

# 論文 FRP シートとコンクリート界面のモデル化に着目した有限要素解析による剥離破壊の再現性評価

尾崎 允彦\*1・佐藤 靖彦\*2

**要旨:** 付着試験における FRP シートの剥離破壊の FEM 解析による再現性を 4 つのモデル化手法により検討した。FEM 解析でのモデル化として、樹脂とコンクリート界面に離散的なインターフェース要素を用いることで、実際の剥離挙動を再現できることが明らかとなった。また、コンクリート表層 (2 mm) の材料特性のみを変更した場合のモデルでは、荷重伝達領域が大きくなってしまふものの、ひび割れ性状は実際の付着挙動と一致することを確認した。

**キーワード:** FRP シート, 付着試験, FEM 解析, 付着挙動, 付着応力-すべり関係, ひび割れ性状, 剥離

## 1. はじめに

近年、既設コンクリート構造物の補強工法として FRP シートによる補強が広く行われている。FRP シートを用いた補強では、部材耐力は FRP シートとコンクリートの付着に大きく影響されるため、FRP シートとコンクリートの付着に関する研究が多く行われてきた<sup>1)</sup>。FRP シート-コンクリート間の付着を評価する場合には、付着試験を行う必要がある。最近、付着試験方法として、付着長を確保するために、片引付着試験が用いられ、その付着試験を解析上で再現し、FRP シート-コンクリート間の付着特性を評価する研究が行われている<sup>2),3)</sup>。

既往の FRP シートの付着解析では、各材料を直接モデル化した非線形有限要素解析<sup>4),5)</sup>や、付着応力-すべり関係をインターフェース要素に導入した非線形有限要素解析<sup>3)</sup>が行われてきた。インターフェース要素を用いる場合には、解析を行う際に実験結果の付着応力-すべり関係もしくは提案されている付着モデルを用いる必要がある。しかし、付着モデルについては現在までに多くのモデルが提案されている<sup>6)</sup>が、付着モデル自体のばらつきが大きく、適用範囲も限られているため、限られた FRP シートや樹脂の材料特性及びその組合せにしか適用できない。また、付着試験によって付着応力-すべり関係を求める場合には実際の付着挙動を概ね再現することができるが、

実験から付着応力-すべり関係を求める必要がある。例えば、使用される環境に最適な FRP シート補強材料の開発、さらには、補強設計の自由度を広げるためには、付着応力-すべり関係を用いない解析によって付着試験を再現できることのメリットは大きい。しかし、付着応力-すべり関係を用いず、材料を直接モデル化して行った Pham and Al-Mahaidi<sup>6)</sup>による非線形有限要素形解析では、荷重-すべり関係などのマクロな挙動は一致しているものの、ひびみ分布性状やひび割れ性状は実験結果との差異が見られる。国内外のいずれの解析も FRP シートの剥離現象を十分に再現できているとはいえない。また、FEM 解析における付着試験のモデル化手法に着目した研究は行われていない。そこで、本研究では付着応力-すべり関係を用いない新たな解析方法の開発のために FEM 解析によるモデル化が付着挙動に及ぼす影響の詳細な評価を試みた。

## 2. 解析概要

### 2.1 解析モデル

#### (1) 付着試験供試体のモデル化

本研究における非線形有限要素解析では、解析コードとして DIANA10.4 を用いた。既往の実験<sup>2)</sup>の付着試験供試体を図-1 に示すように 2 次元でモデル化を行った。既往の研究<sup>6)</sup>と同様に、コンクリート要素は上側のみ細

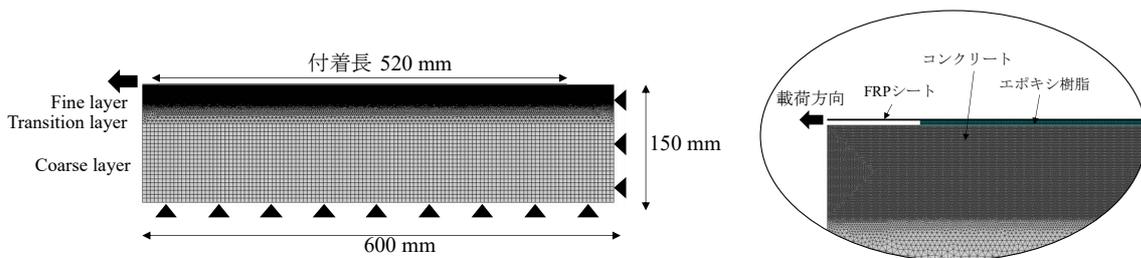


図-1 FEM 解析モデル

\*1 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻 (学生会員)

\*2 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科教授 博士 (工学) (正会員)

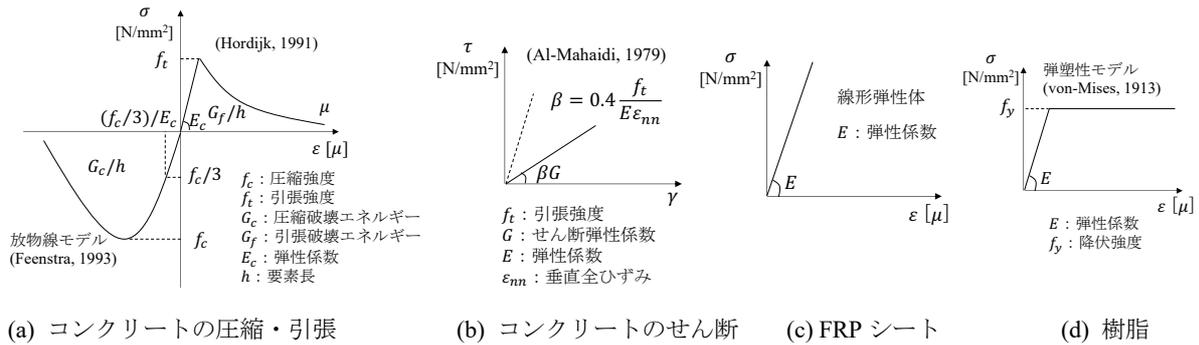


図-2 材料構成則

かいメッシュ (0.25 mm) として、下側は付着挙動に及ぼす影響が小さいことから粗いメッシュ (5.0 mm) とした。

(2) コンクリートの材料構成則

コンクリートの圧縮構成則は図-1(a)に示すように圧縮破壊エネルギーに基づく Feenstra の放物線モデル<sup>7)</sup>を用い、引張構成則には引張破壊エネルギーに基づいた Hordijk モデル<sup>8)</sup>を用いた。せん断構成則には図-2(b)に示す Al-Mahaidi のモデル<sup>9)</sup>を用いた。材料特性値は、圧縮強度 38.9 N/mm<sup>2</sup>、圧縮破壊エネルギー 54.89 N/mm、引張強度 2.64 N/mm<sup>2</sup>、引張破壊エネルギー 0.092 N/mm、せん断伝達係数の下限値 0 とした。

(3) FRP シートの材料構成則

本研究の範囲内では、FRP シートが破断ひずみまで達することはないため、材料構成則は図-2(c)のような線形弾性体とした。材料特性は実験値と同様に、弾性係数 259 kN/mm<sup>2</sup> とした。

(4) エポキシ樹脂の材料構成則

エポキシ樹脂の構成則は弾塑性モデルとして von-Mises 塑性モデルを用いた。エポキシ樹脂は弾性係数 2805 N/mm<sup>2</sup>、降伏応力 35 N/mm<sup>2</sup> とした。

2.2 解析方法

本研究では、FRP シートとコンクリート間のモデル化手法として次の 4 ケースを用いた非線形有限要素解析を行い、モデル化の方法に伴う解析結果への影響及び実験結果の再現性を議論する。

(1) 付着応力-すべり関係を用いた方法

最も実績のある方法は、実験結果より算定される付着応力-すべり関係を用いた非線形有限要素解析であり、本

論文では、この方法を、「付着応力-すべりモデル」として解析を実施する。採用した付着応力-すべり関係は実験により測定した FRP シートのひずみより算定した図-3 に示すモデルである。なお、ピーク付着応力 5.50 N/mm<sup>2</sup>、ピーク時すべり 0.10 mm、終局すべり 0.325 mm、法線方向剛性 2805 N/mm<sup>3</sup> とした。

(2) 各材料を直接モデル化した方法

既往の研究<sup>4),5),6)</sup>と同様にコンクリート、樹脂、FRP シートを別々の要素としてモデル化し、付着応力-すべり関係を用いない非線形有限要素解析 (以下、「直接モデル」) を行う。本モデルの特徴としては、付着応力-すべり関係を用いずに材料のみを直接モデル化し、コンクリートの非線形性のみで FRP シートの剥離現象を再現しようとするところにある。

