

# 論文 竹-鉄筋コンクリート複合構造における接合部の構成と耐力に関する基礎的研究

今本啓一<sup>\*1</sup>・清原千鶴<sup>\*2</sup>・小川裕史郎<sup>\*3</sup>

**要旨**：本研究は、竹内部にコンクリートを充填した部材(CFB- Concrete Filled Bamboo)を用いた構造物を実現する際に重要である、接合部の耐力や部材・素材の特性を実験的に検証したものである。竹は、繊維方向に沿って割裂という脆性的な破壊を生じるため、その挙動を拘束する治具を設置し、節と端部の距離について検討を行った。また、日射や降雨などの屋外環境における劣化の影響を検討するため、暴露試験を行い、吸水抑制の重要性を示した。また、実構造物における柱と梁の接合方法についても各種接合材料を用いて耐力、破壊機構、変形について実験的に検証し、その補強効果を定量的に評価した。

**キーワード**：竹、コンクリート、節、暴露試験、接合部、鉛直載荷試験、棒鋼

## 1. はじめに

### 1.1 研究概要

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、現在、各国の支援団体によって鉄筋コンクリート造(以下、RC造)の避難施設「サイクロンシェルター」が建設されている。しかし、その数は国土・人口に見合ったものではない。それに伴い、国際設計競技において、材料の調達がしやすく安全性を確保できるものとして竹-RC複合構造物が提案され、研究が進められている。

既往の研究<sup>1)</sup>において、著者らはCFB(Concrete Filled Bamboo・竹内部にコンクリートを充填した部材)部材の性能の検討を行っているが、本稿では、割裂や経年劣化に焦点を当てた試験を行い、CFBの劣化特性に関するデータ収集を行った。

また、門型試験体を作製し、柱梁接合部の鉛直載荷に対する耐力の実験的検討を行った。以降、竹の載荷による割裂に焦点を当てた割裂試験、屋外環境における経年による劣化(耐力低下)に焦点を当てた暴露試験、接合部の鉛直載荷を行った接合部試験の検討結果を述べる。

### 1.2 竹の選定

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る。本研究では、既往の研究<sup>2)</sup>で他の竹と比較して外皮層と内皮層の強度の有意差が小さいとされ、最も直径が大きく節間の短い孟宗竹(大分産、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90~110mm、内厚10mm、節間長さは200~300mmであった。

## 2. 実験と検証(割裂試験)

### 2.1 概要

#### (1) 実験概要

本試験は、CFB引張試験<sup>1)</sup>で端部のコンクリートの引抜けや割裂が起きたことに起因して実施したものである。

引張試験における破壊モードから、端部の割裂を主要因とする部材の耐力低下が確認されたが、割裂挙動を拘束する拘束材(以下、拘束バンド)を用いることによる耐力の向上も見られた。このことから、竹の割裂のメカニズムを解明し、拘束バンドなどの治具による効果的な補強方法の検討を行うことを目的とする。この場合、計測項目は荷重、載荷軸と直交方向のひずみとした。

#### (2) 試験体概要

図-1に試験体図とひずみゲージ(検長30mm)設置位置を示す。試験体は既往の研究における引張試験の端部を模擬したもので、全長290mmの竹を使用した。試験体1体につき節を1つ含み、下端部から節までの距離が160, 210, 220mmとなるように切り出して(210mmのものは2体A, B, 他は1体ずつ)、内部には下端にスタイロフォームを設置して、20mm程度の空間を空けてコンクリート(調合表を表-2に示す)を充填した。節の竹内部には隔壁があるが、それらを内皮から8mm程度残して取り除き、残った部分を本研究では残存隔壁と称する。なお、下端から節までの距離に加え、拘束バンドの設置箇所数を実験変数に設定(0, 1, 3箇所)し、ひずみゲージは下端部から145mm、竹の軸から4方向に載荷軸と直交方向に設置して計測を行った。

