

法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-03-14

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの初期養生期間がひび割れ抵抗性に及ぼす影響

小俣, 貴洋 / OMATA, Takahiro

(発行年 / Year)

2010-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2010-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2009 年度 修士論文

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの
初期養生期間がひび割れ抵抗性に及ぼす影響

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

08R5106 小俣 貴洋

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの 初期養生期間がひび割れ抵抗性に及ぼす影響

小俣 貴洋

現在、高炉セメントは、製造時の CO₂ 排出量が小さい点で評価が高まっている。高炉セメントを用いたコンクリートは、水和熱による温度上昇の抑制、アルカリシリカ反応の抑制、化学抵抗性の向上、強度化に寄与することが知られている。また、高炉スラグ微粉末を混和材として用いることで、多種多様な環境条件に応じたセメントを選定することが可能となる。これらのことから、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートは、環境低負荷型の高性能コンクリートとして、大きな役割を担うものと期待されている。しかし、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは環境条件に左右されやすく、強度発現が養生方法に大きく依存する面がある。そのため、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは初期の湿潤養生が重要であるといわれており、普通コンクリートに比べやや長い湿潤養生日数が定められている。

本研究では、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの力学特性が湿潤養生期間にどの程度影響を受けるか検討することを目的として、養生方法を変化させた力学的特性実験を行った。得られた結果を基に、型枠脱型時期を変化させ湿気移動解析および温度応力解析を行い、初期の湿潤養生期間がひび割れ抵抗性に与える影響について検討した。

ここで得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートでは湿潤養生期間が力学的特性に及ぼす影響が大きく、湿潤養生から気中養生に移行した時点以降、強度発現がほとんど見られない。
- (2) 湿度低下はコンクリート表面部から 50mm 以上の箇所では脱型から 28 日後でもほとんどないことから、コンクリート表面部から 20~30mm の箇所までが最も乾燥収縮の影響を受けている可能性がある。
- (3) 型枠存置期間を 14 日間とすることで、表面にひび割れが発生した場合でも内部への進行を防ぐことができる。
- (4) 型枠脱型後、養生シートを用いることで、内部のひび割れ抵抗性を上昇させることができる。

INFLUENCE THAT CONCRETE WITH THE GROUND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG INITIAL CURING DURATION EXERTS ON RESISTANCE OF CRACK

Takahiro OMATA

The portland blast-furnace slag cement is valued for its small amount of discharge in carbon dioxide under the process of manufacturing, however, one of the weak accept of this substance is that it is unstable as is dependent on the environmental condition and the consequence of the strength expression of the blast furnace is often determined by the process of curing.

In this study, we conducted the experiment of mechanical peculiar energy with the improved process of curing in order to understand how the concrete with the ground granulated blast furnace slag will be affected during the process of wetting curing.

Then we evaluated its finding and put some changes on demolding time to analyze the moisture transfer and thermal stress and that led us to have the better grasp of the influence which was made by the beginning of process in wetting curing, on crack resistance.

Here is the major findings we achieved.

- 1) The concrete with ground granulated blast furnace slag minute powder show little strength expression after moving from wetting curing process to curing in the air as the process of wetting care affected greatly on mechanical property.
- 2) According to the fact that the temperature did not decrease more or less at the point which was more than 50mm above from concrete surface even in 28 days after demolding. This also suggests that the point which is 20 or 30mm height from the concrete surface is most likely to have had the damage of drying contraction.
- 3) Extending the duration of demolding time may prevent damage going into inside even though the concrete surface cracked a bit
- 4) The use of the curing seat enables to ascent the level of resistance against cracking inside.

目次

第1章 背景, 目的.....	- 1 -
1.1 背景.....	- 1 -
1.2 目的.....	- 1 -
第2章 既往の研究.....	- 2 -
2.1 高炉スラグ微粉末の概要.....	- 2 -
2.2 コンクリートマニュアルによる概要.....	- 4 -
2.3 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの湿潤養生期間に関する研究 その1.....	- 5 -
2.4 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの湿潤養生期間に関する研究 その2.....	- 6 -
2.5 高炉セメントの自己収縮および断熱温度上昇量に関する研究.....	- 8 -
2.6 高炉セメントを用いたコンクリートの自己収縮に関する実験的研究.....	- 11 -
2.7 高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの細孔構造と乾燥収縮.....	- 13 -
2.8 高炉スラグ微粉末混和コンクリートに発生するひび割れに関する研究.....	- 15 -
2.9 養生期間および脱型時の強度に対する参考値.....	- 17 -
2.10 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの水中養生日数について.....	- 18 -
2.11 脱型時期がかぶりコンクリートの耐久性に及ぼす影響に関する研究.....	- 19 -
2.12 温度との連成を考慮したコンクリートの湿気移動解析に関する研究.....	- 21 -
2.13 コンクリートの乾燥収縮によるひずみと応力の解析.....	- 25 -
第3章 使用材料及び配合.....	- 30 -
3.1 使用材料.....	- 30 -
3.2 配合.....	- 34 -
第4章 実験概要.....	- 35 -
4.1 供試体の作製.....	- 35 -
4.2 圧縮強度試験およびヤング係数試験.....	- 35 -
4.3 割裂引張強度試験.....	- 37 -
4.4 直接引張強度試験.....	- 38 -
4.5 断熱温度上昇試験.....	- 41 -
4.6 同定解析.....	- 42 -
第5章 養生方法による強度特性の検討.....	- 44 -
5.1 圧縮強度試験結果.....	- 44 -
5.2 圧縮強度比の結果.....	- 54 -
5.3 圧縮強度とヤング係数の関係.....	- 71 -
5.4 応力とひずみの関係.....	- 73 -
5.5 単位容積質量の変化率と乾燥期間の関係.....	- 76 -
第6章 引張特性及び断熱温度上昇特性.....	- 82 -
6.1 引張強度試験.....	- 82 -
6.2 断熱温度上昇試験.....	- 85 -
6.3 同定解析.....	- 88 -

第7章 解析方法	- 91 -
7.1 解析の概要	- 91 -
7.2 検討ケース	- 91 -
7.3 湿気移動解析	- 94 -
7.4 圧縮強度発現式	- 103 -
7.5 ヤング係数発現式	- 106 -
7.6 引張強度発現式	- 107 -
7.7 断熱温度上昇特性	- 108 -
7.8 境界条件	- 109 -
7.9 自己収縮	- 113 -
7.10 乾燥収縮	- 114 -
7.11 他の解析条件	- 115 -
第8章 解析結果	- 116 -
8.1 湿気移動解析	- 116 -
8.2 温度応力解析	- 124 -
(1) ひずみに関する結果および考察	- 124 -
(2) 応力に関する結果および考察	- 134 -
(3) ひび割れ指数に関する結果および考察	- 142 -
(4) シート養生	- 152 -
第9章 結論	- 155 -
9.1 力学特性試験における結論	- 155 -
9.2 湿気移動解析における結論	- 156 -
9.3 温度応力解析における結論	- 156 -
9.4 まとめ	- 157 -

参考文献

謝辞

第 1 章 背景, 目的

1.1 背景

現在, 高炉セメントは, 製造時の CO₂ 排出量が小さい点で評価が高まっている. 普通セメントを製造する際は, 石灰石を焼成し粉砕する工程が必要である. しかし高炉スラグ微粉末は鉄鋼製造からの副産物であり, 単に普通セメントに混合するだけで水硬性を発揮する. そのため, 製造時のエネルギー消費量や CO₂ 発生量を削減できる. 実際, 2002 年の普通セメント 1 t 製造時の CO₂ 排出量は約 800kg であるが, 普通セメントと高炉スラグ微粉末を約半量ずつ混合した高炉セメント B 種は, CO₂ 発生量をほぼ半減することができた. このような効果から, 高炉スラグ微粉末および高炉セメントはエコマークの商品類型として登録されている.

高炉セメントを用いたコンクリートは, コンクリートの水和熱による温度上昇の抑制, アルカリシリカ反応の抑制, 耐硫酸塩性や海水に対する化学抵抗性の向上, さらには高流動化, 高強度化に寄与することが知られているため, 高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートは今後, 環境低負荷型の高性能コンクリートとして, 大きな役割を担うものと期待されている. また, 高炉スラグ微粉末を混和材として用いることで, 多種多様な環境条件に応じたセメントを選定することが可能となる. これらのことから, 高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートは, 環境低負荷型の高性能コンクリートとして, 大きな役割を担うものと期待されている.

しかし, 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは環境条件に左右されやすく, 強度発現が養生方法に大きく依存する面がある. そのため, 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは初期の湿潤養生が重要であるといわれており, 普通コンクリートに比べやや長い湿潤養生日数が定められている¹⁾. しかし, 現場においては工期短縮, 型枠転用などの理由により早期脱型が行われることがある²⁾. その結果, 若材齢コンクリートは乾燥環境にさらされ, 水和阻害を受けることとなり, 強度発現, 耐久性に多大な影響を及ぼすこととなる. これらの影響は, 普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートよりも高炉混入コンクリートの方が大きく受けると考えられる.

1.2 目的

本研究では, 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの力学特性が湿潤養生期間にどの程度影響を受けるか検討することを目的として, 養生方法を変化させた力学的特性実験を行った. 得られた結果を基に, 型枠脱型時期を変化させ湿気移動解析および温度応力解析を行い, 初期の湿潤養生期間がひび割れ抵抗性に与える影響について検討した.

第2章 既往の研究

2.1 高炉スラグ微粉末の概要

(1) 高炉スラグ微粉末

高炉スラグ微粉末とは、溶鉱炉で銑鉄と同時に生成される熔融スラグを水または空気によって急冷したガラス質の高炉スラグ(急冷スラグ)を粉砕してつくる灰白色の乾燥微粉末である。

(2) 高炉スラグ微粉末の生成

高炉は主原料の鉄鋼石をコークス、石灰石等の副原料とともに高温で熔融し、コークスの炭素により還元し、銑鉄を製造する。この際に、鉄鉱石の鉄以外の成分は、副原料の石灰石やコークス中の灰分と一緒に高炉スラグとなり分離回収される。この高炉スラグは天然の岩石に類似した成分を有し、銑鉄 1t 当り約 300kg 生成する。高炉から取り出されたばかりのスラグは約 1,500℃の熔融状態であるが、冷却の方法によって、徐冷スラグと水砕スラグの2種類の高炉スラグとなる。

高炉スラグ微粉末は水砕スラグの方である。熔融スラグに加圧水を噴射するなどして、急激に冷却すると、ガラス質(非結晶)の粒状スラグとなる。これを水砕スラグと呼び、セメント用、土工用などに利用されるほか、加工することでコンクリート用細骨材としても利用されている。

図-2.1 高炉スラグ微粉末の製造フローを以下に示す。

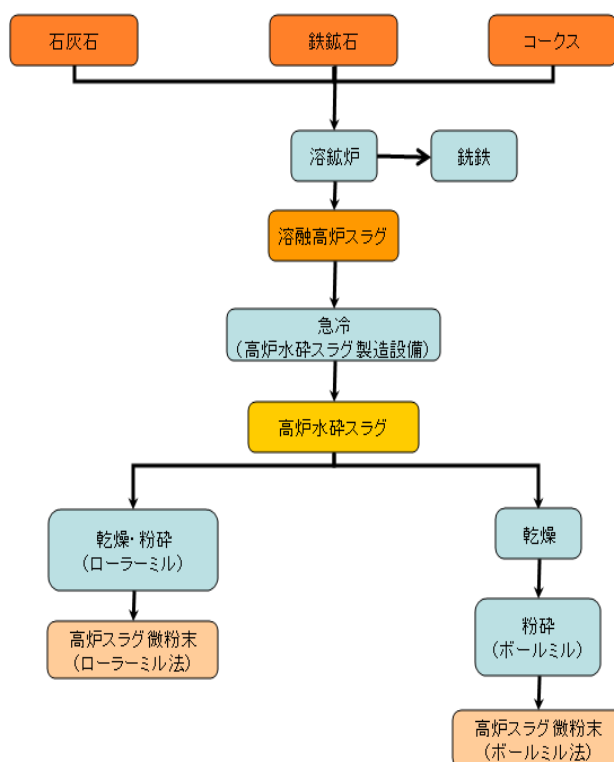


図-2.1 高炉スラグ微粉末の製造フロー

(3) 高炉スラグ微粉末の性質

a) スラグの反応は、スラグの SiO_2 や Al_2O_3 の鎖状結合が pH12 以上で切断され、固溶されていた CaO 、 Al_2O_3 、 MgO などが溶出し、カルシウムシリケート水和物(C-S-H ゲル)およびカルシウムアルミネート水和物(C-A-H ゲル)を生成して硬化するといわれており、これを潜在水硬性という。

b) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートにおいて、スラグの置換率は 30~70%の範囲が一般に用いられているが、最近では省資源、低発熱型コンクリートの観点から、80%以上セメントと置換することが研究されている。

c) 強度発現性を向上させるためには、スラグ粉末度を大きくすることや、適当なアルカリ刺激材の開発が考えられている。現在、粉末度は、 $3000\sim 10000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度のものが使用されており、スラグの置換率や粉末度が増大するほど、ブリーディングが少なく、コンクリートの流動性が増大する場合が多い。

d) 水和熱は、 20°C 以下で養生した場合、粉末度が小さく、置換率が大きいときには普通ポルトランドセメントに比較して小さく、水和熱によるコンクリートの温度上昇を抑制し、温度ひび割れを低減することができる。しかし、養生温度が高くなると、活性が増し、水和熱が普通ポルトランドセメントより大きくなる場合がある。

e) 十分に湿潤養生すれば、ペーストの細孔容積が減少し、密実になるので、長期強度は無混入のコンクリートの場合より増大し、乾燥収縮が低減する。

f) 硫酸塩や海水に対する耐久性が改善され、アルカリ骨材反応に対する抑制効果が大である。

g) 中性化は、水結合材比が同じ場合、一般のコンクリートよりやや大きくなることが指摘されており、十分湿潤養生することが必要である。

h) スラグの粉末度が大きい場合には、自己収縮が、スラグ無混入の場合より大きくなることが指摘されている。

i) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、高炉スラグ微粉末の特性や成分のために、練り混ぜ時や硬化後に、一般のコンクリートとは異なった色調を示すことがある。すなわち、練り混ぜ時には、高炉スラグ微粉末がセメントと比較して白いため、一般のコンクリートより白くなることが多い。また硬化後数日から数週間は、高炉スラグ微粉末にわずかに含まれている硫化鉄の影響で青みがかかった色調を呈する。この期間は、水中あるいは海中にあると長期にわたる。さらに長期になると、酸化などによって青みが薄くなり、最終的には、一般のコンクリートよりやや白い色となる。

j) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのクリープは、一般のコンクリートのものに比較して同程度以下と考えてよい。しかしながら、材齢3日程度の若材齢で裁荷する場合、あるいは水結合材比が70%程度の場合には、一般のコンクリートのものよりも大きくなる傾向にあるので注意を要する。養生が不十分であると相当に増大することがある。

k) 置換率を大きくすることにより、発熱速度が低減されるとともにコンクリートの温度上昇が抑制できる。

l) 置換率が大きいほど、耐薬品性の効果がある。

2.2 コンクリートマニュアルによる概要³⁾

・養生別の圧縮強度試験の一例

標準湿潤養生を与えた供試体について行った正規の圧縮強度は、コンクリートの均一性と品質を示す重要な指標である。屋外に放置し外気にさらして養生した供試体の試験結果は価値のないものであって、まったく誤解を導くものである。この試験結果は標準養生の供試体の強度と関係づけることはできない。そして表面積容積比が大であるために、供試体が構造物における状態を表現することはできない。プレキャストパイプその他の製品のコンクリートに対して、養生の適否とか強度増進の程度を求めるためには、円柱供試体の製作、養生は製品の製造、養生方法と同様にする。このようなプレキャストコンクリート製品の製造の際には、生産を促進するために蒸気養生が最も一般的に用いられる。

図-2.2 はコンクリートが前養生なしに乾燥空気にさらされると、強度の増進は若齢で縮まってしまうことを示している。打ち込まれた後すぐ乾燥した空气中にさらされたコンクリートの6ヶ月強度は14日間湿潤養生した後空气中にさらされたコンクリートの強度の約50%である。

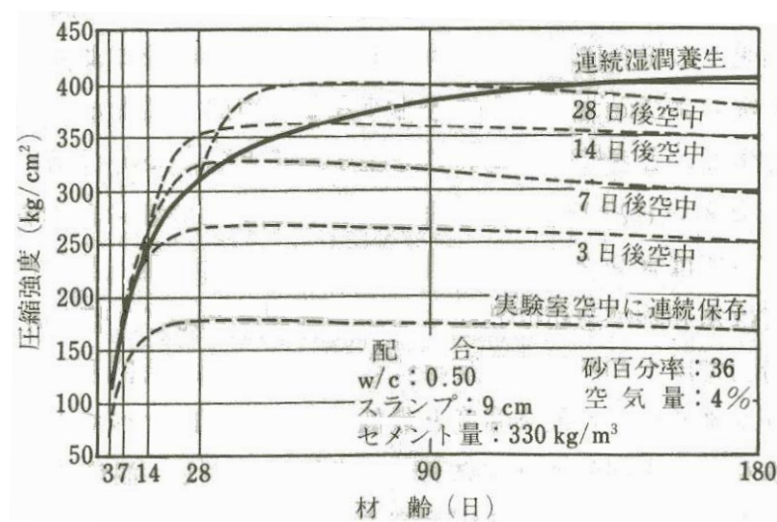


図-2.2 初期湿潤養生後実験室空气中で乾燥したコンクリートの圧縮強度

2.3 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの湿潤養生期間に関する研究 その1

松沢氏ら⁴⁾は湿潤養生打切り後の強度発現を調べて7~10日間湿潤養生した場合と同等となる圧縮強度を検討し、湿潤養生打切り時期を明らかにすることを目的とし、研究を行った。

表-2.1にコンクリートの調合及びフレッシュ試験結果を示す。調合はスラグ置換率42%で水結合材比50%と60%、スラグ置換率27%で水結合材比60%の3調合とした。また圧縮強度用供試体は標準養生、現場封かん養生、構造体からのコア、両端開放の4種類である。

表-2.1 コンクリート調合及びフレッシュ試験結果

調合名	W/B(%)	置換率(%)	単位量(kg/m ³)					化学混和剤		フレッシュ試験	
			W	C	BS	S	G	WR (B×wt%)	AE (A)	SL (cm)	air (%)
BB50	50	42	173	201	145	700	1046	3.46	1.38	19	3.2
BB60	60	42	173	167	121	749	1046	2.88	2.88	20	4.3
BA60	60	27	173	210	77.9	752	1046	2.88	2.88	21	4.9

高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、水結合材比が等しい場合、スラグ置換率が42%のものより27%のものの方がわずかに強度発現は大きい。図-2.3より、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、圧縮強度が10N/mm²を超える、または、圧縮強度に対する現場封かん91日、標準養生28日強度に対する圧縮強度比が50%以上ある材齢ならば、脱型し湿潤養生を打ち切っても、その後の強度増進に大きな影響を与えない。

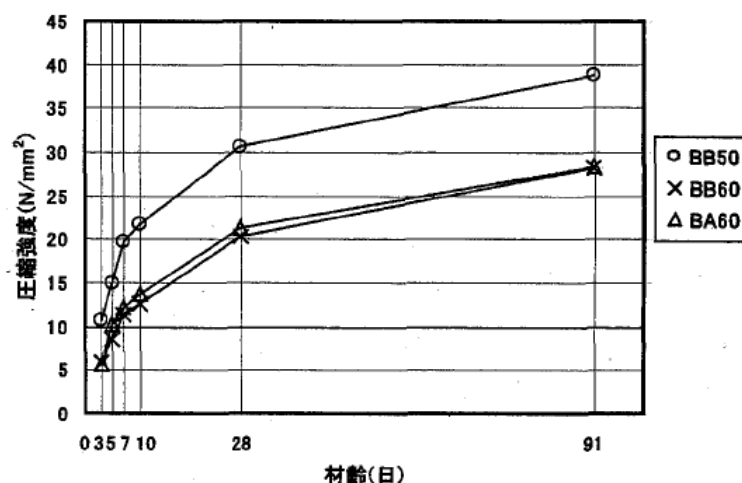


図-2.3 現場封かん調合別の圧縮強度

2.4 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの湿潤養生期間に関する研究 その2

保坂氏ら⁵⁾は10および20℃の一定温度条件下で、標準養生、封緘養生および両端開放した供試体を用いて圧縮強度を試験し、それらの強度発現性の比較を行った。

コンクリートの調合は、水結合材比50%でスラグ置換率42%、水結合材比60%で置換率42%と27%の3種類を調合した。表-2.2にコンクリートの配合表を示す。

表-2.2 コンクリートの配合表

調合名	W/B(%)	スラグ置換率(%)	s/a(%)	単位量(kg/m ³)					化学混和剤添加量	
				W	C	BS	S	G	WR(B×%)	AE(A)
BB50	50	42	44.6	180	209	151	756	992	0.25	2
BB60	60	42	46.2	180	174	126	807	992	0.25	1.5
BA60	60	27	46.3	180	219	81	810	992	0.25	1

ここでは質量減少率、圧縮強度、脱型強度について以下のような結果を得ている。

(1) 質量減少率

図-2.4は10, 20℃の両端開放供試体の解放後から圧縮試験までの質量減少率を示したグラフである。質量減少はコンクリート中の水分量・養生温度・湿度に依存しスラグ置換率による違いはない。また、質量減少は調合によらずほぼ同一であった。

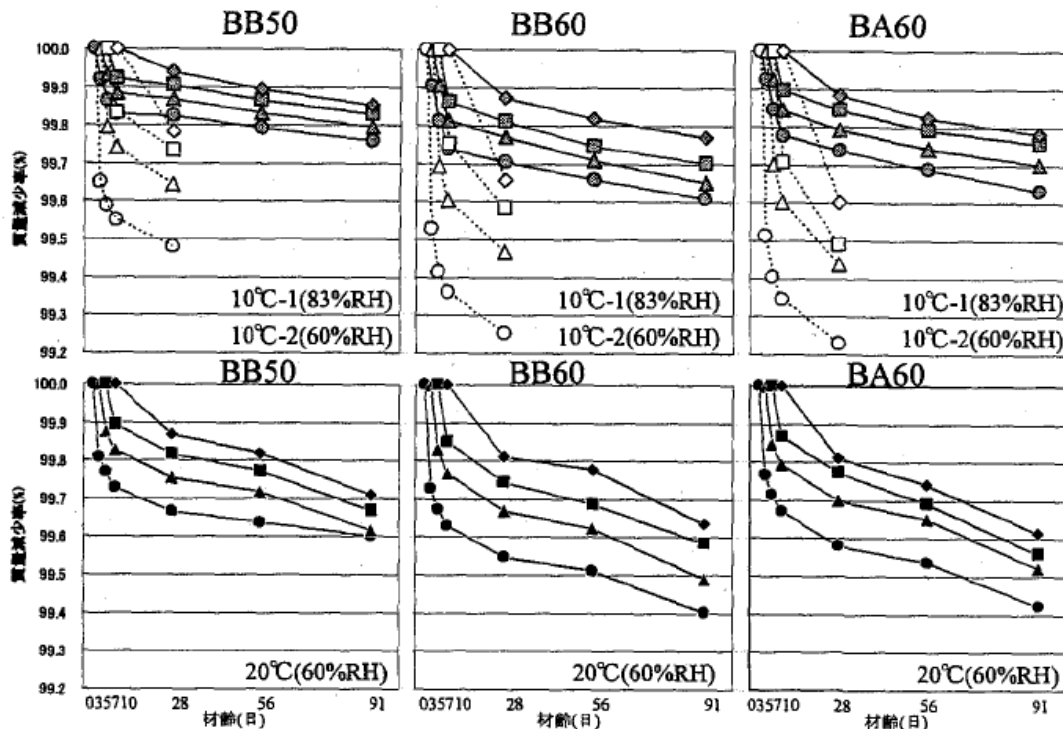


図-2.4 材齢と質量減少率の関係

(2) 圧縮強度

図-2.5 に材齢 28, 91 日における各養生の圧縮強度を示す。20℃では標準が最も強い強度を示しているが、材齢 28 日の 10℃では逆に標準が一番低くなっている。また両端解放については 10, 20℃では湿潤養生打ち切り時期が早いほど、強度が低くなった。

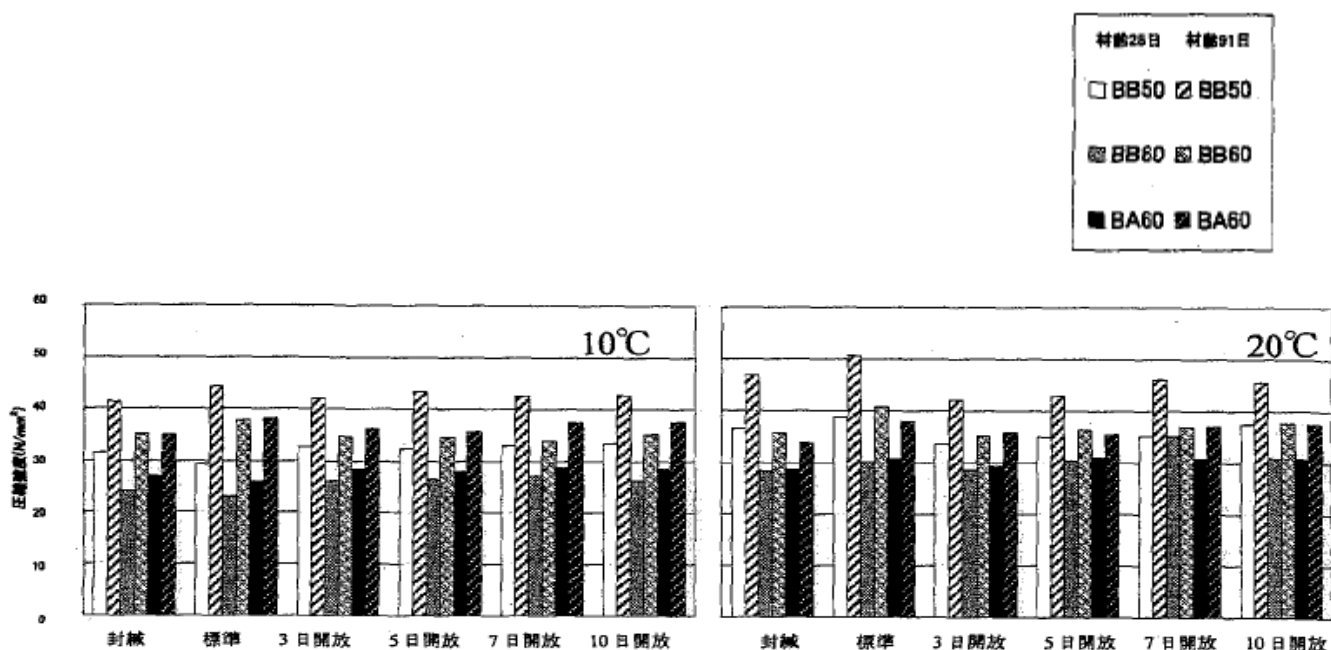


図-2.5 材齢 28, 91 日における各養生の圧縮強度

(3) 脱型強度

20℃では全体として脱型時圧縮強度が 15N/mm² 以上で、標準 28 日圧縮強度に対する脱型時圧縮強度が 40%以上あるならば、湿潤養生を打切っても、封緘 91 日圧縮強度の 90%程度強度発現をすることが分かった。10℃も同様に脱型時圧縮強度が 15N/mm² 以上で、水中 28 日圧縮強度に対する脱型時圧縮強度が 40%以上であるならば、湿潤養生を打切っても、封緘 28 日圧縮強度の 90%程度以上強度発現することが分かった。

2.5 高炉セメントの自己収縮および断熱温度上昇量に関する研究

宮澤氏ら⁶⁾は、高炉セメント B 種のひび割れ抵抗性を向上することを目的とし、自己収縮および断熱温度上昇量がいずれも小さくなる条件について研究をおこなった。高炉スラグの比表面積、置換率およびせっこう量を JIS 規格の範囲内で変化させ、検討を行った。

高炉スラグの置換率を 40, 50 および 60%, 高炉スラグの比表面積を $2880\text{cm}^2/\text{g}$, $3870\text{cm}^2/\text{g}$ および $4650\text{cm}^2/\text{g}$ (それぞれ BF2900, BF3900, BF4700), 試作高炉セメント中の SO_3 量を 1%, 2% および 4% と変化させ、計 7 種類の試作 BB を作製した。また、BF2880 は BF1400 および BF3900 を混合することにより作製した。比較用として市販の普通ポルトランドセメント(N), 高炉セメント B 種 [(BB), 高炉スラグの混入率 40%] および低熱ポルトランドセメント(L)を使用した。

(1) コンクリートの自己収縮ひずみに対する BF 比表面積の影響

図-2.6 は、異なる比表面積の高炉スラグを置換率 50% で混入し、 SO_3 量を 4% とした場合の自己収縮ひずみを示している。BF 比表面積が小さくなるほど自己収縮ひずみが小さくなる傾向が見られた。

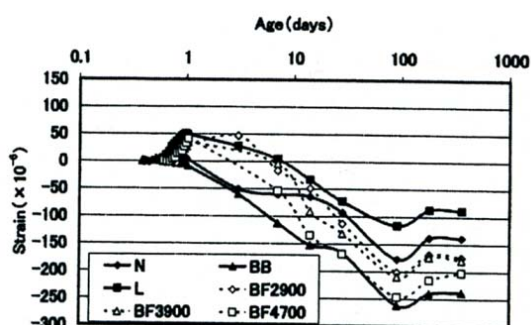


図-2.6 コンクリートの自己収縮ひずみ(BF 置換率の影響)

(2) コンクリートの自己収縮ひずみに対する BF 置換率の影響

図-2.7 は、BF2900 を置換率 40~60% の範囲で混入し、 SO_3 量を 4% とした場合の自己収縮ひずみを示している。また、材齢 3 日までは BF 置換率が高いほど膨張ひずみが大きいことがわかる。これは、 SO_3 量を 4% としているためエトリンガイドの生成量が多くなったためだと考えられる。

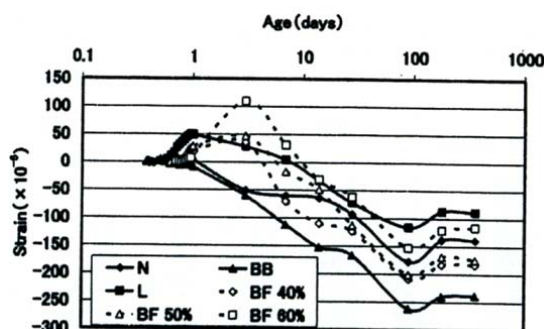


図-2.7 コンクリートの自己収縮ひずみ(BF 比表面積の影響)

(3) コンクリートの自己収縮ひずみに対する SO₃ 量の影響

図-2.8 は SO₃ 量を 1~4%の範囲で混入し、BF2900 を 50%混入した場合の自己収縮ひずみを示している。材齢 28 日程度までは、SO₃ 量が増えるほど自己収縮が小さく苦なることがわかる。SO₃ 量が 4%の場合は、材齢 3 日まで膨張ひずみを生じている。

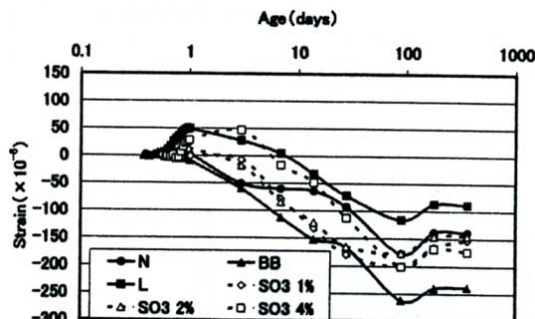


図-2.8 コンクリートの自己収縮ひずみ(SO₃ 量の影響)

いずれの試作高炉セメント B 種においても市販の高炉セメント B 種と比較して自己収縮ひずみを小さくすることが可能であることが確認された。各配合において 91 日から 182 日にかけて膨張ひずみを示しているがこれは恒温室の温度の変動によると考えられる。

以上のことから、航路セメント B 種の事故収縮を低減するためには JIS 規格の範囲内で高炉スラグの置換率を増やし、高炉スラグの比表面積を小さくし、SO₃ 量を多くすることが有効である。

(4) コンクリートの断熱温度上昇量に対する BF 比表面積の影響

図-2.9 は異なる比表面積の高炉スラグを置換率 50%で混入し、SO₃ 量を 4%とした場合の断熱温度上昇量を示している。BF 比表面積が断熱温度上昇量に与える影響はほとんど見られなかった。

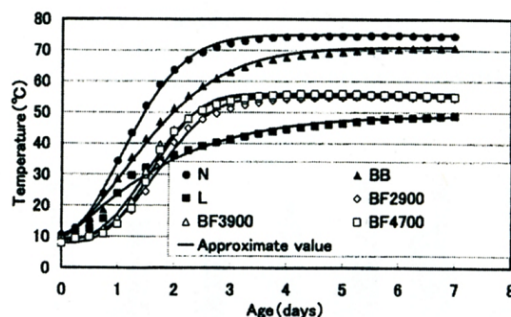


図-2.9 コンクリートの断熱温度上昇量(BF 比表面積の影響)

(5) コンクリートの断熱温度上昇量に対する BF 置換率の影響

図-2.10 は BF2900 を置換率 40～60%の範囲で混入し, SO₃ 量を 4%とした場合の断熱温度上昇量を示している. BF 置換率が高くなるほど断熱温度上昇量が抑えられる傾向が見られた. また, BF2900 を 50%以上とした場合に温度上昇速度および終局断熱温度上昇量が著しく低くなり, BF 置換率 60%においては終局断熱温度上昇量が低熱ポルトランドセメントとほぼ同程度となった.

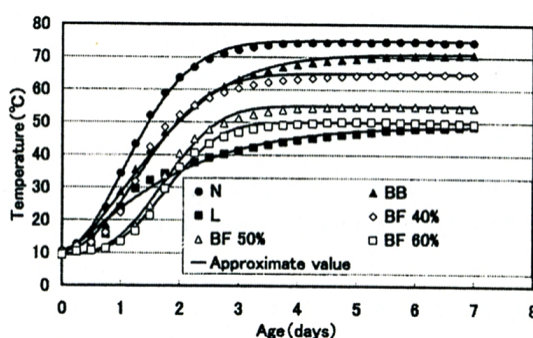


図-2.10 コンクリートの断熱温度上昇量(BF 置換率の影響)

(6) コンクリートの断熱温度上昇量に対する SO₃ 量の影響

図-2.11 は SO₃ 量を 1～4%の範囲で混入し, BF2900 を 50%混入した場合の断熱温度上昇量を示している. 終局断熱温度上昇量は SO₃ 量 1%の場合と比べると 2%以上にすることにより減少する. 既往の研究にも報告されているような SO₃ 量の増加とともに Q_∞は減少し温度上昇は早くなるという傾向が認められた.

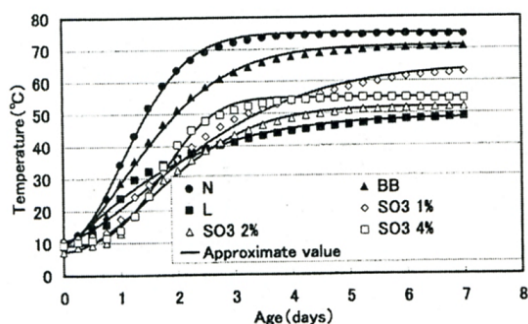


図-2.11 コンクリートの断熱温度上昇量(SO₃ 量の影響)

以上のことから, 高炉セメント B 種の断熱温度上昇量を低減するためには JIS 規格範囲内で高炉スラグの置換率を増やすことが有効である.

これらの結果から, 高炉セメント B 種の比表面積を 3000cm²/g 程度, SO₃ 量を 4%程度とし, 高炉スラグの置換率を高く設定することにより従来の高炉セメント B 種と比較して自己収縮特性および断熱温度上昇特性を大幅に改善できることが明らかになった.

2.6 高炉セメントを用いたコンクリートの自己収縮に関する実験的研究

久保氏ら⁷⁾は、高炉セメント B 種を使用した通常の強度レベルのコンクリートについて、自己収縮、乾燥収縮とびひび割れ抵抗性等とこれらの相互関係について検討を行った。

セメントは、市販されている 3 銘柄の高炉セメント B 種(A, B および C と略記する)と 3 銘柄の普通ポルトランドセメントを等量混合したもの(N と略記する)を使用した。

(1) 自己収縮試験結果

自己収縮試験結果を表-2.3 および図-2.12 に示す。ひずみは、いずれのコンクリートとも、打設後ある期間までは(+)の値、すなわち膨張傾向を示し、その後(-)の値、すなわち収縮傾向になった。ひずみが再び 0 になった材齢は、A が約 5 日で最も遅く、B が焼く 1 日で最も早く、C が約 4 日であり、N は約 3 日であった。材齢 21 日における収縮ひずみ量は、A が 72×10^{-6} 程度で最も小さく、B が 94×10^{-6} 程度、C が 103×10^{-6} 程度で最も大きく、N は 36×10^{-6} 程度であった。以上のことから、高炉セメント B 種を使用したコンクリートの自己収縮は、普通ポルトランドセメント使用コンクリートの約 2~3 倍大きく、A~C 間の差異も若干見られた。

表-2.3 自己収縮試験結果

セメントの種類	ひずみ($\times 10^{-6}$)								
	0.5 日	1 日	3 日	4 日	5 日	7 日	14 日	21 日	28 日
A	38	38	16	11	4	-13	-52	-72	-81
B	6	6	-16	-24	-32	-48	-81	-91	-98
C	31	33	8	2	-5	-23	-74	-103	-116
N	26	24	-1	-12	-22	-41	-31	-36	-44

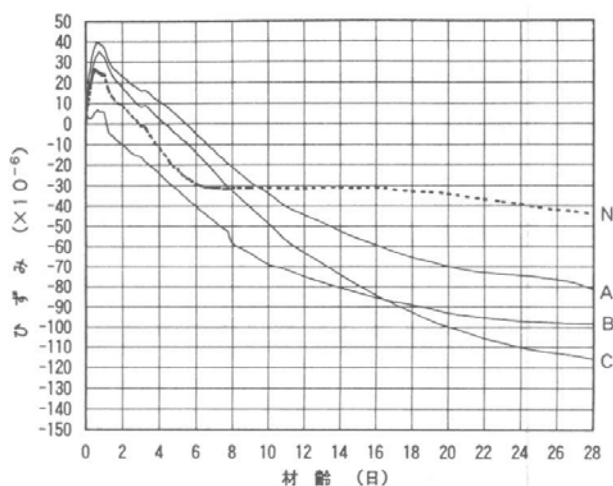


図-2.12 自己収縮試験結果

(2) 乾燥収縮試験結果

乾燥収縮試験結果を表-2 および図-2 に示す。乾燥材齢 8 週における長さ変化は A, B および C とほぼ同等の値を示し, A が 670×10^{-6} , B が 660×10^{-6} , C が 620×10^{-6} で, また N も 630×10^{-6} であることから, この時点における長さ変化には, セメントの種類および銘柄による差異はあまり認められない。乾燥材齢 1 週における長さ変化は, A が 300×10^{-6} , B が 240×10^{-6} , C が 280×10^{-6} で, 乾燥材齢 8 週に対する割合は, それぞれ A が 45%程度, B が 36%程度, C が 45%程度であった。また N では 210×10^{-6} , 33%程度であった。以上のことから, 高炉セメント B 種を使用したコンクリートは, 乾燥材齢初期の段階では A~C 間お差異が若干認められ, 普通セメントを用いたコンクリートよりやや大きめの値であったが, 長期になるとこのような傾向は認められなかった。

表-2.4 乾燥収縮試験結果

セメントの種類	長さ変化($\times 10^{-6}$)					
	1 日	3 日	1 週	2 週	4 週	8 週
A	110	200	300	450	540	670
B	80	160	240	400	510	660
C	90	190	280	420	500	620
N	80	150	210	350	500	630

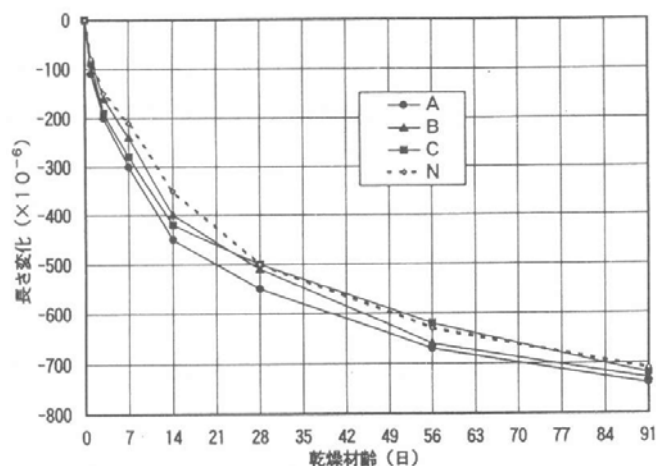


図-2.13 乾燥収縮試験結果

高炉セメント B 種を使用したコンクリートの自己収縮, 乾燥収縮について, 以下のことが明らかとなった。

- 高炉セメント B 種を使用したコンクリートの自己収縮は, 普通ポルトランドセメント使用コンクリートの約 2~3 倍とかなり大きく, また A~C 間の差異は若干認められる。
- 高炉セメント B 種を使用したコンクリートは, 乾燥材齢初期の段階では A~C 間の差異が若干認められ, 普通セメントを使用したコンクリートより若干大きめの値であったが, 長期になるとこのような傾向は認められない。

2.7 高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの細孔構造と乾燥収縮

李氏ら⁸⁾は、乾燥収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響を解明することを目的として、比表面積 4000, 8000, 11000, 18000cm²/g, の高炉スラグ微粉末を用いたモルタルを実験対象として、モルタルの細孔構造と乾燥収縮を把握し、モルタルの細孔構造から、乾燥収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の比表面積および置換率の影響について検討を行った。

(1) 乾燥収縮率

高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの乾燥収縮率を図-2.14 に示す。高炉スラグ微粉末の置換率は 30% の場合、モルタルの乾燥収縮率は無混入のものと同程度である。置換率 50% の高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの乾燥収縮率は、乾燥の初期では、高炉スラグ微粉末の比表面積が大きいほど大きくなり、長期間の乾燥では、無混入のものと同程度あるいはやや大きい。置換率は、さらに増えて、70% になると、乾燥の初期だけでなく、長期でも無混入のモルタルより若干大きい。乾燥期間 182 日の場合、置換率 50% の比表面積 11000, 18000cm²/g 高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの乾燥収縮率は、 -8.25 , -8.71×10^{-4} であり、無混入のもの (-8.17×10^{-4}) と同程度である。使用範囲の置換率では、高炉スラグ超微粉末は乾燥収縮に悪影響を与えない。

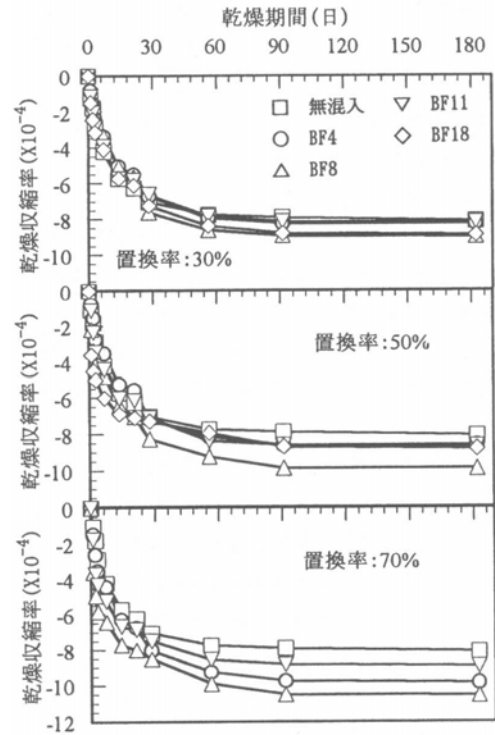


図-2.14 モルタルの乾燥収縮率

(2) 乾燥収縮と質量減少率の関係

モルタル中の水の蒸発、すなわち質量現象することによるモルタルの乾燥収縮は生じる。各種モルタルの乾燥収縮率と質量減少率との関係を図-2.15 に示す。乾燥によってモルタルの質量減少率の増加による乾燥収縮は大きくなる。しかし、乾燥の初期では、置換率 50%・比表面積 18000cm²/g, 置換率 70%・比表面積 8000 と 11000 cm²/g の高炉スラグ微粉末を用いたモルタルを除いて、すべてのモルタルに対して、質量減少率の増加に対して乾燥収縮率の増加は、小さいが、その後(質量減少率約 2% 以上の場合)急激に増大する。一方、置換率 50%・比表面積 18000cm²/g, 置換率 70%・比表面積 8000 と 11000 cm²/g の高炉スラグ微粉末を用いたモルタル

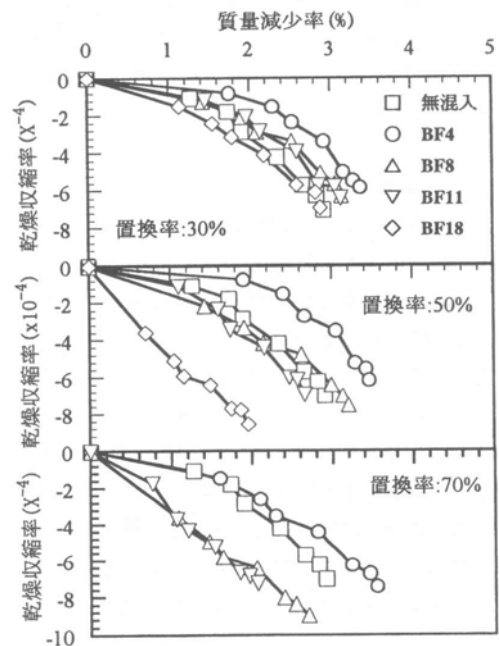


図-2.15 乾燥収縮と質量減少率の関係

では、乾燥収縮率は乾燥の最初から急激に増大する。すなわち、高炉スラグ微粉末の比表面積と置換率が大きいほど、細孔径は小さくなり、その小さい細孔中の水の蒸発は乾燥収縮に大きく影響を及ぼすものと言える。

(3) 細孔分布の影響

乾燥収縮は細孔中の水の蒸発によってからになった細孔の量と孔径に関係する。毛細管空隙内外の圧力差は $\Delta P=2\gamma/r$ (γ :毛細管水の表面張力, r :毛細管の半径)で表される。細孔径が小さいほど、この乾燥収縮を生じる圧力差はかなり大きくなるため、乾燥収縮は大きい。すなわち、小さい孔径の細孔量と乾燥収縮との間には密接な関係がある。乾燥によって空になった細孔分布から求める $10\mu\text{m}\sim 30\text{nm}$, $30\sim 10\text{nm}$, $10\sim 3.8\text{nm}$ および 3.8nm 以下の細孔量(3.8nm 以下の細孔量は質量減少量から乾燥によって空になった細孔量の値を差し引いて求める結果である)と乾燥収縮率との関係を重回帰分析法により式(2.1)のように求めた。

$$\Delta L/L = -0.105X_1 - 0.104X_2 - 0.434X_3 - 0.545X_4 - 2.231 \quad (R^2=0.91) \quad (2.1)$$

ここに、 $\Delta L/L$:乾燥収縮率($\times 10^{-4}$)

X_1 : $10\mu\text{m}\sim 30\text{nm}$ の細孔量(mm^3/g)

X_2 : $30\sim 10\text{nm}$ の細孔量(mm^3/g)

X_3 : $10\sim 3.8\text{nm}$ の細孔量(mm^3/g)

X_4 : 3.8nm 以下の細孔量(mm^3/g)

式(2.1)により、乾燥によって空になった細孔は乾燥収縮に影響を及ぼす。特に 10nm 以下の空になった細孔量は乾燥収縮に大きく影響を与える。

得られた知見について以下にまとめる

- a) 高炉スラグ微粉末はモルタルの細孔構造に大きく影響を与え、比表面積と置換率が大きいほど、細孔量と細孔径は小さくなる。この細孔構造の変化は、モルタルの乾燥収縮に影響を及ぼす。
- b) 乾燥によって空になった細孔は $0.1\mu\text{m}$ 以下のものであり、その空になった細孔量の増加による乾燥収縮は増大する。特に 10nm 以下の細孔中の水の蒸発は乾燥収縮に大きく影響を与える。
- c) 高炉スラグ微粉末を用いることにより、モルタルの細孔径が小さくなるために、細孔中の水が蒸発しにくくなり、また細孔量も小さくなり、乾燥過程に質量減少率は小さい。さらに質量減少率と乾燥収縮との関係も変化する。
- d) 置換率 50%以下では、高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの乾燥収縮は、乾燥初期では若干大きいのが、長期乾燥に至ると無混入のものと同程度あるいはやや大きい。使用範囲の置換率では、高炉スラグ超微粉末は乾燥収縮に悪影響を与えない。

2.8 高炉スラグ微粉末混和コンクリートに発生するひび割れに関する研究

岩城氏ら⁹⁾は、高炉スラグ微粉末を混和した高強度コンクリートを対象に、高炉スラグ微粉末の混和の有無、使用する高炉スラグ微粉末の種類といった要因が自己収縮に起因するひび割れ性状への影響、および、材齢の途中から乾燥収縮による影響が加味された場合のひび割れ性状について調査することを目的として研究を行った。

セメントは普通ポルトランドセメント(PI)，高炉スラグ微粉末は、高炉スラグ微粉末 4000、(置換率は 70%，以後 BS47 と称す)及び高炉スラグ微粉末 8000(置換率は 80%，以後 BS87 と称す)を使用した。

(1) 長さ変化試験

図-2.16 に、材齢 42 日において封かん養生から気中養生に切り換えた場合の各配合の長さ変化率測定結果を示す。図-2.16 より、乾燥後の収縮量は、BS47、PI、BS87 の順に減少しており、BS87 において他の 2 配合と比較し明らかに少ないことがわかる。また、BS87 において乾燥に伴う水分逸散量が最も少なくなるという結果が得られた。このように、BS87 で他配合と比較し明らかに乾燥後の収縮量及び水分逸散量が減少した理由として、粉末度の高い高炉スラグ微粉末を多量に混和した結果、細孔組織が緻密化するとともに、スラグ表面に吸着した水分が乾燥により開放されにくくなったことが考えられる。さらに、本研究で採用した配合は水結合材比 25%と非常に低く、さらに粉末度の高い高炉スラグ微粉末を混和していることにより、初期の水和反応が急速に進行したため、乾燥開始時において蒸発可能水自体が欠乏してしまったことが考えられる。以上の検討結果より、本実験条件においては、高炉スラグ微粉末の粉末度、置換率ともに高い配合で、脱型後の自己収縮量及びこれに乾燥の影響が加味された場合の収縮量ともに低下することが確認された。

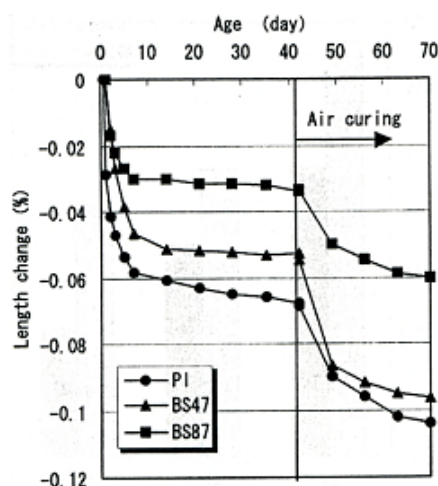


図-2.16 モルタルの長さ変化(封かん養生から気中養生)

(2) ひび割れ本数測定

図-2.17 は、各供試体に発生したひび割れ総数を養生条件ごとにまとめた結果である。材齢 70 においてひび割れ性状を観察した結果、封かん養生を継続した場合目視可能なひび割れは発生しておらず、微細なものだけであった。このことから、本実験条件下においては自己収縮のみの影響により表面上マクロなひび割れは発生しないことが確認された。

一方、材齢 42 日から気中養生を行った供試体は、封かん養生を継続した場合と比較し、ひび割れ本数が著しく増加した。すなわち、自己収縮のみの影響ではひび割れが顕在化することはないが、これに乾燥の影響が加わるとひび割れが著しく助長する結果となった。これらのひび割れのほとんどでは、供試体の隅角部から垂直に進展するひび割れ幅 0.1mm 以下の微細ひび割れであった。配合間のひび割れ本数に着目すると、封かん養生を継続した場合においても材齢途中で気中養生に切り換えた場合においても P1, BS47, BS87 の順に減少しており、この傾向は、図-1 に示される材齢 70 日における各配合の収縮量と対応する結果となった。すなわち、コンクリートがある程度硬化した段階以降(本実験の場合型枠脱型以降)に発生する自己収縮及び乾燥収縮がひび割れに多大な影響を及ぼす可能性が示唆される結果となった。このような結果が得られた理由として、若材齢における収縮ひずみはクリープにより緩和され、また弾性係数も小さいために応力の顕著な増加に結びつかないことと関連していると考えられる。コンクリートの硬化過程における自己収縮及び乾燥収縮の進展と発生するひび割れ性状との関係については、今後さらに詳細な検討を行う必要がある。

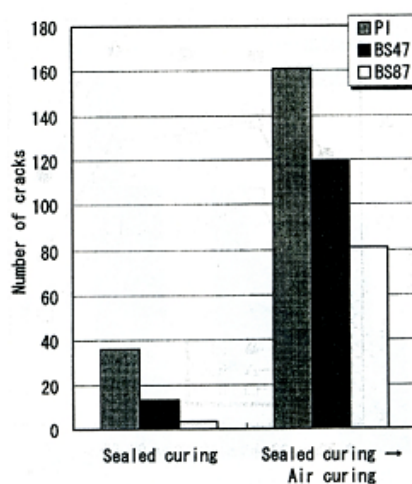


図-2.17 各配合に対するひび割れ本数

2.9 養生期間および脱型時の強度に対する参考値¹⁰⁾

(1) 水分逸散の防止

コンクリートは、打込み後ごく早い時期に表面が乾燥して内部の水分が失われると、セメントの水和反応が十分に行われず、また、特に直射日光や風などによって表面だけが急激に乾燥すると、ひび割れ発生の原因となる。このため、打ち終わったコンクリートの上部には、シートで日よけや風よけを設けることが望ましいとされている。

(2) 養生期間の標準

コンクリートの力学的特性，耐久性，およびその他の性能等の品質等を高めるためには，できるだけ長く湿潤状態に保つのがよい。これは，コンクリートを十分に硬化させることと，硬化中の乾燥による収縮をできるだけ小さくするためである。しかし，長期間湿潤養生をすることは一般の構造物においては困難であり，また不経済でもある。しかも，湿潤養生の効果の大部分は初期の養生期に限られている。そこで，養生温度によって養生の効果は異なるが，標準な養生日数が定められている。養生期間の標準を表-2.5 に示す。

表-2.5 養生期間の標準

日平均気温	普通ポルトランドセメント	混合セメント B 種	早強ポルトランドセメント
15℃以上	5 日	7 日	3 日
10℃以上	7 日	9 日	4 日
5℃以上	9 日	12 日	5 日

(3) 施工時強度

構造物が完成するまでの期間に想定される荷重に対して構造的な安全性を保証し，合理的な施工および完成直後の構造物の性能を保証するために，条件に応じてコンクリートにその時点時点で適切な強度が要求される。施工時のコンクリート強度は，打込み温度，環境温度等の影響を受けるので，これらを考慮して型枠および支保工の取外し時期を選ぶ必要がある。型枠および支保工の取外しに必要なコンクリートの圧縮強度の参考値として以下の表-2.6 が与えられている。

表-2.6 型枠および支保工の取外しに必要なコンクリートの圧縮強度の参考値

部材面の種類	例	コンクリートの圧縮強度(N/mm ²)
厚い部材の鉛直に近い面，傾いた上面 小さいアーチの外側面	フーチングの側面	3.5
薄い部材の鉛直に近い面，45° より 急な傾きの斜面，小さいアーチの内面	柱，壁，はりの側面	5.0
スラブおよびはり， 45° より緩い傾きの下面	スラブ，はりの底面 アーチの内面	14.0

2.10 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの水中養生日数について¹⁾

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの養生期間は、試験によって定めるものを原則とする。

まず普通ポルトランドセメントのみを使用した水セメント比が 45～55%のコンクリートにおいて、材齢 28 日に対する圧縮強度比が 50%程度に達する材齢を基準とする。対応する同じ水結合材比で普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末で置換した場合に、同等の圧縮強度比となるのに必要な水中養生日数の目安を、気温とコンクリートの養生温度が同じ場合について求めた。結果を表-2.7 に示す。

高炉スラグ微粉末は、粉末度が大きくなるにしたがって初期の強度発現性も大きくなる傾向にあり、所用の水中養生期間を短くすることが可能である。なお、打込み温度の下限値である 10℃を下回る気温下において、その後の水和熱によるコンクリートの温度上昇が期待できないような薄い断面の部材等では、コンクリートの露出面を水中養生状態に保つ期間が相当に長くなること。また寒中コンクリートの施工でない場合でも、低温の水中養生状態を長く保つことは、ときとして凍害を受ける危険性もあることから、コンクリートを乾燥させたり、部材内の著しい温度差によるひび割れを生じさせたりしないような、適切な方法の保温養生あるいは給熱養生を用いることを考慮するのがよい。

表-2.7 水中養生日数の目安（水結合材比 50%）

粉末度 (cm ² /g)		4000	6000	8000
置換率 (%)		50		
日平均気温 (°C)	17	7 日以上	7 日以上	6 日以上
	10	10 日以上	9 日以上	8 日以上
	5	13 日以上	12 日以上	10 日以上

2.11 脱型時期がかぶりコンクリートの耐久性に及ぼす影響に関する研究

佐藤氏ら¹¹⁾は、初期の乾燥状態が強度に及ぼす影響に関して実験的検討を行った。

脱型時期と混和剤種類を主要なパラメータとして検討を行うこととし、材齢 1, 3, 7 日で脱型した供試体を室内乾燥させ、各種試験に供した。測定項目は、スランプ、空気量、圧縮強度、ヤング係数、質量変化、割裂引張強度とした。また、併せて標準水中養生および 20℃封かん養生供試体を作製し、材齢 28, 91 日で圧縮試験を行った。なお、標準水中供試体は材齢 1 日で脱型し、直ちに水中養生を開始した。

表-2.8 に計画調合を示す。プレーンコンクリートの計画調合は、目標スランプを 1%とし、AE 減水剤、AE 剤を使用したコンクリートの調合をベースに、容積比が同一になるように調合を定めた。なお、図中の記号は、アルファベットは混和剤種類を、数字は脱型材齢を表している。

表-2.8 配合表

水セメント比 (%)	記号	細骨材率 (%)	単位水量	単位粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	絶対容積(l/m ³)			質量(kg/m ³)			化学混和剤		スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
					セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材	Ad1	Ad2			
55	PL	42.8	190	0.66	109	296	395	345	763	1072	0	0	2.6	1.1	14
55	AE	42.8	183	0.64	105	285	381	333	736	1034	C+0.25%	1.5A	14.7	6.3	13
55	SP	42.8	183	0.64	105	285	381	333	736	1034	C+0.50%	0	14.4	4.2	13.3

(1) 質量変化

図-2.18 に、材齢と各脱型時からの質量変化量の関係を、図-2.19 に材齢と脱型時からの質量変化率の関係を示す。図より、脱型時期が早いほど、質量変化率は大きいことがわかる。また、混和剤種類で比較すると、混和剤を使用した方が質量変化は大きくなる傾向にあり、初期脱型による乾燥によってコンクリートの品質が影響を受けやすくなることを示唆している。

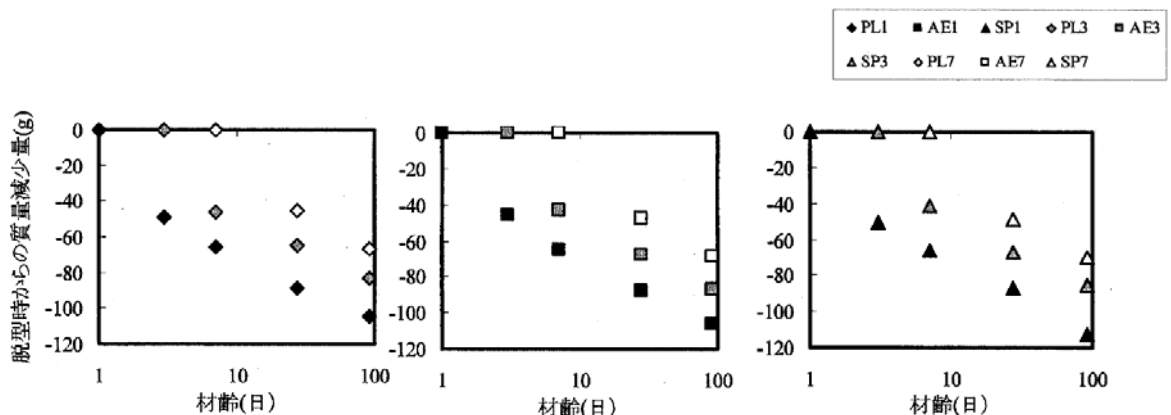


図-2.18 材齢と質量変化量の関係

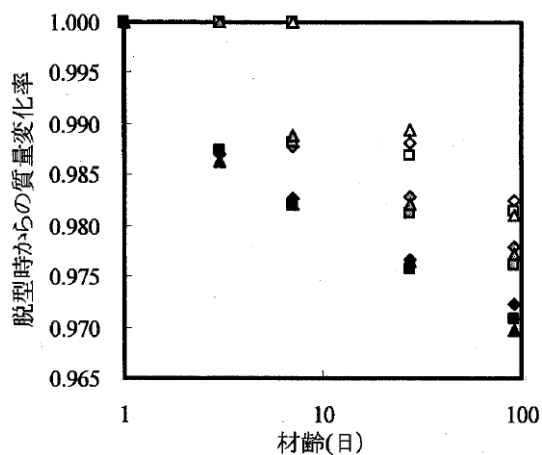


図-2.19 材齢と質量変化量の関係

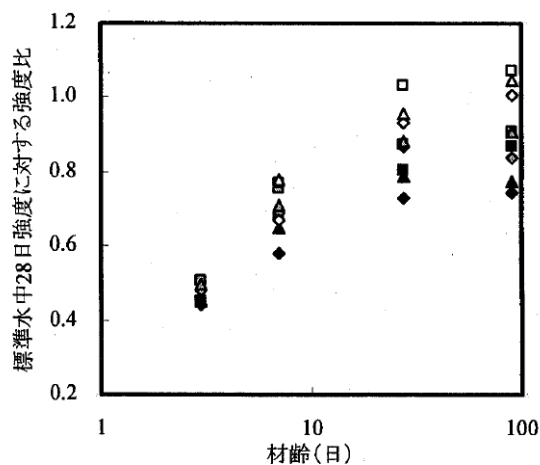


図-2.20 材齢と強度比の関係

表-2.9 に圧縮強度試験結果を，図-2.20 に材齢と各調合の標準水準養生 28 日強度に対する強度比の関係を示す．混和剤を使用した方が全体的に強度は高い傾向があった．

混和剤を使用した場合の方が，脱水量が多いにも関わらず強度比は大きい傾向が見られたが，プレーンコンクリートとの差異はそれほど大きいとはいえず，脱型時期の影響の方が顕著であることがわかった．

28 日強度との比は，1 日脱型で 0.75，3 日脱型で 0.82，7 日脱型で 1.0 である．脱型 7 日の場合は十分な強度増進が期待できるが，初期脱型は材齢 3 日までの範囲では強度増進にきわめて大きな影響をもつことがあらためて確認された．これらの結果から，かぶりコンクリートの品質は，初期の養生条件に大きく影響を受けるという知見が得られた．

表-2.9 強度試験結果 (単位 N/mn²)

材齢 (日)	PL1	PL3	PL7	PL(W)	PL(S)	AE1	AE3	AE7	AE(W)	AE(S)	SP1	SP3	SP7	SP(W)	SP(S)
3	19.1	20.7				19.1	20.7				19.1	20.7			
7	24.9	29.6	28.9			24.9	29.6	28.9			24.9	29.6	28.9		
28	31.5	37.4	40.2	43.1	39.6	31.5	37.4	40.2	43.1	39.6	31.5	37.4	40.2	43.1	39.6
91	32.1	36.2	43.4	53.9	42	32.1	36.2	43.4	53.9	42	32.1	36.2	43.4	53.9	42

2.12 温度との連成を考慮したコンクリートの湿気移動解析に関する研究

籠橋氏ら¹²⁾は、コンクリート中の湿気移動に伴う相対湿度分布の相対湿度分布の解析法の定式化を行った。

(1) 湿気移動解析の提案

コンクリート中の湿気移動則として、従来から式(2.2)が用いられることが多い。これに対し、籠橋氏らは式(2.3)を採用している。

$$J = \lambda_p S \frac{d(RH)}{dx} \quad (2.2)$$

$$J = -\lambda_p S \frac{dP}{dx} \quad (2.3)$$

ここに、 S : 湿流が通過する面積(m²), J : 湿流(g/h), λ_p : 透湿率(g/hr·m·mmHg),

P : 蒸気圧(mmHg), RH : 相対湿度(%)

式(2.2)は、湿気移動を相対湿度勾配で表している。一方、式(2.3)は、湿気移動はコンクリート中の蒸気圧勾配により生じると定義するものである。一方、コンクリートのような微視的に多孔質の材料において、細管水は負ポテンシャル ψ (J/kg)の状態にある。この場合、相対湿度 RH と蒸気圧 P との関係は次式で表される。

$$P = P^* \exp\left(\frac{\psi M_V}{RT}\right) \quad (2.4)$$

$$RH = 100 \times \exp\left(\frac{\psi M_V}{RT}\right) \quad (2.5)$$

$$\text{ただし、 } P^* = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5T_c}{237.3+T_c}} \quad (2.6)$$

ここで、 P^* : 温度 $T(K)$ での飽和蒸気圧(mmHg), M_V : 水蒸気の分子量(kg/mol),

R : 気体定数(8.3143 J/mol·K), T : 絶対温度(K), T_c : 温度(°C)

式(2.4)において温度 T_c が上昇すると、式(2.6)に示すように飽和蒸気圧 P^* が増大するので蒸気圧 P も大きくなる。一方、相対湿度 RH は温度 T_c が上昇しても大きくは変化しない。なぜならば、 T は絶対温度であるから温度 T_c が変化しても式(4)右辺の値の変動は少ないと考えられるからである。一般に固体の温度が上昇すると乾燥が促進される(湿気移動が大きくなる)。式(2.3)の湿気移動則は、蒸気圧 P で定義しているので温度上昇による湿気移動の促進現象を表現しているが、一方の式(2.2)では考慮できない。従って、コンクリートのように温度変化が生じる場合は、式(2.2)の蒸気圧 P による湿気移動を用いるのが合理的である。以上の説明を図 2.21 に示す。

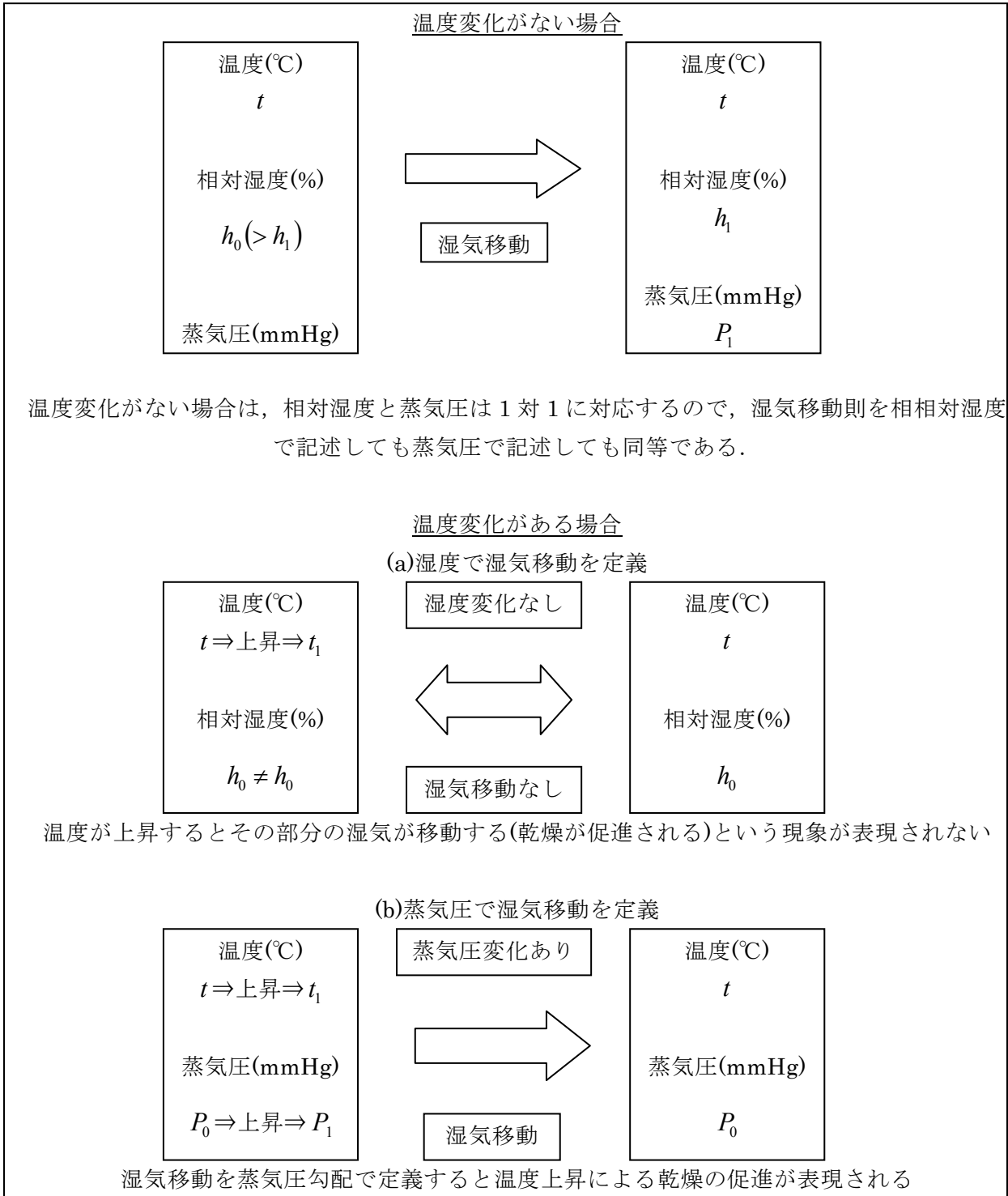


図-2.21 湿気移動側

式(2.3)の湿気移動則から次の湿気移動の非線形支配方程式が導かれる。

$$\text{基礎式} \left(\frac{dq}{dP} \right)_p \cdot \frac{\partial P}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_p \nabla P) + \left(\frac{dq}{dt} \right)_p \quad (2.7)$$

また、境界条件として、次式を仮定することができる。

$$-\lambda_p \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha (P - P_c) f_\omega \quad (2.8)$$

ここで、 q : 湿気密度(g/m^3), $\left(\frac{dq}{dP} \right)_p$: 湿気容量($\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{mmHg}$), $\left(\frac{dq}{dt} \right)_p$: 水和による湿気密度

