

国内外で提案された FRP シート-コンクリート界面付着モデルによる付着応答の差異

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

コンクリート構造物の補強法として FRP シートを用いた工法が広く普及している。FRP シートで補強を行った場合は、FRP シートが剥離することで部材全体の破壊に至ることが多い。このため、補強後の部材の破壊を制御するためには、FRP シート-コンクリート界面の付着性状を適切に評価できる必要がある。

FRP シートの付着に関する研究は、1990 年代から 2000 年代にかけて多く行われており、数多くの付着モデルが提案されている。ここで、付着モデルとは FRP シート-コンクリート間の局所的な付着応力-すべり関係のことである。これまでの研究は、付着モデルの形状の差異に着目するものが多く、付着モデルがシートとコンクリート間のマクロな応答にどのような違いが現れるのかを比較した研究はほとんど見られない。付着性状を正確に把握するためには、全体挙動も併せて検討する必要がある。そこで、本研究では、現在までに提案されている代表的な付着モデルを用いた付着試験の数値解析を行うことで、局所的な付着モデルがマクロな応答にどのような影響を及ぼすのかを明らかにする。

2. 既往の付着モデル

現在までに国内外で多くの付着モデルが提案されている。既往の付着モデルの多くは実験結果から付着応力-すべり関係を算出し、モデルの構築を行っている。本研究で検討する付着モデルは、Lu ら¹⁾、Monti ら²⁾、Nakaba ら³⁾、Pellegrino ら⁴⁾、Savoia ら⁵⁾、Wu and He⁶⁾、Dai ら⁷⁾、Wu and Jiang⁸⁾、佐藤ら⁹⁾によるものである。ここで、各付着モデルの特徴として、Monti モデルと Pellegrino モデルはバイリニアの関係として提案されており、Nakaba モデルと Savoia モデルは Popovics 式に従うように構築されている。また、Lu、Wu and He、Wu and Jiang、Dai、Sato モデルは最大付着応力までは急激に付着応力が増加し、ポストピークでは徐々に軟化していくような形状のモデル

となっている。特に、Dai モデルと Sato モデルは局所的な FRP シートのひずみや位置による付着応力の変化も考慮されている。

3. 数値解析による付着応答

既往の付着モデル 9 ケースを用いて付着試験体の数値解析を行い、実験結果と比較することでその付着応答を評価する。接着長 520 mm、付着幅 25 mm の付着試験体¹⁰⁾を解析対象として、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-1 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、また、FRP シートの破断は考えない。

数値解析によって得られた荷重-すべり関係を図-2(a)、荷重端から 50 mm 地点の付着応力-すべり関係を図-2(b)に示す。ここで、実験値は同じ条件において 2 回の試験を行ったため、2 体の供試体を示している。図-2(a)より最大荷重時までの挙動は Nakaba、Savoia、Dai のモデルがよく一致している。これは図-2(b)の付着応力-すべり関係が実験値と近いためである。しかし、実験結果は最大荷重後に剥離の影響で荷重が低下した後、一定となるのに対し、既往の付着モデルでは、この現象を再現できておらず最大荷重のまますべりが増加している。最大荷重後に荷重が変動する挙動については、Sato モデルが実験と近い挙動を示している。これは、Sato モデルでは付着応力-すべり関係が位置によって変化するため、剥離の進展とともに荷重が変化する挙動を再現できる。

4. 付着モデルを用いたパラメトリック解析

既往の付着モデルを用いてパラメトリック解析を行う。図-3(a)はコンクリート圧縮強度を 30 N/mm²に固定し、FRP シートの剛性（弾性係数×厚さ）を変化させた場合の最大荷重を示している。図-3(a)より全てのモデルで剛性の増加とともに最大荷重が増加しているものの、増加の度合いはモデルによって異なっていることがわかる。特に剛性が大きい場合に

