

論文 炭素繊維シートで補強された RC 部材の破壊挙動の有限要素解析

劉 玉擎*1・彦坂 熙*2・亀山好秀*3・原田拓也*3

要旨： 炭素繊維シートで補強された鉄筋コンクリートの梁、床版および橋脚においては、シートとコンクリートの付着特性がその破壊挙動に大きく影響する。本研究はシートとコンクリートの間の局所付着すべり特性を、両者間のリンク要素に組み込んで考慮する二次元有限要素解析法を提示し、既往の実験結果と比較検討したものである。本解析により、初期ひび割れ発生後からひび割れの両側でシートの局所付着破壊が起こること、およびシートの端部がコンクリートせん断破壊の区間に入ると、シート端部の剥離が発生し易くなることなどがシミュレートされた。

キーワード： 炭素繊維シート、付着すべり、破壊挙動、有限要素解析

1. 序論

鉄筋コンクリート(RC)の梁、床版および段落し部を有する橋脚の耐荷性能を向上させるために、炭素繊維シートをコンクリート表面に貼付ける補強工法がよく採用される。本工法により補強された RC 部材の破壊挙動は、炭素繊維シートとコンクリート表面の接着性状に大きく影響される。したがって、実験的研究とともに、両者間の付着特性を考慮する実用的解析法についての研究も近年重要となってきている。

Arduini ら¹⁾ は炭素繊維シートとコンクリート表面の完全付着を仮定して有限要素解析を行っている。両者間の付着すべり作用を考慮する有限要素解析として、完全脆性すべり破壊とした4節点アイソパラメトリック板ボンド要素を用いる 李²⁾の研究がある。本研究では、炭素繊維シート要素とコンクリート要素間のリンク要素により付着作用を考慮するが、特に両者間の局所付着すべり特性をリンク要素に組み込むことが特色の一つである。解析例として、炭素繊維シートで補強された RC 梁の破壊挙動をシミュレートし、既往の

実験結果と比較検討した。

2. コンクリート材料のモデリング

圧縮応力下のコンクリートは、初期降伏まで線形弾性材料と仮定し、その後は Kupfer ら³⁾ の実験データに基づく限界曲面まで等方的に硬化させる。限界曲面に達した要素は等方的に軟化させ、ひずみで定義される破壊曲面を超えるとその要素の応力を解放する。

引張応力下のコンクリートは、引張限界曲面に達すると、最大主応力に直交するひび割れが生じるものとする。ひび割れ後の引張ひずみ軟化段階において、ひび割れとそれに直交するひび割れ局所座標系に関するコンクリートの応力-ひずみ関係は次式で与えられる。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\beta G} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \varepsilon^f \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

*1 九州大学 助手 工学部 建設都市工学科 工博 (正会員)

*2 九州大学 教授 工学部 建設都市工学科 工博 (正会員)

*3 九州大学 学生 工学部 建設都市工学科

ここに、 E はヤング係数、 G はせん断弾性係数、 ν はポアソン比、 ϵ^f は破壊ひずみ、 β はせん断剛性低減係数である。また σ_{11} 、 σ_{22} 、 τ_{12} および ϵ_{11} 、 ϵ_{22} 、 γ_{12} は、ひび割れ面に垂直な方向を1とする応力およびひずみを表す。

式(1)の右辺を整理すれば、同式は次のように書き換えられる。

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{E(1-\omega)} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\beta G} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここに、 ω はコンクリートの引張ひずみ軟化特性を表すために導入した損傷度パラメータで、 $\omega=0$ （無損傷）から $\omega=1$ （完全損傷）までの任意の値をとる。損傷度 ω と破壊ひずみ ϵ^f の間には次の関係がある。

$$\epsilon^f = \frac{\omega}{1-\omega} \frac{\sigma_{11}}{E} \quad (3)$$

損傷度 ω は、ひび割れ面に垂直な応力 σ_{11} が図-1のごとく解放されるように調整する。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \omega &= 0 && (\epsilon_{11} \leq \epsilon_f) \\ \omega &= 1 - \frac{f_t}{E\epsilon_{11}} \exp\left[-\frac{\kappa}{\epsilon_0}(\epsilon_{11} - \epsilon_f)\right] && (\epsilon_{11} > \epsilon_f) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

