

#### 4. 施工環境シミュレータによる風荷重に対する足場の危険性評価

大幢勝利\*, 日野泰道\*, ポンクムシン ソンボル\*\*

#### 4. Hazard Evaluation of Scaffolds against Wind Load Using Construction -Environmental-Simulator Wind Tunnel

by Katsutoshi OHDO\*, Yasumichi HINO\* and Songpol PHONGKUMSING\*\*

**Abstract:** Construction accidents caused by wind frequently happen and the workers are often injured and killed. One important problem that leads to the engineering concern nowadays is the accident of the scaffolds. Temporary scaffolds are typically covered with sound barrier panels or plastic sheets to prevent construction materials and debris from falling from scaffolds. In Japan, the design of scaffolds mainly considers wind loads that are directly acting on the exterior surface of the scaffolds. However, due to these sheets and the wind direction, wind entering the gap between the building and scaffolds through the wall openings, etc. results in significant increase of wind load acting on the scaffolds. The increase of wind pressures can affect the stability of the scaffolds and lead to the total collapse of the large scale scaffolds which can cause injury or loss of life as well as economic loss and construction time delay.

In this study, a series of wind tunnel experiments using the Construction-Environmental-Simulator was conducted to measure the wind pressures acting on the 1/150 scale 0% porosity simplified scaffolds models. As a first step, a building model without opening was used and a uniform wind condition was considered. Based on the wind tunnel experimental results, the wind direction that caused the maximum pressure was identified. Moreover, there were high pressures around the connection corner of the front and side panels of the scaffolds in a certain case that wind was not directly acting on the scaffolds. This is because there were high pressures acting on the inner surface of the scaffolds that face the building model due to wind that entered the gap between the building and scaffolds. Thus, the wind pressures acting on the scaffolds are greatly influenced by the existence of the building.

An analysis for the hazard evaluation of scaffold was also performed to ascertain the probability of scaffold collapse. The probability of scaffold system failure was found to be sensitive to the wind speed and direction. In a certain wind direction, there was a high risk caused by the pressure due to wind blowing behind the building and scaffolds.

**Keywords;** Wind tunnel experiment, Reliability analysis, Scaffolds, Structural system

---

\* 建設安全研究グループ Construction Safety Research Group

\*\* 科学技術振興事業団 重点研究支援協力員 Supporting Staff for Priority Research, Japan Science and Technology Corporation

## 1. はじめに

建設工事で使用される足場は、メッシュシート等により囲まれているため、風荷重に対する安定性が問題となっており、実際に強風時に多くの倒壊災害が発生している。これらの中には、大規模な足場が倒壊した事例もあり、多数の死傷者を出す災害に発展したこともある。このような倒壊災害について検討すると、構造物と足場の隙間に吹き込んだ風により、足場の背面に作用する風圧力が増大し倒壊したと思われる事例が多く見られる。

これまでの筆者らの研究<sup>1)</sup>や技術指針<sup>2)</sup>では、足場の前面からの風荷重に対する安全性について検討されている。しかし、このような足場の背面に作用する風荷重については特殊な例を除いて検討されていない。これは、足場に作用する風圧力に関する研究があまり行われておらず、一部の実験データ<sup>3)</sup>しか得られていないためである。

そこで、本研究では、施工環境シミュレータを用いて、足場の設置状況や風向の変化等を考慮した風洞実験を行い、足場に作用する風圧力を測定した。その結果を基に、足場の危険性を評価するために開発した手法<sup>1)</sup>を用いて信頼性解析を行い、足場の背面に作用する風荷重の影響について検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 施工環境シミュレータ

本研究では、Fig. 1 に示す施工環境シミュレータ

を使用して風洞実験を行った。本シミュレータは、回流式の境界層風洞で、Fig. 1 に示すように二つの測定胴がある。第一測定胴は構造物の模型を対象にした風洞実験を行うためのものであり、第二測定胴は施工時の作業環境など、人間を対象にした実験を行うためのものである。

本研究では、両者のうち模型実験を行うための第一測定胴を使用した。第一測定胴は、幅 2.3 m、高さ 2.0 m で、最大 25 m/s の風速を発生させることができるものである。

### 2.2 実験概要

風洞実験は、足場の背面に作用する風荷重の影響について基本的なデータを得ることを目的として、Fig. 2 に示すように建物の形状は一定で、三種類の足場の設置状況について行った。

