

# 論文 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

齋藤 俊克\*1・木村 彰吾\*2・出村 克宣\*3

**要旨:** 本研究では、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を水中養生、湿乾養生、並びに湿乾養生後水中養生した場合の曲げ性状について検討している。その結果、竹素材の引張強さおよびセメントモルタルに対する竹素材の付着強さは、エマルジョン塗布量の増加に伴って増大する。また、湿潤竹素材の引張強さは、乾燥のものに比べて小さくなる。竹補強材をエマルジョン処理することによって竹補強セメントモルタルの曲げ性状は改善するが、水中養生したものに比べて、その他の養生を行った方が曲げ強さおよび曲げタフネスが大きい傾向にある。

**キーワード:** 竹補強セメントモルタル, エマルジョン処理, 養生方法, 引張強さ, 付着強さ, 曲げ性状

## 1. はじめに

U字溝、道路の縁石、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、小型二次製品や非構造部材であれば、力学的要求レベルによっては、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の抑制に寄与することができるものと考えられる。

菊地、出村は、これまで、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<sup>1), 2)</sup>。また著者らは、竹補強材はセメントモルタルの乾燥に伴って寸法変化を生じやすく、その付着性が低下し、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ことから、竹補強材をセメント混和用ポリマーエマルジョンで処理することを試みている。その結果、エマルジョン処理竹補強材を用い、乾燥養生した場合には、その使用が竹補強セメントモルタルの曲げ性状を改善することを明らかにしている<sup>3)</sup>。

本研究では、湿潤状態においても、竹補強材のエマルジョン処理効果が得られるかどうかを明らかにする目的で、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を水中養生、湿乾養生、並びに湿乾養生後水中養生した場合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 練混ぜ水および混和剤

練混ぜ水としては、水道水を使用した。また、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。混和剤の性質を **Table 3** に示す。

### 2.4 竹材

竹材としては、福島県産の真竹(気乾密度: 0.72 g/cm<sup>3</sup>)を使用した。その採取条件を **Table 4** に示す。

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

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine Specific Surface (cm <sup>2</sup> /g)	Setting Time (h-min)		
		Initial Set	Final Set	
3.16	3370	2-22	3-27	
Compressive Strength of Mortar (MPa)				
3d		7d		
31.0		44.4		
7d		28d		
62.1		62.1		
Chemical Compositions (%)				
MgO	SO <sub>3</sub>	ig. loss	Total Alkali	Chloride Ion
2.25	2.03	2.47	0.49	0.019

**Table 2 Properties of Fine Aggregate.**

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

\*1 日本大学 工学部建築学科助教 博士(工学) (正会員)

\*2 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

\*3 日本大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

## 2.5 竹素材の表面処理剤

竹素材の表面処理剤としては、セメント混和用として用いられるカチオン系アクリルエマルジョンを使用した。表面処理剤の性質を **Table 5** に示す。

## 3. 試験方法

### 3.1 竹素材の引張試験

#### (1) 竹素材の作製

3 箇月間屋外で放置した竹材の **Fig.1** に示す箇所から表皮が付いていない状態で、厚さ約 1.2mm、幅約 3mm、長さ 300mm の寸法で竹素材を切り出し、20°C、60% (RH) の条件下に 2 週間静置して気乾状態とした。更に、表面処理剤を 0、10、20 および 40g/m<sup>2</sup> 塗布し、20°C、60% (RH) の条件下で 48h 乾燥して、エマルジョン処理乾燥竹素材（以下、乾燥竹素材と称する）とした。また、湿潤時の挙動を検討するために、乾燥竹素材を 1d 水中 (20°C) 浸せきして湿潤竹素材とした。なお、竹素材の中央部分に引張応力を集中させるために、中央部分の厚さが約 0.4mm になるように紙やすりを用いて削ってからエマルジョン処理した。**Photo 1** には、竹素材の外観を示す。

