

AFRP シート緊張接着曲げ補強 PC 梁の耐荷性状に関する数値解析

Numerical analysis on load-carrying behavior of PC beams reinforced with pretensioned AFRP sheet

室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院
三井住友建設（株）
釧路工業高等専門学校
室蘭工業大学大学院

○ 学生会員 池田 翔哉 (Syouya Ikeda)
正会員 小室 雅人 (Masato Komuro)
フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
正会員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)

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) シートを用いた接着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（以後、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 AFRP シートを緊張接着した曲げ補強矩形 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有限要素解析を実施し、既往の実験結果¹⁾との比較によって解析手法の妥当性を検討してきた²⁾。その結果、実験結果の剛性勾配や変曲点等の耐荷性状や破壊形式を大略再現可能であることを明らかにしている。

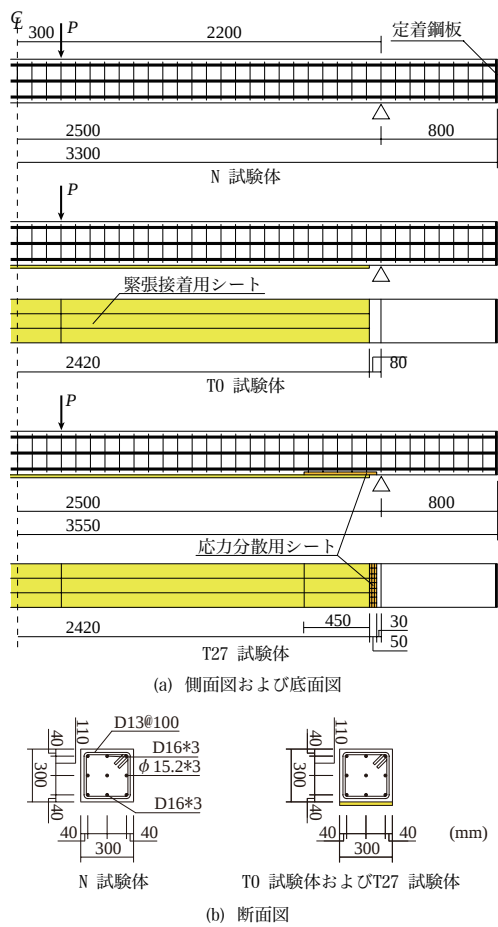
さらに、著者らは、PC 梁を対象に AFRP シート緊張接着による補強効果を実験的に検討し、曲げ耐力の向上を確認している³⁾。しかしながら、RC 梁あるいは PC 梁を FRP シート緊張接着工法によって補強する場合において、その補強効果を適切に評価するためには、実験的研究のみでは限界があり、数値解析的研究を併用してその手法を確立することが肝要である。

このような背景より、本研究では既往の研究で RC 梁を対象に提案した数値解析手法の PC 梁への適用性を検討するために、シートを緊張接着した試験体を含む 3 体の矩形 PC 梁を対象に有限要素法に基づく弾塑性解析を実施した。

ここでは、荷重－変位関係、破壊性状について着目し、実験結果との比較を行うことにより、解析手法の妥当性を検討した。なお、本解析には構造解析用汎用コード DIANA9.3 を使用した。

2. 試験体概要

図－1 には、本解析で対象とした矩形 PC 梁の形状寸法、配筋状況および補強概要を示している。試験体は、梁幅が 300mm の矩形 PC 梁である。軸方向鉄筋には、D16 を上下端に、断面中央には $\phi=15.2$ mm の PC 鋼より線をそれぞれ 3 本ずつ配筋している。スターラップには D13 を 100 mm 間隔で配筋している。緊張接着用 FRP シートには、梁幅と同じ幅を有する AFRP シート（目付量：1,245 g/m²）を用い、シートの補強範囲を梁中央部から両支点の 80 mm 手前までとしている。なお、T27 試験体については、緊張接着用 FRP シート端部に発生する応力集中を緩和させる



図－1 試験体の形状寸法

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 ^{#1} (%)	実測導入 緊張率 ^{#1} (%)
N	-	-	-
T0	1,245	0	0
T27	1,245	26.7 (141.1)	25.5 (134.7)

