

論文 引張荷重を負荷した炭素繊維シート補強 RC 部材の剝離破壊性状に関する解析

吉澤弘之*1・呉 智深*2

要旨：本論文では引張荷重が作用する炭素繊維シートにより補強された RC 構成材の複合効果に関し、破壊エネルギー法を用いて炭素繊維シートの補強効果、シートの剝離破壊性状、終局限界状態における構造体の変形、破壊挙動に関する検討を行い、数種のモデルにつき解析を行った。

キーワード：炭素繊維シート、剝離破壊、破壊エネルギー、鉄筋降伏

1. 前書き

近年、RC 構造物の梁やスラブ、橋梁の補修、補強に強度、剛性、耐久性に優れた炭素繊維シートが用いられている。炭素繊維シートは鋼の十倍以上の引張強度と鋼と同等以上の弾性率を発揮し、主に RC 部材の引張荷重作用部の補強に用いられている。炭素繊維シートの補強効果は、RC 構造物の耐力と靱性の向上、剛性の向上、及びひび割れの拘束効果等が考えられる。たとえばコンクリートのひび割れ部の炭素繊維シートには大きな緊張力が発生し、それによりひび割れの開口が抑制される。この炭素繊維シートで補強した RC 部材のひび割れ拘束効果に関する実験的な報告 [1, 2] はなされているが、ひび割れ幅、負荷応力状態、炭素繊維シートの剝離長さ、更に炭素繊維シートとコンクリート母材のせん断剝離性状等に関する定量的な報告はほとんど行われていないのが現状である。

RC 部材に引張荷重が作用し、RC 部材にひび割れが生じると、ひび割れ近傍の炭素繊維シートはコンクリートの界面で剝離破壊を起こす。このひび割れ近傍の炭素繊維シートの剝離端部にはせん断応力が作用する [3]。炭素繊維シートとコンクリートのせん断剝離破壊に関しては、通常平均せん断応力で整理し設計を行っている。しかし、実際の剝離挙動は脆性的なモード II 型の剝離進展であり、定量的な評価には破壊力学的な取り扱いが必要と考えられる。著者らは前報 [4] で炭素繊維シートとコンクリート間の界面剝離破壊エネルギーを用い、炭素繊維シートで補強した RC 構成材の引張特性に関する解析モデルの構築を試みた。今回はこの手法を更に発展させ、鉄筋の降伏、および炭素繊維シートとコンクリートの界面の剝離破壊を考慮した解析法を用い、数種のモデルについて検討したので報告する。

2. 解析の手法

著者らは Ouyang [5] 等の非線型破壊力学に基づいた破壊エネルギー法を発展させ、炭素繊維シートで補強した RC 構成材の引張特性に関する解析モデルの構築を試みた [4]。この解析法により、実験で同定された炭素繊維シートとコンクリート間の界面剝離破壊エネルギー G_{IIc} を使用し、炭素繊維シートによるひび割れの拘束効果および剛性補強効果を合理的に算定できるようになった。本報告では、このモデルをさらに発展させ、鉄筋の降伏と、炭素繊維シートの最終剝離破壊含む構造体の終局限界状態までの挙動を予測することを目的とする。

*1 東燃 (株) トウシート事業室、 工修 (正会員)

*2 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科、工博 (正会員)

2.1 エネルギーのバランス、構成材のひずみ

図1に示す炭素繊維シート補強を行ったRC構成材に引張応力 σ を負荷し、 N 個のひび割れを生じた構造体のコンクリート、鉄筋、炭素繊維シートの平均歪みを ε_c 、 ε_s 、 ε_{cf} とする。ひび割れ数が N の時、ひび割れの開口幅を w_o とすると各構成材に生じるひずみの平均値は以下の通りとなる。

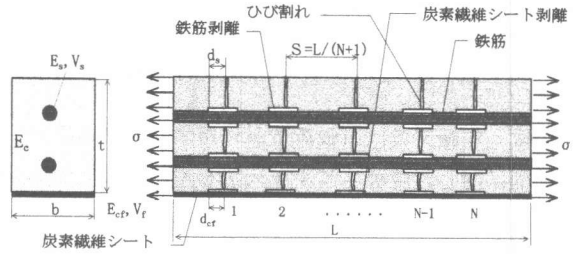


図1 炭素繊維シート補強RC構成材形状図

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cf} = \varepsilon_c + \frac{Nw_o}{L} \quad (1)$$

