

風荷重が作用する枠組足場の倒壊挙動 に関する数値解析的評価

Numerical Evaluation on Collapse Behavior of Prefabricated Scaffolds under Wind Loads

多湖拓海¹⁾, 磯部大吾郎²⁾

Takumi Tago and Daigoro Isobe

1) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail:s2120868@s.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)

Numerical evaluation on collapse behavior of prefabricated scaffolds are conducted under wind loads with various speeds and angles. The Adaptively Shifted Integration (ASI)-Gauss method, which can stably calculate non-linear phenomena such as fracture, is used as a numerical method in this research. The numerical results show that timing when wall ties are pulled out varies depending on wind speed and attachment interval of wall ties. Furthermore, it is turned out that when any wall tie is pulled out, the other wall ties are pulled out as in a chain reaction.

Key Words : Prefabricated Scaffolds, Wind Loads, ASI-Gauss Technique

1. 序論

近年、強風による足場の倒壊被害が相次いでいる。最近では、東急東横線沿いの建設現場に建てられた足場が倒壊し、線路内に覆いかぶさったことで交通機関に被害が生じ、約17万3800人に影響が出た[1]。事故当時、北西から最大瞬間風速16.4 [m/s]の強風が吹いており、建物東側に設置された足場が倒壊した。このように、足場の倒壊は近隣に甚大な被害を引き起こす危険性があり、防止するための方策が必要である。

足場が風荷重によって倒壊する主な原因としては、足場と建物壁面を接続している「壁つなぎ」(図-1)と呼ばれる部材が壁から引き抜かれることが挙げられる。壁つなぎ自体の引張強度、圧縮強度はともに十分に高いものであるが、それらに比べて壁つなぎを壁面に固定させるために打ち込むアンカーの引き抜き強度は著しく低いことが既存の研究[2]で明らかになっている。また、設計指針として風荷重に対する足場の安全技術指針[3]が示されているが、想定以上の風荷重が作用した際の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について評価することは足場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、多くの現場で一般的に用いられている枠組足場(図-2)に対し、風荷重を作用させたときの倒壊挙動を数値解析によって調査する。パラメータは壁つなぎの取り付け間隔、風速および風向角とし、それらの差異による倒壊発生の有無および倒壊挙動の違いを評価する。解析手法には、最小限の要素分割で大規模構造物を解析することができるASI-Gauss法[4]を用いる。

2. 枠組足場の数値解析モデル

(1) 枠組足場の各部材の概要

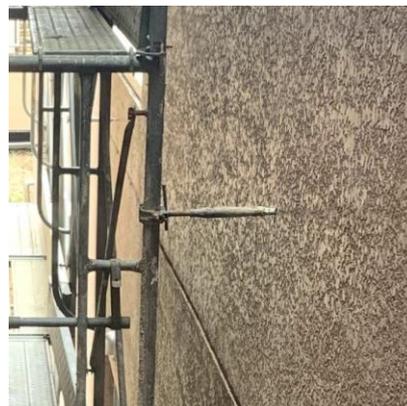


図-1 壁つなぎ



図-2 枠組足場

枠組足場には多くの部材が用いられているが、本研究では、足場の強度に寄与していると考えられる建柱、床付き布柱、交差筋交い、壁つなぎのみをモデル化した。建柱は、足場の構造に対し柱の役割を担う部材であり、脚柱、横架材および補剛材を溶接したものである。床付き布柱

