

論文 鉄骨枠付き補強ブレースを千鳥配置した RC 柱・梁接合部の圧縮時せん断力

重本 将史*1・勅使川原 正臣*2・中村 聡宏*3・田子 茂*1

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架構に伝わり、基礎まで伝達する際に、柱・梁接合部の入力せん断力にどのように影響を与えるかを、鉄骨枠付きブレース補強された 2 層 2 スパン架構の荷重増分解析を行うことによって明らかにした。荷重増分解析の結果から、ブレースの負担する水平力はすべて梁に軸力として伝わり、それに伴って梁の曲げ耐力が増大するため、柱の耐力が大きく梁の曲げ降伏が先行する場合には、柱・梁接合部の入力せん断力が大きくなり、柱・梁接合部がせん断破壊する可能性があることが分かった。

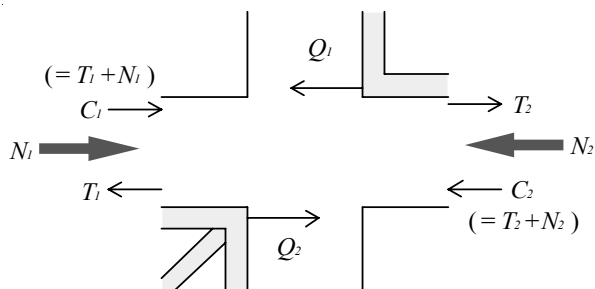
キーワード: 鉄骨枠付きブレース, 柱・梁接合部, 分散配置, 耐震補強

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、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状に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¹⁾は、分散配置は連層配置に対し、変形制限、耐震第 2 次診断法の適用性という点で優れていることを明らかにした。しかし、分散配置ではブレースの応力を上階から下階に伝達する際に、梁に大きな圧縮・引張軸力が作用するため、柱・梁接合部破壊が生じる可能性がある。梁に圧縮軸力が作用する場合の柱・梁接合部の水平方向の力の釣合状態を図-1 に示す。水平方向の釣合を考えると、柱・梁接合部への入力せん断力は式(1)のように表せる。

$$Q_j = (T_1 + N_1) + T_2 - Q_i \quad (1)$$

式中の記号は図-1 参照。



N_1 : 左梁軸力
 Q_i : 上階柱せん断力
 T_i : 左梁の主筋引張力
 C_i : 左梁端のコンクリート圧縮力と主筋圧縮力の和
 N_2 : 右梁軸力
 Q_j : 下階柱せん断力
 T_j : 右梁の主筋引張力
 C_j : 右梁端のコンクリート圧縮力と主筋圧縮力の和

図-1 柱・梁接合部の水平方向の力の釣合状態

式(1)から、鉄骨枠付きブレースから梁に伝わる力 N_1 が大きくなると柱・梁接合部への入力せん断力が大きくなる。筆者ら²⁾は、千鳥状に鉄骨枠付きブレースで補強された架構の柱・梁接合部を取り出した要素実験を行い、鉄骨枠付きブレースの負担する水平力の一部が梁に軸力として伝わることを明らかにした。

そこで本研究では、鉄骨枠付きブレース補強された 2 層 2 スパン架構^{3) 4)}において、ブレースの負担する水平力が梁に軸力として伝わることで、柱・梁接合部の入力せん断力にどのように影響を与えるかを、荷重増分解析を行い検討する。

2. 解析概要

2.1 解析対象

解析対象は、大西ら^{3) 4)}が行った鉄骨枠付きブレースを分散配置した鉄筋コンクリート造 2 層 2 スパン架構の試験体とした。ブレースの耐力をパラメータとした case1(ブレース耐力小, S-1.43), case2(ブレース耐力大, L-1.43)の 2 つのケースについて解析を行う。解析ケースを表-1 に、試験体配筋図を図-2 に示す。両試験体ともに、設計時に柱・梁接合部のせん断破壊が想定されていたが、実験での既存部の破壊形式は柱のせん断破壊が先行しおり、柱・梁接合部のせん断破壊は生じていない。

表-1 解析ケース

	ブレース種類	ブレースの水平耐力
case1 (S-1.43) ³⁾⁴⁾	2-L-30×30×3	187 kN
case2 (L-1.43) ³⁾⁴⁾	2-L-40×40×5	362 kN

