

論文 付着用エポキシ樹脂接着剤を用いたコンクリートと合板の接着一体化に関する実験的研究

師橋 憲貴*1・阿部 忠*2・野口 博之*3・水口 和彦*4

要旨：本論文は、コンクリートと木材の付着用エポキシ樹脂接着剤による一体化を検討する基礎的研究として木材に合板を使用した試験体の直接引張試験による引張強度と、1面せん断試験によるせん断応力度を評価し、接着性能について検討を行ったものである。結果として、接着剤を塗布せず、接合具を用いない試験体はコア抜き時にコンクリートと合板の界面が分離したが、接着剤を塗布した場合は、接合具の有無にかかわらず、コンクリートと合板の界面の剥離およびせん断破壊は認められなかった。1面せん断試験の単位面積当たりの最大せん断強度は接合具を用いた試験体は接合具を用いない試験体と比較し1.6～1.8倍を示した。

キーワード：接着一体化、付着用エポキシ樹脂接着剤、直接引張強度、せん断応力度、接着性能

1. はじめに

近年、建築構造分野への木材の利用促進の一環として、中層建築構造物への利用を目的に合成構造の研究が行われている¹⁾。一例としてCLT(直交集成板)の上部に鉄筋コンクリートを配置した合成床スラブがある。このような合成床スラブは、曲げ応力を受ける際、下部のCLTが引張力を負担し、上部の鉄筋コンクリートが圧縮力を負担する合理的な構造となり、遮音性にも優れるという特徴がある。CLTと鉄筋コンクリートを一体化する方法としては金属製の接合具が用いられ、CLTと鉄筋コンクリートの内部に接合具が挿入されて、せん断力を伝達する手法が取られている。一方、コンクリートに関する接着剤に着目するとセメントの水和反応を阻害することなくフレッシュコンクリートの打ち継ぎに利用できる付着用エポキシ樹脂接着剤(以下、付着用接着剤という)が開発されている。筆者らの既往の研究においては、この付着用接着剤を既存コンクリートに塗布してモルタルを注入した柱部材は既存コンクリートとモルタルとの付着状況が良好で一体性が保たれることを確認している²⁾。そこで本研究ではコンクリートと木材を一体化する方法として付着用接着剤を用いることを試み、付着用接着剤を用いたコンクリートと木材の接着一体化を検討する基礎的研究として木材には合板を使用し、直接引張試験による引張強度と1面せん断試験によるせん断応力度を評価することにより接着性能について実験的に研究を行った。

2. 接着性能を評価する試験方法

本研究ではコンクリートと合板の接着一体化を評価する試験方法として、直接引張試験方法と1面せん断試験

方法の2方法により検討を行った。直接引張試験方法は写真-1に示すように、コンクリートを合板の面外方向に直接引張、引張強度を求める方法であり、建研式引張試験と称される汎用化した試験方法である。コンクリートにアタッチメントを付着用接着剤で装着し、試験装置で面外方向へ垂直に引張、荷重を読み取る方法で試験を行った。荷重速度は、表面被覆材の付着強さ試験に準じて毎秒0.02N/mm²とした。試験装置には変位の測定器が付属していないため、アタッチメントに引張力を与える全ネジボルトの頂部にアルミのアンクルを取り付け、アタッチメントが持ち上がる変位量をダイヤルゲージで測定した。1面せん断試験方法は写真-2に示すように、試験装置にコア抜きした試験体を挿入し、コンクリートと合板の接着面のせん断応力度を求める方法とした。試験装置を2000kN万能試験機にセットし、加圧盤で試験体の合板側が挿入されている可動部を加力することによりコンクリートと合板の接着面に直接せん断力を与えた。

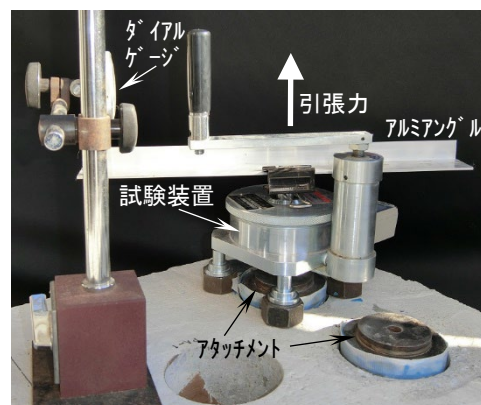


写真-1 直接引張試験方法

*1 日本大学生産工学部建築工学科 教授 博士(工学)(正会員)