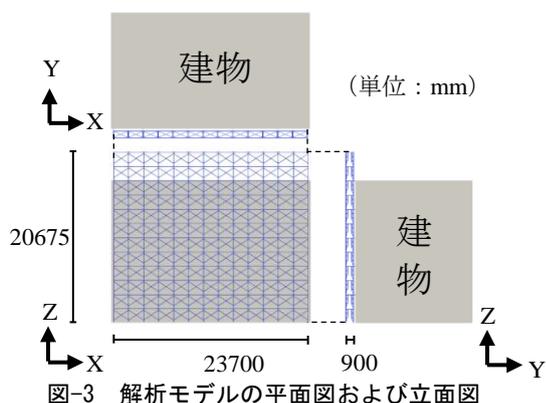


図-3 解析モデルの平面図および立面図

は、建枠間に渡し、作業床となるものである。壁つなぎは、足場を建物壁面に固定させるものであり、アンカーを介して固定されている。

(2) 解析モデル

枠組足場全体の解析モデルを図-3に示す。解析対象の枠組足場は、既存の研究[5]の風洞実験と同様、12層13スパンの枠組足場とする。各部材の詳細な寸法は各メーカーによって異なるため、解析モデルを作成する際には既存の研究[6]で用いられていた寸法および規格[7]を参考にした。建枠と床付き布枠、建枠と交差筋かい、建枠と壁つなぎの結合部はピン接合とし、壁つなぎの主材と取付金具の場合と同じ方法で模擬した。

防音シートはモデル化していないが、シートの単位面積当たりの質量を1.2 [kg/m²]とし、枠組足場の第1構面側に密度として加えることで重量のみ考慮した。なお、第1構面とは、建物から見て外側の面のことである。

壁つなぎの本数は30本とし、図-4のように設置間隔を変えて取り付ける。分散型は2, 4, 6, 8, 10層に6本ずつ、上層密型は4, 8層に8本ずつ、10層に14本取り付ける。ただし、分散型のように壁つなぎを均等に配置するのが一般的である。

外壁面から引き抜かれることを表現するために、壁つなぎの取付金具に2000 [N]の引張軸力が作用したらその要素を破断させることとした[8]。また、建枠間についても引き抜きを考慮して、微小要素を用いて脚柱ジョイン

トを表現し、9807 [N]の引張軸力が作用したら破断させることとした[9]。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、壁つなぎの取付金具は完全固定とした。

3. 枠組足場の倒壊解析

(1) 風荷重の設定

本解析では、枠組足場の第1構面側の脚柱と横架材の交点182点それぞれに、それらの点における風速に基づいて計算される風荷重を与える。枠組足場に作用する風荷重 P [N]は次のように求める。

$$P = Cq_z A \quad (1)$$

C , q_z , A はそれぞれ風力係数、速度圧 [N/m²]、作用面積 [m²]である。速度圧 q_z は次式で与えられる。

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

ここで、 ρ , V_z はそれぞれ空気密度 [kg/m³]、高さ z [m]における風速 [m/s]である。なお、 q_z と V_z の下添え字 z は、地表面からの高さ z [m]に依存する量であることを表す。

空気密度は大気的气圧や温度によって異なるが、ここでは一般に風荷重の概算で用いられている $\rho = 1.25$ [kg/m³]とする。 V_z は指数分布[10]に基づいて次のように求める。

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

ここで、 z_0 , V_0 , α はそれぞれ基準高さ [m], z_0 [m]における風速 [m/s]、風速の鉛直分布を表す指数である。本解析では、基準高さを足場の高さである $z_0 = 20.625$ [m]とし、 $V_0 = 15 \sim 34$ [m/s]とする。指数 α 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[3]。

次に、枠組足場の風力係数 C を求める。既存の研究[5]では、風洞実験によって図-5のような風向角 θ に風力係数 C が依存することが示されている。既存の研究の風洞実験および仮設工業会が定めている、建物に併設された足場の設置位置による補正係数を参考にして、図-6のように風力係数 C を決定した。

