

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	水平スチフナにより梁両部材端を部分的に補剛した H 形断面梁の弾性横座屈耐力
Title(English)	Elastic Lateral Buckling Strength of Wide Flange Steel Beams with Both Beam Ends Partially Stiffened by Longitudinal Stiffeners
著者(和文)	福田 拓人, 三井 和也, 五十嵐 規矩夫
Authors(English)	Takuto Fukuda, Kazuya Mitsui, Kikuo Ikarashi
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, , pp. 703-704
Citation(English)	Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, , , pp. 703-704
発行日 / Pub. date	2022, 7
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

水平スチフナにより梁両部材端を部分的に補剛したH形断面梁の弾性横座屈耐力

正会員 ○ 福田 拓人*¹
同 三井 和也*²
同 五十嵐 規矩夫*³

H形断面梁 エネルギー法 弾性座屈
横座屈 補剛板 水平スチフナ

1. 序

鋼材重量軽減と経済性向上を目的としてH形断面梁のウェブ要素の薄肉化が進んでいる。幅厚比の大きいウェブでは局部座屈が発生しやすくなるため、応力が大きい梁部材の両端を水平スチフナにより部分的に補剛し、局部座屈の発生を抑制する設計が実施されている^{1), 2)}。水平スチフナは梁部材の構面外方向への剛性を上昇させるため、局部座屈だけでなく横座屈に対しても発生を抑制効果が期待できる。本研究では表1に示すように両部材端を断面内・構面内方向に対し2軸対称に、計4枚の水平スチフナにより部分的に補剛したH形断面梁を対象に、水平スチフナがH形断面梁の弾性横座屈耐力に与える影響を明らかにする。また、その弾性座屈耐力の近似評価方法を提案する。

2. エネルギー法に基づく数値解析概要

表1にエネルギー法に基づく数値解析で使用するH形断面梁の解析モデル、記号および座屈変位関数を示す。梁の両部材端の境界条件は単純支持および固定支持を対象とする。これら境界条件を満足するウェブとフランジの変位関数は文献3)において定義されており、各板要素のひずみエネルギー増分・仕事増分も文献3)に従うものとする。せん断力はウェブのみが負担するものとし、ウェブ内のせん断応力 τ はせん断流れ理論により算定した。水平スチフナの変位関数は式(1)に示すように座屈発生後も曲げ変形が生じず、ウェブに対して直角を維持するような関数 h_i を設定した。これより、水平スチフナのひずみエネルギー増分 ΔU_h は式(2)により表現できる。水平スチフナの寸法の検討範囲は板厚 t_h とスチフナ半幅 b_h がフランジと同サイズ以下と設定し、補剛位置 d_h/b_w の検討範囲は0~1、補剛範囲 l_h/L の検討範囲は0.0~0.5とした。 $d_h/b_w=0$ はウェブの断面中央に水平スチフナを2枚、 $d_h/b_w=1$ はフランジと同位置に水平スチフナを補剛することを意味する。 $l_h/L=0.5$ は材長全体にわたり補剛することを意味する。

3. 水平スチフナにより補剛した梁部材の横座屈耐力

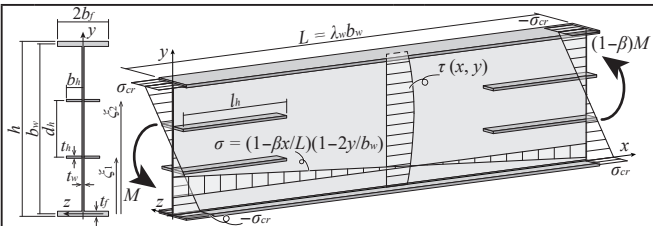
3.1. 材長全体にわたり補剛した梁部材

エネルギー法に基づき、材長全体にわたり水平スチフナにより補剛した場合($l_h/L=0.5$)の弾性横座屈耐力について検討を行う。図1に補剛位置の変化が弾性横座屈耐力に及ぼす影響を示す。弾性横座屈耐力はウェブ座屈係数 k_w に変換した値をプロットしている。無補剛の梁部材と比較し、水平スチフナを補剛することにより横座屈耐力が上昇している。補剛位置が中立軸から離れるほどスチフナ補剛による振れ剛性が大きくなるため補剛効果が大きくなる。

