

論文 テンション繊維シートを用いた PRC 部材のせん断補強効果

出雲 健司*1・浅水 俊博*2・佐伯 昇*3・志村 和紀*4

要旨：本研究は桁のウェブに2方向のアラミド繊維シート、炭素繊維シートを貼り、繊維の違い、シートに与えたプレストレス量の有無によるせん断補強効果を検討したものである。実験の結果、繊維の違いによってせん断補強効果の違いは出たが、破壊荷重の大きな違いは出なかった。シートを貼ることにより桁の耐力の増加がみられ、シートにプレストレスを導入することにより、さらに桁の耐力の増加がみられた。また、シートによる耐力の増加分とプレストレスによる耐力の増加分の算定を行ったが、概ね実験値を評価することができた。

キーワード：PRC部材、アラミド繊維シート、炭素繊維シート、せん断補強効果

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の劣化や活荷重の増大による補修・補強が大きな問題となっている。これらの問題を解決するために連続繊維シートによる補修・補強の研究が盛んに行われている。本研究は、桁のウェブに2方向のアラミド・炭素繊維シートを貼り、繊維の違いやシートに与えるプレストレス量の違いなどにより、そのせん断補強効果を検討したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び桁の形状

本研究で使用した炭素繊維シート（以下、CFS）とアラミド繊維シート（以下、AFS）の物性値をTable 1に示す。使用したCFSとAFSは桁に対しての長さ方向、高さ方向にそれぞれ1：1の割合で繊維が入っている。また、使用したプライマーと接着剤はともにエポキシ系樹脂である。実際に使用した桁の形状ならびにゲージの測定位置をFig.1に示す。桁の断面はT型であり、主鉄筋はSD345 D19、圧縮鉄筋とスターラップはともにSD295 D6を使用しており、スターラップは20cmの間隔で配置した。シートはFig.1に示されるように、桁

Table 1 シートの物性値

繊維の種類	CFS	AFS
比重	1.79	1.39
厚さ(mm)	0.112	0.144
引張強度(N/mm ²)	3879	2493
引張弾性率(kN/mm ²)	242	86
破断伸度(%)	2.1	3.1

Table 2 桁の種類

供試体番号	シート	プレストレス導入量(kN)
96-N-0	なし	—
96-C-0	CFS	0
96-C-15	CFS	15
96-A-0	AFS	0
96-A-15	AFS	15

