

論文 AFRP シート緊張接着曲げ補強PC 梁の静的耐荷性状に関する 数値解析手法の妥当性検討

池田 翔哉^{*1}・小室 雅人^{*2}・三上 浩^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨: 本研究では、FRP シートで緊張接着曲げ補強された PC 梁に関する弾塑性解析法を確立することを目的に、緊張接着曲げ補強 RC 梁に関する解析と同様に、梁に緊張力を導入するために要素の追加・変更・除去するフェーズ機能を用いて解析を行っている。解析の妥当性は、AFRP シートで緊張接着曲げ補強された PC 梁に関する静載荷実験結果と比較する形で検討を行った。検討の結果、1) 提案の解析手法を用いることにより、実験結果の耐荷性状を大略再現可能であること、また、2) 実験結果における破壊形式に関しても大略再現可能であること等、が明らかになった。

キーワード: AFRP シート, 緊張接着, PC 梁, 耐荷性状, 弾塑性解析

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^{1),2)}。

著者らもアラミド製 FRP (AFRP) シートを用いた緊張接着工法の開発やその曲げ補強効果の検討を目的に、矩形 RC 梁を対象に実験的検討³⁾を行ってきた。併せて、有限要素法を用いた三次元弾塑性解析を実施し、実験結果との比較により、解析手法の妥当性を検討してきた⁴⁾。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 AFRP シート緊張接着工法を PC 梁に対して適用して、曲げ耐力の向上効果を確認している⁵⁾。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曲げ補強する場合において、その補強効果の適切な評価や合理的な設計法を確立するためには、実験的研究のみならず、数値解析の研究を併用して検討することが望ましい。

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 梁を対象に弾塑性有限要素解析を実施した。解析では、施工順序に対応して適切に解析を行うために、要素の追加・変更・除去を可能にするフェーズ機能を用いることにより、梁に緊張力を導入している。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⁵⁾との比較を行うことにより、妥当性の検討を行った。なお、本解析には構造解析汎用コード DIANA9.3⁶⁾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 $\phi=15.2\text{mm}$ の PC 鋼より線 (以後、PC 鋼材) 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: $1,245\text{ g/m}^2$) 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

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		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

*1 国土交通省 北海道開発局 函館開発建設部 修(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 准教授 博(工) (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術研究開発本部 技術開発センター 博(工) (正会員)

*4 釧路工業高等専門学校 校長 (正会員)

