

論文 竹筋コンクリート梁における竹筋加工方法と付着特性

松尾 栄治*1・末永 慎一*2・寺崎 文人*3・永松 武則*4

要旨：竹筋コンクリートは RC 構造と比較して強度的に劣るものの、竹材は錆びることがないため適材適所で使用すればライフサイクルコストが小さい構造物として期待できる。本研究では引張補強材としての竹筋とコンクリートとの付着を高めることを目的に、簡易な加工方法による定着効果について実験的に確認した。すなわち、竹筋全体にわたって切欠きを設ける方法と端部を鉄筋のフックのように折り曲げる方法を対象として、小型竹筋コンクリート梁にて静的曲げ試験を実施した。その結果から、竹筋による曲げ補強効果および加工方法が付着に及ぼす効果を確認した。

キーワード：竹筋コンクリート、曲げ、付着、定着

1. はじめに

竹林所有者の高齢化に伴う放置竹林の増大は、特に地方において顕著な社会問題になっている¹⁾。一方で、鉄筋コンクリート構造物の維持管理費用の拡大は深刻な社会問題となっているが、その多くは補強材としての鉄筋が腐食することに起因する劣化事例が対象となっている。そこで、竹材をコンクリート補強材として適材適所で活用できれば、竹材の「錆びない」という特性を将来の維持管理費用の削減につなげる可能性が広がる。

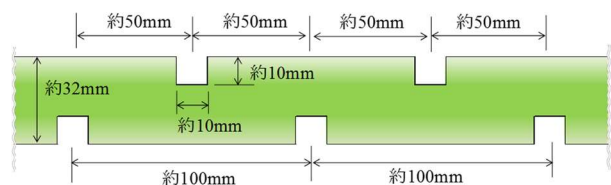
筆者らはこれまでに、割裂した孟宗竹を格子状に組んで、床版下面の面的補強材とした場合の押抜きせん断耐力について実験的に検討してきた²⁾。これは、竹筋とコンクリートの付着力が小さいという欠点を竹筋を格子状に組むことによる定着効果で補うものである。また、竹筋が引張応力に対して降伏点を有さずに脆性破壊するという欠点に対しても、補強対象をせん断力とすることで問題を包含している。結果としては、RC 床版の 60% 程度の耐力（理論値比）を示すことが明らかになったが、さらに竹筋コンクリートの用途拡大を目指すには、梁部材への適用が不可欠である。その場合、竹筋とコンクリートの付着を確保すること、天然由来の竹筋の強度のばらつきに対して合理的な設計方法を確立すること、竹筋の植物的腐食が生じない使用条件を明確にすることなどが主要な課題となる。特に付着の問題は力学的に重要であり、付着の確保は設計の前提となる基本的な事項である。竹材にはほぼ等間隔に節が存在しており、付着（定着）に効果を発揮することも考えられるが、実際はこれがコンクリートとの付着においてほとんど役に立たないことを筆者らは予備実験において確認している^{3)~4)}。既往の研究では、河村による竹筋コンクリート梁（Bamboo

Reinforced Concrete, 以下 BRC と略す。）に関する総合的な研究事例の中で、付着力確保のための竹材の加工例が示されているが⁵⁾、より作業コストを小さくできる方法を確立することが望ましい。

さて、日本には多くの種類の竹材が生息し、補強材としての使用方法も様々なパターンが想定される。本研究では、西日本で広く分布している竹材のひとつである孟宗竹に着目し、これを繊維方向に割裂して使用することに対象を絞り、さらにできるだけ省力化して付着力を確保することを目標とした。すなわち、割裂した孟宗竹の側面に切欠きを等間隔に設けることで付着力を確保する方法（切欠き法）と、孟宗竹の端部に熱加工を施しながら折り曲げる方法（端部法）を対象とした。前者は竹繊維の連続性が一部損なわれる欠点を有しているとともに、竹材長が長くなると比例的に作業の手間も増える。後者は竹材の伐採直後でない加工が困難になること、加工には熟練が必要になることなどの留意事項がある。実験

