

(11) 竹筋コンクリートの機械式定着に関する 実験的研究

寺井 雅和

正会員 近畿大学准教授 工学部建築学科 (〒739-2116 広島県東広島市高屋うめの辺一番)

E-mail:terai@hiro.kindai.ac.jp

発展途上国では、鉄筋などの鋼材は高価な材料であるため、建設コスト面からその利用は制限されている。また、鋼材の生産には、化石燃料が使用されるため、地球温暖化防止が課題となっているなか、大量使用が問題視されている。そこで、コンクリート構造物における補強筋としての鉄筋の代用品として、竹筋の利用が注目されている。海外では、竹筋コンクリートの研究が活発に行われており、施行事例も数多く残されている。しかしながら、竹筋コンクリート構造を実際に施工して実用的なものとして使用するためには、竹とコンクリートとの複合材料としての性状、すなわち付着性状や継手・仕口など接合部の詳細設計について検証が必要である。

竹主筋は折り曲げたり溶接することが出来ないため、端部定着を図る方法として機械式定着が考えられる。本研究は、この機械式定着の性能を評価するために、要素試験体による引き抜き試験を行った。定着部の仕様は、主筋の太さ3種類に対して、こぶ形状や材質を変えた3タイプを提案した。鉄筋のフック定着と比較すると、竹筋の機械式定着の変形性能は良くないが、定着を設けるとある程度の引き抜き抵抗があり、耐力の向上が見られた。また、その引抜き耐力は、竹筋表面の付着力とこぶの接着力の累加として、定量的に評価できることが確認できた。

Key Words : bamboo, mechanical anchorage, pull-out test, bond, bamboo reinforced concrete

1. はじめに

(1) 研究背景

鉄筋コンクリート構造物の補強材には、鋼材が使用されている。しかし、鋼材の価格高騰、製造時の二酸化炭素排出による環境問題が懸念されている中、近い将来、鋼材の使用が制限されていることも考えられ、鋼材に代わる材料を用いた「ものづくり」が期待される。

竹は、東南アジアを中心に世界各地に600種、日本でも約150種が生育している。さらに、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生育するので、入手や加工が容易であり、かつ軽量なので運搬コストが低く、建設分野に竹材を積極的に活用することで、建築物の製造コストを低く抑えることが可能になる。また、竹筋の引張強度は、鉄筋の約1/2程度であり、中には同等の強さを示す竹もあることから、鉄筋の代用品として利用され、いわゆる「竹筋コンクリート構造」が建設されている地域が世界にはある。日本でも戦時中から終戦直後まで全国各地でつくられていたが、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。その一方、海外では現在でも竹筋コンクリートは施工されている地域があり、そのため研究も行われている。

鋼材価格の高騰・変動や、鋼材の入手が困難な地域、環境問題などを背景として、現代において竹筋コンクリート構造物を実現化するために、筆者らは竹筋コンクリート梁・柱・面部材の力学性状、竹とコンクリートの付着性状などの実験を行い、鉄筋コンクリート構造との違いや竹筋コンクリート構造における力学的特徴、施工上の問題、さらにはコスト面での検証まで行ってきた^{1,2)}。

竹筋は、ふしがあるが表面が滑らかなので、コンクリートとの付着はほとんどない。その付着応力は、丸鋼よりやや大きい0.4~0.6N/mm²程度であることを既往の実験で確認している²⁾。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、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。そのため、鉄筋コンクリート部材の中で補強筋として能力を発揮するためには、竹筋端部に定着を設ける必要がある。

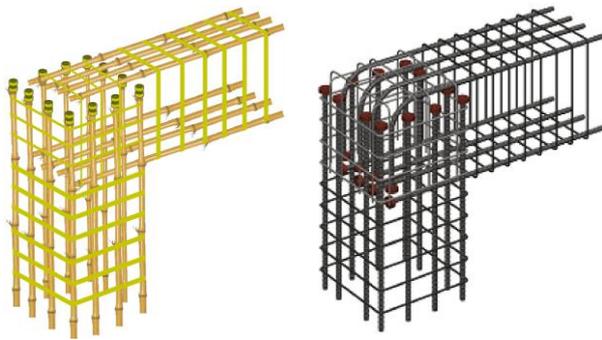


図-1 竹主筋の機械的定着のイメージ図 (右は鉄筋の接合部)



