

論文 ポリマーセメントモルタルの破壊力学的性状

出村克宣*¹, 大濱嘉彦*², 三橋博三*³

要旨：セメントコンクリート及びセメントモルタルの引張に対する性能の改善策として、ポリマーの混入が挙げられる。その改善効果を評価するためには、破壊力学パラメーターの検討が有効であるものと考えられる。本研究では、ポリマーセメントモルタルの圧縮及び引張強さ、破壊エネルギー、特性長さ及び脆性度指標を求めると共に、J積分を用いて引張軟化曲線を推定している。その結果、ポリマーセメントモルタルの引張強さ及び破壊エネルギーはポリマーセメント比の増加に伴って増大するが、その脆性度指標はポリマーセメント比10-15%で最大に達することを明らかにしている。

キーワード：ポリマーセメントモルタル、引張強さ、破壊エネルギー、脆性度指標

1. はじめに

一般に、セメントコンクリート及びセメントモルタルの引張に対する性能の改善策として、繊維補強や各種のポリマーを混入する方法が挙げられる。しかしながら、これらを混入することによる改善効果の評価については、従来から用いられてきた割裂引張強度や曲げ強度だけでは不十分であり、破壊エネルギーや引張軟化曲線などの破壊力学パラメーターの検討が有効であるものと考えられる[1]。

本研究では、ポリマーセメントモルタルの破壊性状を明らかにすることを目的とし、圧縮強さ、引張強さ及びRILEMの試験方法に応じた三点曲げ試験を行い、その圧縮及び引張強さ、破壊エネルギー、特性長さ及び脆性度指標を求めると共に、J積分を用いて、引張軟化曲線を推定する。

2. 使用材料

(1) セメント及び骨材

セメントとしては、普通ポルトランドセメントを、骨材としては、豊浦標準砂を使用した。

(2) セメント混和用ポリマーディスパージョン

セメント混和用ポリマーディスパージョンとしては、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)及びポリアクリル酸エステル(PAE)エマルジョンを使用した。

(3) セメント混和用エポキシ樹脂

セメント混和用エポキシ樹脂(EP)としては、ビスフェノールA型エポキシ樹脂を使用した。

3. 試験方法

3.1 供試体の作製

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)に従って、セメント：砂=1:3(質量比)及びフロー値 170 ± 5 とし、ポリマーセメント比(P/C)を0, 10, 20, 25及び30%としたSBR,

*1 日本大学助教授 工学部建築学科, 工博(正会員)

*2 日本大学教授 工学部建築学科, 工博(正会員)

*3 東北大学教授 工学部建築学科, 工博(正会員)

EVA及びPAE混入モルタル，ポリマーセメント比を0, 5, 10, 15, 20及び30%とした硬化剤無添加EP混入モルタル，ポリマーセメント比を0, 15, 25, 30及び35%とした(SBR+EP5)混入モルタル(EP混入率5%)及びポリマーセメント比を0, 15, 20及び30%とした(SBR+EP10)混入モルタル(EP混入率10%)を調製した。ポリマーセメントモルタルを寸法φ50x100mm(圧縮強さ試験用)，ブリケット形(引張強さ試験用)及び寸法40×40×160mm(三点曲げ試験用)に成形した。その際，三点曲げ試験用供試体については，厚さ2mm，幅40mm及び高さ20mmの亚克力板を型枠中央部に接着しておき，供試体中央部に切欠きが入るようにした。成形後，2日湿空(20℃，80%R.H.)，5日水中(20℃)，21日乾燥(20℃，50%R.H.)養生を行って，供試体とした。

3. 2 圧縮強さ試験

JIS A 1172(ポリマーセメントモルタルの強さ試験方法)及び日本コンクリート工学協会のポリマーセメントモルタル試験方法規準(案)のポリマーセメントモルタルの圧縮強さ及び静弾性係数試験方法(案)に従って，圧縮試験を行い，ワイヤストレインゲージを用いて，供試体の縦ひずみを測定した。その結果から，圧縮強さ及び弾性係数を算出した。なお，弾性係数は，圧縮強さの1/3の応力に対するひずみから，割線弾性係数として求めた。

