

ポリウレア樹脂層を有する FRP シートとコンクリート間の 付着機構に関する検討

Study on bond mechanism between FRP sheet and concrete with polyurea resin layer

北海道大学大学院工学院北方圏環境政策工学専攻 ○学生員 樺木達也 (Tatsuya Kabaki)
北海道大学大学院工学院北方圏環境政策工学部門 正会員 佐藤靖彦 (Yasuhiko Sato)

1. はじめに

既設コンクリート構造物の補強工法として CFRP ストランドシート工法がある。これまでに、シートとコンクリート界面にポリウレア樹脂層を設けることで部材耐力がさらに向上することが明らかとなっている¹⁾。これは、樹脂層を設けることでシート-コンクリート間の付着強度が増加した結果であると考えられる。一方で、低温環境下で行った補強後の RC はり部材の曲げせん断試験では、ポリウレア樹脂の効果の程度とともに耐力や破壊形式が変化することが報告されている²⁾。これは、低温環境下におけるポリウレア樹脂の力学特性の変化が、シート-コンクリート間の付着性状に影響を及ぼすためであると推察される。これらの事実を合理的に説明するためには、ポリウレア樹脂層を有するシートとコンクリート間の付着機構を明らかにしなければならない。

本研究では、常温と低温環境を対象とし、ポリウレア樹脂層の影響を考慮できる CFRP シート-コンクリート間の付着モデルを開発する。

2. 既往の実験結果

2.1 実験概要

付着モデルの開発にあたり、過去に著者らの研究室において行われた実験結果を用いる²⁾。実験供試体は図-1 に示す高さ 600mm で断面が 300mm×300mm のコンクリートブロックに鋼板を含めた長さ 860mm、幅 100mm のストランドシートを接着長 500mm で貼り付けたものである。供試体上部のストランドシートを挟んだ鋼板部分をアクチュエータにて引っ張ることでシートとコンクリート界面に付着力を導入した。ストランドシートには下端から 20mm 間隔でひずみゲージを貼付した。

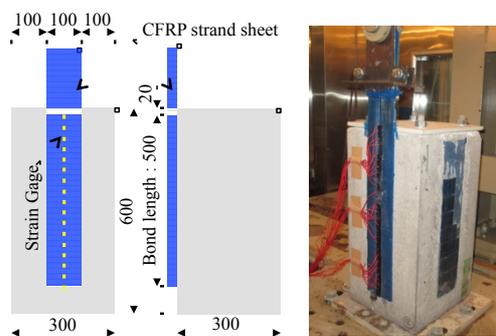


図-1 実験供試体²⁾

2.2 実験結果

クリップゲージによって測定したポリウレア樹脂を用いた場合の端部のすべりを図-2 に、ポリウレア樹脂を用いない場合の端部のすべりを図-3 に示す。

図-2 より常温では大きなすべりが生じているが、低温では最大荷重時でも 0.05mm 程度のすべりしか生じていない。これはポリウレア樹脂の弾性係数が温度によって変化したためだと考えられる。

