

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	せん断力を受ける平行四辺形パネルウェブの弾性せん断座屈耐力
Title(English)	Elastic Shear Buckling Strength of Parallelogram Panel Web Subjected to Shear Stress
著者(和文)	荒谷 智将, 三井 和也, 五十嵐 規矩夫
Authors(English)	Tomomasa Aratani, Kazuya Mitsui, Kikuo Ikarashi
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, , , pp. 929-930
Citation(English)	Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, , , pp. 929-930
発行日 / Pub. date	2022, 7
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

せん断力を受ける平行四辺形パネルウェブの弾性せん断座屈耐力

正会員 ○ 荒谷 智将*¹
同 三井 和也*²
同 五十嵐 規矩夫*³

弾性座屈耐力 エネルギー法 せん断応力
平行四辺形 パネルウェブ L形接合部パネル

1. 序

工場や倉庫といった内部に無柱空間が必要とされる建築物では1方向ラーメンの構造形式が採用されることが多い。この構造物の最上層の接合部パネルには隣り合う辺に柱部材と梁部材がL形に接合されるため、十字形接合部パネルとは異なる挙動を示す¹⁾。また、L形接合部パネルの形状は屋根勾配や柱梁接合部の接合形式により、パネルの形状が長方形、平行四辺形と様々な形状を採りえる。近年、鋼構造建築物では経済性と居住性の観点から部材の大断面化・薄肉化が進んでおり、パネル内で発生する座屈耐力の評価も重要となっている。一方で、前述の平行四辺形の座屈問題では一様なせん断応力が作用する基本的な応力状態の場合であっても、その座屈耐力は明らかとなっていない。本研究ではまず、一様なせん断応力が作用する平行四辺形板要素を対象として、その形状変化に伴う弾性座屈耐力をエネルギー法に基づき明らかにするとともに、平行四辺形状の接合パネルを有するL形接合部パネルのせん断座屈耐力を有限要素法により明らかにする。

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平行四辺形のパネルウェブの解析モデル、記号および座屈変位関数を示す。対象とする平行四辺形板要素の形状は表1中のType AとType Bであり、Type Bは $y = x$ に対して1次変換の関係にある。板要素周辺の境界条件は単純支持または固定支持を対象とし、表1中の式(2.a), (2.b)および式(3.a), (3.b)がそれぞれの境界条件に対応する変位関数である。なお、パネルウェブ角度 θ により三角級数の位相が式(4)のように変化する。パネルウェブで吸収するひずみエネルギー増分 ΔU と外力仕事増分 ΔT はTimoshenkoの板座屈理論²⁾に従う。せん断座屈応力 τ_{cr} は板要素内において一様に作用するものとして、表1に示すせん断応力の向きを正・負方向と定義する。解析変数はアスペクト比とパネルウェブ角度 θ およびせん断応力の向きである。

3. 平行四辺形板要素の弾性せん断座屈耐力

まず平行四辺形の板要素の弾性せん断座屈耐力について基本的な検討を行う。図1に周辺支持辺の境界条件毎のType Aのせん断座屈係数 k_τ とアスペクト比の逆数 a/b の関係を示す。点線は長方形板要素に純せん断応力が作用する場合の座屈係数の近似式(6)である³⁾。

$$k_\tau = \begin{cases} 5.34 + 4.00(b/a)^2 & \text{周辺単純支持} \\ 8.98 + 5.60(b/a)^2 & \text{周辺固定支持} \end{cases} \quad (6)$$

$\theta \neq 0^\circ$ の場合はせん断応力の方向による影響を受けることが確認でき、せん断応力の方向、パネルウェブ角度により座屈係数の収束値が異なる。せん断座屈係数 k_τ は $\theta = 0^\circ$ の場合に比較し、せん断応力が正方向の場合は大きく、負方

