

報告

〔2014〕 FRPで被覆したアンボンドブレースに関する実験的研究

正会員 ○高橋春蘭 (スペース工房21)

正会員 安藤信好 (武蔵工業大学工学部)

1. 序

中高層建築で用いているブレース構造において、筆者等は、ブレースに対して座屈防止の働きはするが軸力は伝達しないとする材、いわゆるアンボンドブレース(ブレースを絶縁材にて付着を切り、RCで被覆した材)をここ数年研究してきた。その一環として、RC被覆材のひび割れ後のブレースの耐力低下と靱性の改善を図るためにFRPによる補強、即ちRC被覆材の外側にFRPで覆い補強したアンボンドブレースを考案し、実験を行ったのでここに報告する。

目的は、FRPの座屈後のRCひび割れに対する拘束効果と、繰り返し加力下における靱性とその破壊性状についての考察である。

2. 試験体、及び試験方法

I. 試験体; 試験体は、表1に示すように、中間柱(λ≒78)のRAシリーズと短柱(λ≒49)のRBシリーズの2種類とし、それぞれFRP補強の有無、及び主筋比の違いについての計6体とする。但しブレースの元たわみeはL/1840まで矯正している。

FRPの補強方法; RC被覆材の外側にCM*マット(チョップストランドマット)その上にアラロイ(一方向強化材)と樹脂含浸したガラスクロス巻き、トップコート(樹脂コーティング)仕上げとした(繊維方向は材軸に一致)。尚厚さは6mmである。

アンボンド用絶縁材; 厚さ100μのPV(ポリエチレンビニール)を4層に重ねている(計400μ厚)。この厚さは、付着試験についてのJMC(建材試験センター)委員会の提案に準拠して試験を行い、その結果付着のない事を事前に確認してこの値を定めたものである。

*) CMマット; ストランド状のガラス繊維を切断したものをバインダーでマット状にしたもの。

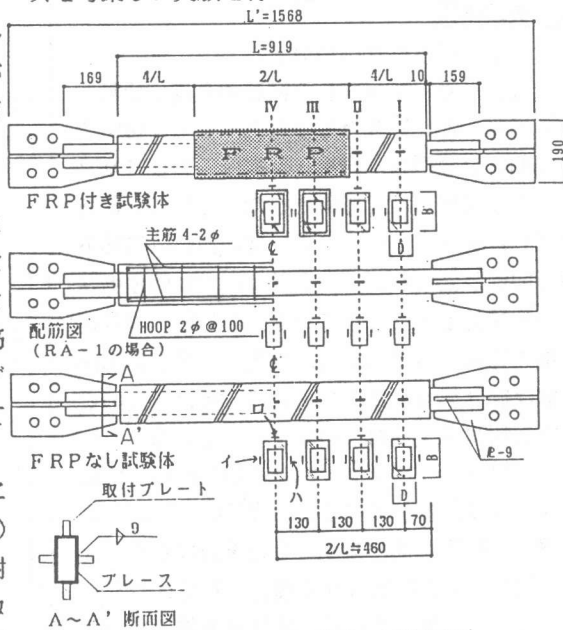


図-1 試験体及びゲージ位置図

表-1 試験体の諸元

分類	試験体名	FRP 有無	材長 L cm	細長比 λ	比 I _a	断面 8×D ² mm	主筋 mm	主筋比 P _t %	帯筋 P _v %
RA	RA-1	無	91.9	77.9	20.2	11.0 ×5.5	4-2.0φ	0.21	0.057
	RA-1F	有		20.2	4-2.0		0.21		
	RA-2F	有		21.1	6-2.6		0.53		
RB	RB-1	無	49.6	21.4	13.5 ×7.5	6-2.0	0.19	0.058	
	RB-1F	有		21.4		6-2.0	0.19		
	RB-2F	有		22.7		10-2.6	0.52		

RAシリーズ断面

ブレース □=60×30×3.2

RBシリーズ断面

ブレース □=50×50×3.2

注:
1. 細長比λはブレースに対する値
2. 比I_aは(I_r+I_c)/I_sを示す。但し、I_r、I_c、I_sは、鉄筋、コンクリートおよび鉄骨に関する断面二次モーメントを示す。
3. 元たわみeはL/2000以下まで矯正済みである。