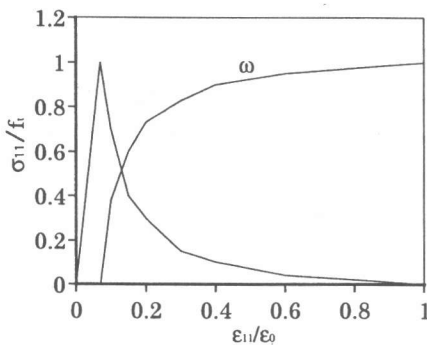


図-1 引張軟化曲線と損傷度関数

ここに、 ϵ_f と f_t は引張軟化開始点のひずみと応力、 ϵ_0 は軟化曲線において応力を0と見なしうるひずみ、また κ は指数曲線ひずみ軟化の度合を調整するパラメータで、 $\kappa=5$ により直接引張試験で観察されるひずみ軟化を近似できる⁴⁾。

3. 炭素繊維シートとコンクリートの付着すべりを考慮した解析モデリング

炭素繊維シートで補強されたRC部材においては、炭素繊維シートとコンクリートの付着特性がその耐荷力と破壊性状に大きな影響を与える。本研究では、炭素繊維シート要素とコンクリート要素の間に図-2に示すようなリンク要素を設けることにより、炭素繊維シートとコンクリートの付着作用を考慮する。炭素繊維シート面の垂直方向には相対変位が生じないように、リンク剛性 k_n に非常に大きな値を与える。炭素繊維シートの面方向のリンク剛性 k_b は炭素繊維シートとコンクリートの付着すべり挙動を表現するものである。

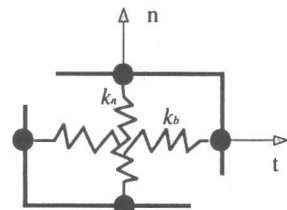


図-2 シートの付着リンク要素

炭素繊維シートとコンクリートの付着すべり挙動に関する既往の実験的研究⁵⁾では、両者間の接着長さにわたる平均付着応力に及ぼす炭素繊維シートの接着長さの影響が主に調べられている。炭素繊維シートの付着すべり破壊実験においては、付着応力を解放しながら破壊が進行していき、最終の全面すべり破壊に達する進展過程が観察されている。したがって、本研究ではこのような破壊過程をシミュレートするために、炭素繊維シートとコンクリート間における局所付着すべり挙動を有限要素解析に組み込むことを新たに考える。ここでは、炭素繊維シートの面方向のリンク剛性 k_b を図-3に仮定する付着応力-すべり関係により

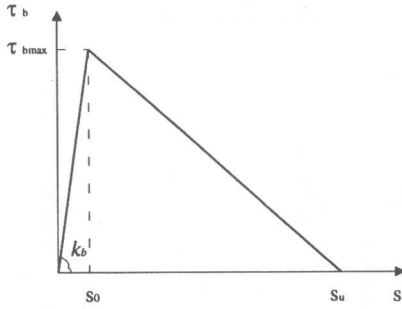


図-3 シートの付着応力-すべり関係

表すこととする。

図-3の τ_{bmax} は炭素繊維シートとコンクリートの局所付着強度を表し、一般に1.2~1.8MPaとされている⁶⁾。 k_b は両者間の局所付着剛度である。付着破壊までの弾性剛度 k_b は、炭素繊維シートおよびコンクリートの弾性剛度より弱い両者間の含浸接着層の弾性剛度 E_b により決定し、次式で求めることとする。

$$k_b = \frac{E_b}{2(1+\nu_b)t_b} \quad (5)$$

ここに、 E_b 、 ν_b は含浸接着層の弾性剛度およびポアソン比、 t_b は含浸接着層の厚さである。なお、終局すべり変位 S_u は τ_{bmax} に対応する変位 S_0 の10倍を用いることとする。

