

各種 FRP シート曲げ補強 RC 梁の曲げ耐荷性状に関する数値解析

Numerical analyses of flexural strengthened RC beams in cases using various kinds of FRP sheet

室蘭工業大学
室蘭工業大学
三井建設(株)
(独)北海道開発土木研究所

○学生員 張 広鋒 (Guangfeng Zhang)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
正員 栗橋祐介 (Yusuke Kurihashi)

1. はじめに

近年、既存鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補強工法として軽量かつ高引張強度を有する連続繊維シート (以後、FRPシート) を用いた接着工法が数多く採用されるようになってきた。このため、各研究機関では、FRPシートを用いた RC 構造物の合理的かつ実用的な補強設計手法の確立を目的とした実験的・解析的研究を盛んに実施している。

著者らも FRPシートを用いて曲げ補強した RC 梁部材の耐荷性状およびシートの剥離挙動を適切に評価可能な数値解析的手法を確立するために、シートの剥離モデルを含む解析手法を提案し、その妥当性を実験結果と比較することにより検討している¹⁾。

本研究では、提案の数値解析手法の汎用性を検討することを目的として、材料特性の異なる各種 FRP シートを用いた場合の曲げ補強 RC 梁に関する数値解析を行い、実験結果と比較する形でその汎用性に関する検討を行った。

2. 実験概要

表-1には、解析対象とした試験体の一覧を示している。これらの試験体は、著者らが過去に行った実験²⁾の一部であり、断面タイプ2種類、シート材料3種類の全6体の矩形 RC 梁である。試験体名の第一項目は RC 梁の断面タイプ (A: 梁高 250 mm、B: 梁高 400 mm)、第二項目は FRP シートの種類および目付量 (AT、AK: アラミド繊維、CS: 炭素繊維)、第三項目はシートの補強層数を表している。

図-1には試験体の形状寸法、配筋状況、載荷点位置およびシートの接着概要を示している。試験体は、いずれも主鉄筋に D16 (SD345) を用いた複鉄筋矩形 RC 梁であり、断面寸法 (幅×高さ) は A、B 梁でそれぞれ 150×250 mm、

150×400 mm である。全ての試験体において、底面には幅 130 mm の FRP シートを梁中央部から両側支点の 100 mm 手前までの範囲に貼り付けている。シート上には、その補強効果や剥離挙動を精査するため、箔歪ゲージを 100 mm 間隔および載荷点直下に貼り付けている。表-2および表-3には、それぞれ実験時に実施したコンクリート、鉄筋および FRP シートの材料試験により得られた力学的特性値の一覧を示している。

表-1 試験体の一覧

試験体名	梁高 h (mm)	せん断スパン比 a/d	引張剛性 $E_f \times A_f$ (MN)	シート材料
A-AT525-1	250	5.0	3.86	アラミドテクノーラ
A-AK415-1			4.39	アラミドケブラー
A-CS300-1			4.99	炭素 (高強度)
B-AT525-2	400	3.1	7.71	アラミドテクノーラ
B-AK415-2			8.77	アラミドケブラー
B-CS300-2			9.99	炭素 (高強度)

表-2 コンクリートおよび鉄筋の材料特性一覧

材料	圧縮強度 f'_c (MPa)	引張強度 f_t (MPa)	降伏強度 f_y (MPa)	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
コンクリート	29.6	2.34	-	22.1	0.2
主鉄筋	-	-	406	210	0.3
帯鉄筋	-	-	380		

表-3 各種シートの材料特性一覧

シート種類	繊維目付量 (g/m ²)	厚さ t_f (mm)	引張強度 σ_f (GPa)	弾性係数 E_f (GPa)	破断歪 (%)
アラミドテクノーラ	525	0.378	2.35	78.5	2.99
アラミドケブラー	415	0.286	2.06	118.0	1.75
炭素 (高強度)	300	0.167	3.40	230.0	1.48

