

論文 竹筋コンクリート部材の設計法に関する一考察

寺井 雅和*1

要旨: 竹筋コンクリートを実現するためには、竹とコンクリートの付着力が低い問題を解決しなければならない。本論では、竹とコンクリートとの付着力向上に寄与する要因を整理するために、幾つかの梁型供試体を作製し付着実験を行った。実験パラメータは、1) 竹串ピッチ (串なし, ピッチ 15mm と 50mm), 2) ゴムコートの有無, 3) エポキシ充填の有無, そして 4) コンクリート強度 (F_c 13, 19) である。また、竹筋コンクリートの配筋設計を通して、竹主筋端部の定着部における定着性状について、実験で検討した付着強度との関係性について検討を行った。

キーワード: 竹筋コンクリート, 付着, 配筋設計, 曲げ, せん断, 定着

1. はじめに

竹筋コンクリート (Bamboo Reinforced Concrete, 以下 BRC) は、補強筋 (主筋) に竹を使用したコンクリート部材のことである。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、軽量で加工しやすいなどの特徴から、鉄筋が手に入りにくい地域や、生育地に近い熱帯や亜熱帯地域で BRC は活用が期待されており、実際に施工されている事例もある。このため、世界各地で 1900 年代初めころから研究が続けられている¹⁾。日本でも BRC は戦前から研究が行われ、終戦直後まで全国各地でつくられたが²⁾、戦後復興により鉄鋼の生産供給が安定したため、BRC に関する技術や研究開発は姿を消した。しかしながら、化石燃料の使用などによる地球環境の悪化により、環境問題は 20 世紀後半に全世界的な問題となり、環境負荷低減が注目されるようになり、天然素材の竹を利用したモノづくりが世界的に見直されてきている^{1),3),4)}。

BRC が成立するためには、様々な問題を解決する必要があるが、その中でも重要な一つとして、竹主筋とコンクリートとの付着力の低さがある。付着力が低い要因として、①表面が滑らかなため滑りやすい、②フレッシュコンクリートの中で吸水することによる膨張弛緩のため、竹とコンクリートの間にすき間が生じる、ことが挙げられる。①の対策として、切り欠きを設ける⁵⁾、突起を後付けする⁶⁾、などの開発事例がある。筆者も竹材に竹串を刺し突起を設ける方法を提案しその有効性を示した⁷⁾。次に、②の対策としては、表面にペンキを塗る⁸⁾、エポキシ樹脂を塗る⁹⁾、あるいはゴムコートを施す⁷⁾ことで竹表面からの吸水を抑えある程度の付着力向上に寄与することが確認されている。

本論文では、竹とコンクリートの付着力が低い問題に

ついて、付着力向上に寄与する要因を整理するために、幾つかの梁型供試体を作製し付着実験を行った。この実験結果を解析し、竹とコンクリートの付着力について定量的算定を試みた。また、BRC と鉄筋コンクリート (Steel Reinforced Concrete, 以下 RC) の部材設計を比較するために、具体的な建物を想定した配筋設計を行い、竹主筋端部の定着部における定着性状について、先に評価した付着強度との関係性について検証を行った。

表-1 供試体一覧

供試体	断面 $b \times D$ (mm)	コンクリート強度 (N/mm^2)	主筋			せん断補強
			径 (mm)	表面処理	エポキシ樹脂充填	
B19_0_Rc	100×100	19	竹 1-18φ 引張主筋比 P_t 約 2.0%	ゴムコート	なし	なし
B19_@15_Rc						
B19_@50_Rc						
B13_0_Rc_Ef		ゴムコート		有り		
B13_@15_Rc_Ef						
B13_@50_Rc_Ef						
B13_0_Rc		ゴムコート		なし		
B13_@15_Rc						
B13_@50_Rc						
B13_0_Ef		なし		有り		
B13_@15_Ef						
B13_@50_Ef						
B13_0						
B13_@15		なし		なし		
B13_@50						

