

鋼繊維とポリマーディスペーションによる コンクリートの引張変形特性の改善

IMPROVEMENT OF DUCTILITY OF CONCRETE THROUGH THE ADDITION OF STEEL FIBER AND POLYMER DISPERSIONS

小林 一 輔*・来 海 豊**

By Kazusuke KOBAYASHI and Yutaka KIMACHI

1. はし が き

コンクリートは元来脆性材料の1種であるから、その変形能は他の工業材料に比べて著しく小さい。たとえば、その伸び能力はたかだか $100 \sim 200 \times 10^{-6}$ 程度¹⁾に過ぎず、このために鉄筋コンクリート部材の設計では使用荷重状態において引張を受ける部分のコンクリートに対してある大きさのひびわれを許容している。

一方、最近における耐震工学の進歩はこれまでの建設技術では不可能と思われたような構造物の設計を可能にしたが、これに伴って構造材料としてのコンクリートに対してもより多様な性能が要求されるようになってきた。たとえば、沈埋トンネルのコンクリート函体や超高層ビルのコンクリート耐力壁などの設計では、地震時に生ずる大きな変形の一部を構造物自体に吸収させているが、この場合にはコンクリートの引張変形能とせん断変形能の大幅な改善が望まれている。

しかし、コンクリートが骨材とカルシウムシリケート水和物から構成されている1種の人造岩石であることを考えれば、これらの無機質系成分の改質を通じて上記の特性を大幅に改善することはほとんど不可能に近いと考えられる。コンクリートの性能改善の中でも脆性に関しては、これまでみるべき進歩がなかった理由もここにある。

本研究はコンクリートの引張変形特性をポリマーディスペーションの添加によるマトリックスの改質と鋼繊維の分散による混合系のひびわれ制御といういわゆる複合化の手法を適用することによって改善しようとしたものである。引張変形特性を評価するための目安としては便宜上伸び能力（または一様伸び）を用い、その目標値として上記の構造物の設計上望まれている値の下限値ま

たはひびわれ制御の面から望まれる乾燥収縮ひずみの上限値と考えられる 500×10^{-6} を設定して検討を進めた。

上記の目標を達成するための実験研究の手順は下記のとおりである。

1. モルタル供試体によるポリマーディスペーションの選定ならびに養生方法の検討。
2. 選定されたポリマーディスペーションを添加したコンクリートの配合に関する検討。
3. 上記のコンクリートに鋼繊維を分散せしめた鋼繊維補強ポリマーセメントコンクリートの引張変形特性に及ぼす繊維混入率、繊維のアスペクト比、ポリマーセメント比の影響についての検討。

2. 複合系コンクリートとその引張変形特性について

(1) ポリマーセメントコンクリート（モルタル）

モルタルやコンクリートに水性ポリマーディスペーションを添加すると、その添加量やディスペーションの種類に応じて伸び能力、防水性、接着性、耐衝撃性などの諸特性が改善されるが強度はあまり向上しない。これらはポリマーセメントモルタル（コンクリート）とよばれ、主として床材、防水材、防食ライニング材などに用いられてきた。したがって、その研究も、当初から構造材料としてのコンクリートの性能改善を目的としたものはきわめて少なく、せん断壁に対する適用を意図した秋浜らの研究²⁾があるにすぎない。秋浜らはポリマーとしてポリアクリル酸エステルを用いたエマルジョンをセメント量の15%および25%添加することにより、これを用いたコンクリート耐力壁（粗骨材：人工軽量骨材、最大寸法20mm）の変形能力（せん断変形）は従来のセメントコンクリート耐力壁に比べて1.63~1.87倍に向上することを明らかにするとともに、コンクリートの

* 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所

** 正会員 工修 (株)大林組

変形能力が増大するとその特性はリニアに壁体のせん断変形能力に現われてくる可能性が確められたと報告している。一方、ポリマーセメントモルタルの物性解明の1つとしてその変形特性を調べたものとしては森・河野の研究⁹⁾と大浜¹⁰⁾の研究がある。森・河野はネオプレンラテックスおよび天然ゴムラテックスを添加したポリマーセメントモルタルの引張破壊時までの変形量が、プレーンモルタルの値に比べて前者で約3倍、後者で約4倍に達したことを明らかにしている。大浜はSBRラテックス、NBRラテックスおよびPVACエマルジョンを添加したポリマーセメントモルタルの引張破壊時のひずみを検討し、それぞれポリマーセメント比が20%の場合に 250×10^{-6} 、 130×10^{-6} および 360×10^{-6} 程度であって、NBRラテックスを使用したものは引張変形追従性が劣ること、PVACエマルジョンを用いたものはヤング率の減少が著しいことなどを明らかにしている。

本研究では検討の対象としたポリマーディスパージョンを合成ゴムを固相とするラテックスに限定した。その理由は、分子構造からみて鎖状高分子が局所的に配向した、いわゆる結晶性高分子から成る合成樹脂を固相としたエマルジョンに比べて鎖状高分子のランダム構造から成る合成ゴムを固相とするラテックスの方がコンクリートの引張変形特性の改善には適していると考えられたためである。コンクリートの引張変形特性の改善のみに着目すればラテックスの中で最も有効なものは天然ゴムラテックスであるといわれており、筆者らも予備実験の段階でこれを確認したが、セメントおよび水と混合した場合の性状が不安定であって、同一の条件で混合したと思われる場合でもそのコンシステンシーは著しく変動した。天然ゴムラテックスがポリマーセメントモルタル用としてそれほど広く普及していないおもな理由はここにあるものと思われた。現在ポリマーセメントコンクリート用として実用化されているラテックスは、それぞれSBR、NBR、CR、MBRおよび天然ゴムなどを固相とするものであるが、これらの中で最も一般的なセメントコンクリート用ラテックスはSBRラテックスである。したがって、本研究ではポリマーディスパージョンとしてSBRラテックスに重点をおいて検討を進めたが、参考のため市販のNBRラテックス1種についてもこれを取り上げ実験を行った。

SBRラテックスの性質は共重合体のポリマーディスパージョンの合成時における原料モノマーの比、すなわち、スチレンモノマーとブタジエンモノマーの比によって変化し、前者の比率が増すに従ってポリスチレンと類似の性状、すなわち、引張変形能は小さいが強度が増大し、後者の比率が高くなると、ゴム状弾性を示すようになって引張変形能は増大するが強度が低下するといわれ

ている。本研究ではポリマーディスパージョンとして合成が可能である限界のモノマー比であるスチレンモノマー：ブタジエンモノマー＝25：75 および 60：40 に45：55を加えた3種のSBRラテックスを試製し、実験に供した。

