

(32) 竹筋コンクリート部材の曲げ変形に関する実験的研究

寺井 雅和

正会員 近畿大学准教授 工学部建築学科 (〒729-6112 広島県東広島市高屋うめの辺一番)
E-mail:terai@hiro.kindai.ac.jp

竹の表面は摩擦がほとんどないため、大きな付着力は期待できない。竹筋コンクリート構造が成立するためには、竹主筋とコンクリートが高い付着力で一体化する必要がある。そこで、本研究では、コンクリートと丸竹との付着力を向上させるために、竹材の表面に串加工および樹脂注入する処理方法を提案し、この加工を施した主筋を配した梁型供試体による載荷試験を行った。実験の結果、次のことが確認できた。1) 串を50mmピッチ加工すれば、高い付着力を得ることができる。2) 竹が曲げ変形すると扁平に潰れ、縦に割れるため、空洞部分にエポキシ樹脂を注入することで、縦割れを減らすことができる。3) 串加工と樹脂注入をした竹は、コンクリート梁の主筋として耐力向上と変形性能向上に繋がる。

Key Words : Bamboo, Bond, Flexural Behavior, Bamboo Reinforced Concrete

1. はじめに

竹は外皮が滑らかなため、コンクリートが付着し難い。滑らかな竹の表面とコンクリートとは固着力で接着しているが、引き剥がれ滑り出すと、あとは摩擦力だけで抵抗するのみとなる。そのため、鉄筋コンクリート構造の代替として竹筋コンクリート構造が成立するためには、竹主筋に対して何らかの処理や加工が必要である。先の研究¹⁾で、竹の表面にゴムコートをし、さらに図-1に示すように串を差し込んで凹凸をつけることで機械的抵抗させる表面加工方法を提案した。この提案した竹筋について、引抜き試験と梁型供試体による曲げ載荷試験を行い付着性状について確認した。この結果、ゴムコートと串加工により付着力向上への有効性が確認できた。一方で、いくつかの問題も明らかとなった。串のピッチは50mmとすることで、大きな付着強度が発揮されたが、ある程度の応力ですべり抜けてしまい、完全な付着は得られなかった。また、丸竹に大きな曲げが作用すると部分的に縦割れが生じ、扁平な形状に潰れ、そのことによって表面の付着が大きく損なわれることが分かった。

本研究の竹筋は丸竹を使用しているが、竹は中空構造のため引張抵抗に寄与する実断面積は小さい。そのため、引張鉄筋比の小さいコンクリート部材となっており、その曲げ挙動は特異であることが知られている²⁾。また、竹筋コンクリート部材は、丸鋼のように鉄筋とコンクリート間で付着のないRC梁部材の挙動に類似していると

考えられ³⁾、これらの知見をもとに曲げ挙動の評価をする必要がある。

本研究では、先に行った実験を更に進めて、串ピッチと付着強度の関係、および丸竹内部の空洞部分にエポキシ樹脂を充填した竹筋の補強効果について確認するために、はり型供試体による曲げ載荷試験を行い、その特性を把握し、竹筋コンクリート梁部材の曲げ変形性状について検証を行うものである。



図-1 串竹筋

2. 曲げ載荷実験

(1) 実験の概要

先の実験では串ピッチ 100mm と 50mm の 2 種類を設定した。串ピッチ 50mm とした供試体では、大きな付着応力度 (0.64N/mm^2) を示し、載荷点と支点を繋ぐように斜めひびわれが生じた。また、100mm ピッチ供試体では、部分的に付着割裂ひびわれが発生した。このように、串ピッチによって破壊性状が異なっていたので、本研究では、付着力と破壊モードの関係について検討する

ために、ピッチ 15mm となる供試体についても実験をすることにした。

また、丸竹に大きな曲げが作用すると部分的に縦割れが生じ扁平に潰れ、そのことによって表面の付着が大きく損なわれ、付着滑りが進行していることが分かった。荷重-変位関係も、耐荷力が大きく変動する特異な動きを示す。そこで、竹の空洞部にエポキシ樹脂を充填し、曲げ剛性を高めるとともに、竹の縦割れを防止し、安定した曲げ変形を狙うこととした。