のウェブに接着した。載荷方法は中央一点載荷で、静的試験を行った。また、本研究で使用した

*1 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻、工修（正会員）

*2 富山県庁、工修

*3 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻、工博（正会員）

*4 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻、工修（正会員）

桁の種類をTable2に示す。ここで、プレストレス導入量はシート1枚に対する量である。なお、桁は全てシートが剥離した後にせん断破壊するように設計した。

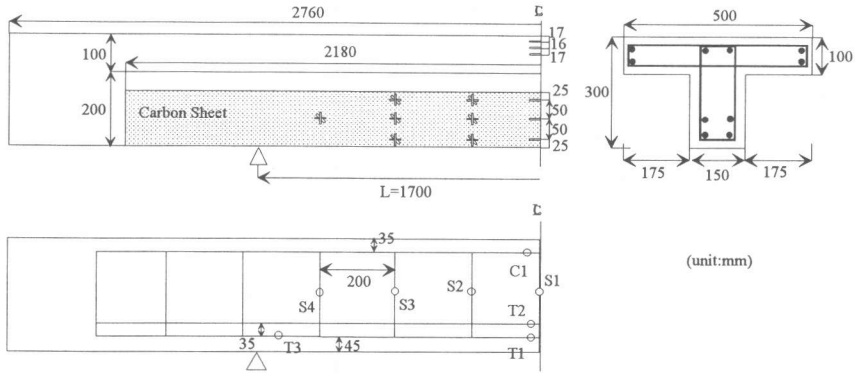


Fig.1 桁の寸法

2.2 プレストレスの導入法

プレストレスの導入法はFig.2に示されるように大きく分けて4つの過程がある。第一段階として、Fig.2(a)に示されるように、桁のウェブをディスクサンダーで表面処理した後にプライマーを塗り、約一日養生した。第二段階として、Fig.2(b)に示されるように、桁の一方の端部のみ接着剤でシートを貼り、板状の固定金具で桁にシートを挟み込み、ボルトで金具を固定した。また、一方のウェブ面のシートの固定も同時に行った。第三段階として、この固定端のシートが完全に接着した後、ウェブ全体に接着剤でシートを貼り付け、接着剤の硬化前に、Fig.2(c)に示されるように、もう一方の端部にプレストレス導入用のフレームを取り付け、シートを固定するためにローラーにシートを巻き付け、引張力に対して摩擦力によって固定する。また、シートを巻き付けたローラーが回転しないようにストッパーで固定する。Fig.2(d)に示されるように、フレームにセンターホールジャッキを取り付け、引張用鉄筋とローラーを連結させて、ローラーを引張ることによりプレストレスを導入する。接着剤が硬化し、シートが接着された後に、プレストレスの導入装置を外し、実験を行った。

3. シート剥離によるせん断破壊時の耐力算定法

本研究ではシート接着したせん断耐力 V をコンクリートのみが受け持つせん断耐力 V_{cd} 、スターラップが受け持つせん断耐力 V_{sd} 、プレストレスが受け持つせん断耐力 V_{ped} 、シートが受け持つせん断耐力 V_{fd} の4つに分けて算定を行い、式(1)に示す。[1]

$$V = V_{cd} + V_{sd} + V_{ped} + V_{fd} \quad (1)$$

式(1)の各項は、式(2)から(4)で表される。

$$V_{cd} = 0.20\beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_{nt} \cdot \sqrt[3]{f_c} \cdot b_w \cdot d \quad (2)$$

ここで、 $\beta_d = \sqrt[3]{1/d}$ 、 d : 有効高さ(m)、 $\beta_p = \sqrt[3]{100p_w}$ 、 $p_w = A_s/(b_w d)$

A_s : 主鉄筋の断面積(mm²)、 b_w : ウェブの幅 (mm)、 $\beta_{nt} = \sqrt{1 + \sigma'_{nd}/f_{td}}$
 σ'_{nd} : 軸方向による平均圧縮応力(N/mm²)、 f_{td} : コンクリートの引張強度(N/mm²)
 f_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

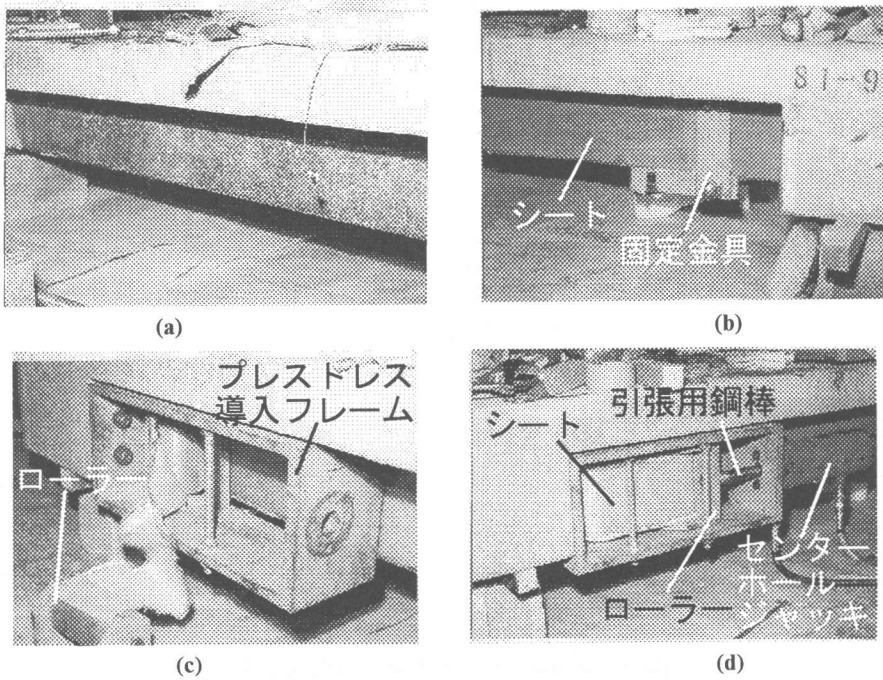


Fig.2 プレストレスの導入過程

$$V_{sd} = \frac{A_{sw} \cdot \sigma_{sy} \cdot z}{s \cdot \tan \alpha_n} \quad (3)$$