#### (3) セットアップ概要

図-2にセットアップ図を示す。試験体の空間がある端部を下面として設置(竹のみが載荷面に接触)し、万能

\*1 東京理科大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

\*2 東京理科大学 工学部建築学科補手 工博 (正会員)

\*3 元東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 工修

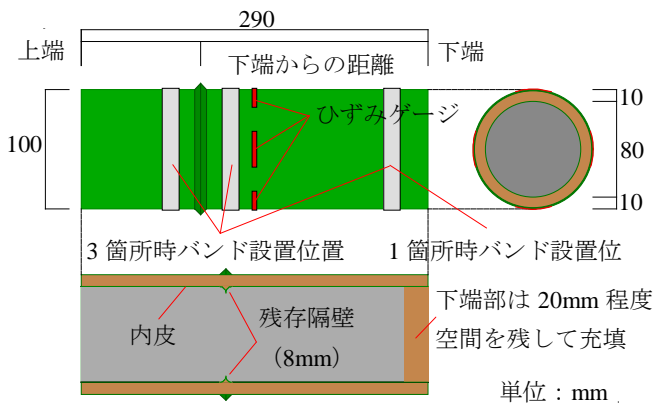


図-1 試験体図とゲージ設置位置

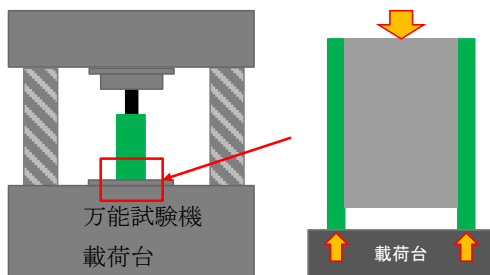


図-2 セットアップ図と載荷概念図

圧縮載荷において、上面は治具を竹内部に充填したコンクリートだけに接触させることで引張試験時の端部のコンクリートの引抜けと同様の挙動を模擬した。

## 2.2 結果と考察

文献1)における割裂を伴う引張破壊を写真-1に示す。



写真-1 引張試験時の割裂破壊

本実験における破壊モードは以下に記載する2種類挙げられた。

- (1) 割裂が起きることによるコンクリートの引抜け
- (2) 割裂が生じない状況でのコンクリートの引抜け

特に(2)の場合は、竹内部の残存隔壁が破壊しコンクリートと共に引抜ける挙動であった。

図-4は、残存隔壁を均一に8mmと仮定して竹の長辺と短辺から面積を算出し、残存隔壁の面積あたりに最大荷重がかかった際の結果を距離別にまとめたものである。

拘束バンド設置箇所数別の近似直線の相関係数に着目すると、拘束バンドの個数が多いほど決定係数が大きくなる。この値自体は小さいが、相対的に最大耐力のバ

ラツキを制御できると考える。

図の傾きは拘束バンドが0箇所では横軸と並行であり、1箇所では負に、3箇所では正になっている。既往の研究より、「端部(CFB最下部)から節までの長さが短いほど強度が高い」ことから、拘束バンドが1箇所の場合は相反してしまう。一方、拘束バンド3箇所は既往の研究と同様の傾向が見られた。

破壊モードを見ると、拘束バンド0箇所では割裂が発生しないものもあり、1箇所では割裂発生直後に残存隔壁とコンクリートが一体となって引抜ける挙動であったため、隔壁の破壊を進行させるのみで引抜けにあまり効果的な拘束をできていないことが分かる。拘束バンド3箇所の場合、割裂発生後の靱性も確保できることを考えるとバンドを3箇所に設置することが効果的と言える。

表-2 充填コンクリートの調査表

w/c	単用量(kg/m <sup>3</sup> )				フレッシュ性状		
	水	セメント	細骨材	粗骨材	スランプ(cm)	フロー(cm)	空気量(%)
55	179	326	699	1067	21.2	42.7x41.8	4.4

