足場の墜落防護工法を考慮した 風力算定方法の基礎的研究

高橋 弘樹¹・大幢 勝利²・高梨 成次³・北條 哲男⁴

¹正会員 主任研究員 独立行政法人労働安全衛生総合研究所 建設安全研究グループ
(〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6)
takahah@s.jniosh.go.jp

^{2,3}正会員 上席研究員 独立行政法人労働安全衛生総合研究所 建設安全研究グループ
(〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6)
² E-mail:ohdo@s.jniosh.go.jp

³ E-mail:takanasi@s.jniosh.go.jp

⁴フェロー会員 教授 ものづくり大学 技能工芸学部 建設学科
(〒361-0038 埼玉県行田市前谷333)
E-mail:hojo@iot.ac.jp

建設工事における墜落災害の対策として、平成21年3月に労働安全衛生規則が改正され、新たに墜落防止用の手すりや板、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。足場を設置する際は、風荷重に対する足場の強度を検討する必要があるが、現行の指針は、従来の足場を対象としているため、規則改正後の足場に対応しているかは不明である。これらのことから本論文では、幅木の高さをパラメータとして、足場の風力に関する風洞実験を行った。実験の結果、規則に沿った高さ15cmの幅木を設置した足場は、幅木がない足場に比べて、1.5倍程度の風力係数を見込んだ方が良いことが分かった。これらの結果を基に、規則改正後の足場に対応した風力係数の算定方法の検討を行った。

Key Words : construction safety, scaffolds, wind load, wind tunnel test, wind force coefficient

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⁾。さらに、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。規則改正前の足場と規則改正後の足場を図-1に、手すり先行工法の設置状況を写真-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

図-1 規則改正前と規則改正後の足場の例

写真-1 手すり先行工法の設置状況

写真-2 風により倒壊した足場

図-2 風力測定装置

た足場を総称して、墜落防護工法とした。

建設工事などで使用する足場は、風の影響を受けやすく、写真-2に示すような足場の倒壊災害が発生している。墜落防護工法は、従来の足場に比べて手すりなどを多く取り付けることから、規則改正後の足場と従来の足

場では、足場周囲の風環境が異なる。これまで、強風に対する足場の安全対策に関して、幾つかの研究がされており^{3)~5)}、これらの研究成果より、風荷重に対する足場の設計指針⁶⁾が出されている。しかし、これらの研究や指針は従来の足場を対象としており、墜落防護工法に対応するかは分からない。

本研究は、風に対する墜落防護工法の安全対策を目的として、幅木を取り付けた足場に作用する風力を、構造物の風力評価において多く使用されている風洞模型実験^{例えば5)~7)}により検討した。さらに、これらの結果より幅木を取り付けた足場の風力係数の算定方法について検討を行った。

2. 実験概要

(1) 風洞装置

風洞実験は独立行政法人労働安全衛生総合研究所の閉鎖回流式風洞装置を用いて行った。風力測定装置の概要を図-2に示す。風洞装置の全長は74,900mmであり、測定胴の寸法は幅2,300mm、高さ2,000mmである。風力の測定は、風洞床面の下に設置した6分力天秤を用いた。試験体(模型)は風力天秤の上に剛接して、模型部分のみが風洞床面から出るように設置した。

(2) 試験体

実験に用いた模型は、建設工事で一般的に使用されているわく組足場とした。模型の縮尺は、天秤に設置できる大きさと重量を考慮して1/10とし、3層1スパンの足場を設置した。

足場の風力係数は、足場の投影面積に影響する。規則改正後の足場には、幅木等を取り付けることになっているが、幅木を取り付け、投影面積が増えた足場の風力係数は不明である。今回は、墜落防護工法の中で、基本的な足場と考えられる幅木のみを取り付けた足場を対象とし、足場の風力係数と足場の投影面積の関係を調べるため、幅木の高さをパラメータとして実験を行った。実験に用いた足場部材の寸法を図-3に、組み上げたわく組足場を図-4に示す。なお、足場の枠面方向をX方向、交差筋かい面方向をY方向、高さ方向をZ方向とした。

幅木は、交差筋かい面(Y-Z面)の1面に取り付けた。また幅木は、最下層に取り付ける必要がないことから、2層目と3層目に取り付けた。

本論では、幅木の高さと幅木を取り付けた層の足場の投影面積を式(1)、(2)のような無次元化した係数で示した。これらの値をまとめたものを表-1に、足場1層の投影率 η と幅木の高さ率 α の関係を図-5に示す。図-5より、足場1層の投影率 η と幅木の高さ率 α は、比例関係になった。

