

実大テンセグリティ構造物の強風時実測軸力値と構造計算値との比較に関する基礎的研究

坪井 洸太*1
川口 健一*2
水谷 圭佑*3
路 越*4

2017年に竣工した実大テンセグリティ構造物に対して、継続的に各部材のひずみ計測を行い、強風時における実測軸力値と数値計算軸力値を比較することで、実大テンセグリティ構造物に実際に生ずる各部材軸力の挙動の把握を試みた。解析は設計時構造計算に加え、実測された節点座標と長期荷重時軸力を元にした線形計算に基づき行なった。結果は実測と数値計算が一致する部材と大きく乖離する部材が存在したが、外力の変化に対する軸力変化の傾向は概ね一致した。

1. 序論

テンセグリティ構造はその形状が持つ独特の浮遊感からアート作品としてよく展示されるが、設計や施工の難しさから実建築物として用いられることは極めて稀であり、また実大テンセグリティ構造物の外力下における実挙動についての既往研究は少ない。東京大学生産研究所川口研究室では、テンセグリティ構造の建築への応用を目指して2017年5月に「ホワイトライノII」を建設した。既往の研究ではホワイトライノIIについて、施工時の張力導入過程における実測軸力と解析軸力の比較が行われている^{[1][2]}。本論では設計時解析結果と比較するため、平時の実測節点座標を元に再度構造計算を行い、強風時(台風時)の実測軸力値と比較することで、実大テンセグリティ構造物に実際に生ずる各部材軸力の大きさに関し外力の変化に対する各部材軸力の挙動の把握を試みた。

2. 方法

2.1. 検討対象建物概要

本論では張力型空間構造モデルドーム「ホワイトライノII」を計測対象とする。本建物は東京大学柏キャンパスに2017年5月に竣工した建築物であり、ケーブル補強型サスペンション膜構造の屋根架構をタワー型(図1上図左)と五角錐台型(同右)の2基のテンセグリティ構造物が支持する。建物全体の床面積は約440㎡、外形の最高高さは約15mである。建物外周を高さ約2mの鉄筋コンクリート造外壁で囲み、内部に配置した2基のテンセグリティ構造が上部の膜屋根の反力を支持している(図1)。タワー型のテンセグリティの高さは約13m、五角錐台型のテンセグリティの高さは約10mである。本論ではこのうち五角錐台型テン

セグリティの挙動について調査検討を行う。

五角錐台テンセグリティ(図2)は11節点、圧縮材6本、引張材24本から構成されている。圧縮材は直径216.3mm、厚さ12.7mmの円筒断面であり、引張材は直径14.5~38mmの円形断面である。支持部では、水平放射方向にピンローラー状態で支えられている。ポスト材とそれを吊り上げる5本の張力材を除いた五角錐台型部分の架構の不静定次数は2である。五角錐台型テンセグリティはポスト材(S2)を介して上部膜屋根を支持す

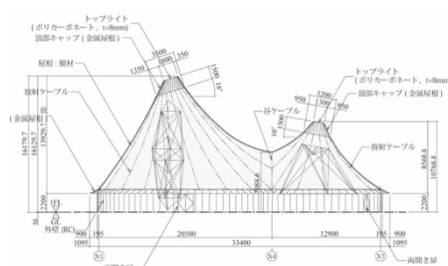
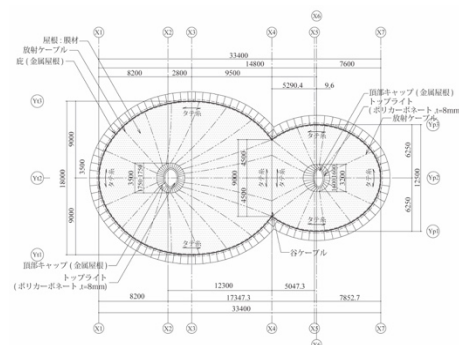


図1 ホワイトライノII 平面図(上図)・立面図(下図)

