

論文 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

菊地 弘悦*1・出村 克宣*2

要旨: 本研究では、薄肉竹素材を格子状に組んで補強材とした竹補強セメントモルタルを開発し、その機械的性質に及ぼす養生方法の影響について検討することを目的に、水中養生、湿乾組合せ養生または蒸気養生して竹補強セメントモルタルを製造し、その曲げおよび衝撃試験を行っている。その結果、養生方法にかかわらず、竹補強セメントモルタルの機械的性質のうち、曲げたわみ 20mm までの曲げタフネスに関しては、竹補強による著しい改善効果が認められる。その他の性質については、湿乾組合せ養生および蒸気養生した場合、水中養生に比べて竹補強による改善効果が小さいことを明らかにしている。

キーワード: 竹補強セメントモルタル, 養生方法, 曲げ強さ, 曲げタフネス, 衝撃エネルギー, 付着強さ

1. はじめに

現在、発展途上国の急激な経済成長の影響により、世界的な金属資源の不足が問題となっている。そのため、金属資源の代替品を検討することは急務であると考えられる。金属資源の中でも鋼材の不足は、過去に我が国でも第二次世界大戦中で発生した。当時は、軍事物資として需要の高い鋼材の入手が困難となり、鉄筋の代用品として竹を用いた、竹筋コンクリートの研究が行われ¹⁾、²⁾、実際に建設された構造物も現存する³⁾。この当時に建設された竹筋コンクリートは、橋梁などの比較的大型の部材が多く、小型・薄型部材としての利用は少ない。

コンクリートを製造するに当たって、重要な要素の一つに養生方法が挙げられる。一般には、コンクリートの用途によって様々な養生方法が適用されていることから、養生方法の違いが及ぼす性能への影響を検討することは、どのような用途での利用が可能であるかを判断する一つの要素となる。

著者らは、これまで、力学的要求レベルが低いセメントモルタルおよびコンクリート製品に対して、竹を補強材として利用することを目的に、薄肉竹素材を格子状に組んで補強した、竹補強セメントモルタルを開発し、その機械的性質について検討している⁴⁾。

本研究では、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について検討することを目的に、水中養生、湿乾組合せ養生および蒸気養生を適用して製造した竹補強セメントモルタルの曲げ性状および耐衝撃性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、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、福島県産の真竹を使用した。その採取条件を **Table 4** に示す。

3. 試験方法

3.1 補強用竹材の作製

竹材を厚さ約 1.2mm, 幅 3, 6 および 9mm の寸法に成形した棒状の薄肉竹素材を補強用竹材とした。**Table 5** には、その性質を示す。

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)	
		Initial Set	Final Set
3.16	3370	2-22	3-27
Compressive Strength of Mortar (MPa)			
		3d	7d
		31.1	45.7
			28d
			60.4
Chemical Compositions (%)			
MgO	SO ₃	ig. loss	
1.53	2.05	2.03	

*1 太平洋マテリアル株式会社 修士 (工学) (正会員)

*2 日本大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

3.2 補強材の作製

補強用竹材を格子状（格子間隔：50mm）に編み込むことによって補強材を作製した。なお、補強用竹材が交錯する箇所については、結束しないものとした。また、セメントモルタル供試体体積に対する補強材の体積分率を補強材比として算出した。

3.3 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 に示す調合の供試モルタルを練混ぜ、Photo 1 に示すような補強材を3層設置した寸法2×25×55cm および2×30×30cmの型枠中に打込んだ。その後、次に示す養生を行って供試体を作製した。

- (1) 水中養生 (W) : 1d 湿空 [20°C, 90% (RH)] および 27d 水中 (20°C) 養生
- (2) 湿乾組合わせ養生 (WD) : 1d 湿空 [20°C, 90% (RH)], 6d 水中 (20°C) および 21d 乾燥 (20°C, 60% (RH)) 養生
- (3) 蒸気養生 (S) : 3h 湿空, 蒸気 (50°C) 養生 (50°C・h) および 10d 乾燥養生