写真-1 過年度開発した定着部 (Type A)



写真-2 新たに開発した定着部 (左からType B, Type C(竹棒), Type C(鉄筋))

(2) 研究目的

鉄筋は、折り曲げ加工や溶接が可能のため、鉄筋端部にフックを設けることができる。しかし、竹筋は、加熱で容易に曲げることができるが、所定の精度で曲げるには高度で熟練の技能が必要となり、大量生産で低コストな建設技術には向いていない。そこで、鉄筋ではすでに開発されている機械式定着を、竹筋にも応用する(図-1)。

本研究では、竹材をコンクリート構造物の主筋として用いる際に必要な定着部の開発を目的として、形状の模索と要素実験により定着性能について確認を行った。

2. 引き抜き試験

(1) 概要

竹の定着部を考えたとき、中空の竹において丸竹のままの折り曲げは難しく、また竹は熱加工ができるが、高度で熟練した技術が必要であるため、フック加工は困難である。そこで、機械式定着として何らかの方法で‘こぶ’を取り付ける方法を考える。

過年度、写真-1のように一回り大きな竹を輪切りにし、それを強力な接着剤で取り付けるという方法でこぶを付けた定着筋を開発し実験を試みた³⁾。この実験では、定着させたコンクリートブロックの寸法が小さかったため、多くの試験体でコンクリートが割れてしまい、定着耐力を十分に検証することができなかった。そこで、今年度の試験体では、コンクリート塊の大きさを大きく、また、容易に割れないようコンクリート強度を高くして追加実

験を行った。

定着部の形状として、写真-2に示すような2種類(Type BとC)を新たに提案し、過年度行った実験結果と対比をしながら、合計3種類の定着部の施工性や性能について確認する。試験に用いた定着部の形状寸法を図-2および表-1に示す。

(2) 供試体

試験体形状は、一辺の150mm立方体(ただし、過年度の試験体³⁾は100mm立方)のコンクリート塊の中心に機械式定着加工した竹を一本埋め込み、引き抜く試験体とした。通常、このような試験では、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ある程度付着を切ることが多い。しかし、竹は表面が滑らかで付着力が期待できないため、このたびの試験体では縁切りの処理は施していない。

表-2に試験体一覧を、図-2に試験体図を示す。過年度行った仕様(一回り太い径の竹を、竹軸に接着剤で取り付ける)をType Aとして、今年度の実験では、Type BとCの二種類を検討する。Type Bは、外径33mmの塩化ビニール管を長さ20mmと40mmに切断し、これを3種類の太さの竹筋にかぶせて、Type Aと同じ接着剤で取り付ける。Type Cは、竹筋の端部にドリルで穴を開け、竹軸(径3.1mm)または鉄筋(径3.2mm)を数本差し込んだ。実験要因は、差し込む棒の種類(竹と鉄)と本数(1, 2, 3本)、そして竹筋の太さ(2種類)である。今年度は、新たに18体を制作・実験し、過年度行った180°フックをつけた鉄筋1体とType Aの2体を含め、合計21体の実験結果で比較検討した。

