

令和 4 年 6 月 25 日現在

機関番号：51303

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15080

研究課題名(和文) 屋根部材-梁接合部の拘束度を考慮した大空間構造物の横座屈性能評価

研究課題名(英文) Lateral Buckling Performance of Steel structures with Folded Roof Plates-beam joint

研究代表者

吉野 裕貴 (YOSHINO, YUKI)

仙台高等専門学校・総合工学科・助教

研究者番号：70756428

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)： 現行の設計指針では、屋根折板のような非構造部材は横補剛材として考慮されていない。一方で、屋根折板はH形鋼梁の横座屈荷重を増加する可能性がある。一方で、梁は柱に取りつくため、横座屈変形に対して材端拘束される。

本論文では、繰返し荷重を受ける部分架構載荷実験により屋根折板-梁接合部の連続補剛効果が梁の横座屈に及ぼす影響を明らかにし、設計指針の座屈設計式を用いた新たな横座屈耐力評価法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実大スケールのラーメン架構内の梁を対象とし、実際の梁-屋根折板の接合方法を再現した部分架構載荷実験を行うことで、梁の横座屈に対する連続補剛材による補剛効果を考慮した現行の耐震設計法では想定されていない実構造物の損傷を把握することができる点である。

また、非構造部材の損傷を事前に予測することができ、早急に対応が必要とされている大地震により設計時には想定していない既存の学校体育館屋根の非構造部材の損傷等についてもより精度の高いシミュレーションが可能となる。

研究成果の概要(英文)： Non-structural members like folded roof plates are not considered as lateral braces, but these members may be effective to increase lateral buckling load of H-shaped beams. On the other hand, H-shaped beams are rigidly connected to the columns, which have high warping restraint against lateral buckling deformation.

In this paper, partial frame tests of H-shaped beams subjected to cyclic loading are conducted and bracing effect of roof plates and warping restraint effect of beam-to-column joints on lateral buckling of H-shaped beams are clarified and the strength and the stiffening moment are evaluated safe according to the reference.

研究分野：鋼構造

キーワード：非構造部材 横座屈 ラーメン骨組み H形断面梁 屋根折板-梁接合部

1. 研究開始当初の背景

梁の材端支持条件を考えると、図1に示すように梁材端の反り変形に対する柱梁接合部等の拘束、梁材端の反り及び横曲げ変形に対する柱や直交梁による拘束を検討する必要がある。

現行の鋼構造設計規準¹⁾では梁の横座屈に対して梁端部を単純支持と規定している。また、鋼構造限界状態設計指針・同解説²⁾では梁が柱に剛接合されている場合、柱等の周辺部材による拘束を考慮して、横座屈長さを低減しているものの、柱及び柱梁接合部の断面形状によらず一律としていることから、梁の材端支持条件を必ずしも適切に捉えているとは言い難い。

柱と梁の断面形状の組み合わせにより梁端の境界条件は単純支持から反り変形及び横曲げ変形が固定された完全固定となる。材端の拘束が梁の座屈性能に与える影響については実験的及び解析的な検討が行われている^{3)~8)}。

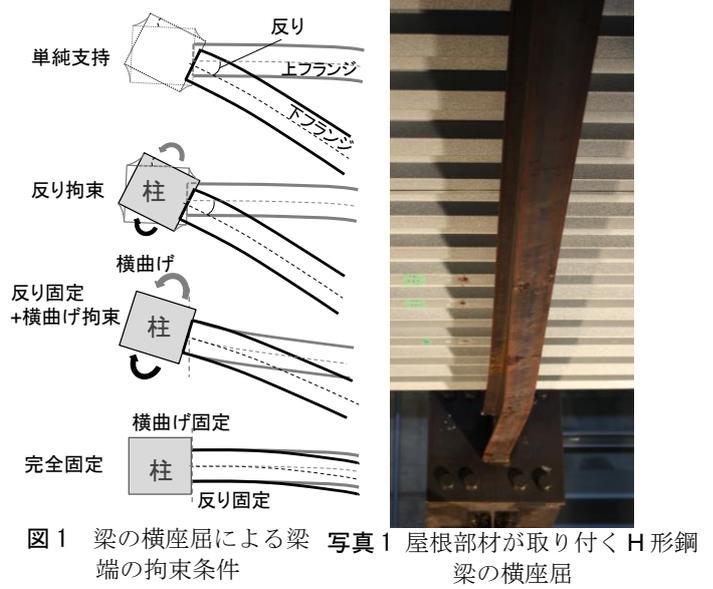
一方で、近年様々な形状の空間構造物に大スパン H 形鋼梁が用いられている。このような梁の設計では、横座屈に対して耐力を確保するために、材長方向に複数の横補剛材を設置する場合がある。実際の構造物では、写真1のように屋根折板のような非構造部材が梁の材長方向に連続して取り付けことから、このような非構造部材を連続補剛材とみなすことができれば、梁の横座屈変形に対して拘束効果を発揮することが明らかにされている⁸⁾⁹⁾。

