

# 風荷重が作用する枠組足場の OpenFOAMとASI-Gauss法を用いた片方向連成解析

One-way Coupled Analysis of Prefabricated Scaffolds under Wind Loads  
using OpenFOAM and ASI-Gauss Code

多湖拓海<sup>1)</sup>, 磯部大吾郎<sup>2)</sup>

Takumi Tago and Daigoro Isobe

1) 筑波大学 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: tago.takumi.tp@alumni.tsukuba.ac.jp)

2) 博(工) 筑波大学 教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

In this paper, numerical evaluation on displacement of prefabricated scaffolds and axial force of wall ties are conducted under wind loads calculated from fluid analysis and the safety technical guidelines of prefabricated scaffolds. OpenFOAM, which is an open-source numerical solver, is used for fluid analysis. The Adaptively Shifted Integration (ASI)-Gauss code, which can stably calculate nonlinear phenomena such as member fracture, is used as a structural analysis code in this research. As a result, the fluid analysis revealed that even if prefabricated scaffolds were safe under the safety technical guidelines, the wind loads caused by the complex flow effects might lead to the collapse.

**Key Words :** Prefabricated Scaffolds, Wind Loads, ASI-Gauss Code, OpenFOAM

## 1. 序論

建設・解体現場には、建物に近接して作業が行えるように足場が設置されている。足場には多くの場合、養生シートや防音パネルが取り付けられている。しかし、これらのシート類によって風の受圧面積が増加することで足場に掛かる風荷重が増大し、足場を建物外壁面に固定する壁つなぎが引き抜かれ、倒壊に至る事例が起きている[1]。

足場を組み立てる際、その設計指針として風荷重に対する足場の安全技術指針[2]は示されているが、構造物周囲に発生する渦や剥離流といった、複雑な流れによって作用する風荷重に対する足場の安全性については不明瞭な点が多く、そのような場合の足場の挙動を評価することは、その安全性向上に際して極めて重要であると考えられる。

そこで本研究では、まず建物に併設された5層4スパンの枠組足場に対し流体解析を行い、枠組足場に作用する風荷重を算出する。流体解析結果から得られた風荷重と、風荷重に対する足場の安全技術指針をもとに得られた風荷重をそれぞれ外力とし構造解析を行い、枠組足場の変位および壁つなぎの軸力を比較する。流体解析には、オープンソースの流体解析ソルバーであるOpenFOAM[3]を用いる。構造解析には、最小限の要素分割で大規模構造物を解析することが可能であるASI-Gauss法[4]を用いる。

## 2. 安全技術指針による風荷重の算定方法

安全技術指針[2]において、足場に作用する風荷重 $P$ は次式で計算される。

$$P = C_i q_z A \quad (1)$$

ここで、 $C_i$ ,  $q_z$ ,  $A$ はそれぞれ風力係数、速度圧 [N/m<sup>2</sup>],

作用面積 [m<sup>2</sup>]である。速度圧は空気密度 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]と高さ $z$  [mm]における風速 $V_z$  [m/s]から次式で与えられる。

$$q_z = \frac{1}{2} \rho V_z^2 \quad (2)$$

$$V_z = V_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^\alpha \quad (3)$$

ここで、 $z_0$ ,  $V_0$ ,  $\alpha$ はそれぞれ基準高さ [m], 基準高さにおける風速 [m/s], 風速の鉛直分布を表すべき指数である。

風力係数は、風洞実験結果による平均風力係数 $\bar{C}$ と建築物に併設された足場の設置位置による補正倍率を用いて決定する。建築物に併設された足場の設置位置による補正は、風荷重の方向、足場に取り付けられたシート等の位置によって値が決まる。本研究で対象とする5層4スパンの枠組足場の風力係数を例にすると、風が側面側から流入した場合の風力係数は図-1のようになる。

以上のように、安全技術指針では速度圧、風力係数、作用面積から風荷重を算出している。しかしながら、安全技術指針は、構造物周辺に生じる渦や剥離流のような複雑な流れは考慮されていない。特に、風が構造物の側面側から流入するような場合には、建物に設置された足場は剥

