

論文 廃発泡ポリスチレン溶液を収縮低減剤として用いたポリエステルコンクリートの長さ変化及び強度

大濱 嘉彦^{*1}・太田 将弘^{*2}・沼田 誠史^{*3}

要旨：本研究では、廃発泡ポリスチレンの有効なリサイクル方法の開発を目的に、収縮低減剤として廃発泡ポリスチレンのスチレン溶液を用いた、プレキャスト製品用ポリエステルコンクリートを製造し、その可使時間、硬化過程における長さ変化及び加熱養生による強度について検討している。その結果、廃発泡ポリスチレンのスチレン溶液を収縮低減剤として用いたポリエステルコンクリートは、廃発泡ポリスチレンのスチレン溶液混入率 30%においてほぼ無収縮を達成できると共に、開始剤及び促進剤添加率の調整によって、可使時間を広範囲に制御可能であり、曲げ強度 23.3～25.6MPa 及び圧縮強度 131～134MPa を発現する。

キーワード：廃発泡ポリスチレン、硬化収縮低減、ポリエステルコンクリート、可使時間、強度

1. はじめに

ポリエステルコンクリートは、速硬・早強性で高強度を発現し、且つ、水密性、耐薬品性、耐摩耗性などに優れることから、主に、ブロックマンホール、パイプ、U字溝などのプレキャスト製品として使われているが、 $3000\sim6000\times 10^{-6}$ という大きな硬化収縮を起こすため、プレキャスト製品におけるひび割れ発生などの問題が生じる。そこで、ポリエステルコンクリートの硬化収縮を低減するため、ポリスチレンやポリ酢酸ビニルなど熱可塑性樹脂をポリエステルコンクリートに混入する方法が採られてきたが、これらの収縮低減剤は、高価なため、付加価値の高い製品にしか使用されないのが現状である。

発泡ポリスチレンは、包装材、魚箱、トレー、断熱材、コンクリート用型枠などに幅広く利用されており、大量に廃棄される。我が国における廃発泡ポリスチレンのマテリアルリサイクル率は、2004年では、その回収量(175,000t/年)の41.0%である¹⁾。しかしながら、まだマテリアルリサイクル率が高いとは言えず、更に効率的なマテリアルリサイクル技術及び再生品の用途

の開発が要求されている。廃発泡ポリスチレンのマテリアルリサイクル法としては、ポリマーモルタル用結合材として廃発泡ポリスチレンのスチレン溶液を用いる方法²⁾と硬化収縮の大きいポリエステルモルタル(結合材として不飽和ポリエステル樹脂を用いたもの)用収縮低減剤として廃発泡ポリスチレン自体を利用する方法³⁾が検討されている。しかしながら、廃発泡ポリスチレンをスチレンに溶解して製造する廃発泡ポリスチレン溶液を、ポリエステルコンクリート用収縮低減剤として利用するための詳細な研究は行われていない。

本研究では、廃発泡ポリスチレンの建設材料としての有効利用、並びに、ポリエステルコンクリートのための安価な収縮低減剤の開発を目的として、廃発泡ポリスチレン溶液を収縮低減剤として用いた、プレキャスト製品用ポリエステルコンクリートを製造し、その可使時間、硬化過程における長さ変化、加熱養生による曲げ及び圧縮強度に及ぼす廃発泡ポリスチレン溶液混入率、開始剤及び促進剤添加率の影響について検討する。

*1 日本大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

*2 日本大学 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*3 日本大学 工学部建築学科

2. 使用材料

2.1 結合材用材料

廃発泡ポリスチレンとしては、その模擬品として、JIS A 9511 (発泡プラスチック保温材) に規定する、ビーズ法発泡ポリスチレンの「保温板 3号」(以下、EPS と略称) を使用した。なお、EPS については、60°C で 48h 乾燥し、その含水率を 0.1%以下にして使用した。結合材用液状レジンとしては、オルトフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂 (以下、UP と略称)、減容剤兼結合材用モノマーとしては、工業用スチレン (以下、ST と略称) を使用した。カップリング剤としては、 γ -メタクリロキシプロピルトリメトキシシラン (以下、silane と略称) を使用した。開始剤としては、メチルエチルケトンパーオキサイド (以下、MEKPO と略称) を使用した。促進剤としては、ナフテン酸コバルト (以下、CoNa と略称) を使用した。

