

阿蘇神社楼門におけるアラミドロッドを用いた柱継手の性能試験

- 種別：材料試験 [木材・煉瓦・鉄・コンクリート・その他]、重量測定、要素試験 [接合部・軸組・壁・水平構面 (床・天井・小屋組・屋根)・非構造部材・その他]、補強性能試験、接合部・軸組・壁・水平構面 (床・天井・小屋組・屋根)・非構造部材・その他]

●基本情報

文化財名称：阿蘇神社楼門

文化財種別（指定年月日）：重要文化財（平成 19 年 6 月 18 日）

所在地：熊本県阿蘇市一の宮町宮地

所有者（管理団体）：宗教法人阿蘇神社

構造形式：三間一戸二階二十間、入母屋造、正面千鳥破風付、軒唐破風付向拝三間、銅板葺

建築年：江戸末期（1850 年頃）

事業名称：重要文化財阿蘇神社一の神殿ほか 5 棟保存修理工事（災害復旧）

事業期間：平成 28 年 7 月～令和 6 年 3 月（予定）

工事種別：解体修理（災害復旧）

事業者：阿蘇神社

設計監理：（公財）文化財建造物保存技術協会

実験計画者：（有）安芸構造計画事務所

実験機関：熊本県林業研究指導所

実験年月日：平成 30 年（2018）9 月 18～20 日

引用・参考文献：

- ・宮原作太、古川洋、石大樹、木村将士、藤原大輔(2018)「柱継手の性能改善に関する実験的研究その 1～3」(日本建築学会大会学術講演梗概集(東北) 2018 年 9 月)
- ・石大樹、宮原作太、藤原大輔、木村将士、古川洋(2017)「柱継手性能確認のための実験的研究その 1 慈眼寺本堂における金輪継ぎ手」(日本建築学会大会学術講演梗概集(中国) 2017 年 8 月)

●実験に至る経緯と目的

平成26年（2014）4月16日の熊本地震により楼門は倒壊し、倒壊した衝撃で柱や横架材とその接合部に大きな被害が発生した。特に、柱頭組み物が差し物で構成されていたこと

が倒壊時の衝撃で柱頭部の折損に繋がった。1、2階合わせて22本中20本が破損し、そのうち10本の柱頭部分を新材に取り替えて採用することとなった。柱頭部の取り替え修理にあたって、目立たない方法で可能な限り柱断面の性能回復できる方法として、アラミドロッドを引張り材として接着剤で固定する方法を採用し、その継ぎ手性能を確認するための実験を行った。



写真1 柱頭部分の破損状況

● 姿図・寸法

【試験体及び使用材料】

柱修復は、破損部分を切断した既存の柱を建てた状態で、柱頭の新材を継ぐことを想定し、アラミドロッドの引張耐力を確認するために、円柱に縦孔を掘削し接着剤を充填したうえでアラミドロッドを挿入し、6本の引き抜き試験体を作成した。

接合部の曲げ耐力を確認するための試験体として、500φの実物の柱に対して、図3に示すような断面積1/2にあたる350φの試験体を作成した。直径9mmのアラミドロッドは外周に沿ってかぶり厚さ40mmで、約70mmのピッチで12本配置した。

アラミドロッドを配置した円形断面では、圧縮を負担する木部のエリアやアラミドロッドの張力を推定することが困難なことから、梁の予備実験を兼ねて、矩形断面160mmx240、上下各2本のアラミドロッドを配置した曲げ試験体(図2)も作成した。曲げ試験体の継ぎ手部分には、十字目違を設けてせん断力の伝達を図り、継ぎ手の木口面は接着防止フィルムを挟み、引張力の伝達が無いように配慮した。曲げ試験体の寸法形状と樹種、引張材の配置は表1に示す通りでアラミドロッドを定着する掘削孔径はφ20mm、その定着長は400mmを確保した。