#### (2) 竹素材の引張試験

乾燥および湿潤竹素材について、荷重速度 1mm/min で載荷して引張試験を行い、縦ひずみを測定し、弾性係数を算出した。

### 3.2 セメントモルタルに対する竹素材の付着試験

#### (1) 被着体としてのセメントモルタルの強さ試験

##### 1) 供試体の作製

JIS R 5201 (セメントの物理試験方法) に従って、**Table 6** に示す調合の供試モルタルを調製して、寸法 4×4×16cm に成型し、1d 湿空 [20°C、90% (RH)]、6d 水中 (20°C) および、27d 乾燥 [20°C、60% (RH)] 養生を行って、強さ試験用供試体を作製した。

##### 2) 強さ試験

JIS R 5201 に従って、供試体の曲げおよび圧縮強さ試験を行った。

#### (2) 竹素材の付着試験

##### 1) 竹素材の作製

3.1 (1) に示した方法で、エマルジョン塗布量 0、10、20 および 40g/m<sup>2</sup> とした乾燥竹素材を作製した。

##### 2) 付着試験用供試体の作製

セメントモルタルに対する埋め込み長さが 4cm になるように竹素材を設置した寸法 4×4×16cm の型枠中に、

**Table 3 Properties of High-Range Water-Reducing Admixture.**

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

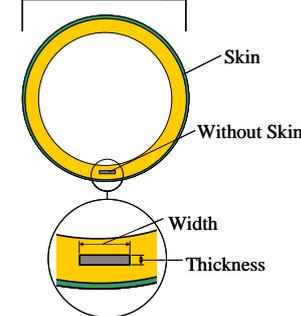
**Table 4 Felling Conditions of Bamboo.**

Felling Season	Part of Use	Age of Bamboo (Year)
April 2012	Part of 1 to 5 Meter from Roots	4

**Table 5 Properties of Polymer Emulsion.**

Appearance	Volatile Content (%)	Viscosity (mPa · s)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Minimum Temperature of Film Formation (°C)
Milk-White Liquid	45	10~20	1.02	0

**Section of Bamboo Culm**



**Emulsion Treated**



**Untreated**

**Fig.1 Collection Position of Bamboo Element.**

**Photo 1 Appearance of Bamboo Elements.**

(1) の 1) と同様に調製したセメントモルタルを打設した。その後、1d 湿空 [20°C、90% (RH)]、6d 水中 (20°C) および、27d 乾燥 [20°C、60% (RH)] 養生を行って、付着試験用供試体を作製した。

#### 3) 付着試験

**Fig.2** に示すように、供試体に埋め込まれた竹素材をクロスヘッド速度 5mm/min で引き抜き、付着試験を行った。その際、クロスヘッドの移動距離から、竹素材の供試体からの引き抜け距離を測定した。

### 3.3 竹補強セメントモルタルの曲げ試験

#### (1) 竹補強材の作製

3.1 (1) と同様に、竹材から厚さ約 1.2mm、幅 9mm の寸法で竹素材を切り出し、気乾状態として補強用竹素

**Table 6 Mix Proportions of Cement Mortar.**

W/C (%)	Cement : Sand (by mass)	Mix Proportions (kg/m <sup>3</sup> )			WRA* (%)	Flow
		Water	Cement	Fine Aggregate		
45	1 : 3	222	494	1482	1.1	170±5

Note, \*: High-range water-reducing admixture content to cement by mass.

材とし、補強用竹素材を格子間隔 50mm となるように編み込み、無処理竹補強材とした。更に、補強用竹素材に表面処理剤を 40g/m<sup>2</sup> 塗布し、48h 乾燥 [20℃, 60% (RH)] 養生して、エマルジョン処理竹補強材とした。

### (2) 曲げ試験用供試体の作製

JIS A 1138 (試験室におけるコンクリートの作り方) に準じて、Table 6 に示した調合の供試モルタルを練り混ぜ、無処理竹補強材およびエマルジョン処理竹補強材を 1 層設置した寸法 2×25×55cm の型枠中に打設した。その後、以下に示す 3 種類の養生を行って、曲げ試験用供試体を作製した。なお、Fig.3 には供試体の概要図を示す。