(2) 鋼繊維補強コンクリート

鋼繊維をコンクリート中にある一定量以上混入するとひびわれ発生応力度が顕著に増大し、たとえば、引張載荷の場合には鋼繊維を容積百分率で2%混入した場合の値がプレーンコンクリートの値の1.6～1.8倍程度に達すること、この値に対応するひずみを伸び能力と定義すれば、鋼繊維を2%程度混入したコンクリートの伸び能力は、鋼繊維のアスペクト比に応じて200～300×10⁻⁶程度の値となることが明らかにされている⁹⁾。一方、引張載荷を継続して、ひびわれ発生応力度を越えて引張強度に達する間では、コンクリートマトリックスに多重ひびわれ(multiple crack)を生じつつ引張ひずみを増すことが確められている。この事実は、上記の値を越えて引張変形能を改善するためにはコンクリートマトリックスの引張変形能を改善する必要があることを示唆するものであり、本研究においてコンクリートの引張変形能の改善を図る手段として、ポリマーディスパージョンの添加によるコンクリートマトリックスの改質と鋼繊維の分散によるひびわれの拘束という複合化の手法を併用した理由もここにある。

(3) 鋼繊維補強ポリマーセメントコンクリート

コンクリートマトリックスとしてポリマーディスパージョンを添加したポリマーセメントコンクリートを用い、この中に鋼繊維を分散せしめた鋼繊維補強ポリマーセメントコンクリートに関しては、すでに二、三の研究^{9),11)}が報告されているが、これらはいずれも引張変形特性に関してはまったくあげておらず、したがって、この課題に関する既往の研究は内外を通じて皆無であるといえる。

3. 使用材料、配合の定め方、供試体の製作および試験方法

(1) 使用材料

セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、細骨材としてはモルタルの場合には豊浦標準砂、コンクリートの場合には川砂(富士川産、FM:3.0)を用いた。粗骨材としては最大寸法が7mmの川砂利を使用した。

使用した4種のラテックスの性質を表-1に示す。

表-1 ラテックスの性質

ラテックスの種類	比重 (20°C)	pH	粘度 (20°C, cps)	全固形分 (%)	固形分粒径 (Å)
NBR	1.0	9	25	40	
SBR(ST 25)	0.97	9.5	60	45	2100~3300
SBR(ST 45)	0.99	9	25	45	1200~1800
SBR(ST 60)	1.0	9	25	45	1100~1900

表-2 鋼繊維の形状寸法

種類	$d \times l$ (mm)	アスペクト比
カットワイヤー	0.25 × 20	80
せん断ファイバー	0.40 × 14	35
	0.42 × 20	48
	0.40 × 25	63
	0.43 × 30	70

ただし、せん断ファイバーの場合の d は換算直径

なお、ディスパージョン中の界面活性剤に起因する発泡を抑制するためにシリコン消泡剤を用いた。

鋼繊維はモルタルの場合にカットワイヤーを、コンクリートの場合にはアスペクト比の異なる4種のせん断ファイバーを用いた(表-2)。

(2) 配合の定め方

ラテックスを添加した場合の配合の定め方としては、ラテックス中の全固形分を結合材の一部とみなし、基準配合のセメント量をこれによっておきかえるという内割り方法を採用した。したがって、本文ではセメント量とラテックス中の全固形分の和に対するラテックス中の全固形分の重量比 ($P/C+P$) をポリマーセメント比と称することにした。

ラテックスを添加したモルタルの配合は、水セメント比が50%、単位セメント量が 700 kg/m^3 、フロー値が $195 \pm 5 \text{ mm}$ のブレンモルタルを基準配合とし、ポリマーセメント比に応じてラテックス中の全固形分とセメ

ント量の和が基準配合の単位セメント量である 700 kg/m^3 となるように単位セメント量を定めるとともに、基準配合と同一のフロー値 ($195 \pm 5 \text{ mm}$) となるように単位水量を定め、各単位量を決定した。この配合において、水、セメントおよびラテックス中の全固形分の容積の総和を結合材容積と定義すると、ポリマーセメント比の値が10~20%の範囲で変化した場合におけるこの値の変化はNBRラテックスの場合で $529 \sim 553 \text{ l/m}^3$ 、SBRラテックス(ST-25)の場合で $518 \sim 521 \text{ l/m}^3$ 、SBRラテックス(ST-45)の場合で $527 \sim 542 \text{ l/m}^3$ 、SBRラテックス(ST-60)の場合で $511 \sim 527 \text{ l/m}^3$ となる。すなわち、NBRラテックスの場合の変化がやや大きいもの、大体においてラテックスの種類が同じならば、その結合材容積はポリマーセメント比が10~20%の範囲で変化しても大きく変わることはないことが確かめられた(表-3)。

一般に、ラテックスを添加すると、コンクリートの流動性が著しく増大するが、その流動性は普通のセメントコンクリートが示すようなチクソトロピックなものではなく、ダイラタントのものであるために、スランブ試験を行ってもコーンを引抜いたあとスランブがおちつくまでに時間を要し、そのコンシステンシーを定めることは困難である。そこで、ラテックスならびに鋼繊維を使用したコンクリートの配合を定めるにあたっては、コンシステンシーの代わりに上記の結合材容積を尺度とした。すなわち、① 鋼繊維の種類ならびにその混入率ごとに水セメント比が50%、細骨材率が80%の場合、スランブが $3 \pm 2 \text{ cm}$ となるような鋼繊維補強コンクリートの配合を定め、これを基準コンクリートとした。② 次にポリマーセメント比に応じてラテックス中の全固形分とセメント量との和がそれぞれ対応する基準コンクリートの単位セメント量に等しくなるようにして単位セメント

表-3 ポリマーセメントモルタルの配合

ポリマーディスパージョンの種類	ポリマーセメント比 $P/C+P$ (%)	水セメント比 W/C (%)	単位水量 W (kg/m^3)	単位セメント量 C (kg/m^3)	単位細骨材量 S (kg/m^3)	単位ポリマーディスパージョン量 (kg/m^3)	結合材容積 (l/m^3)	フロー値 (mm)
基準セメントモルタル	0	50	350	700	1133.6	0	570.8	195 ± 5
NBR	10	42	265.2	630	1227.7	175	533.9	
	15	40	236.7	595	1237.7	262.5	529.3	
	20	42	236.3	560	1174.8	350	553.0	
SBR (ST 25)	10	40	251.2	630	1264.8	156	520.1	
	15	39	228.7	595	1256.3	233	521.3	
	20	36	201.3	560	1266.2	311	518.0	
SBR (ST 45)	10	41	258.2	630	1246.3	156	527.1	
	15	40	236.7	595	1237.7	233	529.3	
	20	40	225.8	560	1201.3	311	542.5	
SBR (ST 60)	10	41	258.2	630	1246.3	156	527.1	
	15	37	219.2	595	1284.1	233	511.8	
	20	35	194.3	560	1284.8	311	511.0	

