

論文 竹補強ポリマーセメントモルタルの曲げ性状

我喜屋 宗満^{*1}・齋藤 俊克^{*2}・出村 克宣^{*3}

要旨：本研究では、アクリル系再乳化形粉末樹脂を混入した竹補強ポリマーセメントモルタルの曲げ性状について検討している。その結果、竹補強ポリマーセメントモルタルの曲げ性状は、ポリマーセメント比の増加に伴い改善することを明らかにしている。また、ポリマーセメント比 10 および 20%においては、竹補強ポリマーセメントモルタルの曲げ強さは、初期ひび割れ応力として示される。本研究の限りでは、竹補強ポリマーセメントモルタルの曲げ性状は、エマルジョン処理竹補強材を用いた竹補強セメントモルタルとほぼ同等の性能を有する。

キーワード：竹補強ポリマーセメントモルタル、ポリマーセメント比、初期ひび割れ、タフネス、曲げ強さ

1. はじめに

U 字溝、道路の緑石、駐車場の車止めなどのコンクリート製小型二次製品や非構造部材に使用する補強材に期待される力学的補強効果の要求レベルは、構造部材に比べて相当に低いにもかかわらず、鉄鋼材料が補強材として用いられている。しかし、コンクリート製小型二次製品や非構造部材であれば、鋼材に匹敵する引張強度を有している竹材を補強材として用いることが可能であると考えられる。また、竹を利用することにより、鋼材不足の解消と、竹の用途拡大による竹林の荒廃抑制に寄与することができるものとする。

菊地、出村は、棒状の薄肉竹素材を格子状に組んで補強材とすることによりセメントモルタルの曲げ強さ、曲げタフネスおよび耐衝撃性が改善されることを明らかにしている^{1), 2)}。しかし、竹補強材は乾燥に伴って寸法変化を生じやすく³⁾、セメントモルタルとの付着性が低下し、竹補強セメントモルタルの力学的性質に影響を及ぼすことが懸念される。そこで木村、齋藤らは、竹素材をセメント混和用ポリマーで表面処理したエマルジョン処理竹補強材とすることで、竹素材の引張強さが増大することおよび基材であるセメントモルタルと竹補強材の付着性が改善することから、竹補強セメントモルタルの曲げ性状も改善できることを明らかにしている^{4), 5)}。しかしながら、竹素材に所定量のエマルジョンを塗布する作業は手間が掛かること、およびその養生には数日を要することが製造時の問題点として挙げられる。

一方、ポリマーセメントモルタルはセメント水和物や骨材がポリマーフィルム相で覆われた組織を形成することから、竹補強材に対しても同様の効果が得られると考え、本研究では、竹補強ポリマーセメントモルタルの曲げ性状について検討している。

2. 使用材料

2.1 セメント

セメントとしては、JIS R 5210(ポルトランドセメント)に規定する普通ポルトランドセメントを使用した。その性質を **Table 1** に示す。

2.2 細骨材

細骨材としては、阿武隈川産川砂を使用した。その性質を **Table 2** に示す。

2.3 練混ぜ水

練混ぜ水としては、水道水を使用した。

2.4 セメント混和用ポリマー

セメント混和用ポリマーとしては、アクリル系再乳化形粉末樹脂を使用した。その性質を **Table 3** に示す。

2.5 消泡剤および混和剤

消泡剤としてはシリコーン系消泡剤を使用し、セメント混和用ポリマーの全固形分に対して 0.5% (質量比) 添

Table 1 Physical Properties and Chemical Compositions of Ordinary Portland Cement.

Density (g/cm ³)	Blaine Specific Surface (cm ² /g)	Setting Time (h-min)		Compressive Strength of Mortar (MPa)		
		Initial Set	Final Set	3d	7d	28d
3.16	3330	1-55	3-17	31.3	46.2	61.4
Chemical Compositions (%)						
MgO	SO ₃	ig. loss	Total Alkali	Chloride Ion		
1.80	2.01	1.90	0.56	0.023		

Table 2 Properties of Fine Aggregate.