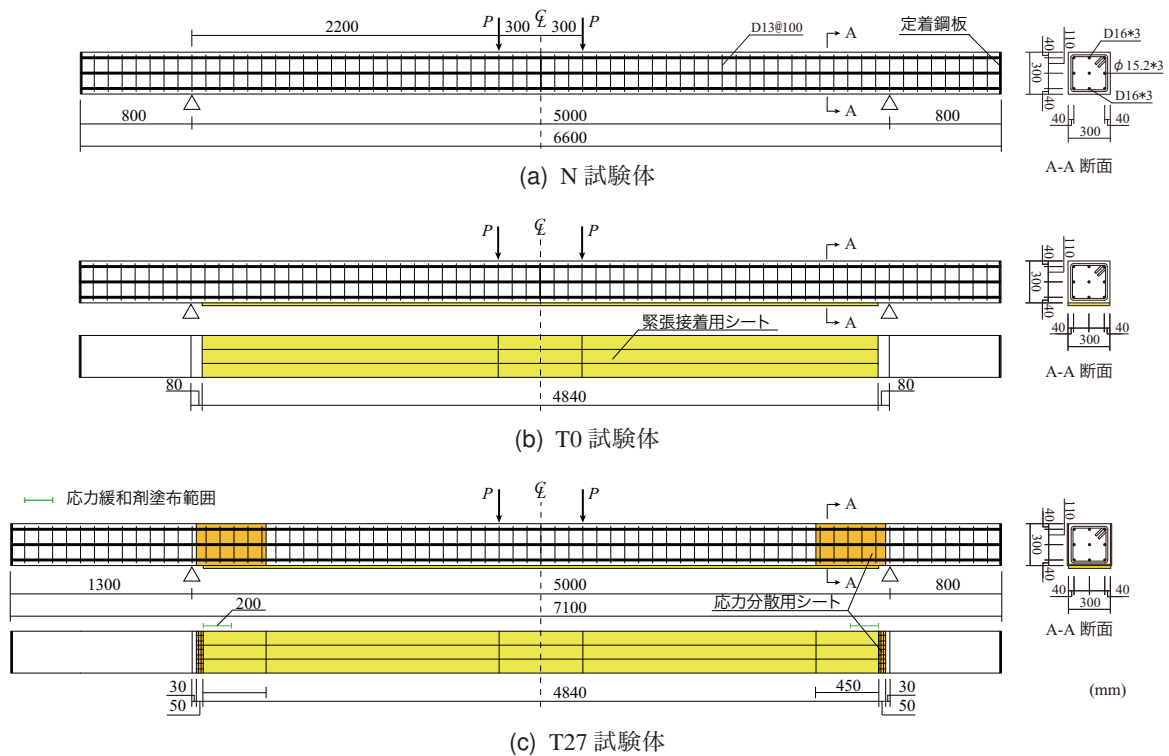


図-1 試験体の形状寸法

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⁷⁾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 鋼材の降伏応力は 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

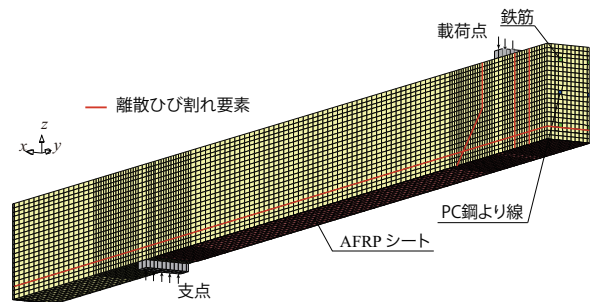


図-2 要素分割図 (T0 試験体の場合)

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 鋼材、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。

また、応力分散用 AFRP シートに関しては、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より、簡略化のために梁側面のシートは省略し、梁底面のみをモデル化することとした。

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

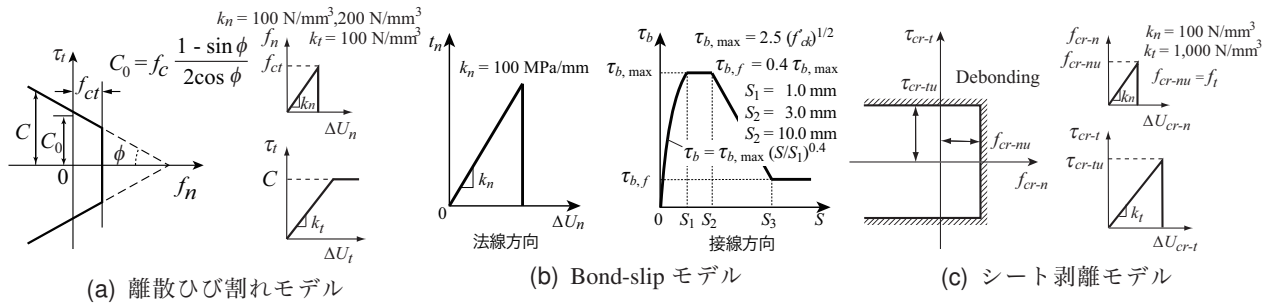


図-3 接触面要素に適用した応力-相対変位関係

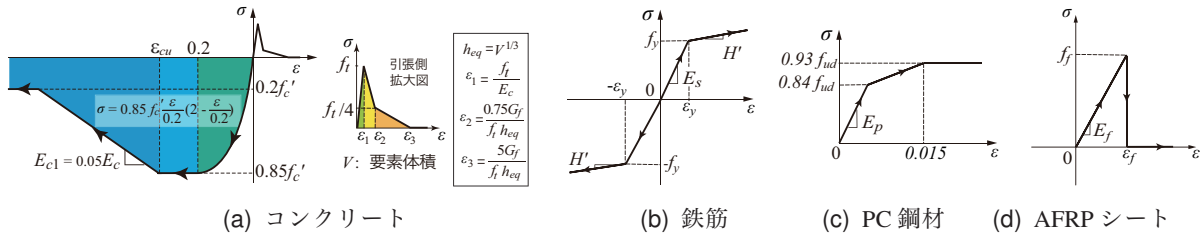


図-4 材料構成則

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⁴⁾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/mm^3 とし、その他の要素は 100 N/mm^3 と設定した。