2. 研究の目的

本報告書は、実大ラーメン架構における H 形鋼梁の部分架構荷重実験¹⁰⁾を行い、梁の横座屈に対する連続補剛材の補剛効果と梁材端で反り拘束及び横曲げ拘束効果を受ける梁の横座屈挙動を明らかにした。また、連続補剛材として活用するための屋根折板の要求性能¹¹⁾及び保有性能¹²⁾について明らかにする。

3. 研究の方法

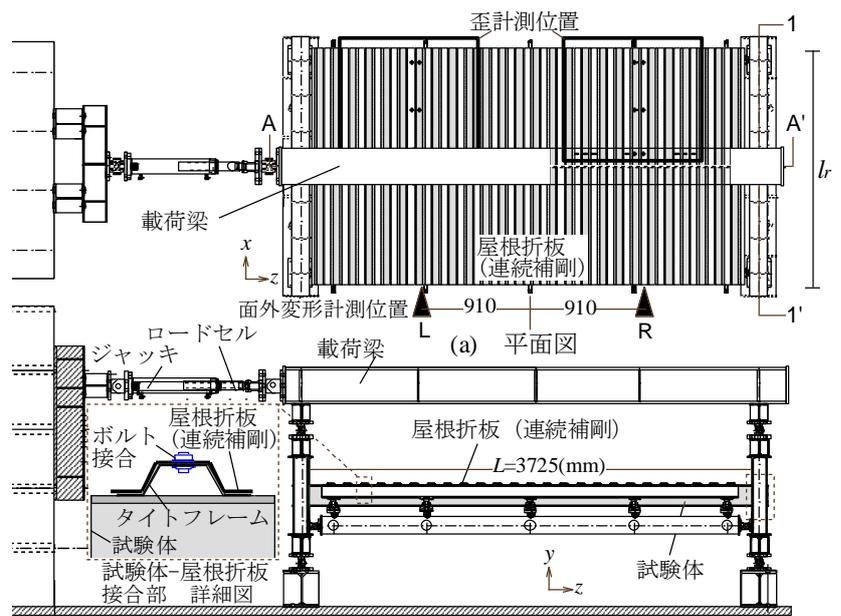
図2に逆対称曲げモーメントを受ける H 形鋼梁の横座屈荷重実験装置概要を示す。実験装置に取りつけた載荷梁の水平方向に強制変位を与えている試験体と折板の接合方法は、図2(b)中の接合部の詳細図のように、実際の屋根折板の接合方法に準じて、梁に溶接接合したタイトフレームと折板を山部分でボルト接合としている。屋根折板の材端部は図2(c)のように試験体の両端に折板受けフレームを設置している。タイトフレームを溶接した H 形鋼をピンに接合することで z 軸回りの回転を自由とする。また、ピン下に設置したスライドベアリングによって水平移動 (x 方向) を自由としピンローラ支持としている。試験体は表1に示す4体とし、梁断面は



H-175×90×5×8 で、パラメータは横座屈細長比及び補剛形式である。

[2] 振りモーメントを受けるルーフデッキの回転補剛性の実験的検証¹¹⁾

図6にルーフデッキの振り実験装置を示す。試験体の材軸方向 (z 方向) の端部は両端ピンとする。荷重方法はジャッキより H 形鋼梁の下フランジを z 方向に強制変形させ、試験体に振りモーメントを作用させる。試験体はルーフデッキ SS600 である。梁ルーフデッキ接合部の拘束条件はタイトフレーム及び治具接合の2種類とする。タイトフレーム接合はタイトフレームの谷フランジ部分を H 形鋼(中央部)に溶接し、山フランジ部分でボルト接合とする。治具接合は写真3(b)に示すように治具の山フランジ部分でボルト接合とし、ボルト接合が1か所もしくは、2か所とする。