- (a) 水中養生 (W27) : 1d 湿空 [20℃, 90% (RH)] および 27d 水中 (20℃) 養生
- (b) 湿乾養生 (W6D21) : 1d 湿空 [20℃, 90% (RH)], 6d 水中 (20℃) および 21d 乾燥 [20℃, 60% (RH)] 養生
- (c) 湿乾養生後水中養生 (W6D21W7) : 1d 湿空 [20℃, 90% (RH)], 6d 水中 (20℃), 21d 乾燥 [20℃, 60% (RH)] および 7d 水中 (20℃) 養生

### (3) 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タフネス試験方法) に準じて、供試体の曲げ試験を行った。また、供試体中央部のたわみを測定し、たわみが 15mm における曲げタフネスを算出した。なお、竹補強セメントモルタルは、変形性能に優れた材料であるため、規定の 3mm ではなく、15mm までのたわみを用いて、曲げタフネスを算出している。

## 4. 試験結果および考察

### 4.1 竹素材の引張性状

Fig.4 には、乾燥および湿潤竹素材の引張応力-ひずみ度曲線をエマルジョン塗布量別に示す。その乾湿状態並びにエマルジョン塗布量にかかわらず、竹素材は、最大引張応力までひずみ度がほぼ直線的に増大し、破壊に至ると脆性的な破壊挙動を示す。また、エマルジョン塗布量が多い竹素材ほど、最大引張応力時のひずみ度が大きい傾向にある。一方、湿潤竹素材の最大応力時のひずみ度は、同じエマルジョン塗布量とした乾燥竹素材のそれに比べて、小さい傾向にある。

Fig.5 には、乾燥および湿潤竹素材の引張強さ並びに弾性係数とエマルジョン塗布量の関係を示す。その乾湿状態にかかわらず、竹素材の引張強さは、エマルジョン塗布量の増加に伴って増大する傾向にある。また、湿潤竹素材の引張強さは、エマルジョン未処理 (塗布量: 0%) において、乾燥竹素材に比べて 100MPa 程度低下するが、エマルジョン処理量の増加に伴う強さ改善の程度はほぼ同程度である。特に、エマルジョン塗布量 40g/m<sup>2</sup> とした

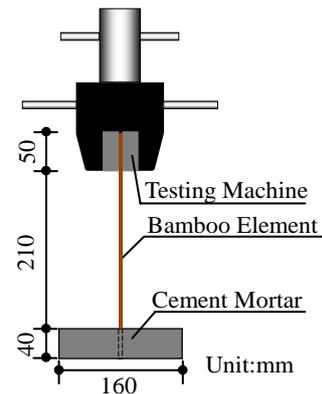


Fig.2 Appearance of Bond Strength Test.

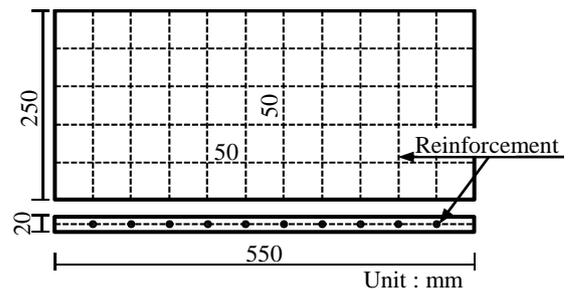


Fig.3 Arrangement of Reinforcement in Specimen.

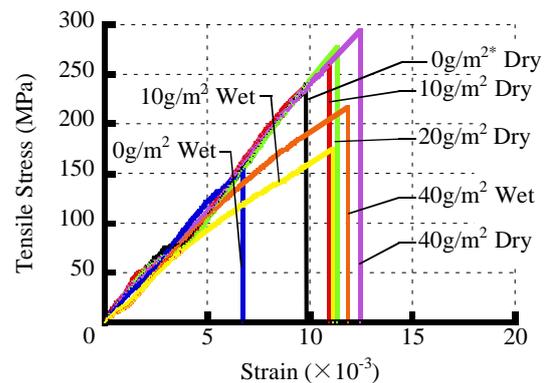


Fig.4 Tensile Stress-Strain Curves for Bamboo Elements.  
Note. \*: Applied amount of emulsion for bamboo-element.

