

AFRP シート曲げ補強 RC 梁の剥離挙動解析

Numerical Analysis on Failure Behavior of RC Beams flexural Strengthened with AFRP Sheet

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

近年、既設コンクリート構造物の新しい補強方法として、構造物の表面に連続繊維シート（以後、FRP シート）を接着する工法がよく用いられ、合理的補強法確立に向けた研究が種々実施されている。例えば、シートで曲げ補強された RC 梁の場合には、上縁コンクリートの圧縮破壊により破壊する場合の他、シートとコンクリートとの剝離により終局に至る場合のあることが明らかになっている。しかしながら、シートの付着特性あるいは剝離メカニズムは未だ明確に提示されるに至っていない。合理的な RC 部材のシート補強法を確立するためには実験研究のみならず解析的な研究も重要であるものと推察される。

このような観点から、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、三次元有限要素法（FEM）による弾塑性解析を試みた。本研究ではシートの剝離挙動に着目しているため、ひび割れ発生位置および進展方向を実験結果に基づき接触面要素（Interface Element）を用いてモデル化した。また、シートの剝離を再現するためにCoulomb Friction型モデルの適用を試みている。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。なお、本数値解析には汎用構造用解析ソフトDIANA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¹⁾の一部を対象として行った。試験体は破壊形式の異なる二つの

AFRP シート曲げ補強 RC 梁である。すなわち、1) 上縁コンクリートが圧壊した後シートが剝離するタイプ（以後、曲げ圧壊型試験体と呼ぶ）および 2) 上縁コンクリートの圧壊前にシートが剝離するタイプ（以後、剝離破壊型試験体と呼ぶ）である。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。曲げ補強材としては全て強化方向が 1 方向の AFRP シートを用い、梁底面に 1 層（曲げ圧壊型試験体）もしくは 2 層（剝離破壊型試験体）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、実験時の各材料の力学的特性値は、表-1 に示すとおりである。

3. 数值解析概要

3.1. 要素分割および解析方法

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。コンクリート、鉄筋およびAFRPシートは、8節点あるいは6節点の三次元固体要素でモデル化して

表-1 各材料の力学的特性値

	コンクリート	鉄筋	AFRP シート
圧縮強度 f'_c (MPa)	28.2	-	-
引張強度 f_t (MPa)	2.34	-	2480
降伏強度 σ_y (MPa)	-	380	-
弾性係数 E (GPa)	23.4	206	131
ポアソン比 ν	0.2	0.3	0.2

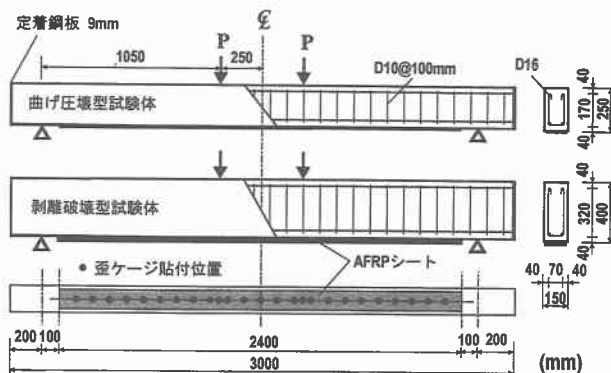


図-1 試験体の形状寸法

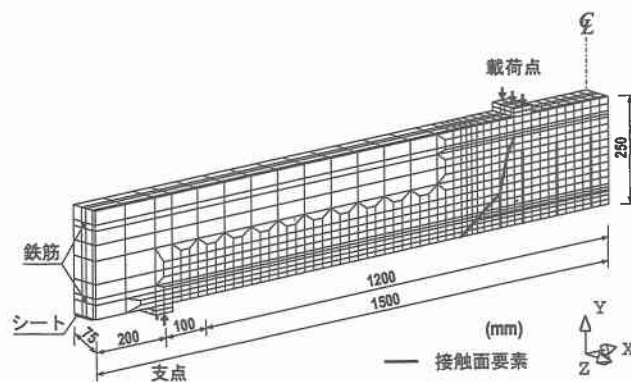


図-2 要素分割図(曲げ圧壊型試験体)