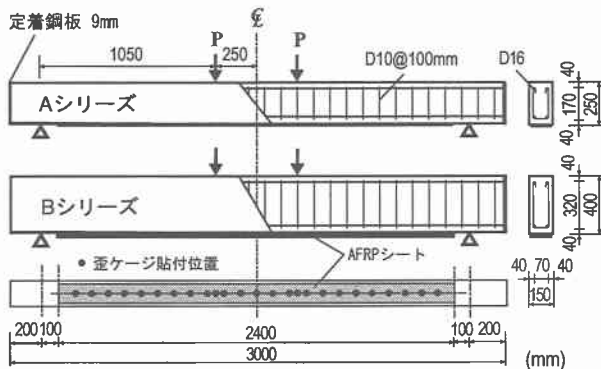


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況、載荷点位置およびシート接着概要図

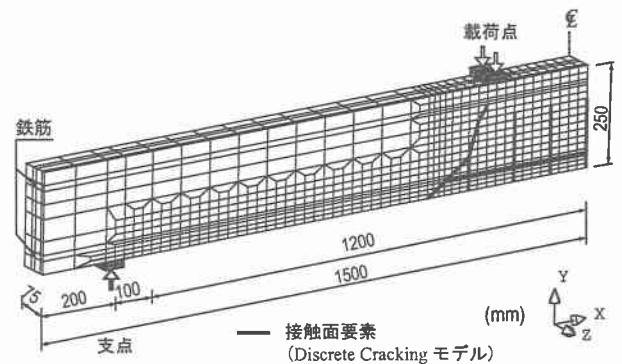


図-2 要素分割図の一例 (A-AT525-1 試験体)

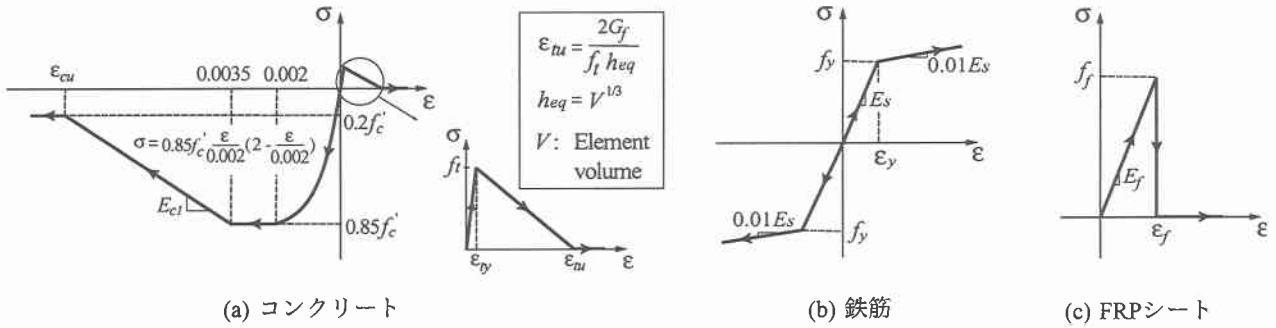


図-3 材料構成則

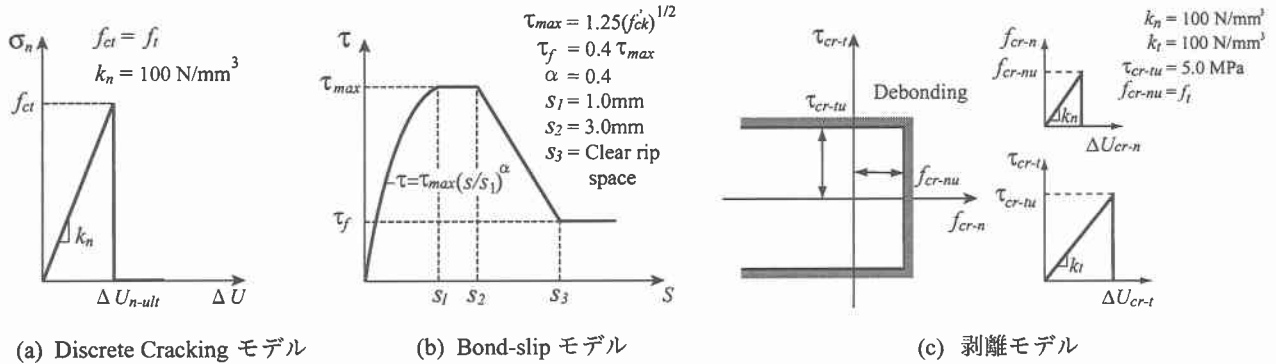


図-4 接触面要素に適用した各応力-相対変位関係

3. 数値解析の概要

3.1 解析モデル

図-2には、要素分割図の一例として、A-AT525-1試験体に関する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、鉄筋およびFRP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化している。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。収束計算には一般に広く用いられているNewton-Raphson法を採用している。

3.2 材料構成則

図-3(a)にはコンクリートの応力-歪関係を示している。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、圧縮歪 $3,500 \mu$ 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し、終局歪 ϵ_{cu} は図示のように定義している。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。FRP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。