本研究で使用した足場と建物の模型は縮尺 1/150 で、建物の高さは 126 mm、短辺方向の幅は 128 mm、長辺方向は 248 mm であり、建物には開口部がないものとした。また、足場の設置状況は Fig. 2 に示すように次の三種類とした。

Type1：足場が建物の短辺方向に併設してある場合  
(足場A)

Type2：足場が建物の長辺方向に併設してある場合  
(足場B)

Type3：足場Aと足場Bを組み合わせて、建物の短辺と長辺の両方に足場が併設してある場合

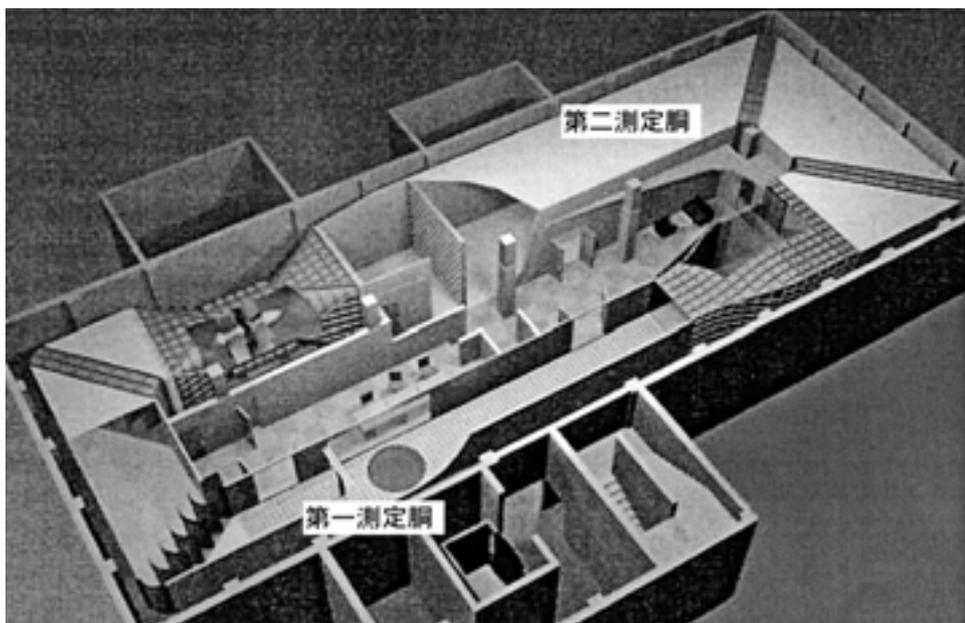


Fig. 1 Constructon-Environmental-Simulator.  
施工環境シミュレータ

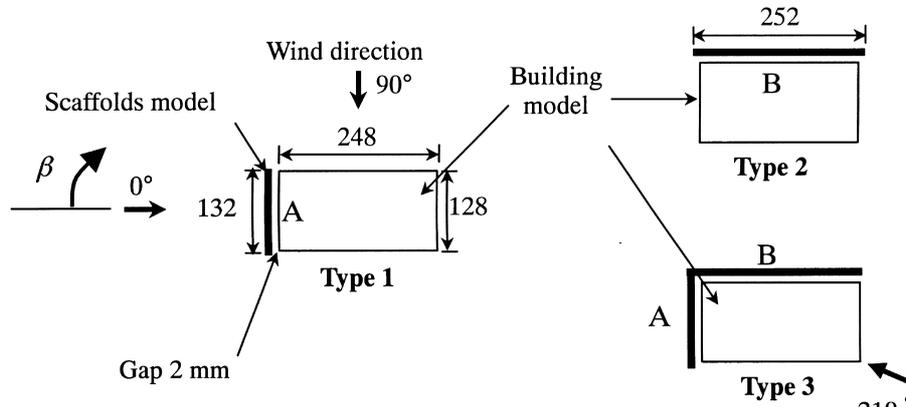


Fig. 2 Experimental configuration (mm).  
実験概要 (mm)

足場は、防音パネル等で覆われて風荷重が最も大きな場合として、充実率が100%で全く穴がないものとした。足場の寸法は建物の寸法より幅で4mm、高さで6mm大きくし、足場Aの幅は132mm、高さ132mm、厚さ7mm、足場Bの幅は252mm、高さ132mm、厚さ7mmとした。また、足場と建物の間隔は2mmとした。