キーワード FRP, 付着応力-すべり関係, 付着モデル, パラメトリック解析, 付着性状

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

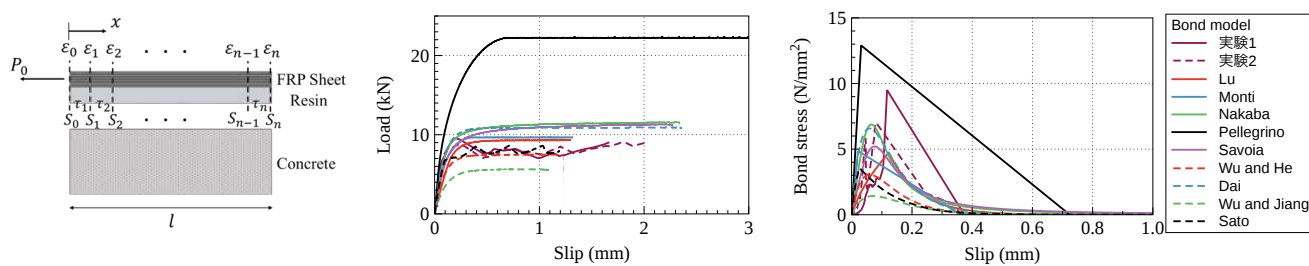
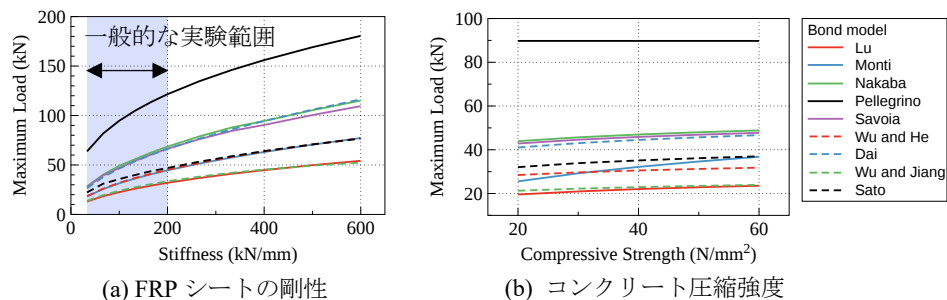


図-1 解析モデル

(a) 荷重-すべり関係

(b) 付着応力-すべり関係

図-2 実験結果との比較



(a) FRP シートの剛性

(b) コンクリート圧縮強度

図-3 材料特性を変化させた場合の最大荷重

においては最大荷重がモデルによって大きく異なっている。これは実験結果よりモデルが構築されているため、実験を行った範囲に依存したモデルとなっているためだと言える。これより、現在のモデルでは適用範囲が実験を行った範囲に限られていると言え、FRP シートを用いた自由度の高い柔軟な設計を行うためには、適用範囲の広い付着モデルを構築する必要がある。図-3(b)のコンクリート圧縮強度による影響をみると、Monti モデル以外では圧縮強度による最大荷重の変化は小さくなっている。このため、圧縮強度がマクロな付着応答へ及ぼす影響は小さいと考えられる。

5. まとめ

既往の付着モデルを用いて付着試験の数値解析を行うことで、以下の知見が得られた。

- ・ 実験結果と比較した場合、最大荷重時までの挙動や最大荷重後の挙動とそれぞれ近い挙動を示すモデルは幾つかあったが、全体として FRP シートの剥離現象などを十分に再現できているモデルはなかった。
- ・ パラメトリック解析により、どのモデルも基となる実験範囲に依存しているため、適用範囲が限られることが明らかとなった。また、FRP シートを用いた設計範囲を広げていくためには、汎用的な付着モデルを構築する必要がある。

参考文献

- 1) X. Z. Lu et al., Bond-slip models for FRP sheets/plates

bonded to concrete, Engineering Structures, Vol.27, pp.920-937, 2005.

- 2) G. Monti et al., FRP adhesion in uncracked and cracked concrete zones, FRPRCS-6, pp.183-192, 2003.
- 3) K. Nakaba et al., Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete, ACI Structural Journal, Vol.98(3), 2001.
- 4) C. Pellegrino et al., Experimental study on bond behavior between concrete and FRP reinforcement, J. Comps. Constr., Vol.12(2), pp.180-189, 2008.
- 5) M. Savoia et al., Non linear bond-slip law for FRP-concrete interface, FRPRCS-6, pp.163-172, 2003.
- 6) Y. F. Wu and L. He, Width effect of interfacial bond characteristics, Construction and Building Materials 220, pp.712-7126, 2019.
- 7) J. Dai et al., Unified analytical approaches for determining shear bond characteristics of FRP-concrete interfaces through pullout tests, J. ACT, Vol.4(1), pp.133-145, 2006.
- 8) Y. F. Wu and C. Jiang, Quantification of bond-slip relationship for externally bonded FRP-to-concrete joints, J. Comps. Constr., Vol.17(5), pp.673-686, 2013.
- 9) 佐藤靖彦：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, Vol.47(648), pp.71-87, 2000.
- 10) 小林朗：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, pp.855-867, 2020.