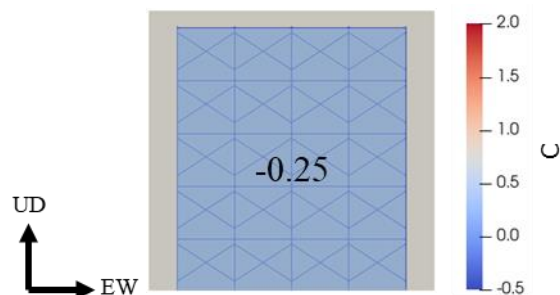


図-1 風が側面側から流入した場合の風力係数

離流の影響を受けやすく、想定されるべき風荷重を算出できないという問題点が考えられる。

### 3. 風荷重が作用する枠組足場の数値解析

#### (1) 解析モデル

##### a) 流体解析モデル

流体解析モデルの概観を図-2に示す。解析領域は一辺20,000 [mm]の立方体である。一辺9,000 [mm]の立方体を建物に模擬し、建物一足場間のクリアランスを250 [mm]とし、5層4スパンの枠組足場を設置している。枠組足場の寸法は、高さ8,500 [mm]、幅7,200 [mm]、奥行き900 [mm]である。枠組足場の脚柱および横架材の断面は、メッシュ化のしやすさを考慮し、一辺48.6 [mm]の正方形断面としている。枠組足場の前面に取り付けられたシートは空隙のないものとし、シートの厚さは2 [mm]としている。総セル数は37,648,304である。

##### b) 構造解析モデル

構造解析モデルの概観を図-3に示す。枠組足場の寸法は、流体解析モデルと同様、高さ8,500 [mm]、幅7,200 [mm]、奥行き900 [mm]である。建柱と床付き布柱、建柱と交差筋かい、建柱と壁つなぎの結合部はピン接合としている。床付き布柱の質量を25 [kg]とし、部材の密度を調整することで表現している。次に、風荷重を作用させる構造節点の位置を図-4に示す。便宜上、風荷重を作用させる構造節点を左下から右上にかけて「0-0, 0-1, …, 5-4」と定義

する。壁つなぎの本数は全部で10本とし、図-5のように枠組足場の両端の各層に取り付ける。なお、壁つなぎの番号は、風荷重を作用させる構造節点の番号と統一している。この取り付け間隔は、労働安全衛生規則[5]で定められた層方向5層以内、スパン方向4スパン以内という条件を満たしている。壁つなぎが外壁面から引き抜かれることを表現するために、壁つなぎに2,000 [N]の引張軸力が作用したら破断させる[6]。また、建柱間についても引き抜きを考慮して、微小要素に9,807 [N]の引張軸力が作用したら破断させる[7]。構造解析では、シートのモデル化はしていないが、シートの単位面積当たりの質量を1.2 [kg/m<sup>2</sup>]とし、枠組足場のシートを取り付ける側に密度として加えることで重量のみ考慮している。最下層の脚柱下端の拘束条件は、最も危険と考えられるピン接合、壁つなぎは完全拘

