

凍結融解試験下でのコンクリートの劣化に関する基礎的研究

片岡, 孝介 / KATAOKA, Takayuki

(発行年 / Year)

2007-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2007-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2006 年度 修士論文

凍結融解試験下でのコンクリートの
劣化に関する基礎的研究

法政大学大学院 工学研究科
建設工学専攻 修士課程

カタオカ タカユキ

05R5104 片岡 孝介

(指導教員：溝渕 利明教授)

凍結融解試験下での コンクリートの劣化に関する基礎的研究

法政大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 修士課程
05R5104 片岡 孝介

2007年2月20日

概要

コンクリートの凍結融解抵抗性に関しては古くから数多くの研究がなされている。その多くは、最低温度や凍結融解速度が規定された条件下で行われており、耐久的なコンクリートを製造するための材料および配合の選定を目的としたもので、A Eコンクリートの開発はその主たる成果といえるが、現在、凍結融解作用によるひび割れやスケーリングなどの劣化が後を絶たない。この要因として、劣化エネルギーと凍結融解抵抗性の関係や劣化メカニズムに関して必ずしも十分に解明できていないことが挙げられる。

本研究では、凍結融解試験を行う際に、任意の凍結最低温度、水セメント比、試験開始材齢を設定し劣化エネルギーと凍結融解抵抗性との関係に関して検討を行い、それらの設定条件とスケーリング量により、劣化メカニズムに関しての検討を行うことを目的としている。

非破壊試験では相対動弾性係数、スケーリング量を劣化指標とし、破壊試験は凍結融解下におけるコンクリートを任意のサイクルで圧縮強度試験、引張強度試験を行った。

その結果、凍結最低温度、水セメント比、試験開始材齢が凍結融解抵抗性に与える影響を明らかにし、今後の耐久性設計に寄与できる資料を得た。

FUNDAMENTAL STUDY ABOUT DETERIORATION OF CONCRETE UNDER FREEZING AND THAWING TEST

By

05R5104 Takayuki KATAOKA

Graduate Course of Civil and Environmental Engineering , Hosei University ,

20th February , 2007

ABSTRACT

Many studies are made about freezing and thawing test of concrete for a long time. The most are performed under the prescribed condition that minimum temperature and speed of freezing and thawing. They were aimed for materials to produce permanent concrete and the choice of combination. Development of the concrete which used Air Entraining Agent for can be said to be result as the master. However, there is still no end to deterioration such as cracking and scaling by freezing and thawing now. There is it for what can not elucidate about deterioration mechanism and relations between deterioration energy and resistance of freezing and thawing.

In this research, I set arbitrary lowest temperature, water-cement ratio starting age of the exams. This purpose is to examine about deterioration mechanism and relations between deterioration energy and resistance of freezing and thawing.

I assumed relative dynamic modulus of elasticity and quantity of scaling a deterioration index by a nondestructive test. In addition, I performed a compressive strength test and a pulling strength test of the concrete under freezing and thawing in the choice of cycle.

As a result, I clarified the influence that lowest temperature, water-cement ratio and starting age of the exams give resistance of freezing and thawing and got the document which could contribute to a future durability design.

目次

ページ

第1章 緒論

1.1	背景	1
1.2	研究目的及び研究概要	1

第2章 既往の研究

2.1	耐凍結融解抵抗性	3
	(1)概略	3
	(2)スケーリング	3
	(3)急速凍結融解試験	3
2.2	凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化メカニズム	4
	(1)古典的理論	4
	(2)Powersの水圧作業仮説	4
	(3)浸透説	7
2.3	凍結融解メカニズムに関する理論	11
	(1)凍結融解メカニズムに関する理論	11
	(2)限界飽和度	12
	(3)水分凍結温度	12
2.4	凍害劣化要因に関する研究	13
	(1)外的影響	13
	(2)内的影響	16
2.5	繊維補強による耐凍結融解性	26
2.6	ビニロン繊維の性質	28
2.7	メガミックスの性質	29

第3章 使用材料・配合及び測定装置

3.1	使用材料	31
3.1.1	セメント	31
3.1.2	フライアッシュ	31
3.1.3	細骨材	31
3.1.4	粗骨材	31

3.1.5	混和剤料	32
3.1.5	練り混ぜ水	32
3.1.6	メガミックス	32
3.1.7	ビニロン繊維	32

第4章 凍結融解試験における劣化指標としての非破壊試験

4.1	研究目的と研究内容構成	37
4.2	研究方法	37
4.2.1	供試体の作成	37
	(1) 軽量及びコンクリートの練混ぜ	37
	(2) フレッシュコンクリートの試験	38
	(3) 供試体作製およびコンクリートの養生	38
4.2.2	超音波伝播速度測定法	38
4.2.3	凍結融解試験	38
4.2.4	試験ケース	40
4.3	試験結果	41
4.3.1	凍結融解試験最低温度-17における劣化	41
	(1) 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係	41
	(2) 凍結融解サイクルと質量減少率の関係	43
	(3) 凍結融解サイクルと体積減少率の関係	44
	(4) 質量減少率と体積減少率の関係	44
	(5) 相対動弾性係数と体積減少率の関係	45
	(6) 相対動弾性係数と質量減少率の関係	45
4.3.2	凍結融解試験最低温度-15における劣化	46
	(1) 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係	46
	(2) 凍結融解サイクルと質量減少率の関係	46
	(3) 凍結融解サイクルと体積減少率の関係	46
	(4) 質量減少率と体積減少率の関係	46
	(5) 相対動弾性係数と体積減少率の関係	46
	(6) 相対動弾性係数と質量減少率の関係	47
4.3.3	凍結融解試験最低温度(-17・-15)の変化における劣化	47
	(1) 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係	47
	(2) 凍結融解サイクルと質量減少率の関係	47
	(3) 凍結融解サイクルと体積減少率の関係	48
	(4) 質量減少率と体積減少率の関係	48
	(5) 相対動弾性係数と体積減少率の関係	48

(6) 相対動弾性係数と質量減少率の関係	-----	4 9
4 . 3 . 4 結論	-----	4 9
第 5 章 凍結融解試験における劣化指標としての非破壊試験		
5 . 1 研究目的と研究内容構成	-----	9 0
5 . 2 研究方法	-----	9 0
5 . 2 . 1 圧縮強度試験	-----	9 0
5 . 2 . 2 引張強度試験	-----	9 0
5 . 2 . 3 試験ケース	-----	9 0
5 . 3 試験結果	-----	9 1
5 . 3 . 1 凍結融解下における圧縮強度の変化	-----	9 1
5 . 3 . 2 凍結融解下における引張強度の変化	-----	9 2
5 . 3 . 3 初期強度と破壊サイクル数の関係	-----	9 3
5 . 4 結論	-----	9 4
第 6 章 劣化指標としての修正相対動弾性係数の有効性		
6 . 1 修正相対動弾性係数の必要性	-----	1 0 5
6 . 2 修正相対動弾性係数の算出方法	-----	1 0 5
6 . 2 . 1 非劣化状態の超音波伝播速度の変化	-----	1 0 7
6 . 2 . 2 凍結融解試験中の積算温度	-----	1 0 8
6 . 3 修正動弾性係数を用いた評価	-----	1 0 8
6 . 3 . 1 凍結融解試験最低温度-17 における評価	-----	1 0 8
(1) 凍結融解サイクルとの比較	-----	1 0 8
(2) 修正相対動弾性係数と体積減少率の関係	-----	1 0 8
(3) 修正相対動弾性係数と質量減少率の関係	-----	1 0 9
6 . 3 . 2 凍結融解試験最低温度-15 における評価	-----	1 0 9
(1) 凍結融解サイクルとの比較	-----	1 0 9
(2) 修正相対動弾性係数と体積減少率の関係	-----	1 0 9
(3) 修正相対動弾性係数と質量減少率の関係	-----	1 0 9
6 . 3 . 3 凍結融解試験最低温度(-17 ・ -15) の変化における評価	-----	1 0 9
6 . 3 . 4 破壊サイクル数と初期強度の関係	-----	1 1 0
6 . 3 . 5 結論	-----	1 1 0
第 7 章 繊維補強コンクリートの耐凍結融解性		
7 . 1 本章目的と範囲	-----	1 4 0
7 . 2 繊維補強モルタル強度試験	-----	1 4 0

7.2.1	繊維補強モルタル強度試験供試体の作成	140
	(1)配合	140
	(2)練混ぜ	140
	(3)供試体の作成	140
7.2.2	フロー値試験	141
7.2.3	圧縮強度試験	141
7.2.4	曲げ強度試験	141
7.2.5	試験結果	141
	(1)フロー試験結果	141
	(2)圧縮強度試験結果	141
	(3)曲げ強度試験結果	141
	(4)まとめ	142
7.3	繊維補強コンクリートの耐凍結融解性	142
7.3.1	凍結融解供試体の作成	142
7.3.2	試験ケース	143
7.3.3	試験結果	143
	(1)強度試験結果	143
	(2)相対動弾性係数の推移	144
	(3)体積減少率の推移	144
	(4)質量減少率の推移	144
	(5)質量減少率と体積減少率の関係	144
	(6)相対動弾性係数と体積減少率の関係	144
	(7)相対動弾性係数と質量減少率の関係	145
7.4	結論	145

第8章 結論

8.1	結論	155
-----	----	-----

参考文献

謝辞

第1章 序論

1.1 背景

コンクリート構造物を建設するに当たっては構造物の使用目的に応じた設計を行い、使用するコンクリートは作業に適したワーカビリティと所要の強度や水密性、さらに耐久性を兼ね備えなければならない。コンクリートは耐久性の優れた構造材料であり、その耐久性は半永久的であるともいわれてきた。しかし、実際のコンクリート構造物は供用中、気象作用、化学的作用、物理的作用、電気的作用、アルカリ骨材反応、並びに大気中の炭酸ガスによる中性化など様々な作用による劣化は避けられない。さらに、近年ではコンクリート構造物であっても十分な耐久性をもたない事例の報告が増え、一部では社会的な問題ともなっている。また我が国においては特に気象作用が寄与する耐凍害性が重要視されている。なぜなら、コンクリートの凍害に著しい影響を与える凍結融解の繰り返しが起こり得る気象条件、すなわち、最低気温と最高気温の日較差が大きい内陸部、冬期には降雪、降水が多く晴天時には日射を受ける寒冷地など凍害に対して苛酷な条件である地域が全国各地に分布しているからである。そのうえ一般に土木構造物は水に接する機会が多く、さらにその水が流れている場合や、水面の位置が変化するという特徴があり、また、一般に仕上げ材を用いないので、コンクリートが直接気象作用や水と接触するという点で条件が厳しく凍害の被害に拍車をかけている。土木構造物に用いるコンクリートには配合設計の基準として、一般に土木学会コンクリート標準示方書及び示方書に準拠した仕様書、あるいは基準があり、構造物の種別、規模、環境などにより設計基準強度、スランプ、最大水セメント比、その他の配合条件が定められている。また、苛酷な気象作用にさらされる恐れのある構造物コンクリートに対し、耐凍害性の点から必要とされる水セメント比や空気量なども規定されている。しかし、これらの規定は、これまでに培われた経験や実績に基づいて一応の基準を示したもので、コンクリートの諸条件が凍結融解特性にあたる影響を十分に解明したものではない。そのため凍結融解特性に関して引き続き今後も検討する必要がある。

1.2 研究目的及び研究概要

凍結融解作用を受けるコンクリートの耐久性に関しては古くから数多くの研究が行われ、多くの貴重な知見が得られている。耐久的な構成材料選定に関する検討、耐久的な配合選定に関する検討、劣化指標に関する検討、促進試験方法に関する検討、補修に関する検討、劣化を制御に関する検討、劣化予測に関する検討などである。それらの多くは、最低温度や凍結融解速度が規定された条件下で行われており、耐久的なコンクリートを製造するためのコンクリートを製造することを目的としたもので、A Eコンクリートの開発はその主たる成果といえる。

しかしながら、現在、A E剤が広く使用されているにも関わらず、凍結融解作用による

ひび割れやスケーリングなどの劣化が後を絶たない。これらの要因として、劣化エネルギーと凍結融解抵抗性との関係や凍害の劣化メカニズムに関して必ずしも十分に解明できていないことが挙げられる。

そこで本研究は、室内促進凍結融解試験を行う際に、任意の凍結最低温度、水セメント比、試験開始材齢を設定することにより劣化エネルギーと凍結融解抵抗性との関係の検討を行うことを目的としている。本研究では、劣化エネルギーを最低温度による外的要因、凍結融解抵抗性を水セメント比、試験開始材齢による内的要因と定義する。また、それらの設定条件とスケーリング量を表す質量変化・体積変化の測定により、劣化メカニズムに関しての検討を行うことを目的としている。

第2章 既往の研究

2.1 耐凍結融解抵抗性

(1)概略

コンクリートの凍害とは、コンクリートの細孔中に含まれる水分が凍結することで生じる膨張圧と水分の移動によってコンクリートが破壊される現象のことをいう。この凍害でコンクリートは膨張圧によって組織を劣化させたり、あるいはスケーリング・ポップアウトといった劣化形態をとったりする。

コンクリート内の水分が凍結することによってその体積は膨張し、その膨張圧が硬化体の引張り強度を超えてしまった場合にはひび割れといった症状を生じる。後に、凍結を繰り返すとコンクリートの組織的な崩壊となる。ひび割れは亀甲状のひび割れを生じることが多く、エフロレセンスを伴うことも多い。こういった凍害に関して AE 剤等による適切な空気量の混入がきわめて有効であることがいわれている。

(2)スケーリング

コンクリートが水で濡れている場合には、膨張による劣化に先行して表面層の劣化を起こすことがあり、このような劣化には AE 剤の空気混入だけで対応することができず、水セメント比の減少などによってコンクリート組織の緻密化を行う必要がある。スケーリングには 水セメント比の大きなコンクリートが凍結融解作用を伴うことで生じる通常のスケーリング 海水等の塩類と凍結の複合スケーリング ブリーディング水が仕上げ表面層直下にたまることによって生じるスケーリング、があることが知られている。

ポップアウト

多孔質で吸水率の高い粗骨材(軟石)が骨材中の水分の凍結によって膨張を起こし、骨材表面のモルタル層を剥落させる現象をいう。粗骨材の膨張が劣化原因であり、AE 剤等にだけで対応することが難しい。均質で良質な骨材を使用する必要がある。

(3)急速凍結融解試験

一定の温度条件で凍結融解の繰り返しを行う試験である。この試験方法は材料の耐凍害性を相互に比較することが目的であり、実際に用いられるコンクリートの耐久性を予測するものではない。ASTMC 666 は、A法(水中凍結水中融解法)およびB法(空气中凍結水中融解法)から構成され、いずれも凍結最低温度 -18°C 、融解温度 $+5^{\circ}\text{C}$ の繰り返しを行う。測定は、通常質量の損失と動弾性係数の低下について行われ、動弾性係数の低下をもとに次式より耐久性指数が計算される。

$$DF(\text{耐久性指数}) = \frac{P \times N}{M}$$

P : 相対動弾性係数,

N : 動弾性係数が 60%になるサイクルまたは 300 サイクルのいずれか小さなもの

M : 原則として 300 サイクル

しかしながら、この実験方法による 1 回の凍結融解の繰り返しが、実際の気候条件の中で生じる 1 回の凍結融解とどのような関係にあるかについて定量的な考察はまだされていない。しかし、そこから生まれる耐久性指数と実際の耐久性能には明白な相関がある。(1)

2.2 凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化メカニズム

(1)古典的理論

凍結が起きた際の最も原始的な説明は、水が氷に変化した際の体積膨張 9%に相当する力が発生するという考え方であった。この説明は、少なくとも、コンクリートが凍る際の一部の現象として適用できるが、完全に満足できるものではないことが間もなく認識され、そして他の理論が提案された。

最初の古典的な理論のうち、最も知られているのは、1944 年に Collins が提唱した「アイスレンズ形成理論」である。この理論は、熱の流れの方向に直角のアイスレンズ状の氷が形成されると考えるものである。この理論は、結合力の乏しい多孔性の材料において適用されるものであり、土質材の凍害理論および若材齢のコンクリートに適用されるが、硬化したコンクリートの凍害劣化現象を十分に説明できない欠点を有する。

(2)Powers の水圧作業仮説

Collins の「アイスレンズ形成理論」発表の 5 年後、1949 年に"The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete"「コンクリートの耐凍害性必要空気量」と題され論文が、T. C. Powers によって発表された。この論文の中で Powers は簡単な理論に基づき、ペーストの特性に対する気泡間隔と凍結速度下の関係を定量的に表す「水圧説」を示した。この理論は、コンクリートの凍害損傷を説明した最初の微視的モデルに基づく説として著名なものである。この説の基本的な仮説は、凍害損傷が結氷箇所からの水の流れによって引き起こされると考えている。飽水状態にある供試体において、温度が 0 以下に低下した時、毛細管中の水が凍結し始める。この時、氷の形成によって毛細管中では体積増加が起きる。毛細管中は水で満たされているために、毛細管は自由に膨張することができないので、ある量の水が毛細管から外部へ追い出されることとなる。この水の移動する方向は、系の中では損傷を起こさないで凍結できる唯一の可能な場所、すなわち気泡へ移動しなくてはならないはずである。従ってその水は多孔質体、ある透水性を持ったセメントペーストを通して移動しなくてはならない。この多孔質体を通しての水の流れに伴って発生する力を求めるに当たって、Powers は Darcy の法則を適用した。その際に、もしその力がペーストの引張強度を超えるなら、例えば水が移動しなくてはならない距離があまりにも長い場合、あるいは凍結速度が速い場合には、その浸透圧は高まり、これによってセメントペーストは引張力で破壊されたと考えた。

Powers は、図 2.1 に示すような、単一の空隙が硬化セメントペーストのシェルで囲まれたモデルを考え、これに Darcy の法則を適用し、その浸透力を算出する式 2.1 を示した。

$$P_{\max} = \frac{\eta}{3} \left(1.09 - \frac{1}{s} \right) \frac{UC}{K} \phi(L) \quad \text{式 2.1}$$

ここで、 P_{\max} ：空隙へ向かう水の流れ（浸透流）によって引き起こされる力の最大値

：水の粘性

s ：硬化セメントペーストの飽水度

U ：結氷速度

C ：冷却速度

K ：硬化セメントペーストの透水係数

(L) ：空隙に向かって流れる水の最大移動距離

である。

Powersは、この浸透流によって引き起こされる力（ P_{\max} ）がセメントペーストの引張強度を越えるまでに成長したときに、ひびわれが発生すると考えた。Powersによれば (L) は、次のように計算できるとしている。

$$\phi(L) = \frac{L^3}{r_b} + \frac{3}{2}L^2 \quad \text{式 2.2}$$

ここで、 r_b ：空気泡の半径

L ：空気泡を囲むセメントペーストシェルの厚さ

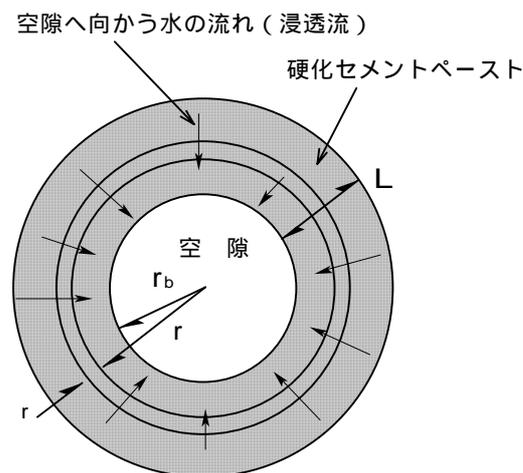


図 2.1 Powers の水圧説を説明するモデル

水圧説は、連行空気泡の有益性を最初に説明した理論であったという点において非常に有意義なものであった。しかし、この説の紹介以降多くの研究がなされたが、この説によ

ってすべての現象を説明することはできなかった．水圧説は，今では説得性が乏しいものとなっている．すなわち，多くの実験が，水は氷ができている毛細管細孔に向かって動く傾向があるのであって，氷ができている毛細管細孔から水が来るのではない傾向を示したからである．

Powers は，Helmuth と共同して，凍結の最中に氷が形成されている毛細管細孔へ水が移動する傾向があり，そしてこの移動がペーストを収縮させるという重要な事実を発見したのは，水圧説が発表された4年後の1953年であった．

図 2.2 は，凍結中のセメントペーストの長さ変化を測定した実験結果である．この実験の特徴的な点は，凍結中に一旦温度降下を中止させある一定温度を保持した点にある．温度一定下におけるセメントペーストの長さ変化は，AE剤を用いて空気泡を連行させた場合においては収縮し，AE剤を用いない場合においては膨張を示した．凍結温度を一定に保持したことは，先の式 2-1 において冷却速度 C を $0 / \text{hr}$ にしたことに対応し， P_{max} （空隙へ向かう水の流れ（浸透流）によって引き起こされる力の最大値）は発生しないこととなり，セメントペーストは膨張も収縮も生じないはずである．

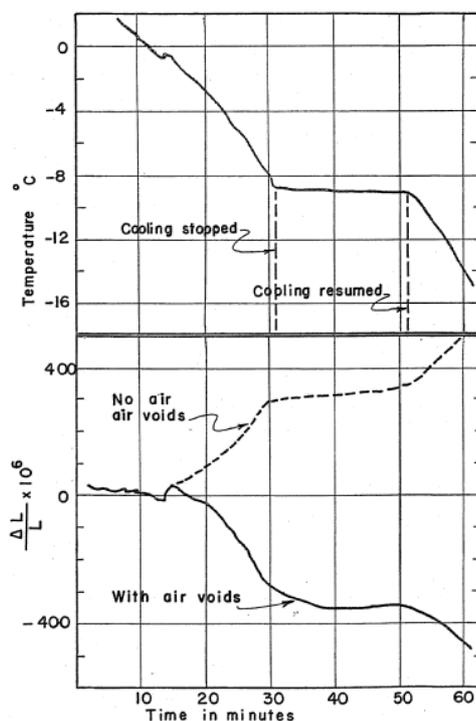


図 2.2 凍結温度一定下におけるセメントペーストの長さ変化

Powers と Helmuth は，その原因がゲル水の凍結細孔への移動にあると考えた．その考え方は次のとおりである．

もし飽和したセメントペーストの温度がわずかに 0 以上にあるなら，毛細管細孔での水はゲル間隙で水と熱力学的に平衡であると考えられることができる．もし，このペースト

の温度が 0 以下に十分に減少したら、所定の温度において氷の自由エネルギーが液体水のそれより低いから、この平衡は壊されることとなる。そのために、ゲル間隙での液体水は、氷ができ始めた毛細管細孔に向かってそれを強制的に移動させるポテンシャルエネルギーを獲得する。この水が凍結している毛細管細孔に届く時、その水は凍結し、そして氷結晶は大きさを増す。この氷結晶の成長は氷結晶と細孔固体壁の間の凍結していない水のフィルムに圧力を発生させる。もし、種々の理由のために、その圧力が系が平衡を再確立する時間の間にあまりにも大きくなるなら、細孔が十分に膨張することができないために、永久の損傷が起こる。このゲル間隙からの水の離脱運動は浸透力としてペーストに作用し、AE 剤を用いた場合では収縮を引き起こし、AE 剤を用いないものでは膨張を起こす。

(3)浸透説

修正水圧説では、ゲル間隙から凍結部分への水分移動を考えるに当たって、セメントペーストの細孔内での水が、純粋ではなく溶かされた化学物質（主にアルカリ Na_2O と K_2O ）を含んでいるという周知の事実を考慮に入れなかった。そこで、熱力学の知識に基づいて、この凍結作用の理論を修正が試みられた。これが、Powersによって 1975 年に発表された「浸透圧説」である。

セメントペーストは図 2.3 のように表され、気泡、毛細管細孔（以下、単に細孔）およびゲル間隙から成る。もし、飽和したセメントペーストで 0 以下に温度が低下しても、水はすぐには凍結しない。その理由の第 1 は結氷する温度を低下させる溶解化学物質の存在であり、第 2 は表面張力が重要となる相対的にサイズの小さい間隙のためである。あるサイズの細孔にとって、温度が氷の形成が可能である値に達した時、溶解された化学物質のために細孔でのすべての水が凍結するわけではない。

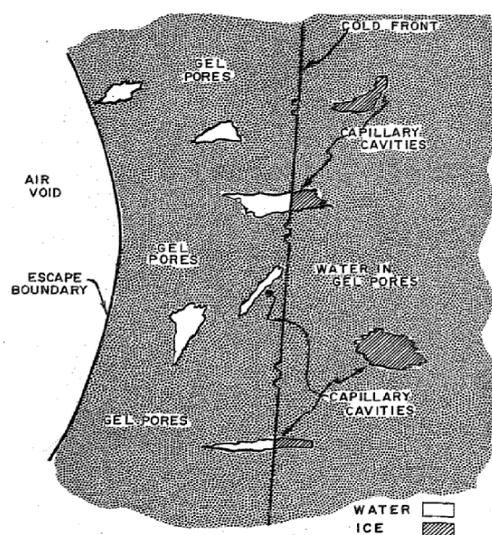


図 2.3 セメントペーストの構造

以下，図 2.4 および図 2.5 に示す模式図に従って解説する．

【STEP 1，例えば系の温度が - 5 の場合】

- 1-1：大きな細孔中で氷ができる．(- 5 に応じた細孔径で凍結が起きる．)
- 1-2：氷の形成によって，氷の中には化学物質が入り込めないので細孔内で化学物質の濃縮が起きる．濃縮は，系の温度に応じた溶融温度の濃度に達するまで進む．
- 1-3：濃度濃縮が起きた細孔と周辺の細孔の間に濃度勾配が生じるために，浸透圧が発生し，これが駆動力となって，水分の移動が生じる．
- 1-4：濃度濃縮が起きた細孔に周辺の細孔からの水が到達したことによって，溶液濃度が一旦減少する．これによって再度氷が成長し易い状況が生まれる．細孔内が飽和していれば，氷の体積膨張によって細孔内に圧力を発生させることとなり，また水分移動の際にも周辺の水分が移動した細孔にも圧力を発生させることとなる．
- 1-5：大きな細孔では，平衡濃度に達するまで再び氷が成長し，氷の成長による内部圧力が増すとともに，溶液の濃度濃縮が起き，濃度勾配が生じ，再度周辺の細孔から水分が移動してくる．

以降，STEP1-4 と STEP1-5 が繰り返され，一定温度下であっても，長さ変化が生じることとなる．

【STEP2，例えば系の温度が - 10 に低下した場合】

- 2-1：2 番目に大きなサイズをもつ細孔 (- 10 での凍結サイズに応じた細孔) で氷ができる．
- 2-2：1 番大きなサイズの溶液濃縮のために生じる水分移動とともに，2 番目に大きなサイズをもつ細孔での濃度濃縮のための水分移動が起きる．

以降，STEP 1 と同様なメカニズムで損傷が進む．

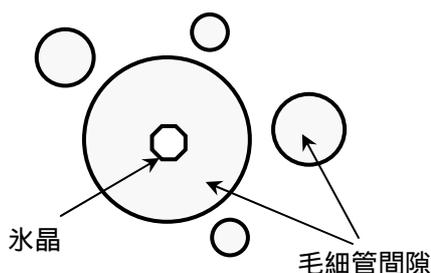
ただし，温度が下がるにつれて総ての間隙内の水が凍るわけではない．すなわち，ゲル水は - 78 まででは凍らないので，一般の気象環境下ではコンクリート内には必ず水分が存在することになり，これが水の供給源の役割を果たすため，持続的に損傷が続くこととなる．

また，この理論において Powers は AE 剤によって連行された気泡の役割を次のように説明している．

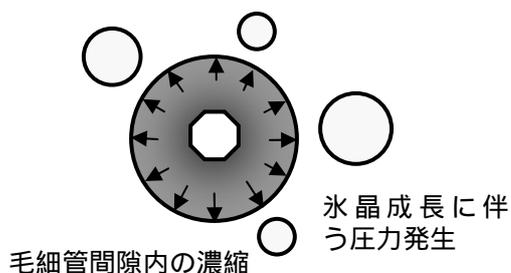
気泡の内壁には僅かながらの水分を有しているものと考えられる。温度が低下すると細孔内の水分と同時に気泡内においても氷が形成される。これによって溶液の濃縮が起きるが、未凍結の細孔からの水分移動が氷の形成されている細孔へと同時に、気泡内へも水分移動が起きる。これによって、気泡が無い場合と比較して細孔内の氷の成長が抑制されるとする考えである。

この理論は、凍結防止剤の散布による劣化防止をよく表現できることが多くの研究者によって認められている。しかし、これを一般のコンクリートの凍害に適用するには未だ説得に欠ける。すなわち、この理論では凍結速度の影響が表現できていないのである。

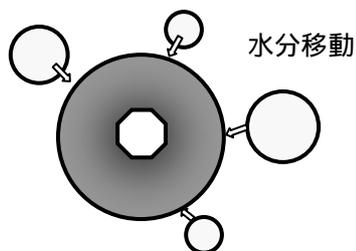
凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化メカニズムに関しては、このほかに「毛細管間隙径に依存する過冷却水説」あるいは「熱力学説」などがあるが、未だにコンクリートの劣化を明確に説明できるものが無いのが現状である。



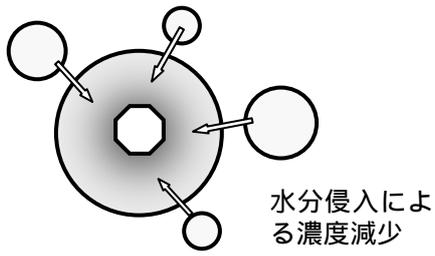
STEP 1 - 1 :
大きな細孔中で氷ができる。(-5 に応じた細孔径で凍結が起きる。)



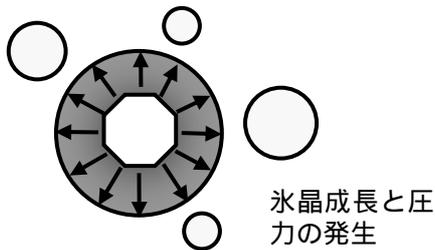
STEP 1 - 2 :
氷の形成によって、氷の中には化学物質が入り込めないで細孔内で化学物質の濃縮が起きる。
濃縮は、系の温度に応じた溶融温度の濃度に達するまで進む。



STEP 1 - 3 :
濃度濃縮が起きた細孔と周辺の細孔の間に濃度勾配が生じるために、浸透圧が発生し、これが駆動力となって、水分の移動が生じる。



STEP 1 - 4 :
 濃度濃縮が起きた細孔に周辺の細孔からの水が到達したことによって、溶液濃度が一旦減少する。これによって再度氷が成長し易い状況が生まれる。細孔内が飽和していれば、氷の体積膨張によって細孔内に圧力を発生させることとなり、また水分移動の際にも周辺の水分が移動した細孔にも圧力を発生させることとなる。



STEP 1 - 5 :
 大きな細孔では、平衡濃度に達するまで再び氷が成長し、氷の成長による内部圧力が増すとともに、溶液の濃度濃縮が起き、濃度勾配が生じ、再度周辺の細孔から水分が移動してくる。

以降、STEP 1 - 3 ~ STEP 1 - 5 が繰り返され、一定温度下であっても、長さ変化が生じることとなる。

図 2.4 浸透圧による水分移動 (STEP1: 場の温度が -5)

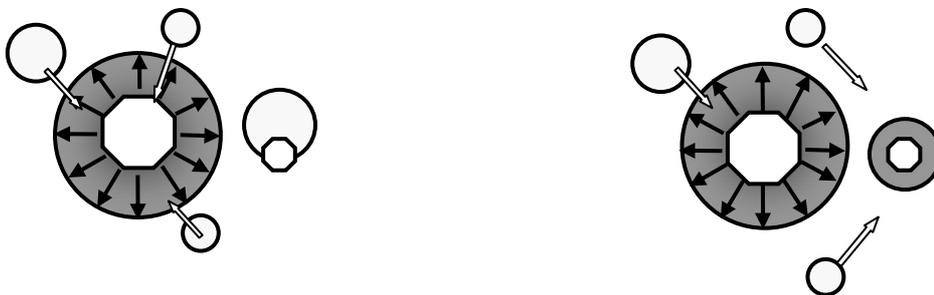


図 2.5 浸透圧による水分移動 (STEP 2: 場の温度が -10 に低下した場合)

2.3 凍結融解メカニズムに関する理論

(1) 凍結融解メカニズムに関する理論

凍害に関する要因は多岐にわたり、多くの要因が錯綜してその凍害に関与することになる。

凍害はポップアウト以外は硬化セメント組織の膨張によって生じるが、凍害を起こしたコンクリート内には凍結時の異常な膨張がコンクリート内の水分の融解後も残留することが知られている。凍結時の膨張量に関しては、温度が低ければ低いほど大きくなり、さらに残留膨張量に関しては動弾性係数の低下および引張り強度の低下と密接な関係を示すことが知られている。

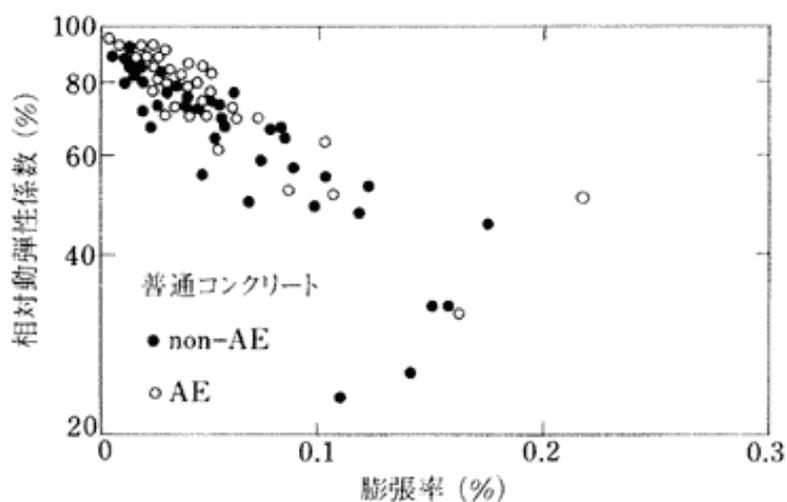


図 2.6 凍害による膨張率と相対弾性係数の低下の関係

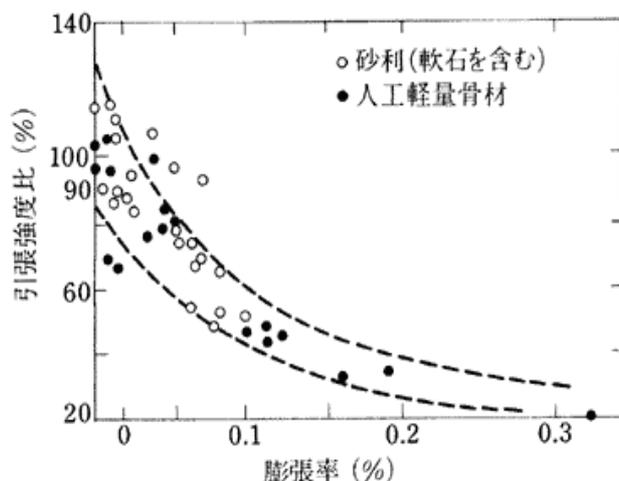


図 2.7 凍害による膨張と引張り強度の低下の関係

(2) 限界飽和度

水が氷になる際に生じる圧力は非常に大きく、この膨張圧をコンクリート強度によって拘束することは難しい。このために、水分凍結による体積膨張を緩和するだけの空隙がコンクリート内部にあれば、凍害から逃れることができる。このことはコンクリートの凍害が生じるかどうかはコンクリート中にどの程度水分が含まれているかどうかということと密接にかかわっていると見える。つまり、飽水度を下げるために空気量を混入するという

ことで、凍害に対して有効になるということを説明できる。気泡内部の空気は毛管現象によって浸水した水によって閉じ込められ、内部空隙がすべて水に置き換わることはない。

(3) 水分凍結温度

通常条件において水分が氷となった場合に9%の体積膨張を生じるが、氷の温度低下に伴い体積は収縮する。しかしながら、コンクリートの凍害では、0℃以下温度で温度が低下するのに従い体積膨張が継続し、劣化も温度が低いほど激しいことが知られている。これは、微小な細孔中の水分が細孔壁の拘束を受けることで融解温度が細孔径に依存して低下することによって説明ができる。つまり、夫温度の低下に伴いより小さな細孔の細孔中の水分が新たに凍結し、結果として温度が低下するほど凍結水量が増大するので、膨張量が温度低下にともなって増加する。

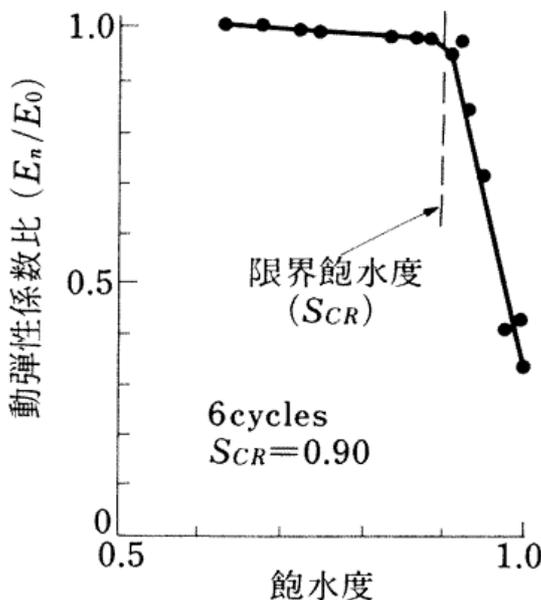


図 2.8 限界飽水度

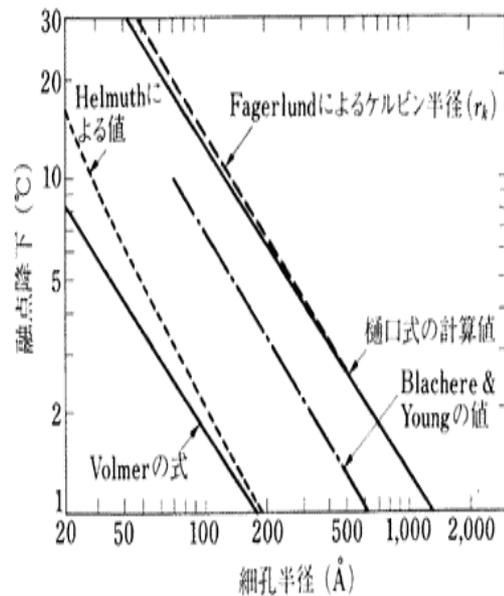


図 2.9 融点降下の理論式の比較

また、コンクリート中の細孔水においては多くのイオンを含有していたり、また、細孔内圧力が通常より上下したりしているために、冷却過程において融点以下でも準安定状態(過冷却状態)とし液体のままであることが多いため融点降下の理論式の比較よりも凍結温度に関しては低いことも多い。

2.4 凍害劣化要因に関する研究

(1) 外的影響

気象作用

コンクリート中に存在する水を凍結させる気象作用は、気温の低下である。気温の低下とともに、風作用も加われば、コンクリートの内部の温度はさらに低下する。そのため風速が一般に大きい沿岸などの地域ではより注意が必要である。また、寒冷地の中でも、最低気温の低い地域ほど、コンクリート内部のより小さな毛細管空隙の水が凍って水圧が高くなるため、劣化の程度も著しくなる。図 2.10 によれば、-2 程度の凍結の繰り返しでは、コンクリートに劣化が見られないが、これが -5 を過ぎると著しい凍害を受けている⁽²⁾ 最低温度持続時間の影響は小さく、また冷却速度も劣化の程度にそれほど影響していないのがわかる。現実の構造物においては、実験室における条件のように過大な冷却速度となることは少ないから、この影響は重視する必要はないと考えられる。

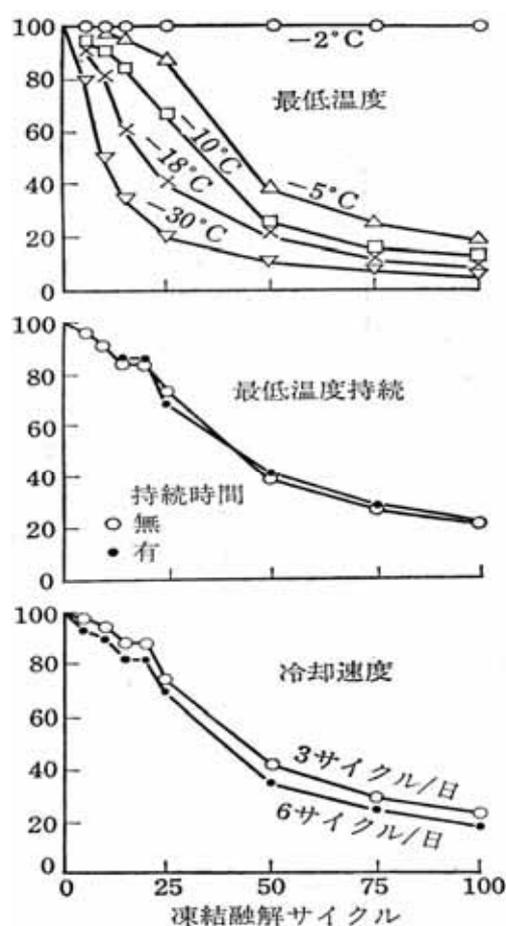


図 2.10 凍害に対する冷却条件の影響⁽¹⁾

凍結した水を溶かす気象作用としては、気温の上昇と日射があげられる。冬期の気温の日較差が大きく、日中の気温がコンクリート内部の凍結水を溶かすほどに上昇する地域は厳しい条件下にある。図 2.11 はコンクリート表面近くの温度変化を測定した例であり、冬期の最高気温が 1 程度の日であっても、南向きの日射を受ける表面付近の温度は 20 程度までに上昇しており、日射の影響は著しい。⁽³⁾凍害は積雪寒冷の気象条件を有する地域で起こるが、単に積雪地域とはいっても、それぞれの気象条件は大きく異なっており、各場所における気象作用の現象を同一視することはできない。それぞれに特有の気象条件によって、凍害に対する能動的要因は場所的に異なり、同じ作成条件のコンクリートの構造物であっても、凍害の受け方に差が生じる。

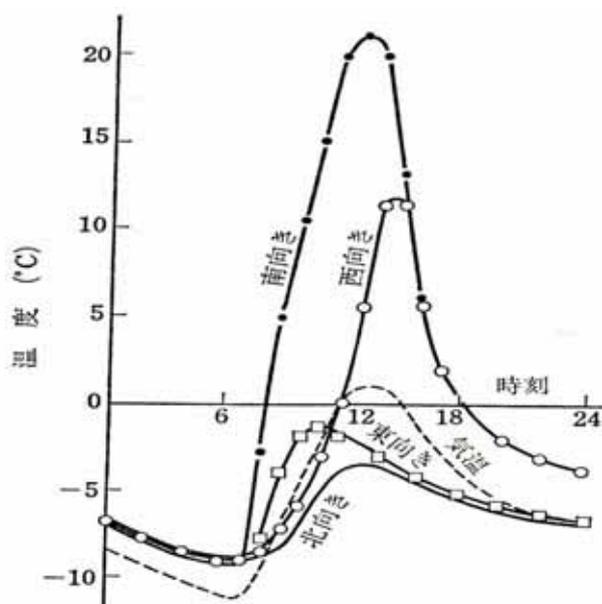


図 2.11 コンクリートの表面温度⁽²⁾

構造物の条件

コンクリート中で凍結している水を融かす要因は、気象作用以外にも存在する。その 1 つは、水利構造物や海岸構造物等における水位変動であり、その箇所にあるコンクリートの内部では、冠水していないときに凍結した水が、冠水によって融解する。特に、潮位の変動を受ける海岸構造物では、確実に 1 日サイクルの凍結融解にさらされ、しかも波浪や塩分の作用が加わるために劣化の危険が大きい。海水に浸されるコンクリートが凍結融解

作用を受ける場合には、通常よりも多量の空気混入を必要とする。(4)

建築構造物では、暖房も凍結水を融かす要因になる。気温の上昇や日射に加え、暖房によって融解したコンクリート中の水は、夜間に暖房がないと凍結する可能性が強く、このような条件の下では、凍結融解の繰り返しが多くなる。

構造物の方位もコンクリート中の水の凍結融解に関連する。きわめて寒冷的な地域では、コンクリート中の水が凍ったままの状態に保たれる北面よりも、昼間の日射によって凍結水が融け、しかも融雪水が供給される南面の部材が厳しい条件下にある。他方、日中の気温が北面の部材中の凍結水を溶かすまでに上昇する地域では、相対的に温度の低い北面の部材で夜間に水が凍る可能性が強く、南面の部材よりも凍結融解作用を受ける回数が多くなる。

日射によるコンクリート内部の温度上昇は表面の色によっても大きく異なる。図 2.12 によると、白色塗装をすることによって温度上昇が大幅に低減されている。(5) コンクリート中の水の凍結が避けられない場合には、白色塗装によって凍結状態を保持することも凍害の軽減に役立つと考えられる。コンクリート本来の色は熱の吸収が意外と大きく、白色塗装によって温度上昇が大幅に低減される。コンクリート中の水の凍結が避けられない場合には、白色塗装をして凍結状態を保つのも、凍害の軽減に役立つと考えられる。

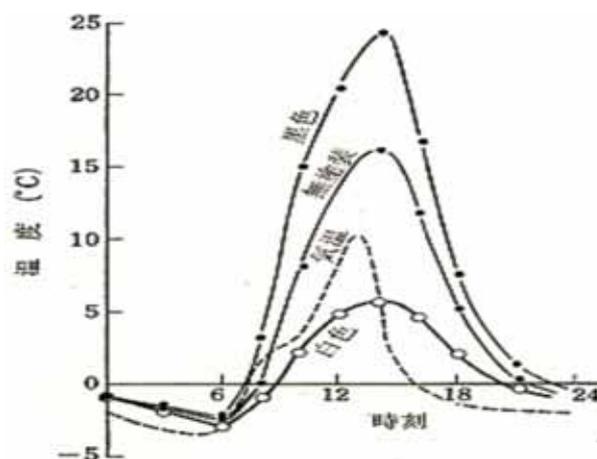


図 2.12 着色したコンクリートの表面温度変化(5)

コンクリート中の水を凍結・融解させるのは、主に気象作用であるが、特殊な例としては道路の凍結防止剤などがあげられる。凍結防止剤の使用は、路面の雪を融かして車両の通行を円滑にするが、融雪水がコンクリート内部に浸透して飽和度を高め、しかも塩分を含む水は浸透圧と水圧を大きくして、スケーリングの発生を引き起こす、さらに、凍結防止剤は起寒剤の作用を果たして(6)、コンクリート内部の温度を急激に低下させて劣化を著しくしてしまう。

(2) 内的影響

使用材料の性質

凍結融解に関連する要因の多くは、人為的に制御するのが不可能かあるいは非常に困難なため、供給される水を可能な限り浸透させない条件や、水の凍結融解作用に対して十分抵抗できる条件を整えるのが、凍結を防止するための可能な方策となる。水の凍結融解作用に抵抗する能力は、コンクリート自体の性質によって決まるが、その前段として、構成材料個々の適性もよく吟味しておく必要がある。

セメントの種別によるコンクリートの耐凍害性の違いは、一般に小さいと考えられていて大きな要因ではない。ただし、混合セメントについては、その耐凍害性を懸念している例がある。図 2.13 は暴露試験の結果⁽⁷⁾であり、普通セメントに比べて混合セメントを用いたコンクリートの劣化が著しい。また、沿岸構造物を対象とした調査例⁽⁸⁾でも、混合セメントを用いたコンクリートの劣化が著しい。混合セメントは水和が遅いため、比較的若い材齢で凍害を受ける可能性が強く、この点に注意を要するが、長期的に見れば普通コンクリートと同程度の耐凍害性を持つとする調査例もある。

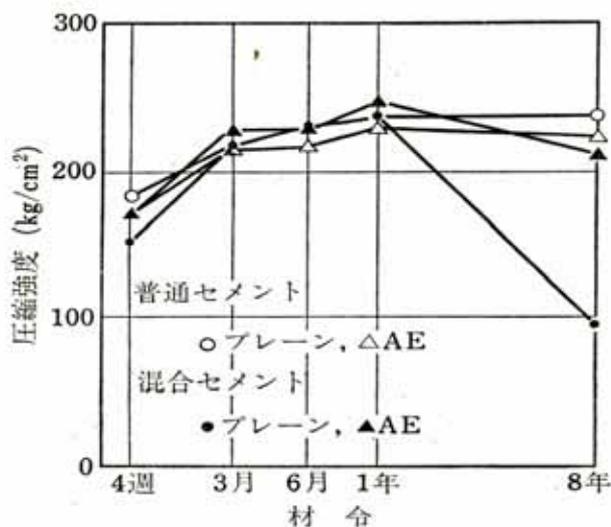


図 2.13 屋外暴露試験⁽⁷⁾

セメントと水との化合物である硬化ペーストの耐凍害性には、水セメント比が大きく関連するが、通常用いられるその範囲でモルタルやコンクリートと比較すれば、硬化ペーストの耐凍害性は格段に劣る。図 2.14 はその比較をしているもので、硬化ペーストはわずかのサイクルで破壊に至っている⁽⁷⁾。硬化ペースト単独では乾燥収縮が過大で容易にひび割れが発生するため、構造材料としての適正を有さない。骨材と複合してはじめて実用に耐えうるのと同様に、耐凍害性に関して、硬化ペースト単独ではほとんど無防備で、骨材との複合硬化により、その欠陥が解消されるといえる。

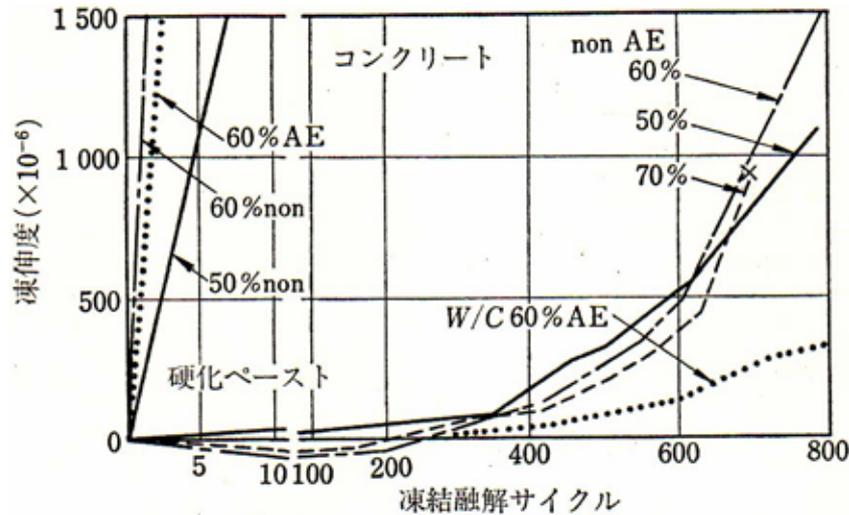


図 2.14 セメントペーストとコンクリートの耐凍害性の比較⁽⁷⁾

モルタルとコンクリートの耐凍害性にも大きな差がある。しかし、いずれが優れているかについては、異なる結果が提示されていて、はっきりしていない。

骨材は他の材料と複合したときに、耐凍害性を高める反面、それを損ねる作用も果たしている。この複合時の特性とは別に、骨材自体もコンクリート中で凍結融解作用を受けるから、その耐凍害性をよく吟味しておく必要がある。特に骨材はコンクリート中において、3/4程度もの容積を占めており、それ自体の耐凍害性が劣る場合には、文字どおりの骨格材料となる資格がない。骨材が直接の原因となる凍害は、配合に格段の配慮を払っても、防ぎようがないと考えられている。

表 2-1 より、骨材寸法の大きなものほど、凍結融解による劣化が著しい⁽⁹⁾。同様の傾向は、チャートを用いた表 2-2 の結果からも見受けられる。これは凍結時において、粒径の大きい骨材ほど、内部から外へ排出される水の流動距離が長く、それに伴い高い水圧が発生するためであると解釈できる。ペーストに拘束されない条件の下では、骨材寸法が 6mm 程度以下であれば、凍っても損傷を受けないとされており⁽¹¹⁾、細骨材自体が凍結融解作用によって劣化する可能性は少ない。これが細骨材と粗骨材の大きな違いであり、骨材自体の耐凍害性は主として粗骨材の場合に問題となる。このように、凍害発生機構としての水圧説を骨材に適用すれば、骨材にも限界寸法が存在することになる。

表 2-1 骨材寸法と凍結融解による劣化⁽⁹⁾

骨材	粒径の範囲 (mm)	硫酸ナトリウム試 験(5回)の損失量 (%)	A S S H Oの凍結融解試 験(160回)の損失量(%)
川砂利	25~15	19.8	43.3
	15~10	19.4	19.2
	10~5	18.3	19.4
人工軽量骨材	25~15	6.3	46.5
	15~10	1.9	20.2
	10~5	3.2	7.4

表 2-2 飽水させたチャートの凍結融解試験⁽¹⁰⁾

粒径の範囲 (mm)	凍結融解 12 サイ クルで通過する骨材 (%)	凍結融解 51 サイ クルで通過する骨材 (%)
40~20	33	61
20~10	12	34
10~5	1	6

凍結速度以外で限界寸法に関わる要因は、全て骨材自体の性質であり、これらの要因から、骨材自体の耐凍害はいくつかのタイプに分けられる⁽¹⁰⁾。第1は大理石などのように空隙率のきわめて小さい骨材で、一般に強度や弾性係数が大きいから、水圧が発生しても、弾性的に調節する性能を持ち、破壊に至ることはない。第2は、微細な空隙を多量に有する、たとえばチャートのような骨材で、透水性が低く、空隙率も大きいので、高い水圧が発生し、限界寸法以上では破壊に至るおそれがある。骨材自体の破壊は、凍結のたびごとに繰り返される膨張によって組織が弛緩し、残留膨張がある限界を超えたときに発生する。膨張により、骨材自体が破壊に至らなくともコンクリート全体の耐凍害性は大いに損なわれる。図 2.15 コンクリートのひずみの変化を測定した例であり、凍結時における膨張が骨材自体の膨張によるのは明らかで、コンクリート全体の膨張は、骨材寸法が大きいほど著しい。骨材寸法が小さければ、骨材はほとんど膨張せず、周囲のモルタルを傷めないから、このタイプの骨材を使用する場合には最大寸法の選定に注意を要する⁽¹²⁾。3番目のタイプは、砂岩などのように空隙率が大きく、しかも高い透水性を持つ骨材で、この種の骨材は

空隙が水で満たされていても、氷の形成に伴う水の移動が高い透水性のために容易であり、外部への排水が円滑であれば、骨材内部に高い水圧が発生しない。しかし、現実には骨材の周りに低い透水性の硬化ペーストが存在するから、水の排出が困難となる。そのため、骨材内部や特にペーストとの界面に高い水圧が生じ、骨材自体が膨張したり、接するペーストが劣化したりする。また骨材から水が排出されれば、周囲のペーストの飽和度が高まるため、ペーストの劣化がいつそう促進される。

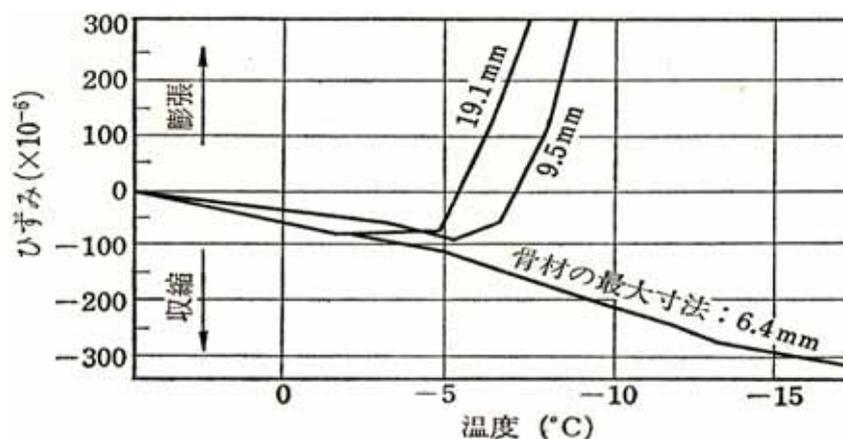


図 2.15 コンクリートの耐凍害性に及ぼす骨材の最大寸法の影響

コンクリートの性質

骨材自体が凍害の直接的な原因とならない場合には、複合材料としてのコンクリートの耐凍害性は、硬化ペーストの質と量およびペーストと骨材との界面の状態によって支配される。硬化ペーストの性質は基本的に水セメント比によって決まる。図 2.16 はセメント硬化体中の個々の成分の容積百分率を示しており、通常 of 低温度で凍結可能となる毛細管水の量が水セメント比によって大きく異なるから、硬化ペーストの耐凍害性も、水セメント比によって決定されることになる。毛細管水は水セメント比が小さいほど少なく、水和が完了した時点では、水セメント比 40% 以下の硬化ペーストに、毛細管水が存在しない⁽¹³⁾

硬化ペーストの耐凍害性には、単に毛細管水の量だけではなく、細孔径分布も大きく関連し、 $10^3 \sim 10^4$ 程度の空隙が多い場合に劣化しやすいと考えられているが、水セメント比 40% の硬化ペースト内にはこの範囲の空隙がわずかで、ここにも耐凍害性に優れている理由が見出される。空隙のほとんどが微細で、組織が緻密である特質は、強度が大きくて凍結時の膨張に抵抗する能力が高いことを意味し、同時に透水性が低いいため、凍害発生の要件である外部からの水の浸透を容易に許さない利点を持つ。

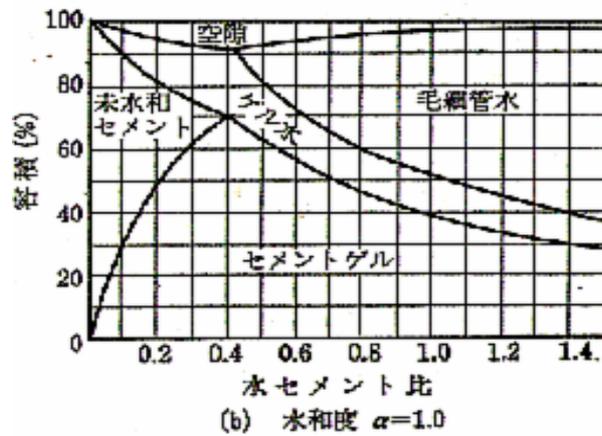
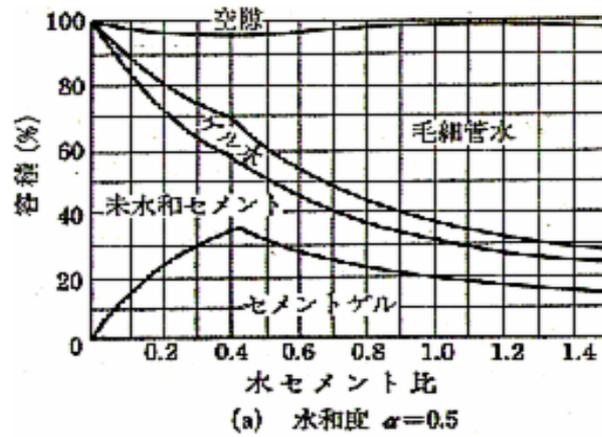


図 2.16 セメント硬化体中の構成成分の容積割合⁽¹³⁾

このような硬化ペースト自体の耐凍害性からすれば、コンクリートの水セメント比を可能な限り低く抑えるのがよいとの結論が導かれよう。しかし、例えば理想と考えられる 40% 以下に水セメント比を選定するのは、必ずしも現実的ではないし万全でもない。一つは、経済性および施工性から、通常用いられるコンクリートにおいては、より大きな水セメント比が要求されるためである。この場合、硬化ペースト部分の耐凍害性は劣ると考えるべきで、弱点となるこの部分の容積を少なくするとか、独立気泡の連行によって、耐凍害性を高めるなどの処置が必要となる。

水セメント比の選定に際しては、所要強度を満たすことにのみ重点が置かれがちであるが、水セメント比は同時に耐凍害性に関しても決定的要因である点を銘記する必要がある。

空気量・気泡間隔係数

練混ぜ時に混入した空気は硬化後も気泡という形で硬化コンクリートにも残留する。耐凍害性に関しては前述のように絶対空気量ではなく、水分移動距離と相関のある気泡間隔係数によって説明が行われ、そのため、空気量が一定であるならば、気泡が小さくその間隔が小さくなるほど凍害に関しては有利に働くということがいえる。Backstromらはコンクリートについて気泡間隔係数と凍結融解に対する抵抗性との関係を広範な実験資料から整理して次のような結果を得て、耐凍害性に関して、推奨気泡間隔係数は200~250 μm 程度であることを示した⁽¹⁴⁾。

しかしながら、コンクリートの調合と気泡間隔係数を結びつける理論的なモデルがまだないことから、おおよそ気泡間隔係数を表すことのできる空気量を指標として耐凍害性をあらわすことが多い

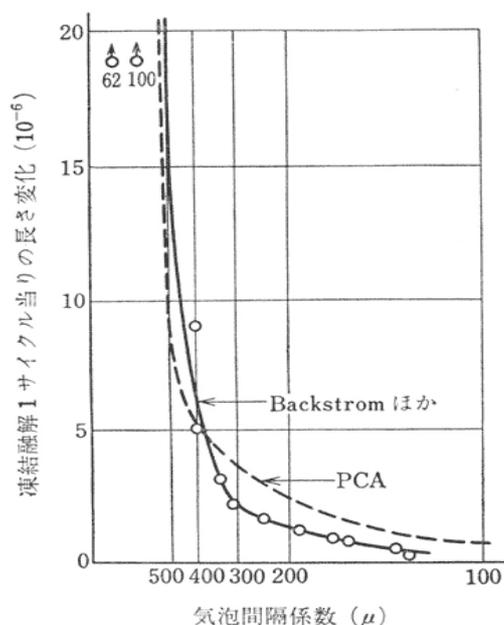


図 2.17 気泡間隔係数と凍結融解によるコンクリート長さ変化の関係

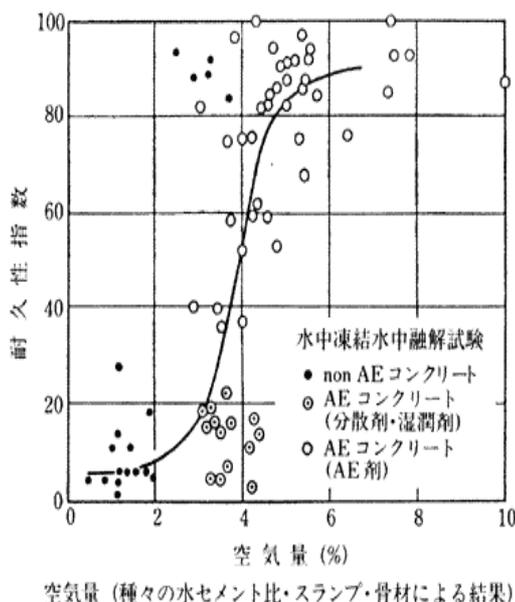


図 2.18 種々のコンクリート配合と耐凍害性の関係

水セメント比

水セメント比はコンクリート組織の細孔構造を形成する支配的なパラメータであり、水分の凍結がコンクリートの細孔径に依存することから水セメント比の低い緻密なコンクリートほどその耐凍害性が優れていることを示すことになる。きわめて低水セメント比である高強度コンクリートであれば、通常の凍結温度であっても内部の水分は未凍結のまま残り、non-AE コンクリートであっても耐凍害性が高いことが知られている。組織を緻密化するには、水セメント比を小さくすることはもちろん、混和剤を使用する、養生を十分行うといったことが有効である。

骨材

骨材もまた耐凍害性に大きく関与する要因である。低品質骨材で吸水率などが高い場合には細孔内水分の凍結によりポップアウトを起こすなど、その骨材の細孔構造も大きな要因であることが指摘されており、骨材種類の影響として粗骨材の吸水率の影響は、吸水率が1%を超えたものを使用するときにおいて、1%毎に耐久性指数が10減少する。

また、凍害が大きな温度差をもって生じることを考えるとセメント硬化体と骨材の熱膨張率の違いや骨材界面の付着性状も大きな要因となることが推測されるし、また、細骨材量などは練混ぜ時に混入する空気量と相関があることが指摘されており、気泡間隔係数-空気量-細骨材量といった間接的な要因ではあるけれどもやはり耐凍害性に関与している。

細骨材率に関しても永倉の研究があり、細骨材率が35%~55%の間において影響はないが、その範囲を超えた場合には5%増減するたびに耐久性指数も5%増減する。

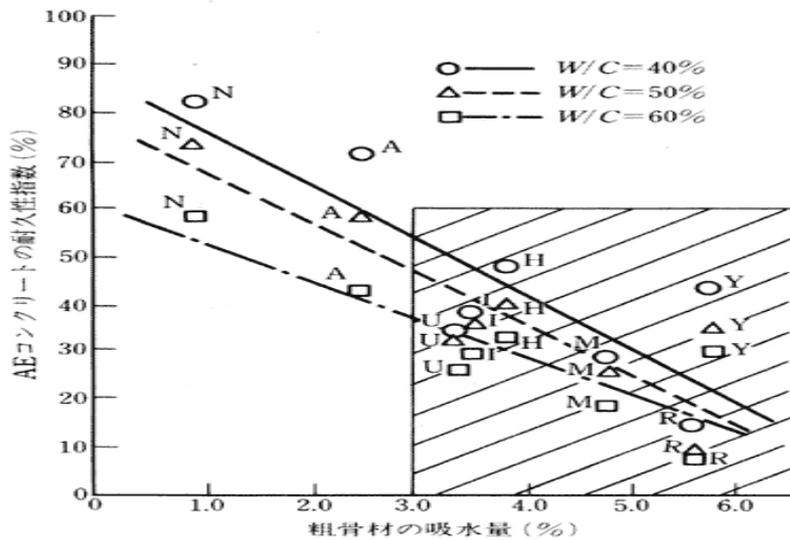


図 2.19 粗骨材吸水率と耐久性指数の関係

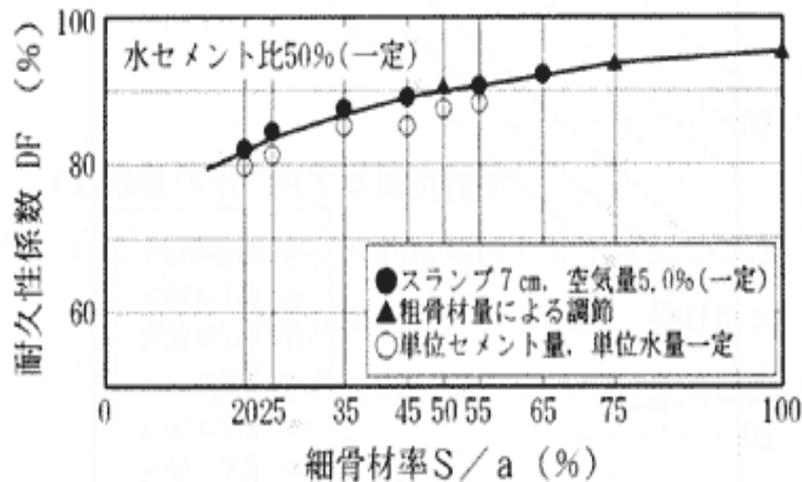


図 2.20 粗骨材吸水率と耐久性指数の関係

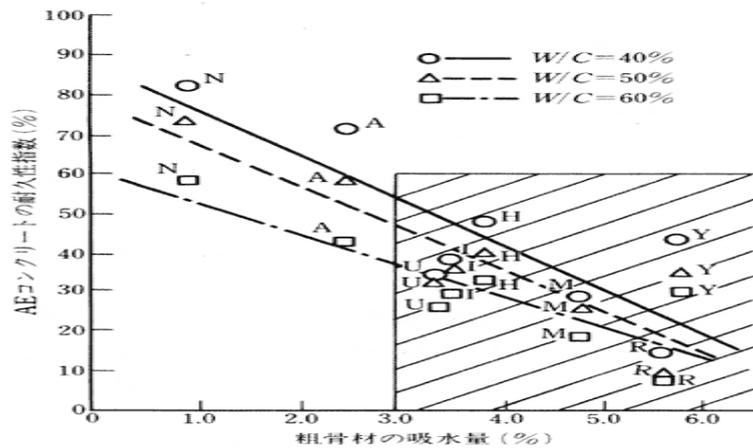
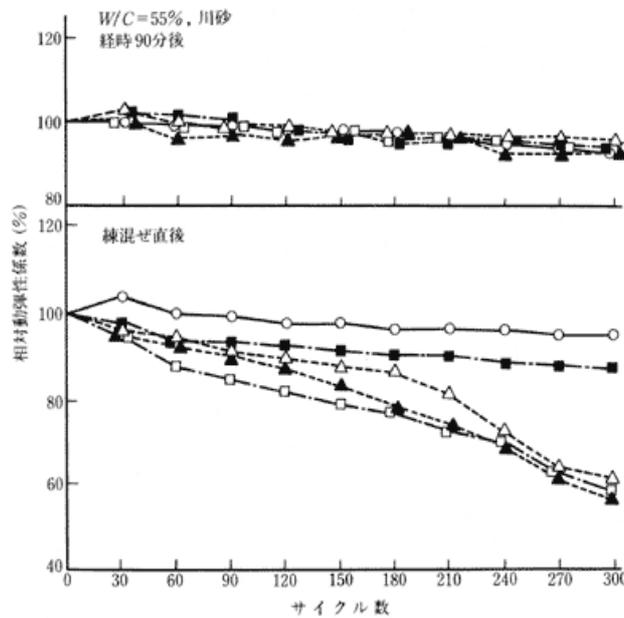


図 2.21 粗骨材吸水率と耐久性指数の関係

混和剤

高性能 AE 減水剤を用いた一般のコンクリートの凍結融解に対する抵抗性は従来の AE 減水剤等のコンクリートと同程度であることが指摘されている。

水セメント比 55%において練混ぜ直後と練混ぜから 90 分後のコンクリートに対して凍結融解に関してその挙動が異なるという実験結果から、空気量変化は大して大きくないものその耐凍害性に関して性質が異なるという報告がある。



記号	混和剤	スランブ (cm)	単 位 量 (kg/m ³)	空気量 (%)	
				直後	90分
○	AE 減水剤	18	185	4.3	2.8
△	ナフタリン系	18	175	4.2	5.8
□	ポリカルボン酸系	18	175	4.1	4.3
▲	ナフタリン系	21	185	4.2	4.2
■	ポリカルボン酸系	21	185	4.5	5.5

図 2.22 練混ぜ時と 90 分後における耐凍害性

またそのときの気泡間隔係数と耐久性指数は以下のようにになっている。

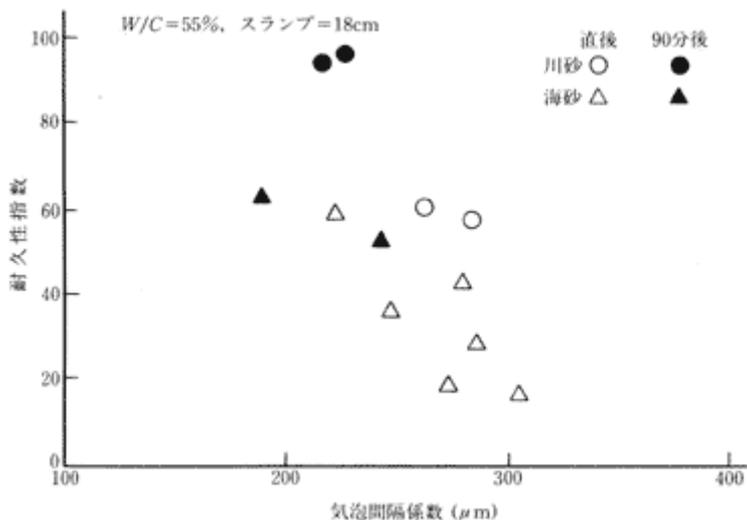


図 2.23 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

高強度コンクリートにおける凍結融解抵抗性はフレッシュコンクリートにおける空気量を 4%とした場合にはいずれのコンクリートでもその耐凍害性は優れているが、2%とした場合には水セメント比が 35%以下であれば優れているがそれ以上となると問題が生じる。また、空気量がほとんどない場合においても水セメント比が小さくなるにしたがって耐凍害性は改善される。

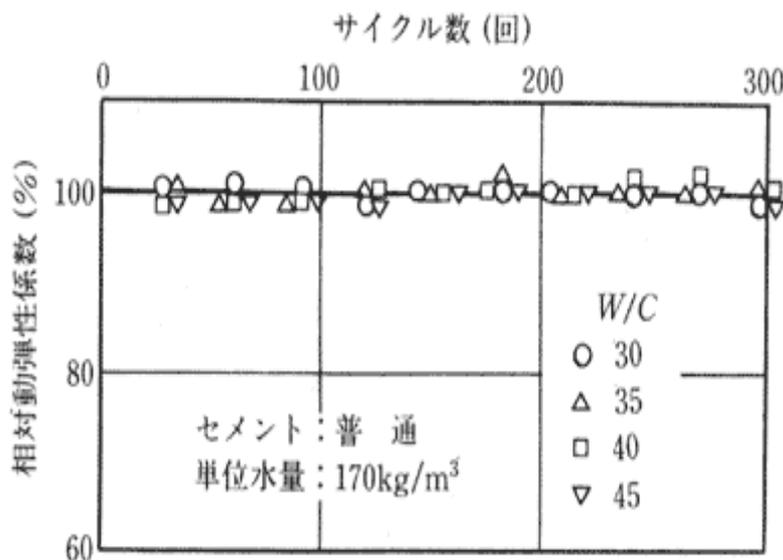


図 2.24 水セメント比と相対動弾性係数
(空気量 4%)

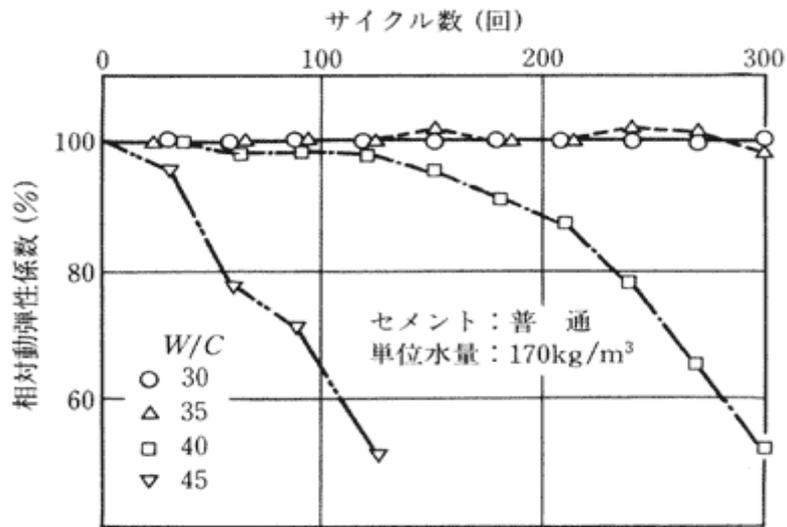


図 2.25 水セメント比と相対動弾性係数
(空気量 2%)

