

招待論文

ポリマーコンクリートに関する研究の発展と動向

PROGRESS AND TREND OF STUDIES ON POLYMER CONCRETE

岡田 清*

By Kiyoshi OKADA

1. まえがき

コンクリートは結合材としてのセメントペーストと骨材とよりなる2相材料と考えてよいが、結合材としてその一部また全部にポリマーを使用することにより、従来コンクリートに比べ優れた品質のコンクリート・ポリマー複合体をつくることができる。ポリマーは本来は重合体の意味であるが、ここでは広義に有機高分子材料全般をさすものとする。このようなコンクリート・ポリマー複合体には大別して、①結合材にセメントとポリマーを用いたもの（ポリマーセメントコンクリート）、②硬化コンクリートにモノマー、プレポリマー等を含浸させて重合などの操作を加え、コンクリート中にポリマーを結合材の一部として一体化したもの、③結合材にポリマー（主としてレジン樹脂）のみを用いたコンクリート（レジンコンクリート）とがある。

なおコンクリート・ポリマーの複合体としてはコンクリート表面に防水や防食のために施工したポリマー等のコーティングやライニング、また接着剤塗布やひびわれへの樹脂注入等もある。特に前者に対しては海浜近くのコンクリート構造物における塩分の浸透防止のための有力手法としても最近最も注目をあびている。また後者についてはすでに多くの実績をもち評価も定着しつつある。しかしここではこれらについては触れないことにする。

さて、前述の3種のコンクリート・ポリマー複合体の名称については世界的には統一されておらず、術語にも若干の混乱がある。以下ではコンクリート・ポリマー複

合体は単にこれをポリマーコンクリートとし、その他はJIS記載の名称を用いることにする。

各種ポリマーコンクリートの研究開発の歴史は各国で異なっているが、本格的な研究は1950～1960年代に始まったといえよう。米国ではポリマー含浸コンクリートの研究に大きな刺激を受けて、1971年ACI 548委員会「Polymers in Concrete」が設立され、その主催の下にシンポジウムが開催されその成果をSP 40 (1973年)、SP 58 (1978年)、SP 69 (1981年)と発表している。ポリマーコンクリートに関する国際会議も第1回(1975年、英国、ロンドン)、第2回(1978年、米国、オースチン)、第3回(1981年、日本、郡山)、第4回(1984年、西独、ダルムシュタット)と開催され、着々と成果をあげつつある。わが国では日本材料学会、日本建築学会では精力的にこれらに関する委員会活動を行っている。

以下ではポリマーコンクリートに関する研究や応用開発について述べ、その問題点を明らかにし、今後発展の動向に触れる。

2. ポリマーコンクリートの典型的な性質

各種ポリマーコンクリートの典型的な性質を普通コンクリートとの対比のうえで比較してみると、表-1のようである¹⁾。これからもわかるとおり、ポリマー含浸コンクリート(PIC)、レジンコンクリート(REC)には普通コンクリートに比較し、種々の強度、耐凍結融解性、耐酸性、耐摩耗性に対し著しい改良がみられ、ポリマーセメントコンクリート(PCC)は曲げ強度や付着強度、耐摩耗性が向上している。

表-1は、もちろん供試体による実験室の試験結果であり、各ポリマーコンクリートの改良された性質ないし

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科
(〒606 京都市左京区吉田本町)

表一 各種ポリマーコンクリートの典型的な性質¹⁾

性質	普通コンクリート	ポリマー含有量コンクリート (PIC)	レジコンクリート (REC)	ポリマーセメントコンクリート (PCC)
圧縮強度 (kgf/cm ²)	350	1400	1360	385
引張強度 (kgf/cm ²)	25	105	98	56
曲げ強度 (kgf/cm ²)	49	175	210	126
弾性係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)	2.5	4.2	3.5	1.4
付着強度 (kgf/cm ²)	8.8	—	>45	>45
吸水率 (%)	5.5	0.6	0.6	—
耐凍結融解性 (サイクル数/重量減少率%)	700/25	3500/2	1600/0	—
耐硫酸塩性 (浸漬日数/膨張率%)	500/0.5	700/0.1	—	—
耐酸性 (普通コンクリートに対する改善率)	—	10	>20	4
耐摩耗性 (普通コンクリートに対する改善率)	—	5	10	10

その改良の程度と、その製造、施工、適用範囲とが技術的に、また経済的にどのように対応するかによって、各ポリマーコンクリートの発展と将来性が左右されるものである。

3. ポリマーセメントコンクリート (PCC)

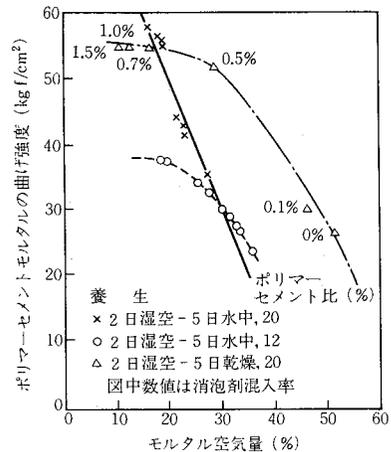
(1) ポリマーの種類と配合要因

セメントポリマー (ポリマー含有量はセメントの重量に対し通常 10~20% 程度) を結合材とする PCC はほとんどモルタルとして使用されている。構造用コンクリートとしての利用が少ないのは、PCC とすることによる品質改良の程度と価格上昇との間の不均衡によるものである。

使用ポリマーの選択は重要である。すなわち、ポリマー添加によりセメントの正常な水和作用が阻害されないこと、およびセメント水和があっても有効なポリマーの造膜性が保持されていること、等が要求される。わが国ではスチレンブタジエンゴム (SBR) ラテックス、エチレン酢酸ビニル (EVA) 系、ポリアクリル酸エステル (PAE) 系エマルジョンが最も多い。これらには通常過剰な空気連行を調整するため適量の消泡剤を含有させてある。最近での年間使用量は約 10 万 t に達している。その他各種の水溶性のポリマーとして、たとえばメチルセルローズ (MC)、ポリビニルアルコール (PVA) 等も施工性や付着性改良のために用いられている。欧米では水性エポキシの使用もあるが、わが国では経済性の点でほとんど用いられていない。

ポリマーセメントコンクリートの特徴はその製造、取扱いが普通のセメントコンクリートの場合とほとんど変わらず、きわめて容易であり、ワーカビリティも良好となること、引張強度、曲げ強度、耐酸性、耐摩耗性等も良好なことである。

