

V-39

FRPシートによるPRC桁の補強効果について

北海道大学大学院 学生員 甄 曉青
 北海道大学工学部 正 員 佐伯 昇
 北海道大学工学部 正 員 志村 和紀
 日本高圧コンクリート 正 員 秦 滋康

1. はじめに

現在、コンクリート構造物の補修、補強が大きな問題となっている。その理由として、20~30年以上経つ構造物が多くなったこと、重荷重の交通量が多くなったこと、また、活荷重のレベルアップがなされることになったことなどが挙げられる。そのため、コンクリート構造物の耐力向上、あるいは補修工法の開発が必要となり、より高強度、高性能、軽量化の新しい材料の検討と研究が始められている。工業材料として広く使われている高分子新材料、FRP材料あるいはそれらの複合材料の開発が進められてきて、今日において、土木分野における補強、補修材料にも用いるようになってきた。このような材料は確かに高価であるが、例えば、94kgの鋼板とわずか4.5 kgのFRPをどちらを選ぶか、また、現場作業において、材料コストの増加に対し、人力コストは80%というのが事実である¹⁾。つまり、軽量化FRPを使うことによって、施工を容易にするし、また、地震の重量に対する影響を減らす等大きなメリットを生むこともできる。

現在、鋼板接着法あるいは外ケーブルの補強工法などが取られている、一方、FRPシートによるの接着工法の開発も進められている。

特に最近、シート状の連続繊維補強材が開発されており、コンクリート構造物に貼り付け、せん断補強や、既存構造物の補修を行う研究や施工が進められていて、実用化に於ける研究が盛んである。それぞれの研究の中には、幾つか理論的な研究があるが、付着などの複雑な問題点があつて、より合理的な設計理論が明らかでない現状である。

本研究では、せん断及び曲げ耐力の向上を目指すため、一方向及び二方向繊維シートに着目し、FRPの高強度などの特徴を有効に利用するため、また、ひび割れに対する補修効果があると考えられ、繊維シートを緊張材として、シートにプレストレスを導入し、鉄筋コンクリート構造物のウェブに貼り付け、コンクリート構造物への補強効果を検討したものである。

表-1 繊維シートの物性値

		一方向繊維シート	二方向繊維シート	
		Sheet 横のみ	Fiber 縦 横	
公称幅	(cm)	14.6	15	15
繊維断面厚さ	(cm)	0.102	0.0289	0.0289
使用繊維		ケブラー49	ケブラー49	ケブラー49
単位幅繊維量	テール本/cm	2,840×200	2,840×13.3	2,840×7.6
繊維目付量	(g/m ²)	—	420	240
単位幅繊維断面積	(mm ² /cm)	—	2.89	1.65
単位幅引張破断荷重	(kgf/cm)	—	630	357
破断伸度	(%)	3.1	2.95	2.95
引張強度	f (kgf/cm ²)	6604	21800	21600
引張弾性率	E (kgf/cm ²)	2.13×10 ⁵	7.39×10 ⁵	7.26×10 ⁵

2. 実験方法

2.1 使用材料

(1)連続アラミド繊維(AFS)

本実験では一方向及び二方向アラミド繊維シートを用いて、緊張材として使用した。

Strengthening of Prestressed Reinforced Concrete Beam with Aramid Sheet
 by Zhen Xiaoqing, Noboru SAEKI, Katunori SHIMURA and Shigeyasu HATA

本実験で使われているアラミド繊維はケブラー49 (ケブラーはポリ-p-フェニレンテトラアミド (PPTA) からなる繊維である) の合成繊維であり、強靱、炭素繊維より軽く、湿潤時にも強度低下が少なく、伸長率が高く、しわがよりにくい、疲労に対しても強いという特徴があり、耐衝撃性も優れており²⁾、また、取り扱いやすいというメリットをもっている。物性値を表-1に示す。

AFSの貼り付け手順は次の通り：

(AFSを緊張する装置図を図-1に示す。)