2.2 充填材及び骨材

充填材としては、重質炭酸カルシウム (粒径、0.3-350 μ m) を、細骨材としては、JIS G 5901 (鋳型用けい砂) に規定する 48 号及び 100 号けい砂のブレンド品 (粒径、0.15-0.6mm) を、又、粗骨材としては、JIS A 5001 (道路用碎石) に規定する、硬質砂岩の単粒度碎石 S-5 (7 号) を使用した。なお、充填材及び骨材については、105°C で 48h 乾燥し、それらの含水率を 0.1%以下にして使用した。

3. 試験方法

3.1 供試結合材の調製

EPS:ST=30:70 (質量比) で調製した廃発泡ポリスチレン溶液 (以下、EPS/ST 溶液と略称) を **Table 1** に示す結合材配合に従って、UP に混入した後、silane、MEKPO 及び CoNa を添加し、よくかくはんして供試結合材を調製した。

3.2 供試ポリエステルコンクリートの調製

JIS A 1181 (レジンコンクリートの試験方法) に従って、供試結合材を用いて、**Table 2** に示す割合の供試ポリエステルコンクリートを調製した。

Table 2 Mix Proportions of Polyester Concretes Using UP/EPS/ST-Based Binders.

Mix Proportions (% , mass fraction)			
Binder	Filler	Fine Aggregate	Coarse Aggregate
10.0	20.0	20.0	50.0

3.3 可使時間試験

JIS K 6833 (接着剤の一般試験方法) の 7.1 (可使時間) 及び JIS A 1181 の 6.2 (触感法) に従って、20°C、60% (RH) の条件下において、供試結合材及び供試ポリエステルコンクリートの可使時間を測定した。

3.4 長さ変化試験

非接触型レーザー変位計を用いて、基長を 300mm とし、精度 0.01 μ m で、供試ポリエステルコンクリートの硬化過程における長さ変化を測定した。なお、供試ポリエステルコンクリートの長

Table 1 Formulations of UP/EPS/ST-Based Binders with EPS/ST Solution as Shrinkage-Reducing Agent.

Formulation No.	Formulations (mass fraction)				
	Liquid Resin (%)		Silane (phr*)	MEKPO (phr)	CoNa (phr)
	UP	EPS/ST Solution			
UES10/0-0.5-0.3	100.0	0.0			
UES9/1-0.5-0.3	90.0	10.0			
UES8/2-0.5-0.3	80.0	20.0			
UES7/3-0.5-0.3	70.0	30.0		0.5	0.3
UES6/4-0.5-0.3	60.0	40.0			
UES5/5-0.5-0.3	50.0	50.0			
UES7/3-0.3-0.3			0.5		0.3
UES7/3-0.3-0.5				0.3	0.5
UES7/3-0.3-1.0					1.0
UES7/3-0.5-0.3	70.0	30.0			0.3
UES7/3-0.5-0.5				0.5	0.5
UES7/3-0.5-1.0					1.0

Note, * : parts per hundred parts of resin (mass fraction) .

さ変化は、開始剤及び促進剤の添加後 10min から 1200min (20h) まで、乾燥[20°C, 60% (RH)]養生下において、5min 間隔で測定した。

3.5 供試体の作製

JIS A 1181 に従って、供試ポリエステルコンクリートを寸法 60×60×240mm に成形した後、24h 乾燥[20°C, 60% (RH)]+15h 加熱(70°C)養生を行って供試体を作製した。

3.6 曲げ及び圧縮強度試験

JIS A 1181 に従って、供試体の曲げ及び圧縮強度試験を行った。

4. 試験結果及び考察

4.1 EPS/ST 溶液を収縮低減剤として用いたポリエステルコンクリートの可使用時間、長さ変化及び強度に及ぼす収縮低減剤混入率の影響

Fig.1 には、開始剤及び促進剤添加率を一定とし、EPS/ST 溶液を収縮低減剤として用いた結合材及びポリエステルコンクリートの可使用時間と EPS/ST 溶液混入率の関係を示す。EPS/ST 溶液を収縮低減剤として用いた結合材及びポリエステルコンクリートの可使用時間は、EPS/ST 溶液混入率の増加に伴って短くなる。EPS/ST 溶液を収縮低減剤として用いた結合材及びポリエステルコンクリートの可使用時間と EPS/ST 溶液混入率の間には、高い相関性が認められ、両者の関係は、次の実験式で表される。

