FRP シート曲げ補強した損傷を有する RC 梁の耐荷性状に関する 数値解析的検討

Numerical analysis of flexural reinforcing behavior of FRP sheet for damaged RC beams

岸 徳光*, 三上 浩**, 小室 雅人***, 栗橋 祐介***

Norimitsu Kishi, Hiroshi Mikami, Masato Komuro, Yusuke Kurihashi

***博(工), 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員(〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)
***博(工), 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員(〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)
****博(工), 室蘭工業大学大学院 講師 くらし環境系領域 社会基盤ユニット(〒050-8585 室蘭市水元町 27 番1号)

In order to establish a numerical analysis method for evaluation of the flexural reinforcing effects of fiber reinforced polymer (FRP) sheet for the damaged RC beams, a 3D nonlinear FE analysis method is proposed. In this paper, both smeared and discrete cracking models for concrete are applied. For numerical simulations, two damaged beams are prepared which are pre-loaded up to point of: 1) the rebar yield point; and 2) the residual displacement reaching 0.4 % of the clear span length. Those are reinforced by bonding Aramid FRP (AFRP) sheet and statically reloaded up to reaching the ultimate state. The numerical results are compared with the experimental ones. From this study, it is confirmed that applying the proposed numerical analysis method, flexural reinforcing behavior of the damaged RC beams due to bonding AFRP sheet can be better simulated.

Key Words: numerical analysis, *RC* beam, *FRP* sheet, loading history, flexural reinforcing effect キーワード: 数値解析, RC 梁, FRP シート, 載荷履歴, 曲げ補強効果

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補修・補強法とし て,RC 増厚工法や鋼板接着工法が一般的な工法とし て多く採用されている.しかしながら,鋼板やコンク リートを実構造の補強材として用いる場合には,1) 補 強材料の重量が重く施工性に難があること,2) それに よる構造物の死荷重の増大すること,3) 鋼板の場合に は防錆処理を施さなければならないこと等,いくつか の留意点がある.このような状況下,近年では軽量で 施工性に優れ,かつ高強度を有するアラミド繊維や炭 素繊維等の新素材繊維を用いた連続繊維 (FRP) シート を接着する工法が広く採用されるようになってきた. またそれに伴い,FRP シート接着による RC 部材の補 強効果に関する実験的・解析的研究が,国内外におい て数多く行われている^{1~9}.

一方,補強対象である既設 RC 構造物の中には,経 年劣化や活荷重の増加ならびに地震の影響等により, ひび割れや残留変位が生じているものが数多く存在す る.しかしながら,既往の FRP シート補強に関する 研究事例の多くは,実験,数値解析にかかわらず新設 の構造物を対象とした検討が多く行われており,ひび 割れや残留変位を有する構造物あるいは部材を対象と した検討は非常に少ない.このため,FRP シート接 着工法による既設 RC 構造物の補強効果を適切に評価 し、より信頼性の高い補修・補強工法を確立するため には、新設のみならずある程度の損傷を有する RC 部 材を対象とした検討は極めて重要であるものと考えら れる.また、これらの検討においては、種々の条件下 に対して全て実験的に検討を行うことは、多大な費用 が必要となることから効率的ではなく、実験的研究と 数値解析的研究を併用して実施することが肝要である ものと判断される.

このような背景より,著者らは,既往の研究におい て初期に曲げ載荷によって損傷を与えた後に,アラミ ド製連続繊維(AFRP)シート接着によって曲げ補強を 施した矩形断面 RC 梁を対象に,既往の新設 RC 梁に 関する数値解析的手法を基本とした三次元弾塑性解析 を試みた⁹⁾.その結果,損傷を有する AFRP シート補 強 RC 梁の耐荷性状を大略再現できることを明らかに している.しかしながら,それらの成果は,断面寸法 が等しくシート補強量が異なる2種類の RC 梁に対し てのみ検討されたものであり,より汎用性の高い解析 手法を確立するためには,種々の条件下において,そ の妥当性を検討する必要がある.

