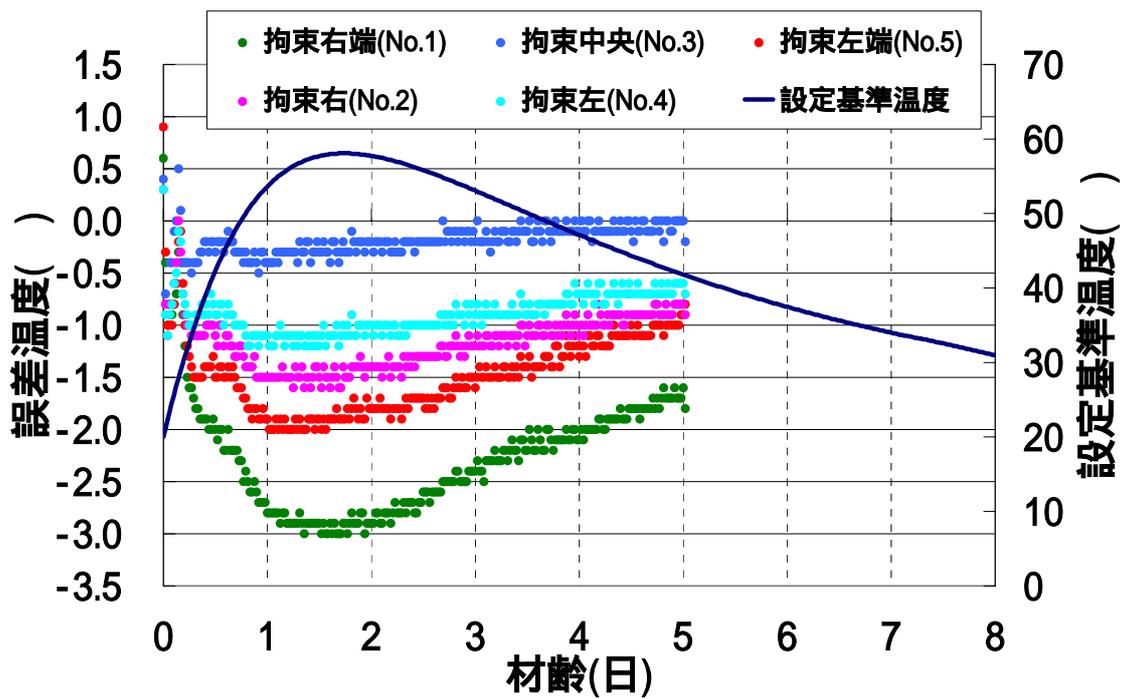


図 6.18 制御誤差-3(拘束装置：拘束度 0.9)

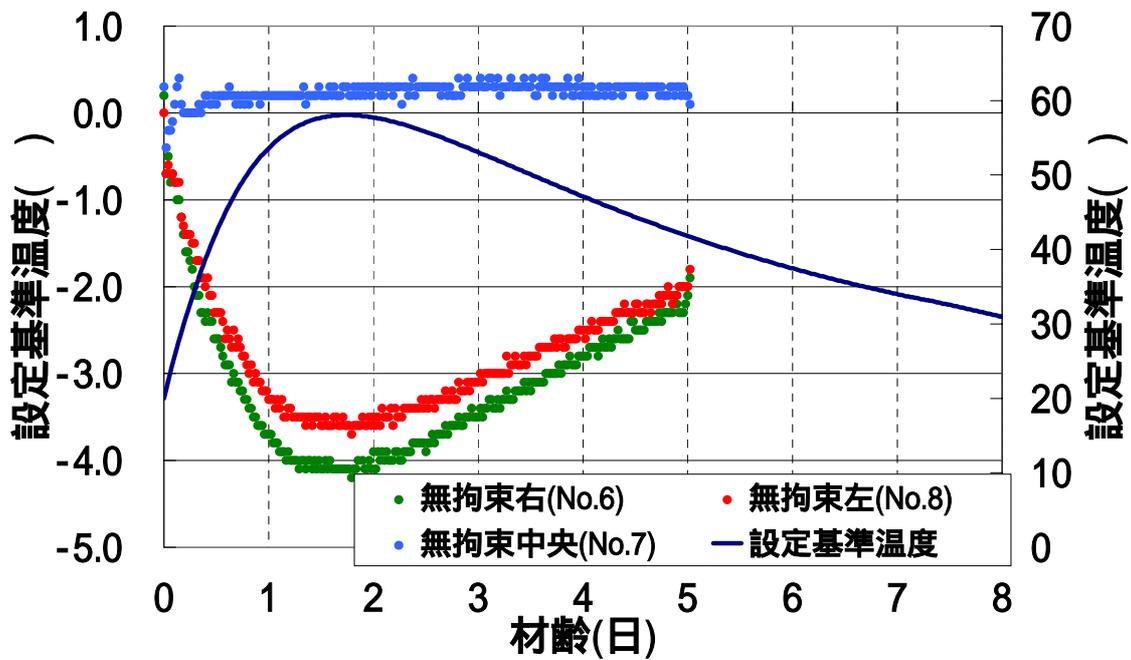


図 6.19 制御誤差-3(無拘束装置：拘束度 0.9)

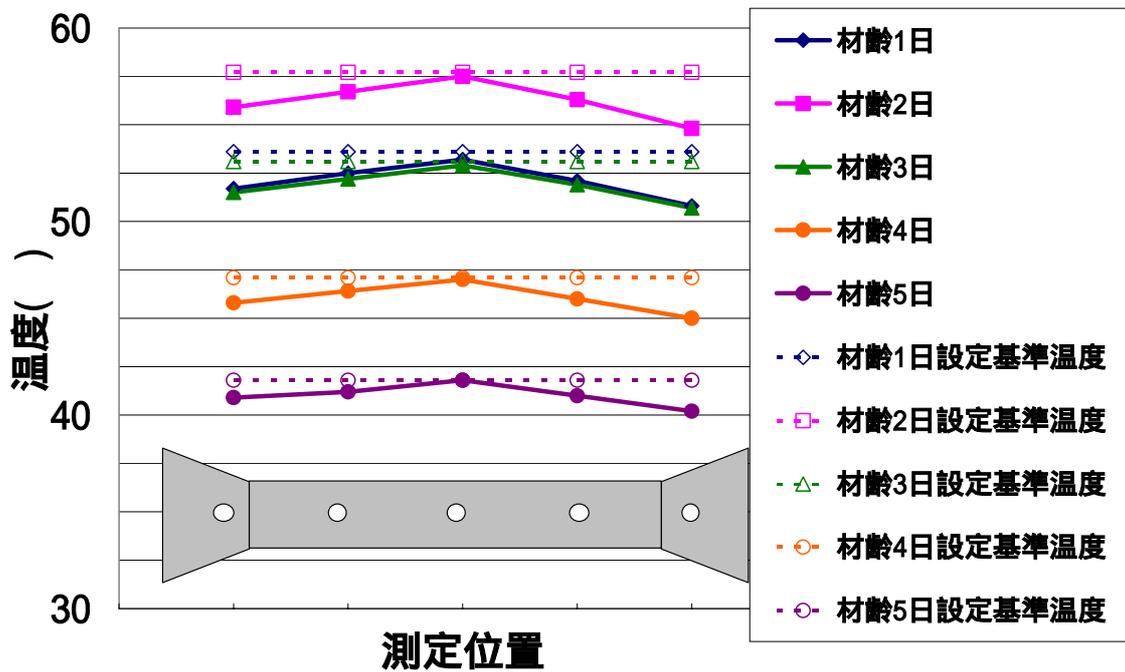


図 6.20 温度分布-3(拘束装置：拘束度 0.9)

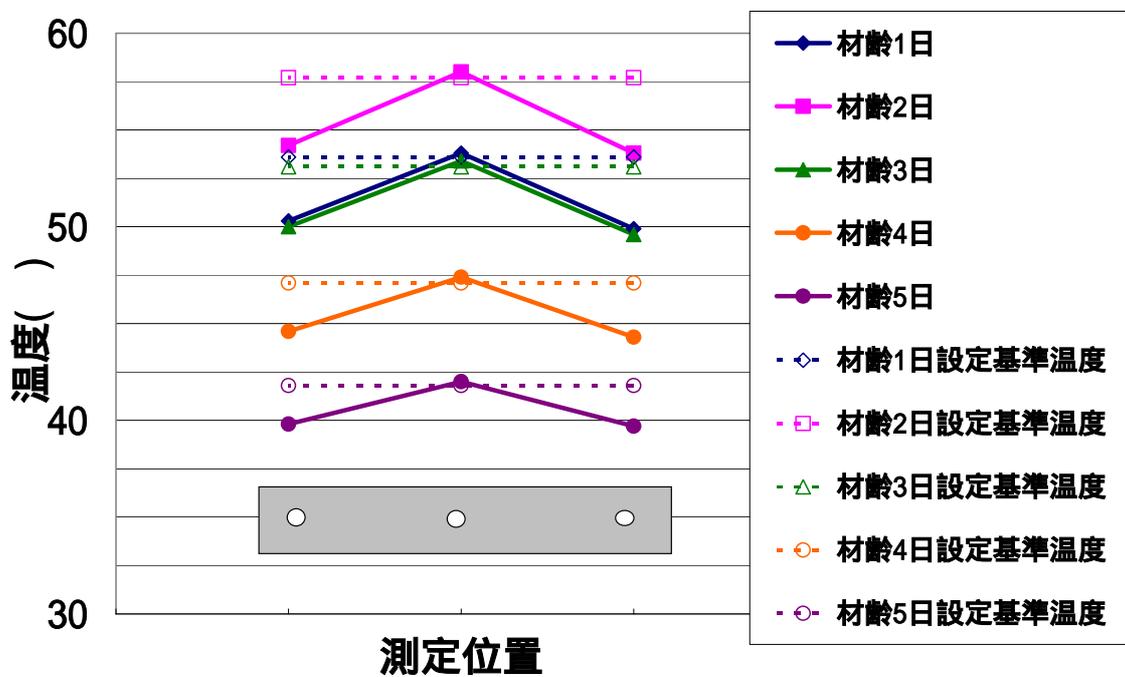


図 6.21 温度分布-3(無拘束装置：拘束度 0.9)

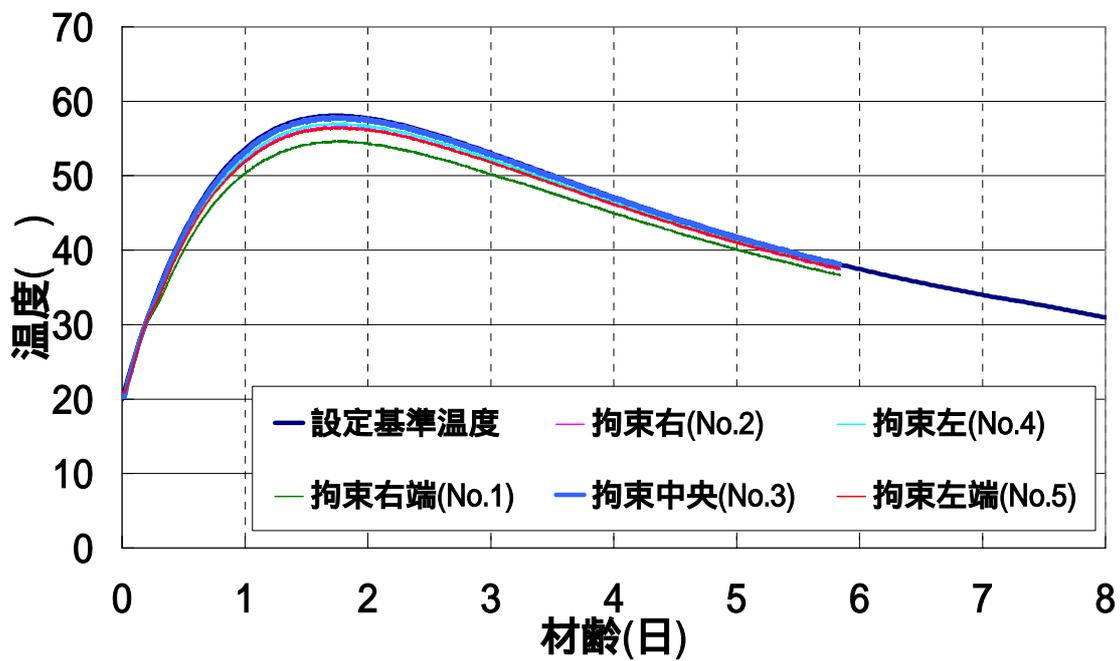


圖 6.22 溫度制御結果-4(拘束裝置：拘束度 0.8)

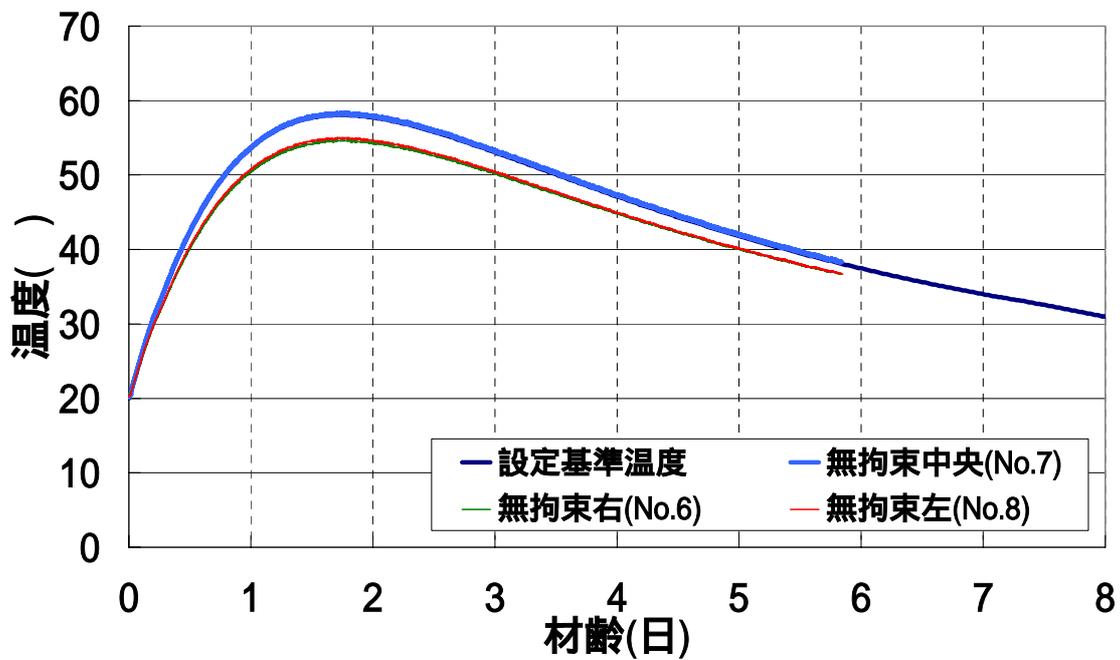


圖 6.23 溫度制御結果-4(無拘束裝置：拘束度 0.8)

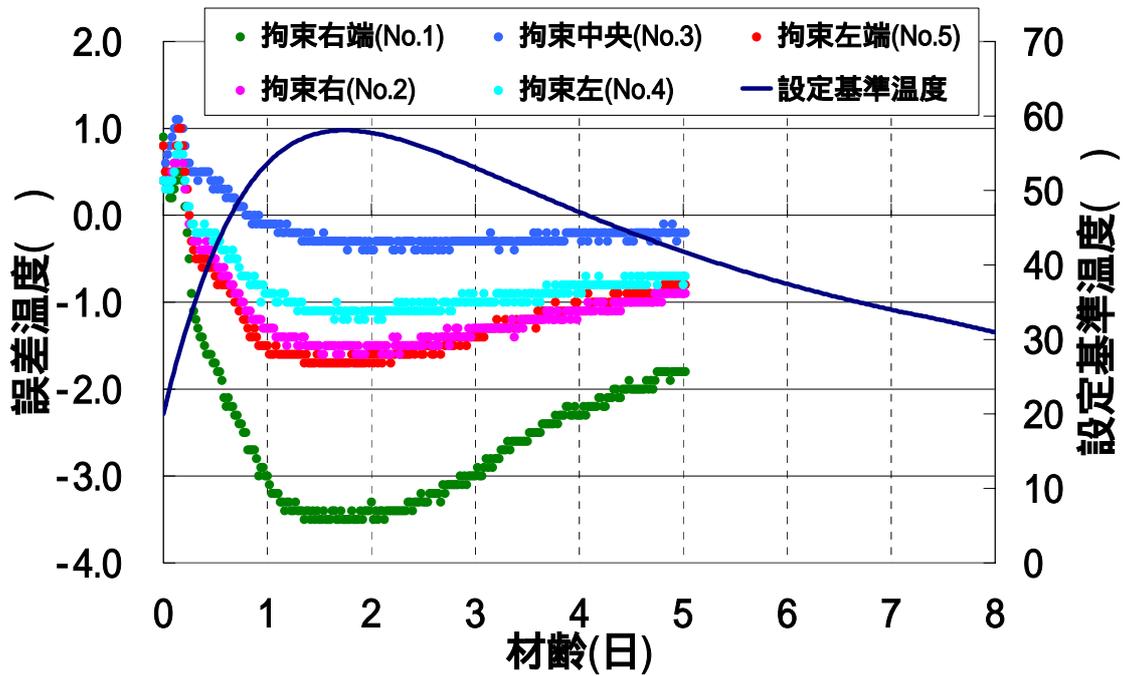


図 6.23 制御誤差-4(拘束装置：拘束度 0.8)

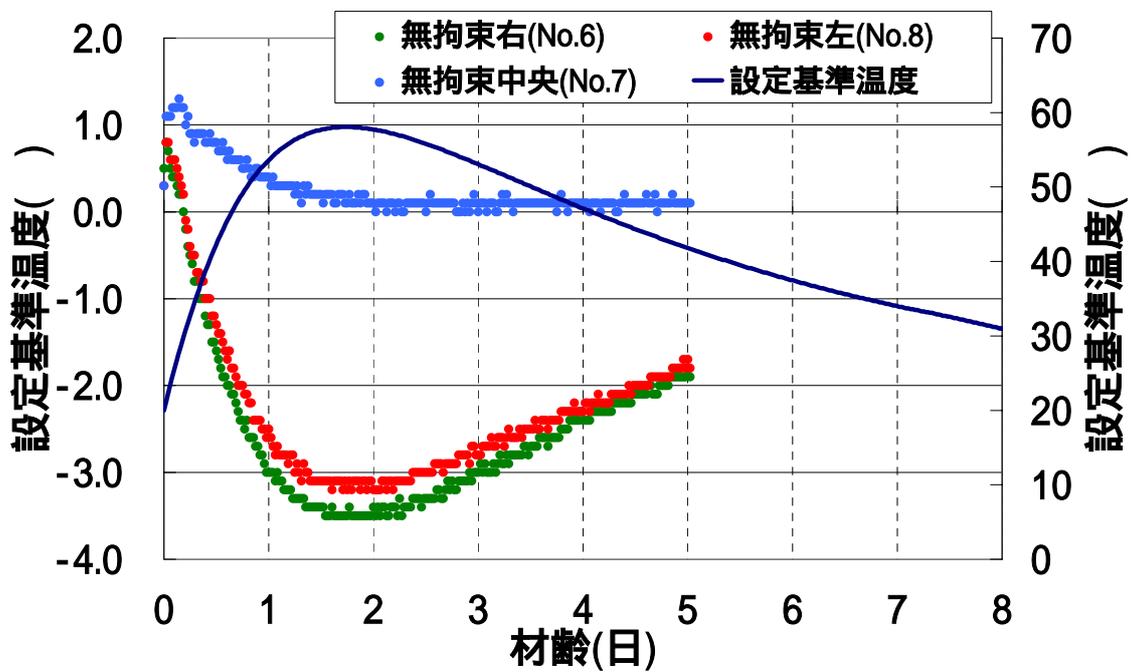


図 6.24 制御誤差-4(無拘束装置：拘束度 0.8)

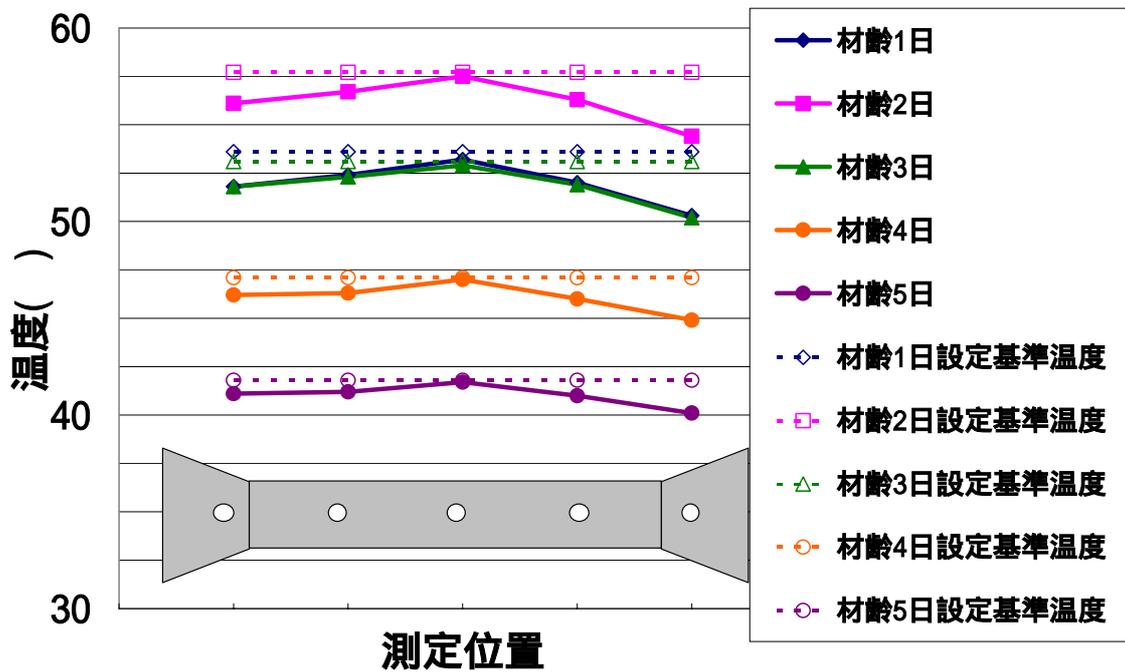


図 6.25 温度分布-4(拘束装置：拘束度 0.8)