ここで、 A_{sw} 、 σ_{sy} 、 s : スターラップの断面積(mm²)、降伏強度(N/mm²)、間隔(mm)

$z = d/1.15$ 、 d : 有効高さ(mm)、 α_n : 斜めひび割れ角度[2]

$$V_{ped} = P_{ed} \cdot \sin \alpha_p \quad (4)$$

ここで、 P_{ed} : プレストレス量(N/mm²)

α_p : 軸方向緊張材が部材軸となす角度

(シートによる面的効果を見逃し、ここでは0°としている)

V_{sd} は以下に示すように算定を行った。

先の論文[3]において、普通丸鋼の付着強度が総合的に判断してシートの付着強度に相当であることを述べて、用いたが今回はこれをもう少し正確に評価するためにシートの一軸試験を行った。また、他の試験結果[4~7]も取り入れ、コンクリートの圧縮強度とシートの種類別を考慮した付着強度 B_{cal} (kN)の式を次式[8]に示す。

$$B_{cal} = (3.4f_c^{2/3} + 69.0) \cdot E_f \cdot L \cdot b_f \cdot t_f \times 10^{-6} \quad (\text{AFS}) \quad (5a)$$

$$B_{cal} = (3.8f_c^{2/3} + 15.2) \cdot E_f \cdot L \cdot b_f \cdot t_f \times 10^{-6} \quad (\text{CFS}) \quad (5b)$$

ここで、 L : 付着長 (mm) ただし、 $L \geq 100$ の時は $L = 100$ 、 t_f : シートの厚さ (mm)

E_f : シートの引張弾性係数 (kN/mm²)、 b_f : シートの幅 (mm)

また、Fig.3に96-A-0の剥離による破壊状況の破壊時の写真とひび割れ図を示す。Fig.3(a)の写真に示されるようにシートに黒い線で囲まれた部分が剥離して、せん断破壊に至った。破壊過程はひび割れが上フランジまで成長し、ひび割れが入った場所のシート上端部がまず剥がれだし、徐々に剥離がひび割れから遠ざかるように広がっていき、軸直角方向に見てシートの高さ半分のところで最大荷重に至り、桁が破壊した。他の桁でも同様な破壊形態を示し、文献[9]でも同様な破壊形態が示されている。この理由として、シートは繊維方向のみに力を分担し、繊維の長さが短い橋軸直角方向のシートが剥がれる。ひび割れ発生部分ではせん断力による引張力が橋軸直角方向に作用している。したがって、Fig.4に示されるその直角三角形を有効付着面積とした。Fig.3(b)のひび割れ図でもほぼそのような形状を表している。

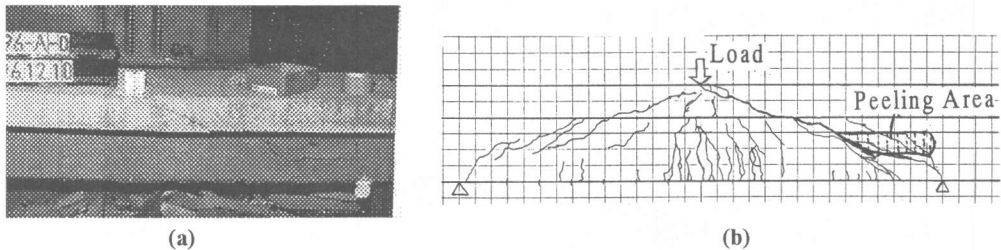


Fig.3 96-A-0のシート剥離後の破壊状況

以上のことより、式(5a),(5b)の $L \cdot b_f$ を有効付着面積と置き換えてトラス理論を適用すると、 V_{fd} は次式(6)で表される。

$$V_{fd} = B_{cal} \cdot \frac{z}{h_c} \cdot \frac{h_f}{h} \quad (6)$$

ここで、 h_c : 軸直角方向のひび割れ長さ (mm)

h_f : シートの高さ (mm)、 h : 桁高 (mm)

