

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06294

研究課題名(和文) 鋼構造骨組の立体的挙動を考慮した変形性能評価

研究課題名(英文) Deformation capacity evaluation of steel frame considering spatial behavior

研究代表者

金尾 伊織 (KANAOKA, Iori)

京都工芸繊維大学・デザイン・建築学系・教授

研究者番号：80372564

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：梁の面外変形に着目した補剛方法を提案し、骨組内の補剛で連結された梁の挙動を明確にし、骨組内の補剛条件に関して検討した。

端部補剛を片側に付2か所設け、その内側の中間部領域を  $y = 140$  で均等間隔補剛する補剛方法を提案し、面外変位の抑制効果を確認した。その補剛は、現行の必要補剛軸剛性および必要曲げ剛性以上の剛性を有していればよいことを確認した。また、骨組内の小梁で連結された梁の補剛軸力は小さいが、補剛曲げモーメントは大きいことを解析および実験で示した。骨組内の梁の横座屈を拘束するためには、補剛材の曲げ剛性が重要である可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：This research proposed the lateral bracing method restraining out-of-plane deformation. Moreover, the behavior of the beams connected by lateral bracings in a frame was clarified. The following information is obtained:

(1) In this proposed method, two lateral bracings are located at each beam-end and the remainder as equal distance of  $l_b/iy = 140$ . This method ensures the plastic deformation capacity of the beam and restrains the out-of-plane deformation below 30mm. The required stiffness of lateral bracing for proposed method is equal to the current design code. (2) According to analysis and experiment, although the axial force of the lateral bracing arranged between two beams in a frame is small, bending moment of the lateral bracing is large. In order to restrain the lateral buckling of the beam in a frame, the possibility was shown that the flexural stiffness of lateral bracing is important.

研究分野：建築構造・鋼構造

キーワード：鋼構造 横座屈 横補剛 面外変形 立体骨組

1. 研究開始当初の背景

日本では、高い耐震性能を有する建物を目指して耐震基準が整備されている。鉄骨建物の耐震性能を判定する場合、座屈が発生した時点で建物は崩壊とみなされ、それ以上の耐力・変形は期待できない。しかし、代表者は横座屈によって大きな面外変形が生じて直ちに骨組の崩壊には至らない可能性を示した<sup>1),2)</sup>。また、他の実大梁実験においても、同様の知見が得られている<sup>3)</sup>。梁に横座屈が生じていても骨組は高い変形性能を有するが、面外変形によってスラブの破損や外壁落下につながる事が考えられることから、横座屈の指標として、面外変形を考慮する必要があると考えられる。しかし、梁横座屈後の面外変形に着目し、骨組内の梁の性能を満足する補剛条件を示した研究は見当たらない。

2. 研究の目的

本研究では、面外変形に着目した梁の補剛方法を提案し、その補剛に要求される性能を明らかにすると共に、骨組内の梁の挙動を明確にするため、以下を主な研究課題とする。

1. 梁に要求される性能を維持するための補剛条件の提案
2. 骨組内の梁に要求される補剛条件の提案

3. 研究の方法

(1) 面外変形を抑制する補剛方法

現行の耐震設計基・規準における保有耐力横補剛の均等間隔補剛規定と端部補剛規定<sup>4)</sup>に基づいて、簡易で効果の高い補剛方法を提案している<sup>5)</sup>。しかし、面外変形については検討されていないため、文献<sup>5)</sup>の方法を応用して面外変形を拘束する補剛方法を提案する。単純梁の有限要素解析を行い、パラメータは下記とする。

1. 梁断面形状
2. 補剛間隔

上記で示された補剛方法で、耐力および面外変形を満足するための必要補剛条件を検討する。パラメータは下記とする。

1. 補剛材の軸剛性
2. 補剛材の曲げ剛性

(2) 骨組内の梁の横座屈挙動

増分摂動法を用いた立体梁・柱有限要素法による立体骨組解析プログラム<sup>6)</sup>を用いて、骨組内の梁の横座屈挙動について検討する。1層1スパンの門型立体骨組を対象とし、柱頭に水平力を単調载荷する。解析パラメータは以下とする。

