

論文 竹筋コンクリート柱の中心圧縮挙動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。本研究では、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、丸竹を主筋に、ポリプロピレン製バンドをせん断補強筋に用いた、鋼材を全く使用しない竹筋コンクリート柱部材の中心軸圧縮耐力について実験を行い、鉄筋コンクリート柱部材との違いを検討した。

キーワード：竹筋コンクリート, 柱, 中心圧縮, 拘束効果, コンクリート強度, ポリプロピレン製バンド

1. はじめに

近年、鋼材の価格が高騰している。発展途上国では高価な鋼材は入手が難しく、大量使用は制限されている。また、鋼材の生産には大量の化石燃料が使用されるため、環境問題への配慮から今後は生産が制限されていくことも考えられる。そのような時代において、建設コストが低く、高度な施工技術も要しない信頼性の高い耐震補強構法の開発を行うことは、現在の開発途上国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、安価で生育分布が広く、成長が早い竹材を用いることから、開発途上国においても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。日本では戦時中、次第に物資が不足し、特に土木建築用の鋼材が入手困難となり、鉄筋コンクリート工法も不可能となってきた。そのため、鉄筋に代わる代用品の研究が行われるようになり、竹筋コンクリートの研究が脚光を浴びた。竹は入手が容易であり、補強筋としての製造エネルギーが僅かであるため、鉄筋の代用品として着目された。その後、日本では高度経済成長に伴い竹筋コンクリートの研究は行われなくなるが、最近、環境問題や循環型社会への対応が注目されるなか、天然素材を利用したモノづくりが活発になっている。なかでも竹は、ナノテク・バイオなど先端的な研究領域との融合も見られ、工学や化学、農学、医学など多角的な視野に立って研究が進められており、今後21世紀の新産業・新技術を切り拓く可能性を秘めている材料と言える。

筆者らは、これらの点をふまえ、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、これまでに竹筋とコンクリートの付着性状と竹筋コンクリート梁の曲げ性状について実験的に研究を行ってきた^{1),2)}。本論文では、これまでの研究に引き続き、補強筋として鋼材

を使わないコンクリート構造物の開発を視野に入れ、主筋に丸竹、せん断補強筋にPPバンドを用いた柱部材の試験体を数体製作して、中心軸圧縮耐力について実験的に検討したものである。

2. 実験計画

2.1 試験体計画

本研究では、柱部材の主筋に鋼以外の材料として丸竹を用いるが、主筋だけではなくせん断補強筋にも鋼材以外の材料を利用することを考え、荷造り用テープとして販売されているポリプロピレン製のテープ（以下、PPバンド；写真-1）を用いた。PPバンドは、①容易に多量に入手可能、②安い、③強く変形能が高い、④耐久性が優れている、⑤加工や運搬が容易、という特徴がある。そのため、既往の研究でも組積造の耐震補強材やRC柱の応急補強材としての利用が検討されている^{3),4)}。

PPバンドは、断面寸法が15.5mm×0.49mm（実測による平均値）であり、断面積は約7.6mm²となる。同程度の断面積をもつ鉄筋φ3（SR235）（断面積7.1mm²）と比較すると、販売価格は本実験で入手した材料の平均値として、PPバンドが1m当たり7.3円（100m巻730円）、鉄筋は1m当たり585円なので、体積当たりのコストは85.7倍になる。また、後述の表-5に材料試験結果をまとめてあるが、PPバンドの有効引張強度は鋼材の1/2.5程度となり、この違いを考慮に入れても鋼材に対して、約50倍近いコストパフォーマンスがある材料であることがわかる。



写真-1 ポリプロピレン製テープ (PPバンド)

*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)