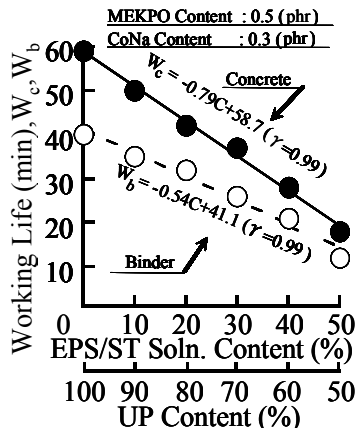


Fig.1 UP : EPS/ST Solution Ratio vs. Working Life of UP/EPS/ST-Based Binders and Polyester Concretes Using EPS/ST Solution as Shrinkage-Reducing Agent.

$$W_b = -0.54C + 41.1 \quad (\gamma = 0.99) \quad (1)$$

$$W_c = -0.79C + 58.7 \quad (\gamma = 0.99) \quad (2)$$

ここに、 W_b : 結合材の可使用時間 (min)

W_c : ポリエステルコンクリートの可使用時間 (min)

C : EPS/ST 溶液混入率 (%)

γ : 相関係数

Fig.2 には、開始剤及び促進剤添加率を一定とし、EPS/ST溶液を収縮低減剤として用いたポリエステルコンクリートの可使用時間と結合材の可使用時間の関係を示す。EPS/ST溶液を収縮低減剤として用いたポリエステルコンクリートの可使用時間は、結合材のそれよりも約 1.4 倍長くなる傾向にある。これは、結合材の重合熱がポリエステルコンクリートの充填材及び骨材に奪われるためと考えられる⁴⁾。EPS/ST溶液を収縮低減剤として用いたポリエステルコンクリートの可使用時間と結合材の可使用時間の間には、高い相関性が認められ、両者の関係は、次の実験式で表される。

$$W_c = 1.44W_b - 0.89 \quad (\gamma = 0.99) \quad (3)$$

ここに、 W_b : 結合材の可使用時間 (min)

W_c : ポリエステルコンクリートの可使用時間 (min)

γ : 相関係数

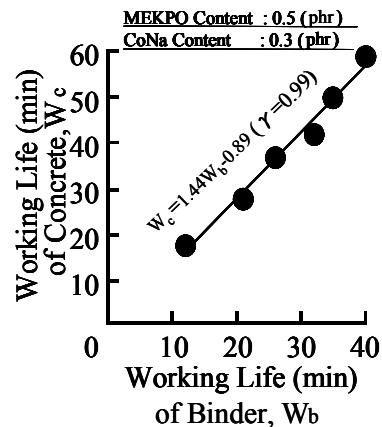


Fig.2 Working Life of UP/EPS/ST-Based Binders vs. Working Life of Polyester Concretes Using EPS/ST Solution as Shrinkage-Reducing Agent.

Fig.3 には、開始剤及び促進剤添加率を一定とし、EPS/ST 溶液を収縮低減剤として用いたポリエステルコンクリートの乾燥養生中における長さ変化挙動を EPS/ST 溶液混入率別に示す。EPS/ST 溶液を収縮低減剤として用いたポリエステルコンクリートの長さ変化は、EPS/ST 溶液混入率にかかわらず、打込み直後では、極めて小さい膨張であるが、乾燥養生材齢の経過に伴って緩やかに収縮に転じ、その後、EPS/ST 溶液混入率 30, 40 及び 50% のポリエステルコンクリートの長さ変化は、徐々に膨張に移行する。その理由は、EPS/ST 溶液混入率の増加に伴って、結合材の重合熱による膨張を起こす EPS の量が増加するためと推察される。更に、ポリエステルコンクリートの長さ変化は、一部の例外を除いて、乾燥養生材齢 12 から 19h において、EPS/ST 溶液混入率別にほぼ一定となる。