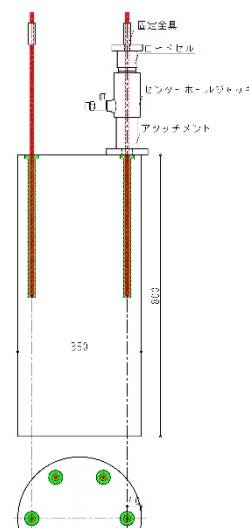


図1 引抜試験体

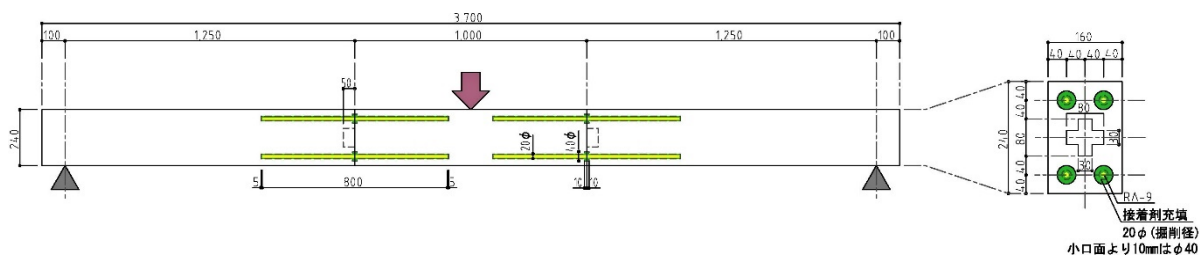


図 2 曲げ試験体：矩形断面

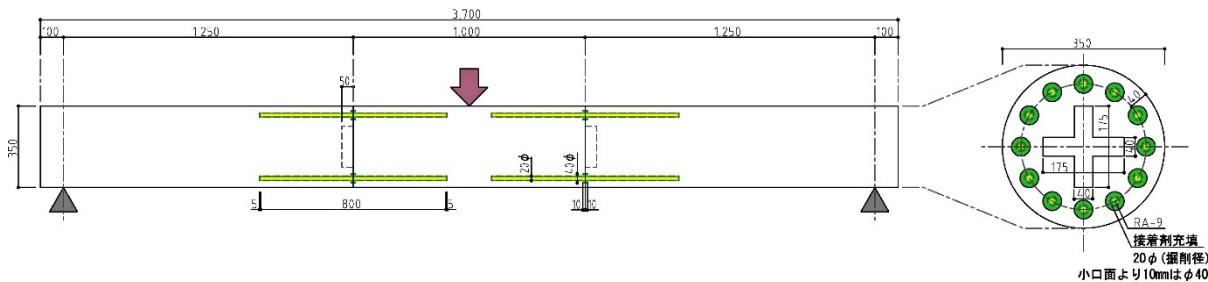


図 3 曲げ試験体：円形断面

表 1 曲げ試験体

試験体	試験体名称	製材断面積	樹種	引張材の配置			形状
				材料	本数	配置	
曲げ試験体 ：矩形断面	MSA9R-240R-1	□-160x240	すぎ	SR-RA9	4	上下 2 本	図 2
	MSA9R-240R-2	□-160x240	すぎ	SR-RA9	4		
	MSA9R-240R-3	□-160x240	すぎ	SR-RA9	4		
曲げ試験体 ：円形断面	MSA9R-350 φ-1	350 φ	すぎ	SR-RA9	12	円周状	図 3
	MSA9R-350 φ-2	350 φ	すぎ	SR-RA9	12		
	MSA9R-350 φ-3	350 φ	すぎ	SR-RA9	12		

継ぎ手仕口補強の引張材として、表 2 の性能を有する SA-RA9 ((株)サフレ社製)を採用した。また、アラミドロッドと製材の接着剤には、アサヒボンド 701(アサヒボンド工業(株))のエポキシ樹脂を採用した。柱材表面へ流出しても目立たないように、接着剤識別のための着色剤は添加しなかった。木材の水分によりエポキシ樹脂の硬化不良を改善するために、事前に性能を確認した湿潤面用プライマーを掘削孔内に添付した。また、エポキシ樹脂の木材へ含浸や施工性を調整する増粘剤の添加量、接着強度に及ぼす影響についても事前に確認した。

表 2 引張材：アラミドロッドの仕様、性能

品番	ヤング率 $\times 10^4 \text{N/mm}^2$	引張強度 N/mm^2	公称直径 mm	公称断面積 mm^2	単位重量 g/m	保証耐力 kN
SA-RA7	6.86	1.150	7.8	47.8	58	60
SA-RA9			9.3	67.9	84	85
SA-RA11			11.0	95	115	112

表3 接着剤の仕様、性能

プライマー、接着剤 増粘剤等	硬化物比重	引張強さ $\times 10^6 \text{N/mm}^2$	引張せん断 接着強さ $\times 10^6 \text{N/mm}^2$	圧縮 ヤング率 10^6N/mm^2	主成分、配合比等
湿潤面用プライマー アサヒボンド® 800P	1.1±0.05 (23°C)	—	—	—	主剤：エポキシ樹脂 硬化剤：ポリアミン系化合物 主剤：硬化剤＝2：1（質量比）
接着剤 アサヒボンド® 701	1.1±0.05 (23°C)	≥30	≥12.5	≥1500	主剤：エポキシ樹脂 硬化剤：変性ポリアミン 主剤：硬化剤＝3：1（質量比）
増粘剤	0.09g/cc	—	—	—	天然無機繊維状粘土鉱物

●接着作業工程

- ①柱表面の割れ目のシーリング 柱表面に傷つかないように3種類のシーリング材を試す。
- ②充填孔の掃除
- ③孔内及び小口にプライマーの添付
- ④アラミドロッドの長さ確認
- ⑤接着剤の調合、注入容器への詰め替え
- ⑥接着剤の充填、アラミドロッドの挿入
- ⑦アラミドロッドの固定、養生



柱表面のシーリング



プライマーの添付



接着剤の調合



接着剤の充填



ロッドの挿入養生

写真2 接着工程写真

●試験体の製作工程

破損した柱の継ぎ手施工を想定して、試験体の接着作業は柱を建てた状態で行うこととした。

- ① 3分割した試験体を施工順序に考慮して並べる。
- ② 試験体中央、上部のピースに接着剤を充填、養生
- ③ 下部の試験体に接着剤を充填。中央部を吊上げアラミドロッドを挿入、固定、養生
- ④ 中央部の試験体に接着剤を充填し中央部を吊上げアラミドロッドを挿入、固定、養生



