

V-35

連続繊維シートを用いたコンクリート部材の設計手法について

北海道大学工学部	学生員	当 目 雅 人
北海道大学工学部	正 員	佐 藤 靖 彦
北海道大学工学部	正 員	古 内 仁
北海道大学工学部	正 員	上 田 多 門
北海道大学工学部	正 員	角 田 與史雄

1. はじめに

既存のコンクリート構造物には、劣化により曲げ耐力やせん断耐力が不足し、補強を必要とする場合がある。劣化の原因としては、設計段階では予測できなかった外力の作用や、コンクリート及び鉄筋の経年劣化などがあげられ、クラックの発生、コンクリートの剥落等の様々な現象として現れる。こうした補強には鋼板の接着や巻き付けが多く用いられているが、施工性や経済性、防食性などの面で改善すべき点も多い。そこで、高強度、高耐久性、軽量などの特長を持った連続繊維シートを用いた補強に大きな期待が寄せられている。

このような連続繊維シートを補強材として用いる場合について、耐力試験や付着試験等の様々な実験結果が報告されているが、これを設計に反映させているものは少ないと言える。そこで、本研究ではこれまでに報告されている実験データを用い、連続繊維シートを曲げ補強材として用いる場合の設計方法について考える。

2. 連続繊維シートで補強したはりの曲げ耐力

2. 1 曲げ耐力の評価

現在までに報告されている研究において、連続繊維シートを曲げ補強材として用いた場合は、既存の曲げ理論が適用可能であるとされているものが多く見受けられる。そこで、曲げせん断試験を行っている文献において、断面諸元や材料特性が明らかにされている20体の供試体を用い、はり理論により曲げ耐力を計算した。

供試体の諸元を表-1に示す。これらの供試体における最大荷重及び曲げ耐力の計算値は表-2の通りである。図-1はシ

表-1 実験供試体の諸元

供試体	コンクリート 圧縮強度 (kgf/cm^2)	鉄筋 降伏強度 (kgf/cm^2)	鉄筋 弾性係数 ($\times 10^{-6}$ kgf/cm^2)	圧縮 鉄筋量 (cm^2)	引張 鉄筋量 (cm^2)	シート 引張強度 (kgf/cm^2)	シート 弾性係数 ($\times 10^{-6}$ kgf/cm^2)	シート 厚さ (cm)	シート 定着長さ (cm)	シート量
1	300	3840	2.04	0.633	0.633					無し
2	300	3840	2.04	0.633	0.633	30300	2.45	0.0100	20.0	1層
3	300	3840	2.04	0.633	0.633	30300	2.45	0.0100	20.0	1層
4	300	3840	2.04	0.633	0.633	30300	2.45	0.0100	20.0	1層
5	300	3840	2.04	0.633	0.633	30300	2.45	0.0100	20.0	2層
6	312	3600	2.00	2.104	2.140					無し
7	312	3600	2.00	2.104	2.140	27000	2.35	0.0097	60.0	1層
8	320	3070	2.00	5.730	8.590	35500	2.35	0.0165	110.0	1層
9	320	3070	2.00	5.730	8.590	35500	2.35	0.0165	110.0	3層
10	295	3500	2.10	2.530	3.800					無し
11	295	3500	2.10	2.530	3.800	46300	2.65	0.0165	110.0	1層
12	295	3500	2.10	2.530	3.800	46300	2.65	0.0165	110.0	3層
13	295	3500	2.10	2.530	3.800					無し
14	295	3500	2.10	2.530	3.800	43200	4.01	0.0165	110.0	1層
15	295	3500	2.10	2.530	3.800	43200	4.01	0.0165	110.0	3層
16	295	3500	2.10	2.530	3.800	43200	4.01	0.0165	110.0	3層 +周1
17	295	3500	2.10	2.530	3.800	43200	4.01	0.0165	110.0	3層 +ボルト
18	288	3985	1.92	8.590	8.590	30000	3.80	0.0165	75.0	2層+ U字1層
19	370	3467	1.92	20.270	20.270					無し
20	355	3467	1.92	20.270	20.270	33600	2.62	0.2917	240.0	3層 +周3層

Design Method for Concrete Members Reinforced with FRP Sheet

by Masato TOUME, Yasuhiko SATO, Hitoshi FURUUCHI, Tamon UEDA, Yoshio KAKUTA

ートで補強したはり供試体の終局耐力の実験値と計算値との比を表す。

シートの破断と剥離によって破壊を起こしているものに着目すると、終局時の破壊モードがシートの破断である場合の耐力比は0.5～0.8程度であるのに対し、シートの破断による場合の耐力

