

RC 梁に接着した FRP シートの剥離挙動に関する数値解析的研究

A Numerical Study on Debonding Behavior of AFRP Sheet Bonded to Lower Surface of RC Beams

室蘭工業大学	正 員	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
三井建設 (株)	フェロー	三上 浩 (Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学	フェロー	松岡 健一 (Ken-ichi Matsuoka)
室蘭工業大学	○ 学生員	張 広鋒 (Guangfeng Zhang)

1. はじめに

現在、連続繊維シート（以後、FRPシート）を用いた既設コンクリート構造部材の補強効果の究明と実用化に関する研究が盛んに行われている。FRP シートによって補強されたコンクリート部材のせん断および曲げ耐力は、シートとコンクリートとの剥離により支配される場合がある。このため補強効果を適切に評価するためには、シートとコンクリートとの付着特性あるいは剥離メカニズムを適確に把握することが重要である。

このような背景より、本研究では、アラミド繊維製 FRP（以後、AFRP）シートで曲げ補強した RC 梁の破壊挙動を適切に評価可能な数値解析手法の確立を目的として、RC 梁の三次元有限要素法（FEM）による弾塑性解析を試み、本解析結果の妥当性について検討を行った。妥当性検討は、別途実施した静的曲げ載荷実験の実験結果と比較することにより行った。本数値解析はシートの剥離挙動に着目しているため、ひび割れ幅および進展方向を実験結果に基づき離散ひび割れ要素（接触面要素）を用いてモデル化している。なお、本数値解析には汎用構造用解析ソフト DIANA¹⁾を用いている。

2. 試験体概要

本数値解析は、過去に著者等が行った実験²⁾の一部を対象として行った。表-1には、本数値解析で対象とした試験体の一覧を示している。試験体は剥離破壊性状の異なる2種類の AFRP シート曲げ補強 RC 梁であり、梁上縁コンクリートが圧壊した後シートが剥離するタイプ（以後、曲げ圧壊型試験体と呼ぶ）および上縁コンクリート圧壊前にシートが剥離するタイプ（以後、剥離破壊型試験体と呼ぶ）を対象として解析を行っている。図-1には、試験体の形状寸法、配筋状況および載荷点位置を示している。この2種類の試験体は、全て軸方向筋

に D16 (SD345) を用いた複鉄筋矩形 RC 梁であり、せん断補強筋には D10 (SD295) を用い、これを 100 mm 間隔で配筋している。曲げ補強材として全て AFRP シートを用い、梁底面に1層もしくは2層を中央部から支点の 100 mm 手前の範囲まで貼り付けている。また、シート上には付着性状を検討するために、歪ゲージを 100 mm 間隔および載荷点直下に貼り付けている。なお、実験時における各材料の力学的特性値は、表-2 ~ 4 に示すとおりである。

3. 数値解析条件および仮定

3.1. 数値解析モデル

図-2には、曲げ圧壊型試験体に関する全体の要素分割図を示している。解析対象は、RC 梁の対称性を考慮してスパン方向および断面方向に2等分した 1/4 モデルである。適用した要素タイプは8節点あるいは6節点の三次元固体要素である。しかしながら、上端鉄筋およびスターラップ要素には、DIANA に予め組み込まれている埋め込み鉄筋要素¹⁾を用いている。要素の積分点数は、解析精度を考慮して全要素8点積分とした。境界条件は、対称切断面においてはその面に対する法線方向変位成分を拘束し、支点部は節点の鉛直方向変位成分を拘束している。なお、非線形求解法は強制変位による増分解析により行い、収束計算は Secant BFGS 法で行った。

3.2. ひび割れモデル

本数値解析では、実験結果の破壊状況を参照して、コンクリート-鉄筋間、コンクリート-シート間およびコンクリートの内部に発生する曲げひび割れとせん断ひび割れの箇所全てに接触面要素を配置している。図-3(a)には、三次元の接触面要素概念を示している。接触面要素は、図に示す B1, B2 要素間 (S1, S2 面間) に存在し、厚さ 0 の 8 節点仮要素である。ここで、接触面要素