(2) 供試体

竹主筋のコンクリート梁を 8 体を計画した。表-1 に供試体諸元、図-2 に供試体の形状および配筋状況を示す。実験パラメータは、串ピッチ 0, 15, 50, 100mm (ピッチ 0mm は、串加工のないもの)、エポキシ充填の有無を設定した。串は、図-1 に示すように、設定したピッチにドリルで穴を開けて串を差し込むが、同一線上に穴が連続すると竹が縦割れを起こしやすくなるので、50, 100mm ピッチ供試体では隣り合う串を 90 度ずつ回転させて差し込み、15mm ピッチ供試体では 45 度ずつ回転させて差し込んだ(図-3)。串加工した全ての供試体で、串の出は約 4mm とした。また、先の研究で付着に対する有効性が確認されたゴムコート加工は、全ての主筋に対して施した。

供試体の寸法は全て同一で、断面幅 100mm、断面せい 200mm、梁長さは 1000mm とするが、主筋の抜け出し量を測定するため、主筋端部を 12mm 程度小口面から出るよう製作したので、コンクリート部分の外寸は図-2 に示すように 976mm となる。引張主筋の有効高さは 170mm であり、せん断補強筋は配置していない。

(3) 使用材料

表-2 に主筋で使用した竹の材料試験結果を示す。竹は自然素材なので、供試体により太さや強度が異なっているが、3 本の材料試験を行った平均値として算出した。コンクリートは、設計基準強度 $F_c=30$ で製作したが、供試体ごとに製作・実験時期が異なるため、2 種類の材料強度がある。表-3 に供試体ごとのテストピースによる材料諸値を示す。

(4) 加力方法・計測

実験は、中央 1 点を一方向に押す集中荷重で行った。全ての供試体で、せん断スパン 300mm (せん断スパン比 $a/d=1.76$) とする。梁の変形は、図-4 に示す梁下面 3 点で計測した。以降、梁の“たわみ”は、これら 3 点の変位量を単純平均した値とする。また、梁の小口面から出した主筋端部に変位計を当て、すべり量を計測した。

表-1 供試体諸元

試験体	径 (mm)	串ピッチ (mm)	エポキシ樹脂充填	主筋比 p_t (%)
BRC-0	竹 15φ	0 串なし	×	1.05 充実断面 として
BRC-0J			○	
BRC-100		100	×	
BRC-100J			○	
BRC-50		50	×	
BRC-50J			○	
BRC-15		15	×	
BRC-15J			○	

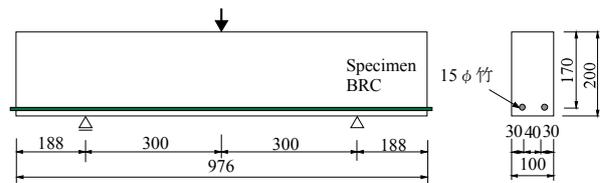


図-2 はり供試体詳細 (単位: mm)

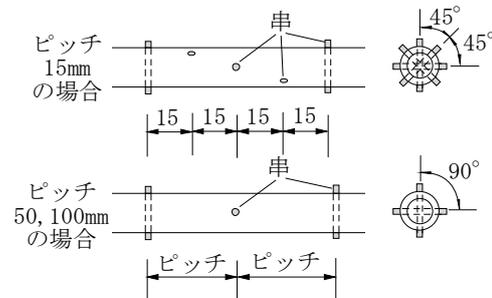


図-3 串竹筋の加工詳細

表-2 主筋の材料諸値

規格	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
本竹 外径14.9mm 内径9.4mm	122	17.2

表-3 コンクリートの材料諸値

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
BRC-50, -50J, -100, -100J	38.5	2.99	35.1
BRC-0, -0J, -15, -15J	41.4	3.33	35.1

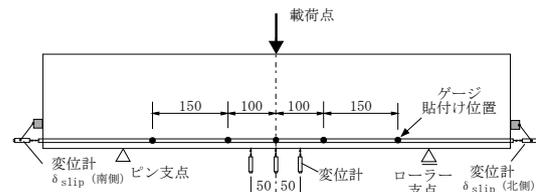


図-4 ゲージ貼付け位置と変位計測点 (単位: mm)