^{#1} () 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 (%)
1,245 ^{#1}	1,764	0.858	2.06	118	1.75
435/435 ^{#2}	588/588	0.286			

^{#1}: 緊張接着用シート, ^{#2}: 応力分散用シート

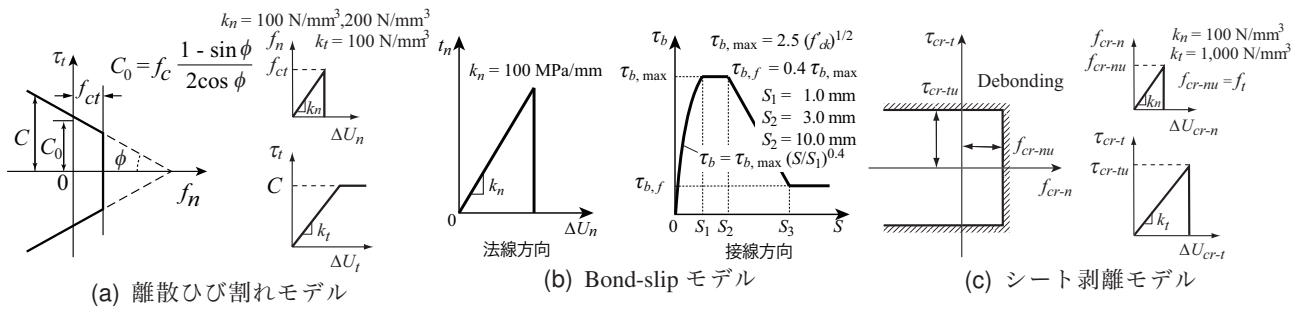


図-3 接触面要素に適用した応力-相対変位関係

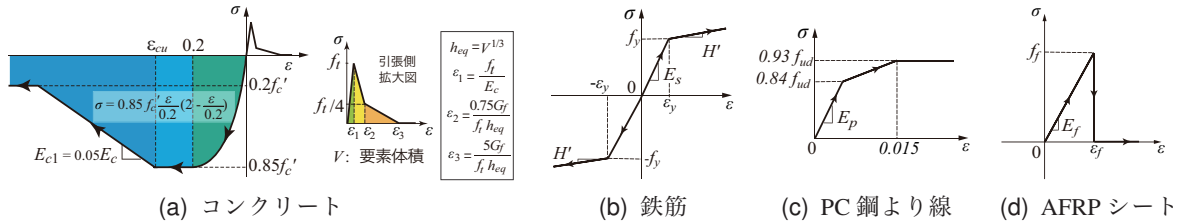


図-4 材料構成則

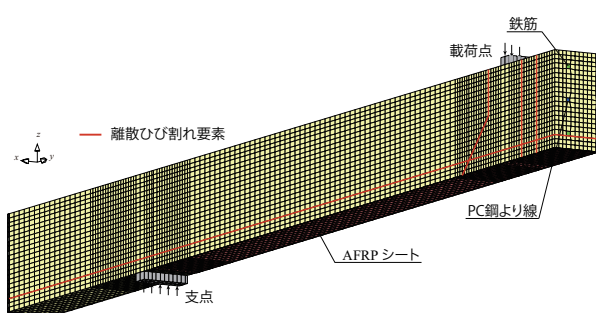


図-2 要素分割図 (T0 試験体の場合)

ために、応力分散用の2方向AFRPシートをあらかじめU字型に接着し、その上に応力緩和材を用いて緊張力を導入したAFRPシートを接着することとした。

表-1には、AFRPシートへの導入緊張率の一覧を示している。本研究では、3体の試験体を対象に数値解析を実施した。なお、表中の試験体名は、Nは無補強試験体、T0は無緊張接着補強、T27は提案した緊張接着補強である。

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、梁とは独立したシート緊張用架台を設置し、油圧ジャッキによりシートに緊張力を導入した状態でPC梁に接着している。接着樹脂の硬化に必要な一週間程度の養生期間が経過した後、油圧ジャッキを解放し、PC梁にプレストレスを導入している。その他の詳細な緊張接着作業工程については文献⁴⁾を参照されたい。

