

出雲大社会所における柱仕口部の炭素繊維補強の性能試験

- 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：出雲大社会所
文化財種別（指定年月日）：重要文化財（平成16年7月6日）
所在地：島根県出雲市
所有者（管理団体）：宗教法人出雲大社
構造形式：桁行 16.9m、梁間 10.2m、入母屋造、正面階隠一間、銅板葺
建築年：江戸中期（寛文7年（1667））
事業名称：出雲大社本殿ほか22棟保存修理事業
事業期間：平成20年5月1日～平成30年3月31日
工事種別：解体修理
事業者：宗教法人出雲大社
設計監理：公益財団法人文化財建造物保存技術協会
実験計画者：有限会社安芸構造計画事務所
実験機関：－
実験年月日：－
引用・参考文献：－

●実験に至る経緯と目的

本建物の耐震診断では柱の曲げ性能によって水平力を負担するよう検討されていたが、足固め・敷居による柱の断面欠損が随所に確認された。197mm正角の柱に対して、交差する幅 60mmの貫の交差、敷居の取り付け幅 150mm、深さ 20mmの欠損を考慮すると、有効断面係数が 42%まで減じることになる。1階床交差部の有効断面係数が 50%以下の柱は 39本中 16本に及んでいる。

構造補強は、床下に筋違を設置するとともに、柱の折損を防止するため、断面欠損の著しい柱の足固め・敷居の仕口部分に炭素繊維を用いて補強することが計画された。本実験は、この炭素繊維の接着性能を確認するための引張試験と、補強後の柱の曲げ耐力を確認する曲げ試験を行った。