なお、Table 7 には、作製した供試体の寸法と補強用竹材の幅の組み合わせを示す。

3.4 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タフネス試験方法）に準じて、寸法2×25×55cmの供試体の曲げ試験を行った。その際、供試体中央部のたわみを測定し、曲げタフネスを算出した。また、供試体に初期ひび割れが発生した時の曲げ荷重から、初期ひび割れ応力を算出した。

3.5 衝撃試験

JIS A 1408（建築用ボード類の曲げおよび衝撃試験方法）に従って、寸法2×30×30cmの供試体中央部に、高さ30cmから質量1042gの鋼球を連続的に落下させて、衝撃試験を行った。その際、供試体被衝撃面またはその裏面にひび割れが発生した時（初期ひび割れ）、およびひび割れが供試体の端部に到達した時（破壊）の鋼球の落下回数をそれぞれ測定した。鋼球の質量、落下高さおよび回数、ならびに供試体の体積から、次式を用いて、初期ひび割れエネルギーおよび破壊エネルギーを算出した。

$$E_1 = g \times h_s \times W_s \quad (1)$$

$$E_t = \sum [(E_1 / V_m) \times N_d] \quad (2)$$

Table 6 Mix Proportion of Cement Mortar.

W/C (%)	Cement : Sand (by Mass)	Mix Proportions (kg/m ³)			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.

Table 2 Properties of Fine Aggregate.

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

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

Appearance	Density (g/cm ³)	Alkaline Content (%)	Chloride Ion Content (%)
Dark Reddish-Brown Liquid	1.040~1.060	0.9	<0.01

Table 4 Felling Conditions of Bamboo.

Felling Season	Part of Use	Age of Bamboo (Year)
Feb.2007	Part of 1 to 5 Meter from Roots	4

Table 5 Properties of Bamboo Element for Reinforcement.

Density* (g/cm ³)	Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity in Tension (GPa)	Bond Strength** (MPa)
0.75	257	13.7	0.87

Notes, *: at air dry condition.

** : to cement mortar with compressive strength of 57.2MPa.

Table 7 Specimens Size and Width of Bamboo Element for Reinforcement.

Specimens Size (cm)	Width of Bamboo Element for Reinforcement (mm)
2×25×55	-, 3, 6, 9
2×30×30	-, 6

Note, * : Unreinforced cement mortar.

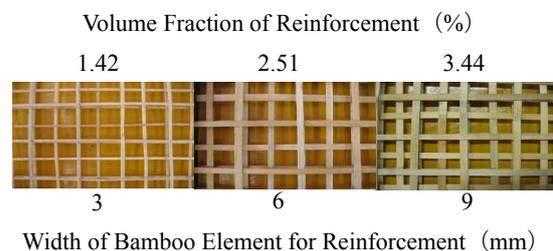


Photo 1 Appearance of Reinforcements.

ここに、

E_1 : 鋼球を1回落下させた時の衝撃エネルギー (J)

E_t : 初期ひび割れまたは破壊エネルギー (J/m³)

g : 重力加速度 (m/s²)

h_s : 鋼球の落下高さ (m)

W_s : 鋼球の質量 (kg)

V_m : 供試体の体積 (m³)

N_d : 初期ひび割れまたは破壊までの鋼球の落下回数 (回)

4. 試験結果および考察

4.1 曲げ性状

Fig.1 には、無補強セメントモルタルの曲げ荷重-たわみ曲線を、Fig.2 から Fig.4 には、竹補強セメントモルタルの曲げ荷重-たわみ曲線を養生方法別に示す。なお、これらの曲げ荷重-たわみ曲線については、3 個の供試体について、曲げ荷重ごとにたわみの平均値を算出して作成している。

その養生方法にかかわらず、無補強セメントモルタルの曲げ荷重-たわみ曲線は、荷重の増加に伴いたわみが直線的に増大し、初期ひび割れ発生と同時に破壊に至る脆性的な破壊挙動を示す。