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。なお、実験時におけるコンクリートの圧縮強度 f'_c は79.5 MPa、主鉄筋の降伏応力 f_y は368 MPa、PC鋼より線の降伏応力は1,580 MPaである。

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NおよびT0試験体は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モデルとし、T27

試験体については非対称であるため、断面方向にのみ2等分した1/2モデルとしている。コンクリート、上下端鉄筋、PC鋼より線、定着鋼板および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。

境界条件は、対称切断面において法線方向変位成分を、支分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。

また、応力集中を緩和するために配置した2方向AFRPシートも、実験と同一条件とするために所定の位置に配置している。なお、実験終了後の観察より、梁側面において応力分散用シートとコンクリート間に剥離が生じていないこと、およびモデル作成時の煩雑さを避けるために、本解析では梁側面のシートについてはモデル化を省略した。

3.2 接触面要素の配置および応力-相対変位関係

AFRPシートで補強したPC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、既往の研究成果を参考に、図-2に示すように離散ひび割れ要素を配置している。

コンクリートのひび割れ部における離散ひび割れ要素には、図-3(a)に示すようなCoulomb-frictionモデルを適用し、法線方向の相対変位 ΔU_n とその方向の引張応力 f_n との関係を与えた。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。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、骨材のかみ合わせを考慮し、応力を保持したまま滑動を続けるものとしている。なお、梁の曲げ圧縮破壊を考慮するため、実験結果より、ひび割れが発生していない梁上端からかぶりまでの範囲にある離散ひび割れ要素の法線方向剛性 k_n は200 N/mm³とし、その他の要素は100 N/mm³と設定した。

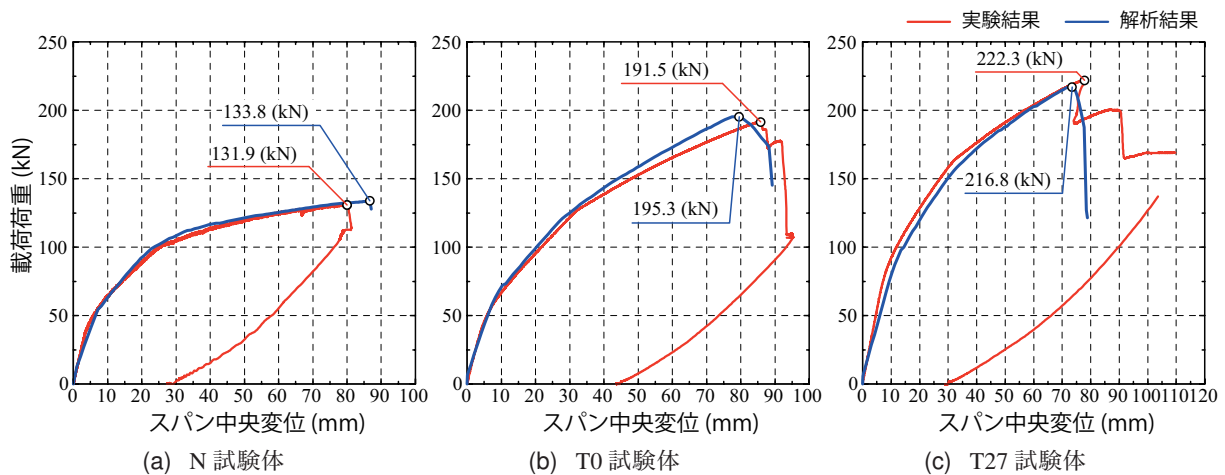


図-5 載荷荷重-スパン中央変位関係の比較

主鉄筋要素の周囲に配置した接触面要素において、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⁵⁾を参考にして図-3(b)のように定義した。

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-3(c)に示されるモデル¹⁾を適用した。

応力緩和材に関しては、ボンド要素の接線剛性勾配 k_t を変化させることによってモデル化した。具体的には、シート端部から応力緩和材塗布範囲に対して、ボンド要素の接線剛性勾配を $k_t = 5 \sim 100 \text{ N/mm}^3$ まで線形的に変化させている。なお、法線方向の応力-相対変位関係に関しては $k_n = 100 \text{ N/mm}^3$ と一定とした。

