

論文 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, AFRP シートを緊張接着した曲げ補強 RC 梁の耐荷性状および破壊挙動を評価可能な解析手法の確立を目的として, 断面寸法が異なる緊張接着曲げ補強 RC 梁を対象に三次元弾塑性解析を実施し, 実験結果との比較によりその妥当性に関する検討を行った。その結果, 1) 断面寸法およびシートに導入する緊張力が異なる場合でも RC 梁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が明らかになった。

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

1. はじめに

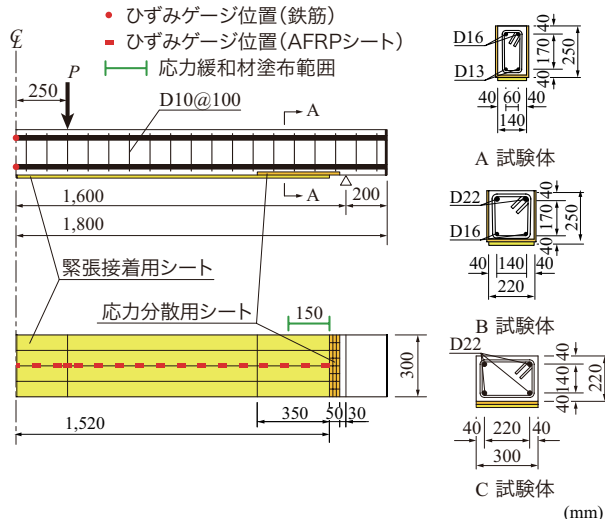
近年, 既設鉄筋コンクリート構造物の補強工法として, 連続繊維 (FRP) シートをを用いた接着工法が数多く採用されている。最近では, FRP シートの曲げ補強効果をより低い荷重レベルから発揮させる方法として, FRP シートに緊張力を与えた状態で接着する方法 (以後, 緊張接着工法) が考案され, 一部で実用化されている。

著者らも緊張接着用シートをアンカー等の機械式定着用具を用いずに施工可能なアラミド繊維製 FRP (AFRP) シートを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¹⁾。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, 実構造も含めた種々の断面部材に対する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果的に遂行することが重要となる。

このような視点より, 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。しかしながら, これらの結果は 1 種類の形状寸法に対して得られた知見であり, 提案解析手法の信頼性をさらに向上させるためには, 形状寸法や緊張力の異なる矩形 RC 梁に対しても検討を行う必要があるものと考えられる。

このような背景より, 本研究では, 形状寸法および緊張力の異なる 6 種類の矩形 RC 梁を対象に提案の数値解析手法を適用した弾塑性解析を実施し, その妥当性に関する検討を行った。ここでは, 荷重-変位関係, 破壊性状, シートの軸方向ひずみ分布について着目している。なお,



(a) 正面図および底面図 (A 試験体) (b) 断面図

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	目標導入緊張率 ^{#1} (%)	実測導入緊張率 ^{#1} (%)	導入ひずみ (%)
A-T13	13 (32.1)	13.2 (32.6)	0.231
A-T27	27 (66.7)	26.5 (65.5)	0.464
B-T13	13 (50.5)	12.8 (49.5)	0.224
B-T27	27 (104.8)	25.7 (99.6)	0.450
C-T13	13 (68.8)	14.4 (76.3)	0.252
C-T27	27 (142.9)	26.4 (139.5)	0.462

^{#1}()内は導入緊張力 (kN)

*1 室蘭工業大学大学院 博士前期課程 建築社会基盤系専攻 (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院 工学研究科 暮らし環境系領域 講師 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 副センター長 博(工) (正会員)

*4 釧路工業高等専門学校 校長 (正会員)

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

本解析には構造解析汎用コード 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 RC 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、梁幅が異なる矩形 RC 梁 (純スパン長 3,200 mm) である。軸方向鉄筋には、D13, D16, D19, D22 を断面形状ごとに組み合わせ、上下端に 2 本ずつ配筋した。スターラップには D10 もしくは 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、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シートを接着することとした。この応力緩和材の弾性係数は緊張接着用エポキシ樹脂の 1/60 程度である。