*1 名古屋大学大学院 環境学研究科 大学院生 (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)

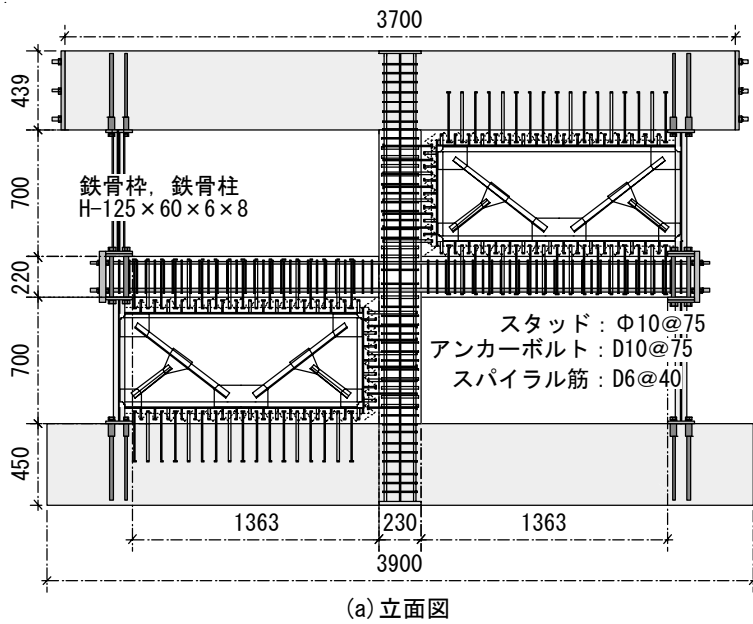


図-2 試験体配筋図⁴⁾

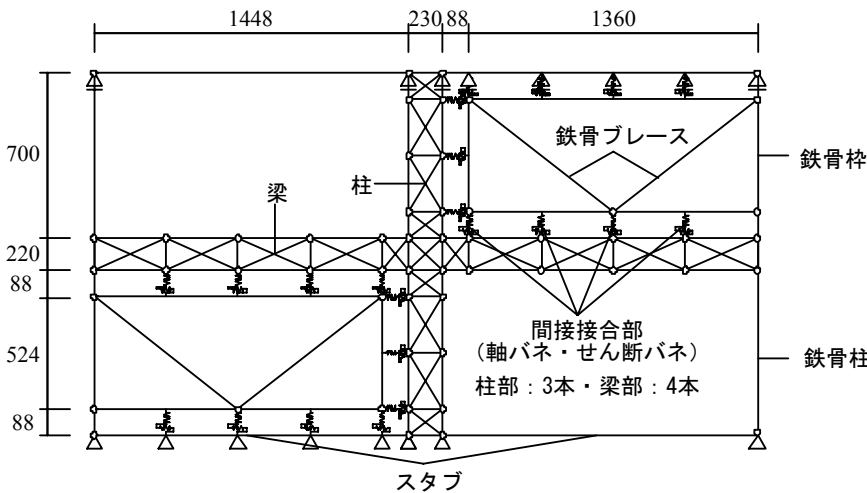


図-3 解析モデル

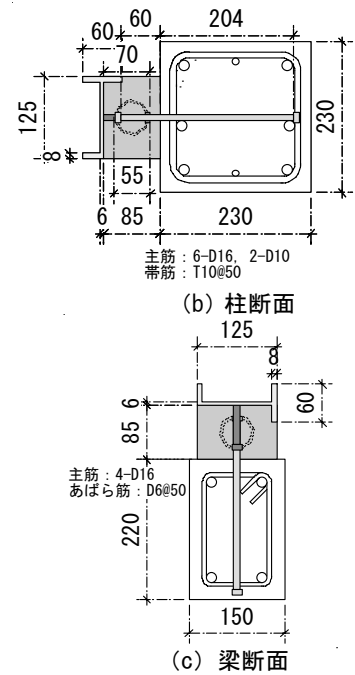


図-4 トラスモデル

2.2 解析モデルの断面仮定

解析モデルを図-3に示す。既存部の柱、梁はトラスモデルとし、スタブや鉄骨ブレース、鉄骨柱、鉄骨柱は線材モデル、間接接合部は軸バネとせん断バネでモデル化した。柱、梁をトラスモデルとすることで、柱・梁接合部の入力せん断力をトラスモデルの斜材から求めることができる。また、ブレースの負担する水平力が、鉄骨柱梁から間接接合部のせん断バネを介して梁に、軸バネを介して柱に伝わるモデルとした。