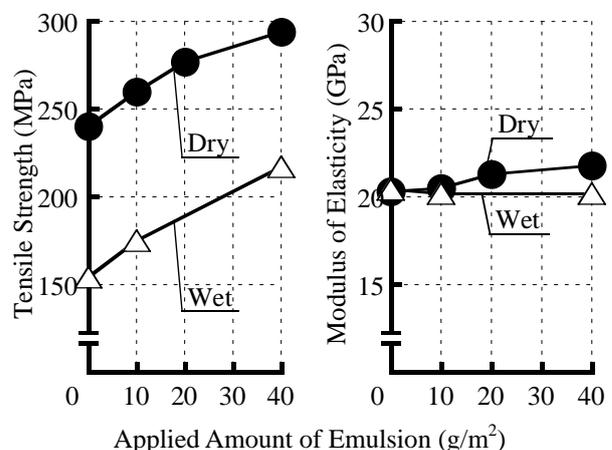


Fig.5 Applied Amount of Emulsion vs. Tensile Strength and Modulus of Elasticity of Bamboo Elements.

湿潤竹素材の引張強さは、エマルジョン未処理の乾燥竹素材の引張強さの90%程度まで改善される。これらのことは、塗布したエマルジョン中のポリマー成分が竹素材に含浸して、竹組織を改質したためと考えられ、特に、竹素材を湿潤下で使用する場合の強さ改善に効果的であると推察される。なお、エマルジョン塗布量  $40\text{g/m}^2$  とした乾燥竹素材の引張強さは  $294\text{MPa}$  であり、JIS G 3112 (鉄筋コンクリート用棒鋼) に規定される棒鋼の引張強さの下限値である  $380\text{MPa}$  の約77%に相当する。

一方、乾燥竹素材の弾性係数は、エマルジョン塗布量の増加に伴い、若干増大するものの、湿潤竹素材の弾性係数は、エマルジョン塗布量が増加してもほぼ一定であり、引張強さのような改善効果が認められない。これは、竹素材に含浸したポリマー成分の弾性係数が小さいことに起因するものと考えられる。なお、エマルジョン未処理の場合、乾燥および湿潤竹素材の弾性係数はほぼ同様である。

以上のことから、竹素材の引張強さは、その乾湿状態によって著しく影響を受けるが、弾性係数はほぼ一定である。なお、本研究の限りでは、竹素材の弾性係数は  $20\sim 25\text{GPa}$  の範囲であり、 $210\sim 220\text{GPa}$  である鋼材の9~12%に相当する。

#### 4.2 セメントモルタルに対する竹素材の付着性状

Table 7 には被着体としてのセメントモルタルの曲げおよび圧縮強さを、Fig.6 にはセメントモルタルに対する竹素材の付着応力と引き抜け距離の関係を示す。エマルジョン塗布量が0および  $10\text{g/m}^2$  の竹素材は、わずかな付着応力レベルにおいて急激に引き抜ける挙動を示す。一方、エマルジョン塗布量20および  $40\text{g/m}^2$  とした竹素材は、わずかな引き抜け距離において付着応力が直線的に増大し、最大付着応力後においては、応力が緩慢に減少

Table 7 Strength Properties of Cement Mortar.