表-1 には、各試験体の AFRP シートへ導入する導入緊張率及びひずみの一覧を示している。本研究では、断面寸法および緊張力の異なる 6 種類の矩形 RC 梁を対象に数値解析を実施した。なお、試験体名は、断面形状 (A ~ C) およびシートの目標導入緊張率 (%) を組み合わせて定義している。

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 RC 梁に接着している。詳細な緊張接着作業工程については文献³⁾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。

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の一例として B 梁について示している。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、主鉄筋および 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

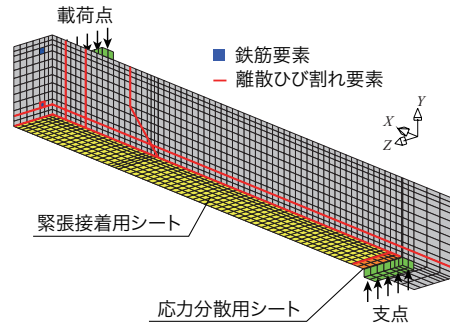


図-2 要素分割図 (B 梁の場合)

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、応力集中が生じる部分について、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。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ている。

本数値解析では、载荷点および支点部における応力集中をできるだけ避けるため、両部分に長さ 50 mm、厚さ 25 mm の鋼板要素を配置している。また、解析は载荷点部の鋼板要素中央部の梁幅方向全 8 節点に強制変位を与えることにより実施した。

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 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、既往の研究成果²⁾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。限界引張応力値 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、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、ひび割れ開口後のか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た。

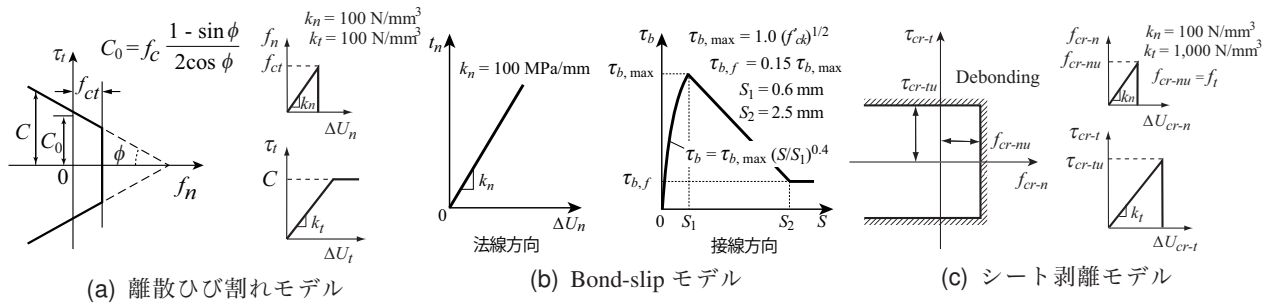


図-3 接触面要素に適用した応力-相対変位関係

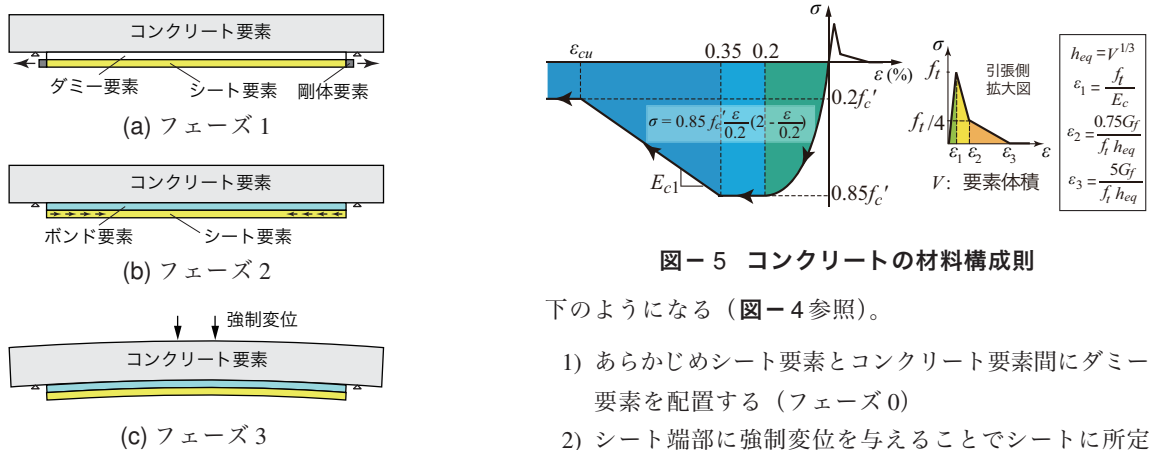


図-4 解析の流れ (フェーズ解析過程)