わが国で使用されているポリマーセメントモルタルの



図一 消泡剤が SBR セメントモルタルの空気量と強度に及ぼす影響²⁾

配合はセメント砂比 (重量) 1:2~1:3、ポリマーセメント比 (重量) 5~20%、水セメント比は所要のワーカビリティに応じ 30~60% である。養生は通常、数日間湿潤養生とし、その後は使用状態に応じたような空中養生が行われている。なお、使用するポリマーの種類が同じでもポリマーディスパージョンに含まれている安定剤、乳化剤、消泡剤などは製品によって異なっているし、練りませ方法によっても連行される空気量が著しく変わる。このため JIS A 1171 (試験室におけるポリマーセメントモルタルの作り方) では練りませ条件として手練りとし、その詳細を定めている。添加される消泡剤の量とポリマーセメントモルタル強度との関係の一例を図一に示す²⁾。

ポリマーディスパージョンの混入はワーカビリティを増大させるが、これは界面活性作用による AE 効果、セメント分散効果、ポリマー粒子自身によるボールベアリング効果によるものであって、ポリマーディスパージョンは一種の有効な AE 減水剤でもある。なお前記 SBR ラテックス、EVA、PAE エマルジョンを用い 1:3 配合、ポリマーセメント比 5~25%、水量はフロー値 160~180 に調整したポリマーセメントモルタルでの実験によると、水セメント比約 60% 以下ではブリーディングはほとんど生じないものが得られている³⁾。

(2) 強度および耐久性特性

通常、同一ワーカビリティの普通コンクリートに比しポリマーセメントコンクリートの空気量は少なくとも 3% は大である。したがってポリマーが強度に与える影響としては、ワーカビリティ増大による減水の正の効果と空気連行による負の効果があるため、ポリマーセメントコンクリートの圧縮強度の向上はほとんどみられないが、曲げ強度についてはポリマー混入による骨材とマ

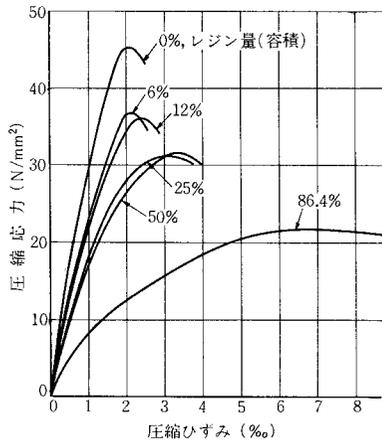


図-2 エポキシセメントモルタルの応力ひずみ曲線に及ぼすエポキシ量の影響 (W/C=0.45, 20°C, 65 RH 養生)⁴⁾

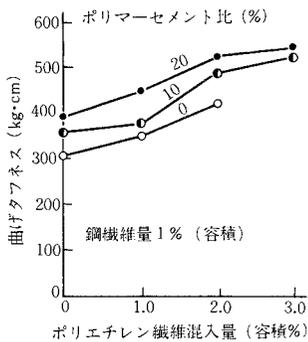


図-3 鋼繊維混入 SBR セメントコンクリートの曲げタフネスに及ぼすポリマーおよびポリエチレン繊維混入の影響⁶⁾

トリックス間の付着向上やポリマー膜形成のために強度向上の効果は大きい。図-2 はエポキシセメントモルタルについてエポキシ混入比(容積比)の変形能への影響を検討した一例である⁴⁾。この例で内部組織の電子顕微鏡観察によるとエポキシ混入比が結合体全容積の6%のものはポリマー量が少なすぎて、セメントペースト系とポリマー系とが共同して結合材として有効に作用しておらず、変形能改善の効果がほとんどないことを裏書きしている。なおエポキシセメントモルタルに減水剤を併用したり、シリカヒュームを混和して、強度の向上を図ろうとする試みも行われている⁵⁾。また鋼繊維や有機繊維(たとえばポリエチレン繊維)を単独あるいは混成使用し、ポリマーセメントコンクリートにより大なる強度やタフネスを与えようとする研究も行われている。図-3はその一例で、鋼繊維1%(容積比)混入のSBRラテックス使用のポリマーセメントコンクリート(C=400 kg/m³, s/a=0.4, 骨材最大寸法10 mm, スランプ10 cm)

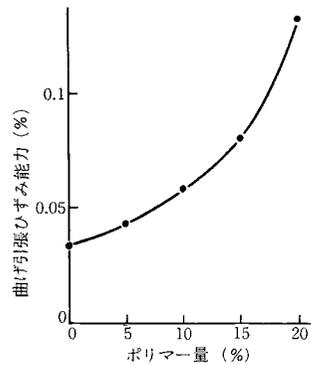


図-4 アクリルセメントモルタルのポリマー量と曲げ引張ひずみ能力(セメント:砂=1:1.5, 材令14日)⁷⁾

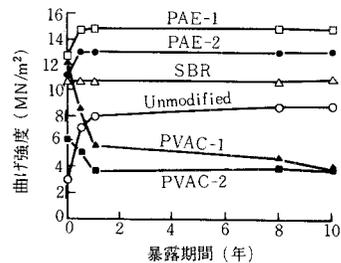


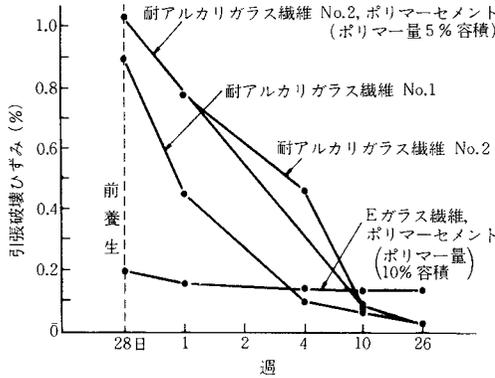
図-5 ポリマーセメントモルタルの屋外暴露時間と曲げ強度⁸⁾

におけるポリマーおよびポリエチレン繊維混入量の曲げタフネスに及ぼす影響を示す⁶⁾。

次に図-4 はポリマー混入によりコンクリートの引張に対する伸び能力の改善を示す一例で、これを工場床等の上部薄層部に使用したとき伸び能力0.05~0.07%以上のポリマーコンクリートでは収縮ひびわれは発生しなかったと報告されている⁷⁾。