表一 梁供試体の諸元（シリーズ I）

供試体名	補強筋種類	補強材長 (mm)	切欠き			
			有無	間隔(mm)	幅(mm)	深さ(mm)
Non-RC	無補強	530以下	—	—	—	—
BRC	孟宗竹	530以下	なし	—	—	—
BRC-D5	孟宗竹	530以下	あり	100	10	5
BRC-D10	孟宗竹	530以下	あり	100	10	10



図一 切欠きの形状（BRC-D10 の例）

*1 九州産業大学 建築都市工学部都市デザイン工学科 教授 博（工）（正会員）

*2 下関工科大学 建設工学科 教諭

*3 株式会社安部日鋼工業 九州支店工事部

*4 九州産業大学 建築都市工学部都市デザイン工学科 技能員（正会員）

表-2 配合および材料試験結果 (シリーズ I)

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						SL (cm)	Air (%)
		W	C	S	G	減水剤	AE剤		
68	42	165	241	771	1196	2.41	0.723	15.0	8.0
28日圧縮強度 $\sigma_c = 19.8\text{N/mm}^2$, ヤング係数 $E_c = 26.9\text{kN/mm}^2$									

表-3 竹材の物性試験結果

	引張強度 σ_{bt}	ヤング係数 E_{bt}
シリーズ I	非測定	15.2kN/mm ²
シリーズ II	158.1N/mm ²	10.8kN/mm ²
シリーズ III	121.1N/mm ²	15.2kN/mm ²

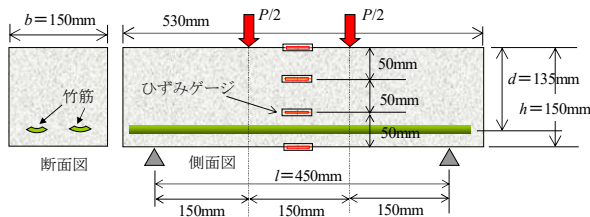


図-2 供試体の断面図と側面図 (シリーズ I, II)



図-3 端部法における竹筋 (シリーズ II)

表-4 配合および材料試験結果 (シリーズ II)

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	C	S	G	減水剤	AE剤
68	42	165	241	771	1196	2.41	0.723
28日圧縮強度 $\sigma_c = 21.7\text{N/mm}^2$, ヤング係数 $E_c = 27.1\text{kN/mm}^2$							

では小型の BRC において曲げ試験を行い、破壊性状や変形状について切欠き法と端部法を比較することで、孟宗竹の適用性について検討した。

なお、本稿においては機械的な引っ掛け作用によるコンクリートと竹筋のマクロ的な一体化のことを「定着」、表面接触によるミクロ的な一体化を「付着」と称する。将来的には鉄筋のように、コンクリートの設計基準強度や竹材種類、さらには定着方法やかぶりなどをパラメータとした定着長の理論式を導く必要があるため、本研究ではまず有効な定着方法の選定を行うことを目的とした。

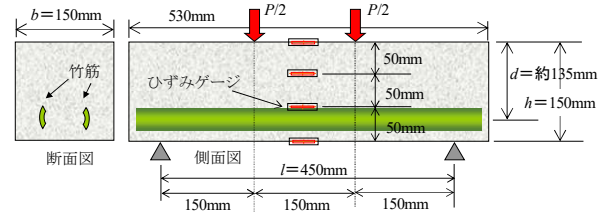


図-4 供試体の断面図と側面図 (シリーズ III)

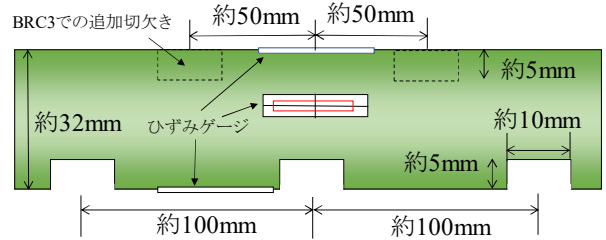


図-5 竹材の切欠き寸法 (シリーズ III の BRC2, BRC3)

2. 実験方法

2.1 シリーズ I (切欠き法)