表-2 曲げ耐力

供試体	シート量	実験値 (t f)	破壊モード	計算値 (t f)	実験値/計算値
1	無し	2.89	圧壊	1.97	1.47
2	1層	4.64	シート破断	4.31	1.08
3	1層	4.29	シート破断	4.31	1.00
4	1層	4.83	シート破断	4.31	1.12
5	2層	5.68	せん断破壊	5.94	0.96
6	無し	3.20	不明	2.96	1.08
7	1層	4.90	不明	4.49	1.09
8	1層	22.90	シート剥離	27.03	0.85
9	3層	26.00	シート剥離	44.31	0.59
10	無し	9.50	不明	8.63	1.10
11	1層	13.20	シート剥離	23.04	0.57
12	3層	20.10	シート剥離	38.95	0.52
13	無し	9.00	不明	8.63	1.04
14	1層	17.20	シート剥離	21.99	0.78
15	3層	23.20	シート剥離	45.09	0.51
16	3層+周1層	27.60	せん断破壊	49.53	0.56
17	3層+ボルト	24.20	ボルトせん断	45.09	0.54
18	2層+U字1層	27.33	シート破断	40.93	0.91
19	無し	45.90	圧壊	40.60	1.13
20	6層	40.93	シート剥離	72.88	0.83

力比はほぼ1.0である。これより、シートが破断する場合の曲げ耐力は、はり理論により評価できるものと考えられる。

2. 2 シートが破断する場合の曲げ耐力

前節において、破壊モードがシートの破断による場合は、はり理論により曲げ耐力が評価可能であることを述べたが、ここでは、破断により破壊している4体の供試体（2，3，4，18番）について、さらに次の2点を考慮して曲げ耐力を評価することにする。

（1）鉄筋のひずみ硬化の影響 鉄筋のみで補強したはり供試体の荷重－変位曲線及び鉄筋の荷重－ひずみ曲線から、鉄筋のひずみ硬化が起こっていると予測される供試体（2，3，4番）については、鉄筋のひずみ硬化による耐力の増加を考慮して計算する。以上の供試体の無補強の場合（1番）において、実験値と計算値の差がひずみ硬化によるものであると仮定し、実験値と計算値が一致するように鉄筋降伏後のひずみ硬化係数を定め、その値を用いて曲げ耐力を計算する。鉄筋降伏後のひずみ硬化係数を表－3に示す。

（2）シートの実測ひずみの適用 表－3にシートの実測ひずみと破断ひずみを示す。シートが破断した場合、終局時の実測ひずみは引張強度から求めた破断ひずみよりも小さく、70％程度の大きさである。よって、実測ひずみが明らかな供試体（2，3，18番）については、破断ひずみを実測ひずみに置き換えて曲げ耐力を計算する。

以上の2点を考慮した計算結果を表－4に示す。表－4より、表-4 ひずみ硬化・実測ひずみ考慮での曲げ耐力

ひずみ硬化の起こっているものはこれを考慮することにより、実験値と計算値とがより近くなるといえる。実測ひずみを用いて計算したものは良好な結果が得られていない。これは、ひずみを計測した位置以外の部分で、より大きなひずみに達したために破壊がおこり、実測ひずみは正確に終局時のシートのひずみを示していないことが予測される。しかし、2，3，18番の3体は、破断ひずみを10％程度小さく見積もった方が良好な結果を得られる。はり部材中のシートの破断ひずみが引張強度より求めた破断ひずみより10％程度小さくなる理由としては、ひび割れが斜め方向に入った場合などにシートのひずみが不均一になるといったことが考えられる

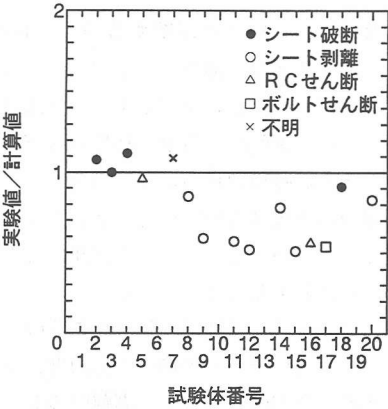


図-1 曲げ耐力比（無補強を除く）

表-3 破断時のひずみと鉄筋のひずみ硬化係数

供試体	実測ひずみ (μ)	破断ひずみ (μ)	ひずみ硬化係数 (kgf/cm ²)
2	9500	12367	0.16
3	7000	12367	0.16
4		12367	0.16
18	5796	7895	