1. 梁断面
2. 補剛剛性

(3) 補剛付梁の横座屈後大たわみ挙動実験

H-50×20×1×1.6の補剛付小型H形鋼の大たわみ実験を実施し、梁単体の補剛効果、補剛で連結された梁の補剛効果について検討する。パラメータは以下とする。

1. 補剛付単体梁
2. 補剛で連結された2本の梁

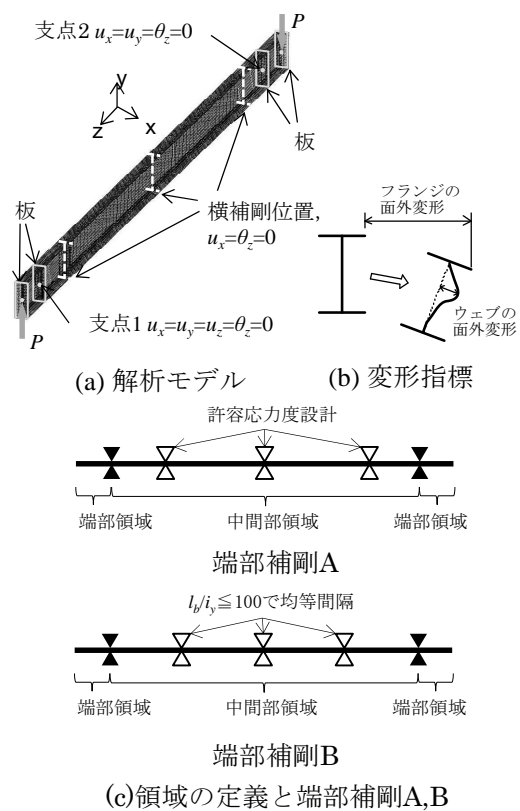


図1 解析モデルと指標

4. 研究成果

(1) 面外変形を抑制する補剛方法

梁の耐力を維持する横補剛方法として、<sup>5)</sup>は梁端部補剛位置に補剛材を設け、残る部分を梁の弱軸回りの細長比 $\lambda_y \leq 100$ の間隔で補剛する方法(端部補剛B)を提案した。この方法を参考に、面外変形に効果的な補剛方法を提案する。なお、梁と外装材の距離が約30mmであることからこれを基準とする。

① 解析モデル

図1に解析モデルの概要を示す。汎用有限要素法プログラム Marc2013 を用いる。梁は H-500×200×10×16, H-600×200×11×17, H-800×300×14×26, 材長は $\lambda_y=260\sim570$ である。梁を支点から外側に1mはね出し、その先に鉛直荷重を加え、逆対称曲げモーメントを与え、载荷点、支点位置にはフランジと同厚の鋼板を取り付けている(図1(a))。要素は4節点厚肉シェル要素を用い、フランジ、ウェブは20mm×50mm, 50mm×50mm程度に等分割する。応力ひずみ関係はバイリニアモデル、ヤング係数 $E=2.05 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ , 降伏応力度 $\sigma_y=235 \text{N/mm}^2$ , 降伏後の接線係数 $E/100$ である。载荷用のはね出し梁部分は、接線弾性係数 $100E$ の弾性材料である。境界条件を図1中に示す。梁端回転角0.015rad, 0.03rad, 0.045radの振幅を2回ずつ繰返し载荷する。(b)に示すフランジとウェブの面外変位を指標とする。(c)に示す文献<sup>4)</sup>に基づく通常の端部補剛(端部補剛A)と端部補剛Bで補剛された梁について、梁端から端部補剛までの端部領域、端部補剛で挟まれた中間部領域の面外変位を比較する。