(b) 立面図 (A-A')
図2 実験装置概要

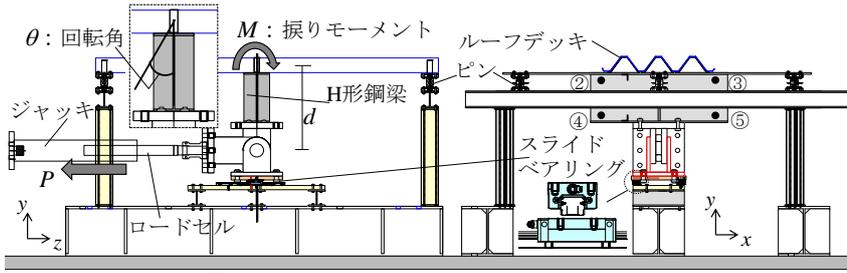


図6 ルーフデッキの捩り実験装置概要

その際、ルーフデッキとボルト間の座金の代替として厚さ5mmの平板を用いる。

4. 研究の成果

[1] 逆対称曲げモーメントを受ける連続補剛H形鋼梁の横座屈載荷実験¹⁰⁾

図3に正載荷時における梁の横座屈性状の骨格曲線を示す。縦軸は(a-1)が $M/M_{p,b}$ であり、柱に生じる曲げモーメントより換算した梁端の曲げモーメントを全塑性曲げモーメント M_p で除した値である。また、載荷履歴曲線において前サイクルの最大モーメントを超えた曲線をつなぎ合わせた値である。最大耐力以降は、各サイクルの最大耐力から除荷時までをつなぎ合わせている。横軸は梁の面内方向の材端回転角 θ であり、変位計より求めた柱の回転角を M_p 時の回転角 θ_p で除した値である。

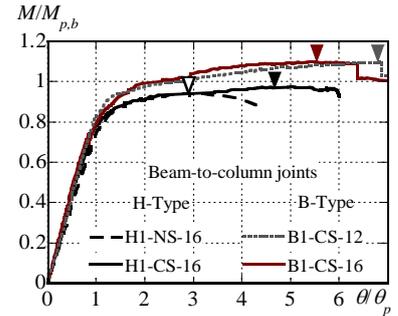
$$\theta_p = \frac{M_p L}{6EI} \quad (1)$$

なお、 EI ：試験体梁の強軸(x 軸)まわりの曲げ剛性、 $L(=3725\text{mm})$ ：試験体梁の材長である。 $\theta_p=0.014\text{rad}$ である。(b)は梁上下フランジの水平変形 (x 方向)の平均値 ($u=(u_{UF}+u_{LF})/2$) と材長 L の割合、(c)は捩れ変形である。図中のプロット▽は正載荷時における試験体の最大耐力時を示している。

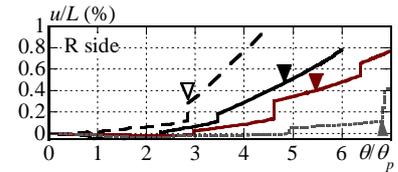
図3(a)の補剛形式及び柱梁接合部断面の違いについて比較する。(a)において、無補剛(HI-NS-16)より連続補剛(HI-CS-16)の最大耐力が5%程度上昇している。最大耐力に達するまでの材端回転角比(以降、累積回転角比と呼ぶ。)は無補剛より連続補剛の方が70%程度大きい。H-Type(HI-CS-16)よりB-Type(B1-CS-16)の最大耐力が10%程度上昇している。累積回転角比はH-TypeよりB-Typeの方が20%程度大きい。B-Typeの場合、横座屈細長比が $\lambda_1=120$ (B1-CS-12)と $\lambda_1=160$ (B1-CS-16)の最大耐力はほぼ変わらないが、 $\lambda_1=120$ の累積回転角比は $\lambda_1=160$ より30%程度大きい。