AE減水剤使用

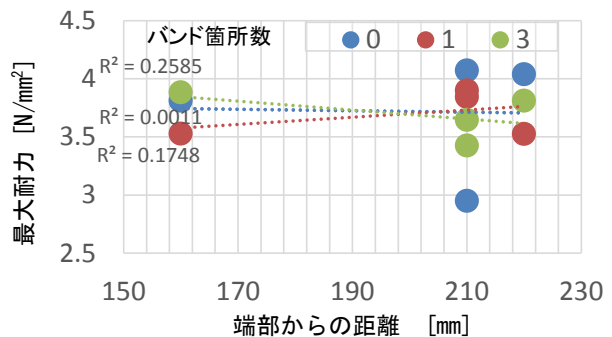


図-4 残存隔壁の応力度と端部からの距離の関係

## 3. 実験と検証(暴露試験)

### 3.1 概要

#### (1) 実験概要

本試験はCFB部材の屋外暴露試験を通して、耐力劣化の程度や要因などについて検証するためのものである。試験は、東京都葛飾区新宿6-3-1所在の東京理科大学葛飾校舎の屋上(地上11F)にてJIS Z 2381に準じて行い、後述する実験要因ごとに6月から1, 3, 6ヶ月の暴露試験体を用意した。一般的に木材などは含水率によって耐力が増減するといわれているが、木材と比較して、竹は緻密な外皮によって表面からの水分の出入りは少ないと考えられるため、竹の水分量と耐力の関係、吸水と乾燥の繰返しによる劣化等も検討を行った。暴露期間が終了した試験体は、耐力検証のために圧縮試験を行った。なお、直前の天候による水分量が大きく結果を左右することが考えられるため、試験は、回収後14日間恒温恒湿室(20℃, 60%)に保存した後に実施した。

