

載荷履歴を有する RC 梁の AFRP シート補強に関する数値解析的検討

Numerical study for flexural reinforced damaged RC beams with AFRP sheet

室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
三井住友建設 (株)	フェロー	三上 浩 (Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学	正会員	栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
室蘭工業大学 大学院	○ 学生会員	西島羽 侑一 (Yuichi Nishitoba)

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るようになった。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である。また、実験的研究のみならず、数値解析の研究も併用してより効果的に推進することが肝要である。

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、アラミド繊維シート接着による曲げ補強を施して、矩形断面 RC 梁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を基本にして、数値解析を試み、実験結果との比較により、この妥当性を検討した。なお、解析には、汎用解析コード 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、シートの層数、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

表-1 試験体一覧

試験 体名	主鉄筋	シート 層数	事前載荷	予想される 破壊形式
N	D16	-	-	曲げ圧壊型
S1-L0		1	無し	
S1-L1			レベル 1	
S1-L2			レベル 2	
S2-L0		2	無し	剝離破壊型
S2-L1			レベル 1	
S2-L2			レベル 2	

表-2 AFRP シートの力学的特性値(公称値)

繊維 目付量 (g/m ²)	保証 耐力 (kN/m)	厚さ (mm)	引張 強度 (GPa)	弾性 係数 (GPa)	破断 ひずみ (%)
415	588	0.286	2.06	118	1.75

着した全7体である。表中、第1項目は英文字(N:無補強, S:シート補強)にシート層数を付して示し、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。曲げ補強シートには表-2に示すAFRPシートを用いている。事前載荷レベルは、レベル1では主鉄筋降伏まで、レベル2では残留変位が10mm程度に至るまでと設定した。

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 本ずつ配置した。曲げ補強シートには、幅 150 mm のシートを用い、梁中央部から両支点の 100 mm 手前までの範囲に接着した。試験体のコンクリート強度は 29.5 MPa であり、鉄筋の降伏強度は 392 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 3 次元固体要素を用いてモデル