図-3 より、ポリウレア樹脂を用いない場合の端部のすべりは無視できるほど小さいことが明らかである。

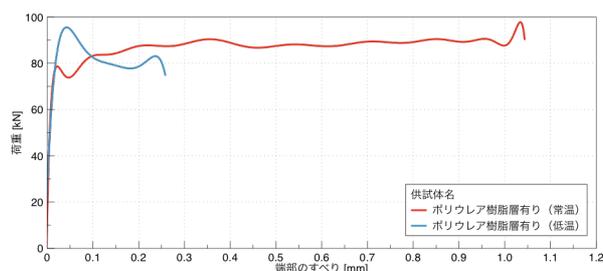


図-2 ポリウレア樹脂層が有る場合の端部すべり

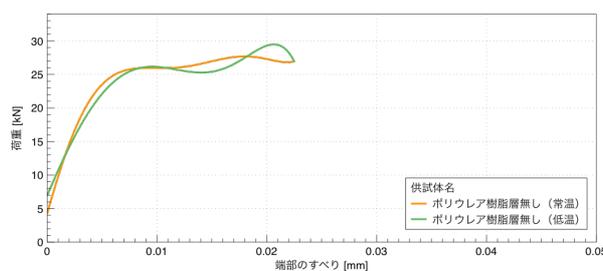


図-3 ポリウレア樹脂層が無い場合の端部すべり

3. 付着モデル

過去の実験により、ポリウレア樹脂を設けた場合、端部でのすべりが生じることが明らかとなった。そこで、端部のすべりが存在する場合の付着の基礎式を導く。

3.1 基礎式の誘導

文献 3)を参考とし基礎式を導く。試験体の応力は横断面内で等分布と仮定する。まず外力と試験体内に働く力の釣合いから次式が得られる。

$$P_{cfx} + P_{mx} = 0 \quad (1)$$

ここで、 P_{cfx} はシート内および樹脂層からなる部分の内部の引張力、 P_{mx} はコンクリート内部の引張力を示す。

次に、図-4 に示す微小区間 dx のシートに作用する力の釣合いから次式が得られる。

$$\frac{dP_{cfx}}{dx} = -b \cdot \tau_x \quad (2)$$

ここで、 b はシートの付着幅を表す。

また相対すべり S_x の dx 区間における増分 dS_x は、樹脂層およびコンクリートからなる部分の平均変形と、シートの平均変形との差に等しいことから次式が求まる。

$$-\frac{dS_x}{dx} = \frac{P_{cfx}}{E_{cf} \cdot A_{cf}} - \frac{P_{mx}}{E_m \cdot A_m} \quad (3)$$

ここで、 E_{cf} はシートの弾性係数、 E_m は樹脂層とコンクリートからなる部分の等価弾性係数、 A_{cf} はシートの断面積、 A_m は樹脂層とコンクリートの断面積を示す。

式(1)、(2)、(3)より、次式が得られる。

$$-\frac{d^2S_x}{dx^2} = k^2 \cdot S_x \quad (4)$$

ここで、 S_x はシート・樹脂層・コンクリートからなる部分の相対すべり、 x は試験体材軸方向の座標（荷重端部を 0）を表し、 k は部材の寸法や材料によって定まる常数である。

式(4)は、付着問題に関する基礎微分方程式と言われ、付着応力がすべり量の関数として表せる付着構成則が与えられれば、任意の境界条件の下で式(4)を解くことにより、すべり量の分布、付着応力の分布を得ることができる。

図-5 に示すように、相対すべりと付着応力が弾性範囲内にある場合を考えた場合の、 $x=0$: $P_{cfx}=P_{cf0}$ および $x=l_{cf}$: $S_x=S_0$ という境界条件を用いて、式(4)を解き、付着応力 (τ_x) を求めると、次式で表される。

$$\tau_x = \frac{k \cdot \sinh(kl_{cf} - kx)}{b \cdot \sinh(kl_{cf})} \cdot P_{cf0} + \frac{\alpha \cdot \cosh(kx)}{\sinh(kl_{cf})} \cdot S_0 \quad (5)$$

ここで、 l_{cf} はシートの付着長、 P_{cf0} はシートに加わる引張力、 α は付着応力-すべり関係における係数、 S_0 は端部のすべりを表す。

式(5)より、シート全体に作用する付着応力は、シートに作用する引張力による付着応力（第1項）と樹脂層の変形による付着応力（第2項）の和で表される考えることができる。

3.2 付着モデル

本研究では、佐藤⁴⁾が開発した付着モデルを参考に、ポリウレタ樹脂を有するモデルを考える。

プレピーク領域

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{K \cdot f_c^{0.2} \cdot S}{1 + 10^3 \cdot \varepsilon} + \gamma \cdot S_0 \quad (6)$$

