

墜落防護工法に対応した建わくの座屈強度に関する解析的研究

Analytical study on buckling strength of vertical frame corresponding to fall protection method

高橋 弘樹*, 大幢 勝利**, 高梨 成次***

Hiroki Takahashi, Katsutoshi Ohdo and Seiji Takanashi

*博士(工学), (独)労働安全衛生総合研究所研究員, 建設安全研究グループ(〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6)

**博士(工学), (独)労働安全衛生総合研究所上席研究員, 建設安全研究グループ(〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6)

***博士(工学), (独)労働安全衛生総合研究所主任研究員, 建設安全研究グループ(〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6)

The Japanese Industrial Safety and Health Law was revised in March, 2009, bringing in new measures to address accidental falls in the construction industry. As part of this revision, regulations were put in place to set the positions of guard rails and other components in scaffolds. Many of these members were set to one side of the scaffolds, therefore creating an eccentric load in the scaffolds. In this study, the buckling strength of the vertical frame subjected to eccentric load was examined by the analysis. And, the equation method on the buckling load of the vertical frame subjected to eccentric load was examined. Results of the equation method corresponded well with the results of the numerical analysis, confirming the validity of the equation method.

Key Words: Fall, Scaffolds, Vertical frame, Eccentric load, Buckling strength

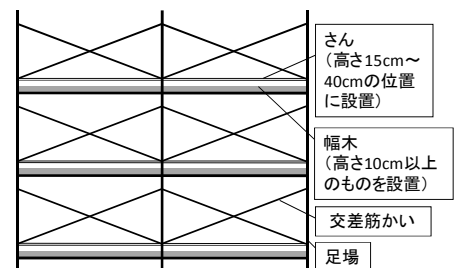
キーワード: 墜落, 足場, 建わく, 偏心荷重, 座屈強度

1. はじめに

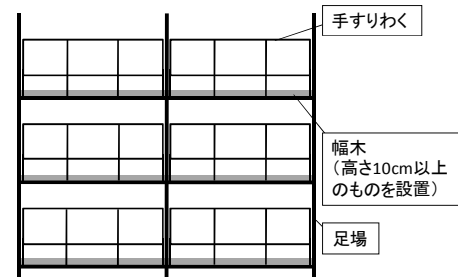
平成 20 年の建設業の労働災害による死亡者数は 430 人であるが, この内, 墜落による死亡者数は 172 人であり, 建設業の労働災害の中で最も件数が多い¹⁾. 更に, 墜落による労働災害の中で, 足場からの墜落による死亡者数は 31 人であり, 墜落災害の中で最も件数が多い.

これらのことなどから, 足場における安全基準が再検討され, 平成 21 年 3 月に労働安全衛生規則が改正された²⁾. この改正に伴い, 新たに墜落防止用のさんや幅木, メッシュシートなどを足場に取り付けることが義務付けられた. また, 平成 15 年には, 足場からの墜落災害等の防止を目的として, 「手すり先行工法に関するガイドライン」³⁾が策定されている. 手すり先行工法は, 足場の組立・解体時に常に先行して手すりを設置する工法であり, 手すりわくと呼ばれる特殊な手すりが用いられている. 義務付けられた幅木やさん及び手すり先行工法の手すりわくの取付け例を図 1 に示す. なお, 本論では, 義務付けられた幅木やさん及び手すりわくなどを設置した足場を総称して, 墜落防護工法とした.