このような観点より、本研究では、新たに主鉄筋径 の異なる2種類のRC梁を追加し、既往の研究成果⁹⁾ も含めた全12体について、提案手法の妥当性を検討



図-1 試験体の形状寸法, 配筋状況および計測位置

表-1 試験体一覧

試験体名	主鉄筋径	シート層数	事前載荷レベル		
A-S2L0			0		
A-S2L1	D13	2	1		
A-S2L2			2		
B-S1L0			0		
B-S1L1	D16	1	1		
B-S1L2			2		
B-S2L0			0		
B-S2L1		2	1		
B-S2L2			2		
C-S1L0			0		
C-S1L1	D19	1	1		
C-S1L2			2		

した. さらに, 文献 9) では, コンクリートに関する引 張側の応力–ひずみ関係をバイリニア型にモデル化し ているが,本論文では,土木学会コンクリート標準示 方書¹⁰⁾(以下,標準示方書)に準拠してトリリニア型に モデル化することとした. なお,本数値解析には汎用 構造解析コード DIANA 7.2¹¹⁾を用いている.

2. 実験概要

表-1には、本数値解析の妥当性検討に用いた試験 体の一覧を示している.試験体は、主鉄筋径を3種 類、シート層数を2種類および事前載荷レベルを3 種類に変化させた全12体である.曲げ補強シートに は、AFRPシート(繊維目付量435g/m²,幅150mm, 厚さ0.286mm,保証耐力588kN/m)を用いた.なお、 AFRPシートの保証耐力は公称値¹²⁾である.表中、第 一項目は主鉄筋径別に英文字(A:D13,B:D16,C: D19)を割り振り、第二項目には英文字Sにシート層 数を、第三項目には英文字Lに事前載荷レベル(0,1,

表-2 コンクリートの材料特性値

材料	圧縮	引張	弾性	ポア
	強度	強度	係数	ソン比
	f_c' (MPa)	f_t (MPa)	E_c (GPa)	v_c
コンクリート	29.5	2.19	27.5	0.2

表-3 鉄筋の材料特性値

呼び径	降伏	弾性	ポア	備考	
	強度	係数	ソン比		
	f_y (MPa)	E_s (GPa)	V_s		
D10	391			スターラップ	
D13	404	206	0.3		
D16	392	200	0.5	主鉄筋	
D19	400				

2)を付して示している.

なお、本研究では、損傷を有する RC 梁を対象とし ていることから、特定の載荷レベルまで事前載荷を実 施し、RC 梁にひび割れや残留変位を発生させている. ここでは、事前載荷レベルとして、以下の3段階を設 定した.

レベル0:事前載荷なし

- レベル1:主鉄筋が降伏に至る載荷レベル
- レベル 2:スパン中央部の残留変位が純スパン長の 0.4%(=10.4mm)程度となる載荷レベル

なお,載荷レベル2は,主鉄筋が降伏しかつ上縁圧壊 に至らない程度の損傷レベルを想定し,設定したもの である.

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(梁幅×梁高)が150×250mm、純スパン長2,600 mm、かぶり厚は40mmの矩形 RC 梁である. 上端鉄 筋および下端鉄筋には、D13、D16、D19をそれぞれ 2本ずつ配置し、スターラップはD10を100mm間隔



図-2 要素分割図



写真-1 A-S2L1 試験体の終局状況

に配置している. AFRP シートの補強範囲は, 梁中央 部から両支点の 100 mm 手前までの範囲としている. **表**-2 および **表**-3 には, それぞれ実験時におけるコ ンクリートおよび鉄筋の材料特性を示している. コン クリートの圧縮強度は $f'_c = 29.5$ MPa, 主鉄筋の降伏強 度は $f_y = 392 \sim 404$ MPa であった. なお,後述の数値 解析において,各試験体の鉄筋の降伏強度は,**表**-3 に示す値を用いている. また,**図**-1 に示すように, 試験体にはスパン中央部の上縁コンクリート,主鉄筋 およびシート表面にひずみゲージを貼付している.

写真-1には,一例として A-S2L1 試験体の終局時の実験状況を示している.

3. 解析概要

3.1 要素分割状況および境界条件

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



図-3 接触面要素配置図



図-4 フェーズ解析過程における シート要素のモデル化

鉄筋要素を配置できる特徴を有している. なお,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 載荷点部の鋼板要素中央点の梁幅方向全 6 節点に強 制変位を与えることにより実施した.収束計算には Newton-Raphson 法を採用し,収束判定条件としては エネルギーノルムを 0.5% と設定した.なお,収束条 件を満足しない場合(最大反復数 5 回)には収束計算 を打ち切り,次の解析ステップへ不釣合い力を持ち越 す方法を採用している.