向の場合は小さくなり、パネルウェブ角度が大きくなるほどこの傾向は顕著となる。正負方向の耐力差はパネル内に発生する座屈半波長が要因であり、図1(b)に示す波形図A, B($a/b = 2.0, \theta = 20^\circ$)のように、せん断応力が正方向の方が短い座屈半波長となるため、座屈耐力が大きくなる。 $\theta = 0^\circ$ の場合について、式(6)と数値解析結果の対応を確認すると a/b が1.0以上の範囲では良い対応を示すが、 a/b が1.0より小さい範囲では評価精度が低下していた。一般的なパネル接合部は a/b が1.0以下であるため、 $a/b \leq 1.0$ の範囲に対して良い精度の評価方法が必要である。そこで、一様なせん断応力下ではType Aの $a/b \leq 1.0$ とType Bの $a'/b' \geq 1.0$ のせん断座屈係数を求めることが同義であることを利用し、Type Aの $a/b \leq 1.0$ の範囲の評価を試みる。

図2(a)に周辺支持辺の境界条件毎のせん断座屈係数 k_τ

表1 本研究で使用する記号および座屈変位関数

Type A	Type B	Differential plate element
E: ヤング係数 [N/mm ²] (= 205,000)		D _w : パネルウェブの板剛性 [N-mm]
ν: ポアソン比 [-] (= 0.3)		τ: せん断応力 [N/mm ²]
D: 積分領域 [-]		τ _{cr} : 弾性せん断座屈応力 [N/mm ²]
座屈変位関数: $w = \sum_m \sum_n c_{mn} \cdot u_m \cdot v_n$ (1) m, n: 座屈半波数, c _{mn} : 未定係数		
○ 周辺単純支持		○ 周辺固定支持
x 軸方向 $u_m = \sin \frac{m\pi x_0}{L}$ (2.a)		x 軸方向 $u_m = \sin \frac{\pi x_0}{L} \sin \frac{m\pi x_0}{L}$ (3.a)
y 軸方向 $v_n = \sin \frac{n\pi y_0}{L}$ (2.b)		y 軸方向 $v_n = \sin \frac{\pi y_0}{L} \sin \frac{n\pi y_0}{L}$ (3.b)
○ 角度 θ に伴う三角関数の位相変化		
Type A $x_0 = x, y_0 = y + x \tan \theta$ (4.a)		Type B $x_0 = x + y \tan \theta, y_0 = y$ (4.b)
○ パネルウェブで吸収するひずみエネルギー増分 ΔU と外力仕事増分 ΔT		
$\Delta U = \frac{D_w}{2} \int_D \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dy dx$ (5.a)		
$\Delta T = \frac{\tau_{cr} \cdot t}{2} \int_D \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} dy dx$ (5.b) $\tau_{cr} = k_\tau \cdot \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \cdot \frac{t^3}{b^2}$ (5.c)		

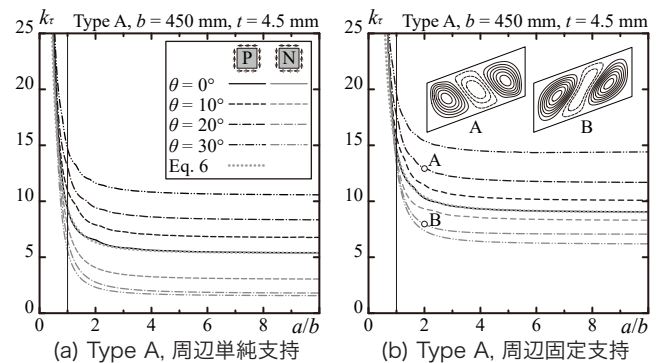


図1 アスペクト比 a/b の変化に伴うせん断座屈係数 k_τ の変化

とアスペクト比の逆数 a'/b' の関係を示す。Type A とは異なり、Type B の座屈係数の取束値はせん断応力の方向、パネルウェブ角度に関わらず式 (6) の第 1 項と一致する。ただし、 a'/b' が 1.0 程度ではパネルウェブ角度の影響が確認できるため、 $a'/b' = 1.0$ における影響を抽出した結果を図 2(b) に示す。以上より、図 2(a) における $a'/b' = 1.0$ の値を採り、図中に示す値へ取束する式 (7) および式 (8) を Type B の平行四辺形が一樣なせん断力を受ける場合の座屈係数の近似式として提案し、図 2(b) 中に示す。

