

## 座屈拘束機能を有する鉄骨ブレースの弾塑性性状

堀江竜巳 (技術研究所)	真瀬伸治 (技術研究所)
矢部喜堂 (技術研究所)	中村庄滋 (設計本部)
堀富博 (設計本部)	坂本真一 (技術研究所)
橋大介 (技術研究所)	広瀬景一 (技術開発本部)

### § 1. はじめに

細長比の大きい鉄骨ブレースを圧縮力に対して有効に機能させるためには、全体座屈の拘束が必要となる。全体座屈の拘束方法として、芯鉄骨にアンボンド加工を施し、その周りに鉄筋コンクリートなどの座屈拘束材を被覆した鉄骨ブレースに対する研究が、これまでに幾つか報告されている<sup>1)~5)</sup>。この形式のブレース部材の特徴は、圧縮時も引張時と同様の荷重—変形挙動を期待でき、架構の剛性・耐力を容易に調整できることにある。

本研究は、この座屈拘束材として、ひび割れ強度が高く、ひび割れ後の変形性状が良好な鋼繊維補強コンクリート(以下、SFRC)を適用した場合の鉄骨ブレースの弾塑性性状を検討するものである。

本報では、十字形断面部材を芯鉄骨とし、その周りにアンボンド加工した後、SFRCを被覆したブレースを対象として、部材実験<sup>6)7)</sup>、FEM解析<sup>8)</sup>および骨組実験<sup>9)</sup>により当該ブレースの弾塑性性状を検討する。

### § 2. 部材実験

#### 2.1 実験概要

試験体は計9体で、形状寸法および配筋詳細を図-1に示す。全試験体とも、芯鉄骨はR-9の溶接組十字形断面部材で、その断面積は17.6cm<sup>2</sup>である。ブレースの両端部には、架構との取合いを考慮した接合部を設けている。被覆コンクリートがブレースの耐力・軸剛性には寄与せず曲げ剛性にのみ効くように、図-1に示すように芯鉄骨にVMテープ、発泡スチロールを被覆することで、被覆コンクリートと芯鉄骨の付着を切っている。設定したパラメータは、表-1に示すように被覆コンクリートの断面サイズ、鋼繊維混入量および補強筋の有無である。被覆コンクリートの断面サイズについては、□-200×200、□-175×175、□-150×150の3種類、鋼繊

維混入量については1m<sup>3</sup>当たり40kgと70kgの2種類とした。表-2に鋼材の機械的性質を示す。表-3にSFRCの調査を、その結果得られたSFRCの材料特性を表-4に示す。コンクリートは早強ポルトランドセメントを使用し、粗骨材は最大粒径15mmの砕石である。本実験で使用了鋼繊維は、長さ30mm、径0.5mm(アスペクト比60)のフック付の伸線形である。SFRCの曲げ試験結果を図-2に示す。

加力は、アムスラー型の600tf構造物試験機を用い、試験体両端のガセット端部を固定支持として行なった。

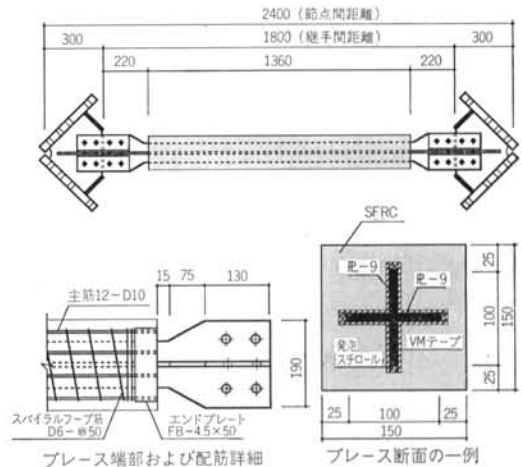


図-1 試験体の形状寸法および配筋詳細

試験体名	被覆コンクリート断面サイズ(mm)	鋼繊維混入量(kg/cm <sup>3</sup> )	補強筋の有無
C1N-SF40	□-200×200	40	無
C1N-SF70		70	
C1R-Plain		0	主筋比 1.07% 帯筋比 0.64%
C1R-SF40		40	
C2N-SF40	□-175×175	40	無
C2N-SF70		70	
C3N-SF40	□-150×150	40	無
C3N-SF70		70	
CN	(純鉄骨)	—	—

表-1 試験体一覧

鋼材	鋼種	使用箇所	降伏点 $\sigma_y$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	引張強さ $\sigma_B$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	破断伸び El. (%)
D6	SD295A	フープ筋	39.2	51.6	18.0
D10	SD295A	主筋	36.1	51.4	20.2
凡-9	SM490A	芯鉄骨	34.4	56.0	35.0

表-2 鋼材の機械的性質

調合名	鋼繊維 混入率 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	SF
Plain	0		49.5	175	341	879	896	0
SF40	0.51	51.3	57.5	210	409	927	684	40
SF70	0.89			210	409	921	680	70