ポストピーク領域

$$\tau = \tau_{max} \cdot \exp(-C(S - S_{max})) \quad (7)$$

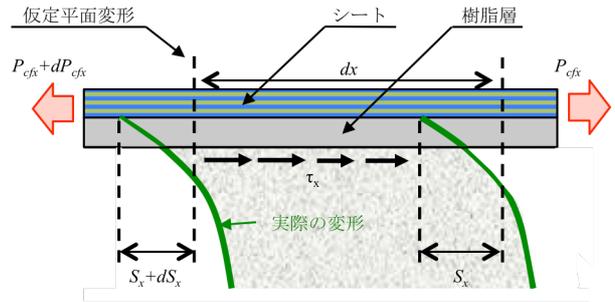


図-4 力の釣合い

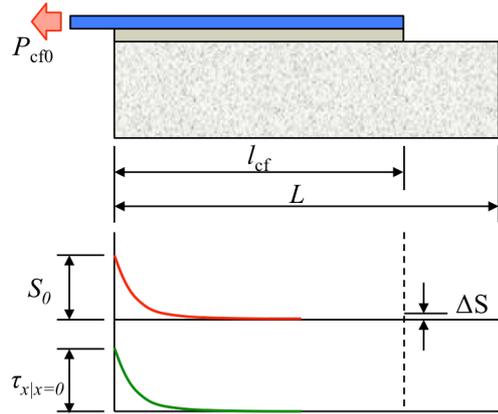


図-5 弾性範囲内におけるすべりと付着応力の関係

ここで f_c はコンクリート圧縮強度、 S_0 は端部すべり、 S_{max} は最大付着応力時のすべり、 K 、 γ 、 C は係数を表す。

実験結果との比較から K 、 γ 、 C 、 τ_{max} を変数としており、ポリウレタ樹脂層有りの常温および低温、ポリウレタ樹脂無しでの3条件に対して係数を定めた。係数を表-1に示す。

表-1 付着モデルに用いた係数

| 条件 | K | γ | C | τ_{max} |
|------------|-----|----------|-----|--------------|
| 樹脂層有り (常温) | 10 | 30 | 3.0 | 3.0 |
| 樹脂層有り (低温) | 15 | 30 | 2.5 | 3.5 |
| 樹脂層無し | 60 | 0 | 10 | 3.8 |

4. 付着モデルによる実験結果の再現性

4.1 最大荷重

表-2 に実験値と数値解析における最大荷重と両者の比を示す。実験結果と解析結果が一致している。

表-2 実験と計算の最大荷重の比較

| 条件 | 実験値 (kN) | 解析値 (kN) | 実験と解析の比 |
|------------|----------|----------|---------|
| 樹脂層有り (常温) | 93.0 | 93.0 | 1.00 |
| 樹脂層有り (低温) | 96.4 | 92.6 | 1.04 |
| 樹脂層無し | 30.7 | 28.3 | 1.09 |

4.2 ひずみ分布

図-6 にひずみ分布図を示す。ポリウレア樹脂層を有する常温および低温において、荷重が大きいかほど実験値との差は大きくなっているが全体の傾向を再現できている。また、ポリウレア樹脂層無しの場合において良好な再現性を有している。

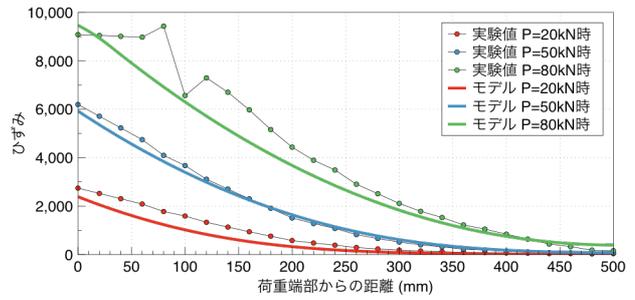
4.3 付着応力-すべり関係と荷重-ひずみ関係

図-7 に荷重端部から 160mm と 400mm の付着応力-すべり関係を示す。荷重端に近い 160mm 位置の結果を示す図-7(a)において、3 条件それぞれ実験値と概ね値が近い結果となっている。自由端に近い 400mm の結果を示す図-7(b)において、ポリウレア樹脂層を用いない場合においては実験値に近い値を示しているが、ポリウレア樹脂層を用いた場合、すべりが増えるにつれ実験値との差異が生じる。

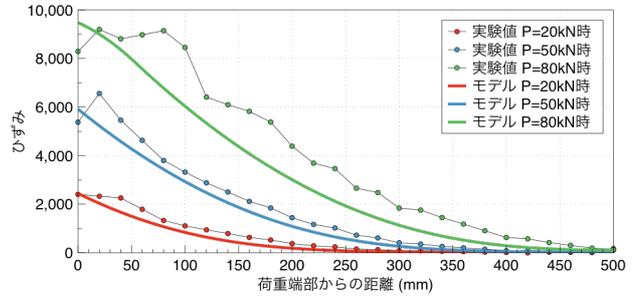
図-8 に荷重端部から 160mm と 400mm の荷重-ひずみ関係を示す。荷重端に近い 160mm 位置の結果を示す図-8(a)において、ポリウレア樹脂層を用いた時の常温では、立ち上がりを実験よりも早く、実験と差が生じている。低温時では、実験での荷重が 50 から 80kN 間における挙動を正しく再現できていない。図-8(b)において、3 条件それぞれ実験値と概ね値が近い結果となっている。