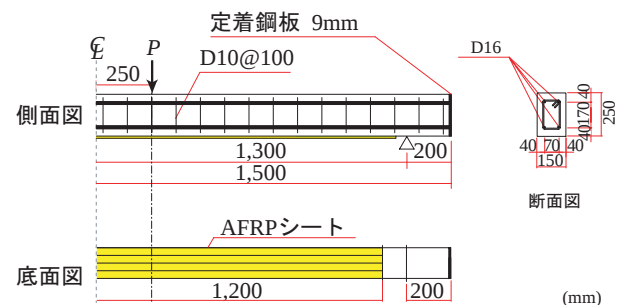


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要

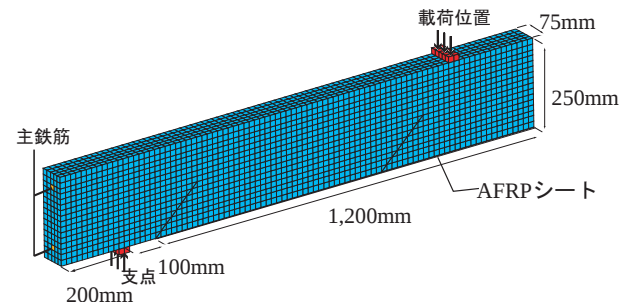


图-2 要素分割图

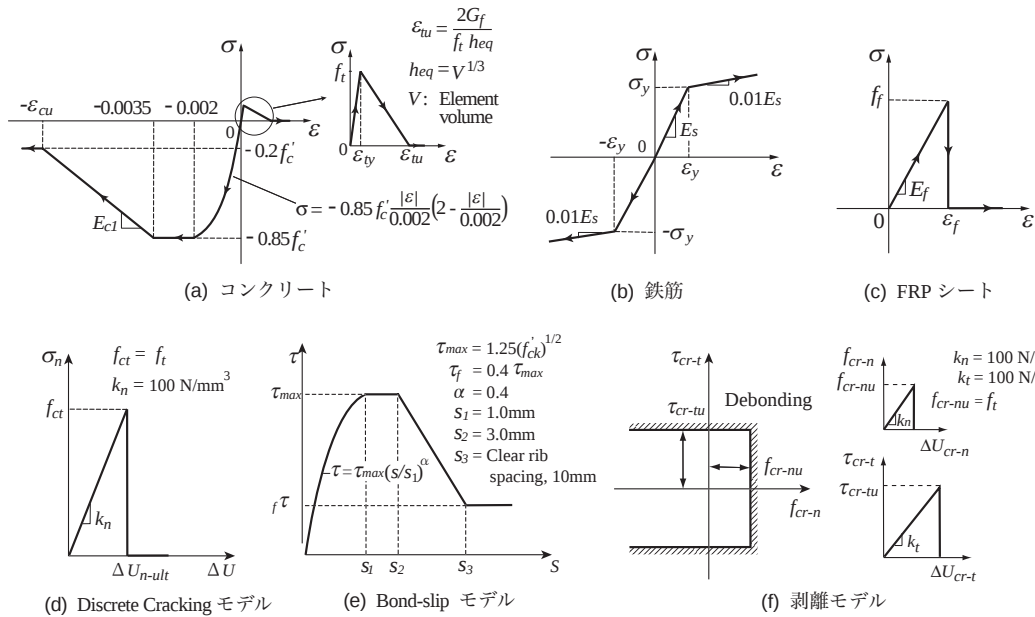


図-3 材料構成則

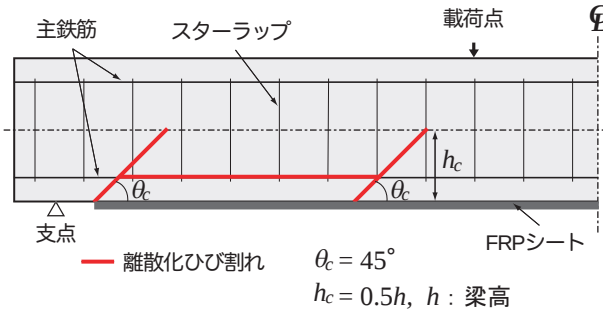


図-4 接触面要素配置図

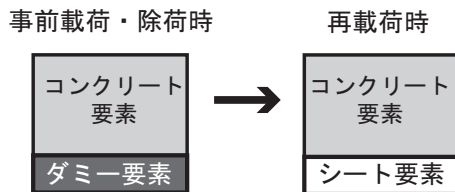


図-5 phase 解析過程での材料の変化

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、離散ひび割れモデルには、既往の研究¹⁾において提案されたモデルを用い、図-4 のように離散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、支点部においては節点の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、シートを接着する前の事前・除荷に対する解析を行い、その後シートによる補強をした RC 梁の解析を行った。その手法として、

DIANA に組み込まれている Phase 解析によって事前・除荷を行い、除荷後シートの要素を追加し、さらに載荷を行った。載荷から除荷、再載荷は、図-2 に示す載荷位置での強制変位によって行っている。解析においては、事前・除荷、除荷後に接点の変位が残留した状態でシート要素を付加するために、図-5 に示すようにあらかじめダミー要素を付加し、再載荷時にダミー要素とシート要素と入れ替える処理を施している。ダミー要素には梁の耐荷性状に影響を与えない物性値を入力している。事前・除荷時の載荷荷重は、鉄筋降伏までのレベル 1 載荷においては、解析上で、鉄筋降伏を確認してから、1 ステップ (0.5 mm の強制変位) を与えた後、除荷するものとした。レベル 2 載荷においては、残留変位を 10 mm 程度となるように、調整して載荷を行っている。

3.3 材料構成則

図-3(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 $3,500 \mu$ 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。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、終局ひずみ ϵ_{tu} は文献²⁾ に基づき図に示すように定義している。図中の G_f はコンクリートの引張破壊エネルギーである。上下端鉄筋およびスターラップ要素には、図-3(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。降伏は von Mises の降伏条件に従うものとしている。AFRP シートには、図-3(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。

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-3(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の剥離をモデル化

