

論文 竹-鉄筋コンクリート複合構造における接合部に関する基礎的研究

小川 裕史郎*1・今本 啓一*2・清原 千鶴*3

要旨: 本研究は竹を用いて内部にコンクリートを充填した部材(CFB- Concrete Filled Bamboo)と RC 部材の接合部に関して実験的に検討したものである。単に竹にコンクリートを充填した部材の基本性能(リファレンス)の把握と, RC 部材からのコンクリートの引抜け防止対策を施した部材の実験を行い, 耐力・変位・ひずみ等の挙動を計測した。本実験の結果として, 竹の節・隔壁・拘束材等によるコンクリートの引抜け防止効果を確認し, 耐力上昇の要因と判断した。

キーワード: 竹, コンクリート, 節, 引張試験, 接合部, 鉄筋, 割裂挙動拘束材

1. はじめに

バングラデシュでは度重なるサイクロンの襲来に見舞われ, 多くの人命, 家畜, 財産が被害を受けている。1970 年の当時東パキスタンであった現在のバングラデシュを襲ったサイクロン被災を期に, 各国の支援団体によってバングラデシュには避難施設「サイクロンシェルター」が数多く建設されたが, その数は未だ国土の広さと人口に見合ったものではない。

現在でもサイクロンシェルター建設は行われており, 災害救援復興支援を目的とした国際設計競技では, 材料の調達し易く安全性を確保できるものとして竹と鉄筋コンクリート造(以下 RC 造)の複合構造物の提案が行われ, 竹を鉄筋の代替として利用する建築構造物の研究が進んでいる。既往の研究^{1), 2), 3)}として, モルタルを充填した竹の引張試験を行ったものや, 著者らの CFB(Concrete Filled Bamboo・竹内部にコンクリートを充填した部材)の曲げ・圧縮試験による力学的な補強効果を確認したものが報告されているが, 竹-コンクリートの複合構造物の接合部の評価方法に関する研究はほとんど行われていない。一方で国外では, 竹端部に割裂挙動拘束材(竹の割裂挙動を拘束する部材, 以後拘束バンドと記載)を用いて構造物として実用している例が数多く存在⁴⁾する。そこで, 本研究では, 竹-RC 複合構造物の接合部に関する基礎的研究として, 竹と RC の柱の接合部を模擬した試験体を作製し, 接合部の引張強度について実験的に検討を行った。

2. シリーズ 1

本研究における実験はシリーズ 1~3 で構成されている。シリーズ 1 で CFB の基本性能や破壊モードとその主要因について把握し, シリーズ 2・3 で性能向上のための改善・改良を施している。

2.1 実験概要

シリーズ 1 では CFB 部材の基本性能の把握と破壊モードの主要因の特定を目的としている。RC 構造物の上部に CFB 部材を建設することを想定し, CFB 柱材と RC 構造物を模擬したコンクリートブロック(以後「ブロック」と表記)の接合部まわりの引張試験を行う(JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」に準ずる)。

(1) 実験変数

基本的な CFB 部材の引張強度と, 竹内部のコンクリートの引抜けに影響を与えると考えられる要素として, コンクリート充填深さの範囲内の残存隔壁(竹内部の隔壁を取り除いた際の残り(5mm 程度))や端部の隔壁の有無, 節間長さが考えられるため, それらを実験変数として実験を行う。竹内部に充填したコンクリートの材齢による影響を検討するため, 試験材齢を 7 日・14 日・28 日とした。コンクリートの調合表を表-1 に示す。

(2) 試験体概要

竹には孟宗竹の他に真竹, 破竹があるが, それぞれ直径, 内厚(竹の断面における厚さ), 1 節間の長さなどの特性が異なり, 本実験では最も直径が大きく節間の短い孟宗竹(樹齢 3~5 年, 発注時に採取し油抜き処理を施し自然乾燥させたもので, 実験を行うまでに 2 か月程度経過している)を採用した。使用した竹は直径 90~

表-1 充填コンクリート調合表

材齢28日	単用量[kg/m ³]					
	W/C[%]	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
55	179	326	699	1067	3.26	0.01956