規則改正後の足場は, 従来の足場に加え, 手すりなどを足場に取り付けるため, 従来の足場より固定荷重が大



(a) 交差筋かい+さん+幅木



(b) 手すりわく+幅木

図 1 墜落防護工法の例

きい. また, 足場は建物や橋などの構造物に沿って建てられることが多いため, 手すりわくなどは足場の構造物側の反対の 1 側面に取り付けることが多く, 足場には偏

った荷重が作用する。また、現在示されている足場の強度などに関する指針^{4,5)}には、足場の許容積載荷重や使用高さの限度が示されているが、これらの値は従来の足場を対象としているため、規則改正後の足場に必ずしも対応しているわけではない。

足場の座屈強度は、建わくと呼ばれる足場部材の中の縦の枠材の座屈強度によって決まる。本論文では、この足場の基本部材である建わくを対象として、偏心荷重を受ける建わくの座屈解析を行い、その強度について検討した。なお、本論文では、建わくの中心軸に沿って作用する荷重を中心荷重とし、建わくの中心軸から離れた軸に沿って作用する荷重を偏心荷重とした。

2. 解析概要

数値解析は、汎用有限要素解析プログラムの ANSYS を用いて行った。建わくは鋼材であり、建わくが座屈すると図2に示す建わくの脚柱の中央部分が塑性することから、解析モデルの材料は、等方性の弾塑性体とし、降伏条件は、数値解析で一般的に使われている Von Mises の条件に従うものとした。解析に使用した応力-ひずみ関係を図3に、材料物性値を表1に示す。応力-ひずみ関係は、一般的な鋼材の応力-ひずみ関係を簡略化したバイリニア型とした⁶⁾。降伏後はひずみ硬化を考慮し、2次勾配 E_{st} をヤング係数 E の 0.01 倍とした⁶⁾。表中の ν はポアソン比である。

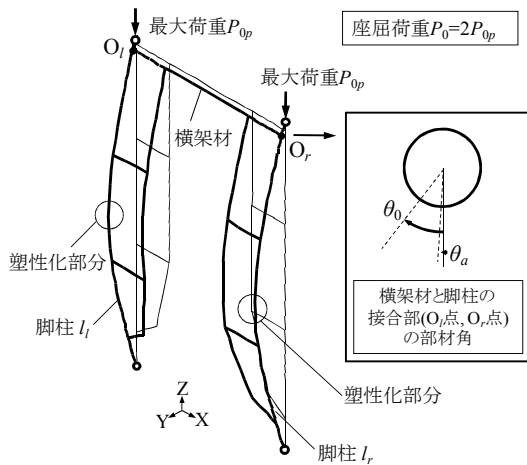


図2 中心荷重を受ける建わくの座屈

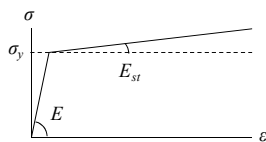


図3 解析に用いた応力-ひずみ関係

表1 解析に用いた材料物性値

部材 (鋼材の材質)	E (N/mm ²)	ν	σ_y (N/mm ²)	E_{st} (N/mm ²)
建わくの脚柱、横架材 (STK500)	205,000	0.3	355	2,050
建わくの補剛材 (STK400)	205,000	0.3	235	2,050

3. 中心荷重を受ける建わくの座屈解析

建わくは、建設工事などで一般的に使われている標準建わくを対象とした。標準建わくの座屈強度の基本的な性能を調べるため、偏心荷重を受ける建わくの座屈強度に影響を及ぼすと考えられる補剛材の長さをパラメータとして、中心荷重を受ける建わくの座屈荷重を検討した。建わくの解析モデルを図4に示す。図4に示した補剛材の長さ h_s は、一般的に使われている建わくの代表的な長さである。建わくの解析モデルは、鋼管により構成されていることから、有限要素は2節点のビーム要素を用いた。横架材の長さ b は、一般的に使われている 900mm のものを用い、補剛材の長さ h_s は、0mm, 500mm, 1,000mm, 1,500mm の4種類を設定した。支持条件は、足場を組み上げた場合を想定して、図2に示すように、建わくの脚柱上下端部をピンとして、脚柱上下端部の横移動を拘束した。荷重は、組み上げた足場の上層から荷重を受けることを想定して、建わくの脚柱上端部から作用させた。