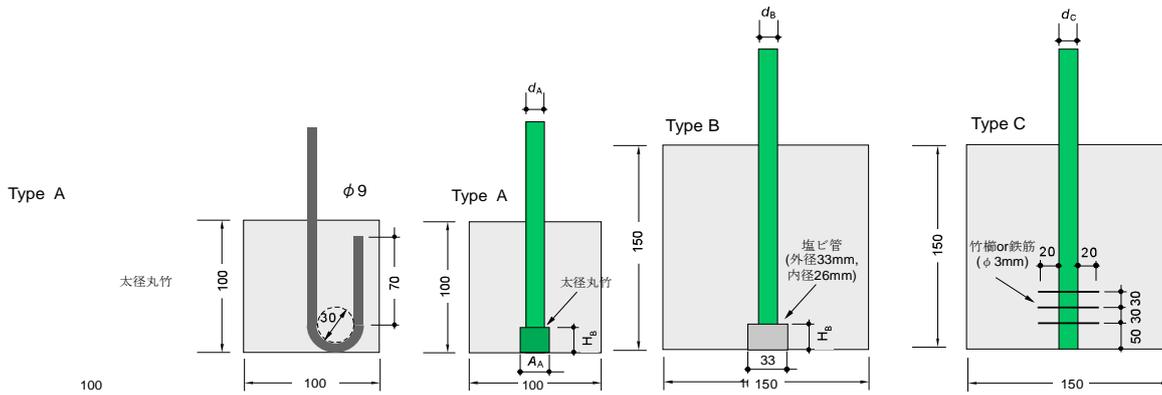


図-2 試験体詳細 (単位 ; mm)

表-1 定着部の寸法

種類	各部の詳細および実測寸法	
鉄筋*	φ 9mm ($\sigma_y=424\text{N/mm}^2$), 180° フック	
Type A*	中径の丸竹 ($d_A=14.9\text{mm}$) 丸竹をかぶせ, 隙間に接着剤を充填 ($A_A=19.7\text{mm}$, $H_A=10, 20\text{mm}$)	
Type B	3種類の径の丸竹 ($d_B=11.1\text{(S)}, 16.1\text{(M)}, 23.5\text{(L)}\text{mm}$) 塩ビ管 (外径33mm)をかぶせ, 隙間に接着剤を充填 ($H_B=20, 40\text{mm}$)	
Type C	2種類の径の丸竹 ($d_C=14.9\text{(S)}, 29.0\text{(L)}\text{mm}$)	竹櫛 ($\phi 3.1\text{mm}$)を1~3本差し込む
	2種類の径の丸竹 ($d_C=14.8\text{(S)}, 27.2\text{(L)}\text{mm}$)	鉄筋 ($\phi 3.2\text{mm}$)を1~3本差し込む

*過年度試験体³⁾

表-2 試験体一覧

試験体名称	材料	太さ	こぶ長さ	接着剤	試験体名称	材料	櫛の材質	櫛の数
AS*	鉄筋	φ 9	なし	なし	C-S-B 1	細 φ 18	竹櫛	1
A0*	竹筋	φ 18	10mm	2液混合	C-S-S 1		鉄筋	
A10*			20mm		C-S-B2		竹櫛	
A20*		20mm	C-S-S2		鉄筋			
B-S20		φ 18	40mm		C-S-B3	竹櫛		
B-S40		中 φ 22	20mm		C-S-S3	鉄筋		
B-M20			40mm		C-L-B 1	竹櫛		
B-M40		太 φ 25	20mm		C-L-S 1	鉄筋		
B-L20			40mm		C-L-B2	竹櫛		
B-L40			40mm		C-L-S2	鉄筋		
						C-L-B3	竹櫛	
				C-L-S3	鉄筋	3		

*過年度試験体³⁾

表-3 コンクリートの材料特性

材料	使用試験体	種類	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)
コンクリート	TypeA	Fc5	3.1	-
	TypeB	Fc5	6.4	-
	TypeC	Fc18	23.1	-
鉄筋	鉄筋主筋	φ 9	-	424
竹	竹主筋	本竹	-	180

(3) 使用材料

a) 竹

本実験で使用した竹は, 本竹という名前で販売されて

いる竹を入手した. 恐らく真竹 (マチク) の若竹を伐採して乾燥させたものと思われるが, 産地など詳細は不明である. 本実験では, 外径約11, 16, 23mm (実測値の平均として) の3種類の太さの竹を丸竹のまま使用している.

