

論文 CFRP 接着工法における炭素繊維シート付着耐力向上実験

岳尾 弘洋*1・松下 博通*2・矢原 輝政*3・佐川 康貴*4

要旨：CFRP 接着工法における付着応力分布の基礎式より導かれた応力集中係数と、鉄片による引張せん断接着強度試験の結果より、炭素繊維シートの引張剛性を上げることで、炭素繊維シートの剥離終局荷重を増大させることが可能であるとの予測を得た。そこで、炭素繊維シート定着部の引張剛性を大きくする定着方法（2層増貼り）と、機械的に定着する方法（鋼板、アンカーボルト）とによりシートを定着した CFRP 補強コンクリート棒部材の両引き試験を行い、それぞれの定着効果を確認した。その結果、各定着方法による供試体はいずれも剥離終局荷重が向上する傾向を示した。

キーワード：CFRP 接着工法, 応力集中係数, 引張剛性, 増貼り, 機械的定着

1. はじめに

CFRP 接着工法における部材の終局は、炭素繊維シート（以下、「シート」と呼ぶ）の進行性剥離によって起こり、シートの付着応力は限られた区間のみ分布し、剥離の進行に伴い移動することが、既往の知見として得られている^{1), 2)}。また、本工法における、パイリニアモデルの付着応力-相対滑り関係も近年発表されている²⁾。本研究は、シートの剥離は付着応力が最大付着応力に達した時に起こるという観点より検討を始め、付着応力集中緩和を目的に研究を進めた。まず、CFRP 補強コンクリート棒部材をモデル化し、付着応力分布の基礎式を導き付着応力集中緩和の方向性を示した。その結果をもとに、鉄片による引張せん断接着強度試験を行い、パラメーターを特定した。その後、付着耐力向上が期待できるような各種定着方法により作製した CFRP 補強コンクリート棒部材の両引き試験を行い、その効果を確認した。

2. 付着応力分布基礎式の誘導

シートが剥離する以前の、シートとコンクリ

- | | | |
|-----|-------------|--------------------------|
| * 1 | ショーボンド建設(株) | 九州支店工事課 (正会員) |
| * 2 | 九州大学大学院教授 | 工学研究科建設システム工学専攻 工博 (正会員) |
| * 3 | 清水建設(株) | |
| * 4 | 九州大学大学院 | 工学研究科建設システム工学専攻 |

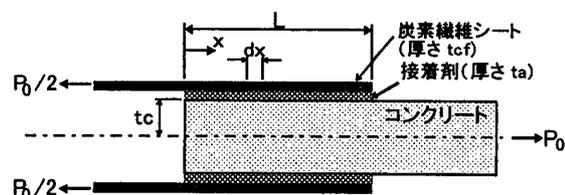


図-1 供試体モデル図

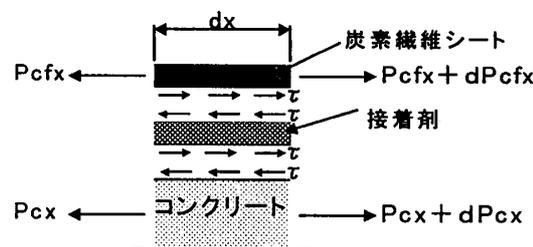


図-2 微小要素

ートの間に働く付着応力分布を得るため、図-1のような弾性体モデルを考え、付着応力分布基礎式を導いた。ここで、添え字 cf, c, a は、それぞれシート、コンクリート、接着剤を表す。

式の誘導にあたって、次の仮定を設けた。

- ・力のつり合いは、 x 方向のみを考える。
- ・接着剤の層は、せん断応力のみを伝える。
- ・微小区間 dx で τ (付着応力) は一定。

$x=x$ と $x=x+dx$ で囲まれた微小要素を各材料に分割したものを、図-2に示す。

微小区間 dx のシートに作用する力のつり合いから

$$P_{cfx} + dP_{cfx} + \tau \cdot b_{cf} \cdot dx - P_{cfx} = 0$$

$$\therefore \tau_x = -\frac{1}{b_{cf}} \cdot \frac{dP_{cfx}}{dx} \quad (1)$$

外力と供試体内の力のつり合いから

$$P_{cfx} + P_{cx} = \frac{P_0}{2} \quad (2)$$

となる。

次に、フックの法則およびひずみと変位の関係より

$$P_{cfx} = E_{cf} \cdot b_{cf} \cdot t_{cf} \cdot \varepsilon_{cf}$$

$$= E_{cf} \cdot b_{cf} \cdot t_{cf} \cdot \left(-\frac{\partial u_1}{\partial x} \right) \quad (3)$$