市販されているわく組足場に座屈実験を行うと、足場は図5のように、個材座屈をする⁷⁾。このことより、建わく1枠の座屈形状は、足場が個材座屈する場合と同じ図2のようになると仮定した。また、実際の鋼材は通常ははじめから少し曲がっており、これを元たわみと呼んでいる。ヨーロッパ鋼構造協会連合では実部材の計測などから、両端がピン支持された部材の中央の元たわみは、部材長さの 1/1,000 程度であるとしている⁸⁾。本論文で対象としているわく組足場も元たわみを有していると考えられ、この値を参考にして、図6に示すように、建わくの Y 方向に対して、建わく中央のたわみが建わく高さの 1/1,000 (1.7mm) になるように sin 波で元たわみ δ_0 を与えた。なお、本論における座屈解析は、固有値解析を行わず、元たわみを持つ部材に軸方向に圧縮力を作用させることで、座屈を発生させた。

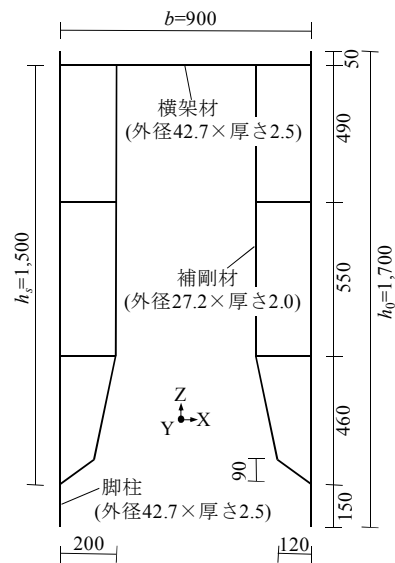


図4 解析に用いた建わく

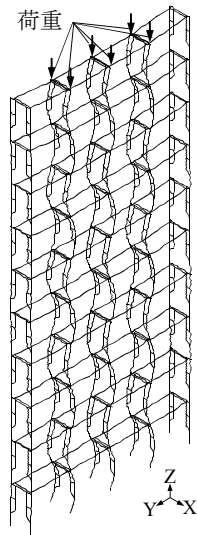


図5 足場の個材座屈

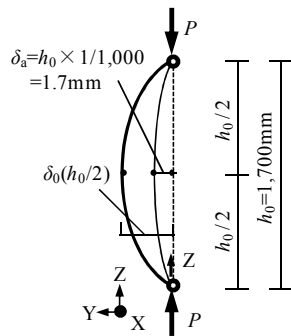


図6 元たわみをもつ脚柱の横たわみ

表2 建わくの座屈荷重

補剛材の長さ h_s (mm)	座屈荷重 P_0 (kN)
0	81.7
500	82.6
1,000	90.0
1,500	95.6

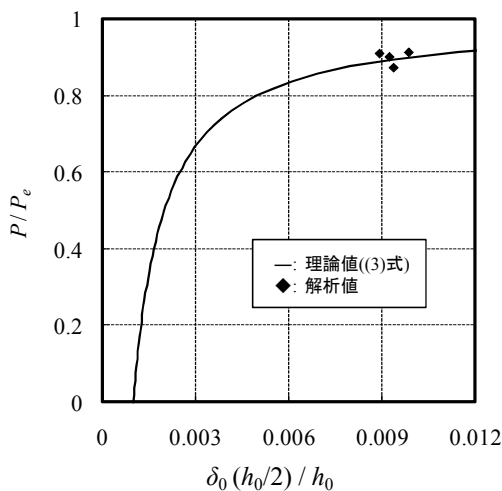


図7 建わくの圧縮荷重と横たわみの関係

また、今回の支持条件と元たわみにより計算された建わく1枠の座屈荷重 P_0 は、わく組足場が個材座屈するときの座屈荷重とほぼ同じになり、建わく1枠の座屈荷重 P_0 を調べることで、足場の座屈強度がわかると考えられる。なお、建わくの座屈荷重 P_0 は、図2に示す脚柱 l_1 と脚柱 l_r の頂部の最大荷重 P_{0p} の合計の $2P_{0p}$ として計算した。