表-3 SFRCの調合表

調合名	鋼繊維 混入率 $V_f$ (%)	圧縮強度 $F_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係 数 $E$ (tf/cm <sup>2</sup> )	曲げ強度 $\sigma_b$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	曲げ タフネス $T_b$ (kgf·cm)	換算曲げ 強度 $\bar{\sigma}_b$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
Plain	0	578	324	51.3	—	—
SF40	0.51	533	303	54.6	248	35.5
SF70	0.89	517	302	73.8	411	59.3

表-4 SFRCの材料特性

加力パターンは、図-3に示すように軸方向変位が節点間距離( $l$ )の1/100まで、正負交番の漸増繰返し加力を10サイクル行ない、その後耐力低下するまでさらに漸増で繰返し加力を行なった。なお、引張加力時を正サイクル

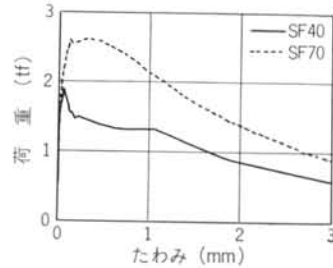


図-2 SFRCの曲げ試験結果

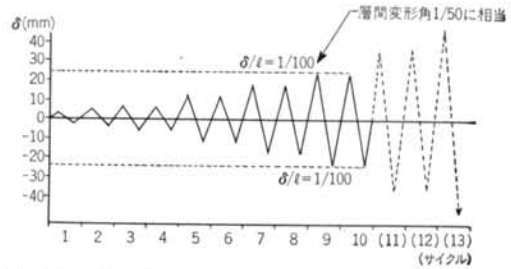


図-3 加力パターン

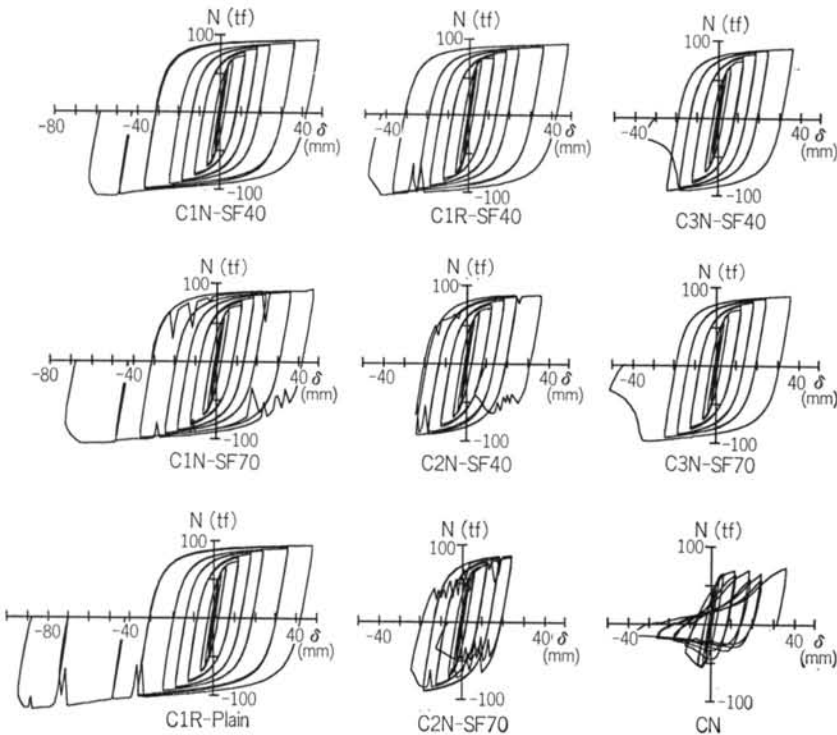


図-4 荷重-変形関係

とする。

節点間変位，継手間変位，構面内および構面外変位はゲージ式変位計で測定した。芯鉄骨，鉄筋，ガセットおよびコンクリート表面のひずみは，ワイヤー・ストレーン・ゲージを貼付して測定した。

## 2.2 実験結果および考察

図-4に荷重-変形関係を示す。ここでいう変形は節点間変位である。軸方向変位が節点間距離の1/100(10サイクル)までの復元力特性は，被覆コンクリートを有する全試験体とも，純鉄骨の試験体CNに比べて履歴性状の安定した紡錘型であった。C1シリーズは，C2，C3シリーズに比べて軸方向変位が1/100を超える大変形領域まで耐力低下は生じなかった。各シリーズとも，補強筋の有無，鋼繊維混入量 $40\text{kg/m}^3$ と $70\text{kg/m}^3$ によって，復元力特性に明確な差は見られなかった。