表-3 実験要因と試験体名称

試験体名称		隔壁		
		無		有
バンド	有	バンド	バンド+束	隔壁有
	無	恒温室	隔壁無	

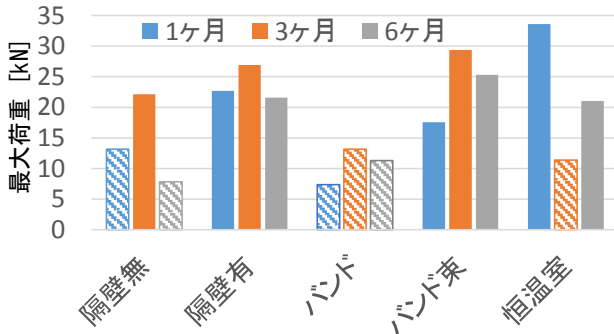


図-5 暴露試験 圧縮試験結果

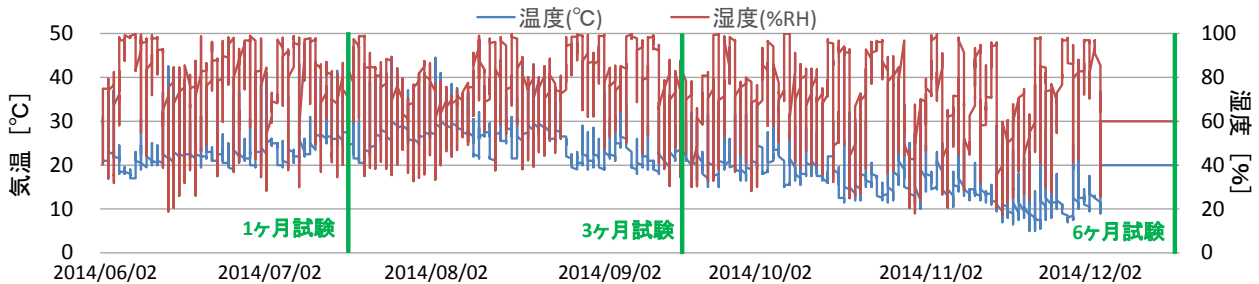


図-6 温湿度計計測結果

(2) 試験体概要

実験要因を表-3に示す。実験要因は隔壁や拘束バンドの有無、試験体柱脚の束の有無とし、恒温室内に存置した試験体を用いた。試験体は全長 290mm 程度の竹を用いた。試験体上端はアルミテープで封かんし、水分の出入りを抑制して下端からの吸水を模擬した。試験体は節(残存隔壁)を1つ含み、隔壁有りのもののみ、さらに下端部に隔壁を残した状態で内部にコンクリートを充填した。なお、拘束バンドを設置する試験体はコンクリート充填時に既に竹の割裂が発生しているものを用いた。また、表-3に加えて吸水量の参考として、竹のみでコンクリートを充填しないもの、内部に充填したコンクリートと同様の調合の試験体(供試体)も暴露を行った。

(3) セットアップ概要

暴露試験は、全ての試験体を移動の無いよう、柵に固定して行った。また束には型枠用の合板を用いた。

圧縮試験における載荷方法を図2に示す。試験時の計測項目は荷重のみとした。

3.2 結果

図-5に暴露後の圧縮試験の結果を示す。棒グラフが斜線のものは、割裂幅が大きく載荷前(割裂時期は不明)から内部のコンクリートと内皮のクリアランスが大きい状態の試験体であり、参考値とした。

表-4 暴露前後の試験体質量変化

質量変化(g)	1ヶ月	3ヶ月	6ヶ月
CFB隔無	36.9	-67.4	-65.5
CFB隔有	4.5	-21.9	-63.3
バンド	2.9	27.2	-14.4
バンド+束	58.2	-32.7	-66.1
恒温室	-74.7	-71.7	-73.9
竹	2.36	-2.05	-8.69



写真-2 試験体写真(暴露後に撮影)

(例: 竹のみ 左から開始日・1・3・6ヶ月)

また図-6に暴露期間中の温湿度計の計測結果も記載する(暴露期間中の平均気温 22.7°C, 最高 44.5°C, 最低 5.0°C)。気温があまり上がらず、湿度が高くなっている時刻は雨天時であり、東京都千代田区・江戸川臨海の気象観測台の結果とも天候は概ね一致している。

3.3 考察

表-4に暴露期間 1, 3, 6ヶ月の試験体の暴露前後の質量変化を示す(試験体は暴露開始時に1体 4000g 前後)。

(1) 暴露期間ごとの比較

写真-2に暴露期間ごとの試験体を示す。外観から、暴露に伴い外皮の色褪せや汚れが目立ち、孢子の付着も確認できた。表-4より、質量が1ヶ月のもののみ増加し、3, 6ヶ月のものは減少していた。これは降雨による吸水と、その後の気候による脱水・乾燥の影響と考えられる。図-5より、1ヶ月より3ヶ月において一時的に最大荷重が高いのは、夏期により竹材の一次的な乾燥促進によることも一因であると推測するが、6ヶ月の試験体で再び耐力が低下していることから、暴露による耐力の低下を確認することができる。

(2) 実験変数での比較

(a) 竹のみの試験体と供試体の吸水量

表-4の竹の試験体の質量変化、表-5に示す供試体の質量変化より、ほぼ全ての試験体で供試体以上の増減が

表-5 暴露前後の供試体質量変化

質量変化(g)	1ヶ月	3ヶ月	6ヶ月
供試体	5	14.8	0.5
	3.1	2.1	9.8

表-6 実験変数

試験体名称	ロープ(Rope)	棒鋼(Steel)	斜材(Diagonal)
R	○	-	-
R-D	○	-	○
S	-	○	-
S-D	-	○	○
SR-D	○	○	○

あり、竹の水分の増減と質量変化の相関性が分かる。

(b) 隔壁の有無

隔壁の有無で比較すると、隔壁有の試験体の方が常に耐力が高く、安定して 20kN 超を記録した。これは既往の研究<sup>1)</sup>の結果とも一致している。また、水分の増減も少ないことから比較的安定した環境を維持しており、部材の劣化を抑制していると考えられる。