境界条件は,解析対象の連続性を考慮し,対称切断 面においてはその面に対する法線方向変位成分を拘 束し,支点部は節点の鉛直方向変位成分を拘束して いる.

3.2 接触面要素の配置

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、1) コンクリートのひび割れは離散ひび割れモデ ル、2)鉄筋のすべりには Bond-Slip モデル、および 3) シートの剥離状況にはシート剥離モデル¹⁾を適用して いる.なお、コンクリート要素に関しては、上記の離 散ひび割れモデルの他に、分布ひび割れモデルとして Multi-directional Fixed Crack モデルを適用している.

コンクリート部に導入する離散ひび割れの配置位置 に関しては,既往の研究成果^{3,4}より,1)シート先端部



図-5 材料構成則



図-6 接触面要素に適用した応力-ひずみ関係

からシートが剥離する場合,2)シート先端部から載荷 点に向けてかぶりコンクリートが剥落する場合,およ び3)載荷点から斜め45°に発生する斜めひび割れに よるピーリング作用によってシートが剥離する場合, が報告されていることより,それらを考慮して図-3 に示す位置に離散ひび割れモデルを配置した.なお, この配置は全12体において同一とした.

3.3 解析手法

ひび割れや残留変位を有する RC 梁にシート曲げ補 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,事前載荷による損傷レベルをシート補強後の 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,以下のようになる.1)事前載荷 では,シート要素を導入せずに所定の損傷レベルに至 るまで解析を実施する.その後,2)荷重を除荷する. 3)除荷後シート要素を追加し,再載荷を実施する. 実験では、事前載荷後にひび割れや残留変位が存在 する状態でシートの接着を行っている.それらを適 切に再現するため、事前載荷および除荷解析時には、 図-4 に示すようにあらかじめシート要素およびコン クリートーシート間の接触面要素配置位置にダミー 要素を付加し、解析に影響を与えない程度の物性値を 与えている.その後、シート補強解析時には、ダミー 要素を1)シート要素および2)コンクリートーシート 間の接触面要素と入れ替える処理を行っている.この 際、入れ替えたシート要素およびコンクリートーシー ト間の接触面要素は、事前解析時の変形を継続してい る.なお、上述の2つのダミー要素の物性値に関して は、後述 3.4 節および 3.5 節で述べることとする.

また,事前載荷時における最大載荷点変位は,あら かじめ予備解析を実施し決定している.すなわち,実 験結果と一致するように,レベル1の場合には主鉄筋 が降伏する時点の載荷変位を,レベル2の場合には除 荷後の残留変位が10.4 mm となるように設定した.

3.4 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.

試験	最大荷	重 (kN)	最大変位 (mm)		主鉄筋ひずみ ^{#1} (µ)		コンクリートひずみ ^{#1} (μ)	
体名	実験結果	解析結果	実験結果	解析結果	実験結果	解析結果	実験結果	解析結果
(a) A 試験体								
A-S2L1	35.6	37.6	8.3	9.5	-	2,400	-1,005	-1,100
A-S2L2	37.2	41.7	17.8	19.3	17,600	6,850	-2,288	-1,940
(b) B 試験体								
B-S1L1	53.9	56.6	9.5	12.2	1,911	2,160	-1,092	-1,400
B-S1L2	57.5	59.3	18.8	21.1	16,609	9,160	-3,043	-3,070
B-S2L1	51.0	56.6	10.2	12.2	1,873	2,160	-1,407	-1,400
B-S2L2	56.8	59.3	19.5	21.1	16,847	9,160	-2,259	-3,070
(c) C 試験体								
C-S1L1	80.4	72.7	12.1	10.5	2,504	2,370	-1,488	-1,310
C-S1L2	81.6	81.5	21.7	21.5	12,158	6,340	-3,239	-2,580

表-4 事前載荷における最大荷重および最大荷重時変位およびひずみの比較

^{#1}ひずみ:主鉄筋およびコンクリートひずみともにスパン中央点.ただし、コンクリートは上縁ひずみ

図-5 (a) 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 μ までは標準示方書¹⁰⁰に基づいて定式化し, 3,500 μ 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 von Mises の降伏条件を用いている.