ポリマーセメントモルタルの耐久性についても最近かなりまとまった研究が発表されつつある。図-5はその一例で、ポリマーディスパージョンとしてSBR, PAE, PVAC(ポリビニルアセテート)を用い、セメント砂比1:3, ポリマーセメント比20%, 水量はフロー170を得るよう調節したモルタルについて、屋外暴露10年の曲げ強度の変化を普通のセメントモルタルと比較して試験したものである⁸⁾。ポリビニルアセテート(PVAC)使用のもの以外は普通セメントモルタル以上の良好な耐候性を示している。その他、凍結融解抵抗性、耐薬品性等についても検討され、普通セメントモルタルより優れていることが示されている。

その他ガラス繊維補強セメント(GRC)の耐久性向上のためにもポリマーが利用されている。耐アルカリ性のガラス繊維を用いたGRC板でも長年月ではガラス繊維はセメントのアルカリのため劣化することが報告され

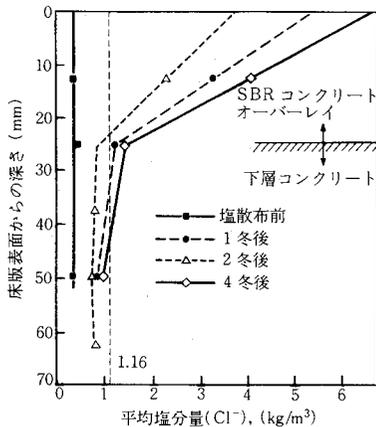


図—6 各種ガラス繊維補強セメントの引張破壊ひずみ (水中50°C養生)⁹⁾

ているが、ポリマーセメントモルタルを用いることによりガラス繊維がポリマーフィルムによる保護を受け劣化を防ぎ得るという。図—6は50°C水中保存の促進試験によるガラス繊維補強ポリマーセメントの引張破壊ひずみの経時変化を普通セメント使用のときと比較したものである⁹⁾。

(3) 利用分野とその拡大

前述のようなポリマーセメントコンクリートの特性を利用して、床材、防水材、防食ライニング材、接着材等への使用がふえている。また修理用としてモルタル層あるいはモルタルやペーストのグラウトに使用されている。米国では1972年以降から塩化カルシウム散布により損傷を受けた橋梁床版のオーバーレー(厚さ25~44mm)にも多く使用され、図—7は25mm厚のSBRセメントコンクリートのオーバーレーにより、床版表面からの塩化カルシウムの浸入量が大幅に減少したことを示す一例である¹⁰⁾。またある橋梁ではSBRセメントモルタル50mm厚の補修層で毎年の多量の解氷剤散布にも



図—7 25mm厚のSBRセメントコンクリートのオーバーレーによる塩分量と深さとの関係(オハイオ州)¹⁰⁾

かわらず20年以上も健全であるという。英国でも修理用のパッチングにSBRセメントモルタル使用の手引を与えており¹¹⁾、C:S=1:2.5、固形分量50%のSBRラテックスをセメント重量の20%使用、施工に適した適当の水量、等の配合をすすめている。わが国では吹付けモルタルにポリマーを混入し、引張りじん性の改良やね返り量の低減を図ることも行われている。

また新しい試みとしてはセメントペースト硬化体中の巨視的なひびわれ(空隙)を取り除き、これを15μm以下にするいわゆるMDF(macro-defect-free)ペーストがBirchallらによって開発され、曲げ強度600~700kgf/cm²がえられているが¹²⁾、これは特殊な粒子分布構成をもつ水硬性セメントと水分散性ポリマーに7~15重量%の水を用いて特殊混合、50kg/cm²で油圧プレス成形したものであり、セメントのファインセラミックス化ともいえるべきものである。同様な試みとして合成したγ-C₂S粉末(ブレン値1550cm²/g)と水溶性のポリマーとしてポリビニルアセテート、およびポリアクリルアミドをそれぞれ5および7%、水量12、15%とし、MDFペーストと同様な成形をし、湿度100°C、RH45%で1時間養生したペーストについて表—2のような結果を得たことも報告されている¹³⁾。

表—2 新しいポリマーセメント複合体の典型的な性質¹³⁾

性 質	使用ポリマー	
	ポリビニルアセテート	ポリアクリルアミド
曲げ強度: σ_t^* (MPa)	73.5	76.6
σ_t^{**} (MPa)	60.2	61.7
吸 収 率 (%)	0.51	0.75
長 さ 変 化 (%)	0.05	0.07
JIS A 1321による不燃性試験	合 格	合 格

* 供試体 3×50×100mm, 45% RH, 100°C 1時間養生

** 同上供試体で300°C, 1時間養生

またプレストレストコンクリートや斜張橋ケーブルのセメント系グラウトに高い伸び能力を与え、また鋼材として亜鉛めっき鋼線が使用されても亜鉛めっきとは反応しないものとして、ポリアクリル酸エステル(PAE)を用いて、ポリマーセメント比20%では2000μ以上の伸び能力が得られた研究もある¹⁴⁾。

これら新しい試みはポリマーセメントコンクリートの新分野をひらくものと考えられる。

4. ポリマー含浸コンクリート(PIC)

(1) 製法と品質

硬化したセメントコンクリートを基材としてこれにポリマーを含浸させたPICの開発は1970年初頭から米国のBNL(Brookhaven National Laboratory)とUSBR(U.S. Bureau of Reclamation)を中心に強力な展開を

み、つづいて欧州各国でも研究が開始された。わが国でもほとんど時を同じくして開発研究が行われてきたが、その後の発展はあまり大きくない。これは以下のような理由による。

すなわち、PIC では基材コンクリートの空隙や水隙はポリマー相と入れ替わり、セメントペーストと骨材間の付着の改善があるため、前出表—1のように高強度、高水密性、優れた凍結融解抵抗や耐摩耗性、耐化学薬品性を示すのが特徴である。しかしその製造は基材となるコンクリートを硬化させたくえてポリマー含浸を行うという2段階処理の複雑さがある。プレキャストされた柱、はり、壁、パネル、パイル等にポリマーを含浸させ、構造材や化学薬品作用、摩耗を受けるプラント構造物、水理構造物等の保護材として有利に利用する試みも行われているが、たとえば成形製品の完全含浸（部材断面に対しポリマーを全断面に含浸させる）のときは、乾燥、脱気、モノマーの加圧含浸、加熱や放射線による重合等の一連の含浸工程を実施するためには、部材の大きさに制限があり、小形のものにしか実施できない欠点がある。これら欠点のため経済的に商品化することが困難なことが多い。