* 表中の単位水量中にはディスパージョンに含まれる水分も加算している。

表-4 鋼繊維補強ポリマーセメントコンクリートの配合 (SBR ラテックス (ST-45) 使用, s/a 80%)

(粗骨材粒径5~7mm)

鋼繊維の寸法 $d \times l$ (mm)	結合材容積 V_m (l/m^3)	鋼繊維 混入率 (%)	ポリマー セメント比 $P/C+P$ (%)	水セメント 比 W/C (%)	単位水量 W (kg/m^3)	単 位 セ メ ン ト 量 C (kg/m^3)	単 位 細 骨 材 量 S (kg/m^3)	単 位 粗 骨 材 量 G (kg/m^3)	単位ポリマ ーディスパ ージョン量* (kg/m^3)	スランブ (cm)
0.4 × 14	367.86	2.0	0 20	50 44.9	225 161.6	450 360	1330.0	335.0	0 200.0	3 ± 2 —
0.42 × 20	392.38	2.0	0 20	50 44.9	240 172.4	480 384	1278.4	322.0	0 213.3	3 ± 2 —
0.4 × 25	421.81	2.0	0 20	50 44.9	258 185.3	516 412.8	1216.5	306.4	0 229.3	3 ± 2 —
0.43 × 30	367.86	1.0	0	50	225	450	1330.0	355.0	0	3 ± 2
			10	47.7	193.3	405			100.0	—
			15	46.4	177.4	382.5			150.0	—
	434.84	2.0 及び 3.0	0	50	266	532	1189.0	299.5	0	3 ± 2
			10	47.7	228.5	478.8			118.2	—
			15	46.4	209.7	452.2			177.3	—
		3.0	20	44.9	191.0	425.6		236.4	—	

* 表中の単位水量中には、ディスパージョンに含まれる水分も加算している。

量を定めるとともに、基準コンクリートと同一の結合材容積となるよう、単位水量を定め、各単位量を決定した(表-4)。なお、以上の場合、単位骨材量もそれぞれの基準コンクリートの値と同一にした。

また、表-4の中で結合材容積の値が434.84 l/m^3 の場合における鋼繊維補強ポリマーセメントコンクリートの配合が、繊維量が3%の場合でも2%の場合とまったく同じ配合となっている理由は、① 鋼繊維を外割で添加したこと、② 結合材容積の値が大きいために鋼繊維量を同一配合のマトリックス中に1%だけ多く添加しても供試体を成形できる程度のコンシステンシーのコンクリートが得られたことなどによる。したがって、表-4の各単位量は、正しくは鋼繊維補強ポリマーセメントコンクリートを鋼繊維とポリマーセメントコンクリートマトリックスから成る2相系と考えた場合における後者の単位量を示す。

(3) 供試体の製作

直接引張試験用供試体はモルタルの場合にはブリケット供試体、コンクリートの場合には本研究のために設計した図-1に示す形状寸法のものを用いた。供試体はすべて打込み後2日間湿空(20°C, 80% RH)に保ち、脱形後はそれぞれ下記の養生を行った。

- (A) 12日間乾燥養生(20°C, 45% RH)
 - (B) 5日間水中→7日間乾燥養生(20°C, 45% RH)
 - (C) 10日間水中→2日間乾燥養生(20°C, 45% RH)
- ただし、プレーンモルタルの養生は(C)に限定した。

(4) 試験方法

直接引張強度、伸び能力および引張応力-ひずみ曲線

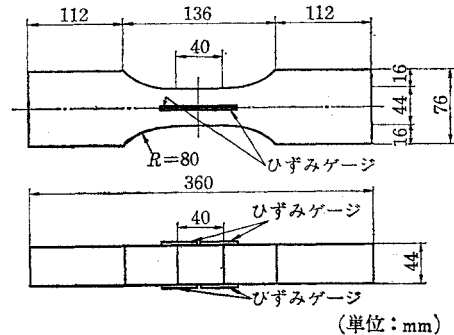


図-1 直接引張試験用供試体の形状寸法と抵抗線ひずみゲージの貼付位置

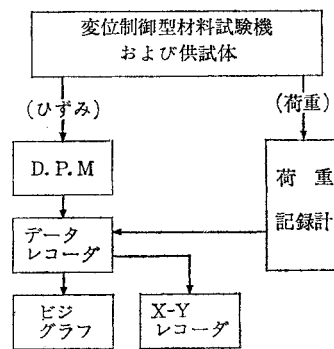


図-2 引張変形測定システム

は図-2に示すような測定システムを用いて求めた。また、供試体のひずみ測定にあたってはモルタル供試体の場合にゲージ長30mmの抵抗線ひずみゲージ、コンクリート供試体の場合にはゲージ長40mmの抵抗線ひずみゲージを用いた。なお、上記の抵抗線ひずみゲージの貼り付け位置はモルタル供試体の場合には供試体の中

央とした。コンクリート供試体の場合には 図-1 に示すように供試体中央部の引張領域部中心線の左右に密接させて片面で 2 枚、両面で合計 4 枚の抵抗線ひずみゲージを貼り付けたが、両面の相対する 1 組のひずみゲージはそれぞれ並列に結線して両面のひずみ測定値の平均値が得られるようにした。

4. 伸び能力の求め方について

コンクリートの伸び能力をその引張破壊時におけるひずみと定義すると、この値はコンクリートの脆性のために材料特性というよりはむしろ使用する引張試験機の剛性やそのクロスヘッドの変位速度によって左右される。したがって、その材料固有の引張応力-ひずみ曲線や伸び能力の値を得るためには、試験機の剛性が大きくしかもクロスヘッドの変位速度を制御できる剛性試験機を用いればよいと考えられている。しかし、通常の変位制御型材料試験機を用いて载荷を行っても供試体が破壊に近づくと、供試体の引張領域全体にわたって一様なひずみを生ずるわけではなく、ひびわれ断面付近の局部においては著しくひずみが増大して外部からエネルギーの供給がなくとも試験機に蓄えられたエネルギーによって破壊が進行する。したがって、材料特性としての伸び能力の値を正確に求めることは一般にはきわめて困難であると考えられる。

