

# レジンコンクリートの構造利用に関する研究

Research of Resin Concrete for Structural Use

学位論文：博士(工学) 甲64

平成9年1月

林 富士男

# 目次

## 1. 序論

1. 1 レジンコンクリート概説 . . . . .	1
1. 2 レジンコンクリートの材料 . . . . .	2
1. 2. 1 結合材 . . . . .	2
1. 2. 2 充填材および骨材 . . . . .	4
1. 2. 3 配合 . . . . .	5
1. 3 レジンコンクリートの利用と構造設計 . . . . .	5
1. 3. 1 レジンコンクリートの特徴 . . . . .	5
1. 3. 2 レジンコンクリートの構造利用 . . . . .	6
1. 3. 3 レジンコンクリートの構造設計 . . . . .	7
1. 4 本研究の目的 . . . . .	8
<参考文献> . . . . .	9

## 2 レジンコンクリートの物性とその発現

2. 1 まえがき . . . . .	1 2
2. 2 物性の発現 . . . . .	1 2
2. 2. 1 使用材料と配合 . . . . .	1 2
2. 2. 2 特性の測定方法 . . . . .	1 3
2. 2. 3 ゲル化時間と物性の発現の試験結果および考察 . . . . .	1 3
2. 2. 3. 1 硬化収縮の発現 . . . . .	1 3
2. 2. 3. 2 弾性係数の発現 . . . . .	1 4
2. 2. 3. 3 対数減衰率と粘弾性比率の変化 . . . . .	1 5
2. 2. 3. 4 強度の発現 . . . . .	1 6
2. 2. 4 製造時期と特性発現の試験結果および考察 . . . . .	1 7
2. 2. 4. 1 動弾性係数の発現 . . . . .	1 7
2. 2. 4. 2 対数減衰率の発現 . . . . .	1 7
2. 2. 5 特性の発現順序 . . . . .	1 8
2. 2. 6 硬化条件と物性発現 . . . . .	1 8
2. 2. 7 設計用値の採用時期 . . . . .	1 9
2. 3 曲げ強度の寸法依存性 . . . . .	1 9
2. 3. 1 R E C の材料と配合 . . . . .	1 9
2. 3. 2 供試体の製作と試験 . . . . .	1 9
2. 3. 3. 結果と考察 . . . . .	2 0
2. 3. 4 設計用値と供試体寸法 . . . . .	2 0
2. 4 まとめ . . . . .	2 1
<参考文献> . . . . .	2 1

## 3 レジンコンクリート物性の温度依存性

3. 1 まえがき . . . . .	3 8
---------------------	-----

3. 2	試験の概要	3 8
3. 2. 1	供試体の作製	3 9
3. 2. 3	熱的特性の測定方法	3 9
3. 3	試験結果および考察	4 0
3. 3. 1	樹脂の熱変形特性	4 0
3. 3. 2	RECの熱特性	4 0
3. 3. 3	RECの変形特性	4 1
3. 3. 3. 1	RECの熱膨張	4 1
3. 3. 3. 2	RECの動弾性係数	4 1
3. 3. 3. 3	RECの対数減衰率	4 1
3. 3. 3. 4	RECの粘弾性比率	4 1
3. 3. 3. 5	RECの変形特性と温度	4 2
3. 3. 4	RECの強度特性	4 2
3. 3. 4. 1	RECの曲げ強度特性	4 2
3. 3. 4. 2	RECの圧縮強度特性	4 2
3. 3. 4. 3	RECの強度特性と温度	4 2
3. 4	まとめ	4 3
	＜参考文献＞	4 3
 <b>4 レジンコンクリートの鉄筋補強と内部拘束応力</b>		
4. 1	まえがき	5 7
4. 2	試験の概要	5 8
4. 2. 1	使用材料と配合	5 8
4. 2. 2	特性の測定方法	5 8
4. 3	試験結果および考察	6 0
4. 3. 1	実験－1（鋼材本数を変えた実験）の鋼材ひずみ	6 0
4. 3. 2	実験－2（はりの長さを変えた実験）の鋼材ひずみ	6 0
4. 3. 3	鋼材ひずみの発現	6 1
4. 3. 4	はりの曲げ強度の低下	6 1
4. 3. 5	拘束応力の推定	6 3
4. 4	まとめ	6 4
	＜参考文献＞	6 4
 <b>5 レジンコンクリートの構造設計に対する提言</b>		
5. 1	まえがき	7 6
5. 2	指針（案）への提言	7 6
5. 2. 1	適用範囲に対する提言	7 6
5. 2. 2	RECの諸性質に対する提言	7 7
5. 2. 3	ひびわれ曲げモーメントに対する提言	7 8
5. 3	まとめ	7 9

<b>付録</b>	<b>「ポリエステルレジンコンクリート構造設計計算指針(案)」</b>	<b>付 1</b>
-----------	-------------------------------------	------------

# 1 序論

## 1. 1 レジンコンクリート概説

レジンコンクリート(resin concrete: REC)はコンクリート・ポリマー複合体(concrete-polymer composite)の一種であり、コンクリート・ポリマー複合体はポリマーの使用形態の違いによってポリマーセメントコンクリート(polymer cement concrete: PCC)、ポリマー含浸コンクリート(polymer-impregnated concrete: PIC)、レジンコンクリートに分類されている。

ポリマーセメントコンクリートは、セメントコンクリートにポリマー混和剤(polymer admixture)を加えて混練し硬化させるものである。ポリマーの混和により、曲げ・引張強度および伸び能力が増大する、防水性が優れる、耐薬品性が向上するなどの特徴がある。その開発研究の歴史は比較的早く1930年代にイギリス、アメリカなどで天然ゴムラテックス、酢酸ビニルなどを用いて床材、表面処理材、防水材としての研究・実用が始められている。1950年代後半以降は高分子化学産業の発展もあり各種のポリマーの開発・利用が進められ、現在では一般的な建設材料として普及している。日本ではポリマーセメントモルタルとして仕上げ材、補修材などで広く使用されている。ポリマーとしては水中にポリマーの微粒子を均一に分散し浮遊させたゴムラテックス(スチレン・ブタジエンゴム:SBR)あるいは樹脂エマルジョン(ポリアクリル酸エステル:PEA, エチレン酢酸ビニル:EVA)などが用いられている。ポリマーセメントコンクリートの材料・混練・打設などはポリマー混和剤を加えることを除いて従来のセメントコンクリートと全く同じ材料・技法である[1], [2]。

ポリマー含浸コンクリートは、硬化したセメントコンクリートの表面より低粘度のモノマーあるいはオリゴマーを組織内の空隙に含浸させた後、加熱などによって重合させてポリマーとしたものである。セメントコンクリートの組織内の空隙あるいは微小亀裂へのポリマーの充填により、高強度、防水性が優れる、耐薬品性が向上するなどの特徴がある。その開発研究は1960年代後半にアメリカで始まり、1970年代前半には日本でも開始されている。含浸モノマーとしてはメタクリル酸メチル(MMA)やスチレン、アクリロニトリルなどがある。日本ではMMAがもっぱら使用されており、重合の方法は加熱によることが多い。その利用方法としては、プレキャスト製品の製造を目的とした工場で施工する方式が主として挙げられるが、アメリカでは既存構造物の強度、耐磨耗性、水密性の改善を目的として、部分的に含浸を行う現場で施工する方式も行われている。ポリマーの含浸率はプレキャスト製品で5～15% (コンクリート中のポリマーの重量比)、現場施行では含浸深さ20～30mmと言われている。ポリマー含浸コンクリートは基材となるセメントコンクリートの製造・乾燥、含浸のための浸漬・加圧、重合のための加熱あるいは放射線照射と製造工程が複雑であり、ポリマーの使用量も後述するレジンコンクリートと大差がなく相対的にコストが高いため日本での利用は少ないが、耐久性を目的とした埋設型枠などの事例もある[3], [4]。

レジンコンクリートはポリマーコンクリート(polymer concrete: PC)ともいわれ、RECあるいはPCの略号が用いられている。従来はレジンコンクリートと呼びならわされてきたが、近年世界的にはポリマーコンクリートの語が用いられるようになり、学

術用語集・建築学編ではこれを採用している。しかしながらコンクリート・ポリマー複合体のことをポリマーコンクリートとも称しており、さらに、建設分野では従来よりP Cと略称されるものにプレストレストコンクリートがあり、また、プレキャストコンクリートにもP Cの略称が用いられることがある。同じく構造用に用いられる異なる材に対して同一の略号を用いた場合の混乱を避けることが望ましいとして、術用語集・土木工学編ではレジンコンクリートの語を用いている。いずれ用語についての統一がされるであろうし世界的な趨勢で「ポリマーコンクリート（P C）」と成ると考えるが、本論文では後者により「レジンコンクリート（R E C）」の語を使用することとする。

レジンコンクリートは、セメントコンクリートの結合材であるセメント水和物に代えて、合成樹脂（ポリマー）のみを結合材として用い、フィラーおよび骨材と混練し硬化させたものである。結合材が合成樹脂であることより、強度をはじめとする力学的性質に優れる、耐薬品性に優れるなどの特徴がある。その研究開発は1960年前後から日本、西ドイツ、ソ連で始められた。その後、擬石などの化粧材、コンクリート構造補修材、工場床や構造用材料としてのプレキャスト材などへの利用が高まり、各種の研究が進められている。合成樹脂としては、不飽和ポリエステル樹脂、エポキシ樹脂、フラン樹脂、フェノール樹脂などの熱硬化性樹脂が用いられる。日本では、工場製品には硬化のコントロールの容易さと安価なことから不飽和ポリエステル樹脂が、現場施工には硬化収縮が少ないこと、および硬化速度の調節は困難であるが硬化剤の増減の必要がないことなどからエポキシ樹脂が主として用いられる[5]、[6]。アメリカではエポキシ樹脂が多用されており、一部メタクリル酸メチルも用いられている[1]。

先述の2種類の材料がセメントコンクリートに付加物を加えた技術であり全体的な物性全般はセメントコンクリートのそれに準ずるものである。一方、レジンコンクリートはセメントを全く使用しないものであるために、力学的特性や耐久性に優れるセメントコンクリートと類似の材料として、従来からよく知られてきたセメントコンクリートとほぼ同じように取り扱うことのできる側面と、硬化収縮が大きくかつ短時間に発現することや特性の温度依存性が大きいなどで、新しい材料としてかなり異なった取扱いが必要な面があることが明らかになってきている[7]。

本研究では用途を構造材料に限定し、不飽和ポリエステル樹脂を使用したレジンコンクリートを主体にして、従来のセメントコンクリートとは異なった取扱いが必要な面に関してその構造用材料としての性伏や問題点について実験的検討を行なうことにした。

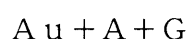
## 1. 2 レジンコンクリートの材料

### 1. 2. 1 結合材

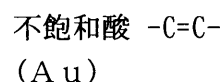
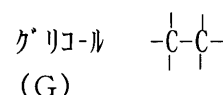
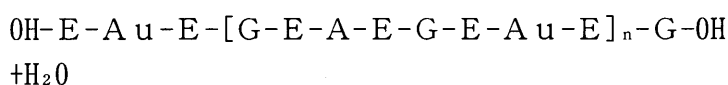
レジンコンクリートあるいはモルタルの製造において、結合材用の合成樹脂としては不飽和ポリエステル樹脂、エポキシ樹脂などの熱硬化性樹脂が用いられてきたが、強い刺激臭はあるものの低粘度で施工性がよいことから熱可塑性樹脂のメタクリル酸メチルモノマーも用いられている。

不飽和ポリエステル樹脂（UP）は、不飽和基を持つポリエステル（飽和多塩基酸お

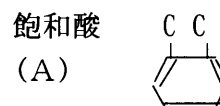
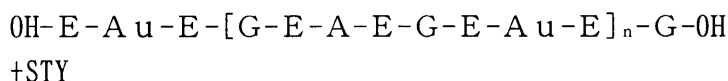
よび不飽和多塩基酸と多価アルコールの縮合物であるアルキド) をビニルモノマーで溶解させた両者の混合物である。不飽和多塩基酸としてはマレイン酸ならびにフマル酸が、飽和塩基酸としてはフタル酸が、多価アルコールとしてはエチレングリコールならびにプロピレングリコールが多く用いられる。ビニルモノマーとしてはスチレンが多用される。また、硬化剤としては、触媒としてメチルエチルケトンパーオキシド (MEKPO) と促進剤としてナフテン酸コバルトの組み合わせ、あるいは過酸化ベンゾイル (BPO) とジメチルアニリン (DMA)、ジエチルアニリン (DEA) の組み合わせなどが多用されている。これら硬化剤を樹脂に添加することでラジカルを発生させ、アルキドとモノマーの架橋反応を開始させて重合させ三次元網目構造が作られる [8]。これらを模式的に以下に示す。



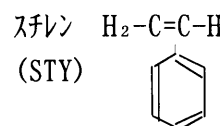
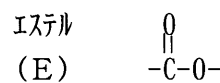
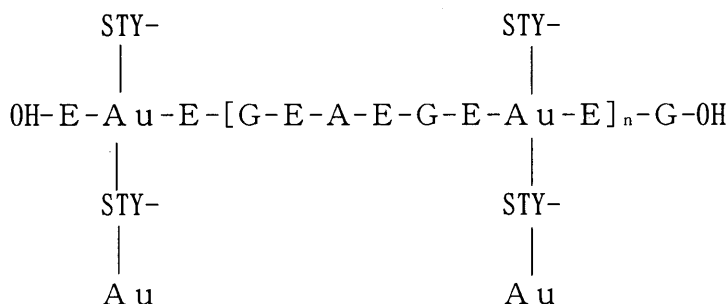
↓ 縮合反応



ポリエステル樹脂



重合 (架橋反応)

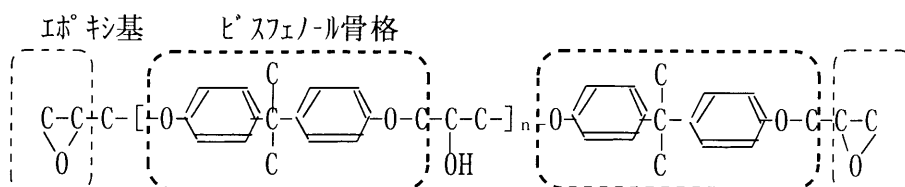


レジンコンクリートには、価格的理由により、オルソフタル酸系の樹脂が主として使用されている。耐熱性や耐蝕性の向上のために高価格なイソフタル酸系の樹脂 (オルソ系の 1.5 倍程度) なども用いられている。また、一般的に使用されている樹脂の粘度は 2 ~ 20 ⅾⅾ 程度である。

エポキシ樹脂 (EP) は、末端に反応しやすいエポキシ基  $\begin{array}{c} \diagup \quad \diagdown \\ -CH-CH- \\ \diagdown \quad \diagup \\ O \end{array}$  を 2 個以上

持つもので、一般にはビスフェノール A とエピクロロヒドリンとの縮合物であり、次の一般式で示される。これにアミン類や酸無水物、ポリアミドなどの硬化剤を添加することによって重合反応を生じさせ、三次元網目構造が作られる。この EP の粘度は 130 ⅾⅾ 程度あり、REC とした場合には作業性などに問題が生ずる。このため一般的には希釈剤を添加して 5 ~ 30 ⅾⅾ 程度としたものが使用される [9]。また、EP の価格はその生産規模が拡大したことなどで低下しオルソ系 UP の 2 ~ 4 倍程度であるが、

硬化剤の価格が3～10倍と高いため結果的にはUPの3～5倍程度となる。



メタクリル酸メチル（MMA）モノマーは、 $\text{CH}_2=\underset{\text{CH}_3}{\text{C}}-\text{COOCH}_3$  の化学構造をしており、

これが過酸化触媒などによって重合し、長鎖状高分子のメチルメタクリレート（アクリル樹脂）となる。REC用の結合材として用いるうえでは、トリメチルプロパントリメタクリレート（TMPTMA）などの架橋剤が加えられ、重合には、触媒として過酸化ベンゾイル、促進剤としてジメチルアニリンなどが用いられ、網目構造を持たせる方法がとられている。

UPは、硬化時の収縮が大きいいため、ポリスチレン、ポリ酢酸ビニル樹脂などの熱可塑性樹脂を加えて低収縮としたものも用いられているが、これは基本的に熱可塑性樹脂の膨張により見掛けの収縮を低減するものである。このため膨張による強度の低減は避け難く、さらに温度などの硬化条件により収縮低減効果に差が生じることがあり、常温で硬化させる場合での安定的な使用は困難なようである。またUPは分子構造中にエステル結合を持つため、水やアルカリにより加水分解を受けて劣化しやすく、一般の耐薬品性もEPに比べて多少劣る。

EPは、硬化収縮が少ないこと、硬化剤の増減が不必要などの利点があるが、その反面として、常温下で一定の硬化時間を得るためには温度に応じて硬化剤を選定する不便さがある。さらに従前から言われている一部硬化剤による皮膚刺激に加えて、最近、未硬化エポキシ樹脂が労働安全衛生法規上の変異原性物質に指定され、使用時の安全・衛生上の対策などの問題もある。

MMAは、UPやEPと異なり粘性が非常に低いため作業性などの施工性に優れること、 $-20^{\circ}\text{C}$ にいたる低温での硬化性および耐候性に優れることなどにより注目されているが、UPの3～4倍程度と高価であることに加え、強い刺激臭があること、引火性が大きいこと、硬化収縮が大であることなどが欠点である。

## 1. 2. 2 充填材および骨材

レジンコンクリートは液状の樹脂を結合材とするものであるため、セメントコンクリートにおける微粒分としてのセメントの役割、すなわち骨材の空隙を充填するとともに、ワーカビリティの改善や材料の分離防止などの目的を果たすものとして充填材（フィラー）を添加する必要がある。フィラーとしては、重質炭酸カルシウムやシリカ粉が用いられている。

骨材には、碎石、川砂利、川砂、海砂、けい砂などの清浄で健全なものが用いられる。同一粒度で産地を異にするの粗骨材を用いた同一配合の不飽和ポリエステル樹脂RECの曲げおよび圧縮強度試験結果を図1-1に示す。このように粗骨材の性状による強度への影響が顕著である。従って粗骨材には強硬な石質のものをを用いる必要がある。粗骨

材の最大寸法は10～20mm程度のものが用いられている。

骨材が水分を含んでいると樹脂と骨材との接着強度が低下することから、強度特性上からはフィラーおよび骨材の含水率は0.5%以下にすることが望ましく、強制乾燥された骨材が用いられる[10]。なお、含水率3%程度までの骨材について、シランカップリング剤や吸水剤の利用により強度の低下を防ぐ方法も報告されている[1]。しかし、実用上からは、強制乾燥を行い含水率を0%に制御する方が容易と考えられる。なお、強制乾燥を行っても、保管状況によっては空気中の水分を吸着し0.5%を越える可能性があるため、骨材の保管は、これに対する配慮が必要である。

### 1. 2. 3 配合

レジンコンクリートの配合は、その使用目的、製造方法、経済性などから決定される。セメントコンクリートと同様の打設を行う場合、レジンコンクリートの樹脂量が多いと流動性などは向上して作業性は良くなるが、硬化までの間に材料の比重差で分離が生じ骨材部分が下部に沈降し上部には樹脂またはペーストが浮く分離現象が生じる(図1-2)。この場合に、レジンコンクリートではセメントコンクリートにおけるブリージング水の蒸発や再吸収に相当する現象がないために、分離層が明瞭なまま硬化し不均質なものとなる。従って、打設が可能でかつ分離を生じない範囲内で配合を定める上では、セメントコンクリートの場合ほど配合の自由度が大きいものではなく、樹脂量も10wt%前後の比較的狭い範囲に限られている。その結果、一般的なUP-RECの圧縮強度は1000～1500kgf/cm<sup>2</sup>程度、曲げ強度は200～300kgf/cm<sup>2</sup>程度、硬化収縮は線収縮率で2.2～2.5%程度、空気量は3～4%程度となる(図1-3～1-5)。さらに、レジンコンクリートの材料価格面からは、充填材や骨材は良質な物で乾燥などの諸処理を行ったとしても高々20～30円/kgであるのに対して、樹脂は安価とされるUPの最も低価格なものでも250円/kg以上であり、その価格差は10倍ほどある。従って、作業性などは骨材の粒径などで改善されるのが通常であり、樹脂量は可能な限り少なくされる。

## 1. 3 レジンコンクリートの利用と構造設計

### 1. 3. 1 レジンコンクリートの特徴

レジンコンクリートはセメントコンクリートに比較して次のような特性をもっている。

- 1) 圧縮強度、曲げ強度、引張強度が大きい。
- 2) 水密性が良好であり、防水性や耐凍結融解性に優れている。
- 3) 耐薬品性(とくに耐酸性)に優れている。
- 4) 耐摩耗性に優れている。
- 5) 振動減衰性能が大きい。
- 6) 電気絶縁性が大きい。
- 7) 顔料による着色が容易である。
- 8) 接着剤で容易・確実に構造的な接着ができる。
- 9) 硬化時間が広範囲に調節でき、かつ硬化完了までの時間がきわめて短い。



10) 基本的にはセメントコンクリートと同一の製造方法で生産できる。  
この反面、合成樹脂が結合材であるため配合を工夫しても基本的に不燃材とすることは困難であり、耐火性や耐熱性に劣ることや、特性の温度依存性が大きいなどの欠点がある[1], [6], [10] - [13]。

### 1. 3. 2 レジンコンクリートの構造利用

レジンコンクリートの利用には、その製造形態により現場施工と工場製品との2種がある。現場施工の大部分は、路面補修、ダムのエプロンや水路の補修、耐食ライニングなどの非構造材的な用途であるが、寒冷地の低温下での道路舗装材としての事例やNTTによる早強性、高強度、防水性、接着性などを利用した小径トンネルライニングの現場自動施工の例もある[14], [15]。

一方、工場製品では、樹脂の高価格により材料費が高価となるものの、その短時間での硬化・強度発現による型枠回転率の高さ、養生用地などが少なくすむ設備回転率の良さから、人件費・設備費などは少なくすむ。このため製造原価としてはセメントコンクリート製品の1.5～2倍程度となり、高強度のほかにさらに耐食性、水密性、耐摩耗性など種々の機能を複合的に要求される用途に対しては、セメントコンクリート製品と十分に対抗できることにより、その利用は拡大している。ただし構造利用としては、先述したように耐火性・耐熱性についての弱点を持つことから、これらの影響を受けない分野あるいは影響をできるだけ回避できる分野として、地下埋設の構造物が主体となっている。以下にそれらの例を示す。

#### (1) マンホール類

工場製品の代表例として報告も数多い電々公社(現=NTT)のレジンコンクリート製ブロックマンホールは、1970年以前に実用化されすでに7万個(約25万トン)以上使用されている。このほか、ガス・水道の弁室用、下水道用のマンホールにも使用されている。さらに昨今は都市の美観などから電線類の地中化の傾向が強く、電線の接続・分岐・保守のためのマンホールやハンドホールとしての使用も多い。これらのマンホール類が土木用途の埋設構造物とすれば、建築用途での埋設構造物としては、住宅の地下に埋設し土地の有効利用を行う大型の物置である住宅用地下収納庫がある。これらの人がその内部に入ることを前提とするマンホール類以外の小型の構造物としては、消火栓やガス・水道の各種メーターの保護ボックスや各種マスなどがある[16]。

#### (2) パイプ

FRPとレジンコンクリートとを組み合わせた合成管は、軽量で耐食性に優れた利点をもつもので、最大径3000mmまで実用化されており、上下水道管、電線管などとして軟弱地あるいは海浜などで使用されているが、近年には、鉄筋補強したレジンコンクリートの高剛性な遠心成形管が実用化され、その良好な耐食性・水密性により管内で発生する硫化水素に対する腐食耐久性が著しく改善されるので、下水道管としての使用が増大している。

#### (3) 薬品槽など

レジンコンクリートの優れた耐食性を利用したもので、酸性液のタンク、化学薬品のポンプ台、排水溝、薬品処理槽などの事例がある。なお排水溝は日本では事例は少ない

が、西ドイツなどでは耐食用途以外の一般的用途にも耐凍結融解性が高いことより盛んに使用されているようである。耐薬品用途では、樹脂の種類・グレード、骨材の性質、薬品の種類・濃度・温度によりレジンコンクリートの耐性能が異なるので、利用にあたっては、これらを十分に把握しておくことも重要であり、また構造材を兼ねる場合が多いので、長期の荷重だけでなく短期の荷重に対しても十分な配慮を行ってひびわれなどの発生がないようにすることが重要である。

#### (4) その他非構造材としての利用

レジンコンクリート製のテラゾーは古くから知られているが、近年生活の高級化志向から、洗面台、浴槽なども重量感のある石調のものが好まれる傾向にあり、この方面への利用が増大しつつある。欧州、アメリカでは非構造材的な浴室などの水回りにとどまらず、構造材的な建物の内外装材としてレジンコンクリート製パネルが用いられている。日本では建築基準法規上の規制がありこの種構造材の事例はまだ無い。

レジンコンクリートは大きな振動減衰特性（鉄の10～20倍）をもつことから、工作機械などの精密機械ベッドあるいは部品としての利用がある。この用途の利用は日本では少ないが、西ドイツ、スイスなどで盛んである[16]。

### 1. 3. 3 レジンコンクリートの構造設計

レジンコンクリートの構造利用としては、前述の用途・使用例にみられるように、主として曲げを受ける面部材から成り、その水密性や耐薬品性などの特徴も利用し、かつ耐熱性から地下に埋設して用いられるものが多い。

構造設計としてはレジンコンクリートの材料特性に基づいた設計を行うべきであり、1985年に日本材料学会コンクリート工事用樹脂委員会（岡田委員長）から、材料特性に基づいた一つの考え方を盛り込んだものとして、「ポリエステルレジンコンクリート構造設計計算指針（案）」が出されている。

しかし、例えば、レジンコンクリートはそれ自体は中性であり、ひびわれが発生した後の鋼材の防食保護性はまったく期待できない。このため、レジンコンクリートの曲げ部材は、その高い曲げ強度を利用して、ひびわれ発生前の段階で使用される形態を中心とすべきであり、その圧縮強度と鋼材の引張強度を利用して、鉄筋コンクリートのようないびわれ発生後の段階まで使用される形態は避けるべきと言えるが、不用意に鉄筋補強をした事例も見受けられ、その構造設計は従来からのセメントコンクリート・鉄筋コンクリートに対する設計方法をそのまま利用しているのが現状である。

また、この構造設計計算指針（案）では、力学的性質が資料によって十分判明している範囲を対象としているために、レジンコンクリートの諸特性の温度依存性が大きいとして使用環境温度を50℃以下とし、また部材のひびわれ曲げモーメントの算定には補強材による硬化収縮の拘束による内部応力の影響を考慮すべきとして、今後の検討の必要性を指摘しているが、これらを踏まえた改訂はまだ実施されていない。

さらに、レジンコンクリートの構造利用では、構造体として外力を受け持つとともに、目的に応じた諸機能を持つものが多い。従って、構造体としての力学的な要件が満足されると同時に、所要の機能が具備されるような設計方法、すなわち、構造設計と機能性設計の両者が確立されることが必要である。しかしながら、機能性設計については、そ

の概念が新しく、手法についてもまだ確立したものはないが、レジンコンクリートの諸機能を区分しその各々に対する評価パラメータを用いて必要とする機能を満足させるような方法が考えられ、このような方法を樹立することが望ましい。これについては、まだ確立されたものはなく、ようやくレジンコンクリートの機能を明確に区分するという考えが出てきた段階である。

#### 1. 4 本研究の目的

本論文では、不飽和ポリエステル樹脂を使用したレジンコンクリートの構造設計に利用できる資料の提供を目的として実験的検討を行ったものであり、第1章ではレジンコンクリートの構造利用と構造設計の現状を概説した。

第2章では、レジンコンクリートの変形特性・強度特性の初期の発現ならびに強度の寸法依存性について実験的に検討し、構造設計の設計用値としての特性の採用時期についてならびに強度供試体の適正寸法について考察するとともに、物性発現から見た硬化養生条件についても考察した。

第3章では、レジンコンクリートの変形特性・強度特性の温度依存性について検討し、特性の依存性に顕著な変化点が存在し、これが使用樹脂の特性に相関することを示し、この依存性を設計上で配慮する必要がある温度について考察した。

なお、本章は、文献[17], [18]としてすでに公表したものに未公表のデータを追加したものである。

第4章では、硬化収縮の補強材による内部拘束について、硬化収縮などの特性の発現状況、補強材ひずみの発現状況および曲げ強度の低下を実験的に検討し、拘束応力の実用的な推定方法について考察した。

第5章では、以上の各結論にもとづき、「ポリエステルレジンコンクリート構造設計計算指針（案）」の各種指摘項目などに対する補足意見、ならびに次なる改訂に対する提言を試みて結論とした。

## 参 考 文 献

- [1] 大濱 嘉彦, 出村 克宣, ポリマーコンクリート, シーエムシー, 1984
- [2] 岡田 清, Polymers in Concrete-新しい動向-1. 複合建設材料としてのコンクリート工事用樹脂, 材料, Vol. 41, No. 467, pp. 1311-1315, 1992
- [3] 大濱 嘉彦, コンクリート・ポリマー複合体の利用と研究・開発の動向, コンクリート工学, Vol. 28, No. 10, pp. 5-17, 1990
- [4] 小柳 洽, Polymers in Concrete-新しい動向-4. レジンコンクリート・ポリマー含浸コンクリートの利用, 材料, Vol. 41, No. 470, pp. 1709-1716, 1992
- [5] 村井 信夫, 水野 進, 高増量樹脂(プラスチックコンクリート), 電気通信研究所実用化報告, Vol. 10, No. 10, 1961
- [6] 岡田 清, ポリマーコンクリートに関する研究の発展と動向, 土木学会論文集, Vol. 354, pp. 1-11, 1985
- [7] 小柳 洽, レジンコンクリートの現状-とくに構造利用について-, コンクリート工学, Vol. 31, No. 4, 1993
- [8] 滝山 栄一郎, ポリエステル樹脂ハンドブック, 日刊工業新聞社, 1988
- [9] エポキシ樹脂技術協会, エポキシ樹脂応用技術の基礎, 1990
- [10] 岡田 清, 村井 信夫, 坂村 晃, 佐藤 泰敏, レジンコンクリートについて, 材料, Vol. 16, No. 167, pp. 91-99, 1967
- [11] 岡田 清, 米沢 敏男, レジンコンクリートの材料特性の温度依存性について, 材料, Vol. 24, No. 260, pp. 38-44, 1975
- [12] 山崎 竹博, 出光 隆, 渡辺 明, 宮川 邦彦, ポリエステルレジンコンクリートのクリープ特性に関する研究, 材料, Vol. 40, No. 456, pp. 1178-1184, 1991
- [13] 小柳 洽, 六郷 恵哲, 内田 裕市, コンクリートの破壊現象の安定とその計測, コンクリート工学, Vol. 20, No. 6, pp. 83-89, 1982
- [14] Demura, K., Y. Ohama, T. Yamamoto, M. Komiyama, Field Trial of Polyester Concrete for Protection of Stilling Basin at Hydroelectric Power Station, Polymers in Concrete, 3th Intl. Cong. of Polymers in Concrete, 1981, Japan
- [15] 高塚 外志夫, 岡田 武司, 近藤 章司, 中西 信輔, 自動トンネル築造工法におけるライニング技術の研究開発, 土木学会論文集, No. 355/VI-2, pp. 91-99, 1985
- [16] 小柳 洽, 林 富士男, レジンコンクリートの利用の現状, コンクリート工学, Vol. 23, No. 10, pp. 26-33, 1985
- [17] 小柳 洽, 林 富士男, 大島 光晴, レジンコンクリートの変形特性への熱影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp. 661-664, 1995
- [18] 林 富士男, 大島 光晴, 小柳 洽, 構造用レジンコンクリートの熱的特性と力学特性の温度依存性, 材料, Vol. 45, No. 9, pp. 1014-1020, 1996

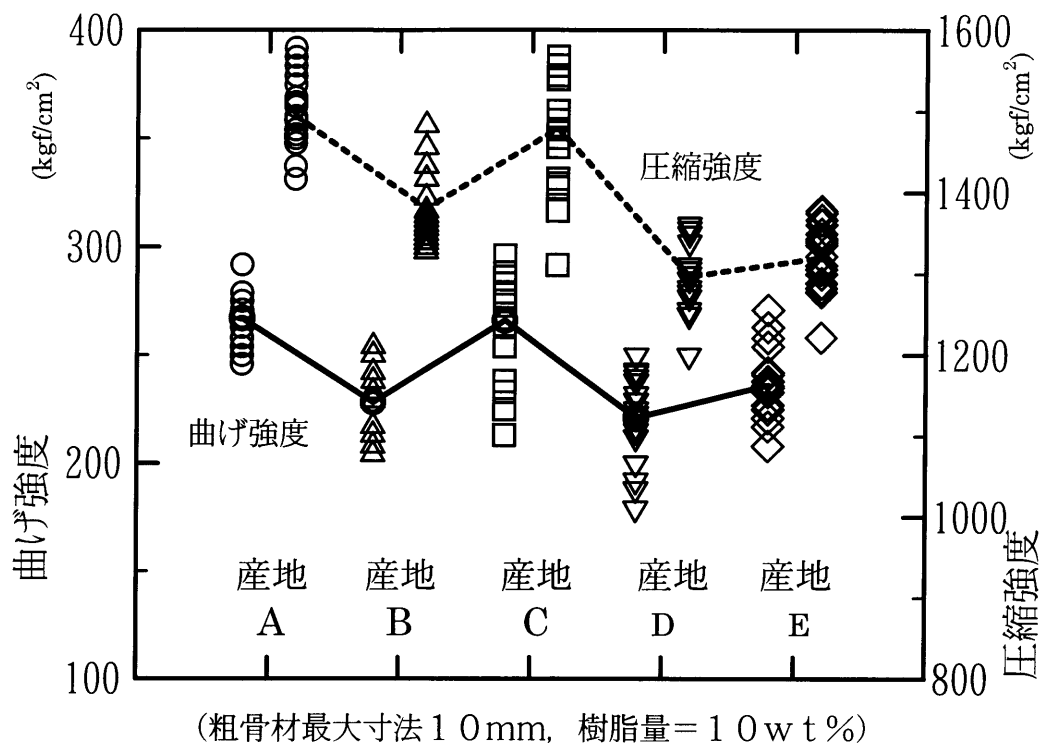


図 1-1 粗骨材産地とREC強度の関係

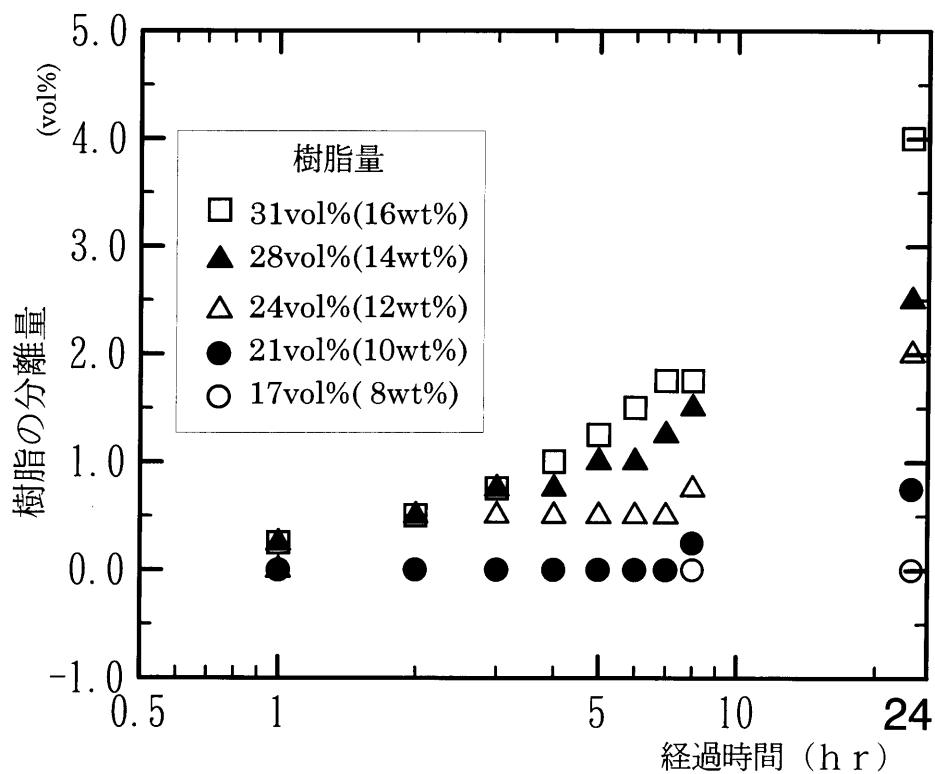


図 1-2 RECの静置時間と樹脂分離の関係

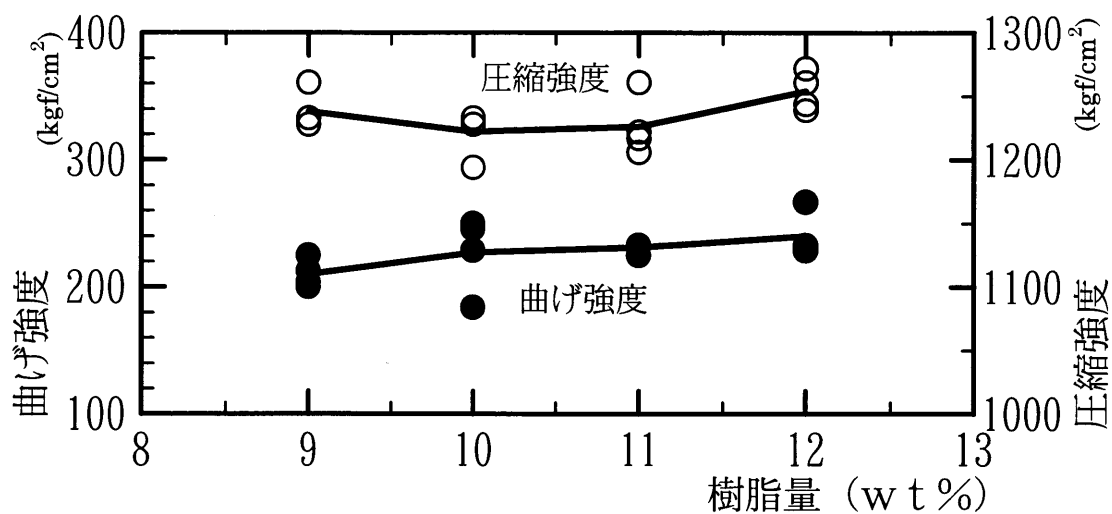


図 1-3 RECの樹脂量と強度の関係

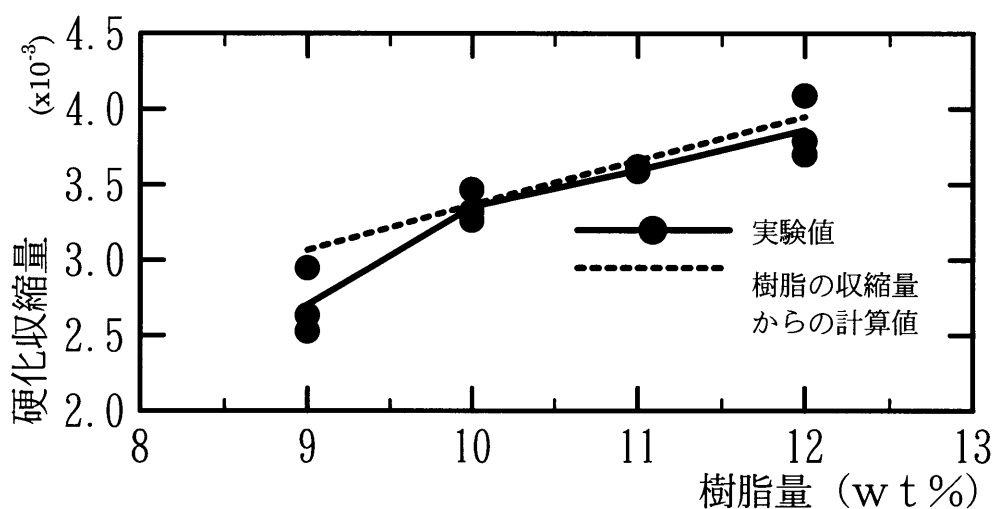


図 1-4 RECの樹脂量と硬化収縮の関係

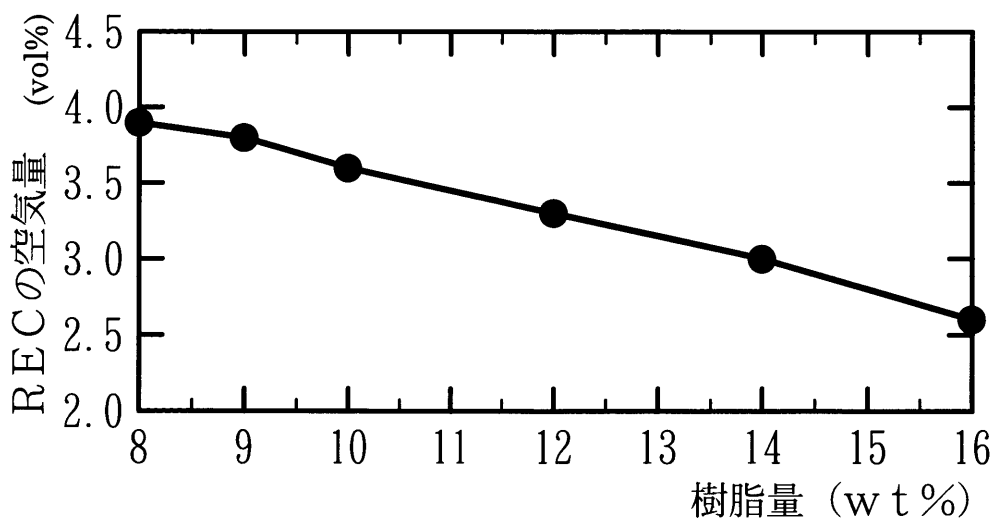


図 1-5 RECの樹脂量と空気量の関係

## 2 レジンコンクリートの物性とその発現

### 2. 1 まえがき

不飽和ポリエステルR E Cの強度、弾性係数などの力学的性質の値などに関する、既往の報告は後述する温度依存性も含めて数多いが、不飽和ポリエステルR E Cの硬化が任意に調節できるものであるにも関わらず、構造設計の設計用値として、セメントコンクリートの28日強度に相当するような、これら物性の採用時期について議論した報告はなく、「ポリエステルレジンコンクリート構造設計計算指針（案）」にもこれに関しての規定はされていない。

