

論文 竹筋コンクリートの付着性状および曲げ性状に関する基礎的研究

寺井 雅和*¹・南 宏一*²

要旨: 発展途上国における耐震建築および耐震補強技術に寄与することを期待して、安価で入手が容易な竹材を鉄筋コンクリート構造の主筋として鉄筋のかわりに用いる竹筋コンクリート構造の開発を行う。普通コンクリートを用いた竹筋コンクリート部材の力学性状の把握と、鉄筋コンクリート部材との構造特性の違いを明確にすることを目的として実験的研究を行った。本論では、丸竹による竹筋と普通コンクリートの付着性状および竹筋を主筋に用いた梁の曲げ性状について実験を行い、鉄筋コンクリート構造との違いを明らかにした。

キーワード: 竹筋コンクリート, 竹筋, 付着性状, 梁, 曲げ性状, 耐震補強

1. はじめに

中華人民共和国（以下、中国）における建築物の耐震構造設計方法や耐震診断、耐震補強設計方法は、近年の経済成長と日本など諸外国からの技術支援によって、めざましい発展を遂げている。しかし、大都市で新しく建設されるものについては、これら新しい技術で造られるが、それ以外の地域では昔ながらの施工法や材料で建設されているようである。また、既存ストックのうち地震に対する対策が配慮されていないものが非常にたくさんあり、古くなった建物も多数存在している。2008年5月に発生した四川大地震は、中国内陸の山間部で発生したが、このような建築物の多くが倒壊するなど甚大な被害を受けている。このような中、中国における耐震補強に対する技術向上や耐震診断、補強設計が積極的に行われている。中国はれんが造建物が圧倒的に多いため、これに対する研究・工事が盛んに行われている^[1,2]。れんが造に対する補強工事の例として、RC造柱添え付け補強がある（図-1）。中国の国情に適した、安価で、できるだけ信頼性の高い耐震補強構法の開発を行うことは、現在の中国やひいては東南アジア諸国等の建築事情にとって重要である。本研究で対象とする竹筋コンクリートは、発展途上国における耐震建築および耐震補強技術に大きく寄与することが期待される。

竹の引張強度は、鉄筋の約 1/2 の強さがあり、中には同等の強さを示す竹もある。また、竹は成長が早く、日本国内はもとより中国から東南アジアにいたる広い地域に成育するので、入手が比較的容易である。この竹を鉄筋コンクリート構造の主筋として鉄筋のかわりに用いる、いわゆる竹筋コンクリートに関する研究は、日本では戦前（1940年代まで）に盛んに行われ^[3,4]、竹筋コンクリート構造物は戦時中から終戦直後まで全国各地でつくられていったが、その後、戦後復興により鉄鋼の生産供給が安定したため、竹筋コンクリートに関する技術や研究開発は姿を消した。

竹を竹筋コンクリートとして使用するには次のような問題があり、その対策に様々な処理や加工が必要となる。

- ・コンクリートの中でアルカリ性の水分を吸収すると組織が破壊してしまう。
- ・竹の外皮は滑らかなため、コンクリートが付着し難い。
- ・竹は、根元と先端は、太さが違うため強度が異なる。

しかしながら、1900年代後半から、全世界的な問題として、環境負荷の低減が注目されるようになり、鉄鋼にかわり竹を補強材に用いたコンクリート構造物の開発研究が再び着目されている。最近行われている竹筋コンクリートの研究は、主筋としての竹だけではなく、コンクリートに対しても環境負荷が小さい、ソイルセメントコンクリートやポーラスコンクリートと組み合わせたものが多い^[5,6]。普通コンクリートを用いた研究もあるが^[7,8]、あまり数は多くはないので、現在広く普及している鉄筋コンクリートと竹筋コンクリートとの対比や力学的性質の違いなどは、明確になっているとはいえない。