足場と建物の模型は第一測定胴のターンテーブル中央に設置し、このターンテーブルを回転させることによって、Fig. 2に示す足場と建物に作用する風向を変化させた。また、風速の乱れの影響などを排除し、一様流下で基本的なデータを得るために、ターンテーブルを測定胴の床面から0.65mの高さに設置した。これは、ターンテーブルを測定胴の床面と同じ高さに設置した場合、床面の摩擦の影響により風速に大きな乱れが生じるためである。Fig. 3は、この状態におけるターンテーブルからの高さで風速及び乱れの強さの関係を示したものである。Fig. 3より、風速が一定(10m/s)となる境界層高さは35mmで、50mmより上方での乱れの強さは1%以下であった。

実験では、足場Aに片側16箇所(両側で32箇所)、足場Bに片側32箇所(両側で64箇所)の圧力チューブを埋め込み、その差圧により足場に作用する風圧を求めた。風速はFig. 3と同様に10m/sとして、Fig. 2に示す風向を0~360°の範囲で30°刻みに変化させて、それぞれの風向ごとにType 1, 2, 3の足場に作用する風圧力を5回づつ測定した。また、実験データのサンプリング周波数は256Hzで、測定時間は30秒間とした。

### 3. 解析方法

#### 3.1 解析モデル

足場には部分的に大きな風荷重が作用するが、そ

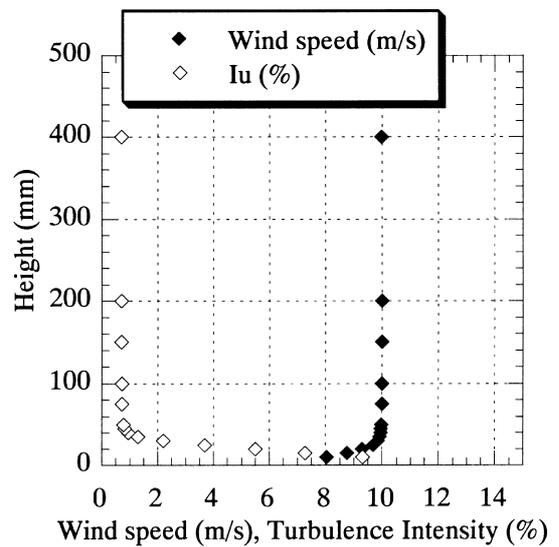


Fig. 3 Wind and Turbulence Intensity profile.  
風速と乱れの強さの高さ方向分布

の部分是最も破壊しやすいものと考えられる。そこで、風洞実験で大きな風圧が作用する部分の破壊確率を計算することとして、Fig. 4に示すように11層×11スパンの骨組み構造としてモデル化した。この解析モデルは、足場Aにほぼ相当する大きさである。Fig. 4には、壁つなぎの取り付け位置が示してあるが、本解析では2層2スパン毎に取り付けられているものとして解析した。

#### 3.2 風荷重

風荷重 $P$ は次に示す式(1)より算定した。

$$P = \frac{1}{2} \rho U^2 A C G \quad (1)$$

ここで、

$\rho$  : 空気密度

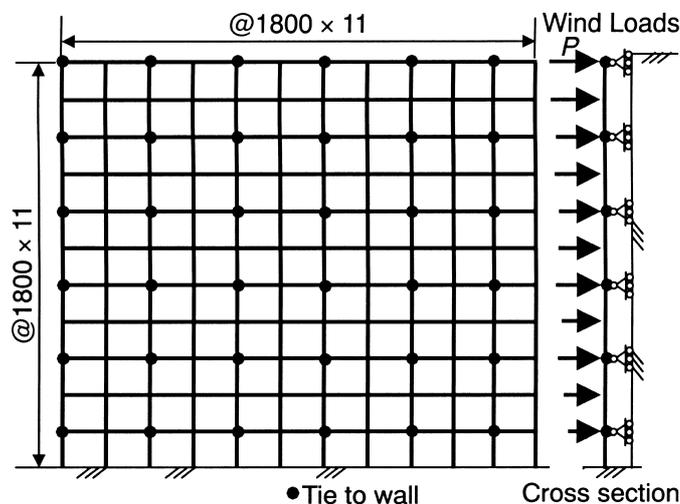


Fig. 4 Analysis model.  
解析モデル

$U$  : ( $=U_0 \cdot E$ ) 平均風速

$U_0$  : 最大風速 (10 分間平均) の期待値

$E$  : 風速の鉛直分布係数

$A$  : 風圧の受圧面積

$C$  : 平均風力係数

$G$  : ガスト影響係数

$U_0$  は、10 分間平均風速の月最大値の分布が Gumbel 分布に従うものとして、足場の供用期間より再現期間 12 ヶ月の場合について求められており<sup>4)</sup>、地域毎に異なるが 14 ~ 20 m/s の範囲にある。 $U_0$  の変動係数は、平均的なものとして 0.21 とした。平均風力係数  $C$  および  $C$  の変動係数は、風洞実験の結果から求めた値を使用することとした。また、ガスト影響係数  $G$  はガスト応答解析<sup>5)</sup> より求め、式 (1) に代入することにより、平均風力に変動荷重を加えた等価静的荷重として解析モデルに与えた。