Ⅱ. 試験方法； 試験は、鉄骨フレーム（四接点ピン支持）内に試験体を取付け水平加力する方法である（図-2参照）。加力は正負の繰り返しとし、その加力サイクルは変形制御の $1\delta y$ 、 3 、 5 、 7 、 $10\delta y$ （ δy ：以下本文での δy は、プレースの降伏歪 εy に材長 L を乗じたもの）としている。但し初回の圧縮ループは、座屈荷重*とその直後の低下の挙動の考察から更に $1.2\sim 1.3\delta y$ まで加力した。変位は材軸及び横（材軸に直交の面外）方向の2方向での値を変位計で測定し、また応力は歪ゲージを用いて（位置は図-1参照）測定している。

3. 実験結果

3-1 破壊性状について

<RAシリーズ>FRP補強の有無で比較検討してみると、補強無し $RA-1$ では材中央部に曲げひび割れが発生し、以降このひび割れがさらに進展して座屈荷重となっている。他方、補強した $RA-1F$ 、 $2F$ では、初めは材端で軸方向ひび割れが生じ、以降この割れの進展状況が座屈荷重を左右している。その後、繰り返し加力に従い横方向変位が増大し、FRP端部に曲げひび割れが発生している。更に、このひび割れ幅が拡大し曲げ破壊となっている。

<RBシリーズ>いずれも最初に材端で材軸方向にひび割れが発生し、以降このひび割れが進展し、座屈荷重となり、その後の繰り返し加力に伴いこのひび割れが進展拡大してコンクリートの剝離を生じている。FRP補強の有無で比較検討してみると、軸方向のひび割れ発生及び座屈荷重時の変位量はあまり変わらない。しかし、その後の正負繰り返しにおいて、 $RB-1$ では中央曲げひび割れの拡大に対して $1F$ と $2F$ でのひび割れ進展は、補強無しの $RB-1$ より緩やかである。また最終破壊において、補強無しの試験体ではコンクリートの圧縮破壊（材中央部）であるのに対して、補強した試験体では、軸方向のひび割れがFRP端部で面外方向に大きく膨らみ剝離した事の違いがあげられる。

*表-3の*3で定義・説明

表-2 材料の機械的性質

コンクリート	スラブ	21.0	cm	
	圧縮強度	328.1	Kg/cm ²	
	引張強度	16.1	Kg/cm ²	
	ヤング率	236.0	t/cm ²	
鉄線	2.0 φ	降伏強度	2.17	t/cm ²
		引張強度	3.24	t/cm ²
		のび率	15.40	%
	2.6 φ	降伏強度	2.42	t/cm ²
		引張強度	3.41	t/cm ²
		のび率	15.40	%
鉄骨	RA	降伏強度	4.29	t/cm ²
		引張強度	4.80	t/cm ²
		のび率	27.70	%
		ヤング率	2.15×10^6	Kg/cm ²
	RB	降伏強度	3.58	t/cm ²
		引張強度	4.01	t/cm ²
のび率		31.00	%	
	ヤング率	2.08×10^6	Kg/cm ²	
FRP	縦横直交方向	破壊強度	1.39	t/cm ²
		ヤング率	1.80×10^5	Kg/cm ²
	縦横水平方向	破壊強度	1.74	t/cm ²
		ヤング率	2.39×10^5	Kg/cm ²