このためコンクリートの表面よりモノマーの湛水による自然含浸で、たとえば深さ40mm程度までポリマーを含浸させ（部分含浸という）、含浸工程の簡易化により完全含浸法と同様な改良効果をねらうことが行われている。

含浸材は通常は低粘度のモノマーや液状レジンであり、わが国では主としてメチルメタクリレート (MMA) やスチレンが使用され、重合作用は加熱によっている。PICの含浸ポリマー量は通常5~15重量%である。ポリマー含浸により基材となるコンクリートはそれが低品質であっても高品質のPICを得ることができるが、最初より高品質のコンクリートでさらに高品質のPICが得られる。この場合高品質の基材コンクリートでは品低質のものをを用いた場合に比べ含浸ポリマー量は少である。一般には高品質の基材コンクリートを用いてPICを得る方が経済的である。

PICの性質については多くの研究成果が発表されているが、表—3はその一例で、基材コンクリートと比較して各種性質を示してある¹⁵⁾。なお今までのPICの最大圧縮強度については良質の砕石使用により2700~2900 kgf/cm²¹⁶⁾、自然砂利で2200 kgf/cm²¹⁵⁾のものが報告されている。ポリマー含浸による強度改良効果については、田沢はぜい性材料の破壊機構に関するグリフィスの理論からの説明を試み、強度の改良は以下に示すようにポリマー含浸前後におけるコンクリートのひびわれ幅、弾性係数、表面エネルギーの比から求まる3つの α_1 、

表—3 ポリマー含浸コンクリートの典型的な性質¹⁵⁾

性質	基材普通コンクリート	MMAコンクリート	MMA+10%TMPTMAコンクリート
ポリマー含浸量(重量%)	0	4.6~6.7	5.5~7.6
圧縮強度(MPa)	34	125	131
弾性係数(10 ³ MPa)	19	43	33
引張強度(MPa)	2.31	10.4	8.62
曲げ強度(MPa)	4.34	15.8	—
曲げ弾性係数(10 ³ MPa)	20	49	—
摩耗抵抗(mm)	1.27	0.38	0.019
キャビテーション抵抗(in)	8.13	0.51	—
温度膨張係数(10 ⁻⁶ /°C)	7.24	9.45	9.11

供試体は含浸前150°Cで乾燥し、重合は加熱法による。
MMA:メチルメタクリレート
TMPTMA:トリメチロールプロパントリメタクリレート

α_2 、 α_3 の積として推定し得るとしている¹⁷⁾。

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_b}{C_i}} \sqrt{\frac{E_i}{E_b}} \sqrt{\frac{\gamma_i}{\gamma_b}} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3$$

ここに、C:内部ひびわれ長さの1/2

E:弾性係数

γ :表面エネルギー

b, i:それぞれ含浸前および含浸後を表わすファイックス

一例として上式に実験値を代入して、コンクリートでは $\alpha=4.87$ 、モルタルでは $\alpha=6.30$ を得ている。

(2) 適用分野と問題点

PICの応用面としては前述のように高強度、防食性、高耐久性あるいは装飾性などを目的に各種のプレキャスト材が製作されたが、大規模な商業化とはならないでいる。

一方、PICの現場施工の例としては、摩耗損傷やキャビテーション、凍結融解による損傷を受けたダム溢水路その他の水理構造の補修や保護があり、米国では開拓局や工兵隊による施工例が報告されている。わが国でも東北電力でダム余水吐きの補修が試みられているが、大浜らは従来工法の簡易化と熱エネルギーの有効利用を図るため、含浸すべき基材コンクリートを乾燥させてただちに含浸材を湛水状態より含浸させ、乾燥時の余熱を利用して重合させる迅速工法の開発を行っており¹⁸⁾、注目される。含浸材としてはモノマーとしてメタクリル酸メチル(MMA)、架橋剤としてトリメチロールプロパンメタクリレート(TMPTPA)、触媒として2,2'-アゾビスイソブチロニトリル(AIBN)、カップリング剤として γ -メタクリロキシプロピルトリメトキシシラン(Silane)をそれぞれ95:5:0.5:1の割合で用いている。

また米国では塩化カルシウムにより損傷を受けた橋梁のコンクリート床版の補修にPICの現場施工が行われた。

この場合は表層50~80mm程度の部分含浸であるが、最近はその改良効果が疑問視されている¹⁹⁾。この工法を

適用する主目的は塩化カルシウムがコンクリート中に浸透して鉄筋を腐食させるのを防ぐことにあるが、施工した多くの床版ではなおびわれのあることが観測され、この工法によってひびわれが封かんされるという保証が全然ないためである。通常、コンクリート床版には、たとえその幅は肉眼では観測されなかったとしても、多少とも収縮ひびわれが生じていることもあり、またこの工法での重合工程でモノマーがポリマーに転化するとき、また高温で重合したポリマーが常温に冷却されたときの収縮によってひびわれが入ることがある。このため補修方法としては表層のコンクリートをはつて鉄筋を露出させ、この周辺コンクリートに含浸させ、その上にレジンコンクリートを打ち込まないと塩化カルシウムの浸入に対し効果がないという報告もある。

古代中国 (A. C. 200 年頃) では、鋪石れんがに桐油を含浸させた優れた製品を使用しており、最近では塩水湖地帯の鉄道軌道下に含浸コンクリートパイプやカルバートを大規模に応用した例が報告されている²⁰⁾。

ポリマー含浸コンクリートの優れた品質とその製造工程を考えると、小型部材への適用の拡大、より有効な現場施工技術の開発、そしてコンクリートへの高い付加価値の付与等についての研究が必要である。

なお、ポリマーに代わり硫黄をせっこうやコンクリートに含浸させる方法も併行して開発研究が行われているが、ここでは述べない。

5. レジンコンクリート (REC)

(1) 配合と品質

従来のセメントの代わりにポリマーを結合材として用い、フィラー、骨材を固めたレジンコンクリート (REC) は最近最も注目をあびている。この開発研究はわが国では西独、ソ連とともに早くも 1960 年頃から行われてきたが、米国でも近年急激にコンクリート構造補修材、工場床やプレキャスト材として利用が高まり、これをポリマーコンクリート (PC) と称している。

