

連層鉄骨ブレースで補強された RC 骨組の三方向外力下での耐震性能評価
(その3 三次元非線形有限要素解析による検討)

正会員 中沼弘貴*¹
正会員 北山和宏*²

有限要素解析 二軸曲げ 連層鉄骨ブレース
全体曲げ破壊 耐震補強

1. はじめに

2002年に佐藤ら¹⁾が連層鉄骨ブレースで耐震補強したRC2層3スパン骨組試験体を実験し、全体曲げ破壊と基礎浮き上がり破壊を比較し、全体曲げ破壊のほうが耐震性能に優れていることを指摘した。また2006年に著者ら²⁾が2002年と同様の試験体を作製し水平2方向載荷実験を行った。その結果ブレース脇の付帯柱の二軸曲げの影響により耐力が1割程度低下し変形性能も低下したことを指摘したが、二軸曲げに関する詳細な検討は示さなかった。そこで本研究では、三次元非線形有限要素解析によって実験状況を再現し柱脚とブレース脚部の圧縮応力状態、軸力負担推移を明確にする。

2. 試験体のモデル化

解析対象試験体は水平2方向載荷試験体(試験体No.3)とした。解析モデルおよび試験体配筋を図-1、材料強度を表-1に示した。解析モデルは試験体No.3同様2層3スパンとした。解析は柱1,4(以下独立柱と記す)脚部および柱2,3(以下付帯柱と記す)脚部にあるスタブを固定し、水平2方向載荷モデルは軸力を中央に160kN与えて面外方向に1.5%変形させた状態で面内頂部変形角2%まで変形させる(以下2方向載荷と記す)。2方向載荷を行ったモデルをM3-2とし、面内水平載荷のみを行なった(以下1方向載荷と記す)モデルをM3-1とした。コンクリートは六面体要素、主筋は線材として1本ずつモデル化し、せん断補強筋は六面体

要素内に分布鉄筋としてモデル化をした。

柱は断面140mm×140mmを36分割し、高さ660mmを15分割した。梁は断面140mm×90mmを24分割し、梁内法スパン860mmを12分割した。ブレース斜材は線材置換し試験体同様の断面積とした。ブレース縦枠と間接接合部相当のコンクリート部分は、コンクリート断面積をヤング係数比で除して鉄骨断面に置換した。柱2脚部のモデル化詳細図を図-2に示す。全体曲げ破壊で付帯柱脚部に大きなひび割れが発生するためクラックリンクは、付帯柱1層脚部危険断面、1層ブレース横枠底面と基礎梁の間に設けた。またアンカー筋はバネに置換し、ブレース横枠と直下のコンクリートを接続した。柱2,3は1層柱脚危険断面付近にポンドリンクを設け主筋の抜け出しを表現した。三次元非線形有限要素解析は単調載荷とし、ソフトウェア「FINAL³⁾」により実施した。

3. 水平力-頂部変形角関係

両モデルの解析より得られた水平力-頂部変形角関係を太線で、実験結果の履歴を細線で図-3に示す。実験値と解析値を比較すると、解析の初期剛性が高いため、引張側柱(柱3)全主筋引張降伏時頂部変形角と最大耐力時頂部変形角は実験・解析で差が生じたが、耐力は一致した。実験・解析ともに全体曲げ破壊(引張側柱が全主筋引張降伏しその後境界梁が曲げ降伏した)によって最大耐力に達した。

解析では両モデルとも柱主筋が同耐力で全て引張降伏した。1方向載荷を行なったM3-1は頂部変形角0.98%(278kN)で全体曲げ破壊し最大耐力に達した。その後全梁主筋降伏した頂部変形角1.2%で耐力が5%低下した。2方向載荷を行なったM3-2は頂部変形角0.7%(246kN)で全体曲げ破壊し最大耐力に達し以後耐力を保持した。2方向載荷モデルM3-2の最大耐力は1方向載荷モデルM3-1より12%小さかった。