Flexural Strength (MPa)	Compressive Strength (MPa)
8.56	48.6

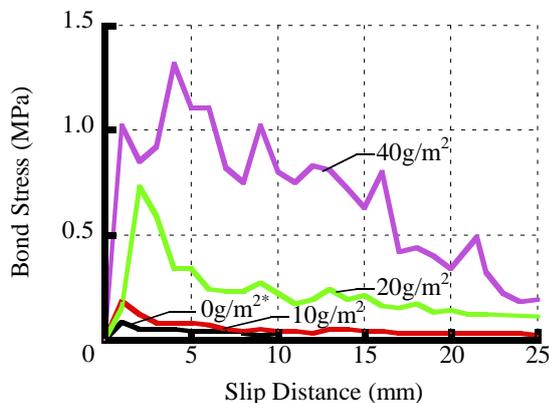


Fig.6 Slip Distance vs. Bond Stress of Bamboo Elements to Cement Mortar.

Note, \*: Applied amount of emulsion for bamboo-element.

する履歴を示す。特に、エマルジョン塗布量  $40\text{g/m}^2$  としたエマルジョン処理竹素材は、付着応力の増減を繰り返しながら、引き抜け距離が増大する。これは、竹素材にエマルジョンを塗布することにより、竹素材表面に形成されたポリマーフィルム相とセメントモルタルとの付着性が改善していることを示唆するものである。

従って、Fig.7 に示すように、セメントモルタルに対する竹素材の付着強さは、エマルジョン塗布量の増加に伴って増大する傾向にある。なお、エマルジョン処理竹素材の付着強さは、最大で  $1.3\text{MPa}$  程度である。これは、鉄筋コンクリート用棒鋼としての丸鋼が約  $3.5\text{MPa}$  (基材コンクリートの圧縮強度:  $40\text{MPa}$ ) である<sup>4)</sup> のに対して、その約37%に相当する。

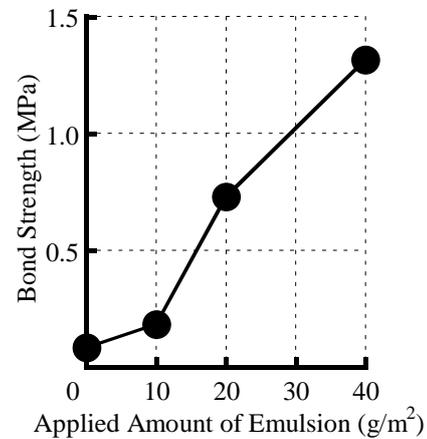
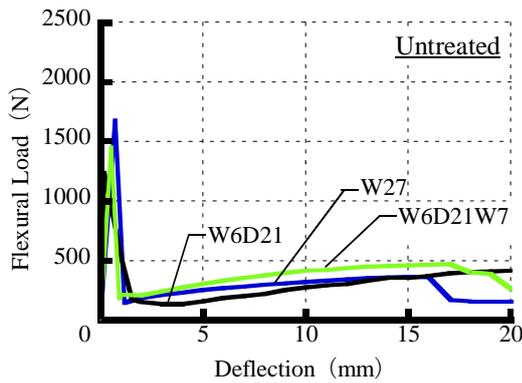


Fig.7 Applied Amount of Emulsion vs. Bond Strength of Bamboo Elements to Cement Mortar.

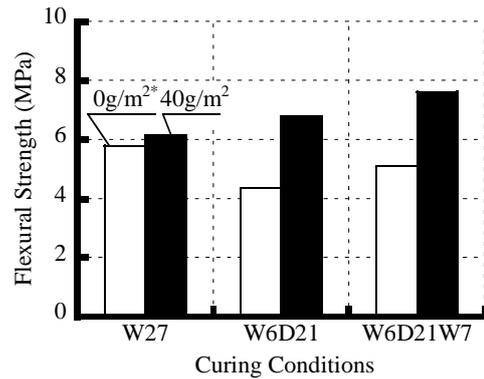
#### 4.3 竹補強セメントモルタルの曲げ性状

Fig.8 および Fig.9 には、無処理補強材およびエマルジョン処理補強材を用いた竹補強セメントモルタルの曲げ荷重-たわみ曲線を示す。養生方法にかかわらず、無処理竹補強材を用いた竹補強セメントモルタルの曲げ荷重-たわみ曲線は、初期ひび割れ発生と同時に荷重が急激に低下した後、緩やかなたわみの増大を伴いながら荷重が若干増加する履歴を示す。