竹は, 自然素材であるため材料としての性質はばらつきがある. また, 節は強度が低く, 節間強度 (節を含まない部分の強度) に比べて弱いことが知られている. 本試験で使用した竹も, 上記のように産地や伐採時期が不明なので, 強度特性は均質とは言えないが, 実際に数本の竹材を実験室で引張試験を行った結果, 180N/mm^2 (表-3) であった.

b) コンクリート

硬化コンクリートの載荷試験時の圧縮強度を表-3に示す. 竹筋コンクリートは, 比較的材料品質の悪い構造物での活用が期待されているために, コンクリート品質が良く, 強度が高いものは想定していない. また, 竹とこぶの接着力が低いので, コンクリート強度があまり高いとこぶが破壊してしまう恐れがあったので, 本研究ではFc5程度の低強度コンクリートで実験した. ただし, 本章の「(1)概要」で述べた通り, コンクリートの破壊が起こらないように, Type Cの試験体だけはFc18で製作した.

コンクリートは, 最大骨材寸法20mm, 打設時のスランプは18cm, 空気量4.0%で設計した. 供試体の打設方向は, すべて上面より行った.

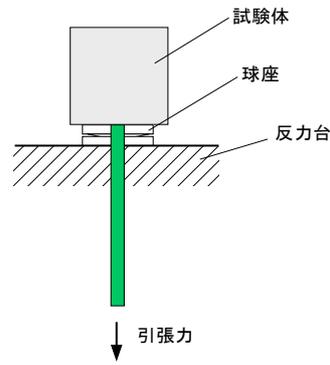


図-3 荷重方法



写真-3 実験装置

表-4 引抜き耐力の計算値と実験結果の比較

Type	試験体名	軸径 ϕ	軸部の 付着力 P_{bond1}	こぶの 接着力 P_{bond2}	ダボ抵抗 P_{dowel}	合計 P_{cal}	実験値 P_{exp}	$\frac{P_{cal}}{P_{exp}}$
A	A10	14.9	2.78	0.20	-	2.98	3.66	0.81
	A20	14.9	2.47	0.40	-	2.87	2.91	0.99
B	B-S20	11.1	2.99	0.30	-	3.29	2.77	1.19
	B-S40	11.1	2.53	0.60	-	3.13	1.58	1.98
	B-M20	16.1	4.34	0.43	-	4.77	2.56	1.86
	B-M40	16.1	3.67	0.87	-	4.54	2.55	1.78
	B-L20	23.5	6.33	0.63	-	6.97	7.52	0.93
	B-L40	23.5	5.36	1.27	-	6.63	4.88	1.36
C	C-S-B1	15.4	4.79	-	0.86	5.65	3.10	1.82
	C-S-B2	14.6	4.54	-	1.73	6.27	3.45	1.82
	C-S-B3	14.7	4.57	-	2.59	7.16	4.10	1.75
	C-L-B1	29.7	9.23	-	0.86	10.10	3.39	2.98
	C-L-B2	28.6	8.89	-	1.73	10.62	1.80	5.90
	C-L-B3	28.6	8.89	-	2.59	11.49	4.45	2.58
	C-S-S1	15.6	4.85	-	1.54	6.39	11.21	0.57
	C-S-S2	14.1	4.38	-	3.07	7.46	4.94	1.51
	C-S-S3	14.6	4.54	-	4.61	9.15	2.40	3.81
	C-L-S1	28.1	8.74	-	1.54	10.27	13.22	0.78
	C-L-S2	28.4	8.83	-	3.07	11.90	7.09	1.68
	C-L-S3	25.0	7.77	-	4.61	12.38	5.49	2.25

※竹主筋の軸径 ϕ は実測値

(4) 加力・計測方法

荷重方法と実験装置を、図-3と写真-3にそれぞれ示す。試験体は、コンクリート打ち込み方向と上下逆さまに試験機上部ブロックの上に設置し、下部ブロックで竹の端部をつかみ、引張り力を与えて単調荷重を行った。なお、上部ブロックと試験体の間には球座を設けて、試験体に曲げ荷重が発生しないようにしている。主筋の抜け出し量は、ブロック間の相対変位として2本の変位計によって測定した。