表-1 試験体諸元

UNIT	Specimen	Concrete f _c (MPa)	主筋			Hoop			載荷条件
			種類	配筋	p _g (%)	種類	配筋	p _w (%)	
1	LR-16PP@50	10.0	鉄筋	4-φ16	2.01	PPバンド	@50	0.151	単調載荷
2	LB-15PP@100		竹筋	4-φ15	1.13	PPバンド	@100	0.078	単調載荷
3	LB-24PP@100		竹筋	4-φ24	2.35	PPバンド	@100	0.078	単調載荷
4	MR-16PP@50	20.0	鉄筋	4-φ16	2.01	PPバンド	@50	0.151	単調載荷
5	MB-15PP@100		竹筋	4-φ15	1.13	PPバンド	@100	0.078	単調載荷
6	MB-24PP@100		竹筋	4-φ24	2.35	PPバンド	@100	0.078	単調載荷
7	HB-15φ@50	30.0	竹筋	4-φ15	1.13	φ3丸鋼	@50	0.141	単調載荷
8	HB-15PP@50-C		竹筋	4-φ15	1.13	PPバンド	@50	0.151	繰り返し載荷
9	HB-15PP@50		竹筋	4-φ15	1.13	PPバンド	@50	0.151	単調載荷
10	HB-24PP@50		竹筋	4-φ24	2.35	PPバンド	@50	0.151	単調載荷
11	HB-24φ@100		竹筋	4-φ24	2.35	φ3丸鋼	@100	0.071	単調載荷
12	HB-24PP@50		竹筋	4-φ24	2.35	PPバンド	@100	0.078	単調載荷
13	HR-D13φ@50		鉄筋	4-D13	1.27	φ3丸鋼	@50	0.141	単調載荷
14	HR-D13PP@50		鉄筋	4-D13	1.27	PPバンド	@50	0.151	単調載荷
15	HR-D16φ@100		鉄筋	4-D16	1.99	φ3丸鋼	@100	0.071	単調載荷
16	HR-D16PP@100	鉄筋	4-D16	1.99	PPバンド	@100	0.078	単調載荷	

試験体名: LR-16PP@50-C
 Hoopピッチ(mm) 加力方法 なし:単調/C:繰り返し
 Hoopの種類 PP:PPバンド / φ:丸鋼
 柱主筋径(mm) D:異形鉄筋
 R:鉄筋コンクリート/B:竹筋コンクリート
 コンクリート強度 L:10MPa/M:20MPa/H:30MPa

竹主筋の断面積 φ15: 113mm², φ24: 235mm²
 鉄筋の断面積 φ16: 201mm², D13: 127mm², D16: 199mm²

2.2 試験体

本実験では、鉄筋コンクリート（主筋が鋼棒）と竹筋コンクリート（主筋が竹材）の角柱試験体を合計16体製作した。表-1に供試体緒元一覧、図-1に試験体配筋の詳細を示す。供試体の断面は200mm×200mm、高さ500mmとし、外形寸法は全試験体で共通である。高さ方向に上下の100mm区間は加力スタブとして、横補強筋と鋼板で高密度に配筋しており、試験区間は中央部分の300mmとした。スタブ部分の鋼板寸法は全供試体で共通としたので、コンクリートのかぶり寸法は7.5mmとなり、主筋径にかかわらずコアコンクリートの断面寸法は185mm×185mmとなっている。



ρ_w=0.071% UNIT15 ρ_w=0.151% UNIT4 ρ_w=0.141% UNIT7 ρ_w=0.078% UNIT12

写真-2 試験体配筋状況

実験パラメータは、1) コンクリート強度 (10,20,30MPa) 2) 主筋種類と径 (鋼: φ13,D13,φ16,D16, 竹: φ15,φ24) 3) 横補強筋種類と間隔 (φ3鋼材, PPバンド, 50mm,100mm) 4) 載荷方向 (単調載荷, 繰り返し載荷) の4項目とした。なお、横補強筋がφ3鋼材の場合、135°フックで閉鎖するロ字型とするが、PPバンドによる横補強は1段ずつ閉鎖すると施工効率が悪いので、試験区間にスパイラルに巻きつける方法とした。ピッチは図-1に示すように上下段の間隔が一定となるように巻きつけている。写真-2に代表的な試験体の配筋写真を示す。

2.3 使用材料

使用したコンクリートの調査計画を表-2に示す。目標強度10MPaの調査は、当研究室で行われている低強度コンクリートに関する一連の研究⁵⁾で使用されている方法により、水セメント比を132%とし、水和反応の効果を低減させるためセメントに一定量の石粉（炭酸カルシウム粉末）を混入・置換することで、安定したワーカビリティを有した低強度コンクリートを作り出している。コンクリートの材料試験結果を表-3に示すが、実験時