また、同構造設計計算指針（案）では、寸法依存性が大きいために強度供試体の寸法をR E C部材と同程度とすべきと規定している。この強度の寸法依存性が、R E Cの顕著な硬化収縮などに起因するものであるのかどうかに関して議論した既往の報告は少ない。

R E Cを構造材料として適正に設計するためには、強度などの力学的特性の適切な設計用値を定める必要があり、R E Cの物性発現を把握してその採用時期を明確にすること、また強度の寸法効果特性を定量的に把握しておくことが重要である。

本章ではR E C用の不飽和ポリエステル樹脂として最も広く用いられているオルソフタル酸系UPを使用したR E Cを対象として、2. 2節では硬化反応により流動体から固体に変化していく過程でゲル状を呈しR E Cに流動性がなくなる現象であるゲル化時間（いわゆる可使用時間）を、実用上の範囲である30～180分で変化させた場合の強度、硬化収縮、弾性係数、対数減衰率などについてその発現の状況を調べ、R E Cの構造設計に際しての設計用値の採用時期などについて検討した。

さらに2. 3節で強度の寸法依存性については、粗骨材の最大寸法を10～25mmに変化させた配合について、各種寸法において打設製作した供試体とこれより切り出した供試体の強度試験を行い、粗骨材最大寸法と寸法依存性および供試体製作条件と強度に関して検討した。

### 2. 2 物性の発現

#### 2. 2・1 使用材料と配合

R E Cの製作に使用した材料とその重量配合を表2. 2－1に示す。

表2. 2－1 R E Cの使用材料と配合（w t %）

材料名	配合	材 料 の 詳 細
樹 脂	1 1	オルソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂（粘度 4ポイズ）
充填材	2 0	重質炭酸カルシウム（平均粒径 40μ）
細骨材	2 0	静岡産山砂（最大寸法 0. 6mm, F. M. =1. 3）
粗骨材	4 9	揖斐川産玉碎石（最大寸法 10mm , F. M. =5. 9）
触 媒	適量	メチルエチルケトンパーオキサイド（活性酸素量 10%）
促進剤	適量	ナフテン酸コバルト（コバルト量 6%）

## 2. 2. 2 R E C の各種特性の測定方法

コンクリートの収縮等の測定は、機械式ひずみ計を用いて、硬化後に供試体表面に標点を貼付けて初期値とし、以降の変化を計測する方法が一般的であるが、R E Cでは、ゲル化時間が早い場合には標点を貼り付けた時点ですでに幾分かの収縮が発現しており、収縮の初期値の設定に不安があり、総収縮量に疑問が生じる事例が多い。本研究では、ゲル化初期の段階を精度よく計測するため、図2-1に示すように、直径 $\phi 100 \times 500$ mmの塩ビのパイプにR E Cを打設し、打設面に直径90mm厚さ10mmのポリエチレン製の円盤を置き、その経時的な沈下量をダイヤルゲージ式変位計で測定し、測定完了後にR E Cの長さをノギスで測定して、これらより計算で収縮量を求めることとした。ただし硬化が進行し収縮の発現速度が小さくなると、ゲージ式変位計では検出精度が低下するので、ゲル化後48時間以降も計測を行う場合は、断面 $100 \times 100$ mm、長さ400mmの角柱供試体で、検長250mmのホイットモアー型機械式ひずみ計を用いて測定することとした。

R E Cの動弾性係数および対数減衰率は、寸法 $\phi 100 \times 200$ mmの円柱供試体を用いて、動弾性係数測定器により計測した縦波共振周波数により求めた。

既報[1]の実験結果などから、R E Cに圧縮力を1分間加えたときに生じるひずみ( $\varepsilon_a$ : 載荷時の弾性ひずみ,  $\varepsilon_b$ : 載荷中のひずみ増加)の比率 $\varepsilon_b / \varepsilon_a$ と圧縮力を除いた時に生じるひずみ( $\varepsilon_c$ : 除荷時の弾性ひずみ,  $\varepsilon_d$ : 除荷後1分でのひずみ減少)の比率 $\varepsilon_d / \varepsilon_c$ の経時変化を比べると、これらが同等の値でかつ同一の変化を示し、載荷中のひずみ増加 $\varepsilon_b$ には非可逆的なフローによるひずみが極めて少ないことが判明している(図2-2-1)。常温下ではクリープが少ないことはR E Cの基本的な特性であるのか、あるいは載荷が1分と短いことに起因するのかは未解明である。しかし、 $\varepsilon_b / \varepsilon_a$ をクリープと呼ぶことには少し問題があり、本研究ではこれらを粘弾性比率と定義した。

本章の研究では、図2-2に示すように、断面 $100 \times 100$ mm、長さ400mmの角柱供試体に、1000kgfの圧縮力を1分間加えて除荷したときのひずみ( $\varepsilon_c, \varepsilon_d$ )を測定し、粘弾性比率として除荷後のひずみ減量( $\varepsilon_d$ )と除荷時の弾性ひずみ( $\varepsilon_c$ )との比( $\varepsilon_d / \varepsilon_c$ )を求めた。また、弾性ひずみ( $\varepsilon_c$ )と圧縮応力から静弾性係数を求めた。

R E Cの曲げ強度および圧縮強度は、寸法 $60 \times 60 \times 240$ mmの角柱供試体を用いて、JIS A 1184(ポリエステルレジンコンクリートの曲げ強度試験方法)およびJIS A 1183(はりの折片によるポリエステルレジンコンクリートの圧縮強度試験方法)により求めた。

## 2. 2. 3 ゲル化時間と物性の発現の試験結果および考察

ゲル化時間を、実用上の範囲である30分、60分、120分および180分と変化させた表2-1に示す配合のR E Cで、硬化収縮、弾性係数、対数減衰率および強度などについて、材令14日以内の初期における特性の発現状況を調べた試験の結果を以下に示す。なお、この試験のR E C供試体の製作時の材料温度、製作および製作後の供試体の保管(養生)ならびに特性測定時の温度はすべて20℃である。

### 2. 2. 3. 1 硬化収縮の発現

図2-3に各ゲル化時間毎の硬化収縮の発現状況を、図2-4には24時間における収縮量に対する発現率の状況を示す。



R E Cの硬化収縮の発現状況は、ゲル化時間の早遅に関わらず、ゲル化後のある時間から発現して、収縮量の概ね10～20%までは比較的緩やかな増加を、70～80%までは急激な増加を、90～95%までは再び比較的緩やかな増加をし、これ以降は非常に緩慢な増加を示して3つの変化点（変化点A：緩やか→急激、変化点B：急激→緩やか、変化点C：緩やか→微増）が存在する形態である。各ゲル化時間での硬化収縮が、これら変化点に達する時間を表2.2-2に示す。表より、硬化収縮の発現は、ゲル化の早い場合には10時以内で緩慢となり、ゲル化の遅い場合でも48時間以内には緩慢となっており、硬化収縮の発現はこの時間程度で終了するものと考えられる。

また、ゲル化が遅い配合ほど硬化収縮の開始が遅くなり、その増大の度合い（増加速度）も小さくなっている。さらに硬化収縮の量もゲル化が遅いほど少ない値である。

ゲル化時間の早遅は、単に硬化開始の早遅を指すだけでなく、収縮の発現速度（硬化反応の進行速度）にも影響しているものである。

表2.2-2 ゲル化時間毎の硬化収縮発現の変化点

ゲル化 時間 (分)	発現 開始 (時間)	変 化 点			発現の模式図
		A (時間)	B (時間)	C (時間)	
30	0.3	0.5	2	5	
60	0.8	1	3	8	
120	1	2	5	10	
180	2	3	8	30	

### 2.2.3.2 弾性係数の発現

R E Cの動弾性係数のゲル化時間毎の発現状況を図2-5に、材令7日における動弾性係数に対する発現率の状況を図2-6に示す。またR E Cの静弾性係数のそれらを図2-7および図2-8にそれぞれ示す。

弾性係数の発現は、硬化収縮の場合と同様の傾向を示し、発現率の概ね10～20%までは比較的緩やかな増加を、その後70～80%までは急激な増加を、90～95%までは再び比較的緩やかな増加を、その後は非常に緩慢な増加を示す3変化点があり、ゲル化時間は弾性係数の発現とその発現速度に影響をおよぼすものであった。ただしゲル化が早い配合では、供試体の脱型時間の制約により、発現の開始が確認できなかった。R E Cのゲル化時間毎のこれら変化点の時間を表2.2-3ならびに表2.2-4に示す。

動弾性係数の発現は、ゲル化の早い場合には10時以内で緩慢となり、ゲル化の遅い場合でも48時間以内には緩慢となっており、硬化収縮の発現が終了するのと大差ない時間でその発現を終了している。一方、静弾性係数は、動弾性係数より遅れて発現し、その発現の終了も遅れているが、ゲル化の遅い配合の場合でも48時間で緩慢となっており、この程度の時間で静弾性係数の発現も終了すると言える。

また、動弾性係数は、ゲル化時間の早遅に関わらず、ゲル化後48時間以降では同程度の値を示しているが、ゲル化の遅い配合ほどわずかに小さいようである。一方、静弾性係数ではゲル化が遅い配合ほど、その最終値も小さい値を示している。また、静弾性係数の最終値は動弾性係数のそれより10%程度低い値であった。

これは、動弾性係数が、厳密な意味のフックの法則とは合致しない非弾性材料に対する初期接線係数を示すものであり、静弾性係数がこれより大きな応力レベルに対する割線係数であるから、静弾性係数は動弾性係数より低い値となり、また、この大きな応力レベルに耐える骨格が硬化により形成されるためにより時間を必要とするために、静弾性係数の発現も遅れるものと考えられる。さらに、各ゲル化時間毎の各種特性の発現率を比較した図2-17、2-18により、動弾性係数の発現の変化点Aの時点での硬化収縮の発現率は40%程度であり、静弾性係数の変化点Aでの硬化収縮の発現率は80%程度であることから、以上のことがうかがえる。

表2. 2-3 ゲル化時間毎の動弾性係数発現の変化点

ゲル化 時間 (分)	発現 開始 (時間)	変 化 点			発現の模式図
		A (時間)	B (時間)	C (時間)	
30	--	1	2	6	
60	--	1.5	3	8	
120	2	3	7	10	
180	3	4.5	10	30	

表2. 2-4 ゲル化時間毎の静弾性係数発現の変化点

ゲル化 時間 (分)	発現 開始 (時間)	変 化 点			発現の模式図
		A (時間)	B (時間)	C (時間)	
30	--	1.5	4	8	
60	--	2	5	20	
120	2	4	11	30	
180	3	6	15	48	

### 2. 2. 3. 3 対数減衰率と粘弾性比率の変化

R E Cの対数減衰率のゲル化時間毎の変化状況を図2-9に、対数減衰率の最大測定値に対する比率の変化状況を図2-10に示す。またR E Cの粘弾性比率のそれらを図2-11および図2-12にそれぞれ示す。

R E Cの対数減衰率および粘弾性比率は、ゲル化後のある時間から測定可能となり、時間の経過とともに増大して最大値を示したあと反転減少に転じる。この最大値の40～30%に減少するまでは急激に、つぎに20～10%に減少するまでは比較的緩やかに、その後は非常に緩慢な減少を示して、硬化収縮と同様に3つの変化点（変化点A：最大値、変化点B：急激→緩やか、変化点C：緩やか→微減少）があり、ゲル化時間はこれらの発現とその発現速度に影響をおよぼすものであった。ゲル化時間毎のこれら変化点の時間を表2. 2-5ならびに表2. 2-6に示す。

対数減衰率の変化は、ゲル化の早い場合には数時間で、ゲル化の遅い場合でも20時間以内には緩慢となり、動弾性係数の発現が終了するのと大差ない時間でその変化は終了し一定値となっている。一方、粘弾性比率の変化は、対数減衰率より遅れて始まり、その変化の終了も遅れているが、ゲル化の遅い配合の場合でも48時間で緩慢となり、

静弾性係数の発現と大差のない時間で変化を終了し一定値となっている。

ゲル化時間の早遅による対数減衰率の最終値の差は顕著ではないが、粘弾性比率ではゲル化時間が遅い配合ほど大きな最終値となった。また図2-17、図2-18より、対数減衰率の変化点Aが現れる時点での硬化収縮の発現率は40～60%程度であり、粘弾性比率の変化点Aでの硬化収縮の発現率は70～90%程度であった。これらは、先述の弾性係数における場合と同様の理由と考えられる。

対数減衰率と粘弾性比率は初期に置いて増加し最大値を示した後で減少する。これは初期では粘性が極めて大きく弾性は微少であるため、弾性が大きく粘性は小さいことを前提としているこれらの試験方法による結果であろう。ある意味では、硬化反応が進行し収縮が発現して、この最大点A点を示す時点が弾性体と見なしうる指標とも考えられる。

表2. 2-5 ゲル化時間毎の対数減衰率の変化点

ゲル化時間 (分)	発現開始 (時間)	変 化 点			変化の模式図 対数減衰率 時間
		A (時間)	B (時間)	C (時間)	
30	—	1	2	4	
60	—	2	3	7	
120	—	3	5	10	
180	4	4.5	6	12	

表2. 2-6 ゲル化時間毎の粘弾性比率の変化点

ゲル化時間 (分)	発現開始 (時間)	変 化 点			変化の模式図 粘弾性比率 時間
		A (時間)	B (時間)	C (時間)	
30	—	2	3	6	
60	—	3	4	10	
120	4	7	10	30	
180	10	12	15	48	

## 2. 2. 3. 4 強度の発現

RECの曲げ強度のゲル化時間毎の発現状況を図2-13に、材令14日での曲げ強度に対する発現率の状況を図2-14に示す。またRECの圧縮強度のそれらを図2-15および図2-16にそれぞれ示す。

曲げ強度および圧縮強度はゲル化時間30分の場合では2時間、60分では3時間、120分では5時間程度で測定可能な強度(曲げ強度：50 kgf/cm<sup>2</sup>、圧縮強度：200 kgf/cm<sup>2</sup>)となり、その他の特性と同様に急激に増加したあと緩慢な増加があり、曲げ強度では20時間、24時間、30時間程度で、圧縮強度では30時間、40時間、50時間程度でほぼ一定値となり、ゲル化時間は強度の発現とその発現速度に影響をおよぼすものであった。強度については、樹脂の硬化程度以外に骨材の界面状況による付着強度差などによるバラツキが大きいため、ゲル化時間による強度発現終了の時間の判定は困難であるが、ゲル化の遅い場合でも48時間程度で強度の発現は終了すると言える。

また、図 2-17 より、強度は静弾性係数の発現と同程度の時間から発現している。

#### 2. 2. 4 製造時期と特性発現の試験結果および考察

研究の対象としている構造材では、その寸法が大きいため加熱硬化あるいは加熱養生をおこなうことは希であり、常温硬化の常温養生が主体となる、そこで春夏秋冬の各温度条件下での物性発現を調べるため、材料温度と製作時作業温度を、35℃、20℃および5℃とし、ゲル化時間を40分として、春夏秋冬の各時期に製作した表 2.2-1 に示す配合のRECを、製作時の温度で保管（養生）した場合と屋内に放置し外気温で保管（養生）した場合での、1年間の動弾性係数、対数減衰率の発現についての試験の結果を以下に示す。なお、特性測定時の供試体温度は、2日目までは養生温度とし、7日目からは、測定の前より20℃の室内に供試体を移し温度が20℃となるよう調節して行った。

##### 2. 2. 4. 1 動弾性係数の発現

2種の養生条件での動弾性係数の発現状況を図 2-19 に示す。図より20℃、35℃で製作しその温度で養生したものは、前項での発現状況と同様に、ゲル化後数時間で急激に発現し、それ以降は緩やかな発現をして1日以降はわずかに増加する程度でありほぼ一定となっている。一方、5℃で製作しその温度で養生したものは、前項の発現状況より遅れて、ゲル化後1日まで急激な発現があり、それ以降緩やかな発現をして2日以降はわずかに増加する程度であり一定の値となっている。しかし、高温で製作したものとは比べて動弾性係数の値は7%程度小さい。

また、20℃、35℃で製作し、外気温で養生したものと、製作時温度で養生したものとは、その発現および最終値に差は認められず同等と見なし得る。しかし、5℃で製作し外気温で養生した場合の動弾性係数の最終値は、高い温度履歴の結果であるためか、わずかに製作時温度で養生をした場合より大きな値を示し、高温で製作したものとの差は3%程度となっている。さらに春と秋に同一の20℃で製作し、その後は気温の変化に連動する外気温で養生したものでは、高い温度により早く遭遇する春に製作したものが、わずかであるが大きな値を示すようである。従って、初期の硬化反応が終了した以降での温度の履歴による動弾性係数の向上も存在するようであり、この場合より早い時期に高温に遭遇することが効果的と言えるようである。ただし、この効果は特性値の絶対値に比べれば、バラツキの範疇に入る程度のものであり、常温硬化で常温養生を行う場合の、RECの動弾性係数は製作後の数日以内にその発現を終了すると見なすべきと考える。

##### 2. 2. 4. 2 対数減衰率の変化

2種の養生条件での対数減衰率の変化状況を図 2-20 に示す。図より20℃、35℃で製作したものは、動弾性係数の場合と同様に、その変化状況および最終値に大差はなく同一の傾向を示し、ゲル化後2日で0.05程度の値となり10日以後は0.03～0.04の範囲で推移している。一方、5℃で製作したものは、高温で製作したものより発現が遅れ、ゲル化後7日でも0.07程度であり、製作時の温度で養生した場合は10日で0.05程度となり一定とる、外気温で養生した場合には、同じく10日で

0.04程度で一定となり、低温時の発現が、動弾性係数の場合以上に遅れるようである。また、動弾性係数の場合と同様に5℃で製作したものは、高温で製作したものと比べて、対数減衰率はわずかであるが大きいようである。

### 2.2.5 特性の発現順序

図2-17、2-18に示す各種特性の発現率の経時変化の関係より、特性の発現順序としては、まず硬化反応による発熱と硬化収縮がおり、やや遅れて動弾性係数の発現と対数減衰率の減少が、さらに遅れて静弾性係数の発現と粘弾性比率の減少が起り、これと同時にやや遅れて強度の発現がある。また、発現がおくれる特性ほど、その発現速度も緩慢であり、その発現が終了する順序も同一である。この特性の発現およびの終了の前後関係は、RECのゲル化時間に関わらず一定であった。

### 2.2.6 硬化条件と物性発現

UP樹脂の硬化とは、硬化剤より発生した1次ラジカルで樹脂の不飽和酸の二重結合にモノマーラジカルが生じ、二重結合が切れてモノマーと結合する架橋反応が連鎖的に起こることである[2]。ゲル化とはこの反応がある段階まで進み樹脂の流動性がなくなることである。ゲル化の調整とは1次ラジカルの発生量を制御して、これに続く連鎖反応の速度に緩急を持たせることである。従ってゲル化を遅くすると反応の進行速度も遅くなり、特性の発現に時間を要することになるが、架橋反応が100%達成されるならば得られる特性値は同じになるはずである。しかしながら、2.2.3項ではゲル化の遅いほど、2.2.4項では温度が低いと、硬化収縮や弾性係数に差が観測された。このことは、反応の進行が遅いと、反応熱の放散などで必要なエネルギーの供給が不足するために反応の完了が阻害される、あるいは緩慢な反応であるために、ある段階以降では分子の移動がすでに形成された骨格により阻害され反応の進行により多くの時間を要するようになり、反応が極めて緩慢しか進行しない、などの理由が考えられる。2.2.4項の動弾性係数・対数減衰率の場合、これら発現の遅い場合での物性値が時間の経過により、いずれは発現の早い場合での物性値に収束する現象は認められず、樹脂の熱変形温度あるいはそれ以上の温度で数時間から数日間の強制加熱をするアフターキュアー（加熱により硬化樹脂の流動性を高め、クリープ現象を促進して内部応力を解放する結果と考えられる）と呼ばれるような特別な外部作用を行わない限り、常温下では初期の硬化反応で得られた物性値の差は縮まらないものと考えられる。

研究の対象としている構造材では、その寸法や重量あるいはコストの制約からこれらの操作を実現することは難しく、RECは硬化反応のある段階で型枠を取り除かれ精々が外気温と大差のない屋内で保管されることを考えると、物性発現の見地からは不飽和ポリエステルRECの硬化条件としては、高温で且つ短時間に物性発現を完了させることが好ましいようである。

温度に関しては、5℃、20℃、35℃の物性を比較すると、5℃と20℃との間に大きな開きが存在するようであり、物性の発現が安定するまでの間は、概ね10～15℃以上に保つのが好ましいようである。

また本章の実験では、ゲル化が早い程良好な結果が得られおり、ゲル化は早いほど好

ましいことになるが、これはゲル化を早くした結果として連鎖反応が急速に進行して短時間で物性発現が完了したためである。従って、ゲル化するにわち可使時間を長く取る必要が有る場合には、ゲル化から物性発現完了までの時間を短くする方策（例えば、硬化剤がMEKPOとナフテン酸コバルトのときにはジメチルアニリン、アセチルアセトンなどを添加する、あるいは使用樹脂には反応性の高いものを選ぶなど）を取れば良いと考えられる。

## 2. 2. 7 設計用値の採用時期

構造材料としての不飽和ポリエステルRECの製作条件などを考えた場合、実用的なゲル化時間および温度の範囲内であれば、ゲル化が30分以下の早い条件であれば12～24時間で、同じく3時間程度と遅い条件あるいは5℃と低温の条件でも48時間で最終値の90～95%の特性を発現している。このことから各種物性の設計用値の採用時期としては、従来のセメントコンクリートの場合のように28日と長い期間にする必要はなく、2日（48時間）場合によっては1日（24時間）で良いと考えられ、最長を取っても7日までで十分である。

## 2. 3 曲げ強度の寸法依存性

### 2. 3. 1 RECの材料と配合

RECの製作に使用した材料とその重量配合を表2. 3-1に示す。

表2. 3-1 RECの使用材料と配合（wt%）

材料名	配合1	配合2	配合3	料の詳細
樹脂	10	10	10	メタクリル酸系不飽和ポリエステル樹脂（粘度4ポイズ）
充填材	20	20	20	重質炭酸カルシウム（平均粒径40μ）
細骨材	20	20	20	静岡産山砂（最大寸法0.6mm, F.M.=1.3）
粗骨材	50	—	—	木曽川産玉碎石（最大寸法10mm, F.M.=5.6）
粗骨材	—	50	—	揖斐川産玉碎石（最大寸法15mm, F.M.=6.2）
粗骨材	—	—	50	揖斐川産玉碎石（最大寸法25mm, F.M.=7.6）
触媒	ゲル化45分適量			ベンゾイルペルオキサイド（活性酸素量10）
促進剤	ゲル化45分適量			ナフテン酸コバルト（コバルト量6%）

### 2. 3. 2 供試体の製作と試験

表2. 3-1の各配合のRECで、断面寸法が6x6, 10x10, 15x15, 20x20, 25x25cmで長さがそれぞれの断面辺長の4倍である5種類の角柱供試体を、各々3本ずつ製作した。

供試体は、RECの硬化後1時間で型枠から脱型し、脱型後1日して80℃の加熱炉で15時間の加熱養生を行った。強度試験までは20℃の室内にて保管した。

曲げ強度試験は、支点間距離を供試体の断面高さの3倍とする三等分点载荷にて行った。試験時の材令は10日とした。さらに、断面寸法が15x15cm以上の供試体の曲げ試験の折片から、6x6x24cmおよび10x10x40cmの角柱をダイヤモンドカッターで切り出して、切出し供試体とし、同様の曲げ強度試験を実施した。試験時の材令は40日である。

### 2. 3. 3. 結果と考察

各配合の供試体の断面高さと曲げ強度の関係を図 2-21 に示す。

各配合の同一寸法の曲げ強度を比較した場合、骨材寸法の大きい配合での曲げ強度は、骨材寸法の小さい配合でのそれより低い値である。またこれは、供試体寸法が小さい場合ほどその差が大きいうのである。破壊は応力集中の大きな箇所すなわち骨材との界面から生じ、骨材寸法が大きいほど応力集中の度合いが大きくなる。従って、最大寸法が小さな粗骨材を使用すると、断面に樹脂が均一に配置されより均質となり応力集中の度合いが小さくなる結果と考えられる。また強度差が断面寸法の増加とともに小さくなるのは、供試体の断面寸法に対する骨材の寸法の比が小さくなり、その影響度も少なくなるためとも考えられる。

各配合のレジンコンクリートの曲げ強度は、供試体の断面高さの増加とともに、ほぼ直線的に低下している。粗骨材の最大寸法が 15 mm および 25 mm の配合では、断面寸法が 6 cm の供試体の強度が 10 cm 以上の供試体での強度の関係より若干ずれている。このずれは、供試体の断面寸法が使用骨材の最大寸法に比べて小さくなり均質な供試体の製作ができなかった結果と考えられるが、断面寸法 10 cm 以上の強度結果だけを対象にすると、曲げ強度の低下度合いは骨材寸法の小さいものほど大きく、寸法依存性には使用骨材の最大寸法も影響し、骨材寸法が小さいほど強度の寸法依存性は大きいことがうかがえる。

しかし、著者の経験では管理した骨材を使用しても、曲げ強度の標準偏差を 5 % 以下にすることは相当困難であり、強度試験結果には相当の「バラツキ」を考える必要があること（図 1-1 参照）、ならびに著者らの図 2-22 に示す既報の結果 [3]、[4] などより総合的に判断すると、REC の曲げ強度は、基本的には断面寸法 6 cm から 25 cm まで、図上で直線的に低下する関係にあると考える。これらより、曲げ強度は供試体の断面高さの 0.25 乗～0.20 乗に比例して低下している。従来のセメントコンクリートでは約 0.15 乗に比例して低下するとの報告があり [5]、REC は強度の寸法依存性が大きいと言える。

つぎに、図 2-24 に示す切出し供試体による曲げ試験結果について考える。強度の「バラツキ」は切出し前の成形供試体でのそれより大きくなっているが、各配合での切出し供試体は成形供試体と同等の強度を示している。この「バラツキ」の増大は、切出し時の刃物の揺れなどで、供試体の表面に微少な傷が発生したことなどによると考える。

切出し供試体での結果、ならびに図 2-22、2-23 に示す硬化収縮を低減した配合の REC でも同様に寸法による強度低下の傾向を示していることから、REC の強度の寸法依存性は、REC の硬化収縮や、供試体のマスに起因する蓄熱差による硬化差には影響されていないと結論づけられる。

### 2. 3. 4 設計用値と供試体寸法

REC の曲げ強度をもとに構造設計を行う場合には、以上で明らかにした強度の寸法効果の特性を配慮し、曲げ強度の設計用値としては対象とする構造部材の厚さ寸法もしくはそれに近い寸法の断面高さを持つ強度供試体の試験結果あるいはその部材寸法に換算した曲げ強度を用いるべきである。

曲げ強度は供試体の断面高さが無限に増大した場合には引張り強度と同一となると考えらる。このため経済的では無いが、曲げ強度に変えてこれより低い値である引張り強度を設計用値として採用することもできる。なお、図2-23に示すとおり割裂強度においても寸法依存性が存在しており、設計部材の寸法もしくはそれに近い寸法の強度供試体の結果を採用する必要がある。

## 2. 4 まとめ

不飽和ポリエステル樹脂RECの硬化収縮、弾性係数、対数減衰率、強度等の物性は、ゲル化を30～180分程度で変化したとき、ゲル化の早い遅い（硬化反応の密度）の影響を受け、初期の段階では大きな開きがあるが、温度条件が同一で有れば、ゲル化後48時間程度経過すれば、ほぼ同等の物性値となる。

温度が低く条件が悪い場合には、物性の発現が緩やかとなり遅くなるだけでなく、硬化反応を継続維持する温度のエネルギーも低いためか、最終の物性値も低いものとなる可能性がある。

ゲル化時間が、実用的な範囲である30～180分程度で変動しても、RECの硬化収縮、弾性係数、対数減衰率、強度等の物性は、ゲル化後48時間程度経過すれば、その物性値は95%以上発現しており、実用上の構造設計の設計用値として使用できると言える。

不飽和ポリエステル樹脂RECの曲げ強度は、従来のセメントコンクリートで言われている以上の供試体寸法への依存性を示し、試験供試体の断面高さの1/4～1/5乗に比例して減少する。この依存性は供試体寸法のための差によるものであり、寸法の相違によるRECの硬化収縮等の影響は見られなかった。

RECの構造設計計算の設計用値としては、設計する部材の寸法（厚さ）に近い断面寸法の供試体での強度試験結果あるいはその部材寸法に換算した強度を用いる必要がある。また、部材の厚さ寸法が変化するとき、最大寸法での強度とすべきである。

## 参 考 文 献

- [1] 小柳 洽, 大野 定俊, 村井 信夫, 林 富士男, RECの収縮性状と補強筋による拘束応力の発現, 第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp. 241～244, 1980
- [2] 滝山 栄一郎, ポリエステル樹脂ハンドブック, 日刊工業新聞社, 1988
- [3] 戸崎 達也, 大野 定俊, 小柳 洽, 林 富士男, 小宮山 正, レジンコンクリートの各種強度と供試体寸法の影響, 日本材料学会 第30期学術講演会, 309, 1981
- [4] NGUYEN VAN LOI, 内田 裕市, 六郷 恵哲, 小柳 洽, 大島 光晴, レジンコンクリートの強度における寸法効果, 土木学会第48回年次学術講演会, V19, 1993
- [5] 内田 裕市, 六郷 恵哲, 小柳 洽, コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討, 土木学会論文集, Vol. 16/V-2, No. 442, pp. 101-107, 1991