2. 付着強度の定量化

2.1 供試体

筆者は、これまでの研究で、竹に穴をあけ竹串をらせん状に差し込むだけの簡単な加工をした竹串竹筋と、フレッシュコンクリートの中で吸水することによる膨張弛緩を抑えて付着力向上が確認された表面のゴムコート防

*1 近畿大学 工学部建築学科准教授 博士 (工学) (正会員)

水を開発した⁷⁾。この竹串竹筋の付着効果を定量的に評価するために、幾つかの梁型供試体を作製し実験を行った。

表-1 に供試体一覧、図-1 に供試体の形状および配筋状況を示す。供試体寸法は、断面 100mm×100mm、長さ 400mm とするが、竹主筋端部のすべり量を実測するため、主筋両端部を 5mm 程度小口面から出した。そのため、コンクリート部の外寸は約 390mm となっている。竹筋 1 本を梁の下端（引張縁）から 20mm となるように配置した。実験パラメータは、1) 竹串ピッチ（串なし、ピッチ 15mm と 50mm）、2) ゴムコートの有無、3) エポキシ充填の有無、そして 4) コンクリート強度（Fc13、19）である。パラメータの掛け合わせで 15 種類の供試体があるが、同一試験体を 3 体ずつ合計 45 体作製した。竹串は、図-2 に示すように、設定したピッチにドリルで穴を開けて太さ 3mm の竹串を差し込むが、同一線上に穴が連続すると竹が縦割れを起こしやすくなるので、串を 45 度ずつ回転させて差し込んだ。竹串の出は、既往の研究⁷⁾を参考に約 4mm 程度とした。

試験は図-3 に示すように全ての供試体で支点間距離（300mm）を三等分する 2 点荷重で行った。

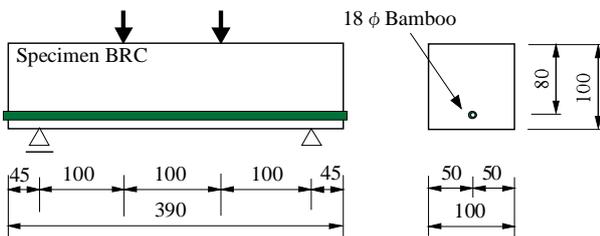


図-1 供試体寸法



図-2 竹串竹筋

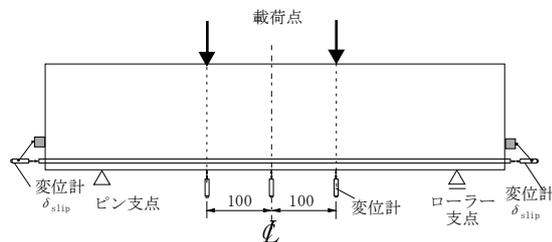


図-3 荷重および計測方法

表-2 材料試験結果

	竹材		コンクリート	
	寸法 (mm)	引張強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
B19シリーズ	外径18.4 内径12.5	125	18.5	1.70
B13シリーズ			13.0	1.29

2.2 使用材料

表-2 に材料特性を示す。竹は 1 本ずつ断面外寸、内寸を実測したが、本実験で使用した全ての竹の平均値として、外径 18.4mm、内径 12.5mm となり、断面形状を同心円とすると 1 本の断面積は 144.3mm² となる。引張強度は丸竹のまま試験をしたので、節や反りの影響で素材強度（節間強度）よりは低くなっていると思われる。竹は目打ちと油抜き処理済みで、ホームセンター等で販売されている間伐竹と思われるものを使用した。また、差し込んだ竹串は、模型工作用に市販されている直径 3mm のものを所定の長さに切断して使用した。ともに材種は不明である。