Size (mm)	Density (g/cm ³)	Water Absorption (%)
≤2.5	2.64	2.27

*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 日本大学 工学部建築学科助教 博士 (工学) (正会員)

*3 日本大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

加した。混和剤としては、ポリカルボン酸エーテル系の高性能減水剤を使用した。その性質を **Table 4** に示す。

2.6 竹材

竹材としては、福島県産の真竹を使用した。その採取条件および性質を **Table 5** および **Table 6** に示す。

3. 試験方法

3.1 ポリマーセメントモルタルの強さ試験

(1) 供試体の作製

JIS A 1171 (ポリマーセメントモルタルの試験方法) に準じて、セメント：細骨材＝1：3（質量比）、ポリマーセメント比を 5, 10 および 20%とした調合の供試ポリマーセメントモルタルを、そのフロー値が 170 ± 5 となるように、水セメント比を調整して練り混ぜ、空気量を測定した。次に、供試ポリマーセメントモルタルを寸法 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ に成形した。その後、2d 湿空 [20℃, 90% (RH)], 5d 水中 (20℃) および 21d 乾燥 [20℃, 60% (RH)] 養生を行って、強さ試験用供試体を作製した。なお、ポリマー未混入モルタル（ポリマーセメント比 0%）の供試体については、セメント：細骨材＝1：3（質量比）、水セメント比 50%でフロー値が 170 ± 5 となる高性能減水剤添加率を 0.6%として練り混ぜ、同様に成形・養生して作製した。

(2) 強さ試験

JIS A 1171 に従って、供試体の曲げおよび圧縮強さ試験を行った。

3.2 竹補強ポリマーセメントモルタルの曲げ試験

(1) 補強用竹素材の作製

Fig.1 に示す箇所から、竹材の表皮が付いていない状態で、厚さ約 1.2mm、幅 9mm の寸法で切り出した棒状の薄肉竹材を、20℃, 60% (RH) の条件下に 2 週間以上静置して気乾状態とし、竹素材とした。**Photo 1** には、作製した補強用竹素材の外観を示す。

(2) 竹補強材の作製

Fig.2 に示すように、(1)で作製した補強用竹素材を格子状に織り込んだものを竹補強材とした。なお、補強用竹素材が交差する箇所は、結束しないものとした。

(3) 供試体の作製

JIS A 1171 に準じて、ポリマーセメント比 0, 5, 10 および 20%とした **3.1(1)**と同一調合の供試ポリマーセメントモルタルを、型枠の高さの中央部に竹補強材を設置した寸法 $20 \times 250 \times 500\text{mm}$ の型枠中に打設した。その後、2d 湿空 [20℃, 90% (RH)], 5d 水中 (20℃) および 21d 乾燥 [20℃, 60% (RH)] 養生を行って、曲げ試験用供試体を作製した。

(4) 曲げ試験

JCI-SF4 (繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げ

Table 3 Properties of Redispersible Powder for Cement Modifier.

Glass-Transition Point, Tg (°C)	Volatile Content (%)	Density (g/cm ³)
8	99±1	0.50

Table 4 Properties of High-Range Water-Reducing Admixture.

Appearance	Density (g/cm ³)	Alkaline Content (%)	Chloride Ion Content (%)
Dark Reddish-Brown Liquid	1.030～1.070	0.9	<0.01

Table 5 Felling Conditions of Bamboo.

Felling Season	Part of Use	Age of Bamboo (Year)
Oct. 2014	Part of 1 to 5 Meter From Roots	3

Table 6 Properties of Bamboo.

Density (g/cm ³)	Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity in Tension (GPa)
0.72	234	20.3

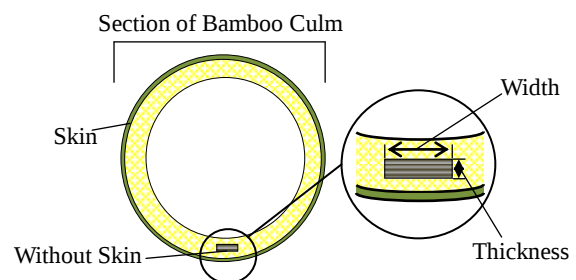


Fig.1 Collection Position of Bamboo Element.



Photo 1 Appearance of Bamboo Element.