使用ポリマーとしては種々のものが用いられるが、わが国では主としてエポキシ樹脂、不飽和ポリエステル樹脂 (ポリエステルスチレン系) とメチルメタクリレートモノマーである。従来は価格と造ったレジンコンクリートの性能との比較上、不飽和ポリエステル樹脂が最も多く用いられてきたが、最近は強い刺激臭はあるが低粘度で施工性がよく、低温養生 (-22°C でも可) でも用い得るメチルメタクリレートモノマーが注目をあびつつある。同様な理由でグリセロール・メタクリレートスチレン系を結合材とするレジンコンクリートについても研究が行われている^{21), 22)}。

フィラーとしては重質の炭カ粉末やシリカ粉やフラ

イアッシュ等が用いられ、細粗骨材は清浄、健全なもの、かつ含水量 0.5 % 以下のものが望ましい。骨材の含水量が多いと強度発現が少ないためである。この影響を緩和するためにシランカップリング剤、吸水剤等を添加することも多い。

レジンコンクリート (モルタル) は普通コンクリートと同様に、一般にはミキサーを用いて練りませ、型枠等に打ち込まれる。モルタルあるいはコンクリートにおける結合材としてのポリマーの量は 9~25 % である。結合材の種類にかかわらず、標準的な配合としては次のようである。

レジンモルタルに対し

結合材：フィラー：細骨材
=1：(0~1.5)：(3~7)

レジンコンクリートに対し

結合材：フィラー：細・粗骨材
=1：(1~1.5)：(8~8.5)

レジンコンクリートの性質は使用ポリマー結合材の種類と性質および骨材の性質に大きく依存する。たとえばメチルメタクリレート (MMA) コンクリートではその圧縮強度は補修用のプレパックド型にしたものでは 500~700 kgf/cm²、構造用の高強度のものは 1 000~1 400 kgf/cm² にも達するが、実際の応用面では必ずしも超高強度を必要とせず、補修用としてはむしろ曲げ強度やたわみ性に富んだものが要求されることが多いといえる。

レジンコンクリートの諸性質の温度依存性も重要で、表-4 は MMA コンクリートに関する結果の一例を示す¹⁹⁾。また図-8 は同一の不飽和ポリエステルレジンを用いたモルタルとコンクリート (表-5 参照) の圧縮強度およびクリープの温度依存性を調べた一例であり、この場合 60°C ではクリープの増大が顕著となっている²³⁾。エポキシレジンコンクリートのクリープについても同様な研究報告があり、樹脂のガラス転移点を境としクリープの増大があるという²⁴⁾。

次にレジンコンクリートの耐久性についても逐次資料

表-4 メチルメタクリレート含浸コンクリートの性質への温度の影響の一例¹⁹⁾

試験	温度 (°C)			
	-26	21	49	88
圧縮強度 (MPa)	171	135	109*	97
弾性係数 (10 ³ MPa)	46	36	—	31
ポアソン比	0.24	0.23	—	0.22
弾性限 (MPa)	97	52	—	33
圧縮破壊ひずみ (10 ⁻³)	5.36	7.08**	—	>8.00
割裂引張強度 (MPa)	10.4	9.9	—	9.4

特記以外は供試体 φ15 cm、高さ 30 cm の 3 個の平均

*供試体数 1 本

**供試体 2 本の平均

ポリマーの含浸量は約 7.5 (重量) %, ポリマー系は MMA 97.5 %, TMPTMA 2.5 %

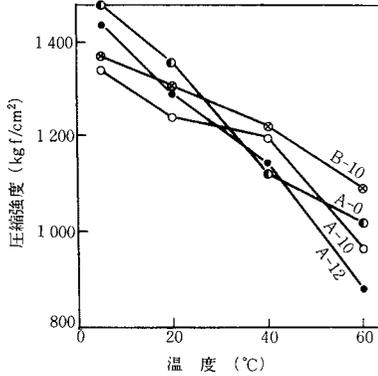


図-8 ポリエステルレジンコンクリートの圧縮強度と温度²³⁾

表-5 レジンコンクリートの重量配合比 (容積配合比, %) ²³⁾

種類	レジンの種類	レジン	フィラー (炭酸カルシウム)	骨石 (最大寸法 15 mm)	砂 FM=2.89
A-10	A	10 (19.0)	10 (8.6)	45 (39.3)	35 (33.1)
A-12	A	12 (22.4)	12 (10.1)	45 (39.5)	30 (28.0)
A-C	A	50 (70)	50 (30)	—	—
B-10	B*	10 (19.1)	10 (8.5)	45 (39.3)	35 (33.1)

* Aに比べやや低収縮、高い熱変形温度のもの。

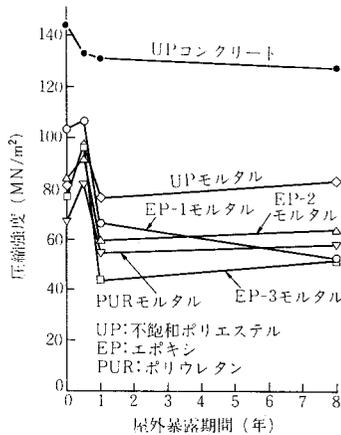


図-9 各種レジンモルタルとポリエステルコンクリートの圧縮強度と屋外暴露期間²⁵⁾

が整いつつあるが、図-9はポリエステル、エポキシ、ポリウレタンの各モルタルとポリエステルコンクリートについて8年間にわたる屋外暴露試験を行った結果を示す²⁵⁾。これによれば暴露の最初の1年での強度は低下はあるがそれ以後に劣化進行は認められていない、今後ともこの種研究の充実が望まれるところである。

レジンコンクリートの応力ひずみ関係はきわめて弾性的である。構造部材として利用するために引張強度補強やじん性増大を図るため、鋼や有機繊維、鉄筋等が使用されるが、鉄筋使用のときは結合材ポリマーの硬化収縮