解析結果を表2に示す。建わくの座屈荷重 P_0 は、補剛材の長さが長くなるほど、値が大きくなった。この解析結果をオイラー荷重と比較して評価を行った。建わくのオイラー荷重 P_e は、次のように与えられる。

$$P_e = \frac{\pi^2 EI_e}{h_0^2} \quad (1)$$

π : 円周率 E : ヤング係数(N/mm²)

h_0 : 建わく1枠の高さ(mm) I_e : 補剛材の影響を考慮した等価断面2次モーメント(mm⁴)⁷⁾

I_e は、森らが提案した補剛材の影響を考慮した等価断面2次モーメントであり、次式により表わされる⁷⁾。

$$I_e = 2 \left(I_0 + I_s \frac{h_s}{h_0} \right) \quad (2)$$

I_0 : 脚柱の断面2次モーメント(mm⁴),

I_s : 補剛材の断面2次モーメント(mm⁴)

h_s : 補剛材の取り付け長さ(mm)

図6に示すような部材の中央に元たわみ δ_a をもつ脚柱に荷重 P が作用した場合の脚柱の横たわみ $\delta_0(z)$ と荷重 P との関係は、次のように表せる⁹⁾。

$$\delta_0(z) = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_e}{P_e - 2P} \delta_a \sin \frac{\pi \cdot z}{h_0} \quad (3)$$

z : 脚柱下端からの長さ(mm)

座屈解析の結果と(3)式の比較を図7に示す。図の縦軸は(1)式のオイラー荷重 P_e に対する荷重 P の比を示し、横軸は建わく1枠の高さ h_0 に対する脚柱の中央のたわみ $\delta_0(h_0/2)$ の比を示す。図中の黒い点は解析結果 P_0 の値を示し、曲線は(3)式の理論値を示す。

解析値は理論値にほぼ対応しており、解析結果はおおむね妥当な値であると言える。また、これらの解析結果のオイラー荷重 P_e に対する解析の座屈荷重 P_0 の比 $n (=P_0/P_e)$ の平均値は、0.90であった。従って、解析に用いた建わくは、元たわみの影響により理論値よりも10%程度、座屈強度が減ったと考えられ、今回設定した元たわみをもつ建わくは、オイラー荷重の90%程度の座屈強度を保有している結果となった。本論では n の値を平均値の0.90として定め、今回設定した建わくの座屈荷重の基準値を $0.9P_e$ とした。

4. 偏心荷重を受ける建わくの座屈解析

4.1 解析モデルと解析方法

建わくの解析モデルは、3章と同じモデルを用いた。偏心荷重を受ける建わくを図8に示す。図の O_l 点は横架材と脚柱 l_l の接合部を示し、 O_r 点は横架材と脚柱 l_r の接合部を示す。支持条件は、組み上げた足場を想定して、図8に示すように、建わくの脚柱上下端部をピンとし、脚柱上下端部の横移動を拘束した。建わくの座屈形状は、足場が個材座屈をする場合を想定して、図8のように仮定した。元たわみとして、建わくのY方向に対して、建わく中央のたわみが建わく高さの1/1,000(1.7mm)になるようにsin波で与えた。荷重は、組み上げた足場の上層から荷重を受けることを想定して、建わくの脚柱上端部から作用させた。なお、図8の θ_a は元たわみに伴う部材角であり、 θ_l は荷重が P_{e0p} のときの O_l 点の部材角であり、 θ_r は荷重が αP_{e0p} のときの O_r 点の部材角である。

偏心荷重の比率は、図8に示すように脚柱 l_l の頂部に作用する荷重を基準にして、脚柱 l_r の頂部に作用する荷重の α の値を調整して決定し、 α は0~1の値をとるものとした。 α は、値が小さいほど偏心の割合が大きく、0のときは脚柱 l_r に荷重が作用していないことを表し、1のときは脚柱 l_l と脚柱 l_r に作用する荷重の大きさが同じ(偏心がない)ことを示す。