(3) 接着界面に破壊インターフェース要素を用いた方法

新しい方法として、FRP シート-コンクリート界面の剥離を表現するために直接モデルの樹脂とコンクリート界面に破壊層としてインターフェース要素を導入したモデル (以下、「破壊インターフェース要素モデル」) の解析を行う。今回界面の剥離を表現するために用いたインターフェース要素は離散的なひび割れを再現するために用いられる要素であり、図-4 に示すひび割れモデルに基づいている。破壊インターフェース要素の剛性は、実際のエポキシ樹脂の剛性の 0.3 倍に設定した。また、破壊インターフェース要素の引張強度は、コンクリート表層ではコンクリート中央部よりもモルタル部分が多いため、表層の引張強度は実際のコンクリートの引張強度よりも

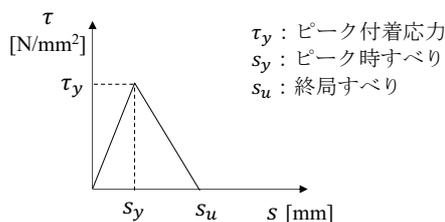


図-3 付着応力-すべり関係

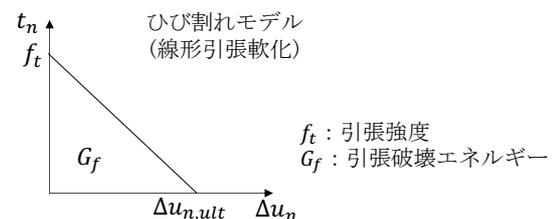


図-4 ひび割れモデル

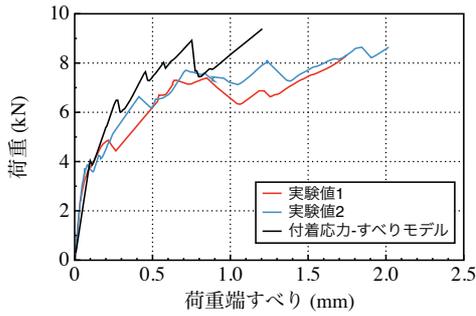


図-5 実験値と解析値の荷重-すべり関係

小さいと考えられる。しかし、その適切な値を決めることは難しい。ここでは、 $1.0 \text{ N/mm}^2$  に設定した。一方で、コンクリート表層にはエポキシ樹脂が含浸することが知られており、引張破壊エネルギーはコンクリート単体時よりも大きくなると考え、 $0.2 \text{ N/mm}^2$  に設定した。なお、破壊インターフェース要素は2節点、2積分点の線要素とし、1次の形状関数を用いた。

#### (4) コンクリート表層を破壊層とした新たな方法

新しいモデルとして、破壊インターフェース要素を用いずに直接モデルのコンクリート表層 (2 mm) に破壊を局所的に発生させることを意図し、コンクリートの表層の材料特性のみを変更したモデル (以下、「コンクリート表層破壊モデル」) を用意した。コンクリート表層ではコンクリート中央部に比べて、破壊インターフェース要素と同様にモルタル部分の割合が大きく、樹脂が含浸していると考えられるため、引張強度を  $1.0 \text{ N/mm}^2$ 、引張破壊エネルギーを  $0.2 \text{ N/mm}^2$  に設定した。また、せん断伝達は0とした。

破壊インターフェース要素モデルとコンクリート表

層破壊モデルで用いた引張強度と引張破壊エネルギーの数値の妥当性については今後検討を深める。

### 3. 解析結果と考察

#### 3.1 付着応力-すべりモデル

解析結果と小林ら<sup>2)</sup>による既往の実験の荷重-すべり関係の比較を行う。図-5に荷重-すべり関係を示す。全体的な挙動は良い一致を示している。しかし、新井ら<sup>3)</sup>の解析結果でも見られるように、終局時のすべりが小さく実際の試験体の伸びが再現できていない。これは、実際の付着応力-すべり関係と実験値よりモデル化した付着応力-すべり関係の差異によるものであると考えられる。なお、実験は同様の条件で2回行われており、それらの結果が実験値1と実験値2として示されている。また、荷重は、荷重端におけるFRPシートのひずみに弾性係数と断面積を乗じることで算出し、荷重端すべりについてはFRPシートのひずみを積分することによって求めた。