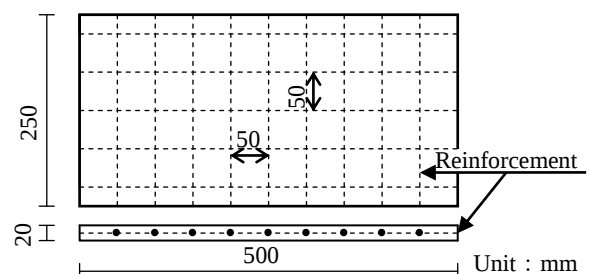


Fig.2 Arrangement of Reinforcement in Specimen.

タフネス試験方法) に準じて、供試体の曲げ試験（3 等分点载荷法）を行った。その際、供試体中央部のたわみを測定した。曲げ試験の結果より、初期ひび割れ応力、初期ひび割れ時のたわみ、初期ひび割れ時までの曲げタ

フネス，初期ひび割れ後の最小曲げ応力，たわみ 15mm までの曲げタフネス，並びに曲げ強さを算出した。

4. 試験結果および考察

Fig.3 には，ポリマーセメントモルタルの水セメント比および空気量とポリマーセメント比の関係を示す。

ポリマーセメントモルタルの水セメント比は，ポリマーセメント比の増加に伴って若干減少する傾向にある。本研究では，フロー値が 170 ± 5 となるように水セメント比を調整して供試体を作製している。従って，ポリマーセメント比が増加すると，セメント混和用ポリマーの持つ界面活性効果やポリマー粒子のボールベアリング効果によってポリマーセメントモルタルのワーカビリティが改善されたため，要求される単位水量が減少して水セメント比が低下するものと推察される。

また，ポリマーセメントモルタルの空気量は，ポリマー未混入モルタル（ポリマーセメント比 0%）に比べて 3%程度小さい値であり，ポリマーセメント比が増加してもほぼ一定である。一般に，セメント混和用ポリマーとしての再乳化形粉末樹脂は空気連行性を有している。そこで，本研究ではその全固形分に対して 0.5%一定の消泡剤を添加しており，ポリマーセメント比が増加すれば，単位容積中の消泡剤量が増加し，空気連行性と消泡効果が相まってほぼ一定の空気量を示すものと推察される。

Fig.4 には，ポリマーセメントモルタルの曲げ強さおよび圧縮強さとポリマーセメント比の関係を示す。

ポリマーセメントモルタルの曲げ強さは，ポリマーセメント比の増加に伴って増大する傾向にある。これは，ポリマーセメント比の増加に伴う水セメント比の減少およびポリマーセメントモルタル中に形成されるポリマーフィルムの曲げ補強効果に起因するものである。

一方，ポリマー未混入モルタルに比べて，ポリマーセメント比 5%のポリマーセメントモルタルの圧縮強さは 10MPa 程度大きい値を示し，ポリマーセメント比が増大すると減少する傾向にある。一般に，ポリマーセメントモルタル中に形成されるポリマー相の弾性係数が小さいことに起因して，ポリマーセメントモルタルの圧縮強さは，ポリマーセメント比の増加に伴い減少する。しかし，ポリマーセメント比 5%のポリマーセメントモルタルにおいて圧縮強さの改善が認められるのは，著しい空気量の低下によるものと推察される。

Fig.5 および **Fig.6** には，それぞれ，竹補強ポリマーセメントモルタルの初期ひび割れ直後までの曲げ荷重－たわみ曲線および，たわみ 30mm までの曲げ荷重－たわみ曲線を示す。

竹補強ポリマーセメントモルタルの曲げ荷重－たわみ曲線は，荷重の増加と共にたわみが増大しながら初期

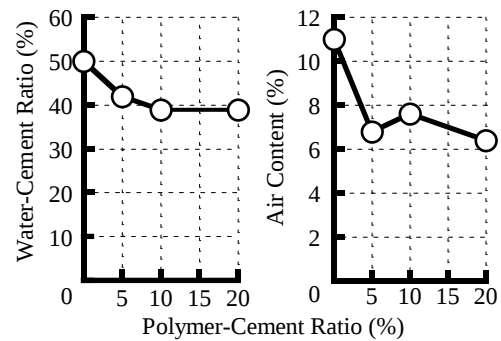


Fig.3 Polymer-Cement Ratio vs. Water-Cement Ratio and Air Content of Polymer-Modified Mortars.