- a. コンクリート桁のウェブにデスキャンダーをかけ、コンクリート表面の剥離剤等を除去し、平らにする。
- b. 貼り付ける面にローラにてプライマーを塗る。
- c. 2液型エポキシ樹脂繊維含浸接着剤CE剤を所定の配合比で混合する。
- d. シートの先端に接着剤にてコンクリート桁の一端を定着し、また固定金具で固定する。約2,3日接着剤を硬化させる。
- e. コンクリートの貼り付ける面にCE剤をローラで均一塗布する。
- f. シートにもCE剤をローラで均一塗布する。
- g. シートをコンクリート塗布面に貼り付け、そして、他端に固定金具で仮止める。
- h. 含浸ローラでシートの上から再度CE剤を塗布する。
- i. 次に、仮止め金具を本締めて、速やかに緊張金具を組み付ける。装置のローラにてテープでシートのハジをはり、巻き付けて、固定ピンでローラの回転を止める。
- j. 片方のセンターホルダジャッキにロードセルを設置しUCAMに接続し荷重を計測しながら、油圧ジャッキでシートに指定のプレストレスを与えていく。
- k. 硬化まで、常温で約一週間を必要である。

(2) コンクリートと鉄筋

コンクリート及び鉄筋の試験結果³⁾を表-2と表-3に示す。

表-2 コンクリート試験結果

供試体	弾性係数 E (kg/cm ²)	圧縮強度 f _{cb} (kg/cm ²)	引張強度 f _{ct} (kg/cm ²)
A1-0	3.158*10 ⁵	575	27
A1-1	3.158*10 ⁵	554	32
B1-0	3.158*10 ⁵	500	24
B1-1	3.158*10 ⁵	569	35
B2-0	2.59*10 ⁵	433.95	31.69
B2-1	2.84*10 ⁵	497.76	31.99

表-3 補強筋試験結果

	公称断面積 A (cm ²)	弾性係数 E (kg/cm ²)	降伏強度 σ _{sy} (kg/cm ²)
引張鉄筋 D16	1.986	1.81*10 ⁶	3776
引張鉄筋 D13	1.267	1.812*10 ⁶	3860
圧縮鉄筋 D10	0.7133	1.72*10 ⁶	3505
スターラップ [*] D10	0.7133	〃	〃

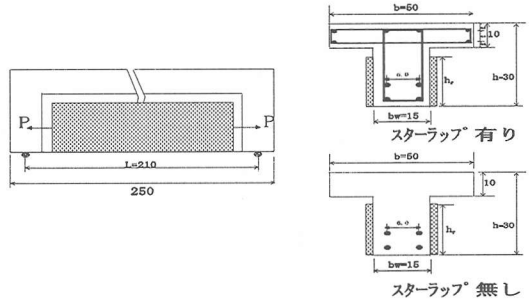
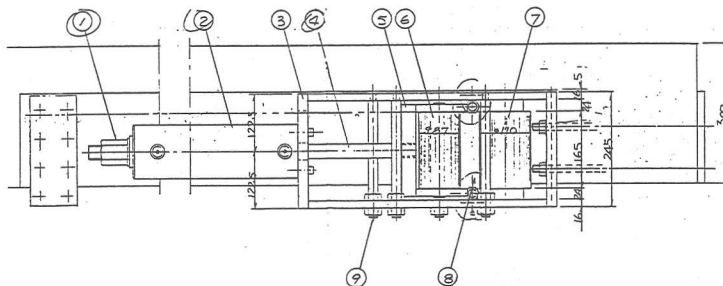


図-2 供試体形状図

FRP緊張装置及び金具図面



1	コンクリート、鉄筋	SS20	2	
2	FRP緊張プレート	SS20	2	
3	FRP押プレート	2	H18 SS20	
4	圧縮ローラ	2		
5	引張ローラ	2		
6	片側固定用FRP	SS20	2	
7	チェーンバネ	SNM1	2	既設品
8	3/4インチ SS20	1		
9	2センチネジ	2	CR0H20	
10	ナット	2	既設品	

図-1 AFS用緊張装置

2.2 供試体の形状・寸法

供試体の形状・寸法、スターラップの配置状況、AFSの配置状況を図-2に示す。供試体はT形断面、ウェブ幅は15cm、高さ30cm(有効高さは23.95cm)で、供試体長さは250cmである。