筆者らは、これらの点をふまえ、普通コンクリートを用いた竹筋コンクリート部材の力学性状の把握と、鉄筋コンクリート部材との構造特性の違いを明確にすること

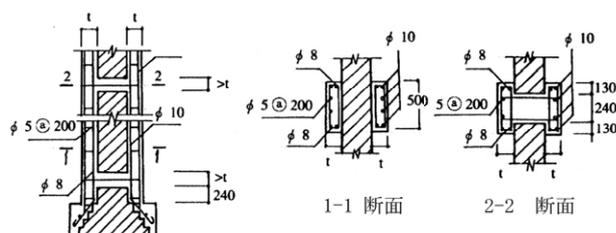


図-1 柱添え付け補強詳細^[2]

*1 福山大学 工学部建築・建設学科准教授 博士 (工) (正会員)

*2 福山大学 工学部建築・建設学科教授 工博 (正会員)

を目的として実験的に研究を行うものである。本論では、竹筋と普通コンクリートの付着性状および竹筋を主筋に用いた梁の曲げ性状を確認するために、試験体を作製し、実験的に検討を行った。

2. 竹筋と普通コンクリートとの付着性状

竹筋と普通コンクリートとの付着強度や破壊性状を明らかにするために、普通コンクリートに竹を埋め込んで竹筋の引抜き試験を行った。

2.1 使用材料

本実験で使用した竹は黒竹(紫竹)(産地不明)である。黒竹は、坪庭の造園材料として好まれる他、直径20-30mm程度で細く黒光りしているので、小窓の棧などの室内装飾、掛軸、筆の軸のほか、民芸品として用いられている。本実験では、外径約16mm(肉厚約4mm、節間隔約200mm)と約22mm(肉厚約4mm、節間隔約400mm)の2種類の黒竹を丸竹のまま使用している。ここで、丸竹とは切削加工していない伐採された状態のままの竹を意味する。竹材の引張試験結果(節間強度)を図-2に示す。コンクリートは、フレッシュ性状および硬化コンクリートの強度特性を表-1に示す。

表-1 コンクリートの材料特性

配合	30-18-20N	材齢	28日
スランプ	17.0cm	圧縮強度 (N/mm ²)	41.5
空気量	4.40%	割裂強度 (N/mm ²)	3.59
温度	17°C		
フロー値	28.5×29.0		

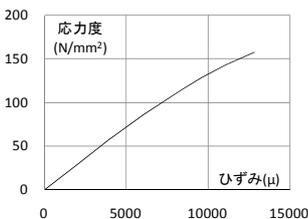


図-2 竹材の引張試験結果

表-2 試験体緒元

試験体名	主筋径・種類
Bφ16	16mm・黒竹
Bφ22	22mm・黒竹
Sφ19	19mm・丸鋼
SD19	19mm・異形鋼
Sφ16	16mm・丸鋼
SD16	16mm・異形鋼

2.2 供試体

付着試験の供試体は、既往の研究報告を参考にして、また荷重装置の形状を考慮して一辺を200mmのコンクリート立方体の中心に主筋を1本配した引抜き試験体である。試験体の自由端には、抜け出し量の計測でコンクリート境界の影響が出ないように20mm程度付着を切っている。したがって、実際の付着長は主筋の径にかかわらず180mmとなる。

表-2に試験体一覧を示す。変動因子は、主筋種類(竹と鋼)と主筋径(16~22mm)である。主筋種類として、丸竹と棒鋼の2種類を比較した。竹の表面は固く滑りやすいので付着が得られないために、既往の竹筋コンクリー

ト研究では割竹として表面加工している場合が多い。しかし、割竹の場合、コンクリートの水分を吸収しやすいため膨張弛緩を繰り返す、付着が失われることが既往の研究で指摘されている。また、コンクリートのアルカリが竹の脂肪分を分解するために強度を失うことも知られており、割竹をコンクリート内に埋め込む場合は、防水加工や耐アルカリ加工が必要となる。本研究では、「1.はじめに」でも述べたように、特別な技術を用いず、身近にある材料を活用することが目的にあるので、丸竹のまま主筋として利用する実験を行った。