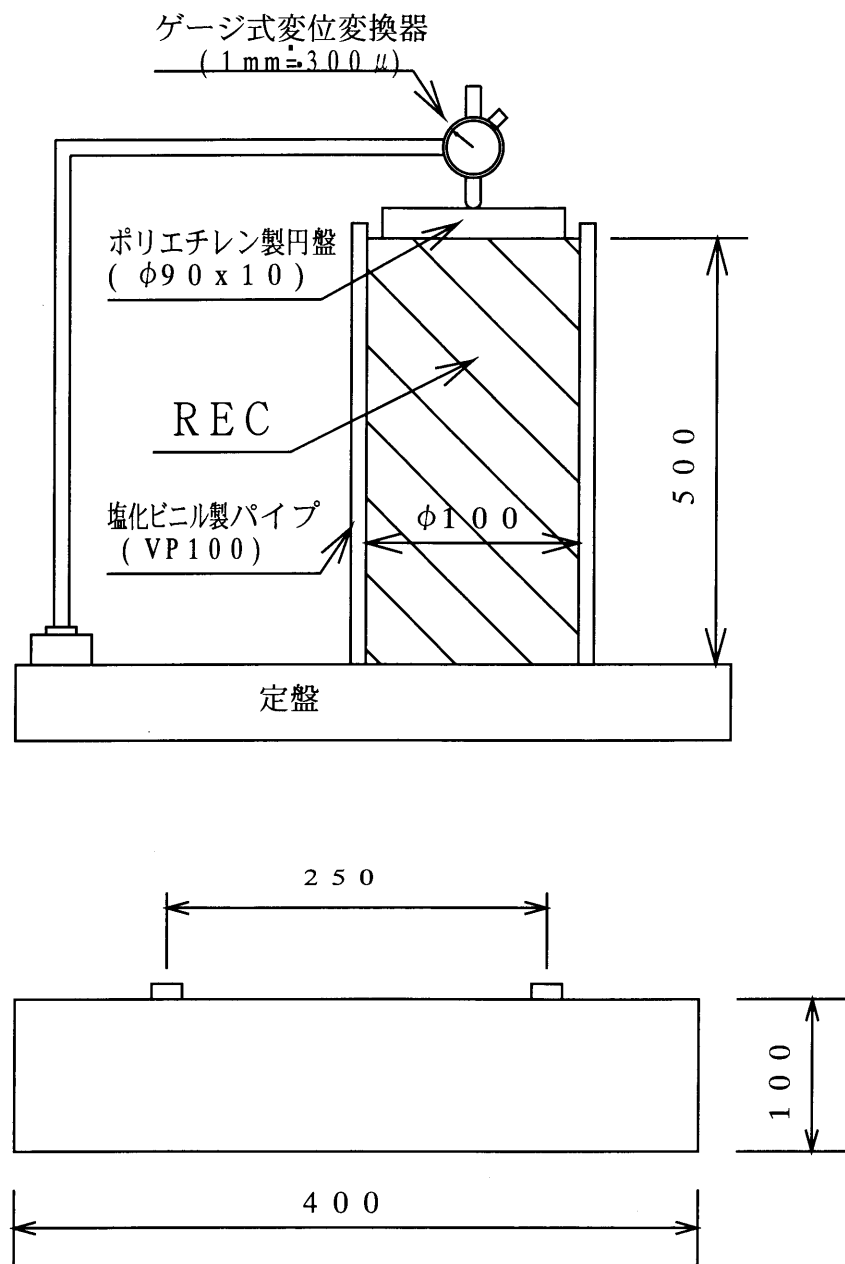


図 2-1 RECの硬化収縮の測定方法

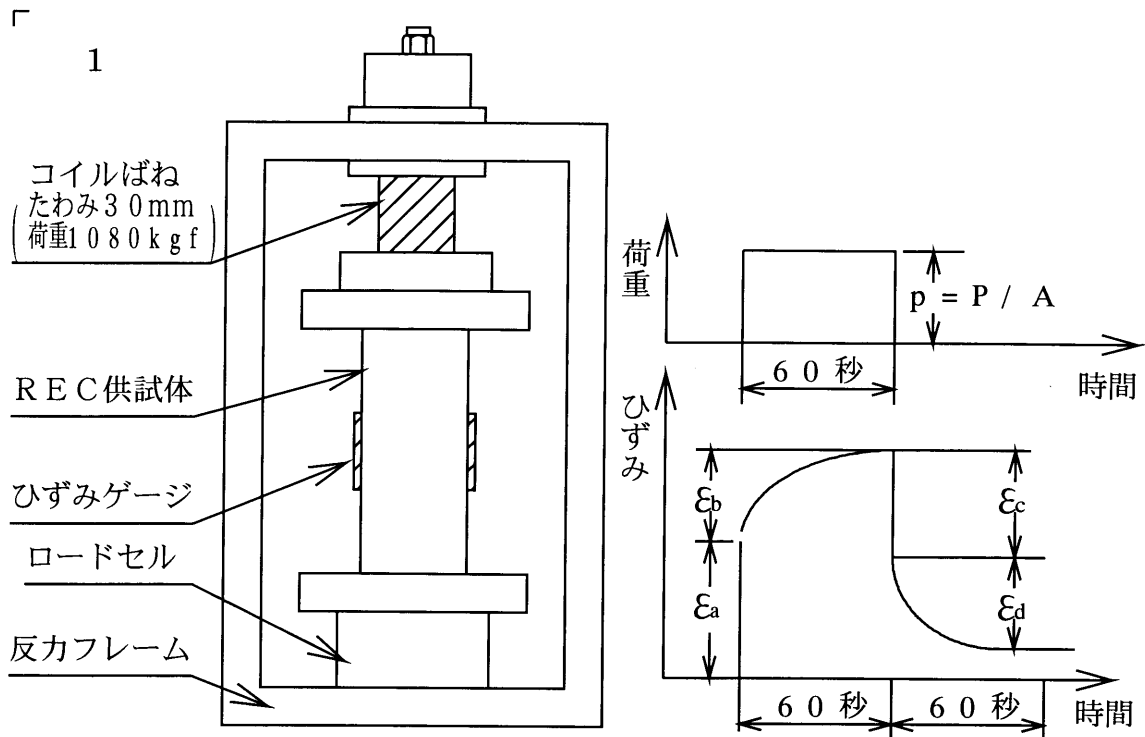


図 2-2 粘弾性比率の試験方法

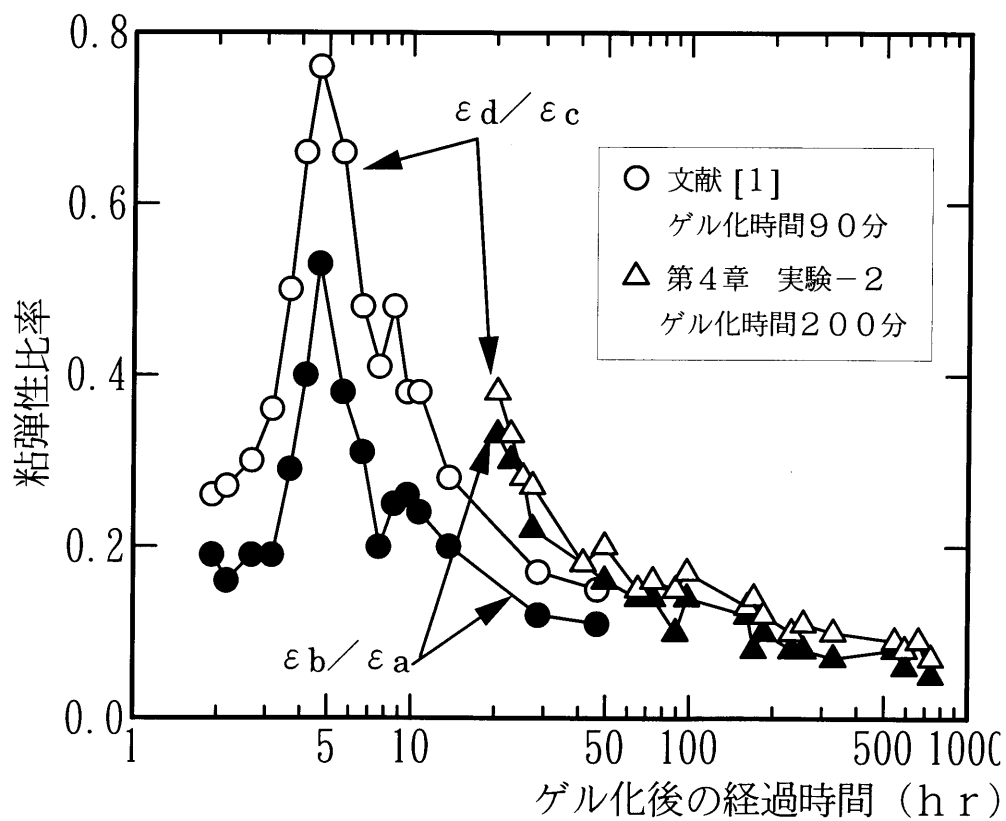


図 2-2-1 粘弾性比率の比較

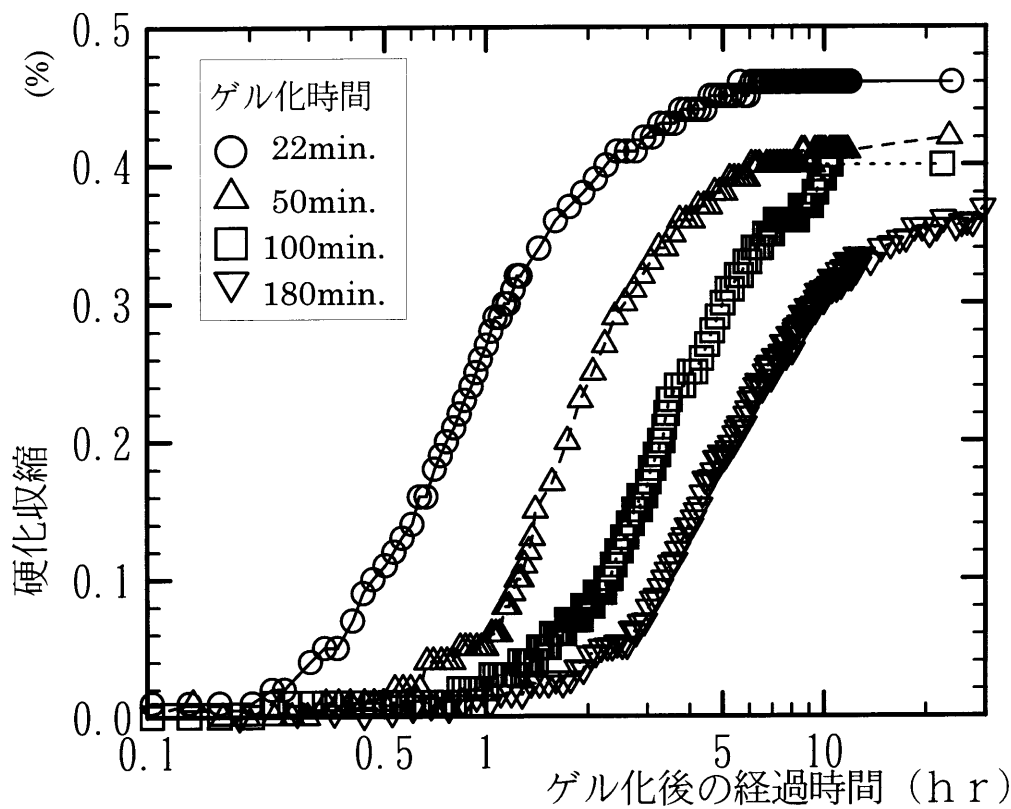


図 2-3 ゲル化時間と硬化収縮の経時変化の関係

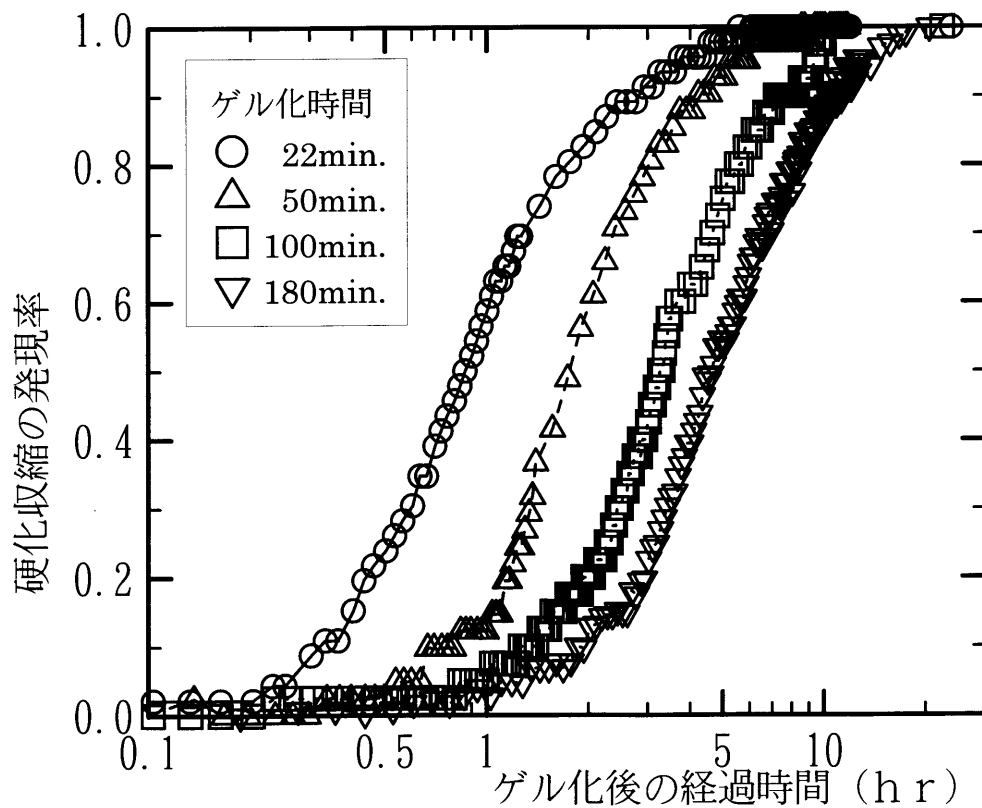


図 2-4 ゲル化時間と硬化収縮の発現率の関係

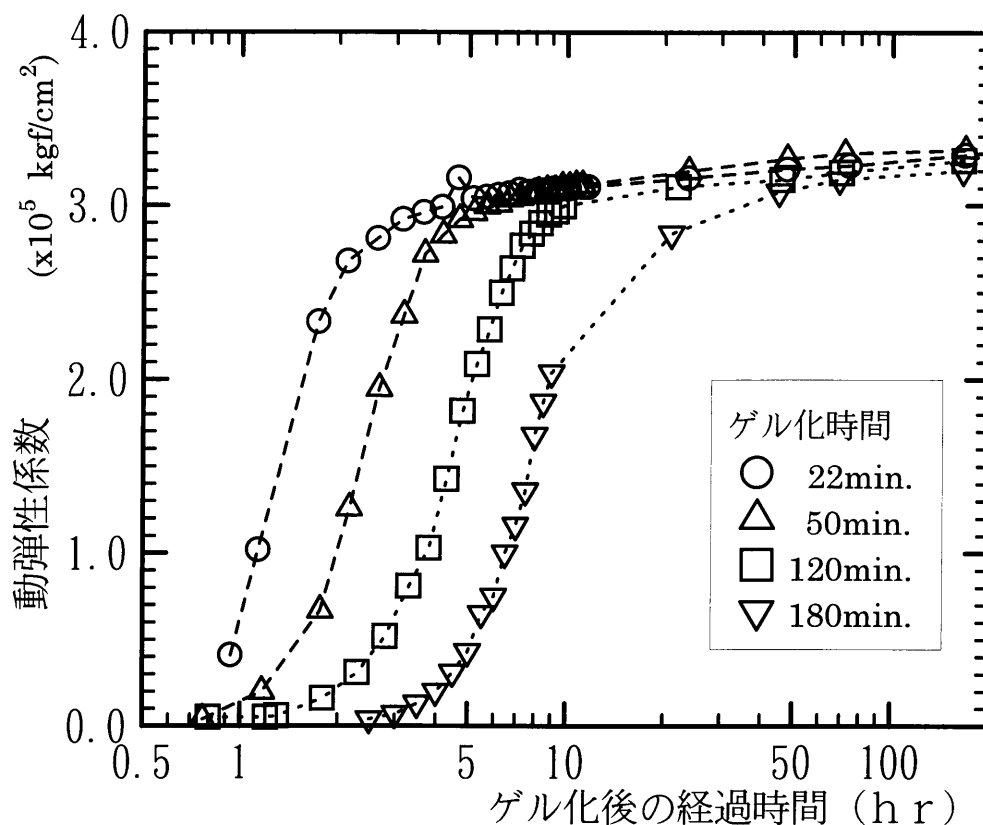


図 2-5 ゲル化時間と動弾性係数の経時変化の関係

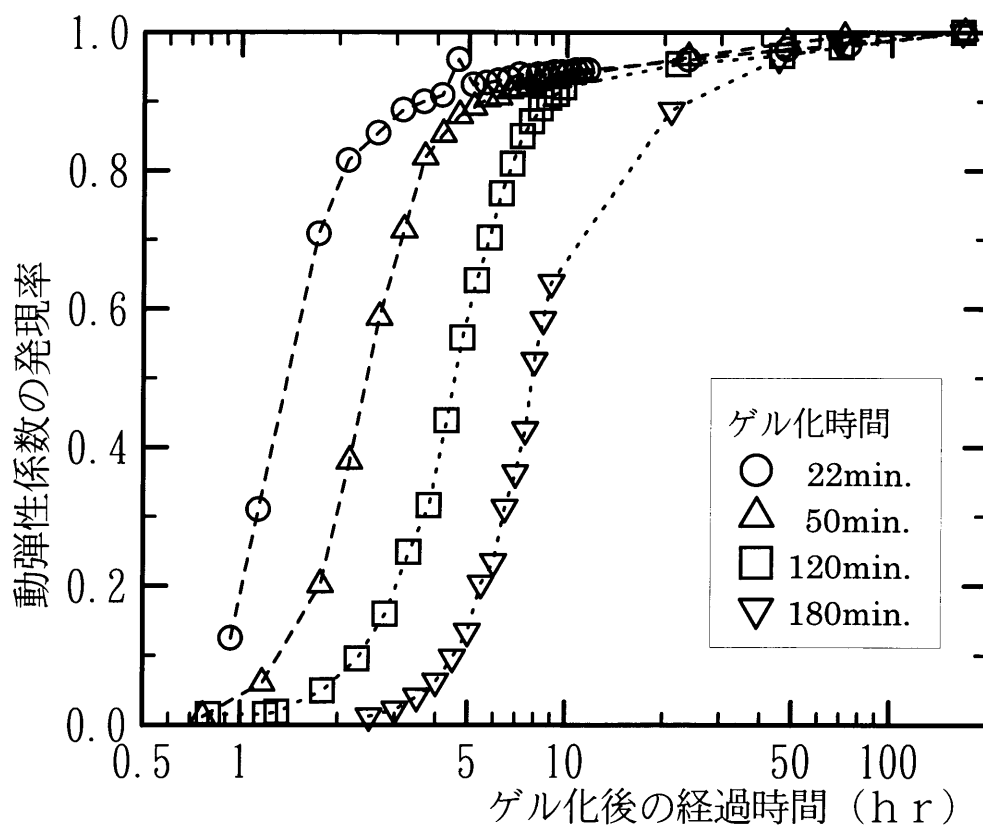


図 2-6 ゲル化時間と動弾性係数の発現率の関係

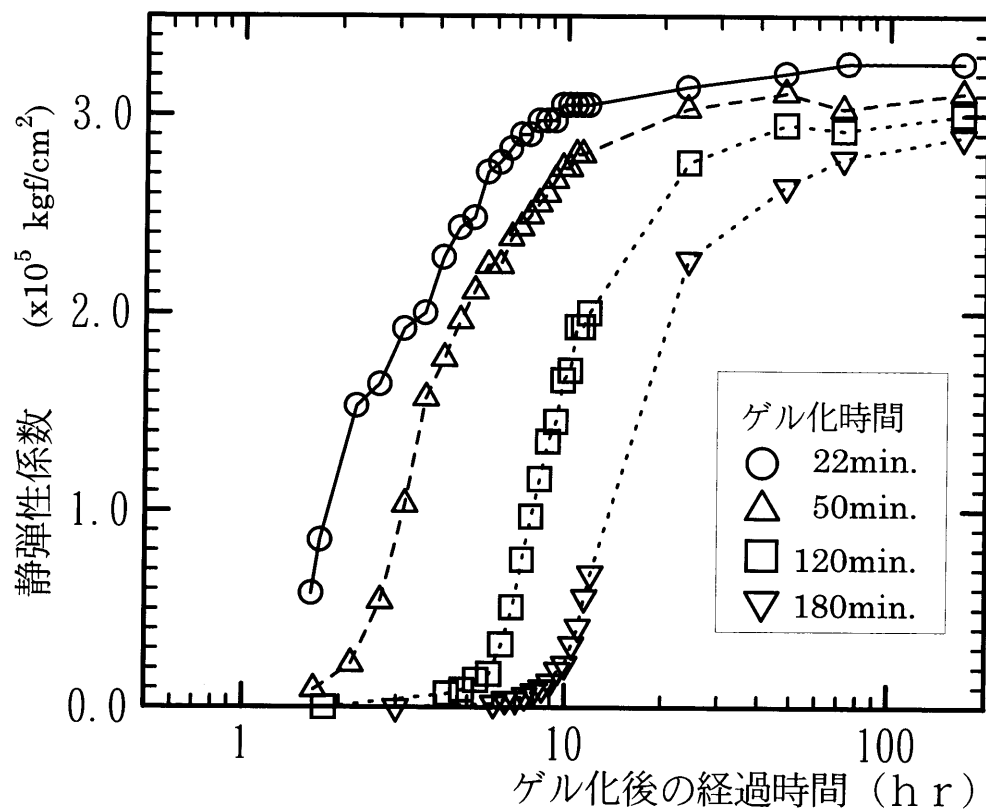


図 2-7 ゲル化時間と静弾性係数の経時変化の関係

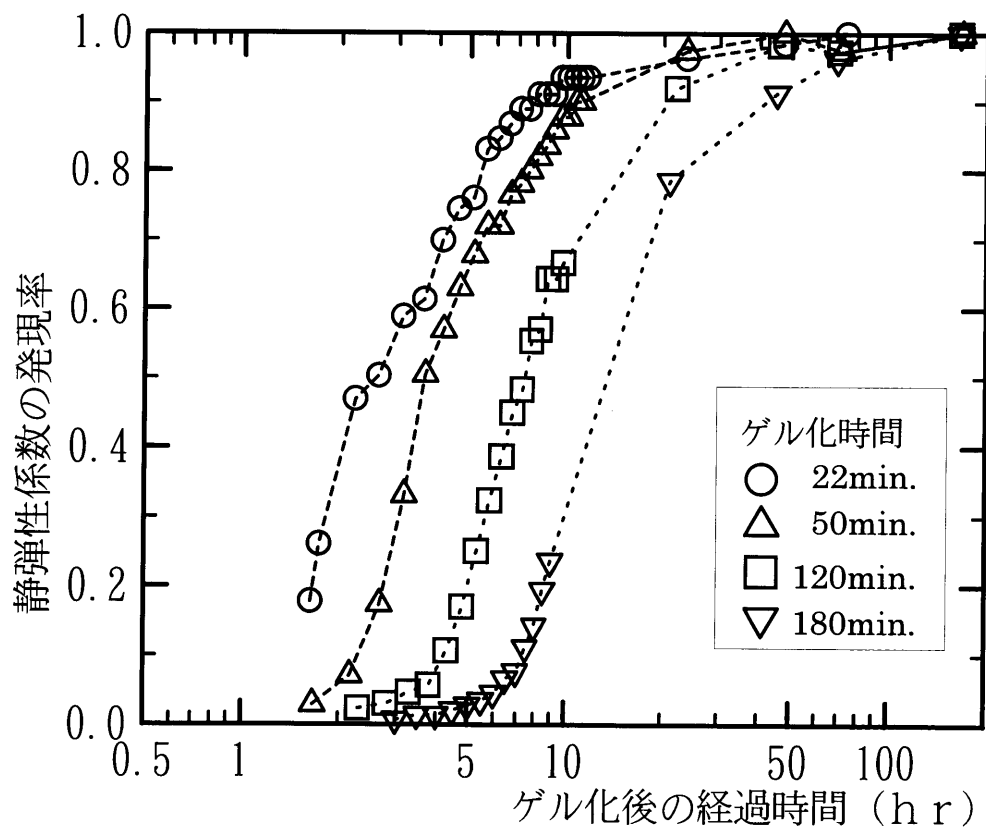


図 2-8 ゲル化時間と静弾性係数の発現率の関係

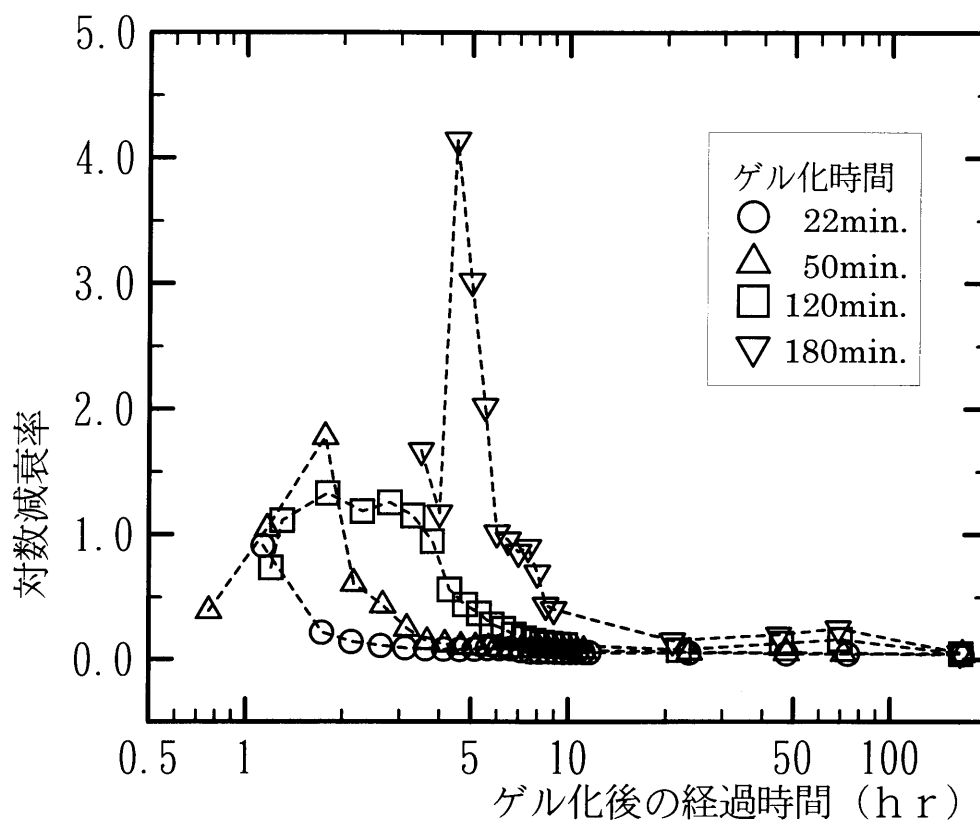


図 2-9 ゲル化時間と対数減衰率の経時変化の関係

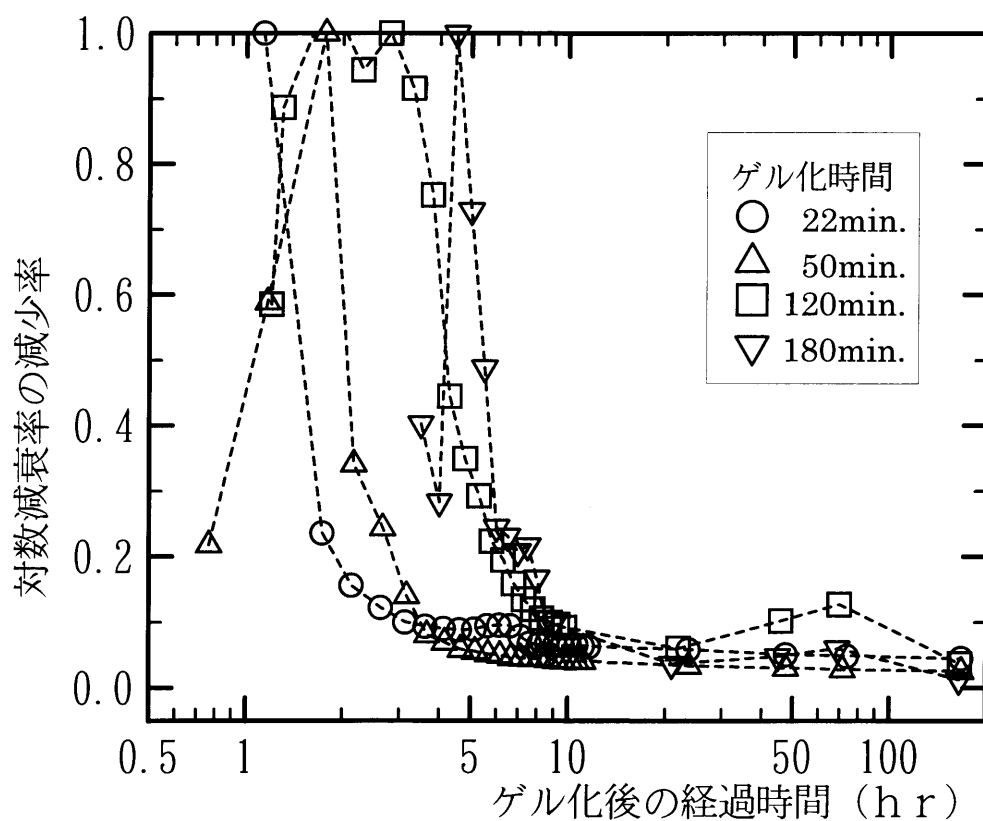


図 2-10 ゲル化時間と対数減衰率の減少率の関係

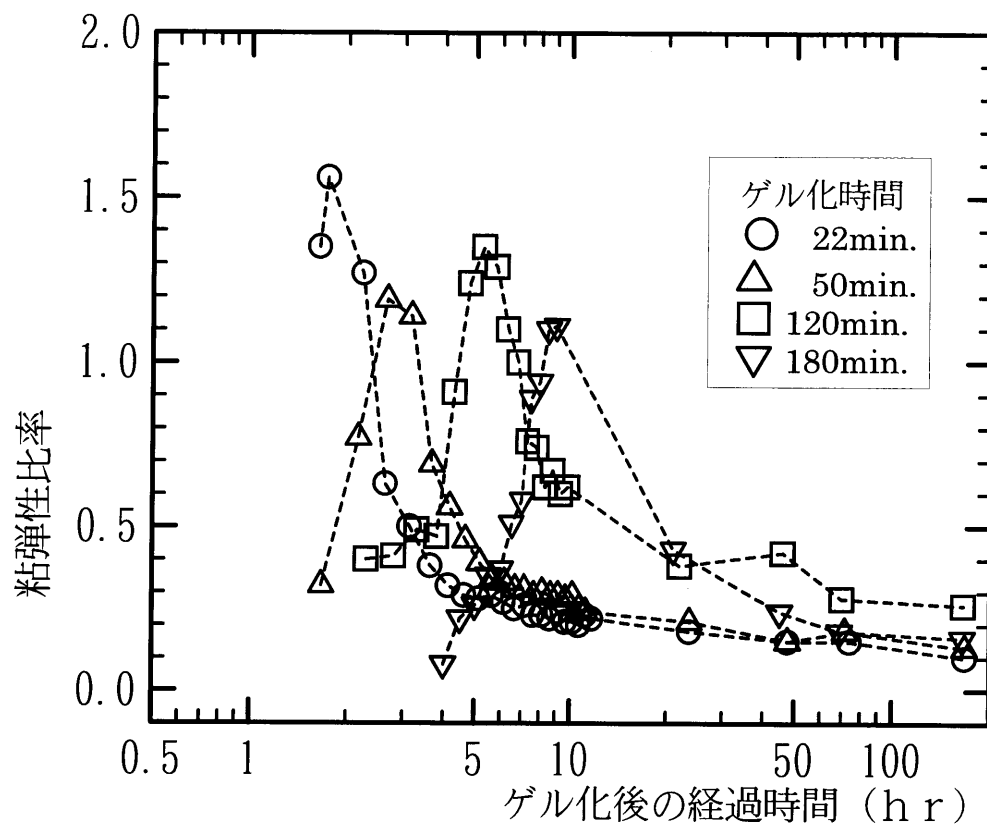


図 2-1-1 ゲル化時間と粘弾性比率の経時変化の関係

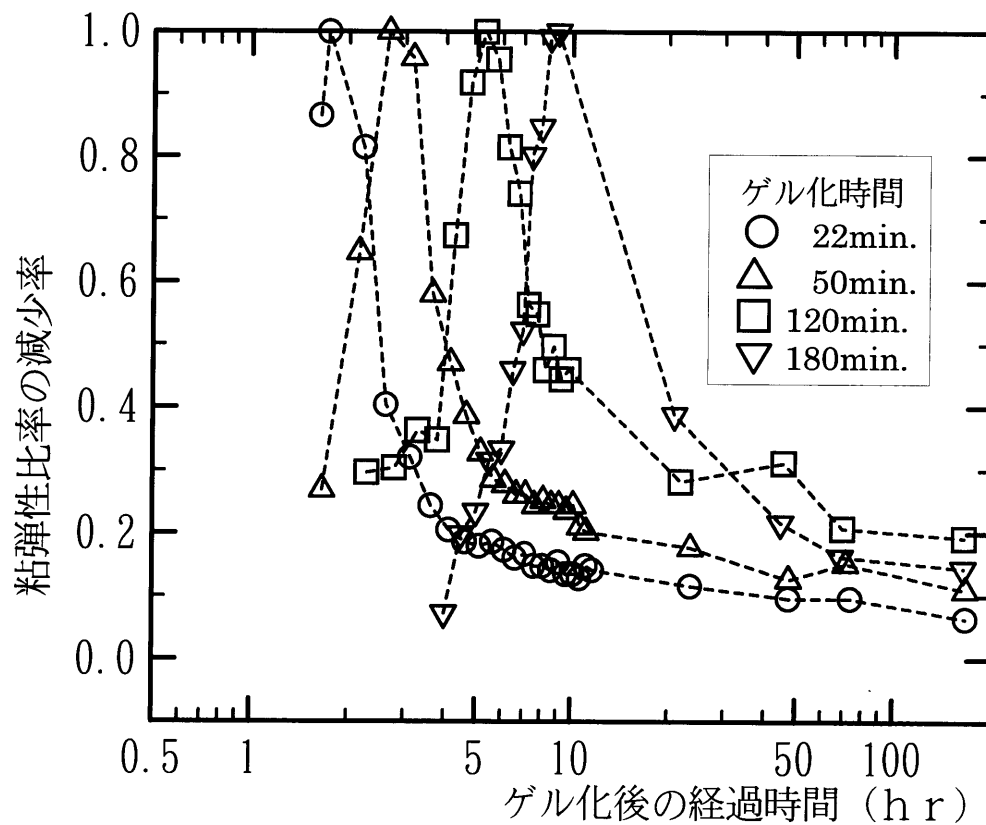


図 2-1-2 ゲル化時間と粘弾性比率の減少率の関係

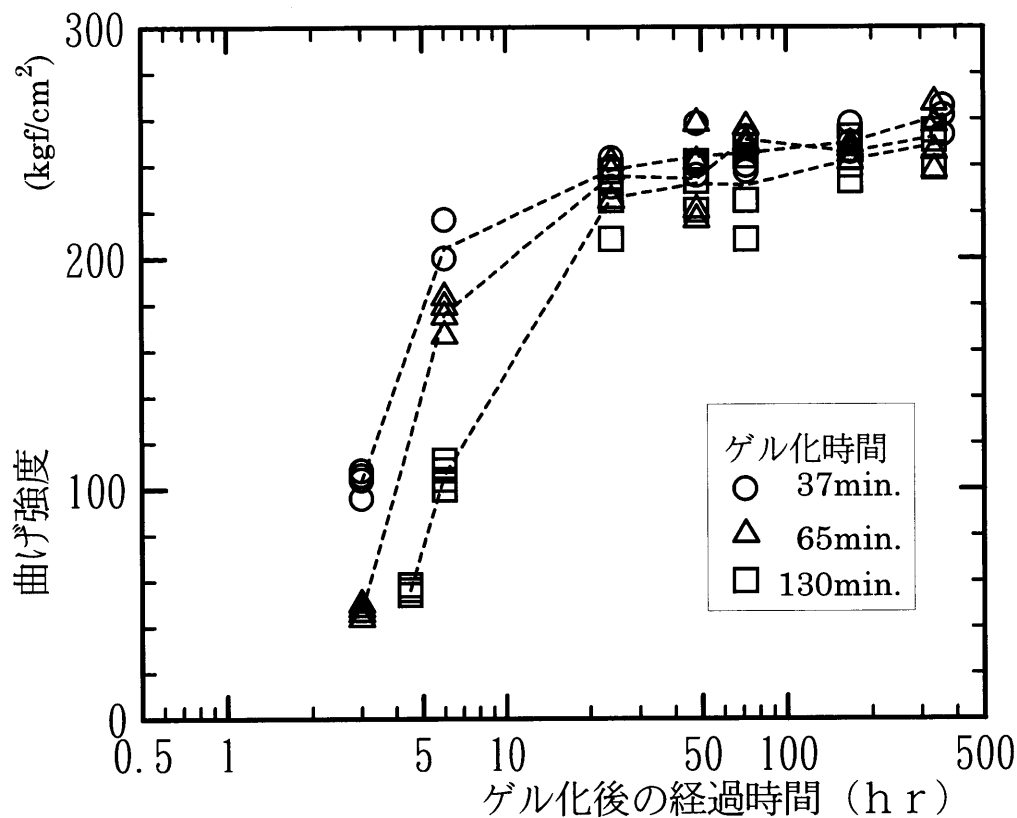


図 2-13 ゲル化時間と曲げ強度の経時変化の関係

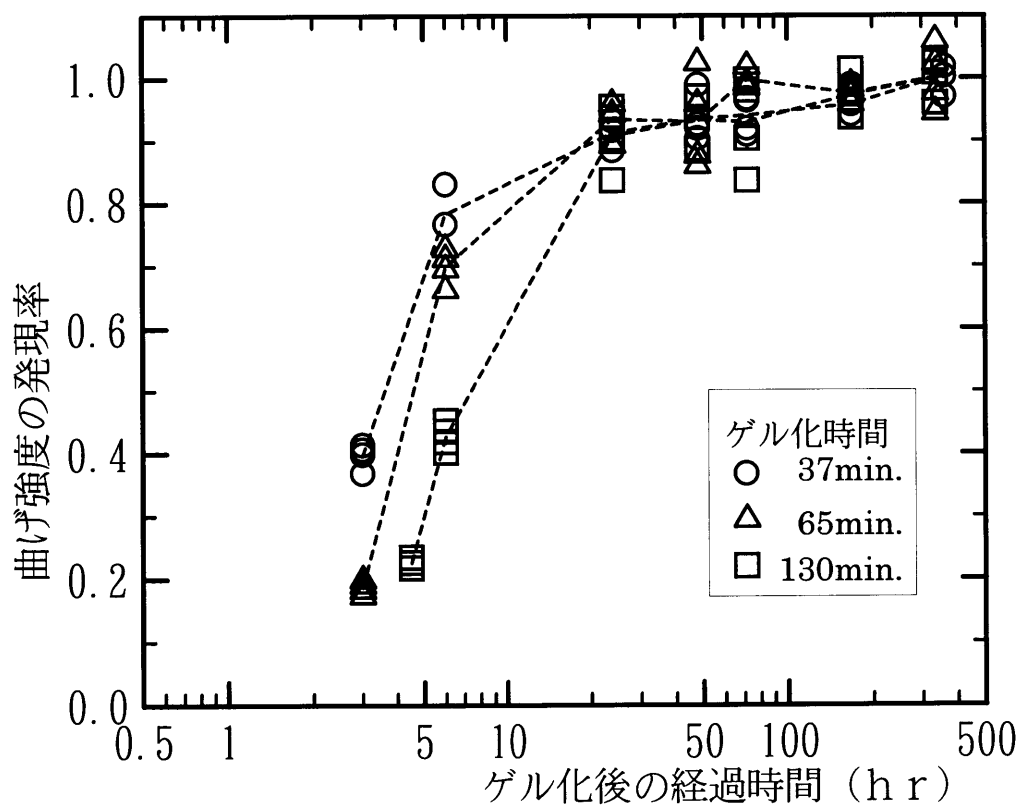


図 2-14 ゲル化時間と曲げ強度の発現率の関係



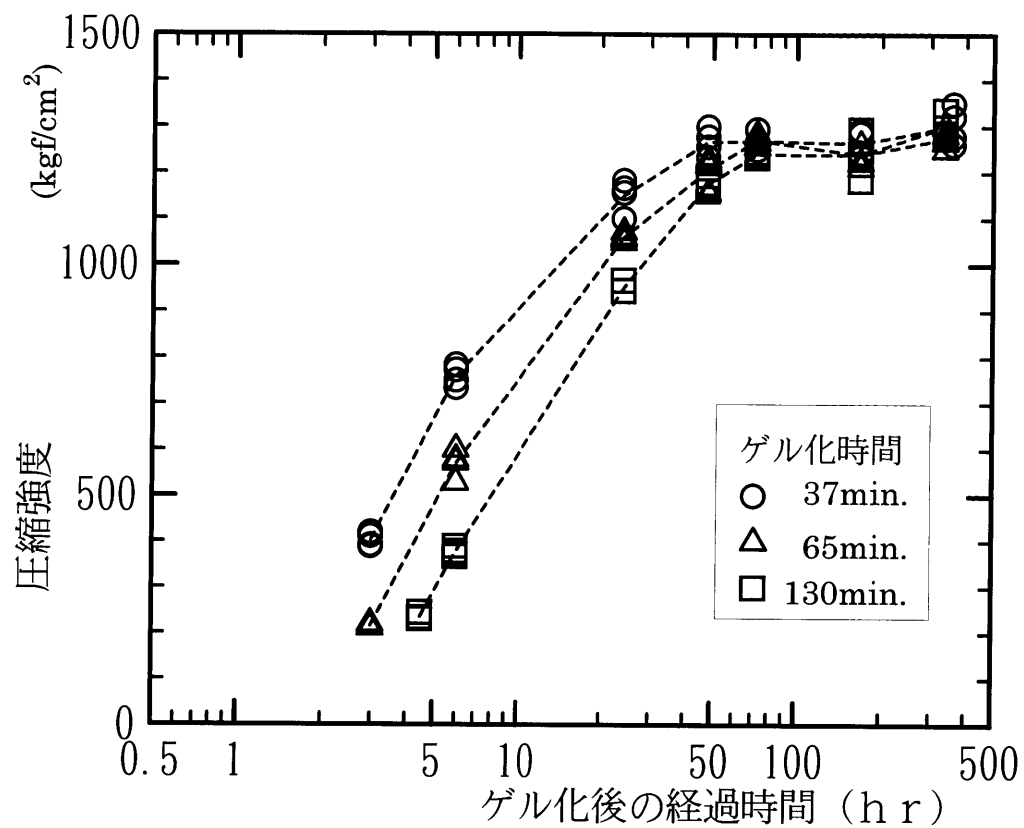


図 2-15 ゲル化時間と圧縮強度の経時変化の関係

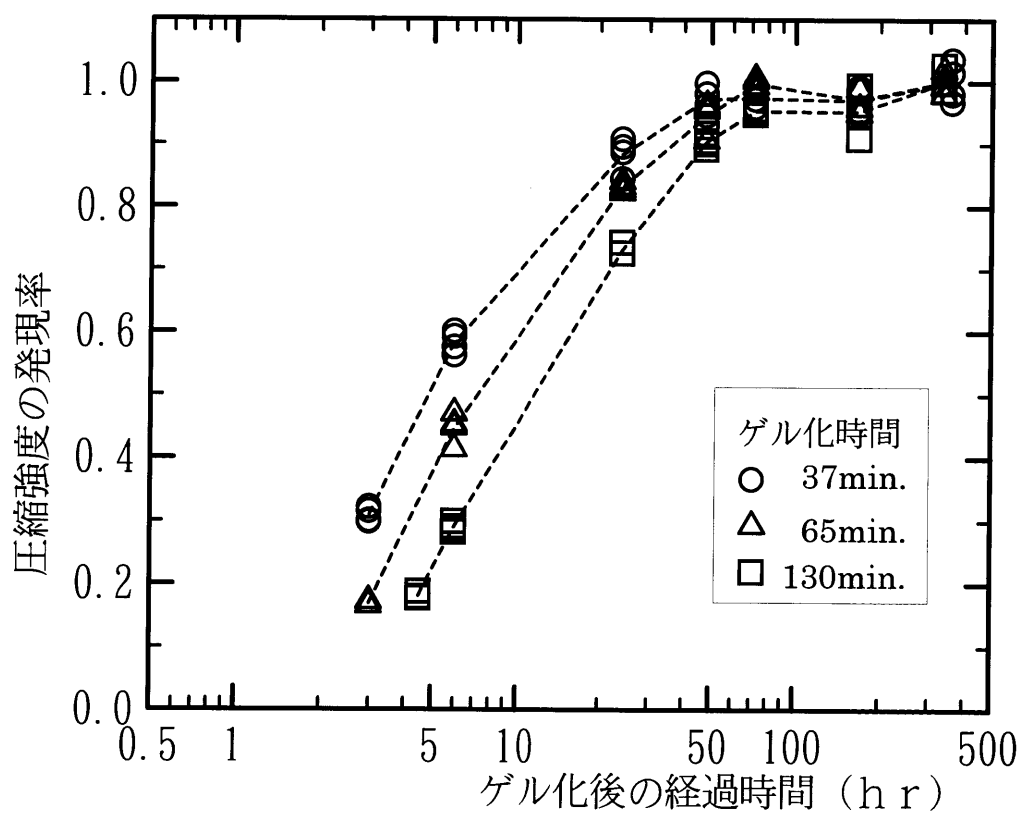


図 2-16 ゲル化時間と圧縮強度の発現率の関係

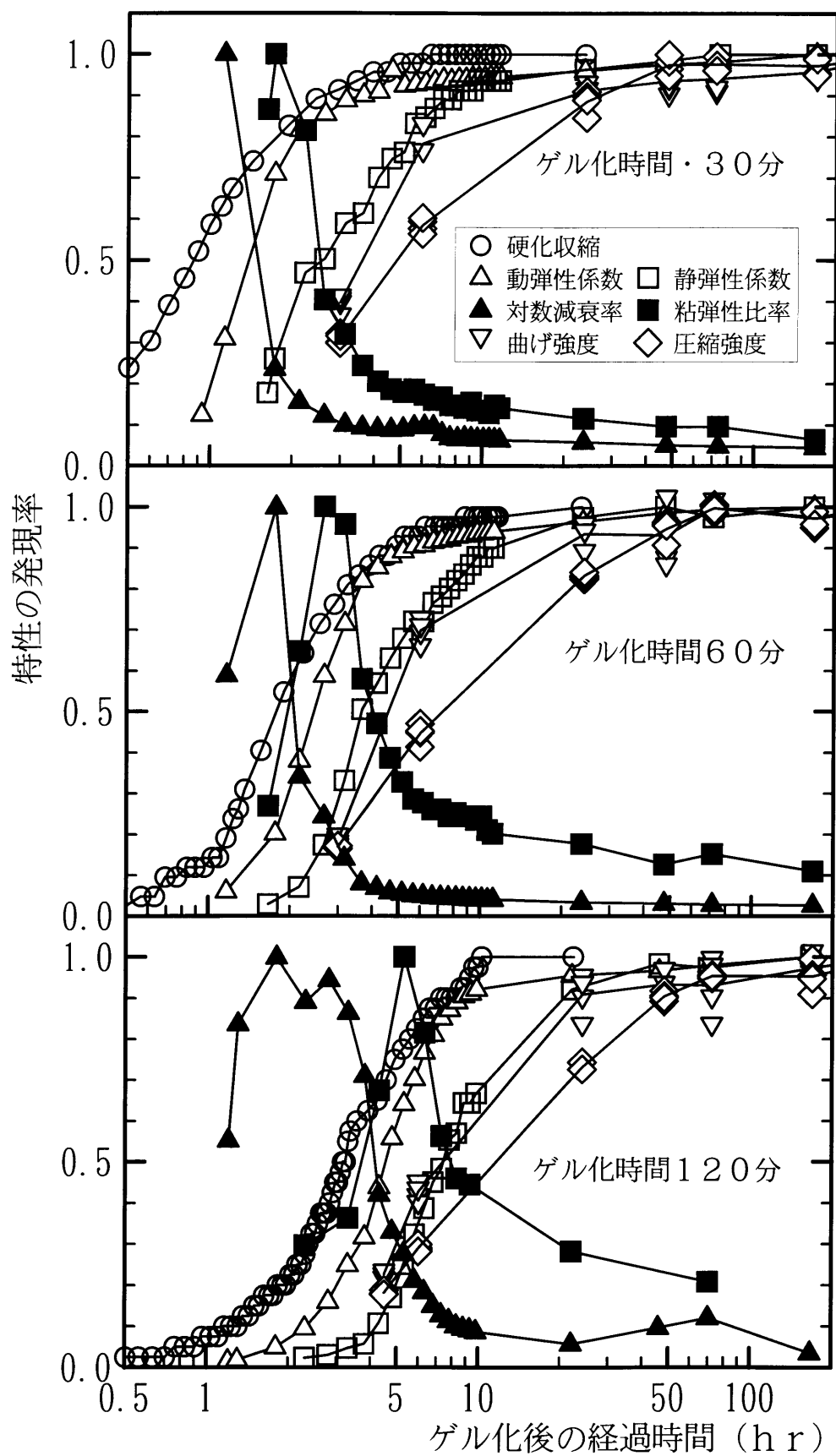


図 2-17 各ゲル化時間での諸特性の発現率の関係

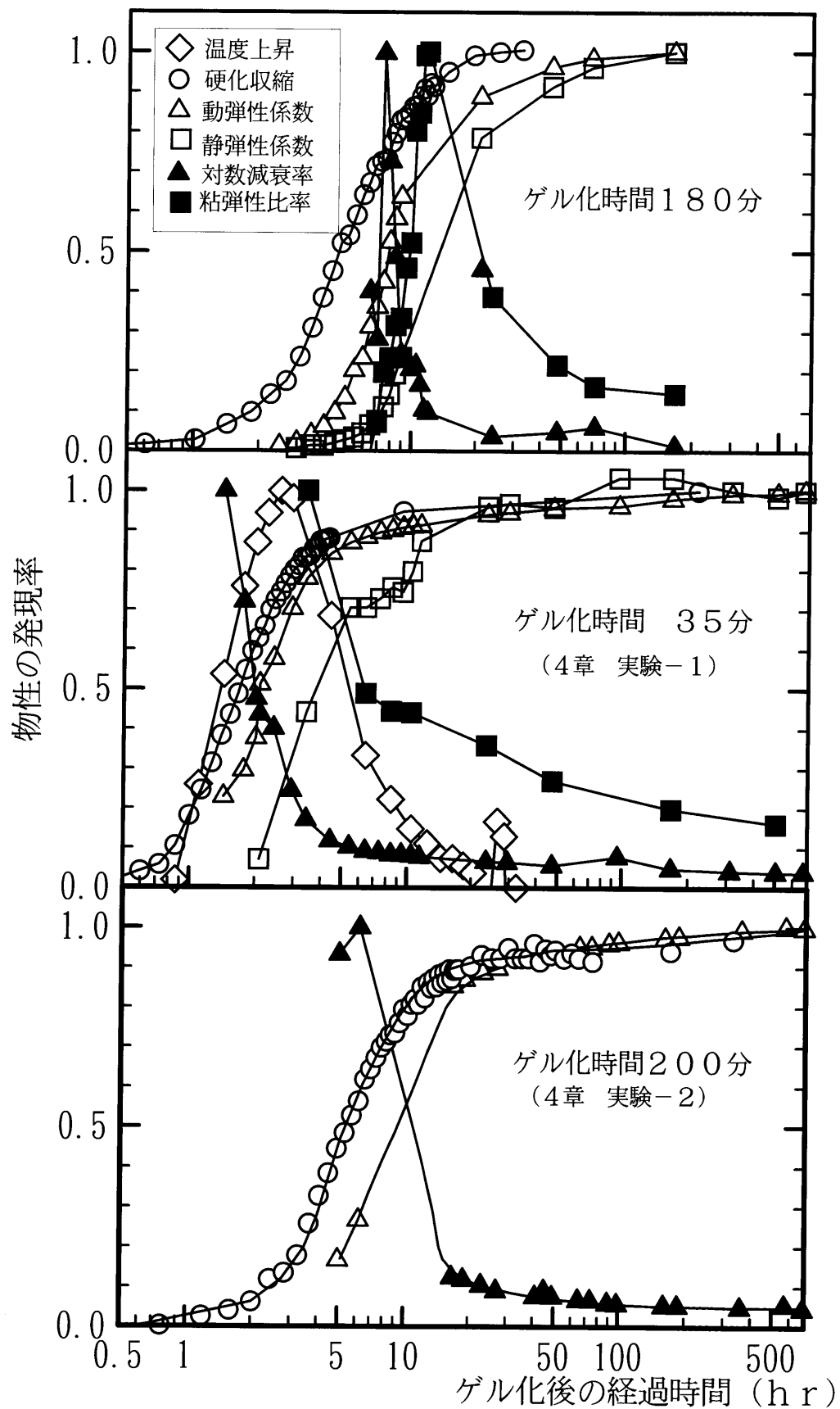


図 2-18 物性の発現率の経時変化の状況

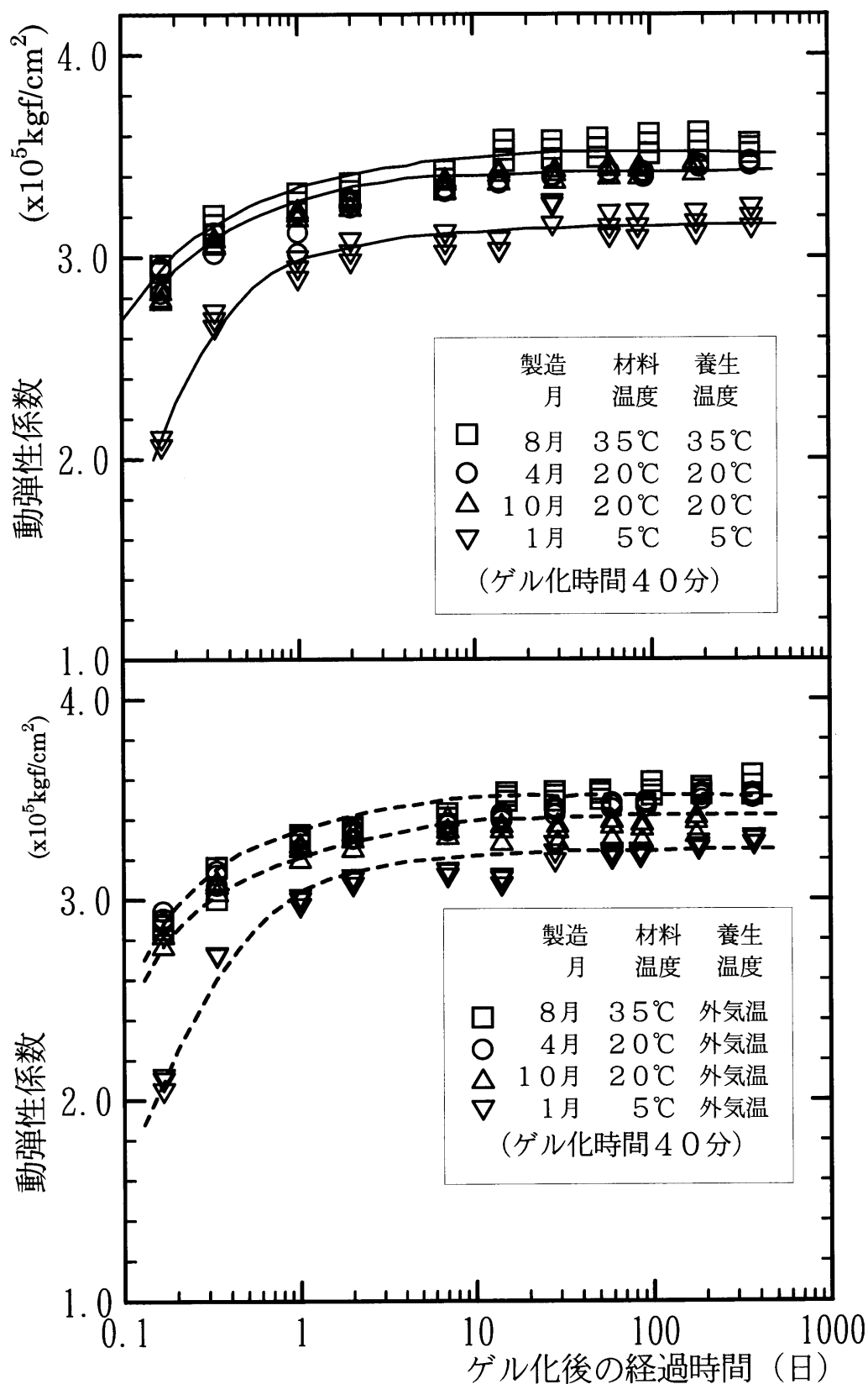


図 2-19 材料温度・養生温度と動弾性係数の発現

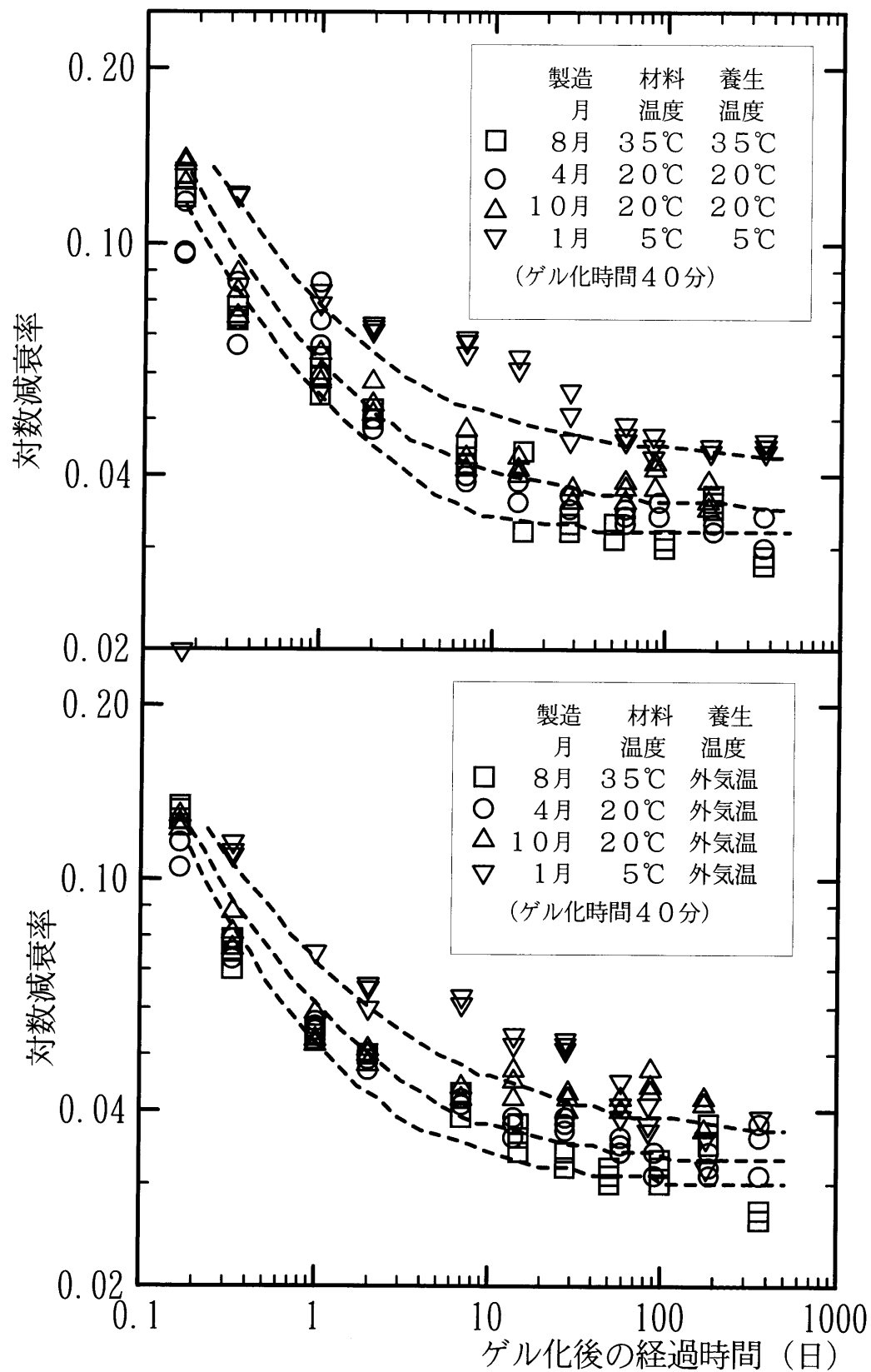


図 2-20 材料温度・養生温度と対数減衰率の発現

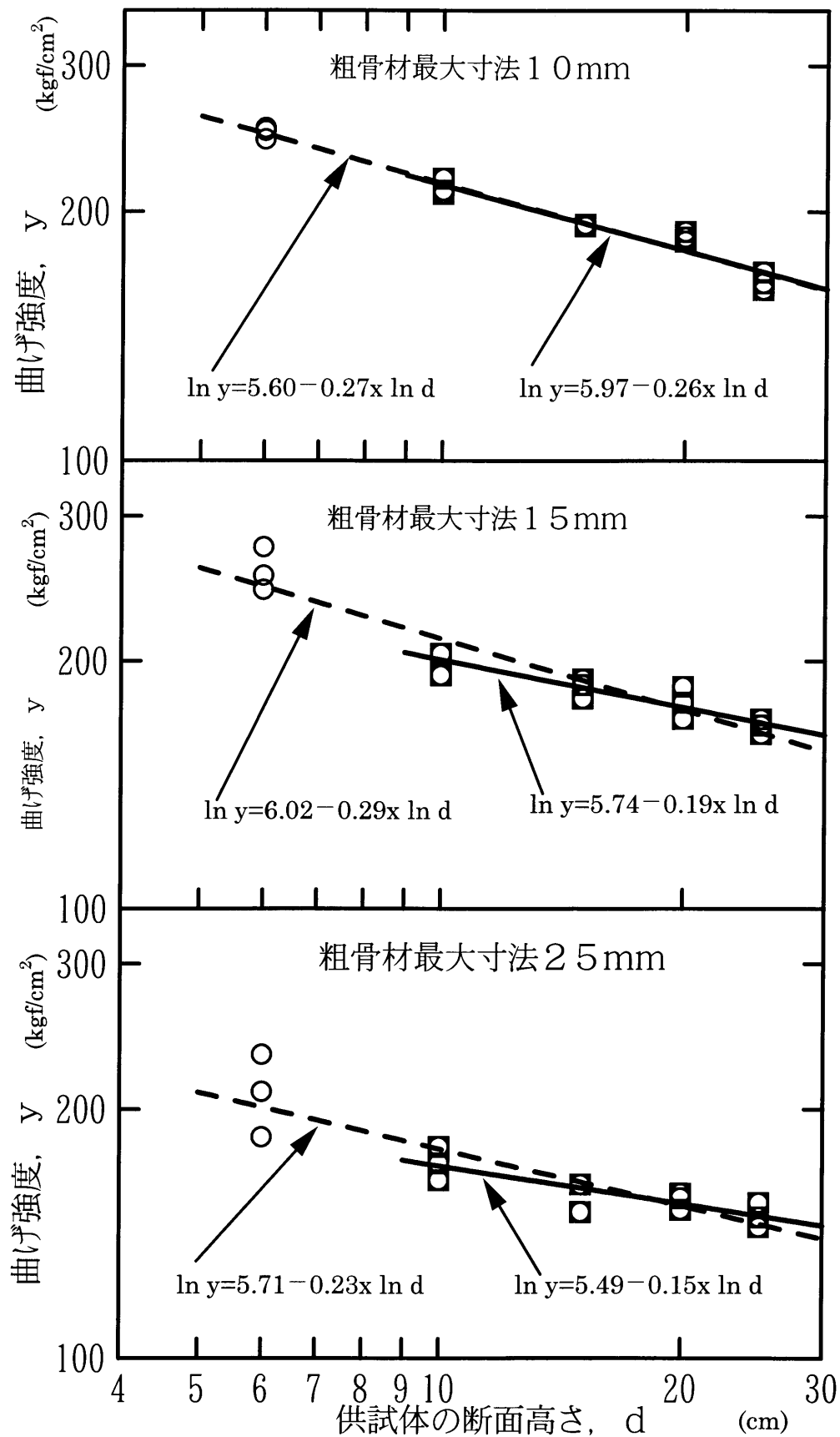


図 2-21 供試体寸法と曲げ強度の関係

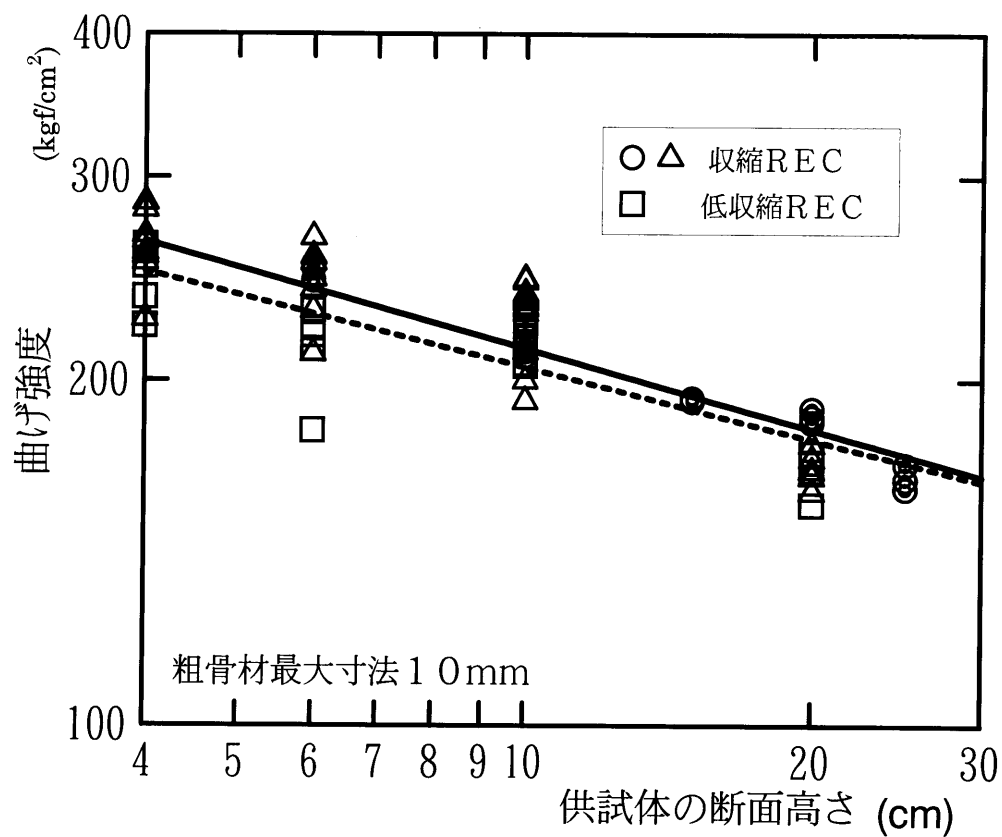


図 2-22 供試体寸法と曲げ強度の関係

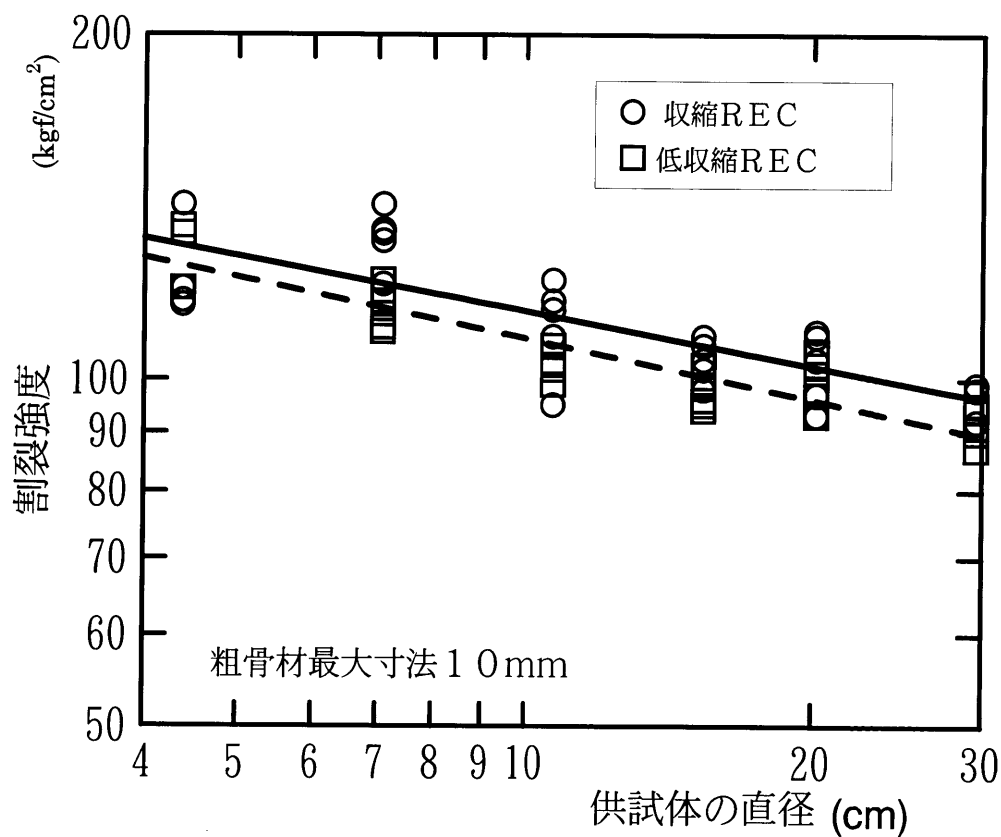


図 2-23 供試体寸法と割裂強度の関係

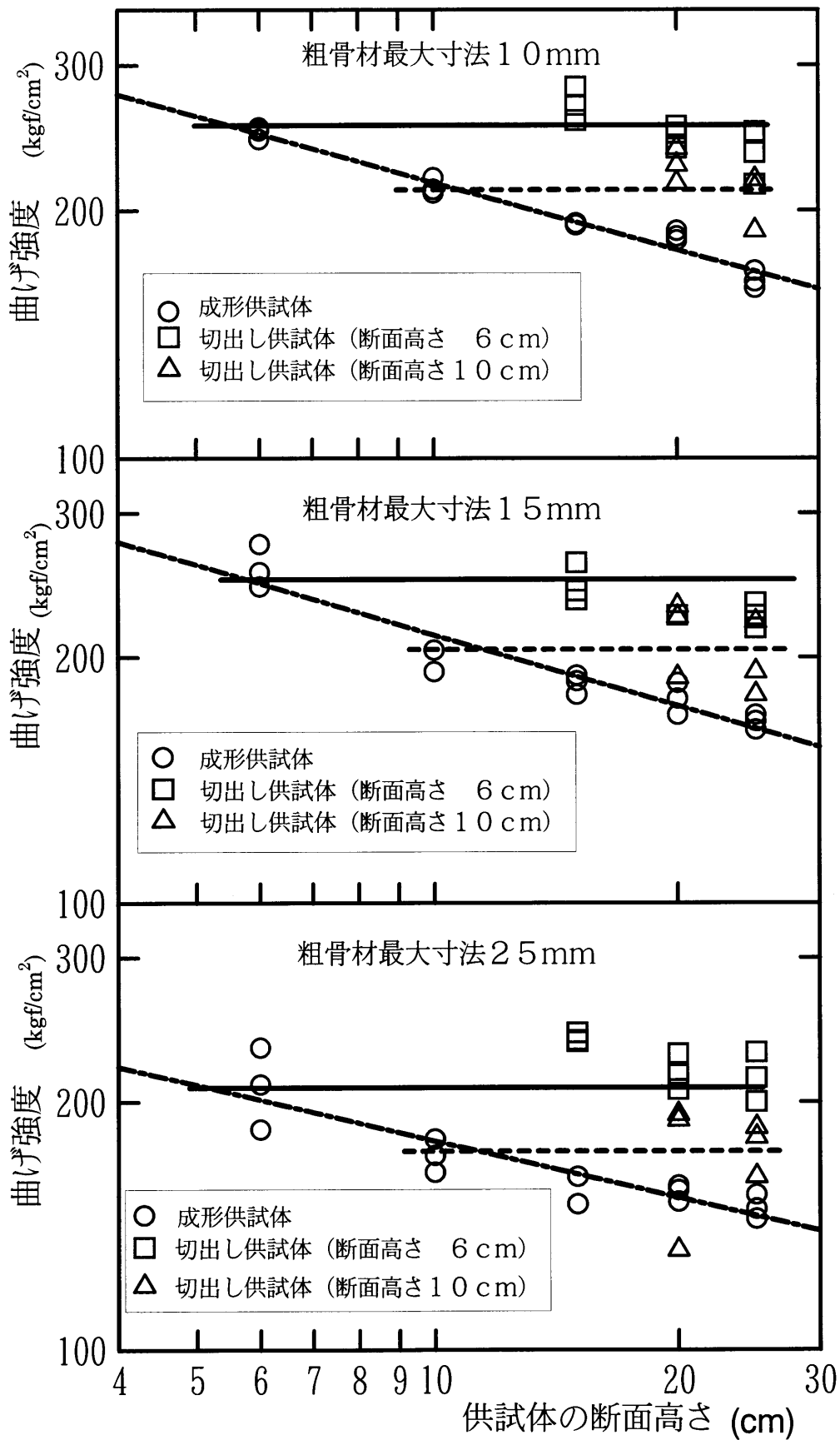


図 2-24 成形供試体と切出し供試体の曲げ強度



### 3 レジンコンクリート物性の温度依存性

#### 3. 1 まえがき

R E Cはその諸特性の温度依存性がセメントコンクリートに比べて著しく大きく、R E Cを構造材料として利用する場合には、この温度依存性を把握しておくことが使用環境温度の設定や構造設計上の重要な問題である。これらに関して、岡田らは配合の異なる不飽和ポリエステルR E Cのクリープを種々の温度や載荷応力レベルで実測し、温度の増加に伴う強度の低下やクリープ係数の増大の報告している〔1〕。また、山崎らは種々の温度や載荷応力レベルでR E Cのクリープを測定し、構造材料としての可能温度を40～50℃と報告している〔2〕。これら既往の研究は、特性の温度依存の現象などに関して報告されたものであり、その理由についての報告は少ない。

本章では、3種類の不飽和ポリエステル樹脂(U P)と2種類のエポキシ樹脂(E P)について、樹脂単体の熱変形温度(H D T)およびガラス転移温度(T g)を調べ、これら樹脂を用いたR E Cの変形特性ならびに強度を各温度で測定し、R E Cの特性に及ぼす温度の影響について、樹脂の種類および樹脂量から検討し、R E Cの構造設計に際して、実用的に特性変化を考慮すべき温度に関して検討した。

なお、U Pとしては、最も広く用いられているオルソフタル酸系U PであるU P-1、これに比べて耐熱性が良いとされるイソフタル酸系U PであるU P-2およびオルソフタル酸系のアルキドの組成を改良して必要モノマー量を低減し低収縮性・高耐熱性としたU P-3の3種類を使用した。また、E Pとしては、樹脂の低粘度化ために、一官能形の希釈剤が添加されているビスフェノールA型E Pと変性芳香族アミンとを重量比で100:70で配合するE P-1、および樹脂の低粘度化ならびに熱的特性改良のために、3官能形の希釈剤が添加されているビスフェノールA型E Pと脂肪族アミンとを重量比で100:20で配合するE P-2の2種類を使用した。

#### 3. 2 試験の概要

##### 3. 2. 1 供試体の作製

使用した樹脂の種類および特性を表3-1に示す。その他の材料としては、粗骨材は掛斐川産玉碎石(最大寸法 10mm, F. M. =5.9)、細骨材は静岡産山砂(最大寸法 0.6mm, F. M. =2.0)、充填材は重質炭酸カルシウム(平均粒径 40 $\mu$ )を使用した。

またU Pの硬化剤としての触媒および促進剤にはメチルエチルケトンパーオキシサイドおよび6%ナフテン酸コバルトをそれぞれ使用した。

本章の研究に用いたR E Cは広義に解釈してレジンモルタルも含めて、樹脂量が10および13%のレジンコンクリートならびに樹脂量が20%のレジンモルタルであり、R E Cの配合比(重量)を表3-2に示す。

R E Cの供試体は、樹脂の反応性の差の影響を取り除くため、練り混ぜ後24時間より80℃で24時間のアフターキュアを行った。U Pの触媒および促進剤の添加量は、可使時間が60分程度になるように調整した。

また、E P 樹脂のみの供試体では、所定量の硬化剤を、U P 樹脂のみの供試体では、可使時間が60分程度になる触媒および促進剤を添加して作製し、R E C の供試体と同様の目的で、同様のアフターキュアを実施した。

表 3-1 使用樹脂の熱的特性

記 号	樹 脂 の 種 類	H D T (℃)	T g (℃)
U P - 1	オルソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂 (粘度4ポイズ)	72	98
U P - 2	イソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂 (粘度4ポイズ)	87	113
U P - 3	オルソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂 (粘度4ポイズ)	87	118
E P - 1	ビスフェノールA系樹脂 1官能形希釈 (粘度7ポイズ)	45	65
E P - 2	ビスフェノールA系樹脂 3官能形希釈 (粘度7ポイズ)	63	78

表 3-2 R E C の配合 (w t %)

配合名称	樹脂	充填材	細骨材	粗骨材
10%	10	20	20	50
13%	13	19	19	49
20%	20	30	50	—

### 3. 2. 3 熱的特性の測定方法

樹脂のH D Tは、寸法12.7x12.7x127mmの角柱供試体を用いて、JIS K 7207 (硬質プラスチックの荷重たわみ温度試験方法)のA法により、所定の曲げ荷重を受けるはり供試体を連続的に昇温して、変位量が0.26mmになる温度を測定した。

樹脂のT gは、寸法10x2x60mmの角柱供試体を用いて、JIS K 7198 (プラスチックの非共振強制振動法による動的粘弾性の温度依存性に関する試験方法)により、昇温速度は1℃/min、加振周波数0.4Hzで、25~200℃の範囲で測定した (リエンテック社製RHEO VIBRON使用)。

R E C の比熱は、寸法φ50x90mmの円柱供試体を用いて、断熱型熱量計で断熱状態で供試体に一定熱量を加え、温度の上昇と時間を測定して求めた。

R E C の線膨張率は、寸法φ50x90mmの円柱供試体を用いて、差動トランス型変位計を用いた押棒式変位法により、供試体の雰囲気温度を10℃から80℃まで12時間かけて変化させて、供試体の寸法変位を測定して求めた。

R E C の熱伝導率は、寸法300x300x30mmの平板供試体を用いて、JIS A 1412 (熱絶縁材の熱伝導率及び熱抵抗の測定方法)の平板直接法により求めた。

R E C の動弾性係数および対数減衰率は、恒温槽で所定の温度に24時間かけて調整した寸法φ100x200mmの円柱供試体を用いて、動弾性係数測定器により計測した縦波共振周波数により求めた。

R E C の粘弾性比率は、同様に所定の温度に調整した寸法100x100mmx400mmの角柱供試体に1000kgfの圧縮力を1分間加えて供試体表面のひずみを測定し、载荷中のひずみ

増分 ( $\varepsilon b$ ) と弾性ひずみ ( $\varepsilon a$ ) との比 ( $\varepsilon b/\varepsilon a$ ) として求めた (図 2-2 参照)。

REC の曲げ強度および圧縮強度は、同様に所定の温度に調整した寸法 60x60x240mm の角柱供試体を用いて、JIS A 1184 (ポリエステルレジンコンクリートの曲げ強度試験方法) および JIS A 1183 (はりの折片によるポリエステルレジンコンクリートの圧縮強度試験方法) により求めた。