ここでコンクリートの平均ひずみ ε_c はひび割れ幅 w_o の影響を受けず、鉄筋、及び炭素繊維シートのひずみはひび割れ幅 w_o が考慮されている。ここで図1において各記号は以下を表す。

- | | | |
|-----------------|---------------------|-------------------------|
| L : 構成材の長さ | t : 部材高さ | b : 部材幅 |
| S : ひび割れの平均間隔 | d_s : 鉄筋の剥離長さ | d_{cf} : 炭素繊維シートの剥離長さ |
| E_s : 鉄筋の弾性率 | E_c : コンクリートの弾性率 | E_{cf} : 炭素繊維シートの弾性率 |
| V_s : 鉄筋の体積比 | V_f : 炭素繊維シートの体積比 | |

ひび割れの平均間隔 S は

$$S = \frac{L}{N+1} \quad (2)$$

引張荷重を受け、ひび割れの生じた炭素繊維シート補強RC構成材では、ひび割れ部分で鉄筋の剥離破壊、鉄筋とコンクリート界面の付着すべり、炭素繊維シートとコンクリート界面の剥離破壊が生じるとともに、ひび割れの本数とひび割れ幅が徐々に増加していく。

破壊力学的観点から、ひび割れ進展時に解放される歪みエネルギーは(3)式に示すように、鉄筋とコンクリートの界面の剥離エネルギー及びすべりエネルギー、炭素繊維シートとコンクリートの剥離エネルギー、コンクリートのひび割れ進展抵抗と等しくなる。

$$-\frac{1}{bt} \frac{\partial \phi_c}{\partial N} = R_{icf} + \frac{1}{bt} \frac{\partial (\phi_s + \phi_{ds} + \phi_{dcf})}{\partial N} \quad (3)$$

ここで

- ϕ_c : 鉄筋の剥離および付着すべり、炭素繊維シートの剥離を考慮しない N 個のひび割れを有するコンクリートの歪みエネルギー
- ϕ_s : N 個のひび割れを有する部材の剥離した鉄筋とコンクリートの界面での摩擦エネルギーの総和
- ϕ_{ds} : N 個のひび割れを有する部材の鉄筋の剥離エネルギーの総和
- ϕ_{dcf} : N 個のひび割れを有する部材の炭素繊維シートとコンクリートの剥離エネルギーの総和
- R_{icf} : 無補強コンクリートのひび割れ進展抵抗値

各ひびずみエネルギーの算出方法及びひび割れ周辺の炭素繊維シート応力度等の詳細は前報[4]に詳しく論じている。

2.2 炭素繊維シートの剥離破壊エネルギー及び炭素繊維シートのせん断剥離強度の算出

ひび割れ数が N 個のときの炭素繊維シートの剥離エネルギー ϕ_{dcf} は以下の式で算出した ($G_{IIc} = \gamma_{cf}$)。

$$\phi_{dcf} = 2Nbd_c\gamma_{cf} \quad (4)$$

ここで γ_{cf} は炭素繊維シートの単位面積当たりの剥離破壊エネルギーである。

鉄筋降伏前の炭素繊維シートの剥離長さは非常に小さいことが報告されているため[2]今回の解析ではひび割れ数 N が最大となるまでは $d_{cf} \leq d_s$ (鉄筋の剥離長さ) の条件とした。炭素繊維シートのモードIIでの剥離破壊エネルギー γ_{cf} は図2に示す形状のダブルせん断試験片を用いて著者らが算出した $6.0 \text{ N/m} = 0.006 \text{ N/mm}$ の値[6]を使用した。