表-2 試験体名称と寸寸法

試験体名称	竹の長さ		竹寸法[mm]		
	短(Short)	長(Long)	直径	90-110	
節や隔壁の有無	残存隔壁無(HN)	S-HN	L-HN	内厚	10
	残存隔壁有(HA)	S-HA	L-HA	節間(長)	200
	残存隔壁, 端部	S-HA+F	/	節間(短)	300
	隔壁有(HA+F)				

*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 工学部建築学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京理科大学 工学部建築学科 補手 博士(工学) (正会員)

110mm, 内厚 10mm, 節間長さは 200~300mm であった。試験体名称と竹の各種寸法を表-2 に示す。各試験体の一例を図-1 に示す。各試験体は節を4~5個有するよう竹を切断し、竹内部の隔壁中央部を全て取り除き、コンクリートの充填深さを変化させることで残存隔壁の有無を調整した。中空空間にはスタイロ材を挿入し、試験体下部を養生テープで封かんして上部より充填を施した。

(3) セットアップ概要

既存 RC 部を模擬したブロックと CFB 柱材の接合方法は、ブロックに金属系の埋込式あと施工アンカーを設置し、CFB 試験体下部にはアンカーと接続するための異形棒鋼(D13・先端にアンカー接続用のネジ切り 20mm があるもの)を埋め込むこととした。

試験には万能試験機を用いた。ブロック下部と CFB 上部に異形棒鋼(D13)を埋め込み、万能試験機のチャックに取り付けて載荷した。セットアップを図-2 に示す。なお、載荷時には万能試験機下部に変位計を設置し、引張軸方向変位を測定した。また、図-2 に示すように CFB 試験体中央部の軸方向に2箇所、接合部付近の軸方向、軸直交方向にそれぞれ 2 箇所のひずみゲージ(検長 30mm)を設置して測定を行った。この後に行うシリーズ 2・3 も同様のセットアップである。

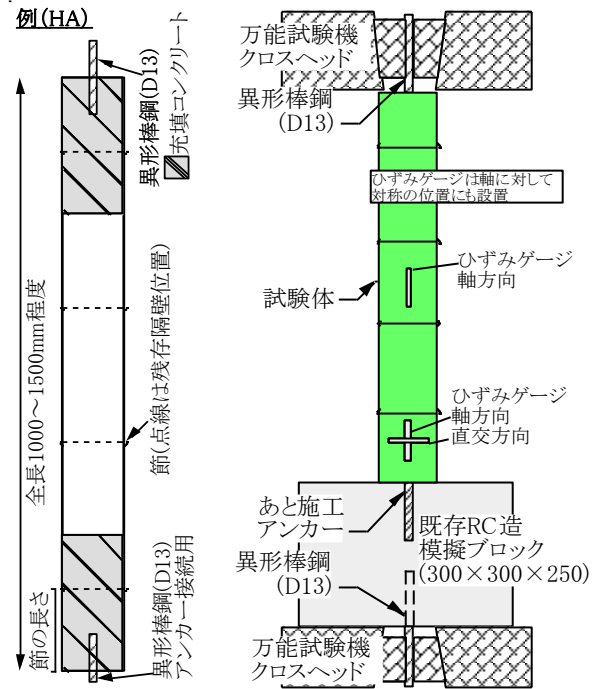


図-1 試験体図

図-2 セットアップ図

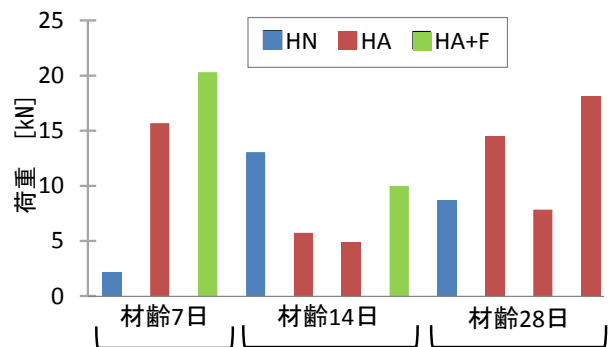


図-3 引張試験結果

2.2 実験結果

引張試験結果を図-3 に示す。部材としての性能を失う3つの破壊モードがあることを確認した。以下にその3種類を示す。

- (1) 充填コンクリートと竹との付着が非常に弱いため起こる、充填したコンクリートの竹からの引抜け
- (2) 竹の割裂による充填したコンクリートの引抜け
- (3) 残存隔壁付近におけるコンクリートの割裂破断による引抜け

