

曲げとせん断を受ける竹筋コンクリート部材に関する研究

Study on concrete members with bamboo reinforcement under bending and shear

構造及びコンクリート工学分野 松田一樹

鉄筋の代わりに竹筋を使用したコンクリートが実用化されれば、CO₂ 排出抑制に大きく貢献できることから、補強筋に竹筋を用いた竹筋コンクリートについて様々な試験を行った。まず、アルカリ環境下に置かれた竹筋の引張特性の経時変化を調査した。次に、竹筋コンクリートの曲げ破壊実験とせん断破壊実験の結果を FEM 解析により評価した。本研究より、鉄筋の代わりに竹筋を使用するのではなく、鉄筋と竹筋を併用することで最大荷重や降伏荷重の向上が確認できた。

It could contribute CO₂ discharge control greatly that reinforcement materials of RC members alter ordinal steel re-bars to bamboo strips. For the sake, first, a time dependant tensile strength degrade of the strip embedded within concrete as alkali atmosphere was investigated. Second, loading tests of the members with the each material only and a combined usage the bamboo strips and the re-bars under bending and shear have been carried out. Last, material nonlinear analyses relevant to the tests were also conducted. As a result, the combined usage can enhanced maximum strength and ductility of the member.

1. はじめに

現在環境問題が広く認識されており、製作時の環境負荷の大きい鉄筋の代わりに竹筋を用いることによって環境負荷を低減することができると思われる。

また、プラスチック等の新しい素材の普及によって竹材の需要が減少している。竹材余剰が問題となる地方も存在し、需要拡大が望まれている。さらに、異常増殖した竹林が、植林地の侵食や住宅基礎や給排水管の破壊など、深刻な被害をもたらした事例もある[1]。

1.2 研究目的

このような背景のもと、鉄は莫大な化石燃料を使って生産するのにに対し、竹筋は大気中の二酸化炭素を吸って育つ地球にやさしい素材である。鉄筋の代替として、竹筋を用いることができれば、土木構造物建設の際の CO₂ 排出量を大幅に抑制でき、環境面に大きく貢献できる。

そこで本研究では、竹筋の RC 部材への適用を目標に、①アルカリ環境下に置かれた竹材の引張特性の経時変化、②FEM 解析による竹筋を用いたはり部材の曲げ破壊実験の評価、③竹筋を用いたはり部材のせん断破壊実験と FEM 解析による評価、これら 3 項目に関して試験・検討を行い、竹筋の土木構造部材への適用性を検討することを目的として、研究を進めていった。

2. アルカリ環境下に置かれた竹材の引張特性の経時変化

2011年8月に京都府下にて伐採された真竹(丹波地方産)を材料に、竹筋をアルカリ環境下のコンクリートに埋め込み、所定の期間(0, 1, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 42, 56, 168日, 365日)養生した後、コンクリートから取り出し引張試験を行った。竹筋の引張強度や弾性係数の変化から、コンクリート内での経時劣化について検討した。

