

### 3. 上下階の柱径差 50mm 以上の異幅柱接合部の開発

#### Development of Different Column Sizes Joints that Secure Different in Column Diameter of 50mm or more on the Upper and Lower Floors

諸沢 柁治\* 吉川 勇季\*\*

#### —概要—

鉄骨造建物では、上下階で用途・階高が異なる場合や、折板屋根が用いられる場合、上下階の荷重差が大きく変化する傾向がある。このようなケースでは、下階の柱幅に対してサイズダウンした柱を上階に用いることは、しばしば見受けられる。この場合、用いられる接合部パネルは、「テーパ管形式」や「異幅柱接合形式」(図1)が一般的によく用いられる。しかし、テーパ管形式はコストアップや納期に留意する必要がある、異幅接合形式は日本建築学会の鋼構造接合部設計指針によって径差 50mm までと制限されている。

そこで、異幅接合部工法研究会(ゼネコン9社)では、鉄骨造建物をより低コストで合理的に設計するために、角形鋼管の異幅接合形式の径差を 50mm 以上とした場合でも適用できることを目的として「異幅柱接合部工法」(図2,3)を開発した。本工法は、2022年に日本 ERI(株)にて構造性能評価を取得しており、上下階の柱径差を 150mm まで適用することが可能である。本報では、本工法の実験的および解析的検証結果を報告する。

#### —技術的な特長—

異幅柱接合部工法の特長は、同幅となる通常の柱梁接合部形状と変わらない構成となっていることから、品質低下を招くような複雑な製作加工や管理項目がなく、上階柱を積極的に絞ることが可能なため、製作コスト低減が期待できる。異幅柱接合部工法を適用した柱梁接合部試験体の加力実験および降伏線理論に基づく極限解析を比較した結果(表1)、ダイアフラムの塑性曲げ耐力の解析値は実験値と同等の結果を示し、想定通りの破壊形式となることが確認できた。

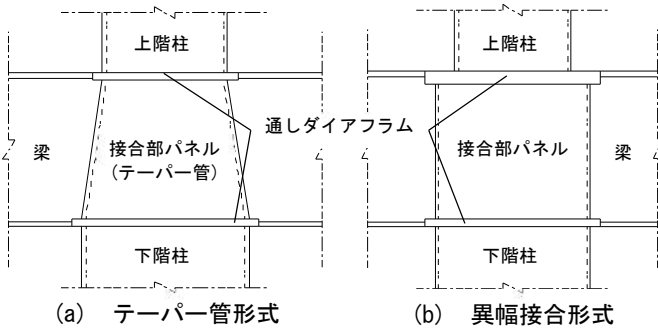


図1 上下階で異なる一般的な接合部形式

表1 実験と極限解析による評価との関係

| 試験体 No. | 接合形式 | 軸力比 $\eta$ | 縮尺 | 先行破壊形式 | DF板厚 $t$ [mm] | 径差 [mm] | 通しダイアフラムの曲げ耐力(正加力時) |                     |              | $jM_{p(exp)} / jM_p$ | $jM_{u(exp)} / jM_p$ |
|---------|------|------------|----|--------|---------------|---------|---------------------|---------------------|--------------|----------------------|----------------------|
|         |      |            |    |        |               |         | 実験値                 |                     | 極限解析         |                      |                      |
|         |      |            |    |        |               |         | $jM_{p(exp)}$ [kNm] | $jM_{u(exp)}$ [kNm] | $jM_p$ [kNm] |                      |                      |
| 1       | 中柱   | 0          | 縮小 | D      | 25            | 100     | 313                 | 406                 | 293          | 1.07                 | 1.38                 |
| 2       | 外柱   | 0          |    |        |               |         | 297                 | 379                 | 296          | 1.00                 | 1.28                 |
| 3       | 隅柱   | 0          |    |        |               |         | 380                 | 349                 | 253          | 1.11                 | 1.38                 |
| 4       | 中柱   | 0.164      |    |        |               |         | 369                 | 353                 | 271          | 0.99                 | 1.30                 |
| 5       | 中柱   | 0.328      |    |        |               |         | 223                 | 280                 | 202          | 1.1                  | 1.39                 |
| 6       | 外柱   | 0.164      |    |        |               |         | 250                 | 317                 | 215          | 1.16                 | 1.48                 |
| 7       | 隅柱   | 0.164      |    |        |               |         | 246                 | 334                 | 210          | 1.17                 | 1.59                 |
| 12      | 中柱   | 0          | 実大 |        | 40            | 150     | 1237                | 1754                | 1287         | 0.96                 | 1.36                 |
|         |      |            |    |        |               |         | 平均値                 |                     |              | 1.07                 | 1.39                 |

※接合破壊形式の記号は、D:通しダイアフラム曲げ先行破壊

※本報の内容は異幅柱接合部工法研究会(計9社:青木あすなる建設、浅沼組、安藤ハザマ、北野建設、鴻池組、五洋建設、鉄建建設、長谷工コーポレーション、矢作建設工業、および神戸大学 田中剛 教授)の共同研究による成果の一部であり、日本建築学会学術講演会梗概集(pp.905-912、2023.9)にて発表済みである。

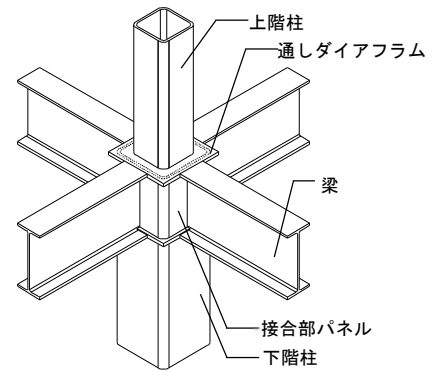


図2 本工法の概要図

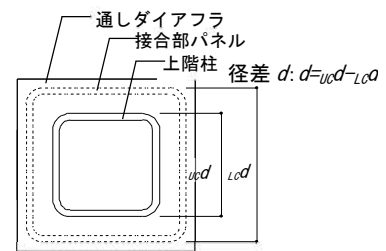


図3 径差の定義

## 上下階の柱径差 50mm 以上の異幅柱接合部の開発

## Development of Different Column Sizes Joints that Secure Different in Column Diameter of 50mm or more on the Upper and Lower Floors

○諸沢 柁治\*

吉川 勇季\*\*

Masaharu MOROSAWA

Yuuki YOSHIKAWA

**ABSTRACT** Column-to-beam connections with unequal width column is in the case where the column widths of the SHS column on the upper and lower floors are different, the upper floor column and the joint panel are welded to the through diaphragm at the top of column beam joint with a thicker plate thickness, and stress is transmitted through the through diaphragm. In this method, by adjusting the thickness of the plate so that the through diaphragm does not break ahead of the upper floor column, the diameter difference between the upper floor column, the joint panel, and the lower floor column can be applied up to 150mm or less.

In the report, we conducted a pressing experiment reduced test specimen and an actual sized specimen to which this method was applied and compared the experimental results with the evaluation by limit analysis based on the yield line theory. As a result of the comparison, it was confirmed that the experimental values showed a good correspondence with the analysis values.

**Keywords** : 異幅柱接合部, 角形鋼管, 通しダイアフラム, 降伏線理論, 塑性曲げ耐力, 最大曲げ耐力  
*Different Column Sizes Joints, Square Steel Column, Through Diaphragm, Yield Line Theory, Plasticity Flexural Capacity, Maximum Flexural Capacity*

## 1. はじめに

近年、我が国の鉄骨造建築物における建設市場は、Eコマース利用率の拡大に伴い、大型物流施設等の設計や施工案件の拡大傾向が続いている。今後もこの傾向は続くものと予想されることから、このような建物に適用できる構造形式の合理化工法が望まれるが、鉄骨造において特に高軸力下に対応できる柱梁接合部の研究は少ない現状にある。また、構造物が大型化していく状況下においては、構造物の実挙動を把握するためにも実大実験によるデータの蓄積が必要であると考えられるが、実大試験体を用いた実験的検証は充実しているとは言い難い状況にある。

そこで、筆者らは構造形式の合理化を目的として、鉄骨造建物の物流倉庫やオフィスビル等の柱梁接合部に着目し、上下階において使用する角形鋼管柱の柱幅が異なる場合に対応できる工法について、高軸力下や実大サイズの試験体をパラメ

ータに加えた実験的および解析的検証を通して有効性を確認する取組みを実施した。

本報では、本研究の取組みについて報告する。

## 2. 異幅柱接合部工法の概要

鉄骨造建物において、低層の物流倉庫のような最上階の屋根が軽い場合や、ホテルやオフィスビルのように上下階で用途や階高が異なる場合、上階の柱幅を下階よりも小さくする場合がある。このように上下階の角形鋼管の柱幅が異なる場合、**図1**に示すように、上方に向かい柱幅を絞るテーパ管を接合パネルに用いる「テーパ管形式」と、通しダイアフラムを介して上階柱と接合部パネルを単純に接合する「異幅接合形式」を用いている。しかし、テーパ管形式は、製作難易度が高く、コストアップや納期に留意する必要がある。異幅接合形式は、これまで数多くの研究<sup>1)~5)</sup>が実施されており、上階柱と下階柱の径差は一般社団

\*技術研究所 構造研究部 建築構造研究室

\*\*東京建築本店 設計部

法人日本建築学会の鋼構造接合部設計指針<sup>6)</sup>によって50mmまでと制限されている。そのため、異幅柱接合部工法は、建物をより低コストで合理的に設計するために、角形鋼管の「異幅接合部」の径差が大きい場合でも適用できることを目的として開発した技術である。

本工法の概要図を図2に、本工法の接合形式を図3に示す。本工法は、通しダイアフラムが上階柱に先行して破壊しない板厚となるように調整することで、上階柱と接合パネル及び下階柱の径差を最上階で150mm、中間階で50~100mmとすることができる。また、接合形式は、接合パネルに対して上階柱心が一致する「中柱形式」、加力方向に対して1方向に偏心が生じる「側柱形式」と「外柱形式」および、2方向に偏心する「隅柱形式」の4形式とした。なお、側柱形式と外柱形式は、いずれも外周部に偏心する同形状の接合形式であるが、加力方向によって構造特性が異なるため区別している。

本工法の特長は、同幅となる通常の柱梁接合部形状と変わらない構成となっていることから、品質低下を招くような複雑な製作加工や管理項目がなく、上階柱を積極的に絞ることが可能なため、製作コスト低減が期待できる。

### 3. 検証の概要

本工法の検証において、実験検証では異幅接合形式とした角形鋼管柱梁接合部の上階柱と接合部パネルを取り出した縮小モデル試験体と実

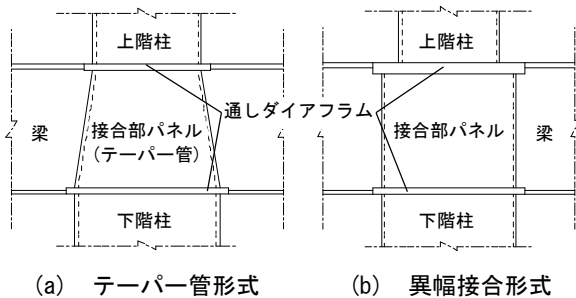
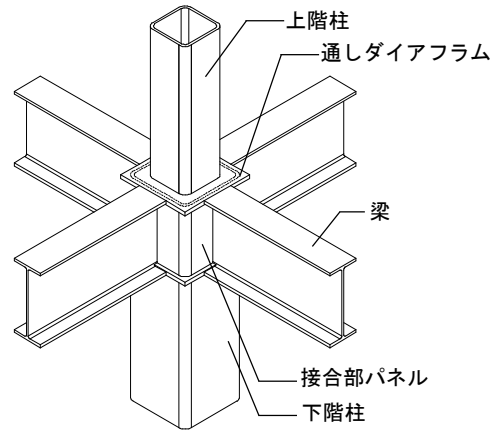
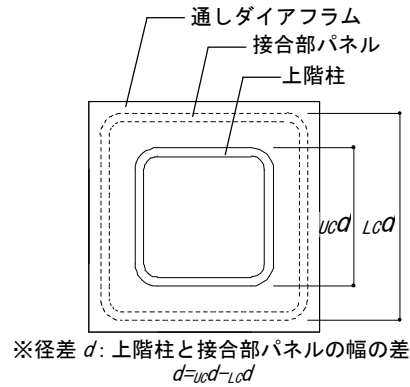


図1 上下階で異なる一般的な接合部形式

大モデル試験体による要素実験を行った。次に、実験結果の妥当性および通しダイアフラムを中心とした接合部の応力状態を把握するために、



(a) 本工法の構成概要



(b) 径差の定義

図2 本工法の概要図

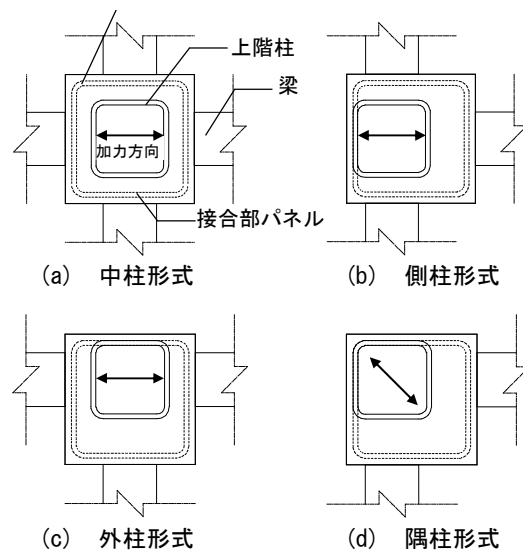


図3 本工法の接合形式

FEM 解析による検証を行った。更には、実験によって得られた通しダイアフラムの塑性曲げ耐力と、降伏線理論に基づく極限解析による評価との比較検証を行った。なお、1 方向の偏心形式については側柱形式と外柱形式があるが、本検証では偏心による通しダイアフラムへの影響がより大きくなる外柱形式を対象とした。

#### 4. 加力実験

##### 4.1. 実験概要

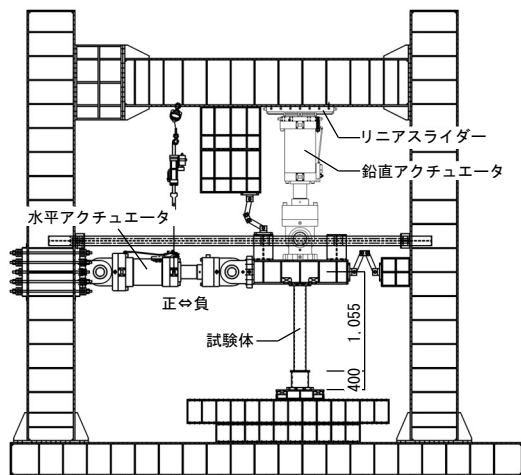
試験体形状および荷重装置を図4に示す。試験体のうち、縮小試験体は1/2スケールで、上階柱：□-250×9、接合部パネル：□-350×9、実大試験体は上階柱：□-400×19、接合部パネル：□-550×19とし、鋼材は、柱がUBCR365、接合部パネルが

SM520Cを用いた。主な実験因子は、先行破壊形式、軸力比、接合形式とし、計13体の実験を実施した。試験体一覧を表1、試験体詳細図を図5、鋼材の材料試験結果を表2に示す。

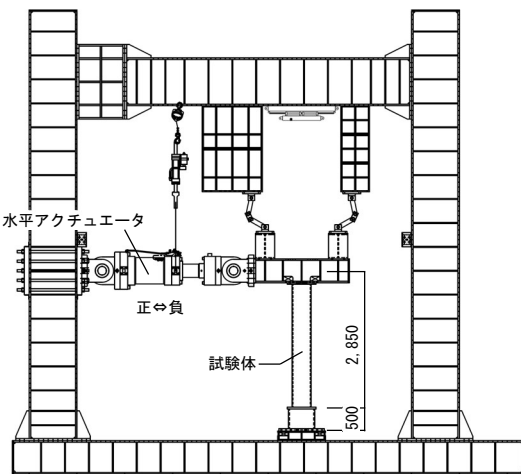
加力は、図4に示す荷重装置で、軸力を荷重する試験体は鉛直アクチュエータで一定軸力荷重しつつ、水平アクチュエータで片持ち柱の先端に水平力を荷重した。加力履歴は、上階柱の全塑性モーメント  $cM_p$  および剛接合と仮定した全塑性モーメント時の回転角  $cR_p$  を基準に、 $\pm 0.25 cM_p \times 1$ 、 $\pm 0.5 cM_p \times 1$ 、 $\pm 0.75 cM_p \times 1$ 、 $\pm 1 cR_p \times 2$ 、 $\pm 2 cR_p \times 2$ 、 $\pm 4 cR_p \times 2$ 、最後は正方向に可能な限り荷重する計画とした。

##### 4.2. 実験結果

各試験体の  $cB M - \theta_c$  関係図を図6に示す。  $cB M$



(a) 縮小試験体



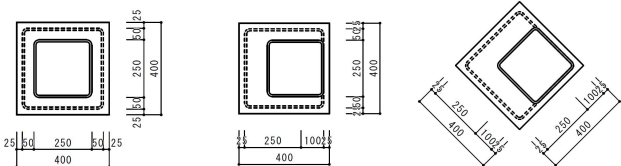
(b) 実大試験体

図4 試験装置と試験体図

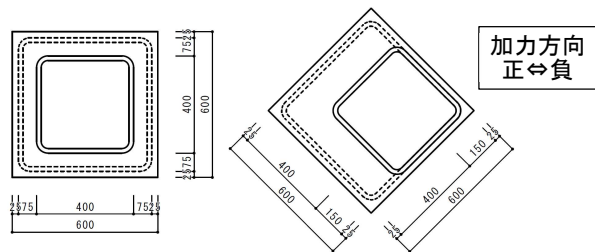
表1 試験体一覧

| 先行破壊形式 | 軸力比   | 径差    | 試験体   | 縮小(1/2) |       |        |        | 実大     |  |
|--------|-------|-------|-------|---------|-------|--------|--------|--------|--|
|        |       |       |       | 中柱      | 外柱    | 隅柱     | 中柱     | 隅      |  |
| D      | 0     | 縮小    | 番号    | No. 1   | No. 2 | No. 3  | No. 12 | —      |  |
|        | 0.164 | 100mm | ダイア板厚 | 25mm    | 25mm  | 25mm   | 40mm   | —      |  |
|        |       | 150mm | 番号    | No. 4   | No. 6 | No. 7  | —      | —      |  |
| C      | 0     | 縮小    | 番号    | No. 5   | —     | —      | —      | —      |  |
|        | 0.164 | 100mm | ダイア板厚 | 25mm    | —     | —      | —      | —      |  |
|        |       | 150mm | 番号    | No. 8   | No. 9 | No. 10 | —      | No. 13 |  |
|        |       | 実大    | ダイア板厚 | 32mm    | 32mm  | 32mm   | —      | 32mm   |  |
|        |       |       | 番号    | No. 11  | —     | —      | —      | —      |  |
|        |       |       | ダイア板厚 | 32mm    | —     | —      | —      | —      |  |

※接合破壊形式の記号は、D:通しダイアフラム曲げ先行破壊、C:上階柱の曲げ先行破壊



(a) 縮小中柱形式 (b) 縮小外柱形式 (c) 縮小隅柱形式



(d) 実大中柱形式 (e) 実大隅柱形式

図5 試験体詳細図

表2 材料試験結果

| サイズ      | 材種      | 降伏強度<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | 引張強度<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | 破断伸び<br>[%] | 使用部位     |
|----------|---------|------------------------------|------------------------------|-------------|----------|
| □-250×9  | UBCR365 | 491                          | 549                          | 36.7        | 上階柱      |
| □-350×9  |         | 463                          | 520                          | 36.7        | 接合パネル    |
| □-400×19 |         | 511                          | 556                          | 41.3        | 上階柱      |
| □-550×19 |         | 501                          | 547                          | 43.3        | 接合パネル    |
| PL-25    | SM520C  | 422                          | 557                          | 37.3        | 通しダイアフラム |
| PL-32    |         | 401                          | 543                          | 31.7        |          |
| PL-40    |         | 383                          | 531                          | 32.2        |          |
| PL-70    |         | 416                          | 565                          | 36          |          |

は柱脚部に発生する曲げモーメントで、軸力による付加曲げ、水平アクチュエータの傾きによる補正を行っている。 $\theta_c$ は柱の変形角であり、柱頭加力位置の水平変位を柱長さで除した値である。なお、No.1の負加力時ピーク付近の荷重変動は、面外変形拘束用のパンタグラフが接触したことによるものである。

通しダイアフラムの曲げを先行破壊形式で計画した縮小試験体のうち、中柱形式としたNo.1,4,5は、 $\pm 4_c R_p$ 加力時に柱脚部の局部座屈を確認した。外柱形式のNo.2および隅柱形式のNo.3,7は $-2_c R_p$ 加力後に柱脚の引張側溶接部で亀裂を確認し、その後圧縮側で局部座屈が生じた。また、外柱形式のNo.6は $+1_c R_p$ 後にダイアフラムの沈み込み、 $-2_c R_p$ 後に接合部パネルの局部座屈、 $+4_c R_p$ 後に柱脚部引張側の溶接部に亀裂を確認

した。実大試験体のNo.12は、 $+2_c R_p$ 加力後に柱脚溶接部に亀裂を確認し、その後進展していった。

上階柱の曲げを先行破壊形式で計画した縮小試験体No.8~11は、すべて $\pm 2_c R_p$ または $\pm 4_c R_p$ 加力時に柱脚部の局部座屈を確認した。実大試験体のNo.13は、 $+4_c R_p$ 加力後に柱脚溶接部に亀裂が生じ、最終は柱脚部にも亀裂が生じた。

実験結果より算定した通しダイアフラムおよび上階柱曲げ性能を表3に示す。降伏曲げ耐力、塑性曲げ耐力はSlope Factor法で、接線剛性が初期剛性の1/3に低下した時点を降伏曲げ耐力、1/6に低下した時点を塑性曲げ耐力と評価した。通しダイアフラムの曲げ性能は $CBM$ と通しダイアフラムの回転角 $\theta_{DF}$ より、上階柱の曲げ性能は $CBM$ と柱の部材角 $\theta_{cb}$ より算定した。

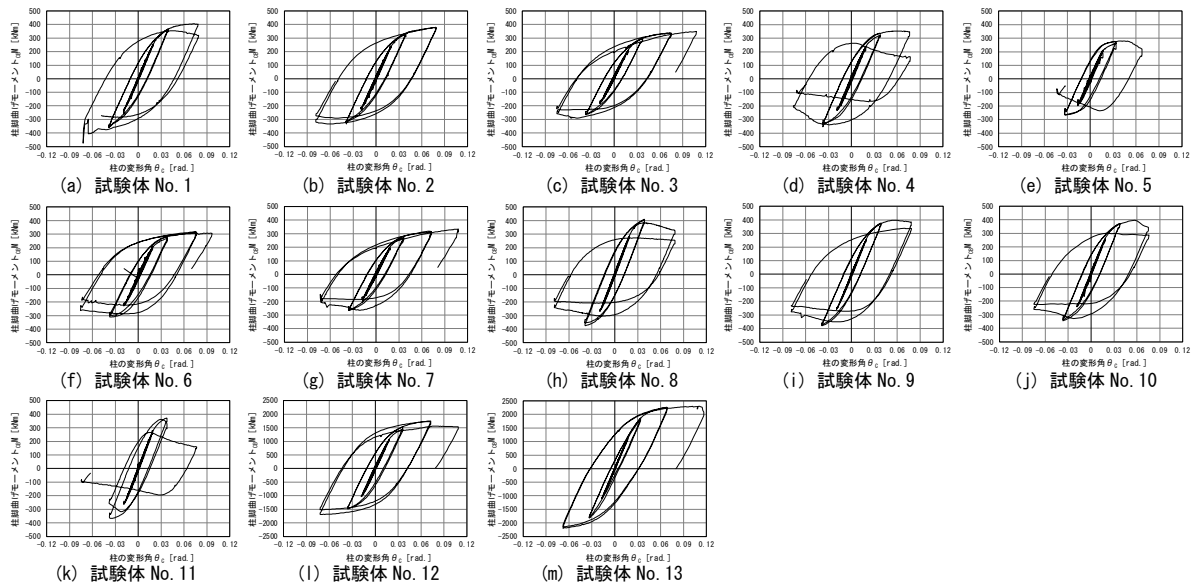


図6  $CBM-\theta_c$ 関係図

表3 通しダイアフラムと上階柱の曲げ性能一覧

| 試験体 No. | 接合形式 | 軸力比 $\eta$ | 縮尺 | 先行破壊形式 | DF板厚 t [mm] | 通しダイアフラム面外曲げ性能          |                         |                             |                          |                          |                             |                          |                          |                             |                          |                          |                             | 上階柱の曲げ性能                 |                          |       |       |  |  |
|---------|------|------------|----|--------|-------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|-------|-------|--|--|
|         |      |            |    |        |             | 正加力                     |                         |                             | 負加力                      |                          |                             | 正加力                      |                          |                             | 負加力                      |                          |                             | 正加力                      |                          |       | 負加力   |  |  |
|         |      |            |    |        |             | 最大耐力 $M_{c(exp)}$ [kNm] | 最大耐力 $M_{c(exp)}$ [kNm] | 初期剛性 $J_{Kc(exp)}$ [kN/rad] | 降伏耐力 $J_{Mc(exp)}$ [kNm] | 塑性耐力 $J_{Mp(exp)}$ [kNm] | 初期剛性 $J_{Kc(exp)}$ [kN/rad] | 降伏耐力 $J_{Mc(exp)}$ [kNm] | 塑性耐力 $J_{Mp(exp)}$ [kNm] | 初期剛性 $J_{Kc(exp)}$ [kN/rad] | 降伏耐力 $J_{Mc(exp)}$ [kNm] | 塑性耐力 $J_{Mp(exp)}$ [kNm] | 初期剛性 $J_{Kc(exp)}$ [kN/rad] | 降伏耐力 $J_{Mc(exp)}$ [kNm] | 塑性耐力 $J_{Mp(exp)}$ [kNm] |       |       |  |  |
| 1       | 中柱   | 0          | 縮小 | D      | 25          | 406                     | -376                    | 57188                       | 276                      | 313                      | 56512                       | -229                     | -254                     | 22335                       | 353                      | 357                      | 21034                       | -319                     | -340                     |       |       |  |  |
| 2       | 外柱   | 0          |    |        | 25          | 379                     | -333                    | 41434                       | 264                      | 297                      | 38106                       | -205                     | -273                     | 22260                       | 347                      | 352                      | 22852                       | -310                     | -312                     |       |       |  |  |
| 3       | 隅柱   | 0          |    |        | 25          | 349                     | -291                    | 36490                       | 252                      | 380                      | 28702                       | -224                     | -257                     | 23029                       | 304                      | 316                      | 22634                       | -259                     | -285                     |       |       |  |  |
| 4       | 中柱   | 0.164      |    |        | 25          | 353                     | -326                    | 56090                       | 254                      | 369                      | 63479                       | -218                     | -275                     | 19993                       | 307                      | 336                      | 20831                       | -297                     | -320                     |       |       |  |  |
| 5       | 中柱   | 0.328      |    |        | 25          | 280                     | -266                    | 50201                       | 217                      | 223                      | 63065                       | -168                     | -229                     | 19118                       | 241                      | 253                      | 20550                       | -226                     | -241                     |       |       |  |  |
| 6       | 外柱   | 0.164      |    |        | 25          | 317                     | -311                    | 30975                       | 213                      | 250                      | 46265                       | -220                     | -276                     | 21729                       | 286                      | 291                      | 21839                       | -301                     | —                        |       |       |  |  |
| 7       | 隅柱   | 0.164      |    |        | 25          | 334                     | -268                    | 34728                       | 271                      | 246                      | 37193                       | -202                     | -238                     | 23414                       | 265                      | 299                      | 20562                       | -238                     | -265                     |       |       |  |  |
| 8       | 中柱   | 0          |    |        | 32          | 409                     | -373                    | 80651                       | 344                      | 390                      | 77467                       | -296                     | -361                     | 21658                       | 382                      | 408                      | 23231                       | -325                     | -357                     |       |       |  |  |
| 9       | 外柱   | 0          |    |        | 32          | 398                     | -380                    | 57764                       | 377                      | 359                      | 50543                       | -307                     | -368                     | 22044                       | 359                      | 372                      | 24215                       | -344                     | -378                     |       |       |  |  |
| 10      | 隅柱   | 0          |    |        | 40          | 395                     | -345                    | 81959                       | 339                      | 369                      | 79570                       | -283                     | -326                     | 23210                       | 348                      | 375                      | 22608                       | -304                     | -341                     |       |       |  |  |
| 11      | 中柱   | 0.164      |    |        | 32          | 372                     | -368                    | 75013                       | 328                      | 369                      | 72181                       | -326                     | -367                     | 20146                       | 343                      | 369                      | 22165                       | -337                     | -353                     |       |       |  |  |
| 12      | 中柱   | 0          |    |        | 実大          | D                       | 40                      | 1754                        | -1689                    | 279014                   | 1155                        | 1237                     | 295585                   | -949                        | -1116                    | 92069                    | 1718                        | —                        | 96952                    | -1631 | -1679 |  |  |
| 13      | 隅柱   | 0          |    |        |             | C                       | 70                      | 2295                        | -2191                    | 484990                   | 2013                        | 2122                     | 440623                   | -1795                       | -2024                    | 100971                   | 1974                        | 2137                     | 105917                   | -1702 | -2009 |  |  |

\*接合破壊形式の記号は、D:通しダイアフラム曲げ先行破壊、C:上階柱の曲げ先行破壊

## 5. FEM 解析

### 5.1. 解析概要

前章の実験について FEM 解析で検証し、実験結果の妥当性および、通しダイアフラムを中心とした接合部の応力状態等について確認した。解析パラメータは表 1 と、解析モデル形状は図 5 と同様である。

鋼材材料特性は、降伏応力度 $\sigma_y$ 到達まではヤング率 $E = 205000 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ とし、降伏応力度以降は材料試験結果をトレースしたものを真応力-対数ひずみに変換して入力した。降伏条件は Von-Mises の降伏条件に従うものとした。

解析モデルと境界条件を図 7 に示す。解析モデルはソリッド要素にて作成し、対称性より 1/2 モデルとした。境界条件は、解析モデル底部を固定とし、上階柱の頂部に軸力を分布荷重として入力した後、水平方向に加力した。加力は一方向単調

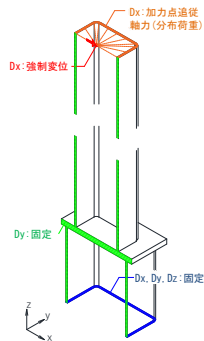
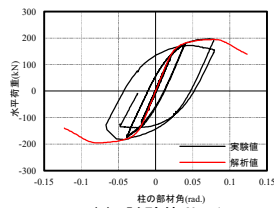
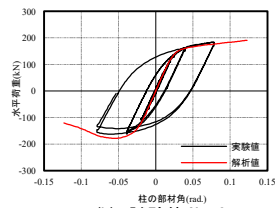


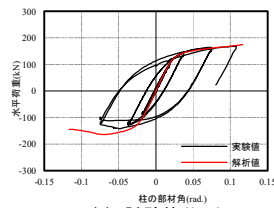
図 7 境界条件



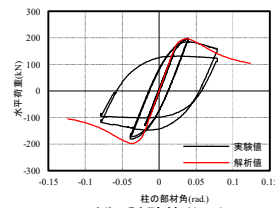
(a) 試験体 No. 1



(b) 試験体 No. 2

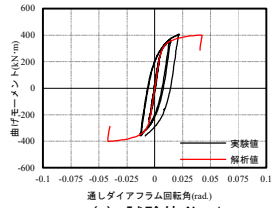


(c) 試験体 No. 3

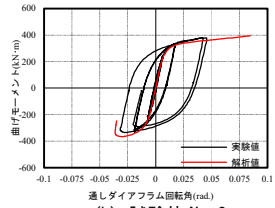


(d) 試験体 No. 8

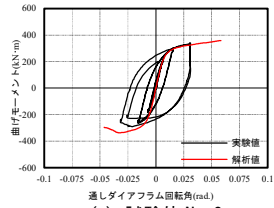
図 8 水平荷重-上階柱の部材角



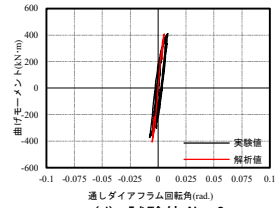
(a) 試験体 No. 1



(b) 試験体 No. 2



(c) 試験体 No. 3



(d) 試験体 No. 8

図 9 通しダイアフラム曲げモーメント-回転角

加力とし、強制変位として上階柱の塑性曲げ時変形量 $\delta_p$ の 1/16 を 1000Step 頂部に加えた。

### 5.2. 解析結果

水平荷重 $Q$ と上階柱の部材角 $R$ の関係を図8に、通しダイアフラムの曲げモーメント $M$ と回転角 $\theta_{DF}$ の関係を図9に抜粋してそれぞれ示す。 $Q - R$ 関係は、実験の履歴曲線と対応がよく、変形状況を精度よく再現できている。 $M - \theta_{DF}$ 関係についても、最大耐力時回転角(0.02~0.05rad.)に至るまで実験の履歴曲線と良く対応し、通しダイアフラムの変形状況を精度良く再現できている。

通しダイアフラムの $M - \theta_{DF}$ における、実験と解析での初期剛性および各耐力の比較結果を表4に示す。解析結果における降伏曲げ耐力 $jM_y$ および塑性曲げ耐力 $jM_p$ については、実験と同様に、接線剛性が初期剛性の1/3 および1/6 に低下した時点での曲げモーメントとした。最大曲げ耐力 $jM_u$ は、実験時に最大曲げモーメントを発揮した

表 4 実験と解析での初期剛性および各耐力の比較

| 試験体 No. | 接合形式 | 軸力比 $\eta$ | 縮尺 | 先行破壊形式 | DF板厚 $t$ [mm] | 初期剛性                 |                      | 降伏曲げ耐力               |                      |                      |                      | 塑性曲げ耐力               |                      |                      |                      | 最大曲げ耐力               |                      |                      |
|---------|------|------------|----|--------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|         |      |            |    |        |               | 実験値                  | 解析値                  | 実験値                  | 解析値                  | 実験値                  | 解析値                  | 実験値                  | 解析値                  | 実験値                  | 解析値                  | 実験値                  | 解析値                  | 実験値                  |
|         |      |            |    |        |               | $jK_{e(Exp)}$ [kN·m] | $jK_{e(Ana)}$ [kN·m] | $jK_{y(Exp)}$ [kN·m] | $jK_{y(Ana)}$ [kN·m] | $jM_{y(Exp)}$ [kN·m] | $jM_{y(Ana)}$ [kN·m] | $jM_{p(Exp)}$ [kN·m] | $jM_{p(Ana)}$ [kN·m] | $jM_{u(Exp)}$ [kN·m] | $jM_{u(Ana)}$ [kN·m] | $jM_{u(Exp)}$ [kN·m] | $jM_{u(Ana)}$ [kN·m] | $jM_{u(Exp)}$ [kN·m] |
| 1       | 中柱   | 0          | 縮小 | D      | 25            | 57188                | 56143                | 1.02                 | 276                  | 282                  | 0.98                 | 313                  | 329                  | 0.95                 | 406                  | 380                  | 1.07                 |                      |
| 2       | 外柱   | 0          |    |        | 25            | 41434                | 41009                | 1.01                 | 264                  | 263                  | 1.00                 | 297                  | 302                  | 0.98                 | 379                  | 359                  | 1.06                 |                      |
| 3       | 隅柱   | 0          |    |        | 25            | 36490                | 38759                | 0.94                 | 252                  | 247                  | 1.02                 | 380                  | 278                  | 1.01                 | 337                  | 324                  | 1.04                 |                      |
| 4       | 中柱   | 0.164      |    |        | 25            | 56090                | 55616                | 1.01                 | 254                  | 258                  | 0.99                 | 369                  | 293                  | 0.92                 | 353                  | 335                  | 1.05                 |                      |
| 5       | 中柱   | 0.328      |    |        | 25            | 50201                | 53210                | 0.95                 | 217                  | 179                  | 1.21                 | 223                  | 224                  | 1.00                 | 280                  | 234                  | 1.19                 |                      |
| 6       | 外柱   | 0.164      |    |        | 25            | 30975                | 40599                | 0.76                 | 213                  | 190                  | 1.12                 | 250                  | 227                  | 1.10                 | 313                  | 281                  | 1.12                 |                      |
| 7       | 隅柱   | 0.164      |    |        | 25            | 34728                | 38512                | 0.9                  | 271                  | 218                  | 1.00                 | 246                  | 246                  | 1.00                 | 319                  | 310                  | 1.03                 |                      |
| 8       | 中柱   | 0          |    |        | 32            | 80651                | 99910                | 0.81                 | 344                  | 400                  | 0.86                 | 390                  | 405                  | 0.96                 | 409                  | 405                  | 1.01                 |                      |
| 9       | 外柱   | 0          |    |        | 32            | 57764                | 65875                | 0.88                 | 377                  | 339                  | 0.99                 | 359                  | 378                  | 0.95                 | 398                  | 408                  | 0.98                 |                      |
| 10      | 隅柱   | 0          |    |        | 40            | 81959                | 92597                | 0.89                 | 339                  | 370                  | 0.92                 | 369                  | 401                  | 0.92                 | 395                  | 401                  | 0.98                 |                      |
| 11      | 中柱   | 0.164      |    |        | 32            | 75013                | 99459                | 0.75                 | 328                  | 378                  | 0.87                 | 369                  | 384                  | 0.96                 | 372                  | 348                  | 0.97                 |                      |
| 12      | 中柱   | 0          |    |        | D             | 40                   | 279014               | 272006               | 1.03                 | 1155                 | 1170                 | 0.99                 | 1237                 | 1306                 | 0.95                 | 1754                 | 1761                 | 1.00                 |
| 13      | 隅柱   | 0          |    |        | C             | 70                   | 484990               | 516370               | 0.94                 | 2013                 | 2160                 | 0.93                 | 2122                 | —                    | —                    | 2263                 | 2172                 | 1.04                 |

※破砕形式の記号は、D: 通しダイアフラム曲げ先行破壊、C: 上階柱の曲げ先行破壊

回転角  $j\theta_{u(\text{exp})}$  時の曲げモーメント、または解析時に  $j\theta_{u(\text{exp})}$  まで達しなかった場合は解析での最大曲げモーメントとした。表4より、解析値に対する実験値の比率は、初期剛性は0.75~1.03、降伏曲げ耐力は0.86~1.21、塑性曲げ耐力は0.92~1.10、最大曲げ耐力は0.97~1.19 となり、実験値と解析値は概ね一致した。

図10(a)に破壊形式が通しダイアフラムの曲げのNo.1、(b)に破壊形式が上階柱のNo.8の、接合部付近の変形性状およびミーゼス相当応力分布を示す。なお、各図とも破壊モード位置の降伏曲げ耐力時の図を示す。No.1は上階柱に比べて通しダイアフラムの変形が大きく、ダイアフラムは上階柱角から接合部パネルに渡るように降伏している。No.8は上階柱の変形が先行しており、端部に局部座屈が見られるものの、ダイアフラムの変形は抑えられている。

6. 極限解析と実験結果の比較

実験により得られた破壊形式が通しダイアフラムの面外曲げ破壊となった試験体の通しダイアフラムの塑性曲げ耐力と降伏線理論に基づく極限解析<sup>3),4)</sup>による評価との比較を行う。

本工法の接合形式は4形式あるが、ここでは、中柱形式の通しダイアフラムの塑性曲げ耐力の評価について記述する。

中柱形式では図11に示す4つの崩壊機構を仮

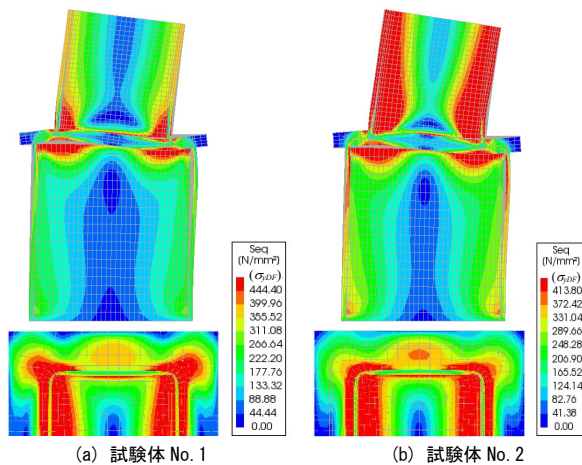


図10 接合部付近の変形性状(10倍)およびミーゼス相当応力分布

定する。上階柱の軸力  $u_c N$  が小さい場合は機構 N-1 で崩壊し、軸力が増加するにつれて機構 N-2、N-3 に移行し、軸力のみが作用する場合には機構 N-4 で崩壊する。図中の赤線はダイアフラムの降伏線(以下、同様)、青線はダイアフラムと接合部パネルとの境界部に生じる降伏線(以下、同様)を表し、灰色の領域は上階柱の軸降伏領域を表す。

図11における機構N-1の塑性曲げ耐力  $jM_p(\text{ana})$  の導出方法の概要を示す<sup>3),4)</sup>。図中の  $x$  を上階柱の回転中心から引張外縁までの距離とすると、外力仕事  $E_e$  および内力仕事  $E_i$  はそれぞれ式(1)および式(2)で表される。

$$E_e = jM_p(\text{ana}) \cdot \theta + u_c N \cdot (u_c d / 2 - x) \cdot \theta \quad \text{式(1)}$$

$$E_i = {}_D E_i + {}_C E_i \quad \text{式(2)}$$

${}_D E_i$  は降伏線のヒンジ回転による内力仕事、 ${}_C E_i$  は上階柱の軸降伏による内力仕事を表し、 $E_e = E_i$  として、通しダイアフラムの塑性曲げ耐力  $jM_p$  を導出する。なお、未知数  $x$  および  $y$  は、上界定理

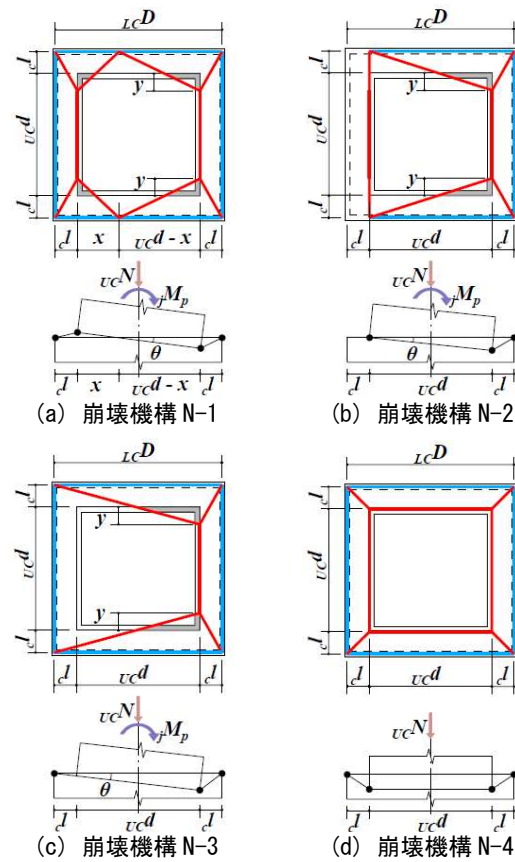


図11 中柱形式の崩壊機構

に基づき、 $\partial jM_p/\partial x = 0$ および $\partial jM_p/\partial y = 0$ により決定される。

実験における塑性曲げ耐力  $jM_{p(exp)}$  および最大曲げ耐力  $jM_{u(exp)}$  と極限解析による塑性曲げ耐力  $jM_p$  との関係を表5に示す。表5より、一部を除き、負加力時の  $jM_p$  が解析値を下回っている。これは直前の正加力時に塑性化したことによるパウシンガー効果で耐力が低下したと考えられるため、負加力時は参考値とする。正加力時では、 $jM_{p(exp)}/jM_p$  および  $jM_{u(exp)}/jM_p$  の平均値はそれぞれ1.07と1.39となり、想定通りの破壊形式となることが確認できた。

7. まとめ

上下階において使用する角形鋼管の柱幅が異なる場合に対応できる工法について、高軸力下や実大試験体をパラメータに加えた実験的検証を行った。その結果、通しダイアフラム破壊を想定した試験体の結果から算出した通しダイアフラムの塑性曲げ耐力は、降伏線理論に基づく極限解析より導出した塑性曲げ耐力の設計式と良い対応を示し、想定通りの破壊形式となることが確認できた。

謝辞

本報告は、矢作建設工業、青木あすなろ建設、浅沼組、安藤ハザマ、北野建設、鴻池組、五洋建設、鉄建建設、長谷工コーポレーションの9社で構成される異幅柱接合部工法研究会における共同研究成果である。また、本研究において多くのご指導をいただいた神戸大学の田中剛教授に深く感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 田中剛、田淵基嗣 富田洋平：上下階で柱幅が異なる角形鋼管柱梁接合部に関する研究(その1~2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1 構造Ⅲ, pp.249-952, 2003
- 2) 寺嶋正雄, 田淵基嗣, 田中剛：上下階で柱幅の異なる角形鋼管柱梁接合部における通しダイアフラムの耐力評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 構造Ⅲ, pp.1021-1022, 2008
- 3) 田中剛, 寺嶋正雄, 田淵基嗣：異幅角形鋼管柱梁接合部における通しダイアフラムの耐力評価, 日本鋼構造協会鋼構造年次論文報告集, 第16巻, pp.95-102, 2008
- 4) 寺嶋正雄, 田中剛, 田淵基嗣, 三好誠二：異幅角形鋼管柱梁接合部における通しダイアフラムの面外曲げ耐力(その1, その2), C-1 構造Ⅲ, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1085-1088, 2011
- 5) 上田学, 田中剛, 三好誠二：径差の大きい異幅接合形式角形鋼管柱梁接合部の弾塑性挙動(その1, その2), 構造Ⅲ, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1233-1236, 2012
- 6) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針, 2021

表5 実験と解析での初期剛性および各耐力の比較

| 試験体 No. | 接合形式 | 軸力比 $\eta$ | 縮尺 | 先行破壊形式 | DF板厚 $t$ [mm] | 径差 [mm] | 通しダイアフラムの曲げ耐力(正加力時) |                     |              | $jM_{p(exp)}/jM_p$ | $jM_{u(exp)}/jM_p$ |
|---------|------|------------|----|--------|---------------|---------|---------------------|---------------------|--------------|--------------------|--------------------|
|         |      |            |    |        |               |         | 実験値                 |                     | 極限解析         |                    |                    |
|         |      |            |    |        |               |         | $jM_{p(exp)}$ [kNm] | $jM_{u(exp)}$ [kNm] | $jM_p$ [kNm] |                    |                    |
| 1       | 中柱   | 0          | 縮小 | D      | 25            | 100     | 313                 | 406                 | 293          | 1.07               | 1.38               |
| 2       | 外柱   | 0          |    |        |               |         | 297                 | 379                 | 296          | 1.00               | 1.28               |
| 3       | 隅柱   | 0          |    |        |               |         | 380                 | 349                 | 253          | 1.11               | 1.38               |
| 4       | 中柱   | 0.164      |    |        |               |         | 369                 | 353                 | 271          | 0.99               | 1.30               |
| 5       | 中柱   | 0.328      |    |        |               |         | 223                 | 280                 | 202          | 1.1                | 1.39               |
| 6       | 外柱   | 0.164      |    |        |               |         | 250                 | 317                 | 215          | 1.16               | 1.48               |
| 7       | 隅柱   | 0.164      |    |        |               |         | 246                 | 334                 | 210          | 1.17               | 1.59               |
| 12      | 中柱   | 0          | 実大 |        | 40            | 150     | 1237                | 1754                | 1287         | 0.96               | 1.36               |
|         |      |            |    |        |               |         | 平均值                 |                     |              | 1.07               | 1.39               |

※接合破壊形式の記号は、D: 通しダイアフラム曲げ先行破壊