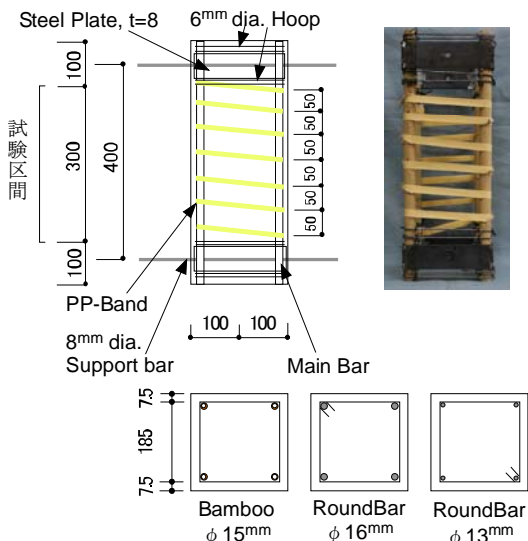


図-1 試験体詳細図 (単位: mm)

材齢のため、20MPaを打設した試験体は24.8MPaまで強度が発現している。

実験で主筋として使用した鉄筋および竹、さらに横補強筋に使用したφ3みぎ棒鋼とPPバンドの引張試験結果を表-4に示す。竹は割れずに丸竹のまま使用したので、材料試験も丸竹で行った。丸竹は試験片のつかみ部が割れやすいため、内部に棒鋼を挿入し、隙間をエポキシ樹脂系接着剤で固着した。それでも引張試験では最大強度前につかみ部が割れ、竹の素材部分で破断することはなかったため、正確な引張強度は不明である。PPバンドも引張試験を行い弾性剛性と破断時強度を測定した。PPバンドは、徐々に断面が減少していく破断性状を示したので、表-4の降伏強度は最初に荷重が低下した(部分的に切れた)点とした。

表-2 調査計画

呼び強度	水セメント比 (%)	単位量(kg/m ³)					細骨材率 (%)	スランプ (cm)
		セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤		
10	131.9	167	220	838	832	2.70	50.2	18
20	62.0	329	204	897	848	2.96	51.5	18
30	45.0	429	193	748	925	1.08	45.7	18

表-3 コンクリートの材料試験結果

設計強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	弾性係数 (GPa)	圧縮強度時ひずみ (%)	比重
10	12.0	1.08	13.9	0.191	2.25
20	24.8	1.88	22.5	0.199	2.27
30	29.2	1.95	25.3	0.158	2.22

表-4 鉄筋およびPPバンドの引張試験結果

種類	σ_y (N/mm ²)	弾性係数 (GPa)	降伏ひずみ (μ)	破断のび (%)	
主筋	鉄筋φ13	329.4	201	1639	31.5
	鉄筋φ16	343.3	204	1685	33.3
	鉄筋D13	373.9	183	2507	19.3
	鉄筋D16	352.3	180	2072	18.2
	丸竹φ15	-	12.7	-	-
	丸竹φ24	-	20.0	-	-
Hoop	鉄筋φ3	567.7	210	4754	-
	PP-Band	134.3	0.67	200000	18.3