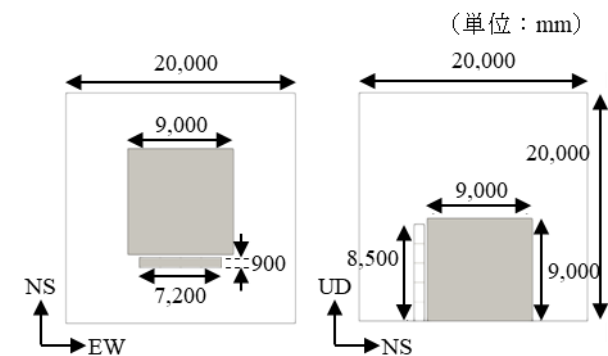


図-2 流体解析モデル

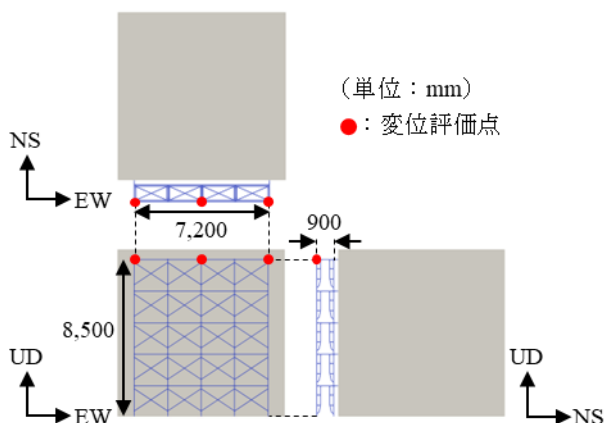


図-3 構造解析モデル

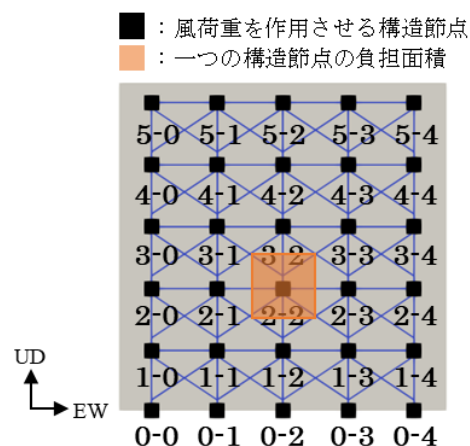


図-4 風荷重を作用させる構造節点

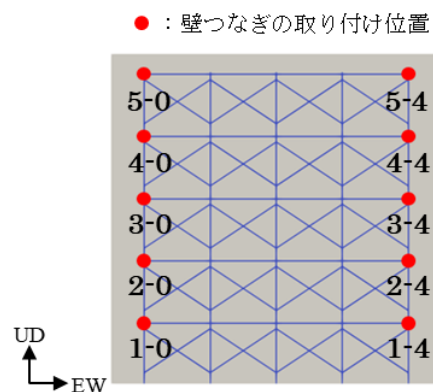


図-5 壁つなぎの取り付け位置

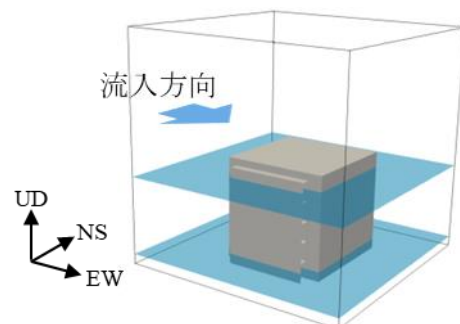


図-6 流入方向および切断面

束としている。

## (2) 解析条件

### a) 流体解析条件

流体解析の条件について記す。境界条件は、地表面および構造物表面には滑りなし条件、解析領域側面および上面には対称条件を適用している。

流入条件には、風速の高さ方向分布を導入し、高さ $z$ における風速 $U_z$ は次式で表されるものを与える。

$$U_z = U_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^\alpha \quad (4)$$

ここで、 $z_0$ 、 $U_0$ 、 $\alpha$ はそれぞれ基準高さ、基準高さにおける風速、べき指数である。本解析では、 $z_0 = 10$  [m]、 $U_0 = 30$  [m/s]とする。べき指数は、4~9 階の中層建築物が主となる地域を仮定して、 $\alpha = 0.27$ とする。

図-6に示すように構造物の側面から風を流入させる。乱流モデルにはRNG  $k$ - $\varepsilon$ モデルを用い、時間増分を0.001 [s]とし、8 [s]の解析を実施する。