2.1 試験概要

図-2.1, 図-2.2 に試験体概要図とコンクリートの埋め込み状況を示す。各埋め込み期間で3体ずつ、節の有無について試験を行った。

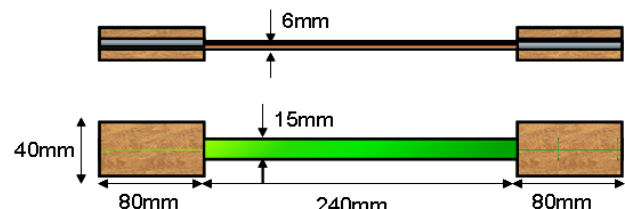


図-2.1 引張試験体図
図-6.5 引張実験供試体略図

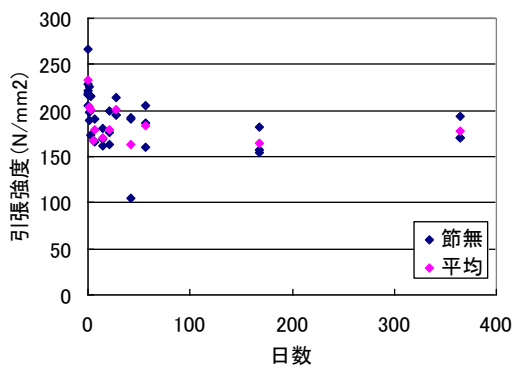


図-2.2 竹筋コンクリート埋め込み状況
図-6.2 打設後の写真

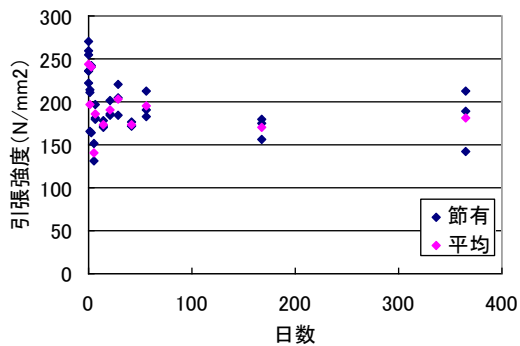
2.2 コンクリート内部での竹筋の経時変化

図-2.3 にコンクリートへの埋め込み期間と引張強度の関係を示す。図中で紺色マーカーは各供試体の引張強度をプロットしたもので、桃色マーカーはその平均をプロットしたものである。また、図-2.4 に0日時の引張り強度を1としたときの引張強度低下率と埋め込み日数の関係を示す。図-2.4中の紺色マーカーは節無の平均値を、桃色マーカーは節有の平均をプロットしたものである。

節なし節ありともに、埋め込み後7日程度で7割程度の強度まで低下、その後365日経過時でも7割程度の強度を示した。また、紙面の都合上掲載は割愛するが、弾性係数に関しては経時変化の影響は見られない結果となった。



(a) 節なし



(b) 節あり

図-2.3 コンクリート内での引張強度の経時変化

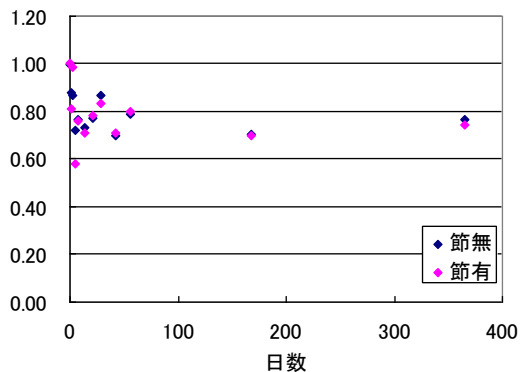


図-2.4 引張り強度低下率

3. FEM 解析による竹筋を用いたはり部材の曲げ破壊実験の評価

低品質再生骨材と竹筋を用いて作製したはり部材について、曲げ載荷試験を行った。竹筋と鉄筋の比率や本数を変化させることで、部材の耐力や破壊性状の違いから、竹筋と低品質再生骨材の土木構造物への併用・適用性について検討した。またこれまでの研究で得られた材料特性を用いて、FEM 解析を行い、実験の評価を行った。

3.1 解析対象と使用材料の力学的特性

本研究では、竹筋・再生コンクリート部材の曲げ載荷試験を解析対象とする。図 3.1 に実験に用いた供試体形状を示す。供試体断面の幅は 300mm、高さは 200mm、供試体の長さは 1800mm である。また、材料試験から得られた竹筋と鉄筋、コンクリートの材料特性を表 3.1 に示す。なお、コンクリートは普通コンクリートではなく再生コンクリートを用いている。

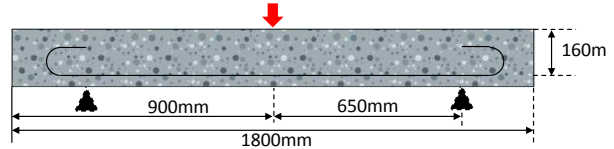


図 3.1 供試体形状

表 3.1 材料定数

コンクリート		鉄材(D10)	
E_c (kN/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	σ_{sv} (N/mm ²)	E_s (kN/mm ²)
25.8	36.8	330.4	173.5
竹材			
E_B (kN/mm ²)	σ_{BF} (N/mm ²)	ϵ_{BF} (μ)	
18.0	178.4	9911	

表 3.2 に実験パラメータを示す。実験パラメータは、補強筋比は 0.45 と 0.89 の 2 種類を用いた。補強筋については鉄筋のみ、および鉄筋の 3 分の 1 を竹筋に置換したもの、鉄筋の 3 分の 2 を竹筋に置換したもの、竹筋のみの 4 種類とした。供試体名は、S が鉄筋、B が竹筋を表しており、それぞれの後の数字が部材内に埋め込んだ本数を表している。

表 3.2 実験パラメータ

供試体	骨材	配筋方法		補強筋比
		置換率	使用補強筋数	
S3	再生	0	鉄筋×3	0.45
S2B1		1/3	鉄筋×2, 竹筋×1	
S1B2		2/3	鉄筋×1, 竹筋×2	
B3		1	竹筋×3	0.89
S6		0	鉄筋×6	
S4B2		1/3	鉄筋×4, 竹筋×2	
S2B4		2/3	鉄筋×2, 竹筋×4	
B6		1	竹筋×6	

3.2 解析概要

図 3.2 に解析モデルを示す。フルモデルを用いた 2 次元有限要素解析により行う。解析では竹筋とコンクリート間の付着特性を考慮したものとしていないもので比較を行った。なお、コンクリート - 鉄筋間の付着

