# 法政大学学術機関リポジトリ HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-05-10

## 若材齢時コンクリートの材料特性とひび割れ 発生限界に関する研究

綱島, 隆将 / TUNASHIMA, Takamasa

(発行年 / Year) 2011-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted) 2011-03-24

(学位名 / Degree Name) 修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor) 法政大学 (Hosei University)

## 2010 年度 修士論文

# 若材齢時コンクリートの材料特性と ひび割れ発生限界に関する研究

指導教員:溝渕 利明 教授

# 法政大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 修士課程

09R5117 綱島 隆将

### 若材齢時コンクリートの材料特性と

## ひび割れ発生限界に関する検討

#### 綱島 隆将

本研究では、コンクリートのひび割れに影響を及ぼす材料特性ならびに,ひび割れ発生 条件に関する傾向を正しく把握することを目的としてを実験的検討を行った。実験を行っ た材料特性としては,ひび割れを誘発する要因として自己収縮特性,一方,ひび割れに抵 抗する要因として,引張特性に焦点をあて実験を行った。

コンクリートの引張特性としては、ドックボーン型の直接引張試験装置を用いることで、 直接引張強度、引張ヤング係数、引張伸び能力を算出した。

また,ひび割れの発生条件に関する検討では,実構造物に近い拘束条件、および実構造物を想定した温度履歴を再現することが可能な一軸拘束試験装置(TSTM)を用いて,応力およびひずみに基づくひび割れ発生条件についての検討を行った。

これらの試験から得られた主な結果は以下の通りである。

(1)直接引張強度は割裂引張強度よりも約10%程小さい。

(2)十分に養生を行った場合であれば、引張ヤング係数と圧縮ヤング係数はほぼ同等

(3)引張伸び能力の限界値は130μ程度である

(4)ひび割れ発生時の応力強度比の下限値は0.6である。

#### THE MATERIAL PROPERTY OF EARLY AGE CONCRETE AND INVESTIGATE A CRACKING CRITERION

#### Takamasa TUNASHIMA

This paper presents of an experimental study on the material property, especially tensile property of early age concrete and investigate a criterion for the occurrence of thermal cracking. Based on the tensile property obtained by using the Direct Tensile Test Machine (DTTM) in which the dog-bone shape specimen can be measure both tensile strength and tensile strain, and a cracking criterion investigate by using the Thermal Stress Testing Machine (TSTM) in which the dog-bone shape specimen can be measure stress and strain from concrete placing to cracking age. In addition this machine is capable of simulating the temperature history, and can be kept constant restraint ratio.

According to those study, following results were obtained:

- (1)Direct Tensile Strength is about 10% lower than that of Splitting Tensile Strength.
- (2)Tensile Young's Modulus that obtained by using the Direct Tensile Test Machine
- (DTTM) is equal to Compressive Young's Modulus.
- (3)Tensile Strain Capacity that obtained DTT is about  $130 \,\mu$ .
- (4)It is measured that the Tensile strain Strength Ratio limit is about 0.6 by useing TSTM and DTT result, although it is very difficult to apply the Cracking criterion.

## 目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	2
1.2 研究の目的	3
1.3 本論文の構成	3
1.4 用語の定義	5
第2章 既往の研究	6
2.1 ひび割れに影響を及ぼす材料特性	6
<b>2.1.1</b> ひび割れを <u>誘発する</u> 材料特性	6
<b>2.1.2</b> ひび割れに <u>抵抗する</u> 材料特性	
<b>2.2</b> 各種指針による材料特性の予測式	9
2.2.1 圧縮強度	9
2.2.2 引張強度	11
2.2.3 ヤング係数	13
2.2.4 自己収縮(国外)	15
2.2.4 自己収縮(国内)	
2.3 直接引張試験に関する知見	
2.4 ひび割れ発生の条件	
第3章 各種セメントを用いた直接引張試験	
3.1 実験概要	
3.2 実験計画	23
3.3 試験方法	25
3.4 実験結果	27
3.4.1 破断性状	

3.4.2	圧縮強度と材齢28
3.4.3	引張強度と材齢
3.4.4	ヤング係数と材齢
3.4.5	引張ひずみと材齢
3.4.6	JCI 予測式との比較(引張強度)42
3.4.7	JCI 予測式との比較(ヤング係数) 44
3.4.8	圧縮強度増進に伴う引張ひずみの変化46
3.4.9	各種強度試験による比較検討48
kita -t-	
第4章 〕	直接引張試験結果の定式化 51
4.1 定	式化の目的51
4.2 定	式化の方法
4.3 各	種実験式
4.3.1	引張強度の実験式52
4.3.2	引張伸び能力の実験式58
第5章 注	<b>温度一定条件下における自己収縮試験62</b>
5.1 実	験概要
5.2 実	験計画62
5.3 試	験方法
5.4 実	験結果
5.4.1	温度測定結果65
5.4.2	ひずみ測定結果
5.4.3	JCI 予測式との比較69
第6章 汕	<b>温度応力試験によるひび割れ発生限界の検討</b>

5.1 実験概要
5.2 実験計画70
5.3 試験方法72
5.4 実験結果(拘束度別)74
5.4.1 温度測定結果74
<b>5.4.2</b> ひずみ測定結果
5.5 実験結果の比較
5.5.1 温度測定結果
<b>5.5.2</b> ひずみ測定結果
<b>5.5.3</b> 応力および応力ひずみ測定結果
5.5 ひび割れ発生条件の検討100
<b>5.5.1</b> 応力および強度100
5.5.2 ひずみおよび伸び能力105
5.5.3 応力およびひずみ108
第7章 結論114

参考文献

謝辞

#### 第1章 序論

#### 1.1 研究の背景

マスコンクリート構造物に発生する温度ひび割れ,乾燥収縮や自己収縮によるひび割れ など,若材齢時に発生するひび割れは力学的な弱点になるだけではなく,耐久性に大きな 影響を与えることから,コンクリートのひび割れを定量的に評価することは重要な課題の 一つといえる.コンクリートの体積変化に起因するひび割れを精度よく予測するためには, コンクリート部材に発生する応力やひずみを正しく算定すると同時に,ひび割れが発生す る条件についての定量的な判断基準が必要となる.

現在では、先哲の努力により有限要素法を用いた数値解析手法が開発され、コンクリートのひび割れを予測するための実用技術となっている.とりわけ、マスコンクリート構造物においては、有限要素法を用いた温度応力解析が事前に行われることが一般的になりつつあり、温度ひび割れに対する認知度が高くなってきている.

しかし、日本コンクリート工学協会が行った、温度応力解析結果と実際のひび割れ発生の一致度に関するアンケート調査によると、解析結果と実際の一致度については、約 30% 程の人が一致しないとの報告をしており<sup>1)</sup>、解析精度が十分であるとは言い難い.

温度応力解析を行う際には、コンクリートの温度特性や力学的特性値といった材料特性 値が必要となり、解析の精度は材料特性値に大きく左右される. 図1 に温度応力解析によ るひび割れ発生の検討フローおよび材料特性値を示す.材料特性の中でもひび割れ発生に 抵抗する要因としては、引張強度や引張伸び能力が挙げられるが、引張強度は圧縮試験や 割裂試験により間接的に算出することが一般的であり<sup>2),3)</sup>、引張伸び能力については考慮さ れていないのが現状である.一方で、誘発要因の一つである自己収縮については、乾燥収 縮に比べて値が小さいことから、実用上は一般に無視できると説明されていた.しかし、 近年では水セメント比が小さい高強度コンクリートや高炉スラグを混入したコンクリート では自己収縮が極めて大きくなることが報告されており、その重要性が認識されつつある<sup>4</sup>.

また,ひび割れ発生条件については,部材内に発生する引張応力が引張強度の一定割合 に達した場合とする考え方が最も直感的に理解しやすく,温度ひび割れ指数もこの考え方 に基づいている.既往の研究では,応力に基づいた検討が最も多く<sup>5-7)</sup>,その他のひび割れ 発生条件としては,ひずみやエネルギー<sup>8)</sup>に基づくものなどが挙げられる.しかしながら, いずれの条件においても研究者により意見が異なり,統一的な見解が得られていないのが 現状である.

以上のような背景から,若材齢時コンクリートのひび割れ予測技術の発展に資するため には,ひび割れ照査に必要な材料特性値ならびに,ひび割れ発生条件に関する実験的事実 の傾向を正しく把握することが重要であると考えられる.



図1 温度応力解析によるひび割れ発生の検討フロー

#### 1.2 研究の目的

本研究では、1.1 節に示した背景を踏まえ、ドックボーン型の一軸引張試験装置(DTTM) および、温度応力試験装置(TSTM)を用いて<sup>9</sup>、若材齢時コンクリートの引張特性および自 己収縮特性、ならびにひび割れ発生条件に関する実験的検討を行った.

#### 1.3 本論文の構成

本論文における構成を図2に示す.本論文は7章から構成されており,各章の概略は以下の通りとなっている.

「第1章 序論」では、本研究の背景および目的について示した.また、本論文の構成を示 すとともに、各章の概要を記載した.

「第2章 既往の研究」では、温度応力解析を行う際に必要となる入力値、言い換えれば、 コンクリートのひび割れに影響を及ぼす材料特性についての文献調査を行った。節の構成 としては、材料特性をひび割れを誘発する要因と、ひび割れに抵抗する要因とに分類する ことにした.これらの材料特性のうち、本論文で調査を行ったのは、誘発要因として自己 収縮特性、抵抗要因として引張特性である.

また,温度応力の算定と伴に,ひび割れ発生の予測精度向上のための技術的両輪を成す, ひび割れ発生条件に関する既往の成果を調査した.

「第3章 各種セメントを用いた直接引張試験」では、直接引張試験装置を用いて実験を行い、並列して行った割裂引張試験や圧縮強度試験との関係を明らかにすると伴に、引張ひずみの限界についての検討を行った.

「第4章 直接引張試験結果の定式化」では、第3章で得られた試験結果を元に、直接引張 強度や引張ひずみの実験式を算出した.算出にあたっては、若材齢時における精度の追従 性を高めることを目的として、基準材齢を3日もしくは7日とした.

「第5章 温度一定条件下における自己収縮試験」では、日本コンクリート工学協会(JCI)に 記載されている自己収縮予測式と、実験結果との比較検討を行うこととした.JCI予測式で は、温度依存性を考慮するために経験最大温度をパラメータとしているが、本検討では、 異なる温度一定条件下における自己収縮試験を実施することで、自己収縮の温度依存性に 関して考察を行った.

「第6章 温度応力試験によるひび割れ発生限界の検討」では、ひび割れ発生条件の実験的 傾向を把握することを目的として、温度応力試験装置を用いて試験を行った.検討を行う 際の、応力・強度比やひずみ・伸び能力比については、第4章で算出した実験式を用いる こととした.

「第7章 結論」では、各章における検討から得られた知見を総括した.

#### 第1章 序論

□研究の背景・目的

□本論文の構成

#### ビジョン:ひび割れ発生の事前予測精度の向上



図2 本研究のビジョンと論文の構成

#### 1.4 用語の定義

本論文で用いている用語および用語の意味を以下に述べる.

#### ■温度ひび割れ:

セメントの水和および自己収縮に伴うコンクリートの体積変化が拘束作用を受けること で発生する、体積変化に起因したひび割れ.

#### ■自己収縮(Autogenous Shrinkage):

セメントの水和により凝結始発以後に巨視的に生じる体積減少.なお,この収縮には物質 の侵入や逸散,温度変化,外力や外部拘束に起因する体積変化は含まれない.

#### ■応力強度比(Stress Strength Ratio):

TSTM 試験における拘束応力を,直接引張試験における引張強度で除したもの.

#### ■ひずみ伸び能力比(Strain Strain Capacity Ratio):

TSTM 試験における拘束ひずみを、直接引張試験における引張伸び能力で除したもの.

■ダミー(自由)ひずみ(Free Strain): TSTM 試験における無拘束供試体に生じるひずみ.

#### ■拘束したひずみ(Rest Strain):

TSTM 試験における拘束供試体に生じるひずみ.