試験体ピースを配置



ロッドを挿入・接着・養生



下部と中央を接着・養生



上部を吊上げ接着・養生

写真3 試験体製作工程

●実験方法

1) 引張強度の確認

写真4に示すように、円柱内に定着したアラミドロッドをセンターホールジャッキで張力を与え、その張力をロードセルで、伸び量をデジタル変位計で測定した。張力はロッドが引き抜けるまで加力することを原則とした。

2) 曲げ耐力の確認

写真5に示すように、曲げ試験体をピン、ローラーの支点上にセットし、単純増加の中央集中荷重を加え、万能試験器の圧力とデジタル変位計にて梁中央のたわみを測定し、荷重-変形曲線を求めた。



写真4 ロッドの引抜試験

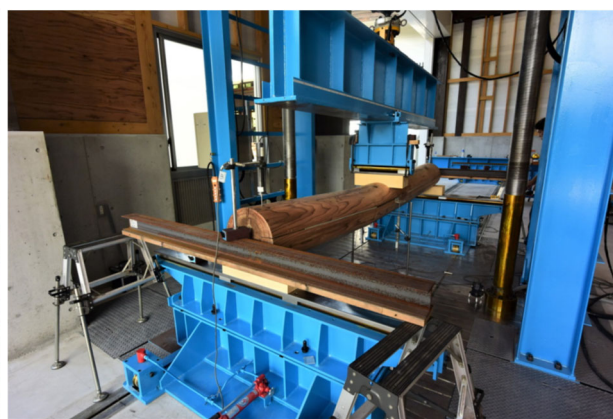


写真5 曲げ試験体の加力状況

●試験結果

1) 引張試験結果

6本のアラミドロッドの引張力-伸び量のグラフを図4に示した。図中にSA-9Rとして、定着されていないアラミドロッド長さ： $L_0=535\text{mm}$ と保証耐力： $P_0=85\text{kN}$ より算定される伸び量： δ_0 も併せて示した。

$$\delta_0 = P_0 \cdot L_0 / (E_r \cdot A_r) = 9.76\text{mm} \quad E_r = 6.86 \times 10^4 \text{N/mm}^2, \quad A_r = 67.6 \text{mm}^2$$