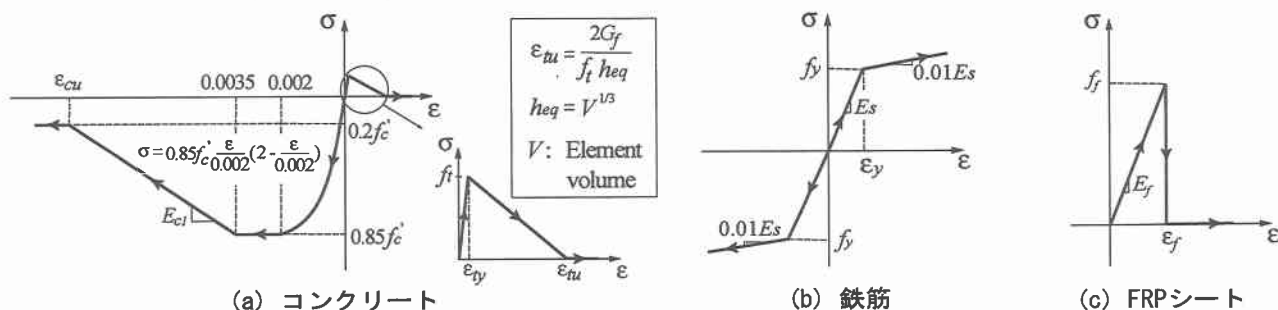


図-3 各材料の応力-歪関係

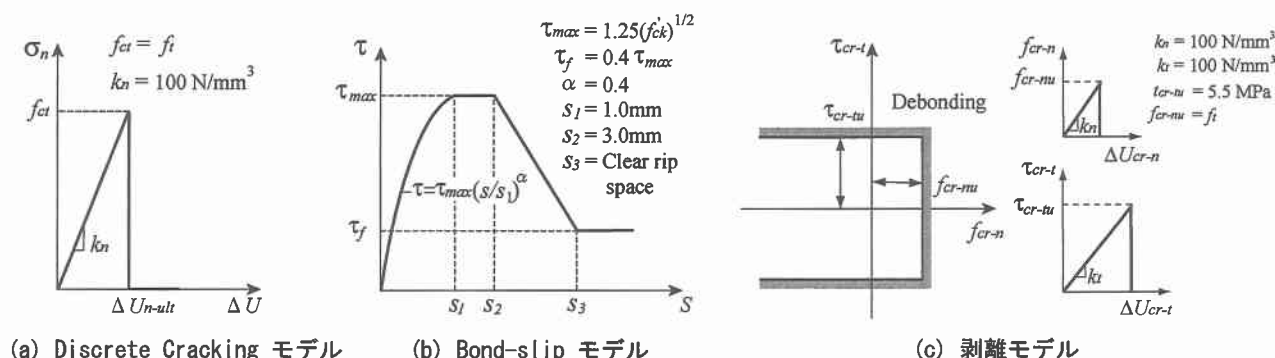


図-4 各接触面要素の応力-相対変位関係

いる。また、スターラップには DIANA に予め組み込まれている埋め込み鉄筋要素 (Embedded Reinforcement Element) を用いている。要素の積分点数は、解析精度を考慮して埋め込み鉄筋要素を除いて全要素 8 点積分とした。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、収束計算には Newton-Raphson 法を適用している。

3.2. 各材料の特性

コンクリートの応力-歪関係を図-3(a) に示す。圧縮側の構成則に関しては、材料実験から得られた圧縮破壊強度 f'_c を用い、圧縮歪 $3,500\mu$ までは土木学会コンクリート標準示方書に基づいて定式化し、 $3,500\mu$ 以後は初期弾性係数の 0.05 倍で $0.2f'_c$ まで線形軟化モデルとした。また、降伏の判定には von Mises の降伏条件を用いている。一方、引張側に関しては、線形軟化モデルを適用し、終局歪 ϵ_{tu} は参考文献に基づいて、図のように定義している。上下端鉄筋およびスターラップ要素には、図-3(b) に示すような塑性硬化係数 H' を考慮した弾塑性体モデルを適用した。降伏は von Mises の降伏条件に従うものとしている。AFRP シートには、図-3(c) に示すように引張強度に達した時点で破断したと見なされるモデルを適用した。

3.3. 接触面要素モデル

本数値解析では、RC 梁の実挙動に即して RC 梁のひび割れの進展やシートの剥離性状に着目した検討を行うため、図-2(b) に示しているように、コンクリート部 (Discrete Cracking モデル)、コンクリート-鉄筋間 (Bond-slip モデル)、コンクリート-AFRP シート間 (剥離モデル) に接触面要素を配置して、ひび割れの開