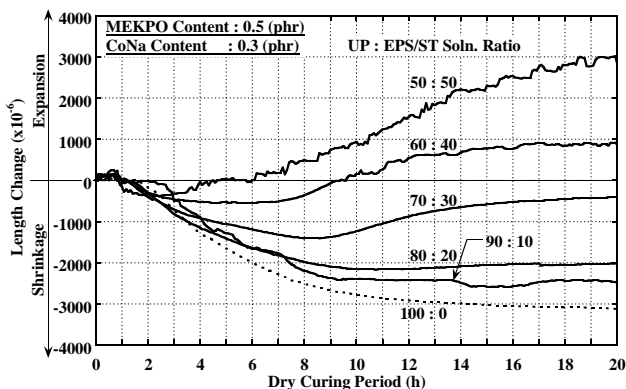


Fig.3 Length Change during Dry Curing of Polyester Concretes Using EPS/ST Solution as Shrinkage-Reducing Agent.

Fig.4 には、開始剤及び促進剤添加率を一定とし、EPS/ST 溶液を収縮低減剤として用いたポリエステルコンクリートの乾燥養生材齢 20h における長さ変化と EPS/ST 溶液混入率の関係を示す。EPS/ST 溶液を収縮低減剤として用いたポリエステルコンクリートの長さ変化は、EPS/ST 溶液混入率の増加に伴って、収縮から膨張に転じ、EPS/ST 溶液混入率 30% 以上において、収縮低減効果が顕著に現れる。EPS/ST 溶液混入率 0~50% におけるポリエステルコンクリートの長さ変化

は、約 $-3000 \sim 3000 \times 10^{-6}$ であり、EPS/ST 溶液混入率 30% において、ほぼ無収縮となる。

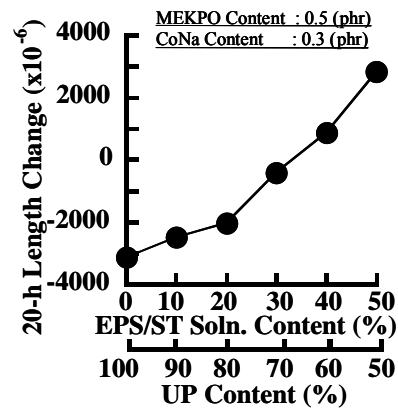


Fig.4 UP : EPS/ST Solution Ratio vs. 20-h Length Change of Polyester Concretes Using EPS/ST Solution as Shrinkage-Reducing Agent.

Fig.5 には、開始剤及び促進剤添加率を一定とし、EPS/ST 溶液を収縮低減剤として用いたポリエステルコンクリートの曲げ及び圧縮強度と EPS/ST 溶液混入率の関係を示す。EPS/ST 溶液を収縮低減剤として用いたポリエステルコンクリートの曲げ及び圧縮強度は、EPS/ST 溶液混入率の増加に伴って緩やかに若干低下する。しかしながら、無収縮に近い EPS/ST 溶液混入率 30% のポリエステルコンクリートの曲げ及び圧縮強度は、23.3 及び 131MPa であり、従来のポリエステルコンクリートと比較しても、遜色ないことが分かる。

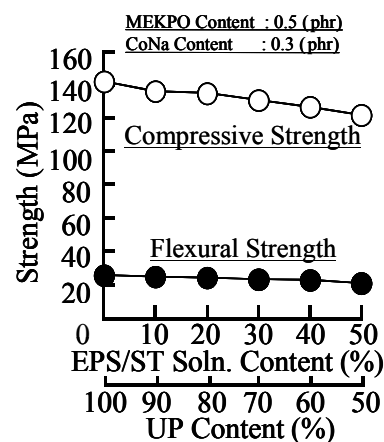


Fig.5 UP : EPS/ST Solution Ratio vs. Flexural and Compressive Strengths of Polyester Concretes Using EPS/ST Solution as Shrinkage-Reducing Agent.