一方、竹補強セメントモルタルの曲げ荷重-たわみ曲線は、適用した養生方法によって若干異なる挙動を示す。補強用竹材の幅、換言すれば、補強材比にかかわらず、水中養生した竹補強セメントモルタルの曲げ荷重-たわみ曲線は、荷重の増加に伴いたわみが直線的に増大し、初期ひび割れが発生して荷重が一度低下するが、その後、たわみの増加を伴いながら、再び荷重が増大した後、荷重が緩慢に低下する挙動を示す。それに比べて、湿乾組合せ養生および蒸気養生した竹補強セメントモルタルの曲げ荷重-たわみ曲線は、荷重の増加に伴いたわみが直線的に増大し、初期ひび割れが発生して荷重が一度低下するが、その後、たわみの増加を伴いながら、最大たわみを与えるまで荷重が増大し続け、破壊に至る挙動を示す。

本研究においては、水中養生した竹補強セメントモルタルは、水中養生直後に試験に供しており、供試体中の補強用竹材は含水状態にあると考えられる。それに比べて、湿乾組合せ養生および蒸気養生には乾燥工程が含まれる。従って、湿乾組合せ養生および蒸気養生した竹補強セメントモルタル中の竹補強材に比べて、水中養生したものの中の竹補強材の引張強さは小さいものと推察される。そのために、たわみがある程度増大した後において、水中養生した竹補強セメントモルタルの荷重は、たわみの増加を伴いながら緩慢に減少し、その他の養生を行ったものにおいては、たわみの増加を伴いながら、破壊に至るまで荷重が増加し続けるものとする。

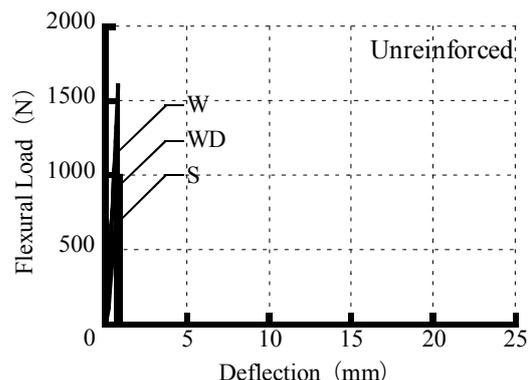


Fig.1 Flexural Load-Deflection Curves for Unreinforced Cement Mortars.

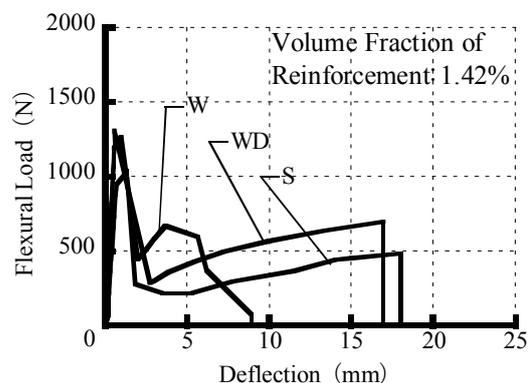


Fig.2 Flexural Load-Deflection Curves for Bamboo-Reinforced Cement Mortars Using 3mm of Bamboo Element for Reinforcement.

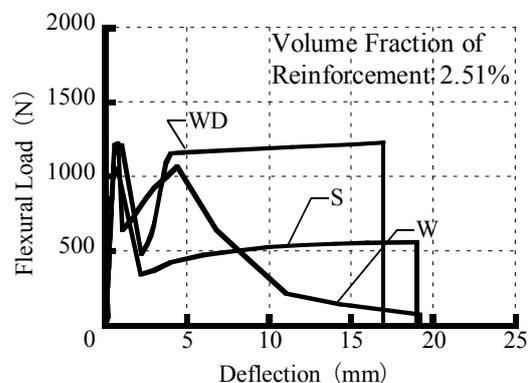


Fig.3 Flexural Load-Deflection Curves for Bamboo-Reinforced Cement Mortars Using 6mm of Bamboo Element for Reinforcement.