変化($\text{g}/\text{hr} \cdot \text{m}^3$), t : 時間 (h), α : 蒸発率($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{mmHg}$), P_c : コンクリート周囲の蒸気圧

(mmHg), f_ω : 空気流動に関する係数

すなわち、基礎式(2.7)を式(2.8)および(2.9)と連成させて、境界条件式(2.8)のもとで解けばよいことになる。

籠橋氏らは以上のような湿気移動解析の手法を提案している。

(2) 解析例

本研究で提案する解析法による解析例を示す。解析はここで提案する手法(温度連成)と相対湿度による湿気移動則にもとづく手法(温度非連成)の 2 方法で実施した。解析モデルは厚さ 150mm のスラブとした。蒸発面はスラブ上面のみとした。解析期間は 60 日間とした。スラブの温度を打設から 25 日間は 20°C(一定)、その後 30 日まで 8°C/日の割合で温度上昇させ、30 日以降は 60°C(一定)に保たれるものとした。周囲の環境条件は温度 20°C、相対湿度 70%(蒸気圧 12.278mmHg)の一定とした。

透湿率 λ_p と湿気容量 $\left(\frac{dq}{dP} \right)_p$ は、西岡らの研究結果にもとづき、図-2.22, 23 に示すように相対

湿度の関数として評価した。水和による湿度密度変化 $\left(\frac{dq}{dt} \right)_p$ はないものとした。また、蒸発率 α

は著者らの研究をもとに $\alpha=0.5(\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{mmHg})$ とした。空気の流動に関する係数 $f_\omega=1$ とした。

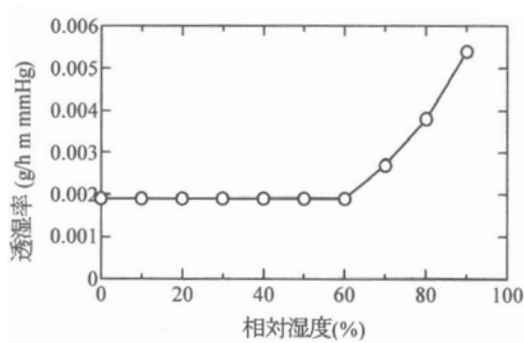


図-2.22 透湿率の相対湿度依存性

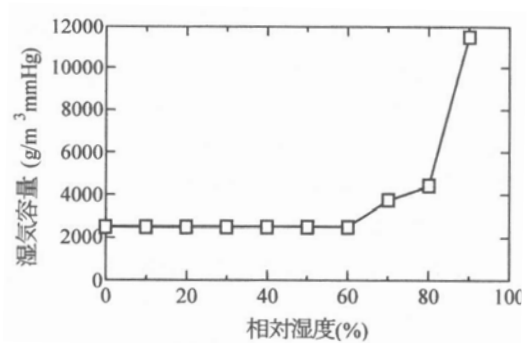


図-2.23 湿気容量の相対湿度依存性

図-2.24～25 に、温度連成と温度非連成の解析結果を示す。図-2.24 の温度連成の解析から、表面付近で急激に相対湿度が低下し、乾燥が進行することがわかる。特に、表面から 30mm までの領域で大きな相対湿度勾配が生じている。材齢 25～30 日にかけて温度 20℃～60℃に上昇するとコンクリート内の蒸気圧が上昇し、乾燥がさらに促進され、表面付近では周囲の相対湿度 70%よりはるかに低い相対湿度にまで達する。材齢 60 日後で、表面の相対湿度は 27%、表面からの 10mm の位置では 43%となる。

一方、図-2.25 から、温度非連成の解析では、材齢 25 日までは温度が 20℃一定のため温度連成の場合と一致するが、材齢 25 日以降は、温度上昇の影響は全く反映されておらず、周囲の相対湿度 70%に漸近していく傾向を示している。

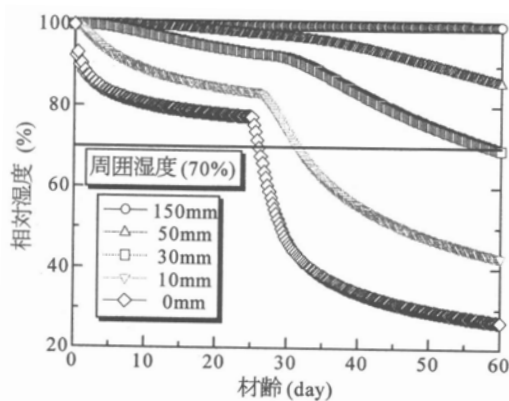


図-2.24 相対湿度変化(温度連成)

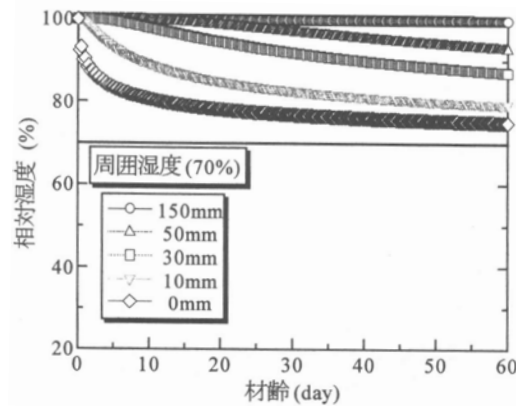


図-2.25 相対湿度変化(温度非連成)

コンクリート中の蒸気圧で定義した湿気移動則にもとづく、湿気移動の非線形基礎方程式を用いた。解析法の合理性を解析ならびに湿気移動実験を実施して明らかにした。本研究で提案した解析法では、コンクリートの温度変化が湿気移動に与える影響が反映されているので、コンクリート構造物における湿気移動に伴う相対湿度分布を解析する方法として適当であると考えられる。

2.13 コンクリートの乾燥収縮によるひずみと応力の解析

籠橋氏ら¹³⁾は、乾燥収縮によるひずみと応力の解析ならびに乾燥収縮応力と温度応力の合成応力の挙動について検討している。

(1) 乾燥収縮ひずみの測定方法

図-2.26 に示すように、 $30 \times 30 \times 300\text{mm}$ の小型角柱供試体の $30 \times 30\text{mm}$ 断面中央に温度・相対湿度計測用の小孔を設け、側面には 250mm 間隔で長さ変化計測用のゲージプラグを埋設した。供試体の両端にはシール（封緘処理）を施し、他の4面から乾燥させた。供試体は材齢1日で脱型し、封緘処理および小孔中央に小型電気湿度計を設置した後、乾燥開始材齢まで湿布養生および封緘養生を行った。乾燥開始後の小孔中の温度・相対湿度は小型電気湿度計を用いて計測し、供試体の長さ変化はひずみ計を用いて計測した。実験は環境試験室内で行い、温度は 20°C 一定、相対湿度は図-2.27 に示すようにコントロールした。

供試体の乾燥収縮ひずみの計測は、供試体中心（小孔中央）の相対湿度と周囲の相対湿度がほぼ同一となるとともに、供試体の重量が一定となるまで継続した。このようにして、ある相対湿度に対する乾燥収縮ひずみ量が求まった後、周囲の相対湿度をさらに低下させ、それ以降は同様の手順で計測を続けた。

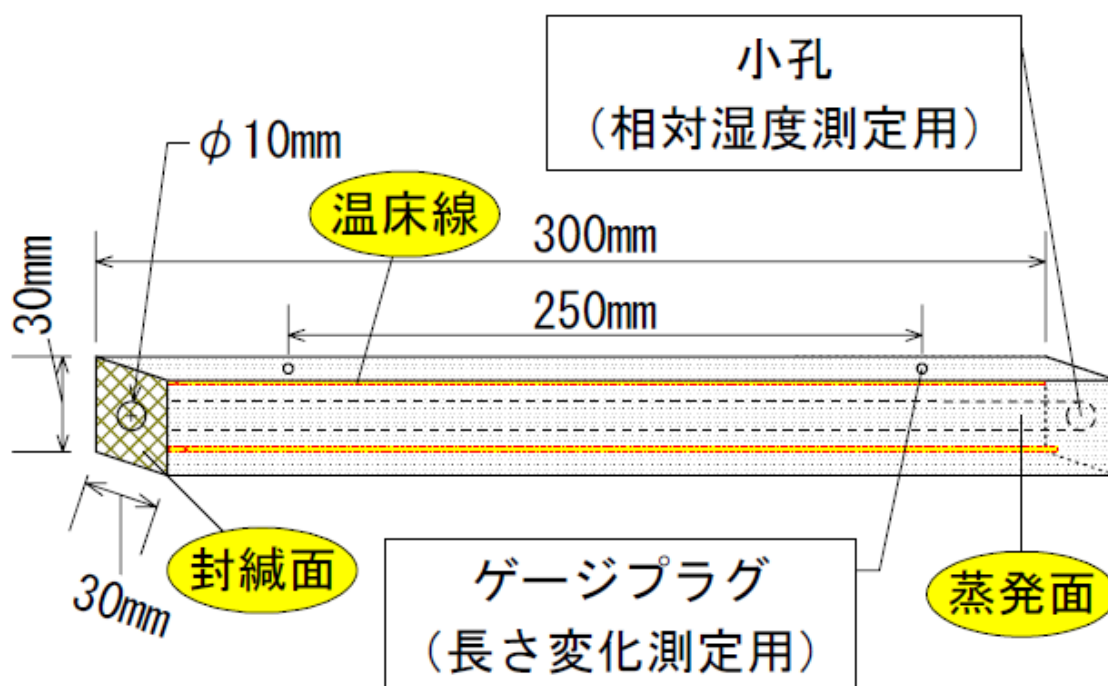


図-2.26 長さ変化供試体

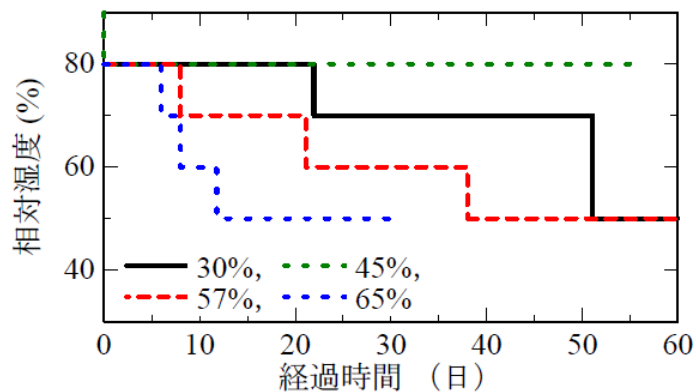


図-2.27 試験室の環境

本研究で行った実験概要をまとめて表-2.10 に示す。表-2.10 に示すように、本研究では乾燥収縮ひずみの発現性状に及ぼすコンクリートの配合 (W/C, W) と供試体温度の影響を検討することにした。

表-2.10 実験種類

W/C (%)	乾燥開始材齢 (日)	供試体温度 (°C)	環境条件
30	7	40	温度20°C一定, 相対湿度80%から 段階的に変化
	7	20	
45	7	40	
57	1	20	
65	1	40	
	1	20	

(2) 実験結果

図-2.28～31 に供試体の小孔中の相対湿度と乾燥収縮ひずみとの関係の実験結果を示す。供試体の乾燥収縮ひずみは、乾燥収縮ひずみ実測値を自己収縮ひずみ実測値で補正して求めた。コンクリートの乾燥収縮ひずみは、W (W/C) が増大すると大きくなる傾向を示した。特に、W/C が 45%から 57%に変化する段階で大きく増大する傾向が認められた。

図-2.28 および図-2.31 から、乾燥収縮ひずみの発現速度はコンクリート温度が高いほど大きくなるが、周囲の相対湿度と平衡に達した時の相対湿度と乾燥収縮ひずみとの関係は、コンクリート温度 40°Cと 20°Cとでは大差はない結果となった。

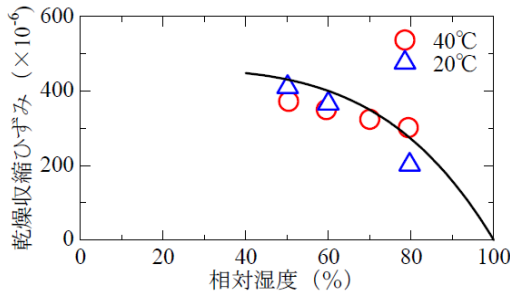


図-2.28 相対湿度と乾燥収縮ひずみ
(W/C=30%)

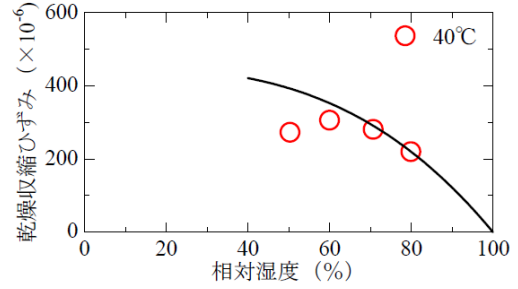


図-2.29 相対湿度と乾燥収縮ひずみ
(W/C=45%)

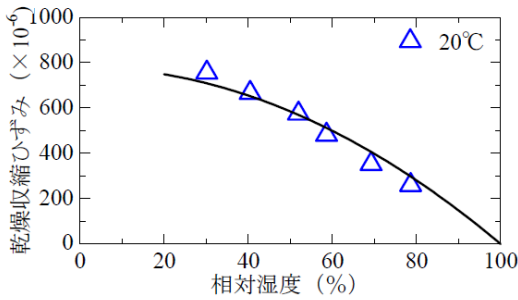


図-2.30 相対湿度と乾燥収縮ひずみ
(W/C=57%)

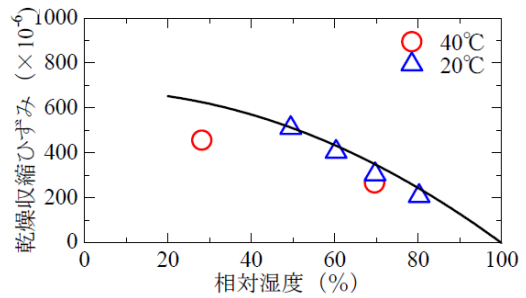


図-2.31 相対湿度と乾燥収縮ひずみ
(W/C=65%)

(3) 乾燥収縮応力と温度応力の合成応力解析

橋脚柱部 (10000×4000mm) の水平断面をモデル化して、乾燥収縮ひずみおよび乾燥収縮応力の解析を実施するとともに、温度および温度応力の解析も実施して、乾燥収縮応力と温度応力との合成応力について検討した。

図-2.32 に温度の経時変化、図-2.33 に相対湿度の経時変化を示す。図-2.32 から、コンクリートの温度は材齢 2~3 日付近でピークに達し、その後は周囲温度 20°C に近づいていく。図-2.33 から、コンクリート表面の相対湿度は材齢とともに低下し、材齢 90 日では 56%程度に達する。表面から 100mm の位置では相対湿度の変化は極めて緩やかとなり、材齢 50 日付近まで相対湿度の低下は生じない。湿気移動解析で水和熱の影響を考慮した解析結果から、水和熱によって湿気移動（乾燥）が促進されることが確認できる。

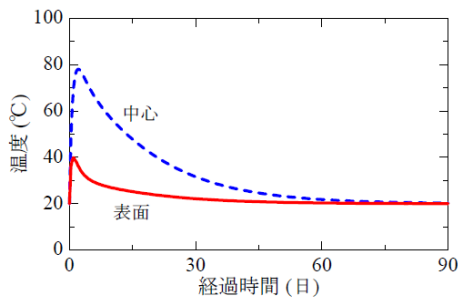


図-2.32 温度変化

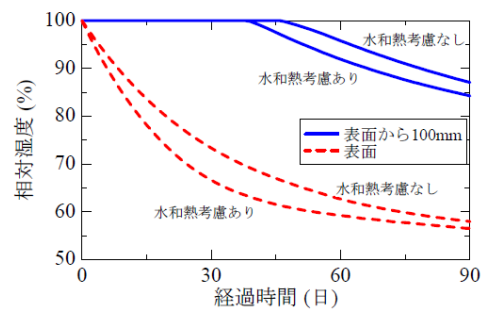


図-2.33 相対湿度変化

図-2.34 に部材断面のひずみ分布，図-2.35 に部材断面の応力分布の解析結果を示す．図-2.34 から，温度ひずみは部材の温度上昇期に部材中の温度分布に対応した形で発生し，温度の降下に伴い減少していく．一方，乾燥収縮ひずみの進行は緩やかである．材齢 90 日時点では，表面から 200～300mm 程度の範囲でのみ乾燥収縮ひずみが発生している．ただし，その量は比較的大きく，乾燥収縮ひずみの発生は表面的であることがわかる．部材内部への乾燥収縮ひずみの進行は，この後も緩やかに長期間にわたり進行していくと考えられる．

図-2.35 から，温度応力は内部拘束応力の典型的パターンを示し，表面では引張から圧縮へ，一方，中心では圧縮から引張へと変化する．これに対して，乾燥収縮応力は乾燥収縮ひずみの発生性状から，その発生は表面から 200～300mm の範囲にとどまっている．しかし，局部的に大きな引張応力が発生する．温度応力と乾燥収縮応力の部材表面での合成応力は，乾燥収縮応力の影響で極く表面近傍で引張応力となる．長期的には，乾燥収縮応力はその大きさおよび部材内部への進展は大きくなるので，部材全体の合成応力に大きな影響を与えると考えられる．

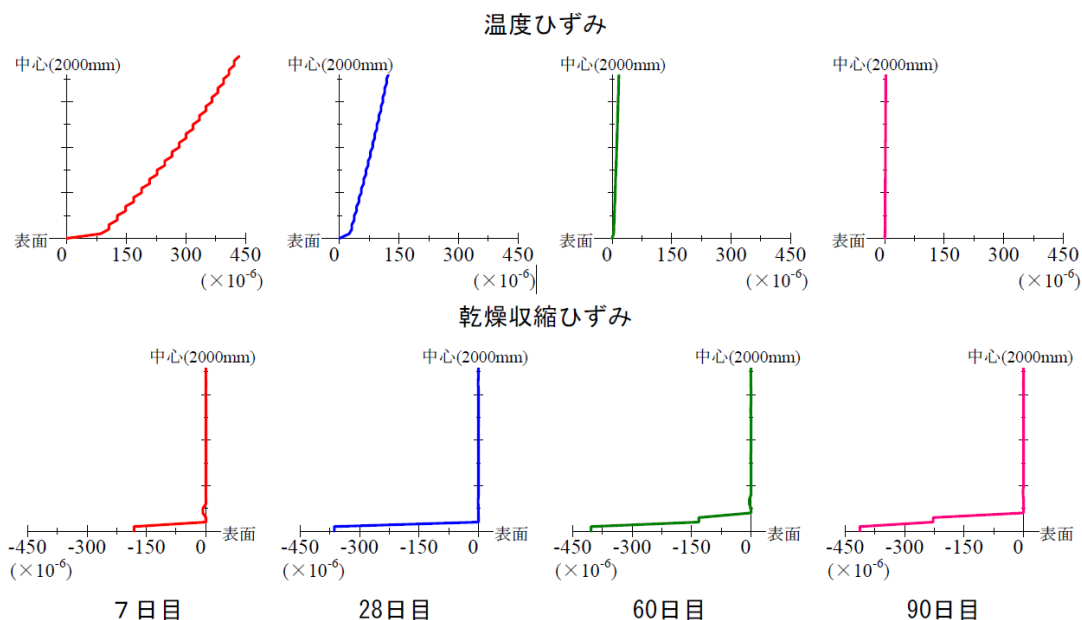


図-2.34 部材断面の部材断面のひずみ分布

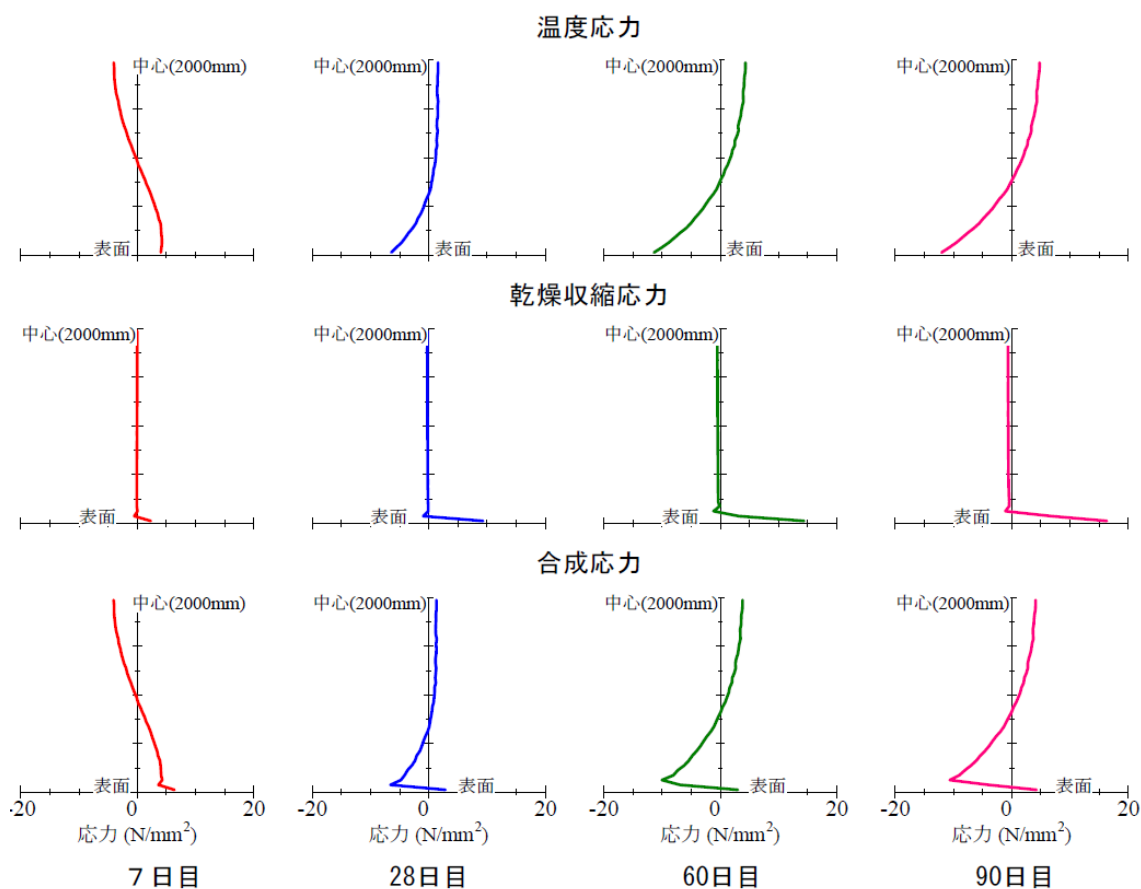


図-2.35 部材断面の応力分布

(4) まとめ

乾燥収縮によるひずみと応力の解析ならびに、乾燥収縮応力と温度応力の合成応力の挙動について明らかにした。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- a) 各種配合のコンクリートについて、相対湿度と乾燥収縮ひずみとの関係が得られた。
- b) コンクリートの乾燥収縮ひずみは、 W (W/C) が増大すると大きくなる傾向を示した。特に、 W/C が 45%から 57%に変化する段階で大きく増大する傾向が認められた。
- c) 相対湿度と乾燥収縮ひずみとの関係には、供試体温度の影響は明確に認められなかった。
- d) 水和による温度上昇により、コンクリート中の水分移動（乾燥）が促進される。
- e) 乾燥収縮応力は、少なくとも材齢 90 日程度までは表面から 200~300mm の範囲内で大きな引張応力となる。
- f) 温度応力と乾燥収縮応力との合成応力は、乾燥収縮応力の影響で極く表面近傍で引張応力となる。長期的には乾燥収縮応力はその大きさおよび内部への進展は増大するので、部材全体の合成応力に大きな影響を及ぼすと考えられる。

第3章 使用材料及び配合

3.1 使用材料

(1) セメント

本試験において使用したセメントは、大阪住友セメント社製の普通ポルトランドセメントである。セメント試験成績表を表-3.1 に示す。

表-3.1 セメント試験成績表

品質		種類	普通ポルトランドセメント	
			規格値(JIS R 5210)	試験成績
密度	(g/cm ³)		—	3.15
比表面積	(cm ² /g)		2500 以上	3500
凝結	水量 (%)		—	27.4
	始発 (h-m)		60min 以上	2-07
	終結 (h-m)		10h 以下	3-11
安定性	パット法		良	良
圧縮強さ (N/mm ²)	3d		12.5 以上	29.7
	7d		22.5 以上	45.4
	28d		42.5 以上	試験中
化学成分 (%)	酸化マグネシウム		5.0 以下	1.11
	三酸化硫黄		3.0 以下	1.97
	強熱減量		3.0 以下	1.76
	全アルカリ		0.75 以下	0.60
	塩化物イオン		0.035 以下	0.020

(2) 骨材

a) 細骨材

本試験に使用した細骨材は旧大井川水系の陸砂であり、使用にあたり 5mm ふるいでふるい分けを行い、通過したものを表面水率 1%程度になるように調整し、使用時には表面水率の測定を行い、使用水量と細骨材量の補正を行う。細骨材の物性値を表-3.2 に、ふるい分け結果を表-3.3 に示す。

表-3.2 細骨材の試験結果

密度(g/cm ³)	吸水率(%)	粗粒率
2.58	2.30	2.78

表-3.3 細骨材のふるい分け結果

10mm	5mm	2.5mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm
0	1	21	39	54	72	91

b) 粗骨材

本試験に使用した粗骨材は、東京都青梅産の硬質砂岩砕石であり、20~15mm, 15~10mm, 10~5mm にふるい分け並びに水洗したものを所定の粒度となるように混合したものである。粗骨材の物性値を表-3.4 に、ふるい分け結果を表-3.5 に示す。

細骨材及び粗骨材の粒度分布曲線を図-3.1 に示す。

表-3.4 粗骨材の試験結果

密度(g/cm ³)	吸水率(%)	粗粒率
2.66	0.50	6.75

表-3.5 粗骨材のふるい分け結果

30mm	25mm	20mm	15mm	10mm	5mm	2.5mm
0	0	6	30	70	99	100

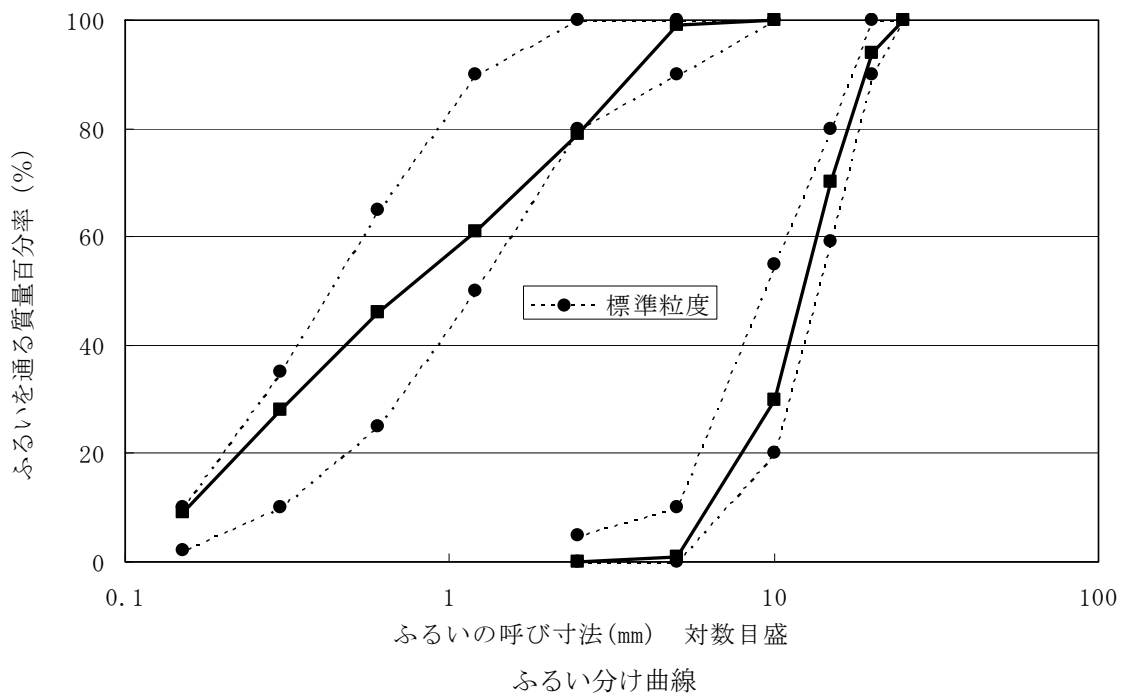


図-3.1 細骨材及び粗骨材の粒度曲線

(3) 高炉スラグ微粉末

本試験に使用した高炉スラグ微粉末はデイ・シイ社製の粉末度が 4000, 6000, 8000cm²/g の 3 種類である。各物性値を表-3.6~8 に示す。

表-3.6 高炉スラグ微粉末 4000 cm²/g の物性値

品質		種類	高炉スラグ微粉末 4000	高炉スラグ微粉末 4000 (セラメント)
			JIS規格値	試験値
密度(g/cm ³)			2.80以上	2.90
比表面積(cm ² /g)			3000以上 5000未満	4390
活性度 指数 SAI(%)	7日		55以上	64
	28日		75以上	93
	91日		95以上	113
モルタルフロー値比(%)			95以上	101
化学成分 (%)	酸化マグネシウム MgO		10.0以下	5.99
	三酸化硫黄 SO ₃		4.0以下	0.00
	強熱減量 ig.loss		3.0以下	0.15
	塩化物イオン Cl ⁻		0.02以下	0.004

表-3.7 高炉スラグ微粉末 6000 cm²/g の物性値

品質		種類	高炉スラグ微粉末	高炉スラグ微粉末
			6000	6000 (ファインセラメント20A)
			JIS規格値	試験値
密度(g/cm ³)			2.80以上	2.91
比表面積(cm ² /g)			5000以上 7000未満	6840
活性度 指数 SAI(%)	7日		75以上	82
	28日		95以上	107
	91日		95以上	115
モルタルフロー値比(%)			90以上	94
化学成分 (%)	酸化マグネシウム MgO		10.0以下	5.87
	三酸化硫黄 SO ₃		4.0以下	0.00
	強熱減量 ig.loss		3.0以下	0.09
	塩化物イオン Cl ⁻		0.02以下	0.004

表-3.8 高炉スラグ微粉末 8000 cm²/g の物性値

品質		種類	高炉スラグ微粉末	高炉スラグ微粉末
			8000	8000 (ファインセラメント10A)
			JIS規格値	試験値
密度(g/cm ³)			2.80以上	2.91
比表面積(cm ² /g)			7000以上 10000未満	8570
活性度 指数 SAI(%)	7日		95以上	96
	28日		105以上	113
	91日		105以上	119
モルタルフロー値比(%)			85以上	91
化学成分 (%)	酸化マグネシウム MgO		10.0以下	6.00
	三酸化硫黄 SO ₃		4.0以下	0.00
	強熱減量 ig.loss		3.0以下	0.04
	塩化物イオン Cl ⁻		0.02以下	0.004

(4) 混和剤

a) AE 剤

本試験に使用した AE 剤は、「マイクロエア 202」である。

b) AE 減水剤

本試験に使用した AE 減水剤は「ポゾリス No.70」である。

(5) 練り混ぜ水

本試験に使用した練り混ぜ水は、法政大学コンクリート実験室の上水道水である。

3.2 配合

配合条件は、目標スランプ 12cm、目標空気量 4.5%とした。配合条件を満たすため、本練りの前に試し練りを行い、得られたスランプ・空気量のデータを補正し、本練りした。

・示方配合

ここで、示方配合とは、骨材は表面乾燥飽和状態であり、細骨材は 5mm ふるいを通るもの、粗骨材は 5mm ふるいにとどまるものを用いた場合の各材料の単位量を計算したものである。示方配合表を表-3.9 に示す。

表-3.9 示方配合表

粗骨材の 最大寸法 (mm)	目標 スランプ (cm)	目標 空気量 (%)	水結合材 比 (%) $\frac{W}{C+BF}$	細骨材率 (%) s/a	粉末度 (cm^2/g)	置換率 (%) $\frac{BF}{C+BF}$	単位量 (kg/m^3)						
							水	セ メン ト	混 和 材	細 骨 材	粗 骨 材	A E 減 水 剤	A E 剤
							W	C	BF	S	G	ml/C=100kg	C×%
20	12	4.5	50	41	—	—	156	312	—	740	1099	250	0.003
20	12	4.5	50	41	4000	50	153	153	153	740	1101	250	0.005
20	12	4.5	50	41	6000	30	157	220	94	735	1093	250	0.004
20	12	4.5	50	41	6000	50	150	150	150	746	1109	250	0.005
20	12	4.5	50	41	6000	70	156	94	218	735	1088	250	0.006
20	12	4.5	50	41	6000	80	158	63	253	730	1083	250	0.008
20	12	4.5	40	39	6000	50	159	199	199	668	1061	250	0.008
20	12	4.5	60	43	6000	50	153	128	128	795	1088	250	0.007
20	12	4.5	50	41	8000	50	162	162	162	725	1077	250	0.01

第4章 実験概要

4.1 供試体の作製

(1) 打込み

目標スランブは $12\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量は $4.5\pm 1.0\%$ で練混ぜを行う。容量 100ℓ の二軸ミキサーに細骨材、セメント、高炉スラグ微粉末、水、混和剤、粗骨材の順に投入し1分間練混ぜる。

その後、鋼製型枠に練り終えた直後のコンクリートを2層に分け突き詰める。各層を突き棒で8回突き、詰め終えたら木槌で型枠の周りを軽くたたく。2層詰め終えたら、金ごてを使いコンクリート上面をならす。

(2) スランブ試験

スランブ試験は[JIS A1101 スランブ試験方法]に準拠する。

(3) 空気量試験

空気量試験は[JIS A1128 フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験]に準拠する。

(4) キャッピング

圧縮強度用供試体はキャッピングを行った。キャッピングに用いるセメントペースト（水セメント比 28%）は、用いるほぼ1時間前に練り混ぜておき、キャッピングを行った。

4.2 圧縮強度試験およびヤング係数試験

(1) 概要

本研究では、養生方法が力学的特性に及ぼす影響の検討を行った。直径 100mm 、高さ 200mm の円柱供試体を使用し、圧縮強度試験を実施した。試験材齢は 3,7,14,28,56,91(日)の6材齢とする。

(2) 養生方法による強度特性の検討

実験の要因と水準を表-4.1 に示す. 粉末度, 水結合材比, 置換率の条件を組み合わせた 9 種類のコンクリートにて実施する.

表-4.1 要因と水準

粉末度 (cm ² /g)	水結合材比 (%)	置換率 (%)
4000	50	50
6000	40	50
	50	0
		30
		50
		70
		80
	60	50
8000	50	50

上記で示したコンクリートの養生方法はそれぞれ表-4.2 に示す通り, 水中養生, 気乾養生, および”各材齢まで水中養生しその後気乾養生”の 7 種類の養生条件で行う. 水中養生を行う養生槽中の水温は 20±3℃とし, 気乾養生を行う恒温室の気温は 20±3℃, 湿度は 60%RH とした.

表-4.2 養生方法

No.	養生方法
1	水中養生 (20℃)
2	気乾養生 (20℃, 60%RH)
3	材齢 3 日まで水中養生その後気乾
4	材齢 7 日 ”
5	材齢 14 日 ”
6	材齢 28 日 ”
7	材齢 56 日 ”

4.3 割裂引張強度試験

(1) 試験方法

割裂引張試験は(JIS A 1113)に準拠して行った。供試体寸法は φ150×200mm の円柱供試体とし、鋼製型枠にて作製し、材齢 2 日で脱型を行った。

割裂引張強度は以下の式により求めた。

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (4.1)$$

ここで d : 供試体の直径(mm) d_1, d_2 : 2 方向の直径

$$f_t = \frac{2P}{\pi dl} \quad (4.2)$$

ここで f_t : 割裂引張強度(N/mm²) P : 破壊荷重(N) l : 供試体長さ(mm)

(2) 試験項目

実験の要因と水準を表-4.3 に示す。

表-4.3 要因と水準

要因	水準
水結合材比 (%)	40, 50, 60
粉末度 (cm ² /g)	6000
置換率 (%)	50

4.4 直接引張強度試験

(1) 試験方法

簡易直接引張試験機を用いて直接引張試験を行った。簡易直接引張試験に用いる供試体の寸法は $100 \times 100 \times 840\text{mm}$ 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 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。

簡易直接引張試験に用いる供試体を図-4.1 に示し、図面を図-4.2 に、写真を写真-4.1 に、概要図を図-4.3 に示す。

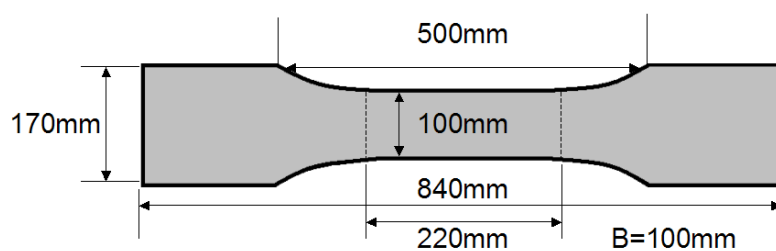


図-4.1 直接引張試験供試体

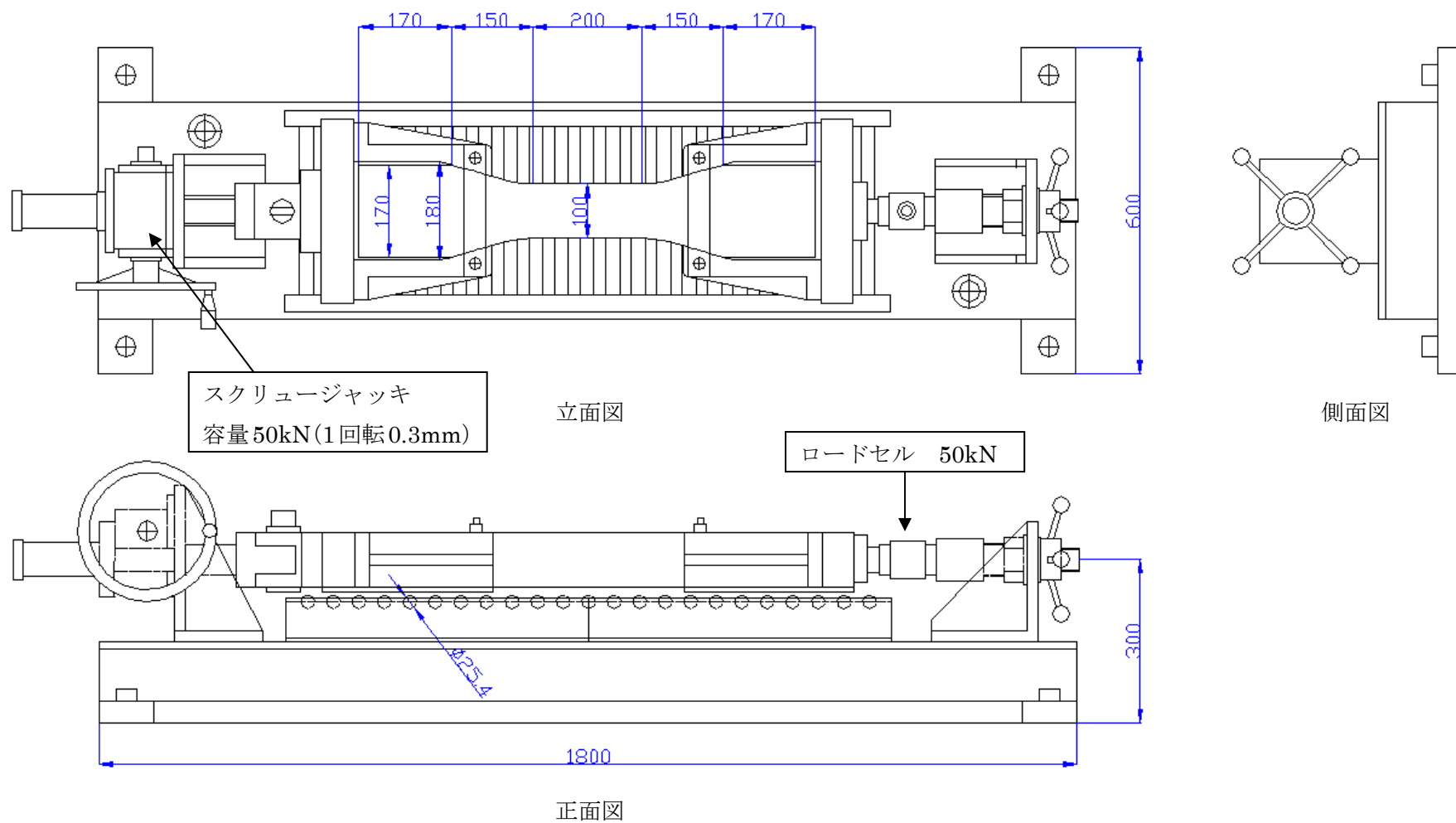


図-4.2 直接引張試験機



写真-4.1 簡易直接引張強度試験機

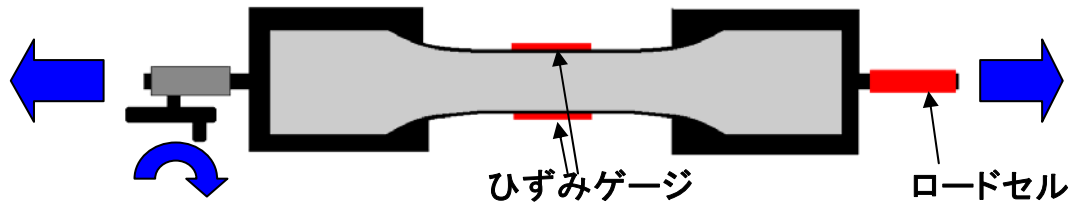


図-4.3 直接引張試験機概要図

直接引張強度は次の式で求めた。

$$b = \frac{b_1 + b_2}{2}, h = \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (4.3)$$

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

$$f_t = \frac{P}{bh} \quad (4.4)$$

ここで、 f_t : 引張強度(N/mm²) P : 破壊荷重(N)

(2) 試験項目

実験の要因と水準を表-4.4に示す。

表-4.4 要因と水準

要因	水準
水結合材比 (%)	40, 50, 60
粉末度 (cm ² /g)	6000
置換率 (%)	50

4.5 断熱温度上昇試験

(1) 試験概要

本試験は、株式会社東京理工エディアベイテックカロリーメータ(カロリーメータと称する)を使用し、コンクリートの断熱温度上昇試験を行った。この装置は試験体の温度に追従して試験体周辺の温度を調整する。つまり、外気温の影響を受けない状態での温度上昇を測定するための装置である。カロリーメータを写真-4.2、写真-4.3に示す。



写真-4.2 カロリーメータ



写真-4.3 カロリーメータ

(2) 試験体

プラスチック製の円柱型容器(外径φ170mm×高さH240mm)にコンクリートを5ℓ打ち込み、コンクリートの温度上昇を測定した。

4.6 同定解析

(1) 解析方法

温度解析は、マスコンクリートの温度応力専用プログラムソフト「ASETEA-MACS for windows Ver.6」を使用し、供試体同様のモデルで行った。

(2) 解析モデル

供試体は、円周方向を 20 分割、半径方向を 4 分割、縦方向を 4 分割とした。メッシュレイアウトを図-4.4～図-4.6 に示す。

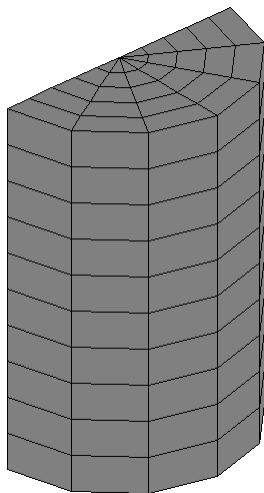


図-4.4 メッシュレイアウト(概要図)

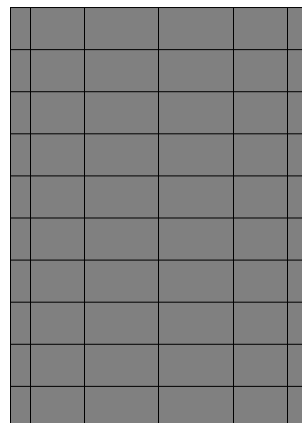


図-4.5 メッシュレイアウト(正面図)

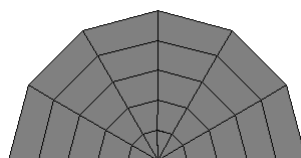


図-4.6 メッシュレイアウト(平面図)

(3) 解析条件

温度解析におけるコンクリートの物性値を表-4.5に示す。
また、断熱温度上昇は以下のようにした。

$$\text{断熱温度上昇式： } T = K \left[1 - \exp \left\{ -\alpha(t - t_0)^\beta \right\} \right] \quad (4.5)$$

K：断熱温度上昇によるパラメータ(°C)

α ：温度上昇に関するパラメータ(1/日)

β ：温度上昇に関するパラメータ

t：材齢(日)

t_0 ：発熱開始材齢(日)

表-4.5 物性値

項目	物性値
熱伝導率(W/m°C)	2.7
密度(kg/m ³)	2400
比熱(kJ/kg°C)	1.15

第 5 章 養生方法による強度特性の検討

5.1 圧縮強度試験結果

(1) 材齢と圧縮強度の関係

各種類別の材齢と圧縮強度の結果を図-5.1～9 に示す。

図-5.1 の普通コンクリートより，途中から気乾した供試体が一時的に水中養生よりも圧縮強度が上昇する結果となった。普通コンクリートでは初期材齢でこの傾向が顕著に見られた。しかし，高炉スラグ微粉末を用いたものは，置換率が高くなるほどこの傾向は少なくなる。これは置換率が高いほど，高炉スラグ微粉末の特性である潜在水硬性が特に強く現れたためと考えられる。そのため図-5.5 で示している置換率 80% のような高置換率の場合では途中から気乾養生したものが水中養生を超えることはなかった。

(2) 材齢とヤング係数の関係

材齢とヤング係数の結果を図-5.10～18 に示す。

水中養生期間が長いほどヤング係数は高い結果となった。しかし水中養生期間が長い分，途中から気乾養生に移したときのヤング係数の低下率は大きくなった。この影響は置換率が高くなるほどに強くなる。また粉末度による違いからは，置換率ほど顕著な違いは現れなかった。ヤング係数は粉末度よりも置換率の影響を強く受けることと推察される。

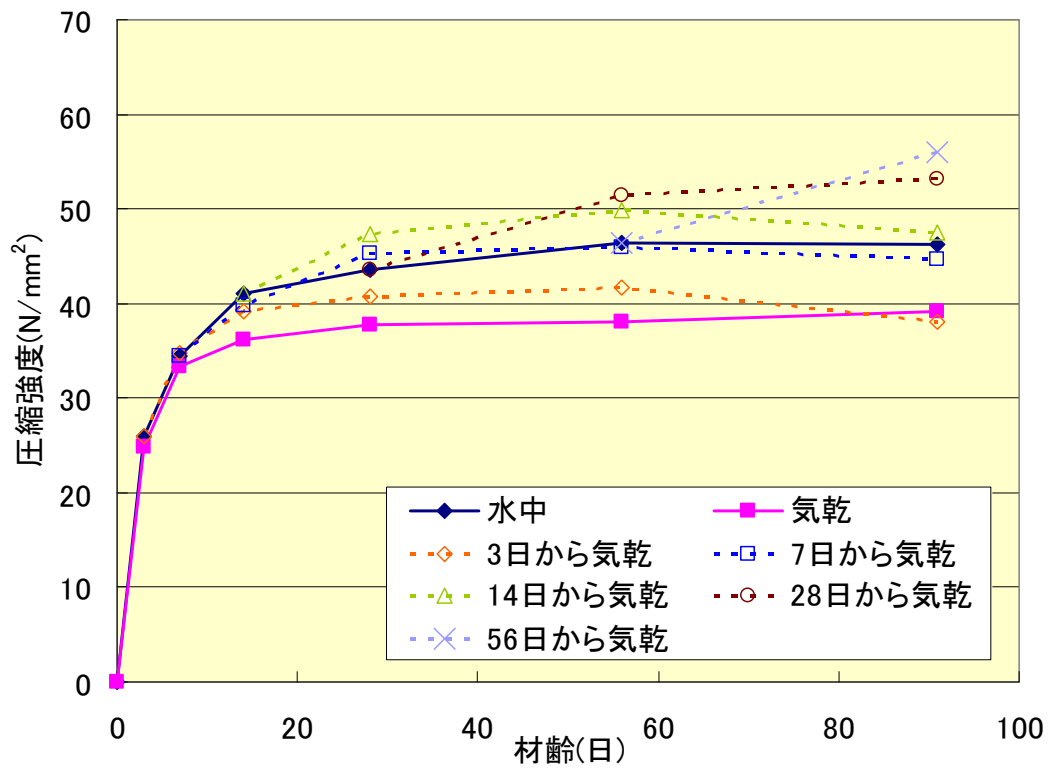


図-5.1 材齢と圧縮強度の関係 (普通コンクリート W/C=50%)

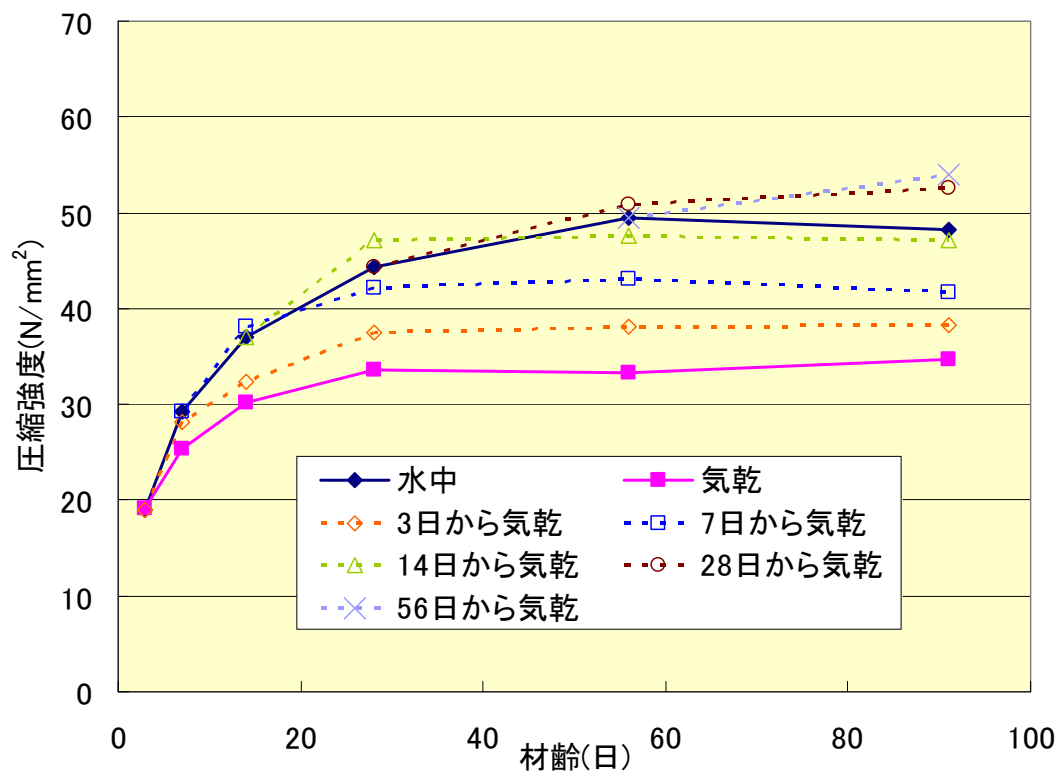


図-5.2 材齢と圧縮強度の関係 (粉末度 6000cm²/g 置換率 30% 水結合材比 50%)

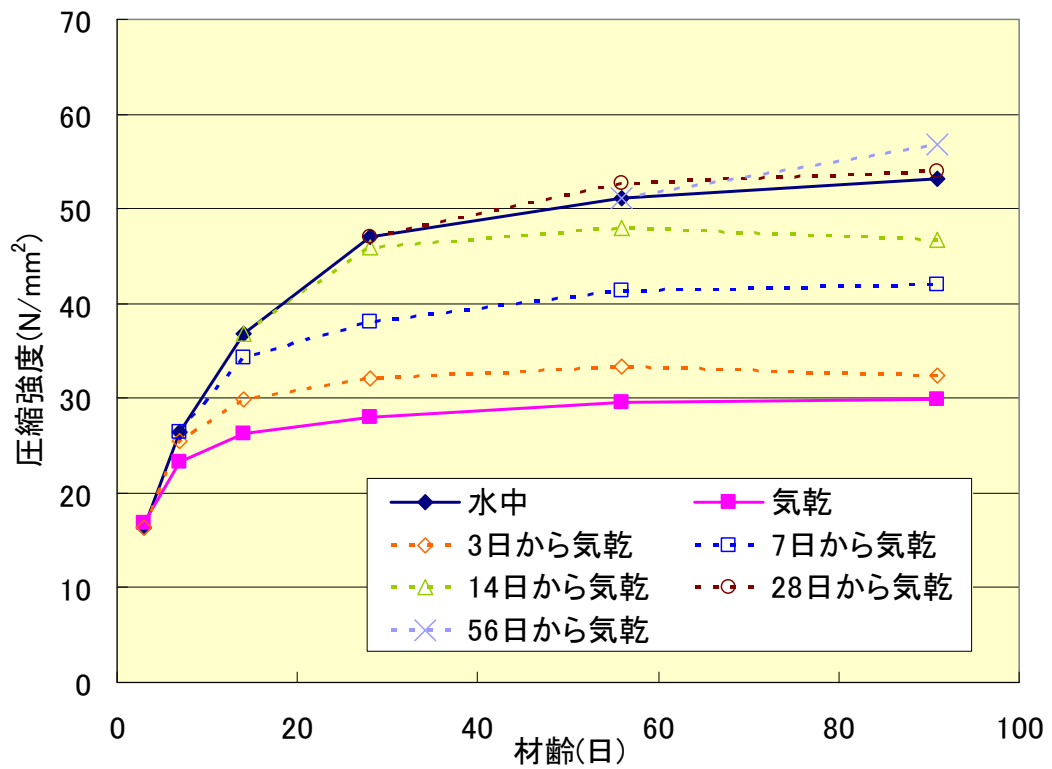


図-5.3 材齢と圧縮強度の関係 (粉末度 6000cm²/g 置換率 50% 水結合材比 50%)

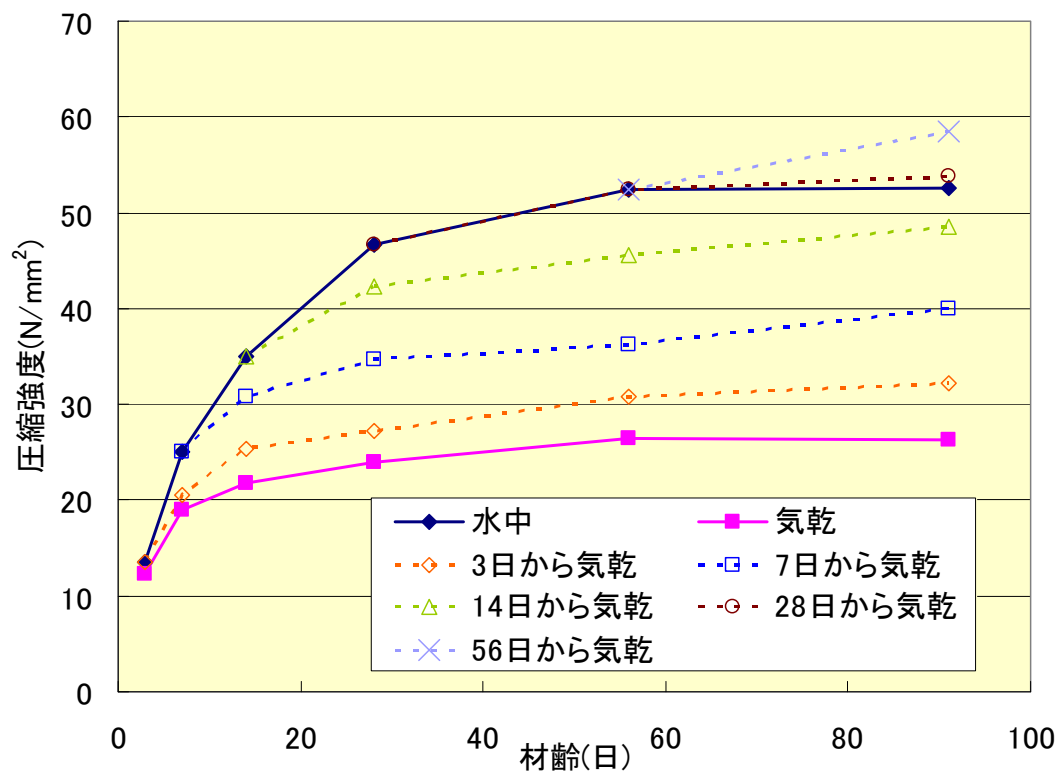


図-5.4 材齢と圧縮強度の関係 (粉末度 6000cm²/g 置換率 70% 水結合材比 50%)

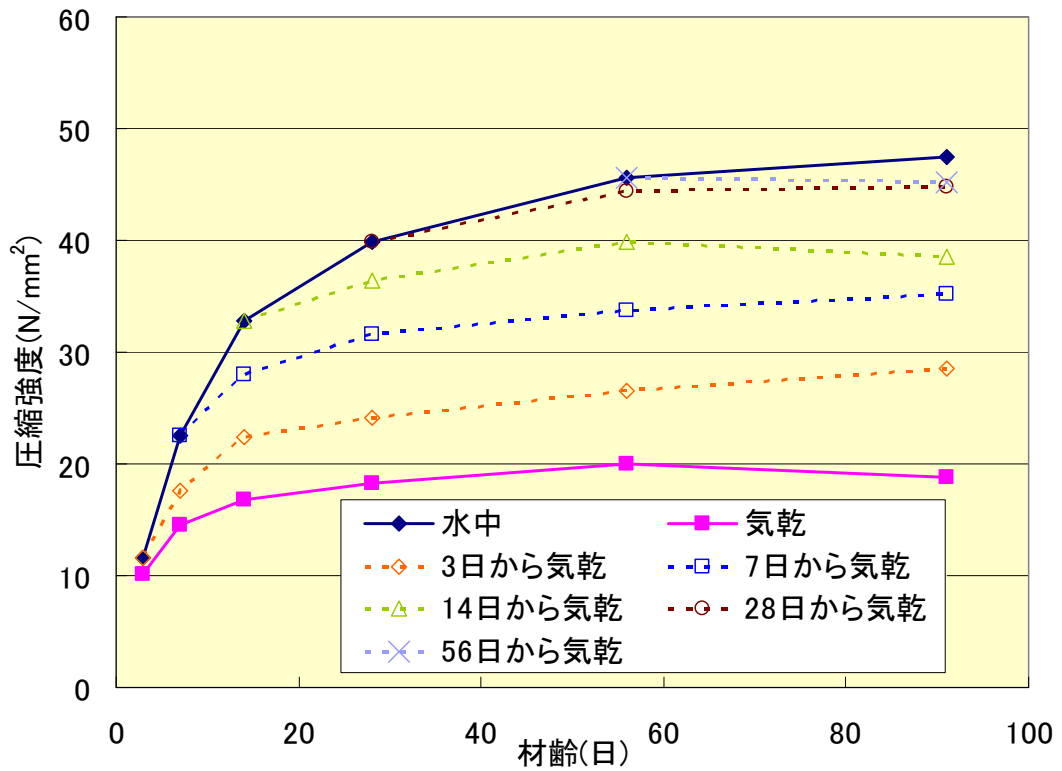


図-5.5 材齢と圧縮強度の関係 (粉末度 6000cm²/g 置換率 80% 水結合材比 50%)

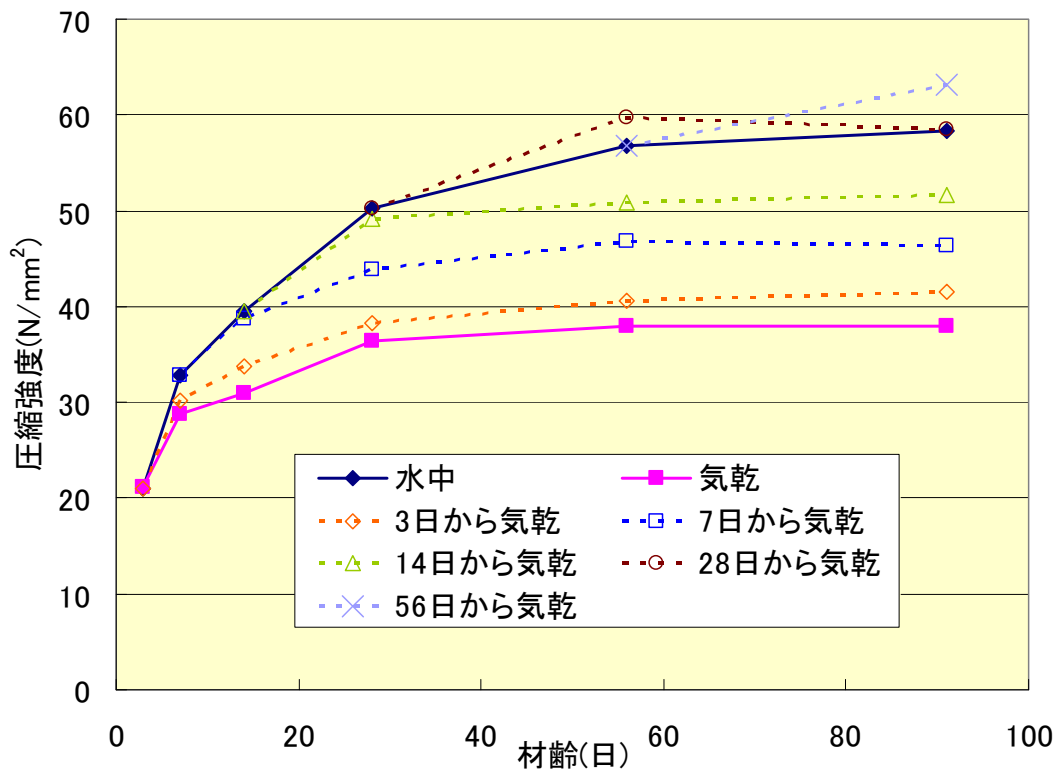


図-5.6 材齢と圧縮強度の関係 (粉末度 6000cm²/g 置換率 50% 水結合材比 40%)

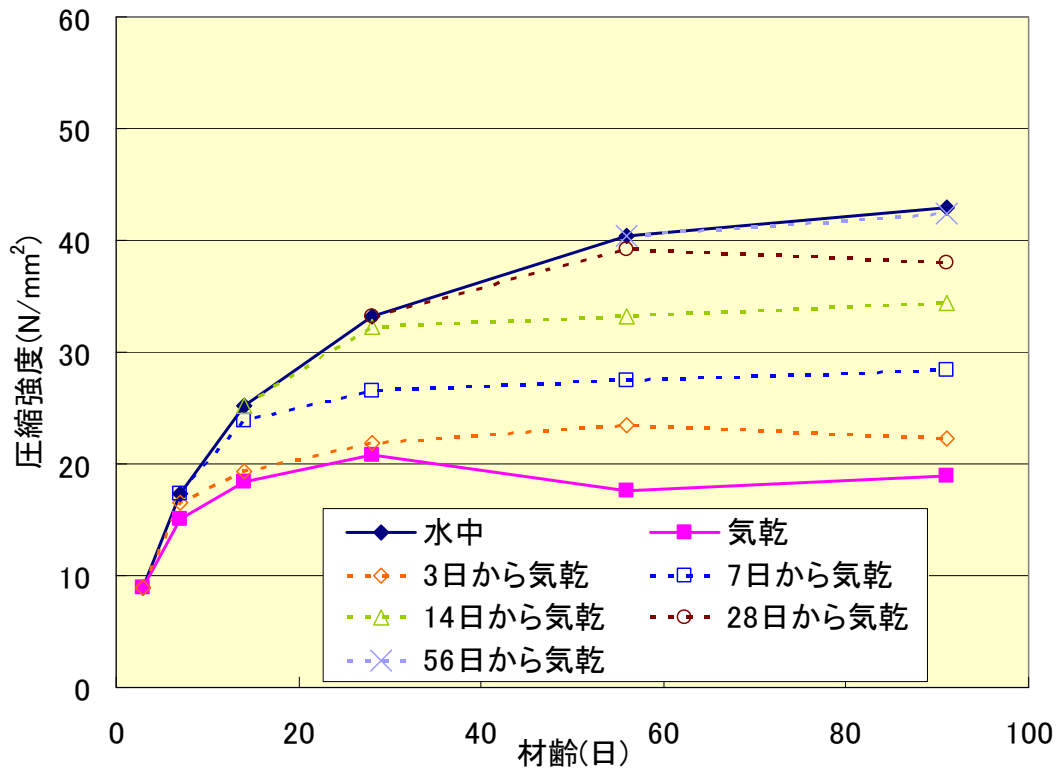


図-5.7 材齢と圧縮強度の関係 (粉末度 6000cm²/g 置換率 50% 水結合材比 60%)

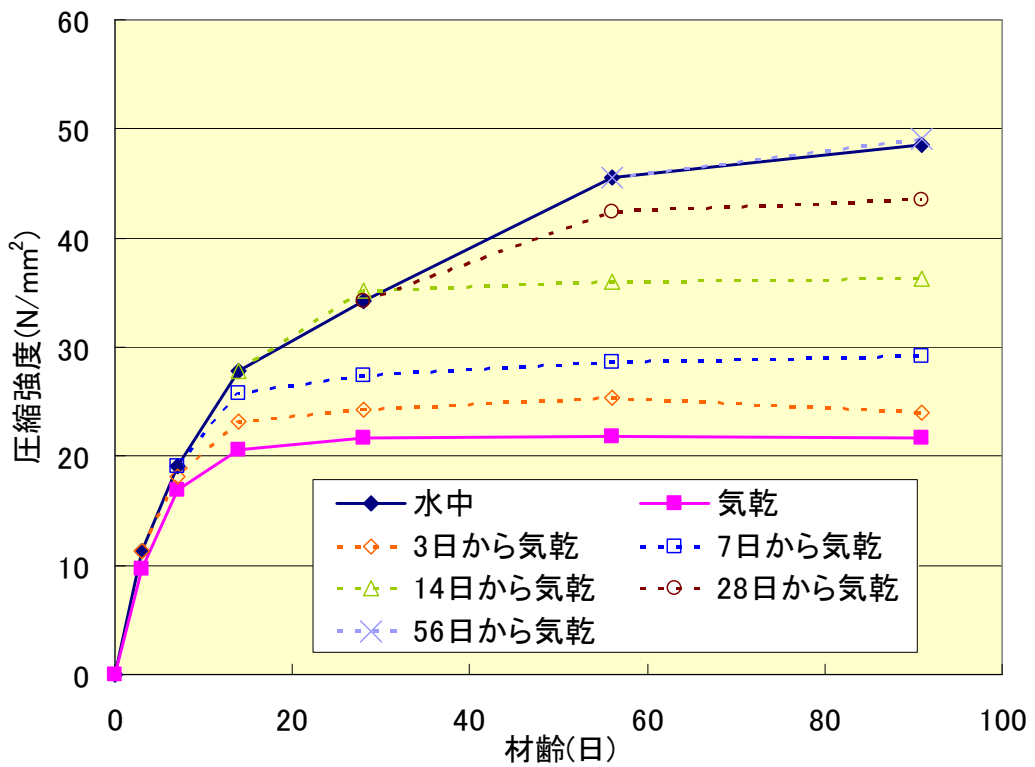


図-5.8 材齢と圧縮強度の関係 (粉末度 4000cm²/g 置換率 50% 水結合材比 50%)

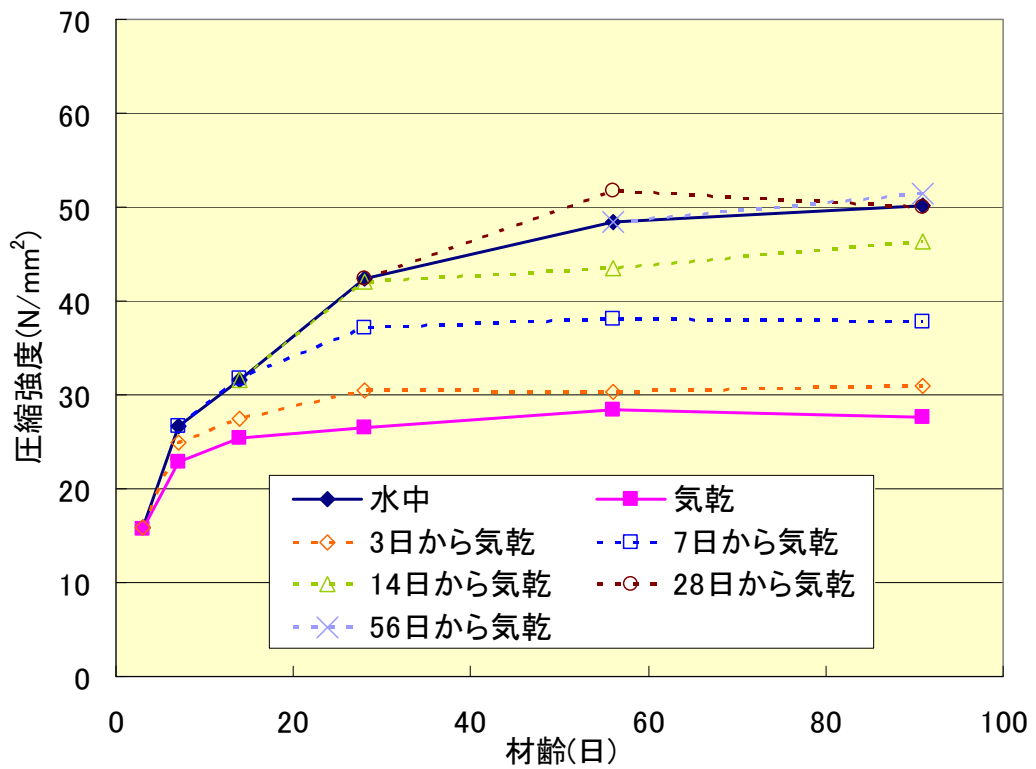


図-5.9 材齢と圧縮強度の関係 (粉末度 8000cm²/g 置換率 50% 水結合材比 50%)