主筋径は、丸竹として入手できた外径22mmと16mmを使用し(写真-1)、棒鋼はこれに近い径として19mmと16mmの丸鋼と異形鋼で比較を行った。



写真-1 実験に使用した黒竹

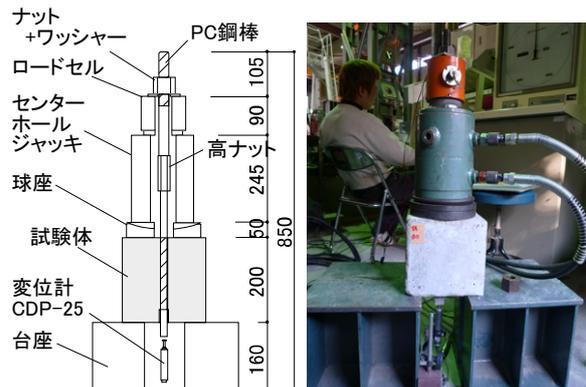


図-3 荷重装置



写真-2 実験状況

2.3 加力・計測方法

引抜き試験の荷重装置を図-3と写真-2に示す。センターホールジャッキを用い、ロードセルを介して主筋に引張り力を与えて荷重を行った。なお、センターホールジャッキと試験体の間には鉄筋とコンクリート端面に曲げ荷重が発生しないように球座を設けている。主筋のすべり量は試験体底面の自由端に取り付けた変位計によって測定した。



写真-3 PC鋼棒と竹材の接合部

竹とセンターホールジャッキの棒鋼は写真-3と図-4に示すように十分に長い高ナットをPC棒鋼に溶接し、竹と高ナットはエポキシ樹脂系・化学反応形接着剤でしっかりと接着した。竹の表面は固くて滑りやすいため、写真-3で見ると、表面を薄く削り、さらに少しの凹凸ができるように傷をつけて荒くした。この接着長さについては数回の予備実験をもとに120~200mm程度とした。

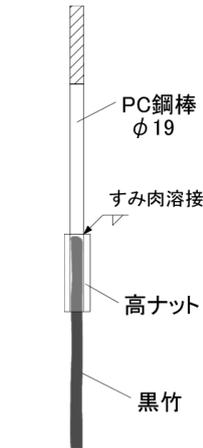


図-4 竹と PC 鋼棒の接続詳細



写真-4 異形鋼による破壊状況 (D19)

2.4 実験結果

付着応力-主筋拔出し量関係を図-5-1、図-5-2に示す。縦軸の付着応力度 (τ (N/mm²)) は次式で表わすように、ロードセルで検出された引抜き荷重 Q を、主筋の周長 ϕ と付着長さ l の積で計算される表面積 ($=\phi \times l$) で除した値とする。

$$\tau = \frac{Q}{l \cdot \phi} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 Q : 引抜き荷重 (N)、 ϕ : 主筋の周長 (mm)、 l : 付着長さ (=180mm)