<引張試験>

● 姿図・寸法

【使用材料】

柱材 ヒノキ

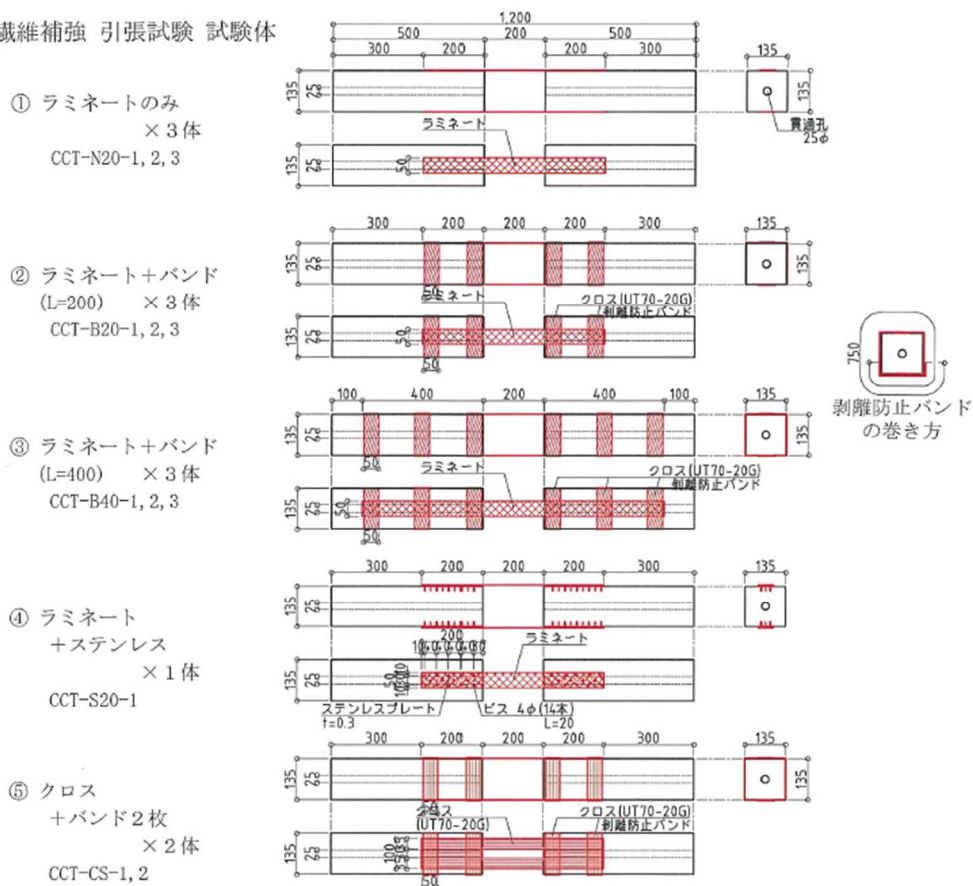
炭素繊維 ラミネート・一方向高強度クロスの種類

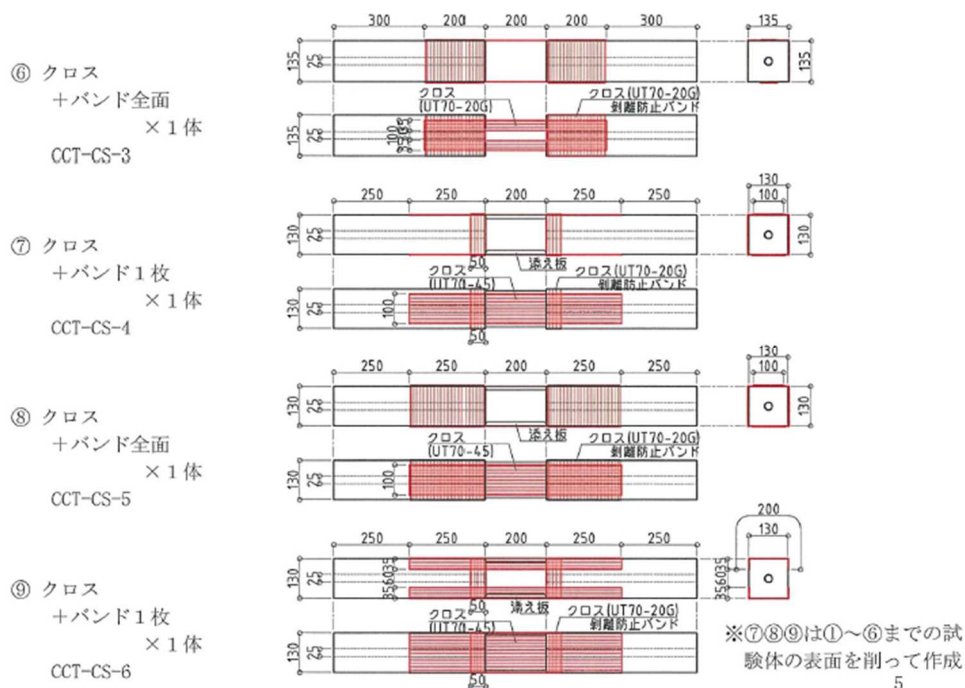
【試験体寸法】

下図のように柱材二材を、一定間隔を取った状態で並べ、側面に炭素繊維を高強度エポキシ樹脂で接着して繋いだ。ステンレスプレートや剥離防止のバンドの補強を追加したものも作成し、表に示す9種類の試験体を用意した。

no	試験体	台数	引張材 (長さ、幅)	剥離防止バンド	呼称
①	ラミネート	3	TL520 (L=200, B=50)	—	CCT-N20-1, 2, 3
②	ラミネート+バンド	3	TL520 (L=200, B=50)	UT70-20G 2段	CCT-B20-1, 2, 3
③	ラミネート+バンド	3	TL520 (L=400, B=50)	UT70-20G 3段	CCT-B40-1, 2, 3
④	ラミネート+ステンレス	1	TL520 (L=200, B=50)	—	CCT-S20-1
⑤	クロス+バンド	2	UT70-20G (L=200, B=70)	UT70-20G 2段	CCT-CS-1, 2
⑥	クロス+バンド	1	UT70-20G (L=200, B=70)	UT70-20G 全面	CCT-CS-3
⑦	クロス+バンド	1	UT70-45G (L=200, B=100)	UT70-20G 1段	CCT-CS-4
⑧	クロス+バンド	1	UT70-45G (L=200, B=100)	UT70-20G 全面	CCT-CS-5
⑨	クロス+バンド	1	UT70-45G (L=200, B=200)	UT70-20G 1段	CCT-CS-6