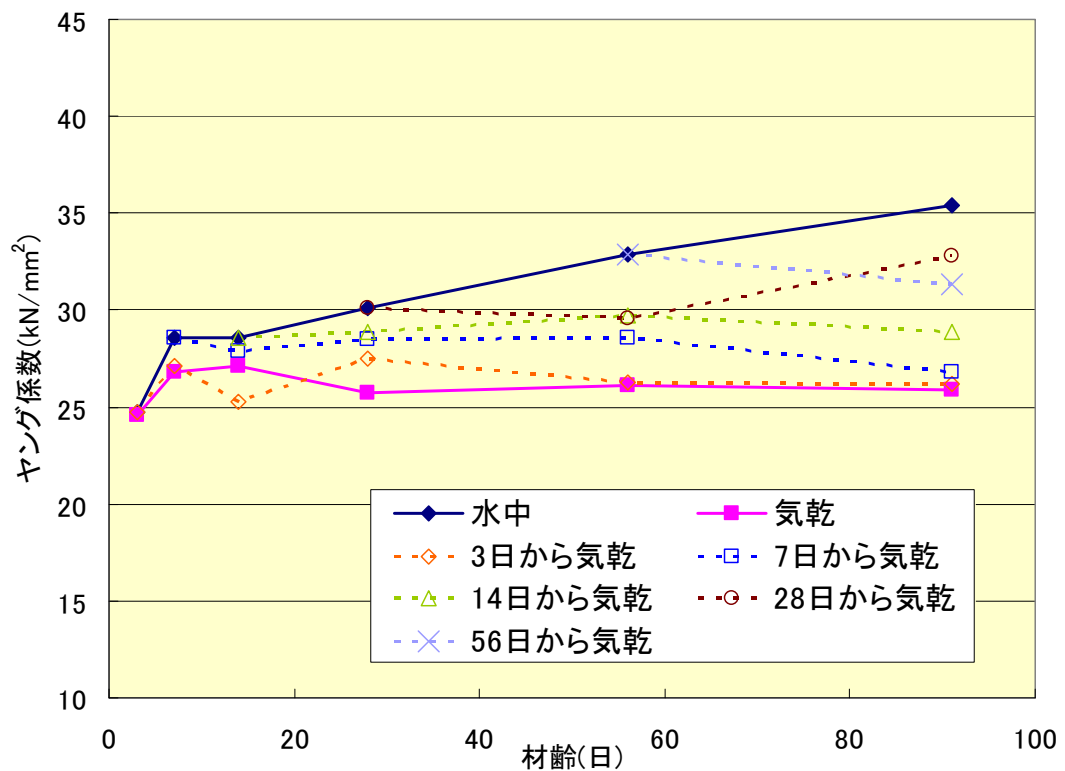


図-5.10 材齢とヤング係数の関係 (普通コンクリート W/C=50%)

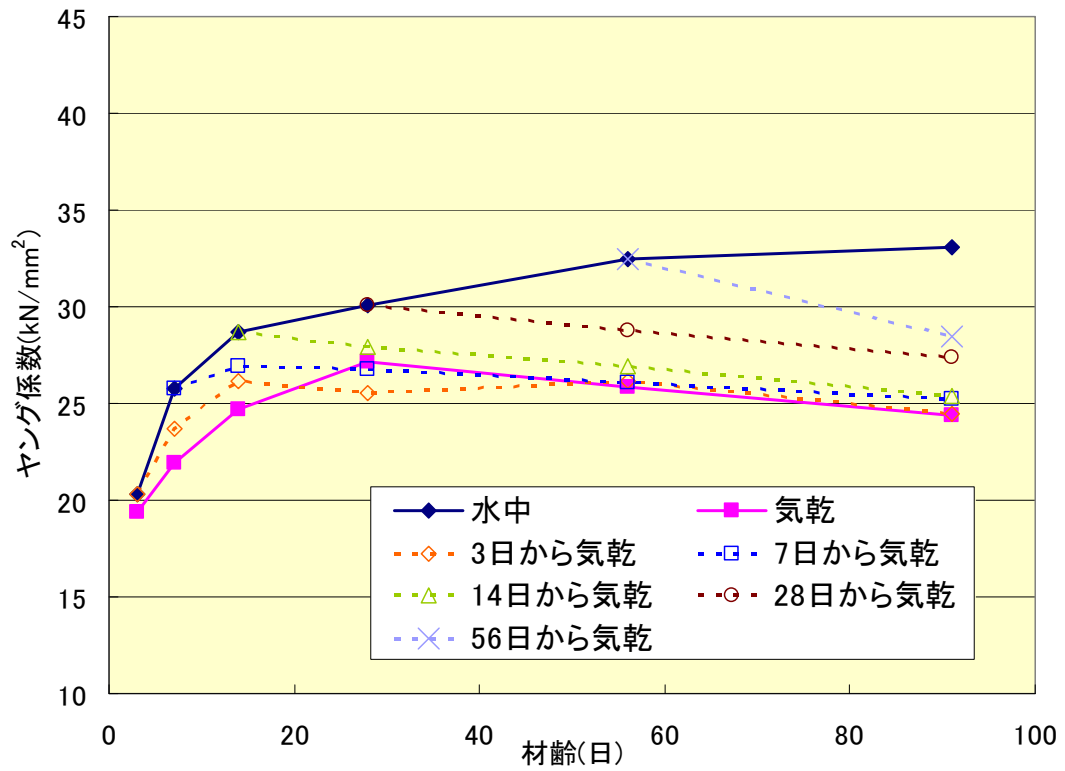


図-5.11 材齢とヤング係数の関係 (粉末度 6000 cm²/g 置換率 30% 水結合材比 50%)

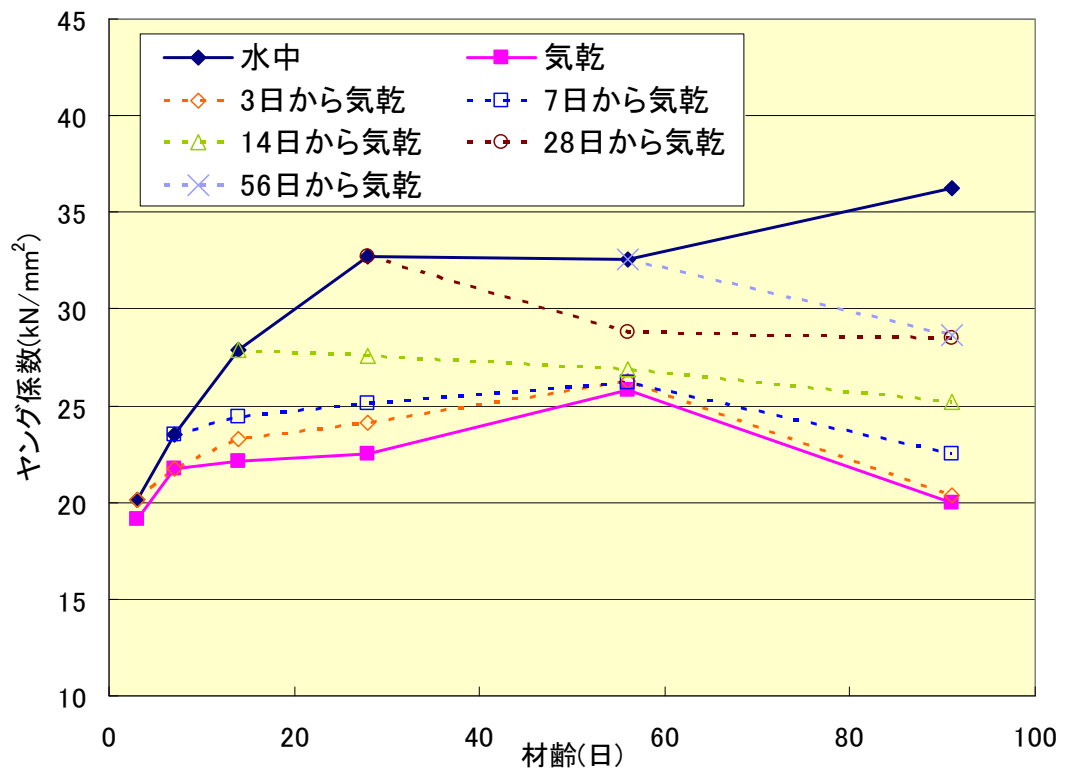


図-5.12 材齢とヤング係数の関係 (粉末度 6000 cm²/g 置換率 50% 水結合材比 50%)

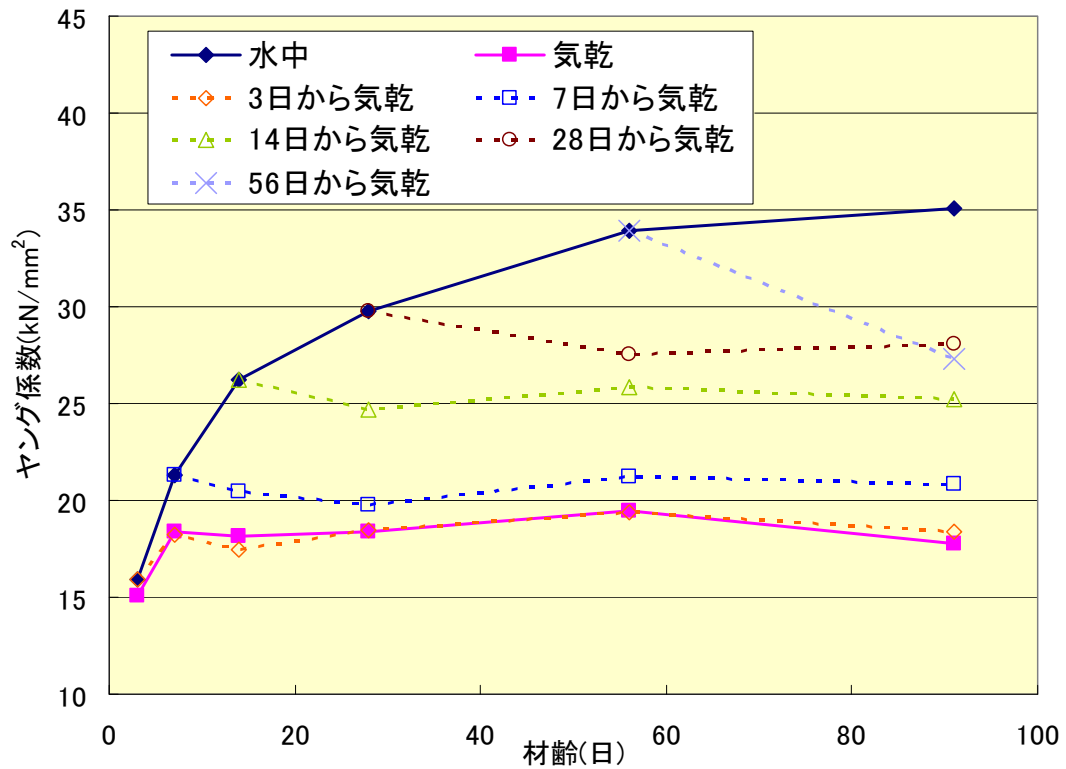


図-5.13 材齢とヤング係数の関係 (粉末度 6000 cm²/g 置換率 70% 水結合材比 50%)

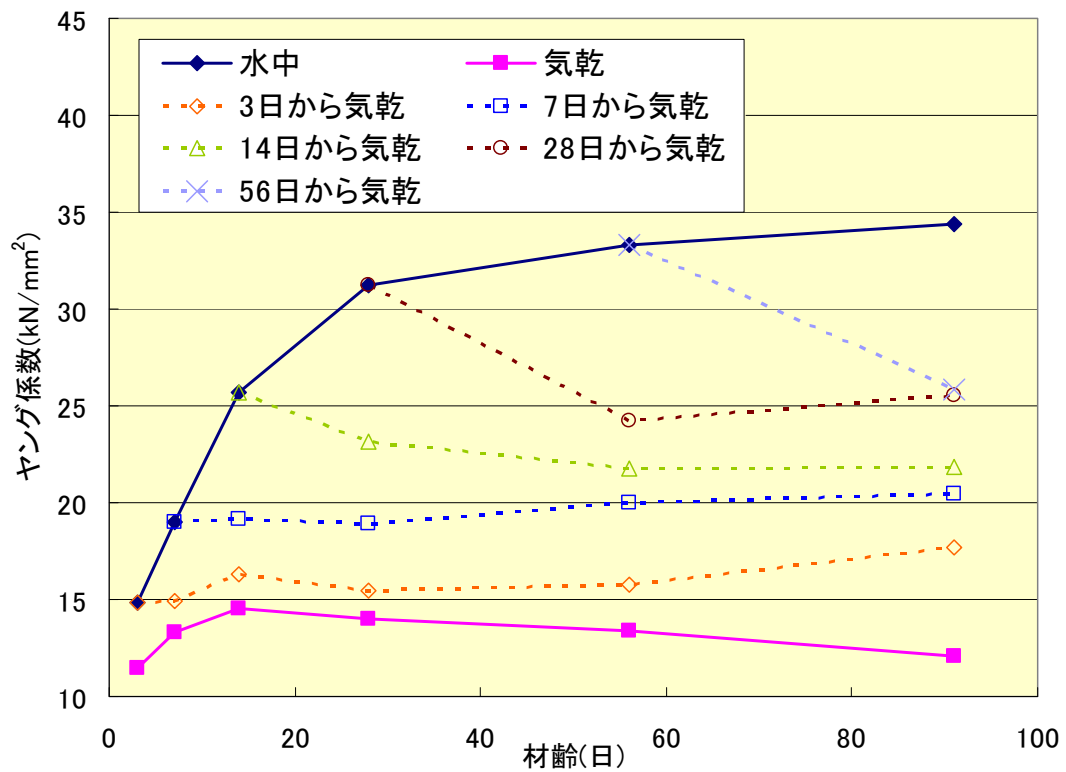


図-5.14 材齢とヤング係数の関係 (粉末度 6000 cm²/g 置換率 80% 水結合材比 50%)

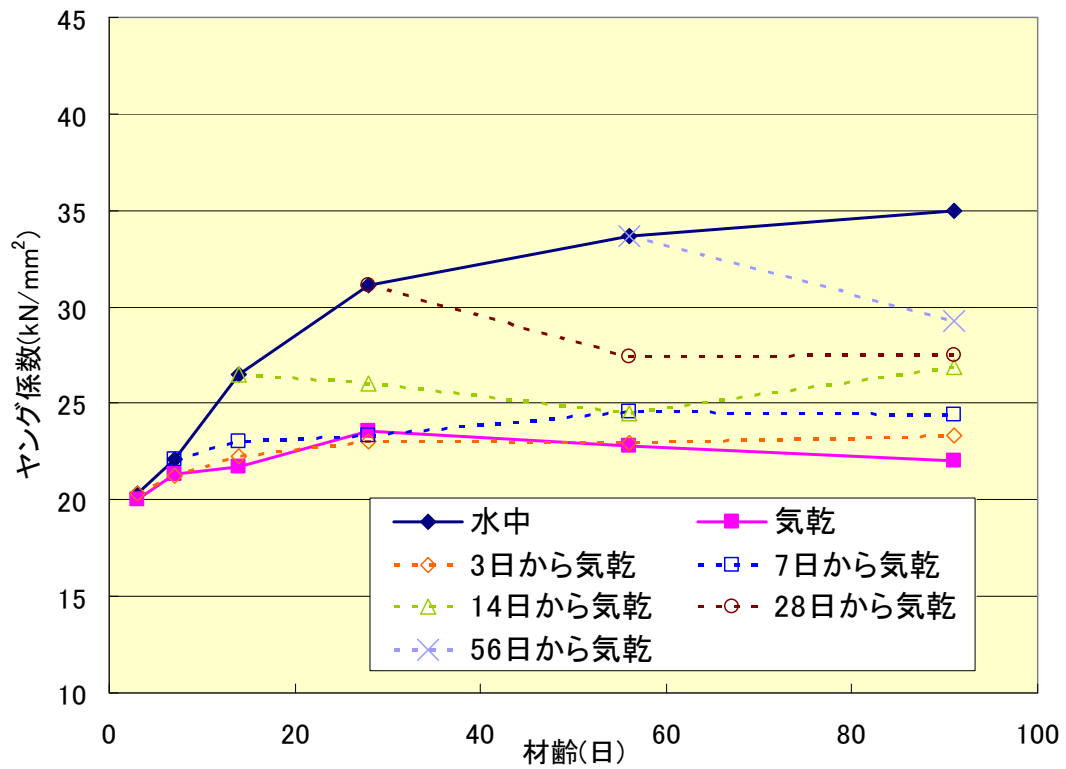


図-5.15 材齢とヤング係数の関係 (粉末度 6000 cm²/g 置換率 50% 水結合材比 40%)

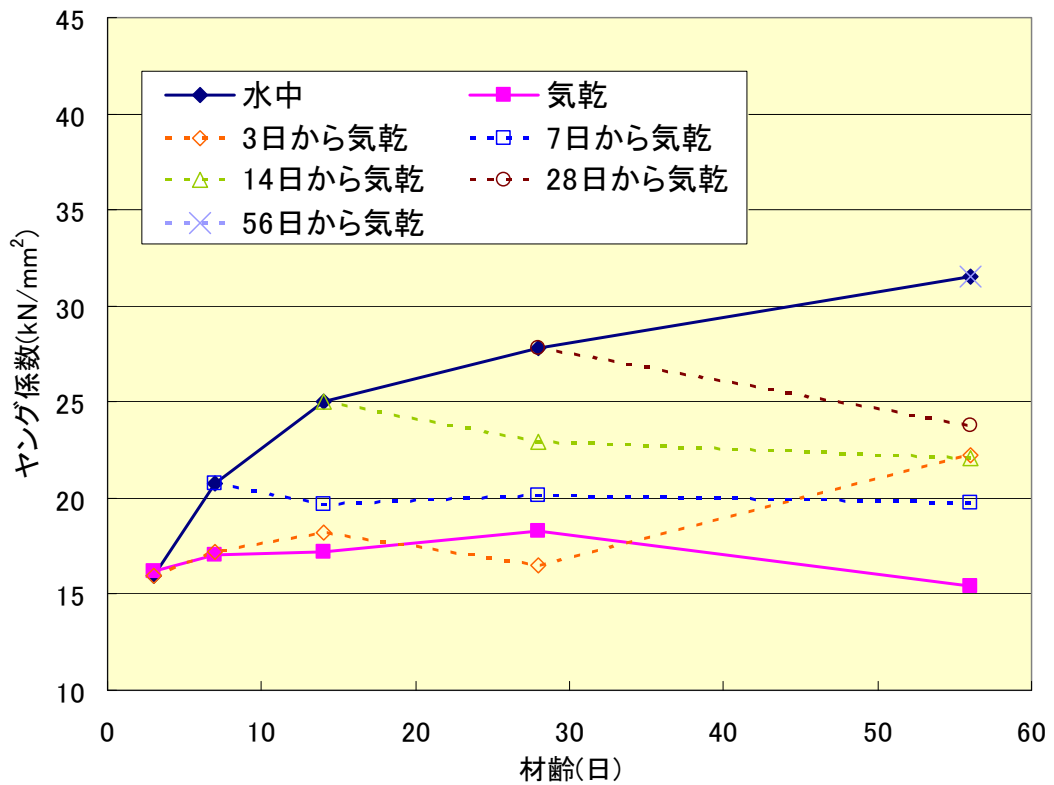


図-5.16 材齢とヤング係数の関係 (粉末度 6000 cm²/g 置換率 50% 水結合材比 60%)

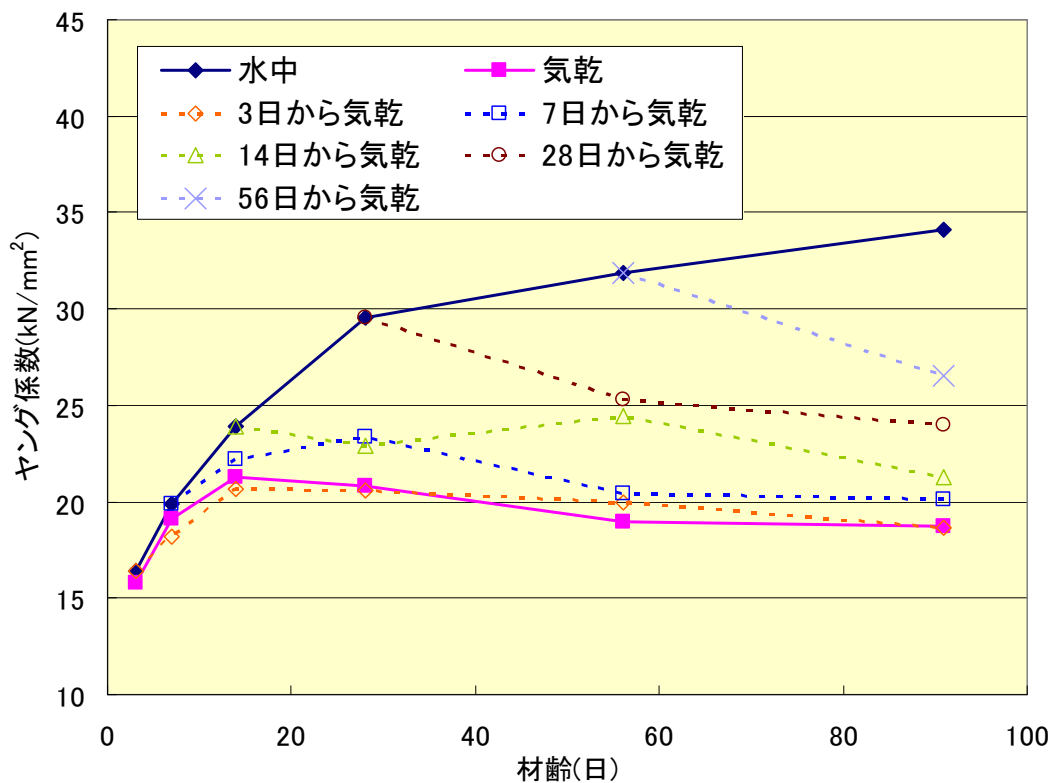


図-5.17 材齢とヤング係数の関係 (粉末度 4000 cm²/g 置換率 50% 水結合材比 50%)

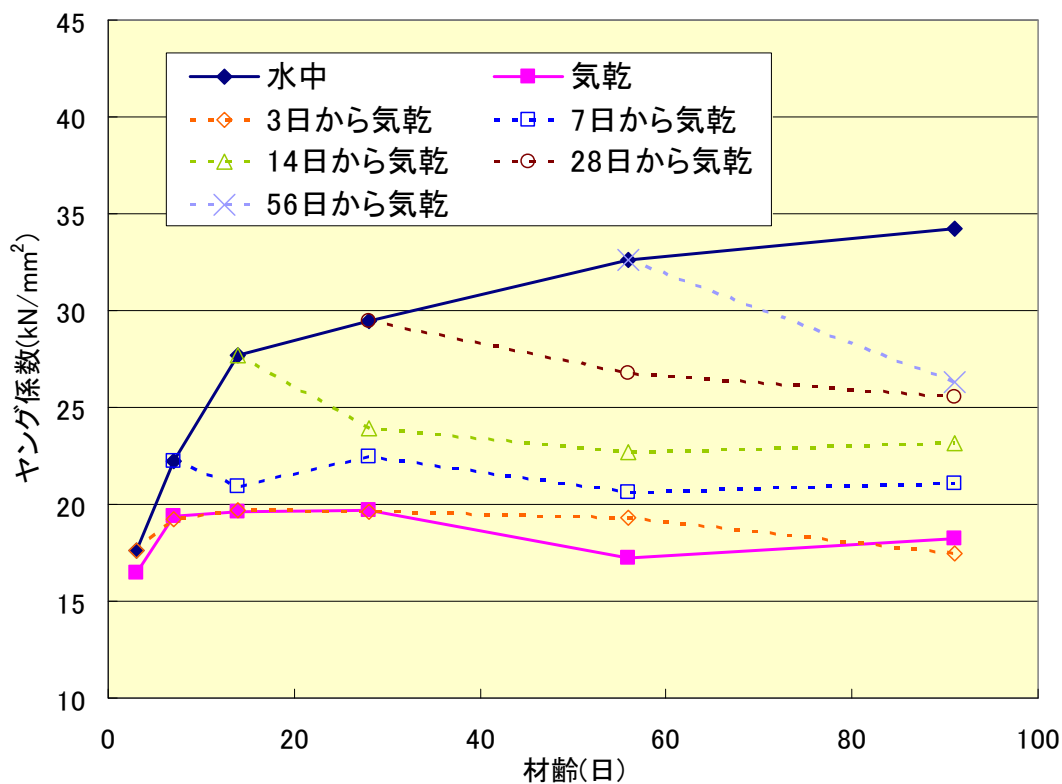


図-5.18 材齢とヤング係数の関係 (粉末度 8000 cm²/g 置換率 50% 水結合材比 50%)

5.2 圧縮強度比の結果

材齢と圧縮強度比の関係を図-5.19～27 に示す。圧縮強度の試験結果で得られた値を用いて、各材齢での水中養生の圧縮強度を 1.00 としている。

(1) 置換率による強度特性の検討

材齢と圧縮強度比の関係を図-5.28～32 に示す。これらは図-5.19～23 から養生方法の種類別に置換率でまとめた結果であり、粉末度 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ 、水結合材比は 50% である。

図-5.28 から、置換率 0% は材齢 91 日の時点で水中と比べた場合、強度が約 20% の低下率であったが、置換率 80% では 60% も低下した。置換率が高いほど乾燥の影響を受けやすい結果となった。図-5.29 から、気乾養生ほど強度の低下率は見られないが、図-5.28 と同様の傾向を示した。図-5.30 から、置換率 0% は水中と同程度の強度を得られた。図-5.29 に比べ高炉スラグ微粉末を用いたものは、水中養生したものとの強度の差は縮まるが、まだ水中養生と同等の強度は得られなかった。図-5.31 では高炉スラグ微粉末を用いたものは、低下率 20% 以内となった。置換率 30% にいたっては水中養生とほぼ同等の強度となったといえる。図-5.32 では置換率 80% は水中よりも少し強度が小さくなるが、ほぼ全て自身の水中養生と同等の強度が得られた。

これらの結果より、置換率 0% よりも高炉スラグ微粉末を用いたものは長い水中養生期間が必要となる。高炉スラグ微粉末を用いたものは 28 日まで水中養生すれば、置換率 70% までは自身の水中養生と同等、もしくはそれ以上の強度比となった。しかし置換率 80% だけは高炉スラグ微粉末の影響をより強く受けているため、28 日以上水中養生しなければ、水中と同程度の強度比は得られない。

(2) 粉末度による強度特性の検討

材齢と強度比の関係を図-5.33～37 に示す。これらは図-5.21, 26, 27 から養生方法別に粉末度でまとめた結果であり、それぞれ置換率 50%、水結合材比は 50% である。

図-5.33 より粉末度 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ の低下率が高いが、 $6000, 8000\text{cm}^2/\text{g}$ は同じような低下率であった。図-5.34, 35, 36 も図-5.33 と同じような傾向であった。水中養生期間が長くなるにつれ、次第に強度比 100 に近づいていることが分かる。図-5.37 では粉末度 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ の強度比が水中と比べて 10% 程度小さいが、粉末度 $6000, 8000\text{cm}^2/\text{g}$ は自身の水中養生と同等の強度を得ることができた。

(3) 普通コンクリート（水中養生）との比較

コンクリート標準示方書¹⁰⁾では、普通ポルトランドセメントの水中養生期間は5日と明記されている。また高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針¹¹⁾には高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの水中養生日数の目安（表-2.6）が記されており、普通コンクリートと比べると、水中養生の影響を受けやすいため、水中養生期間が長くなっている。

実際に同じ水中養生期間では、普通コンクリートと比べて高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、どの程度強度が低下しているのか、置換率と粉末度の違いから比較を行った。

普通コンクリートの水中養生を1.00とした場合の材齢と強度比の関係を置換率別に図-5.38～42に示す。また同様に粉末度別の結果を図-5.43～47に示す。

a) 置換率による検討

図-5.38～42では置換率が高くなるほど、低下率が大きくなった。図-5.39では3日から気乾に移した場合、置換率30%であれば強度の低下率は20%程度に保たれ、図-5.40より7日から気乾に移した場合では低下率10%程度に保たれる。またその他、置換率70%までに関しても、材齢91日で約20%以内の低下率で留まることが分かった。図-5.41から14日まで水中養生すれば置換率80%以外は、水中養生の普通コンクリートとほぼ同程度の強度となった。

b) 粉末度による検討

図-5.43～47では、粉末度6000、8000 cm²/gは同じような低下率であった。3日から気乾にしたものは、水中養生の普通コンクリートと比べると、粉末度6000、8000 cm²/gは強度が30%程度低下する。粉末度4000 cm²/gではほぼ半分近い強度の低下となる。7日から気乾養生にした場合、粉末度6000 cm²/gは材齢91日まで経過すると10%程度の低下率で保たれた。

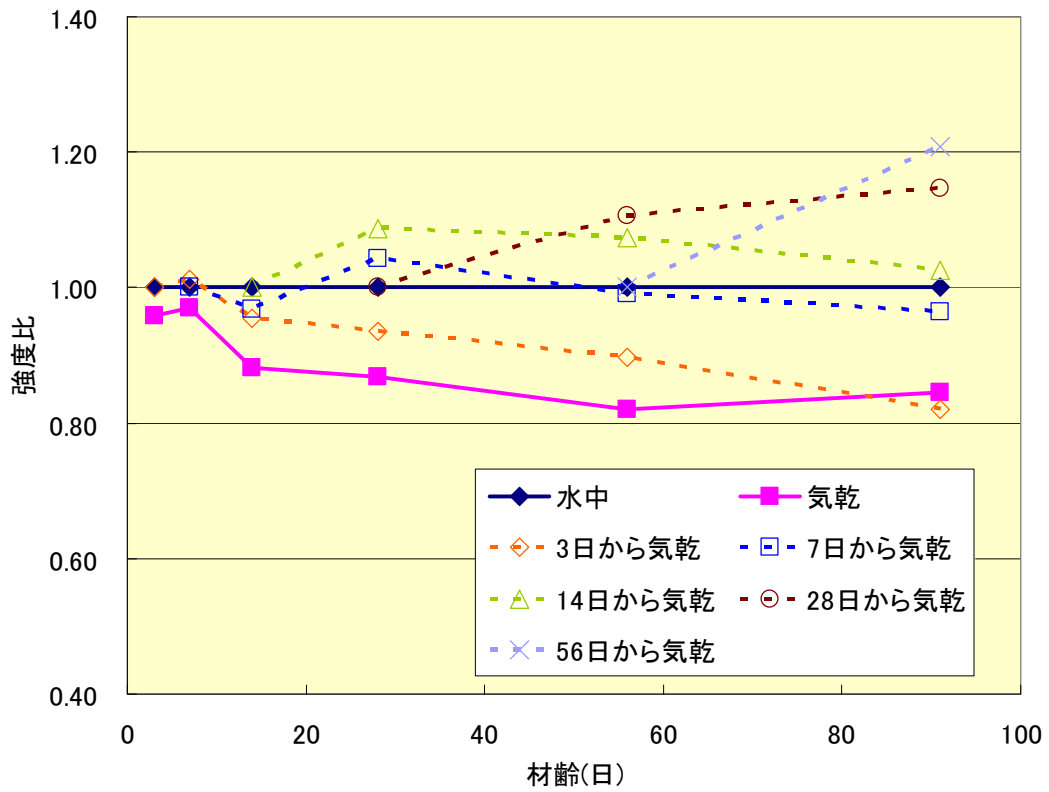


図-5.19 材齢と圧縮強度比の関係（普通コンクリート W/C=50%）

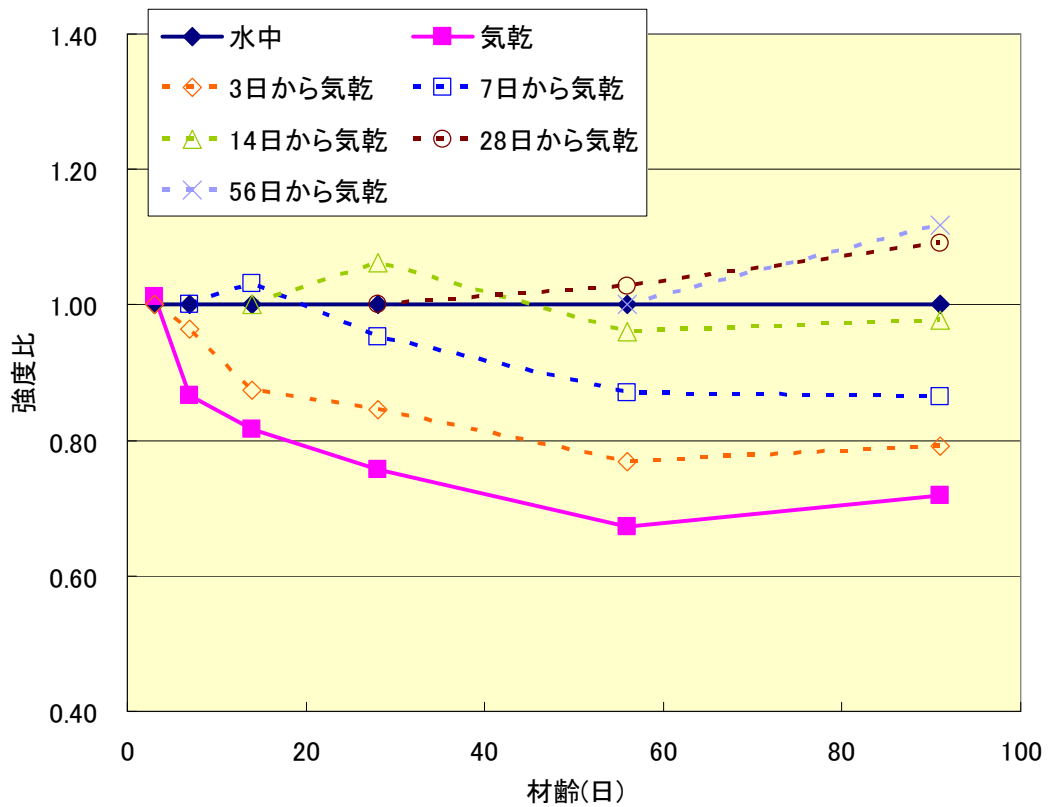


図-5.20 材齢と圧縮強度比の関係（粉末度 6000 cm²/g 置換率 30% 水結合材比 50%）

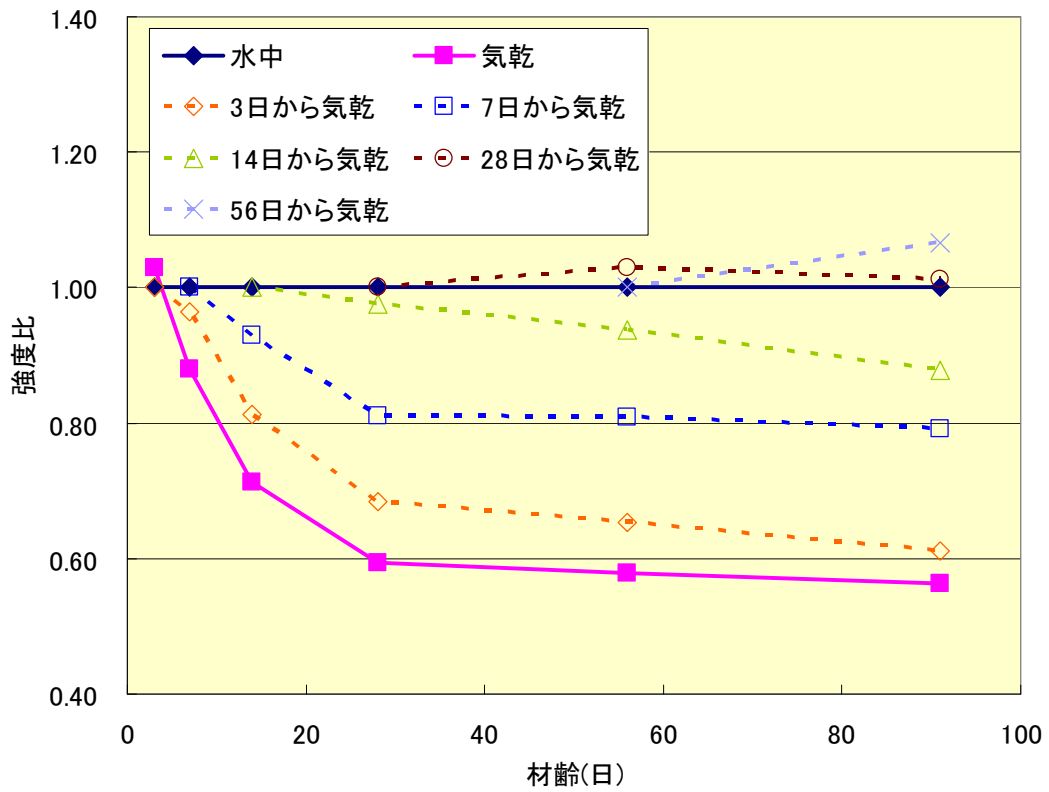


図-5.21 材齢と圧縮強度比の関係（粉末度 6000 cm²/g 置換率 50% 水結合材比 50%）

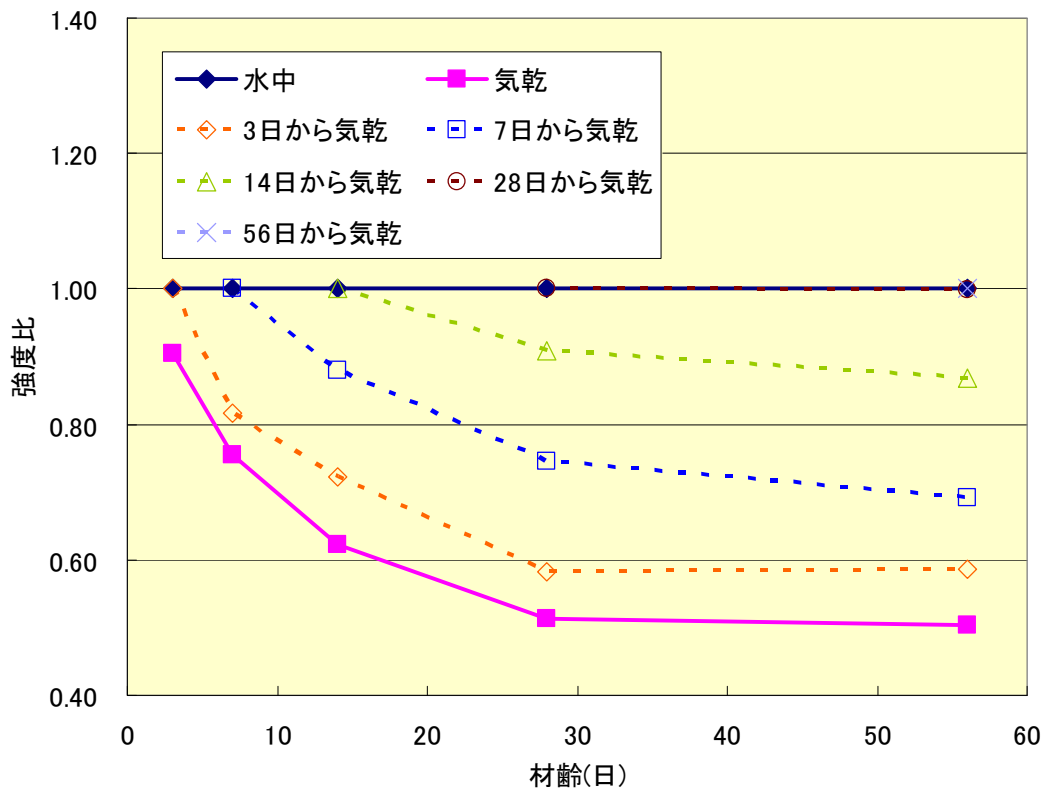


図-5.22 材齢と圧縮強度比の関係（粉末度 6000 cm²/g 置換率 70% 水結合材比 50%）

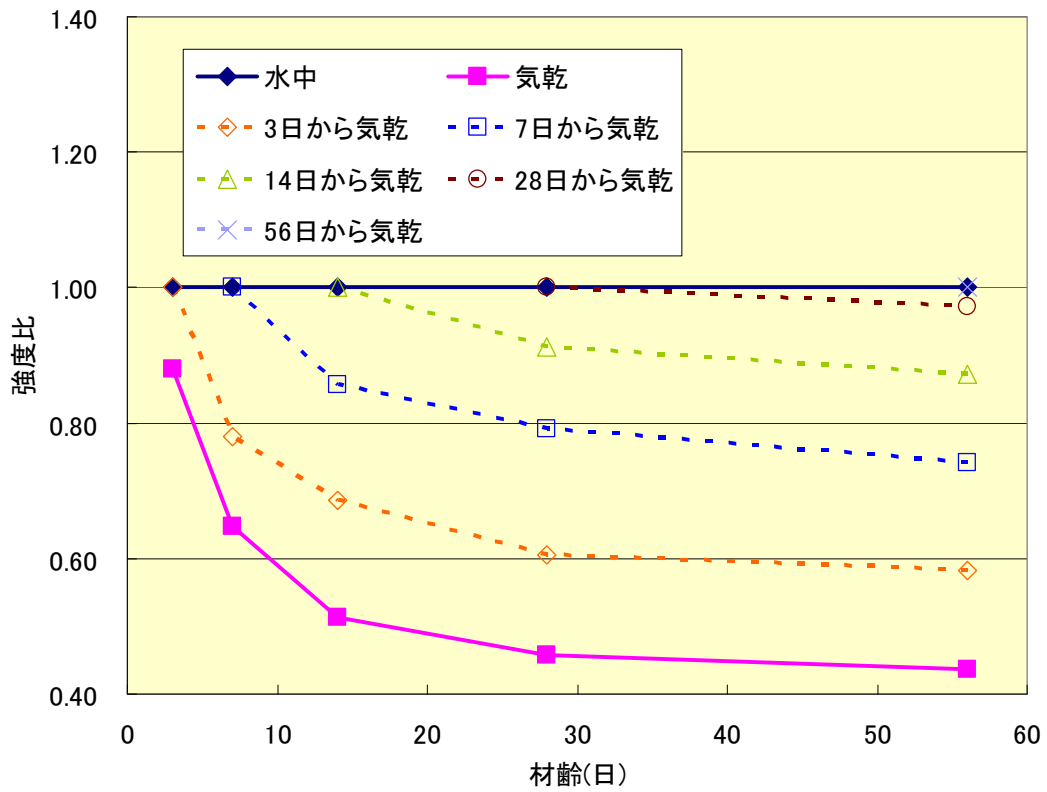


図-5.23 材齢と圧縮強度比の関係（粉末度 6000 cm²/g 置換率 80% 水結合材比 50%）

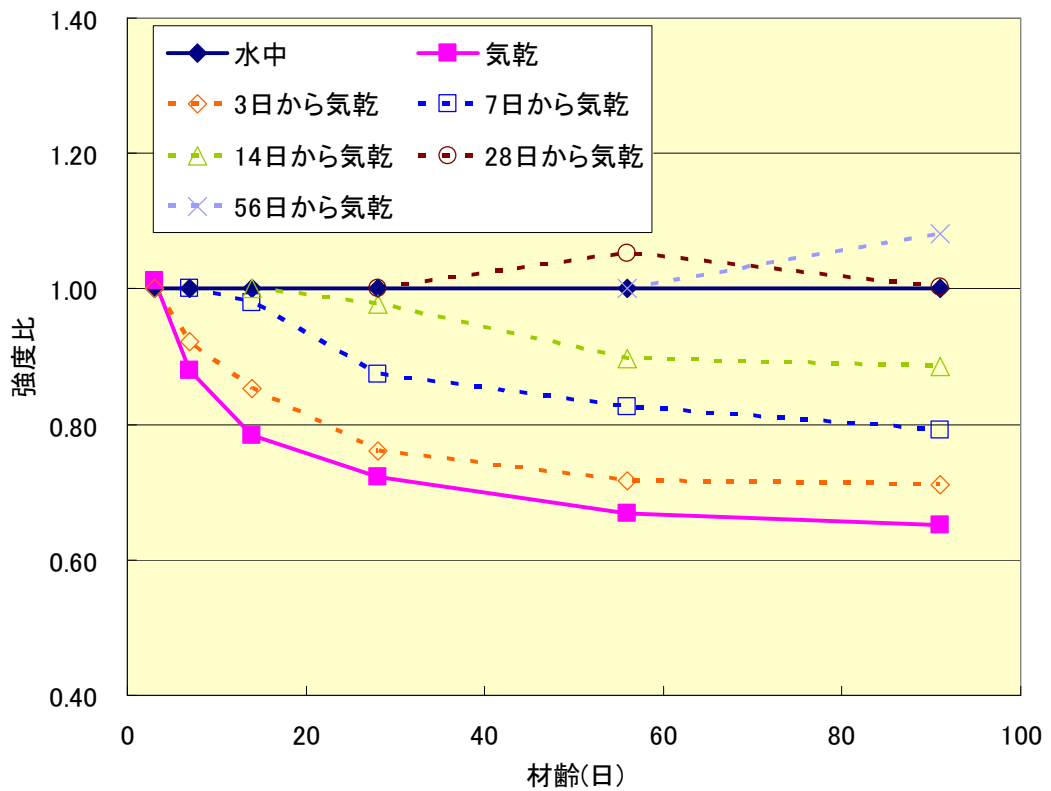


図-5.24 材齢と圧縮強度比の関係（粉末度 6000 cm²/g 置換率 50% 水結合材比 40%）

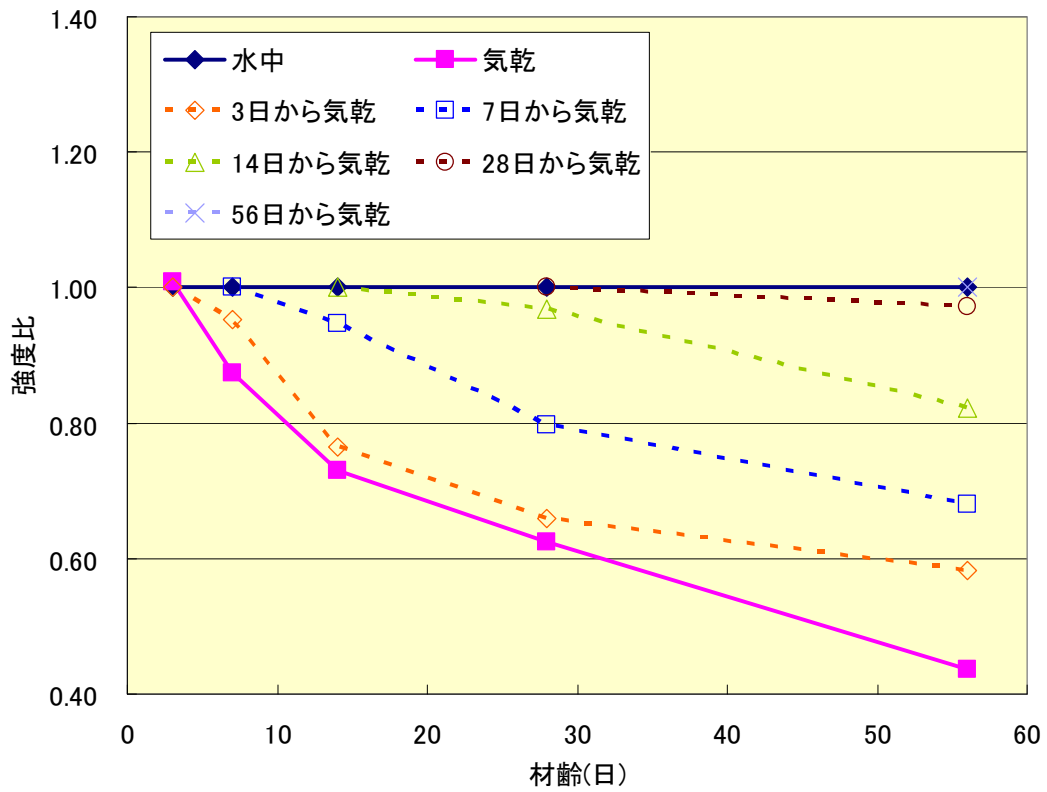


図-5.25 材齢と圧縮強度比の関係（粉末度 6000 cm²/g 置換率 50% 水結合材比 60%）

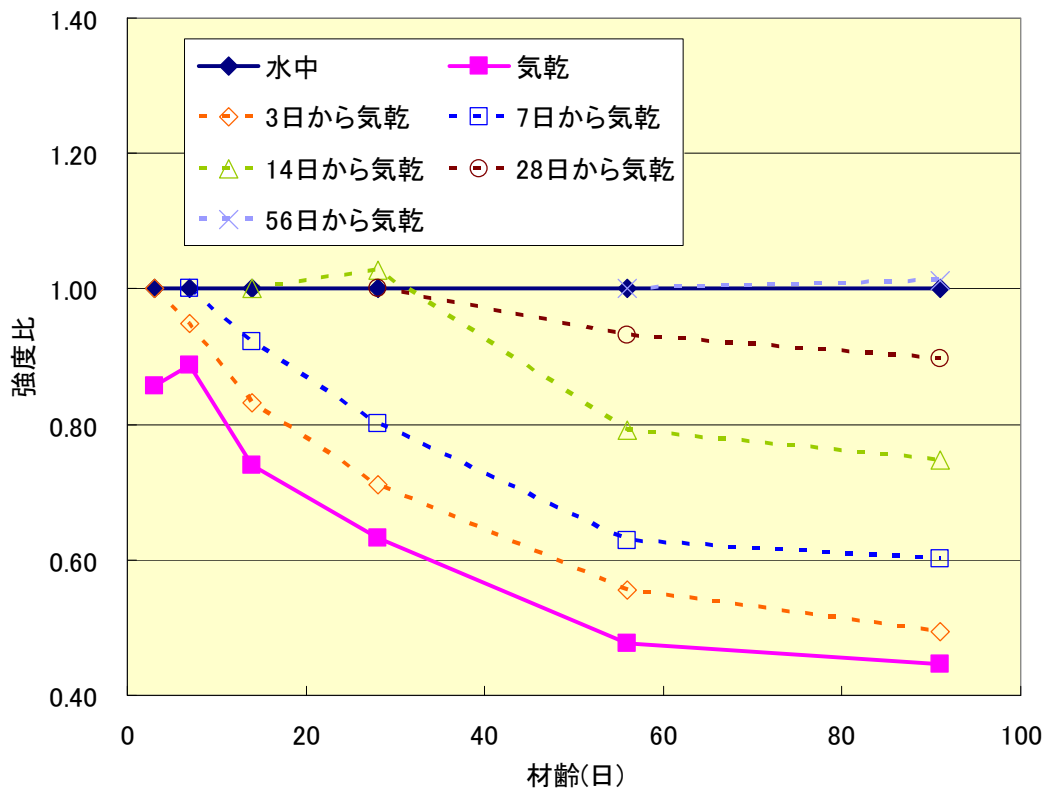


図-5.26 材齢と圧縮強度比の関係（粉末度 4000 cm²/g 置換率 50% 水結合材比 50%）

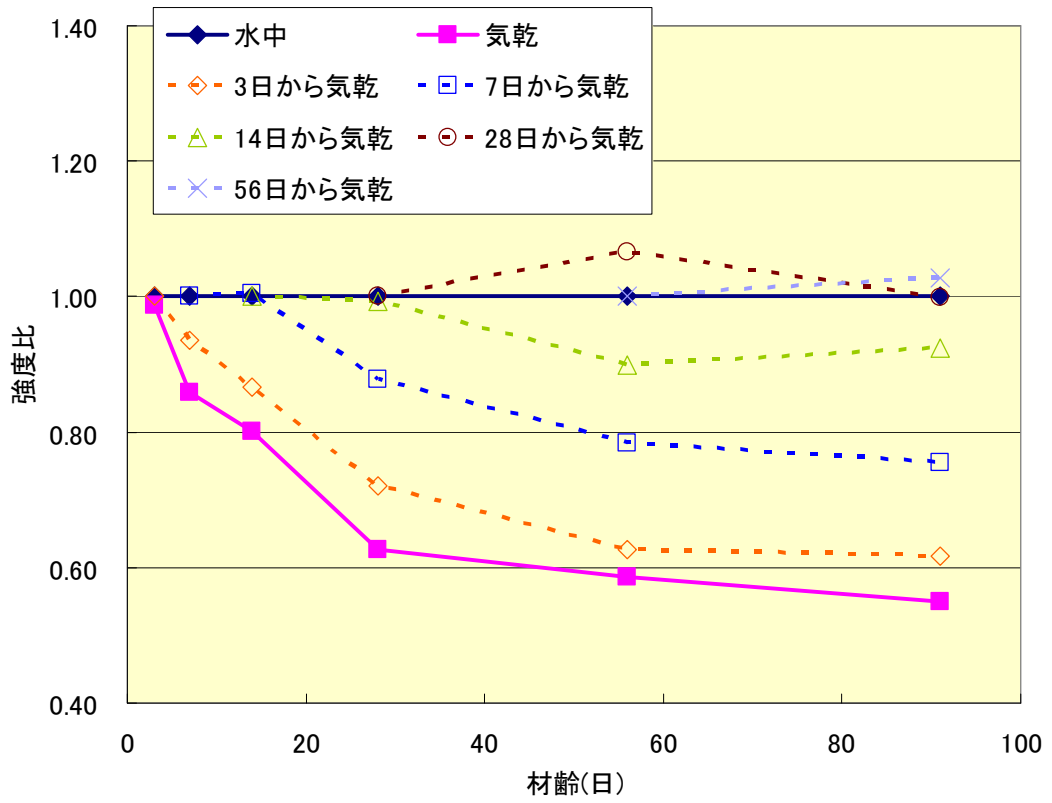


図-5.27 材齢と圧縮強度比の関係 (粉末度 8000 cm²/g 置換率 50% 水結合材比 50%)

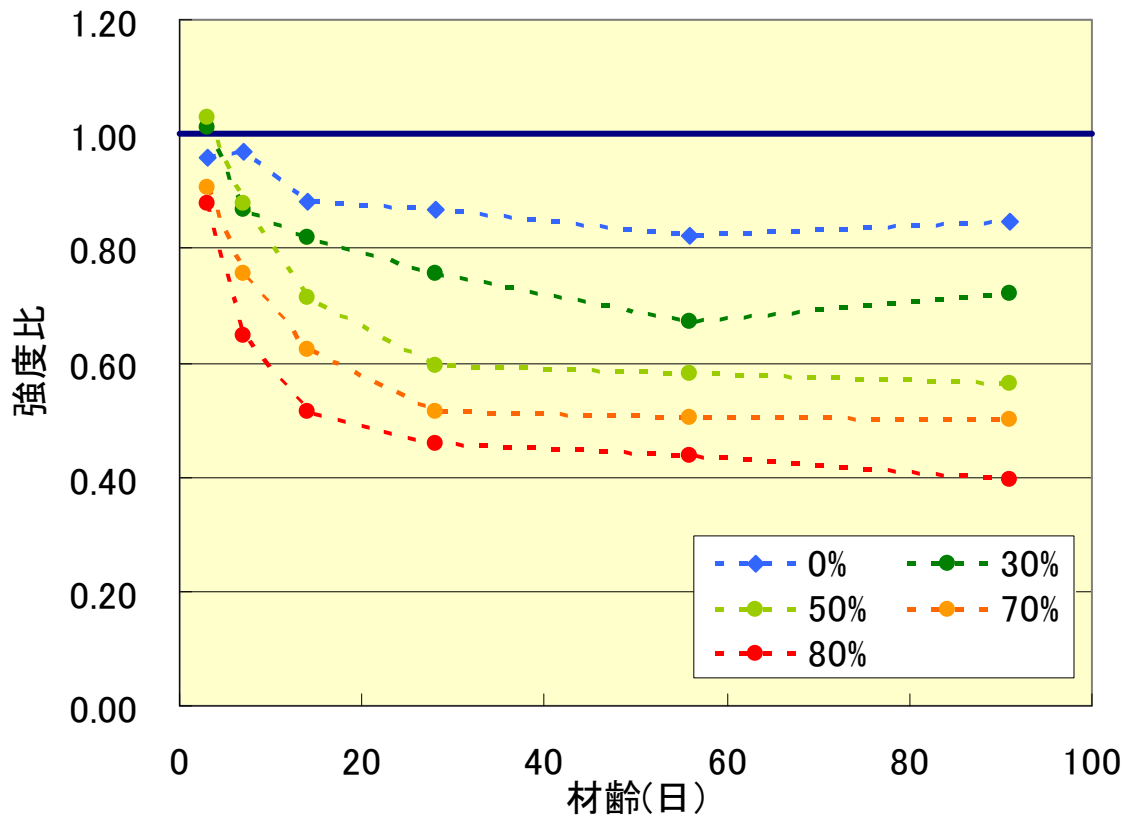


図-5.28 各種類の水中を 1.00 とした材齢と強度比の関係 (気乾)

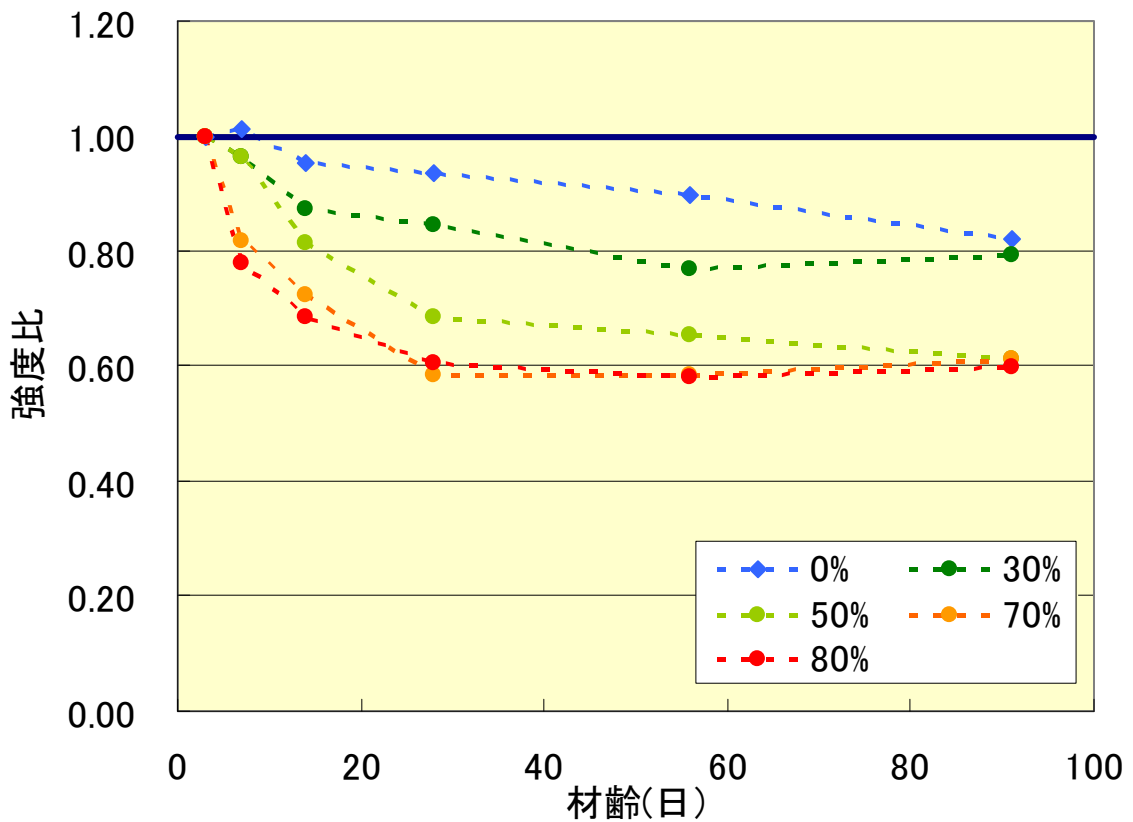


図-5.29 各種類の水中を 1.00 とした材齢と強度比の関係 (3日から気乾)

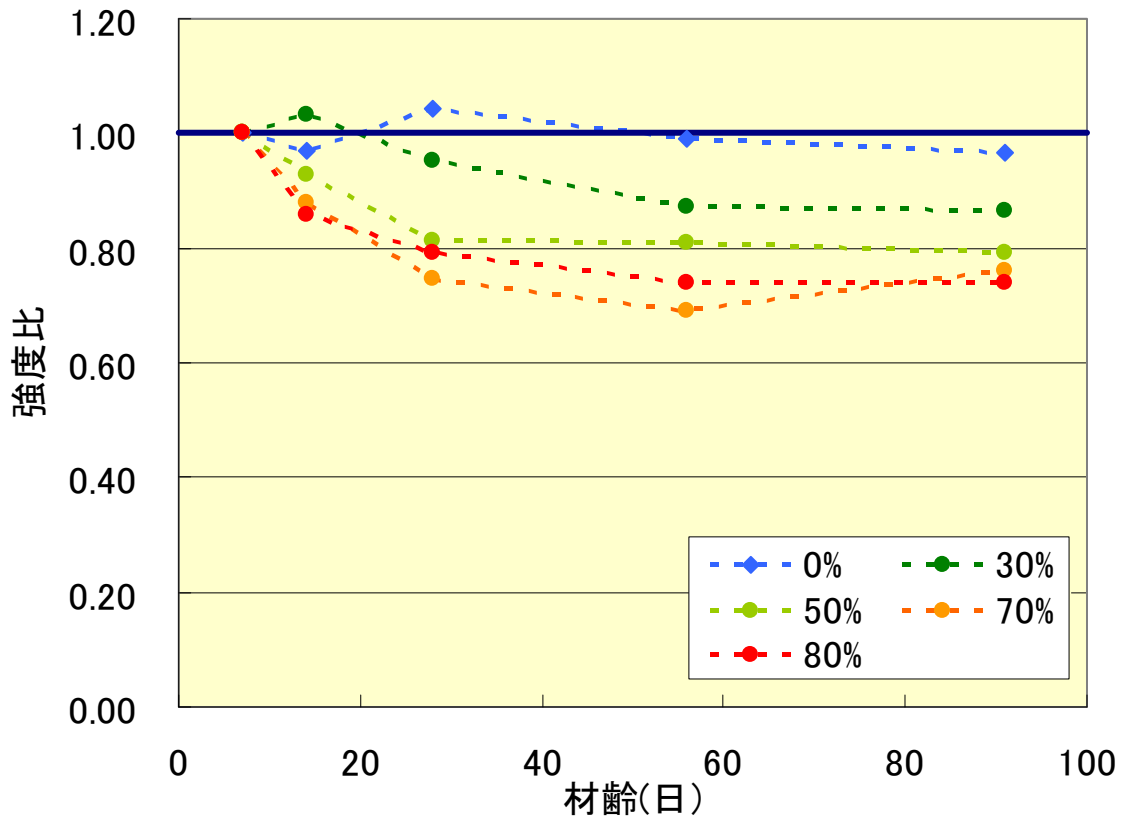


図-5.30 各種類の水中を 1.00 とした材齢と強度比の関係 (7 日から気乾)

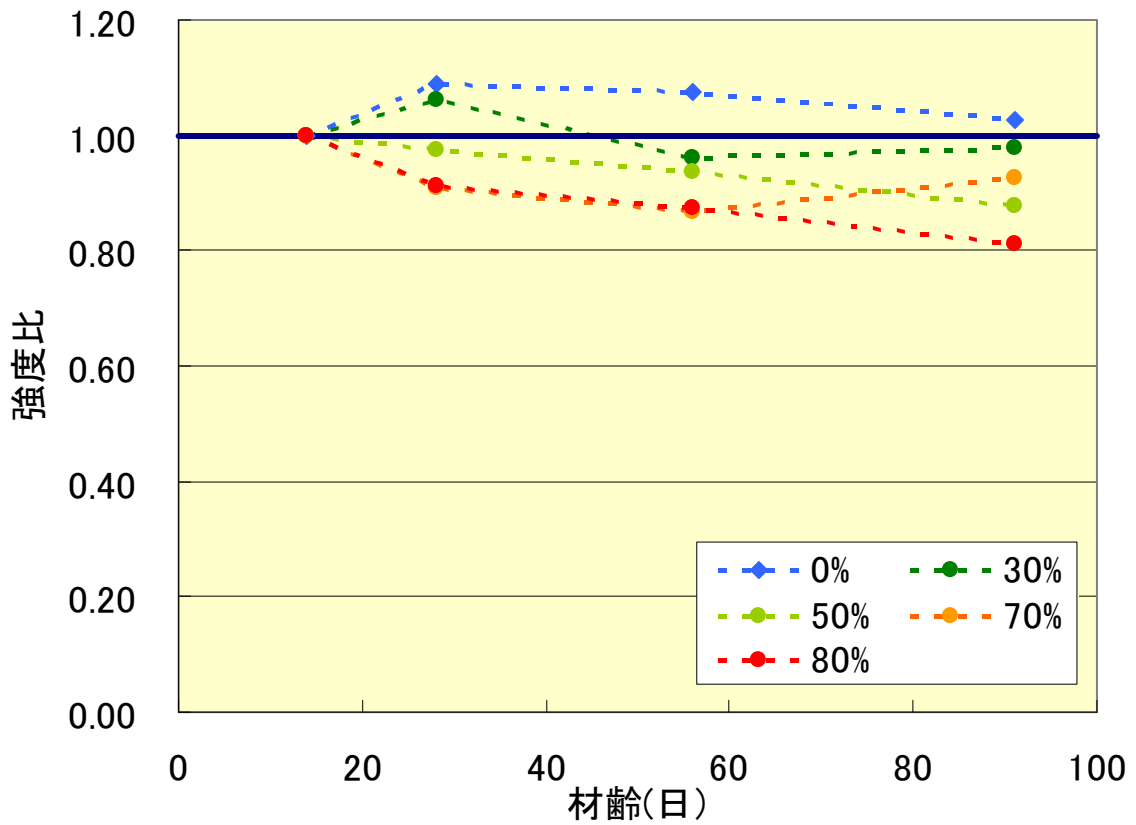


図-5.31 各種類の水中を 1.00 とした材齢と強度比の関係 (14 日から気乾)

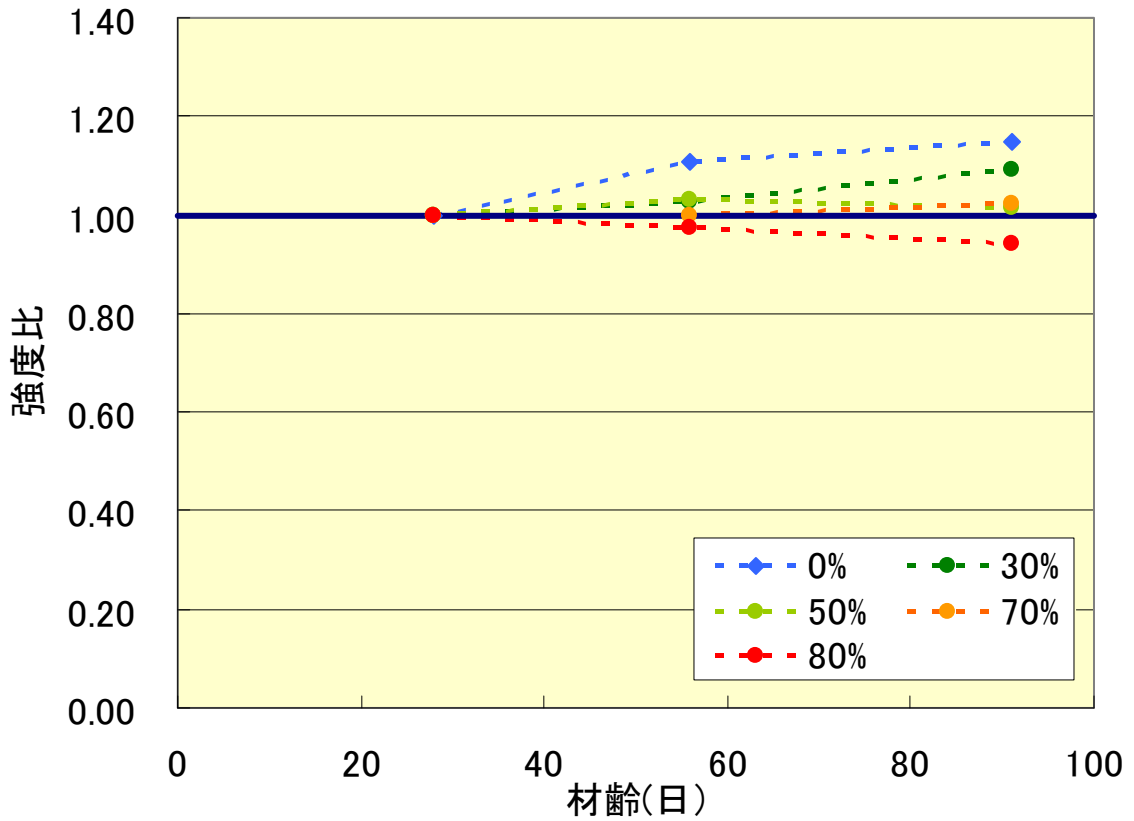


図-5.32 各種類の水中を 1.00 とした材齢と強度比の関係 (28 日から気乾)

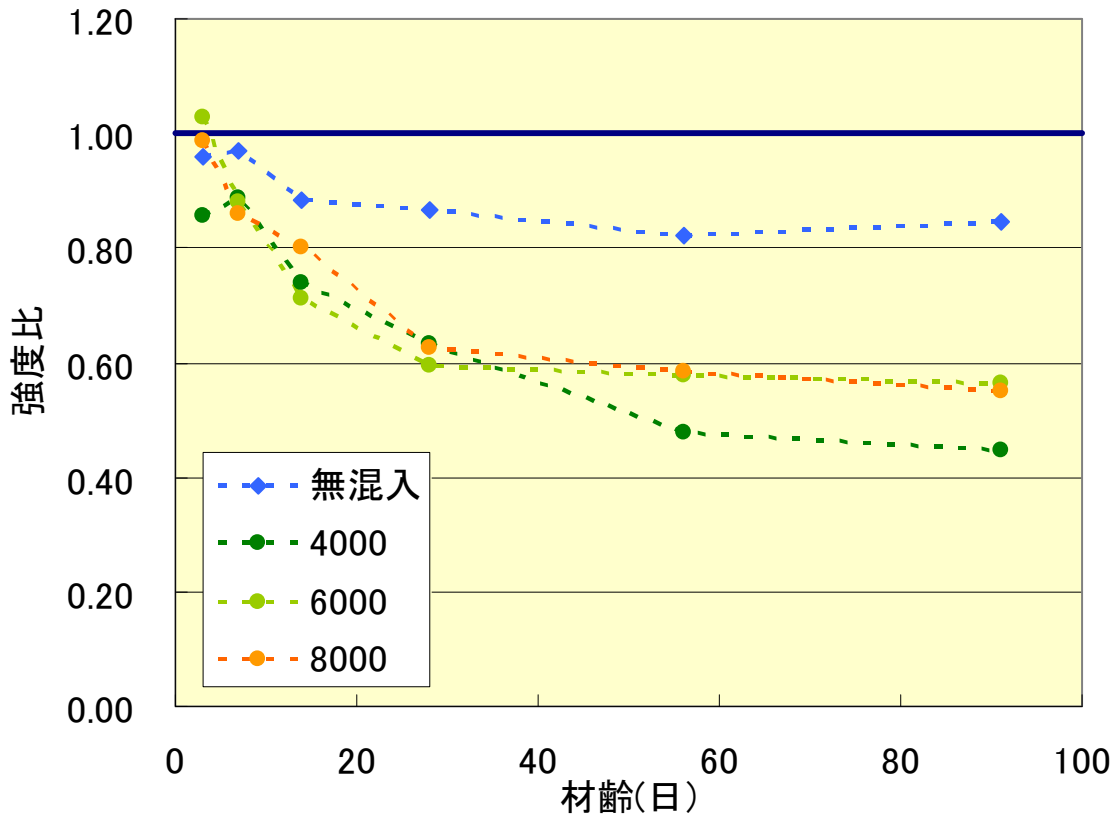


図-5.33 各種類の水中を 1.00 とした材齢と強度比の関係 (気乾)