4. 炭素繊維シートで補強されたRC梁の破壊シミュレーション

4.1 供試体のモデリング

本研究では、図-4に示すスパン $L=250\text{cm}$ のRC梁¹⁾を解析対象として、炭素繊維シートで補強されたRC梁の破壊挙動をシミュレートする。供試体B1は無補強のRC梁であり、B2およびB3はそれぞれ供試体B1の底面に1層および3層の長さ $d_{cf}=230\text{cm}$ 、厚さ $t_{cf}=0.17\text{mm}$ の炭素繊維シートを貼付けたものである。

図-5に供試体の有限要素メッシュを示す。コンクリートには定ひずみ三角形平面応力要素、鉄筋および炭素繊維シートには一次元トラス要素を

用いた。鉄筋および炭素繊維シート要素の節点とコンクリート要素の節点の間には付着リンク要素を設けた。鉄筋とコンクリート間の付着リンク要素に関しては、ひび割れ近傍の付着損傷を考慮し、リンク損傷度に応じて変化させる付着特性を組み込む⁴⁾。炭素繊維シートとコンクリート間の付着特性は図-3の付着応力-すべり関係で表現する。表-1にコンクリート、鉄筋、炭素繊維シート¹⁾および炭素繊維シートとコンクリート間の接着層の材料特性⁷⁾を示す。

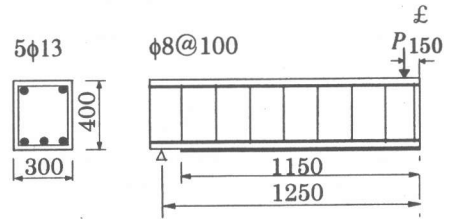


図-4 供試体の寸法と構造形式(単位:mm)

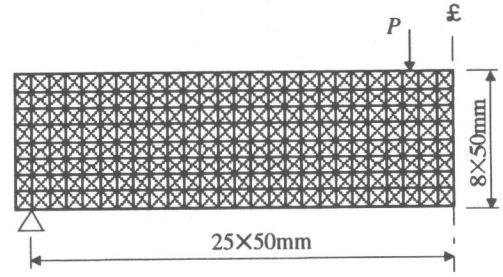


図-5 供試体の有限要素メッシュ

表-1 材料特性

材料	E (GPa)	ν	f_c (MPa)	f_t (MPa)	f_y (MPa)	τ_{bmax} (MPa)
コンクリート	20	0.2	30	3	----	----
鉄筋	200	0.3	----	----	340	----
シート	400	0.26	----	3000	----	----
接着剤	2.2	0.3	----	----	----	1.5

4.2 解析・実験結果の比較および考察

各供試体B1, B2, B3の荷重 P -スパン中央の変位 d の関係の解析および実験結果を図-6に、終局ひび割れ状態の解析結果を図-7に示す。各供試体の破壊形式の解析結果は実験結果と非常に一