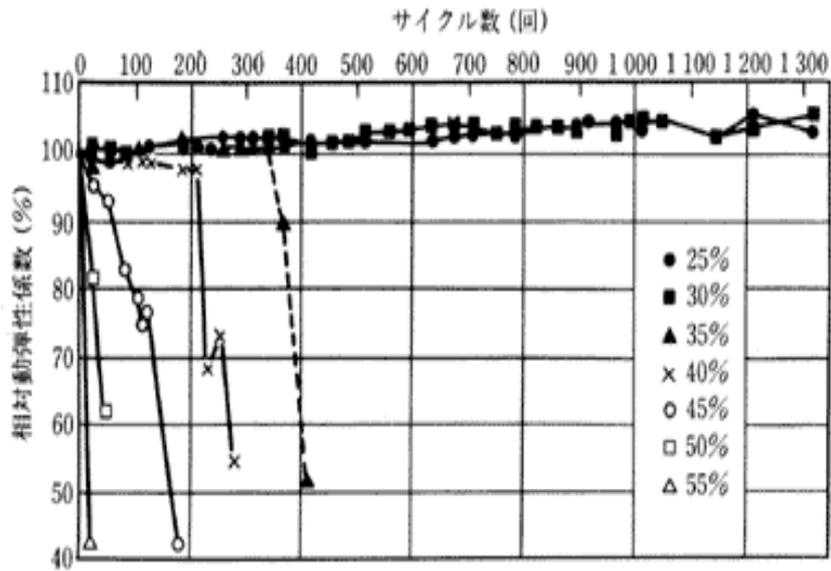


図 2.26 non-AE コンクリートにおける
水セメント比と相対動弾性係数の関係

2.5 繊維補強による耐凍結融解性⁽²²⁾

ポリプロピレン繊維補強コンクリートの硬化特性は、普通コンクリートと同様に、コンクリートの組織構造に左右され、組織構造の変化は、繊維径、繊維長さ、および、繊維混入量によって異なることが明らかになった。その圧縮強度は、空気量との相関が高く、基本的には普通コンクリートと同様に取り扱うことができるものと考えられる。また、凍結融解抵抗性は、繊維の混入によって巻き込まれる空気の影響を受けるが、普通コンクリートと同様に、良好な空気を適切に連行させることにより、十分な耐久性の確保が可能であり、さらに繊維による架橋効果によりコンクリート表層のスケーリング劣化を抑制できる可能性があることが明らかとなった。

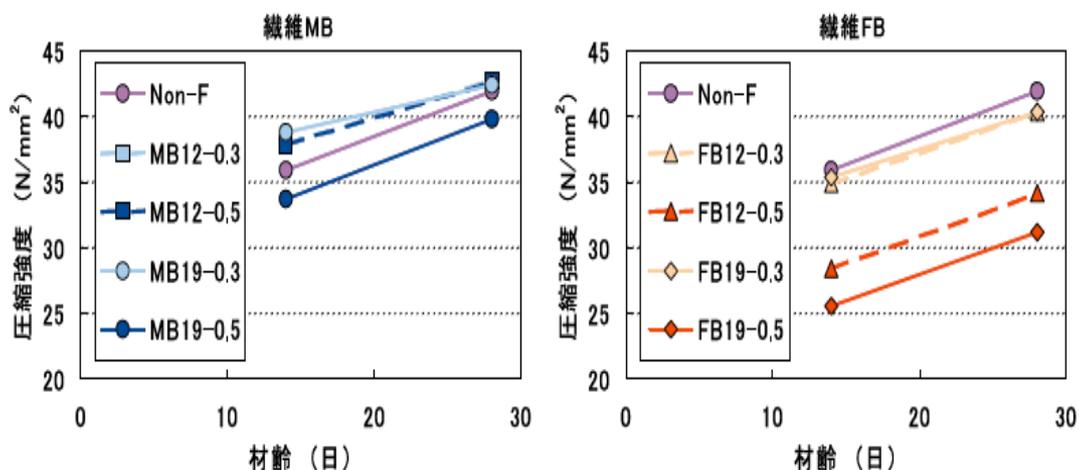


図 2.27 各繊維コンクリートの圧縮強度⁽²²⁾

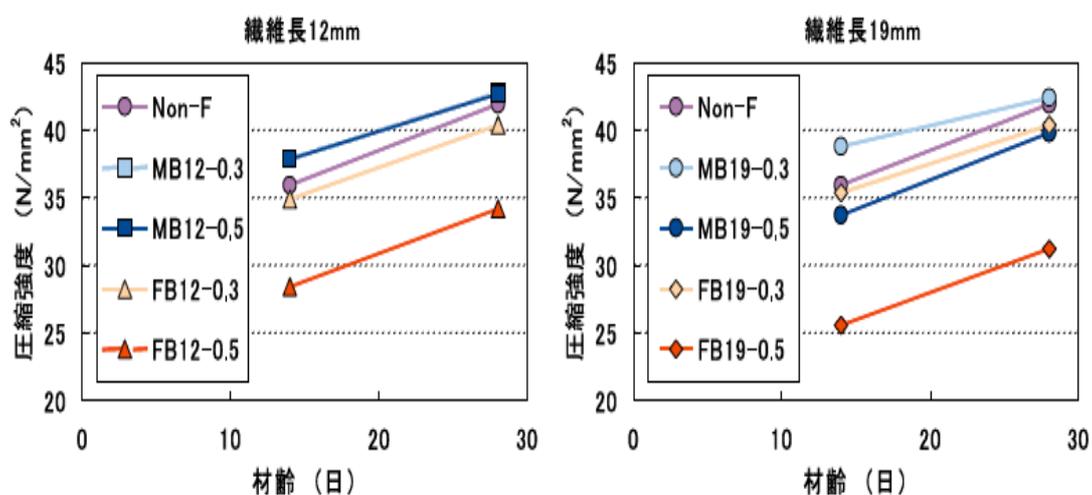


図 2.28 圧縮強度に及ぼす繊維混入率の影響⁽²²⁾

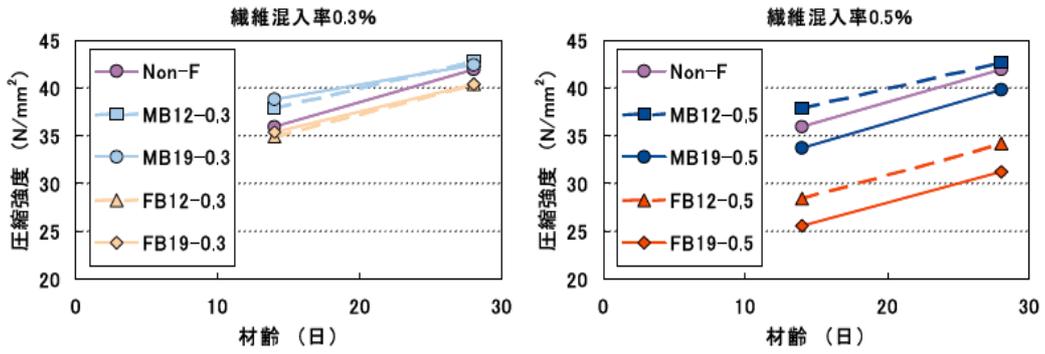


図 2.29 圧縮強度に及ぼす繊維長の影響⁽²²⁾

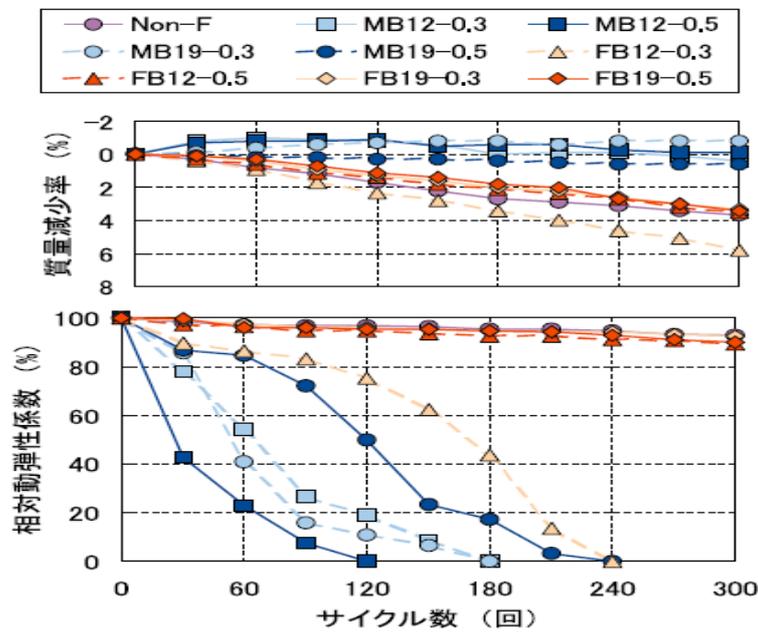


図 2.27 繊維補強による相対動弾性係数の推移⁽²²⁾

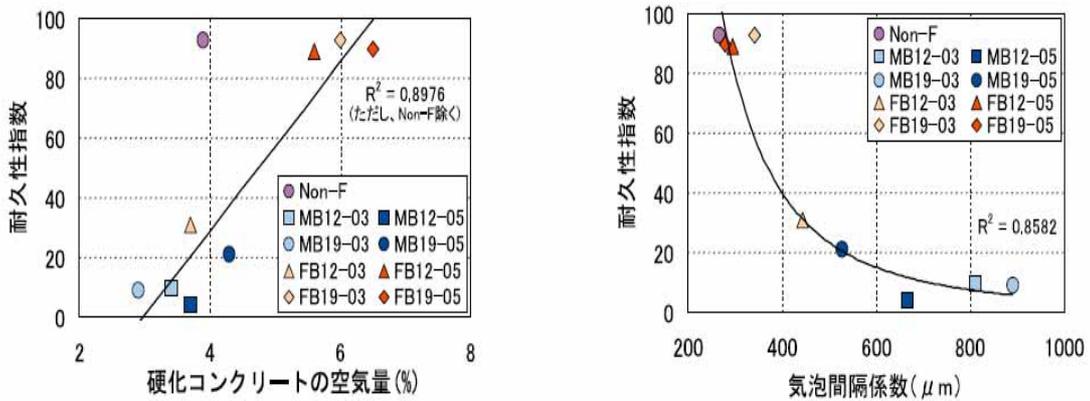


図 2.28 繊維補強による耐久性指数と空気量・空気間隔係数の関係⁽²²⁾

2.6 ビニロン繊維の性質

ビニロンはポリビニルアルコール（PVA）を主体とする合成繊維に対して日本であたえられた一般名である。PVAは1924年に最初に合成されたが、繊維としてはナイロンとらんで我が国において初めて大規模に工業化された繊維であり、1950年以来40余年の歴史を有している。それ以来、いろいろな分野で利用されてきましたが、繊維強度が高い、耐候性、耐薬品性が優れているなどの特長から、近年、工業用、産業用の分野で広く用いられております。中でも、シート、ボードなどのセメント系建材分野で、石綿の安全性が問題視され始めた1980年初頭より、その代替物として脚光を浴びるようになり、今日では、ヨーロッパをはじめ世界中で、建材分野における石綿の代替物として、実績を積んでいます。

セメント系材料において補強材としての繊維に求められるマトリックスへの接着性、高い繊維引張強度、優れた耐候性など必要性能の全てを備えたビニロンは、石綿代替で積んだ実績のもと、コンクリートの強度向上を始め、FRCとしてタフネスの向上からひび割れの防止などの機能を与える新しいタイプの繊維にまで成長しました。

また、圧縮強度の高い脆性物質として利用されてきたセメント成型物に対し、新しいタイプのPVA繊維によって、木材、アルミニウムにも匹敵するようなきわめて優れた引張特性を付与することに成功しました。

PVAは水溶性であるためこれを水に溶解し乾式または湿式紡糸法により紡糸される。さらに熱延伸によって分子配向をあたえて繊維とする。ビニロンは水に溶解するが225程度で熱処理すると熱水に対しても不溶性となる。

ビニロン繊維の大きな特徴としては、原料であるPVAが水溶性であることから、他の合成繊維とは異なり親水性に優れている。これは表面の起伏性状と共にビニロン繊維とセメントマトリックスとの付着強度が良いことの原因となっている。薬品に対する耐久性は高く、特にセメントの高アルカリ環境下ではきわめて大きな耐性を示す。一般に合成繊維の熱的性質はあまりよくないが、ビニロン繊維の融点は240である。

高靱性セメント複合材は、コンクリートのさまざまな分野での補修材として期待されているだけでなく、地震対策資材などへの用途展開が進められています。

使用例：トンネルライニング、高負荷土間コンクリート、
各種吹き付けコンクリートなど主として土木分野でのコンクリート補強

2.7 メガミックスの性質

PRODUCT DATA SHEET



MEGAMIX II

概要説明

XYPEX MEGAMIX II は、劣化したコンクリートの断面修復を行うための厚ぬり用補修モルタルです。これは優れた付着性、低収縮性、耐化学的腐食性と高い強度を作り出すために特に調合したものです。これは単一成分よりなるモルタルで、吹付けまたはこて塗りのいずれかの方法で10mm から 50mm の厚さに塗布することができます。MEGAMIX II の高性能特性は、XYPEX による改質技術により高い評価を受けております。

断面修復の適用部位

- 貯水タンクと貯水槽
- 下水処理場
- 通水管と下水管
- マンホール
- 海洋構造物
- 橋梁上部工と下部工
- トンネル覆工
- 駐車場
- 建物外壁
- 建物屋上

優れた特徴

- コンクリートへの優れた接着性および付着性
- 収縮が少なく、繊維により強化されている
- 塩化物イオンの浸透遮断性に優れている
- プレミックスのため、水を加えるだけである
- 壁面、床下面の断面修復、吹付けができる
- VOCに準拠

荷姿

Megamix II の包装は、27.2kg 缶入り。

保管

Xypex 製品は、直射日光が当たらない乾燥した所で保管する必要があります。貯蔵寿命は 1 年です。

仕様

27.2kg 入り缶の Megamix II は、10.0mm の厚さに塗布した場合、1.36m² の広さに塗布できます。

物理的特性

配合 27.2kg 缶当たり 3.8ℓの清水

圧縮強度(ASTM C109)

24 時間	21.2MPa
3 日	38.0MPa
7 日	47.2MPa
28 日	59.3MPa

曲げ強度(ASTM C78)

28 日	8.2MPa
------	--------

割裂強度(ASTM C496)

28 日	4.2MPa
------	--------

直接引張付着強さ(ACI 503R 付属書 A)

90 日	2.3MPa
------	--------

促進塩素透過性(ASTM 1202)

28 日	572 ケーロン
90 日	420 "

凝結時間(ASTM C266)

始発	4 時間 10 分
終結	7 時間 10 分

塗布方法

1. 表面の準備：劣化部のコンクリートを高圧噴射水、ハツリなどの方法で取り除きます。構造的補修または鉄筋腐食のケレンを必要に応じて行います。補修領域の周辺を 10mm の深さまでカッターを入れます。補修領域からごみ、微細な破片やその他の異物を高圧水やその他の適当な方法で取り除き、表面を清掃し、接着性が得られるようにします。

Concrete Waterproofing by Crystallization™

XYPEX CHEMICAL CORPORATION

XYPEX

Patching Resurfacing

Concrete Rehabilitation 03930

2. **練混ぜの手順**：モルタル・ミキサーを用いることで最大の効果を上げることができます。しかし、ヘラによる練混ぜは少量の場合に用いることができます。27.2kg 入缶当たり3.8リットルの清水を混合します。必要な水量の約90%をミキサーに加え、その後 Megamix II の粉末を加えます。軽く混合し、残りの水を必要に応じて加えます。混合を3分から5分間均一な練りができあがるまで続けます。専用の吹付装置は、必要な水を追加する度ごとにモルタルを混合し、排出することができなければなりません。過度に混合した場合、または排出が遅れた場合、モルタルが固まる場合があります。

3. **MEGAMIX II の塗布**：補修領域に水をたっぷり含ませます。コンクリートの表面乾燥状態になり次第、本製品を吹付または塗布します。接着をより良くするには、準備した表面に固い毛のブラシで Megamix II をすり込み塗布します。このすり込み塗布層が湿っている間に（普通約20分以内）Megamix II の全量を塗布します。モルタルが固まり、厚みが付くように十分なスピードの低圧スプレー・ガンで Megamix II を塗布します。Megamix II は、必要であれば、こてまたはなでこてを用いて塗布することができます。仕上げ作業は出来るだけ早く終えてください。

4. **塗布の厚さ**：Megamix II 塗布の厚さは、工事現場の状況と必要によって変わります。一般的な目安として、塗布の厚さは10 mm から50 mm の間とします。スプレー（吹付）塗布のための単一層の厚みは、鉛直では50mmまで、天井では40mmまでとすることができます。表面を粗くし、または刻み目を付けてから、塗布し、さらに初回の凝固の直後に塗布します。

注：厚さが50mm以上の塗布の場合には、ジャパン・ザイペックスの技術部またはお客様の地区のザイペックス代理店にご連絡下さい。

5. **養生**：補修モルタルの品質を最適にし、永続性のあるものとするためには、養生は必要不可欠です。Megamix II の養生を行うには、ASTM C309に準拠した養生剤を用いるか、または湿潤養生法により養生してください。湿潤養生法の場合、スプレーまたは湿った麻布、ポリエチレン・シートまたはその他の適当な手段を3日間用いて継続的に湿気を補給します。貯蔵構造物（例えば、貯水槽やタンク）は、Megamix II 塗布層に3日間湿潤養生を行った後に水を入れることができます。

注：

1. 高温、乾燥、風の強い時には、最終凝固の前に特別の養生方法が必要となることがあります。その中には、仕上げ工程の後に霧吹きスプレーや適当な養生剤の使用があります。

2. Megamix II は、打設温度3℃以下または30℃以上の場合には、凍結や急速な蒸発（高温や寒冷また風が強い状態）を避けるようにしてください。

技術サポート・サービス

詳しくお知りになりたい場合、代わりの塗布方法、または Xypex の処理方法と他の製品または技術との適合性に関する情報については、ジャパン・ザイペックスの技術部またはお客様の地区のザイペックス代理店にご連絡下さい。

取り扱いの際の安全に関する注意事項

Xypex 製品はアルカリ性です。Xypex 製品は、セメント質の粉末または混合物であり、皮膚と目に対しかなりの刺激を引き起こすことがあります。これらの問題に対する注意書きが、すべての Xypex 製品の缶や包装に詳細に明示してあります。また当社は、すべての製品に対し総合的で最も新しい製品の安全性に関するデータ・シートを備えております。各データ・シートには、お客様の従業員とのお客様を保護するための健康と安全に関する情報が記載されています。ジャパン・ザイペックスの技術部またはお客様の地域の最寄りのザイペックス代理店にご連絡いただき、製品の安全性に関するデータ・シートの写しを入手されてから、製品を保管し、使用されますようご案内申し上げます。

保証

ザイペックス・ケミカル・コーポレーションが製造した製品には重要な欠陥がなく、またその通常の高品質と一致していることを保証します。いずれかの製品に欠陥があることが判明した場合、ザイペックス・ケミカル・コーポレーションの責任は、工場渡りで製品を取り替えることに限定します。ザイペックス・ケミカル・コーポレーションは、製品の商品性または特定の目的への適合性に関する一切の保証を行わず、また本保証はその他の一切の明示的あるいは暗示的保証に代わるものであります。ユーザーは、製品が自らの意図した用途に対し適切であるか判断していただき、これと関連したすべてのリスクと責任を負っていただきます。

XYPEX®

XYPEX is a registered trademark of Xypex Chemical Corporation

ジャパン・ザイペックス株式会社
〒107-0062 東京都港区南青山2-22-3
Telephone: 03 3403 8511 Facsimile: 03 3479 1557
Email: info@xypex.co.jp Website: www.xypex.co.jp

ジャパン・ザイペックス株式会社資料による

第 1 章 使用材料

3.1 使用材料

3.1.1 セメント

本実験には、住友大阪セメント株式会社製の普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントを使用した。セメントの保管は、湿度による風化などの影響を防ぐため、1袋ずつビニールに入れてテープで密封し木箱に収めた。使用する際には、セメントを貯蔵缶に移し替えた。セメントの物理的性質及び化学成分については、JIS R 5201 “セメントの物理的試験方法” 及び JIS R 5202 “ポルトランドセメントの化学分析方法” に基づいた試験結果を表 3.1 に示す。

3.1.2 フライアッシュ

実験に用いたフライアッシュは四電ビジネス株式会社製のものを使用した。3.1.1 のセメントの保管方法と同様である。

3.1.3 細骨材

本試験に使用した細骨材は、鬼怒川産の混合砂である。使用するに際して、先ず 5 mm のふるいによって過大粒を取り除いた後、表面水率が 1 % 前後となるよう切り返しなら均等に乾燥させた。その後直ちに木箱に入れ、表面水率の変動を押さえるために側面をビニールで覆い、上面は湿らせたウエス及びビニールを被せて保管した。

使用する前に JIS A 1125 “骨材の含水率に基づく表面水率の試験方法” により表面水率を測定し、単位水量及び細骨材量の補正を行った。

細骨材の試験は、次に示す JIS 規格に基づいて実施した。

JIS A 1102 “骨材のふるい分け試験方法”

JIS A 1104 “骨材の単位容積重量及び実績率試験方法”

JIS A 1109 “細骨材の比重及び吸水率試験方法”

それぞれの試験結果を表 3.2, 3.3 及び図 3.1 に示す。

3.1.4 粗骨材

本試験に使用した粗骨材は青梅産の砕石である。まず表面に付着している不純物を取り除くため水洗いによって十分に洗浄した。最大寸法は 20mm とし、粒度を整えるために 20 ~ 15mm を大砂利、5 ~ 15mm 小砂利の 2 種類にふるい分けした後、表乾状態にさせた後、茶箱に収めた。収めるにあたっては側面をビニールで覆い上面は湿らしたウエスをかけて保存した。使用する際には、大砂利、中砂利及び小砂利をそれぞれ重量比で 4:3:3 の割合になるよう調整した。粗骨材の試験は、JIS A 1102 “骨材のふるい分け試験方法”、JIS A 1104 “骨材の単位容積重量及び実績率試験方法” 及び JIS A 1110 “粗骨材の比重及び吸水率試

験方法”において規定されている方法によって試験を行った。それぞれの試験結果を表 3.4 , 3.5 および図 3.2 に示す。

3.1.5 混和剤料

AE 剤

本試験に使用した AE 剤は、株式会社エヌエムビー社製のマイクロエア 303A である。AE 剤の劣化を防ぐため恒温室に保管した。

AE 減水剤

本試験に使用した AE 減水剤は、株式会社エヌエムビー社製 AE 減水剤標準形 1 種ボゾリス NO.70 である。AE 減水剤の劣化を防ぐため恒温室で保管した。

3.1.5 練り混ぜ水

実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。

3.1.6 メガミックス

本試験に用いた繊維補強材は、ザイペックス株式会社製の MEGAMIX である。直射日光が当たらない乾燥した所で保管した。MEGAMIX の物理的特性は表 3.6 に示す。

3.1.7 ビニロン繊維

本試験に用いたビニロン繊維は、株式会社クラレ社製 KURALON K-1 である。ビニロン繊維の標準物性は表 3.7 に示す。

表 3.1 セメントの化学成分及び物理的性質

試験項目		普通 ポルトランドセメント		早強 ポルトランドセメント		フライアッシュ		
		日本工業 規格	試験値	日本工業 規格	試験値	日本工業 規格	試験値	
		(JIS R 5210)		(JIS R 5210)		(JIS R 5210)		
化学成分 (%)	強熱減量	3.0 以下	1.7	3.0 以下	1	-	1.6	
	酸化マグネシウム	5.0 以下	1.45	5.0 以下	1.3	5.0 以下	1.3	
	三酸化硫黄	3.0 以下	1.95	3.5 以下	2.9	3.0 以下	1.8	
	全アルカリ	0.75 以下	0.58	0.75 以下	0.53	-	-	
	塩化物イオン	0.035 以下	0.015	0.02 以下	0.01	-	0.01	
物理的性質	密度(g/cm ³)	-	3.15	-	3.13	-	2.95	
	比重面積(cm ² /g)	2500 以上	3300	3300 以上	4550	2500 以上	3300	
	凝結	水量(%)	-	27.5	-	29.5	-	27.5
		始発(h - m)	45 分以上	2-10	45 分以上	1-55	60 分以上	2 45
		終結(h - m)	10 時間以下	3-20	10 時間以下	2-50	10 時間以下	4 00
	安定性(パット法)	良	良	良	良	良	良	
	圧縮強さ (N/mm ²)	1 日	-	-	10.0 以上	28	-	-
		3 日	12.5 以上	29	20.0 以上	47	10.0 以上	23
		7 日	22.5 以上	44	32.5 以上	58	17.5 以上	37
		28 日	42.5 以上	61.5	47.5 以上	68	37.5 以上	56

住友大阪セメント株式会社資料による

表 3.2 細骨材の試験結果

試験項目	規格値	試験値
表乾密度(kg/l)	2.50 以上	2.64
吸水率(%)	3.5 以下	2.07
粗粒率	-	2.73
単位容積質量(kg/l)	1.50 以上	1.69
実績率(%)	55 以上	66.2

表 3.3 細骨材のふるい分け結果

ふるいの呼び寸法 (mm)	各ふるいに留まる質量の累計 (%)
10	0
5	0
2.5	9
1.2	29
0.6	59
0.3	82
0.15	94
粗粒率 FM	2.73

表 3.4 粗骨材の試験結果

試験項目	規格値	試験値
表乾密度(kg/l)	2.50 以上	2.68
吸水率(%)	3.0 以下	0.81
粗粒率	-	6.72
単位容積質量(kg/l)	1.50 以上	1.65
実績率(%)	55 以上	59.5

表 3.5 粗骨材のふるい分け結果

ふるいの呼び寸法 (mm)	各ふるいに留まる質量の累計 (%)
40	0
30	0
25	2
20	14
15	35
10	66
5	98
2.5	100
粗粒率 FM	6.72

表 3.6 メガミックスの物理的特性

圧縮強度 (ASTM C109)	1 日	21.2MPa
	3 日	38.0MPa
	7 日	47.2MPa
	28 日	59.3MPa
曲げ強度 (ASTM C78)	28 日	8.2MPa
割裂強度 (ASTM C496)	28 日	4.2MPa
直接引張付着強さ (ACI 503R)	90 日	2.3MPa
促進塩素透過性 (ASTM 1202)	28 日	572 クーロン
	90 日	420 クーロン
凝結時間 (ASTM C266)	始発	4 時間 10 分
	終結	7 時間 10 分

ザイペックス社の資料による

表 3.7 ビニロン繊維の標準物性

RECS100L × 12	
直径 (μ)	100
標準長 (mm)	12
引張強度 (MPa)	1100
切断伸率 (%)	10
ヤング率 (GPa)	25

クラレ社の資料による

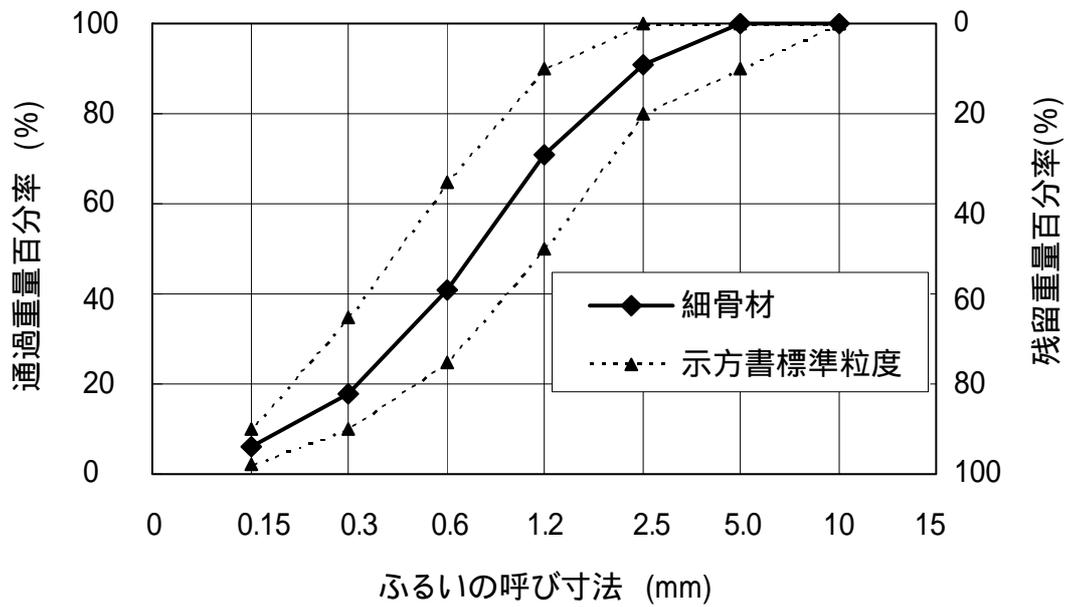


図 3.1 細骨材の粒度分布曲線

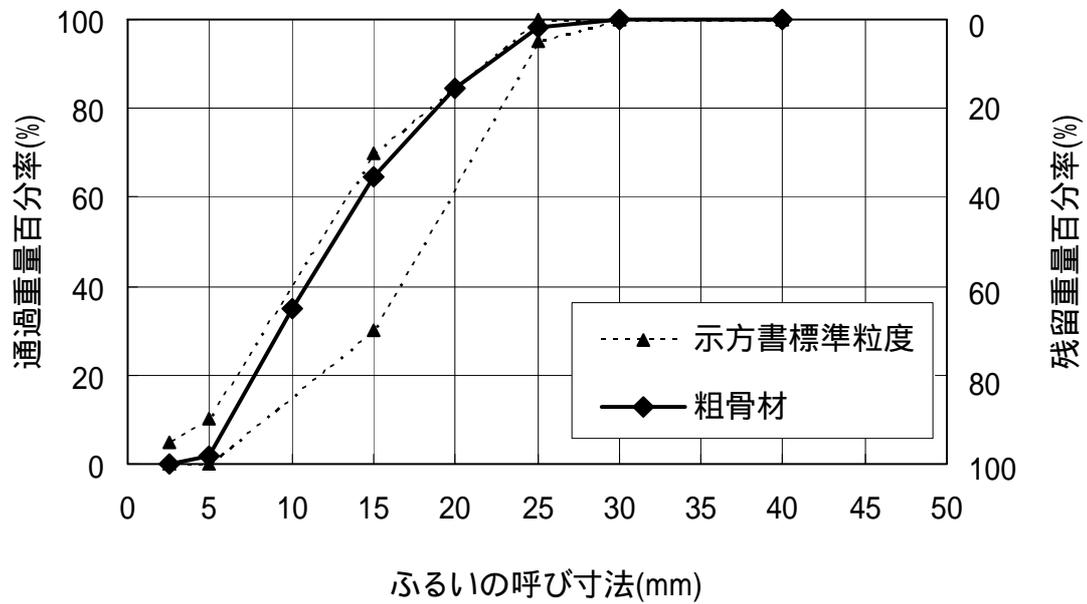


図 3.2 粗骨材の粒度分布曲線

第4章 凍結融解試験における劣化指標としての非破壊試験

4.1 研究目的と構成

本研究は、凍結融解試験によるコンクリートの劣化指標として相対動弾性係数・スケールリング量としての質量変化・体積変化の測定によって、コンクリートの諸条件の変化による劣化状況を把握することを目的とする。

試験対象とするコンクリートは、空気量・単位水量を一定とし、水セメント比を変化させた。また、圧縮強度の影響を明らかにするため、試験開始材齢を変化させることとした。また、凍結融解試験条件として、凍結融解の最低温度を変化させることとした。

コンクリートの凍結融解試験を行う場合、その劣化の程度を表す指標として、動弾性係数および質量変化が一般的である。本研究においても、非破壊の劣化指標として、これらを用いることとした。

また、スケールリング量を劣化指標として用いることの可能性評価も並行して行うこととした。

4.2 研究方法

4.2.1 供試体の作成

(1)計量及びコンクリートの練混ぜ

コンクリートの配合表を以下の表4.1に示す。セメントとして普通ポルトランドセメントを用いて、容量50、100の(株)丸東三友製作所の強制練ミキサを使用し練混ぜを行った。コンクリートは練混ぜ後直ちに練板上に排出し、スコップによる切り返しを3往復行った後、スランプ、空気量の測定ならびに供試体作製を行った。供試体の作製は、型枠にコンクリートを投入後バイブレーターによる締め固めを行った。供試体寸法は径100mm、高さ200mmの円柱コンクリート供試体とした。

表4.1 配合表

目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	W/C (%)	W (kg/mm ³)
12±1.5	4.5±0.5	50	180
		65	
		80	
		110	

(2)フレッシュコンクリートの試験

スランプ試験

スランプ試験は、JIS A 1132 “スランプ試験方法” に準拠した。

空気量試験

空気量試験は、JIS-A-1118 “フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法” に準拠した。

(3)供試体作製およびコンクリートの養生

コンクリート打ち込み 24 時間後、キャッピングを行った。キャッピング後 24 時間で脱枠を行い、各試験材齢までは 20 ± 2 の水中で試験開始材齢まで養生した。ただし試験開始材齢 1 日の供試体は表面仕上げを入念に行うこととした。

4.2.2 凍結融解試験

凍結融解試験装置は、(株)丸東三友製作所製のものをを用いた。装置は3槽式のものであり、冷液槽、温液槽、温度測定装置ならびに制御装置で構成されている。温度測定装置は、試験槽内の温度管理用供試体の中心温度を 0.1 の精度で測定でき、記録装置に温度変化の様子が記録されるようになっている。装置を図 4.1 に示す。凍結融解試験は、JIS A 1148 “コンクリートの凍結融解試験方法” に準拠した。

4.2.3 超音波伝播速度測定法

動弾性係数の測定は、超音波伝播速度測定法を用いた。超音波伝播速度測定法では、富士物産(株)製の超音波式コンクリート品質試験機パンジットを用いた。超音波伝播速度は、測線を軸方向に設けた場合について測定した。図 4.2 に超音波伝播速度測定方法を示す。

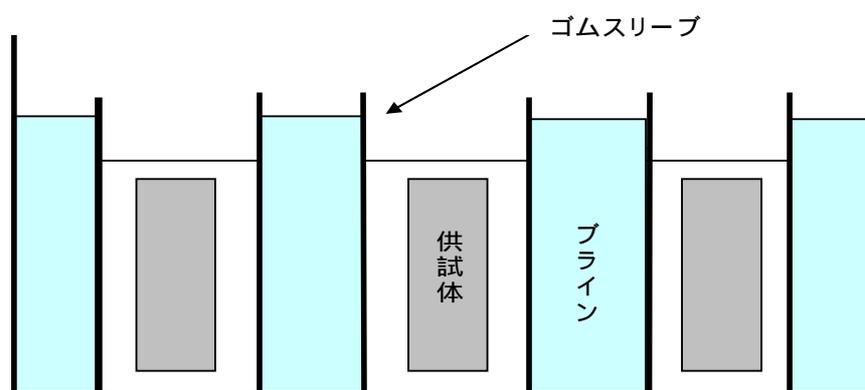
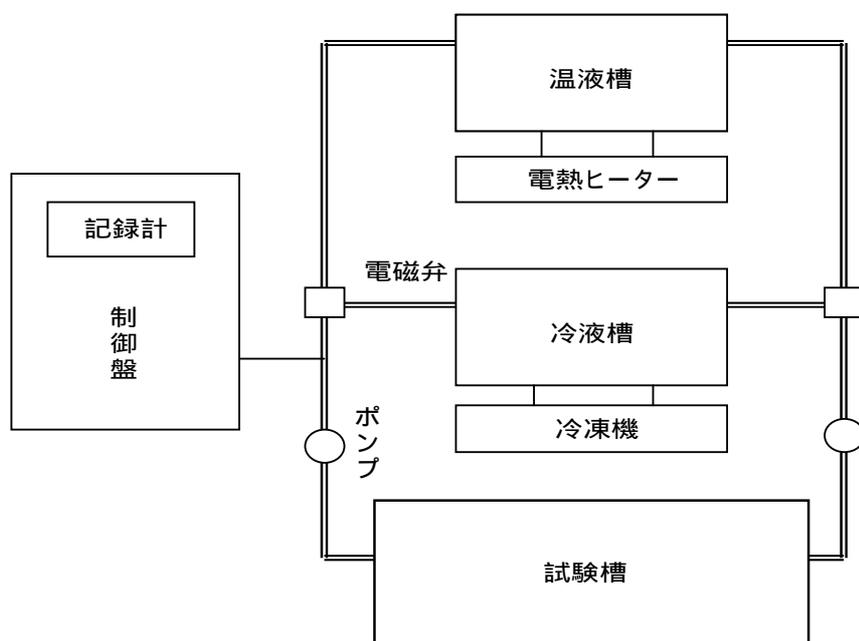


図 4 . 1 凍結融解試験

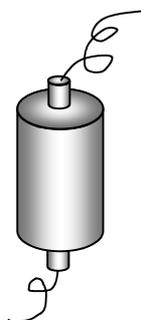


図 4 . 2 超音波伝播速度測定方法

4.2.4 試験ケース

本研究は凍結最低温度 - 17℃，融解温度 4.5℃ と凍結最低温度 - 15℃，融解温度 4.5℃ の 2 パターンを対象として実験を行った。試験開始材齢は凍結最低温度 - 17℃ の試験では 1 日，3 日，5 日，7 日，14 日，28 日とし，凍結最低温度 - 15℃ での試験では 3 日，5 日，7 日とした。また凍結最低温度 - 17℃ に実験において供試体の水セメント比は試験開始材齢 1 日，3 日，5 日では 65%とし 7 日，14 日，28 日では 50%，65%，80%，110%とした。凍結最低温度 - 15℃ の実験において供試体の水セメント比は試験開始材齢 3 日，5 日，7 日に使用したコンクリートは全て 65%とした。試験ケースを表 4.2 に示す。

表 4.2 試験ケース

凍結最低温度	- 17						- 15		
試験開始材齢 W/C	1 日	3 日	5 日	7 日	14 日	28 日	3 日	5 日	7 日
50%									
65%									
80%									
110%									

4.3 試験結果

本試験では相対動弾性係数が 60%を下回った場合か、測定不可能なほど供試体が劣化した場合を試験終了とした。相対動弾性係数が 60%以下または実験継続が困難になるサイクル数を表 4.3 に示す。

表 4.3 試験終了サイクル数

	試験終了サイクル数				
	-17				-15
W/C 材齢	50%	65%	80%	110%	65%
1日		40			
3日		60			50
5日		80			150
7日	330	150	50	20	180
14日	270	240	150	20	
28日	420	330	180	90	

4.3.1 凍結融解試験最低温度-17 における劣化

(1)凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係

図 4.3 から図 4.9 に凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係を示す。図 4.3 から図 4.6 は W/C を変化させ、試験開始材齢による違いを示しており、図 4.7 から図 4.9 は試験開始材齢を変化させ、W/C による違いを示している。

図 4.3 は W/C=50%の関係を示している。いずれの場合においてもばらつきが見られた。初期サイクルでいずれの供試体も相対動弾性係数が 100%を上回った。また、試験開始材齢 14 日のものの劣化が一番早く、次いで 7 日、28 日という順番に試験終了となっている。試験開始材齢 7 日のものについては、凍結融解サイクル数 300 回を越えたため試験終了とした。試験開始材齢 14 日のものについては、240 サイクルで測定不可能となった。

図 4.4 は W/C=65%の関係を示している。試験開始材齢 14 日の供試体が相対動弾性係数の増加が著しく約 200 サイクルまでは試験開始材齢 28 日より相対動弾性係数は高い数値となっているが、相対動弾性係数が 60%以下になる前に破壊に至っている。また、試験開始材齢が若いものほど低下してからの劣化速度が早い結果となり、試験開始材齢が遅いものほど劣化してからの低下傾向は緩やかである。

図 4.5 は W/C=80%の関係を示している。サイクル初期段階では試験開始材齢が 28 日を除いて相対動弾性係数の増加傾向がみられた。しかし、90 サイクルにおいて試験開始材齢 28 日の供試体の相対動弾性係数が急激に増加し 120%を上回る結果となり、その後、徐々に低下したが、60%を下回る前に破壊に至っている。

図 4.6 は W/C=110%の関係を示している。試験開始材齢 7 日と 14 日では 20 サイクルの時点で相対動弾性係数が 60%を下回っている。それに対し、試験開始材齢 28 日では 90 サイクルにおいて 60%を下回る結果となった。これは、養生期間が 14 日以内では初期強度の小ささに対して凍結可能水量が多く、28 日では初期強度は小さいものの、養生期間を十分にとる事によって凍結可能水量が減少し、劣化エネルギーが減少したものと考えられる。

図 4.7 は試験開始材齢 7 日の関係を示している。W/C が大きいものほど劣化は早いことが確認できる。また、W/C=50%では 300 サイクルを超えても破壊に至ることはなかった。W/C=80%は 50 サイクル、110%は 20 サイクルと初期段階での破壊に至っている。

図 4.8 は試験開始材齢 14 日の関係を示している。W/C=110%の相対動弾性係数の低下傾向が顕著であり 20 サイクルで破壊に至っている。W/C=50%、65%ではほぼ同様な推移をしており、W/C=80%のものが 150 サイクルで破壊に至っており、試験開始材齢 7 日と比較して大きく耐凍結融解性が上昇した結果となった。

図 4.9 は試験開始材齢 28 日の関係を示している。W/C=110%が 90 サイクルで破壊に至っているが、試験開始材齢 7 日、14 日と比較して耐凍結融解性が上昇傾向にあることが判る。また、W/C=80%は相対動弾性係数が 60%を下回る前に破壊に至っている。

W/C の増加、試験開始材齢の早いものほど相対動弾性係数の低下が見られ耐凍結融解性が低い傾向が確認できた。また、試験開始後、ほとんどの供試体で相対動弾性係数の増加が見られた。これは凍結融解下においても、強度発現がみられるということに他ならない。相対動弾性係数の増加が見られなかった供試体は、水セメント比 110%の供試体すべてと水セメント比 50%、試験開始材齢 28 日の供試体であった。相対動弾性係数の増加が見られないからといって強度発現をしていないとは限らない。つまり、強度発現よりも凍結融解作用による劣化が大きければ相対動弾性係数は増加しないためである。水セメント比 110%の実験はその他の実験に比べ比較的早く終了している。これは、コンクリート内部の凍結可能水量が多いためであると考えられる。

(2)凍結融解サイクルと質量百分率の関係

図 4.10 から図 4.16 に凍結融解サイクルと質量百分率の関係を示す。図 4.10 から図 4.13 は W/C を変化させ、試験開始材齢による違いを示しており、図 4.14 から図 4.16 は試験開始材齢を変化させ、W/C による違いを示している。

図 4.10 は W/C=50% の関係を示している。いずれの場合においてもばらつきが見られた。試験開始材齢 28 日を除いて質量百分率が 100% を上回る時期があった。試験開始材齢が遅い供試体ほど質量減少が緩やかな結果となった。試験開始材齢 7 日と 28 では質量が約 5% 減少した時点で試験終了となっている。試験開始材齢 14 日は初期段階で質量の増加傾向がみられ、約 1.5% 減少した時点で試験終了となっている。これは供試体にクラックが発生し水分の供給により質量が増加し、その部分が弱点となり破壊に至ったために、質量減少率が小さかったと考える。

図 4.11 は W/C=65% の関係を示している。試験開始材齢 1 日は質量百分率が 100% を超えて試験終了となった。これは、弱材齢であり凍結可能水量が多いために、比較的大きなクラックが発生、水分の供給により質量が増加し、コンクリート全体が劣化したために質量が増加したまま破壊に至ったと考える。

図 4.12 は W/C=80% の関係を示している。試験開始材齢が 7 日のものは 50 サイクルを過ぎてから急激な質量減少がみられ、約 8% の質量低下で破壊に至った。また、14 日と 28 日については 14 日のほうが緩やかな減少を示しているが、最終的には両者とも約 5% の質量低下で破壊に至っている。

図 4.13 は W/C=110% の関係を示している。試験開始材齢 14 日の質量増加、減少ともに急激な傾向がみられた。7 日では、ほぼ質量減少することなく破壊にいたっており、供試体全体に劣化がみられたために、質量が減少することなく破壊に至ったとかんがえる。それに対し、28 日では約 9% の質量減少で破壊に至っている。

図 4.14 は試験開始材齢 7 日の関係を示している。W/C=65%、80% の供試体については同様な傾向が見られたが、破壊に至った時点での質量減少量には大きな違いがみられた。W/C=80% では約 8%、W/C=65% では約 14% の質量減少で破壊に至っている。

図 4.15 は試験開始材齢 14 日の関係を示している。W/C=65%、80% では 100 サイクル以降でその低下傾向に差が生じ始めたが、最終的に約 5% の質量減少で破壊に至る結果となった。それに対し、W/C=50% は 60 サイクル以降で差が生じ始め、最終的に約 1.5% の質量減少で破壊に至っている。

図 4.16 は試験開始材齢 28 日の関係を示している。質量減少がみられず、水セメント比が小さいものほどその低下傾向が緩やかな結果となった。しかし、破壊に至った時点での質量減少量には違いが生じ、 $W/C=50\%$ 、 80% では約 5%、 $W/C=65\%$ 約 10%、 $W/C=110\%$ では約 9%の質量減少で破壊に至っている。

試験開始直後、ほとんどの供試体で質量増加の傾向が見られた。質量増加が見られなかったのは試験開始材齢 28 日の供試体のみであり、それ以前の若い材齢では質量増加の傾向が見られた。質量が増加する結果については、凍結融解作用により供試体に微細なクラックが入り、そこに水が入り込むことで質量が増加するのではないかと考える。また、その増加傾向が大きいものほど、低下傾向も急激なものとなり、クラックによる水分供給とともに、その部分が弱点になるとかんがえる。

(3)凍結融解サイクルと体積百分率の関係

図 4.17 から図 4.23 に凍結融解サイクルと体積百分率の関係を示す。図 4.17 から図 4.20 は W/C を変化させ、試験開始材齢による違いを示しており、図 4.21 から図 4.23 は試験開始材齢を変化させ、 W/C による違いを示している。

4.3.1(2)の質量減少率との関係とほぼ同様な傾向が得られた。また、 $W/C=50\%$ の供試体を除いてほとんどの供試体で体積増加の傾向が見られた。これは、凍結融解作用により供試体に微細なクラックが入り、組織の痲漢によってそこに水分が供給され、凍結、膨張することによって体積が増加するものと考えられる。

(4)質量百分率と体積百分率の関係

図 4.24 から図 4.32 に凍結融解サイクルと体積百分率の関係を示す。図 4.24 から図 4.27 は W/C を変化させ、試験開始材齢による違いを示しており、図 4.28 から図 4.30 は試験開始材齢を変化させ、 W/C による違いを示している。図 4.31 と図 4.32 は全てのケースにおいて示している。

質量百分率と体積百分率のグラフからは試験開始材齢が遅く、 W/C が小さい供試体ほど試験開始後に質量、体積ともに増加せずに減少する傾向にあり、試験開始材齢が若く、 W/C が大きい供試体ほど試験開始後に質量、体積ともに一度増加してから減少する傾向にあるといえる。つまり試験開始材齢が遅く、 W/C が小さい供試体は試験開始後に左斜め下に値が推移していくが、試験開始材齢が若く、 W/C が大きい供試体は一度右斜め上に値が推移した後、左斜め下に推移していく。また、すべての値をプロットすると、直線状に値があり相関関係が言える。

凍結融解作用を受けたコンクリートの劣化形態としては、ひびわれ卓越型とスケーリング卓越型に大きく分かれる。前者の形態は、AE 剤を用いないプレーンコンクリートに多く認められるものであり、また後者の形態は AE コンクリートに多く認められるものである。

今回は AE コンクリートを使用した。本来 AE コンクリートはスケーリング卓越型であるが若材齢時に凍結融解下におかれると、供試体表面に微細なひび割れを伴う。これを介して供試体内部へ水分の供給が容易となるほか、ひびわれ自体が保水の役割を果たすと考えられ、この場合ひびわれに水分が捕獲され質量は増加するものとする。

(5) 相対動弾性係数と体積百分率の関係

図 4.33 から図 4.39 に相対動弾性係数と体積百分率の関係を示す。図 4.33 から図 4.36 は W/C を変化させ、試験開始材齢による違いを示しており、図 4.37 から図 4.39 は試験開始材齢を変化させ、W/C による違いを示している。

相対動弾性係数と体積百分率の関係を示したグラフには大きく二つの種類があると考えられる。まず一つは、相対動弾性係数が低下すると体積が減少するもの、もう一つは、相対動弾性係数が低下しても体積が減少しないものに分けることができる。前者は、水セメント比 50%、試験開始材齢 7 日、14 日、28 日の供試体、水セメント比 65%、試験開始材齢 5 日、7 日、14 日、28 日の供試体、水セメント比 80%、試験開始材齢 14 日、28 日の供試体、水セメント比 110%、試験開始材齢 28 日の供試体である。また、後者は水セメント比 65%、試験開始材齢 1 日、3 日の供試体、水セメント比 80%、試験開始材齢 7 日の供試体、及び水セメント比 110%、試験開始材齢 7 日、14 日の供試体である。

(6) 相対動弾性係数と質量百分率の関係

図 4.40 から図 4.46 に相対動弾性係数と体積百分率の関係を示す。図 4.40 から図 4.43 は W/C を変化させ、試験開始材齢による違いを示しており、図 4.44 から図 4.46 は試験開始材齢を変化させ、W/C による違いを示している。

相対動弾性係数と質量百分率の関係を示したグラフには大きく二つの種類があると考えられる。まず一つは、相対動弾性係数の低下とともに質量も減少していくもの。もう一つは、相対動弾性係数が低下しているにもかかわらず、質量が減少しないものである。相対前者は、水セメント比 50%、試験開始材齢 7 日、14 日、28 日の供試体、水セメント比 65%、試験開始材齢 7 日、14 日、28 日の供試体、水セメント比 80%、試験開始材齢 14 日、28 日の供試体、水セメント比 110%、試験開始材齢 28 日の供試体である。また、後者は水セメント比 65%、試験開始材齢 1 日、3 日、5 日の供試体、水セメント比 80%、試験開始材齢 7 日の供試体、及び水セメント比 110%、試験開始材齢 7 日、14 日の供試体である。4.3.1(5)と違うのは水セメント比 65%、試験開始材齢 5 日の供試体が後者に含まれたことだけであった。

4.3.2 凍結融解試験最低温度-15 における劣化

(1)凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係

図4.47に凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係を示す。

いずれの場合においてもばらつきが見られた。試験開始材齢の若いものほど相対動弾性係数の低下が見られ耐凍結融解性が低い傾向が確認できた。また、試験開始後、ほとんどの供試体で相対動弾性係数の増加が見られ、試験開始材齢が若い供試体ほど相対動弾性係数の増加がみられる。これは凍結融解下においても、強度発現がみられるということに他ならず、弱材齢での強度発現のほうが凍結融解による劣化よりも大きかったためと考える。

(2)凍結融解サイクルと質量百分率の関係

図4.48に凍結融解サイクルと質量百分率の関係を示す。

試験開始直後、すべての供試体で質量増加の傾向が見られた。質量が増加する結果については、凍結融解作用により供試体に微細なクラックが入り、そこに水が入り込むことで質量が増加するものと考えられる。

(3)凍結融解サイクルと体積百分率の関係

図4.49に凍結融解サイクルと体積百分率の関係を示す。

すべての供試体において体積増加の傾向が見られなかった。これは、供試体に微細なクラックは入るが、非常に小さなクラックであるために、水が入ることなく供試体表面部から剥離していったためと考える。

(4)質量百分率と体積百分率の関係

図4.50と図4.51に質量百分率と体積百分率の関係を示す。

いずれの供試体においても試験開始後に質量が増加し体積が減少する傾向にあり、試験開始材齢が3日と5日ではほぼ同じ推移となった。また、試験開始材齢7日で体積の減少に対して質量の減少が小さい結果については、初期強度が高いために微細なクラックが入っても表面部が剥離することなく、クラックに水が入るためではないかと考える。また、すべての値をプロットすると、直線状に値があり相関関係が言える。

(5)相対動弾性係数と体積百分率の関係

図4.52に相対動弾性係数と体積百分率の関係を示す。

試験開始材齢が若い供試体ほど相対動弾性係数の低下に比べて体積百分率の低下が緩やかな結果となった。これは、試験開始材齢が若い供試体ほど内部の劣化が早いためであると考えられる。つまり、劣化メカニズムに違いが生じ、試験開始材齢が若い供試体ほどクラックが大きいためと考える。

(6) 相対動弾性係数と質量百分率の関係

図 4.53 に相対動弾性係数と質量百分率の関係を示す。

試験開始材齢が若い供試体ほど相対動弾性係数の低下に比べて体積減少率の低下が緩やかな結果となった。これは、試験開始材齢が若い供試体ほど内部の劣化が早いためであると考えられる。つまり、劣化メカニズムに違いが生じ、試験開始材齢が若い供試体ほどクラックが大きいために、クラックに水が入り凍結したためと考える。

4.3.3 凍結融解試験最低温度(-17℃・-15℃)の変化における劣化

(1) 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係

図 4.54 から図 4.57 に凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係を示す。図 4.54 はすべてのケースを示しており、図 4.55 から図 4.57 は試験開始材齢ごとの凍結融解最低温度による違いを示している。

いずれの場合においても最低温度が低いほど相対動弾性係数の低下が急激な傾向となっている。しかし、試験開始材齢 3 日の供試体ではほぼ同じ推移となっている。試験開始材齢 5 日の供試体では全体的に凍結融解最低温度-15℃ の相対動弾性係数が上回る結果となったが、最終的には最低温度-17℃ の相対動弾性係数は急激に下がり凍結融解最低温度-15℃ が上回る結果となった。試験開始材齢 7 日の供試体では 100 サイクル付近までは凍結融解最低温度-17℃ の相対動弾性係数が上回っていたが、100 サイクルを超えると急激に下がり凍結融解最低温度-15℃ の相対動弾性係数が上回る結果となった。

試験開始材齢 3 日では耐凍結融解抵抗性が極端に低いために同じような推移になったと考える。また、凍結融解最低温度が-15℃ は相対動弾性係数の低下が緩やかなのに対して、凍結融解最低温度が-17℃ は相対動弾性係数があるサイクルで極端に減少する傾向にあった。これは劣化メカニズムの違いによるものと考えられ、前者が比較的表面部から徐々に劣化していくのに対し、後者は内部にまで劣化が及び、劣化の大きな表面部とその劣化が繋がった時に供試体全体に大きなダメージが与えられるためと考える。

(2) 凍結融解サイクルと質量百分率の関係

図 4.58 から図 4.61 に凍結融解サイクルと質量百分率の関係を示す。図 4.58 はすべてのケースを示しており、図 4.59 から図 4.61 は試験開始材齢ごとの凍結融解最低温度による違いを示している。

いずれの場合においても最低温度が低いほど質量減少率の低下が急激な傾向となっている。しかし、試験開始材齢 3 日の供試体ではほぼ同じ推移となっている。これは耐凍結融解抵抗性が極端に低いために劣化メカニズムがほぼ同じであるために同様な推移になったと考える。また、凍結融解最低温度-17℃ の方が試験開始直後の質量増加が大きく、その後の質量減少が急激に起こっている。凍結融解最低温度-15℃ では質量減少が比較的緩やかな

傾向である。これは劣化メカニズムの違いによるものと考えられ、前者では微細なクラックが入り質量が増加する。その後、そのクラックから十分に水を供給され一気に破壊が進行すると考える。一方、凍結最低温度-15 の供試体ではクラックをいれるほどのエネルギーがなく供試体表面のセメントペースト部から薄利し、細骨材、粗骨材の順番で剥離していくと考える。

(3)凍結融解サイクルと体積百分率の関係

図 4.62 から図 4.65 に凍結融解サイクルと体積百分率の関係を示す。図 4.62 はすべてのケースを示しており、図 4.63 から図 4.65 は試験開始材齢ごとの凍結融解最低温度による違いを示している。

いずれの場合においても最低温度が低いほど体積減少率の低下が急激な傾向となっている。しかし、試験開始材齢 3 日の供試体では、50 サイクル以降ほぼ同様な推移となっている。また、凍結融解最低温度-17 の方が試験開始直後の体積増加が大きく、その後の体積減少が急激に起こっている。凍結融解最低温度-15 では体積減少が比較的緩やかな傾向である。これは劣化メカニズムの違いによるものと考えられ、前者では微細なクラックが入り、そのクラックから十分に水が供給され凍結することにより膨張したようになるが、その後、一気に破壊が進行すると考える。一方、凍結融解最低温度-15 の供試体ではクラックをいれるほどのエネルギーがないために比較的緩やかに体積が減少していくものと考えられる。

(4)質量百分率と体積百分率の関係

図 4.66 から図 4.70 に質量百分率と質量百分率の関係を示す。図 4.66 と図 4.67 はすべてのケースを示しており、図 4.68 から図 4.70 は試験開始材齢ごとの凍結融解最低温度による違いを示している。

試験開始材齢 5 日では、ほぼ同様な推移となっているが、全体的に凍結融解最低温度-17 にくらべ凍結融解最低温度-15 の方が質量減少に比べて体積減少の割合が高い結果となった。

(5)相対動弾性係数と体積百分率の関係

図 4.71 から図 4.74 に相対動弾性係数と体積百分率の関係を示す。図 4.71 はすべてのケースを示しており、図 4.72 から図 4.74 は試験開始材齢ごとの凍結融解最低温度による違いを示している。

凍結融解最低温度-15 の値は比較的、相対動弾性係数の増減と体積百分率に相関関係があると考えられる。凍結最低温度-17 の値は、-15 の値に比べ、相対動弾性係数の変化と体積減少率が相関関係にないと考えられる。

(6) 相対動弾性係数と質量百分率の関係

図 4.75 から図 4.78 に相対動弾性係数と質量百分率の関係を示す。図 4.75 はすべてのケースを示しており、図 4.76 から図 4.78 は試験開始材齢ごとの凍結融解最低温度による違いを示している。

凍結融解最低温度-15 の値は比較的、相対動弾性係数の増減と質量百分率に相関関係があると考える。凍結最低温度-17 の値は、-15 の値に比べ、相対動弾性係数の変化と質量減少率が相関関係にないと考える。

4.4 結論

凍結融解最低温度-17、-15 において、W/C が大きく試験開始材齢が若い供試体ほど劣化が早い結果となった。相対動弾性係数が 100%を超える原因については、劣化速度よりも強度発現の影響が大きいためと考える。また、それらは質量増加・体積増加の傾向、もしくはその減少傾向が比較的緩やかな傾向が見られたが、その原因については、劣化メカニズムに相違が生じたものと考えられる。W/C が大きく試験開始材齢が若い供試体は耐凍結融解性が低く、微細なクラックが供試体に入る。これを介して供試体内部へ水分の供給が容易となるほか、ひび割れ自体が保水の役割を果たすと考えられ、クラックによる膨張部に水分が凍結したためにこのような結果になったと考える。反対に、W/C が小さく試験開始材齢が遅い供試体は耐凍結融解性が高く、クラックは入るものの外的作用の大きい表面部のみならず、内部に進むほど健全なコンクリートとなっている。そのために、クラックによる膨張・水分吸収がほぼ影響せず、表面部の剥離が徐々に進行していくためであると考えられる。また、スケーリングに関して、体積増加・質量増加 体積増加・質量減少 体積減少・質量増加 体積減少・質量減少のパターンがみられた。に関しては、クラック発生による膨張・水分供給・凍結が発生している状態、に関しては、クラック発生による膨張は見られ表面部の剥離も生じたが、水分供給がされなかった状態、に関しては、表面部で剥離現象は見られるが、微細なクラック発生による水分供給が勝っている状態、に関しては、クラック発生による膨張・水分供給・凍結減少よりも表面部のスケーリングが進行している状態、であると考えられる。また、体積増加がみられた供試体では、耐凍結融解性が低い可能性があると考えられる。

凍結融解最低温度の違いとして、凍結融解最低温度が-17 は-15 よりも劣化の進行速度が著しく早かった。それはコンクリートに対してのエネルギーの違いであり、凍結融解最低温度-17 では微細なクラックが入り、そのクラックから十分に水が供給され凍結することにより膨張したようになるが、その後、一気に破壊が進行すると考える。一方、凍結融解最低温度-15 の供試体ではクラックをいれるほどのエネルギーがないために比較的緩やかに表面部から劣化していくものと考えられる。

コンクリートの耐凍結融解性と最低温度による劣化エネルギーには何かしらの関係性が

あるように考えるが、明確な解明には至らなかった。しかし、耐凍結融解性と劣化エネルギーの相互作用からコンクリート供試体の劣化メカニズムに相違があるものとする。

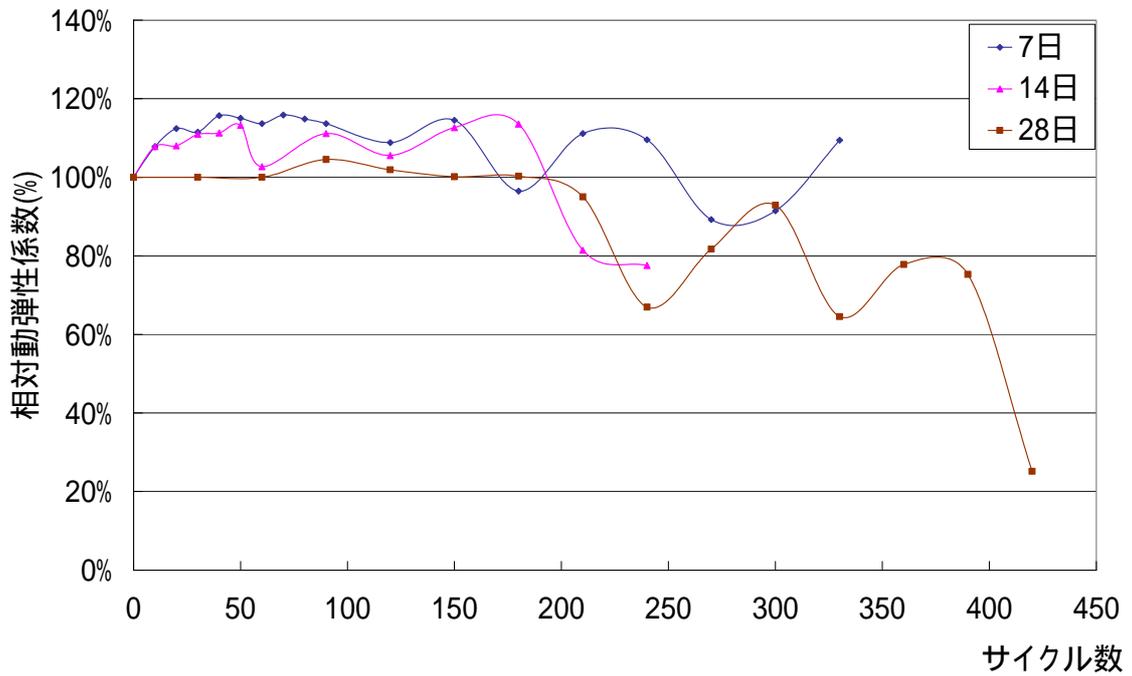


図 4.3 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係(W/C=50%, 最低温度-17)

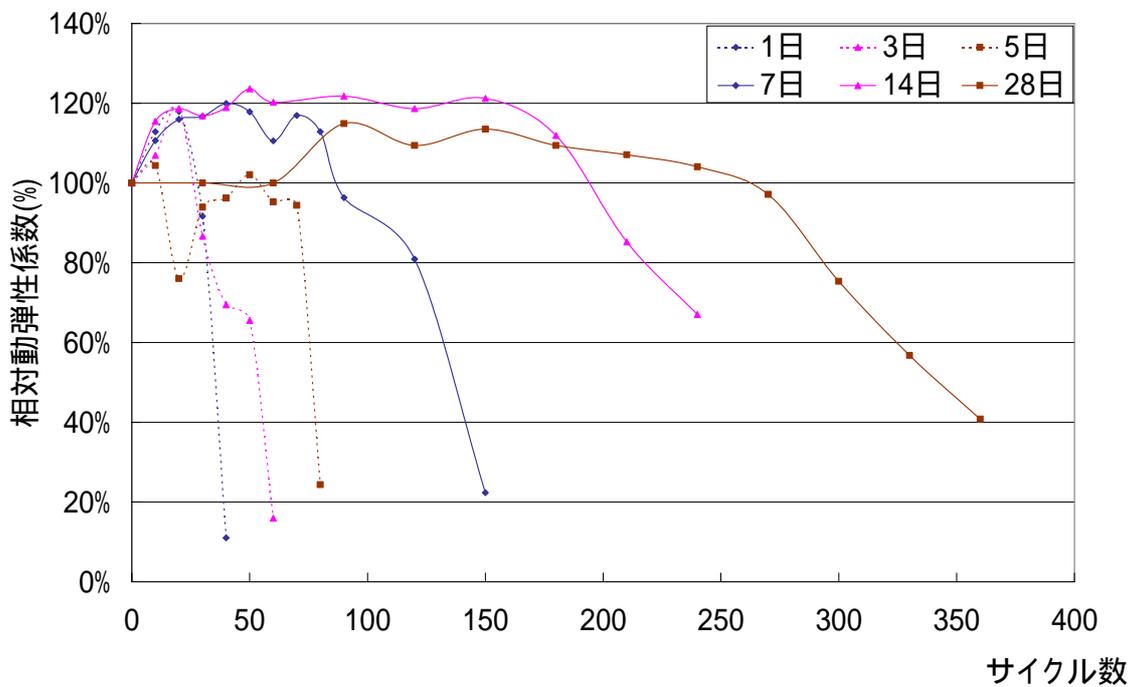


図 4.4 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係(W/C=65%, 最低温度-17)

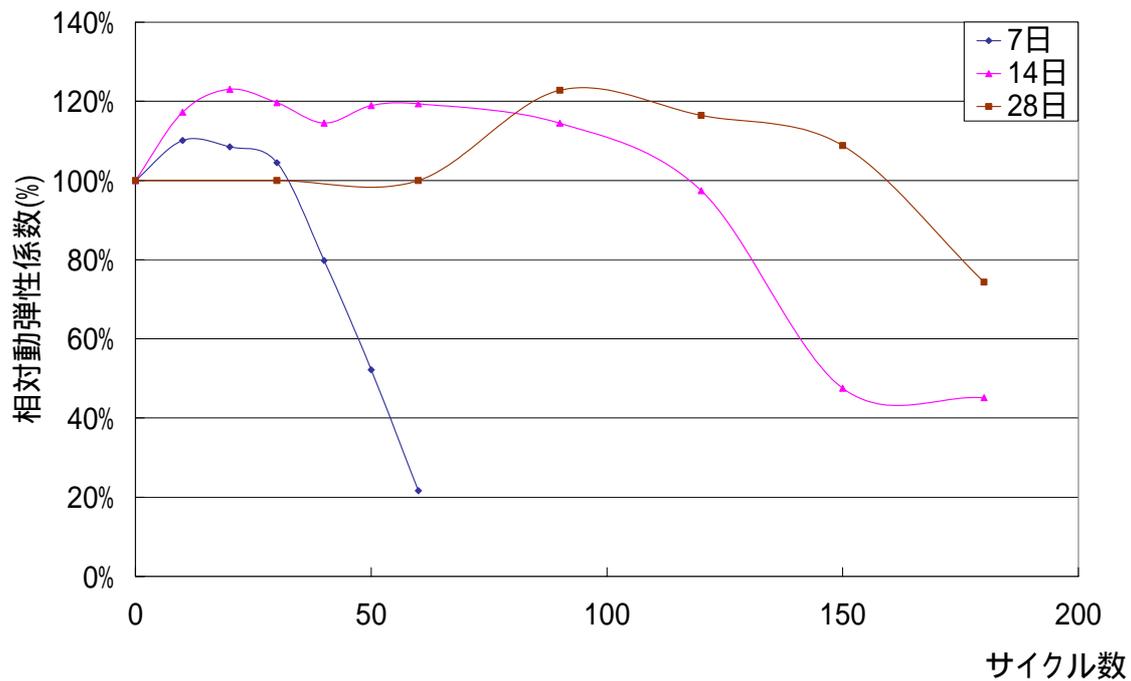


図 4.5 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係(W/C=80% , 最低温度-17)

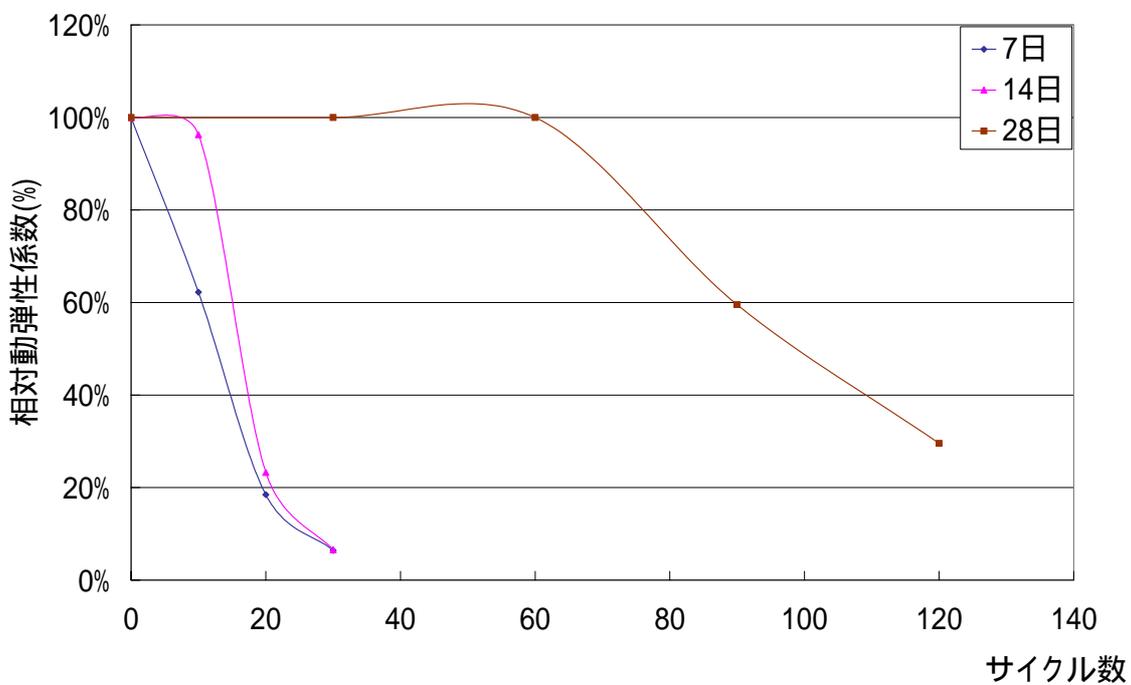


図 4.6 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係(W/C=110% , 最低温度-17)

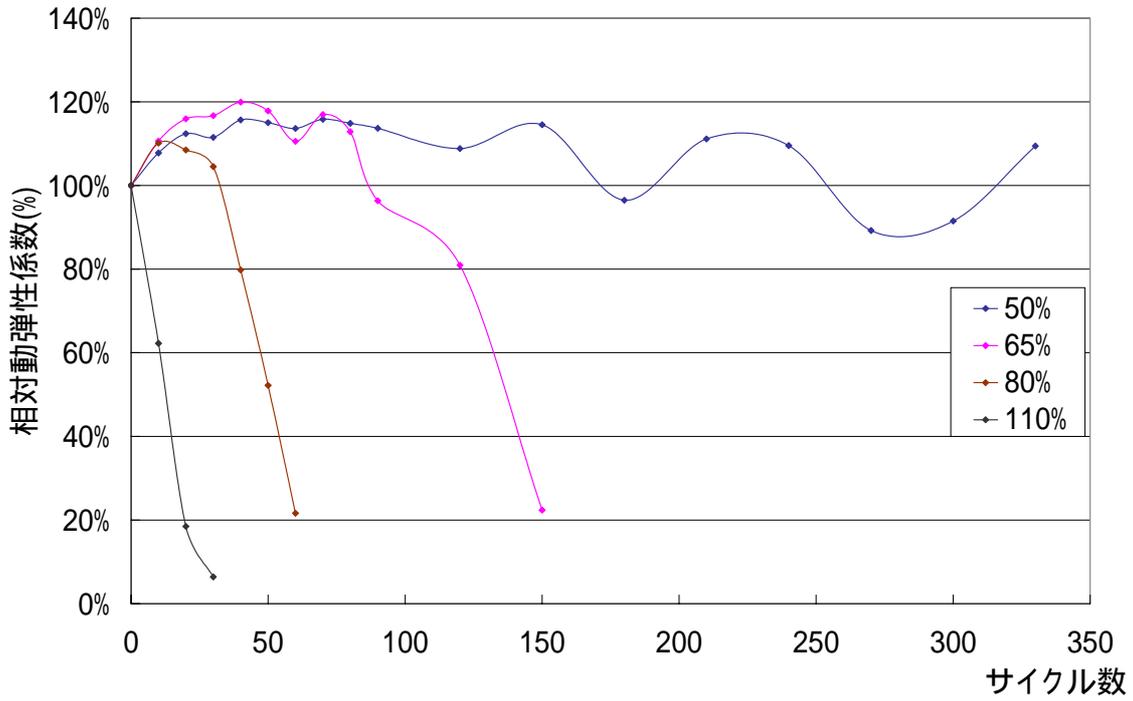


図 4.7 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係(開始材齢 7 日，最低温度-17)

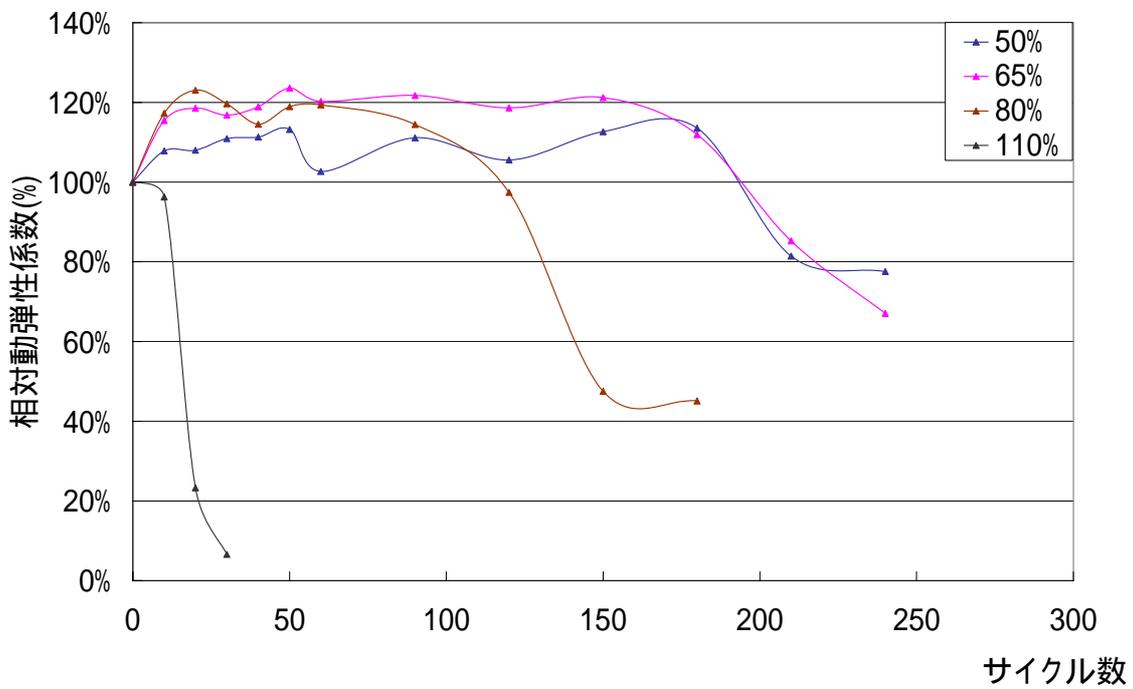


図 4.8 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係(開始材齢 14 日，最低温度-17)