(b)において、無補剛(HI-NS-16)の水平変形は、最大耐力手前から徐々に発生し、最大耐力付近から急激に大きくなっている。連続補剛(HI-CS-16)の水平変形は、無補剛の最大耐力時($\theta/\theta_p=2.8$)には無補剛より小さい。B-Type(B1-CS-16)の水平変形は、H-Type(HI-CS-16)の最大耐力時($\theta/\theta_p=4.7$)の値より抑えられているが、両試験体の最大耐力時の水平変形はほぼ等しい。

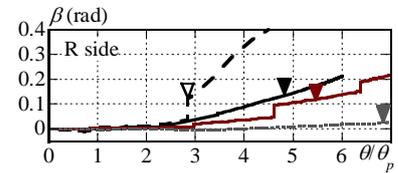
(c)において、無補剛(HI-NS-16)の捩れ変形は最大耐力時付近で急激に上昇している。連続補剛の捩れ変形は無補剛に比べて緩やかに上昇し、無補剛の最大耐力時($\theta/\theta_p=2.8$)では捩れ変形が抑えられている。B-Typeの水平変形は、H-Typeより緩やかに上昇しており、最大耐力時でも捩れ変形が抑えられている。



(a) 材端曲げモーメント



(b) 水平変形



(c) 回転変形

図3 骨格曲線(正載荷時)

次に、屋根折板に生じる応力分布を明らかにし、梁の横座屈変形に対する屋根折板の回転補剛剛性を算出する。

図4に屋根折板に生じる梁面外方向の補剛モーメント比分布を示す。図2(a)に示す正載荷時に下フランジが圧縮となるR地点の値である。縦軸は屋根折板に生じた単位幅あたりの捩りモーメント M_r を屋根折板の単位幅あたりの降伏モーメント $M_{y,r} (= \sigma_{y,r} \cdot Z_r, Z_r$: 単位幅あたりの屋根折板の断面係数) で除した値である。 M_r を補剛モーメントと定義する。 M_r は正載荷時における屋根折板の山及び谷フランジの面外軸歪 $\varepsilon_{x,r}$ を用いて次式より求めた。

$$M_r = \frac{2E_r I_r ({}_B \varepsilon_{x,r} - {}_A \varepsilon_{x,r})}{d_r} \quad (2)$$

ここで、 d_r ：屋根折板のせい ($d_r=25\text{mm}$)、 ${}_A \varepsilon_{x,r}$ 、 ${}_B \varepsilon_{x,r}$ ：谷(A)及び山(B)フランジの梁面外軸歪である。なお、本論文では、(2)式中の山及び谷フランジの軸歪の差より求められるモーメントは山幅(140mm)に生じると考え、140mmで除した値を単位幅あたりの補剛モーメントとしている。また、屋根折板の面外軸歪はプロットで示す最大耐力時において

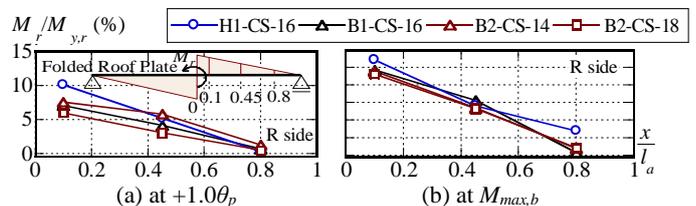


図4 補剛モーメント

$i\epsilon_{y,r}=200\times 10^{-6}$ 程度であり、屋根折板の降伏歪($\epsilon_{y,r}=1867\times 10^{-6}$)以下となっている。また、写真2より最大耐力時に屋根折板に変形が見られないことから、屋根折板は最大耐力時まで弾性と想定し、弾性理論式である(2)式を用いて補剛モーメントを算出した。横軸は3か所の計測位置 x/l_a である。全ての試験体で梁-屋根折板接合部近傍 ($x/l_a=0.1$) から折板端部 ($x/l_a=0.8$) に近づくほど補剛モーメントが小さくなる。(a)中の図は梁の横座屈により屋根折板の材長中央に振りモーメントが生じた場合の力学モデルであり、屋根折板に生じるモーメントは同様なモーメント分布となっている。図3(a)の+1.0 θ_p 時の補剛モーメントは屋根折板の降伏モーメント $M_{y,r}$ の10%程度である。(b)の梁の最大耐力時 ($M_{max,b}$) には25%程度まで上昇する。