3.3 接触面要素に適用した応力-相対変位関係

本数値解析では、RC梁の実挙動に即してひび割れ状況やシートの剥離性状に着目した検討を行うために、図-2に示しているように予め規定したコンクリートの一部、コンクリート-主鉄筋間、コンクリート-FRPシート間に接

触面要素を配置して、ひび割れの開口、主鉄筋のすべり、およびシートの剥離などの幾何学的不連続現象をモデル化している。本数値解析では、図-4に示している3種類の応力-相対変位関係を設定している²⁾。

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破壊強度 f_t と等価であるものと設定した。Bond-slipモデルにはCEB-FIPによるすべり-付着応力関係式を採用した。また、シートの全面剥離を再現するため、著者が提案した剥離モデルを用いている。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} はそれぞれ法線方向、せん断応力の限界応力である。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。

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

上式は、文献3)の式の単位(psi)をMPaの単位に換算したものである。

4. 数値解析結果および考察

4.1 荷重-変位関係

図-5には、各試験体における荷重-変位関係に関する解析結果を実験結果と比較して示している。各解析に関し

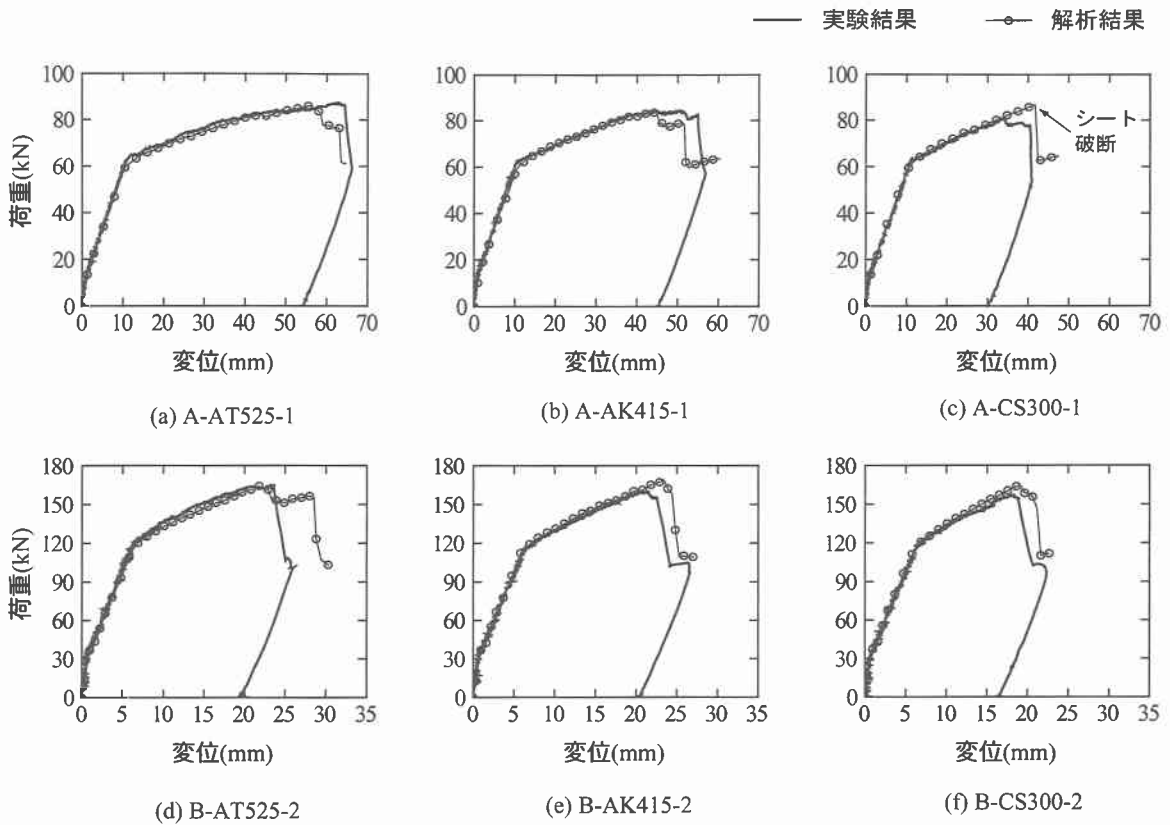


図-5 荷重-変位関係

ては、A-CS300-1 試験体の場合にはシートの破断によって計算を終了している。他の5試験体の場合には全てシートの全面剥離によって計算を終了している。

図-5(a)のA-AT525-1試験体に関する比較図により、解析結果は変位56mm付近まで実験結果と良く一致している。その後、荷重は急に低下していることが分かる。(b)図のA-AK415-1試験体に関する結果もA-AT525-1試験体と同様な分布性状を示している。これらの解析結果において、荷重が急激に低下する時点では、かぶりコンクリートのピーリング作用によって斜めひび割れ先端部からシートの剥離が発生しているものと推察される。また、(c)図のA-CS300-1試験体の結果を見ると、実験終局時まで両結果がほぼ同様な分布性状を示している。しかしながら、その後解析結果は明瞭な剛性勾配の低下を示さず、シートの破断までほぼ直線的に荷重が増加しており、実験時の耐荷挙動と異なっている。一方、後述の実験結果のシートの歪分布(図-6c)を見ると、シートの全面剥離前に等曲げ区間におけるシート歪が $20,000\mu$ 以上の値を示していることから、実験的にもシート破断に近い状況であり、解析結果は実験結果と良く対応しているものと判断される。