そこで、本研究では一般に剛性試験機と称されている減速ギア駆動方式の変位制御型材料試験機（島津製作所オートグラフ）を用いて、そのクロスヘッドの変位速度を一定（0.5 mm/min）として载荷を行い、得られた伸び能力の値を相対評価することによってこの問題を回避することにした。

図-3 は供試体のひびわれ断面周辺の一区間（ここで

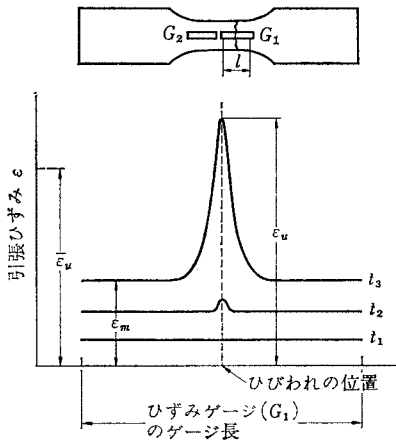


図-3 ひびわれ断面周辺における引張ひずみ分布の模式図

はひずみゲージ (G_1) のゲージ長の区間とした) における引張ひずみ分布とそのひびわれ発生までの時間的変化を模式的に示したものである。この図において、ひずみ分布 (t_3) はひびわれ発生寸前のひずみ分布を表わしたものであるが、このひずみの測定は実際にはある一定のゲージ長を有するひずみゲージ (G_1) を通して行われるので、ひびわれ発生寸前におけるひずみの測定値 (ϵ_u) は局部塑性変形によるひずみ (ϵ_m) を含むゲージ長区間の平均的なひずみとして得られる。本研究では、上記の ϵ_u を伸び能力の測定値として用い、ひずみ分布 (t_3) における ϵ_m の値を一樣伸びと考えると、この値をもう 1 組のひずみゲージ (G_2) によって得られるものとして、このゲージによる t_3 段階における測定値 (ϵ_m') をもって一樣伸びとした。

さて、上記の ϵ_u を求めるためには、载荷の進行に伴って引張ひずみが急激に増大する点を求める必要がある。

この点を求める手段としてはまず X-Y レコーダに直接出力する方法が考えられるが、この方法の難点はひびわれが発生しても記録用のペンが慣性力のためにただちにこの変化を捉え得ないことである。本研究では、まず荷重ならびにひずみをデータレコーダに入力し、これをビジュグラフに出力して引張ひずみの時間的変化を求めた。図-4 はその 1 例を鋼繊維補強ポリマーセメントコンクリートの場合について示したものである。この図における引張ひずみと時間との関係において、上の図は、ひびわれをその測定区間内に含むひずみゲージ (G_1) による測定結果であるが、この図のように表示することにより引張ひずみが急激に増加する点が A 点として明確に捉えられることがわかる。本研究では、この点に対応するひずみ値をもって伸び能力 (ϵ_u) とした。なお、下の図はもう 1 組のひずみゲージ (G_2) による結果であるが、本研究ではこの図における A' 点に対応するひずみをもってひびわれを生ずるまでの一樣伸び (ϵ_m') とした。

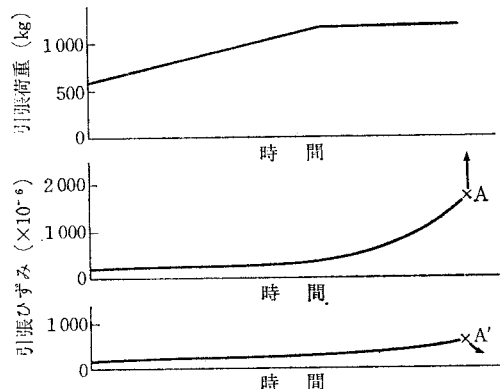


図-4 引張荷重ならびに引張ひずみと時間との関係

5. ポリマーディスパージョンの添加によるモルタルの引張変形特性の改善

モルタル供試体を使用してその引張変形特性に及ぼすポリマーディスパージョン（ラテックス）の種類と添加量の影響を明らかにするとともに、その最適養生条件について検討し、さらに鋼繊維の存在下における各種ラテックスの引張変形特性を調べたものであって、これらの結果に基づいて本研究の目的に適するポリマーディスパージョンを選定した。また、本章においては、特にポリマーセメントモルタルの養生方法に関する検討を行っているが、その理由は以下に述べるようにこの複合体の硬化機構に対して養生方法が密接に関与していることによる。すなわち、複合体中のセメントはディスパージョン中の水を奪って水和により硬化し、ディスパージョンは

水を奪われてポリマー粒子の凝集が起こり、乾燥の進行とともにポリマーフィルムを形成する。ポリマーフィルムはセメント水和物の結晶間やこれらと骨材の界面に点在し、その接着性によって一体化した組織構造が形成される。すなわち、複合体中のセメントに関しては水中養生を必要とし、ポリマーディスパージョンに関しては乾燥養生を要することになる。したがって、一般にポリマーセメントモルタルの養生方法としては初期に水中養生を行った後乾燥養生を行う方法、または養生期間全体にわたって乾燥養生を行う方法などが用いられているが、特に引張変形特性に関して適切な養生方法は明らかにされていない。

(1) ポリマーセメント比の影響

図-5~8 はそれぞれ NBR ラテックスおよび 3 種の SBR ラテックスを添加したモルタルの引張応力-ひずみ曲線を示したものであって、これらの図より明らかになった点をまとめると以下のとおりである。