‘-’は未計測

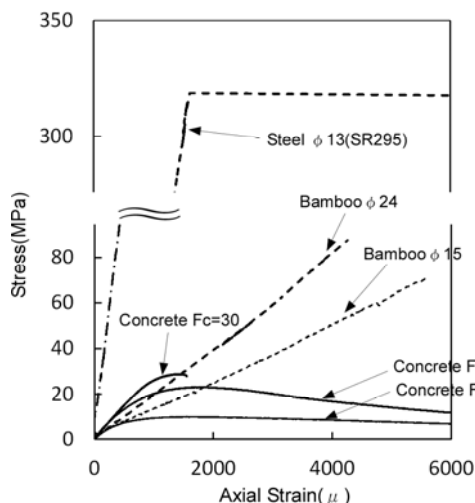


図-2 各種材料の引張試験結果比較

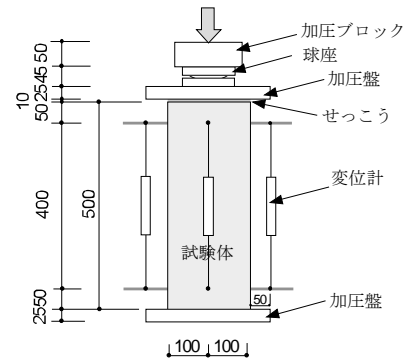


図-3 柱試験体載荷状況

図-2には、本実験で使用した材料試験の結果をまとめた。竹の剛性は鋼材の約1/10程度となり、10MPa程度の低強度コンクリートと同じ位であり、竹が縦割れして試験終了するまでは、ほぼ線形挙動を示すことがわかる。

2.4 加力および測定方法

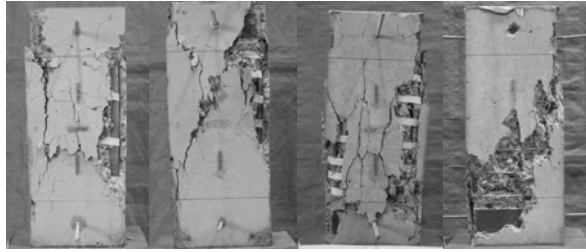
加力は5MN万能試験機を用い、単調および一方繰り返し載荷とした(図-3)。繰り返し載荷では、最大荷重の1/3、2/3程度で1回ずつ、最大荷重以降は軸方向変位で1、2、3mmに除荷・載荷を1回繰り返した。供試体の四側面には、変位測定用ボルトを埋め込み、これに変位計を取り付けた。試験体表面には、数枚のひずみゲージを貼りつけ、軸方向ひずみと周長方向のひずみを計測した。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

試験体は、2週間で脱型した後、そのまま気中に放置して養生した。養生期間中は、気温が高かったため、実験前の乾燥ひび割れが多数発生していた。この乾燥ひび割れは、竹主筋を用いた試験体の主筋沿いに多かったが、これは竹材が乾燥や温度変化の影響を大きく受けて膨張収縮を繰り返したためと考えられる。

代表的な4つの試験体のひび割れ発生状況(最終破壊時)を写真-3に示す。全ての試験体で、最大軸耐力の少し前に主筋沿いのひび割れが発生し、最大荷重に達すると試験部分表面に多数のひび割れが発生した。ひびわれ損傷は、局部的なものではなく、試験部分全域に渡っており、多くの試験体で対角方向にせん断帯が形成された。軸変形が進むにつれてカバーコンクリートが剥落し、全ての試験体で主筋が座屈した。竹を主筋に用いた試験体でも、竹の縦割れや局部座屈が確認できた。竹は曲げに強い材料なので、座屈しても割れたり折れたりすることはない。軸耐力が急激に低下することはない。ひび割れの角度や破壊領域に特徴的な違いは確認できなかった。全ての試験体で、せん断補強筋(PPバンドとφ3鉄筋)は破断することがなかった。



LB-15PP@100 MB-15PP@100 HB-15PP@50C HR-D16PP@50
写真-3 ひびわれ状況図（最終破壊状況）

3.2 荷重-変形関係

全ての試験体の応力-変形関係を図-4に示す。縦軸は、柱断面積 200mm×200mm で割った応力度、横軸は試験体側面に4本取り付けられた変位計の平均値として描いている。図-4には、拘束効果を考慮した鉄筋コンクリート柱の応力-ひずみ曲線として提案されている2つのモデルも描いている。点線は、普通強度コンクリートに対して提案されている「孫・崎野式」⁶⁾であり、一点鎖線は、簡易な形式で拘束効果を定量化し、低強度コンクリートから普通強度コンクリートまで対応できる拘束されたコンクリートの応力-ひずみ曲線「荒木式」⁷⁾を表している。「孫・崎野式」は、鋼管や中子筋など横補強材による拘束効果を精度よく定式化したモデルであるが、本論における曲線形状は、主筋の座屈や載荷履歴の影響を受けず、横補強筋のみで拘束された鉄筋コンクリート柱として、単調載荷の応力-ひずみ関係を求めた。計算には、表-3と表-4による材料試験値を使った。UNIT1~6のように、10、20MPaの低強度コンクリートによる試験体では、「荒木式」との対応がよいことがわかる。一方、30MPaの普通強度コンクリートによる試験体では、最大耐力後の軟化域での脆性的な応答は「孫・崎野式」との対応がよいが、主筋に竹、Hoop筋にPPバンドを用いた試験体では、これらのモデル式では実験結果を精度よく表現できないことがわかる。

