論文 高靭性セメント複合材料を用いた鉄骨ブレースの中央部接合に関する研究

西山 功*1・梁 一承*2・福山 洋*3・諏訪田 晴彦*4

要旨:鉄筋コンクリート造の耐震補強としてブレース付き鉄骨骨組(補強フレーム)の設置 が行われている。建物外周に面していない部位への適用では,上記補強フレームの建物内部 での組立が必要となる。補強フレームのブレース中央部に接合位置を設け,高靭性セメント 複合材料を使用して接合する方法により施工の合理化が図られる。本研究では,高靭性セメ ント複合材料を使用したブレース中央接合部の構造性能を,ブレース単体実験及びブレース 骨組実験により検討した。

キーワード:鉄骨ブレース,耐震補強,高靭性セメント複合材料,PC鋼棒,鉄骨接合

1. はじめに

鉄筋コンクリート造の耐震補強としてブレー ス付き鉄骨骨組(補強フレーム)の設置がしば しば使用されている。しかし,補強フレームは 鉄骨製作工場で既組立されており,現場では既 存骨組に挿入・固定されるのみであり,建物外 周に面していない骨組部位への適用には一般に 困難が伴う。

ここでは、補強フレームをいくつかの部品と して現場に搬入し、それぞれの部品を現場で高 靭性セメント複合材料(以下,高靭性セメント と呼ぶ)を使用して接合する方法を対象とし、 このような工法では必ず存在するブレースの中 間の高靭性セメントによる接合部の構造性能を ブレース単体試験体及びブレース骨組試験体に より検討する。

ブレースは鉄骨部材であり,その中間の接合 部においては,ブレースに作用する引張力を PC 鋼棒により,圧縮力を高靭性セメントにより伝 達する。また,ブレースの靭性は,主として PC 鋼棒の伸び能力に期待している。なお,高靭性 セメントとしては,HPFRCC¹⁾及び RPC²⁾を使用す る。 2. 実験概要

2.1 ブレース単体試験体の実験

図 - 1にはブレース単体試験体³⁾の詳細を示 す。試験体の寸法は断面200×200mmで,主筋と してはPC鋼棒23の端部を転造ネジとしたもの を4本とし,帯筋は使用していない。高靭性セ メントはパン型ミキサーにより練混ぜ,試験体 を横にした状態で打設し,脱型後気中養生を行 った。鉄骨部にはH-200x200x19x19(mm)を使用 した。

ブレース単体試験体のパラメータは表 - 1 に 示すように,高靭性部の幅(B:200)に対する 長さ(H)と投入する繊維種類とした。混入する 繊維にはポリビニルアルコール繊維 (PVA:Poly-Vinyl Alcohol),ポリエチレン繊維 (PE:Polyethylene),鋼繊維(SC:Steel Codes)を 用いた。No.C1, No.C2, No.C3 は PVA を使用(投 入率1.7%)するもので H/Bを変数とした。No.C4 はH/Bが2.0で,高靭性部に対しPE(1%)とSC(1%) を混合して使用した。No.C5 は H/B が 2.0 で,高 靭性部に対し PE(1%)を使用した。No.C6 は H/B が 2.0 で,繊維を使用しないものであり,No.C7 は H/B が 2.0 で,シース管により PC 鋼棒と高靭 性部(PVA 使用)との付着を切った。表 - 2 に使

- *1 独立行政法人 建築研究所 建築生産研究グループ 工博 (正会員)
- *2 日本学術振興会 科学技術特別研究員 博士(工) (正会員)
- *3 独立行政法人 建築研究所 構造研究グループ 工博 (正会員)
- *4 国土交通省国土技術政策総合研究所 研究官 (正会員)

用材料の材料特性を示す。さらに,表-3には試 験区間の長さを変化させたPC鋼棒の引張試験結 果を示す。載荷は図-2に示すように2000kN サーボ型試験機を用いて,加力を行う。引張力 は高靭性部の長さ(H)を検長として上下の鉄板 の間に変位計を設置して+1/1600,+1/800, +1/400,+1/200,+1/100,+1/67,+1/50,+1/33, +1/25,+1/20,+1/15の各変位まで2回づつ載 荷した。その後は+1/10以上の変位まで単調載荷 した。一方,圧縮力はそれぞれの引張時の荷重 レベルまで加力(例えば,+1/1600が+180kNの 場合,圧縮力は-180kNまで加力)を行った。

| No. | 高靭性部 の長さ H(mm) | H/B | 材料 | 比較 |
|-----|----------------------|-----|----------------------|---------------------|
| C1 | 400 | 2.0 | | 高靭性部の断面 |
| C2 | 600 | 3.0 | PVA-HPFRCC | (BxD); 200 x 200 |
| C3 | 200 | 1.0 | | 鉄骨部 |
| C4 | 400 | | PESC-HPFRCC | :200x200x19x19 |
| C5 | | | PE-HPFRCC | PC 鋼棒 |
| C6 | | 2.0 | MORTAR | · $23(4 \text{ 木})$ |
| C7 | | | PVA-HPFRCC (シース管) | , <i>25</i> (十个) |