特性については剛結合としている。

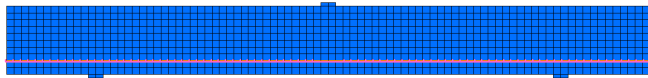


図 3.2 解析モデル図

3.3 解析結果

解析結果の一例として、図 3.3 に S2B1、図 3.4 に S1B2 の荷重 - 変位関係を示す。凡例の剛結、付着はコンクリート - 竹筋間の付着特性を表している。解析も実験同様、竹材の破断による急激な荷重低下が見られた。また、解析では部材降伏後に付着特性の影響が大きくなるのがわかる。S2B1 では、最大荷重と竹材破断後の荷重に、実験結果との違いが生じたが、どちらも同程度であり、竹材による強度増分を示すことができていると思われる。ただし、最大荷重時の変位が解析では異なっており、それぞれの実験での付着特性を適切に設定できていないことが考えられる。また、図 3.5 に示す S2B1 のひび割れ図より、付着モデルでは実験結果を概ね再現できたが、剛結モデルではひび割れの分散性が見られ、局所的な破壊があまり再現できていない結果となった。これらより、付着モデルで実験結果を概ね再現することができたと言える。

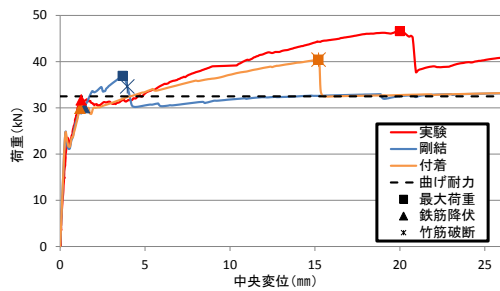


図 3.3 荷重 - 変位関係 (S2B1)

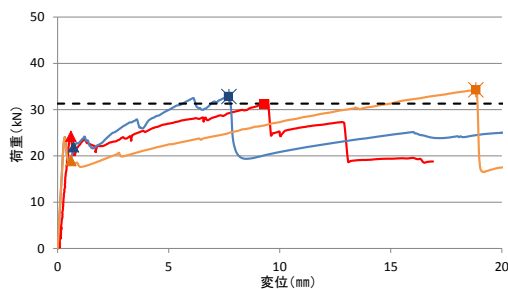


図 3.4 荷重 - 変位関係 (S1B2)

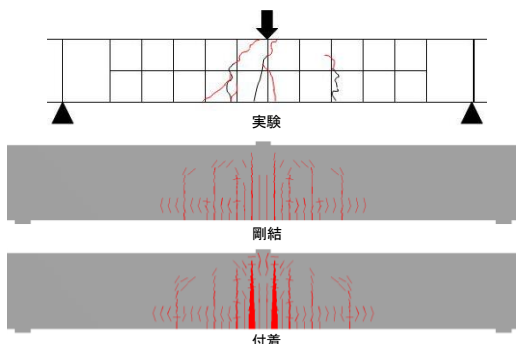


図 3.5 ひび割れ図 (S2B1)

4. 竹筋を用いたはり部材のせん断破壊実験と FEM 解析

竹筋を用いて作製したはり部材について、せん断載荷試験を行った。竹筋と鉄筋の本数を変化させることで、部材の耐力や破壊性状の違いから、竹筋の土木構造物への適用性について検討した。またこれまでの研究で得られた材料特性を用いて、FEM 解析を行い、実験の評価を行った。

4.1 実験パラメータ (試験体断面図)

実験パラメータは、鉄筋のみの供試体に竹筋を追加したものや竹筋のみを補強筋として使用したものである。供試体名は、S が鉄筋、B が竹筋を表しており、それぞれの後の数字が部材内に埋め込んだ本数を表している。表 4.1 に実験パラメータと算定せん断耐力 V_c 、算定曲げ耐力 P_u 、せん断耐力と曲げ耐力の比である耐力比を示す。曲げ耐力は等価応力ブロック法、せん断耐力は仮の算定方法として土木学会式[3]を使用する。せん断耐力算定の際、竹筋の断面積は 90mm^2 をそのまま使用せず、鉄筋との弾性係数比で置換して算定した。また、表 4.2 に材料試験のより得られた材料定数を示す。

表 4.1 実験パラメータ

供試体名	せん断耐力 V_c (kN)	曲げ耐力 P_u (kN)	耐力比 P_u/V_c
S1	59.1	85	1.4
S1B2	60.5	97.5	1.6
S1B4	61.9	109.5	1.8
S2	74.5	153.5	2.1
S2B1	74.9	158.4	2.1
S2B3	75.8	167.9	2.2
B4	31.1	30	1
B5	33.5	37.2	1.1

表 4.2 材料定数

コンクリート		鉄筋(SD490 D16)	
圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
21.5	25.8	587.5	195.2
竹筋(15×6mm ²)			
節有		節無	
破断強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	破断強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
153.3	15.7	164.1	14.8