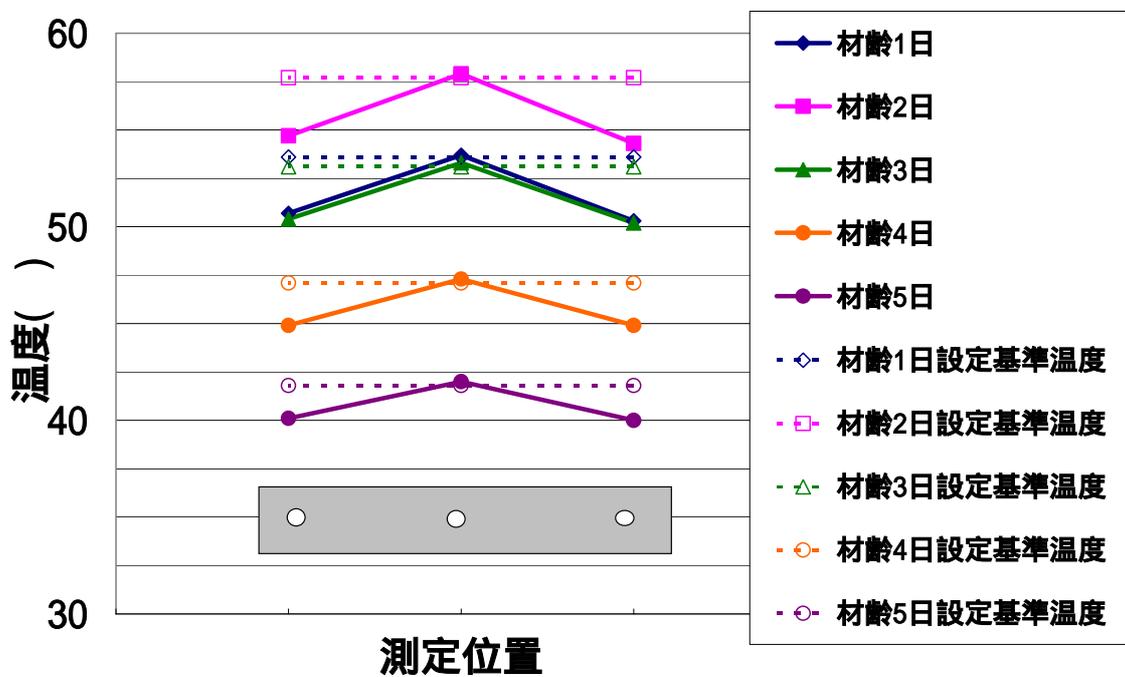


図 6.26 温度分布-4(無拘束装置：拘束度 0.8)

## 6.2 温度制御結果考察

図 6.4～図 6.26 より全体的に類似した結果となった。拘束供試体・無拘束供試体ともに中央では約 $\pm 1.0$  以内で納まる一方で、無拘束供試体右側で最大の約-4 の誤差が出る結果となり、参考とした装置より悪い結果である<sup>(6)</sup>。両供試体の中央点での温度を基準に温度制御を行っているため、中央点での誤差が無いことで基本的な温度制御はうまくできていると考えられるが、測点が中央から外側になるにつれ、また温度上昇に従って誤差が大きくなっていき、最大温度周辺で誤差も最大となり、温度降下に従って温度誤差も小さくなっている。各材齢ともに中央と左右端の温度差は約 2.5 となり、右端の方が拘束供試体・無拘束供試体ともに低い結果となった。温度差による温度応力を発生させないようにするためにはこの点に関して一層の改善が必要であるが、この温度差が生じてしまった原因として考えられることは、中央点のみの温度を一致させようとしているため、左右の部位に関して実際の温度を考慮していない、また温度制御用に使われている制御水の通水パイプからの熱の逸散、コンクリート供試体に通水パイプが通っている型枠までの距離の影響などが考えられる。

## 6.3 変位測定結果

図 6.27, 6.28 に示す各供試体変位測定位置による変位測定結果を図 6.29～図 6.32 に示す。なお、図中において正方向がコンクリートの収縮、負方向が膨張の挙動を示している。

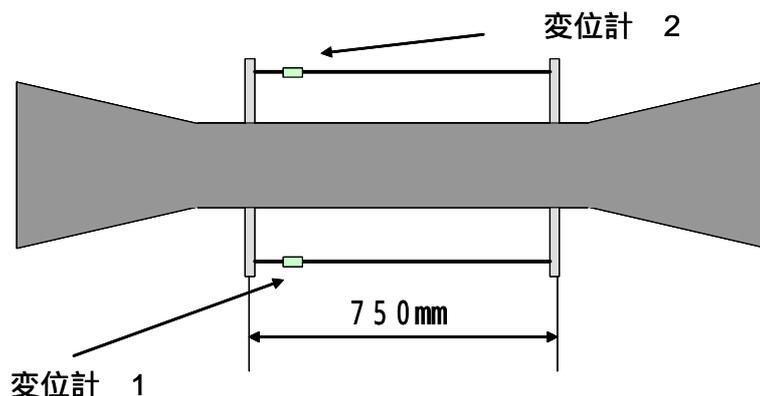


図 6.27 拘束供試体変位測定位置

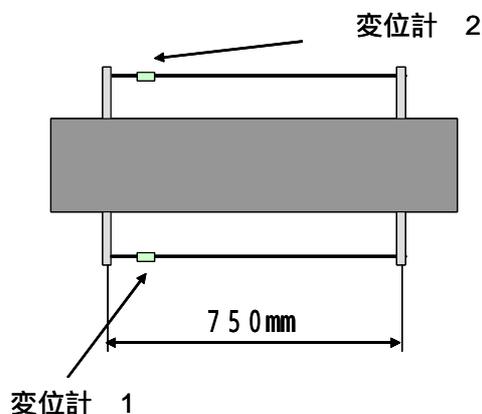


図 6.28 無拘束供試体変位測定位置

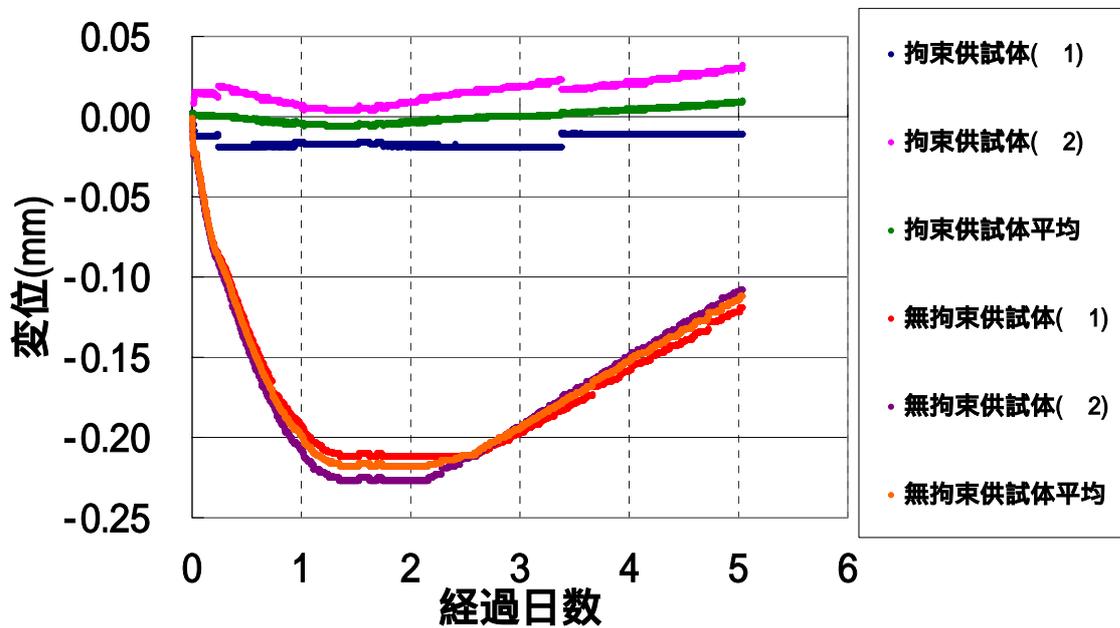


図 6.29 変位制御結果-1(拘束度 1.0)

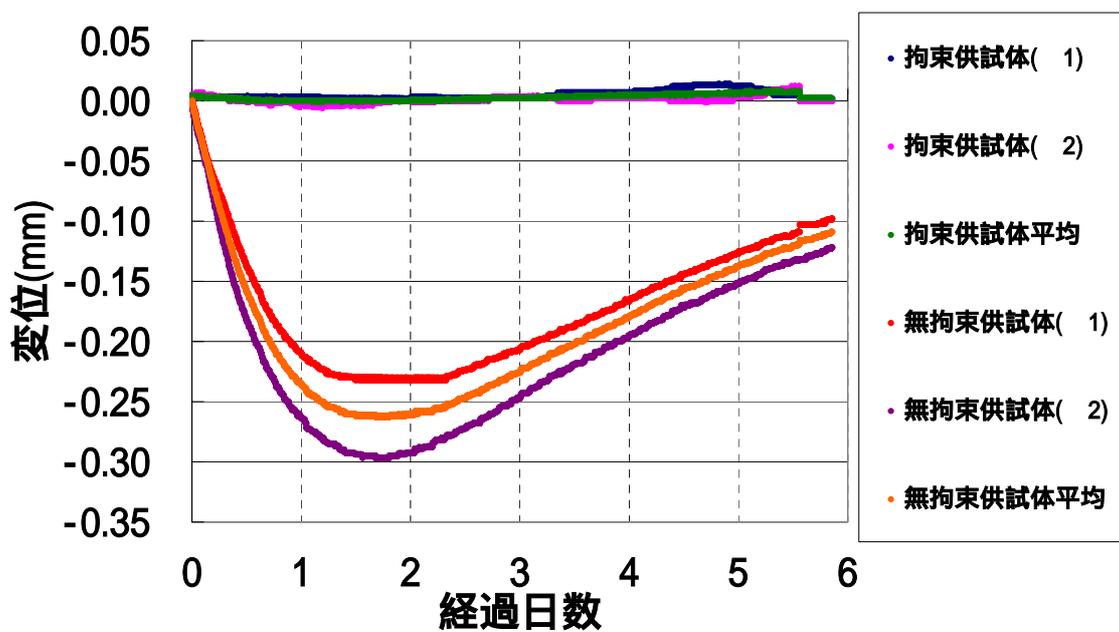


図 6.30 変位制御結果-2(拘束度 1.0)

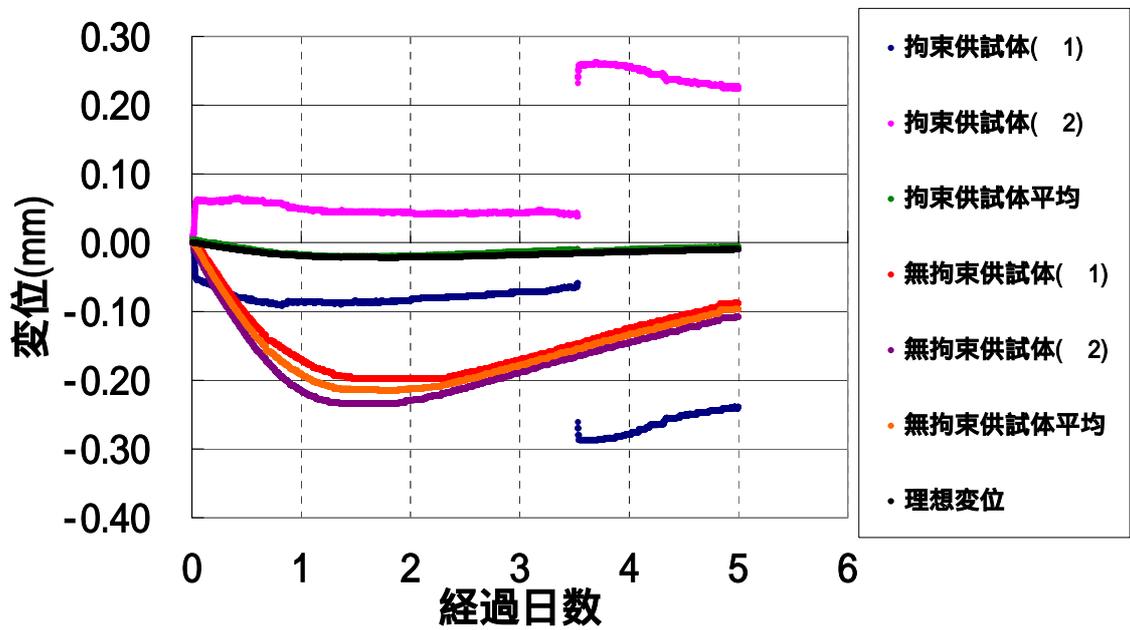


图 6.31 变位制御結果-3(拘束度 0.9)

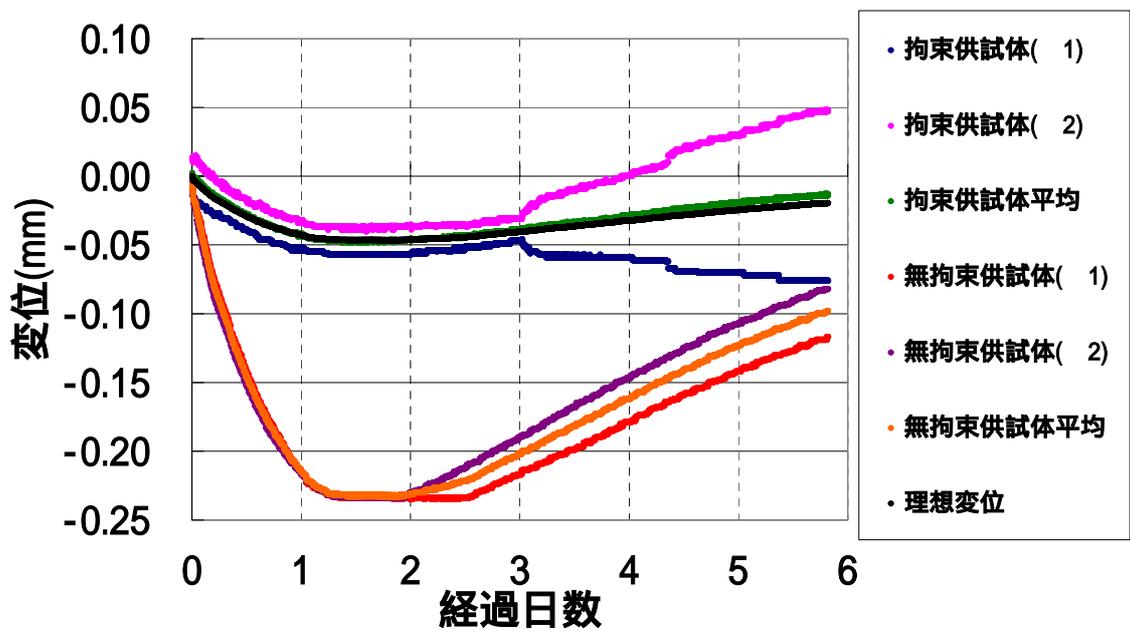


图 6.32 变位制御結果-4(拘束度 0.8)

#### 6.4 変位制御考察

図 6.29～6.32 より、拘束供試体及び無拘束供試体ともに左右の変位の平均に関しては概ねよい結果を得ることが出来ていると考えられるが、試験 2 の拘束供試体を除き両供試体ともに左右で大きく誤差が生じる結果となった。

拘束供試体の場合、試験 1 では拘束条件：拘束度 1.0 の完全拘束であるので理想は左右ともに変位が生じないことであるが、逆向きの変位が生じてしまっている。一方で左右の平均は 0 付近となり条件を満たしている。この結果より供試体左右での変位を 0 にするために若干の曲げ等の影響を受けていることも懸念される。この原因は供試体の変位測定の間と直行する向き(横幅)の設定・制御がうまく出来ていなかったことだと考えられ、その点を改善した同じく拘束条件：拘束度 1.0 の試験 2 では、ほぼ 0 付近の値となった。改善により、より良好な結果を得ることができるようになったと考えられる。拘束度 0.9 の試験 3 では、左右の変位の平均は理想変位とほぼ同程度の結果となったが、試験 1 と同じように左右で逆の変位が生じてしまっている。また材齢約 3.5 日で変位に極端なずれが生じてしまった。この原因は供試体のすべりが生じてしまった結果だと考えられる。一方でそのすべりが生じてしまった後も左右の変位の平均値は理想変位とほぼ同程度の結果となっており、変位制御は正常にできているものと思われる。拘束度 0.8 の試験 4 では試験 3 とは異なり変位の方向は同じ向きではあるが誤差が生じてしまっている。しかし材齢約 3 日で試験 3 と同様に逆向きの変位が生じはじめてしまった。一方で変位の左右の平均は試験終了時までほぼ理想変位と同じ値をとる結果となった。

無拘束供試体の場合、試験 1 では温度上昇につれ膨張していき、温度降下につれ収縮しているのがわかる。膨張による変位が最大値付近で、左右で若干の誤差が生じているがほぼ左右が同一の変位となる結果となった。試験 2 では試験 1 と類似した変位推移を示しているものの温度上昇時から左右で変位に誤差が生じはじめ、最大変位点付近で最大の誤差となり、その後温度降下とともに誤差が縮小していく結果となった。この原因は、変位測定用の埋め込み治具が、変位測定の向きの線と正確に直角になっていなかったことなどが考えられ、改善が必要である。試験 3 では温度上昇時に誤差が生じ始め、試験 2 と同じく最大変位点付近で最大の誤差が生じてその後、温度降下時に誤差が縮小し材齢約 3 日あたりより誤差は解消される結果となった。試験 4 では温度上昇時はほぼ同一の変位となったが温度降下時に誤差が生じてしまう結果となった。

試験の中心となる拘束供試体に関して、左右の変位の若干の誤差が生じてしまっているが平均値がほぼ条件通りとなったことにより、以上の結果を用いて以降の考察を進めることにする。

## 6.5 熱膨張係数

図 6.33 ~ 6.36 に 6.1 温度制御結果中の無拘束供試体の温度制御結果及び 6.3 変位制御結果から算出した試験で使用したコンクリート供試体のひずみと温度変化量の関係を示す。

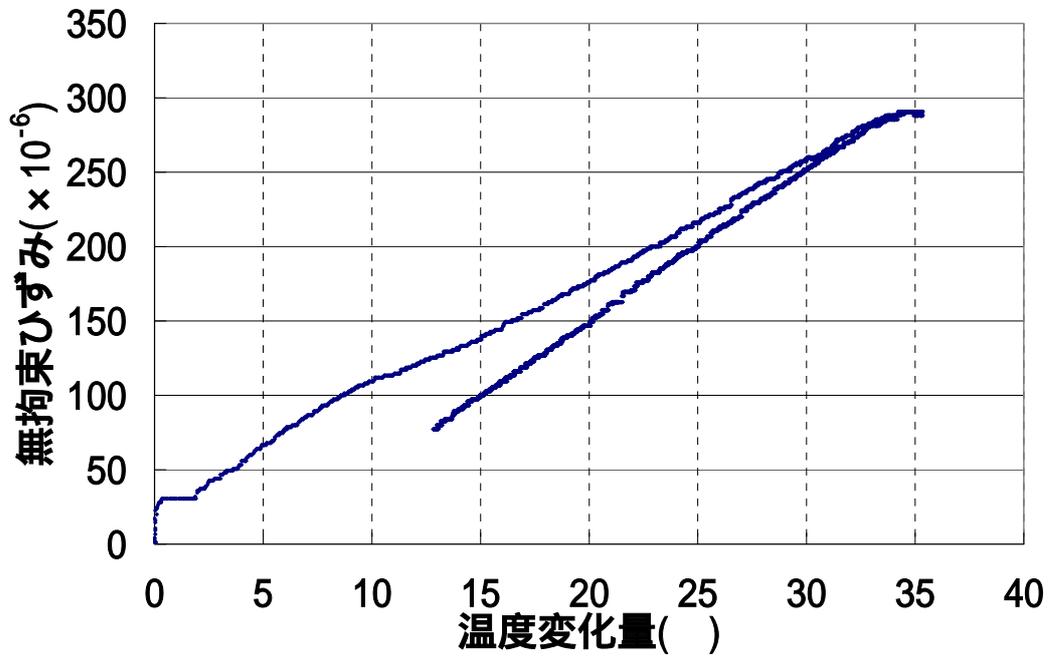


図 6.33 温度変化量と無拘束ひずみの関係-1

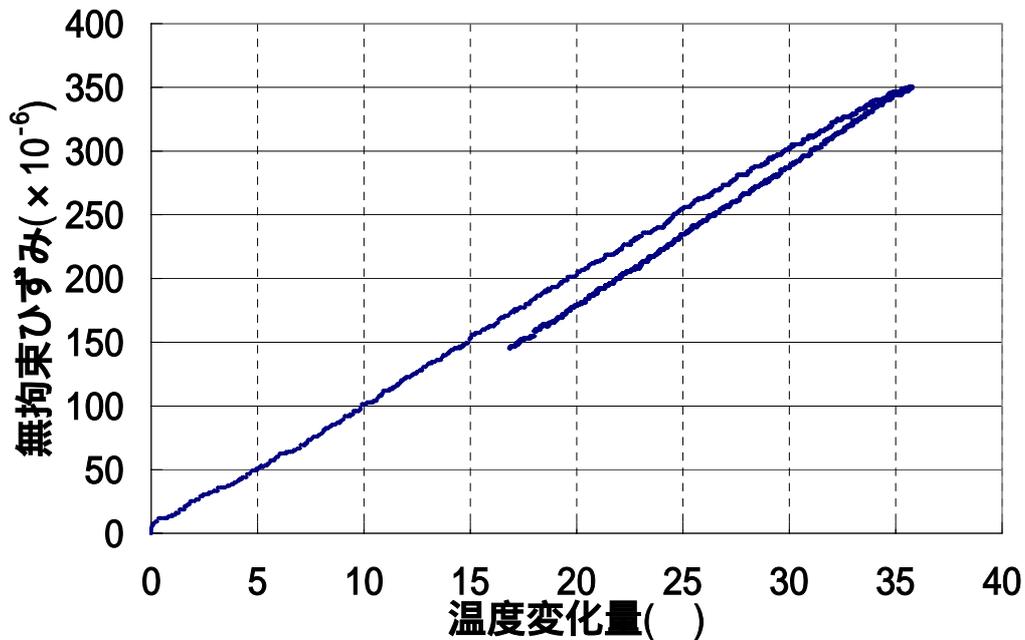


図 6.34 温度変化量と無拘束ひずみの関係-2

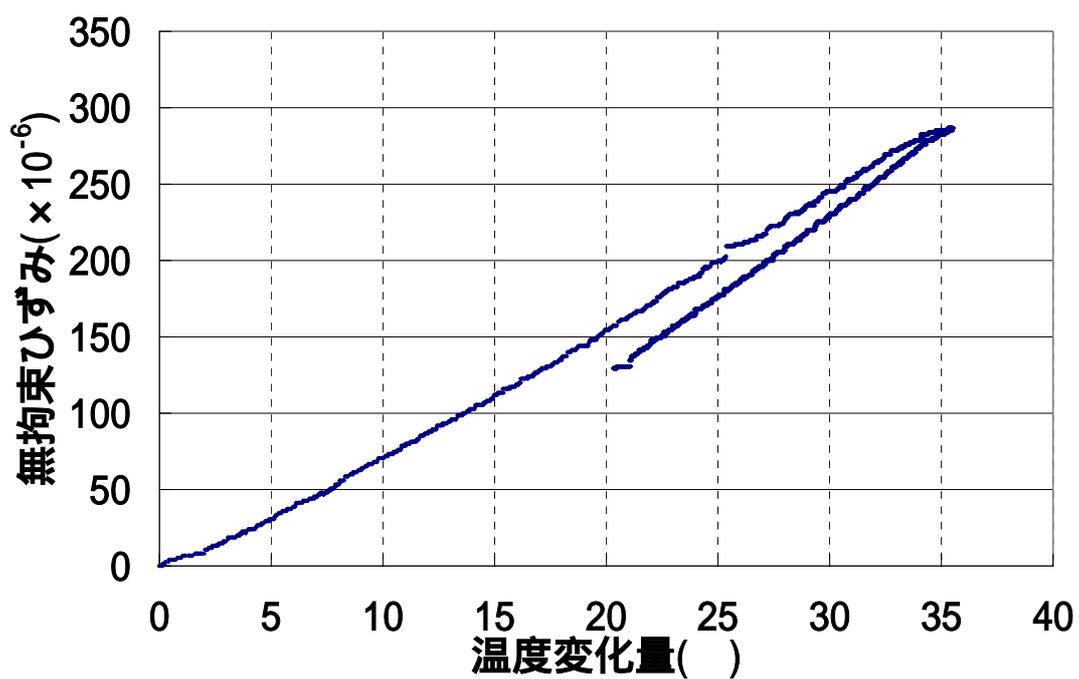


図 6.35 温度変化量と無拘束ひずみの関係-3

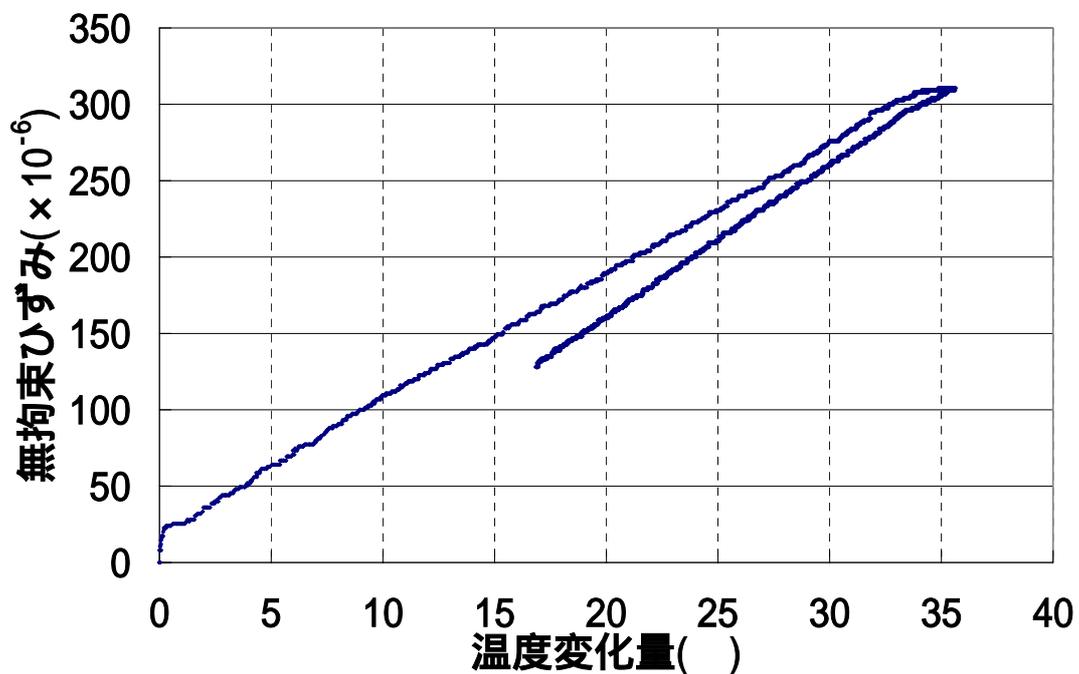


図 6.36 温度変化量と無拘束ひずみの関係-4

また図 6.33 ~ 6.36 の結果より算出した試験コンクリート供試体の熱膨張係数を図 6-37 , 6.38 に示す .