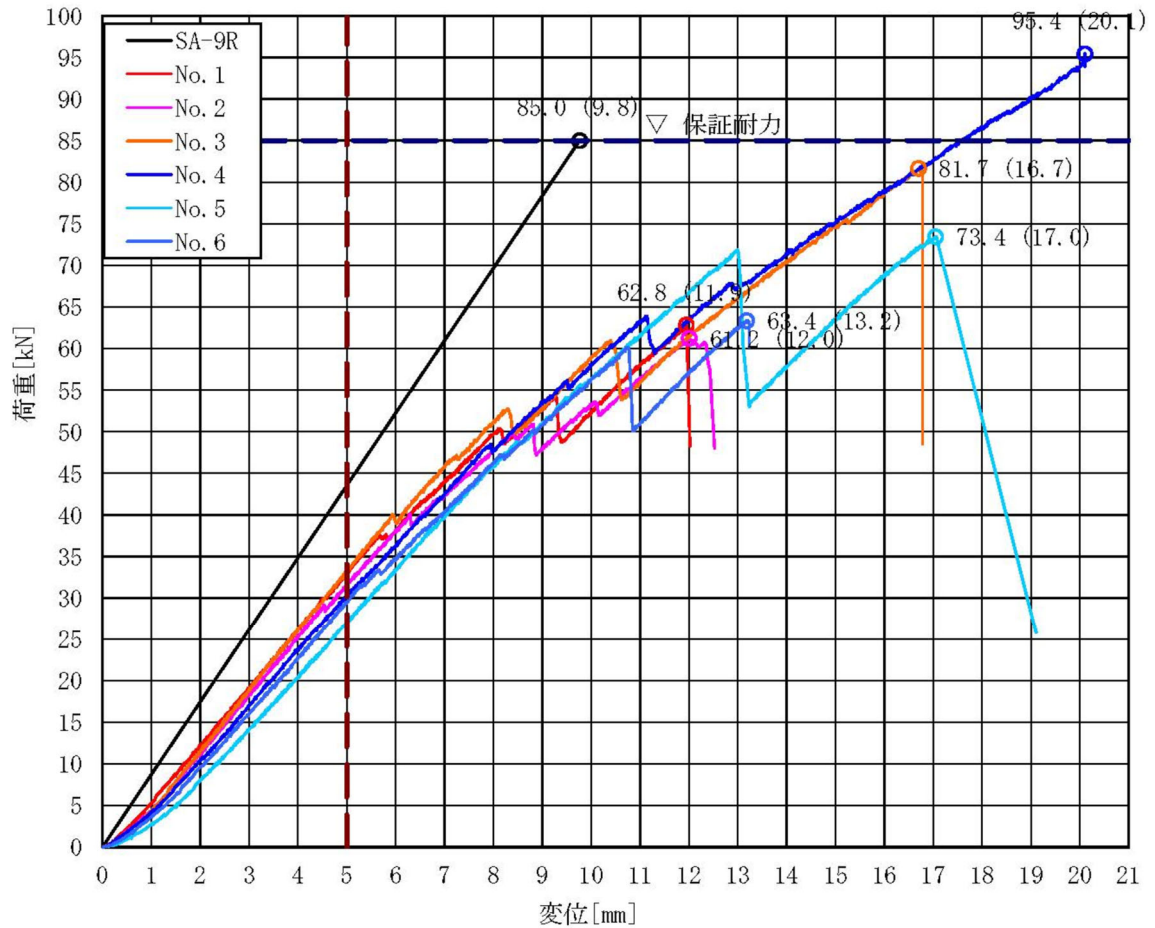


図4 引抜試験の荷重-変形曲線

また、張力-伸び量の試験結果より算定される、保証耐力に対する張力比、弾性剛性比及び付着強度の試算結果を表4に示した。

表4 引張試験結果 保証耐力比： P_{max}/P_o 、弾性剛性比： K_5/K_o 、付着強度： P_{max}/A_n

ロッド No	P_{max} kN	δ_{max} mm	P_{max}/P_o	P_{max}/A_n N/mm ²	δ' mm	δ_n mm	P_{max}/δ_n kN/mm	P5 kN	K_o, K_5 kN/mm	K_5/K_o
SA-RA9	85.00				9.76	—	—		8.71	—
No, 1	62.83	11.95	0.74	2.38	7.22	4.73	13.27	32.87	6.57	0.76
No, 2	61.24	12.01	0.72	2.32	7.03	4.98	12.31	31.28	6.26	0.72
No, 3	81.65	16.70	0.96	3.09	9.38	7.32	11.15	33.14	6.63	0.76
No, 4	95.44	20.10	1.12	3.62	10.96	9.14	10.44	29.36	5.87	0.67
No, 5	73.44	17.05	0.86	2.78	8.44	8.61	8.52	26.78	5.36	0.62
No, 6	63.56	13.18	0.75	2.41	7.30	5.88	10.81	29.43	5.89	0.68
平均	73.03	15.17	0.86	2.77		6.78	10.78	30.48		0.70

$K_o = P_o / \delta_o = 8.71 \text{ kN/mm}$ 、 $\delta' = P_{max} / K_o$ 、 $\delta_n = \delta_{max} - \delta'$ 、P5:変形5mmで負担する張力
付着面積： $A_n = \phi \cdot \pi \cdot L = 26389 \text{ mm}^2$ ←孔径 ϕ ：21mm、定着長さ： $L = 400 \text{ mm}$

試験体No.4保証耐力を超えて抜け出すことはなく、固定治具が飛散して建物等に損傷を与える可能性があることから、抜け出す前に加力を中止した。試験後の解体によりアラミドロッドが製材の節部を貫通し接着されていたことから、高強度に至ったことが確認できた。図4と表4より以下のようなことが判った。

- a) 引張耐力の平均値は、No,4の試験体を除いても、保証強度の80%を、弾性剛性も70%と、木造の接合部としては接合効率が非常に高いことが確認できた。
- b) 掘削孔の外形を付着面積として、製材とアラミドロッドの平均付着強度は 2.77 N/mm^2 となった。また、破断時の伸び量(δ_{max})より、定着されていない部分の伸び量(δ')を差し引いた接着部分の伸び量(δ_n)は最小で4.7mm、平均で6.8mm、平均の伸び剛性 10.8 kN/mm と、十分な変形が期待できることが判った。
- c) 最大耐力に達した破損状況を見ると、試験体No,4を除いて接着剤とロッドが抜け出し、試験体No,6だけはその後ロッドのみが抜け出した。解体して見るとロッドの定着端に滑った様子が確認できた。

以上の試験結果より、エポキシ樹脂を用いて、製材にアラミドロッドを直径の40倍程度を定着させれば、引張耐力として保証耐力の85%程度、定着部の剛性にして 10 kN/mm が期待できることが確認できた。



写真6 引抜試験の破損状況

2) 曲げ試験結果：矩形断面

応力状態が想定し易い矩形断面：□-160x240の曲げ試験の結果を中央集中荷重—中央変位のグラフを図5に示した。図中の無垢材は、 $E_w=7000\text{N/mm}^2$ 、 $F_b=27\text{N/mm}^2$ 試験体と同一条件の単純梁の荷重変形—曲線を示す。無垢梁：□-160x240の中央集中荷重： $P_m=47.4\text{kN}$ 、中央変位： $\delta_c=33.5\text{mm}$ の時に中央部が曲げ耐力に達して破断することを示している。

アラミドロッドで補強された3体の試験体は殆ど同じような挙動を示した。継ぎ手部分の下端が開き、上端に圧縮破損による回転が発生し、アラミドロッドを固定する接着剤が飛び出し、圧縮端の下端で割裂が生じて最大耐力に至り载荷を中止した。