最初のシリーズでは繊維方向に割裂した孟宗竹の両サイドに切欠きを設けることで付着力を増加させた。特に切欠き深さに着目しつつ梁の曲げ試験を行い、たわみやひずみの変形状から付着性状を確認した。梁供試体は無補強の供試体 (Non-RC)、孟宗竹を割裂しただけのもの (BRC)、竹筋に深さ 5mm の切欠きを設けたもの (BRC-D5)、竹筋に深さ 10mm の切欠きを設けたもの (BRC-D10) をそれぞれ 1 体の合計 4 体である。詳細を表-1 に示す。切欠きはいずれも図-1 のように 100mm 間隔で設け、お互いに同じ断面に集中しないように配慮した。コンクリートの配合および材料試験結果を表-2 に示す。また、表-3 に竹材の物性試験結果を示すが、補強材である竹筋は鉄筋と比較して大幅に強度が小さいため、被補強側のコンクリートも強度の小さい配合としてバランスを考慮した。竹筋は図-2 のように引張側にかぶり 10mm で 2 本配置し、植生時の上下方向による強度差 (上方ほど強度が小さい) をできるだけ相殺するために方向を互いに逆とした。いずれも比較的強度が強い竹の表皮側が下側になるように配置した。

2.2 シリーズ II (端部法)

次のシリーズでは切欠きを設けずに、端部を加熱して折り曲げることで竹筋を定着させる方法を用いた。梁供試体は無補強の供試体 (Non-RC)、竹筋の端部に熱で U 字に曲げ加工を施したもの (BRC-U)、同じ要領で L 字に曲げ加工を施したもの (BRC-L)、曲げ加工を施さずフラットな状態のもの (BRC-F) をそれぞれ 1 体の合計 4 体を作製した (図-3 参照)。

加熱方法は試行錯誤の結果より、竹筋本体に火が直接



図-6 載荷状況

表-5 曲げ試験結果 (シリーズ I)

供試体名	ひび割れ発生荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	破壊形態	タフネス値 (kN・mm)
Non-RC	20.4	20.4	曲げ	100
BRC	不明	36.6	せん断	360
BRC-D5	25.5	42.6	せん断	483
BRC-D10	23.0	42.9	せん断	482

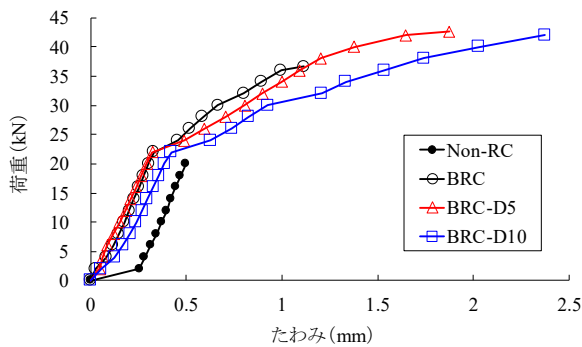


図-7 荷重-たわみ曲線 (シリーズ I)

当たらないようキッチンペーパーやアルミホイルを巻き、市販のガスバーナーであぶる方法を採用した。竹筋の配置はシリーズ I と同様とし、スパン中央部の表皮側と内皮側にひずみゲージを貼付した。竹材は伐採から数カ月以内でないと上記のような熱加工は困難であり、これは竹材表面の色の変化によりある程度の判断ができる。すなわち、表皮が緑色に近いほど加工が容易で、乾燥して黄色になると加熱しても変形しなくなる。ただし、表皮が緑であると脂分も多いため燃焼しないように留意する必要がある。

本シリーズにおけるコンクリートの配合および材料試験結果を表-4 に示す。

2.3 シリーズ III (縦置き法)

上記の 2 シリーズの補足として、竹筋を図-4 のように縦配置する方法を実施した。縦配置により竹筋の断面二次モーメントを大きくできること、補強材間のあきが大きくなることで粗骨材最大寸法の制限を緩和できることなどのメリットがある。一方で、引張応力が最大となる下縁付近での竹筋量が少ないデメリットがある。

