

論文 連続繊維シート補強 RC 柱部材のじん性予測に関する研究

新保 学幸^{*1}・下村 匠^{*2}・丸山 久一^{*3}

要旨：連続繊維シート補強された鉄筋コンクリート柱の正負交番載荷実験の結果から、その変形・破壊メカニズムを考察し、これを表現する簡便な力学モデルを提案した。シートの物性、補強量を入力値として、せん断ひび割れの発生状況ならびにシートの剥離状況を考慮しつつ、部材の破壊モードと終局変位を、満足の行くレベルで予測しうることを示した。

キーワード：連続繊維シート、せん断ひび割れ、剥離、付着構成則、じん性、終局変位

1. はじめに

炭素繊維、アラミド繊維の連続繊維シートを用いた既設コンクリート構造物の補修補強は数多く行われている。土木分野では、土木学会指針により設計体系が一応の完成を見た¹⁾。しかし、個別の項目の性能照査法に関しては、実験式によるもの、実験を行って照査しなければならないものなどがあり、課題が残されている。

本研究は、シート補強 RC 柱部材の変形性能評価法について検討するものである。柱供試体の一連の交番載荷試験結果より、シート補強 RC 柱部材の変形・破壊メカニズムを考察する。これに基づき、せん断ひび割れの発生状況ならびにシートの剥離状況を考慮しつつ、部材の破壊モードと終局変位を予測する力学モデルを提案し、検証する。

表-1 基準供試体の諸元

項目	単位	
軸力 (kN)	0	
幅 (mm)	500	
高さ (mm)	500	
有効高さ (mm)	460	
せん断スパン (mm)	1250	
せん断スパン比	2.72	
コンクリート圧縮強度 (MPa)	28~42	
軸方向鉄筋強度 (MPa)	350	
軸方向鉄筋比 (%)	1.83	
せん断補強筋強度 (MPa)	290	
せん断補強筋比 (%)	0.05	
せん断余裕度		0.73

2. 試験概要

2.1 試験体概要

シート補強を行わない基準供試体を含め全 8 体の供試体を試験した。補強前の供試体は共通であって、その諸元を表-1 に、形状・寸法・配筋を図-1 に示す。

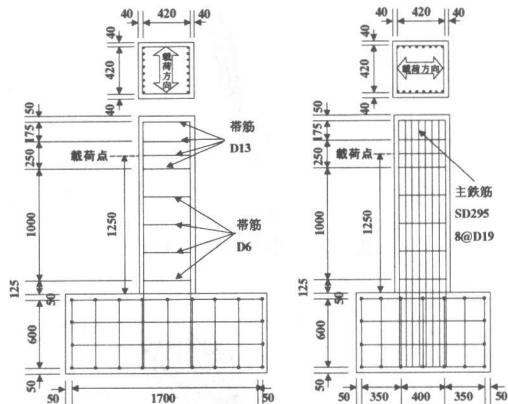


図-1 供試体の形状・寸法・配筋

2.2 載荷方法

載荷方法は静的正負交番載荷とした。供試体は鉛直に設置し、反力壁に設置したアクチュエータにより水平方向に交番載荷した。軸力は加えていない。載荷点は柱基部から 1250mm の位置とした。

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 長岡技術科学大学助教授 工学部建設・環境系 博士 (工学) (正会員)

*3 長岡技術科学大学教授 工学部建設・環境系 Ph.D. (正会員)

表-2 試験パラメータおよび結果

	供試体名	n0	n1	n2	n3	n4	n5	n6	n7
試験 パラメータ	シートの種類	-	炭素	アラミドI	アラミドII	アラミドI	アラミドII	アラミドII	ポリエスル
	シートの厚さ (mm)	-	0.111	0.193	0.169	0.064	0.056	0.113	0.391
	シートの引張強度 (MPa)		4290	2720	2860	2720	2860	2860	1010
	シートの弾性係数 (GPa)		261	131	83.2	131	83.2	83.2	6.51
試験結果	シートの破断ひずみ (μ)		16400	20800	34400	20800	20800	34400	153000
	最大荷重(正側) (負側)	(kN)	303.5 -262.9	306.4 -306.5	297.8 -310.2	299.8 -315.3	293.9 -289.9	296.5 -286.9	294.3 -303.1
	最大変位(正側) (負側)	(mm)	13.0 -13.3	45.7 -45.7	48.09 -48.17	73.71 -175.96	15.43 -16.32	20.70 -21.20	44.02 -38.54
	最大シートひずみ(実験値) (μ)		-	17970	18182	25744	15351	33381	33707