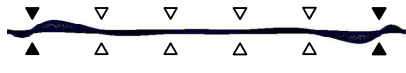


図2 最大変形時(変形量10倍表示)

$$l_b/i_y \leq 140 \text{で均等間隔}$$

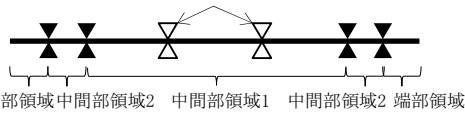
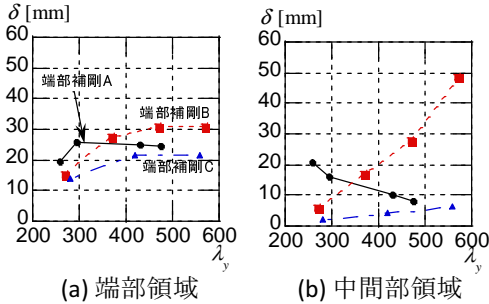


図3 領域の定義と端部補剛C



(a) 端部領域 (b) 中間部領域  
図4 フランジ最大面外変位 (H600)

## ② 面外変形を抑制する補剛方法

端部補剛 A, B のフランジの最大面外変位の解析結果から、短い材長では端部補剛 A, 長い材長では端部補剛 B の面外変位が大きいことを確認した。また、中間部領域では、材長が長くなると、端部補剛 B の変位が著しく増加し、50mm 程度の変位が生じていた。このことから、面外変位を拘束する新しい補剛方法が必要であることを確認した。

H-600,  $\lambda_y=570$  の梁の変形図を図 2 に示す。中間部領域の面外変形は端部領域に近い補剛間で生じていることから、図 3 に示すように梁端部に 2 か所端部補剛を設け、その内側を均等間隔に補剛する方法を検討する。以下、端部補剛と端部補剛の間を中間部領域 2、その内側を中間部領域 1 と定義する。H-600,  $\lambda_y=570$  の梁を対象として、中間部領域 1 を 2~6 等分 (補剛間隔を  $l_b/i_y=72\sim 215$ ) した場合のフランジの最大面外変位を検討し、中間部領域 1 の補剛間隔は  $\lambda_y \leq 140$  であれば、端部補剛 A と同等以上の効果を示すことから、端部補剛を 2 か所設け、その中間部を  $\lambda_y=140$  で均等補剛する方法を端部補剛 C と定義する。端部補剛 C で補剛した梁の解析結果を図 4 に示す。いずれも、端部補剛 C の面外変位は端部、中間部領域で 30mm 以下である。

## ③ 面外変形を抑制する補剛方法の必要補剛剛性

端部補剛 B, 端部補剛 C の横補剛に要求される補剛剛性について検討する。図 5 に解析モデルを示す。材長は細長比  $\lambda_y=270$  (端部補剛 B),  $\lambda_y=560$  (端部補剛 C) である。横補剛材は補剛位置断面にフランジ厚のスチフナを取り付け、スチフナに軸ばね・回転ばねを取り付けてモデル化する。軸ばねの剛性は許容応力度設計指針 7 に従う必要補剛剛性を基準剛性  $K_0$  とし、 $K_0 \sim 300K_0$  に変化させる。回転ばねは文献 8) に従う必要曲げ補剛剛性を基準曲げ剛性  $K_{B0}$  とし、 $0 \sim 1000K_{B0}$  に変化さ

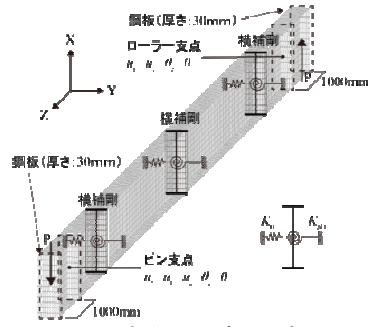
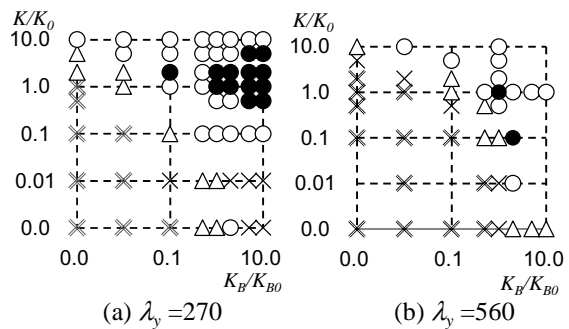