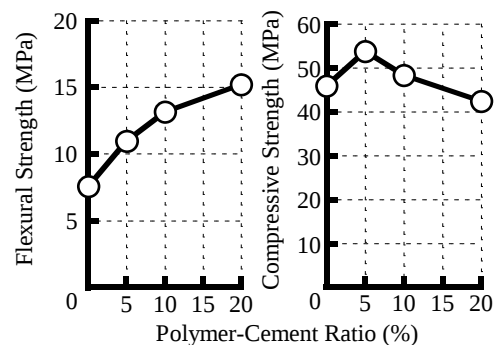


Fig.4 Polymer-Cement Ratio vs. Flexural and Compressive Strengths of Polymer-Modified Mortars.

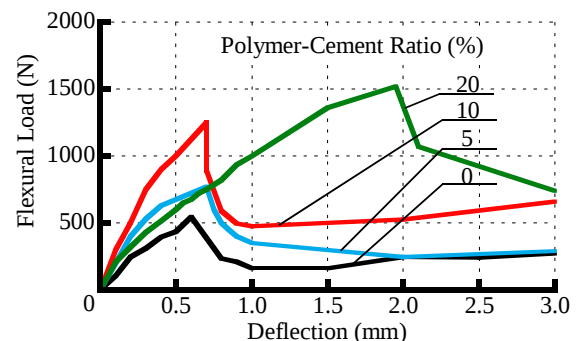


Fig.5 Flexural Load-Deflection Curves for Bamboo-Reinforced Polymer-Modified Mortars after First Crack.

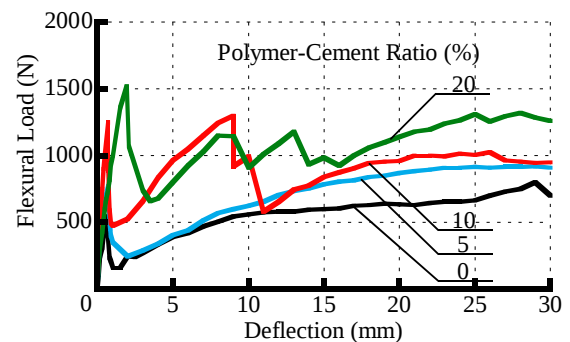


Fig.6 Flexural Load-Deflection Curves for Bamboo-Reinforced Polymer-Modified Mortars up to Deflection of 30mm.

ひび割れ応力に達した後、荷重が急激に低下する。その後、ポリマー未混入竹補強モルタルおよびポリマーセメント比 5%の竹補強ポリマーセメントモルタルにおいては、たわみの増加を伴いながら荷重が緩やかに増大する曲げ荷重-たわみ関係を示す。一方、ポリマーセメント比 10 および 20%の竹補強ポリマーセメントモルタルにおいては、初期ひび割れが発生して荷重が低下した後においても、再び荷重が回復した後、急激に低下し、その後、たわみの増加を伴いながら荷重が増大する荷重-たわみ曲線を与える。特に、ポリマーセメント比 20%の竹補強ポリマーセメントモルタルにおいては、荷重の回復と低下の繰り返しが多い傾向にある。このことは、ポリマーセメント比の大きい竹補強ポリマーセメントモルタルほどひび割れ分散性に優れていることを示唆するものである。

Fig.7 および **Fig.8** には、竹補強ポリマーセメントモルタルの初期ひび割れ応力および初期ひび割れ時のたわみとポリマーセメント比の関係を示す。

竹補強ポリマーセメントモルタルの初期ひび割れ応力および初期ひび割れ時のたわみは、ポリマーセメント比の増加に伴って増大する傾向にある。特に、竹補強ポリマーセメントモルタルの初期ひび割れ応力は、ポリマー未混入竹補強モルタルのそれに比べて、ポリマーセメント比 10%では約 2.4 倍、ポリマーセメント比 20%では約 2.8 倍の値を与える。一方、竹補強ポリマーセメントモルタルの初期ひび割れ時のたわみは、ポリマーセメント比 10%まで、ポリマー未混入竹補強モルタルのそれとほぼ同様の値を与える。しかしながら、ポリマーセメント比 20%の竹補強ポリマーセメントモルタルの初期ひび割れ時のたわみは、ポリマー未混入竹補強モルタルのその 4 倍程度の値を与える。