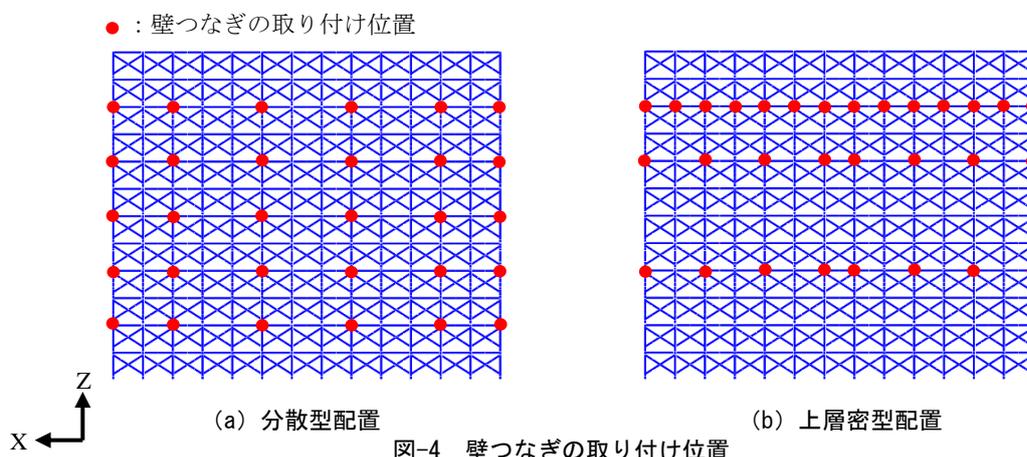
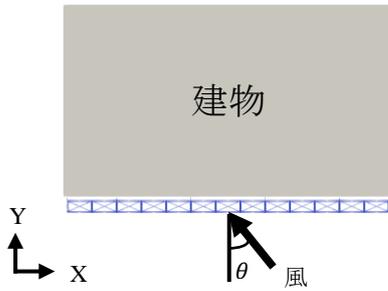
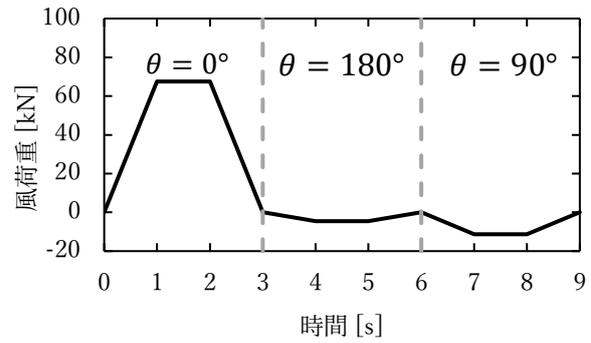
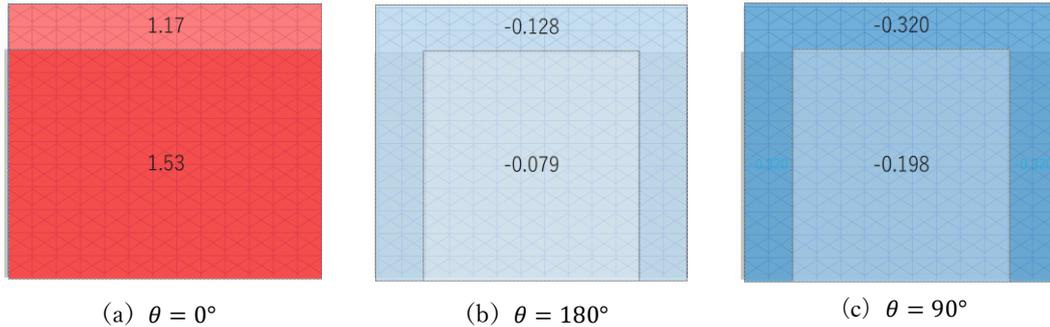


図-4 壁つなぎの取り付け位置

図-5 風向角 θ 図-7 足場全体に作用する風荷重 ($V_0 = 15$ [m/s])図-6 風力係数 C の分布

作用面積 A は風荷重を加える節点が負担する面積とする。同じ高さにある節点であっても、端部の節点の作用面積はそれ以外の節点の半分となる。

以上から各風速における風荷重を算出する。風向角 $\theta = 0^\circ, 180^\circ, 90^\circ$ の順に吹くと仮定し、時間増分を 0.001 [s]、解析時間を 9 [s]とする。風荷重は動的荷重として与え、その時刻歴波形はいずれの風向角でも、図-7のように、 1 [s]かけて風荷重の大きさが最大になり、その後 1 [s]定常で、 1 [s]で除荷されるという台形波とする。

(2) 解析結果

解析は、 $z_0 = 20.675$ [m]における風速 V_0 を $15 \sim 34$ [m/s]の範囲で 1 [m/s]ずつ変化させながら実施する。本節では、 $V_0 = 15, 19, 28, 31$ [m/s]の結果を示す。