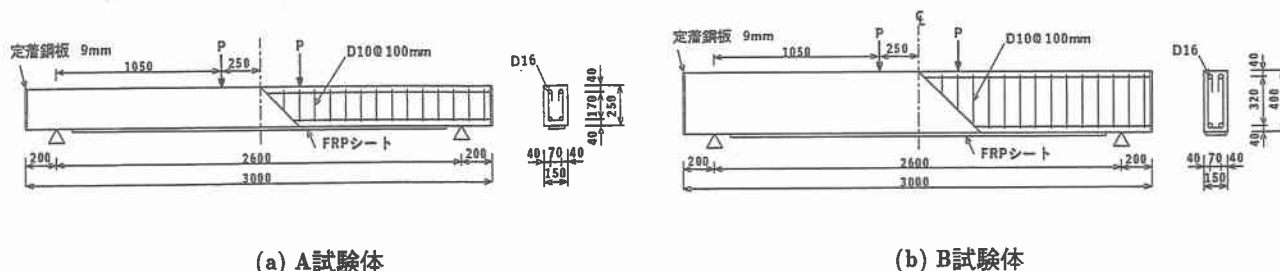


図-1 試験体の形状寸法

表－1 試験体一覧

試験体名	梁高 h (mm)	シート 層数	せん断 スパン比 a/d	せん断 余裕度 V_{us} / P_{us}
曲げ圧壊型試験体	250	1	5.0	2.32
剝離破壊型試験体	400	2	2.9	2.06

* V_{us} : 静的せん断耐力, P_{us} : 静的曲げ耐力

表－2 コンクリートの力学的特性値

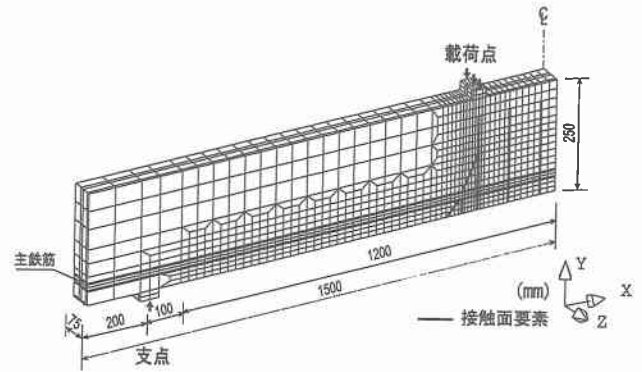
圧縮強度 f_c (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν_c
28.2	23.4	0.215

表－3 鉄筋の力学的特性値

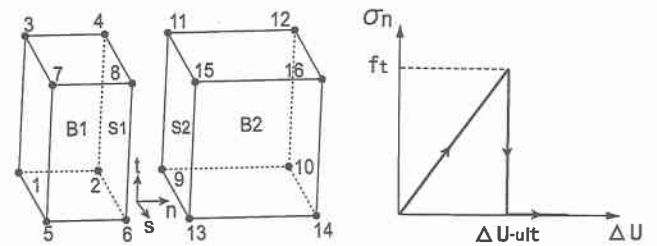
鉄筋名称	材質	降伏強度 σ_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
D16	SD345	378	206	0.3
D10	SD295	392		

表－4 AFRP シートの力学的特性値

繊維目付量 (g/m ²)	シート厚さ t (mm)	弾性係数 E_{af} (GPa)	引張強度 f_{af} (GPa)	破断歪 ε_{af} (%)
415	0.286	131	2.48	1.89