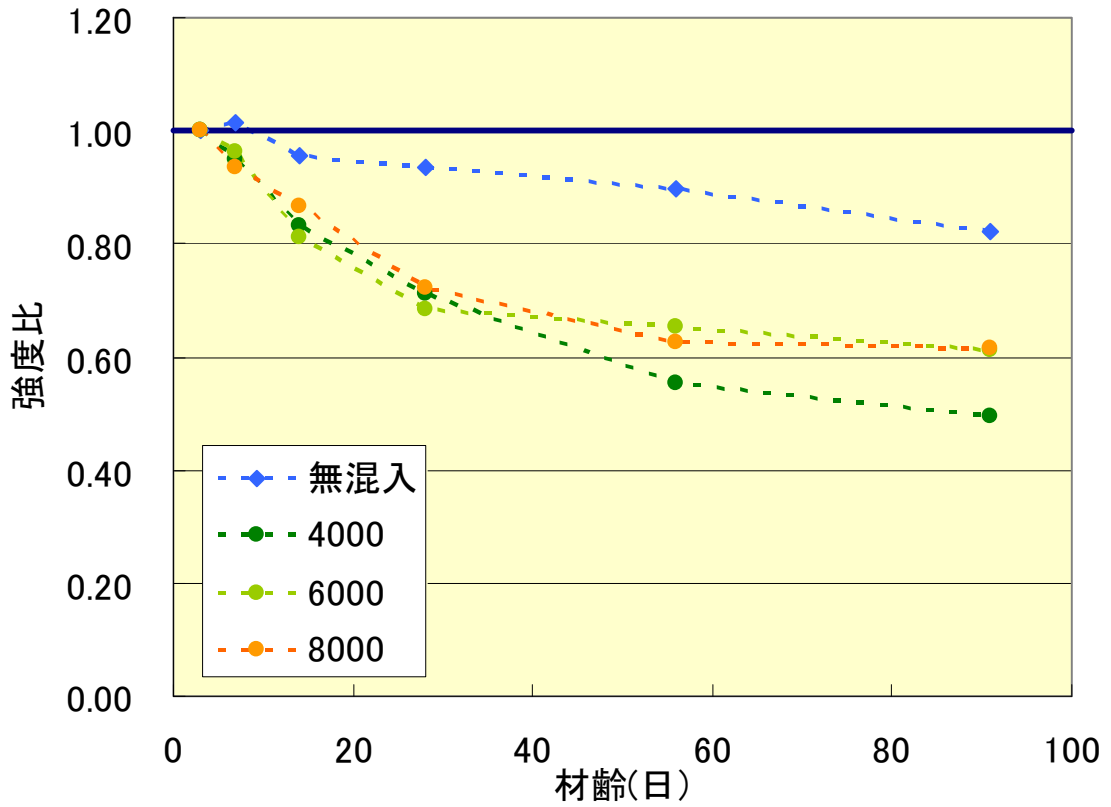


図-5.34 各種類の水中を 1.00 とした材齢と強度比の関係 (3 日から気乾)

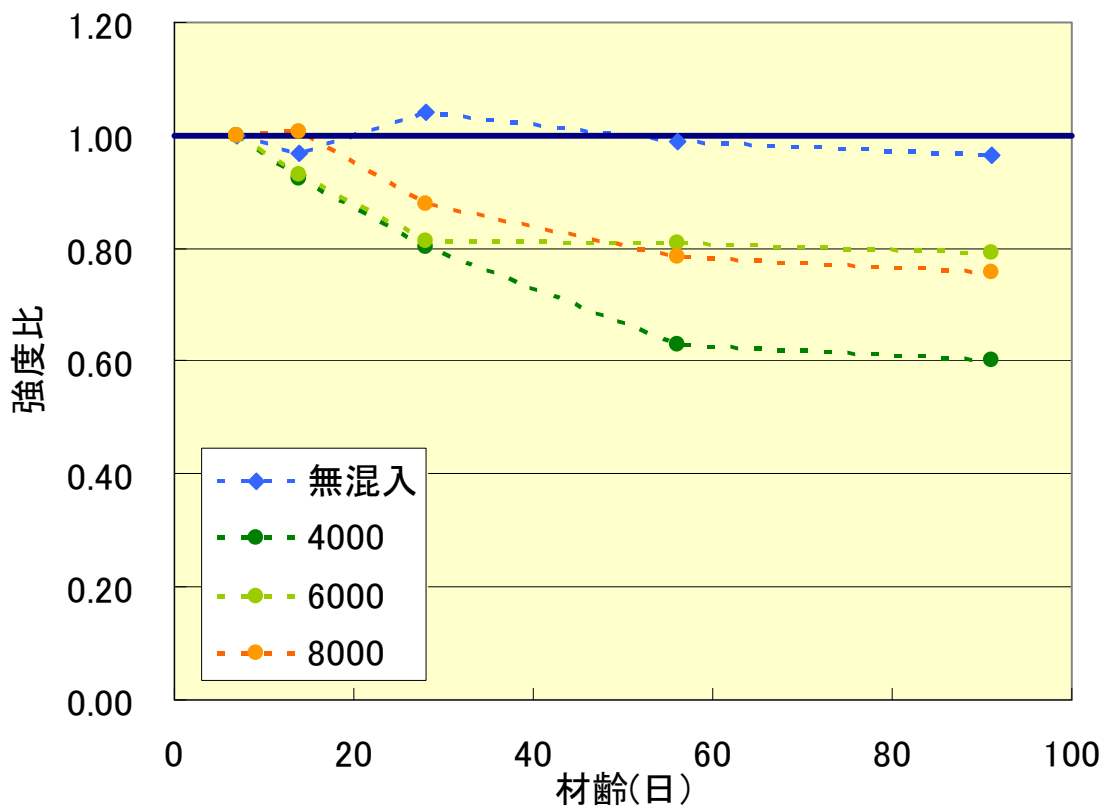


図-5.35 各種類の水中を 1.00 とした材齢と強度比の関係 (7 日から気乾)

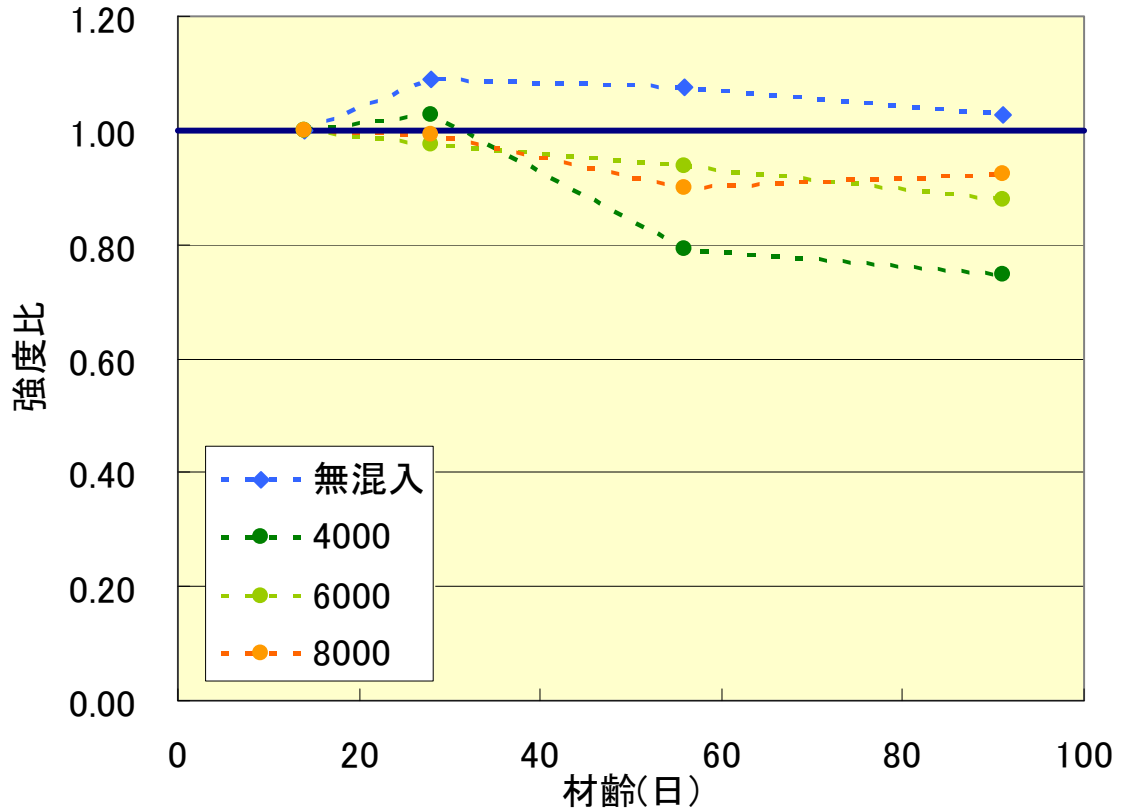


図-5.36 各種類の水中を 1.00 とした材齢と強度比の関係 (14 日から気乾)

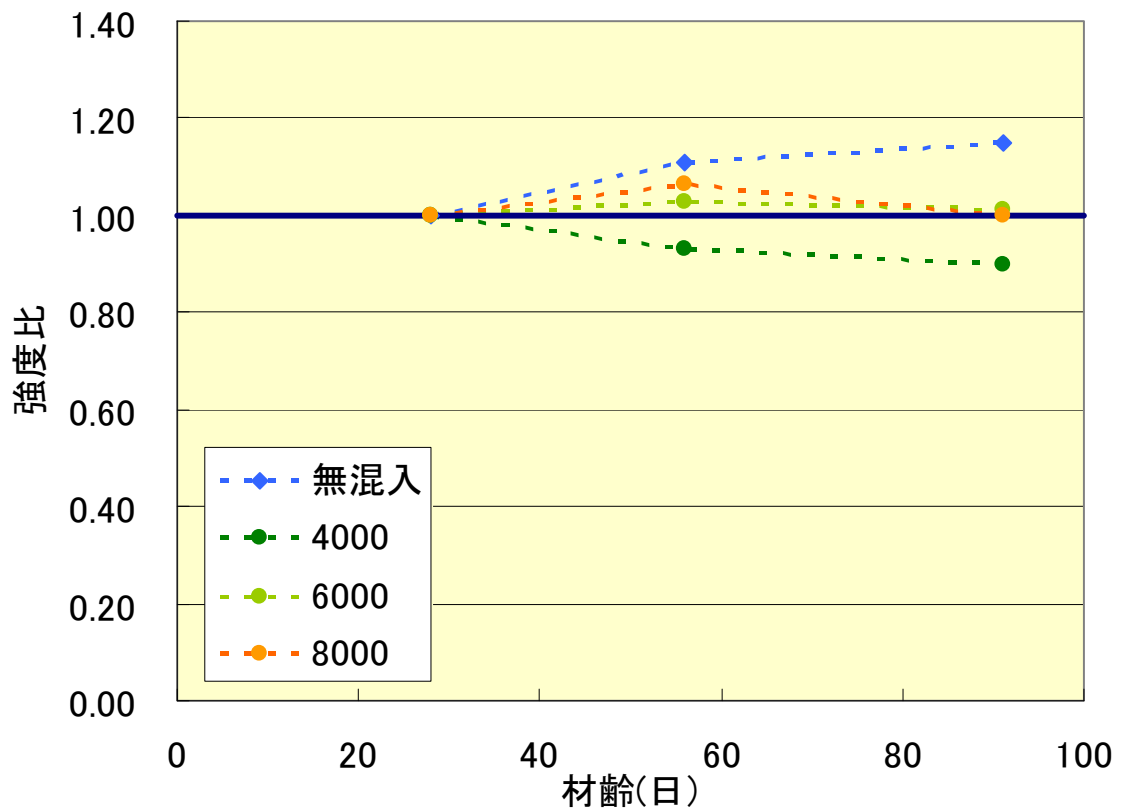


図-5.37 各種類の水中を 1.00 とした材齢と強度比の関係 (28 日から気乾)

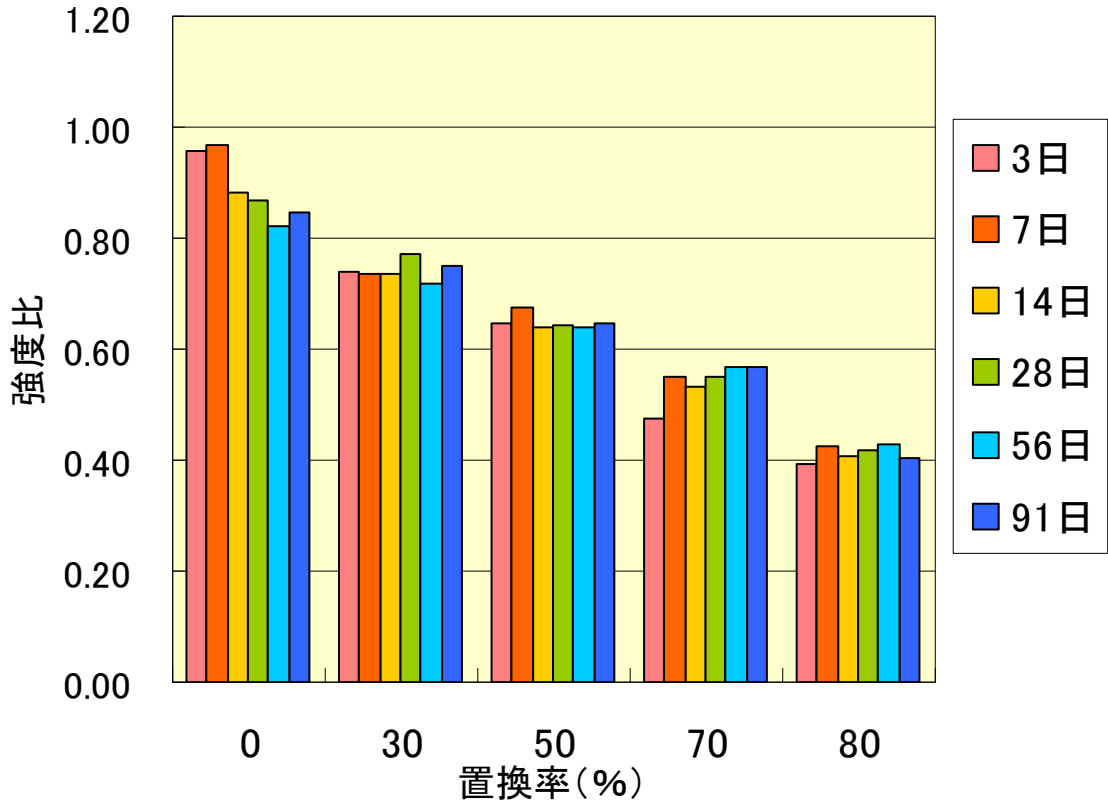


図-5.38 N50(水中)を 1.00 とした置換率と強度比の関係 (気乾)

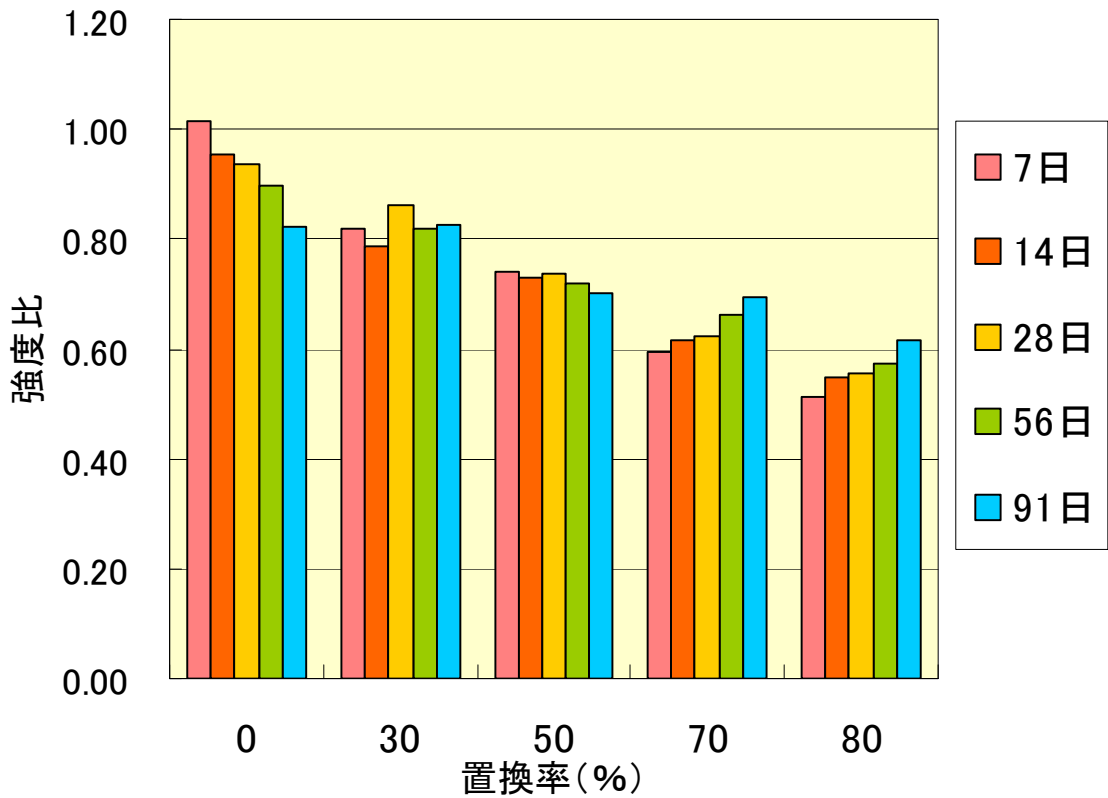


図-5.39 N50(水中)を 1.00 とした置換率と強度比の関係 (3日から気乾)

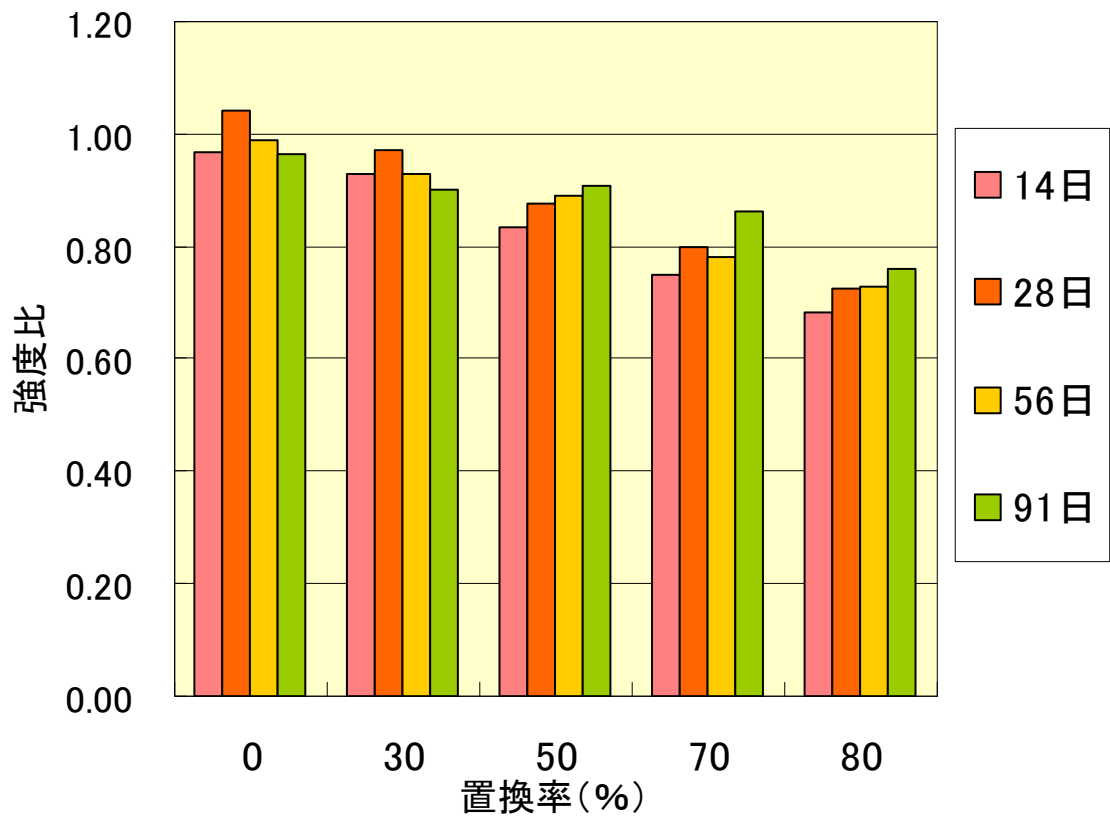


図-5.40 N50(水中)を 1.00 とした置換率と強度比の関係 (7日から気乾)

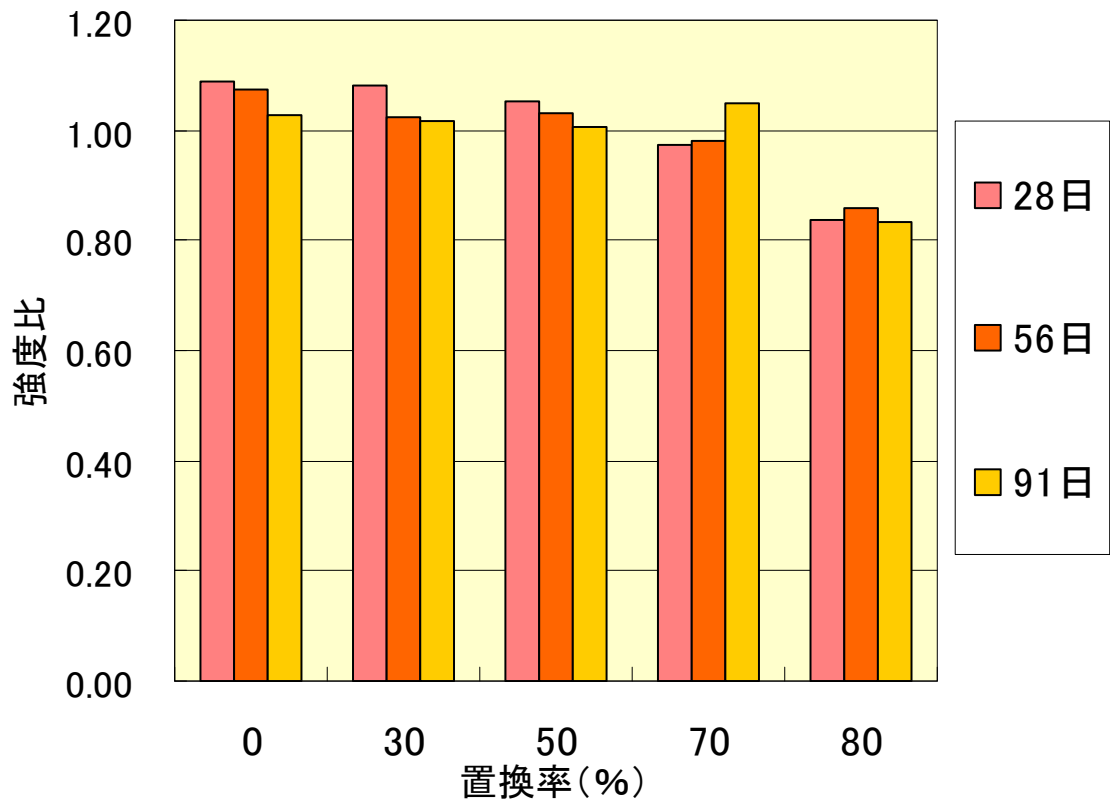


図-5.41 N50(水中)を 1.00 とした置換率と強度比の関係 (14日から気乾)

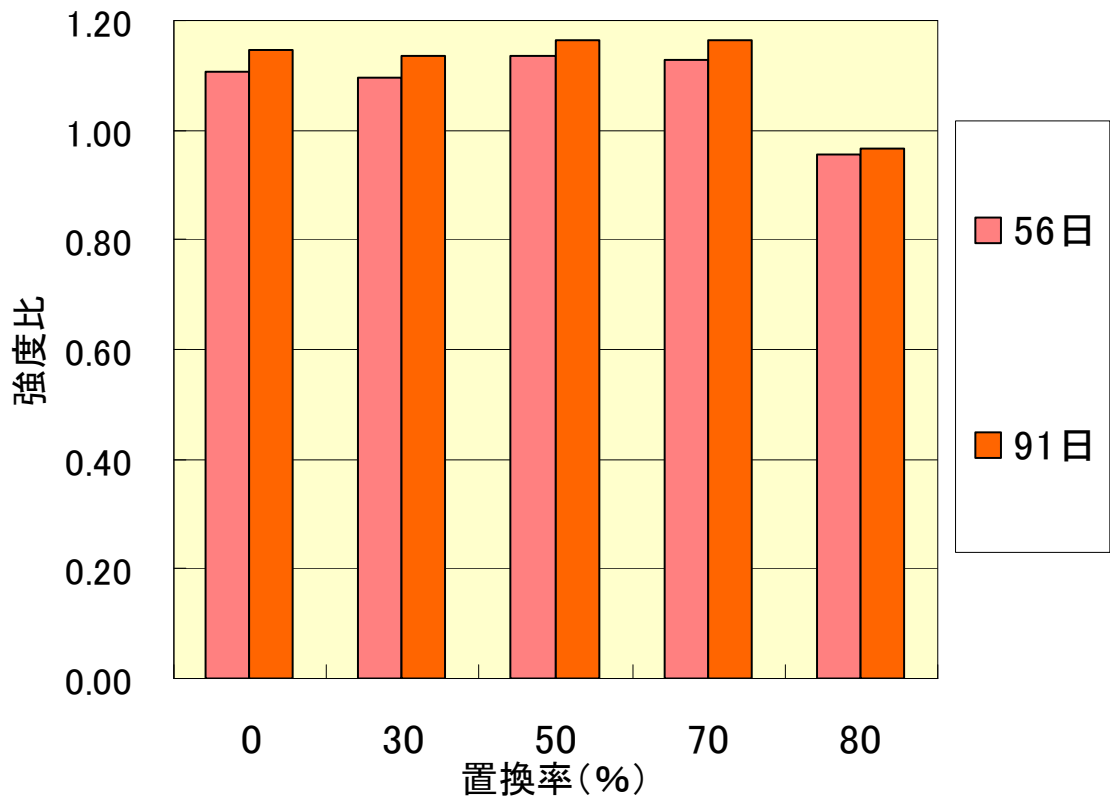


図-5.42 N50(水中)を 1.00 とした置換率と強度比の関係 (28 日から気乾)

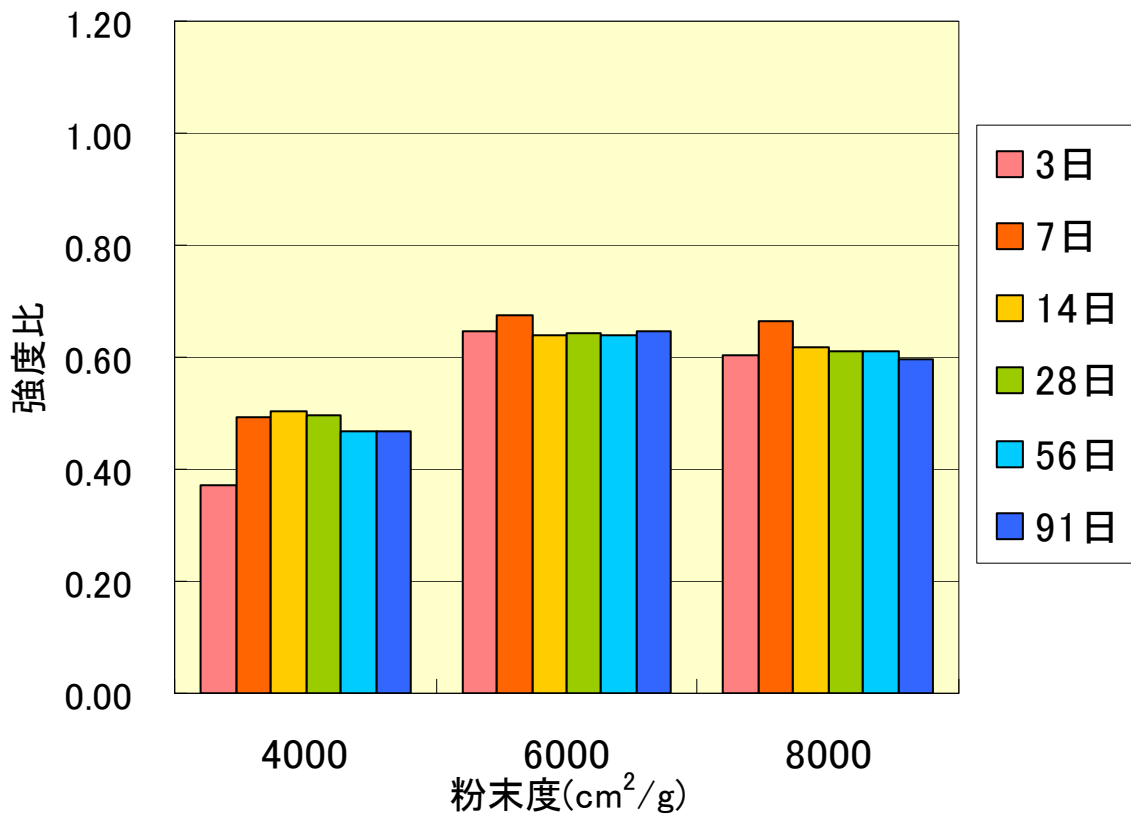


図-5.43 N50 (水中) を 1.00 とした粉末度と強度比の関係 (気乾)

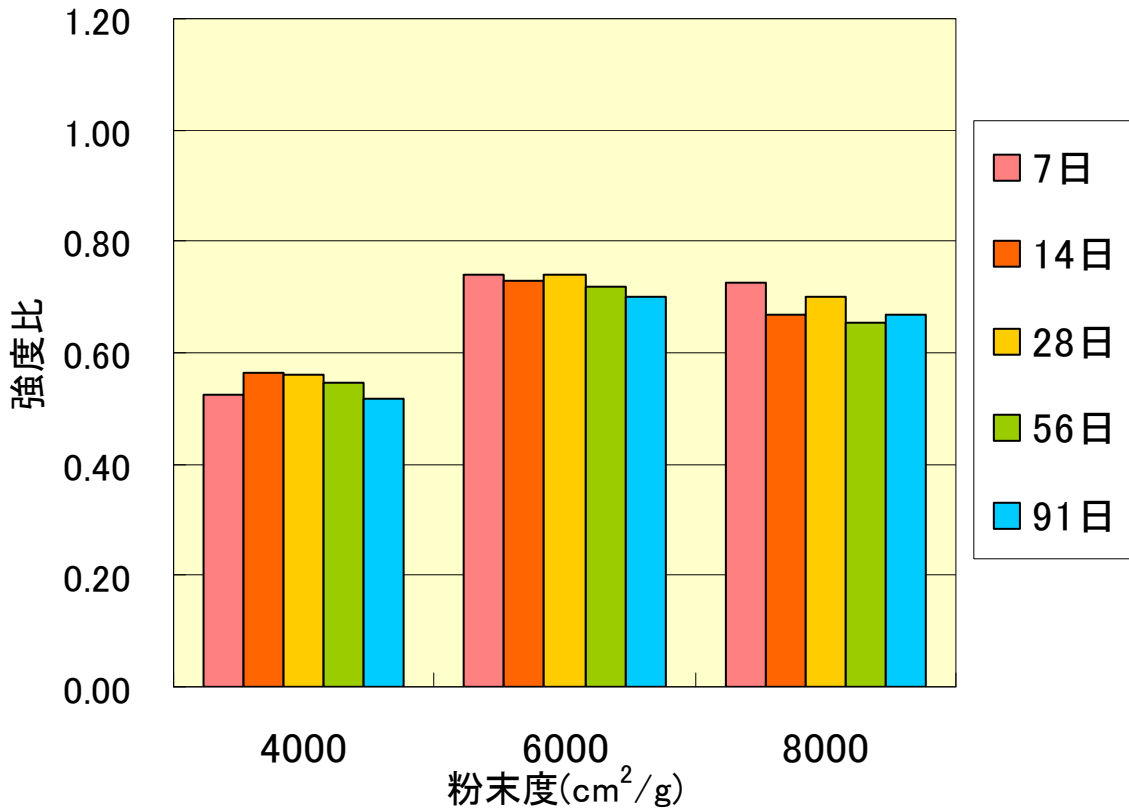


図-5.44 N50（水中）を1.00とした粉末度と強度比の関係（3日から気乾）

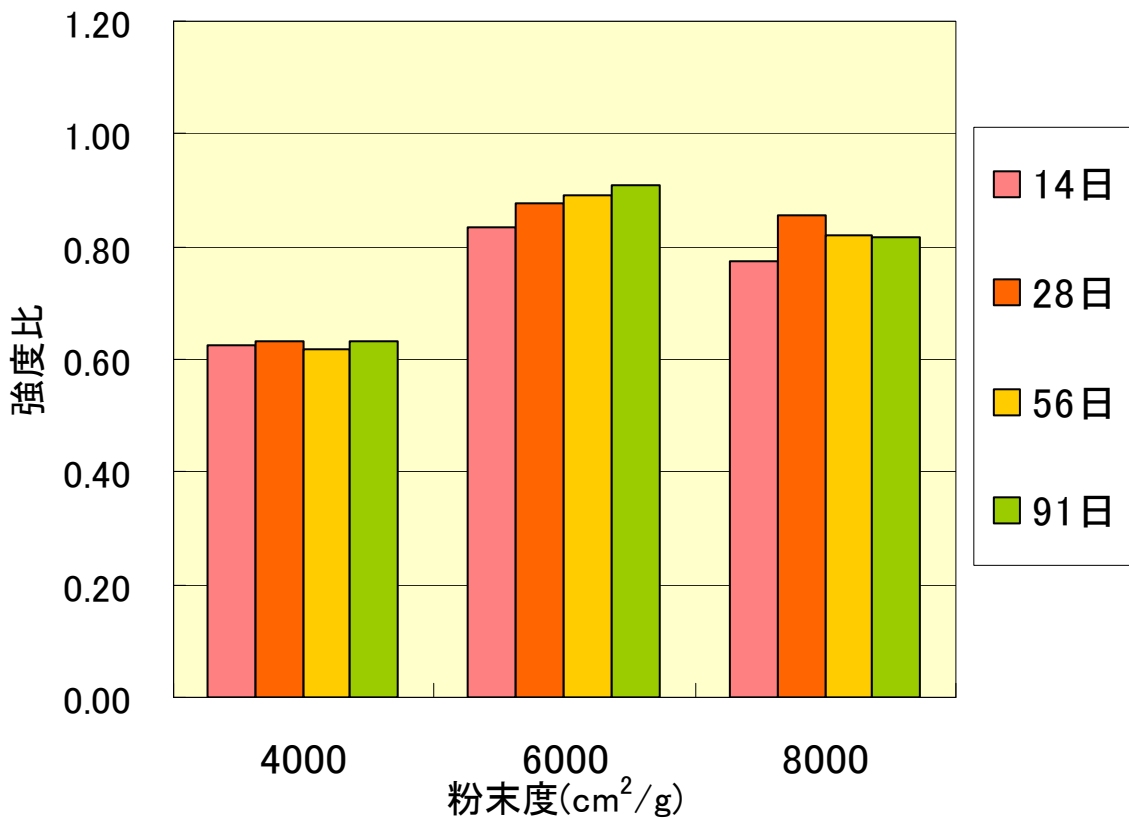


図-5.45 N50（水中）を1.00とした粉末度と強度比の関係（7日から気乾）

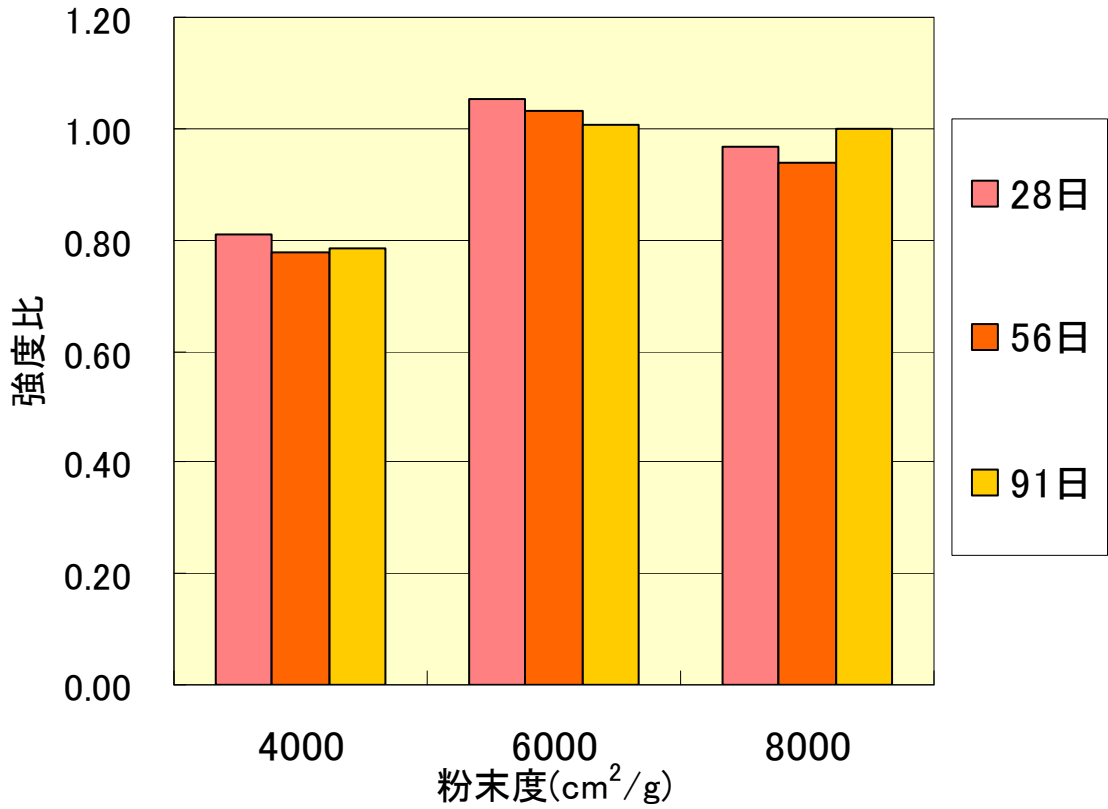


図-5.46 N50（水中）を1.00とした粉末度と強度比の関係（14日から気乾）

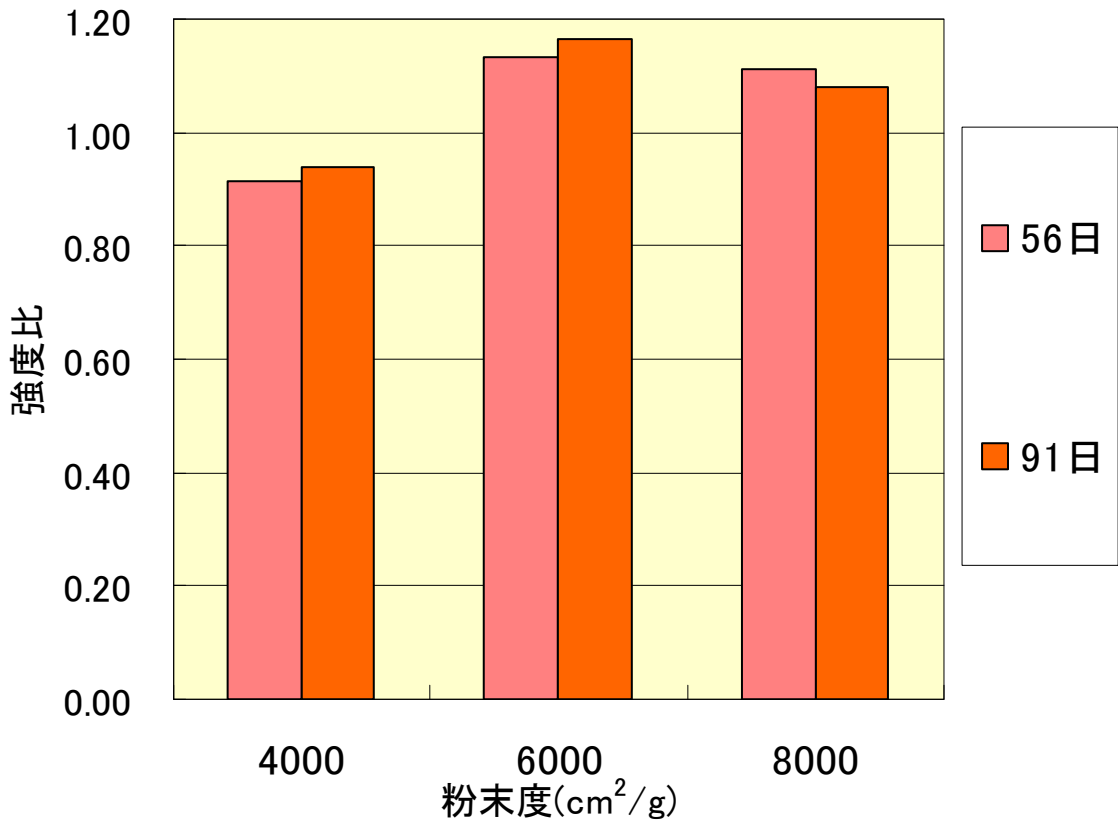


図-5.47 N50（水中）を1.00とした粉末度と強度比の関係（28日から気乾）

5.3 圧縮強度とヤング係数の関係

圧縮強度とヤング係数の関係のうち、全供試体を用いたものを図-5.48、図-5.48を養生方法別にしたものを図-5.49に、各材齢まで水中養生しその後気乾養生したものを湿潤養生期間ごとにしたものを図-5.50にそれぞれ示す。

図-5.48から、若干ばらつきはあるものの、全供試体を用いても相関係数は0.871となり比較的高い相関関係となった。また、図-5.49から、圧縮強度が10N/mm²程度までは水中養生したものと乾燥の影響を受けたものは、ほぼ同様の傾向を見せている。しかし、圧縮強度の増加に伴い、水中養生したものに比べ、乾燥の影響を受けたものでは同一圧縮強度に対してヤング係数が小さくなっていることがわかる。水中養生したものに関しては、圧縮強度とヤング係数の関係は、相関係数が0.967となり、気乾養生および途中から気乾養生したものを含めた圧縮強度とヤング係数の関係は、相関係数が0.894となり、ともに高い相関関係が得られた。

また、図-5.50から、途中から気乾養生にしたもののみ場合でも、圧縮強度とヤング係数の関係は、相関係数が0.850となり比較的高い相関関係となった。

これらのことは、コンクリートが乾燥の影響を受け、水和が十分に進行せず内部が粗な状態になっているためであると考えられる。材齢56日から気乾養生し、材齢91日で圧縮強度試験を行ったものも、図-5.50において他の湿潤養生期間のものと同様の傾向を見せていることから、湿潤養生期間に関わらず、コンクリートは乾燥による影響を受けると考えられる。

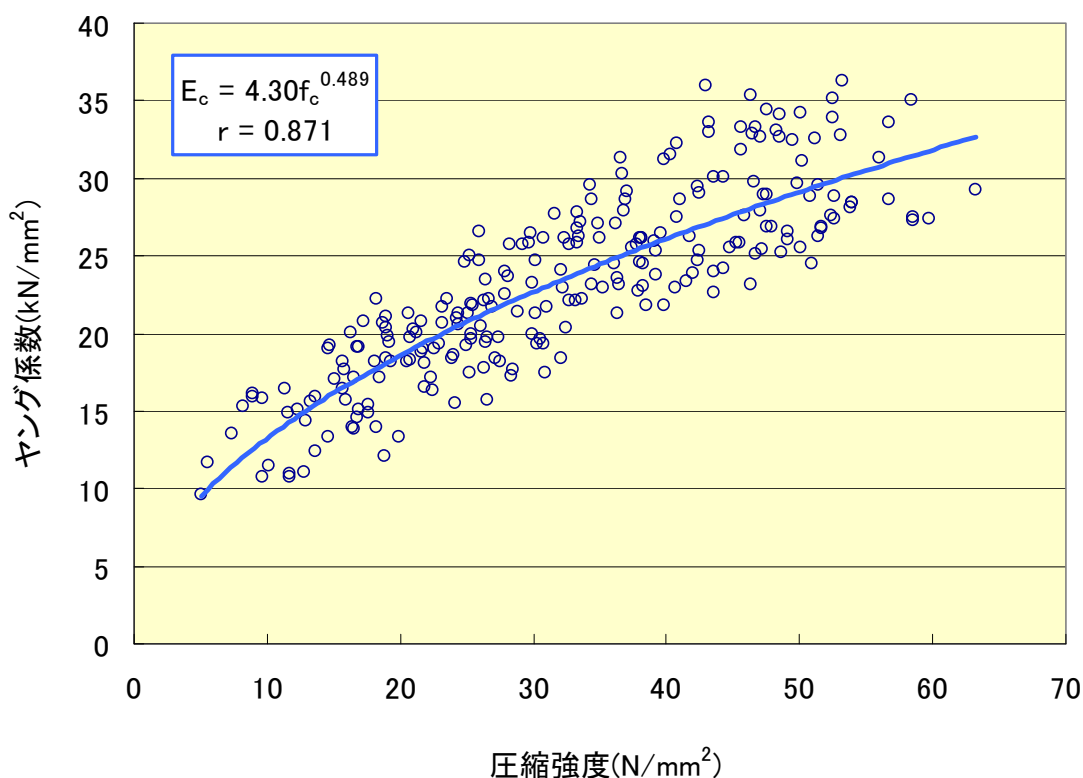


図-5.48 圧縮強度とヤング係数の関係（全種類）

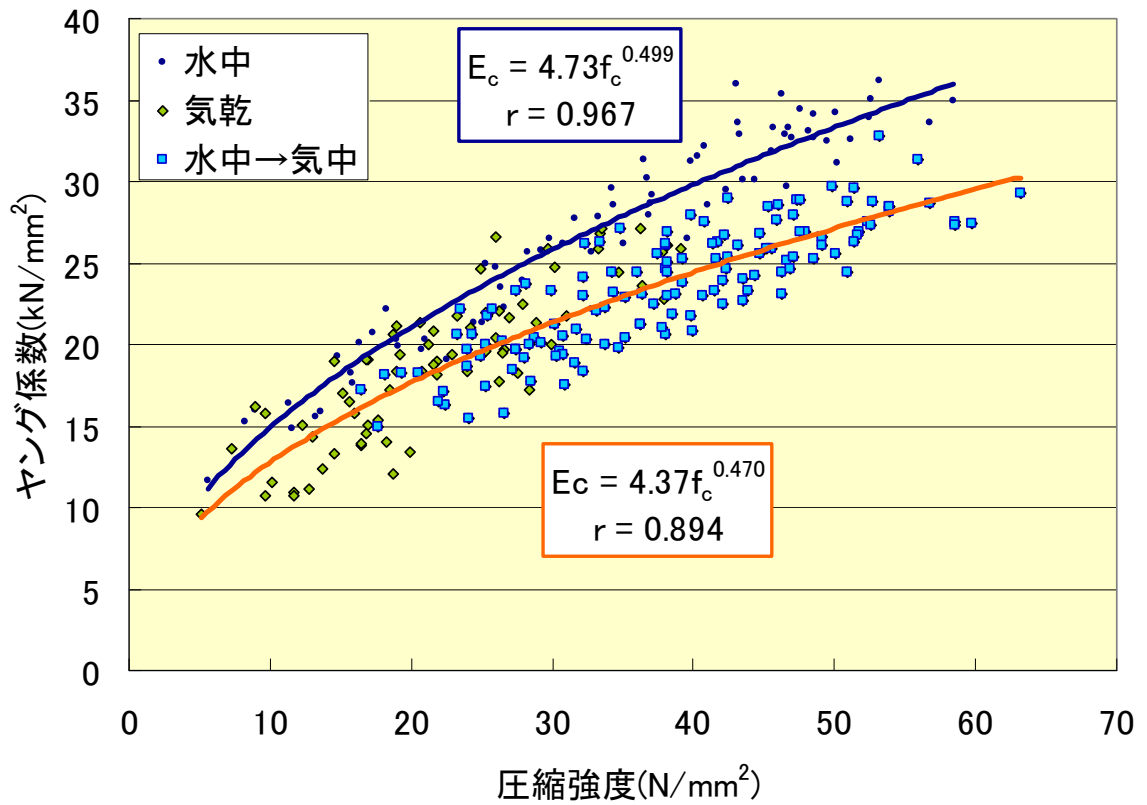


図-5.49 圧縮強度とヤング係数の関係（養生方法別）

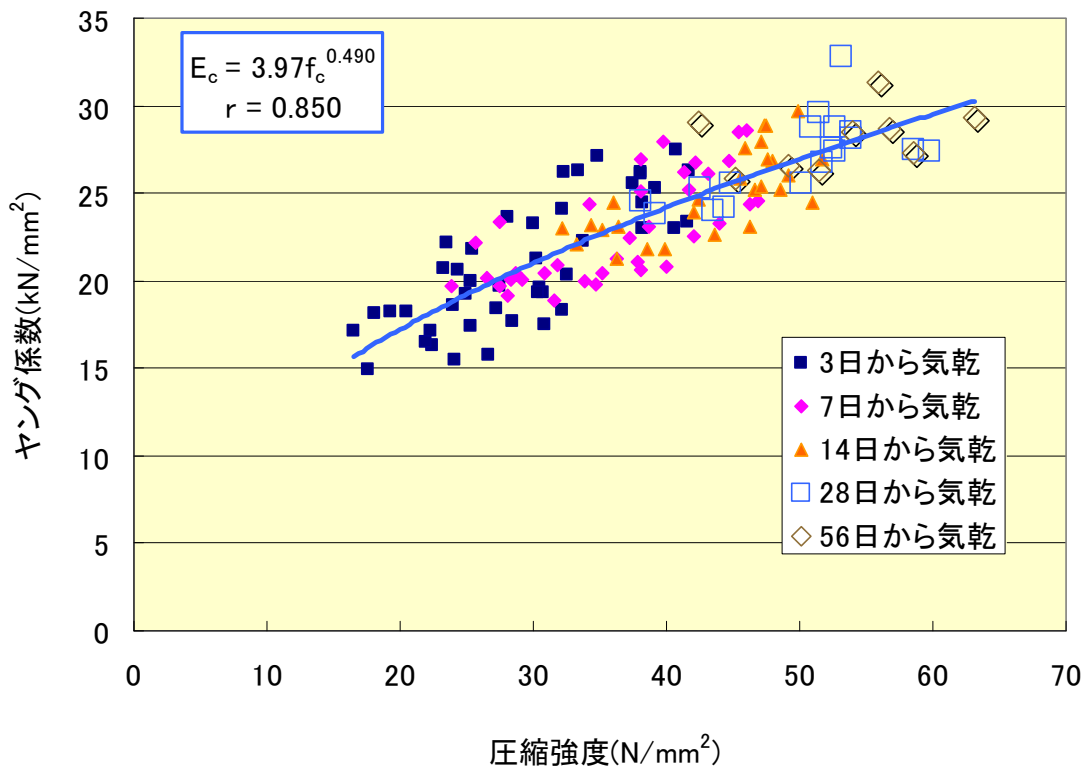


図-5.50 圧縮強度とヤング係数の関係（湿潤養生期間別）

5.4 応力とひずみの関係

応力-ひずみ曲線のうち、普通コンクリートのものを図 5-51 に、粉末度 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ 、水結合材比 50%を用いたものを置換率ごとに図 5-52~55 にそれぞれ示す。

図-5-51~55 から、普通コンクリートと高炉スラグ混入コンクリートを比較すると、同一ひずみに対する応力は、普通コンクリートでは水中養生と気乾養生に差があまりないが、高炉混入コンクリートでは置換率が高くなるとともに気乾養生したものより水中養生したものの方が応力は大きくなる。

置換率が高く、湿潤養生期間が短いものは同一応力に対してひずみが大きいので変形しやすくなっている。これは、初期の材齢で湿潤養生を終了し、乾燥の影響を受けることで水和反応が阻害され、供試体の内部が緻密化されず、空隙が増えたためと考えられる。

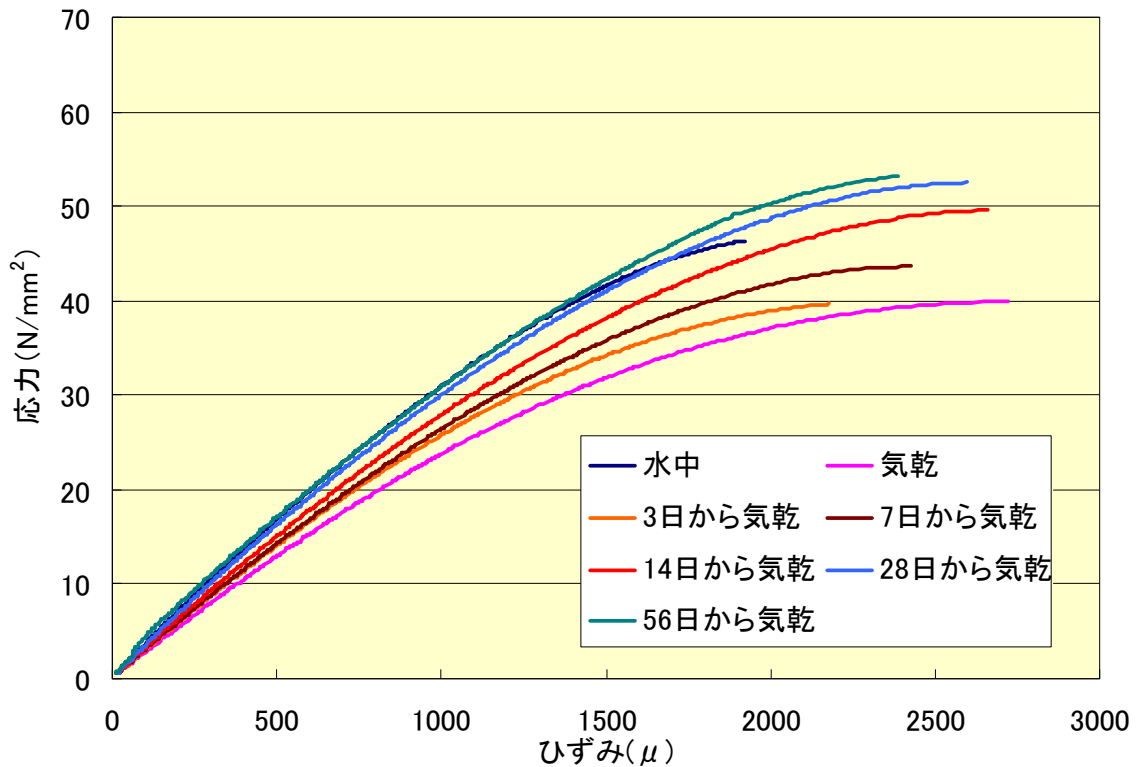


図-5.51 応力ひずみ曲線(普通コンクリート, W/C=50%)

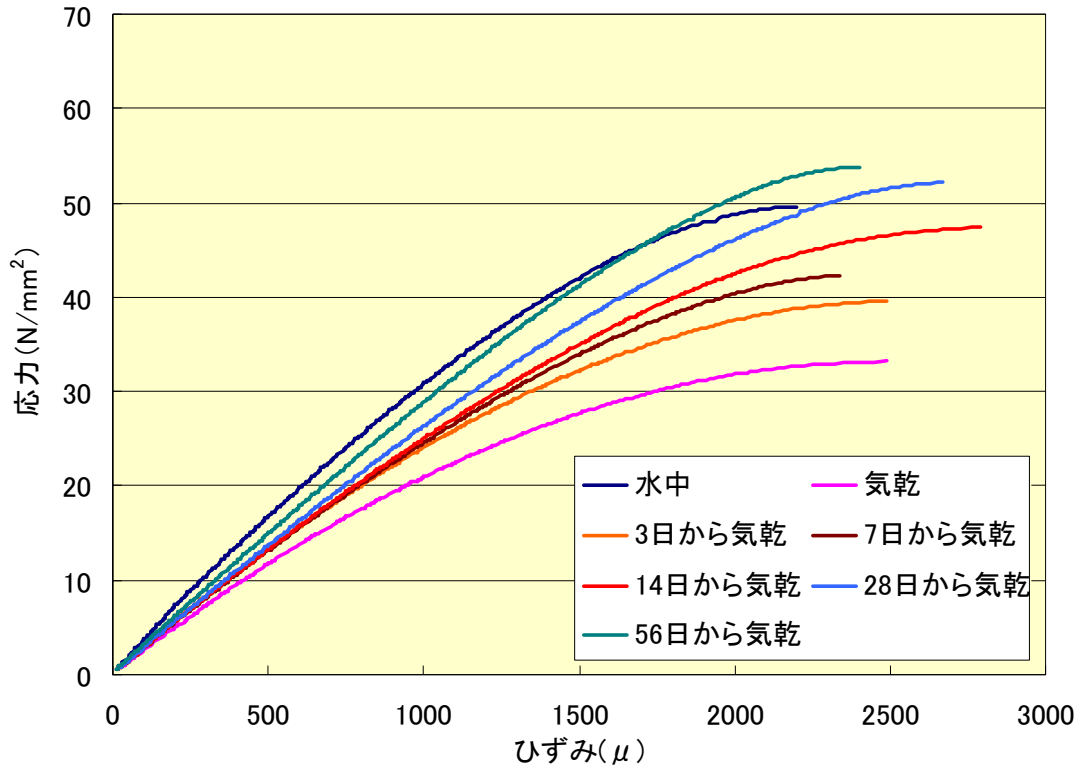


図-5.52 応力ひずみ曲線(粉末度 6000cm²/g, 置換率 30%, 水結合材比 50%)

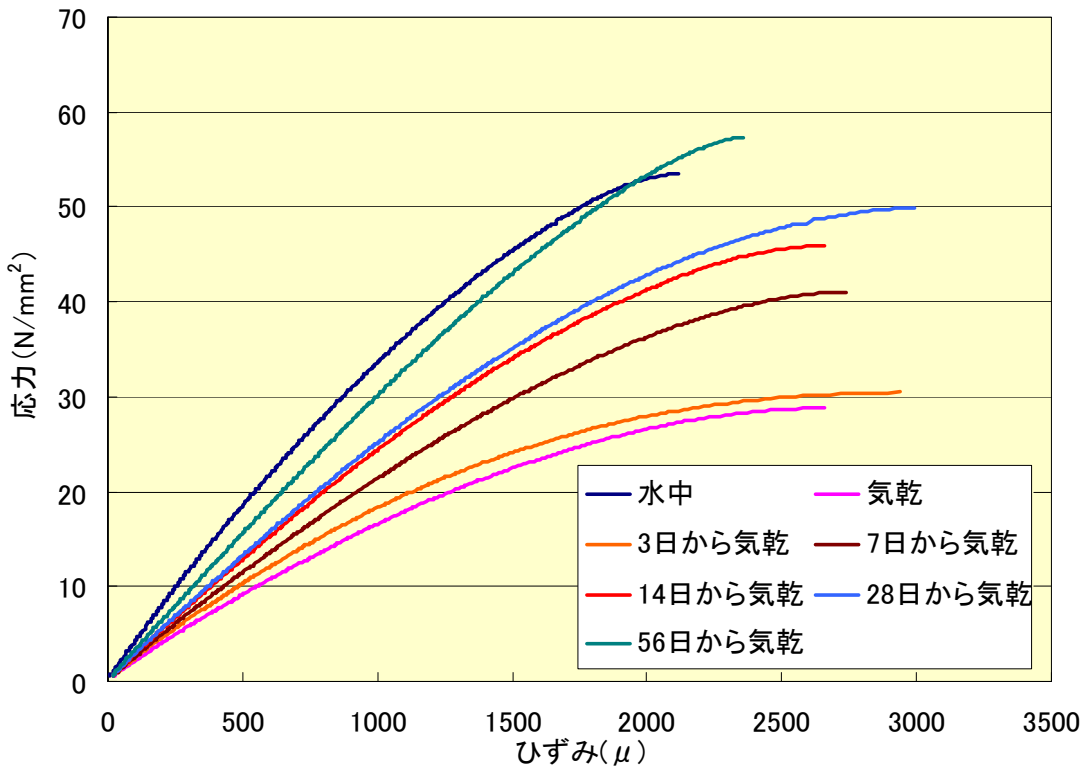


図-5.53 応力ひずみ曲線(粉末度 6000cm²/g, 置換率 50%, 水結合材比 50%)

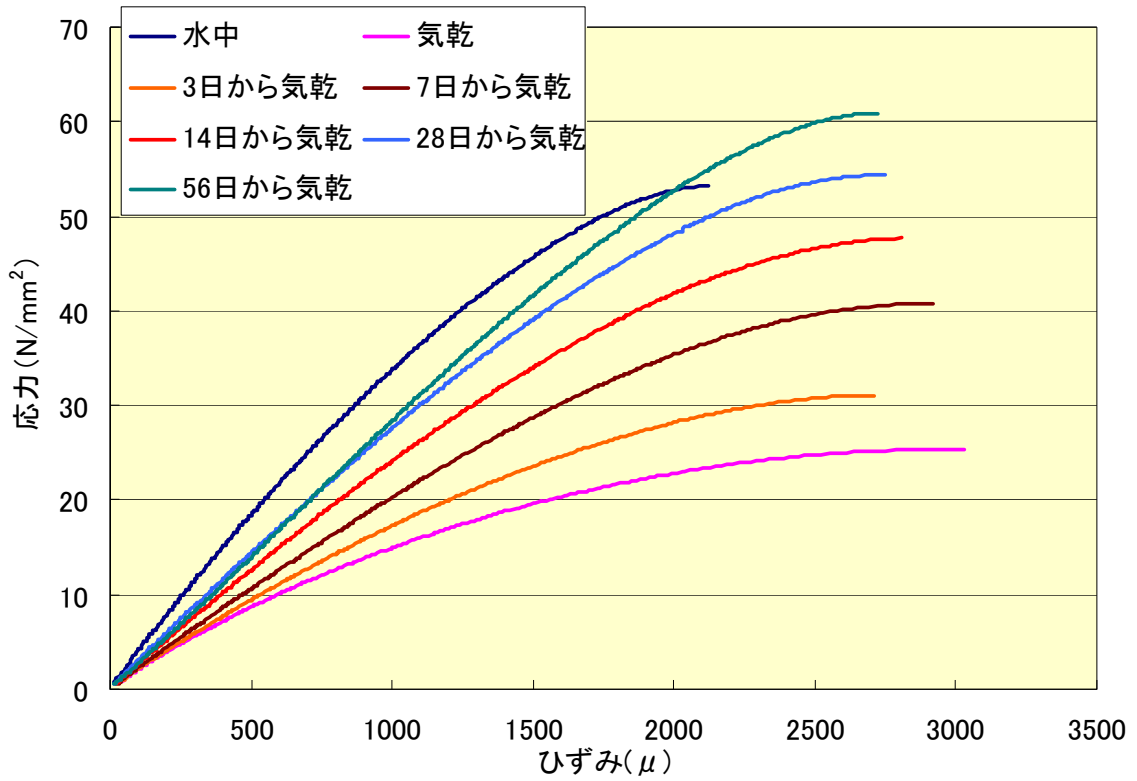


図-5.54 応力ひずみ曲線(粉末度 6000cm²/g, 置換率 70%, 水結合材比 50%)

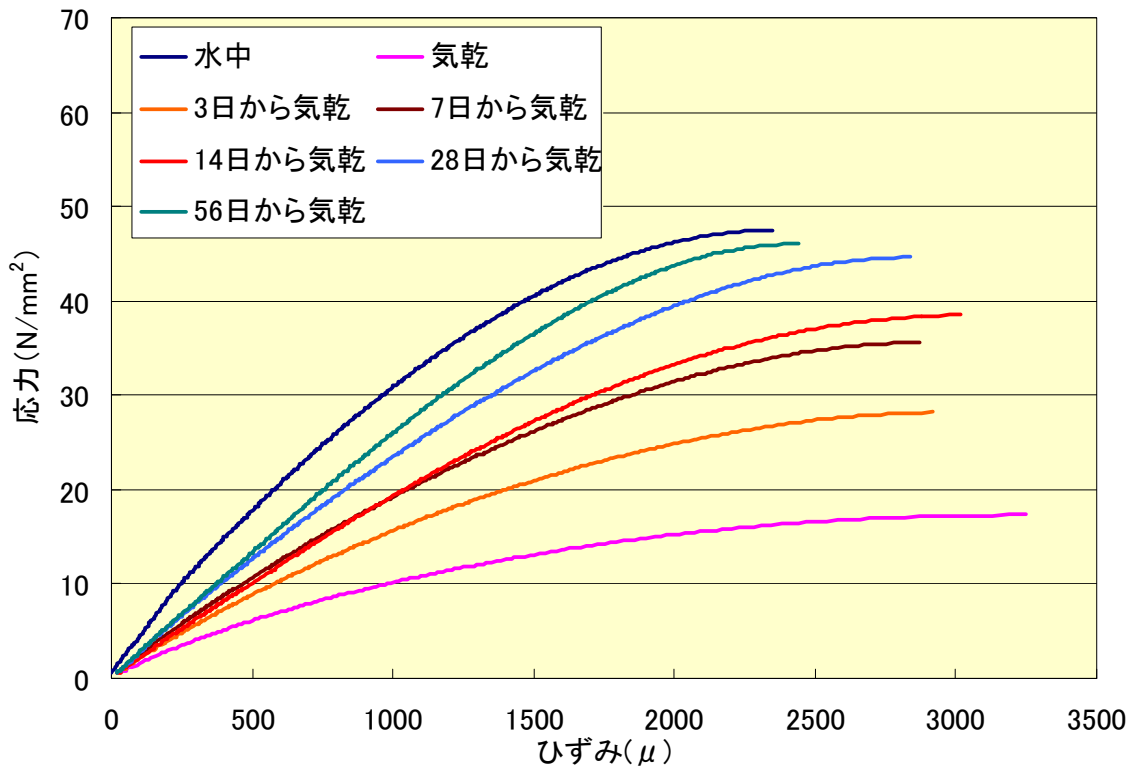


図-5.55 応力ひずみ曲線(粉末度 6000cm²/g, 置換率 80%, 水結合材比 50%)

5.5 単位容積質量の変化率と乾燥期間の関係

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの乾燥による質量の変化を、養生条件の違いから検討を行った。

(1) 置換率による検討

図-5.56~60 に乾燥開始後の質量変化率を、置換率を変化させた場合について養生方法別に示す。

図-5.56 から、気乾養生の場合、質量変化率は、置換率による影響をほとんど受けない結果となった。しかし、湿潤養生期間が変化した場合、高炉スラグ微粉末で置換したものは普通コンクリート（置換率 0%）より低下率は小さくなっている。

また、湿潤養生期間が短いものほど、初期の低下率は急激となり、乾燥の影響を受けやすくなっていると考えられる。これは、十分な水中養生を行わない場合、水和反応が十分に行われなため緻密にならず、水分が乾燥しやすい状態となっていることが原因であると考えられる。また、図-5.60 から、長期間水中養生したものは、質量の低下率は安定している。

(2) 粉末度による検討

図-5.61~65 に乾燥開始後の質量変化率を、粉末度を変化させた場合について養生方法別に示す。

水中養生期間が長くなるにつれ、粉末度の明確な差が見られるようになった。また気乾養生や 3 日から気乾養生など、水中養生期間が短い場合でも、乾燥期間が経過すると低下率が緩やかとなり、粉末度による違いが見てとれる。

いずれの場合においても、乾燥期間が経過すると粉末度 6000, 8000, 4000 cm^2/g の順に質量の低下率は小さくなった。これは、圧縮強度やヤング係数の傾向と同様であった。関係として、粉末度が高くなるほど水和反応が生じやすく、より緻密化するものと思われ、質量の低下率は小さくなる。今回の実験では粉末度 6000 cm^2/g の練りあがり温度が高かったことが影響し、粉末度 6000 cm^2/g の方が水和反応は大きく、より緻密になったものと考えられる。質量低下率が小さいものほど、水分が抜けていかないため潜在水硬性を発揮しやすくなり、強度、ヤング係数に影響したものと推察される。

(3) まとめ

質量の低下率から高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、普通コンクリートと比べて初期強度が小さい。しかし、水中養生期間が長くなるほど普通コンクリートとの強度の差は縮まり、長期材齢では普通コンクリートと同等以上の強度を発揮する。この理由の一つとして、水和反応が考えられる。高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、普通コンクリートより長期にわたり水和反応が起こり、緻密になることで変形しにくく、圧縮強度、ヤング係数共に高くなる。