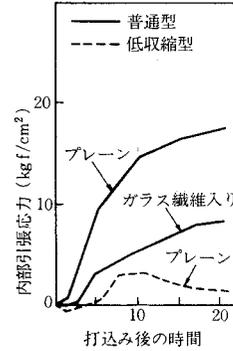


図-10 ポリエステルレジンコンクリートの内部引張応力 (測長70 cm, φ11 mm 鋼棒使用)²⁶⁾

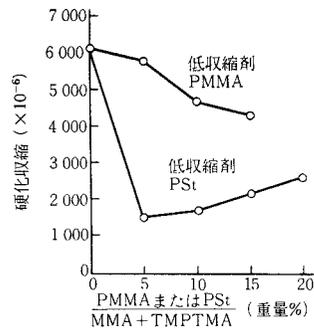


図-11 メタアクリル酸コンクリートの6時間硬化収縮に及ぼす低収縮剤使用の影響²⁷⁾

を拘束するために図-10に一例を示すようにレジンコンクリートには元応力が導入される。このため曲げ材ではひびわれ荷重の増大は望みにくいが、終局強度は増大できる²⁶⁾。

結合材ポリマーの硬化収縮を少とするために低収縮性ポリマーや収縮低減剤の研究も行われていて、図-11はその一例でMMAコンクリートの硬化収縮に及ぼす収縮低減剤としてのポリメタクリル酸メチル (PMMA) およびポリスチレン (PSt) の影響を示す²⁷⁾。

図-12は不飽和ポリエステルレジンコンクリートはりのじん性に及ぼす各種の径およびアスペクト比をもつ鋼繊維補強の影響を検討した一例であるが、粗骨材最大寸法10 mm、結合材の粘度25°Cで360 cPを用いた本実験では径1.0 mm、アスペクト比40のものが最適であったと報告されている²⁸⁾。

(2) 応用分野と研究課題

レジンコンクリートの特徴は、含浸コンクリートと同程度の高強度、耐久性、耐摩耗性、水密性等を有し、また良好な電気絶縁性をもつこと、またその製作に当たっては普通のセメントコンクリートに近い容易さで実施することができ、かつ短時間で硬化させ得ること、等であ

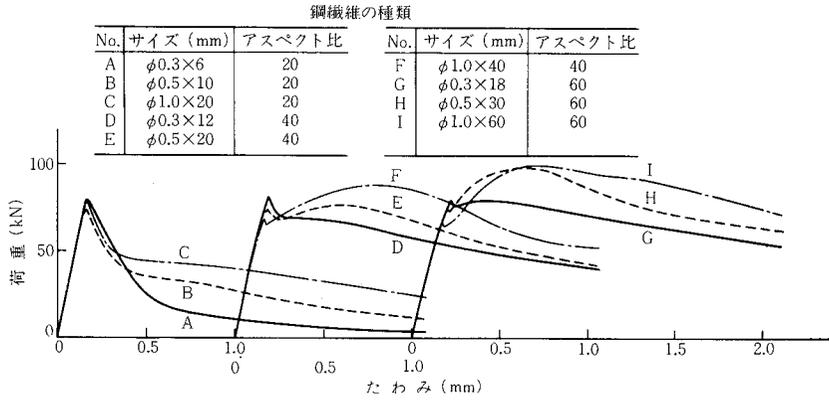


図-12 各種鋼繊維で補強のポリエステルコンクリートの荷重たわみ曲線(鋼繊維量2%容積)²⁸⁾

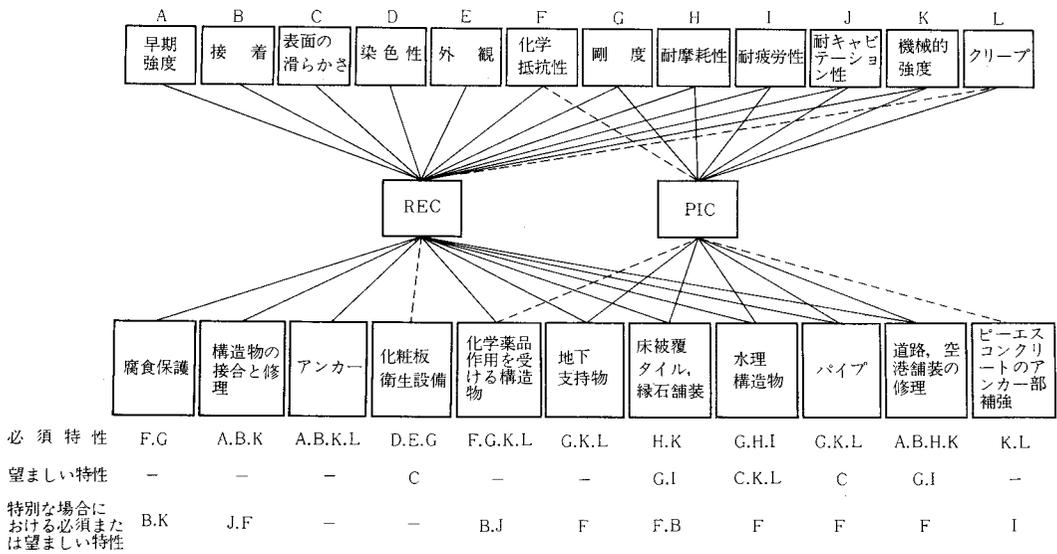


図-13 主要な特性によるレジンコンクリートとポリマー含浸コンクリートとの適用面²⁹⁾

る。

しかし結合材ポリマーはその硬化時に大きな発熱、また比較的大きな収縮を生ずる。そのため1回に打つ打設コンクリートの厚さは必然的に制限され、厚さ15cm以下程度とする必要があり、耐火性に問題がある。

レジンコンクリートの特性を利用し得る応用面を将来の可能性も含めて、含浸コンクリートのそれと比較して示すと図-13のようである²⁹⁾。含浸コンクリートの応用がほとんどない現状において、レジンコンクリート利用に対する期待は大きいといえよう。現在における応用面を大別すると、(1)小断面のプレキャストされた構造部材、(2)保存、装飾、電気絶縁、衛生設備等のプレキャストされた非構造部材、(3)床版や水理構造等の補修、オーバーレー、ライニング等の現場施工が行われるもの、とすることができる。

上記(1)の典型的なものは、わが国の電電公社が大幅に採用している各種型式の不飽和ポリエステルレジン結合材とするマンホールが有名である。これにより従来のセメントコンクリート製のものに比べて大幅な重量軽減(1/3にも達する)による運搬の容易さや接着工法の適用を含めた施工の迅速化が可能となったという。またFRPとポリエステルモルタルと組合せによる合成管で同径の鋼管に等しい強度をもつものも民間数社でつくられており、その最大径は5.2mにも達している。西独では排水溝、下水管、等も使用されている。