#### ■拘束ひずみ(Restrained Strain):

TSTM 試験における無拘束供試体に生じるひずみと拘束供試体に生じるひずみの差.

#### ■拘束率(Restrained dgree):

ダミー(自由)ひずみに対する拘束ひずみの割合

#### ■引張ひずみ(Tensile Strain):

直接引張試験における,最大引張強度時のひずみ

#### ■引張伸び能力(弾性的な)(Tensile Strain Capacity):

本研究では、引張ひずみをクリープの影響を受けない弾性的な引張伸び能力と定義した.

#### 第2章 既往の研究

#### 2.1 ひび割れに影響を及ぼす材料特性

2.1.1 ひび割れを誘発する材料特性

コンクリートのひび割れ発生に影響を与える材料特性は、大きく分けてひび割れを誘発 する要因と、抵抗する要因とに分けられる.**表 2-1**に誘発要因とその作用について示すと 伴に、各要因について説明する.

表 2-1 ひび割れ発生を誘発する材料特性<sup>10)</sup>

材料特性	ひび割れに関わる作用
水和熱	セメントと水が反応することにより生じる
線膨張係数	温度変化に対する熱のコンプライアンス
収縮ひずみ	水和収縮、自己収縮、乾燥収縮などがある
弹性係数	応力とひずみの比で表される
圧縮クリープ	部材内に生じた圧縮応力を緩和する働き

(a)水和熱

水和熱は、温度ひび割れ発生の最も大きな駆動力であり、断熱温度上昇はセメント鉱物 の組成、骨材と水の密度、比熱、量によって決定される.

(b)線膨張係数

線膨張係数は、単位温度変化に対するひずみ変化の割合を表しており、この値が大きい 程、温度ひずみも大きくなる.また、自己収縮と温度ひずみの分離を目的とした線膨張係 数の経時変化や温度依存性が盛んに検討されており、材齢初期においては一般に使用され ている 10 µ /℃よりもかなり大きな値となることが実験により明らかにされている<sup>11~15)</sup>.

(c)収縮ひずみ

コンクリートの収縮には、温度収縮、水和収縮、自己収縮、乾燥収縮、そして炭酸化収 縮がある.水和収縮は、硬化収縮ともいわれ、未水和のセメントと水が反応する時、生成 する水和物の体積が元の体積(水と未水和セメントの体積)の和よりも少なくなる現象であ る.これは、水とセメントが化学的に結合することによって起こるものであるため化学収 縮(Chemical shrinkage)と呼ばれることもある.水和収縮(化学収縮)は、自己収縮(Autogenous Shrinkage)のようなマクロな体積変化とは異なった現象であり、収縮量の大部分は硬化体中 の内部空隙となって残るため、この収縮量を測定することにより、水和に伴って形成され る内部空隙を予測することができる.

図 2-1 にセメントの水和反応による化学組成の変化を示す. 図 2-1 に示すように、水和収縮(化学収縮)は、内部空隙と自己収縮の和である.つまり、第5章で詳しく述べる自己

収縮は、水和収縮(化学収縮)により、セメント硬化体のマクロな体積減少として扱われるものである.



図 2-1 水和反応による化学組成の変化<sup>16)</sup>

炭酸化収縮は、セメントの水和物(主として Ca(OH)<sub>2</sub>)が、空気中の炭酸ガスと反応し、炭酸化の過程で収縮が生じる現象である.とりわけ、コンクリートが乾燥しながら炭酸化した場合の炭酸化収縮量は、全体の 0.1%を超えるとの報告もあり、乾燥収縮の中には炭酸化収縮も大きく関与していると考えられる.

温度収縮、自己収縮、乾燥収縮の関係の概略を図 2-2 に示す<sup>17)</sup>.図 2-2 に示すように、 これらは相互に依存しており、温度収縮は温度降下、自己収縮は自己乾燥、乾燥収縮は水 分移動が発生の主な原因であると考えられている.

(d)弾性係数

弾性係数は、温度ひび割れおよび収縮ひび割れの両方に影響し、大きな値をとる程拘束 応力が大きくなる.

(e)圧縮クリープ

マスコンクリート構造物では、水和発熱による温度上昇による膨張ひずみが若材齢時に 生じるが、鉄筋や外部拘束等によりこのひずみが拘束され圧縮応力が生じる.しかし、こ の材齢のコンクリートは十分に弾性係数が発現しておらず、この圧縮応力がクリープによ り大きく低減される結果、コンクリート温度が水和反応の鈍化と外部冷却により下降する 局面では大きな引張応力を生じさせることとなり、ひび割れ発生に繋がると考えられる. すなわち、圧縮クリープが大きい程ひび割れは発生しやすい.クリープの予測モデルとし ては、クリープの発生が骨材やセメント硬化体から成る極めて複雑な複合材料であること に加え、作用応力下での水分移動も伴うため、機構の解明や汎用性のある数学的支配方程 式の定式化には至っていないのが現状である.



図 2-2 温度・自己収縮・乾燥収縮の関係<sup>17)</sup>

2.1.2 ひび割れに抵抗する材料特性

. . . . . . . . .

**表 2-2**にひび割れに抵抗する要因とその作用について示すと伴に、各要因について説明 する.

表 2-2 ひび割れ発生を誘発する材料特性<sup>10)</sup>

材料特性	ひび割れに関わる作用
引張クリープ	部材内に生じた引張応力を緩和する働き
引張強度	応力進展によるひび割れ発生に抵抗
引張伸び能力	ひずみ進展によるひび割れ発生に抵抗
破壊エネルギー	ひび割れ進展・ひび割れ幅の拡大に抵抗
鉄筋付着	ひび割れ幅拡大に抵抗

(f)引張クリープ

引張クリープは、圧縮クリープとは異なり、温度ひび割れおよび収縮ひび割れを抑制す る方向に働く.これは、収縮が拘束されることにより発生した引張応力を引張クリープが 緩和するからである.同じクリープであっても、圧縮と引張でまったく逆の効果を示すこ とは大変興味深い.

(g)引張強度

ひび割れ発生基準として,最も一般的に用いられている.次節で詳しく述べるように、 引張強度は圧縮強度の関数として簡便に予測されることが多い. (h)引張伸び能力

引張強度と同様に、ひび割れ発生基準の一つとして考えられている. 一般的には 100~300 µ程度とされている.

(i)破壊エネルギー

ひび割れ発生基準の一つとして考慮されるようになってきており、また、ひび割れの発 生に対してだけでなく、発生した後のひび割れ幅にも影響を与える.この値を大きくする ことでひび割れ進展と幅の拡大を抑制し、いわゆるひび割れ抵抗性が高いコンクリートと することができる.この特性値に関する研究は急激に進歩してきている. (i)鉄筋付着

鉄筋の付着は、ひび割れ幅の拡大に対して重要な役割を果たす.ひび割れが発生すると、 ひび割れ面では、発生以前にコンクリートが負担していた応力がひび割れ幅の拡大ととも に急激に失われるが、その代わりに鉄筋がひび割れ面での応力伝達を担うようになる.ひ び割れ幅の拡大とともにある範囲まではこの鉄筋による伝達応力は大きくなることが知ら れており、ひび割れを架橋する役割をする.しだがって、この鉄筋付着が大きい程小さな ひび割れ幅で大きな応力を伝達できることになり、ひび割れ幅は抑制されることになる. ただし、鉄筋付着は内部拘束応力を発生させる原因ともなることから、場合によっては誘 発要因になる可能性もあることに注意が必要である.

#### 2.2 各種指針による材料特性の予測式

2.2.1 圧縮強度

#### (a) 日本コンクリート工学協会の定める圧縮強度<sup>1)</sup>

2008 年に日本コンクリート工学協会より改定されたマスコンクリートのひび割れ制御指 針<sup>1)</sup>では、コンクリートの圧縮強度を以下のように定めている.

コンクリートの圧縮強度は、材齢、温度依存性を考慮できる式(2-1)によって評価するのを標準とする.

$$f'_{c}(t_{e}) = \frac{t_{e} - s_{f}}{a + b \cdot (t_{e} - s_{f})} f'_{c}(t_{n})$$
(2-1)

ここに、 $f'_{c}(t_{e})$  : 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)  $t_{e}$  : 有効材齢 (日) a,b : セメント種類および管理材齢に応じた圧縮強度の発言を表す係数  $s_{f}$  : セメントの種類に応じた硬化原点に対応する有効材齢(日)  $f'_{c}(t_{n})$  : 管理材齢 $t_{n}$ における圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>) コンクリートの強度発現は、温度の影響を等価な材齢として評価する式(2-2)を用い、 式(2-1)によって求めるのを標準とする.

$$te = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i \cdot \exp\left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0}\right]$$
(2-2)

ここに、
$$t_e$$
: 有効材齢(日)  
 $\Delta t_i$ : ある一定のコンクリート温度が継続する機関(日)  
 $T(\Delta t_i)$   $\Delta t_i$ の間継続するコンクリート温度(°C)  
 $t_0$ : 1°C

式(2-1)中の係数 a,b は、セメントの種類および管理材齢に応じて、また係数 S<sub>f</sub>は、セメントの種類に応じて表 2-3 より求めるのを標準とする. また、式(2-1)中の係数  $f'_c(t_n)$ は、セメント水比に応じて表 2-4 より求めるのを標準とする.

セメント	管理材齢tn	$a = \alpha_1 + \beta_2$	$\beta_l(C/W)^*$	$b = \alpha_2 + \beta_2 (C/W)^*$		$S_f$
の種類	(日)	$\alpha_1$	β1	α2	β <sub>2</sub>	
₩ \Z L <sup>0</sup> () ~)	28	6.31	-1.36	0.771	0.0494	
普通小 ルトフノ	56	6.94	-1.54	0.875	0.0278	0.37
	91	7.37	-1.67	0.946	0.0138	
中国新生。11日	28	15.8	-3.44	0.428	0.125	
中庸恐いルトノ	56	20.2	-4.79	0.637	0.0862	0.42
	91	24.3	-6.09	0.844	0.0399	
(正表)上。11二、	28	21.9	-3.94	0.203	0.143	
1氏熱ホルトフン	56	32.8	-6.92	0.410	0.125	0.50
r extr	91	42.0	-9.72	0.612	0.086	
	7	3.27	-0.816	0.512	0.122	
早強ポルトラン	14	3.96	-1.04	0.711	0.0759	0.20
ト゛セメント	28	4.39	-1.19	0.841	0.0428	0.30
	91	4.79	-1.32	0.966	0.0096	
古にない」	28	14.4	-3.86	0.477	0.140	
向知じ入下	56	17.4	-4.88	0.687	0.0877	0.42
B 種	91	19.2	-5.44	0.787	0.0757	
75/2 2 411	28	13.4	-3.20	0.514	0.116	
7747ッジュセメント B種	56	16.2	-4.12	0.708	0.0739	0.47
	91	18.4	-4.80	0.850	0.0456	

#### 表 2-3 圧縮強度発現式の各係数

\*C/W:セメント水比

セメントの	管理材齢	$f'_c(t_n) = p_1 + p_2(C/W)$		
種類	$t_n$ ( $\square$ )	$p_1$	$p_2$	
来なた。リコントット・	28	-14.5	28.1	
晋1囲ホ ルトフント てメ	56	-12.8	28.7	
2 F	91	-11.6	29.1	
中国新生。オリニント。	28	-17.6	27.5	
中庸熱ホルトフノト	56	-12.9	28.8	
UXZE	91	-7.28	29.1	
低熱ポルトランドセメ	28	-17.6	25.2	
	56	-13.4	28.7	
	91	-6.44	29.4	
	7	-22.6	30.5	
早強ポルトランドセメ	14	-18.2	31.0	
ント	28	-14.9	30.9	
	91	-11.5	30.5	
古伝わり	28	-10.2	24.3	
高炉でメント D 種	56	-3.38	23.6	
B 相	91	-1.43	24.5	
	28	-27.2	31.8	
ノフイノッシュセメント B	56	-24.2	32.9	
不里	91	-22.4	34.0	

#### 表 2-4 圧縮強度発現式の各係数

\*C/W:セメント水比

2.2.2 引張強度

a)土木学会の定める引張強度<sup>2)</sup>

2007 年に制定された土木学会標準示方書設計編<sup>2)</sup>では、ひび割れ指数の算定に用いるコンクリートの引張強度を以下のように取り扱うように定めている.