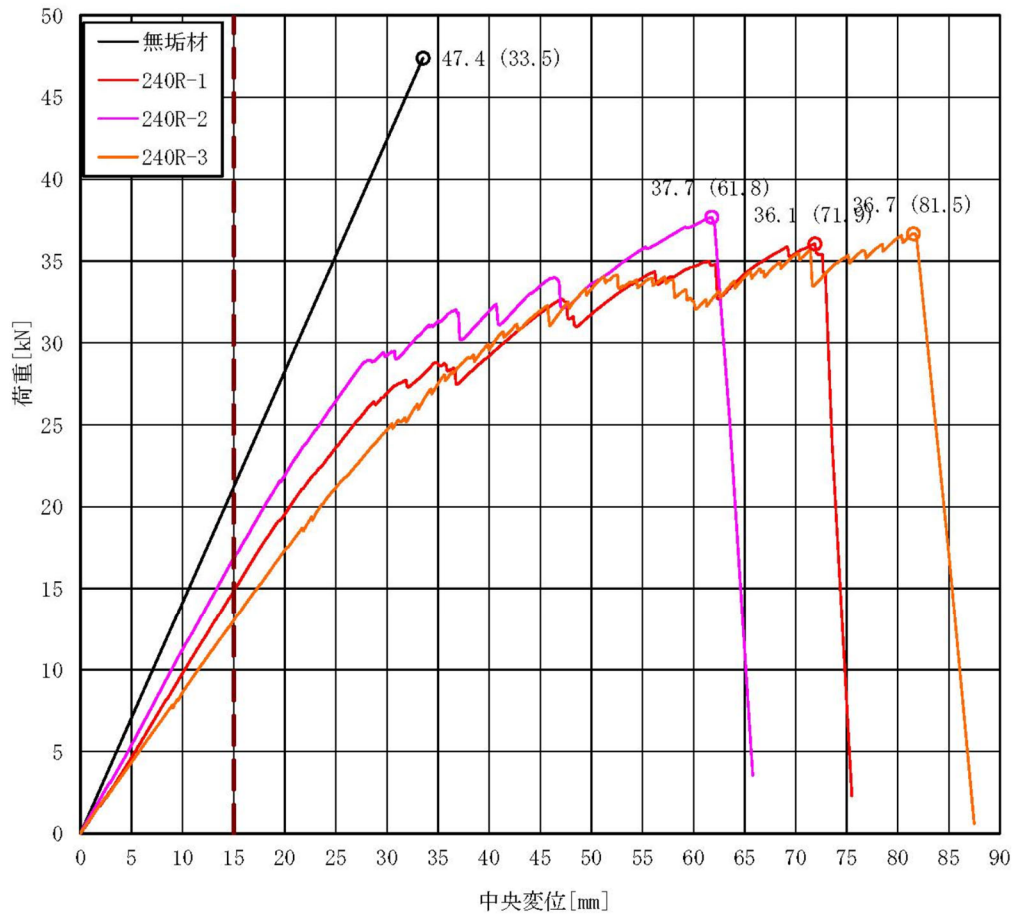


図5 矩形断面の曲げ試験結果中央集中荷重－中央変位

荷重－変形のグラフより、最大中央集中荷重と中央変位、単純梁としての初期剛性を無垢材と比較し、断面の平面保持の仮定に基づき、アラミドロッドの張力を概算算定した結果を表5に示した。断面の圧縮合力＝ロッドの張力として、圧縮中心からロッドまでの距離の算定した結果180mmとなり、ロッド張力を $0.90 \cdot dt$ として算定した。

表 5 矩形断面曲げ試験結果耐力比： P_{max}/P_m 、弾性剛性比： K_{15}/K_o 、有効張力： $T_u/2P_o$

試験体	P_m/P_{max} kN	δ_{cmax} mm	P_{max}/P_m	P15 kN	K_o, K_{15} kN/mm	K_{15}/K_o	Mj kN・m	$2P_o, T_u$ kN	$T_u/2P_o$
160x240	47.4	33.53		21.2	1.41	—	—	170	
240R-1	36.06	71.88	0.76	14.82	0.99	0.70	22.5	125.2	0.74
240R-2	37.68	61.78	0.79	16.81	1.12	0.79	23.6	130.8	0.77
240R-3	36.67	81.53	0.77	13.01	0.87	0.61	22.9	127.3	0.75
平均	36.80	71.73	0.78	14.88		0.70	23.0	127.8	0.75

P_{max} ：各試験体の最大荷重、 δ_c ：最大荷重時の梁中央部の鉛直変位、

P15：中央鉛直変位15mmの鉛直荷重、 $K_o, K_{15}=P_{15}/15$ 、Mj：継手部の曲げモーメント

$P_o=85\text{kN}$ アラミドロッドの保証耐力

$T_u=M_j/(0.90 \cdot dt)$ 、 $dt=240-40=200\text{mm}$ ロッドのかぶり厚さ 40mm

図5と表5より、以下のようなことが判った。

- d) 矩形断面継手部のアラミドロッド補強は、安定した復元力特性を示した。
- e) 本試験体の仕様、 \square -160x240の上下に引張材2-SA-RA9を配置した補強では、最大耐力は無垢材の75%以上、弾性剛性は70%の性能が確認された。

f) 平面保持の仮定に基づいた引張材の張力： $T=M/(0.9 \cdot dt)$ で算定可能で、アラミドロッドの張力は保証耐力の75%相当であった。ロッドの引張試験結果（表4Pmax/Po）に比べれば、効率はやや低下する結果となった。