3. 引き抜き試験

(1) 定着耐力試験

定着耐力試験における試験結果を図-4、-5に示す。これらの図の縦軸は、コンクリート強度が試験体グループ毎に異なるので、次式によってコンクリート強度の影響

を補正している。

$$T = P_{exp} / \sqrt{\sigma_B} \quad (1)$$

ここに、 P_{exp} ：実験で計測した引き抜き荷重値 (kN)， σ_B ：コンクリート強度 (N/mm²)。

試験体の破壊形式は、いずれの試験体もコンクリートにひび割れはなく、竹筋が抜け出るように破壊をした。なお、C-S-S2、C-S-S3の2体は試験途中で竹筋が破断したため、最大耐力を計測できていない。

180°フックとした鉄筋の荷重-変形関係を見ると、変形量1mmで引抜き荷重T=2、変形量2mmで荷重T=3となっている。これに対して、竹筋の場合、Type AもType Bも変形1mm程度で荷重T=0.5~1程度と、剛性が1/4~1/2程度であることがわかる。丸竹をこぶに取りつけたType Aは、変形量4mm程度で最大耐力を迎えるのに対し、塩ビ管をこぶに取りつけたType Bでは、変形量1mm程度で最大耐力となる。ただし、Type Bでは、最大耐力を迎え

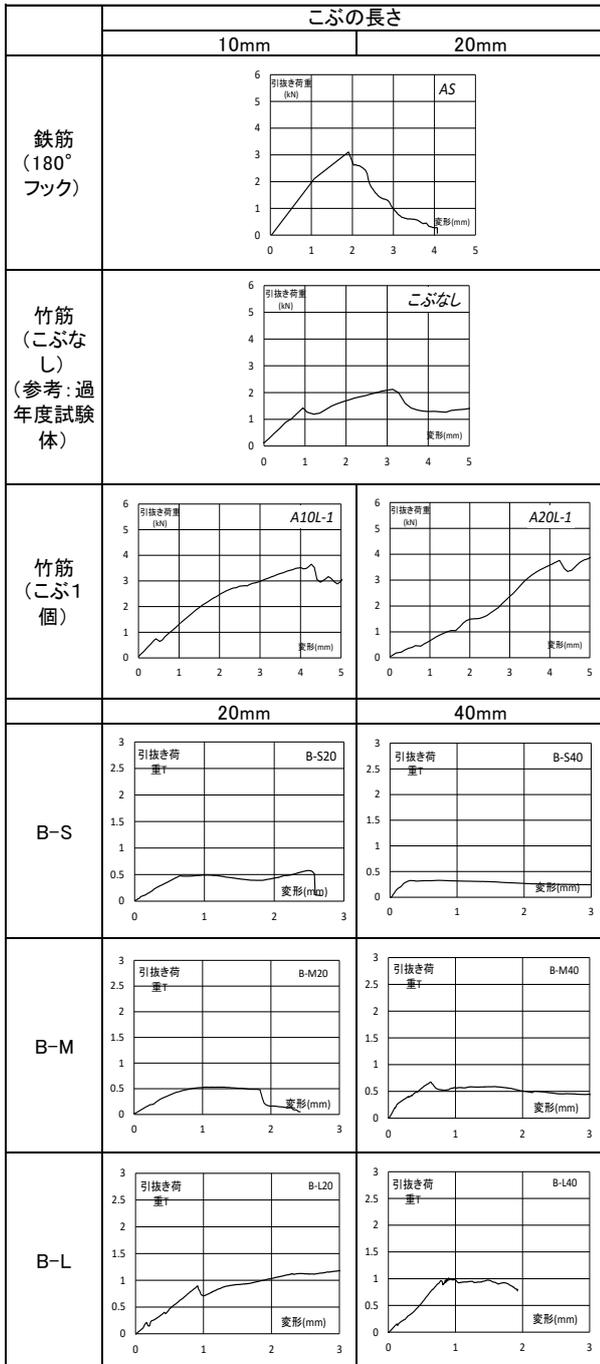


図-4 荷重 - 変形関係 (Type A, B)

でも、急激に力が抜けるわけではなく、力を保持するか、緩やかに低下しているのがわかる。これは、竹には節があり、断面直径が一定ではないため、表面付着力によりある程度の抵抗が見られていると考えられる。