2.3 試験パラメータ

各供試体の試験パラメータは、使用する連続繊維シートの種類および補強量(シートの厚さ)である。表-2に試験結果とともに示す。使用した連続繊維シートの種類は4種類である。特にポリエスルシートは、形状や寸法はその他のシートと大きな違いはなく、破断ひずみが約10倍と非常に伸びやすいことが特徴である。

シートの補強状況は、全ての供試体で基部から載荷点上部まで円周方向に完全に巻立てた。

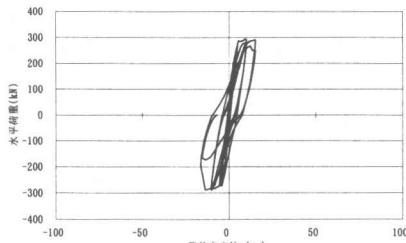


図-2 履歴曲線(n4)

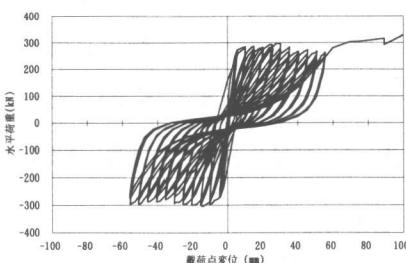


図-3 履歴曲線(n7)

3. 試験結果に関する検討

3.1 変形性能

試験結果を表-2に、また、破壊状況が異なる代表的な供試体の履歴曲線を図-2および図-3に示す。最大荷重はいずれもシート補強を行わない基準供試体と同程度であり、シート補強による耐力増大効果は見られなかった。これ

は、荷重が曲げ耐力に達したためであると考えられる。しかし、最大変位では大きな違いが見られた。同じ種類のシートを用いた場合、補強量が増すにつれて最大変位も大きくなり、また同程度の補強量で補強した場合、破断ひずみの大きなシートの方がより大きな変位を示した。以上より、シート補強により柱部材の変形性能を向上させる効果が得られることがわかった。

3.2 破壊性状

各供試体の終局状態におけるひび割れおよびシートの剥離状況を図-4に示す。基準供試体n0は基部から載荷点を結ぶせん断ひび割れが発生し、脆性的なせん断破壊を示した。シート補強した供試体n1~n7は、いずれもシートが破断することにより耐力が低下し終局となった。

試験中の目視や軽くたたくことにより、ひび割れや剥離領域をある程度把握しながら実験を行った結果、以下のようない進展状況が考えられる。

シート補強した供試体の破壊性状は、はじめに基部の1d(d:有効高さ)区間に約45度のせん断ひび割れが発生し、その後その上部に同じようにせん断ひび割れが発生する場合(供試体n1,n2,n3,n6,n7)と、上部にひび割れが発生する前にシートが破断してしまう場合(供試体n4,n5)に分けられた。このような破壊性状の違いが変形性能に大きく影響しており、ひび割れが上部に進展するものは基部にのみひび割れが発生したものよりも終局変位が大きく、また、ひび割れの状況が似ている場合は、ひび割れに伴うシートの剥離領域が大きいものほど終局変位が大きくなっていることがわかる。