3. 3 引張強さ試験

日本コンクリート工学協会のポリマーセメントモルタル試験方法規準(案)のポリマーセメントモルタルの引張強さ試験方法(案)に準じて，供試体の引張試験を行った。

3. 4 三点曲げ試験

RILEMの試験方法(案)[2]に従って，インストロン万能試験機を用い，クロスヘッド速度を0.05mm/minとして載荷して，供試体の三点曲げ試験を行い，荷重，載荷点変位及び切り欠き先端の開口変位を測定した。更に，三点曲げ試験結果から，破壊エネルギーを算出すると共に，引張軟化曲線を求めた。又，引張強さ，圧縮試験で得られた弾性係数及び破壊エネルギーから特性長さ[3]を算出し，その逆数を脆性度指標として求めた。

4. 試験結果及び考察

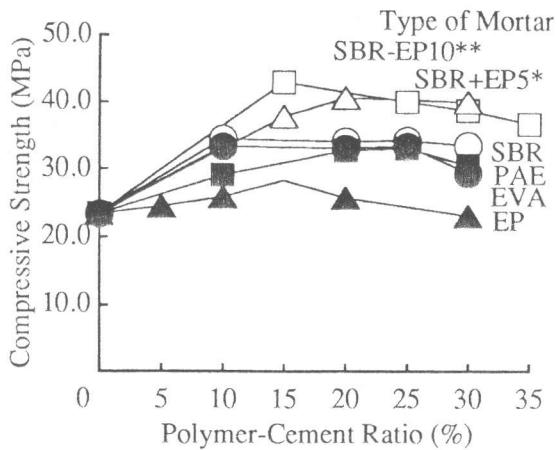
表-1には，ポリマーセメントモルタルの破壊力学パラメーターを示す。図-1から図-3には，ポリマーセメントモルタルの圧縮強さ，引張強さ及び弾性係数とポリマーセメント比の関係

を示す。一般に，ポリマーセメント比の増加に伴い，ポリマーセメントモルタルの圧縮及び引張強さは増大し，その圧縮強さはポリマーセメント比15-25%で最大値に達するが，引張強さはポリ