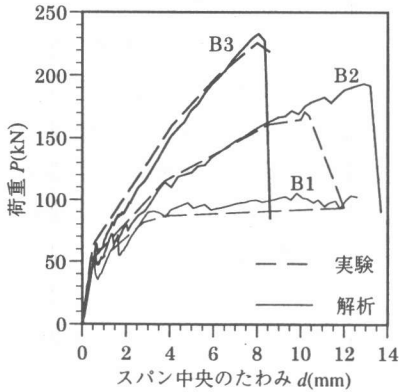


図-6 荷重 P -変位 d の関係

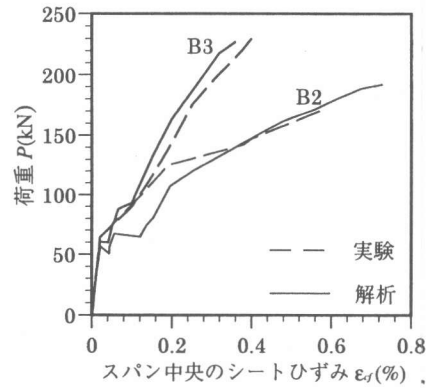


図-8 荷重とシートひずみの関係

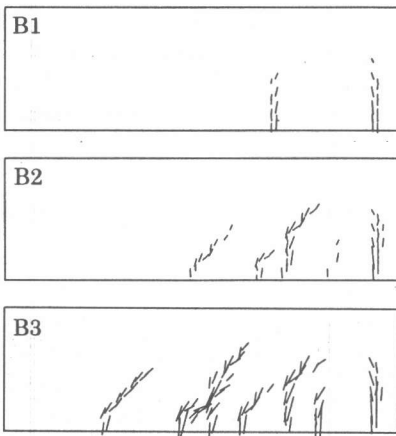


図-7 終局のひび割れ状態

致しており、B1、B2 および B3 はそれぞれ圧縮側コンクリートの破壊、スパン中央付近の炭素繊維シートの破断およびシート端部の剥離である。供試体 B3 の最大荷重 P_{max} および終局変位 d_{max} の解析結果は実験とよく合っているが、供試体 B2 の P_{max} および d_{max} の解析結果は実験値より大きくなっている。実験結果によれば、炭素繊維シートの破断による終局破壊直前における供試体 B2 のシートの引張応力は 2280MPa で、シートの破断強度の約 3/4 となっている。この原因として、炭素繊維シートは軸方向の引張強度が大きい、直交方向の抵抗能力が弱いこと、およびコンクリート表面に貼付けたシートの破断強度はひび割れ開口に伴うせん断作用などの応力集中により、単純な引張試験測定値より低下している⁶⁾ ことなどが考えられる。

図-7 に示す終局ひび割れ状態より、炭素繊維

シートで補強された RC 梁はシート量の増加に伴ってせん断破壊タイプとなっていることが観察される。したがって、供試体 B3 では炭素繊維シート端部の付近で発生したコンクリートのひび割れがシート端部の剥離を促したものと思われる。

図-8 は供試体 B2、B3 の荷重 P とスパン中央断面の炭素繊維シートのひずみ ϵ_{cf} の関係の解析および実験結果を比較したものであり、解析および実験の $P-\epsilon_{cf}$ の変化傾向はよく対応していることがわかる。また、終局時における供試体 B3 の炭素繊維シートの応力はその破断強度の約 1/2 となっており、コンクリートのせん断破壊およびシートの付着破壊により炭素繊維シートの強度が十分に発揮できなくなっている。

図-9 に、解析による供試体 B2、B3 の終局強度直前におけるシートの応力分布を示す。同図より、シート端部の付近におけるコンクリートのせん断変形および供試体 B2 のシート破断により、B3 のシート端部付近の応力 σ_{cf} が B2 のシート端部付近の σ_{cf} より大きくなるのが観察される。

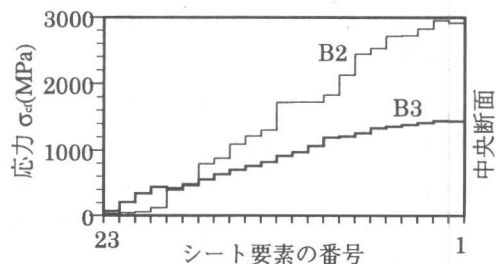


図-9 炭素繊維シートの応力分布

4.3 シートとコンクリートの付着応力分布

図-10 は変位 $d=0.8, 1.4, 8.2\text{mm}$ 時における供試体 B2 および B3 の炭素繊維シートの付着応力分布を示したものである。

両供試体の炭素繊維シートとも、コンクリートの初期ひび割れが起こるまですべり変形はほとんど発生していないが、初期ひび割れ発生後からひび割れ両側にはすべりが大きく生じている ($d=0.8\text{mm}$ 時)。変位 d が増大するに伴い、新たに発生したひび割れの両側の付着応力も大きくなり、付着すべり破壊が次第に生じる ($d=1.4\text{mm}$)。ただし、シートを1層補強した供試体 B2 では付着すべり破壊がひび割れの両側付近に局在しているが、3層補強した供試体 B3 では付着すべり破壊がシートの端部に進展している ($d=8.2\text{mm}$)。