### 3. 3 試験結果および考察

#### 3. 3. 1 樹脂の熱変形特性

樹脂の  $T_g$  測定により得られた、いわゆる動的弾性率とも称されている動弾性係数 ( $E'$ )、ならびにこれと粘性による損失成分との比である  $\tan \delta$  と温度との関係を図 3-1 に示す。樹脂の動弾性係数は、25℃より温度の上昇につれて若干低下し、表 3-1 に示す HDT より 10~20℃低い温度から  $T_g$  より 15℃程度高い温度までの間で急激に低下し、樹脂の種類にかかわらず顕著な温度依存性を示す。この急激な低下が始まる温度と HDT との関係は樹脂によって差がある。この急激な低下が HDT より低い温度で始まるのは、HDT は規定のたわみ量に達する温度を測定する試験方法であり、たわみの急激な増加は HDT より低い温度で始まっているためと考えられる。

#### 3. 3. 2 REC の熱特性

REC の比熱、熱伝導率および線膨張率に加えて補強材として使用される可能性の高い鋼材ならびに比較としてセメントコンクリートのそれらの代表値を表 3-3 に示す。

REC の比熱は樹脂量により若干の差は認められるが、同一樹脂量では樹脂の種類による差は認められない。また、その値はセメントコンクリートのそれと同程度であり、鋼材のそれと比較すると 1.6 倍程度大きい。

REC の熱伝導率と温度との関係を図 3-2 に示す。REC の熱伝導率は、樹脂量の増加より低下が認められるが、樹脂の種類には大きく影響されないようである。図より、その熱伝導率は温度が上昇するとわずかに低くなる傾向を示すが、顕著ではない。また、その値はセメントコンクリートのその 1.5 倍程度大きく、鋼材のその 1/30~1/50 である。

表 3-3 REC の熱特性

樹 脂	配 合 名 称	比熱 (J/g·K)	熱伝導率 (W/m·K)	熱膨張率 ( $\times 10^{-5} K^{-1}$ )	
UP-1	10%	0.80	1.46	1.59	---
UP-1	20%	0.84	0.95	2.18	---
EP-2	10%	0.80	1.48	1.25	---
セメント コンクリート		1.05 0.84	0.92 1.00	1.00 1.05	コンクリート標準示法書 理科年表
鋼		--- 0.48	--- 50.0	1.20 1.07	コンクリート標準示法書 理科年表

### 3. 3. 3 RECの変形特性

#### 3. 3. 3. 1 RECの熱膨張

RECの線膨張率の測定より求めた熱膨張と温度との関係を図3-3に示す。RECの熱膨張と温度との関係には温度依存性があり、また、UP-1のRECでは50～60℃程度、EP-2のRECでは40～60℃程度で直線性が失われる。

この点以下では、両者の関係はほぼ直線と仮定でき、この範囲で算出した熱膨張率が表3-3に示す値である。この温度範囲では、セメントコンクリートあるいは鋼材のその1.5倍程度であり、樹脂量が多いモルタルの場合でも2倍程度である。

RECの構造利用でこれらの特性が問題となるのは、環境の温度変化による変形での補強材あるいは接続材との一体挙動に関する事項であり、この観点では、熱伝導率および熱膨張率がセメントコンクリートのその1.5倍であるが、熱伝導率は鋼材のそれに比べると極めて小さくセメントコンクリートとの差は小さい。この温度範囲であれば鉄筋コンクリートの設計で行っている鋼材とコンクリートの熱膨張と同一であるとの仮定を用いても差し支えはないと考えられる。

#### 3. 3. 3. 2 RECの動弾性係数

同一樹脂量10%におけるRECの動弾性係数( $E_d$ )と温度の関係を図3-4に示す。RECの動弾性係数は、樹脂の種類を問わず顕著な温度依存性を示し、ある温度以上で急激に低下する。HDTが低い樹脂(UP-1, EP-1)のRECほど、低い温度でこの低下が現れる。

RECの樹脂量ごとの動弾性係数( $E_d$ )に加えて樹脂単体の動弾性係数( $E'$ )と温度の関係を図3-7～図3-10に示す。これらの図より、樹脂の種類を問わず、各温度におけるRECの動弾性係数は、樹脂量の少ない配合ほど高く、温度の上昇に伴う動弾性係数の低下は、樹脂量にかかわらずなく、3.3.1節で述べた使用樹脂の動弾性係数( $E'$ )が急激に低下し始める温度付近でより大きくなることが判る。

#### 3. 3. 3. 3 RECの対数減衰率

樹脂量10%のRECの対数減衰率( $\delta$ )と温度の関係を図3-5に示す。RECの対数減衰率も、樹脂の種類を問わず動弾性係数と同様に顕著な温度依存性を示し、ある温度以上で急激に増加する。この温度以下での対数減衰率の変化は少なく、ほぼ直線(一定値)に近似できる。

RECの樹脂量ごとの対数減衰率( $\delta$ )と温度の関係を図3-11～図3-14に示す。これらの図から、RECの対数減衰率は樹脂量の影響を受けないことが判る。温度の上昇に伴うRECの対数減衰率の増加は、樹脂量に関係なく、3.3.1節で述べた使用樹脂の動弾性係数が急激に低下し始める温度付近で、明確な変化点が存在することが判る。

#### 3. 3. 3. 4 RECの粘弾性比率

樹脂量10%のRECの粘弾性比率( $\varepsilon_b/\varepsilon_a$ )と温度との関係を図3-6に示す。粘弾性比率も対数減衰率と同様の温度依存性を示し、上述の温度付近に変化点が存在す

ることが判る。

### 3. 3. 3. 5 R E Cの変形特性と温度

3. 3. 3. 1項から3. 3. 3. 4項の各種R E Cの変形特性の試験結果より、R E Cの変形特性値には、R E Cの樹脂量および使用樹脂の特性、さらには骨材等の特性も影響してくるが、変形特性の温度依存性には、使用樹脂の特性のみが影響することが判る。また、R E Cの変形特性の温度依存性の変化点は、変形特性の種類によらず、樹脂ごとにほぼ一定の温度であり、3. 3. 1節で述べた使用樹脂の動弾性係数の急激な低下が始まる温度付近である。

この温度の決定には、変化点の存在が明確で、かつ、樹脂量の影響を受けない対数減衰率の測定が有効と考えられる。この変化点は、樹脂単体のH D Tより、U Pでは10～20℃程度、E Pでは20～30℃程度低い値である。樹脂によってTgとH D Tとの差が異なること、H D Tが樹脂単体におけるこの変化点の指標であることから、R E Cの変形の温度依存性の変化点の指標としては、TgよりH D Tを用いる方がよいと考える。

### 3. 3. 4 R E Cの強度特性

#### 3. 3. 4. 1 R E Cの曲げ強度特性

U P-1, U P-2, U P-3およびE P-2のR E Cの樹脂量ごとの曲げ強度と温度の関係を図3-17～図3-20に示す。樹脂の種類を問わず、各温度でのR E Cの曲げ強度は樹脂量の多い配合ほど高い。一方、R E Cの曲げ強度は、樹脂の種類を問わず、顕著な温度依存性を示し、その依存性の変化点は、樹脂量に関係なく、3. 3. 3. 5項で述べた温度付近である。

#### 3. 3. 4. 2 R E Cの圧縮強度特性

同様のR E Cの樹脂量ごとの圧縮強度と温度の関係を図3-21～図3-24に示す。圧縮強度については、曲げ強度の場合とは異なり、U P-1ではその差はわずかであるが、各温度でのR E Cの圧縮強度は、樹脂量の少ない配合ほど高い。

R E Cの圧縮強度も、樹脂の種類を問わず、顕著な温度依存性を示し、その依存性の変化点は、樹脂量に関係なく、また、曲げ強度の場合よりは10℃程度大きい、3. 3. 3. 5項で述べた温度付近である。

#### 3. 3. 4. 3 R E Cの強度特性と温度

R E Cの曲げ強度および圧縮強度から、R E Cの強度の決定には、R E Cの樹脂量ならびに使用材料の特性も影響してくるが、強度特性の温度依存性には、使用樹脂の特性のみが影響することが判る。

R E Cの強度特性も温度依存性があり、その依存性の変化点は3. 3. 3. 5項で述べた温度である。R E Cの強度特性と樹脂の変形特性の指標であるH D Tとが本質的に関係するものとは必ずしも言えないが、R E Cの強度の温度依存性の変化点はH D Tと関連するものである。

### 3. 4 まとめ

R E Cの変形および強度特性には温度依存性があり、この温度依存性に顕著な変化点が存在する。この依存性は、使用樹脂の特性の温度依存性により決定され、R E Cの樹脂量には影響されない、また、変化点は使用樹脂のH D Tと相関している。

この変化点の温度は、「R E Cの熱変形温度」と定義されるものであり、このR E Cの熱変形温度以上の温度域でのR E Cの利用に対しては、R E Cの構造設計において、クリープ等の変形特性の変化および強度の変化を考慮に入れる必要がある。

また、このR E Cの熱変形温度以下の温度域では、熱伝導率、線膨張率等の熱特性がコンクリートのそれと大差のないものであり、この温度域であれば、R E Cの鉄筋補強に当たっては、鉄筋との熱膨張差等について、セメントコンクリートで用いられている仮定が適用できる。

不飽和ポリエステル樹脂のH D Tは、グリコールと飽和酸および不飽和酸の構成、飽和酸の種類（オルソ<イソニテレ）、モノマーの種類とある限度以下ではその比率、および二重結合の濃度などで決まると言われている。通常、不飽和酸の比率やモノマーの比率を多くして熱変形温度の上昇を図っているが、それによって反対に、架橋密度の増加により硬化収縮の増大、伸び能力の低下などの現象が出てくる。また、エポキシ樹脂の場合には樹脂の骨材等との濡れの改善や作業性の改善のために希釈剤が添加されているが、少量の添加で効果の大きい1官能形の希釈剤の場合はH D Tを下げる結果ともなる[3]、[4]。このように、樹脂の特性を全般的に向上させることは技術上あるいはコスト上の問題もあり困難なため、一般的には何かの特性を犠牲にしてある特性の改善が図られるものであるが、構造設計の観点からは、その他の特性を犠牲にしない限りにおいて、R E Cの結合材用樹脂としてはH D Tの高いものを使用することが望まし。

### 参 考 文 献

- [1] 岡田 清, 米沢 敏男, レジンコンクリートの材料特性の温度依存性について, 材料, Vol. 24, No. 260, pp. 38-44, 1975
- [2] 山崎 竹博, 出光 隆, 渡辺 明, 宮川 邦彦, ポリエステルレジンコンクリートのクリープ特性に関する研究, 材料, Vol. 40, No. 456, pp. 1178-1184, 1991
- [3] 滝山 栄一郎, ポリエステル樹脂ハンドブック, 日刊工業新聞社, 1988
- [4] エポキシ樹脂技術協会, エポキシ樹脂応用技術の基礎, 1990

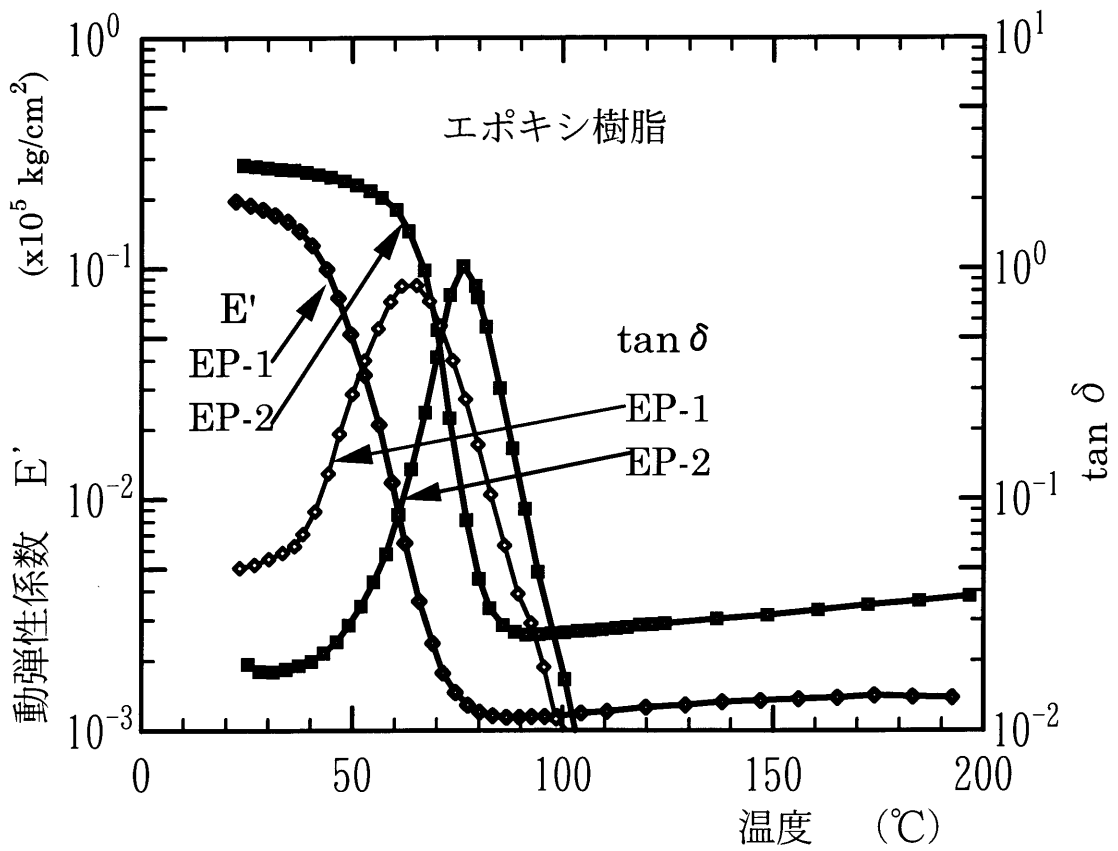
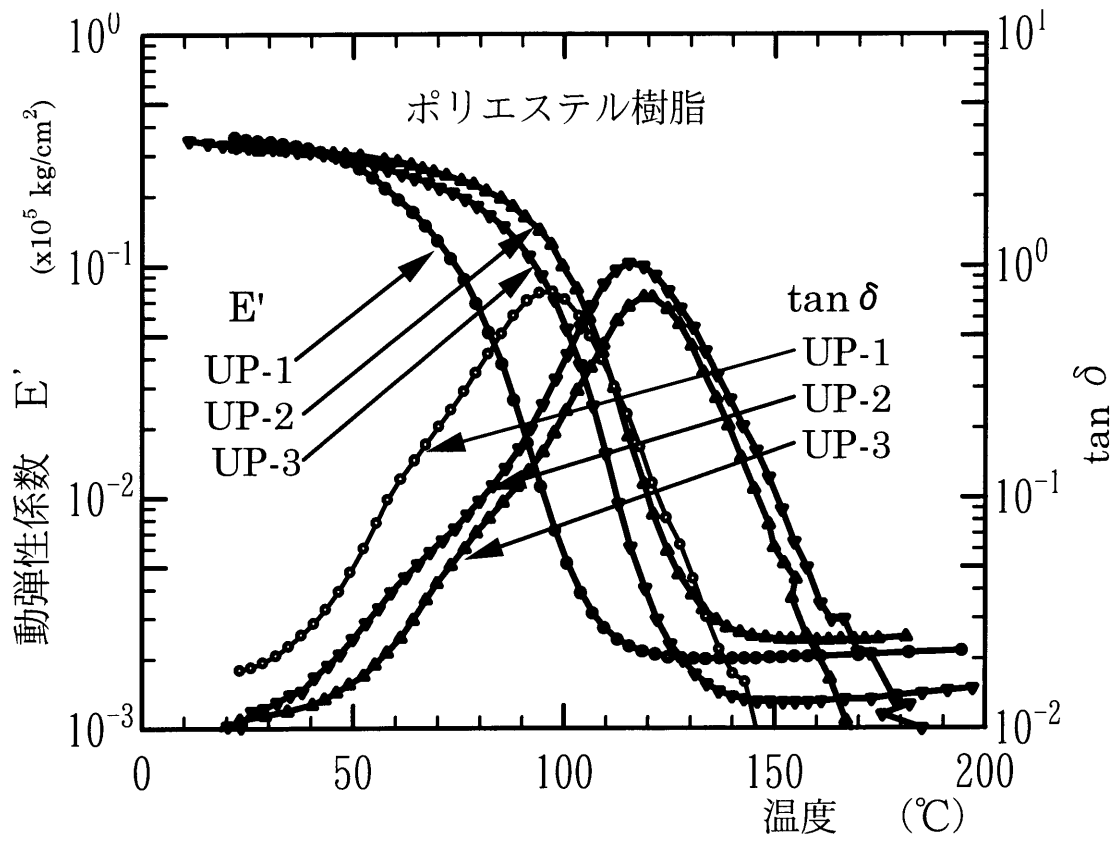