*1 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻修士課程
*2 東京大学生産技術研究所教授・工学博士
*3 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻博士課程
*4 元東京大学大学院工学系研究科建築学専攻修士課程

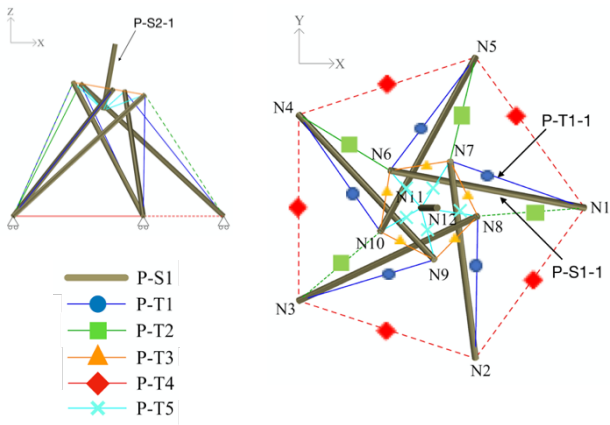


図2 ホワイトラインII部材構成図



図3 施工時のS2材と上部リング

る構造となっており、図3に示すようにポスト材は膜ケーブルの取り付け上部リングに対して独楽の芯のように固定されている。本論においてはポスト材の実測軸力値を五角錐台型テンセグリティが膜屋根から受ける外力として検討を行う。底面五角形は正五角形であるが、上面五角形が鉛直z軸に対してx軸方向に10度傾いており、また節点N2とN9をつなぐT2材が省略された非対称な形状となっている。節点N1～N5は放射方向滑り支承によって支持されている。

テンセグリティ構造に支持されているケーブル補強膜屋根の膜材仕様はいわゆるB種膜、CMX270NMR、塩化ビニル樹脂コーティングガラス繊維織物である。

2.2. 実測方法

既往の研究で本建物では竣工後に節点座標の測定が行われており³⁾、本論でも実測節点座標データを用いた。測定にはレーザー距離計を用いている。測定した節点座標を表1に示す。

本建物では竣工した2017年5月から2019年7月までの約2年間、毎10分ごとに部材中央付近に貼付されたひずみゲージを用いてひずみ計測をおこなっている。以下では、各時刻で得られる17部材の軸力データを1セットと呼ぶこととする。ただし、ひずみゲージデータを順番に読み込んでいくため、データの取得は最初と最後に数秒間のタイムラグが発生する。ひずみゲージは曲げの影響をキャンセルするために断面直径の両端に貼付され、その相加平均を測定値として用いている。数値計算と

表1 実測された長期荷重時節点座標

節点符号	x [mm]	y [mm]	z [mm]
N1	3723	151	0
N2	202	-4684	0
N3	-5510	-2844	0
N4	-5493	3131	0
N5	198	5010	0
N6	-2501	1362	5920
N7	-567	1658	5582
N8	321	-136	5427
N9	-1073	-1556	5666
N10	-2814	-631	5978
N11	-1503	189	4741

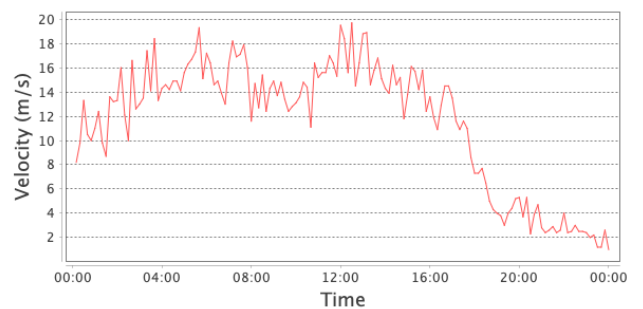


図4 我孫子市における2017年10月23日の最大瞬間風速推移(気象庁HPのデータを加工)