主鉄筋および PC 鋼材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⁸⁾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⁴⁾を適用している。なお、図中の f_{cr-nu} および τ_{cr-tu} はそれぞれ限界法線方向応力、限界せん断応力を意味し、前者にはコンクリートの引張強度 f_t を、後者には既往の文献⁹⁾を参考に次式によって評価した。

$$\tau_{cr-tu} = 0.92 \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

応力緩和材に関しては、ボンド要素の接線剛性勾配 k_t

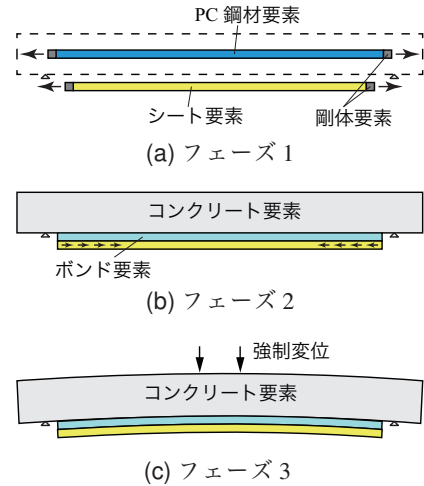


図-5 解析の流れ (フェーズ解析過程)

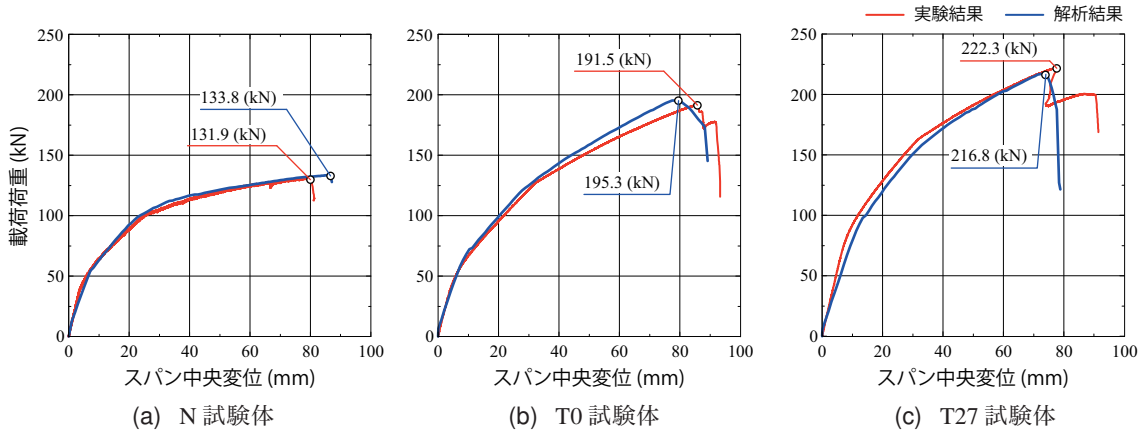
を変化させることによってモデル化した。具体的には、シート端部から応力緩和材塗布範囲に対して、ボンド要素の接線剛性勾配を $k_t = 5 \sim 100 \text{ N/mm}^3$ まで線形的に変化させている。なお、法線方向の応力-相対変位関係に関しては $k_n = 100 \text{ N/mm}^3$ と一定とした。

3.3 解析手法

PC 梁の打設および FRP 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。

表－3 実験結果と解析結果の比較

試験体名	実験結果				破壊形式	解析結果				
	主鉄筋降伏時		最大荷重時			主鉄筋降伏時		最大荷重時		破壊形式
	荷重 P_y (kN)	変位 δ_y (mm)	荷重 P_{max} (kN)	変位 δ_{max} (mm)		荷重 P_y (kN)	変位 δ_y (mm)	荷重 P_{max} (kN)	変位 δ_{max} (mm)	
N	97.2	23.4	131.9	80.1	上縁側圧壊	91.8	19.7	133.8	86.7	上縁側圧壊
T0	122.1	30.2	191.5	85.8	圧壊後剥離	115.6	25.8	195.3	78.5	圧壊後剥離
T27	157.0	29.7	222.3	77.6	圧壊後剥離	147.7	28.9	216.8	73.5	圧壊後剥離



図－6 載荷荷重－スパン中央変位関係の比較

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。(図－5参照)

- 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ある剛体要素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) 荷重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)

なお、フェーズ2において、1)PC鋼材により導入されるプレストレス力は設計条件と一致していること、および2)シートひずみに関してはシート端部において解析結果と実験結果に若干の差異が見られるものの、その他の領域においては適切に再現していることを確認している。

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)に示すコンクリートの圧縮側の構成則に関しては、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。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。 G_f は示方書に基づいて、次式のように定義している。

$$G_f = 10(d_{max})^{1/3}(f'_{ck})^{1/3} \quad (2)$$

ここで、 d_{max} は粗骨材の最大寸法(mm)、 f'_{ck} はコンクリートの圧縮強度の特性値である。本研究では、 d_{max} を実験に即して20mmと設定した。