水平スチフナにより材長全体にわたり補剛した場合の弾性横座屈耐力 M_{cr}^* の評価を行う。材長全体にわたり補剛した梁部材に振りモーメント M_T が作用すると、図2に

示すフランジとスチフナの曲げ変形に起因するせん断力 Q_f 、 Q_h が曲げ振れモーメント M_{TWf} 、 M_{TWh} を発生させる。これら曲げ振れモーメントと純振れモーメント M_{TS} が作用外

表1 本研究で使用する記号および座屈変位関数



E : ヤング係数 [N/mm ²]	ν : ポアソン比 [-]
G : せん断弾性係数 [N/mm ²]	σ_{cr} : 弾性座屈応力度 [N/mm ²]
I_y : 弱軸まわりの断面二次モーメント [mm ⁴]	J : ねじり定数 [mm ⁴]
I_{ω} : 曲げねじり定数 [mm ⁴]	λ_w : ウェブ辺長比 [-]
I_h : スチフナの断面二次モーメント [mm ⁴]	β : 曲げモーメント勾配 [-]
I_f : フランジの断面二次モーメント [mm ⁴]	D_h : スチフナの板剛性 [N-mm]
A_f : フランジ断面積 [mm ²]	A_h : スチフナ断面積 [mm ²]
M_{cr0} : 無補剛時の弾性横座屈耐力 [kN-m]	水平スチフナ: $h_i = z \cdot \frac{\partial w}{\partial y} \Big _{y=\xi_i}$ (1)
M_{cr} : 材長全体補剛時の弾性横座屈耐力 [kN-m]	

水平スチフナのひずみエネルギー:

$$\Delta U_h = \sum_i \frac{D_h}{2} \left\{ \int_0^{l_h} \int_{-b_h}^{b_h} \left[\left(\frac{\partial^2 h_i}{\partial x^2} \right)^2 + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 h_i}{\partial x \partial z} \right)^2 \right] dz dx + \frac{E I_h}{2} \int_0^{l_h} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \Big|_{y=\xi_i} \right)^2 dx + \int_{L-l_h}^L \int_{-b_h}^{b_h} \left[\left(\frac{\partial^2 h_i}{\partial x^2} \right)^2 + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 h_i}{\partial x \partial z} \right)^2 \right] dz dx + \frac{E I_h}{2} \int_{L-l_h}^L \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \Big|_{y=\xi_i} \right)^2 dx \right\} \quad (2)$$

水平スチフナの検討範囲: $0 \leq t_h/t_f \leq 1, 0 \leq b_h/b_f \leq 1, 0 \leq d_h/b_w \leq 1, 0.0 \leq l_h/L \leq 0.5$

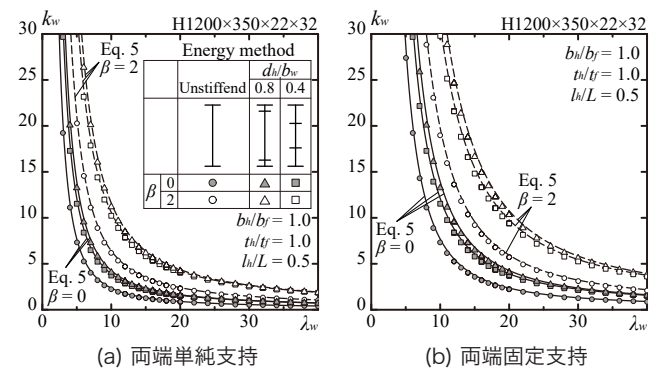
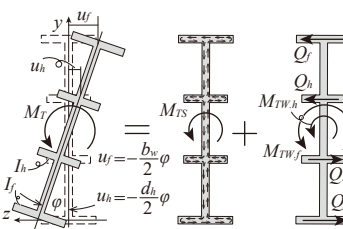