### 3.3 部材強度

風荷重によって影響を受ける部材は支柱と壁つなぎであるが、本解析では支柱に比べ破壊確率の高い、壁つなぎについてのみ強度を検討することとした<sup>6)</sup>。その際、仮設機材構造基準<sup>7)</sup> を参考に、壁つなぎの平均強度を 9810N、強度のばらつきに対する変動係数を 10% とした。

### 3.4 信頼性解析

信頼性解析は以下の手順により行った。<sup>1)</sup>

(1) 強風に対する足場の現行の設計方法に基づき、足場に作用する平均風力を求める。

(2) 解析モデルに対しガスト応答解析を行い、平均風力に変動荷重を加えた等価静的荷重を求める。

(3) 解析モデルに等価静的荷重を与えて壁つなぎに生じる軸力を求め、FORM (1 次信頼性解析法) により破壊確率を求める。

(4)  $\beta$ -unzipping 法により卓越した破壊モードを求める。

(5) 各破壊モードを並・直列システムで表し、構造システム全体の破壊確率<sup>8), 9)</sup> を求める。

## 4. 風洞実験結果

風洞実験により測定した風圧力を用いて、以下に示す式 (2) より足場に作用する平均風圧係数  $C_p$  を求めた<sup>10)</sup>。

$$C_p = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{ref}} \quad (2)$$

ここで、

$P_{in}$  : 足場の背面 (建物側) に作用する平均風圧

$P_{out}$  : 足場の前面 (外側) に作用する平均風圧

$P_{ref}$  : 境界層より上方に設置したピトー管の平均風圧

式 (2) より求めた平均風圧係数  $C_p$  の中で、正と負の最大値が現れた風向における  $C_p$  の分布を、足場の設置状況 Type 1, 2, 3, 毎に Fig. 5 ~ Fig. 7 に示す。同図は、足場の前面に作用する風圧 (足場を建物側に倒す方向の風圧) を正、足場の背面に作用する風圧 (足場を建物と反対側に倒す方向の風圧) を負として、足場を外側からみたものである。また、図中の縦軸と横軸は、それぞれ足場模型の高さと幅を 1 として基準化したものである。

正負の最大値は、図中に斜線で示した場所に現れ

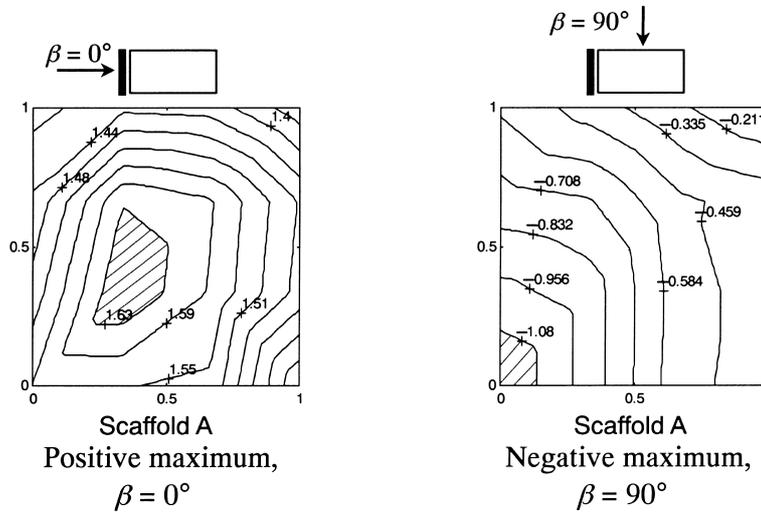


Fig. 5 Maximum case of  $C_p$  for Type 1 scaffolds.  
Type 1 の足場で  $C_p$  の最大値が現れたケース