Fig.9 には、竹補強ポリマーセメントモルタルの初期ひび割れ時までの曲げタフネスとポリマーセメント比の関係を示す。

竹補強ポリマーセメントモルタルの初期ひび割れ時までの曲げタフネスは、ポリマーセメント比 10%まで若干増加し、ポリマーセメント比 20%で著しく増大する。しかしながら、ポリマーセメント比 5 および 10%の竹補強ポリマーセメントモルタルであっても、その曲げタフネスはポリマー未混入竹補強モルタルのその 1.6 倍および 2 倍の値を与える。また、ポリマーセメント比 20%の竹補強ポリマーセメントモルタルの曲げタフネスは、ポリマー未混入竹補強モルタルの 8.2 倍となる。

Fig.10 には、竹補強ポリマーセメントモルタルの初期ひび割れ後の最小曲げ応力とポリマーセメント比の関係を示す。

竹補強ポリマーセメントモルタルの初期ひび割れ後

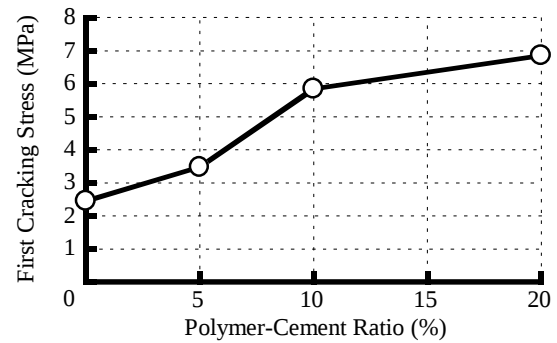


Fig.7 Polymer-Cement Ratio vs. First Cracking Stress of Bamboo-Reinforced Polymer-Modified Mortars.

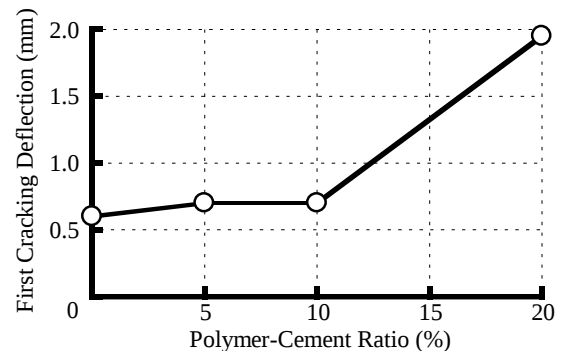


Fig.8 Polymer-Cement Ratio vs. First Cracking Deflection of Bamboo-Reinforced Polymer-Modified Mortars.

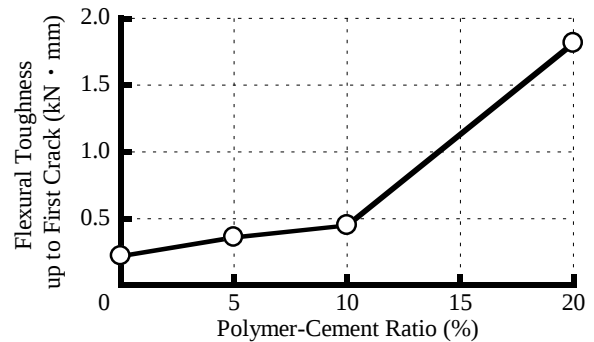


Fig.9 Polymer-Cement Ratio vs. Flexural Toughness up to First Crack of Bamboo-Reinforced Polymer-Modified Mortars.

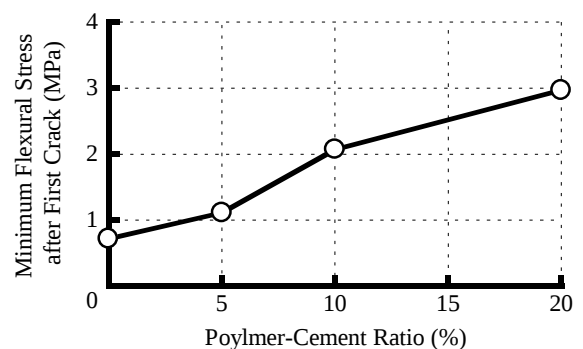


Fig.10 Polymer-Cement Ratio vs. Minimum Flexural Stress after First Crack of Bamboo-Reinforced Polymer-Modified Mortars.