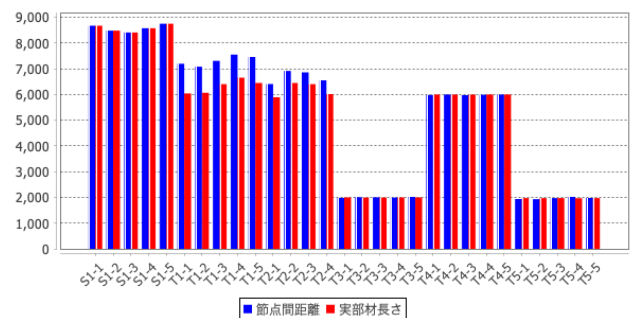


図5 各部材における節点間距離と実部材長さ

の比較対象とする実測軸力値には特に強風を観測した2017年10月22日0時～23日24時の48時間の計288セットのデータを用いる。

なお、当時現地には中心気圧970hPaであり、我孫子市において最大瞬間風速18m/sを観測した台風21号が到達している。図4に23日の我孫子市における最大瞬間風速の推移を示す。上部膜屋根を直接支持するS2材の最大軸力は132.2kNであり、本論で扱う実測データ内における最大軸力とした。実測には静的なデータロガーを用いている。

2.3. 数値計算方法

本論では五角錐台型テンセグリティについての2種類の数値計算データを比較した。両者とも既往の文献を参照⁴⁾したもので

ある。

1つ目は設計時に行なった構造計算⁵⁾であり、剛性行列として部材の伸び変形に関する剛性を表す弾性剛性行列に、次式で示される軸力による剛性を表す幾何剛性行列 K_G を加えた非線形計算によるものである。

$$K_G = \frac{n}{L} \begin{bmatrix} I - \lambda\lambda^T & -(I - \lambda\lambda^T) \\ -(I - \lambda\lambda^T) & I - \lambda\lambda^T \end{bmatrix} \quad (1)$$

n は注目している部材の軸力、 L は部材長さ、 I は単位行列、 λ は方向余弦ベクトルを表す。初期節点座標と初期張力は設計値

とし、引張材は中間節点を設けて圧縮力を負担できないモデルとしている。テンセグリティ架構の自重による固定荷重は各節点に集中荷重として与え、膜屋根の自重とプレストレスを含む固定荷重および風荷重はS2材を介して節点N11に作用する集中荷重として与えている。境界条件は節点N1、N2、N3、N4、N5の鉛直方向および節点N3、N4のX方向、節点N1のY方向を拘束し、放射方向ピンローラーを模擬、その他の節点は自由としている。部材材料のヤング係数は全て205000N/mm²とし、計算手法は荷重増分法である。こうして得られた解析軸力値を以下「設計時解析値」と呼ぶ。