連続補剛材(屋根折板)の回転補剛性を算出する。図4の補剛材の最大振りモーメントを補剛モーメントと定義し、補剛モーメントを同時点の捩れ変形で除した値を回転補剛性 K_β とする。一方で、H形鋼梁と連続補剛材の接合を剛接合と仮定すると、連続補剛材の理論回転補剛性は、屋根折板の一山分の回転剛性として次式で求められる。

$$K'_\beta = \frac{12E_r I_r}{l_r} \quad (3)$$

このとき、 E_r :連続補剛材のヤング率、 I_r :連続補剛材の断面二次モーメント、 l_r :等間隔に設置された並列する梁のうち中央の梁から両梁間の中心までの長さとする(図2(a))。 K'_β は(3)式の理論回転補剛性 K'_β に対して2~3%程度となる。また、次項で後述する文献11)の検討で、振りモーメントを受けるルーフデッキの回転補剛性も理論回転補剛性 K'_β に対して2%程度となっており、概ね対応することを確認している。そこで、実際の回転補剛効果を適切に評価するために次項の耐力評価に用いる回転補剛性は K'_β の2%とする。

図5に材端拘束された連続補剛H形鋼梁の弾塑性横座屈モーメントと修正一般化細長比の関係を示す。縦軸は最大曲げモーメント M_{max} を全塑性曲げモーメント M_p で除した値である。横軸は次式の修正一般化細長比である。

$$\bar{\lambda}_b = \sqrt{\frac{M_{p,b}}{K'_\beta M_{cr}}} \quad (4)$$

実験結果の修正一般化細長比は、H形断面柱の場合、梁材端で反り拘束されているとし、文献10)の(11)式 wM_{cr} に d を乗じた wM_{cr} を用いる。

一方で、箱形断面柱の場合、振り剛性が非常に大きく、梁材端の反り変形は十分拘束され、柱の振り抵抗により横曲げ拘束を受ける。そのため、文献10)の(11)式反り固定され横曲げ拘束を受ける連続補剛H形鋼梁の弾性横座屈荷重 P_{cr} に

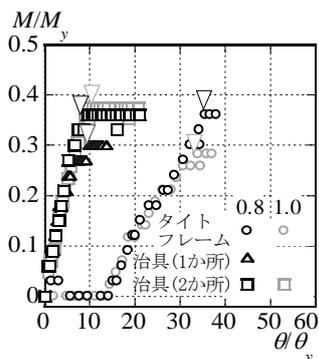


図7 振りモーメント-振り角

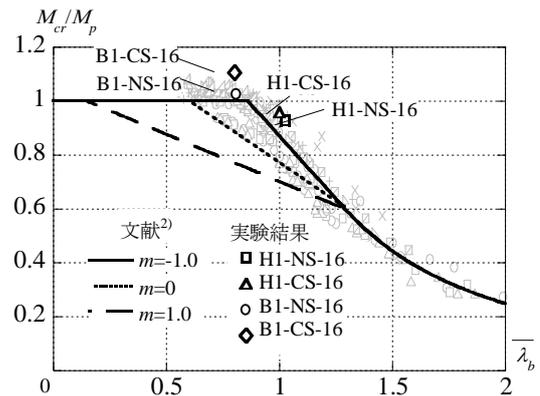


図5 H形鋼梁の弾塑性横座屈耐力-修正一般化細長比

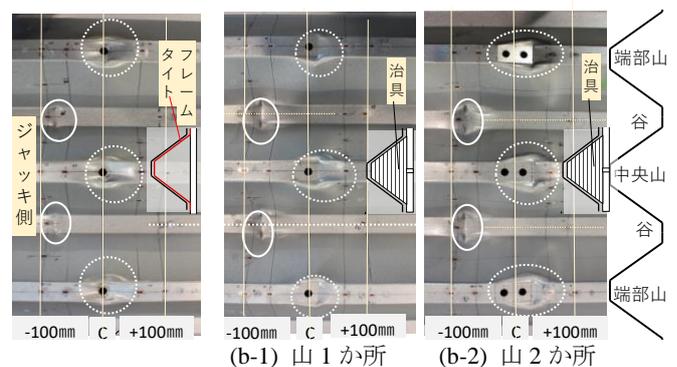
d を乗じた wM_{cr} を用いる。このとき、文献10)の(11)式に材端支持の違いによる拘束効果と連続補剛による補剛効果を考慮した修正モーメント勾配係数 m を乗じることで逆対称曲げモーメントを受けるH形鋼梁の弾性横座屈モーメントとなる。また、式中の連続補剛材の補剛性は回転補剛性 K'_β の2%を用いる。