4.2 EPS/ST 溶液混入率 30%のポリエステルコンクリートの可使時間、長さ変化及び強度に及ぼす開始剤及び促進剤添加率の影響

Fig.6 には、EPS/ST 溶液混入率 30%の結合材及びポリエステルコンクリートの可使時間と CoNa 添加率の関係を MEKPO 添加率別に示す。EPS/ST 溶液混入率 30%の結合材及びポリエステルコンクリートの可使時間は、MEKPO 及び CoNa 添加率の増加に伴って短くなる。

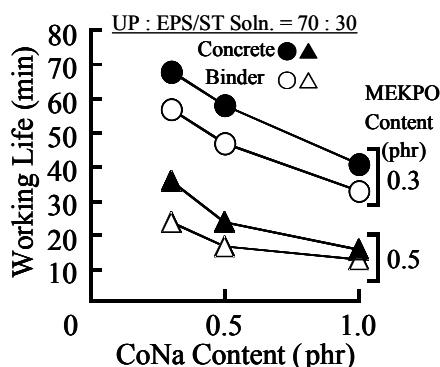


Fig.6 CoNa Content vs. Working Life of UP/EPS/ST-Based Binders and Polyester Concretes with EPS/ST Solution Content of 30%.

Fig.7 には、EPS/ST溶液混入率 30%のポリエステルコンクリートの可使時間と結合材の可使時間の関係を示す。EPS/ST溶液混入率 30%のポリエステルコンクリートの可使時間は、結合材のそれよりも約 1.2 倍長くなる傾向にある。これは、前述したように、結合材の重合熱がポリエステルコンクリートの充填材及び骨材に奪われるためと考えられる⁴⁾。EPS/ST溶液混入率 30%のポリエステルコンクリートの可使時間と結合材の可使時間の間には、高い相関性が認められ、両者の関係は、次の実験式で表される。

$$W_c = 1.15W_b + 1.15 \quad (\gamma = 0.99) \quad (4)$$

ここに、 W_b : 結合材の可使時間 (min)

W_c : ポリエステルコンクリートの可使時間 (min)

γ : 相関係数

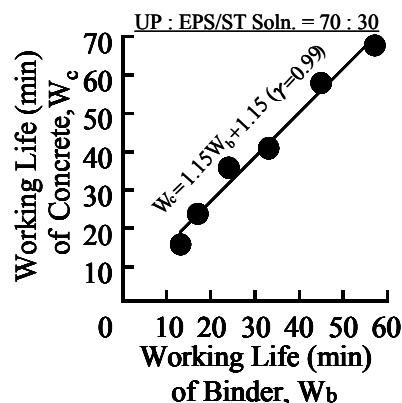


Fig.7 Working Life of UP/EPS/ST-Based Binders vs. Working Life of Polyester Concretes with EPS/ST Solution Content of 30%.

Fig.8 には、EPS/ST 溶液混入率 30%のポリエステルコンクリートの乾燥養生中における長さ変化挙動を MEKPO 及び CoNa 添加率別に示す。EPS/ST 溶液混入率 30%のポリエステルコンクリートの長さ変化は、打込み直後は小さい膨張であるが、MEKPO 及び CoNa 添加率の増加にかかわらず、乾燥養生材齢の経過に伴って緩やかに収縮に転じるが、その後、乾燥養生材齢 6 から 17h において、徐々に膨張に移る。

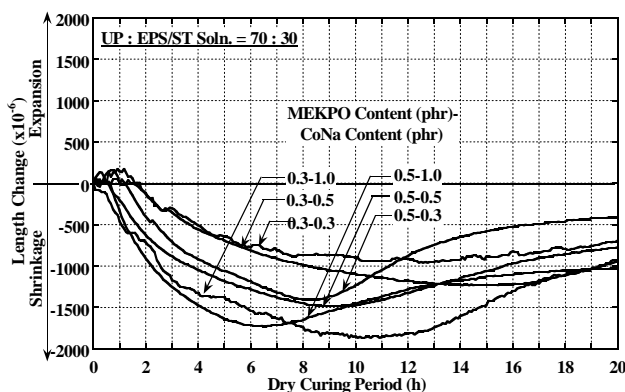


Fig.8 Length Change during Dry Curing of Polyester Concretes with EPS/ST Solution Content of 30%.

Fig.9 には、EPS/ST 溶液混入率 30%のポリエステルコンクリートの乾燥養生材齢 20h における長さ変化と CoNa 添加率の関係を MEKPO 添加率別に示す。EPS/ST 溶液混入率 30%のポリエステルコンクリートの長さ変化は、一部の例外を除いて、CoNa 添加率の増加に伴って、収縮に移行する。

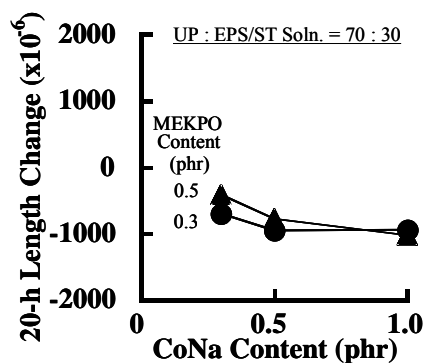


Fig.9 CoNa Content vs. 20-h Length Change of Polyester Concretes with EPS/ST Solution Content of 30%.