(a) 建わく

(a) X-Z面

(b) Y-Z面

図-4 実験に用いたわく組足場

(b) 床付き布わく

(c) 交差筋かい

図-3 足場部材の寸法

表-1 足場1層の投影面積と投影率

幅木の高さ (mm)	幅木の高さ率 τ	足場1層の投影面積 (mm ²)	足場1層の投影率 η
なし	0	5,220	0.16
10	0.06	7,000	0.21
15	0.09	7,890	0.24
50	0.29	13,924	0.42
90	0.53	20,467	0.62
130	0.76	26,995	0.81
170	1.00	33,268	1.00

図-5 足場1層の投影率と幅木の高さの関係

$$\tau = h_b / h_v \quad (1)$$

$$\eta = A_b / A_0 \quad (2)$$

ここで、 τ : 幅木の高さ率、 h_b : 幅木の高さ、 h_v : 建わくの高さ、 η : 足場1層の投影率、 A_b : 幅木を取り付けた足場1層の投影面積、 A_0 : 幅木の高さ170mmの足場1層の投影面積

(3) 実験風速

風洞内の天井から 550 mm の位置に設置したピトー管により速度圧を測定し、その値を用いて風速を計算した。風速は、2, 4, 6, 8, 10 m/s の 5 パターンを設定した。

わく組足場は、主に鋼管により構成されている。鋼管は円形断面であり、足場の鋼管の長さは直径に比べて長いので、足場の風力係数を計算する場合は、2 次元円柱を考えればよいとある⁹⁾。円柱の風力係数は、レイノルズ数により変化することから、物体の代表長さを建わくの脚柱の直径の 5 mm として、レイノルズ数を計算し、実験で設定した風速をレイノルズ数により評価した。本実験のレイノルズ数と風速の関係を図-6 に示す。図-6 には、円柱の風力係数とレイノルズ数の関係⁹⁾も参考のため示した。なお、レイノルズ数 Re は、次式により計算できる。

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (3)$$

ここで、 U : 風速 (m/s)、 D : 物体の代表長さ (本論では脚柱の直径 5 mm を用いた。)、 ν : 動粘性係数 ($\times 10^5$) ($= \mu / \rho$, $\mu = 1.82 \times 10^{-5} \text{ (N} \cdot \text{sec/m}^2)$: 粘性係数, ρ : 密度)

図-6 より風速 2~10 m/s のレイノルズ数は $6.5 \times 10^2 \sim 3.5 \times 10^3$ 程度であり、このときの円柱の風力係数は 1.0~1.2 程度である。本実験の風速 2~10 m/s の範囲では、風速が高いほど風力係数の値が安定していることから、本報では風速 10 m/s の結果について考察することにした。

また、足場の風力係数は、風向により異なることから、基本的なデータ取得を目的として、風向をパラメータとして実験を行った。風向角度は、図-7 に示すように、0, 30, 60, 90 度の 4 パターンを設定した。

3. 実験結果

実験結果を図-8 に示す。図-8 (a) は足場の風力係数と風向角の関係を示し、図-8 (a) 内の数字は幅木の高さと幅木の高さ率 τ を示す。図-8 (b) は足場 1 層の風力係数と幅木の高さ率 τ の関係を示す。

足場 1 層の風力係数は、幅木のある足場 1 層の図-4 の X 方向の値を以下のように計算した。

$$C = \frac{F}{q_F A} \quad (4)$$

ここで、 F : 足場 1 層に作用した力 (= 足場全体に作用した力 $\times$ (幅木を取り付けた層の足場 1 層の投影面積 / 足場 3 層の投影面積))、 q_F : 基準速度圧 $= 1/2 \rho \cdot V_H^2$, ρ : 空気密度, V_H : 風速, A : 代表面積 (Y-Z 面の投影面積)

図-6 円柱の風力係数とレイノルズ数の関係

図-7 実験に用いた風向角

図-8 (a) 足場 1 層の風力係数と風向角の関係

図-8 (b) 足場 1 層の風力係数と幅木の高さ率の関係

図-8 (a) より, 風向角が $0 \sim 90$ 度の範囲では, 0 度の場合が足場 1 層の風力係数が最も高く, 角度が高くなるほど足場 1 層の風力係数が小さくなった. 0 度の場合が最も高いことから, 次章で行う足場の風力の算定方法の検討は, 0 度を対象とした. また, 図-8 (b) より, 足場 1 層の風力係数は幅木の高さ率 τ にほぼ比例して大きい値になった.