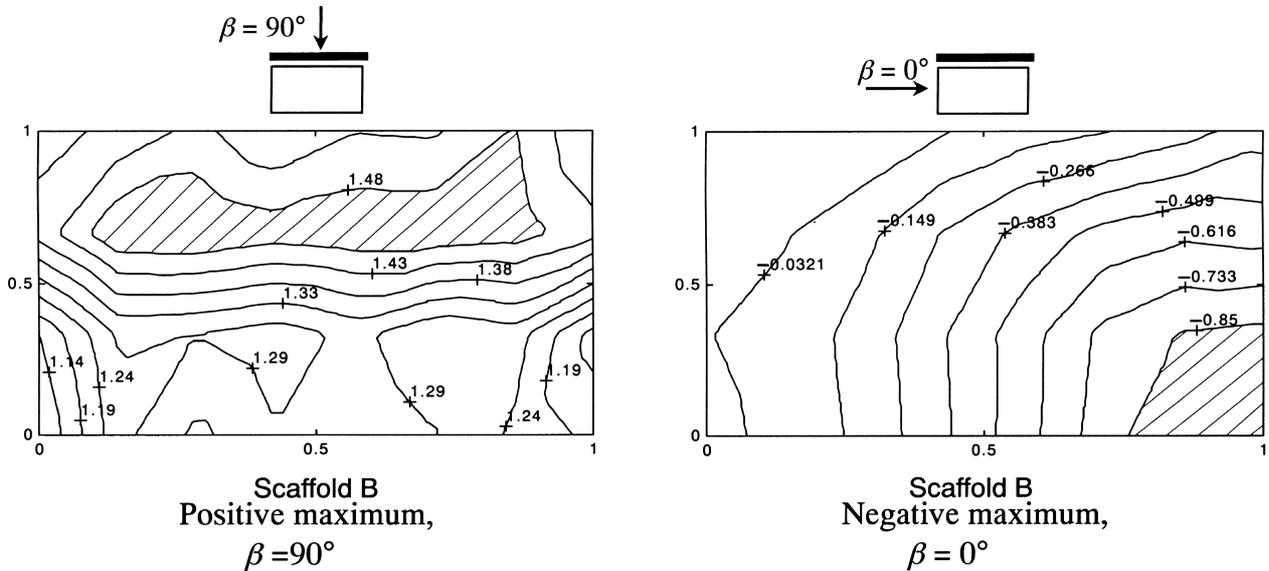


Fig. 6 Maximum case of  $C_p$  for Type 2 scaffolds.  
Type 2 の足場で  $C_p$  の最大値が現れたケース

た。Type 1 ではFig. 5より、正圧の最大値が $\beta = 0^\circ$ で中央付近に、負圧の最大値が $\beta = 90^\circ$ で左下隅にそれぞれ現れた。Type 2 ではFig. 6より、正圧の最大値が $\beta = 90^\circ$ で中央上部に、負圧の最大値が $\beta = 0^\circ$ で右下隅にそれぞれ現れた。Type 3 ではFig. 7より、正圧の最大値が $\beta = 0^\circ$ で足場Aの中央付近に、負圧の最大値が $\beta = 270^\circ$ で足場Aの右下隅にそれぞれ現れた。正と負の絶対値を比較すると、Type 1, 2, 3, とも正の最大値の方が大きくなった。Type 1, 2, 3, での比較では、Type 2 に比べType 1, 3 の方が平均風圧の最大値が正負とも大きく、特に足場 A に作用する風圧が大きかった。

また、Fig. 8 はType 3 で風向が $\beta = 210^\circ$ の時の平

均風圧係数 $C_p$ の分布を示したものである。この時、風向から考えると足場には風が直接当たらないが、足場AとBを接続するコーナー部分中央において、足場Aに大きな負の風圧が生じていた。この場所での平均風圧の絶対値は、Type 3 においては負の最大値である $\beta = 270^\circ$ の時に次いで大きなものであった。これは、足場と建物の隙間から吹き込んだ風が足場のコーナー部分に溜まったためであり、その結果としてコーナー部分で足場の背面に大きな風圧 ( $P_{in}$ ) が生じたためである。