$$P_{cx} = E_c \cdot b_c \cdot t_c \cdot \varepsilon_c$$

$$= E_c \cdot b_c \cdot t_c \cdot \left(-\frac{\partial u_2}{\partial x} \right) \quad (4)$$

となる。ここで、 u_1 、 u_2 は、シートおよびコンクリートの変位である。

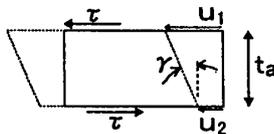


図-3 接着層の変形

接着剤の層については、図-3より

$$\tau_x = G_a \cdot \gamma = G_a \frac{u_1 - u_2}{t_a} \quad (5)$$

となる。

式(1)~式(5)より u_1 、 u_2 を消去すると

$$\frac{d^2 P_{cfx}}{dx^2} - \alpha^2 P_{cfx} + \frac{\beta}{2} P_0 = 0 \quad (6)$$

ただし、

$$\alpha^2 = \frac{G}{t_a} \left(\frac{1}{E_{cf} \cdot b_{cf} \cdot t_{cf}} + \frac{1}{E_c \cdot b_c \cdot t_c} \right) \cdot b_{cf} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{G}{t_a} \cdot \frac{1}{E_c \cdot b_c \cdot t_c} \cdot b_{cf} \quad (8)$$

となり、これが付着応力分布の基礎式である。 $x=0$ で $P_{cfx} = P_0/2$ および $x=L$ で $P_{cfx} = 0$ という境

界条件を用いれば式(6)の解として

$$\frac{P_{cfx}}{P_0/2} = (1-\eta) \cosh \alpha x$$

$$- \frac{(1-\eta) \cosh \alpha L + \eta}{\sinh \alpha L} \sinh \alpha x + \eta \quad (9)$$

ただし、

$$\eta = \frac{\beta}{\alpha^2} \quad (10)$$

を得る。

さらに、式(1)の関係から τ_x を求めると式(11)

の双曲線関数になる。

$$\tau_x = \frac{P_0}{2} \cdot \alpha \cdot \frac{1}{b_{cf}}$$

$$\times \left\{ \frac{(1-\eta) \cosh \alpha L + \eta}{\sinh \alpha L} \cosh \alpha x - (1-\eta) \sinh \alpha x \right\} \quad (11)$$

$x=0$ のとき最大値

$$\tau_{\max} = \frac{P_0}{2} \cdot \alpha \cdot \frac{(1-\eta) \cosh \alpha L + \eta}{\sinh \alpha L} \cdot \frac{1}{b_{cf}} \quad (12)$$

をとる。

ここで、平均せん断応力 τ_{ave} を

$$\tau_{ave} = \frac{P_0/2}{b_{cf} \cdot L} \quad (13)$$

と定義し、応力集中係数³⁾ ξ として付着応力の最大値と平均せん断応力の比を考えると

$$\xi = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{ave}} = \alpha \cdot L \cdot \frac{(1-\eta) \cosh \alpha L + \eta}{\sinh \alpha L} \quad (14)$$

となり、 αL が十分大きいとすると、応力集中係数 ξ は、次のように近似できる。

$$\xi \approx \alpha \cdot L \cdot (1-\eta) \quad (15)$$

式(15)において、 α を小さくすることで ξ が小さくなり、応力集中を緩和できる。 α を小さくするには、式(7)において、工法上改良可能である接着剤の層厚 t_a とシートの引張剛性 $E_{cf} \cdot A_{cf}$ を大きくすればよいことになる。