図4のダブルせん断試験片で予亀裂が急激に進展する際のコンクリートの平均せん断強度 τ_{cfc} と付着長さ L_{cf} の関係を図3に示す。この関係より下式に示すように炭素繊維シートの付着長さ、炭素繊維シートの剥離破壊が生じる際の強度 σ_{cfc} を算出した。

$$\sigma_{cfc} = \frac{L_{cf}\tau_{cfc}}{lV_{cf}} \quad (5)$$

本モデルではコンクリート部にひび割れが発生すると、ひび割れ近傍の炭素繊維シートがコンクリートと層間剥離を生じる。ひび割れ部の炭素繊維シートの応力 σ_{cfc} が σ_{cfc} に達すると剥離は図4に示すように隣の層間剥離と連結を起す。そして試験体の両端部だけ炭素繊維シートはコンクリートと接着している状態になり、この端部の部分が剥離した時点が炭素繊維シートの最終剥離破壊とした。

3. 構成部材の応力の算出

(3)式からあるひび割れ数 N に対し、満足する ϵ_o を算出する。この際(3)式が成立する主な条件は以下の式である。

$$2d_s \leq S \quad (6)$$

得られた ϵ_o 、 w_o からコンクリート、鉄筋、炭素繊維シートに生じる応力度、平均応力度を算出する。

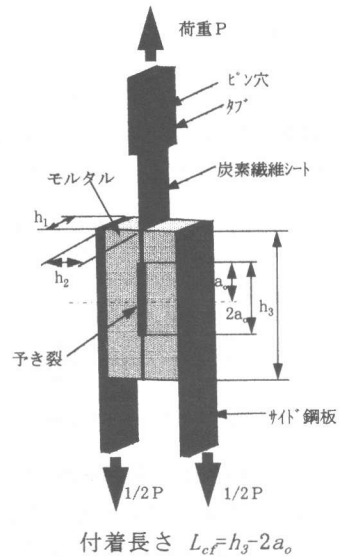


図2 ダブルせん断試験片

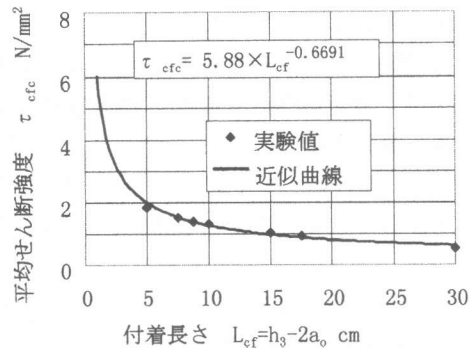


図3 付着長さ とせん断強度の関係

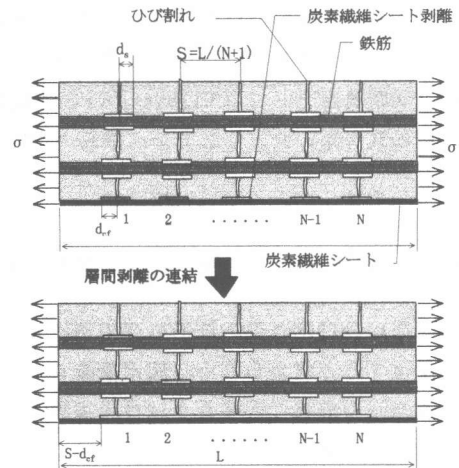


図4 炭素繊維シートとコンクリートの層間剥離の連結

$$\sigma_c = \frac{\epsilon_c}{M_c} \quad (7)$$

ここで M_c はコンクリートのコンプライアンスである。

鉄筋の降伏応力を σ_{sy} 、その時のひずみを ϵ_{sy} とすると鉄筋の降伏前、及び降伏後の応力は(8)、(9)のようになる。

$$\sigma_s = E_s \epsilon_s = E_s \left(\epsilon_c + \frac{N w_o}{L} \right) \quad : \quad \text{if } \epsilon_s < \epsilon_{sy} \quad (8)$$

$$\sigma_s = \sigma_{sy} \quad : \quad \text{if } \epsilon_s \geq \epsilon_{sy} \quad (9)$$

$$\sigma_{cf} = E_{cf} \epsilon_{cf} = E_{cf} \left(\epsilon_c + \frac{N w_o}{L} \right) \quad (10)$$

$$\sigma = \sigma_s V_s + \sigma_c (1 - V_s - V_f) + \sigma_{cf} V_f \quad (11)$$