図1 材長全体にわたり補剛した梁部材の弾性横座屈耐力



$$M_T = M_{TS} + M_{TWf} + M_{TWh} = GJ \frac{d\phi}{dx} + EI_f \frac{d^3 u_f}{dx^3} \cdot b_w + EI_h \frac{d^3 u_h}{dx^3} \cdot d_h = GJ \frac{d\phi}{dx} - \frac{EI_f b_w^2}{2} \frac{d^3 \phi}{dx^3} - \frac{EI_h d^2}{2} \frac{d^3 \phi}{dx^3} = GJ \frac{d\phi}{dx} - EI_{\omega} \frac{d^3 \phi}{dx^3} \quad (3)$$

$$I_{\omega} = \frac{I_f b_w^2}{2} + \frac{I_h d^2}{2} \quad (4)$$

図2 水平スチフナにより補剛したH形断面梁部材の振り挙動

力に抵抗するため、式(3)の釣合式が成り立つ。この釣合式より、材長全体にわたり水平スチフナにより補剛した梁部材の曲げねじり定数 I_{ω} は式(4)と定義できる。定義した曲げねじり定数と式(5)に示す算定式^{3), 4)}を用いて材長全体補剛時の弾性横座屈耐力 M_{cr0}^* の評価を行う。

$$M_{cr0}^* = C_1 \frac{\pi^2 EI_y}{(k_u L)^2} \sqrt{\frac{I_{\omega}}{I_y} \left[\left(\frac{k_u}{k_{\phi}} \right)^2 + \frac{GJ(k_u L)^2}{\pi^2 EI_{\omega}} \right]} \quad (5)$$

C_1 はモーメント修正係数³⁾であり、 k_u , k_{ϕ} は境界条件による影響係数⁴⁾である。実線および破線で示す式(5)による算定結果は両端の境界条件や応力勾配、補剛位置が変化した場合でもエネルギー法解析結果と良い対応を示した。

次にスチフナ剛性と補剛位置に関する検討を行う。フランジ断面積に対する水平スチフナ断面積比 A_h/A_f を一定として、水平スチフナの形状を変化させた場合の影響を図3(a)に示す。横軸である水平スチフナの断面二次モーメントに対するねじり定数の比 J_h/I_h の増加に伴い、無補剛時の横座屈耐力 ${}_0M_{cr0}$ からの耐力上昇率は低下するため、面外曲げ剛性を上昇させることが効率的な補剛につながる。ただし、水平スチフナに局部座屈が生じる可能性があるため、水平スチフナの幅厚比はフランジ幅厚比より小さくすることが望ましい。補剛位置が耐力上昇率に与える影響を図3(b)に示す。図1と同様に、補剛位置は中立軸より離れた位置ほど効果的であるといえる。一方で、局部座屈に対しては必ずしも中立軸より離れた補剛位置が効果的とは限らないため^{2), 5)}、横座屈と局部座屈の耐力を最も上昇させる最適補剛位置が存在すると推定される。

3.2. 梁両部材端を部分的に補剛した梁部材

図4に補剛範囲の変化に伴う弾性横座屈耐力への影響をエネルギー法により求めて示す。補剛範囲の増加により無補剛時の横座屈耐力 ${}_0M_{cr0}$ から材長全体補剛時の横座屈耐力 M_{cr0}^* へと増加しており、両端の境界条件によりその上昇傾向は異なる。図5に無拘束時の座屈モードを示す。両端単純支持の場合、 $l_h/L = 0.1$ 程度までは端部の回転を十分に拘束できないため、補剛効果の上昇率の傾きは小さい。一方、両端固定支持の場合、端部の回転が拘束されているため、 $l_h/L = 0.1$ 程度であっても上昇率の傾きが大きくなる。また、図5より横座屈変形の変位は両端単純支持で $0.31L$ 、両端固定支持で $0.36L$ 付近で最大となっており、対応する図4の範囲では耐力上昇率の傾きが大きくなっている。いずれの境界条件においても、 $l_h/L = 0.25$ でおおよそ全体補剛時までの上昇量の50%の耐力上昇率が見込める。

最後に水平スチフナにより梁両部材端を部分的に補剛したH形断面部材の近似評価を行う。断面積比 A_h/A_f 、スチフナ幅厚比 b_h/t_h 、両端の境界条件により補剛による耐力上昇率にばらつきはあるものの、 ${}_0M_{cr0}$ と M_{cr0}^* の間を直線的に変化していると仮定する。図1に示すように弾性横座屈耐力算定式(3)とエネルギー法の対応が確認されているため、無補剛時の横座屈耐力 ${}_0M_{cr0}$ と材長全体補剛時の横座屈耐力 M_{cr0}^* を算出し、補剛範囲 l_h/L と耐力上昇率の線