図5 解析モデルの概要



(a)  $\lambda_y=270$  (b)  $\lambda_y=560$   
図6 補剛軸剛性・曲げ剛性の影響

せる。解析結果を図 6 に示す。(a)  $\lambda_y=270$ , (b)  $\lambda_y=560$  のフランジ面外変位を示す。縦軸は軸剛性、横軸は曲げ剛性を基準剛性で除して無次元化している。フランジ面外変位は  $\delta < 30\text{mm}$  は  $\circ$ ,  $\delta < 50\text{mm}$  は  $\Delta$ ,  $\delta \geq 50\text{mm}$  は  $\times$  で示す。 $K_0$  以上かつ  $K_{B0}$  以上の剛性を有していれば、概ね必要性能を満足できる。なお、耐力も同様の条件で、全塑性モーメント以上の耐力を維持できることを確認している。

## ④ 結論

1. 端部補剛規定に従い端部補剛を両端に 4 か所設け、その内側の中間部領域を  $\lambda_y \leq 140$  で均等間隔補剛する端部補剛 C を提案し、面外変位の抑制効果を確認した。
2. 必要補剛軸剛性および曲げ剛性以上の剛性を有していれば、端部補剛 B, 端部補剛 C は十分に補剛効果を発揮できる。

## (2) 骨組内の梁の横座屈挙動

骨組内の横補剛で連結された梁の横補剛に要求される性能について検討する。

### ① 解析モデル

図 7 に解析モデルを示す。階高 3.7m, スパン 14.56m, 柱  $\square 400 \times 400 \times 19$ , 梁 H-600  $\times 200 \times 11 \times 17$  (細長比 350), 補剛材 H-500  $\times 200 \times 10 \times 16$  である。横補剛は文献 4) に規定されている保有耐力横補剛の端部補剛規定に従う。部材は元の断面諸量と同等になるように、材料線要素でモデル化し (図 7(b)), 材軸方向に部材幅の 1~2 倍程度の長さになるように部材を等分割している。応力ひずみ関係は(c)に示すバイリニアモデルとする。境界条件は、ピン柱脚は  $x, y, z, \theta_z$  と反りを拘束し、柱と梁および梁と横補剛材の接合節点は、反りを拘束している。4 つの柱頭に水平力を与え層間変形角 0.1rad まで

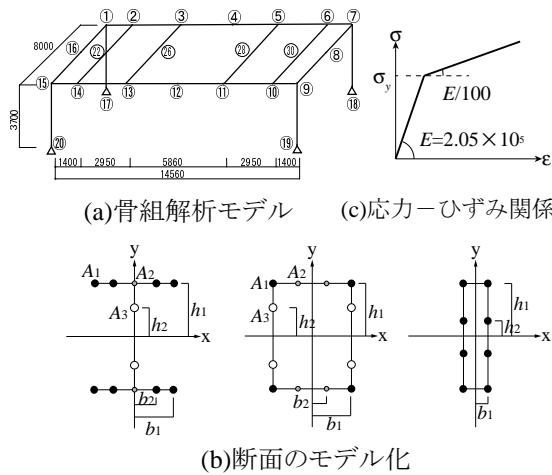


図7 解析モデル(H-600×200 λ=350)

載荷する。補剛軸剛性および補剛曲げ剛性をパラメータとした解析を行う。

## ② 解析結果

解析結果を図 8 に示す。(a)は荷重-層間変形角関係、(b)は補剛軸力分布、(c)は補剛曲げモーメント分布を示す。(a)の縦軸は水平耐力を崩壊荷重で除して無次元化し、(b)、(c)では補剛軸力および補剛曲げモーメントを必要補剛軸力、必要補剛曲げモーメントで除している<sup>8)</sup>。(a)より 0.1rad の最大変形時まで耐力を維持し、崩壊荷重の 1.2 倍の耐力を示している。(b)、(c)より補剛軸力は最大でも必要補剛力の 12%程度であり、補剛に生じるモーメントは、必要曲げモーメントよりも大きく、外側の補剛に大きいモーメントが発生している。