供試体	破断ひずみ適用 (t f)	破断ひずみ適用 ひずみ硬化考慮 (t f)	実測ひずみ適用 (t f)	実測ひずみ適用 ひずみ硬化考慮 (t f)
2	4.31 (Fe/Fe)	4.85 (0.96)	3.76 (1.23)	4.17 (1.11)
3	4.31 (1.00)	4.85 (0.88)	3.27 (1.31)	3.54 (1.21)
4	4.31 (1.12)	4.85 (1.00)		
18	40.93 (0.91)		35.64 (1.05)	

が、本研究では明確にすることができなかった。

2. 3 シートが剥離する場合の曲げ耐力

図-1より、破壊モードがシートの剥離による場合は、既存のはり理論を適用して曲げ耐力を評価することは不可能である。表-5に既存の実験結果のシート剥離時の荷重、終局時の荷重、荷重の増加割合を示す。これより、シート剥離後の耐力の増加割合は0～15%程度であることが明らかであり、耐力の増加は比較的小さいと言える。よって、シートが剥離するときを終局時と仮定しても良いと考えられる。したがって、シートの剥離がどのような条件で起こるのかが分かれば、シートが剥離する場合の曲げ耐力を評価することができる。

どのような条件で剥離が起こるのかを考えた場合、剥離を支配する要素としてシートの平均付着応力度、ひずみ、すべり量を考えることができる。平均付着応力度は剥離時のシートの引張力をシートの付着面積で除した値である。ひずみは終局時のシートのひずみをはり理論により計算した。ただし、鉄筋のひずみ硬化が予想される供試体(11, 12, 14, 15, 20番)ではこれを考慮している。すべり量ははりの変形を無視し、付着区間でシートのひずみを積分して求めた。以上の値を剥離により破壊している7体の供試体(8, 9, 11, 12, 14, 15, 20番)について計算し、結果を表-6に示す。

ここで、ひずみが同じであっても付着長が異なればすべり量に大きな差が生じるため、剥離を考える上ではひずみよりもすべり量を考慮した方が有効であると思われる。よって、表-6の結果を用いて平均付着応力度とすべり量の関係を表したものが図-2である。図の曲線は回帰したものであり、剥離時の平均付着応力度とすべり量の関係を示していると考えられる。

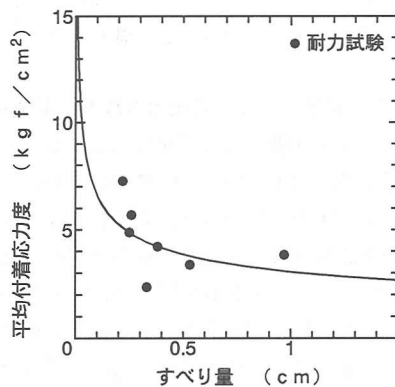


図-2 平均付着応力度-すべり関係(耐力試験)

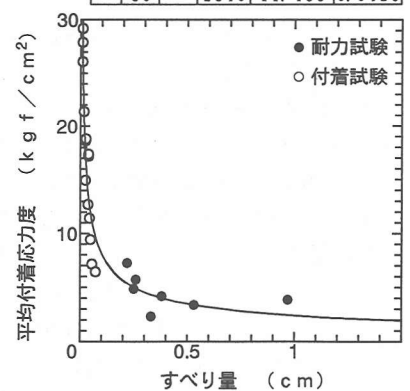


図-3 平均付着応力度-すべり量
(耐力試験・付着試験)

さらに、付着試験の結果において剥離時のシートの平均付着応力度、ひずみ、すべり量を計算し表-7に示す。表-6に表-7のデータを加えて描いたものが図-3である。図-2と図-3を比較すると、類似した曲線が描かれていることが分かる。したがって、この関係を用いれば剥離時の荷重、つまり終局耐力を評価できると言えよう。

2. 4 破壊モードの設定

前節まででは破壊モードを区別して曲げ耐力を評価したが、本節では破壊モードに違いが生じる条件を検討する。表-8はシートの破断により破壊する供試体(2, 3, 4, 18番)の平均付着応力度、ひずみ、すべり量を計

表-5 剥離後の耐力増加割合

供試体	剥離時の荷重 (t f)	終局時の荷重 (t f)	耐力増加割合 (%)
8	20.0	22.9	14.5
9	25.5	26.0	2.0
20	60.4	60.4	0.0

表-6 剥離時のひずみ・平均付着
応力度・すべり量

文献 番号	付着長 cm	シート 量	ひずみ (μ)	平均付着応力度 (kgf/cm ²)	すべり量 (cm)
1)	4	1層	6142	35.0	0.0123
		10	7633	17.4	0.0382
3)	2	1層	4077	45.7	0.0040
		4	5118	29.2	0.0102
		6	5645	21.4	0.0169
		8	6580	18.8	0.0263
		10	7546	17.2	0.0377
6)	5	1層	3465	27.900	0.0087
		10	4626	18.625	0.0231
		15	4738	12.717	0.0355
		20	4676	9.413	0.0468
		25	4434	7.140	0.0554
	10	3層	4769	6.400	0.0715
		10	2161	26.100	0.0108
		20	2474	14.938	0.0247
		30	2840	11.433	0.0426