これらの応力集中要因が、接着強度に及ぼす影響を実験的に確認するため、標準的な含浸接着剤を用いて基礎実験を行った。

3. 応力集中係数の各パラメータに対する基礎実験

3. 1 実験概要

接着剤の厚さおよび被着体の厚さ（引張剛性）をパラメータとして引張せん断接着強度試験（JIS K 6850）を行った。

(1) 供試体

供試体は、図-4に示すように、25×100mmの鋼板2枚（SS400）を、接着剤（CFRP接着工法で使用する含浸接着剤）により接着長さ12.5mmで接着し、支持体を使い、引張実験中に偏心がかからない様にした。

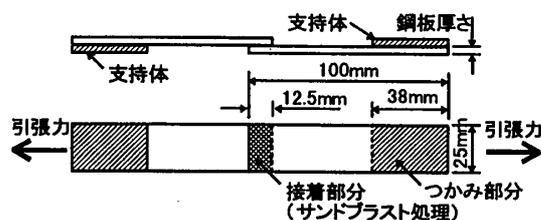


図-4 供試体図

(2) 実験要因

引張せん断接着強度に対する、接着剤の厚さの影響を調べるために、接着剤の厚さを60～300 μm の範囲で10種類に変化させた供試体（鋼板厚1.6mm一定）を作成した。また被着体の剛性の影響を調べるために、鋼板の厚さを0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0mmと変化させた供試体（接着剤厚は一定）を作成した。各要因において、各々5本の供試体を作製した。

(3) 実験方法

2.5tf 万能試験機により引張実験を行い破壊に至るまでの最大荷重を測定した。引張せん断接着強度は、式(16)により求め、5本の平均値により実験結果を整理した。載荷速度は1mm/min., 試験時温度は20℃で行った。

$$s = P/A \quad (16)$$

ここで、 s ：引張せん断接着強度(N/mm²)

P ：最大荷重(N)

A ：供試体のせん断面積(mm²)

3. 2 実験結果

供試体の破壊は、全て接着剤と鋼材表面の界面破壊によって起こった。含浸接着剤の厚さと

引張せん断接着強度との関係を図-5に、鋼板厚と引張せん断接着強度の関係を図-6に示す。

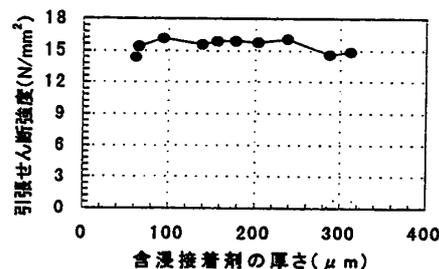


図-5 接着剤厚と引張せん断強度の関係

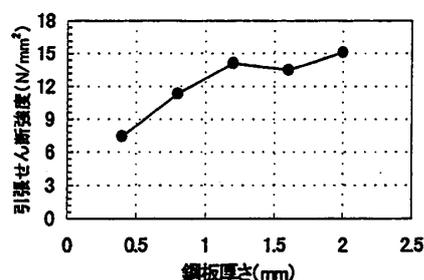


図-6 鋼板厚と引張せん断強度の関係

図-5より、前節の仮定に反して、接着剤の厚さを厚くしても引張せん断接着強度は増加しないことが分かる。接着剤厚が厚くなることにより、最大付着応力に至るまでの相対滑り量は大きくなるが、引張せん断強度は増加しないことより、既往の研究²⁾に見られる付着応力-相対滑り関係の塑性域の存在が示唆される。

図-6より、被着体（鋼板）の剛性を上げることにより、引張せん断接着強度が増加することが分かる。これは、前節のシートの引張剛性を上げることで、応力集中が緩和されるという結果に相当するものであり、また、既往の研究¹⁾におけるシートの引張剛性は、付着耐力に正比例するという結論とも一致するものである。

次に、曲げ引張部をモデル化した両引き供試体を用いて、シート定着部の引張剛性と剥離終局荷重の関係を確認した。

4. 付着耐力向上実験

4. 1 実験概要

(1) 供試体

本実験に用いた供試体の概略を、図-7に示す。供試体は、10cm×10cmの棒部材とし、つかみ部としてD19の鉄筋(SD295A)を埋め込んだ。シートは、接着幅4cm、片側(測定側)接着長さ30cmとし軸方向の向かい合う側面に接着した。接着面は、ディスクサンダー処理後、エポキシ樹脂プライマーを塗布し、エポキシ樹脂含浸接着剤を用いてシートを接着した。また、片側で破壊するように、測定側と補強側に区別し、補強側には軸方向、軸直角方向の2方向に繊維が配列されるようシートを増貼りした。使用したシート、含浸接着剤の物性を、それぞれ表-1、表-2に示す。コンクリートは、W/C=55.0%、粗骨材最大寸法20mm、スランプ8cm、空気量2.5%で、圧縮強度30MPaを目標としたものを使用した。