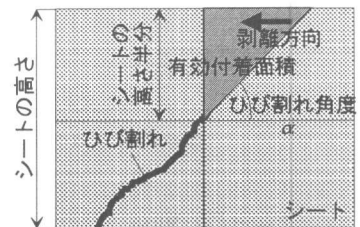


Fig.4 有効付着面積の概略図

4. 実験の結果と考察

実験と算定式の結果をTable 3に示す。桁は全てシート剥離直後、破壊に至っていった。この表のシート増加分とはシートによって桁の耐力が増加した分を示しており、式(6)によって算定を行い、プレストレス増加分とはプレストレスをシートに導入することによって桁の耐力が増加した分を示しており、式(2)の β_m による V_{cd} の増加分である。

この表に示されるように、シートを貼ることにより、耐力の増加がみられ、シートにプレストレスした場合はを導入した桁の方が導入していない桁に比べて耐力の増加しており、より補強効果が上がるのではないかとと思われる。また、繊維の違いによる耐力の増加の違いはほとんどないように思われる。

本研究で使用したシート剥離によるせん断耐力の算定式だが、この表に示されるように、実験値を評価できなかつた。これは破壊形式が複雑であるとともに、曲げ、せん断、軸力という力が同時に加わっており、それぞれ複雑な相関関係を持っていると思われる。したがって、これらの相関関係を解明していくのが今後の課題と思われる。しかし、シートによる増加分とプレストレスによる増加分は概ね評価できていると思われる。

Table 3 実験と算定式の結果

供試体 番号	f_c (N/mm^2)	f_{td} (N/mm^2)	a_n	計算値 (kN)				実験値 (kN)		
				曲げ耐力 [3]	剥離せん 断耐力	シート 増加分	プレスト レス 増加分	破壊 荷重	シート 増加分	プレスト レス 増加分
96-N-0	46.4	4.03	27.0	254	197	-	-	294	-	-
96-C-0	52.0	4.12	31.1	296	202	14.9	-	307	13	-
96-C-15	40.3	1.98	31.4	291	211	13.0	20.1	328	13	21
96-A-0	60.3	3.21	29.2	281	212	13.1	-	305	11	-
96-A-15	42.5	2.90	29.3	278	212	11.9	14.4	327	11	22

Fig.8に主鉄筋のひずみ（ゲージT1）を示す。このグラフに示されるようにCFS、AFS共にシートをウェブに貼ってもほとんど主鉄筋のひずみが軽減されておらず、曲げに対しての補強効果はこの桁ではほとんど期待が出来ないと思われる。シートの断面積を鉄筋の断面積に置き換えて計算して見ると、桁の中の鉄筋の断面積と比較してほとんど増加していないので、主鉄筋の断面積とシートを主鉄筋の断面積に換算した差が高い桁では曲げに対してはほとんど効果がないのではないかとと思われる。ただし、96-C-15、96-A-15では他の桁と比べて主鉄筋の降伏荷重が上がっているので、プレストレスによる曲げ補強効果は多少あると思われる。