現行の設計方法を示した技術指針<sup>2)</sup>では、足場に風が直接当たる場合の風荷重について、主に検討することとされている。しかし、本研究で行った施工

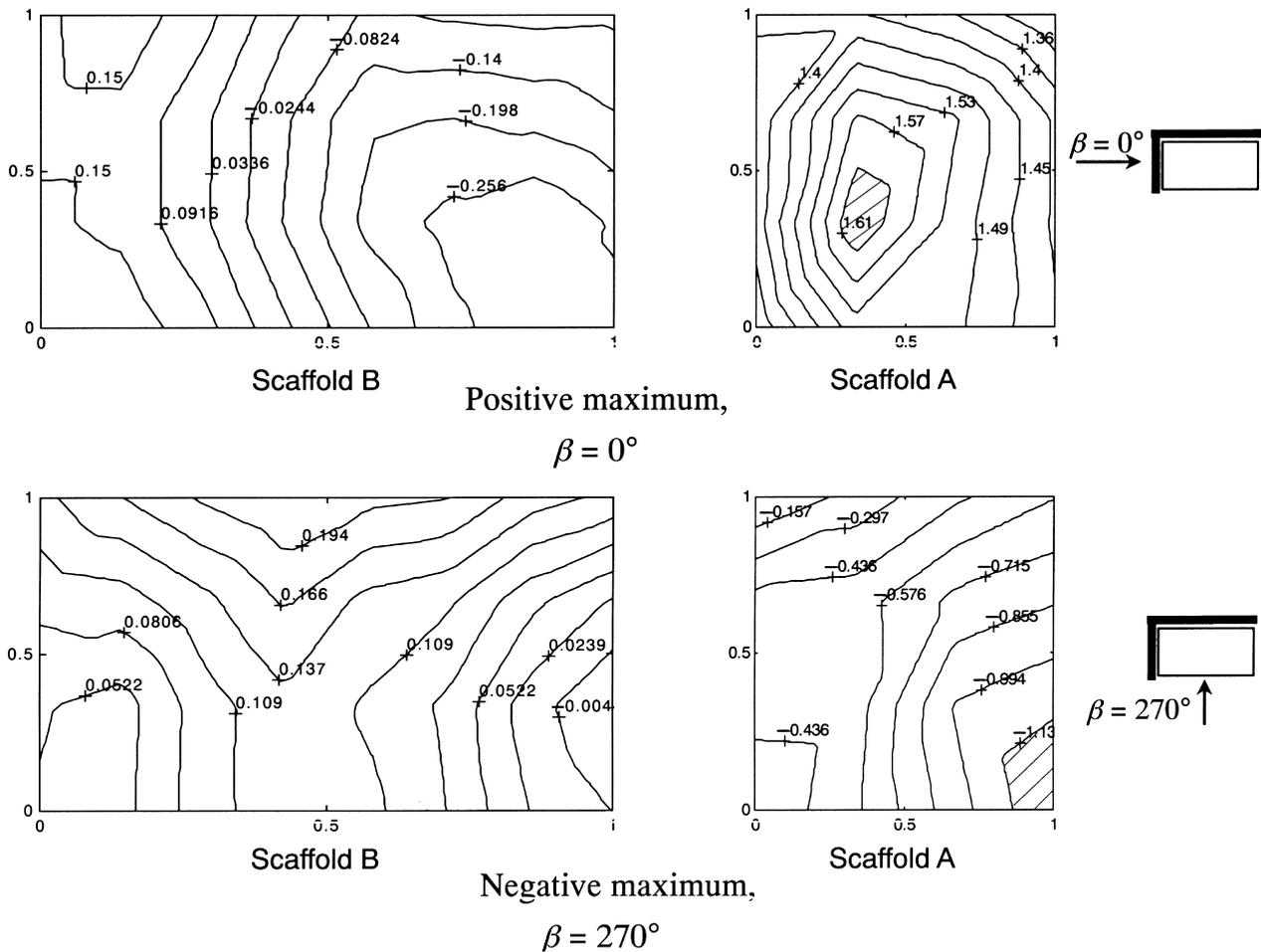


Fig. 7 Maximum case of  $C_p$  for Type 3 scaffolds.  
Type 3 の足場で  $C_p$  の最大値が現れたケース