図3-1 樹脂の動的弾性係数、 $\tan \delta$  と温度

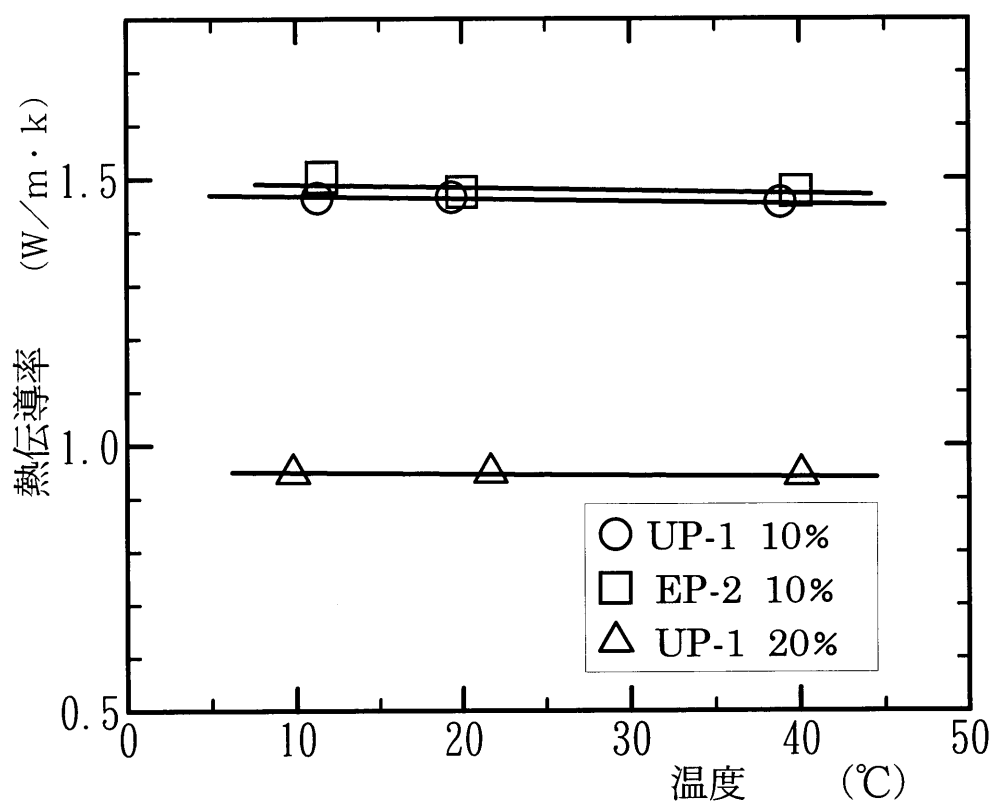


図3-2 RECの熱伝導率と温度

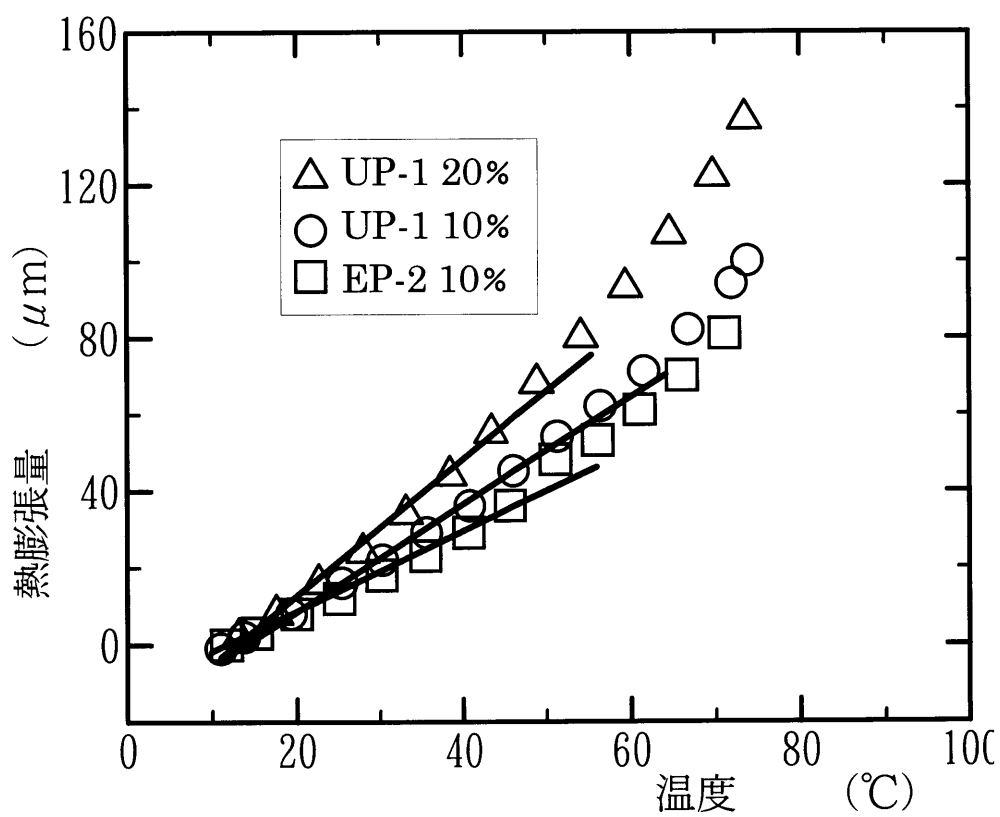


図3-3 RECの熱膨張と温度



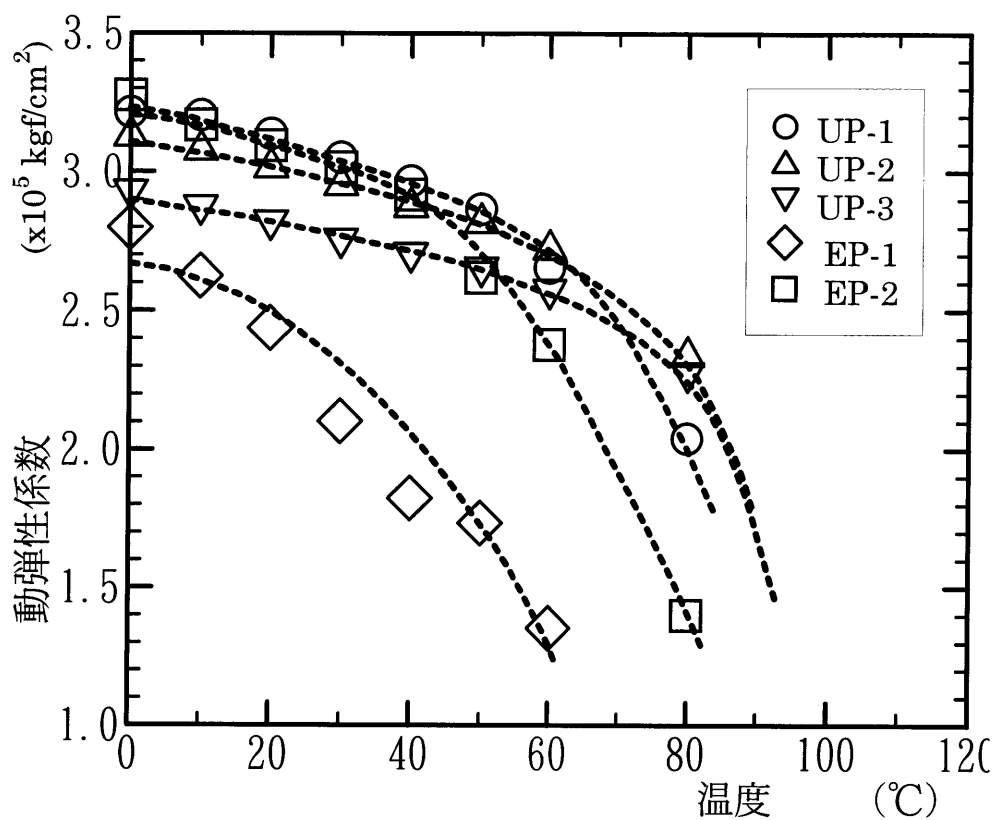


図3-4 10%RECの動弾性係数と温度

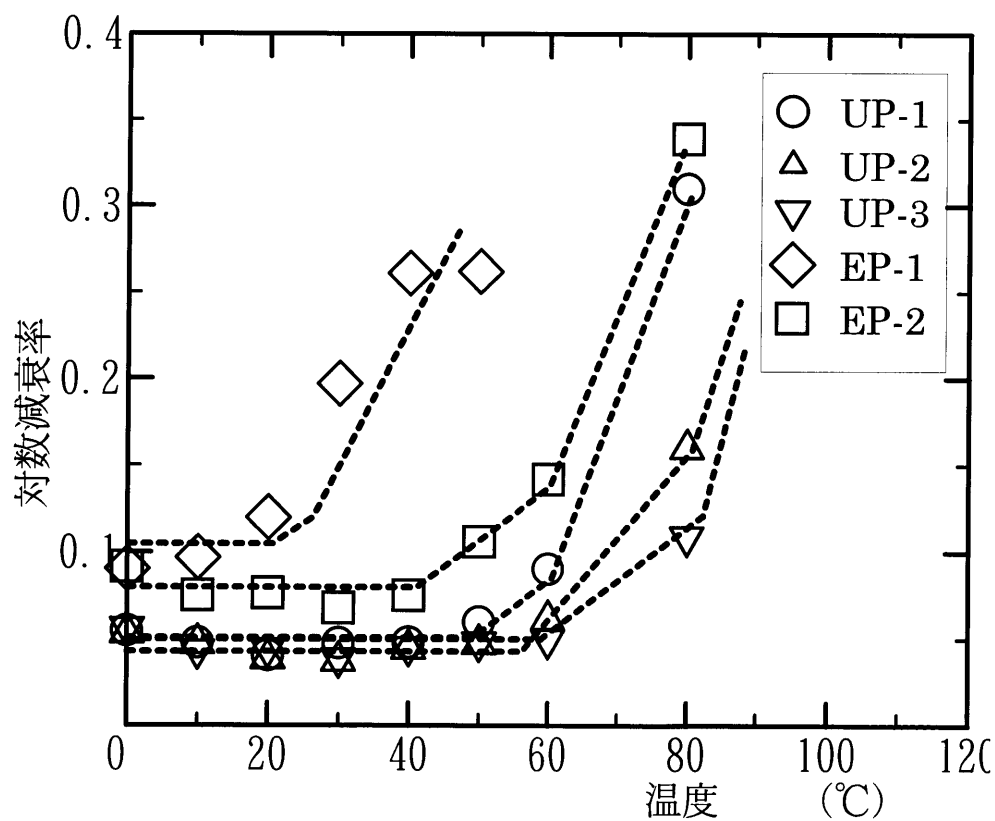


図3-5 10%RECの対数減衰率と温度

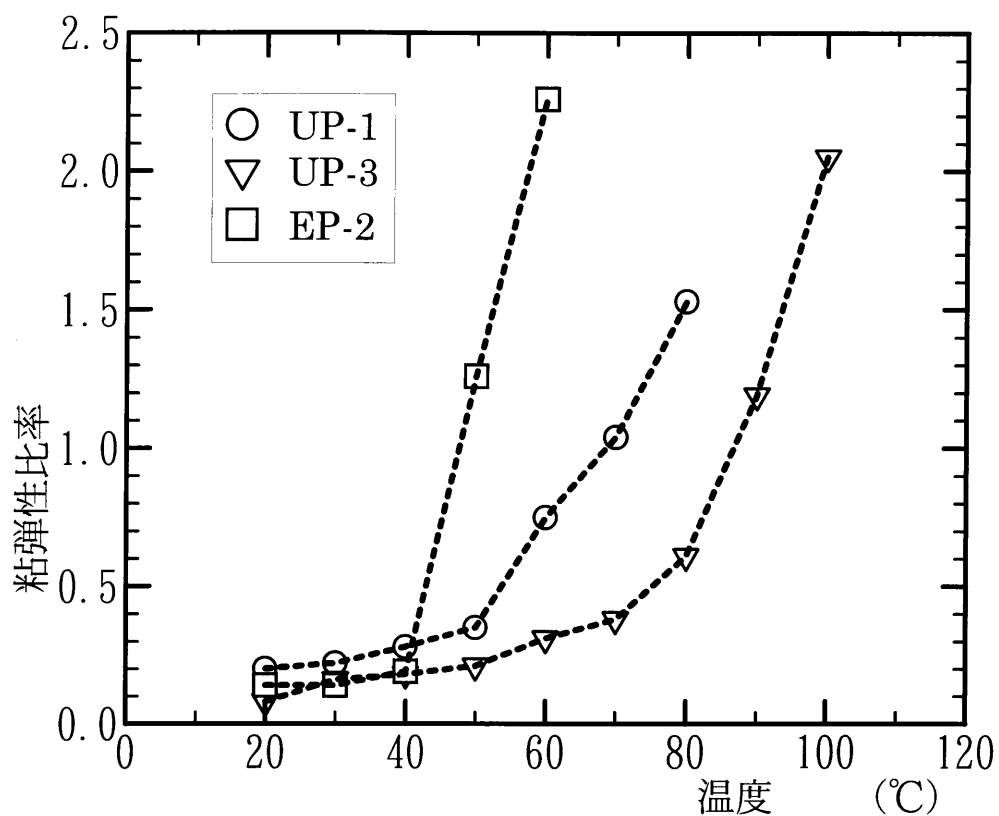


図3-6 RECの粘弾性比率と温度

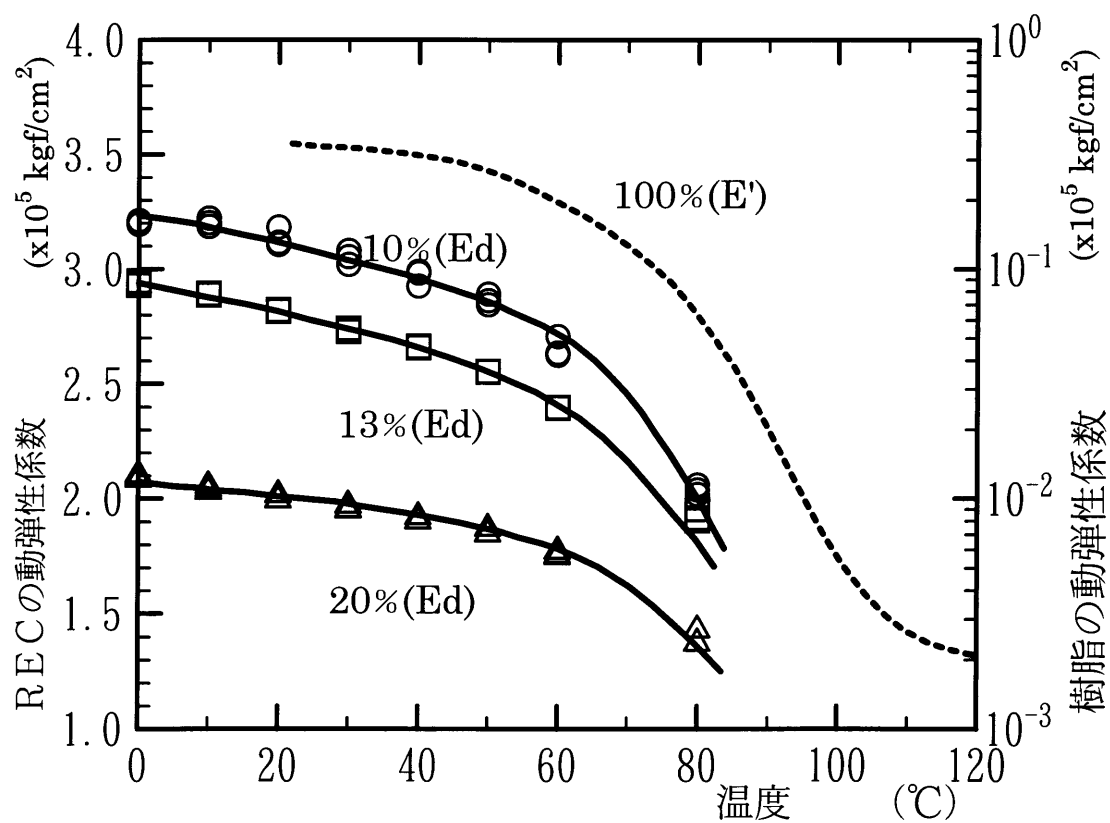


図3-7 UP-1樹脂RECの動弾性係数と温度

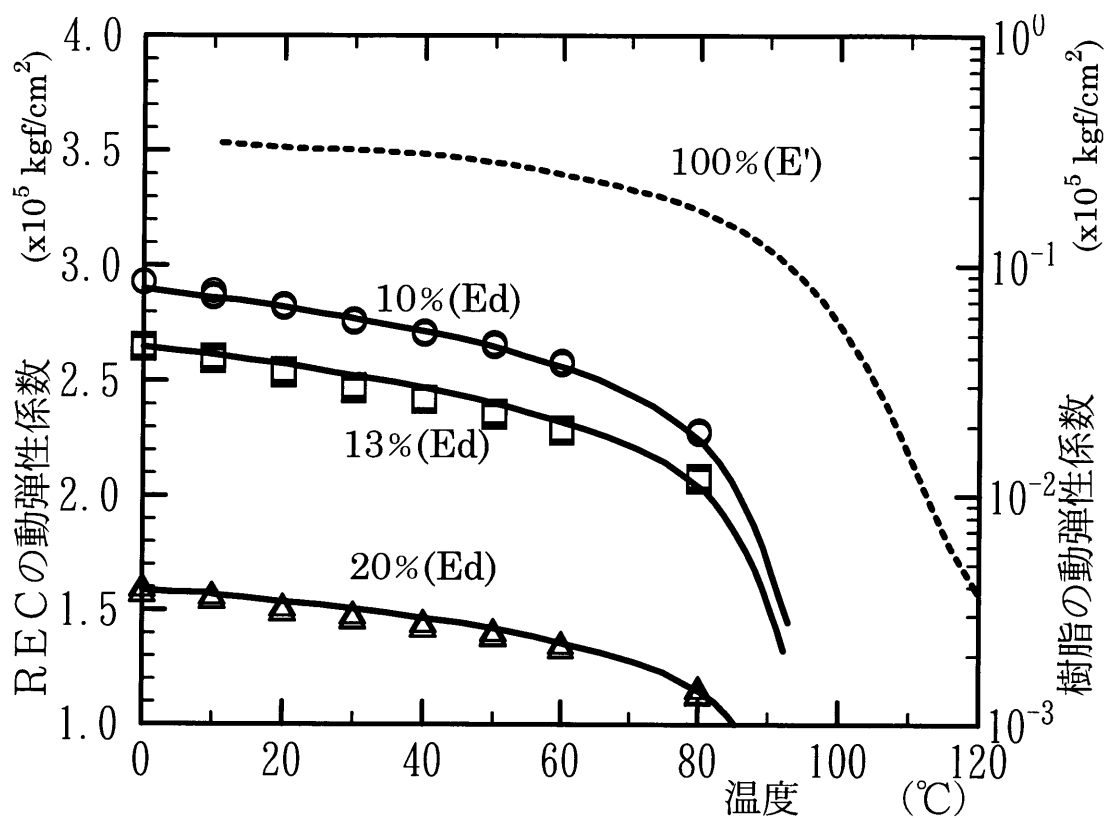


図3-8 UP-3樹脂RECの動弾性係数と温度

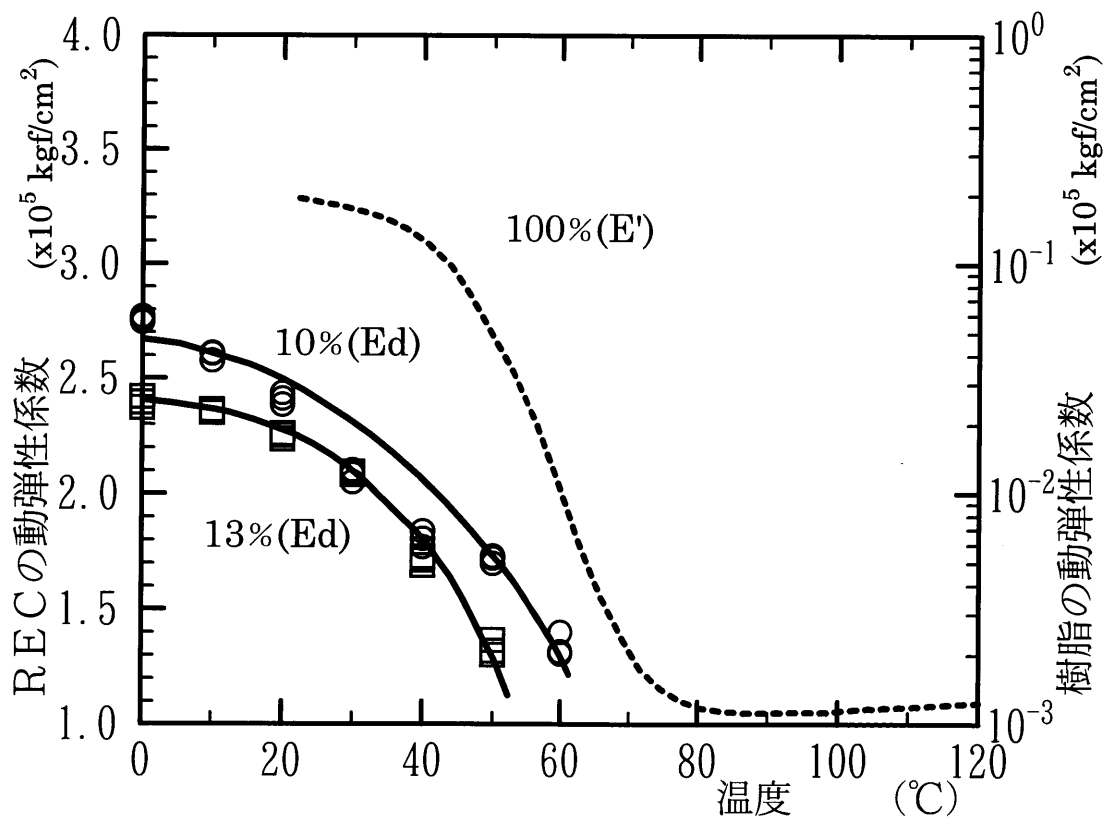


図3-9 EP-1樹脂RECの動弾性係数と温度

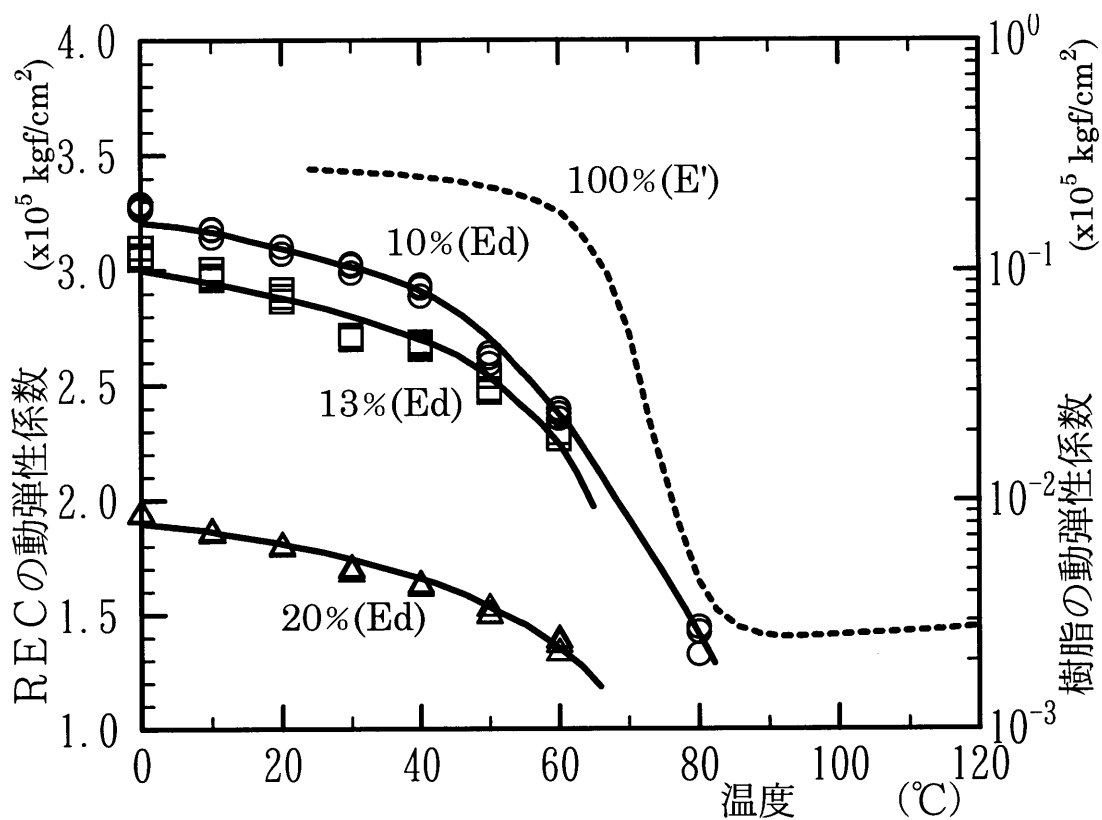


図3-10 EP-2樹脂RECの動弾性係数と温度

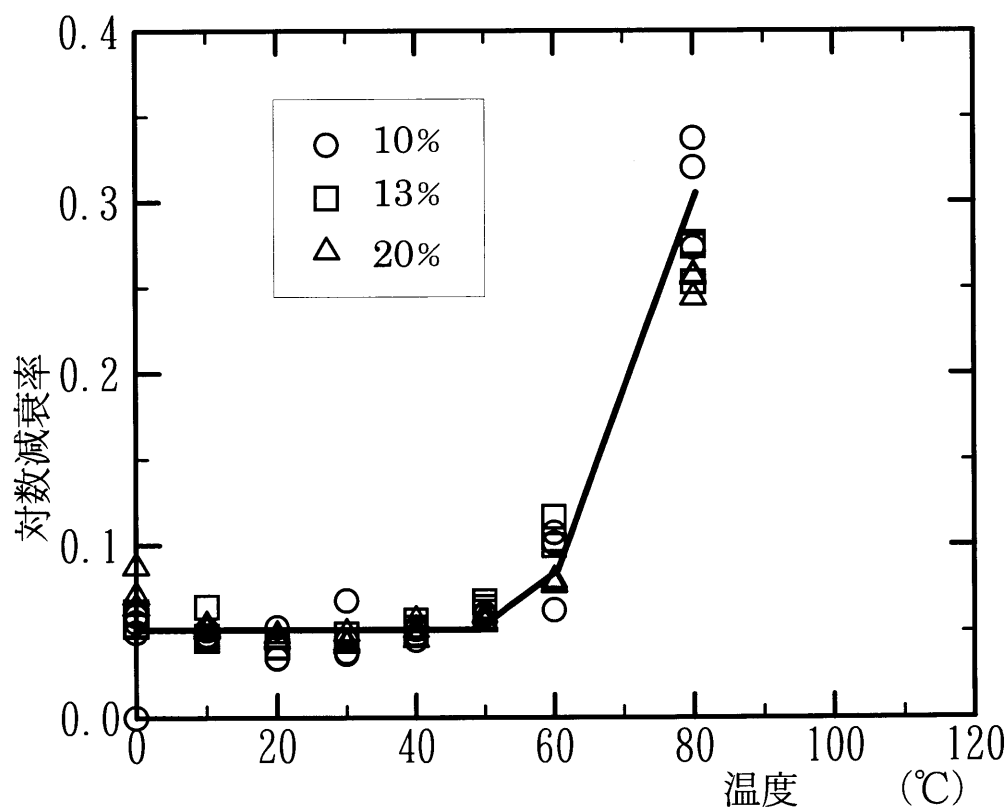


図3-11 UP-1樹脂RECの対数減衰率と温度

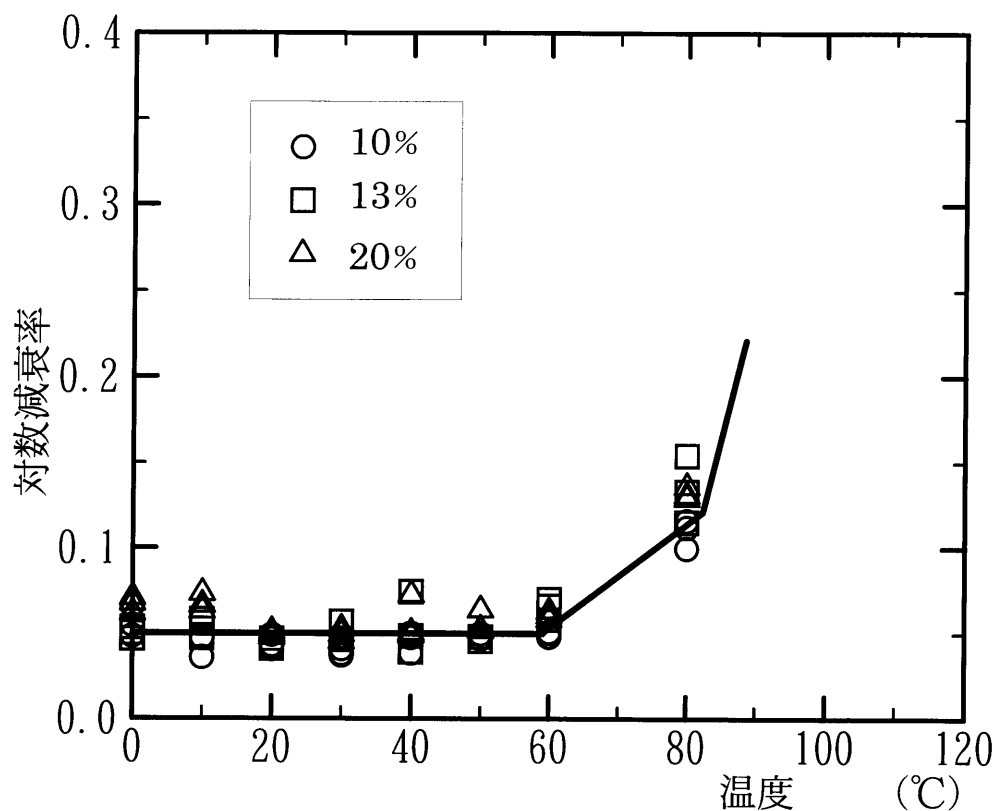


図3-12 UP-3樹脂RECの対数減衰率と温度

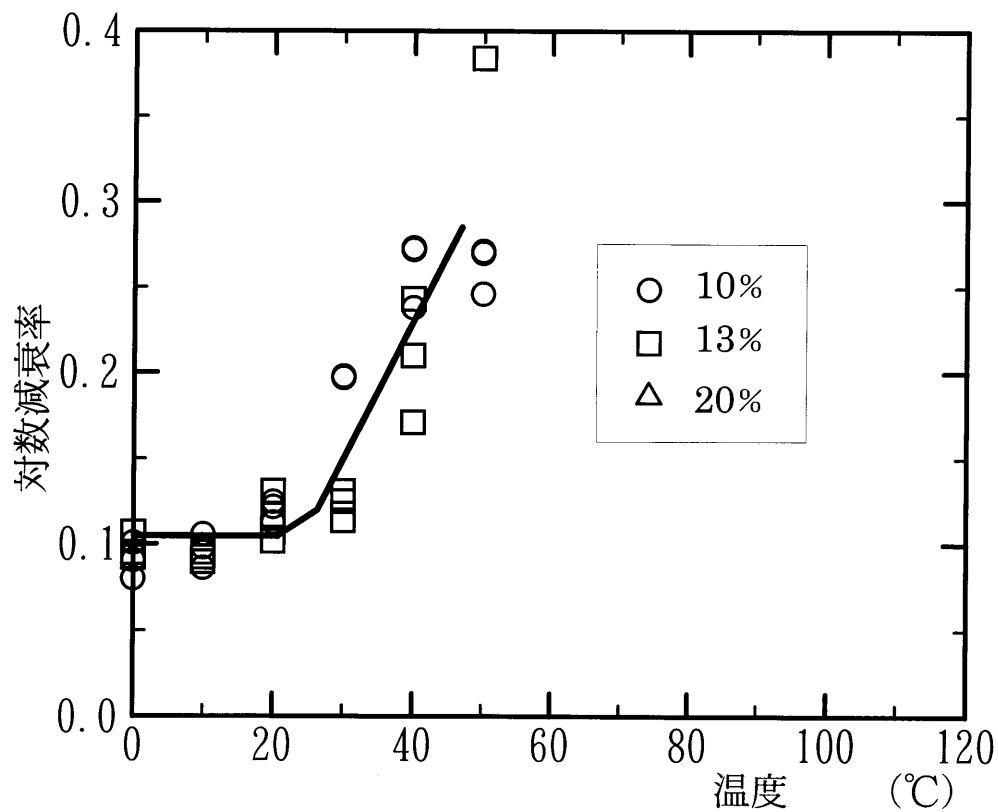


図3-13 EP-1樹脂RECの対数減衰率と温度

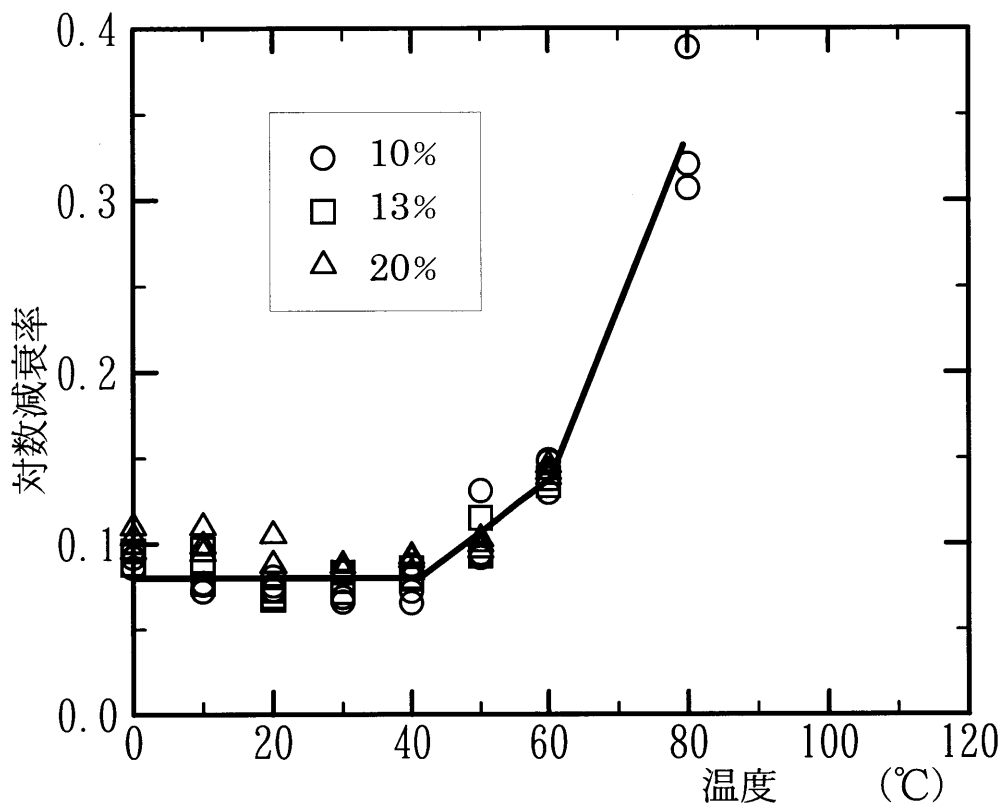


図3-14 EP-2樹脂RECの対数減衰率と温度

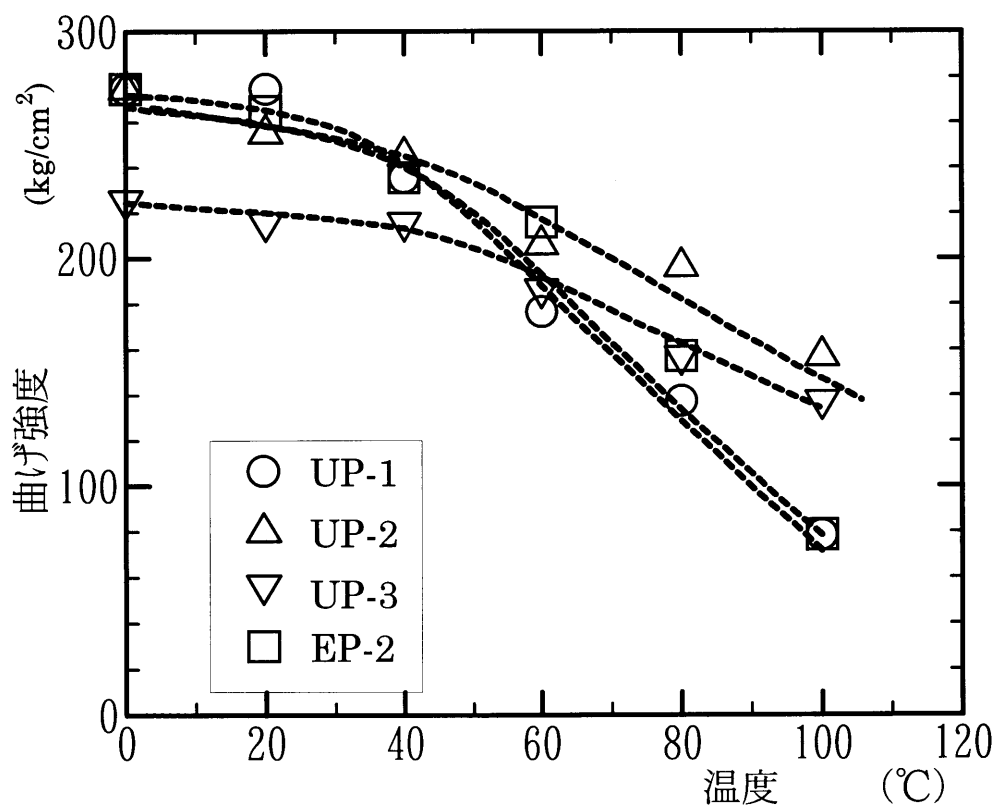


図3-15 10%RECの曲げ強度と温度

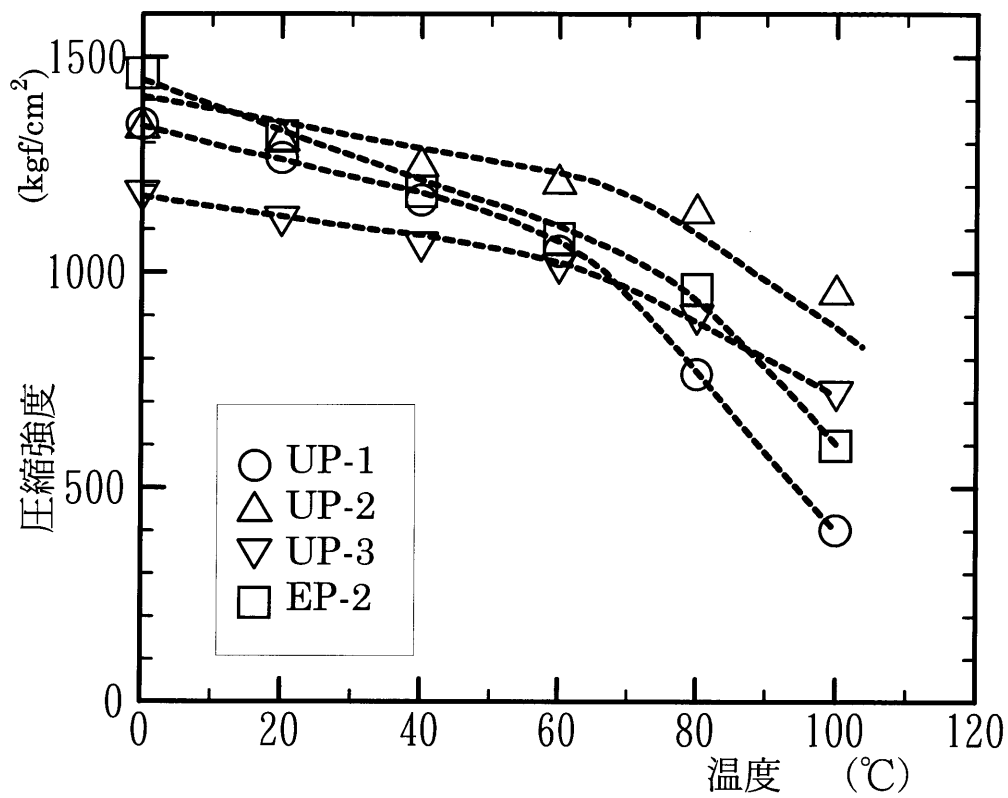


図3-16 10%RECの圧縮強度と温度

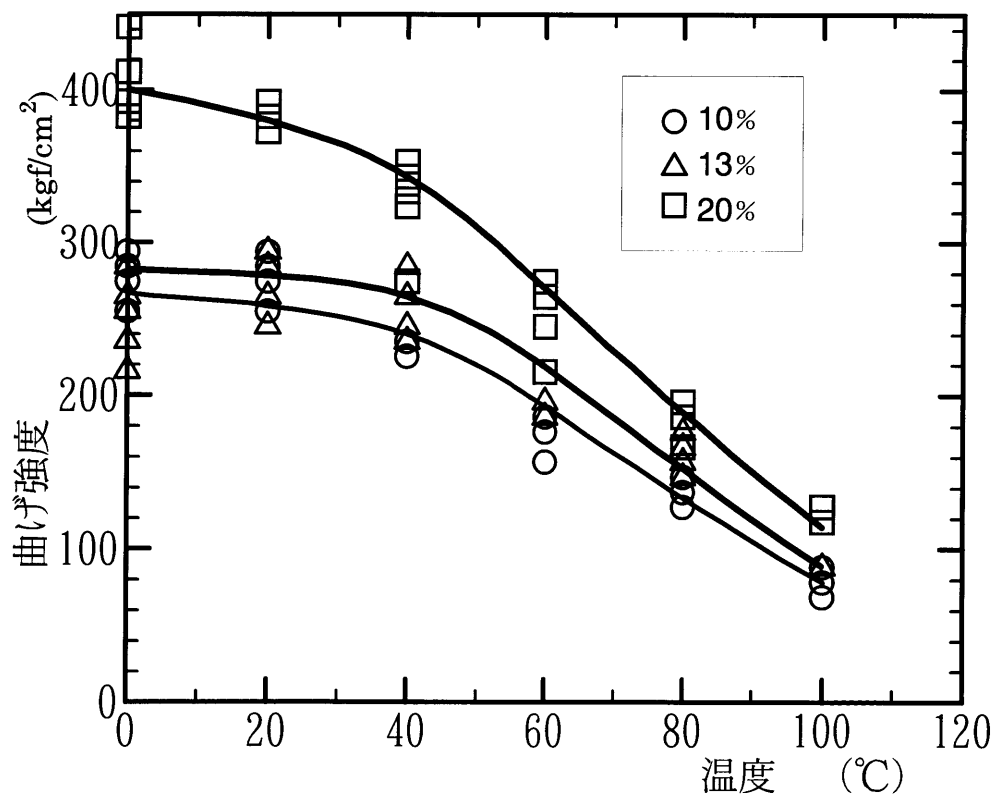


図3-17 UP-1樹脂RECの曲げ強度と温度

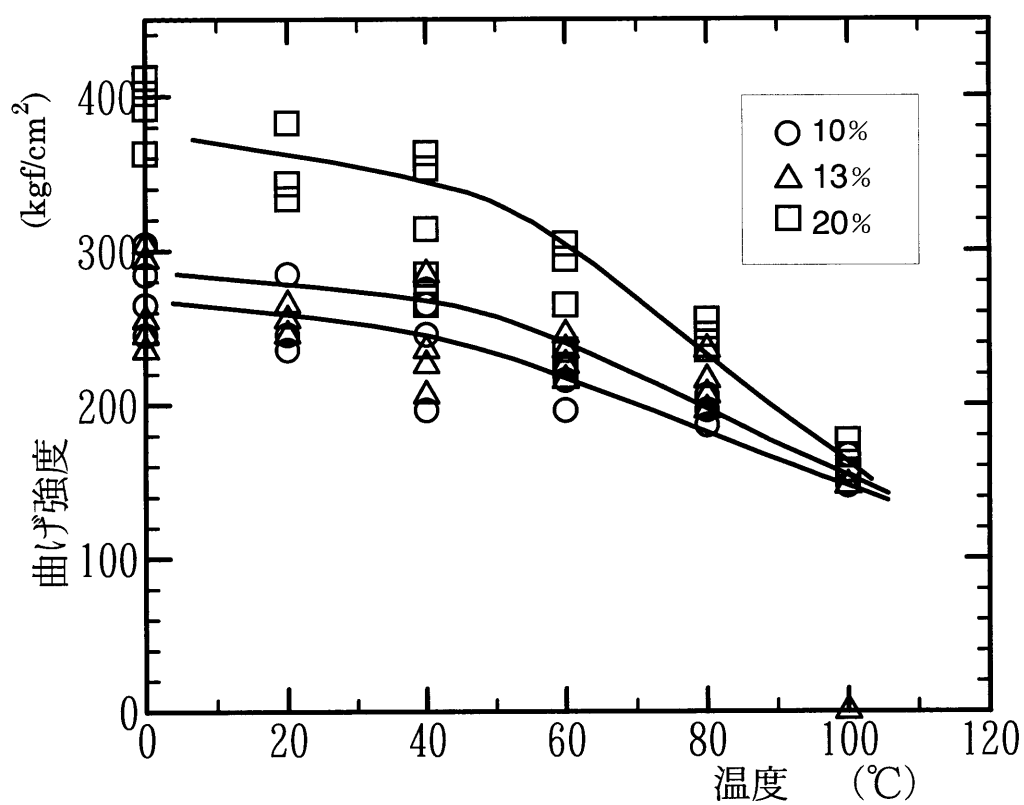


図3-18 UP-2樹脂RECの曲げ強度と温度

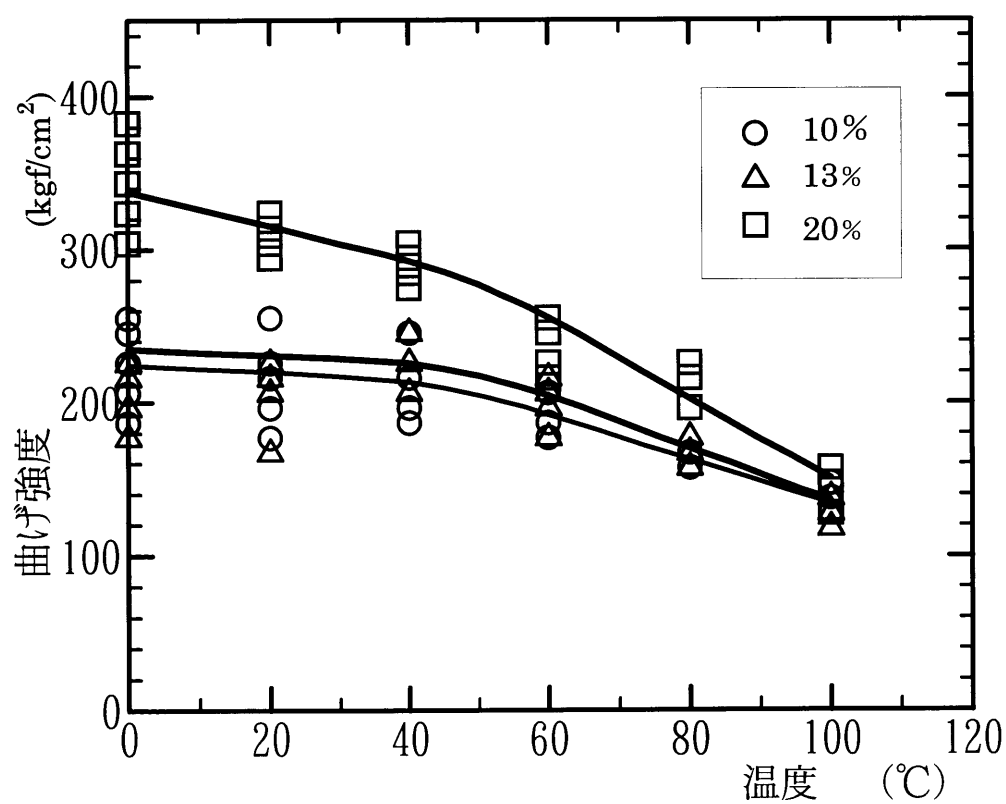


図3-19 UP-3樹脂RECの曲げ強度と温度



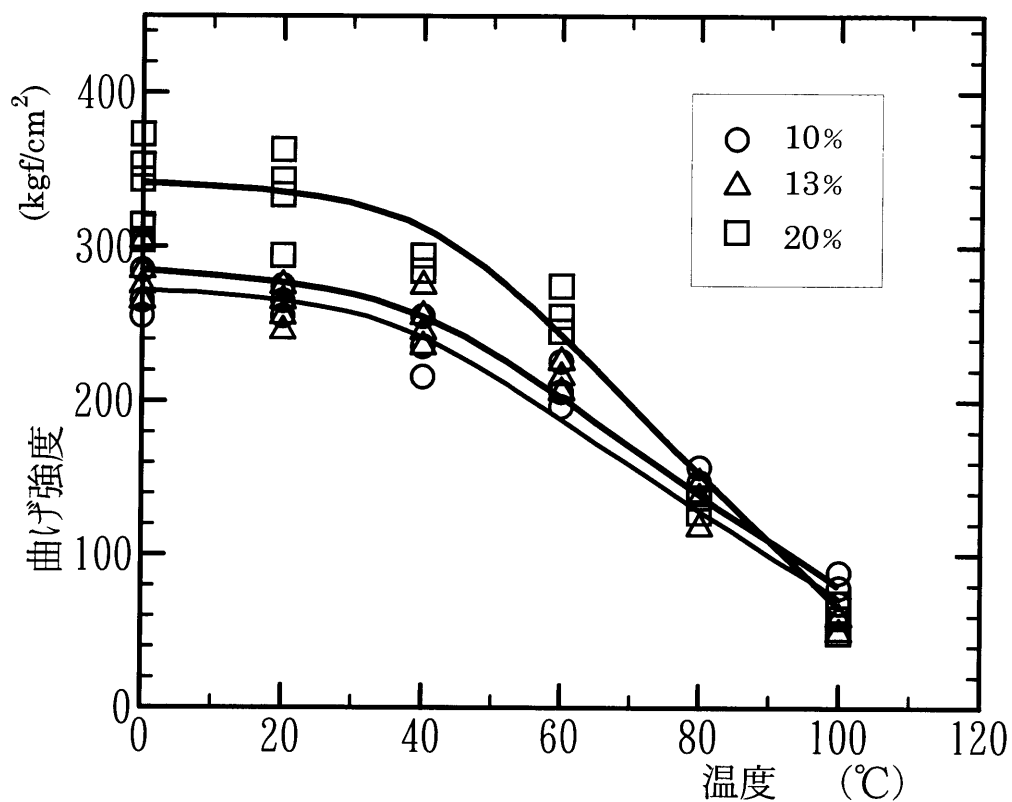


図3-20 EP-2樹脂RECの曲げ強度と温度

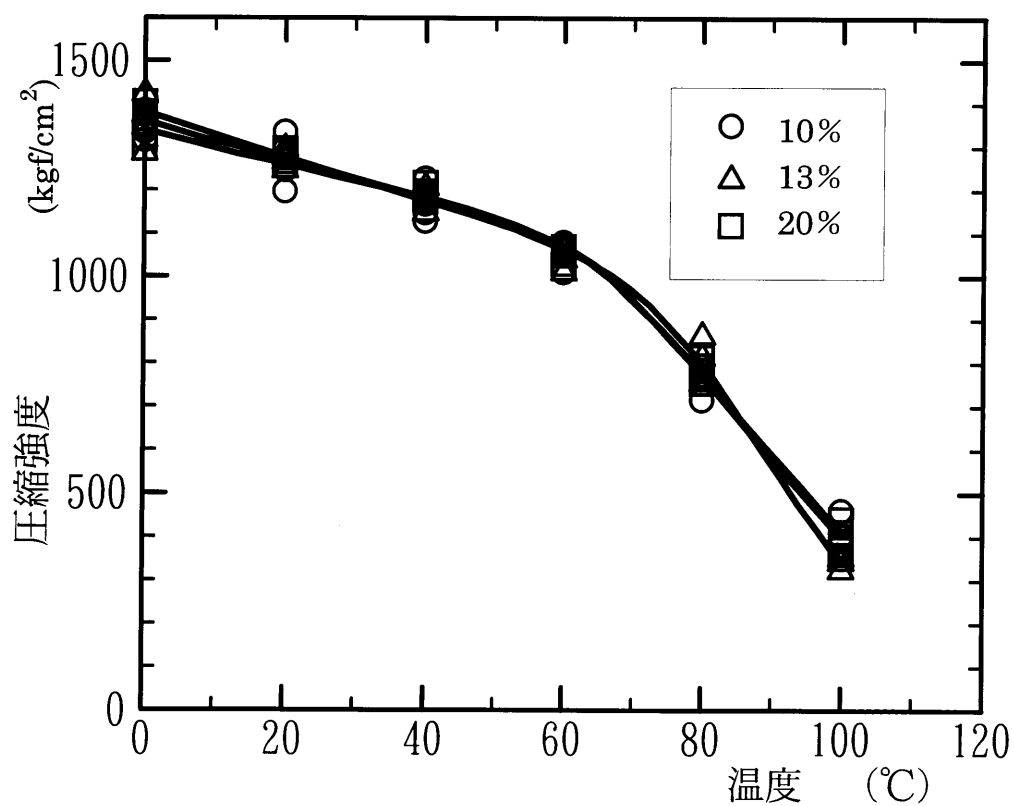


図3-21 UP-1樹脂RECの圧縮強度と温度

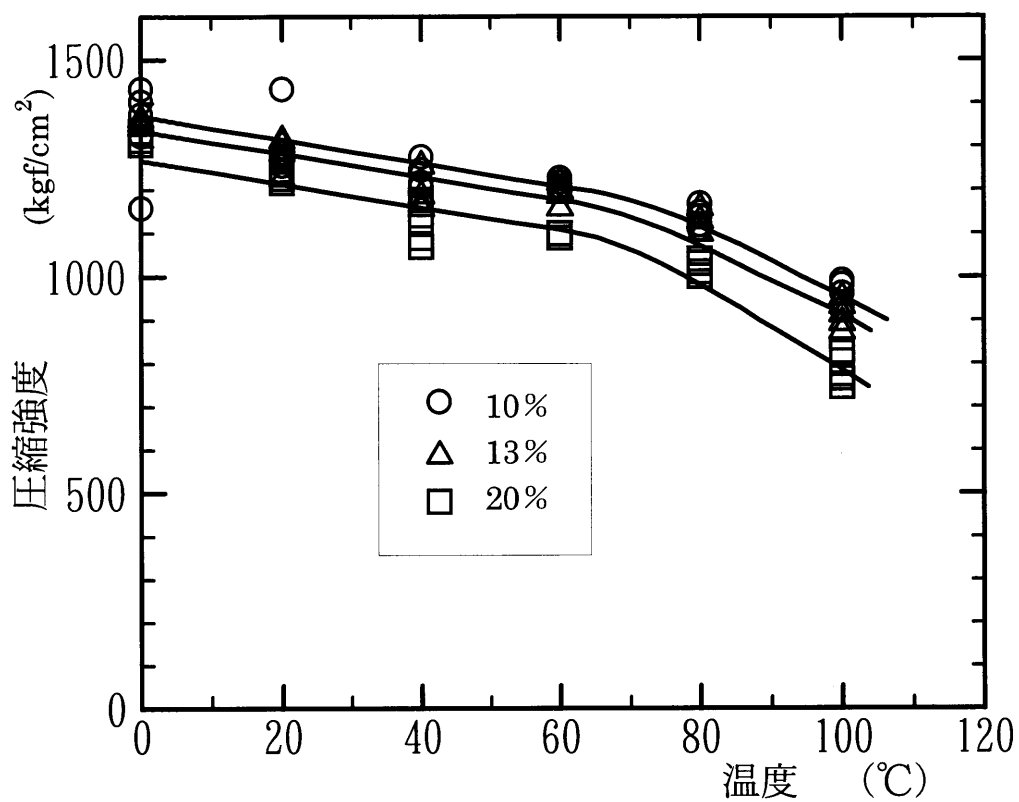


図3-22 UP-2樹脂RECの圧縮強度と温度

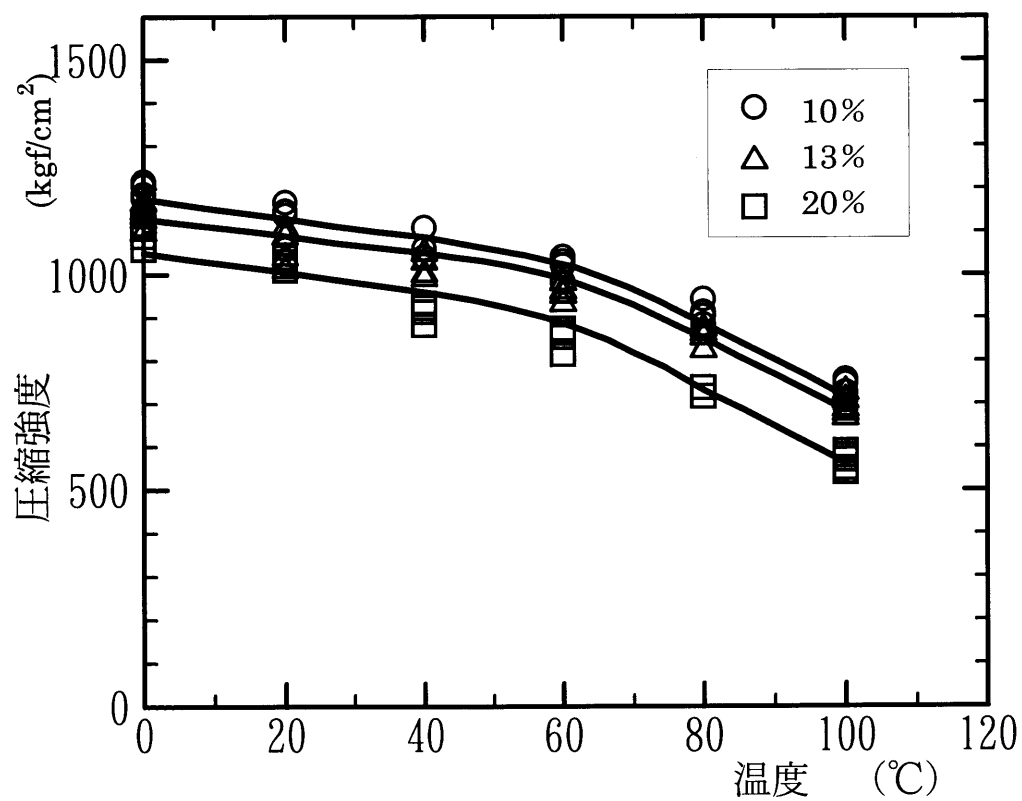


図3-23 UP-3樹脂RECの圧縮強度と温度

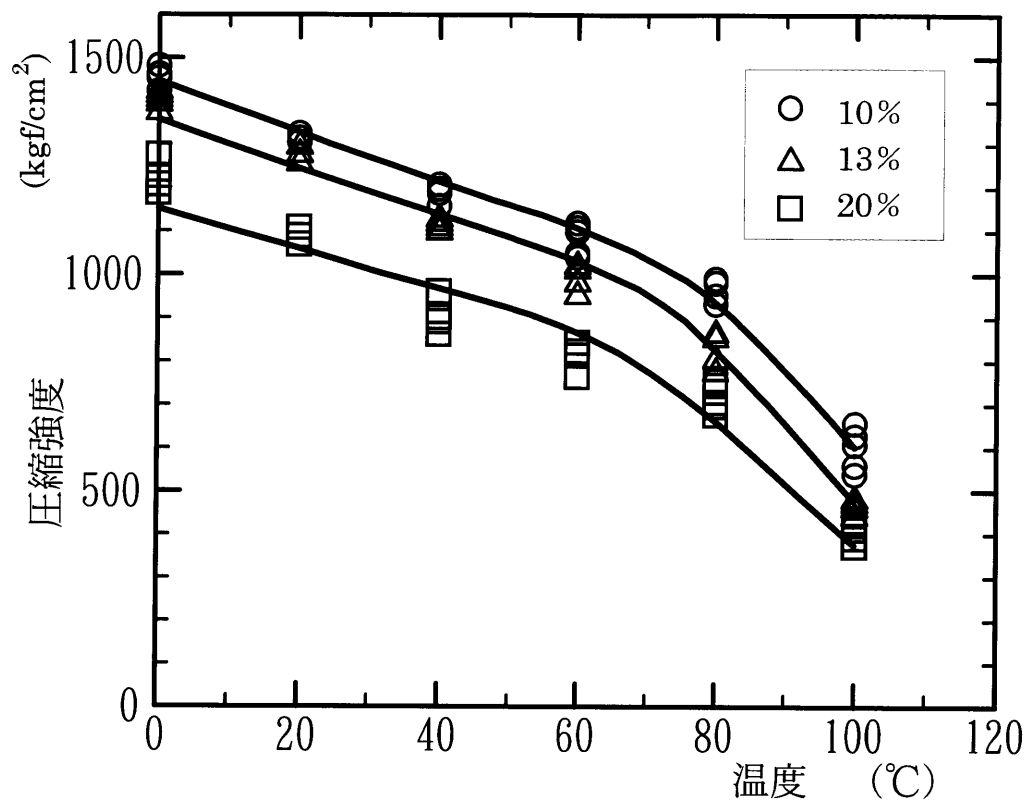


図3-24 EP-2樹脂RECの圧縮強度と温度

## 4 レジンコンクリートの鉄筋補強と内部拘束応力

### 4. 1 まえがき

レジンコンクリートは、圧縮・曲げ・引張などの強度が高いが、破壊時にはセメントコンクリートと同種の材料にみられるように高強度ゆえに延性の少ない脆性的な破壊様相を示す。このためR E Cを構造部材として利用するには、脆性的な破壊様相を緩和するための補強が必要となる。補強材としては鋼材あるいはガラス繊維や炭素繊維を樹脂で固めたF R Pロッドなどがある。しかし、これらロッドは高強度で防蝕性にも優れているが、ガラス繊維の場合はヤング率が小さいために、R E Cにひびわれが発生すると耐力の移行で大きな変形がおこること、炭素繊維の場合は高価格であること、さらに両者とも任意形状への加工性に劣ること等から、鉄筋あるいはP C鋼棒などの鋼材を補強材として使用する場合が多い。

一方、我が国でR E Cの結合材として最も広く用いられている不飽和ポリエステル樹脂は、硬化反応による収縮が大きいために、補強材の存在によりR E Cの硬化収縮が拘束されて、R E Cに内部応力が発生し部材の曲げ耐力が低下する。また、R E Cが中性でありセメントコンクリートのような強アルカリ性による補強鋼材の防食を期待できないため、部材のひびわれ発生を容認する鉄筋コンクリートのような考え方では、ひびわれ発生後には補強鋼材が腐蝕して耐力の低下をおこす危険性がある。これらから、R E Cの構造部材の主要な限界状態は、耐久性の面からみて、ひびわれ発生時としなければならないものとする。またこの観点からは、R E Cの鋼材による補強では、補強材の量を増加させて破壊耐力を向上させるよりむしろひびわれ発生以降はひびわれ耐力を維持するだけで除々に変形が進行し十分な延性を示して破壊に至るような、補強の程度で十分と考える。従って、R E Cの構造設計では、補強材の存在により部材に導入される内部応力の算定、すなわち、部材のひびわれ耐力の推定が重要な問題となる。

この内部応力の算定に関して、岡田らは、はりの曲げ試験により、はり下縁に発生する引張応力 $\sigma_t$ を次式により算出している[1]。

$$\sigma_t = \left[ \frac{1}{A_c} + \frac{e \cdot y}{I} \right] \cdot \frac{E_c \cdot A_c \cdot E_s \cdot A_s}{E_c \cdot A_c + E_s \cdot A_s} \cdot \varepsilon$$

$\varepsilon$  : R E Cの硬化収縮の推定量

I : 換算断面二次モーメント

E : R E Cおよび補強材の弾性係数

A : R E Cおよび補強材の断面積

e : 中立軸から補強材までの距離

y : 中立軸から下縁までの距離

また、小林らは、R E Cはりの曲げ試験と硬化過程の物性測定により、硬化初期の収縮は粘性流動のため拘束応力の発生にはほとんど関与しないと、拘束応力は、はりの硬化収縮のうち拘束に関与する部分の割合として捕捉係数 $\omega$ を導入し、次式で算出できるとしている[2]。

$$\sigma_u = e \cdot E_c \cdot \omega \cdot k / (k + 1) ; k = A_s \cdot E_s / A_c \cdot E_c$$

$\omega$  : 実験の範囲では0.3～0.4

e : R E Cはりの硬化収縮量

E : R E Cおよび補強材の弾性係数

A : R E Cおよび補強材の断面積

また、山崎らは、R E Cの硬化収縮ひずみと弾性係数の経時変化を求めて、これらの時

間関数式を  $\varepsilon_c(t)$ 、 $E_c(t)$  として示し、拘束応力は  $\varepsilon_c(t)$  の単位時間増分と  $E_c(t)$  との積の時間に関する積分値として算出できるとしている [3]。これらの既往の研究で示された方法では、計算のための数値の仮定方法が不明確であるか、あるいは、計算のための作業が複雑であり容易簡便に利用しにくい等の問題がある。

本章では、鋼材比を 0.5～1.5% とし鋼材本数を 1～3 本と変化させたはり供試体による実験－1、および、鋼材比を 1.5～2.9% としはり長さを 2 種としたはり供試体による実験－2 により鋼材に導入される圧縮ひずみの発現状況、はりの曲げ強度の低下量等を測定し、これと同時に測定した R E C の硬化収縮・弾性係数・対数減衰率などの特性などから、はりに発生する内部応力を R E C の硬化収縮量および鋼材比から実用的に推定することに関して検討した。

## 4. 2 試験の概要

### 4. 2. 1 使用材料と配合

R E C の製作に使用した材料とその重量配合を表 4－1 に示す。また補強材としては公称径 9.2, 11, 15, 17 および 21 mm の P C 鋼棒を使用した。

表 4－1 R E C の使用材料と配合 (w t %)

材料名	配合	材 料 の 詳 細
樹 脂	1 1	オルソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂 (粘度 4 $\phi$ 1 $\lambda$ )
充填材	2 0	重質炭酸カルシウム (平均粒径 40 $\mu$ )
細骨材	2 0	静岡産山砂 (最大寸法 0.6mm, F. M. =1.3)
粗骨材	4 9	揖斐川産玉碎石 (最大寸法 10mm, F. M. =5.9)
触 媒	適量	メチルエチルケトンパーオキサイド (活性酸素量 10%)
促進剤	適量	ナフテン酸コバルト (コバルト量 6%)

### 4. 2. 2 特性の測定方法

実験－1 (鋼材本数を変えた実験) では、鋼材比、鋼材本数を変えた 12x10x130cm の長方形断面のはり供試体を作成し、材令 17 日ではりの曲げ試験を実施した。なお、供試体の作成および計測等は無温調の室内で実施したため、試験時の温度は 10℃ 前後であった。また R E C のゲル化時間は 35 分であった。はり供試体の種類を表 4－2 に、はり供試体の形状および曲げ試験方法を図 4－1 に示す。

また、実験－2 (はり長さを変えた実験) では、鋼材比を変えた 12x10x130cm および 12x10x60cm の長方形断面のはり供試体を作成し、材令 28 日ではりの曲げ試験を実施した。なお、この実験は 20℃ に管理された試験室内で行った。また R E C のゲル化時間は 200 分であった。はり供試体の種類を表 4－3 に、はり供試体の形状および曲げ試験方法を図 4－2 に示す。

両実験において、鋼材に導入される圧縮ひずみは、鋼材の表面に貼付けた抵抗線ひずみゲージ (検長 2mm) で、R E C の打設完了から 24 時間または 48 時間まで計測した。ひずみゲージと R E C の付着を防止するため、ゲージ表面には巾 10mm の四フッ化エチ

レンテープを被覆した。ゲージの貼付位置は図4-1、図4-2に示す。

R E Cの硬化収縮は、2章2節と同様に、直径 $\phi 100 \times 500 \text{mm}$ の塩化ビニルパイプにR E Cを打設し、打設面に直径90mm厚さ10mmのポリエチレン製の円盤を置き、これの沈下量をゲージ式変位計で測定し、測定完了後にR E Cの長さをノギスで測定してこれらより計算で収縮量を求めた。ただし、ゲル化後48時間以降は、断面 $100 \times 100 \text{mm}$ 、長さ400mmの角柱供試体で、検長250mmのホイットモアー型ひずみ計を用いて測定した（図2-1参照）。

R E Cの動弾性係数および対数減衰率は、寸法 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体を用いて、動弾性係数測定器により計測した縦波共振周波数により求めた。

R E Cの静弾性係数および粘弾性比率は、実験-1では、寸法 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の角柱供試体に1000kgfの圧縮力を1分間加えて供試体表面のひずみを測定し、弾性ひずみ（ $\varepsilon_a$ ）と圧縮応力から静弾性係数を、載荷中のひずみ増分（ $\varepsilon_b$ ）と弾性ひずみ（ $\varepsilon_a$ ）との比（ $\varepsilon_b / \varepsilon_a$ ）として粘弾性比率を求めた（図2-2参照）。また、実験-2では、アムスラー型圧縮試験機を用いて、寸法 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体に $600 \times 10^{-6}$ 程度の圧縮ひずみを発生させる圧縮力を1分間加えて供試体表面のひずみを測定し、同様に、弾性ひずみと圧縮応力から静弾性係数を、載荷中のひずみ増分（ $\varepsilon_b$ ）と弾性ひずみ（ $\varepsilon_a$ ）との比（ $\varepsilon_b / \varepsilon_a$ ）として粘弾性比率を求めた。

表4-2 実験-1のはり供試体の種類

供試体記号	鋼材径 (mm)	鋼材数 (本)	鋼材比 (%)	供試体寸法 (cm)	供試体数
0.5-1	9.2	1	0.55	12x10x130	2
1.1-1	13	1	1.11		
1.1-2	9.2	2	1.11		
1.5-1	15	1	1.47		
1.5-2	11	2	1.58		
1.5-3	9.2	3	1.66		

表4-3 実験-2のはり供試体の種類

供試体記号	鋼材径 (mm)	鋼材数 (本)	鋼材比 (%)	供試体寸法 (cm)	供試体数