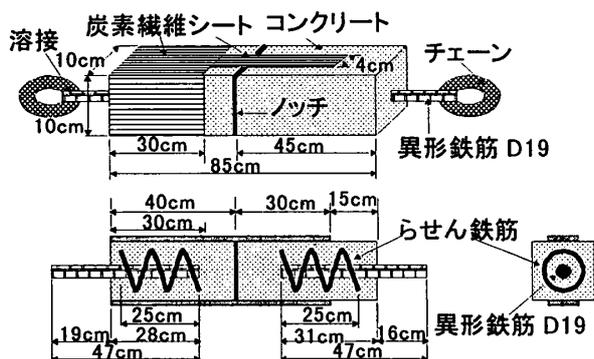


図-7 供試体概略図

表-1 炭素繊維シートの物性

弾性係数 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	厚さ (mm)	目付量 (g/m ²)	破断伸度 (%)
2.30×10 ⁵	3481	0.167	300	1.5

表-2 含浸接着剤の物性

曲げ強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	引張せん断強度 (N/mm ²)	混合粘度 (mp·s)
85.8	59.7	15.7	4130

(2) 実験要因

シートの付着応力集中緩和により、剥離時付着耐力を向上させることを目的として、以下の3点に着目し実験要因を決定した。実験要因を、

表-3 実験要因及び実験結果

No.	試験要因	コンクリート強度 (N/mm ²)		剥離発生荷重 (kN) A	終局荷重 (kN) B	荷重幅 (kN) B-A
		圧縮	引張			
①	1層	30.7	3.13	21.4	27.3	5.9
②	全体2層	33.0	3.05	28.3	37.7	9.4
③	層別2層	上10cm	2.61	21.6	29.9	8.3
		上15cm	2.61	20.8	31.3	10.5
		上20cm	3.13	20.3	29.5	9.2
⑥	下15cm	33.0	3.05	18.3	27.2	8.9
⑦	鋼板定着	32.3	2.95	13.8	32.0	18.2
⑧	アンカー定着	32.3	2.95	16.1	26.3	10.2

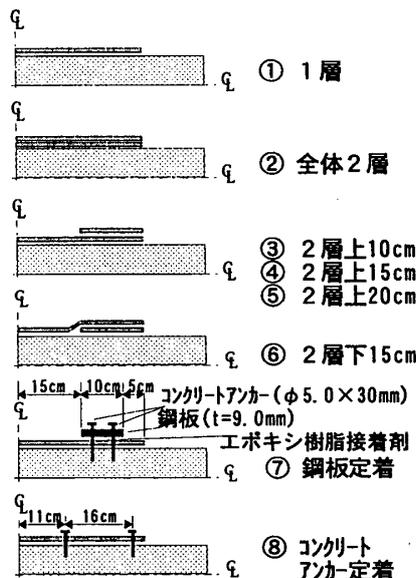


図-8 実験要因図

表-3 および図-8に示す。

- ・ 定着長さだけシートの引張剛性を上げる。
- ・ 定着長は既往の研究¹⁾より、10~15cm前後とする。
- ・ 比較のため、機械的にシートを定着する。

供試体①は、シートを1層貼りつけたもので、供試体②は、シートを全体に2層貼り付けたものである。供試体③~⑥は、付着応力集中緩和により剥離進行を抑える目的でシート端部において各定着長さだけシートを増厚(引張剛性を増加)したもので、供試体⑦、⑧は、シート端部において機械的にシートを定着したものである。供試体⑦は、シートを鋼板とコンクリートアンカーで定着したもので、供試体⑧は、シートをコンクリートアンカーのみで定着したものである。