表-1 ポリマーセメントモルタルの破壊力学パラメーター

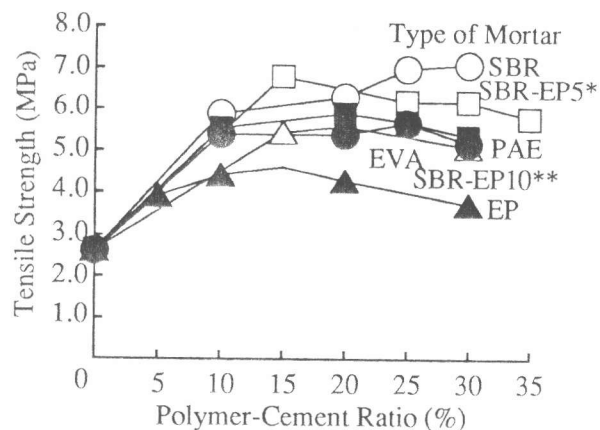
| Type of Mortar | P/C (%) | Water-Cement Ratio (%) | f_c (MPa) | $E_{1/3}$ in Compression (GPa) | f_t (MPa) | Gf (N/cm) | L_{ch} (cm) | $1/L_{ch}$ |
|----------------|---------|------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|-----------|---------------|------------|
| Unmodified | 0 | 77.0 | 23.4 | 15.5 | 2.63 | 0.581 | 13.0 | 0.0769 |
| SBR | 10 | 61.4 | 34.5 | 19.4 | 5.90 | 0.595 | 3.32 | 0.301 |
| | 20 | 53.6 | 34.2 | 18.5 | 6.30 | 1.16 | 5.41 | 0.185 |
| | 25 | 50.3 | 34.3 | 15.2 | 7.00 | 1.82 | 5.65 | 0.177 |
| | 30 | 47.9 | 33.6 | 15.0 | 7.10 | 1.91 | 5.68 | 0.176 |
| SBR + EP5* | 15 | 61.4 | 43.0 | 16.5 | 6.80 | 0.810 | 2.89 | 0.346 |
| | 25 | 53.6 | 40.1 | 11.0 | 6.20 | 1.18 | 3.38 | 0.296 |
| | 30 | 50.3 | 38.8 | 8.79 | 6.20 | 2.17 | 4.95 | 0.202 |
| SBR + EP10** | 35 | 47.9 | 36.8 | 7.45 | 5.80 | 2.34 | 6.94 | 0.144 |
| | 15 | 65.7 | 37.9 | 16.8 | 5.44 | 0.470 | 2.67 | 0.375 |
| | 20 | 61.4 | 40.7 | 16.1 | 5.60 | 0.761 | 3.91 | 0.256 |
| EVA | 30 | 53.6 | 40.1 | 13.5 | 5.10 | 1.37 | 7.09 | 0.141 |
| | 10 | 65.9 | 33.4 | 16.9 | 5.40 | 0.755 | 4.39 | 0.228 |
| | 20 | 58.5 | 33.1 | 9.27 | 5.40 | 1.08 | 3.42 | 0.292 |
| | 25 | 58.0 | 33.5 | 8.45 | 5.70 | 1.53 | 3.98 | 0.251 |
| PAE | 30 | 53.5 | 29.5 | 7.94 | 5.20 | 2.01 | 5.92 | 0.169 |
| | 10 | 61.3 | 29.2 | 17.1 | 5.54 | 0.723 | 4.03 | 0.248 |
| | 20 | 54.8 | 32.8 | 15.2 | 5.91 | 0.851 | 3.70 | 0.270 |
| | 25 | 50.7 | 33.1 | 15.0 | 5.71 | 1.83 | 8.40 | 0.119 |
| EP | 30 | 48.8 | 30.6 | 13.9 | 5.37 | 1.81 | 8.70 | 0.115 |
| | 5 | 77.0 | 24.5 | 15.4 | 3.92 | 0.545 | 5.46 | 0.183 |
| | 10 | 77.0 | 26.0 | 16.2 | 4.42 | 0.638 | 5.29 | 0.189 |
| | 15 | 77.0 | 28.4 | 17.7 | 4.62 | 0.533 | 4.42 | 0.226 |
| | 20 | 77.0 | 25.8 | 17.5 | 4.29 | 0.546 | 5.18 | 0.193 |
| | 30 | 77.0 | 23.2 | 14.0 | 3.74 | 0.603 | 6.02 | 0.166 |

Notes, *EP Content : 5%
**EP Content : 10%



Notes, *EP Content : 5%, **EP Content : 10%

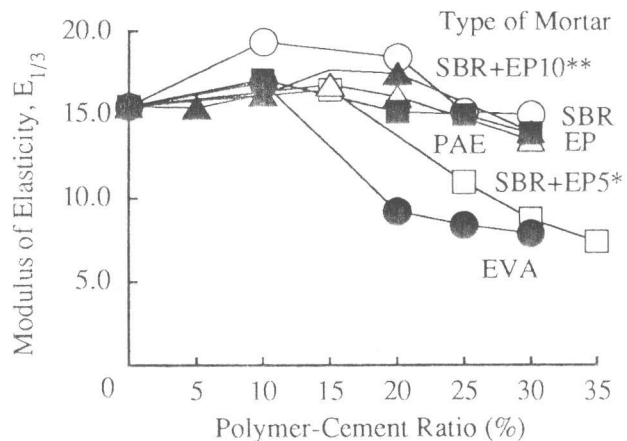
図-1 ポリマーセメントモルタルの圧縮強さとポリマーセメント比の関係



Notes, *EP Content : 5%, **EP Content : 10%

図-2 ポリマーセメントモルタルの引張強さとポリマーセメント比の関係

マーセメント比20%以上ではほぼ一定値を与える。しかしながら、ポリマーセメントモルタルの弾性係数は、ポリマーセメント比15%まで若干増大するか又は一定であり、それ以上のポリマーセメント比では、減少する傾向にある。ポリマーセメントモルタルは、セメント水和物と3次元網状構造を持つポリマーフィルムが結合材相を、骨材が分散相を形成する2相系複合材料と考えることができる。ポリマーセメント比の増加に伴う圧縮強さの改善は、ポリマーの持つ優れた接着性による、骨材と結合材界面の接着性の改善に起因するものとする。