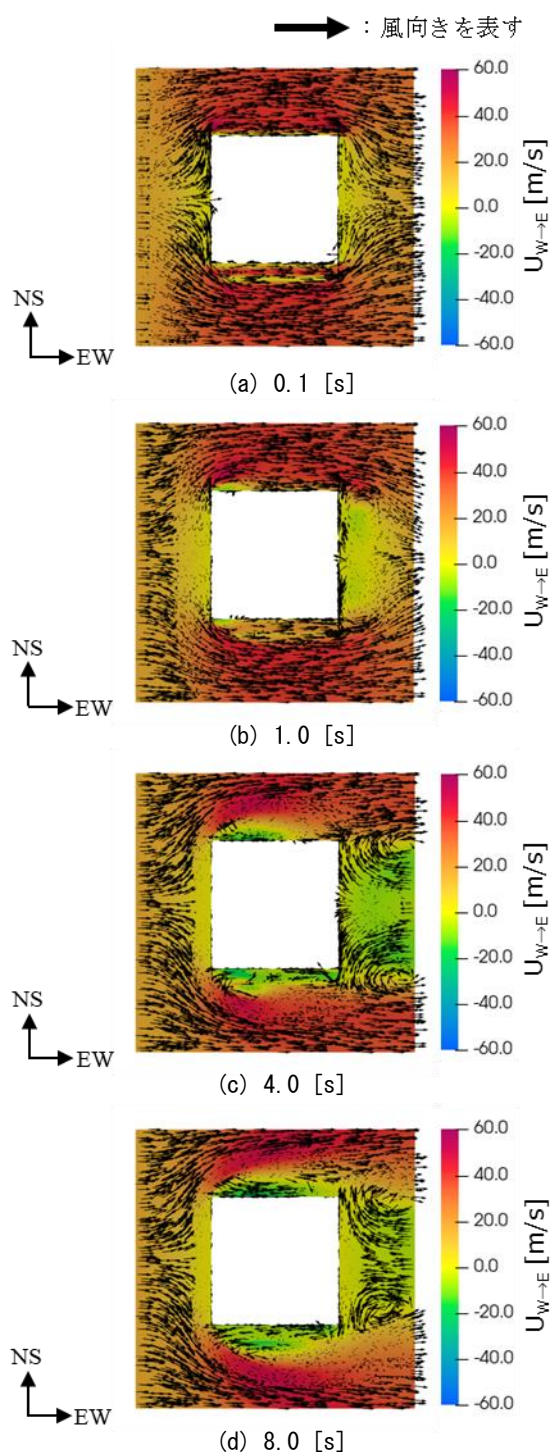


図-7 各時刻における風速分布  
(EW 方向, 高さ 850 [mm])

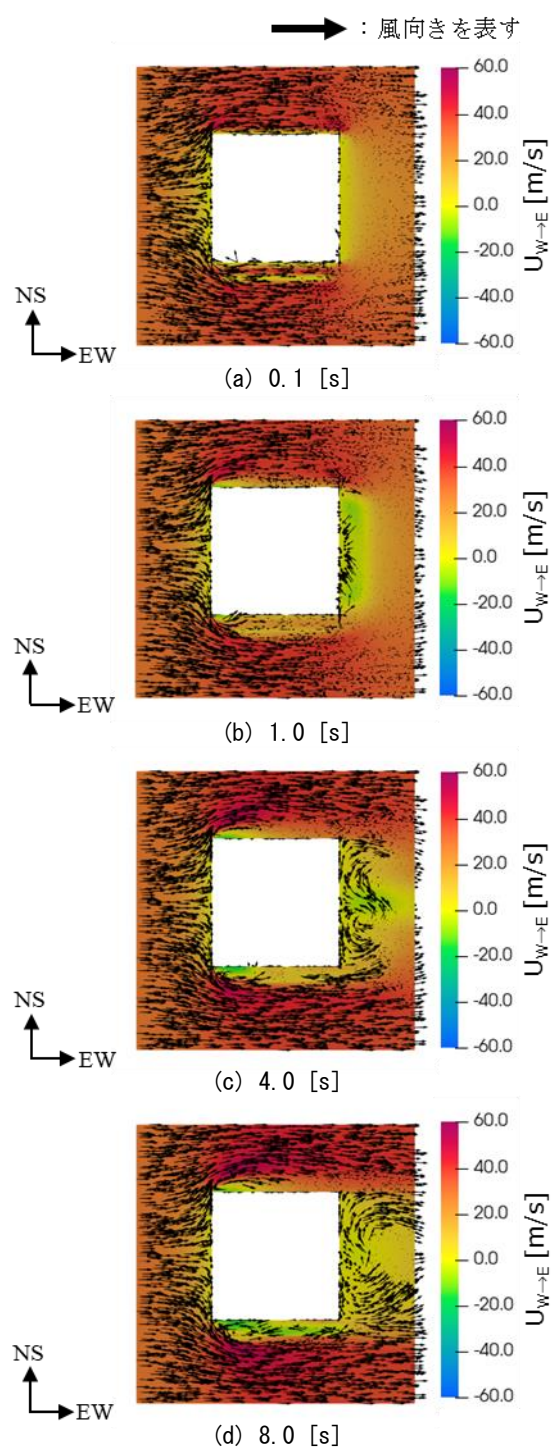


図-8 各時刻における風速分布  
(EW 方向, 高さ 7,650 [mm])



## b) 構造解析条件

流体解析から得られた流体節点*i*における圧力 $p_i$ を基に、構造節点*j*に作用する風荷重 $F_j$ を算出し、風荷重の時刻歴波形を作成する。構造節点*j*に作用する風荷重 $F_j$ は、次式を用いて算出する。

$$F_j = \int_{A_i} p \, dA \approx p_1 A_1 + \dots + p_{n_i} A_{n_i} = \frac{A_j}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} p_i \quad (5)$$