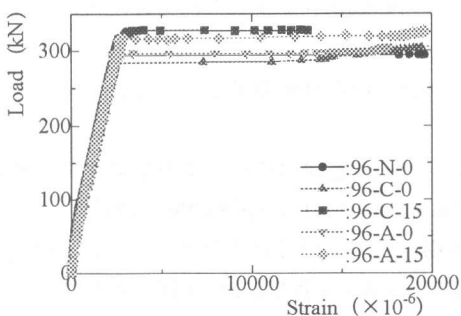


Fig.8 主鉄筋のひずみ（ゲージT1）

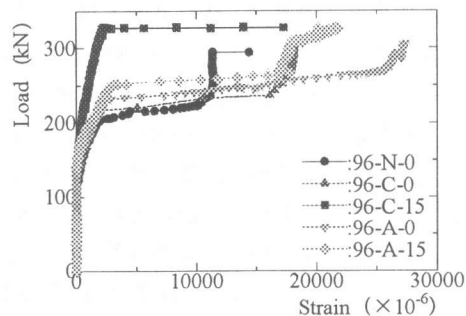


Fig.9 スターラップのひずみ（ゲージS3）

Fig.9にスターラップのひずみ（ゲージS3）を示す。このグラフに示されるようにプレストレスを導入せずに、ただウェブにシートを貼った桁96-C-0、96-A-0は同一荷重でのスターラップのひずみの軽減がほとんどないが、シートにプレストレスを導入した桁96-C-15、96-A-15は明らかにスターラップのひずみを軽減させており、せん断補強効果が表れていると思われる。スターラップの降伏荷重を比較すると、96-C-0以外の桁は共に降伏荷重を上げており、シートによるせん断補

強効果が表れていると思われる。特に96-C-15がスターラップの降伏荷重を大幅に上げており、また、同一荷重でのひずみの軽減量も多い。ただ、96-A-15などは見られるような降伏後、スターラップのひずみ硬化により荷重を更に分担している部分が無く、96-C-15ではひずみ硬化が起きる前にシートがひび割れを拘束しきれなくなり、シートが先に剥離してしまったため、96-N-0と96-C-15の降伏荷重の向上分ほど破壊荷重が上がらなかったと思われ、結果的にひずみ硬化により荷重が更に上がった96-A-15とほぼ同じ荷重で破壊している。

5. まとめ

さらに今後実験が必要であるが、この実験の範囲内において次のようなことが言える。

- (1) 桁にシートを貼ることにより、桁の耐力が増加し、せん断補強効果があった。また、シートにプレストレスを導入することにより更に桁の耐力が増加し、せん断補強効果があった。
- (2) 同一プレストレス量の場合、炭素繊維の方がアラミド繊維シートと比べて、同一荷重におけるスターラップのひずみ軽減量が多く、降伏荷重の向上性は良いと思われる。
- (3) 本研究で使用したシート、プレストレスによる耐力の増加分の算定式は概ね実験値を評価できた。
- (4) 破壊パターンが複雑であり耐力に対する評価は更に実験が必要である。

【謝辞】

本研究に際し、ご助力を得たショーボンド建設(株)の江口和雄氏、日本高圧コンクリート(株)の秦滋康氏および白石豊、山口雅史(北海道大学工学部)に深謝いたします。

参考文献

- [1] コンクリート標準示方書(平成8年版)設計編、土木学会
- [2] 佐伯昇, 高田宣之, 藤田嘉夫: ねじり荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の耐力、土木学会論文集、第390号、V-8、pp.123-130、1988.2
- [3] 甄暁青, 佐伯昇, 秦滋康: 連続繊維シートによるPRC桁の補強効果について、セメント・コンクリート論文集、No.50、pp.340-345、1996
- [4] 浅水俊博, 出雲健司, 佐伯昇, 志村和紀: コンクリートと炭素性シート及びアラミド繊維シートの付着特性、土木学会北海道支部論文報告集、第53号(A)、pp.586-589、1997
- [5] 浅野靖幸, 佐藤靖彦, 上田多門, 小野定: 炭素繊維シートの付着特性について、JCI北海道支部新素材のコンクリート構造物への利用シンポジウム論文報告集、pp.75-80、1996
- [6] 東燃(株): 炭素繊維シートとコンクリートの定着強度試験
- [7] (株)大林組技術研究所: シート状CFRPとコンクリートの付着試験、CRS研究会技術資料No. 3
- [8] 浅水俊博: 連続繊維シートによるRC桁の剥離せん断に関する研究、北海道大学工学研究科土木工学専攻修士論文、1997
- [9] 宇治公隆: シート状炭素繊維補強材を用いた既存鉄筋コンクリート部材のせん断耐力向上効果に関する研究、コンクリート工学論文集、第3巻第2号、pp.37-47、1992