また、水中養生した竹補強セメントモルタルの初期ひび割れ発生後の荷重の低下量は、湿乾組合せ養生および蒸気養生したものそれよりも少ない傾向にある。前述したように、水中養生した竹補強セメントモルタル中の竹補強材は含水し、膨潤状態にあるため、他の養生を施したものに比べて、セメントモルタルマトリックスと補強用竹材の付着が良好な状態にあると考えられる。しかし、湿乾組合せ養生および蒸気養生した竹補強セメント

モルタルにおいては、乾燥工程中に補強用竹材の収縮が生じ、セメントモルタルマトリックスとの付着が低下しているものと推察される。そのために、水中養生した竹補強セメントモルタルにおいては、荷重が一時低下した後の竹補強材への応力伝達が高い荷重状態で生じるものと推察される。

幅 3mm の補強用竹材を用いた竹補強セメントモルタルにおいては、養生方法にかかわらず、初期ひび割れ発生時の荷重が最大荷重となり、荷重が一度低下した後に回復する荷重の最大値は最大荷重の 1/2 以下となる。

幅 6mm の補強用竹材を用いた竹補強セメントモルタルにおいても、養生方法にかかわらず、初期ひび割れ発生時の荷重が最大荷重となる。また、水中養生および湿乾組合せ養生した竹補強セメントモルタルにおいては、最大荷重後に回復する荷重の最大値は、最大荷重とほぼ同様かまたは若干小さい値を与える。

幅 9mm の補強用竹材を用いた竹補強セメントモルタルにおいては、水中養生および湿乾組合せ養生したものにおいて、最大荷重は、初期ひび割れ発生後に回復する荷重で与えられる。また、湿乾組合せ養生および蒸気養生した竹補強セメントモルタルにおいて、初期ひび割れ発生後に荷重が一時低下した後の荷重の回復は、幅 6mm の竹補強材を用いたものに比べて緩慢に生じ、その後、わずかな荷重の増加を伴いながらたわみが増大し続ける挙動を示す。このように、荷重の回復が幅 6mm の竹補強材を用いたものに比べて緩慢に生じるのは、幅 9mm の竹補強材の使用によって補強材比が増大する一方、セメントモルタルマトリックスの量が減少し、補強材に対する応力伝達が遅延することによるものと推察される。

以上のように、竹補強セメントモルタルの曲げ荷重-たわみ曲線は、初期ひび割れ発生まではほぼ同様の傾向を示すが、初期ひび割れが発生して荷重が一度低下した後の挙動に大きな違いが認められる。初期ひび割れ発生後においては、補強材比の大きいものほど、回復する荷重が大きい傾向にある。これは、補強用竹材の弾性係数が小さいことに起因して、初期ひび割れまではセメントモルタルが荷重を負担し、初期ひび割れ発生後においては補強材が応力を負担することによるためと推察される。

Fig.5 には、竹補強セメントモルタルの曲げ試験時の初期ひび割れ応力を養生方法別に示す。竹補強セメントモルタルの曲げ試験時の初期ひび割れ応力は、湿乾組合せ養生した竹補強セメントモルタルを除いて、その養生方法にかかわらず、補強用竹材の幅が増加してもほぼ一定の値となる傾向を示す。一方、湿乾組合せ養生した竹補強セメントモルタルの曲げ試験時の初期ひび割れ応力は、水中養生したもののそれよりも若干大きくな

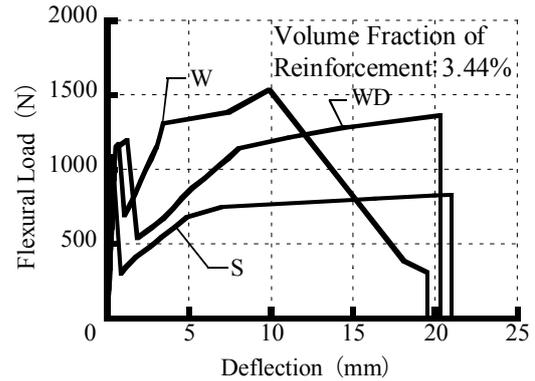


Fig.4 Flexural Load-Deflection Curves for Bamboo-Reinforced Cement Mortars Using 9mm of Bamboo Element for Reinforcement.