図-5に面外方向への変形状況を示す。純鉄骨の試験体CNは，初期の繰返し加力時から徐々に面外変形が進展したのに比べて，C1シリーズは全試験体とも面外変形は見られず，C2，C3シリーズは9~11サイクルで全体座屈により面外変形が生じると，急激に変形が進展したことを示している。一方，C1シリーズでは12~13サイクルで，C2シリーズでは9~10サイクルでボルト接合部にすべりが生じた。図-5に見られるように，C2シリーズが9~10サイクルで面外変形が顕著になっていることと符合している。このことより，ボルト接合のすべりによって接合部の固定度が低下し，座屈が生じ易くなったものと推測される。

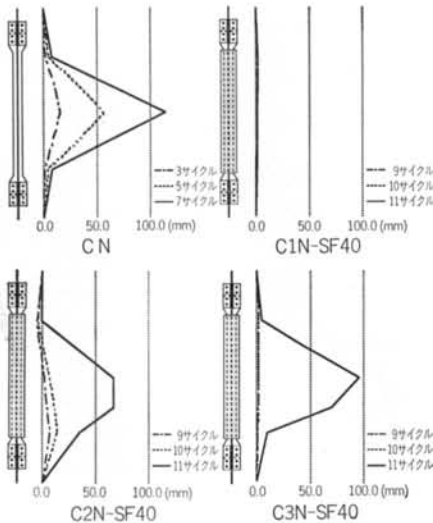


図-5 面外方向の変形状況

各試験体の弾性剛性を表-5に示す。被覆コンクリートを有する試験体の弾性剛性は，純鉄骨の試験体CNとほぼ同じ値を示していることから，芯鉄骨と被覆コンクリートの付着は切れているものと判断される。弾性剛性から算出される剛域の長さは，試験体の両端部から内側15.5~25.5cmである。

最大圧縮耐力は，芯鉄骨の降伏耐力の計算値(60.5tf)に比べてC1シリーズで1.70~1.93倍，C2，C3シリーズで1.46~1.61倍である。C1シリーズの最大圧縮耐力の値が高いのは，最大圧縮耐力時に芯鉄骨がめり込み，被覆コンクリートも軸耐力を負担したためである。一方，全体座屈を生じたC2，C3シリーズの場合においても，純鉄骨の試験体CNの座屈耐力(55.6tf)に対して1.59~1.76倍あり，最大圧縮耐力は芯鉄骨のみの最大耐力まで上昇していることが分かる。また，純鉄骨の試験体CNの座屈耐力よりJohnson式を用いて有効細長比を算定すると45.2であり，座屈長さは93cmとなる。

各試験体の10サイクルまでの平均累積塑性変形倍率 $\bar{\epsilon}$ を表-5に示す。 $\bar{\epsilon}$ は累積塑性ひずみエネルギーを弾性ひずみエネルギーの2倍で無次元化し，正負を平均したものである。補強筋の有無，鋼繊維混入量に関わらず，被覆コンクリートを有する全試験体とも，純鉄骨の試験体CNに比べて2倍以上のエネルギー吸収能力を有している。図-6に，純鉄骨の試験体CNとC3N-SF40試験体の10サイクルまでの $\bar{\epsilon}$ の推移を示す。両試験体の $\bar{\epsilon}$ は4サイクルまではほぼ同じ値であるが，5サイクル目以降

試験体名	弾性剛性 $K$ (tf/mm)	最大圧縮耐力 $N_{max}$ (tf)	平均累積塑性変形倍率 $\bar{\epsilon}$ *	最終破壊状況
C1N-SF40	19.6	108.1	25.0	コンクリート端部 割裂破壊
C1N-SF70	19.4	102.9	25.1	
C1R-SF40	19.7	102.6	25.5	
C1R-Plain	19.3	116.8	25.1	全体座屈
C2N-SF40	19.0	92.2	25.1	
C2N-SF70	19.3	88.6	21.6	
C3N-SF40	19.3	93.8	25.2	全体座屈
C3N-SF70	19.5	97.7	24.9	
CN	17.7	55.6	10.6	全体座屈

\* ) 10サイクルまでの平均累積塑性変形倍率

表-5 実験結果

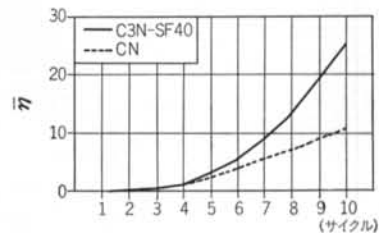


図-6 平均累積塑性変形倍率の推移

は両試験体の間の差が増大している。他の被覆コンクリートを有する試験体の間も、C3N-SF40 試験体と同等な値を示している。

写真-1, 2 に破壊状況を示す。被覆コンクリートの断面サイズを□-200×200 としたC1シリーズは、圧縮変形によって芯鉄骨端部のクリアランスがなくなるまで全体座屈が生じず、コンクリートのひび割れも見られなかった。その後さらに漸増加力することによって、芯鉄骨端部のテーパ部分がコンクリート端部にめり込むことにより、写真-2 のようにコンクリート端部が割裂破壊した。一方、被覆コンクリートの断面サイズを□-175×175 としたC2シリーズおよび□-150×150 としたC3シリーズは、全体座屈によりひび割れが生じ、写真-1 のように曲げ破壊した。この破壊形式の場合には、コンクリート中央部に曲げひび割れが生じると、急激にひび割れが進展し耐力が低下した。各シリーズとも、補強筋の有無、鋼繊維混入量 40kg/m<sup>3</sup> と 70kg/m<sup>3</sup> によって破壊性状の差は見られなかった。

