T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	端部曲げと等分布荷重による曲げを受ける H 形断面梁ウェブの弾性局部座屈耐力
Title(English)	Elastic Local Buckling Strength of I-Shaped Beam ' s Web Plate Subjected to End Moments and Uniformly Distributed Load
著者(和文)	中野 友貴, 五十嵐 規矩夫, 三井 和也
Authors(English)	Tomoki Nakano, Kikuo Ikarashi, Kazuya Mitsui
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, , , pp. 653-654
Citation(English)	Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, , , pp. 653-654
発行日 / Pub. date	2022, 7
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

日本建築学会大会学術講演梗概集
（北海道） 2022 年 9 月

端部曲げと等分布荷重による曲げを受ける H 形断面梁ウェブの弾性局部座屈耐力

正会員 ○中野 友貴 *
同 五十嵐 規矩夫 **
同 三井 和也 ***

H 形鋼梁　ウェブ　エネルギー法
弾性座屈　局部座屈　等分布荷重

1.序

H 形断面梁の局部座屈に関し，現在まで数多くの荷重条件で研究がされており，現状の設計指針 [1]では，単純な応力状態による規定がなされている．昨今の構造材に多く使用されるロングスパン梁では，短期荷重における固定荷重の支配率が増加する．しかし，これらの分布荷重による応力変化を考慮した研究は少なく，指針も設計の実情を十分に考慮できているとは言い難い．そこで本研究では等分布荷重と端部曲げを受ける H 形断面梁ウェブの弾性局部座屈耐力について明らかにする．

2. ウェブ板要素の弾性局部座屈耐力算定手法

エネルギー法を用いた理論解析により梁ウェブの弾性局部座屈耐力を算出する．本研究は 4 辺固定支持ウェブ [2]を対象としている．図 1 に荷重条件および応力分布，表 1 に記号一覧，表 2 に諸式を示す．曲げモーメント分布は 1 次分布 M_1 と 2 次分布 M_2 に分け，M_1 を端部曲げモーメント比 β，M_2 を曲げモーメント 2 次分布指標 γ で表現する．座屈耐力はひずみエネルギー式(3)と面内応力仕事式(4), (6), (8)の釣り合いより固有値析を行う．

3.H 形断面梁ウェブ弾性局部座屈耐力および座屈性状

左端曲げの向きを考慮し，図 2 に等分布荷重が鉛直下向きに作用する場合，図 3 に鉛直上向きに作用する場合の座屈耐力を曲げ座屈係数 k_σ を用いて示し，図 4 に各荷重条件に対応した曲げモーメント分布図を示す．局部座屈には曲げ応力度の影響を大きく受ける曲げ型局部座屈とせん断応力度の影響を大きく受けるせん断型局部座屈の 2 種類の座屈形式がある．図 2 左図の菱形プロット(γ = 0.5)，丸プロット(γ = 1.5)に対応した座屈モードを図 5 (a), (b)に示す．図 5 (a.1), (b.1)では縦に伸びる座屈波形が特徴の曲げ型，(a.2), (b.2)では斜めに伸びる座屈波形が特徴のせん断型を生じている．図 5 (a.1)ではせん断型との連成も若干確認できる．このことから辺長比の逆比 1/λ が小さい範囲では曲げ型，大きい範囲ではせん断型を示すことがわかる．図 2 左図における菱形プロットは連成座屈を生じるため座屈形式の境界部が連続的に変化し，丸プロットは 1/λ = 0.1 で座屈形式の境界が顕著に現れる．図 2 左図の荷重条件では曲げ型は部材中央付近または端部で発生する．中央付近で座屈が発生する場合は座屈範囲における均等曲げに近い応力状態となるため k_σ = 39.6 付近をとる．対して端部で座屈が発生する場合では端部曲げのみを受ける場合に