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

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

供試体の引張強度の材齢に伴う変化は、一般にその圧縮強度から推定できる.式(2-3) と式(2-4)はその例である.式(2-3)の右辺の f'<sub>ck</sub>は設計基準強度であるとしているが、 構造物完成後の再検討などにおいて、試験などにより圧縮強度が得られている場合にはそ れを用いてよい.

$$f'_{c}(t) = \frac{t}{a+bt} d(i) f'_{ck}$$
(2-3)

$$f_{tk}(t) = c\sqrt{f'_c(t)}$$
 (2-4)

ここに、  $f'_{c}(t)$ : 材齢 t 日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)  $f_{tk}(t)$ : 材齢 t 日におけるコンクリートの引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)  $f'_{ck}$ : コンクリートの設計基準強度 (N/mm<sup>2</sup>)

t:材齢(日)

*i*:設計基準強度の基準材齢(日)

- a,b: セメント種類によってばらつくが,表2-5を標準とする.高炉セメントB種を用いる場合は、中庸熱ポルトランドセメントと同等の値を用いてもよい.フライアッシュセメントB種および低熱ポルトランドセメントについては定数を与えられるほどデータが蓄積されていないので、過去の実績を参考にして定めるとよい.
  - c:コンクリートの乾燥の程度によって異なるが, 0.44を基準とする.
  - d: 材齢 28 日に対する材齢 91 日の強度増加率であり、d(28)は表 2-5 を 基準とする.また、セメントの種類によらず、d(91)=1 とする.

表 2-5 式 (2-3) の定数 a, b, d の値

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

b) 日本コンクリート工学協会の定める引張強度<sup>1)</sup>

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

コンクリートの引張強度は、材齢、温度依存性を考慮できる式(2-5)によって評価するのを標準とする.

$$f_t(t_e) = C_1 \times f'_c (t_e)^{C_2}$$
(2-5)

ここに,  $f_t(t_e)$  : 引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)  $f'_c(t_e)$ : 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)  $C_1, C_2$ : 係数

コンクリートの引張強度は、式(2-5)によって求める.式(2-5)中の係数は $C_1$ =0.13 および $C_2$ =0.85を標準とする.これらの係数は、水中養生供試体に基づいて定めたものであるので、水中養生と同等の養生ができない場合には、適切に修正しなければならない.特に、高炉セメントやフライアッシュセメントのような混合セメントの場合には、養生の良否が引張強度の発現に敏感に影響を与えるので、養生条件によっては引張強度を適切に低減することが必要である.

コンクリートの引張強度は,式(2-5)によらず,信頼できる資料,または割裂引張強度試験 によって求めてもよい.ただし,これらのコンクリートの引張強度は,有効材齢の関数として 扱う.

2.2.2 ヤング係数

#### a) 土木学会の定めるヤング係数<sup>2)</sup>

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

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

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

既往の研究成果によれば、材齢28日に荷重が作用する場合に比べて材齢2日で荷重が作 用する場合には、クリープ係数が1.5~2.0 倍大きくなることが報告されている.また、コ ンクリートの温度が高く保たれている場合にも、クリープ係数は増大する.これらの諸点 を考慮し、有効ヤング係数を設定する方法としては、積算温度に基づいて定めた圧縮強度 からヤング係数を推定し、対応する材齢におけるクリープあるいはリラクセーションを考 慮してヤング係数を低減する簡易法が一般的に用いられている.この場合、クリープ特性 は圧縮、引張ともに同じ特性となる. 有効ヤング係数の近似値を簡便に求めたいときには,式(2-6)を用いてもよい.ただし, 設計基準強度が 50N/mm<sup>2</sup>を超えるコンクリートのクリープ特性については現状では不明な 点も多いので,別途クリープ試験当を実施して定めることが望ましい.

$$E_{e}(t) = \varphi(t) \times 4.7 \times 10^{3} \sqrt{f'_{c}(t)}$$
(2-6)

ここに,

$$E_{e}(t)$$
 : 材齢 t 日における有効ヤング係数度 (N/mm<sup>2</sup>)

 $f'_{c}(t)$  :式(9)による材齢 t 日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

#### b) 日本コンクリート工学協会の定めるヤング係数<sup>1)</sup>

2008 年に日本コンクリート工学協会より改定されたマスコンクリートのひび割れ制御指 針<sup>1)</sup>では、コンクリートのヤング係数を以下のように定めている.

コンクリートのヤング係数は、材齢、温度依存性等を考慮できる式(2-7)によって評価 するのを標準とする.

$$E_{C}(t_{e}) = C_{1} \times f'_{c} (t_{e})^{C_{2}}$$
(2-7)

ここに,  $E_c(t_e)$  : ヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)  $f'_c(t_e)$  : 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)  $C_3, C_4$  : 係数

コンクリートのヤング係数は,圧縮強度の関数である式(2-7)を用いる.なお,式(2-7)中の係数は C<sub>3</sub>=6300 および C<sub>4</sub>=0.45 を標準とするが,信頼できる資料,または実験によって係数 を求めてもよい.コンクリートのポアソン比は 0.2 を標準とするが,信頼できる資料,または 実験によって係数を求めてもよい.

#### 2.2.4 自己収縮(国外)

国内・国外を問わず、コンクリートの自己収縮予測式は、各種提案されている.これら の予測式を大まかに分類すると、セメントペーストの自己収縮から複合則を用いてコンク リートの自己収縮を予測するもの、セメントの鉱物組成および反応率を基に予測するもの、 自己収縮は水和率に依存すると仮定して圧縮強度を関数として予測するもの、自己収縮の 進行を表す関数と終局値を基に予測するものとがある.

以下,代表的な自己収縮予測式について述べることとする.なお本研究では,第5章で 述べるように,普通ポルトラントセメントのみを対象としたことから,基本的に予測式の 記載も普通ポルトラントセメントの場合を用い,その他については割愛することとした.

B.Persson は、コンクリートの自己収縮は内部相対湿度φの変化によって生じ、その内部 湿度は W/B と材齢の関数によって表現されるとし、粒状のシリカフュームを使用した場合 の自己収縮を式(2-8)で提案した<sup>18)</sup>.

$$\epsilon_{auto} = 350 \left( 1 - \phi \left( \frac{W}{B}, t \right) \right) + 760$$
 (2-8)

ここで, φ(W/B, t)=0.38(W/B+2.4-0.1In(t))

同様に W.H.Dilger らは、凝結以降の自己収縮ひずみ予測式を W/B と材齢の関数によって 表現し、シリカフュームの有無別に予測式を提案した<sup>19</sup>.シリカフュームなしの場合の予 測式を式 (2-9)に示す.

$$\epsilon_{\text{auto}} = 700 \cdot \exp(-3.5\text{W/B}) \cdot \frac{t^{0.7}}{\gamma + \alpha \cdot t^{0.7}}$$
(2-9)

 $\sub \sub , \ \alpha = 1.04^{-W/3B}, \ \gamma = 16.7(1-\alpha)$ 

RILEM の French Chapter(AFREM)では、プレストレストコンクリート設計の目的で自己収縮予測式を示している<sup>20)</sup>. この予測式は、材齢 28 日までのコンクリートの自己収縮は水和率に依存するという考え方を用い、圧縮強度の比をパラメータとしているのが特徴である. 材齢 28 日以前における予測式を式(2-10)に、材齢 28 日以後の予測式を式(2-11)に示す.

$$\epsilon_{auto} = (f_{c28} - 20) \left\{ 2.2 \frac{f_c(t)}{f_{c28}} - 0.2 \right\} \times 10^{-6}$$
 (2-10)

ただし, f<sub>c</sub>(t)/f<sub>c28</sub>≧0.1

$$\epsilon_{auto} = (f_{c28} - 20) \left\{ 2.8 - 1.1 \exp\left(\frac{t}{96}\right) \right\} \times 10^{-6}$$
 (2-11)

ここで、f<sub>c</sub>(t): 材齢t日における圧縮強度 f<sub>c28</sub>: 材齢 28日における圧縮強度

また, prEN1992-1(Eurocode2)においても, 圧縮強度をパラメータとした自己収縮予測式2-11 が提案されている<sup>21)</sup>.

$$\epsilon_{auto} = 1 - \exp(-0.2t^{0.5}) \times \{-2.5(f_{ck} - 10) \times 10^{-6}\}$$
 (2-12)

ここで, fck: コンクリートのシリンダー圧縮強度(MPa) t : 材齢(日)

さらに, DIN1045-1 では圧縮強度を基にした自己収縮ひずみの最終値を記載している<sup>22)</sup>. コンクリートの強度クラス別に自己収縮の最終値をチャートで表している.本研究では, 予測式を対象としているためチャートについては省略する.

以上,これらの自己収縮予測式のパラメータを整理したものを**表 2-6**に示す.なお,表 中の〇は式にパラメータとして直接考慮されているものを示す.

提案者·機関	B.person <sup>18)</sup>	W.H.Dilger <sup>19)</sup>	AFREM <sup>20)</sup>	prEN <sup>21)</sup>	DIN <sup>22)</sup>
提案年	1997	1997	1996	2000	
W/C	0	0			
混和材	0	0			
圧縮強度			0	0	0
骨材の影響					
セメント					0
温度					

表 2-6 自己収縮予測式のパラメータ

2.2.3 自己収縮(国内)

一方で国内においては、いくつかの研究例があるものの、田澤・宮澤らが継続的に行っている研究が代表的である。田澤・宮澤らが 1992 年から 2010 年までに行った自己収縮の研究報告には自己収縮予測式が複数提案されている。本項では、それらの予測式を大きく3つに分類して述べることとする。

田澤・宮澤らは 1994 年に<sup>23)</sup>, セメントペーストの自己収縮予測式として, セメントの鉱物組成およびそれらの反応率をパラメータとした予測式を提案した.これは, 自己収縮は各鉱物の反応で生じる反応生成物の種類に依存し, 各鉱物ごとに異なった大きさで生じる自己収縮を線形的に重ね合わせたものであると仮定し, セメントペーストの予測式は式(2-13)で表される.

$$\begin{split} \epsilon_{p}(t) &= a \cdot \alpha_{c3s}(t) \cdot \left(C_{3}S\%\right) + b \cdot \alpha_{C2S}(t) \cdot \left(C_{2}S\%\right) + c \cdot \alpha_{C3A}(t) \cdot \left(C_{3}A\%\right) \\ &+ d \cdot \alpha_{C4AF}(t) \cdot \left(C_{4}AF\%\right) + e(\gamma) + f \end{split}$$

田澤・宮澤らが 1994 年に提案した自己収縮予測式は,適用可能な水セメント比が限られ ていることや,適切な反応率の設定が困難である点に課題があった.そこで,宮澤らは 1997 年に<sup>24)</sup>,終局値を用いた簡便な式である、コンクリートの断熱温度上昇式のような形式で 表現した、自己収縮予測式を**式 2-14** 提案した.

$$\epsilon_{a}(t) = \gamma \epsilon_{c0}\left(\frac{W}{B}\right)\beta(t)$$
 (2-14)

ここで、 ε c0 は自己収縮の終局値であり、0.2≦W/B≦0.5 の場合は式(2-15)で表わされる.

$$\epsilon_{c0}(\frac{W}{B}) = 3070 \exp\left\{-7.2(\frac{W}{B})\right\}$$
 (2–15)

 $\beta$ (t)は、自己収縮の進行を表す関数であり、式 2-16 により表される. なお、式 2-16 中の a,b は定数であり水セメント比によって異なる.

$$\beta(t) = 1 - \exp\{-a(t - t_0)^b\}$$
 (2-16)

この提案式(田澤・宮澤 1997)の適用範囲は、水結合材比 20~60%の一般的な単位骨材容 積を有するコンクリートで、コンクリート温度が 20~60℃程度の場合となっている.この 予測式は、平成 14 年(2002 年)の土木学会標準示方書<sup>25)</sup>に採用されたが、適用範囲などに若 干の違いが見られる.