## 2.3 解析シミュレーション

### (1) SFRC の曲げ特性

SFRC の曲げ特性を把握するために、部材実験に先立って行なわれた鋼繊維混入量 70kg/m<sup>3</sup> の SFRC の曲げ試

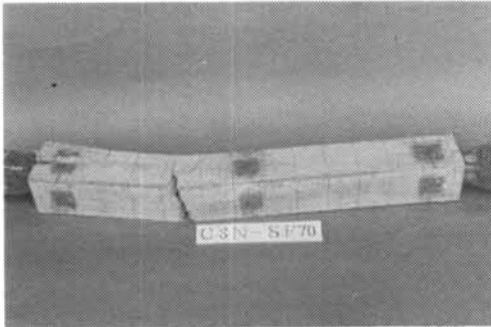


写真-1 曲げ破壊

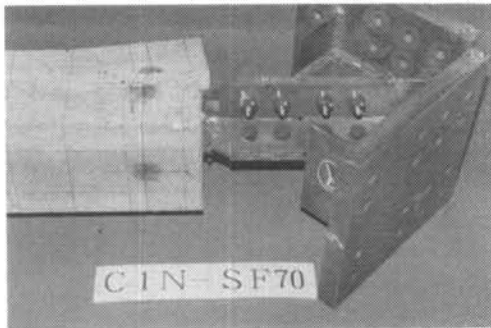


写真-2 割裂破壊

験結果をシミュレーションする。

解析モデルは、図-7 に示すように四角形平面要素を用いる。SFRC の応力(σ)ひずみ(ε)関係を図-8 に示す。圧縮側は線形を仮定し、引張側は引張強度 f<sub>t</sub> に達するとクラックが生じ、σ-ε 関係が負勾配をもって軟化し、ファイバーが効き始めると σ が一定となるような関係を仮定する。諸パラメータは、Lim 他<sup>10)</sup> の研究を参考に既往の実験結果より定めた。なお、解析コードとしては汎用 FEM 構造解析プログラム“DIANA”を用いる。

図-9 に実験ならびに解析における荷重-たわみ関係を示す。実験結果は同配合の供試体においても、その施工条件によって鋼繊維の配向性・分散性に違いが生じ、ある程度ばらつきが生じているが、プレーンコンクリートのように最大引張強度以後の急激な破壊は生じず、靱性のある性状を呈している。また、解析値はおおむね実験値と対応しており、本モデルにより SFRC の曲げ特性

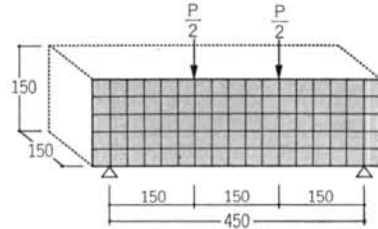


図-7 曲げ試験解析モデル

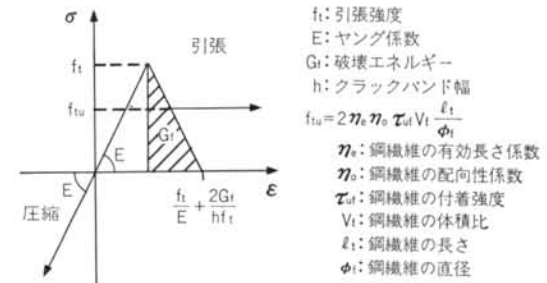


図-8 SFRC の σ-ε 関係のモデル化

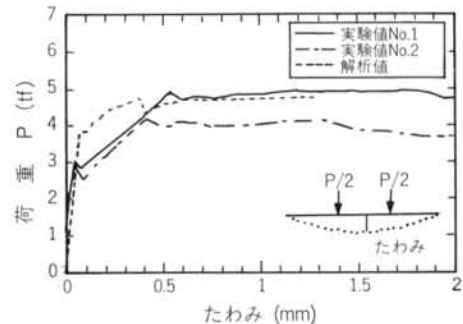


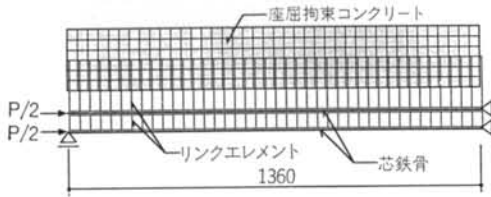
図-9 荷重-たわみ関係(曲げ試験)