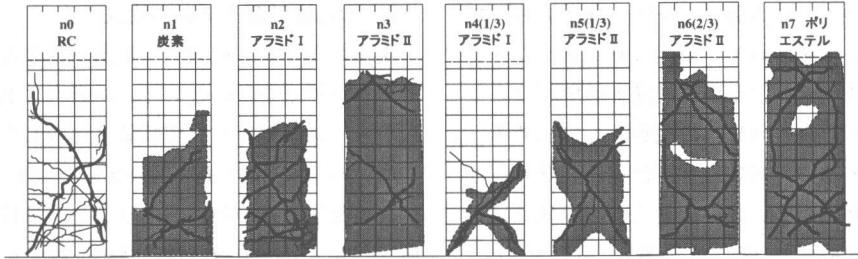


図-4 ひび割れおよびシートの剥離状況

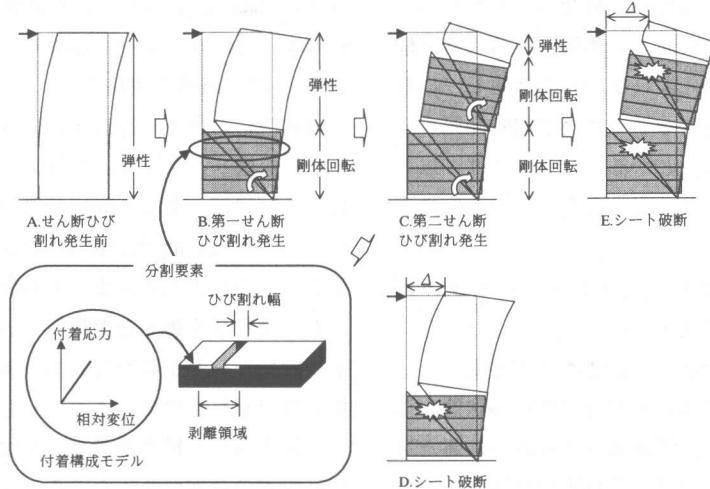


図-5 じん性予測モデルの概要

4. シート補強 RC 柱部材のじん性予測モデル
前章において考察したように、連続繊維シート補強柱の終局変位には、せん断ひび割れの発生状況が大きく影響している。また、そのひび割れ状況は、シートの種類と補強量の影響を受ける。これらの相互関係を適切に表現することが、シート補強部材のじん性予測の鍵となると考え、以下の力学モデルを考案した。

せん断ひび割れ発生前は、弾性はりとする。曲げ剛性は、シートの影響を無視し、曲げひび割れ発生後の鉄筋コンクリートの一般的な曲げ理論を用いて算定する（図-5 の A）。

せん断ひび割れ（斜めひび割れ）の発生条件は、曲げモーメントにより規定することとする。

$$M_c = V_c \times a \quad (1)$$

ここに、 M_c ：せん断ひび割れ発生モーメント、 V_c ：せん断ひび割れ発生荷重、 a ：せん断スパンである。 M_c は、シート補強していない基準

供試体の実験値を用いる。本実験の柱部材では、曲げモーメントが最大となる柱基部において最初に式(1)の条件が満足される。

せん断ひび割れ発生条件が満足されたら、その断面を起点に 45 度の角度で、ひび割れが発生するものとする（図-5 の B）。ただし交番載荷の影響は考えず、一方向に斜めひび割れを導入する。ひび割れを含む領域は、剛体回転モデルに移行させ、その変形はひび割れ先端を回転中心とした剛体回転により表し、負担するせん断力 V は、以下により計算する²⁾。

$$V = V_c + V_s + V_f \quad (2)$$

ここに、 V_c ：コンクリートが負担するせん断力であって、せん断ひび割れ発生荷重に等しいとする、 V_s ：せん断補強鉄筋のせん断力であって、簡単のためせん断補強鉄筋は降伏していると仮定し算定する、 V_f ：連続繊維シートが負担するせん断力である。 V_c と V_s は一定値とする。シ

ートの負担するせん断力 V_f は、既報において提案した手法を用いて、要素分割を行いシートの付着構成モデルに基づく剥離進展解析により、剛体回転モデルの回転角の関数として求める²⁾。 V_f の計算方法の詳細は既報²⁾に譲る。せん断ひび割れが発生していない部材上部の領域は、弾性解析を継続する(図-5のB)。

荷重の増加にともない、最初のせん断ひび割れ部分のシートが破断して終局となる場合(図-5のD)と、せん断ひび割れの発生していない上部の領域に新たなせん断ひび割れ発生する場合(図-5のC)とがある。これらは、以下の①②の条件のどちらが先に満足されるかにより判定する。

- ① せん断ひび割れを跨ぐシートのひずみが破断ひずみに達する。
- ② 上部の弾性領域で、式(1)が満足される。

①が先行する場合、その時点が終局状態となる(図-5のD)。②が先行する場合、新たなせん断ひび割れを設け、これまでと同様の計算を行う(図-5のC)。本モデルでは、せん断ひび割れの発生条件を曲げモーメントにより規定しているので、第二せん断ひび割れ発生荷重は第一せん断ひび割れ発生荷重よりも大きい。

なお、本研究では、コンクリートの圧縮破壊を考えず、部材が終局に至る条件をシートの破断のみとする。したがって、②の場合であっても、最終的には複数のせん断ひび割れ上で①の条件が同時に満足されて部材の終局となる(図-5のE)。

部材の載荷点変位 Δ は、以下により評価する。

$$\Delta = \Delta_c + \Delta_e \quad (3)$$

ここに、 Δ_c : せん断ひび割れ領域の剛体回転の水平変位への寄与分であり、幾何学的に計算できる、 Δ_e : せん断ひび割れの発生していない部分の弾性変形の水平変位への寄与分である。本計算手法によれば、理論的には任意の荷重段階における変位を求めることができるが、本研究では終局変位を興味の対象とする。