柱のトラスモデルは図-4(a)に示すような上下の剛体の梁とそれらにピン接合された鉛直材と斜材で構成されている。梁のトラスモデルは図-4(b)に示すような左右の剛体の柱とそれらにピン接合された水平材と斜材で構成されている。本解析は柱・梁接合部の水平せん断力を求めることを目的としているため、柱、梁のトラスモデルは架構の水平方向の剛性（柱のせん断剛性、梁の軸剛性）が試験体と等しくなるように要素の断面を決定す

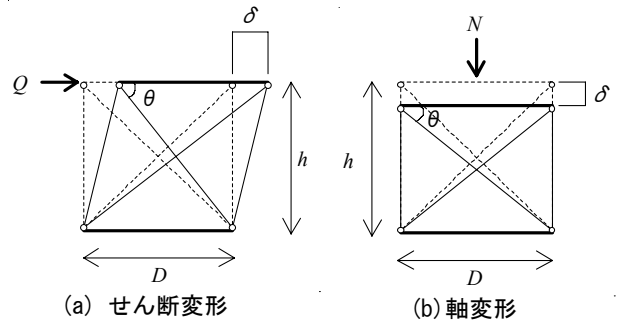


図-5 トラスモデルの変形

る。そのため、架構の鉛直方向の剛性（柱の軸剛性、梁のせん断剛性）が試験体の剛性と異なる。

柱部材モデルの鉛直材の断面積は部材の曲げ剛性と等しくなるように式(2)で決定する。その際に、実際の柱（梁）の断面2次モーメントは、鉄筋をヤング係数比を用いて等価な断面積のコンクリートに置き換えた等価断面2次モーメントを用いた。梁部材モデルの水平材の断面積も同様に決定する。

$$A_c = \frac{6I_e}{D_c^2 + 3D^2} \quad (2)$$

$$I_e = \frac{bD^3}{12} + 2 \cdot \left(\frac{E_s}{E_c} - 1 \right) \cdot A_s \cdot d_s^2$$

ここで、 A_c : トラスモデルの鉛直材の断面積(mm²)
 I_e : 柱 (梁) の等価断面 2 次モーメント(mm⁴)
 D : 柱 (梁) せい(mm)
 D_c : 柱のトラスモデルの鉛直材 (梁のトラスモデルの水平材) のせい(mm)
 b : 柱 (梁) の幅 (mm)
 E_c : コンクリートのヤング係数(N/mm²)
 E_s : 鉄筋のヤング係数(N/mm²)
 A_s : 柱 (梁) 引張鉄筋の断面積(mm²)
 d_s : 中立軸 (柱, 梁断面の中央) から柱 (梁) 主筋までの距離(mm)。

柱のトラスモデルの斜材の断面積については、図-5(a)に示すようなせん断変形を考慮し、トラスモデルのせん断剛性が部材のせん断剛性と等しくなるように式(3)で決定する。

$$A_{cb} = \frac{G \cdot A \cdot D}{2E_c \cdot \kappa \cdot h \cdot \cos^3 \theta} \quad (3)$$

ここで、 A_{cb} : 柱モデルの斜材の断面積(mm²)
 A : 柱の断面積(mm²)
 G : コンクリートのせん断弾性係数(N/mm²)
 D : 柱 (梁) せい(mm)
 E_c : コンクリートのヤング係数(N/mm²)
 κ : 形状係数 (=1.2)
 h : 柱モデルの鉛直材の長さ(mm)
 θ : 剛梁と斜材のなす角。