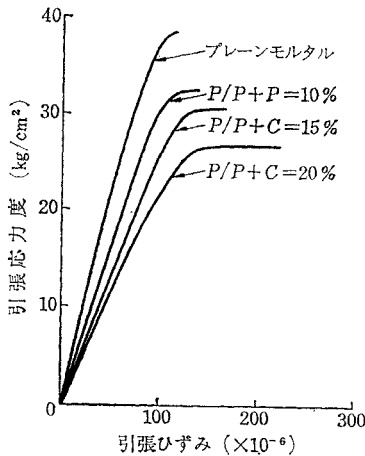


図-5 NBR ラテックスを添加したモルタルの引張応力-ひずみ曲線

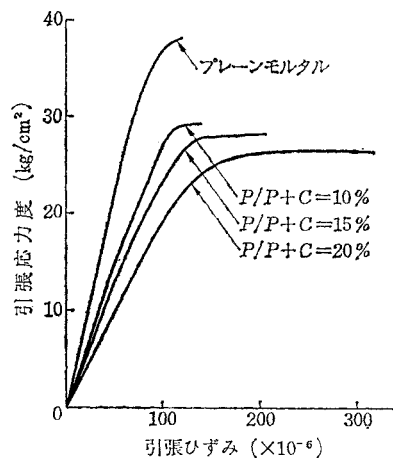


図-7 SBR ラテックス (ST-45) を添加したモルタルの引張応力-ひずみ曲線

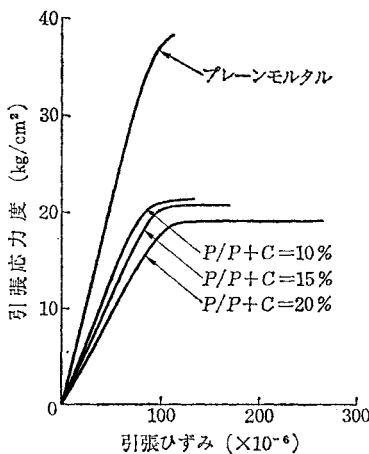


図-6 SBR ラテックス (ST-25) を添加したモルタルの引張応力-ひずみ曲線

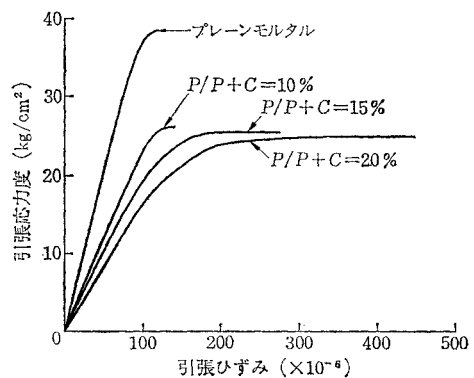


図-8 SBR ラテックス (ST-60) を添加したモルタルの引張応力-ひずみ曲線

i) ポリマーセメントモルタルの引張応力-ひずみ曲線は特徴のある2つの部分、すなわち、従来の脆性材料にみられるようなほぼ最大応力度にまで至る弾性領域と増加する応力に対して著しくひずみが増大して伸び能力に達するまでの疑似塑性領域から構成されている。

ii) ポリマーセメント比が増加するに従って引張強度および弾性係数は低下するが、疑似塑性領域部分は拡大して伸び能力は顕著に増大し、特に SBR ラテックス (ST-60) をポリマーセメント比で 20% 添加した場合にはプレーンモルタルの 3~4 倍に相当する 450×10^{-6} 程度に達している。

ラテックスの添加によりモルタルの引張応力-ひずみ曲線の相当な部分を疑似塑性領域が占めるようになる理由については次のように考えることができる。

ポリマーセメントモルタルをポリマーセメントペースト相と骨材相からなる 2 相系複合材料とみなせば、骨材には大きい変形能力を期待できないために、複合体が変形を受ける場合、変形に寄与する主体はポリマーセメントペースト相であると考えられる。ポリマーセメントペースト相はポリマー相とセメントペースト相から構成されているが、セメントペースト相は一種の人造岩石とみなされることから、変形に寄与する主体はポリマー相にあると考えられる。しかし、ポリマー相はその弾性係数が著しく小さいために応力分担の主体とはなり得ず、また、ポリマーセメントペースト相と骨材相との界面は一般に強度的には弱点となるので、複合体が応力を受ける場合の応力分担の主体はセメントペースト相にあると考えられる。ポリマーセメントペースト相中におけるポリマー相の量は、ポリマーセメント比が 15~20% 程度の場合、ポリマー相をセメントペースト相、セメントペースト相を骨材相と考えると、この割合は通常のセメントコンクリートにおけるものと同等とみなし得る値である。

また、ポリマー相はフィルム形成後はセメント水和物の結晶間やこれらと骨材の界面に点在し、巨視的には結合材相中に均等に分散しているものとみなし得る。

複合体が引張荷重を受ける場合、それによって生ずる変形が小さい範囲において系はほぼ一様に変形していると考えられるが、変形が大きくなるとポリマー相が強度的には応力集中源として作用するために、セメント水和物内部の結合が局所的に失われることにより破壊が進行するものと考えられる。この間ポリマー相が引張またはせん断変形することによりセメント水和物相は相互に相対変位を生ずるために系の変形量は増大するが、変形を受ける主体がポリマー相であるため、系の破壊に近づくに従って応力の増加はほとんど期待できなくなり、破壊断面においてセメント水和物相の結合が完全に断たれることに

より系の破壊が決定されると考えられる。すなわち、顕著な疑似塑性を示すことになる。

また、本研究で用いた配合方式によれば、ポリマーセメント比を増加させると単位セメント量は減少する。このことは応力分担の主体であるセメントペースト相が減少し、強度的には欠陥とみなされるポリマー相が増加することを意味する。以上がポリマーセメント比の増加に従って引張強度が減少する理由であると考えられる。

(2) 養生条件の影響

図9~10 はそれぞれポリマーセメントモルタルの伸び能力ならびに引張強度に及ぼす養生方法の影響を、SBR ラテックス (ST-45) の例について示したものである。養生条件の影響は伸び能力に関しては明確でない

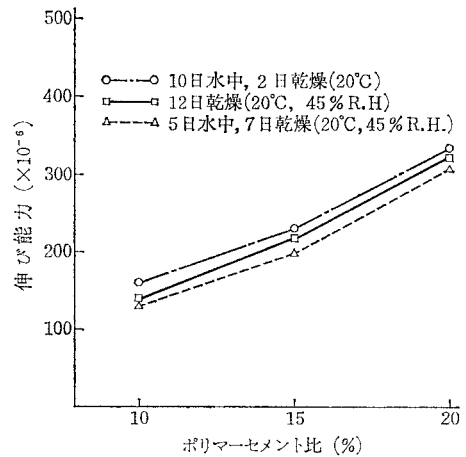


図9 SBR ラテックス (ST-45) を添加したモルタルの伸び能力に及ぼす養生方法ならびにポリマーセメント比の影響

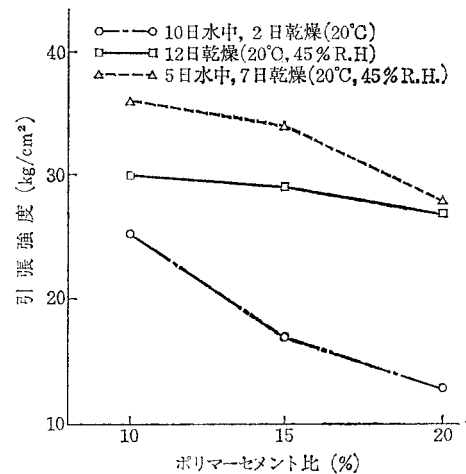


図10 SBR ラテックス (ST-45) を添加したモルタルの引張強度に及ぼす養生方法とポリマーセメント比の影響

が引張強度に関しては顕著に認められ、10日間水中養生後2日間乾燥養生を行った場合にはそれぞれ5日間水中養生後7日間乾燥養生または12日間乾燥養生を行った場合の50~70%程度の値にとどまった。この理由については以下のように考えられる。