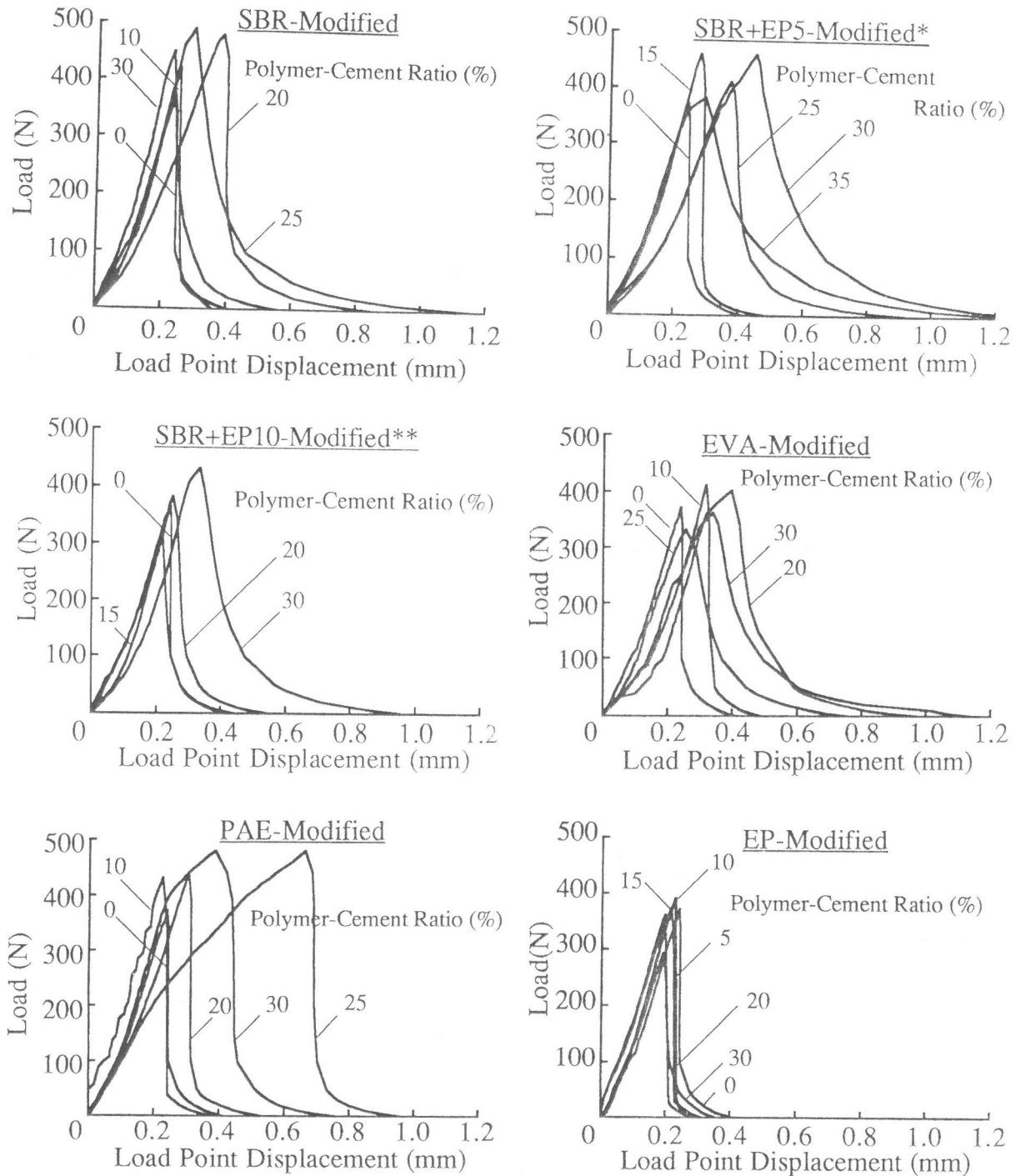
Notes, *EP Content : 5%, **EP Content : 10%