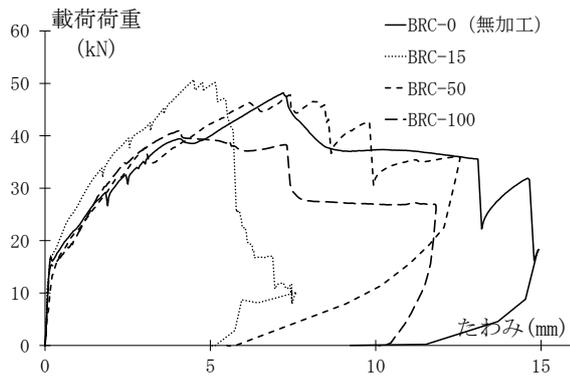


図-5 荷重 - たわみ曲線 (串ピッチによる比較)

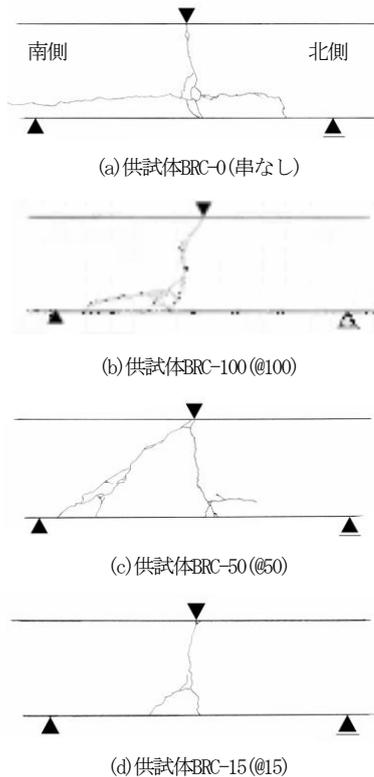
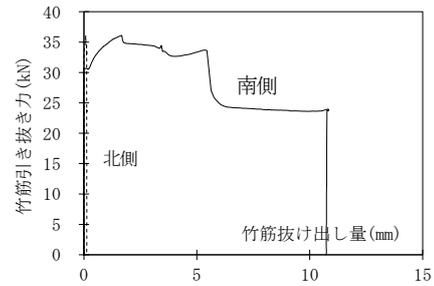


図-6 ひびわれ状況

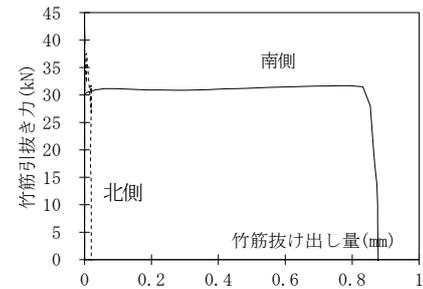
3. 実験結果と考察

(1) 串ピッチの違いと破壊モード

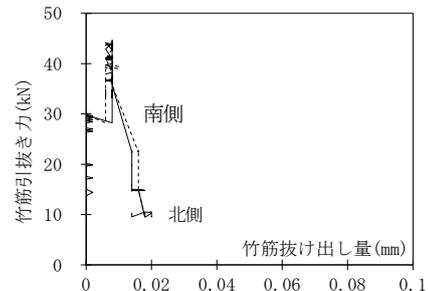
図-5に串ピッチをパラメータとした供試体4体 (全てゴムコート加工あり, エポキシ充填なし) の荷重-たわみ曲線を, 図-6にこれらの供試体の最終ひびわれ状況を示す. 全ての供試体で, 載荷荷重18kN程度で載荷点直下付近の梁下端に曲げひびわれが発生し剛性が低下した. その後, 竹主筋とコンクリートの付着が破壊されひびわれが進展する. これによりひびわれ部分での引張主筋のひずみの局部増大が解放されて, 耐力が小さく低下するが, その後は荷重はすぐに回復し, もとの剛性のまま



(a) 供試体BRC-100 (@100)



(b) 供試体BRC-50 (@50)



(c) 供試体BRC-15 (@15)

図-7 主筋の抜け出し

耐力は増加する.

BRC-50も, 載荷点直下から曲げひびわれが発生したが, その後支点と載荷点を結ぶ線上にせん断ひび割れが発生し, 急激に耐力が低下した. 串本数がBRC-50より少ないBRC-0 (串なし), BRC-100 (@100mm) は付着割裂ひびわれの発生により急激に耐力を失ったが, 串本数が最も多いBRC-15 (@15mm) は, 付着割裂ひびわれは生じておらず, 完全なる曲げ破壊をしている. 図-7に, 梁の小口面における主筋両端部のすべり変位量を横軸にとった, 竹主筋引抜き力-抜け出し量の関係を示す. BRC-100では10mm以上大きく滑り抜けているが, 串ピッチが小さい-15では全く抜け出していない. 以上のことから, BRC-15では, 主筋とコンクリートの付着は破壊せず, 実験終了まで完全付着を保持したと言える. 曲げひびわれが発生後, ひびわれ近傍で局部的に曲げ抵抗し, そのため主筋に割れや縦裂けが発生したため, 引張破断したと考えられる.