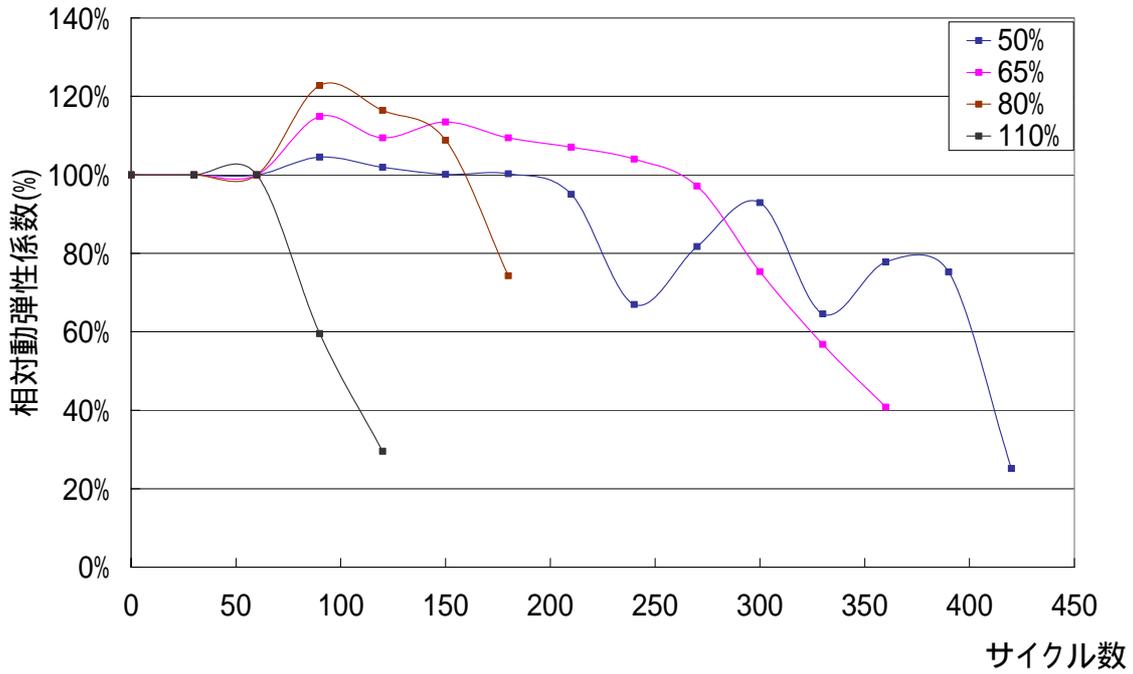


図 4.9 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係(開始材齢 28 日 , 最低温度-17)

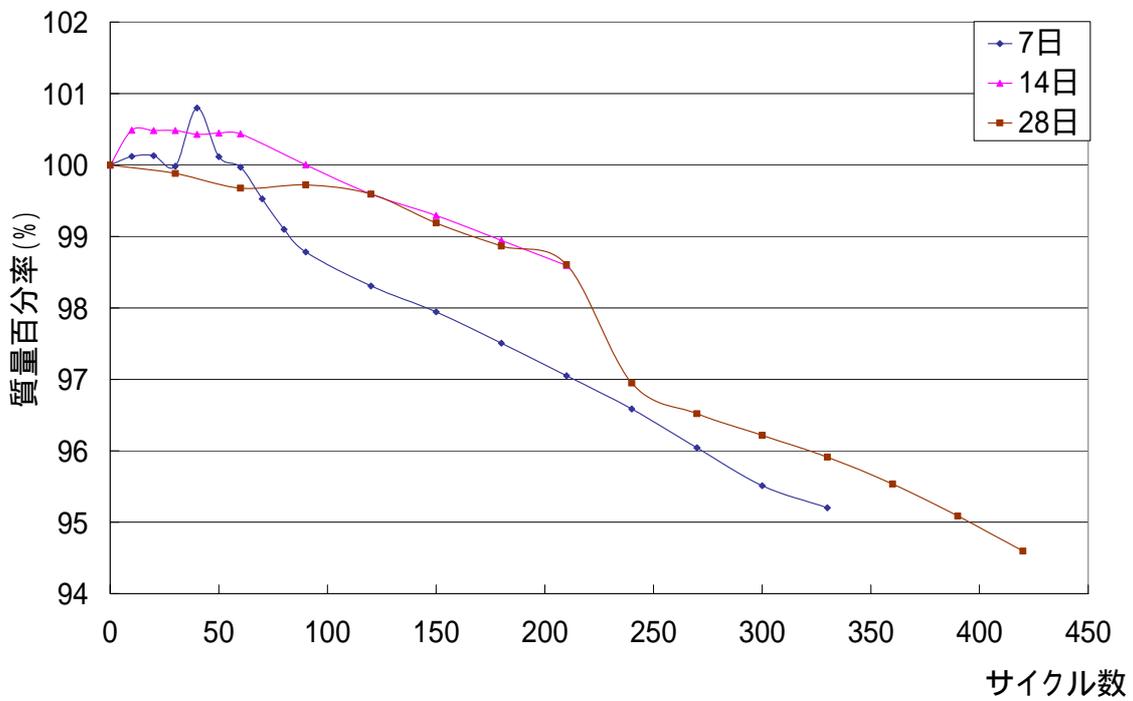


図 4.10 凍結融解サイクルと質量百分率の関係(W/C=50% , 最低温度-17)

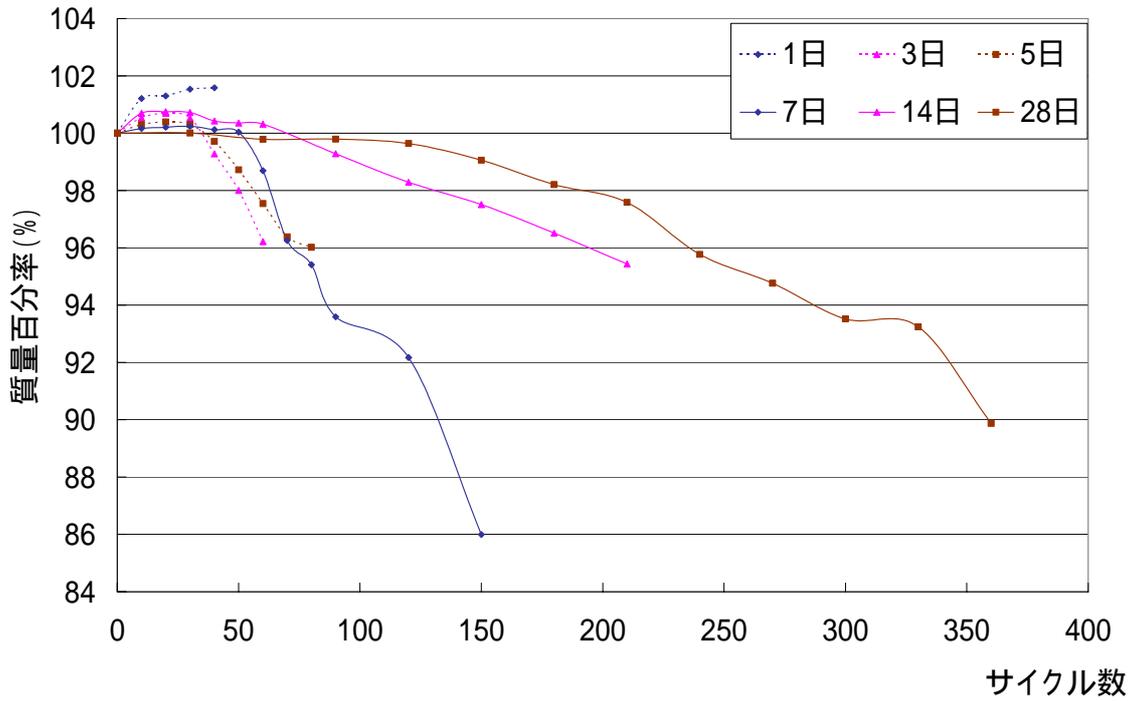


図 4.11 凍結融解サイクルと質量百分率の関係(W/C=65% , 最低温度-17)

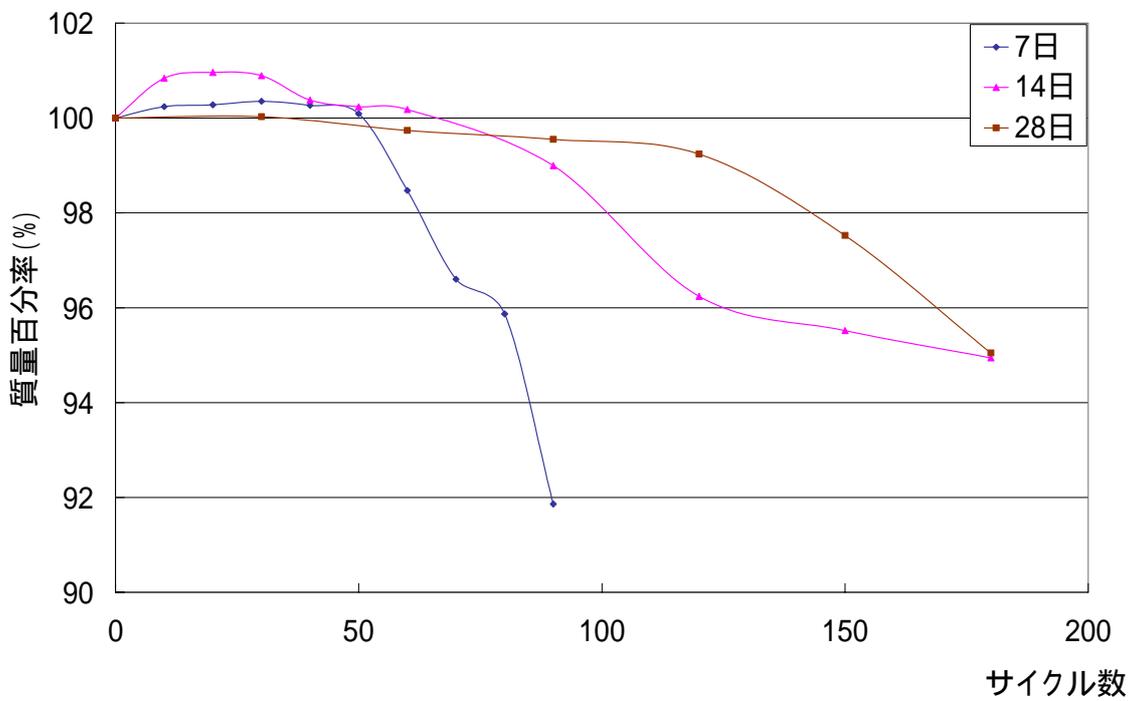


図 4.12 凍結融解サイクルと質量百分率の関係(W/C=80% , 最低温度-17)

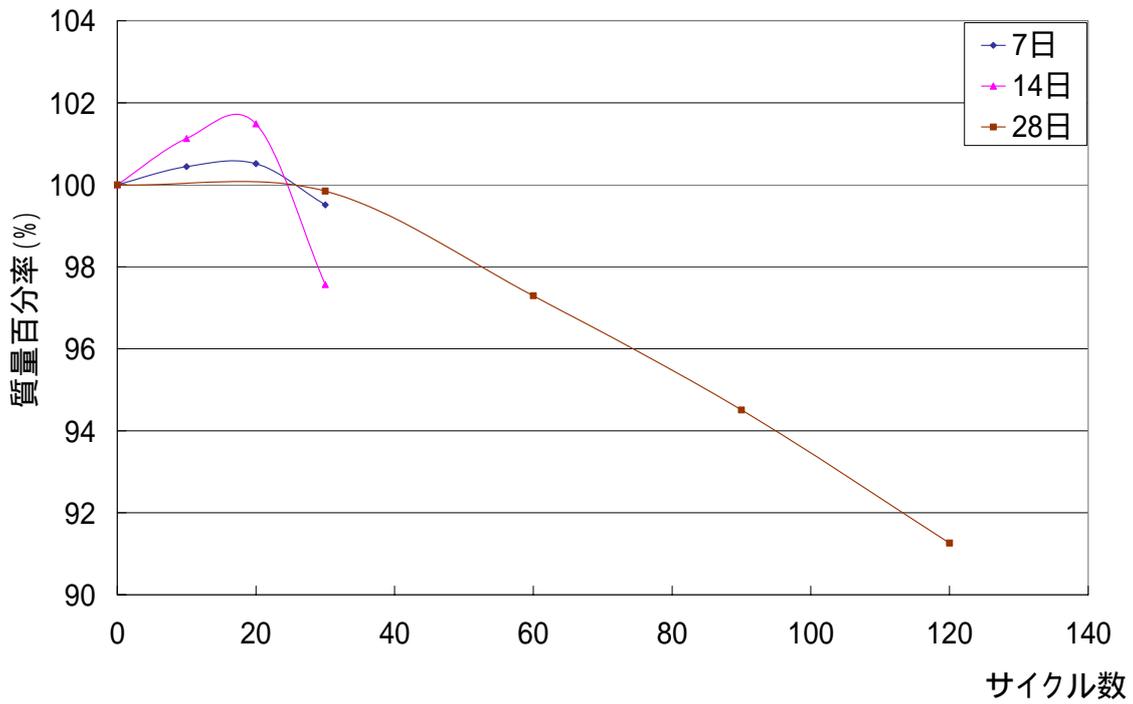


図 4.13 凍結融解サイクルと質量百分率の関係(W/C=110% , 最低温度-17)

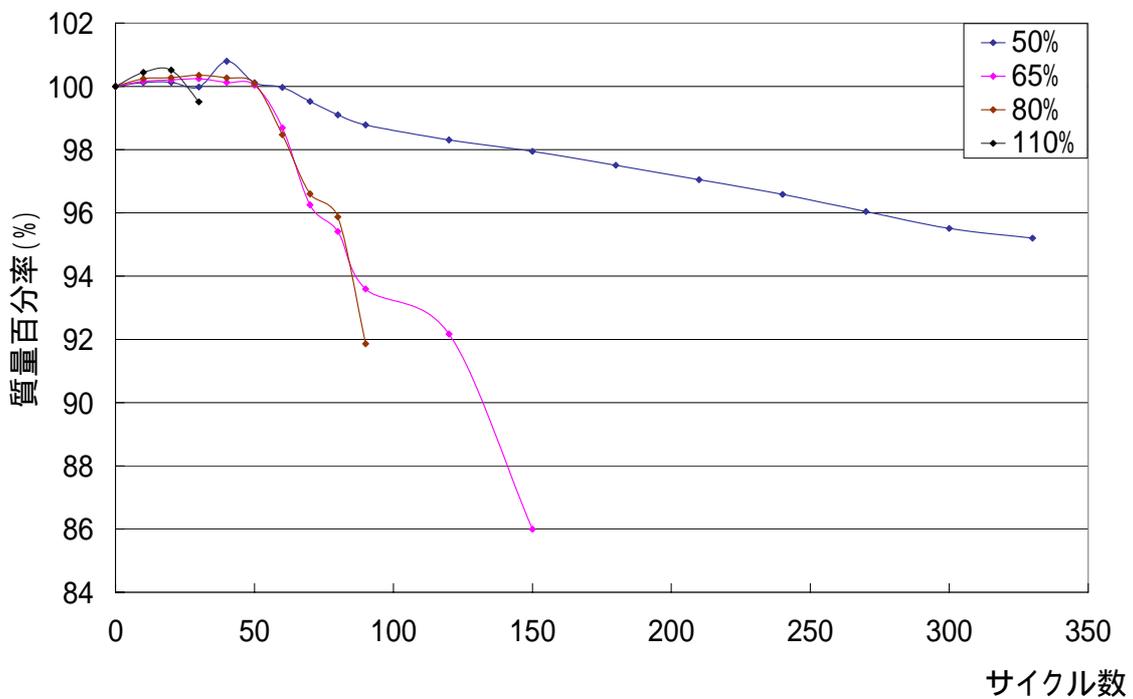


図 4.14 凍結融解サイクルと質量百分率の関係(開始材齢 7 日 , 最低温度-17)

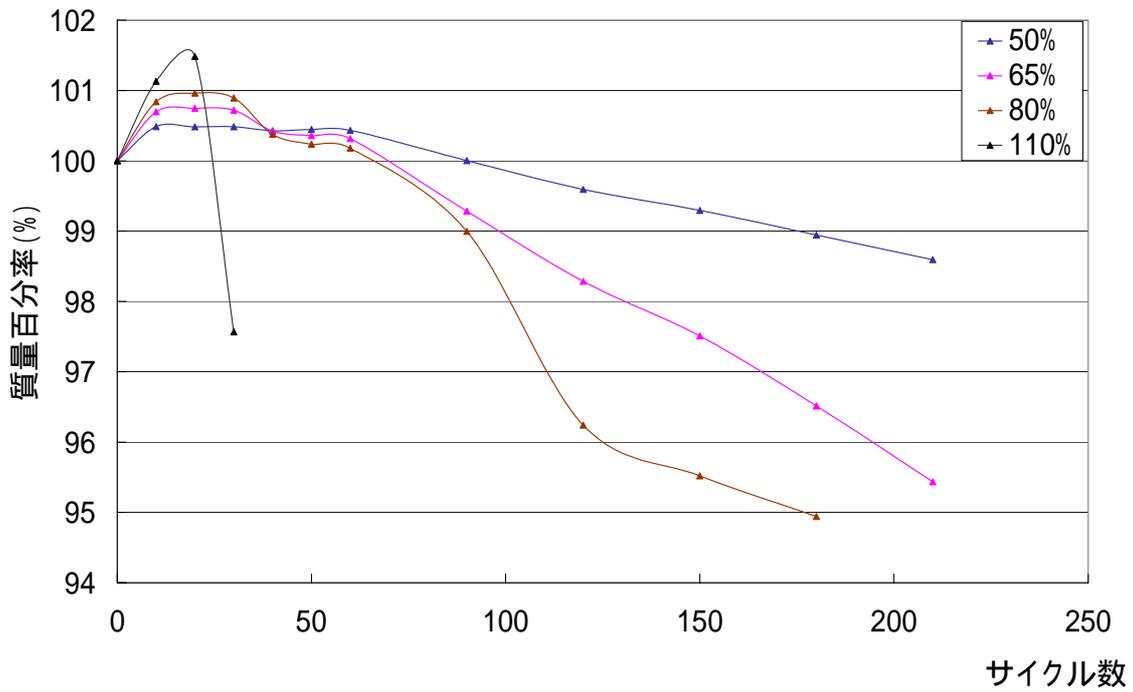


図 4.15 凍結融解サイクルと質量百分率の関係(開始材齢 14 日，最低温度-17)

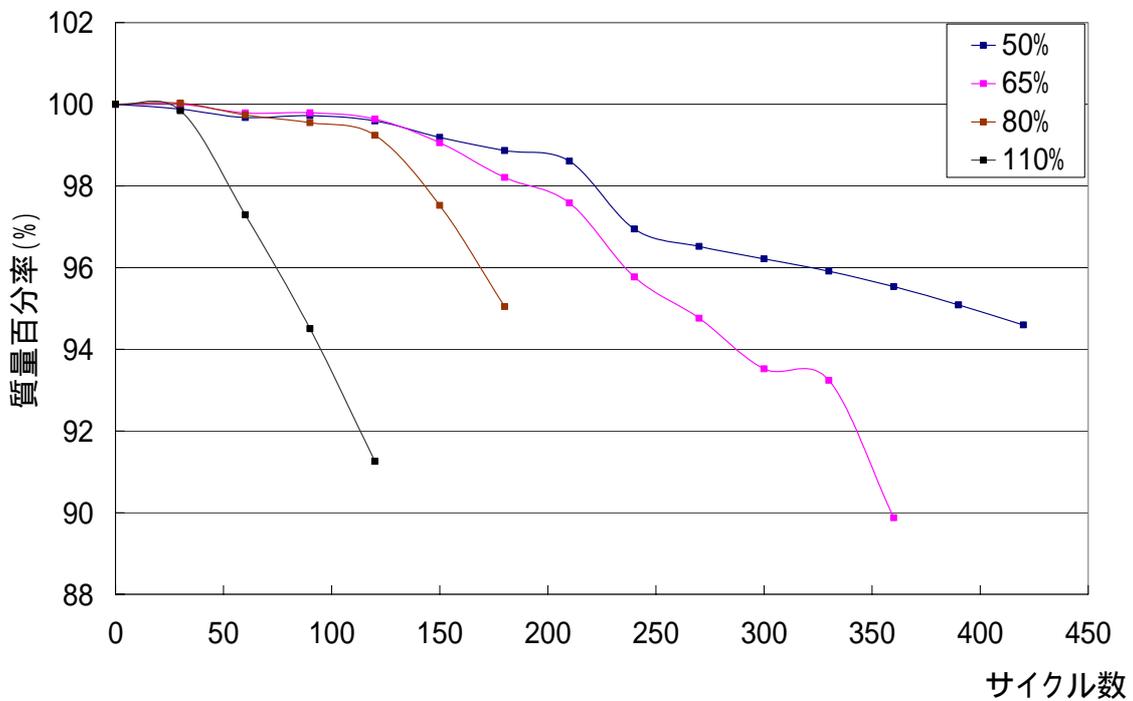


図 4.16 凍結融解サイクルと質量百分率の関係(開始材齢 28 日，最低温度-17)

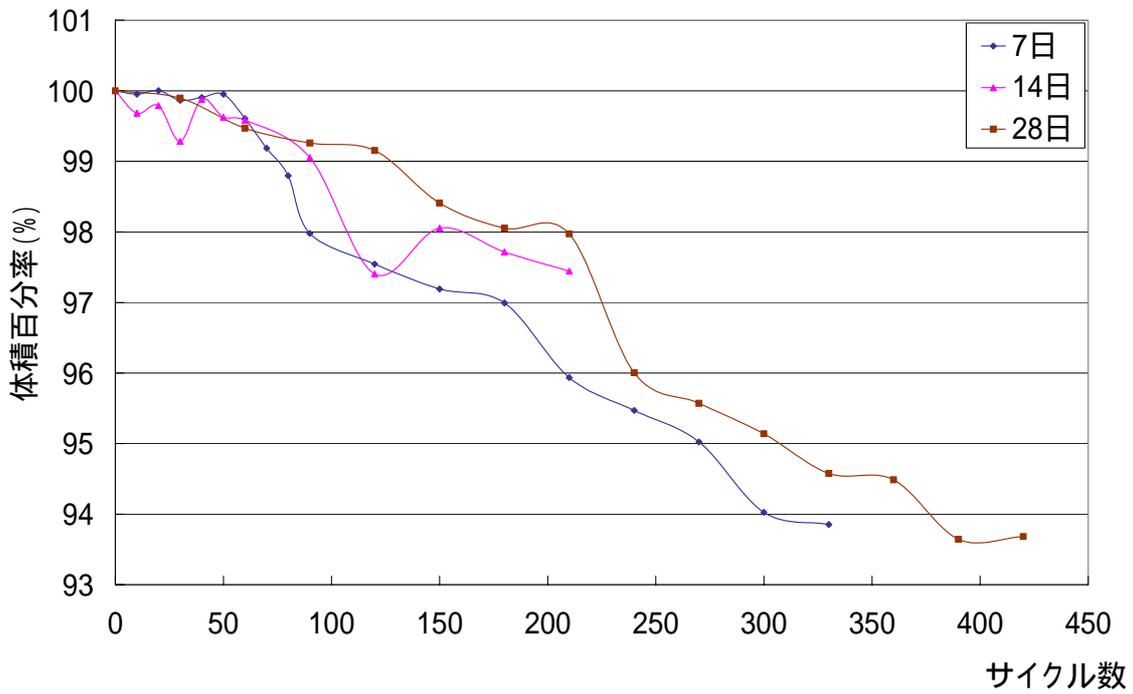


図 4.17 凍結融解サイクルと体積百分率の関係(W/C=50% , 最低温度-17)

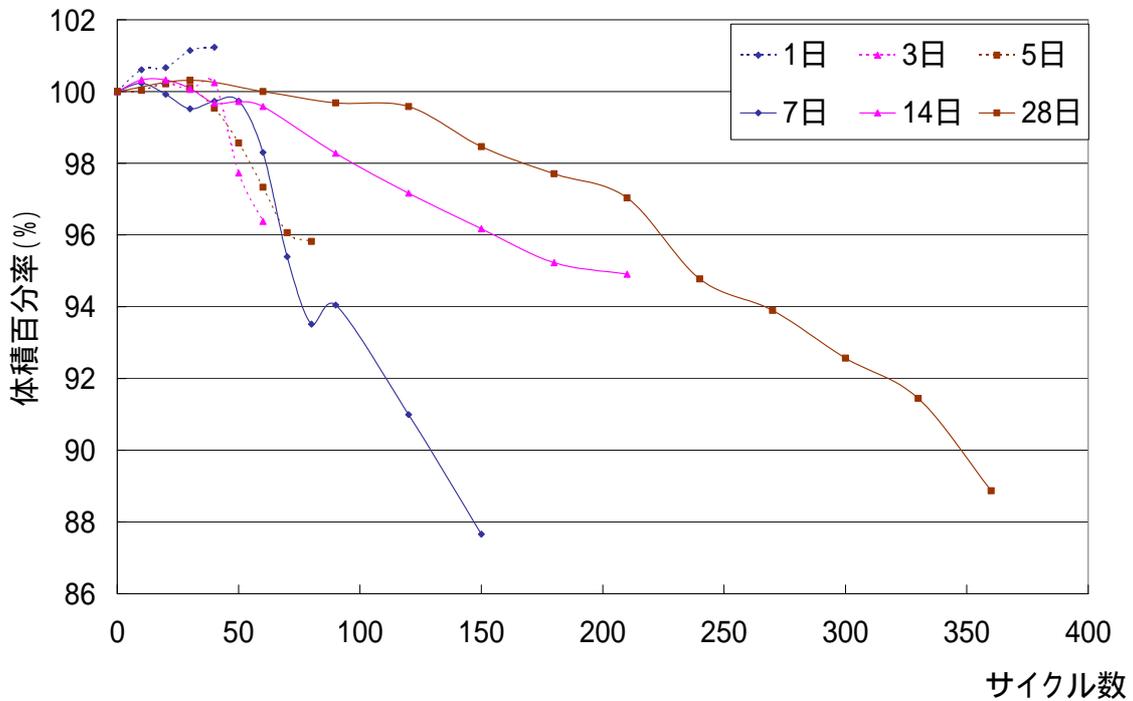


図 4.18 凍結融解サイクルと体積百分率の関係(W/C=65% , 最低温度-17)

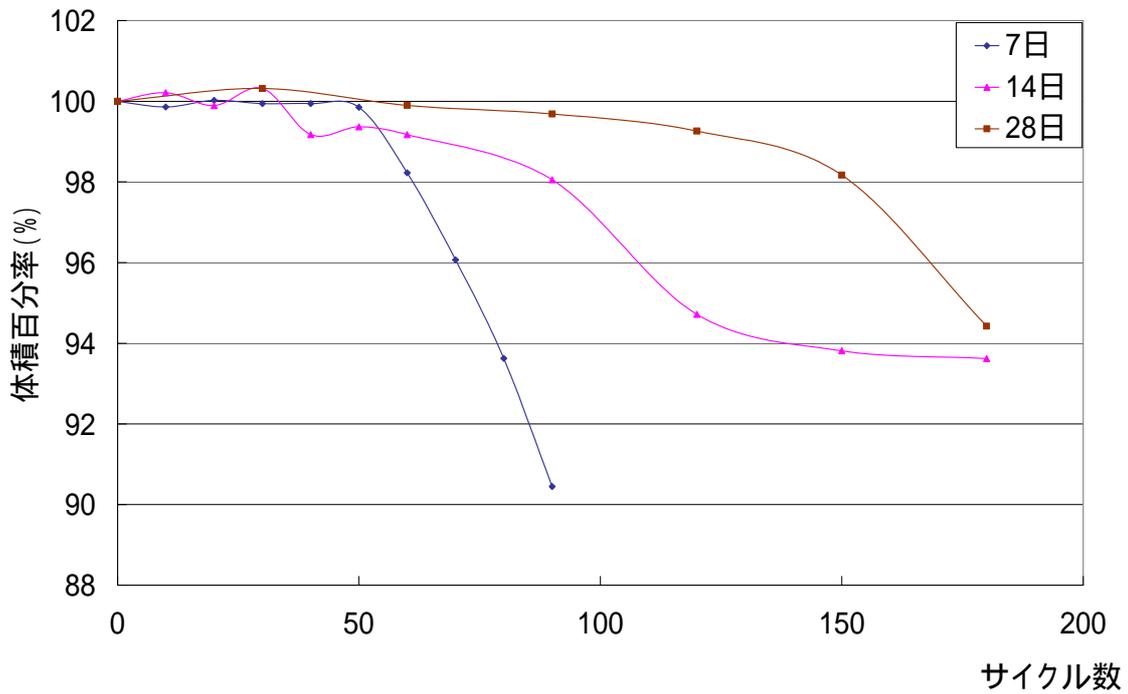


図 4.19 凍結融解サイクルと体積百分率の関係(W/C=80% , 最低温度-17)

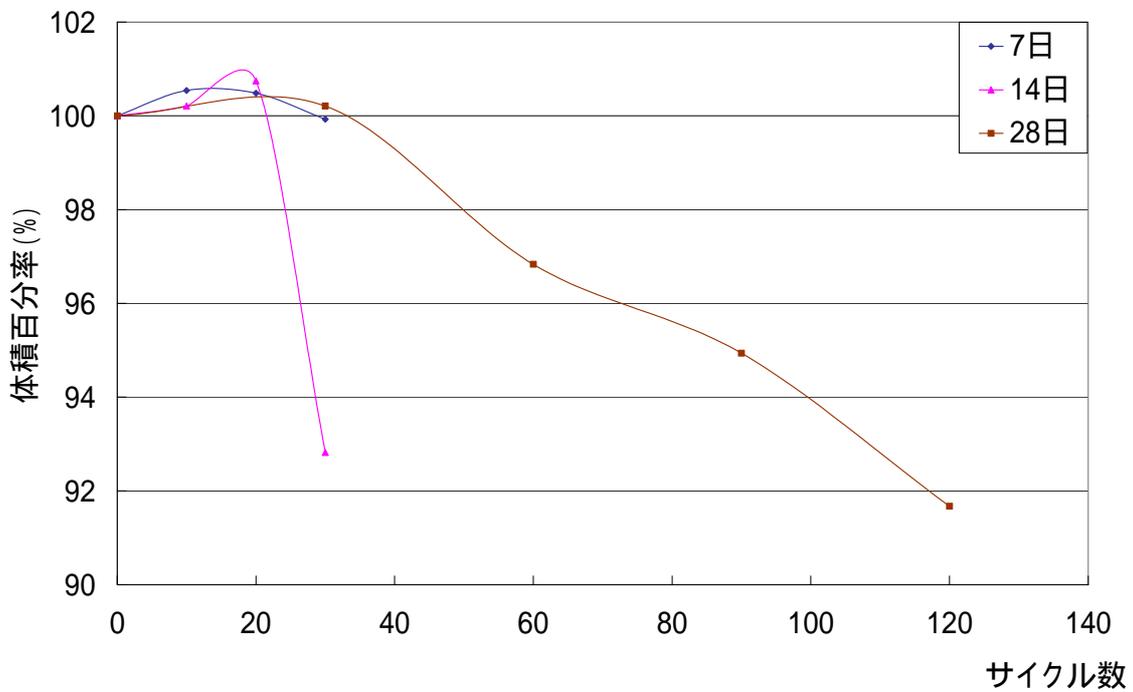


図 4.20 凍結融解サイクルと体積百分率の関係(W/C=110% , 最低温度-17)

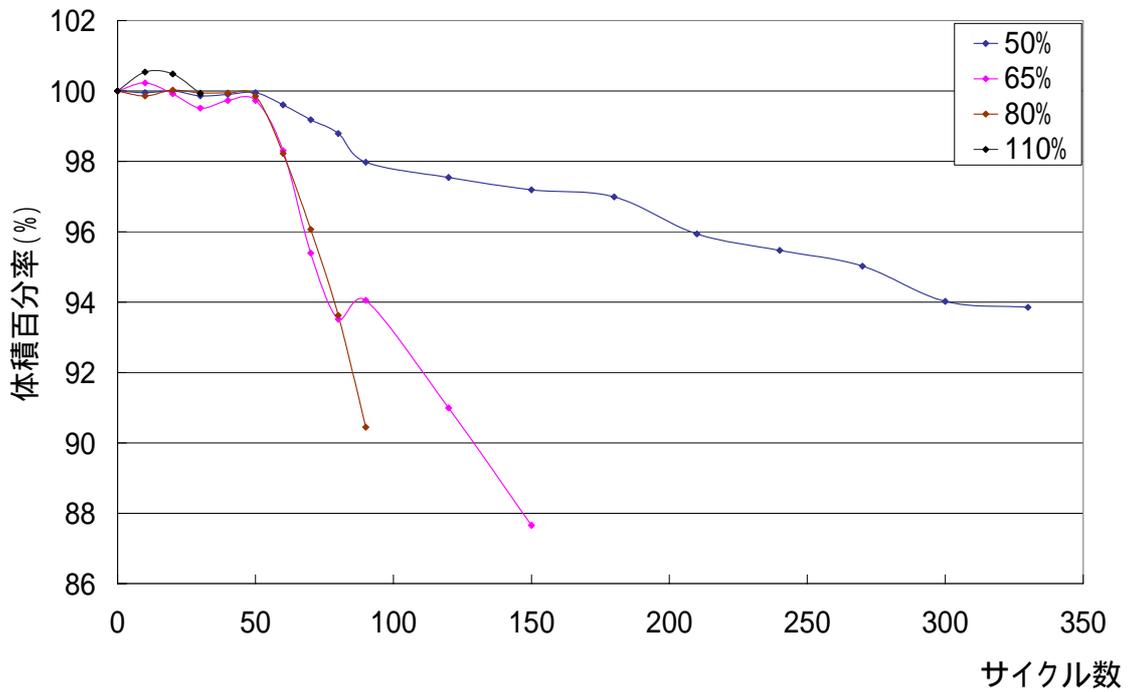


図 4.21 凍結融解サイクルと体積百分率の関係(開始材齢 7 日, 最低温度-17)

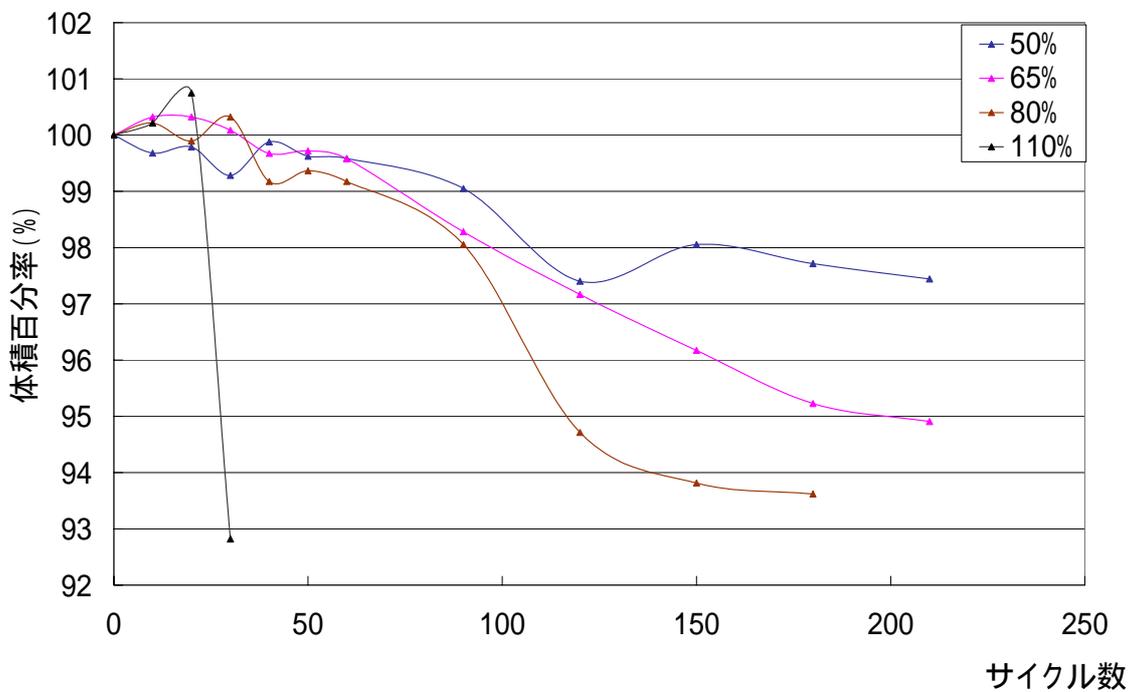


図 4.22 凍結融解サイクルと体積百分率の関係(開始材齢 14 日, 最低温度-17)

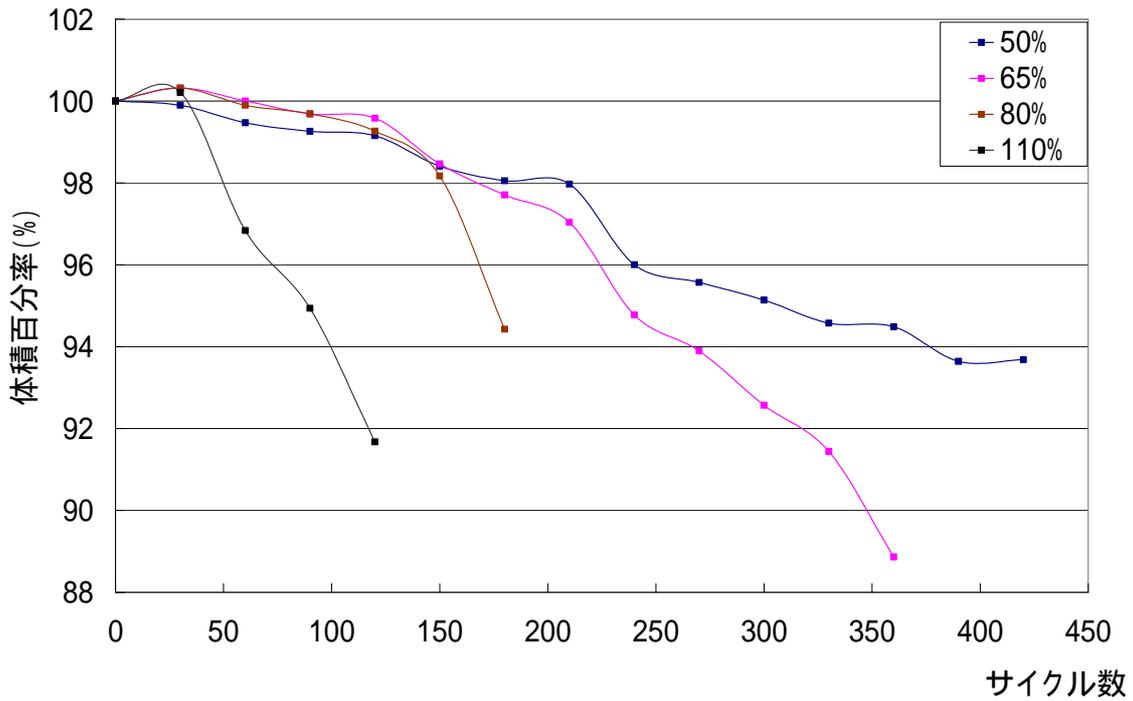


図 4.23 凍結融解サイクルと体積百分率の関係(開始材齢 28 日, 最低温度-17)

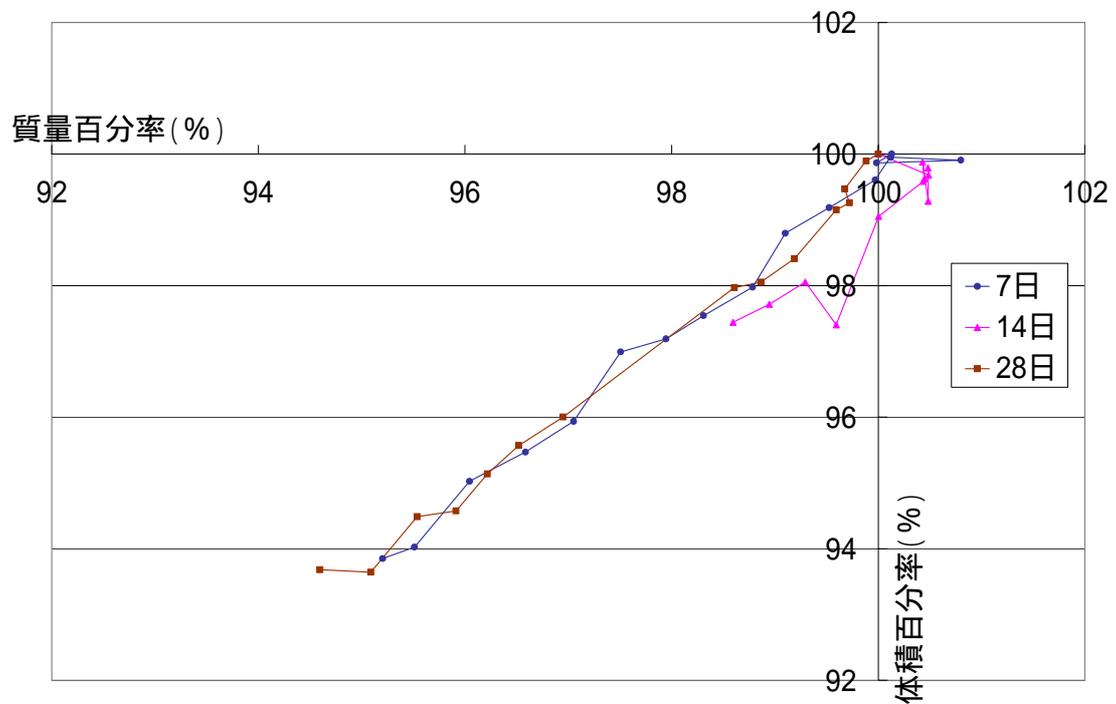


図 4.24 質量百分率と体積百分率の関係(W/C=50%, 最低温度-17)

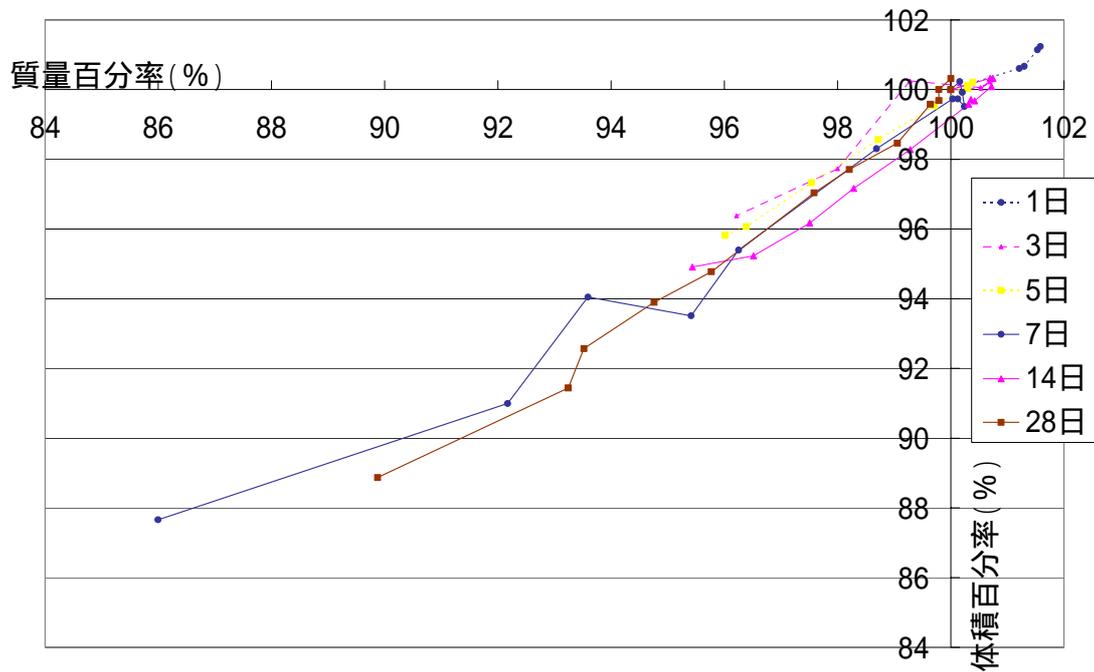


図 4.25 質量百分率と体積百分率の関係(W/C=65% , 最低温度-17)

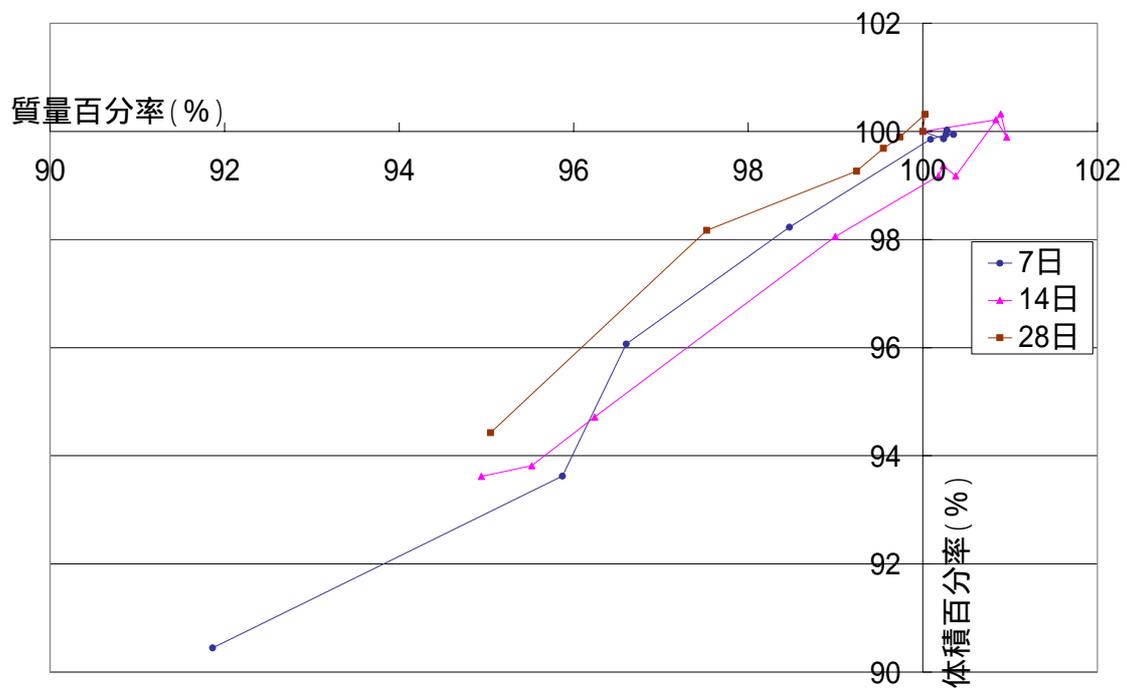


図 4.26 質量百分率と体積百分率の関係(W/C=80% , 最低温度-17)

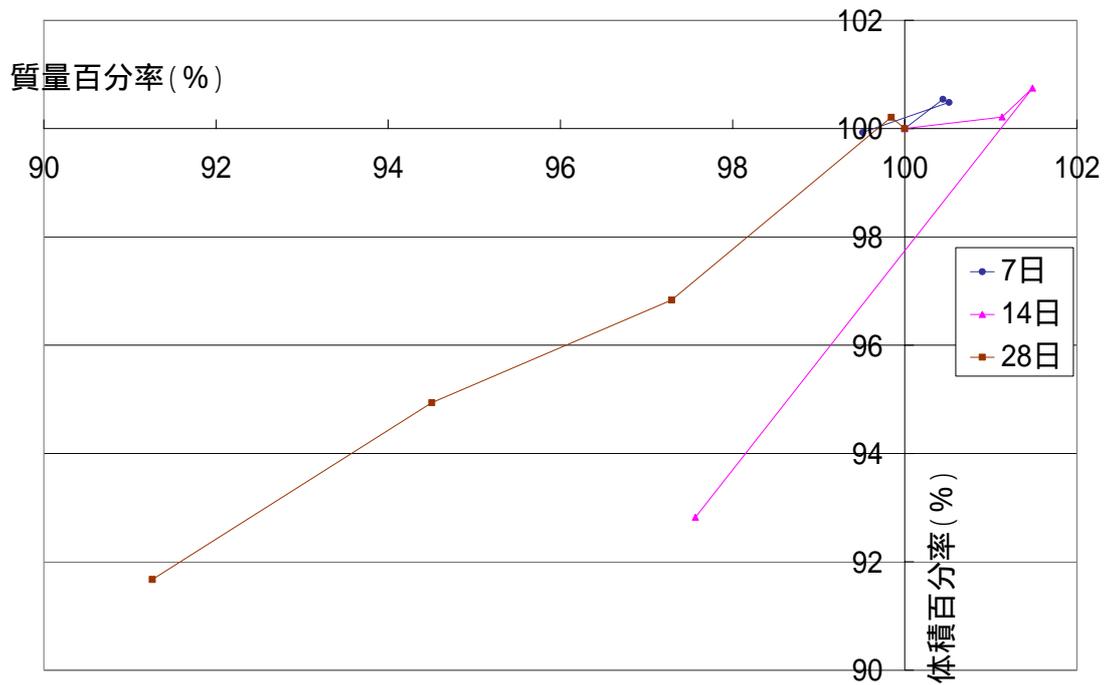


図 4.27 質量百分率と体積百分率の関係(W/C=110% , 最低温度-17)

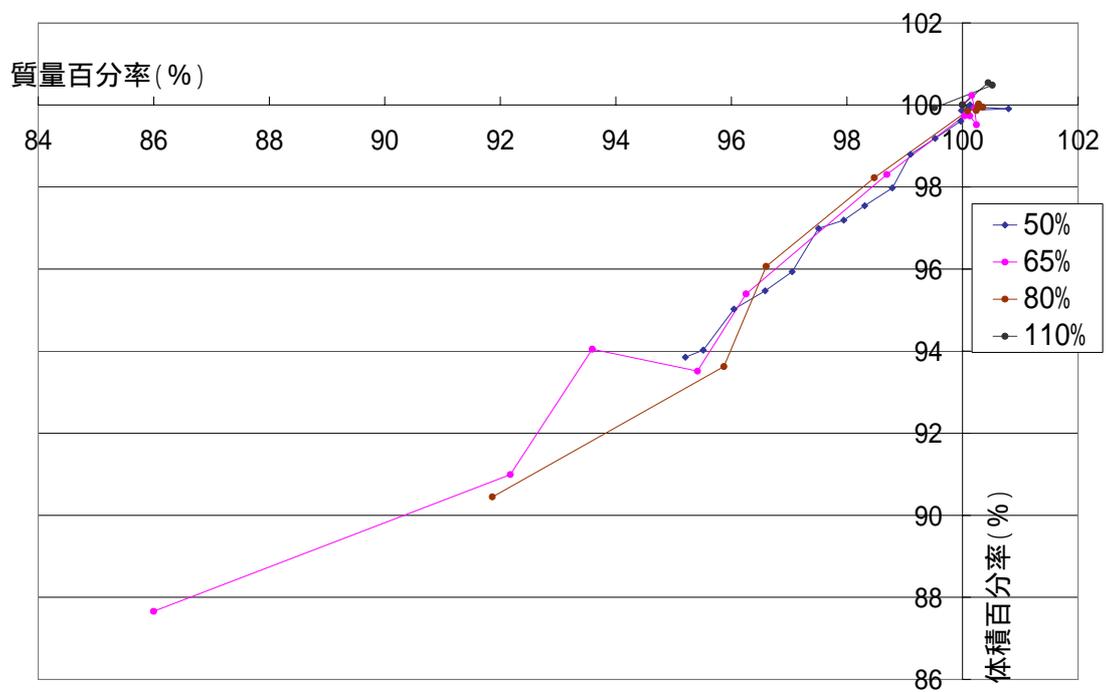


図 4.28 質量百分率と体積百分率の関係(開始材齢 7 日 , 最低温度-17)

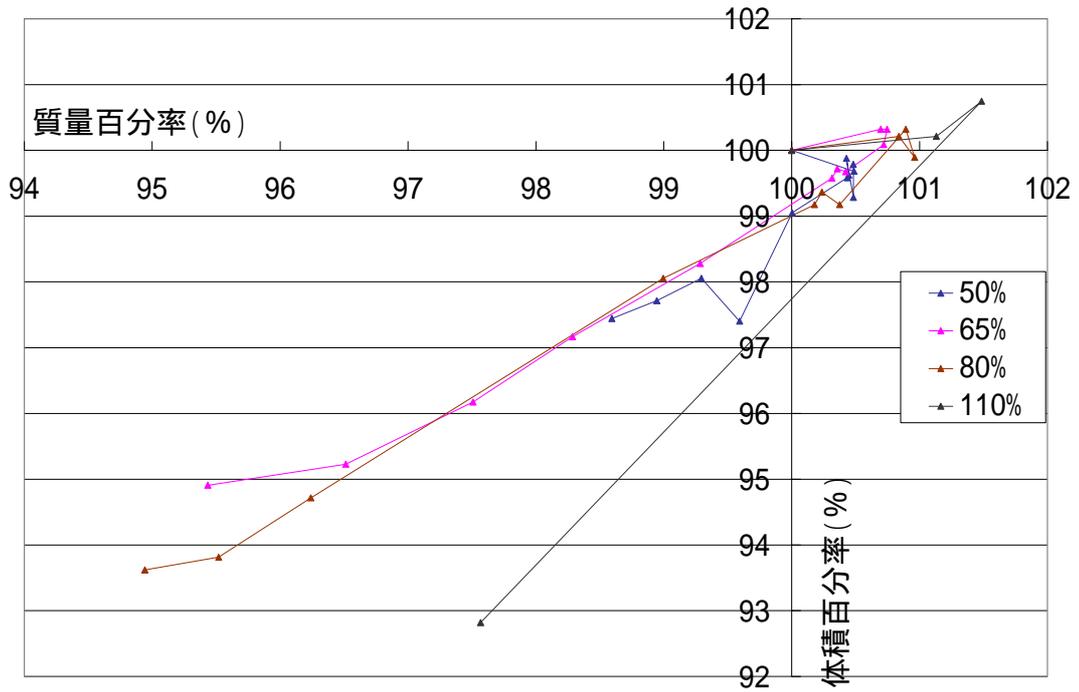


図 4.29 質量百分率と体積百分率の関係(開始材齢 14 日，最低温度-17)

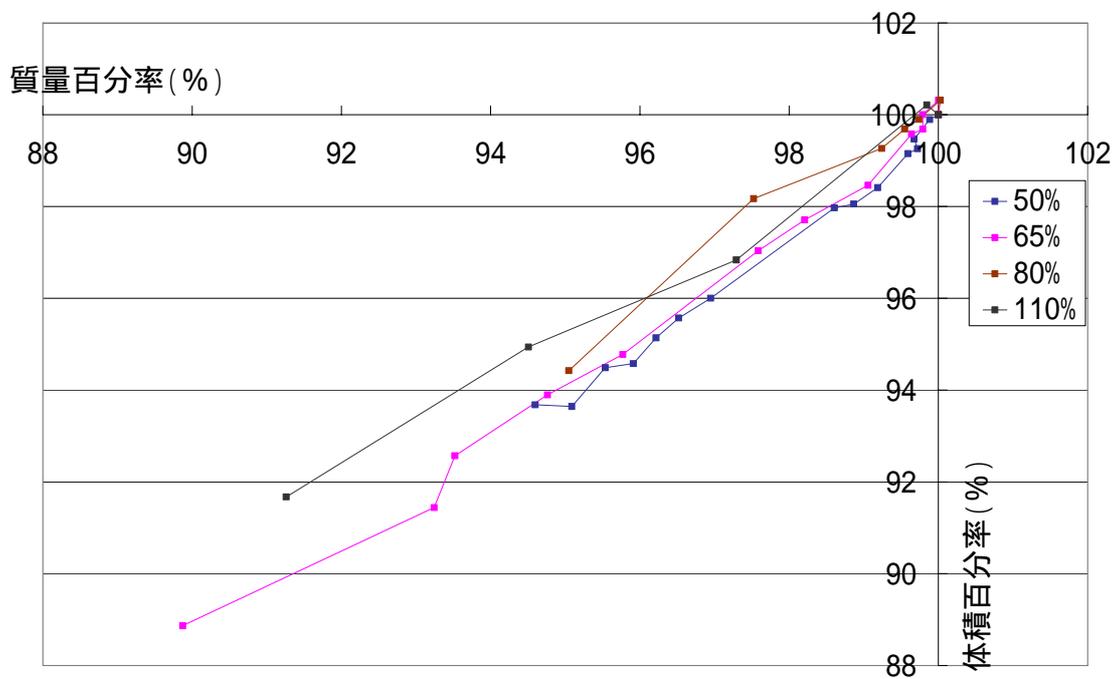


図 4.30 質量百分率と体積百分率の関係(開始材齢 28 日，最低温度-17)

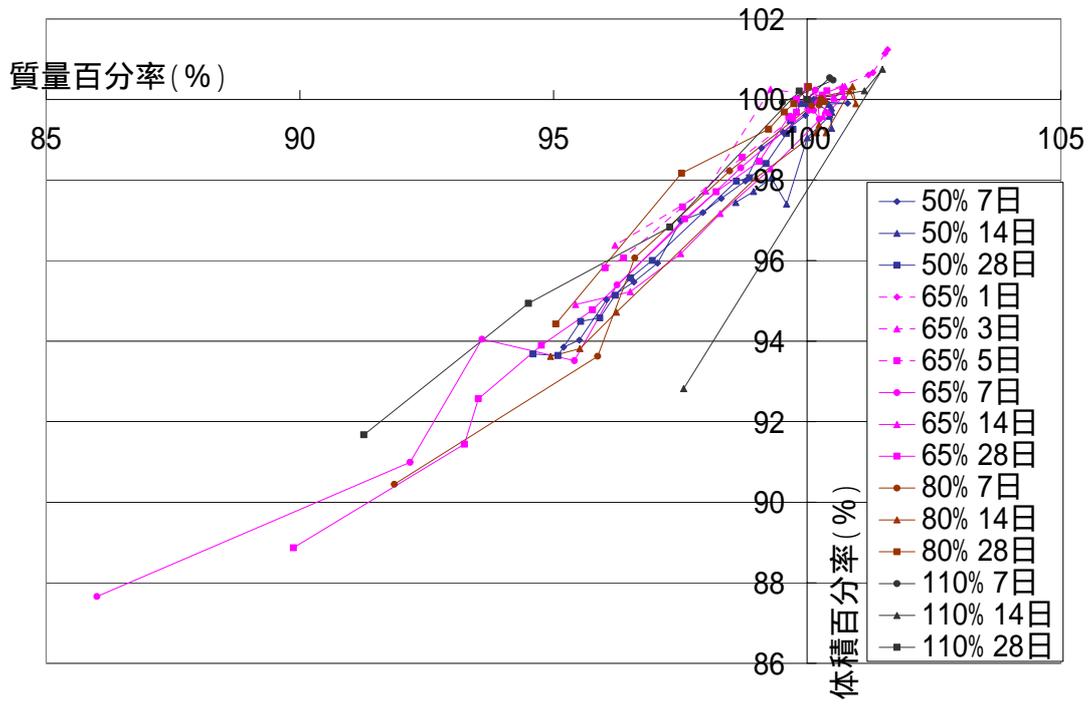


図 4.31 質量百分率と体積百分率の関係(最低温度-17)

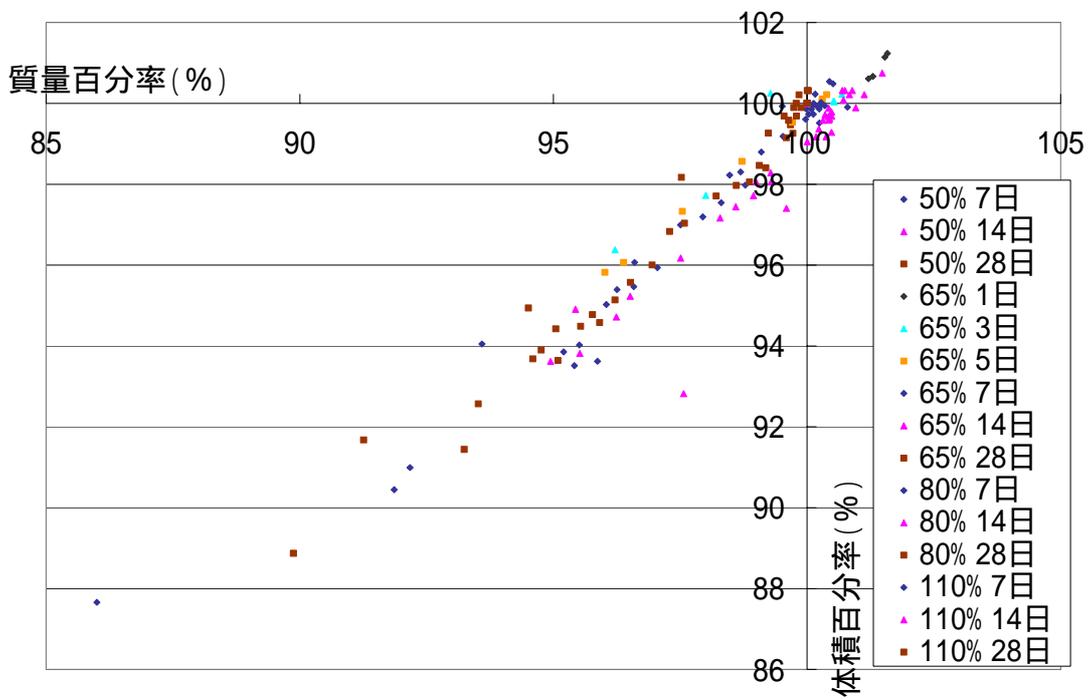


図 4.32 質量百分率と体積百分率の関係(最低温度-17)

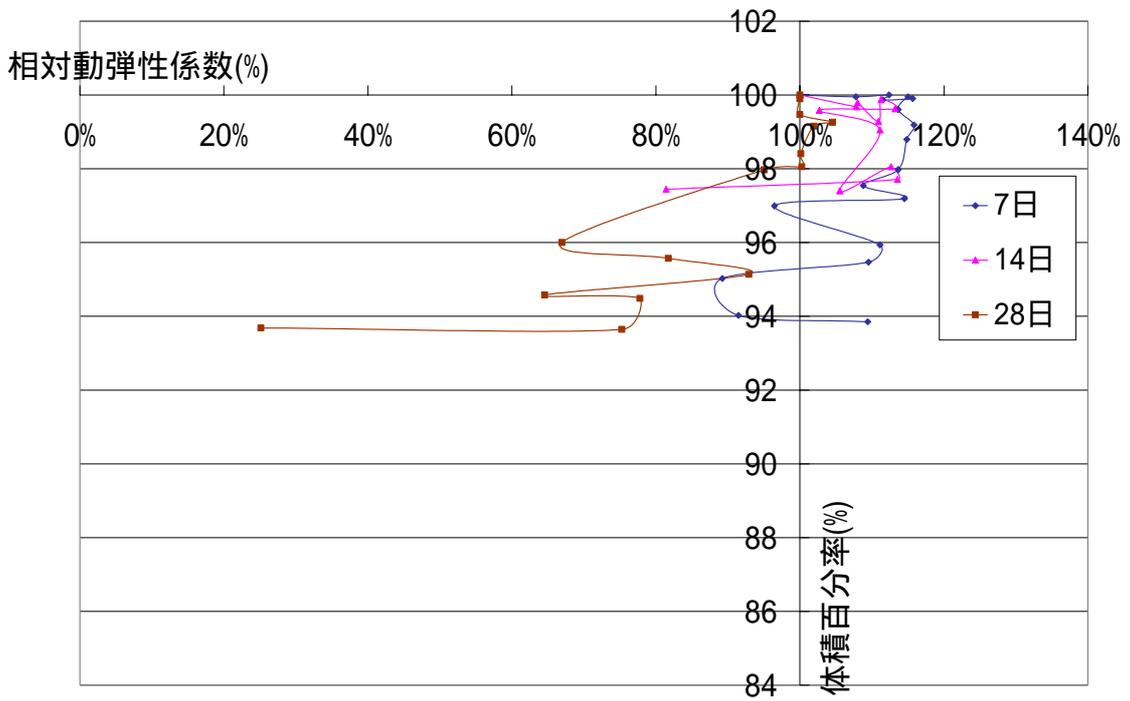


図 4.33 相对動弾性係数と体積百分率の関係(W/C=50% , 最低温度-17)

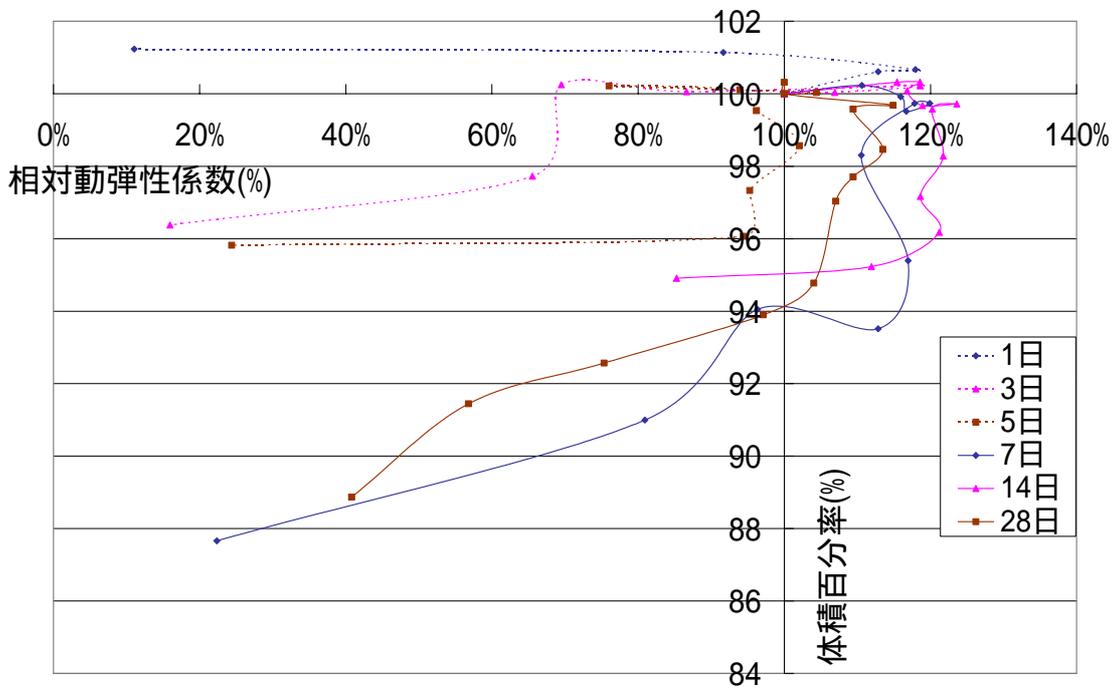


図 4.34 相对動弾性係数と体積百分率の関係(W/C=65% , 最低温度-17)

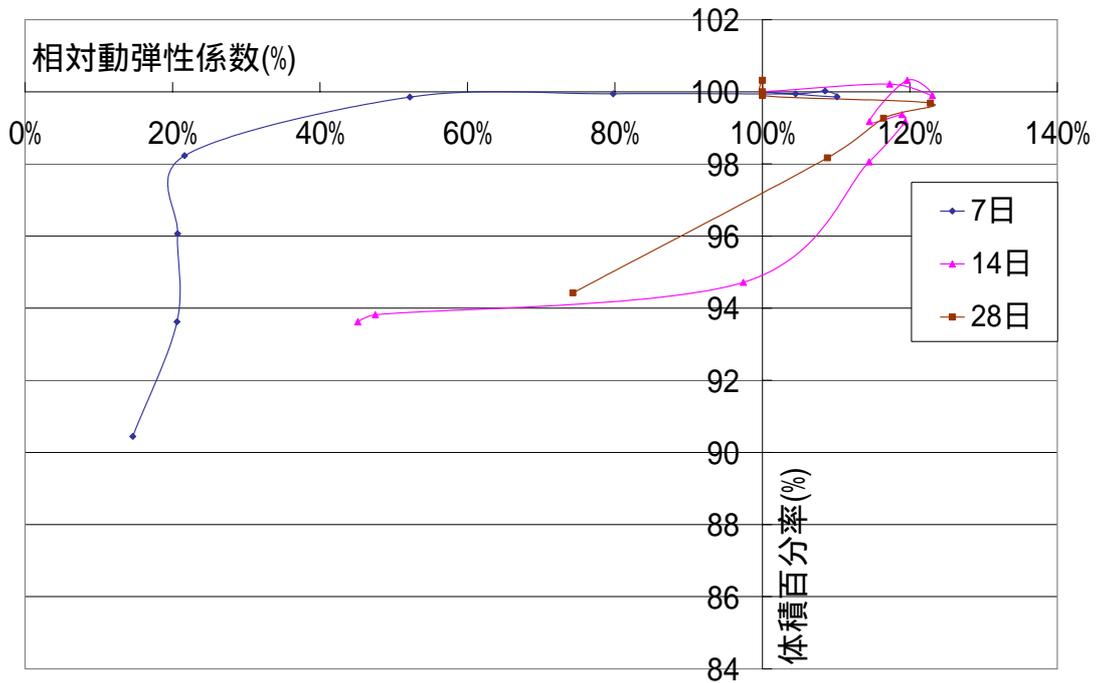


図 4.35 相对動弾性係数と体積百分率の関係(W/C=80% , 最低温度-17)

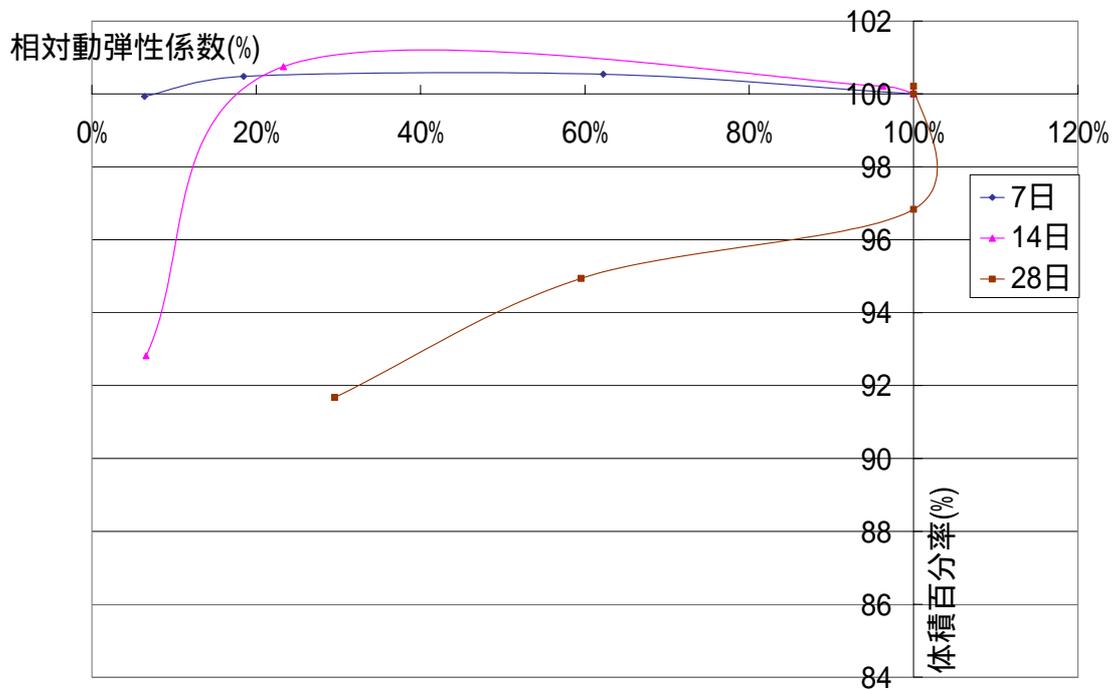


図 4.36 相对動弾性係数と体積百分率の関係(W/C=110% , 最低温度-17)

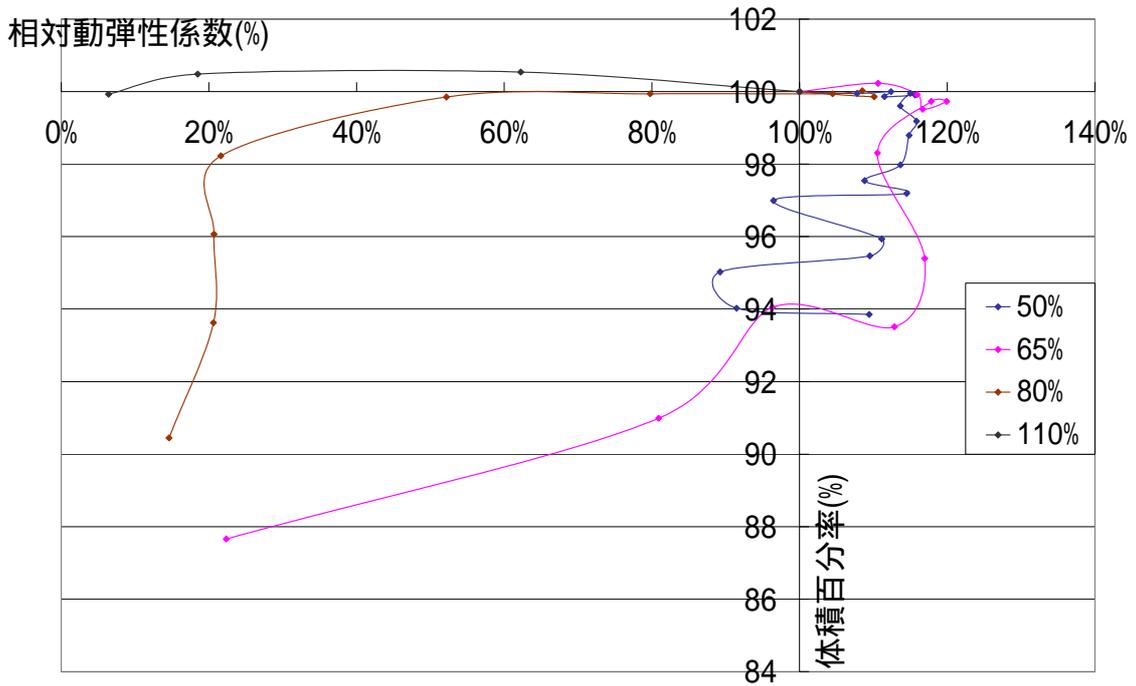


図 4.37 相对動弾性係数と体積百分率の関係(開始材齢 7 日, 最低温度-17)

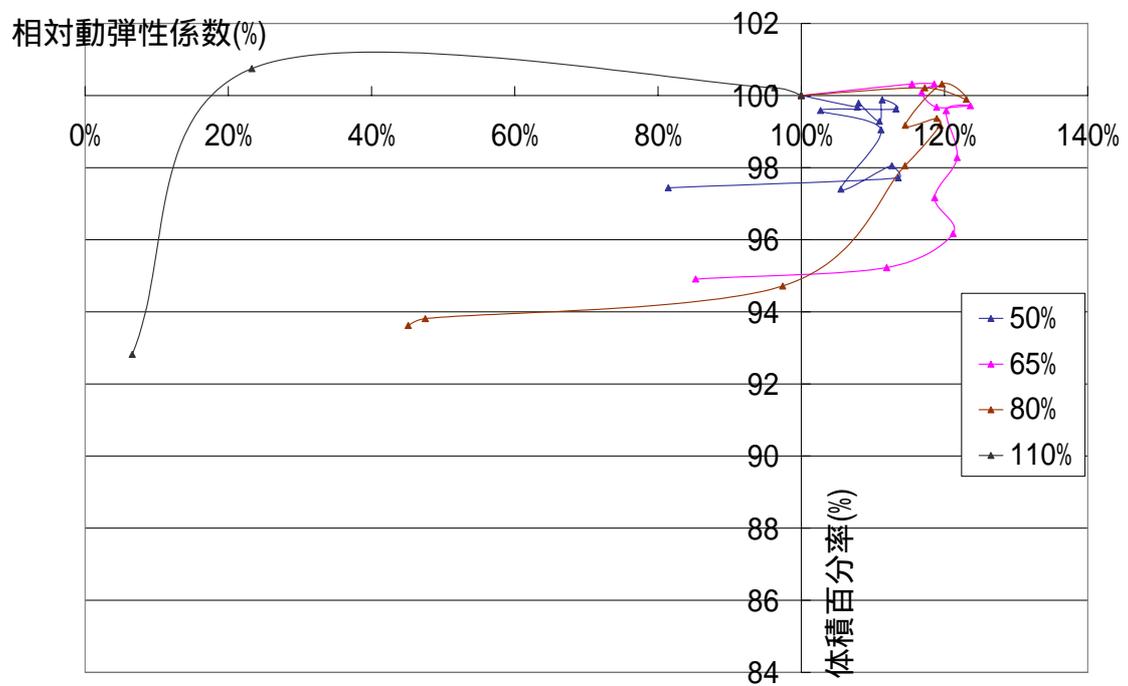


図 4.38 相对動弾性係数と体積百分率の関係(開始材齢 14 日, 最低温度-17)