4.4 端部のすべり

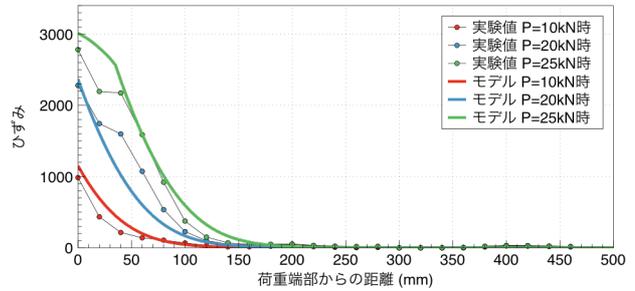
常温時におけるポリウレア樹脂層を用いた際の荷重-端部のすべり関係を図-9 に示す。図-9(a)において、実験では荷重が 70kN 付近に達してから端部のすべりが著しく増加しているのが分かる。



(a) ポリウレア樹脂層有り (常温)

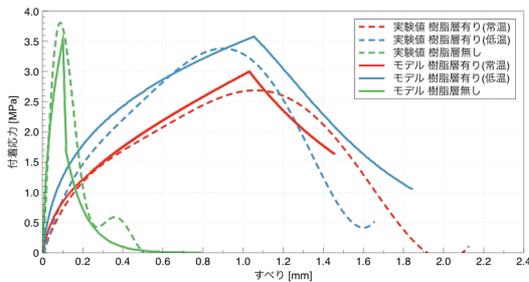


(b) ポリウレア樹脂層有り (低温)