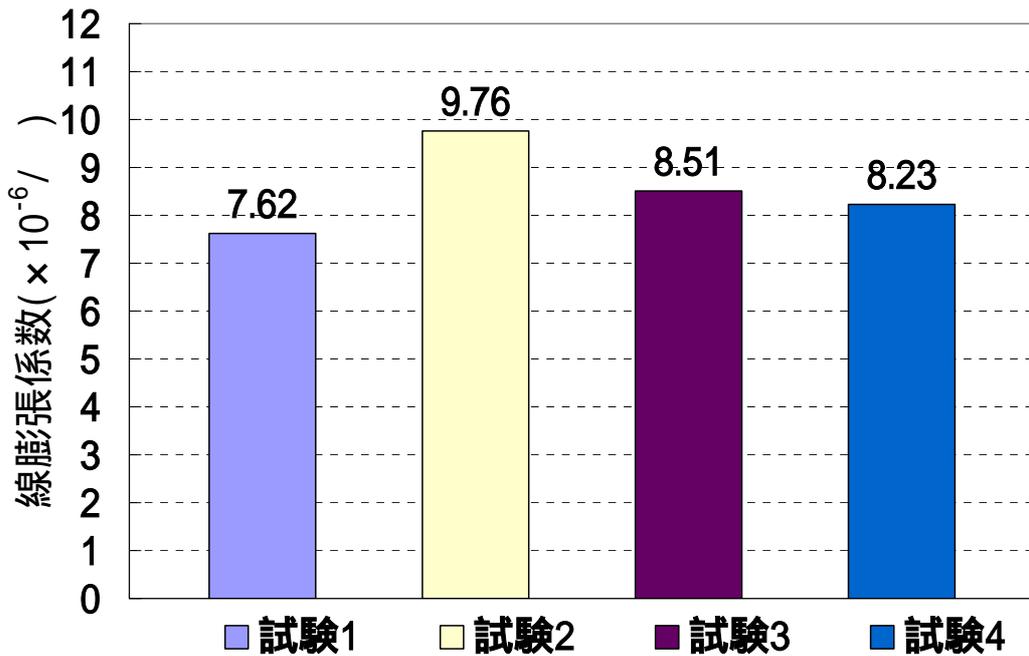


図 6.37 熱膨張係数(膨張時)

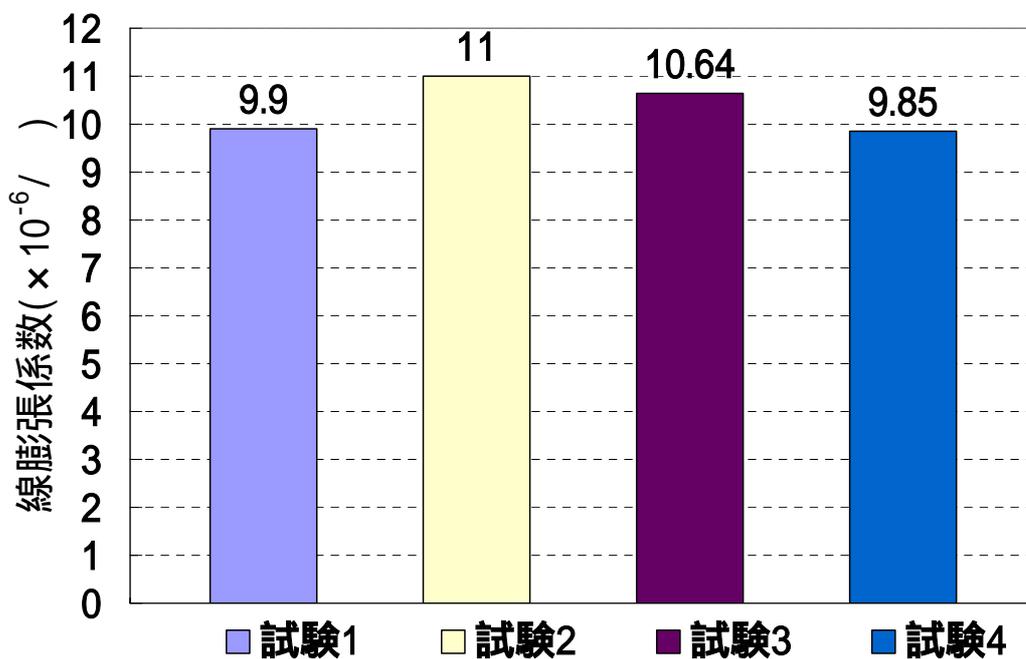


図 6.38 熱膨張係数(収縮時)

図 6.37 はコンクリート膨張時の温度増加量あたりの膨張量を熱膨張係数として示したものである。図 6.38 はコンクリート収縮時の温度低下量あたりの収縮量を熱膨張係数として示したものである。図 6.37 に示されたとおり、膨張時熱膨張係数は最小値が試験 1 の  $7.62 \times 10^{-6}/$  ，最大値が試験 2 の  $9.76 \times 10^{-6}/$  である。また、図 6.38 に示されたとおり、収縮時熱膨張係数は

最小値が試験 4 の  $9.85 \times 10^{-6}/$  ，最大値が試験 2 の  $11.00 \times 10^{-6}/$  である．本研究で用いたコンクリートは，概ね一定範囲の熱膨張係数を持つことを示している．したがって，各試験ともにコンクリートの膨張・収縮は問題無く生じており，試験結果を比較することが可能であると考えられる．

また一般的なコンクリートの熱膨張係数は  $7.0 \sim 13.0 \times 10^{-6}/$  と言われていて，土木学会コンクリート標準示方書では  $10.0 \times 10^{-6}/$  を用いて良いことになっている．なお，本試験で用いたコンクリートは土木学会コンクリート標準示方書<sup>(11)</sup>の定めた熱膨張係数の値より，膨張時熱膨張係数は若干下回る結果であった．

## 6.6 応力測定結果

図 6.39～6.42 に応力測定結果を示す．

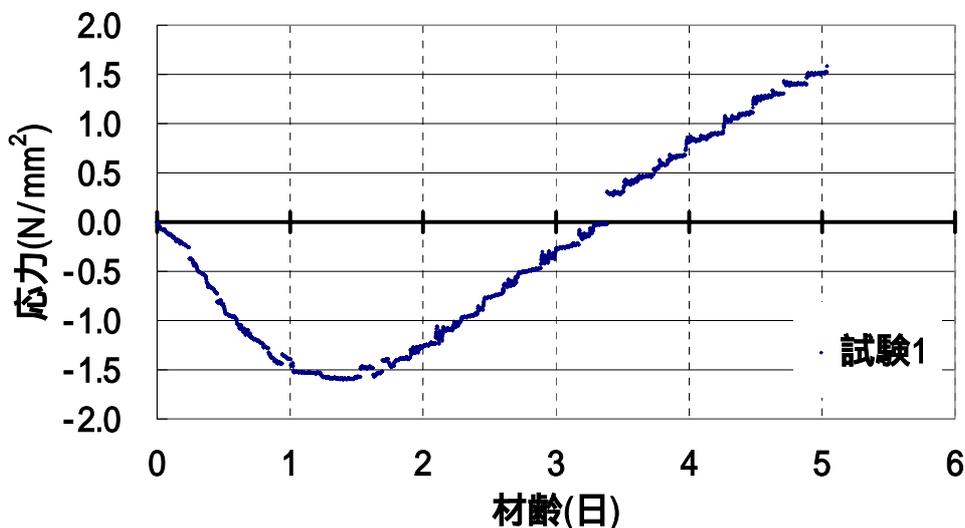


図 6.39 応力測定結果-1(拘束度 1.0)

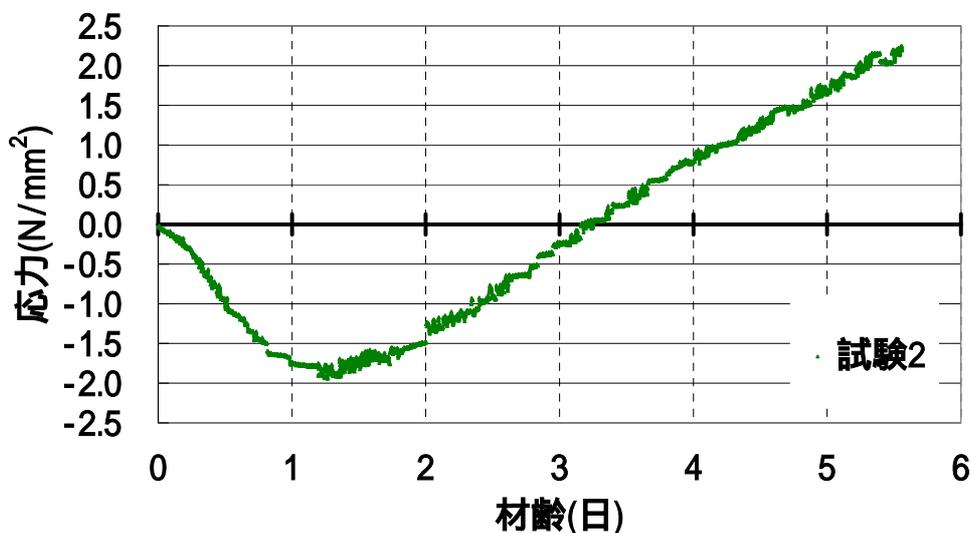


図 6.40 応力測定結果-2(拘束度 1.0)

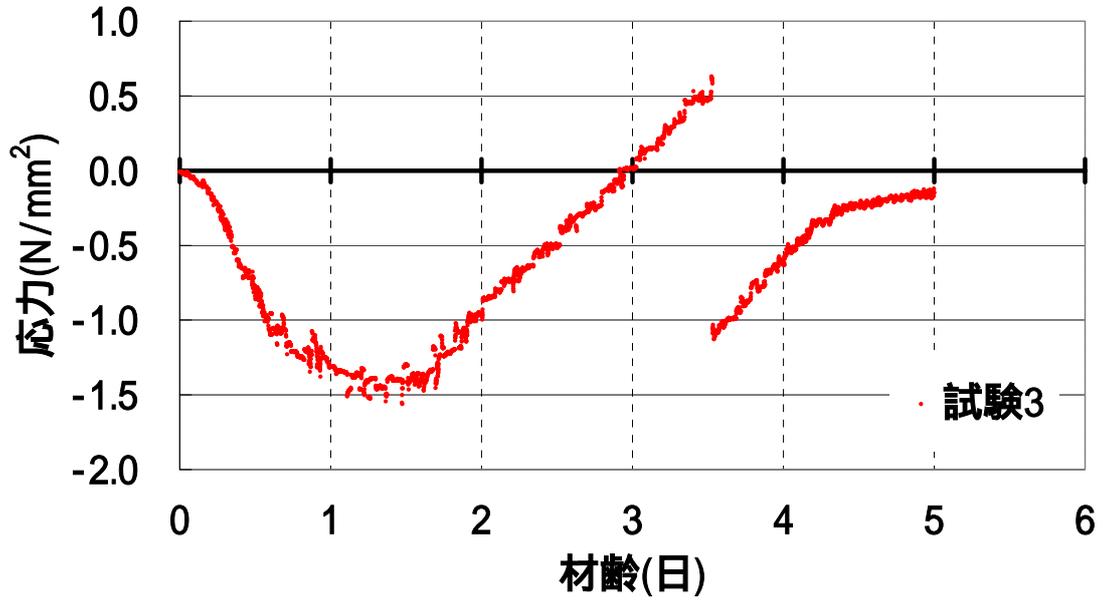


図 6.41 応力測定結果-3(拘束度 0.9)

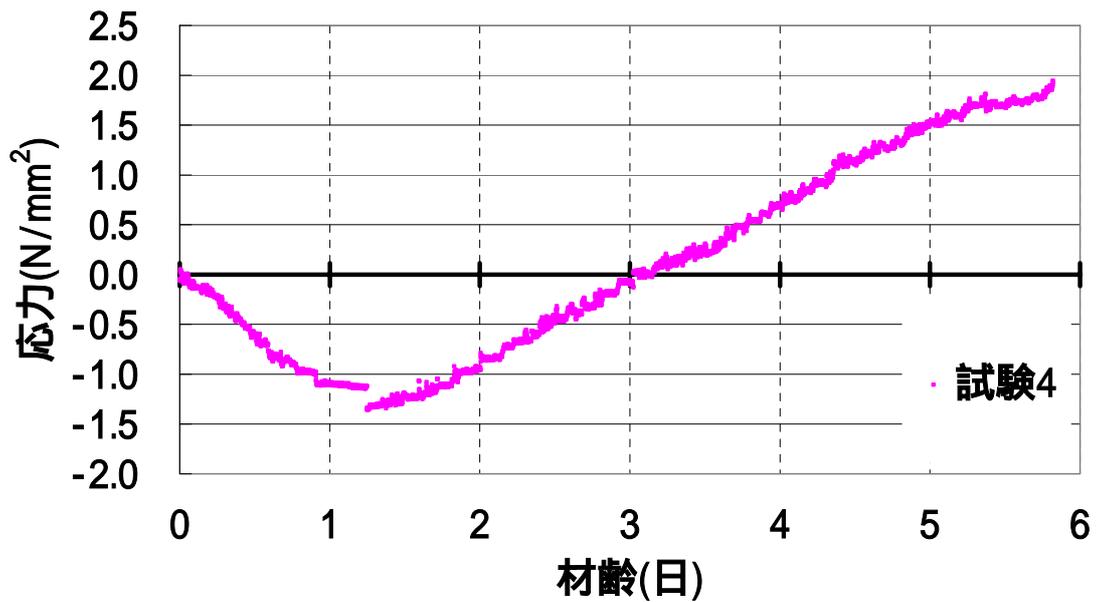


図 6.42 応力測定結果-4(拘束度 0.8)

ここで全試験結果を図 6.43 に示す。

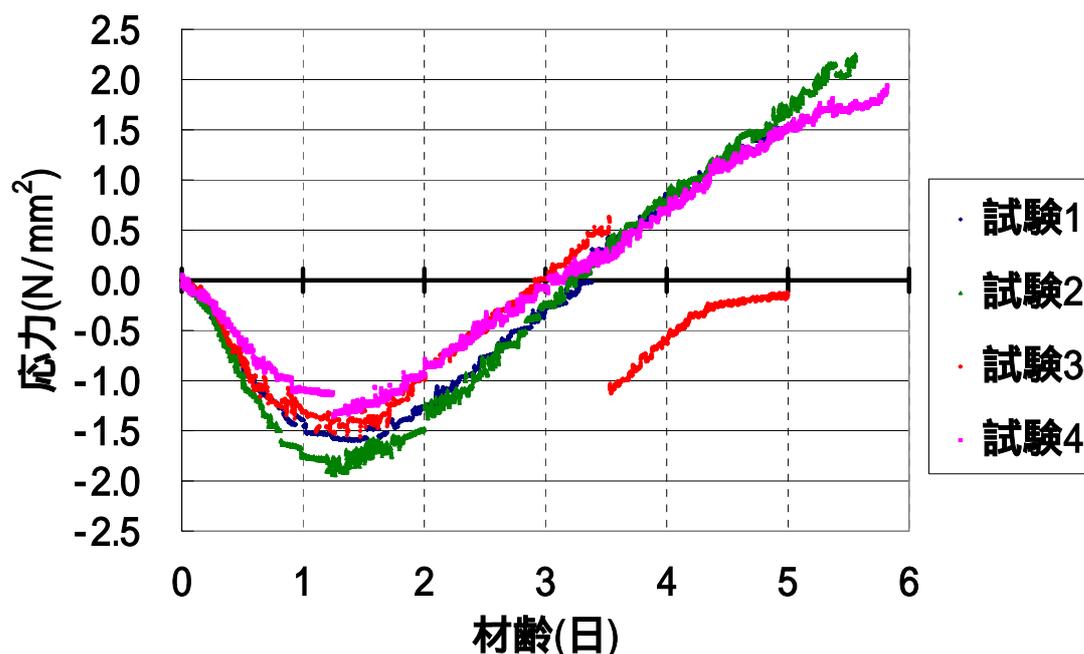


図 6.43 応力測定全結果

各拘束度ともに材齢約 5～5.5 日でひび割れが生じ、ひび割れ発生時の応力は拘束度 0.9 を除き約 1.5～2.0N/mm<sup>2</sup>となった。一方で圧縮応力域では、各拘束度ともに材齢約 1～1.5 日まで上昇し、拘束度が大きいほどに最大応力が大きくなる結果となった。以上の点から本研究で実施した拘束度の差異の範囲では、測定開始からの圧縮応力から引張応力へ移行し進展する状況は各拘束度で差異は小さく類似しており、最大圧縮応力に差が生じるものの、それがコンクリートのひび割れに与える影響は小さいと考えられる。一方で拘束度 0.9 に関しては、圧縮応力域については正常に測定できているが、引張領域では一度応力が引張領域側から圧縮側に振れ、再び引張側に進展していることから、変位測定結果でも述べたように供試体にすべりが発生してしまったと考えられる。

## 第7章 直接引張強度試験結果

### 7.1 ひずみ測定結果

図 7.1 に円柱型直接引張強度試験時・角柱型直接引張強度試験時の供試体両側面に貼り付けたひずみゲージによるひずみ測定結果一例を示す．両試験ともにほぼ両側面間の差異は無く，曲げの影響はほとんど受けていないと考えられる．

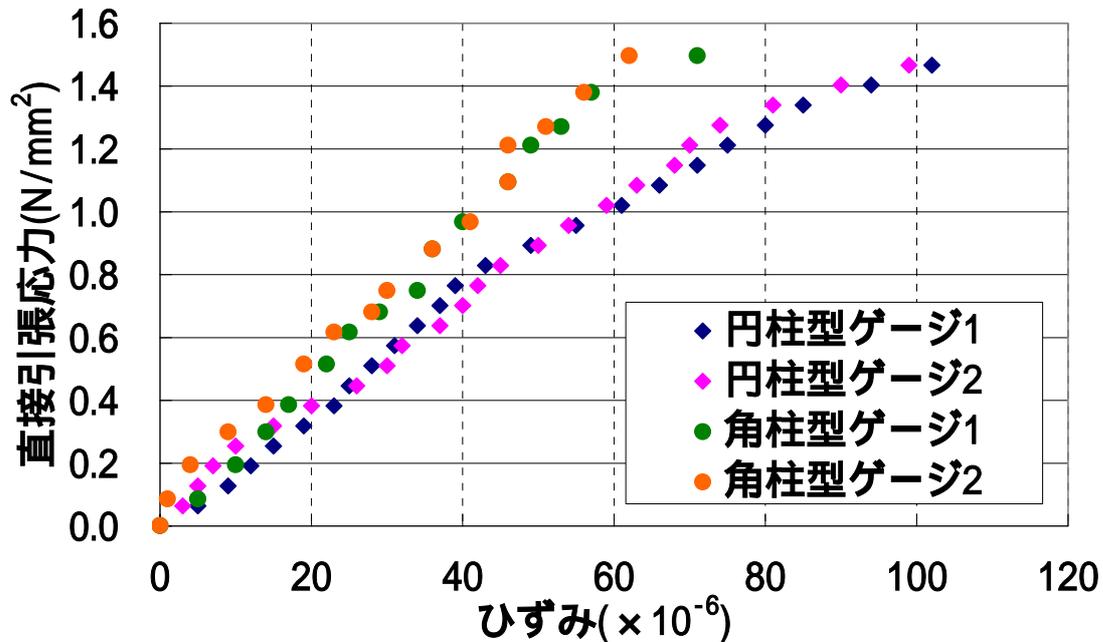


図 7.1 ひずみ測定結果一例

また図 7.2～7.5 に実際の供試体破断面及び破断位置の一例を示す．円柱型直接引張供試体は，ほぼ中央で破断したものである．一方で供試体から治具が剥離してしまったり，供試体中央部ではなく接着面付近で破断したりする場合もあった．角柱型直接引張供試体では，多くの供試体は試験部位 200mm の間，かつ中央付近で破断した．一方で供試体の試験部位中央付近ではなく断面が変化し始める付近で破断することもあった．また破断面を見てみると両供試体ともに粗骨材は均等に分布している．

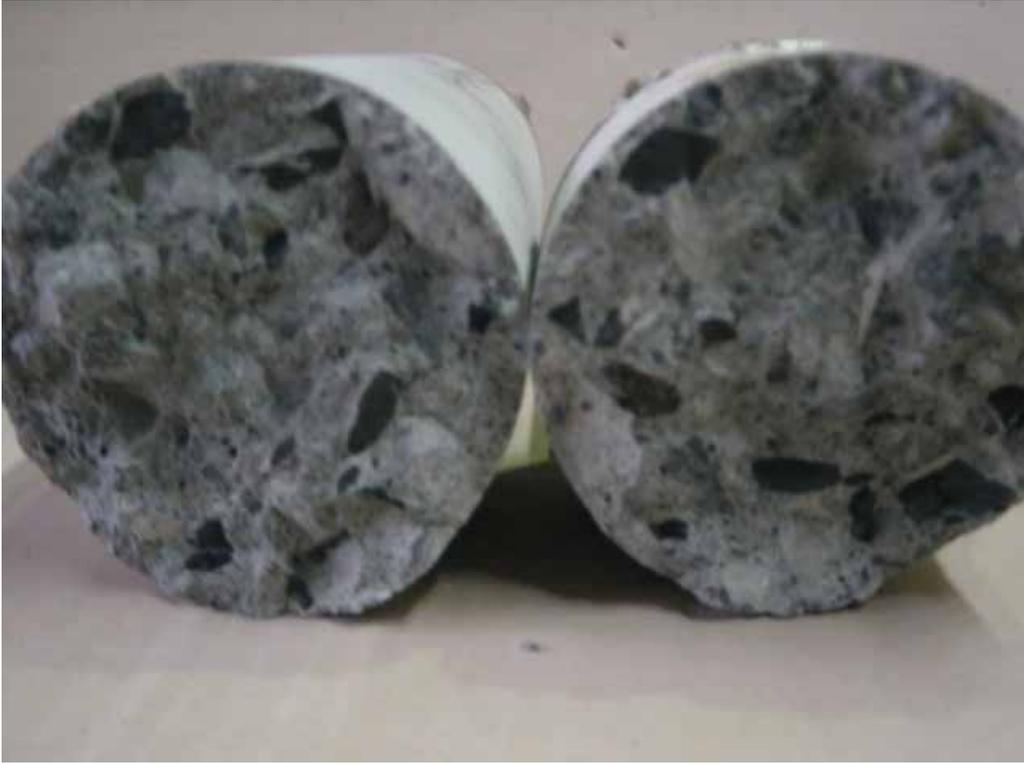


图 7.2 圆柱型直接引張供試体破断面



图 7.3 圆柱型直接引張供試体破断位置



図 7.4 角柱型直接引張供試体破断面



図 7.5 角柱型直接引張供試体破断位置

図 7.6 , 7.7 に両試験両養生の全ケースのひずみ測定結果の一例を示す . また比較のため図 7.8 ~ 7.10 に両試験両養生のセメント別の一例を示す .