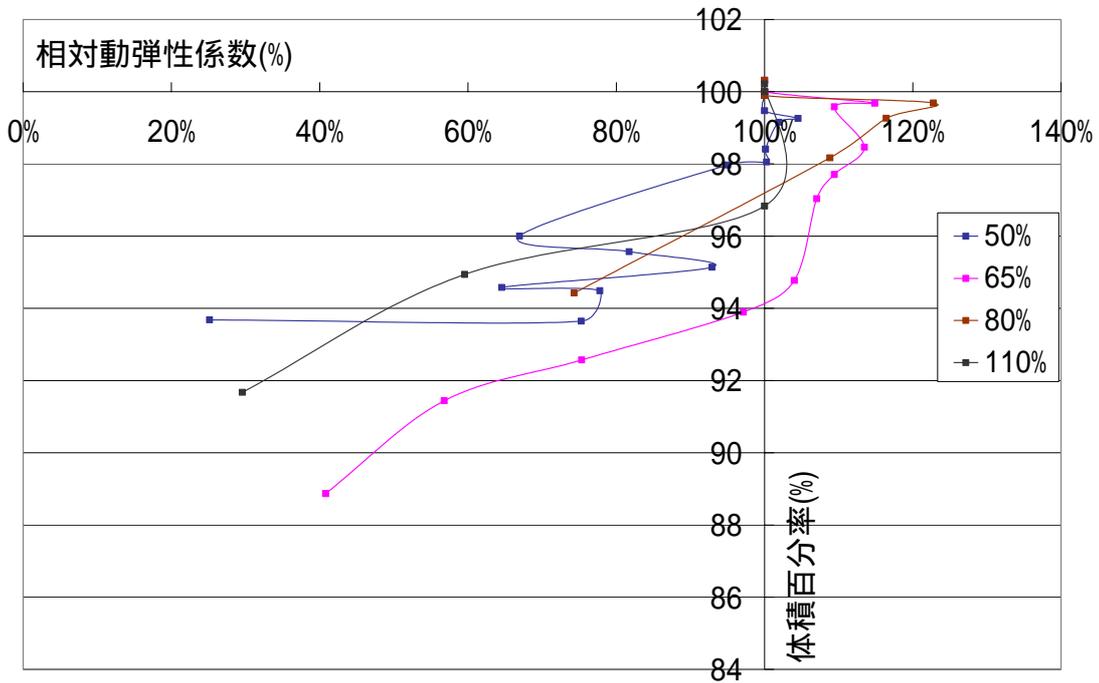


図 4.39 相対動弾性係数と体積百分率の関係(開始材齢 28 日 , 最低温度-17)

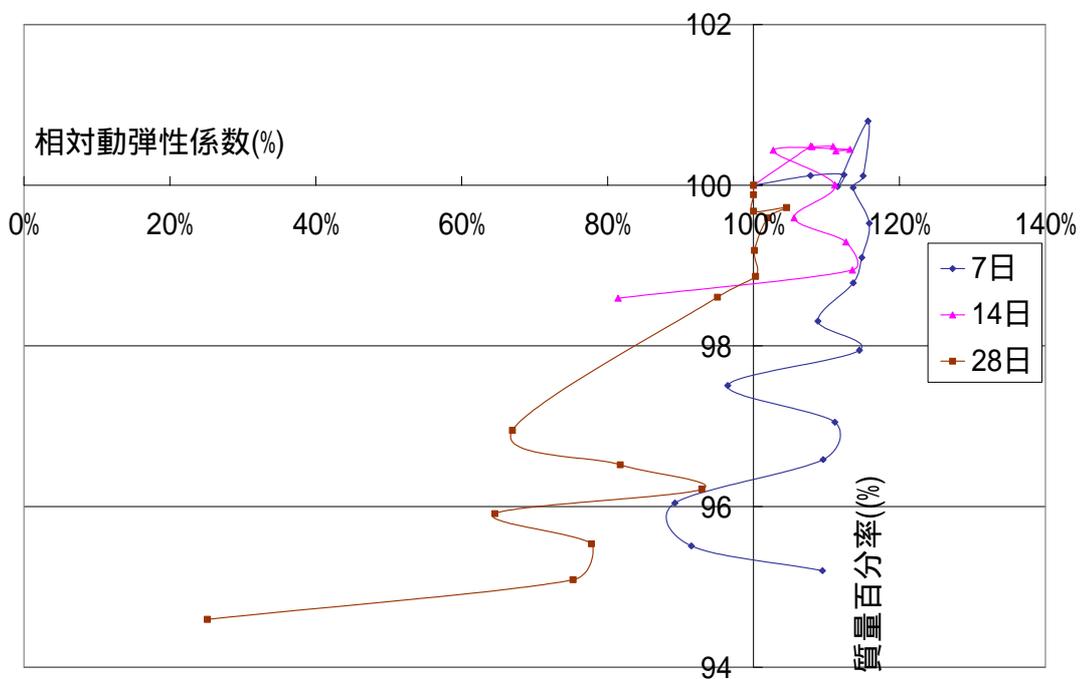


図 4.40 相対動弾性係数と質量百分率の関係(W/C=50% , 最低温度-17)

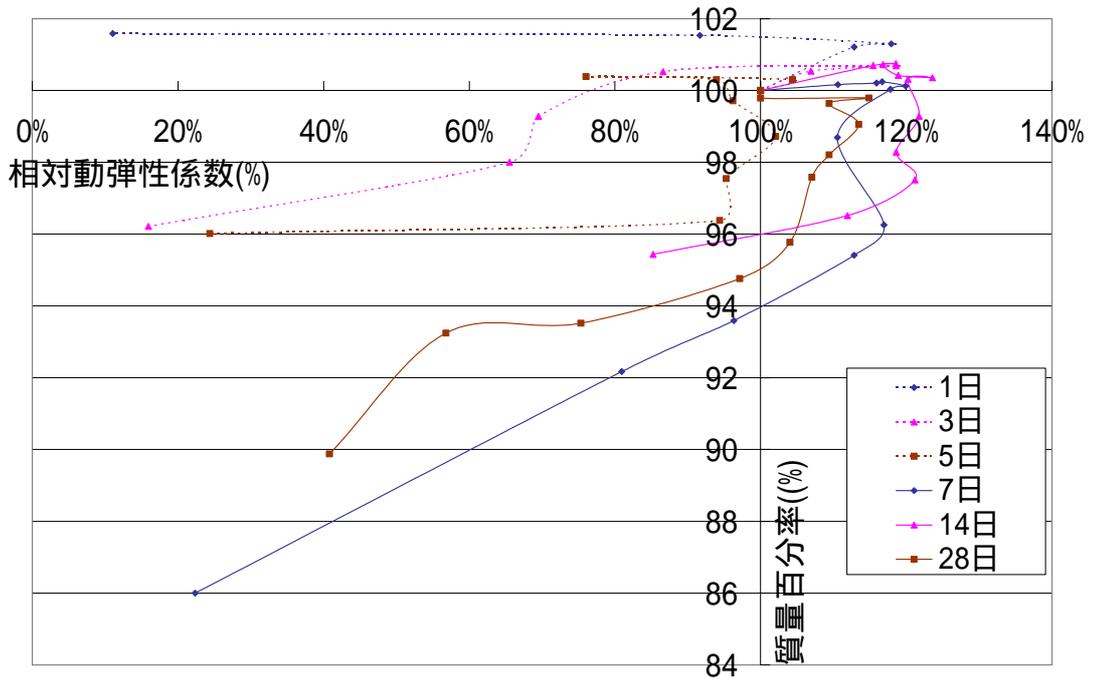


図 4.41 相对動弾性係数と質量百分率の関係(W/C=65% , 最低温度-17)

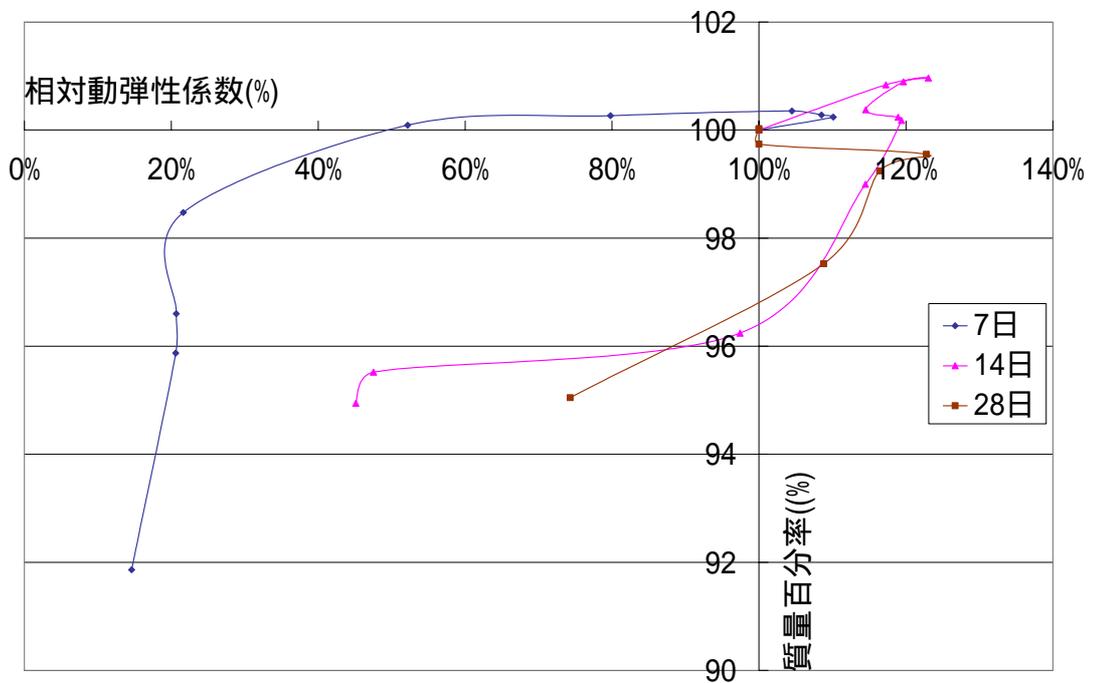


図 4.42 相对動弾性係数と質量百分率の関係(W/C=80% , 最低温度-17)

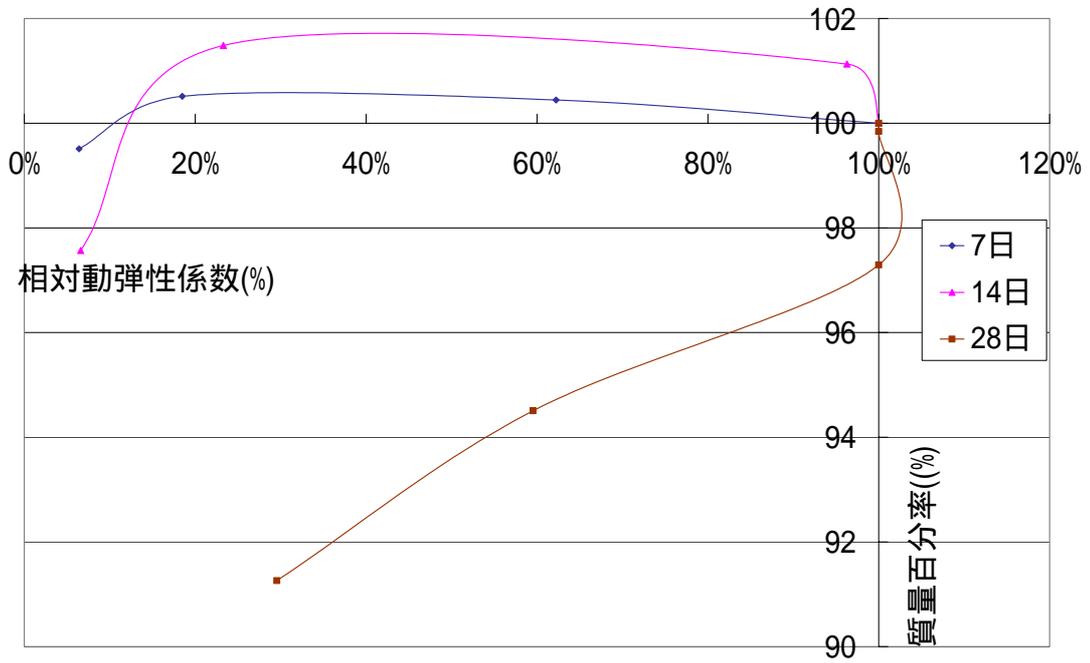


図 4.43 相対動弾性係数と質量百分率の関係(W/C=110% , 最低温度-17)

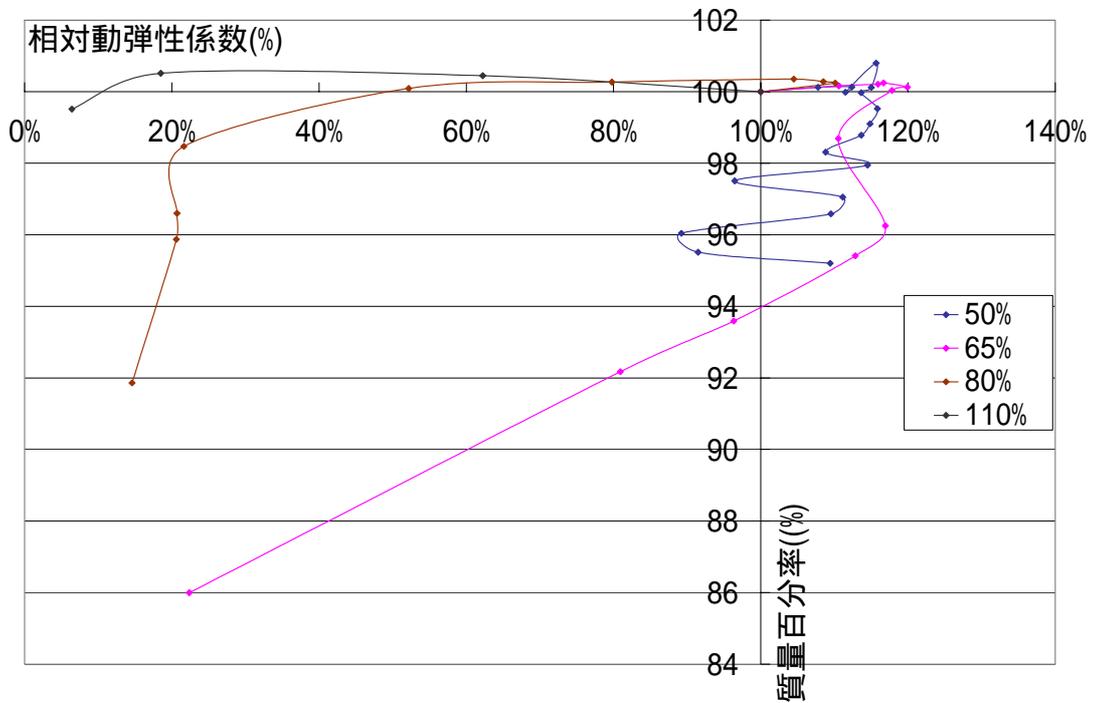


図 4.44 相対動弾性係数と質量百分率の関係(開始材齢 7 日 , 最低温度-17)

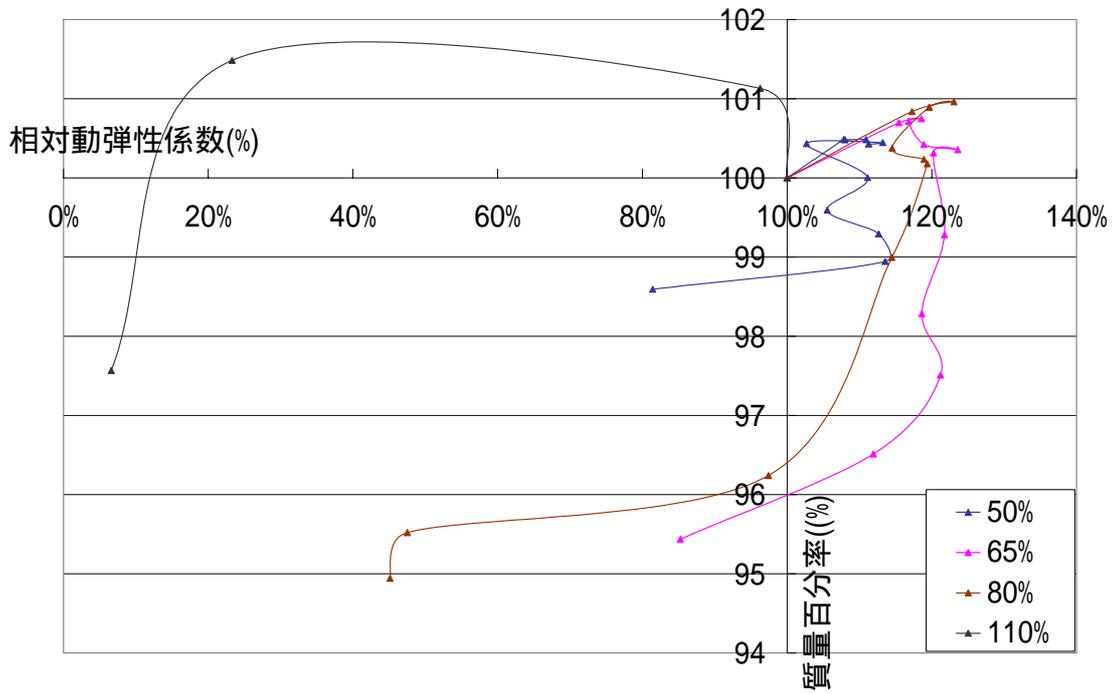


図 4.45 相対動弾性係数と質量百分率の関係(開始材齢 14 日 , 最低温度-17)

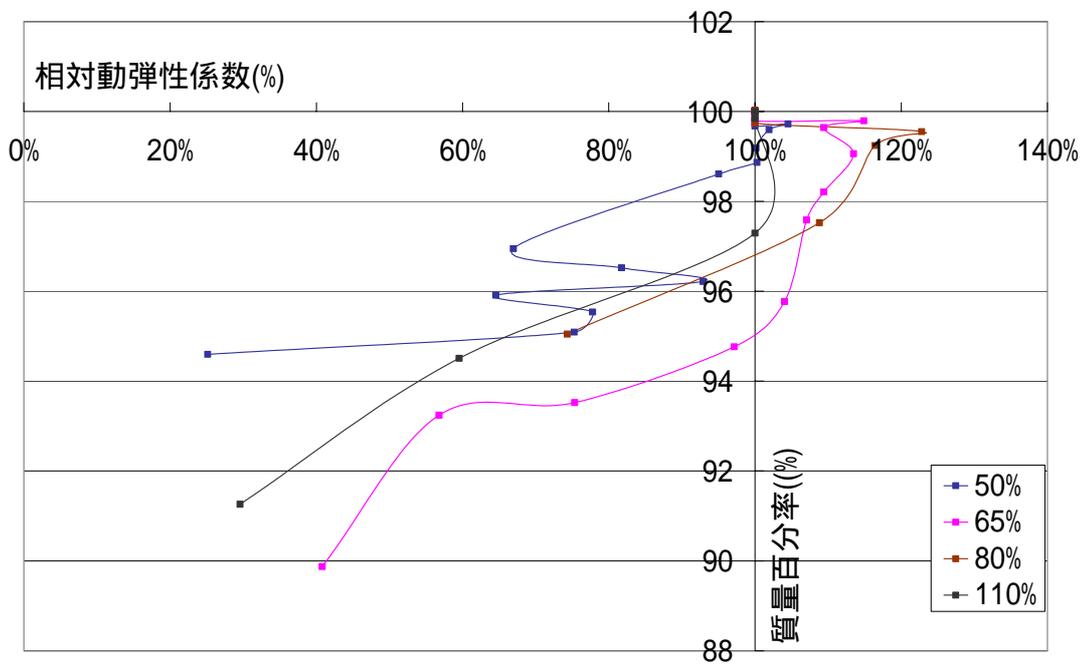


図 4.46 相対動弾性係数と質量百分率の関係(開始材齢 28 日 , 最低温度-17)

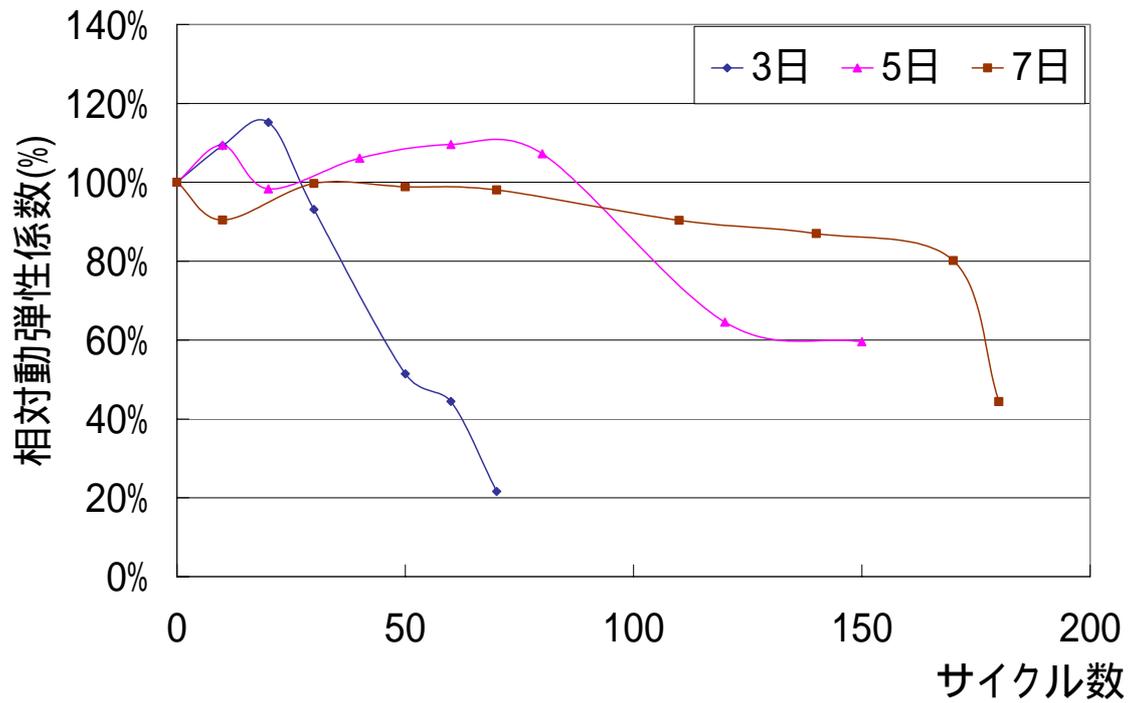


図 4.47 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係(最低温度-15)

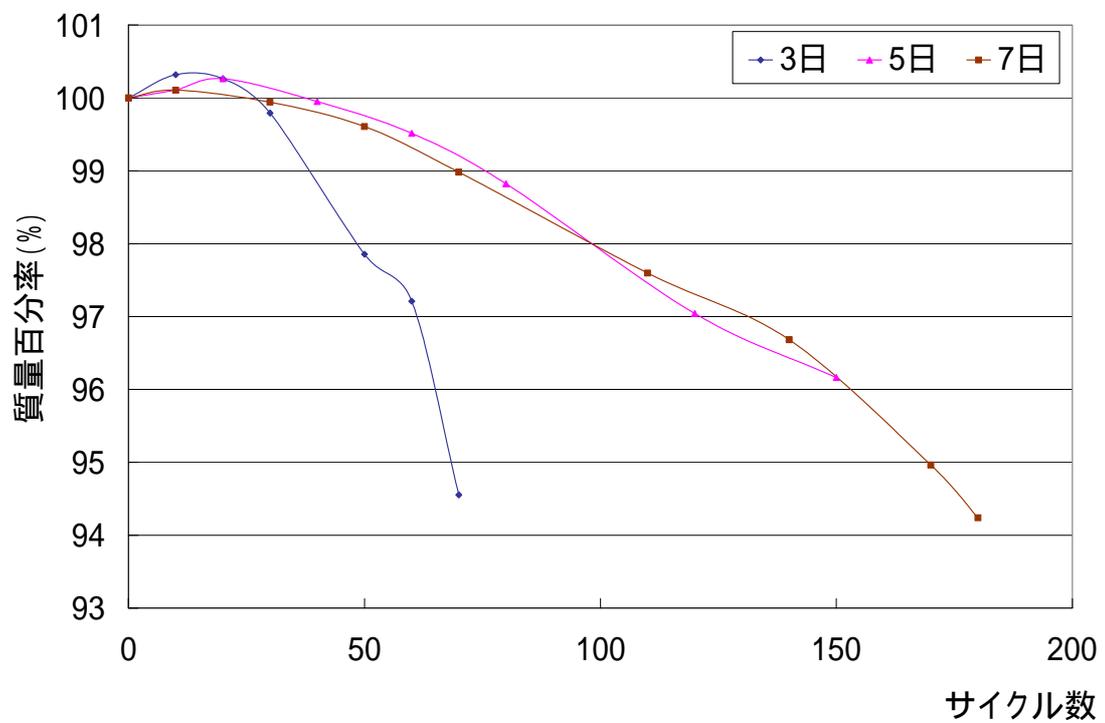


図 4.48 凍結融解サイクルと質量百分率の関係(最低温度-15)

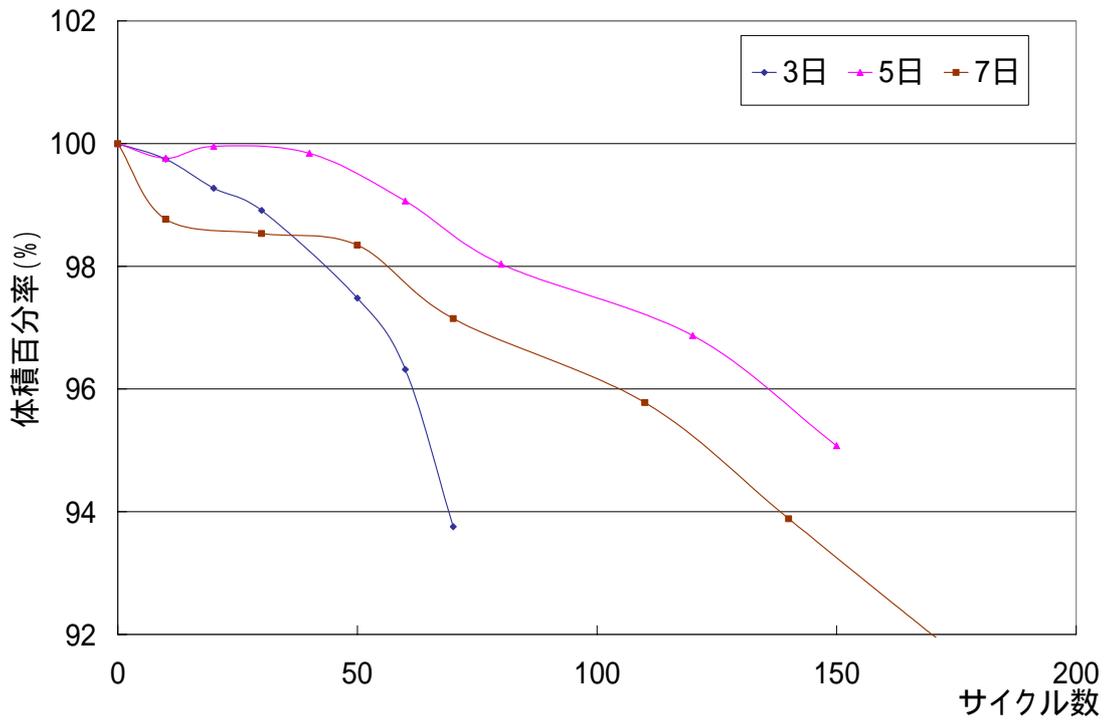


図 4.49 凍結融解サイクルと体積百分率の関係(最低温度-15)

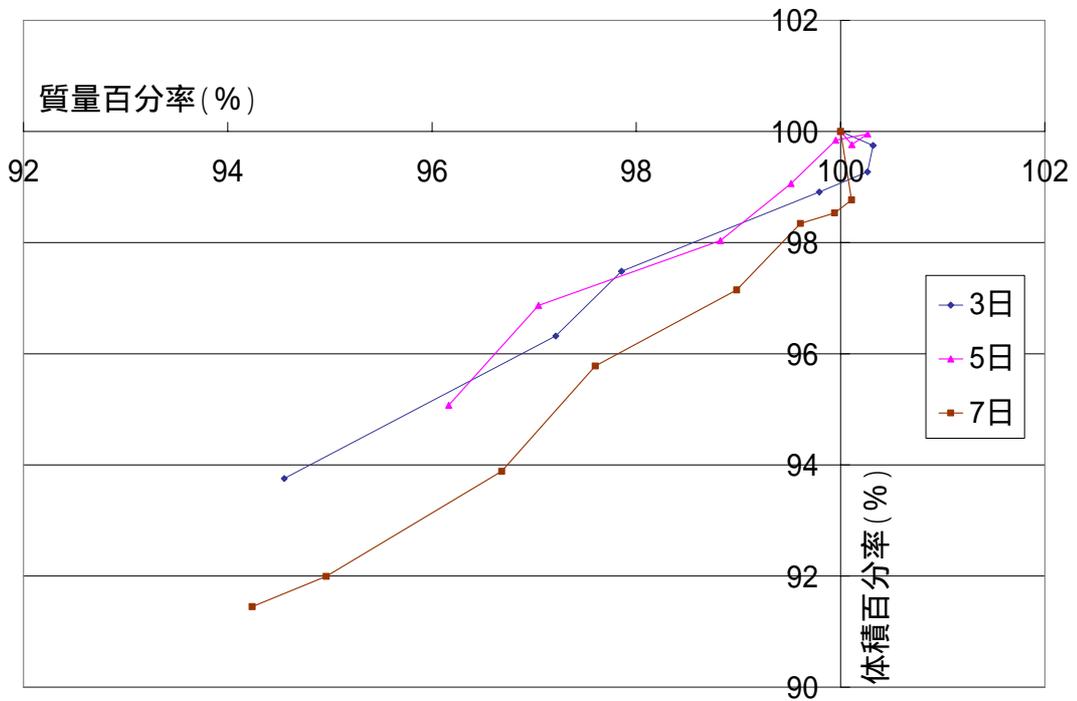


図 4.50 質量百分率と体積百分率の関係(最低温度-15)

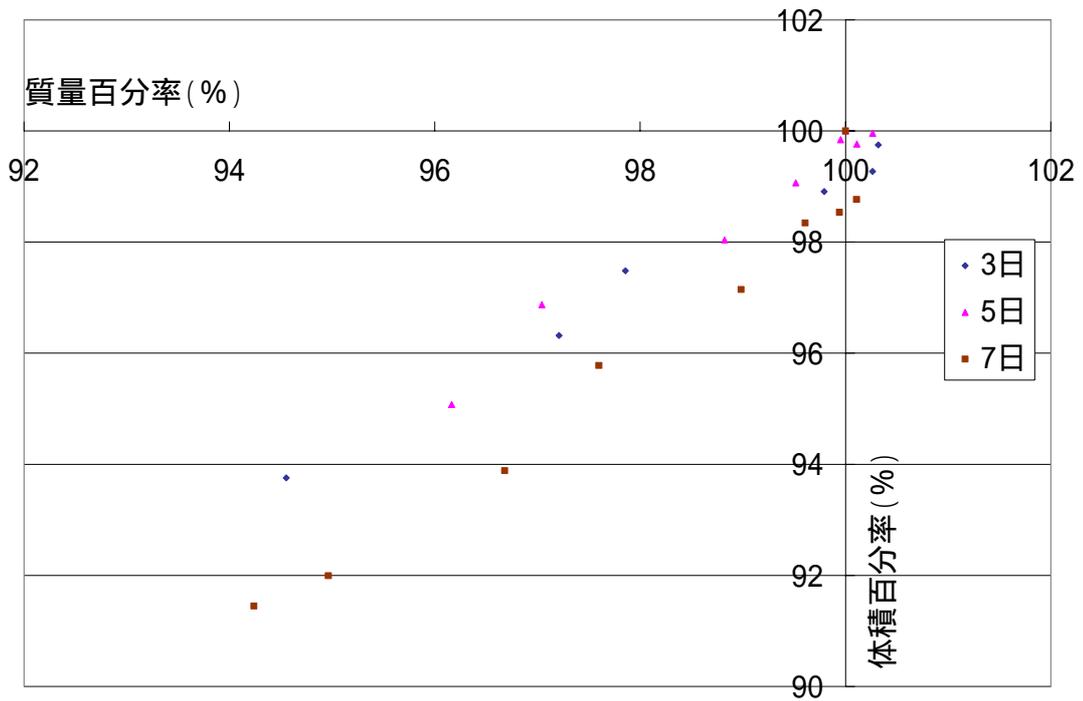


図 4.51 質量百分率と体積百分率の関係(最低温度-15)

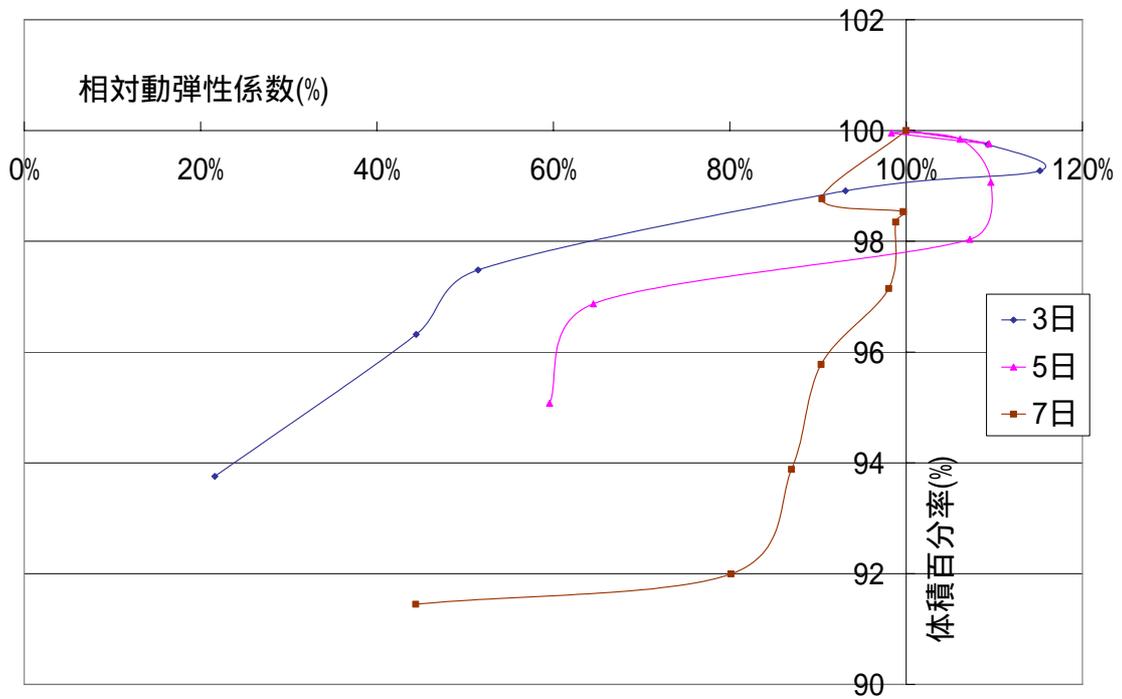


図 4.52 相对動弾性係数と体積百分率の関係(最低温度-15)

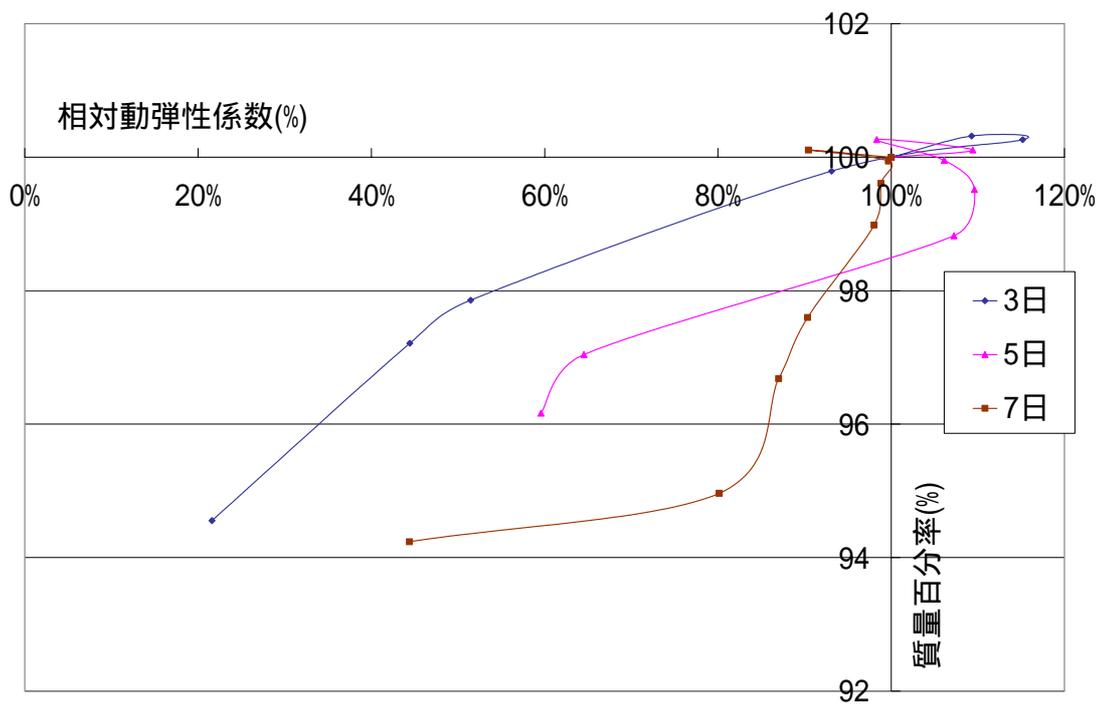


図 4.53 相対動弾性係数と質量百分率の関係(最低温度-15)

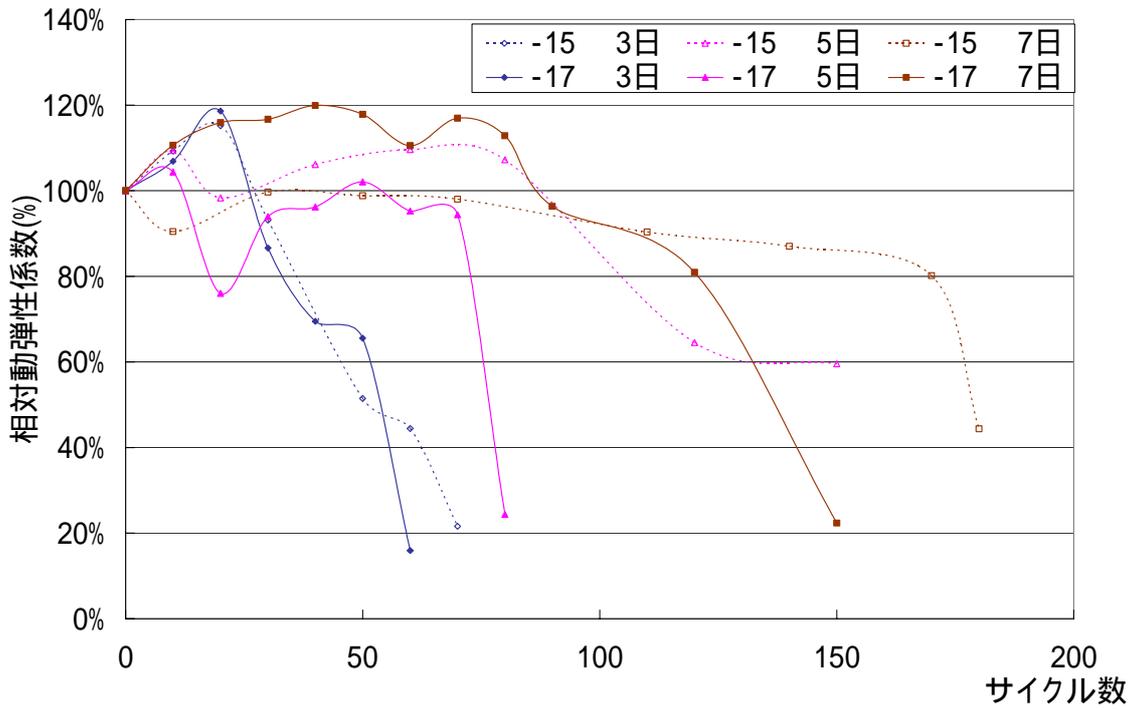


図 4.54 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係

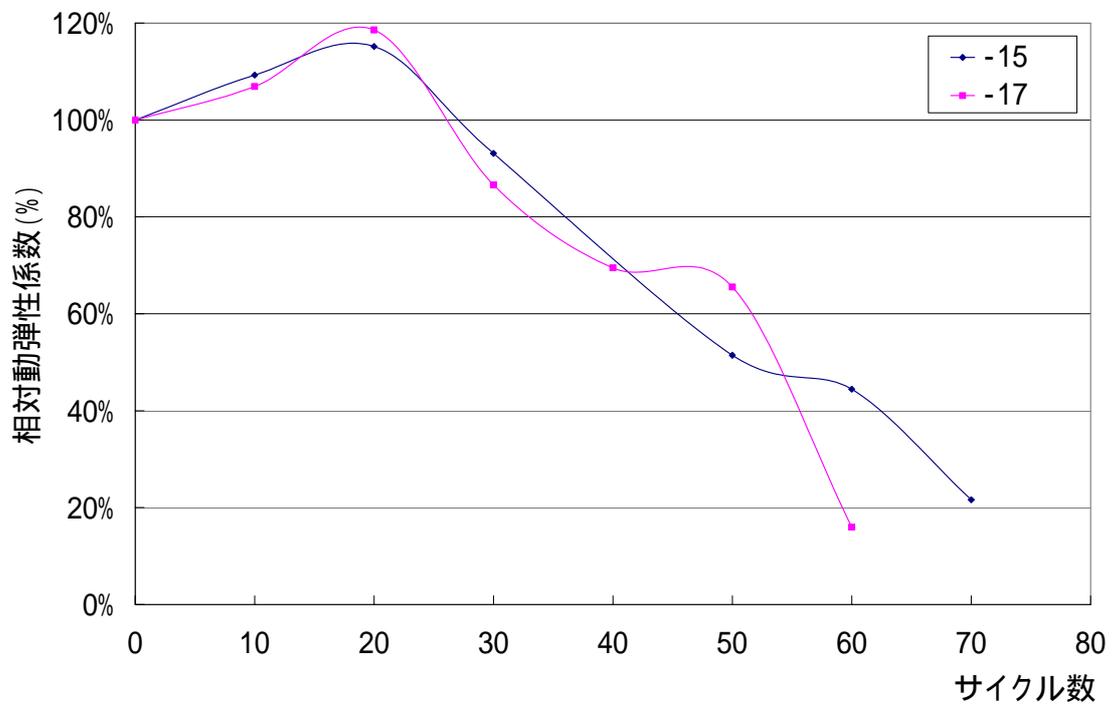


図 4.55 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係(開始材齢 3 日)

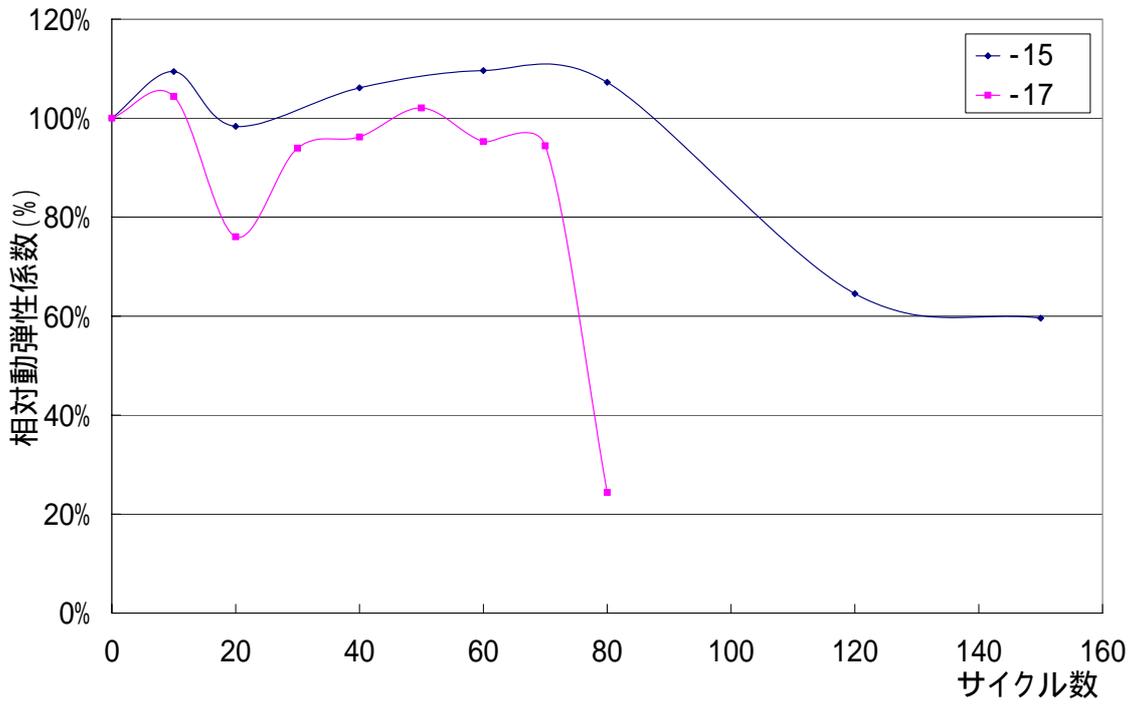


図 4.56 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係(開始材齢 5 日)

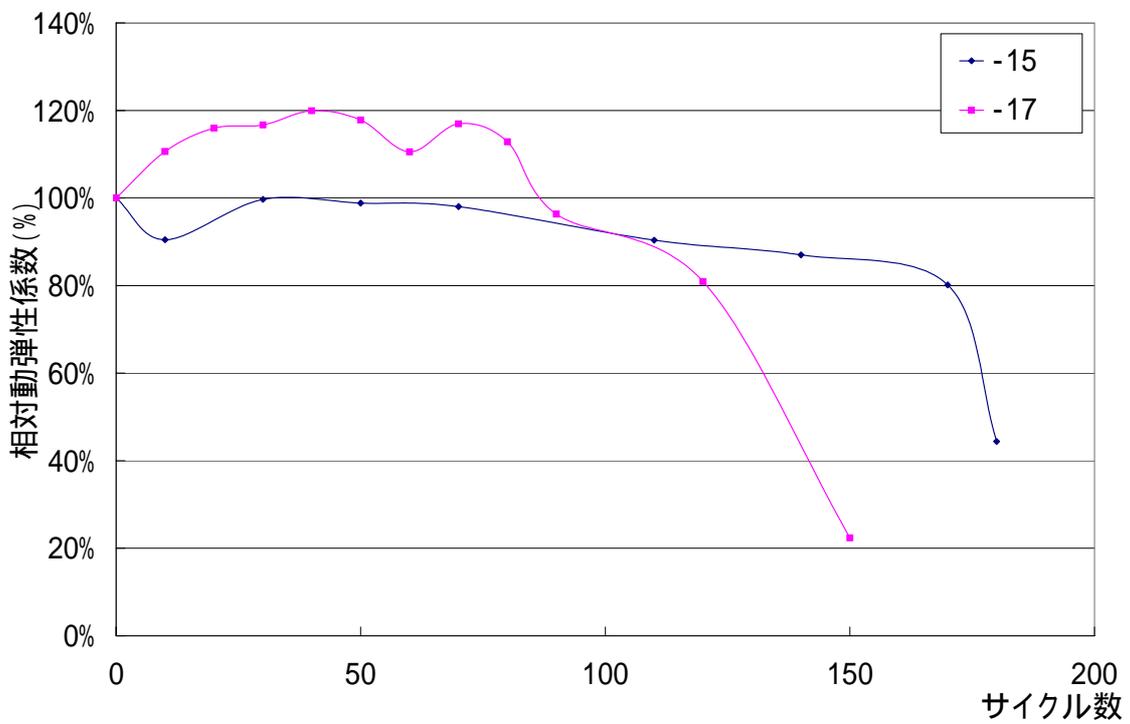


図 4.57 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係(開始材齢 7 日)

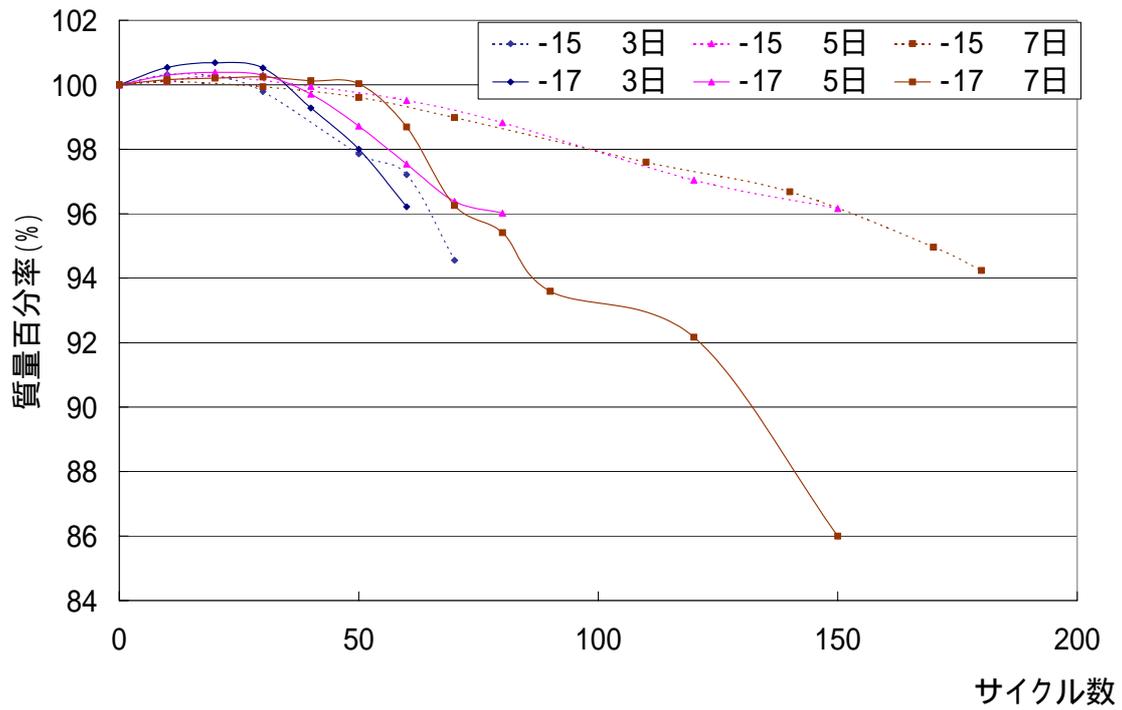


図 4.58 凍結融解サイクルと質量百分率の関係

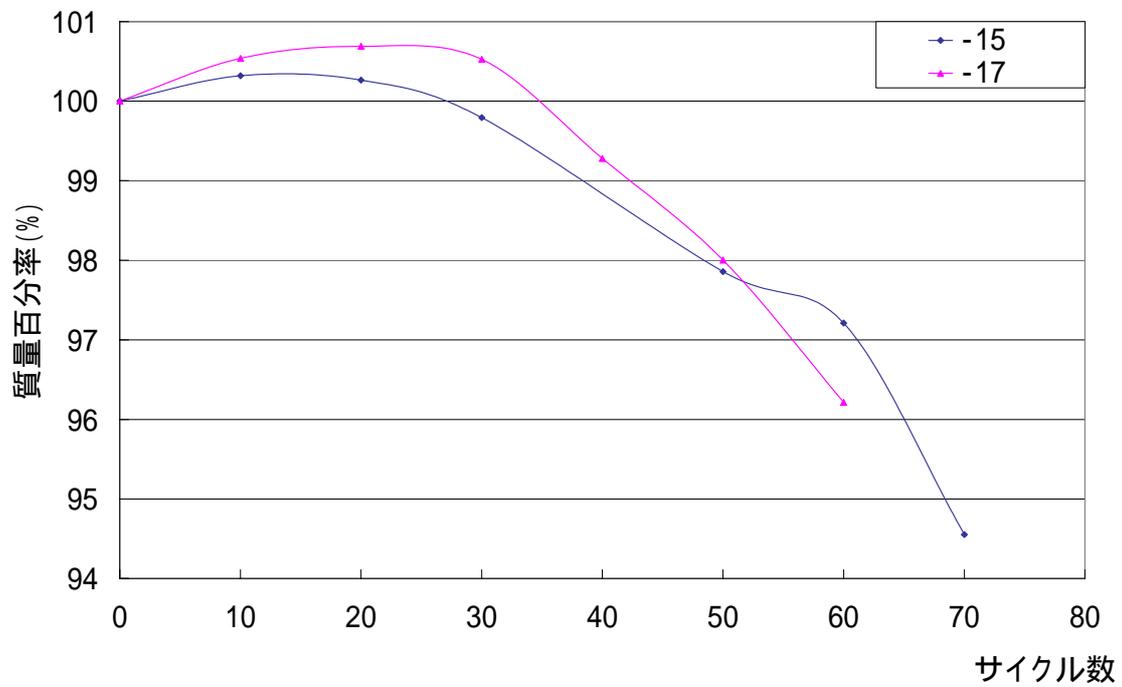


図 4.59 凍結融解サイクルと質量百分率の関係(開始材齢 3 日)

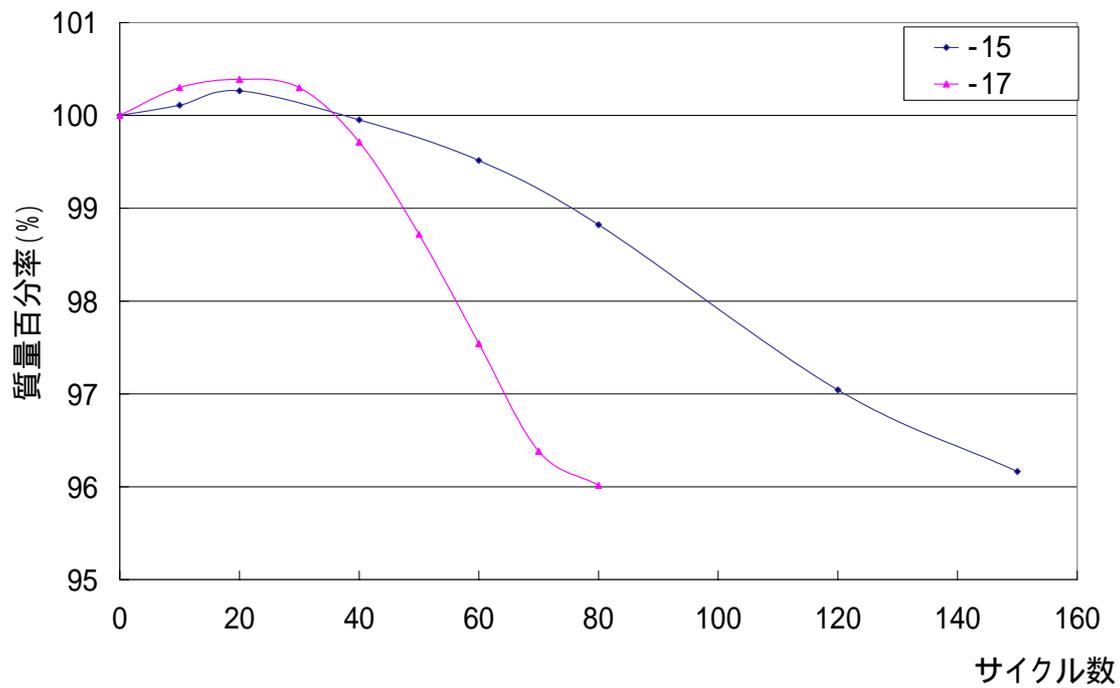


図 4.60 凍結融解サイクルと質量百分率の関係(開始材齢 5 日)

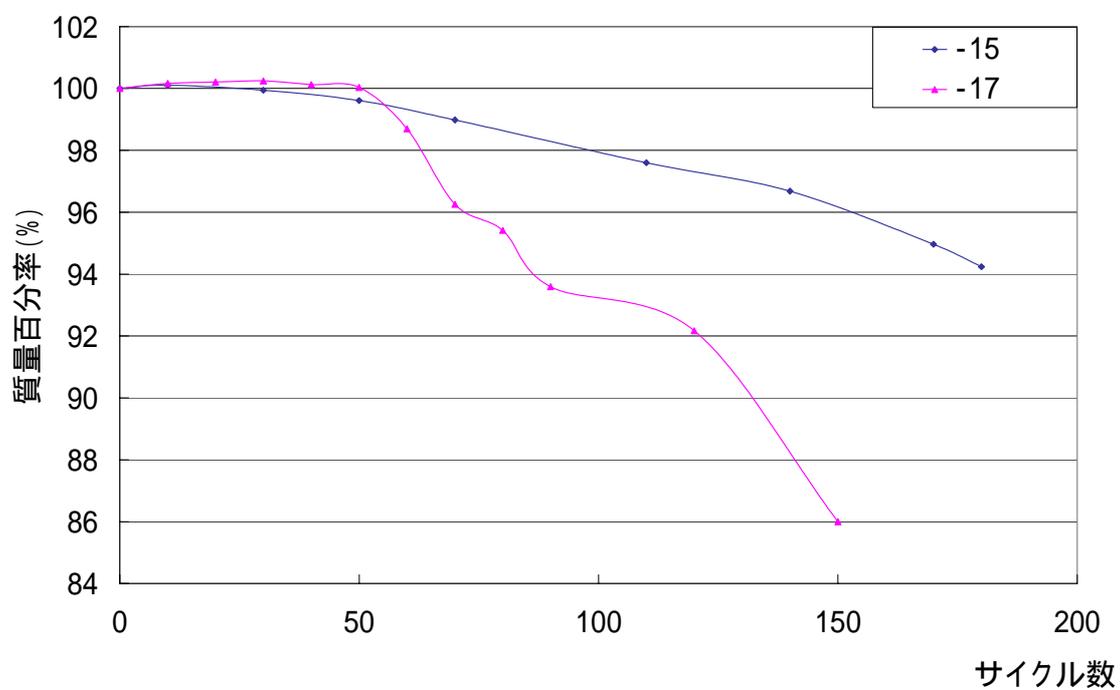


図 4.61 凍結融解サイクルと質量百分率の関係(開始材齢 7 日)

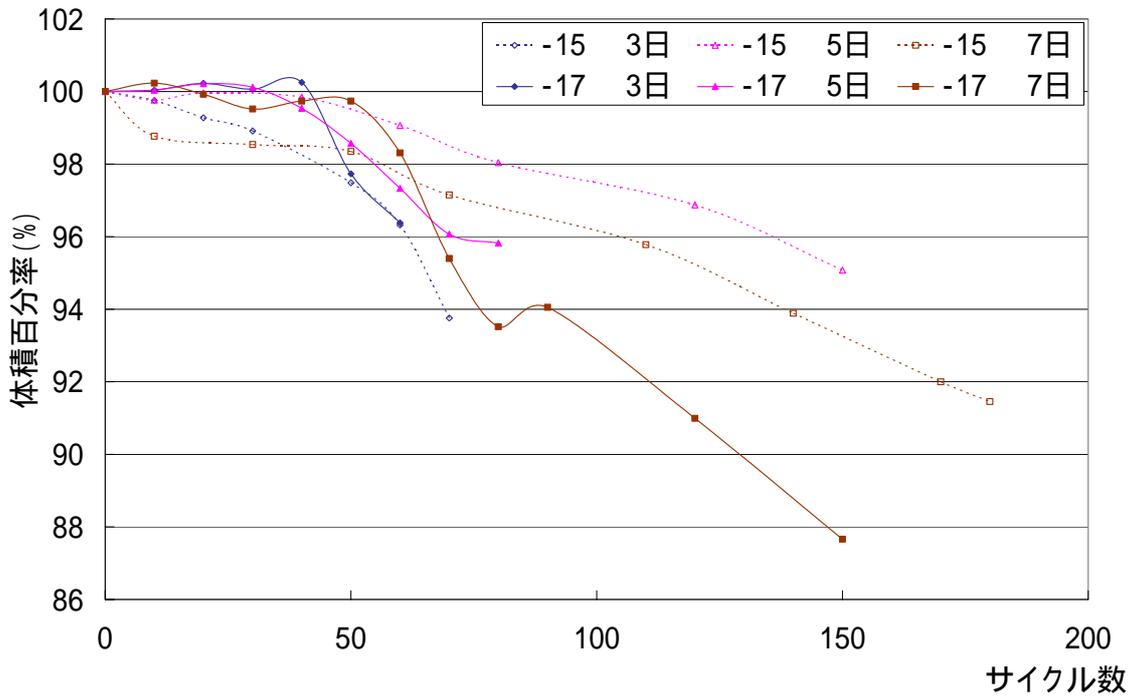


図 4.62 凍結融解サイクルと体積百分率の関係

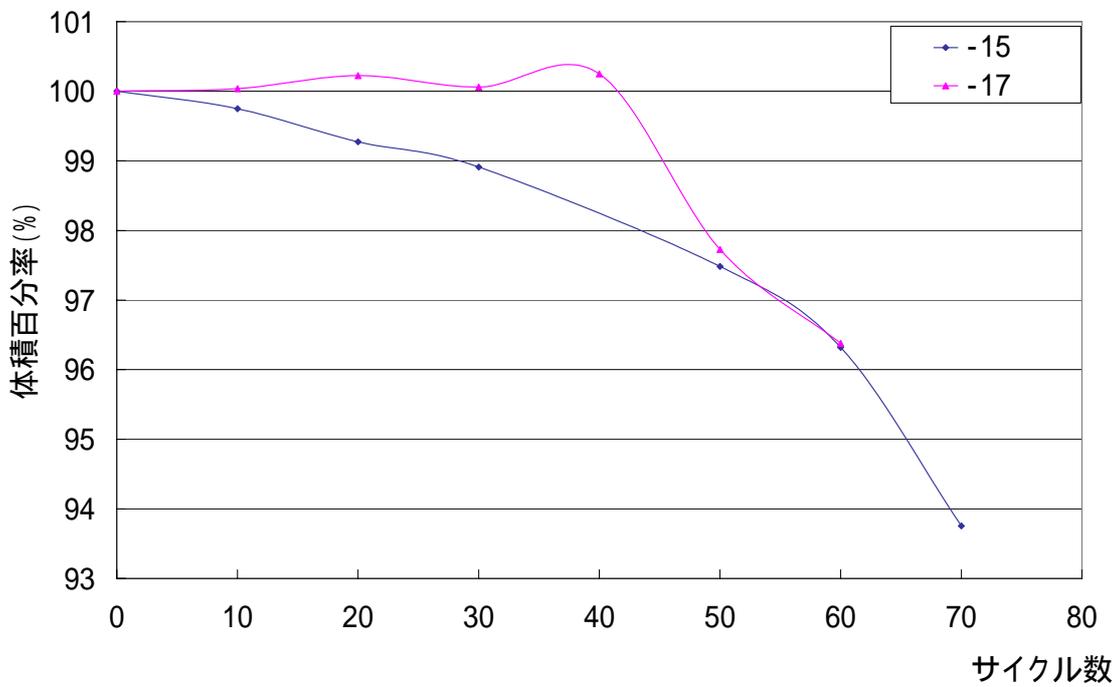


図 4.63 凍結融解サイクルと体積百分率の関係(開始材齢 3 日)

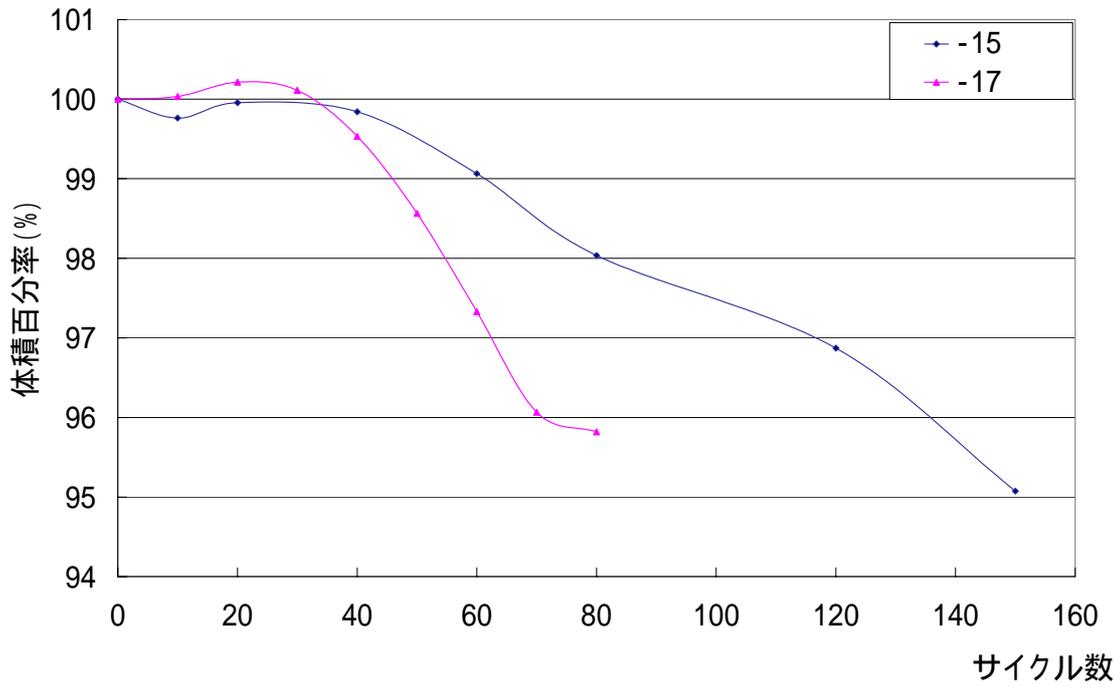


図 4.64 凍結融解サイクルと体積百分率の関係(開始材齢 5 日)

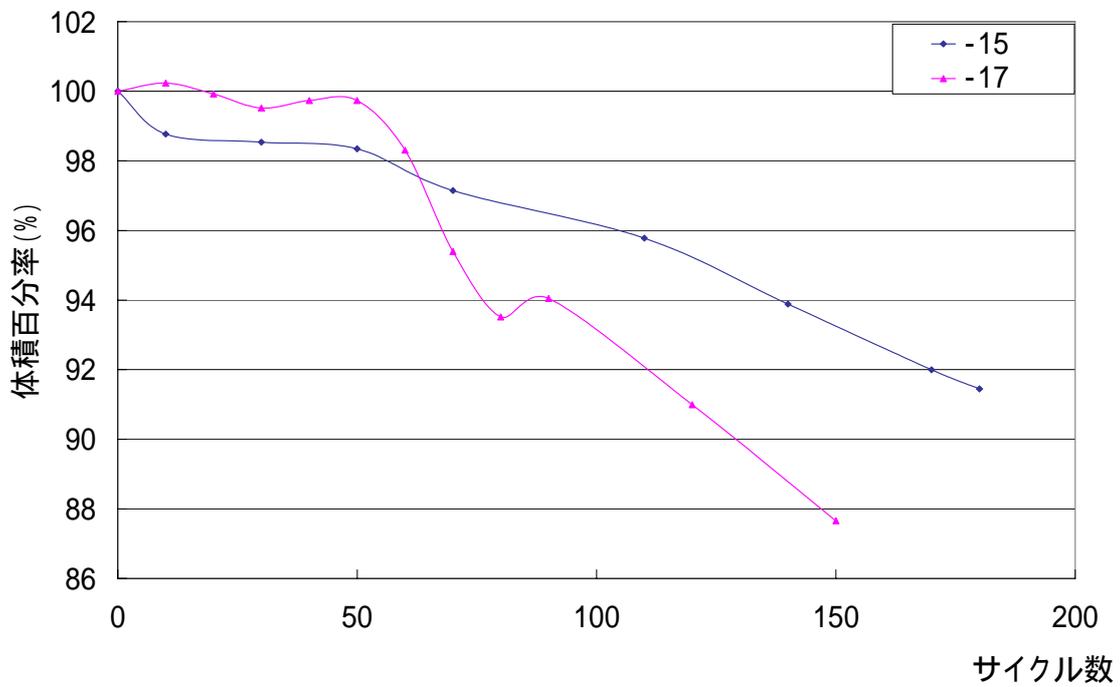


図 4.65 凍結融解サイクルと体積百分率の関係(開始材齢 7 日)

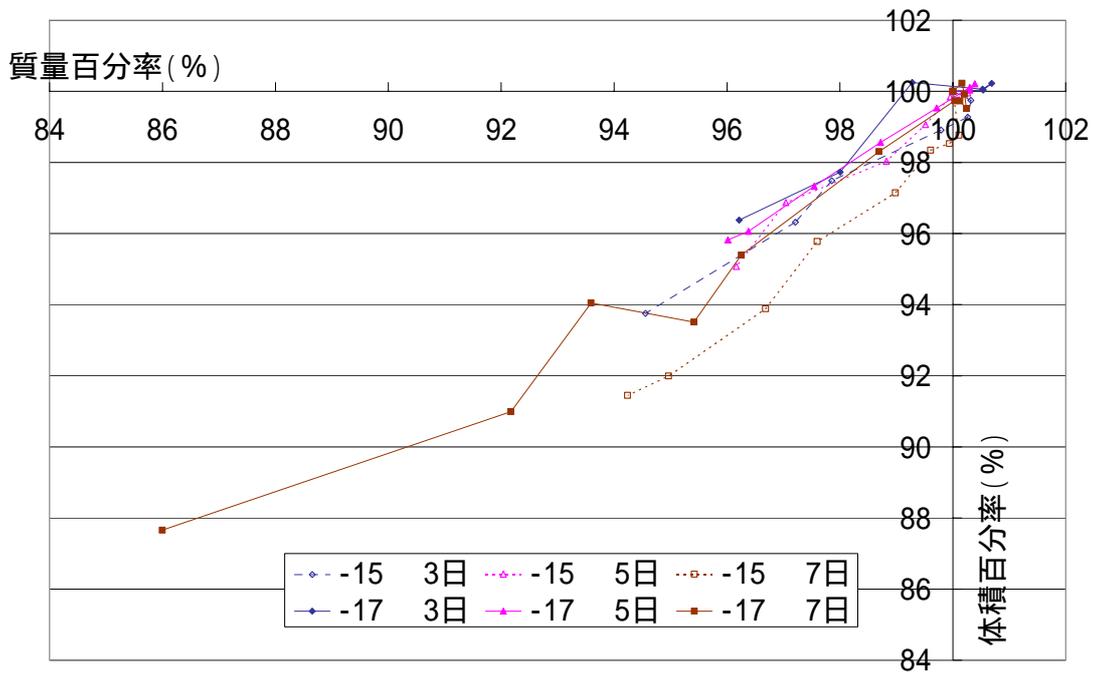


図 4.66 質量百分率と体積百分率の関係

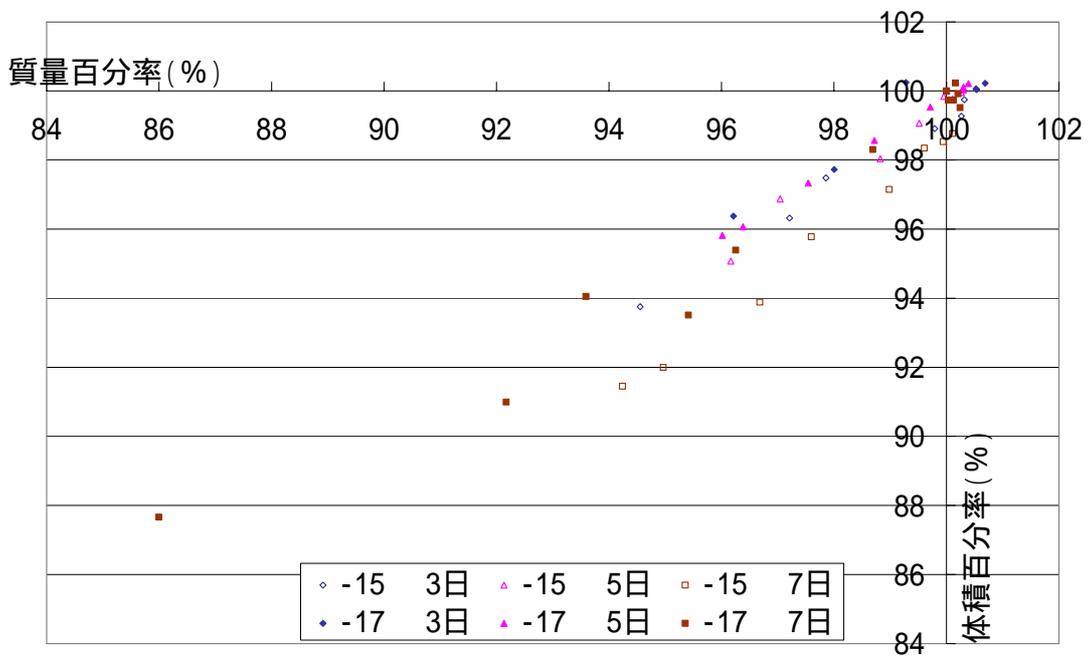


図 4.67 質量百分率と体積百分率の関係

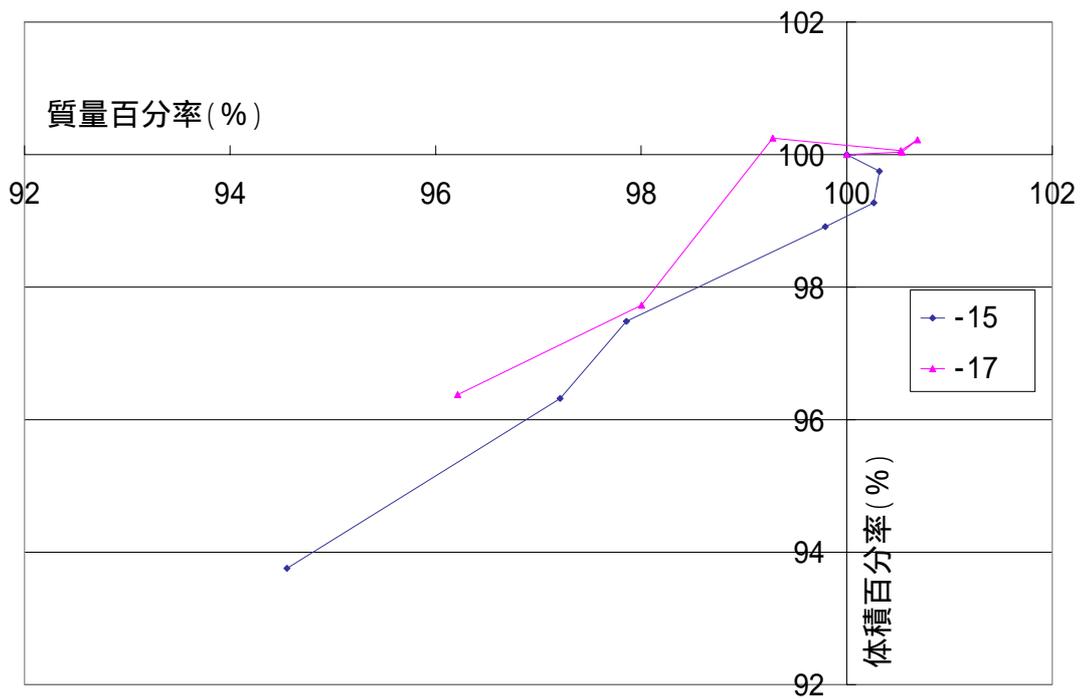


図 4.68 質量百分率と体積百分率の関係(開始材齢 3 日)