をおおむね追跡できることが分かった。

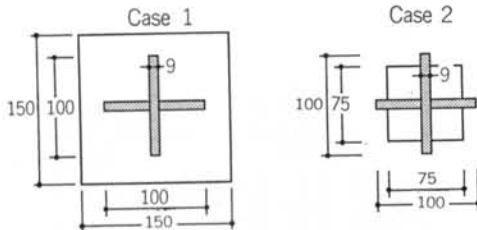
(2)部材の荷重—変形関係

前述のSFRCのモデルを用い、部材実験をシミュレーションする。解析モデルを図—10に示す。解析モデルは座屈拘束コンクリート被覆部分のみをモデル化し、接合部の影響を無視する。図—11に示すように、解析モデルの断面サイズは、部材実験の試験体のうち被覆コンクリートの断面サイズが□—150×150のもの（Case 1）と、比較モデルとして Case 1 と芯鉄骨のサイズが同じであり、被覆コンクリートの断面サイズが1/2のもの（Case 2）の2ケースである。被覆コンクリートは曲げ供試体と同様なモデル化を行ない、十字形断面芯鉄骨は2本の矩形の梁要素にモデル化し、材軸方向、直交方向とも変位をリンクする。また、元たわみとして材長の1/1000を与える。芯鉄骨と被覆コンクリートとは材軸直交方向の変位のみをリンクし、両者の付着は考えない。

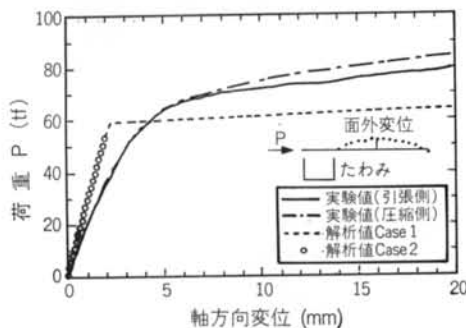
図—12に実験ならびに解析における荷重—変形関係を示す。Case 1の解析においては、被覆コンクリートの緑応力がSFRCの最大引張強度に達しておらず、充分な拘束



図—10 部材実験モデル



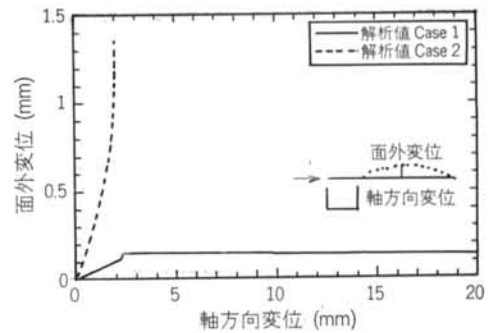
図—11 部材実験解析断面



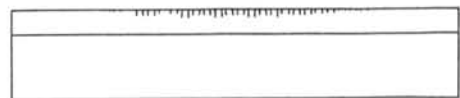
図—12 荷重—変形関係（部材実験）

効果を保持し芯鉄骨の軸降伏で耐力が決まる Bi-linear 型の荷重—変形関係となっており、実験結果と対応している。これに対し、Case 2の断面においては図—13に示すように初期から面外変形が卓越し、図—14に示すように被覆コンクリートにクラックが発生し、芯鉄骨の降伏耐力に達する前に過大なひずみが生じ解析は終了した。

表—6に、被覆コンクリートの弾性座屈荷重（式(1)）、解析によって得られた緑応力から算定した中央曲げモーメント（式(2)）ならびに元たわみ量から求める中央曲げモーメント（式(3)）の値を示す。Case 2の解析による最大荷重は芯鉄骨の降伏耐力を下回っており、弾性座屈荷重と対応する。また、Case 1において解析から求める中央曲げモーメントは、元たわみ量から求める中央曲げモーメントにおおむね対応している。この曲げモーメントを中央1点集中の外力に置き換えると、芯鉄骨の降伏耐力の0.4%程度に相当する。



図—13 面外変形（部材実験）



図—14 Case 2クラック図

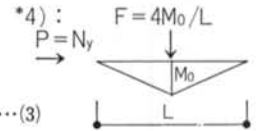
	芯鉄骨 降伏耐力 N <sub>y</sub> (tf)	SFRC*1) 座屈荷重 P <sub>cr</sub> (tf)	曲げモーメント M <sub>0</sub> (tf·cm)		F/N <sub>y</sub> (%) *4)	
			解析値	計算値	解析値	計算値
Case1	59	826	8.1*2)	8.6*3)	0.4	0.43
Case2	59	52	—	—	—	—

$$*1) : P_{cr} = \frac{12E_c I_c}{L^2} \dots (1)$$

$$*2) : M_0 = Z_c \sigma \dots (2)$$

$$*3) : M_0 = \frac{1}{\left(1 - \frac{N_y}{P_{cr}}\right)} \delta_c N_y \dots (3)$$