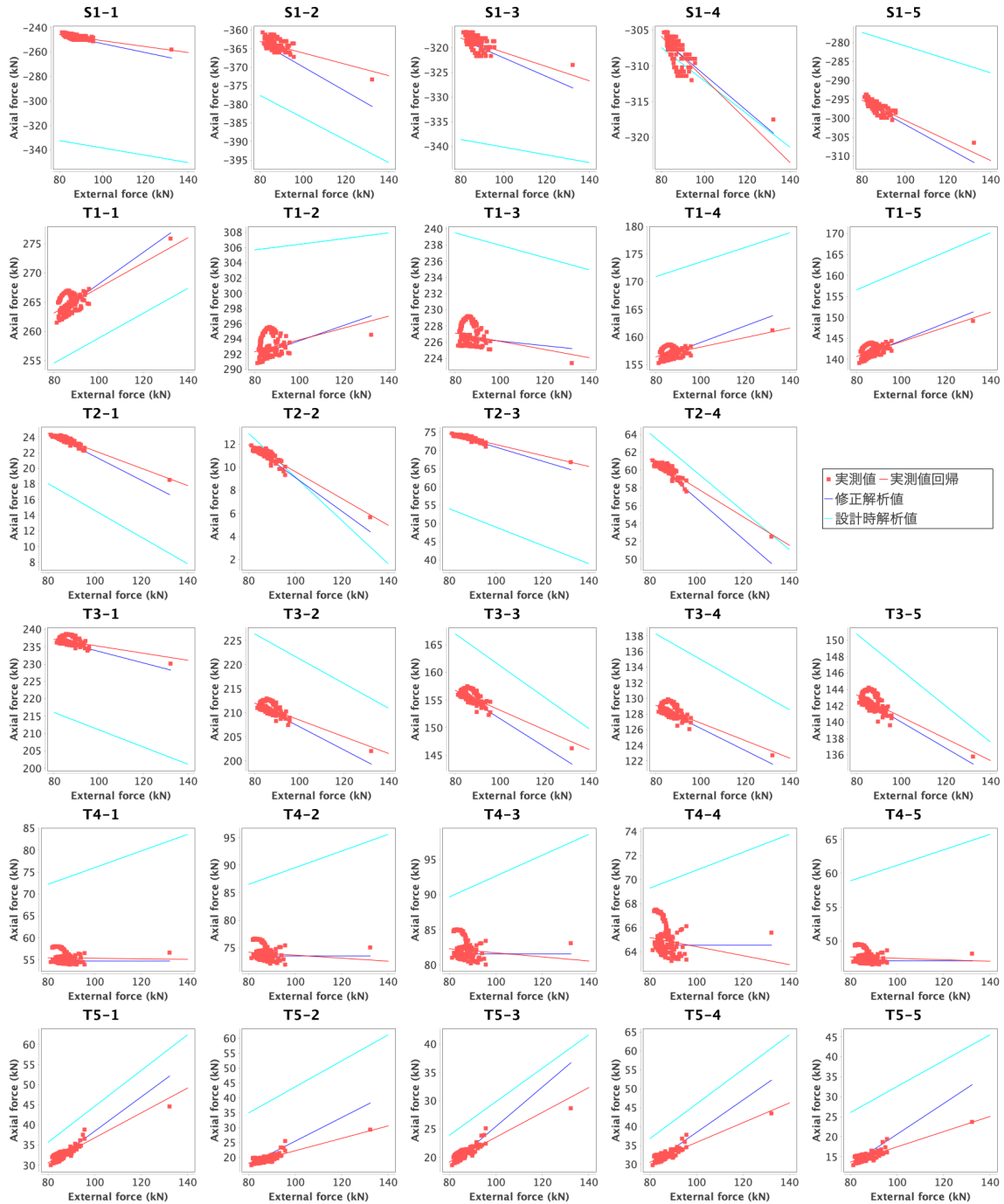


図6 外力変化に対する実測軸力値と数値計算による軸力値の比較

2 つ目はより実構造物に近いデータを使うこととして、実構造物の平時の実測節点座標と実測軸力を元に行った数値計算である。まず、常時荷重における各部材軸力を求めるため、本論で用いた 48 時間分のデータの中から、比較的軸力値が安定していた 2017 年 10 月 22 日 0~9 時の 10 分ごとの計 54 セットの軸力値データの平均値を各部材ごとに求め、それらを実測常時軸力とした。このうち、上部膜屋根を直接支持する部材 S2 の実測常時軸力を実測常時外力としている。初期節点座標は表 1 に示した実測座標であり、後述の通り実測された常時軸力は各節点で不釣り合い力が生じていたため、数値計算手法は軸力による幾何剛性を考慮しない線形解析である。図 5 に各部材における節点間距離と実部材長さを示す。青棒が節点間距離であり、赤棒が実部材長さである。S1 材の実部材長さは節点間距離と等しいものとしている。引張材については特に T1 材および T2 材の実部材長さは圧縮材に溶接されたガセットプレート部に設けられたジョイントの間の距離であり、圧縮材端部を端点と考えた節点間距離より短い。このため、本計算では部材剛性計算時の部材長さは実構造物に合わせて修正している。実際に引張材の弛緩は発生していないので、引張材も圧縮力を負担するものとした。境界条件については後述の通り実測軸力から滑り支承が期待される滑りを発揮していないことが予想されたため、節点 N1~N5 をピン支持とし、その他の節点は自由としている。その他の条件は設計時解析と同様である。以上の計算手法により得られた軸力値を以下「修正解析値」と呼ぶ。