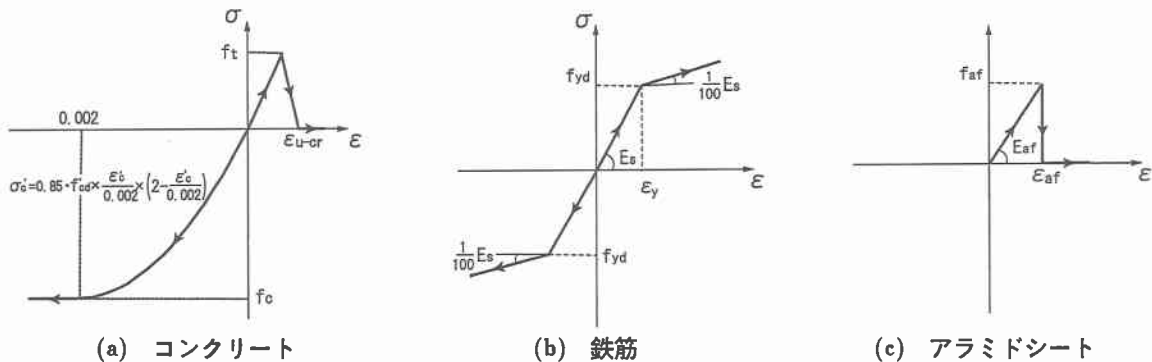


図－2 要素分割図 (曲げ圧壊型試験体)



(a) モデル (b) 応力－変位関係

図－3 接触面要素



(a) コンクリート (b) 鉄筋 (c) アラミドシート

図－4 各材料の応力－歪関係

の中心線に対し、法線方向の相対変位 ΔU_n 、応力を σ_n とすると、 ΔU_n と σ_n の関係は図－3(b) のように示される。 f_t は接触面要素の破壊強度、 ΔU_{ult} は、終局変位である。なお、本解析の対象とした曲げ圧壊型試験体および剝離破壊型試験体の破壊性状を再現するために、実験結果を参考にして両試験体の接触面要素の配置位置を設定している。

3.3. 材料物性モデル

コンクリート要素の応力－歪関係を図－4(a) に示す。このモデルは、圧縮側に対しては土木学会コンクリート標準示方書による関係式、引張側に対しては、線形モデルを用いている。なお、解析対象は RC 構造であるため、引張側の終局歪 ε_{u-cr} は下端鉄筋の降伏歪 ε_y を採用している。なお、圧縮側の降伏の判定には、Drucker-Prager の降伏条件を用いている。上下端鉄筋およびスターラップ要素に用いた物性モデルは、図－4(b) に示すような降伏後の塑性硬化係数 H' を考慮した弾塑性体モデルである。降伏応力 σ_y 、弾性係数 E_s およびポアソ

ン比 ν_s には、表－3 に示す値を採用している。なお、 H' は、弾性係数 E_s の 1% と仮定した。

AFRP シート要素に用いたモデルは、図－4(c) に示すように、シートの応力が表－4 に示す引張強度に達した時点で破断したと見なされるモデルである。なお、降伏条件は Von Mises の降伏条件に従うものとしている。

4. 離散ひび割れ分布性状及び剝離性状

図－5 には解析終局時の離散ひび割れ分布性状、およびコンクリートの第 1 主応力コンター図を示している。また、本解析は梁下縁かぶりコンクリートにおけるピーリング作用によるシートの引き剥がれに着目しているため、図中には、斜めひび割れと梁下縁かぶりコンクリートに発生した曲げおよび斜めひび割れの交差点に着目した拡大図を合わせて示している。両解析結果において、曲げ圧壊型試験体は上縁コンクリートの圧壊、剝離破壊型試験体は梁下縁部のシートの剝離により、解が発散して計算を終了している。両試験体とも、主鉄筋降伏時に