本実験では、基本となるスターラップ有りの曲げ破壊体タイプAとスターラップ無し of せん断破壊タイプB(せん断スパン・有効高さ比は4.3とした)。

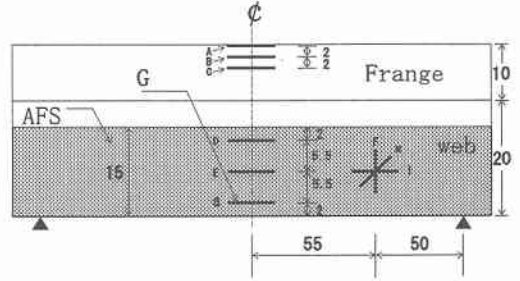


図-3 供試体のゲージの位置

2.3 載荷方法及び測定項目

実験は1点集中載荷とし、荷重を破壊まで単調増加させた。

供試体中央部のたわみを変位計で測定し、コンクリートとシートのひずみを測定した、位置は図-3に示す。

3. 解析方法

本研究では三つの破壊パターンを検討し、補強効果を解析した。

3.1 曲げ補強効果

一般的に、曲げ破壊形式はシートの破断による圧壊とコンクリートの破壊による曲げ破壊二つと考えられる。

(1)コンクリートが圧壊し、シートが破壊しない場合の曲げ耐力の算定にはプレストレストコンクリート部材の設計を準用した。

シートはその断面の重心を用いて、引張緊張材として算定した。

コンクリートの圧壊による曲げ破壊条件はシートの最下端ひずみ ϵ_{fe} がシートの終局ひずみ ϵ_{fb} 小さいこと。

$$\epsilon_{fe} \leq \epsilon_{fb} \quad \text{----- (1)}$$

荷重作用時のシート重心でのひずみは

$$\epsilon_f = \epsilon_{fpv} + \epsilon^*_f + \epsilon_{cp} \quad \text{----- (2)}$$

ϵ_{cp} はプレストレスによるコンクリートのひずみで、比較小さい。

$$\epsilon_f = \frac{P}{A_f E_f} + \frac{1-k-\frac{h_f}{d}}{k} \epsilon_{cu} + \epsilon_{cp} \quad \text{----- (3)}$$

つり合い条件から中立軸 k は： $k = A + \sqrt{A^2 + C}$

$$\text{ここで、 } A = \frac{[P_F E_f (\epsilon_{fpv} + \epsilon_{cp} - \epsilon_{cu}) + P \sigma_{sy} - \rho' E_s \epsilon_{cu}]}{2\alpha f_{cb}} ; C = \frac{[\epsilon_{cu} (f P_F E_f + a' \rho' E_s)]}{\alpha f_{cb}}$$

破壊モーメントは次式で表す。

$$M_{cb} = T_s y_c + T_f y_f + T_{s1} (y_c - y_{s1}) \quad \text{----- (4)}$$

(2)シートの最下端の破壊条件は

$$\epsilon_{fe} = \frac{P}{A_f E_f} + \frac{h-kd}{kd} \epsilon_{cu} + \epsilon_{cp} \quad \text{----- (5)}$$

ここで、 ϵ_{fb} ： シートの破断伸度； ϵ_{cu} ： コンクリートの終局ひずみ $a' d$ ： 圧縮鉄筋の高さ

ϵ_{fe} ： シートの最下端のひずみ P ： 有効プレストレスト力； ρ' ： 圧縮鉄筋比

E_s ： 鉄筋のヤング係数； E_f ： シートのヤング係数； h_f ： シートの幅；

d ： 桁の有効高さ； A_f ： シートの断面積； T_s ： 引張鉄筋の引張力；

T_{s1} ： 圧縮鉄筋の引張力； T_f ： FRPシートの引張力。

3.2 せん断補強効果

せん断耐力の算定式は次式を使用した。

$$V_{max} = V_{sd max} + V_{cd} \quad \text{----- (6)}$$

ここで、

$$V_{sd \max} = \left(\frac{A_{sw}}{s} + 2\gamma t_f n_b \frac{h_f}{h_w} \right) \frac{z \sigma_{sy}}{\tan(\alpha_n)}$$