図中のプロットは白抜きプロットが実験結果、灰色プロットは文献8)の弾塑性大変形解析結果を示している。参考までに各線はそれぞれ(4)式の修正一般化細長比を適用した座屈設計式²⁾を示している。破線は $m=-1.0$ (等曲げ)、点線は $m=0$ 、実線は $m=1.0$ (逆対称曲げ) である。実験結果は実線である $m=1.0$ の設計式を上回り分布している。

[2] 振りモーメントを受けるルーフデッキの回転補剛性の実験的検証¹¹⁾

屋根折板を梁の横座屈に対する連続補剛材として活用するためには、屋根折板の保有性能(耐力、変形性能)が梁の横座屈時に補剛材に作用する必要補剛力としての要求性能を満たす必要がある。

図7に屋根折板の作用する振りモーメントと振り角の関係を示す。縦軸はルーフデッキに生じる振りモーメント M を屋根折板の降伏モーメント M_y で除した値である。 M はロードセルに生じる荷重 P とピンルーフデッキ中央間距離 d の積より求めた。横軸はH形鋼梁の回転角 θ を M_y 時の回転角 θ_y で除した値である。 θ は図6の梁上下フランジの



(a) タイトフレーム接合 (b-2) 山2か所

写真2 最終変形状態

水平変位の差を上下フランジ間距離で除した値、 θ は次式の M に M_y を代入した場合の値である。

$$\theta = \frac{ML}{48EI} \quad (5)$$

梁と屋根折板の一般的な接合方法は梁に溶接されたタイトフレームを介して屋根折板の山フランジ部分でボルト接合されており、H形鋼梁に谷フランジが接触する θ は15付近より振りモーメントが発生する。一方で、ルーフデッキの形状と同様な治具を用いて山部分でボルト接合した場合、ボルト本数によらず载荷と同時に振りモーメントが生じている。ただし、どの試験体でもプロットで示す最大モーメント時には梁の捩れ変形時に屋根折板の圧縮フランジの接合部近傍における局部変形と梁フランジと接触する谷フランジ部分で局部的なせん断変形が生じていた。振りモーメント M を振り角 θ で除した回転補剛性はタイトフレーム及び治具の接合方法によらず、 $M/M_y=0.2$ 時点で理論値の2%程度となっている。

まとめ

本節では横座屈に対する連続補剛材の補剛効果と梁材端で反り拘束及び横曲げ拘束効果を受ける梁の横座屈挙動に関する知見を紹介した。

- 1) 梁に取りつく柱断面によって梁端の境界条件は異なる。梁接合部による振り抵抗である反り拘束された梁の場合は、文献10)の(11)式弾性横座屈荷重が求められ、両式を設計指針²⁾の一般化細長比に適用することで、梁材端で反り拘束及び横曲げ拘束効果を受ける梁の非弾性域での弾塑性横座屈耐力を概ね評価できる。
- 2) 地震時には梁に逆対称曲げモーメントを生じる。等曲げモーメントに比べてモーメント勾配を受ける梁の曲げ耐力、塑性変形性能は大きくなるが、連続補剛による面外変形の拘束効果や材端拘束度の違いにより、必要補剛性や必要補剛力は異なる。モーメント勾配と材端拘束度の関係を考慮した評価式が提案されており、この評価式により梁材端で反り拘束及び横曲げ拘束効果を受ける場合の連続補剛材の補剛力を求めることができる。
- 3) 繰返し载荷を受ける材端拘束された連続補剛 H 形鋼梁の横座屈実験より、梁が連続補剛されることで塑性