(3) 載荷方法

載荷速度は、ノッチ部にひび割れが発生するまでは 0.06mm/min.で、その後、破壊に至るまで 0.03mm/min. (変位制御) で載荷を行った。荷重はロードセルから読み取り、各荷重時のひずみを、シート表面に貼り付けたワイヤストレーンゲージ (30mm) により測定した。

4. 2 実験結果および考察

(1) 破壊性状

実験結果を、表-3にまとめる。荷重の増加に伴い、中央ノッチ部にひび割れが発生する。ノッチ部のひび割れ発生と同時に、ノッチより3~5cm の位置に 45 度方向の斜めひび割れが発生し、荷重は一時低下する。再び荷重は増加し、シートの剥離が発生する。剥離後、荷重はわずかに増加しながら、シートの全面剥離で終局を迎える (供試体①~⑥)。

定着部を、鋼板で補強した供試体⑦の終局は、片面のシートが鋼板内で剥離し、終局を迎えた。

定着部を、コンクリートアンカーのみで補強した供試体⑧は、アンカー径 ($\Phi 5\text{mm}$) の幅のシートをコンクリート面に残してシートが全面剥離し終局を迎えた。

全ての供試体の剥離面は、プライマーと含浸接着剤間の界面破壊と、コンクリート表層部の凝集破壊が混在していた。

(2) 剥離発生荷重

ノッチ近傍のひび割れ部を除いた部分で、最もノッチに近いひずみゲージと隣接するひずみゲージの値が等しくなったときの荷重を、剥離発生荷重とした。

剥離発生荷重を、シート接着時の施工性を表す指標としてみると、供試体⑦、⑧の値が他の供試体の値と比べて著しく小さく、供試体⑦、⑧が同一作成日であることよりシート接着時の施工不備が伺える。

(3) 剥離発生荷重および終局荷重

シートの剥離進行を抑制する効果を評価するため、剥離発生荷重と終局荷重の差 (表-3の荷重幅 B-A) をとり、定着補強していない供

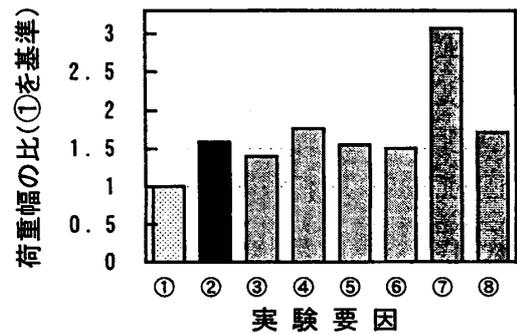


図-9 剥離進行抑制効果

試体①の値に対する割合を、図-9に整理した。

図-9より、定着部を増貼り補強した供試体の荷重幅はいずれも供試体①より大きく、供試体④ (上 15cm 増貼り) の値が最も高く、付着耐力向上効果が大きいことが分かる。また、供試体⑥ (下 15cm 増貼り) についてもある程度の効果が期待できることが分かる。

供試体⑦ (鋼板定着)、⑧については、定着機構が異なること、剥離発生荷重が小さかったことにより一概に比較できないが、供試体⑦の終局荷重はシート引張強度の 70%程度であり十分な定着効果があるといえ、供試体⑧については定着効果があまり期待できないといえる。

(4) シートのひずみ分布

供試体①、②、⑤について、各荷重時のひずみ分布を、それぞれ図-10、11、12に示す。いずれの供試体においても、荷重の増加に伴いシートの剥離が進行し、全面剥離に至る過程が伺える。各荷重においてひずみグラフの傾きが負の領域は、付着に寄与している付着有効域である。また、負の領域中央部の傾きが直線の部分は付着応力-相対滑り関係の塑性域と考えられる。図-10、11より、付着有効域のひずみ分布の傾き ($\Delta\varepsilon/\Delta L$) を比較すると、供試体②の傾きは供試体①の傾きの2分の1程度であるが、引張剛性 ($E_{cf} \cdot A_{cf}$) が2倍であるため、1層貼り、2層貼りともコンクリートとシートの最大付着応力 ($E_{cf} \cdot A_{cf} \cdot \Delta\varepsilon/\Delta L$) は、ほぼ等しいといえる。