図-6に実験と解析のFRPシートのひずみ分布をそれぞれ示す。解析によるFRPシートのひずみは、Pham and Al-Mahaidi<sup>6)</sup>やLuら<sup>10)</sup>の解析でも見られるように、曲げの影響によって高さ方向の要素ごとにひずみ分布が異なり、ばらつきが見られた。それゆえ、本研究では、FRPシートのひずみ分布は高さ方向に平均化して求め、さらに、局所的なひずみの変動を低減するために1 mm 間隔での軸方向の平均化を行った。これは実験においても、ひずみゲージは、貼付位置でのFRPシートの平均ひずみを表していると考えられるからである。

図-6(a), (b)の実験結果と図-6(c)の解析結果を比較すると、ひずみ分布の概形はよく一致しており、剥離の

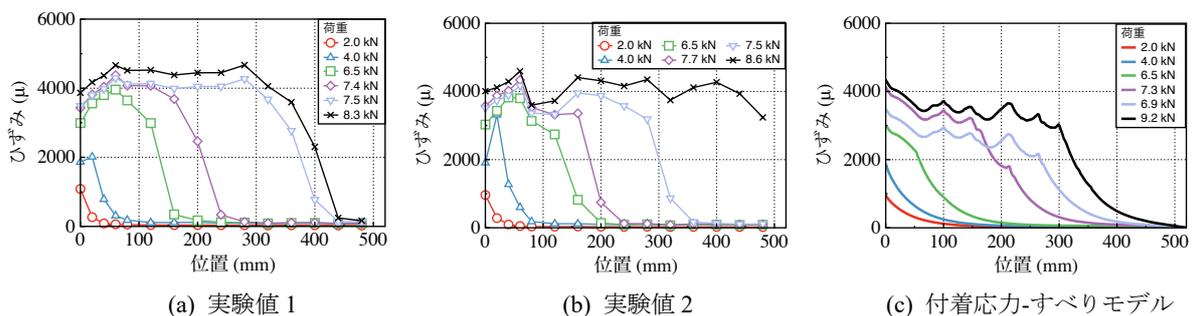


図-6 実験値と付着応力-すべりモデルのFRPシートのひずみ分布

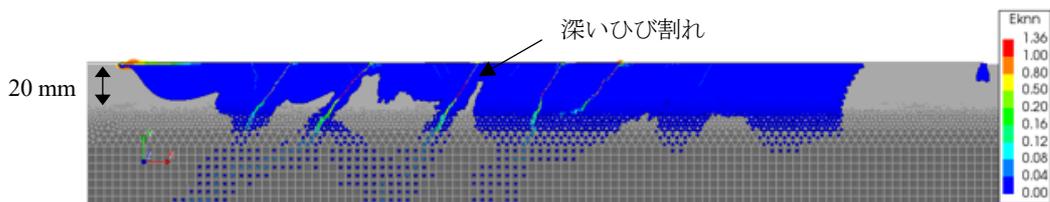


図-7 付着応力-すべりモデルのひび割れ状況

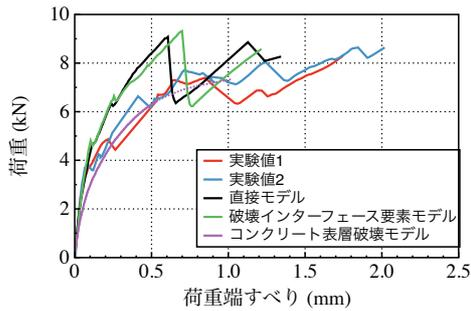


図-8 各モデルの荷重-すべり関係



図-11 付着試験の剥離の様子

進展に伴って、荷重伝達領域が変化していく様子を再現できている。一方、解析における荷重端付近ではコンクリートの局所的な変形に起因するひずみの低下が見られる。また、解析における剥離領域においては、ひび割れ位置での局所的な変形に起因し、大きなひび割れの間で波状にひずみ変動している。非線形有限要素解析と実験結果の全体的な挙動は一致しているため、付着応力-すべり関係を用いた場合、既往の研究と同様にFRPシートの破壊過程は概ね再現できているといえる。

ひび割れ図を図-7に示す。後述するように、局所的な深いひび割れが発生しており、実際のひび割れ性状との差異が見られる。

### 3.2 直接モデル

図-8に直接モデルと実験により得られた荷重-すべり関係を示す。図には、破壊インターフェース要素モデルとコンクリート表層破壊モデルの結果も示してあるが、これらに関しては後ほど議論する。