コンクリートは、普通ポルトランドセメント、最大寸法 20mm の砕石および福山市瀬戸町産砕砂を使用した。コンクリート打ちは Fc19 の B19 シリーズを 1 回、Fc13 の B13 シリーズを 3 回に分けて行ったが、B13 シリーズの配合は同一とし、表-2 に示す材料強度は 3 回の平均値である。

2.3 付着強度

主筋の引張力 T を、図-4 に示す力のつり合いから、載荷荷重 P を用いて表す ((1-1)式)。梁部材内の主筋に作用する付着強度 τ は、主筋の引張力 T を、主筋の周長 ϕ と付着長さ l の積で計算される表面積 ($=\phi \times l$) で除した値とするが ((1-2)式)、試験体によるコンクリート強度のばらつきを統一するために、既往の研究⁷⁾同様、線形補間による補正をした。

$$M = \frac{Pa}{2} = T \cdot j, \quad \tau = \frac{T}{\phi l} \quad (1-1)(1-2)$$

$$\tau = \frac{P \cdot a}{2j \cdot \phi \cdot l} \cdot \alpha \quad (2)$$

ここに、 P : 梁部材の載荷荷重 (N)、 a : せん断スパン ($=l - 45\text{mm}$)、 ϕ : 主筋の周長 (mm)、 l : 付着長さ (供試体ごとにひびわれ発生箇所から求める; 107~197mm)、 j : 応力中心間距離 ($=7/8d$, $d=80\text{mm}$)、 α : コンクリート強度に対する補正係数 ($=30/\sigma_c$, σ_c : コンクリート圧縮強度 N/mm²)。

図-5 左に、竹主筋の引抜き力-抜け出し量の関係を示す。縦軸は主筋の抜け出し力 T 、横軸は梁端の小口面から出した主筋端部のすべり量 δ_{slip} としている。また、図-5 右は、すべり量 1mm までを切り取って描いているが、縦軸は式(1)により計算した付着強度とする。竹主筋は曲げひびわれから外側の部分が引き抜かれるように滑るが、どちらか片側だけが滑っていることがわかる。本論では、図のように主筋の抜け出しが顕著となり強度の低下が見られた点を付着強度とした。

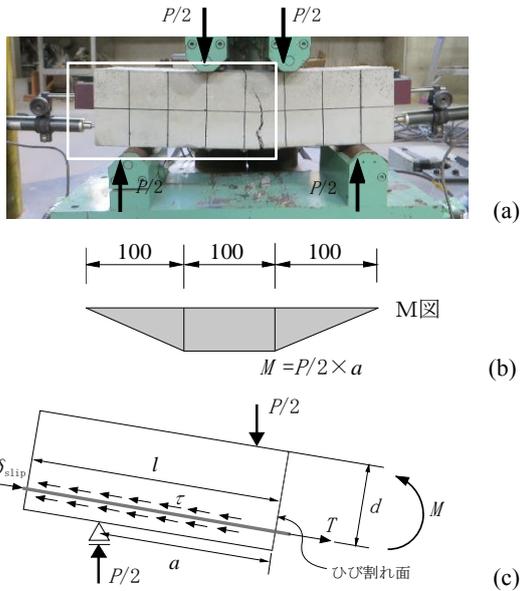
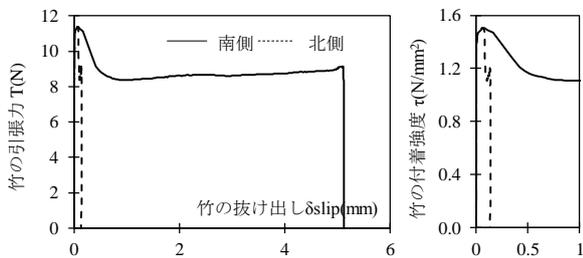