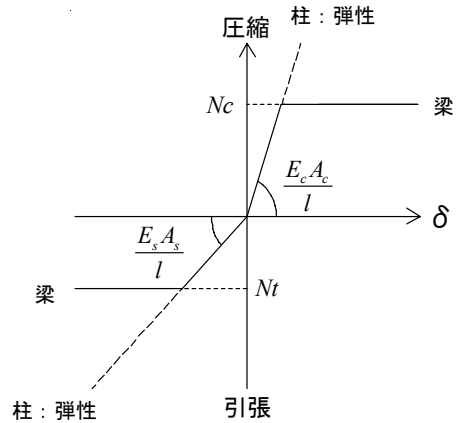
梁のトラスモデルの斜材の断面積については、図-5(b)に示すような軸変形を考慮し、トラスモデルの軸剛性が部材の軸剛性と等しくなるように式(4)で決定する。

$$A_{bb} = \frac{A - 2A_c}{2 \sin^3 \theta} \quad (4)$$

ここで、 A_{bb} : 梁モデルの斜材の断面積(mm²)
 A_c : 梁モデルの水平材の断面積(mm²)
 A : 梁の断面積(mm²)
 θ : 剛梁と斜材のなす角。

2.3 復元力特性

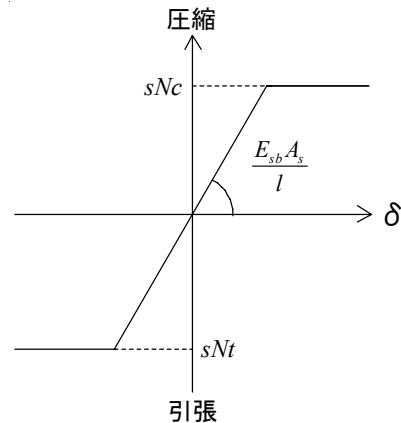
本解析では、鉄骨枠付きブレースの負担する水平力が梁に軸力として伝わることで、梁の曲げ耐力が上昇し、梁曲げ降伏時の柱梁接合部の入力せん断力が大きくなることを確認する。そこで、柱の曲げ破壊とせん断破壊、梁のせん断破壊は生じないと仮定し、柱部材の鉛直材と斜材、梁部材の斜材は弾性とした。柱部材モデルの鉛直材と梁部材モデルの水平材、鉄骨ブレース、鉄骨枠、鉄骨柱の軸バネの復元力特性を図-6に示す。梁部材モデルの水平材の軸耐力は、引張側の N_t を引張鉄筋の降伏強度、圧縮側の N_c を引張鉄筋の降伏強度に梁の釣合軸力を



図中の記号について

E_c : コンクリートのヤング係数
 E_s : 鉄筋のヤング係数
 A_c : 柱トラスモデルの鉛直材 (梁の水平材) の断面積
 A_s : 引張鉄筋の断面積
 l : 柱トラスモデルの鉛直材 (梁の水平材) の長さ
 N_c : 引張鉄筋の降伏強度+釣合軸力
 N_t : 引張鉄筋の降伏強度