4.2 解析結果と偏心荷重を受ける建わくの座屈荷重

ここで、偏心荷重を受ける建わくの座屈荷重の評価をするため、この計算方法を検討する。図8に示す支持条件の建わくに偏心荷重が作用して座屈するとき、建わくの脚柱 l_l と脚柱 l_r は横架材により接続していることから、脚柱の曲げ剛性と横架材のねじり剛性の影響により O_l 点と O_r 点には部材角 θ_m が生じる。図2に示すように中

心荷重を受ける元たわみをもつ建わくが座屈荷重 P_0 になったときの O_l 点と O_r 点の部材角を θ_0 とすると、部材角 θ_m は次式により求められる。

$$\theta_m = \frac{GI_p}{b \left(\frac{3EI_e}{h_0} + \frac{2GI_p}{b} \right)} \cdot (\theta_0 - \theta_{0a}) \quad (4)$$

G : せん断弾性係数(N/mm²) b : 建わくの幅(mm)

I_p : 横架材のねじり定数(mm⁴)

θ_{0a} : 荷重 αP_0 のときの O_l 点と O_r 点の部材角

この θ_m に伴って生じる O_l 点の曲げモーメント M と脚柱 l_l に発生する曲げモーメント $M_m(z)$ は、図9(a)のような分布になり、次式のように表せる。

$$M = \frac{3EI_e \theta_m}{h_0} \quad (5)$$

$$M_m(z) = \frac{3EI_e \theta_m}{h_0} \cdot \left(\frac{z}{h_0} \right) \quad (6)$$

また、中心荷重を受ける元たわみをもつ建わくが座屈荷重 P_0 になったときの脚柱 l_l の横たわみ $\delta_0(z)$ は、次式のように与えられる。

$$\delta_0(z) = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_e}{P_e - n \cdot P_e} \delta_a \sin \frac{\pi \cdot z}{h_0} \quad (7)$$

このときの脚柱 l_l の曲げモーメント $M_0(z)$ は、図9(b)のような分布になり、次式により求められる。

$$M_0(z) = \frac{n \cdot P_e}{2} \cdot \delta_0(z) \quad (8)$$

n : オイラー荷重 P_e に対する解析の座屈荷重 P_0 の比

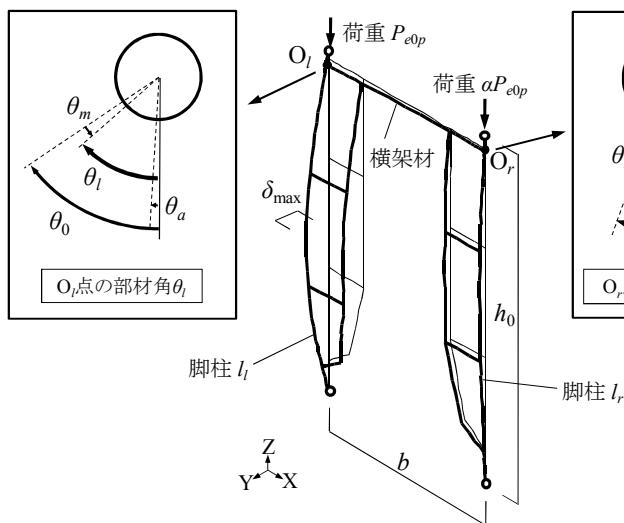
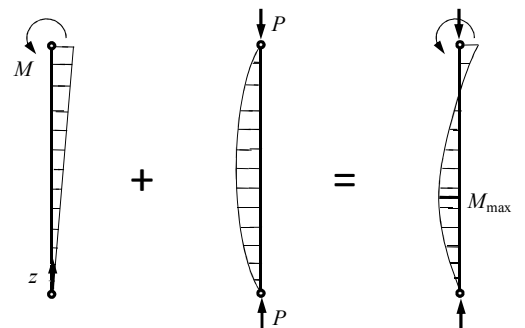