4.2 試験体概要

図 4.1 に試験体の側面図を、図 4.2 に想定項目を示す。供試体断面の高さは 300mm、幅は 200mm、有効高さは 160mm、長さは 1300mm である。

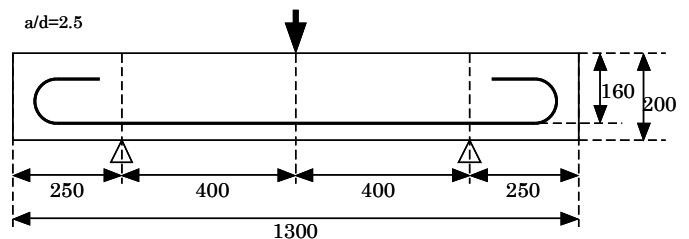


図 4.1 試験体側面図

4.3 実験結果

4.3.1 各試験体の最大荷重と荷重-中央変位関係

表 4.3 に各試験体の算定せん断耐力 V_{cd} , 算定曲げ耐力 P_u , (せん断/曲げ)耐力比, 及び実験での最大荷重 P_{max} , 耐力比 P_{max}/P_u もしくは P_{max}/V_{cd} , 破壊形式, これら一覧を示す. 耐力比の低かった S1, B4, B5 の 3 体はせん断破壊ではなく曲げ破壊に至った.

表 4.3 各試験体の算定耐力と実験時最大荷重

供試体名	算定せん断耐力 V_{cd} (kN)	算定曲げ耐力 P_u (kN)	耐力比 V_{cd}/P_u	最大荷重 P_{max} (kN)	P_{max}/V_{cd} or P_{max}/P_u	破壊形式
S1	59.1	85	1.4	121.8	1.4	曲げ
S1B2	60.5	97.5	1.6	142.8	2.4	せん断
S1B4	61.9	109.5	1.8	167.4	2.7	せん断
S2	74.5	153.5	2.1	128.2	1.7	せん断
S2B1	74.9	158.4	2.1	189.8	2.5	せん断
S2B3	75.8	167.9	2.2	235.6	3.1	せん断
B4	31.1	30	1	58.6	2.0	曲げ
B5	33.5	37.2	1.1	60.4	1.6	曲げ

図 4.2 から図 4.4 に各試験体の荷重-中央変位曲線(P- δ 図)を示す. 荷重-中央変位関係をみてみると, 鉄筋のみの供試体に竹筋を入れることにより最大荷重の増加がみられる. また, 竹筋と鉄筋を組み合わせることによって変形性能が向上しているといえる. S1 シリーズを比較すると, S1B2 と S1B4 は部材の降伏荷重とひび割れ発生後の剛性が増加している. S1B4 は竹筋が 1 本破断することにより荷重が約 10kN 低下している. S1 シリーズの最大荷重を比べてみると, 竹筋が 1 本入ることにより荷重が約 10kN 増加すると考えられる. しかし S2 シリーズではこのような傾向はみられなかった. S2 シリーズでは最大荷重後に荷重が大きく低下して脆性的な破壊を示していることからせん断破壊であるといえる. S1 シリーズのように竹筋の本数と増加する荷重との関係性はみられない. S2 の P- δ 図において, 荷重 115kN 当たりで剛性に変化が生じたのは上縁部のコンクリートが圧縮破壊したことと, 斜めひび割れが上縁に抜けたためであると考えられる. B4 と B5 に関しては, ひび割れが分散せずに 1 本のひび割れが進展することで破壊に至った. また, ひび割れ発生と同時に荷重が大きく低下, その後徐々に荷重が増加して最大荷重到達後に竹の破断により破壊に至る.

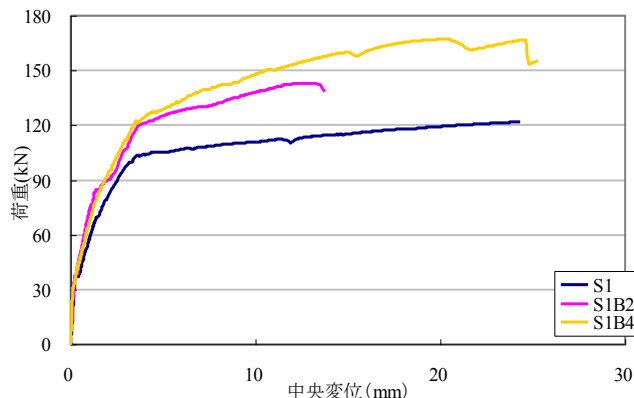


図 4.2 P- δ 図 (S1 シリーズ)