ここで、 $A_j$ 、 $n_j$ はそれぞれ構造節点*j*の作用面積、 $A_j$ 内に存在する流体節点*i*の総数である。時間増分を 0.001 [s]とし、8 [s]の解析を実施する。

## (3) 解析結果

## a) 流体解析結果

図-6の切断面における風速分布を図-7および図-8に示す。図-7および図-8から、解析開始直後、剥離流が形成される前に枠組足場と建物の間に風が流入しているのが確認できる。その後、建物および足場の風上側から剥離流が形成され、時間とともに風下側へ広がる。上層よりも中層以下の方が剥離流は顕著であり、剥離領域が広がっている。シートの表面側および裏面側の気圧分布を図-9および図-10に示す。図-9から、シート表面側の気圧は、時間

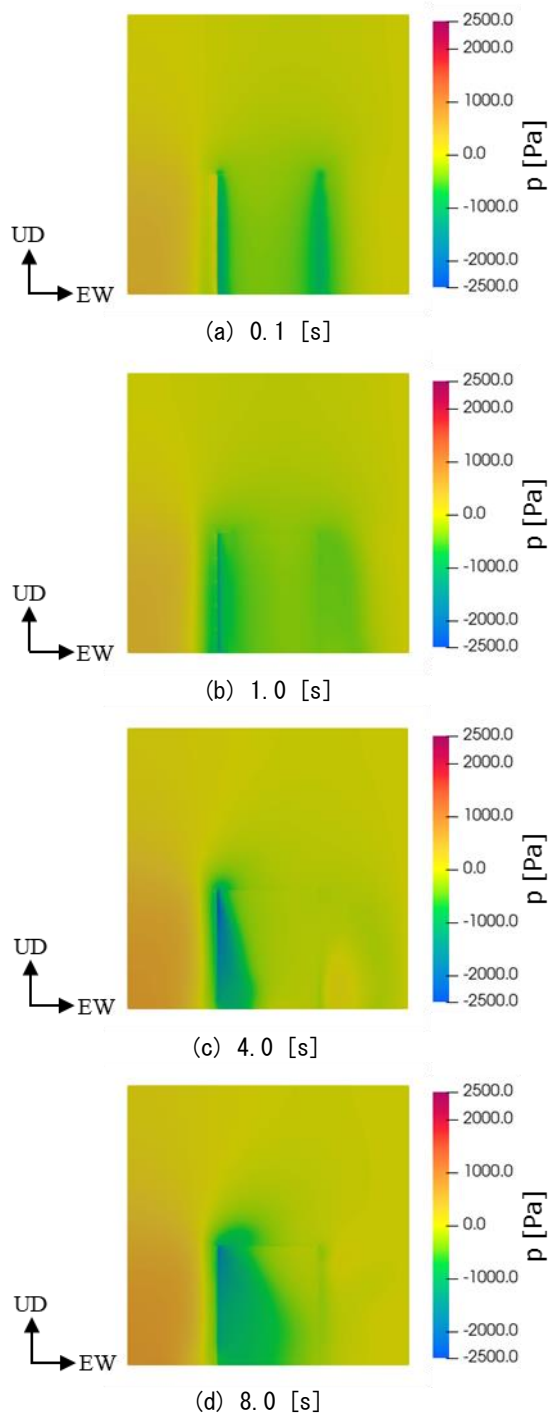


図-9 各時刻における圧力分布（シート表面側）

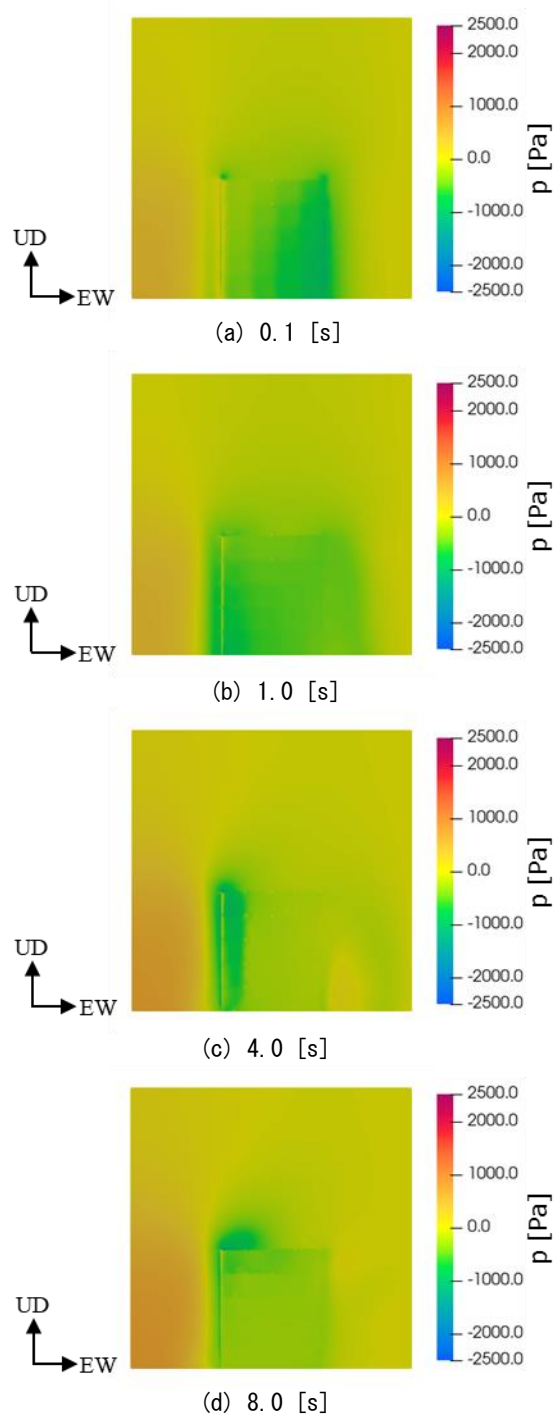


図-10 各時刻における圧力分布（シート裏面側）