図8 偏心荷重を受ける建わくの座屈



(a) θ_m に伴って生じる曲げモーメント
(b) 軸力による曲げモーメント
(c) 偏心荷重を受ける脚柱の曲げモーメント

図9 偏心荷重を受ける脚柱 l_l の曲げモーメント

偏心荷重を受ける元たわみをもつ建わくが座屈荷重に達するとき、脚柱 l_l には $M_m(z)$ と $M_0(z)$ が同時に作用する。このときの脚柱 l_l の曲げモーメント $M_{e0}(z)$ は、図 9(c) のような分布になり、次式により得られる。

$$M_{e0}(z) = M_0(z) - M_m(z) \quad (9)$$

脚柱 l_l の降伏軸力と曲げモーメントの関係から、偏心荷重を受ける建わくの脚柱 l_l の座屈荷重 P_{e0p} は、次式により求められる。

$$P_{e0p} = \left(\sigma_y - \frac{\max\{M_{e0}(z)\}}{Z_e} \right) A \quad (10)$$

σ_y : 脚柱の降伏応力(N/mm²) A : 脚柱の断面積(mm²)
 Z_e : 脚柱の弾性断面係数(mm³)

また、偏心荷重を受けて建わくが変形する場合、脚柱 l_l と脚柱 l_r では、作用する荷重の大きさが異なるので、脚柱 l_l と脚柱 l_r の高さ方向(z 方向)の変形量が異なる。このため、横架材は、図 10 のように変形する。この変形に関わる荷重 P_h は、次式により得られる。

$$P_h = \frac{12EI_c\delta_h}{b^3} \quad (11)$$

δ_h は、脚柱 l_l と脚柱 l_r の z 方向の変形量の差であり、次式のように表せる。

$$\delta_h = \delta_l - \delta_r \quad (12)$$

δ_l : 荷重 P_{e0p} のときの脚柱 l_l の z 方向の変形量(mm)
 δ_r : 荷重 αP_{e0p} のときの脚柱 l_r の z 方向の変形量(mm)

δ_l は、次式により求められる。

$$\delta_l = \delta_{lz} + \delta_{ly} \quad (13)$$

δ_{lz} : 脚柱 l_l の縮み量を除いた z 方向の変形量(mm)

δ_{ly} : 脚柱 l_l の縮み量(mm)

高さ方向の微小長さを dz とすると、 δ_{lz} は、次式により得られる。

$$\begin{aligned} \delta_{lz} &= \int_0^{h_0} \left(dz - \sqrt{dz^2 - (\delta_0(z+1) - \delta_0(z))^2} \right) dz \\ &= \int_0^{h_0} dh dz \end{aligned} \quad (14)$$

dh : 微小長さ dz における z 方向の変形量(mm)

δ_{ly} は、次式により求められる。

$$\delta_{ly} = \frac{P_{e0p}h_0}{EA} \quad (15)$$

(12)式の δ_r は、(14)式の値を αP_{e0p} による値として求め、(15)式の P_{e0p} に αP_{e0p} を代入して計算し、これらを合計することで計算できる。

以上より、偏心荷重を受ける建わくの座屈荷重 P_{e0} は、次式により求められる。

$$P_{e0} = (1 + \alpha)P_{e0p} + P_h \quad (16)$$

解析結果を図 11 に示す。図の縦軸は建わくの座屈荷重 P_{e0} / 建わくの降伏荷重 P_y を示し、横軸は脚柱 l_l の頂部に作用する荷重に対する脚柱 l_r の頂部に作用する荷重の比