表 - 1 ブレース単体試験体の一覧

表 - 2 高靭性セメント等の材料特性

| 材料 | 繊維種類 (混入率 %) | 圧縮強度 (MPa) | ヤング係数 (GPa) |
|-------------|-----------------|---------------|----------------|
| MORTAR | | 58.14 | 19.6 |
| PVA-HPFRCC | PVA(1.7) | 48.31 | 18.2 |
| PE-HPFRCC | PE(1.0) | 50.53 | 18.3 |
| PESC-HPFRCC | PE(1.0)+SC(1.0) | 50.81 | 20.3 |

表 - 3 PC鋼棒の引張試験結果

| 長さ (mm) | 初期剛性 (kN/mm) | 降伏応力 (MPa) | 最大強度 (MPa) | 最大強度 時の変位 (mm) |
|------------|-----------------|---------------|---------------|----------------------|
| 200 | 368.0 | 920.4 | 1091.5 | 10.62 |
| 400 | 178.5 | 926.6 | 1089.0 | 25.60 |
| 600 | 122.4 | 926.9 | 1085.9 | 36.85 |

2.2 ブレース骨組試験体の実験

図 - 3 には試験体の詳細を示す。ブレースの寸 法は断面 200(B) × 294(D) mm で,中間接合部 の主筋としては PC 鋼棒 19 或いは PC 鋼棒 17 の端部を転造ネジとしたものを4本とし,帯筋 は使用していない。高靭性セメントはパン型ミ キサーにより練混ぜ,試験体を試験装置にセットしてから打設し,脱型後気中養生を行った。 一方,鉄骨ブレースにはH-294x200x12x12(mm) とH-294x200x6x6(mm)を使った。



図 - 1ブレース単体試験体図



図 - 2 ブレース単体試験体の実験装置

試験体のパラメータは表 - 4 に示すように, 高靭性部の幅(B:200)に対する長さ(H)と投 入する繊維種類である。No.D1(PVA400)とNo.D2 (PVA600)はH/Bが2.0,3.0で,ポリビニルア ルコール繊維(PVA)を1.7%投入した。No.D3 (RPC400)とNo.D4(RPC200)試験体はそれぞれ H/B が 2.0 と 1.0 で,高靭性部に超高強度コンク リート (RPC: Reactive Powder Concrete)を用 いた。No.D1, No.D2, No.D3 では鉄骨ブレース部 を弾性とし,高靭性部での変形を期待している。 一方, No.D4 は高靭性部を弾性にし, 鉄骨ブレー ス部で変形性能を期待したものである。表 - 5 と表 - 6 に使用材料の材料特性を示し,表 - 7 には試験区間の長さを変化させた PC 鋼棒の引張 試験の結果を示す。載荷は図 - 4 に示すような 試験装置により加力を行った。正負交番繰返し 載荷とし, 階高(1700mm)に対して層間変形 角をそれぞれ±1/1600,±1/800,±1/400,± 1/200, ±1/100, ±1/67 まで各2回づつ行い, その後は,耐力低下時まで単調載荷した。変位 計は層間変位,床とのすべり量,ブレースの変 位,高靭性部の軸変位,などを計測するために 設置した。高靭性部の軸変位は高靭性部の長さ

を検長として高靭性部の上下鉄板の間に変位計 を設置して計測した。また,フレームとブレー スにひずみゲージを貼り付け,各部の軸力を測 定した。

| No. | 高靭性部 の長さ H(mm) | 繊維 種類 | PC 鋼棒 | 比較 |
|-----|----------------------|----------|------------|-------------------------|
| D1 | 400 | PVΔ | | H-294x200x12x12 |
| D2 | 600 | 1 1/1 | 1 7 | (|
| D3 | 400 | | | |
| D4 | 200 | RPC | 19 | H-294x200x6x6 鉄骨部で変形 |

表-4 ブレース骨組試験体の一覧

表 - 5 高靭性セメントの材料特性

| No. | 繊維種類 (混入率 %) | 圧縮強度 (MPa) | ヤング係数 (GPa) |
|-----|-----------------|---------------|----------------|
| D1 | PVA(1.7) | 46.0 | 18.2 |
| D2 | RPC | 124.0 | 48.1 |
| D3 | PVA(1.7) | 40.5 | 18.5 |
| D4 | RPC | 128.6 | 48.2 |