(a) 柱鉛直材, 梁水平材



図中の記号について

E_s : 鋼材のヤング係数
 sN_t : 鋼材の引張降伏強度
 bA_s : ブレースの断面積
 sN_c : 鋼材の圧縮降伏強度

(b) 鉄骨ブレース, 鉄骨枠, 鉄骨柱

図-6 復元力特性

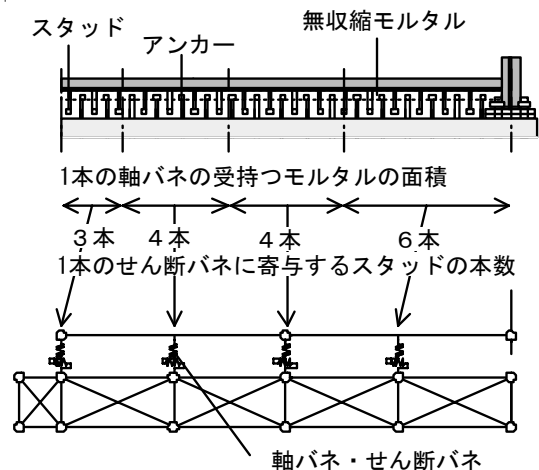


図-7 間接接合部のモデル化

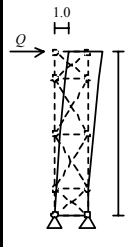
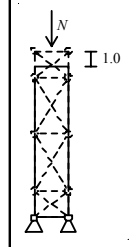
加えた値とし、梁に軸力が加わることで梁の曲げ耐力が大きくなるモデルとした。また、引張側の軸剛性は鉄筋のみの剛性とした。間接接合部については、モルタルの境界面でのすべりを考慮し、スタッド(アンカー)のせん断変形のみで力を伝達すると考え、せん断バネの剛性はスタッドとアンカーのせん断剛性の小さい方とした。間接接合部はスタッド、アンカーで十分に補強されていると考え、せん断バネは弾性とした。また、図-7のように1本のせん断バネに寄与するスタッドの本数を決定した。軸バネは弾性とし、その剛性は圧縮力に対してはモルタルの軸剛性、引張力に対してはゼロとした。これは、スタッドとアンカーに引張力が作用する場合に、モルタルがその引張力を伝えることができないと考えたからである。また、図-7のように1本の軸バネが受持つモルタルの面積を決定した。

3. 解析モデルの妥当性の検証

複数のトラスモデルを組み合わせさせた柱部材と梁部材の架構の水平方向の剛性が実際の部材の剛性と等しくなっているかの検証を行った。これは、鉄骨枠付きブレースの負担する水平力のうち、柱に伝わる成分と梁に伝わる成分が、柱のせん断剛性と梁の軸剛性に影響されると考えたからである。柱・梁部材モデルのせん断剛性および、軸剛性の計算値と解析値の比較を表-2に示す。柱についてはせん断剛性が、梁については軸剛性が計算値と解析値とで概ね一致し、解析で十分に再現されていることが確認できる。表-2における断面2次モーメント I の計算の際には、中立軸位置を柱(梁)断面の中央と考慮し、圧縮側はコンクリートと鉄筋、引張側は鉄筋のみを考慮し計算した。

続いて、間接接合部のモデル化の妥当性を検証するため、筆者らの行った要素実験²⁾をトラスモデルでモデル化し、解析を行った。要素実験では、鉄骨枠から伝わってくる力を想定し、支点を鉄骨枠先端に設けた試験体Aと、ブレースから伝わってくる力を想定し、支点をブレース接続位置に設けた試験体Bの2体について実験を行っている。また、実験で用いたスリットの有る試験体と、試験体に設けていたスリットを無くしたFEMモデルの応力解析を行い、梁への荷重の伝達率を求めた。実験結果とFEMモデルの結果の比較から、FEMモデルでのモデル化は妥当であると考えられるため、試験体に設けていたスリットを無くしたFEMモデルとトラスモデルの梁への荷重の伝達率の比較を行う。要素実験の試験体図を図-8に示す。また、梁への荷重の伝達率の比較を表-3に、要素実験と解析の間接接合部ずれ変位の比較を図-9に示す。

表-2 柱・梁部材モデルのせん断剛性および、軸剛性の計算値と解析値の比較

	せん断方向の剛性(kN/mm)		軸方向の剛性(kN/mm)	
	計算	解析	計算	解析
せん断剛性 $k_m = \frac{GA}{\kappa l}$			軸剛性 $k_n = \frac{EA}{l}$	
曲げ剛性 $k_s = \frac{3EI}{l^3}$				
水平剛性 $k_h = \frac{1}{1/k_m + 1/k_s}$				
柱	32	35	1797	1200
梁	2.3	3.5	495	494

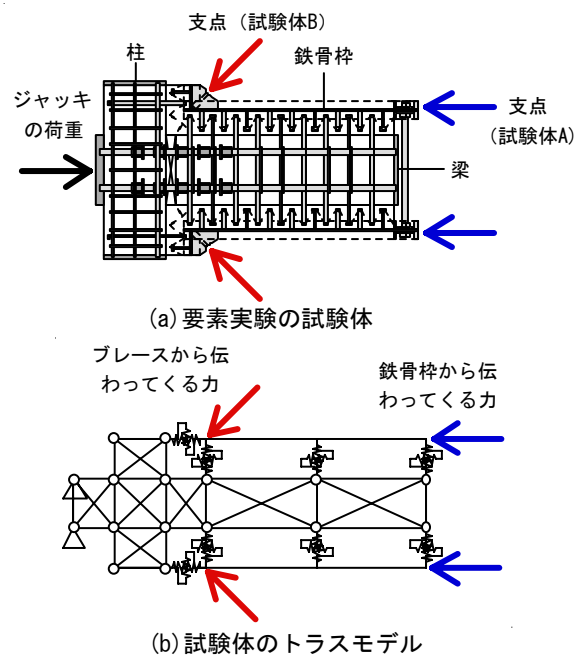


図-8 要素実験の試験体図

表-3 梁への荷重の伝達率の比較

	スリット	試験体A	試験体B
実験 ²⁾	有	41%	23%
FEMモデル ²⁾	有	39%	21%
FEMモデル ²⁾	無	50%	32%
トラスモデル	無	44%	21%