・周辺単純支持 ($0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$)

$$k_\tau = \begin{cases} 5.34 + (4.00 + 7\theta/40)(b'/a')^2 & \text{せん断応力: 正側} \\ 5.34 + (4.00 - 2\theta/15)(b'/a')^2 & \text{せん断応力: 負側} \end{cases} \quad (7)$$

・周辺固定支持 ($0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$)

$$k_\tau = \begin{cases} 8.98 + (5.60 + 6\theta/40)(b'/a')^2 & \text{せん断応力: 正側} \\ 8.98 + (5.60 - \theta/21)(b'/a')^2 & \text{せん断応力: 負側} \end{cases} \quad (8)$$

4. L 形接合部パネルのせん断座屈耐力

平行四辺形状の L 形接合部パネルと一樣なせん断応力下の平行四辺形板要素の座屈係数との対応を有限要素法による固有値解析より明らかにする。図 3 に解析モデル概要図とその境界条件を示す。パネルウェブ以外における座屈現象を抑制するため、柱梁ウェブの面外変形は拘束している。荷重は点 B を上下鉛直方向に作用させ、それぞれの方向に対して正の固有値を 1 次座屈モードとして抽出した。なお、下向きの荷重はせん断応力が負方向に、上向きの荷重はせん断応力が正方向に対応する。

図 4 に固有値解析から得られたパネル中央に作用する曲げモーメントをパネル体積で除してせん断座屈応力度を求め、せん断座屈係数 $ana k_\tau$ へと変換した結果を示す。図 4(a), (b) の縦軸はそれぞれ式 (7) および式 (8) により求めたせん断座屈係数 $cal_{pin} k_\tau$, $cal_{fix} k_\tau$ により無次元化している。L 形接合部パネル境界条件において、周辺単純支持よりも周辺固定支持の方が近いことがわかる。また、パネルウェブ角度 θ が大きくなるほど一樣なせん断状態の座屈係数に対する比率 $ana k_\tau / cal_{fix} k_\tau$ が大きくなっているが、概ね $ana k_\tau / cal_{fix} k_\tau = 1.0$ 付近を推移している。

図 5 に柱梁辺長比 λ_c , λ_b がせん断座屈耐力に及ぼす影響を、図 6 に図 5 に対応する座屈モードを示す。柱梁辺長比が変化するとパネルに作用するせん断応力と曲げ応力の比率が変化し、パネル内の応力分布も変化するため、同一形状の L 形接合部パネルであってもせん断座屈係数は変化する。柱辺長比 λ_c もしくは梁辺長比 λ_b が大きいほど、パネルに作用する曲げ応力成分が減少するため、せん断座屈係数が一樣せん断応力状態に近づくと考えられ、座屈モードもせん断応力下の座屈モードへ近づく。

以上の結果から、一樣なせん断力を受ける周辺固定支持平行四辺形の近似座屈耐力式 (8) により、L 形接合部パネルのせん断座屈耐力を近似評価できる可能性を示した。

5. 結

本研究では一樣なせん断力が作用する平行四辺形板要素を対象として、その形状変化に伴う弾性座屈耐力をエネルギー法に基づき明らかにし、その近似評価式を提案した。また、接合パネル形状が平行四辺形状の L 形接合部