炭素繊維補強 引張試験 試験体



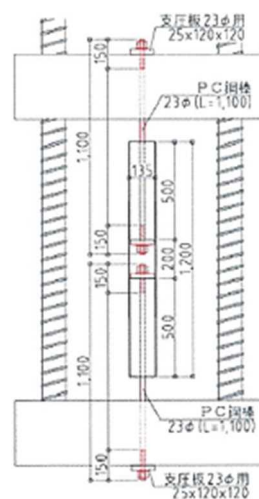


●概要

炭素繊維による柱の曲げ補強を実現するため、使用する炭素繊維の種類を選択、その必要定着長さ、剥離防止バンドの効果確認を目的とし、試験体の引張試験を行う。

●実験方法

上下の柱材の中央に孔を設け、この孔にPC鋼棒を通して端部をナットで固定し、引張試験機でPC鋼棒を引張り、試験体に張力を与えた。



●特性値

表に示す通り。

炭素繊維—製材引張試験結果：引張耐力、付着強度、破損箇所の一覧

No	符号	最大引張力 Pu[kN]	最大変位 δu [mm]	平均加力 avPu[kN]	付着面積 As[cm ²]	付着強度 [kN/cm ²]		破損箇所
						Pu/As	(平均)	
①	CCT-N20-1	89.39	1.31	3台	200.0	0.45	0.43	木理/繊維
	CCT-N20-2	80.53	1.11			0.40		木理破断
	CCT-N20-3	85.83	1.09			85.25		0.43
②	CCT-B20-1	109.92	1.26	3台	200.0	0.55	0.48	木理
	CCT-B20-2	99.34	1.25			0.50		木理/接着面
	CCT-B20-3	79.05	0.95			96.10		0.40
③	CCT-B40-1	108.77	2.37	3台	400.0	0.27	0.27	木理/接着面
	CCT-B40-2	94.96	1.21			0.24		木理
	CCT-B40-3	115.24	1.39			106.32		0.29
④	CCT-S20-1	93.83	1.21	93.83	200.0	0.47		接着面
⑤	CCT-CS-1	32.96	2.37	2台	400.0	0.08	0.08	繊維破断
	CCT-CS-2	34.42	2.52			33.69		0.09
⑥	CCT-CS-3	35.74	2.48	35.74	400.0	0.09		繊維破断
⑦	CCT-CS-4	83.36	3.57	83.36	500.0	0.17		木理
⑧	CCT-CS-5	96.59	3.59	96.59	500.0	0.19		木理
⑨	CCT-CS-6	172.67	2.83	172.67	1000.0	0.17		木理

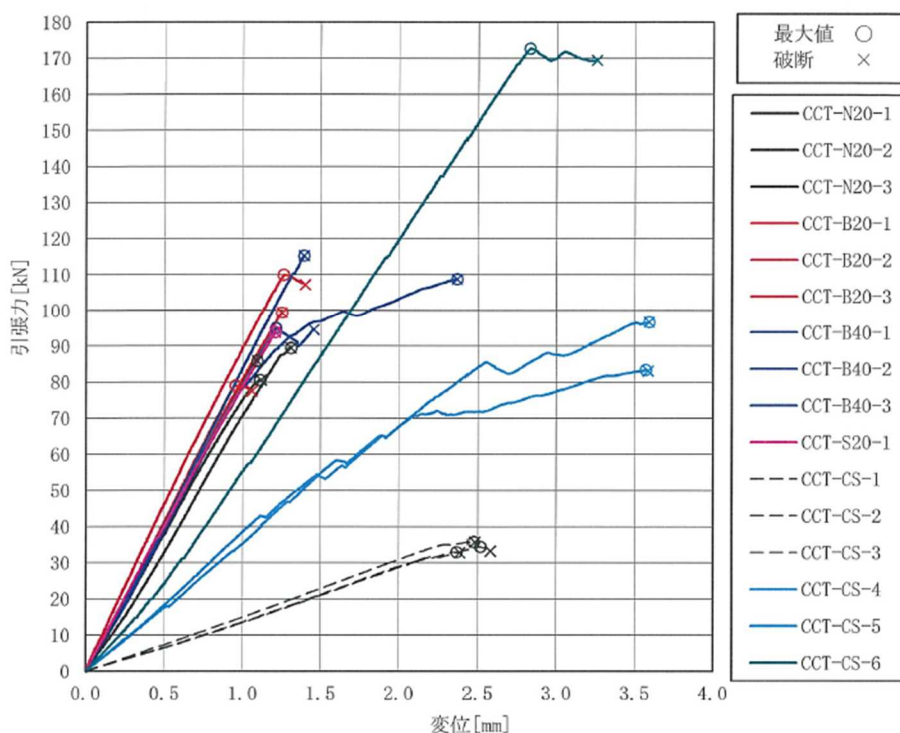
●荷重変形

図に示す通り。

炭素繊維—製材の引張試験結果

最大加力 200[kN]