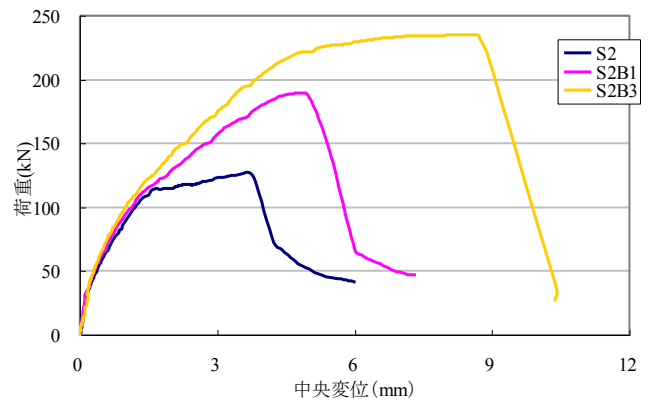


図 4.3 P- δ 図 (S2 リーズ)

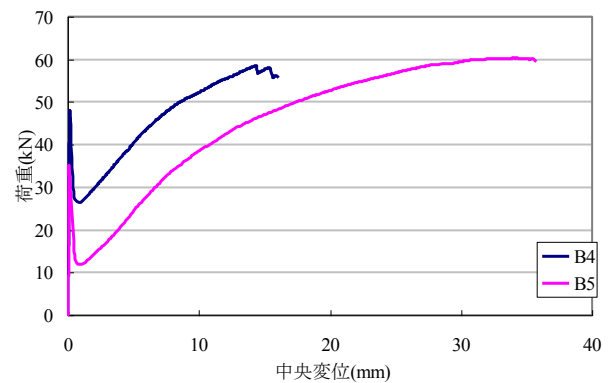


図 4.4 P- δ 図 (竹筋のみ)

4.3.2 各試験体の破壊性状

破壊性状の一例として, 図 4.5 から図 4.7 に S2 シリーズの試験終了後のひび割れ図を示す. これら 3 体はひび割れ図からもわかるとおり, せん断スパン内に斜めひび割れが生じてせん断破壊に至っている. しかし, 鉄筋のみの S2 から竹筋を増やすことによって破壊形式に明確な差は見られず, 竹筋は破壊性状には大きく関与せず, 鉄筋の本数が支配的であると考えられる.

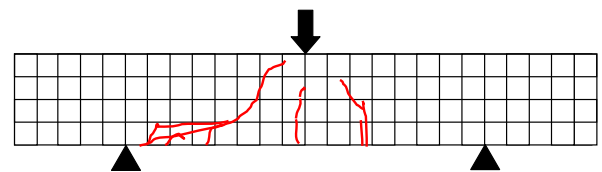


図 4.5 S2 のひび割れ図

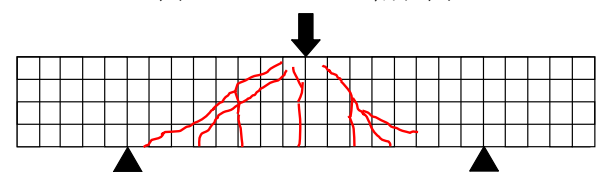


図 4.6 S2B1 のひび割れ図

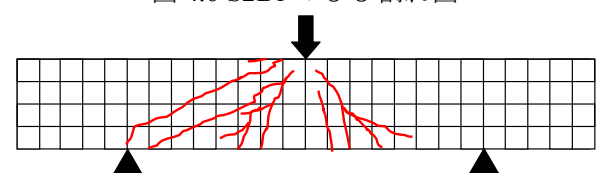


図 4.7 S2B3 のひび割れ図

4.3.3 各試験体補強筋の荷重-ひずみ関係

補強筋の荷重-ひずみ関係の一例として、図 4.8 に S2 シリーズの鉄筋ひずみの一例を示す。このひずみは、せん断スパン内で計測した鉄筋ひずみを比較したもので、計測位置は載荷点から支根部へと伸びた斜めひび割れとほぼ同じ位置で計測している。今回使用した鉄筋の降伏ひずみは約 3000 μ であるため、S2B3 に使用した鉄筋のみが降伏していることがわかる。しかし破壊性状をみると、斜めひび割れ進展後に脆性的な破壊をしているため、曲げ降伏後のせん断破壊とした。この図の形状が S2 シリーズの P- δ 図に酷似していることから、今回のせん断破壊試験では P- δ の挙動は主鉄筋の荷重-ひずみ関係が支配的であると考えられる。

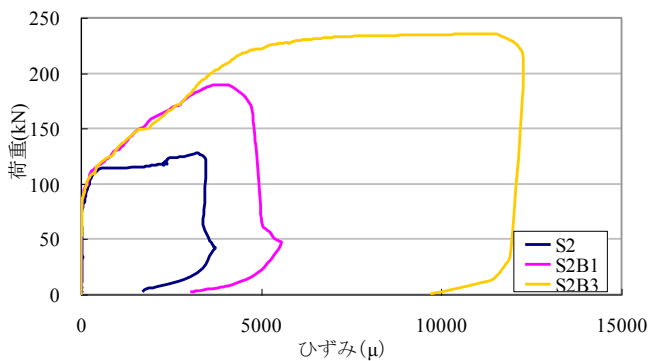


図 4.8 荷重-ひずみ関係(S2 シリーズ)