以上の検討より炭素繊維シート補強RC部材の引張特性を算出する解析のフロー図を図5に示す。

ひび割れ数 N が(6)式の条件により最大値となりこれ以上増加しない場合、鉄筋ひずみはひび割れ幅 w_o を広くしてやることにより増加させた。この時、コンクリートは鉄筋からほとんど剥離しているので、コンクリートのひずみ増加分はひび割れ部の炭素繊維シート張力の増加分によるものだけとした。

4. 解析結果

検討した破壊エネルギー解析法の有用性およびその安定性を検証するため、数種の炭素繊維シート補強をしたRC引張構造モデルを用いて数値解析を行った。検討に使用した炭素繊維シートは一般的に用いられているものから2種類を選択した。その物性を表1に示す。

解析に使用したRC部材は正方形断面とし、部材長さ L は470mmとした。また、幅102mmの部材は鉄筋の体積比は $V_s = 0.027$ 、幅127mmの部材は $V_s = 0.017$ とした。また、 $E_c = 33$ GPa、 $E_s = 210$ GPaとし、 $r = 9.4$ mm、 $\sigma_{sy} = 345$ MPa、剥離した部分の鉄筋とコンクリートの摩擦力 $\tau_s = 2.5$ MPa、限界ひび割れ幅 $w_o = 0.12$ mmとしている。

コンクリート部材のひび割れ進展抵抗値 R_{Icf} は、Ouyang等[7]の算出した表2の値を用い、鉄筋の剥離長さとしてはGilbert[8]らが提案した以下の式を用いた。ここで r は鉄筋の半径である。

$$d_s = \frac{r}{20V_s} \quad (12)$$

(12)式では鉄筋の剥離長さは一定値となるが、

実際にはひび割れ部の鉄筋の応力値により変化すると考えられる。炭素繊維シート補強時の鉄筋の剥離長さは今後実験等で確認する予定である。

図6は鉄筋の体積比 $V_s = 0.027$ のRC構成材を高強度炭素繊維シート1層で補

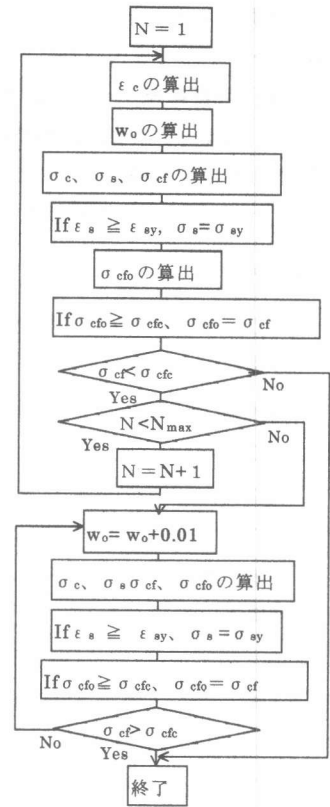


図5 計算フロー図

表1 炭素繊維シートの物性

	高強度タイプ	高弾性タイプ	
弾性率	GPa	230	380
設計強度	MPa	3500	3000
厚さ	cm	0.0167	0.0165

表2 コンクリートのひび割れ進展抵抗値 R_{Icf}

部材幅 b (mm)	部材高さ t (mm)	粗骨材径 a_o (mm)	コンクリート引張 強度 f_t (MPa)	R_{Icf} (N/mm)
102	102	12.1	2.30	0.009
127	127	13.2	2.38	0.010

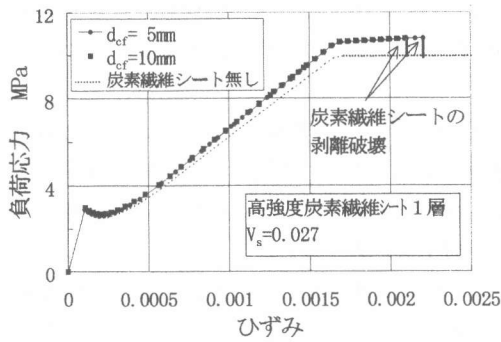


図6 炭素繊維シート剥離長さによる応力ひずみ線図の変化

強した際の応力ひずみ線図である。炭素繊維シートで補強すると、鉄筋の降伏時の負荷応力が上昇し、鉄筋降伏後もひずみの増加に伴い炭素繊維シートの寄与により負荷応力は増加する。更にひずみが増加すると炭素繊維シートの最終剥離破壊が生じ、負荷応力は低下し、炭素繊維シート補強をしていないRC部材の応力ひずみの関係と一致する。