直接モデルでは、実験値と比較すると付着試験の全体挙動は概ね一致している。しかし、図-9(a)に示すFRPシートのひずみ分布では剥離領域でも大きなひずみの変動が見られる。これは、図-10に示すような局所的な深

いひび割れがコンクリート表層から20-30mm程度まで発生しているためである。Pham and Al-Mahaidi<sup>6)</sup>によるFEM解析でも同様のひび割れが発生している。過去の付着試験で得られた破壊性状を図-11に示すが、コンクリート表層には浅いひび割れ(2mm程度)が剥離領域全体に分散して発生している。すなわち、直接モデルでは、荷重-すべり関係の挙動は再現できているものの、ひずみ分布とひび割れ性状は再現できていないと考えられる。また、図-9(a)のひずみ分布ではひび割れ部分で曲げ変形が生じるため、剥離領域においてもひずみが低下しており、剥離という現象を再現できているとは言い難い。

図-12に示す付着応力-すべり関係はFRPシートのせん断応力とすべりを、実験値のひずみより算定した付着応力-すべり関係と比較したものである。ここで、解析値のすべりはある位置でのFRPシートの変位から端部の変位を引いた相対変位である。荷重端から50mm地点における付着応力-すべり関係を示す図-12(a)では直接モデルの付着応力-すべり関係は実験値に近い概形を示している。このため、全体挙動である荷重-すべり関係もよく一致していると考えられる。次に、図-12(b)は荷重端から100mm地点における付着応力-すべり関係を示して

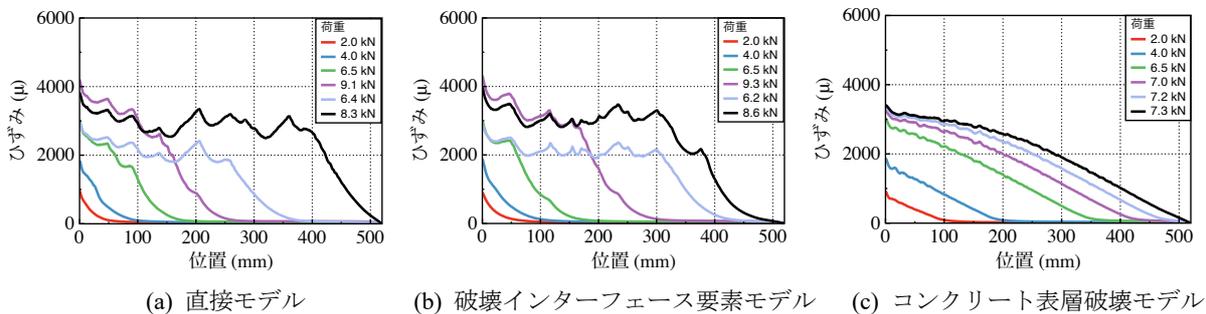


図-9 各解析モデルによるFRPシートのひずみ分布

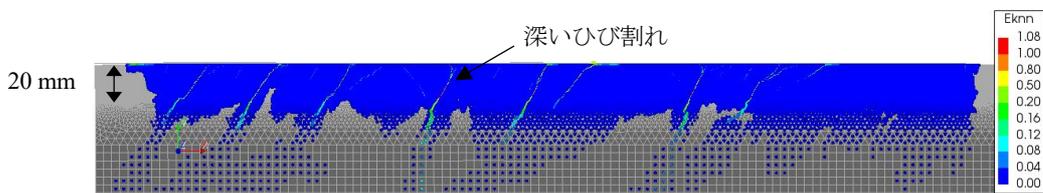
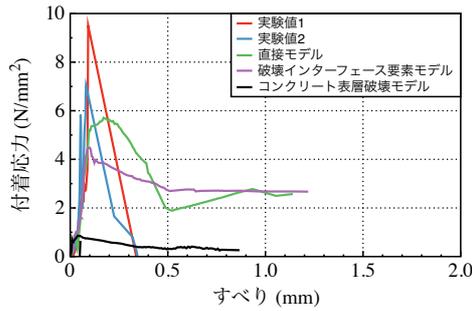
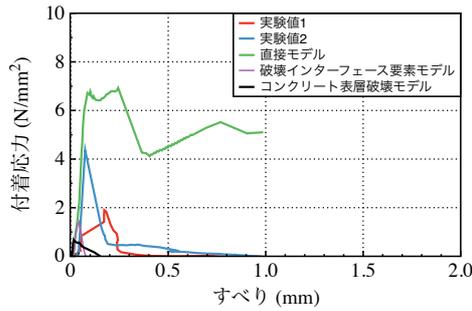