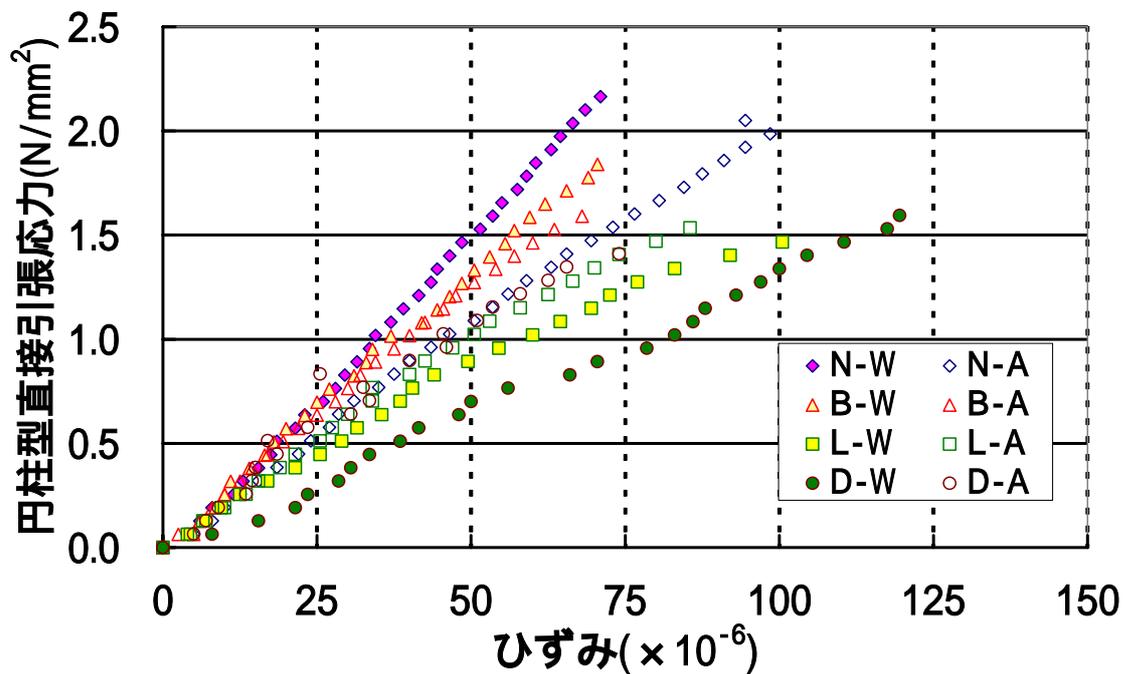


図 7.6 円柱型直接引張強度試験-ひずみ測定結果

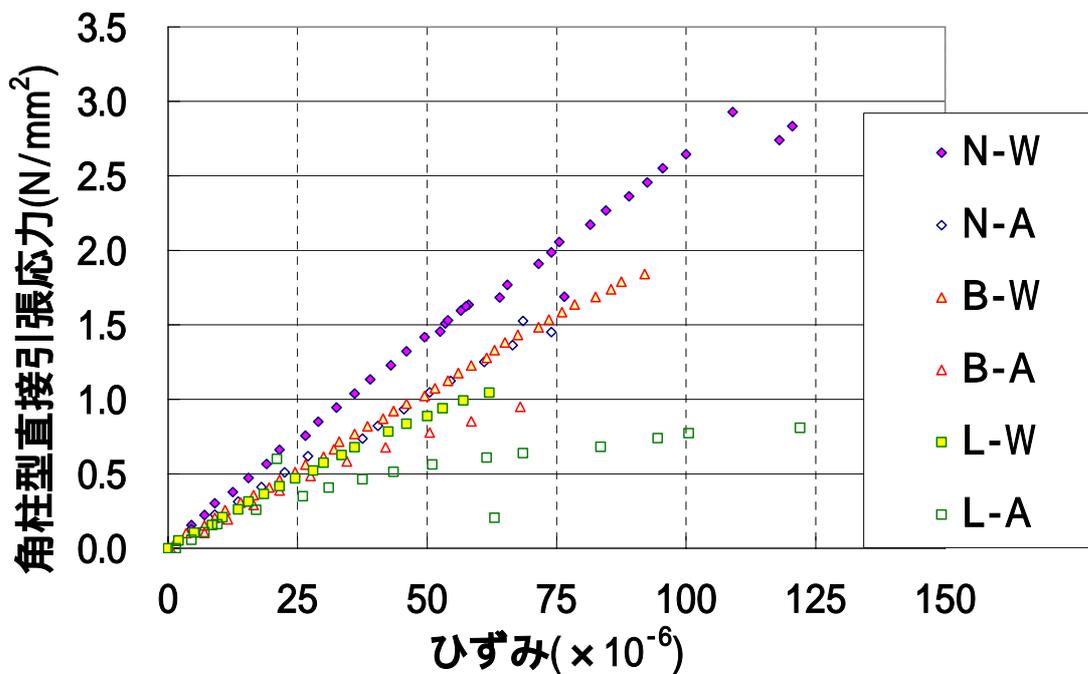


図 7.7 角柱型直接引張強度試験-ひずみ測定結果

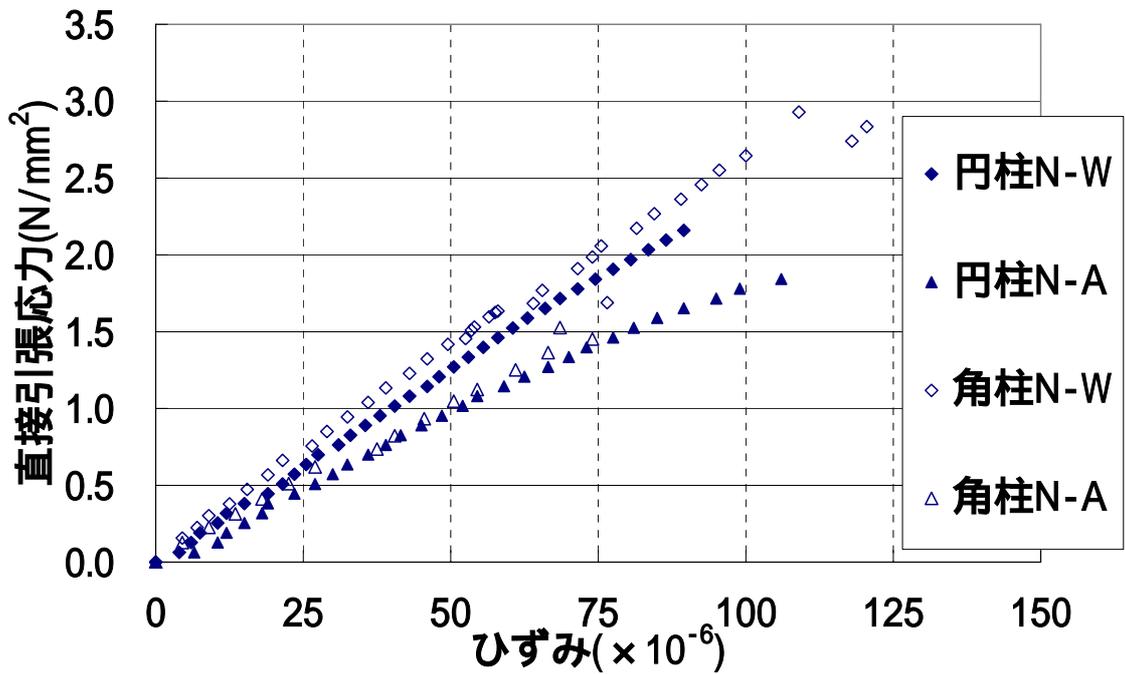


図 7.8 直接引張強度試験-ひずみ測定結果-普通セメント

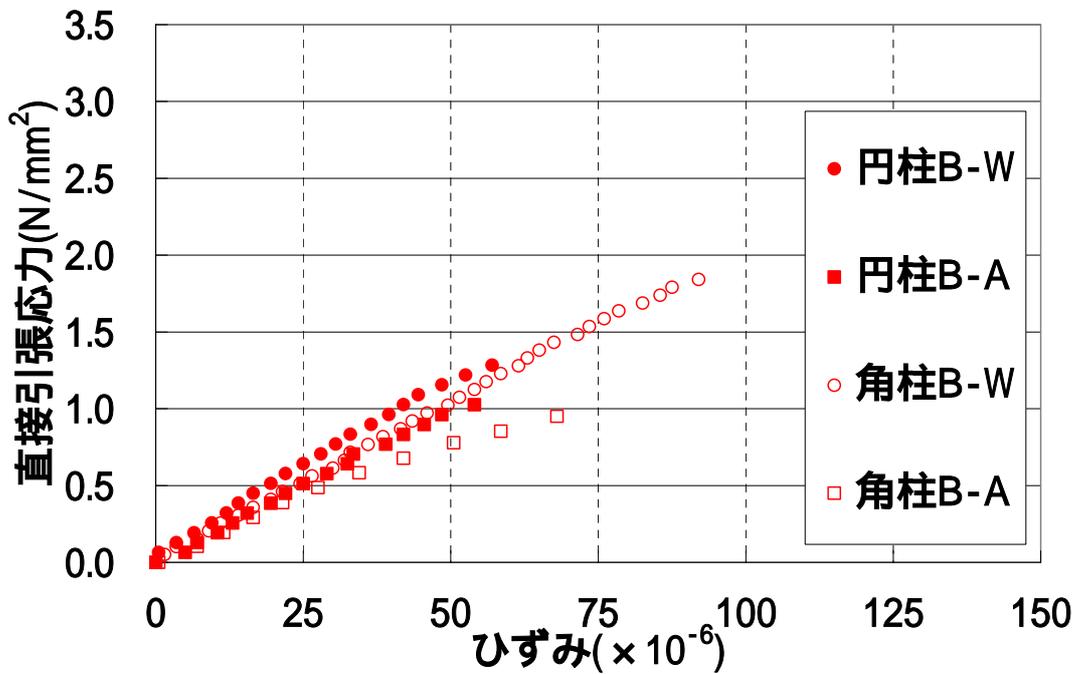


図 7.9 直接引張強度試験-ひずみ測定結果-高炉セメント B 種

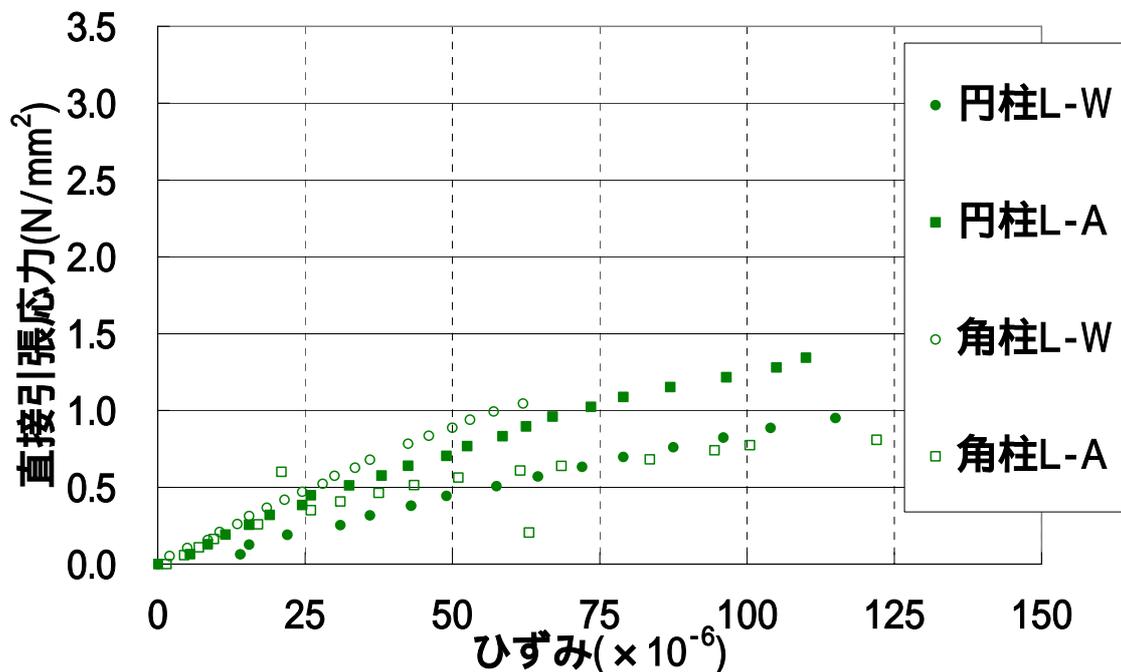


図 7.10 直接引張強度試験-ひずみ測定結果-低収縮高炉セメント B 種

全てのケースで供試体破断までひずみと引張応力の関係はほぼ線形に近い結果となった。セメント別に見てみると、普通ポルトランドセメントの場合、試験の違いに関係なく同養生方法ならば、ほぼ同じ測定結果となった。また両試験ともに水中養生の供試体の方が同ひずみに対する応力は大きい値という結果になった。高炉セメント B 種の場合、普通ポルトランドセメントよりも両試験・両養生ともに特にひずみが小さい時点では類似した値をとる結果となった。しかし気中養生で比較をしてみると 25  $\mu$  ひずみ付近から差異が生じる結果となった。また両試験ともに水中養生の供試体の方が同ひずみに対する応力は大きい値という、普通ポルトランドセメントと同様の結果となった。低収縮高炉セメント B 種は、前述の 2 種類のセメントよりもばらつきが目立つ。また円柱型直接引張供試体の場合、気中養生の方が同ひずみに対する応力が大きい結果となった。ばらつきが目立つ要因は、低収縮高炉セメント B 種が、他の 2 種類のセメントに比べ打込み後の若材齢の強度が安定しないためだと考えられる。そのためひずみを測定するだけでも非常に難しい状況であった。