(c) 束の有無

束の有無で比較すると、最大耐力は暴露 1ヶ月以外は暴露した全ての試験体の中で各材齢の最高値を示しており、束を用いることによって劣化を抑制し、隔壁が無いにもかかわらず高い強度を保てる事が分かる。

(d) 拘束バンドの有無

バンド束と隔壁有無の試験体を比較すると、バンドを設置したものの方が最大耐力が大きいことが分かる。部材破壊時の靱性という観点からも拘束バンドの効果を確認しており、バンドの設置が CFB 構造に不可欠であることが分かる。

4. 実験と検証(接合部試験)

4.1 概要

(1) 実験概要

本試験は、CFB の柱梁材を直角方向に接合した門型試験体の鉛直荷重試験を通して、接合部の接合方法や耐力の検証を行い、実用化の設計指針に役立てるものである。

(2) 実験変数

表-6 に実験要因を示す。柱梁接合部の接合方法、斜材の有無を実験変数として荷重を行う。接合方法は、現地で見られる<sup>3)</sup>ロープ(写真-3, 綿製, φ4mm, 全長 10m)



写真-3 ロープによる接合状況

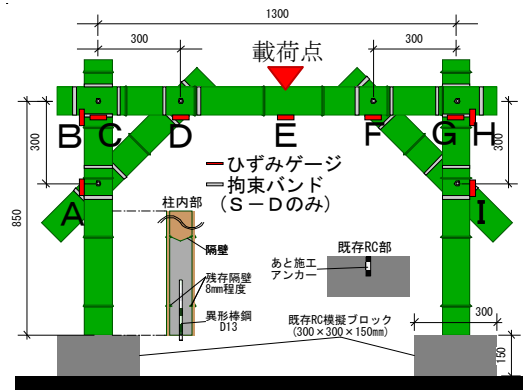


図-7 試験体図とひずみゲージ設置位置

や棒鋼(M16, 全長 350mm, 全ネジ切り, 竹にφ18mmの孔あけ加工)を用いたものである。その接合方法ごとに斜材の有無で試験体形状に差異をつけ、各項目の組み合わせで5種類の試験体を作製した。棒鋼のみで接合する場合に限り、棒鋼を通した部材の両脇に拘束バンドを設置して竹の割裂挙動を拘束する。

(3) 試験体概要

図-7 に試験体図とひずみゲージ設置箇所(A~D)を示す。門型試験体は、CFB の柱材 2本と梁材 1本で構成する。梁材は両端を柱材と接続し、柱材は引張試験<sup>1)</sup>と同様に、既存 RC 構造物を模擬したコンクリートブロックと金属系の埋込式あと施工アンカーを用いて接続した。柱材は端部から 1つ目の隔壁を内皮から 8mm 程度を残して取り除き、2つ目の隔壁までコンクリートを充填した。なお、充填の際に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)を埋め込むこととした。梁材にはコンクリートは充填しない。

梁の全てのゲージ(C~G)は、竹の円形断面の中心軸を対称として荷重点の裏側(鉛直方向下側)に設置した。位置は荷重点直下(E)、斜材との交点(D, F)、柱材との交点(C, G)である。また、柱の全てのゲージ(A, B, H, I)は、試験体が構成する面の外側にあたる位置に設置した。位置は斜材との交点(A, I)、梁材との交点(B, H)である。

(4) セットアップ概要

図-8 にセットアップ図を示す。実験には万能試験機を用いる。荷重面と一体の挙動をする治具に門型試験体を設置し、梁材の中央部を荷重点として鉛直荷重を行う。また、前述したひずみゲージの他に、棒状変位計を用いて梁の鉛直変位と門型試験体の面外変位を計測する。鉛直変位は試験機下部の荷重面 2箇所、面外変位は試験体の両柱脚部に 1箇所ずつ変位計を設置した。