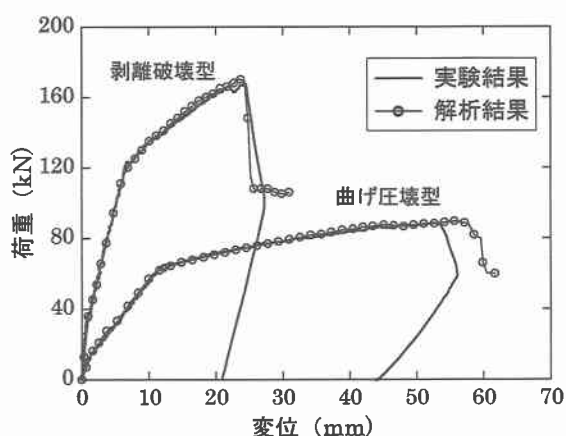


図-5 荷重-変位関係

口、鉄筋のすべり、およびシートの剥離等の不連続現象をモデル化している²⁾。ここで、Discrete Cracking モデルは接触面要素の法線方向の開口とその方向の引張応力との関係をモデル化している。なお、限界応力値 f_{ct} は、コンクリートの引張破壊強度 f_t と等価であるものと設定した。Bond-slip モデルには CEB-FIP によるすべり-付着応力関係式を採用した。

剥離モデルに関しては、法線方向およびせん断方向の剥離基準を次のように定義した。

$$f_{cr-n} > f_{cr-nu} \quad (1)$$

$$\sqrt{\tau_{cr-ts}^2 + \tau_{cr-tt}^2} > \tau_{cr-tu} \quad (2)$$

ここで、 f_{cr-n} 、 τ_{cr-ts} 、 τ_{cr-tt} は、それぞれ付着界面の法線方向引張応力、軸方向および断面方向のせん断応力

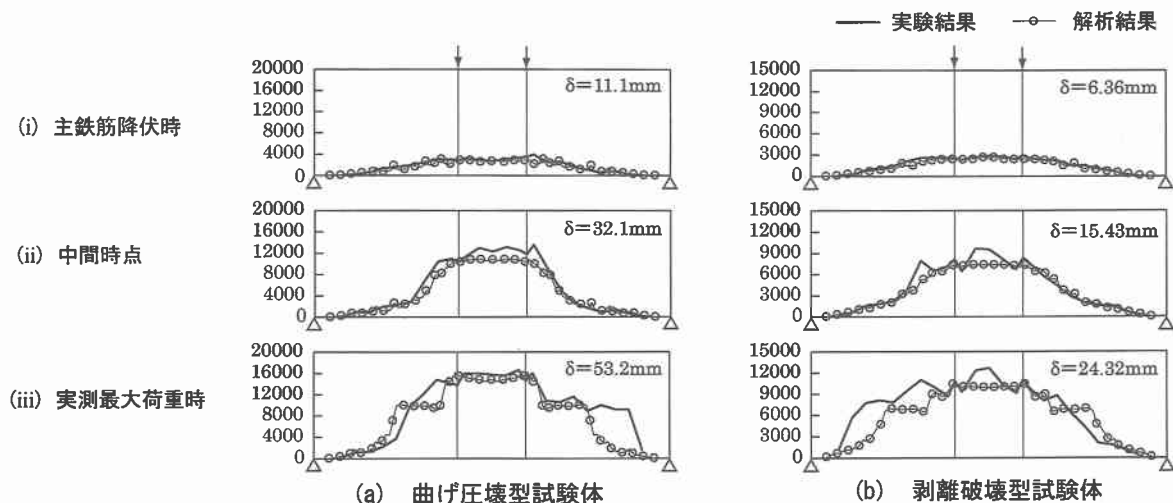


図-6 AFRP シートの歪分布性状

であり、 f_{cr-nu} 、 τ_{cr-tu} はそれぞれ法線方向、せん断応力の限界強度である。剝離発生した後の各応力は全て解放されることにした。 k_t と τ_{cr-tu} は文献 3) を参考にし、それぞれ 100 N/mm^2 と 5.5 MPa と設定した。

4. 数値解析結果および考察

4.1. 荷重-変位関係

図-5には、両試験体における荷重-スパン中央部変位（以後、単に変位）曲線に関する解析結果を実験結果と比較して示している。なお、いずれの梁の場合にも、シートの全面剝離により計算を終了している。