いずれの場合も、金属アンカーがブロックから引抜けるには至らなかった。竹の割裂はコンクリートが引抜ける際に残存隔壁と接触し、竹を押し上げて引抜ける挙動のために起こったと推測できる。

2.3 考察

HA(残存隔壁有)の方が HN(残存隔壁無)より強度が高い。また、CFB の最下部に隔壁を残してコンクリートの引抜けを抑制した HA+F の強度は端部に隔壁のない HA より高い。なお、材齢 14 日で HN の強度が高くなっている理由として、試験体に使用した竹の生長時の湾曲により充填コンクリートが引抜けにくくなったことが考えられる。荷重と変位の関係の一例を図-4 に示す。最大荷重と変位の関係は、最大荷重の大きい試験体ほど変位も小さい。これはコンクリートと竹が一体となった挙動を示している。また、同材齢(28日)の HA で CFB

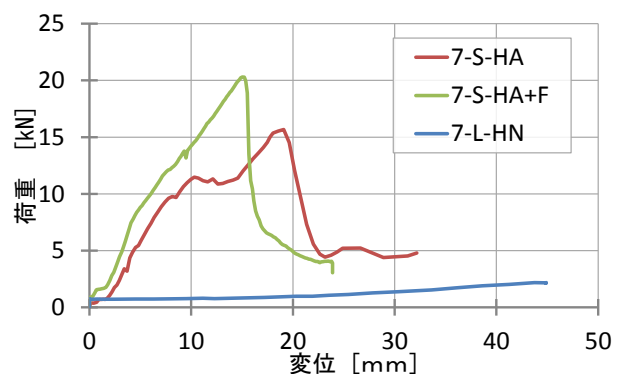


図-4 荷重変位関係(材齢 7日)

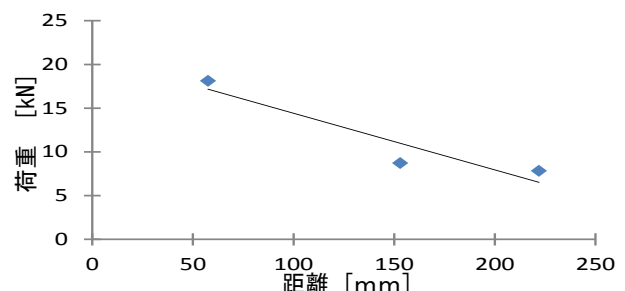


図-5 CFB 最下部から節までの距離と最大荷重

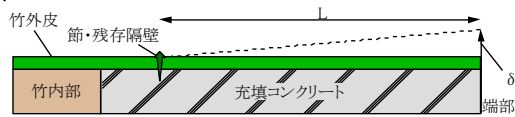


図-6 端部可撓距離 概念図 (CFB 断面)