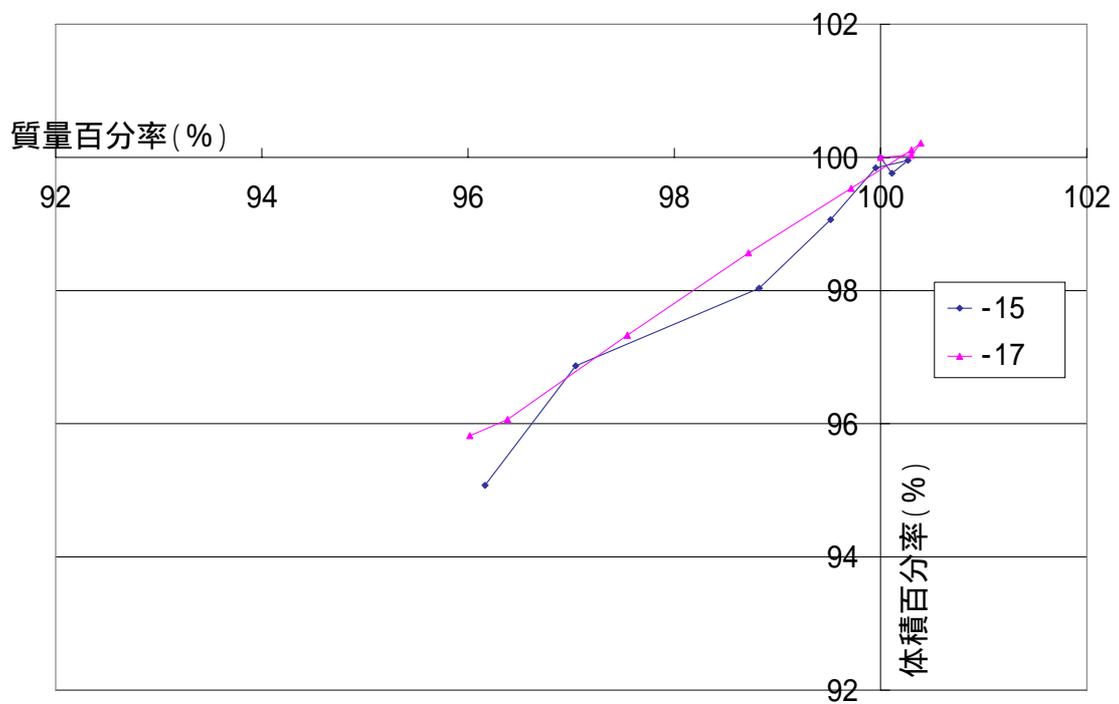


図 4.69 質量百分率と体積百分率の関係(開始材齢 5 日)

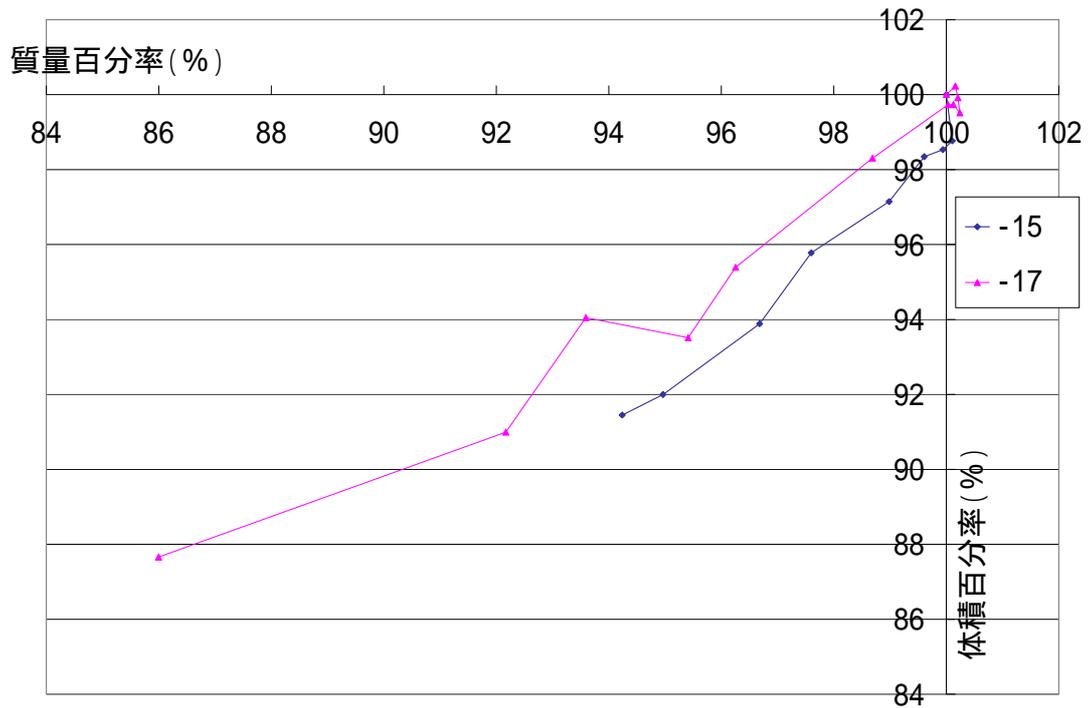


図 4.70 質量百分率と体積百分率の関係(開始材齢 7 日)

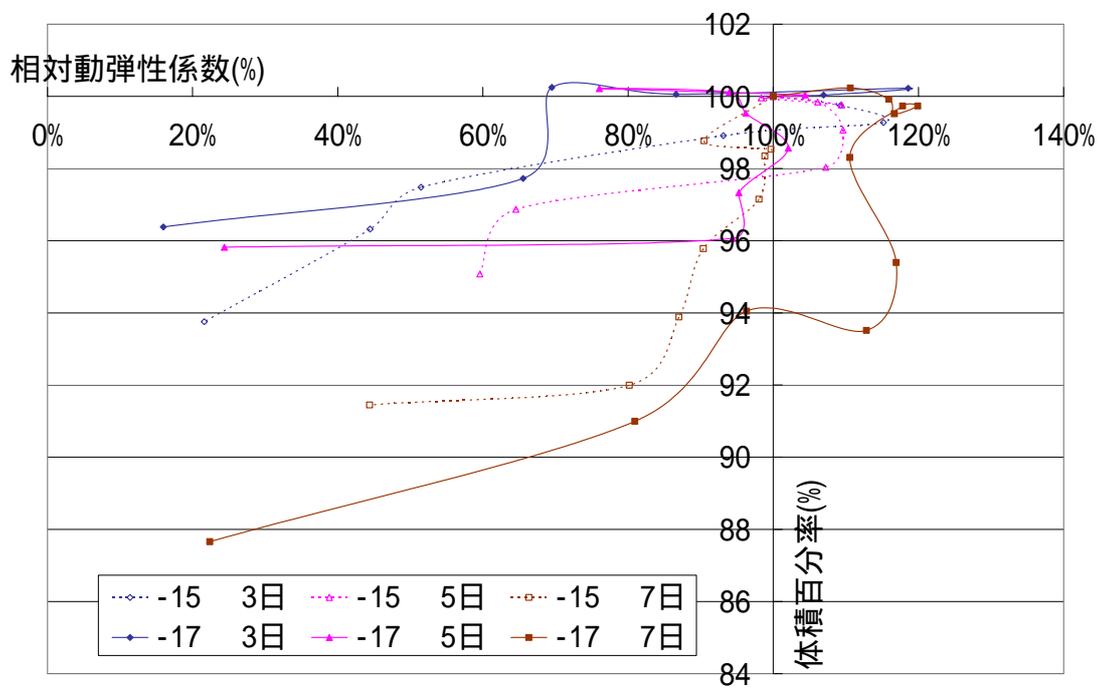


図 4.71 相対動弾性係数と体積百分率の関係

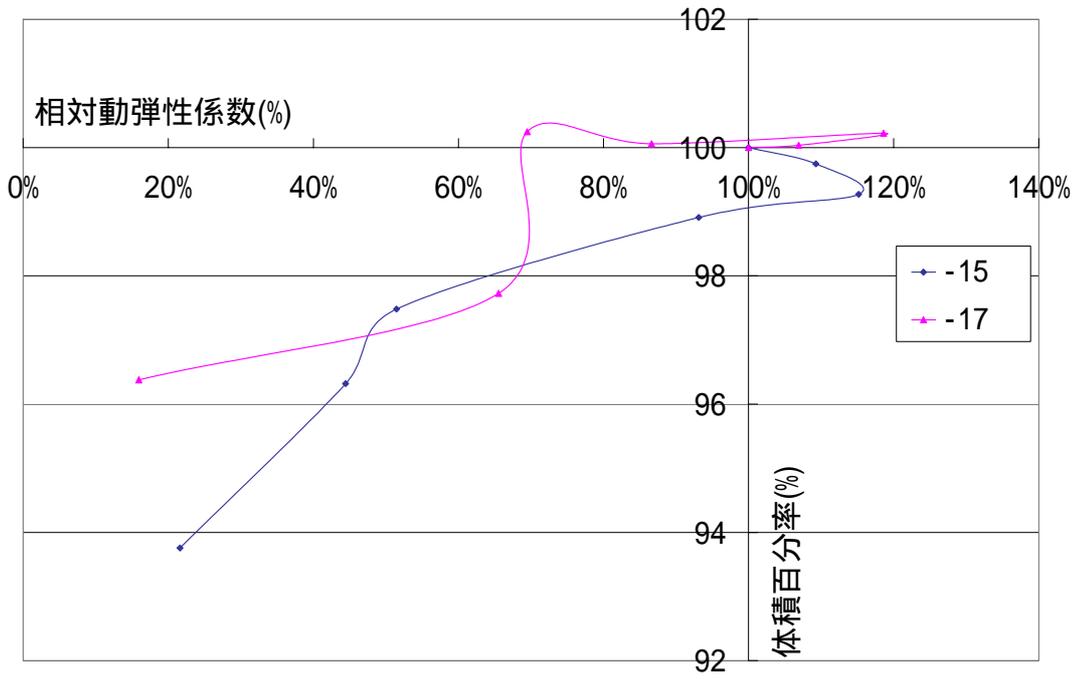


図 4.72 相対動弾性係数と体積百分率の関係(開始材齢 3 日)

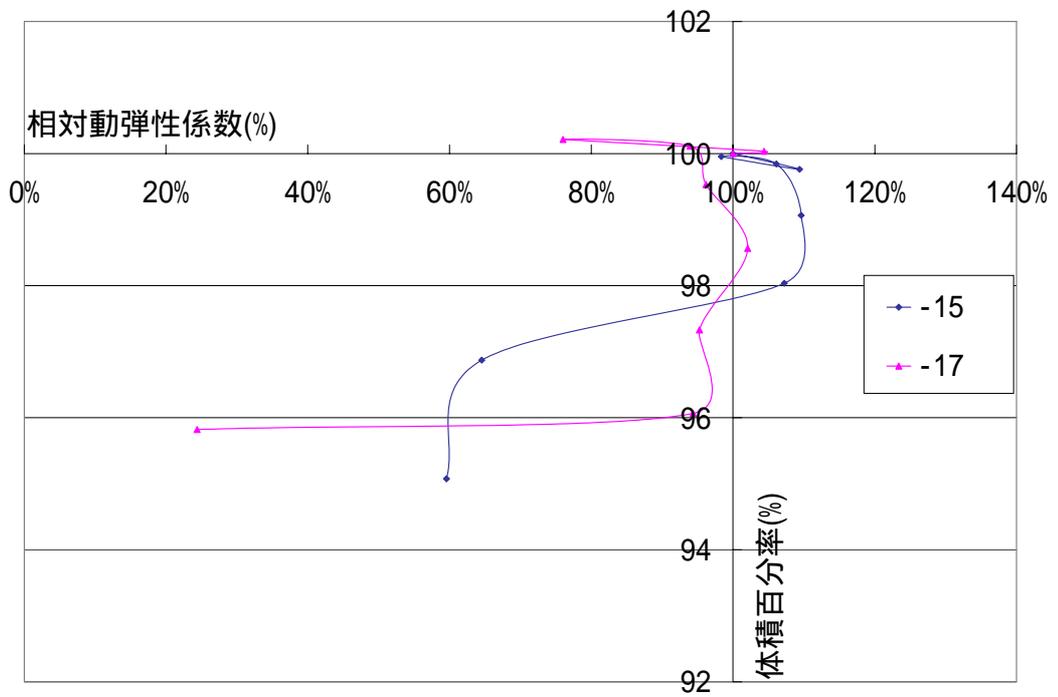


図 4.73 相対動弾性係数と体積百分率の関係(開始材齢 5 日)

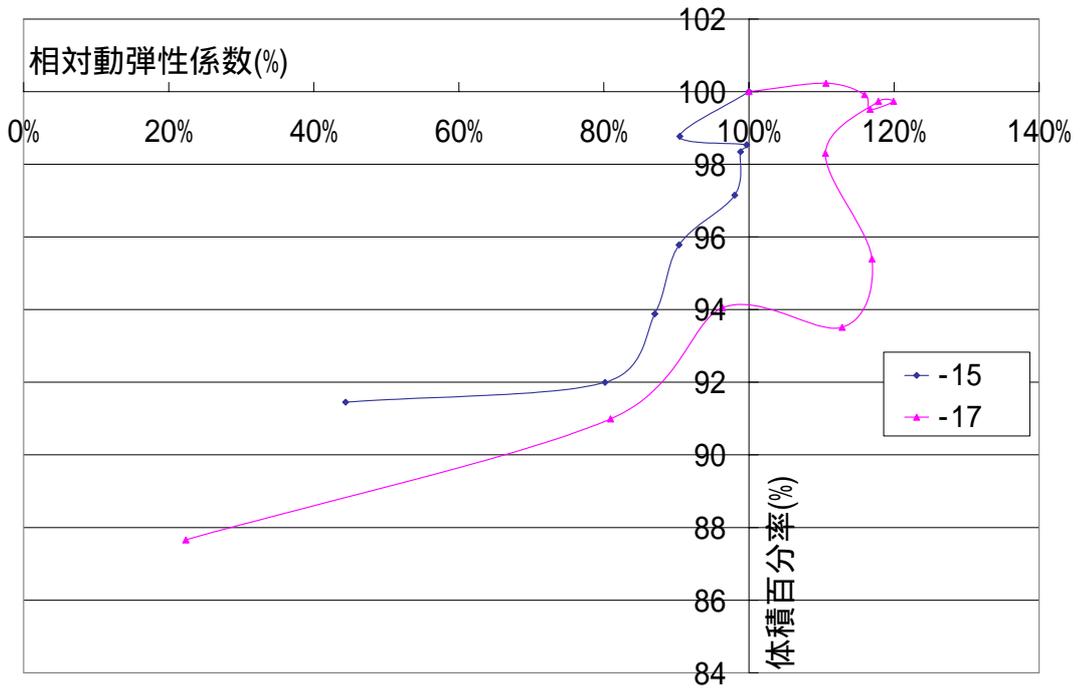


図 4.74 相対動弾性係数と体積百分率の関係(開始材齢 7 日)

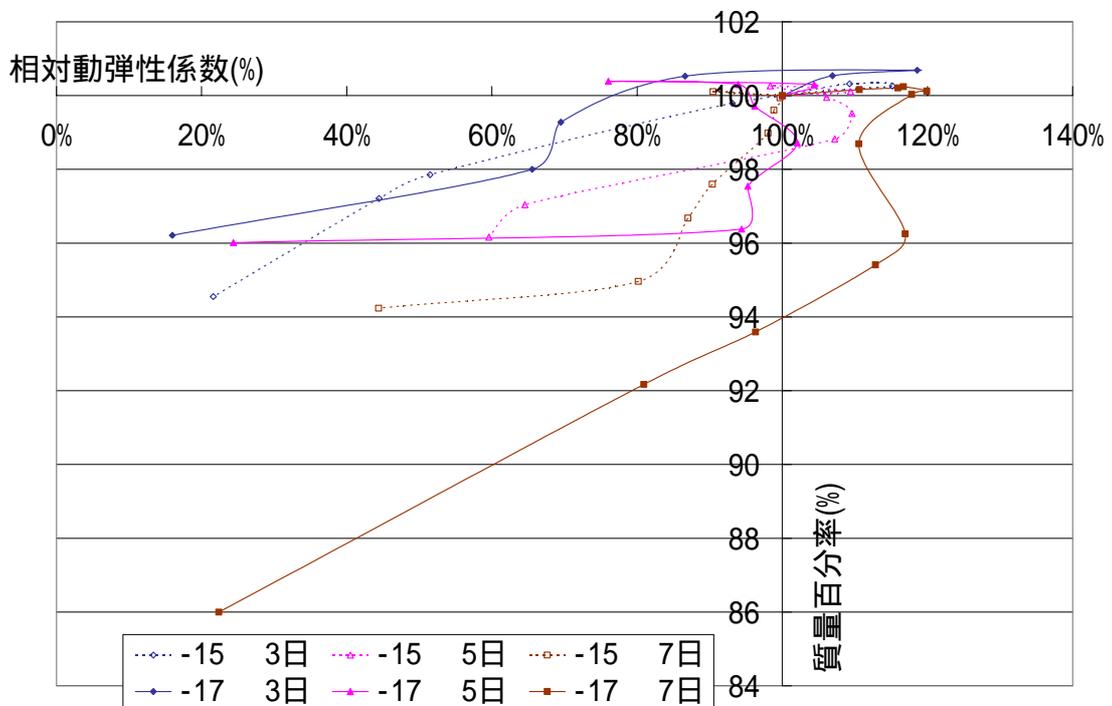


図 4.75 相対動弾性係数と質量百分率の関係

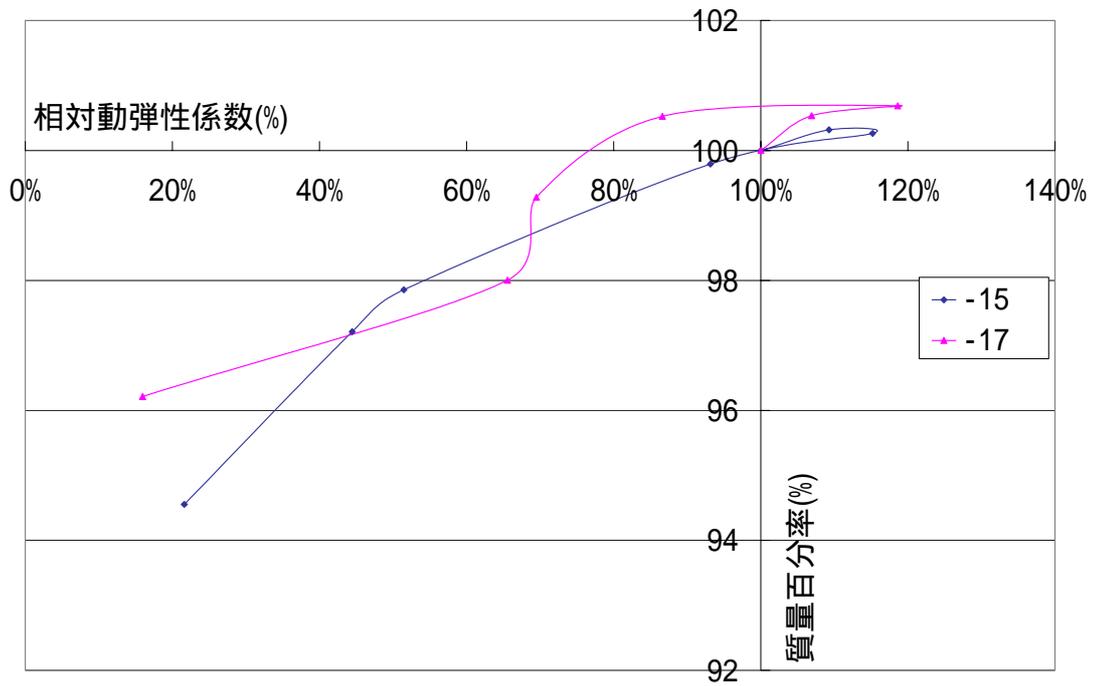


図 4.76 相対動弾性係数と質量百分率の関係(開始材齢 3 日)

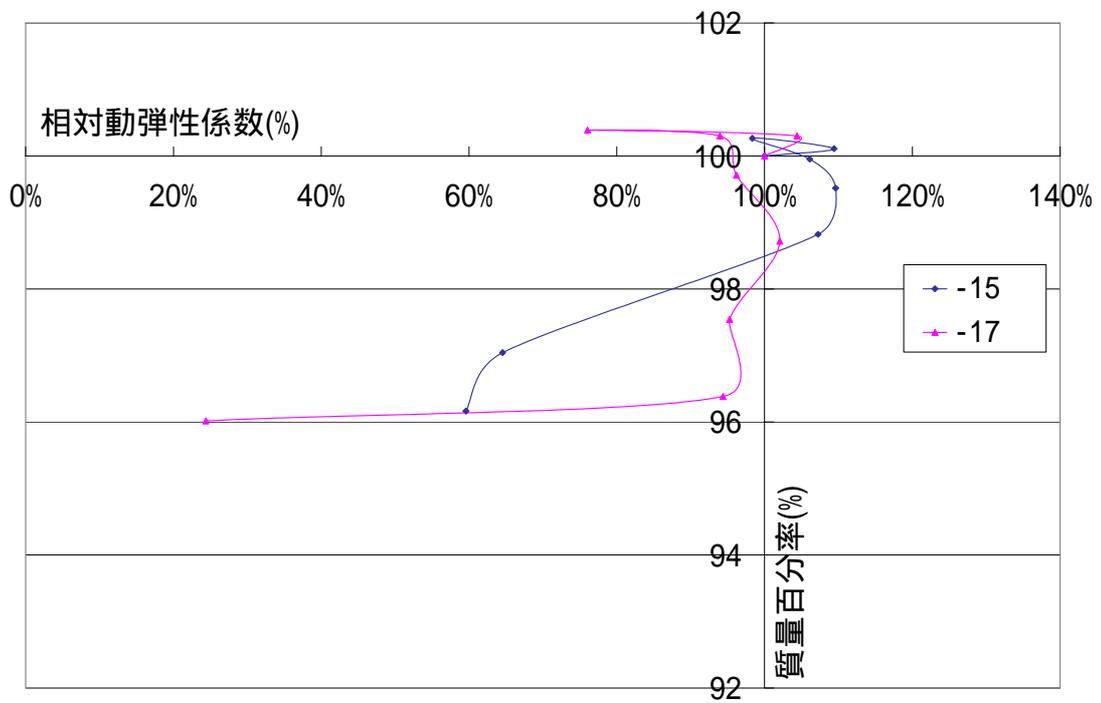


図 4.77 相対動弾性係数と質量百分率の関係(開始材齢 5 日)

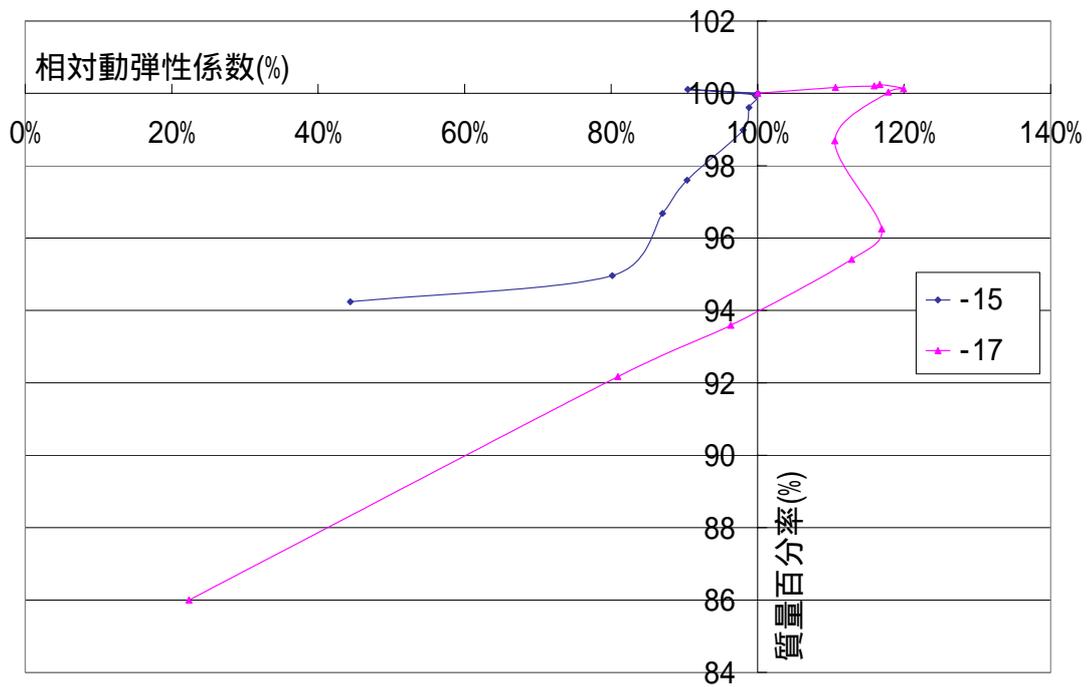


図 4.78 相対動弾性係数と質量百分率の関係(開始材齢 7 日)

第5章 凍結融解試験における劣化指標としての非破壊試験

5.1 研究目的と構成

本研究は、凍結融解試験を行ったコンクリートの圧縮強度試験、引張強度試験を行い、第4章で得られた非破壊試験データと標準水中養生供試体の強度試験と比較することで、凍結融解試験がコンクリートの力学的特性に与える影響を解明することを目的とする。

試験対象とするコンクリートは、W/C=65%とし、試験開始材齢を変化させることとした。また、凍結融解最低温度を-15 とした。

5.2 研究方法

5.2.1 圧縮強度試験

圧縮強度試験用供試体は、JIS A 1132 “コンクリートの強度試験用供試体の作り方” に準拠して作製した。供試体は 100×200mm の円柱供試体とし、供試体の上面はセメントペーストによるキャッピングを行い供試体軸に垂直な平面に仕上げた。圧縮強度試験は、JIS A 1108 “コンクリートの圧縮強度試験” に準拠して行った。

5.2.2 引張強度試験

引張強度試験用供試体は、JIS A 1132 “コンクリートの強度試験用供試体の作り方” に準拠して作製した。供試体は 100×100mm の円柱供試体とした。引張強度試験は、JIS A 1113 “コンクリートの割裂引張強度試験方法” に準拠した。

5.2.3 試験ケース

本研究は凍結融解試験の温度を-15 から+4.5 とし、試験開始材齢を3日、5日、7日とした。試験ケースを表5.1に示す。

表 5.1 試験ケース

凍結最低温度	-15	
W / C	65%	
強度試験 試験開始材齢	圧縮強度試験	引張強度試験
3日		
5日		
7日		

また、試験開始材齢それぞれに対して、選定したサイクル毎に凍結融解試験下の供試体を取り出し、圧縮強度試験、引張強度試験を2本ずつ行った。表 5.2 に選定したサイクルを示す。

表 5.2 選定したサイクル

試験開始材齢										
3日	サイクル	0	10	30	50	60	70			
	材齢	3	5	10	14	16	21			
5日	サイクル	0	10	20	40	60	120	150		
	材齢	5	10	14	16	21	35	39		
7日	サイクル	0	10	30	50	70	110	140	170	180
	材齢	7	10	16	21	24	35	39	45	47

5.3 試験結果

5.3.1 凍結融解下における圧縮強度の変化

図 5.1, 表 5.3 に水中養生供試体の圧縮強度試験結果, 図 5.2, 表 5.4 に水中養生供試体の引張強度試験結果を示す。

表 5.3 水中養生供試体の圧縮強度

		圧縮強度 (N/mm ²)			
W/C		50%	65%	80%	110%
材齢					
1日			7.01		
3日			9.86		
5日			12.2		
7日		24.1	13.3	8.00	3.55
14日		27.3	18.8	11.2	5.39
28日		29.8	21.3	12.4	6.36

表 5.4 水中養生供試体の引張強度

		引張強度 (N/mm ²)			
材齡 \ W/C		50%	65%	80%	110%
1 日					
3 日			1.35		
5 日			1.46		
7 日		2.23	1.88	1.17	0.61
14 日		2.36	2.33	1.40	0.83
28 日		2.91	2.61	1.63	0.81

図 5.3 に材齡と圧縮強度の関係、図 5.4 にサイクル数と圧縮強度の関係、図 5.5 から図 5.7 に試験開始材齡の変化による圧縮強度と相対動弾性係数の変化を示す。

図 5.3、図 5.4 よりいずれの試験開始材齡においても圧縮強度の増加傾向がみられたが、水中養生供試体の無劣化の供試体と比較した場合には劣化の影響を確認することができた。強度が増加傾向にあるのは、供試体の劣化速度よりも強度発現の影響が大きく出たためであると考える。また、試験開始材齡 5 日、7 日では 40 サイクル、材齡 16 日以降ではほぼ同様な変化を示しており、圧縮強度がある一定値に達した後は平衡状態を保ち、最終的に減少する結果となった。

図 5.5 から図 5.7 より、相対動弾性係数と圧縮強度には相関性がみられず、相対動弾性係数が低下した場合においても圧縮強度の増加が見られた。これは、凍結融解によるコンクリート内部の組織の崩壊や微細なひび割れによって、コンクリート内の組織が弛緩し、組織の健全性が損なわれているために相対動弾性係数は低下したが、比較的劣化が少ないと予想される中心部分にはコアが残っており、組織の健全性が失われていたとしても強度発現により圧縮強度が増加したものと考えられる。

5.3.2 凍結融解下における引張強度の変化

図 5.8 に材齡と圧縮強度の関係、図 5.9 にサイクル数と圧縮強度の関係、図 5.10 から図 5.12 に試験開始材齡の変化による圧縮強度と相対動弾性係数の変化を示す。

図 5.8、図 5.9 より、試験開始材齡 3 日においてはサイクルを重ねる毎に引張強度の減少傾向がみられたが、試験開始材齡 5 日と 7 日では、初期強度に比べて多少であるが強度の増加傾向がみられた。このことより、凍結融解最低温度-15℃では試験開始材齡 5 日以前の供試体では強度の増進がみられないと考える。試験開始材齡 5 日では、若干の増加傾向にあるものの 120 サイクル、材齡 35 日以降で急激な強度低下がみられた。試験開始材齡 7 日では最初の 10 サイクルで強度が低下するものの、その後増加傾向にあり、120 サイクル、

材齢 35 日以降で急激な強度低下がみられ、それ以降は若干の強度増加がみられた。また、水中養生供試体の無劣化の供試体と比較した場合にはすべてのパターンにおいて強度劣化の影響を確認することができ、いずれも初期強度より低い値で破壊に至っている。

図 5.10 から図 5.12 より、試験開始材齢 3 日のものについては、相対動弾性係数の低下とともに引張強度も低下する傾向がみられた。また、多少のずれがあるものの試験開始材齢 5 日、7 日においても相対動弾性係数の低下とともに引張強度も低下する傾向にある。これは、凍結融解によるコンクリート内部の組織の崩壊や微細なひび割れによって、コンクリート内の組織が弛緩し、組織の健全性が損なわれ、引張強度と類似した傾向にあるのではないかと考えられる。

5.3.3 初期強度と破壊サイクル数の関係

図 5.13 から図 5.17 に初期強度と破壊サイクル数の関係を示し、図 5.18 と図 5.19 に凍結融解最低温度の変化における初期強度と破壊サイクル数の関係を示す。

いずれの場合も初期強度と破壊サイクル数には非常に高い相関関係がみられた。それらの近似式と相関係数を表 5.5 に示す。凍結融解最低温度-17 では初期圧縮強度よりも初期引張強度の方が高い相関関係がみられたが、凍結融解最低温度-15 では、初期圧縮強度の方が初期引張強度よりも高い相関関係がみられた。また、図 5.18 の凍結融解最低温度-17 では相関係数が他と比較して小さな値となった。これは、試験開始材齢が若いことによる耐凍結融解性の低下、凍結融解最低温度が低いことによる劣化エネルギーの増加により、劣化メカニズムに相違がみられ、初期凍害的な劣化が起こり、破壊サイクル数に変化が生じ近似曲線との間に違いが生じたためと考える。

表 5.5 初期強度と破壊サイクル数の近似式と相関係数

試験開始材齢	凍結融解最低温度	初期強度	近似式	相関係数
全材齢	-17	圧縮	$y=14.7x-44.5$	0.901
		引張	$y=177x-106$	0.941
3.5.7 日	-15	圧縮	$y=38.2x-324$	0.988
		引張	$y=440x-524$	0.830
3.5.7 日	-17	圧縮	$y=23.4x-179$	0.770
		引張	$y=329x-390$	0.965

(y : 破壊サイクル数、 x : 初期強度を示す)

5.4 結論

凍結融解下のコンクリートの圧縮強度、引張強度は水中養生してあるコンクリートに比べ凍結融解作用を受けることで低下している。しかし、圧縮強度に関しては全ての開始材齢において凍結融解下でも強度発現はしており、試験開始材齢3日の圧縮強度に関しては、破壊サイクルに至った時でも強度の増加傾向がみられた。また、試験開始材齢3日の引張強度は増加することなく減少する一方であり、試験開始材齢5日、7日については類似した推移を示している。また、圧縮強度において破壊サイクルに達した際でも初期圧縮強度よりも高くなっているのに対して、引張強度においては破壊サイクルに達した際に初期引張強度よりも低い値となった。

相対動弾性係数と強度の関係については、凍結融解によるコンクリート内部の組織の崩壊や微細なひび割れによってコンクリート内の組織の弛緩により、組織の健全性は損なわれるが、比較的劣化が少ないと予想される中心部分にはコアが残っており、組織の健全性は失われていたとしても強度発現により圧縮強度は増加したのではないかと考えられる。引張強度に関しては、コンクリート内の組織の健全性損なわれているために強度の低下傾向がみられ、相対動弾性係数と相関性があると考ええる。

また、初期強度と破壊サイクルは非常に高い相関関係にあり、特に、初期圧縮強度よりも初期引張強度の方が高い相関関係にあり、劣化予測として初期強度を用いることが有効であると考ええる。

これらのことから、凍結融解作用を受けるコンクリートは、コンクリート内の組織の健全性を損なう劣化であり、圧縮強度よりも引張強度に大きな影響を及ぼすとともに、初期引張強度と破壊サイクル数とは非常に高い相関関係にあるので、劣化指標としては圧縮強度よりも引張強度が有効である。また、劣化予測に対して初期引張強度を用いることを提案する。

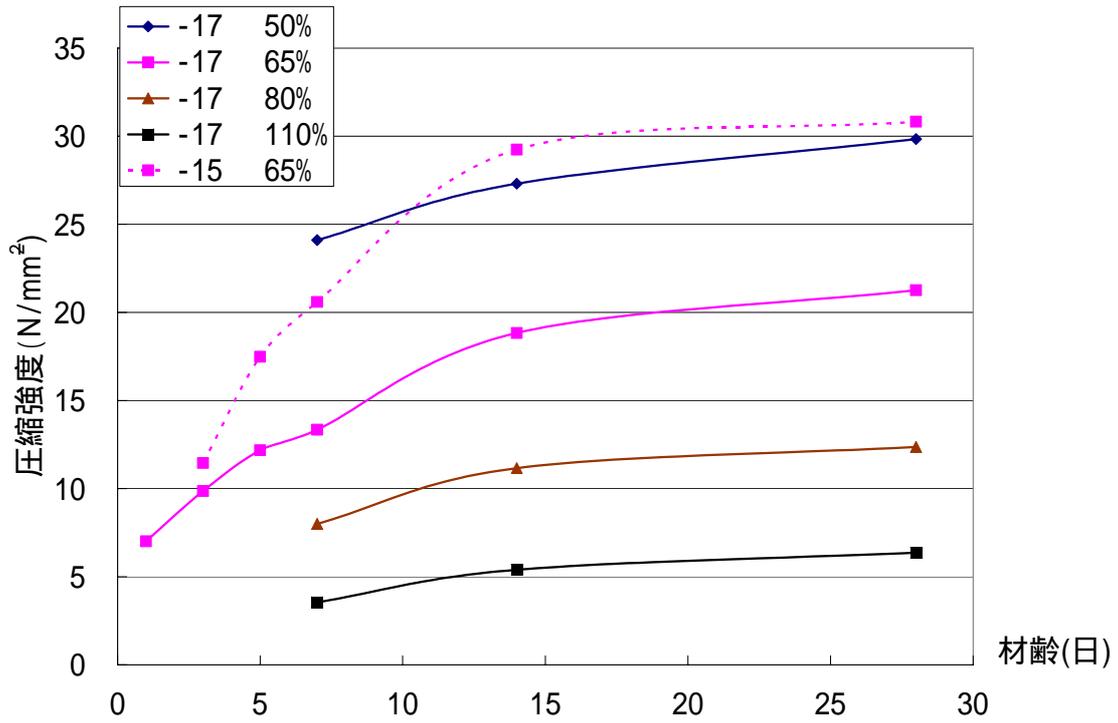


圖 5.1 標準水中養生壓縮強度試驗結果

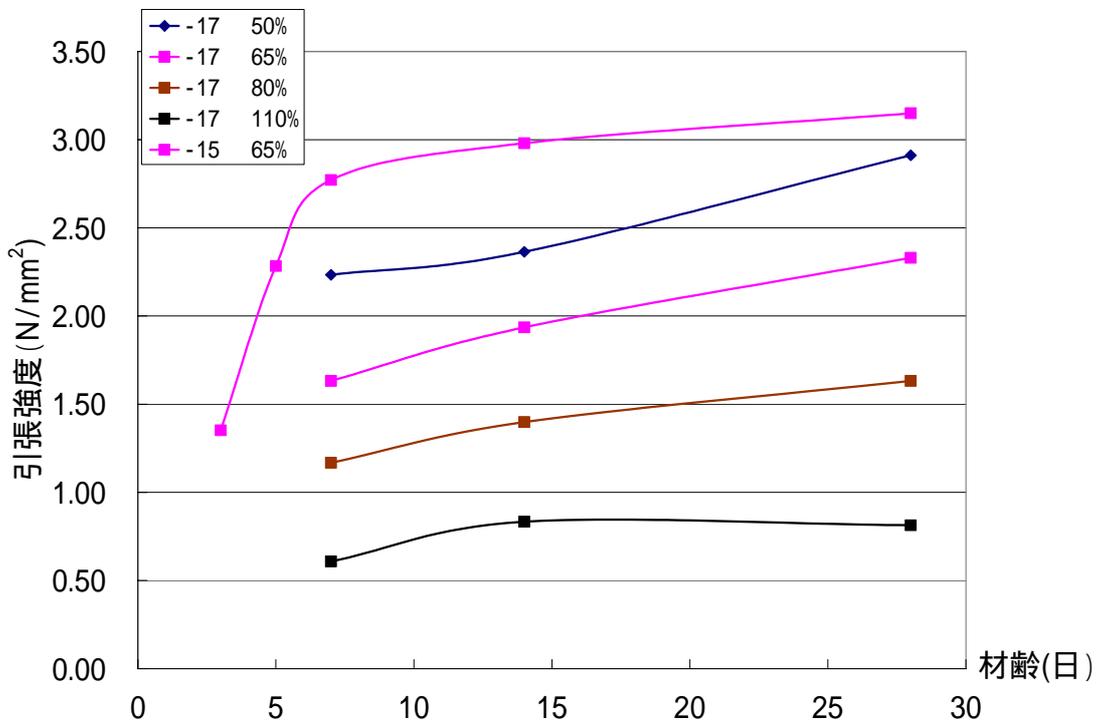


圖 5.2 標準水中養生引張強度試驗結果

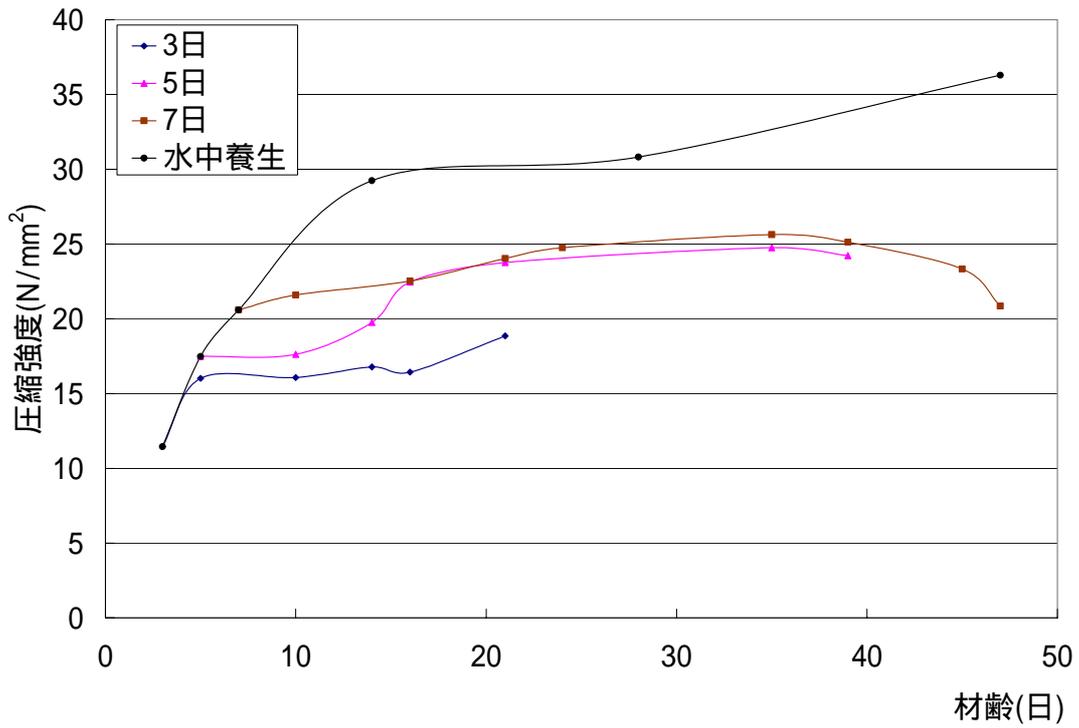


図 5.3 材齡と圧縮強度の関係

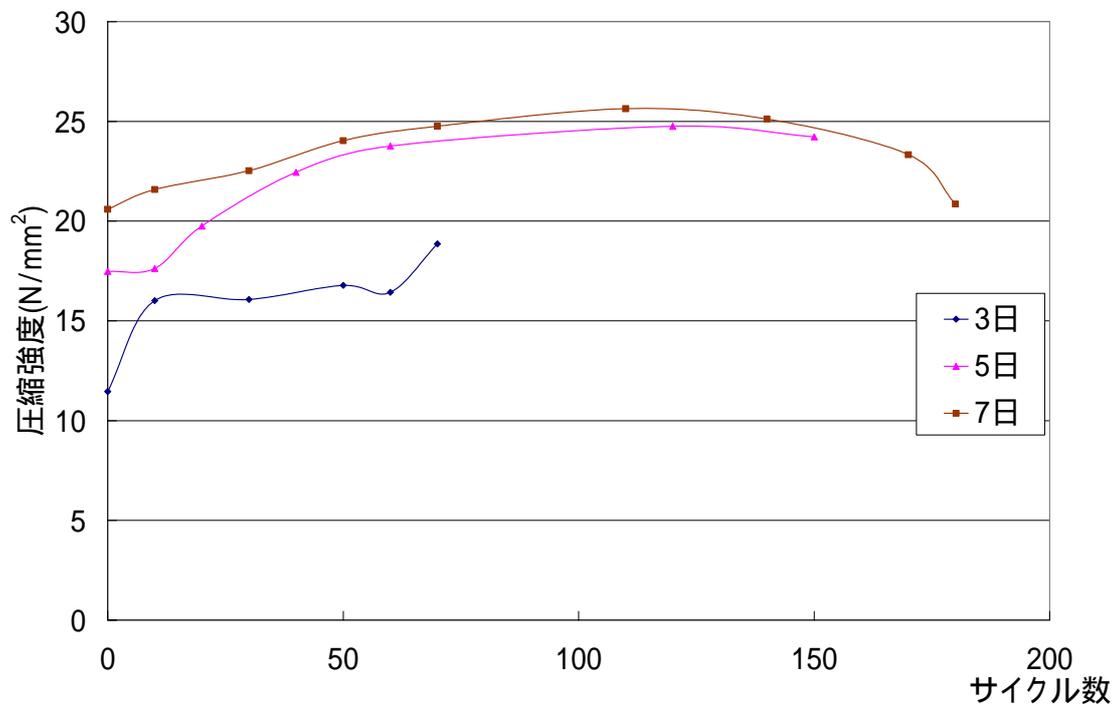


図 5.4 サイクル数と圧縮強度の関係

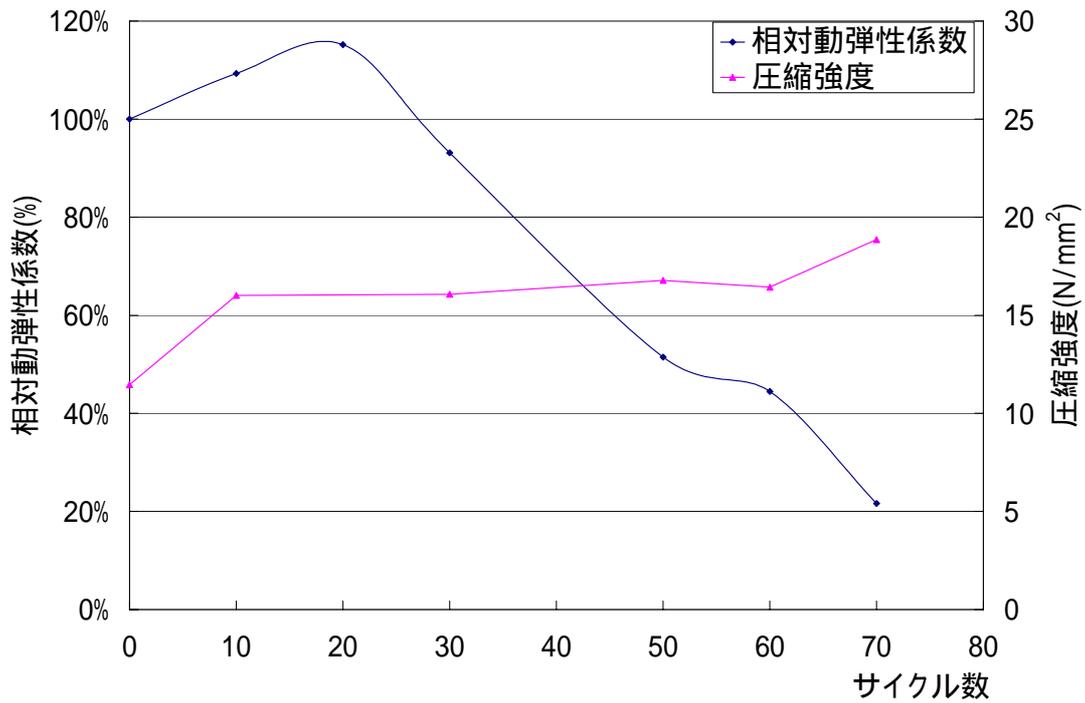


図 5.5 圧縮強度と相対動弾性係数の推移(試験開始材齢 3 日)

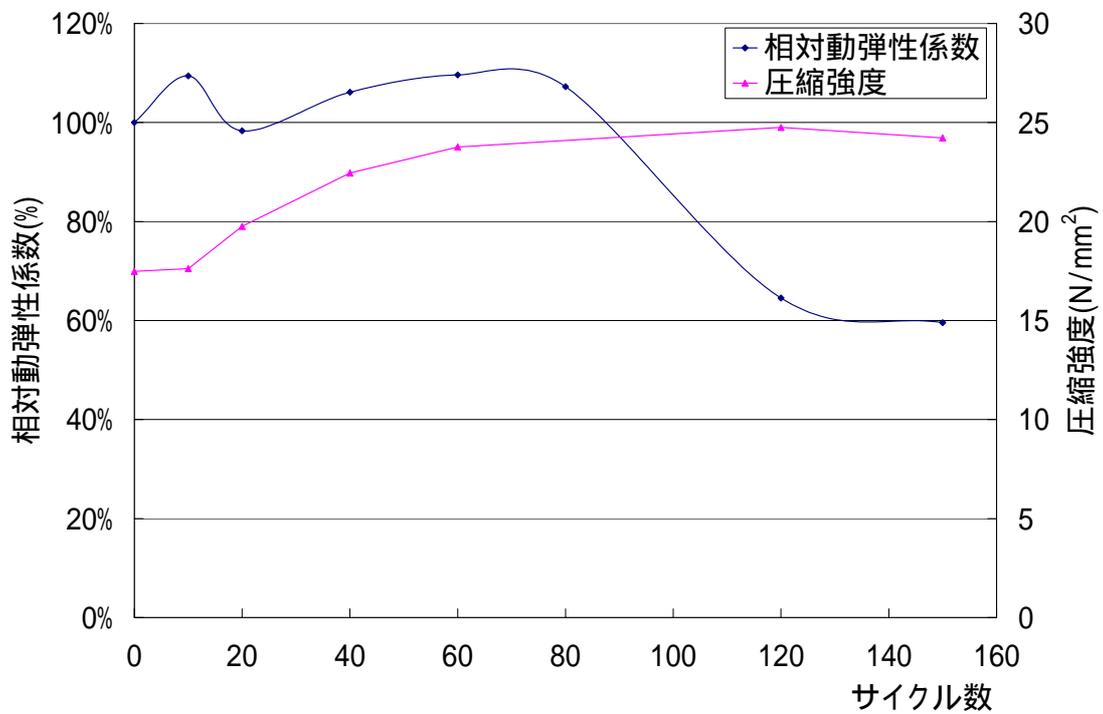


図 5.6 圧縮強度と相対動弾性係数の推移(試験開始材齢 5 日)

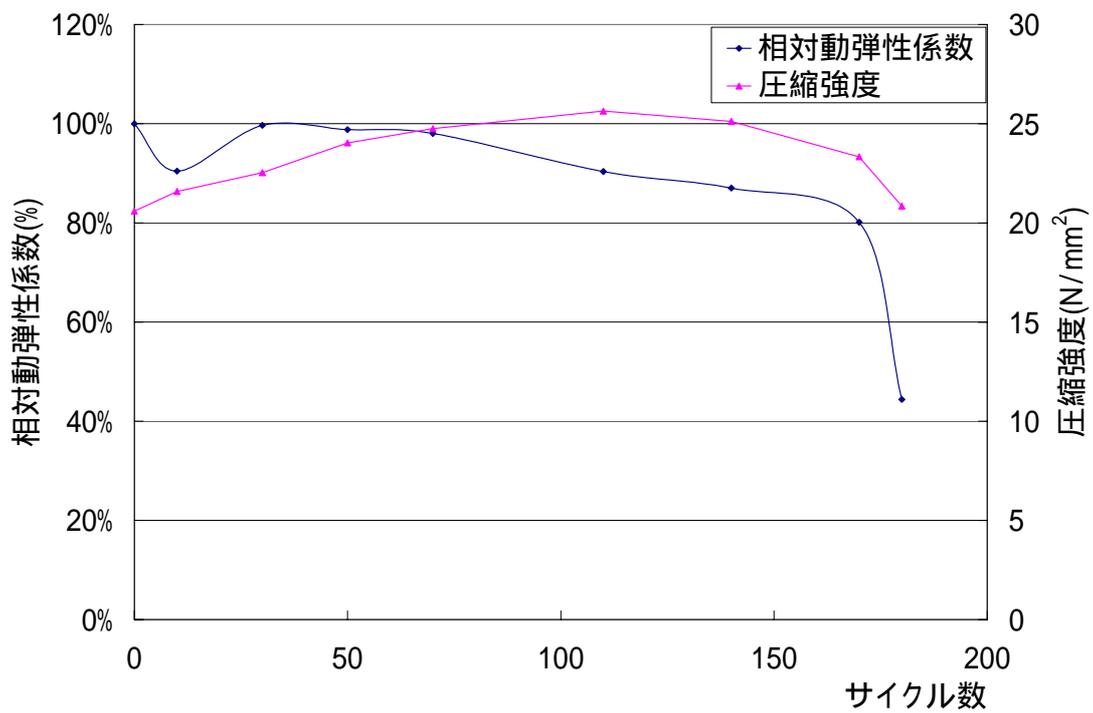


図 5.7 圧縮強度と相対動弾性係数の推移(試験開始材齢 7 日)

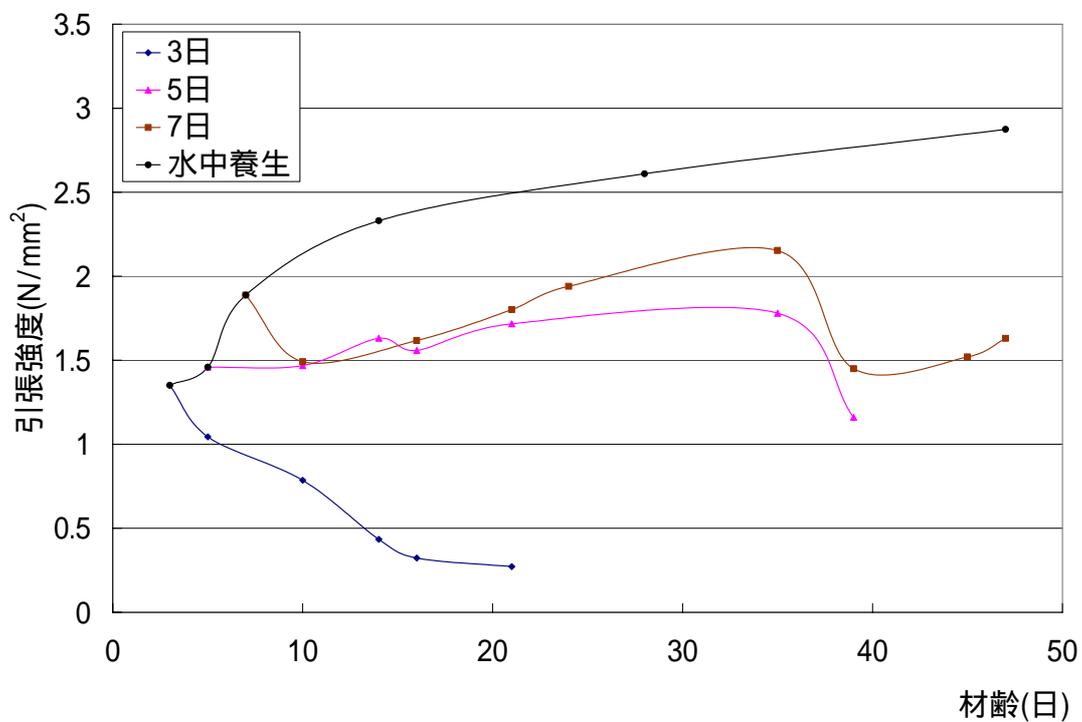


図 5.8 材齢と引張強度の関係

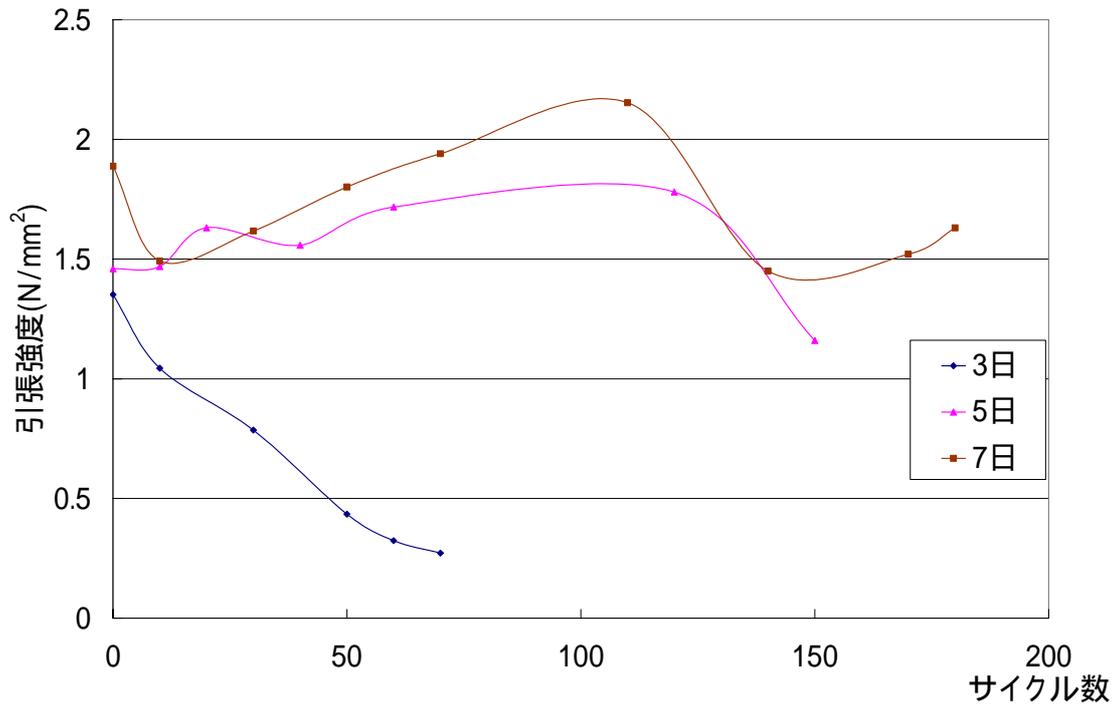


図 5.9 サイクル数と引張強度の関係

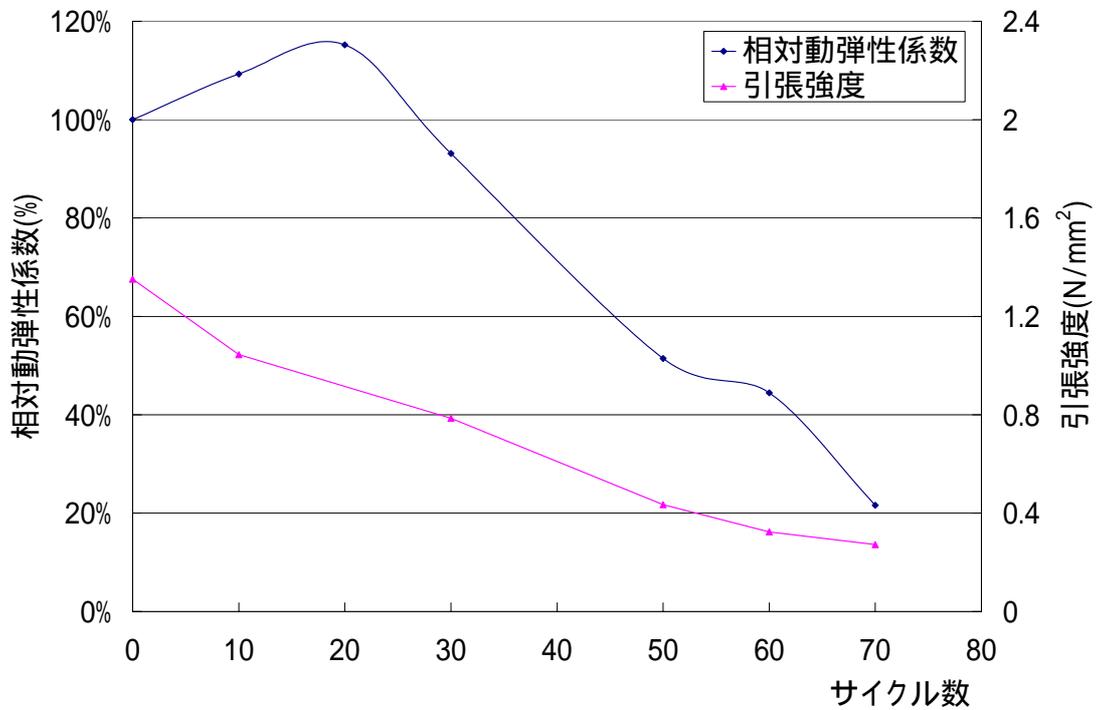


図 5.10 引張強度と相对動弾性係数の推移(試験開始材齢 3 日)

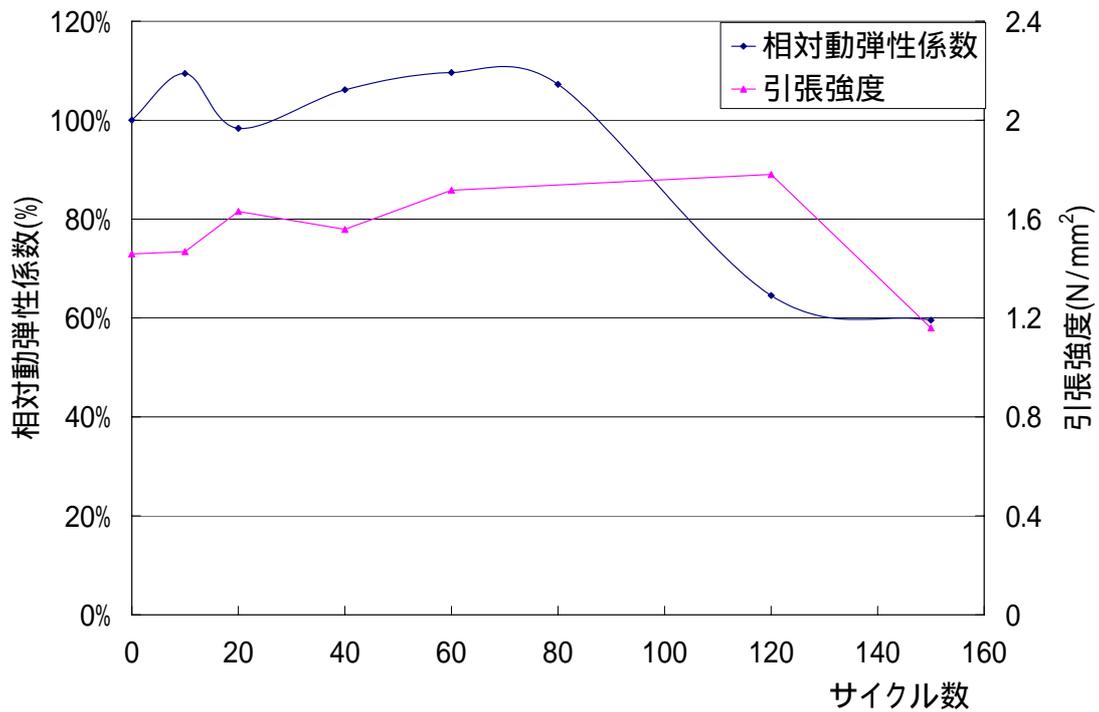


図 5.11 引張強度と相対動弾性係数の推移(試験開始材齢 5 日)

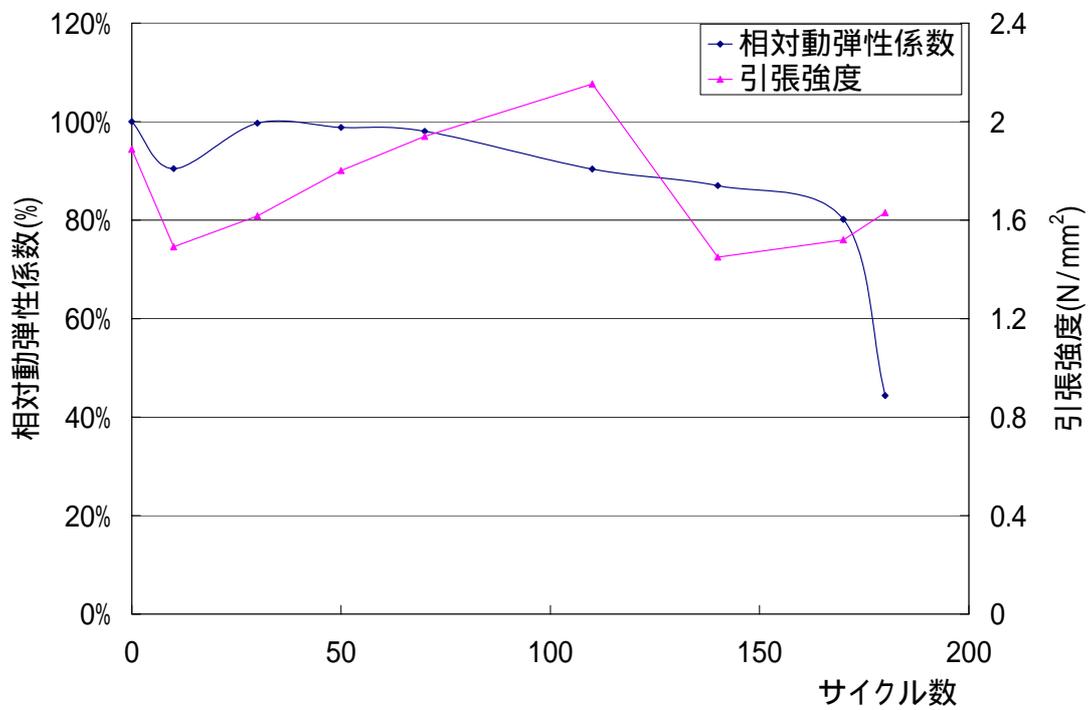


図 5.12 引張強度と相対動弾性係数の推移(試験開始材齢 7 日)

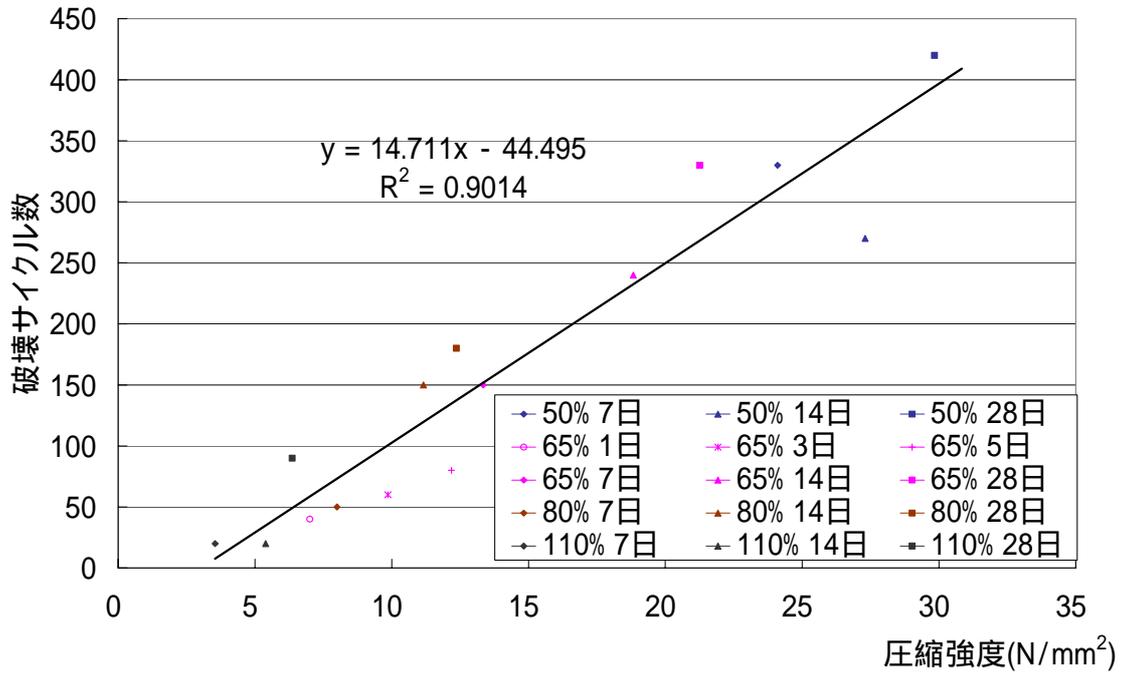


図 5.13 初期圧縮強度と破壊サイクル数の関係（最低温度-17℃）

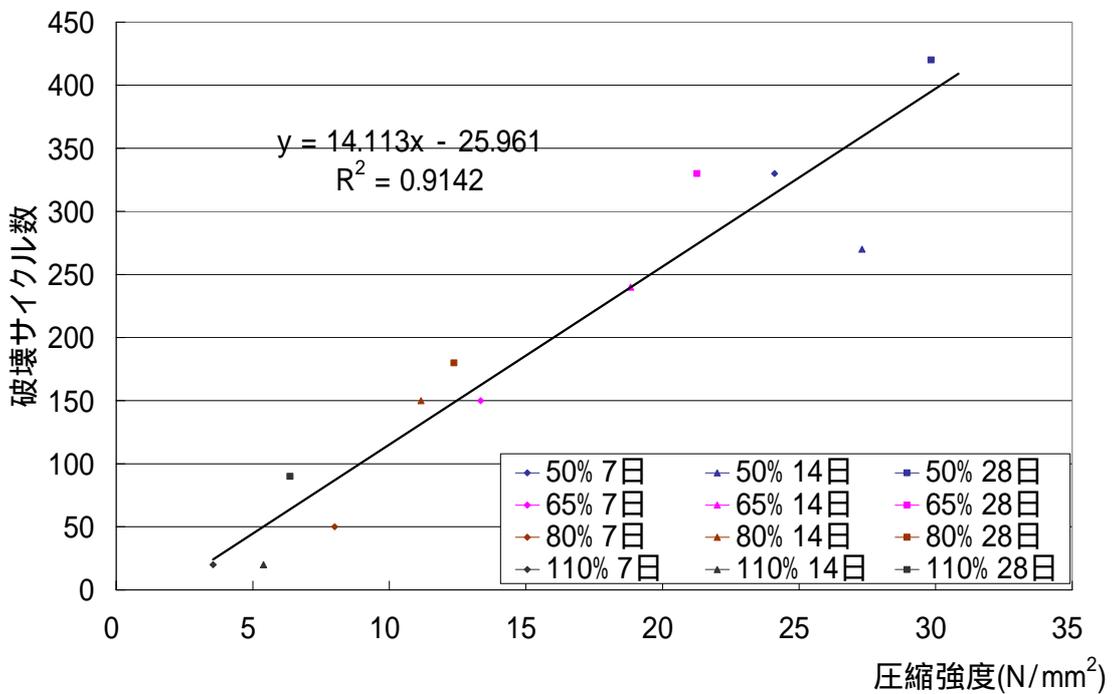


図 5.14 初期圧縮強度と破壊サイクル数の関係（最低温度-17℃）

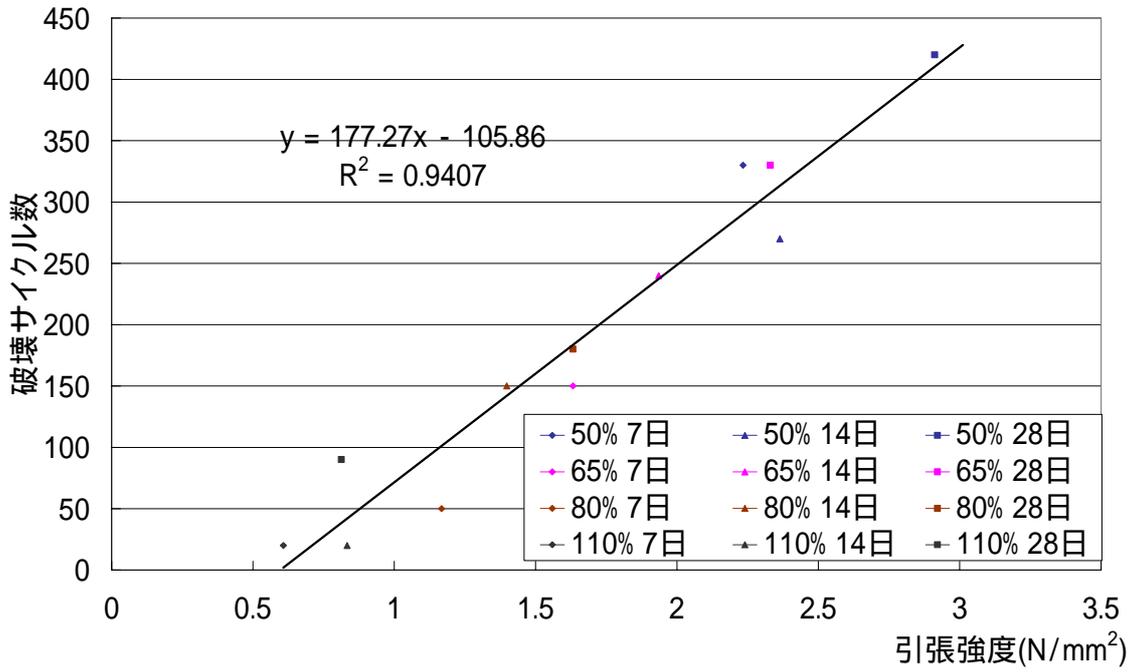


図 5.15 初期引張強度と破壊サイクル数の関係（最低温度-17℃）

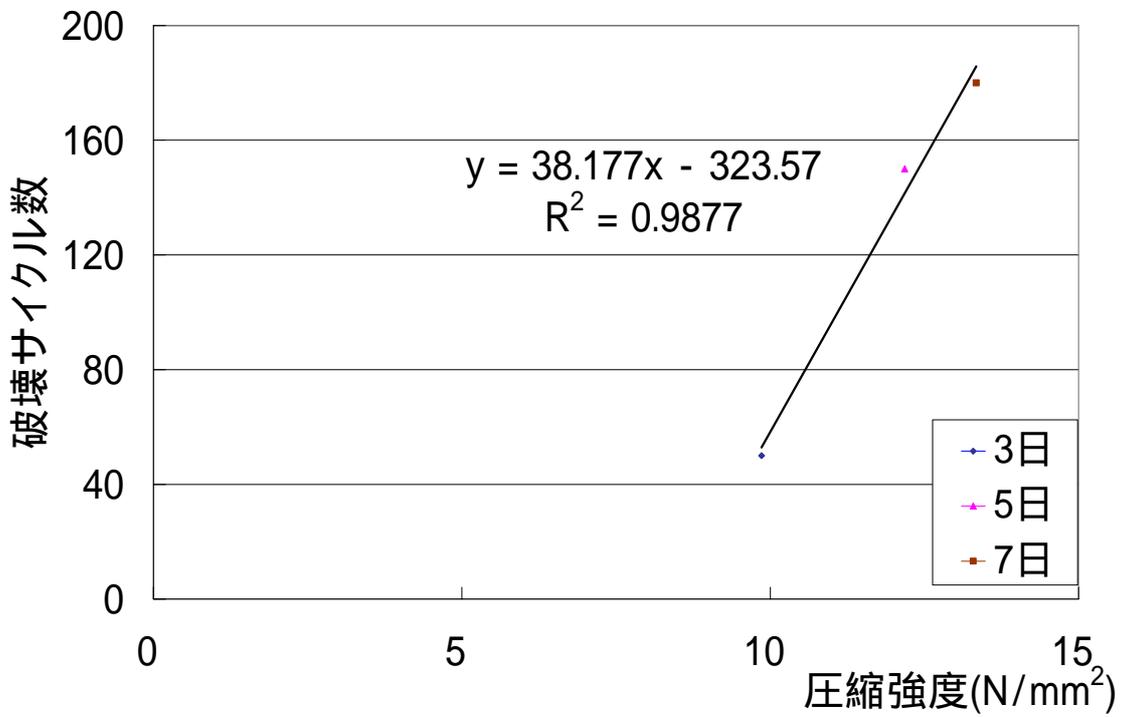


図 5.16 初期圧縮強度と破壊サイクル数の関係（最低温度-15℃）

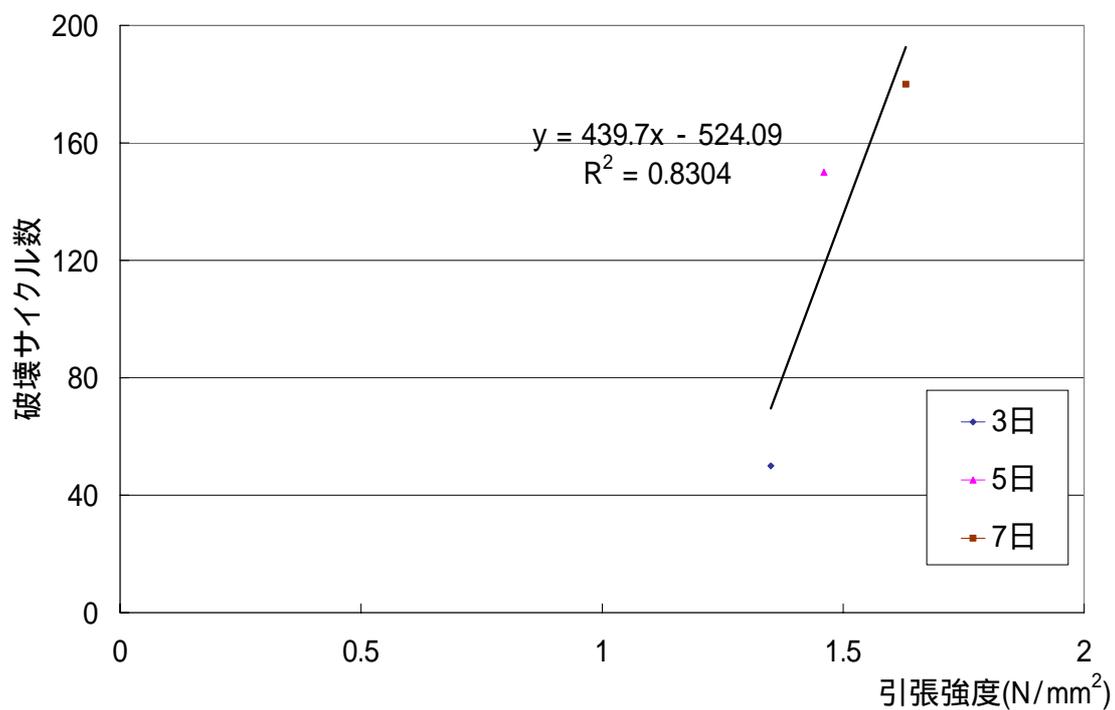


図 5.17 初期引張強度と破壊サイクル数の関係（最低温度-15℃）

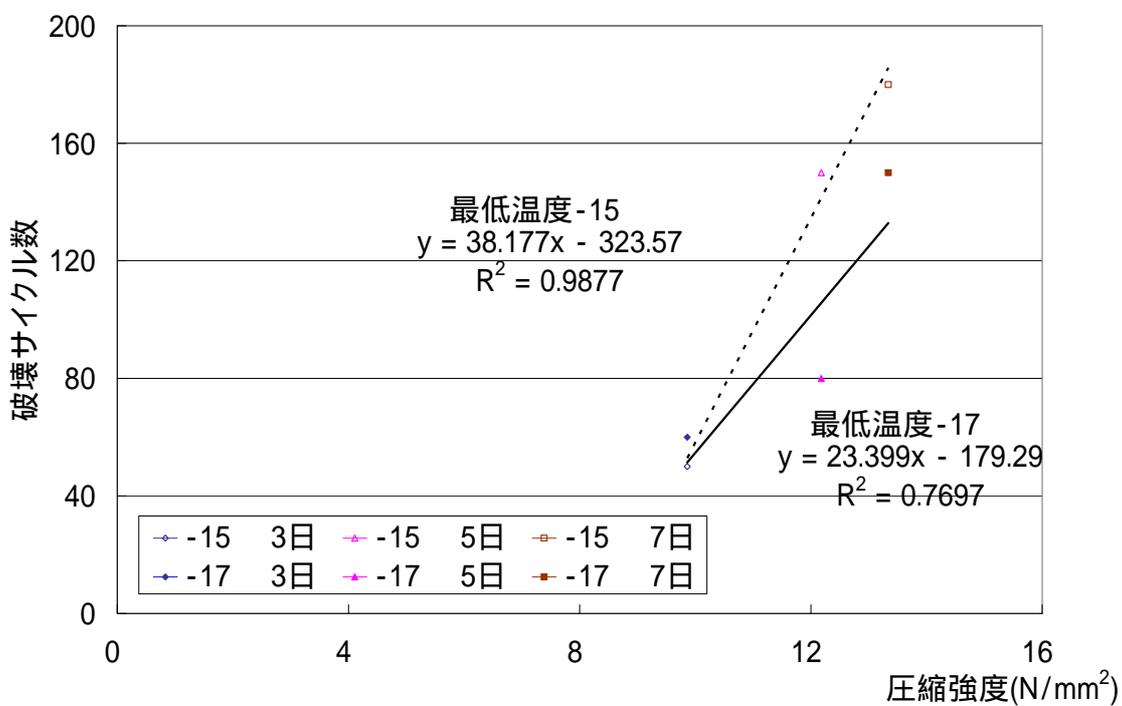


図 5.18 初期圧縮強度と破壊サイクル数の関係

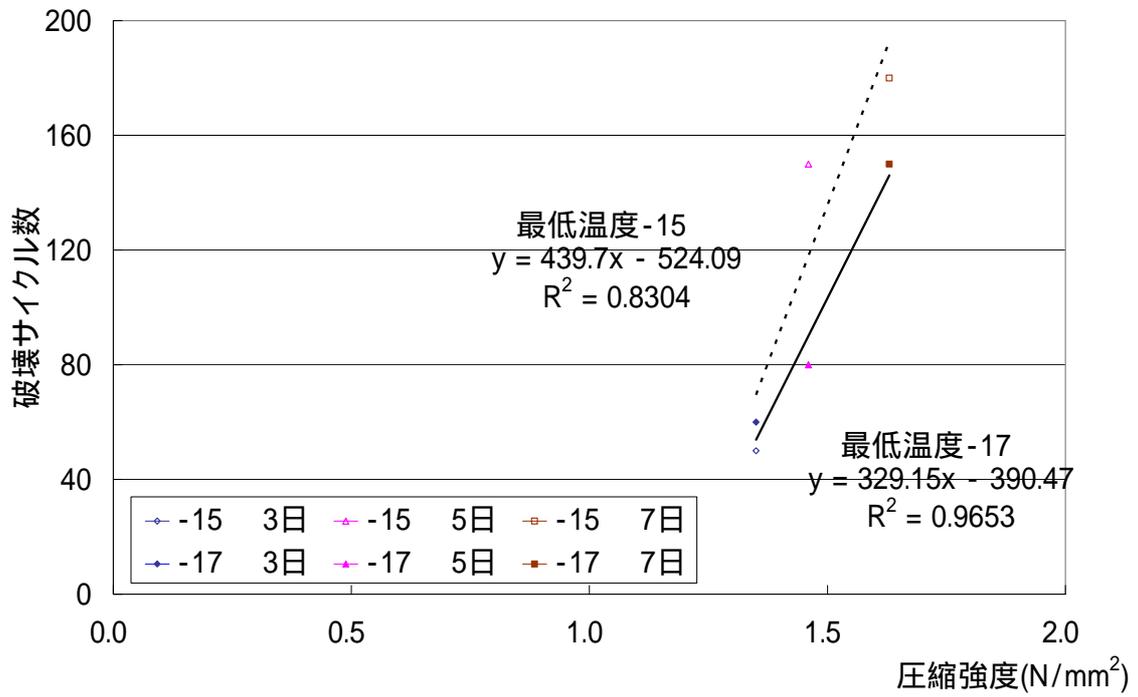


図 5.19 初期引張強度と破壊サイクル数の関係

第6章 劣化指標としての修正相対動弾性係数の有効性

6.1 修正相対動弾性係数の必要性

第4章、第5章の結果から、凍結融解試験下においてもコンクリートの強度発現がみられ、コンクリートの相対動弾性係数が増加する場合がある。つまり、凍結融解試験時の相対動弾性係数(REd_0)は、劣化の影響(REd_1)と強度発現の影響(REd_2)の両方の影響を受けていると考えられる。その関係を式6.1に示す。

$$REd_0 = REd_1 + REd_2 \quad \text{式 6.1}$$

初期サイクルでは、水セメント比が小さいものほど相対動弾性係数が増加する傾向にある。これは、水セメント比が小さいものほどコンクリートの耐凍結融解性が強いためにコンクリートの組織の劣化がみられず、強度発現が起こりうる状態にあったためと考えられる。しかし、試験開始材齢が遅く耐凍結融解性が強い場合では、コンクリートの強度発現がほぼ見込まれないために、劣化の影響が勝ったために相対動弾性係数の増加傾向が見られなかったと考えられる。また、水セメント比が110%の場合、試験開始材齢の影響はあまり見られない。これは、耐凍結融解性が低いために劣化の影響が大きかったためと考えられる。