図-4 力のつりあい (c)は(a)の白枠部分



B13_0 Rc(B13・串無し・ゴムコートあり・エポキシ注入なし)の場合

図-5 主筋の抜け出し

(1)コンクリート強度による影響

本実験ではFc13と19の二種類の強度の異なるコンクリートで実験している。図-6にコンクリート強度と付着強度の関係を示しているが、大きな違いは見られない。異形鉄筋の場合、節が周囲のコンクリートを支圧して抵抗するため、コンクリート強度が大きい程大きな抵抗力を発揮すると考えられるが、竹筋は少ない節と竹串がわずかに機械的抵抗を示すのみと考えられるので、コンクリート強度による違いは強く出なかったと考えられる。

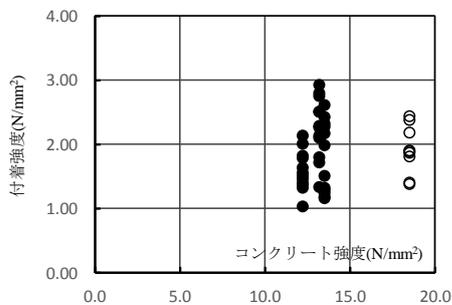


図-6 コンクリート強度と付着強度の関係

(2)竹串の本数による影響

図-7に竹串本数を横軸にとった付着強度の関係を示

す。なお、プロットの点は同一試験体3体の平均値である。竹串本数はピッチを決めて差し込んだので、単位長さ当たりの数値として表した。竹串本数が多い方が付着強度は向上しているが、15mmピッチの場合が極端に大きいわけではない。本実験では竹主筋にドリルで孔を空けて竹串を突き刺すため、あまり串本数が多いと断面欠損が起る。孔が空くと軸方向に縦割れが発生し串による抵抗が弱くなったり、周外に捲れて周辺コンクリートとの付着強度低下を起したりすることが考えられる。そのため、15mmピッチ程度で頭打ちになっているようである。

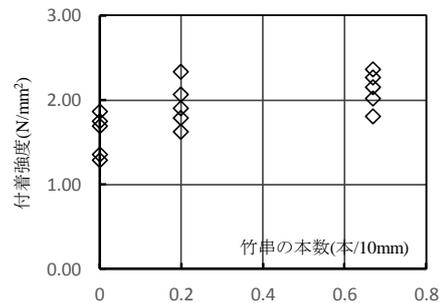


図-7 竹串の本数と付着強度の関係

(3)付着長さによる影響

ひび割れの発生位置によって、付着長さは供試体ごとに異なる。付着強度に違いが見られるかを調べるため、図-8に付着長さと付着強度の関係を示す。白丸は既往の研究⁸⁾で行われた実験結果を示す。この実験は、丸竹の表面に何も加工や処理をせずに行った引き抜き試験であるため、本実験も同じ条件の供試体のみをプロットしている(串加工なし、ゴムコートなし)。既往の研究では、付着長さが長くなると付着強度は低下し、またある程度の長さ以上は付着に寄与しないことが明らかになっている。すなわち、竹の有効定着長さは305mm以上あればよいとされる⁸⁾。この理由として、竹は植物で繊維質であり、摩擦抵抗は繊維方向に強く依存するためであると説明されている。本実験結果からは付着長さによる強い関係は見られないが、強度レベルは既往の研究に近いことが確認できる。

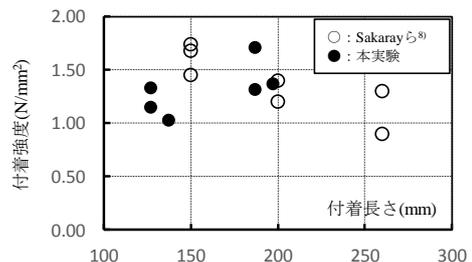


図-8 付着長さと付着強度の関係

(4) ゴムコートとエポキシ樹脂充填の影響

本項(2)で述べたように、竹主筋に穴を空けると縦割れが起りやすくなるので、竹の中空内部にエポキシ樹脂を充填することで縦割れが抑制できるのではないかと考えた。この効果を見るためにエポキシ充填が有るものと無いものを比較する。図-9 に表面のゴムコートの有無も含めパラメータごとの付着強度の違いをまとめた。ゴムコートあり、エポキシ充填ありの方が、それぞれないものに比べて付着強度は向上していることがわかる。特にゴムコートの影響は大きく、竹串本数にかかわらず付着強度 0.5N/mm^2 程度の向上が確認できる。