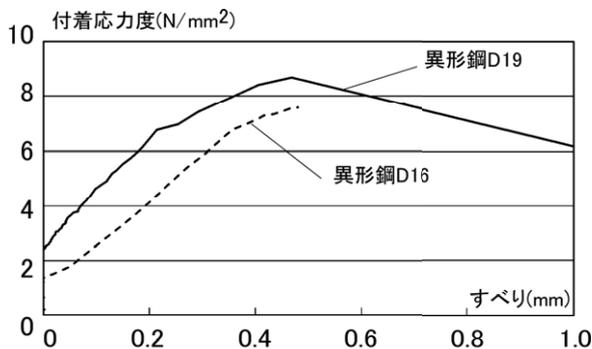


図-5-1 付着応力-主筋拔出し量関係

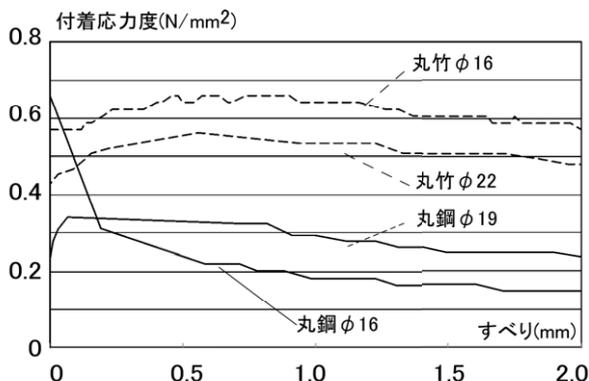


図-5-2 付着応力-主筋拔出し量関係

(1) 異形鉄筋の付着すべり

異形棒鋼による実験結果を図-5-1に示す。付着強度は、D19が8.7N/mm² (抜け出しすべり量0.45mm)、D16は7.5N/mm² (同0.45mm) となり、付着表面積が大きいD19の方が高い付着応力を示した。D19の破壊状況を写真-4に示すが、主筋のふしが周囲のコンクリートを割り裂き、コンクリートを押し広げるように破壊した。なお、D16の試験体は最大付着強度直後に、PC鋼棒と主筋を接続していた溶接部が破断したため、コンクリート表面には顕著なひび割れは生じる前に実験を終了した。

(2) 丸鋼の付着すべり

丸鋼の付着特性は、鋼とコンクリートの表面接着力と、それが界面内でせん断破壊してからの摩擦作用によって付着抵抗が与えられると理解されている。図-5-2の実験は丸鋼であるが、表面接着力はφ19が0.34N/mm²、φ16が0.66N/mm²でそれぞれ失われ、抜け出しすべり量増大につれて付着力が失われている。最大付着力は異形鉄筋と異なり、表面積が小さなφ16の方が大きかった。これは、写真-5のようにφ19は黒皮がついているのに対して、φ16には表面に錆が浮いていたので、すべり出すまでの表面付着力が大きい、一度すべり出すと付着抵抗が小さいためすべりやすかったと考えられる。φ16はすべり出した後の強度低下が大きく、その後はφ19より低く推移している。

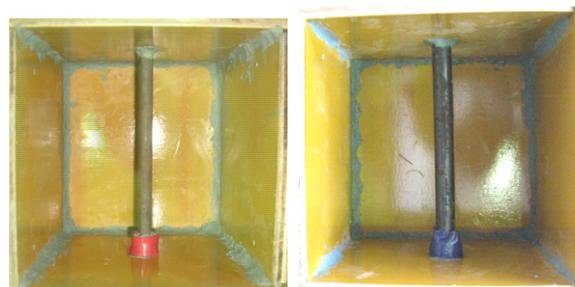


写真-5 丸鋼の表面状態 (左: φ16, 右: φ19)

(3) 丸竹の付着すべり

図-5-2より、丸竹の付着力は直径が小さい方 ($\phi 16$) が、滑り出しはじめる付着力は大きい。ただし、竹の周長は $\phi 15$ が50.3mm、 $\phi 22$ が69.1mmとして付着力を計算しているが、竹材の太さは場所によって異なるので、表面積の計算は平均的な値となっていることに注意が必要である。すべり出してからの推移は丸鋼のそれに近く、コンクリートと竹表面の摩擦作用によってほぼ一定の付着力で推移することがわかる。

竹にはふしがあるので、これがコンクリートとの引き抜き抵抗として作用していると考えられるため、 $\phi 16$ と $\phi 22$ の付着力を単純には比較できない。写真-6に示すように、付着区間には1つのふしがあり、これが引っかかることである程度の抵抗を示していると考えられる。そして、抜け出し量が1mm程度になると緩やかに付着力が低下してくるが、これは竹が抜け出すにつれてふしの表面が潰れるためと考えられる。このことは、試験後にコンクリートブロックから引き抜いた竹のふし部分の状態から推測できる(写真-7)。