各風速における足場最上部の Y 軸方向変位を図-8に示す。図-8(a)から、 $V_0 = 15$ [m/s]では分散型、上層密型のいずれも倒れていないことがわかる。次に、図-8(b)では、上層密型は $V_0 = 15$ [m/s]の場合と同様に倒れていないが、分散型では 7 [s]辺りから倒れ始めていることが確認できる。図-8(c)から、 $V_0 = 28$ [m/s]のとき、分散型は 4 [s]辺りから倒れ始めており、 $V_0 = 28$ [m/s]のときよりも早いタイミングで倒れ始めていた。一方、上層密型は倒れていなかった。 $V_0 = 31$ [m/s]では、上層密型も倒れ始めていた。このときの解析モデルの様子を図-9, 10に示す。

また、各風速における分散型、上層密型の場合における壁つなぎの軸力を図-11~14に示す。図-11~14の評価対象は、各ケースにおいて最も大きな風荷重を受ける壁つなぎおよびその壁つなぎと同じ X 座標上に取り付けている壁つなぎとした。ここで、壁つなぎを区別するための記号

として、「層番号-左端から数えた番号」を用いた。 $V_0 = 15$ [m/s]のとき、図-11から分散型、上層密型ともに壁つなぎは 1 本も引き抜かれておらず、倒壊には至らなかった。この傾向は、 $V_0 = 16 \sim 18$ [m/s]でも同様に確認された。 $V_0 = 19$ [m/s]のとき、分散型では壁つなぎの軸力が $7.037 \sim 7.212$ [s]で 2000 [N]を超え、 $10 \rightarrow 8 \rightarrow 6 \rightarrow 4 \rightarrow 2$ 層の順に全て引き抜かれていた(図-12(a))。一方、上層密型では壁つなぎが 1 本も引き抜かれなかった(図-12(b))。この傾向は、壁つなぎが抜けるタイミングに差はあるが、 $V_0 = 20 \sim 27$ [m/s]でも確認された。 $V_0 = 28$ [m/s]のとき、分散型では $4.007 \sim 4.196$ [s]で壁つなぎが全て引き抜かれており(図-13(a))、倒壊し始めるタイミングが $V_0 = 19 \sim 27$ [m/s]の場合より早かった。ただし、壁つなぎが引き抜かれた順番は同様であった。一方、上層密型では $V_0 = 19 \sim 27$ [m/s]の場合と同様、壁つなぎが 1 本も引き抜かれておらず、倒壊はしなかった(図-13(b))。この傾向は、 $V_0 = 28 \sim 30$ [m/s]で確認された。図-14(a)から、 $V_0 = 31$ [m/s]のとき、分散型において壁つなぎが引き抜かれたのは $3.839 \sim 4.011$ [s]であった。一方で、上層密型も図-14(b)から $7.430 \sim 7.491$ [s]で引き抜かれていた。上層密型で壁つなぎが引き抜かれた順番は、 $8 \rightarrow 10 \rightarrow 4$ 層の順番であった。壁つなぎが引き抜かれる時間に差はあるが、 $V_0 = 32 \sim 34$ [m/s]でも同様の傾向が確認された。

以上の解析結果から、各ケースにおける足場の倒壊の有無をまとめると、表-1 のようになる。このことから、分散型では風速 18 [m/s]まで耐えられ、上層密型では風速 30 [m/s]まで耐えられることがわかった。

分散型と上層密型でこのような差が生じたのは、風速

の鉛直分布から、足場の上層部ほど風速が大きくなり、それに伴って風荷重も大きくなるが、分散型の上層部に取り付けられた壁つなぎの本数が上層密型よりも少なく、壁つなぎ 1 本当たりが負担する風荷重が増加したことによると考えられる。分散型と上層密型には壁つなぎが引き抜ける順番にも違いが見られた。分散型は10 → 8 → 6 → 4 → 2層の順で壁つなぎが引き抜かれていたが、上層密型は8 → 10 → 4層の順で引き抜かれた。このような違いが生じた原因も壁つなぎの負担面積によるものであると考えられる。分散型は、2、10層の壁つなぎの負担面積が一番大きく、その他の部分は2/3程度であることから、負担する風荷重は上層ほど大きく、下層ほど小さくなった。一方、上層密型は、壁つなぎの負担面積は4層が一