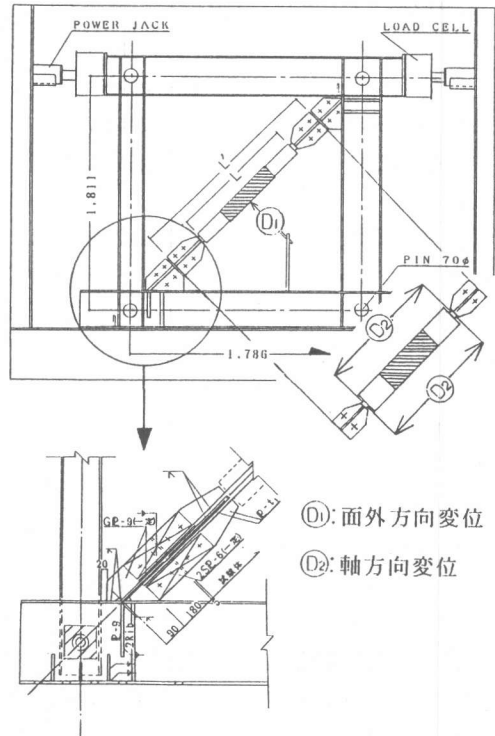


図-2 加力装置及び変位測定図

3-2 座屈荷重について

<RAシリーズ>FRPの補強無しのRA-1での σ/σ_y (表-3の*参照)の値は0.75であり、他方補強したRA-1F, 2Fではこの値がほぼ1.0に近い。なお前者の I_R は約20であり、後者ではこれにFRPの断面を加算すると I_R が約40となる。このように耐力(座屈荷重)を材の降伏強度まで上げる($\sigma/\sigma_y=1$)為には最小の I_R 、即ちRC被覆が必要であり、筆者らの従来の研究²⁾

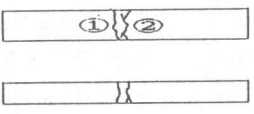
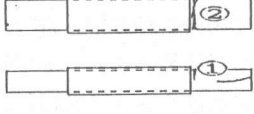
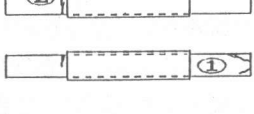
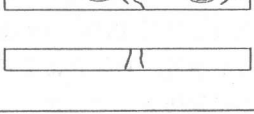
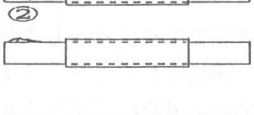
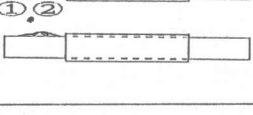
(プレートを用いたアンボンドブレースでの実験、および理論解析)結果と一致している。即ち入 κ 78で \square 形ブレースの場合 I_R は30程度必要である。また同じ補強下で主筋比を考えた1Fと2Fとでの耐力差は殆どない。

<RBシリーズ>FRP補強の有無に拘らず、いずれの試験体においても σ/σ_y の値が1.0以上となっている。なお入 κ 49の場合 σ/σ_y を1.0にするにはプレートブレースでは I_R が30程度なのに対して \square 形ブレースでは20程度でよい事が解析からも明らかであり、筆者らの研究²⁾と一致している。

3-3 耐力低下、および靱性について

<RAシリーズ>FRPの補強効果が破壊性状と座屈荷重より明確となってお

表-3 破壊性状表

試験体	σ/σ_y *	破壊性状
RA-1	0.75 (16.3)	①: 材中央部で曲げひび割れが発生、後このひび割れが進展して座屈荷重(軸変位1.2 δ_y 時)となる。 ②: 291kNの圧縮側 2.0 δ_y でその曲げひび割れ幅が拡大して耐力低下を来す。 
RA-1F	0.99 (21.6)	①: 材端で軸方向のひび割れ発生(1.7 δ_y)。座屈はブレースのめり込み現象によっている(1.9 δ_y)。 ②: 391kNの圧縮側 3.0 δ_y でFRP取付の端部に曲げひび割れが発生、以降耐力低下大となる。 
RA-2F	0.97 (21.2)	①: 材端で軸方向のひび割れ発生(1.4 δ_y)。以降このひび割れが進展、拡大して座屈荷重(1.9 δ_y)となる。 ②: 391kNの圧縮側3.6 δ_y でFRP取付の下端部に曲げひび割れが発生、以降耐力低下大となる。 
RB-1	1.05 (21.5)	①: 材端で軸方向のひび割れが発生(3.0 δ_y)。荷重の増大につれてこの割れが進展、4.9 δ_y で座屈となる。 ②: 391kNの圧縮側 4.3 δ_y で材中央部に斜めひび割れが発生、以降耐力低下を来す。 
RB-1F	1.04 (21.3)	①: 材端で軸方向のひび割れが発生(3.0 δ_y)、後この割れが緩やかに進展し5.0 δ_y で座屈となる。 ②: 591kNの圧縮側7.4 δ_y でFRP取付の下端部でコンクリートの剝離、それまでの耐力低下は小さく安定している。 
RB-2F	1.01 (20.6)	①: 材端で軸方向のひび割れが発生(3.0 δ_y)、後5.1 δ_y で座屈となる。 ②: 591kN圧縮側 10 δ_y でFRP取付の端部でコンクリートの剝離、それまでは耐力低下も小さく安定した挙動である。 