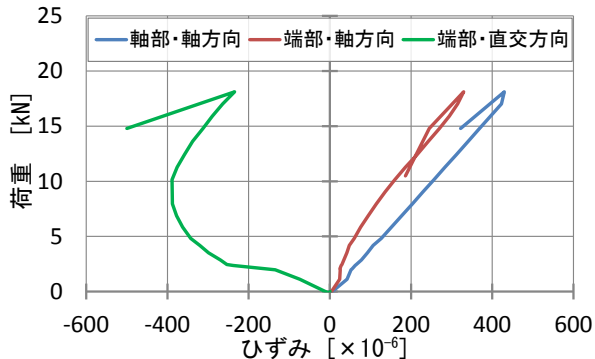


図-7 中央部・端部の荷重-ひずみ関係

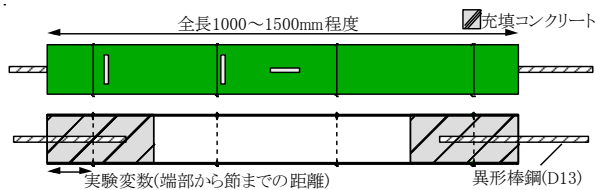


図-8 試験体概要とひずみゲージ設置位置

最下部から節までの距離と最大荷重関係を比較したものを図-5に示す。図より、距離に近いものほど強度が高い傾向が確認できた。図-6に示す概念図で説明する。この図は試験体端部を拡大した概念図である。節付近は竹の割裂に対する抵抗力が大きく、節から端部までの距離を可撓距離 L とすると、 L に比例して端部での変形 δ が大きくなり、割裂が起きやすいためだと考えられる。

さらに中央部、端部のひずみに関して述べる。図-7にHAの各位置における荷重ひずみ関係を示す。軸方向のひずみは、中央部よりも端部の方が小さいことがわかる。これは端部にはコンクリートが充填されているため、竹の分担応力が低減されたためであると考えられる。いずれの部分も最大荷重後にほぼ同経路でひずみが減少しており、その傾向は全ての試験体で見られたことから、竹は弾性域で挙動したことが考えられる。

3. シリーズ2

3.1 実験概要

シリーズ1でCFBの破壊モードと隔壁等による耐力が明らかになった。また、接合部から節までの距離が短い試験体は引張強度が高くなる一方で、鉄筋が埋設されたコンクリートを残存隔壁に付着させることで竹に割裂が生じやすくなる傾向がわかった。これらを踏まえ、シリーズ2では埋め込んだ鉄筋の長さや節との位置関係により、強度上昇や鉄筋のコンクリートからの引抜け防止を目的とした実験を行った。

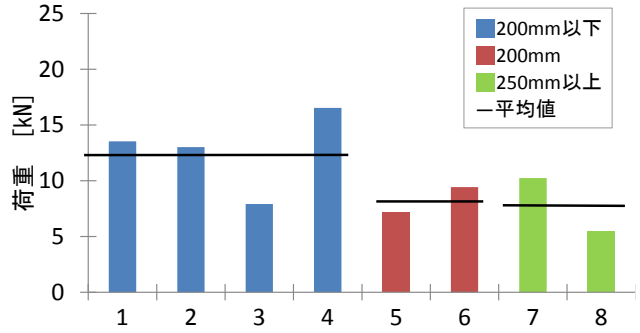


図-9 最大引張荷重

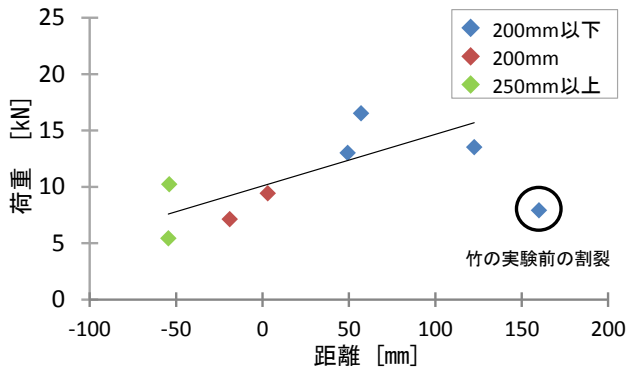


図-10 CFBの節を超えた鉄筋の長さや荷重の関係

(1) 実験変数

実験変数はCFB端部から節までの距離とし、鉄筋が埋設されたコンクリートを残存隔壁に付着させる場合を200mm以下、コンクリートのみ残存隔壁に付着させる場合を200mm、残存隔壁との付着のない場合を250mm以上の3種類とした。試験体の寸法は表-2と同様で、全長が約900mm~1000mmの孟宗竹である。強度の上昇が見込まれる200mm以下のみ、傾向・破壊モードを検証するために試験体数を4本としている。

(2) セットアップ概要

セットアップ・載荷方法・試験体概要はシリーズ1と同様である。CFB内のコンクリート充填深さを250mm、鉄筋の埋込み長さを200mmとする。試験体概要とひずみゲージ設置位置を図-8に示す。