## ③ 補剛剛性が立体骨組の挙動に与える影響

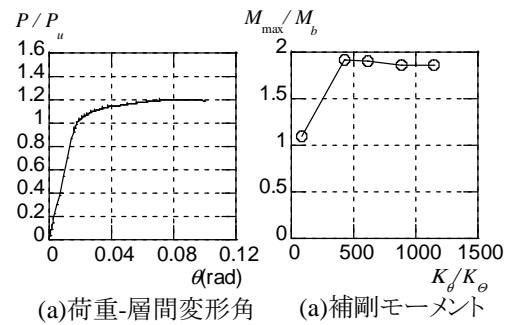
補剛材が骨組挙動に与える影響について検討する目的で、横補剛の補剛軸剛性および曲げ剛性を変化させた解析を行った。文献 13)で規定されている必要補剛剛性を必要補剛剛性 ( $K_{\theta}$ ,  $K_B$ ) とし、横補剛剛性を変化させる。ここで、 $K_{\theta}=1346$  (kNm/rad),  $K_B=2040000$  (kN/m)である。

解析結果を図 9 に示す。(a)補剛曲げモーメント-補剛曲げ剛性関係、(b)面外変位-補剛曲げ剛性関係、(c)梁変形図を示す。

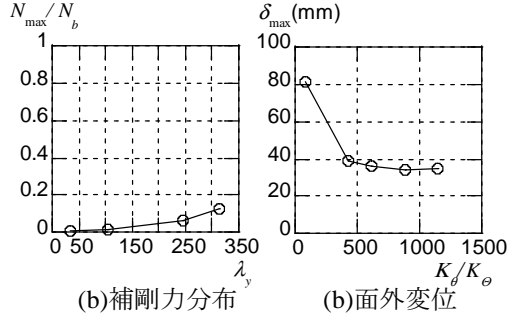
(a)より曲げ剛性が大きくなると、補剛に発生する曲げモーメントは大きくなり、必要補剛曲げモーメントの約 2 倍の曲げモーメントが発生している。また、補剛曲げ剛性を 1000 倍以上にしても、30mm 程度の面外変形が生じたが、400 倍以上では概ね一定の値となる。(c)より補剛で接続された 2 本の梁は全体的に弓なりの形状を示している。

## ④ 結論

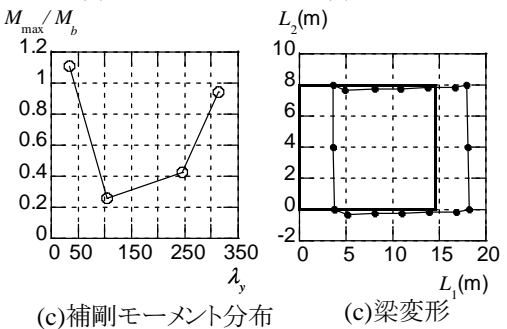
本研究では、増分摂動法を用いた立体梁-柱有限要素解析プログラムを用いて 1 層 1 スパンの立体骨組静的解析を行った。補剛軸力は小さいが、補剛曲げモーメントは大きいことを示した。また、面外変形を完全には拘束できないが、補剛材の曲げ剛性が基準剛性の 400 倍以上で概ね一定となることを示した。



(a)荷重-層間変形角



(b)補剛力分布



(c)補剛モーメント分布

図8 立体骨組挙動 (H-600×200 λ=350)

(3) 補剛付梁の横座屈後大たわみ挙動実験  
前節では、骨組内の梁同士が小梁で連結された場合、補剛には軸剛性のみならず曲げ剛性が重要である可能性を示した。小型 H 形鋼梁の繰返し載荷実験を行い、横補剛に生じる力について明らかにする。