番大きく、次に8層、一番小さいのは10層であった。負担面積と風速の鉛直方向分布から、負担する風荷重は8層の壁つなぎが一番大きくなり、8層から引き抜かれ始めた。壁つなぎの軸力のグラフからも、負担する風荷重の大きさは、分散型では10層が一番大きく、上層密型では、8層が一番大きいことがわかる。

また、壁つなぎが1本でも抜けてしまうと、その壁つなぎが負担していた風荷重を近接の壁つなぎが負担することになり、連鎖的に引き抜かれ、足場の倒壊が始まる。したがって、足場の倒壊を防ぐには、壁つなぎが1本も引き抜かれないこと、すなわち、壁つなぎの引き抜き強度もしくは本数に十分余裕を持たせることが重要であると考えられる。

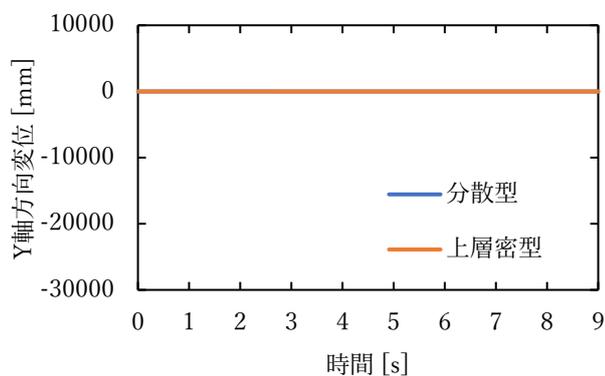
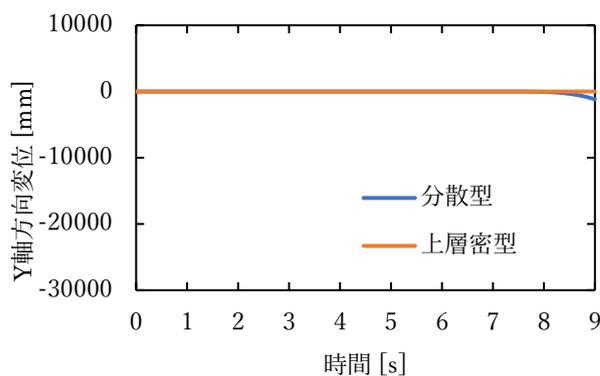
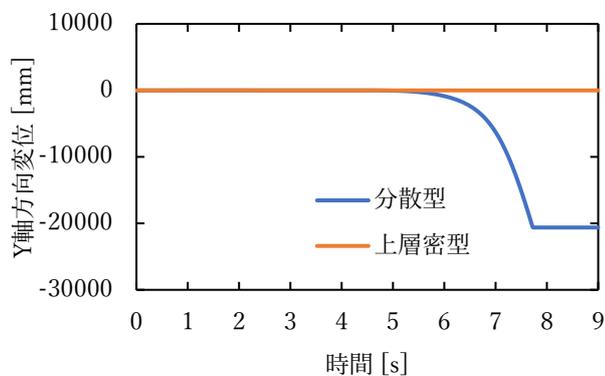
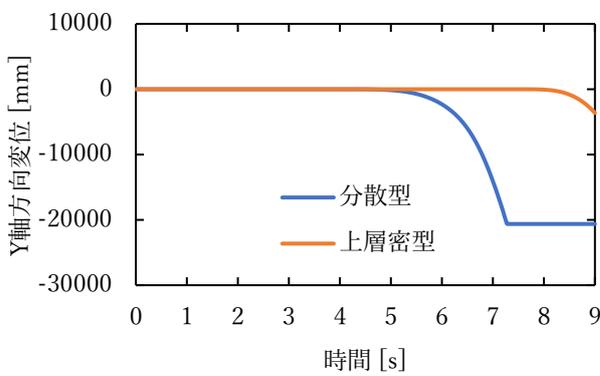
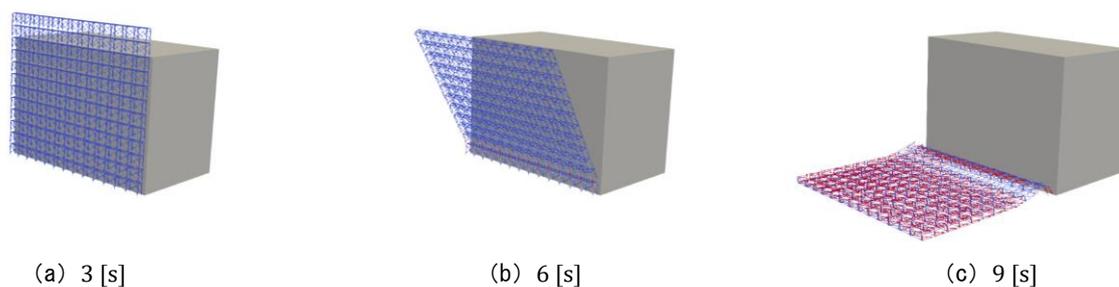
(a) $V_0 = 15$ [m/s](b) $V_0 = 19$ [m/s](c) $V_0 = 28$ [m/s](d) $V_0 = 31$ [m/s]