一方, 引張側に関しては, 標準示方書¹⁰⁾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 CEB-FIP Model Code¹³⁾ に基づいて, 次式のように定義している.

$$G_f = G_{f0} (f'_c / f_{cm0})^{0.7}$$
(1)

ここで、 $f_{cm0} = 10$ MPa、 G_{f0} は粗骨材径に対応して決定される定数である。本研究では、粗骨材径を実験に即して 15 mm と設定し、 $G_{f0} = 0.029$ N/mm とした。

なお、本研究で適用した分布ひび割れモデルの場合、引張側の軸方向ひずみのコンターレベルが図中の ϵ_1 に達した時点でひび割れが発生し、 ϵ_3 に達した時 点でひび割れが開口していることを意味している。

上下端鉄筋およびスターラップ要素には、**図**-5(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.本研究では、塑性硬化係数 H'を弾 性係数 E_s (= 206 GPa)の1% と仮定している。降伏は von Mises の降伏条件に従うものとした。

AFRP シートには, **図**-5 (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, 公称値を用いてそれ ぞれ $f_f = 2.06$ GPa, $E_f = 1.18$ GPa, $\varepsilon_f = 1.75$ % と設 定した.なお,事前解析時におけるシート要素の物性 値は、 $E_f = 1$ MPa と設定した.

3.5 接触面要素に適用した応力-相対変位関係

本研究では、前述のように接触面要素には、 図-3 に示す離散ひび割れモデル、Bond-slip モデルおよび 剥離モデルを適用し、それぞれひび割れの開口、主鉄 筋のすべりおよびシート剥離等の挙動をモデル化して いる.

離散ひび割れモデルは,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 $\Theta - 6$ (a) のよう にモデル化している.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.本モ デルでは,引張応力 σ_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,法線方向の 引張応力 σ_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.

主鉄筋要素の周囲に配置した Bond-slip モデルから 成る接触面要素において,主鉄筋方向の付着応力 τ と 相対変位 S の関係は, CEB-FIP Model Code¹³) を参考 にして 図-6 (b) のように定義した. 図中, f'_{ck} はコ ンクリートの圧縮強度の特性値であり,本研究の場合 には $f'_{ck} = 21.5$ MPa として与えられる. 主鉄筋とコン クリート要素間の法線方向引張応力-相対変位関係 には,離散ひび割れモデルに準拠した線形関係を定義 している. また,シート剥離を再現するために,著者 らが提案した 図-6 (c) に示されるモデル¹⁾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.

試験体名	残留変	述 (mm)	主鉄筋ひずみ ^{#1} (μ)		コンクリートひずみ ^{#1} (μ			
	実験結果	解析結果	実験結果	解析結果	実験結果	解析結果		
	(a) A 試験体							
A-S2L1	1.4	1.3	-	560	-128	-280		
A-S2L2	9.6	10.4	15,140	4,910	-1,175	-1,140		
	(b) B 試験体							
B-S1L1	1.3	2.5	270	363	-100	-391		
B-S1L2	9.6	10.4	11,510	6,950	-1,665	-2,010		
B-S2L1	2.1	2.5	420	363	-378	-391		
B-S2L2	10.3	10.4	14,560	6,950	-1,035	-2,010		
(c) C 試験体								
C-S1L1	1.7	1.1	420	339	-140	-216		
C-S1L2	10.5	10.4	9,690	4,460	-1,480	-1,360		

表-5 事前載荷除荷時における残留変位およびひずみの比較

#1ひずみ:主鉄筋およびコンクリートひずみともにスパン中央点

ただし,コンクリートは上縁ひずみ



(b) A-S2L2 試験体

図-7 事前載荷終了後における試験体の状況と数値解析による軸方向ひずみ分布と比較(A試験体)

$$f_{cr-n} > f_{cr-nu} \tag{2}$$

$$\tau_{cr-t} = \sqrt{\tau_{cr-ts}^2 + \tau_{cr-tt}^2} > \tau_{cr-tu}$$
(3)

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ことから、シートはコンクリー トが薄く付着した状態で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/mm³ と仮定した. また, τ_{cr-tu} は 文献¹⁴⁾ を参考にして, 次式を用いて評価することと した.

$$\tau_{cr-tu} = 0.92\sqrt{f_c'} \tag{4}$$

なお, 事前解析時における応力-相対変位関係は, $k_n = k_t = 0.0005 \text{ N/mm}^3$ と非常に小さな値を与えて いる.