0-L	--	—	--	12x10x130	2
15-L	15	1	1.47		
17-L	17	1	1.89		
21-L	21	1	2.89		
0-S	--	—	--	12x10x60	2
15-S	15	1	1.47		
17-S	17	1	1.89		
21-S	21	1	2.89		

#### 4. 3 試験結果および考察

##### 4. 3. 1 実験－1（鋼材本数を変えた実験）の鋼材ひずみ

R E Cの硬化収縮等の経時変化を図4－3に、はり中央における鋼材のひずみの経時変化を図4－4に示す。

鋼材ひずみはゲル化後70分程度から発現し、4時間程度までは急激に増加し、6時間以降は緩やかな増加となった。R E Cの硬化収縮は、ゲル化後40分度で発現を始めているため、鋼材ひずみの発生は硬化収縮の発生より30分程度遅れている。

発生する鋼材ひずみは鋼材比が少ないほど大きな値となるが、その発現の経時変化は、鋼材比・鋼材本数に関わらず同一の傾向を示す。また図4－4、および、はり断面での鋼材位置と発生鋼材ひずみとの関係を示す図4－5、図4－6より、同一の鋼材比では、鋼材本数が変化しても、ほぼ同一の鋼材ひずみを示し、この程度の鋼材比の範囲では、鋼材本数すなわち鋼材の付着面積は発生鋼材ひずみに影響を与えない。また適正な鋼材間隔が維持されればR E Cは均等に鋼材と付着している。

##### 4. 3. 2 実験－2（はりの長さを変えた実験）の鋼材ひずみ

R E Cの硬化収縮等の経時変化を図4－7に、はり中央における鋼材のひずみの経時変化を図4－8に示す。

鋼材ひずみはゲル化後3時間程度から発現し、12時間程度までは急激に増加し、15時間以降は緩やかな増加となり、36時間以降は微増となった。硬化収縮は2時間未滿で発現を始めているため、鋼材ひずみの発生は硬化収縮の発生より60分程度遅れている。前節と同様に鋼材比により発生鋼材ひずみに差はあるが、鋼材ひずみ発現の経時変化は同一である。

図4－9に、3種類の鋼材比で、はり長さを変えた場合のはり中央の鋼材ひずみの経時変化を示す。この図より、鋼材比に関わらず、短いはりの鋼材ひずみが長いはりのそれより小さい。また図4－10には、鋼材の各位置での鋼材ひずみの分布状況を示す。長いはりの鋼材ひずみの分布では、中央部で鋼材ひずみが一定の区間が認められるが、短いはりではこれが認められず、鋼材の定着には30cm以上必要であることがわかる。短いはりでは中央部でもこの鋼材の定着長を越えていないために、長いはりの中央部より小さい鋼材ひずみを示したと考える。この鋼材の定着長さに関して著者らは既報で、20cm程度と報告していたが〔4〕、既報では鋼材位置が断面の下方に偏心したものであったことを考慮すると、R E Cの硬化収縮による鋼材への影響には、鋼材のはり断面における位置（鋼材のかぶりあるいは鋼材の偏心量）と関係し、三次元的な影響が考えられる。なお、今回の実験でのかぶりは5cmであり、実用的な範囲としては大きい方であり、実用上は鋼材の定着長は30cm程度と見込めば良いと考える。

また、鋼材比が大きく、鋼材の付着面積が小さい場合（大きな鋼材比で、鋼材本数が少ない場合）には、R E Cの付着強度に限界があり、硬化初期において鋼材とR E Cの付着が切れて滑る現象（鋼材ひずみが減少する）が考えられる。この付着が切れたとも考えられる変化が、供試体端部における鋼材ひずみの測定データーの一部に散見されたが、定量的な解析ができるほどの明確なデーターは得られていない。

### 4. 3. 3 鋼材ひずみの発現

鋼材ひずみとR E Cの硬化収縮・弾性係数などの特性の増加速度（一分間当たりの増分量）の経時変化を図4－11，図4－12に示す。

R E Cの諸特性の発現の状況は、2. 2節で述べたとおりであり、鋼材ひずみの発現開始は、硬化収縮の発現開始よりも遅れ、動弾性係数の発現開始と同程度の時間である。また、鋼材ひずみが最大増加速度を示す時間は、ゲル化35分の実験－1では2時間程度、ゲル化200分の実験－2では7時間程度であり、硬化収縮が最大増加速度を示す時間の1. 5時間ならびに3時間に比べると大きく遅れており、それぞれのゲル化時間での動弾性係数が最大増加速度を示す時間とほぼ一致する。

鋼材ひずみの出現の遅れは、R E Cの遅延弾性の影響もあるが、硬化初期の動弾性係数の測定が不可能なほどに粘性の大きな領域で発生する硬化収縮は、鋼材で拘束されることなくフローあるいは付着強度の不足で流動し、鋼材に影響を与えず、R E Cの硬化が進行して組織の骨格が形成され、ある程度に弾性が発現した状態（例えば、動弾性係数の測定の加振に対して共振を示す程度）より以降で生じた硬化収縮のみが鋼材により拘束される結果と考えられる。

### 4. 3. 4 はりの曲げ強度の低下

はりの曲げ試験による、ひびわれモーメント、ひびわれ時のはり下縁の算定応力および算定下縁応力と無補強はりの曲げ強度との差である曲げ応力の低下量を表4－4，表4－5に示す。なお、実験－1では、無補強はりのひびわれモーメント等は10x10x40cmの角柱供試体による三等分点载荷の曲げ試験の値とした。

表4－4 曲げ試験結果（実験－1）

供試体記号	鋼材径 (mm)	鋼材数 (本)	鋼材比 (%)	ひびわれ モーメント (tonf・cm)	ひびわれ時 下縁応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	曲げ応力 低下量 (kgf/cm <sup>2</sup> )
R E Cの曲げ強度（10x10x40cm供試体）				(39. 0)	195	---
0. 5－1	9. 2	1	0. 55	36. 3 37. 4	182 189	12. 3 5. 4
1. 1－1	13	1	1. 11	32. 1 33. 0	160 166	34. 7 29. 0
1. 1－2	9. 2	2	1. 11	30. 1 33. 0	155 168	39. 5 26. 9
1. 5－1	15	1	1. 47	30. 2 31. 0	151 147	43. 9 47. 9
1. 5－2	11	2	1. 58	33. 3 32. 8	166 164	28. 4 30. 4
1. 5－3	9. 2	3	1. 66	30. 5 31. 6	151 160	43. 8 34. 9



表4-5 曲げ試験結果（実験-2）

供試体記号	鋼材径 (mm)	鋼材数 (本)	鋼材比 (%)	ひびわれ モーメント (tonf・cm)	ひびわれ時 下縁応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	曲げ応力 低下量 (kgf/cm <sup>2</sup> )
0-L	--	-	--	36.8	189	---
				37.2	191	---
15-L	15	1	1.47	30.2	155	34.6
				31.2	161	29.5
17-L	17	1	1.89	30.2	155	34.6
				28.4	146	43.9
21-L	21	1	2.89	29.2	150	39.8
				29.2	150	39.8
0-S	--	-	--	39.4	205	---
				36.3	189	---
15-S	15	1	1.47	28.2	144	53.3
				36.3	185	12.0
17-S	17	1	1.89	32.5	166	31.1
				33.8	172	24.8
21-S	21	1	2.89	28.2	144	53.3
				33.2	169	27.8

図4-13に、実験-1（鋼材本数を変えた実験）での、はり供試体のひびわれモーメントと鋼材比の関係を示す。さらに、図4-14では、曲げ応力の低下量と鋼材比の関係および鋼材ひずみの最終値（ゲル化後24時間）を用いて、断面の平面保持を仮定し、鋼材に働く圧縮力とR E Cに働く引張力を等しいとして求めたR E Cに作用する引張応力と鋼材比の関係を示す。同様に、実験-2（はり長さを変えた実験）でのそれらを図4-15、図4-16にそれぞれ示す。

図4-13および図4-15より、はり供試体のひびわれモーメントは、鋼材比の増加につれて低下する。鋼材本数が多い場合は少ない場合に比べてわずかにひびわれモーメントが大きいとも見受けられるが顕著では無く、強度のバラツキの範囲内で同等であり、曲げ耐力と鋼材本数との間には関係が認められない。また、長さの短いはり供試体のひびわれモーメントは、4.3.2節の鋼材ひずみでも述べたように、長いはりのそれに比べて少し大きい、バラツキも大きく定着長領域での不安定さが示されている。

図4-14、図4-16の曲げ応力の低下量の実験値と鋼材ひずみからの計算値は、強度試験によるバラツキと鋼材ひずみの測定精度などを考えると、比較的よく一致しており、はりの曲げ強度低下量（R E Cに生ずる内部応力）は鋼材ひずみからの計算値と一致している。

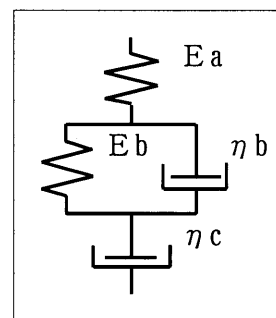
図4-17には、実験-1のはりと実験-2の長いはりによるひびわれモーメントの結果と鋼材比の関係を示す。また図4-18には、はりの曲げ試験時のR E Cの硬化収

縮を $3800 \times 10^{-6}$ 、および、その弾性係数を $3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ とし、R E Cの弾性が優先し始める時期の硬化収縮率は60～80%であることから（2.2.3.3項）、この硬化収縮の20%、30%および40%が鋼材ひずみの発生に寄与するとして、平面保持を仮定し力の釣り合いより求めたR E Cの拘束応力と実験での曲げ応力低下量を示した。

図4-17より、ひびわれモーメントは鋼材比の増加に比例してほぼ直線的に低下している。しかし、図4-18より、鋼材比2.89%での曲げ応力低下量は他の鋼材比での鋼材比の場合よりも少ない。これは実験上のバラツキの可能性もあるが、前項で述べたR E Cと鋼材との付着限度の問題で、鋼材比が大きく付着面積が少ないために「滑り」がおこり、鋼材には一定以下のひずみしか導入されない現象の可能性もある。また、図-18でゲル化時間35分である実験-1での曲げ応力低下量は40%の仮定線の近傍に、ゲル化時間200分である実験-2でのそれが30%の仮定線の近傍に分布している。ゲル化時間が早い場合は曲げ応力の低下量が大きくなるのがうかがえる。これは、ゲル化が遅いと弾性の発現速度も小さいため粘性が優勢である形態と弾性が優勢となる形態との境界域にある時間も長い。このため鋼材による拘束を受けない収縮が多くなる結果とも考えられる。全体的には、R E Cの硬化収縮の20%～40%が鋼材ひずみの発生に寄与したと仮定すればほぼ実験値と合うことが判る。

#### 4. 3. 5 拘束応力の推定

硬化したR E Cは2つのスプリング（ $E_a$ 、 $E_b$ ）と2つのダッシュポット（ $\eta_b$ 、 $\eta_c$ ）要素の組み合わせとして仮定できる。従って、R E Cの硬化収縮の経時変化と弾性係数と粘性係数の経時変化が判明すれば、硬化収縮が鋼材により拘束されて生じるR E Cの内部応力は、微小時間においては弾性係数と粘性係数は一定であるので、この間の硬化収縮の増分と断面における力の釣り合いから内部応力の増分が求められ、この増分をそれまでの内部応力に加算することを繰り返すことによって求められる。



しかし、第2章で述べたように、R E Cの硬化収縮、弾性係数、粘性係数などの発現の経時変化は、使用樹脂の反応特性、硬化剤の添加量の差、材料および硬化初期における温度の差などにより変化するものであり、これを網羅する物性発現の汎用的な数式を定義することは困難なことであろう。

また、R E Cの硬化初期においては $\eta_c$ が他に比べて極端に大きく、この間に生じた収縮が鋼材により拘束されて内部応力とはならないと考えられる。R E Cの硬化が進行して $\eta_c$ が減少し $E_a$ が優勢となりR E Cが弾性体と見なせる形態となり、これ以降に生じる硬化収縮が拘束されて内部応力が生じると考えられる。さらに2.2.1項でも触れたことならびにR E Cのクリープ係数がセメントコンクリートのそれに比べて小さいことから、この $E_a$ が優勢となったあとの $\eta_c$ は相当に小さい可能性もある。このことは、硬化過程の応力緩和としてクリープ係数を仮定し、完全硬化後の収縮量と弾性係数から求める計算方法等には、計算の前提としての構造仮定に問題が有るとも言える。

従って、R E Cの硬化収縮が、動弾性係数の測定が不可能なほどに粘性（ $\eta_c$ ）が大

きな時期にその70%程度を発現していることから、多少の誤差はあるが、R E Cの硬化収縮量から硬化初期のこの収縮量を一定割合として差し引いたものと硬化後のR E Cの弾性係数を用いて、平面保持を仮定した断面の力の釣り合いより求める方法が実用的と言える。

#### 4. 4 まとめ

R E Cの硬化収縮が補強材により拘束されR E Cに導入される内部応力は、R E Cの硬化収縮、弾性、粘性、粘弾性ならびにR E Cと補強材との付着性能の経時変化を掌握すれば、これらの影響を含む関係式の時間積分として求められるが、事前に決定しなければならない経時変化曲線の種類も多く、またその測定も困難なものもあり、構造設計で容易に使用できる実用的な方法とは言えない。