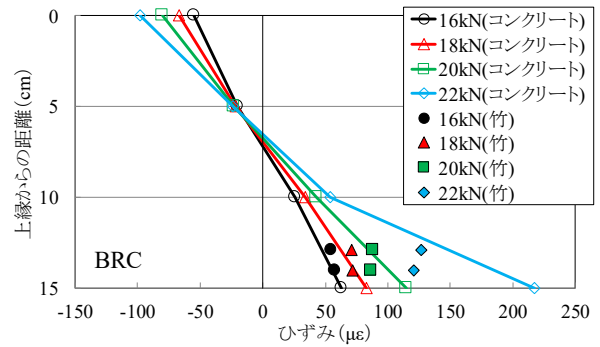


図-8 BRCのひずみ分布 (シリーズ I)

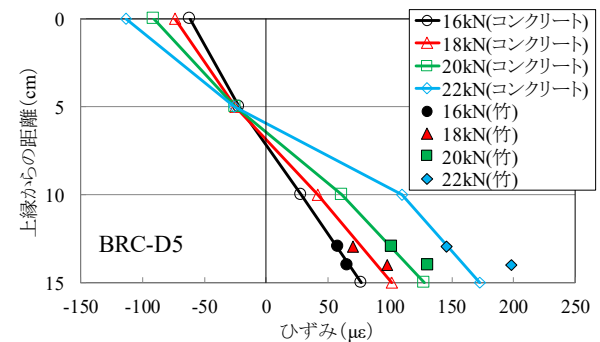


図-9 BRC-D5のひずみ分布 (シリーズ I)

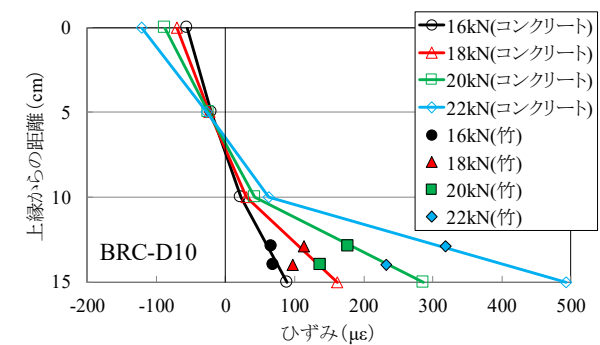


図-10 BRC-D10のひずみ分布 (シリーズ I)

梁供試体は、無補強の供試体 (Non-RC)、孟宗竹を割裂しただけのもの (BRC1)、切欠きを下側のみに設けたもの (BRC2)、切欠きを上下の両サイドに設けたもの (BRC3) をそれぞれ 1 体の合計 4 体を作製した。図-5 に竹材の切欠き寸法を示す。後述のシリーズ I の結果を踏まえ、切欠きの深さは 5mm とした。なお、本シリーズのコンクリートの配合はシリーズ II と同様である。

2.4 共通項目

上記の 3 つのシリーズいずれにおいても供試体寸法を 150×150×530mm とした。また、ひずみゲージは梁供試体の上面と下面、上縁から 50mm、100mm の位置に貼付し、曲げ応力による縦ひずみ分布から平面保持状況を確認した。その分布上に竹筋のひずみをプロットし、線上にあるか否かで付着状況の良否を評価した。載荷方法は

表-6 曲げ試験結果 (シリーズII)

供試体名	ひび割れ発生荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	曲げ強度 (N/mm ²)	破壊形態	タフネス値 (kN・mm)
Non-RC		30.8	4.11	曲げ破壊	41.4
BRC-F	25	32.6	4.35	曲げ破壊	41.5
BRC-L	25	64.2	8.56	曲げ破壊	320.3
BRC-U	29	43.6	5.81	曲げ破壊	111.8

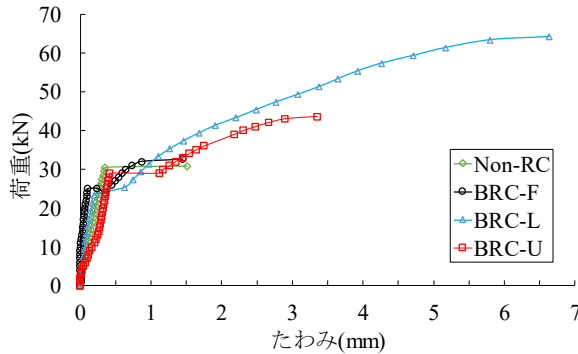


図-11 荷重-たわみ曲線 (シリーズII)