ひび割れ部の炭素繊維シートの剥離長さ d_{cr} はひび割れ部の炭素繊維シート応力等によって変化すると考えられるが、ここでは5mmもしくは10mmの固定値としている。図6に示すように剥離長さ d_{cr} はRC構成材の応力ひずみの関係にほとんど影響しない。しかし、図7に示すように、ひび割れ部の炭素繊維シートの応力、及び剥離挙動には大きく影響する。剥離長さが短い場合は長いときに比べ低い負荷応力で、ひび割れ時に生じたシートとコンクリートの層間剥離が隣の層間剥離と連結する。しかし、炭素繊維シートの最終剥離破壊を生じる負荷応力はほとんど変化しない。この図7では層間剥離連結時に大きなシート応力のギャップが生じているが、こ

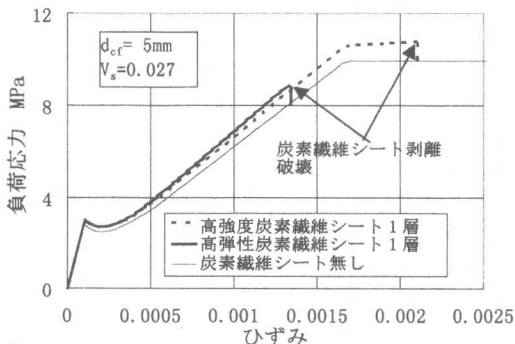


図9 炭素繊維シートの弾性率による応力ひずみ関係の変化

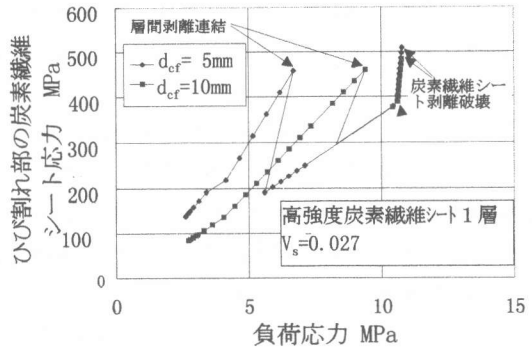


図7 ひび割れ部の炭素繊維シート応力の変化

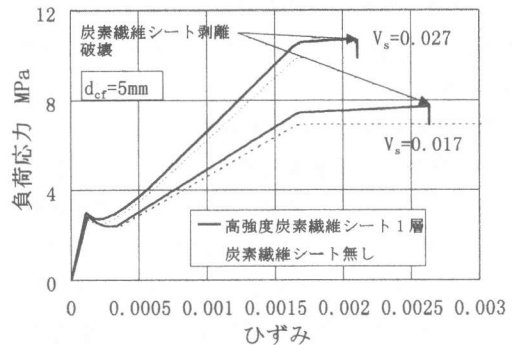


図8 鉄筋比による構成部材の応力ひずみ関係の変化

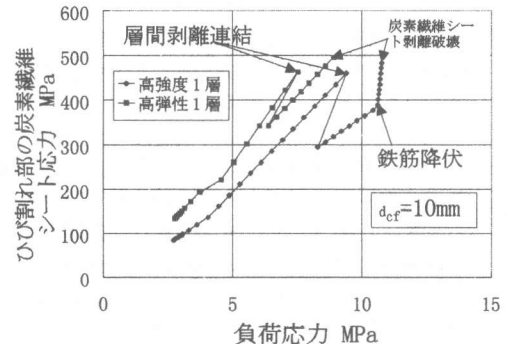


図10 ひび割れ部の炭素繊維シート応力の変化

れは層間剥離の連結が一気に生じると解析で想定しているからである。実際の現象では層間剥離の連結は徐々に生じると思われ、ひび割れ部の炭素繊維シートの応力も徐々に低下するものと考えられる。