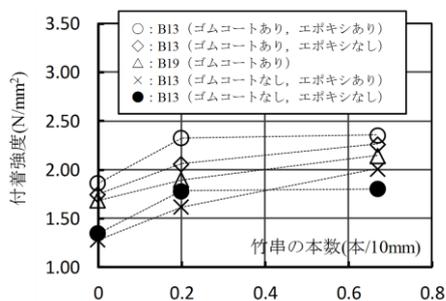
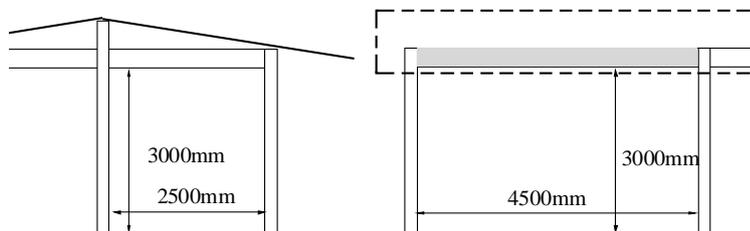


図-9 パラメータごとの付着強度の変化



(a) 立面図



(b) 東南アジアの住宅

図-10 設計対象建物

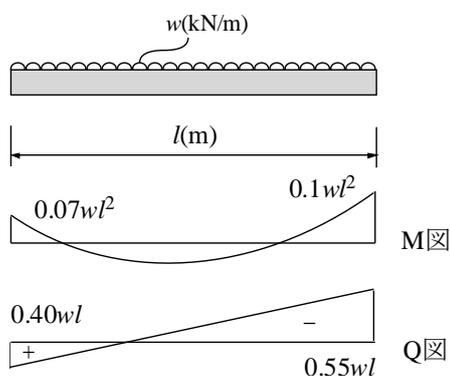


図-11 応力図

3. BRC 部材の設計例

既存の RC 建物を BRC で設計する場合に、どのような寸法、配筋となるのかを検討する。具体的な事例として、図-10 のような東南アジア諸国で広く生産されている住宅建築を考える。平面 $5\text{m} \times 9\text{m}$ 、部屋の高さ 3m で、X,Y 方向それぞれ 2×2 スパンの骨組みである。壁にはブロックを積んでいるが、梁部材の設計を行うにあたり、壁の荷重は梁で受けないとする。切妻屋根の妻面にもブロックが見られるが簡単のために無視をした。また、屋根は写真のように極めて軽量なものと考えられるので小屋組を含め荷重は無視する。したがって、設計対象の大梁に作用する積載荷重は天井を兼ねたコンクリートスラブのみを考え、 50mm 厚のスラブから軽微な下地が吊ってあると仮定した。このような仕様が一般的なものかどうかは確かではないが、仮想の建物による計算を試みる。

この建物の図-10a に網掛けで示す大梁について計算を行った (長さ 4.5m の梁)。地震力などの水平力は考えず、長期荷重のみに対する設計を行う。構造計算を行うために、表-3 に示す条件を設定した。鉄筋は丸鋼 (SR235) とし、かぶり 30mm 、主筋のあき 25mm とする。竹の断面寸法と引張応力度は、表-2 の実験値を使用する。コンクリートは、設計基準強度 $F_c=21.0$ として、引張応力度とせん断応力度は、表-3 中の式で算出した。