*1. σ は座屈荷重をブレース・鉄骨の断面積で除したものであり、 σ_y はブレース材の降伏強度を示す。

*2. ブレース材のみの座屈時の応力度 σ_{cr} は、日本建築学会式に従って求めると、RAシリーズでは0.71 σ_y 、RBシリーズでは0.89 σ_y である。

*3. ()は座屈荷重(t)を示す。本文での座屈荷重とは、軸力において全体座屈となって、それ以上の荷重が不可能となった荷重で最大のものを意味する。

り、更に軸方向変位よりこれらの結果を考察する。まず座屈荷重時の軸方向変位は、RA-1の場合 $1.2\sigma_y$ であるのに対して、RA-1F、2Fでは共に $1.9\sigma_y$ で前者より大きい。また曲げひび割れ発生に伴う耐力低下の開始時の変位は、RA-1が $2.0\sigma_y$ (2サイクル) であり、RA-1F、2Fではそれぞれ $3.0\sigma_y$ 、 $3.6\sigma_y$ (3サイクル) でこれも大きくFRPの効果は明白である。更に主筋比の違いによる1Fと2Fでは、耐力低下の開始時の軸変位、及び3サイクル(最大 $5\sigma_y$) 下での負領域におけるループ面積(2.01:2.38)に差を生じ、主筋比が増すことにより一層安定している。また面外方向変位をFRPの有無で比べてみると、その差が明確(図-4参照)で、2サイクル目の圧縮領域 $\sigma/\sigma_y \approx 0.6$ のとき、RA-1は 6.37 mm 、RA-2Fは 0.37 mm の変位となっており、FRPによる拘束効果が確認されている。

<RBシリーズ>FRP補強の有無に拘らず、座屈荷重はほぼ同じである。しかし座屈荷重後、補強無しRB-1では3サイクル以降の圧縮耐力が座屈荷重の約83%である。他方RB-1F、2Fではこの値が約91~92%で耐力低下の小さい事が判明している。なお、主筋比の違いによるループの安定性には差*はみられない。