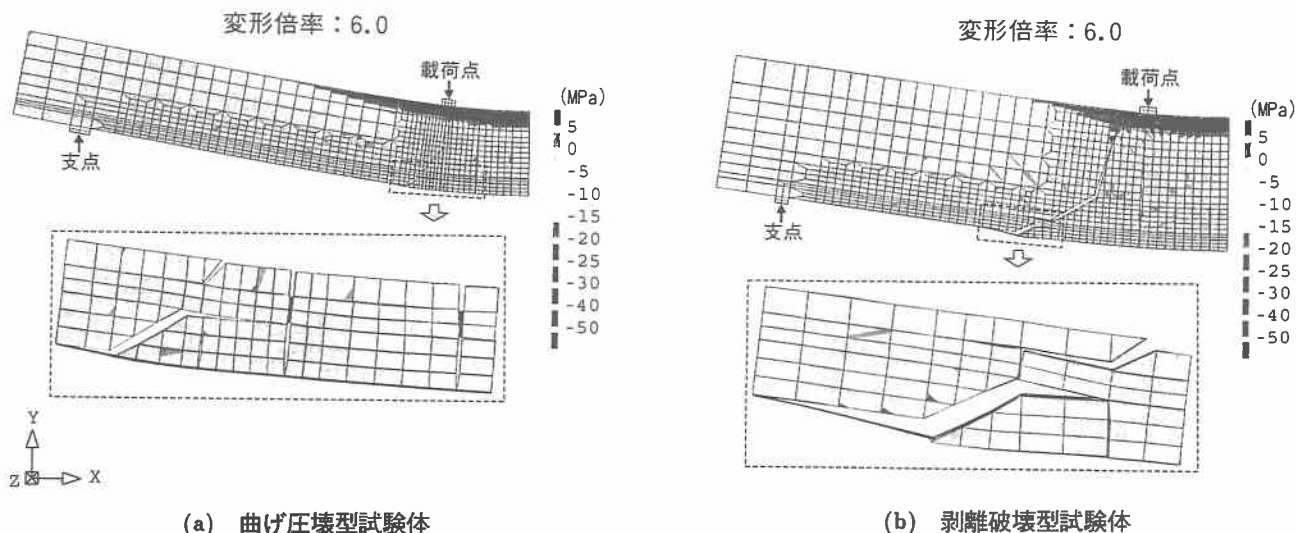


図-5 ひび割れ分布性状および第1主応力図

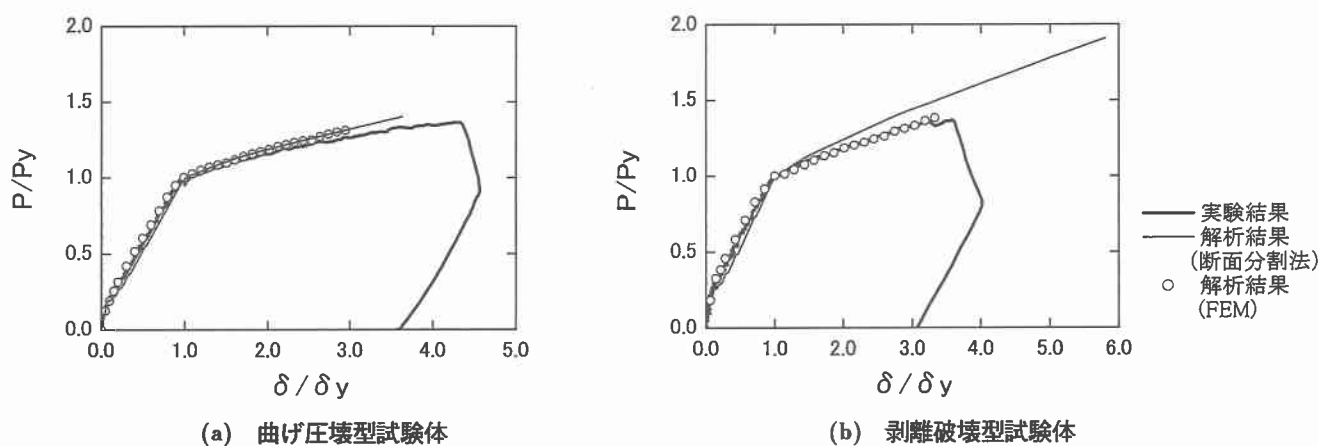


図-6 荷重—変位関係

は等曲げ区間に 100 mm 間隔で設定した曲げひび割れが全て開口することを確認していることより、実験結果と同様の性状を示しているものと推察される。

図-5(a)の曲げ圧壊型試験体の結果より、主鉄筋降伏後曲げひび割れのみならず斜めひび割れも開口し、これらのひび割れが交差してコンクリートブロックが形成されていることが分かる。しかしながら、図のように梁上縁コンクリートの歪が終局圧縮歪である $3,500 \mu$ に達して解析を終了しているため明瞭なシートの剥離現象は示されず、完全付着に近い状況であることが分かる。