また、どの種類のコンクリートの場合も、長期間水中養生すれば質量の低下率は小さくなる。

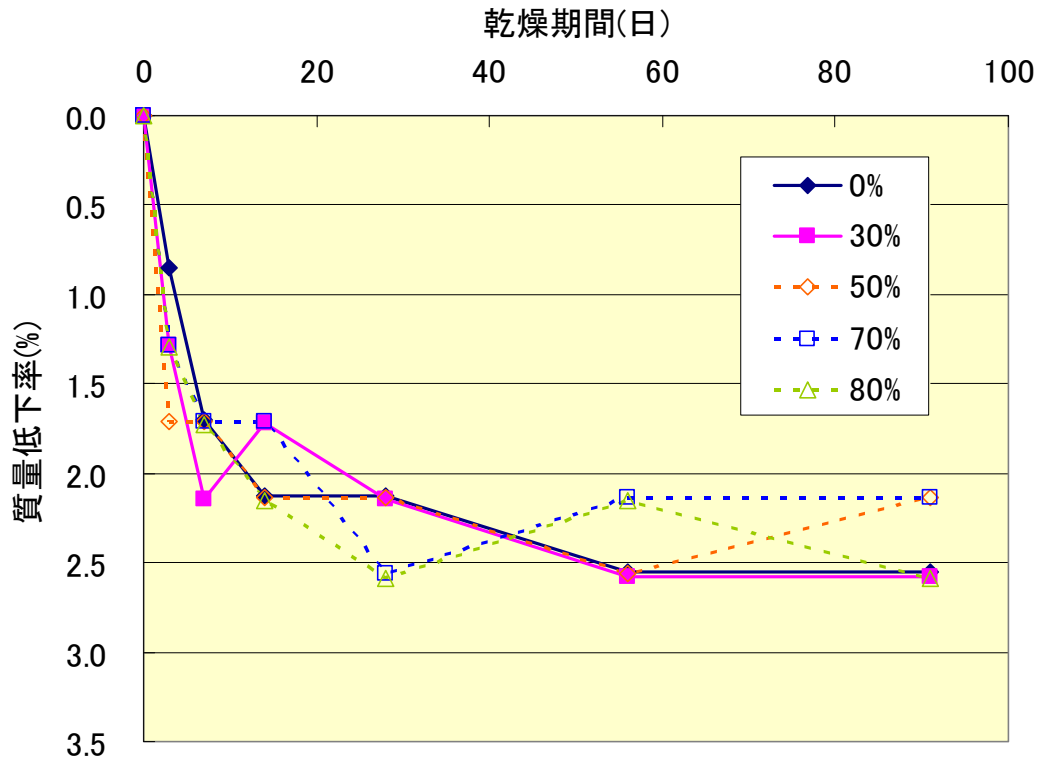


図-5.56 乾燥期間と質量変化率の関係（気乾養生）

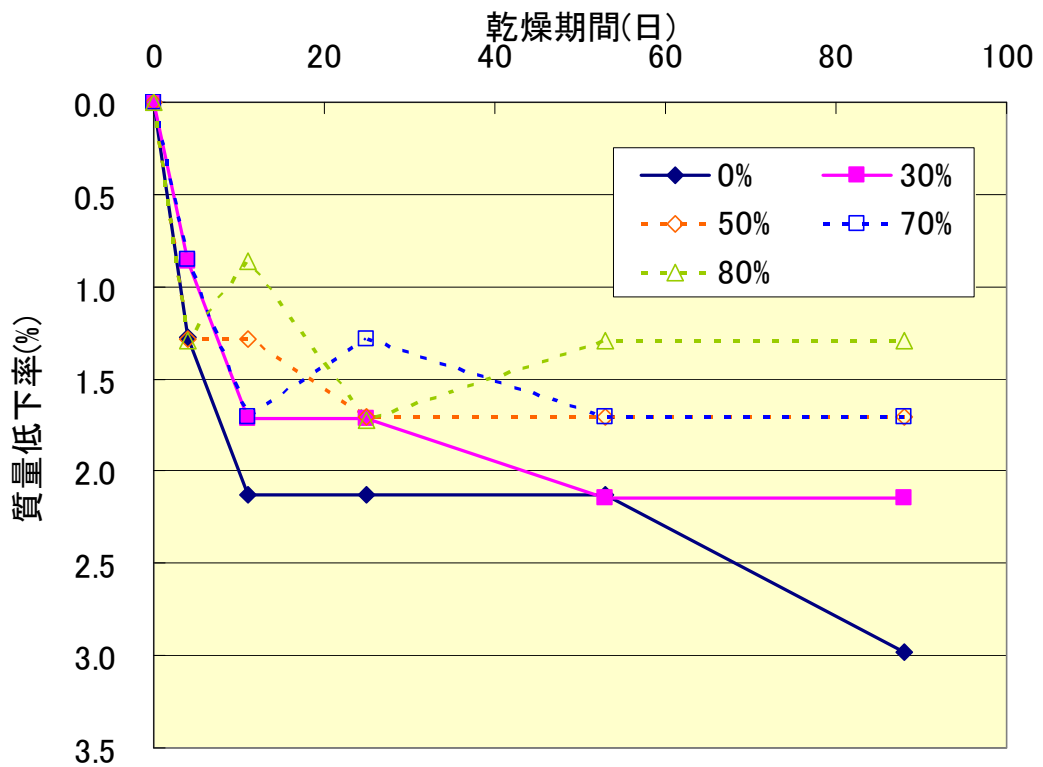


図-5.57 乾燥期間と質量変化率の関係（3日から気乾）

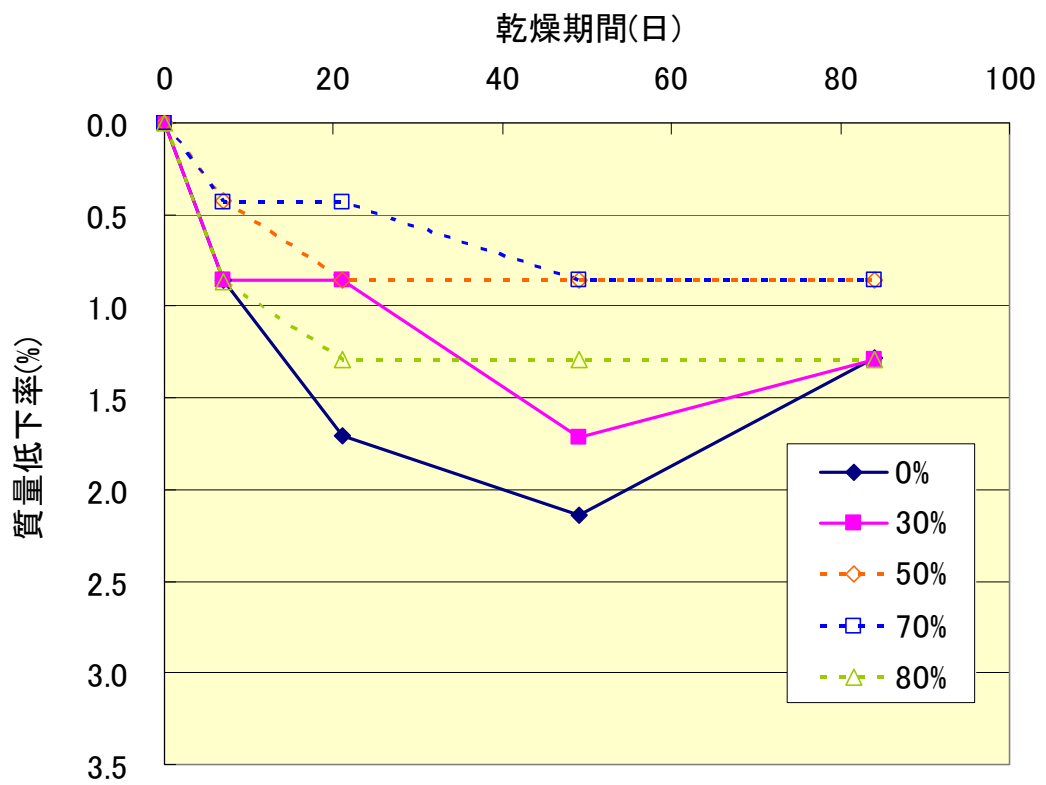


図-5.58 乾燥期間と質量変化率の関係 (7日から気乾)

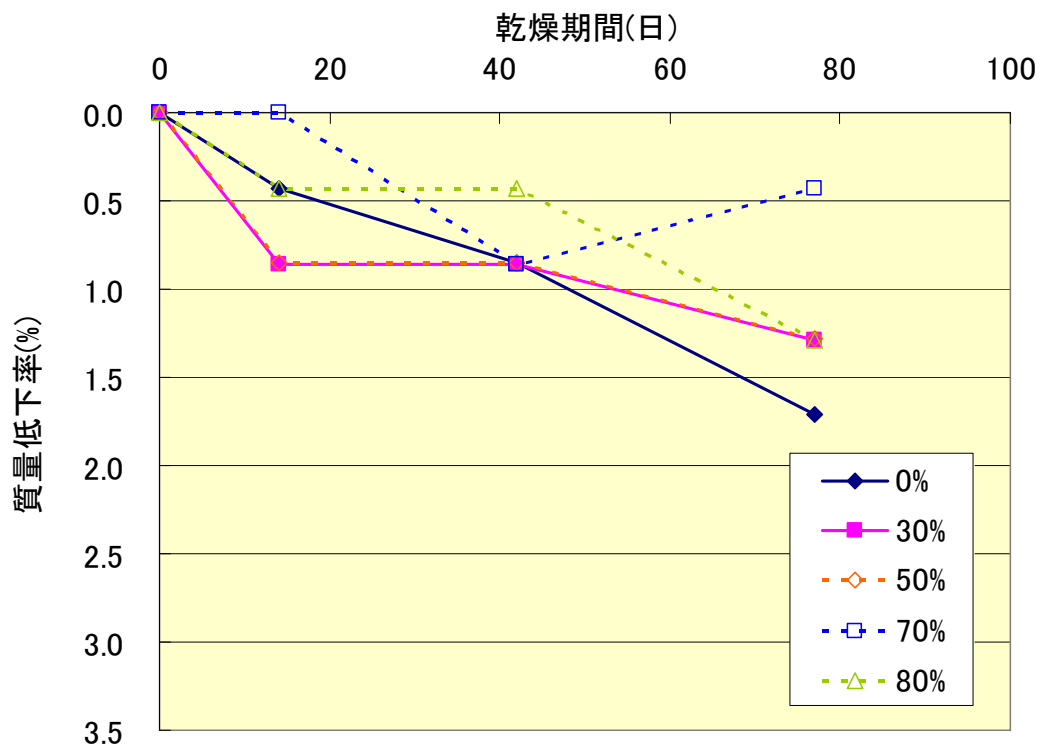


図-5.59 乾燥期間と質量変化率の関係 (14日から気乾)

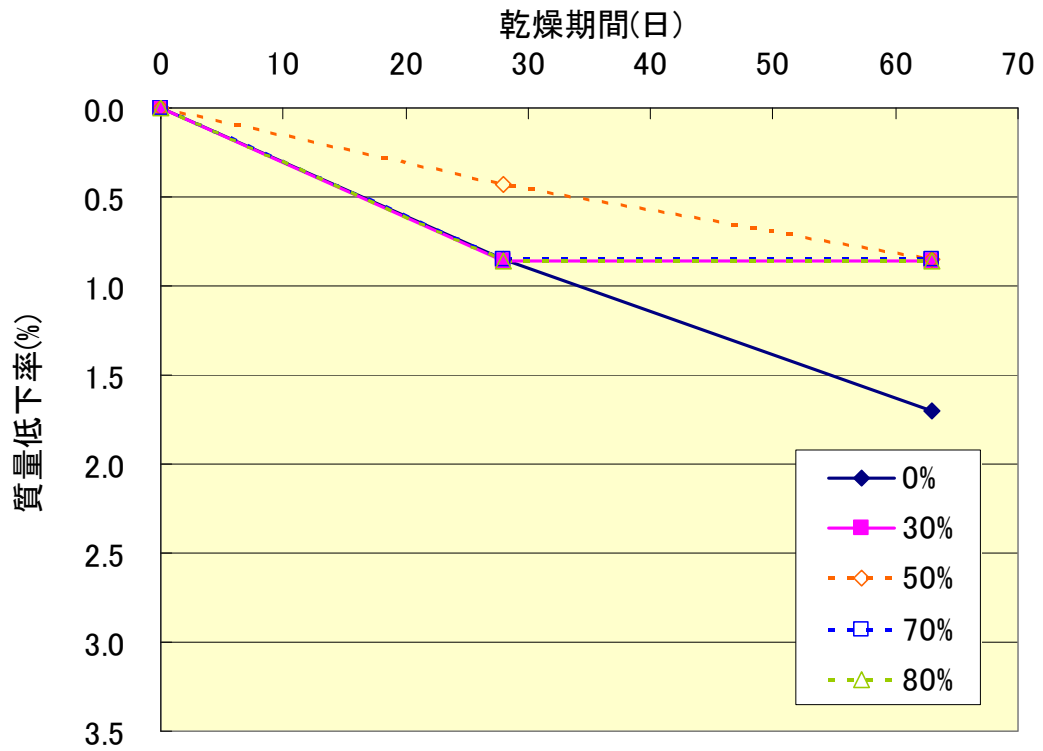


図-5.60 乾燥期間と質量変化率の関係 (28日から気乾)

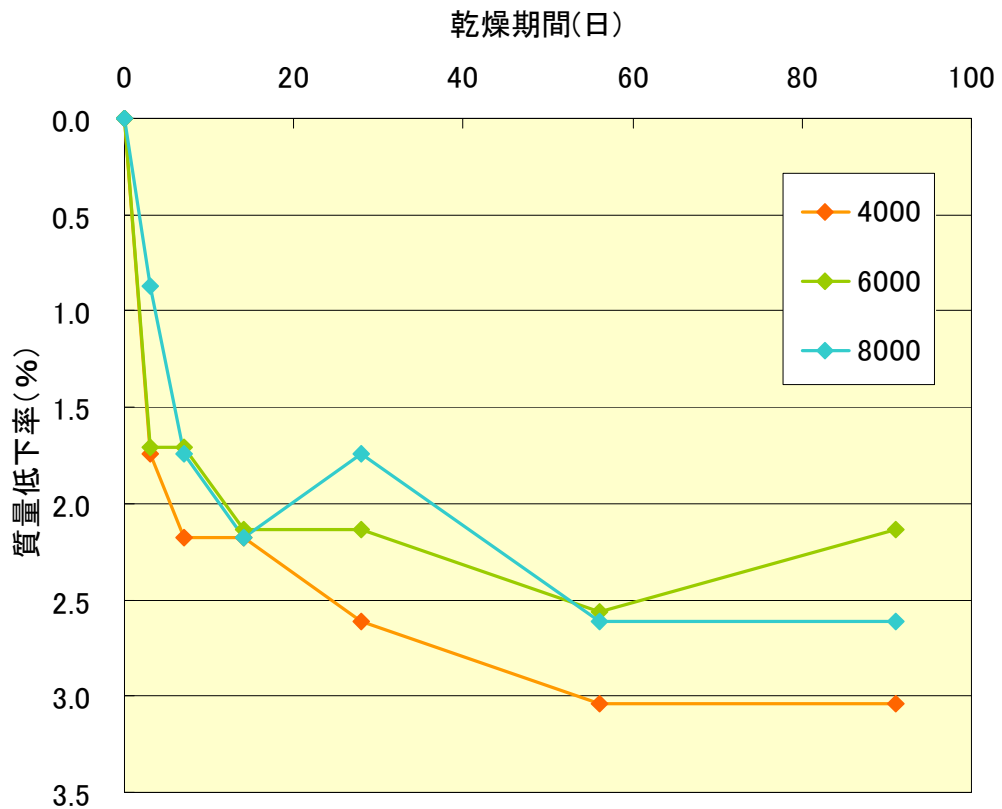


図-5.61 乾燥期間と質量変化率の関係 (気乾養生)

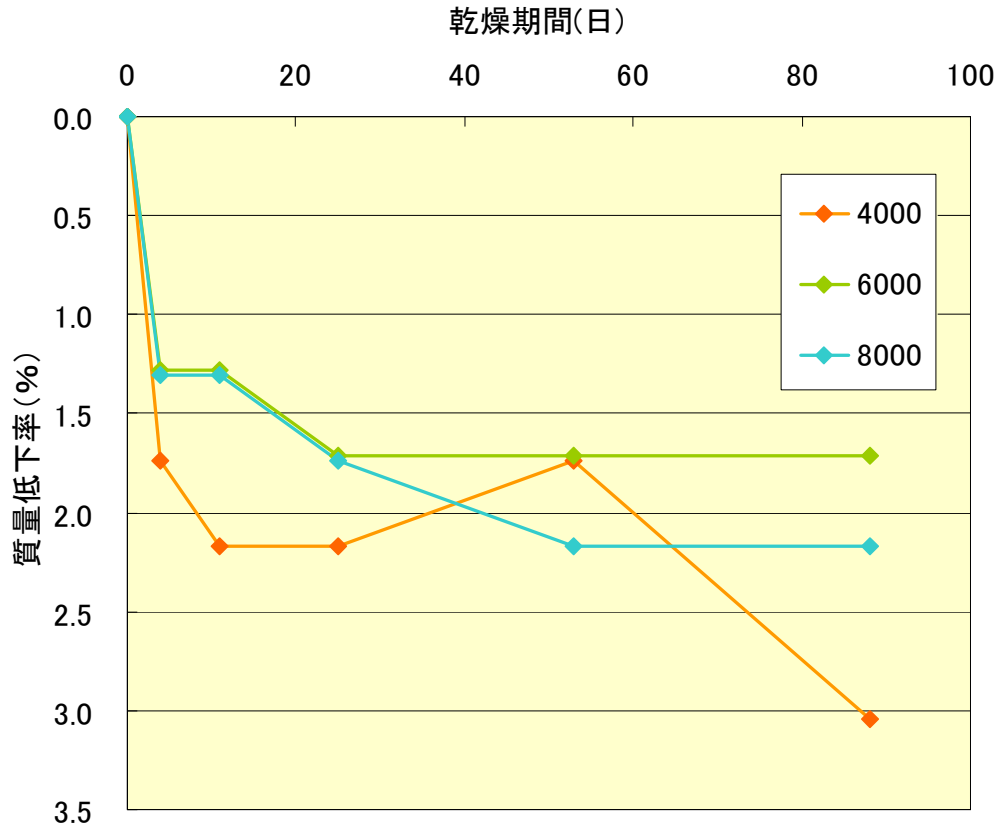


図-5.62 乾燥期間と質量変化率の関係 (3日から気乾)

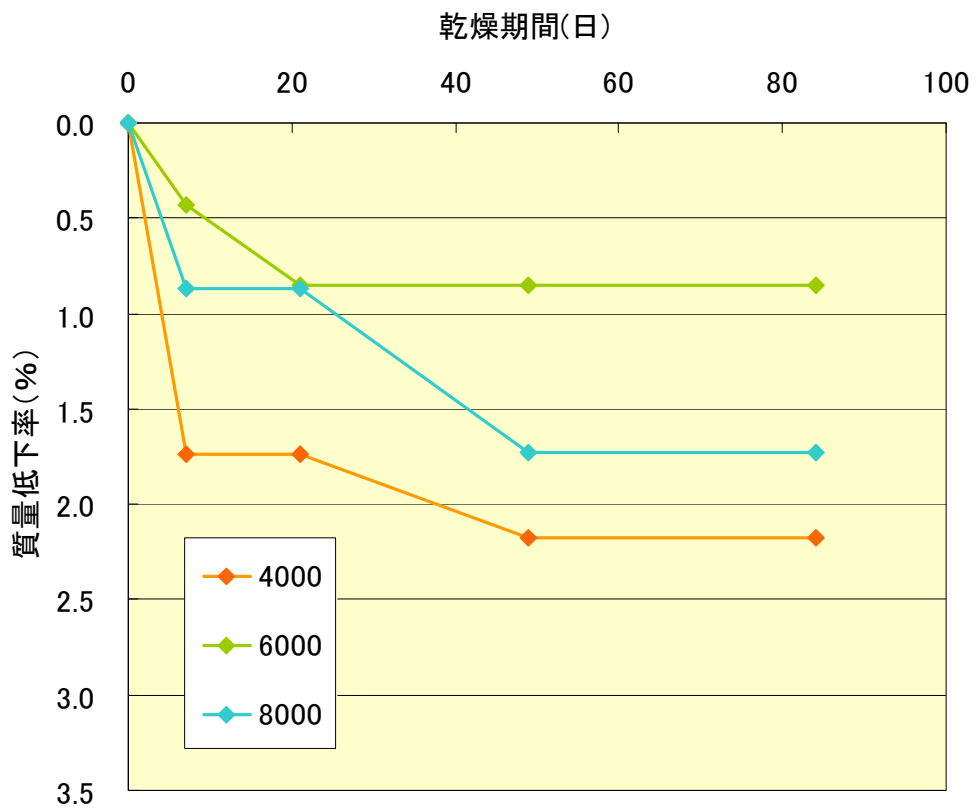


図-5.63 乾燥期間と質量変化率の関係 (7日から気乾)

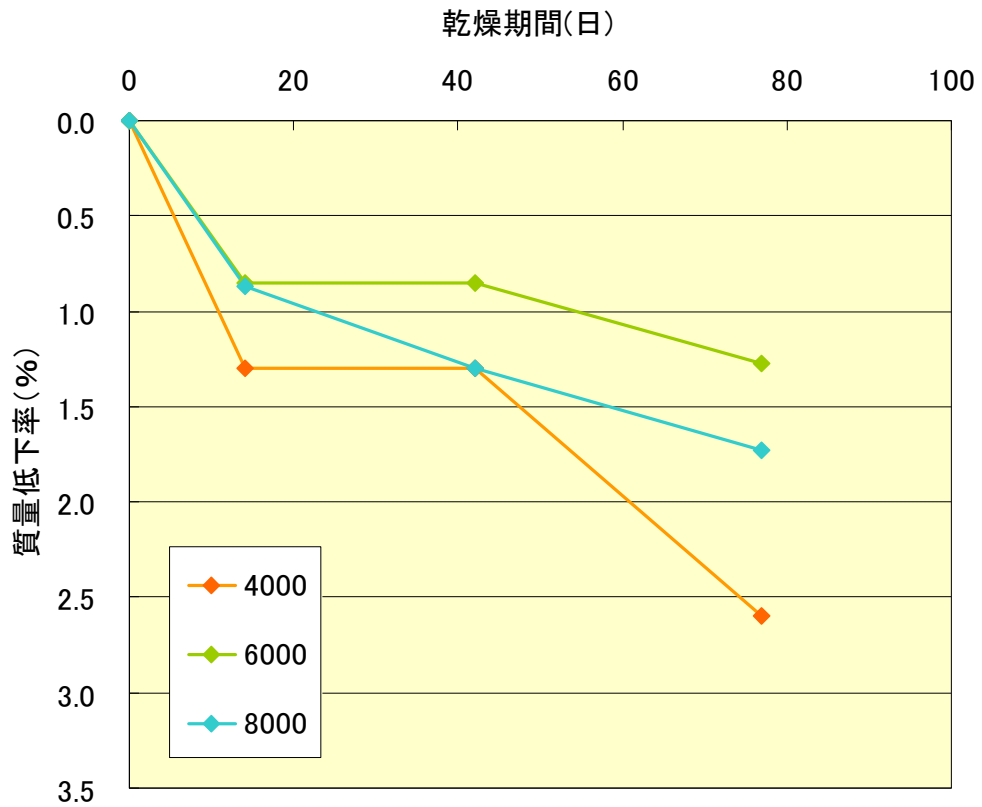


図-5.64 乾燥期間と質量変化率の関係 (14日から気乾)

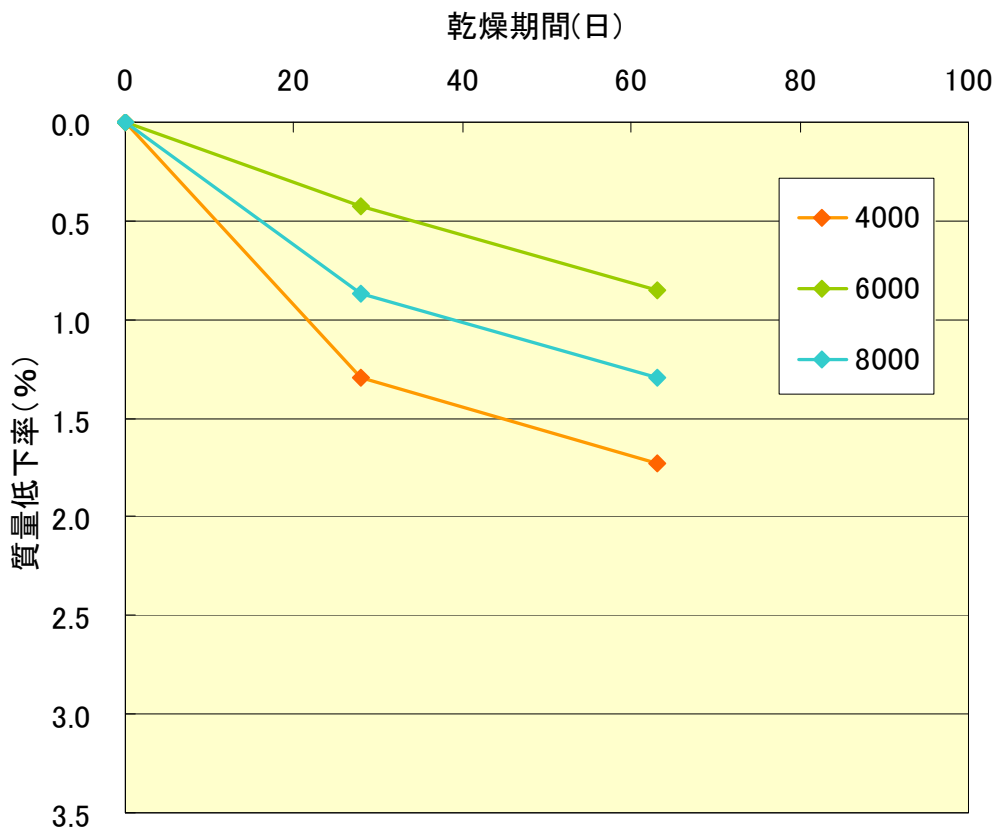


図-5.65 乾燥期間と質量変化率の関係 (28日から気乾)

第6章 引張特性及び断熱温度上昇特性

6.1 引張強度試験

材齢と割裂引張強度の関係を図-6.1に、材齢と直接引張強度の関係を図-6.2に、材齢と引張ヤング係数の関係を図-6.3にそれぞれに示す。また、直接引張強度と割裂引張強度の関係を図-6.4に、引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の関係を図-6.5にそれぞれ示す。

図-6.1 および、図-6.2、図-6.3 から、直接引張強度および引張ヤング係数に若干のばらつきが見られるものの、割裂引張強度、直接引張強度、引張ヤング係数のいずれも材齢の経過とともに強度が増加しており、水結合剤比が小さくなるに従い大きくなる傾向を示している。

また、図-6.4 から、直接引張強度と割裂引張強度を比較すると、割裂引張強度の方が大きい値を示す結果となった。割裂引張強度試験は、試験法として容易であるものの、セメントと骨材と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、ひび割れを生じる断面が限定されてしまうこと、また供試体破断時の強度が最小であるとは限らないことから、実際の引張強度よりも大きく評価してしまう可能性があり、強度が最小に近い位置で破断する直接引張強度の方が、割裂引張強度よりも小さい値となったと考えられる。

また、図-6.5 から、圧縮ヤング係数よりも引張ヤング係数の方が若干大きくなっているものの、ほぼ同等の値となる結果となった。

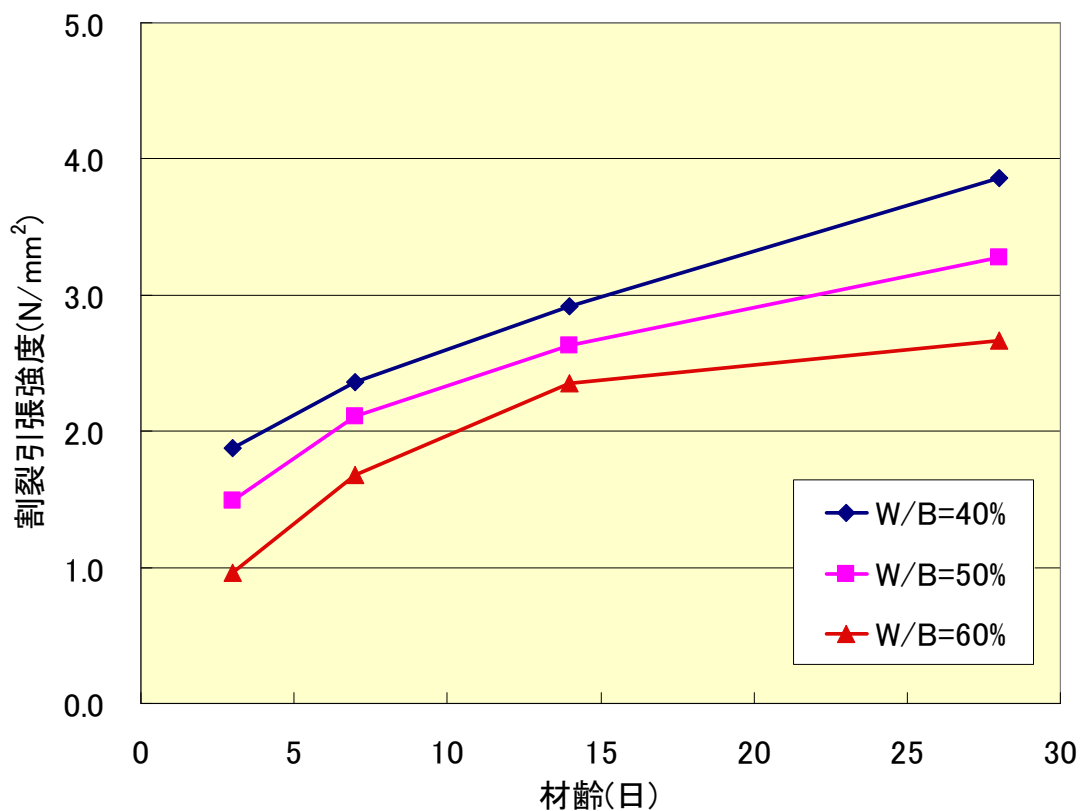


図-6.1 材齢と割裂引張強度の関係

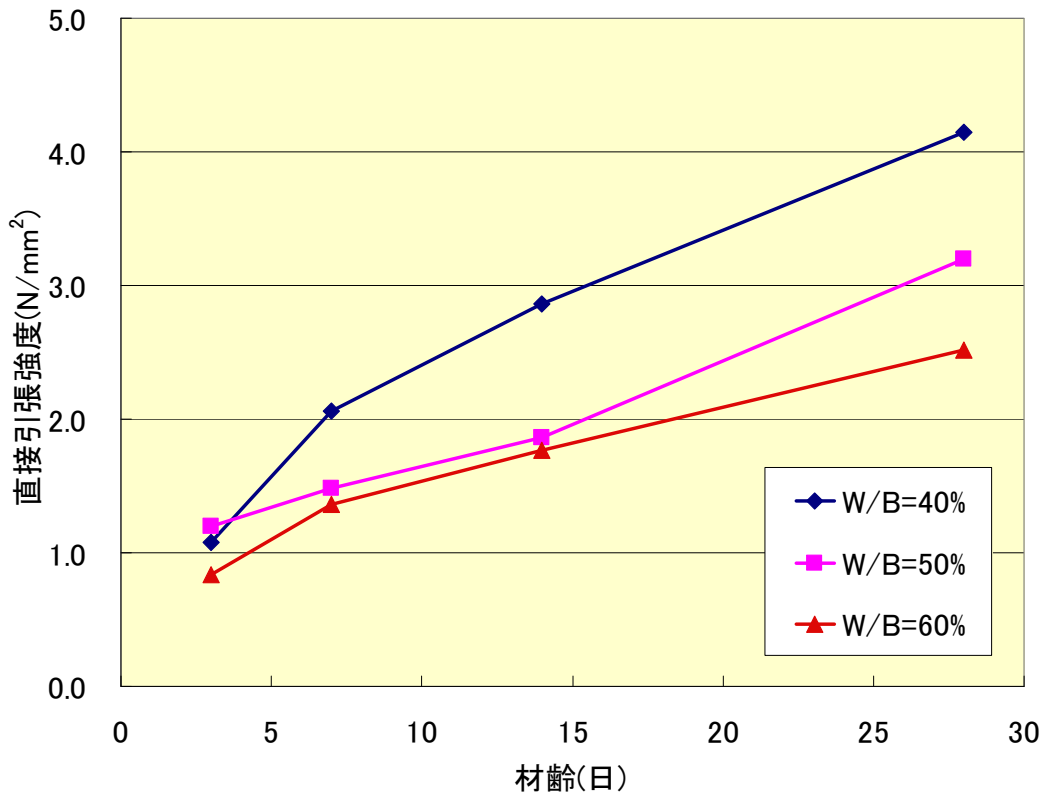


図-6.2 材齢と直接引張強度の関係

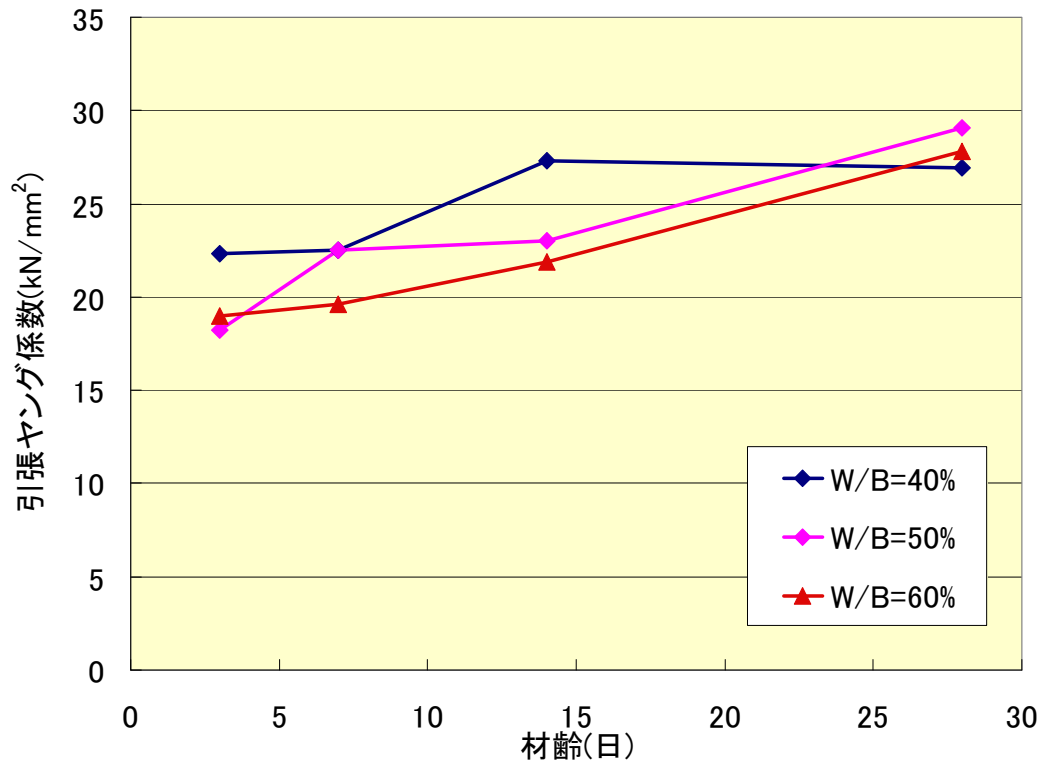


図-6.3 材齢と引張ヤング係数の関係

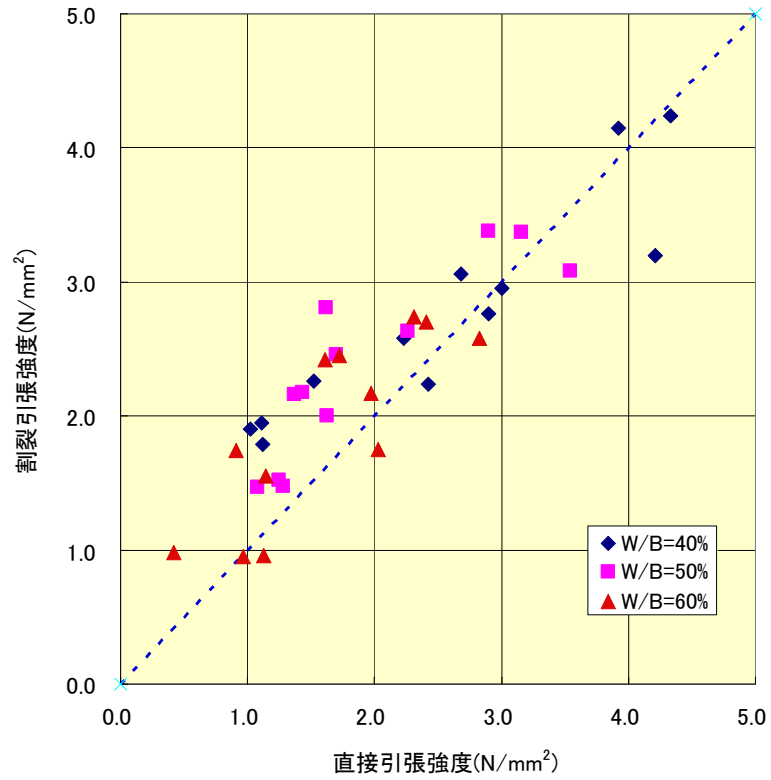


図-6.4 直接引張強度と割裂引張強度の関係

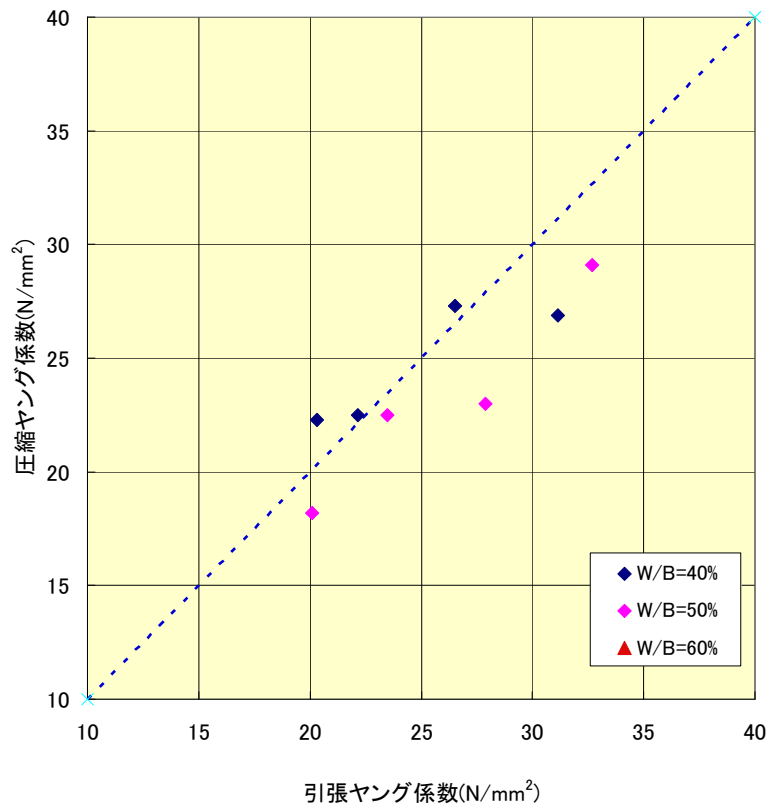


図-6.5 引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の関係

6.2 断熱温度上昇試験

(1) 置換率による比較

断熱温度上昇試験によって得られた温度履歴を、粉末度 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ を用いたものを図-6.6 に、粉末度 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ を用いたものを図-6.7 に置換率別にそれぞれ示す。水結合材比は 50% で一定である。

図-6.6 から、温度上昇時では、置換率 70%、80%、50%、30% の順に高い温度となっており、最高温度は、置換率 80%、70%、30%、50% の順に高い温度となっている。既往の研究⁶⁾では、置換率が高くなるほど断熱温度上昇量が抑えられる傾向が見られていることや、置換率を 50% 以上とした場合に温度上昇速度および終局断熱温度上昇量が著しく低くなることが報告されている。本研究では、置換率 70% および 80% の最高温度が、置換率 50% に比べ著しく低いことから、既往の研究で言われているような結果が得られたと考えられる。また、置換率 30% および 50% については、無混入のものとはほぼ同等の最高温度となった。

(2) 粉末度による比較

断熱温度上昇試験によって得られた温度履歴を、粉末度別に図-6.8 に示す。水結合材比は 50%、置換率は 50% で一定である。

図-6.8 から、粉末度 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 、 $6000\text{m}^2/\text{g}$ 、 $8000\text{m}^2/\text{g}$ の順に、温度上昇時および最高温度が高くなるとなる結果が得られた。最高温度については、 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ は、無混入とほぼ同等となり、 $6000\text{m}^2/\text{g}$ 、 $8000\text{m}^2/\text{g}$ については、無混入よりも高くなった。

(3) 水結合材比による比較

断熱温度上昇試験によって得られた温度履歴を、水結合材比別に図-6.9 に示す。粉末度は $6000\text{cm}^2/\text{g}$ 、置換率は 50% で一定である。

図 6-9 から、水結合材比 60%、50%、40% の順に温度上昇時および最高温度が高くなるとなる結果が得られた。

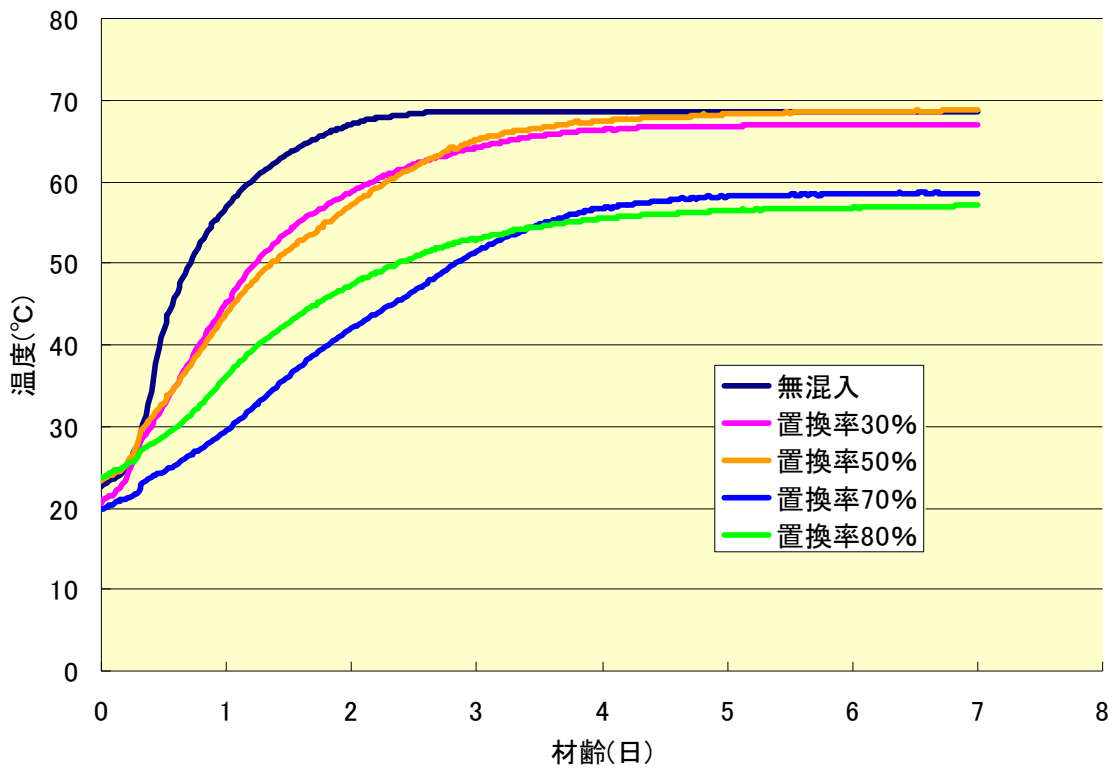


圖-6.6 溫度履歷(粉末度 4000 cm²/g, 水結合材比 50%)

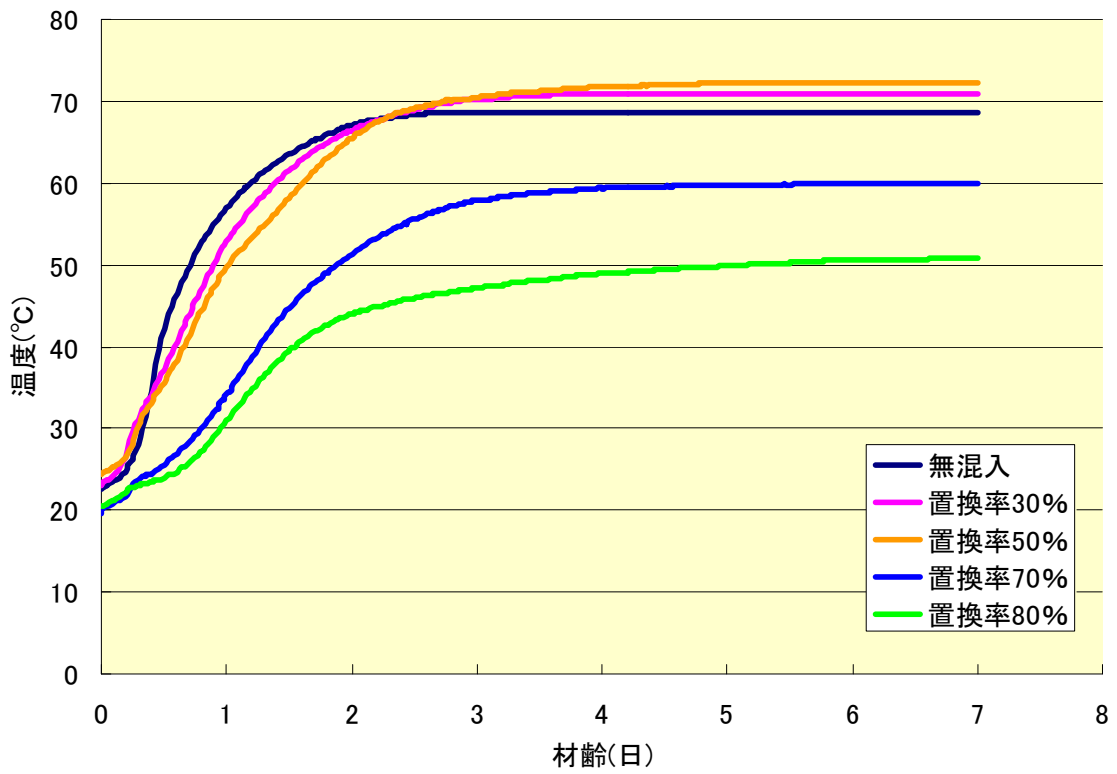


圖-6.7 溫度履歷(粉末度 6000 cm²/g, 水結合材比 50%)

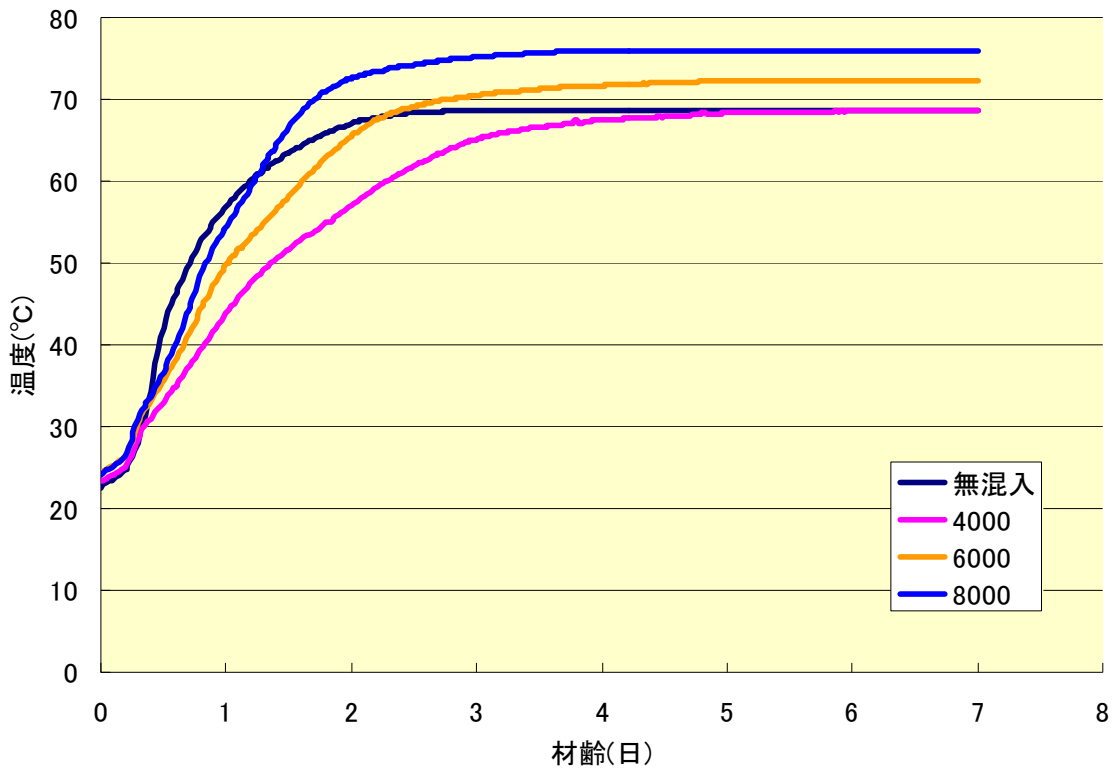


図-6.8 温度履歴(置換率 50%, 水結合材比 50%)

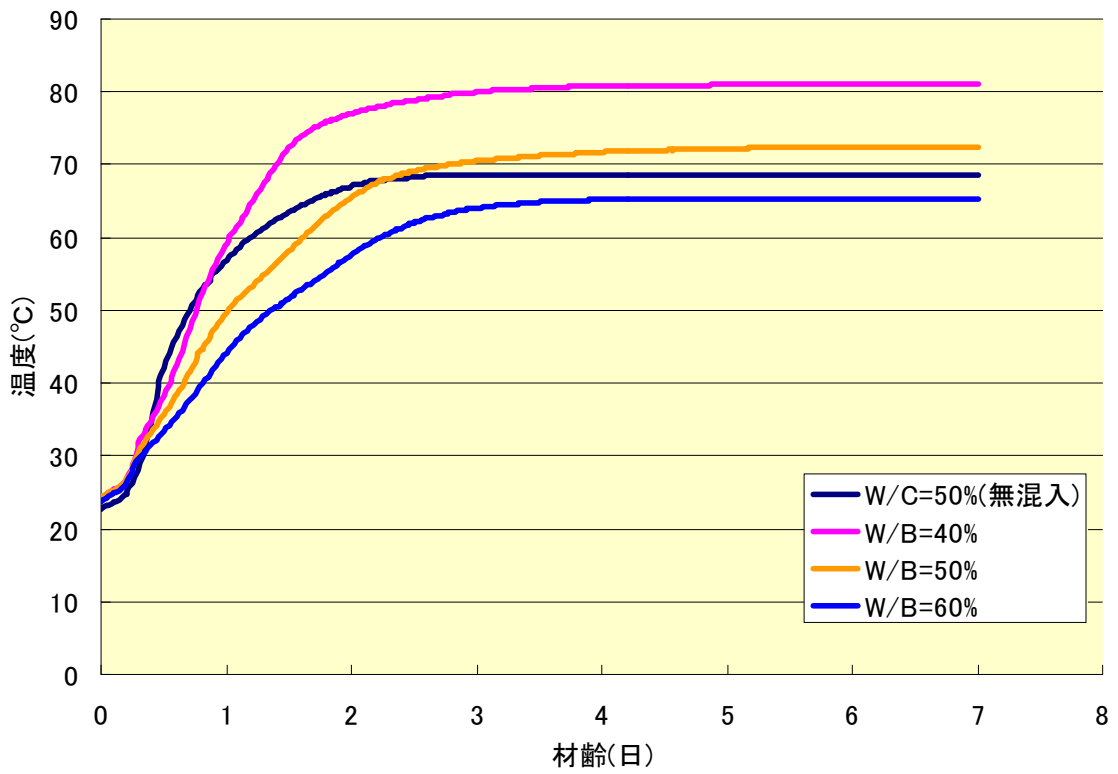


図-6.9 温度履歴(粉末度 6000 cm²/g, 置換率 50%)

6.3 同定解析

(1) 断熱温度上昇式における各係数

6.2 における試験結果をもとに、同定解析を行った。得られた各係数を表-6.1 に示す。

(2) 置換率による比較

置換率と終局断熱温度上昇および、上昇速度に関する定数の関係のうち、粉末度 4000cm²/g を用いたものを図-6.10 に、粉末度 6000cm²/g を用いたものを図-6.11 にそれぞれ示す。

図-6.10, 11 から、置換率の増加に伴い終局断熱温度上昇および、上昇速度に関する定数ともに減少する傾向をみせている。粉末度 4000cm²/g において、上昇速度に関する定数が置換率 70% よりも 80% の方が高い値となっているが、置換率 80% の打込み温度が 23.7℃ であるのに対し、置換率 70% の打込み温度が 19.9 であり、およそ 4℃ の差があることが原因であると考えられる。同様に、粉末度 6000cm²/g においても、同様の傾向がみられるがこちらも打込み温度による影響であると考えられる。

(3) 粉末度による比較

粉末度と終局断熱温度上昇および、上昇速度に関する定数の関係を図-6.12 に示す。

図-6.12 から、粉末度の増加に伴い、終局断熱温度上昇量も増加する結果となった。上昇速度に関する定数については、粉末度による明確な差はみられなかった。

(4) 単位結合材量による比較

単位結合材量と終局断熱温度上昇および、上昇速度に関する定数の関係を図-6.13 に示す。

図-6.13 から、単位結合材量の増加に伴い終局断熱温度上昇および、上昇速度に関する定数ともに増加する傾向をみせている。

表-6.1 断熱温度上昇式における各係数

粉末度	置換率	水結合材比	K	α	β	t0
N		50	46.3	1.65	1.00	0.20
4000	30	50	47.0	0.80	1.10	0.10
4000	50	50	47.0	0.70	1.03	0.18
4000	70	50	40.0	0.40	1.30	0.20
4000	80	50	34.6	0.60	1.05	0.17
6000	30	50	48.0	1.05	1.12	0.10
6000	50	50	48.0	0.90	1.23	0.13
6000	70	50	40.5	0.45	1.75	0.00
6000	80	50	30.0	0.50	1.60	0.02
6000	50	40	56.0	1.10	1.50	0.11
6000	50	60	43.0	0.80	1.20	0.14
8000	50	50	52.0	0.85	1.60	0.02

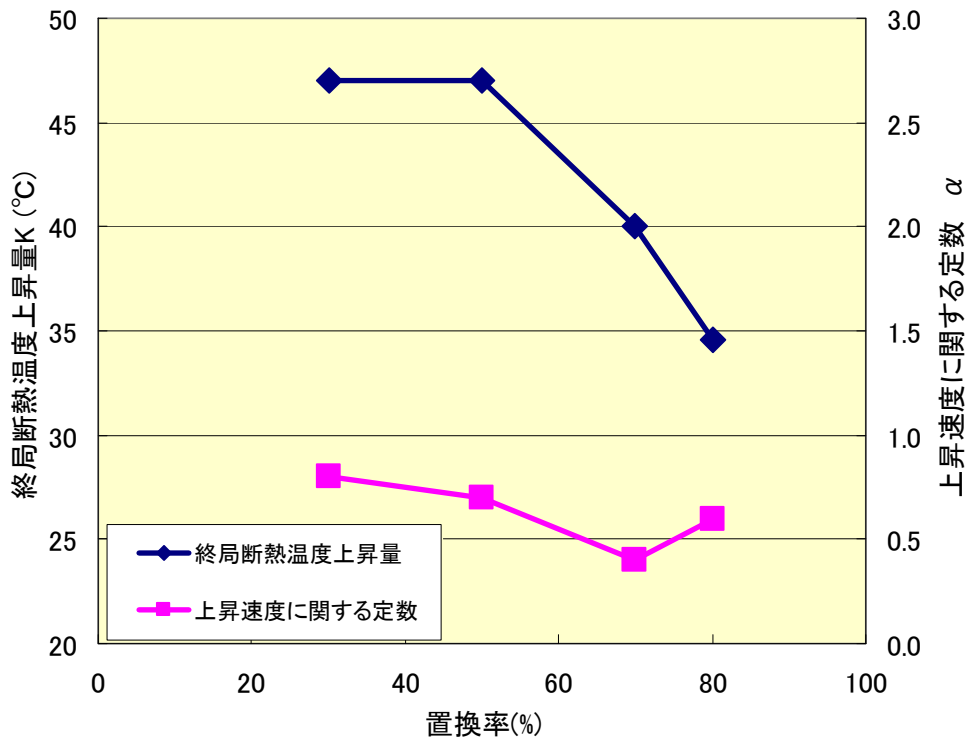


図-6.10 置換率と終局断熱温度上昇および上昇速度に関する定数の関係
(粉末度 4000cm²/g)

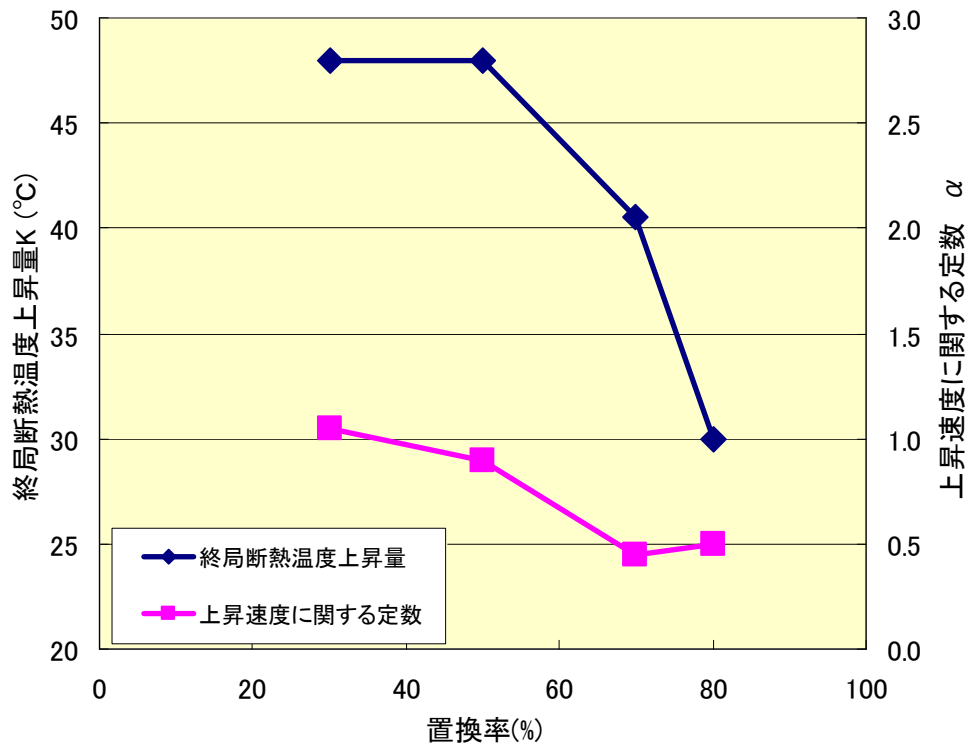


図-6.11 置換率と終局断熱温度上昇および上昇速度に関する定数の関係
(粉末度 6000cm²/g)

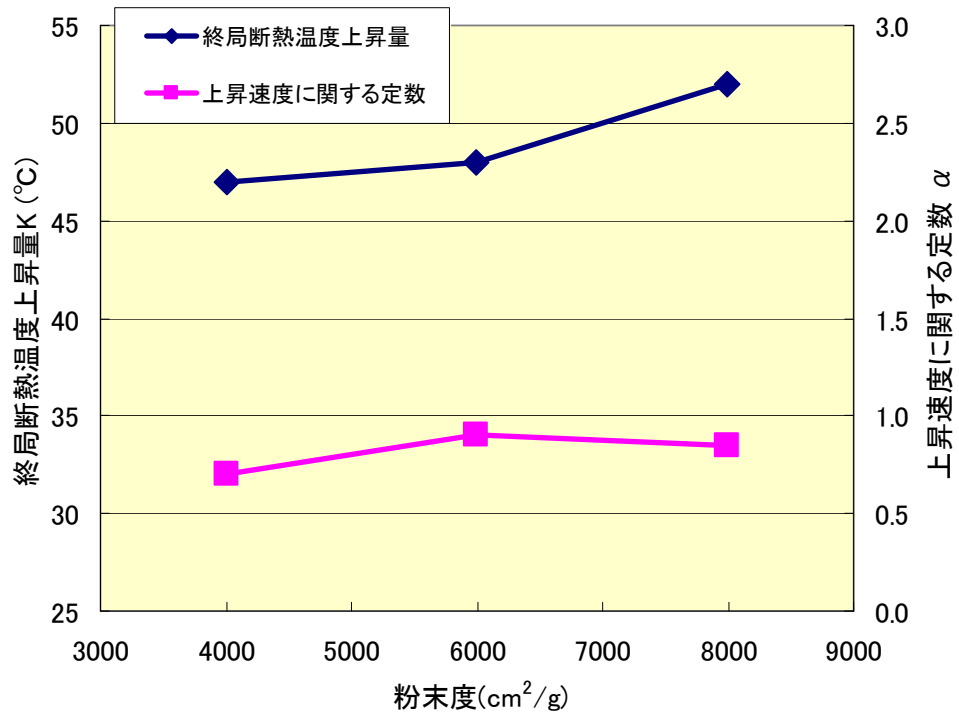


図-6.12 粉末度と終局断熱温度上昇および上昇速度に関する定数の関係

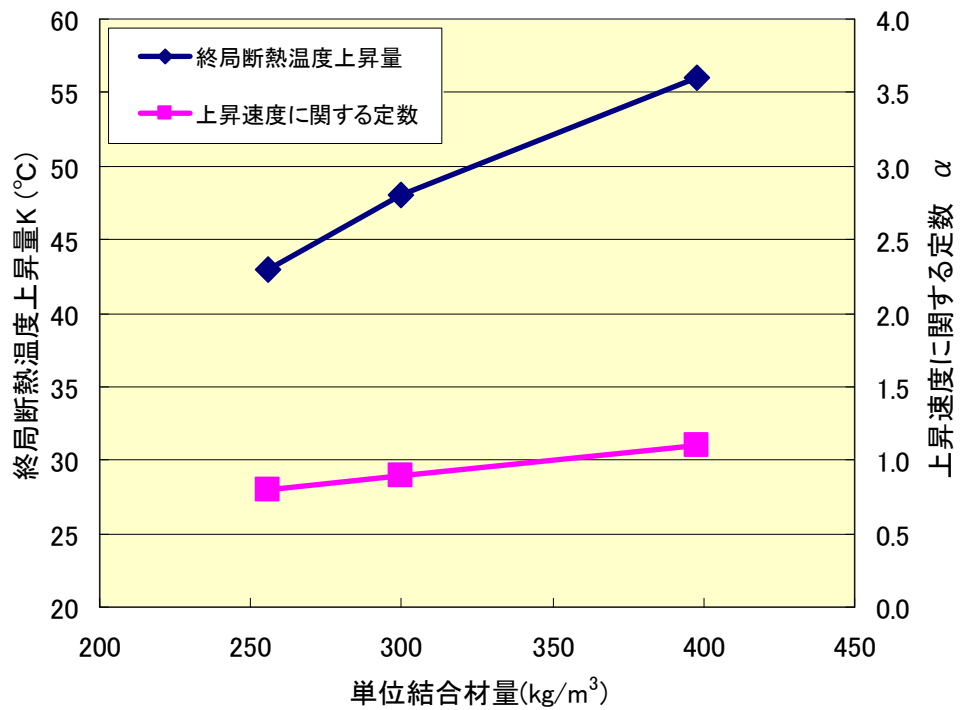


図-6.13 単位結合材量と終局断熱温度上昇および上昇速度に関する定数の関係

第7章 解析方法

7.1 解析の概要

本研究では、湿気移動を考慮した温度応力解析を行った。温度応力解析に関しては3次元有限要素法を用いて行った。解析モデルは壁状構造物とした。解析方法は、温度解析を行った後、湿気移動解析を行った。湿気移動解析結果から、コンクリートが乾燥している範囲を定め、その範囲については、気中養生した強度特性を与え、乾燥の影響を受けていないと判断した範囲については、湿潤養生した強度特性を与えることとした。

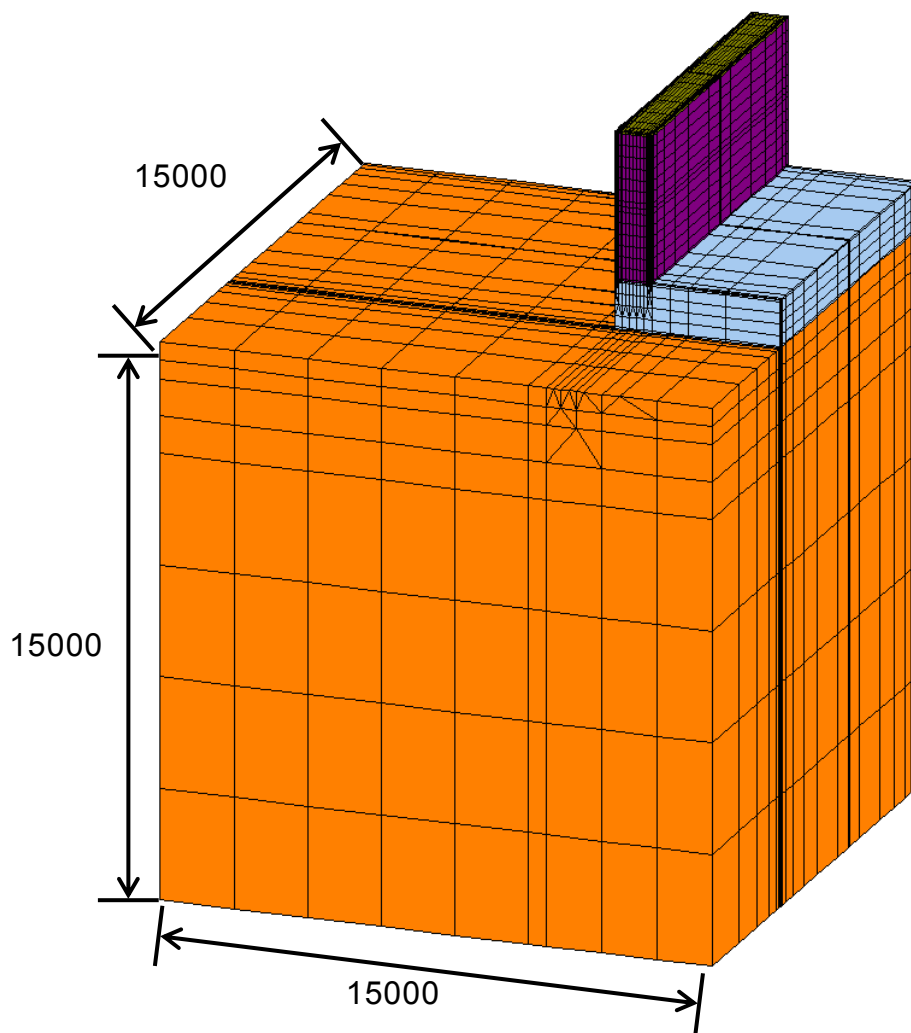
7.2 検討ケース

使用コンクリートは、第5章の実験で用いた普通コンクリートおよび、高炉スラグ混入コンクリートとした。高炉スラグ混入コンクリートは、置換率および水結合材比を50%で固定し、粉末度を4000cm²/g、6000cm²/gの2種類とした。構造物に与える物性値については乾燥収縮の考慮の有無、表面部の強度低下の考慮の有無の3水準とした。検討ケースを表-7.1に示す。型枠存置期間は、3、7、14日とした。解析期間は対象部材(壁部)打込み後40日間とした。メッシュレイアウトを図-7.1及び図-7.2に示す。

また、脱型後、コンクリートの表面部から水分の移動が起こらないように養生シートを使用した場合についても検討を行った。

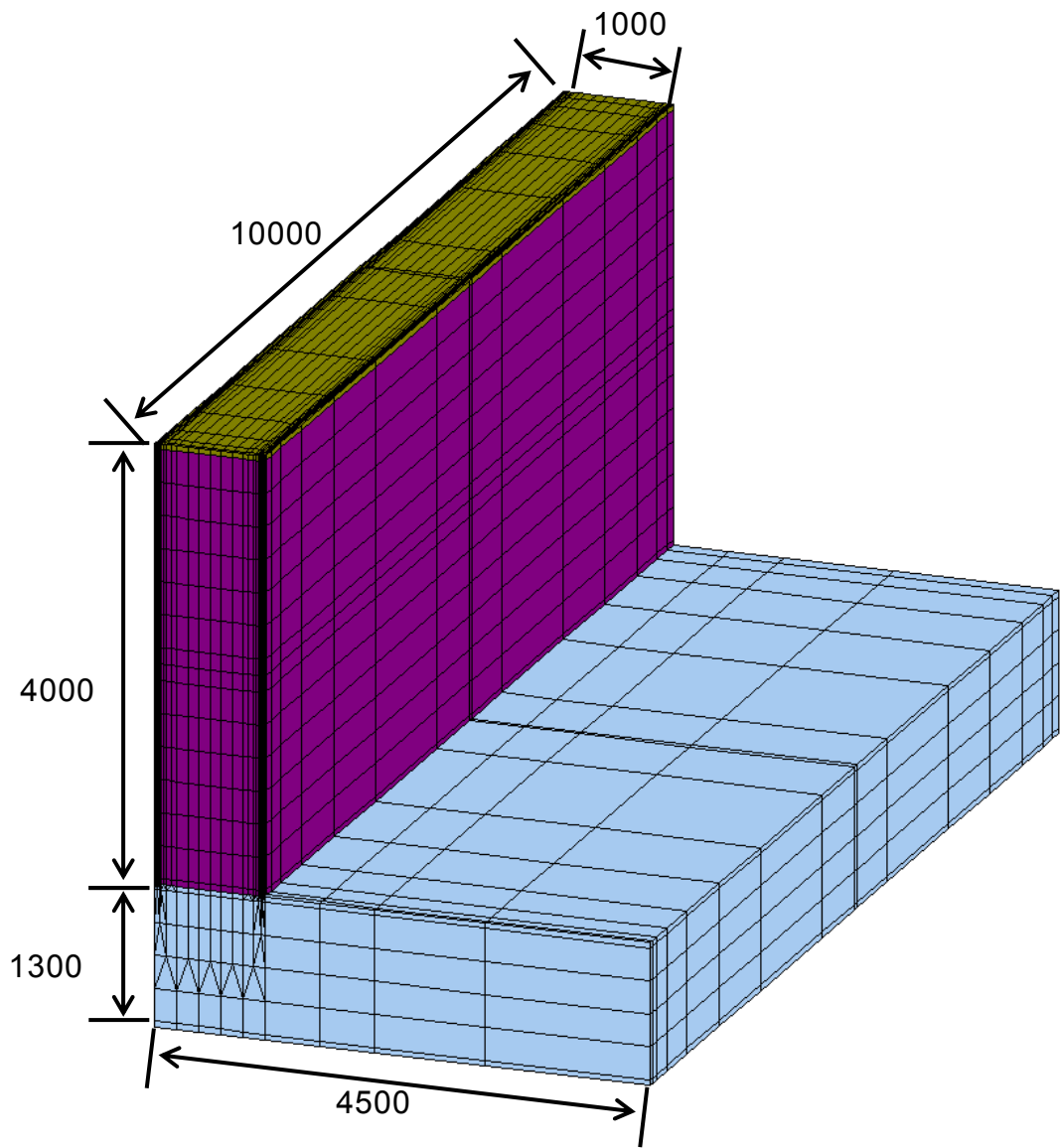
表-7.1 検討ケース

検討ケース	表面部の強度	乾燥収縮
ケース1	水中養生	考慮せず
ケース2	水中養生	考慮する
ケース3	脱型時期に応じた 気中養生	考慮する



単位 mm

図-7.1 メッシュレイアウト(全体)



単位 mm

図-7.2 メッシュレイアウト(コンクリート部分のみ)

7.3 湿気移動解析

本研究では、マスコンクリートの温度応力専用プログラムソフト「ASETEA-MACS for windows Ver.6」を用いて湿気移動解析を行った。

(1) 出力データ

使用したプログラムでは節点ごとの蒸気圧(mmHg)が計算される。しかしながら、蒸気圧は一般的ではないため、人間にとってわかりやすい相対湿度(%)で出力される。相対湿度と蒸気圧とは、温度を介して次のような関係がある。

$$RH = \frac{e}{e^*} \times 100 \quad (7.1)$$

ここで、 RH : 相対湿度(%), e : 蒸気圧(hPa), e^* : 飽和蒸気圧(hPa)である。

$$e^* = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5T_c}{237.3+T_c}} \quad (7.2)$$

ここで、 T_c : 摂氏温度(°C)である。

(2) 湿気移動側

質量 w , 体積 v の物体の湿気密度 q を次式により定義する¹⁴⁾。

$$q = \frac{w - w_0}{v} \quad (7.3)$$

ここで、 q : 湿気密度(g/cm³), w : 物体の質量(g), w_0 : 相対湿度 0%での物質の質量(g),
 v : 物体の体積(m³)である。

湿気の流れである湿流 J によって、湿気 Q が微小時間 dt の間に湿流 J に直角な面積 S の面を通過するとき、湿流 J と湿気密度 j は次式のように定義できる。

$$J = \frac{dQ}{dt} \quad (7.4)$$

$$j = \frac{dJ}{dS} \quad (7.5)$$

ここで、 J ; 湿流(g/h), Q : 湿気(g), t : 時間(h), j : 湿気密度(g/h・m²), S : 湿流が通過する面積(m²)である。

コンクリート中の湿気移動解析の基礎である湿気移動則としては、次の2式が挙げられる。

$$J = -\lambda S \frac{d(RH)}{dn} \quad (7.6)$$

$$J = -\lambda_p S \frac{dP}{dn} \quad (7.7)$$

ここに、 λ :透湿率 (g/h・m・RH), RH :相対湿度(%), λ_p :透湿率 (g/h・m・mmHg), P :蒸気圧 (mmHg), n : x, y, z 座標方向である。