*2 日本大学 名誉教授 博士(工学)(正会員)

*3 日本大学生産工学部土木工学科 助教 博士(工学)(正会員)

*4 日本大学生産工学部土木工学科 教授 博士(工学)(正会員)

荷重速度は、割裂引張強度試験に準じて毎秒 0.06N/mm²とした。変位は、可動部の沈み込み量を変位計により測定した。

3. 実験概要

3.1 試験体計画および形状

表-1 に試験体一覧を、また図-1 に試験体の採取箇所を示す。合板の大きさは、厚さ 42mm、長さ 920mm×915mm とした。合板の周囲に型枠を設置し、合板の上部にコンクリートを 90mm 打設した。合板は 4 区画に分け、接着剤を塗布せず、接合具を用いない試験体を P、接着剤を塗布し、接合具を用いない試験体を PA、接着剤を塗布し、接合具に N ぐぎを用いた試験体を PAN、接着剤を塗布し、接合具にラグスクリーを用いた試験体を PAL とした。写真-3 に合板を 4 区画に分けた状況を示す。接合具に N ぐぎおよびラグスクリーを用いた理由は、特殊な工具を必要とせず施工が容易であること、また一般に市販されており購入が容易で実用性があると考えたためである。1 区画に試験体は 3 体計画し、1 体は 1 面せん断試験(試験体名の末尾が 1)、残りの 2 体は直接引張試験(試験体名の末尾が 2 および 3)とした。

図-2 に直接引張試験の試験体形状を、また図-3 に 1 面せん断試験の試験体形状を示す。接合具には、径が M12、全長 133mm で首下長さ 125mm のラグスクリーおよび全長 90mm で丸くぎの形状をした N ぐぎを用いた。ラグスクリーおよび N ぐぎともに頂部から 22mm の被りコンクリートの厚さを設けてあらかじめ合板に設置しコンクリートを打設した。合板の上面は付着用接着剤が浸透するようくぎの先端を用いて傷を付け目荒らしを施した。直接引張試験の試験体はダイヤモンドコアドリルを用いて直径 100mm のコアビットにより合板の深さ 10mm までコア削孔を行った。1 面せん断試験の試験体は、直接引張試験の試験体と同様の方法でコアビットを貫通させてコア抜きし試験体を取り出した。

3.2 付着用接着剤の概要

表-2 に付着用接着剤の特性を示す。主剤と硬化剤の混合比は 5:1 で、混合後は硬化剤の色である写真-3 に示すような青色の液状のものを使用した。付着用接着剤は塗布後被着体と接着剤が馴染むまで 5 分以上の時間を取る仕様となっているため、コンクリートを打設する約 20 分前に塗布を開始し、塗布量は 1.4kg/m² とした。

3.3 コンクリートの概要

表-3 にコンクリートの調合を、また表-4 に打設時のコンクリートの性状を示す。コンクリートは呼び強度 24 N/mm² の普通コンクリートを使用した。打設後は屋根のある屋外にて試験体にビニールシートを掛けて養生を行った。表-5 に実験時のコンクリートの特性を示す。



写真-2 1面せん断試験方法

表-1 試験体一覧

試験体名	木材の種類	接着剤の有無	接合具の種類	試験方法
P-1 P-2 P-3	合板	無し	無し	1面せん断 直接引張
PA-1 PA-2 PA-3				1面せん断 直接引張
PAN-1 PAN-2 PAN-3		有り	Nぐぎ	1面せん断 直接引張
PAL-1 PAL-2 PAL-3			ラグスクリー	1面せん断 直接引張