変形性能が大きくなり、材端拘束度が大きくなることで最大耐力が大きくなることを確認した。

- 4) さらに、梁の横座屈時における屋根部材（ルーフデッキ）の一山あたりの補剛力は、実構造物と同様な接合条件下で梁の降伏耐力の0.02%程度、振り剛性は理論剛性の2%程度となる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鋼構造座屈設計指針，2009.11
- 2) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計指針・同解説，2010.2
- 3) 竹屋壮修，井戸田秀樹：任意の境界条件における H 形鋼梁の弾性横座屈耐力，日本建築学会構造系論文集，第 84 巻，第 755 号，pp.73~83，2019.1
- 4) 五十嵐規矩夫，軈伸之，王韜：H 形断面梁の横座屈耐力に与える端部境界及びモーメント勾配の影響係数，日本建築学会構造系論文集，第 76 巻，第 670 号，pp.2173~2181，2011.12
- 5) 中村 武，若林 實：H 形断面はりの弾性横座屈モーメントの修正係数 C に対する近似解 一設計式一，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 II，pp.1319~1320，1978.9
- 6) 鈴木敏郎，木村祥裕：ラーメン架構における H 形鋼梁の横座屈長さ，日本建築学会構造系論文集，第 64 巻，第 521 号，pp.127~132，1999.7
- 7) 鈴木敏郎，木村祥裕：H 形断面の横座屈に対する柱梁接合部によるそり拘束の影響，日本建築学会構造系論文集，第 65 巻，第 537 号，pp.115~120，2000.11
- 8) 木村祥裕，宮夢積：勾配曲げモーメントを受ける連続補剛 H 形鋼梁の弾塑性横座屈挙動に及ぼす柱梁接合部の拘束効果，日本建築学会構造系論文集，第 84 巻 766 号，pp.1601-1611，2019.12
- 9) 木村祥裕，佐藤唯：等曲げモーメントを受ける連続補剛 H 形鋼梁の弾塑性横座屈に及ぼす横曲げ拘束効果，日本建築学会構造系論文集，第 86 巻，第 779 号，pp.145-155，2021.1
- 10) 吉野裕貴，廖望，木村祥裕：部分架構載荷実験による連続補剛 H 形鋼梁の横座屈性状に及ぼす補剛効果，日本建築学会構造系論文集，第 87 巻 797 号，pp.634-645，2022.7 掲載予定
- 11) 廖望，吉野裕貴，木村祥裕：H 形鋼梁一屋根折板接合部が連続補剛材の回転補剛性に及ぼす影響の実験的検証，鋼構造論文集，第 28 巻 112 号，pp.101-110，2021.12
- 12) 廖望，吉野裕貴，木村祥裕：H 形鋼梁の横座屈連続補剛材として活用する屋根折板の保有性能，鋼構造論文集，第 28 巻 110 号，pp.97-109，2021.6

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 廖望, 吉野裕貴, 木村祥裕	4. 巻 28
2. 論文標題 H形鋼梁 - 屋根折板接合部が連続補剛材の回転補剛性に及ぼす影響の実験的検証	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 鋼構造論文集	6. 最初と最後の頁 101-110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 廖望, 吉野裕貴, 木村祥裕	4. 巻 28
2. 論文標題 H形鋼梁の横座屈連続補剛材として活用する屋根折板の保有性能	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 鋼構造論文集	6. 最初と最後の頁 97-109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 吉野裕貴
2. 発表標題 曲げモーメントを受けるデッキプレートの初期剛性および曲げ耐力の検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉野裕貴
2. 発表標題 部分架構載荷実験による連続補剛H形鋼梁の横座屈性状
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 廖望, (共著) 吉野裕貴
2. 発表標題 ルーフデッキの初期剛性・曲げ耐力を検証するための三点曲げ実験
3. 学会等名 日本鋼構造協会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉野裕貴
2. 発表標題 連続補剛されたH形鋼梁の部分架構載荷実験
3. 学会等名 日本鋼構造協会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉野裕貴
2. 発表標題 三点曲げ実験によるデッキプレートの曲げ耐力に及ぼす幅厚比の影響
3. 学会等名 日本建築学会東北支部
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉野裕貴
2. 発表標題 H形鋼梁の横座屈による捩りモーメントを受けるルーフデッキの耐力
3. 学会等名 日本建築学会大会(北陸)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廖望, (共著) 吉野裕貴
2. 発表標題 曲げモーメントを受ける波型鋼板の保有性能
3. 学会等名 日本鋼構造協会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉野裕貴
2. 発表標題 三点曲げ実験による波型鋼板ルーフデッキの曲げ耐力
3. 学会等名 日本建築学会東北支部
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------