## 7.2 円柱型直接引張強度試験

### 7.2.1 円柱型直接引張強度試験結果

図 7.11 ~ 7.15 に円柱型直接引張強度試験結果を示す。

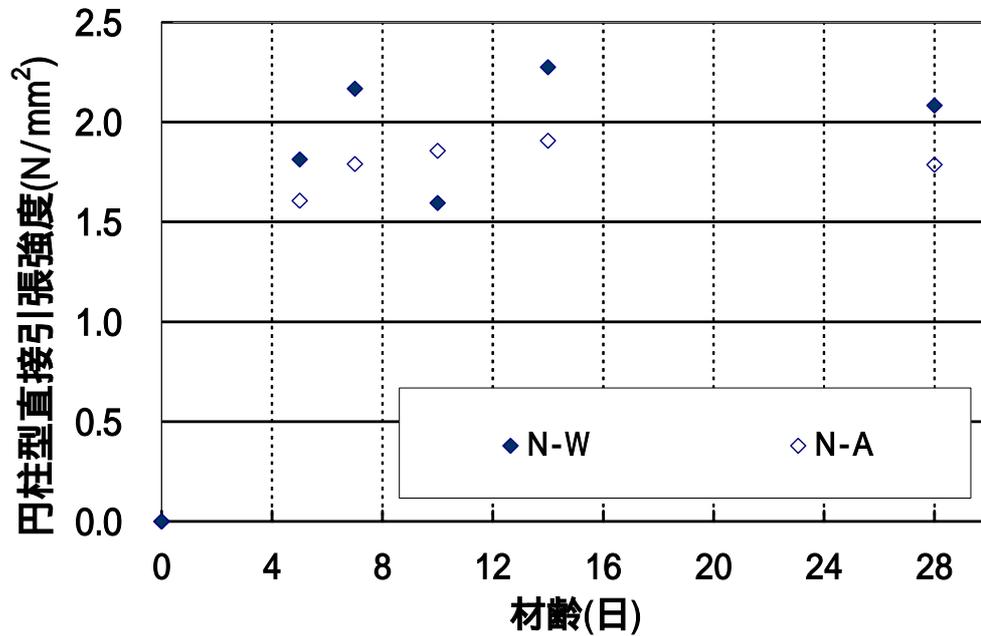


図 7.11 円柱直接引張強度試験結果-普通ポルトランドセメント

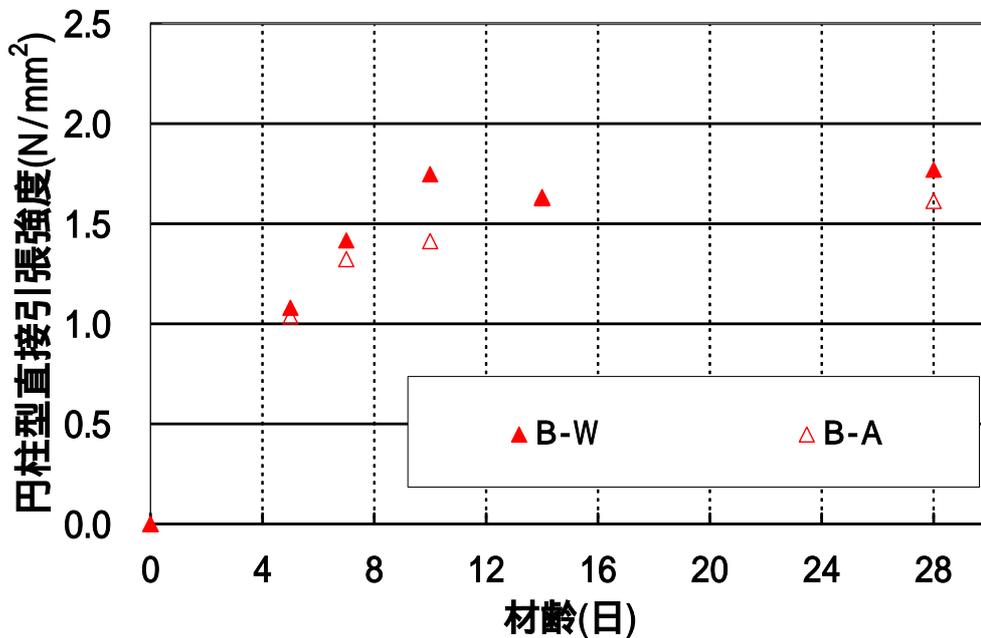


図 7.12 円柱型直接引張強度試験結果-高炉セメント B 種

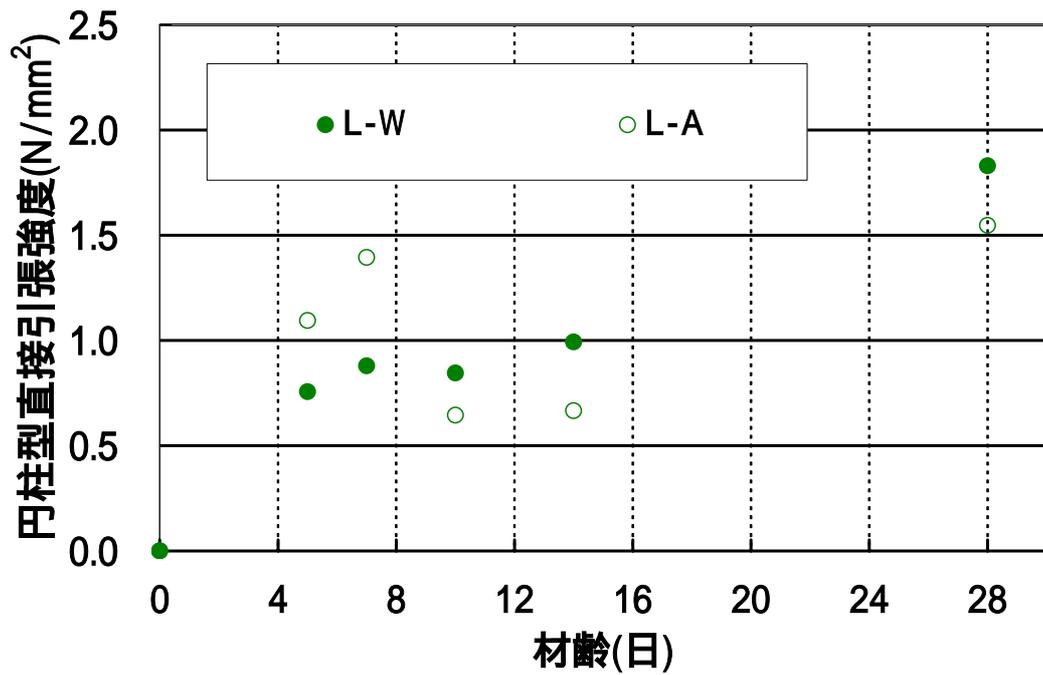


図 7.13 円柱型直接引張強度試験結果-低収縮高炉セメント B 種

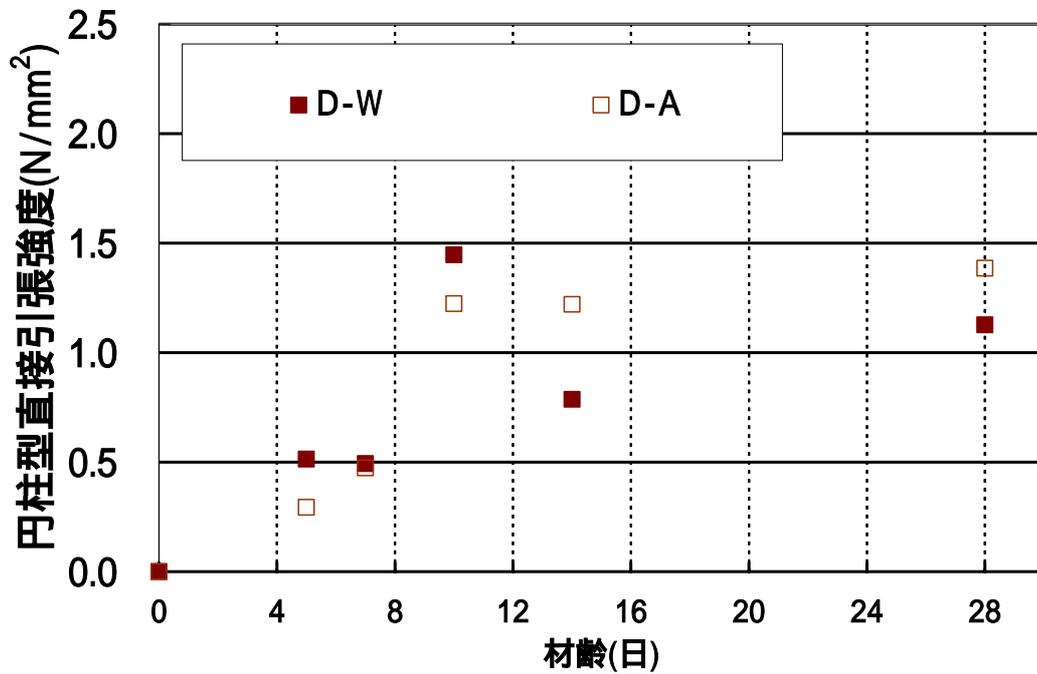


図 7.14 円柱型直接引張強度試験-ダム用高炉セメント B 種

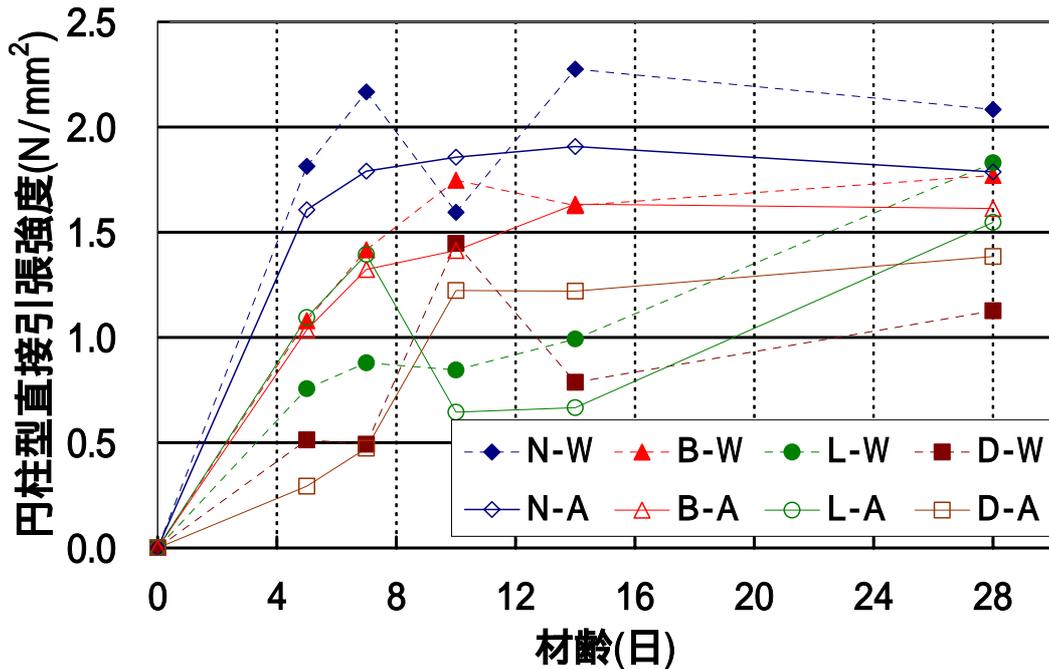


図 7.15 円柱型直接引張強度試験結果一覧

図 7.11 より普通ポルトランドセメントの場合，円柱直接引張強度に関して，水中養生と気中養生では各試験材齢で約 0.2～0.5N/mm<sup>2</sup>の差異があり，材齢 10 日を除き一般的に言われているように水中養生の方が大きな強度となり<sup>(12)</sup>，養生方法の違いによる差異は大きい結果となった。また，試験期間内に限ると若材齢の強度発現は大きいものの，材齢 5 日以降の大きな強度発現の進展は見られなかった。

図 7.12 より高炉セメント B 種の場合，普通ポルトランドセメントに比べ，両養生方法とも材齢 7 日までの強度発現が小さいものの，材齢 10 日まで強度増進がみられた。ただし材齢 10 日以降の強度増進は小さく，養生方法による強度の差異は本試験ではみられなかった。

図 7.13 より低収縮高炉セメント B 種の場合，材齢 14 日までの強度発現は上述の 2 種類のセメントよりも小さい結果となった。ただし，材齢 14 日以降の強度の増進がみられ，材齢 28 日では両養生方法ともに高炉セメント B 種に近い強度となった。また材齢 7 日までの強度は気中養生の方が大きな値となったが，それ以降水中養生の方が大きな値となる結果となった。

図 7.14 よりダム用高炉セメント B 種の場合，材齢 7 日までは上述のセメント 3 種類と比べ強度が小さく，その後材齢 14 日までの強度発現が見られ低収縮高炉セメント B 種の強度を超える材齢もあるものの，材齢 28 日では両養生方法ともに本試験で用いた 4 種類のセメントの中では一番小さい強度となった。

### 7.2.2 割裂引張強度試験結果

円柱型直接引張強度試験と平行して行った割裂引張強度試験の結果を図 7.16 ~ 7.20 に示す。

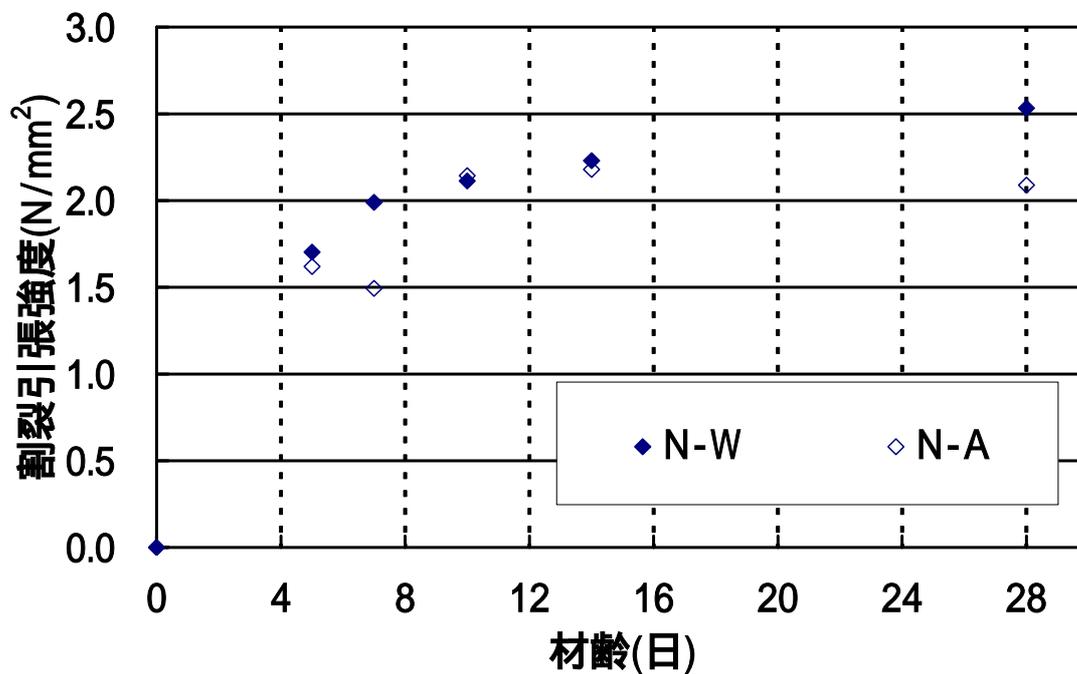


図 7.16 割裂引張強度試験結果-普通ポルトランドセメント

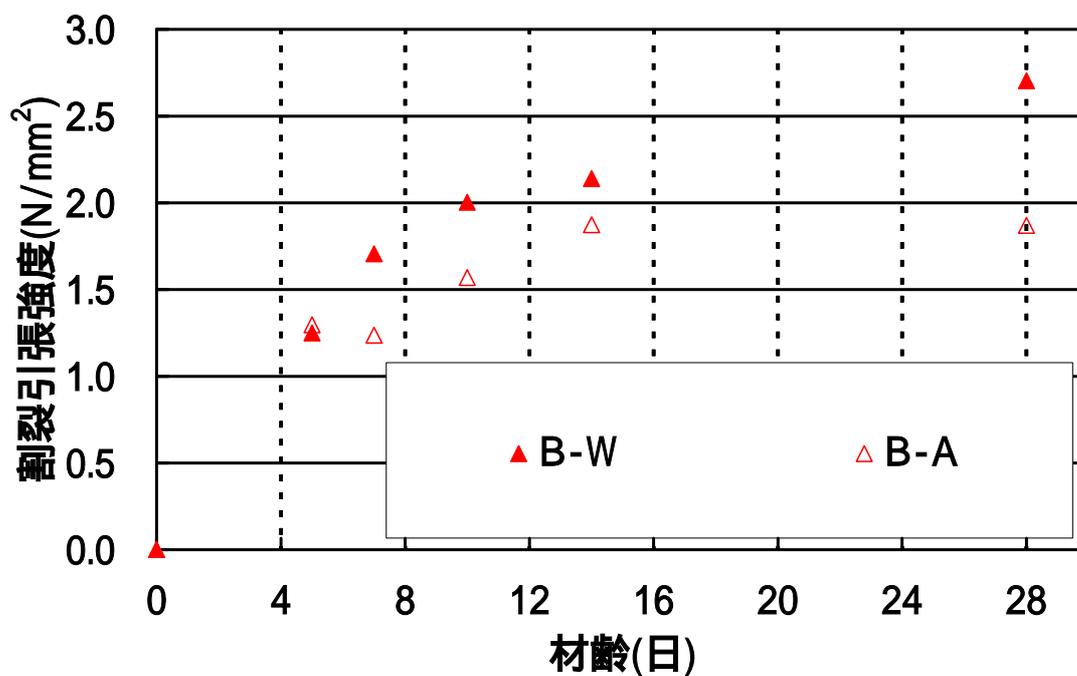


図 7.17 割裂引張強度試験結果-高炉セメント B 種

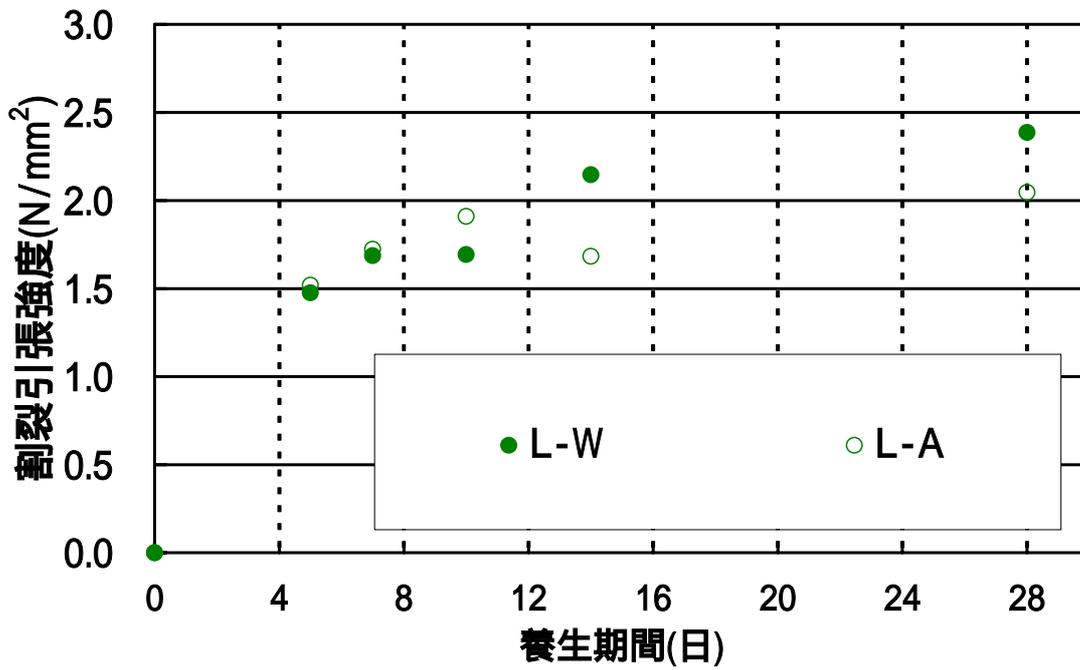


図 7.18 割裂引張強度試験結果-低収縮高炉セメント B 種

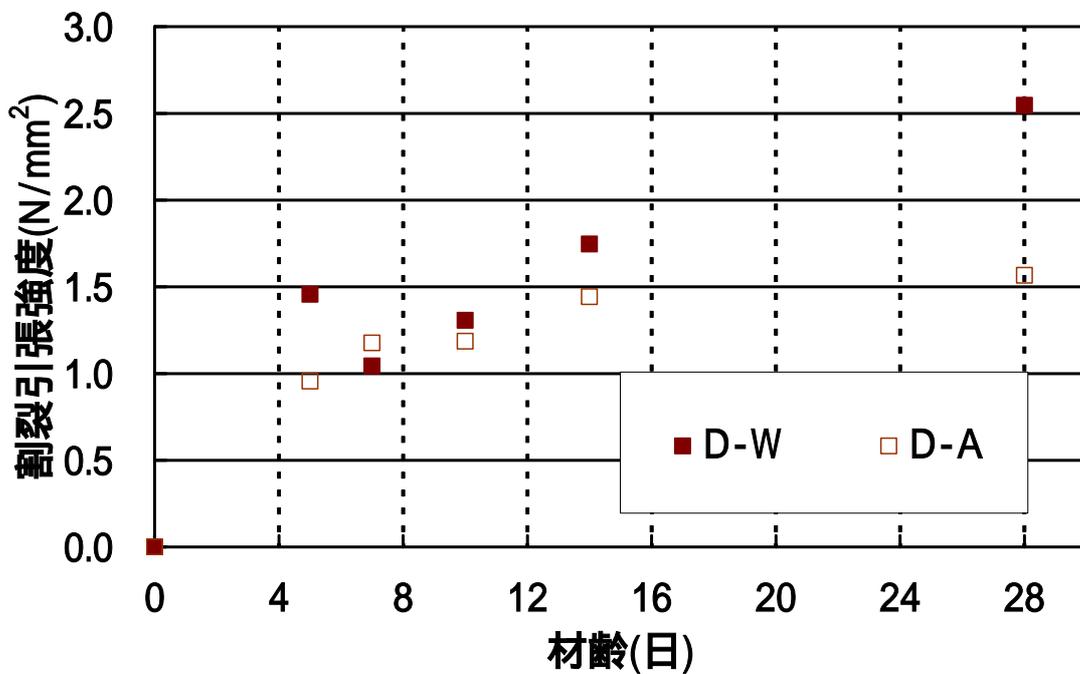


図 7.19 割裂引張強度試験結果-ダム用高炉セメント B 種

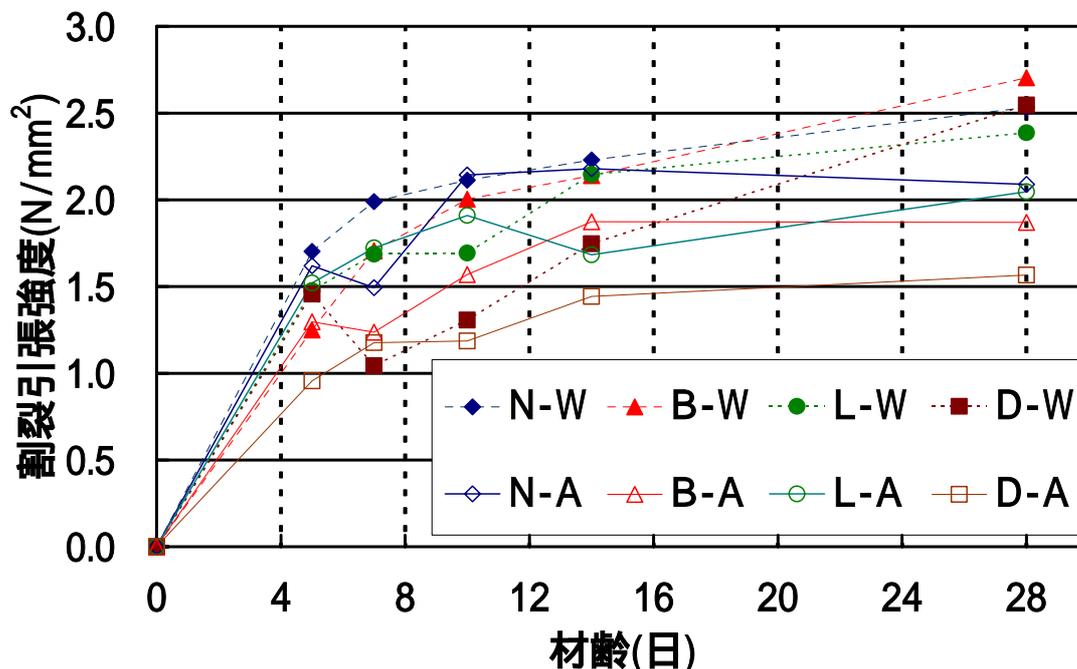


図 7.20 割裂引張強度試験結果一覧

図 7.16 より普通ポルトランドセメントの場合，両養生方法とも材齢 5 日までの強度増進が大きく，その後材齢 14 日までの強度増進は円柱型直接引張強度と同様に緩やかであった．また材齢 14 日以降の大きな強度増進はみられなかった．また，養生方法での強度の差異は材齢 7，28 日に見られるものの，比較的小さいものであるといえる．

図 7.17 より高炉セメント B 種の場合，普通ポルトランドセメントと同様に，材齢 5 日までの強度増進が大きい結果となった．その後，両養生方法とも養生期間が経過するに従い強度は増進するが，材齢 7 日以降で水中養生と気中養生の強度に差異が生じる結果となった．また，水中養生は，材齢 14 日以降も強度の発現がみられ材齢 28 日では気中養生の約 1.5 倍の強度となった．

図 7.18 より低収縮高炉セメント B 種の場合，材齢 7 日までは両養生方法とも強度増進が大きい結果となった．水中養生したケースは材齢 7 日～材齢 10 日で強度増進がみられないものの，材齢 14 日以降強度増進がみられた．気中養生したケースでは材齢 7 日以降強度発現がほとんどみられなかったが，試験期間を通じて両養生方法間で大きな強度の差はみられない．

図 7.19 よりダム用高炉セメント B 種の場合，材齢 14 日までは，両養生方法ともに強度は他のセメントよりも小さく強度発現も緩やかであったが，水中養生したケースはそれ以降の強度増進が大きい結果となった．一方，気中養生したケースは材齢 14 日以降の強度発現もほとんどみられなかった．

割裂引張強度試験は円柱型直接引張強度試験に比べ強度にばらつきが少ない結果となった．このことから，割裂引張強度試験は簡便で，一定の精度で測定が可能な試験であることが確認できる．

図 7.20 より、全セメントともに強度の大きさに差異はあるもののほぼ類似した強度増進を示し、比較的安定している。

### 7.2.3 円柱型直接引張強度と割裂引張強度の関係

図 7.21 に各セメントの同一材齢、同一養生方法での円柱型直接引張強度と割裂引張強度とを比較した結果を示す。

割裂引張強度の方が円柱型直接引張強度に比べてほとんどのケースで大きくなる結果となった。

普通ポルトランドセメントの場合、両養生方法とも割裂引張強度に比べ円柱型直接引張強度は約 80%程度であったが、円柱型直接引張強度の方が大きくなるケースがいくつかみられた。高炉セメント B 種の場合、ほぼ普通ポルトランドセメントと同様な傾向を示し、割裂引張強度に比べ円柱型直接引張強度は約 70%程度であった。低収縮高炉セメント B 種の場合、全ケースで割裂引張強度が大きい結果となり、円柱型直接引張強度は約 50%程度となった。ダム用高炉セメント B 種は低収縮高炉セメント B 種とほぼ類似した結果となった。

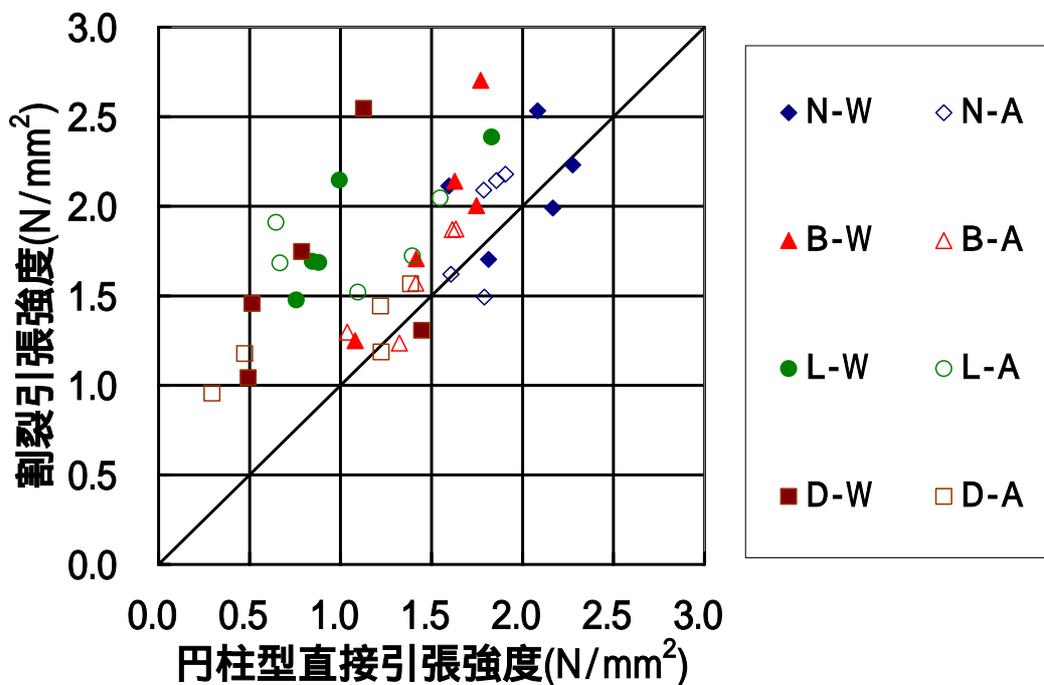


図 7.21 円柱型引張強度と割裂引張強度の関係

### 7.2.4 円柱型直接引張強度と圧縮強度の関係

図 7.22 に円柱型直接引張強度と同時に平行して行った圧縮強度との関係を示す。また同じく割裂引張強度との関係を図 7.23 に示す。

一般にコンクリートの引張強度は、圧縮強度が  $40\text{N/mm}^2$  程度までは約  $1/10 \sim 1/13$  程度<sup>(13)</sup>といわれているが、円柱型直接引張強度 / 圧縮強度の関係は普通ポルトランドセメント・高炉スラグセメントでは一般的に言われている約  $1/10 \sim 1/13$  に近い関係になるが、低収縮高炉セメント B 種・ダム用高炉セメント B 種に関しては約  $1/15 \sim 1/20$  の関係になる結果となった。一方で割裂引張強度 / 圧縮強度の関係はほぼ約  $1/10$  付近に集まる結果となった。