## ① 横補剛付小型鋼梁の静的実験

実験概要を図 10 に示す。H-50×20×1×1.6 の梁を対象とし、材質 SS400 の直方体鋼材を切削加工によって製作した。載荷装置は、4 つの H 形柱からなり、柱頭柱脚はピンを介して剛な梁に接続されている。試験体梁は、両端に剛なプレートと溶接し、プレートと柱をボルトで接合している。載荷梁の一端はジャッキと緊結され、ジャッキによって、載荷梁が水平方向に移動して、柱は柱脚中心に回転し、試験体梁に逆対称曲げを与える。載荷振幅は、試験体梁の全塑性モーメント  $M_p$  に対応する梁端回転角  $\theta_p$  (0.0083rad) を基準にして、 $\theta_p$ ,  $2\theta_p$ ,  $4\theta_p$ ,  $6\theta_p$ ,  $8\theta_p$ ,  $10\theta_p$ ,  $12\theta_p$ ,  $15\theta_p$  とし、 $\theta_p \sim 12\theta_p$  の範囲では正負方向に 2 サイクルずつ、 $15\theta_p$  は 1 サイクル載荷した。各試験体梁の概要を (b) に示す。補剛位置は端部補剛規定 2) に基づいて決定した。B4 は補剛材の端部を剛な梁に取り付けたもので補剛材は丸鋼  $\phi 4.5$ ,  $L=250$ mm, B9, B10 は梁同士を横補剛で連携し、補剛材は丸鋼  $\phi 6$ ,

図9 補剛剛性の影響 (H-600×200 λ=350)

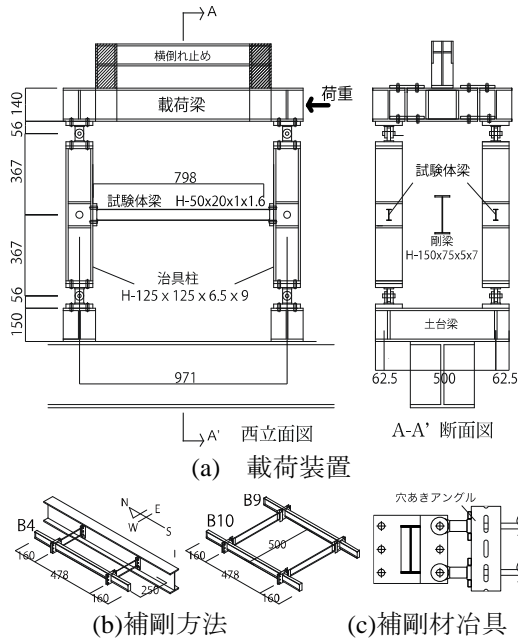


図10 実験概要

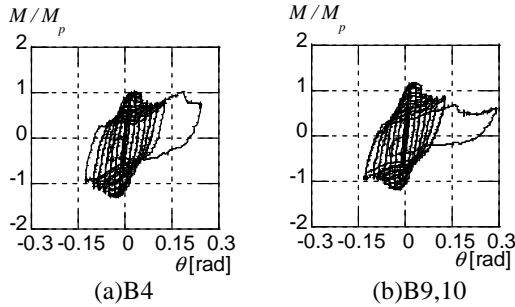


図11 梁端モーメント-梁端回転角

$L=500\text{mm}$  である。補剛材は丸鋼を使用し、端部にねじ切り加工をしてロッドエンドベアリングを介して治具に取り付けている。梁の補剛用治具を(c)に示す。ジュラルミンを切削加工して製作し、治具と補剛材は、ベアリングを介することで上下方向に回転可能なピン支点となっている。なお、補剛材治具の補剛材間隔を拘束している。

### ② 実験結果

各試験体の梁端モーメント-梁端回転角関係を図 11 に示し、実験の様子を写真 1 に示す。縦軸は全塑性モーメントで除して無次元化している。いずれも  $4\theta_p$  方向 1 サイクル目で最大耐力を示して横座屈が発生し、耐力が低下した。その後、ピンチングが生じた。

各試験体の補剛材上下の補剛軸力および補剛モーメント-梁端回転角関係を図 12 に示す。上下の補剛材の軸力を足し合わせて補剛軸力、補剛材の軸力と、補剛材の上下間距離から補剛モーメントを算出している。