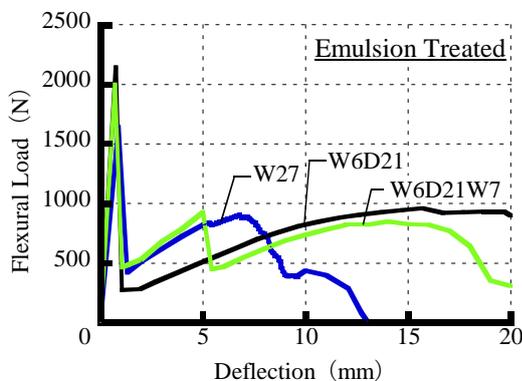
一方、エマルジョン処理竹補強材を用いた竹補強セメントモルタルの曲げ荷重-たわみ曲線は、初期ひび割れ発生と同時に急激に荷重が低下した後、再び荷重が最大曲げ荷重の約50%まで回復する履歴を示す。特に、湿乾養生した竹補強セメントモルタルは、測定最大たわみ20mm までたわみの増大が継続する。これは、湿乾養生における養生が21dの乾燥養生で終了することから、竹補強材表面に形成されるポリマーフィルム相とセメントモルタル組織との良好な付着性状が維持されることに起因するものと推察される。それに比べて、水中養生または湿乾養生後水中養生した竹補強セメントモルタルにお



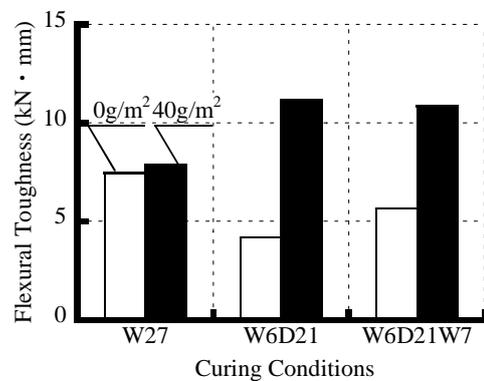
**Fig.8 Flexural Load-Deflection Curves for Bamboo-Reinforced Cement Mortars Using Untreated Bamboo Reinforcement.**



**Fig.10 Flexural Strength of Bamboo-Reinforced Cement Mortars Cured under Various Curing Conditions.**  
Note, \*: Applied amount of emulsion for treatment of bamboo reinforcement.



**Fig.9 Flexural Load-Deflection Curves for Bamboo-Reinforced Cement Mortars Using Emulsion Treated Bamboo Reinforcement.**



**Fig.11 Flexural Toughness of Bamboo-Reinforced Cement Mortars Cured under Various Curing Conditions.**

いては、湿乾養生したよりも小さなたわみ量において荷重の低下が生じ、特に、水中養生したものが最も小さなたわみ量での荷重低下を示す。これは、竹補強材表面に形成されるポリマーフィルム相とセメントモルタル相との間に水分が浸入することによる影響と推察される。なお、前述したように、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が最大荷重後に示す荷重は、最大荷重の50%程度であり、養生による影響はほとんど認められない。従って、竹補強材をエマルジョン処理することによって、ある変形量までであれば、竹補強セメントモルタルの曲げ挙動に及ぼす養生条件の影響を抑制できるものと推察される。しかし、その変形量は竹補強セメントモルタルの補強方法によっても異なることから、本研究のみにおいてそれを明確に示すことは困難である。

**Fig.10** および **Fig.11** には、無処理竹補強材並びに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強さおよび曲げタフネスを示す。水中養生した竹補強セメントモルタルの曲げ強さおよび曲げタフネスは、無処理竹補強材並びにエマルジョン処理竹補強材を用い

たもので大きな差異は認められない。これは、セメントモルタルの曲げ性状に関しては、補強材の引張強さよりもむしろ弾性係数が大きく影響することに起因するものの、前述した通り、乾燥竹素材と湿潤竹素材において、エマルジョンの塗布による弾性係数の改善が認められないことによるものと推察される。