図 - 3 ブレース骨組試験体図



図 - 4 ブレース骨組試験体の試験装置へのセット状況

| 板厚 | 降伏応力 (MPa) | 引張強度 (MPa) | ヤング係数 (GPa) | 材質 |
|----|---------------|---------------|----------------|--------|
| 6 | 233.4 | 322.5 | 200.2 | LYP235 |
| 12 | 285.8 | 422.4 | 210.8 | SN400B |

表-6 鋼材の材料特性

表 - 7 PC鋼棒の引張試験結果

| 長さ (mm) | 初期剛性 (kN/mm) | 降伏応力 (MPa) | 最大強度 (MPa) | 最大強度 時の変位 (mm) |
|------------|-----------------|---------------|---------------|----------------------|
| 210 | 140.4 | 937.2 | 1099.9 | 15.81 |
| 400 | 67.6 | 935.3 | 1096.2 | 29.30 |
| 610 | 48.2 | 923.8 | 1089.8 | 43.82 |

3. 実験結果及び考察

3.1 ブレース単体試験体の結果

図 - 5 にはブレース単体試験体の軸荷重と軸 変形関係(高靭性部長さを検長)を示す。また, 表 - 8 には実験結果を示す。No.C1(PVA400)で は最大引張荷重が-1698.0kNで,その後の耐力低 下も小さく,高靭性部にはマルチプルクラック ⁴⁾が発生した。その後,26.67mm(6.7%)の変形時にPC 鋼棒が破断した。No.C2(PVA600)は最大引張荷重が-1739.2kNで,マルチプルクラックが発生したが,+1/15の2サイクル目の途中でPC 鋼棒が破断した。No.C3(PVA200)は最大引張荷重が-1725.6kNで,2本ぐらいのクラックと縦ひび割れが観察され,+1/10でPC 鋼棒が破断した。No.C4(PESC400)は最大引張荷重が-1720.6kNで,マルチプルクラックと縦ひび割れが観察され+1/12でPC 鋼棒が破断した。No.C5(PE400)は最大引張荷重が-1728.8kNで,マルチプルクラックと縦ひび割れが観察され+1/15の2サイクル目でPC 鋼棒が破断した。

No.C6(M0400)は最大引張荷重が-1627.8kNで, 若干のクラックと縦ひび割れが観察され, +1/100の1サイクル目でモルタルの一部が剥落 し,+1/50の2サイクル目でモルタルの剥離によ り拘束効果を失い,PC鋼棒の座屈により耐力が

表-8 ブレース単体試験体の実験結果

| 試験体 | 初期剛性 | 最大荷重 | 最大荷重 | 破断モード |
|----------------|-----------|---------|--------|------------|
| | (kN/mm) | (kN) | 時の変位 | |
| | | | (mm) | |
| C1 (PVA400) | 399.7 | -1698.0 | -15.9 | PC 鋼棒の破断 |
| C2 (PVA600) | 331.2 | -1739.2 | -17.91 | PC 鋼棒の破断 |
| C3 (PVA200) | 630.2 | -1725.6 | -12.88 | PC 鋼棒の破断 |
| C4 (PESC400) | 429.8 | -1720.6 | -12.01 | PC 鋼棒の破断 |
| C5 (PE400) | 427.9 | -1728.8 | -15.90 | PC 鋼棒の破断 |
| CG (M0400) | 200.0 | 1607.0 | 7 00 | PC 鋼棒座屈による |
| C6 (M0400) | 390.9 | -1627.8 | -7.92 | セメント縦割れ |
| C7 (PVA400S) | 392.3 | -1710.8 | -15.65 | セメントの圧壊 |







低下した。PC 鋼棒にシース管を通し,セメント との付着を無くした No.C7 (PVA400S)は最大引 張荷重が-1710.8kN で,縦ひび割れのみ観察され た。PVA による繊維補強で剥落はなかったが, -1/20 の2サイクル目で,高靭性セメントの圧壊

