

論文 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

西島羽 侑一^{*1}・岸 徳光^{*2}・三上 浩^{*3}・小室 雅人^{*4}

要旨：本研究では、損傷を受けている RC 梁のシート補強効果を数値解析的に適切に評価可能な手法を確立することを目的に、載荷履歴を持つ RC 梁に AFRP シートを接着して静載荷を行った試験体を対象として、三次元有限要素法による数値解析を行った。その結果、離散ひび割れモデルを用いることによって、損傷を受けた RC 梁に関しても、RC 梁の耐荷性状やシートの補強効果は、コンクリート上縁の圧壊後にシート破断あるいは剥離に至る場合を除き、大略評価可能であることが明らかになった。

キーワード：FRP シート、三次元弾塑性解析、載荷履歴、耐荷性状

1. はじめに

近年、既設鉄筋コンクリート(RC)構造物の補修・補強工法の1つとして、連続繊維シート接着工法が多く採用されている。この種の補修・補強工法は、既設 RC 構造物を対象としているのにもかかわらず、新設の各種 RC 部材を対象とした実験的研究^{1),2)}や解析的研究に基づいて、設計法が確立されている。より信頼性の高い補修・補強法を確立するためには、既設構造物としてある程度の損傷を受けた状態下における FRP シートの補強効果について検討することが重要な課題の1つである。しかしながら、各種断面部材に対して全て実験研究により検討を行うことは困難であり、数値解析的手法を併用して、効果的に行うことが肝要である。

このような観点から、著者らは初期に曲げ載荷によって損傷を与えた後に、アラミド繊維(AFRP)シート接着による曲げ補強を施した矩形断面 RC 梁を対象として、その耐荷挙動に関する実験的研究を実施している。本論文では、この種の RC 梁に関する数値解析的手法を確立することを目的に、新設 RC 梁に関する数値解析的手法³⁾を基本とした数値解析を試み、実験結果との比較によってその適用性に関する検討を行った。なお、本数値解析には構造解析汎用コード DIANA 7.2 を用いた。

2. 実験概要

表-1には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は、無補強試験体の他、シート層数、事前載荷レベルが異なる6種類の RC 梁に対し、AFRP シートを接着した全7体である。曲げ補強シートには AFRP シート(繊維目付量 435 g/m²、幅 150 mm、厚さ 0.286 mm、保証耐力 588 kN/m)を用いた。表中、第1項目は英文字(N: 無補強, S: シート補強)にシート層数を、第2項目には英文字 L に事前載荷レベルを付して示している。レベル1は主鉄筋が降伏に至る載荷レベル、レベル2はスパン中央部の残留変位が純スパン長の 0.4 % (=10.4 mm) 程度となる載荷レベルとした。

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 150×250 mm、純スパン長 2,600 mm の矩形 RC 梁である。上端鉄筋及び下端鉄筋には、D16 を2本ずつ配置している。AFRP シートは、梁中央部から両支点の 100 mm 手前までの範囲に接着した。実験時におけるコンクリートの圧縮強度 f'_c および引張強度 f_t は、それぞれ $f'_c = 29.5$ MPa、 $f_t = 2.19$ MPa であった。また、鉄

表-1 試験体一覧

試験体名	主鉄筋	シート層数	事前載荷
N	D16	-	-
S1-L0		1	無し
S1-L1			レベル1
S1-L2			レベル2
S2-L0		2	無し
S2-L1			レベル1
S2-L2			レベル2

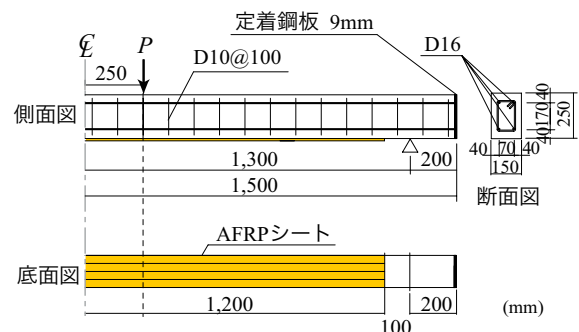


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要

*1 苫小牧市役所 修(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院教授 工学研究科 くらし環境系領域 工博 (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 主席研究員 博(工) (正会員)