4.2 結果

図-9 に各試験体の最大耐力のグラフを示す。破壊モードは以下に記載する 2種類が挙げられる。

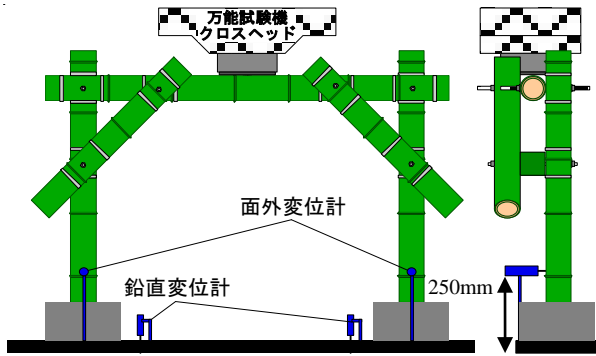


図-8 セットアップ図

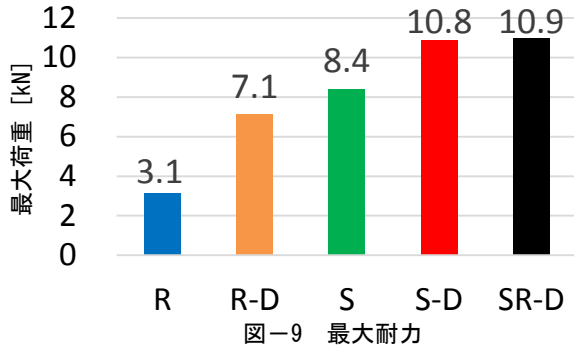


図-9 最大耐力

- (1) 梁材の滑落による耐力低下
- (2) 梁の割裂、陥没による耐力低下

接合方法として棒鋼を用いない試験体(R, R-D, 以下, R系)の場合, (1)の破壊モードであった。棒鋼を用いる試験体(S, S-D, SR-D, 以下, S系)の場合, (2)の破壊モードであった。写真-4 にそれぞれの破壊モード時の様子を示す。

### 4.3 考察

本項において, 耐力の比較や荷重-変位関係, ひずみ計測結果より, 以下の2点の特徴を挙げる。

- (1) ロープより棒鋼を用いたものの方が耐力が大きい。
- (2) 斜材には接合部の補強効果があり, 接合部の剛性の向上もみられる

図-9より, 最大耐力は, ロープを用いたR, R-Dよりは棒鋼を用いたS, S-D, SR-Dにおける接合の方が耐力が大きいことが分かる。また, ロープ単独よりもロープおよび斜材, 棒鋼単独よりは斜材を加えたS-DおよびSR-Dの耐力が大きいことから斜材には補強効果があるといえる。

図-10に各試験体の荷重-鉛直変位関係のグラフを示す。変位は台座盤の変位を測定することにより梁載荷部の変位とした。S系では, 耐力の大小関係に加えて最大荷重時の変位を抑えることができるといえる。また, S系のグラフの傾きが一致しておりR系に比べて値も大きいことから, 初期剛性が安定し, なおかつ接合部の剛性が高いことが分かる。これは破壊モードの違いに直結しており, 棒鋼によって梁の滑落を防ぐことができる。R系の接合では, 載荷方向が鉛直逆向き, あるいは水平

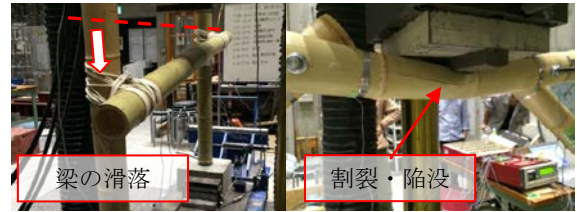


写真-4 破壊状況(左:R 右:S-D)