複合体中において、ポリマー相はポリマーフィルムが形成されなければ強度的には空隙と同様なものとみなされる。しかし、ポリマーフィルムが形成される程度は養生方法によって異なる。水中養生を行った場合にはポリマーフィルムがほとんど形成されないために複合体の引張強度は小さくなる。一方、乾燥養生を行った場合には初期において複合体表面にポリマーフィルムが形成されることにより保水性が向上し、内部においてはラテックス中の水を奪いながらセメントの水和反応が進行するため、同様にポリマーフィルムが形成されて一体化した組織構造となる。また、初期に短期間水中養生を行った後乾燥養生した場合には、セメントの水和が先行した後乾燥によりポリマーフィルムが形成されるために、初期に乾燥養生を行った場合と同様に一体化した組織構造が形成される。このように引張強度に関しては養生条件の影響が顕著に認められたにもかかわらず、伸び能力に関してはその影響がほとんど認められなかった理由を説明することは現段階では困難であるので今後の検討課題としたい。

(3) 鋼繊維の存在下における性状

図-11はポリマーセメントモルタルの引張応力-ひずみ特性に及ぼす鋼繊維混入の効果について示したものである。この図より、鋼繊維を混入すると引張強度、伸

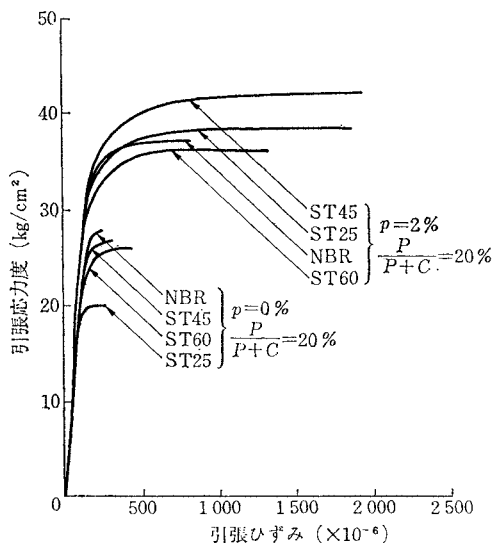


図-11 鋼繊維補強ポリマーセメントモルタルの引張応力-ひずみ特性

び能力ともに顕著に改善され、その効果は特に2種のSBRラテックス(ST-25およびST-45)を用いた場合に著しいことがわかる。

また、NBRラテックスを添加したものは引張強度は良好であるが伸び能力は大して改善されていない。さらに、SBRラテックス(ST-60)を添加したものは鋼繊維を混入しない場合には最も大きい伸び能力を示したが、混入した場合には他の2種のSBRラテックスを用いたものよりも小さい伸び能力しか得られていない。この理由については明らかでなく今後の検討事項と考えられる。

なお、本章で取扱った実験の主目的はディスパージョンの選定にあるので、伸び能力、引張強度、鋼繊維の性状ならびにラテックスの安定性を考慮してスチレンとブタジエンの比率が45:55のSBRラテックス(ST-45)を選定し、以後の実験ではこのラテックスを用いることにした。

6. ポリマーディスパージョンの添加ならびに鋼繊維の分散によるコンクリートの引張特性の改善

モルタル供試体による実験結果より、セメントモルタルの引張変形特性の改善に対してはスチレンとブタジエンの結合比が45:55のSBRラテックス(ST-45)が適していることが明らかとなり、さらに鋼繊維の混入によって上記の特性が顕著に改善されることを確認した。したがって、本章ではこのラテックスを添加したポリマーセメントペースト相を結合材とし、鋼繊維を補強材としたコンクリート、すなわち、鋼繊維補強ポリマーセメントコンクリートの引張変形特性について検討し、これに及ぼす鋼繊維の形状寸法、養生条件、ポリマーセメント比および鋼繊維の混入率などの影響を明らかにした。なお、本研究で用いた配合方法によれば、鋼繊維の形状寸法および繊維混入率によってポリマーセメントペースト相の容積、すなわち、結合材容積が変化するので(表-5)、この影響を検討する目的で鋼繊維を混入しないポリマーセメントコンクリートについて、結合材容積と引張特性との関係を明らかにするための実験を行った。

(1) 結合材容積がポリマーセメントコンクリートの引張特性に及ぼす影響

鋼繊維補強ポリマーセメントコンクリートの引張変形特性に関する実験に用いた配合では、結合材容積が約 $0.37 \sim 0.43 \text{ m}^3/\text{m}^3$ の範囲で変化しているので、本実験では結合材容積を $0.343 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 、 $0.392 \text{ m}^3/\text{m}^3$ および $0.441 \text{ m}^3/\text{m}^3$ の3段階に変化させて製作したポリマーセ

表-5 ポリマーセメントコンクリートの配合 (SBR ラテックス (ST-45) 使用, s/a 80%)

(粗骨材粒径 5~7 mm)

結合材容積 V_m (l/m^3)	ポリマーセメント比 $P/C+P$ (%)	水セメント比 W/C (%)	単位水量 W (kg/m^3)	セメント量 C (kg/m^3)	単細骨材量 S (kg/m^3)	単粗骨材量 G (kg/m^3)	単位ポリマーディスパージョン量* (kg/m^3)
343.3	0	50.0	210.0	420	1 381.6	348.0	0
	10	47.7	180.4	378			93
	15	46.4	165.6	357			140
	20	44.9	150.8	336			187
392.4	0	50.0	240.0	480	1 278.4	322.0	0
	10	47.7	206.2	432			107
	15	46.4	189.3	408			160
	20	44.9	172.3	384			213
441.4	0	50.0	270.0	540	1 175.2	296.0	0
	10	47.7	231.9	486			120
	15	46.4	212.9	459			180
	20	44.9	193.9	432			240

* 水分を含む

メントコンクリート (表-5) について、その引張変形特性に及ぼす結合材容積の影響について検討を行った。図-12~13 はそれぞれ伸び能力および引張強度に及ぼす結合材容積の影響について示したもので、これらの図より結合材容積が増加すると伸び能力は増大するが引張強度は低下する傾向が認められる。この理由は前述したように結合材容積が増加することが、結果的には変形を受ける主体ではあるが強度的には欠陥として作用するとみなされるポリマー相の増加につながっていることによって説明することができる。