*4 室蘭工業大学大学院講師 工学研究科 くらし環境系領域 博(工) (正会員)

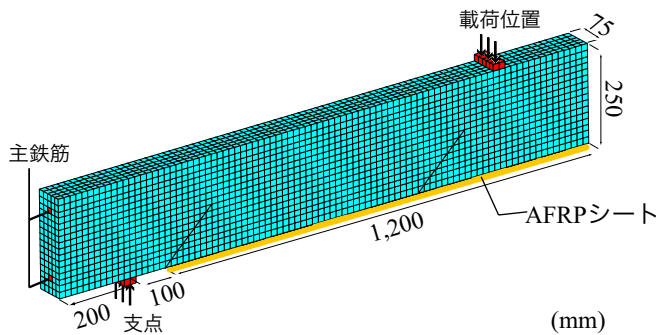


図-2 要素分割図

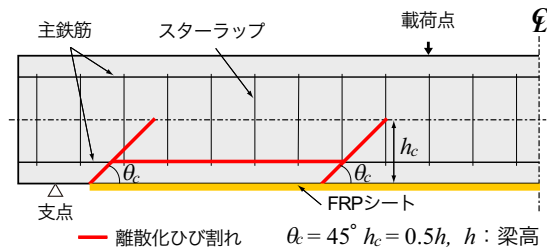


図-3 接触面要素配置図

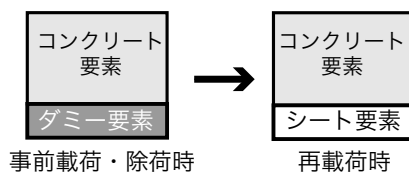


図-4 phase 解析過程におけるシート要素のモデル化

筋の降伏強度 σ_y は, D16, D10 でそれぞれ 392 MPa, 391 MPa であった。

3. 解析概要

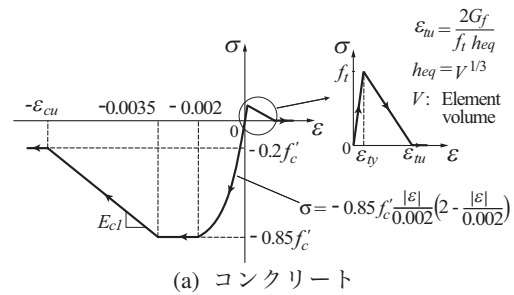
3.1 要素分割と境界条件

図-2 に要素分割図を示す。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 に予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母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, 離散化ひび割れモデルには, 既往の研究³⁾において提案されたモデルを用い, 図-3 のように離散化ひび割れを配置することとした。

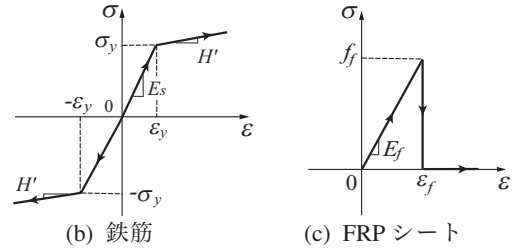
境界条件は, 解析対象の連続性を考慮して, 対称切断面に対してはその面に対する法線方向変位成分を拘束し, 支点部の節点は鉛直方向変位成分を拘束している。