5. じん性予測モデルの検証

提案したシート補強 RC 柱部材のじん性予測モデルの検証を目的として、本研究における実験シリーズを解析し、実験値と比較した。計算では、シートの物性値は試験値をそのまま用い、付着構成モデル中の材料パラメータは標準的な値³⁾(最大付着応力 $\tau_u=7.5\text{ MPa}$ 、最大相対変位 $\delta_u=0.2\text{ mm}$) を用いた。せん断ひび割れ発生モーメント M_c は、シート補強していない基準供試体 n0 の実験値を用いた。

終局時における載荷点変位の計算値と実験値の比較を図-7 に示す。終局変位が大きな供試体については、あまり高い精度が得られなかった。これらは、n3 および n7 供試体であり、降伏変位の 11 倍の変位まで交番載荷したが、シートが破断せず耐力を保持していたため、以降、最終的にシートが破断し耐力が低下するまで片押し載荷したものである。

全体を通じて提案予測モデルは、定量的な精度に改善の余地があるものの、シートの種類と補強量によらず、順当に終局変位を予測できているといえる。

提案予測モデルの特徴は、シート補強 RC 柱の主要な耐荷メカニズムである、せん断ひび割れの形成とシートの剥離の進展に基づき、終局変位を予測することにある。図-6 は、せん断ひび割れとシートの剥離の進展状況の計算結果を示したものである。実験結果である図-4 と対比すると、ひび割れ状況は実験とよく似ていること、剥離領域の分布は多少異なるものの、破断ひずみの大きいシートほど剥離領域が広い傾向が一致していることがわかる。また、ひび割れが基部のみに発生する場合、剥離領域が小さくなる傾向も表現できている。

以上の結果より、提案モデルは、簡便であるにも関わらず、シート補強 RC 柱の終局変位を、耐荷機構に立脚して、満足の行くレベルで予測できるものと判断した。

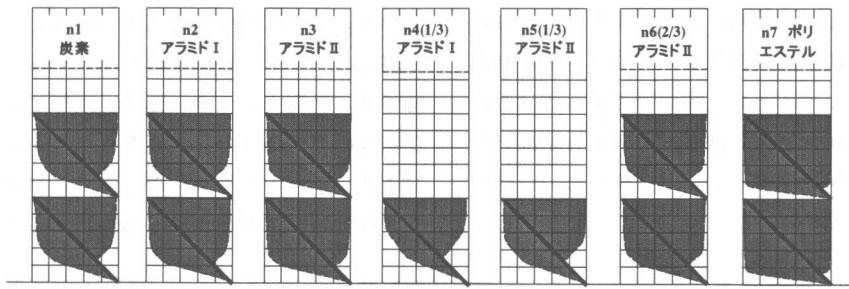


図-6 ひび割れおよびシートの剥離状況の計算結果

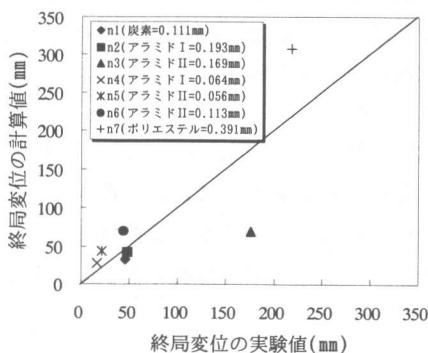


図-7 じん性予測モデルの検証

6. 提案予測モデルによる感度解析

6.1 補強量

本研究で提案したじん性予測モデルを用いて、各種要因がシート補強 RC 柱の変形性能に及ぼす影響について感度解析を行った。部材寸法等は、本研究の実験供試体とした。

まず、連続繊維シートの補強量（シートの厚さ）について検討した。シートの物性値を一定として、補強量を増加させていった場合の計算結果では、以下の順序で破壊モードが推移し、終局変位が増大する。

I : ひび割れ 1・未剥離破断

II : ひび割れ 2・未剥離破断(II-1)

または

ひび割れ 1・剥離破断(II-2)

III : ひび割れ 2・剥離破断

ここで、未剥離破断とは、シートの剥離が発生する前に破断が生じる場合である⁴⁾。破壊モード II-1 はひびみに対してシートに発生する力が極端に大きなもので、補強量が大きい場合に

のみ発生するため、今回実験で使用したアラミド II の物性値を入力しても現われなかった（図-8）。結果として、計算による破壊モードの推移は、実験で見られた破壊モードの推移と同じ傾向を示している。

図-8 では、同一破壊モードにおいては、シートの厚さを変化させても終局変位はほとんど変化していない。これは、シートの破断ひびみが一定である場合、シート破断時の剛体回転モデルの回転角も等しくなるためである。しかし、その間もシートの負担するせん断耐力は増加している。終局変位とせん断耐力を総合的に判断すると、補強量の増加により補強効果が大きくなるといえる。