とともに風上から風下へ負圧となっていくことが分かる。上層よりも中層以下の方が負圧の広がる範囲が大きい、これは中層以下の方は剥離領域が広いからだと考えられる。一方、図-10から、シート裏面側の気圧は解析開始直後に風上側で渦が発生することで負圧となるが、時間とともに渦が消滅し、次第に落ち着いていくことが分かる。

#### b) 構造解析結果

風荷重の時刻歴波形を図-11に示す。構造解析の可視化結果、壁つなぎに作用する軸力の時刻歴波形、枠組足場最上部におけるNS方向変位をそれぞれ図-12～図-14に示す。2.0 [s]以降から風上側の1～3層に取り付けてある壁つなぎの軸力が特に大きくなり、3.5 [s]付近で1→2→3→4→5

層の順で連鎖的に壁つなぎが引き抜かれた。これは、枠組足場の中層以下の方が剥離領域が広く、枠組足場が建物から引き剥がされる方向に風荷重が大きくなったからである。その後、5.0 [s]付近で風下側の壁つなぎも引き抜かれ、枠組足場が倒壊に至り、非常に危険な状態となった。このように剥離流の影響を大きく受けると想定される場合、足場の中層以下から壁つなぎが引き抜かれる可能性が考えられる。本研究で解析対象とした5層4スパンの枠組足場においては、3層以下の中低層部を補強するのが効果的である。