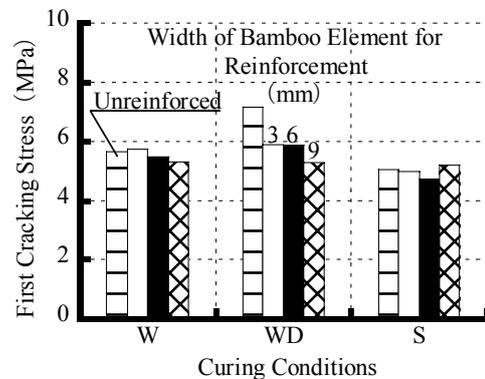


Fig.5 First Cracking Stress of Bamboo-Reinforced Cement Mortars Cured under Various Curing Conditions.

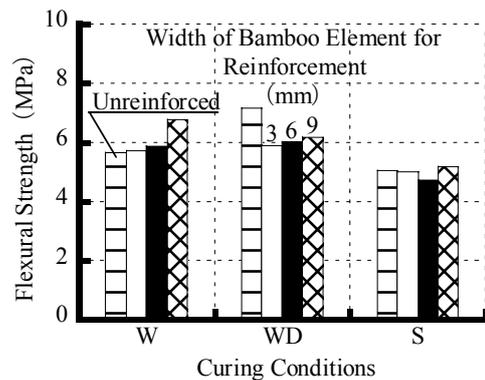


Fig.6 Flexural Strength of Bamboo-Reinforced Cement Mortars Cured under Various Curing Conditions.

る傾向にあるが、補強用竹材の幅が大きくなると減少する。さらに、補強用竹材の幅にかかわらず、蒸気養生した竹補強セメントモルタルの曲げ試験時の初期ひび割れ応力は、水中養生したものに比べ小さい値となる。

Fig.6 には、竹補強セメントモルタルの曲げ強さを養生方法別に示す。水中養生した竹補強セメントモルタルの曲げ強さは、補強用竹材の幅が大きくなると若干大き

くなる傾向にある。また、湿乾組合せ養生した場合、無補強セメントモルタルに比べて、竹補強したものの曲げ強さは小さい傾向にあるが、補強用竹材の幅が大きくなると若干大きくなり、いずれの竹補強セメントモルタルの曲げ強さとも、水中養生したもののそれよりも大きい。一方、竹補強材の幅にかかわらず、水中養生および湿乾組合せ養生した竹補強セメントモルタルの曲げ強さに比べて、蒸気養生したもののそれは小さく、また、竹補強材の幅の影響もほとんど認められない。しかしながら、蒸気養生した竹補強セメントモルタルの曲げ強さは、いずれの補強材を用いたものであっても、水中養生したものに比べて約 8 割の強度発現が認められる。これは、蒸気養生した通常のコンクリートの強度発現と同程度であることから、竹補強セメントモルタルの養生方法として、蒸気養生の適用も可能であると推察される。

なお、Fig.5 および Fig.6 から明らかなように、セメントモルタルマトリックス（無補強セメントモルタル）の初期ひび割れ応力および曲げ強さは、水中養生したものに比べて、蒸気養生したものが小さく、乾湿組合せ養生したものが大きい。また、上述したように、水中養生および蒸気養生した場合には、無補強セメントモルタルに比べて、竹補強セメントモルタルの初期ひび割れ応力および曲げ強さはほぼ同様か若干大きい。しかし、乾湿組合せ養生した竹補強セメントモルタルの初期ひび割れ応力および曲げ強さは、補強材比にかかわらず、無補強セメントモルタルよりも小さな値を与える。これは、乾湿組合せ養生した場合には、セメントモルタルマトリックスと補強材の付着性が低下することが影響を及ぼしているものと推察される。