Fig.10 には、EPS/ST 溶液混入率 30%のポリエステルコンクリートの曲げ及び圧縮強度と CoNa 添加率の関係を MEKPO 添加率別に示す。EPS/ST 溶液混入率 30%のポリエステルコンクリートの曲げ及び圧縮強度は、MEKPO 及び CoNa 添加率が増加しても、ほとんど変化しない。

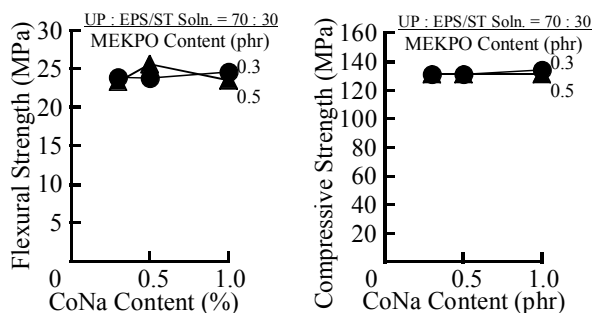


Fig.10 CoNa Content vs. Flexural and Compressive Strengths of Polyester Concretes with EPS/ST Solution Content of 30%.

5. 結論

- (1) EPS/ST 溶液を収縮低減剤として用いたポリエステルコンクリートの可使用時間は、EPS/ST 溶液混入率の増加に伴って短くなるものの、その長さ変化は、EPS/ST 溶液混入率 30%でほぼ無収縮となる。
- (2) EPS/ST溶液混入率 30%のポリエステルコンクリートの可使用時間は、MEKPO添加率を 0.3～0.5phr及びCoNa添加率を 0.3～1.0phrに調整することで、約 20～70minの広範囲に制御可能であり、その時のポリエステルコンクリートの長さ変化は、約-1000～-400×10⁻⁶の範囲にある。又、このポリエステルコンクリ

ートの可使用時間は、式(4)を用いて、結合材の可使用時間から算出することができる。

- (3) EPS/ST 溶液を収縮低減剤として用いたポリエステルコンクリートの曲げ及び圧縮強度は、EPS/ST 溶液混入率の増加に伴って若干低下する傾向にある。しかし、EPS/ST 溶液混入率 30%のポリエステルコンクリートの曲げ強度は 23.3～25.6MPa、圧縮強度は 131～134MPa であり、MEKPO 及び CoNa 添加率の影響をほとんど受けず、従来のポリエステルコンクリートと比較しても遜色ない。

以上のことから、EPS/ST 溶液を収縮低減剤として用いたポリエステルコンクリートは、EPS/ST 溶液混入率 30%において、ほぼ無収縮を達成できると共に、従来のポリエステルコンクリートと同等の強度を発現し、開始剤及び促進剤添加率の調整によって、可使用時間を広範囲に制御できる。

謝辞

本研究は、経済産業省平成 17 年度地域新生コンソーシアム研究開発事業である「廃発泡ポリスチレン溶液を結合材とした高耐久性複合建材の開発」の一部として実施したものである。ここに記し、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 発泡スチロール再資源化協会編：JEPSRA INFORMATION 2005, 発泡スチロール再資源化協会, 東京, pp.10-12, 2005
- 2) 崔 洛運, 大濱嘉彦, 出村克宣：廃発泡ポリスチレンを用いたポリマーモルタルの基礎性状に及ぼす廃発泡ポリスチレン溶液濃度及び架橋剤添加率の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.1135-1140, 2001.6
- 3) 崔 洛運：産業廃棄物を用いた建築用複合材料の開発, 日本大学博士学位論文, pp.107-131, 2003.1
- 4) McNerey, M.T. : Research in Progress: Rapid All-Weather Pavement Repair with Polymer Concrete, Applications of Polymer Concrete, SP-69, American Concrete Insitute, Detroit, pp.93-105, 1981