#### (4) 安全技術指針との比較

安全技術指針から算出される風荷重の時刻歴波形、壁

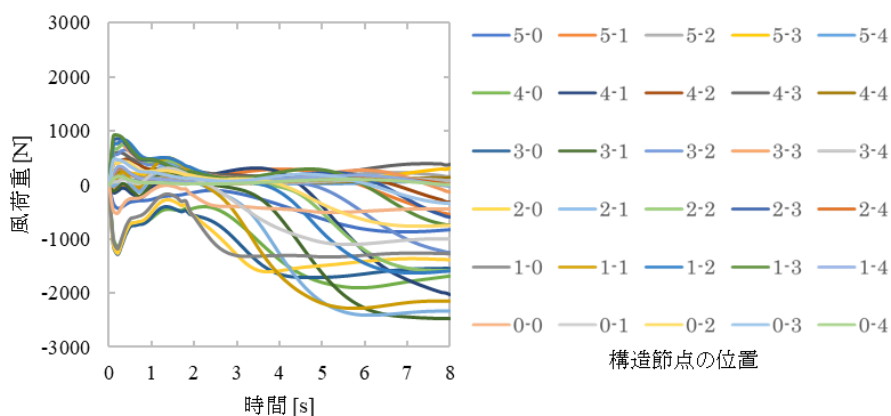


図-11 風荷重の時刻歴波形（流体解析結果）

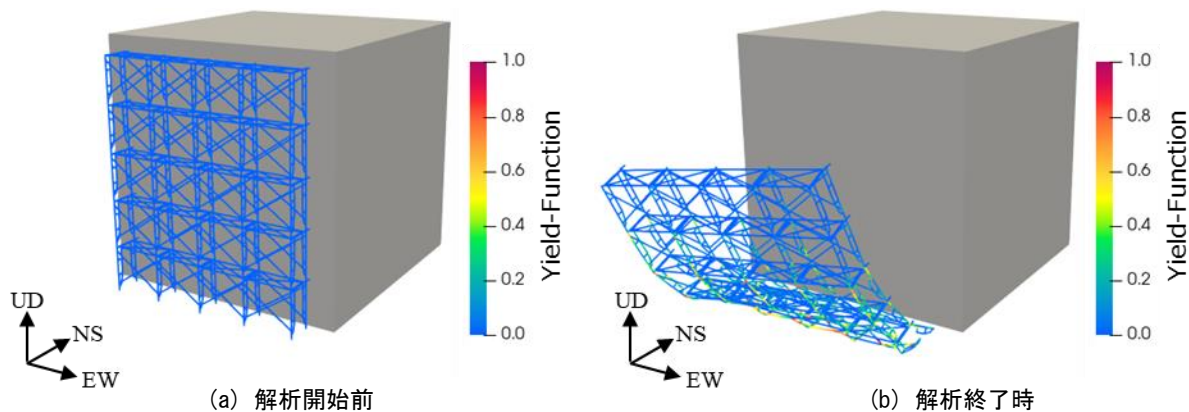


図-12 可視化結果

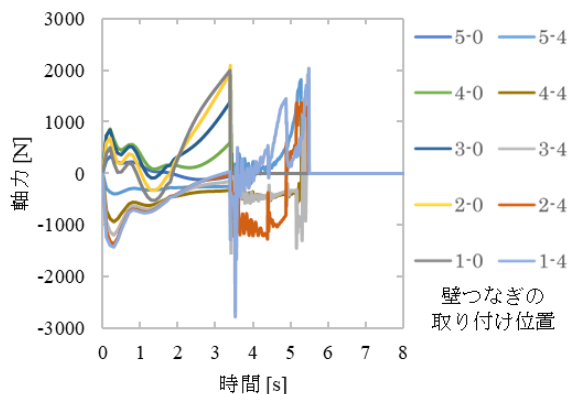


図-13 壁つなぎに作用する軸力（流体解析結果）

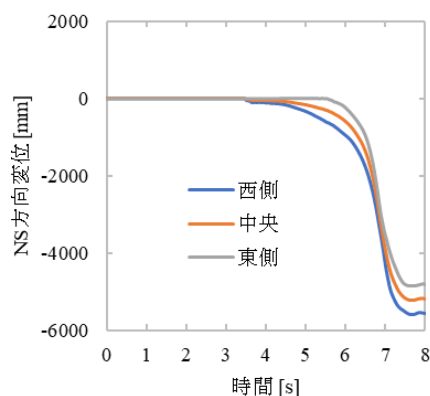


図-14 枠組足場最上部のNS方向変位（流体解析結果）

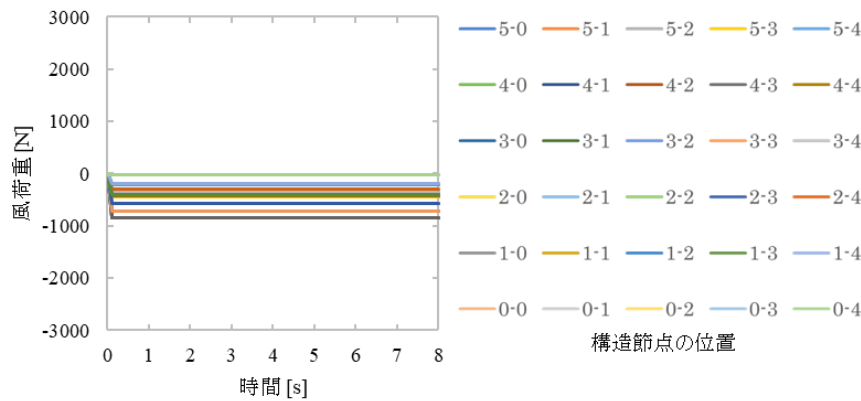


図-15 風荷重の時刻歴波形（安全技術指針）

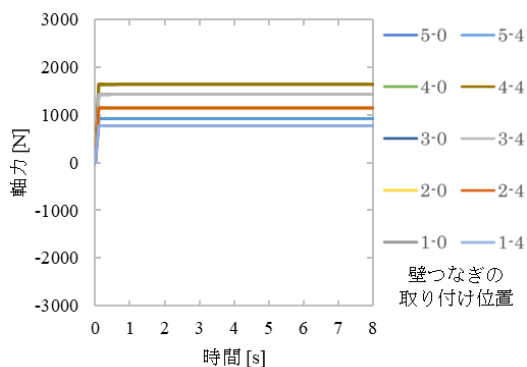


図-16 壁つなぎに作用する軸力（安全技術指針）

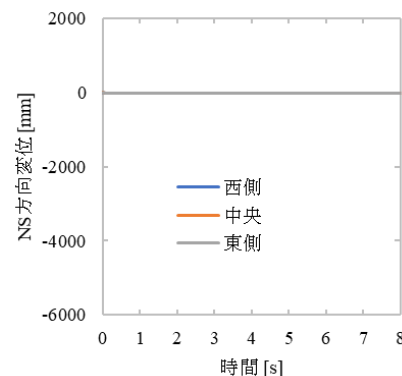


図-17 枠組足場最上部の NS 方向変位（安全技術指針）

つなぎに作用する軸力および枠組足場最上部の NS 方向変位をそれぞれ図-15～図-17 に示す。流体解析結果と安全技術指針で風荷重が大きく異なっていた。流体解析結果では、剥離流の形成や枠組足場と建物の間で生じる瞬間的な流れによって非常に複雑な風荷重となる。一方、安全技術指針では、そのような複雑な流れに対しては全く考慮されておらず、壁つなぎが引き抜かれるほどの風荷重は生じなかった。このように、安全技術指針は、風の吹き始めのような流れが急激に変化する場合や剥離流が形成されることによって気圧分布が時々刻々と変化する現象には対応できない。

#### 4. 結論

本研究では、建物の一面に5層4スパンの枠組足場が設置されている場合を想定し、枠組足場および建物の側面側から流入した場合において、流体解析ソフトである OpenFoam を用いて流体解析を実施し、枠組足場のシート部分に作用する風荷重を算出した。また、得られた風荷重を外力とし、ASI-Gauss法を用いて構造解析を実施し、強風が吹いた際の枠組足場の挙動を調査した。