いずれも3等分点荷重を採用し、変位計を用いてスパン中央部のたわみを測定した (図-6 参照)。

なお、竹材の物性については各シリーズにおいて引張強度と引張ヤング係数を測定している。総じて引張強度はコンクリートの圧縮強度よりも大きく、ヤング係数はコンクリートのヤング係数よりも小さい。すなわち、剛性の観点からは、特に曲げひび割れ発生前は竹材による補強効果はなく、ひび割れ発生後の引張応力負担および終局強度においてのみ補強効果を発揮すると考えられる。

3. 実験結果

3.1 シリーズ I (切欠き法)

シリーズ I における曲げ試験結果を表-5 に示す。荷重-たわみ曲線を図-7 に示す。表中のタフネス値とは図-7 のグラフにおける横軸と曲線で囲まれた面積のことである。BRC-D10 の最大荷重が最も大きく、また BRC-D5 もほぼ同じ最大荷重を示した。すなわち、切欠きの深さの影響は小さく、今回の実験においては 5mm 程度で十分である可能性がある。

ひずみ分布を図-8~10 に示す。上縁から 13 および 14cm の位置の黒マーカーが竹筋のひずみである。平面保持を確認することで曲げひび割れの発生の有無が確認できる。また、コンクリートのひずみと竹筋ひずみの相対ズレにより両者の付着状況を確認できる。図-8 の BRC の場合、荷重 22kN 付近において竹筋の付着が切れたと判断できる。一方、BRC-D5 と BRC-D10 は、より大きな荷重まで付着しており、切欠きによる付着力の改善効果が確認できる。また、両者の効果に大きな差はなかった。

竹筋繊維の連続性を確保するという観点からは切欠き深さは浅い方が望ましい。したがって、今回のように

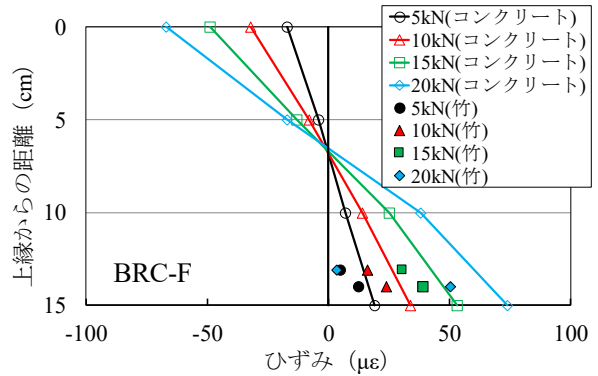


図-12 BRC-Fのひずみ分布 (シリーズII)

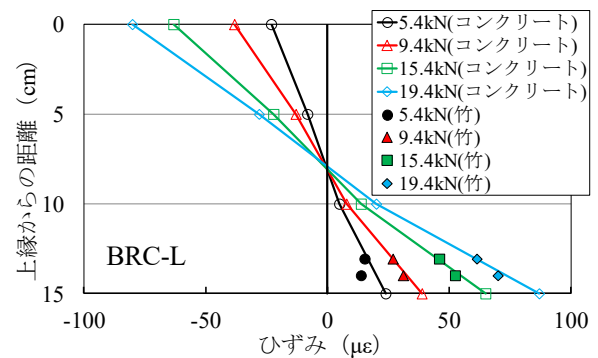


図-13 BRC-Lのひずみ分布 (シリーズII)

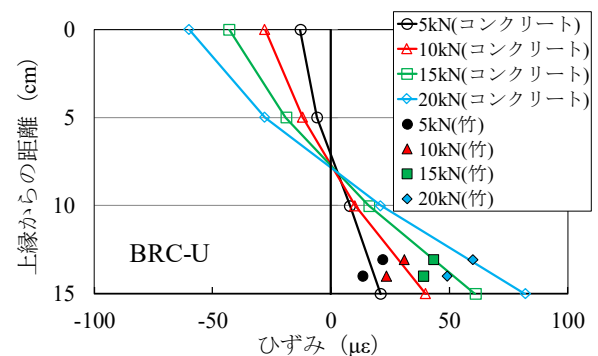


図-14 BRC-Uのひずみ分布 (シリーズII)