3. 結果

外力変化に対する各部材軸力の実測値と 2 種類の数値計算結果値を図 6 に示す。横軸が外力、縦軸が各部材の外力に対する軸力である。図中赤点は実測軸力値を示しており、実測された S2 材の軸力を横軸値とし、その際の各部材の軸力を縦軸値としてプロットしている。図中赤線は実測軸力値に対する回帰直線である。図中青線は修正解析軸力値であり、実測常時外力時の結果と実測最大外力時の結果を線で結んだものである。図中水色線は設計時解析軸力値を表し、増分解析の結果のうち、実測外力値に合わせて外力が 80~140kN の範囲を示している。実測常時外力は 83.0kN、実測最大外力は 132.2kN である。テンセグリティ架構は非線形挙動を示す場合もあるが、今回の検討荷重範囲における架構応答の非線形性は非常に小さいため、実測値に対しては直線回帰を行なった。

全体の傾向として T4 材を除くと、実測軸力は外力増加に従って 2 種類の解析軸力と同じ増減方向に変化していることが読み取れる。修正解析値は実測値に一致させることを目標とした値であったが、すべての部材について実測値の±10kN 範囲内に収まり、外力変化に対する軸力の変化率も概ねよく一致した。

圧縮材 S1 に注目すると、S1-1 材において実測値が設計時解析値の 30%程度乖離しているが、既往の研究³⁾でこの材のひずみ計測は信頼性が低いことが報告されており、この乖離もそれに起因するものと考えられる。その他の圧縮材の実測値については設計時解析値の±10%範囲内に収まった。

続いて図 6 における引張材に注目すると、実測値において

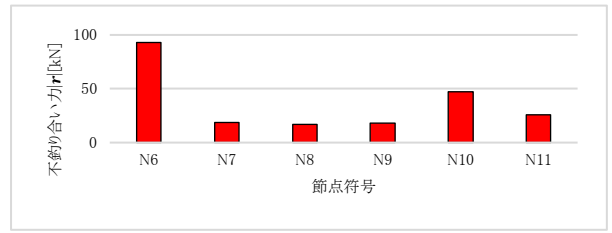


図 7 実測節点座標と実測軸力から計算された各節点の不釣り合い力の大きさ

T1 材、T3 材、T4 材について、S2 を介して伝わる外力に対する軸力変化にかなりの幅があることがわかる。この原因については S2 材は軸力のみならず、せん断力を伝えていることも一因と考えられる。T4 材の実測においては設計時解析との相関が他の部材と比較して薄く、外力増加に対して解析から想定される軸力上昇が見られない。この原因としては T4 材は滑り支承同士をつなげる引張材であり、強外力時に実際に生じている支点的滑りが構造解析で想定していたものと異なることが挙げられる。実際には想定以上の支点反力が発生している可能性がある。修正解析値では支点をピン支持としたため、支点間を結ぶ T4 材は常時軸力のまま一定となっている。T2 材内で軸力を比較すると最大で 6 倍程度のばらつきがあるが、これは節点 N2 と N9 をつなぐ引張材が存在しないという非対称性によるものと考えられる。