アラミドロッドで補強された継手部の破損状態は、写真7に見るようにアラミドロッドを固定するエポキシ樹脂が接着面に飛び出し、梁中央部と上部圧縮端に割裂が発生し両側に進行した。継ぎ手部の左右2箇所のうち、写真8に見られるように、破損を免れた継ぎ手部分は除荷と共に梁下端の開きが小さくほぼ直線に戻った。試験終了後、接着剤が飛び出て破損したアラミドロッドの状況を観察すると、写真9に示すように、継手木口付近にはロッドに接着剤が付着した状態で、掘削孔の木理面の破断が確認される。定着長の2/3程度はロッドと接着剤が剥がれた状態で、定着端の底では滑り出た分の隙間が確認された。



写真7 継手木口面



写真8 除荷後の梁の変形



写真9 引き出されたロッドの状態

3) 曲げ試験結果：円形断面

円形断面：350φの曲げ試験の結果を中央集中荷重－中央変位のグラフを図6に示した。図中の無垢材は、 $E_w=7000\text{N/mm}^2$ 、 $F_b=27\text{N/mm}^2$ 試験体と同一条件の単純梁の荷重変形－曲線を示す。無垢梁：○-350φの中央集中荷重： $P_m=129.9\text{kN}$ 、中央変位： $\delta_c=23.7\text{mm}$ の時に中央部が曲げ耐力に達して破断することを示している。

アラミドロッドで補強された3体の試験体のうち2体はほぼ同じような挙動を示したが、残り1体の鉛直力の負担耐力は他の1.5近くに達した。その外観上の差は認められなかった。

試験体3体とも弾性剛性はほぼ同じで、最大耐力達した後最下端のアラミドロッドは抜け出し、変形と共に鉛直力は段階的に低下した。

荷重－変形のグラフより、最大中央集中荷重と中央変位、中央の鉛直変位10mmの時の弾性剛性を無垢材と比較した。断面の平面保持の仮定に基づき、曲げモーメントの釣り合いより、圧縮側の縁応力を曲げの基準強度とした圧縮合力＝アラミドロッドの張力の合力として、最下端のアラミドロッドの張力を矩形断面に倣い保証耐力の75%を採用した。さらに内側のロッドは中立軸からの距離に比例するものと仮定して、継ぎ手断面の曲げ応力を試算し実験結果と比較した。

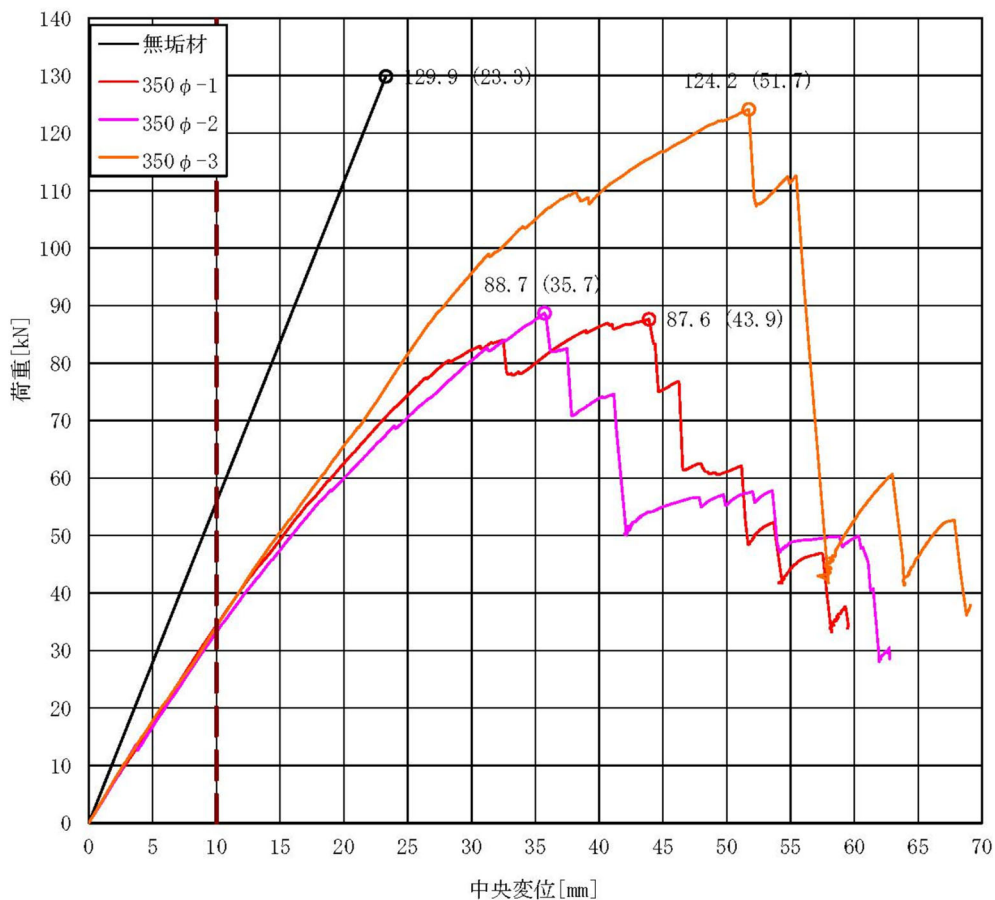


図 6 円形断面の曲げ試験結果中央集中荷重－中央変位

以上の結果を表6に示した。図6と表6より以下のことが確認できる。

- g) 実験結果の荷重－変形曲線は、矩形断面に比べて、バラツキが大きく、最大耐力に達した後の性能は期待できない結果となった。
- h) 350 φ のすぎ材にSA-RA9を円弧状に12本、かぶり厚さ40mm、定着長さ400mmの継ぎ手仕様の弾性剛性については無垢材の60%、継ぎ手の曲げ耐力は試験体350 φ-3を無視した2体の平均値としても、無垢材の2/3近くは確保できた。
- i) 継手部の曲げ耐力を平面保持の仮定より算定した結果は、梁の曲げ試験より算定した継手部の曲げ応力よりも大きめの値を与える結果となった。