(2) エポキシ充填の効果

前節の考察を踏まえ、竹主筋の裂けや縦割れが生じることを防止するために、竹の空洞部分にエポキシ樹脂を充填することで、梁の曲げ剛性を高め、変形性能を向上することを考える。

a) 竹主筋単体の曲げ実験

はじめに、エポキシ樹脂注入の効果を確認するため、竹主筋単体の曲げ実験を行う。コンクリート梁の主筋に使用したものと同一径15mm程度の丸竹を用いる。図-8に曲げ実験の加力状況を示す。加力には2000kN万能試験機を用いた。供試体の支持は両端ピン支点で、スパン中央部に一点に荷重を与える3点曲げ荷重とした。竹筋の変形は、図-8に示す梁下面3点で計測した。竹筋の“たわみ”は、これら3点の変位量を単純平均した値とする。

串の有無、エポキシ充填の有無をパラメータとし、4体の実験を行った。供試体名称と実験パラメータの関係を表-4に示す。図-9に、エポキシ充填の施工手順を示す。なお、この施工手順で数本を試作し、縦に割ってみて内部に空洞が出来ていないことを確認している。

図-10に荷重-たわみ曲線を示し、写真-1に実験終了後の破壊状況を示す。串の有無、内部充填の有無にかかわらず、剛性の推移に大きな違いはない。しかし、破壊性状には違いが見られた。写真-1より、エポキシ充填しない場合、串があるもの（BC）はドリルで穴を開けているため、串を刺してある箇所から複数の縦割れが生じた。串がないもの（AC）は、節を跨いで大きく割れるように裂けるため、耐荷力の低下が激しい。一方、エポキシ充填した場合、串があるもの（BD）は、割れが局所的に発生し、割れ・裂けの数が少ない。串がないもの（AD）は、竹の表面に割れや裂けは発生しなかった。

以上のことから、竹筋コンクリートの主筋として付着方向向上のためには串が必要であるが、竹に穴を開けるため縦割れが数多く発生する。これにより、曲げ剛性の低下や竹筋の早期破断が心配されるので、解決策として空洞内部にエポキシ樹脂を充填することで、縦割れの発生を局所的にとどめることが可能となることが確認できた。

b) 竹筋梁供試体の曲げ実験

図-11にエポキシ充填の有無を比較した、8体の荷重-変位曲線を示す。実線がエポキシ充填をしていない供試体、同じ色の点線がエポキシ充填をした供試体である。また、図-12にエポキシ樹脂を充填した供試体の最終ひびわれ状況を示す。

串ピッチ15mmの供試体以外では、エポキシ樹脂を充填することで、耐力、変形性能ともに向上していることが分かる。破壊性状は、いずれの供試体も付着割裂破壊で最大耐力が決定しており、付着割裂ひびわれの急激な

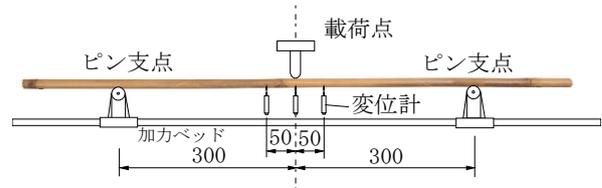


図-8 曲げ実験加力状況 (単位:mm)