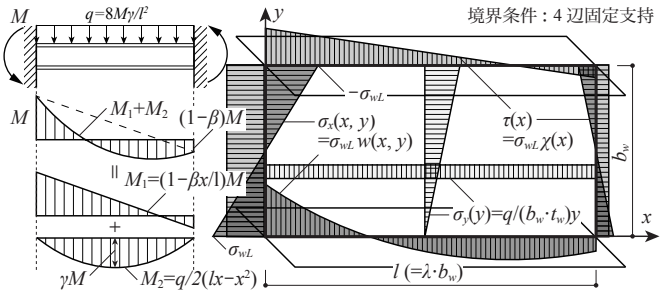


図 1 荷重条件およびウェブ面内応力度分布図

表 1 局部座屈に関する記号一覧

l：ウェブ板の材長(x)方向長さ	b_w：ウェブ板の梁せい(y)方向長さ
M：左端曲げモーメント	q：等分布荷重の大きさ
M_1：1 次分布曲げモーメント	M_2：2 次分布曲げモーメント
β：端部曲げモーメント比	γ：曲げモーメント 2 次分布指標
σ_{wL}：左端最大縁曲げ応力度	$\sigma_x(x, y)$：材長(x)方向の曲げ応力度
$\tau(x)$：せん断応力度	$\sigma_y(y)$：梁せい(y)方向の応力度
W：ウェブ板の面外(z)方向変位.	D：ウェブ板の曲げ剛性
t_w：ウェブ板厚　ν：ポアソン比 (= 0.3)	λ：ウェブ辺長比 ($=l/b_w$)
A_f：フランジ断面積	A_w：ウェブ断面積
η：せん断曲げ比 [3] ($\cong 1/6 + A_f/A_w$) ($0.5 \le \eta \le 2.25$)	
$k_{\sigma L}$：左端縁曲げ応力での曲げ座屈係数	
k_σ：最大曲げ応力での曲げ座屈係数　k_τ：最大せん断応力でのせん断座屈係数	
$k_{\tau 0}$：純せん断のみを受ける場合のせん断座屈係数	

表 2 弾性局部座屈耐力算定に用いる諸式

$$W=\sum_{i}^{\infty}\sum_{j}^{\infty}a_{ij}\sin\frac{i\pi x}{l}\sin\frac{\pi x}{l}\sin\frac{j\pi y}{b_w}\sin\frac{\pi y}{b_w} \quad (1) \qquad D=\frac{Et_w{}^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

$$\Delta U=\frac{1}{2}D\int_0^l\int_0^{b_w}\left\{\left(\frac{\partial^2W}{\partial x^2}+\frac{\partial^2W}{\partial y^2}\right)^2-2(1-\nu)\left[\frac{\partial^2W}{\partial x^2}\frac{\partial^2W}{\partial y^2}-\left(\frac{\partial^2W}{\partial x\,\partial y}\right)^2\right]\right\}\mathrm{d}x\mathrm{d}y \quad (3)$$

$$\Delta T_1=\frac{1}{2}t_w\int_0^l\int_0^{b_w}\sigma_x(x,y)\left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y \quad (4) \qquad \sigma_x(x, y)=\sigma_{wL}w(x, y) \quad (5)$$

$$\Delta T_2=\frac{1}{2}t_w\int_0^l\int_0^{b_w}2\tau(x)\left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial W}{\partial y}\right)\mathrm{d}x\mathrm{d}y \quad (6) \qquad \tau(x)=\sigma_{wL}\chi(x) \quad (7)$$

$$\Delta T_3=\frac{1}{2}t_w\int_0^l\int_0^{b_w}\sigma_y(y)\left(\frac{\partial W}{\partial y}\right)^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y \quad (8) \qquad \sigma_{wL}=k_{\sigma L}\sigma_c=k_{\sigma L}\frac{\pi^2D}{t_wb_w{}^2} \quad (9)$$

$$w(x, y)=\left\{\left(1-\frac{\beta}{l}x\right)-4\gamma\left[\frac{x}{l}-\left(\frac{x}{l}\right)^2\right]\right\}\left(1-\frac{2y}{b_w}\right) \quad (10)$$

$$\chi(x)=\left[\beta+4\gamma\left(1-\frac{2}{l}x\right)\right]\frac{\eta}{\lambda} \quad (11) \qquad \sigma_y(y)=\frac{q}{b_wt_w}y \quad (12)$$

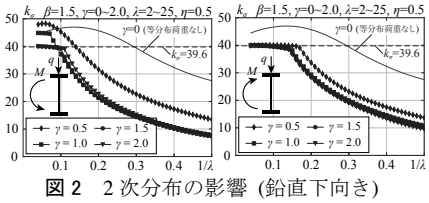


図 2 2 次分布の影響 (鉛直下向き)

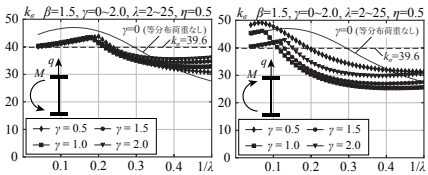


図 3 2 次分布の影響 (鉛直上向き)