Fig.7 および Fig.8 には、竹補強セメントモルタルの曲げタフネスを養生方法別に示す。なお、Fig.7 には、JCI-SF4 に準じて、曲げたわみが 3mm になるまでの曲げタフネスを示している。また、Fig.8 には、湿乾組合せ養生した竹補強セメントモルタルにおいて最大応力が得られた、曲げたわみ 20mm までの曲げタフネスを示している。養生方法にかかわらず、無補強セメントモルタルに比べて、竹補強セメントモルタルは大きな曲げタフネスを示す。しかしながら、曲げたわみ 20mm までの曲げタフネスについては、いずれの養生方法においても、補強用竹材の幅の増加、換言すれば、補強材比の増加によって著しく増大する。それに比べて、曲げたわみ 3mm までの曲げタフネスについては、水中養生した竹補強セメントモルタルにおいて補強用竹材の幅が大きくなると若干増大する傾向にあるが、その他の養生を行ったものにおいては、その影響は明確でない。また、一部のものを除けば、曲げたわみ 3mm までの曲げタフネスは、(大) 水中養生 > 湿乾組合せ養生 > 蒸気養生 (小) の順

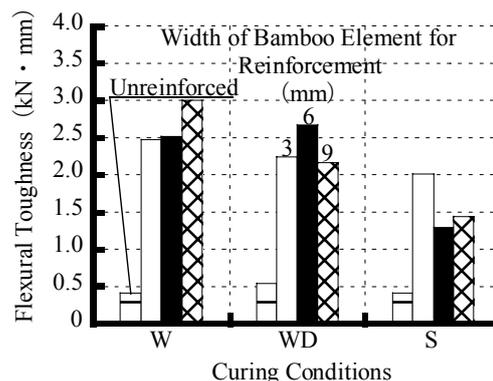


Fig.7 Flexural Toughness Calculated up to Deflection of 3mm of Bamboo-Reinforced Cement Mortars Cured under Various Curing Conditions.

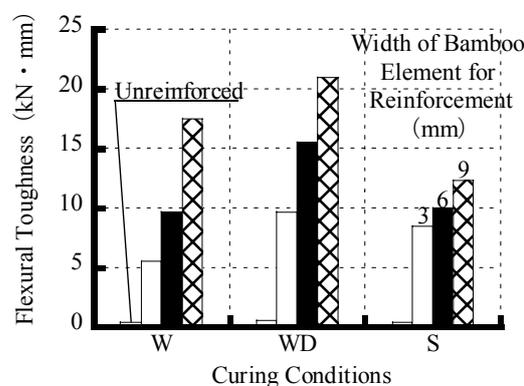


Fig.8 Flexural Toughness Calculated up to Deflection of 20mm of Bamboo-Reinforced Cement Mortars Cured under Various Curing Conditions.

となり、曲げたわみ 20mm までの曲げタフネスは (大) 乾湿組合せ養生 > 水中養生 > 蒸気養生 (小) の順となる。曲げタフネスに及ぼす養生方法の影響がこのような傾向になるのは、前述したように、水中養生した竹補強セメントモルタルに比べて、湿乾組合せ養生および蒸気養生したものにおいては、乾燥工程を含むことによって竹補強材の付着の低下が生じているものの、竹補強材の引張強さは大きいことに起因するものと推察される。

なお、補強材比が大きい場合には、たわみ 20mm まで、大きなタフネスが得られることから、本研究で想定している用途としての小型・薄型部材や製品において大きなタフネスが要求される箇所については、部分的に竹の補強量を増加させることが有効であることを示唆するものである。

4.2 耐衝撃性

Fig.9 には、竹補強セメントモルタルの衝撃試験時の初期ひび割れエネルギーを、Fig.10 には、竹補強セメントモルタルの衝撃試験時の破壊エネルギーを養生方法別に示す。無補強セメントモルタルの衝撃試験時の初期ひび割れエネルギーおよび破壊エネルギーとも、湿乾

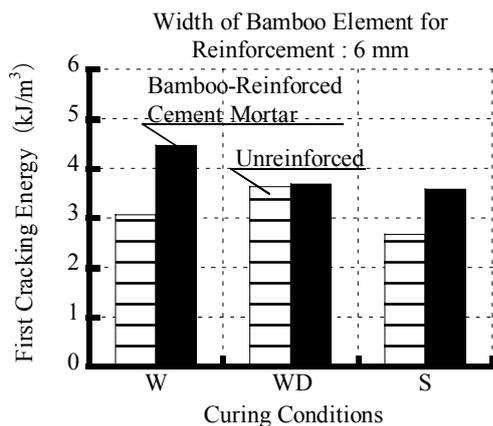


Fig.9 First Cracking Energy at Impact Test of Bamboo-Reinforced Cement Mortars Cured under Various Curing Conditions.

