

三次元弾塑性解析法を用いたAFRPシート緊張接着 RC 梁の耐荷挙動に関する数値解析的検討

Numerical study on load-carrying behavior of reinforced RC beams with pre-tensioned AFRP sheet by means of three-dimensional elasto-plastic FE analysis method

室蘭工業大学大学院 ○学生会員 氏家 友哉 (Tomoya Ujiie)
室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
三井住友建設(株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学 正会員 小室 雅人 (Masato Komuro)

1. はじめに

近年、既設鉄筋コンクリートあるいはプレストレストコンクリート (RC/PC) 構造物の補強工法として、連続繊維 (FRP) シートを接着する工法が数多く採用されている。最近では、FRP シートの曲げ補強効果をより低い荷重レベルから発揮させる方法として、FRP シートに緊張力を与えた状態で接着する方法 (以降、緊張接着工法) が考案され、一部で実用化されている。

著者らは既往の研究において、緊張接着用シート端部に定着治具を用いずに施工可能なアラミド繊維製 FRP (AFRP) シートを用いた緊張接着工法を開発し、実験的にその補強効果を確認してきた。提案の緊張接着工法の信頼性をより高いものにするためには、実構造も含めた種々の断面部材に対しての検討が不可欠である。しかしながら、それらの検討を全て実験的研究によって行うことは非常に困難であることより、数値解析的手法を併用して効率的に検討を進めることが重要となる。

このような観点より、本研究では、AFRP シートを用いた緊張接着した曲げ補強 RC 梁を対象に耐荷性状および破壊性状を適切に評価可能な数値解析手法の確立を目的として、有限要素法による三次元弾塑性解析を実施し、既往の実験結果との比較によって解析手法の妥当性を検討した。ここでは、荷重-変位関係および終局時の破壊性状等について着目している。なお、本解析には、構造解析用汎用コード DIANA9.4 を使用した。

表-1 試験体と AFRP シートへの導入緊張率一覧

試験体名	シート目付量 (g/m ²)	目標導入緊張率 * (%)	実測導入緊張率 * (%)
A1-T0	830	0 %	0 %
A1-T20		20 % (71)	20.8 % (73)
A1-T40		40 % (141)	40.2 % (142)
A2-T0	1,245	0 %	0 %
A2-T27		27 % (141)	27.3 % (145)

* () 内は導入緊張力 (kN)

表-2 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

目付量 (g/m ²)	保証耐力 (kN/m)	設計厚 (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断ひずみ (%)
830*	1,176	0.572	2.06	118	1.75
1,245*	1,764	0.858			
435/435**	588/588	0.286			

*: 緊張接着用シート, **: 応力分散用シート

2. 試験体概要

表-1 には、本実験に用いた試験体と AFRP シートへの目標導入緊張率及び実測導入緊張率の一覧を示している。試験体数は、AFRP シートの目付量を 2 種類として、各シートへの導入緊張率を変化させた全 5 体である。表中、試験体名の第 1 項目は AFRP シートの種類 (A1: 目付量 830 g/m², A2: 目付量 1,245 g/m²)、第 2 項目の英文字 T に付随する数値は AFRP シートの目標導入緊張率 (%) を示している。

図-1 には、本実験に用いた試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要を示している。試験体は、断面寸法が 22 × 30 cm、純スパン長 3.2 m の矩形 RC 梁である。下端鉄筋には D22 を 2 本配置した。なお、主鉄筋比および帯鉄筋比はそれぞれ 1.43、0.48 % である。緊張接着用シートには、幅 300 mm のシートを用い、梁中央部から両支点の 80 mm 手前までの範囲に接着した。なお、シートの定着を確保するために、接着両端部には応力分散用の 2 方向 AFRP シートを予め接着し、その上に緊張力を導入したシートを接着することとした。また、応力分散用シート部への接着には応力緩和材を用いている。

AFRP シートの緊張接着は、プレテンション方式によるプレストレストコンクリート (PC) 梁の製作と同様に、梁とは独立してシート緊張用架台を設置し、シートに緊張力を導入した状態で RC 梁に接着する方式で行った。また、接着樹脂の硬化に必要な一週間程度の養生期間を経過した後、緊張力を解放し、RC 梁にプレストレスを導入している。