表 6 円形断面曲げ試験結果耐力比： P_{max}/P_m 、弾性剛性比： K_{15}/K_0 、有効張力：75%

試験体	P_m/P_{max} kN	δ_{cmax} mm	P_{max}/P_m	P10 kN	K_0, K_{10} kN/mm	K_{10}/K_0	M_j (実) kN・m	M_j の試算 中立軸の高さ： y_0
350 ϕ	129.90	23.30		55.80	5.58	—	—	$y_0=57.75\text{mm}$
350 ϕ -1	87.63	43.90	0.67	34.34	3.43	0.62	54.8	$\Sigma N_c=309.9\text{N}$
350 ϕ -2	88.69	35.71	0.68	33.03	3.30	0.59	55.4	$\Sigma N_t=309.6\text{kN}$
350 ϕ -3	124.16	51.73	0.96	33.96	3.40	0.61	77.6	$M_j=67.4\text{ kN}\cdot\text{m}$
平均	100.16	43.78	0.77	33.78		0.61	62.6	$M_j(\text{実})/M_j=0.92$



写真10 継手部の破損状況

円形断面の破損状況を見ると、矩形断面と同様に張力を負担する継ぎ手部のアラミドロッドは、写真10に見られるように定着用の接着剤と共に引き出されていた。試験後解体してアラミドロッドの状況を確認すると、写真11のように定着端の先端に隙間が認められ、製材の掘削孔との間に滑りが発生していることが確認できた。写真12の除荷の状況を見ると、矩形断面と同様に破損にまで至らなかった継ぎ手部分は、梁下端の開きが戻り、ほぼ直線の状況にまで復元していた。



写真11 破損したアラミドロッドの状況



写真12 除荷後の試験体の状況

● 考察

① 完全弾塑性体として復元力特性

矩形断面□-160x240、円形断面：350φの曲げ試験結果を完全弾塑性体の復元力特性に置換すると、それぞれ図7、図8のような結果となる。それぞれのPuより継ぎ手部分の耐力を算定した結果を表7に示した。

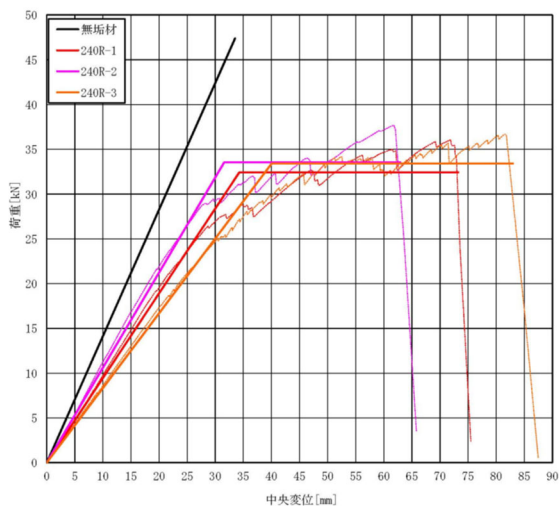


図7 矩形断面の復元力特性

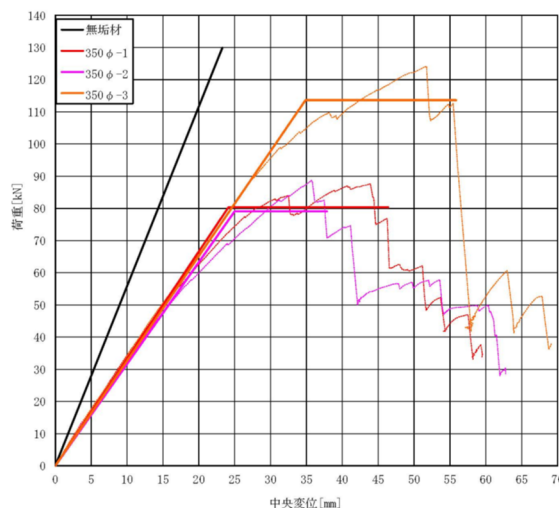


図8 円形断面の復元力特性

表7 完全弾塑性体の復元力特性

	試験体	Pu kN	δv mm	δu mm	μ	Ds	復元力特性の低減 継ぎ手部分の曲げ耐力
矩形断面	240R-1	32.44	34.3	73.3	2.14	0.55	Pu/Pmax=33.13/36.8=0.90 Mj=33.13/2x1.25=20.7kN・m
	240R-2	33.54	31.6	62.9	1.99	0.58	
	240R-3	33.41	40	83	2.07	0.56	
	平均	33.13	35.3	73.1	2.07	0.56	
円形断面	350φ-1	80.33	24.1	46.4	1.92	0.59	Pu/Pmax=91.01/100.16=0.91 Mj=91.01/2x1.25=56.9kN・m
	350φ-2	79.08	25	37.8	1.51	0.7	
	350φ-3	113.63	34.9	55.9	1.6	0.67	
	平均	91.01	28	46.7	1.68	0.65	