その後,宮澤らは自己収縮の温度依存性について検討を行い,2008年に高温履歴を想定 した自己収縮予測式を提案した<sup>26)</sup>.この予測式は,式(2-15)で表される水セメント比を関 数としている自己収縮の終局値に,経験最大温度の関数を付加しているのが特徴である. 普通ポルトラントセメントの場合の自己収縮の終局値を式(2-17)に示す.

$$\epsilon_{\rm sh,\infty} = 3070 \times \left\{ -7.2 \left( \frac{W}{C} \right) \right\} +50 \times \left[ 1 - \exp\{-1.2 \times 10^{-6} \times (T_{\rm max} - 20)^4\} \right]$$
(2-17)

ここで、T<sub>max</sub>:経験最大温度

この経験最大温度を考慮した提案式(宮澤 2008)は<sup>26</sup>、日本コンクリート工学協会のひび 割れ制御指針 2008<sup>1)</sup> に採用され,現在国内においては,もっとも代表的な予想式となって いる.しかしこの予測式は、マス温度履歴を想定しているため,温度ひずみの補正が極め て重要であるにもかかわらず,前節で述べたように,補正が正確であるとは言い難い.ま た,寸法の異なる二つの供試体で試験を行っていることから,寸法効果の影響を考慮して いないと考えられることや,供試体の打込み方向と埋設ひずみ計の設置方向が二つの供試 体で異なる点,経験最大温度をパラメータとしていることから,コンクリートの温度上昇・ 下降と自己収縮進行のタイミングについて考慮していないといった点に問題がある.

以上,これらの自己収縮予測式のパラメータを整理したものを**表 2-7**に示す.なお,表 中の○は式にパラメータとして直接考慮されているもの. △は直接パラメータとなっては いないが,有効材齢という形で間接的に考慮されていることを示す.

提案者·機関	宮澤 <sup>23)</sup>	宮澤 <sup>24)</sup>	宮澤 <sup>26)</sup>	土木学会 <sup>25)</sup>	JCI <sup>1)</sup>
提案年	1994	1997	2008	2002	2008
W/C		0	0	0	0
混和材		0	0	0	0
圧縮強度					
骨材の影響	0				
セメント	0	0	0		0
温度		Δ	0		0

表 2-7 国内における自己収縮予測式のパラメータ

2.3 直接引張試験に関する知見

直接引張試験による試験方法が一般化されれば、コンクリートの真の引張強度が得られ るだけでなく、引張ひずみのデータも得ることができる.しかしながら、試験中に生じる 偏心を完全に避けることが難しく、引張力をコンクリート供試体に一様に作用させるには 工夫が必要である.

これまでに行われている直接引張試験における引張方法としては大きく分けて以下の 4 つの方法があり、これらの方法を組み合わせて試験を行っているものもある.

①供試体端部に鉄筋やボルトを埋め込んで引張る方法.
 ②供試体端部を何らかの方法で引っ掛けて引張る方法.
 ③供試体端部に圧縮力を加え,摩擦力を利用するもの.
 ④供試体端部を接着剤で固定して引張る方法.

また,供試体の形状については大きく分けて,角柱・円柱・ドックボーン型がある. 図2 -3に形状の概略図を示す.



#### 2.4 ひび割れ発生条件

2.4.1 ひび割れ発生条件の分類と問題点

コンクリートのひび割れは、体積変化に起因する体積収縮が何らかの理由で拘束された 場合に発生することが多い.しかしながら、具体的なひび割れ発生条件とは何かについて は不明な点が多いのが現状である.ここでは、現在までに報告されているひび割れ発生基 準を紹介すると伴に、問題点について述べることとする.

①引張応力が引張強度を超える

②長期間作用する引張応力が引張強度の一定割合に達する

③引張ひずみが伸び能力を超える

④破壊力学に基づくひび割れ進展条件を満たす

①の条件は、静的な短時間強度試験下においてよく適用されている条件である.しかし、 荷重速度ならびに荷重履歴などの影響から派生するクリープが関係する場合、コンクリー トの破壊性状が変化することから、ひび割れ発生基準としての適用には疑問が生じる.つ まり、長期載荷を受けている状況下でのひび割れはクリープ破断であるともいえ、破断は 引張強度よりも低い応力で一般には発生することから、この条件を単純に適用することは 危険側の評価となることが考えられる.

②の条件は、体積変化に起因する応力の進展が、静的な強度試験の応力速度に比較して きわめて遅い速度であることを考慮している.一般に、荷重速度が速くなると破壊限界応 力は増加し、逆に荷重速度が遅くなると破壊限界比は低下していくことが知られている. このことから、①の条件と同様に、収縮ひび割れの発生は長期間作用する引張応力とその ときに保有している引張強度との比率を表す応力限界比が 100%に達する前に生じる.例え ば、このひび割れ発生時の応力強度比として、70%が提案されており<sup>28)</sup>、この値はクリー プ破断における値と同等であるとの指摘もある.しかしながら、この 70%の根拠は限られ た実験から得られた多分に経験的な値であり、他の文献ではさまざまな要因の影響により 40~90%の範囲で異なった結果が得られたとの報告がなされている.この要因としては、 ひび割れが発生する材齢の影響が多くの文献で指摘されており、図 2-3 にしめすように、 ひび割れ発生材齢が長くなるほど応力強度比が高くなることが共通して報告されている<sup>28)</sup>.

③の条件は、引張応力により作用する引張ひずみが引張伸び能力(ひび割れ発生時の引張 ひずみ)を超えるとひび割れが発生することを意味している.この引張伸び能力は、当然の ことながらクリープの影響を直接に受け図2-4に示すように、ひび割れが発生する材齢が 長くなるほど値が大きくなることが指摘されている<sup>28)</sup>.既往の研究によれば、この値は100 ~300 µ 程度の範囲に分布していると報告されている.しかし、引張伸び能力は、自由ひず みから拘束されたコンクリートのひずみを差し引いた値とすることが一般的であり、ひず みの検長をどのようにするかなどの定義が研究者により異なるなど多くの課題が残されて いる.



図 2-3 ひび割れ発生材齢と応力強度比の関係<sup>28)</sup>



図 2-4 引張伸び能力に与える材齢の影響<sup>28)</sup>

第3章 各種セメントを用いた直接引張試験

#### 3.1 実験概要

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

これらのコンクリートの特性値は、ひび割れ発生やひび割れ幅の検討を行う上で欠かす ことのできない重要なパラメーターであり、精度よい推定を行うことが、収縮ひび割れの 予測・制御を行う上での重要な鍵といえる.

本研究では、収縮ひび割れの予測技術の発展に資することを目的とし、若材齢コンクリートの特性値、とりわけ引張特性、ならびに変形特性の傾向を正しく把握することを試みたものである.

コンクリートの引張強度は、一般に φ150mm の円柱供試体を用いた割裂引張試験によっ て、間接的に求められる.しかし、割裂引張試験は円柱供試体を横に置いて上下より圧縮 荷重を加えているため、載荷点付近で圧縮応力が作用し、一様な引張応力が生じない場合 があり、粗骨材とモルタルマトリックスとの遷移領域における付着力を十分に考慮してい ないといった問題点がある.また、割裂引張試験は引張変形を測定できないため、引張ヤ ング係数や伸び能力の限界値を得ることはできない.

それに対し、直接引張試験は、引張強度と引張変形を同時に得られるという利点がある ものの、試験方法は各種提案されており<sup>27)</sup>、統一された試験方法は未だに確立されていな いのが現状である.既往の研究では、直接引張強度の方が大きいとするものや<sup>29)</sup>、割裂引 張強度の方が大きいとするもの<sup>30)</sup>、直接引張強度は割裂引張強度とほぼ同等とするもの<sup>31)</sup> とがあり、統一的な見解が得られていないと判断される.

一方,最近深刻化しつつある地球環境問題に対応すべく,持続的な経済発展を可能とする 循環型社会の形成が,世界的な課題として認識されつつある中で,1980年代以降,高炉セ メントの需要が増加している.とりわけスラグ混入量が30%から60%の高炉セメントB種 は、セメント製造時の燃料原単位が普通セメントに比べて約45%,電力の消費量も約15% 少なく,環境負荷低減が期待できる.しかしながら,高炉セメントは初期強度の改善を行 ったことにより,コンクリートの断熱温度上昇量および自己収縮が大きくなることが知ら れており,施工条件等によっては,収縮ひび割れの危険性が大きくなる場合がある.この ような高炉セメントの問題点を改善し,ひび割れ抵抗性を高めるべく,高炉セメントの比 表面積,高炉スラグ微粉末の置換率および石膏の量をJISの範囲内で調整した低発熱・収縮 抑制型高炉セメント B種(以後MKCIIIと称す)が開発され実構造物への評価が行われるよう になってきている<sup>32)</sup>.今後,こういった高炉スラグセメントを利用する際には、その諸特 性を十分理解した上で,設計・施工が行われる必要がある.これまでに、高炉スラグセメ ントの諸特性として,発熱特性や自己収縮特性,強度特性に関する評価が行われている<sup>32),</sup> <sup>33)</sup>.しかし,強度特性に関する試験では圧縮強度試験が検討されている場合が多く,引張強 度試験を行う場合であっても,割裂引張試験のみを行うことが多い.

以上のような背景を踏まえ、本検討ではドックボーン型の直接引張試験装置を導入し、各 種セメントの若材齢時コンクリートにおける引張特性及び変形特性について実験的検討を 行った.

3.2 実験計画

本研究では、コンクリートの力学特性を正しく評価することを目的として、各検討ケー スに対し、直接引張試験、割裂引張試験、圧縮強度試験を行った.

検討ケースとしては、普通セメント、早強セメント、MKCIII,高炉セメント B 種の計4 種類のセメントを用いたコンクリートに対し、水セメント比 60%、50%、40%、30%の4水 準について実験を行った.なお、養生はすべて水中養生とした.検討ケースを表 3-1 に示 す.なお、試験材齢はいずれのケースにおいても3日、7日、14日、28日とした.

セメント	養生	水セメント比(%)	略称			
普通セメント			普通			
早強セメント		20 40 50 60	早強			
MKCI	水中	30,40,50,60	MKC			
高炉セメントB種			高炉			

表 3-1 検討ケース

本試験で使用したセメントの物理的性質を表 3-2 に示す. 目標とするスランプは 8cm, 空気量は 4.5%とした. AE 減水剤については,標準型のポゾリス No.70 を使用した. なお, いずれのセメントにおいても,水セメント比 30%のものについては,所定のスランプを得 るために, JIS A 6204 の高性能 AE 減水剤標準形(I種)規定に適合するレオビルド SP8N を使 用した.また,いずれの水準においても許容値をスランプで 12±2cm,空気量で 4.5±1%を として配合を決定した.

表 3-3 に本試験で使用したセメントの化学成分,表 3-4 に,細骨材および粗骨材の物性 値,表 3-5~3-6 および図 3-1 にふるい分け試験結果,表 3-7 に,各ケースにおけるコンク リート配合を示す.