3.2 実験結果

図-9に各試験体の最大引張荷重を示す。CFB端部から節までの距離と反比例して最大荷重の平均値が大きくなる傾向が現れた。

試験体の破壊モードは以下の2通りである。

- (1) 竹の割裂による充填したコンクリートの引抜け
- (2) 竹の割裂が未発生のコンクリートが引抜け

3.3 考察

図-10に節を超えた鉄筋の長さや最大引張荷重の関係を示す。端部からの距離が150mmを超えた試験体の耐力にばらつきがみられるが、節を越えた鉄筋の長さや比例して強度が高くなる傾向にある。このことから、鉄

表-3 実験変数と試験体名称

実験変数と 試験体名称	設置箇所数			幅 [mm]	厚さ [mm]	最大結束径 [mm]	引張強度 [kN]	
	0	1	3					
材質	金属系	N(シリーズ)	M-1	M-3	12.3	1mm	203	1.2
	樹脂系	2の試験体	R-1	R-3	12.5	以下	200	1.1

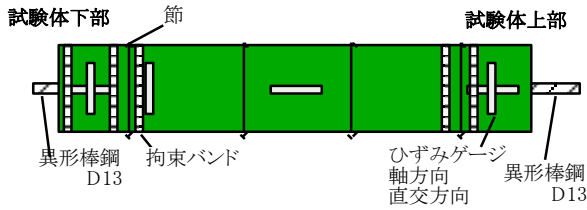


図-11 拘束バンド・ひずみゲージ設置箇所

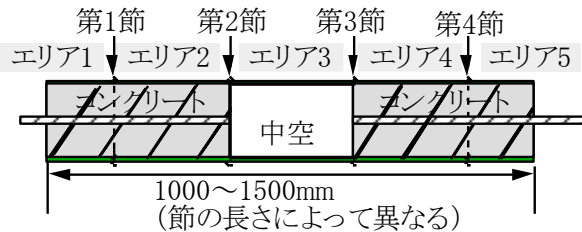


図-12 試験体概要と名称定義

筋が埋設されたコンクリートが残存隔壁に付着していることが強度向上に大きな影響を与えていることが確認できる。なお、ばらつきの原因として、試験前に発生していた竹の乾燥による割裂の影響で、竹にコンクリートの引抜けに対する耐力が低下していたことが考えられる。

4. シリーズ3

4.1 実験概要

シリーズ1・2で竹の端部から最初の節までの距離、コンクリートの充填深さ、鉄筋の埋め込み深さ、鉄筋と節の位置関係等に関する実験・考察を行った。実験の際のCFBの性能低下に関する破壊モードとして、竹の割裂が主要因となっていることが明らかとなった。よって、CFBの最外部から引張軸と直交方向の挙動を拘束し、竹の割裂とその進展を抑制する割裂挙動拘束バンド(以後、拘束バンド)を用いて性能の向上を図る実験を行う。セットアップ・載荷方法は前出の実験と同様である。

(1) 実験変数

実験変数と試験体名称、拘束バンド要素実験結果を表-3に示す。実験変数は竹外皮の端部・節付近の拘束バンドの設置箇所数・材質である。拘束バンドは2種類(金属製、樹脂製)を使用し、設置箇所数(1, 3)を設定した。設置箇所を図-11に示す。設置箇所は、CFB上部の節の上下は固定とし、設置箇所1とはCFB下部の1箇所に設置したものである。表内の試験体Nは拘束バンドを用いないもので、シリーズ1・2の実験結果を用いる。



写真-1 試験体外観(M-1)



写真-2 試験終了後内部(R-1)



写真-3 残存隔壁破壊後
(写真2右端部の拡大)

(2) 試験体概要

2番目の節までの距離を一定にして切断し、節数は4つとしている。両端からそれぞれ最初の内部の隔壁は取り除き、2番目の隔壁までコンクリートを充填した(充填方法はシリーズ1と同様)。これにより試験体中央部の節1つは竹のみの中空構造とすることができ、竹本来の引張特性を把握することができる。コンクリートの充填深さ、鉄筋の埋め込み長さは上部350mm、下部400mmで、両端部から2番目の隔壁までである。また、今後の記述においては、節、節間について定義し、記述するものとする。(セットアップ時の下方向から順に第1節、等)試験体概要・定義を図-12に示す。各試験体は棒状変位計およびひずみゲージ(竹: 検長30mm, バンド: 検長5mm)を用いて軸方向変位、軸方向、軸と直交方向の竹最外皮のひずみおよび拘束バンドのひずみを計測する。