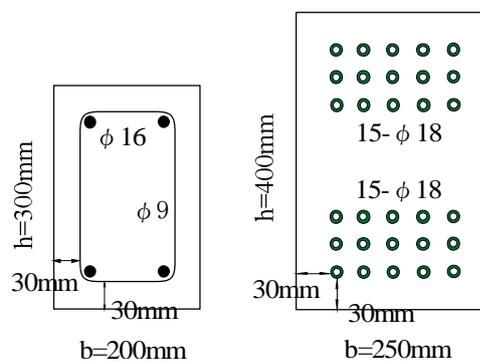


図-12 配筋状況 (左 RC, 右 BRC)

表-3 設計条件

	主筋				あばら筋		コンクリート		
	寸法 (mm)	降伏 応力度 (N/mm ²)	かぶり (mm)	あき (mm)	寸法 ピッチ (mm)	降伏 応力度 (N/mm ²)	圧縮 応力度 (N/mm ²)	引張 応力度 (N/mm ²)	せん断 応力度 (N/mm ²)
RC	φ 16	235	30	25 以上	φ 9 @250	235	21.0	2.57 (=0.56√σ _c)	0.70 (=min(1/30F _c , 0.49+F _c /100))
BRC	外径18.4 内径12.5	125			-	-			

図-11 に計算対象の大梁に作用する鉛直荷重を示す。柱と梁の剛比は全て同じであるとしたとき、内柱側の梁端部で曲げモーメントは $M = 0.1wl^2$ 、せん断力は $Q = 0.55wl$ で最大となった。ここで、 w は単位長さ当りの等分布荷重(kN/m)を、 l はスパン長さ(mm)を表す。なお、梁部材の強度算定は、日本建築学会の『鉄筋コンクリート造計算規準・同解説』に準じて行った¹⁰⁾。

RC 部材で作られた建物に働く荷重を算定する。屋根や壁の重さは考えないので、対象となる大梁に作用する荷重は梁の自重（固定荷重）と天井スラブ+天井仕上げによる積載荷重のみとなる。梁自身の重さは 6.48kN (=24kN/m³×0.2×0.3×4.5)。スラブ厚を 50mm とすると、スラブの重さは 1.2kN/m² (=24kN/m³×0.05m)となり、天井の仕上げは軽微な仕様と考えて 0.2kN/m² とすると、梁が受ける積載荷重は 1.4kN/m² (=1.2+0.2)となる。この大梁が負担する床面積は 4.81m² となり、単位長さ当り等分布荷重 2.94kN/m (= (6.48+1.4×4.81)/4.5)がかかる。

3.1 BRC 部材の曲げ設計

梁端部の曲げモーメントは 5.96kNm (=0.1×2.94×4.5×4.5)となる。図-12 で仮定した断面に対して主筋降伏時の最大曲げモーメントを計算すると式(3)で計算されるように 13.8kNm となり、十分な曲げ耐力を有しており長期荷重に対しては安全である。

$$M = a_t f_t j \quad (3)$$

$$= (201 \times 2) \times 155 \times (7/8 \times 253) = 13.8 \text{ kNm}$$

$$d = 300 - 30 - 9 - 16/2 = 253 \text{ mm}$$

この梁を BRC とした場合の計算を行う。BRC は、ひび割れが発生するとたわみが大きくなり不安定な挙動となるため、梁が受ける荷重に対してひび割れないよう設計しなければならない⁴⁾。RC 梁が抵抗できる最大曲げモーメントに対して、ひび割れないように設計するためには、断面係数 Z が $5.4 \times 10^6 \text{ mm}^3$ 以上必要となり、これを満足する断面寸法を $250 \times 400 \text{ mm}$ とした (図-12)。

$$\sigma_t = 13.8 \text{ kNm} / Z < 2.57 \text{ N/mm}^2 \text{ より、} Z > 5.4 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