$$V_{cd} = f_{vcd} b_w d \quad (f_{vcd} \text{ は示方書}^3) \text{ の式を用いた})$$

σ_{sy} : 鉄筋の降伏強度

$$n_f : \frac{E_f}{E_s}, \quad n_b = \frac{\sigma_{fb}}{\sigma_{sy}} \quad (\sigma_{fb} \text{ はシートの破壊強度})$$

t_f : 繊維シートの厚さ

s : スターラップの間隔

z : $d/1.15$

A_{sw} : スターラップの断面積

h_{sw} : スターラップの高さ

b_w : ウェブの幅

$$\alpha_n : \tan^4(\alpha_n) = \frac{b_w z / A_l + n}{s b_w / A_v + n}$$

γ : シートのばらつき及び接着により低減係数

3.3 シート剥離時せん断耐力 (二方向シートの場合)

コンクリートとシートとの間のせん断応力度は

$$\bar{\tau}_{cp} = \frac{f_f \cdot t_f}{h_f} \cdot \frac{1}{\cos(\alpha_n)} \quad \text{----- (7)}$$

シート剥がれる条件

$$\bar{\tau}_{cp} = \tau_{cpa} \quad \text{----- (8)}$$

シート剥離時せん断耐力の算定は次式を用いた

$$\frac{f_f}{n_f} < \sigma_{sy} \text{ の場合: } V = \tau_{ca} h_f z \frac{\cos(\alpha_n)}{\tan(\alpha_n)} \cdot \left(\frac{A_w}{n_f t_f s} + \frac{2h_f}{h_{sw}} \right) + V_{cd} \quad \text{----- (9)}$$

$$\frac{f_f}{n_f} \geq \sigma_{sy} \text{ の場合: } V = \frac{A_{sw} \sigma_{sy} z}{s \tan(\alpha_n)} + \tau_{ca} \frac{\cos(\alpha_n)}{\tan(\alpha_n)} \cdot \frac{2(h_f)^2 \cdot z}{h_{sw}} + V_{cd} \quad \text{----- (10)}$$

ここで τ_{cpa} : シートの付着応力、ここではコンクリートのせん断強度と考えた ($0.24 \cdot \sqrt[2]{f_{cb}}$)

f_f : シート軸方向のせん断応力度

f_{cb} : コンクリートの圧縮強度

3.4 スターラップ無しの供試体のせん断耐力の評価は Bazant's equation⁴⁾を用いた。

5. 実験結果と考察

表-4 実験値と結果 (単位:tf)

理論値と実験値の結果が表-4に示す。

(1)表-4のB1-1、B2-1の実験結果を見ると、二方向シートの方が一方向より、せん断耐力が上がる事が分かった。

(2)一方向シートを貼り付けることにより、耐力と剛性が上がることは分かった。スターラップとシートを併用した補強の場合がシート無しに比較して耐力が24%上がった、シートで補強した場合はせん断耐力はシート無しに比較して37%が上がった。

	供試体	シート	スターラップ	計 算 値			実験値	破壊形式
				せん断耐力	曲げ耐力	剥離荷重		
一方向シート	A1-0	無	有	32.1	11.4	—	12.5	曲げ破壊
	A1-1	有	有	38.5	21.9	38.3	15.5	剥離**
	B1-0	無	無	9.5	9.1	—	9.6	せん断破壊
	B1-1	有	無	16.7	16.5	14.4	13.2	剥離"
二方向シート	B2-0	無	無	10.1	13.3	—	12.7	剪断破壊
	B2-1	有	無	38.8	18.1	17.3	21.3	剥離"

*接着不良

それぞれの引張鉄筋のひずみ曲線は図-4.aとb及び図-6に示す。

(3)二方向シートの場合は、シートのみ補強による、せん断耐力が68%近く向上することが分かった。

(4)破壊形式としては、シートのみで補強した場合は、シートの剥離によるせん断破壊を示した。スターラップとシートを併用した補強の場合は、シートの剥離による曲げ破壊を示した。