4.2 実験結果

シリーズ1によって明らかになった3種類の破壊モードの中で、シリーズ3では2.2節パターン(3)の竹内部の第1節付近でのコンクリートの破断による鉄筋の引抜けはなかった。多くの試験体で竹内部の節が破壊し、コンクリートと共に引抜けるという破壊性状であった。試験前の外観・試験後の内部の写真を写真-1・2・3に示す。

4.3 考察

(1) 耐力の比較

前項で述べた破壊性状より、シリーズ2と同様、鉄筋埋め込み長さが十分確保されていることが確認できた。一方で、第1節の竹内部の残存隔壁が破壊され、コンク

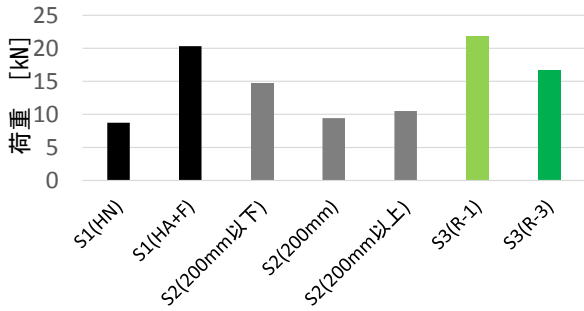


図-13 シリーズ1~3 耐力比較

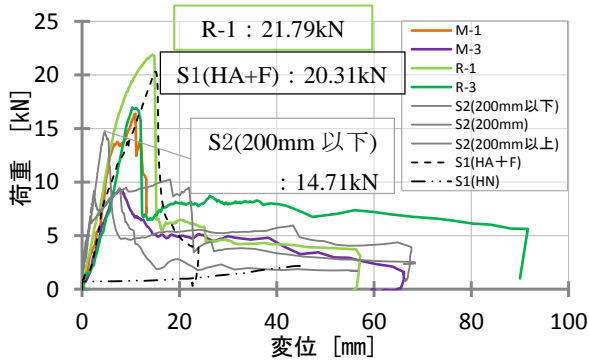


図-14 拘束バンド有無における荷重-変位関係比較

リートと共に引抜けたことから、最大耐力は残存隔壁の強度に大きく依存することがわかった。以下、図-13に各シリーズの代表的な試験体の最大耐力を示す。

(2) 拘束バンドの効果の検証

図-14に拘束バンドの有無による耐力の比較のグラフを示す。図には比較対象としてシリーズ1の実験結果(節に付着していない基準試験体(S1(HN))と最も耐力が大きかった隔壁ありのもの(S1(HA+F)))も記載している。シリーズ2・3では実験前から割裂が発生していたにもかかわらず、多くの試験体でS1(HN)の結果より耐力が上昇し、最大耐力時の変位が大きくなっていることがわかる。ただし、養生時のひび割れが特に大きかったM-3試験体に限り、耐力が10kNに達しなかった。シリーズ2でシリーズ1・3のコンクリート引抜け防止策を講じたものよりも大きな耐力を示したものは無く、いずれも15kN以下であった。これらのことから、拘束バンドの使用により、耐力の増大とともに大きな変形特性を有する効果を得られた。なお、結果を見ると拘束バンドを複数用いた試験体の方が最大耐力が低い値となっているが、拘束バンドの効果は竹が拡がる挙動の拘束のみであり、竹本来の直径より内側に締め付ける力は発生していないため耐力低下の要因ではなく、個体差によるものであると考えられる。