表-7 付着試験のひずみ・平均付着
応力度・すべり量

供試体	剥離時のひずみ (μ)	平均付着応力度 (kgf/cm ²)	すべり量 (cm)
8	9606	3.386	0.53
9	4583	4.874	0.25
11	5926	2.356	0.33
12	4775	5.694	0.26
14	6991	4.205	0.38
15	4022	7.258	0.22
20	8042	3.841	0.97

算したものである。図-4では、剥離時の平均付着応力度とすべり量を表した図-3に、破断時の値も加えて表している。

図-4において、荷重が増加すると平均付着応力度、すべり量とともに増加する。この時の増加の割合はシートの弾性率や付着長、断面積などにより異なる。この値が曲線上に達したときに剥離が起こると言えるのだが、それ以前にシートのひずみが破断ひずみに達してしまえばシートは破断すると考えられる。

しかし、図-4において、ある程度のばらつきを考慮したとしても、破断時の値の1つは曲線を大きく超えている。この供試体はシートをU字型に貼り付けて補強を行っているため、剥離が起こらずに破断に至ったと考えられる。

本研究において、破壊モードの違いについては、データが少ないために結論づけることはできない。

3. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) シートの破断によって破壊に至る場合は、既存のはり理論を用いて曲げ耐力を評価することができる。しかし、シートの引張強度を90%程度に低減して考えた方が安全と言える。
- (2) シートの剥離によって破壊に至る場合は、剥離が起きた時を終局時と考え、剥離時のシートの平均付着応力度とすべり量の関係を用いて曲げ耐力を評価することができる。
- (3) 破壊モードの違いは、シートの平均付着応力度とすべり量が剥離時を示す曲線上に達したときに剥離による破壊が起こり、曲線に達するまでにシートのひずみが破断ひずみに達した場合は破断による破壊が起こると考えられる。

【参考文献】

- 1) 岡野素之, 木村耕三, 小島克朗 (大林組技術研究所) : 炭素繊維貼付けによる既存部材の補強に関する研究 (その1), 大林組技術研究所報, No. 43
- 2) 谷木謙介, 田中常雄 (三井化成総合研究所), 木村耕三, 小島克朗, 武田寿一 (大林組技術研究所) : 炭素繊維貼付けによる鉄筋コンクリート部材の補強に関する研究 (その1), 日本建築学会大会学術講演 (1988)
- 3) 宇治公隆, 横田和直 (大成建設技術研究所), 池田尚治 (横浜国立大学) : 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 (1992)
- 4) 酒井研二, 打田靖夫 (関西電力), 岡本潤二, 吉田晴亮 (近畿コンクリート工業), 小松憲一 (東燃) : 炭素繊維シートで補強したRC梁の曲げ性能, 土木学会第47回年次学術講演会 (1992)
- 5) (東燃) : トウシート補強した鉄筋コンクリート梁の曲げ強度, FORCA トウシート技術資料
- 6) 神野靖夫 (清水建設技術研究所), 坂口昇 (清水建設技術開発センター), 久住光男 (清水建設技術研究所) : コンクリート梁のせん断補強試験実験報告書 (1994)
- 7) 大野了 (大林組), 安藤博文, 前田良文, 緒方紀夫 (日本道路公団), 小島克朗 (大林組) : 曲げを受けるシート状CFRPとコンクリートとの付着性状, 土木学会第49回年次学術講演会 (1994)

表-8 破断時のひずみ・平均付着応力度・すべり量

供試体	破断時のひずみ (μ)	平均付着応力度 (kgf/cm^2)	すべり量 (cm)
2	12367	15.15	0.12
3	12367	15.15	0.12
4	12367	15.15	0.12
18	7895	19.80	0.30

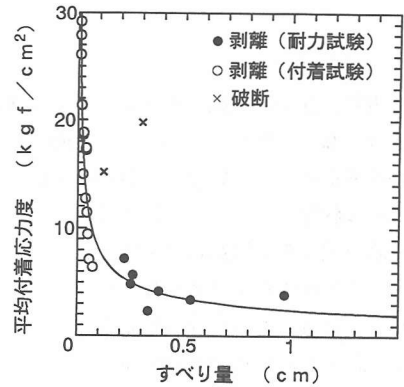


図-4 平均付着応力度-すべり量 (剥離時・破断時)