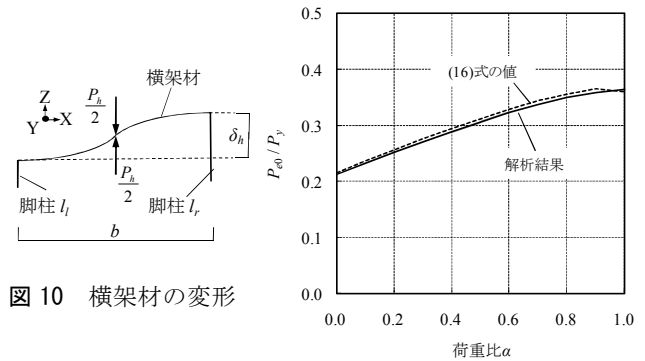
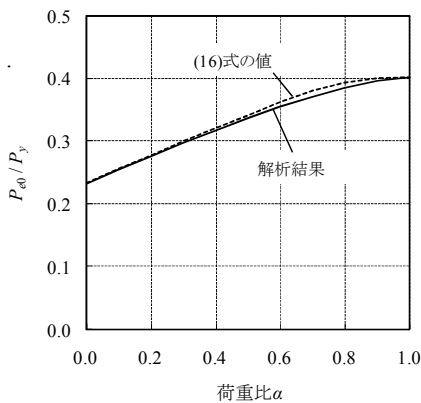
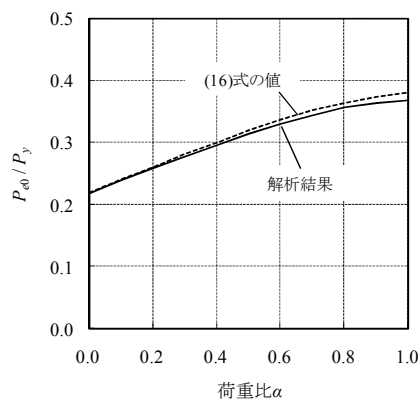


図 10 横架材の変形

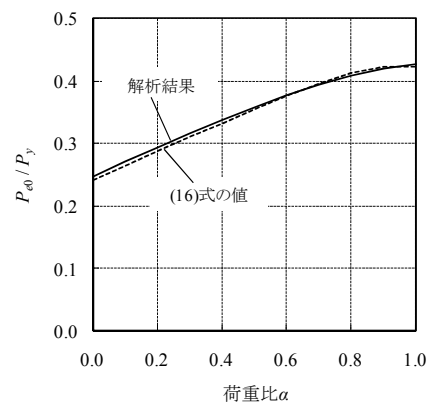
(a) 補剛材長さ 0mm



(b) 補剛材長さ 500mm



(c) 補剛材長さ 1000mm



(d) 補剛材長さ 1500mm

図 11 建わくの座屈荷重と荷重比の関係

率 α を示す。図中の実線は解析結果の値を示し、点線は今回検討した計算方法 ((16)式) による値を示す。

図 11 より (16) 式の値は、解析結果にほぼ対応しており、この計算方法により偏心荷重を受ける建わくの座屈荷重が計算できることが確かめられた。また、解析結果と (16) 式により求めた座屈荷重 P_{e0} は、荷重の比率 α が小さくなるほど値が小さくなり、荷重が脚柱 l_f のみに作用している場合 ($\alpha=0$ の場合) は、中心荷重を受ける場合 ($\alpha=1$ の場合) に比べて 40~44% 程度強度が低下した。

ここで、枠幅が 900mm で補剛材の長さが法規範囲内の 1500mm の建わくを対象として、組み上げた足場に及ぼす偏心荷重の影響を考察する。足場には、墜落防護に関する部材として、1 側面に手すりわくとメッシュシートを取り付けるものとした。この内、手すりわくの重量を調整して検討を行った。手すりわくの重量は、約 10kN 程度である¹⁰⁾ことから、0~200kN の範囲で調整した。一般的な建わくに作用する 1 層 1 スパン当たりの部材重量⁴⁾を表 3 に示す。表 3 に示す合計値が、建わく 1 柱に作用して、更に、18kN のメッシュシート⁴⁾と 0~200kN の範囲の手すりわくを足場の 1 側面に取り付けた場合の建わくの座屈荷重を図 11(d) を基に求めた。更に、この場合の建わくの座屈荷重の低減の比率 γ を、偏心荷重を受ける建わくの座屈荷重 (18kN のメッシュシートと 0~200kN の範囲の手すりわくを足場の 1 側面に取り付けた場合の建わくの座屈荷重) / 中心荷重を受ける建わくの座屈荷重 (メッシュシートと手すりわくを取り付けない場合の建わくの座屈荷重) として計算し、 γ と手すりわくの重量 M_b の関係を求めた。これらの関係を図 12 に示す。横軸の手すりわくの重量は、手すりわくのみ重量である。この図は、足場の 1 側面に手すりわくとメッシ