3.3 軸耐力の評価

竹筋（または鉄筋）コンクリート柱の中心軸圧縮耐力の計算は、鉄と竹とコンクリートを弾性体と仮定し（構成則）、主筋とコンクリートが一体となって変形するという仮定のもと（変形適合条件）、主筋とコンクリートの力のつり合いから（つり合い条件）最大耐力値を計算した。実験による最大軸耐力（ P_{exp} ）と、計算による値（ P_{cal} ）を表-5にまとめ、 P_{exp}/P_{cal} 値を縦軸にプロットしたものを図-5に示す。この図で、●印は鉄筋コンクリート、◆印は竹筋コンクリートを表す。鉄筋コンクリート試験体は、およそ実験値と計算値が近く、横補強筋による拘束に関わらず軸耐力を計算できることがわかる。一方、竹筋コンクリート試験体でも、軸耐力は計算によりほぼ評

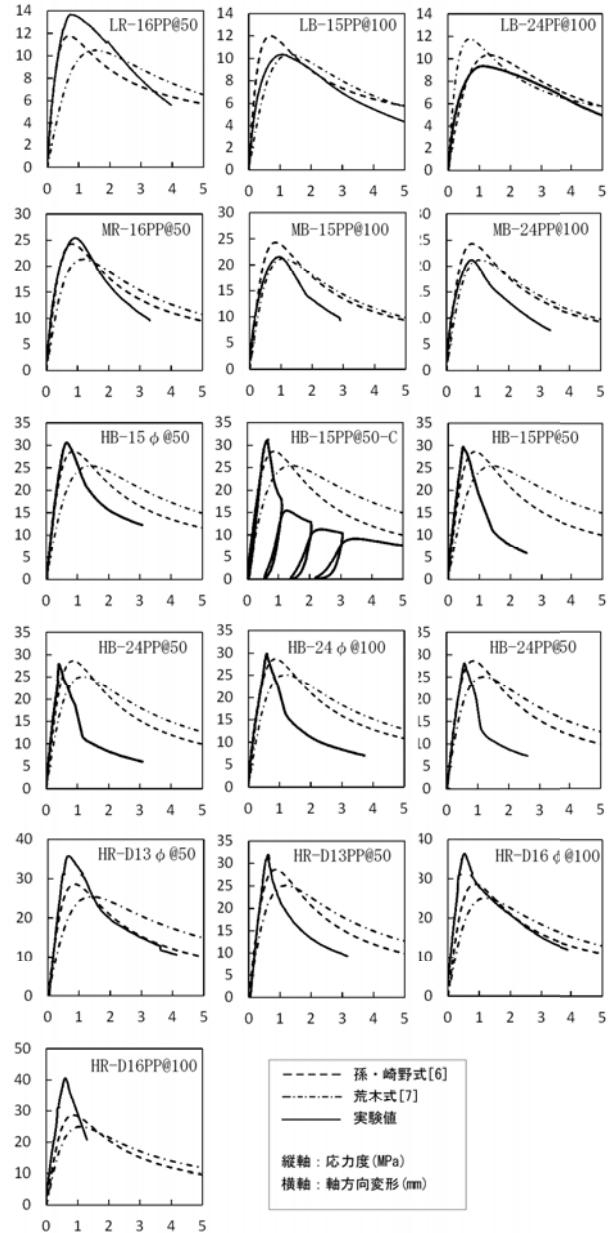


図-4 応力-変形関係

表-5 軸耐力一覧（実験値と計算値）

UNIT	コンクリート強度	主筋径	せん断補強筋		加力方法	実験値 P_{exp} (kN)	計算値 P_{cal} (kN)	P_{exp}/P_{cal}
			種類	ピッチ				
1	10	φ16	PP	50	単調	548.0	580.5	0.94
2		15	PP	100	単調	415.0	474.5	0.87
3		24	PP	100	単調	375.5	464.5	0.81
4	20	φ16	PP	50	単調	1020.0	1075.1	0.95
5		15	PP	100	単調	865.0	908.2	0.95
6		24	PP	100	単調	846.0	887.7	0.95
7	30	15	φ3	50	単調	1225.0	1184.1	1.03
8		15	PP	50	繰り返し	1252.0	1184.1	1.06
9		15	PP	50	単調	1190.0	1184.1	1.01
10		24	PP	50	単調	1115.0	1156.7	0.96
11		24	φ3	100	単調	1196.0	1156.7	1.03
12		24	PP	100	単調	1122.0	1156.7	0.97
13		D13	φ3	50	単調	1431.0	1304.9	1.10
14		D13	PP	50	単調	1280.0	1304.9	0.98