図-10 直接モデルのひび割れ状況



(a) 荷重端から 50 mm 地点



(b) 荷重端から 100 mm 地点

図-12 付着応力-すべり関係

いる。実験値同士や実験値と解析値で若干の差異が見受けられるが、これは、局所的なコンクリートのひび割れによる影響によって生じていると考えられる。このため、局所的な付着応力-すべり関係の精緻な評価は現在では難しく、今後の検討課題としたい。

### 3.3 破壊インターフェース要素モデル

図-8の荷重-すべり関係では、直接モデルと比較して剥離後にわずかに剛性が低下している。これは、破壊インターフェース要素を用いることによって、界面の応力が引張強度に達した場合、FRPシートとコンクリート要素が切り離されるためである。荷重-すべり関係では直接モデルと破壊インターフェース要素モデルでは大きな違いはないものの、図-9(b)に示すようにひずみ分布では剥離領域でのひずみの低下や変動が小さくなり、ひずみ

が概ね一定となっている。これより、破壊インターフェース要素を導入することによって、剥離という離散的な挙動を再現できると考えられる。また、ひび割れ性状は図-13のようになっており、直接モデルに比べてひび割れが若干分散しているものの、ひび割れが深い層にまで及んでおり、ひび割れ性状における実験との差は大きい。

図-12の付着応力-すべり関係では直接モデルと同様に実験値と近い概形を示す。これより、破壊インターフェース要素モデルを用いた場合には、ひずみ分布や荷重-すべり関係は実際の挙動とよく一致しているものの、ひび割れ性状は異なっている。

### 3.4 コンクリート表層破壊モデル

図-8の荷重-すべり関係におけるコンクリート表層破壊モデルは、すべりが0.54 mm以降において、計算は継続できたが未収束となったため、参考として未収束区間を点線で示している。図-8には、コンクリート表層破壊モデルでは他のモデルで見られた荷重の変動がなくなり、剥離の進展に伴い徐々にかつ滑らかに剛性が低下していく様子が見られる。これは図-9(c)のひずみ分布からわかるように剥離領域でもひずみが一定とならず、FRPシートからコンクリートに荷重が伝達されており、荷重伝達領域が荷重の増加とともに大きくなってしまっているためである。図-14のひび割れ図よりコンクリートの表層のみ引張強度を低減することで、局所的な深いひび割れが入らず全体的にひび割れが浅く分散して入っていることがわかる。これによって、図-9(c)のひずみ分布も他のモデルに比べてひずみの変動がなくなっている。

図-12の付着応力-すべり関係では、付着応力の値が小さく、この影響によって全体の力のつり合いを満たすために荷重伝達領域が増加していると考えられる。

これより、コンクリート表層破壊モデルを用いた場合、ひび割れ性状は実験と同様の結果を得ることができるが、荷重伝達領域が増加してしまっているため、ひずみ分布は実際の挙動との差異が見られる。