切欠き間隔が 10mm という条件下では 5mm 以下の切欠き深さにより付着を確保することが望ましい。切欠き間隔と最適切欠き深さの関係については詳細な追加実験が必要となる。

3.2 シリーズ II (端部法)

シリーズ II の曲げ試験結果を表-6 に示す。Non-RC はひび割れ発生と同時に破壊に至った。また、荷重-たわみ曲線を図-11 に示す。ひび割れ発生荷重は 25~30kN と大きな違いはなかった。ひび割れ発生前と後では傾きが大きく異なることがわかる。また、BRC-L が特に最大荷重が大きく、タフネス値も高い結果になった。Non-RC と BRC-F には大きな違いがなかった。

表-7 曲げ試験結果 (シリーズⅢ)

供試体名	切欠き	ひび割れ発生荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	破壊形態
NRC			30.8	曲げ
BRC1	なし	23.0	52.0	せん断
BRC2	下側	23.8	60.0	曲げ
BRC3	上下	23.8	60.6	曲げ

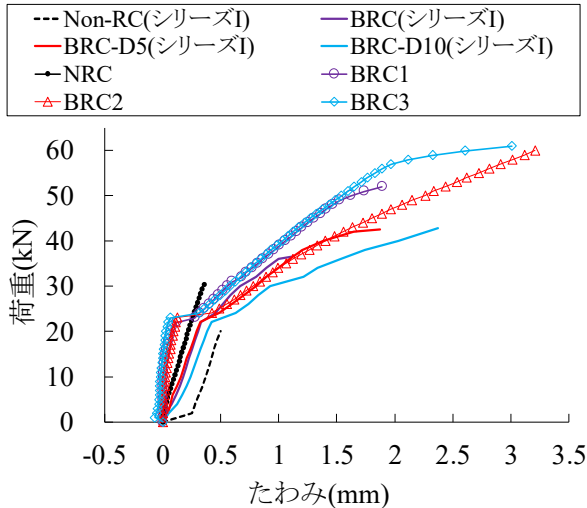


図-15 荷重-たわみ曲線 (その1)

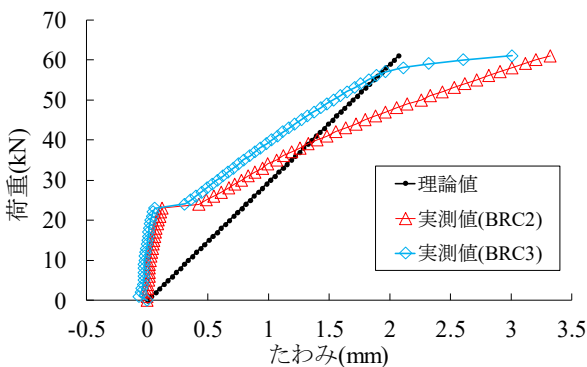


図-16 荷重-たわみ曲線 (その2)

荷重 20kN までのひずみ分布を図-12~14 にそれぞれ示す。直線が各梁のコンクリートのひずみを、塗りつぶしマーカーがそれぞれ竹の上面位置と下面位置のひずみを表している。なお、ひずみは引張を正で表している。BRC-F と BRC-U は竹筋とコンクリートにずれが生じており、滑りが生じていることがわかる。特に平面保持の観点からコンクリートと竹筋のひずみのずれにより定着性状を評価した場合、BRC-F は 20kN の時点で大きくずれが生じている。しかしながら、BRC-L のずれは全体的に小さく、3 種類の加工方法の中では最も定着効果が大いと考えられる。この理由として、U 字型に加工すると折返し部がコンクリートの締めめ作業を妨げたことによる施工上の悪影響と考えられる。特に竹筋は鉄筋と比