(d)図のB-AT525-2試験体に関する比較図より、解析結果の最大荷重は実験結果と大体一致しているものの、終局変位は実験結果を上回っていることがうかがえる。また、(e)図のB-AK415-2試験体および(f)図のB-CS300-2試験体に関する比較図に着目すると、いずれの試験体においても、解析最大荷重が実験結果を若干上回っているものの、解析結果は終局まで実験結果と大略対応していることが分かる。

表-4には、各試験体の実験結果の最大荷重 P_{max} および

表-4 各実験結果の最大荷重 P_{max} および最大荷重時変位 δ_{max} の一覧

試験体名	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	試験体名	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)
A-AT525-1	86.9	63.4	B-AT525-2	164.4	23.5
A-AK415-1	84.1	50.9	B-AK415-2	159.1	21.3
A-CS300-1	80.3	34.0	B-CS300-2	156.2	18.0

び最大荷重時変位 δ_{max} を纏めて示している。表より、試験体の断面タイプにかかわらず、弾性係数の最も低いアラミドテクノロジーシートを用いたAT試験体の最大荷重および最大荷重時変位が、最も大きいことが分かる。また、弾性係数の最も高い高強度炭素シートを用いたCS試験体の結果は、最も小さい。これより、梁の最大荷重や最大荷重時変位は、シートの弾性係数が大きいほど、小さくなる傾向にあるものと推察され、また解析結果はこの性状が大略評価可能であることが分かる。

4.2 FRPシートの歪分布

ここでは、解析結果の妥当性やFRPシートの歪分布性状に及ぼすシートの材料特性の影響を考察するため、シートの軸方向歪分布性状に関する実験結果と解析結果の比較を行う。図-6には、同一変位時の歪分布を比較するために、図-6(a)~(c)にはA-CS300-1試験体が最大荷重到達時の変位 $\delta = 34.0$ mm、図-6(d)~(f)にはB-CS300-2試験体が最大荷重到達時の変位 $\delta = 18.0$ mmにおける各結果を比較して示している。

図-6(a)のA-AT525-1試験体に関する比較図より、梁左側等せん断力区間の実験結果にシート歪が均等化された区域が現れ、シートの剥離が発生しかつ左側支点に向って