B9, B10 は補剛軸力が小さく、B4 は補剛軸力が大きい。一方、B9 の補剛モーメントは極めて大きく、文献 8) に規定されている曲げモーメントよりも大きな値となっているが、B4 の補剛モーメントは小さい。

### ③ 結論

小型 H 形鋼梁の実験を行い、梁同士を横補

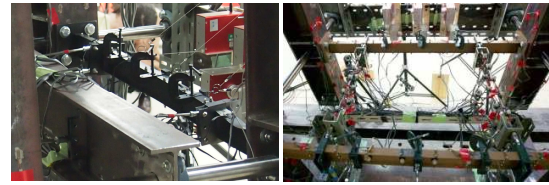


写真1 実験の様子

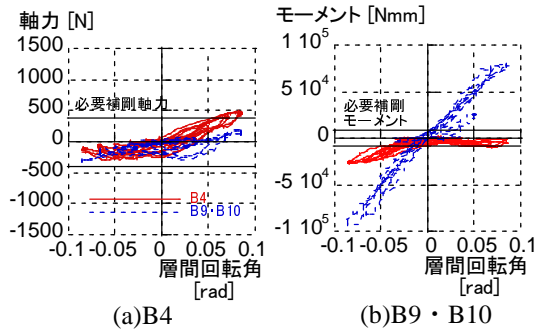


図12 補剛軸力・モーメント

剛でつないだ場合、梁は同じ方向に面外変形することを確認した。横補剛の一端を剛な梁に取り付けた場合と比較すると、補剛軸力は小さく、面外変形を拘束するためには、補剛材の曲げ剛性が重要である可能性を実験的にも示した。

### (4) 結論

数値解析を用いて、梁の面外変形に着目した補剛方法を提案した。また、骨組内の補剛で連結された梁の挙動特性に関して解析的・実験的検討を実施し、以下の知見を得た。

1. 端部補剛規定に従い端部補剛を両端に 4 か所設け、その内側の中間部領域を  $\lambda_p \leq 140$  で均等間隔補剛する端部補剛 C を提案し、面外変位の抑制効果を確認した。
2. 現行の必要補剛軸剛性および必要曲げ剛性以上の剛性を有していれば、提案した補剛方法は、補剛効果を發揮できる。
3. 骨組内の梁で、小梁で連結された梁の補剛軸力は小さいが、補剛曲げモーメントは大きいことを示した。また、小型梁の実験を行い、同様の結果を得た。骨組内の梁の横座屈を拘束するためには、補剛材の曲げ剛性が重要である可能性を示した。今後、曲げ剛性に関する検討の必要性を示した。

### <参考文献>

- 1) 金尾伊織, 森迫清貴, 村本真: 水平力を受ける鋼 1 層ラーメンの梁横座屈発生後挙動に関する基礎的考察, 日本建築学会構造系論文集, 第 649 号, pp.643-649, 2010.3.
- 2) 中尾浩之, 金尾伊織: 鋼構造ラーメン骨組内の梁耐力と変形性能に関する基礎的考察, 構造工学論文集, Vol.60B, pp.257-264, 2014.3.
- 3) 伊賀はるな, 聲高 裕治, 伊山 潤, 長谷川 隆: コンクリート床スラブによる H 形断

面梁の横座屈補剛効果に関する実験, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 巻号 53, pp.513-516, 2013.5

- 4) 国土交通省住宅局建築指導課：2015 年版建築物の構造関係技術基準解説書, 2015
- 5) 于征, 金尾伊織, 森迫清貴：繰返し荷重を受ける H 形鋼梁の保有耐力横補剛に関する数値解析的研究, 日本建築学会構造系論文集, pp.323-329, 第 79 巻, 第 696 号, 2014.2
- 6) 金尾(奥田)伊織, 森迫清貴, 中村武：一軸材料線要素からなる梁・柱有限要素を用いた鋼立体ラーメンの弾塑性挙動の解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 533 号, pp.99-106, 2001.
- 7) 日本建築学会：鋼構造設計基準—許容応力度設計法—, 2005.9
- 8) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計指針, 2011.4

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① 于征, 河合柳之介, 金尾伊織：H 形鋼梁の面外変形を効果的に拘束する横補剛方法に関する数値解析的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 80 巻, 第 714 号, pp.1319-1327, 2015.8.