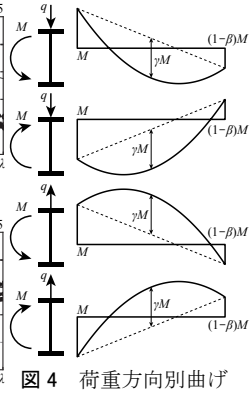


図 4 荷重方向別曲げモーメント分布

Elastic Local Buckling Strength of I-Shaped Beam's Web Plate Subjected to End Moments and Uniformly Distributed Load

NAKANO Tomoki, IKARASHI Kikuo and MITSUI Kazuya

比べ等分布荷重による座屈範囲の曲げ応力勾配の増加より，$k_\sigma > 39.6$ となる．一方せん断型では，等分布荷重によりせん断応力度が増加するため，$\gamma = 0$ に比べて耐力は低下する．図 3 の大まかな特徴は図 2 と同じだが，特にせん断型範囲で右肩上がりの耐力変化が確認できる．これは梁せい方向の応力度 $\sigma_y(y)$が原因であると考えられる．エネルギー式の通り，同一荷重条件 β, γ に対して $1/\lambda$ の増加に伴い $\sigma_y(y)$が増加することで耐力は減少する．そのため，同じ座屈形式でも図 2 とは異なる耐力変化を示す．以上より，実情を踏まえた弾性局部座屈耐力の把握には等分布荷重による応力分布変化の影響を適切に考慮する必要がある．そこで任意荷重を受ける場合のせん断座屈係数 k_τ と純せん断を受ける場合のせん断座屈係数 $k_{\tau 0}$ を用いたせん弾座屈係数比 $k_\tau/k_{\tau 0}$ で弾性局部座屈耐力を表現する．$k_{\tau 0}$ は高い精度の近似式 [4]が提案されており，統一的評価に適切な指標と判断した．図 6 にせん断曲げ比 [3] η 毎の $k_\tau/k_{\tau 0}$ と $1/\lambda$ の関係を，耐力曲線種別に Type (A), (B) (連成発生型，完全分離型)として代表例を示す．Type (A)は曲げ型とせん断型が同位置に発生するため，徐々に座屈モードが変化する耐力曲線となる．そのため，両座屈形式の特徴が見られる連成座屈を生じる範囲がある．Type (B)は曲げ型とせん断型では異なる位置に局部座屈が発生するため座屈形式が急激に変化する．これらを踏まえ図 6 中に示す通り曲線領域を (I)曲げ型, (II)連成型, (III)せん断型と表現し，図 6 (a), (b)の各領域に対応した座屈モードを図 7 に示す．Type (A) の図 7 (a.1) ~ (a.3)では常に左端に座屈を生じており，曲げ型からせん断型へと徐々に移行する．一方，Type (B) の図 7 (b.1) ~ (b.3)では梁ウェブ材中央付近に生じる曲げ型から左端に生じるせん断型へと移行する．耐力曲線は図 6 中の灰色線で示す通り主に領域(I)で見られる直線と主に領域(III)で見られる曲線で表現される．2 曲線の交点は座屈形式の変化の境界と同義で，特に座屈形式の変化に伴い座屈発生箇所が大きく変化する Type (B)に対しては耐力を求めずに最適補剛位置の大まかな把握が可能となる．この点の辺長比 Λ を導出式 λ_c で評価し図 8 に導出式とこの式の整合性を示す．辺長比が非常に大きい範囲でばらつきはあるが，$\lambda = 0 \sim 20$ 程度では概ね一致する．

ここで，縦スチフナ等の補剛を受ける梁ウェブ弾性局部座屈耐力について確認を行う．本解析モデルは 4 辺固定支持の境界条件下の梁ウェブ任意区間における耐力を算出することができる．梁全体の荷重条件よりスチフナ補剛区間における着目区間での β, γ を算出し解析を行う．図 9 に同一応力分布下での着目区間の差異が与える耐力変化について示す．梁全体の辺長比を λ_L とし，補剛位置を λ/λ_L とすると，図 9 (a.2) $\lambda_L = 20$ では $\lambda/\lambda_L = 0.1$ 程度で 1.1 倍の耐力上昇効果が表れていることがわかる．他のいずれも同様に，この耐力曲線を用いることで図中に示す通りの最適補剛位置を算出することが可能である．