式(7.6)は、湿気移動はコンクリート内部の相対湿度勾配によって生じると定義しており、一方、式(7.7)では、湿気移動はコンクリート中の蒸気圧勾配によって生じると定義している。従来から、湿気移動則としては、式(7.6)が用いられることが多いが、使用したプログラムでは、以下の理由から式(7.7)を採用している。

コンクリートのような微視的に多孔質の材料において、微細空隙水は負ポテンシャル ψ の状態にある。この場合、相対湿度 RH と蒸気圧 P との関係は次式で表される。

$$P = P^* \exp\left(\frac{\psi M_V}{RT}\right) \quad (7.8)$$

$$RH = \frac{P}{P^*} = 100 \times \exp\left(\frac{\psi M_V}{RT}\right) \quad (7.9)$$

$$\text{ただし、} P^* = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5T_c}{237.3+T_c}} \quad (7.10)$$

ここで、 P^* :温度 $T(K)$ での飽和蒸気圧(mmHg), ψ :微細空隙水は負ポテンシャル(J/kg)

M_V :水蒸気の分子量(kg/mol), R :気体定数(8.3143 J/mol・K),

T :絶対温度(K), T_c :温度(°C)

式(7.10)において温度 T_c が上昇すると、飽和蒸気圧 P^* が増大するので、式(7.8)より蒸気圧 P も大きくなる。一方、相対湿度 RH は温度 T_c が上昇しても大きくは変化しない。なぜならば、 T は絶対温度であるから温度 T_c が変化しても RH の変動は少ないと考えられるからである。

一般に固体の温度が上昇すると乾燥が促進される(湿気移動が大きくなる)。式(7.7)の湿気移動則は、蒸気圧 P で定義しているので温度上昇による湿気移動の促進現象を表現しているが、一方の式(7.6)では考慮できない。従って、コンクリートのように温度変化が生じる場合は、式(7.7)の蒸気圧 P による湿気移動を用いるのが合理的である。ただし、温度変化がない場合、式(7.6)と式(7.7)は等価となる。

(3) 湿気移動運動方程式

図-7.3 に示すような、 dx, dy, dz を各辺の長さとする微小直方体を考える。この微小直方体に単位時間に流入する湿気量から流出する湿気量を差し引いたものが、この微小直方体の湿気の時間変化 $\frac{dq}{dt}$ である。

単位時間に単位面積を移動する湿気量は、考えている点の蒸気圧勾配に比例する。ある点における蒸気圧を P 、透湿率を λ_p とすれば、その点における x 方向、 y 方向、および z

方向に移動する湿気量の単位時間、単位面積あたりの値はそれぞれ、 $-\lambda_p \frac{\partial P}{\partial x}$ 、 $-\lambda_p \frac{\partial P}{\partial y}$

、 $-\lambda_p \frac{\partial P}{\partial z}$ と書ける。したがって、図-7.3 において、

・ x 方向

面 ADHE から単位時間に微小直方体に流入する湿気量は、 $-\lambda_p \frac{\partial P}{\partial x} dydz$

—) 面 BCGF から単位時間に微小直方体から流出する湿気量は、 $-\lambda_p \frac{\partial P}{\partial x} dydz + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda_p \frac{\partial P}{\partial x} \right) dx \cdot dydz$

$$\text{微小直方体へ } x \text{ 方向から流入する湿気量} \quad \lambda_p \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} dx dy dz$$

・ y 方向

面 ABFE から単位時間に微小直方体に流入する湿気量は、 $-\lambda_p \frac{\partial P}{\partial y} dx dz$

—) 面 DCGH から単位時間に微小直方体から流出する湿気量は、 $-\lambda_p \frac{\partial P}{\partial y} dx dz + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\lambda_p \frac{\partial P}{\partial y} \right) dy \cdot dx dz$

$$\text{微小直方体へ } y \text{ 方向から流入する湿気量} \quad \lambda_p \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} dx dy dz$$

・ z 方向

面 ADCB から単位時間に微小直方体に流入する湿気量は、 $-\lambda_p \frac{\partial P}{\partial z} dx dy$

—) 面 EFGH から単位時間に微小直方体から流出する湿気量は、 $-\lambda_p \frac{\partial P}{\partial z} dx dy + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\lambda_p \frac{\partial P}{\partial z} \right) dz \cdot dx dy$

$$\text{微小直方体へ } z \text{ 方向から流入する湿気量} \quad \lambda_p \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} dx dy dz$$

よって，湿気移動によって，微小直方体に単位時間に流出する湿気量は，

$$\lambda_p \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) dx dy dz$$

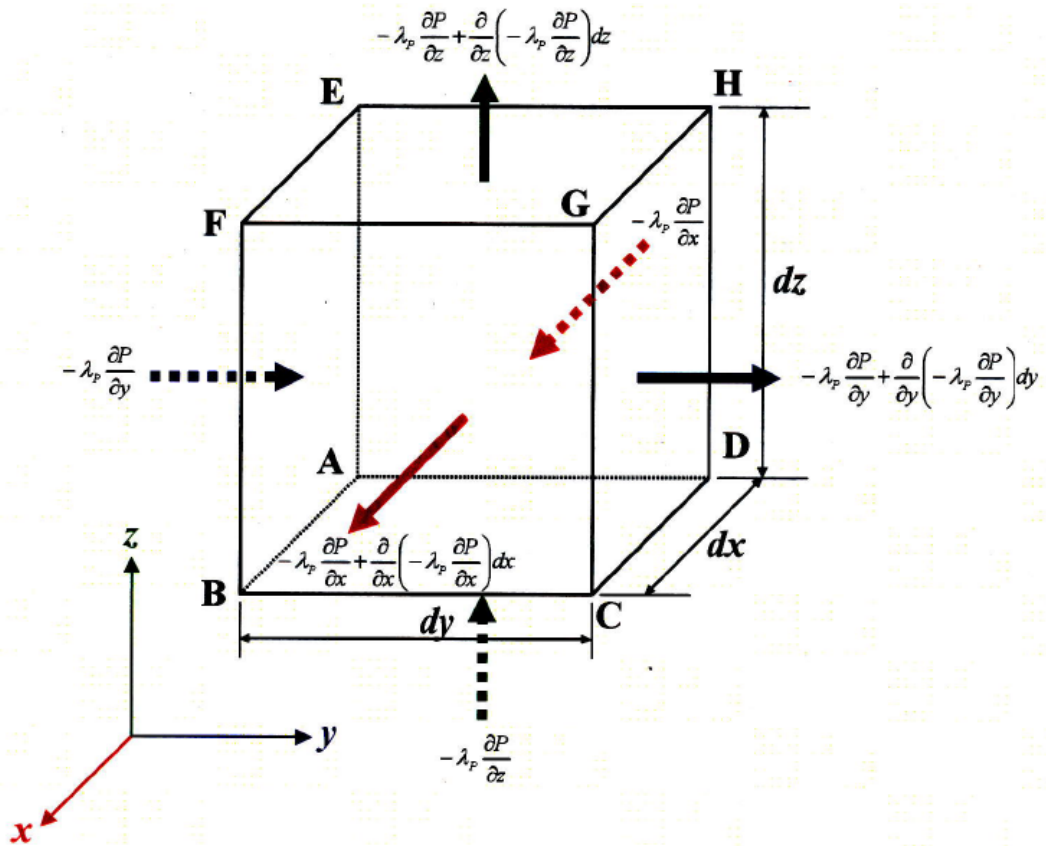


図-7.3 微小直方体領域

また，水和反応により単位時間に単位体積あたりに失われる湿気損失速度(水和速度)を $\frac{dq_h}{dt}$ とすると，単位時間に微小直方体から失われる湿気量 dQ_h は，

$$dQ_h = \frac{dq_h}{dt} dx dy dz \quad (7.11)$$

となる．

ここで， q_h は湿気密度であるが，微小直方体中の湿気密度 q と区別するために用いた．

したがって，単位時間に微小直方体における湿気の流入および流出により残留する湿気量を dQ とすると，微小直方体の湿気収支により，

$$dQ = \lambda_p \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) dx dy dz - dQ_h \quad (7.12)$$

$$\frac{dq}{dt} dx dy dz = \lambda_p \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) dx dy dz - \frac{dq_h}{dt} dx dy dz \quad (7.13)$$

$$\frac{dq}{dt} = \lambda_p \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) - \frac{dq_h}{dt} \quad (7.14)$$

となる．さらに，式(7.14)において，

$$\frac{dq}{dt} = \left(\frac{dq}{dP} \right)_p \frac{\partial P}{\partial t} \quad (7.15)$$

とおくと，最終的に湿気移動の非線形支配方程式となる次式が導かれる．

$$\left(\frac{dq}{dP} \right)_p \frac{\partial P}{\partial t} = \lambda_p \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) - \frac{dq_h}{dt} \quad (7.16)$$

ここで， $\left(\frac{dq}{dP} \right)_p$: 湿気容量 ($\text{g/m}^3 \cdot \text{mmHg}$)， $\frac{dq_h}{dt}$: 水和による湿気密度変化 ($\text{g/hr} \cdot \text{m}^3$) で

ある．

式(7.16)の各項は、次のような物理的な意味がある。

$$\left(\frac{dq}{dP}\right)_p \frac{\partial P}{\partial t} : \text{内部湿気量の変化(湿気容量項)}$$

$$\lambda_p \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) : \text{湿気移動により外部から流入する湿気量(湿気移動項)}$$

$$\frac{dq_h}{dt} : \text{水和による湿気損失(湿気損失項)}$$

つまりこの式は、(内部湿気量)=(湿気移動項)-(湿気損失項)
という湿気収支を表している。

(4)境界条件

式(7.16)は、領域内の任意点で、任意の時刻に成立すべき方程式であり、これを具体的に解くには、境界条件を必要とする。解析において一般的に考慮すべき主な境界条件として、湿気固定境界と湿気伝達境界が挙げられる。

このうち、湿気固定境界については、解析上特に困難な点はなく、応力解析における変位固定境界や温度解析における温度固定境界の扱いで良い。

一方、湿気伝達境界については、一般的に採用されている次の式を使用する。

$$-\lambda_p \frac{\partial P}{\partial t} = \alpha(P - P_0) \quad (7.17)$$

ここで、 α : 蒸発率($\text{g/m}^3 \cdot \text{hr} \cdot \text{mmHg}$)、 P_0 : 周囲の蒸気圧(mmHg)である。

湿気移動解析では、支配方程式である式(7.16)を境界条件である式(7.17)のもとで解く。

(5) 湿気移動解析における材料物性値

湿気動解析を行うためには、湿気移動に関わる物性値を適切に設定する必要がある。湿気

移動に関わる物性値としては、透湿率 λ_p ($\text{g}/\text{h}\cdot\text{m}\cdot\text{mmHg}$)、湿気容量 $\left(\frac{dq}{dP}\right)_p$ ($\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{mmHg}$)、

さらには、境界面における蒸発率 α ($\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{hr}\cdot\text{mmHg}$)がある。

透湿率と湿気容量に関しては、既往の研究¹⁴⁾により相対湿度との関係が示されている。一方、蒸発率¹⁵⁾に関してのデータはほとんど見あたらないが、岐阜大学で行われた実験データがある。

a) 透湿率

材料中の湿気(水蒸気)は、蒸気圧の勾配に比例して移動する。この比例定数を「透湿率(湿気伝導率)」という。相対湿度との関係は、図-7.4に示すような回帰直線を使って、相対湿度と透湿率の関係を表した。

$$\cdot 0 \leq RH \leq 60\% \text{ のとき, } \lambda = 0.0019 \quad (7.18)$$

$$\cdot RH \geq 60\% \text{ のとき, } \lambda = 0.0088RH^2 - 0.0022RH + 0.00009 \quad (7.19)$$

式中での RH は、百分率ではなく小数である。

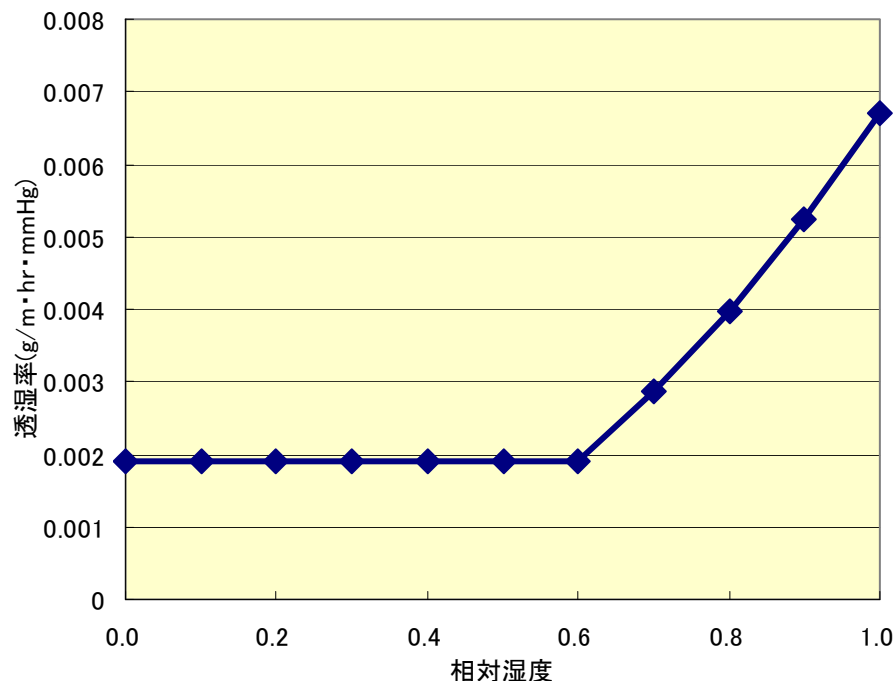


図-7.4 相対湿度と透湿率の関係(近似曲線)

b) 湿気容量

湿気容量は、平衡含水率を相対湿度で微分した値であり、一般的には、湿気容量は相対湿度に対して非線形となる。相対湿度との関係は、図-7.5 に示すような回帰直線を使って、相対湿度と湿気容量の関係を表した。

$$\cdot 0 \leq RH \leq 60\% \text{ のとき, } \frac{dq}{dP} = 2500 \quad (7.20)$$

$$\cdot 60 \leq RH \leq 80\% \text{ のとき, } \frac{dq}{dP} = 9590RH - 3254 \quad (7.21)$$

$$\cdot RH \geq 80\% \text{ のとき, } \frac{dq}{dP} = 70710RH - 52150 \quad (7.22)$$

式中での RH は、百分率ではなく小数である。

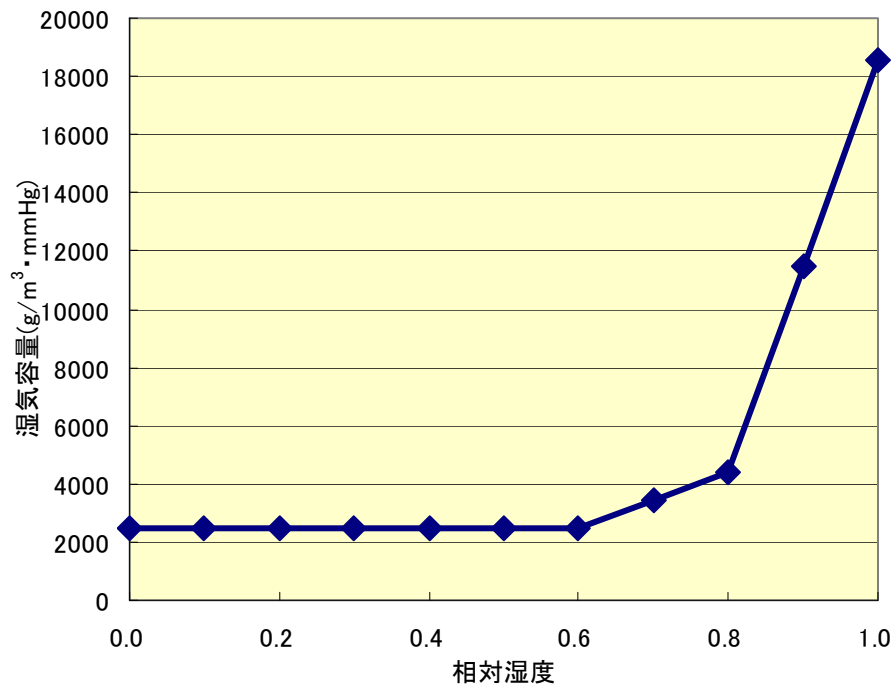


図-7.5 相対湿度と湿気容量の関係(近似曲線)

c) 蒸発率

蒸発率は岐阜大学で行われた水分蒸発量および蒸気圧の計測結果¹⁵⁾から算出した。相対湿度と蒸発率との関係を以下のように定義する。

・ $0 \leq RH \leq 70\%$ のとき, $\alpha = 0.194$ (7.23)

・ $70 \leq RH \leq 100\%$ のとき, $\alpha = 13.6RH^2 - 17.1RH + 5.5$ (7.24)

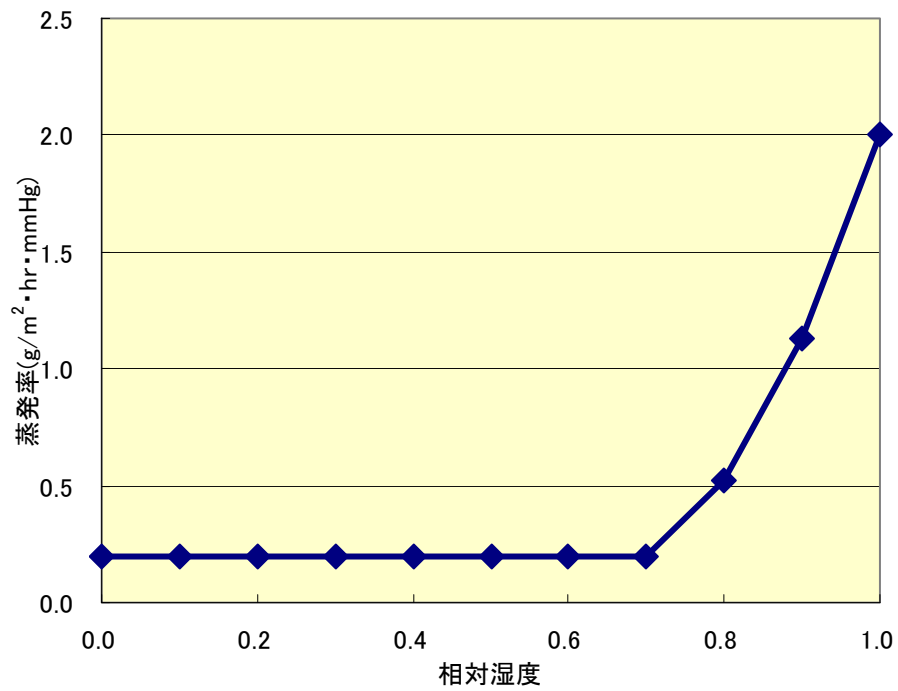


図-7.6 相対湿度と蒸発率(近似曲線)

7.4 圧縮強度発現式

第5章の圧縮強度試験によって得られた圧縮強度と積算温度の関係式を作成した。関係式は以下の(7.25)式を用いた。本研究では得られた関係式を温度応力解析における圧縮強度発現式として用いた。

$$f'_c = \alpha \log M + \beta \cdots (7.25)$$

ここで、 f'_c : 圧縮強度(N/mm²)、 M : 積算温度(h°C)、 α, β : 実験で得られた係数

(1) 普通コンクリート(W/C=50%)

圧縮強度の発現式における各係数を表-7.2に示す。圧縮強度発現式によって得られた積算温度と強度の関係を図-7.7に示す。湿潤養生期間が14日以上のものについては、水中養生したものとほぼ同等の強度が得られたので、水中養生した場合の圧縮強度発現式を用いる。

表-7.2 圧縮強度発現式の各係数

養生方法	α	β
水中	5.97	-17.1
気乾	3.73	-0.570
3日から気乾	3.62	2.31
7日から気乾	4.23	0.26

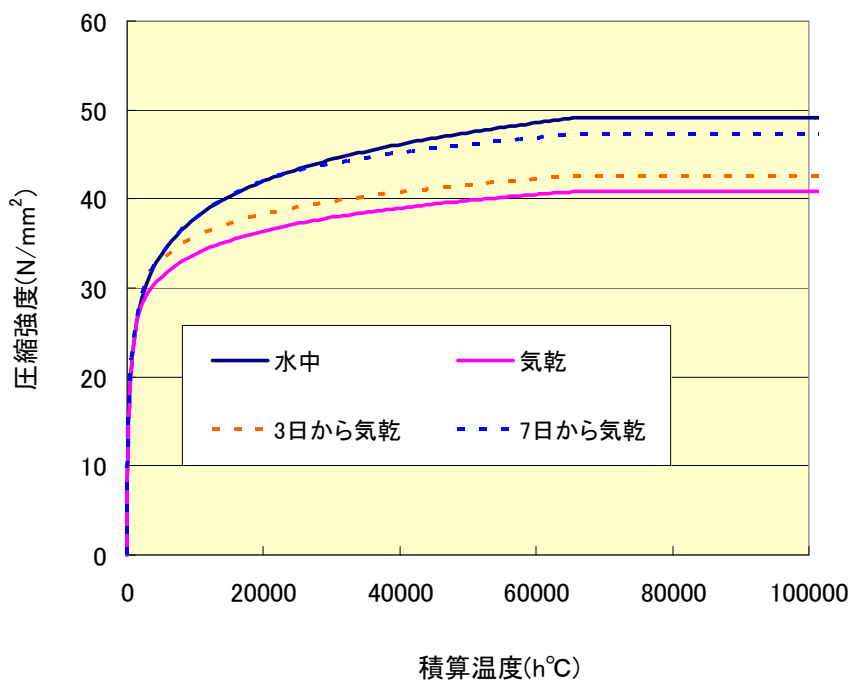


図-7.7 積算温度と圧縮強度(計算値)との関係(普通ポルトランドセメント)

(2) 高炉スラグ混入コンクリート(粉末度 4000, 置換率 50%, 水結合材比 50%)

圧縮強度の発現式における各係数を表-7.3 に示す. 圧縮強度発現式によって得られた積算温度と強度の関係を図-7.8 に示す.

表-7.3 圧縮強度発現式の各係数

養生方法	α	β
水中	11.3	-76.7
気乾	3.25	-12.2
3日から気乾	3.73	-14.4
7日から気乾	3.62	-9.69
14日から気乾	4.27	-9.71
28日から気乾	8.16	-45.9

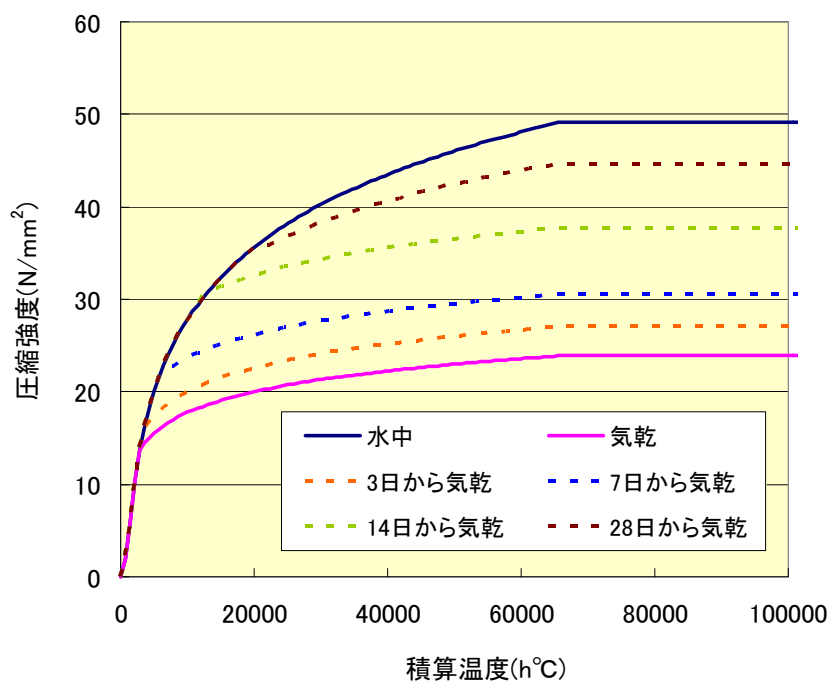


図-7.8 積算温度と圧縮強度(計算値)との関係(粉末度 4000, 置換率 50%, 水結合材比 50%)

(3) 高炉スラグ混入コンクリート(粉末度 6000, 置換率 50%, 水結合材比 50%)

圧縮強度の発現式における各係数を表-7.3 に示す. 圧縮強度発現式によって得られた積算温度と強度の関係を図-7.9 に示す. 湿潤養生期間が 28 日以上のものについては, 水中養生したものとほぼ同等の強度が得られたので, 水中養生した場合の圧縮強度発現式を用いる.

表-7.4 圧縮強度発現式の各係数

養生方法	α	β
水中	11.3	-69.1
気乾	3.69	-9.47
3日から気乾	4.60	-15.5
7日から気乾	5.99	-22.6
14日から気乾	5.22	-8.90

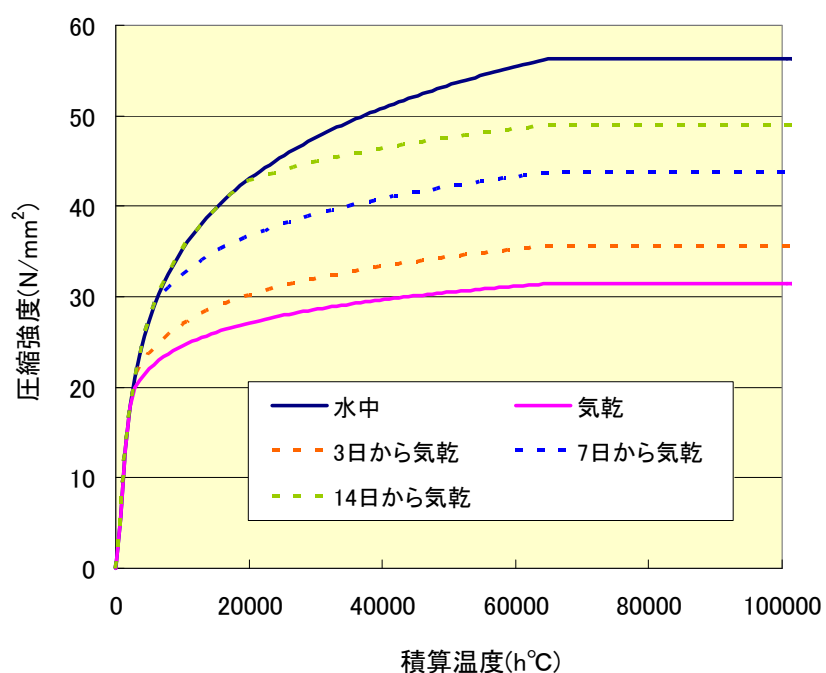


図-7.9 積算温度と圧縮強度(計算値)との関係(粉末度 6000, 置換率 50%, 水結合材比 50%)

7.5 ヤング係数発現式

圧縮強度とヤング係数の関係を養生方法別に図-7.10 示す。水中養生をしたものについては、以下の(7.26)式、乾燥の影響をうけたものについては、以下の(7.27)式をヤング係数の発現式とした。

$$E_c = 4.73f_c^{0.499} \dots (7.26)$$

$$E_c = 4.37f_c^{0.470} \dots (7.27)$$

ここで、 E_c : ヤング係数(N/mm²)、 f_c : 圧縮強度(N/mm²)である。

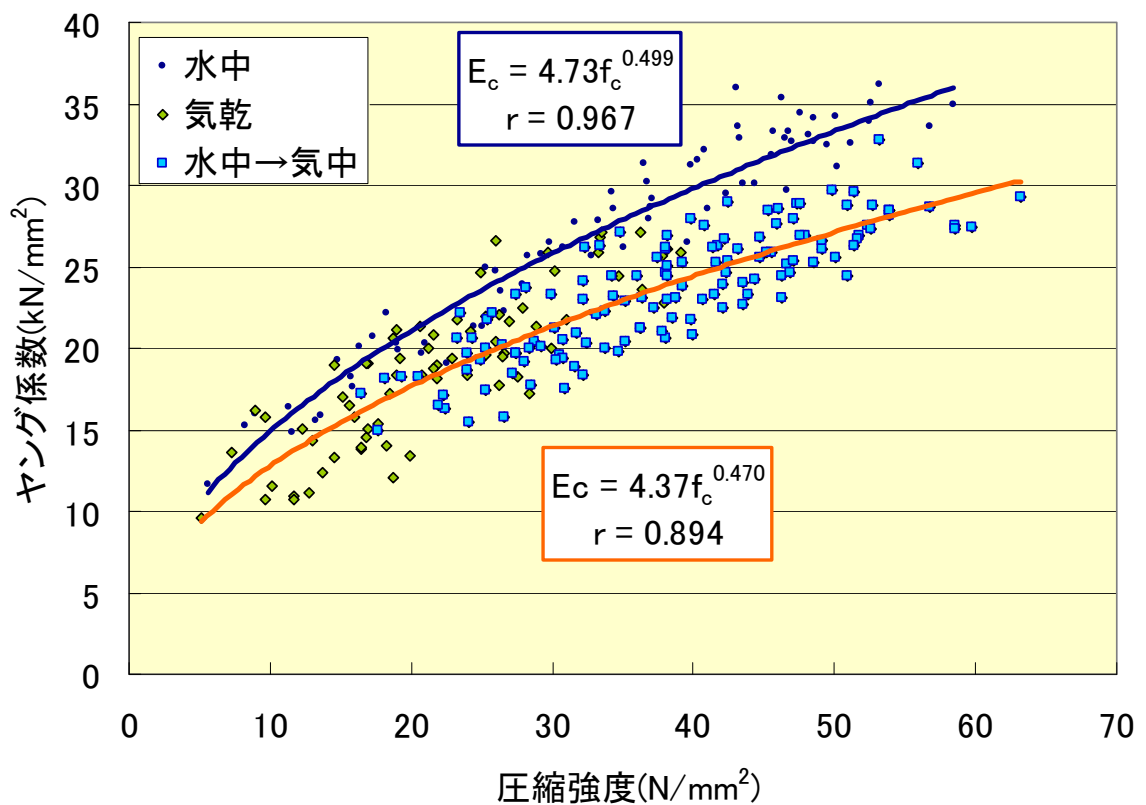


図-7.10 圧縮強度とヤング係数の関係

7.6 引張強度発現式

圧縮強度と引張強度の関係を試験方法別に図-7.11 示す。圧縮強度と割裂引張強度の関係式を以下の(7.28)式、圧縮強度と直接引張強度の関係式を以下の(7.29)式にそれぞれ示す。実際のコンクリート構造物に近い引張特性を表していると考えられる(7.29)式を温度応力解析に用いることとした。

$$f_t = 0.192f_c^{0.745} \dots (7.28)$$

$$f_t = 0.102f_c^{0.879} \dots (7.29)$$

ここで、 f_t : 引張強度 (N/mm²), f_c : 圧縮強度 (N/mm²)である。

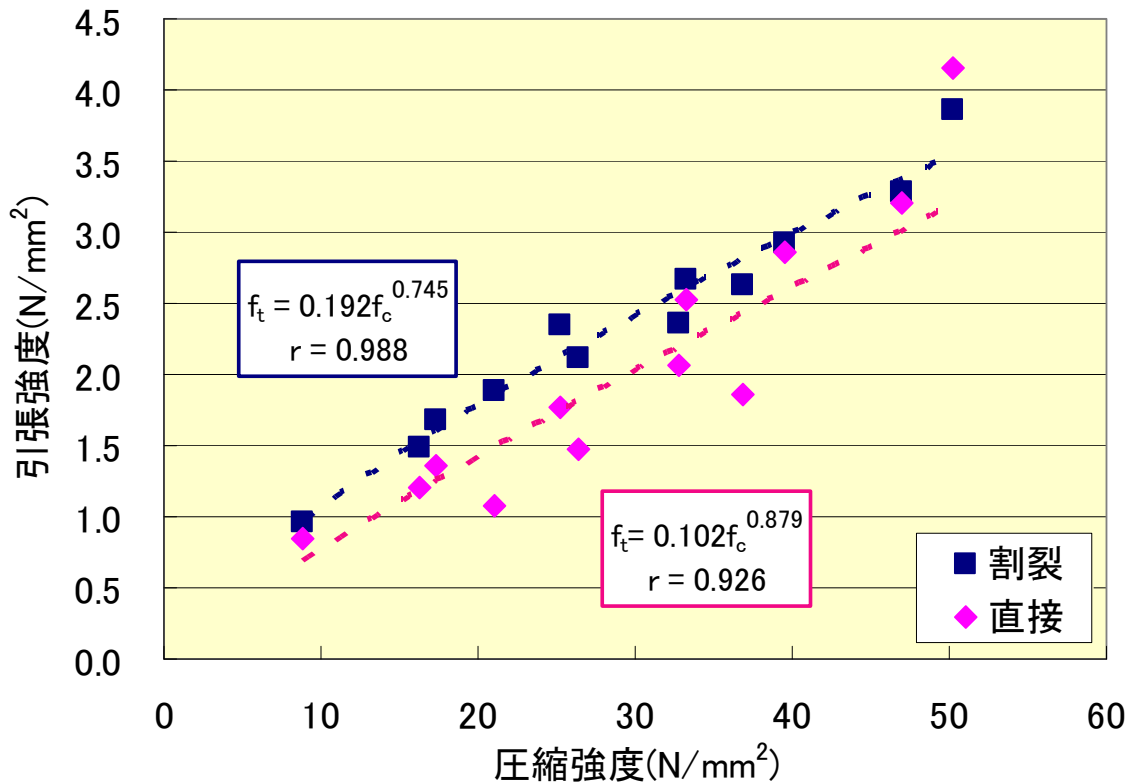


図-7.11 圧縮強度と引張強度の関係

7.7 断熱温度上昇特性

断熱温度上昇式は以下の(7.30)式を使用する。各係数については、第 5 章の同定解析で得られたものを使用する。断熱温度上昇式の各係数を表-7.5 に示す。

$$T = K[1 - \exp\{-\alpha(t - t_0)^\beta\}] \cdot \cdot \cdot (7.30)$$

K：断熱温度上昇によるパラメータ(°C)

α ：温度上昇に関するパラメータ

β ：温度上昇に関するパラメータ

t：材齢(日)

t_0 ：発熱開始材齢(日)

表-7.5 断熱温度上昇式における各係数

粉末度	置換率	水結合材比	K	α	β	t_0
N		50	46.3	1.65	1.00	0.20
4000	50	50	47.0	0.70	1.03	0.18
6000	50	50	48.0	0.90	1.23	0.13

7.8 境界条件

(1) 熱伝達境界

熱伝達境界は、脱型前は熱伝達率を $8\text{W/m}^2\text{C}$ 、脱型後は $14\text{W/m}^2\text{C}$ とした材齢と熱伝達率の関係を図-7.12 に示す。

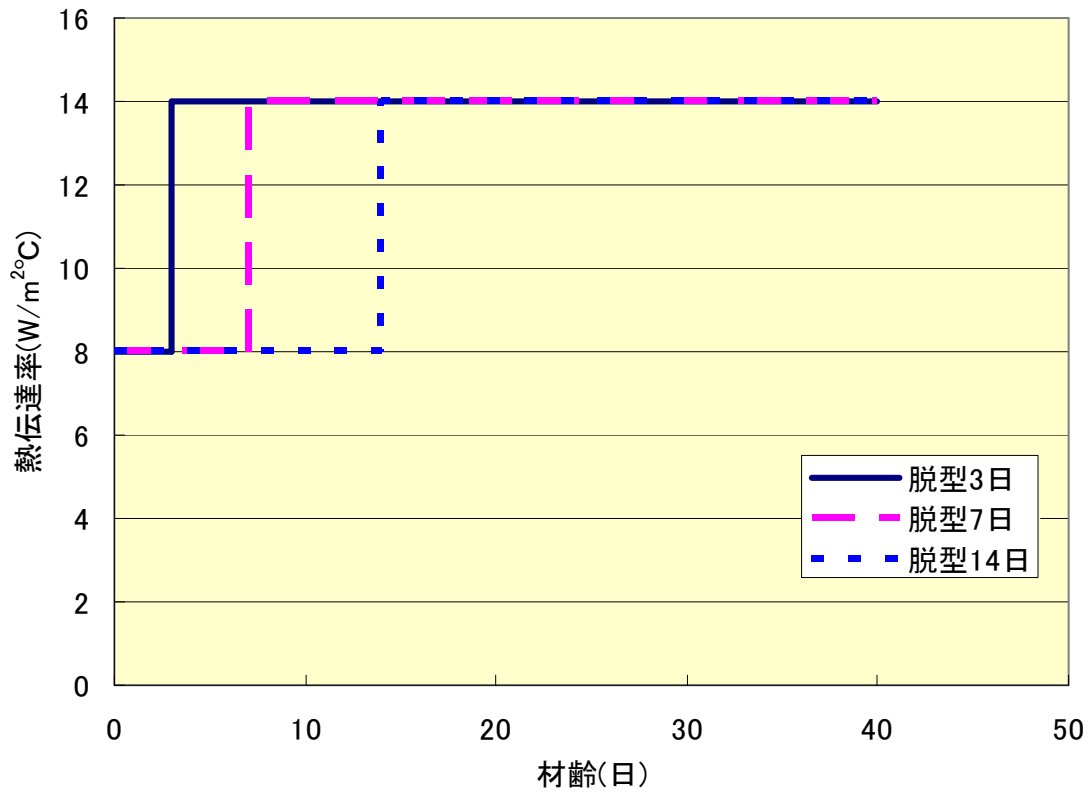


図-7.12 熱伝達率

(2) 外気温

湿気移動解析及び温度応力解析で用いた外気温を図-7.13, 図-7.14 に示す. 本解析では, コンクリートの打込み温度が 20℃となるように, 外気温が 15℃程度となる日から 40 日間の外気温を解析で用いた.

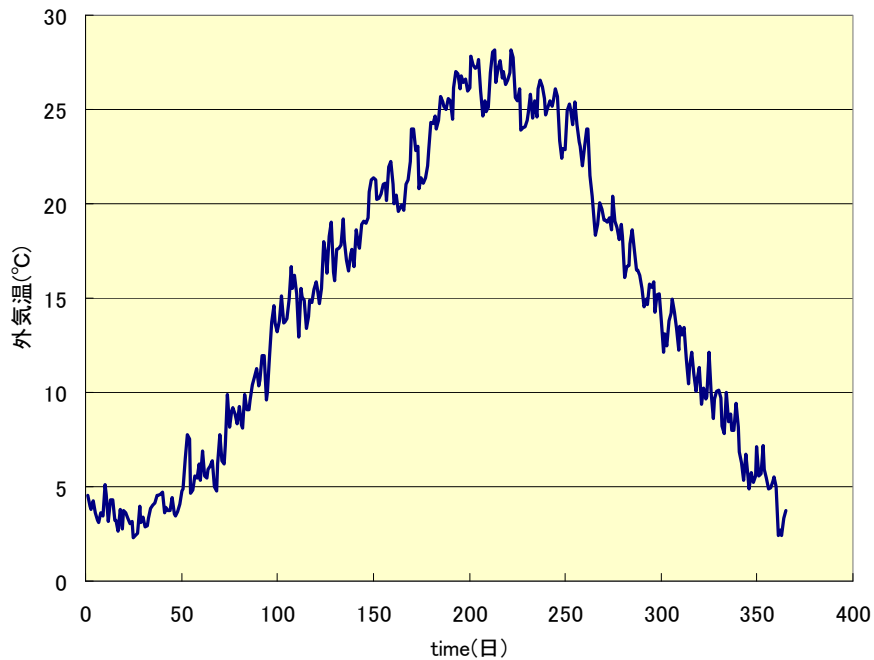


図 7.13 外気温(年間)

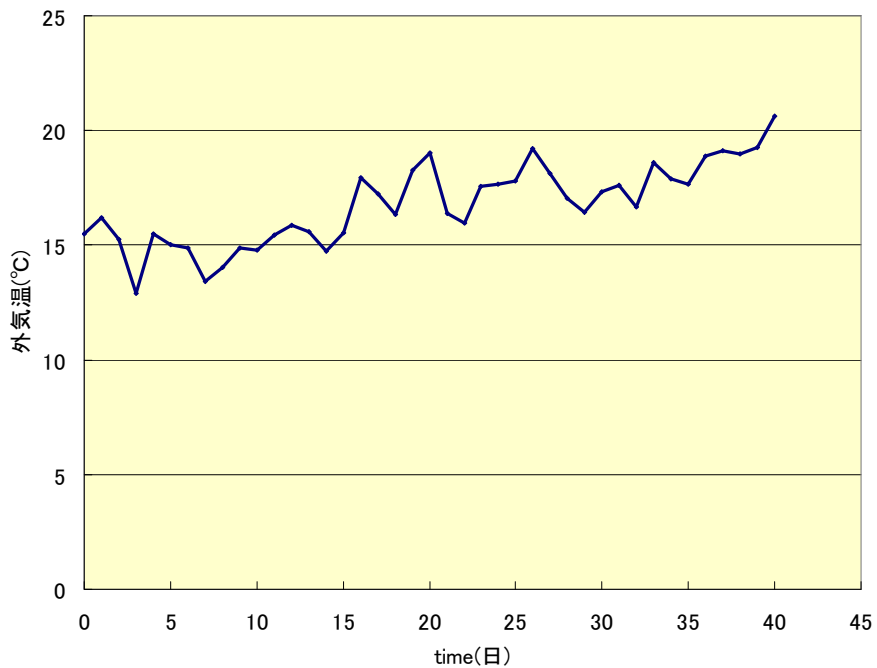


図 7.14 外気温(解析期間)

(3) 乾湿係数

湿気境界は、脱型前は乾湿係数を $0\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 、脱型後は $1\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ とした。また、シート養生期間は、水分の移動のないものとして $0\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ とした。材齢と乾湿係数の関係を図-7.15, 16に示す。

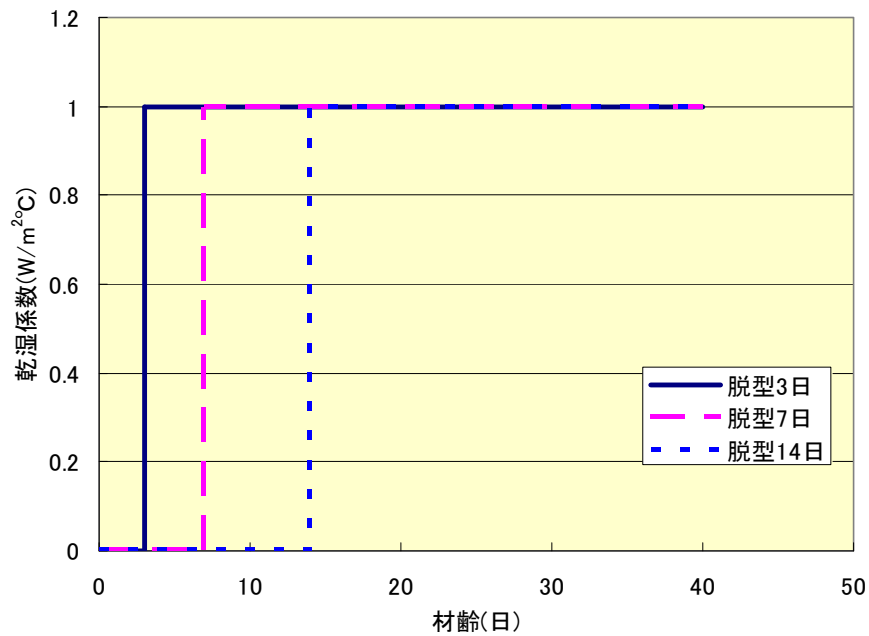


図-7.15 乾湿係数

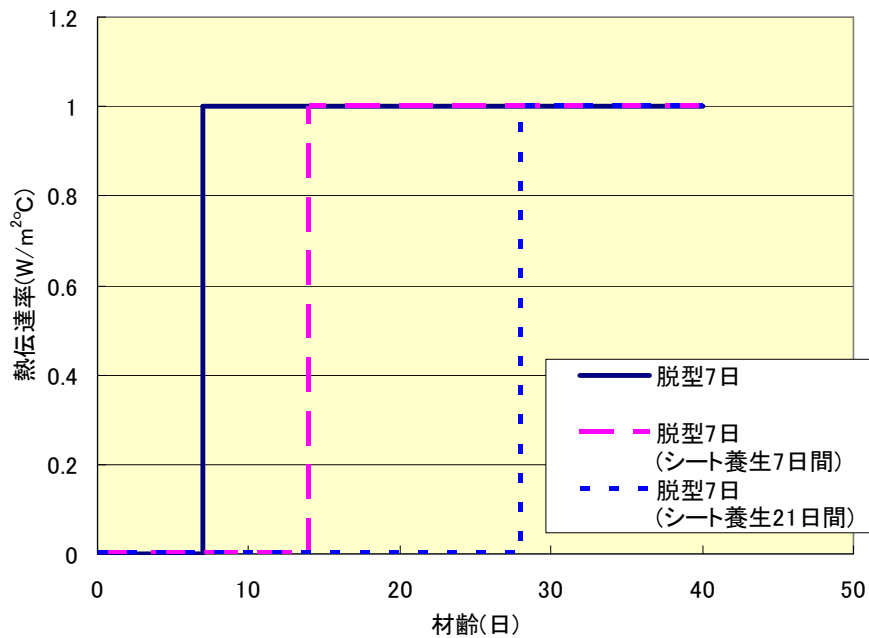


図-7.16 乾湿係数(シート養生期間)

(4) 外部蒸気圧

湿気移動解析及び温度応力解析で用いた外部蒸気圧を図-7.17, 図-7.18 に示す. 構造物周辺の相対湿度を 60%RH として一定となるような外部蒸気圧を与えた..

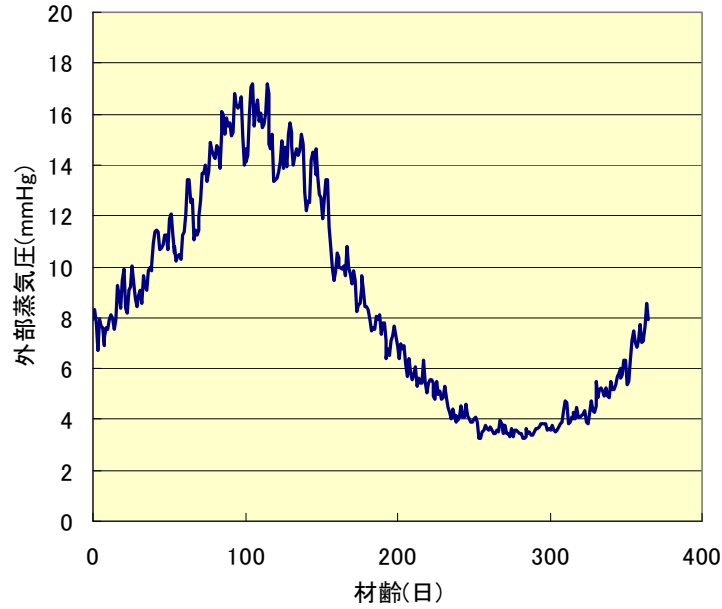


図-7.17 外部蒸気圧(年間)

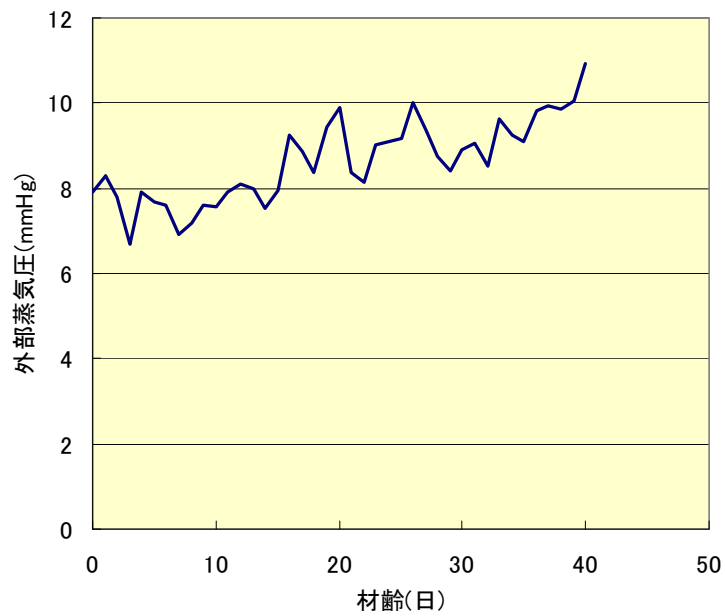


図-7.18 外部蒸気圧(解析期間)

7.9 自己収縮

コンクリートの自己収縮ひずみは、セメントの種類、水セメント比、温度依存性等を考慮できる(7.31)式を用いた。

$$\varepsilon_c(t) = \gamma \cdot \varepsilon_{co} \cdot \beta(t) \quad (7.31)$$

$$\text{ここで, } \varepsilon_{co} = 3070 \exp(-7.2(W/B)) \quad (7.32)$$

$$\beta(t) = 1 - \exp\{-a(t-t_0)^b\} \quad (7.33)$$

ここで, $\varepsilon_c(t)$: 材齢 t における自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

γ : セメントおよび混和材の種類を表す係数(普通ポルト $\gamma=1$)

$\varepsilon_{co}(W/B)$: 自己収縮の終局値 ($\times 10^{-6}$)

$\beta(t)$: 自己収縮の進行を表わす関数

W/B : 水結合材比

a, b : 定数

$$a = 3.72 \exp\{-6.83(W/B)\} \quad (7.34)$$

$$b = 0.251 \exp\{2.49(W/B)\} \quad (7.35)$$

t_0 : 凝結の始発(日)

t : 材齢(日)

t_0 および, t はコンクリートの温度によって次式で補正する。

$$t_0 \text{ および, } t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp\left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0}\right] \quad (7.36)$$

Δt_i : 温度が $T^\circ\text{C}$ である期間の日数(日)

$T(\Delta t_i)$: 期間 Δt_i における温度($^\circ\text{C}$), $T_0 = 1^\circ\text{C}$

7.10 乾燥収縮

乾燥収縮は以下の(7.37)式を用いた.

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{sh\infty}(t, t_0)}{\{\beta + (t - t_0)\}} \times 10^{-6} \quad (7.37)$$

$$\varepsilon_{sh\infty} = \frac{\varepsilon_{shp}}{(1 + \phi t_0)} \quad (7.38)$$

$$\varepsilon_{shp} = \frac{\alpha(1-h)W}{1 + 150 \exp(-500/f_c(28))} \quad (7.39)$$

$$\phi = 10^{-4} \{15 \exp(0.007 f_c(28) + 0.25W)\} \quad (7.40)$$

$$\beta = \frac{4W\sqrt{V/S}}{100 + 0.7t_0} \quad (7.41)$$

ここで, W : 単位水量(kg/m³)

V/S : 体積表面積(mm)

t_0 : 乾燥開始材齢(日)で 98 日以上の場合は $t_0=98$ とする.

h : 相対湿度=RH/100

$f_c(28)$: 材齢 28 日におけるコンクリートの強度(N/mm²)

α : セメント種類による係数で, 普通・低発熱セメントなら 11
早強セメントなら 15

7.11 他の解析条件

解析条件を表-7.6 に示す.

表-7.6 解析条件

項目	解析条件
熱伝導率(W/m°C)	2.7
密度(kg/m ³)	2300
比熱	1.15
打込み温度(°C)	20
クリープ	ヤング係数低減法
	材齢 2 日まで $\Phi=0.42$ 材齢 3 日まで $\Phi=0.65$
ポアソン比	0.2
熱膨張係数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	10

第 8 章 解析結果

8.1 湿気移動解析

本研究では、第 7 章に示す 3 種類のコンクリートを用いて湿気移動解析を行ったが、セメントの種類によって湿度がほとんど変化しなかったことから、高炉スラグ混入コンクリート(粉末度 4000cm/g², 置換率 50%, 水結合材比 50%)を用いた場合のみを以下に示す。

(1) コンクリート表面からの距離とコンクリート内部の湿度の関係

型枠脱型後の期間別にコンクリート表面からの距離とコンクリート内部の湿度の関係のうち、脱型日ごとに図-8.1~8.3 にそれぞれ示す。また、解析評価位置を図-8.4 に示すとともに、図-8.4 に示した位置におけるコンクリート内部の水分状態を図-8.5~図-8.11 に示す。なお、この解析評価位置は温度応力解析でも同様の位置である。図 8.1~図 8.3 からコンクリート表面部では脱型 12 時間後でコンクリート表面の湿度は、脱型 3 日のものは 76%、脱型 7 日のものは 79%、脱型 14 日のものは 83%まで低下している。また、図-8.5~11 から湿度低下はコンクリート表面部から 50mm 以上の箇所では 28 日後も湿度はほぼ低下せず、約 100%を保つ結果となった。この結果からコンクリート表面部から 20~30mm の箇所までが最も乾燥収縮の影響を受けている可能性があると考えられる。

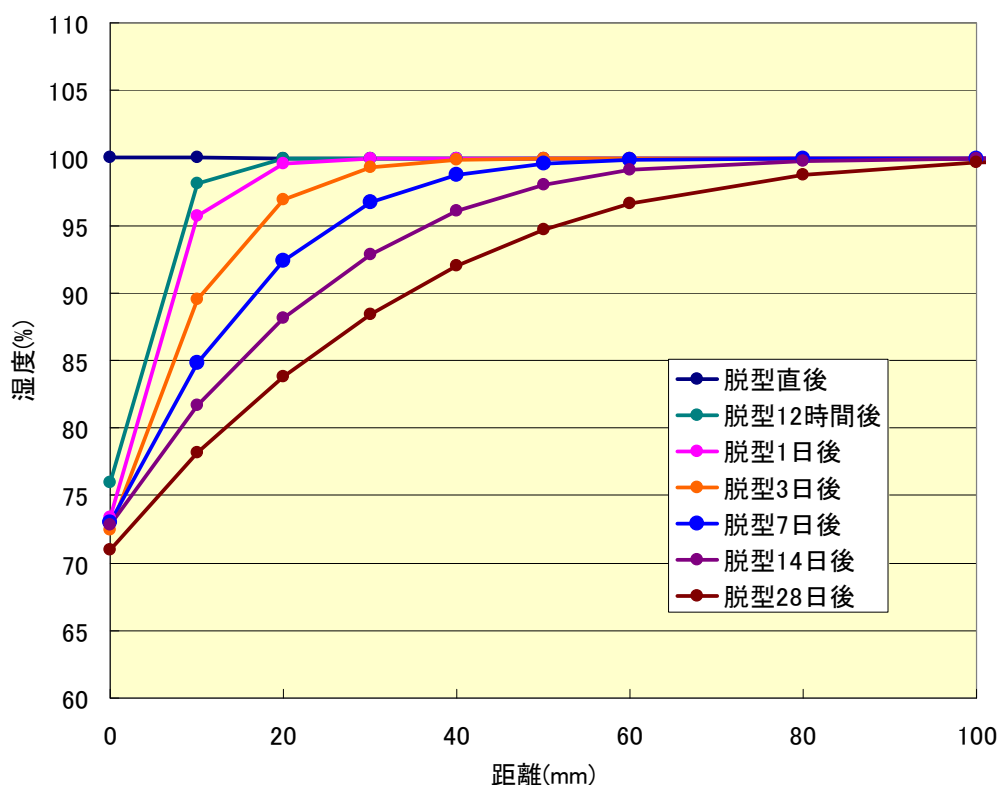


図-8.1 表面部からの距離と湿度の関係(脱型 3 日)

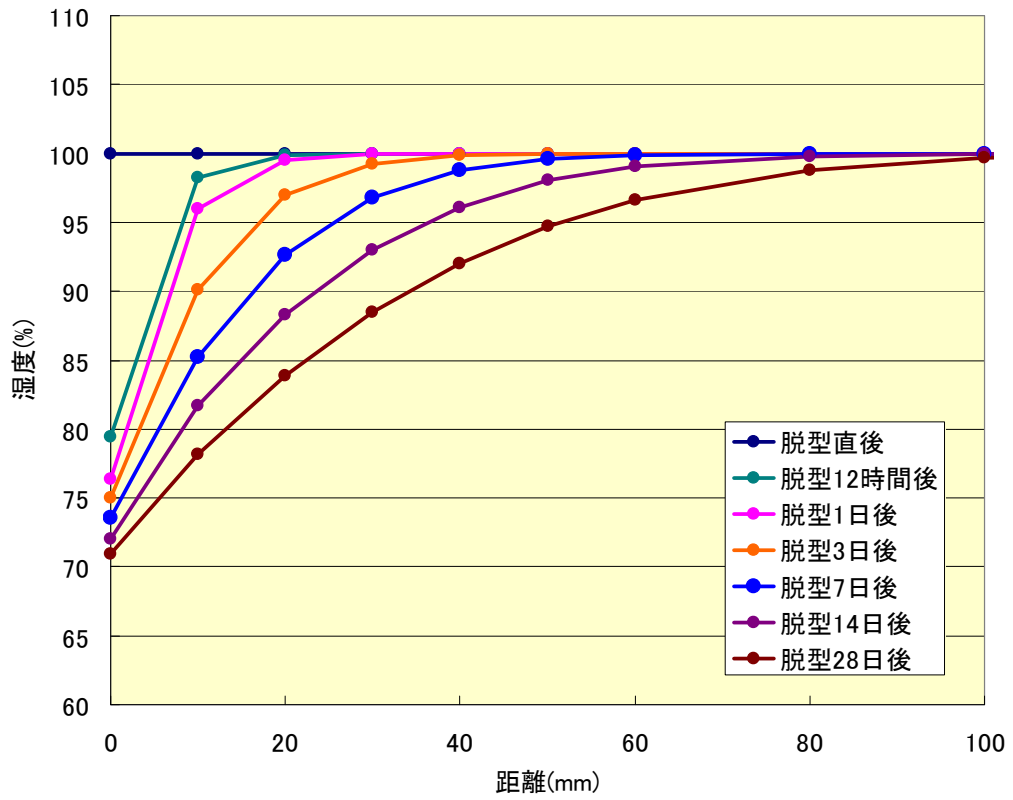


図-8.2 表面部からの距離と湿度の関係(脱型 7 日)

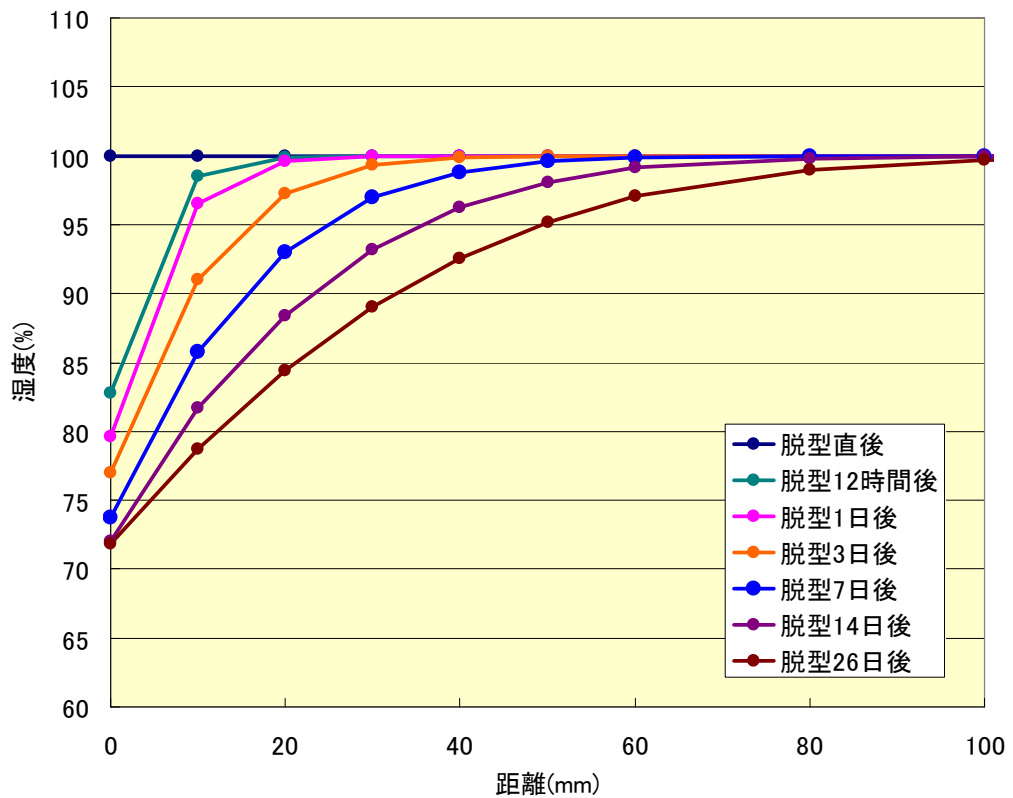


図-8.3 表面部からの距離と湿度の関係(脱型 14 日)

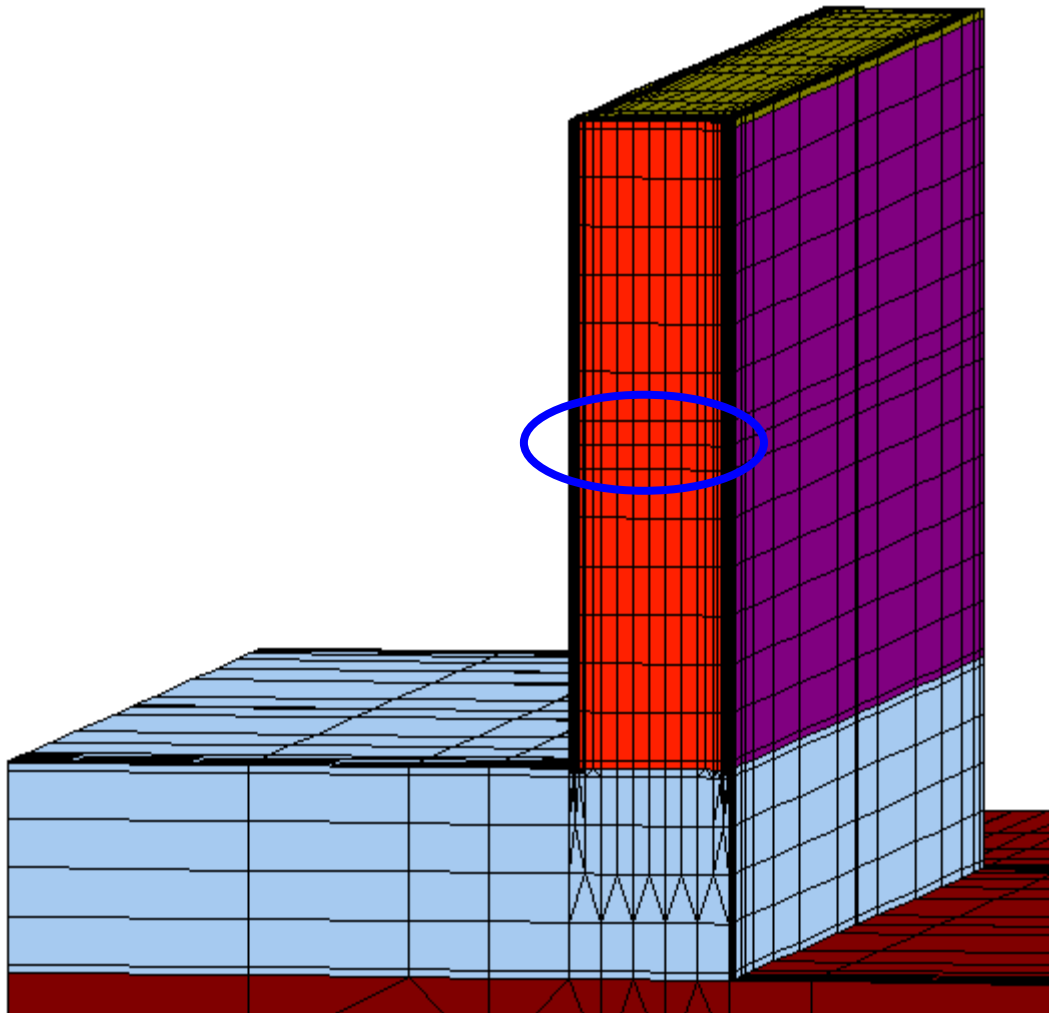


図-8.4 解析評価位置

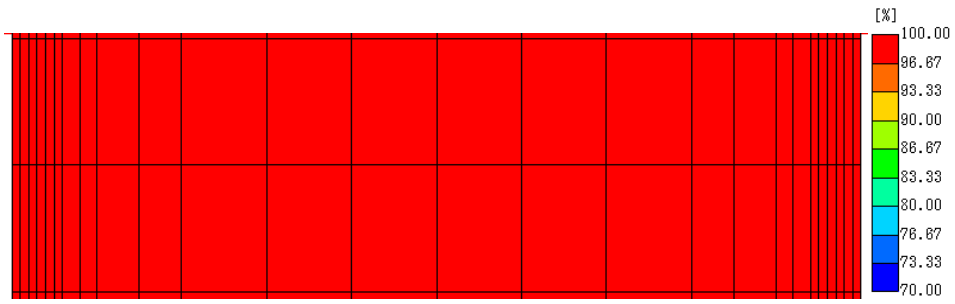


図-8.5 コンクリート内部の水分状態(脱型 7 日, 脱型直後)

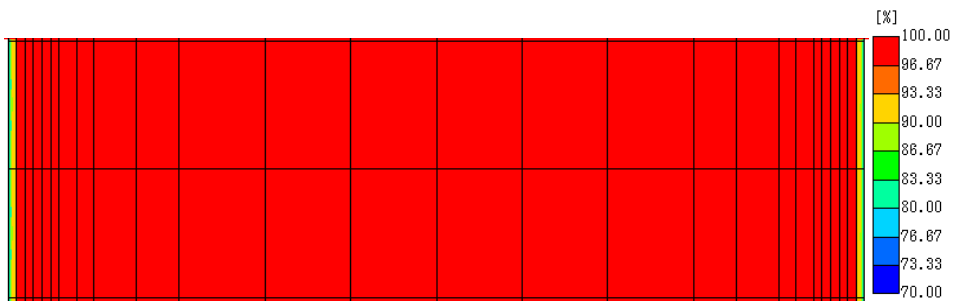


図-8.6 コンクリート内部の水分状態(脱型 7 日, 脱型 12 時間後)

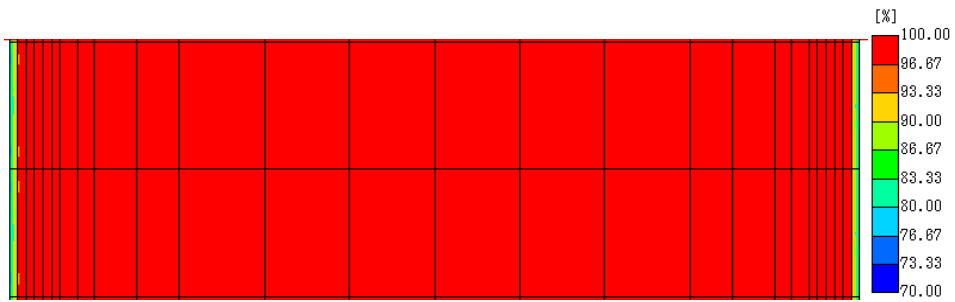


図-8.7 コンクリート内部の水分状態(脱型 7 日, 脱型 1 日後)

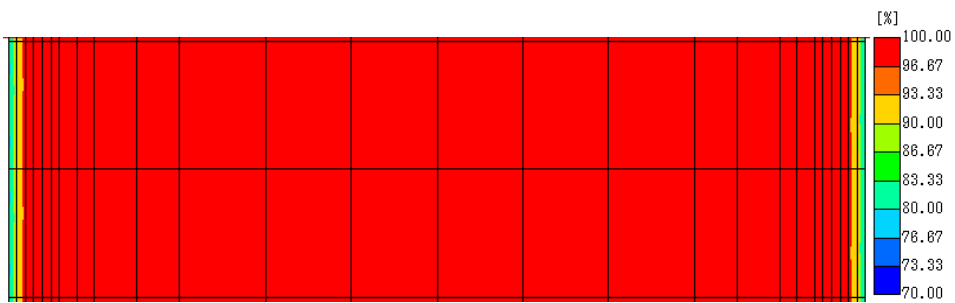


図-8.8 コンクリート内部の水分状態(脱型 7 日, 脱型 3 日後)

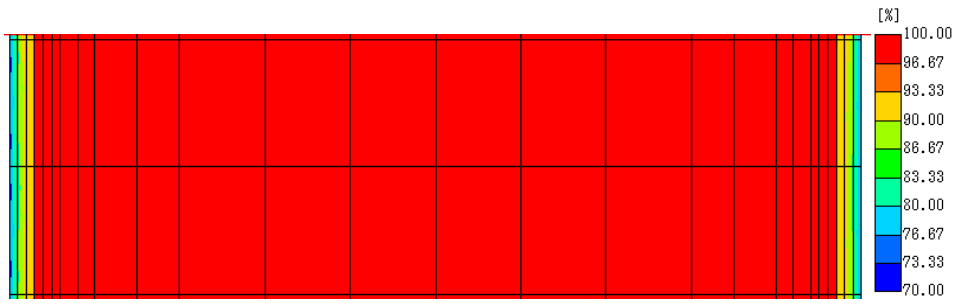


図-8.9 コンクリート内部の水分状態(脱型 7 日, 脱型 7 日後)

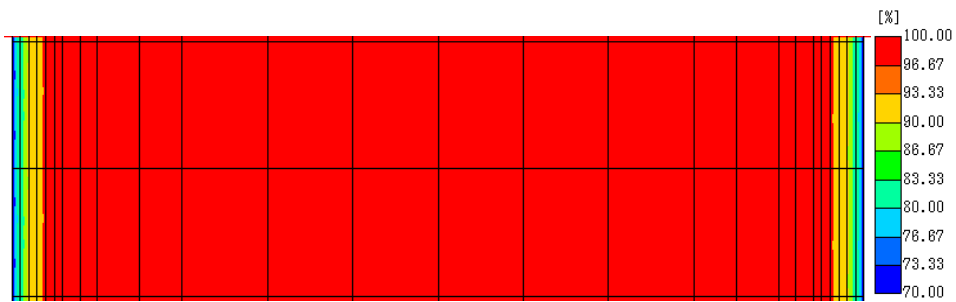


図-8.10 コンクリート内部の水分状態(脱型 7 日, 脱型 14 日後)

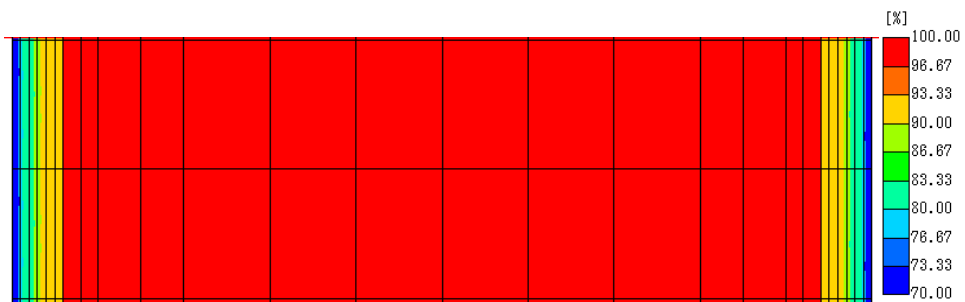


図-8.11 コンクリート内部の水分状態(脱型 7 日, 脱型 28 日後)

(2) 材齢と湿度の関係

型枠脱型時期別にコンクリート構造物の表面，表面から 50mm，100mm の位置における材齢と湿度の関係を図-8.12~14 にそれぞれ示す．図-8.12 からコンクリート表面部の湿度の低下率は，脱型日に関係なく脱型からおよそ 12 時間後でおよそ 80%程度まで低下し，材齢 40 日では脱型日に関係なく 70%程度まで低下する結果となった．また，図-8.13 から，表面から 50mm の位置においても脱型後 3 日程度で 90%程度まで低下している．また，図-8.14 から，表面から 100mm の位置では脱型後もほとんど湿度低下はみられなかった．

この結果から，コンクリート構造物表面部では型枠脱型時期に関係なく表面部から水分の逸散が起こるので，表面部における乾燥収縮の影響が大きくなると考えられる．特に脱型直後は急激な湿度低下を起こしていることから，乾燥収縮にも影響を及ぼしていると考えられる．また，型枠脱型時期が早くなると乾燥の影響を受け，湿潤養生下にある期間が短くなることから，強度増進は小さくなると考えられる．

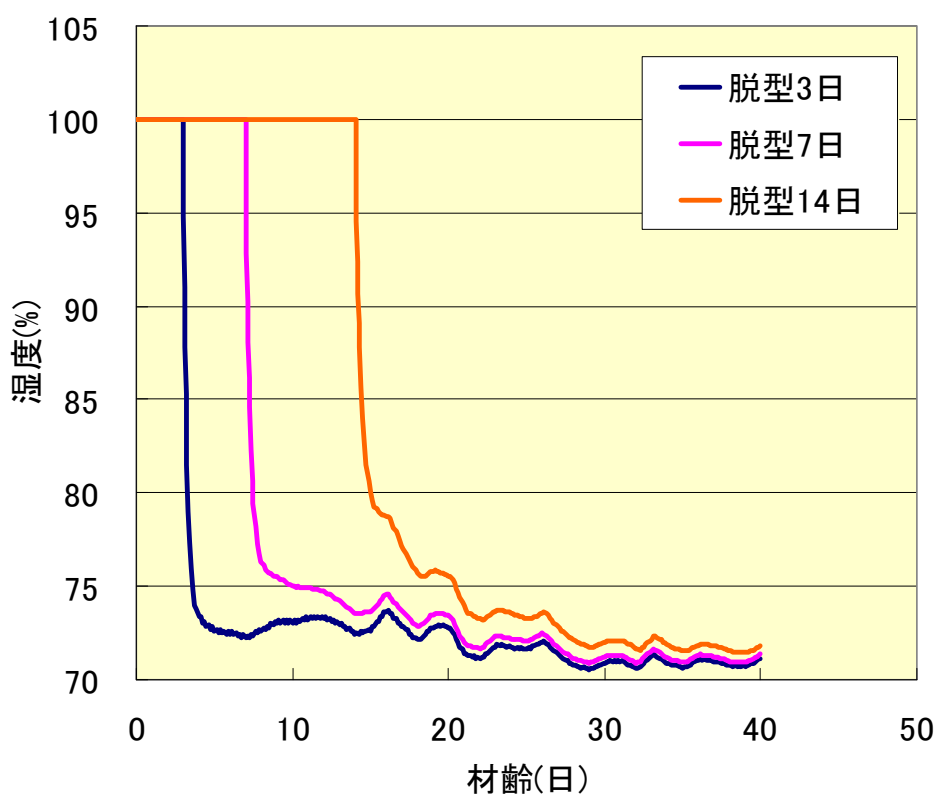


図-8.12 脱型時期別の材齢と湿度の関係(表面部)

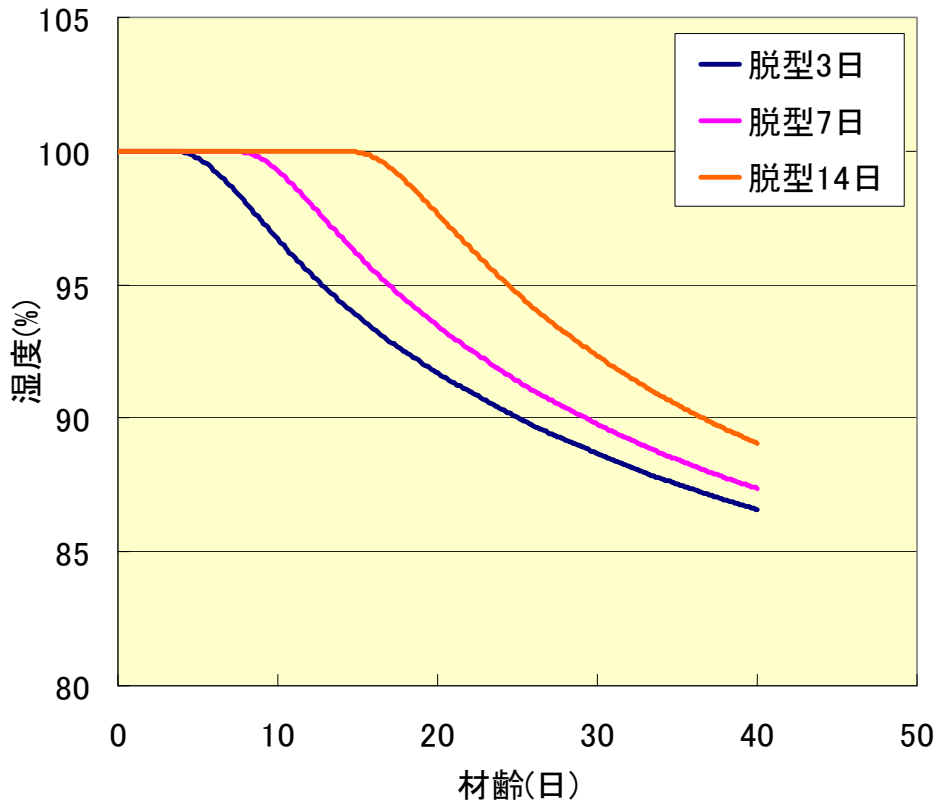


図-8.13 脱型時期別の材齡と湿度の関係(表面から 50mm)

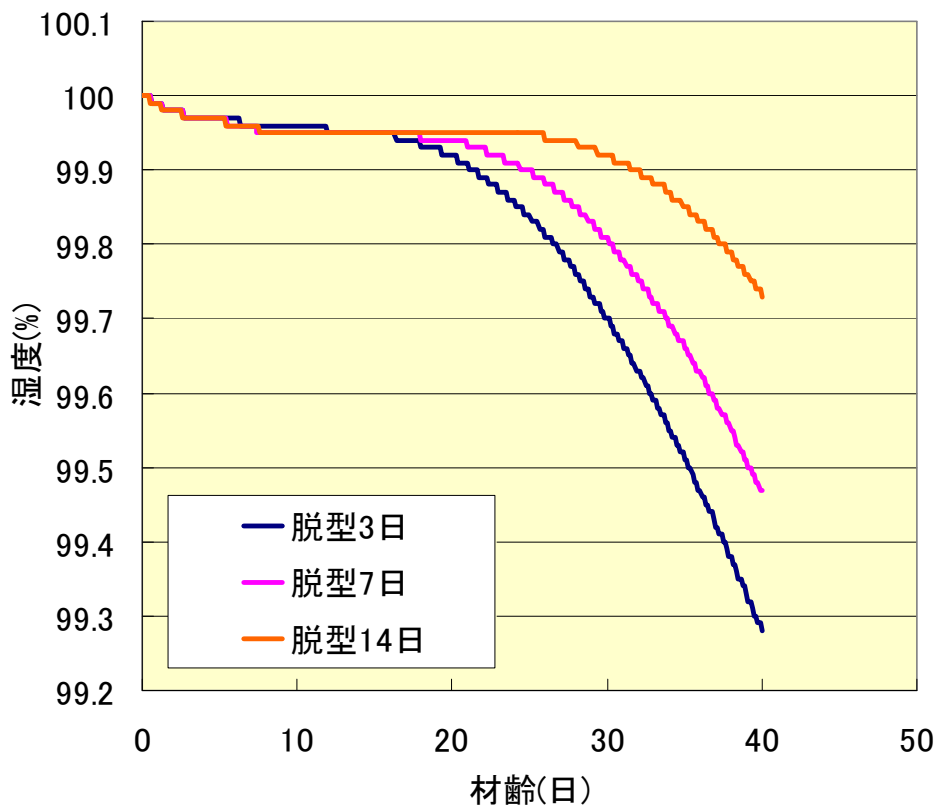


図-8.14 脱型時期別の材齡と湿度の関係(表面から 100mm)

(3) 考察

相対湿度が 60%RH の場合、コンクリート表面部の湿度の低下率が 80%以下となるのは、脱型 3 日および 7 日の場合、12 時間程度、脱型 14 日の場合、24 時間後であり、型枠脱型時期に関わらずほぼ一様な結果となった。また、コンクリート構造物では表面から 50mm までの範囲では乾燥による影響を受けるが、それ以深はほとんど影響を受けなかった。

これらの結果から、コンクリート構造物では型枠脱型時期が早くなるほど、早期に乾燥の影響を受け、水和阻害などによってコンクリート表面部のひび割れ抵抗性は小さくなると考えられる。このことを検討するために、コンクリート表面から 50mm までの範囲について、力学特性試験で得られた結果を基に、湿気移動を考慮した温度応力解析を行い、コンクリート構造物の表面部のひび割れ抵抗性の検討を行うこととした。

8.2 温度応力解析

乾燥収縮および強度低下を考慮しない場合をケース 1, 乾燥収縮のみを考慮した場合をケース 2, 乾燥収縮および強度低下を考慮した場合をケース 3 と称する. 本解析では, 一般によく使用されている粉末度 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ (4000 と称す)を用いたコンクリートを解析対象とし, 粉末度 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ (6000 と称す)および普通ポルトランドセメント(N と称す)を用いたコンクリートを比較対象として解析を行った. 以下に解析結果を示す.