$$\delta_c = L/1000$$



表—6 座屈荷重、中央曲げモーメント

### § 3. K型ブレース付骨組の加力実験

#### 3.1 実験概要

試験体は、図-15に示すように当該ブレースをK型に組み込んだ1層1スパンの門型骨組とした。各試験体のブレース断面および設定したパラメータを表-7に示す。全試験体とも、ブレース芯鉄骨はFR-12の溶接組立十字形断面部材で、その断面積は27.4cm<sup>2</sup>である。Phase 1では芯鉄骨の断面形状をパラメータとし、FR-2試験体の芯鉄骨の断面はFR-1試験に比べてフレーム面外方向の曲げ剛性の高いものとした。Phase 2ではPhase 1よりも被覆コンクリートの断面寸法を小さくし、補強筋の有無をパラメータとした。本実験で用いた鋼繊維はフック付の伸線形のものであり、鋼繊維混入量は70kg/m<sup>3</sup>である。表-8に鋼材の機械的特性を示す。表-9にSFRCの調合を、その結果得られたSFRCの材料特性を表-10に示す。

柱・梁接合部およびブレース接合部をパネルとし、パ

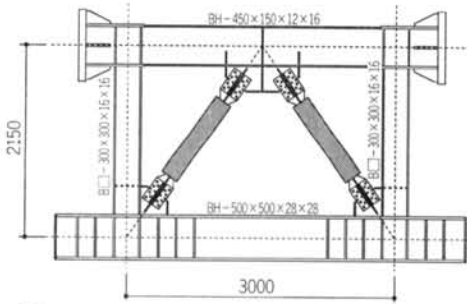


図-15 試験体の形状寸法

鋼材	鋼種	使用箇所	降伏点 $\sigma_y$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	引張強さ $\sigma_B$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	破断伸び E.L. (%)	
D6	SD 295A	フープ筋	Phase1	37.1	50.0	17
			Phase2	39.6	50.1	30
主筋		Phase1	36.8	53.2	18	
		Phase2	36.5	49.9	20	
FR-12	SM 490A	芯鉄骨 梁ウェブ	Phase1	36.2	52.5	26
			Phase2	37.8	54.9	23
柱 梁フランジ		Phase1	39.2	54.5	27	
		Phase2	36.6	53.9	24	

表-8 鋼材の機械的特性

調合名	鋼繊維 混入率 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )		
				水	セメン ト	SF
Phase 1	0.89	53.9	50.0	200	371	70
Phase 2	0.89	51.3	61.0	210	409	70

表-9 SFRCの調合表

調合名	鋼繊維 混入率 $V_f$ (%)	圧縮強度 $F_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係 数 $E$ (tf/cm <sup>2</sup> )	曲げ強度 $\sigma_b$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	曲げタフ ネス $T_b$ (kgf-cm)	換算曲げ 強度 $\bar{\sigma}_b$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
Phase 1	0.89	416	271	56.8	237	35.2
Phase 2	0.89	473	292	84.8	1666	74.0

- (注) 1) 圧縮試験は、Phase1ではφ10×20cm円柱形供試体、Phase2ではφ15×30cm円柱形供試体による  
2) 曲げ試験は、Phase1ではφ10×10×40cm直方形供試体、Phase2ではφ15×15×53cm直方形供試体による  
3) 曲げタフネスおよび換算曲げ強度は、鋼材倶楽部「鋼繊維補強コンクリート設計・施工指針案」による

表-10 SFRCの材料特性

	Phase 1		Phase 2	
	FR-1	FR-2	FR-3	FR-4
ブレース 断面形状				
芯鉄骨	+-120×120×12×12	+-150×90×12×12	+-120×120×12×12	+-120×120×12×12
被覆 コンクリート	□-235×235	□-250×220	□-200×200	□-200×200
補強筋	主筋 12D-10 ( $p_t = 0.77\%$ ) フープ筋 D6-@30 ( $p_w = 0.91\%$ )	主筋 12D-10 ( $p_t = 0.77\%$ ) フープ筋 D6-@30 ( $p_w = 0.97\%$ )	主筋 12D-10 ( $p_t = 1.07\%$ ) フープ筋 D6-@150 ( $p_w = 0.21\%$ )	無
鋼繊維	長さ30mm, 径0.5mm(アスペクト比60):70kg/m <sup>3</sup>		長さ60mm, 径0.8mm(アスペクト比75):70kg/m <sup>3</sup>	

表-7 ブレース断面形状

ネル端にブレースをピン接合としたフレーム解析によると、弾性時のブレースの水平分担率は55%である。

加力は、アクチュエータにより試験体フレーム左右の柱頭に水平力を加えることにより行なった。加力パターンは、層間変形角1/50まで正負交替の漸増繰返し載荷を行なった。繰返し回数はPhase 1で8サイクル、Phase 2で10サイクルである。