	最大荷重 (kN)			最大荷重時変位 (mm)			破壊形式		
試験	実験結果	解析結果	解析/実験	実験結果	解析結果	解析/実験	実験結果	解析結果	対応
体名	$P_{e \max}$	Pamax		$\delta_{e \max}$	$\delta_{a\max}$				
	(1)	(2)	(2)/(1)	(3)	(4)	(4)/(3)			
<u>.</u>				(a) A	試験体		·		
A-S2L0	90.2	98.2	1.09	50.3	46.5	0.92	シート剥離	シート剥離	0
A-S2L1	82.3	81.4	0.99	35.8	34.0	0.95	シート剥離	シート剥離	\bigcirc
A-S2L2	80.9	80.4	0.99	44.0	42.7	0.97	シート剥離	シート剥離	\bigcirc
(b) B 試験体									
B-S1L0	89.0	96.1	1.08	50.0	48.4	0.97	シート破断	シート破断	\bigcirc
B-S1L1	87.4	96.2	1.10	43.4	50.3	1.16	シート剥離	シート破断	×
B-S1L2	81.0	97.5	1.20	62.8	60.0	0.96	シート剥離	シート破断	×
B-S2L0	102.6	107.6	1.05	62.9	37.6	0.60	シート剥離	シート剥離	0
B-S2L1	94.5	106.3	1.12	33.1	39.0	1.18	シート剥離	シート剥離	\bigcirc
B-S2L2	95.4	106.3	1.11	39.2	47.1	1.20	シート剥離	シート剥離	\bigcirc
(c) C 試験体									
C-S1L0	113.8	119.5	1.05	55.7	48.9	0.88	シート破断	シート破断	0
C-S1L1	109.9	119.2	1.08	40.1	48.6	1.21	シート剥離	シート破断	×
C-S1L2	112.7	121.2	1.08	60.6	60.7	1.00	シート剥離	シート破断	×

表-6 最大荷重 P_{max} および最大荷重時変位 δ_{max} における実験結果と解析結果の比較

4. 解析結果および考察

4.1 事前載荷解析

表-4 には,事前載荷における最大荷重時点での RC 梁のスパン中央変位,コンクリートおよび主鉄筋 のひずみを示している.なお,A-S2L1 試験体につい ては,計測装置の不具合により主鉄筋ひずみが計測で きなかったため空欄としている.**表**-5 には,除荷終 了後の残留変位,鉄筋の残留ひずみ,コンクリートの 残留ひずみを表している.

表-4 および表-5より,最大荷重,最大変位およ びコンクリートひずみに関する数値解析結果は,載荷 レベルにかかわらず実験結果をほぼ再現しているこ とが分かる.しかしながら,主鉄筋ひずみに着目する と,特に載荷レベル2において,実験結果と数値解析 結果に大きな差が生じていることが分かる.これは, 1)実験では等曲げ区間に開口幅の狭い曲げひび割れ が発生しているのに対し,本解析で適用した分布ひび 割れモデルでは,要素全体にひび割れが発生するため に局所的なひずみを適切に評価できないこと,および 2)実験においてはスパン中央部に曲げひび割れが発 生しているのに対し,数値解析ではスパン中央部の曲 げひび割れを再現できないこと(後述,図-7(a)参 照)等に起因しているものと推察される.

図-7には、A-S2-L_n 試験体における事前載荷解析 終了後の軸方向ひずみ分布を実験結果と比較して示し ている.解析結果の変形倍率は5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-5(a)と対応しており,100μがひび 割れ発生ひずみを,10,000μがひび割れ開口ひずみを 意味する.

図-7(a)より,載荷レベル1の実験結果と解析結 果を比較すると,等曲げ区間における曲げひび割れの 発生状況やその他ひび割れに関しても,解析結果は 実験結果をほぼ再現可能であることが分かる.また, 図-7(b)に示す載荷レベル2の試験体について見て みると,載荷レベル1と同様に等曲げ区間における曲 げひび割れの進展状況をよく再現できている.離散ひ び割れについては,両ケースともに開口が見られず, 事前載荷の範囲内においては,離散ひび割れの影響は 極めて小さいものと考えられる.