		密度	比重面積		凝結		
セメントの種類	区分	$\left(\frac{3}{2}\right)$	$\left(2\pi r^{2}/r\right)$	水量	始発	終結	
		(g/cm)	(cm/g)	(%)	(h-m)	(h-m)	
普通	品質例	3.15	3300	27.5	2-10	3-20	
ポルトランドセメント	JIS規格值	-	2500以上		60分以上	10時間以下	
早強	品質例	2.98	3300	26.1	3-45	5-25	
ポルトランドセメント	JIS規格值	-	3000以上	-	60分以上	10時間以下	
言にセイントD語	品質例	3.04	3850	28.8	3-0	4-15	
同かピグン下D推	JIS規格值	-	3000以上		60分以上	10時間以下	
低発熱・収縮抑制型	品質例	3.13	4550	29.5	1-55	2-50	
高炉セメント	JIS規格值	-	3300以上		45分以上	10時間以下	

表 3-2 セメントの物理的性質

表 3-3 セメントの化学成分

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

表 3-4 骨材の物性値

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

表 3-5 細骨材 (大井川水系陸砂)のふるい分け結果

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

表 3-6 粗骨材 (東京都青梅産硬質砂岩砕石)のふるい分け結果

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



#### 3.3 試験方法

直接引張試験は,写真 3-1 に示す試験装置および,写真 3-2 に示すドックボーン型の型 枠を使用した.図 3-2 に試験装置の概要を示す.直接引張試験に用いる供試体の寸法は 100×100×840mm であり,供試体中央部の試験区間(220mm)に破断を誘導するため,断面積 を他の部分よりも小さくしている.また,拘束冶具で把持する部分は,供試体の引張領域 での抜出しやすべりを極力少なくするために,試験対象区間の幅から扇状に広げた形状に し

ており,試験対象区間と拘束冶具との境界部分で応力集中が生じないように曲線は緩やか にしている.

載荷装置は、1 回転 0.3mm のスクリュージャッキとし、ロードセルで荷重の測定を行った.また、引張ヤング係数測定は供試体の中心部の左右に 60mm のひずみゲージを貼り測定した.ジャッキ側の装置型枠はユニバーサル・ジョイントとし、載荷時に偏心が起こらないように供試体の位置を調整するようにした.また、試験装置の供試体下部が接する部分はローラーとし、極力摩擦を軽減するようにした.



写真 3-1 直接引張試験装置



平面図





正面図

図 3-2 直接引張試験装置の概要



写真 3-2 直接引張試験供試体の型枠

#### 3.4 実験結果

#### 3.4.1 破断性状

直接引張試験における破断位置の例を**写真 3-3**に示すとともに,破断面の例を**写真 3-4** に示す.破断位置に関しては,図 3-3に示すように,供試体全 203 本のうち,192 本が試 験区間内で破断し,区間外で破断するのは約 4%という結果となった.なお,破断位置は供 試体の試験区間 220mm を 5 等分にして評価を行った.



写真 3-3 供試体破断状況



写真 3-4 供試体破断面



図 3-3 破断位置の分布

#### 3.4.2 圧縮強度

各種セメントを用いて行った、圧縮強度と材齢の関係を図 3-4 から図 3-7 に示す. なお、図中には試験結果の他に、日本コンクリート工学協会(JCI)のひび割れ制御指針 2008 に示されている予測式についても記載した. 記載したのはいずれのセメントにおいても水セメント比 50%の場合である.また、MKC については、制御指針には記載されていなかったため、参考として高炉セメントB種の予測式を記載することとした.

図 3-4 および図 3-5 より, 普通および早強の場合には, 材齢の進行に伴う圧縮強度の 増進, 水セメント比と圧縮強度の関係, 両者ともにきれいな傾向が見られた. 一方で図 3 -6 および図 3-7 より, 高炉および MKC を用いた場合には, 材齢の進行に伴う圧縮強度 の増進が, 一部きれいな傾向として見られない結果となった.







図 3-5 圧縮強度(早強)


図 3-6 圧縮強度(BB)



図 3-7 圧縮強度(MKC)

# 3.4.3 引張強度

各種セメントを用いて行った、割裂引張強度と材齢の関係を図 3-8 から図 3-11 に、直接引張試験の場合を図 3-12 から図 3-14 に示す.











図 3-11 割裂引張強度(MKC)







図 3-13 直接引張強度(H)



図 3-14 直接引張強度(BB)



図 3-14 直接引張強度(MKC)

3.4.4 ヤング係数

各種セメントを用いて行った、圧縮ヤング係数と材齢の関係を図 3-15 から図 3-18 に、 引張ヤング係数の場合を図 3-19 から図 3-22 に示す.



図 3-16 圧縮ヤング係数(H)



図 3-17 圧縮ヤング係数(BB)



図 3-18 圧縮ヤング係数(MKC)







図 3-20 引張ヤング係数(H)







図 3-22 引張ヤング係数(MKC)

3.4.5 引張ひずみと材齢

各種セメントを用いて行った、引張ひずみ(伸び能力)と材齢の関係を図 3-23 から図 3-26 に示す. なお、引張ひずみ(伸び能力)は、破断時におけるひずみの測定値である.

図 3-23 および図 3-24 より, 普通および早強の場合には, 材齢の経過に伴う引張ひず みの増進は見られず, 特に早強の場合には材齢の経過とともに若干ではあるが引張ひずみ が現象する結果となった.

図 3-25 より高炉の場合には、材齢7日で引張ひずみの増進が落ち着き、その後はほぼ 一定となる結果となった.また、図 3-26 より MKC の場合には、材齢10日で引張ひずみの 増進が落ち着く結果となった.







図 3-24 引張びずみ[伸び能力] (H)







図 3-26 引張びずみ[伸び能力] (MKC)

3.4.6 JCI 予測式との比較(引張強度)

各種セメントを用いて行った、圧縮強度に対する引張強度(割裂および直接)の関係を JCI 予測式と伴に図 3-27 から図 3-30 に示す.





# 3.4.7 JCI 予測式との比較(ヤング係数)

各種セメントを用いて行った、圧縮強度に対するヤング係数(圧縮および引張)の関係を JCI 予測式と伴に図 3-31 から図 3-34 に示す.





3.4.8 圧縮強度増進に伴う引張ひずみの変化

各種セメントを用いて行った、圧縮強度に対する引張ひずみの関係を図3-35から図3-36に示す.





# 3.4.9 各種強度試験による比較検討

直接引張強度と割裂引張強度の関係を図 3-39 に、圧縮ヤング係数と引張ヤング係数の 比較を図 3-40 に、直接引張強度と引張ひずみの比較を図 3-41 に示す.





図 3-39 より、水中養生した各種セメントの直接引張強度は割裂引張強度よりも約 10% 程小さくなる結果となり、青木らが行った円柱供試体による直接引張試験とは異なる結果 となった<sup>29)</sup>.

セメント種別による影響としては、普通セメントの場合で、直接引張強度は割裂引張強 度よりも約8%小さく、早強セメントの場合で約14%小さく、高炉セメントB種の場合で 約13%小さくなる結果となった.また、MKCの場合には、既に述べたように高炉系のセメ ントであるにも関わらず、引張強度が4N/mm<sup>2</sup>以下の領域においては、直接引張強度と割裂 引張強度がほぼ同等となる結果となり、異なる試験方法であっても引張強度に及ぼす影響 はあまり見られない結果となった.

MKC が高炉セメント B 種と異なった傾向を示した理由としては、セメントペーストに生 じる自己収縮や自己膨張の影響が考えられる.高炉スラグを混入したセメントペーストは 自己収縮が極めて大きくなることが指摘されており,MKC は石膏の量を増やし初期膨張さ せることで収縮を抑制している<sup>33)</sup>.本検討のような静的な強度試験においては,供試体に 生じる自己収縮に対して外的な拘束はされていないものの,コンクリート中に含まれてい る骨材によって内的には拘束されていると言える.自己収縮が内的に拘束されることによ る影響が引張強度に及ぼす影響については明らかではないが,直接引張試験と割裂引張試 験では,供試体の形状や寸法,打設と載荷方向が大きく異なり,このことが高炉セメント B 種と MKC の引張強度に影響を与えたのではないかと思われる.

図 3-40 より,水中養生した各種セメントの引張ヤング係数は,高炉系のセメントで多 少のバラツキがあるものの,圧縮ヤング係数とほぼ同等となる結果となった. 高炉系のセメントでバラツキが大きく、そのバラツキが引張ヤング係数が小さい傾向と なった理由としては、コンクリート供試体の乾燥の影響が考えられる.高炉スラグ微粉末 は潜在水硬性があり、セメントの一部を高炉スラグ微粉末で置換したコンクリートは乾燥 の影響を受けやすいことが一般に知られている.ドックボーン型の直接引張試験では、円 柱型の圧縮試験に比べ、体積に対する表面積が大きいため、乾燥の影響を顕著に受けたの ではないかと考えれる.本検討では、水中養生による室内試験で実験を行っており、水分 の逸散を完全には防いではいないものの、理想的な養生状態であると考えられる.このこ とから、高炉系のセメントを実構造物に使用する際は、現場レベルで念入りな養生を行っ たと考えられる場合であっても、乾燥の影響を大きく受ける可能性を示すものであり、施 工前の温度ひび割れ照査を行う際には、許容値・設計値の定め方には十分注意する必要が あると思われる.

図 3-41 より、セメント種別によりバラツキがあるものの、引張ひずみが 130 µ 程度に達 すると、引張強度が増進しても引張ひずみが増進しない結果となった. このことは、静的 な短時間強度試験下におけるコンクリートの引張破断が、引張強度よりも低い応力で発生 する可能性があることを示すものであり、引張強度だけでなく、弾性的な引張伸び能力も 考慮する必要があると思われる.

既往の研究では、引張伸び能力は 100~300 程度の範囲にあると報告されているが<sup>28</sup>, こ の報告はクリープの影響を含んだ引張伸び能力であり、若材齢時における引張クリープの 解明が十分でない現状を考えると<sup>34,35)</sup>, 引張伸び能力における一般的表現は困難であると 考えられる.しかしながら、クリープの影響を受けない弾性的な引張伸び能力については、 本検討で用いた直接引張試験装置を用いることで十分に評価可能であると思われる.

### 第4章 直接引張試験結果の定式化

#### 4.1 定式化の目的

前章に述べた静的な直接引張試験により,限られた条件下ではあるが,若材齢時コンク リートの引張特性に関する系統的な実験的事実を得ることができた.これらの実験結果よ り,ひび割れ発生現象を説明できるかどうかの検証を行う.検討を行うひび割れ発生条件 は,引張強度および引張ひずみの2種類とした.

本章ではその準備として,前章の試験結果より,セメント種別,材齢,水セメント比を 考慮した引張強度ならびに弾性的な引張伸び能力の実験式を算出することとした.引張強 度については,日本コンクリート工学協会「ひび割れ制御指針 2008」<sup>1)</sup>に予測式が記載さ れているものの,圧縮強度を関数とした間接的な式であることや,式に用いられている係 数は,管理材齢が 28~91 日と,比較的長期材齢となっている.本検討では,材齢 14 日以 前の若材齢時での追従性の高い実験式を算出することを目的とした.

### 4.2 定式化の方法

本検討では、引張強度、ヤング係数ならびに弾性的な引張伸び能力は、式(4-1)、式(4-2)および式(4-3)に示すように水セメント比と材齢の積で表されるものと仮定し、各セメント種別に式を算出することとした.算出にあたっては、前述したように、若材齢時における追従性を高めるために、基準材齢を3日もしくは7日とした.

$$f_{t} = f_{1}(W/C) \cdot f_{2}(t)$$
 (4-1)

$$\varepsilon_{t} = f_{1} (W/C) \cdot f_{2}(t) \qquad (4-2)$$

- ここで, f<sub>t</sub> :引張強度(N/mm<sup>2</sup>),
  - **ε**<sub>t</sub> : 弾性引張伸び能力(μ)
  - f<sub>1</sub>(W/C) : 水セメント比の影響(%)
  - f<sub>2</sub>(t) : 材齢の影響(日)

4.3 各種実験式

4.3.1 引張強度の実験式

普通セメントを用いた場合の材齢 3 日における,水セメント比と直接引張強度の関係を 図 4-1 に示す.



図4-1より,水セメント比の増加とともに,引張強度は低下しており,両者は比較的高い相関性が見られた.両者の関係は,式(4-3)に示すように指数関数で表すこととした.

$$f_1(W/C) = 36.9 \cdot (W/C)^{-0.717}$$
 (4-3)

普通セメントを用いた場合の水セメント比 60%におけるデータを式(4-3)で除した値と 材齢の関係を図 4-2 に示す. 図 4-2 より,両者の関係は高い相関性が見られ式(4-4)に 示すように指数関数で表すこととした.

$$f_2(t) = 0.81 \cdot (t)^{0.18} \tag{4-4}$$

以上の検討結果より、普通セメントの直接引張強度は、式(4-5)で表すことができる.

$$f_t = 30.0 \cdot (W/C)^{-0.72} \cdot (t)^{0.18}$$
 (4-5)



同様にして、算出した各種セメントの直接引張強度式の各係数を表 4-1 に示す.表 4-1 に示すように、高炉系のセメントでは、水セメント比および材齢に対する依存性が強い結 果となった.