### 3.2 実験結果および考察

図-16に、各試験体のフレーム全体に作用したせん断力( $Q$ )と柱頭の水平変形( $\delta$ )の関係を示す。全試験体とも、フレーム全体としては層間変形角( $R$ )1/50まで大きな耐力低下は見られず、安定した紡錘型の履歴性状を示している。

図-17に、ブレースが負担したせん断力( $Q_B$ )と $\delta$ の

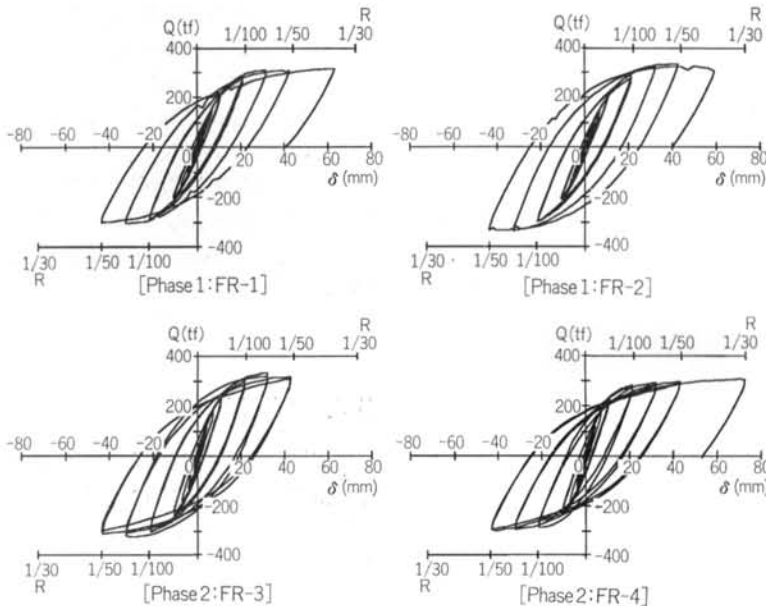


図-16 荷重-変形関係 (フレーム全体)

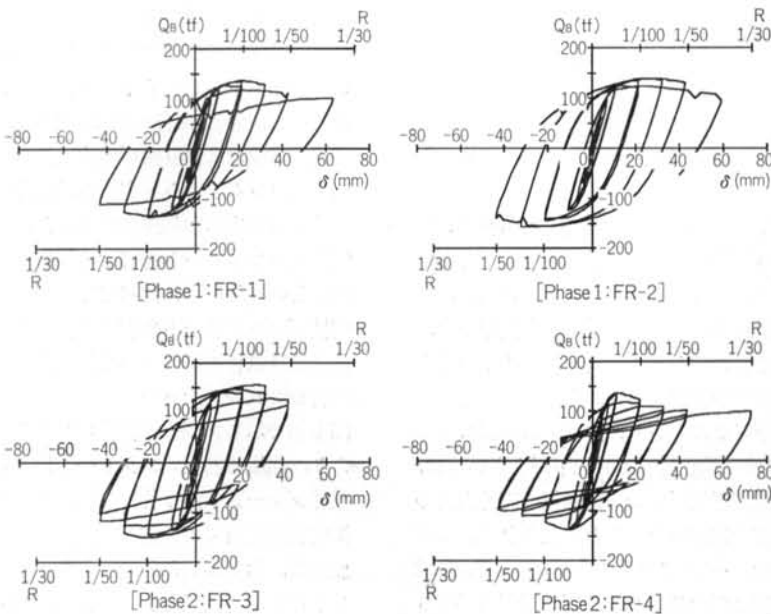


図-17 荷重-変形関係 (ブレース)



写真—3 局部座屈



写真—4 全体座屈

関係を示す。FR-1, FR-2, FR-3 試験体のブレースは、写真—3 に示すように梁中央のガゼット部分の面外変形によって、圧縮側ブレース上端部の被覆していない芯鉄骨部分が面外方向に局部座屈し、徐々に耐力低下した。局部座屈の発生サイクルは、FR-1 試験体で+7サイクル( $R=1.5/100$ ), FR-2 試験体で+8サイクル( $R=1/50$ ), FR-3 試験体で-8サイクル( $R=1.5/100$ )であった。FR-1 試験体に比べてFR-2 試験体の耐力低下が小さいのは、ブレース芯鉄骨の断面形状がブレース端部の面外方向の局部座屈に対して有効に働いたためと考えられる。FR-4 試験体のブレースは、-3サイクル( $R=1/200$ )でSFRC 中央部に曲げひび割れが生じ、その曲げひび割れが+5 サイクル( $R=1/100$ )から急激に進展し、写真—4 に示

Phase 1				Phase 2			
FR-1		FR-2		FR-3		FR-4	
ブレース	フレーム全体	ブレース	フレーム全体	ブレース	フレーム全体	ブレース	フレーム全体
18.4	16.0	22.0	17.8	29.1	27.7	21.3	23.8