この断面に対して、竹の引張主筋量を 2.0%以上で配筋すると、2章の実験で使用した φ18 の竹 (1本当たりの

断面積 144mm²) が片側 13.9 本以上必要となるが、図-12 に示すように片側 15 本で配筋することとした。

$$250 \times 400 \times 0.02 = 2000 \text{ mm}^2 \rightarrow 2000/144 = 13.9 \text{ 本}$$

3.2 BRC 部材のせん断設計

RC 梁に作用する最大せん断力は 7.28kN (=0.55×2.94×4.5)と計算される。図-12 で仮定した断面に対する最大せん断力は式(4)により 32.8kN となり、この梁は十分なせん断力を有していることが確認できる。

$$Q = bj\{\alpha f_s + 0.5f_t(p_w - 0.002)\} \quad (4)$$

$$= 200 \times (7/8 \times 253) \times \{1 \times 0.70 + 0.5 \times 155(0.00314 - 0.002)\} = 32.8 \text{ kN}$$

$$p_w = (2 \times 78.5) / (200 \times 250) = 0.00314$$

$$\alpha = 4 / (M / Qd + 1) = 0.95, \alpha \geq 1 \text{ より } 1.0$$

式(4)の第一項がコンクリートの負担分であり、BRC 梁のせん断ひび割れ荷重 Q_{cr} を計算すると 54.5kN となり、せん断ひび割れの心配はない。このため、BRC ではせん断補強筋は必要としない。

$$Q_{cr} = 250 \times (7/8 \times 318) \times 1.12 \times 0.70 = 54.5 \text{ kN}$$

$$d = 400 - 30 - 18 - 25 - 18/2 = 318 \text{ mm}$$

$$\alpha = 4 / (M / Qd + 1) = 1.12$$

3.3 竹主筋の定着の検討

BRC 梁にひび割れが発生した後、引張力が引張主筋に配分されたときに、竹主筋は破断するまで接合部内に十分定着されている必要がある。一般に接合部内への定着は折り曲げフックとされるが、竹は曲げ加工が難しく、特に丸竹の場合は直線定着にする必要がある。

ひび割れが発生したときに、竹主筋が負担する荷重を計算すると、一本あたり 3.98kN (総引張力 $T=59.8 \text{ kN}$ を 15 本で負担) となる。

$$M = (250 \times 400^2) / 6 \times 2.57 \times 10^{-6} = 17.1 \text{ kNm}$$

$$T = (17.1 \times 10^3) / (0.9 \times 318) = 59.8 \text{ kN}$$

竹筋の接合部内への定着長さ l を 200mm としたときに必要な付着強度は、 0.34 N/mm^2 (=3.98×1000/(57.9×200)) となり、2章の結果から竹筋表面に加工や処理をしなくても十分定着できることが確認できた。また、竹主筋が破断するまで定着を図るためには、定着長さが 200mm

であるときに必要な付着力は $1.55\text{N}/\text{mm}^2$ ($=125 \times 144 / (57.9 \times 200)$)となるが、本稿の実験で確認した串加工やゴムコートを施すことによりこの程度の付着力は十分に実現可能と考えられる。安全を考えるのであれば、定着長さを 300mm 程度に長くすれば、付着強度は $1.04\text{N}/\text{mm}^2$ 程度まで低減可能である。