これらのことから、相対動弾性係数を劣化指標とするのではなく、測定結果から強度発現の影響を除去した純劣化のみを示す修正相対動弾性係数を劣化指標として用いることが有効であるのではないかと考えられる。

6.2 修正相対動弾性係数の算出方法

強度発現の影響を排除した修正相対動弾性係数⁽¹⁶⁾の算出方法について述べる。図6.2に動弾性係数と積算温度の関係を示す。

修正相対動弾性係数を式6.2に示す。

$$REd^{(1)} = \frac{E_a}{E_{b'}} = \frac{\rho^* \cdot V_a^2}{\rho^* \cdot V_{b'}^2} = \frac{V_a^2}{V_{b'}^2} \quad \text{式 6.2}$$

ここで、 $REd^{(1)}$: 修正相対動弾性係数

E_a : 凍結融解試験供試体の動弾性係数

$E_{b'}$: 非劣化状態の動弾性係数

* : 密度()、動ポアソン比()に係わる係数(式6.3に示す)

$$\rho^* = \rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad \text{式 6.3}$$

V_a : 凍結融解試験供試体の伝播速度

$V_{b'}$: 非劣化状態の伝播速度 である。

一方、従来の相対動弾性係数を式 6.4 に示す。

$$REd^{(2)} = \frac{E_a}{E_{01}} = \frac{\rho^* \cdot V_a^2}{\rho^* \cdot V_{01}^2} = \frac{V_a^2}{V_{01}^2} \quad \text{式 6.4}$$

ここで、 $REd^{(2)}$: 従前の相対動弾性係数

E_{01} : 試験開始時の動弾性係数

V_a : 凍結融解試験供試体の伝播速度

V_{01} : 試験開始時の伝播速度である。

修正相対動弾性係数を求めるに当たり、非劣化状態の動弾性係数をどのようにして求めるかが、課題となるが、ここでは同一配合で水中養生した供試体の動弾性係数から求めることとした。ただし、凍結融解試験開始時において、継続して水中養生する供試体と凍結融解試験に供する供試体の動弾性係数が必ずしも一致しないことから、式 6.5 のような仮定を設けることとした。

$$\varphi = \frac{E_{02}}{E_{01}} = \frac{E_b}{E_{b'}} \quad \text{式 6.5}$$

ここで、 E_{02} : 試験開始材齢における非劣化状態（水中養生）の動弾性係数

E_b : 評価時点における非劣化状態（水中養生）の動弾性係数 である。

これを变形し、式 6.6 に示す。

$$\begin{aligned} E_{b'} &= \frac{1}{\varphi} E_b \\ &= \frac{E_{01}}{E_{02}} E_b \end{aligned} \quad \text{式 6.6}$$

よって修正相対動弾性係数($REd^{(1)}$)は、式 6.7 に示されるようになる。

$$\begin{aligned}
 REd^{(1)} &= \frac{E_a}{E_b} = \frac{E_a}{\frac{E_{01}}{E_{02}} E_b} = \frac{E_a}{E_{01}} \cdot \frac{E_{02}}{E_b} = REd^{(2)} \cdot \frac{E_{02}}{E_b} \\
 &= REd^{(2)} \cdot \frac{E_{02}}{E_b} = REd^{(2)} \cdot \frac{\rho^* \cdot V_{02}^2}{\rho^* \cdot V_b^2} = \frac{V_a^2}{V_{01}^2} \cdot \frac{V_{02}^2}{V_b^2} \quad \text{式 6.7}
 \end{aligned}$$

以上まとめると、修正相対動弾性係数は、試験開始時における凍結融解試験供試体および、水中養生供試体の伝播速度 V_{01} 、 V_{02} と評価サイクル時の積算温度に対応する凍結融解試験供試体および、水中養生供試体の伝播速度 V_a 、 V_b によって、式 6.8 示されるようになる。

$$REd^{(1)} = \frac{V_{02}^2}{V_{01}^2} \cdot \frac{V_a^2}{V_b^2} \quad \text{式 6.8}$$

6.2.1 非劣化状態の超音波伝播速度の変化

標準水中養生を継続した供試体の超音波伝播速度の変化を図 6.3 に示す。これによれば、超音波伝播速度は、水セメント比が低いものほど速く、積算温度の増加と共に速くなる事が認められる。

また、積算温度と超音波伝播速度の関係を式 6.9 で回帰する。回帰係数は、図 6.3 に示すとおりである。

$$V = \frac{M - M_0}{\frac{1}{\alpha} + \frac{M - M_0}{\beta}} \quad \text{式 6.9}$$

ここで、 V : 超音波伝播速度

M : 積算温度

M_0 、 α 、 β : 回帰係数である。

また、図中の r は相関係数である。

6.2.2 凍結融解試験中の積算温度

-17 における凍結融解 1 サイクル当たりの温度変化を図 6.4 に、-15 における凍結融解 1 サイクル当たりの温度変化を図 6.5 示す。

積算温度は、一般的に用いられている Saul の式 6.10 のほか、温度が 0 以下となる場合には Nykane の式 6.11 を用いることとした。また、温度が-15 以下の場合には、積算温度は 0 とした。

$$M = \sum t(\theta + 10) \quad \text{Saul の式} \quad \text{式 6.10}$$

$$M = 0.3 \cdot \sum t(\theta + 15) \quad \text{Nykane の式} \quad \text{式 6.11}$$

ここで、 M : 積算温度(DD)

t : 材齢(日)

θ : 温度()である。

図 6.4、6.5 をもとに、凍結融解 1 サイクル当たりの積算温度を求めれば、凍結融解最低温度-17 では 14.23 ・日、-15 では 15.48 ・日である。また、今回の試験では試験機の不調のため、途中で試験が中断した場合が多々あった。試験機停止中の槽内温度は 15 と仮定した。

6.3 修正相対動弾性係数を用いた評価

6.3.1 凍結融解試験最低温度-17 における評価

(1)凍結融解サイクルとの比較

図 6.6 から図 6.20 に凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係を示す。試験開始材齢・W/C を変化させ、相対動弾性係数と修正相対動弾性係数による違いを示している。

ほとんどのケースにおいて修正相対動弾性係数は 100%を下回り、強度発現の影響を除去でき、純劣化のパターンを示せたと考えられる。また、図 6.10 試験開始材齢 7 日・W/C=65%、図 6.13 から図 6.15 試験開始材齢 14 日・W/C=50%、65%、80%では修正相対動弾性係数が 100%を上回る結果となってしまった。

(2)修正相対動弾性係数と体積百分率の関係

図 6.21 から図 6.27 に修正相対動弾性係数と体積百分率の関係を示す。図 6.21 から図 6.24 は W/C を変化させ、試験開始材齢による違いを示しており、図 6.25 から図 6.27 は試験開始材齢を変化させ、W/C による違いを示している。

比較的良好な直線関係が認められ、修正相対動弾性係数が小さくなるほど体積百分率は

小さくなる結果となった。また、W/C が大きく試験開始材齢が若いものほど修正相対動弾性係数の低下に比べ体積減少があまりみられない結果となった。

(3)修正相対動弾性係数と質量百分率の関係

図 6.28 から図 6.34 に修正相対動弾性係数と質量百分率の関係を示す。図 6.28 から図 6.31 は W/C を変化させ、試験開始材齢による違いを示しており、図 6.32 から図 6.34 は試験開始材齢を変化させ、W/C による違いを示している。

比較的良好な直線関係が認められ、修正相対動弾性係数が小さくなるほど質量百分率は小さくなる結果となった。また、W/C が大きく試験開始材齢が若いものほど修正相対動弾性係数の低下に比べ質量減少があまりみられない結果となった。

6.3.2 凍結融解試験最低温度-15 における評価

(1)凍結融解サイクルとの比較

図 6.35 から図 6.37 に凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係を示す。

ほとんどのケースにおいて修正相対動弾性係数は 100%を下回り、強度発現の影響を除去でき、純劣化のパターンを示せたと考えられる。また、図 6.36 試験開始材齢 5 日では修正相対動弾性係数が 100%を上回る結果となってしまったが、ほぼ純劣化のパターンを示せたと考えられる。

(2)修正相対動弾性係数と体積減少率の関係

図 6.38 に修正相対動弾性係数と体積百分率の関係を示す。

比較的良好な直線関係が認められ、修正相対動弾性係数が小さくなるほど体積百分率は小さくなる結果となった。また、試験開始材齢が若いものほど修正相対動弾性係数の低下に比べ体積減少があまりみられない結果となった。

(3)修正相対動弾性係数と質量百分率の関係

図 6.39 に修正相対動弾性係数と質量百分率の関係を示す

比較的良好な直線関係が認められ、修正相対動弾性係数が小さくなるほど質量百分率は小さくなる結果となった。また、試験開始材齢が若いものほど修正相対動弾性係数の低下に比べ質量減少があまりみられない結果となった。

6.3.3 凍結融解試験最低温度(-17 ・ -15)の変化における評価

図 6.40 から図 6.42 にサイクル数と修正相対動弾性係数の関係、図 6.43 から図 6.46 に修正相対動弾性係数と体積減少率の関係、図 6.47 から図 6.50 に修正相対動弾性係数と質量減少率の関係を示す。

第 4 章で述べた項目について、比較的容易に評価することができるようになった。

6.3.4 破壊サイクル数と初期強度の関係

図6.51 から図6.57 に修正相対動弾性係数によって導き出した破壊サイクル数と初期強度の関係を示す。

相対動弾性係数による破壊サイクルから導き出した相関係数に比べて、修正相対動弾性係数を用いた場合、より高い相関関係をとることができた。凍結融解最低温度-15 の初期圧縮強度のものを除いて、すべてのケースにおいて高い相関関係になり、初期圧縮強度より初期引張強度の方が高い相関関係にあった。

また、凍結融解最低温度-17 と-15 において、その近時曲線には平行関係があるように考えられる。つまり、初期強度による耐凍結融解性と凍結融解最低温度による外的エネルギーには何らかの関係性があるのではないかと考えられる。

6.3.5 結論

修正相対動弾性係数を用いることで凍結融解最低温度・試験開始材齢の違いによる強度発現の影響を除去でき、それらの比較検討が容易になったと考えられる。凍結融解最低温度が違えば積算温度に差が生じ、強度の増加に差ができてしまう。その結果、凍結最低温度の違いによる純粋なコンクリートの劣化を調べる事が困難になってしまうことが考えられる。しかし、修正相対動弾性係数を使用することで凍結融解作用によるコンクリートの劣化のみを比較することができ、今後の凍結融解試験の劣化指標として有益であると考えられる。

初期引張強度と破壊サイクルは高い相関関係にあると考えられる。また、凍結融解最低温度変化によって、コンクリート自体が持つ耐凍結融解性と最低温度変化による劣化エネルギーには何らかの関係性があるように考えられる。つまり、最低温度を変化させた場合でも、強度と破壊サイクルにおける直線の傾きは変わることなく定数のみが変わるのでないかと考えられる。

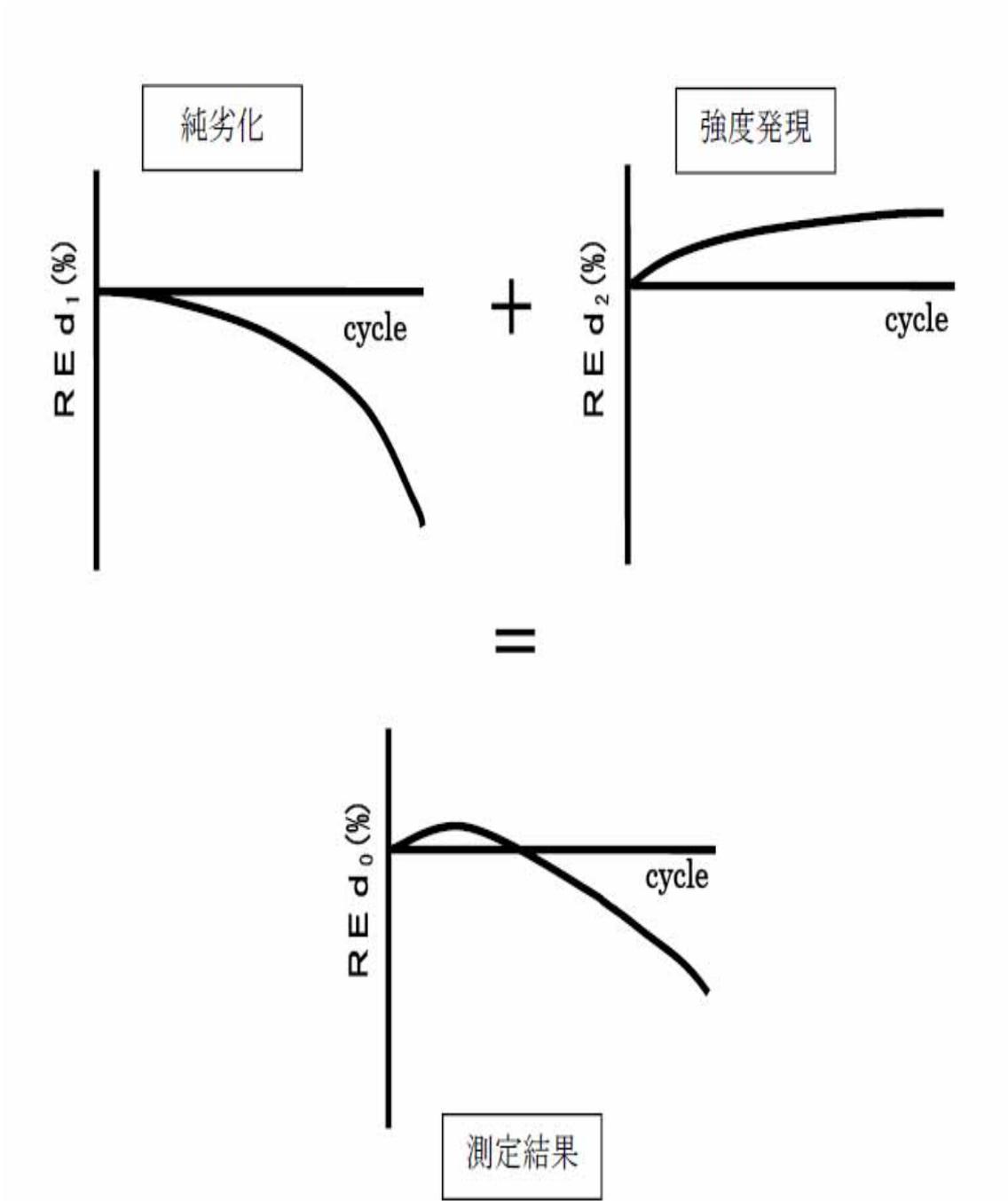


図 6.1 相対動弾性係数の推移

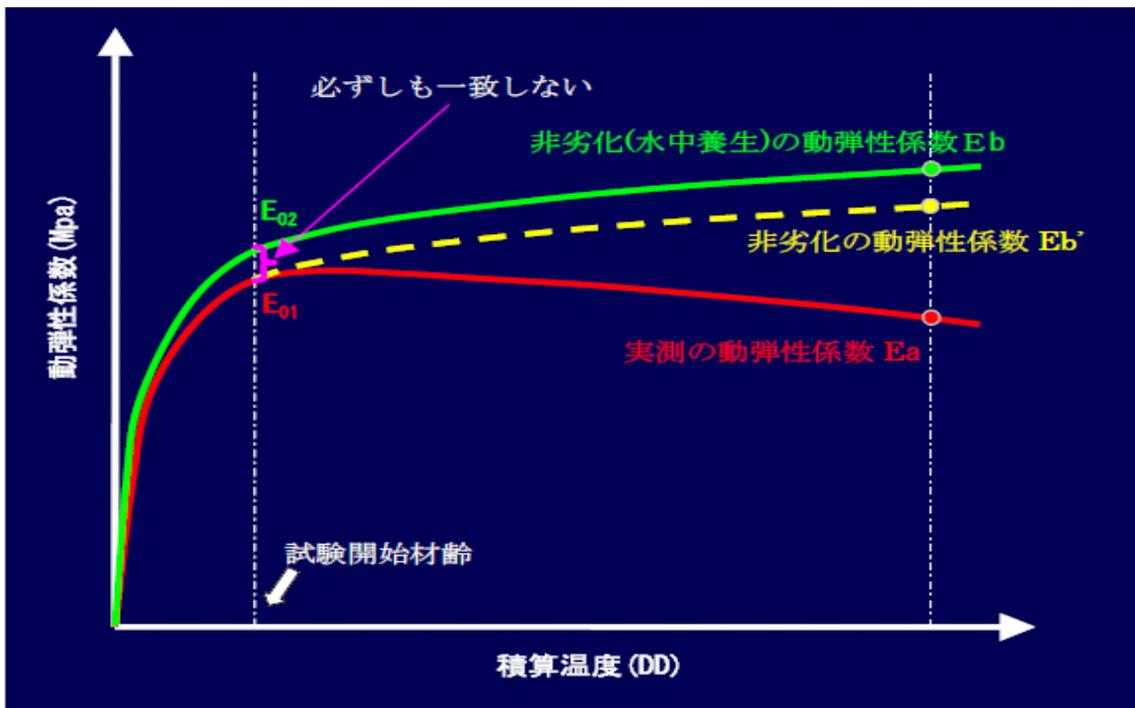


図 6.2 動弾性係数と積算温度の関係

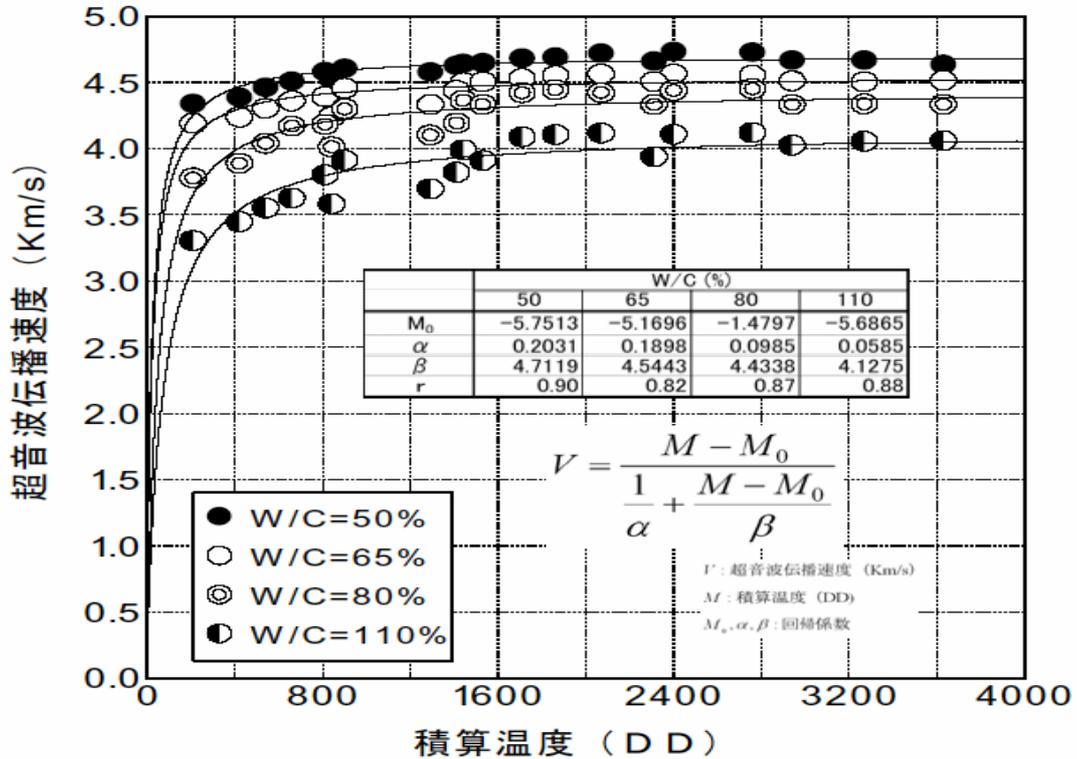


図 6.3 標準水中養生した供試体の超音波伝播速度の変化

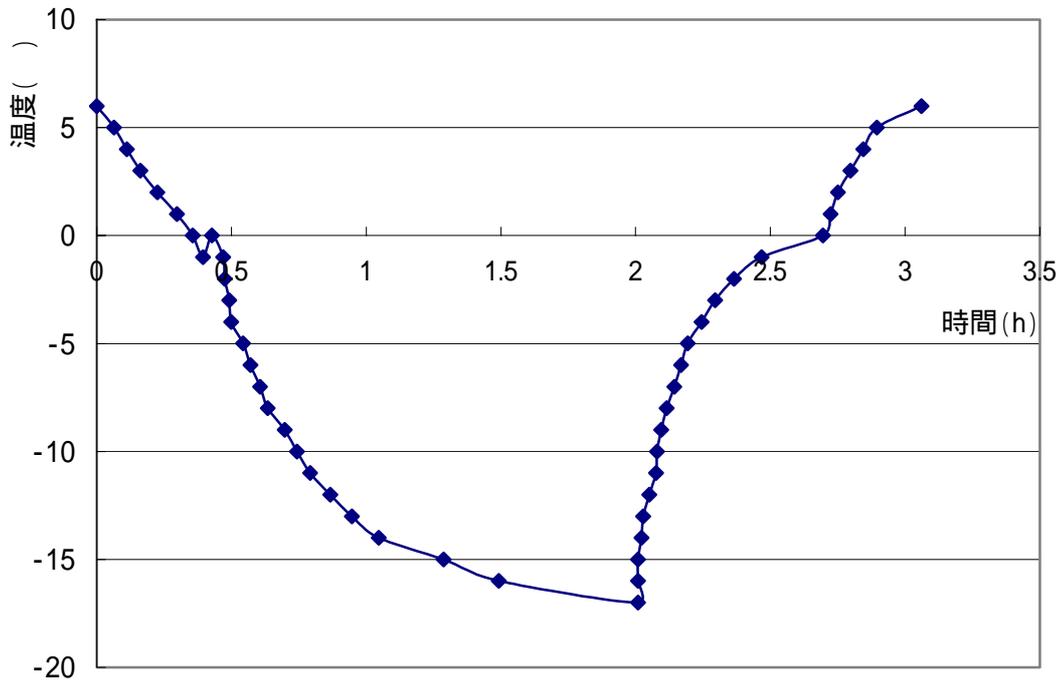


図 6.4 凍結融解サイクルモデル(凍結融解最低温度-17)

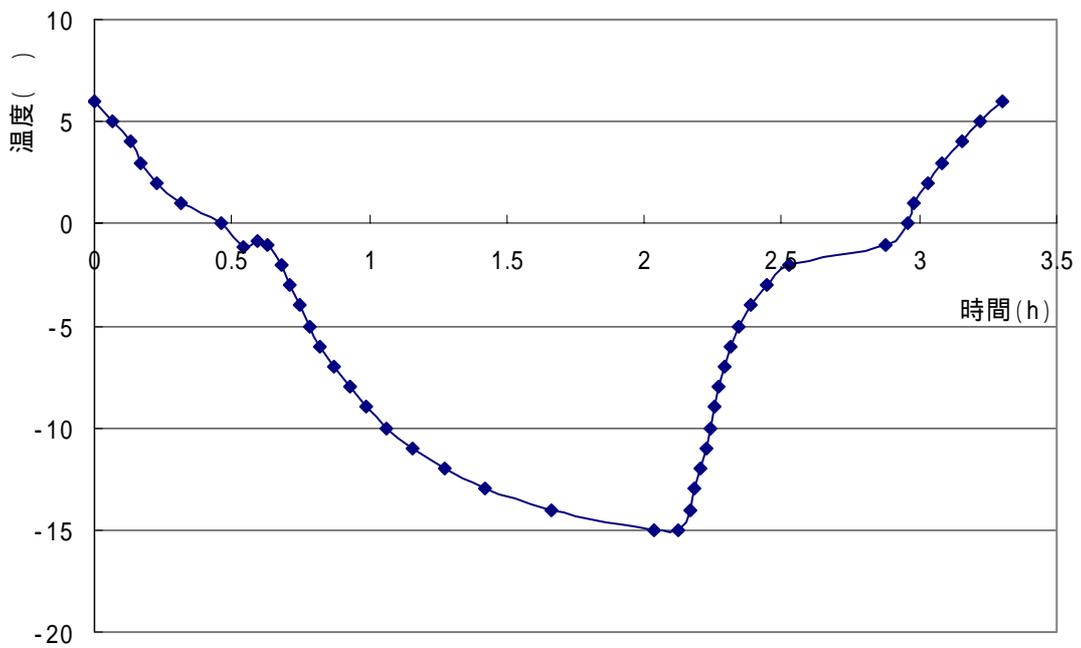


図 6.5 凍結融解サイクル(凍結融解最低温度-15)

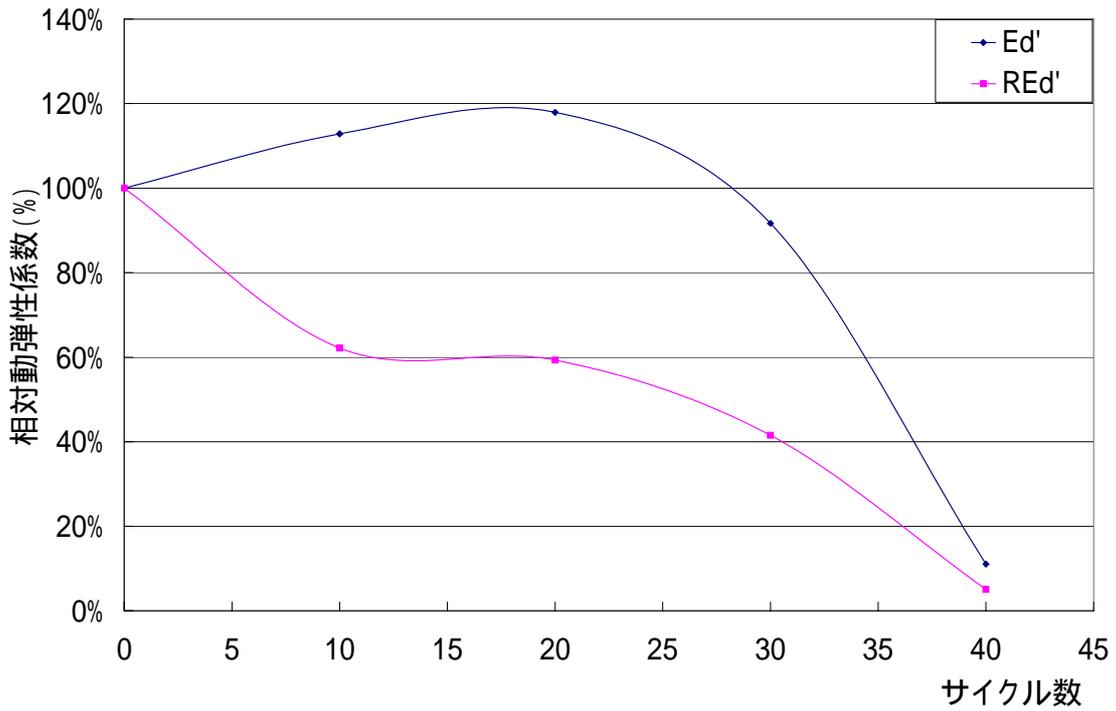


図 6.6 サイクル数と相対動弾性係数の関係（開始材齢 1 日，W/C=65%，最低温度-17℃）

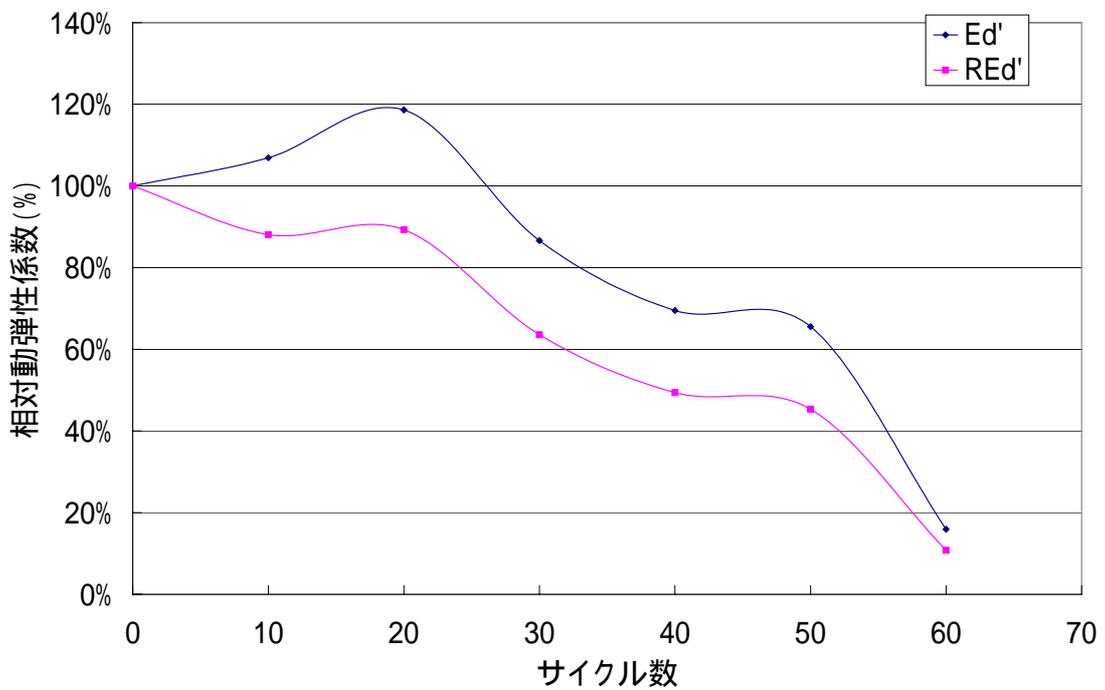


図 6.7 サイクル数と相対動弾性係数の関係（開始材齢 3 日，W/C=65%，最低温度-17℃）

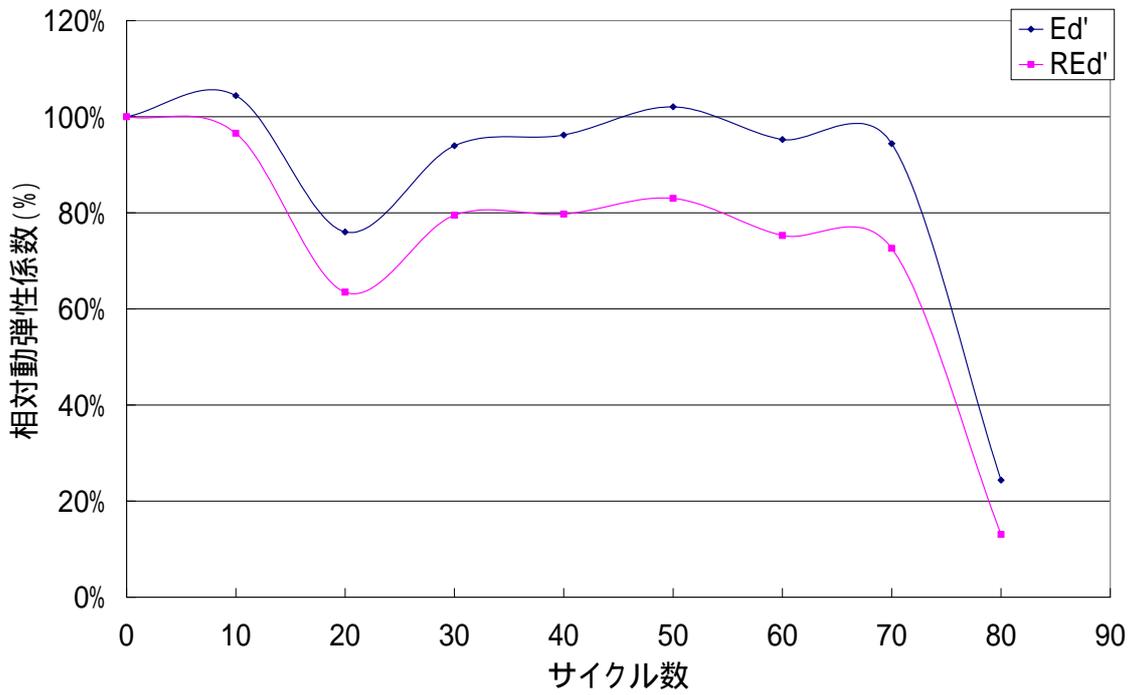


図 6.8 サイクル数と相対動弾性係数の関係（開始材齢 5 日，W/C=65%，最低温度-17℃）

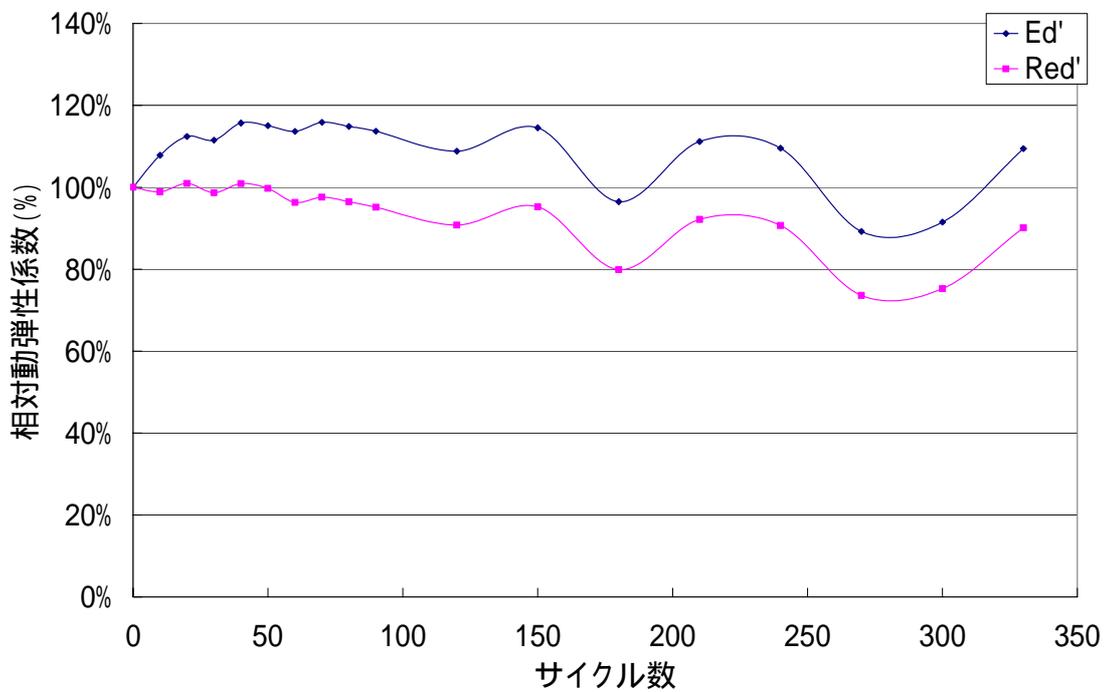


図 6.9 サイクル数と相対動弾性係数の関係（開始材齢 7 日，W/C=50%，最低温度-17℃）

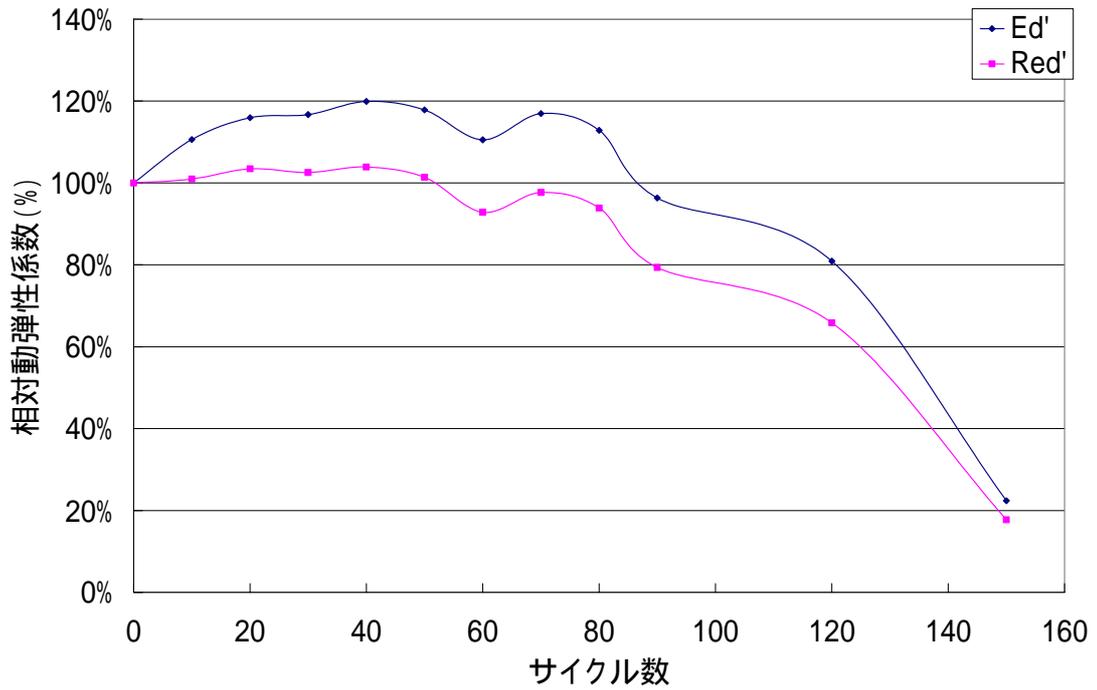


図 6.10 サイクル数と相対動弾性係数の関係（開始材齢 7 日，W/C=65%，最低温度-17℃）

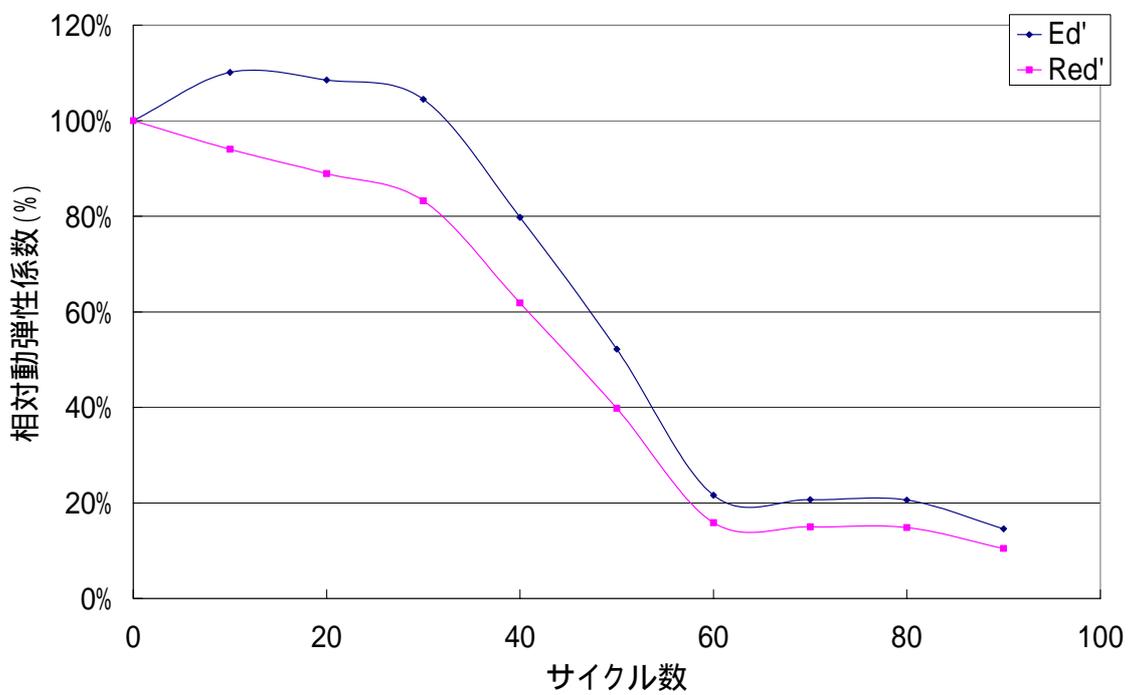


図 6.11 サイクル数と相対動弾性係数の関係（開始材齢 7 日，W/C=80%，最低温度-17℃）

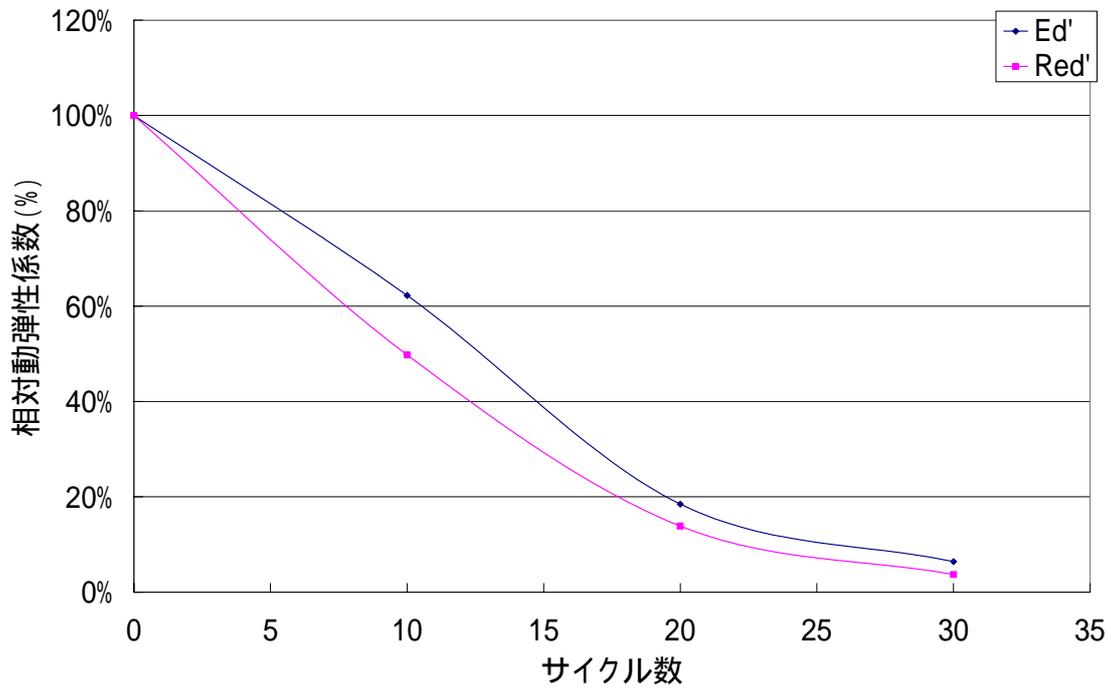


図 6.12 サイクル数と相対動弾性係数の関係(開始材齢 7 日 ,W/C=110% ,最低温度-17)

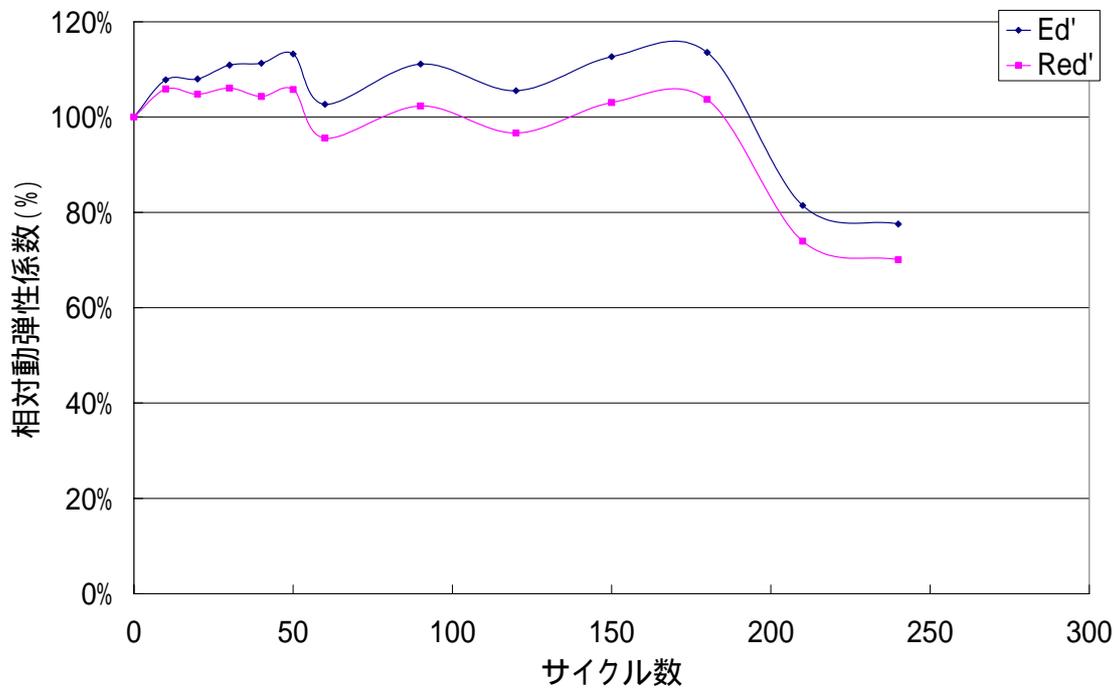


図 6.13 サイクル数と相対動弾性係数の関係(開始材齢 14 日 ,W/C=50% ,最低温度-17)

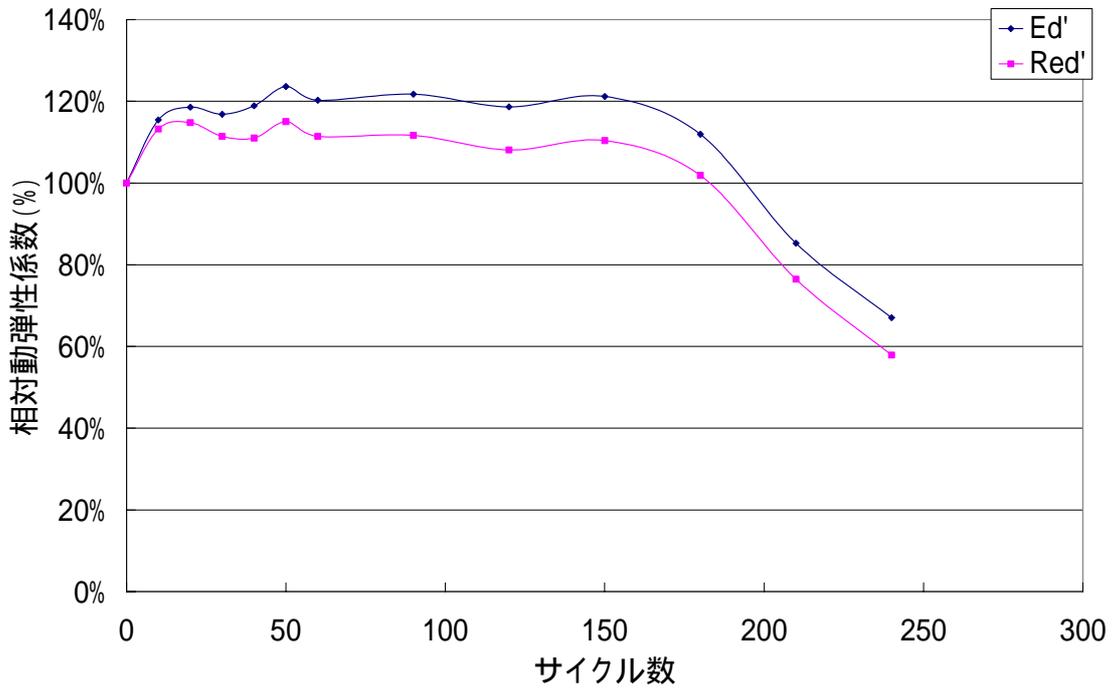


図 6.14 サイクル数と相対動弾性係数の関係(開始材齢 14 日 ,W/C=65% ,最低温度-17)

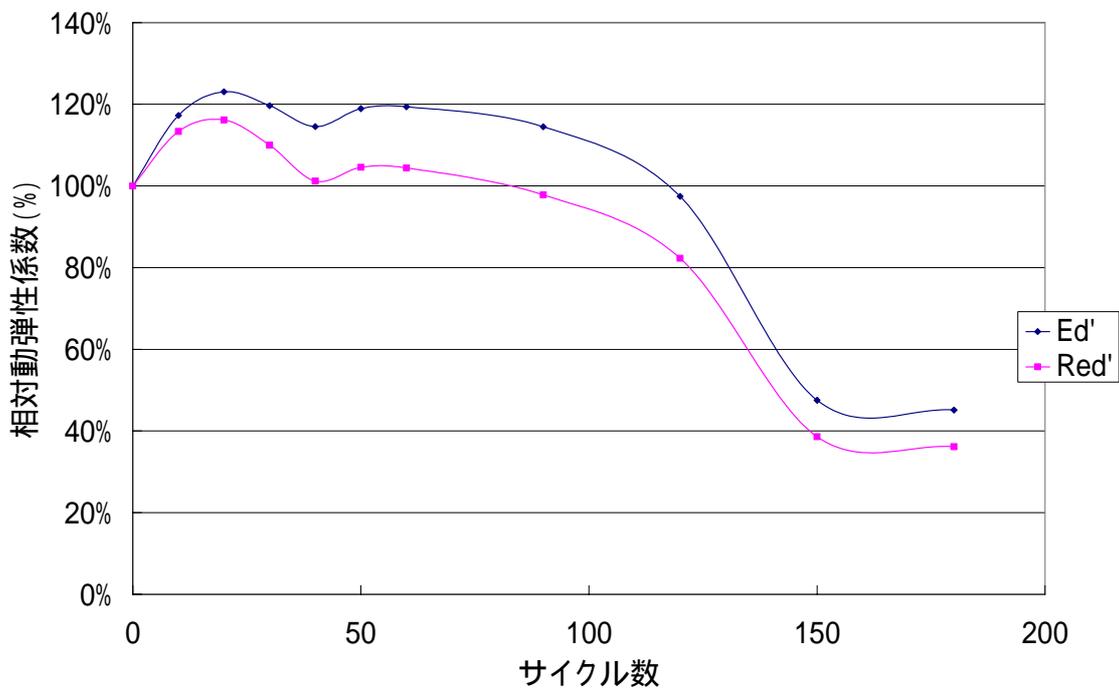


図 6.15 サイクル数と相対動弾性係数の関係(開始材齢 14 日 ,W/C=80% ,最低温度-17)

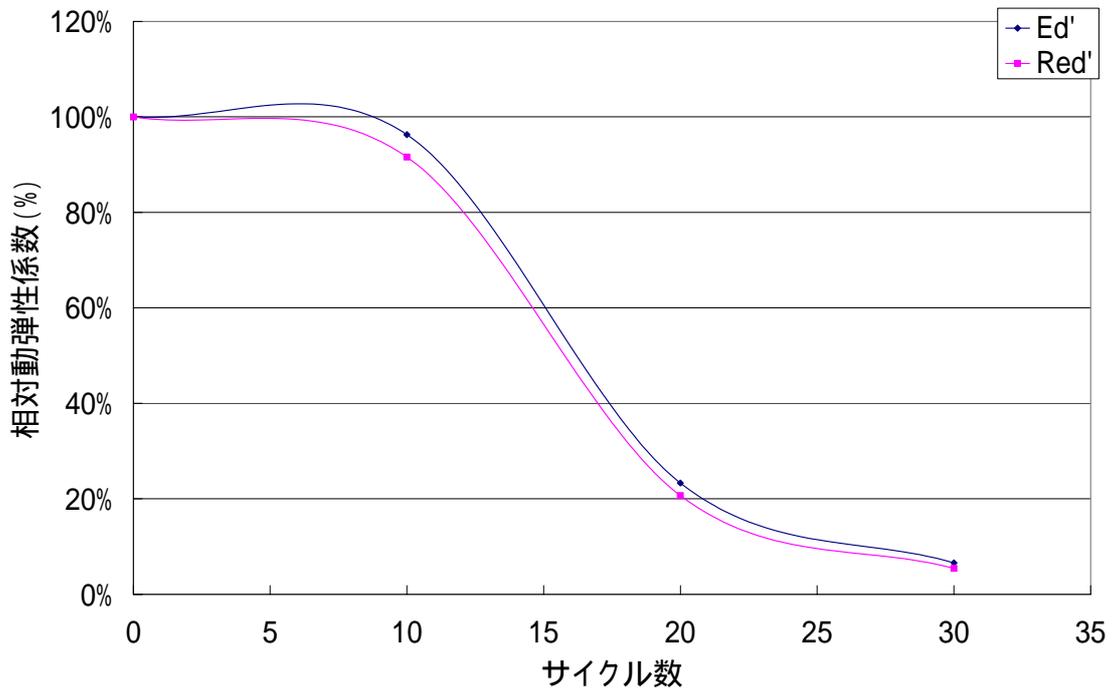


図 6.16 サイクル数と相対動弾性係数の関係(開始材齢 14 日 ,W/C=110% ,最低温度-17)

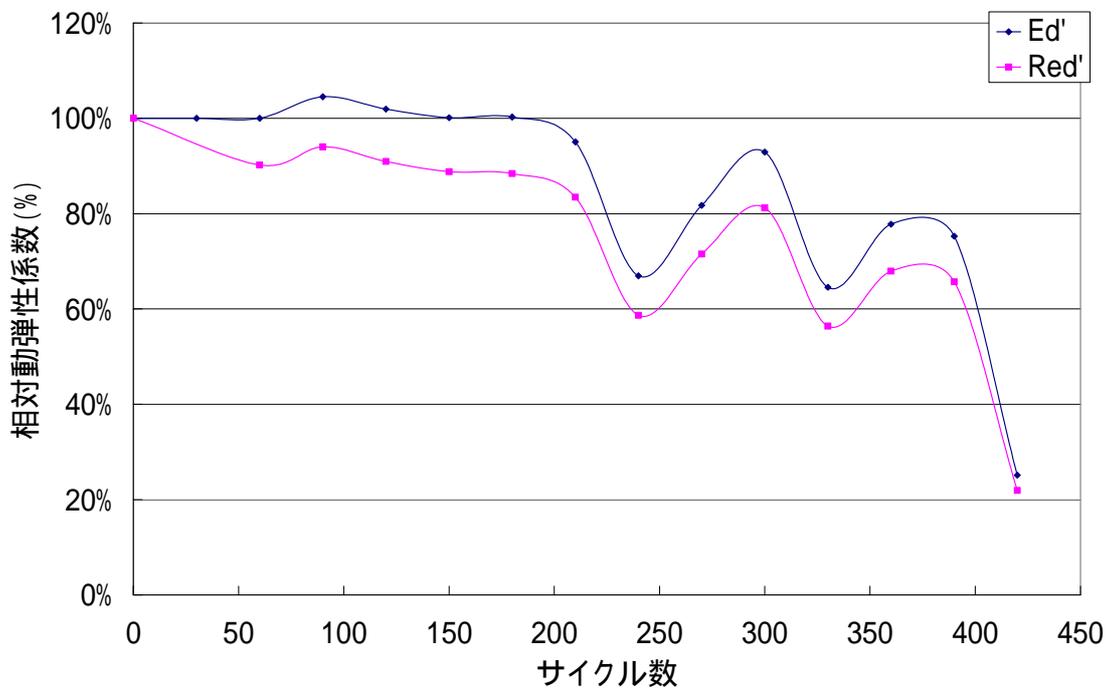


図 6.17 サイクル数と相対動弾性係数の関係(開始材齢 28 日 ,W/C=50% ,最低温度-17)

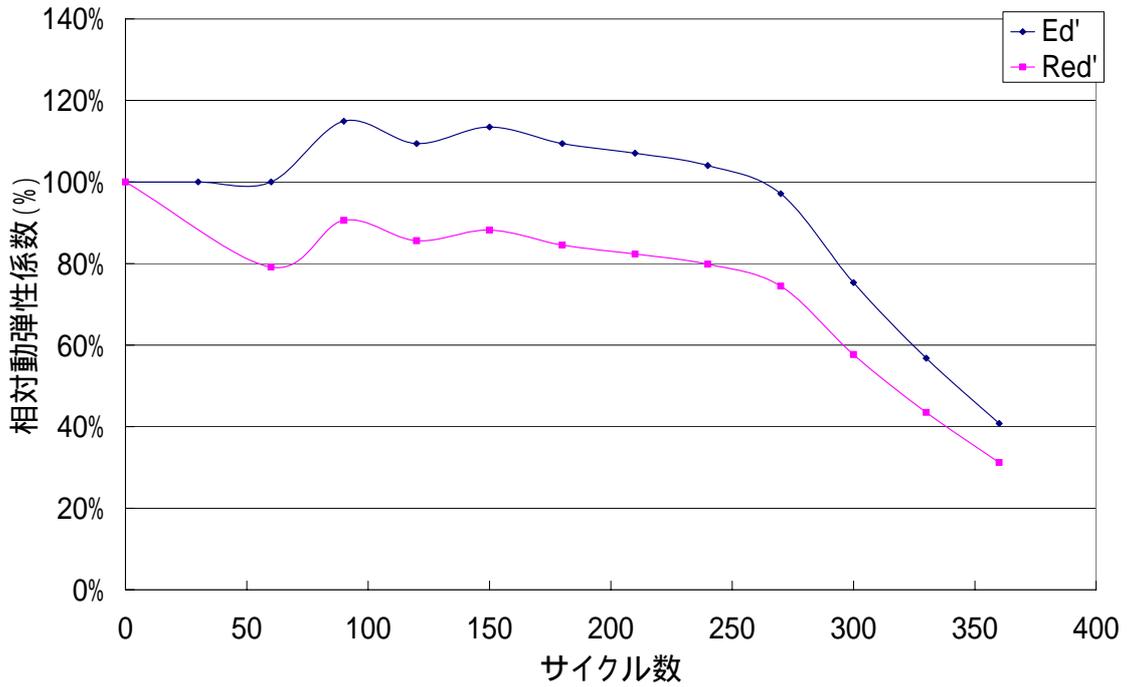


図 6.18 サイクル数と相対動弾性係数の関係(開始材齢 28 日 ,W/C=65% ,最低温度-17)

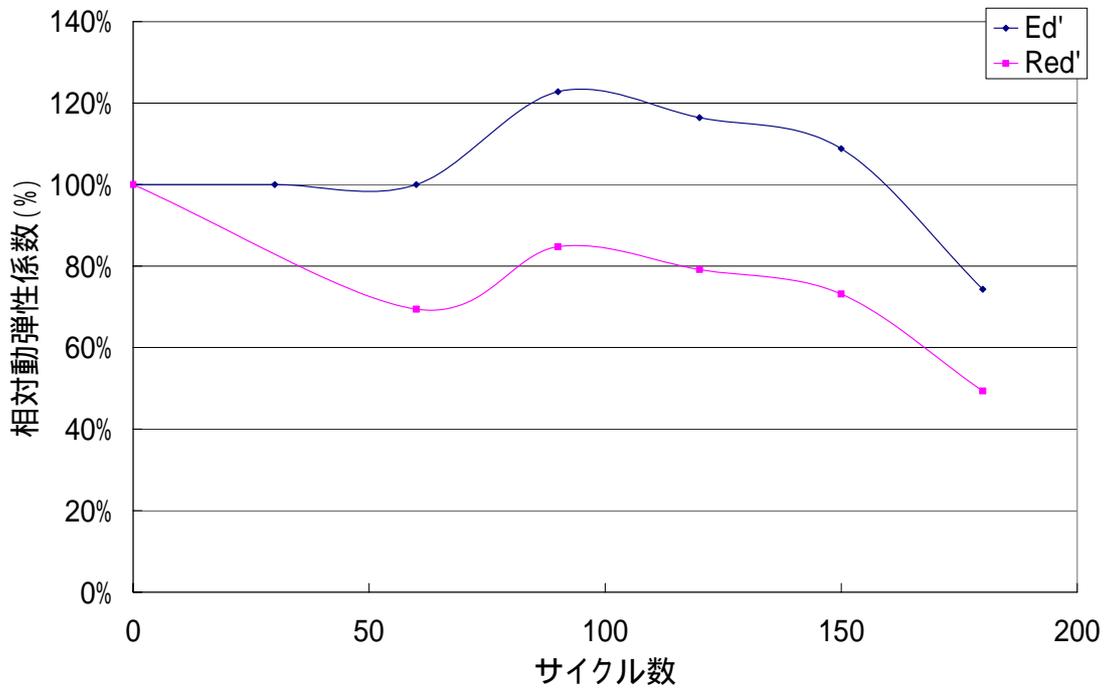


図 6.19 サイクル数と相対動弾性係数の関係(開始材齢 28 日 ,W/C=80% ,最低温度-17)

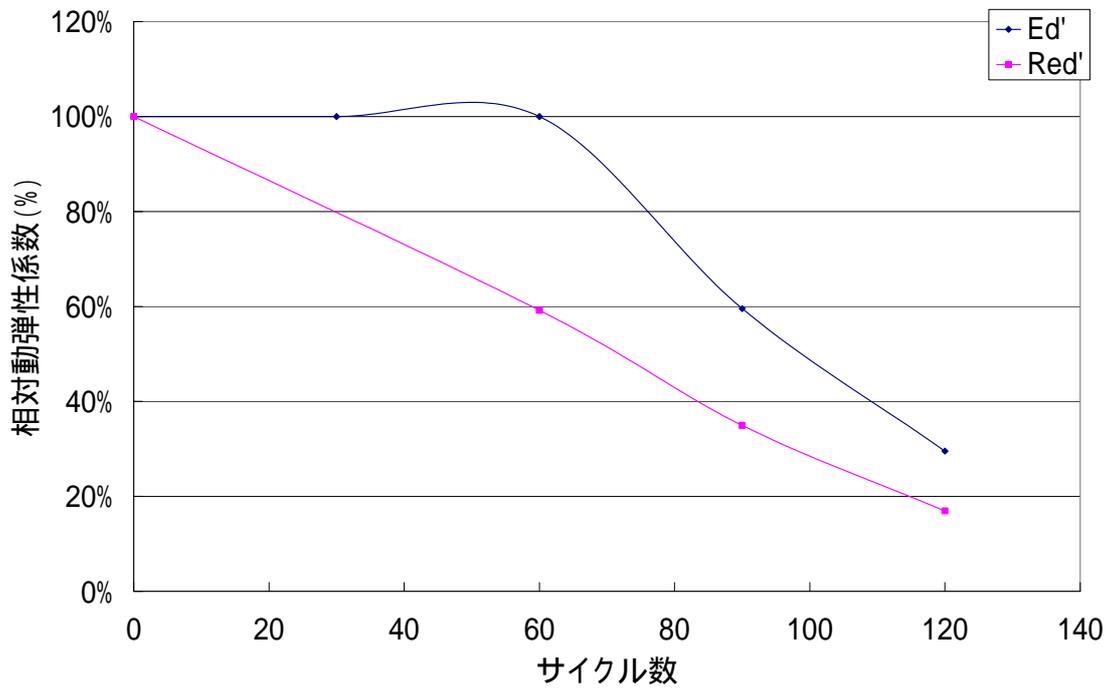


図 6.20 サイクル数と相対動弾性係数の関係(開始材齢 28 日 ,W/C=110% ,最低温度-17)

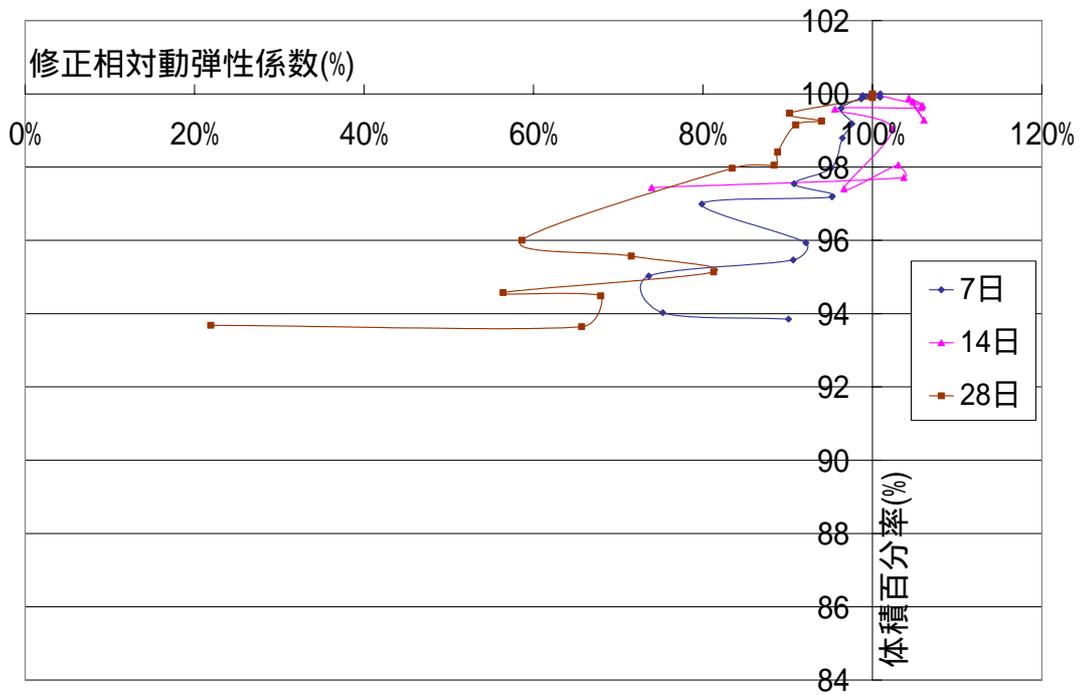


図 6.21 修正相対動弾性係数と体積百分率の関係 (W/C=50% , 最低温度-17)

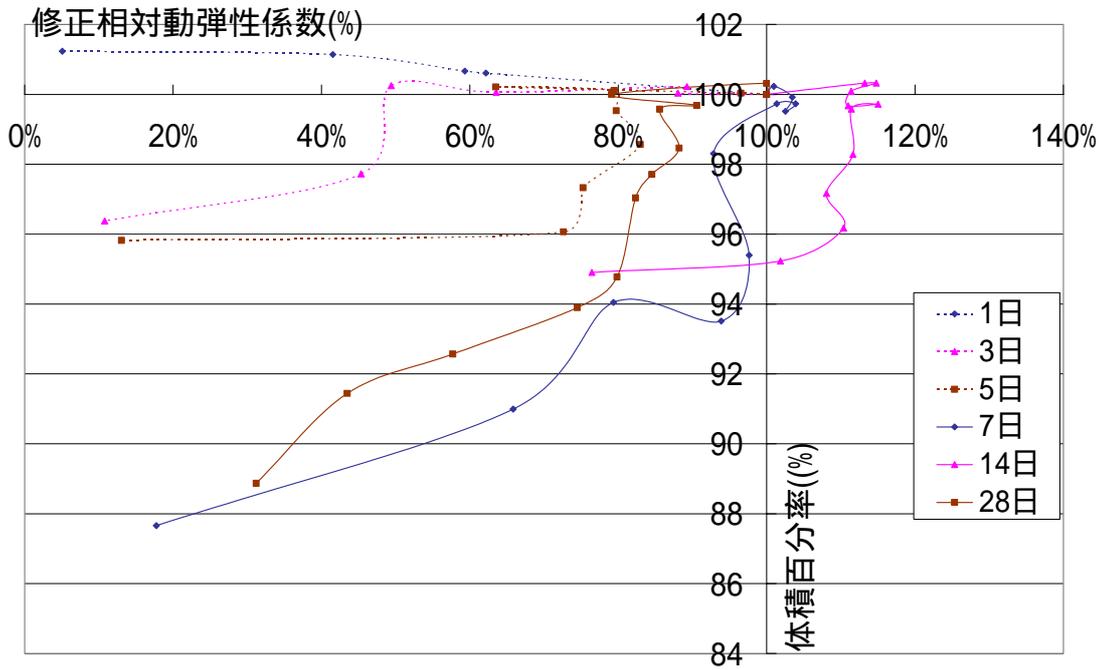


図 6.22 修正相対動弾性係数と体積百分率の関係 (W/C=65% , 最低温度-17)

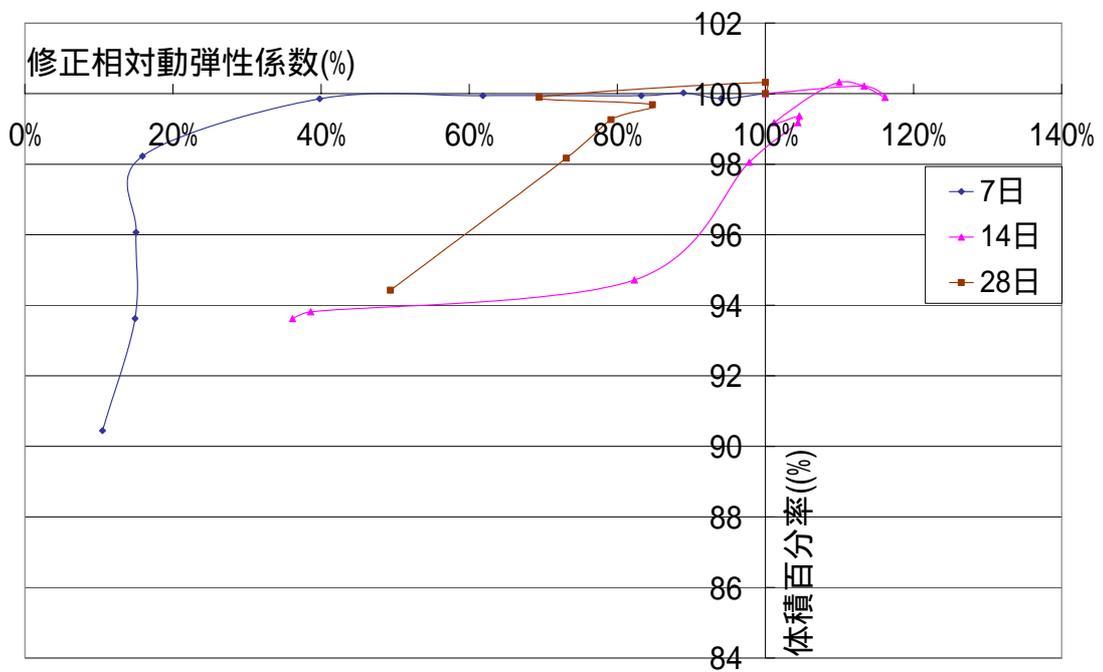


図 6.23 修正相対動弾性係数と体積百分率の関係 (W/C=80% , 最低温度-17)