レジンコンクリート構造部材の設計方針については研究すべき点も多い。前記電々公社のマンホール設計においては、許容応力度設計法によるものとし、表-6に示すような条件が設定されている。これには鉄筋、鉄網、あるいは各種繊維による補強の影響については触れられ

表-6 レジンコンクリートブロックマンホールの設計条件 (電 電 公 社)

項 目	内 容
路 面 荷 重	T-20 路面満載 (後輪荷重 8 t)
	衝 撃 係 数 $i=0.3$
土 質 条 件	内 部 摩 擦 角 $\phi=30^\circ$
	単 位 体 積 重 量 $\gamma=1.6 \text{ t/m}^3$
	側 壁 と の 摩 擦 角 $\delta=0^\circ$
レジンコンクリート	単 位 体 積 重 量 $\gamma=2.4 \text{ t/m}^3$ ポ ア ソ ン 比 $\nu=0.24$
安 全 率	SF=3
規 格	圧縮応力度 $\sigma_c=1000 \text{ kg/cm}^2$ 以上
	曲げ応力度 $\sigma_b=170 \text{ kg/cm}^2$ 以上
	許容圧縮応力度 $\sigma_{ca}=333 \text{ kg/cm}^2$
	許容曲げ応力度 $\sigma_{cb}=56.7 \text{ kg/cm}^2$

ておらず、現実にはレジンコンクリートの許容曲げ応力度で断面設計は支配されているようである。一方で、コンクリート構造の限界状態設計法適用がすすめられている点をも考慮し、レジンコンクリートの設計法へのさらなる研究が必要である。

応用面 (3) の中には、現場で行う橋梁、道路、空港、工場床や水理構造の補修、保全はもちろんのこと、米国等ではプレキャスト版を用い、その下面の空隙填充にグラウトを行う大規模な修理、わが国で最近成功している電電公社の小径トンネルの現場ライニング、等がある。レジンコンクリートを用いた補修工事は成功例は多いが、米国では大規模なオーバーレー工事で失敗した例もある。それはレジンコンクリート修理層と下のコンクリートとの間に水平のせん断ひびわれや、コンクリートに鉛直のひびわれが生じることである。これらひびわれはレジンの重合時の硬化収縮と外界との温度に対する下層コンクリートとレジンコンクリートとの熱膨張係数の差による温度応力によるものであって、プレキャストのレジンコンクリート版を用いて補修箇所を被覆する方法等も試みられている。この際レジンコンクリート版とコンクリートとの間の接着を安価で確実なもので行う必要があり、よくエポキシが用いられている。また、このような普通コンクリートとレジンコンクリート複合体の外荷重に対する挙動の解析やその設計法については今後の研究にまっところが多い³⁰⁾。

また特筆すべきものとしては電電公社が不飽和ポリエステル樹脂モルタルを用いて、内径 120 cm、厚さ 10 cm の小径トンネルの現場自動施工に成功していることである。このとき早期硬化のレジンコンクリートを必要とするため、所要品質として表-7 を要求している³¹⁾。

なお補修工事は緊急を要する場合も多いので、各種の早期硬化のレジンコンクリートに対する研究も盛んに行

表-7 トンネル用ライニングレジンモルタルの所要性質 (電電公社)³¹⁾

項 目	所 要 値
圧 縮 強 度	>34.3 MPa, 打込み後 45 分間以内
曲 げ 強 度	>14.7 MPa, 打込み後 24 時間以内
付 着 強 度	>14.7 MPa, 水中で打込み後 24 時間以内
粘 度	<60 Pa·s, 25 °C
硬 化 ひ ず み	+0.2% ~ -0.1%
分 離 防 止	練りませ後、24 時間以内で分離しないこと

われているが、たとえば舗装補修用レジンコンクリートに対して検討すべき項目と性質は次のようである³²⁾。

検討項目

1. 硬化時間
2. 性能 (耐久性)
3. 可使時間
4. 練りませ、打設および仕上げの容易さ
5. 広い温度範囲で使用が可
6. 雨天での使用
7. 価格
8. 周囲コンクリートとの色の同調
9. 入手しやすいこと

性質

1. コンクリートに対する付着強度
2. 曲げ強度
3. 収縮
4. 圧縮強度
5. 延性 (ダクティリティー)
6. 耐摩耗性
7. 熱膨張係数
8. スティフネス (弾性係数)

6. あとがき

コンクリートへのポリマーの応用としてポリマーセメントコンクリート、ポリマー含浸コンクリート、レジンコンクリートのそれぞれについて研究・応用開発の現況と問題点を述べたが、長い歴史をもち、優れた構造材料であるコンクリートに対し、より高い性質の付与と、より広範な適用性を図るうえで、ポリマーの果たし得る役割は大きい。ただ、土木技術者にとって、その抱いているコンクリートに対するイメージと、ポリマーという材料の結合には異和感をもつことも多いと思われる。ポリマーコンクリートの発展のためには、これについての知識、情報や教育の普及が必要である。これと同時にポリマーの製造、研究開発に携わっている分野からのコンクリート工学への接近も重要であり、最近とみにその傾向が進みつつあることは喜ばしい。建設技術者とポリマー関係技術者間の相互協力を確実にするためには、各種ポリマーコンクリートの術語や試験方法の標準化の確立が重要である。

これらについては欧米各国ともその対応は十分ではない。試験方法も従来のセメント、コンクリート関係の試験方法の適用可能なもの、またそれに改定を加えるべきもの、また新しく試験方法を定めるべきもの等がある。わが国ではとりあえずポリマーセメントモルタルについては 1980 年に JIS A 6203 「セメント混和用ポリマーデイスパージョン」が制定され、またモルタルの試験方

法として、供試体のつくり方、強度試験、スランプ試験、単位容積重量と空気量試験、について1978～79年にJIS A 1171, 1172, 1173, 1174の一連の規定がつけられている。またポリエステルレジンコンクリートを対象として、供試体のつくり方、圧縮強度試験、曲げ切片による圧縮強度試験、曲げ強度試験、割裂引張強度試験、可使時間試験、について1978年にJIS A 1181～1186が制定されている。米国ではコンクリート用の接着剤や補修材料としてエポキシ樹脂系を用いるときにはASTMやAASHTOの規格、ACIの示方書や指針があるが、ポリマーコンクリートについては特になし。英国でもレジン混合体についての試験方法としてその一部を1983年、BS 6319として公布したが³³⁾、残りも1984年中には追加される予定である。ベルギーでも補修用材料としての樹脂結合材の試験方法や規格値についての案が最近公表されている。いずれにしろ今後各国でこの方面の研究活動の発展を期待したい。