3.3 解析手法

PC 梁の打設および AFRP シートに緊張力を導入後、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がある。本研究では、これらの一連の行程を適切に解析するために、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、実験時の行程と同様に以下のようになる。

- 1) シート要素と PC 鋼材要素を読み込む (フェーズ 0)
- 2) それぞれの要素の端部に強制変位を与えることで所定の緊張力を数値解析的に導入する (フェーズ 1)
- 3) コンクリート要素やボンド要素などの残りの要素を追加し、緊張力を開放することで梁にプレストレスを導入する (フェーズ 2)
- 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 (フェーズ 3)。

3.4 材料構成則

図-4には各種材料の応力-ひずみ関係を示している。図-4(a)の、コンクリートの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、圧縮破壊ひずみ ϵ'_{cu} 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、 ϵ'_{cu} 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。

上下端鉄筋およびスターラップ要素には図-4(b)に示すように、降伏後の塑性硬化係数 H' 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。

PC 鋼材要素には、図-4(c)の示方書に基づくトリリニアモデルを適用し、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、図-4(d)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、表-2に示す公称値を用いた。

4. 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-5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。N 試験体と T0 試験体を比較すると、シートの接着により、最大荷重および終局までの変位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。なお、実験における各試験体の破壊性状に着目すると、N 試験体は圧縮破壊により終局となり、T0 および T27 試験体は圧縮破壊が生じた後、シートの剥離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、無補強試験体である N 試験体に着目すると、解析結果は終局までの剛性の変化をほぼ適切に評価していることが分かる。T0 試験体においては鉄筋降伏後の剛性勾配を実験結果よりも高く評価しているものの、鉄筋降伏前までの剛性勾配は実験結果をよく再現できているものと考えられる。また、T27 試験体においては、初期剛性が実験結果より低く、その後の勾配も低めに評価している。しかしながら、終局時近傍の最大荷重を比較すると両試験体ともに実験結果とほぼ一致しており、実験では T0 および T27 試験体がシート剥離により終局に至っていることから、解析結果は実験結果を大略再現できていることが分かる。