また、供試体 B2 および B3 の破壊形式は異なっているが、両供試体とも鉄筋降伏前にコンクリートのひび割れの両側に局在したシートのすべり破壊が起こっている。したがって、ひび割れ近傍における炭素繊維シートの付着メカニズムの解明が今後の研究課題になるとと思われる。

4.4 シートの補強長さの影響

図-11 に1層補強された炭素繊維シートの長さ d_{cf} を変化させて得られた荷重 P —スパン中央の変位 d の関係を示す。補強長さ d_{cf} とスパン L の比 $d_{cf}/L=0.28$ の場合、炭素繊維シートのすべり破壊が急激に進展し、耐荷力は無補強供試体とほとんど変わらない。 $d_{cf}/L=0.76$ の場合は炭素繊維シートが破断し、終局荷重に対するシートの補強効果が大きく発揮される。

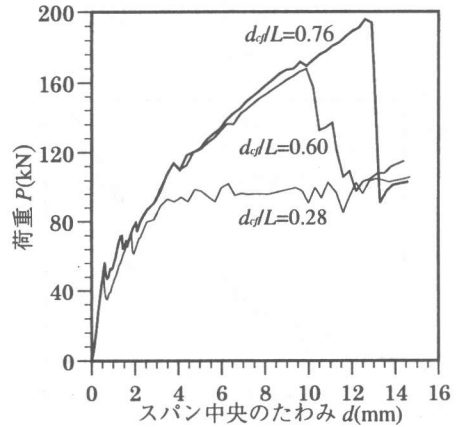


図-11 荷重 P —変位 d の関係

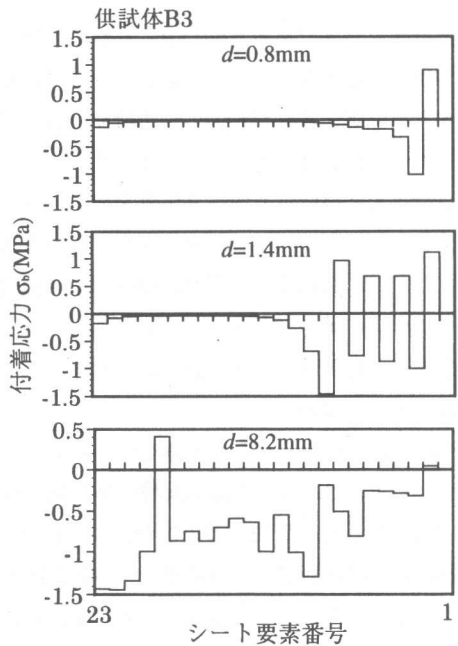
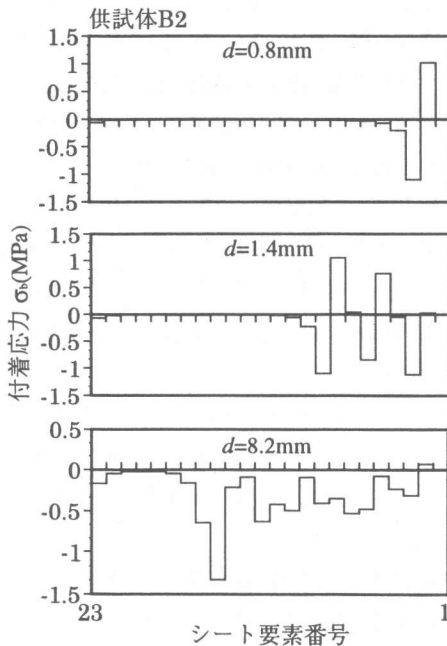