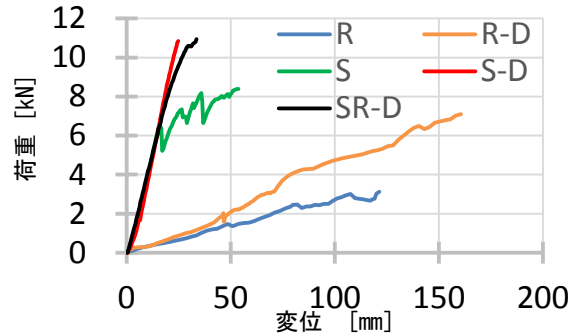


図-10 荷重-鉛直変位関係

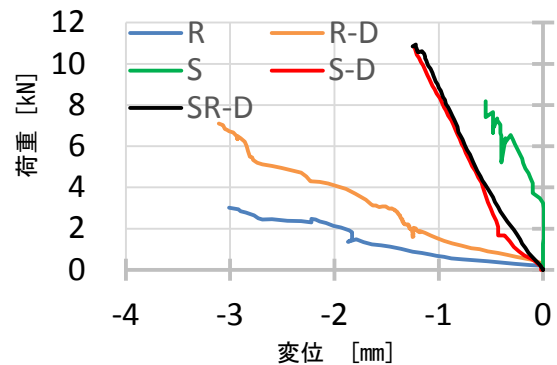


図-11 荷重-面外変位関係

であった場合, 接合方法がロープの際に柱から梁が外れてしまう可能性も考えられるため, 接合部が備えるべき靱性に欠けるといえる。S系は設計の際には, 鉛直変位が鉛直荷重を負担した際の梁の変形量と考えることができる。

図-11に各試験体の荷重-面外変位のグラフを示す。ここでは変位の相対比較を行うため, 変位そのものを示すこととする。接合方法で傾向があり, R系の方が面外変位が大きくなっている。これはR系特有の梁の滑落により, 破壊が生じないまま荷重が伝達され続けたためと考えられる。変形の方法は, 両側の柱が共に同じ方向に傾倒している, あるいは左右で変形方向が異なりねじれが生じている(図-12参照)という2種類が存在する。

また, S系の3体で比較すると, 斜材を有するS-D, SR-Dが同荷重時の面外変位でSを上回っている。これは接合部の剛性が高いため, 柱脚部に鉛直荷重が伝達されていることが理由と考えられる。よって, 斜材に接合部の補強効果があることが確認された。

一方で, 接合部の剛性が高まると柱材まで力が伝達されるため, 柱脚部のアンカー接続用の異型棒鋼が降伏する可能性があると考えられる。

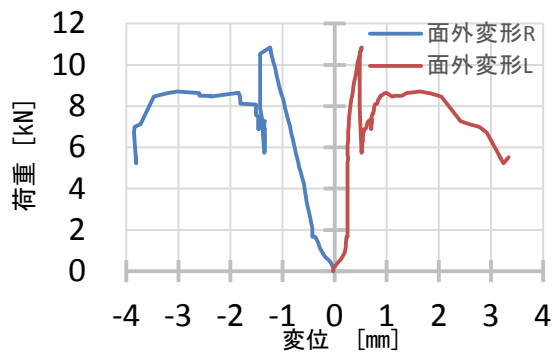


図-12 面外変位 ねじれ(例：S-D)