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⁴⁾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が提案したシート剥離モデル⁵⁾ (図-3 (c) 参照) 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の端部にかけて、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。

また、後述のフェーズ解析におけるダミー要素の応力-相対変位関係は、 k_n, k_t とともに限りなく零に近い値を与えている。

3.3 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

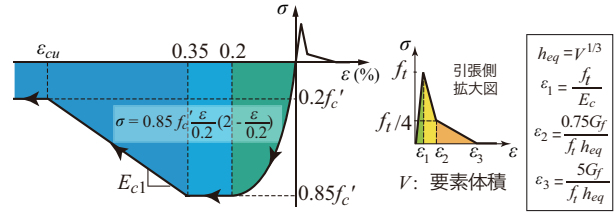


図-5 コンクリートの材料構成則

下ようになる (図-4 参照)。

- 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 (フェーズ 0)
- 2) シート端部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 (フェーズ 1)
- 3) ダミー要素をボンド要素 (シートとコンクリート間の接触面要素) と入れ替え、シートの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

本研究では、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離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。

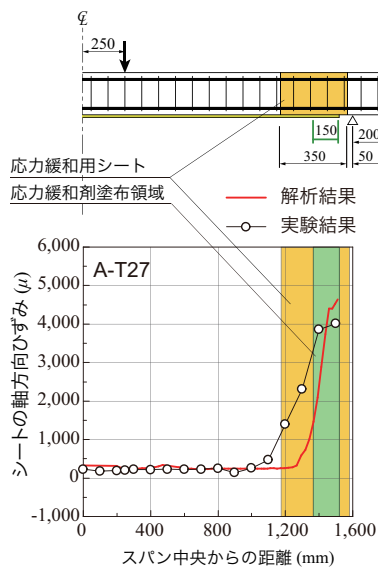
図-5 にはコンクリートの応力-ひずみ関係を示している。圧縮側の構成則に関しては、材料実験から得られた圧縮強度 f'_c を用い、圧縮ひずみが 0.35% までは土木学会コンクリート標準示方書 (以後、示方書) に基づいて定式化し、0.35% 以後は初期弾性係数の 0.05 倍で $0.2f'_c$ まで線形軟化するモデルとした。また、降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件を用い、内部摩擦角 ϕ は 30° とした。一方、引張側に関しては、示方書による引張軟化曲線を適用している。

主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 H' を $0.01E_s$ 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、表-2 に示す公称値を用いた。

表－3 実験結果と解析結果と比較

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)	
A-T13	51.5	16.8	77.9	47.5	シート剥離	52.4	16.4	80.9	41.5	シート剥離
A-T27	63.6	17.5	90.7	45.5	シート剥離	61.8	17.5	85.6	37.1	シート剥離
B-T13	77.1	15.2	124.6	46.4	シート剥離	78.8	15.4	119.8	37.1	シート剥離
B-T27	104.1	19.2	143.2	45.8	シート剥離	98.2	17.8	144.2	42.8	シート剥離
C-T13	107.8	16.4	163.7	45.7	シート剥離	108.0	15.4	176.5	42.6	シート剥離
C-T27	137.9	18.0	191.1	45.5	シート剥離	127.8	16.8	196.4	43.5	シート剥離



図－6 シート端部の軸方向ひずみ分布 (A-T27 梁)