一方、図-5(b)の剥離破壊型試験体の結果を見ると、梁下縁かぶり部において曲げひび割れと斜めひび割れの交差により形成されたコンクリートブロックがシートを下方に押し下げて引き剥がすピーリング現象が再現され、シートの剥離領域が支点方向に拡大していることが分かる。また、梁中央部上縁コンクリートは歪レベルが $2,700 \mu$ 程度であり、未だ圧縮破壊に至る状態ではないことが分かる。

5. 数値解析結果と実験結果の比較

5.1. 荷重—変位関係

図-6には荷重—変位曲線の実験結果を、FEM によ

る解析結果および断面分割法²⁾に基づいた解析結果と比較して示している。本研究において実験および両解析結果は各々の降伏荷重および降伏変位で無次元化して整理している。これは、AFRP シートの曲げ補強効果が主に主鉄筋降伏後に発揮されることに鑑み、各結果を同一の尺度で比較検討するためである。

図-6(a)の曲げ圧壊型試験体の結果より、本 FEM 解析結果は $\delta / \delta_y = 3$ 前後まで実験結果を精度良く再現していることが分かる。なお、両結果では終局時の変位レベルが大きく異なっている。これは FEM 解析結果は上縁コンクリートの圧壊により計算を終了しているのに対し、実験結果は上縁コンクリートの圧壊後、ブロック化した下縁かぶりコンクリートがシートを引き剥がすピーリング作用によりシートの完全剥離を生じ、終局に至っているためである。また、これらの結果はシートとコンクリートの完全付着を仮定した断面分割法結果ともほぼ良く対応している。(b)の剥離破壊型の試験体の結果より、曲げ圧壊型の試験体の場合と同様、FEM 解析結果は実験結果を精度良くシミュレートしていることが分かる。また、両結果の終局時における荷重および変位値も良く対応している。