参 考 文 献

- 1) Kaeding, A.O. : Structural Use of Polymers in Concrete, paper at 2nd Intern. Congress on Polymers in Concrete, Oct. 1978, Austin Texas.
- 2) 岡田 清 : プラスチックコンクリート, コンクリート工学, Vol.16, No.1, pp.18～28, Jan. 1978.
- 3) 大浜嘉彦ほか2名 : ポリマーセメントモルタルのブリッジ挙動, 日本材料学会第33期学術講演前刷集, pp.331～334, 昭和59年5月.
- 4) Ludger Lohaus : Harzgehalte für signifikante Änderungen der Festbetoneigenschaften, paper at 4th Intern. Congress on Polymers in Concrete, Darmstadt, pp.241～246, Sept. 1984.
- 5) Sandor Popovics : New results with epoxy modification of Portland cement concrete, paper at 4th Intern. Congress on Polymers in Concrete, Darmstadt, pp.369～373, Sept. 1984.
- 6) 大浜嘉彦・宮良政克 : 繊維混成補強ポリマーセメントコンクリートの性質, 第28回材研連講演会集, pp.195～196, 昭和59年9月.
- 7) Alexanderson, L. : Polymer cement concrete for industrial floors, Proc. 3rd Intern. Cong. on Polymers in Concrete, pp.358～371, Koriyama, May 1981.
- 8) Ohama, Y. et al. : Weatherability of polymer-modified mortars through ten-year outdoor exposure, paper at 4th Intern. Congress on Polymers in Concrete, Darmstadt, pp.67～71, Sept. 1984.
- 9) Bijen, J. : Durability of some glassfibre-reinforced cement composites, ACI Journal pp.305～311, July-Aug. 1983.
- 10) Bishara, A.G. : Latex-Modified Concrete Bridge Deck Overlays, Field-Modified Concrete Bridge Deck Overlays, Field Performance Analysis, TR Record 785, pp.24～32, 1980.
- 11) Cement and Concrete Association : Construction guide, Repairs to concrete affected by reinforcement corrosion by D.D. Higgins, 1984.
- 12) Birchall, J.D., Howard, A.J. and Kendall, K. : Flexural strength and porosity of cement, Nature 389, pp.388～390, 1981.
- 13) Takagi, S. : New field application and development of will, high strength composite materials based on γ -form dicalcium silicate with water soluble polymers, paper at 4th Intern. on Congress, Polymers in Concrete, Darmstadt, pp.271～276, Sept. 1984.
- 14) 小林 剛ほか3名 : ケーブル・グラウト材としてのポリマーセメントの特性について, 土木学会第38回年次学術講演会概要集, 第5部, pp.263～264, 昭和58年9月.
- 15) Concrete-Polymer Materials, Fifth Topical Report, Brookhaven National Laboratory Report BNL 50390 and Bureau of Reclamation Report REC-ERC-73-12, Dec. 1973.
- 16) Fukuchi, T. and Ohama, Y. : Process Technology and Properties of 2500 kg/cm² Concrete Polymer Impregnated Concrete, 2nd Intern. Congress on Polymers in Concrete, Univ. of Texas, Austin, Oct. 1978.
- 17) 田沢栄一 : 樹脂含浸コンクリートに関する基礎研究, 学位論文, 昭和53年3月.
- 18) 大浜嘉彦ほか3名 : 迅速現場ポリマー含浸工法による現場施工例, 日本材料学会第31期学術講演前刷, pp.336～338, 昭和57年5月.
- 19) Depuy, G.W. : Applications of polymers in concrete in the USA, paper at 4th Intern. Congress on Polymers in Concrete, Darmstadt, pp.79～83, Sept. 1984.
- 20) Han-Yu-lan and Xa Ya-ping : The Application of polymer-impregnated Concrete in China's Salt Lake Area, paper at 3rd Intern. Congress on Polymers in Concrete, Koriyama, May 1981.
- 21) 平野 徹ほか3名 : 低温硬化性ポリマーコンクリート, 日本材料学会第33期学術講演会集, pp.340～342, 昭和59年5月.
- 22) Hirano, T. et al. : Characteristic and application of polymer concrete with glycerol methacrylate/styrene system, paper at 4th Intern. Congress on Polymers in Concrete, Darmstadt, pp.333～338, Sept. 1984.
- 23) 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.394～400, May 1975.
- 24) Letsch, R. : Zum Verformungsverfahren von Epoxidharz mörtel bei stationären und instationären Temperaturen, paper at 4th Intern. Congress on Polymers in Concrete, Darmstadt, pp.231～235, Sept. 1984.
- 25) Ohama, Y. : Recent research and development of concrete-polymer composites in Japan, paper at 4th Intern. Congress on Polymers in Concrete, Darmstadt, pp.21～28, Sept. 1984.
- 26) 岡田 清・徳永博文 : レジンコンクリートはりの力学的特性, 材料, Vol.29, No.318, pp.272～278, March 1980.
- 27) 大浜嘉彦ほか3名 : ポリメタクリル酸メチルコンクリート

- トの収縮低減策の検討, 日本材料学会第33期学術講演会集, pp.331~333, 昭和59年5月.
- 28) Koyanagi, W. et al. : Evaluation of toughness of resin concrete and its improvement by steel fibers, paper at 4th Intern. Congress on Polymers in Concrete, Darmstadt, pp.93~98, Sept. 1984.
- 29) 岡田 清: ポリマーコンクリートの問題点と可能性, セメントコンクリート, No.420, pp.2~8, 1982年2月.
- 30) たとえば McCullough, F. et al. : Design of Polymer-Concrete Runway Repairs, TR Record 943, pp.37~42, 1983.
- 31) Takatsuka, T. et al. : Quick setting resin mortar for small diameter tunnel lining, paper at 4th Intern. Congress on Polymers in Concrete, Darmstadt, pp.195~197, Sept. 1984.
- 32) Fowler, D.W. : A Survey on the Use of Rapid-Setting Repair Materials, TR Record 943, pp.33~37, 1983.
- 33) Tillyer, R.B. et al. : A review of UK initiatives in British standards for polymer concrete testing procedures, paper at 4th Intern. Congress on polymers in Concrete, Darmstadt, pp.495~498, Sept. 1984.

(1984.11.19・受付)