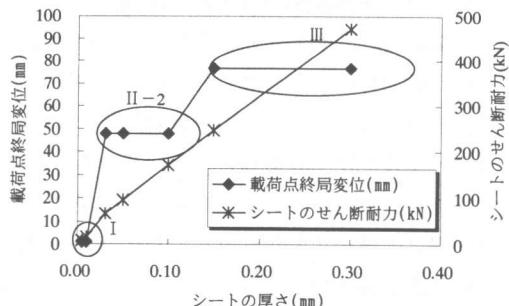


図-8 補強量の違いによる破壊モードと載荷点終局変位およびせん断耐力の推移

6.2 シートの破断ひびみ

続いて、シートの破断ひびみの影響について検討した。引張強度一定の条件とし、破断ひびみに応じて、弾性係数を変化させている。図-9 はシートの破断ひびみと部材の終局変位の関係を示したものである。シートの破断ひびみが

大きくなると、終局時の回転角が大きくなり終局変位も増加する。逆にシートの負担するせん断耐力は減少するため、補強量によっては上部にひび割れが進展する破壊モードから基部のみにひび割れが発生するモードに移行し、一時的に変位は減少する。

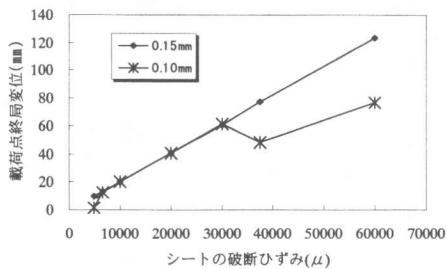


図-9 シートの破断ひずみと終局変位の関係

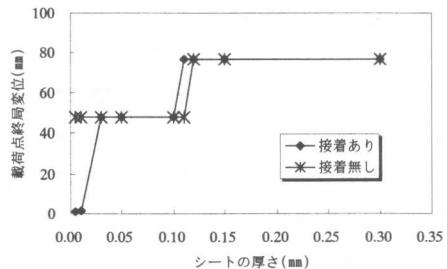


図-10 シートの厚さと終局変位の関係

6.3 シート接着の有無に関する検討

実験において変形性能の高かったものは結果的に全断面シートが剥離している。このことより、シートとコンクリートを接着せず、シートを閉合するだけでも補強効果が期待できると考えられる。そこで、シートを接着した場合としない場合の終局変位を計算し、比較・検討した。その結果を図-10に示す。

せん断耐力では、接着した場合で未剥離破断モードとなる場合は、接着しない場合と同程度であるが、剥離後に破断するモードとなる場合は接着した方がやや高いせん断耐力が得られることがわかっている⁴⁾。

終局変位では、接着した場合で未剥離破断モードとなる場合は極端に低下するため、接着しない場合の方が終局変位が大きくなる。しかし、剥離後に破断するモードとなる場合には同程度

となり、さらに補強量を増加させると、接着した場合の方が早く終局変位が大きくなる。受け持つせん断耐力が大きいため、上部のせん断ひび割れの発生条件が早く満たされるからである。つまり、シートを接着した方が小さな補強量で大きな終局変位が得られる場合があるといえる。

7. 結論

本研究では以下の結論を得た。

- (1) 連続繊維シート補強RC柱部材の終局変位は、せん断ひび割れとシートの剥離領域の進展状況に大きく関係することが、実験より明らかとなった。
- (2) 実験で得られた知見に基づき、シート補強RC柱部材の耐荷メカニズムに立脚して、終局変位を予測する力学モデルを提案した。実験結果の傾向を概ね再現できることを確認した。
- (3) 補強量が多いほど、またシートの破断ひずみが大きいほど、シート補強RC柱部材の終局変位が大きくなることを、本研究で提案したじん性予測モデルにより確認した。

謝辞

実験はアラミド補強研究会の委託により実施したものである。実験の計画、実施にあたり、中井裕司氏、樋口昇氏をはじめとする諸氏のご協力を得たことを付記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリートの補修強指針、コンクリートライブリー101, 2000.7.
- 2) 上原子晶久、下村 匠、丸山久一：連続繊維補強コンクリート部材のせん断耐力評価法に関する研究、土木学会論文集、No.648/V-47, pp.217-226, 2000.5.
- 3) 上原子晶久、下村 匠、丸山久一、西田浩之：連続繊維シートとコンクリートの付着・剥離挙動の解析、土木学会論文集、No.634/V-45, pp.197-208, 1999.11.
- 4) 新保学幸、下村 匠、丸山久一、上原子晶久：連続繊維シート補強部材のせん断耐力に関する感度解析、コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.313-318, 2000.7.