労働安全衛生規則では, 幅木を 15cm 以上にとることとされている. 幅木の高さが 15mm の足場の風力係数は, 幅木の無い足場の風力係数に比べて, $1.35 \sim 1.46$ 倍程度の値になった. 規則に沿った高さ 15cm の幅木を設置した足場は, 幅木が無い足場に比べて, 1.5 倍程度の風力係数を見込む必要がある.

4. 足場の風力係数の算定方法の検討

足場を組み立てる際は, 風荷重に対する足場の安全性を確保するため, 風荷重に対する足場の強度と施工方法などを検討する必要がある. 足場に作用する風荷重を算定するときは足場の風力係数を算定する必要があり, 現行の指針の足場の風力係数の算定方法は, 式(5) になっている. しかし, これは足場にシート等を取り付けた場合の算定方法であり, 幅木の高さ (投影率) をパラメータとした足場の風力係数の算定方法はない⁹⁾. 本論文では, 現行の風力係数の算定方法を参考にして, 幅木の高さをパラメータとした足場の風力係数の算定方法について検討した.

$$C = (0.11 + 0.09\gamma + 0.945C_0 \cdot R) \cdot F \quad (5)$$

ここで, C : 足場の風力係数, γ : 第2構面風力低減係数 $\gamma = 1 - \varphi$, φ : シート等の充実率, C_0 : シート等の基本風力係数, R : シート等の縦横比, F : 建物に併設された足場の設置位置による補正係数

わく組足場の交差筋かい面 (Y-Z面) に風が直角に作用する場合の足場の風力は, それぞれの素材に対する風力の合計となり, 図-9に示すような第1構面の素材に対する風力と, 第2構面の素材に対する風力の和として計算される. 文献6) より, わく組足場の交差筋かい面 (Y-Z面) A_0 に対する第1構面の風力係数は $C = 0.11$ になる⁹⁾. 風下側になる円柱が受ける風力は, 風上側の円柱の受ける風力の $30 \sim 80\%$ になると言われている⁹⁾. 足場の場合も, これらと同等と考えられ, 第1構面の受ける風力の 80% とすると, 第2構面の風力係数は $C = 0.11 \times 0.8 = 0.09$ になる⁹⁾. 従って, わく組足場の風力係数は $C = 0.11 + 0.09 = 0.2$ になる.

図-9 わく組足場の第1構面と第2構面

実験結果の風向角 0° の幅木の高さ率 τ が 0 のときの足場の風速係数は 0.25 であり, 0.2 より値がやや大きい. これは, 今回の実験に用いた模型の交差筋かいの幅が, 文献6) の足場の風力係数の検討に用いた足場の交差筋かいの幅よりも広いためであると考えられる. 実験に用いた模型の交差筋かいの幅が, 文献6) の検討に用いた足場の交差筋かいの幅に近ければ, 風向角 0° の実験値は, 式 (10) の値により近い値となると考えられるので, $C = 0.11 + 0.09 = 0.2$ は妥当な値であると考えられる.

わく組足場に幅木を取り付けた場合, 第2構面にも風力は作用するが, 幅木が無い場合よりは小さい. わく組足場の全面に幅木を取り付けた場合は, 風はすべて第1構面で受け止められ, 第2構面に風力が作用することはないと考えられる. これらのように考えると, 幅木を取り付けた足場の風力係数 C は, 次のように表される.

$$C = C_1 + C_2 + C_b = 0.11 + 0.09\gamma + C_b \quad (6)$$

ここで, C_1 : 第1構面の風力係数, C_2 : 第2構面の風力係数, C_b : 幅木の風力係数

γ は第1構面に取り付けた幅木による第2構面の風力係数の低減係数である. 幅木が無い足場は, 幅木の高さ率 τ は 0 であり, $\tau = 0$ のとき $\gamma = 1.0$ になる. 幅木を足場の全面に取り付けた足場は $\tau = 1.0$ であり, $\tau = 1.0$ のとき $\gamma = 0$ になる. 図-8 (b) より, 足場1層の風力係数と幅木の高さ率はほぼ比例関係にあるので, γ は直線的に変化し, 次式のような関係になると考えられる.

$$\gamma = 1 - \tau \quad (7)$$

文献6) より, 充実率が 100% のシートやネットなどを取り付けた足場の風力係数は 2.0 としている. 幅木を足場の全面に取り付けた場合の風力係数も同等と考えられることから, 幅木の高さ率 τ が 1.0 の場合の式(6)の C の値は 2.0 になり, $C_b = 1.89$ になる.