表-2 には本実験で用いた AFRP シートの力学的特性値を示している。実験時におけるコンクリートの圧縮強度

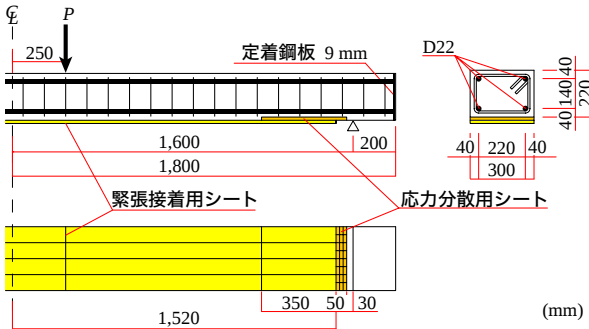


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要

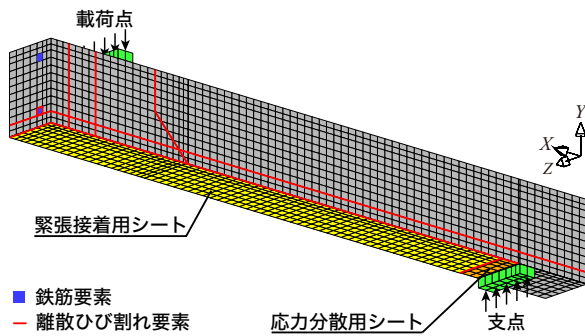


図-2 要素分割状況

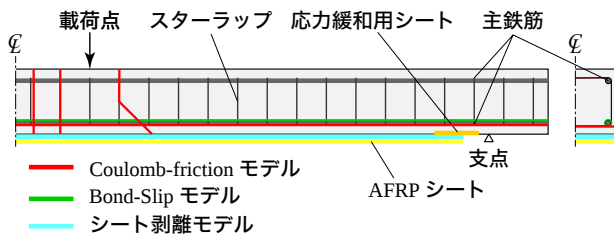


図-3 分散ひび割れ要素配置図

f'_c は 39.2 MPa, 主鉄筋およびスターラップの降伏強度 f_y はそれぞれ 382 MPa および 397 MPa であった。

3. 解析概要

3.1 解析モデルおよび境界条件

図-2 には、解析に用いた要素分割状況を示している。解析モデルは RC 梁の対称性を考慮してスパンおよび断面方向に 2 等分した 1/4 モデルである。コンクリート、上下端鉄筋および AFRP シートは 8 節点あるいは 6 節点固体要素を用いてモデル化している。スターラップに関しては、DIANA にあらかじめ組み込まれている埋め込み鉄筋要素を用いてモデル化している。この要素は、鉄筋要素と周囲のコンクリート要素との完全付着を仮定し鉄筋要素のひずみを周囲のコンクリート要素から算出するため、節点の位置によらず簡易に鉄筋要素を配置できる特徴を有している。

また、AFRP シートで補強した RC 梁の実挙動を精度よく再現するためには、コンクリートのひび割れの開口、鉄筋のすべりおよびシートの剥離状況を適切に考慮する必要がある。本研究では、これらの幾何学的不連続現象を適切に表現するために、図-3 に示すように分散ひび割れ要素を配置している。

境界条件は、対称切断面において法線方向変位成分を、支点部では鉛直方向変位成分を拘束した、単純支持状態としている。

なお、実験では、シートの緊張力解放に伴うシート接着端部への応力集中を抑制するため、シート端部に定着用の 2 方向 AFRP シートをあらかじめ接着し、かつ応力緩和材を塗布している。本数値解析においても、試験体と同一条件とするために緊張接着した試験体においては所定の位置に 2 方向 AFRP シートを配置している。