(1) ひずみに関する結果および考察

a) 経時変化

コンクリート表面からの各距離に対するひずみと材齢との関係を, ケース 1~3 における脱型 7 日の場合を図-8.15~17 に, ケース 3 における脱型 3 日および脱型 14 日を図-8.16, 図-8.17 にそれぞれ示す. ケース 3 における脱型 3, 7, 14 日の湿度とひずみの関係を図-8.18 に示す.

図-8.15 から, ケース 1 の場合, 表面部から中央部までのひずみはほぼ同様の値となった. 一方, 図-8.16, 17 では, 型枠脱型までの期間において, コンクリート表面から 50mm までのひずみは温度のみの影響を受けているが, 脱型直後に表面から 10mm の位置でひずみの増加が始まり, 30mm, 50mm の位置でも順次ひずみの増加が始まっている. 脱型後はコンクリート表面から順次乾燥の影響を受けることとなり, 図に示すように相対湿度の低下がある程度進行するとそれに伴い, ひずみが増加していることがわかる. 表面から 100mm の位置では, 相対湿度がほぼ 100%を保っており, 乾燥によるひずみが発生していない. このことから, 乾燥の影響を受けるのは表面から 50mm 程度までだと考えられる

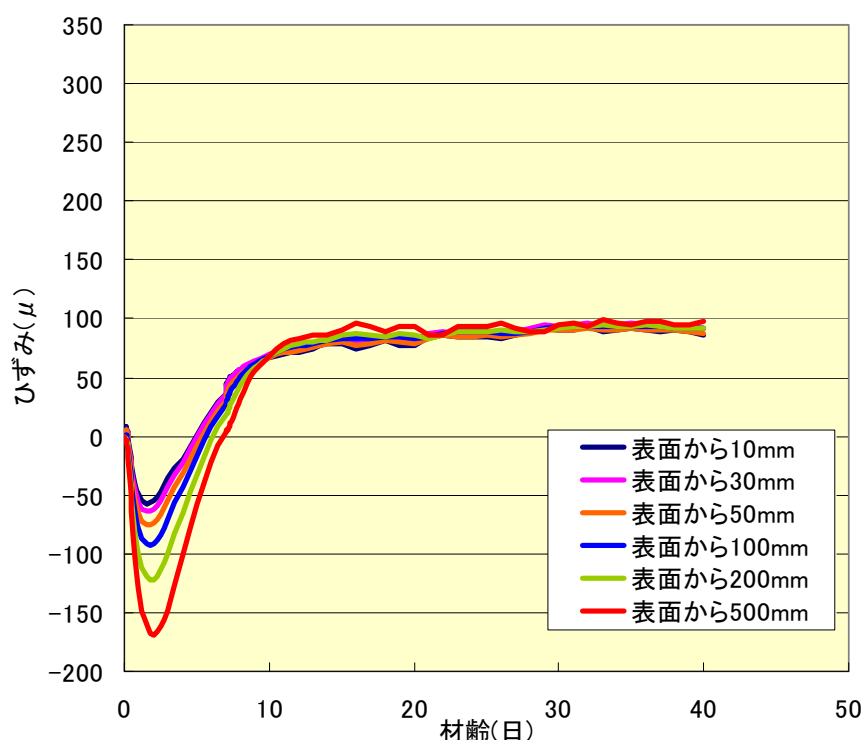


図-8.15 コンクリートひずみ履歴

(ケース 1, 脱型 7 日, 高炉混入コンクリート; 粉末度 $4000\text{cm}^2/\text{g}$)

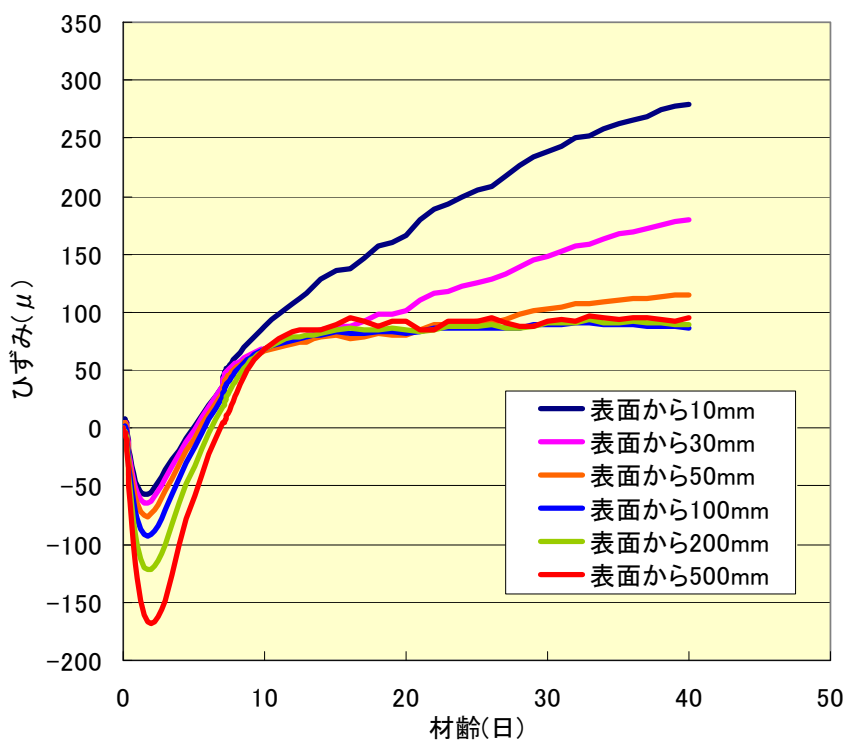


図-8.16 コンクリートひずみ履歴

(ケース 2, 脱型 7 日, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

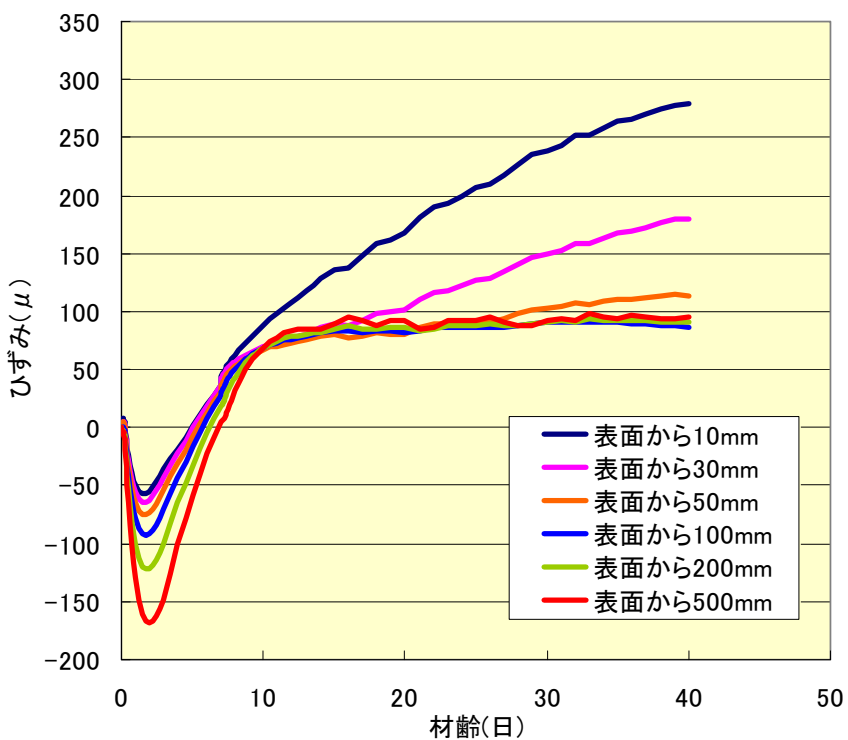


図-8.17 コンクリートひずみ履歴

(ケース 3, 脱型 7 日, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

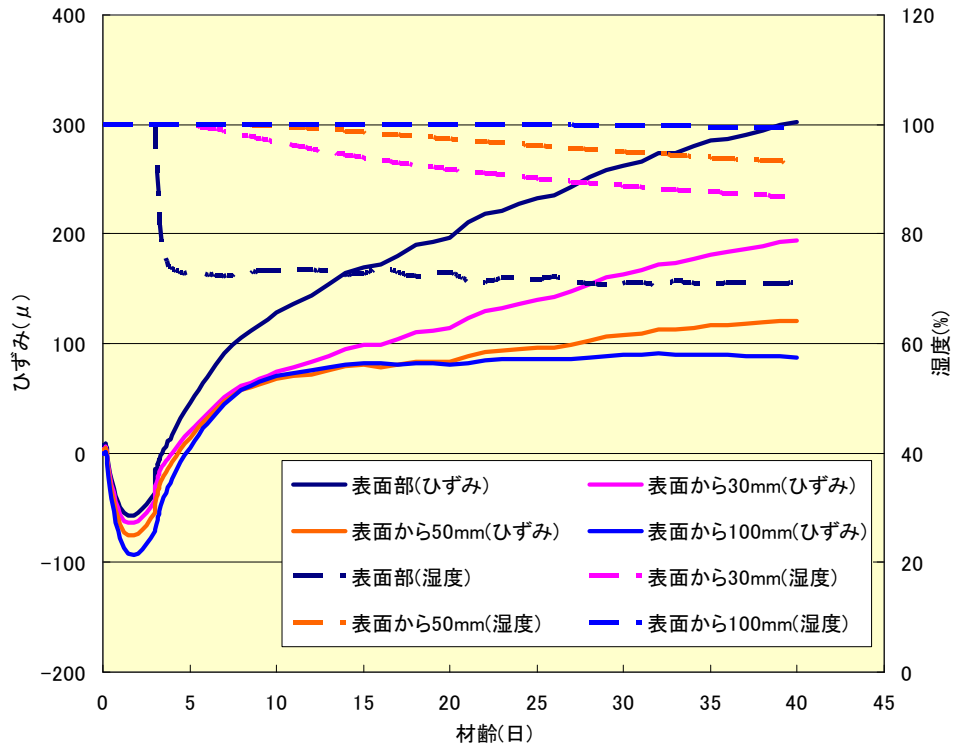


図-8.18 ひずみと湿度との関係

(ケース 3, 脱型 3 日, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

b) 検討ケースによる比較

材齢とひずみの関係のうち、脱型 7 日の場合を検討ケース別に図-8.19 に示す。各ケースにおける最大ひずみを表面からの距離ごとに図-8.20 に示す。

図-8.19 から、乾燥収縮を考慮している検討ケース 2 および 3 では、脱型後から急激にひずみが増加していることがわかる。しかし、検討ケース 2 と検討ケース 3 において発生するひずみに明確な差が認められなかった。また、図-8.20 から、表面部から中央部までのひずみにおいても検討ケース 2 および 3 では、ほぼ同様の値となった。

本解析において、検討ケース 2 では強度低下を考慮せず、打設後から解析終了時まで第 5 章で示した圧縮強度試験における水中養生の強度発現を与え、検討ケース 3 では脱型時までは水中養生の強度を、脱型後は脱型時に応じた気乾養生の強度を与えることによって、乾燥による強度低下を考慮した解析を行った。しかし、検討ケース 2 および検討ケース 3 に発生するひずみに明確な差が現れなかったことから、乾燥によって生じるひずみは強度低下による影響をほとんど受けないと考えられる。ただし、発生するひずみが同様であっても、強度発現は異なるため、ひび割れ抵抗性には差が表れていると思われる。

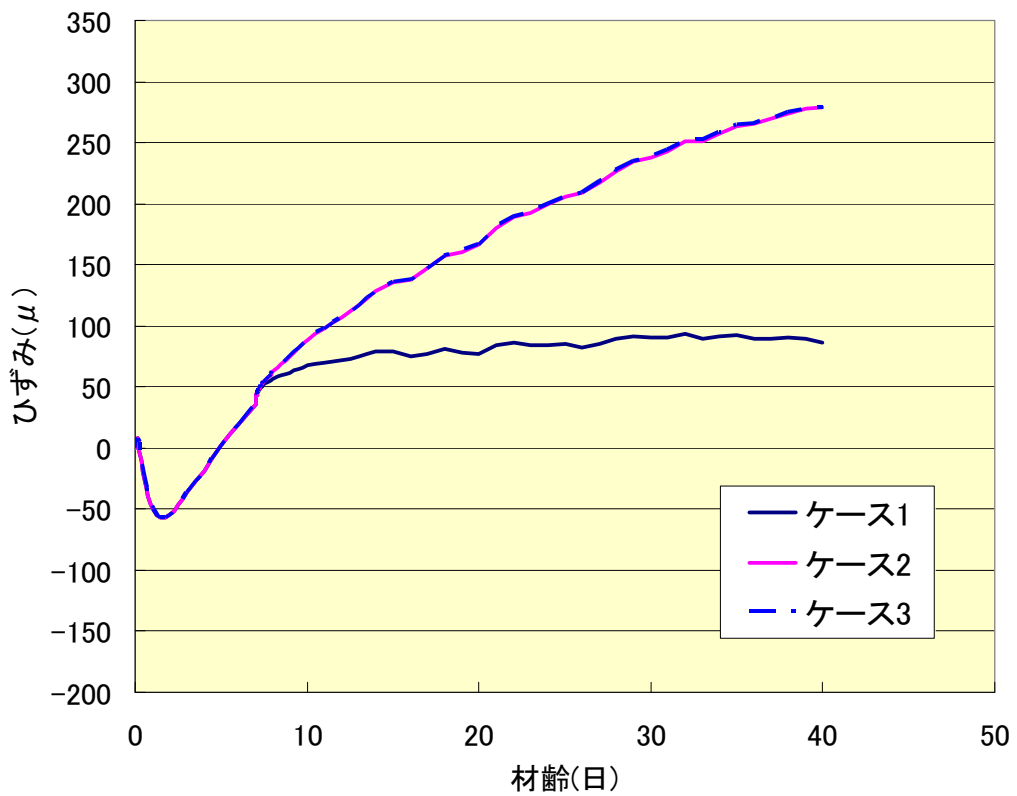


図-8.19 コンクリートひずみ履歴
(脱型 7 日, 表面部, 高炉混入コンクリート; 粉末度 4000cm²/g)

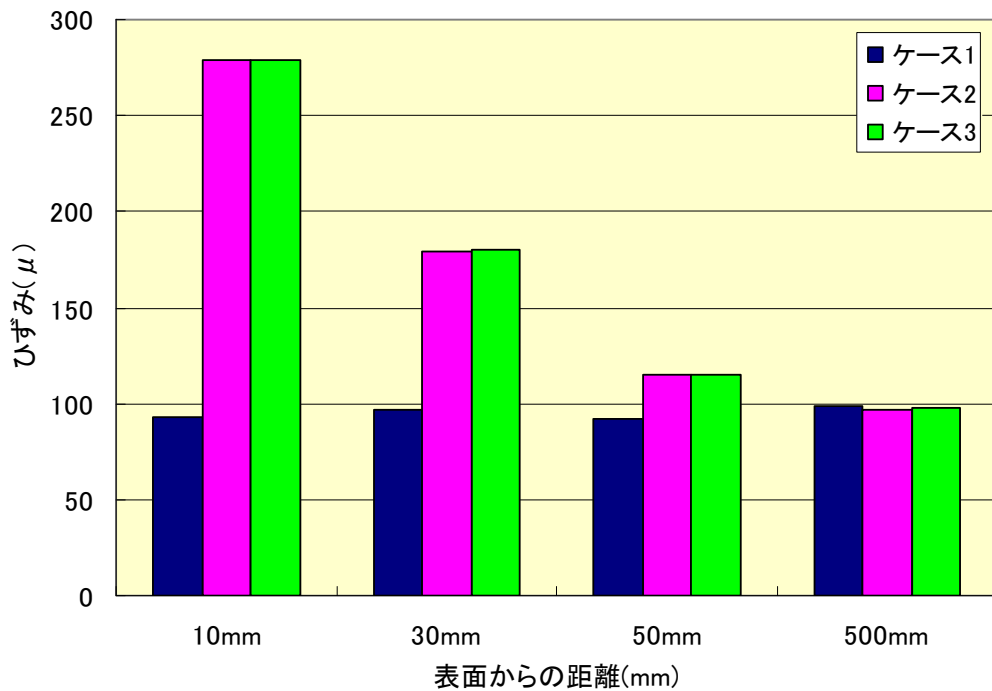


図-8.20 ひずみの最大値
(脱型 7 日, 高炉混入コンクリート; 粉末度 4000cm²/g)

c) 脱型時期による比較

材齢と表面部のひずみの関係のうち、検討ケース 1 を図-8.21 に、検討ケース 3 を図-8.22 に、脱型日別にそれぞれ示す。検討ケース 3 におけるひずみの最大値を脱型日別に図-8.23 に示す。

図-8.21 から、検討ケース 1 の場合、脱型後に若干ではあるがひずみの増加がみられる。しかし、材齢の経過とともに脱型時期の差は少なくなり、材齢 14 日程度で脱型日に関わらずすべてが 100μ 程度のひずみに収束している。このことから、乾燥収縮を考慮しないで解析を行った場合、脱型時期を変えることによる乾燥収縮ひずみの変化の影響をほとんど考慮できないと考えられる。

また、図-8.22, 23 から、表面部のひずみは、脱型 3 日で 300μ 程度、脱型 7 日で 280μ 程度、脱型 14 日で 250μ 程度の値になった。高炉混入コンクリートは十分な湿潤養生を行うことで、ペーストの細孔容積が減少し、密実になるので、乾燥収縮が低減する。しかし、水和反応が十分に進んでいない状態で脱型を行うと、乾燥の影響を受けることで水和反応が阻害され、十分な水和反応物が生成されず内部が粗の状態となり、水分の逸散が促進され、乾燥収縮ひずみが大きくなったと考えられる。

また、図-8.23 から、表面から 50mm の位置におけるひずみは、脱型 3 日で 120μ 程度、脱型 7 日で 110μ 程度、脱型 14 日で 100μ 程度の値となり、若干ではあるが、脱型時期が早いほどひずみが大きくなっている。しかし、型枠存置期間が 11 日も異なるにも関わらず、 20μ 程度の差しかないことから、 50mm 以深では湿度低下に伴う乾燥の影響はほとんどないと考えられる。

これらのことから、脱型時期が早くなるほど、コンクリート表面部から 50mm の深さまでのひずみは大きくなる傾向が示された。ただし、表面からの距離が深くなるほど、脱型時期の影響は少なくなり、表面から 50mm の位置では脱型時期による発生ひずみへの影響は、若干認められるものの、ほとんど影響はないと考えられる。

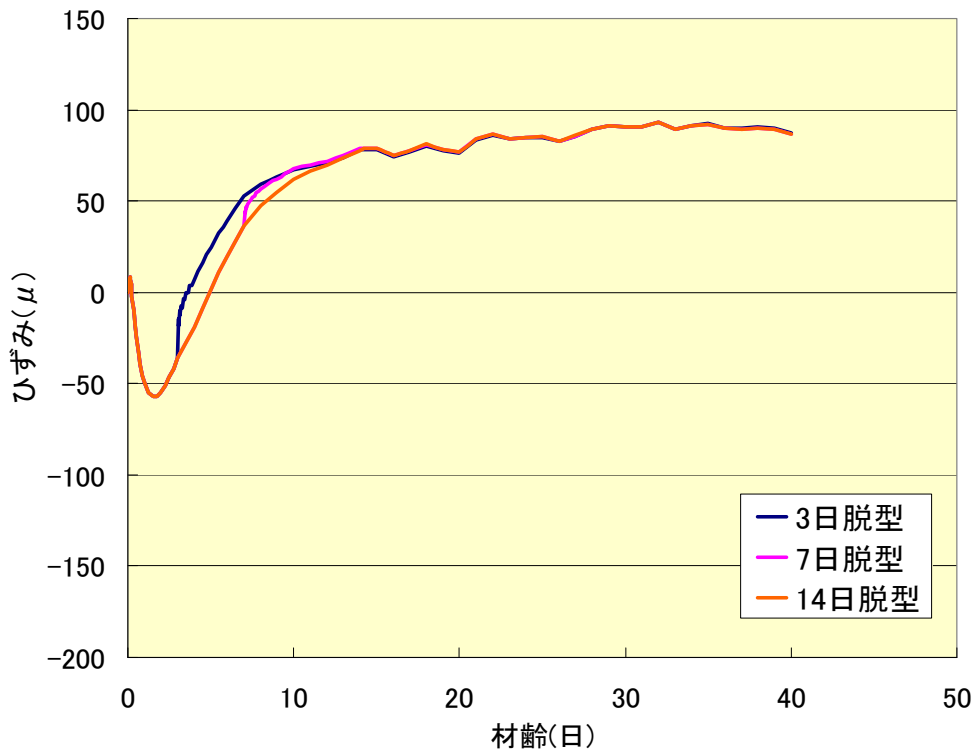


図-8.21 コンクリートひずみ履歴
(ケース 1, 表面部, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

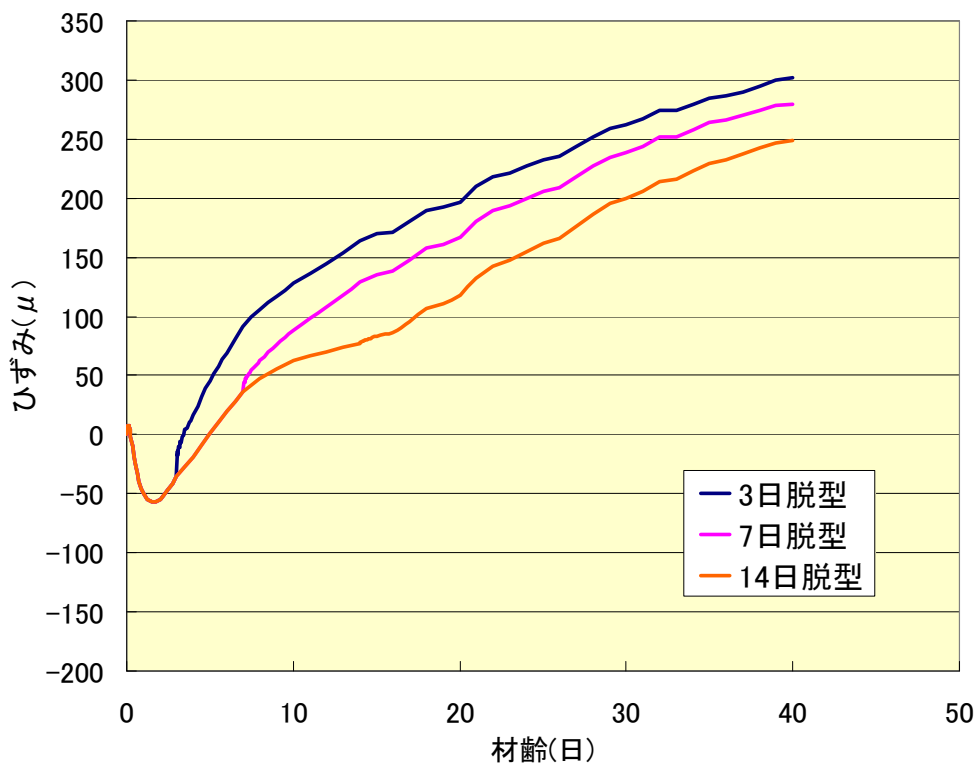


図-8.22 コンクリートひずみ履歴
(ケース 3, 表面部, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

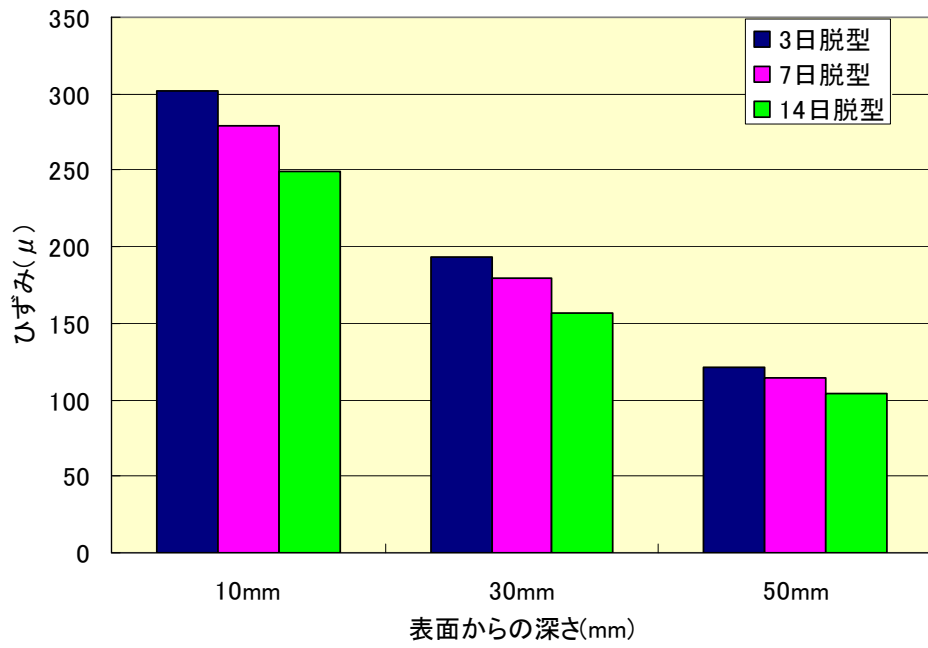


図-8.23 脱型日別 最大ひずみの比較
 (ケース 3, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

d) セメント種別による比較

コンクリートの表面部のひずみ履歴のうち、4000と6000を比較したものを図-8.24に、4000とNを比較したものを図-8.25にそれぞれ示す。また、各コンクリートにおける発生ひずみの最大値を脱型日別に図-8.26に、使用セメント別に図-8.27にそれぞれ示す。

図-8.24から、脱型時期に関わらず、4000よりも6000の方が発生するひずみが大きくなっている。既往の研究⁶⁾¹²⁾において、同一置換率の場合、比表面積が小さいほど、自己収縮が小さくなるという報告や、置換率50%の高炉スラグを用いたモルタルの初期の乾燥は、高炉スラグ微粉末の比表面積が大きいほど大きくなるという報告がある。本解析では、乾燥収縮のみではなく自己収縮も考慮していることや、粉末度の影響によって4000よりも6000の方が発生するひずみが大きくなったと考えられる。

図-8.25から、脱型時期に関わらず、4000の方がNよりも発生するひずみが大きくなっている。既往の研究⁶⁾⁷⁾において、高炉スラグ混入コンクリートに比べ、普通コンクリートは自己収縮が小さくなることや、高炉混入コンクリートの自己収縮ひずみが普通コンクリートに比べて、2~3倍となることや、材齢初期において高炉混入コンクリートの方が普通コンクリートに比べて若干乾燥収縮ひずみが大きくなるという報告がある。本解析でもそのような傾向がみられた。

図-8.26から、脱型日に関わらず6000におけるひずみが他のセメントよりも大きくなっていることがわかる。4000と6000におけるひずみの差は、脱型日に関わらず10 μ 程度だが、普通コンクリートと高炉混入コンクリートでは50 μ 程度の差となっている。これらのことから、高炉スラグ微粉末を用いる場合、型枠脱型直後における乾燥収縮ひずみは、普通コンクリートに比べて大きくなることから、初期の乾燥収縮ひび割れに留意する必要があると考えられる。ただし、既往の研究⁸⁾において、乾燥収縮ひずみは置換率50%程度の高炉スラグ微粉末を用いた場合、長期間の乾燥では、無混入のものとほぼ同程度、もしくは若干大きくなる程度であることが報告されている。高炉スラグ微粉末はモルタル部分の細孔構造に大きな影響を与え、比表面積と置換率が大きいほど、細孔量と細孔径は小さくなるといわれている⁸⁾。潜在水硬性が十分に発揮されていない初期の材齢では、普通コンクリートに比べ乾燥収縮は大きくなったが、長期材齢においては、潜在水硬性の発現により内部が緻密となり、細孔量および細孔径も小さくなり乾燥収縮は普通コンクリートに比べ減少すると考えられる。

本解析では、脱型時期を変えることで乾燥収縮にどのような影響を与えるかを検討するために解析を行った。材齢40日まででは、普通コンクリートよりも高炉混入コンクリートの方が乾燥収縮は大きく、また、粉末度が大きくなるに従い、乾燥収縮も大きくなる結果となった。しかし、長期の材齢では、高炉混入コンクリートと普通コンクリートの乾燥収縮は同程度となるという報告もあるため、今後、長期的な解析を行い検討する必要があると考えられる。

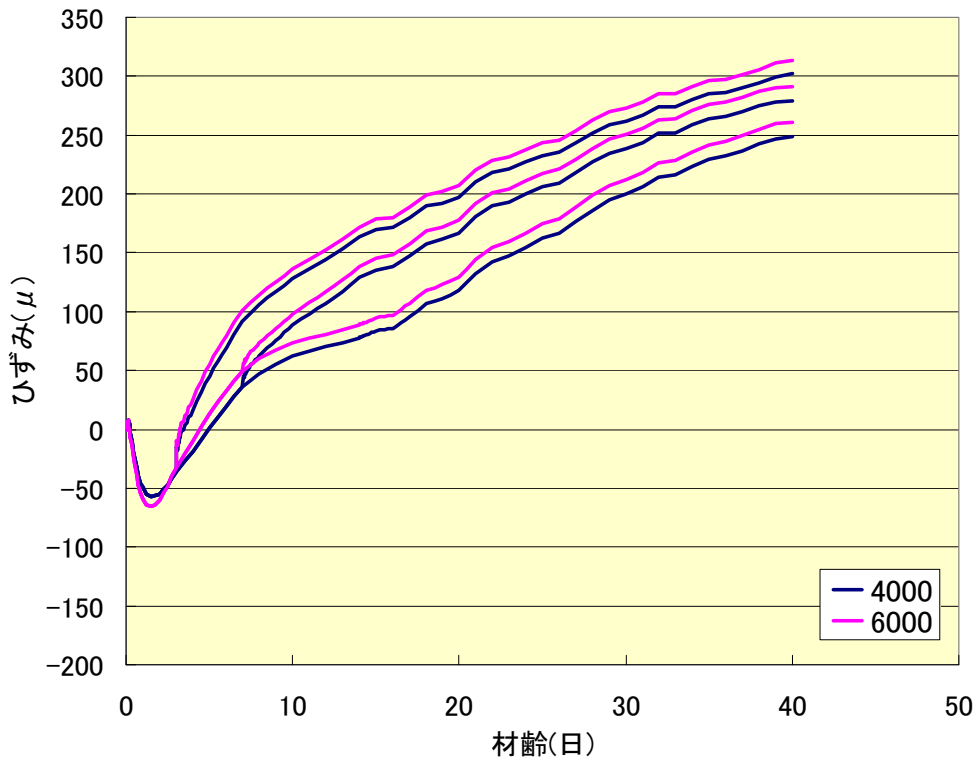


図-8.24 コンクリートひずみ履歴 4000 と 6000 の比較
(ケース 3, 表面部)

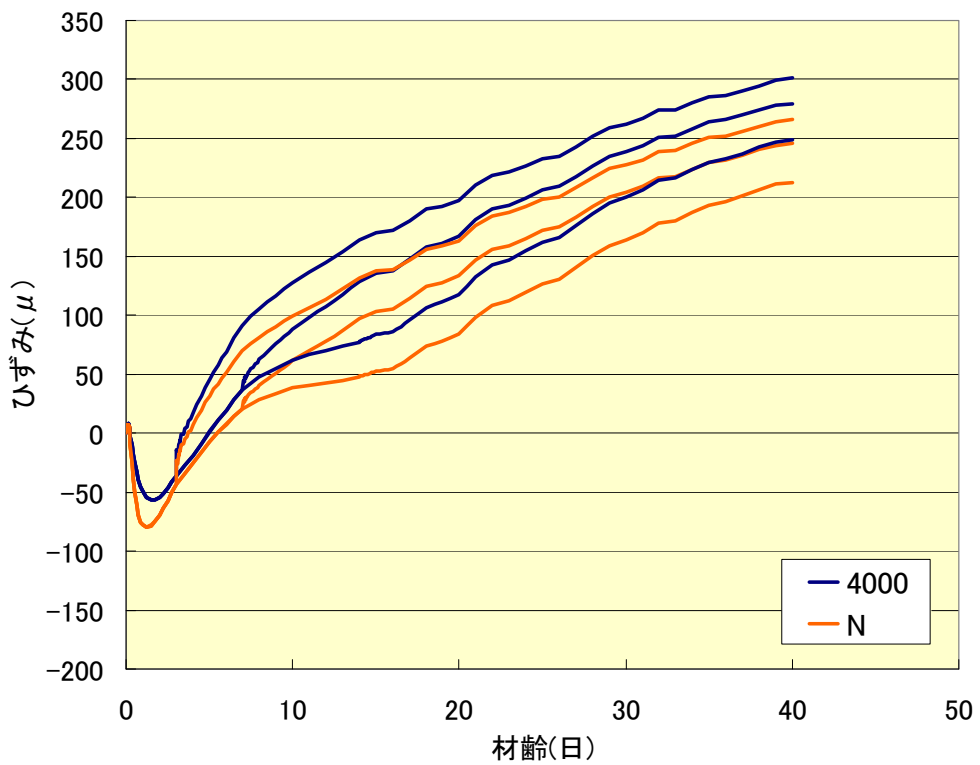


図-8.25 コンクリートひずみ履歴 4000 と N の比較
(ケース 3, 表面部)

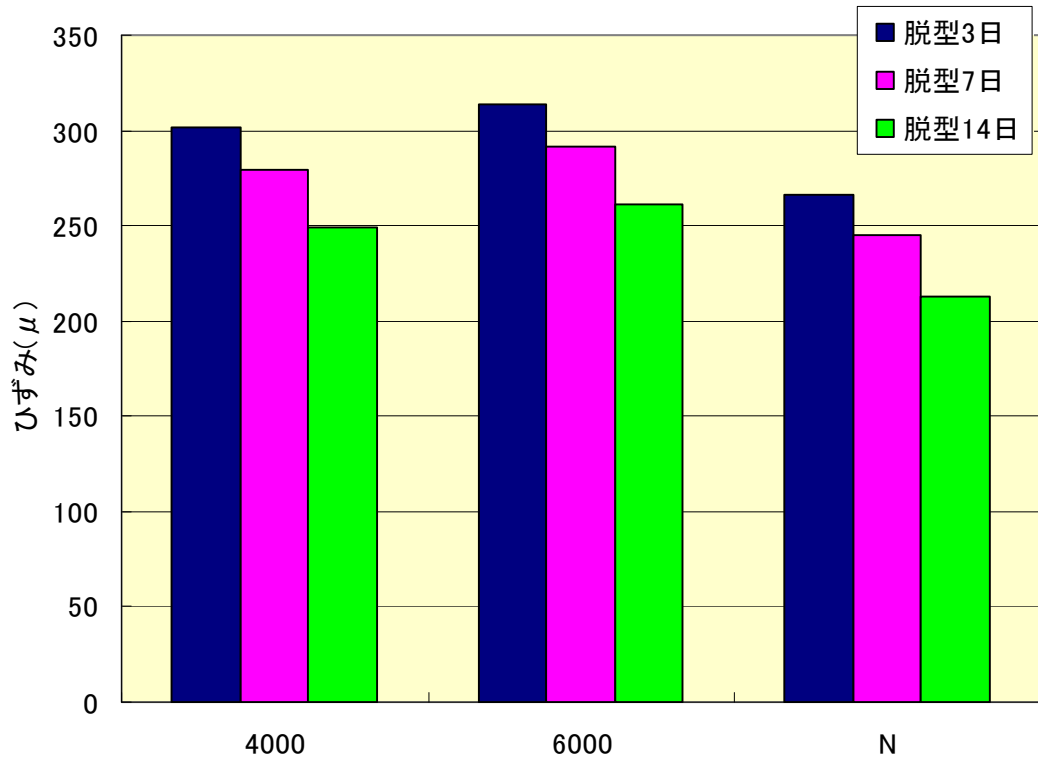


図-8.26 セメント別 ひずみの最大値
(ケース 3)

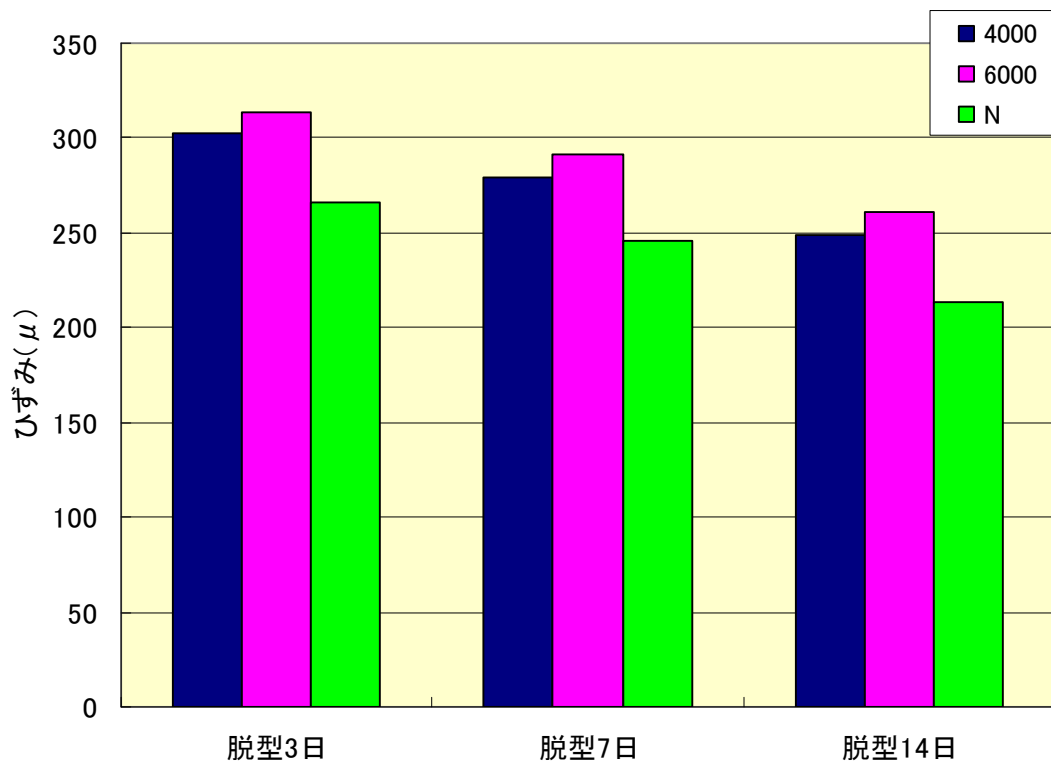


図-8.27 脱型日別 ひずみの最大値
(ケース 3)

(2) 応力に関する結果および考察

a) 経時変化

コンクリート表面からの各距離に対する応力と材齢との関係を，検討ケース 1~3 における脱型 7 日の場合を図-8.28~30 に，検討ケース 3 における脱型 3 日および脱型 14 日を図-8.31，図-8.32 にそれぞれ示す。

検討ケース 1 では，温度変化の影響のみを受けることにより，中央部(表面から 500mm)における発生応力が最大となり，表面に近づくごとに発生応力小さくなっている傾向を示している。一方，検討ケース 2 及び 3 では，型枠脱型までの期間は検討ケース 1 と同様の傾向を示しているが，脱型直後から表面部の応力が急激に増加する結果となった。また，脱型後，乾燥の進行に伴い，表面から 30mm および 50mm の位置でも順次応力が増加している。これらは，表面部からの水分の乾燥により発生したものと考えられる。また，50mm 以深では，材齢 40 日までは応力の増加が見られないことから，乾燥の影響は材齢 40 日までは 50mm 以深ではほとんどないと考えられる。

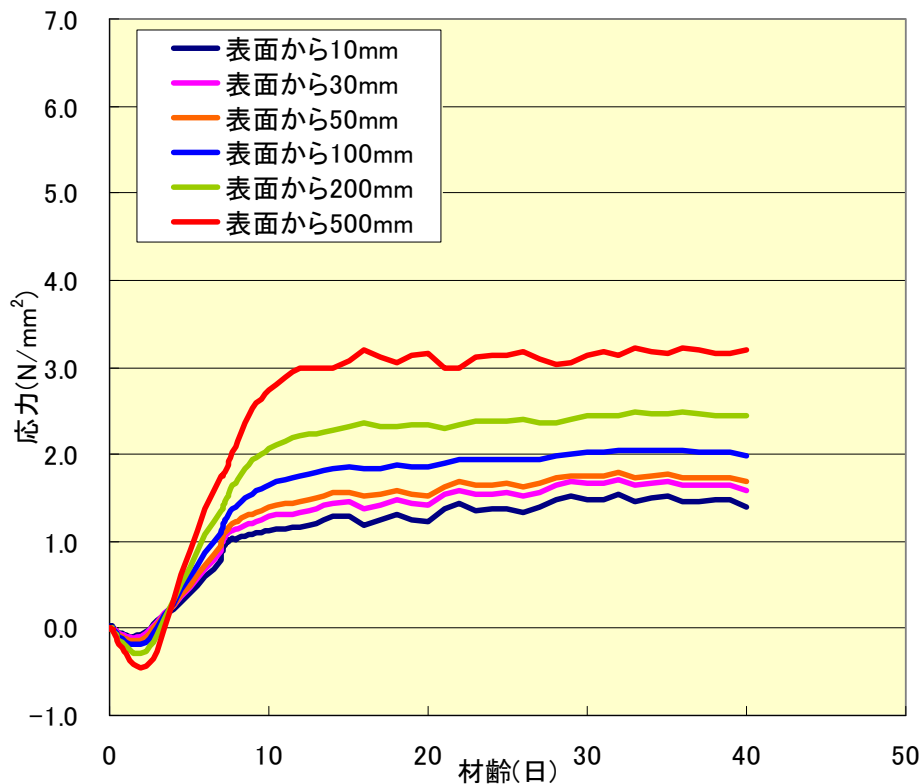


図-8.28 コンクリート応力履歴

(ケース 1, 脱型 7 日, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

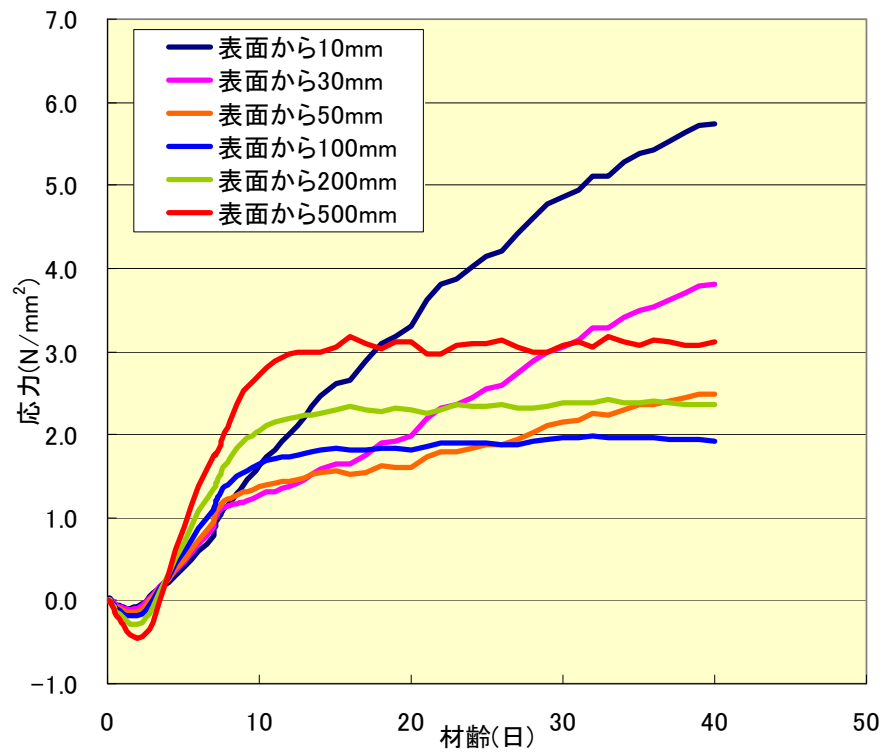


図-8.29 コンクリート応力履歴

(ケース 2, 脱型 7 日, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

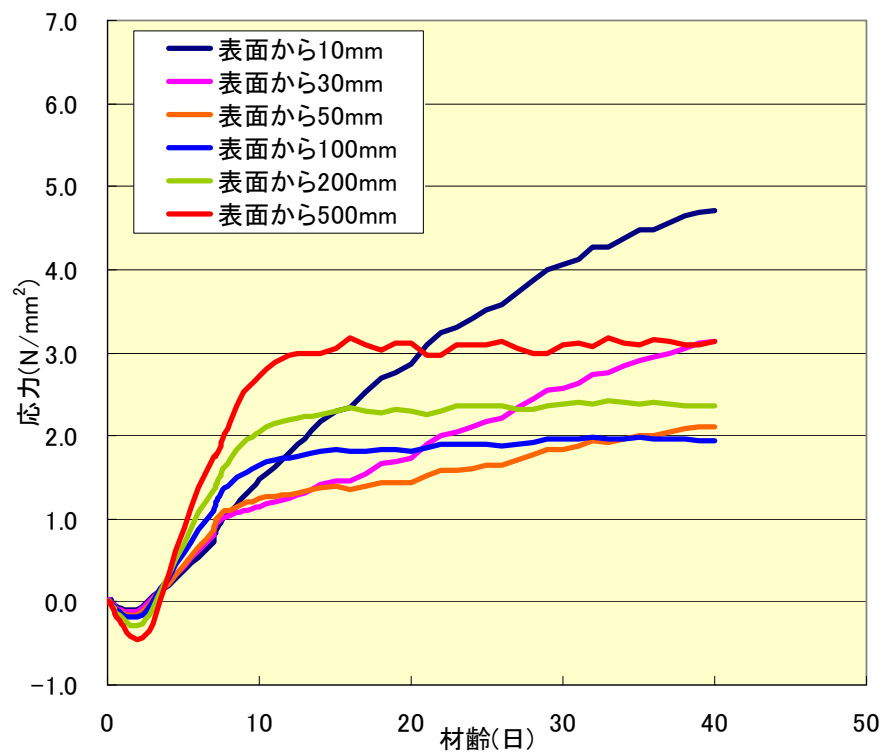


図-8.30 コンクリート応力履歴

(ケース 3, 脱型 7 日, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

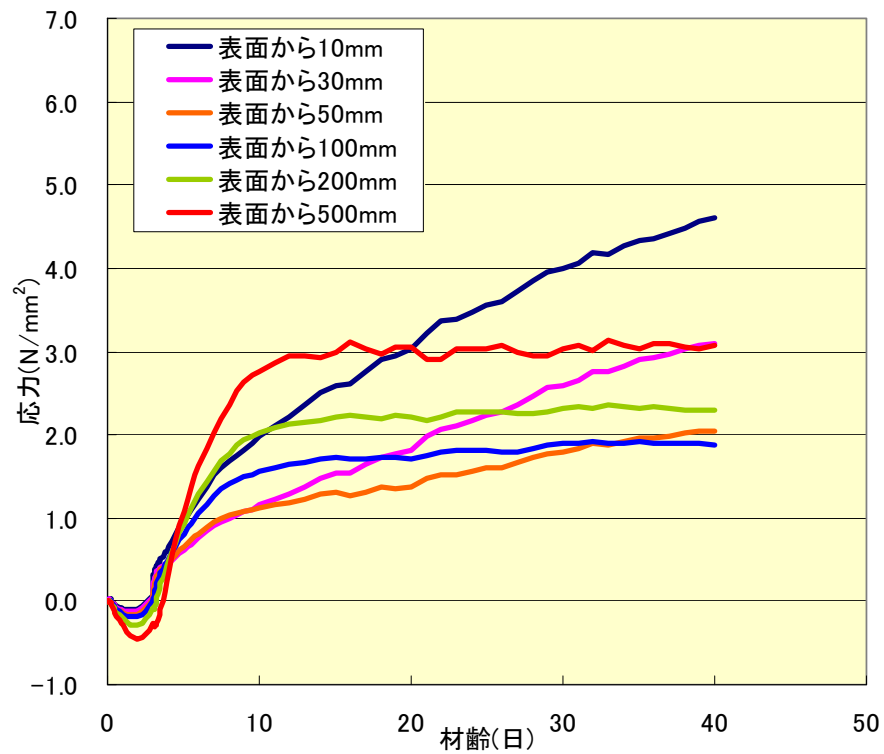


図-8.31 コンクリート応力履歴

(ケース 3, 脱型 3 日, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

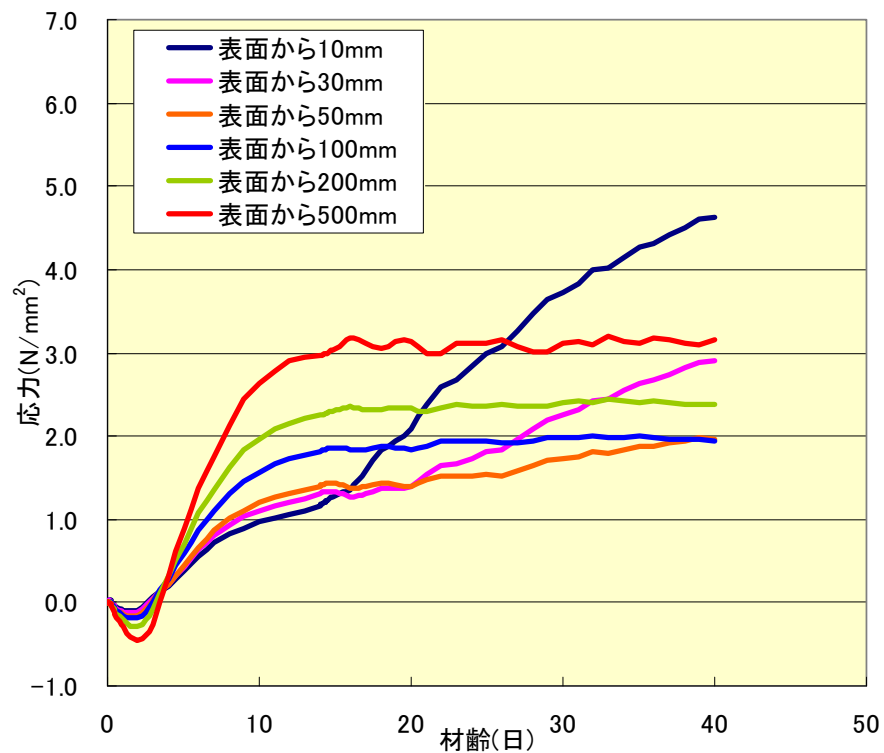


図-8.32 コンクリート応力履歴

(ケース 3, 脱型 14 日, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

b) 検討ケースによる比較

材齢と表面部の応力の関係のうち、脱型 7 日を検討ケース別に図-8.33 に示す。

図-8.33 から、脱型時期に関わらず、検討ケース 2, 3, 1 の順に発生応力が大きくなっていることがわかる。検討ケース 1 においては、脱型時期に関わらずおよそ材齢 7 日以降で発生応力はほぼ一定となっている。これは、乾燥収縮の影響を考慮していないため、温度変化の影響のみを受けたためと考えられる。一方、検討ケース 2 および 3 では、発生応力は材齢の経過に伴い増加を続けている。これは、表面部から水分が逸散することにより発生した乾燥収縮ひずみに起因していると考えられる。また、検討ケース 2 および 3 で発生応力に差が生じている。これは、検討ケース 2 では水中養生した場合の圧縮強度の発現式を与えているのに対し、検討ケース 3 では、脱型時までは水中養生、脱型後は脱型時期に応じた気乾養生を与えているため、検討ケース 2 の方が、発生応力が高くなったと考えられる。

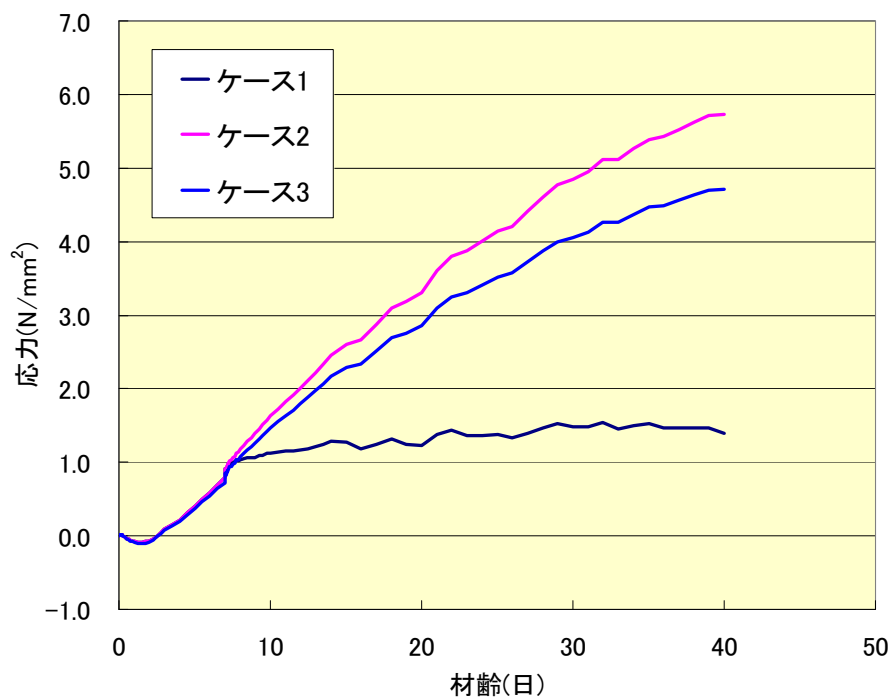


図-8.33 コンクリート応力履歴
(表面部, 脱型 7 日, 高炉混入コンクリート; 粉末度 4000cm²/g)

c) 脱型時期による比較

各検討ケースにおける材齢と表面部の応力の関係を脱型日別に、図-8.34～36 にそれぞれ示す。各検討ケースにおける表面深さごとの最大引張応力を、脱型日別に、図-8.37～39 にそれぞれ示す。

図-8.34 から、検討ケース 1 の場合、脱型 3 日の場合のみ若干低い応力となっているものの、脱型時期による影響はほとんど見られず、発生応力は 1.5N/mm^2 程度に収束している。一方、図-8.35 および 36 から、検討ケース 2 および 3 では脱型直後に急激な応力の増加がみられる。しかし、発生応力は材齢の経過に伴い、脱型日に関わらず 4.5N/mm^2 程度に収束する結果となった。

また、図-8.37～39 から、各検討ケースにおいて、脱型時期に関わらず、最大引張応力はほぼ同様のものとなった。

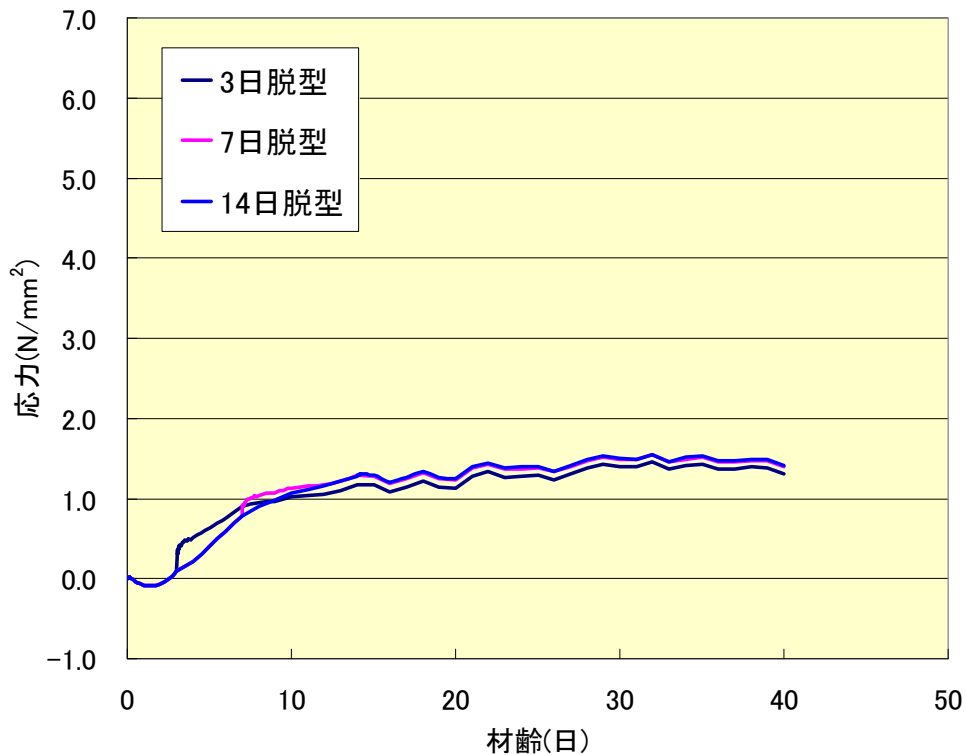


図-8.34 コンクリート応力履歴

(ケース 1, 表面部, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 $4000\text{cm}^2/\text{g}$)

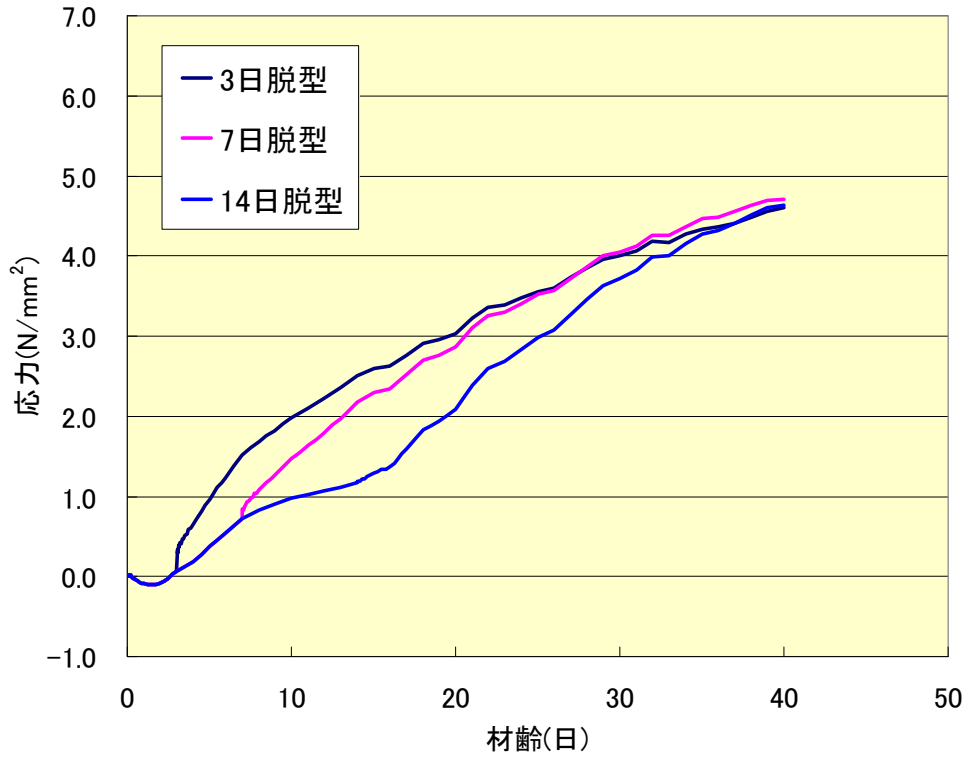


図-8.35 コンクリート応力履歴
(ケース 2, 表面部, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

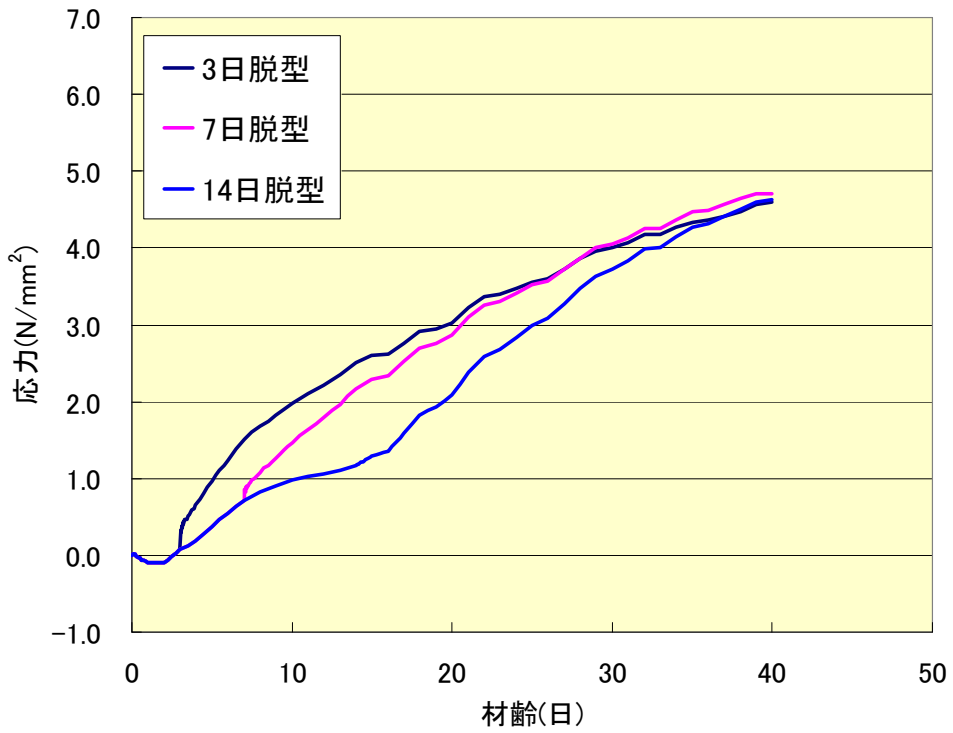


図-8.36 コンクリート応力履歴
(ケース 3, 表面部, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