これより、本研究で提案している離散ひび割れやそれ

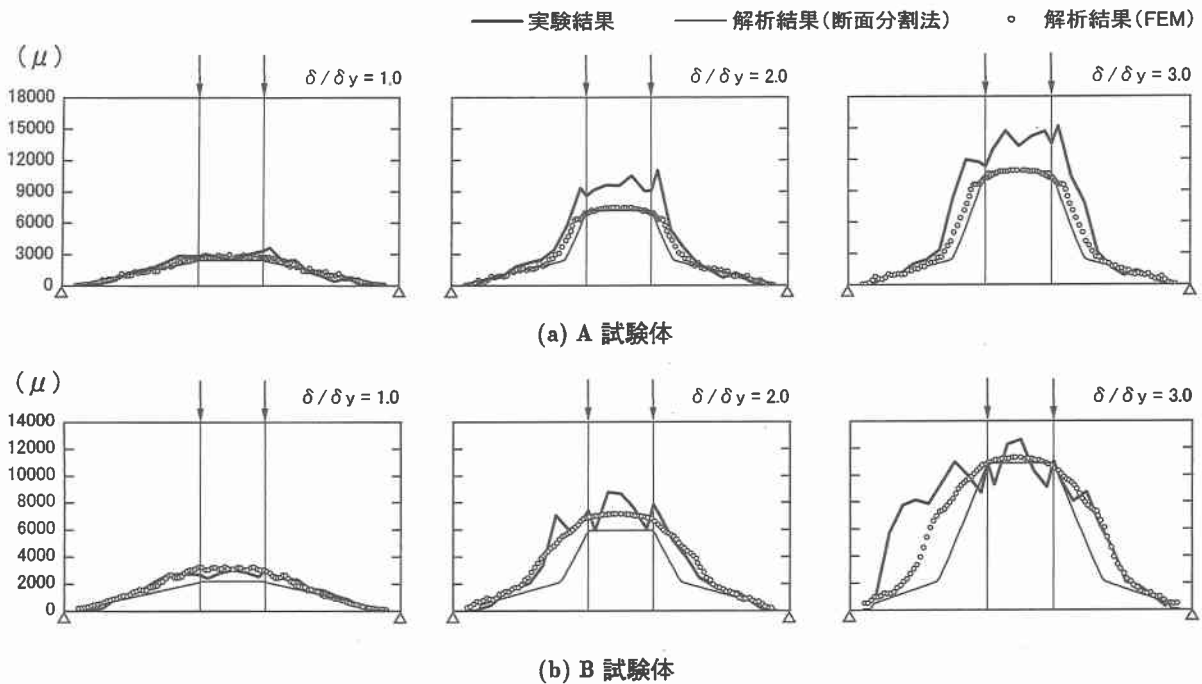


図-7 AFRPシートの歪分布性状

に伴うシートの剥離挙動をモデル化した FEM 解析手法により、実験結果とほぼ同様の破壊挙動を再現可能であるものと推察される。

5.2. シートの歪分布性状

図-7には主鉄筋降伏から終局時までの各変位時における実験結果を FEM 解析結果および断面分割法結果と比較して示している。なお、図中終局変位は、曲げ圧壊型試験体の場合は FEM 解析終了時の変位、剥離破壊型の場合は実験結果の終局時（シート剥離時）の変位としている。いずれの場合も $\delta/\delta_y = 3$ 時点である。(a)の曲げ圧壊型試験体の結果より、FEM 解析結果は終局変位時における実験結果と若干対応していないものの、主鉄筋降伏時から終局変位時にかけて実験結果および断面分割法結果と大略対応していることがわかる。

(b)の剥離破壊型試験体の結果において、FEM 解析結果と実験結果を比較すると、主鉄筋降伏時および終局時前の変位時に両結果は良好に対応していることが分かる。一方、終局時（シート剥離）には左側の等せん断力区間において実験結果が FEM 解析結果よりも大きく示されている部分が見受けられる。これは、FEM 解析では試験体の対称性を考慮し、梁の半スパンをモデル化して検討しているのに対し、実験結果ではピーリング作用によりシートの引き剥がれが顕在化した後、シートの剥離進展が左側に偏ったためと考えられる。しかしながら、両結果で等曲げ区間および右側等せん断力区間における歪分布性状は大略類似している。従って、提案の FEM 解析結果はピーリング作用によるシート引き剥がれ開始時の歪分布性状を適切に再現しているものと考えられる。

断面分割法結果は他の結果に比較して等曲げ区間の歪レベルはほぼ対応しているものの、終局変位時において

等せん断力区間では歪が小さく示されている。これは、断面分割法はシートの完全付着を仮定しているため、シートの部分剥離を表現できないことによるためである。

以上より、本研究で提案した FEM 解析手法により、破壊形式の異なる AFRP シート曲げ補強 RC 梁の歪分布性状を比較的精度良くシミュレート可能であることが明らかとなった。

6. まとめ

本研究では、AFRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊挙動を適切に評価可能な数値解析手法の確立を目的として、三次元有限要素法による弾塑性解析を試み、実験結果との比較により本解析結果の妥当性を検討した。

- 1) 離散ひび割れモデルを考慮した FEM 解析を行うことにより、ピーリング作用によるシートの剥離開始状況を再現することができた。
- 2) 本 FEM 解析手法はシートの完全付着を仮定する断面分割法では再現不能なシートの部分剥離の発生を再現することができることより、実験結果より得られた荷重-変位関係および歪分布性状を精度良く再現することができる。

参考文献

- 1) DIANA Nonlinear Analysis User's manual, TNO Building and Construction Research
- 2) 三上 浩, 岸 徳光, 池田 憲二, 栗橋 祐介: FRP シート補強 RC 梁の梁高や補強量がシートの剥離性状に与える影響, 第55回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), V-580, 1999.