図-3 ポリマーセメントモルタルの弾性係数とポリマーセメント比の関係

しかし、モルタル中に形成されるポリマー

フィルムの弾性係数が小さいことに起因して、ポリマーセメント比が大きくなるとその圧縮強さは低下するものと推察される。又、このことは、ポリマーセメント比が15%までは、ポリマーセメントモルタルの弾性係数の低下を生じさせないが、それ以上のポリマーセメント比での弾性係数の低下をもたらすものとする。一方、ポリマーセメントモルタルの引張強さは、ポリマーセメント比の増加に伴って著しく改善される傾向にある。これは、モルタル中に形成されるポリマーフィルムが優れた引張性能を有するためと推察される。

図-4には、ポリマーセメントモルタルの三点曲げ試験時の曲げ荷重-載荷点変位曲線を示す。ポリマーセメントモルタルの最大曲げ荷重及び最大載荷点変位は、ポリマーセメント比の増加に伴い増大する傾向にあり、曲げ荷重-載荷点変位曲線下の面積で示されるポリマーセメントモルタルのエネルギー吸収能は、ポリマーセメント比の増加に伴って増大する。しかしながら、曲げ荷重-載荷点変位曲線における最大荷重以降の曲線の形状は、いずれも類似した傾向を示しており、ポリマーセメントモルタルにおいては、最大荷重を示した後に急激な荷重低下が生じる。

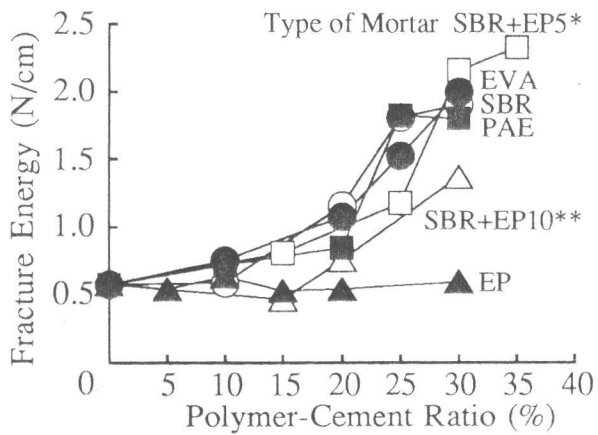


Notes, *EP Content : 5% ,**EP Content : 10%

図-4 ポリマーセメントモルタルの三点曲げ試験時の曲げ荷重-載荷点変位曲線

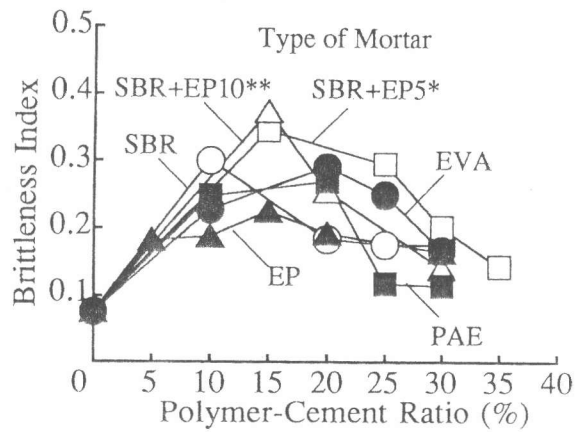
図-5には、ポリマーセメントモルタルの破壊エネルギーとポリマーセメント比の関係を、図-6には、ポリマーセメントモルタルの脆性度指標とポリマーセメント比の関係を示す。又、図-7には、三点曲げ試験の結果から得られた荷重-載荷点変位曲線から、六郷ら[1]によって提案された新J積分法によって作成したポリマーセメントモルタルの引張軟化曲線を示す。

EP混入モルタルを除けば、一般に、ポリマーセメントモルタルの破壊エネルギーは、ポリマーセメント比の増加に伴って増大する傾向にあり、普通セメントモルタル（ポリマーセメント比:



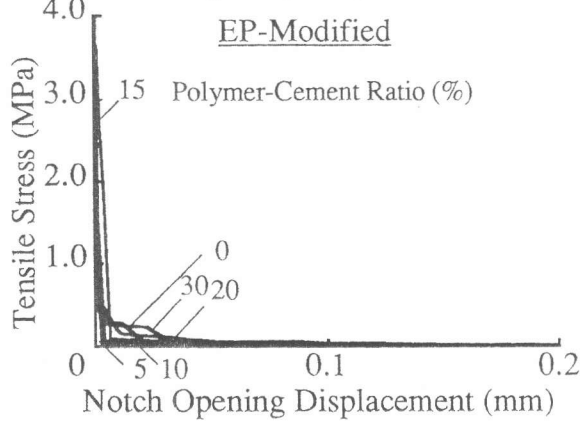
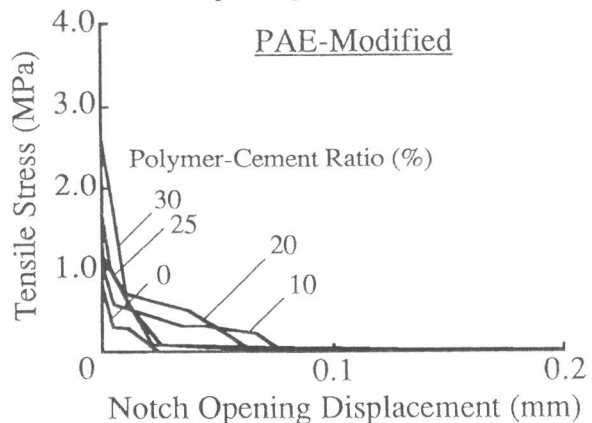
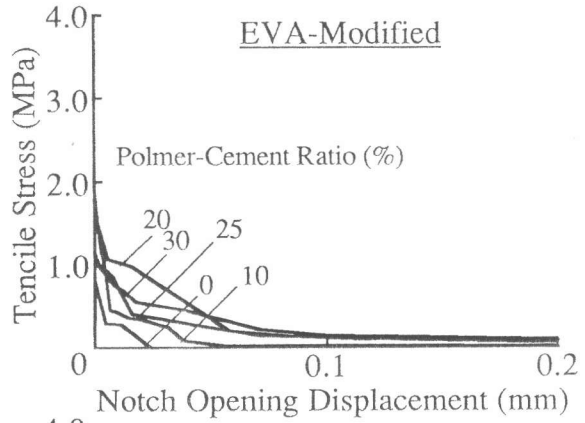
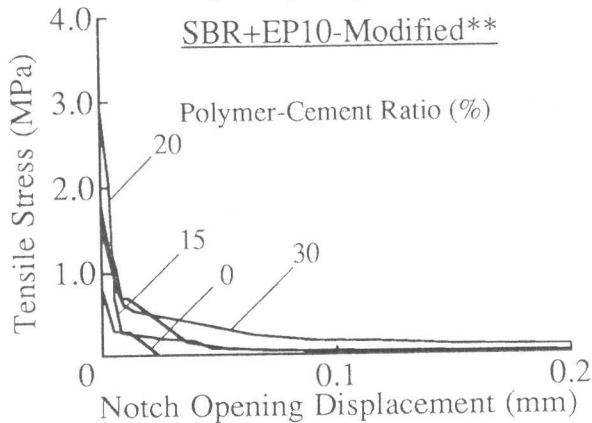
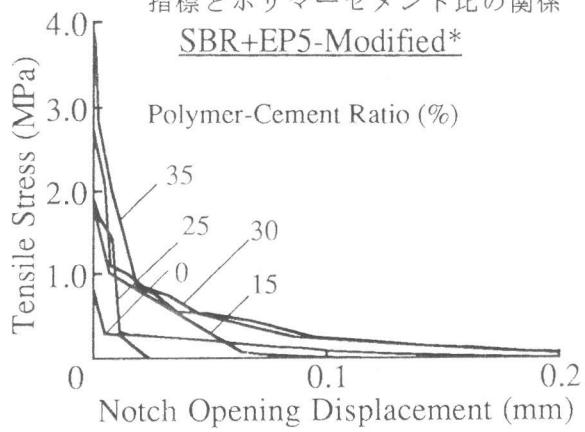
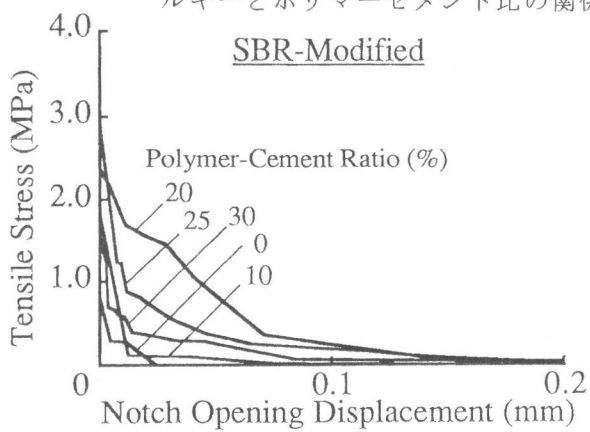
Notes, *EP Content : 5% ,**EP Content : 10%