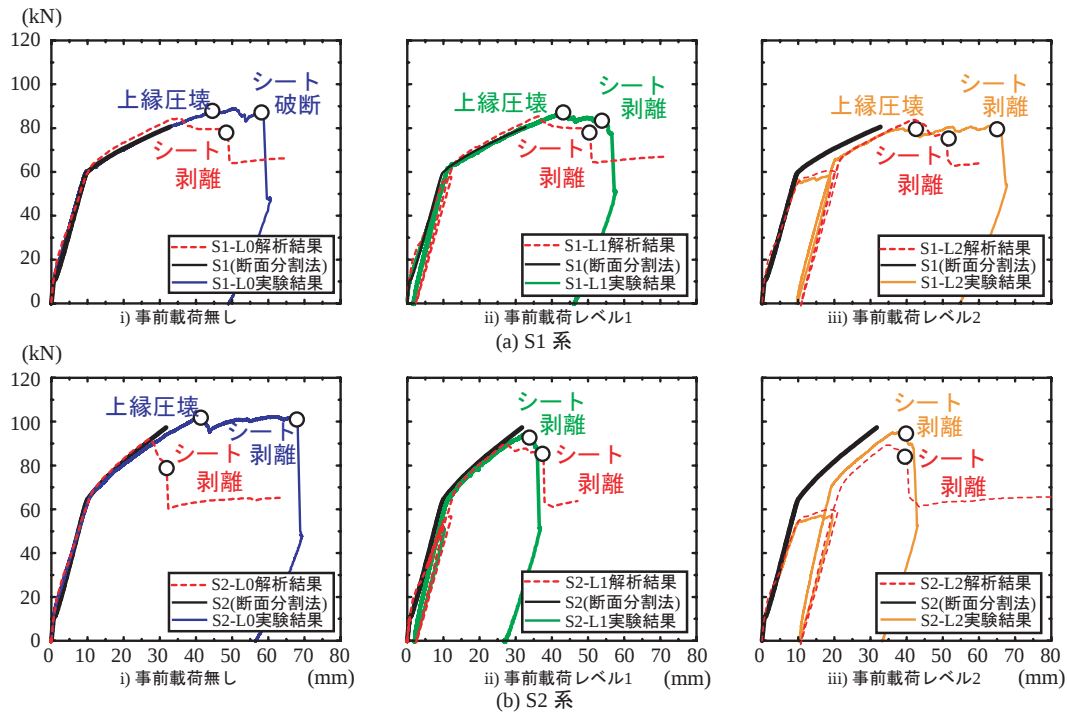


図-6 荷重-変位関係

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-3(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。このモデルでは、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 Code²⁾ を参考にして 図-3(e) のように定義した。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、シートの剥離を再現するために、著者らが提案している 図-3(f) のようなモデルを適用した。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た。

$$f_{cr-n} > f_{cr-nu} \quad (1)$$

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

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。なお、 τ_{cr-tu} は文献³⁾ を参考にして、以下の式を用いて評価することとした。

$$\tau_{cr-tu} = 0.92\sqrt{f'_c} \quad (3)$$

表-3 各試験体における最大荷重

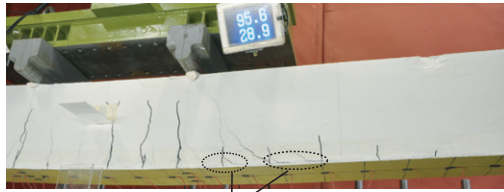
試験体名	実験結果 (kN)	解析結果 (kN)	倍率
S1-L0	88.98	83.56	0.94
S1-L1	87.39	84.35	0.97
S1-L2	81.00	82.99	1.02
S2-L0	102.56	91.96	0.90
S2-L1	94.49	89.73	0.95
S2-L2	95.38	89.33	0.94

4. 解析結果および考察

4.1 荷重-変位関係

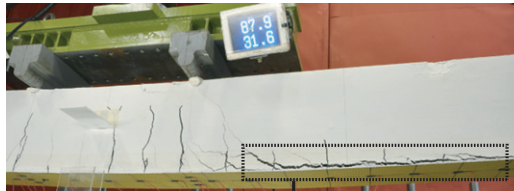
図-6 には、各試験体の荷重-変位関係と、破壊性状を示している。図には、計算結果および実験結果、解析結果の比較図を示している。図中の計算結果は、コンクリート標準示方書に準拠した断面分割法により上縁コンクリートが圧壊ひずみ (3500μ) に達するまで行っている。写真-1~3 と 図-7~9 は、それぞれ実験時の写真と、解析結果の図である。解析結果の図の上部には、軸方向ひずみ分布を表している。下部には、AFRP シートとコンクリートの界面における軸方向のせん断応力分布を表し、せん断応力が 0 となっている部分については、シートの剥離が起きていると判断し、その領域を破線で囲っている。実験写真での剥離の判断については、斜めひび割れが進展し、シートとコンクリートの間にひび割れが発生している部分を剥離と判断している。

