

樹脂特性を考慮した FRP シート-コンクリート界面付着特性の解析的評価

早稲田大学 学生会員 ○尾崎 允彦

早稲田大学 正会員 佐藤 靖彦

1. はじめに

近年、既設構造物の補修補強に FRP シートを用いる工法が普及している。コンクリート構造物を FRP シートによって補強した場合、剥離によって破壊に至ることが多いため、FRP シートとコンクリートの付着性状及び剥離抑制については多くの研究が行われてきた¹⁾。また、既往の研究から FRP シート接着の際に、緩衝材としてポリウレタ樹脂を用いることで付着耐力が向上することが実験的に明らかになっている²⁾。しかし、樹脂の特性を考慮した評価はできておらず、その設計法の確立が課題である。そこで、本研究では筆者が提案した付着応力-すべり関係を用いてパラメトリック解析を行うことで、各材料特性による最大荷重の変化について検討を行った。

2. 解析概要

図-1 のような片引付着試験体について各材料及び形状条件を変化させたパラメトリック解析を行った。具体的には、樹脂の付着剛性（弾性係数／厚さ）、FRP シートの剛性（弾性係数×厚さ）、母材の弾性係数、付着長をパラメータとして変化させた。材料特性を表-1 に示す。

接着界面の力のつり合いと FRP シートの引張力及びひずみの関係から図-2 に示す解析モデルを用いた数値解析により荷重-すべり関係を求めた。なお、収束条件は誤差の許容値を 1% とした。解析に用いた付着応力-すべり関係を式(1)~(3)に示す。

プレピーク領域 ($\tau < \tau_{\max}$)

$$\text{荷重端} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} \geq 832 \cdot \frac{t_m^{0.4}}{E_c^{0.85} \cdot E_m^{0.4}} \right)$$

$$\tau = \alpha \cdot S$$

$$\alpha = \left\{ 3 \cdot \ln \left(0.04 + 4.19 \times 10^{-6} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} \cdot E_c^{1.7} \right) + 1 \right\} \times 0.046 \left(\frac{E_m}{t_m} \right)^{0.75}$$

$$\text{自由端} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} < 832 \cdot \frac{t_m^{0.4}}{E_c^{0.85} \cdot E_m^{0.4}} \right)$$

$$\tau = \beta \cdot S$$

$$\beta = \left\{ 4000 \cdot \exp \left(-3.66 \times 10^{-2} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} \cdot E_c^{0.9} \right) + 4.4 \right\} \times 0.82 \left(\frac{E_m}{t_m} \right)^{0.05}$$

ポストピーク領域 ($\tau \geq \tau_{\max}$)

$$\tau = \tau_{\max} \cdot \exp(-C(S - S_{\max}))$$

(1)

(2)

(3)

ここで、 C :3.0, ε :ひずみ, E_c :コンクリートの弾性係数, E_m :樹脂の弾性係数, t_m :樹脂の厚さ, τ :付着応力, S :すべり, $\tau_{\max}$:最大付着応力, $S_{\max}$:最大付着応力時のすべり, $\varepsilon_{\max}$:ひずみの最大値

3. 解析結果と考察

各パラメータを変化させた場合の最大荷重と付着剛性、シートの剛性、母材の弾性係数、付着長の関係を図-3~6 にそれぞれ示す。図-3 では付着剛性が 20 N/mm³ 付近で最大荷重が最大値となっている。これは付着剛性を小さくすると図-7 のように付着応力-すべり関係の面積である界面剥離破壊エネルギーが大きくなるため、

キーワード FRP, 付着応力-すべり, パラメトリック解析, ポリウレタ樹脂, 付着特性

連絡先 〒169-0072 東京都新宿区大久保 3-4-1 TEL 03-5286-3852

表-1 材料特性		
材料	弾性係数 (N/mm ²)	厚さ (mm)
FRP シート	259000	0.333
ポリウレタ樹脂	66	2.0
コンクリート	30697	150