図-5 ポリマーセメントモルタルの破壊エネルギーとポリマーセメント比の関係



Notes, *EP Content : 5% ,**EP Content : 10%

図-6 ポリマーセメントモルタルの脆性度指標とポリマーセメント比の関係



Notes, *EP Content : 5% ,**EP Content : 10%

図-7 ポリマーセメントモルタルの引張軟化曲線

0%) に比べて、最大破壊エネルギーは約2.5倍から4倍に達する。しかし、ポリマーセメントモルタルの脆性度指標は、ポリマーセメント比10%から20%で最大値を示し、いずれのポリマーセメントモルタルの脆性度指標とも、普通セメントモルタルのそれよりも大きく、ポリマーセメント比が30%程度まで大きくならないと、普通セメントモルタルの脆性度指標に近づかない。脆性度指標は脆性破壊が生じやすい程度を示しており、その値が大きいほど脆性破壊しやすいことを意味する。従って、ポリマーセメントモルタルの脆性改善には、ポリマーセメント比を30%以上とする必要があるものと推察される。以上のように、ポリマーの混入によって、セメントモルタルのエネルギー吸収能が改善されるが、その改善はポリマーの混入に伴う引張強さの改善に起因するものであり、ポリマーセメント比が相当に大きくならないと、その脆性的な破壊性状は改善されないものと推察される。

新J積分法によって作成したポリマーセメントモルタルの引張軟化曲線において、ポリマーセメント比の増加に伴って、ポリマーセメントモルタルの軟化開始応力は増大する傾向にあり、これは、引張強さの改善によるものと考えられる。一方、いずれのポリマーセメントモルタルの引張軟化曲線とも類似した形状を示しているが、ポリマーセメント比10%以上になると、引張軟化曲線と開口変位軸で囲まれる面積は徐々に増大しており、軟化開始応力が増大しても、この面積が増加することによって、ポリマーセメント比の増加に伴う脆性度指標の低下が生じているものと推察される。しかしながら、ポリマーセメント比が大きい場合でも、軟化開始から急激な応力低下を示した後にその面積の増加が生じており、ポリマーセメントモルタルの脆性的な破壊を著しく改善するには至っていない。このことは、破壊エネルギーと脆性度指標の関係について考察したこととよく一致している。

5. 結論

以上の試験結果を結論づければ次の通りである。

- (1) ポリマーセメントモルタルの圧縮及び引張強さは、ポリマーセメント比の増加に伴って増大する傾向にあり、その圧縮強さはポリマーセメント比15-25%で最大値に達するが、引張強さはポリマーセメント比20%以上でほぼ一定値を与える。
- (2) ポリマーセメントモルタルの弾性係数は、ポリマーセメント比15%まで若干増大するか又は一定であり、それ以上のポリマーセメント比では、減少する傾向にある。
- (3) セメントモルタルへのポリマーの混入は、引張強さを改善し、破壊エネルギーを増大させるが、ポリマーセメント比0-30%の範囲では、ポリマーセメントモルタルの脆性度指標はセメントモルタルのそれより大きく、ポリマーセメント比10-15%で最大値に達する。

参考文献

- [1] 六郷恵哲ほか：各種コンクリートの破壊力学パラメータ，コンクリート工学年次論文報告集 11-1, pp. 247-252, 1989
- [2] RILEM Draft Recommendation (TC-50-FMC) : Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Test on Notched Beams, Materials and Structures, Vol. 18, No. 106, pp. 285-290, July/Aug. 1985
- [3] Wittmann, F.H., et al. : Fracture Mechanics of Concrete, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, p. 232, 1983