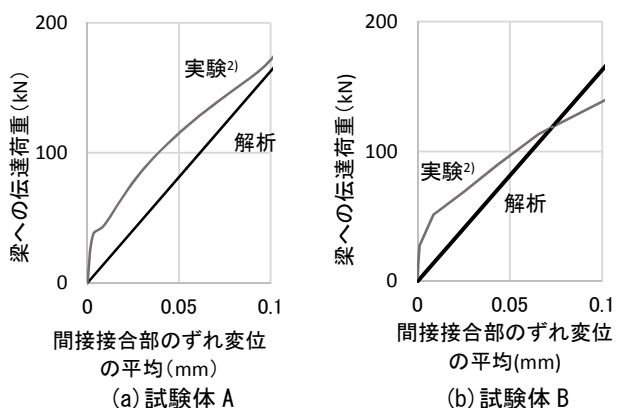


図-9 要素実験²⁾と解析の間接接合部ずれ変位の比較

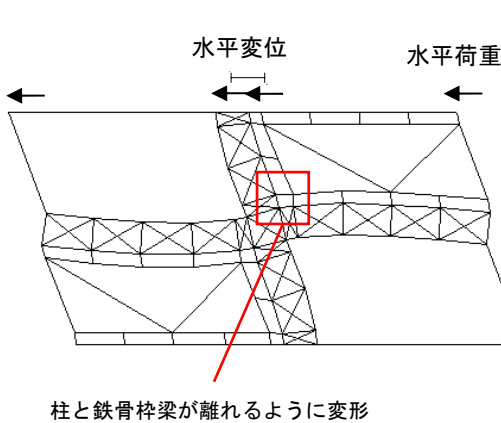
梁への荷重の伝達率は FEM モデルの解析結果に比べて小さくなった。これは図-9 に示すように、間接接合部の剛性をやや過小評価していることが考えられるが、鉄骨枠付きブレースから既存部への水平力の伝わり方の傾向は捉えられていると考えられる。

4. 解析結果

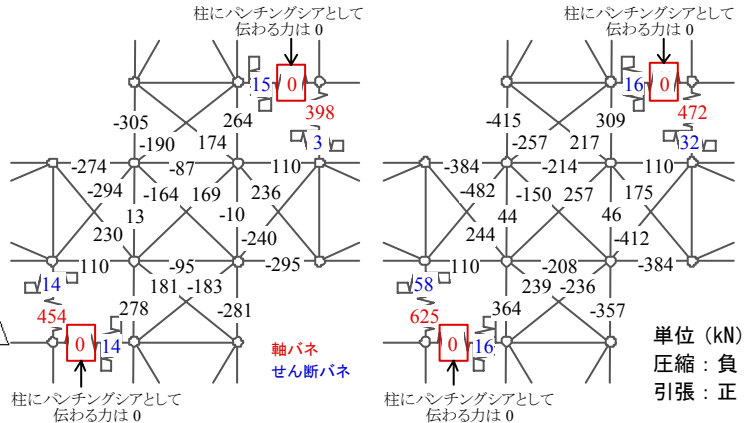
市販の汎用フレーム解析ソフト SNAP/Ver6⁵⁾を用いて荷重増分解析を行った。変形状態の一例を図-10 に示す。加力方向は図-10 に示すように柱・梁接合部に圧縮方向の力が作用する方向とした。加力は図-10 の矢印の位置に同じ大きさの荷重を作用させた。梁曲げ降伏時の柱・梁接合部周りの応力状態を図-11 に、case1 における実験結果の荷重-変形関係の包絡線³⁾⁴⁾と解析結果の比較を図-12 に、荷重-変形関係と柱・梁接合部の入力せん断力を図-13 に示す。図-13 に示した柱・梁接合部のせん断終局強度は、靱性保証型耐震設計指針⁶⁾によった。図-12 に示したように、本解析では、架構の剛性が実験結果と一致しておらず、今後、実験結果の歪分布などと比較し検討する必要がある。また、柱を弾性モデルとしているため実験結果に比べて剛性低下が小さい。case2 においても同様の傾向がみられた。