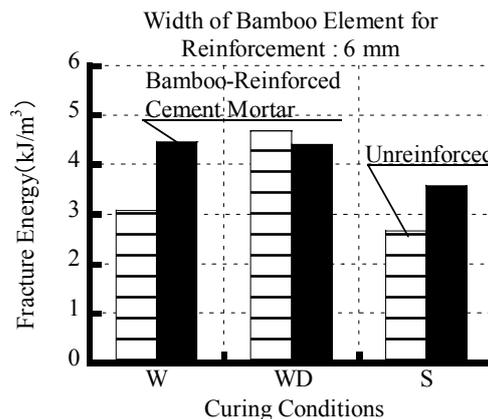


Fig.10 Fracture Energy at Impact Test of Bamboo-Reinforced Cement Mortars Cured under Various Curing Conditions.

組合せ養生したものが大きく、水中養生、蒸気養生の順で小さくなる傾向にある。それに比べて、竹補強セメントモルタルの衝撃試験時の初期ひび割れエネルギーおよび破壊エネルギーとも、(大) 水中養生 > 湿乾組合せ養生 > 蒸気養生 (小) の順となる。また、水中養生および蒸気養生した場合には、衝撃試験時の初期ひび割れエネルギーおよび破壊エネルギーとも、竹補強することによって改善されるが、湿乾組合せ養生した場合にはその改善効果はほとんど認められない。これらのことは、曲げ強さならびに曲げタフネスの場合と同様に、衝撃試験時の竹補強セメントモルタル中の竹補強材の乾燥状態およびそれに起因するセメントモルタルマトリックスとの付着状態が大きく影響しているものと推察される。

なお、竹補強セメントモルタルの衝撃試験時の初期ひび割れエネルギーおよび破壊エネルギーに及ぼすセメントモルタルの強さの影響はあまり明確ではない。これは、衝撃試験においては、動的な荷重を加えるため、竹補強の有無によって、衝撃に対する供試体の挙動が異なることによるものと推察される。

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) 竹補強セメントモルタルの曲げ荷重-たわみ曲線は、養生方法および補強用竹材の幅、換言すれば、補強材比によって、相当地異なる挙動を示す。
- (2) 水中養生および湿乾組合せ養生した竹補強セメントモルタルの曲げ強さは、補強用竹材の幅が大きくなると若干大きくなる傾向にあるが、蒸気養生した竹補強セメントモルタルの曲げ強さに及ぼ

す影響はほとんど認められない。

- (3) 養生方法にかかわらず、無補強セメントモルタルに比べて、竹補強セメントモルタルは大きな曲げタフネスを示す。また、特に、曲げたわみ 20mm までの曲げタフネスは、補強材比の増加によって著しく増大する。
- (4) 水中養生および蒸気養生した場合には、衝撃試験時の初期ひび割れエネルギーおよび破壊エネルギーとも、竹補強することによって改善されるが、湿乾組合せ養生した場合にはその改善効果はほとんど認められない。

謝辞

本研究で行った蒸気養生については、岩城ブロック工業 (株) に多大なご協力をいただいた。ここに記して謝意を申し上げる。

参考文献

- 1) 河村 協: 竹筋コンクリート, 山海堂出版部, 126p, 1941.7
- 2) 細田貫一: 竹筋コンクリート工, 修教社書院, 216p, 1942.2
- 3) 玉井孝幸, 嵩 英雄, 渡邊英樹, 小林一郎, : 熊本県小国町に現存する材齢70年の竹筋コンクリートアーチ橋の調査, 第60回セメント技術大会講演要旨, pp.162-163, 2006.5
- 4) 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