4.4 FEM 解析によるせん断破壊実験の評価

4.4.1 解析概要

解析モデル図 4.9 に解析モデルを示す。フルモデルを用いた 2 次元有限要素解析により行う。解析では竹筋とコンクリート間の付着特性を考慮したものとしていないもので比較を行った。なお、コンクリート-鉄筋間の付着特性については剛結合としている。また、竹材の材料特性について、2.2 の結果より表 4.4 に示す竹筋の引張強度の 7 割強度の値を使用する。

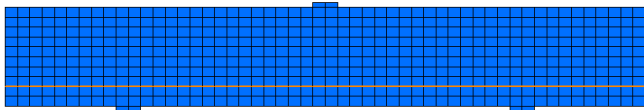


図 4.9 解析モデル図

表 4.4 竹筋の材料特性

節	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	破断ひずみ (μ)
無-7割	114.87	14.8	7251
有-7割	107.31	15.7	7316

4.4.2 解析結果とその評価

表 4.5 に各供試験体の算定耐力と実験時最大荷重、解析時最大荷重を示す。曲げ破壊となった竹筋のみを使用した B4B5 については、解析時の最大荷重は実験時の最大荷重を下回り、算定曲げ耐力と近い値となっ

た。せん断破壊をした供試体については、算定耐力は実験と同様大きく上回るものの、実験で得られた最大耐力よりも低い値となった。また、解析結果の一例として、図 4.10 から図 4.12 に S2 シリーズの荷重-変位関係を示す。凡例はコンクリート-竹筋間の付着特性、定着特性を表している。緑線の剛結剛結は付着・定着ともに剛結、橙線の付着剛結は付着特性のみを考慮したモデルである。なお、3.3 よりコンクリート-竹筋間の定着特性については剛結モデルで再現可能であるということから今回は定着特性を考慮したモデルでの解析は行っていない。赤線は実験時により得られた P- δ で、灰色の点線は算定せん断耐力を表す。この結果より、S2 については実験結果を概ね再現できたといえる。鉄筋と竹筋を併用したモデルについては、どちらも実験時の最大荷重を大きく下回る結果となった。剛結剛結モデルに比べて、付着剛結モデルでは実験時の剛性を概ね再現できている。しかし、解析では実験時の荷重まで上がるよりも先に部材の破壊が始まっている結果となった。

表 4.5 解析結果一覧

供試体名	算定せん断耐力 (kN)	算定曲げ耐力 (kN)	実験最大荷重 (kN)	解析時最大荷重 (kN)	
				剛結剛結	付着剛結
S1	59.1	85	121.8	103.9	
S1B2	60.5	97.5	142.8	129.2	112.2
S1B4	61.9	109.5	167.4	126.2	114.5
S2	74.5	153.5	128.2	131.6	
S2B1	74.9	158.4	189.8	145.0	129.2
S2B3	75.8	167.9	235.6	149.1	150.4
B4	31.1	30	58.6	35.2	38.9
B5	33.5	37.2	60.4	43.6	37.2