4.2 荷重-変位関係

表-6 には、各試験体における最大荷重 P_{max} とその時の変位 δ_{max} ,および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、図-8 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.

まず,A 試験体に着目すると,**表**-6 (a) および 図-8 (a) より,事前載荷の有無にかかわらず,事前載 荷,除荷,再載荷における荷重-変位関係およびシー ト剥離によって終局に至るまで,解析結果は実験結果 をほぼ適切に再現していることが分かる.

次に, B 試験体について検討する.まず,表-6(b)



図-8 載荷荷重-スパン中央変位関係の比較

および 図-8 (b) より,事前載荷のあるシート1層の B-S1Ln 試験体を見ると,解析結果における最大荷重 Pamax が実験結果のそれ Pemax よりも大きく評価され ていることが分かる.また,終局時のシート状況にお いても,解析結果ではシート破断であるのに対し,実 験結果ではシート剥離となっている.これは,載荷点 間に発生する上縁コンクリートの圧壊を解析結果では 適切に再現できていないことに起因しているものと推 察される.すなわち,実験結果では,B-S1L1 試験体 で変位が 45 mm 程度, B-S2L2 試験体で 38 mm 程度 から上縁コンクリートの圧壊が発生し,荷重がほぼ横 ばいとなっているのに対し,解析結果では圧壊による コンクリートの剥離を適切に表現できないためにシー トひずみが増大し,最終的にはシート破断によって終 局に至るものと推察される.すなわち,数値解析にお けるコンクリートの構成則は,図-5(a)に示すよう に圧縮ひずみが 3,500 µ以上の場合,0.2 f_c まで線形 軟化し,その後に一定値を保つモデルを採用している



図-9 実験状況写真および解析結果における軸方向ひずみ分布,シート界面のせん断応力分布 (A-S2L2 試験体)

ことより,実験時のコンクリート圧壊による応力の開 放を適切に表現できないことが大きな理由の1つであ るものと考えられる.

また、シート 2 層の B-S2Ln 試験体の場合には、解 析結果の最大荷重 P_{amax} および変位 δ_{amax} が、実験結 果のそれらよりも大きく評価されている。しかしなが ら、シート剥離によって終局を迎えていることや、終 局に至るまでの実験の荷重 – 変位関係をほぼ適切に評 価している.

表−6 (c) および 図−8 (c) より, C 試験体について

見ると, B1-S1Ln 試験体の場合と同様,実験結果で見 られた上縁コンクリートの圧壊を適切に再現できてい ないため,最大荷重が実験結果よりも若干大きく,か つ破壊形式も異なっている.しかしながら,荷重-変 位関係に関しては概ね実験結果を再現していることが 分かる.

4.3 梁側面の軸ひずみ分布およびシート界面のせん断 応力分布

図-9には、梁側面の軸ひずみ分布とシート界面の



(b) 終局時 (シート破断)

図-10 実験状況写真および解析結果における軸方向ひずみ分布,シート界面のせん断応力分布 (B-S1L0 試験体)

せん断応力分布の一例として、シート剥離によって終 局に至った A-S2L2 試験体の結果を示している.図の 上部は軸方向ひずみ分布、下部は AFRP シートとコン クリート界面における軸方向せん断応力分布である. なお、本解析では、せん断応力が零を示している部分 では、シートの剥離が生じているものと判断し、その 領域を破線で囲んでいる.また、各荷重レベルにおけ る実験状況写真を併せて示している.なお、実験結果 における変位 δ_e は事前載荷の残留変位を加えて示し ている.

図-9(a)より,実験および解析結果の最大荷重時 に着目すると,解析結果では斜めひび割れの開口が見 られる.その近傍ではシートとコンクリート界面のせ ん断応力が零を示していることから,その領域は斜め ひび割れのピーリング作用によりシートが剥離してい るものと判断される.一方,実験結果では曲げひび割 れの他,斜めひび割れの進展が見られるものの,シー ト剥離を確認することはできない.

次に 図-9 (b) に示すシート全面剥離直前の状況を 見ると,解析結果ではシート端部を除いた領域のせん 断応力が零となっており,シート剥離領域が支点方向 へ拡大している状況が示されている.実験結果におい ても、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。終局時 には、解析および実験結果ともにシート剥離によって 終局に至っている。

図-10には、シート破断で終局に至った B-S1L0 試 験体の結果を示している. 図-10(a)より、最大荷 重時における数値結果と実験結果を比較する. 解析結 果では、斜めひび割れがわずかに開口しているもの の、シート界面の軸方向せん断応力が零の部分は存 在せず、シートは完全に付着していることが分かる. また、実験結果においてもシートの剥離は確認でき ない.