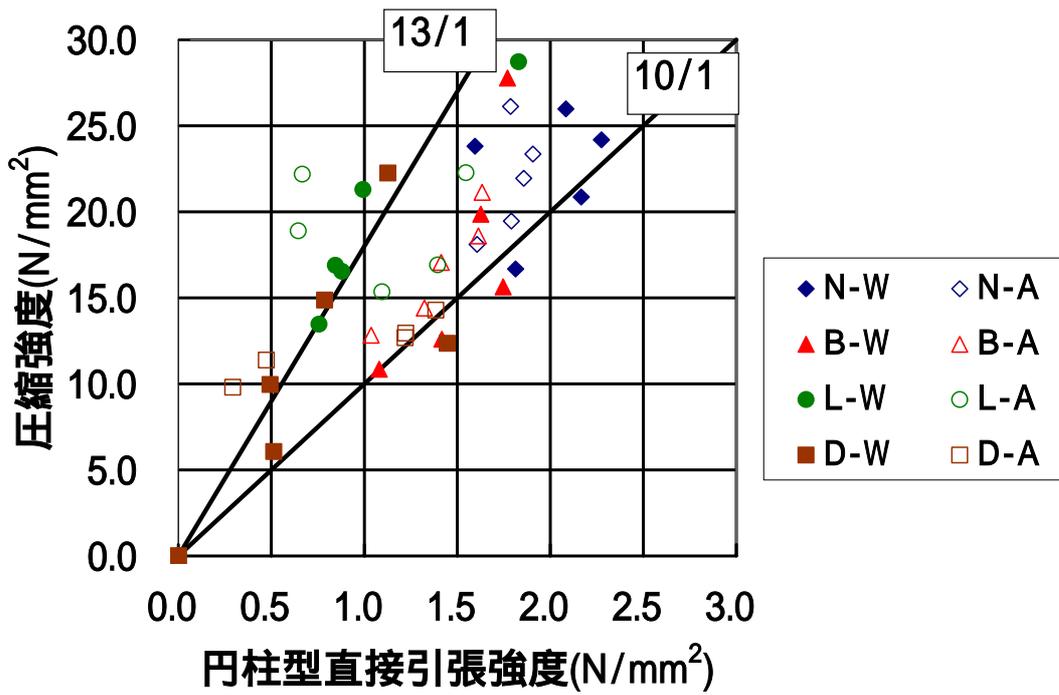


図 7.22 円柱型直接引張強度と圧縮強度の関係

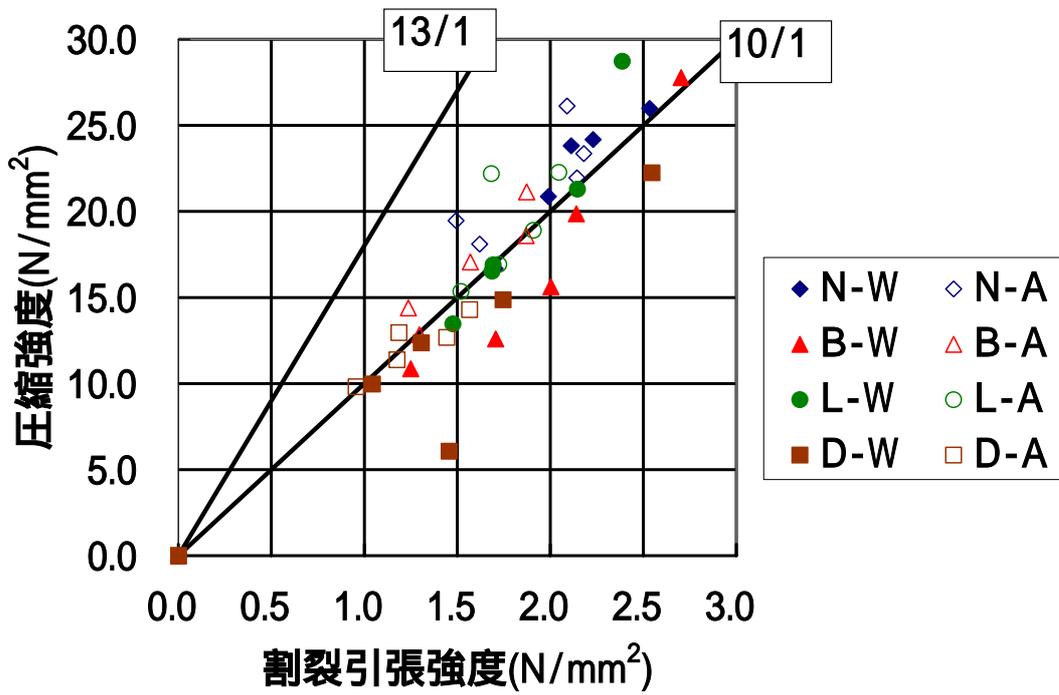


図 7.23 割裂引張強度と圧縮強度の関係

### 7.2.5 円柱型直接引張ヤング係数と圧縮ヤング係数関係

図 7.24 に円柱型直接引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の関係を示す。

普通ポルトランドセメントの場合，水中養生では円柱型直接引張ヤング係数側に偏る，気中養生ではほぼ 1 対 1 となる結果となった。高炉セメントB種の場合，普通ポルトランドセメントと類似する結果となった。低収縮高炉セメントB種の場合，両養生方法ともに極端に圧縮ヤング係数に偏る結果となった。ダム用高炉セメントB種の場合，低収縮高炉セメントB種ほどでは無いが両養生方法ともに圧縮側に偏る結果となった。青木氏<sup>(10)</sup>やNevilleの見解<sup>(14)</sup>では引張ヤング係数と圧縮ヤング係数はほぼ同一であるとされていて，普通ポルトランドセメント及び高炉セメントB種ではこれに当てはまる，または類似する結果となった。一方で低収縮高炉セメントB種及びダム用高炉セメントB種ではその見解とは異なる結果となった。本研究の試験結果が真の値だとするならば，以上の 2 種類のセメントは引張応力が原因となるひび割れに有利なセメントだということになる。

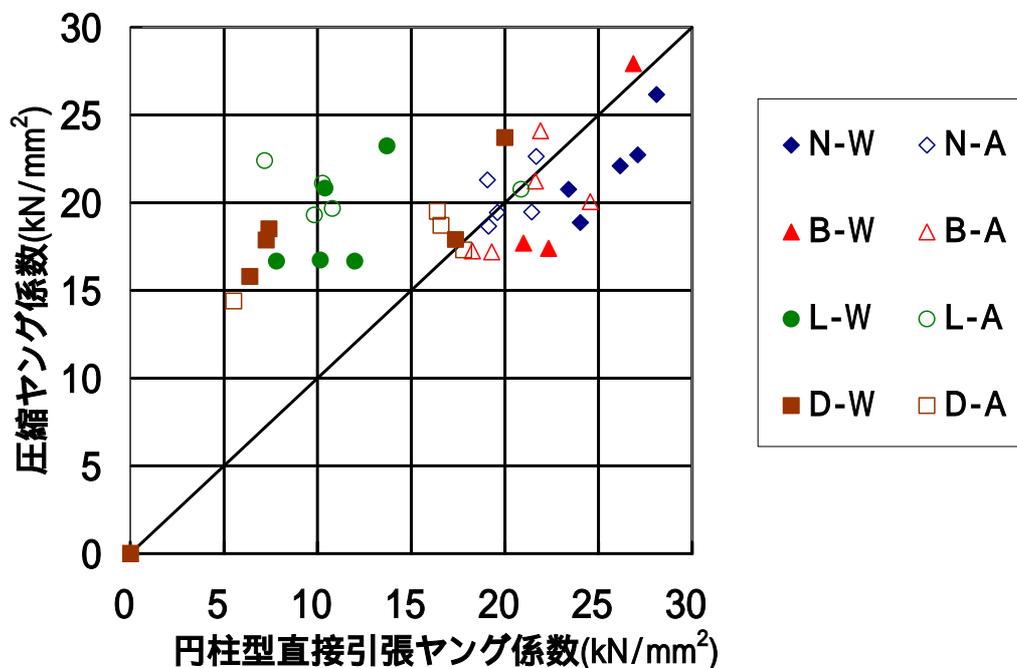


図 7.24 円柱型直接引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の関係

### 7.3 角柱型直接引張強度試験

#### 7.3.1 角柱型直接引張強度試験結果

図 7.25 ~ 7.29 角柱型直接引張強度試験結果を示す。

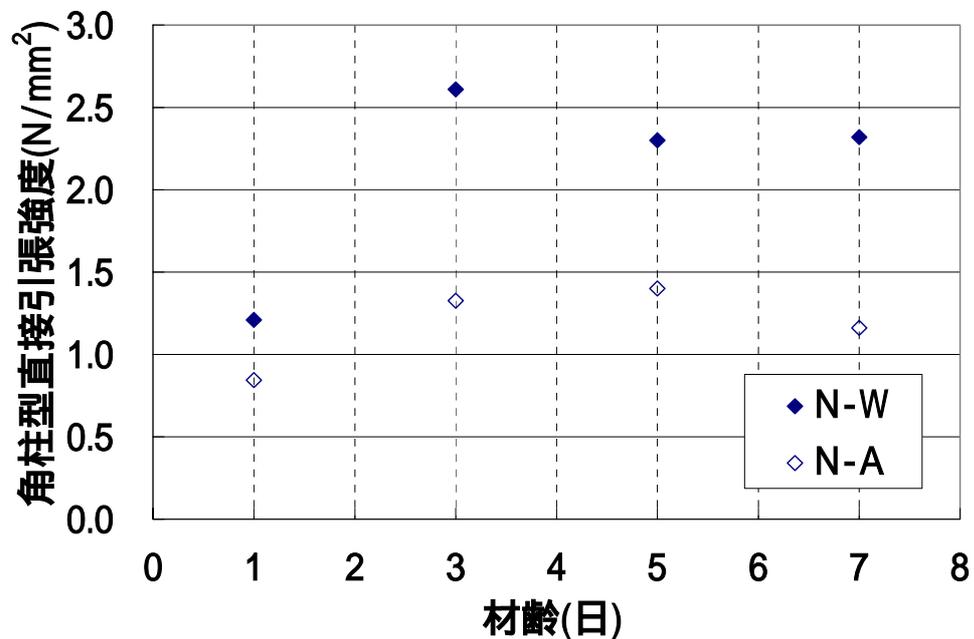


図 7.25 角柱型直接引張強度試験結果-普通ポルトランドセメント

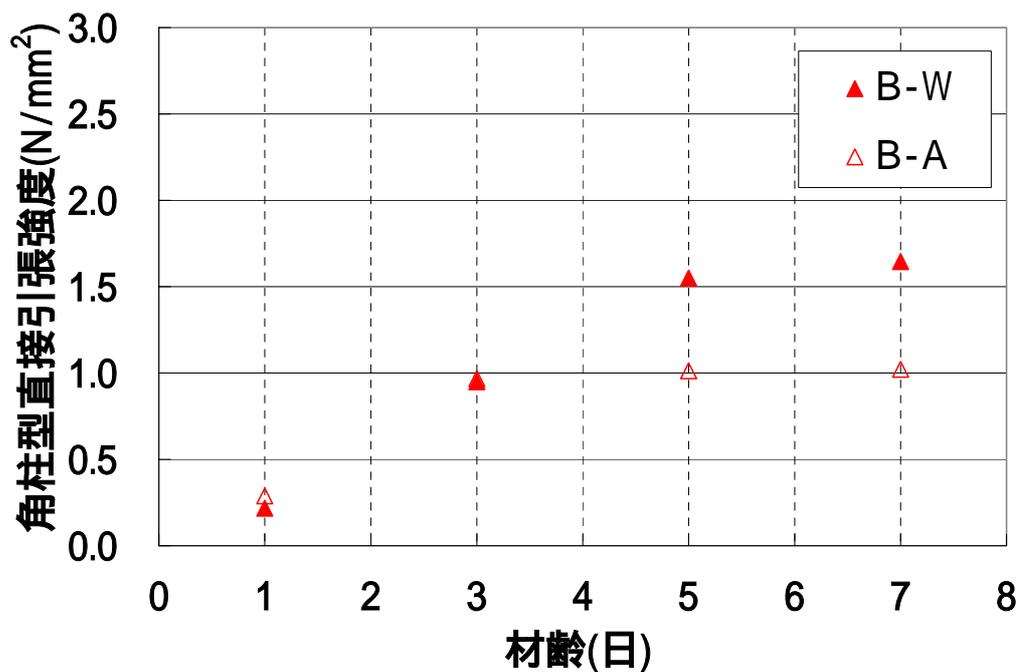


図 7.26 角柱型直接引張強度試験結果-高炉セメント B 種

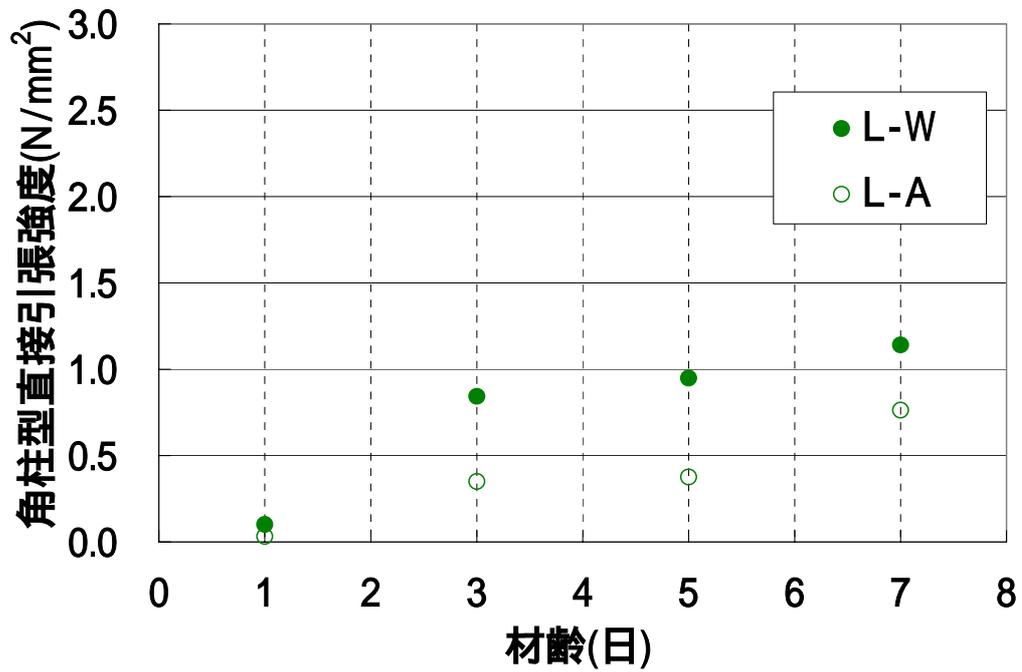


図 7.27 角柱型直接引張強度試験結果-低収縮高炉セメント B 種

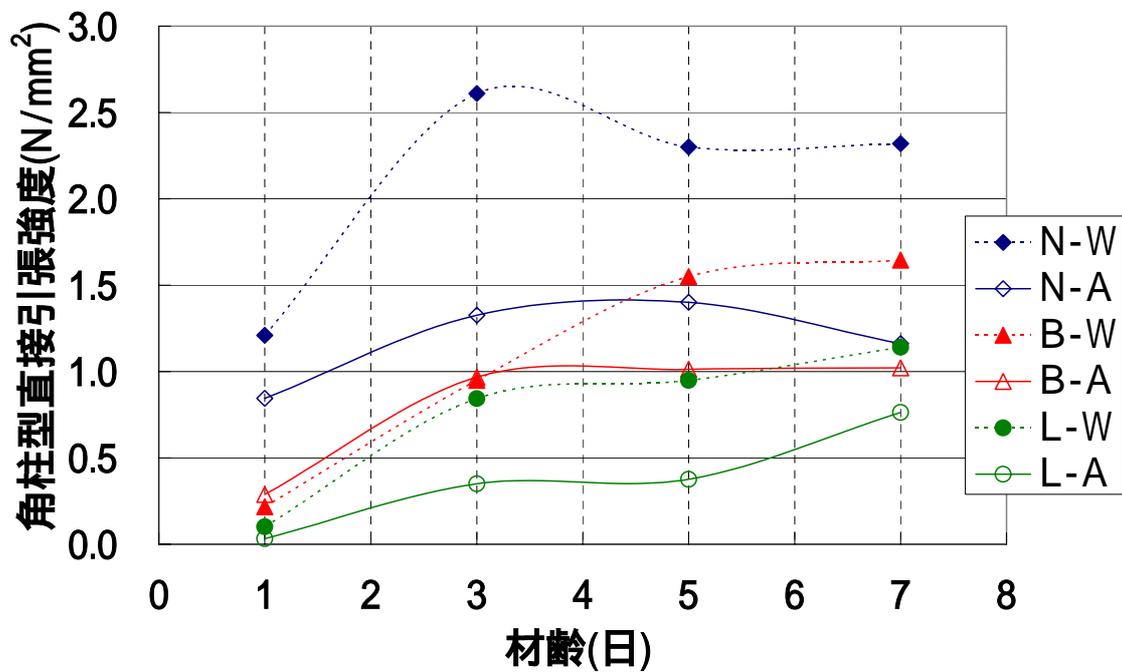


図 7.28 角柱型直接引張強度試験結果一覧

図 7.25 より普通ポルトランドセメントの場合，両養生の差異が一番大きくなったが，材齢 1 日～3 日では強度増進するが材齢 3 日以降の強度増進は見られなかった。

図 7.26 より高炉セメント B 種の場合，材齢が進むに従って強増進が見られるが，材齢 3 日では両養生ともにほぼ同じ強度となった。水中養生では材齢 5 日まで強度の増進が見られるが，気中養生では材齢 3 日以降の増進は見られなかった。

図 7.27 より低収縮高炉セメント B 種の場合，材齢 3 日まで強度発現が進むと材齢 3 日～5 日では強度はほぼ一定の値となり，以降材齢 7 日までに若干の強度増進が見られる結果となった。また材齢 7 日の水中養生で比較をすると，普通ポルトランドセメントと低収縮高炉セメント B 種では約  $1.2\text{N/mm}^2$  の差が出る結果となった。

図 7.28 より各セメントにおいてほぼ全ての材齢で水中養生の方が気中養生よりも強度が大きくなる結果となり，角柱型直接引張強度発現は一般的に言われているような養生の影響を受ける結果となった。また円柱型直接引張強度と比較すると，角中型直接引張強度試験の方が試験がより難しくなる若材齢にもかかわらずばらつきが少ない。