試験体名は以下の単語の頭文字を用いて定義した。
Plywood: 合板 Nail: Nぐぎ
Adhesive: 接着剤 Lag screw: ラグスクリー

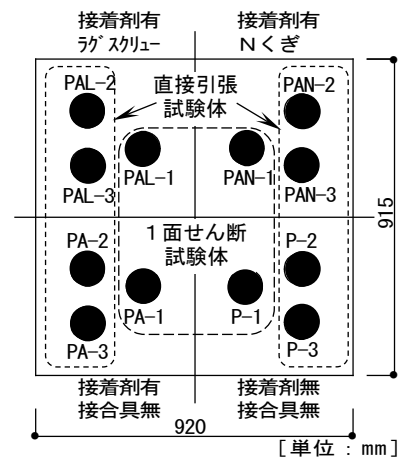


図-1 試験体の採取箇所

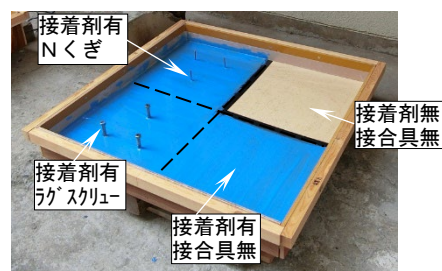


写真-3 合板の区画分け状況

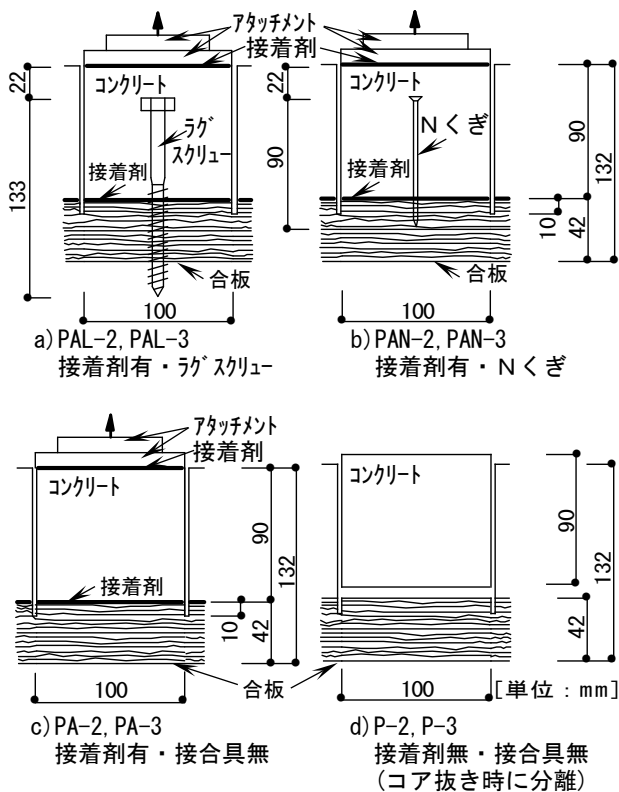


図-2 直接引張試験の試験体形状

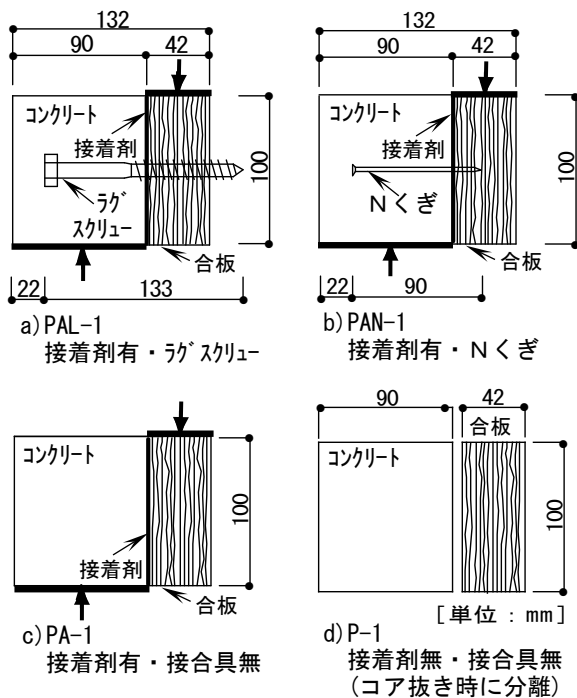


図-3 1面せん断試験の試験体形状

コンクリートの圧縮強度等は現場封かん養生としたテストピース(直径100mm, 高さ200mm)を用いて試験を行った。圧縮強度は28.9N/mm², 割裂強度は2.41N/mm²であった。テストピースに貼付したひずみゲージにより測定した圧縮ヤング係数は24.6kN/mm²であった。