3.2 解析手法

AFRP シートに緊張力を導入後、RC 梁にシートを接着し曲げ補強を施した後の静載荷実験結果を適切に再現するためには、各段階の状況を静解析に正確に引き継ぐ必要

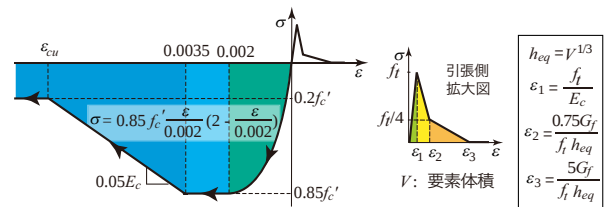


図-4 コンクリートの材料構成則

がある。本研究では、これらの一連の解析を可能とするために、DIANA に組み込まれているフェーズ機能を用いることとした。なお、フェーズ機能とは、解析過程において要素を追加、変更および除去できるものである。すなわち、継続して解析を実施する要素に関しては前段階の応力や変形を、新たに追加・変更する要素に関しては前段階の変形のみを継続して解析に反映することが可能である。

実際の解析の流れは、実験時の手順と同様に以下のようになる。1) あらかじめシート要素とコンクリート要素間にダミー要素を配置する、2) シート端部を拘束し、もう一方に強制変位を与えることでシートに所定の緊張力を数値解析的に導入する、3) ダミー要素をボンド要素（シートとコンクリート間の分散ひび割れ要素）と入れ替え、シートの緊張力を開放することで試験体にプレストレスを導入する、4) 載荷位置に鉛直下向きの強制変位を与えることで、静載荷を再現する。

本数値解析では、載荷点および支点部における応力集中を避けるため、両部分に長さ 50 mm、厚さ 25 mm の鋼板要素を配置している。

3.3 材料構成則

本研究では、前述したようにコンクリートのひび割れ開口等の幾何学的不連続現象を再現するための分散ひび割れモデルの他、コンクリート要素には分布ひび割れモデルを適用して解析を実施している。

図-4 にはコンクリートの応力-ひずみ関係を示している。圧縮側の構成則に関しては、材料実験から得られた圧縮強度 f'_c を用い、圧縮ひずみが $3,500 \mu$ までは土木学会コンクリート標準示方書（以後、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 $0.2 f'_c$ まで線形軟化するモデルとした。また、降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件を用い、内部摩擦角 ϕ は 30° とした。一方、引張側に関しては、示方書による引張軟化曲線を適用している。図中の V , h_{eq} および G_f は、それぞれ要素の体積、等価要素長およびコンクリートの引張破壊エネルギーである。

上下端鉄筋およびスターラップ要素には、降伏後の塑性硬化係数を $0.01 E_s$ とした等方弾塑性体モデルを適用し、降伏の判定には von Mises の降伏条件を適用している。

AFRP シートには、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ている。ここで、AFRP シートの引張強度 f_f 、弾性係数 E_f および破断ひずみ ϵ_f は、公称値を用いている（表-2 参照）。