(2) 鋼繊維の形状寸法の影響

図-14 はポリマーセメント比が 20% で繊維量が 2% の鋼繊維補強ポリマーセメントコンクリートの引張応力-ひずみ特性に及ぼす鋼繊維のアスペクト比の影響に

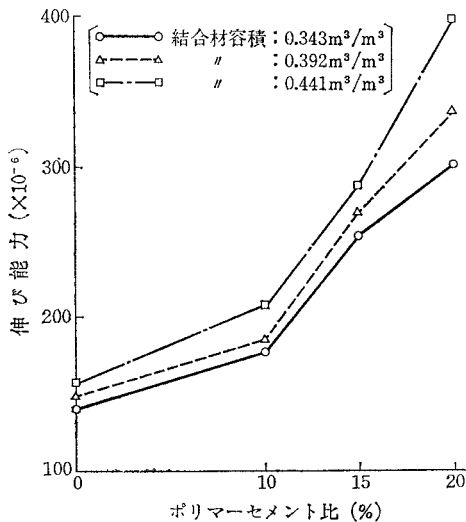


図-12 ポリマーセメントコンクリートの伸び能力に及ぼす結合材容積とポリマーセメント比の影響

ついて示したものである。この図より繊維のアスペクト比 (ここでは換算径がほぼ一定のもの) が大きくなるほど伸び能力が増大する傾向が認められる。この理由はアスペクト比の大きい鋼繊維を用いるほど、所要のコンシステンシーを得るために必要とする結合材容積が増加する事実 (表-5) とその影響を示した 図-11 の結果より明らかである。一方、図-12 より明らかなように結合材容積が増加

した場合には、引張強度が低下することが予想されるが 図-13 の結果はむしろアスペクト比が大きくなるほど

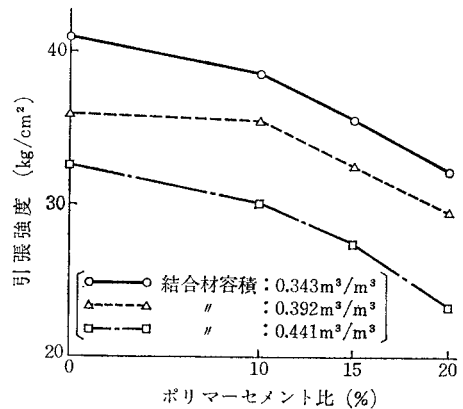


図-13 ポリマーセメントコンクリートの引張強度に及ぼす結合材容積ならびにポリマーセメント比の影響

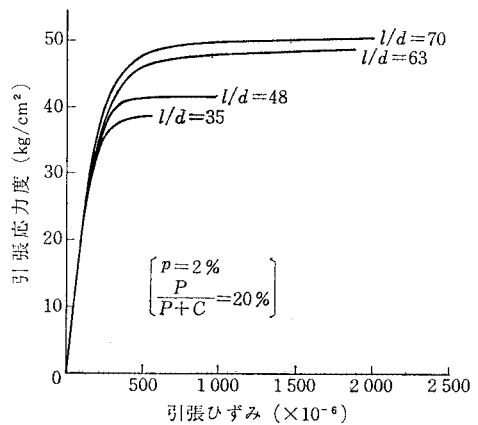


図-14 鋼繊維補強ポリマーセメントコンクリートの引張応力-ひずみ特性に及ぼす繊維の形状寸法の影響

引張強度が増加することを示している。この理由は、一般にアスペクト比の大きい鋼繊維ほど二次元的に配向する傾向があるので、その面内における補強効果が増大するが、特に本研究の場合には供試体の一様引張を受ける断面の寸法が $44 \times 44 \text{ mm}$ 程度であったので、アスペクト比の大きい（繊維長の大きい）鋼繊維ほど引張荷重方向に配向しやすくなったためと考えられる。すなわち、鋼繊維の引張応力方向に対する配向係数が大きくなったことによる補強効果が結合材容積の増加に基づく引張強度低下の要因に対して卓越したものと考えられるので、鋼繊維のアスペクト比の増加による引張強度の増大は見かけ上のものと考えられる。

以上の実験結果より、たとえ配向に基づくものにせよアスペクト比の大きい鋼繊維を用いることは、引張強度特性の改善に有利と考えられたので以後の検討にあたってはすべてアスペクト比が 70 の鋼繊維を使用した。

(3) 養生条件の影響

図-15 は引張強度に及ぼす養生条件ならびにポリマーセメント比の影響を調べたものである。この図と図-10 を対比すると、鋼繊維の混入によって引張強度は養生条件とポリマーセメント比の影響を受けることが少なくなることがわかる。このことは、いかなる養生を行ってもポリマー相は強度的には潜在する欠陥とみなされるが、この欠陥に帰因するひびわれに対する鋼繊維の拘束効果がきわめて卓越していることを示していると思われる。

(4) ポリマーセメント比ならびに繊維混入率の影響

図-16 は伸び能力に及ぼすポリマーセメント比ならびに繊維混入率の影響について示したものである。この図より、ポリマーセメント比ならびに繊維混入率を増加させることにより、伸び能力を顕著に改善することが可能であることが明らかであり、特にポリマーセメント比

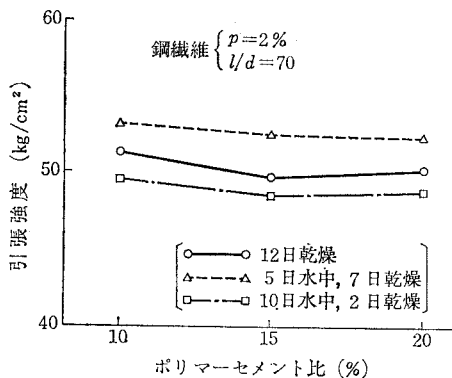


図-15 鋼繊維補強ポリマーセメントコンクリートの引張強度に及ぼす養生方法の影響

が 20% で繊維混入率が 3% の場合ではプレーンコンクリートの 10 倍以上に相当する 2500×10^{-6} 程度の伸び能力が得られることがわかる。また、図-17 は一様伸びに及ぼすポリマーセメント比、ならびに繊維混入率の影響について示したものである。

この図より、伸び能力と同様に一様伸びもポリマーセメント比ならびに繊維混入率の増加に従って増大し、特にポリマーセメント比が 20%、繊維混入率が 3% の場合には目標値の 500×10^{-6} を上回る 700×10^{-6} 程度の一様伸びが得られることがわかる。

鋼繊維をポリマーセメントコンクリートに適用することにより伸び能力が顕著に改善される理由については以下のように考えられる。すなわち、鋼繊維のような弾性係数の大きい短繊維が分散されたコンクリートマトリックスでは、鋼繊維によるひびわれ拘束効果が卓越するた