— 実験結果 —○— 解析結果

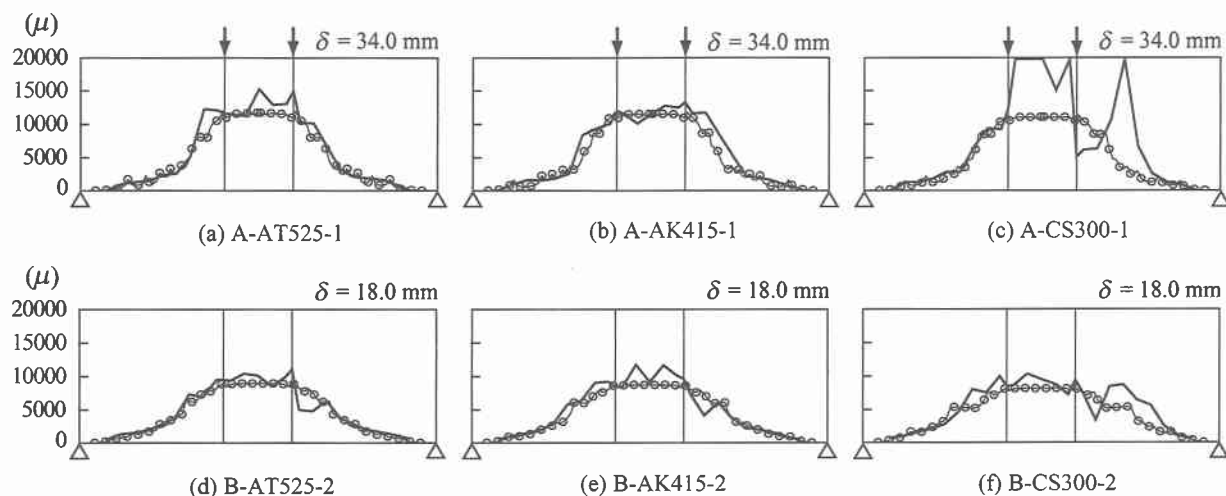


図-6 FRPシートの軸方向歪分布

進行していることが推察される。また、解析結果にもシート歪が均等化された区域が示されており、実験結果と大略対応している。図-6(b)のA-AK415-1試験体に関する結果は、両者がほぼ同様な分布性状を示している。一方、図-6(c)のA-CS300-1試験体に関しては、等曲げ区間および梁右側等せん断力区間の実験結果が解析結果を大きく上回り、20,000 μ を越える歪値を示している。これは、ゲージ貼付け近傍部のシートが局部的に破断したためと推察される。

図-6(d)~(f)に示しているBシリーズの3試験体の比較図を見ると、いずれの試験体においても解析結果は実験結果と大略一致していることが分かる。また、3試験体間の実験結果を比較すると、B-AT525-2およびB-AK415-2試験体はほぼ同様な分布性状を示している。B-CS300-2試験体の結果は、等曲げ区間ではB-AT525-2やB-AK415-2試験体と同程度の歪レベルを示しているものの、右側等せん断力区間では他2試験体よりも大きな歪分布を示していることが分かる。これより、この時点では、B-CS300-2試験体はAT/AK試験体よりもシート剥離の進展が早期に発生する傾向にあることが推察される。これは、材料の弾性係数の大小が深く関わっていることを示唆しており、弾性係数が大きいシートを用いる場合には小さいシートを用いる場合よりも早期に剥離する傾向にあるものと判断される。

4.3 付着界面の破壊挙動

本研究では、著者等が提案した剥離モデルを用いて付着界面の破壊挙動を評価している。このモデルでは、付着界面の破壊は表層コンクリート部の破壊によるものと想定した。その理由は、実験終了後の観察結果、剥離したシートにコンクリート塊が付着していることに基づいている。このことは、付着界面におけるシートの剥離抵抗が下縁部のコンクリートの引張破壊強度よりも大きいことを意味している。

また、4.1および4.2の考察より、シートの弾性係数にかかわらず上述の剥離モデルおよび対応する各パラメータを用いることにより、実験結果の荷重-変位関係やシートの歪分布性状は数値解析的に大略再現可能であることが明らかとなった。このことは、シートの付着界面における力学

特性は、シートの材料特性よりもコンクリートの引張強度に強く依存していることを示唆している。

5. まとめ

本研究では、著者らの提案しているシートの剥離を伴うFRPシート曲げ補強RC梁の数値解析手法の汎用性を検証することを目的に、材料特性の異なるFRPシートを用いる場合の曲げ補強RC梁に関する数値解析を行い、実験結果と比較する形で検討を行った。なお、本研究では、シートの軸剛性が類似となる場合を対象に検討を行っている。本研究より得られた結果を整理すると、

- 1) 著者らが提案した解析手法を用いることにより、シートの材料特性にかかわらず、実験結果の荷重-変位関係やシートの剥離挙動を大略評価可能であることが明らかとなった。
- 2) 引張剛性 $E_f \times A_f$ を等しくする場合には、RC梁の最大荷重や最大荷重時変位は、シートの弾性係数が大きいほど、小さくなる傾向にあることを数値解析的にも明らかにすることができた。
- 3) シートの付着界面における力学挙動は、シートの材料特性よりもコンクリートの引張強度に強く依存していることが数値解析的に明らかになった。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 張 広鋒: FRPシート曲げ補強RC梁に関するシートの剥離挙動解析, 土木学会論文集, 投稿中。
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介, 張 広鋒: 引張剛性の等しい各種FRPシートを接着したRC梁の曲げ耐荷性状コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 24, pp.1429-1434, 2002。
- 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。