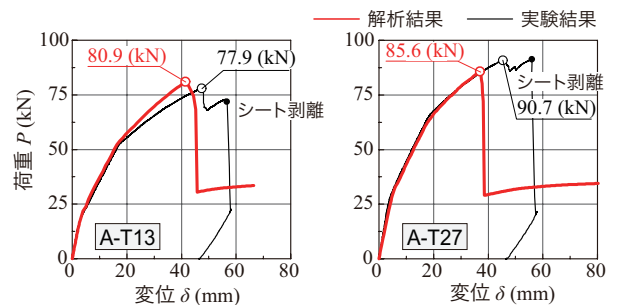
4. 解析結果および考察

4.1 緊張力解放時におけるシート端部の軸方向ひずみ

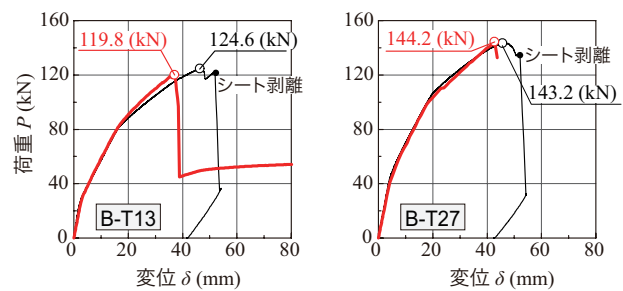
図－6には、緊張力解放後におけるシート端部の軸方向ひずみ分布について、A-T27 梁を例に実験結果と解析結果を比較して示している。図より、解析結果によるシートの軸方向ひずみは、いずれの梁においても応力緩和用シートおよび応力緩和材塗布領域を除いて、実験結果とほぼ等しい値を示していることが分かる。これより、本解析手法は、実際に導入されたシートの緊張力をほぼ適切に再現しているものと判断される。なお、応力緩和材塗布領域における実験結果と解析結果の差に関しては、応力集中を避けるために、前述のようにシート端部から応力緩和材塗布領域端部に向かってポンド要素の接線剛性勾配を線形的に変化させていることによるものと考えられる。

4.2 載荷荷重－スパン中央変位関係

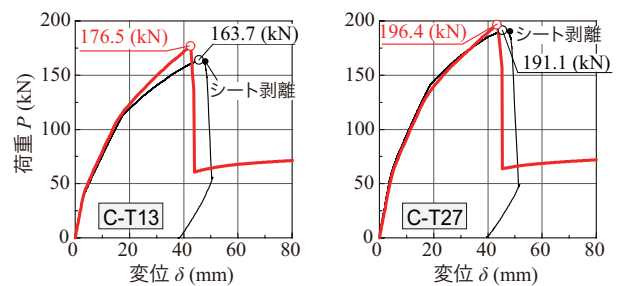
表－3には、各試験体の主鉄筋降伏時および最大荷重時における荷重と変位、並びに終局時における破壊形式について実験結果と解析結果を比較して示している。また、



(a) A-Tn 梁



(b) B-Tn 梁



(c) C-Tn 梁

図－7 載荷荷重－スパン中央変位関係の比較

図－7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。表－3および図－7より、RC 梁の形状寸法にかかわらずシートの導入緊張率の増加に伴い主鉄筋降伏荷重 P_y および最大荷重 P_{max} が增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、いずれの試験体もシート剥離により終局に至っていることが分かる。