R E Cの内部応力の実用的な算定には、樹脂が流動体からゲル、ゲルから固体へと変化していくR E Cの硬化過程で、硬化初期の粘性が大きな領域で発生した硬化収縮は内部応力の導入に寄与しないと考え、粘性が小さくなり弾性が優先する領域で発生する硬化収縮のみに対して、平面保持を仮定した断面の力の釣り合いより求める方法が実用的と言える。具体的には次式で求めた $\varepsilon$ を用いて、岡田らが提案した式で求めればよい。

$$\varepsilon = \beta \cdot \varepsilon_r$$

$\varepsilon$  : R E Cの内部応力の発生に寄与する硬化収縮

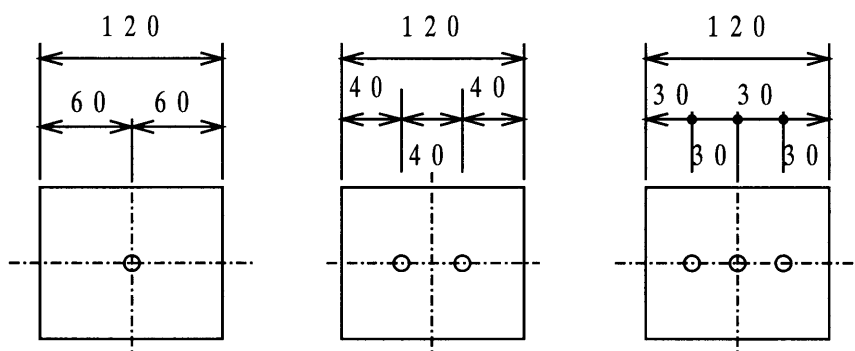
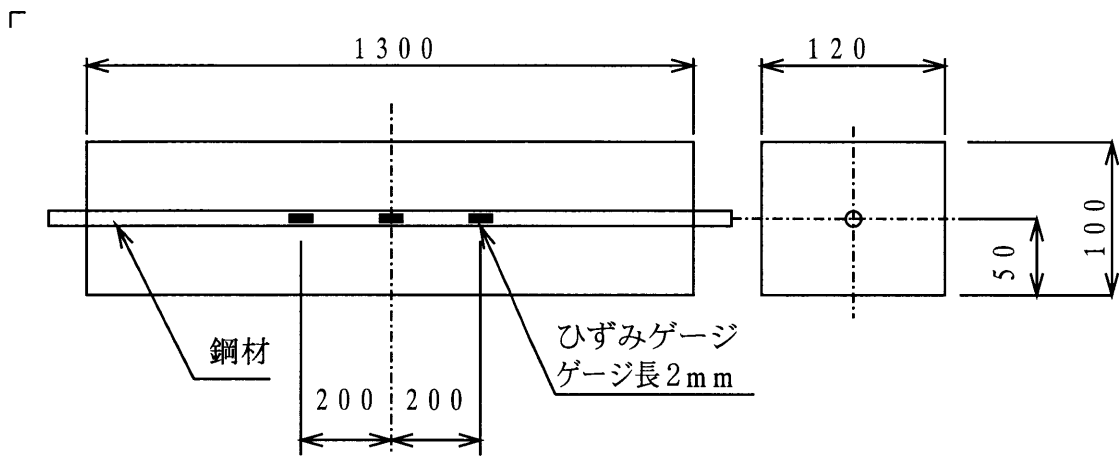
$\varepsilon_r$  : R E Cの自由硬化収縮

$\beta$  : 寄与率 (0.2 ~ 0.4)

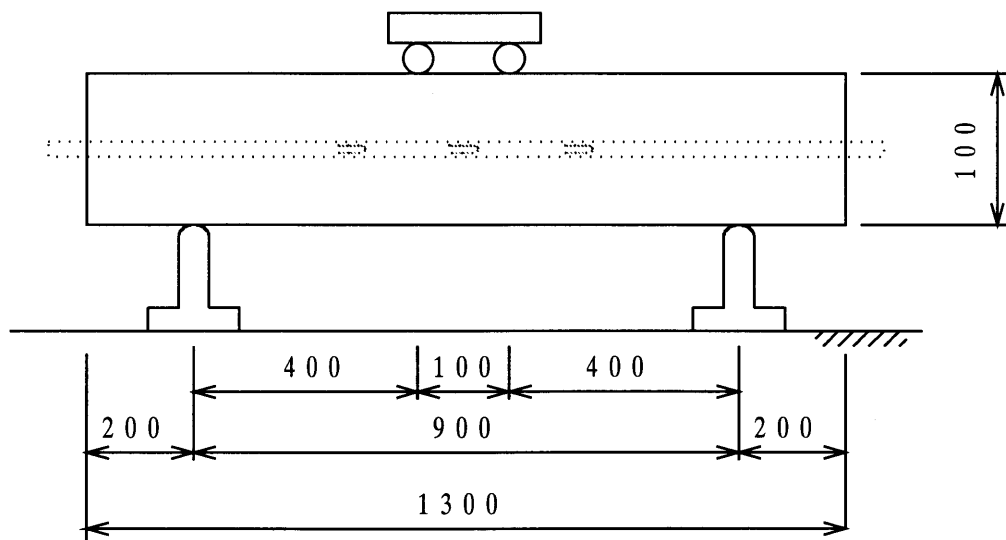
この場合、 $\varepsilon_r$ が未知であれば、使用樹脂の体積硬化収縮量（通常樹脂の性能として製造者が性能表などで公表している）とR E Cの樹脂量の体積比から誘導すれば良い。また、 $\beta$ は、本来、使用樹脂とR E Cの配合およびその硬化条件から個々に決まるものと考えられる。配合に応じてこれを決める必要がある場合には、R E Cの硬化収縮の経時変化と対数減衰率の経時変化を比較して、弾性が優先して対数減衰率の減少が確認できる時点以降の硬化収縮と全硬化収縮の比として求めれば良いであろう。

#### 参 考 文 献

- [1] 岡田 清, 小林 和夫, 矢村 潔, 平井 正樹, レジンコンクリートの補強に関する2・3の実験, セメント技術年報, XXII, pp. 502-506, 1968
- [2] 小林 保, 小林 一輔, レジンコンクリートの補強に関する2・3の実験, コンクリート工学, Vol. 14, No. 4, pp. 123-128, 1974
- [3] 渡辺 明, 高山 俊一, 山崎 竹博, レジンコンクリートのP Cはりへの応用に関する研究, 九州工業大学研究報告, No. 31, 1975
- [4] 小柳 治, 大野 定俊, 村井 信夫, 林 富士男, レジンコンクリートの最適設計に関する一考察, 第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp. 353-357, 1981



供試体の形状



曲げ载荷試験方法

(単位：mm)

図 4-1 実験-1の供試体形状と曲げ試験方法

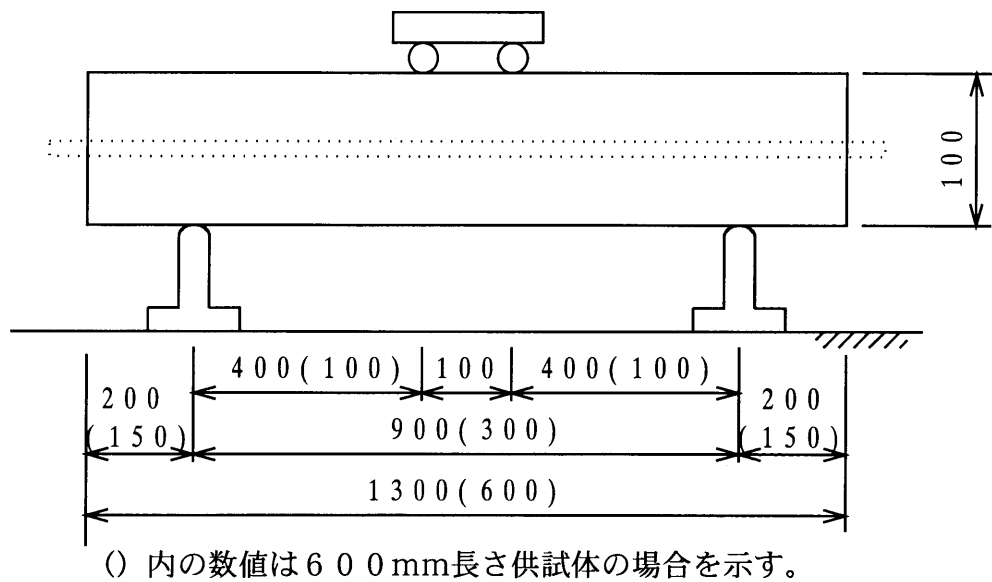
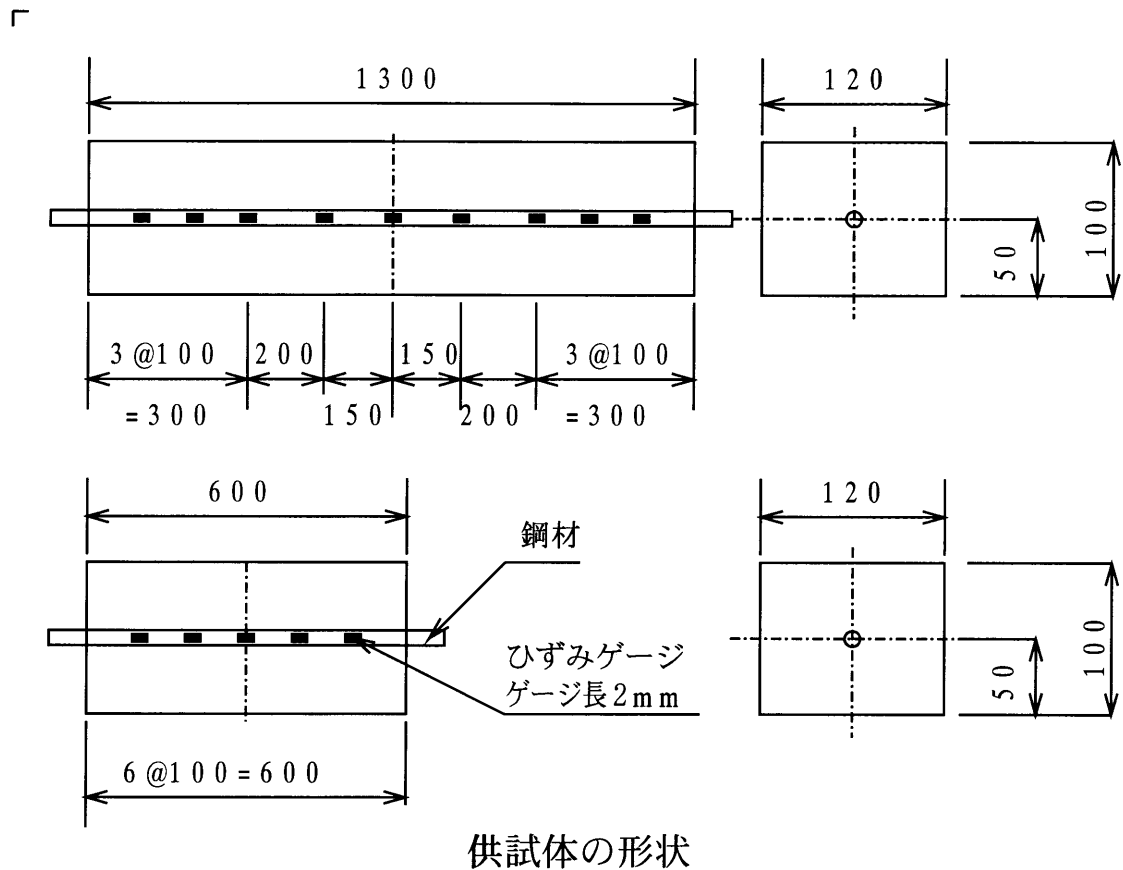


図 4-2 実験-2の供試体形状と曲げ試験方法 (単位: mm)

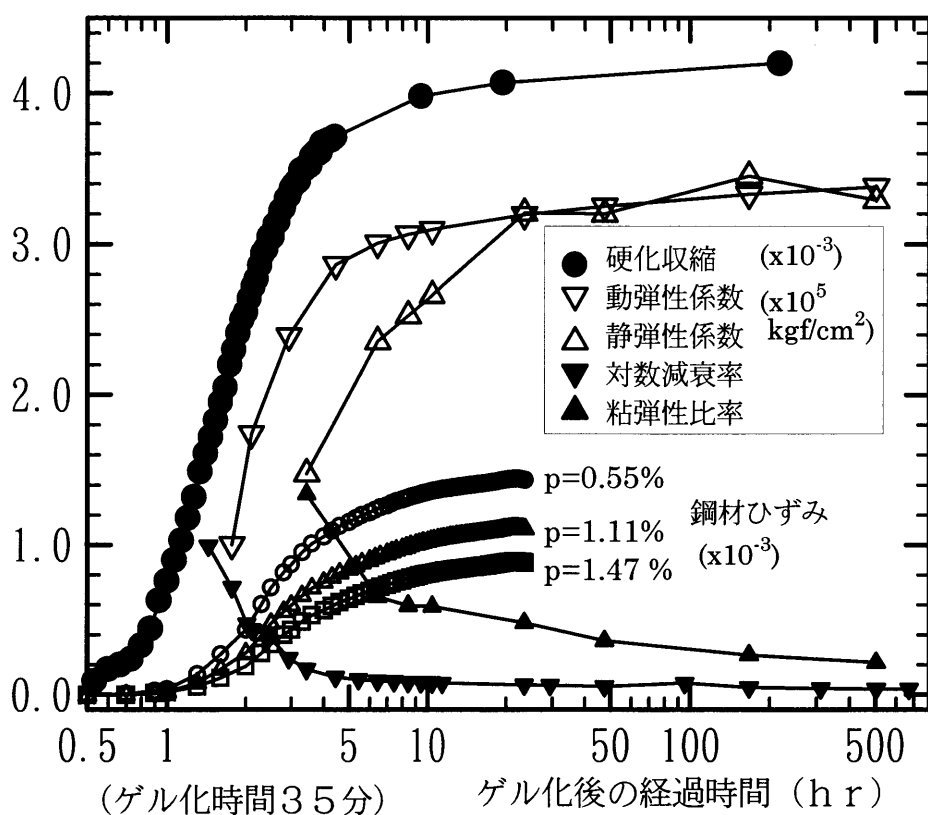


図 4-3 実験-1での諸物性の経時変化

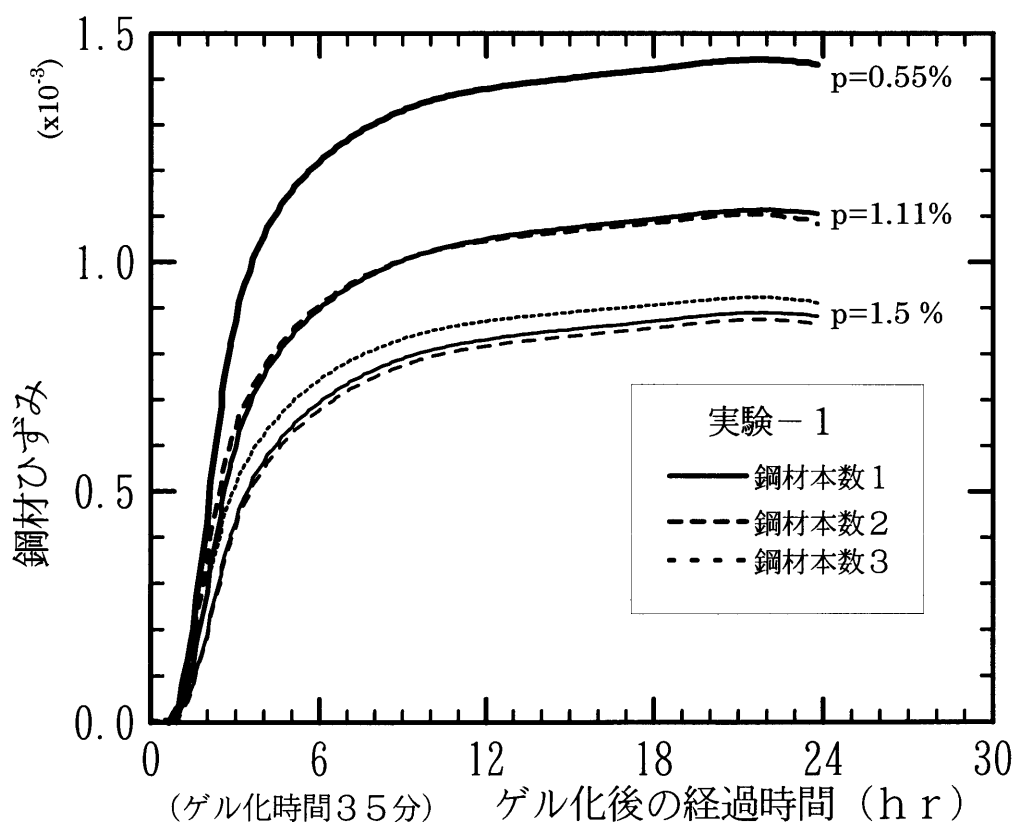


図 4-4 供試体中央の鋼材ひずみの経時変化

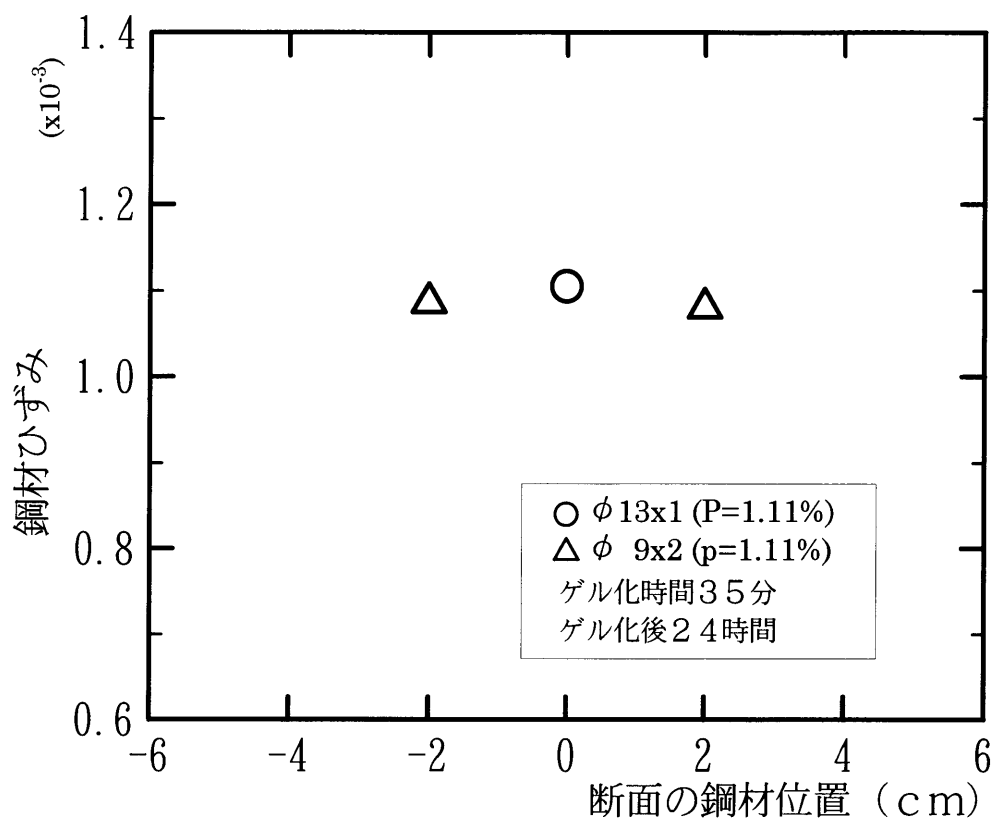


図 4-5 鋼材本数と鋼材ひずみの関係 (p=1.1%)

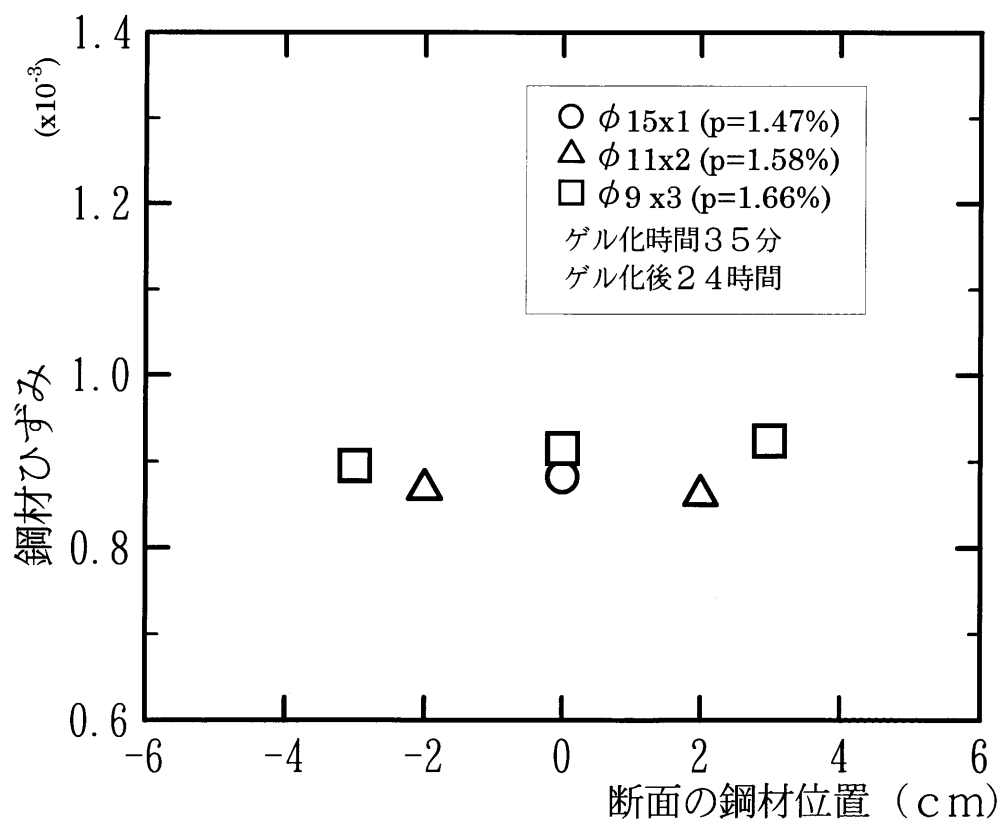


図 4-6 鋼材本数と鋼材ひずみの関係 (p=1.5%)