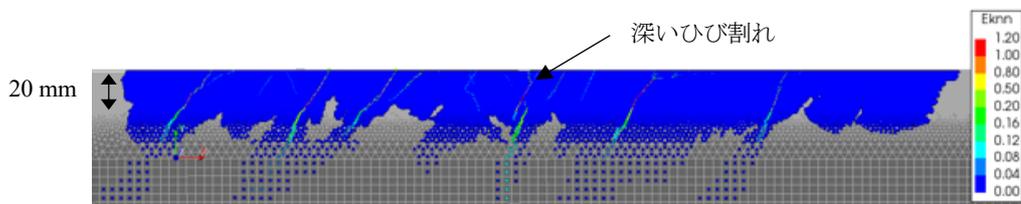


図-13 破壊インターフェース要素モデルのひび割れ状況

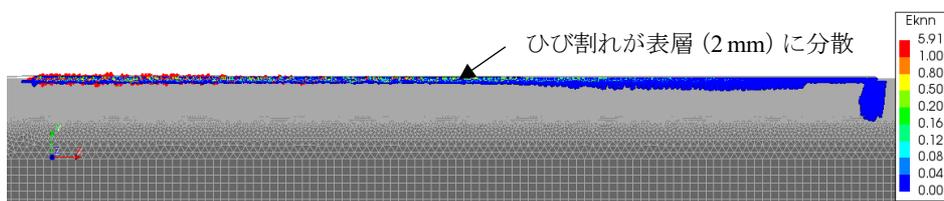


図-14 コンクリート表層破壊モデルのひび割れ状況

表-1 FEM 解析のモデル化が付着挙動に及ぼす影響

モデル	荷重-すべり関係	ひずみ分布	付着応力-すべり関係	ひび割れ性状
付着応力-すべりモデル	○	△	—	×
直接モデル	○	△	○	×
破壊インターフェース要素モデル	○	○	○	×
コンクリート表層破壊モデル	×	×	△	○

### 3.5 モデル化が与える影響の評価

FRP シート付着試験の FEM 解析におけるモデル化の影響の評価を表-1 にまとめる。本研究で行った 4 ケースの FEM 解析におけるモデル化が荷重-すべり関係、ひずみ分布、付着応力-すべり関係、ひび割れ性状にどのような影響を及ぼすかについて示した。表-1 より付着応力-すべりモデルでは曲げ変形の影響によってひずみの低下が見られ、局所的な深いひび割れも発生しているため、FRP シートの付着試験を十分に表現できていないことがわかる。既往の多くの研究で用いられてきた直接モデルも同様に、局所的な深いひび割れによってひずみ分布の低下が見られるため、ひずみ分布とひび割れ性状を十分に再現できているとはいえない。一方、本研究で新たに考案した破壊インターフェース要素モデルは局所的な深いひび割れが発生しているものの、樹脂要素とコンクリート要素が切り離されるためひずみ分布をよく再現できている。また、コンクリート表層破壊モデルではひび割れが表層のみにとどまっており、実際のひび割れ性状をよく再現できているが、荷重伝達領域が大きいいため、ひずみ分布と荷重-すべり関係が実際の挙動とは異なっている。これらの差異が生じる原因として、各モデル化の方法が大きく影響していると考えられる。

### 4. まとめ

本研究の FRP シート付着試験の非線形有限要素解析におけるモデル化による付着挙動に与える影響の評価によって得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 4 ケースのモデル化の差異による解析結果に与える影響とその特徴を明らかにした。
- (2) 樹脂とコンクリート界面に要素間の切り離しを行える破壊インターフェース要素を用いることで、剥離領域においてひずみが概ね一定となるため、剥離という離散的な現象を表現することができる。
- (3) コンクリート表層の材料特性のみを変更したコンクリート表層破壊モデルでは、局所的な深いひび割れを抑制することができ、ひび割れが表層のみに分散するため、実際の現象に近いひび割れ性状となる。
- (4) 荷重-すべり関係、ひずみ分布、付着応力-すべり関係、ひび割れ性状の全てを再現できるモデル化はな

かった。実際の付着挙動を正確に再現するためには今後継続して検討していく必要がある。

### 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, Vol.47, No.646, pp.71-87, 2000.5
- 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, pp.855-867, 2020.3
- 3) 新井崇裕, 山野辺慎一, 荒添正棋, 佐藤靖彦: ポリウレタ樹脂層を有する炭素繊維シート補強工法の高湿時における付着特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1159-1164, 2014.6
- 4) Tao, Y. and Chen, J. F.: Concrete Damage Plasticity Model for Modeling FRP-to-Concrete Bond Behavior, Journal of Composite for Construction, Vol.19, No.1, Article ID 04014026, 2015
- 5) Shi J. W., Cao, W. H. and Wu, Z. S.: Effect of adhesive properties on the bond behavior of externally bonded FRP-to-concrete joints, Composite Part B, Vol.177, Article ID 107365, 2019
- 6) Pham, H. B. and Al-Mahaidi R.: Modeling of CFRP-concrete shear-lap tests, Construction and Building Materials Vol.21, pp.727-735, 2007
- 7) Feenstra, P. H.: Computational Aspects of Biaxial Stress in Plain and Reinforced Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1993
- 8) Hordijk, D. A.: Local Approach to Fatigue of Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1991
- 9) Al-Mahaidi, R. S. H.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Tech. Rep. 79-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, New York, 1979
- 10) Lu, X. Z., Ye, L. P., Teng, J. G. and Jiang, J. J.: Meso-scale finite element model for FRP sheets/plates bonded to concrete, Engineering Structure Vol.27, pp.564-575, 2005