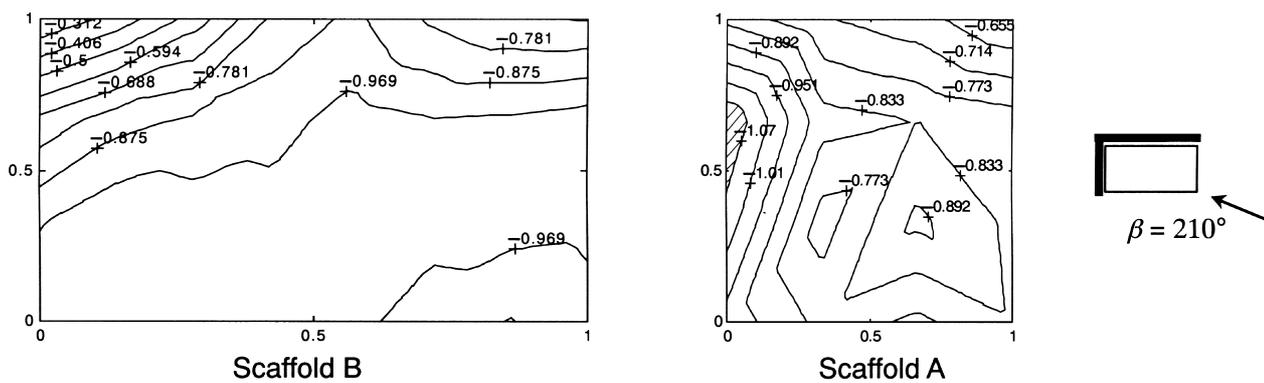


Fig. 8 Distribution of  $C_p$  on Type 3 scaffolds for  $\beta = 210^\circ$   
(The case that wind is not directly acting on the scaffolds)  
Type 3 で  $\beta = 210^\circ$  の時の  $C_p$  の分布  
(足場に風が直接当たらない場合)

環境シミュレータを用いた風洞実験により、足場に風が直接当たらない場合でも、足場と建物の隙間から吹き込む風により、足場背面に大きな風圧が生じる場合もあることがわかった。

### 5. 解析結果

風洞実験で測定した平均風圧係数  $C_p$  を用いて信頼性解析を行った。式 (1) の平均風力係数  $C$  は、

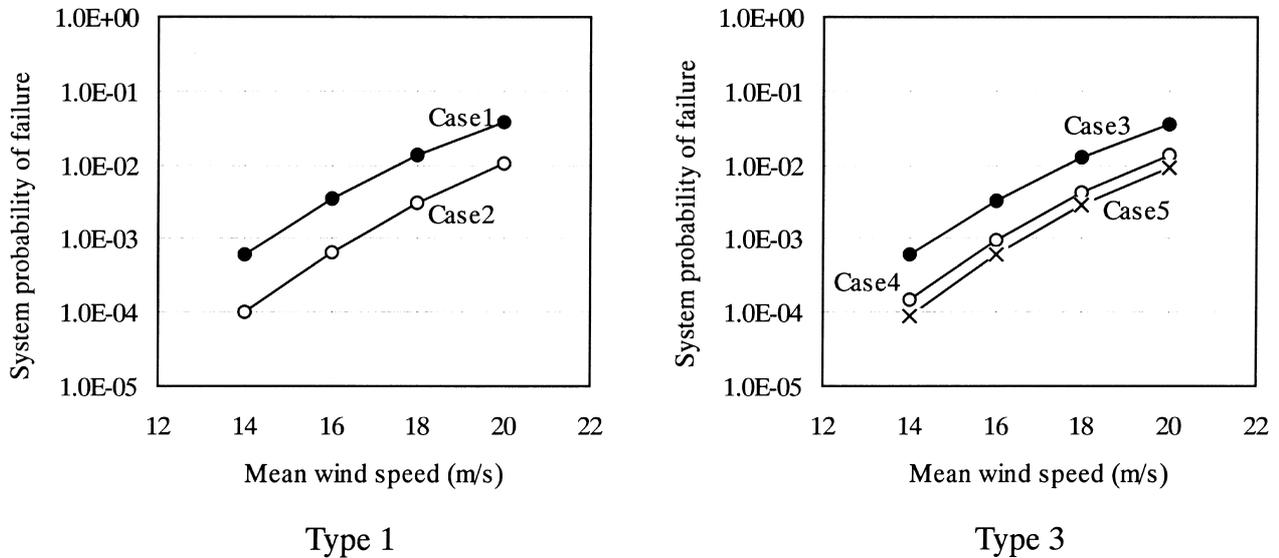


Fig. 9 Results of reliability analysis.  
信頼性解析結果

$C_p$ に分担する面積を乗じたものであるが、面積は一定のため  $C_p$  を  $C$  として計算した。解析は、風洞実験の結果より大きな風圧が作用していたType 1 と Type 3 の足場Aに対し、以下の5 ケースについて行った。