図-10 (b) の終局時に着目すると,実験結果では等曲げ区間でシートが破断し,一部剥離して終局に至っている.一方,解析結果においても,実験結果と同様に等曲げ区間においてのみシート界面のせん断応力が零を示し,シート剥離が発生していることが分かる.また,最終的には実験結果と同様にシート破断で終局に至っており,両者はよく対応している.

図-11 は,実験結果と解析結果の破壊形式が異なる B-S1L2 試験体の結果を3 段階の変位レベルについて整理したものである. 図-11 (a) は,前述の荷



(c) 終局直前

図-11 実験状況写真および解析結果における軸方向ひずみ分布,シート界面のせん断応力分布 (B-S1L2 試験体)

重-変位関係(図-8b)において,実験結果と解析 結果がほぼ等しい値を示す変位40mm程度の状況を, 図-11 (c)は終局直前の状況を,図-11 (b)は両者の 中間付近(変位50mm程度)の状況を示している.

図-11 (a) より,解析結果では離散ひび割れの開口 やシート界面の軸方向せん断応力が零に至っている 箇所が存在しないことより,変位 40 mm 程度までは シートは完全に付着しているものと考えられる.実験 においても,解析結果と同様に斜めひび割れの発生や シートの剥離は確認できない。

変位 50 mm 程度(図-11b参照)の場合には,実験 では等曲げ区間における上縁コンクリートに圧壊が生 じている.解析結果においても,載荷点近傍からスパ ン中央までの領域で圧壊を示す 3,500 µ以上のひずみ が発生していることより,両者はよく対応している.

しかしながら,終局直前の 図-11 (c) をみると,実 験では斜めひび割れの進展によりピーリング作用に よって,広範囲においてシートの剥離が確認できる.



図-12 実験時および解析によるシート軸方向ひずみ分布

一方,解析結果では等曲げ区間においてシートの部分 剥離が生じており,実験結果とは異なる挙動を示して いる.

4.4 シートの軸方向ひずみ分布

図-12 には,前述の A-S2L2 / B-S1L0 / B-S1L2 試 験体におけるシートの軸方向ひずみ分布について,実 験結果と解析結果を比較して示している.また,各試 験体ともに 図-9~図-11 と同等の変位レベルにつ いて整理している.

まず,図-12 (a) に示す A-S2L2 試験体に着目す る.最大荷重時の場合には,実験結果と解析結果は若 干の差異が見られるものの,ひずみの最大値や勾配は 両者大略一致していることが分かる.また,シート剥 離直前の場合には,実験結果において,載荷点から左 側の領域でひずみ勾配が緩やかとなっており,シート 剥離が進展していることが分かる.数値解析結果にお いても,同様にシートのひずみ分布が一定値を示して いることからシート剥離が生じていることを確認でき る.終局後のひずみ分布に着目をすると、実験結果で はシート全域のひずみが小さく、下面に接着したシー トが全域に渡って剥離し終局に至ったことが分かる. 一方、解析結果では、載荷点近傍下縁に配置した離散 ひび割れ部から支点に向かってピーリング作用により シートが剥離するが、等曲げ区間におけるシートは剥 離に至らず曲げひずみが発生し、両者に差異がみられ る.しかしながら、最大荷重時から終局に至るまで、 シートのひずみや剥離状況、ひずみ勾配など、解析結 果は実験結果とよく対応している.

図-12 (b) に示す B-S1L0 試験体に着目する.最大 荷重時において,実験結果では等曲げ区間でひずみの 変動がみられるものの,解析結果ではひずみの変動は 再現できない.しかしながら,ひずみ勾配やひずみの 分布性状は,実験結果と比較的よく一致している.終 局時について見ると,実験結果では等曲げ区間におい てシートのひずみ分布が大きく変動し,一部で公称破 断ひずみ ($\varepsilon = 17,500 \mu$)を超過しており、シートが破断し終局に至ったことが分かる。解析結果も同様に、梁中央部でシートのひずみが限界値に達し、終局に至っている。