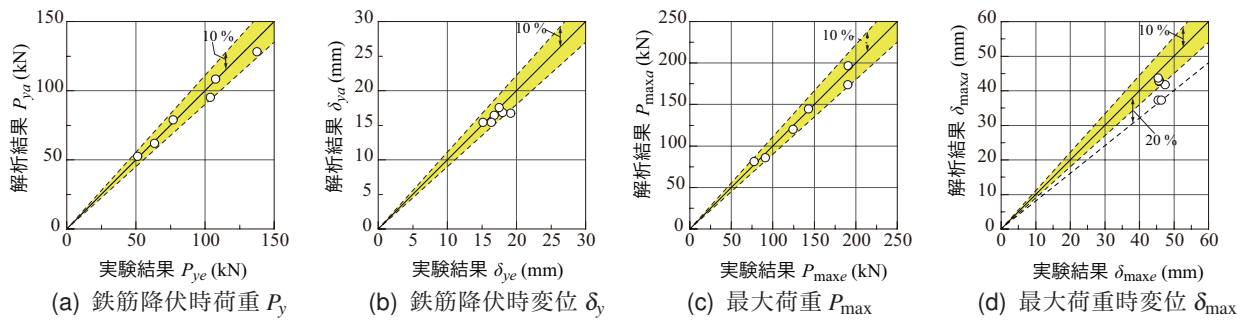


図-8 鉄筋降伏時および最大荷重時における解析結果と実験結果の比較

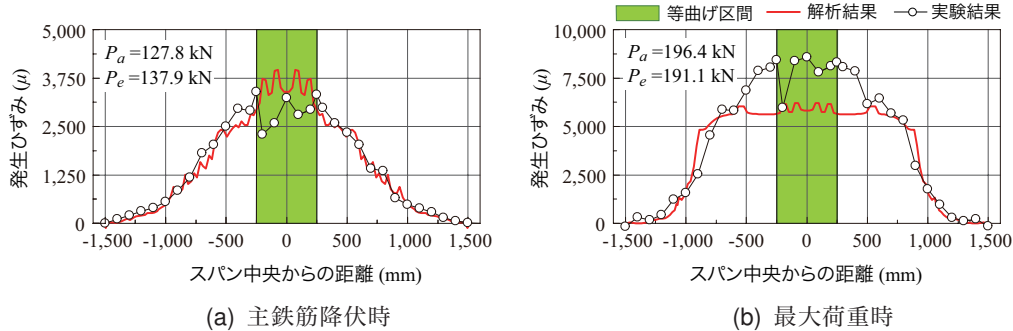


図-9 C-T27 梁における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布性状

次に実験結果と解析結果の比較を行う。図-7より、導入緊張率が小さい A/B/C-T13 梁の場合に着目すると、いずれの場合も解析結果は、実験結果と比較して主鉄筋降伏後の剛性勾配を過大に評価していることが分かる。また、A/C-T13 梁においては実験結果と比較して最大荷重を過大に、B-T13 梁においてはそれ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荷重および変位に関しては、実験結果と大略一致している。なお、数値解析では、いずれの場合もシート剥離で終局に至っており、実験結果の破壊性状を適切に再現可能であることが分かる。

次に、導入緊張率の大きい A/B/C-T27 梁について検討すると、解析結果の最大荷重は A-T27 梁を除いて、実験結果のそれをほぼ適切に評価している。さらに、解析結果は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。なお、いずれの場合においても、実験結果の破壊性状を適切に再現できるものと考えられる。

図-8には、表-3に示した鉄筋降伏時荷重 P_y 、最大荷重 P_{max} およびそれらの発生時変位 δ_y 、 δ_{max} について、解析結果と実験結果をそれぞれ縦軸および横軸に取って整理している。図中の 45° 勾配を有する実直線は、解析結果と実験結果が一致していることを、破線はそれに対する誤差幅 $\pm 10\%$ を意味している。

(a)~(c) 図より、主鉄筋降伏時の荷重 P_y と変位 δ_y に関する解析結果と実験結果の関係を見ると、その誤差は形状寸法や緊張率の大きさにかかわらず $\pm 10\%$ 以内であり、両者の値は非常によく対応していることが分かる。

一方、最大荷重時変位 δ_{max} (d 図参照) に着目すると、解析結果は実験結果よりも最大荷重時変位を若干小さく評価する場合も見られるものの、その誤差は最大でも 20% 程度であることが分かる。

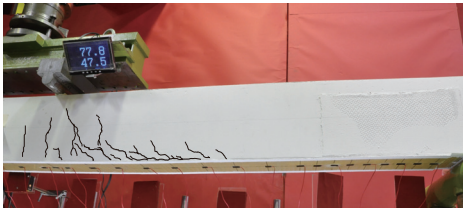
以上より、提案の数値解析手法は、最大荷重時変位に関しては実験結果を若干過小に評価する傾向が見られるが、主鉄筋降伏荷重や降伏時変位および最大荷重に関しては $\pm 10\%$ 以内の誤差で評価できることが明らかになった。

4.3 緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布

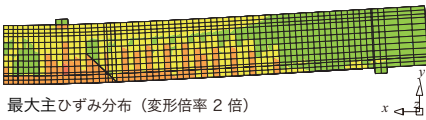
図-9には、C-T27 梁の主鉄筋降伏時および最大荷重時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布を示している。なお、各ひずみ値は荷重載荷に伴って発生した増分ひずみであり、緊張接着時のひずみは含まれていない。また、図中の P_a 、 P_e はそれぞれ着目した数値解析および実験結果の荷重を意味している。まず、実験結果に着目する。(a) 図より、主鉄筋降伏時における軸方向ひずみは、等せん断力区間においてシート接着端部から載荷点に向かってほぼ線形的に増加していることが分かる。これより、主鉄筋降伏時においては、シートは剥離しておらず、コンクリートとの付着が保たれているものと推察される。また、(b) 図より、最大荷重時においては等せん断力区間における軸方向ひずみが増加し、ピーリング作用によってシートの部分剥離が発生していることを確認している。