一方、無処理竹補強材を用いた竹補強セメントモルタルの曲げ強さおよび曲げタフネスは、(大) 水中養生 > 湿乾養生後水中養生 > 湿乾養生 (小) の順となる。このように、湿乾養生した竹補強セメントモルタルの曲げ強さおよび曲げタフネスが最も小さいのは、湿乾養生過程の乾燥養生は、セメントモルタルに関しては、不利な養生条件であることに加え、乾燥期間中に竹補強材の乾燥収縮が生じ、セメントモルタルに対する竹補強材の付着特性が低下するためと推察される。それに比べて、湿乾養生後水中養生した竹補強セメントモルタルの曲げ強さおよび曲げタフネスが改善されるのは、湿乾養生後に水中養生することによってセメントの水和が進行すると共に、竹補強材が吸水して膨張し、その付着特性が改善されるためと考えられる。

しかしながら、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強さは(大) 湿乾養生後水中養生>湿乾養生>水中養生(小)、その曲げタフネスは(大) 湿乾養生>湿乾養生後水中養生>水中養生(小)の順となる。このように、エマルジョン処理竹補強材を用いた場合には、水中養生したものに比べて、その他の養生を行った竹補強セメントモルタルの曲げ強さおよび曲げタフネスが大きい傾向にある。これは、竹補強材にエマルジョンを塗布することによって竹補強材の乾燥収縮が抑制されると共に、湿乾養生過程の乾燥養生中に竹補強材表面に形成されるポリマーフィルム相とセメントモルタル相の界面で良好な付着が生じるためと推察される。

## 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) 竹素材は、最大引張応力までひずみ度がほぼ直線的に増大し、破壊に至るという脆性的な破壊挙動を示す。また、エマルジョン塗布量が大きい竹素材ほど、最大引張応力時のひずみ度が大きい傾向にある。一方、湿潤竹素材の最大応力時のひずみ度は、同じエマルジョン塗布量とした乾燥竹素材のそれに比べて、小さい傾向にある。
- (2) 竹素材の引張強さは、エマルジョン塗布量の増加に伴って増大する傾向にある。また、湿潤竹素材の引張強さは、エマルジョン未処理(塗布量:0%)において、乾燥竹素材に比べて100MPa程度低下するが、エマルジョン処理することによって、乾燥竹素材と同程度の強さ改善効果が発揮される。
- (3) 乾燥竹素材の弾性係数は、エマルジョン塗布量の増加に伴い、若干増大するものの、湿潤竹素材の弾性係数は、エマルジョン塗布量が増加してもほぼ一定である。また、エマルジョン未処理の場合、乾燥お

よび湿潤竹素材の弾性係数はほぼ同様である。

- (4) セメントモルタルに対する竹素材の付着強さは、エマルジョン塗布量の増加に伴って増大する傾向にある。
- (5) 水中養生した竹補強セメントモルタルの曲げ強さおよび曲げタフネスは、無処理竹補強材並びにエマルジョン処理竹補強材を用いたもので大きな差異は認められない。一方、無処理竹補強材を用いた竹補強セメントモルタルの曲げ強さおよび曲げタフネスは、(大) 水中養生>湿乾養生後水中養生>湿乾養生(小)の順となる。しかしながら、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強さは(大) 湿乾養生後水中養生>湿乾養生>水中養生(小)、その曲げタフネスは(大) 湿乾養生>湿乾養生後水中養生>水中養生(小)の順となる。

## 謝辞

本研究で行った竹素材の引張試験および付着試験は、日本大学工学部機械工学科中村理恵助教に多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を申し上げる。

## 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, 2007.7
- 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, 2008.7
- 3) 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, 2012.7
- 4) 笠井芳夫, 大濱嘉彦, 松井 勇, 出村克宣: 新版 建築材料学, 理工図書, p.155, 2000.10