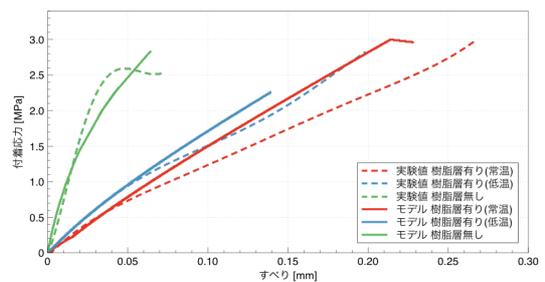


(c) ポリウレア樹脂層無し

図-6 ひずみ分布図

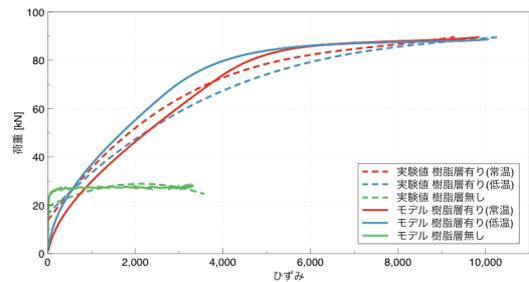


(a)荷重端部から 160mm

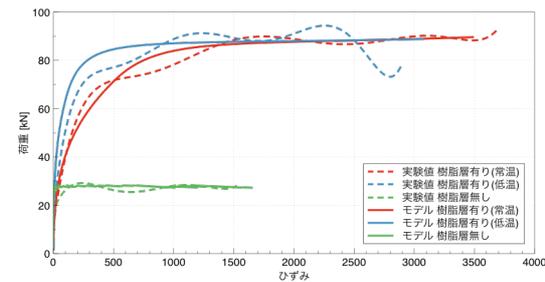


(b)荷重端部から 400mm

図-7 付着応力-すべり関係

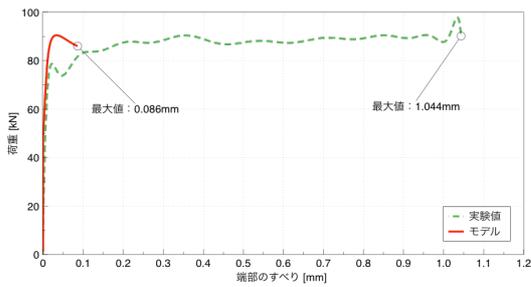


(a)荷重端部から 160mm

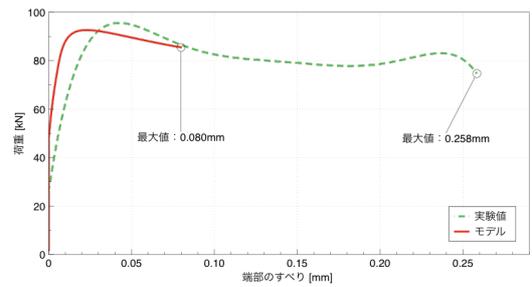


(b)荷重端部から 400mm

図-8 荷重-ひずみ関係

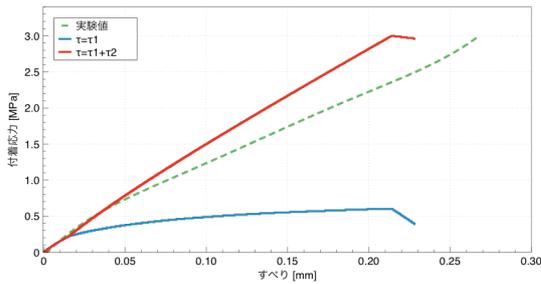


(a)常温時

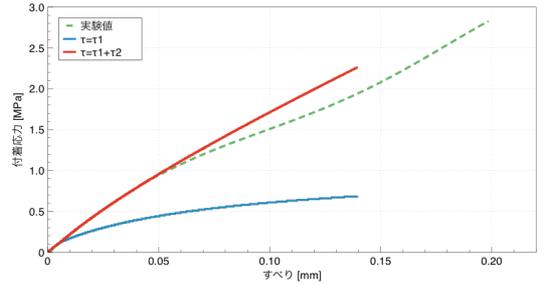


(b)低温時

図-9 荷重-端部のすべり関係



(a)常温時



(b)低温時

図-10 樹脂層に作用する付着応力の影響

端部のすべりの最大値は、実験では 1.044mm に対し、解析では 0.086mm と実験値と比べ 1/12 程度しかない。図-9(b)においても、荷重が 90kN 付近に達してから端部のすべりが急激に大きくなっている。提案する付着モデルにより概ねの挙動は再現できているが、端部のすべりの最大値が、実験では 0.258mm、解析では 0.080mm と、両者に大きな差が見られる。

4.5 樹脂層に作用する付着応力の影響

ここで、図-10 にポリウレタ樹脂層を用いた際の常温時と低温時における端部での樹脂層に作用する付着応力 (τ_2) の大きさを示した。赤線は試験体全体に作用する付着応力 ($\tau_1 + \tau_2$) を示し、青線はシートに作用する付着応力 (τ_1) を示す。つまり、赤線と青線の差は樹脂層に作用する付着応力 (τ_2) を示す。樹脂層に作用する付着応力 (τ_2) の値が大きいため、全体に作用する付着応力 ($\tau_1 + \tau_2$) が実験値よりも大きい値になっていると考えられる。したがって、付着モデルで端部の付着挙動の精度を向上させるためには、ポリウレタ樹脂のせん断と引張の特性を加味する必要があると考えられる。

5. まとめ

開発した付着モデルにより、ポリウレタ樹脂の有無ならびに常温と低温を対象とした場合の最大荷重、ひずみ分布、付着応力-すべり関係、および荷重-ひずみ関係を良好に再現できた。しかし、ポリウレタ樹脂を有する場合の端部のすべりの予測精度が低い。今後、ポリウレタ樹脂のせん断剛性を考慮することで精度の向上を図りたいと考えている。

参考文献

- 1) 小林朗, 佐藤靖彦, 高橋義裕, 立石晶洋: FRP ストランドシート の材料特性と RC 梁の曲げ補強効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No.3, pp.1561-1566, 2008
- 2) 小川泰成: ポリウレタ樹脂を用いた CFRP ストランドシート補強部材の低温時力学特性に関する研究, 北海道大学修士論文, 2016
- 3) 佐藤裕一, 木村耕三, 小島克朗: CFRP シートとコンクリートの付着挙動, 日本建築学会構造系論文集第 500 号, 75-82, 1997
- 4) 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研究, 土木学会論文集, No.648/V-47, pp.71-87, 2000