3.2 解析過程

損傷を有する RC 梁を再現するために, シート接着する前の RC 梁を対象に事前荷重解析を行い, その後 AFRP

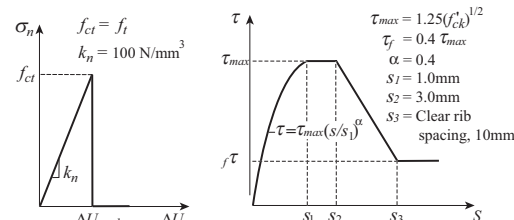


(a) コンクリート

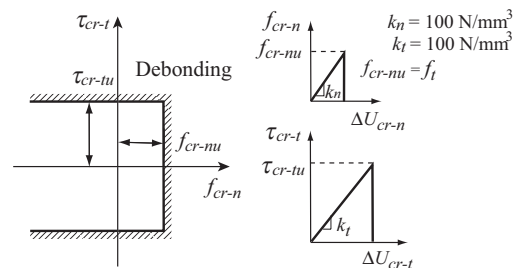


(b) 鉄筋

(c) FRP シート



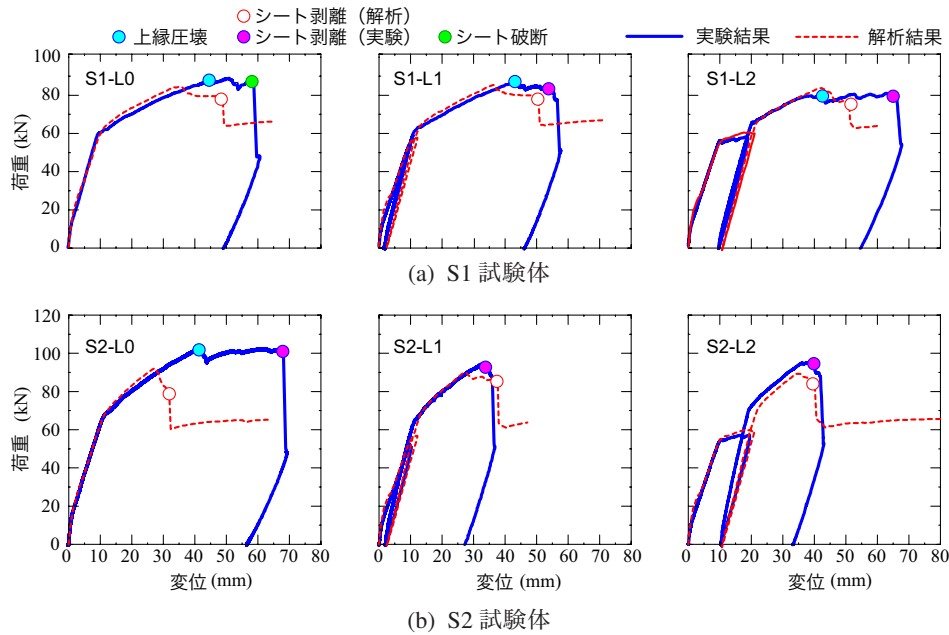
(d) Discrete Cracking モデル (e) Bond-slip モデル



(f) シート剥離モデル

図-5 材料構成則

シート接着によって曲げ補強を施した後に静解析を実施した。その手法は, DIANA に組み込まれている Phase 解析によって事前荷重に相当する解析を行い, 除荷後シート要素を追加して, さらに荷重を行うこととしている。荷重から除荷, 再荷重は, 図-2 に示す荷重位置において強制変位を与えることにより行っている。数値解析では, 事前荷重除荷後に節点変位が残留した状態でシート要素を付加することとし, 図-4 に示すようにあらかじめダミー要素を付加し, 再荷重時にダミー要素とシート要素とを入れ替える処理を施している。なお, 事前荷重時のダミー要素には梁の耐荷性状に影響を与えない程度の物性値を入力している。事前荷重時の荷重点変位は, あらかじめ予備解析を実施して決定している。すなわち, 実験結果と一致するように, 荷重レベル 1 の場合には主鉄筋が降伏する時の荷重変位を, 荷重レベル 2 の場合には除荷後の残留変位が 10.4 mm となるように特定した。



図－6 荷重－変位関係

3.3 材料構成則

図－5(a)にはコンクリートの相当応力－相当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 $3,500 \mu$ までは土木学会コンクリート標準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。本研究では、 $3,500 \mu$ に達した場合を圧壊による終局状態と定義する。また、降伏の判定には von Mises の降伏条件を用いている。

一方、引張側に関しては線形軟化モデルを適用することとし、引張終局ひずみ ϵ_{tu} は文献⁴⁾に基づき、図に示すように定義している。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 Code⁴⁾に基づいて、次式のように定義している。