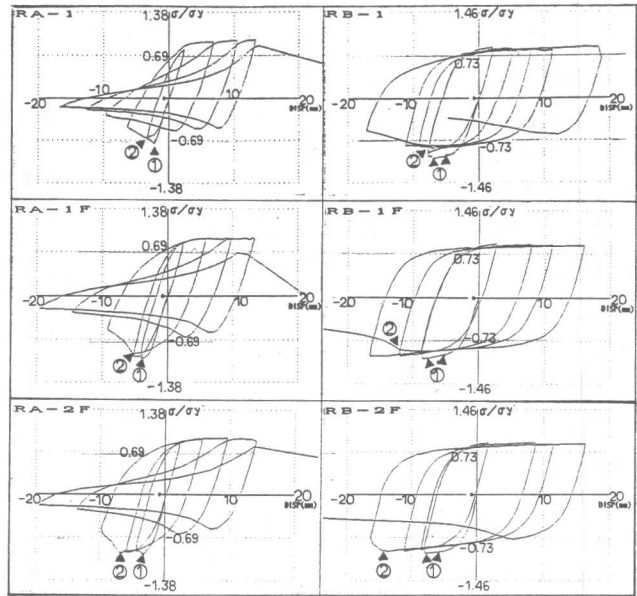


図-3 荷重-軸方向変位曲線

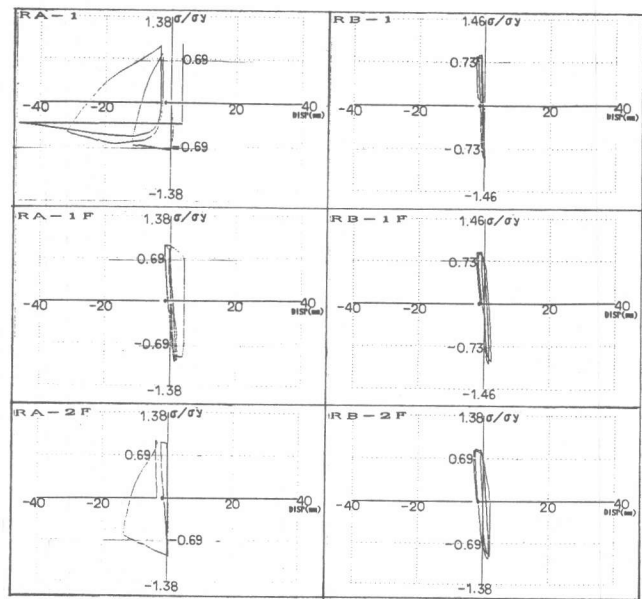


図-4 荷重-面外方向変位曲線

*単純に、正負 $10\sigma_y$ 下でのサイクル面積をRB-1、1F、2Fの間で比較してみると1:1.14:1.22となっており差は小さい。

3-4 荷重-歪について

RA-1とRA-2Fの2体についての実験結果を考察する。ゲージ位置は図-1参照。図-5は耐力低下前後のブレース・鉄骨における荷重-歪曲線を示す。

<RA-1> IとII (図-1参照)の領域では圧縮と引張が逆転しており、この間(材端よりL/8~L/5)に反曲点のあることが判る。材中央部に近いほど表裏の歪差が大きい(曲げが大きい)。この事は座屈現象と一致する。

<RA-2F>座屈は、FRP取付の下端、即ちII近辺であり、ここでの表裏の歪差の大きい事からもこの現象を示している。FRPの拘束下にあるゲージ(III・IV)は表裏ほぼ同じ歪曲線で、その値もI、IIより小さく、この位置では曲げの小さい事が推定できる。

4. 解析

解析理論は既論文¹⁾およびこれを補足した式²⁾によって求められるものでポテンシャルエネルギーの停留式に基く理論である。数値解は、FEM法を用い、節点内力と外力が釣り合う迄のIteration法、強制変位を段階的に変化させるStep by Step法を組み合わせ求める方法による。停留条件式 $\delta \pi = 0$ より下式となる。

$$[K] \Delta u + [Fin] - [Fex] = 0$$

K: 全構造体の剛性マトリックス

Fin: 全構造体の内部応力に釣り合うために必要な節点内力ベクトル

Fex: 全節点外力ベクトル

Δu : 全構造体の変位増分

5. 考察

5-1 耐力と靱性

先に定義した座屈荷重についての実験結果(図-3の①)と解析結果を示したのが表-4である。これより両者は比較的良好一致しこの解析方法でよい事が解る。そ

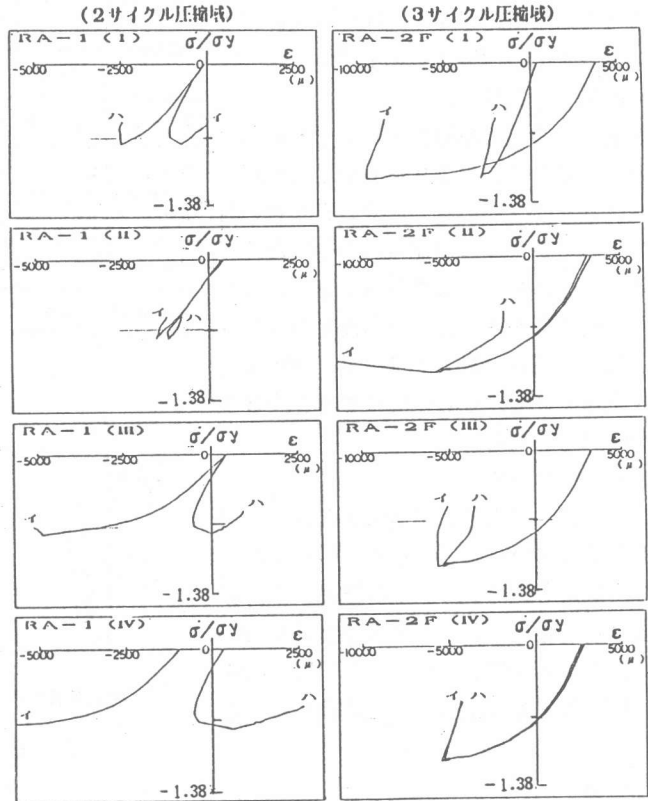


図-5 荷重-歪(鉄骨)曲線

表-4 座屈荷重(その1)