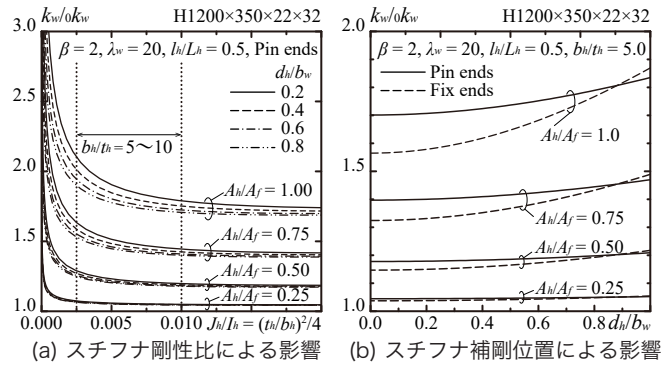


図3 スチフナの剛性比と補剛位置による横座屈耐力の上昇率変化

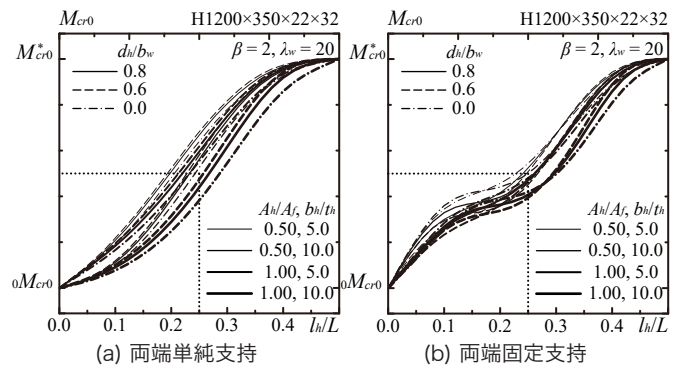


図4 補剛範囲が横座屈耐力に及ぼす影響

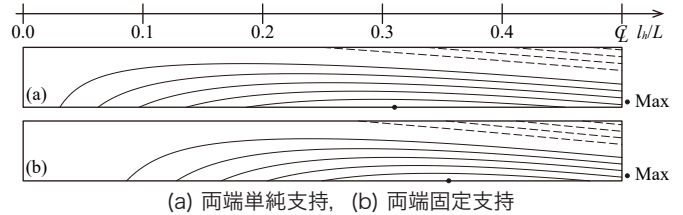


図5 無補剛時の横座屈性状 (H1200×350×22×32, $\beta = 2, \lambda_w = 20$)

形関係を利用した近似式(6)に代入することで、水平スチフナにより梁両部材端を部分的に補剛したH形断面部材の弾性横座屈耐力 M_{cr0} を求めることができる。

$$M_{cr0} = {}_0M_{cr0} + \frac{2l_h(M_{cr0}^* - {}_0M_{cr0})}{L} \quad (6)$$

4. 結

本研究では梁両部材端を水平スチフナにより部分的に補剛した場合の影響をエネルギー法に基づき検討した。また、水平スチフナにより材長方向全体にわたり補剛されたH形断面部材の横座屈耐力 M_{cr0}^* の算定式を導出した。梁両部材端を部分的に補剛した場合の横座屈耐力 M_{cr0} は全体にわたり補剛した場合の横座屈耐力と無補剛時の横座屈耐力 ${}_0M_{cr0}$ の間を線形的に補完する近似式を提案した。

【参考文献】

- 五十嵐規矩夫ら：端部スチフナ補剛を施したH形断面梁の塑性変形能力，日本建築学会構造系論文集，第79巻，第705号，pp. 1667-1675, 2014. 11
- 五十嵐規矩夫，柳下義博：曲げせん断力を受ける補剛平板の弾性座屈性状と最適補剛剛性，日本建築学会構造系論文集，第80巻，第708号，pp. 321-331, 2015. 2
- 五十嵐規矩夫，大西佑樹：上フランジを連続完全拘束されたH形断面梁の弾性座屈耐力，日本建築学会構造系論文集，第79巻，第706号，pp. 1899-1908, 2014. 12
- 日本建築学会：鋼構造座屈設計指針，2018. 2
- 五十嵐規矩夫ら：水平スチフナにより補剛されたウェブの座屈性状および水平スチフナの設計法，日本建築学会構造系論文集，第85巻，第773号，pp. 957-967, 2020. 7

^{*1} 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 大学院生
^{*2} 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 助教・博士(工学)
^{*3} 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 教授・博士(工学)

^{*1} Graduate Student., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology
^{*2} Assist. Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
^{*3} Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.