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

ここで、 $f_{cm0} = 10 \text{ MPa}$ 、 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、 $G_{f0} = 0.029 \text{ N/mm}$ とした。

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、弾性係数 $E_s (=206 \text{ GPa})$ 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 2.06 GPa 、 118 GPa 、 1.75% と仮定した。

3.4 接触面要素に適用した応力－相対変位関係

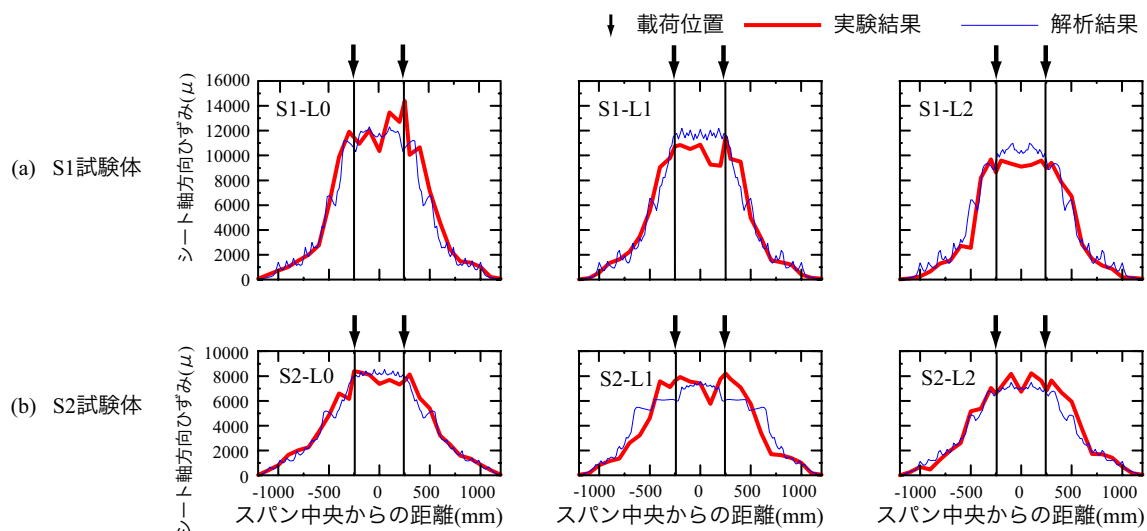
本研究では、図－5(d)～(f)に示している Discrete Cracking モデル、Bond-slip モデルおよび剥離モデルを用い、ひび割れの開口、主鉄筋のすべりおよびシート剥離をモデル化している。

Discrete Cracking 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図－5(d)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 関係は、CEB-FIP Model Code⁴⁾を参考にして図－5(e)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る。本研究の場合には圧縮強度を考慮して 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、Discrete Cracking 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－5(f)に示されるモデルを適用した。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。

$$f_{cr-n} > f_{cr-nu} \quad (2)$$



図－7 シート軸方向ひずみ分布

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

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より、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} と k_n は、discrete cracking モデルに準拠して、それぞれコンクリートの引張強度 f_t と 100 N/mm^2 と等価であるものと仮定した。また、 τ_{cr-tu} は文献⁵⁾を参考にして、次式を用いて評価することとした。

$$\tau_{cr-tu} = 0.92\sqrt{f_c'} \quad (4)$$

4. 解析結果および考察

4.1 荷重－変位関係

図－6 には、各試験体の荷重－変位関係および破壊性状を実験結果と解析結果を比較して示している。図より、荷重レベル 0 の試験体 (S1/2-L0) において、解析結果は実験結果よりも若干早期にシート剥離が生じる傾向が見られるものの、他の荷重レベルでは実験結果の荷重－変位関係をほぼ適切に評価していることが分かる。しかしながら、シート剥離・破断後の耐力低下は、数値解析結果が実験結果よりも小さい傾向を示している。これは、後述の図－8(c) から明らかのように、数値解析では、シート剥離後のコンクリートの剥落を再現できないことより、RC 梁の剛性を過大評価していることによるものと考えられる。