表—11 平均累積塑性変形倍率

すように全体座屈で破壊した。

各試験体の $R=1/50$ までの平均累積塑性変形倍率 $\bar{\epsilon}$ を表—11に示す。 $\bar{\epsilon}$ を求めるために必要な弾性ひずみエネルギーは前述のフレーム解析により算定しており、その値はフレーム全体で $94.0\text{tf}\cdot\text{cm}$ 、ブレースのみで $51.7\text{tf}\cdot\text{cm}$ である。ブレースのみの $\bar{\epsilon}$ を比較すると、Phase 1ではFR-1 試験体よりも芯鉄骨の面外方向の曲げ剛性の大きいFR-2 試験体の方が、Phase 2ではFR-4 試験体よりも補強筋を有するFR-3 試験体のほうが大きい値となっている。

## § 4. 結論

座屈拘束機能を有する鉄骨ブレースについて、部材実験、解析シミュレーションおよび骨組実験により弾塑性性状の検討を行なった結果を要約すると、以下のとおりである。

### 1) 部材実験

(1)被覆コンクリートの断面サイズを $\square-200\times 200$ としたC1シリーズは、所要の軸方向変形に対して全体座屈が生じず、ひび割れは見られなかった。一方、被覆コンクリートの断面サイズを $\square-175\times 175$ としたC2シリーズ、および $\square-150\times 150$ としたC3シリーズでは、全体座屈により曲げ破壊が生じた。

(2)被覆コンクリートを有する試験体の復元力特性は履歴性状の安定した紡錘型であった。

(3)被覆コンクリートを有する試験体の最大圧縮耐力は芯鉄骨の降伏耐力に比べて1.46~1.93倍であった。

(4)被覆コンクリートを有する試験体のエネルギー吸収能力は純鉄骨の試験体の2倍以上であった。

### 2) 解析シミュレーション

(1)本報で示した鋼繊維補強コンクリートのモデル化により、鋼繊維補強コンクリートによって座屈拘束した鉄骨ブレースの曲げ特性を把握することができた。

(2)座屈拘束材である鋼繊維補強コンクリートの弾性座屈荷重、および元たわみ量から求める中央曲げモーメントは本解析結果とおおむね対応している。

### 3) 骨組実験



当該ブレースをK型に組み込んだ鉄骨骨組は、層間変性は履歴性状の安定した紡錘型であった。  
形角1/50まで大きな耐力低下は見られず、その復元力特

#### <参考文献>

- 1) 藤本盛久, 和田章, 佐伯英一郎, 渡辺厚, 人見泰義: “鋼管コンクリートにより座屈を拘束したアンボンドブレースに関する研究” 構造工学論文集 Vol. 34B (1988年3月) pp. 249~258
- 2) 安藤信義, 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年3月) pp. 219~232
- 3) 長尾直治, 高橋茂治: “角鋼管を鉄筋コンクリートで被覆したアンボンドブレースの弾塑性性状(その1: 繰返し加力実験)” 日本建築学会構造系論文報告集 第415号 (1990年9月) pp. 105~115
- 4) 長尾直治, 高橋茂治: “角鋼管を鉄筋コンクリートで被覆したアンボンドブレースの弾塑性性状(その2: 解析的考察)” 日本建築学会構造系論文報告集 第422号 (1991年4月) pp. 45~56
- 5) 井上一朗, 沢泉紳一, 東端泰夫, 井ノ上一博: “アンボンド平鋼ブレース内蔵コンクリート壁の座屈補剛設計” 日本建築学会構造系論文報告集 第432号 (1992年2月) pp. 41~49
- 6) 堀富博, 矢部喜堂, 橘大介, 坂本真一, 中村庄滋, 堀江竜巳: “座屈拘束機能を有する鉄骨ブレースの弾塑性性状(その1. 部材実験の概要及び破壊性状)” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1991年9月)
- 7) 堀江竜巳, 矢部喜堂, 堀富博, 橘大介, 坂本真一, 中村庄滋: “座屈拘束機能を有する鉄骨ブレースの弾塑性性状(その2. 部材実験結果及び考察)” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1991年9月)
- 8) 中村庄滋, 矢部喜堂, 堀富博, 真瀬伸治, 広瀬景一, 堀江竜巳: “座屈拘束機能を有する鉄骨ブレースの弾塑性性状(その3. 部材実験の解析シミュレーション)” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1992年8月)
- 9) 堀江竜巳, 矢部喜堂, 堀富博, 橘大介, 坂本真一, 中村庄滋: “座屈拘束機能を有する鉄骨ブレースの弾塑性性状(その4. K型ブレース付骨組の加力実験)” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1992年8月)
- 10) T. Y. Lim, P. Paramasivam & S. L. Lee: “Bending Behavior of Steel-Fiber Concrete Beams” ACI Structural Journal, Vol. 84, No. 6 (1987)