完全弾塑性体の復元力特性として使用する場合には、約10%程度の低減も必要となる。

②柱継ぎ手金輪継ぎとの比較

一般的な柱継ぎ手である金輪継ぎと弾性剛性及び最大耐力ついて、慈眼寺本堂における金輪継ぎの実験結果と比較した。図9には矩形断面：□-165x165の補強を含めた金輪継ぎ加力試験の荷重－変形曲線を、表8には弾性剛性の無垢材との比較を示した。

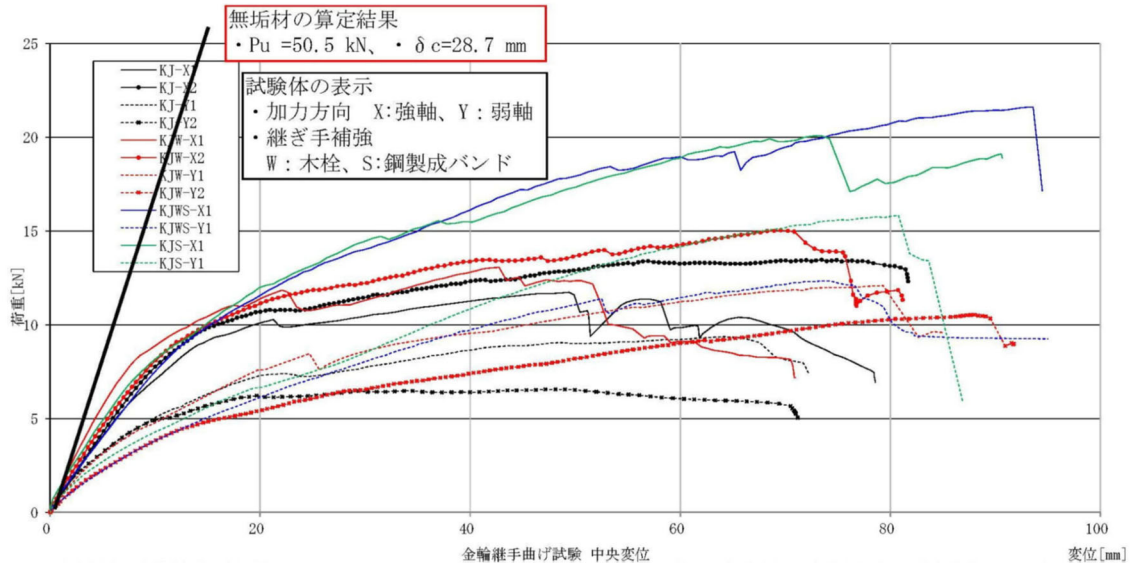


図9 金輪継ぎの3等分加力－中央変位

表8 金輪継ぎの弾性剛性

試験体	実験結果			弾性剛性比
	Py kN	Kv kN/cm	δy Cm	
無垢材	50.05	17.4	2.87	1.0
KJ-X	8.50	7.95	1.069	0.254
KJ-Y	4.80	5.98	0.803	0.150
KJW-X	9.22	9.71	0.950	0.314
KJW-Y	6.25	3.75	1.667	0.122
KJS-X1	10.79	6.80	1.587	0.178
KJS-Y1	7.68	3.08	2.494	0.098
KJWS-X1	12.01	7.42	1.619	0.189
KJWS-Y1	6.91	3.04	2.273	0.063

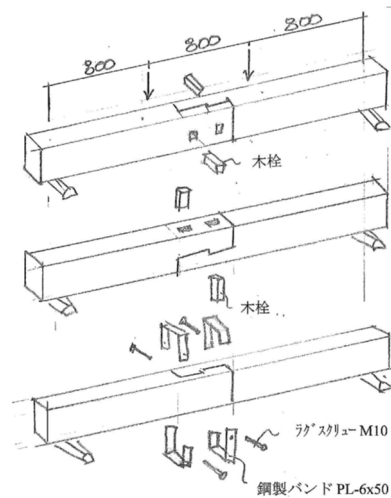


図10 金輪継ぎ試験体の補強要領

荷重－変形曲線より、無垢材の曲げ耐力： $P_u=50.5\text{kN}$ に対して以下の結果である。

- ・ 金輪継ぎ強軸方向： $P_u \approx 12.5\text{ kN} \rightarrow$ 約25%
弱軸方向： $P_u \approx 7.5 \sim 8\text{ kN} \rightarrow$ 約15～16%
- ・ 金輪継ぎ＋鋼板バンド補強強軸方向： $P_u \approx 20\text{ kN} \rightarrow$ 約40%
弱軸方向： $P_u \approx 10 \sim 12\text{ kN} \rightarrow$ 約20～25%

また、弾性剛性では表8より以下の通りである。

- ・ 金輪継ぎ強軸方向：25～30%、弱軸方向：約15%
- ・ 金輪継ぎ＋鋼板バンド補強強軸方向：20%以下、弱軸方向：10%以下

金輪継ぎに比べれば、この度提案したアラミドロッドを引張材とした継ぎ手部の補強効率は、極めて高いことが判る。