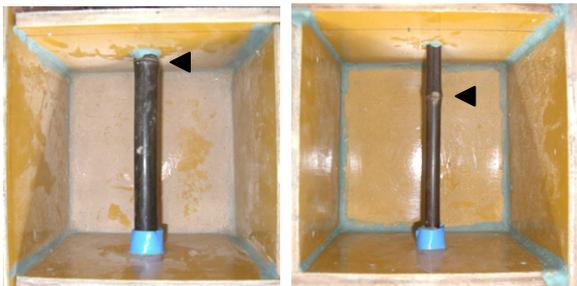


写真-6 節の位置 (▲印) 左 $\phi 22$ 、右 $\phi 16$



写真-7 試験終了後の節の状態 ($\phi 16$)

3. 梁の実験

竹筋コンクリート梁部材の曲げ性状を把握するために、主筋材料をパラメータとした、鉄筋コンクリートおよび竹筋コンクリート梁試験体を作製し、荷重実験を行った。

3.1 使用材料

主筋に用いる竹は、付着試験でも使用した $\phi 16$ mmの黒竹(紫竹)を丸竹のまま使用した。

コンクリートの配合を表-3に示す。

表-3 材料特性

配合	30-18-20N	材齢	16日
スランプ	15.5cm	圧縮強度 (N/mm^2)	29.6
空気量	5.10%		
温度	17°C	割裂強度 (N/mm^2)	2.28
フロー値	19.5×21.0		

表-4 試験体緒元

	試験体名	主筋		せん断補強筋
		上端	下端	
鉄筋コンクリート梁	RC	鉄筋 2D10	鉄筋 2D13	$\phi 4@100$
竹筋コンクリート梁	BRC1		竹*1 2 $\phi 13$	
	BRC2			

竹*1: 本竹(中国産丸竹) 竹*2: 紫竹(産地不明丸竹)

3.2 試験体概要

梁の試験体は、表-4に試験体諸元、図-6に配筋図を示すように、断面 $125mm \times 250mm$ 、長さ $1500mm$ の梁を3体作製した。引っ張り主筋が鉄筋の場合はD13を2本、竹の場合は $\phi 16mm$ を3本配筋した。また、せん断補強筋の組立筋として上端筋には、D10の鉄筋(RC, BRC1)および $\phi 10mm$ 程度の竹筋(中国産本竹BRC2)を全て2本配筋した。鉄筋は端部を 90° に折り曲げて定着しているが、竹は折り曲げず直線のままにしている(図-6)。せん断補強筋は $\phi 4mm$ のみが棒鋼をせん断スパン区間に $100mm$ 間隔で配筋した。

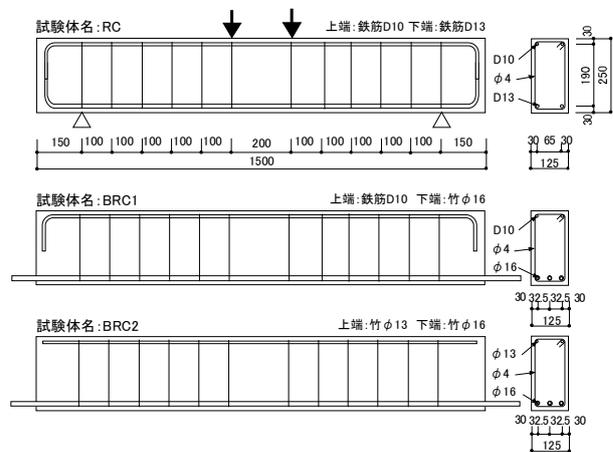


図-6 試験体詳細図 (単位: mm)

3.2 荷重方法および測定方法

竹筋コンクリート梁の曲げ試験は油圧試験機を用いて行った。荷重方法は図-7と写真-8に示すように、支点間距離 $1200mm$ 、荷重点間距離 $200mm$ の4点荷重となるように装置を組み立て、ひびわれを観察しながら破壊まで単調に荷重した。梁のたわみは、荷重点直下の下端2点と梁中央部下端の合計3箇所を変位計で計測した。主筋およびあばら筋のひずみは、表面にワイヤーストレインゲージを数カ所に貼付して計測した。