次に、竹棒や鉄筋で榫状の定着を設けたType Cであるが、やはり変形量1mmでT=0.5~1程度の耐力となり、剛性はType A, Bの竹筋と同程度であった。最大耐力後の変形は、竹筋の太さと榫の材料(竹棒か鉄筋)で、違いが見られた。細径の竹筋+竹棒のC-S-Bシリーズは、Type A, Bとほぼ同じ推移が見られる。太径の竹筋+竹棒のC-L-Bシリーズは、変形量3mmを超えても、荷重が上がり

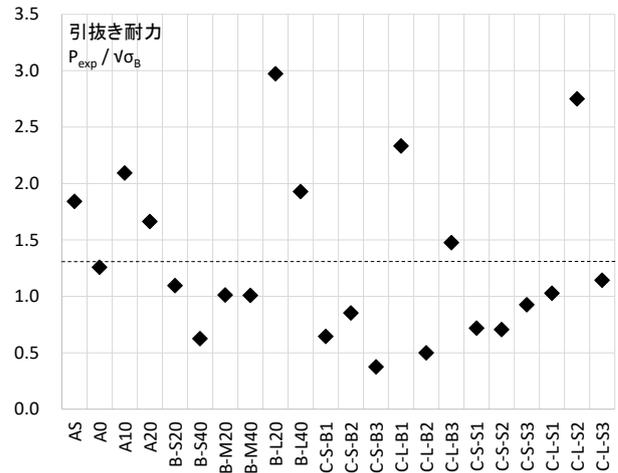


図-6 引抜き耐力一覧 (式(1)による補正值)

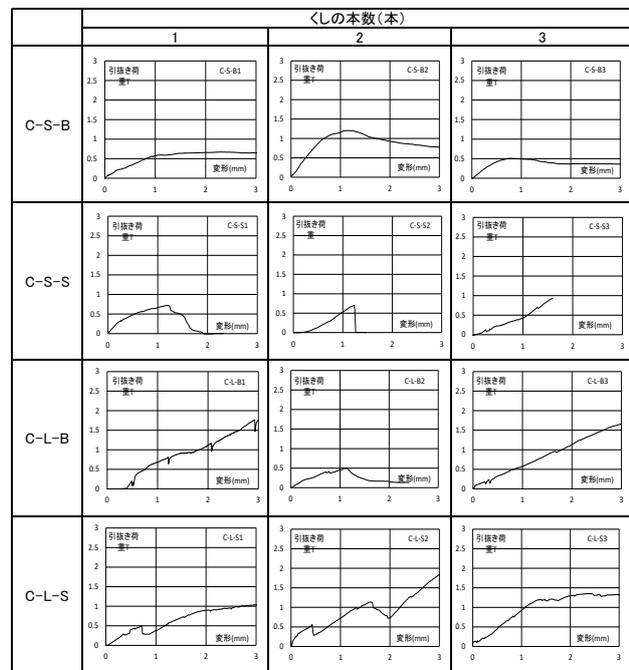


図-5 荷重 - 変形関係 (Type C)

続けた(1体は1mmで、1体は3mmで荷重が急落)。細径の竹筋+鉄筋のC-S-Sシリーズは、変形量1~1.5mmで荷重が急落する。太径の竹筋+鉄筋のC-L-Sシリーズは、変形量2mm程度まで荷重が落ちなかった。

以上の結果から、全般的に定性的な傾向は見られなかったが、竹筋定着は変形量1mmで荷重T=0.5~1.0程度の剛性があることが確認できた。

(2) 定着形状の比較

実験で得られた最大耐力値を表-4、および図-6に示す。図-4、-5と同様、式(1)でコンクリート強度による違いの

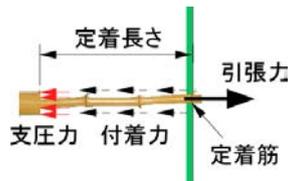
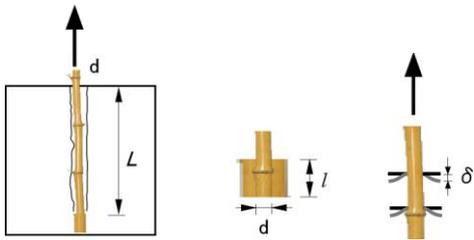