により耐力が低下した。

3.2 ブレース骨組試験体の結果

ブレース骨組試験体の水平荷重と水平変位と の関係を図 - 6 に示す。また,図 - 7 にはブレ

| 試験体 | 初期剛性 (kN/mm) | 正側(負側) 最大耐力 | 正側(負側)最大耐 | 破断モード |
|-------------|-----------------|---------------------|-------------------|------------------------|
| | | (kN) | (mm) | |
| D1 (PVA400) | 316.34 | 1831.6 (-1778.2) | 21.13 (-17.63) | PC 鋼棒の破断 |
| D2 (PVA600) | 302.91 | 1912.5 (-1879.6) | 25.20 (-22.59) | PC 鋼棒の局部座屈 |
| D3 (RPC400) | 387.39 | 1776.7 (-1719.4) | 10.64 (-9.70) | PC 鋼棒の破断 |
| D4 (RPC200) | 345.25 | 1404.3 (-1772.3) | 8.05 (-5.88) | ブレース端部のカセッ トプレートの座屈 |

表 - 9 ブレース骨組試験体の実験結果











(a) D1 (PVA400)



(b)D2 (PVA600) (c) 直 3 映陸王一ド(ブレー





(d) D4 (RPC200)

写真 - 3 破壊モード(ブレース骨組試験体)

ース中間の高靭性部の軸力と軸変位の関係を示 す。表 - 9には実験結果を示した。

高靭性部に PVA を打設した No.D1 (PVA400) で は1/1600 rad. で高靭性部にひび割れがそれぞれ 2本ずつ入りはじめ、その後にはマルチプルクラ ックが発生した。その後+1/100 rad.で引張側ブ レースの高靭性部の下から 100mm の位置に 10mm 程度の幅の大きな隙間が観測された。そして 1/78 rad. で PC 鋼棒が破断して耐力が低下した。 No.D1 (PVA400)の高靭性部の長さを 1.5 倍にし た No.D2 (PVA600) では高靭性部に 1/800 rad. でひび割れが4~6本ずつ入り,その後もクラッ クが増え続けマルチプルクラックが見られた。 そして+1/67 rad.のサイクルで引張側ブレース の高靭性部の下から 150mm 程度の位置に 20mm 以 上の大きな隙間が生じ,-1/67 rad.の加力途中 で隙間の位置で PC 鋼棒が座屈して耐力が低下し た。

No.D1 の高靭性部に PVA のかわりに RPC を打設 した No.D3 (RPC400)では 1/400 rad.で高靭性 部にひび割れが両側ともに 3~4本ずつ入り,そ の後にはマルチプルクラックが発生した。しか し+1/150 rad.で PC 鋼棒が破断して耐力が低下 した。高靭性部の長さを短くして PC 鋼棒 19を 使用した No.D4(RPC200)では高靭性部を弾性に 保ちながら鉄骨部(H-294x200x6x6)を塑性化さ せるために鋼材の板厚を薄くしたが,ガセット プレートの補強をしなかった為に 1/200 rad.で ガセットプレートが局部座屈し耐力が低下した。 なお,高靭性部ではひび割れは観測されなかっ た。

図 - 7 に示すようにブレース骨組に組み込ま れた PC 鋼棒の破断時の変形能力は PC 鋼棒の引 張実験結果の7割程度である。また,これはブ レースに作用する軸引張力と二次的なせん断力 の複合応力を受けるためである。このことは, 写真-3(c)の破壊モードにおけるせん断ずれ変 形から読み取れる。 4. 結論

材中間に高靭性セメントによる接合部を有す るブレースの構造性能をブレース単体試験体 (7体)およびブレース骨組試験体(4体)に より検討した。

ブレース単体実験より繊維を混入しなかった 試験体やシース管中に PC 鋼棒を入れたため横変 位が荷重初期段階から発生する試験体では,高 靭性部で破壊が生じたがそれ以外の試験体では PC 鋼棒の伸び能力が十分に発揮できることがわ かった。

一方,ブレース骨組実験では,ブレース接合 部に2次応力に伴うせん断力が発生したために 想定した PC 鋼棒の伸び能力が少々阻害されるこ とがわかった。これは複合応力による影響であ り,今後より詳細に検討する必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたり, RPC 材料は太平洋セ メント社から提供を受けました。ここに記して, 謝意申し上げます。

参考文献

- 1) 諏訪田晴彦,福山洋,磯雅人:構造物の高靭 性化に向けた高靭性繊維補強セメント複合 材料の開発,コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.133-138,2001
- 小幡一博,菅野俊介ほか:超高強度コンクリートの圧縮特性に関する実験的研究,日本建築学会大会学術講演梗概集,C-2,pp.13-14,2002
- 3) 梁 一承,西山功ほか:高靭性セメント複合 材料と鋼棒による鉄骨部材接合部の強度と 靭性,日本建築学会大会学術講演梗概集,C-2, pp.1073-1074,2003
- 4) 高靭性セメント複合材料を知る・作る・使う, 日本コンクリート工学協会, pp.3-4, 2002