試験体名	細長比	実験値(t)	解析値(t)	実験値 解析値
RA-1	77.9 (≒78)	16.3	17.6	0.92
RA-1F		21.6	23.1	0.94
RA-2F		21.2	23.7	0.89
RB-1	48.6 (≒49)	21.5	20.1	1.07
RB-1F		21.3	20.4	1.04
RB-2F		20.6	20.3	1.01

の結果、短柱に見られるように比 σ/σ_y が1.0に近いほどFRPによる靱性効果が中間柱よりよい。他方中間柱ではFRPの効果が明白であるものの、より優れた靱性を得るには I_R の値を大きく（この $\lambda \approx 78$ の場合 I_R を30程度）して、 σ/σ_y を約1.0に近づけると靱性効果は一層よくなると考えられる。

5-2 解析例（表-5）

5-1の解析結果を基に同じ試験体および材モデルでの解析例を以下に示す。

a) 耐力（座屈荷重）

FRPの被覆長を材長の $L/2$ と定め、FRPの厚さを3~12mmまで変えた場合耐力差はあまりない。これは、FRPの見掛け上のヤング係数が比較的小さいためである。またFRPの厚さ6mmを一定にして被覆長を変えた場合、耐力差が明確となり、特に中間柱（RAシリーズ）で明確で被覆長を $L/4$ から $L/2$ にすると約35%の耐力増となる。

b) 変形について

図-6は、FRPの有無による面外方向の変位量の違いを座屈荷重までの第1ループで示したものである。その結果、解析値および実験値からFRPの補強効果が明白で、FRPで補強したRA-1Fは、補強無しのRA-1に比べて約1/2となっている。

表-5 座屈荷重（その2） (t)

試験体名	FRP厚さ変化(#1)			FRPの材長変化(#2)	
	3mm	6mm	12mm	L/2	L/4
RA-1F	21.7	23.1	23.4	23.1	17.7
RA-2F	23.0	23.7	23.6	23.7	17.9
RB-1F	20.5	20.4	20.3	20.4	17.3
RB-2F	18.6	20.3	20.5	20.3	18.4

*1. 被覆長 $L/2$ を一定とした解析、但し L は材長。
*2. FRPの厚さ6mmを一定とした解析。

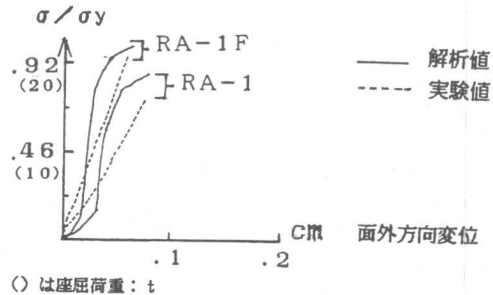


図-6 荷重-変位曲線

6. 結論

ボックス型ブレースを用いたアンボンドブレースにおいて、FRPの効果を期待した本研究の目的から

1. FRPの補強は、耐力（座屈荷重）および靱性において非常に効果的であり、特に靱性効果に優れている。
2. 座屈後の繰返し加力において、履歴性状を良好に確保する為には座屈強度を支配する断面二次モーメント比 I_R を短柱（ $\lambda \approx 49$ ）では20程度、中間柱（ $\lambda \approx 78$ ）では30以上が必要である。
3. FRPを用い、鉄筋比を0.2~0.5%の範囲で変えた場合、いずれの柱も耐力上の差は小さいが座屈後の安定性は増している。

なお、日頃ご指導を戴いている武蔵工業大学、望月重教授に、また本試験体の鉄骨制作、及びFRP製作に協力を戴きましたKK吉田鉄工所、ネフコムKKに感謝します。

参考文献

- 1). 藤本盛久、和田章他 「筋違付鉄骨ラーメンの弾塑性に関する研究」 日本建築学会論文報告集 第209号 S48.7
- 2). 安藤信好、高橋春蘭 「鉄筋コンクリートによりブレースを拘束したアンボンドブレースの基礎的研究」 構造工学論文集 Vol.36B 1990.3