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た。図中の f_{ud} は設計引張強度であり、引張試験結果から $f_{ud} = 1,882$ MPaとした。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

表－3には、各試験体の主鉄筋降伏時および最大荷重時における荷重と変位、並びに終局時における破壊形式に

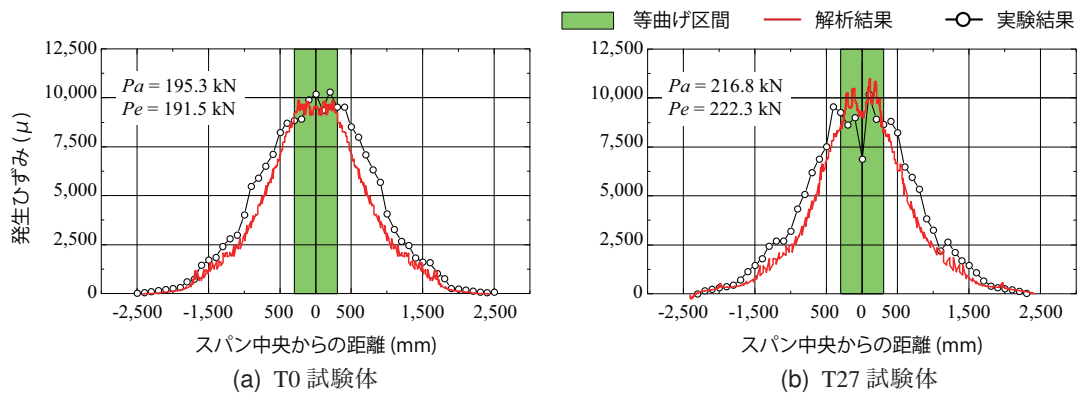


図-7 最大荷重時におけるAFRPシートの軸方向ひずみ分布性状

ついて実験結果と解析結果を比較して示している。また、図-6には、各試験体の荷重荷重とスパン中央変位の関係を示している。

まず、各試験体の実験結果に着目する。表-3より、無補強試験体(N)と無緊張試験体(T0)を比較すると、シートを接着することによって最大荷重が向上している。また、緊張力を導入したT27試験体では、T0試験体よりもさらに荷重レベルが増加していることが確認される。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(図-6(a)参照)に着目すると、初期勾配からひび割れ発生時や主鉄筋降伏時における剛性勾配の変化を含めて終局に至るまでの荷重-変位関係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若干大きく評価しているものの、鉄筋降伏前までの剛性勾配は結果をよく再現できていることが分かる。また、T27試験体においては、初期勾配が実験結果よりも若干低く評価されているものの、終局時近傍の最大荷重を比較するとシート補強した両試験体ともに実験結果とほぼ一致している。

4.2 AFRPシートの軸方向ひずみ分布

図-7には、シート接着したT0およびT27試験体の最大荷重時におけるAFRPシートの軸方向ひずみ分布を示している。なお、各ひずみ値は荷重荷重に伴って発生した増分ひずみであり、緊張接着時のひずみは含まれていない。また、図中の P_a 、 P_e はそれぞれ着目した数値解析および実験結果の荷重を意味している。

まず、実験結果に着目する。等せん断力区間において、どちらの試験体もシート接着端部から荷重点に向かって緩やかに増加していることが分かる。これより、等せん断力区間では終局直前までシートは剥離しておらず、コンクリートとの付着が保たれていることが窺われる。

次に、数値解析結果に着目する。等せん断力区間におけるシート軸方向のひずみは、解析結果は実験結果よりも低く評価しているものの、ひずみ増加の勾配は一致し

ており、実験結果を概ね再現できていることが分かる。また、等曲げ区間に関しては、T0試験体の場合には、解析結果のひずみ分布は大略一致しているものの、T27試験体の場合には、解析結果のひずみ分布は実験結果のそれよりも若干大きく評価している。

4.3 破壊性状

図-8には、各試験体の終局近傍(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は、その性状を明瞭に示すため加筆している。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(a)と対応しており、 100μ がひび割れ発生ひずみ(ϵ_1)を、 $9,900\mu$ がひび割れ開口ひずみ(ϵ_3)を意味している。

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試験体では荷重点付近が圧壊していることが分かる。しかしながら、斜めひび割れは発生せず、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分かる。また、荷重点直下の要素には $-2,500\mu$ 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。なお、終局状態に関しても、T0試験体およびT27試験体の解析結果は圧壊後にシートの剥離を確認しており、実験結果の終局状態と一致している。