表－2 には、各試験体における最大荷重値を一覧に示している。表より、解析結果は実験結果に比べ最大耐力を多少低く評価する傾向にあるものの、その誤差は

表－2 各試験体における最大荷重

試験体名	最大荷重 (kN)		解析/実験
	実験結果	解析結果	
S1-L0	88.98	83.56	0.94
S1-L1	87.39	84.35	0.97
S1-L2	81.00	82.99	1.02
S2-L0	102.56	91.96	0.90
S2-L1	94.49	89.73	0.95
S2-L2	95.38	89.33	0.94

最大 10 % 程度であることより、数値解析結果は実験結果の最大耐力をほぼ適切に評価できるものと推察される。

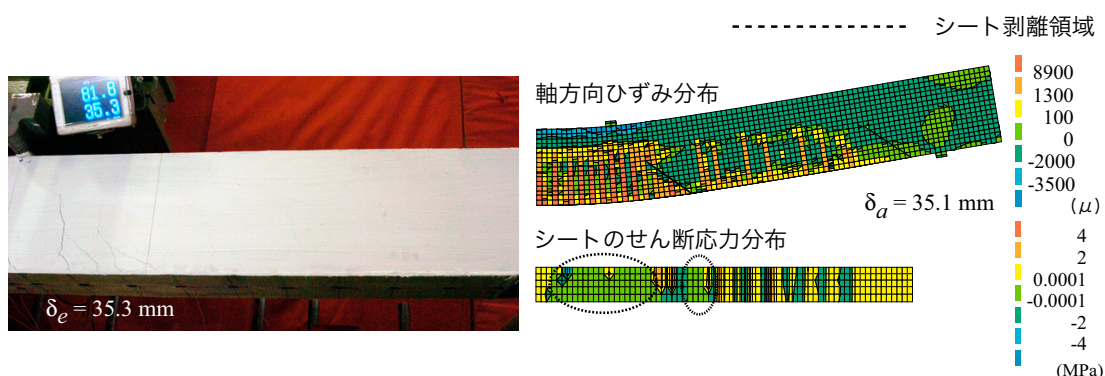
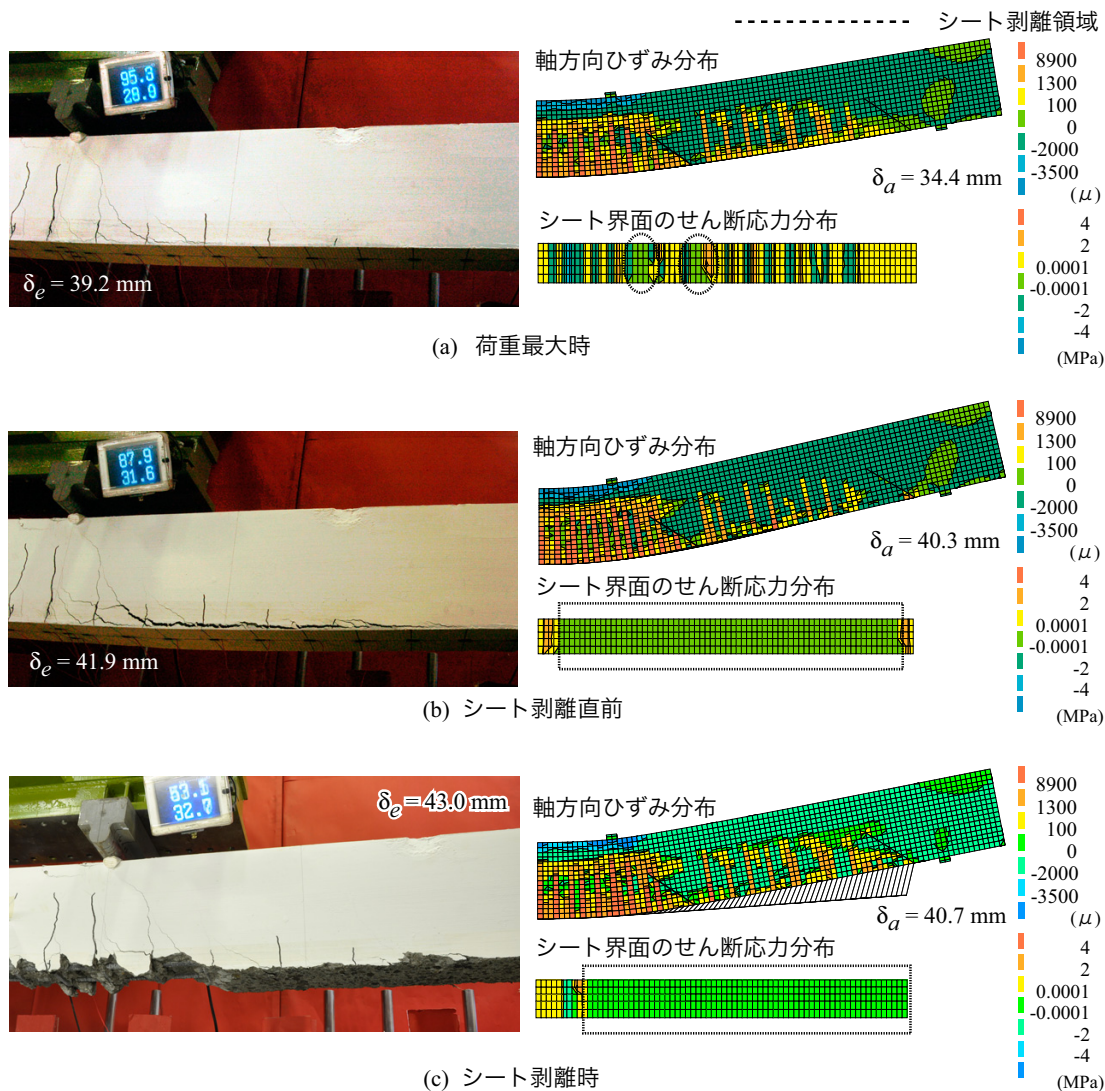
4.2 シートひずみ分布