加力速度 0.7mm/min → 15分で10mm程度



●破壊形状

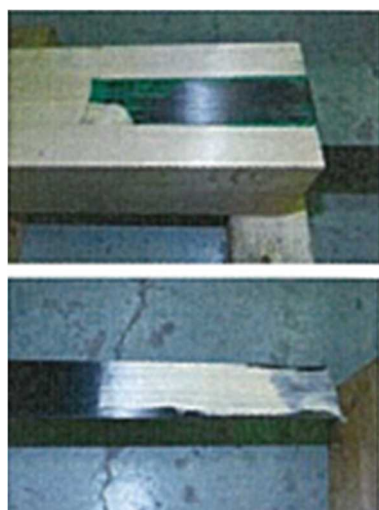
ラミネートを用いた場合、製材表面の木理破断と同時に接着面の破断も確認された。剥離防止バンドは付着面積の拡大につながらないこと、接着長さには効果が期待できないことが分かった。

高強度クロスを用いた場合、木理破断が発生した。剥離防止バンドの効果は小さいが、高強度クロスの接着面積（幅）を2倍にすると、耐力が2倍に増大することが確認された。

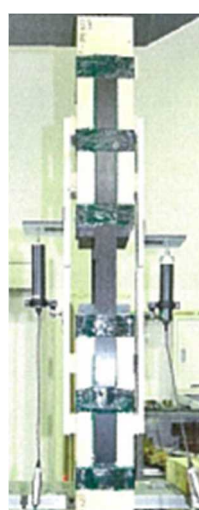
最大張力時の付着強度を比較すると、同様の木理破断でもラミネートでは $0.40\sim 0.55$ kN/cm^2 に対して、クロスでは $0.17\sim 0.19$ kN/cm^2 であった。



①CCT-N20-1
引張破断状況



①CCT-N20-1 接着面
木理破断と接着剥離破損



③CCT-B40-2
引張破断状況



③CCT-B40-2 接着面
木理破断



⑦CCT-CS-4
引張破断状況



⑦CCT-CS-4 接着面
木理破断と剥離防止
シートの破断



⑨CCT-CS-6
引張破断状況



⑨CCT-CS-6 接着面
木理破断、剥離防止シート
は破断せず

●理論式

—

●モデル化

—

●考察

ラミネートは炭素繊維クロスよりも明らかに付着強度が高く、施工も容易であったため、補強にはラミネートを採用した。

< 曲げ試験 >

● 姿図・寸法

【使用材料】

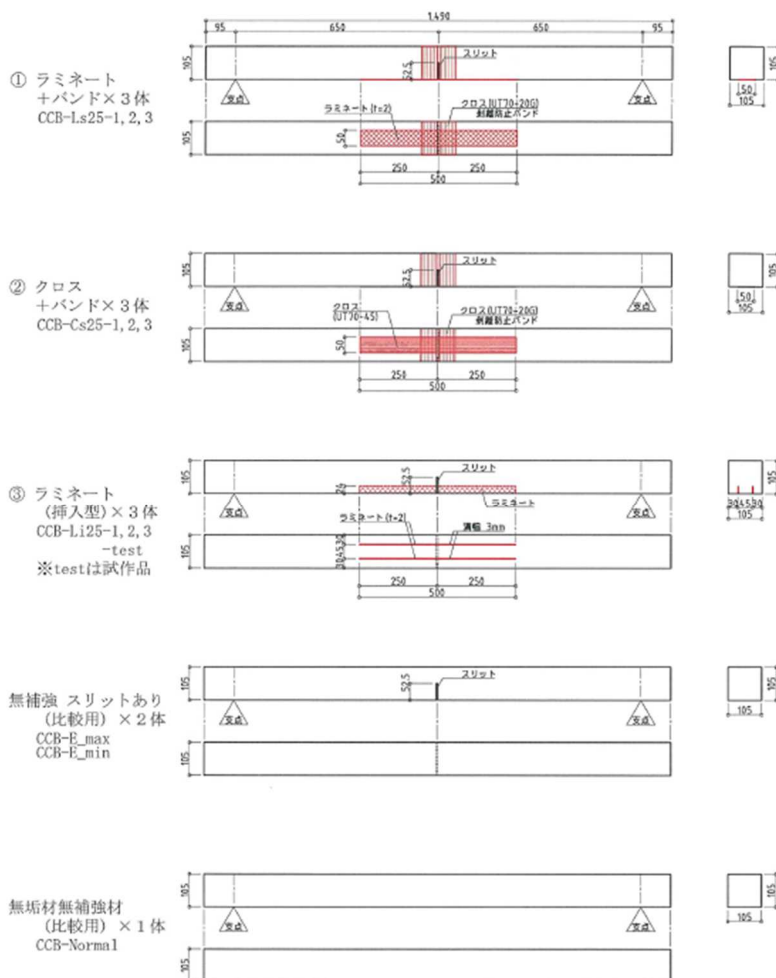
柱材 集成材 (スプルーース)