### 7.3.2 割裂引張強度試験結果

角柱型直接引張強度試験と平行して行った割裂引張強度試験の結果を図 7.29～7.32 に示す。

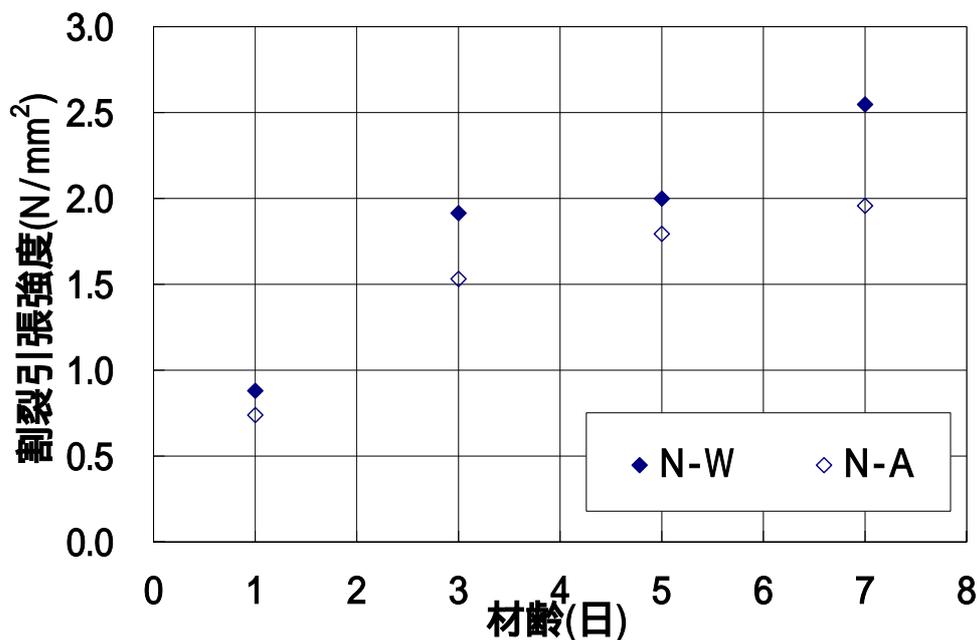


図 7.29 割裂引張強度試験結果-普通ポルトランドセメント

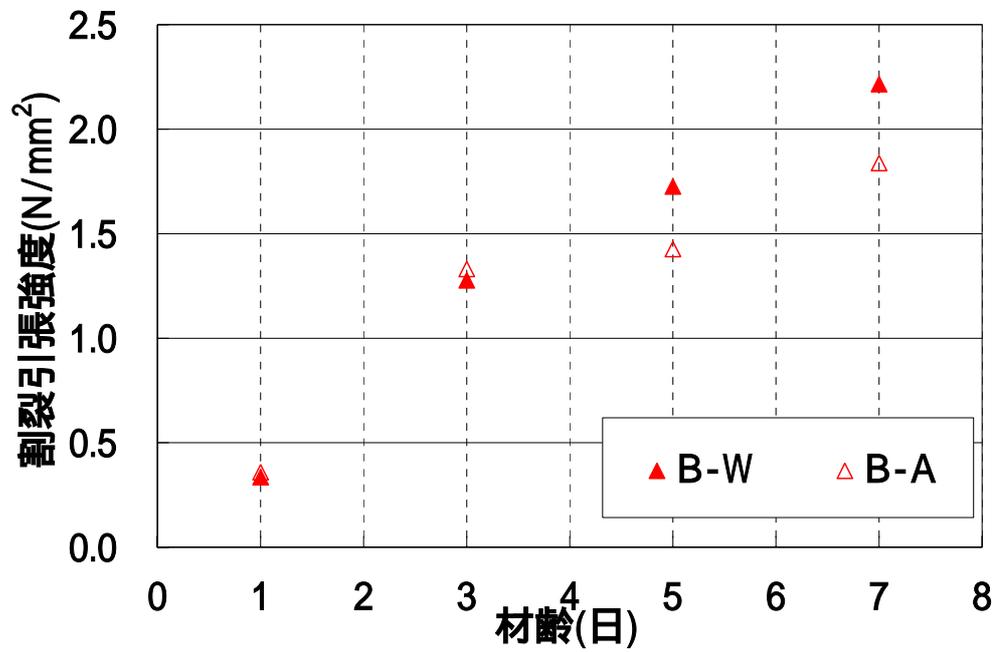


図 7.30 割裂引張強度試験結果-高炉セメント B 種

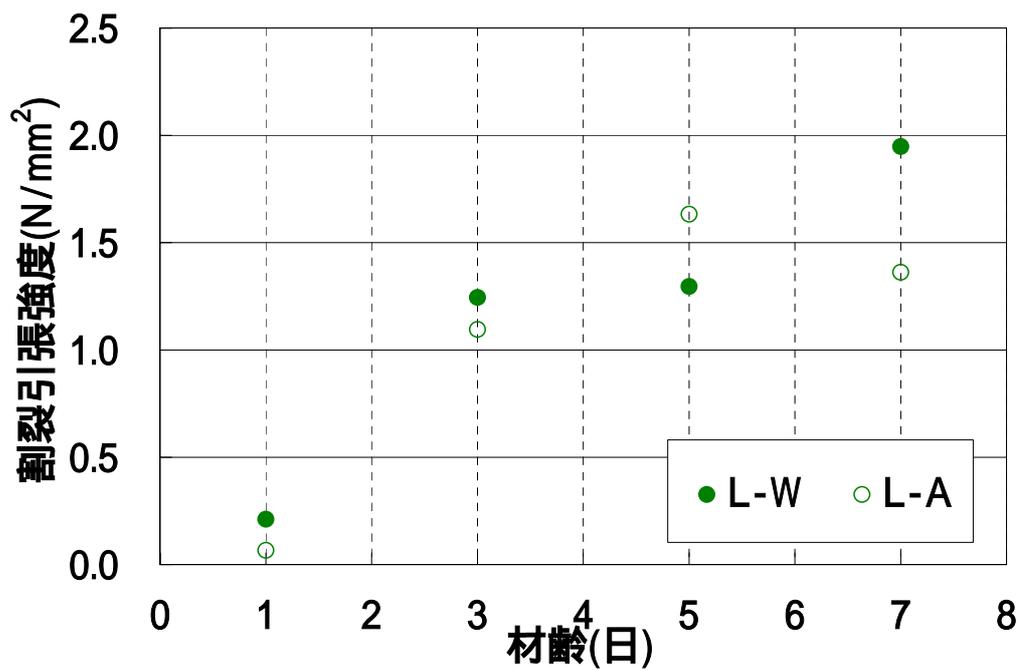


図 7.31 割裂引張強度試験結果-低収縮高炉セメント B 種

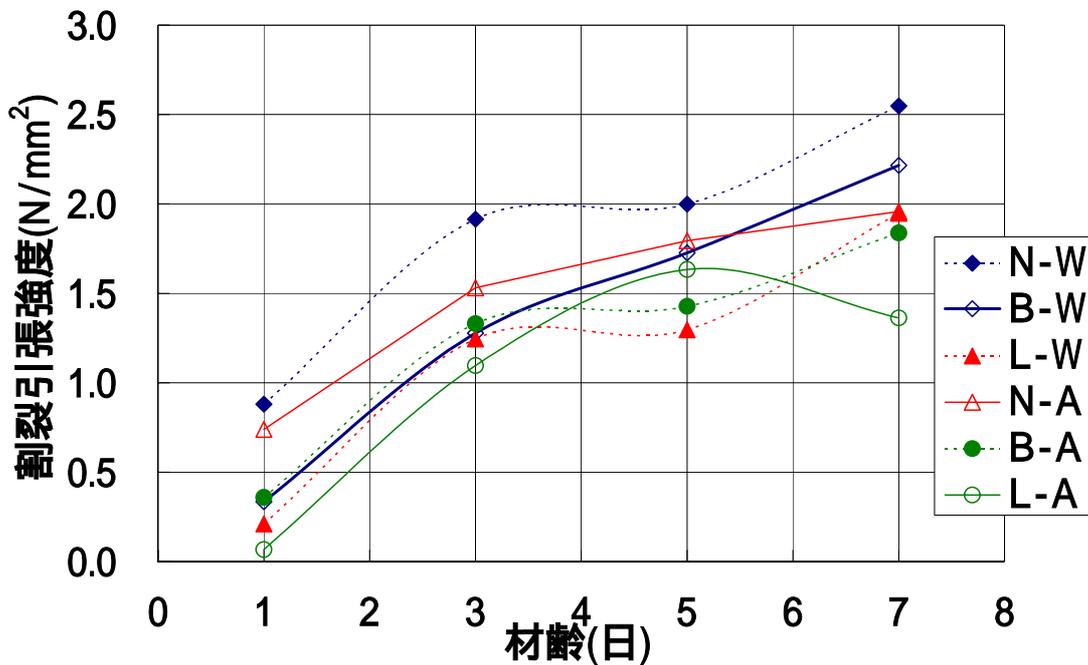


図 7.32 割裂引張強度試験結果一覧

図 7.29 より普通ポルトランドセメントの場合，両養生ともに材齢経過とともに強度も増進する結果となった．また水中養生の方が全材齢について気中養生よりも大きな強度となった．

図 7.30 より高炉セメント B 種の場合，材齢初期では両養生ともに同程度の強度となったが，材齢 3 日以降養生の違いにより強度に差異が生じる結果となった．

図 7.31 より低収縮高炉セメント B 種の場合，ほぼ材齢経過とともに強度は増進している．養生方法別では材齢 5 日を除き水中養生の方が大きな強度となった．

図 7.32 と図 7.28 を比較すると，図 7.32 の方がセメント・養生方法の別に関係なく値がまとまっている．このことは，割裂引張強度試験は一定の精度で強度の測定が可能である一方で，角柱型直接引張強度試験よりもセメント・養生の別の影響を受けにくいと言える．

### 7.3.3 角柱型直接引張強度と割裂引張強度の関係

図 7.33 に各セメントの同一材齢,同一養生方法での純引張強度と割裂引張強度を比較した結果を示す。

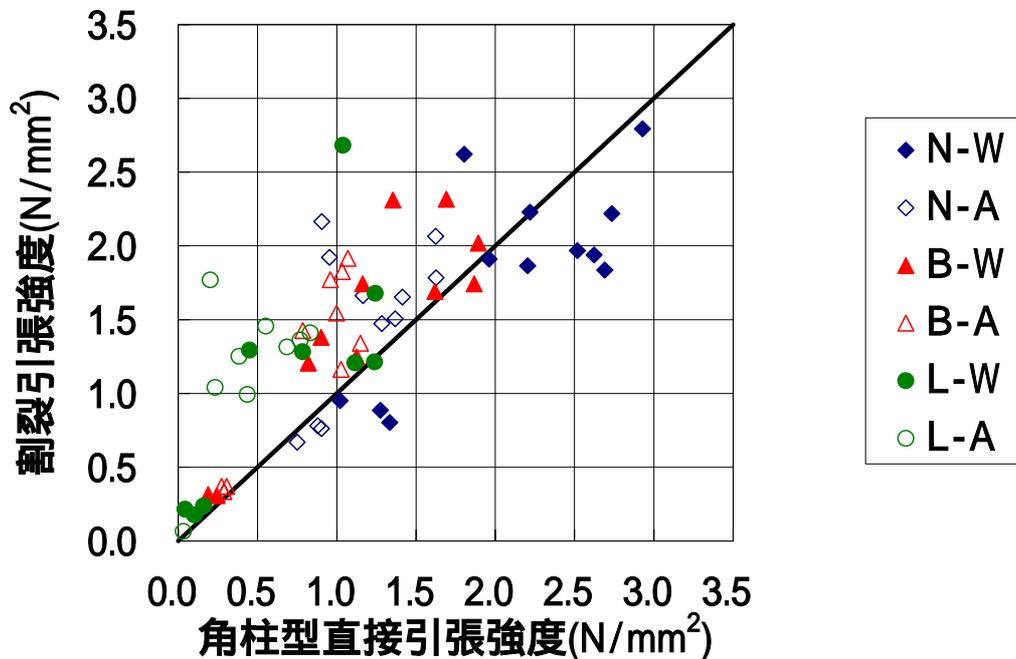


図 7.33 角柱型直接引張強度と割裂引張強度の関係

普通セメント・水中養生を除きほとんどのケースで割裂引張強度の方が角柱型直接引張強度に比べて大きくなる結果となった。

普通ポルトランドセメントの場合，水中養生では角柱型直接引張強度は割裂引張強度の約 70%～166%の範囲であり，平均をとると，ほぼ角柱型直接引張強度対割裂引張強度は同程度となる。

高炉セメント B 種の場合，水中養生では角柱型直接引張強度は割裂引張強度の約 60%～90%の範囲であり，平均をとると，角柱型直接引張強度は割裂引張強度の約 70%程度となった。

低収縮高炉セメント B 種の場合，水中養生では角柱型直接引張強度は割裂引張強度の約 10%～90%の範囲であり，平均をとると，角柱型直接引張強度は割裂引張強度の約 50%程度となった。

この結果と 7.2.3 で述べた円柱型直接引張強度と割裂引張強度の関係と比較すると，普通ポルトランドセメント，低収縮高炉セメント B 種は類似した結果，高炉セメント B 種は若干異なる結果となった。

### 7.3.4 角柱型直接引張強度と圧縮強度の関係

図 7.34 に角柱型直接引張強度と同時に平行して行った圧縮強度との関係を示す。また同じく割裂引張強度と圧縮強度の関係を図 7.35 に示す。

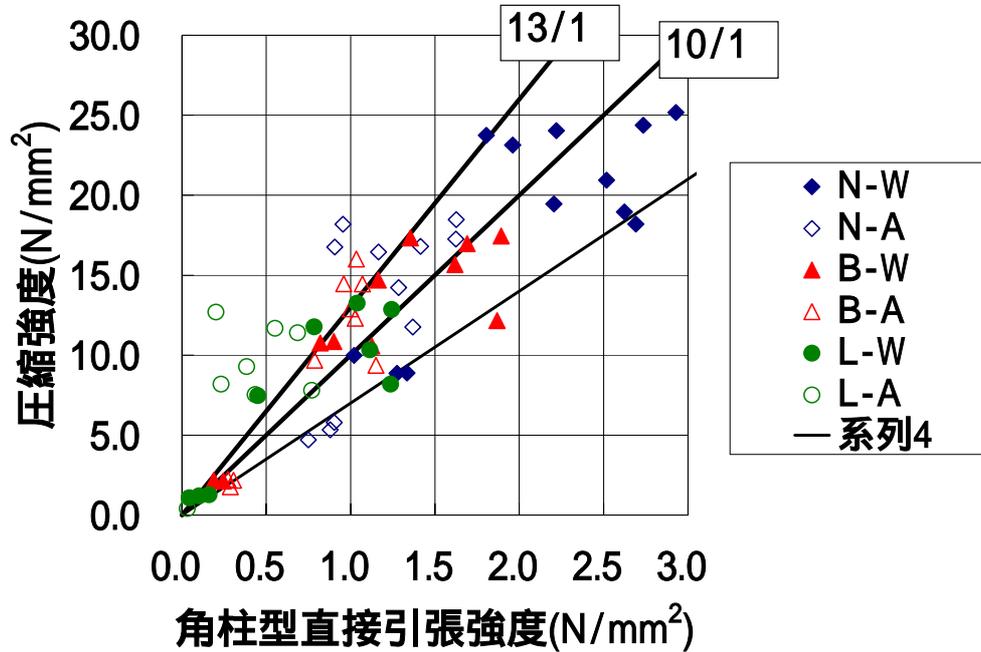


図 7.34 円柱型直接引張強度と圧縮強度の関係

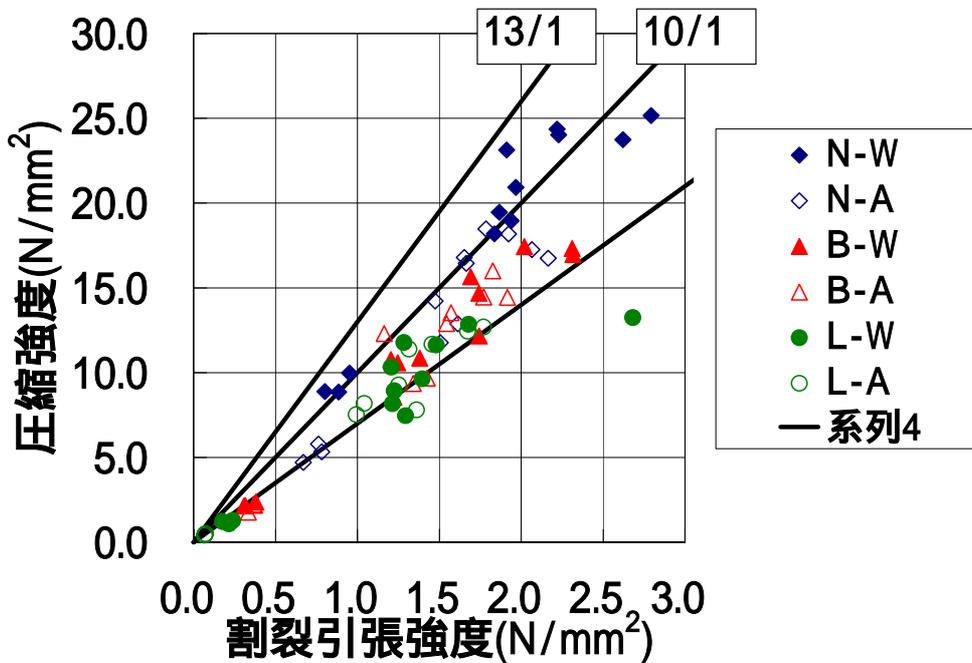


図 7.35 割裂引張強度と圧縮強度の関係

角柱型直接引張強度 / 圧縮強度の関係は全ケースで見ると、約 1/7 ~ 1/13 程度に多くが納まる結果となったが、低収縮高炉セメント B 種の気中養生では 1/13 よりも小さい値となるものも多い。この結果の要因は低収縮高炉セメント B 種、特に強度発現に厳しい気中養生では角柱型直接引張強度が小さいためであると考えられる。

割裂引張強度 / 圧縮強度の関係は同じく全ケースで見ると、角柱型直接引張強度 / 圧縮強度と同様に約 1/7 ~ 1/13 に納まる結果となった。角柱型直接引張強度と圧縮強度の関係よりもばらつきが少なく、ほぼその値に納まってはいるが 1/10 ~ 1/7 の間の値となるものが多く、引張強度が大きく算出されている可能性がある。

### 7.3.5 角柱型直接引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の関係

図 7.36 に角柱型直接引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の関係を示す。

セメントの種類、養生方法の違いに関係なく 1 対 1 のラインをはさみ均等に分布する結果となった。角柱型直接引張ヤング係数側に、普通セメント水中養生、高炉セメント B 種気中養生が、圧縮ヤング係数側に普通セメント気中養生が偏っているが、規則性は特に見受けられない。

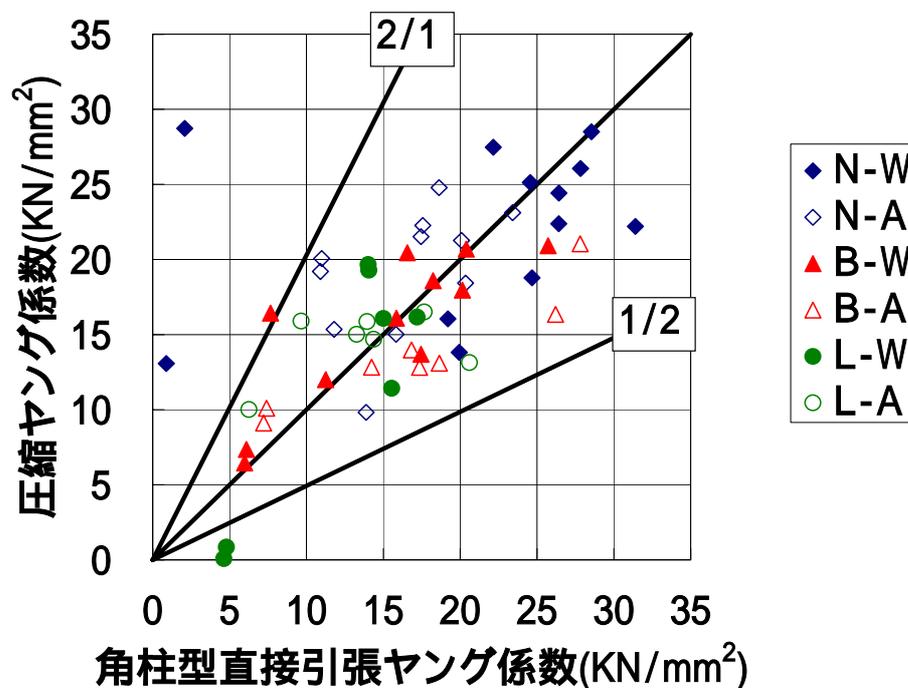


図 7.36 角柱型直接引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の関係

## 第8章 試験結果まとめ

以下, 6章, 7章の試験結果をまとめる.

### 8.1 直接引張強度

#### 8.1.1 割裂引張強度との比較

図 8.1 に円柱型直接引張強度試験及び角柱型直接引張強度試験と両直接引張強度試験実施時に平行して行った割裂引張強度試験の結果を比較して示す.

普通ポルトランドセメント・水中養生で円柱型直接引張強度は割裂引張強度の約 95%程度となった. 表-8.1 に円柱型及び角柱型直接引張強度と割裂引張強度の比の平均を示す. 表-8.1 より普通ポルトランドセメント・水中養生の角柱型引張強度を除き全てのケースで割裂引張強度の方が大きくなる結果となった.

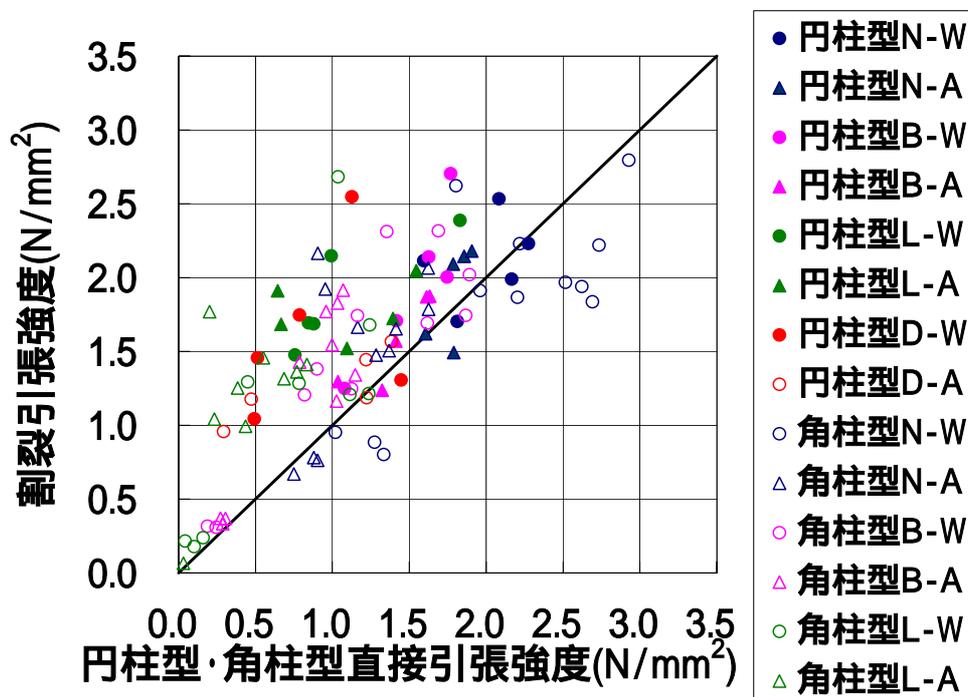


図 8.1 円柱型・角柱型直接引張強度と割裂引張強度の関係

表-8.1 直接引張強度と割裂引張強度の比較

	(%)			
	N-W	N-A	B-W	B-A
円柱型/割裂	95.01	95.72	79.62	90.09
角柱型/割裂	120.37	85.24	77.95	70.23
	L-W	L-A	D-W	D-A
円柱型/割裂	55.25	60.39	56.50	69.38
角柱型/割裂	60.77	40.30		

### 8.1.2 圧縮強度との比較

図 8.2 に引張強度と圧縮強度の比較を示す．一般的にコンクリートの引張強度は圧縮強度の 1/13～1/10 程度と言われているが，円柱型・角柱型直接引張強度は両養生方法ともに多くが 1/13～1/10 の範囲よりも小さくなる結果となった．一方で割裂引張強度は両養生方法ともに 1/13 よりも大きくなり，多くが 1/10 付近からそれを超える結果となった．上述の円柱型・角柱型直接引張強度と割裂引張強度の比較と，この結果より本研究の範囲では割裂引張強度試験はコンクリートの引張強度を過大に評価している可能性がある．

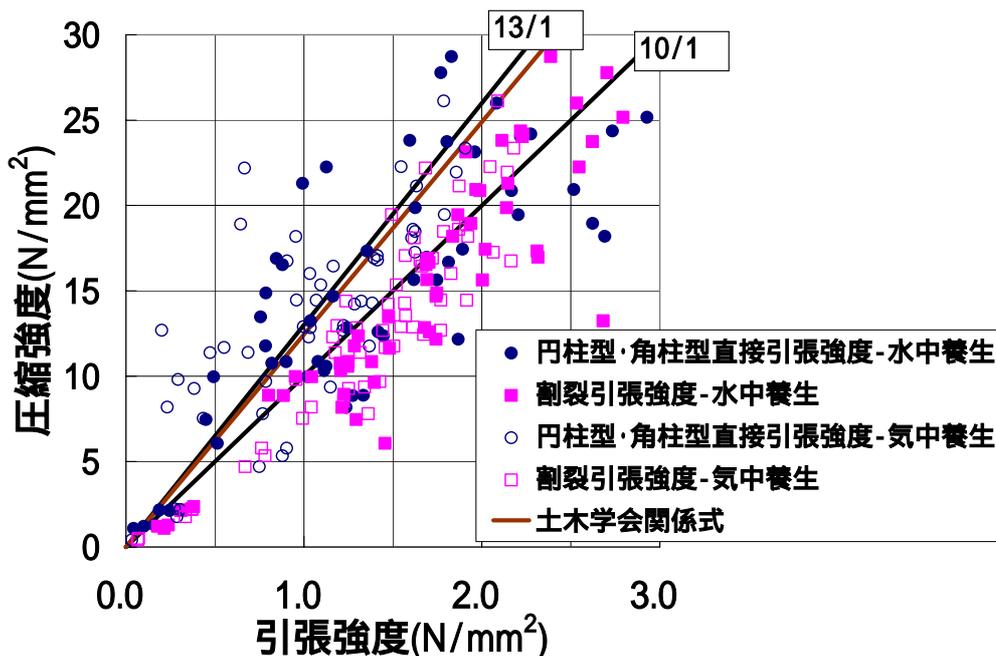


図 8.2 引張強度と圧縮強度の関係

8.1.1 と 8.1.2 の結果より，両直接引張強度はほぼ全てのケースで割裂引張強度よりも小さくなり，圧縮強度と比較をしてもやや小さい結果となった．また図 8.1 散布図より，割裂引張強度側に偏る以外大きな特徴はなく値はばらついている．同じく図 8.2 散布図より直接引張強度と割裂引張強度の差異の特徴は見取れるが，そのほかの特異な点は無く，こちらもばらついている．この要因として両直接引張強度のばらつきが考えられるが，直接引張強度のばらつきは供試体内に存在する構造的な欠陥部の分布やその特性を与えているという見解もあり<sup>(11)</sup>，本研究でも特に円中型直接引張強度試験では 1 回の試験につき円柱型直接引張供試体 6 本を用いたが，6 本ともに同程度の強度を示すことは試験期間を通しあまり見られず，またそれは比較的安定していた普通ポルトランドセメントに比べると低収縮高炉セメントB種，ダム用高炉セメントB種が目立ち，この見解は本研究の円柱型直接引張強度及び角柱型直接引張強度にも当てはまると考えられる．一方で割裂引張強度は，各試験で直接引張強度よりばらつきが小さく安定している．