表-4 竹筋曲げ実験のパラメータ

	串		エポキシ充填
	有無	ピッチ	
AC	なし		なし
BC	あり	15mm	なし
BD	あり	15mm	あり
AD	なし		あり

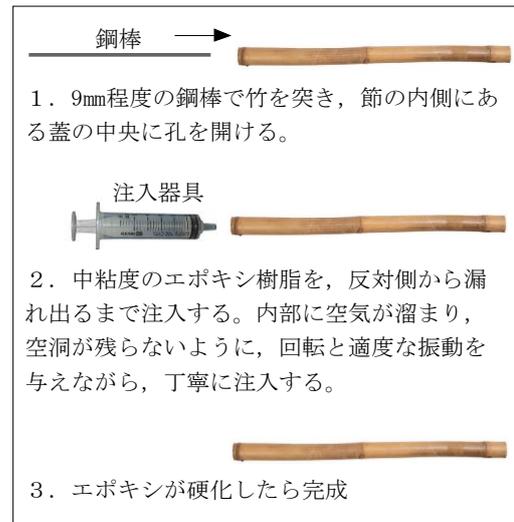


図-9 エポキシ充填の施工手順

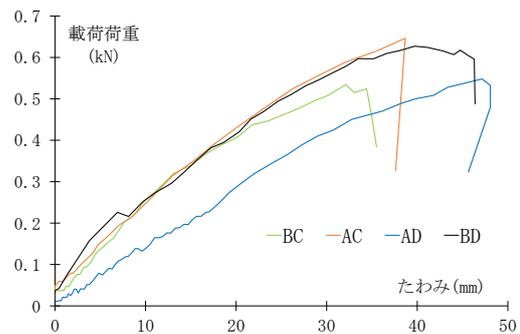


図-10 荷重 - たわみ曲線



写真-1 割れの発生状況 (上から AC, BC, BD, AD)

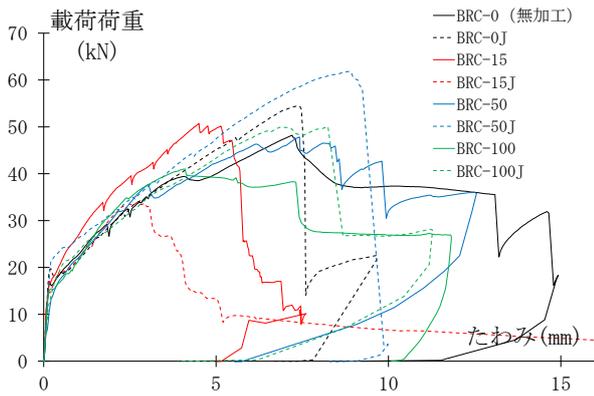


図-11 荷重 - たわみ曲線 (エポキシ充填の有無)

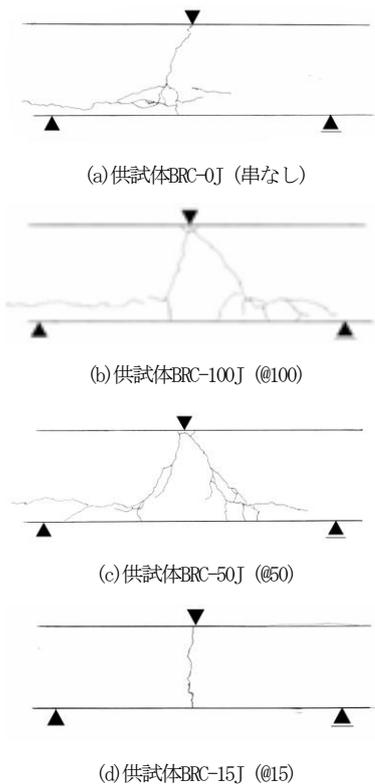
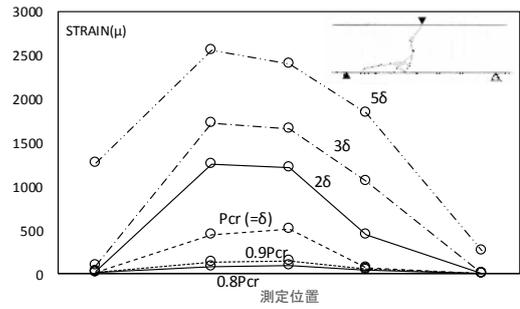


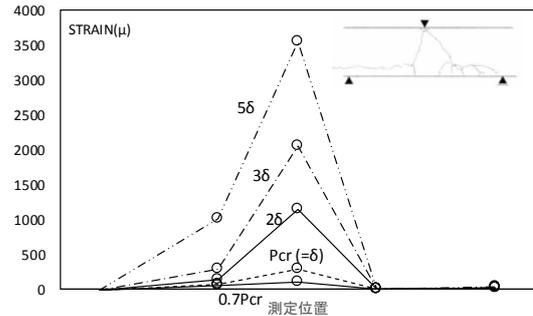
図-12 ひびわれ状況 (エポキシ充填あり)