図－7 には、数値解析結果の最大荷重時変位におけるシートの軸方向ひずみ分布を示している。図より、数値解析結果は荷重点間の等曲げ区間におけるほぼ一定なひずみ分布性状を含めて、実験結果のシートひずみをほぼ適切に評価していることが分かる。

これより、本数値解析手法を用いることによって、解析時の最大荷重時までの範囲においてはシートの補強効果を適切に評価しているものと判断される。

4.3 破壊形式

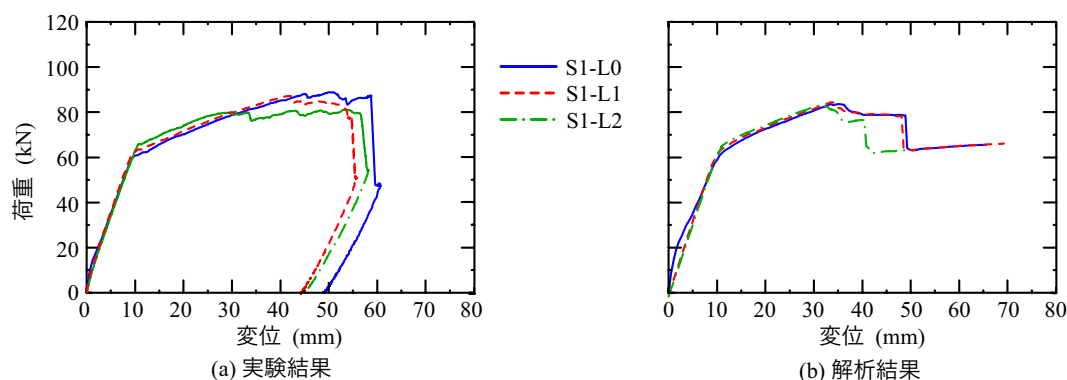
図－8 および 図－9 には、それぞれ S2-L2 および S1-L0 試験体における実験状況と数値解析に関する梁側面の軸ひずみ分布およびシート界面のせん断応力分布を示している。解析結果の上部は軸方向ひずみ分布を、下部は AFRP シートとコンクリートの界面における軸方向のせん断応力分布を表している。なお、本研究では、せん断応力が零を示している部分に関しては、シートが剥離しているものと判断し、その領域を破線で囲っている。一方、実