以上の検討より、計算対象とした大梁を BRC で設計すると、図-13 のようになる。

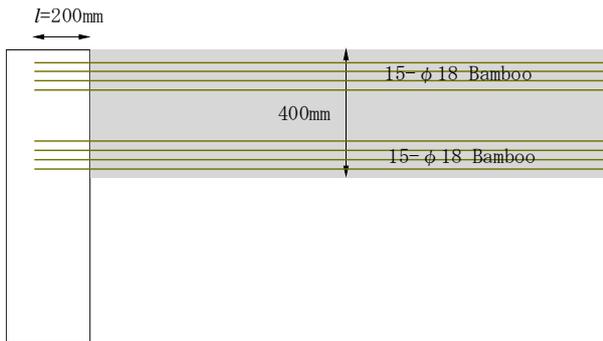


図-13 BRC 梁端部のディテール

4. まとめ

竹筋コンクリートを実現するためには、竹とコンクリートの付着力が低い問題を解決しなければならない。本論では、竹とコンクリートとの付着力向上に寄与する要因を整理するために、幾つかの梁型供試体を作製し付着実験を行った。実験パラメータは、1) 竹串ピッチ (串なし、ピッチ 15mm と 50mm)、2) ゴムコートの有無、3) エポキシ充填の有無、そして 4) コンクリート強度 (F_c13 , 19) である。また、竹筋コンクリートの具体的な建物を想定した配筋設計を行い、竹主筋端部の定着部における定着性状について、実験で検討した付着強度との関係性についても検証を行った。

はじめに、付着実験から明らかとなった点を以下にまとめる。

- 1) コンクリート強度の影響: 竹筋は少ない節と竹串がわずかに機械的抵抗を示すのみと考えられるので、コンクリート強度による違いは強く出ないと考えられる。
- 2) 串本数の影響: 竹串本数が多い方が付着強度は向上するが、串による効果は 15mm ピッチ程度が頭打ちとなる。
- 3) 付着長さの影響: 既往の研究では、付着長さが長くなると付着強度は低下し、またある程度の長さ以上は付着に寄与しないことが明らかになっているが、本実験の範囲では付着長さによる強い関係は見られなかった。
- 4) ゴムコートとエポキシ充填の影響: ゴムコートあり、

エポキシ充填ありの方が、それぞれないものに比べて付着強度は向上した。特にゴムコートの影響は大きく、竹串本数にかかわらず付着強度 $0.5\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の向上が確認できた。

次に、竹筋コンクリート梁部材の構造計算を行った。平面 $5\text{m} \times 9\text{m}$ 、高さ 3m 、 2×2 スパンラーメンの住宅を計算対象とし、このうち大梁を竹筋コンクリートとする場合の断面計算を行った。計算の結果、寸法 $250\text{mm} \times 400\text{mm}$ 、引張主筋は $\phi 18\text{mm}$ の竹が 15 本程度必要となる断面となったが、曲げ耐力、せん断耐力および主筋端部定着の確認において問題ないことが確認された。

なお、梁部材のたわみ、あばら筋が無い場合の施工性、経済性、短期荷重時の性状など、実施設計に向けては様々な問題が残されている。

参考文献

- 1) Hector F Archila, et al.: Bamboo reinforced concrete: a critical review, *Materials and Structures*, Vol.51 (4), August 2018
- 2) 細田貫一: 竹筋コンクリート工, 修教社書院, 1942.2
- 3) Sri murni Dewi, Devi Nuralinah: The Recent Research on Bamboo Reinforced Concrete, Article (PDF Available) in MATEC Web of Conferences 103:02001, January 2017
- 4) Chow H.K: Bamboo as a material for reinforcing concrete, Thesis (B.S.) Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Naval Architecture and Marine Engineering, 1914
- 5) Ghavami K: Ultimate load behaviour of bamboo reinforced lightweight concrete beams. *Cement & Concrete Composites*, vol.17 (4), pp.281–288, 1995
- 6) Muhtar, et al.: The stiffness and cracked pattern of bamboo reinforced concrete beams using a hose clamp, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, Vol.9 (8), pp.273-284, August 2018
- 7) 寺井雅和: 竹とコンクリートの付着性状に関する実験的研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.39, pp.499-504, 2017.7
- 8) Sakaray H, et al.: Investigation on Properties of Bamboo as Reinforcing Material in Concrete, *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, Vol.2(1), pp.77–83, Jan./Feb. 2012
- 9) Ghavami K: Bamboo as reinforcement in structural concrete elements, *Cement & Concrete Composites*, vol.27, pp.637–649, 2005
- 10) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造計算規準・同解説 2010, 2010.2