図-10 炭素繊維シートの付着応力分布

図-12 は1層, 2層および3層に補強された炭素繊維シートの長さ d_{cf} を変化させて得られた耐力と d_{cf}/L の関係を示し, 縦軸は解析による耐力 P_{max} と無補強の供試体 B1 の耐力 P_{Imax} の比である。2層および3層シートで補強された場合, それぞれ $d_{cf}/L=0.28, 0.44$ 以上で耐力が大きくなるが, $d_{cf}/L=0.60\sim 0.80$ の間における耐力はほとんど増大していない。これは, $d_{cf}/L=0.60\sim 0.80$ ではコンクリートのせん断破壊が発生した場合, 炭素繊維シートの端部にすべり破壊が生じ易くなるためであると考えられる。

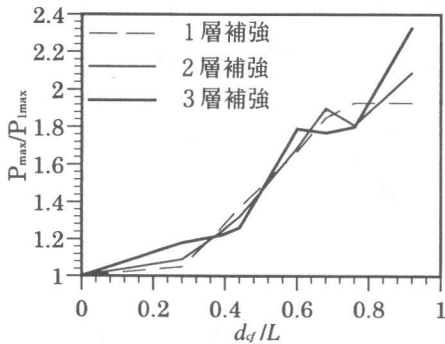


図-12 P_{max}/P_{Imax} と d_{cf}/L の変化関係

5. 結語

炭素繊維シートで補強された RC 部材の解析においては, 炭素繊維シートとコンクリート間の付着すべりを考慮する必要がある。本研究では, 炭素繊維シート要素とコンクリート要素間にリンク要素を設けて, 局所付着すべり特性を組み込むことにより, 両者間の付着特性を取り扱う解析方法を提示した。これにより, 炭素繊維シートで補強された RC 梁の破壊挙動をシミュレートし, 既往の実験結果と比較検討した。得られた知見をまとめれば次の通りである。

- 1) 本解析により得られた炭素繊維シートで補強された RC 梁の破壊挙動は実験結果と良く対応し, 提示した手法の有用性が認められた。
- 2) 終局時の破壊形式が炭素繊維シートの破断または剥離の何れによる場合であっても, 炭素繊維シートには初期ひび割れ発生後から, ひ

び割れの両側にすべり変形が大きく生じ, 局所付着破壊が起こっている。

- 3) ひび割れの両側における局所付着破壊が炭素繊維シートの端部まで進行すると, 終局破壊は炭素繊維シート剥離の破壊形式となる。
- 4) 本解析の条件に限り, 炭素繊維シートの補強長さを梁スパンの約 30% 以上にすれば, 補強効果が大きく期待できる。しかし, シートの端部がコンクリートせん断破壊の区間に入ると, シート端部の剥離が発生し易くなる。

参考文献

- 1) Arduini, M., Tommaso, A. D. and Nanni, A.: Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams, ACI Structural Journal, Vol.94, No.4, pp.363-370, July-Aug. 1997.
- 2) 李翰承, 友澤史紀, 野口貴文, 鹿毛忠継: 炭素繊維シートによって曲げ補強した RC 梁の有限要素解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.1065-1070, 1996.
- 3) Kupfer, H. R. et al.: Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses, ACI Journal, Vol.66, No.8, pp.656-666, Aug. 1969.
- 4) 彦坂 照, Bolander, J., Liu, Y.: 鉄筋コンクリート構造物の非線形 FEM 解析における付着すべりモデルの精密化, 構造工学論文集, Vol.40A, pp.1357-1367, 1994.
- 5) 例えば, 岳尾弘洋, 松下博通, 牧角龍憲, 長島玄太郎: CFRP 接着工法における炭素繊維シートの付着特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1599-1604, 1997.
- 6) 緒方紀夫ほか: 炭素繊維による段落し部を有する既存 RC 橋脚の耐震補強に関する研究, 土木学会論文集, No.540/VI-31, pp.85-104, 1996.
- 7) 齊藤弘志, 江口和雄: 最近の樹脂系材料による補修・補強工法の現状, コンクリート工学, Vol.33, No.12, pp.25-32, 1995.