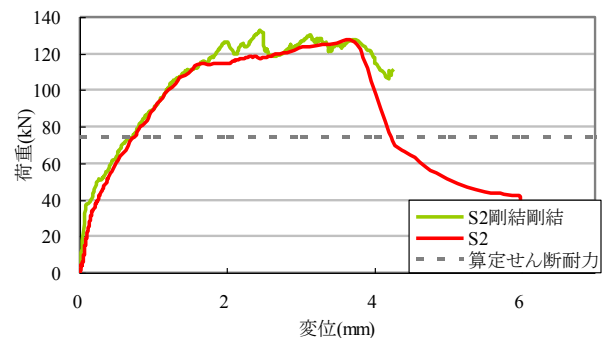


図 4.10 S2 の P- δ 図

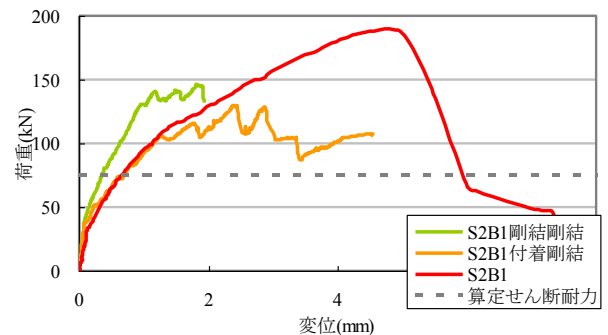


図 4.11 S2B1 の P- δ 図

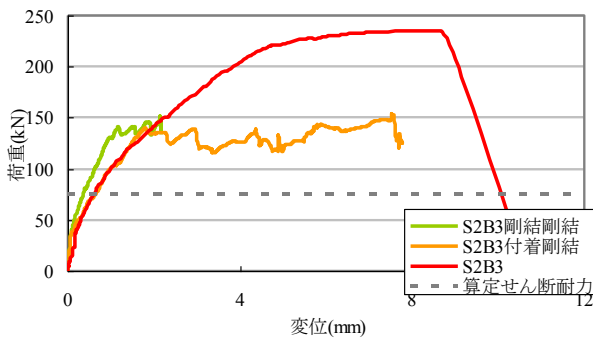


図 4.12 S2B3 の P- δ 図

また、図 4.13 に示す S2B1 のひび割れ図より、付着モデルでは実験結果を概ね再現できたが、剛結モデルではコンクリートの破壊が多く、実験を再現できていない結果となった。これらより、付着モデルで実験結果を概ね再現することができたと言える。

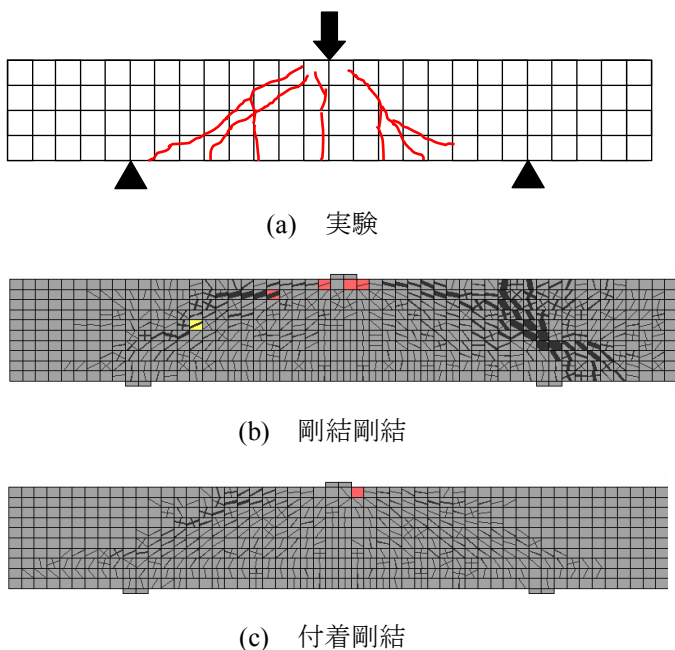


図 4.13 S2B1 ひび割れ図

5. 結論

本研究では、竹筋の土木構造部材への適用性を検討することを目的とし、3つの項目に着目して研究を進めていった。本研究でえられた結果をまとめる。

アルカリ環境下に置かれた竹材の引張特性の経時変化について、コンクリートに埋め込んだ竹筋は、節の有無によらず、埋め込んでから7日間で引張強度が3割低下することがわかった。また、埋め込み7日以降、引張強度の減少はみられず、埋め込み期間1年で0日強度の7割程度で安定する。弾性係数については、コンクリート埋め込みによる経時劣化を明確に確認することは出来なかった。これらのことより竹筋は、アルカリ環境下の期間が長くなるに連れて、「引張限界ひずみ」が減少していくことになる。竹の中のタンパク質が腐食することにより、竹筋内部の繊維が部分的に欠

損したためと考えられる。コンクリート内での竹筋の経時劣化についてはある程度の傾向は得られたが、実用に向けて今後さらに継続して実験を続けていく必要がある。

FEM 解析による竹筋を用いたはり部材の曲げ破壊実験の評価について、竹筋コンクリートの解析を行うにあたって、解析結果には付着特性の影響が大きく、付着を考慮することで実験を概ね再現することができるが、付着特性の適切な設定が必要であるといった結果となった。また、竹筋の定着特性においては剛結モデルを用いることで実験結果を再現できる。

竹筋を用いたはり部材のせん断破壊実験と FEM 解析による評価について、せん断をうける竹筋コンクリートの解析を行う際、コンクリートと竹筋間の付着を考慮することで剛性をうまく表現することができるが、竹筋が破断する変位などが実験とは大きく違うため、今後付着特性を変化させて解析を行う必要がある。また、せん断をうける竹筋コンクリートは、曲げをうけるときと比べると竹筋の本数によって最大荷重の増加が著しく、その原因については十分な考察ができていないため今後さらなる考察が必要である。初期剛性などは FEM 解析により再現できたがピークまで追うことができなかった。しかし、解析と実験ともに算定値よりも安全側で評価することはできる。