図-8 最上部のY軸方向変位



(a) 3 [s]

(b) 6 [s]

(c) 9 [s]

図-9 壁つなぎが分散型に配置された枠組足場の挙動 ($V_0 = 31$ [m/s])

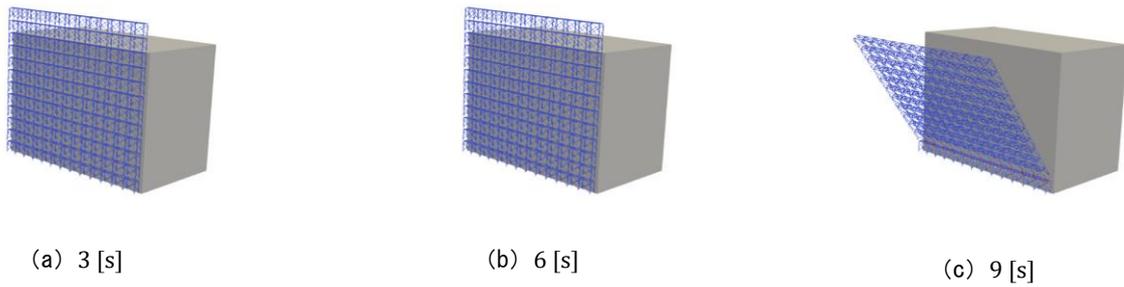


図-10 壁つなぎが上層密型に配置された枠組足場の挙動 ($V_0 = 31$ [m/s])

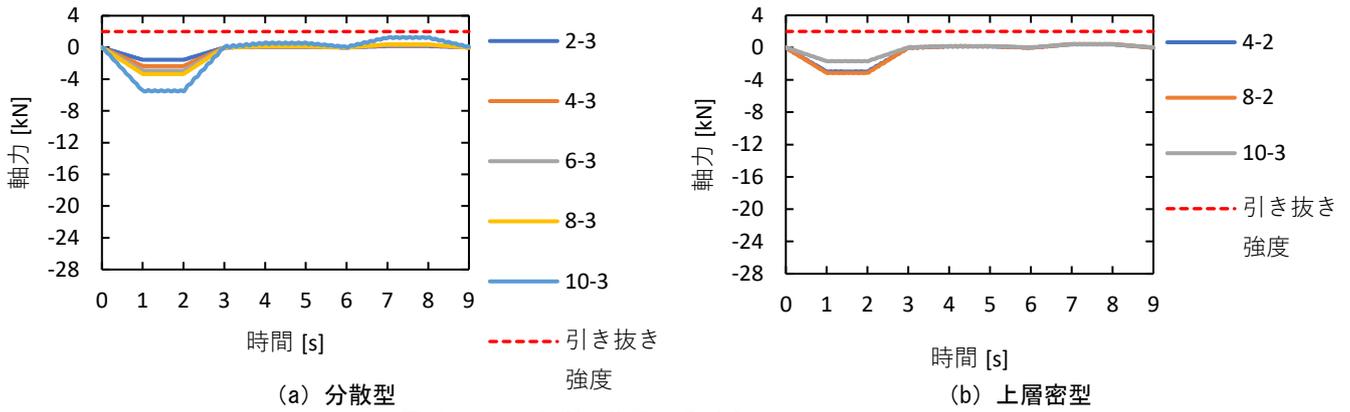


図-11 壁つなぎに作用する軸力 ($V_0 = 15$ [m/s])