(3) 中央部(竹のみ)の軸方向ひずみの比較

図-15に中央部(エリア3)の引張軸方向におけるひずみ測定結果(引張を正、圧縮を負)を示す。図はシリーズ

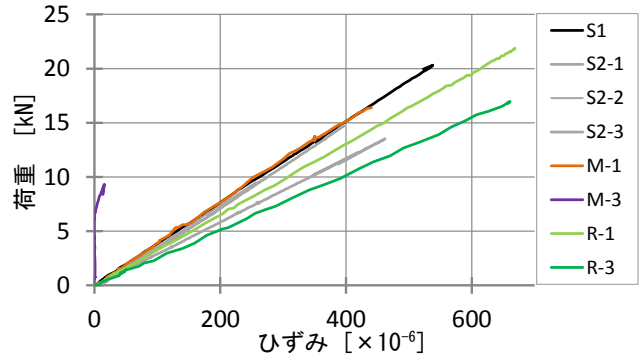


図-15 中央部 軸方向荷重-ひずみ関係

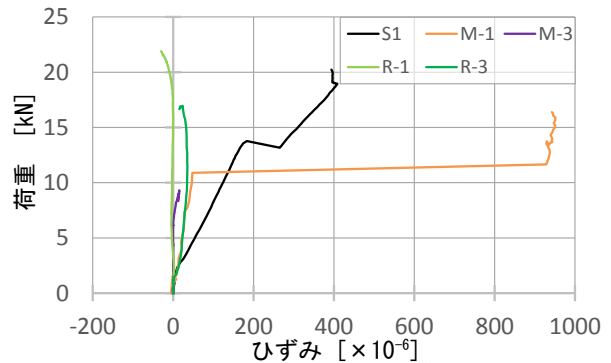


図-16 端部 荷重-ひずみ関係

1(図内S1・隔壁有のもの)、2(S2)、3の比較対象試験体の荷重ひずみ関係を示している。シリーズ2の比較対象試験体は、前項のものとは異なり試験体寸法の近いもの(コンクリート充填深さ・鉄筋埋め込み長さ等)を抽出している。図より、20kN程度までの軸方向引張荷重の範囲内では、ほぼ一定の剛性で耐力が上昇していることから竹本体は弾性域で挙動することがわかる。なお、使用した竹本体のヤング係数は実験結果より、9000~13500N/mm²程度であることが分かった。鉄の205000N/mm²よりは低い値だが、木材(すぎ)の7000N/mm²と比較すると高い値であることがわかる。

(4) 端部の軸方向ひずみの比較

図-16に端部(エリア1)の引張軸方向におけるひずみ測定結果を示す。端部は竹内部にコンクリートが充填されているため、中央部のひずみの挙動とは異なる結果が得られた。なお、比較対象はシリーズ1の試験体である。

中央部と比較して、端部はほぼすべての試験体において、最大荷重に達するまでにひずみは400[×10⁻⁶]以内の範囲に分布している。なお、M-1のみ900[×10⁻⁶]を超えるひずみを計測した。この理由としては載荷前に竹に割裂が起きていたことが挙げられる。

(5) 端部の軸直交方向ひずみの比較

図-17に端部(エリア1)の軸直交方向におけるひずみ測定結果を示す。図は軸方向に引張力をかけた際の荷重ひずみ関係を示している。図より、シリーズ1・2と比較して荷重が低い時点から竹が弾性的な挙動を示している。