## 8.2 円柱型直接引張強度と角柱型直接引張強度

図 8.3 に円柱型直接引張強度と角柱型直接引張強度の比較を示す。

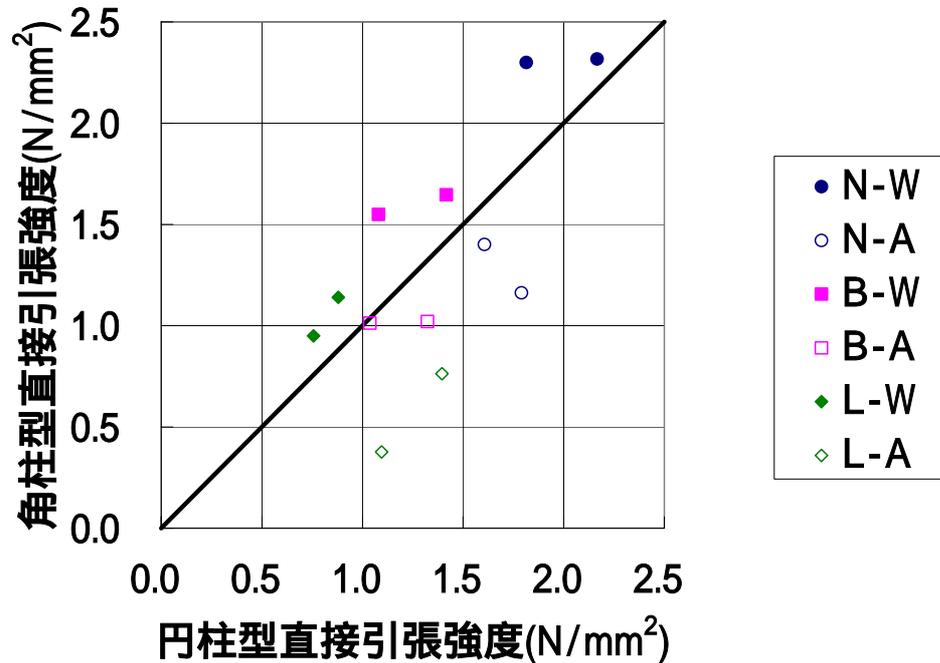


図 8.3 円柱型及び角柱型直接引張強度の関係

セメントの種類に関係なく，水中養生では角柱型直接引張強度が，気中養生では円柱型直接引張強度が大きく出る結果となった．一般的にコンクリートの強度は水中養生の方が気中養生よりも大きくなるといわれているが，このような結果になった要因は両試験の供試体の寸法の差及び円柱型直接引張供試体の治具接着時の養生条件だと考えられる．円柱型引張強度供試体は治具接着後湿布養生を用いたので，完全な水中養生と比較をすれば湿度に差異が生じ，その結果，完全な水中養生をすることができる角柱型直接引張強度が大きくなったと思われる．また気中養生では，表面積が大きい角柱型直接引張強度供試体の方が乾燥の速度が速く進み，それに比べて乾燥しにくい円柱型直接引張強度の方が大きくなったと思われる．また，養生の差異の影響は圧縮強度よりも引張強度の方が受けやすいとの既往の研究<sup>(14)</sup>もあり，試験直前までしっかりと養生の管理をする必要がある．

## 8.3 ヤング係数の比較

図 8.3 にヤング係数の測定結果を引張及び圧縮の比較で示す．全体的に，1 対 1 を中心として両側 1/2 までの範囲にほぼ分布する結果となった．普通ポルトランドセメントについては養生方法・試験方法の違いで大きな特徴は見られず，1 対 1 に近い値となっている．高炉セメント B 種については，普通ポルトランドセメントに類似する結果となったが，比較的引張側に偏っている．低収縮高炉セメント B 種は比較的圧縮側に偏り，特に円柱型直接引張ヤング係数は養生方法の違いに関係なくその傾向が強い．Neville の見解では，引張ヤング係数と圧縮ヤング係数は同一であるとされているので，本研究の結果はそれに当てはまるセメント・養生方法もあるが逆に当てはまらないものもある．なおヤング係数の算出方法は，圧縮ヤング係数の場合は  $50 \mu$  ひすみと圧

縮応力，破壊応力の 1/3 のひずみと圧縮応力の関係で算出するが，本研究では，圧縮ヤング係数はそれに従い，引張ヤング係数は試験時のひずみの推移が破断時までほぼ線形なことから，0 点から破断時までのひずみと引張応力の関係で算出している．

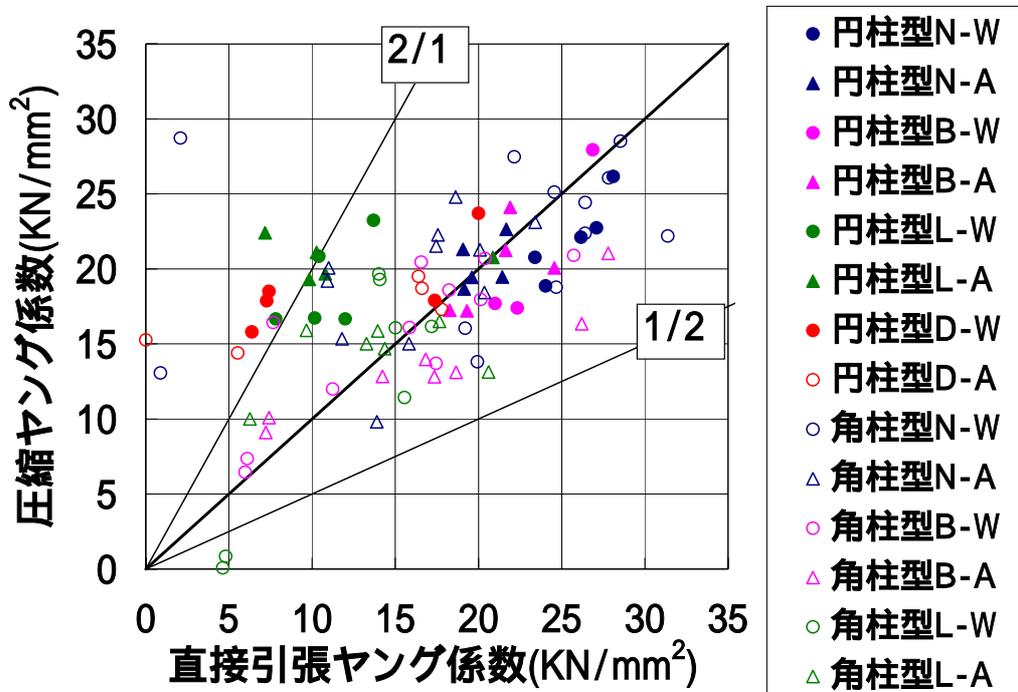


図 8.3 直接引張ヤング係数と圧縮引張ヤング係数の関係

#### 8.4 TSTM 試験結果との関係

本研究で行ったTSTMでの試験で用いた普通ポルトランドセメントに関して、図8.4～8.7にTSTM試験結果と各引張強度の比較を示す。なお凡例は図8.4以降同様である。また破断時に着目するため考察では拘束度0.9は除くことにする。

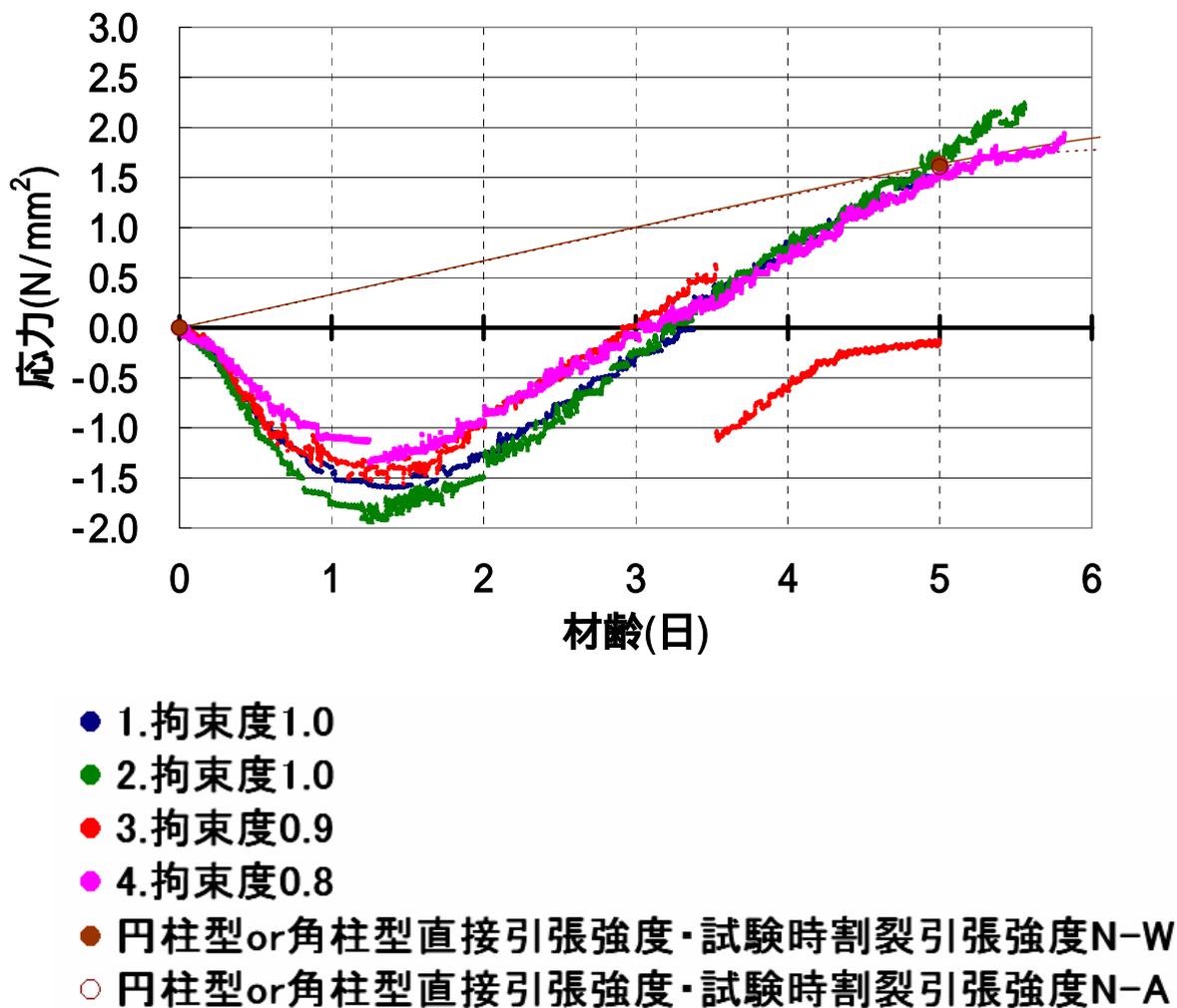


図 8.4 TSTM 結果 - 円柱型直接引張強度比較

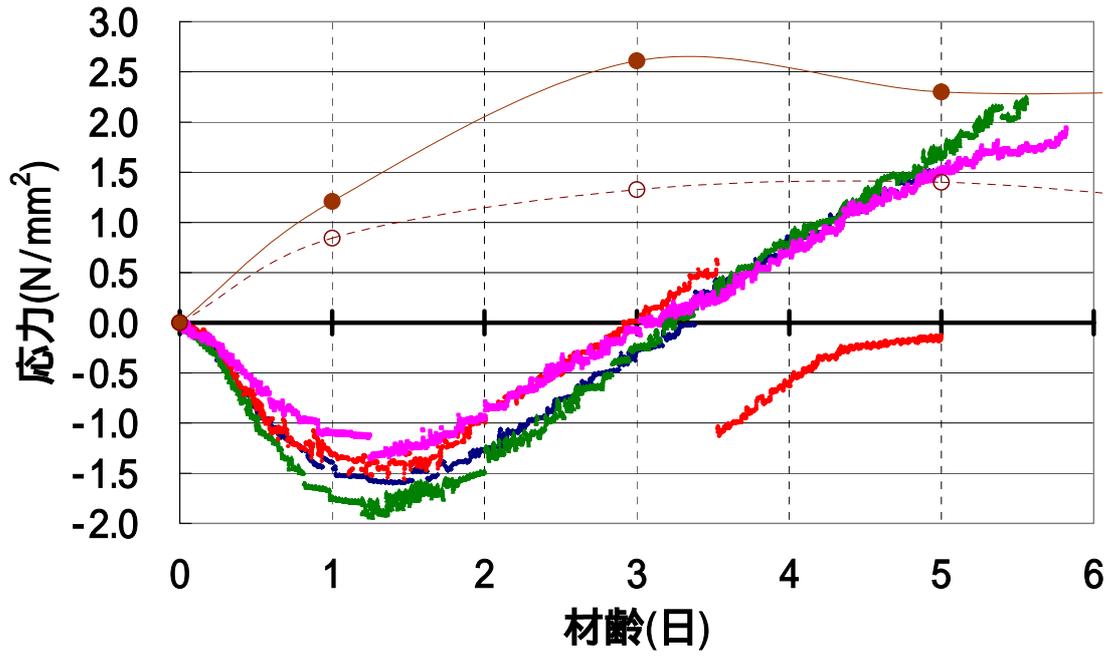


圖 8.5 TSTM 結果-角柱型直接引張強度比較

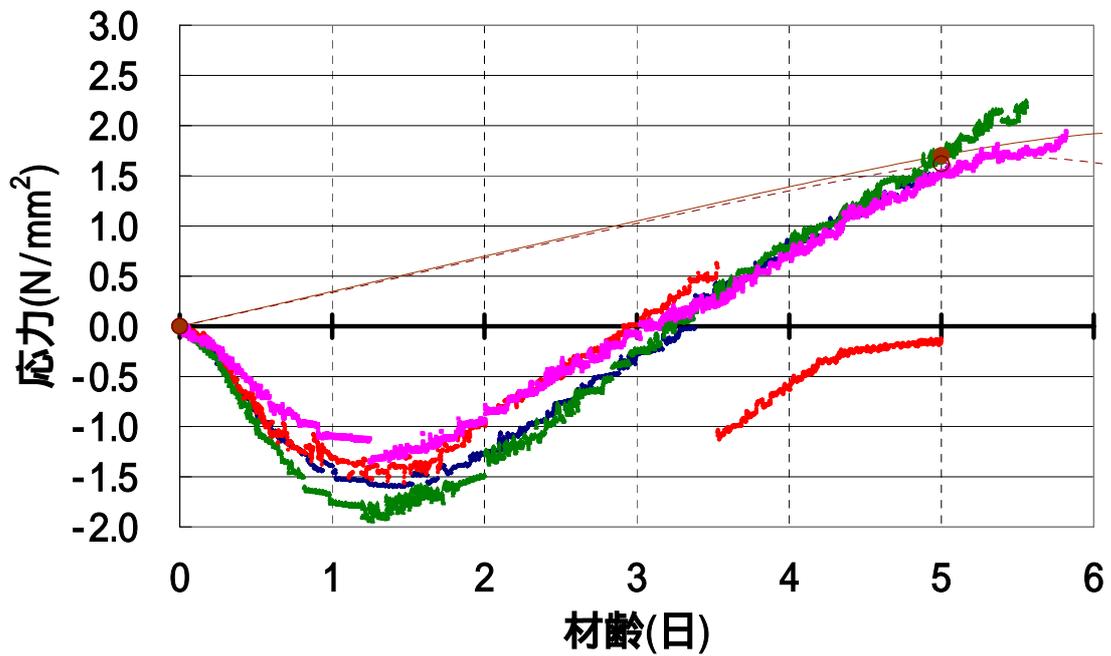


圖 8.6 TSTM 結果-割裂引張強度比較  
(円柱型直接引張強度試験時)

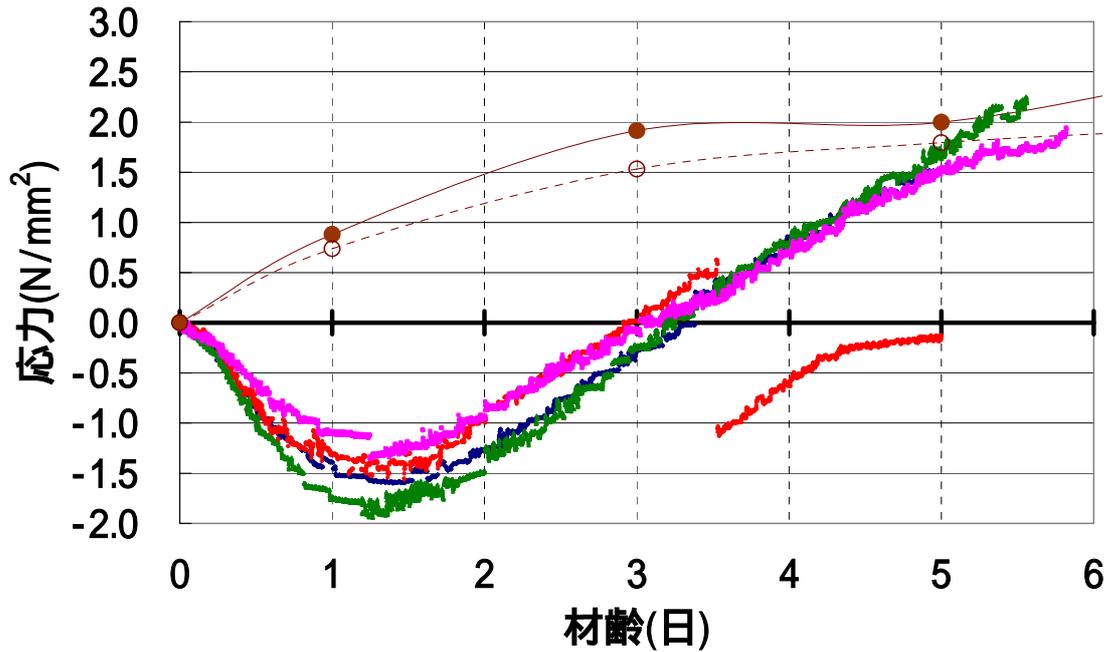


図 8.7 TSTM 結果-割裂引張強度比較  
(角柱型直接引張強度試験時)

円柱型直接引張強度との比較では，TSTM 供試体破断時付近で 1:拘束度 1.0，4:拘束度 0.8 では引張応力と引張強度が両養生方法ともにほぼ同程度となった。

角柱型直接引張強度との比較では，気中養生では材齢 5 日付近で引張応力と強度がほぼ同程度となったが，破断時では差異が生じる結果となった。一方水中養生では 2:拘束度 1.0 破断時の応力と直接引張強度がほぼ同程度となる結果となった。割裂引張強度との比較では円柱型直接引張強度試験時割裂引張強度は，円柱型直接引張強度と TSTM の比較とほぼ同程度となっている。一方で角柱型直接引張強度試験時割裂引張強度との比較では，TSTM 破断時に気中養生では 1:拘束度 1.0，4:拘束度 0.8 と，水中養生で 2:拘束度 1.0 とほぼ同程度となっている。

この結果より本研究の範囲内では，各試験・両養生方法ともに材齢 5 日程度の引張強度を参考にすれば，その時点での TSTM 供試体内部の引張応力がある程度予測することが可能であったことがわかる。またひび割れ発生材齢及び強度についても，TSTM 試験での圧縮応力減少時から引張応力移行時の挙動を基に予測をたて，各種引張強度試験の結果と比較・考察すればある程度の精度で予測可能であると考えられる。

## 第9章 結論

本研究では、TSTM 及び円柱型直接引張強度試験・角柱型直接引張強度試験を用いて特に若材齢時のコンクリートの引張挙動について比較を行い、以下に示すような結果を得ることが出来た。

- (1) 本研究で用いたセメントの場合、引張強度の大きさについて、大きいほうから普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種、低収縮高炉セメント B 種、ダム用高炉セメント B 種の順であり、養生方法の違いは強度に影響を与える、特に供試体が大きくなる角柱型直接引張強度は影響を受けやすいと考えられる。
- (2) 本研究で着目した若材齢時のコンクリートの場合、円柱型直接引張強度及び角柱型直接引張強度よりも、割裂引張強度の方が大きくなり、割裂引張強度ではコンクリートの引張強度を過大評価している可能性を示せた。
- (3) 割裂引張強度試験とは異なる引張強度試験では、特に試験時に供試体に曲げが発生することなどが問題となるが、本研究で用いた円柱型直接引張強度試験及び角柱型直接引張強度試験は若干改善しなくてはならない点を残すが、その問題点についてある程度解決できた。
- (4) (3)をふまえ、角柱型直接引張強度試験は、角柱型直接引張強度試験装置と供試体専用型枠があれば、割裂引張強度試験のように比較的誰でも簡便に同程度の精度でコンクリートの直接引張強度を試験することができると考える。また TSTM についても温度応力に関する資料を収集するにあたり非常に有益であることを確認した。
- (5) ヤング係数に関して、引張ヤング係数と圧縮ヤング係数は本研究の範囲内では 1 対 1 付近にまとめ、ばらつきの幅は引張側・圧縮側ともに 1/2 程度となった。
- (6) TSTM 試験と円柱型直接引張強度試験・角柱型直接引張強度試験及び割裂引張強度試験を併用することで、拘束度 1.0~0.8 程度のコンクリート部材に作用する引張応力及び、ひび割れ発生応力・材齢をある程度予測可能であることを示せた。

本研究では、若材齢の引張挙動及び試験方法について検討を行ったが、材齢 28 日以降の長期材齢についても検討していくことが望ましい。また、治具接着や型枠などの試験装置・方法をさらに改善していき、各種資料を集めること、簡易断熱試験など他の研究・試験と関連付けることで、より精度の高い試験方法の提案やマスコンクリートのひび割れ予測も行えるものとする。

参考文献：

- (1) 吉本彰：コンクリートの変形と破壊，学献社，pp121-145，1990
- (2) R.SPRINGENSCHMID・E.GIERLINGER・W.KIERNOZYCKI：THERMAL STRESSES IN MASS CONCRETE：A NEW TESTING METHOD AND THE INFLUENCE OF DIFFERENT CEMENTS，pp57-72，1985
- (3) Sander Lokhorst・Klaas Van Breugel：Experimental and Numerical Analysis of Stress Development in Hardening Concrete，pp11-20，1994
- (4) K.SCHÖPELM.PLANNERER・R.SPRINGENSCHMID：19 DETERMINATION OF RESTRAINT STRESSES AND OF MATERIAL PROPERTIES DURING HYDRATION OF CONCRETE WITH THE TEMPERATURE STRESS TESTING MACHINE，pp153-160，1994
- (5) Bumbachstr：TCE3：Testing of the cracking tendency of concrete at early ages using the cracking frame test，pp461-464，1997
- (6) 溝淵利明他：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
- (7) 小田部裕一他：温度応力の抑制対策に対する材料評価方法に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp1113-1118，2002
- (8) 溝淵利明他：一軸拘束試験装置を用いた膨張材の温度応力抑制効果に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp1051-1056，1998
- (9) 米山紘一他：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
- (10) 青木優介他：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
- (11) 尾畑伸之他：コンクリートの直接引張強度についての一考察，土木学会第46回年次学術講演会講演概要集，pp210-211，1991
- (12) 土木学会：コンクリート標準示方書「規準編」，pp115-117，pp120-122，2005
- (13) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧[第二版]，pp231，pp382-385，1996
- (14) A.M.Neville, 三浦尚：ネビルのコンクリートバイブル，技報堂出版，p518，2004
- (15) 秋田宏他：コンクリートの直接引張試験における4つの誤解、コンクリート工学論文集、Vol.16, No.1, pp77-85, 2005
- (16) 狩野敏也：コンクリートの直接引張強度とその寸法効果、コンクリート工学年次論文集、Vol.18, No.1, pp531-536, 1996
- (17) 小出英夫他：直接引張試験より得たコンクリート引張軟化曲線の評価に関する研究、土木学会第55回年次学術講演会講演概要集、pp620-621, 2000

## 謝辞

本研究を行うに際しまして、終始御懇篤なる御指導を賜りました溝淵利明教授に厚く御礼を申し上げます。また、多くの御助言および御協力を戴きました満木泰郎講師に深く感謝いたします。実験に際し、適切な御助言、御配慮を戴きました山本幸雄様、山添量文様、多くの御協力戴いた法政大学土木材料実験室の大学院生藤森勇希様はじめ皆様に御礼申し上げます。

法政大学大学院 工学研究科 建設工学専攻  
06R5101 伊藤 裕貴