次に、数値解析結果に着目する。図-9(a)より、主鉄筋降伏時における等曲げ区間の軸方向ひずみ分布に着目すると、解析結果は離散ひび割れ要素の影響によって実験結果よりも大きく評価されているものの、等せん断力

$P_e = 77.8 \text{ kN}$, $\delta_e = 47.5 \text{ mm}$



$P_a = 80.9 \text{ kN}$, $\delta_a = 41.5 \text{ mm}$



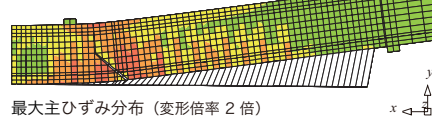
最大主ひずみ分布 (変形倍率 2 倍)

(a) 最大荷重時

$P_e = 22.2 \text{ kN}$, $\delta_e = 58.0 \text{ mm}$



$P_a = 30.5 \text{ kN}$, $\delta_a = 47.8 \text{ mm}$



最大主ひずみ分布 (変形倍率 2 倍)

(b) 実験終了時

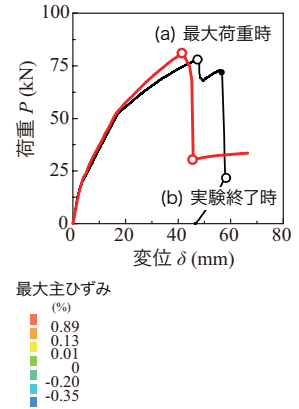


図-10 A-T13 梁における終局近傍のひび割れ性状および最大主ひずみ分布

区間においては実験結果を適切に評価していることが分かる。また、図-9 (b) では、スパン中央から 500 mm の領域にかけて、解析結果が実験結果よりも小さく示される。これは、実験ではピーリング作用によってシートの部分剥離が発生しているのに対し、数値解析では適用した構成則モデルの特性から実験結果に見られるような部分剥離を適切に再現できないことによるものと考えられる。なお、等せん断力区間であるスパン中央点からシート端部に向かって約 250~500 mm 領域における最大主ひずみ分布は一定値を示しているが、これはシートの完全剥離によってひずみが均一化されたものと考えられる。このような傾向は C-T27 試験体以外でもほぼ同様であることを確認している。

4.4 破壊性状

図-10 には、A-T13 梁の終局近傍（最大荷重時および実験終了時）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最大主ひずみ分布を比較して示している。なお、実験結果の写真には、ひび割れを明瞭にするためひび割れ部分に黒線を加筆している。また、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-5 と対応しており、0.01 % がひび割れ発生ひずみ (ϵ_1) を、0.89 % 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、(a) 図より、最大荷重時には、等曲げ区間に曲げによるひび割れが発生している。また、等せん断力区間では載荷点から下方に斜めひび割れの発生とともに、コンクリートとシートの接着界面に沿うように下縁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。また、(b) 図より、実験終了（シート剥離）時においては、ピーリング作用によって、下縁かぶりコンクリートがシートと一体となって剥落していることが分かる。

数値解析結果においても、最大荷重時において、等曲げ区間および斜めひび割れ位置に配置した離散ひび割れ要素が開口していること、実験終了時にはシートが全面

剥離していることより、実験結果と同様の傾向を示していることが分かる。

5. まとめ

- 1) 提案の数値解析手法を適用することにより、AFRP シートに実験結果とほぼ等しいプレストレスを導入することができる。
- 2) 提案の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、RC 梁の形状寸法にかかわらず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。
- 3) また、解析結果は実験結果の緊張接着用シートの最大主ひずみ分布、破壊形式およびひび割れ分布を大略再現可能である。
- 4) 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 RC 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的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, pp. 1309-1314, 2012.6
- 3) 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.
- 4) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford.
- 5) 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.