- Case1: Type 1 で足場に作用する正の平均風圧 (足場前面からの風圧) が最大値となった, 風向が  $\beta = 0^\circ$  の場合
- Case2: Type 1 で足場に作用する負の平均風圧 (足場背面からの風圧) が最大値となった, 風向が  $\beta = 90^\circ$  の場合
- Case3: Type 3 で足場に作用する正の平均風圧 (足場前面からの風圧) が最大値となった, 風向が  $\beta = 0^\circ$  の場合
- Case4: Type 3 で足場に作用する負の平均風圧 (足場背面からの風圧) が最大値となった, 風向が  $\beta = 270^\circ$  の場合
- Case5: Type 3 で足場に直接風が当たらないが足場の背面に作用する風圧が比較的大きくなった, 風向が  $\beta = 210^\circ$  の場合

解析では、現行の設計方法に基づく平均風速 (設計風速, 14 ~ 20 m/s) 毎に各ケースのシステム破壊確率を求めたが、その結果をFig. 9 に示す<sup>11)</sup>。図中の●点は足場前面からの風圧 (case 1, case 3) に対する足場の破壊確率を、○点は足場背面からの風圧 (case 2, case 4) に対する破壊確率を示すが、背面からの風圧に比べ前面からの風圧に対する破壊確率の方が高く、足場の倒壊に対する危険性が高いと考えられる。しかし、case 2 およびcase 4 でも平

均風速が 20 m/sの時に破壊確率が高く $10^{-2}$  を超えているため、足場の背面からの風圧に対しても壁つなぎの配置や強度等を確認する必要がある。

一方、Fig. 9 の右図の×点は、足場に直接風が当たらないが足場の背面に作用する風圧が比較的大きな場合 (case 5) の破壊確率を示すが、case 4 と同様に平均風速が 20 m/sの時に破壊確率が高くなった。よって、足場に直接風が当たらない場合でも、足場と建物の隙間に吹き込む風により足場が倒壊する危険性があるため、足場の設置状況や風向・風速を考慮した安全対策を行う必要がある。

## 6. まとめ

施工環境シミュレータを用いた風洞実験と信頼性解析により、風による足場の倒壊危険性を評価した。その結果以下のことがわかった。

- 1) 施工環境シミュレータを用いた風洞実験により、足場に風が直接当たらない場合でも、足場と建物の隙間から吹き込む風により、足場背面に大きな風圧が生じる場合もあることがわかった。
- 2) 風洞実験の結果を基に信頼性解析を行い、足場の倒壊危険性を評価した結果、本研究の条件下での足場は、背面からの風圧に比べ前面からの風圧に対する破壊確率の方が高く、倒壊に対する危険性が高いと考えられる。
- 3) 一方、信頼性解析は足場に直接風が作用しない場合についても行った。その結果、風洞実験で明らかになった足場背面に作用する大きな風圧により、倒壊に対する危険性が高くなることがわかった。よ

って、足場と建物の隙間に吹き込む風により足場が倒壊する危険性があるため、足場の設置状況や風向・風速を考慮した安全対策を行う必要がある。

#### 参考文献

- 1) 大幢勝利, 日野泰道, 米山義範; 風による足場の倒壊に関する危険性評価, NIIS-SRR-No.21, 2000.
- 2) 風荷重に対する足場の安全技術指針, 仮設工業会, 1999.
- 3) 吉田正邦, 眞田早敏, 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, 鹿島建設技術研究所年報, 第28号, pp.129-136, 1980.
- 4) 茅野紀子; 仮設足場設計用の基準風速に関する検討, 建築学会大会梗概集, 1998.
- 5) 大幢勝利; 風が建設工事の施工性に及ぼす影響, 東京大学大学院博士論文, 2000.
- 6) Ohdo, K. and Kareem, A.; Risk Assessment of Scaffolding System during Construction under Wind Storms, Proceedings of 8th International Conference on Applications of Statistics and Probability, 1999.
- 7) 仮設機材構造基準とその解説, 仮設工業会, 1998.
- 8) Thoft-Christensen, P. and Murotsu, Y.; Application of Structural Systems Reliability Theory, Springer-Verlag, 1986.
- 9) 白石成人他; 構造物のライフタイムリスクの評価, 土木学会, 1988.
- 10) Phongkumsing, S. and Ohdo, K.; Wind Tunnel Experiment on Wind Pressure Acting on The Shielding Scaffolds, Proceedings of 57th JSCE Annual Conference, 2002.
- 11) Ohdo, K. and Phongkumsing, S.; Study on Safety of Scaffolds against Wind Pressure Acting behind Scaffolds, Proceedings of 57th JSCE Annual Conference, 2002.

(平成 14 年 8 月 9 日受理)