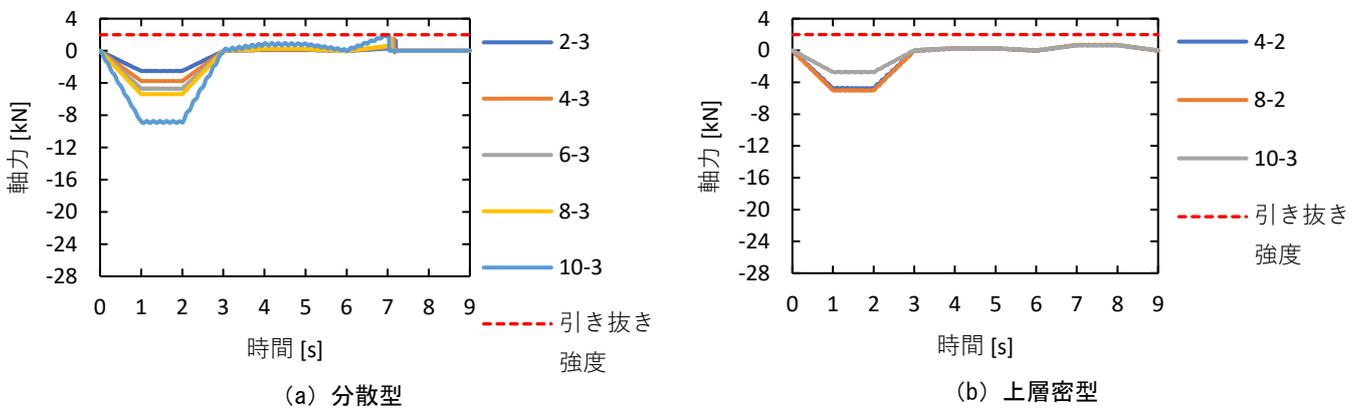


図-12 壁つなぎに作用する軸力 ($V_0 = 19$ [m/s])

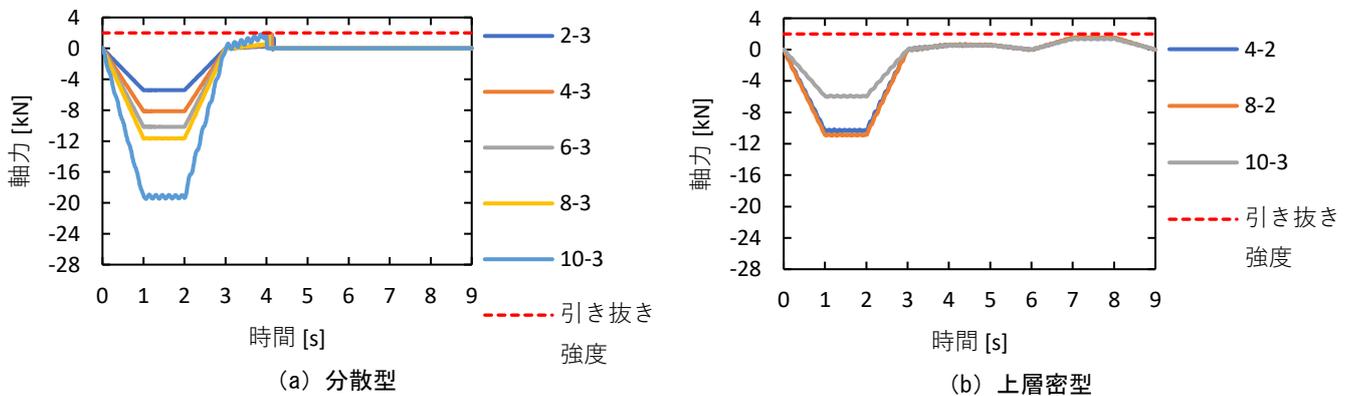


図-13 壁つなぎに作用する軸力 ($V_0 = 28$ [m/s])