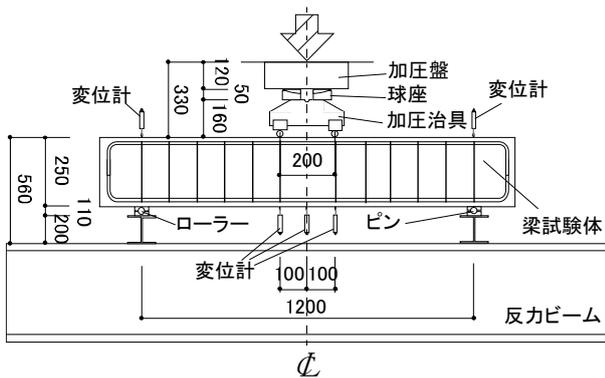


図-7 梁試験体載荷装置

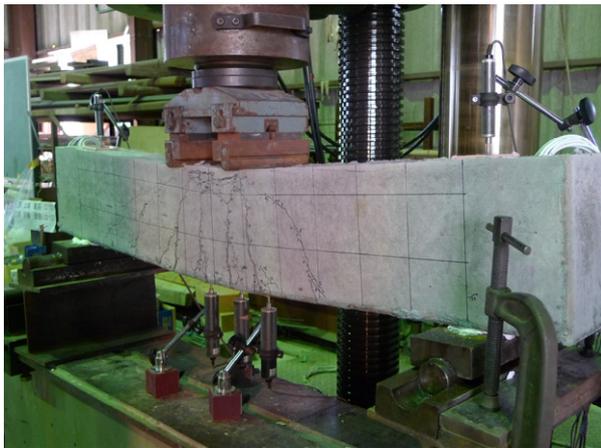


写真-8 梁試験体載荷状況

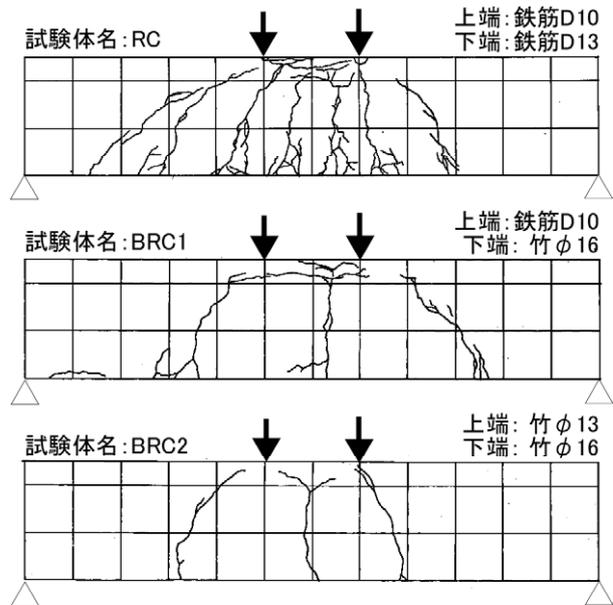


図-8 ひびわれ状況図（最終破壊状況）

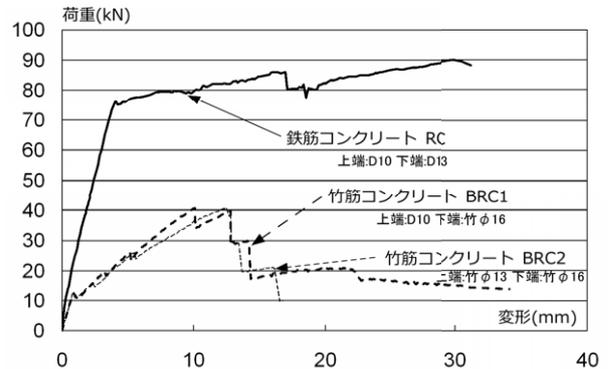


図-9 梁部材の荷重-変形関係

3.3 実験結果

(1) ひび割れ状況

梁試験体の試験終了時のひびわれ発生状況を図-8に示す。鉄筋コンクリートの梁 (RC) は、曲げ初期ひびわれが載荷点付近直下の梁下端に発生し、その後、梁下端に5~6本発生する。これらのひびわれは載荷の進行に伴って載荷点に向かって伸び、ひびわれの幅も次第が大きくなる。引張主筋が降伏後、変形20mm手前で載荷点間の圧縮側コンクリートが圧壊し、荷重がやや低下するが、試験終了まで安定して曲げ破壊の様相を呈した。

竹筋コンクリート (BRC1,2) は、曲げ初期ひびわれが、梁下端中央部分から1本発生した。その後、載荷点付近直下にはほぼ同時期に左右対称に曲げひびわれが発生する。変形の増大とともに、これら3本のひびわれ幅が大きくなり、新たなひびわれ発生はなかった。最大荷重までの間に引張竹主筋のふし部分で割れや破断を繰り返し、その度に荷重が低下した。圧縮側主筋が異形鉄筋 (D10) のBRC1は、上記RCと同様、変形20mmを超えた頃に載荷点間で圧壊をした。一方、圧縮側主筋に竹筋 ($\phi 13$) を用いたBRC2は、この圧縮側コンクリートの破壊は観察されなかった。これは、付着力の違いにより応力伝達が異なったためと考えられる。

(2) 荷重-変形関係