実測常時軸力を元に計算された各節点における不釣り合い力を図 7 に示す。節点 N1~N5 についてはピン支持としているため、支点反力を含めた不釣り合い力は 0 としている。不釣り合い力は節点 N6 が最も大きく 93.1kN であり、その他の節点については 50kN 以下である。節点 N6 は S1-1 材が接続する節点であり、節点 N6 における不釣り合い力は主に上述の S1-1 材のひずみ計測の不具合による実測軸力値のずれに起因すると考えられる。また一部の引張材が各節点からずれた位置で接続していることも不釣り合い力の原因として挙げられる。

4. 結論

本論では実大テンセグリティ構造物から得られた台風時の実測軸力値と 2 種類の計算軸力値を比較した。実測値を元に設計値を修正した計算軸力値については、実測値の±10kN 範囲内に収まった。設計時解析値と実測値の比較においては概ね一致する部材と大きく異なる部材が圧縮材と引張材ともにあることがわかった。多くの部材において実測値と解析値の外力の変化に対する増減は概ね一致し、その傾きについては数値計算値よりも実測値の方が緩くなる傾向が見られた。実測軸力を元に計算された節点における不釣り合い力は最大 93.1kN となった。

本論では各部材で 10 分ごとにひずみ計測を行なったデータを用いており、瞬間的な変化を連続的にとらえることができていない。滑り支承同士を繋ぐ T4 材の実測データの分析からは境界条件の違いが設計時解析値と実測値の違いに現れている。強外力時の実測はひずみについてのみであったが、節点反力についても観測することができれば、より詳細な知見が得られる

ことが期待される。なお、T2 材は短期荷重時に弛緩し、張力を失う設計となっているが、本論で扱ったデータ内では弛緩は発生していない。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 H30-31、挑戦的研究(萌芽)「テンセグリティ構造の最適性に関する探索的調査研究」の助成を

受けたものである。ここに記して謝意を表する。

- [1] 川口健一, 水谷圭佑, 藤原淳, 今井公太郎, 本間健太郎, “タワー型及び五角錐台型テンセグリティ架構の設計と施工 入力による張力導入法と張力導入計画(その 1),” 日本建築学会技術報告集 24 巻 57 号, pp. 591-596, 2018 年.
- [2] 川口健一, 水谷圭佑, 大矢俊治, 今井公太郎, 本間健太郎, “タワー型及び五角錐台型テンセグリティ架構の設計と施工 タワー型テンセグリティ架構の施工時張力導入(その 2),” 日本建築学会技術報告集 24 巻 58 号, pp. 1005-1010, 2018 年.
- [3] 路越, “実大テンセグリティ構造の実測軸力値変動の考察と設計値との比較に関する基礎的研究,” 東京大学修士論文, 2020 年 3 月.
- [4] 川口健一, “一般逆行列と構造工学への応用,” コロナ出版社, 2011 年.
- [5] 水谷圭介, “実大テンセグリティ構造の張力導入における設計値と建設時実測値に関する基礎的研究,” 東京大学修士論文, 2017 年.

Preliminary Study of Comparison between Measured and Computed Axial Force of Full Scale Tensegrity Structure under Strong Wind Load.

Kota Tsuboi ^{*1)}
Ken'ichi Kawaguchi ^{*2)}
Keisuke Mizutani ^{*3)}
Lu Yue ^{*4)}

SYNOPSIS

Axial strain of structural members of a full-scale tensegrity skeleton, constructed in 2017, has been continuously monitored. Its axial force under strong wind, obtained from recorded strain, were compared with its computed value, in order to learn the actual behavior of the structure. Two sets of computed value were prepared, the set used during structural design based on the computational model and additionally calculated set using actual length of members and monitored permanent load. Most of the values agreed well each other but some did not match well. However, relationships between the external force and axial forces corresponded well in general.

^{*1)} Dept. of Architecture, Grad. Sch. of Eng., The Univ. of Tokyo

^{*2)} Prof., IIS, The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

^{*3)} Dept. of Architecture, Grad. Sch. of Eng., The Univ. of Tokyo

^{*4)} Former Dept. of Architecture, Grad. Sch. of Eng., The Univ. of Tokyo