〔学会発表〕(計 14 件)

- ① 小橋資子, 尾下誠, 金尾伊織：骨組内の梁の補剛効果, 日本建築学会大会学術講演会・建築デザイン発表会, 東北大学(仙台市), 2018.9
- ② 尾下誠, 金尾伊織：H 形鋼梁の面外変形を抑制する補剛材の軸剛性と曲げ剛性の検討, 日本建築学会大会学術講演会・建築デザイン発表会, 東北大学(仙台市), 2018.9
- ③ 小橋資子, 尾下誠, 金尾伊織：横補剛を有する骨組内の梁の立体的挙動, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 大阪工業技術専門学校(大阪市), 2018.6
- ④ 尾下誠, 金尾伊織：H 形鋼梁の面外変形を抑制する補剛剛性の検討, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 大阪工業技術専門学校(大阪市), 2018.6
- ⑤ 何天蕊, 金尾伊織：骨組内の梁の横補剛が挙動に与える影響, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 大阪工業技術専門学校(大阪市), 2018.6
- ⑥ 趙曉杰, 金尾伊織, 于征：H 形鋼梁の横座屈に対する日中米横補剛規準の効果, 日本建築学会大会学術講演会・建築デザイン発表会, 広島工業大学(広島市), 2017.8
- ⑦ 尾下誠, 金尾伊織：横座屈を伴う大断面梁の面外変形, 日本建築学会大会学術講演会・建築デザイン発表会, 広島工業大学(広島市), 2017.8

- ⑧ 趙曉杰, 金尾伊織, 于征：中米横補剛規準を満たす H 形鋼梁の挙動, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 大阪工業技術専門学校(大阪市), 2017.6
- ⑨ 小川侑子, 金尾伊織：H 形鋼梁の面外変形を考慮した横補剛の必要条件, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 大阪工業技術専門学校(大阪市), 2017.6
- ⑩ 中井真歩, 金尾伊織：補剛剛性が骨組内の梁の横座屈に与える影響, 日本建築学会大会学術講演会・建築デザイン発表会, 福岡大学(福岡市), 2016.8
- ⑪ 金尾伊織, 小川侑子：梁中央近傍の横補剛の効果, 日本建築学会大会学術講演会・建築デザイン発表会, 福岡大学(福岡市), 2016.8
- ⑫ 中井真歩, 金尾伊織：横補剛を有する鋼立体骨組の挙動に関する基礎的研究, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 大阪工業技術専門学校(大阪市), 2016.6
- ⑬ 金尾伊織, 小川侑子：梁中央近傍の横補剛が与える横座屈挙動への影響, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 大阪工業技術専門学校(大阪市), 2016.6
- ⑭ 小川侑子, 金尾伊織, 于征：スラブを有する鉄骨梁の面外変形が外装材に与える影響, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 大阪工業技術専門学校(大阪市), 2016.6

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

金尾 伊織 (KANAOKA Iori)  
京都工芸繊維大学デザイン・建築学系・教授  
研究者番号：80372564

(4) 研究協力者

于 征 (YU Zheng)  
中冶京誠工程技術有限公司・博士研究員  
小川 侑子 (OGAWA Yuko)  
京都工芸繊維大学大学院・大学院生  
中井 真歩 (NAKAI Maho)  
京都工芸繊維大学大学院・大学院生  
何 天蕊 (HE Tianrui)  
京都工芸繊維大学大学院・大学院生  
趙 曉杰 (ZHAO Xiaojie)  
京都工芸繊維大学大学院・大学院生  
尾下 誠 (OSHITA Makoto)  
京都工芸繊維大学大学院・大学院生  
小橋 資子 (KOBASHI Motoko)  
京都工芸繊維大学・学部生