図-9に3体の試験体の載荷時における荷重と変形の関係を示した。この図で横軸の変形は、載荷点直下にある2カ所の変位計計測値の平均値を用いている。いずれの試験体も荷重10kN程度で梁下端中央部に曲げひび割れが発生したため、やや剛性が低下する。鉄筋コンクリート (RC) は、その後荷重の増加に伴って直線的にたわみが大きくなり、76.3kNで引張主筋が降伏した。曲げひび割れはスパン全体に分散して7本発生し、変位量20mm程度で載荷点間にある圧縮側コンクリートが圧壊して荷重が低下したが、その後は急激な脆性破壊を生じることにはなかった。

一方、竹筋コンクリートは、2体とも同じような荷重変形関係を示している。曲げ初期ひびわれ発生後、数回荷重が低下しながら、40kN程度 (変形10mm) まで変形した。この荷重低下の原因は、先の付着実験でも観察されたように、周囲のコンクリートを支圧していた竹主筋の節が潰れて滑ったことによると考えられる。丸竹の表面はほとんど付着力が期待できないことから、鉄筋コンク

表-5 実験結果と計算結果の比較

試験体名	竹の強度 (N/mm ²)	鉄筋強度(N/mm ²)		コンクリート 強度(N/mm ²)	断面寸法 B×D(mm ²)	実験値 (kN)	計算値(kN)	
		引張主筋	あばら筋				曲げ	せん断
RC	-	370	319	29.6	134×252	76.3	74.4	114
BRC1	118	-			123×247	40.1	41.7	113
BRC2	-	-			128×231	40.5	38.5	111

リート試験体のようにひび割れが分散せず、3本のひび割れが伸展・拡幅を続けた。その後、数回大きく荷重が低下するが、これは竹主筋のふし部分で割れまたは破断したためと考えられる。2体の竹筋コンクリートの違いは、上端筋にD10の異形鉄筋を用いた場合（BRC1）とφ13の丸竹を用いた場合（BRC2）の違いだけであるが、荷重変形関係には大きな違いはなかった。なお、引張主筋が試験体端部から滑って抜け出す現象は観察されなかった。