進展とともに耐力も急激に低下した。串ピッチ15mmの供試体は、ひびわれは曲げひびわれ一本しか発生していない。串の本数が多く、コンクリートとの付着が極めて高いため、竹主筋がすべり抜けることは無かった。そのため、ひびわれ断面での竹の曲げ変形が大きくなり、主筋の割れや裂けが局所的に生じ、破断に至った。この傾向は、エポキシ樹脂を充填していない供試体 (BRC-15) でも見られたが、エポキシ樹脂充填することにより顕著となり、BRC-15Jでは、BRC-15に対して、最大耐力、変形性能ともに低下することとなった。

図-13に串ピッチ100mm供試体において竹主筋ひずみの推移を示す。計測箇所は、図-3中の5点であり、曲げ



(a) 供試体BRC-100 (充填なし)



(b) 供試体BRC-100J (充填あり)

図-13 竹主筋のひずみ分布の計測結果

ひびわれが発生した点の荷重を P_{cr} 、その時の変位を δ としたとき、ひびわれ発生前は $0.7 \sim 0.9P_{cr}$ の点、ひびわれ発生後は 2δ 、 3δ 、 5δ の各点のひずみを抽出した。

充填なし供試体は、ひびわれ発生前からひずみ増加領域は広がっている。これは、曲げひびわれ発生前から、竹主筋とコンクリートとの付着が切れていることが考えられる。一方、エポキシ充填ありの供試体は、曲げひびわれ近傍のひずみのみが増加していく挙動を示し、この領域は端部に拡がることはない。そのため、充填あり供試体では、付着力が十分に高く、主筋が滑り抜けることはないと考えられる。以上のひずみ分布推移の傾向は、串ピッチ100mm供試体以外でも、同じ傾向となった。

4. まとめ

本研究より得られた結果を総合的に検討して得た結論は、次のとおりである。

1) 竹材をコンクリート梁部材の曲げ補強主筋に使用するため、串を差し込み機械的抵抗で付着力を向上させた。串を50mmピッチで差し込めば、ある程度の付着力は期待できることが確認できた。

2) 竹が曲げ変形すると扁平に潰れ、縦に割れる。串加工するために、ドリルで穴を開けるので、串のあるところから割れが発生しやすいことが確認できた。そこで、

空洞部分にエポキシ樹脂を注入することで、割れを減らすことができた。

3) 串加工と樹脂注入をした竹を、コンクリート梁の主筋として用いた竹筋コンクリート梁の曲げ載荷実験から、樹脂注入は付着力増加により、梁部材の耐力向上と変形性能向上に繋がることが確認できた。

串の本数が多い場合、付着力が高くなる反面、破断するため変形性能が小さくなる。竹は、鉄筋のように降伏しないため、破断するとそこで部材性能が決まってしまう。今後は、せん断変形性能や付着割裂破壊についても検討を行い、鉄以外の材料を使用してコンクリート補強した竹筋コンクリート構造の開発と設計を進めて行く計

画である。

参考文献

- 1) 寺井雅和：竹とコンクリートの付着性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol39，No2，pp.499-504，2017.7
- 2) 池田尚治，山口隆裕，後藤康之：鉄筋比の小さい鉄筋コンクリートはりの曲げ挙動に関する研究，コンクリート工学論文集，第1巻，第1号，pp.51-59，1990.1
- 3) MOHD WILDAN，中村光，国枝稔，P.V.Kongkeo，河村精一：丸鋼を用いた低鉄筋比 RC はりの挙動の評価，土木学会中国史部研究発表会梗概集，V-007，pp.453-454，2009.3

EXPERIMENTAL STUDY ON FLEXURAL BEHAVIOR OF BAMBOO REINFORCED CONCRETE MEMBERS

Masakazu TERAJ

There is no bond between bamboo surface and concrete, since the surface of bamboo has little friction. In order to construct the bamboo reinforced concrete structures, it is necessary to integrate bamboo reinforcement and concrete with high bond. This paper deals with the development of longitudinal bamboo bars with processing of bamboo surface and injecting epoxy resin inside the bamboo. The flexural tests of bamboo reinforced concrete beams with its bamboo bars were carried out. As a result, the following could be confirmed. 1) To obtain the high bond stress, it is needed to stab sticks into the bamboo at an interval smaller than 50mm. 2) By injecting epoxy resin into the bamboo hollow, it is possible to reduce the vertical cracks on the bamboo surface. 3) The bamboo reinforced concrete beam members using the longitudinal bars with stabling sticks and injecting epoxy resin, improve strength and deformation performances.