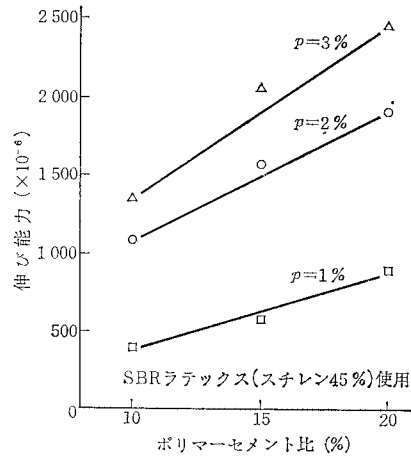


図-16 鋼繊維補強ポリマーセメントコンクリートの伸び能力に及ぼすポリマーセメント比ならびに繊維量の影響

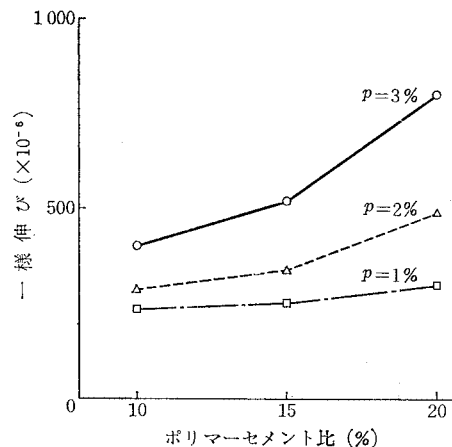
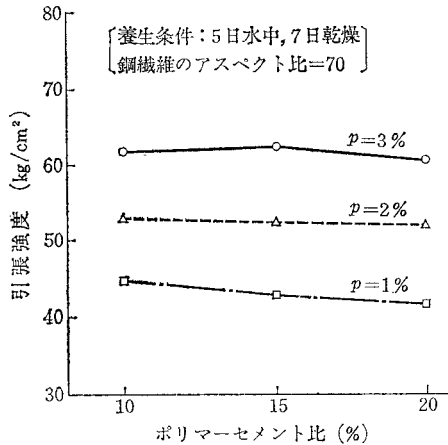


図-17 鋼繊維補強ポリマーセメントコンクリートの一様伸びに及ぼすポリマーセメント比ならびに繊維量の影響



図—18 鋼繊維補強ポリマーセメントコンクリートの引張強度に及ぼす繊維量の影響

めにマトリックス中のひびわれ尖端部における応力拡大係数が減ずるものと考えられる。この結果、鋼繊維の混入によってマトリックス中のひびわれが分散され、系の破壊を遅らせることが可能となる。この場合コンクリートのような脆性マトリックスにおいてはその変形能力が大きいほど系全体の变形能力が大きくなると考えられる。

ポリマーセメントコンクリートをマトリックスとする場合、変形能力の大きいポリマー相の存在により系の破壊までの変形能力はプレーンコンクリートマトリックスの場合に比較してきわめて大きくなる。さらに、鋼繊維とマトリックスの界面において、マトリックスが塑性降伏状態となりやすいために変形に関して一種の相乗効果を生ずるものと思われる。また、繊維混入率が大きくなると鋼繊維によるひびわれ分散効果がより卓越するため、伸び能力のみならず一様伸びも大きくなるものと考えられる。図—18 は 鋼繊維補強ポリマーセメントコンクリートの引張強度に及ぼす繊維混入率の影響を示したものである。

この図より、鋼繊維補強ポリマーセメントコンクリートの引張強度は繊維混入率によって支配され、鋼繊維を2%混入するとポリマーセメント比のいかに問わらず50 kg/cm²程度の引張強度が得られることがわかる。

7. む す び

本研究は脆性材料であるコンクリートの引張変形特性の改善という正攻法では非常にアプローチの困難な課題の検討にあたり、最近の複合材料技術の適用を試みたものである。本研究の範囲内では以下の点が明らかにされたと考える。

(1) コンクリートの引張変形特性の改善 として有

効なポリマーディスパージョンに関しては、本研究において検討の対象とした4種のラテックス、すなわち、スチレンとブタジエンとの結合比の異なる3種のSBRラテックスおよび1種のNBRラテックスのうち、スチレンとブタジエンがほぼ等量で結合しているSBRラテックスが最もすぐれている。

(2) SBRラテックス(スチレンとブタジエンとの結合比=45:55)をポリマーセメント比で20%程度添加してもコンクリートの伸び能力は $300\sim 400\times 10^{-6}$ 程度にとどまり、また、プレーンコンクリートに比べて引張強度も低下するが、これに鋼繊維を容積百分率で3%混入すると 2000×10^{-6} を上回る伸び能力が得られるのみならず一様伸びとしても 500×10^{-6} を上回る値が得られ、さらに引張強度も60 kg/cm²程度に達する。

8. あとがき

本論文は著者の一人が東京大学大学院に在学中に修士論文としてとりまとめたものである。

最後にポリマーディスパージョンの適用に関して貴重なご助言をいただいた日本大学の大浜嘉彦博士ならびにSBRラテックス試料に関して多大の御協力を賜った日本ラテックス加工(株)の白土栄一郎氏および板倉健氏に対して深い謝意を表わすとともに、変位制御型材料試験を長期にわたって使用させていただいた当研究所第一部の田村重四郎教授をはじめとする同研究室の方々に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) Lee, C.R. and Lamb, W.: Effects of Various Factors on the Extensibility of Concrete, Building Research Establishment, CP 15/76, 2.
- 2) Akihama, S., et al.: Improvement of Mechanical Properties of Concrete through the Addition of Polymer Latex, Fiber Reinforced Concrete, American Concrete Institute, SP-44, 1974.
- 3) 森 茂二郎・河野俊夫: ゴム混入セメントモルタル, 小野田研究報告, Vol. 11, No. 40, 1959.
- 4) 大浜嘉彦: 建築用ポリマーセメントモルタルの性状と調査設計に関する研究, 建築研究報告, No. 65, 1973年9月.
- 5) 小林一輔・趙 力采: 単軸引張を受ける鋼繊維補強コンクリートの強度と変形, 土木学会論文報告集, 第257号, 1977年1月.
- 6) Mangat, P.S., and Swamy, R.N.: Properties of Polymer Modified Plain and Fibre Reinforced Concrete, Proc. of the 1st International Congress on Polymer Concrete, 1975年9月.
- 7) 橋本 寛・大浜嘉彦: ポリマーセメントコンクリートの鋼繊維による補強, 日本材料学会第26期学術講演会前刷, pp. 95~96, 1977年5月.

(1977.6.18・受付)