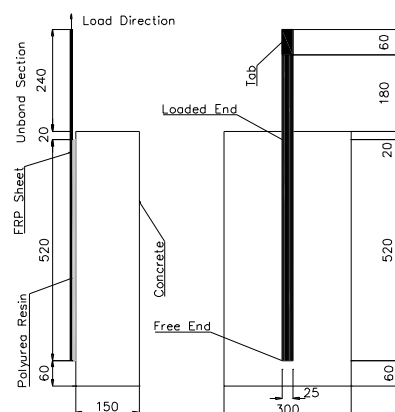


図-1 付着試験体

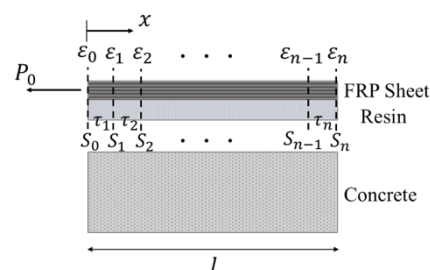


図-2 解析モデル

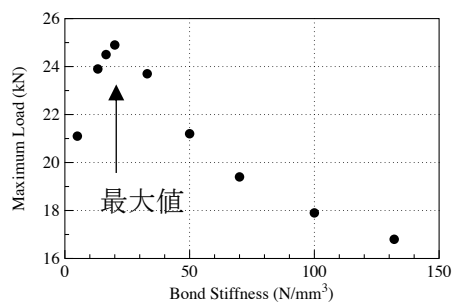


図-3 最大荷重と樹脂の付着剛性

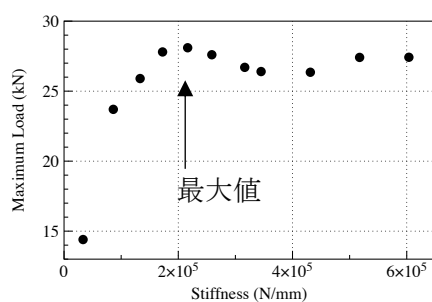


図-4 最大荷重とFRP シートの剛性

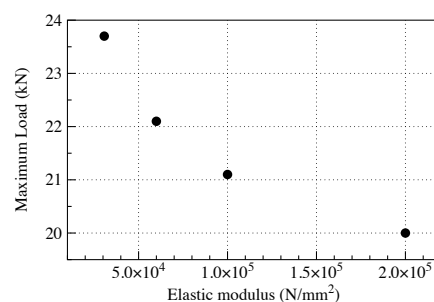


図-5 最大荷重と母材の弾性係数

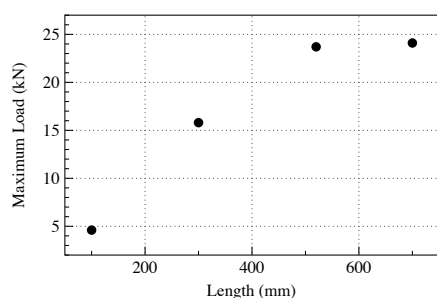


図-6 最大荷重と付着長

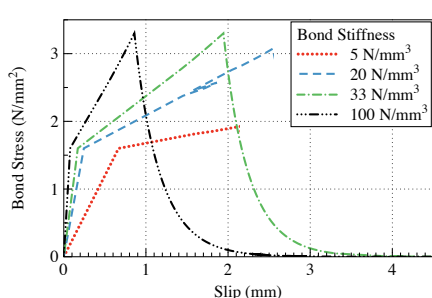


図-7 付着応力-すべり関係

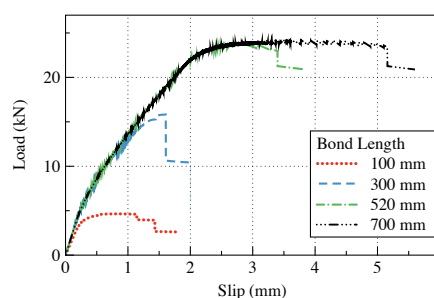


図-8 荷重-すべり関係

有効付着長の増加とともに最大荷重も増加することによる。一方、付着剛性がある一定以下の大きさになると、付着応力-すべり関係が最大付着応力に達する前に終局に至ってしまうため、最大荷重が減少し、FRP シートの補強効果が十分に発揮できていない。図-4 に示すように FRP シートの剛性を変化させた場合も同様に最大値が存在するが、その最大値より FRP シートの剛性が大きい範囲でも、樹脂の付着剛性の場合のように最大荷重の急激な低下は見られず、わずかに最大荷重が減少する程度であった。これは、樹脂の付着剛性の場合と異なり、最大値より剛性が大きくなった場合には最大付着応力が減少するものの界面剥離破壊エネルギーの減少はわずかであるため、最大荷重の低下度合いが小さいと考えられる。

図-5 に示す母材の弾性係数を変化させた場合では、弾性係数を増加させると最大荷重がわずかに小さくなることがわかる。既往の研究で示されているように、他のパラメータに比べて弾性係数の違いによる影響は小さいものと考えられる。また、弾性係数を低下させる方が付着耐力を向上させる結果となった。今回の検討では、母材を弾性体として扱った。弾性係数を小さくすることは間接的にひび割れの発生を考慮しているとも考えることができるが、今後は、その影響を直接的に加味した検討をしていく必要がある。

付着長を変化させた場合、図-6 に示すようにある一定の付着長を超えると最大荷重が増加しなくなることがわかる。これは、有効付着長に対して付着長が短い場合には付着長と有効付着長が等しくなるまでは付着耐力の向上に付着長が寄与するが、有効付着長以上では付着耐力の向上に寄与しないことを示す。しかし、図-8 に示すように有効付着長以上となった場合、最大荷重は増加しないが剥離が開始してから終局に至るまでの剥離進展域が大きくなるため、構造全体としての伸び能力は向上している。

4. まとめ

付着応力-すべり関係を用いたパラメトリック解析より、樹脂の付着剛性や FRP シートの剛性によって、付着試験における剥離荷重が最も大きくなる材料特性が存在することを見出すことができた。また、付着長を増加させた場合には設計上伸び能力に寄与すると考えられる。今後は、非線形性解析を実施する必要がある。

参考文献

- 1) 佐藤靖彦, 浅野靖幸, 上田多門: 炭素繊維シートの付着機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.648/V47, pp.71-87, 2000.
- 2) 小林朗, 尾崎允彦, 佐藤靖彦, 荒添正棋, 立石晶洋, 小森篤也: 高伸度弾性樹脂を用いて接着した FRP シートとコンクリートの付着挙動に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 66A, 2020.