3.4 合板の概要

表-6 に合板の特性を示す。合板の樹種はラワンで密

表-2 付着用接着剤の特性

外観	主剤	白色ペースト状
	硬化剤	青色液状
混合比(主剤:硬化剤)		5:1
硬化物比重		1.42±0.20
圧縮強さ		102N/mm ²
圧縮弾性係数		3976N/mm ²
曲げ強さ		41N/mm ²
引張せん断強さ		15N/mm ² 以上
コンクリート付着強さ		3.7N/mm ² 以上 3.7N/mm ² 以下の場合は母材コンクリート破断
標準塗布量		1.4kg/m ² (人力施工)

表-3 コンクリートの調合

空気量 (%)	W/C (%)	単位質量(kg/m ³)				
		水	セメント	粗骨材	細骨材	AE減水剤
4.5	57.0	183	321	934	853	4.82

呼び強度: 24N/mm², 粗骨材の最大寸法: 20mm
指定スランプ: 18.0cm

表-4 打設時のコンクリートの性状

スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
16.5	5.5	32

表-5 実験時のコンクリートの特性

圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	ヤング係数E (kN/mm ²)
28.9	2.41	24.6

表-6 合板の特性

密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	ヤング係数 (kN/mm ²)
415	15.1	4.13

度は415kg/m³, 電気抵抗式の木材水分計で測定した含水率は15.1%であった。また, 3点曲げ試験によって測定を行った静的ヤング係数は4.13kN/mm²であった。

4. 実験結果

表-7 に実験結果一覧を示す。接着剤を塗布せず, 接合具を用いない試験体のP-1~P-3はコア抜き時にコンクリートと合板の界面が分離し, 1面せん断試験および直接引張試験ともに試験が行えなかったため, データがない。

4.1 直接引張試験

直接引張試験について, 図-4 に直接引張強度-変位量関係を, また図-5 に各試験体の剥離発生時の直接引張強度を示す。直接引張強度は接合具を用いない試験体

表-7 実験結果一覧

試験体名	試験方法	剥離発生時の直接引張強度 (N/mm ²)	最大せん断応力度 (N/mm ²)	破壊状況	
P-1	1面せん断	—	—	コア抜き時にコンクリートと合板の界面が分離	
P-2	直接引張		—		
P-3			—		
PA-1	1面せん断	—	2.36	コンクリート内でせん断破壊	
PA-2	直接引張		0.89	—	合板内で剥離
PA-3			0.81		
PAN-1	1面せん断	—	4.28	コンクリート内でせん断破壊	
PAN-2	直接引張		0.69	—	合板内で剥離
PAN-3			0.89		
PAL-1	1面せん断	—	3.79	合板内でせん断破壊	
PAL-2	直接引張		1.02	—	合板内で剥離
PAL-3			0.90		

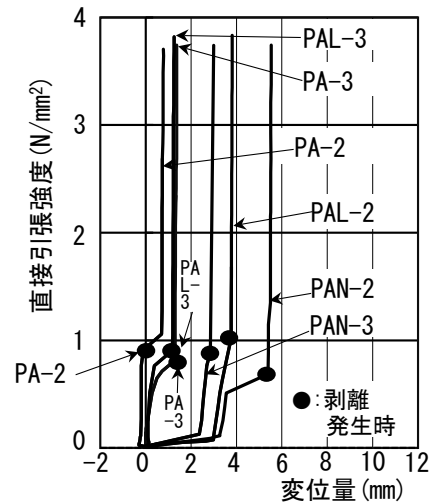


図-4 直接引張強度-変位量関係

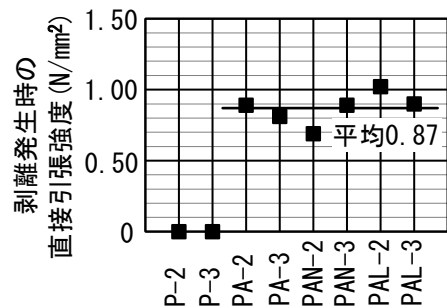


図-5 各試験体の剥離発生時の直接引張強度

と比較するため単位面積当たりの強度として式(1)により求めた。

$$\text{直接引張強度} = \frac{\text{直接引張試験の引張力(N)}}{\text{試験体の断面積(mm}^2\text{)}} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1)$$