炭素繊維 ラミネート・一方向高強度クロスの種類

【試験体寸法】

断面欠損を再現するために柱材の中央下端にスリットを設け、これを炭素繊維や剥離防止バンドをエポキシ樹脂で接着して補強した試験体を作成した。炭素繊維を側面に接着するものと柱材にスリット入れ炭素繊維を挿入するものを用意した。比較のために断面欠損を再現しない柱材と、断面欠損のみ再現し補強しない柱材も用意した。

no	試験体	台数	引張材	剥離防止バンド*	呼称
①	ラミネート+バンド	3	TL520 (L=250, B=50)	UT70-20G 1箇所	CCB-Ls25-1, 2, 3
②	クロス+バンド	3	TL520 (L=200, B=50)	UT70-20G 1箇所	CCB-Cs25-1, 2, 3
③	ラミネート(挿入型)	3	TL520 (L=400, B=50)	-	CCB-Li25-1, 2, 3
	同上 test用	1			CCB-Li25-test
④	スリット(補強無)	2	-	-	CCB-Emax, Emin
⑤	スリット無	1	-	-	CCB-Normal

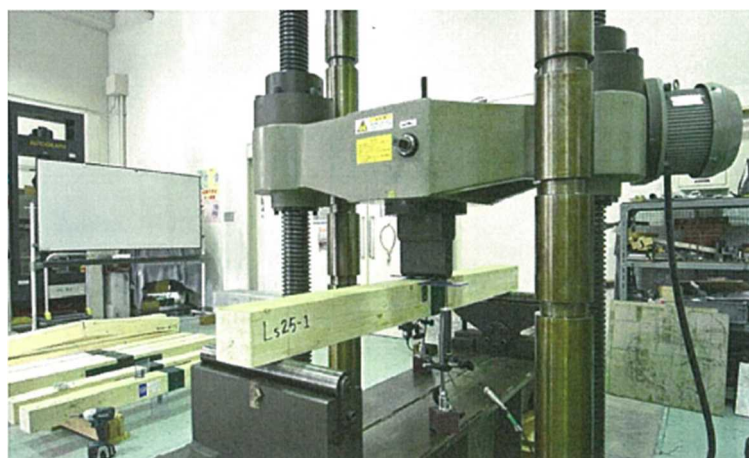


●概要

前述の引張試験に引き続き、エポキシ樹脂で接着した炭素繊維を引張材とする柱の曲げ補強の効果を確認するため、柱脚仕口に準じた中央集中荷重を作用させた単純梁の曲げ試験を実施する。

●実験方法

柱材を中央に設けたスリットを下側にして横に寝かし、スパン 1300mm で支持し、中央集中荷重を単調増加として載荷した。



●特性値

表に示す通り。

No	符号	最大加力 [kN]	最大変位 [mm]	最大モーメント [kN・m]	最大変形角 [rad]	平均モーメント [kN]	弾性剛性 [kNm/rad]	剛性比較
①	CCB-Ls25-1	19.11	10.66	6.21	1/30.5	6.01	192.8	1.094
	CCB-Ls25-2	20.41	11.69	6.63	1/27.8		195.2	1.108
	CCB-Ls25-3	15.94	8.69	5.18	1/37.4		188.0	1.067
②	CCB-Cs25-1	13.22	15.94	4.30	1/20.4	4.45	121.4	0.689
	CCB-Cs25-2	12.37	13.30	4.02	1/24.4		135.6	0.770
	CCB-Cs25-3	15.46	17.13	5.02	1/19.0		142.0	0.806
③	CCB-Li25-1	13.73	20.13	4.46	1/16.1	5.41	131.9	0.748
	CCB-Li25-2	16.17	17.85	5.26	1/18.2		146.0	0.829
	CCB-Li25-3	16.14	14.38	5.25	1/22.6		162.9	0.924
	CCB-LI25-test	20.60	19.46	6.70	1/16.7		152.7	0.867
スリット材	CCB-E-max	7.11	21.63	2.31	1/15.0	2.14	87.8	0.498
	CCB-E-min	6.09	26.23	1.98	1/12.4		63.8	0.362
無垢材	CCB-Normal	23.69	17.59	7.70	1/18.5	7.70	176.2	1.000