図-7 機械式定着部の抵抗機構



Type A, Bの場合 Type Cの場合

図-8 引抜き抵抗機構

影響を補正している。Type A～Cの竹筋の平均値は1.29となり、鉄筋の強さ1.84の70%程度であった。なお、鉄筋試験体は、周囲のコンクリート強度が低く(3.1N/mm²)、コンクリートが割れてしまったので、実際にはもっと高い定着耐力が得られていたと考えられる。

本章の(I)でも検証したように、竹の断面形状・寸法がそれぞれの試験体で異なることや、試験体内部での破壊状況が未確認なので、最大耐力の原因については、今後、特定する計画である。

(3) 定着部の抵抗機構

機械式定着工法による定着耐力には、図-7に示すように、付着力と支圧力が寄与する⁴⁾。付着力は、仕口面から定着部内面までの距離(付着長さ)に支配され、支圧力は、支圧面積および仕口から定着板内面までの距離(定着長さ)にそれぞれ支配される。

本実験の最大耐力を、この抵抗機構で評価する。前記の通り、コンクリートのコーン破壊は見られないことから、最大耐力を決定しているのは、定着部の破壊によるものと考えられる。Type AとBでは、定着こぶを取り付けている接着剤が剥がれ、竹主筋がコンクリートから徐々に抜け出すことで、引き抜き抵抗が徐々に低下していく。すなわち、定着長さ部分の付着力が最大値となり、さらに定着こぶの接着力が最大値となったときに、この竹筋定着は最大耐力を迎えることとなる。一方、Type Cの場合、定着こぶがないため、支圧力の代わりに櫛のように突き出た竹棒、あるいは鉄筋によるダボ抵抗を考える。

以上から、竹筋定着の最大耐力は、付着力による最大強度と定着部の接着強度(Type Cはダボ強度)の累加として計算する。付着力による最大強度 P_{bond1} は、既往の実験から得た竹筋とコンクリートの最大付着応力度0.66

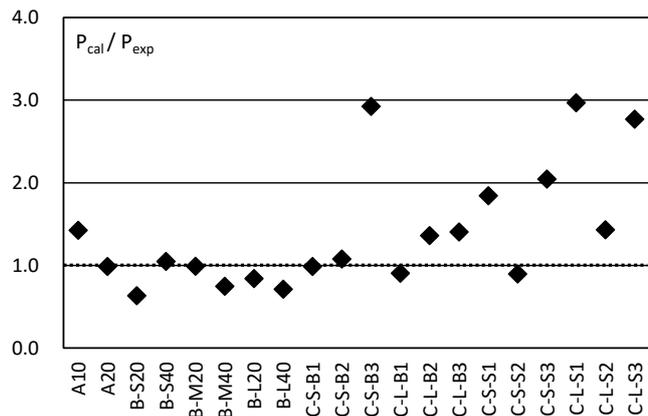


図-9 計算値に対する実験値の比率 (P_{cal}/P_{exp}) 一覧

を使って、式(2)で計算する。また、定着こぶの接着強度 P_{bond2} は、同じく竹と接着材の付着応力度0.43により、式(3)で計算する。Type Cの竹棒や鉄筋のダボ耐力は、式(4)により計算する。

$$P_{bond1} = \tau_{bond1} \cdot \pi \cdot D \cdot L \quad (2)$$

$$P_{bond2} = \tau_{bond2} \cdot \pi \cdot D \cdot l \quad (3)$$

$$P_{dowel} = 0.25 \cdot d^2 \cdot \sigma_f \quad (4)$$

ここに、 L, l : 竹筋の付着長さ (図-8, mm) , D, d : 鉄筋または竹筋の径 (mm) , τ_{bond1} : 竹筋とコンクリートの付着応力度 (既往の研究²⁾より0.66とする。), τ_{bond2} : 竹筋と接着剤の付着応力度 (既往の研究³⁾より0.43とする。), σ_f : 竹筋櫛または鉄筋櫛の降伏強度 (竹; 180N/mm², 鉄; 300N/mm²とする)。