case1 では水平荷重 403kN 時に 1 層、2 層の全ブレースが降伏し、水平荷重 526kN 時に両側の梁が曲げ降伏した。その時の柱・梁接合部の入力せん断力は 241kN で、柱・梁接合部のせん断終局強度の 250kN より小さくなった。解析における柱・梁接合部の入力せん断力は、柱・梁接合部部分のトラス部材の斜材の軸力から算出した。case2 では水平荷重 588kN 時に 1 層、2 層の全ブレースが降伏し、水平荷重 805kN 時に両側の梁が曲げ降伏した。その時の柱・梁接合部の入力せん断力は 295kN で、柱・梁接合部のせん断終局強度の 250kN より大きくなった。これは、解析では柱を弾性としているため、柱が負担するせん断力が大きくなるためである。実験³⁾⁴⁾では両試験体ともに、柱がせん断破壊したため、実験耐力は解析の梁曲げ降伏時の水平荷重よりも小さい。

要素実験²⁾では、表-3 に示すように、ブレースの負担している水平力の約半分が梁に軸力として伝わっていたが、本解析 case1, case2 ともにブレースが負担している水平力はすべて梁に軸力として伝わった。よって図-11 に示すように、柱にせん断力として伝わった力はゼロとなった。これは要素実験とは違い架構の場合には、柱が鉄骨枠梁の端部から離れる方向に変形(図-10)しており、鉄骨枠梁から柱に力が伝わりにくくなっているこ



柱と鉄骨枠梁が離れるように変形
図-10 変形状態の一例



(a) case1 (b) case2
図-11 梁曲げ降伏時の柱・梁接合部周りの応力状態

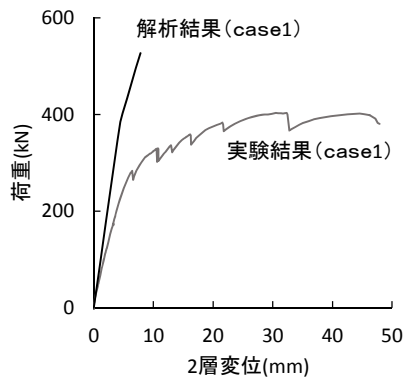
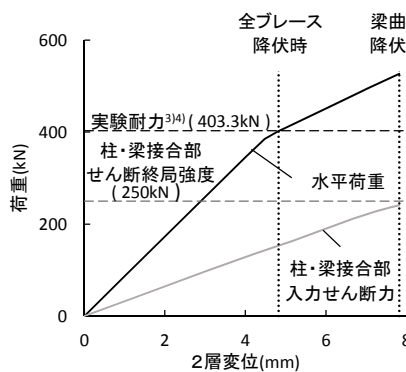
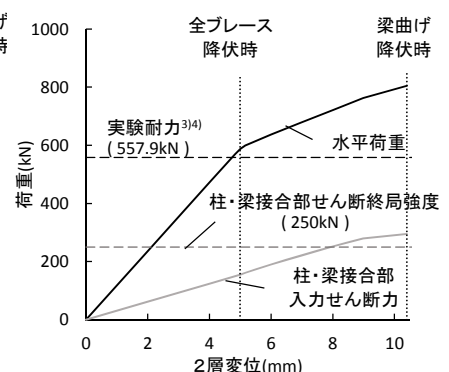


図-12 実験結果の荷重-変形関係の包絡線³⁾⁴⁾と解析結果の比較 (case1)



(a) case1



(b) case2

図-13 荷重-変形関係と柱・梁接合部への入力せん断力

とが原因だと考えられる。ブレースが負担している水平力がすべて梁に軸力として伝わる場合、梁の曲げ降伏モーメントが大きくなるため、柱が十分な耐力を有している場合には、ブレースの水平耐力が大きくなるほど柱・梁接合部の入力せん断力が大きくなる。すなわち、鉄骨枠付きブレースを千鳥配置した場合、ブレースの水平耐力が大きいと、柱・梁接合部がせん断破壊する危険性がある。