流体解析結果から、枠組足場の風上側から剥離流が形成され、時間とともに風下側へ拡大し、枠組足場が建物から引き剥がされる方向に風荷重が作用することが確認できた。

流体解析結果から得られた風荷重を外力とし、構造解析を実施したところ、風上側の壁つなぎから引き抜かれ、

枠組足場が倒壊した。1～3層に取り付けている壁つなぎが特に大きくなっており、剥離流の影響を受けると考えられる足場に対しては、中低層部を重点的に補強するのが効果的であることが示唆された。

流体解析結果と安全技術指針、それぞれから風荷重を算出した際の解析結果を比較すると、両者の傾向は大きく異なっていた。流体解析結果から算出される風荷重は、剥離流や循環流で複雑な風荷重となっているが、安全技術指針ではそれらが考慮されていない。安全技術指針では安全であっても、複雑な流れの影響で生じる風荷重によって足場の倒壊につながる可能性があることが、流体解析を行うことで明らかとなった。

#### 参考文献

- [1] 東京新聞：線路脇足場崩落の東横線、電車そろりと運転再開 17 万人に影響、2021 年 3 月 3 日、<https://www.tokyo-np.co.jp/article/89171>
- [2] 仮設工業会：改訂風荷重に対する足場の安全技術指針、2019。
- [3] OpenFOAM：<https://openfoam.org/>
- [4] 磯部大吾郎：はり要素で解く構造動力学 建物の崩壊解析からロボット機構の制御まで、丸善出版、2020。
- [5] 労働安全衛生規則、第 2 編、第 10 章、第 570 条、鋼管足場。
- [6] 高梨成次、大嶋勝利、高橋弘樹：ALC パネルにおける足場用壁つなぎ材アンカーの強度に関する研究、労働安全衛生研究、第 2 巻、第 2 号、pp85-90、2009。
- [7] JISA8951：鋼管足場、2016。