一方, 図-12 (c) に示す B-S1L2 試験体に着目する と, 前述の荷重変位曲線において実験結果と解析結果 が等しい値を示す変位 40 mm 程度では、両者はよく 対応していることが分かる。しかしながら、さらに変 位が進行した変位 50 mm の場合には、実験結果は上 縁コンクリートの圧壊(前述, 図-11b参照)により, 等曲げ区間の右側のひずみが減少している。一方、解 析結果においては、圧壊によるひずみの減少が再現で きていない.しかしながら、ひずみの最大値や勾配, 載荷点から支点側のひずみ分布に関しては、よく対応 している。終局直前に着目すると、実験結果ではシー トの剥離の進展により、A-S2L2 試験体と同様にひず み分布がほぼ一定の値を示しているのに対し、数値解 析結果では、等曲げ区間のひずみが増大しており、等 曲げ区間と同程度のひずみが支点方向へ拡大する様子 はみられない.

最終的に、1)実験ではピーリング作用を伴うシート剥離、2)数値解析ではシート破断によって終局に 至っており、破壊形式は一致していない.これは、前述のように、数値解析では上縁コンクリートの圧壊を 適切に再現できていないためと考えられる.これに関 しては、今後さらなる検討が必要である.

5. まとめ

本研究では、FRP シート曲げ補強した損傷を有する RC 梁のより汎用性の高い解析手法の確立を目的に, 主鉄筋径を3種類,シート枚数を2種類および損傷レ ベルを3種類に変化させた RC 梁を対象に,三次元弾 塑性有限要素解析を実施した.本研究で得られた成果 は以下の通りである.

- 提案の手法を用いることにより、実験結果の最大 荷重および最大荷重時変位などを含めた耐荷性状 や破壊性状を大略再現可能である。
- 2) しかしながら、上縁コンクリートの圧壊後にシート破断あるいは剥離に至るような場合には、終局 近傍の耐荷性状を適切に評価するまでに至ってい ない.この点に関しては、今後更なる検討が必要 であるものと考えられる。

謝辞:本研究を行うにあたり,室蘭工業大学大学院建 設システム工学専攻構造力学研究室の菊池康則君に多 大なるご支援を戴いた.ここに記して謝意を表する.

参考文献

- 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, 51A, pp. 1037-1048, 2005.
- 2) 岳尾弘洋,松下博通,佐川康貴,牛込俊之:せん 断スパン比を変化させた CFRP 補強梁の曲げ載 荷実験,コンクリート工学年次論文報告集,21(2), pp. 205-210, 1999.
- 3) 三上 浩,岸 徳光,佐藤昌志,栗橋祐介:FRP シートを接着した RC 梁の耐荷性状に与える接着 範囲の影響,コンクリート工学年次論文報告集, 21(3), pp. 1549-1554, 1999.
- 4) 栗橋祐介,岸 徳光,三上 浩,松岡健一:FRP シートの必要接着長に着目した曲げ補強 RC 梁の 静載荷実験,コンクリート工学年次論文報告集, 23(1), pp. 835-840, 2001.
- 5) 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, pp. 47-64, 2001.
- S.T. Smith and J.G. Teng: FRP-strengthened RC beams I: review of debonding strength, *Eng. Struct.*, 24, pp. 385-395, 2002.
- Z.J. Yang, J.F. Chen, and D. Proverbs: Finite element modelling of concrete cover separation failure in FRP plated RC beams, *Constr. Build. Mat.*, 17(1), pp. 3-13, 2003.
- M. Barbato: Efficient finite element modelling of reinforced concrete beams retrofitted with fibre reinforced polymers, *Comput. Struct.*, 87(3-4), pp. 167-176, 2009.
- 9) 西鳥羽侑一,岸 徳光,三上 浩,小室雅人:損 傷を有する RC 梁の AFRP シート補強効果に関す る数値解析手法の妥当性検討,コンクリート工学 年次論文報告集,31(2), pp. 1381-1386,2009.
- 10) 土木学会: コンクリート標準示方書(2002 年制定) 構造性能照査編, 2002.
- 11) Nolinear Analysis User's Manual (7.2), TNO Building and Construction Research.
- 12) http://www.fibex.co.jp/seihin/hinban/fibex3hinban.htm
- 13) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford.
- 14) 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.

(2009年9月24日受付)