の最小曲げ応力は、ポリマーセメント比の増加に伴って増大する傾向にある。このことは、竹補強ポリマーセメントモルタル中に形成されるポリマーフィルムの曲げ補強効果並びに竹補強材とセメントマトリックスとの付着性の改善に起因するものと考えられる。

Fig.11 には、竹補強ポリマーセメントモルタルのたわみ 15mm までの曲げタフネスを示す。なお、たわみ 15mm までの曲げタフネスを算出したのは、エマルジョン処理竹補強材を用いた竹補強セメントモルタルの曲げ性状⁴⁾との比較を行うためである。

たわみ 15mm までの竹補強ポリマーセメントモルタルの曲げタフネスは、ポリマーセメント比の増加に伴って増大する傾向にある。特に、ポリマーセメント比 10%を超えると、竹補強ポリマーセメントモルタルの曲げタフネスは、ポリマー未混入竹補強モルタルのその 2 倍以上となる。これは、ポリマーフィルムの曲げ補強効果はもちろんのこと、ポリマーセメント比の増加に伴って竹補強材とセメントマトリックスの付着性が改善されることに起因するものと推察される。

Fig.12 には、竹補強ポリマーセメントモルタルの曲げ強さとポリマーセメント比の関係を示す。

竹補強ポリマーセメントモルタルの曲げ強さは、ポリマーセメント比の増加に伴って増大する傾向にある。しかしながら、ポリマーセメント比 10 および 20%の竹補強ポリマーセメントモルタルの曲げ強さは、**Fig.7** で示した初期ひび割れ応力である。換言すれば、ポリマー未混入竹補強モルタルおよびポリマーセメント比 5%の竹補強ポリマーセメントモルタルにおいては、初期ひび割れ後に最大曲げ応力が得られ、ポリマーセメント比 10 および 20%の竹補強ポリマーセメントモルタルにおいては、初期ひび割れ応力が最大曲げ応力である。

前述したように、本研究におけるセメントモルタルに対する竹補強は、コンクリート製小型二次製品や非構造部材への応用を目的としたものであり、特に、コンクリート製小型二次製品における補強用鉄筋は、用心筋として機能することが求められている。そのような観点から特に、竹補強を行った場合の荷重-たわみ関係における初期ひび割れまでの性能が重要視されることが考えられる。これまでの試験結果から推察すれば、竹補強モルタルの基材としてポリマーセメントモルタルを使用することは有用であり、その効果は特にポリマーセメント比 10%以上で発揮されることが示唆される。

ここで、本研究と同様の補強を行うに当たって、エマルジョン処理竹補強材を用いた竹補強セメントモルタルの曲げ性状についての筆者らの研究結果⁴⁾との比較を次に示す。なお、竹補強材の処理にはカチオン系アクリルエマルジョンを使用し、10~40g/m²で竹補強材に塗布

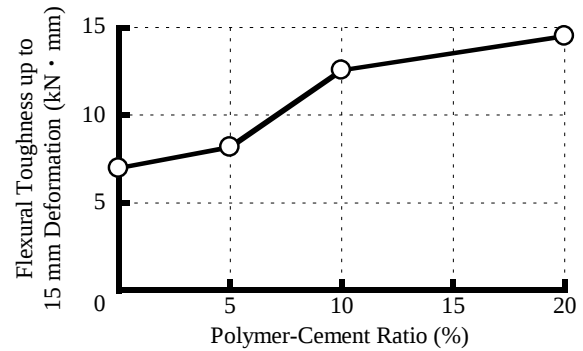


Fig.11 Polymer-Cement Ratio vs. Flexural Toughness up to 15mm Deflection of Bamboo-Reinforced Polymer-Modified Mortars.