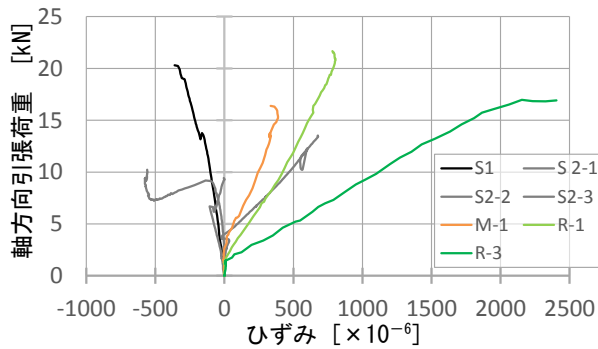


図-17 端部の軸直交方向の荷重-ひずみ関係

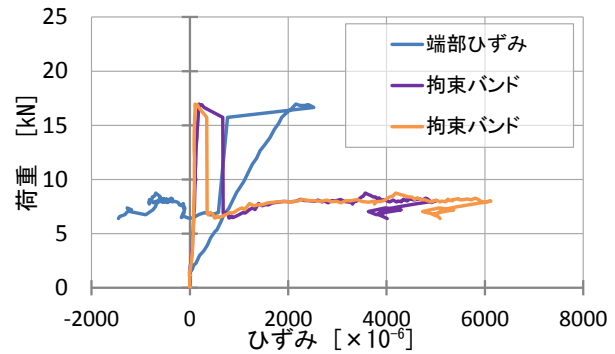


図-18 エリア1 竹外皮と拘束バンドひずみ

拘束バンドの効果によって弾性的な挙動をすることがわかる。拘束バンドの材質で比較すると、金属製と比較して樹脂製の方が伸縮性に優れており、竹本体の弾性的な挙動を引き出すことができることがわかる。

(6) 竹外皮と拘束バンドの挙動の考察

本項では実験結果と同様、R-3を例に述べる。

図-18にエリア1の軸直交方向における竹と拘束バンドの荷重ひずみ関係を示す。2つの拘束バンドにおいて非常に似たひずみ挙動を確認した。竹の挙動と比較すると、最大荷重までは竹の軸直交方向のひずみが増加していき、後の竹の割裂時にひずみが同程度となつてからは拘束バンドのひずみが増加していくことを確認した。最大荷重まで拘束バンドのひずみはほとんど0に近い値をとり、割裂発生後は荷重が再び上昇することはなく、ひずみが増加する一方であったことから、より強固に挙動を拘束し、竹と一体の挙動をするよう配慮する必要がある。

5. 引張実験時の曲げモーメント

本稿における引張試験に関する考察は、両端の異形棒鋼が同一線上に存在していないことによって生じる曲げモーメントを考慮していない記述となっている。養生時に細心の注意を払ったものの、実際には曲げモーメントが生じていると考えられる。しかし、本稿における試験体の端部にはコンクリートが充填されているため、曲げモーメントは主に中央部の中空部分がほとんどを負担するものと考えられる。本実験において、竹の割裂は全て端部に発生したものであり、これはコンクリートの引抜けによって発生したことから、竹本来の特性であるしなやかさによって中央部が曲げモーメントを吸収し、端部の割裂にはほとんど影響を及ぼしていないと考えられる。

6. まとめ

本研究における知見と課題を以下に述べる。

(1) CFBには3つの破壊モードが存在し、特に竹の割裂が大きな要因である。

- (2) 接合部から最初の節までの距離と反比例して引張耐力が上昇する傾向がある。
- (3) 鉄筋が最初の節より長い距離で埋め込まれていると定着し、接合部間の強度の確保に有効である。
- (4) 拘束バンドの使用によってCFBとしての強度および最大荷重時の変形能力が上昇する。
- (5) 本研究のCFB部材の構造は竹内部の残存隔壁の強度に強く依存する。
- (6) 竹に初期割裂があつても、拘束バンドにより耐力を向上させることができる。
- (7) 拘束バンドの材質によって、竹本体の軸直交方向の変形能力に大きく影響がある。

新たに検証が必要となった事項として、竹の個体差の影響と拘束バンドの拘束力(締付力)の影響が挙げられ、引き続き検討を行う予定である。

謝辞

本プロジェクトは大阪工業大学前田茂樹先生およびASA 鈴木啓氏との共同研究によるものです。付して深謝の意を表します。

また本研究は東京理科大学工学部建築学科学部生の小柴夕季さんにご尽力頂きました。感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高遠暁子, 腰原幹雄: 竹の節を利用した接合部に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.91-92, 2009.8
- 2) 野々山聡, 伊藤渉, 今本啓一: 廃石膏ボード微粉末-高炉スラグフライアッシュ混合セメントコンクリートと竹を用いたCFBの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1505-1510, 2010
- 3) 巽純一: 竹筋コンクリート梁の彎曲試験, 建築學會論文集, Vol.13 pp.184-193, 1939
- 4) Gernot Minke: Build with Bamboo - Design and Technology of a Sustainable Architecture, Birkhauser, 2012