5. まとめ

本研究では、既往の研究において、著者らが提案したAFRPシートを緊張接着したRC梁を対象とした数値解析

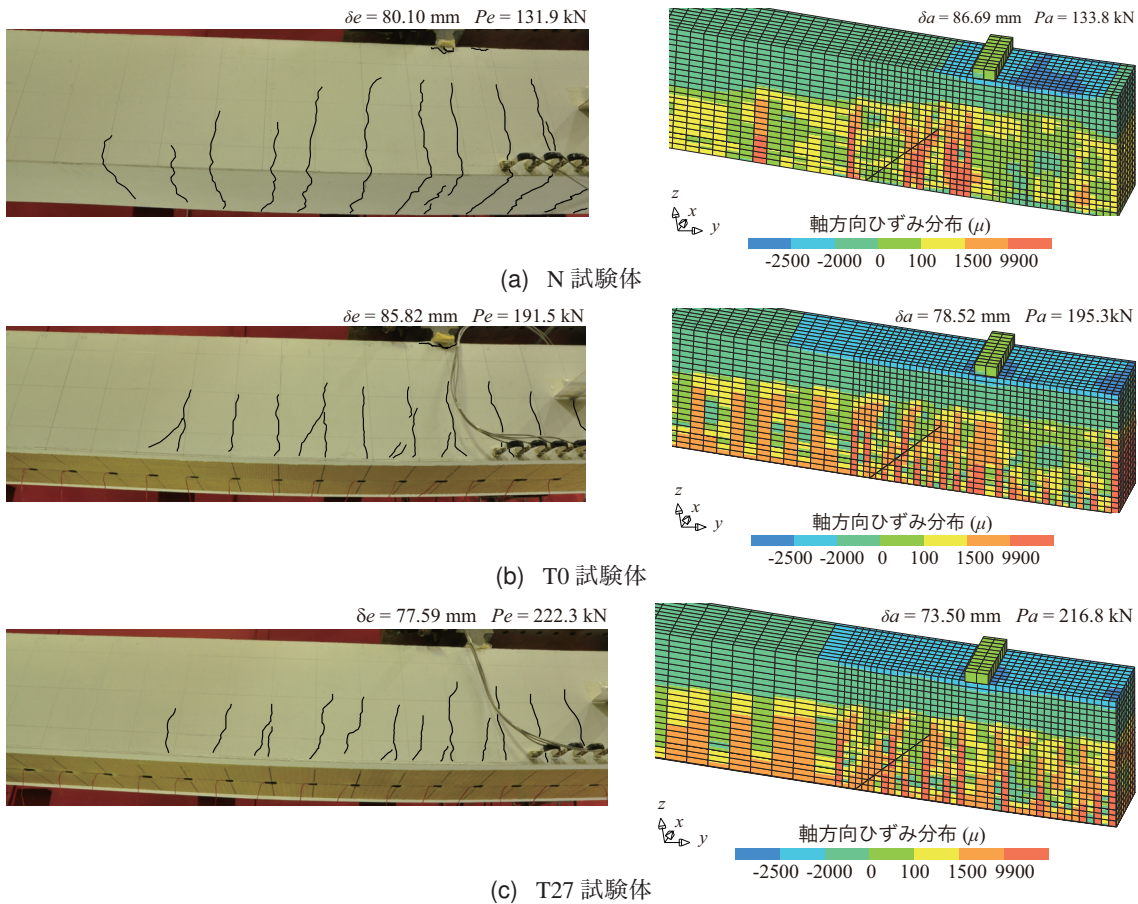


図-8 終局近傍におけるひび割れ性状および軸方向ひずみ分布

手法の PC 梁への適用性の検討を目的として、緊張接着曲げ補強した PC 梁を含む試験体を対象に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、解析結果は実験結果の緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布、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) 佐藤信也, 小橋茂和, 小金澤豊秋, 高橋輝光: 炭素繊維プレート緊張材を用いた「町浦橋」の補強, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol. 15, pp. 355-358, 2006.9.
- 2) 呉 智深, 松崎智優, 福沢公夫, 神田 建: CFRPシート緊張接着による鉄筋コンクリート曲げ部材の補強効果に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.641/V-46, pp.153-165, 2000.2.
- 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 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.
- 4) 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的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, pp. 1309-1314, 2012.6.
- 5) 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.
- 6) Nolinear Analysis User's Manual (9.3), TNO Building and Construction Research.
- 7) 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.
- 8) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford.
- 9) 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.