セメント	基準材齡	α	$(W/C)^a$	$(t)^{b}$
N	3	30.0	-0.72	0.18
Н	3	96.5	-0.95	0.06
BB	3	59.9	-1.12	0.45
МКС	3	183.9	-1.47	0.41

表 4-1 直接引張強度式の各係数

以上のように求めた直接引張強度の実験式より求めた計算値と実験値の比較を,各セメントごとに図 4-3,図 4-5,図 4-7,図 4-9 に示す.また,JCI 予測式より求めた計算値と実験値の比較を,各セメントごとに図 4-4,図 4-6,図 4-8,図 4-10,図 4-3 に示す.



図 4-3 計算値と実験値の比較(N 直接引張強度)



図 4-4 JCI と実験値の比較(N 直接引張強度)



図 4-5 計算値と実験値の比較(H直接引張強度)



図 4-6 JCI と実験値の比較(H 直接引張強度)



図 4-7 計算値と実験値の比較(BB 直接引張強度)



図 4-8 JCI と実験値の比較(BB 直接引張強度)



図 4-9 計算値と実験値の比較(MKC 直接引張強度)



図 4-10 JCI と実験値の比較(BB 直接引張強度)

4.3.3 引張伸び能力の実験式

MKC を用いた場合の材齢3日における,水セメント比と引張伸び能力の関係を図4-11 に示す.



図 4-11 水セメント比と引張伸び能力の関係(材齢3日)

図 4-11 より、水セメント比の増加とともに、引張伸び能力は低下しており、両者は比較的高い相関性が見られた.両者の関係は、式(4-6)に示すように指数関数で表すこととした.

$$f_1(W/C) = 3192 \cdot (W/C)^{-1.03}$$
 (4-6)

普通セメントを用いた場合の水セメント比 60%におけるデータを式(4-6)で除した値と 材齢の関係を図 4-12 に示す.図 4-12 より,両者の関係は高い相関性が見られ式(4-7) に示すように指数関数で表すこととした.

$$f_2(t) = 0.71 \cdot (t)^{0.28} \tag{4-7}$$

以上の検討結果より、普通セメントの直接引張強度は、式(4-8)で表すことができる.

$$\varepsilon_{t} = 2264 \cdot (W/C)^{-1.03} \cdot (t)^{0.28}$$
 (4-8)



図 4-12 引張伸び能力/f<sub>1</sub>(W/C=60)と材齢

同様にして、算出した各種セメントのの引張伸び能力の各係数を表 4-2 に示す.表 4-2 に示すように、普通セメントおよび早強セメントにおける引張伸び能力には時間依存性が ほとんどない結果となり、同一セメントであっても引張強度の時間依存性とは異なる傾向 となった.

セメント	基準材齡	β	$(W/C)^a$	$(t)^{b}$
Ν	3	442	-0.40	0.04
Н	3	507	-0.42	0.01
BB	3	731	-0.73	0.29
MKC	3	2264	-1.03	0.28

表 4-2 直接引張強度式の各係数

以上のように求めた引張伸び能力の実験式より求めた計算値と実験値の比較を,各セメントごとに図4-13から図4-16に示す.



図 4-13 計算値と実験値の比較 (N 引張伸び能力)



図 4-14 計算値と実験値の比較(H引張伸び能力)



図 4-15 計算値と実験値の比較(BB 引張伸び能力)



図 4-16 計算値と実験値の比較(MKC 引張伸び能力)

### 第5章 温度一定条件下における自己収縮試験

#### 5.1 実験概要

既に述べたように、温度応力や温度ひび割れに及ぼす自己収縮の影響は大きく、また、 プレストレスト・コンクリートの不静定力を算定する上でも自己収縮を考慮することは重 要なことである.

一般に、自己収縮試験における測定値には二つの要因が混在している.第一に、セメントの水和反応および硬化過程に依存する自己収縮そのものであり、第二に、セメントの水和熱に起因する供試体の温度変化によって生じる体積変化である.したがって、測定値から自己収縮を算出する際には、熱膨張係数を用いて算出した温度ひずみで補正する必要があり<sup>36</sup>、一般に硬化コンクリートでは  $10(\mu/C)$ が用いられることが多い.しかし、若材齢時における熱膨張係数は、水和発熱反応による影響を大きく受け、材齢に伴って大きく変化することが知られている<sup>11)~15</sup>.国内における代表的な自己収縮予測式としては、日本コンクリート工学協会のひび割れ制御指針 2008<sup>11</sup>の予測式があるが、この予測式は、材齢3ヶ月以上経過した供試体を用いて熱膨張係数の測定を行っており、温度ひずみの補正が正確とは言い難い.

また、これまでに自己収縮に影響を及ぼす要因として、セメントの種類<sup>37),38)</sup>,混和剤お よび混和材の種類や置換率<sup>39)~41)</sup>,配合<sup>23)</sup>などの影響については、研究報告が次第に蓄積 されつつあり、かなりの部分が明らかにされている.しかしながら、温度の影響<sup>26),43)~46)</sup> については、最近になって研究が行われ始めたばかりであり、不明な点が多いのが現状で ある.既往の研究では、養生温度が高いほど自己収縮は大きくなるとするもの、低温養生 のものほど自己収縮が大きくなるとするもの、経験最大温度が高いほど自己収縮が大きく なるとするものとがあり、統一的な見解は得られていないと判断される.

以上のような背景を踏まえ、本研究では、TSTM と呼ばれる試験装置を用いて、異なる温度一定条件下および、マスコンクリート構造物を想定した温度履歴条件下における自己収縮試験を行い、温度依存性を考慮した自己収縮予測式の提案に向けた基礎的研究の試験結果について報告するものである.

#### 5.2 実験計画

本研究では,異なる温度一定条件下および,実構造物を想定したマス温度履歴条件下で 試験を行った.温度一定条件下では,20℃,30℃,40℃,60℃一定を各一回ずつ試験を行 った.マス温度履歴については,標準的な壁状構造物の温度履歴をFEM 解析により算出し たものとした.

セメントには普通ポルトランドセメントを使用し,水セメント比 50%,目標スランプ 8cm, 空気量 4.5%とした.骨材については,大井川水系の陸砂(密度 2.59g/cm<sup>3</sup>,吸水率 2.06%,粗 粒率 2.47),東京都青梅産硬質砂岩砕石(密度 2.66g/cm<sup>3</sup>,吸水率 0.50%,粗粒率 6.75)を用い た. 減水剤については,標準型の AE 減水剤ポゾリス No.70 を用いた. 表 5-1 に本研究で 使用したセメントの物性を示すとともに表 5-2 に配合を示す.

表 5-1 普通ポルトランドセメントの物性値

密度	比表面積	始発終結		28日圧強さ
$(g/cm^3)$	$(cm^2/g)$	(h-m)		(N/mm <sup>2</sup> )
3.15	3350	2-20	3-30	61.5

表 5-2 コンクリートの配合

W/C	s/a	単位量(Kg/m <sup>3</sup> )			
(%)	(%)	W	С	S	G
50	43.0	160	320	772	1051

### 5.3 試験方法

自己収縮試験は、TSTM(Thermal Stress Testing Machine)を用いて行った.TSTM は、コン クリート供試体に任意の拘束度を与える拘束試験装置と、拘束を全くしない無拘束試験装 置からなる.本研究では自己収縮を対象としていることから、無拘束試験装置を用いて試 験を行った.図5-1に無拘束試験装置を示す.供試体の寸法は150×150×750mm であり、 温度測定は熱電対を使用して3点、変位は変位棒を用いて左右で測定をした.

温度制御については、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、コンクリート供試体の温度を入力設定された温度履歴通りに制御す る.また、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、試 験装置及び通水パイプの一部は断熱材で覆っている.

コンクリートの練り上がり温度は、いずれの試験水準においても、20℃とし打設後2時 間以内に供試体温度が設定温度になるようにした.また、水分の逸散による乾燥収縮を防 ぐため、プラスチック製のシートで供試体を封緘した.



圧縮試験はφ100×200mm 供試体を用い、20℃封かん養生で試験を行った. 試験材齢については、3、7、14、28日を基本とし、供試体の本数は各水準につき3本とした. 凝結試験については、いずれの試験水準においても20℃条件下にて試験を行い、自己収縮の起点は凝結始発時間とした.

本研究では、同一配合で過去に行った試験結果に基づいて熱膨張係数の算定を行った. 図 5-2 にコンクリートのひずみと温度変化の関係を示す.本配合におけるコンクリートの 熱膨張係数は、凝結始発時間で 31.1( $\mu$ /°C)、温度上昇時で 8.0( $\mu$ /°C)、下降時で 9.7( $\mu$ /°C) となり、熱膨張係数は、凝結始発時間から材齢と供に急激に減少し、その後はほぼ一定値 に収束する結果となった.

これらの試験結果を基に、本研究では2種類の熱膨張係数(以後、TDC1,TDC2と呼ぶ)を 用いて温度ひずみの補正を行うこととした.TDC1では、温度上昇時と下降時の熱膨張係数 の平均値である  $9.0(\mu/C)$ を用い、TDC2では、試験結果を指数減少関数で回帰したものを 使用した.図 5-3に回帰曲線および試験結果を、式(5-1)に回帰式を示す.





図 5-3 熱膨張係数の回帰式と試験結果

$$\alpha$$
 (t)=A+B • exp(-t/C) (5-1)

本研究では、熱膨張係数と温度変化量から得られる温度ひずみを全ひずみから差し引く ことで自己収縮ひずみの算定を行った.算定においては、式5-2に示す増分による手法を 用いた.

$$\varepsilon_{\text{auto,i}} = \varepsilon_{\text{total,i-1}} + \frac{\alpha_i + \alpha_{i-1}}{2} (T_i - T_{i-1})$$
(5-2)

ここで、 $\epsilon_{auto,n}$ :nステップにおける自己収縮ひずみ( $\mu$ )  $\epsilon_{total,n}$ :nステップにおける全ひずみ( $\mu$ )  $\alpha_{n}$ :nステップにおける熱膨張係数( $\mu$ / $\mathbb{C}$ )  $T_{n}$ :ステップにおける供試体温度( $\mathbb{C}$ )

# 5.4 実験結果

# 5.4.1 温度測定結果

各試験水準における自己収縮試験用供試体の中心部の温度履歴を図5-4に示す.図5-4 より、20℃および 30℃一定条件においては、材齢初期に若干の温度誤差が生じているもの の、ほぼ設定と同等に温度制御できている結果となった.表5-3に、設定温度と実測値の 最大誤差を示す.


## 表 5-3 制御温度と最大温度誤差

制御温度(℃)	20	30	40	60
最大温度誤差(℃)	2.0	4.8	0.5	0.9

## 5.4.2 ひずみ測定結果

各試験水準における全ひずみ履歴を図 5-5 に, TDC1 で補正したものを図 5-6 に, TDC2 で補正したものを図 5-7 に示す. なお,マス温度履歴においては,温度上昇量が大きく, それに伴って全ひずみも大きく膨張していることから,全ひずみ履歴には測定データを省 き,温度補正した場合のみ記載した.また,図 5-5~5-7 における材齢(日)を積算温度(℃・ 日)で表現した場合を図 5-8~5-10 に示す.

図 5-5~5-10 より,極若材齢時において,温度一定条件下におけるコンクリートは膨 張する傾向が見られ,特に 60℃一定条件下においては,他の温度一定条件下にくらべ,長 期材齢にわたって膨張が持続する結果となった.

以上の結果を基に,異なる温度一定条件下およびマス温度履歴条件下における自己収縮 ひずみの終局値を図5-14に示すと伴に,JCI予測式との比較を図5-15に示す.

図 5-15 より、本試験における一定温度が高くなるにつれて、自己収縮ひずみの終局値 が低下する結果となった.一方でマス温度履歴条件下においては、60℃一定温度条件下に おける自己収縮ひずみの終局値と比べ、著しく高い値を示す結果となった.

66











図 5-7 自己収縮(TDC2)履歴











図 5-10 自己収縮 (TDC2) 履歴 (積算温度)







図 5-15 実験結果と JCI 予測式との比較

## 第6章 温度応力試験によるひび割れ発生限界の検討

### 6.1 実験概要

本検討では、ひび割れ発生条件に関する実験的事実の傾向を正しく把握することを目的 として、実構造物に近い拘束条件、および実構造物を想定した温度履歴を再現することが 可能な一軸拘束試験装置(TSTM)を用い実験的検討を行った.

#### 6.2 実験計画

検討ケースは,普通セメントを用いた場合で,拘束度 1.0, 0.9, 0.8, 0.6 の 4 ケースとし, 拘束度 1.0 のみ 2 度試験を行った. 低発熱・収縮抑制型の高炉セメント(MKC)を用いた場 合で,拘束度 1.0, 0.6, 0.4 の 3 水準とした. 表 6-1 に検討ケースを示す.

セメント	W/C(%)	拘束度	略称
普通セメント	50	1.0, 0.9, 0.8, 0.6	Ν
MKCIII		1.0, 0.8, 0.6, 0.4	MKC

表 6-1 検討ケース

本検討で使用したセメントは, 普通セメントおよび MKC, 水セメント比は 50%である. セメントおよび骨材の物性, 配合については前述の直接引張試験と同様のものを使用した.

温度履歴は、普通セメントを用いた場合で、厚さ0.6mの壁状構造物を施工した場合の 壁中央部における温度履歴を温度解析によって事前に想定し、その解析結果を用いること とした. MKCを用いた場合では、実際のボックスカルバート構造物の施工時の温度計測結 果を用いた.対象構造物の断面図を図6-2に、計測位置を図6-3に示す.図6-1に普通セ メントおよび MKC に用いた温度履歴を示す.





図 6-2 検討対象部位(断面図)



図 6-3 各計測器の設置位置の概要(ケーソン断面)

## 6.3 試験方法

TSTM は、コンクリート供試体に任意の拘束度を与える拘束試験装置と、ひずみ制御のもととなる際の自由ひずみを測定する無拘束試験装置からなる. 拘束試験装置及び無拘束試験装置外観および概要,ならびに両供試体の概要を写真 6-1~6-2 および図 6-4~6-7 に示す.

両試験装置には供試体の左右に変位計を設置されており、ひずみの測定を行うとともに、 型枠内に設置した通水パイプに温水あるいは冷水を通水させることにより、事前に任意に 設定した温度履歴を与え、セメントの水和発熱によるコンクリート内部の温度上昇及び温 度降下の過程を再現することができる.温度測定は、拘束試験装置で5点、無拘束試験装 置で3点において温度を測定した.このうち両供試体の中央部の温度を基にして温度制御 が行われる.

また,無拘束供試体に生じる自由ひずみを基に,外部アクチュエータによって拘束供試体に荷重を加え,拘束供試体のひずみを完全拘束状態(拘束度=1.0)から無拘束状態(拘束度=0.0)の間の任意の拘束条件下での制御が可能である.以上のようにして,実構造物に生じる温度状態および拘束状態を再現し,マスコンクリート内部に生じる応力履歴を推定するものである.

試験測定の開始は、コンクリートの凝結始発開始時間とした.コンクリートは凝結始発 開始時間前から発熱するが、ひずみ測定用に埋め込んだ標点棒がコンクリートと同調する には、ある程度コンクリートが自立するまで待つ必要があるためである.コンクリートの 凝結始発開始時間の判断は「コンクリートの凝結時間試験方法(JIS A 1147-2001)」に従った.



写真 6-1 無拘束試験装置



写真 6-2 拘束試験装置



図 6-4 拘束試験装置



図 6-5 無拘束試験装置



図 6-6 拘束・供試体



図 6-7 無拘束・供試体

6.4 実験結果

6.4.1 温度測定結果

各試験結果より, 普通の場合の温度測定結果を図 6-8~6-17 に, MKC の場合を図 6-18 ~6-25 に示す.











図 6-10 拘束供試体の温度履歴 (N 拘束 1.0')



図 6-11 無拘束供試体の温度履歴 (N 拘束 1.0')



図 6-12 拘束供試体の温度履歴 (N 拘束 0.9)



図 6-13 無拘束供試体の温度履歴 (N 拘束 0.9)















図 6-17 無拘束供試体の温度履歴 (N 拘束 0.6)































図 6-25 無拘束供試体の温度履歴 (MKC 拘束 0.4)

<sup>6.4.2</sup> ひずみ測定結果

普通の場合のひずみ測定結果および,ひずみ測定結果から求めた拘束率履歴を図 6-26~ 図 6-37 に示す. 同様に MKC の場合を,図 6-38~図 6-45 に示す.









図 6-27 供試体の拘束度履歴 (N 拘束 1.0)



図 6-28 供試体のひずみ履歴 (N 拘束 1.0')



図 6-29 供試体の拘束度履歴 (N 拘束 1.0')



















図 6-34 供試体の拘束度履歴 (N 拘束 0.6)



図 6-35 供試体のひずみ履歴 (N 拘束 0.6)



図 6-36 供試体のひずみ履歴 (N 拘束 0.6')



図 6-37 供試体の拘束度履歴 (N 拘束 0.6')







図 6-39 供試体の拘束度履歴(MKC 拘束 1.0)







図 6-41 供試体の拘束度履歴(MKC 拘束 0.8)







図 6-43 供試体の拘束度履歴 (MKC 拘束 0.6)







図 6-45 供試体の拘束度履歴(MKC 拘束 0.4)

5.5 実験結果の比較

5.5.1 温度測定結果

各拘束条件における温度履歴の比較を図 6-46~図 6-49 に示す.













5.5.2 ひずみ測定結果

各拘束条件におけるひずみ履歴の比較を図 6-50~図 6-55 に示す.



図 6-52 拘束ひずみ履歴(N)



図 6-55 拘束ひずみ履歴(MKC)

5.5.3 応力測定と応力ひずみ測定の結果

各拘束条件における応力と応力ひずみの関係を図 6-56~図 6-59 に示す.











5.5 ひび割れ発生条件の検討

# 5.5.1 応力および強度

普通の場合の,各拘束条件における引張応力履歴を図 6-60 および図 6-61 に,第4章で 求めた引張強度算出式で除した引張応力・引張強度比の比較を図 6-62 および図 6-63 に示 す.



100



図 6-63 拘束応力・強度比の履歴(N)
MKC の場合の,各拘束条件における引張応力履歴を図 6-64 および図 6-65 に,第4章で 求めた引張強度算出式で除した引張応力・引張強度比の比較を図 6-66 および図 6-67 に示 す.









図 6-67 拘束応力・強度比の履歴(MKC)

図 6-56 より普通の場合には、2 度行った拘束度 1.0 では、圧縮応力が作用している期間 における応力履歴に差があるにもかかわらず、ひび割れ発生時の引張応力およびひび割れ 発生材齢はほぼ同等となる結果となった.また、SZS になる材齢および、ひび割れが発生す る材齢は、拘束度が高くなる程大きくなる傾向が見られた.

図 6-62 より、ひび割れ発生材齢が5日付近においては、いずれの拘束度においても引張応力・引張強度比が 0.75 程度となり、van Breugel<sup>47)</sup> らが行った 40回程度の実験結果に基づく応力強度比の平均値と同等の値となった.一方で、拘束度 0.6 においては、引張応力・引張強度比が 0.6 と低い値でひび割れが発生する結果となった.これまでに発表されている複数の文献を調査した知見によると<sup>48)</sup>、ひび割れ発生時における引張応力・引張強度比の下限値は 0.5 程度、中間値は 0.7 程度と報告されており、これらの知見と同様の結果となった. さらに実験を重ねることにより、ひび割れのバラツキを考慮した、確率的な基準を設定することが可能であると考えられる.しかしながら、一般的にはひび割れ発生材齢が長くなる程、引張応力・引張強度比は大きくなることが報告されており、本検討における再現性を確認すると伴に、ひび割れ発生材齢が長くなると引張応力・引張強度比が低下する原因について、明らかにする必要性があると思われる.

図 6-57 より MKC の場合には、供試体に作用する圧縮応力の最高値は、拘束度が高い程 大きくなり、SZS となる材齢についても拘束度が高い程長くなる傾向となった.しかし、ひ び割れが発生する材齢および、引張応力が進展する速度については、拘束度の影響による 相関が見られない結果となった.

図 6-64 より、ひび割れ発生時の引張応力・引張強度比は、いずれの拘束度においても 1.0 を超え、特に拘束度 1.0 の場合には 1.5 程度と非常に大きな値となり、普通セメントを用いた場合とは大きく異なる結果となった.この原因としては、拘束度 1.0 における圧縮応力履歴は、他の拘束度と比べて大きな値となっており、この圧縮応力の増分が引張応力・引張強度比の増大に何らかの影響を及ぼしたのではないかと思われる.しかし、先に述べた普通セメントの場合には、このような傾向が見られなかったことから、再現性について確認すると伴に、圧縮応力履歴の違いや、引張応力の進展速度による影響についても検討する必要がある.

104

5.5.2 ひずみおよび伸び能力

普通の場合の,各拘束条件における引張ひずみ履歴をおよび,第4章で求めた伸び能力 算出式で除した引張ひずみ・伸び能力比の比較を図6-68および図6-69に示す.





MKC の場合の,各拘束条件における引張ひずみ履歴をおよび,第4章で求めた伸び能力 算出式で除した引張ひずみ・伸び能力比の比較を図 6-70 および図 6-71 に示す.



図 6-71 拘束ひずみ・伸び能力比の履歴(MKC)

図 6-69 より普通の場合には、いずれの拘束度においても拘束引張ひずみ・伸び能力比が 1.0 を超える結果となった.とりわけ、拘束度 0.6 については、拘束引張ひずみ・伸び能力 比が 1.25 と比較的高い値となり、先に述べた引張応力・引張強度比が 0.6 と低い値を示し たのと対称的な結果となった.このことは、ひび割れ発生条件は、応力に基づく観点から だけでは論じられない可能性を示すものであり、温度ひび割れ照査を行うにあたっては、 ひずみに基づくひび割れ発生基準についても、考慮する必要があるのではないかと思われ る.しかしながら、本検討で用いた伸び能力は静的な直接引張試験により得られた値であ り、また TSTM で得られた拘束引張ひずみは、自由ひずみから拘束されたコンクリートの ひずみを単純に差し引いたものである.ひずみの定義については研究者により考えが異な り統一的な見解は得られていないのが現状であり、また実験値にはクリープの影響も含ま れていると考えられる.以上のことから、ひずみに基づく観点からひび割れ発生を論じる ことは、本試験範囲の結果ならびに現状の知見のみではかなり難しく問題点が多いと思わ れる.

図 6-71 より, MKC を用いた場合では, 拘束度 1.0 を除き, 引張ひずみ・伸び能力比は 1.0 以下となった. しかし, 引張応力・引張強度比が先に述べたように 1.0 以上と大きな値 となったことから, MKC の場合にはひずみによるひび割れ発生基準を考慮しなくとも, 危険側の評価にはならない結果となった.

5.5.3 応力およびひずみ

普通を用いた場合の,各拘束条件下における拘束引張応力と拘束ひずみの関係を図 6-72 および図 6-73 に,応力・強度比とした場合を図 6-74 および図 6-75 に示す.また,応力・ 強度比と拘束ひずみ・伸び能力比としたものを図 6-76 に示す.





図 6-75 拘束応力・強度比とひずみの履歴(N)



図 6-76 拘束応力・強度比とひずみ・伸び能力比の履歴(N)

MKC を用いた場合の,各拘束条件下における拘束引張応力と拘束ひずみの関係を図 6-77 および図 6-78 に,応力・強度比とした場合を図 6-79 および図 6-80 に示す.また,応力・ 強度比と拘束ひずみ・伸び能力比としたものを図 6-81 に示す.







図 6-78 拘束応力ひずみの履歴(MKC)





図 6-72 および図 6-77 より算出した有効引張ヤング係数および,3 章で行った直接引張試験の材齢3日における引張ヤング係数の比較を表 6-2 に示す.

図 6-72,図 6-77 および表 6-2 より,普通セメントの場合には,拘束度が高くなるにつれ て有効引張ヤング係数が大きくなる傾向が見られた.一方で,MKC の場合には拘束度と有 効引張ヤング係数との間に相関は見られず,とりわけ拘束度 0.4 においては,有効引張ヤン グ係数が 44.0(KN/mm<sup>2</sup>)と高い値を示した.

また,静的な強度試験による引張ヤング係数は MKC に比べて普通セメントの方が大きい 値を示したのに対し,本検討で算出した有効引張ヤング係数では,普通セメントの方が小 さい傾向となった.

セメント	拘束度					強度試験
	1.0	0.9	0.8	0.6	0.4	(材齢3日)
Ν	16.6	14.9	19.5	12.4		23.3
MKC	21.8		24.2	20.8	44.0	18.0

表 6-2 引張ヤング係数の比較

## 第7章 結論

第3章および4章では,若材齢時コンクリートの引張特性を把握することを目的として, 主として直接引張試験装置を用いて実験的検討を行い,また,実験値に基づき実験式を算 出した.本検討で得られた主な知見を以下に示す.

(1)水中養生した場合の直接引張強度は割裂引張強度よりも約10%ほど小さい.

(2)水中養生した場合の引張ヤング係数は圧縮ヤング係数とほぼ同等である.

(3)直接引張試験から得られた弾性的な引張伸び能力は130µ前後である.

(4)普通セメントおよび早強セメントを用いた場合,弾性的な引張伸び能力は,材齢3日以降ほとんど能力増進せず,水セメント比の違いによる影響は少ない.

第5章では若材齢時コンクリートの自己収縮特性を把握することを目的として,異なる 温度一定条件下およびマス温度履歴条件下における実験的検討を行った.本検討で得られ た主な知見を以下に示す.

(1)異なる温度一定条件下では、温度が高い程自己収縮ひずみの終局値が小さくなる(2)同じ高温履歴であっても、温度一定条件とマス温度履歴とでは自己収縮ひずみの終局値 に著しい違いが見られる.

第6章では、温度ひび割れのひび割れ発生条件に関する実験的事実の傾向を正しく把握 することを目的として、一軸方向に拘束が可能な温度応力試験装置(TSTM)を用いて実験を 行った.実験結果に基づき、ひび割れ発生条件として、応力およびひずみに関する観点か ら検討を行った.しかし、コンクリートのひび割れは、本質的に無視しえないバラツキを 有する現象であり、長期にわたる荷重履歴によってクリープが発生することを考慮すれば、 今回の試験結果のみで、精度良いひび割れの発生基準を適用することは相当に困難である と考えられる.今後も引き続き実験データの蓄積を行い、試験の再現性およびバラツキに 関する影響を明らかにすると伴に、若材齢時クリープに関する知見、とりわけ本検討で行 った温度応力試験では材齢初期に圧縮応力が作用し、その後引張応力に反転する履歴とな っており、変動応力条件下におけるクリープの更なる研究成果が必要であると考えられる. 本検討で得られた試験結果より、概略値レベルのひび割れ発生条件としての実験結果を以 下に示す.

(1)ひび割れが発生する材齢における引張応力強度比の下限値は0.6である.

(2)クリープひずみを考慮しなかった場合の,見掛け拘束ひずみ伸び能力比の下限値は0.4 である.

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会:マスコンクリートのひび割れ制御に関する研究委員会
- 2) 土木学会:土木学会標準示方書設計編, 2007
- 3) 日本コンクリート工学協会:ひび割れ制御指針 2008, 2008.12
- 4) 田澤栄一,宮沢伸吾,重川幸司:水和反応による硬化セメントペーストのマクロな体積 減少,セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.122-127, 1991
- 5) 青木優介, 下村匠: 乾燥収縮ひび割れ抵抗性評価のためのコンクリートの引張変形特性 およびひび割れ発生条件に関する検討, 土木学会論文集 No.732/V 59, pp.135-148, 2003.5
- 6) 濱永康仁:コンクリート部材に生じる収縮ひび割れ発生条件に関する研究,大分大学大学院工学研究科 博士論文,2007.2
- 7) 佐藤嘉昭, 濱永康仁ほか: コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ発生条件に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 2008.12 あ
- 8) 秋田宏,藤原忠司,尾坂芳夫:破壊力学にもとづいた乾燥収縮ひび割れの解析,セメント・コンクリート論文集, Vol.46, pp.708-713, 1992
- 9) 溝渕利明,横関康祐,信田佳延:一軸拘束試験装置を用いた温度ひび割れ試験方法に関する検討,コンクリートの品質評価試験方法に関するシンポジウム論文集,pp.61-68, 1998.12
- 10) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ,2003.5
- 11) 小澤満津雄, 杉本将仁, 森本博昭: 若材齢コンクリートの熱膨張係数推定法に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.59, pp.173-179, 2005
- 12) 楊楊,佐藤良一,竹内崇剛:若材齢時におけるセメントペーストの熱膨張係数に関する 研究,セメント・コンクリート論文集, No.54, pp.209-214, 2000
- 13) 丸山一平, 寺本駕史: セメント硬化体の若材齢体積変化と線膨張係数の経時変化, セメント・コンクリート論文集, No.63, pp.77-84, 2009
- 14) 渡邊智紀,腹部大輔,笠井哲郎,大下英吉:セメント系材料の水和発熱反応依存度型としての線膨張係数に関する研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.23, pp.889-894, 2001
- 15) 丁海文,河野広隆,渡辺博志,佐藤重一:高強度コンクリートの線膨張係数に関する研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.22, pp.955-960, 2000
- 16)田辺忠顕:初期応力を考慮した RC 構造物の非線形解析法とプログラム、技報堂出版、 2004.3
- 17) 佐藤良一・丸山一平: 収縮ひび割れの予測と制御のあるべき姿、コンクリート工学、 pp.11-20、2005.5

- B.Persson : Self-Desication and Its Importance in Concrete Technology, Materials and Structures, Vol.30, pp.293-305, 1997
- 19) W.H.Dilger : A Creep and Shrinkage Model for High-Performance Comcrete, International Conference on Engineering Materials, pp.615-629, 1997
- 20) R.L.Roy : The After Code Type Model for Creep and Shrinkage of High-Strength / High-performance Concrete, pp.387-396, 1996
- 21) CEN : Eurocode2, prEN1992-2, 2000
- 22) DIN1045-1
- 23) 田澤栄一,宮澤伸吾:セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響,土
  木学会論文集, No.502/V-52, pp.43-52, 1994.11
- 24)田澤栄一,宮澤伸吾:コンクリートの自己収縮ひずみの予測法に関する研究,土木学会 論文集,No.571/V-36, pp.211-219, 1997.8
- 25) 土木学会:コンクリート標準示方書 構造性能照査編, pp.32, 2002
- 26) 宮澤伸吾,佐藤良一,杉山淳司:高温履歴を受ける高炉セメントコンクリートの自己収縮予測式,コンクリート工学年次論文集,Vol.30, pp.465-470, 2008
- 27)秋田宏,小出英夫,外門正直:コンクリートの直接引張試験における実際的方法,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, 1999
- 28) 大野俊夫, 魚本健人: コンクリートの収縮ひび割れ発生予測に関する基礎的研究, 土木 学会論文集, No.662, V-49, pp.29-44, 2000
- 29) 青木優介,平野雄大,鈴木孝治,嶋野慶次:直接引張試験で測定したコンクリートの引 張ヤング係数と引張強度,コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, 2007
- 30) 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, 2004.6
- 31) 吉本彰編: コンクリートの変形と破壊, 学献社, 1990.7
- 32) 大友健,:収縮を抑制した高炉セメント B 種を用いた低発熱コンクリートの特性と実構 造物への適用,大成建設技術センター報,第38号,pp.26-1-26-10,2005
- 33) 富山悟,二戸信和,鈴木章市,神崎隆男,久保田賢:低発熱・収縮抑制型高炉セメント を用いたコンクリートの基礎的性質,日本建築学会学術講演概要集(九州),2007.8
- 34) 綾野克紀: クリープの予測手法とその精度の現状, コンクリート工学, Vol.43, No.5, 2005.5
- 35) 入矢桂史郎,腹部達也,梅原秀哲:若材齢コンクリートの圧縮クリープと引張クリープの比較に関する研究,土木学会論文集,No.599, V-40, pp.105-117, 1998.8
- 36) Ahmed Loukili, David Chopin, Abdelhafid Khelidj, Jean-Yves Le Touzo : A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperture history, Cement and Concrete Research, pp.915-922, 2000
- 37) 宮澤伸吾,田澤栄一:セメント系材料の自己収縮に及ぼすセメントの化学組成の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, pp.669-704, 1996

- 38) 宮澤伸吾,黒井登起雄,川合雅弘:コンクリートの自己収縮に及ぼすセメントの種類の 影響,コンクリート工学年次論文集,Vol.24, pp.429-434, 2002
- 39) 三浦智哉,田澤栄一,宮澤伸吾,保利彰宏:コンクリートの自己収縮に及ぼす高炉スラ グ微粉末の影響,コンクリート工学年次論文集,Vol.17, pp.359-364, 1995
- 40) 出雲健司, 矢野めぐみ, 名和豊春, 大沼博志: フライアッシュを使用した若材齢時のモルタルの自己収縮と力学的性質について, セメント・コンクリート論文集, No.55, pp.176-181, 2001
- 41) Januarti Jaya EKAPUTRI, Tetuya ISHIDA, Koichi MAEKAWA: AUTOGENOUS SHRINKAGE OF MORTARS MADE WITH DIFFERENT TYPES OF SLAG CEMENT, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, pp.353-358, 2010
- 42) Tazawa.E, Matsuoka.Y, Miyazawa.S, Okamoto.S : Effect of autogenous shrinkage on self stress in hardening concrete, Proceedings of RILEM International Symposium on Thermal Cracking in Concrete at Early Age, pp.221-228.1994
- 43) 丁海文,河野広隆,渡辺博志,鈴木雅博:水和熱による高温履歴が高強度コンクリートの自己収縮に及ぼす影響,コンクリート工学年次論文集,Vol.21, pp.1117-1122, 1999
- 44) 白井達哉,大友健,宮原茂禎,宮澤伸吾:マス養生温度履歴下で測定した自己収縮ひずみの評価方法と温度ひび割れに及ぼす影響に関する考察,コンクリート工学年次論文集, Vol.31, pp.1609-1614, 2009
- 45) 寺本駕史, 丸山一平: 超低セメント比シリカフュームコンクリートの自己収縮温度依存 性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第73巻, 第634号, pp.2069-2076, 2008
- 46) 寺本駕史,丸山一平,三谷裕二,谷村充:低水結合材比シリカフュームセメントペーストの自己収縮性状に関する研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.31, pp.601-606,2009
- 47) k. van Breugel : Predicting cracksin hardening concrete using a stress-based cracking criterion, Control of Cracking in Early Age Concrete, edited by Mihashi & Wittmann, Swets & Zeitlinger, pp. 317-324, 2002
- 48) 日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存 変形に関するシンポジウム委員会報告書, JCI-C52, 2001

本研究を行うにあたり,終始御懇篤なる御指導を賜りました溝渕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教授に深く感謝い 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には大変お世話に なりました.

また、日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂いた、室野井敏之様、松土雄紀様、今 野浩孝様、田中峻様をはじめとする 20010 年度の法政大学土木材料実験室の皆様に大変感 謝致しております.

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

2011年2月19日

法政大学大学院工学研究科建設工学専攻

09R5117 綱島 隆将