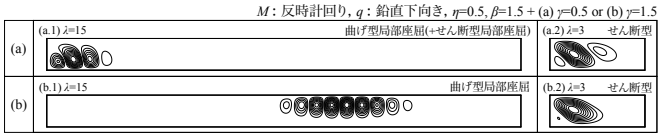
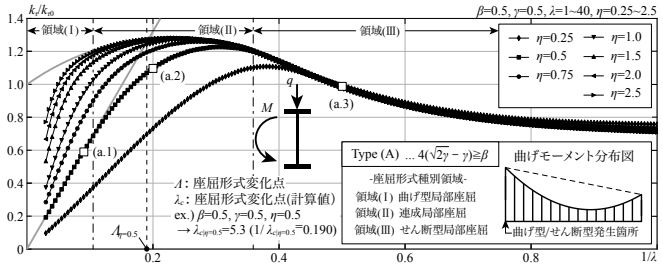
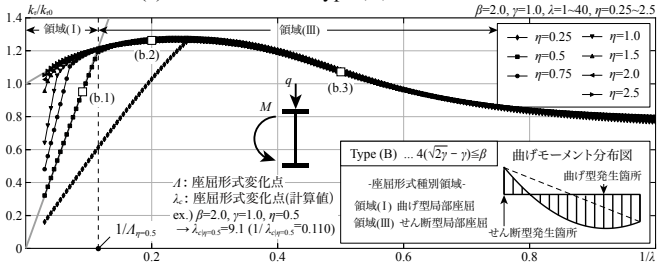


図 5　2 次分布曲げを受けるウェブ板の座屈モード



(a) 座屈形式変化 Type (A) ~連成発生型~



(b) 座屈形式変化 Type (B) ~完全分離型~

図 6　座屈耐力曲線 $k_\tau/k_{\tau 0}$ - $1/\lambda$

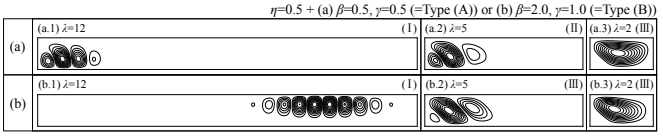


図 7　領域別座屈モード一覧

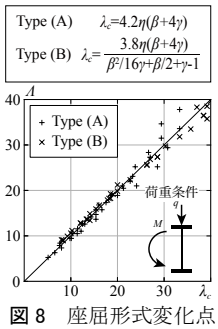


図 8　座屈形式変化点導出式の整合性

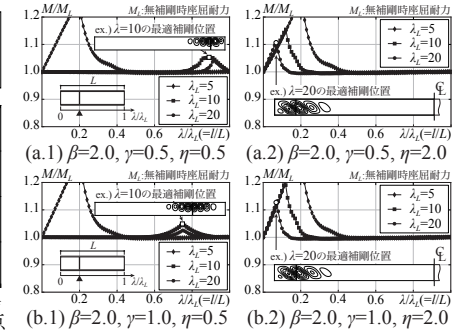


図 9　補剛位置による耐力変化
(図中モード図は無補剛時)

4. 結

端部曲げと等分布荷重による曲げを受ける H 形断面梁ウェブの弾性局部座屈耐力と座屈性状を明らかにした．実情を踏まえた弾性局部座屈耐力の把握には固定荷重による応力分布変化の影響を適切に考慮する必要がある．また，任意荷重に対するスチフナ補剛効果による耐力は境界条件を 4 周辺固定支持と考えれば本モデルを用いることで評価することができる．

【参考文献】

1) 日本建築学会:鋼構造設計座屈設計指針，2018.2
2) 五十嵐規矩夫，鈴木琢也:不均等曲げせん断力を受ける周辺固定支持平板の弾性座屈耐力の算出，日本建築学会構造系論文集，No. 571，pp. 137 - 144，2003.9
3) 五十嵐規矩夫:不均等曲げせん断力を受ける H 形鋼梁ウェブの座屈耐力評価 −周辺単純支持平板としての弾性座屈耐力評価−，日本建築学会構造系論文集，No. 565，pp. 135 - 141，2003.3
4) Theodore V. Galambos : Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, 1998

*　東京工業大学　環境・社会理工学院　建築学系　修士課程
**　東京工業大学　環境・社会理工学院　建築学系　教授・博士(工学)
***　東京工業大学　環境・社会理工学院　建築学系　助教・博士(工学)

*　Graduate Student, Dept. of Architecture and Building Engineering, Tokyo Institute of Technology
**　Prof. Dept. of Architecture and Building Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
***　Asst. Prof., Dept. of Arch., and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.