15		D16	φ3	100	単調	1455.0	1361.7	1.07
16	D16	PP	100	単調	1627.0	1361.7	1.19	

価できるが、コンクリート強度が低いほど、計算値より低い耐力で破壊することがわかる。これは、既往の研究によると⁷⁾、低強度コンクリートは横補強筋量が増大すると、最大応力と最大応力時のひずみ増加率が大きくなる傾向があることが指摘されており、同じ補強筋量であれば、コンクリート強度が低いほど最大応力が小さくなる傾向が、本実験でも確認できたことになる。

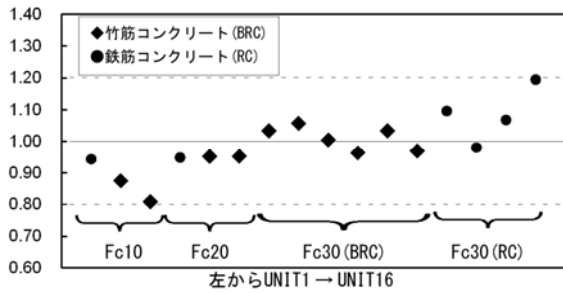


図-5 軸耐力の比較 (縦軸: P_{ex}/P_{cal})

3.4 パラメータの検証

本節で検討する図-6~9までの応力-変形関係のグラフは、縦軸を最大強度で無次元化してある。

(1) コンクリート強度の違いについて

竹筋コンクリート柱の中心圧縮挙動についてコンクリート強度の違いを比較するために、竹主筋径15mm, HoopにPPバンドを巻きつけたUNIT3, 6, 12の3体の応力-変形関係を図-6に示す。最大強度までの剛性推移は、補強筋がある方がやや小さくなっている。補強筋の有無にかかわらず、軸耐力以降の劣化勾配は、コンクリート強度が低いほど大きく荷重低下が緩やかであることがわかる。

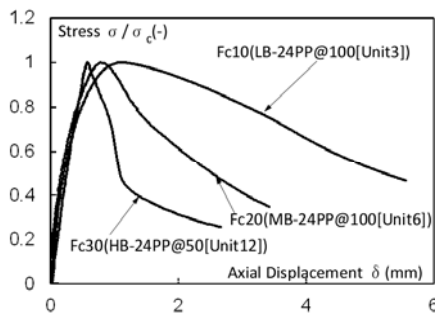


図-6 コンクリート強度の違い

Fc30の試験体は、軸耐力以降急激にひび割れが進展・幅荷重低下した。

(2) 加力方法の違いについて

竹筋コンクリート柱の中心圧縮挙動について、加力方法の違いを比較するために、竹主筋径15mmで、HoopにPPバンドを50mmピッチで巻きつけたUNIT8とUNIT9の2体の応力-変形関係を図-7に示す。表-5より、最大軸耐力は繰り返し载荷をしたUNIT8の方が少しだけ高い。耐力後の推移はほぼ同じであり、繰り返し载荷による軸圧縮応力低下の影響はほとんど見られなかったが、単調载荷の方が大きく軸力低下をしていることがわかる。これは、Hoop筋にPPバンドを使用しているため、拘束効果が発揮されず、単調载荷による急激なひび割れ進展を抑えきれなかったと思われる。