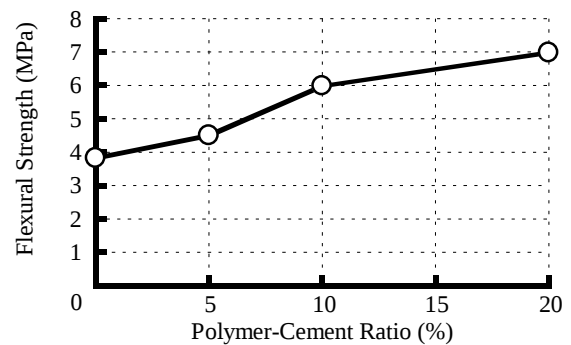


Fig.12 Polymer-Cement Ratio vs. Flexural Strength of Bamboo-Reinforced Polymer-Modified Mortars.

して乾燥養生した。その後、エマルジョン処理竹補強材を用いて竹補強セメントモルタルを作製し、本研究と同様に養生して供試体を作製している。

塗布量 10~40g/m²としたエマルジョン処理竹補強材を用いた竹補強セメントモルタル

- 1.初期ひび割れ応力：3.5~4.0MPa
- 2.たわみ 15mm までの曲げタフネス：12~17kN・mm
- 3.曲げ強さ：5.0~7.5MPa

ポリマーセメント比 5~20%とした竹補強ポリマーセメントモルタル（本研究の結果）

- 1.初期ひび割れ応力：3.5~6.8MPa
- 2.たわみ 15mm までの曲げタフネス：8.0~15kN・mm
- 3.曲げ強さ：4.5~7.0MPa

これらのことから、曲げ性状に関して、竹補強ポリマーセメントモルタルは、エマルジョン処理竹補強材を用いた竹補強セメントモルタルとほぼ同等の性能を有すると推察される。

5. 結論

本研究で得られた試験結果を総括すれば、次の通りである。

- (1) 本研究において基材としたポリマーセメントモルタルの水セメント比はポリマーセメント比の増加

に伴い若干減少し、その空気量はポリマーセメント比 5%以上ではほぼ一定の値である。また、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曲げ強さは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 5%で最大値を与える。

- (2) 竹補強ポリマーセメントモルタルの曲げ荷重－たわみ曲線は、荷重の増加と共にたわみが増大して初期ひび割れに達した後、荷重が急激に低下する。その後、たわみの増加を伴いながら荷重が回復する傾向にあるが、ポリマーセメント比 10 および 20%の竹補強ポリマーセメントモルタルにおいては、再び荷重の回復と低下が繰り返される曲げ荷重－たわみ関係を示す。
- (3) 竹補強ポリマーセメントモルタルの初期ひび割れ応力、初期ひび割れ時のたわみ、初期ひび割れ時までの曲げタフネス、および初期ひび割れ後の最小曲げ応力は、ポリマーセメント比の増加に伴い増大する傾向にある。
- (4) 竹補強ポリマーセメントモルタルのたわみ 15mm までの曲げタフネスは、ポリマーセメント比の増加に伴って増大する傾向にある。
- (5) 竹補強ポリマーセメントモルタルの曲げ強さはポリマーセメント比の増加に伴って増大するが、ポリマーセメント比 10 および 20%のもののそれは、初

期ひび割れ応力が曲げ強さとなる。

- (6) 本研究の限りでは、竹補強ポリマーセメントモルタルの曲げ性状は、エマルジョン処理竹補強材を用いた竹補強セメントモルタルとほぼ同等の性能を有すると推察される。

参考文献

- 1) 菊地弘悦, 出村克宣: 竹補強セメントモルタルの機械的性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.793-798, 2007.6
- 2) 菊地弘悦, 出村克宣: 竹補強セメントモルタルの機械的性質に及ぼす養生方法の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.387-392, 2008.6
- 3) 菊地弘悦: 竹補強セメントモルタルの基礎的性質, 日本大学修士学位論文, pp.24-33, 2008.2
- 4) 木村彰吾, 齋藤俊克, 出村克宣: エマルジョン処理竹補強材を用いた竹補強セメントモルタルの曲げ性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1456-1461, 2012.6
- 5) 齋藤俊克, 木村彰吾, 出村克宣: エマルジョン処理竹補強材を用いた竹補強セメントモルタルの曲げ性状に及ぼす養生方法の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1429-1434, 2013.6