4. 脚部の応力状態

4.1 歪コンター

両モデルの柱3脚部全主筋引張降伏時(面内頂部変形角:0.25%),最大耐力時(M3-1面内頂部変形角:0.98%,M3-2:

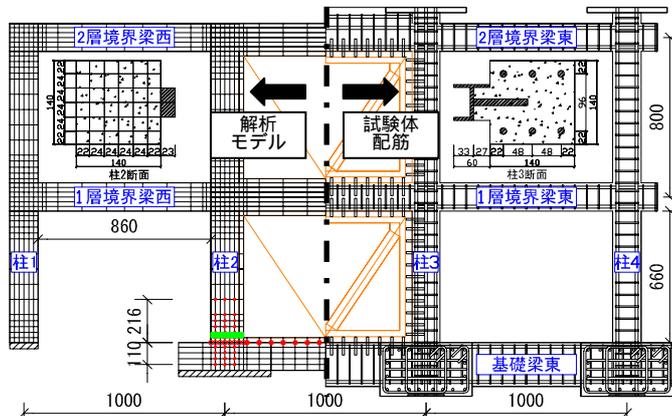


図-1 解析モデルおよび試験体No.3配筋

表-1 材料特性

鋼材	σ_y	σ_t	ν
付帯柱主筋 D10(SD295)	379	492	0.20
独立柱主筋 D13(SD390)	456	660	0.23
梁主筋 D13(SD345)	377	544	0.21
せん断補強筋 6	407	494	0.19
アンカー筋 D10(SD345)	384	547	0.21
鉄骨ブレース (SM490)	280	375	0.14
コンクリート	σ_c	σ_t	ν
	37.0	3.12	0.22
	$\sigma_{c,t}$	$\sigma_{t,c}$	ν
	0	2.67	0.267

σ_y : 降伏応力度 (MPa) σ_t : 最大応力度 (MPa) ν : 降伏歪 (%)
 $\sigma_{c,t}$: 圧縮強度 (MPa) $\sigma_{t,c}$: 引張強度 (MPa) ν : 引張割裂強度 (%)

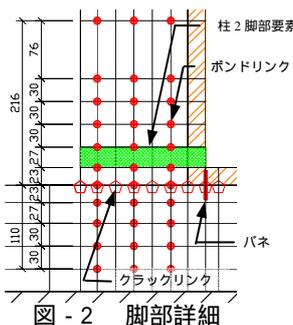


図-2 脚部詳細

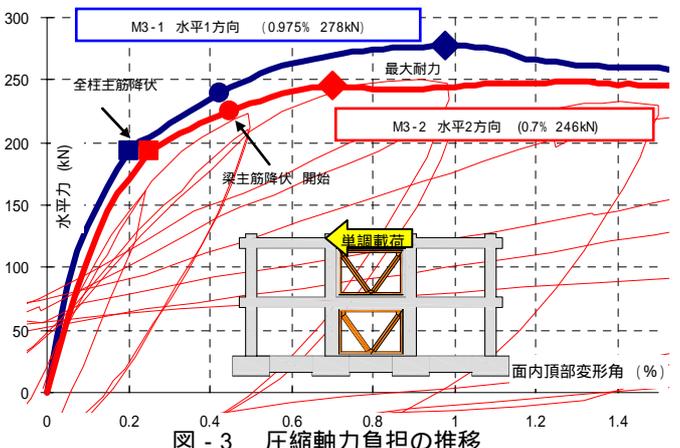


図-3 圧縮軸力負担の推移

0.70%) の柱 2 脚部要素 (図 - 2 に示す) の歪コンターを 図 - 4 に示す。コンクリートは修正 Ahmad モデルを用いたので、歪 0.22% で 37MPa の最大応力となり、歪 0.5% で 4 割程度の応力度に低下し、その後 1 割程度の応力度に低下した。

柱 3 脚部全主筋引張降伏時において、M3-1 は断面の左側半分が圧縮領域となり、均等に圧縮力を負担した。M3-2 は圧縮領域と引張領域の境界が斜めであるが、断面の半分は圧縮領域となった。コンクリートが軟化域 (圧縮歪が 0.5% を越え応力度が 40% に低下した) に達した部分は、二軸圧縮を受ける南西隅角部から 30mm 程度である。

最大耐力時に M3-1 と M3-2 のコンクリートが軟化域に達した面積を比較すると、M3-1 は柱全断面の 2 割程度であるが、M3-2 は 4 割程度である。最大耐力時における、コンクリート軟化域の面積が 2 方向載荷の影響で 2 倍となった。

4.2 圧縮軸力負担推移

圧縮側の付帯柱 2 および接合されているブレース縦枠の圧縮軸力を 図 - 5 に示す。付帯柱の圧縮軸力負担はコンクリートと主筋に分けて示した。付帯柱とブレース縦枠が負担する圧縮軸力の和 (以下、合計圧縮軸力と記す) を実線で示した。図 - 5 中の ~ は、以下の示すように柱脚の圧縮と引張断面の様子を示す。 は柱のみ、 は柱およびブレース縦枠の一部、 は柱およびブレース縦枠の全部、で圧縮軸力を負担することを表す。両モデルとも合計圧縮軸力最大時の変形角がフレームの最大水平耐力時変形角とほぼ一致した。M3-2 はコンクリート断面の軟化域が拡大し圧縮軸力を負担できなくなったため、最大水平耐力時のコンクリート負担圧縮力が M3-1 の 72% に低下し、合計圧縮軸力が 89% に低下した。

最大耐力以降の耐力低下は、以下に示す理由から M3-1 よりも M3-2 が緩やかである。M3-1 は断面の圧縮領域と引張領域の境界が面内載荷軸に対して垂直なため、柱断面が全圧縮

になった後にブレース縦枠が圧縮力を負担する。一方、M3-2 は圧縮領域と引張領域の境界が斜めなため、柱断面の 3/4 程度圧縮負担した時期からブレース縦枠が圧縮力負担を開始するため急激な応力低下が生じない。

5. 結論

連層鉄骨ブレースで補強された 2 層 3 スパンの RC 平面骨組に水平 1 方向および水平 2 方向載荷した実験・解析ではいずれも、連層鉄骨ブレースと RC 付帯柱からなる部分骨組が全体曲げ破壊したが、2 方向載荷時の最大水平耐力は 1 方向載荷時よりも 10% 程度低下した。これは以下のように、水平 2 方向載荷時に二軸曲げを受ける RC 付帯柱の脚部性状に起因する。なおここでの水平 2 方向載荷とは面外頂部変形角 1.5% の変形を保持した状態で、面内に実験では正負交番載荷、有限要素解析では単調載荷したものを指している。

水平 1 方向載荷した三次元非線形有限要素解析では頂部変形角 1% で圧縮側付帯柱脚部のコンクリートが圧壊して軟化域に達したのに対して、2 方向載荷では引張側付帯柱の全主筋が引張降伏した 0.25% 時に断面隅角部のコンクリートが圧壊した。2 方向載荷により付帯柱脚部コンクリートの軟化が早期に生じたため、最大水平耐力時のコンクリート負担圧縮軸力は 1 方向載荷時の 72% にとどまった。

謝辞) 本研究は日本学術振興会の科学研究費補助金 (基盤研究 C, 代表: 北山) によって実施した。

参考文献

- 1) 佐藤照祥, 北山和宏, 岸田慎司, 加藤弘行: 鉄骨ブレースで補強された RC 骨組の耐力と変形性能に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.2, pp.1339-1344, 2004.7
- 2) 中沼弘貴, 北山和宏, 田島祐之, 森田真司: 鉄骨ブレースで補強された RC 骨組の三方向外力下での復元力特性, コンクリート工学年次論文報告集, pp.175-180, 2007.7
- 3) 長沼一洋: 鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究 (その 1), 日本建築学会構造系論文集, 第 421 号, pp.39-48, 1991.3

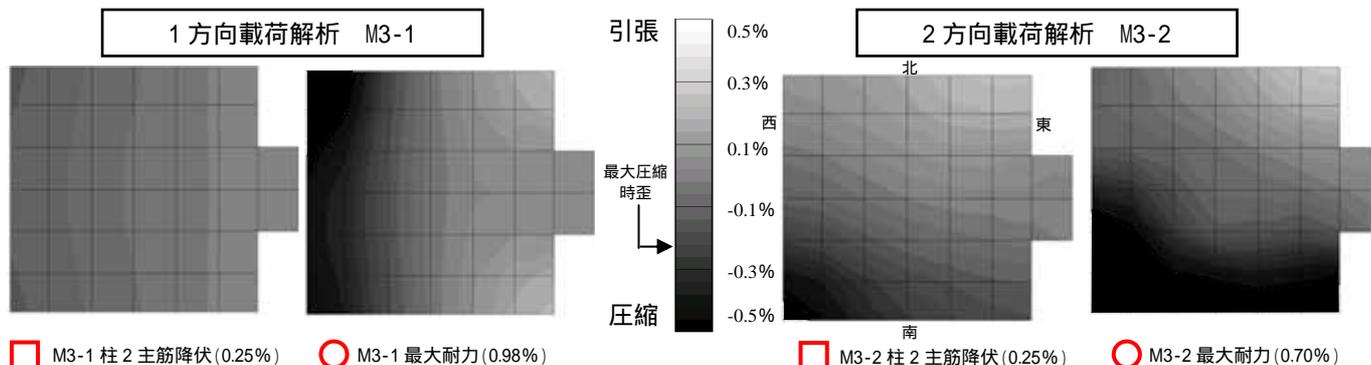


図 - 4 柱 2 脚部要素の歪コンター

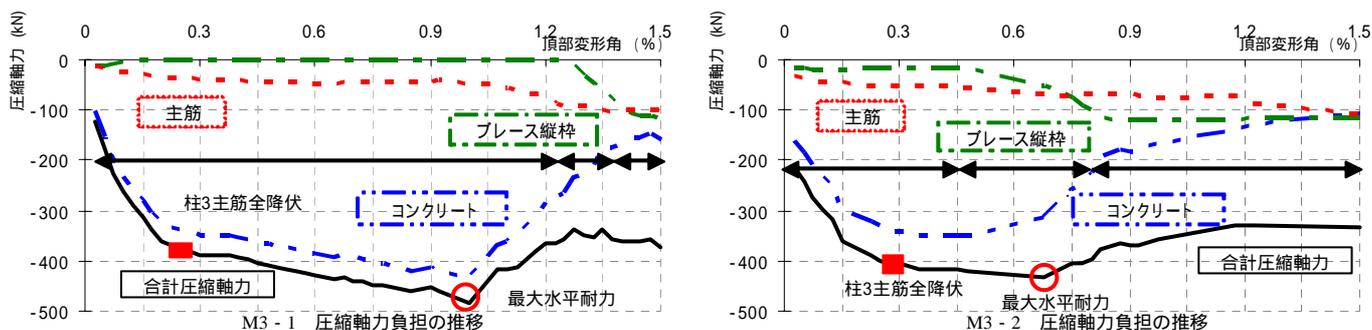


図 - 5 圧縮軸力負担の推移

*1 (株) 竹中工務店 (元首都大学東京) 修士 (工学)

*2 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科建築学専攻准教授 工博

*Takenaka Corporation, (Tokyo Metropolitan University), M.Eng.

**Associate Professor, Tokyo Metropolitan University, Dr.Eng.