図-6 に直接引張試験で想定される破壊モードを、接着剤を塗布し、接合具を用いない試験体の PA を例に示す。今回の直接引張試験では、a) 図アタッチメントとコンクリートの界面(接着剤)の剥離、b) 図コンクリート内での剥離、c) 図コンクリートと合板の界面(接着剤)の剥離、d) 図合板内で剥離のいずれも該当せず、試験体がコア内から引き抜けて取り出せるようなことはなかった。図-4 の直接引張強度-変位量関係に示す剥離発生時の●印は、試験時の観察で音が発生した時点および図中の変位量が増加せず直接引張強度のみが顕著に増加し始めた時点とした。PA-2 はコンクリートの仕上げの不陸のため直接引張試験装置のセットにガタ付きがありマイナスの値に触れてから変位量が増加した。直接引張強度を増加させると、PA-2、PA-3、PAL-3 は変位量があまり増加せずに剥離が発生し、PAN-2、PAN-3、PAL-2 は直接引張強度が小さい値の段階で変位量が増加し、その後直接引張強度が増加し剥離が発生した。剥離発生後は変位量が増加は認められず、直接引張強度が増加し試験装置が引張力を与えることのできる最大値(30kN)に達し試験を終

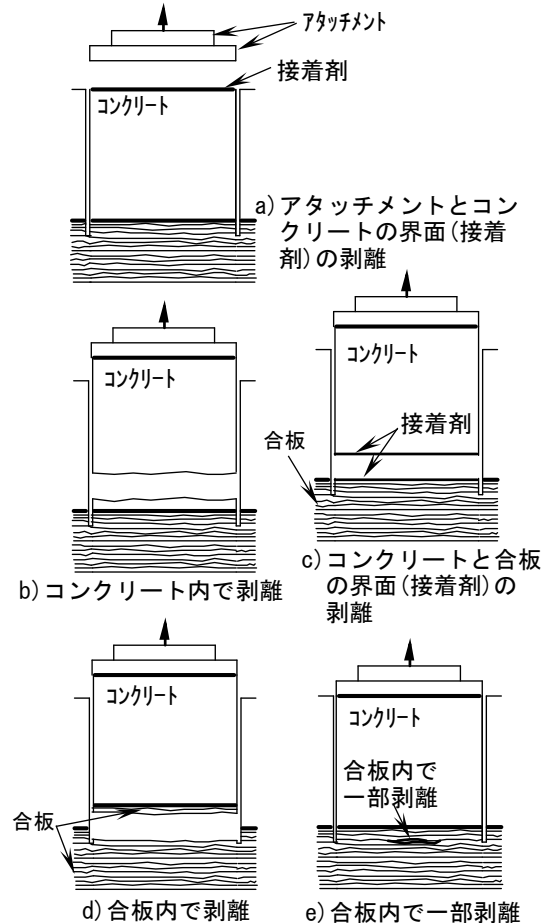


図-6 直接引張試験の破壊モード例

了した。変位量が増加せずに直接引張強度のみが増加した理由は、試験体がコア内にあり目視ができないため推測となるが、図-6 e)図に示すように合板を構成する単板の一部のみに剥がれが生じたが、まだ剥がれが生じていない単板が引張力を負担して変位量は増加せずに直接引張強度の増加が認められたものと考え。図-5の各試験体の剥離発生時の直接引張強度を見ると剥離発生時の直接引張強度は $0.69 \sim 1.02 \text{ N/mm}^2$ 、平均 0.87 N/mm^2 となっており、接合具の種類による直接引張強度の大きさの傾向は認められなかった。コンクリートの表面に仕上げモルタルとして軽量モルタル用いた既往の直接引張強度は平均 1.00 N/mm^2 で破断位置のほとんどがモルタルの破断という既往の研究³⁾があるが、本研究の直接引張強度の平均は 0.13 N/mm^2 ほど下回り、合板を構成する単板同士の引張強度に依存する影響が強かったものと考え。

4.2 1面せん断試験

1面せん断試験について、図-7にせん断応力度-変位量関係を、また図-8に各試験体の最大せん断応力度を示す。せん断応力度は式(2)により求めた。

せん断応力度=

$$\frac{1 \text{ 面せん断試験のせん断力(N)}}{\text{試験体の断面積(mm}^2\text{)}} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (2)$$