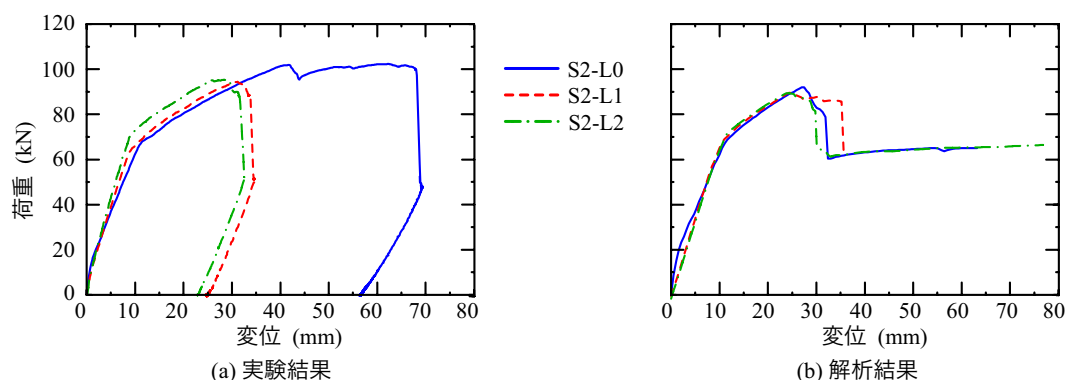
験状況写真においては、斜めひび割れが進展し、シートとコンクリートの間に亀裂が発生している部分を剥離と判断した。なお、図-8における実測変位 δ_e には事前載荷の残留変位を加えて表示している。

図-8(a)より、実験および解析結果における最大荷重時に着目すると、数値解析ではピーリング作用によって

シートの一部が剥離していることが分かる。また、(b)図のシート剥離直前においては、端部を除いてシート界面のせん断応力がほぼ零となっている。さらに、最終的にはシートが全面剥離し終局に至っている(c図参照)。各段階における数値解析によるシートの剥離状況は、実験結果とよく対応していることが分かる。



図－10 S1 試験体において再載荷開始時点を基準とした場合の荷重－変位曲線



図－11 S2 試験体において再載荷開始時点を基準とした場合の荷重－変位曲線

しかしながら、図－9 に示すように圧縮破壊後にシート破断となる S1-L0 試験体のようなケースにおいては、最大荷重時に数値解析では既に斜めひび割れが進展し、シート剥離が生じているのに対して、実験では、ひび割れは発生しているもののシート剥離は生じていない。この点に関しては、今後さらなる検討が必要であるものと考えられる。

4.4 荷重履歴の影響

図－10, 11 には、再載荷開始時点を原点に取った場合の実験結果と解析結果の荷重－変位曲線を示している。図より、実験結果、解析結果ともに、事前載荷レベルが大きいほど、最大荷重到達後にシート剥離が早期に生じる傾向があることが分かる。

5. まとめ

本研究では、損傷を有した RC 梁に AFRP シートを接着し再載荷した場合の RC 梁の曲げ耐荷性状や破壊形式を数値解析により再現することを目的に、新設 RC 梁に関する解析手法を基本に数値解析を実施した。本解析により得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- 1) 事前載荷・除荷時にダミー要素を用いることによって、本解析手法は残留変位等を持つ損傷を受けた RC 梁に AFRP シートを接着した場合においても、AFRP シートの補強効果を含めた耐荷性状を大略評価可能

である。

- 2) 提案の解析手法を用いる場合には、現段階において早期にシートが剥離する傾向がある。梁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、耐荷性状を適切に評価することは困難であり、さらなる検討が必要である。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 683/V-52, pp. 47-64, 2001
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状および破壊形式の予測に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 711/V-56, pp. 91-109, 2002
- 3) 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
- 4) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford
- 5) Chajes, M.J., Finch, W.W., Januszka T.F., and Thomson T.A.: Bond and Force Transfer of Composite Material Plates Bonded to Concrete, *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No. 2, pp. 208-217, 1996