5. 間接接合部のせん断バネを弾塑性にしたモデルの解析 (case3)

case1, case2 の解析では、間接接合部のせん断特性を弾性としていた。しかし、間接接合部がすべることにより、鉄骨枠付きブレースの負担水平力が柱にせん断力として伝わるようになり、柱・梁接合部の入力せん断力が小さくなるのが考えられる。そこで case2 において、間接接合部のせん断バネを弾塑性とした case3 について解析を行い、柱・梁接合部の入力せん断力の比較を行った。間接接合部のせん断バネの復元力特性を図-14に示す。

case2 と case3 の入力せん断力の比較を図-15に示す。case3 においてブレースの負担水平力が大きくなり、スタッドのみで既存部に力を伝えることができなくなると、間接接合部がすべり、柱にパンチングシアとして力が伝わるようになり、梁に軸力として伝わる力が小さくなる。この場合、case2 に比べて梁の曲げ耐力が小さくなるため、

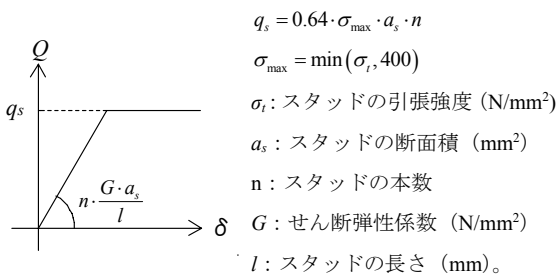


図-14 間接接合部のせん断バネの復元力特性

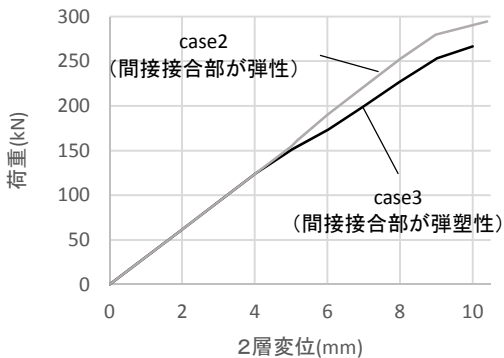


図-15 case2 と case3 の入力せん断力の比較

梁の曲げ降伏時の柱・梁接合部の入力せん断力は小さくなると考えられる。よって、ブレースの水平耐力に対して間接接合部のスタッドとアンカーの補強量が少なく、柱のせん断力は大きくなり、柱がパンチング破壊しやすくなるが、柱・梁接合部の入力せん断力は小さくなると考えられる。

6. まとめ

本論文では、柱・梁部材をトラスモデルで置換した解析モデルを用いて、鉄骨枠付きブレースを千鳥状に補強した2層2スパン架構の荷重増分解析を行った。

本研究で得た知見を以下に要約する。

- (1) 2層2スパン架構では、柱が鉄骨枠梁から離れるように変形し、鉄骨枠梁から柱に力が伝わりにくくなるため、ブレースの負担する水平力はすべて梁に軸力として伝わった。
- (2) ブレースの水平耐力が大きいとブレースから梁に伝わる軸力が大きくなり、柱・梁接合部がせん断破壊する可能性がある。
- (3) ブレースの水平耐力に対して間接接合部のスタッドとアンカーの補強量が少なく、梁の軸力は小さくなり、柱・梁接合部の入力せん断力が小さくなるが、柱のせん断力が大きくなり、柱がパンチング破壊しやすくなる危険性がある。

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, その2, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造IV, pp.853-856, 2012.9
- 2) 重本将史, 勅使川原正臣, 中村聡宏, 大西歩, 田子茂: 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, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造IV, pp.329-330, 2013.9
- 3) 北野靖彦, 勅使川原正臣, 大西歩, 田子茂, 中村聡宏, 鈴木史朗: 既存鉄筋コンクリート造建築物に分散配置された鉄骨枠付きブレースの補強効果に関する実験的研究 その1, その2, その3, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造IV, pp.321-326, 2013.9
- 4) 大西歩, 勅使川原正臣, 田子茂: 既存鉄筋コンクリート造建築物に分散配置された鉄骨枠付きブレースの補強効果に関する実験的研究, 日本建築学会東海支部研究報告集第51号, pp.341-344, 2013.2
- 5) 構造システム(株): SNAP/Ver6
- 6) 日本建築学会: 靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999