図-9に1面せん断試験で想定される破壊モードを、接着剤を塗布し、接合具を用いない試験体のPAを例に示す。接合具を用いない試験体のPA-1および接合具にNくぎを用いた試験体のPAN-1は、a)図コンクリート内でせん断破壊となり、接合具にラグスクリューを用いた試験体のPAL-1はc)図合板内でせん断破壊となった。b)図コンクリートと合板の界面(接着剤)のせん断破壊は認められなかった。図-7のせん断応力度-変位量関係を見ると接合具を用いない試験体のPA-1および接合具にNくぎを用いた試験体のPAN-1は、せん断応力度の増加に伴い変位量が増加しせん断破壊の発生によりせん断応力度が急激に低下した。接合具にラグスクリューを用いた試験体のPAL-1は変位量2mm付近でせん断応力度の増加が横ばいとなりせん断応力度の低下および増加を細かく繰り返しながら変位量が増加して変位量が7.5mm付近で最大せん断応力度となった。このせん断応力度の低下および増加の繰り返しはラグスクリューが曲げ変形を伴いながら合板へめり込みせん断応力度が回復したものと考え。図-8の各試験体の最大せん断応力度を見ると接合具を用いない試験体のPA-1は 2.36 N/mm^2 と接合具を用いた試験体と比較して低い値となり、表-5に示した実験時のコンクリートの割裂強度の 2.41 N/mm^2 と近い値となった。接合具にNくぎを用いた試験体のPAN-1および接合具にラグスクリューを用いた試験体のPAL-

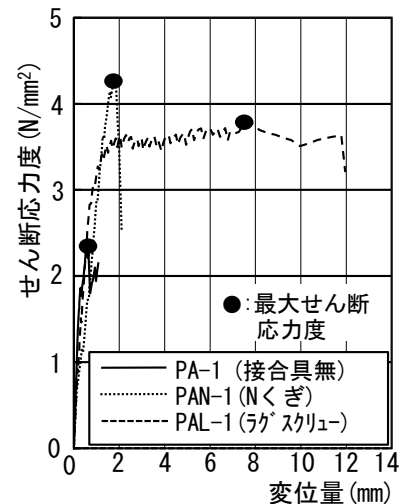


図-7 せん断応力度-変位量関係

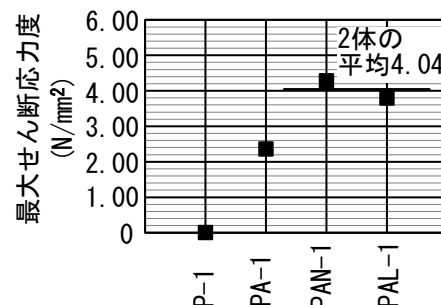


図-8 各試験体の最大せん断応力度

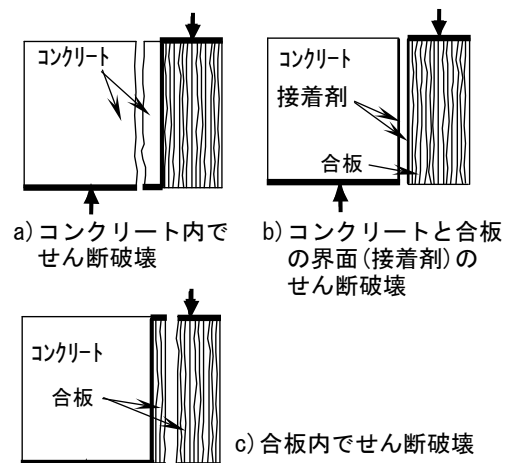


図-9 1面せん断試験の破壊モード例

1は $3.79 \sim 4.28 \text{ N/mm}^2$ 、2体の平均 4.04 N/mm^2 となり接合具を用いた試験体同士は近い値となった。

4.3 試験体の最終破壊形状等

写真-4に接着剤を塗布せず、接合具を用いない試験体P-1のコア抜き時に分離した状況を例示する。合板とコンクリートの界面は合板側およびコンクリート側ともに欠けなどは認められず付着力はかなり弱いことが確認できた。写真-5に接着剤を塗布し、接合具にNくぎを用いた試験体PAN-2の直接引張試験後に取り出した試験体の状況を例示する。直接引張試験では試験体がコア