(3) 横補強筋の違いについて

横補強筋にφ3mm鉄筋を用いた場合と、PPバンドを用いた場合で、中心圧縮挙動にどのような違いがみられるか比較する。図-9左は、主筋に丸竹を用いた場合、図-9右は主筋に鉄筋を用いた場合である。いずれの場合も、鉄筋で横補強したものは最大応力後の強度低下が小さく、拘束効果が高いことがわかる。一方、PPバンドは剛性が低いことと、スパイラルに巻き付けているので、拘束効果を発揮しづらいと思われる。主筋種類と主筋径にかかわらず、φ3mm鉄筋で横補強した試験体に比べて、応力低下が大きく推移していることが確認できる。

(4) 主筋の違いについて

竹筋コンクリート柱の中心圧縮挙動について主筋種類と主筋径による違いを比較する。図-9にコンクリート強度ごとに分けて、数体の試験体の応力-変形関係を示す。

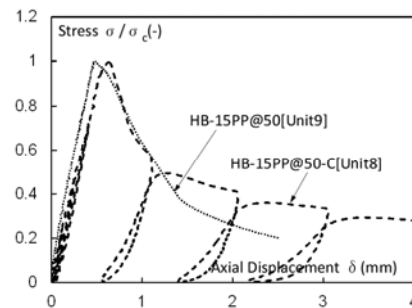


図-7 载荷方法の違い

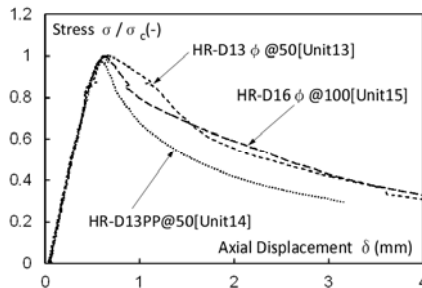
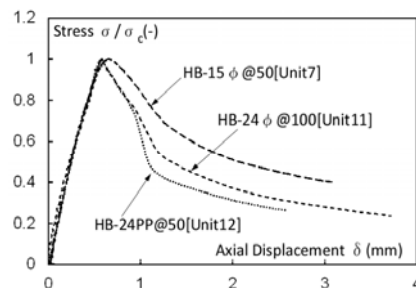


図-8 横補強筋の違いについて (左:竹筋, 右:鉄筋)

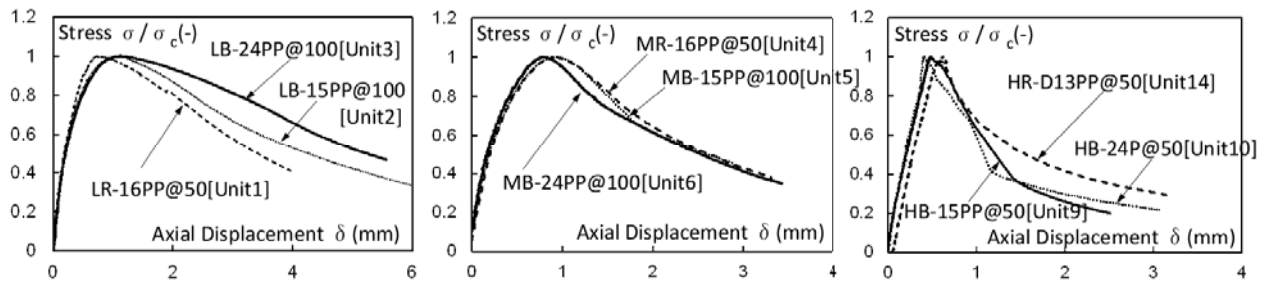


図-9 主筋の違い (左からFc10, Fc20, Fc30)