参考文献

- [1]井上正文ら：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）竹材の材引張試験およびスラブの曲げ実験概要，日本建築学会大会学術静演梗協集，中国，1999.9，p.67-70
- [2]川村満紀：土木材料学，森北出版，1996
- [3]社団法人土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2007
- [4]土木学会：JSCE E-G 503-1999 引抜き試験による鉄筋とコンクリートの付着試験方法。

討議

討議 [谷口先生]

竹筋に何か特別な処理をしているのか？また、フックなど竹筋の加工は容易なものなのか？

回答

中山将駿らの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(日本建築学会九州支部研究報告第 48 号 2009 年 3 月)によると、竹筋にポリマーセメントモルタルを塗布することによって、コンクリートと竹筋間の付着性状の改善がみられたという結果もありますが、本研究には特別な処理はしていません。

竹筋のフック部の加工は、竹筋を提供して頂いた竹材店に任せています。方法としましては、熱を与えて徐々に竹を湾曲させています。今回は内径 50mm の半円フックを与えましたが、特別難しい加工ではないと言われています。

討議 [山口先生]

鉄筋を竹筋に置き換えることは可能か？また、置き換えるなら鉄筋 1 本に対して竹何本で置き換えることができるのか？

可能性として、変形性能を確保するために竹筋を入れるということは考えられないか？

回答

図 4.4 に示すように、鉄筋のかわりに竹筋のみを使用した部材に関しては初期ひび割れ発生後に大きな荷重の低下がみられることから、鉄筋を完全に竹筋に置き換えることは難しいと考えます。置き換えるとなった場合、鉄筋と竹筋の引張強度と等価としたり、弾性係数比を用いて竹筋を鉄筋に置き換えて断面積を決定する方法があります。一例として、SD295 の D10 の鉄筋 1 本に対して、曲げ破壊実験時に使用した竹材ならば断面積を 90 mm^2 にすることで鉄筋と竹筋の強度を等価であるとする事はできますが、竹筋が鉄筋と同程度の効果を発揮する結果は得られません。また、図 4.3 からわかるように、竹筋を 1 本追加することで得られる耐力の上昇量にばらつきがみられるため、鉄筋 1 本に対して竹筋何本で置き換えることができるのかということはまだ明言できません。

図 4.3 と図 A により、鉄筋量は変えずに竹筋を追加することで耐力と変形性能の向上はせん断破壊実験と曲げ破壊実験両方で確認できました。しかし竹筋を追加したことによる耐力の上昇量は明らかでないため、体力の上昇は考慮せずに安全側に設計し、変形性能を向上させるといった方法も可能性としては十分に考え

られます。

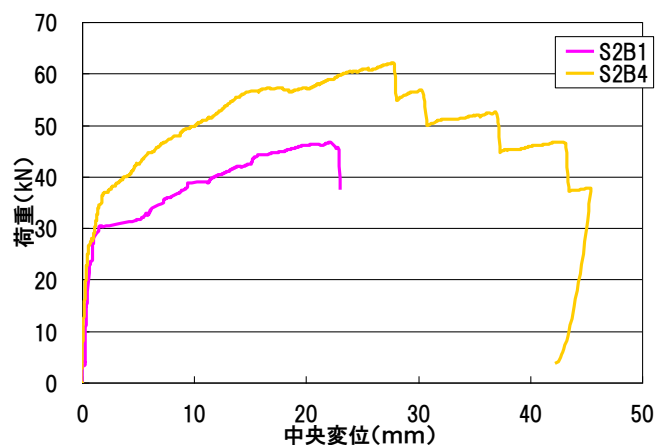


図 A P- δ 図(S2B1, S2B4)

討議 [木内先生]

竹筋の含水率は竹筋の強度に影響しているのか？また、火災に対して弱いといった欠点はないのか？

回答

竹筋の含水率や、火災に対しての検討は本研究では行っていません。

なお含水率については、朝比奈敏勝らの竹の強度に及ぼす含水率の影響(日本建築学会第 17 回機会材料・材料加工技術講演会論文集 2009 年 11 月)によると、竹の強度は絶乾状態で最大となり、気乾状態では絶乾状態に比べて 4.5% の強度低下、生木状態では 34% の強度低下がみられ、含水率の上昇にともなって強度が低下する結果が示されています。このことから竹筋を使用する場合は気乾状態であれば含水率の影響は少ないことがわかります。

討議 [角掛先生]

竹筋は補強筋として使うべきなのか？竹筋を入れたことによる耐力の上昇は考慮しないのか？

回答

山口先生への討議でも示したように、現段階では竹筋を追加したことによる耐力の上昇量が明らかでないため、変形性能の向上のみに期待して竹筋を補強筋として使用することも可能性としては考えられます。しかし今後の研究でその上昇量を明らかにすることができれば耐力の上昇も考慮した設計をすることが可能になると考えています。