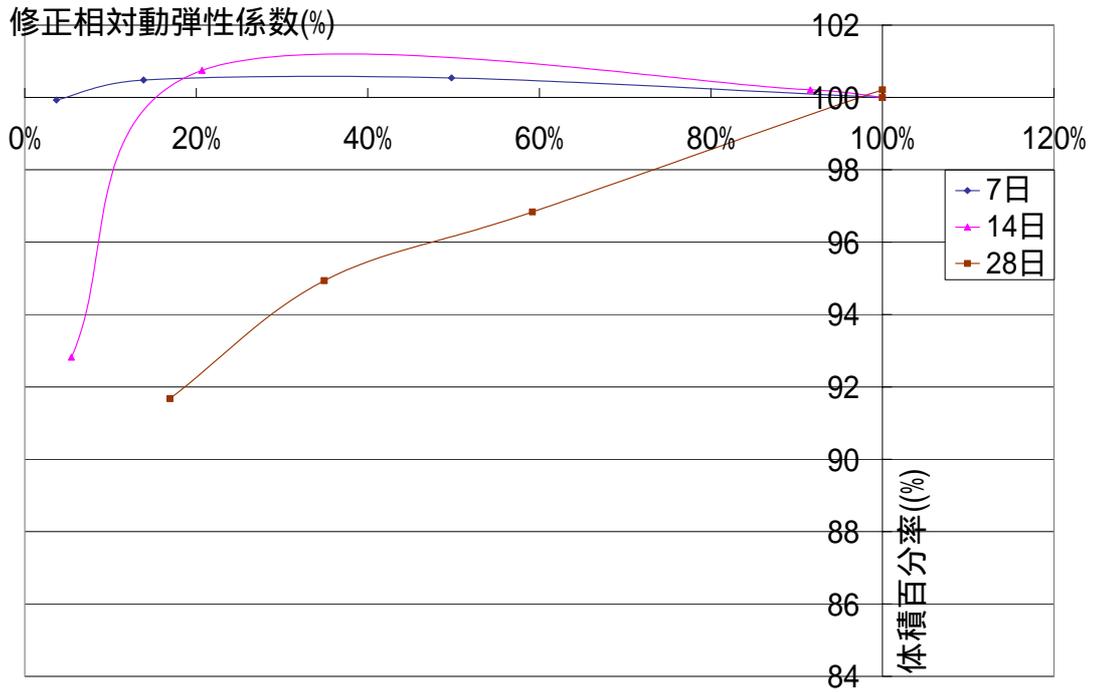


図 6.24 修正相対動弾性係数と体積百分率の関係 (W/C=110% , 最低温度-17)

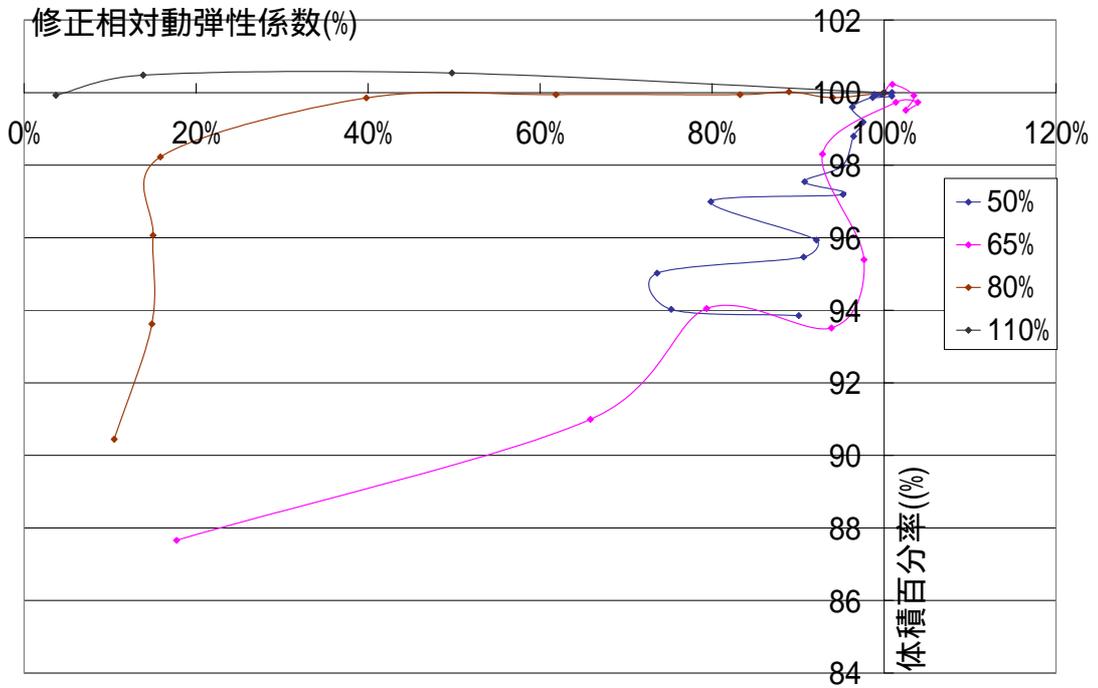


図 6.25 修正相対動弾性係数と体積百分率の関係 (開始材齢 7 日 , 最低温度-17)

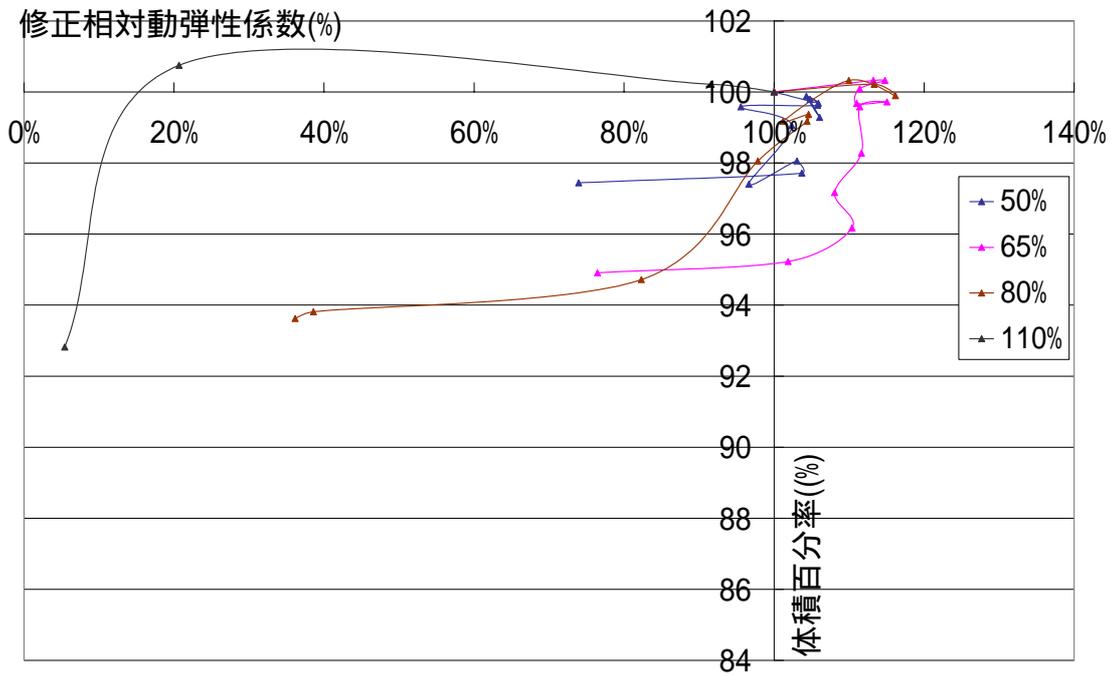


図 6.26 修正相対動弾性係数と体積百分率の関係（開始材齢 14 日，最低温度-17℃）

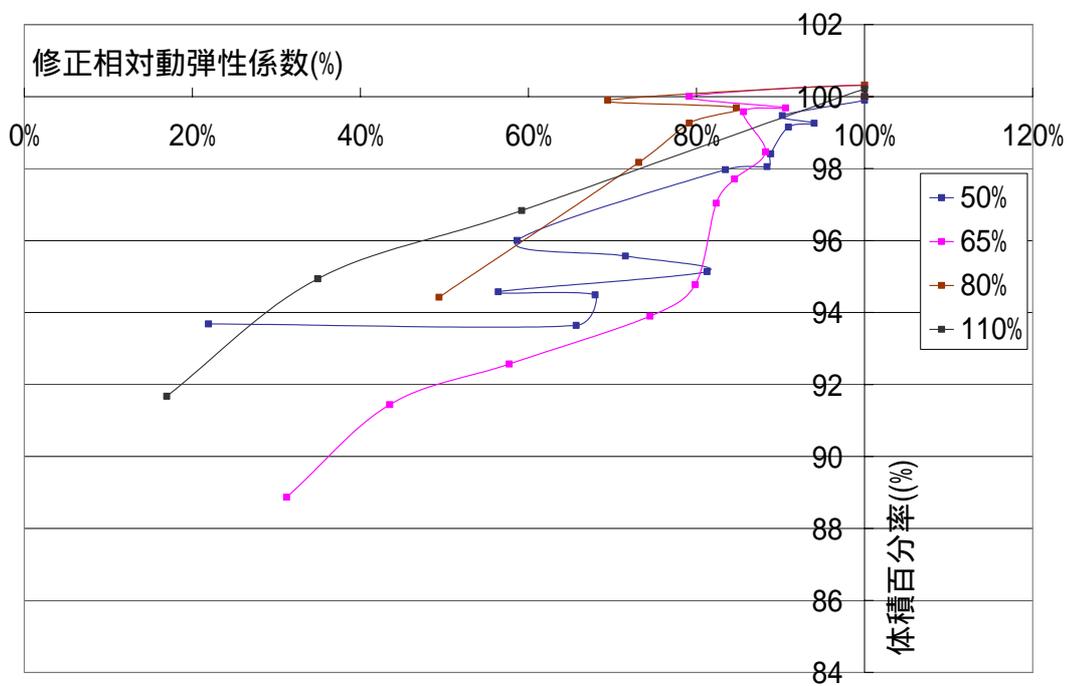


図 6.27 修正相対動弾性係数と体積百分率の関係（開始材齢 28 日，最低温度-17℃）

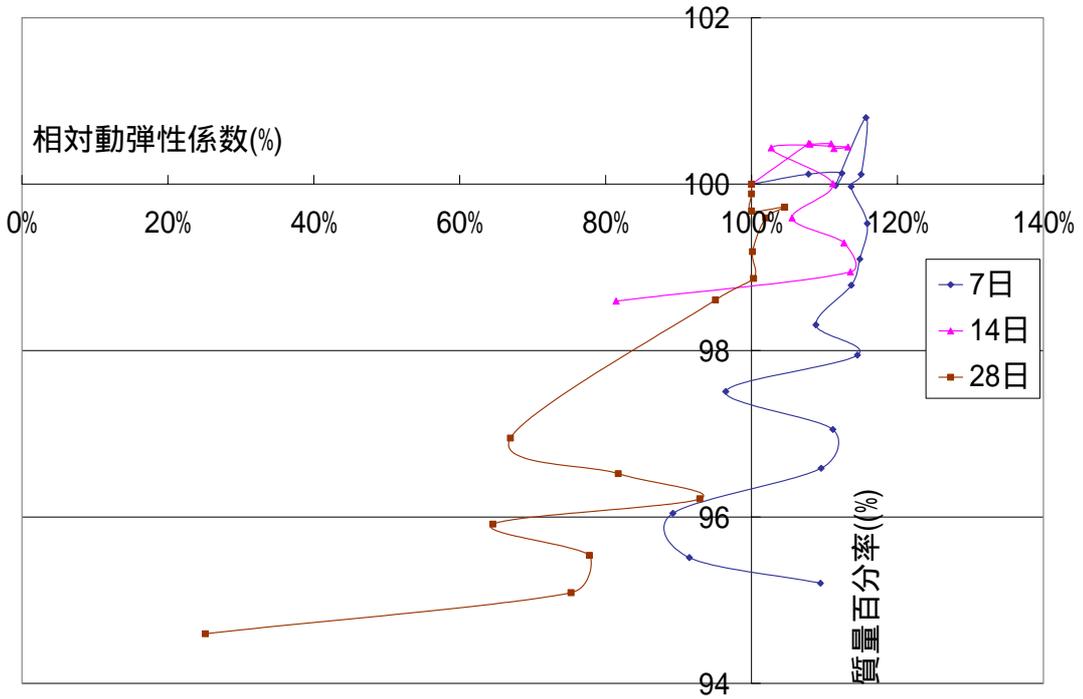


図 6.28 修正相対動弾性係数と質量百分率の関係 (W/C=50% , 最低温度-17)

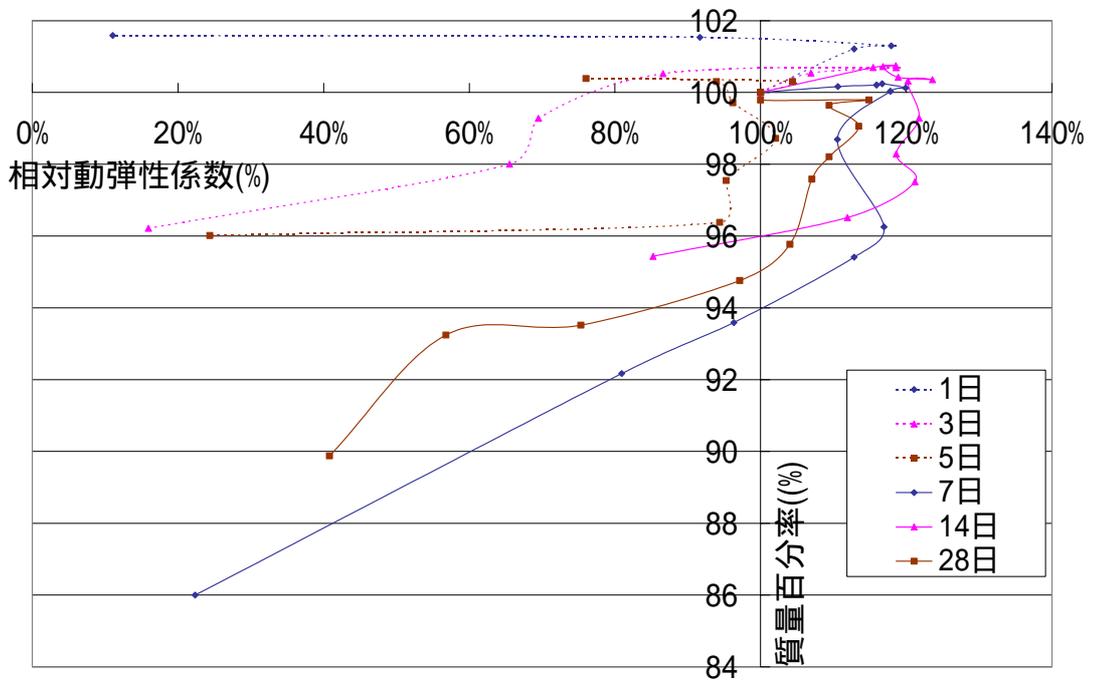


図 6.29 修正相対動弾性係数と質量百分率の関係 (W/C=65% , 最低温度-17)

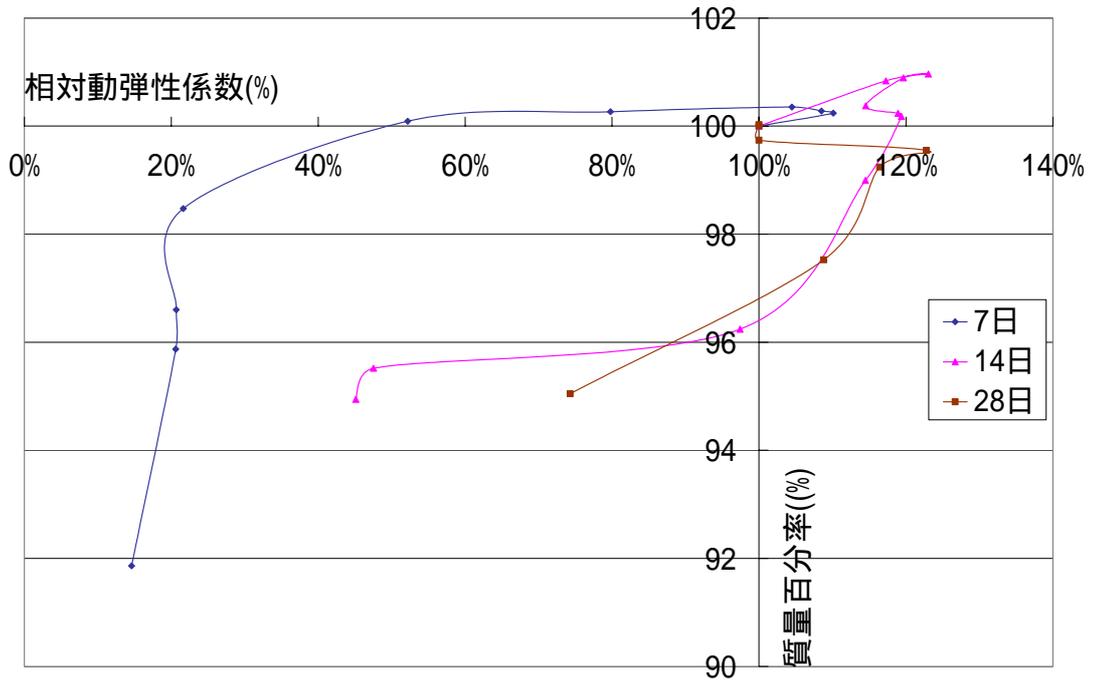


図 6.30 修正相対動弾性係数と質量百分率の関係 (W/C=80% , 最低温度-17)

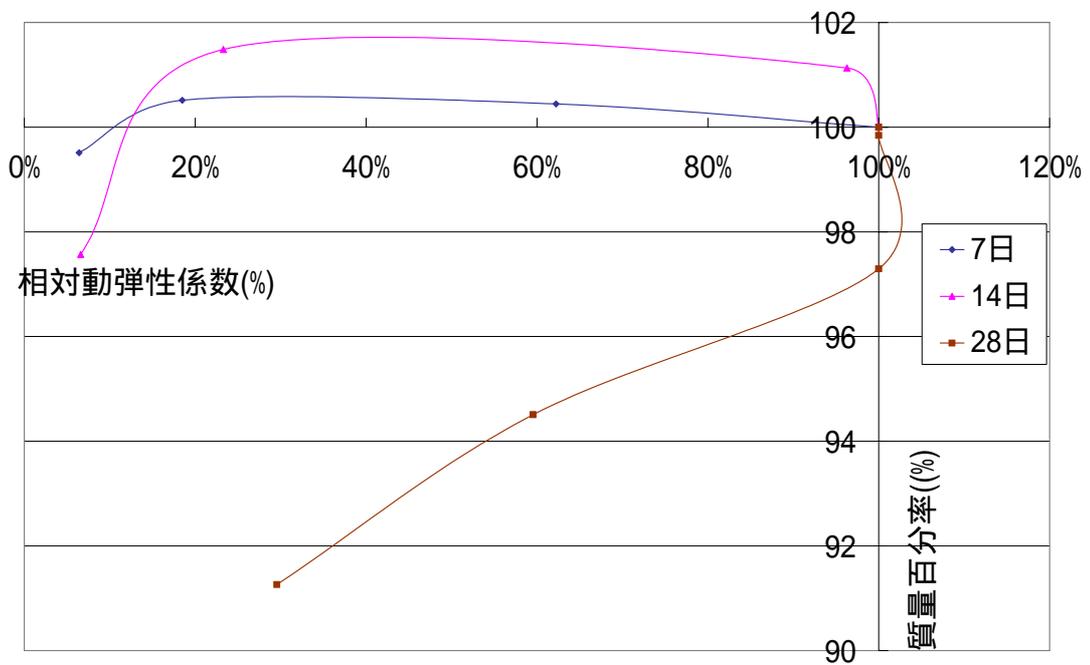


図 6.31 修正相対動弾性係数と質量百分率の関係 (W/C=110% , 最低温度-17)

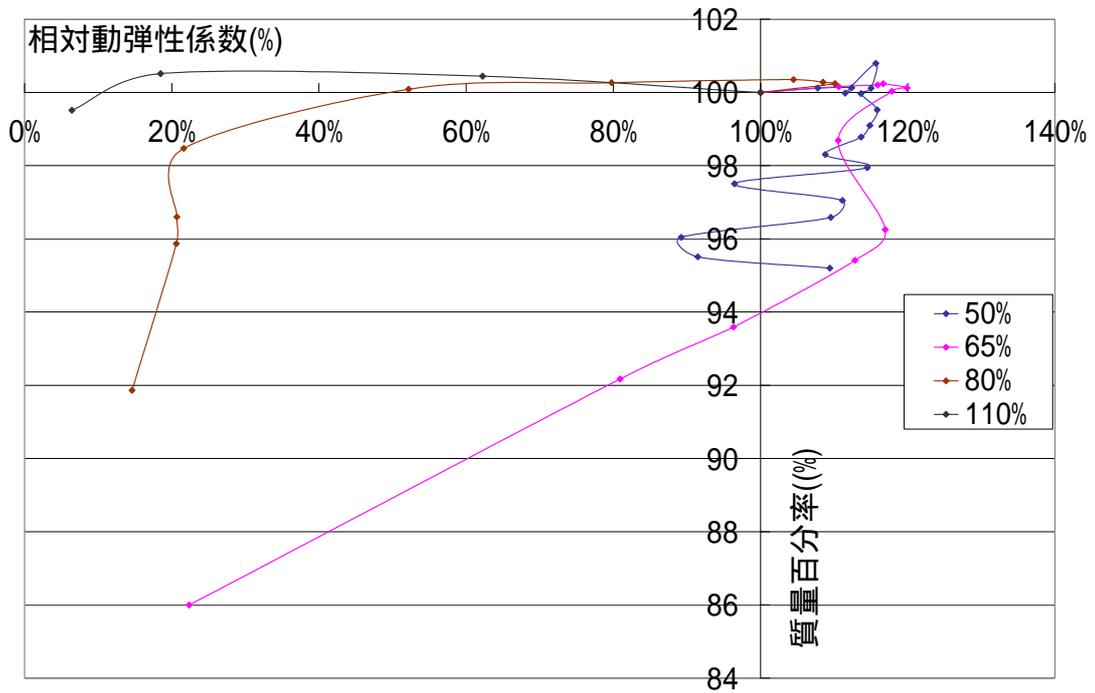


図 6.32 修正相対動弾性係数と質量百分率の関係（開始材齢 7 日，最低温度-17℃）

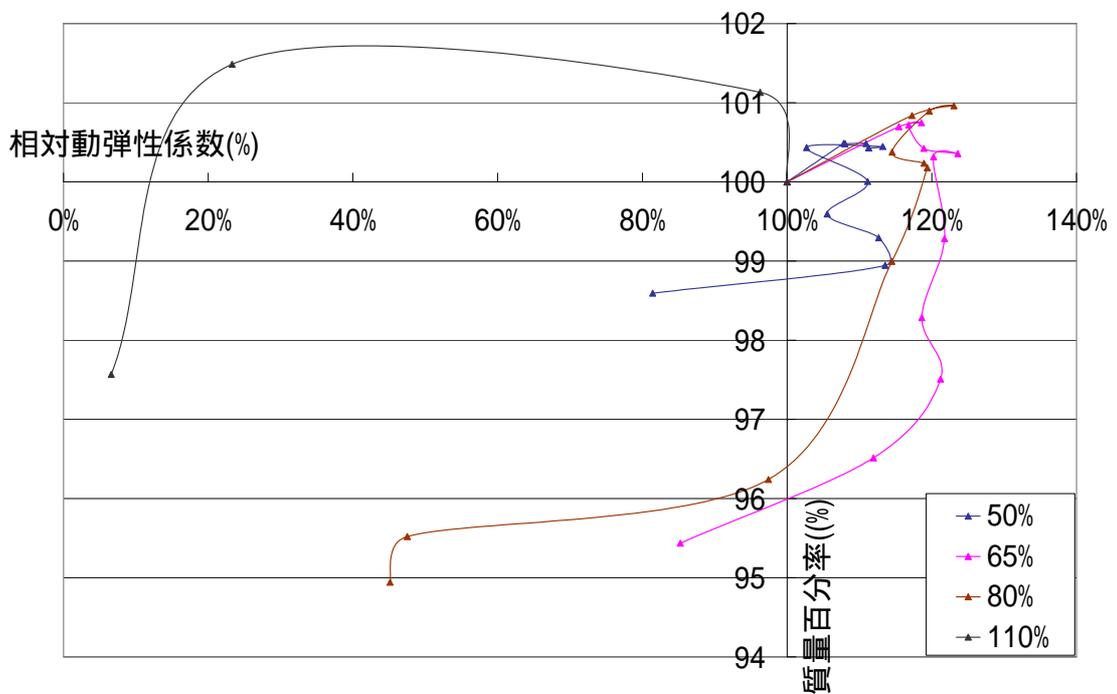


図 6.33 修正相対動弾性係数と質量百分率の関係（開始材齢 14 日，最低温度-17℃）

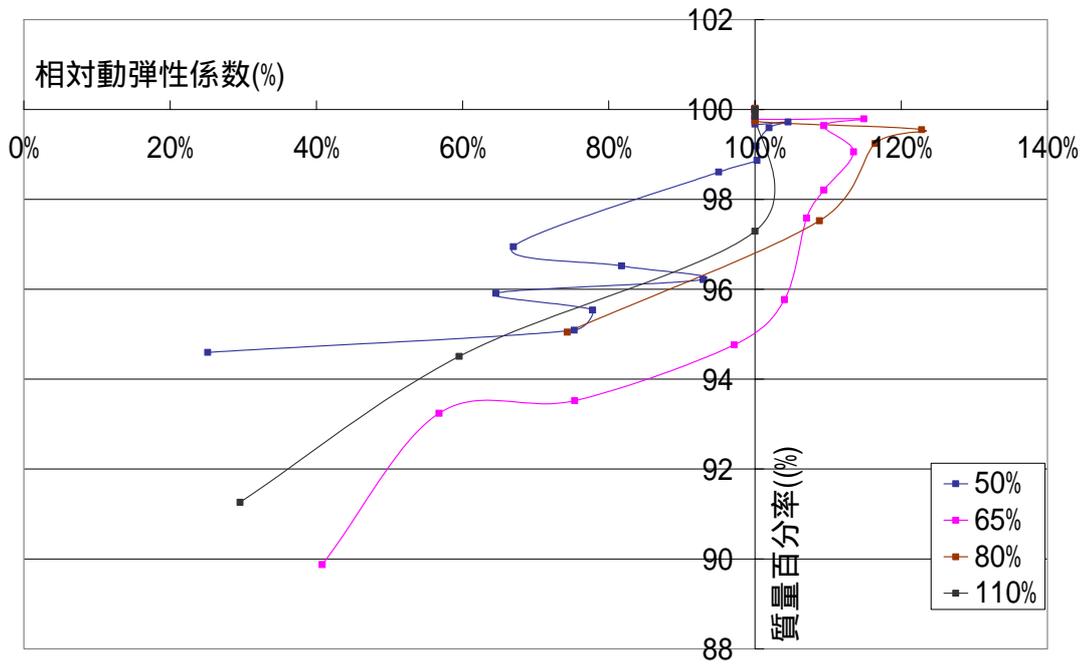


図 6.34 修正相対動弾性係数と質量百分率の関係（開始材齢 28 日，最低温度-17℃）

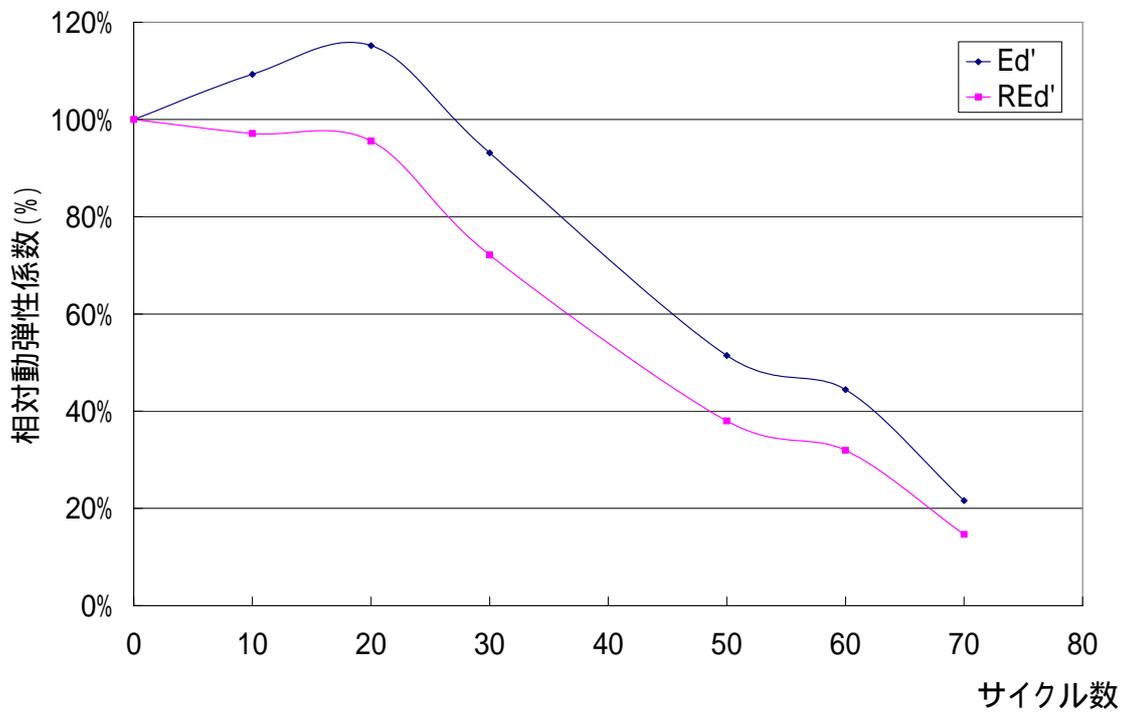


図 6.35 サイクル数と相対動弾性係数の関係（開始材齢 3 日，W/C=65%，最低温度-15℃）

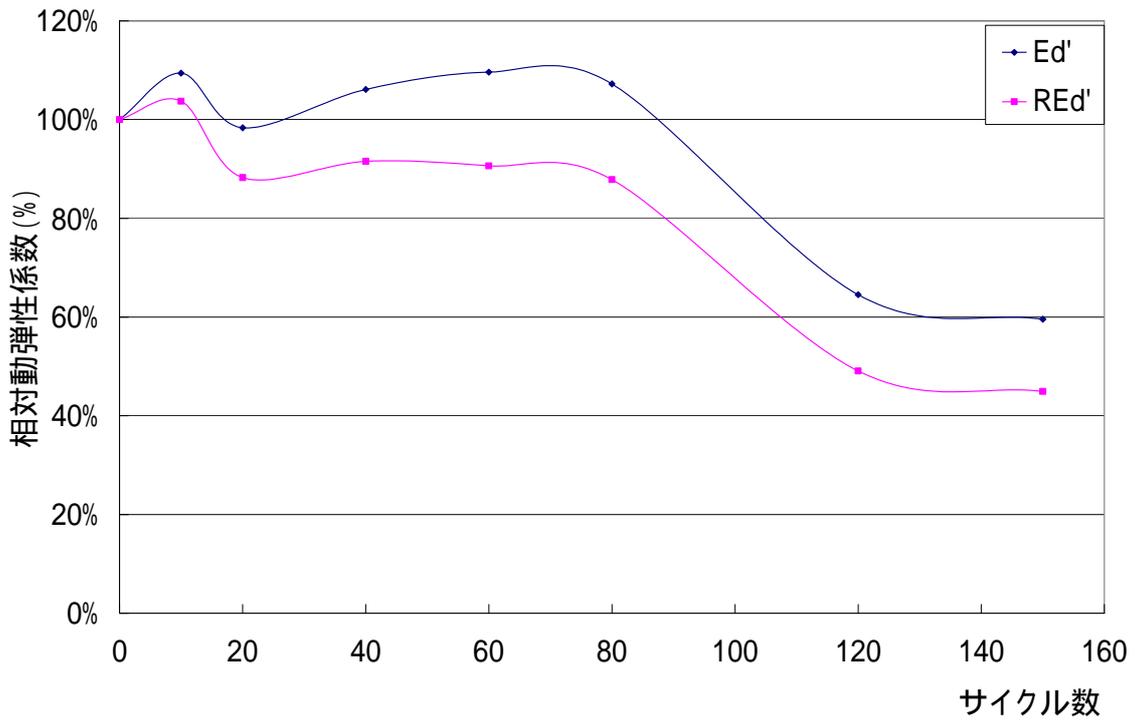


図 6.36 サイクル数と相対動弾性係数の関係（開始材齢 5 日，W/C=65%，最低温度-15℃）

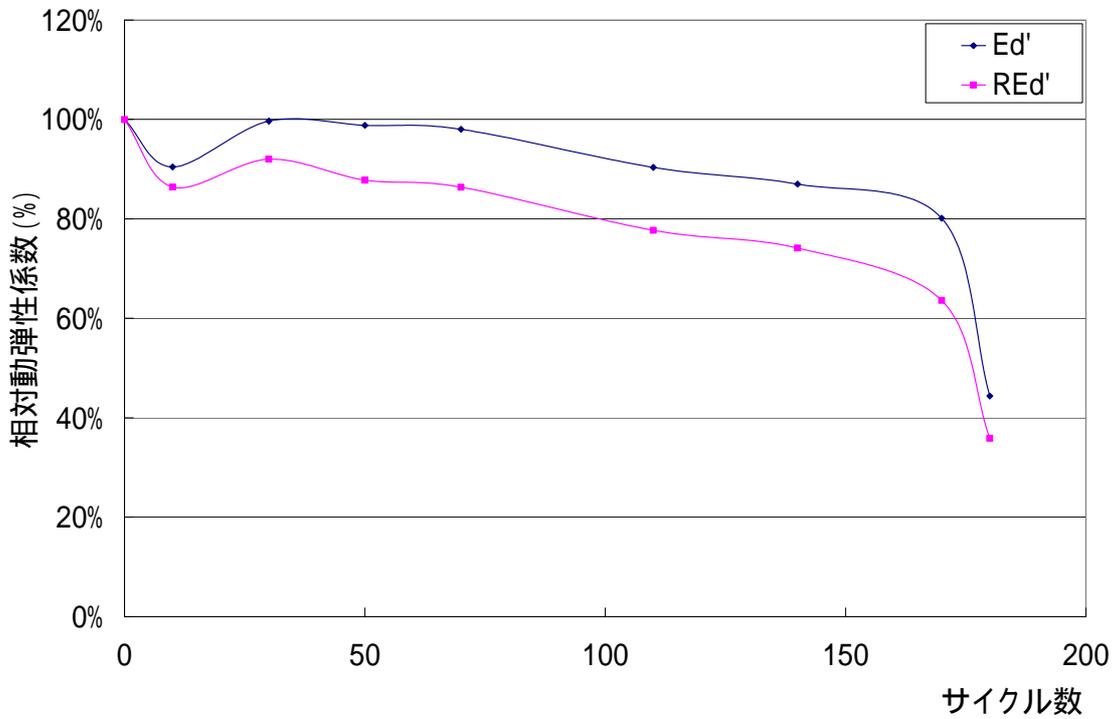


図 6.37 サイクル数と相対動弾性係数の関係（開始材齢 7 日，W/C=65%，最低温度-15℃）

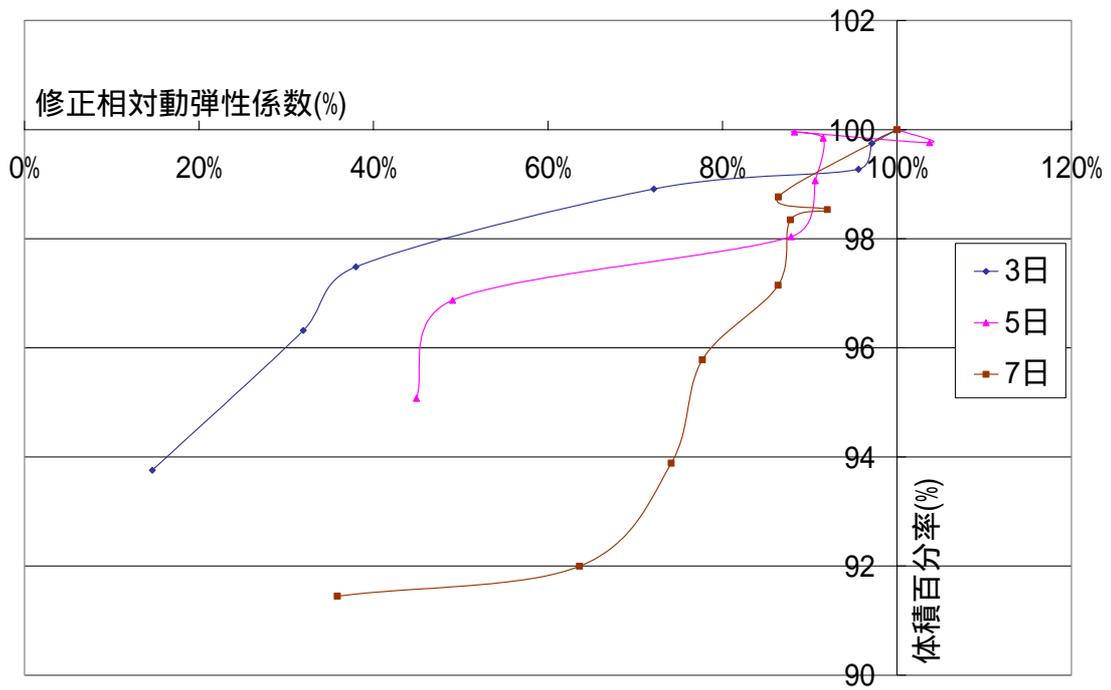


図 6.38 修正相対動弾性係数と体積百分率の関係 (W/C=65% , 最低温度-15)

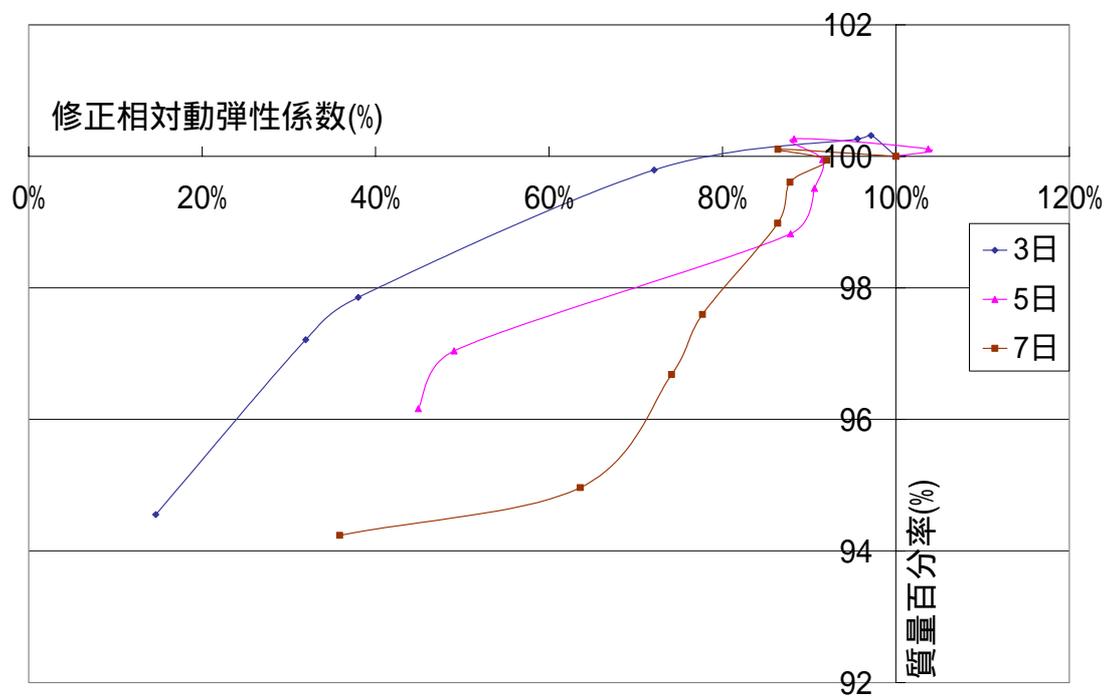


図 6.39 修正相対動弾性係数と質量百分率の関係 (W/C=65% , 最低温度-15)

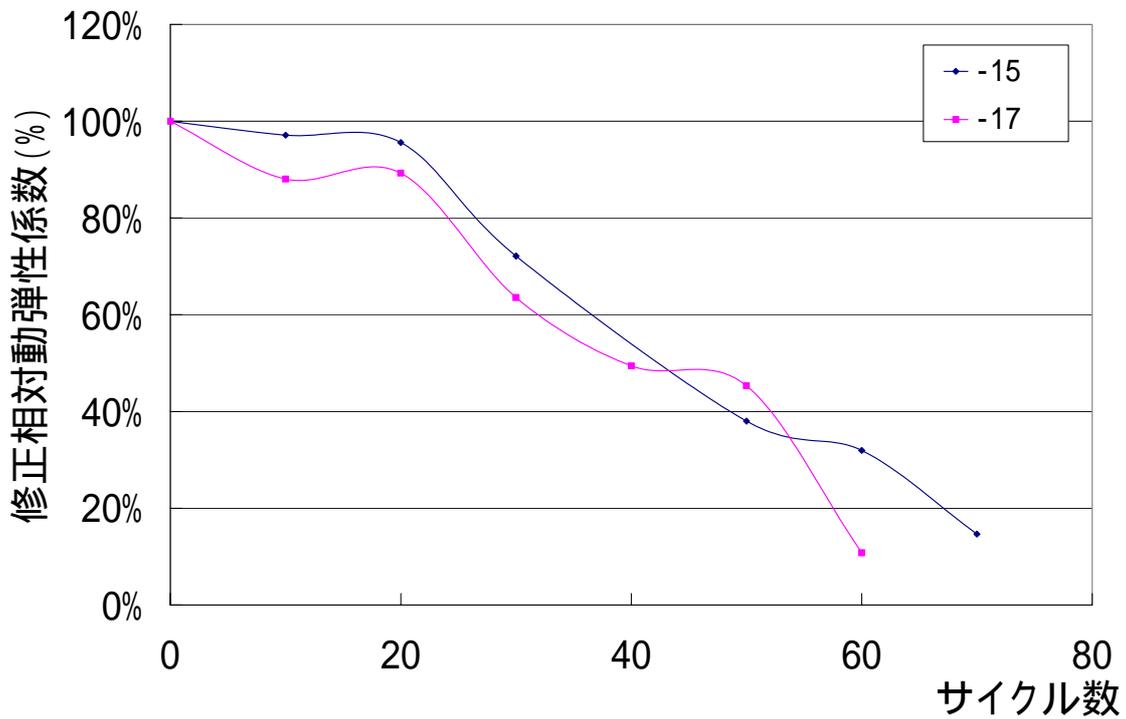


図 6.40 サイクル数と修正相対動弾性係数の関係（開始材齢 3 日，W/C=65%）

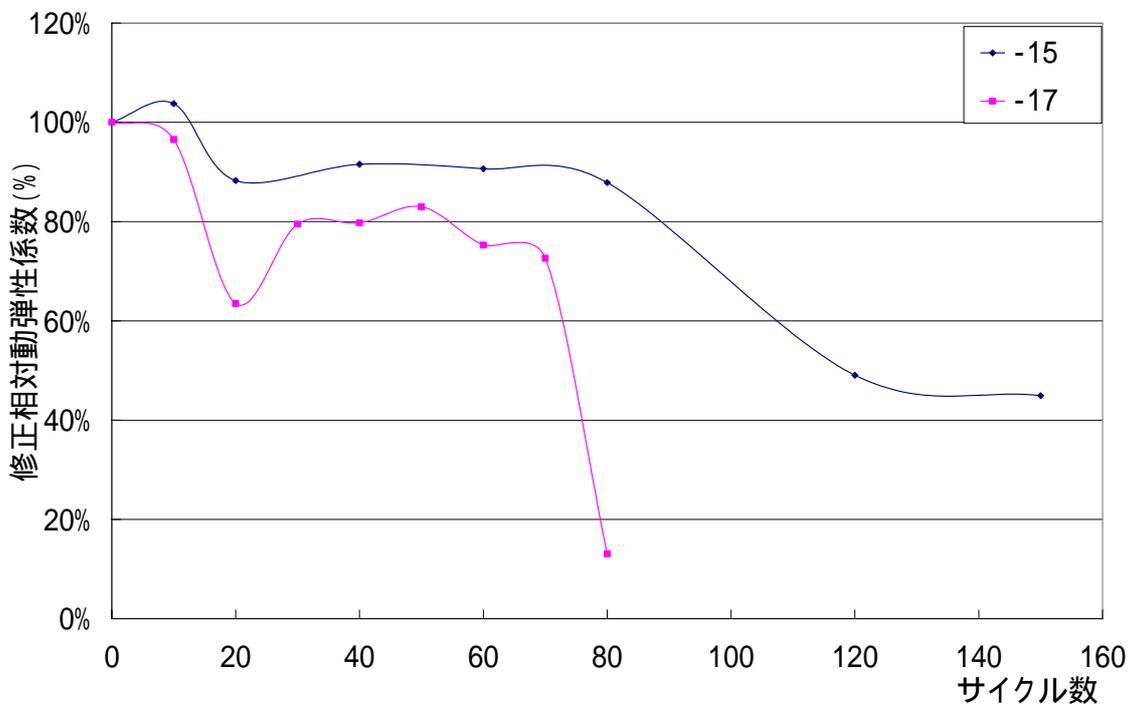


図 6.41 サイクル数と修正相対動弾性係数の関係（開始材齢 5 日，W/C=65%）

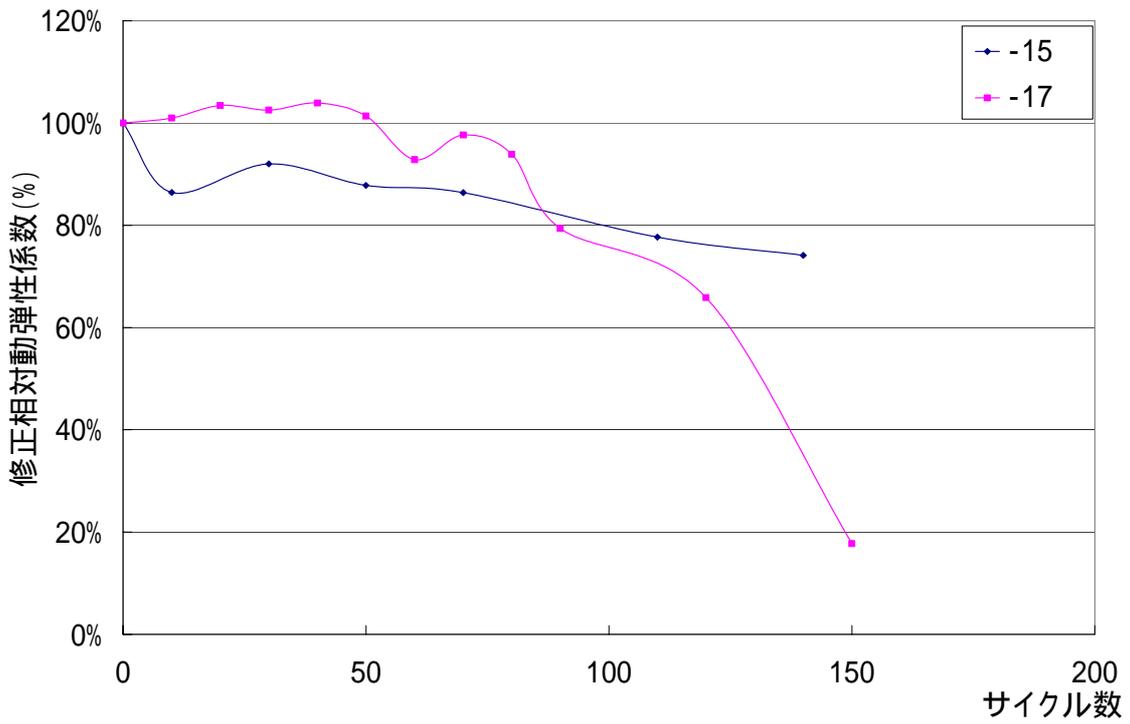


図 6.42 サイクル数と修正相対動弾性係数の関係 (開始材齢 7 日, W/C=65%)

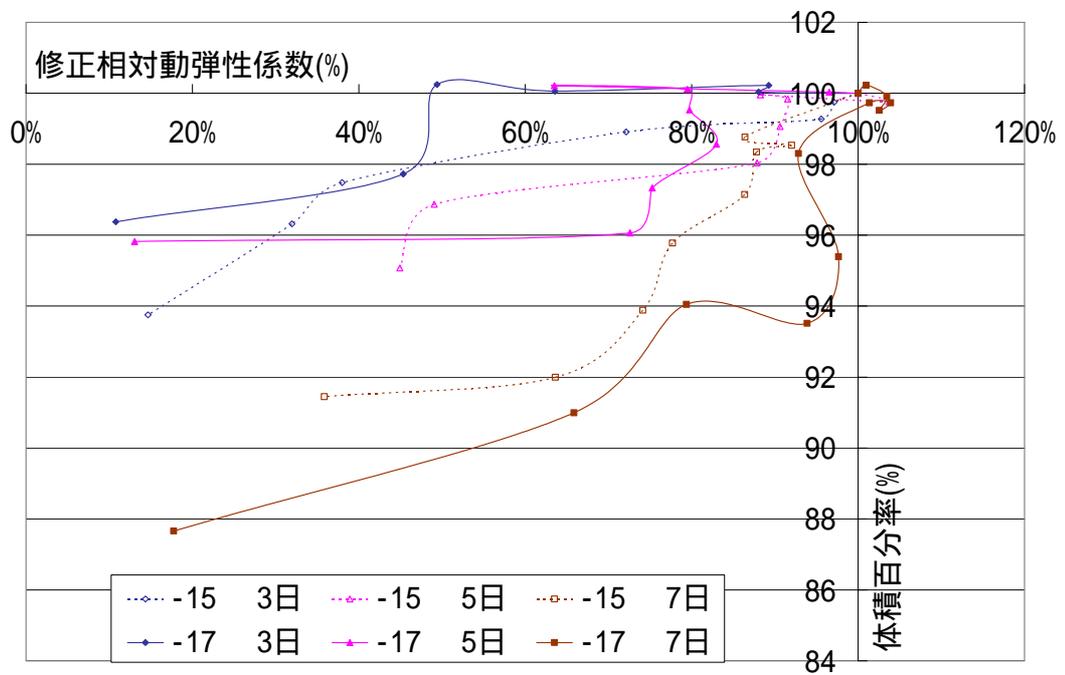


図 6.43 修正相対動弾性係数と体積百分率の関係 (W/C=65%)

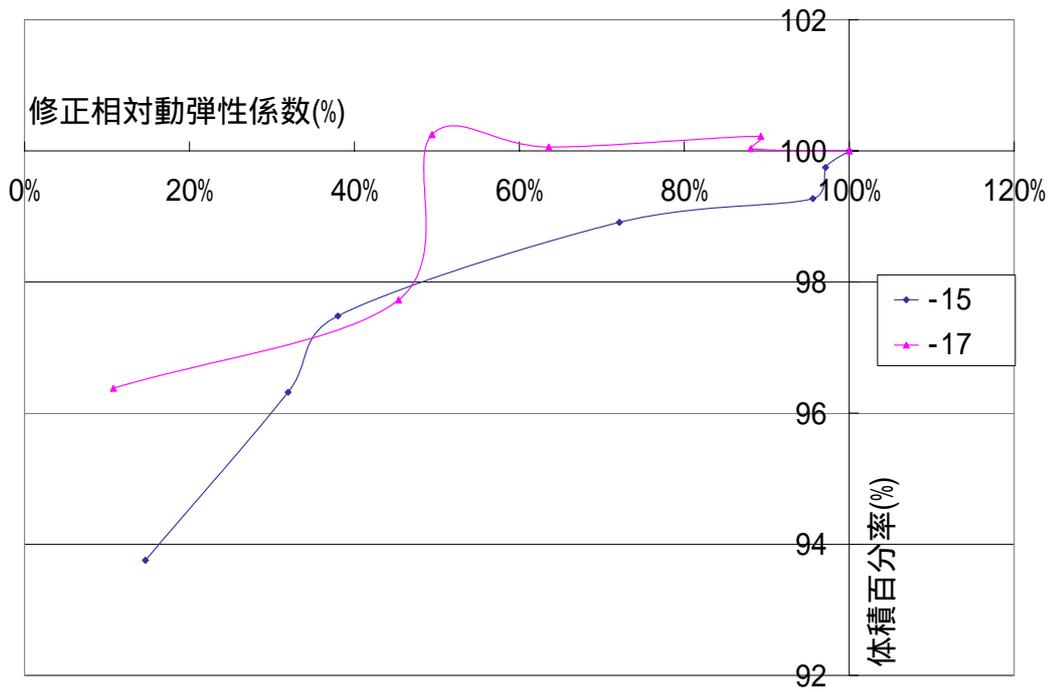


図 6.44 修正相対動弾性係数と体積百分率の関係 (開始材齢 3 日, W/C=65%)

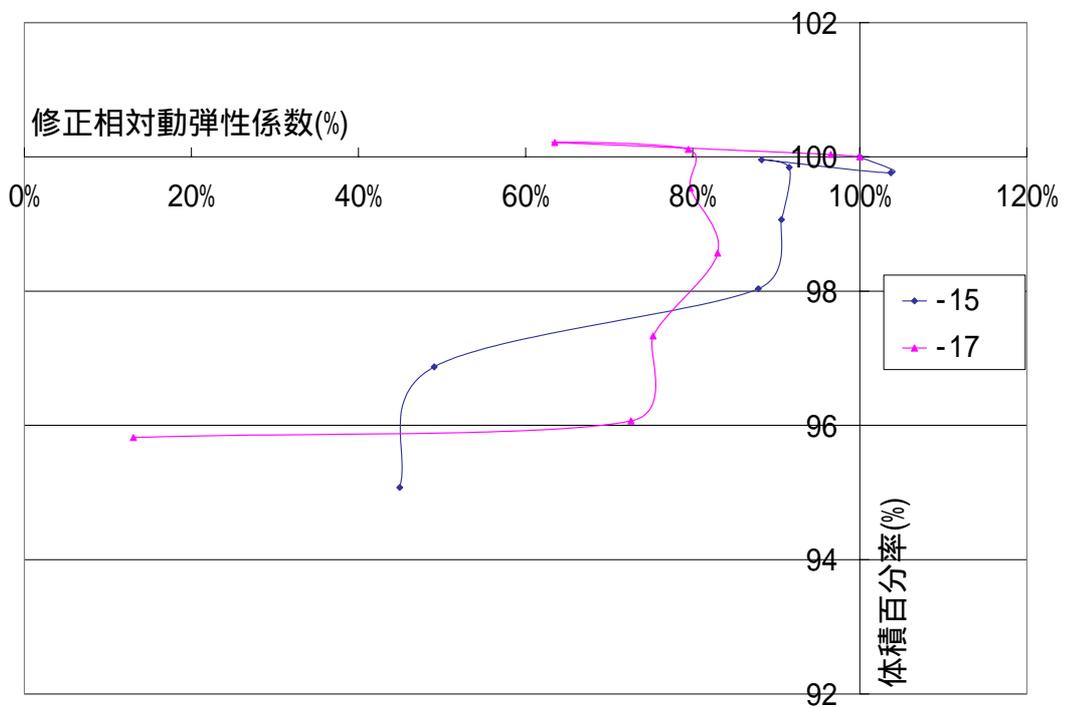


図 6.45 修正相対動弾性係数と体積百分率の関係 (開始材齢 5 日, W/C=65%)

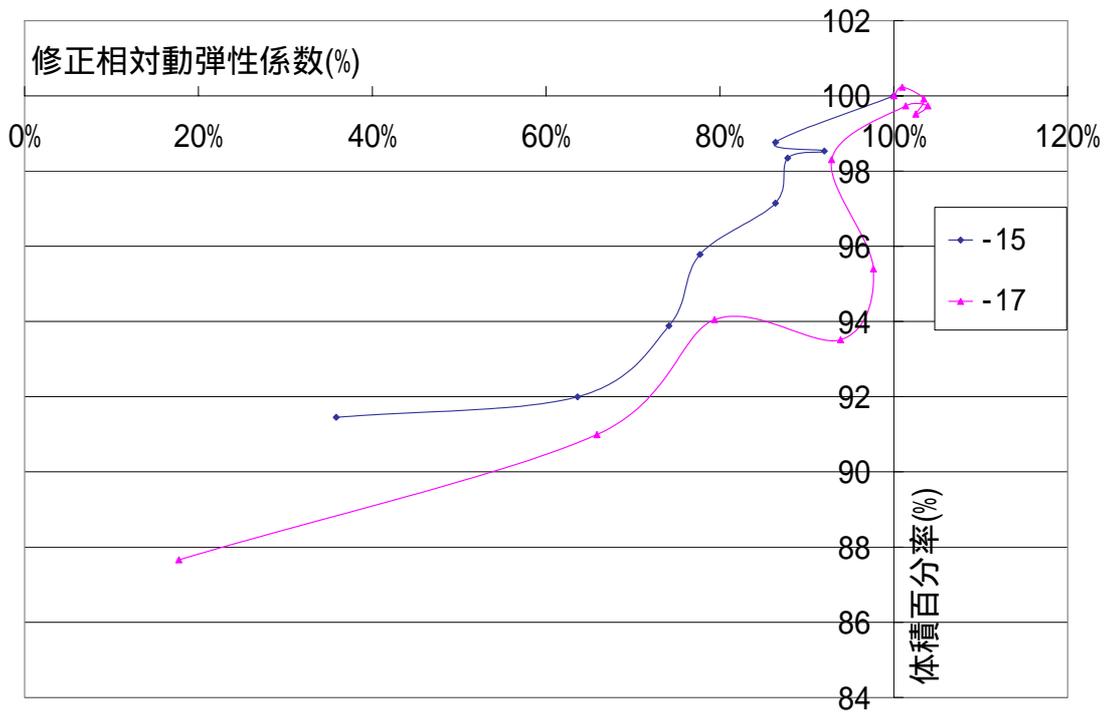


図 6.46 修正相対動弾性係数と体積百分率の関係（開始材齢 7 日，W/C=65%）

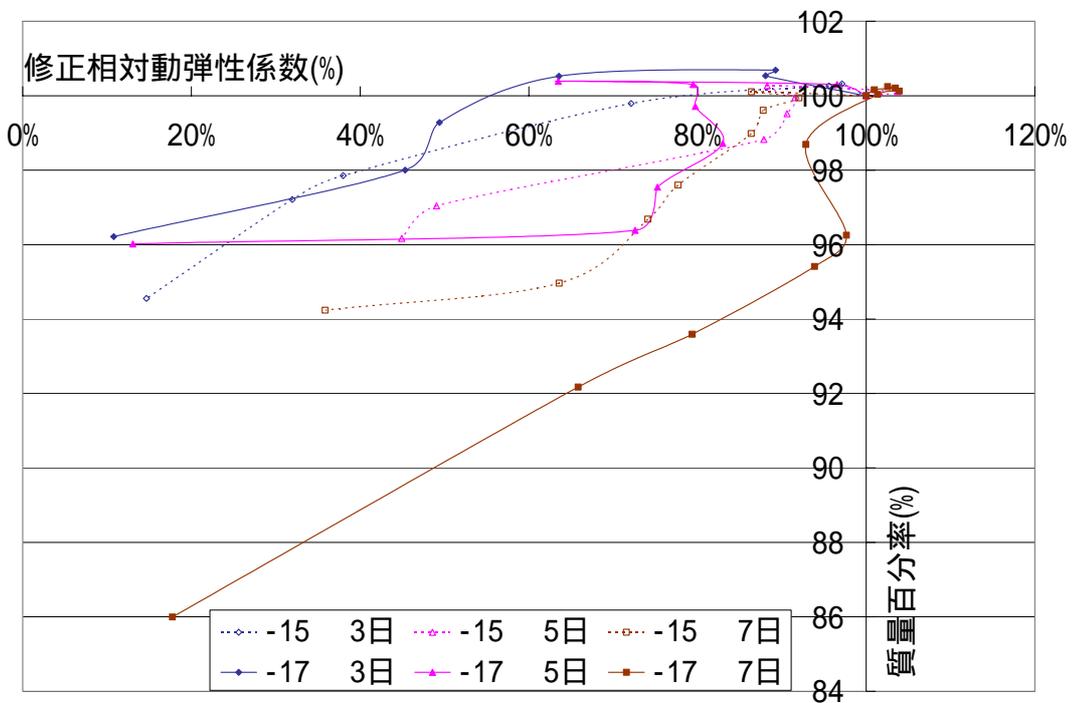


図 6.47 修正相対動弾性係数と質量百分率の関係（W/C=65%）

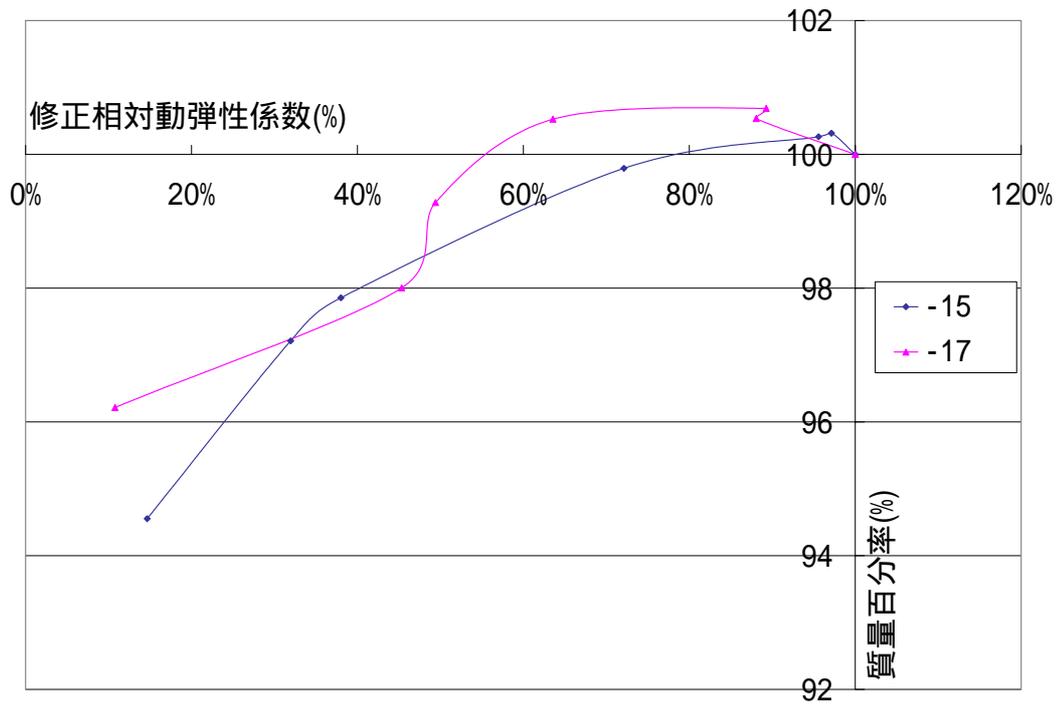


図 6.48 修正相対動弾性係数と質量百分率の関係 (開始材齢 3 日, W/C=65%)

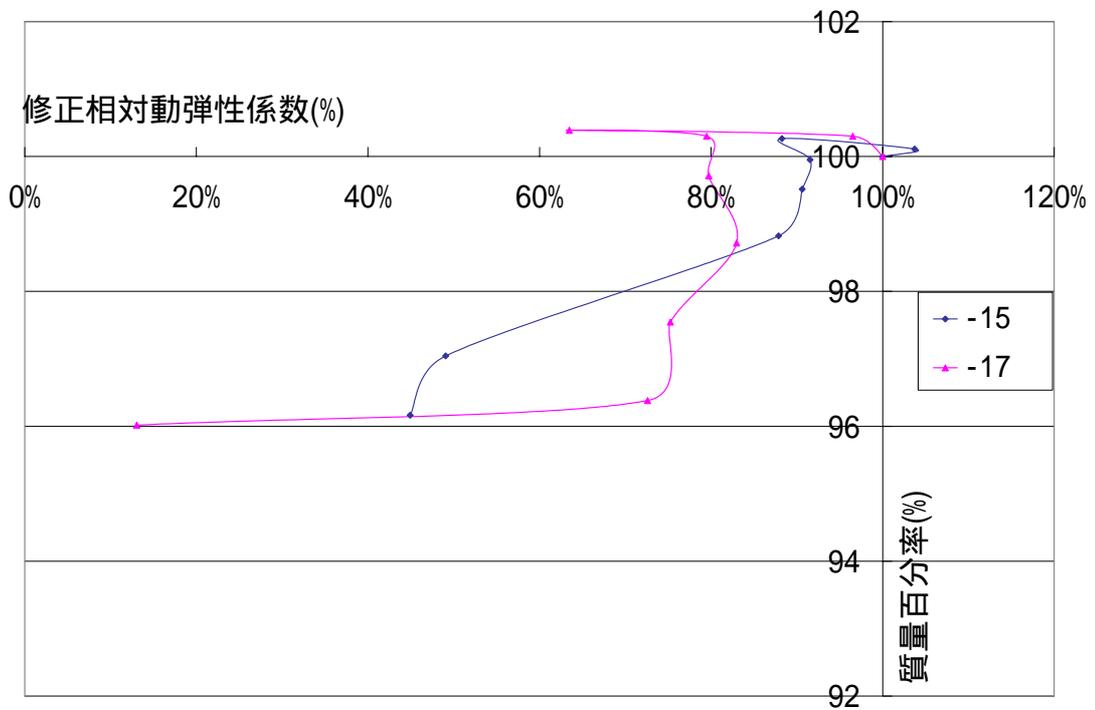


図 6.49 修正相対動弾性係数と質量百分率の関係 (開始材齢 5 日, W/C=65%)

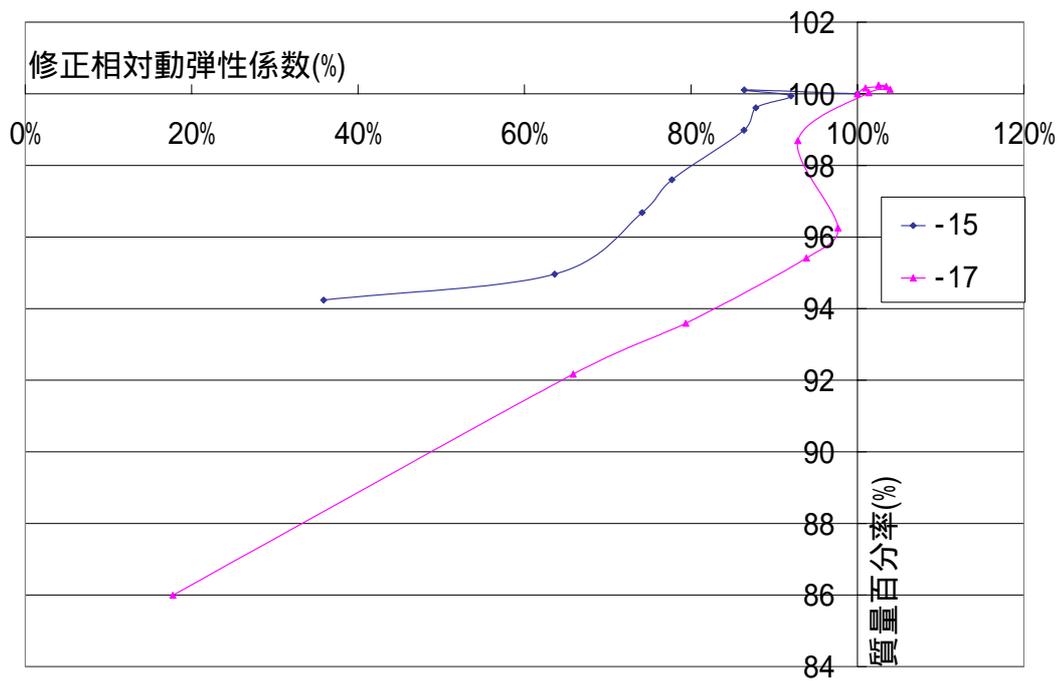


図 6.50 修正相対動弾性係数と質量百分率の関係（開始材齢 7 日，W/C=65%）

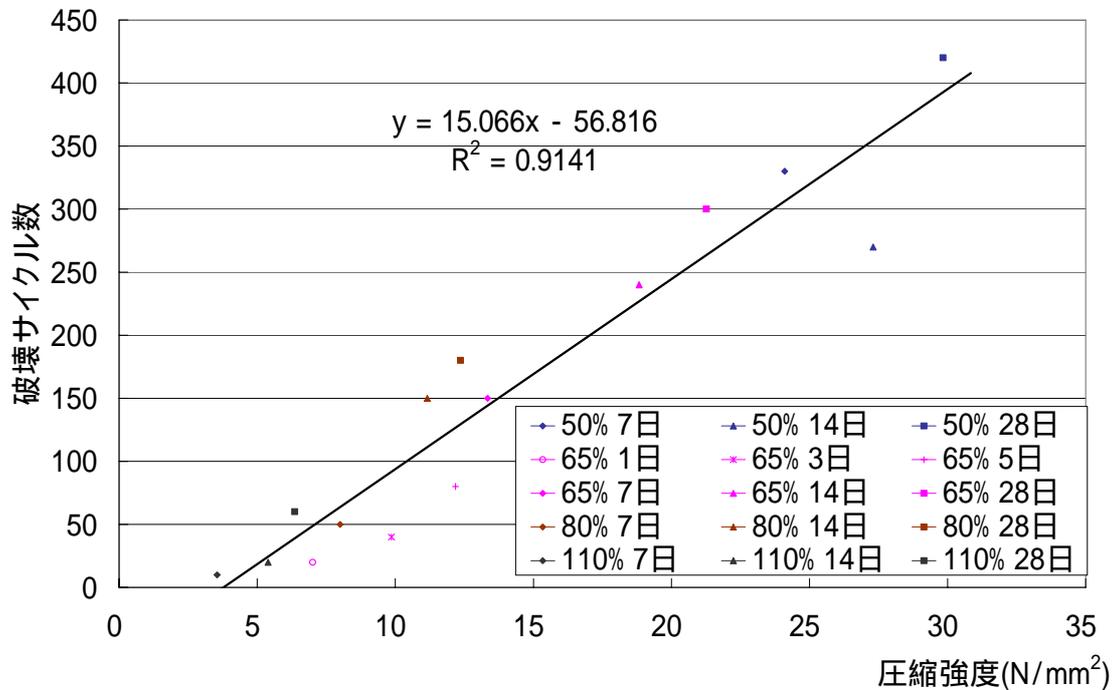


図 6.51 初期圧縮強度と破壊サイクル数の関係（最低温度-17℃）

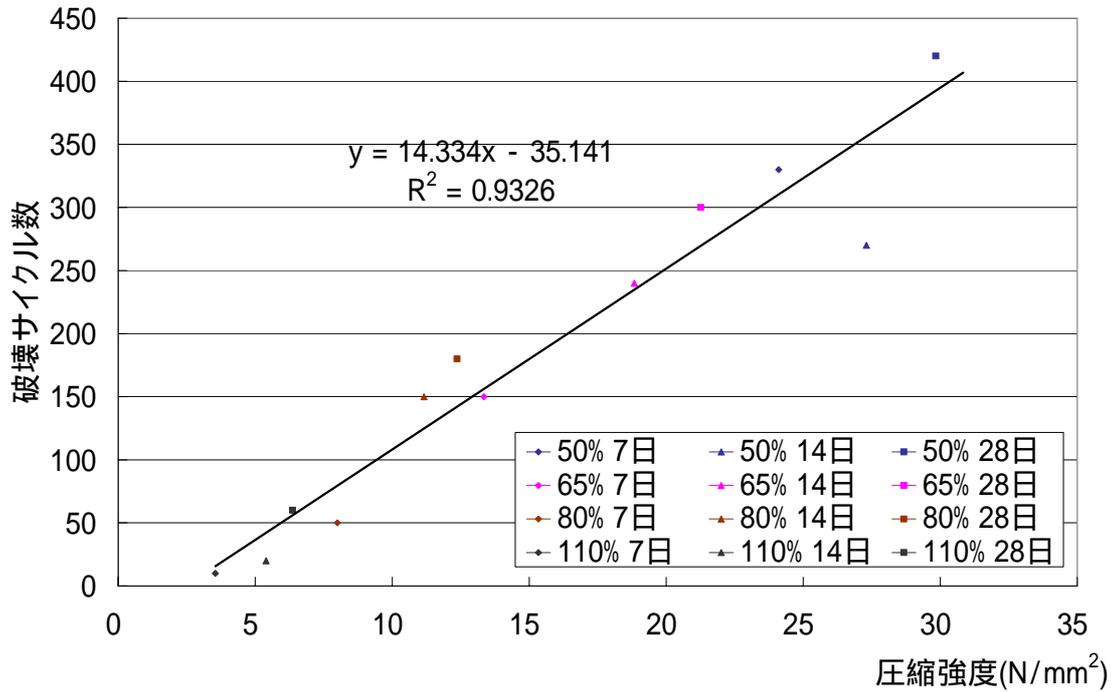


図 6.52 初期圧縮強度と破壊サイクル数の関係（最低温度-17℃）

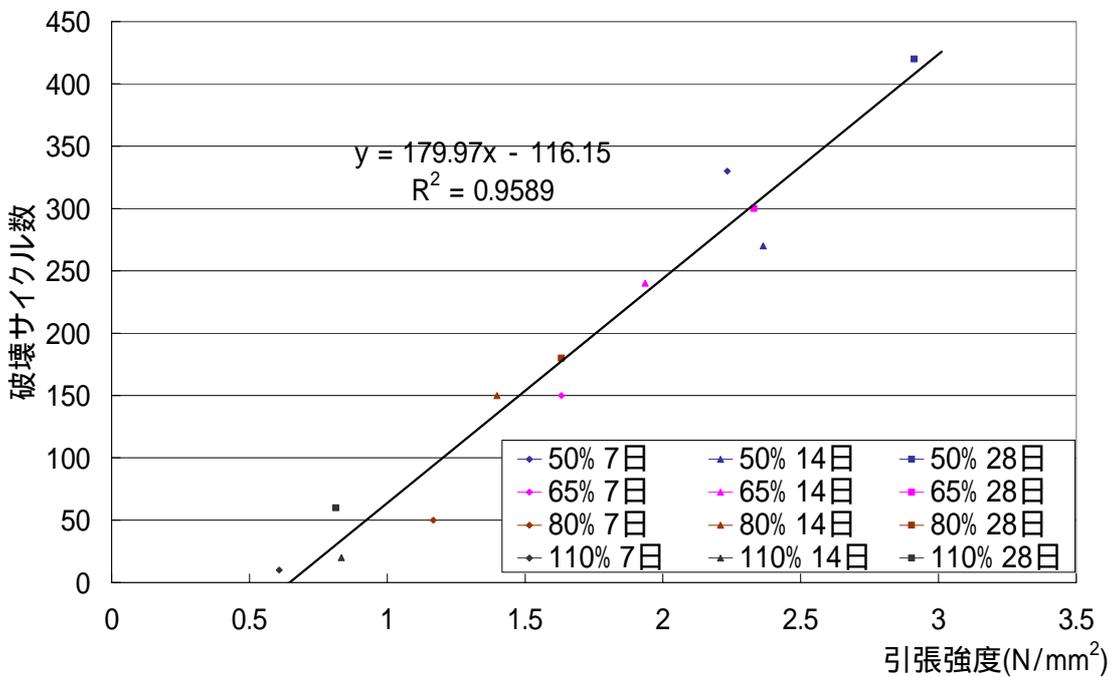


図 6.53 初期引張強度と破壊サイクル数の関係（最低温度-17℃）

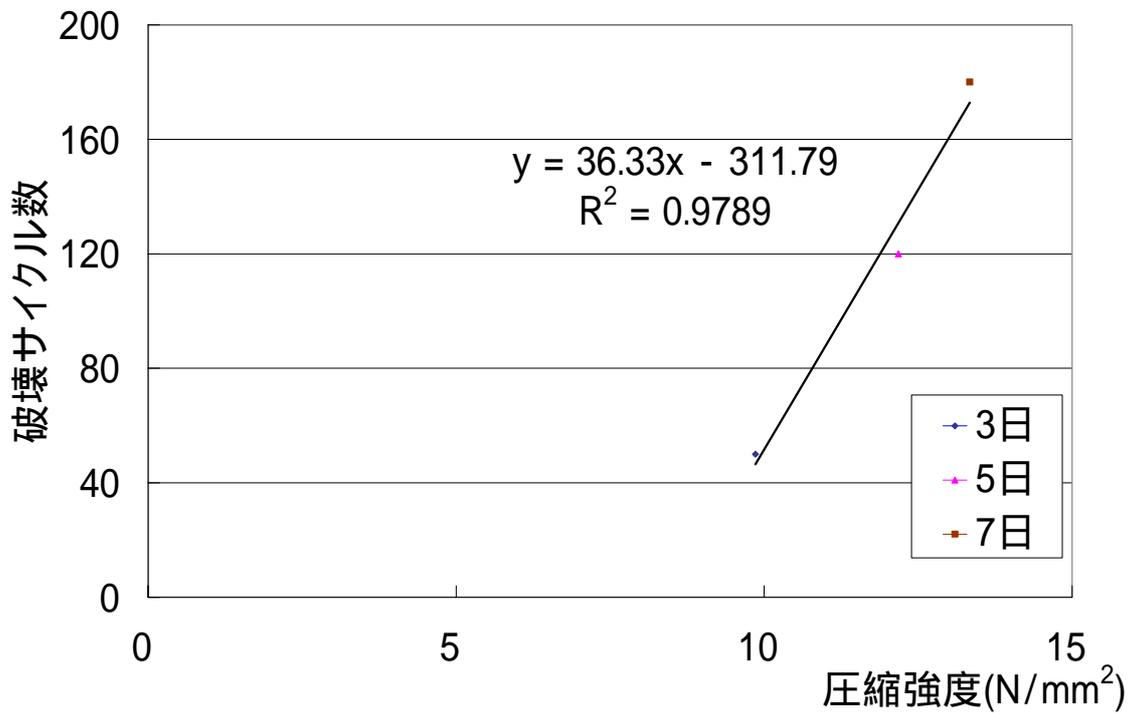


図 6.54 初期圧縮強度と破壊サイクル数の関係（最低温度-15℃）

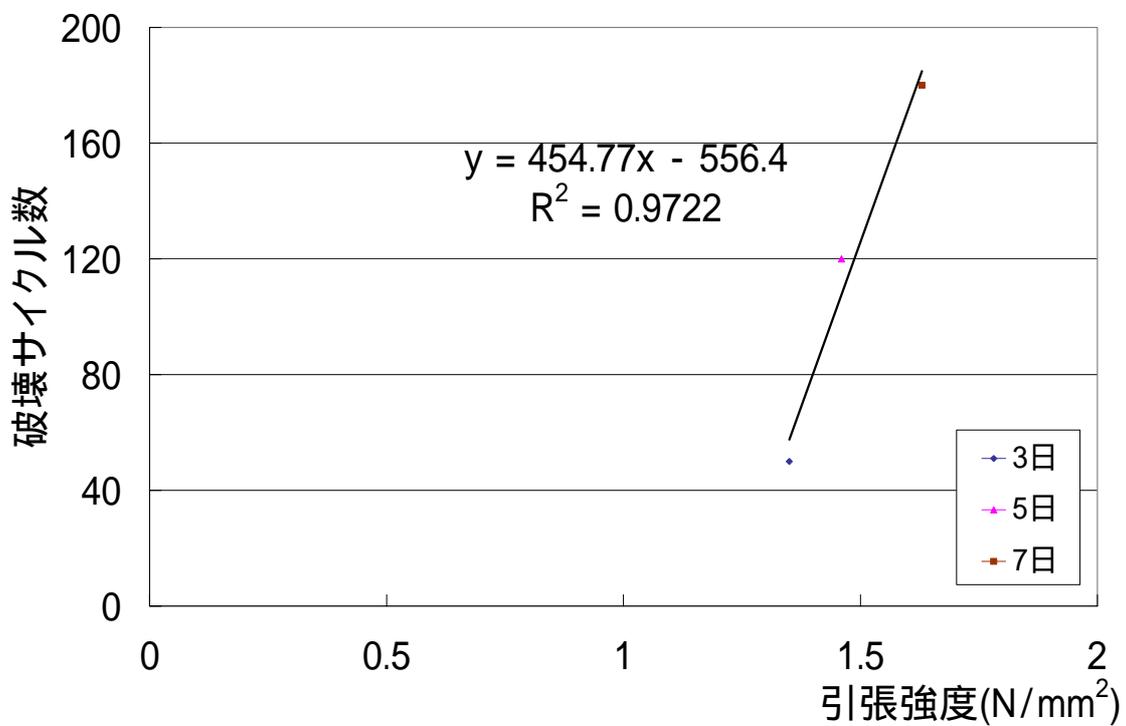


図 6.55 初期引張強度と破壊サイクル数の関係（最低温度-15℃）

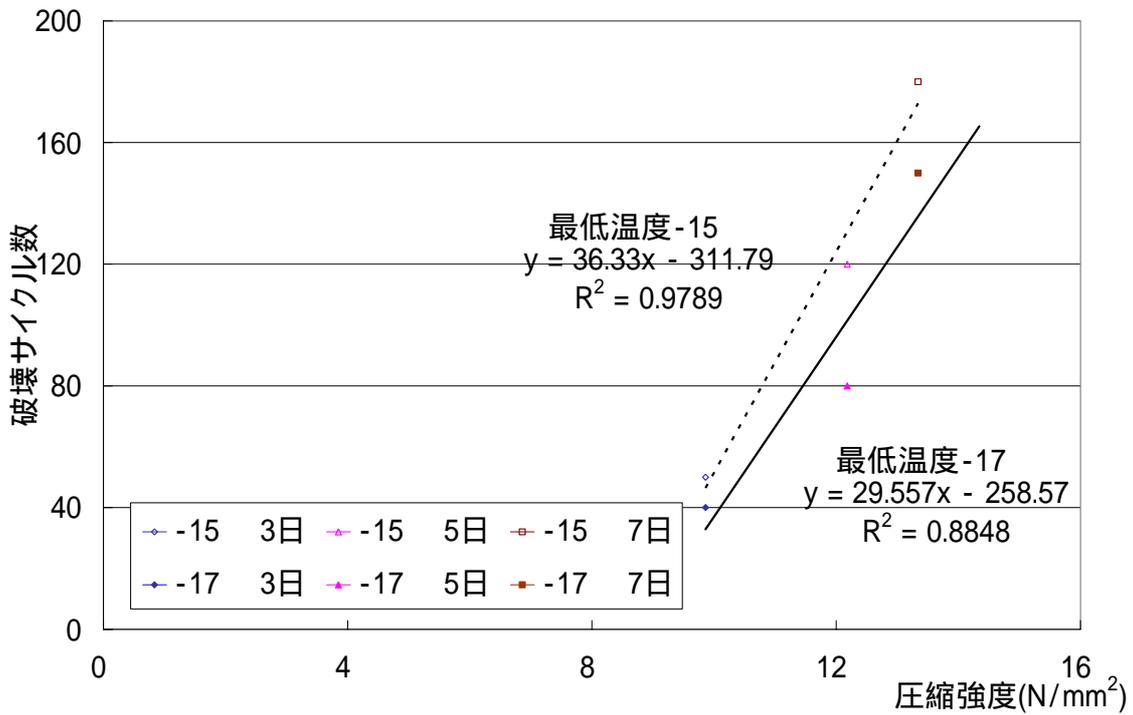


図 6.56 初期圧縮強度と破壊サイクル数の関係 (W/C=65%)