3.4 分散ひび割れ要素の応力-相対変位関係

本研究では、前述のようにコンクリートのひび割れ、主鉄筋のすべりおよびシート剥離を、図-3 に示す位置に分散ひび割れ要素を配置し、モデル化している。

コンクリートのひび割れ部における分散ひび割れ要素

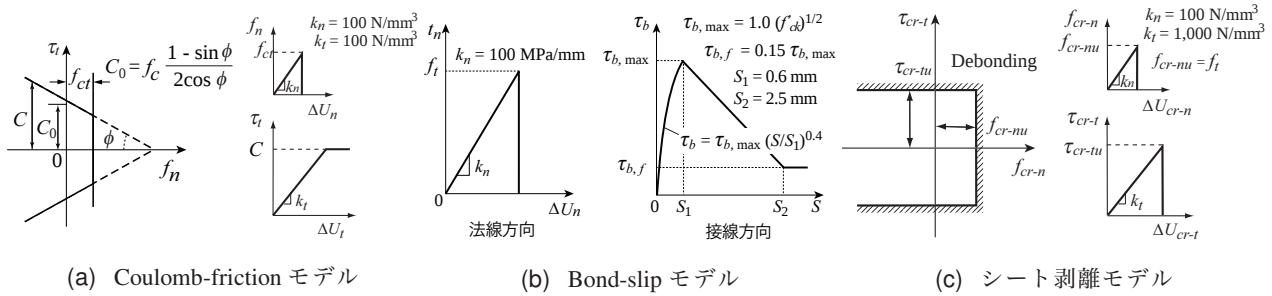


図-5 離散ひび割れ要素に適用した応力-相対変位関係

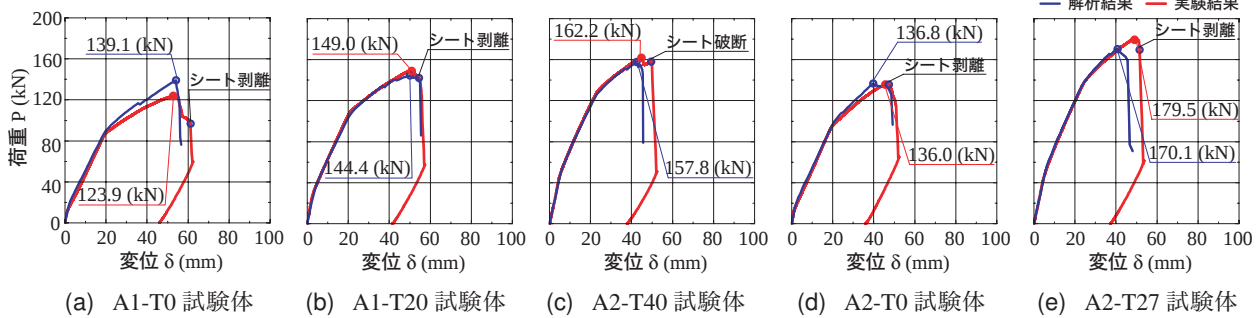


図-6 載荷荷重-スパン中央変位関係の比較

は、Coulomb-friction モデルに基づいて法線方向の相対変位 ΔU_n とその方向の引張応力 f_n との関係を 図-5 (a) のようにモデル化している。本モデルでは、法線方向の応力 f_n が限界引張応力値 f_{ct} に達すると伝達されている引張応力が解放され、ひび割れが完全に開口するものと仮定している。また、限界応力値 f_{ct} は、コンクリートの引張強度 f_t と等価であるものと設定した。また、接線方向応力 τ_t はコンクリートの粘着力 C に達した後、骨材の噛み合わせを考慮し、応力を保持したまま滑動を続けるものとしている。なお、法線方向の引張応力 f_n が限界引張応力 f_{ct} に達した後は、ひび割れ開口後の咬み合わせ効果等を無視して、せん断剛性 k_t も消失するものと仮定している。

主鉄筋要素の周面に配置した離散ひび割れ要素において、主鉄筋方向の付着応力 τ_b と相対変位 S の関係は、CEB-FIP モデルコード¹⁾を参考にして 図-5 (b) のように定義した。主鉄筋とコンクリート要素間の法線方向に関しては、応力 f_n がコンクリートの引張強度に達した時点でひび割れが開口するモデルとしている。

また、シート剥離を再現するために、ボンド要素には著者らが提案した 図-5 (c) に示されるモデル²⁾を適用した。このモデルでは、付着界面の法線方向引張応力と面内せん断応力間の相互作用を無視し、法線方向およびせん断方向の剥離基準を簡易に次のように定義している。

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

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

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であり、 f_{cr-nu} 、 τ_{cr-tu} はそれぞれ引張応力、せん断応力の限界値である。実験終了後の観察より、剥離したシートの全面にはコンクリート塊が付着していることが明らかになっている。そのため、本研究ではシートとコンクリートの接着界面において、接着樹脂が引き剥がされることにより