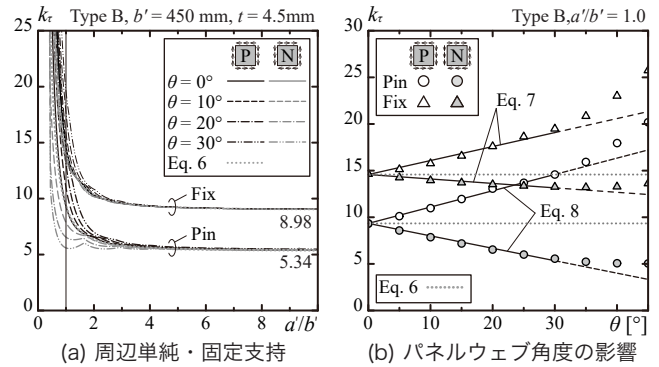


図 2 形状変化に伴う Type B のせん断座屈係数 k_τ の変化

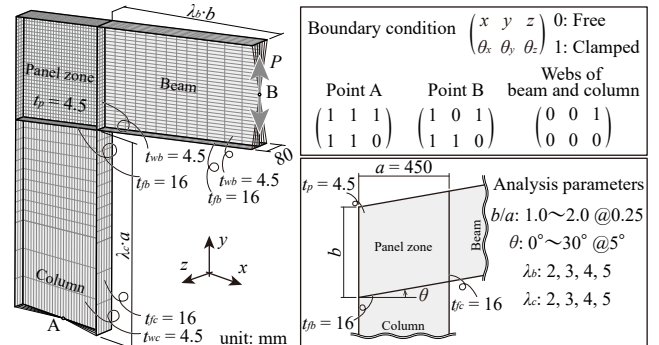


図 3 L 形接合部パネルの有限要素法解析モデル概要図

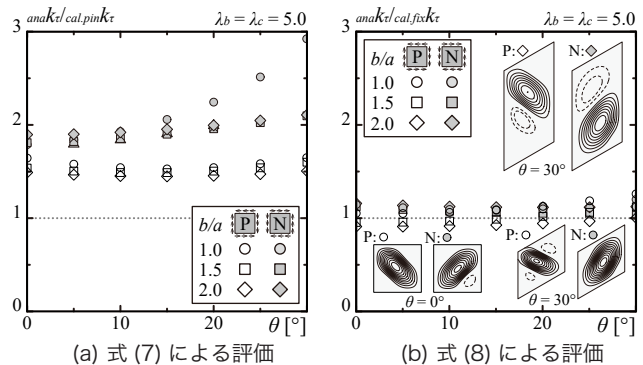


図 4 L 形接合部パネルのせん断座屈耐力の変化

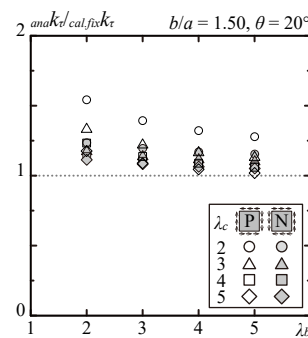


図 5 柱・梁辺長比の影響

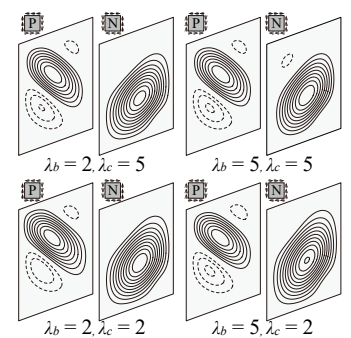


図 6 パネルの座屈モード

パネルと一樣なせん断応力下の平行四辺形板要素との対応を有限要素法による固有値解析により明らかにした。

【参考文献】

- 五十嵐規矩夫ら：H 形断面柱梁 L 形接合部パネルの弾性せん断座屈耐力，日本建築学会構造系論文集，第 85 巻，第 771 号，pp. 759-769, 2020. 5
- Timoshenko, Gere: Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1961
- 日本建築学会：鋼構造座屈設計指針，2018. 2

*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.