表-4に、式(2)～(4)で計算した耐力値、それぞれを累加した計算耐力 P_{cal} 、実験で得られた引き抜き最大耐力 P_{exp} をまとめる。また、図-9に、計算値に対する実験値の比率 (P_{cal}/P_{exp}) を示す。

多くの試験体で P_{cal}/P_{exp} の値は1.0に近く、おおよそ実験結果を評価できると考えられるが、Type Cの多くは計算値が高くなり、実験結果を十分に評価しているとは言えない。これは、実験では想定している抵抗機構より早くに破壊しているとも言える。例えば、竹櫛や鉄筋が櫛の本数分だけ同時にダボ抵抗しているわけではなく、周辺のコンクリートを割り割きながら折れ曲がったり、あるいはダボが差さっている竹主筋の穴を支圧することで、竹が割裂けていることなどが考えられる。このことについては、今後、試験後の試験体を研って、竹主筋の損傷状態を確認することにしていく。

4. おわりに

鉄筋コンクリート構造において、鉄筋は折り曲げ加工が可能のため、端部にフックを設けて定着を図ることができる。しかし、竹材は、加熱で容易に曲げることが難しいため、定着を設けることが難しい。本研究では、竹材をコンクリート構造物の主筋として用いる際に必要な機械式定着部の開発を目的として、形状の模索と要素実験により定着性能について確認を行った。

本論では、竹筋端部の機械式定着の性能を評価するために、要素試験体による引き抜き試験を行った。定着部の仕様は、主筋の太さ3種類に対して、こぶ形状や材質を変えた3タイプを提案した。鉄筋のフック定着と比較すると、剛性は1/4~1/2程度であるが、ある程度の引き抜き抵抗があり、耐力の向上が見られた。また、その引抜き耐力は、竹筋表面の付着力とこぶの接着力の累加として、定量的に評価できることが確認できた。

謝辞：試験体製作・実験実施にあたり、近畿大学工学部建築生産研究室の詫摩哲史君をはじめ、卒論生の多大なご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 寺井雅和, 長尾恭介, 南宏一: 竹とコンクリートの付着性状に関する実験的研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第35巻, pp.253-256, 2012.03
- 3) 寺井雅和: 竹筋定着の性能評価に関する実験的研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第38巻, pp.253-256, 2015.03
- 4) 益尾潔, 窪田敏行: 技術報告 機械式鉄筋定着工法設計指針の概要, GBRC, Vol.31, No.2, pp.17-28, 2006.4

EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANICAL ANCHORAGE OF BAMBOO REINFORCED CONCRETE

Masakazu TERAJ

Recently, in the attention in response to global warming issues and sustainable society, the manufacturing using natural materials has become actively. Bamboo, low cost, fast growing, and broad distribution of growth, is expected to contribute significantly to earthquake-resistant construction and seismic retrofit technology in developing countries. The authors also have been studied for understanding the mechanical behavior of bamboo reinforced concrete members and clarifying the differences of structural properties from steel reinforced concrete and bamboo reinforced concrete. A study of the feasibility of using bamboo and non-steel as the reinforcing material in concrete members was conducted in our laboratory.

For the anchorage of bamboo reinforced concrete structures, it is difficult to attach plates or hooks to the ends of bamboo reinforcements. The mechanical anchorages of steel reinforcement bars are tried to use in some construction systems. In this study, twenty one pull-out tests carried out to investigate the load carrying capacity of bamboo reinforcement with mechanical anchorage. The load carrying capacity of bamboo reinforcement are discussed by comparing with the steel reinforcement with 180-deg. hook. In comparison with the steel reinforcement with 180-deg. hook, the deformation performance of bamboo reinforcement with mechanical anchorages is not good, but the load carrying capacity of bamboo reinforcement is improved by use of anchorages. The equation to predict the pull-out load carrying capacity of mechanical anchorage is proposed as the sum of bond and adhesive force. The predicted capacity agree with the experimental one which were obtained in this experimental study.