シートが剥離するのではなく、コンクリートの引張破壊によるかぶりコンクリートの剥落に伴いシートが剥離するものと仮定した。すなわち、 f_{cr-nu} に対してはコンクリートの引張強度 f_t を、 k_n には 100 N/mm^3 と仮定した。また、限界せん断耐力 τ_{cr-tu} は文献³⁾を参考にして、次式を用いて評価することとした。

$$\tau_{cr-tu} = 0.92 \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

4. 数値解析結果および考察

4.1 載荷荷重-スパン中央変位関係

図-6 には、各試験体の載荷荷重とスパン中央変位の関係を示している。図-6 より、シートの導入緊張力の増加に伴い主鉄筋降伏荷重および最大荷重が増大していることが分かる。また、いずれの試験体においてもひび割れ発生時および主鉄筋降伏時に剛性が低下している。

各試験体の破壊性状に着目すると、緊張試験体である A1-T40 試験体を除く全ての試験体において、シート剥離により終局に至っていることが分かる。A1-T40 試験体はシートの破断により終局に至っている。

次に実験結果と解析結果の比較を行う。まず、無緊張試験体である A1/A2-T0 試験体に着目すると、図-6 (a) および (d) より、解析結果は主鉄筋降伏後の剛性勾配を実験結果と比較して過大に評価していることが分かる。また、A1-T0 試験体においては実験結果と比較して終局荷重を過大に、A2-T0 試験体においては終局時変位を控えめに評価している。しかしながら、解析結果における初期ひび割れ発生後の剛性勾配や主鉄筋降伏時における荷重および変位に関して、実験結果と大略一致している。また、いずれの場合にも、解析結果はシート剥離によって終局に至っていることから、解析結果は主鉄筋降伏後の剛性勾配を除いて、実験結果を大略再現しているものと考えられる。