また、供試体②の付着有効域の長さは、供試

体①の長さの2倍程度である。同一付着力で付着有効域が長いということは、剥離に対する付着抵抗が大きくなることと考えられ、剥離終局耐力が大きくなることが説明できる。これは、2層貼りのシートの引張剛性が1層貼りの値より大きく、付着応力集中が緩和され、剥離進行中の付着有効域が大きくなった結果であると考えられる。

また、図-12のひずみ分布より1層貼りの区間は、図-10（1層貼り）と同じひずみ分布形状を、2層貼りのひずみ分布は、図-11（2層貼り）と同じひずみ分布を示していることが分かる。この事より、付着有効域が剥離の進行に伴って増貼り定着区間に達すると、増貼り部のシートの引張剛性の影響で付着応力緩和効果が現れ、剥離終局荷重が増加することが説明される。

5. まとめ

CFRP 接着工法において、シートの剥離終局荷重を向上させる事を目的に、一連の研究(付着応力分布基礎式の誘導, 鉄片による基礎実験, コンクリート供試体による引張実験)を行った。以下に、本研究で得られた結果をまとめる。

(1) 完全弾性体モデルより誘導したシートの付着応力集中係数から、接着剤の層厚 t_a とシートの引張剛性($E_{cf} \cdot A_{cf}$)を大きくすることにより、付着応力集中緩和が期待できる。

(2) 鉄片を使った引張せん断接着試験(JIS K 6850)より、被着体の引張剛性($E_{cf} \cdot A_{cf}$)を大きくすれば、付着耐力が向上する。

(3) コンクリート供試体を使った引張試験より、シートの定着部を増貼りすることにより剥離抑制効果が認められ、剥離終局荷重は増加する。

(4) 上記実験中、シートの定着部上面を15cm増貼りした供試体の剥離抑制効果が、最も大きかった。

(5) シートを鋼板により機械的に定着することにより、剥離抑制効果が期待できる。

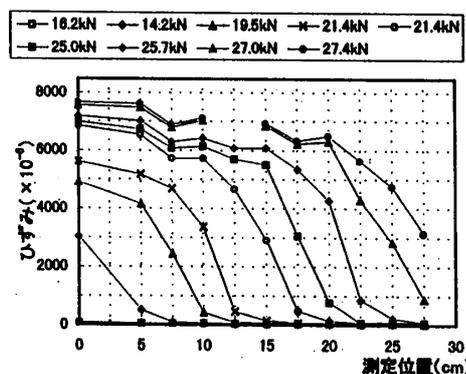


図-10 ひずみ分布 (供試体①)

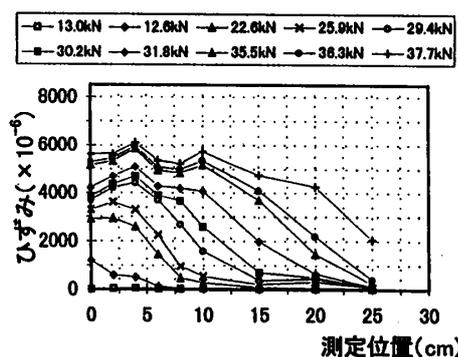


図-11 ひずみ分布 (供試体②)

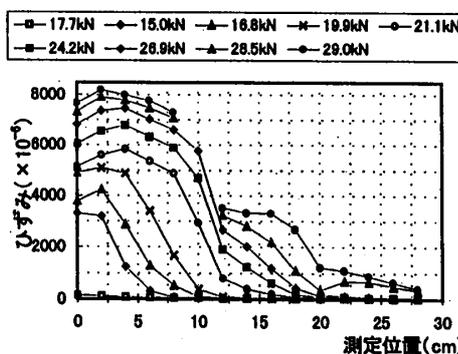


図-12 ひずみ分布 (供試体⑤)

参考文献

- 1) 岳尾弘洋ほか：CFRP 接着工法における炭素繊維シートの付着特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19, No.2, pp.1599-1604, 1997.6
- 2) 佐藤裕一ほか：CFRP シートとコンクリートの付着挙動(その1)，日本建築学会構造系論文集，No.500, pp.75-82, 1997.10
- 3) 福田博・邊吾一著：複合材料の力学序説，古今書院，1993