図8は高強度炭素繊維シートを1層で補強し、炭素繊維シートの剥離長さ d_{cf} を5mmとした際の応力ひずみの関係を示している。鉄筋の体積比 V_s を変化させると、 V_s が低いほど炭素繊維シート剥離破壊時のひずみが大きくなっている。これは V_s が小さいほどひびわれの平均間隔 S が長くなるので、それによって炭素繊維シートの付着長さが増加するためである。

図9に炭素繊維シートの弾性率の違いによる応力ひずみの関係の変化を示す。高弾性の炭素繊維シートの方が図10に示すようにひび割れ部分で応力が高くなるので、今回の解析では鉄筋の降伏前に炭素繊維シートの最終剥離破壊が生じた。なお、炭素繊維シートの剛性が高くなると、炭素繊維シートの最終剥離荷重が高くなるという実験結果[9]もあるため、コンクリートと炭素繊維シート間の剥離進展に関し数値解析、実験等で今後更に詳しい検討を行う予定である。

5. 結論

引張荷重を負荷した炭素繊維シートで補強したRC構成材について、鉄筋の降伏と炭素繊維シートの最終剥離破壊を考慮し、コンクリートのひずみエネルギー及びひび割れ進展エネルギー、鉄筋の剥離破壊及び摩擦エネルギー、炭素繊維シートとコンクリート間の界面剥離破壊エネルギーを用いた破壊エネルギー法を用い解析を行った結果以下の結論を得た。

- 1) 炭素繊維シートにより補強されたRC引張部材の鉄筋の降伏荷重、炭素繊維シート最終剥離荷重を合理的に算定できることを定性的に示した。今後実験結果との比較により定量化されていくことが期待される。
- 2) 鉄筋の体積比、炭素繊維シートの弾性率によってRC構成材の炭素繊維シートの最終剥離破壊が生じるひずみの値が変化することが示された。

なお本論文の一部は、平成8年度文部省科学研究費補助金 基盤A(課題番号08555107、代表: 呉 智深)及びCCA協議会の援助を受けて行ったものであることを付記する。

参考文献

- [1] 森成道、若下藤紀、松井繁之、西川和廣: 炭素繊維シートによる床版下面補強効果に関する研究、橋梁と基礎、PP25-32、1995.3
- [2] 宇治公隆、横田和直、池田尚治: シート状炭素繊維による既設構造物の耐荷性能向上機構、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14、No.2、PP695-700、1992
- [3] 佐藤裕一、木村耕三、小島克朗: CFRPシートとコンクリートの付着性状に関する一考察、日本建築学会学術講演梗概集、PP225-226、1995.8
- [4] 吉澤弘之、呉 智深: 破壊エネルギー解析法による炭素繊維シート補強をしたRC構成材の引張り特性に関する研究、構造工学論文集、Vol.43A、1997.3
- [5] Ouyang, C., Shah, S. P.: Fracture Energy Approach for Predicting Cracking of Reinforced Concrete Tensile Members, ACI Structural Journal vol.91, No.1, PP69-78, Jan./Feb. 1994,
- [6] 福沢公夫、呉 智深、田名部菊次郎、吉沢弘之: 炭素繊維シートとコンクリートの界面剥離破壊エネルギー、第51回土木学会年次学術講演会、vol.5、PP1094-1095、1996.8
- [7] Ouyang, C., Shah, S. P.: Geometry-Dependent R-Curve for Quasi-Brittle Materials, Journal of the American Ceramic Society, vol.74, No.11, PP.2381-2836, 1991
- [8] Gilbert, R. I., : Shrinkage Cracking in Fully restrained Concrete Members, ACI Structural Journal, vol.89, No.2, PP141-149, Mar./Apr. 1992
- [9] 吉澤弘之、島内洋年、木虎久人、國川正勝: 炭素繊維シートとコンクリートの定着挙動、第50回土木学会年次学術講演会、vol.5、PP402-403、1995.7