内から引き抜けて取り出せるようなことはなかったが、アタッチメントの取り外しを兼ねて試験体を取り出してみた。その結果、合板を構成する単板が剥がれることによって試験体を取り出せた。取り出した試験体の観察により、合板とコンクリートの界面(接着剤)の剥離は生じていないことが確認できた。写真-6 に1面せん断試験の最終破壊形状を示す。a)図の接着剤を塗布し、接合具を用いない試験体 PA-1 はコンクリート内のせん断破壊となり、試験時に最大せん断力に達した後、せん断力の除去が遅かったことも考えられるが、コンクリート内で分離が認められた。b)図の接着剤を塗布し、接合具にNくぎを用いた試験体 PAN-1 は PA-1 と同様にひび割れをマジックでなぞって示したコンクリート内のせん断破壊となったが、接合具としてNくぎを用いたためコンクリート内での分離が発生する前にせん断力を除去することができたものとする。c)図の接着剤を塗布し、接合具にラグスクリューを用いた試験体 PAL-1 は、他の試験体と比較し変位量が大きかったためせん断力の除去後、試験体を試験装置から取り出すことができなかった。そのためコンクリートを研いで試験体を取り出した。その際、合板が分離していたため合板内のせん断破壊と判断した。また、ラグスクリューの曲げも認められたことから、ラグスクリューが合板をめり込ませ、合板のせん断破壊を発生させたものと推測する。

5. 結論

コンクリートと合板を付着用エポキシ樹脂接着剤を用いて接着した際の接着一体化について検討を行った結果、本実験の範囲内で以下に示す知見が得られた。

- 1)接着剤を塗布せず、接合具を用いない試験体はコア抜き時にコンクリートと合板の界面が分離した。一方、接着剤を塗布した場合、接合具の有無にかかわらず、コンクリートと合板の界面は、直接引張試験における剥離および1面せん断試験におけるせん断破壊は認められなかった。
- 2)直接引張試験では合板を構成する単板の一部のみに剥がれが生じたものと推測するが、その後、まだ剥がれが生じていない単板が引張力を負担して直接引張強度は増加したものとする。
- 3)1面せん断試験では接合具にラグスクリューを用いた試験体は、合板へのラグスクリューのめり込みと考えられる変位量の増加を伴いながらせん断応力度が最大を迎えた。

以上のことから木材とフレッシュコンクリートの一体化における付着用接着剤の有用性が認められた。一方、本研究では合板単体との引張強度およびせん断応力度の比較が行えていないので今後の課題としたい。

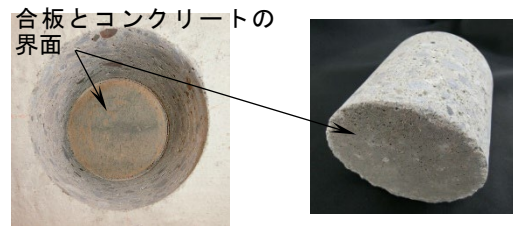


写真-4 接着剤を塗布せず、接合具を用いない試験体の分離の例示 (P-1)

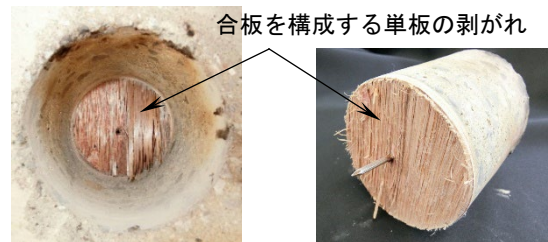


写真-5 直接引張試験後に取り出した試験体の例示 (PAN-2)



a) PA-1 のコンクリート内のせん断破壊



b) PAN-1 のコンクリート内のせん断破壊

c) PAL-1 の合板内のせん断破壊 (コンクリート研り後)

写真-6 1面せん断試験の最終破壊形状

参考文献

- 1)池田将和・荒木康弘・森拓郎・五十田博・北守顕久・藤田和彦：RC床版とCLTの合成床のクリープ性能に関する実験的研究 その1 接合部せん断クリープについて、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)，pp.277-278，2018.9
- 2)殿廣泰史・阿部忠・師橋憲貴・水口和彦：展張格子筋を用いて高強度無収縮モルタル増厚補強した再生コンクリート柱部材の耐荷力性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.2，pp.331-336，2022
- 3)大久保孝昭・根本かおり・長谷川拓哉：コンクリートと仕上げモルタルの接着一体性試験に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.373-378，2001