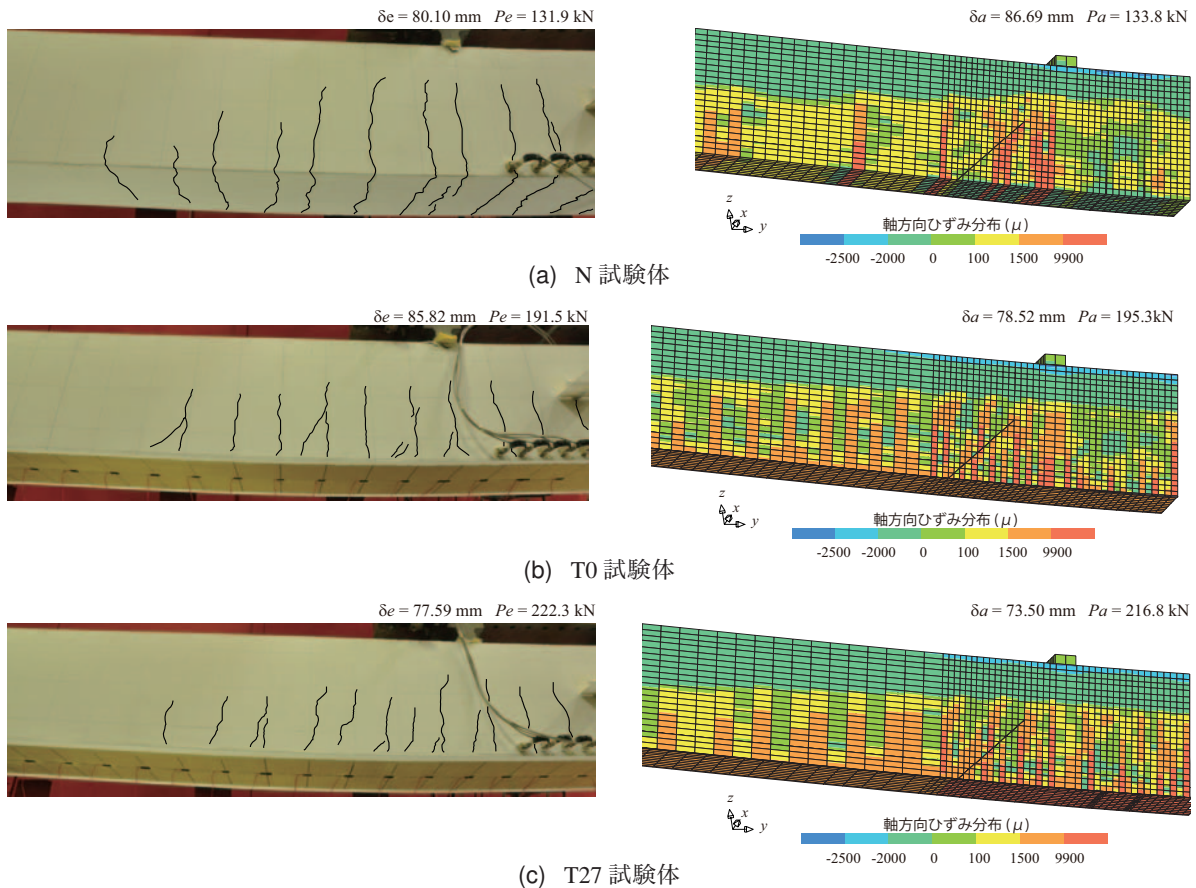


図-6 終局近傍におけるひび割れ性状および軸方向ひずみ分布

4.2 破壊性状

図-6には、梁の終局近傍（最大荷重時）におけるひび割れ性状と数値解析結果における梁側面の軸方向ひずみ分布を比較して示している。図中の P および δ に付随する記号 e, a はそれぞれ実験時と解析時の荷重と変位を示している。実験結果のひび割れ性状には、ひび割れの状態を明瞭とするために加筆している。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(ϵ_1)を、 9900μ がひび割れ開口ひずみ(ϵ_3)を意味する。

まず、実験結果に着目すると、最大荷重時において、曲げによるひび割れが多く発生している。また、(a)および(b)図より、N試験体とT0試験体では載荷点付近が圧壊していることが分かる。しかしながら、斜めひび割れは無く、シートの剥離は発生していない。実験では最大荷重に到達した後、等曲げ区間の上部が圧縮破壊し、シートを接着した試験体はシートが剥離して終局に至っている。

数値解析結果においても、最大荷重時において、ひび割れ開口ひずみの分布状態や等曲げ区間に配置した離散ひび割れが開口していること、斜めひび割れ位置に配置した離散ひび割れ要素は開口していないことより、実験結果と同様の結果を示していることがわかる。また、載荷点直下の要素には -2500μ のひずみが生じていることから、圧縮破壊についても再現できていることが分かる。

5. まとめ

- 1) 提案の解析手法を適用することにより、圧縮破壊による荷重の低下や、実験結果の剛性勾配および変曲

点等の耐荷性状を概ね再現可能である。

- 2) また、ひび割れの分布状態や載荷点付近の圧縮破壊等の破壊性状を大略再現可能である。
- 3) これより、提案の数値解析手法は、AFRPシートを緊張接着したPC梁の静的耐荷性状を大略再現可能であるものと考えられる。

参考文献

- 1) 土佐亮允, 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: AFRPシート緊張接着曲げ補強RC梁の耐荷性状に及ぼすシート目付量および導入緊張率の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, pp. 1309-1314, 2011.6.
- 2) 小室雅人, 岸 徳光, 三上 浩, 氏家友哉: AFRPシート緊張接着曲げ補強RC梁の静的耐荷性状に関する数値解析の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, pp. 1309-1314, 2012.6
- 3) 土佐亮允, 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: AFRPシート緊張接着曲げ補強PC梁の曲げ耐荷性能に及ぼす定着方法の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, pp. 1303-1308, 2012.6.
- 4) 澤田純之, 岸 徳光, 三上 浩, 藤田 学: AFRPシート緊張接着によるRC梁の曲げ補強効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, pp. 1543-1548, 2008.6.
- 5) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford.