

# 論文 鉄骨枠付きブレースから既存柱・梁接合部への水平力伝達経路に関する研究

重本 将史\*1・勅使川原 正臣\*2・中村 聡宏\*3・大西 歩\*4

**要旨：**鉄骨枠付きブレースを分散配置した際に、ブレースの負担する水平力が既存柱・梁接合部にどのような経路で伝わるのかを実験によって明らかにした。実験結果から、ブレースから梁に伝わり既存柱・梁接合部へ伝わる力の成分と、柱に伝わり既存柱・梁接合部へと伝わる力の成分を求めた。実験の解析を行い、実験結果に対応するモデル化を行った。解析結果から力の分配を求め、それをを用いて鉄骨枠付きブレースを分散配置した際の柱・梁接合部の入力せん断力の検討を行った。

**キーワード：**鉄骨枠付きブレース, 分散配置, 間接接合部, 柱・梁接合部, 耐震補強

## 1. はじめに

既存鉄筋コンクリート造建築物に鉄骨枠付きブレースを用いて耐震補強する場合には、せん断成分を卓越させ、補強効果を高める観点から鉄骨枠付きブレースを千鳥配置して補強すること（以下、分散配置）が検討されている。大西ら<sup>1)</sup>の研究で、分散配置が連層配置に対し、変形制限、第2次診断の適用性という点で優れていることが明らかとなった。しかし、分散配置では、既存建物に与える影響が不明瞭であり、特に図-1のように鉄骨枠付きブレースを架構内に分散配置する場合は、接合部の設計が重要である。

本研究では、ブレースから既存柱・梁接合部へ伝わる水平力の梁から伝わる成分と、柱から伝わる成分を明らかにする。

## 2. 水平力の伝達経路

図-1のようにブレースの負担する水平力は、間接接合部を介して既存柱・梁接合部に伝わる。その伝達経路には、間接接合部を介して梁に軸力として伝わる経路  $P_1$ ,

$P_3$  と、柱にせん断力として伝わる経路  $P_2$ ,  $P_4$  がある。 $P_1$  は  $P_c$  の梁に伝わった成分と  $P_t$  の梁に伝わった成分の合計となる。 $P_2$  は  $P_c$  の柱に伝わった成分と  $P_t$  の柱に伝わった成分の合計となる。このように力が伝わる場合、十字形柱・梁接合部の力の釣り合いは図-2 のようになり、接合部への入力せん断力は式(1)のようになる。

$$Q_j = T_1 + C_2 - (Q_{c2} + P_2) \quad (1)$$

よって、 $P_2$  の値が変化すると接合部への入力せん断力が変化し、場合によっては入力せん断力が大きくなる可能性があり、検討が必要になる。

## 3. 研究方法

分散配置したブレース（図-1）の点線で囲まれた部分をモデル化した図-3 のような試験体を用いて実験を行い、力の分配状況を調べる。実験では、梁端部のコンクリートを抜いて鉄筋だけで既存柱・梁接合部に力を伝えるためのスリットを設け、そのスリット部の鉄筋の歪を計測することにより梁に伝達された荷重を求める。試験体は実験を行う際にねじれないようにするために梁軸

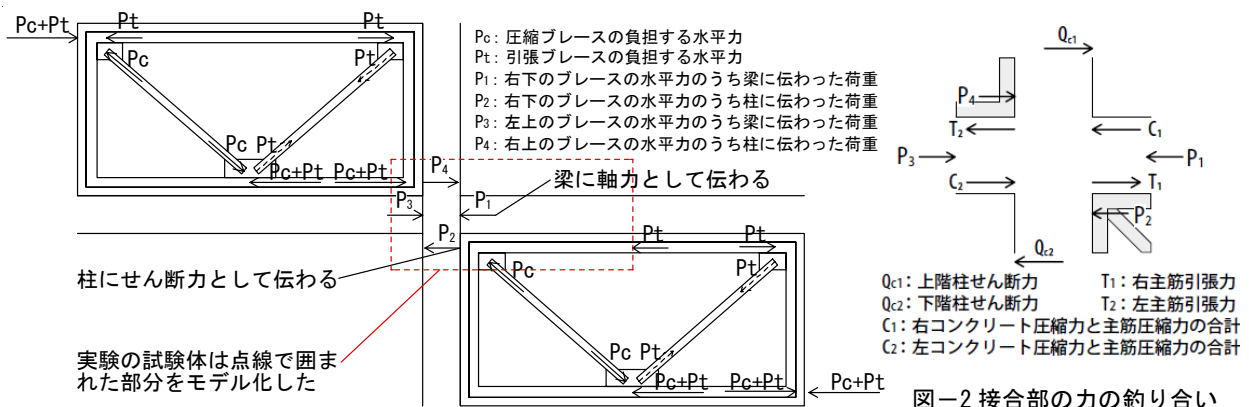


図-1 分散配置の力の流れ

図-2 接合部の力の釣り合い

\*1 名古屋大学 工学部 社会環境工学科 学部生 (学生会員)

\*2 名古屋大学大学院 環境学研究科 教授 工博 (独立行政法人建築研究所 客員研究員) (正会員)

\*3 名古屋大学大学院 環境学研究科 助教 博士 (工学) (正会員)

\*4 名古屋大学大学院 環境学研究科 大学院生 (学生会員)

線に対して対称とした。また、この試験体をモデル化したものを FEM 解析し、実験結果との比較を行う。さらに実験でスリットを設けている部分をコンクリートで埋めた場合のモデルを FEM 解析し、梁への荷重の伝達率を求め、その結果を用いて補強ブレースを分散配置した際の柱・梁接合部への入力せん断力の検討を行う。

#### 4. 実験概要

##### 4.1 試験体概要

試験体はブレース補強を有する架構の十字型柱・梁接合部部分を取りだしたもので、スケールを 1/3 とした。試験体は試験体 A と試験体 B の 2 体とし、パラメータを加力位置とした。図-1 の右下のブレースにおいて、鉄骨枠から伝わってくる水平力  $P_1$  を想定し、加力位置が鉄骨枠の先端にある試験体を試験体 A、ブレースから伝わってくる水平力  $P_2$  を想定し、加力位置が鉄骨枠のブレース接続部にある試験体を試験体 B とする。試験体配筋図を図-3 に、試験体概要を表-1 に、使用材料特性を表-2 に示す。試験体の梁端部には計測の都合上スリットを

設けている。スリットを設けたため、本来ならスリット部のコンクリートにも伝わっていた針の軸力を鉄筋が負担している。その鉄筋が負担している力をスリット部周辺のコンクリートに確実に伝達するために梁端部に機械式定着を用いた。また、梁主筋はスリット部分での座屈を避けるため、D22 の鉄筋を用いた。

##### 4.2 加力方法

加力装置セットアップ図を図-4 に示す。試験体は梁が鉛直方向になるように設置し、試験体 A は鉄骨枠の先端に支点を設けて、鉄骨枠の先端に力を加える。試験体 B はブレースの接合位置に支点を設けて、ブレース位置に力を加える。試験体 A、試験体 B とともに、反対側の梁をジャッキに固定して容量 1000kN のジャッキ(図-4(a))を用いて加力を行った。加力は片側繰り返し载荷とし、荷重は 50kN、100kN、200kN、300kN、400kN、500kN、1000kN の順に加力した(以下、実験 1 とする)。試験体 B においては 1000kN を 3 回繰り返ししている。また、試験体 A、試験体 B とともに荷重 1000kN では壊れなかったため、加力装置をジャッキの容量 2000kN のもの(図-4

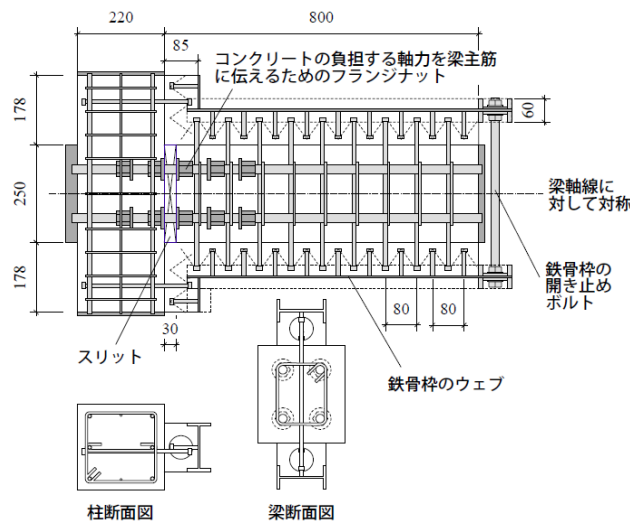


図-3 試験体配筋図

表-1 試験体概要

| 梁            |        |         | 柱         |            |         |
|--------------|--------|---------|-----------|------------|---------|
| 断面           | 主筋     | あばら筋    | 断面        | 主筋         | 帯筋      |
| 220×250      | 4-D22  | 2-D6@80 | 220×220   | 6-D10 2-D6 | 3-D6@60 |
| 補強部          |        |         |           |            |         |
| 鉄骨枠          | 頭付スタッド | アンカー    | スパイラル筋    | 間接接合部      |         |
| H-125×60×6×8 | Φ10@80 | D10@80  | D6×Φ55@40 | 無収縮モルタル    |         |

表-2 使用材料特性

|  | 鉄筋          |              |              | 頭付きスタッド          | H形鋼   |
|--|-------------|--------------|--------------|------------------|-------|
|  | D6<br>SD295 | D10<br>SD345 | D22<br>SD345 | Φ10<br>(SS400相当) | SS400 |
| 降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )                   | 446         | 377          | 381          | 324              | 363   |
| 引張強度(N/mm <sup>2</sup> )                   | 536         | 533          | 568          | 427              | 459   |
| ヤング係数(×10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup> ) | 1.75        | 1.89         | 1.93         | 1.90             | 1.91  |
| 降伏歪(μ)                                     | 2553        | 1996         | 1976         | 1706             | 1904  |
|  | 既存部コンクリート   |              | 無収縮モルタル      |                  |       |
|  | 試験体A        | 試験体B         | 試験体A         | 試験体B             |       |
| 圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )                   | 23.8        | 23.0         | 67.4         | 71.2             |       |
| 割裂引張強度(N/mm <sup>2</sup> )                 | 2.33        | 1.75         | 2.67         | 2.67             |       |
| ヤング係数(×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> ) | 1.93        | 1.94         | 2.43         | 2.49             |       |

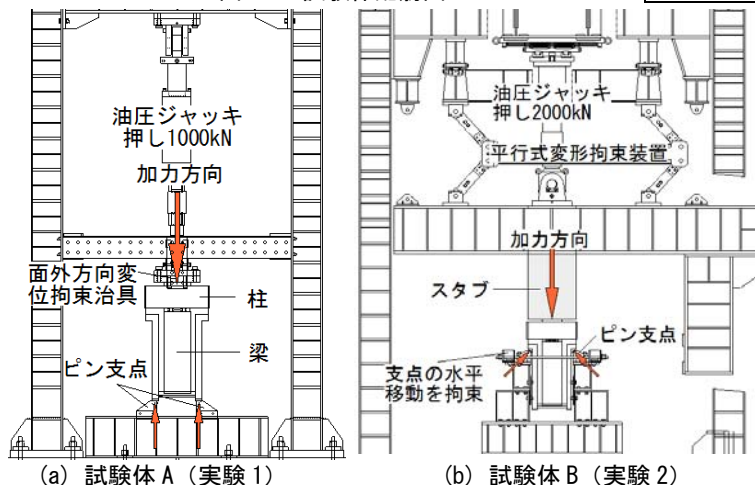


図-4 加力装置セットアップ図

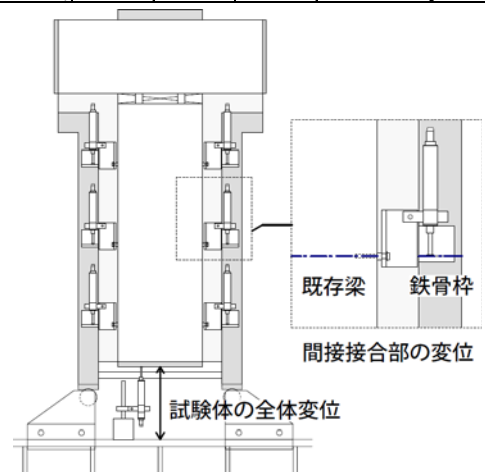


図-5 変位計側位置

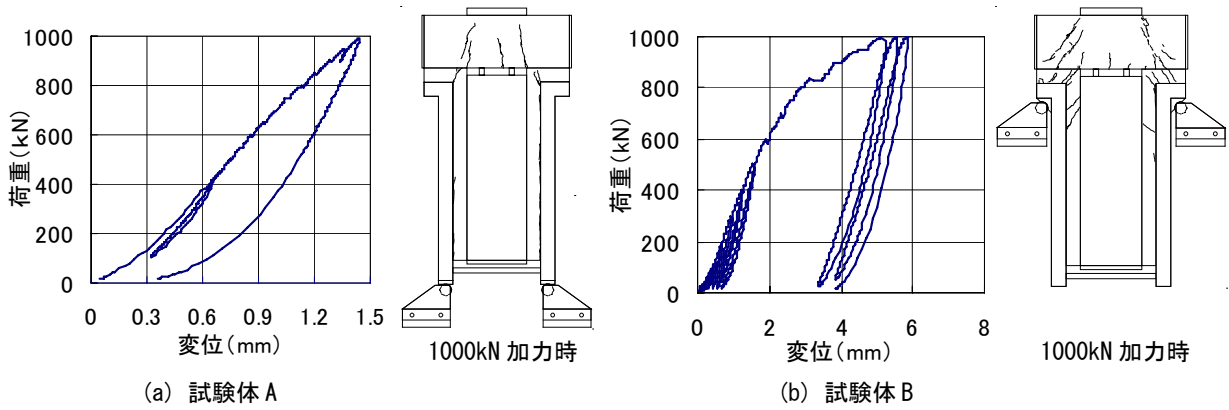


図-6 荷重-変位関係と最終ひび割れ状況 (実験1)

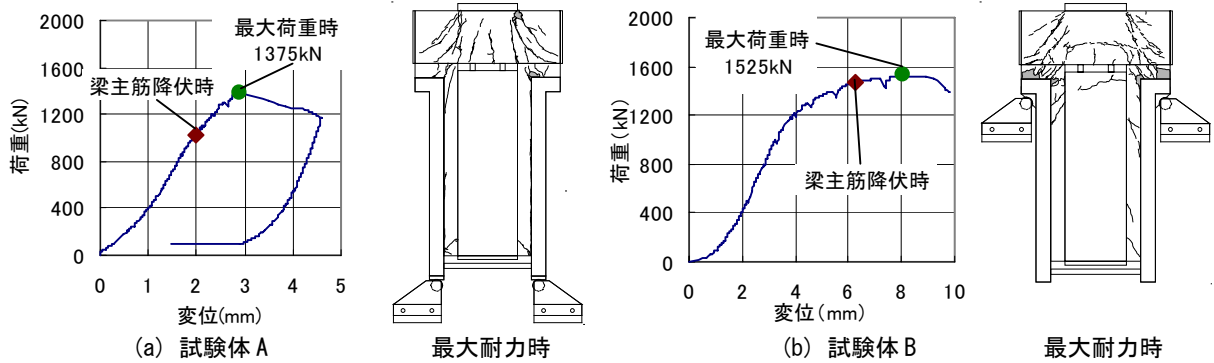


図-7 荷重-変位関係と最終ひび割れ状況 (実験2)

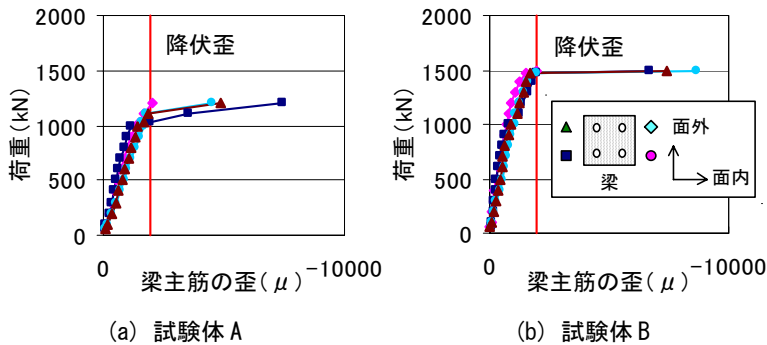


図-8 各荷重時の梁主筋の歪

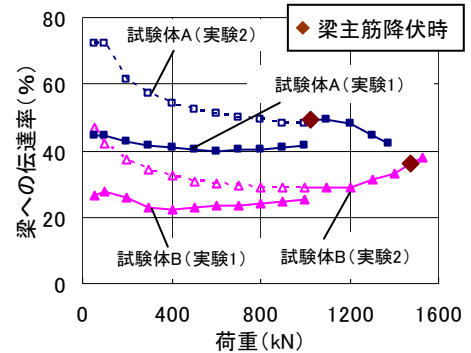


図-9 各荷重時の梁への伝達率

(b) に変えて終局状態まで押し切っている (以下、実験 2 とする)。

## 5. 実験結果

変位計測位置を図-5 に示す。試験体 A, 試験体 B ともに、試験体の全体変位を土台の鉄骨梁から変位計を試験体の底面に当てて計測した。また、既存梁と鉄骨柱との相対変位を間接接合部の変位として計測した。

### 5.1 荷重-変形関係と破壊状況

実験 1 の荷重-変形関係と最終ひび割れ状況を図-6 に示す。また、実験 2 の荷重-変形関係と最終ひび割れ状況を図-7 に示す。図-6, 図-7 の変位は試験体の全体変位を用いている。

#### 5.1.1 試験体 A

実験 1 で荷重 1000kN 加力中に柱にせん断ひび割れが

入り、ひび割れが進展していったが 1000kN では破壊には至らなかった。実験 2 で、荷重 1022kN でスリット部梁主筋が 1 本降伏した。荷重 1200kN で 4 本すべての梁主筋が降伏し、梁に伝わる荷重が一定となった。荷重 1375kN で最大耐力をむかえ、柱がパンチング破壊した。柱の加力位置から鉄骨柱にかけて多くのひび割れが生じ、間接接合部の支点に近い位置にもひび割れが生じた。

#### 5.1.2 試験体 B

実験 1 で荷重 1000kN 加力中に柱にせん断ひび割れが生じ、変形が大きく伸びていったが、荷重 1000kN を 3 回繰り返しても柱はパンチング破壊しなかった。実験 2 において、荷重 1470kN でスリット部梁主筋が 1 本降伏した。荷重 1500kN で 4 本すべての梁主筋が降伏し、梁に伝わる荷重が一定となった。荷重 1525kN で最大耐力をむかえ、柱がパンチング破壊した。柱の加力位置から

鉄骨柱にかけて多くのひび割れが生じ、梁部分の間接接合部は支点に近い梁端部の位置に多くのひび割れが生じた。

## 5.2 梁への荷重の伝達率

各荷重における梁主筋の歪を図-8に示す。荷重500kN以降は100kN刻みで値を示した。試験体Aでは、荷重1022kNで裏面の左側の鉄筋が降伏した。試験体Bでは、荷重1470kNで裏面の左側の鉄筋が降伏した。各荷重時における梁への荷重の伝達率を図-9に示す。梁への荷重の伝達率は、梁主筋の歪から荷重を求め、主筋4本分の荷重の合計値をジャッキの荷重で除することにより求めた。実験2では、試験体A、試験体Bともに実験1で柱にひび割れが入っており、剛性が低下しているため柱に伝わる荷重が少なくなり、梁への伝達率が大きくなったと考えられる。

### 5.2.1 試験体 A

実験1では、梁への荷重の伝達率はどのサイクルの最大荷重時においてもほとんど変わらず42%前後となった。実験2では最初の実験よりも梁への伝達率は高かった。主筋が降伏すると、梁に伝わる荷重が一定になるため、荷重1022kN以降は伝達率が下がっていった。梁主筋1本が降伏した時の梁への伝達率は50%であった。

### 5.2.2 試験体 B

実験1では、梁への荷重の伝達率はどのサイクルの最大荷重時においてもほとんど変わらず25%前後となった。実験2では、柱のせん断ひび割れが大きくなると柱部分の剛性が低下し、梁へ伝わる力の割合が大きくなり、伝達率が大きくなった。試験体Bでは、梁主筋が降伏した後、すぐに終局状態となったため、梁への伝達率は低下しなかった。梁主筋1本が降伏した時の梁への

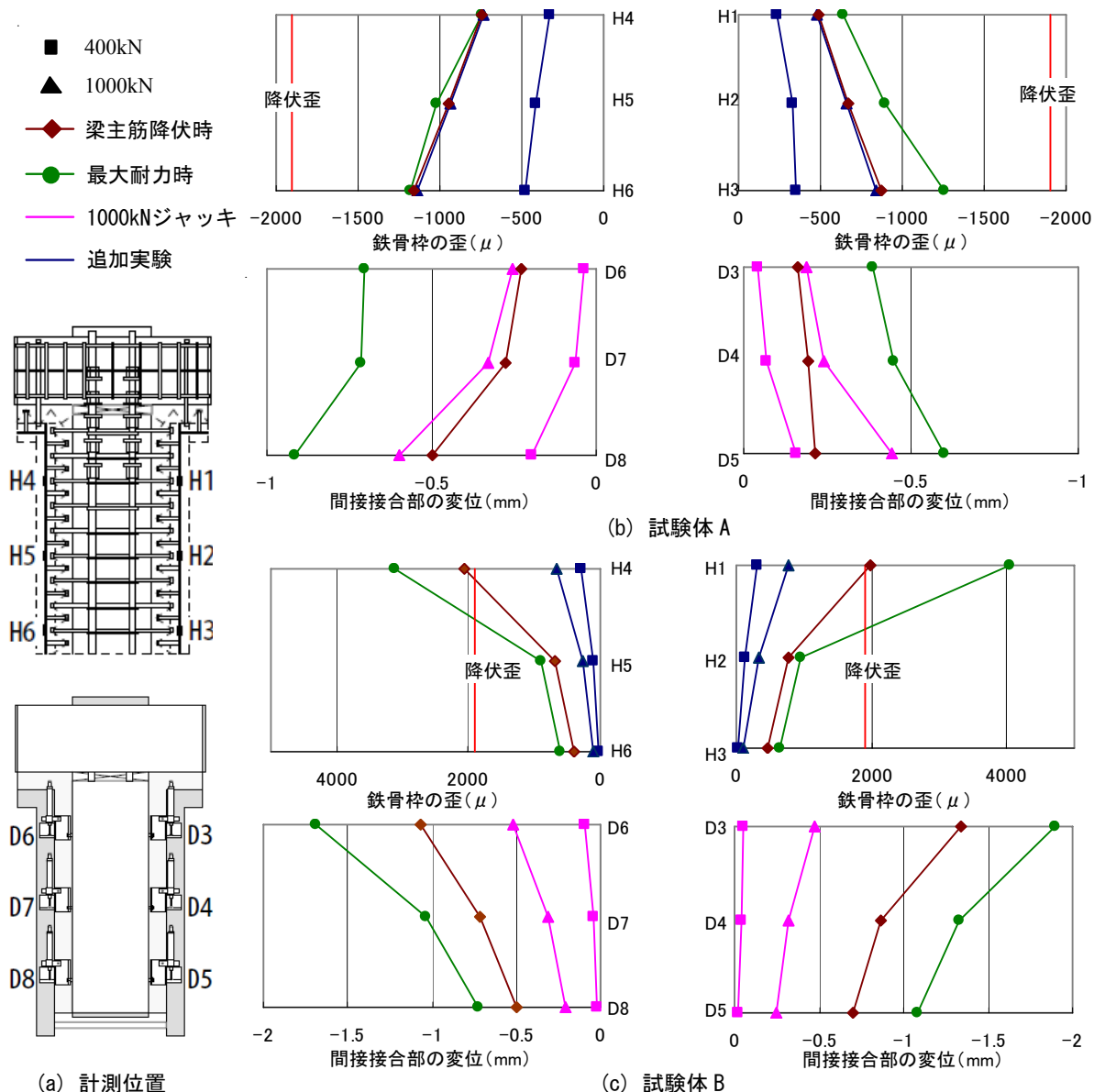


図-10 鉄骨柱の歪と間接接合部の変位の分布

伝達率は36%であった。

### 5.3 鉄骨柱の歪と間接接合部の変位の分布

間接接合部の変位と鉄骨柱の歪の分布を図-10に示す。鉄骨柱の歪は計測位置の鉄骨柱のウェブの外側に貼った歪ゲージの値を用いた。

#### 5.3.1 試験体 A

鉄骨柱の歪は梁端部から離れるほど歪が大きくなる分布となった。間接接合部の変位も梁端部から離れるほど大きな変位となった。間接接合部の変位は図-5に示すように、計測位置の既存梁の鉛直下方向の変位分から鉄骨柱の鉛直下方向の変位分を引いた値であり、計測位置の鉄骨柱の鉛直下方向の変位分が大きくなるほど間接接合部の変位は小さくなる。試験体 A は鉄骨柱の先端に支点があるため、支点から離れるほど鉄骨柱の圧縮変形が蓄積される。そのため、梁端部に近くなるほど間接接合部の変位が小さくなったと考えられる。歪、変位の分布から、梁に伝達された力は間接接合部が変形することにより徐々に鉄骨柱へと伝わったことがわかる。

#### 5.3.2 試験体 B

鉄骨柱の歪は梁端部に近いほど歪が大きくなる分布となった。間接接合部の変位も梁端部に近いほど大きな変位となった。試験体 B は鉄骨柱の角に支点があるため、

支点から離れるほど鉄骨柱の引張力による伸び変形が蓄積される。そのため、梁端部から離れるほど間接接合部の変位が小さくなったと考えられる。歪、変位の分布から、梁に伝達された力は間接接合部が変形することにより徐々に鉄骨柱へと伝わったことがわかる。

## 6. FEM 解析モデル

実験結果の検証を FEM モデルを用いた解析により行った。FEM 解析には市販の FEM 解析ソフト「FINAL<sup>2</sup>」を使用した。FEM モデルを図-11に示す。FEM 解析は弾性のモデルで行い、弾性に近い荷重時において実験結果との比較を行う。コンクリート、無収縮モルタル、加力位置の鋼板は四辺形要素で置換し、主筋、せん断補強筋、鉄骨柱は線材要素で置換した。モルタルとスタッド（アンカー）は一体とし、スタッド（アンカー）を介して梁にせん断力が伝達するものと仮定した。間接接合部部分のせん断剛性はスタッドとアンカーのせん断剛性の小さいほうを用いた。荷重は加力位置の鋼板の上辺に等分布荷重として加えた。

## 7. 解析結果と実験結果との比較

実験で梁への伝達率は最後までほとんど一定であった

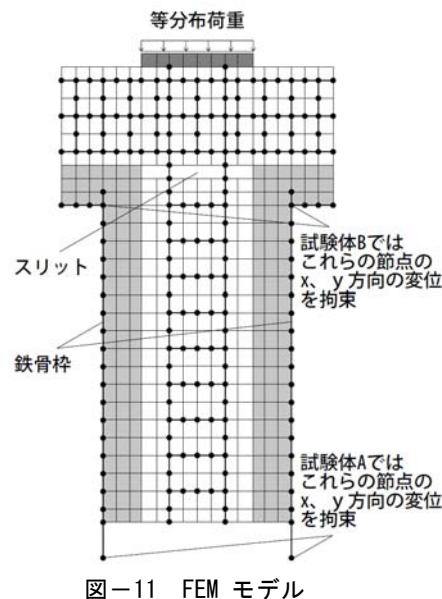


図-11 FEM モデル

表-3 実験結果と解析結果の比較（荷重 400kN 時）

| 計測項目          |    | 実験値    |            | 解析値    | 解析値/実験値       |
|---------------|----|--------|------------|--------|---------------|
|               |    | 実験1    | 実験2        |        | 実験1           |
| 梁への伝達率 (%)    |    | 41     | ( 54 )     | 39     | 0.95 ( 0.72 ) |
| 間接接合部の変位 (mm) | D3 | -0.044 | ( -0.08 )  | -0.067 | 1.53 ( 0.84 ) |
|               | D4 | -0.068 | ( -0.076 ) | -0.138 | 2.03 ( 1.81 ) |
|               | D5 | -0.156 | ( -0.042 ) | -0.240 | 1.54 ( 5.71 ) |
| 鉄骨柱の歪 (μ)     | H1 | —      | ( -230 )   | -381   | — ( 1.66 )    |
|               | H2 | —      | ( -330 )   | -456   | — ( 1.38 )    |
|               | H3 | —      | ( -351 )   | -590   | — ( 1.68 )    |

| 計測項目          |    | 実験値    |            | 解析値    | 解析値/実験値       |
|---------------|----|--------|------------|--------|---------------|
|               |    | 実験1    | 実験2        |        | 実験1           |
| 梁への伝達率 (%)    |    | 23     | ( 32 )     | 25     | 1.09 ( 0.78 ) |
| 間接接合部の変位 (mm) | D3 | -0.092 | ( -0.116 ) | -0.066 | 0.72 ( 0.57 ) |
|               | D4 | -0.038 | ( -0.086 ) | -0.047 | 1.24 ( 0.55 ) |
|               | D5 | -0.016 | ( -0.048 ) | -0.039 | 2.45 ( 0.82 ) |
| 鉄骨柱の歪 (μ)     | H1 | —      | ( 290 )    | 66     | — ( 0.23 )    |
|               | H2 | —      | ( 95 )     | 31     | — ( 0.33 )    |
|               | H3 | —      | ( 31 )     | 4      | — ( 0.14 )    |

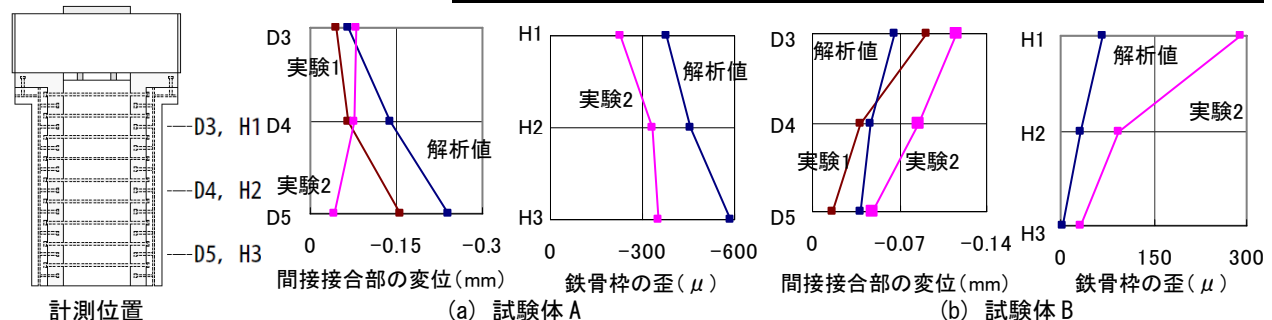


図-12 400kN 時鉛直分布の比較

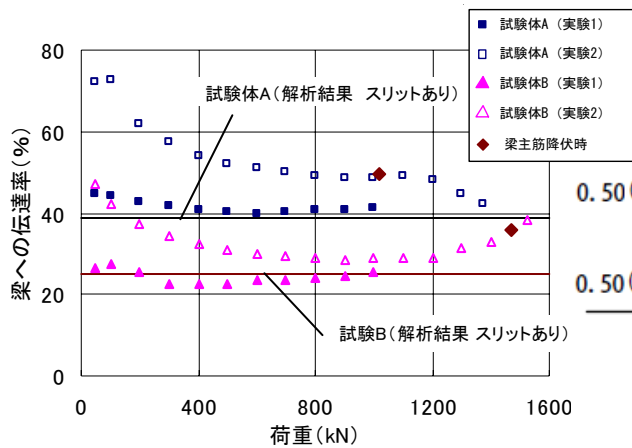


図-13 梁への伝達率の比較

ので、実験結果と解析モデルとの比較は弾性に近い荷重時において行うこととし、荷重 400kN 時において梁への荷重の伝達率と、鉄骨枠歪と間接接合部の変位の鉛直分布の比較を行った。FEM 解析結果と実験結果との比較を表-3 に、鉛直分布の比較を図-12 に示す。また、伝達率の比較を図-13 に示した。表-3 の実験値の括弧内の数値は実験 2 の 400kN 時の数値である。鉄骨枠の歪は実験 1 で適切に計測できなかったため、実験 2 の数値で比較を行う。試験体 A、試験体 B ともに梁への荷重の伝達率において実験結果に近い解析結果を得た。実験 2 では柱にひび割れが入り塑性化しているため、試験体 A、試験体 B ともに解析結果より大きな伝達率となっている。間接接合部の変位の分布においては、試験体 A、試験体 B ともに値に差が見られたが、分布の形状は対応していた。実験 2 においては試験体 A の分布が実験 1 と解析結果とは異なる形状となり、塑性化の影響が考えられる。鉄骨枠の歪の分布においては、解析結果と実験 2 の結果の値に差は見られるが、分布の形状は対応していた。弾性に近い状態では、解析結果と実験結果は概ね対応しており、FEM 解析においても力の伝わり方は実験と同じになった。

### 8. 柱梁接合部への入力せん断力の検討

スリット部にコンクリートを埋めたモデルで FEM 解析を行い、梁への荷重の伝達率を求めた。スリットなしのモデルの梁への伝達率を表-4 に示す。スリット部を埋めたことにより、試験体 A、試験体 B ともに伝達率が上昇した。この結果を用いて補強ブレースを分散配置した際の柱・梁接合部への入力せん断力を検討する。検討すべき入力せん断力を図-14 に示す。図-14 の左側の力の分配は、今回のモデルではブレースの負担水平力はすべて梁部分の鉄骨枠に伝わると考えられるので、試験体 A の伝達率を  $(P_t+P_c)$  に乗じた。右側の力の分配は、 $P_c$  に試験体

表-4 スリットなしのモデルの梁への伝達率

| 梁への伝達率 (%) | 試験体A | 試験体B |
|------------|------|------|
|            | 50%  | 33%  |

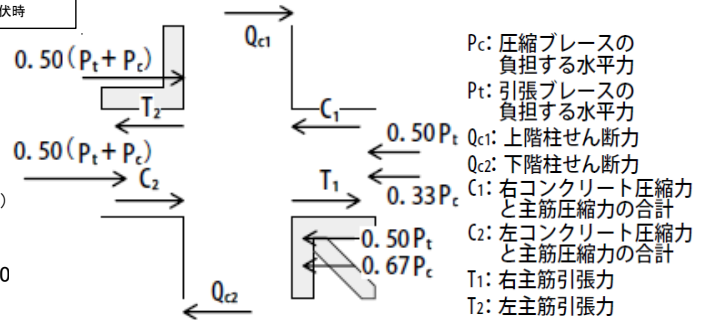


図-14 入力せん断力の検討

B の伝達率を乗じて、梁と柱に分配した。これより、鉄骨枠付きブレースを用いた補強に分散配置を用いる場合、入力せん断力の検討には図-14 のような柱梁接合部の力の釣り合い状態を検討する必要がある。

### 9. まとめ

本研究で得られた知見を以下に要約する。

- (1) 実験において試験体 A の実験結果より、鉄骨枠から伝わる水平力は 42%程度が梁に伝わり、試験体 B の実験結果より、ブレースから伝わる水平力は、25%前後が梁に伝わった。
- (2) 実験を行った試験体の FEM モデルの解析を行い、試験体 A、試験体 B ともに、梁への伝達率の解析結果と実験結果が近い値となった。
- (3) 試験体のスリット部を埋めたモデルの解析では、鉄骨枠から伝わる水平力は 50%が、ブレースから伝わる水平力は 33%が梁へと伝わった。

### 謝辞

本研究は、独立法人都市再生機構における平成 24 年度研究計画「分散配置ブレースの既存梁と既存柱梁接合部に与える影響実験業務」の下で行われた。研究においては、関係者より貴重な意見を頂いた。ここに謝意を表する。

### 参考文献

- 1) 大西歩, 勅使川原正臣, 田子茂: RC+SRC 造中高層集合住宅における鉄骨枠付きブレース補強の配置に関する研究, その 1), 2), 日本建築学会学術講演梗概集, 構造IV, pp.853~856, 2012.9
- 2) 伊藤忠テクノソリューションズ(株): FINAL/V11
- 3) (財)日本建築防災協会: 2001 年改訂版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針・同解説, 2001