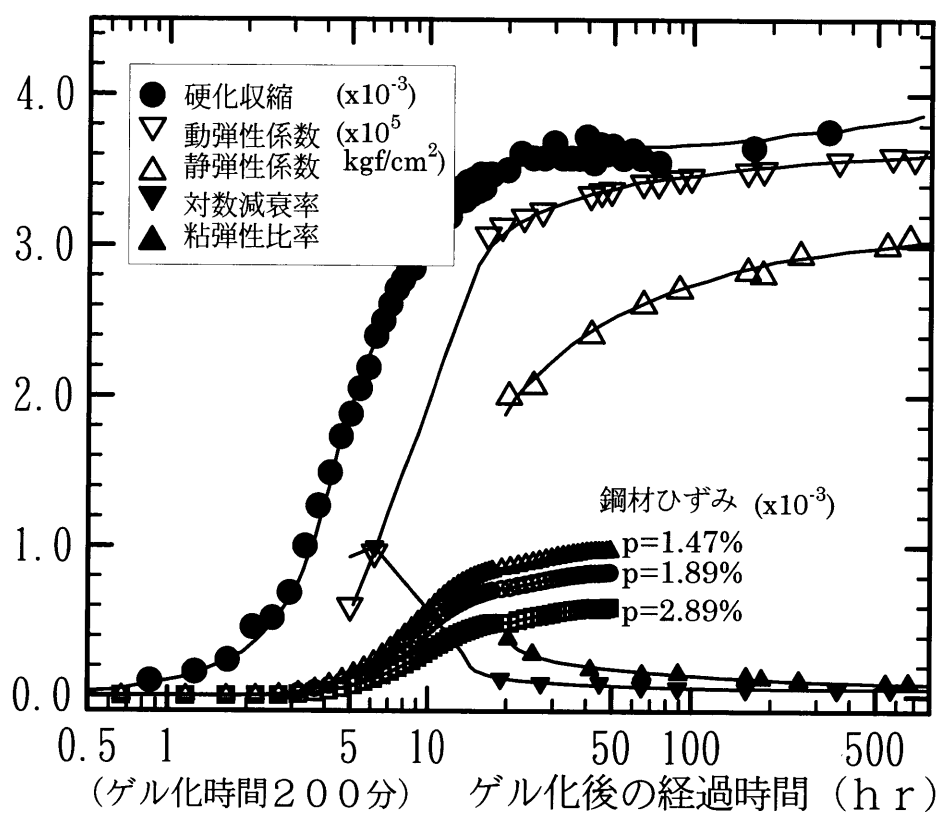


図 4-7 実験-2での諸物性の経時変化

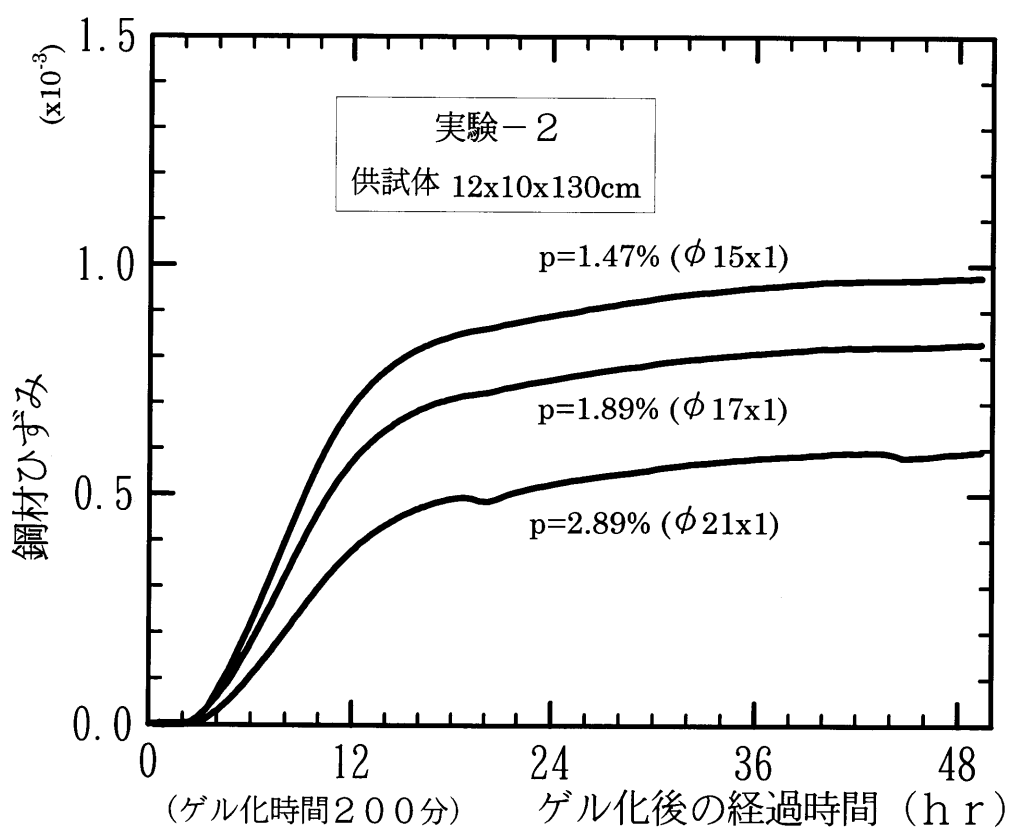


図 4-8 供試体中央の鋼材ひずみの経時変化



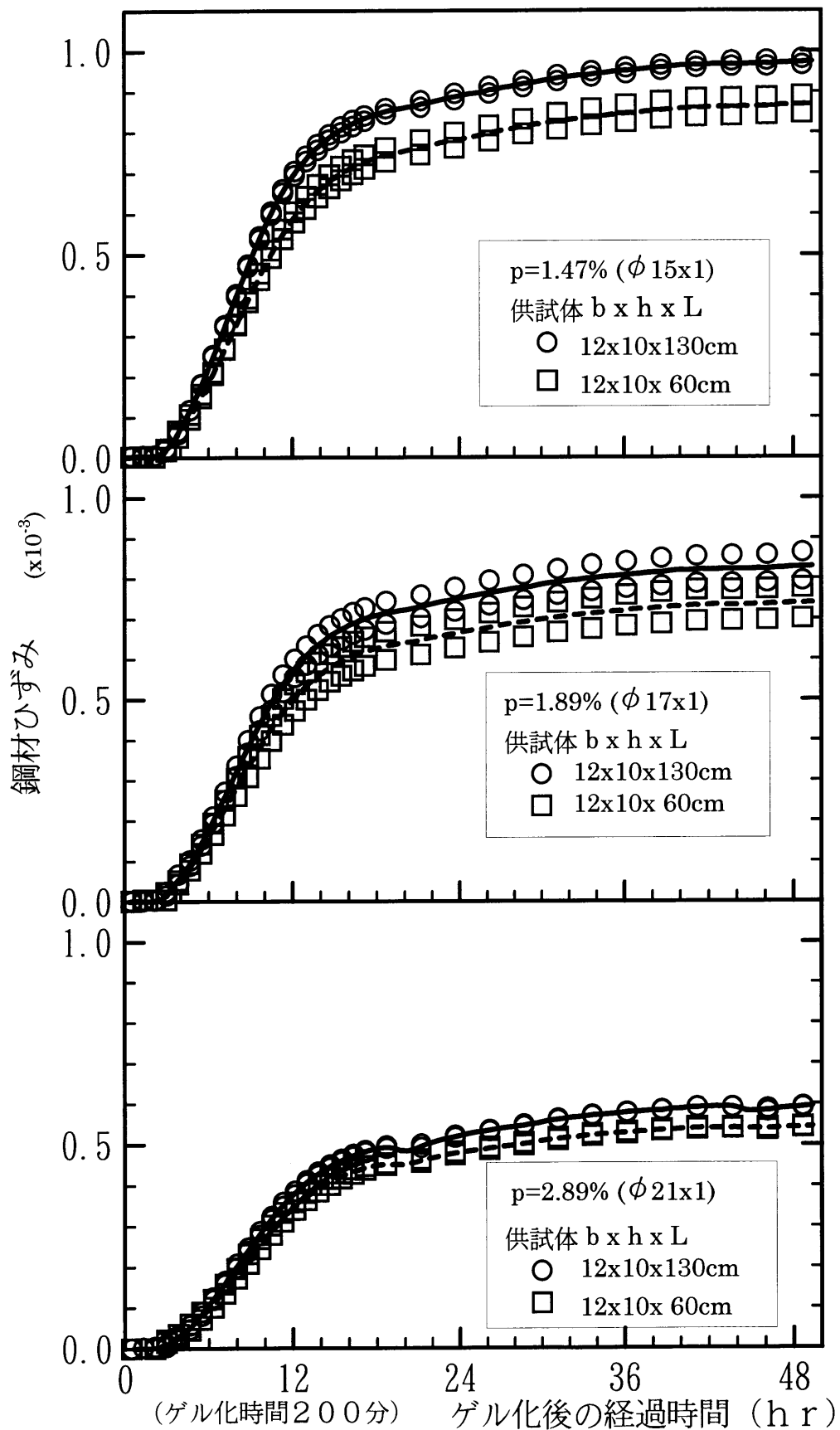


図 4-9 供試体長さと鋼材ひずみの関係

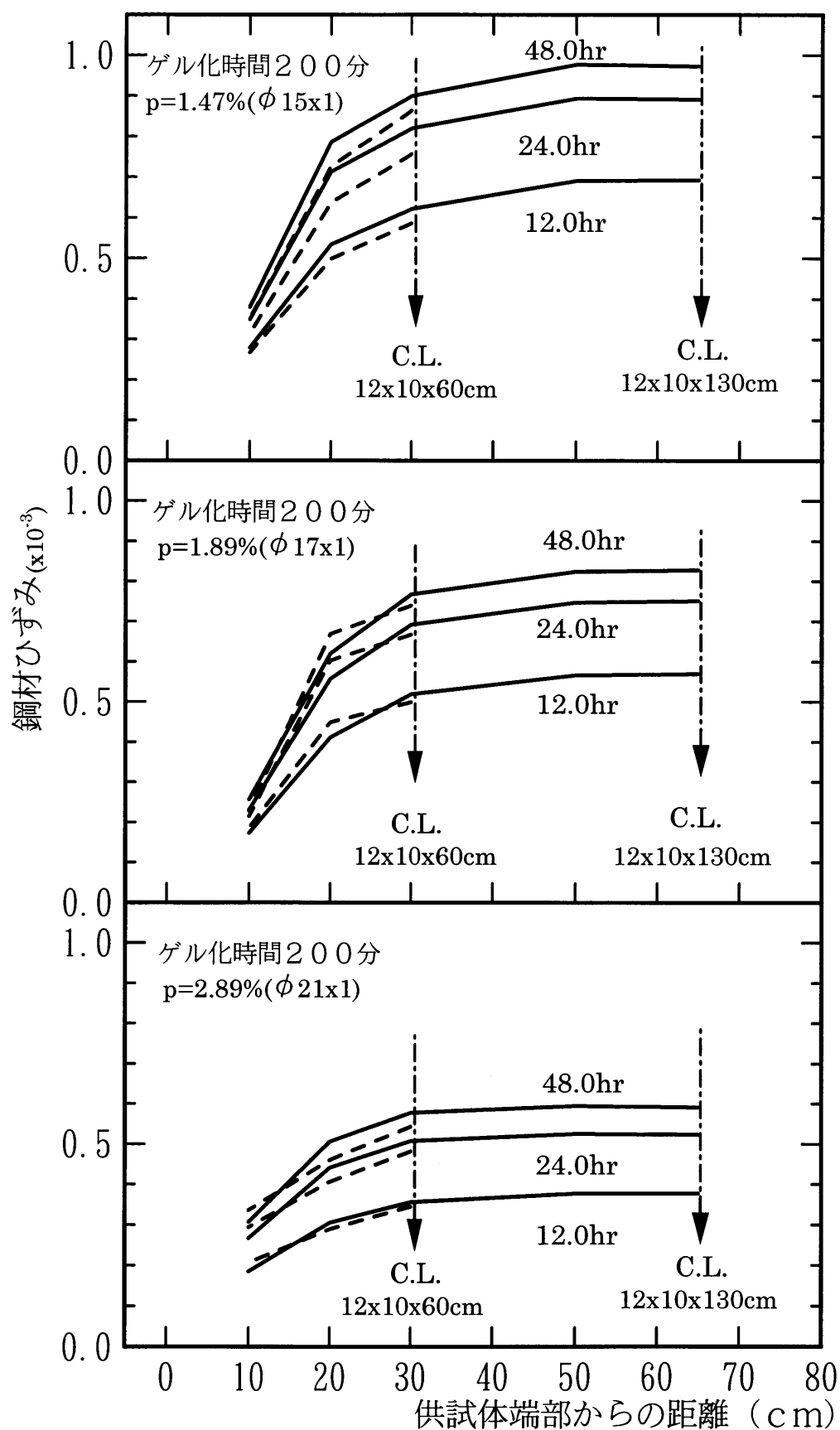


図 4-10 供試体長さで鋼材ひずみの分布の関係

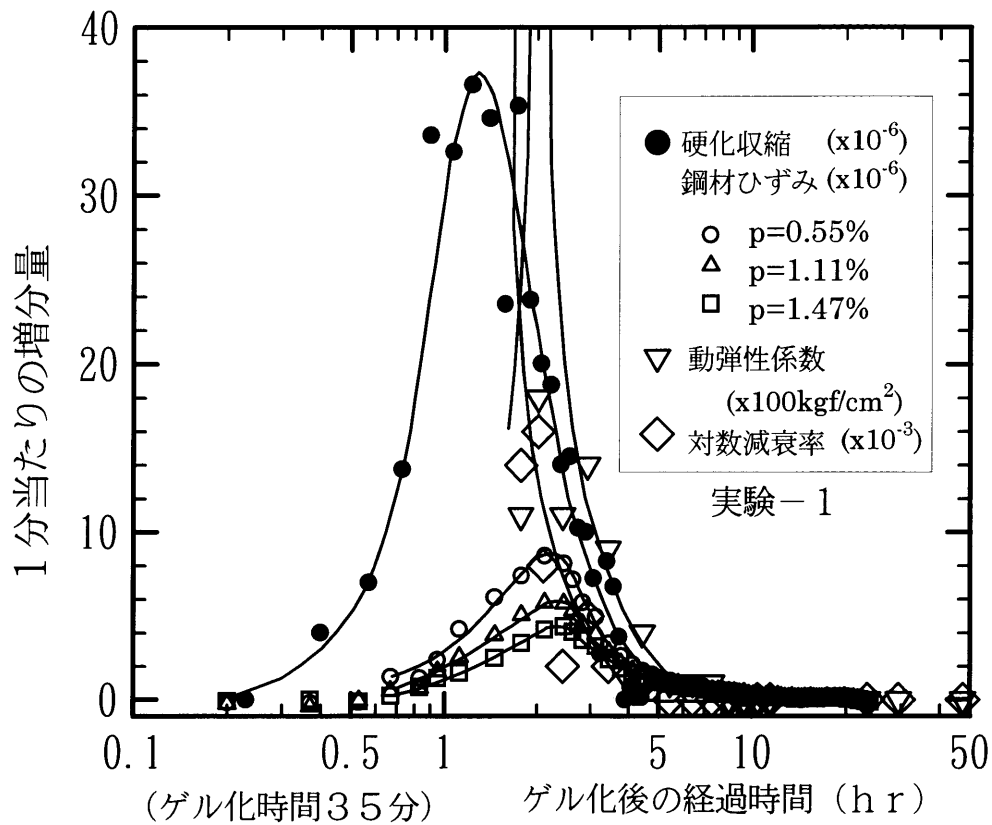


図 4-11 収縮・ひずみ等の増分の経時変化

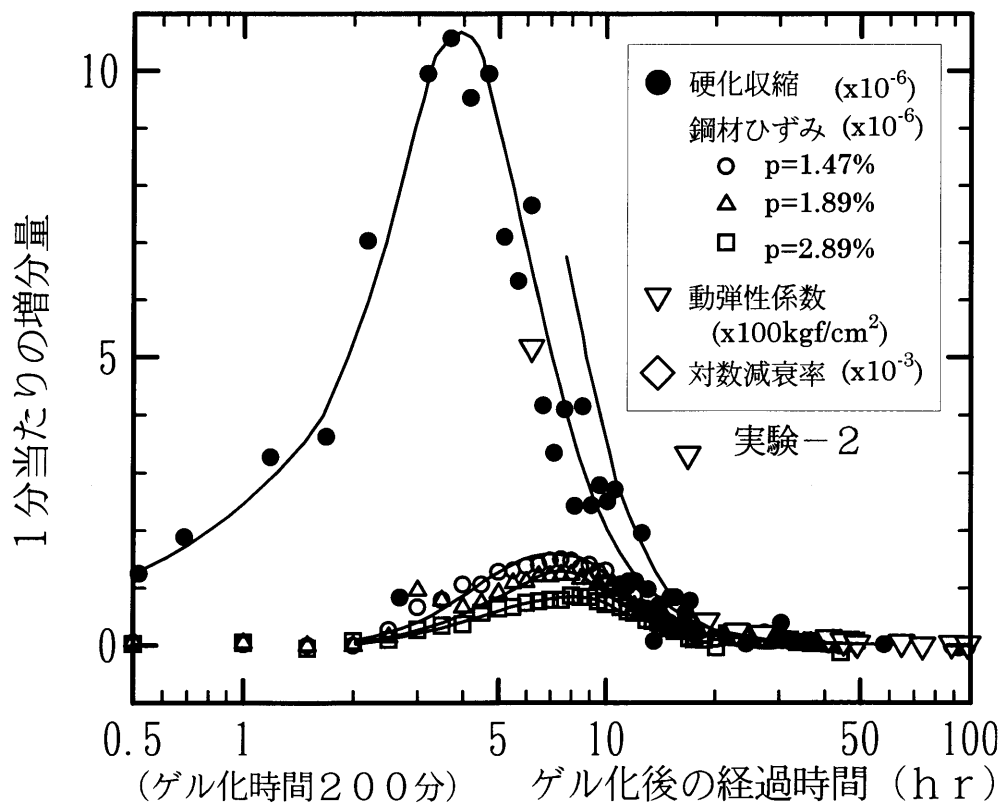


図 4-12 収縮・ひずみ等の増分の経時変化

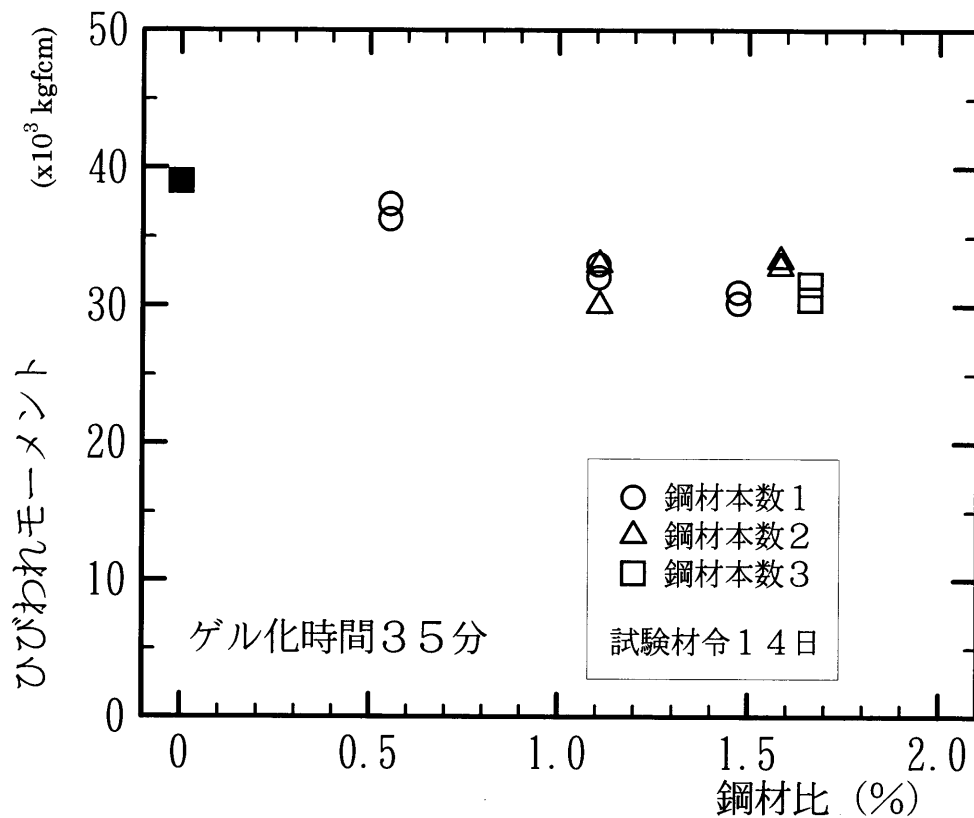


図 4-13 ひび割れモーメントと鋼材比の関係

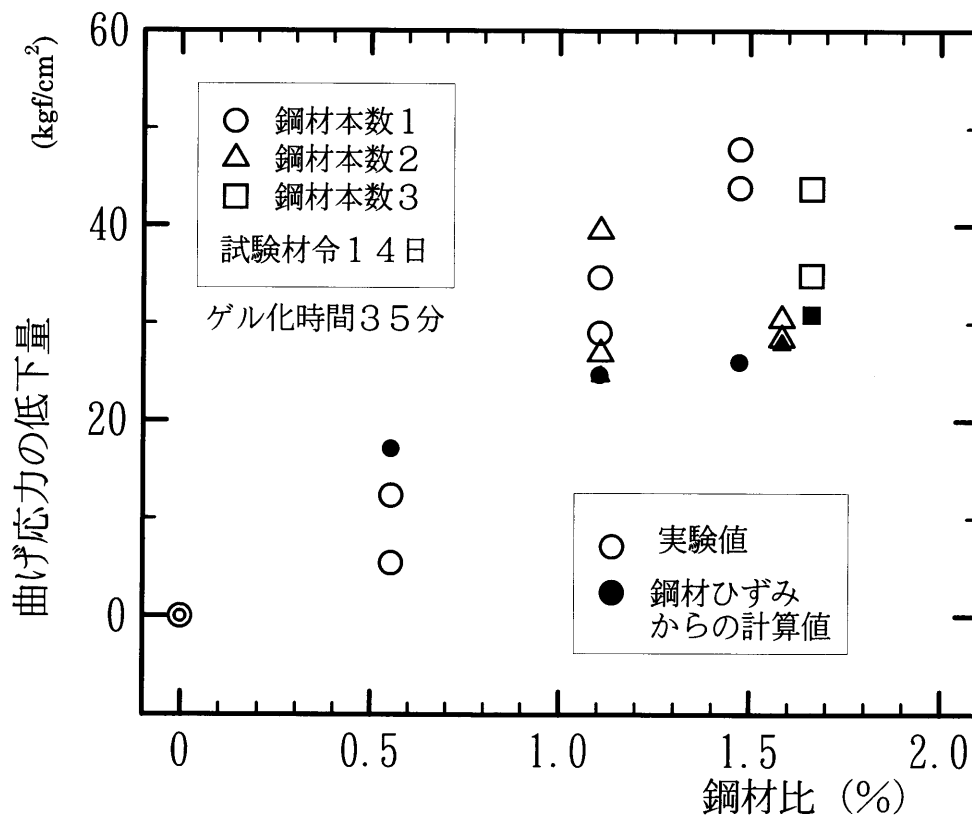


図 4-14 曲げ応力低下量と鋼材比の関係

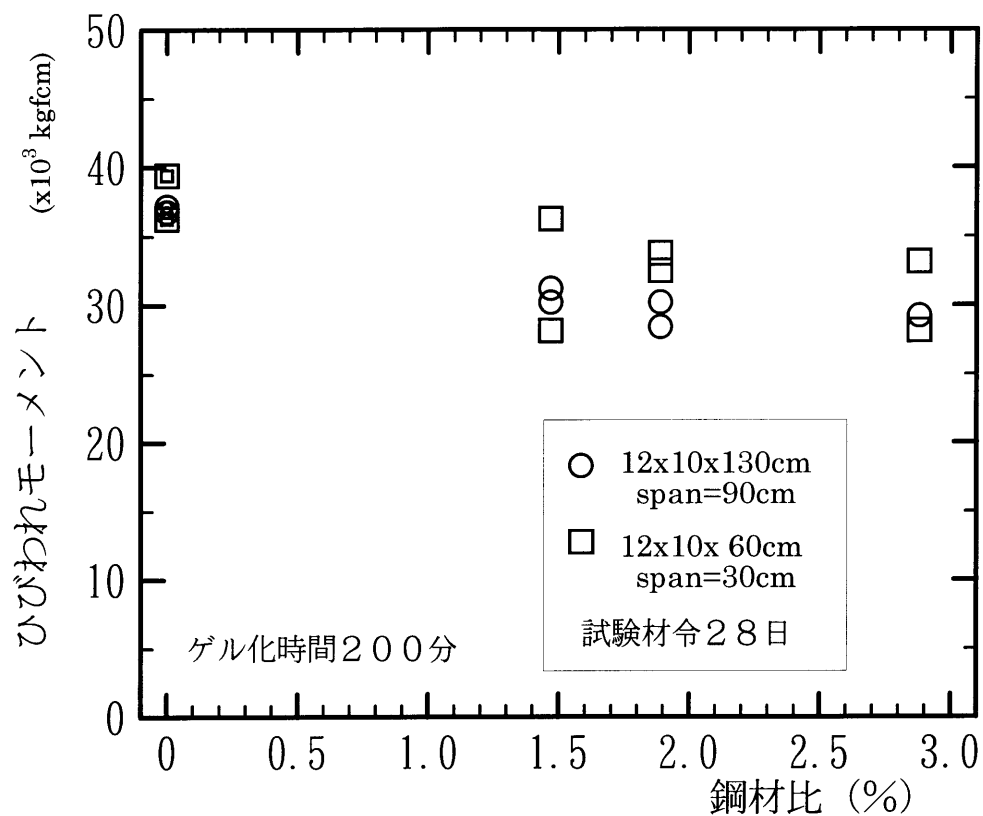


図 4-15 ひび割れモーメントと鋼材比の関係

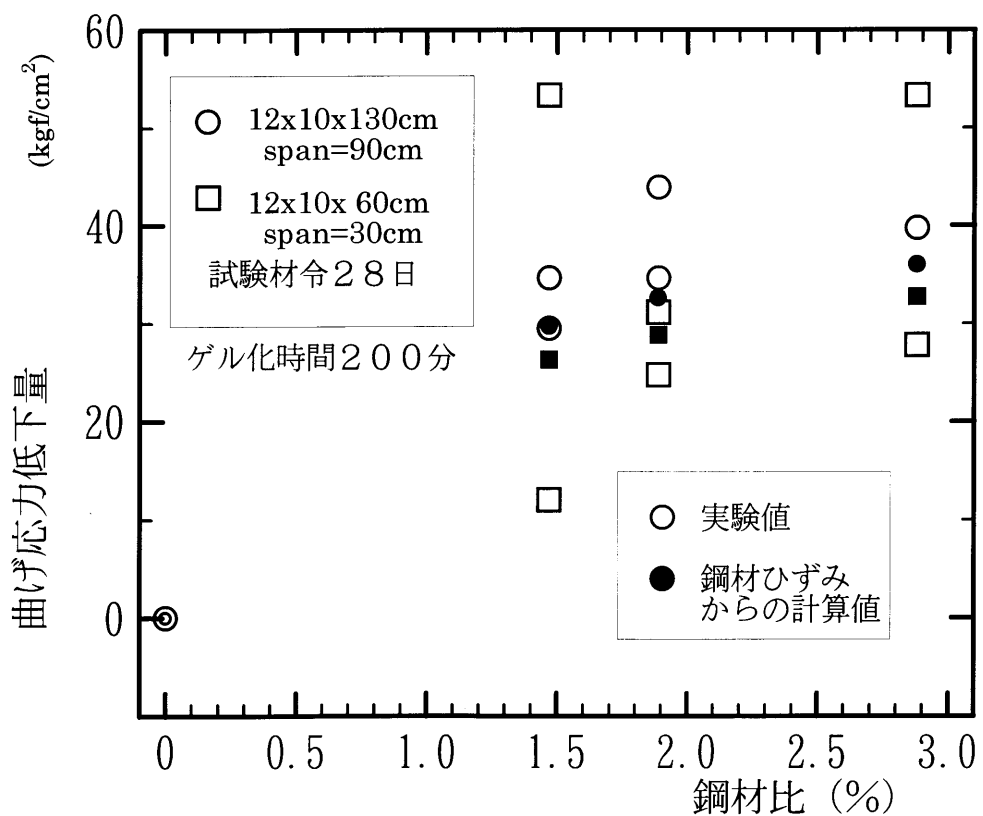


図 4-16 曲げ応力低下量と鋼材比の関係

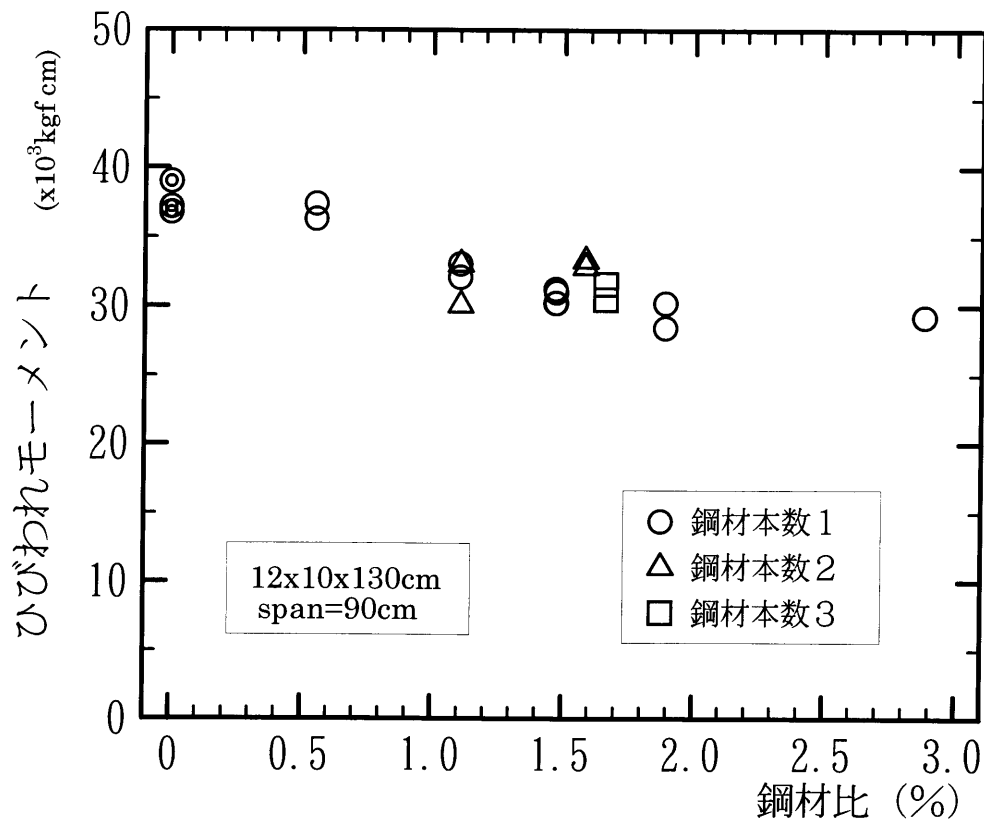


図 4-17 ひび割れモーメントと鋼材比の関係

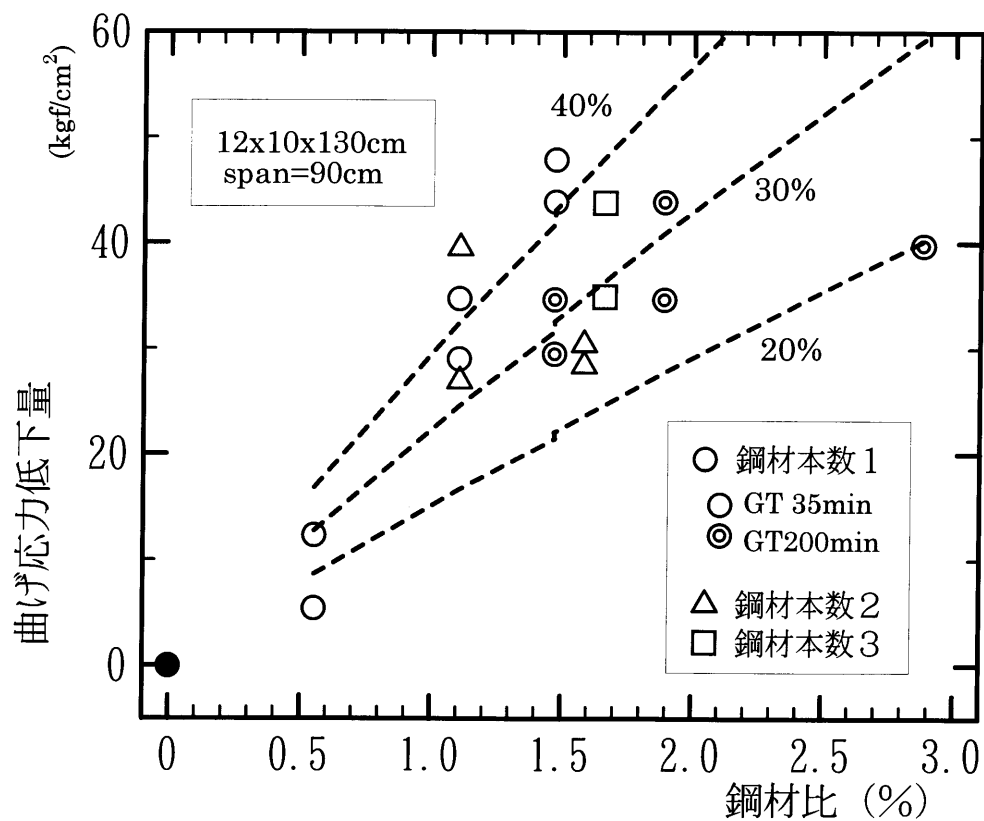


図 4-18 曲げ応力低下量と鋼材比の関係

## 5 レジンコンクリートの構造設計に対する提言

### 5. 1 まえがき

レジンコンクリートの構造設計計算に関する基準としては、1985年に日本材料学会コンクリート工事用樹脂委員会（岡田委員長）から出された、「ポリエステルレジンコンクリート構造設計計算指針（案）」が唯一あるのみである。これは、通常のセメントコンクリート構造の設計方法に準拠しているが、R E Cの多様な特性を考慮に入れた材料特性に基づく構造設計についての、一つの考え方を盛り込んだものである。しかしながらこれは力学的性質が十分判明している範囲を対象としていたために、諸特性の温度依存性、硬化収縮による内部応力などの問題については明確にしておらず、今後の検討の必要性を指摘しているのみである。しかし、この基準の制定以降においてR E Cの構造利用が増加しているにも関わらず、この基準の改訂あるいはこの種基準の新たな制定などに対する具体的、組織的な動向は少ない。これは、この指針（案）が完全無欠であるためではなく、R E Cの構造利用が増加したとは言え、セメントコンクリートのそれに比べれば見えない程のわずかな用途と量であり、不特定の設計者が設計を行う機会あるいは不特定の管理者がその設計を吟味する機会が少ないためと考えられる。さらに、その構造利用も工場製品としての利用が多いために構造設計計算自体が企業のノーハウとして保護されており、製品の最終性能だけの評価で利用されているためとも考えられる。しかし、今後、R E Cの多様な特性を活用してその構造利用が増加すると、構造設計計算は技術的合意に基づいて行われる必要があり、特に設計の吟味はこの合意により実施されるべきである。

本章では、各章の検討で得られた結論にもとづき、「ポリエステルレジンコンクリート構造設計計算指針（案）」の補足ならびに改訂に対する提言を試みて、本論文の結論とする。

### 5. 2 指針（案）への提言

ここで対象とする「ポリエステルレジンコンクリート構造設計計算指針（案）」の内容を末尾に付録として示す。

#### 5. 2. 1 適用範囲に対する提言

第3章でR E Cの変形特性の温度依存性について検討し、温度依存性は使用樹脂により個々に決まるものであり、R E Cにも熱変形温度があることを明らかとした。まず第一にこれを指針（案）の1に追加することを提言する。さらにR E Cの曲げ強度はその圧縮強度の1/4～1/6程度であり、圧縮強度を規定すれば曲げ強度を規定したことになる。しかしながら、R E Cの構造利用の形態では曲げ部材が主体であり、かつ補強鋼材の防蝕の関係からひびわれ発生が主要な限界状態なる。従って、その曲げ強度にも下限として圧縮強度の1/5程度である150kgf/cm<sup>2</sup>を追加することを提案する。

これらの提言を加えて元の指針（案）を書き改めるとつぎのようになる。

#### 1 適用範囲

本指針（案）は・・・・・・・・・。

本指針（案）は、原則として構造物の最大部材厚さが20cm以下であり、構造物の使用される環境温度が50℃以下、かつRECの熱変形温度が50℃以上、RECの圧縮強度が800kgf/cm<sup>2</sup>以上、曲げ強度が150kgf/cm<sup>2</sup>以上また静ヤング係数が1.5x10<sup>5</sup>kgf/cm<sup>2</sup>以上の材質のものを対象とする。

### 5. 2. 2 RECの諸性質に対する提言

第2章でRECの強度などの設計用値の採用材令について検討し、ゲル化後48時間を経過すれば特性の90%以上が発現することが確認された。これを指針（案）の4. 1（1）とその解説に追加することを提言する。

また第3章でRECの熱特性の比熱および熱伝導率を得た。さらにRECの変形特性の温度依存性については、依存性の変化点が対数減衰率の測定から決定できることを明らかにした。これを指針（案）の4. 1（3）の解説に追加することを提案する。

これらの提言を加えて元の指針（案）を書き改めるとつぎのようになる。

#### 4 材料特性と設計用値

##### 4. 1 RECの諸性質

（1）RECの設計基準強度は、試験強度の保証値とする。・・・・・・・・・。RECの引張強度はJISA1185（ポリエステルレジンコンクリートの引張強度試験方法）によって求める。なお、強度試験の材令は48時間以上とする。RECの強度試験においては、供試体寸法は原則としてREC部材寸法と同程度のものを用いるものとする。

#### 解説

（4. 1）について

（1）について 設計計算に用いる上での材料強度の・・・・・・・・・  
・・・，圧縮強度試験はJISA1182，1183のいずれによってもよいこととした。また、RECの物性は硬化条件が適正であれば、硬化の速い場合は24時間で、遅い場合でも48時間で90%以上発現するため。ただし硬化の条件が悪いと7日程度を要することもある。



#### 4・1 RECの諸性質

##### 解説

(3)について RECのクリープや体積変化などのような、上記に規定した強度ならびにヤング係数以外の材料特性や諸特性の温度依存性については、現在のところ十分な資料が蓄積されているわけではないので、設計上これらが必要となる場合には原則的には信頼できる既往の資料か、それが得られない場合には実験値をもととしてこれらの材料特性の設計上のモデル化を行うこととした。RECの変形性状の温度依存性には顕著な変化点があり、これは使用樹脂の熱変形温度により決まりその温度以下である。温度依存性の変化点はRECの対数減衰率の変化で求めることができる。なお、設計計算上の目安として線膨張係数、単位重量およびクリープ係数の概略値を示した。従来からの実験によれば、線膨張係数は $14 \sim 20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、単位重量は $2300 \sim 2400 \text{ kg/m}^3$ であり、クリープ係数は測定値のばらつきと共に温度依存性が非常に大きい $20^{\circ}\text{C}$ において $0.2 \sim 0.5$ となっている。温度が高くなるにつれて、クリープ係数は飛躍的に大となる。また、比熱は $0.8 \text{ J/g}^{\circ}\text{C}$ 、熱伝導率は $1.5 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ 程度である。

#### 5.2.3 ひびわれ曲げモーメントに対する提言

第4章でRECの硬化収縮の補強材による拘束に伴う内部応力の実用的な推定は、硬化収縮の $20 \sim 40\%$ が拘束に寄与するとして、断面の力の釣り合いより行えることを明かとした。これを指針(案)の5.2の解説に追加することを提言する。

この提言を加えて元の指針(案)を書き改めるとつぎのようになる。

#### 5・2 ひびわれ曲げモーメント

##### 解説

(5・2)について

UPは硬化時の収縮が大であるため、  
....., また補強材のヤング係数が  
大きいほど大である。この量をUPの硬化収縮量から直接精度よく推定することは未だ定式化されていないが、RECの硬化初期における収縮は内部応力の発現には寄与しないため、RECの最終収縮量の $20 \sim 40\%$ が拘束に寄与するとして推定することができる。この推定に使用するRECのヤング係数は、実験によって確かめられた値とすることが原則であるが、 $20^{\circ}\text{C}$ で $2.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ としてもよい。

### 5. 3 まとめ

5. 2 節で、本研究から得られた結論を指針（案）に追加することを提案した。一方本研究の過程および著者の20年間のRECとの付き合いにより得た結論として、厳選した良好な骨材等を使用し、管理された工程で生産することは当然であるが、RECの主要な特性の大部分が、使用樹脂のそれによって決定されると言える。しかしながら、REC用UP樹脂としての規格があるわけでもなく、またこれに関して、樹脂の製造者およびRECとしての使用者ならびにRECの研究者との間で、議論されたことも少ないと思う。勿論、その種の制約がないことが、種々の特徴を持った樹脂を利用して、種々の特徴のあるRECが作れる訳ではある。しかしながら構造材料としてみた場合には、RECの強度や変形特性にある程度の制約が必要と考える。著者の経験から得たRECの製造および特性向上による用途拡大の見地から、構造材料用RECの結合材の不飽和ポリエステル樹脂に要望される幾つかの理想性能のを挙げておく。勿論、これら性能が個々に満足された樹脂はすでに存在しているが、必要なのは同時に満足されることであり、樹脂の製造者からは矛盾する要求であり、製作不可能との返答があることも予測している。

今後、RECの製造者や研究者がますます増えて、この種の問題に関する議論の結果としてより良いREC用樹脂が開発され、さらにRECの構造利用の用途が増加することを期待する。

圧縮強度 : 1500 kgf/cm<sup>2</sup>以上  
曲げ強度 : 1500 kgf/cm<sup>2</sup>以上  
引張強度 : 1500 kgf/cm<sup>2</sup>以上  
体積収縮率 : 1%以下  
熱変形温度 : 120℃以上  
伸び率 : 10%以上  
粘度 : 2ポイズ以下(20℃)  
硬化性特性 : ゲル化時間に関わらず、最高発熱温度および  
最高発熱時間とゲル化時間との差が一定であること。

## <謝辞>

本論文は著者が岐阜大学大学院博士課程で行った研究をまとめたものである。

本論文をまとめる機会を与えていただき、会社業務の合間を縫って出席すら常ならぬ白髪頭の不良学生に対し、終始ご厚情ある御指導、御鞭撻を賜った岐阜大学 小柳 治教授に深く感謝の意を表します。

また、本研究を実施するにあたり、終始あたたかい御指導、御鞭撻を賜りました岐阜大学 六郷 恵哲教授、同 森本 博昭教授、同 内田 裕市助教授、同 栗原 哲彦助手に心より感謝申し上げます。

とくに小柳先生には、著者が名阪工材株式会社に入社してレジンコンクリートと関わって以来現在に至るまでの20数年に渡り、研究の御指導は言うに及ばず、その他公私に渡り御教示をいただきましたことを、重ねて、厚くお礼申し上げます。

最後に、著者の大学院への入学を許可していただいた、株式会社サンレック 村井 信夫会長、同 小野 文朗社長、ならびに研究の実施にあたり御理解、御協力をいただいた上司、同僚の方々に深く感謝申し上げます。

## 付 録

# ポリエステルレジンコンクリート構造設計計算指針（案）

日本材料学会 コンクリート工事用樹脂委員会

### 目 次

- 1 適用範囲
- 2 設計の前提
- 3 設計計算に関する一般事項
  - 3・1 総則
  - 3・2 強度設計の区分
  - 3・3 強度設計と計算上の仮定
  - 3・4 不静定力または弾性変形の計算上の仮定
- 4 材料特性と設計用値
  - 4・1 R E C の諸性質
  - 4・2 補強材の諸性質
- 5 部材強度の算定
  - 5・1 許容応力度
  - 5・2 ひびわれ曲げモーメント
  - 5・3 終局耐力

## 1 適用範囲

本指針（案）は、不飽和ポリエステル樹脂を結合材とするレジンコンクリート（以下ＲＥＣと略）を構造物に用いる場合の、構造部材の設計計算を行う上でのひとつの標準を示すものである。

本指針（案）は、原則として構造物の最大部材厚さが２０ｃｍ以下であり、構造物の使用される環境温度が５０℃以下、かつＲＥＣの圧縮強度が８００kgf/cm<sup>2</sup>以上、また静ヤング係数が $1.5 \times 10^5$ kgf/cm<sup>2</sup>以上の材質のものを対象とする。

## 解説

ＲＥＣは、合成樹脂を用いて粗細骨材を結合したものであり、圧縮・引張り・曲げ等の高強度性に加えて、耐食性、耐候性、水密性、絶縁性を始めとする種々の特長を利用して各種の構造利用が計られている。

ＲＥＣの結合材としては、エポキシ樹脂、メタクリル酸メチル等も使用されているが、現在わが国で最も使用量が多く、かつ最も実験データの豊富な不飽和ポリエステル樹脂（以下ＵＰと略）を結合材とするＲＥＣを本指針（案）の対象とした。ＵＰ以外の結合材を用いたＲＥＣについても、その特性がＵＰを用いたＲＥＣと大きく変わらないことが確かめられているならば、本指針（案）を用いて部材の設計計算を行えばよい。

構造設計は、構造物の使用が予定される期間にわたって、外的作用に対する安全性、耐久性、使用性の要件を経済的に満たすようにその機能を保持する其体的な方法を策定することである。本指針（案）はこの構造設計の中で、とくに構造物の力学解析と部材断面の決定に関する構造部材の力学特性に関連した部材の設計計算に限定して、ひとつの設計標準を示すものである。ＵＰを用いたＲＥＣの力学特性は、温度依存性が大であること、ＲＥＣは地中構造を中心として構造利用されていること等を考慮して、ここでは構造物としての設計計算を行う上での対象とする温度範囲を５０℃以下と設定している。なお、従来からのＲＥＣ構造のほとんどがプレキャスト製品であるため圧縮強度は１０００kgf/cm<sup>2</sup>以上であるが、現場打設の低強度のＲＥＣも考えられる。ここでは、ＲＥＣの打設方法は問わず、従来より力学特性について十分判明している範囲として、本指針（案）の適用範囲としてＲＥＣの圧縮強度を８００kgf/cm<sup>2</sup>以上、静ヤング係数を $1.5 \times 10^5$ kgf/cm<sup>2</sup>以上とした。これらの条件をはずれる場合は従来から求められているＲＥＣの性質とは異なる材料特性を有することもあると考えられるため、実験によってＲＥＣの材料特性を求めてこれを設計に反映する必要があることとした。

ＲＥＣは硬化時に発熱ならびに硬化収縮を生ずるため、部材寸法が大きくなると温度ひびわれが生ずることもある。そのため、従来からＲＥＣの部材厚の最大値は実用上ある範囲に限られ、また部材の力学特性の試験も部材厚の限られた供試体によって得られている。これらの理由によって本指針（案）では最大部材厚が２０ｃｍ以下を対象とすることとした。部材厚がこれより大きい場合には、別途に硬化時発熱による温度上昇の影響や、部材強度の寸法効果について検討する必要がある。

## 2 設計の前提

R E Cを用いた構造物の設計計算にあたっては、次の諸事項については、明らかにされているか、あるいは別途に定められるものとする。

- A. 構造物に作用する荷重
- B. 構造物の使用される温度範囲およびその他の環境条件
- C. 構造物に要求される強度およびその他の特性

### 解説

構造物の設計計算においては、外力作用の下での構造材の応答を求め、適切な安全率の下に部材寸法を定めることとなる。R E C構造物に作用する外力は、他の材料を用いた同種の構造物と同一であり、とくに鉄筋コンクリート構造物については、コンクリート標準示方書（以下R C示と略）、道路橋示方書等種々の規準類の中に荷重の規定があるため、本指針（案）の中では構造物に作用する荷重については取扱わず、別途に定められているものとした。なお、地下埋設物などでは、施工時の荷重が最も大きくなる可能性が高い。R E Cの力学特性が一般に大きな温度依存性を有することから、設計に先立って構造物が使用される温度範囲および構造物がおかれる環境条件（気中、水中、土中等）をあらかじめ明確にすることが必要である。R E Cは強度特性以外の耐食性、耐侯性、水密性、絶縁性等の種々のすぐれた性能を考慮して構造利用がなされることが多い。これらの性能に対する評価方法や、それらを直接設計に導入する方法については本指針（案）に述べるにはいたらなかったが、R E Cの構造利用の上で今後の重要検討課題である。

## 3 設計計算に関する一般事項

### 3・1 総則

R E C構造物の解析は、弾性理論によって行うことを原則とする。

### 3・2 強度設計の区分

R E C構造部材の設計計算の上で、R E Cの強度の利用形態と部材の種別によって次のタイプⅠ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳの4種類に区分する。

(a)タイプⅠ：R E Cの曲げ強度を利用する曲げ部材であり、使用限界は許容応力度を、終局限界はひびわれ発生をもとに考えるものとする。

(b)タイプⅡ：R E Cの圧縮強度を利用する曲げ部材であり、使用限界はひびわれ発生を、終局限界は補強材あるいはR E Cの降伏や破壊による部材耐力をもとに考えるものとする。

(c)タイプⅢ：R E Cの圧縮強度を利用する圧縮部材であり、使用限界は必要であれば許容応力度を、終局限界は部材耐力をもとに考えるものとする。

(d)タイプⅣ：その他の部材

### 3・3 強度設計と計算上の仮定

(1)タイプⅠの部材の部材強度、あるいはタイプⅡの部材の曲げひびわれ発生限界状態の検討は、線形弾性応力分布の仮定の下に、R E C全断面が有効であるとして補強材断面のヤング係数を換算した換算断面を使用して求めたR E C部材の応力度が、各タイプの部材に応じて定められた許容応力度あるいは限界応力度以下であることを確かめることによって行う。

(2)タイプⅡの部材およびタイプⅢの部材の終局限界状態の検討は、荷重によって生ずる断面力が、所要の安全性をもって、材料の非弾性性質を考慮して求めた断面耐力の値以下であることを確かめることによって行う。

### 3・4 不静定力または弾性変形の計算上の仮定

ひびわれを生じない断面の不静定力の計算には、一般に補強材を無視したR E C部材の断面二次モーメントを用いてよい。ただし、弾性変形およびひびわれを生じた断面の不静定力の計算には、補強材の影響およびひびわれの影響を考慮した断面二次モーメントを用いるものとする。

R E Cおよび補強材のヤング係数は、断面の応力計算に用いるものと同一とする。

## 解説

### (3・1) について

R E C構造物の各部材に生ずる曲げモーメント、せん断力、軸方向力等あるいはそれに伴って生ずる応力度は、原則として弾性理論によって計算するものとした。なお複雑な構造物の部材の断面力を求める上では、通常行われているような適切な近似解法によればよい。

### (3・2) について

R E C部材の断面設計を行う上で、R E Cのどのような強度特性を利用するかによって設計計算の方法を変えることが考えられるため、強度の利用形態と部材の種別によって4種類のタイプに区分した。

**タイプⅠ：**R E Cの高曲げ強度特性を利用するものであり、曲げひびわれの発生を主要な限界状態とする設計である。R E Cは曲げ強度が高いものの、セメントコンクリートのような高アルカリ性による鋼材防食の効果を有しないため、通常のR E Cの曲げ部材ではこのタイプの利用形態が中心になるものと考えられる。このタイプの部材においても曲げひびわれの発生後直ちに部材の耐力が失われないようにするため、構造的な拘束によって応力再配分が期待できる場合を除けば、一般に適切な補強によってじん性を確保することが必要となる。このときには強度設計に加えてじん性設計を行うことが考えられる。じん性設計の手法は未だ確立はされていないが、部材もしくは断面の有するじん性すなわちエネルギー吸収能を一定値以上とする方法や、破壊時の解放エネルギーを制御して不安定な破壊を生じさせないようにする方法が考えられる。

**タイプⅡ：**通常の鉄筋コンクリートはりのように、R E Cで圧縮力をまた補強材で引張力を受けもつようなはりやスラブ部材である。このような部材に対しては、ひびわれ発生限界および終局限界状態に関する所要の検討が必要である。とくに、終局限界状態に関しては曲げとせん断に対する検討が中心となり、また補強材の設計が重要となる。

タイプⅢ：軸圧縮力を受ける柱や杭等の圧縮部材である。このような部材の設計では、部材の圧縮耐力に加えて挫屈に対する検討が必要となることがある。

タイプⅣ：ＲＥＣの引張強度を利用する部材その他が考えられるが、具体的な利用形態の部材は当面は見当らない。

### （３・３）について

（１）について 本指針（案）で定められた５０℃以下という温度範囲においては、ＲＥＣの変形特性はほぼ弾性的と考えられるため、曲げひびわれ発生限界に関する解析は、線形弾性解析によることにした。

ＲＥＣの高強度を利用する上では、タイプⅠの部材では補強材の量が比較的大となることが多いことから、その影響を無視しない方がよいとして、応力計算の上でも補強材のヤング係数を考慮した換算断面を用いるものとした。しかし、補強材の量が比較的小さい場合や補強材とＲＥＣのヤング係数の差が大きくない場合には、必ずしも換算断面を用いなくてもよい。

（２）について 圧縮応力下のＲＥＣの応力－ひずみ曲線は最大応力近傍では線形関係から大きくはずれるため、圧縮および曲げ荷重下でのタイプⅡおよびタイプⅢの部材の終局耐力は、通常のＲＣの柱やはりと同様に応力－ひずみ曲線の非線形性を考慮して耐力を算定することとした。なお、所要の安全率は式（５・１）の $\gamma$ と同様の項目をもとにして定めるものとする。

### （３・４）について

最も利用形態が多いと考えられるタイプⅠのＲＥＣ部材は、ひびわれを生じない範囲を対象としている。不静定力の計算には断面二次モーメントの比を用いるのでこのような部材の場合、補強材を無視することによる断面二次モーメントの誤差は少ない。したがって不静定力を計算する場合の断面二次モーメントには簡略化して補強材の影響を無視してよいこととした。ＲＥＣ部材にひびわれを生じた場合は、断面二次モーメントが低下するためこれを考慮しなければならない。すなわち、ＲＥＣの非ひびわれ部分と補強材との合成断面として断面二次モーメントを求める必要がある。弾性変形の計算においては、補強材の影響を考慮した方が厳密であるため、補強材を含めて断面二次モーメントを求めることとしたが、補強材を無視した場合との差が少なければ、簡便のためこれを無視してもよい。

セメントコンクリートでは断面の応力計算時と変形計算時とのヤング係数を変えているが、ここでは簡略化してＲＥＣの不静定力および弾性変形の計算に用いるヤング係数は、断面の応力計算に用いるものと同一とすることとした。



## 4 材料特性と設計用値

### 4・1 RECの諸性質

(1) RECの設計基準強度は、試験強度の保証値とする。保証値とは、試験値のばらつきを想定したうえで、大部分の試験値がその値を下まわらないことが保証される値である。

RECの圧縮強度はJIS A 1182 (ポリエステルレジンコンクリートの圧縮強度試験方法)あるいはJIS A 1183 (はりの折片によるポリエステルレジンコンクリートの圧縮強度試験方法)によって求める。

RECの曲げ強度はJIS A 1184 (ポリエステルレジンコンクリートの曲げ強度試験方法)によって求める。RECの引張強度はJIS A 1185 (ポリエステルレジンコンクリートの引張強度試験方法)によって求める。

RECの強度試験においては、供試体寸法は原則としてREC部材寸法と同程度のものを用いるものとする。

(2) RECのヤング係数は、構造物の使用される環境温度に対応した値を用いる場合には、実験によって確かめられた値を用いることを原則とする。

一般には、RECのヤング係数は20℃において $2.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ としてよい。

(3) RECの応力 - ひずみ関係、強度および変形性状の温度依存性、クリープ性状などの力学的性質、線膨張係数、硬化収縮、絶縁性、単位重量などの物理的性質、耐食性、耐水安定性、難燃性などの化学的性質が部材設計上必要とされる場合には、それらの設計に用いる値は原則として既往の資料によるかまたは試験値をもとに定めるものとする。

一般には20℃においてRECの線膨張係数は $18 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 、単位重量は $2400 \text{ kg/m}^3$ 、クリープ係数(クリープひずみの弾性ひずみに対する比)は0.5を用いてよい。

### 4・2 補強材の諸性質

(1) 補強材として鋼材を用いる場合は、JISに規定されているものを用いるものとし、その設計基準強度はJISに規定される保証値とする。

上記以外の補強材については、その強度は既往の資料によるかまたは試験値をもとに定めるものとする。

(2) 鋼材のヤング係数は $2.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ としてよい。

鋼材以外の補強材のヤング係数は既往の資料によるかまたは試験値をもとにして定めるものとする。

(3) 補強材の応力 - ひずみ曲線、クリープ特性、その他の諸性質が部材設計上必要な場合には、それらの設計用値は原則として既往の資料によるかまたは試験値をもとに定めるものとする。

## 解説

### (4・1) について

(1) について 設計計算に用いる上での材料強度の設計用値は、試験強度の保証値として与えられる設計基準強度によって表すこととした。R E Cの各種の強度試験の方法はJ I Sが定められており、強度試験にはそれらを用いることとした。なおR E Cの圧縮強度はセメントコンクリートと異なり、円柱供試体による場合とはりの折片による場合との差がほとんどみられないため、圧縮強度試験はJ I S A 1182, 1183のいずれによってもよいこととした。R E Cの強度は供試体寸法が大きくなるにつれて小さくなるといういわゆる寸法依存性がセメントコンクリートよりも大きい。このため、R E Cの強度試験用供試体の寸法は、対象とするR E C部材の寸法とほぼ同程度とすることが望ましい。

(2) について R E Cのヤング係数は、U Pの種類と量によって異なると共に、温度によって大きく変化する。このため構造物の使用される環境温度に対するヤング係数を用いる必要がある場合あるいはヤング係数を厳密に求める必要がある場合には、実測値によってこれを求めることを原則とした。しかし、ヤング係数の真の値や温度依存性が問題とならない場合には、ヤング係数の概略の値として総則では $1.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 以上としているものの、 $20^\circ\text{C}$ において $2.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ としてよいこととした。なおモルタルのように骨材量が相対的に少なくなるとヤング係数は低下する。また、骨材種別によっても変化する。

(3) について R E Cのクリープや体積変化などのような、上記に規定した強度ならびにヤング係数以外の材料特性や諸特性の温度依存性については、現在のところ十分な資料が蓄積されているわけではないので、設計上これらが必要となる場合には原則的には信頼できる既往の資料か、それが得られない場合には実験値をもととしてこれらの材料特性の設計上のモデル化を行うこととした。なお、設計計算上の目安として線膨張係数、単位重量およびクリープ係数の概略値を示した。従来からの実験によれば、線膨張係数は $14 \sim 20 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 、単位重量は $2300 \sim 2400 \text{ kg/m}^3$ であり、クリープ係数は測定値のばらつきと共に温度依存性が非常に大きいが $20^\circ\text{C}$ において $0.2 \sim 0.5$ となっている。温度が高くなるにつれて、クリープ係数は飛躍的に大となる。

### (4・2) について

(1) について 補強材としては、部材を補強する鉄筋コンクリート用棒鋼、P C鋼材、F R Pロッドなどのほか、材料を補強する鋼繊維、ガラス繊維、その他が考えられる。

補強材として鋼材を用いる場合には、鉄筋コンクリート用棒鋼、P C鋼材などJ I Sに規格化されているものが多い。この場合の補強材の強度についてはJ I Sに規定されている規格値の下限値を設計基準強度として用いて差支えない。他の補強材はJ I Sに規格化されていないため、これらの補強材の設計基準強度については、信頼できる既往の資料によるかまたは試験によって求められた値から、ばらつき等を考慮して求めるものとした。

(2) について 鋼材のヤング係数は、鋼材の種類により異なり、一般には $1.9 \sim 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ とされている。R E Cの補強に鋼材を用いる場合には鉄筋のみならずP C鋼材のような高張力鋼も用いられることなどを考慮して、ここでは鋼材のヤン

グ係数を  $2.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$  とした。その他の補強材については実測例も少ないため、必要に応じて既往の資料あるいは試験によって定めるものとした。

## 5 部材強度の算定

### 5・1 許容応力度

R E C の設計基準強度を  $f_{RK}$  とするとき、許容応力度  $f_{RA}$  は次式で求めるものとする。

$$f_{RA} = \frac{f_{RK}}{2\gamma} \quad (5 \cdot 1)$$

ただし、 $\gamma = 1 \sim 2$  は、外力の種別、構造解析の精度、構造物の重要度、構造物の破壊の及ぼす社会的影響、補修の容易さ等を考慮して定めるものとする。

### 5・2 ひびわれ曲げモーメント

R E C 部材のひびわれ曲げモーメントの算定にあたって、低収縮型 U P を用いない場合には、補強材による U P の硬化収縮の拘束に伴う内部応力を考慮しなければならない。

### 5・3 終局耐力

(1) 終局曲げモーメントの算定にあたっては、R E C ならびに補強材の応力－ひずみ関係と、ひずみの平面保持の仮定を用いるものとする。

(2) 終局せん断耐力の算定にあたっては、原則として既往の実験をもとに定めるものとする。

## 解説

### (5・1) について

タイプ I の部材の設計で用いられる許容応力度は、構造物の種別、荷重の性質、外力と耐力のモデル化の精度、構造物の重要度、構造物の破壊が及ぼす社会的影響等を勘案して経験的に定められるものである。R E C 構造物の歴史はわずか 20 年程度であり、しかも従来の R E C 構造物のほとんどが地中構造物に限られているため、R E C 構造物の一般的な許容応力度を示すことは困難であるが、従来からの土木構造物に対する鋼、コンクリート、木材、石材などの許容応力度の定め方を勘案して、材料の設計基準強度をもとにとりあえず (5・1) 式によって許容応力度を定めるものとした。

### (5・2) について

U P は硬化時の収縮が大であるため、低収縮型 U P を用いない場合の U P－R E C に補強材が配置されたときには補強材が硬化収縮を拘束するため R E C 内に引張応力が内部応力として発生し、ひびわれ耐力を低下させることとなる。この影響は補強材量が多いほど、また補強材のヤング係数が高いほど大である。この量を U P の硬化収縮量から直接精度よく推定することは未だ定式化されていないが、R E C の収縮量の 10～2

0%が直接拘束に関係するものと考えられている。

(5・3) について

(1) について、タイプⅡの部材の終局曲げモーメントの算定は、補強材とR E Cとの間のすべりが無いものとして、平面保持を仮定する通常のはり解析によるものとした。

(2) について、R E Cは圧縮強度が大きいので、タイプⅡのはり部材では補強材の強度が低い場合や補強材の量が少ない場合を除けば、一般に曲げ破壊を生ずるまでにせん断破壊を生ずることが多い。

R E Cはりのせん断耐力に関する資料の蓄積は未だ十分でないため、終局せん断耐力  $V_U$  が必要な場合には実験等によって得られる値をもとにして定めなければならないが、一応の目安としては、R E Cの設計基準圧縮強度  $f_{RC}'$  もとに、せん断応力度の許容値を  $f_{RC}' / 30$  とした次式が考えられる。

$$V_U = \frac{f_{RC}'}{30} \cdot b_w \cdot d$$

ここに、 $b_w$ は曲げ部材のウェブ幅、 $d$ は部材有効高さである。

以上