また, シートやネットなどの網状構造物は, どのよう

な素材であっても、充実率が100%の場合、無限長（2次元）の風力係数は2.0になるとしている⁹⁾。これらより、幅木の風力係数 C_b は、以下ようになる。

$$C_b = 1.89 = \beta \times 2.0 \quad (8)$$

式(8)に示すように、 C_b は係数 $\beta=0.945$ が必要になる。 $\beta=0.945$ を式(6)に代入すると、以下ようになる。

$$C = 0.11 + 0.09 \cdot \gamma + 0.945C_0 \quad (9)$$

C_0 は足場に取り付けるシート等の基本風力係数であり、シート等の場合は、素材毎に充実率0%で風力係数が0、充実率100%で風力係数が2.0になるように多項近似により求められる値である⁹⁾。図-8(b)より、幅木を取り付けた場合の足場1層の風力係数は、幅木の高さ率にほぼ比例しているので、 $C_0=2\tau$ になると考えられる。

式(5)の R は文献6)の値をそのまま使用し、式(5)の F は充実率 φ の値を幅木の高さ率 τ の値に便宜的に置き換えて使用すると幅木を取り付けた足場の風力係数は、次式のようにになる。

$$C = (0.2 + (1.89R - 0.09)\tau) \cdot F \quad (10)$$

風向角0°の足場の風力係数を式(10)を用いて計算した値を図-8(b)に示した。

幅木の高さ率 τ が0~0.7の範囲では、風向角0°の実験結果の方が式(10)より足場の風速係数の値がやや大きい。これは、すでに述べたように、今回の実験に用いた模型の交差筋かいの幅が、文献6)の足場の風力係数の検討に用いた足場の交差筋かいの幅よりも広いためであると考えられることから、式(10)の値は妥当な値であると考えられる。

5. まとめ

本論文では、幅木を取り付けた足場に対して風洞模型実験を行い、その風力について検討した。

実験の結果、規則に沿った高さ15cmの幅木を設置した足場は、幅木がない足場に比べて、1.5倍程度の風力係数を見込む必要があることが分かった。

また、これらの実験結果を基に幅木を取り付けた足場の風力係数の算定式を検討し式(10)のように示した。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 基盤研究(C) No.24510242（代表者：高橋弘樹）の助成を受けました。実験及び実験データの整理には、ものづくり大学（当時）の渡部貴大君の協力を得ました。ここに記して謝意を示します。

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23年度版，2011.
- 3) 労働省産業技術研究所：強風に対する足場等の安全対策，産業安全研究所特別研究報告，1981.
- 4) 茅野紀子：仮設足場設計用の基準風速に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp. 223-224, 1998.
- 5) 吉田正邦、眞田隼早敏、本郷剛、中村修：建設足場に設置された養生シート及び防音パネルに作用する風荷重に関する実験的研究，pp. 129-136, 1980.
- 6) 仮設工業会編：風荷重に対する足場の安全技術指針，2004.
- 7) 丸川比佐夫、大熊武司、寺本隆幸、北村春彦：動的天秤データを利用した高層建築物の時刻歴風力シミュレーションに関する研究，第12回風工学シンポジウム論文集，1988.
- 8) 日本鋼構造協会編：構造物の耐風工学，pp. 89, 1997.

(2013.7.12 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON ESTIMATED METHOD OF WIND FORCE FOR FALL PROTECTION METHOD OF SCAFFOLDS

Hiroki TAKAHASHI, Katsutoshi OHDO, Seiji TAKANASHI and Tetsuo HOJO

The Japanese Industrial Safety and Health Law was revised in March 2009, introducing new measures concerning accidental falls in the construction industry. This revision regulates the use of guard rails, handrails, and other scaffolds components. Wind loads need to be considered when the scaffolds are set up. The wind loads and structural specifications of scaffolds are regulated by current design regulations. However, these provisions do not necessarily comply with the new legal requirements because they were made to apply to old-style scaffolds. A baseboard was used in construction site. In this study, the wind force on the scaffolds, with the height of the baseboard as a parameter, was examined by wind tunnel test. The scaffolds wind force coefficient of scaffolds with a 15cm baseboard is 1.5 times that of the scaffolds without a baseboard. The wind force coefficient should consider the height of the baseboard in the design of the scaffolds. From the results, It should be executed to the new regulations.