表-3 に、各試験体での最大荷重値を示す。全ての試験体において、解析では、最大荷重は概ね実験値と同様の値を示していることがわかる。このことから、ダミー要素を用いることによって、損傷を受けた RC 梁に対する AFRP シートによる補強効果を評価可能であることが明らかになった。しかしながら、変位に関しては、圧縮破壊後に



シートが剥離した領域

写真-1 S2-L2 試験体 荷重最大時 (実験)



シートが剥離した領域

写真-2 S2-L2 試験体 シート剥離前 (実験)



写真-3 S1-L0 試験体 解析時荷重最大 (実験)

シート破断または剥離が生ずるケースにおいて、実験よりも早期に剥離が発生している。この点に関しては、今後の検討課題にしたいと考えている。

4.2 破壊形式

解析においては、全てのケースで破壊形式はシート剥離によるものである。実験においても同じ破壊形式である S2-L1 試験体、S2-L2 試験体については、精度よく実験結果を再現していることがわかる。また、写真-1, 2 と図-7, 8 より、斜めひび割れによるシートの剥離状況がほぼ再現されていることがわかる。しかしながら、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、写真-3 と、図-9 からわかるように、解析ではすでに斜めひび割れが進展し、シート剥離が始まっているのに対して、実験では、ひび割れは進展していない。これは、本解析モデルが、斜めひび割れを促進するような離散ひび割れを配置していることに起因するものと考えられ、圧縮破壊後にシート剥離が始まるような状況では、図-4 に示している h_c や θ_c について、詳細な検討が必要であるもの考えられる。

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

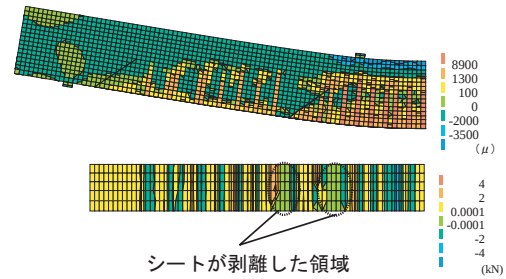


図-7 S2-L2 試験体 荷重最大時 (解析)

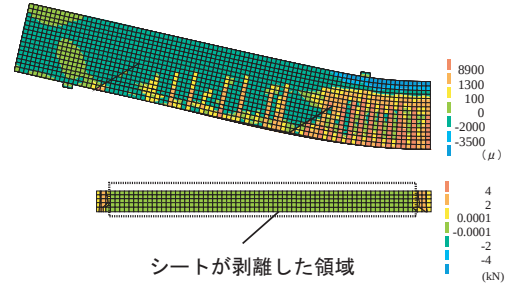


図-8 S2-L2 試験体 シート剥離前 (解析)

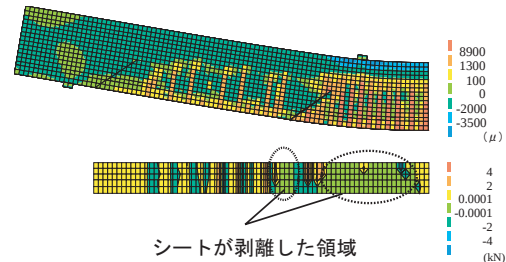


図-9 S1-L0 解析時荷重最大点 (解析)

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) ダミー要素を用いることによって、残留変位等を持つ損傷を受けた RC 梁に FRP シートを接着した場合において、FRP シートの補強効果は大略評価可能である。
- 2) 提案の解析モデルの場合では、現段階においてコンクリート上縁の圧縮破壊後にシート破断あるいは剥離に至るまでを追跡することが出来ない。

参考文献

- 1) 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, 2005.3, pp. 1037-1048
- 2) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford
- 3) 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*, V.93, No.2, pp.208-217, 1996