図より曲げ圧壊型試験体の結果を見ると、解析結果は実測最大荷重時（変位 53.2 mm 時）まで実験結果と良く対応していることが分かる。また、解析結果が変位 56.2 mm 以後、急激に低下している。これは、この時点よりかぶりコンクリート部に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作用によりシートの剝離が急に進展しているためと考えられる。また、全面剝離時点の変位は 60.5 mm であり、実験結果の 56.1 mm より約 8% 大きくなっている。

一方、剝離破壊型試験体に関する比較より、主鉄筋降伏による剛性勾配低下においても、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。最大荷重到達後、曲げ圧壊型試験体と同様シートの剝離範囲が急激に進行し剛性が低下していることが分かる。最大変位は、実験結果より約 1.5 mm 程度小さい。なお、最大荷重は両試験体とも実験結果とほぼ一致している。

4.2. シートの歪分布性状

図-6には、主鉄筋降伏以降の各変位時におけるシートの歪分布に関する解析結果を実験結果と比較して示している。また、図より、両試験体とも、主鉄筋降伏時には、解析結果は実験結果と良く対応していることが分かる。中間時点では、等せん断力区間の両結果は良く一致しているものの、等曲げ区間では実験結果が解析結果より若干大きく示されている。これは、実験結果の場合には曲げひび割れの発生により局所的に大きな歪が発生す

るためと考えられる。

実測最大荷重時の曲げ圧壊型試験体の結果を見ると、等曲げ区間の解析結果は実験結果と比較的精度良く一致している。また、右側の等せん断力区間において、両結果の分布曲線ともシート歪がほぼ一樣な区間が現れている。これは、かぶりコンクリート部に形成されたコンクリートブロックのピーリング作用によってシートの剝離が発生し、剝離した区域の歪が均等化されたためと考えられる。これより、解析結果は剝離部の歪性状に関しても実験結果を再現していることが確認できる。一方、実測最大荷重時の剝離破壊型試験体の結果を見ると、等曲げ区間において、実験結果は曲げひび割れが発生している箇所があるため、解析結果より局所的に大きな歪値が現れている。左側等せん断力区間に関しては、解析結果が実験結果を下回っているものの、歪が均等化されている区間も示され、シートの剝離が梁下縁の斜めひび割れせん断部から左側の支点に向けて進行している傾向が分かる。

以上より、破壊形式の異なる AFRP シート曲げ補強 RC 梁耐荷性状およびシートの歪分布性状は、本研究で提案の FEM 解析手法を用いることにより、実験結果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。

4.3. 離散ひび割れ分布およびシート剝離性状

図-7には、実測最大荷重時および全面剝離直前の両試験体の離散ひび割れ分布性状、第1主応力および付着面の応力分布性状を示している。また、シート剝離時の付着面の三方向応力分布（法線方向引張応力、軸方向および断面方向せん断応力）を比較して示している。

図-7 (a) の曲げ圧壊型試験体の結果を見ると、実測最大荷重時には曲げおよび斜めひび割れが開口し、これらのひび割れの交差によって形成されたコンクリートブロックのピーリング作用によってシートの剝離が進行し始めていることが分かる。また、剝離部の付着界面の三方向応力はすべて零を示していることが確認される。付着界面の軸方向せん断応力コンター図を見ると、剝離