次に、緊張接着した試験体である A1-T20/T40 試験体および A2-T27 試験体について検討する。図-6 (b), (c) お

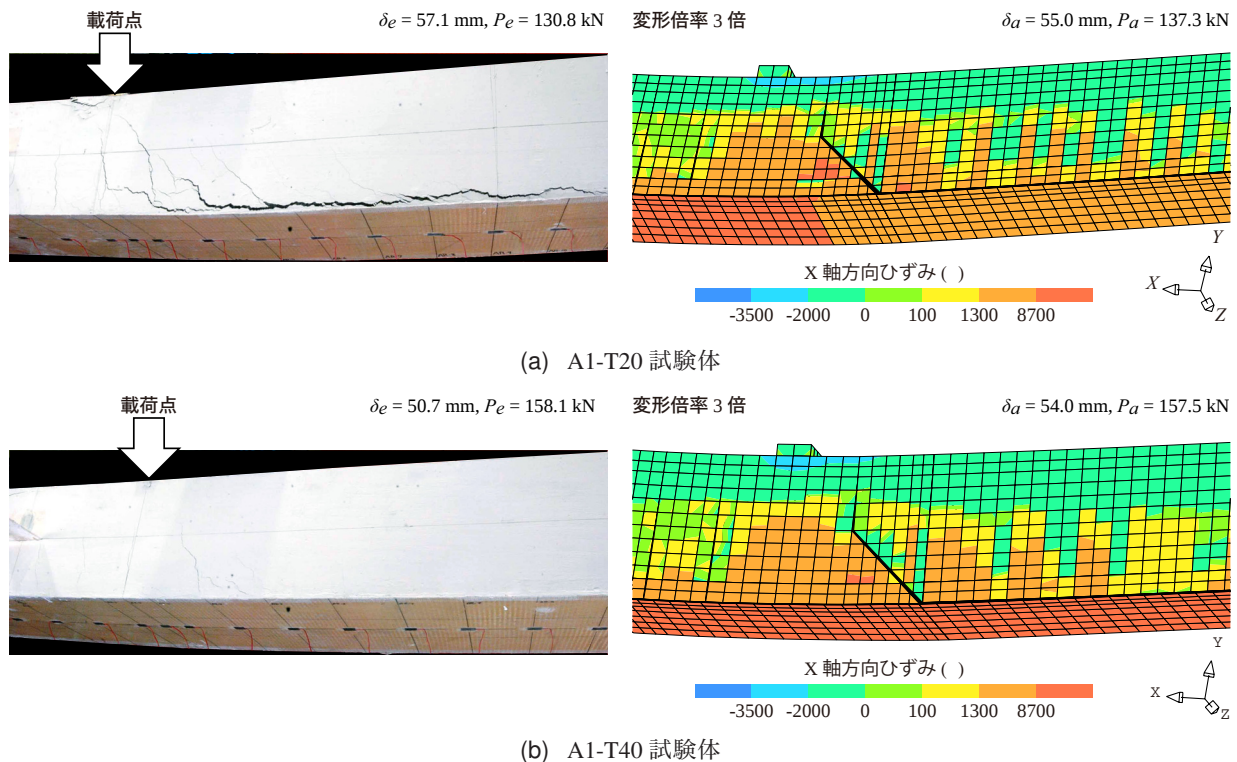


図-7 A1-T20/T40 試験体における終局時近傍の実験状況写真と軸方向ひずみ分布

よび(e)より, 解析結果は, 実験結果に比べ最大荷重を控えめに評価する傾向にあることが分かる。しかしながら, ひび割れ発生および主鉄筋降伏による剛性低下を含め, 実験時の剛性勾配を精度よく再現しているものと判断される。また, 解析結果における破壊形式を見ると, A1-T20 試験体および A2-T27 試験体はシート剥離によって, A1-T40 試験体はシート破断によって終局に至っており, 実験における破壊形式と一致していることから, 解析結果は実験結果と概ね一致しているものと考えられる。

4.2 破壊性状

図-7には, A1-T20/T40 試験体の終局直前時における実験状況写真と数値解析結果における梁側面の軸方向ひずみ分布等を比較して示している。解析結果の変形倍率は3倍である。なお, 解析結果の軸方向ひずみ分布における引張側のコンターレベルは, 図-4と対応しており, 100μ がひび割れ発生ひずみを, $8,700 \mu$ がひび割れ開口ひずみを意味する。

まず, A1-T20 試験体に着目すると, 図-7(a)より, 実験結果において斜めひび割れが開口し, ピーリング作用によってシートに沿うようにかぶりコンクリートにひび割れが発生していることが分かる。一方, 数値解析結果においても, 等曲げ区間においてひび割れ開口程度のひずみが発生していることや, 斜めひび割れ部に配置した離散ひび割れ要素が開口していることより, 実験結果と同様の傾向を示しているものと判断される。

なお, 無緊張試験体である A1/A2-T0 試験体および緊張接着した A2-T27 試験体に関しても, A1-T20 試験体と同様に解析結果, 実験結果ともにシート剥離によって終局に至っており, 両者はよく対応していることを確認している。

次に A1-T40 試験体に着目すると, 実験結果では等曲げ

区間における曲げひび割れおよび斜めひび割れは確認されるものの, ピーリング作用によるシート剥離の兆候は見られない。また, 解析結果においても, 等曲げ区間および斜めひび割れ部において, ひび割れ開口程度のひずみが分布していることが分かる。最終的には, シート要素に引張強度 (2,000 MPa) 以上の軸引張応力が発生し, 実験結果と同様にシートの破断によって終局に至っていることを確認している。

5. まとめ

本研究では, AFRP シート緊張接着 RC 梁の耐荷性状および破壊性状を適切に評価可能な数値解析手法の確立を目的として, 有限要素法による三次元弾塑性解析を実施した。本研究で得られた成果は以下の通りである。

- 1) 提案の数値解析手法を適用することにより, 終局変位近傍における荷重-変位関係を除き, 実験結果の剛性勾配や変曲点等の耐荷性状を概ね再現可能である。
- 2) また, 解析結果は実験結果の破壊形式およびひび割れ分布を大略再現可能である。

参考文献

- 1) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford.
- 2) 張 広鋒, 岸 徳光, 三上 浩: 離散ひび割れ配置モデルの FRP シート曲げ補強 RC 梁に関する数値解析への適用性, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 51A, pp. 1037-1048, 2005.3.
- 3) M.J. Chajes, W.W. Finch, T.F. Januszka, and T.A. Thomson: Bond and force transfer of composite material plates bonded to concrete, *ACI Struct. J.*, 93(2), pp. 208-217, 1996.