表 3 建わくに作用する 1 層 1 スパン当たりの部材重量

部材	重量(N)
幅900mmの建わく	145
交差筋かい	41
幅500mmの床付き布わく	153
幅240mmの床付き布わく	83
合計	422

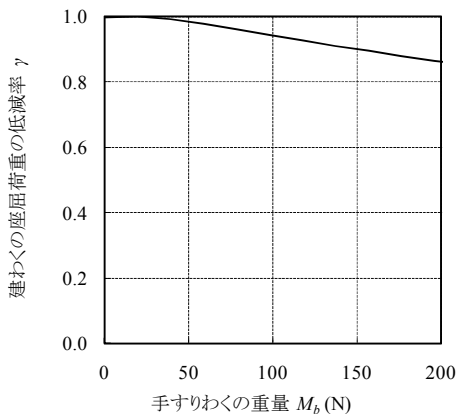


図 12 建わくの座屈荷重の低減率

ュシートを取り付けた場合の手すりわくを取り付けない場合を基準にした手すりわくの重量に対する足場の座屈荷重の低減割合を示す。 γ は M_b が大きくなるほど小さくなった。手すりわくなどを取り付け、偏心荷重を受ける建わくは、中心荷重を受ける建わくに比べて座屈荷重が小さくなることから、手すりわくなどを取り付ける場合は、手すりわくの重量に対応した建わくの許容支持力を設定する必要があると考えられる。

5. まとめ

本論文では、偏心荷重を受ける建わくの座屈強度を数値解析により確かめた。また、偏心荷重を受ける建わくの座屈荷重の計算方法を示し、解析結果と比較することで、その計算方法の妥当性を検討した。示した計算方法は、解析結果とほぼ一致し、その方法が妥当であることを確かめた。

計算の結果、偏心荷重を受ける建わくの座屈荷重 P_{e0} は、荷重の比率 α が小さくなるほど値が小さくなった。手すりわくなどを取り付けた足場は、偏心荷重の影響により中心荷重を受ける場合に比べて座屈荷重が小さくなることから、足場を設置する場合は、手すりわくなどの重量に対応した建わくの許容支持力を設定して設計した方が良いと考えられる。

参考文献

- 1) 建設業労働災害防止協会編: 建設業における労働災害発生状況, 平成 21 年度版建設業安全衛生年鑑, pp. 75-110, 2009.
- 2) 労働調査会出版局編: 労働安全衛生法, 労働法便覧 平成 22 年度版, 2010.
- 3) 建設業労働災害防止協会編: 手すり先行工法に関するガイドラインとその解説, 2004.
- 4) 仮設工業会編: 枠組足場, 足場・型枠支保工設計指針, pp. 17-61, 2004.
- 5) 仮設工業会編: 風荷重に対する足場の安全技術指針, 2004.
- 6) 井上一朗: 鋼材の応力-歪関係のモデル化, 建築鋼構造の理論と設計, pp. 2-3-2-4, 2003.
- 7) 森宜制・前郁夫・国森昌之: 鋼管製枠組式コンクリート型枠支保工の強度に関する実験報告, 労働省産業安全研究所研究所報, No.3, pp.1-8, 1962.
- 8) 成岡昌夫, 福本秀士, 伊藤鉦一: ヨーロッパ鋼構造協会連合・VIII 委員会の鋼柱座屈曲線について, 6(55), pp.56-71, 1970.
- 9) チモシェンコ: 元湾曲がたわみに及ぼす影響, 座屈理論, pp.20-24, 1953.
- 10) 中央ビルト工業: 機材ハンドブック, pp.8-9, 2010.

(2010 年 8 月 6 日受付)