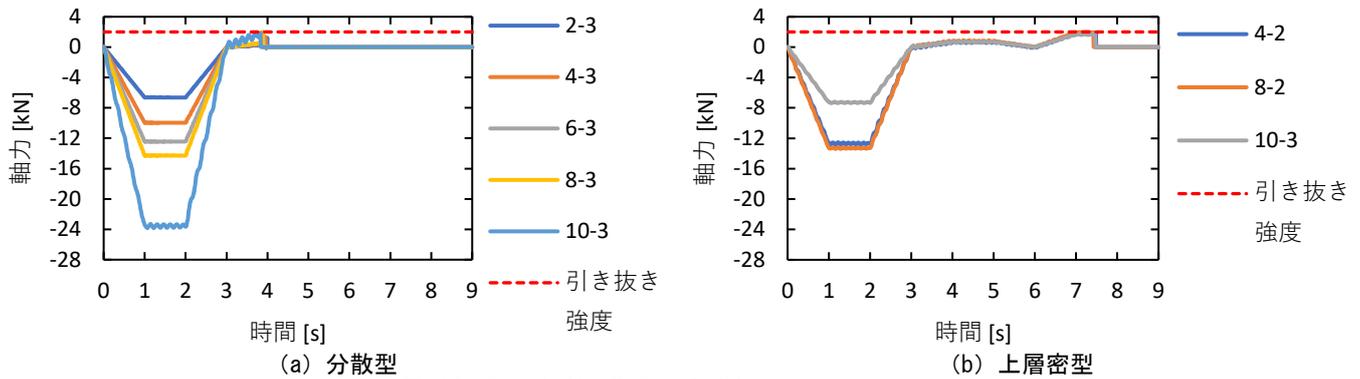


図-14 壁つなぎに作用する軸力 ($V_0 = 31$ [m/s])

表-1 風速15~34 [m/s]での解析結果

風速 [m/s]	分散型	上層密型
15	○	○
16	○	○
17	○	○
18	○	○
19	×	○
20	×	○
21	×	○
22	×	○
23	×	○
24	×	○
25	×	○
26	×	○
27	×	○
28	×	○
29	×	○
30	×	○
31	×	×
32	×	×
33	×	×
34	×	×

○ : 倒壊しない
 × : $\theta = 90^\circ$ のとき倒れ始める
 ×× : $\theta = 180^\circ$ のとき倒れ始める

4. 結論

本研究では、建物外壁に設置された枠組足場をモデル化し、足場最上部における風速が15~34 [m/s]の風が、 $\theta = 0^\circ, 180^\circ, 90^\circ$ の順で吹くと仮定して風荷重を作用させ、倒壊解析を行った。その結果、次の知見が得られた。

- 壁つなぎの取り付け本数が同じであっても、上層部の取り付け間隔を狭くすることで、ある程度の風速まで足場の倒壊を防ぐことが可能である。

- 壁つなぎが1本でも抜けると、他の壁つなぎも連鎖的に引き抜かれる。
- 上記のことから、壁つなぎの引き抜き強度、もしくは本数に十分余裕を持たせる必要がある。

本研究の今後の展望としては、建物外壁1面だけでなく、2面以上に枠組足場が建てられているような複雑な形状のものや、時々刻々と風速が変化する場合を解析し、倒壊挙動を確認する必要がある。また、より最適な壁つなぎの取り付け配置を検討する必要もあると考えられる。

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。
- [2] 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，pp.85-90，2009。
- [3] 仮設工業会：改訂風荷重に対する足場の安全技術指針，2019。
- [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] 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，鹿島技術研究所年報，第28号，1980。
- [6] 高橋弘樹，大嶋勝利，高梨成次：標準わく組足場の耐荷強度に関する評価方法の検討，労働安全衛生研究，第1巻，第3号，pp.211-218，2008。
- [7] 株式会社千歳商会：<http://www.chitose-g.co.jp/index.html>
- [8] ゼン技研株式会社：https://www.zen-g.co.jp/product_2paa.html
- [9] JISA8951：鋼管足場，2016。
- [10] 日本建築学会：日本建築学会荷重指針・同解説，1993。