(5)一方向及び二方向シートのみ(タイプB)で補強した供試体の引張鉄筋の歪みグラフが図-4に示す。そこで、シートの分担効果が分かった。

(6)ウェブ部G点のシートとコンクリート(シート無し)のひずみ曲線が図-5に示す。ひび割れ発生後、引張部のコンクリートはひび割れに対する力がほとんどないが、シートはかなり伸びてきて、シートによる補強効果が分かった。

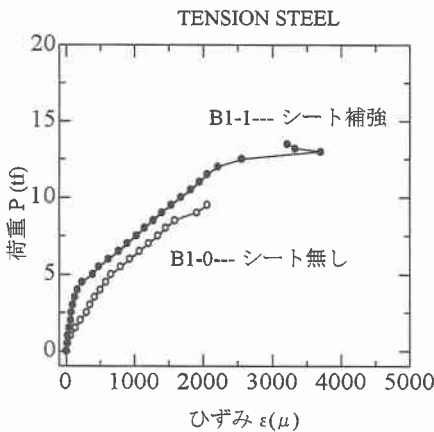
6. 結論

本研究により得られた結論は以下の通りである。

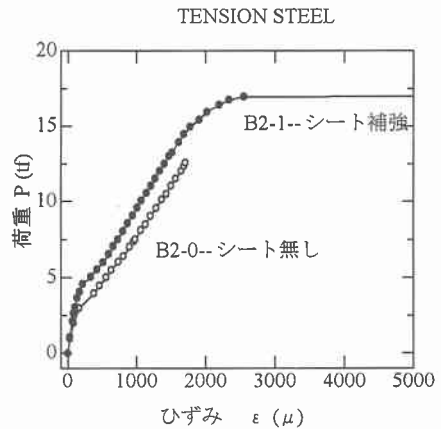
(1)一方向より二方向のシートの方が曲げとせん断補強効果が大きいことが分かった。

(2)一般的に、破壊形式はシートの破断による破壊、コンクリートの圧壊による破壊、シートの剥離による破壊及びシートの定着などの破壊形式が考えられ、本実験では、ほとんどシートの剥離による破壊を示した。

(3)シートによる補強算定が複雑であり、今回の破壊形式が剥離のパターンが多かった、このパターンに対する検討が更に必要であると考えられる。



a. 一方向シート補強



b. 二方向シート補強

図-4 引張鉄筋の歪み(スターラップ無し)

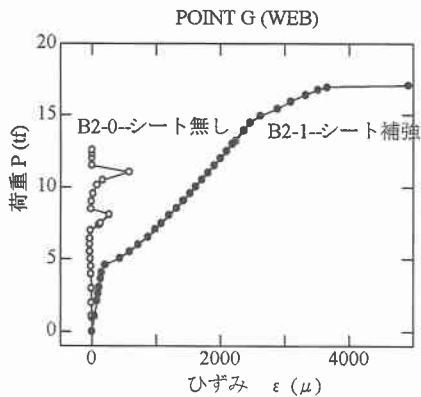


図-5 ウェブのG点のひずみ(スタラップ無し)

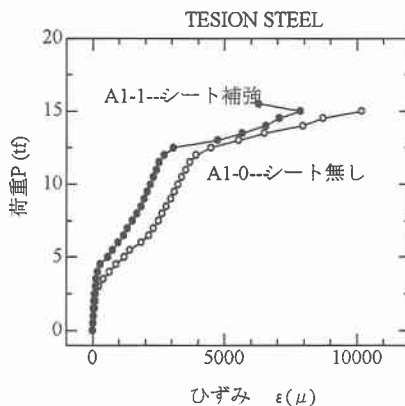


図-6 引張鉄筋のひずみ(スタラップ有り)

【謝辞】

本研究を進めるにあたり、ショーボンド建設の江口和雄様、飛島建設株式会社の山崎隆君のご協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) Urs Meier and Hanspeter Kaiser :strengthening of structures with CFRP Laminates
- 2) 功刀利夫/太田利彦/矢吹和之: 高強度・高弾性率繊維 高分子新素材 One Point-9
- 3) コンクリート標準示方書[平成三年版] 設計編
- 4) Jin-Keun Kim, PhD, PE and Yon-Dong Park, PhD :Shear strength of reinforced high strength concrete beams without web reinforcement Magazine of research, 1994, 46, No. 166, Mar. , 7-16