較して径を大きくする必要があるため、U 字型の場合は留意が必要である。

以上より、竹材の端部に L 字型の曲げ加工を施すことで、梁の最大荷重のみならず、竹材とコンクリートの定着性状が向上した。

3.3 シリーズⅢ (縦置き法)

曲げ試験結果を表-7 に、荷重-たわみ曲線を図-15~16 に示す。図-15 はシリーズ I のデータと比較したものである。シリーズ I の BRC-D5 (切欠き深さ 5mm, 上下切欠き) と BRC3 を比較すると、BRC3 の方が荷重に対するたわみが小さいことがわかった。これは、竹筋の断面二次モーメントが大きくなったことや、それに伴う竹筋のダウエル効果によるせん断抵抗力の向上の影響と考えられる。さらに最大荷重に着目すると BRC3 の最大荷重が 60.6kN と最も大きく、また BRC2 もほぼ同じ数値を示した。このことから竹材の縦配置は有効であるといえる。

図-16 は荷重-たわみ曲線を理論値と比較したもので、理論値は下記のたわみ算定式⁹⁾により求めた。

$$\delta = \frac{23PL^3}{1296E_e} \quad (1)$$

$$I_e = \left(\frac{M_{crd}}{M_{d \cdot max}} \right)^3 \cdot I_g + \left\{ 1 - \left(\frac{M_{crd}}{M_{d \cdot max}} \right)^3 \right\} \cdot I_{cr} \quad (2)$$

ここに、

- δ : たわみ(mm)
- P : 荷重(N)
- E : ヤング係数(N/mm²)
- L : スパン長(mm), ここでは 450mm
- I_e : 換算断面二次モーメント(mm⁴)
- I_g : 全断面有効時の断面二次モーメント(mm⁴)
- I_{cr} : 引張側コンクリートを無視したときの断面二次モーメント(mm⁴)
- M_{crd} : 曲げひび割れ発生時の曲げモーメント(N・mm)
- $M_{d \cdot max}$: 設計曲げモーメントの最大値(N・mm)

弾性域では理論値よりも実測値の剛性が極めて大きいことがわかる。また、塑性域まで俯瞰すると、理論値と実測値が漸近する傾向が確認できる。BRC2 と BRC3 を比較すると、BRC3 の方が荷重に対してたわみが小さいことがわかる。これは、下側と上下の切欠きという違いによる影響と考えられる。

竹筋のひずみとコンクリートのひずみを図-17~19 に示す。上縁から 12cm から 13cm の位置の 3 点のマーカーが竹材のひずみを表す。また、竹材とコンクリートの

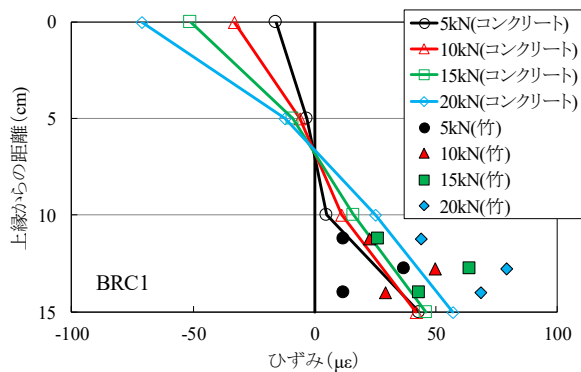


図-17 BRC1のひずみ分布 (シリーズⅢ)

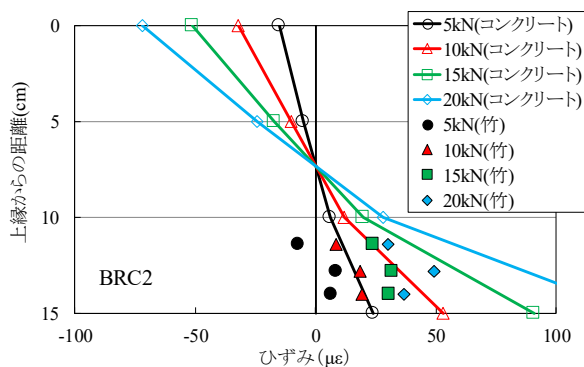


図-18 BRC2のひずみ分布 (シリーズⅢ)