Fc10とFc20の試験体では、主筋径による影響はほとんど見られない。Fc30の試験体では、主筋に竹を使用したUNIT9とUNIT10で脆性的に耐力が低下し、鉄筋を用いた試験体ではいずれも緩やかに圧縮応力が低下していることがわかる。本節の(2)でみたように、軸耐力の推移は主筋種類にはあまり関係なく、コンクリート強度により区別される傾向があることが確認できた。

4. まとめ

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、丸竹を主筋に用いた柱部材の中心圧縮挙動について、試験体を数体製作して実験的に検討した。本実験では、せん断補強筋にも鋼材ではなく荷造り用テープとして販売されているポリプロピレン製のテープの利用を考えて試験体を計画した。実験パラメータは、1) コンクリート強度、2) 主筋種類と径、3) 横補強筋種類と間隔、4) 載荷方向の4項目とし、合計16体の試験体を製作し、柱部材の中心圧縮実験を行った結果、以下のことが確認できた。

- ①破壊性状について：主筋の違いやせん断補強筋の種類にかかわらず、ひび割れの角度や破壊領域に特徴的な違いはなかった。
- ②応力-変形関係について：中心軸圧縮を受ける柱の応力-変形関係を、既往の研究で提案されている2つのモデル(孫・崎野式, 荒木式)で比較したが、これらのモデル式ではPPバンドで横補強した竹筋コンクリート柱の実験結果を精度よく表現できない。
- ③軸耐力について：主筋種類にかかわらず力のつりあい条件から計算した軸耐力でおよそ評価できることがわかった。ただし、より精度を要求するには、横補強筋の拘束効果を考慮しなければならない。
- ④コンクリート強度の影響について：コンクリート強度が低いほど、軸耐力以降の劣化勾配が大きく荷重低下が緩やかである。
- ⑤加力方法の影響について：単調載荷と比較して、繰返し載荷による軸圧縮応力低下の影響はほとんど見られなかった。

⑥横補強筋の拘束効果について：鉄筋で横補強したものは最大応力後の強度低下が小さく、拘束効果が高いが、PPバンドは剛性が低いことと、スパイラルに巻き付けているので、拘束効果を発揮しづらい。

⑦主筋種類と径の違いについて：Fc10やFc20の場合、主筋径による影響はほとんど見られなかった。Fc30の場合、主筋に竹を使用すると脆性的に耐力が低下し、鉄筋を使用すると緩やかに応力が低下することがわかった。

謝辞

試験体の作製および実験にあたり、福山大学学部4年生山岡真梨子さん(現・(株)あい設計)に多大なる協力を得ました。また、試験体の作製の一部は、財団法人サタケ技術振興財団の平成22年度大学研究助成金により行われました。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 山岡真梨子, 寺井雅和, 南宏一: 竹筋コンクリート梁の曲げ性状に関する基礎的研究, 日本建築学会 2010年度大会(北陸) 学術講演梗概集(DVD), 2010.9
- 2) 寺井雅和, 南宏一: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.1183-1188, 2010.7
- 3) Sathiparan Navaratnarajah, 櫻井光太郎, 目黒公郎: Experimental study of PP-band retrofitted masonry structure made of shapeless stone (特集 耐震構造学研究グループ(ERS)), 生産研究 61(6), pp.1051-1054, 2009
- 4) 大久保全陸, 禰寝宏明: 柱外周を応急補強した無筋及び鉄筋コンクリート柱の中心圧縮挙動: 総合プロジェクト・鉄筋コンクリート造震災構造物の復旧技術の開発(その12), 社団法人日本建築学会学術講演梗概集(構造系), pp.2195-2196, 1983
- 5) 川上裕佳, 高月行治, 藤原顕太郎, 根口百世, 南宏一: 低強度コンクリート部材の耐震性能評価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-2, 構造IV, pp.333-336, 2007
- 6) 崎野健治, 孫玉平: 直線型補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, No.461, pp.95-104, 1994.7
- 7) 谷口博亮, 八十島章, 荒木秀夫: 低強度コンクリートRC柱の中心圧縮性状と曲げ耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), C-2, 構造IV, pp.5-8, 2008