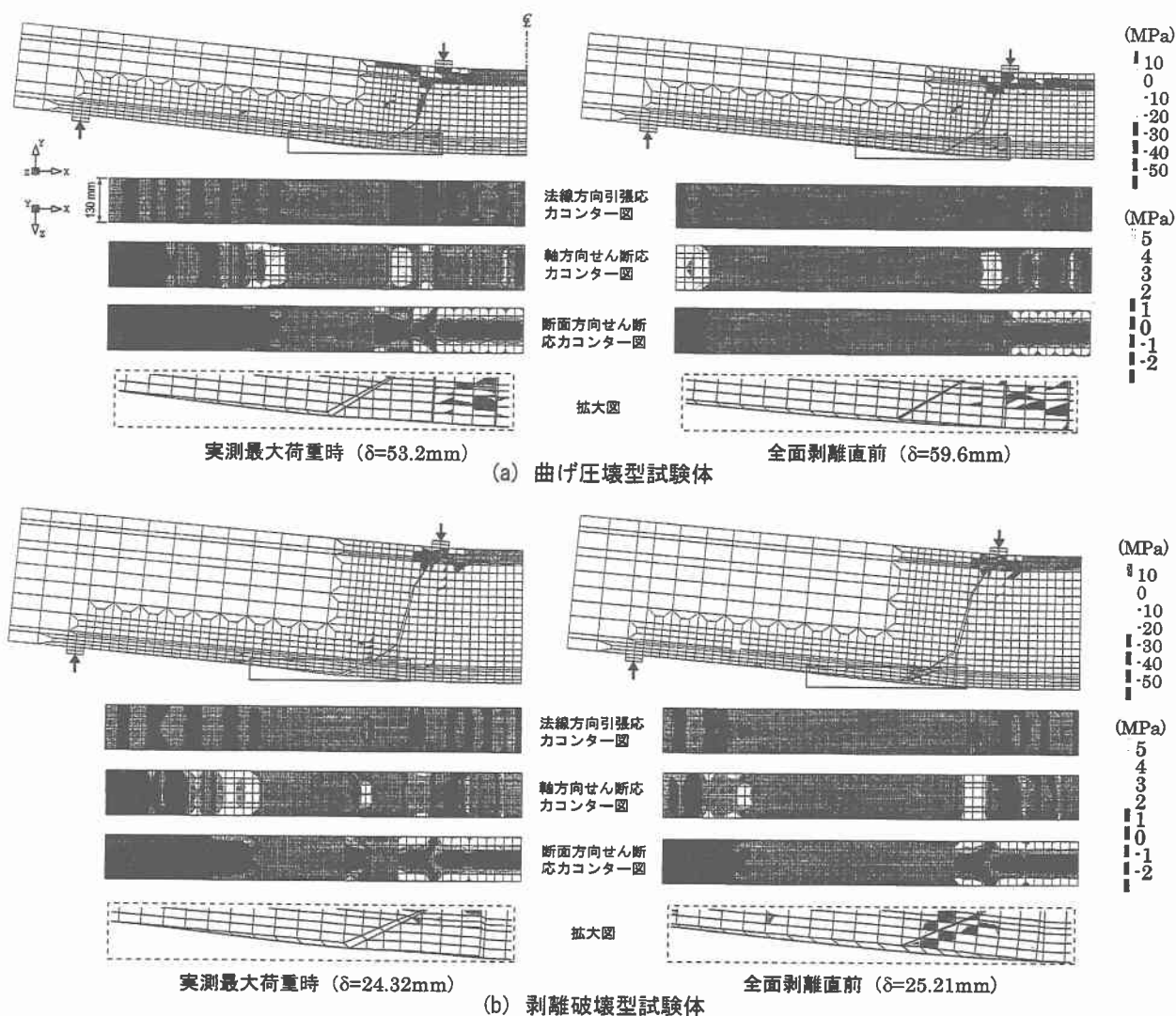


図-7 ひび割れ分布性状，第1主応力および界面せん断応力分布

先端部近傍および曲げひび割れの直下部は局所的に5MPa程度の値を示しており，まさにシートが剥離する寸前であることが分かる．これに対し，等曲げ区間では1MPa前後の小さな応力状態を示し，その領域でシートが剥離する傾向にないことが分かる．全面剥離の直前では，コンクリートブロック直下まで剥離が進行しかつ剥離範囲がシート端部近傍まで及んでいることが分かる．

一方，図-7 (b) の剥離破壊型試験体の結果に関しては，いずれの時点においても図-7 (a) の曲げ圧壊型試験体の結果とほぼ同様な分布性状を示している．以上より，剥離形式の異なる両試験体とも，曲げひび割れに起因する界面せん断応力によるシート剥離の傾向は示されず，かぶり部に形成されたコンクリートブロックのピーリング作用によって剥離することが数値解析的に確認された．

5. 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．検討結果，

- 1) 本研究で提案した各モデルを適用することにより，曲げ圧壊型，剥離破壊型のいずれの場合に対しても載荷初期からシートが全面剥離に至る現象を精度良く再現可能であることが明らかとなった．
- 2) いずれの破壊形式の場合において曲げひび割れに起因する界面せん断応力の増加が示されず，曲げひび割れのみが発生によってシートが剥離する傾向は示されないことが確認された．

参考文献

- 1) 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．
- 2) 岸 徳光，三上 浩，栗橋 祐介，張 広鋒：AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の破壊挙動に関する非線形数値解析，応用力学論文集，Vol.4，333-344，2001．
- 3) 上原子 晶久，下村 匠，丸山 久一，西田 浩之：連続繊維シートとコンクリートの付着・剥離挙動の解析，土木学会論文集，No.634/V-45，197-208，1999．