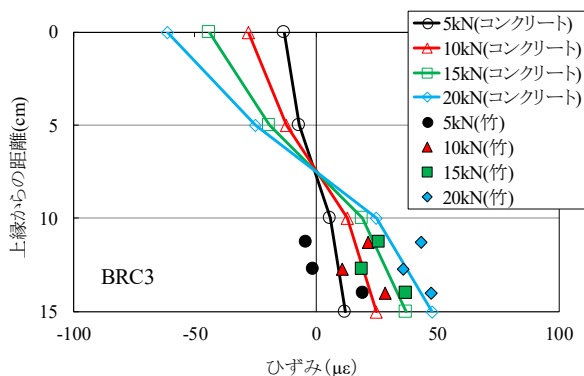


図-19 BRC3のひずみ分布 (シリーズⅢ)

相対ズレにより付着状況を確認できる。図-18よりBRC2は荷重5kNの時点ですでに付着が切れていることが確認できる。一方、図-19のBRC3はより大きな荷重まで付着を保っている。このことより、今回のように竹材を縦に配置する場合は切欠きを下側に設けるだけでは不十分であり、付着力を確保するには上下に設けることが望ましい。

4. まとめと今後の展望

本研究で得られた主な知見は以下のとおりである。

- (1) 小型の竹筋コンクリート構造物において竹材に切欠

きを設けることは付着力向上に有効であり、切欠き深さは5mm程度で十分である。

- (2) 竹筋の定着性状は、端部に曲げ加工をすることでも向上し、竹筋の加工の形状はL字型が好ましい。

- (3) 竹材を縦に配置することは有効であり、付着力の確保のためには切欠きを上下に設けるほうが望ましい。

上記事項と、切欠き加工が煩雑であることや、端部加工においては部材厚さが必要なことを鑑みると、小型BRC構造物においては切欠きを設ける方法、中型以上のBRC構造物においては端部の曲げ加工により竹筋の定着を図る方法が合理的と考えられる。ただし、現段階では終局状態までは定着を確保できておらず、切欠き間隔や形状などを要因としたさらなる検討が必要である。

また、竹筋の強度管理においてはパラツキの管理も重要であり、含水状態、竹材種類、節の有無、母材の個体差などの条件を一定にした場合でも、引張強度には7.4%~34.8%の変動係数がある²⁾。このことが部材強度のパラツキに及ぼす影響についても統計的な手法から明らかにする必要があり、データの蓄積が望まれる。さらに、長さ方向によるパラツキも大きいことから、一定以上の長さにするのは好ましくないと考えられる。また長い場合には「反り」への対処も必要となってくるため、大型の構造物においては竹筋を継手により繋ぐ方法が適切であろう。その観点から今後は供試体寸法を大きくし、その適用範囲を拡大するとともに、付着性状への影響についても確認することが重要である。

謝辞

本研究の実験実施に際し、九州産業大学卒研究生(当時)の田村光隆氏、柳武舞氏、木村旭氏、馬場翔太氏に多大なるご協力を頂いた。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木素之, 長谷川秀人, 六信久美子, 山元哲朗: 山口県における竹林の拡大とその生態, 土木学会論文集G, Vol.62, No.4, pp.445-451, 2006.12.
- 2) 松尾栄治, 高海克彦: コンクリート補強材としての竹材の適用性, 土木学会論文集 F, Vol.65, No.2, pp.190-195, 2009.5.
- 3) 田村光隆, 松尾栄治: 孟宗竹を補強材としたコンクリート梁の付着挙動に関する基礎的研究, 平成25年度土木学会西部支部研究会発表会概要集V-48, pp.731-732, 2014.3.
- 4) 寺崎文人, 松尾栄治, 永松武則: 竹筋コンクリート構造における付着強度の向上効果, 平成27年度土木学会西部支部研究会発表会概要集V-52, pp.725-726, 2016.3.
- 5) 河村協: 竹筋コンクリート, 東京山海堂出版部, 1940.
- 6) 土木学会コンクリート標準示方書, 設計編, 2018.3