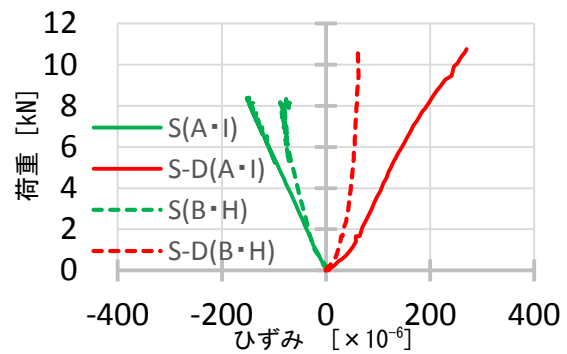


図-13 斜材の有無による柱のひずみ

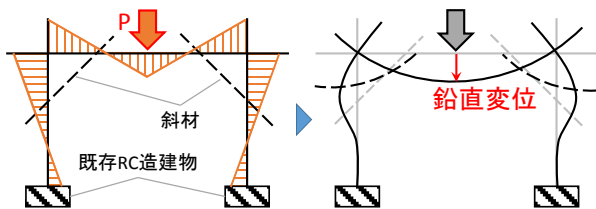


図-14 モーメント図と変形概念図

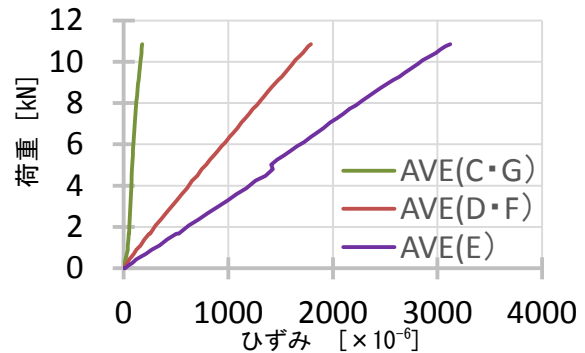


図-15 梁の計測箇所ごとのひずみ(例：S-D)

#### (4) 部材のひずみ

##### (a) 柱のひずみ

図-13にS, S-Dの柱材における斜材、梁材との交点のひずみ計測結果を示す。図より、Sではひずみが圧縮側であったが、斜材を設置することで引張側に転換されている。これは図-14に示すように、柱-梁接合部が剛接合(直角を維持)に近い状態であったために、柱中立軸より上部の外側においては引張ひずみが生じたものとする。このことから、斜材には接合部の補強効果があるといえる。

##### (b) 梁のひずみ

図-15にS-Dにおける梁材のひずみ計測結果を示す。S-Dに限らず、全ての試験体において中央部ほどひずみが大きく、端部の柱に近い位置ほどひずみが小さく記録されている。このことから、接合部の剛性が高く、柱材が荷重に対して反力として働き、梁材がしなっていることが分かる。

以上のことから、ロープよりも棒鋼を用いることで耐力が上昇し、さらに木造同様、斜材を設置することで接合部の剛性が高くなることが分かった。接合部の剛性が高まることで梁の変形を引き出すことができるが、一方で面外変位も大きくなるため柱脚の降伏の可能性がある。本稿3.の暴露試験結果と同様に、コンクリート等による柱脚部に後巻立て等の施工を行うことが、柱脚部の棒鋼の降伏や水分の出入り、アンカーの引抜けの抑制に効果的であると考えられる。

#### 5. 得られた知見

本研究を通して、以下の知見を得た。

- (1) 拘束バンドにより最大耐力安定化が図られる。
- (2) 耐力は節と端部の距離が長くなるほど低下する。
- (3) 水分による耐力低下が大きい、束や後巻立て等の方法を用いることによる水分の出入りの抑制により、部材の劣化を抑制できる。
- (4) 柱梁接合部に棒鋼および斜材を用いることで耐力が上昇し、接合部はほぼ剛接合とみなすことができる。

#### 謝辞

本研究は大阪工業大学前田茂樹研究室およびASA鈴木啓氏との共同研究によるものである。また、公益財団法人大林財団、ユニオン造形財団による助成を受けた。付して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 小川裕史郎, 今本啓一, 清原千鶴: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.5, pp. 2218-2223, 2014.
- 2) 太田基, 野村昌啓: 竹材の性質に関する研究(第5報) 外皮層及び内皮層の欠除が圧縮強度及び比重及び影響, 日本林学会誌, Vol.33, pp244-246, 1951
- 3) Gernot Minke: Build with Bamboo - Design and Technology of a Sustainable Architecture, Birkhauser, 2012