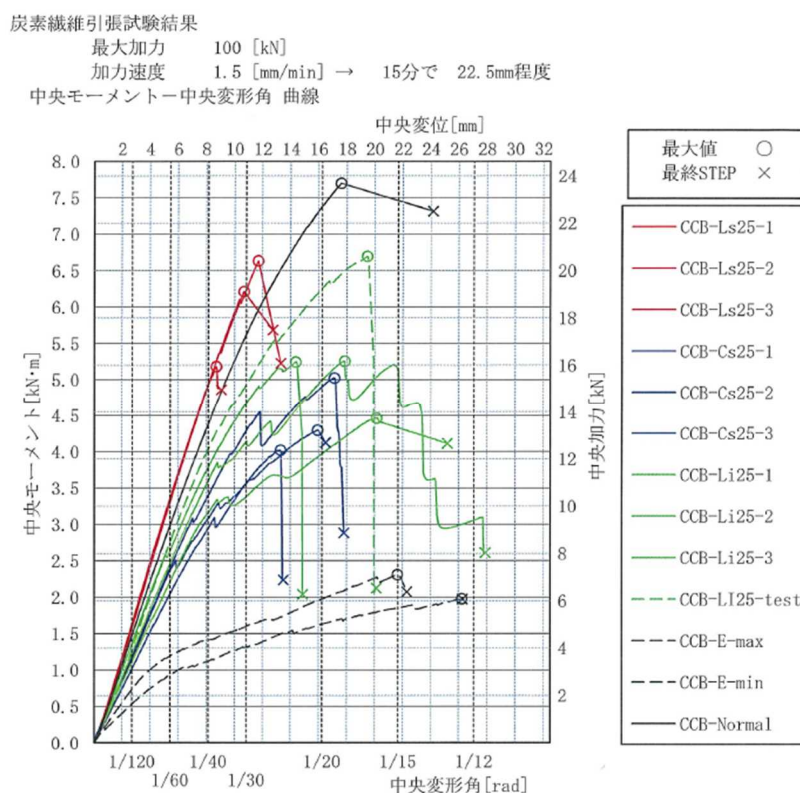
※中央の変形角は、 $\theta = 2 * (\delta c / (Lo/2))$ とする。 δc は中央変位、 $Lo/2=650\text{mm}$

弾性剛性： $k = Mo / \theta$ 、 $\theta = 2 \delta c / 650 = 1/120$ の時の中央曲げモーメント ($M = P \cdot Lo/4$)

基準剛性は□=105x105(Nomar1)の弾性剛性を示す。 $ko = 176.2 \text{ [kN}\cdot\text{m/rad]}$

●荷重変形

図に示す通り。



●破壊形状

ラミネートとバンドで補強した試験体は、顕著な剛性低下がみられないまま 1/30 以下で柱材が曲げにより木理破断をしている。クロスとバンドで補強した試験体、ラミネート挿入で補強した試験体は明確な剛性の低下がみられ、1/20 を超える変形性能がみられた。クロスとバンドで補強した試験体は 3 体中 1 体がクロスの引張破断で他は木理破断であった。ラミネート挿入で補強した試験体は木理破断かラミネートの破断かは判断できなかった。また剛性や耐力にばらつきがみられ施工方法の改善が必要と判断した。



①CCB-Ls25-2 曲げ破損状況



①CCB-Ls25-2 接着面 木理破断



②CCB-Cs25-1 曲げ破損状況



②CCB-Cs25-1 接着面 木理破断



③CCB-Li25-2 曲げ破損状況



③CCB-Li25-2 接着面
木理破断か接着剤剥離か判定できず

●理論式

—

●モデル化

—

●考察

使用した柱材及び炭素繊維の材料特性より、柱材が負担する圧縮力と炭素繊維が負担する引張力が等しくなるとして、実験結果で得られた最大モーメントにおける部材の応力状態を推定した。推定結果を実験で得られた荷重変形関係や破壊形式と比較し考察を行った。

クロスとバンドで補強した試験体ではクロスが引張強度を超え、付着強度も引張試験で得られた強度を超え、木理破断やクロスの引張破断が生じたものと考えられる。

曲げ試験では柱材とラミネート間の付着耐力が引張試験に比べ、1.2倍程度の増大が認められた。

以上の実験結果を考慮して、施工性が良く付着応力状態も確認できたラミネートを補強に採用することを検討した。ラミネート挿入型の補強を採用するには付着強度の確認ができておらず施工にも課題があるため追加の検討が必要とした。