(3) 実験結果と計算結果の比較

竹筋コンクリートの耐力計算を行うにあたり、竹は断面寸法が一定ではなく、そのため場所によって強度が異なる。あるいは、節で屈曲したり、全長にわたり“そり”があったりするので、耐力推定が極めて困難である。ここでは、おおよその耐力を推定するために竹の形状や断面を次のように仮定した。

- ① 竹は中空の円形断面とする。外径は20mm、中空の内径は16mm、すなわち肉厚4mmとする。
- ② 竹は全長にわたり均質であり、根元も先端も強度は同じとする。
- ③ 竹筋の引張り強度は、節がない竹材の材料試験の結果より197N/mm²であった。既往の研究より、節の強度は、節間強度の0.5～0.7倍程度なので118N/mm² (=0.6×197 N/mm²) とした。

以上の通り仮定して計算した曲げ強度とせん断強度を表-5に示す。曲げ強度は、 $M=0.9a_1\sigma_y d$ から求める終局曲げモーメント略算式、せん断強度は、荒川min式より算出した。3体の試験体はいずれも曲げ破壊したが、おおよそ上記の仮定による計算値で実験値を推定できることが確認できた。

4. まとめ

普通コンクリートを用いた竹筋コンクリート部材の力学性状の把握と、鉄筋コンクリート部材との構造特性の違いを明確にすることを目的として実験的研究を行った。本論では、竹と普通コンクリートの付着性状および竹を主筋に用いたコンクリート梁部材の曲げ性状について実験的検討を行った結果、次のことがわかった。

(a) 竹と普通コンクリートとの付着実験

- ① 竹筋がすべり始める付着力は、丸鋼よりやや大きく、0.4～0.6N/mm²程度である。
- ② 竹筋と普通コンクリートの付着—すべり性状は、丸

鋼と同じ傾向で推移する。

- ③ 竹筋にはふしがあるので、これが機械的な抵抗を示すが、すべり量増大とともにコンクリートによる支圧力でふしが潰れる。ふしの高さが小さくなると、表面摩擦力のみの抵抗となるので、丸鋼同様大きな付着力は期待できない。
- ④ 竹筋の太さは場所によって異なるので、表面積から算出する付着力の評価は難しい。

(b) 竹筋コンクリート梁の曲げ実験

- ① 竹筋コンクリート梁は、竹筋の付着力が期待できないため、曲げひび割れは数本発生し、梁の変形増大に伴い、これらひび割れが伸展・拡幅した。
- ② 竹筋コンクリートの曲げ耐力は、竹筋の断面と形状を仮定する事でおおよそ推定可能である。

謝辞

試験体の作製および実験にあたり、福山大学学部4年生の小畑匡広君（現・富士建設）および当研究室の学部3,4年生には多大な協力を得ました。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 清水泰：中国建築物の耐震構造（その1）中国建設部及び建築化学研究院，建築防災，pp.1-6，1993.12
- 2) 清水泰：中国建築物の耐震構造（その2）唐山地震跡及び南京診断センター，建築防災，pp.7-12，1994.1
- 3) 河村協：竹筋コンクリート，山海堂出版部，1941.5
- 4) 細田貫一：竹筋コンクリート工，修教社書院，1942.2
- 5) 河合糺茲，川村政史，笠井芳夫：竹筋ソイルセメントコンクリートの付着性状，暴露試験および曲げ性状に関する実験研究，コンクリート工学論文集，第11巻，第2号，pp.29-37，2000.5
- 6) 遠藤典男，井上健典，松岡保正：竹筋で補強されたポーラスコンクリートの強度向上効果，コンクリート工学年次論文集，第29巻，第2号，pp.319-324，2007.7
- 7) 矢頭盛吾，井上正文，田中圭，住岡修：竹筋コンクリート部材の開発に関する基礎的研究（その1,2），日本建築学会学術講演梗概集，C-1，pp.67-70，1999.7
- 8) 中山将駿，村上聖他：竹の構造材料としての利用技術—竹筋コンクリート梁の構造性能—，日本建築学会学術講演梗概集，pp.485-786，2009.