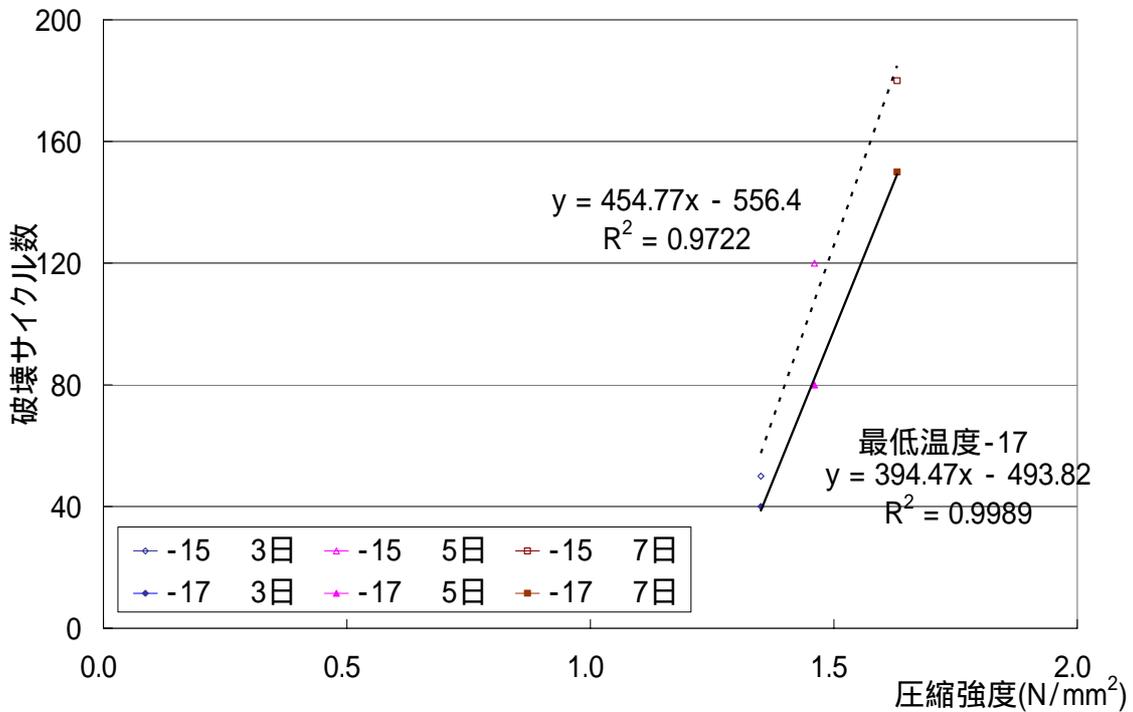


図 6.57 初期引張強度と破壊サイクル数の関係 (W/C=65%)

第7章 繊維補強コンクリートの耐凍結融解性

7.1 研究目的と構成

繊維補強コンクリートは靱性・耐久性が非常に高く，構造物の剥落防止や補修等に広く使用されている．そこで，本章では早強セメントを使用したプレーンコンクリート，MEGAMIX によりプレーンコンクリートを包み込んだ繊維補強コンクリート，KURALON K- を混ぜた繊維コンクリートの3つのコンクリートを用いて，耐凍結融解性にどのような影響を与えるかを検討することを目的としている．

7.2 繊維補強モルタル強度試験

7.2.1 繊維補強モルタル強度試験供試体の作成

(1) 配合

MEGAMIX はプレミックスであって水を加えるだけであるため，水粉体比（W/P）を10%，12%，14%とする．標準値は12%であるが比較のため10%，14%でも行った．

KURALON K- の配合を表7.1に示す．

表7.1 KURALON K- の配合

単位量(kg/m ³)				単位量(g/m ³)	
セメント	フライアッシュ	細骨材	水	AE 減水剤	ビニロン
740	320	530	370	2.6	26

(2) 練混ぜ

MEGAMIX に関して，モルタルミキサ - に先ず MEGAMIX を加え，次に練り混ぜ水を加えて手練りを行う．その後，低速回転で1分10秒，高速回転で40秒練り混ぜるものとする．

KURALON K- に関して，モルタルミキサに先ず細骨材を加え，次にセメント，フライアッシュ，及びあらかじめ AE 減水剤を混ぜた水を加え，低速で1分間，高速で1分間の練り混ぜを行う．その後，KURALON K- を加え，さらに低速で1分間，高速で1分間の練り混ぜを行う．

(3) 供試体の作成

50×100mm，40×40×160mm の型枠を用い，2層による充填とし，突き棒と木槌を用い締固めを行なった後に表面仕上げを行った．2日後に脱型し，その後水中養生を行った．

7.2.2 フロー値試験

フロー値試験は JIS R 5201 に準じて測定を行い、モルタルのフロー値は内径 55×50mm のフローコーンにモルタルを充填し、コーンを持ち上げた時に広がったモルタルの最大直径とそれに直交する直径を測定し、平均値を求めた。

7.2.3 圧縮強度試験

圧縮強度試験用供試体の製造は、JIS A 1132“コンクリートの強度試験用供試体の作り方”に準拠する。供試体の寸法は 50×100mm とし行った。圧縮強度試験は、JIS A 1108“コンクリートの圧縮強度試験方法”に準拠した。

7.2.4 曲げ強度試験

曲げ強度試験用供試体の製造は、JIS A 1132“コンクリートの強度試験用供試体の作り方”に準拠する。供試体の寸法は 40×40×160mm として行った。曲げ強度試験は、JIS A 1106“コンクリートの曲げ強度試験方法”に準拠した。

7.2.5 試験結果

(1) フロー試験結果

図 7.2 にフロー試験結果を示す。また、図中の項目として 10%、12%、14%とは MEGAMIX も W/P を示しており、ECC とは KURALON K- を使用した場合を示しており、以下略して呼ぶこととする。

W/P=10%、12%ではフロー値が他と比べて低く、14%のものが施工性の観点からは優れていると考えられる。

(2) 圧縮強度試験結果

図 7.3 に MEGAMIX の圧縮強度試験結果を、図 7.4 に材齢 7 日の ECC による圧縮強度試験結果を示す。

MEGAMIX では単位水量が増加するほど強度が低下する傾向となった。また、10%を除いて材齢 7 日以内でほぼ強度発現したと考えられる。ECC は MEGAMIX と比較して高い強度となった。これは配合に起因するものと考えられる。

(3) 曲げ強度試験結果

図 7.5 に MEGAMIX の曲げ強度試験結果をし、図 7.6 に材齢 7 日の使用繊維による圧縮強度試験結果を示す。

MEGAMIX では大きなばらつきがみられた。これは、施工性の観点から、均一なモルタルコンクリートの作成が出来なかったためではないかと考えられる。ECC は MEGAMIX と比較して高い強度となった。これは繊維の特性による物と考える。

(4)まとめ

MEGAMIX の W/P=10% , 12%は 14%に比べて強度は高い結果となったが , 施工性の観点からみて , 凍結融解試験の供試体は W/P=14%を検討することとした . また , ECC は非常に高い強度を示しており , これは繊維混入量が影響と考える .

7.3 繊維補強コンクリートの耐凍結融解性

7.3.1 凍結融解試験供試体の作成

MEGAMIX , ECC のモルタル供試体作成方法は 7.2 で示した通りである . 早強ポルトランドセメントについては , 容量 50 , 100 の(株)丸東三友製作所の強制練ミキサを使用し練混ぜを行った . コンクリートは練混ぜ後直ちに練板上に排出し , スコップによる切り返しを 3 往復行った後 , スランプ , 空気量の測定ならびに供試体作製を行った . 早強ポルトランドセメントの配合を表 7.2 に示す .

また , 供試体寸法は 100×200mm とした . MEGAMIX の供試体については , 75×150mm の早強セメントコンクリートを作成し , 2 日後に脱型後水中養生し , 3 日目に 100×200mm の型枠に入れ , W/P=14%の MEGAMIX を流し込みパイプレータを使用し締固めを行った . 図 7.1 に MEGAMIX の供試体概要図を示す .

表 7.2 早強ポルトランドセメント配合表

目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	W/C (%)	W (kg/m ³)	AE 減水剤 (g/m ³)
12 ± 1.0	2.0 ± 0.5	65	180	1000

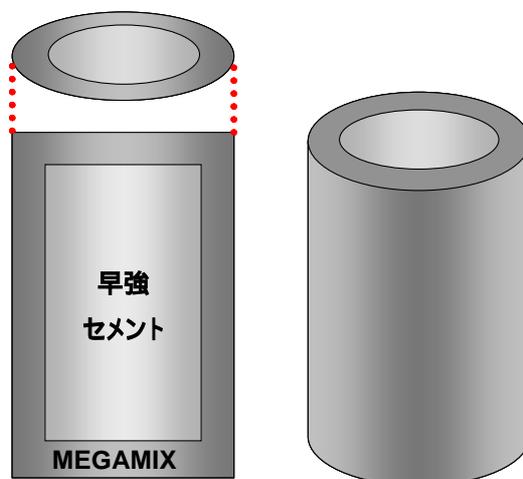


図 7.1 MEGAMIX 供試体概要図

7.3.2 試験ケース

本研究は凍結温度 -15℃，融解温度 4.5℃ として研究を行った。また，凍結融解試験開始材齢を 7 日とした。

7.3.3 試験結果

(1) 強度試験結果

表 7.3 に圧縮強度試験結果，表 7.4 に割裂引張強度試験結果を示す。

表 7.3 圧縮強度試験結果

圧縮強度 (N/mm ²)	7	14	28	破壊サイクル数	材齢
				水中養生供試体	凍結融解供試体
早強	35.1	38.8	41.4	90 サイクル	29 日
				41.5	11.8
MX	17.5	19.6	22.8	300 サイクル	68 日
					4.61
ECC	40.3	44.2	46.0	150 サイクル	41 日
				54.5	26.1

表 7.4 引張強度試験結果

引張強度(N/mm ²)	凍結融解サイクル数	材齢
	標準水中養生供試体	凍結融解試験供試体
早強	90 サイクル	29 日
	2.32	0.991
MX	300 サイクル	68 日
	1.79	1.20
ECC	150 サイクル	41 日
	5.61	3.21

(2) 相対動弾性係数の変化

図 7.7 にサイクル数と相対動弾性係数の関係を示す。凡例の MX とは MEGAMIX を示している。破壊に至る順番としては、早強、ECC、MEGAMIX の順番となっている。MEGAMIX は相対動弾性係数の低下があまり見られず、凍結融解 300 サイクルにおいても相対動弾性係数が 90% を上回っており、耐凍結融解性が高い結果となった。これは、MEGAMIX の層が W/P=14% という非常に水分が少ない状態であるために、耐凍結融解性が高い結果となったと考えられる。

(3) 体積百分率の推移

図 7.8 にサイクル数と体積百分率の関係を示す。MEGAMIX と ECC では体積増加傾向が顕著に見られた。これは、凍結融解によって供試体にクラックが入るが、繊維によって組織が繋がっているために剥離せずに、その部分に水の供給・凍結が起ることにより体積が増加したためと考えられる。ECC は、体積百分率が 102% から 103% で平衡状態になっている。また、ECC より MEGAMIX の方が体積増加は見られたが、これは、繊維の長さが影響しているのではないかと考えられるが、その原因については明確にすることが出来なかった。

(4) 質量百分率の推移

図 7.9 にサイクル数と質量百分率の関係を示す。MEGAMIX と ECC では質量増加傾向が顕著に見られた。これは、凍結融解によって供試体にクラックが入るが、繊維によって組織が繋がっているために剥離せずに、その部分に水の供給が起ることにより質量が増加したためと考えられる。ECC は、質量が減少することなく増加する傾向となった。

(5) 質量百分率と体積百分率の関係

図 7.10 と図 7.11 に質量百分率と体積百分率の関係を示す。MEGAMIX と ECC では質量増加に対して体積増加の方が大きくなった。これは、繊維によって組織が繋がっているためにクラック発生にも関わらず剥離せずに膨張し、そのクラック部分に水が供給されるが、繊維により繋がっているために体積膨張に対して水の供給量が少なくなったためと考える。

(6) 相対動弾性係数と体積百分率の関係

図 7.12 に相対動弾性係数と体積百分率の関係を示す。MEGAMIX と ECC について、関係性がみられなかった。これは、相対動弾性係数の低下にも関わらず、繊維によって体積が増加傾向にあったためと考える。

(7) 相対動弾性係数と質量百分率の関係

図 7.13 に相対動弾性係数と質量百分率の関係を示す。MEGAMIX と ECC について、関係性がみられなかった。これは、クラック発生による水分の供給と表面部の剥離現象が繊維混入をすることにより生じているためと考える。

7.4 結論

MEGAMIX、ECC とともに耐凍結融解性が優れている結果となり、繊維補強により耐凍結融解性が向上することが明らかとなった。また、ECC よりも MEGAMIX の方が耐凍結融解性が高い結果となったが、これは、MEGAMIX は W/P=14% という非常に単位水量が低い条件であったために供試体内部の凍結水が少なく劣化エネルギーが小さいためと考えられる。加えて、MEGAMIX は材齢 7 日で強度発現が十分であるために、現場施工を考慮した上でも MEGAMIX は補修材として適していると考えられる。また、繊維混入量や繊維径による耐凍結融解性の違いもあると考えられるが、明確な解明には至らなかった。

スケーリングに関してだが、繊維補強により劣化が進んだとしても、表面部の剥離傾向が少ない結果となり、組織が弛緩したとしても繊維による架橋効果のために体積・質量とも増加傾向にあった。つまり、劣化指標としてスケーリングを用いる場合には、これらの事を考慮しなければならなくなり、従来のコンクリートと違い、体積・質量が増加した際には強度が著しく低下している恐れがあると考えられるので十分に注意すべきと考える。

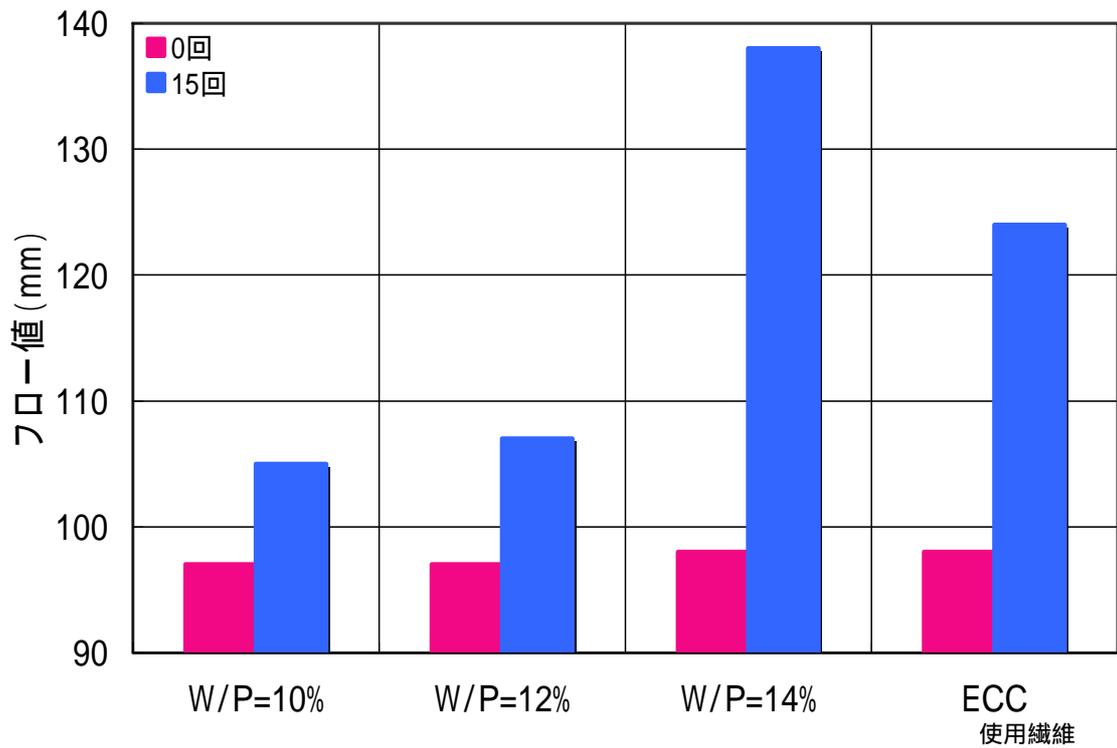


図 7.2 繊維モルタルのフロー値

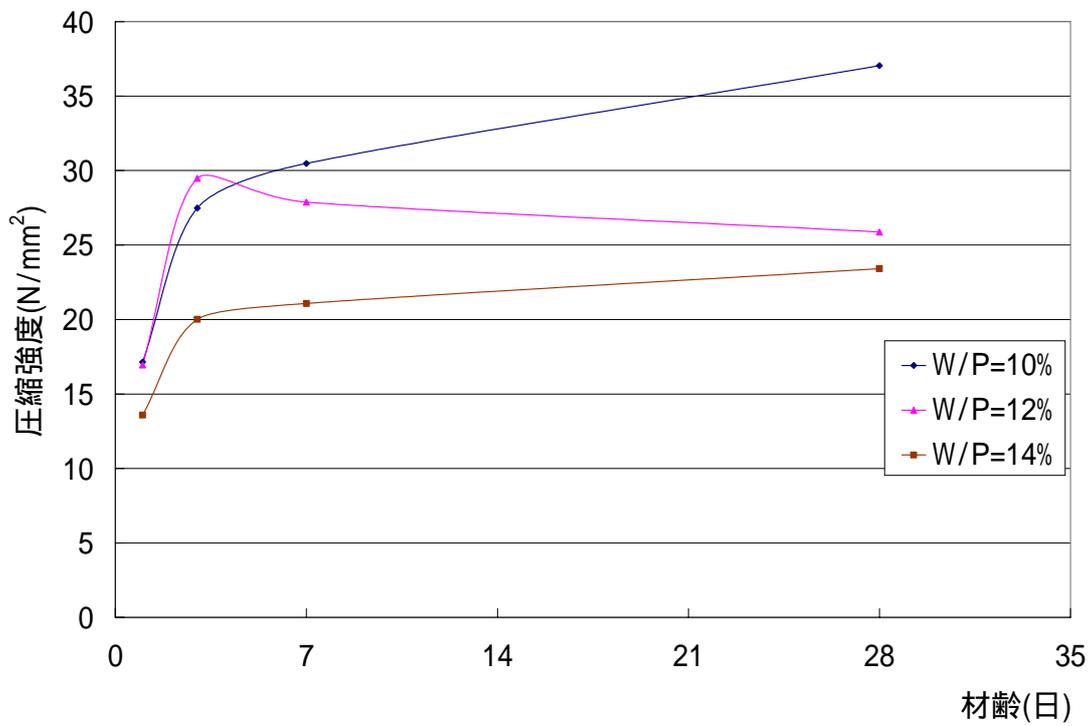


図 7.3 MEGAMIX の圧縮強度の推移

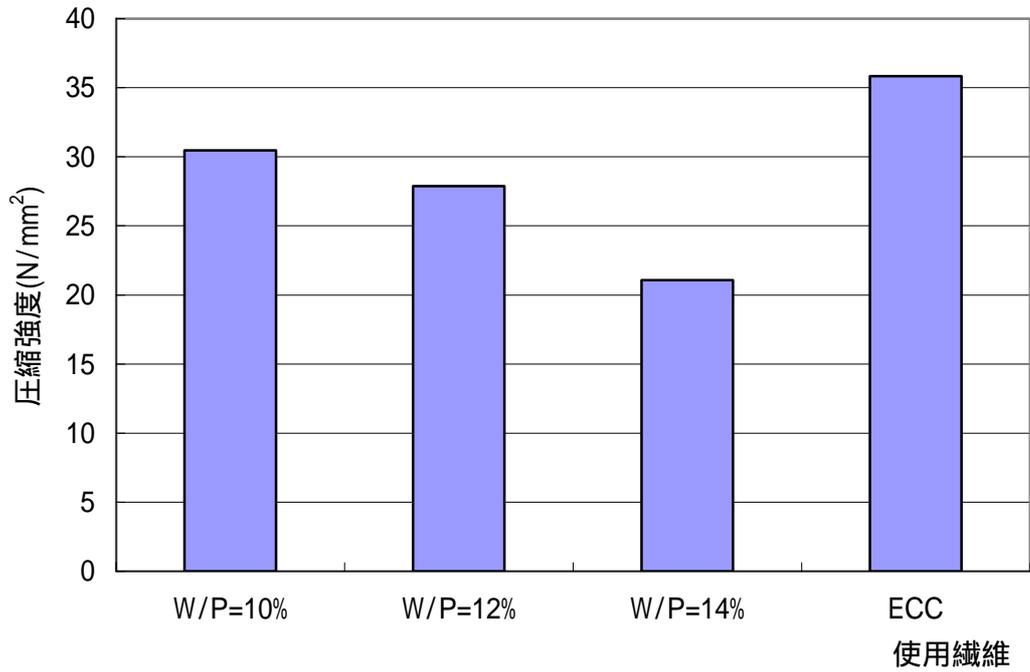


図 7.4 繊維補強モルタルの圧縮強度(材齢 7 日)

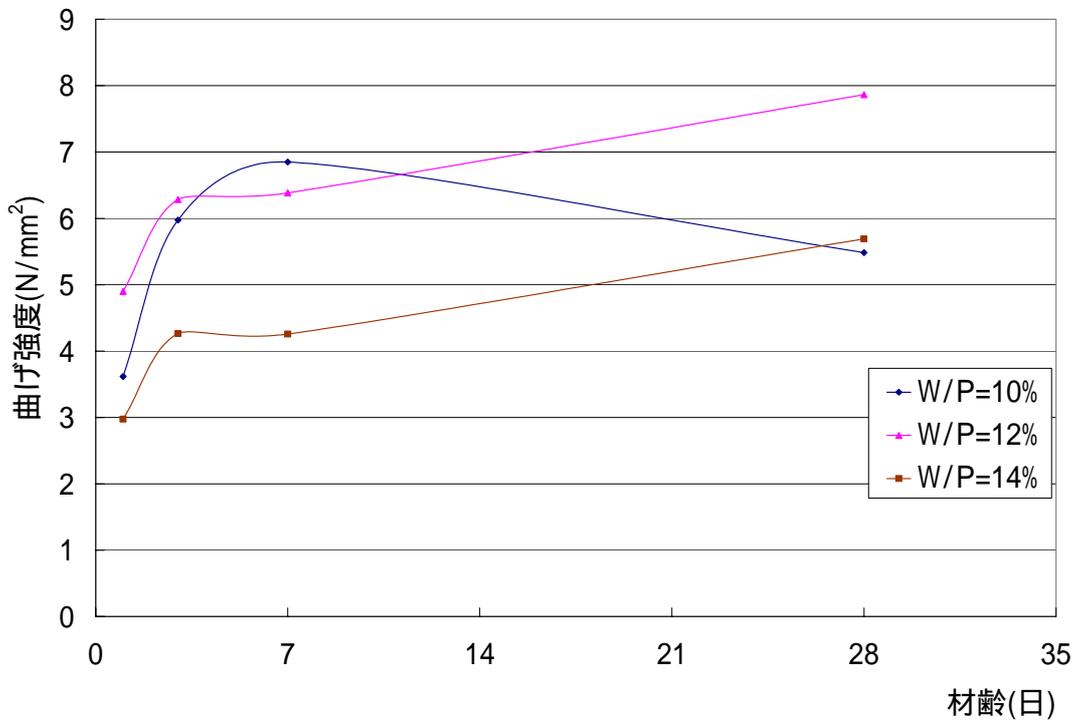


図 7.5 MEGAMIX の曲げ強度の推移

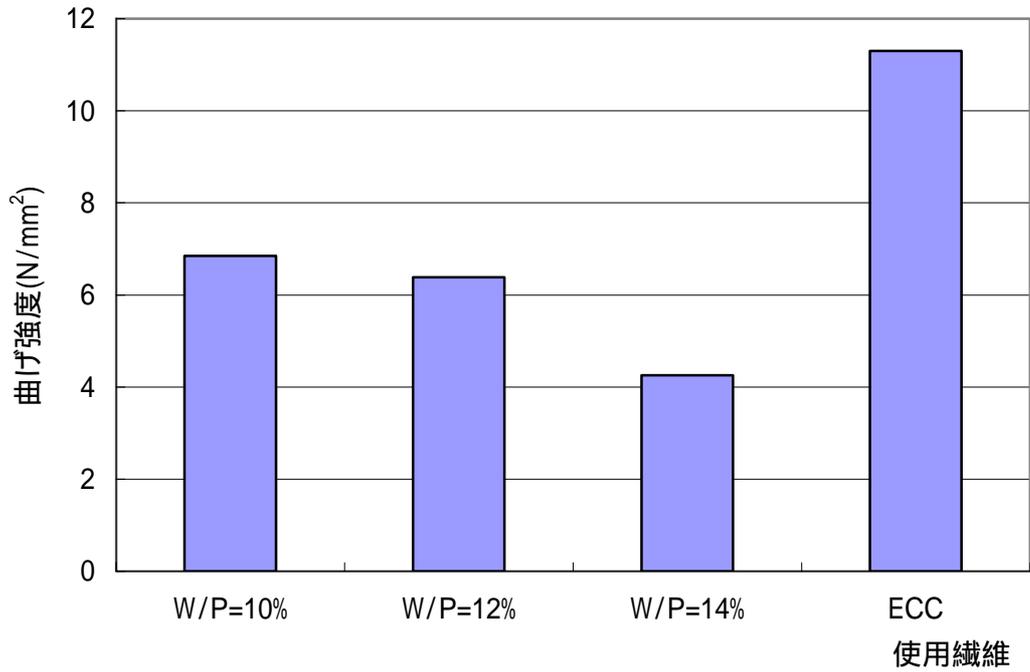


図 7.6 繊維補強モルタルの曲げ強度(材齢 7 日)

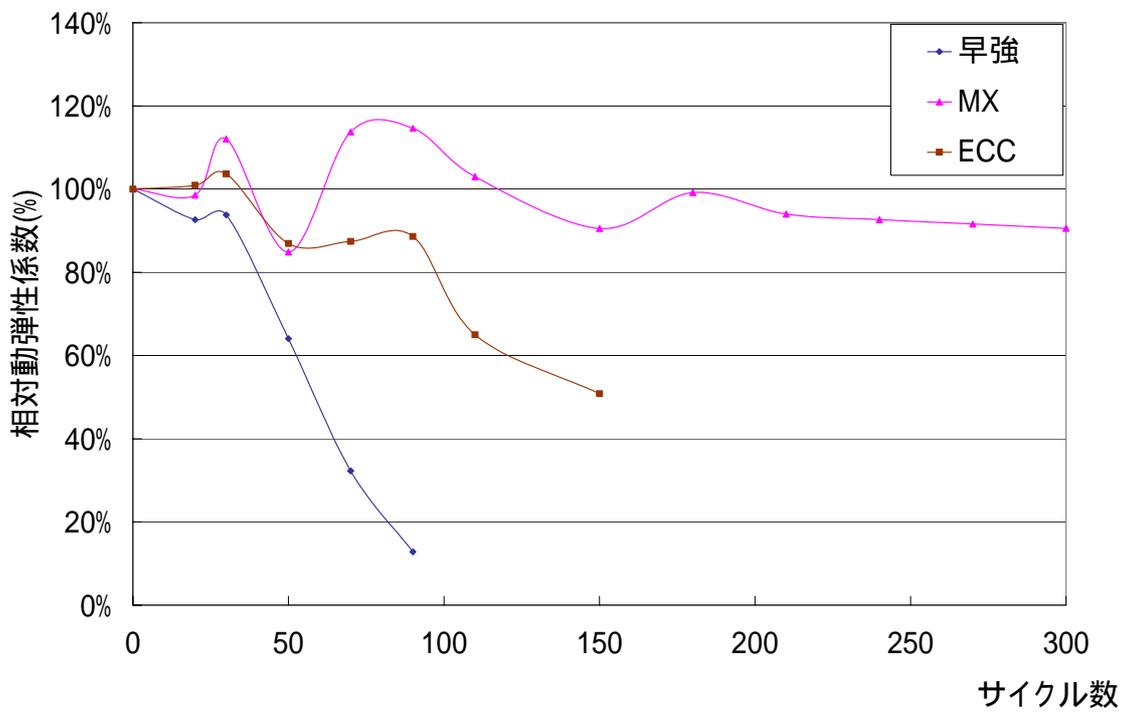


図 7.7 サイクル数と相対動弾性係数の関係

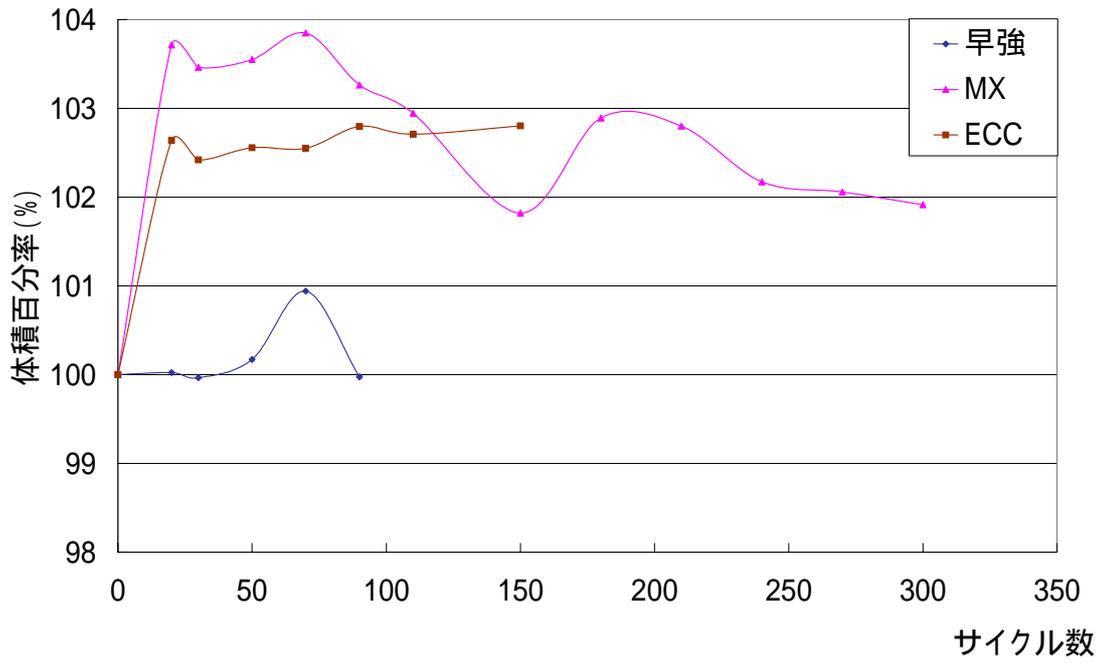


図 7.8 サイクル数と体積百分率の関係

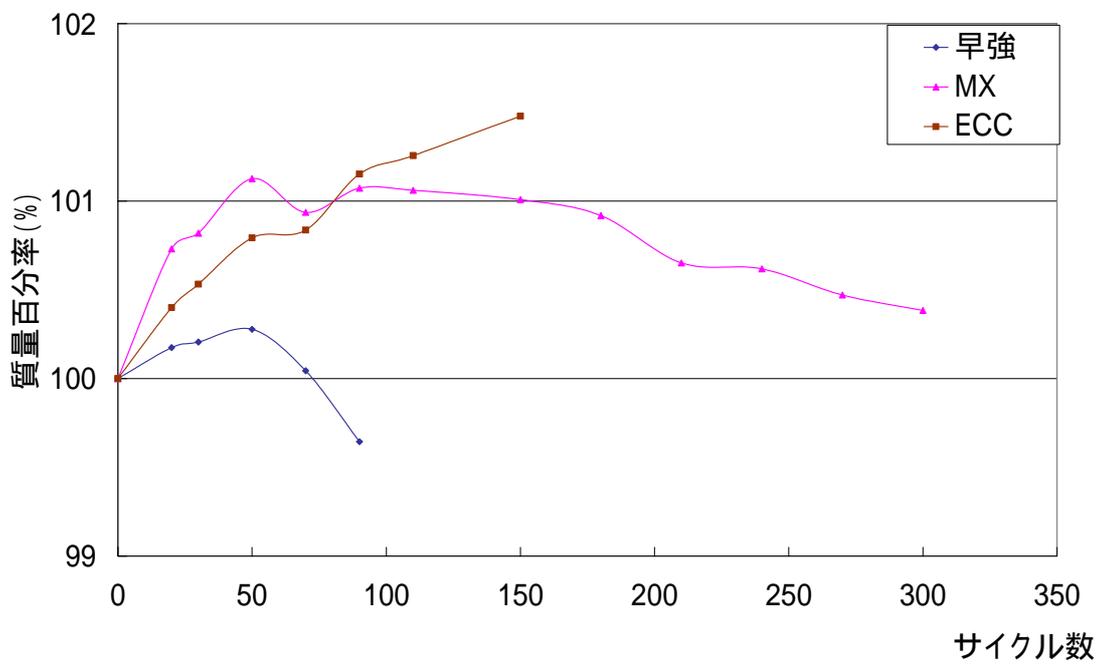


図 7.9 サイクル数と質量百分率の関係

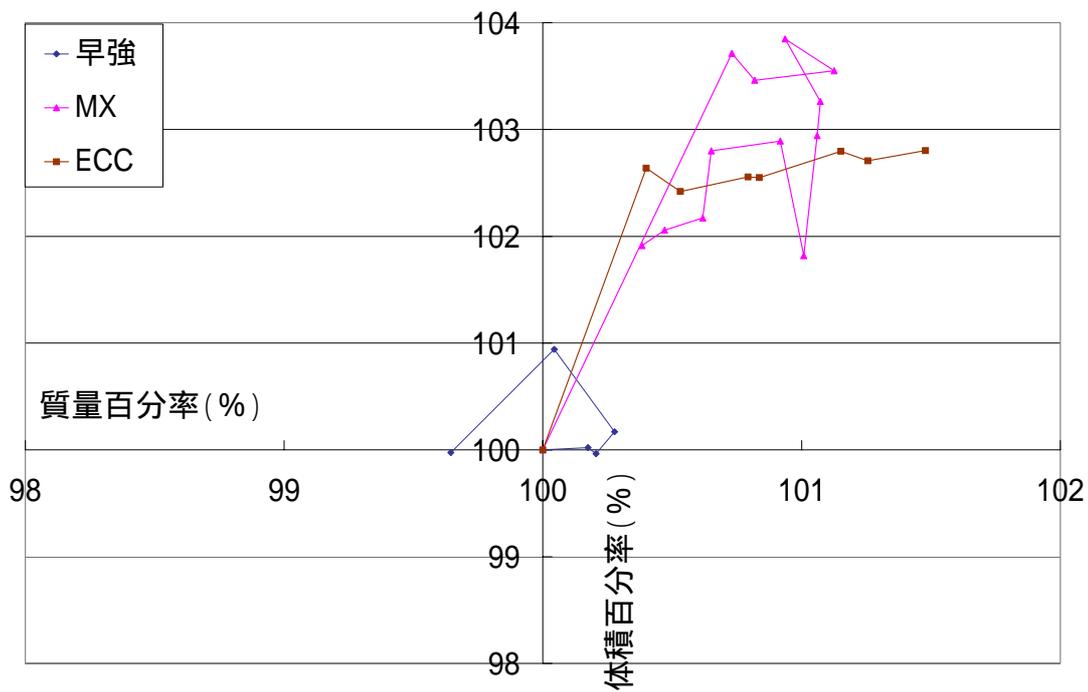


図 7.10 質量百分率と体積百分率の関係

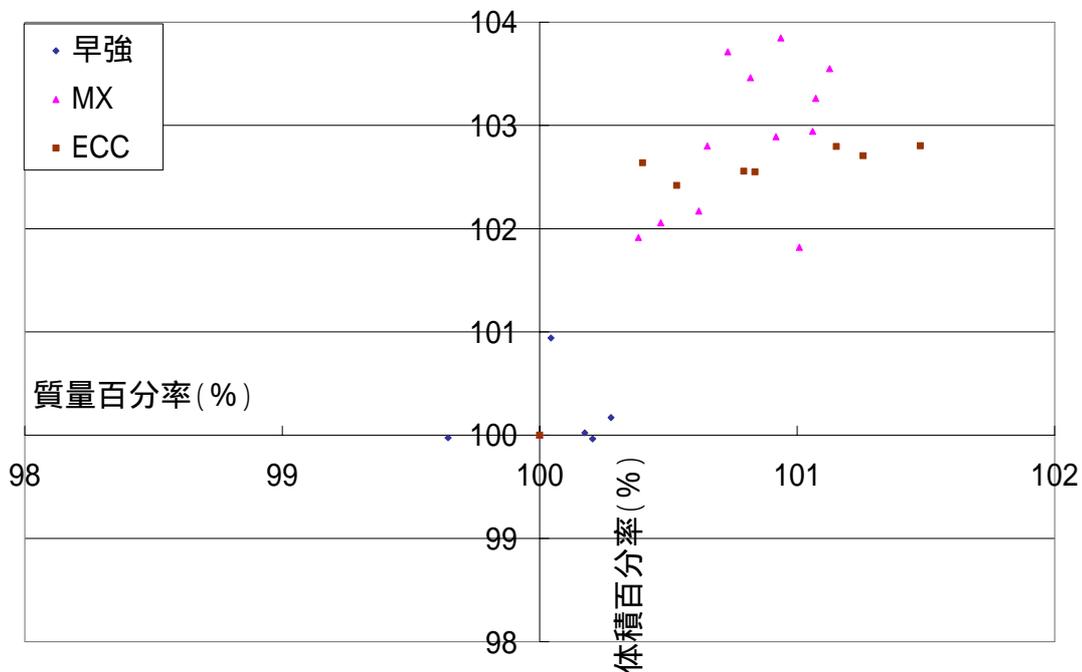


図 7.11 質量百分率と体積百分率の関係(2)

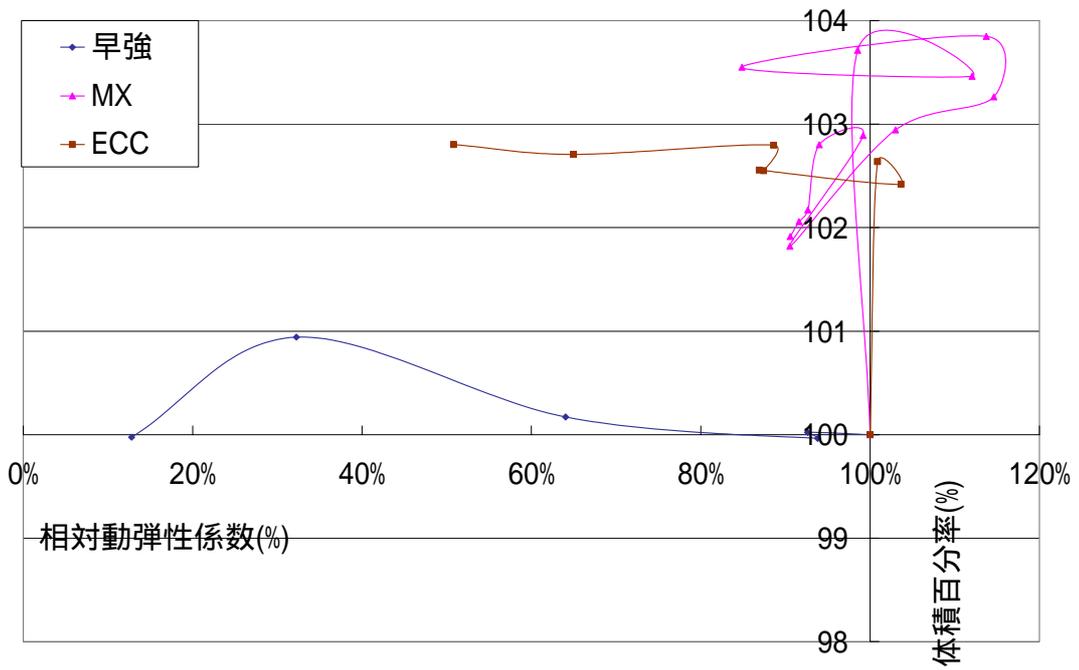


図 7.12 相对動弾性係数と体積百分率の関係

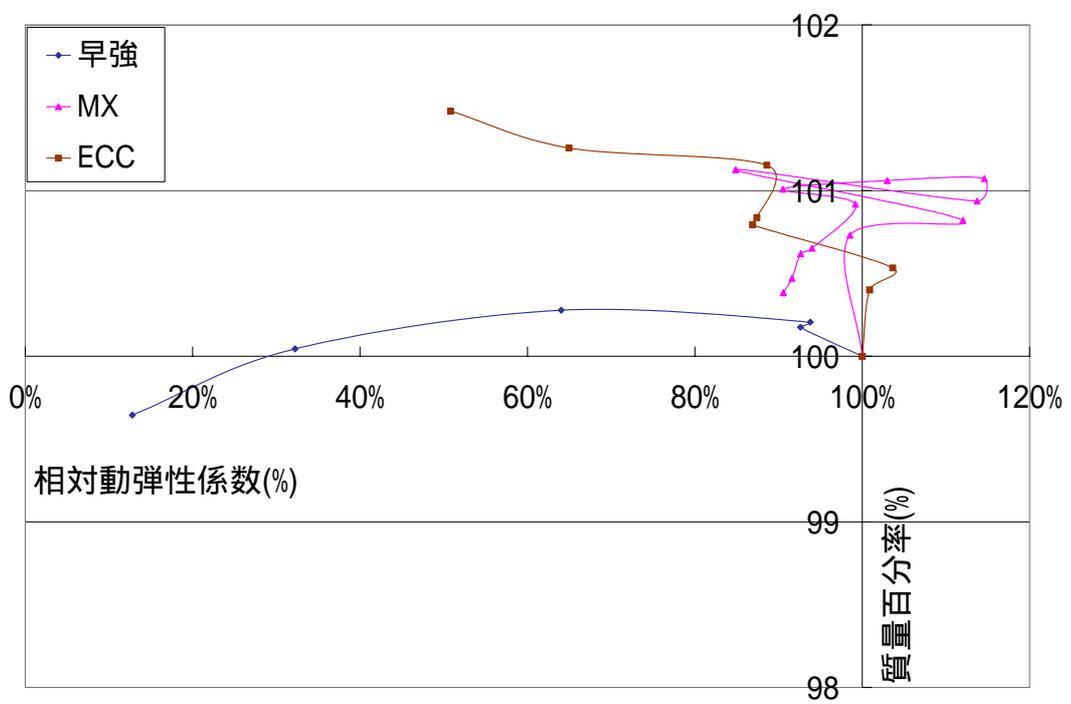


図 7.13 相对動弾性係数と質量百分率の関係

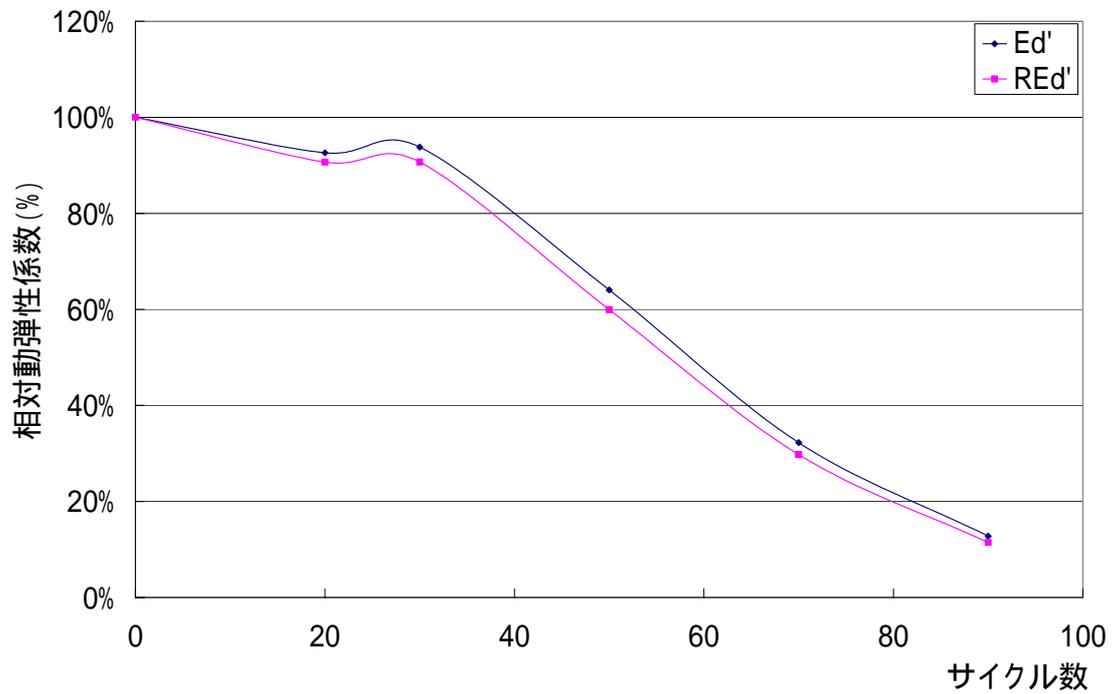


図 7.14 サイクル数と相対動弾性係数の関係(早強)

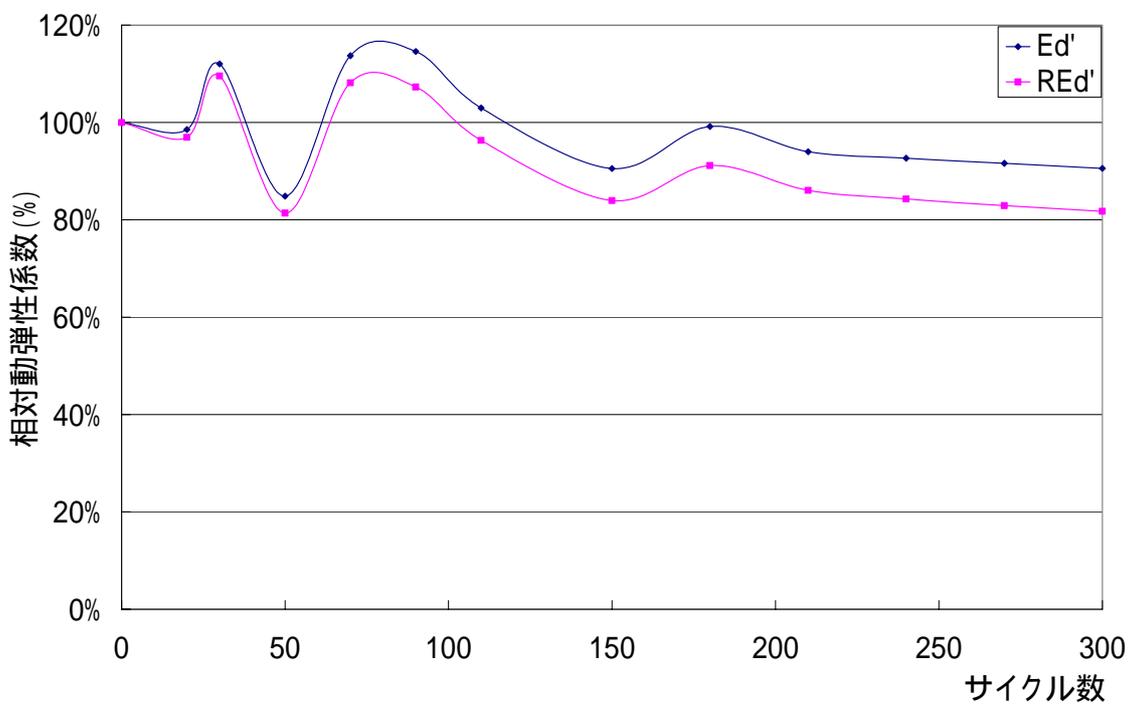


図 7.15 サイクル数と相対動弾性係数の関係(MX)

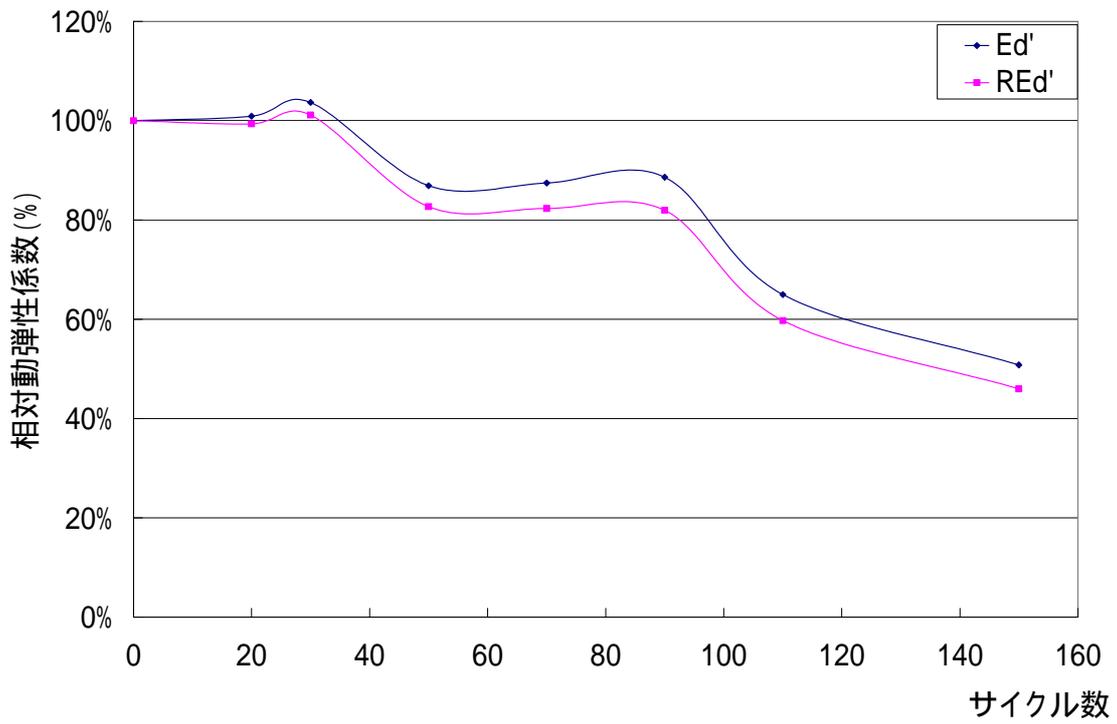


図 7.16 サイクル数と相对動弾性係数の関係(ECC)

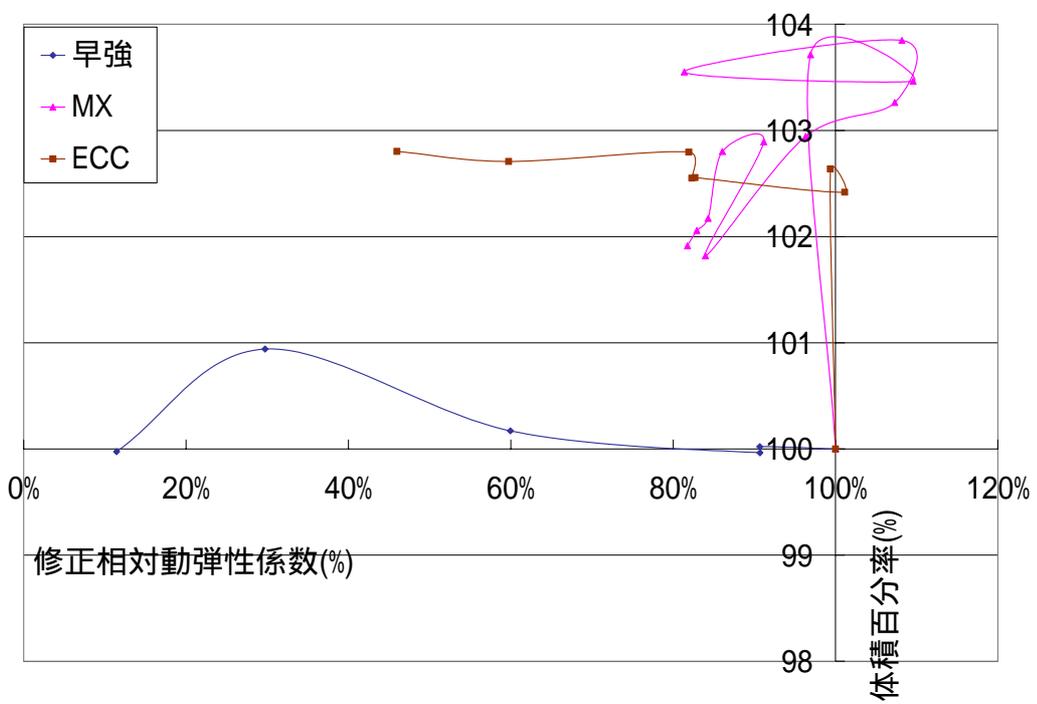


図 7.17 修正相对動弾性係数と体積百分率の関係

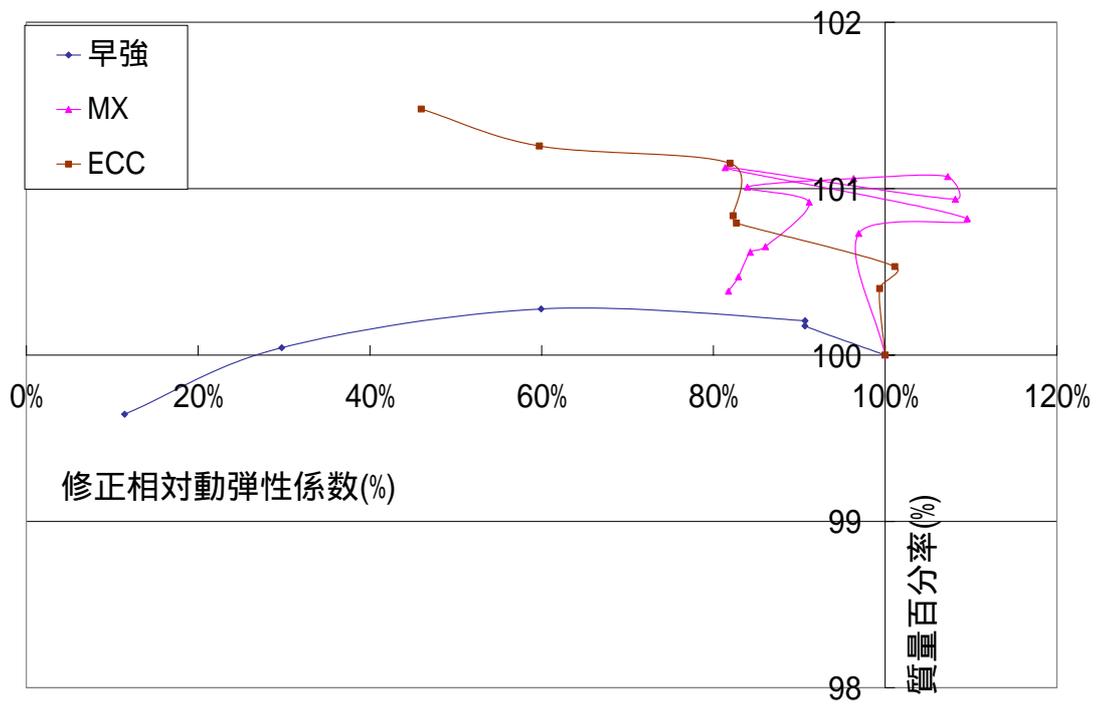


图 7.18 修正相对動彈性係数と質量百分率

第8章 結論

8.1 結論

本研究では水セメント比，試験開始材齢，最低温度の3つのパラメーターを用いて凍結融解試験を行い，非破壊試験および破壊試験により凍結融解作用による劣化エネルギーと凍結融解抵抗性の関係，劣化メカニズムに関しての検討を行った．本研究では，劣化エネルギーとは最低温度による外的要因，凍結融解抵抗性とは水セメント比，試験開始材齢による内的要因と定義する．また，補強材として繊維モルタルを用いた場合の耐凍結融解性に関しての検討を行った．本研究の範囲内で得られた結果をまとめると，以下の通りである．

(1) 水セメント比が大きく，試験開始材齢が若いものほど相対動弾性係数の低下が速く，耐凍結融解性が初期強度に依存している．また，最低温度が高いものほど相対動弾性係数の低下が小さく，劣化エネルギーは最低温度に強く関係している．試験開始材齢の若いものでは，最低温度に関係なくサイクル数と相対動弾性係数の関係では同様な推移となった．また，水セメント比が大きいものでは，試験開始材齢が違うにも関わらず，サイクル数と相対動弾性係数の関係では同様な推移となった．つまり，耐凍結融解性に対して凍結可能水量，もしくは，劣化エネルギーが非常に大きい場合には，その劣化傾向に差はみられない．

(2) 最低温度，水セメント比，試験開始材齢を変化させた場合に，そのスケーリングの傾向に変化が生じた．最低温度が低い場合，もしくは，水セメント比が大きく，試験開始材齢が若い場合には，質量・体積増加に傾向がみられた．これは，最低温度の違いがコンクリートの劣化メカニズムに影響したためと考え，劣化エネルギーが大きく耐凍結融解性が低い場合では，初期段階において比較的大きなクラックが供試体に入る．このクラックを通して供試体内部へ水分の供給が容易となるほか，ひび割れ自体が保水の役割を果たすと考えられ，クラックによる膨張部で水分が凍結し，その部分の水が拭き取れなかったために質量・体積が増加するとともに，その破壊が供試体全体に及ぶために急激に劣化が進行すると考える．それに対して，劣化エネルギーが小さく耐凍結融解性が高い場合では，クラックは入るものの微細であり，外的作用の大きい表面部分の劣化から徐々に進行し，その破壊は表面部分に主に影響するために緩やかに劣化が進行すると考える．つまり，耐凍結融解性と劣化エネルギーの相互作用からコンクリート供試体の劣化メカニズムに相違があるものと考えられる．

(3) スケーリングに関して，体積増加・質量増加，体積増加・質量減少，体積減少・質量増加，体積減少・質量減少の4パターンがみられた．に関しては，クラック発生による膨張・水分供給・凍結が発生している状態，に関しては，体積増加に関してはクラ

ック発生による膨張・水分供給はされた状態であるが、質量減少に関しては、試験開始時の供試体と凍結融解試験中の供試体の乾燥状態の違いによる測定誤差、 に関して、表面部で剥離現象は見られるが、微細なクラック発生による水分供給が勝っている状態、 に関して、クラック発生による膨張・水分供給・凍結減少よりも表面部のスケーリングが進行している状態、であると考える。

また、 ． の状態が初期段階にて発生した際には、クラック発生部分が弱点となり、 ． の状態に移行した際には劣化が急速に進む非常に危険な状態、 ． の状態が初期段階にて発生した際には、劣化が進行していくものの、その劣化速度は比較的緩やかである状態、であると考える。また、 ． の状態が見られた際には、外的エネルギーが大きい、もしくは、凍結融解抵抗性が低い場合であると見え、迅速な処置をとる必要があると考える。

(4)本研究では、相対動弾性係数の低下にも関わらず、質量・体積減少があまりみられない場合を初期凍害と位置付けた。これによれば、水セメント比 65%・試験開始材齢 3 日の供試体の圧縮強度 = 9.86N/mm^2 、引張強度 = 1.35N/mm^2 が初期凍害を受ける境目であると考えられる。しかし、試験開始材齢 28 日の水セメント比 110%ではその値より低い強度にも関わらず、初期凍害を受けることなく破壊に至っている。つまり、初期強度だけではなくコンクリート内部の組織も影響していると考えられる。

(5)凍結融解下のコンクリートの圧縮強度、引張強度ともに、ほとんどの供試体で強度発現があるものの、水中養生してあるコンクリートに比べ強度が弱く、凍結融解作用による劣化が確認出来る。試験開始強度と破壊時の強度を比較した際に、破壊時の圧縮強度は試験開始強度以上となったが、破壊時の引張強度は試験開始強度以下となった。また、試験開始材齢 3 日の引張強度は試験開始直後から低下しており、試験開始材齢が 5 日以前では引張強度の増加が期待できないと考える。

(6)試験開始材齢 3 日の供試体では相対動弾性係数の低下にも関わらず、圧縮強度は増加傾向にあった。また、5 日と 7 日についても、試験開始から約 120 サイクルまでは、相対動弾性係数の低下にも関わらず、圧縮強度は増加している。しかし、引張強度と相対動弾性係数は比較的同様な劣化傾向が見られた。これは、凍結融解によるコンクリート内部の組織の崩壊や微細なひび割れによってコンクリート内の組織が弛緩するが、比較的劣化が少ないと予想される中心部分にはコアが残っており、表面部の組織の健全性が失われていたとしても、強度発現により圧縮強度は増加したものと考える。引張強度に関しては、組織の崩壊や微細なひび割れによってコンクリート内の組織の弛緩により、組織の健全性が失われるために強度の低下傾向がみられ、相対動弾性係数とは比較的良好な関係性があるのではないかと考える。つまり、凍結融解試験において引張強度に与える影響が大きいと考

えられ、劣化状態の把握としては、引張強度に着目しなければならないと考える。

(7)破壊サイクル数は初期強度に強く関係しており、特に初期引張強度に依存していると考えられる。つまり、初期強度を把握することにより、破壊サイクル数を予測できると考える。

(8)修正相対動弾性係数を用いることにより、強度発現の影響を排除した純劣化を表現することができ、また、試験機の違いや最低温度の違いによる凍結融解サイクル時間の違いが与える影響も同一条件として評価できるようになり、劣化指標として有効である。

(9)MEGAMIX、ECCともに耐凍結融解性が優れている結果となり、繊維補強により耐凍結融解性が向上することが明らかとなった。また、耐凍結融解性はECCよりMEGAMIXの方が高い結果となった。これは、MEGAMIXはW/P=14%という非常に単位水量が低い条件であったために供試体内部の凍結可能水量が少なく劣化エネルギーが小さいためと考えられる。加えて、MEGAMIXは材齢7日で強度発現が十分であるために、現場施工を考慮した上でもMEGAMIXは補修材として適していると考えられる。また、繊維混入量や繊維径による耐凍結融解性の違いもあると考えるが、明確な説明には至らなかった。

(10)繊維補強によるスケーリングに関して、劣化が進んだとしても、表面部の剥離傾向が少ない結果となり、組織が弛緩したとしても繊維による架橋効果のために体積・質量とも増加傾向にあった。つまり、劣化指標としてスケーリングを用いる場合には、これらの事を考慮しなければならなくなり、従来のコンクリートと違い、体積・質量が増加した際には強度が著しく低下している恐れがあると考えられるので十分に注意すべきと考える。

以上のことから、凍結最低温度、水セメント比、試験開始材齢が凍結融解抵抗性に与える影響を明らかにし、今後の耐久性設計に寄与できる資料を得ることができた。

参考文献

- 1) 洪悦郎・鎌田英治・田畑雅幸：コンクリートの耐凍害性に及ぼす環境条件の影響(その2 自然環境の影響程度の評価), 日本建築学会北海道支部研究報告 No.62, pp.13~16, 1989
- 2) 鎌田英治：凍結融解抵抗性、コンクリート工学、Vol.22, No.3, 1984.3, pp.38~46
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧、技報堂、p.92
- 4) Lyse, I: Durability of Concrete in SeaWater, Jour.ACI, Vol.57, No.2, 1961.6, pp.1575~1584
- 5) 後藤幸正：コンクリート構造物の耐久性、コンクリート工学、Vol.15, No.9, 1977.9, pp.5~7
- 6) Czernin, W. (徳根吉郎訳)：セメント・コンクリート工学、技報堂、p.151
- 7) 洪悦郎：コンクリートの凍害、コンクリート工学、Vol.13, No.3, 1975.3, pp.33~44
- 8) 佐伯昇・藤田嘉夫：混合セメントを用いた沿岸コンクリートの耐凍害性、セメント・コンクリート、No.432, 1983.2, pp.2~9
- 9) 林・前川・渡辺：人工軽量骨材を用いたコンクリートの諸性質、第21回土木学会年次学術講演会、1966
- 10) Verbeck, G, R. Landgren: Influence of Physical Characteristics of Aggregates on Frost Resistance of Concrete, Proc.ASTM, Vol.60, 1960, pp.1063~1079
- 11) ACI committee 201: Guide to Durable Concrete, Jour.ACI, Vol.74, No.12, pp.537~609
- 12) Macinnis, C, E.C. Lau: Maximum Aggregate Size Effect on Frost Resistance of Concrete, Jour.ACI, Vol.68, No.2, 1971.2, pp.144~149
- 13) Czernin, W. (徳根吉郎訳)：セメント・コンクリート工学、技報堂、p.66, p.67
- 14) 永倉正：コンクリートの配合諸条件が凍結抵抗性に及ぼす影響に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, pp.15~25
- 15) 三浦忠・石垣茂：骨材の質によるコンクリートの耐久性に関する研究, セメント・コンクリート, No.317, 1973.7
- 16) 長合友造・山本泰彦：若材令コンクリートの耐凍害性の評価法に関する基礎研究, 土木学会論文集, No.433, pp.71~80, 1991.8
- 17) 石井清・江川顕一郎・堤知明, 野口博章：凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化予測に関する研究, 土木学会第52回年次学術講演集, pp.221~232, 1997
- 18) 小林正几：コンクリートの凍結融解試験方法に関する2,3の考察, セメント技術年報, pp.261~263, 1969
- 19) 長谷川寿夫：コンクリートの凍結融解方法が試験結果に及ぼす影響, セメント技術年報, pp.118~121, 1985
- 20) 田畑雅幸・洪悦郎・鎌田英治：コンクリートの耐凍害性におよぼす環境要因の影響, セメント技術年報, pp.349~352, 1983

- 21)田畑雅幸・洪悦郎・鎌田英治：コンクリートの凍害の環境要因効果に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集,pp.8～15,1986.9
- 22)吉田行・田口史雄・山崎勲：ポリプロピレン繊維補強コンクリートの圧縮強度および凍結融解抵抗性,北海道開発土木研究所月報第 608 号,2003
- 23)野口博章, 満木泰郎, 溝淵利明, 山田啓介：凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化深度評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E , Vol.62 No.3 , pp.592-605 , 2006.9
- 24)Powers , T.C. : A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete,J.ACI , Vol.16 , No.4 . pp.245-272 , 1945.2
- 25)Powers ,T.C.: Void Spacing as a Basis for Producing Air Entrained Concrete ,J. ACI , Vol.50 , No.46 . pp.741-752 , 1958
- 26)小林正几：各種の AE 剤ならびに減水剤がコンクリートの諸性質におよぼす影響について, セメント技術年報 , Vol.11 , pp.405-409 , 1967
- 27)山下英俊, 堺孝司, 佐伯昇：超音波伝播速度を用いた凍害深さの推定, コンクリート工学論文集 , Vol.7 , No.2 , pp.179-186 , 1996.7

謝 辞

本研究を行うに際しまして、終始御懇篤なるご指導を賜りました満木泰郎教授、溝渕利明教授をはじめ、多くの御助言を頂きました、東電設計株式会社 野口 博章様、MCR 化学技研 中村 行伸様、ジェイテック株式会社 多賀谷 俊宏様、実験に際し適切な御助言、御配慮を戴きました有限会社藤木工業 山添 量文様、佐竹 伸康大学院生、安 紀幸大学院生、藤森 勇希大学院生、伊藤 裕貴大学院生、実験を行うに際し御協力戴いた法政大学土木材料実験室の皆様には謝辞の意を表します。

2007年2月20日