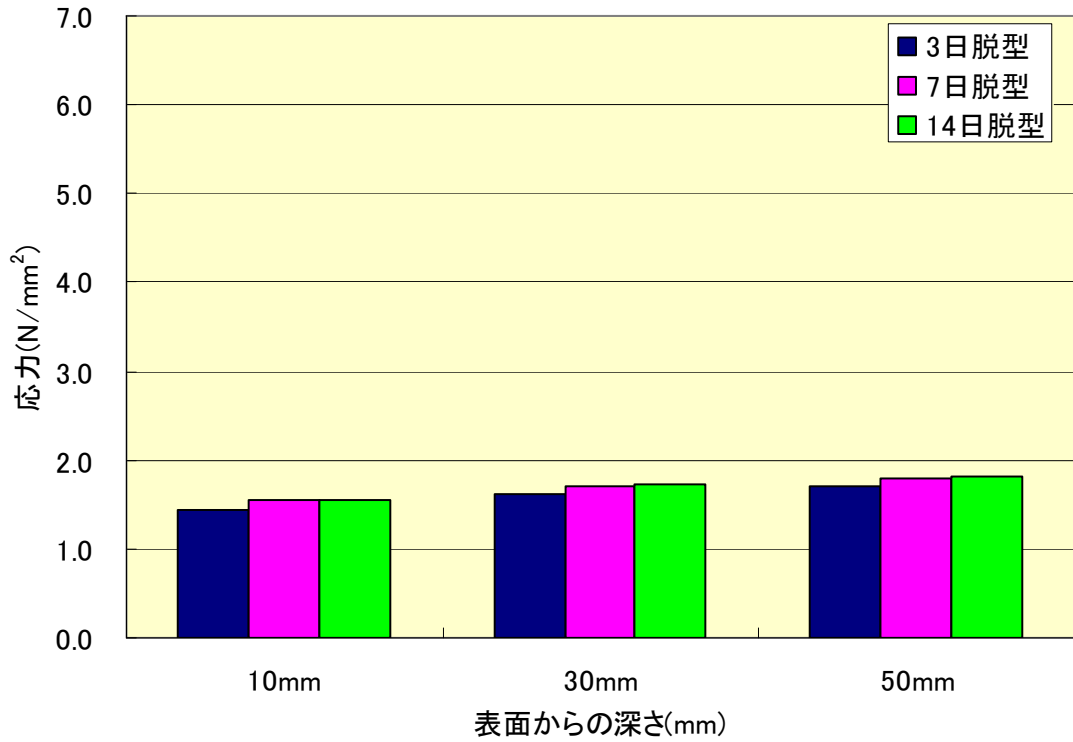


図-8.37 脱型日別 最大引張応力
(ケース 1, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

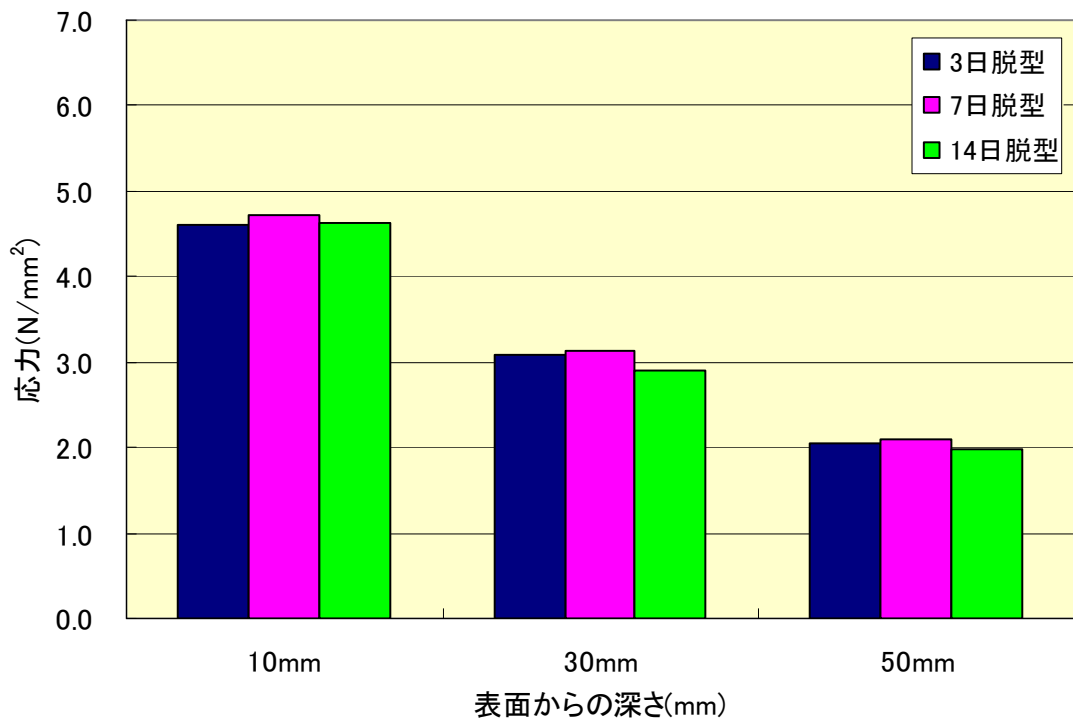


図-8.38 脱型日別 最大引張応力
(ケース 2, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

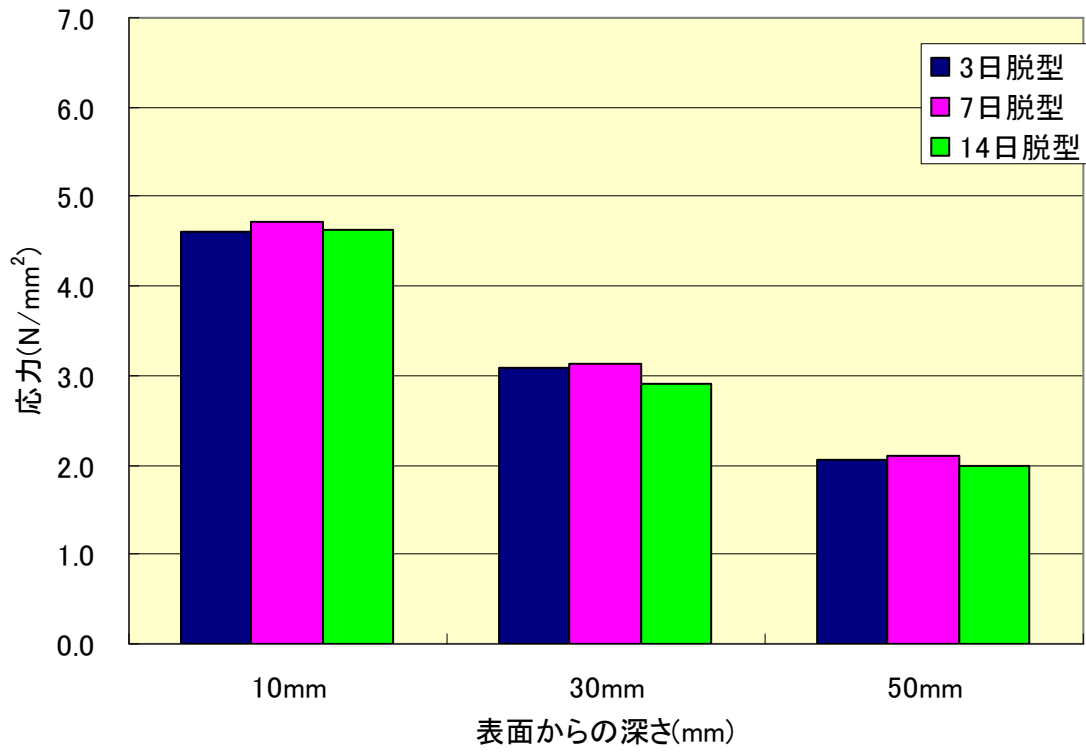


図-8.39 脱型日別 最大引張応力
 (ケース 3, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

(3) ひび割れ指数に関する結果および考察

a) 経時変化

コンクリート表面からの各距離に対するひび割れ指数と材齢との関係のうち、検討ケース 1~3 における脱型 7 日の場合を図-8.40~42 にそれぞれ示す。

図 8.40 から、検討ケース 1 の場合、表面から 10~50mm の範囲において、脱型直後に若干のひび割れ指数の小さくなるが、その後、表面からの距離ごとにそれぞれ一定の値となった。一方、図-8.41 および 42 から、検討ケース 2 および 3 では、表面から 10~50mm の範囲において、脱型直後に急激にひび割れ指数が減少し、その後も緩やかに減少を続けている。これは、検討ケース 2 および 3 は、乾燥収縮を考慮しているため、乾燥収縮ひずみが材齢に伴い増加していることに起因していると考えられる。

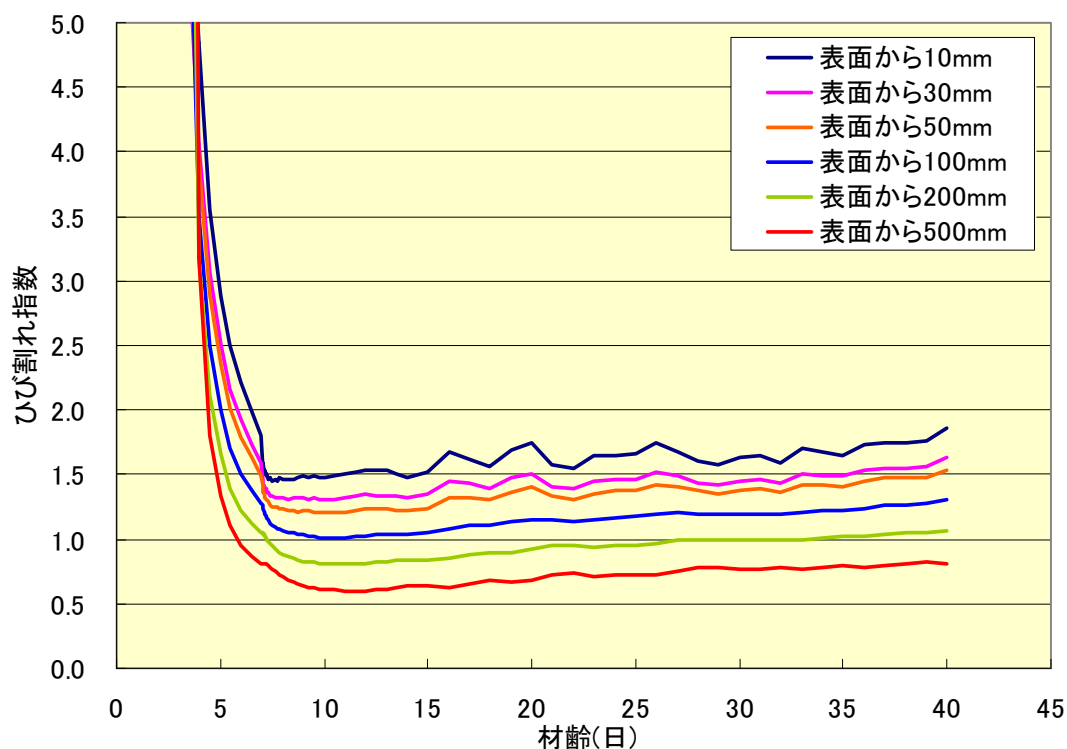


図-8.40 コンクリート指数履歴

(ケース 1, 脱型 7 日, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

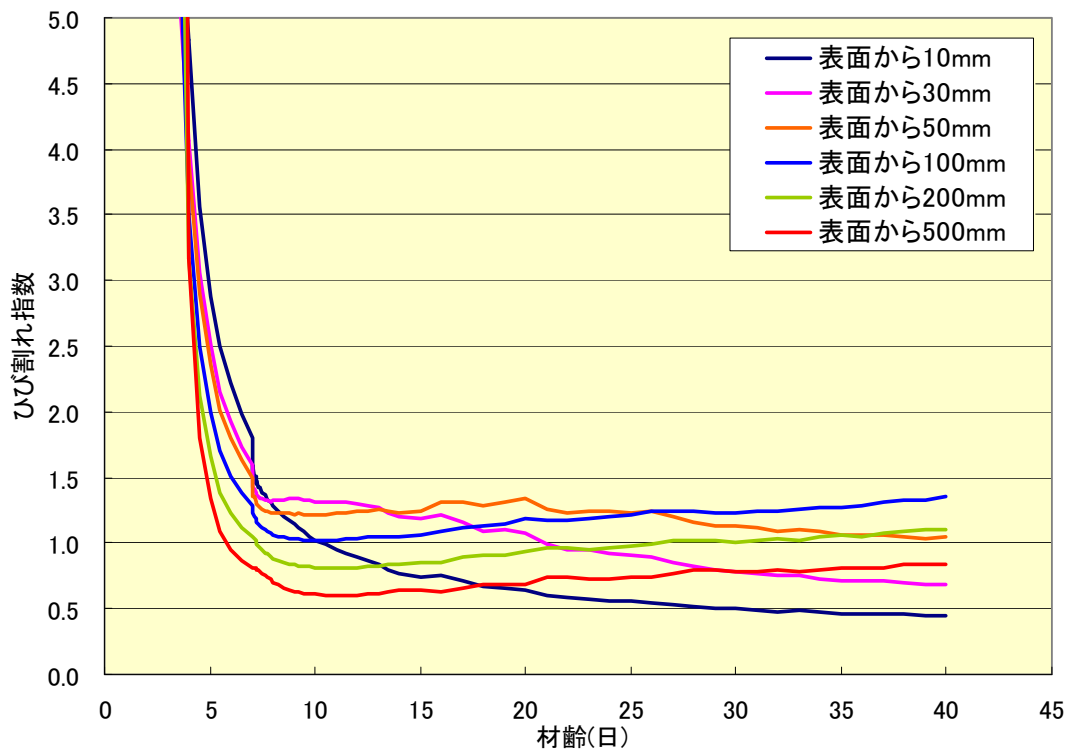


図-8.41 コンクリート指数履歴
 (ケース 2, 脱型 7 日, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

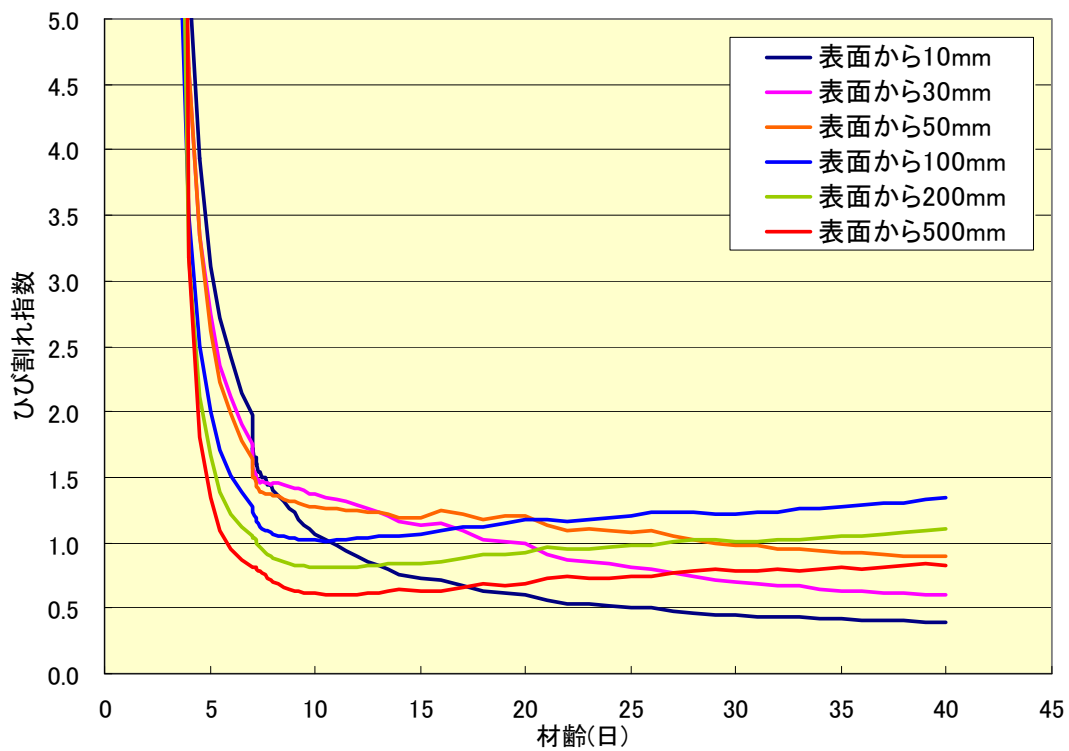


図-8.42 コンクリート指数履歴
 (ケース 3, 脱型 7 日, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

b) 検討ケースによる比較

材齢と表面部のひび割れ指数の関係のうち、脱型 7 日のものを図-8.43 に検討ケース別に示す。また、脱型 7 日における表面深さごとの最小ひび割れ指数を検討ケース別に図-8.44 に示す

図-8.43 から、検討ケース 1 においては脱型時期に関わらず表面部の最小ひび割れ指数は 1.5 以上の値となっており、これらのひび割れ発生確率は 12%程度である。なお、ひび割れ発生確率は、マスコンクリートひび割れ制御指針に従って算出した。一方、表面部の最小ひび割れ指数は、検討ケース 2 の場合 0.45、検討ケース 3 の場合 0.40 であり、ひび割れ発生確率は 100%となり、表面部にひび割れが生じる結果となっている。また、検討ケース 3 においては、表面から 50mm の位置においても、ひび割れ指数が 0.80 となり、ひび割れ発生確率は、84%となった。このことから、検討ケース 3 において、乾燥に起因する表面部のひび割れは内部にまで進行する可能性があると考えられる。

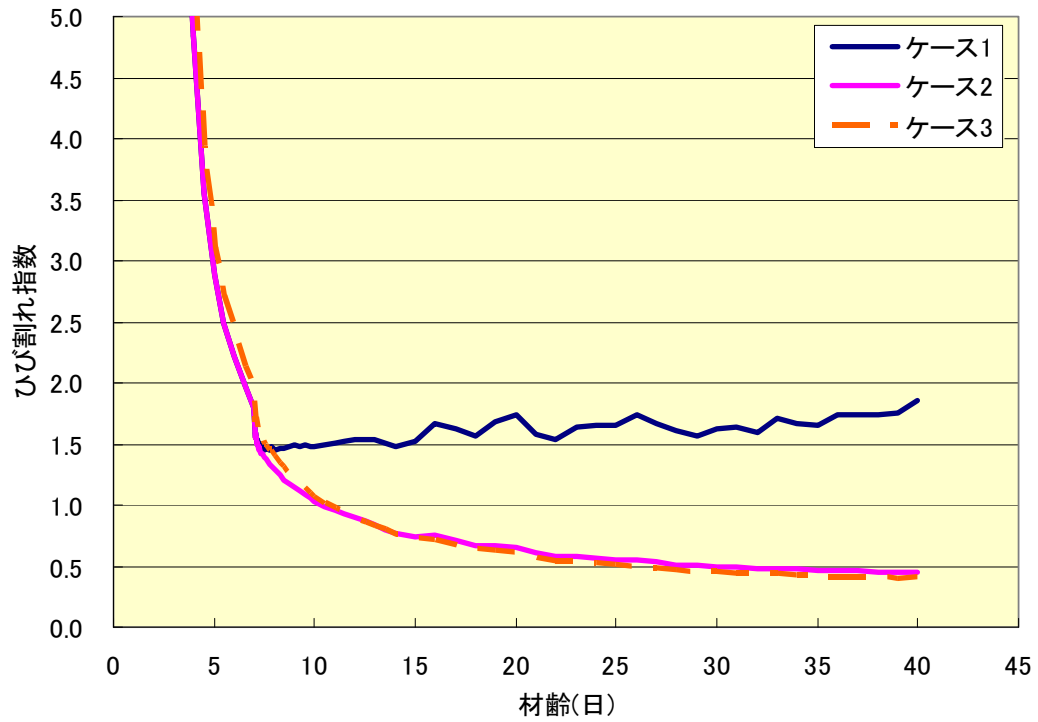


図-8.43 コンクリート指数履歴
(脱型 7 日, 表面部, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

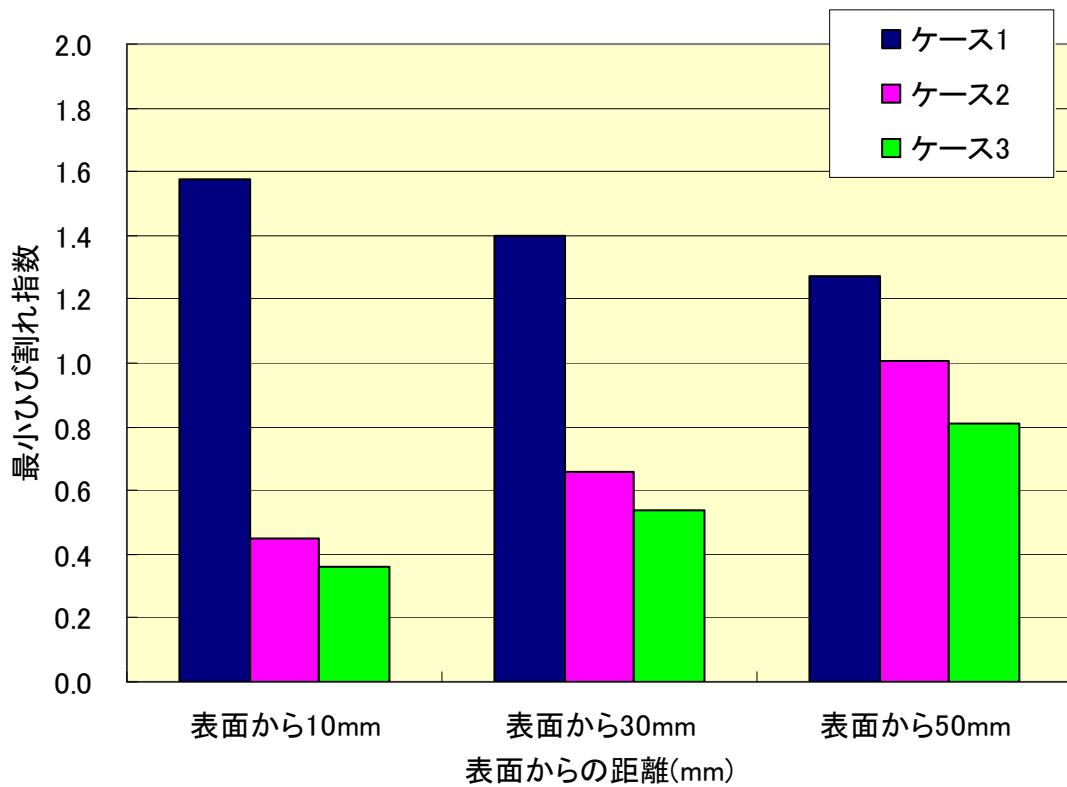


図-8.44 検討ケース別 最小ひび割れ指数
(脱型 7 日, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

c) 脱型時期による比較

各検討ケースにおける材齢と表面部のひび割れ指数の関係を、脱型日別に図-8.45～47にそれぞれ示す。また、各検討ケースにおける最小ひび割れ指数を表面深さ別に図-8.48～50にそれぞれ示す。

図-8.45 から、検討ケース 1 の場合、脱型時期に関わらず、ひび割れ指数は 1.5 以上の値となり、ひび割れ発生確率は 12% であり、表面部にひび割れが発生する確率は低いと考えられる。脱型 3 日の場合のみ、若干ひび割れ指数が大きいですが、他の脱型日とほぼ同等の結果であると判断した。また、図-8.46 および 47 から、脱型 3 日および 7 日の場合、脱型直後に急激なひび割れ指数の低下が見られるが、脱型 14 日の場合、若干ではあるが緩やかに低下する傾向を見せている。これは、水和が十分に進んでいない若材齢時に型枠を脱型したために、十分な強度が発現しておらず、急激にひび割れ抵抗性が低下したと考えられる。

図-8.48～50 から、表面部の最小ひび割れ指数は、脱型 3 日の場合 0.39、脱型 7 日の場合 0.45、脱型 14 日の場合 0.49 となった。若干ではあるが脱型時期を長くすることでひび割れ抵抗性は向上したと考えられる。しかし、湿潤養生期間が 14 日の場合でも、最小ひび割れ指数は 0.49 であり、ひび割れ発生確率は 100% となることから、表面部にひび割れが発生することとなる。これらのことから、ある程度長い期間、湿潤養生を行ったとしても、脱型直後の表面部の乾燥が避けられないことから、乾燥収縮に起因する表面部のひび割れは防ぐことが難しいと考えられる。

一方、図-8.50 から、表面から 50mm の位置において、最小ひび割れ指数は、脱型 3 日の場合 0.81、脱型 7 日の場合 0.89、脱型 14 日の場合 1.1 であり、ひび割れ発生確率はそれぞれ 84%、68%、37% となった。このことから、脱型 3 日および 7 日の場合、表面部のひび割れは内部まで進行する可能性は高いが、脱型 14 日の場合、内部にひび割れが進行する可能性は 50% 以下となった。

これらの結果から、表面部については、型枠脱型時期に関わらず、かなり高い確率で乾燥収縮に起因するひび割れが発生してしまうと考えられる。また、これらのひび割れは、湿潤養生期間が 7 日間までの場合、表面から 50mm 程度の内部まで進行する可能性は高いが、湿潤養生期間が 14 日間の場合、ひび割れの確率を湿潤養生期間 7 日間と比較して半分程度まで減少することができると考えられる。

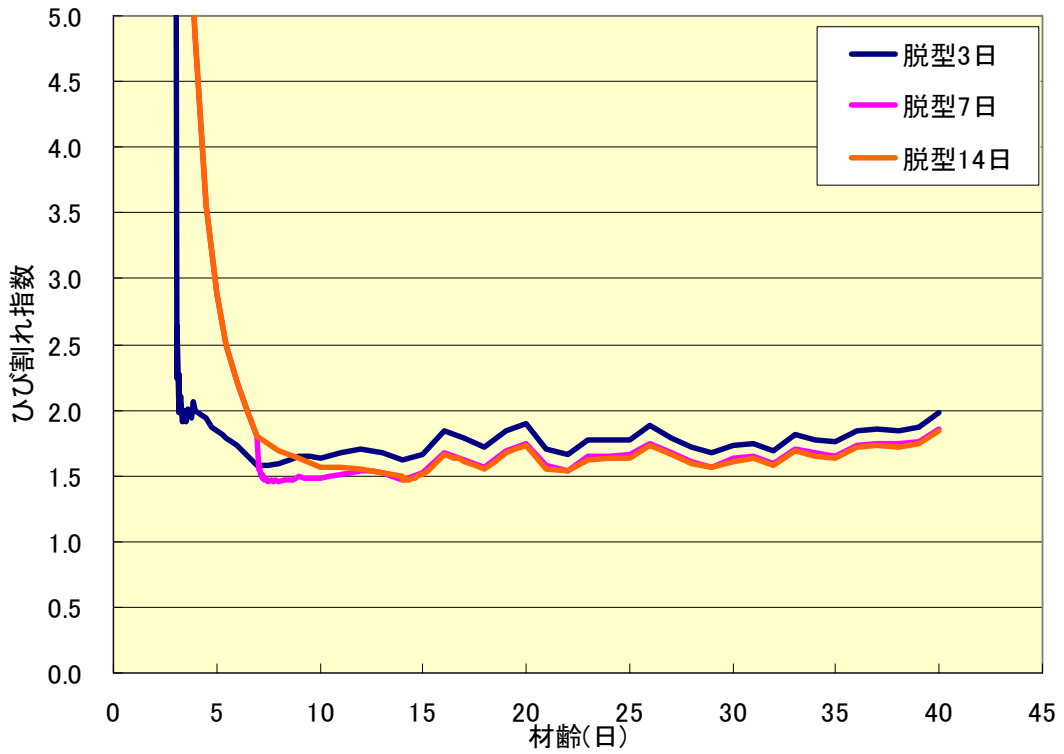


図-8.45 コンクリート指数履歴
 (ケース 1, 表面部, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

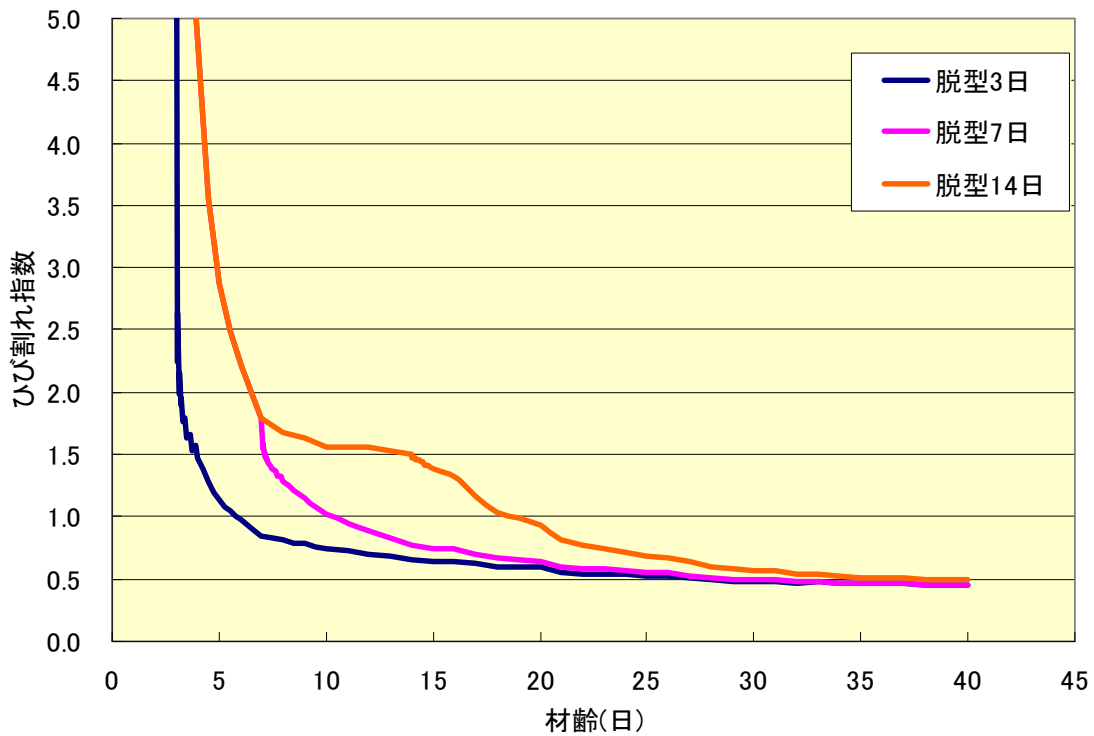


図-8.46 コンクリート指数履歴
 (ケース 2, 表面部, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

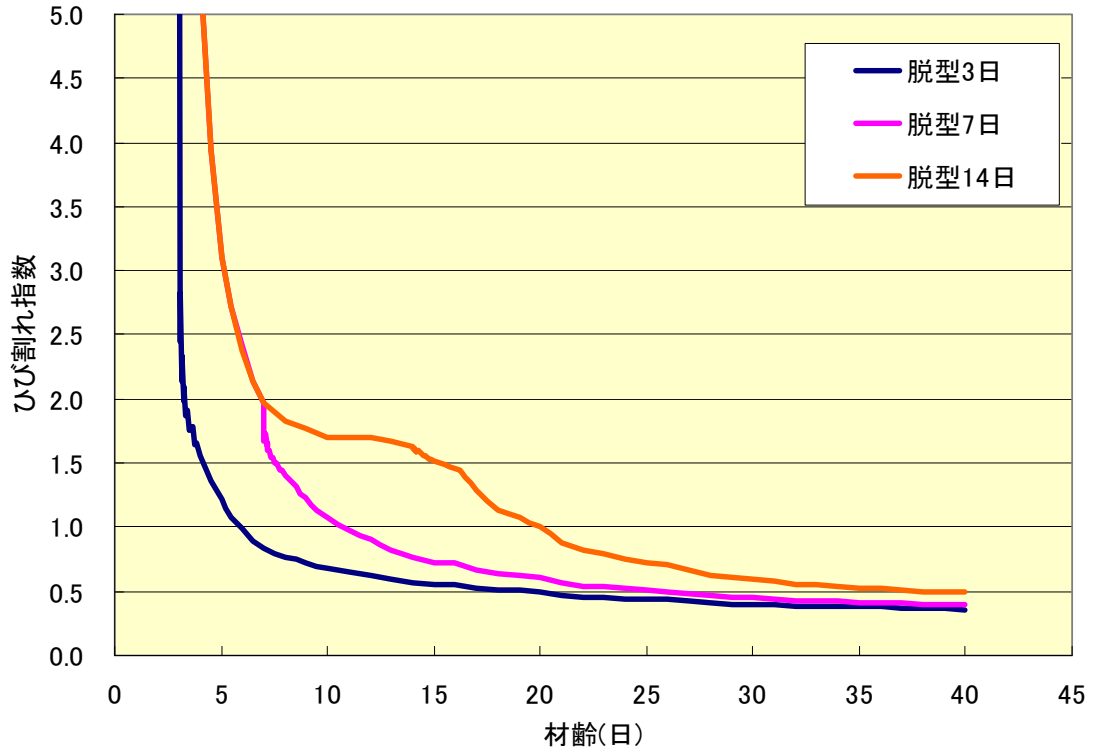


図-8.47 コンクリート指数履歴
(ケース 3, 表面部, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

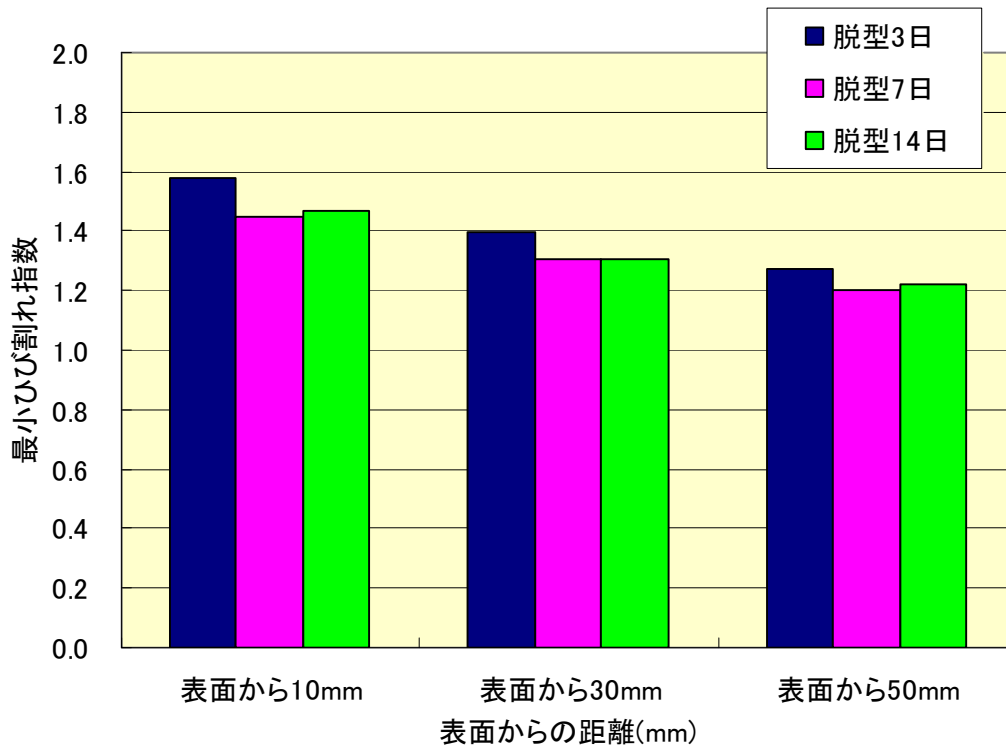


図-8.48 脱型日別 最小ひび割れ指数
(ケース 1, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

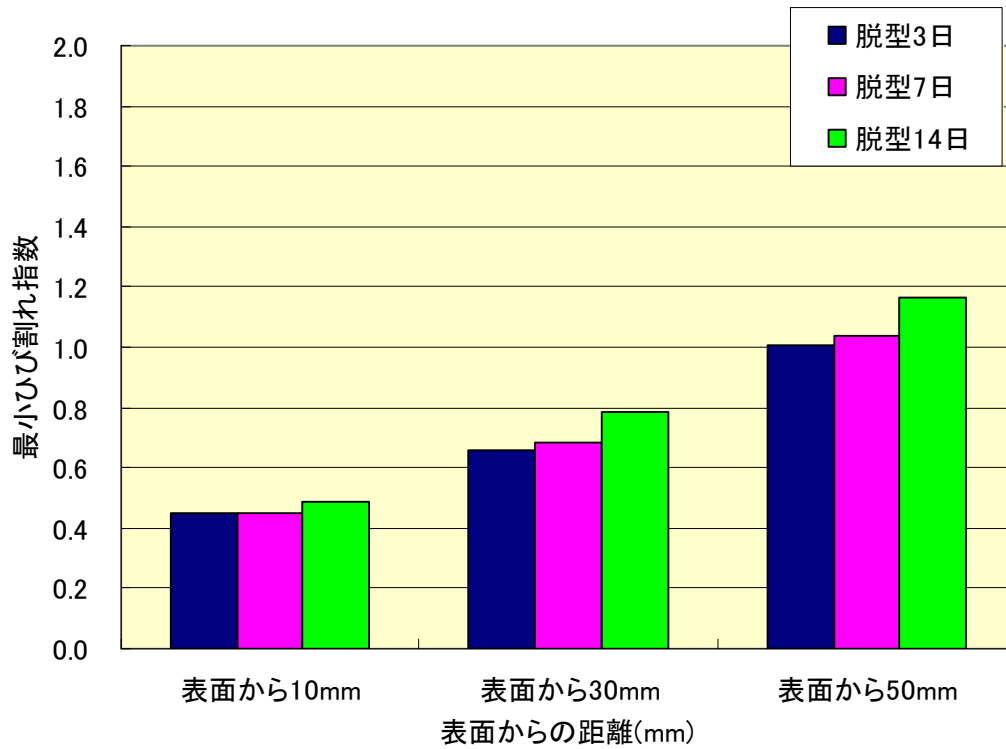


図-8.49 脱型日別 最小ひび割れ指数
(ケース 2, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

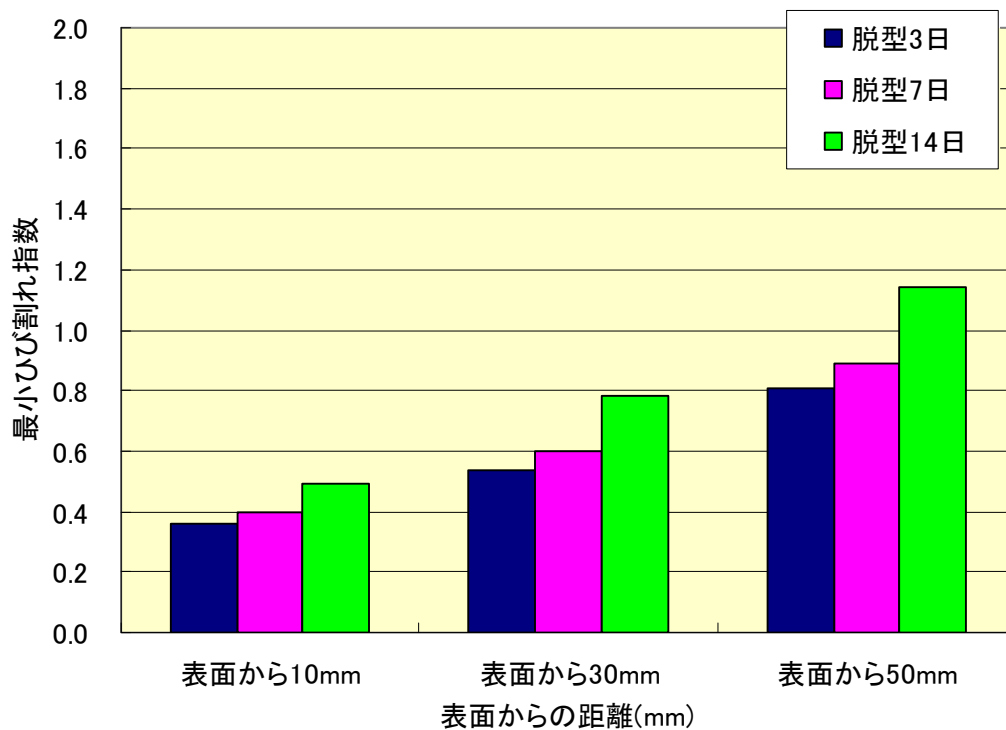


図-8.50 脱型日別 最小ひび割れ指数
(ケース 3, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

d) セメント種別による比較

コンクリートの表面部のひび割れ指数と材齢の関係を、使用コンクリート別に、図-8.51に示す。各コンクリートにおける最小ひび割れ指数を脱型日別に図-8.52に示す。

図-8.51から、4000と6000では解析期間内ではほとんど差が見られなかった。4000と6000では、6000の方が発生するひずみは大きくなる結果となったが、ひび割れ指数は同等の値となった。これは、粉末度が大きいため初期強度が大きくなり、ひずみによるひび割れ抵抗性の差をなくしたと考えられる。また、4000および6000と比べ、Nはひび割れ指数が高くなっている。これは、6.2で述べたように、高炉混入コンクリートと比較して発生する乾燥収縮ひずみが小さいことや、普通コンクリートは5.1および2で述べたように7日間湿潤養生を行うとその後気中養生しても水中養生と同等の強度が得られるため、型枠脱型が7日であっても高炉混入コンクリートと比較して、強度が高くなっていることから、ひび割れ抵抗性が向上したと考えられる。

また、図-8.52から、各コンクリートにおける表面部の最小ひび割れ指数は、4000が0.39、6000が0.45、Nが0.51であり、いずれもひび割れ発生確率は100%となった。このことから、使用セメントに関わらず、型枠脱型が7日の場合、表面部にはひび割れが発生すると考えられる。普通コンクリートは、7日間の水中養生で、その後乾燥を受けても水中養生したものと同等の強度が得られるが、強度が十分であっても表面部に発生する乾燥収縮ひずみによるひび割れには抵抗することができない結果となった。表面部については強度発現よりも、表面からの水分逸散を防ぐことが重要であるのではないかと考えられる。

一方、表面から50mmの位置の最小ひび割れ指数は、4000が0.89、6000が1.17、Nが1.3であり、ひび割れ発生確率は、それぞれ68%、30%、20%であった。先に述べたように、表面部にはひび割れが発生してしまうが、6000およびNの場合、表面部のひび割れは進行する可能性が低いと考えられる。しかし、4000を用いた場合は、表面部のひび割れが進行する可能性が高いと思われる。表面部に比べ、内部のひび割れ抵抗性には、強度の影響が大きく、Nや6000を用いた方がひび割れ発生確率は低くなる。このことから、内部のひび割れ抵抗性を低下させないためには、十分な湿潤養生を行い、強度発現を促進することが重要であると考えられる。

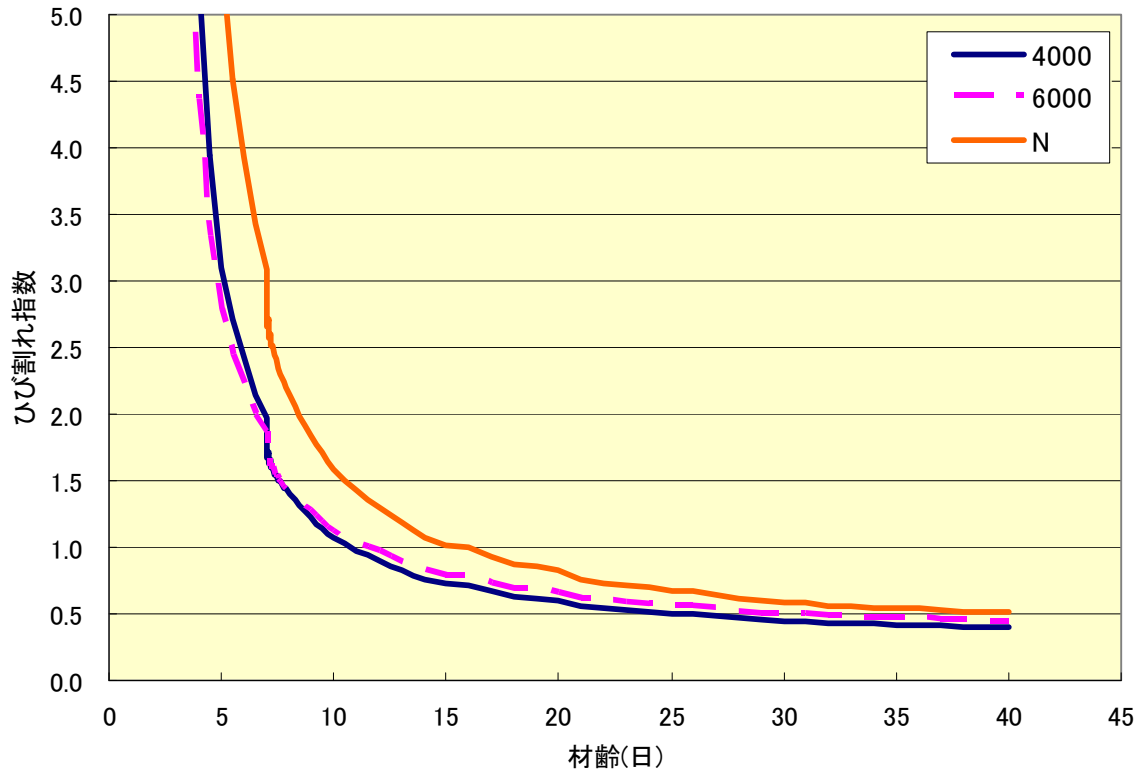


図-8.51 コンクリート指数履歴
 (ケース 3, 表面部, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

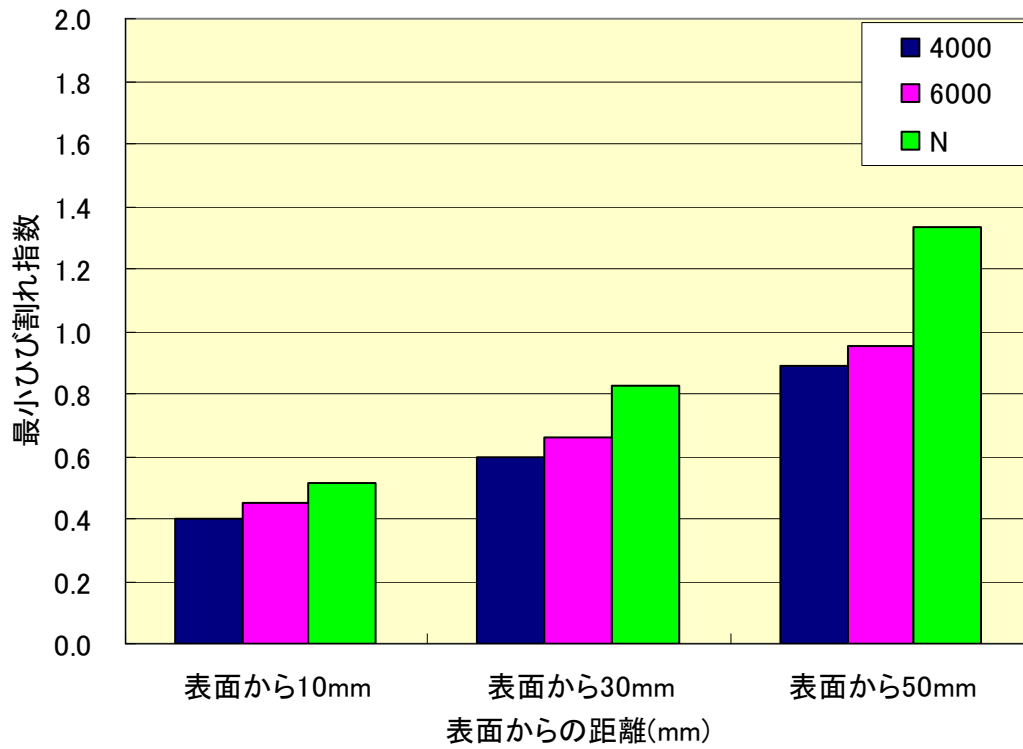


図-8.52 使用セメント別 最小ひび割れ指数
 (ケース 3, 高炉混入コンクリート ; 粉末度 4000cm²/g)

(4) シート養生

脱型時期を 14 日間行った場合でも、表面部のひび割れ抵抗性の低下を防止することができなかったことから、脱型時期を変えることで強度低下を防ぐのではなく、表面部からの水分の逸散を防ぐことが重要であると考えられる。脱型後、表面部からの水分の逸散が起こらないように、表面部に養生シートを使用した場合について検討を行う。本解析では、検討ケース 3(脱型 7 日, 高炉混入コンクリート; 粉末度 4000cm²/g)に対し、シート養生期間 7 日および 21 日の 2 水準について検討する。

ひび割れ指数の経時変化のうち、表面部を図-8.53 に、表面から 50mm の位置を図-8.54 にそれぞれ示す。また、表面からの深さと最小ひび割れ指数の関係を検討ケース別に図-8.55 に示す。また、検討ケース 3 におけるシート養生を行わない場合、および、シート養生期間 7 日、21 日における最小ひび割れ指数を図-8.56 に表面からの深さ別に示す。

図-8.53 から、シート養生を行った場合、脱型後、検討ケース 1 よりも若干大きいひび割れ指数となった。しかし、シート養生終了後は、ひび割れ指数は低下し、検討ケース 2 およびシート養生をしていない検討ケース 3 に漸近する傾向を示した。本解析で行った解析期間内では、最小ひび割れ指数は養生シートなしの場合が 0.40 であるのに対し、シート養生期間 7 日の場合 0.50, 21 日の場合 0.77 であり、シート養生を 21 日間行ったものに関しては、若干ではあるがひび割れ抵抗性が向上したと考えられる。しかし、シート養生した場合であっても材齢 40 日以降のひび割れ指数は検討ケース 3 に漸近し、低下していくと考えられる。このことから、シート養生を 21 日間行った場合でも、シート養生終了後の表面部の水分逸散の影響は大きく、表面部のひび割れを完全に防ぐことは難しいと考えられる。本解析では、ひび割れを考慮した解析を行っていないことから、表面部に発生すると思われるひび割れが、進行性のあるものか、また、ひび割れ深さやひび割れ発生日、コンクリート表面から 30mm 以深でのコンクリート表面でのひび割れ発生後の応力履歴がどのような挙動を示すのか明らかになっていないため、今後さらに検討が必要である。

一方、図-8.54 から、表面から 50mm の位置でも表面部と同様に、ひび割れ指数は脱型後からシート養生終了時まで検討ケース 1 よりも高くっていることがわかる。シート養生終了後は、シート養生 7 日間のものは表面部と同様にひび割れ指数の減少がみられるが、シート養生 21 日間のものに関してはひび割れ指数が 1.5 以上を維持している。また、図-8.56 から、シート養生 21 日間の場合、表面深さ 30~50mm において、乾燥収縮及び強度低下を考慮していない検討ケース 1 とほぼ同等もしくはそれ以上のひび割れ指数となっている。

これらのことから、シート養生を実施することによって、表面部のひび割れ抵抗性にはあまり寄与しないが、内部のひび割れ抵抗性を向上させることができると考えられる。

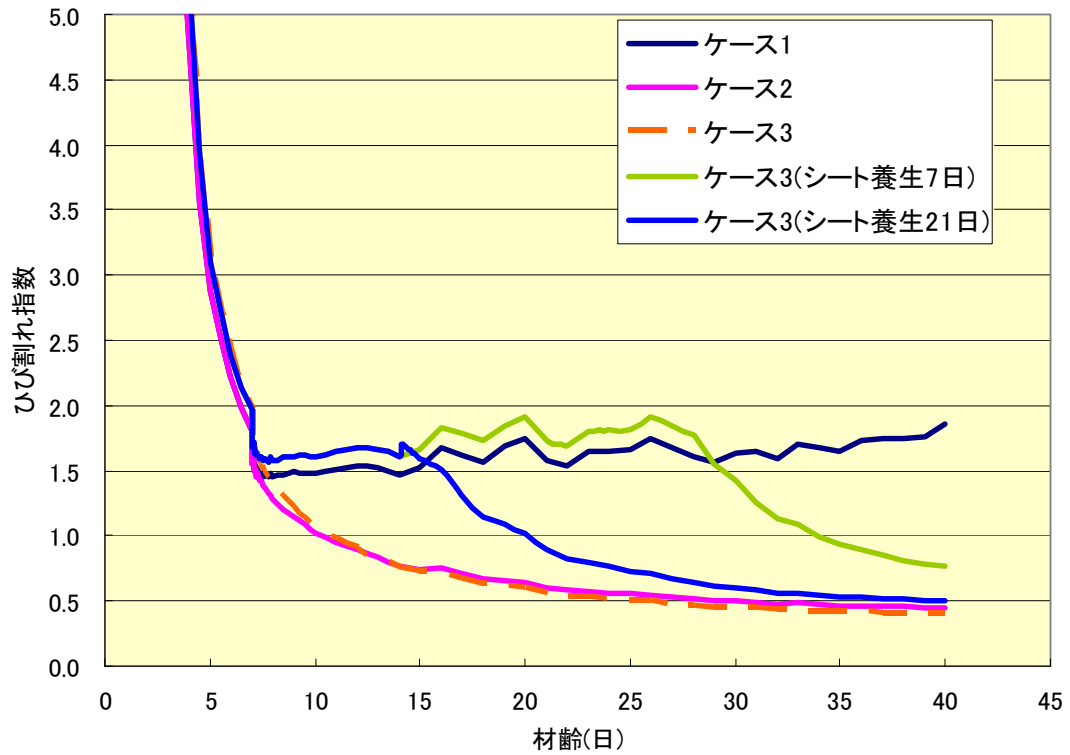


図-8.53 ひび割れ指数の経時変化
 (表面部, 脱型 7 日, 高炉混入コンクリート ; 4000cm²/g)

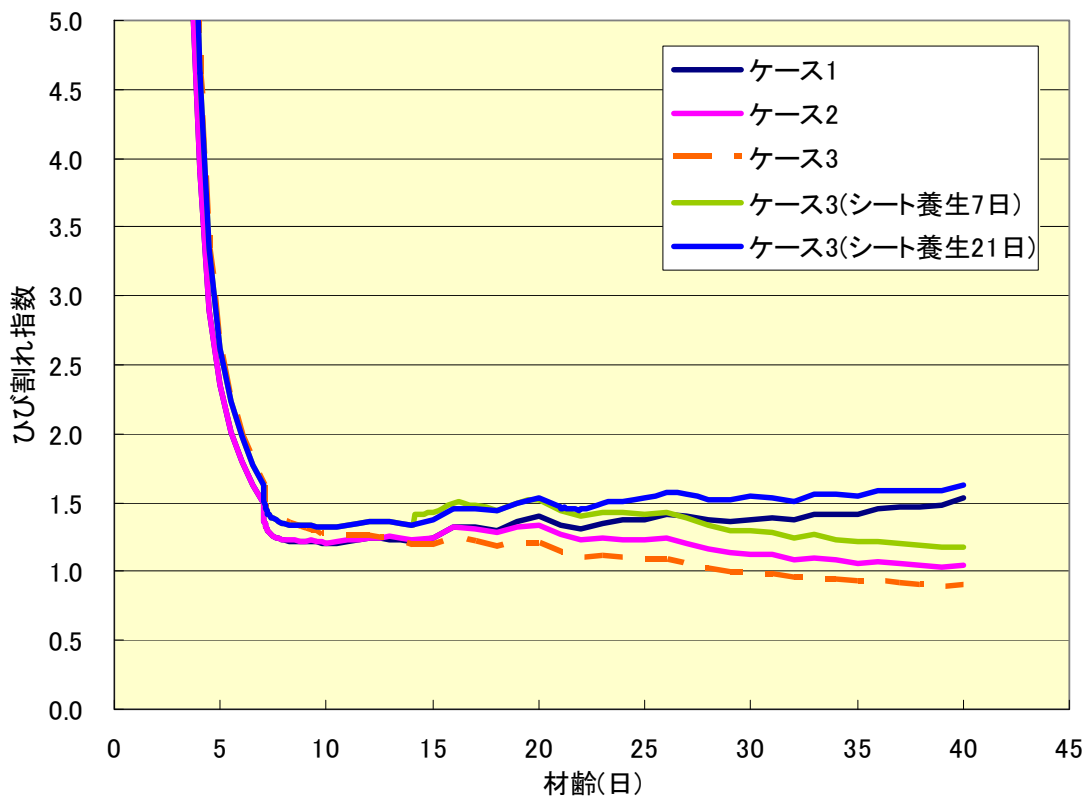


図-8.54 ひび割れ指数の経時変化
 (表面から 50mm, 脱型 7 日, 高炉混入コンクリート ; 4000cm²/g)

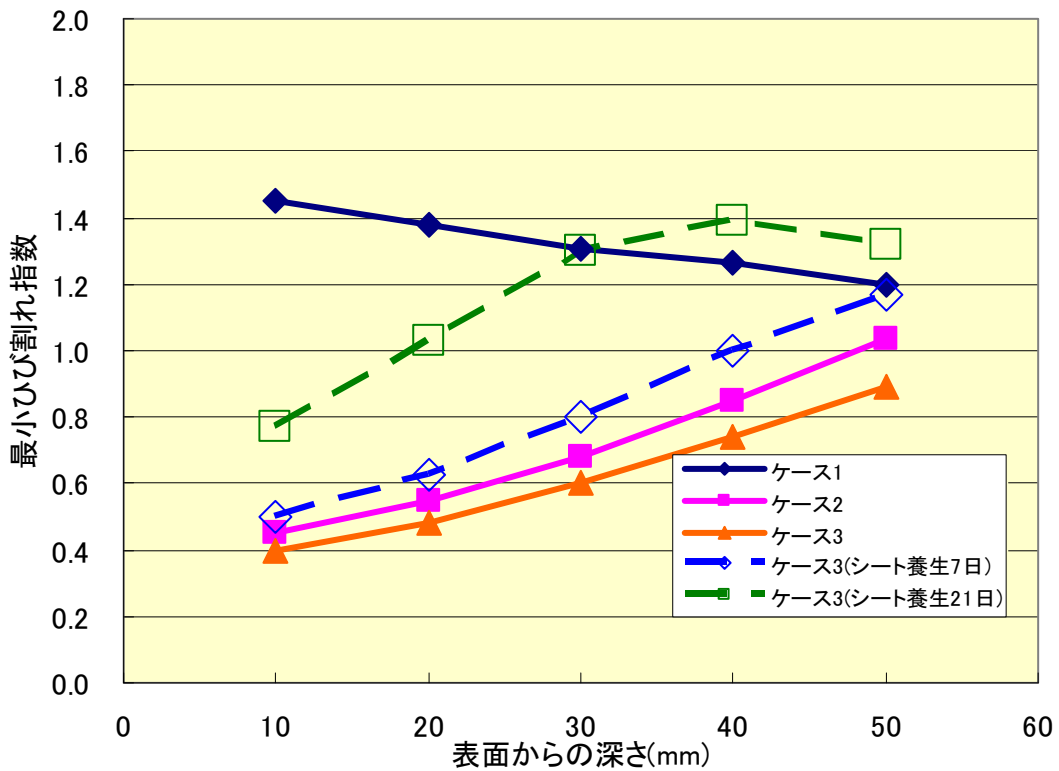


図-8.55 表面深さ別 最小ひび割れ指数
(脱型 7 日, 高炉混入コンクリート ; 4000cm²/g)

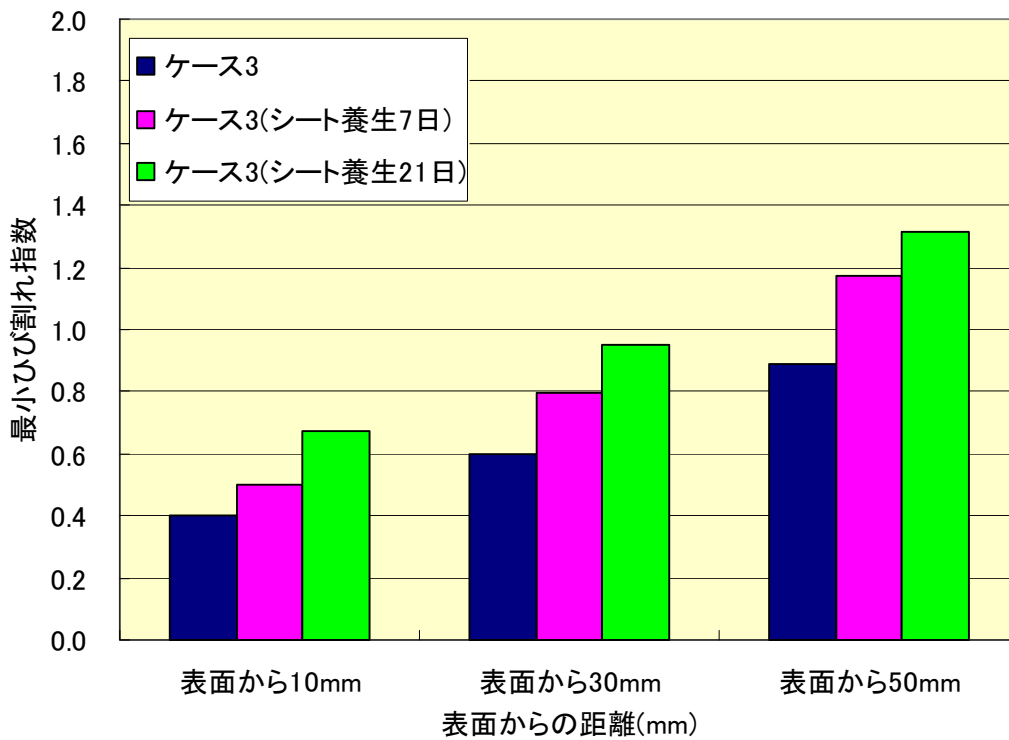


図-8.56 表面深さ別 最小ひび割れ指数
(脱型 7 日, 高炉混入コンクリート ; 4000cm²/g)

第9章 結論

9.1 力学特性試験における結論

本研究では、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの強度特性を養生方法の違いから検討することを目的とし、以下にその結論をまとめる。

(1) 置換率

初期材齢では置換率が高くなるほど、圧縮強度は低い。しかし材齢が経過するにつれてその差は縮まり、長期材齢では置換率が高くなるにつれ圧縮強度は高くなる。しかし置換率が80%としたものは置換率50、70%と比べて圧縮強度は低下した。高炉スラグ微粉末を置換しすぎると大きな強度増進は望めないことが明らかとなった。

養生方法の違いから見ると、高炉スラグ微粉末を用いたものは28日まで水中養生すれば自身の水中と同等、もしくはそれ以上の強度となる。しかし置換率が高くなるほど、高炉スラグ微粉末の特性である初期強度が小さいことが顕著に現れる。そのため置換率80%に関しては、水中と同程度の強度を得るには、28日以上水中養生しなければならない。

普通コンクリートの水中と比較すると、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、早いもので置換率30%であれば、3日から気乾に移しても強度の低下率は20%程度に保たれ、7日から気乾に移した場合では低下率10%程度に保たれる。その他、置換率70%までに関しても7日から気乾に移した場合、低下率は20%程度に留まる。

(2) 粉末度

粉末度6000cm²/gの圧縮強度が一番強い結果となった。一般的には、高炉スラグ微粉末の粉末度が大きくなるに従って初期の圧縮強度は高くなる¹⁰⁾と記されている。しかし実験値からはこのような傾向は見られなかった。原因としては、供試体を作成した日の練り上がり温度が関係しているものと考えられる。高炉スラグ微粉末は温度依存性が強いことから、6000 cm²/gに比べ8000 cm²/gの練り上がり温度が低かったことで、8000 cm²/gの強度が十分に発揮されなかったと推察される。

養生方法の違いからは、粉末度6000、8000cm²/gに関しては28日まで水中養生すれば自身の水中と同等、もしくはそれ以上の強度となる。しかし粉末度4000 cm²/gに関しては、56日水中養生する必要がある。

養生方法の違いから見ると、28日間水中養生し、その後気乾したものの粉末度6000 cm²/gと8000cm²/gは自身の水中と同等となった。4000 cm²/gは10%の低下となった。

普通コンクリートの水中と比較すると、粉末度6000、8000cm²/gは7日間水中養生すればその後気乾しても、約20%の低下に留まった。4000 cm²/gは14日間水中養生し、その後気乾したものは低下率が約20%となった。

9.2 湿気移動解析における結論

湿度低下はコンクリート表面部から 50mm 以上の箇所では脱型から 28 日後でもほとんどなく、表面部から 100mm 以上の箇所では 28 日後も湿度は低下せず、100%を保つことから、コンクリート表面部から 20~30mm の箇所までが最も乾燥収縮の影響を受けている可能性がある。

9.3 温度応力解析における結論

(1) 使用セメントによる比較

脱型時期に関わらず、N、4000、6000 の順に発生するひずみが大きくなる結果となった。これらは、自己収縮や粉末度の影響によるものと考えられる。

使用セメントに関わらず、型枠存置期間が 7 日の場合、表面部にひび割れが発生する結果となった。普通コンクリートは、7 日間の水中養生で、その後乾燥を受けても水中養生したものと同等の強度が得られるが、強度が十分であっても表面部に発生する乾燥収縮ひずみによるひび割れには抵抗することができない結果となった。表面部の強度発現よりも、表面からの乾燥を防ぐことが重要であるのではないかと考えられる。また、6000 および N の場合、表面部のひび割れは進行する可能性が低いと考えられる。しかし、4000 を用いた場合は、表面部のひび割れが進行する可能性が高いと思われる。表面部に比べ、内部のひび割れ抵抗性には、強度の影響が大きく、N や 6000 を用いた方がひび割れ発生確率は低くなる。このことから、内部のひび割れ抵抗性を低下させないためには、十分な湿潤養生を行い、強度低下を防ぐことが重要であると考えられる。

(2) 型枠脱型時期による比較

脱型時期が早くなるほど、コンクリート表面部から 50mm の深さまでのひずみは大きくなる傾向が得られた。また、型枠存置期間を長くすることで、表面部のひび割れ抵抗性をわずかではあるが上昇する結果となった。しかし、ひび割れ発生確率は 100%となり、型枠存置期間を 14 日間にしても表面部のひび割れは防ぐことはできなかった。また、型枠存置期間が 3、7 日の場合は、乾燥収縮によって生じたひび割れが内部にまで進行する可能性が示唆された。一方、型枠存置期間が 14 日の場合は、表面のひび割れが内部に進行する可能性は、50%以下まで低減することができた。

(3) 養生シートの効果による比較

シート養生を 21 日間行ったものに関しては、若干ではあるが表面部のひび割れ抵抗性が上昇する結果が得られた。しかし、シート養生を 21 日間行った場合でも、シート養生終了後の表面部の乾燥の影響は大きく、表面部のひび割れを完全に防ぐことは難しいと考えられる。一方、表面から 50mm の位置では、シート養生 7 日間のものは、シート養生終了後、表面部と同様なひび割れ指数の減少がみられるが、シート養生 21 日間のものに関してはひび割れ指数が 1.5 以上を維持している。シート養生を実施することによって、表面部のひび割れ抵抗性にはあまり寄与しないが、内部のひび割れ抵抗性を上昇させることができると考えられる。

9.4 まとめ

本研究では、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの初期の湿潤養生期間と力学的特性およびひび割れ抵抗性について検討を行った。

表面部の乾燥収縮に起因するひび割れは、型枠存置期間に関わらず発生を防ぐことは難しいが、型枠存置期間を長くすることで、発生したひび割れの内部への進行を低減できることが示された。

また、型枠脱型後に養生シートを用いて、水分の逸散を防ぐことで、内部へのひび割れの進行を大幅に低減することが可能であるという知見が得られた。

今後は、長期的な解析を行うことで、乾燥収縮ひずみの進行について検討することや、ひび割れ幅および、ひび割れ発生日などについても検討を行う必要があると考えられる。

参考文献

- 1)土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針， p.28， 1996.
- 2)伊代田岳史， 魚本健人：早期脱型による乾燥と水分の再供給がコンクリートの内部組織構造に与える影響， コンクリート工学年次論文集， vol23 No2， pp.787-792， 2001.
- 3)U.S.DEPARTMENT OF THE INTERIOR BUREAU OF RECLAMATION : CONCRETE MANUAL EIGHTH EDITION， pp.24-26， 1975.
- 4)松沢友弘， 保坂綱鎮， 榊田佳寛：高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの湿潤養生期間に関する研究（その1 現場条件下での構造体コンクリートによる実験（秋季））， 日本建築学会大会講演梗概集， pp.1123 -1124， 2008.
- 5)保坂綱鎮， 松沢友弘， 榊田佳寛， 檀康弘， 佐藤幸恵：高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの湿潤養生期間に関する研究(その2 一定温度条件下における室内実験)， 日本建築学会大会講演梗概集， pp.1125 -1126， 2008.
- 6)宮澤伸吾， 大澤友宏， 廣島明男， 鯉渕清：高炉セメントの自己収縮および断熱温度上昇量に関する研究， セメント・コンクリート論文集， vol58， pp.154-159， 2004.
- 7)久保征則， 青木茂， 新村亮， 原田暁：高炉セメントを用いたコンクリートの自己収縮に関する実験的研究， vol19 No1， pp.763-768， 1997.
- 8)李長江， 依田彰彦， 横室隆：高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの細孔構造と乾燥収縮， コンクリート工学年次論文集， vol20 No2， pp.187-192， 1998.
- 9)岩城一郎， 澤井洋介， 三浦尚：高炉スラグ微粉末混和コンクリートに発生するひび割れに関する基礎的研究， セメント・コンクリート論文集， vol55， pp.284-289， 2001.
- 10)土木学会：2002年制定 コンクリート標準示方書 施工編， p.59， P.123， 土木学会， 2002.
- 11)佐藤幸恵， 丸山一平， 伊代田岳史， 檀康弘：脱型時期の違いがコンクリートの乾燥と品質に及ぼす影響に関する実験的検討， コンクリート工学年次論文集， vol30 No1， pp.531-536， 2008.
- 12)箆橋忍， 秦泳， 小澤満津雄， 森本博昭：温度との連成を考慮したコンクリートの湿気移動解析に関する研究， コンクリート工学年次論文集， vol23 No2， pp.685-689， 2001.
- 13)箆橋忍， 伊藤佑樹， 堀部謙， 森本博昭：コンクリートの乾燥収縮によるひずみと応力の解析， コンクリート工学年次論文集， vol24 No1， pp.441-446， 2002.
- 14)西岡栄香， 原田 有：多孔質物質の透湿率および湿気拡散について， セメント技術年報， XV， pp.274-278， 1961
- 15)中村恭香：コンクリート中の湿気移動に関する研究， 岐阜大学卒業論文， 2003.2.

謝辞

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

共同で研究を行った、今野浩孝氏、芦田浩司氏、大宅峻介氏、菊田尋子氏、河野薫氏、また、法政大学大学院生、井上量介氏、田中峻氏、綱島隆将氏、松土雄紀氏、室野井敏之氏をはじめ、2009年度の法政大学コンクリート材料実験室の皆様には実験を手伝っていただき大変感謝いたしております。

また実験を行うに際し、コンクリート材料実験室技術嘱託の山本幸雄氏に多大なるご協力及び助言を頂きまして大変感謝致しております。

本論文をまとめるにあたり、多くの方々からのご指導、ご鞭撻、ご協力を頂きまして深く感謝申し上げます。

2010年2月18日

法政大学大学院 建設工学専攻 修士課程

08R5106 小俣 貴洋