

令和 2 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18895

研究課題名(和文) テンセグリティ構造の最適性に関する探索的調査研究

研究課題名(英文) Exploring conditions for Tensegrity being the optimum structure

研究代表者

川口 健一 (Kawaguchi, Kenichi)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：40234041

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では2つの研究を実施した。1は実際に東京大学柏キャンパス内に建設したテンセグリティ実構造物の張力変動の観測。軸力を10分毎に計測し、設計時の挙動と比較を行った。2019年の大型台風による風力も、設計時の最大荷重時の軸力の7割程度であったことが分かった。2はテンセグリティの最適性を検証するため、2次元のグラッドストラクチャ法による位相最適化数値解析を実施した。節点移動も含めた最適化を行ったところ、全体としてはテンセグリティではなく静定トラスに近づく傾向が分った。目的関数をコンプライアンスではなく別の関数に置き換える必要があると考えられる。これらの結果は日本建築学会大会論文として報告した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

前半の研究では、世界的にも珍しい、テンセグリティの実構造物の挙動において構造設計時の数値解析結果が妥当であることが確認できたという意味で工学的及び社会的に意義があると考えている。本研究の元来の目的は、三角形を基とするトラス構造が常に最適であるという従来の常識を変える可能性についての検証であり、ある環境の中では(例えば宇宙や極地等)ではトラス構造よりもテンセグリティ構造の方が適している、といった新しい可能性の検証であった。結果的には目的関数の選定の検証が必要であることが分かった。さらに研究を進める必要があるが、本研究の目指すことが確認されれば従来の構造力学に新たな基本的知見が加わることとなる。

研究成果の概要(英文)：Two researches have been carried out. The first research was done by monitoring the real tensegrity structure which has been built at Kashiwanoha Campus of the university of Tokyo. The axial forces of the members of the tensegrity frame have been recorded every ten minutes and were compared with what had been predicted during the design. As the result, the maximum axial forces recorded during the largest typhoon in 2019 did not exceed seventy percent of the maximum axial force considered during design. In the second research, optimality of the tensegrity was examined by numerical topology optimization with grand-structure procedure. Considering variability of nodal position, the optimized structure usually became statically determinate frames rather than tensegrity. It seemed that the objective function in the analysis should be changed from the compliance to other features of structures. The results of the studies were submitted as some papers and presented in the AIJ annual meeting.

研究分野：空間構造工学

キーワード：テンセグリティ 空間構造 立体構造 張力構造 最適化 不静定構造 不安定構造 トラス構造

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

テンセグリティ構造は、テンションネットワークの中に互いに接触しない圧縮材が散在した構造であり、同一の節点数を持つトラス構造に比べ、約3分の2まで部材数を減らすことが可能であることが知られている。この意味で究極の軽量構造と呼ばれる。バイオ工学の分野においては、D. Ingber (1998) によって細胞の形状を維持する細胞骨格がテンセグリティ構造となっていることが指摘され、現在では定説となっている。つまり、自然界のある条件下においてはテンセグリティ構造は最適な構造として選択されることが知られている。

川口等は2017年に世界でも稀な、テンセグリティ架構を実建造物の骨組として利用する建築物を設計し建設した。この経験において、テンセグリティ架構は細胞内においては最適な加工であるかもしれないが、建築物としての実スケールでは設計も施工も困難な非常に難しい構造物であることが分かった。同時に、設計、建設したテンセグリティ骨組の挙動をモニタリングで確認すること、また、どのような条件下であれば、テンセグリティ構造が建築スケールで最適になりうるのか、という疑問を抱くこととなった。

2. 研究の目的

実際にテンセグリティ構造を建築物として設計建設すると、無駄の多い不静定構造となる。つまり理論的には究極の軽量構造となり得るにもかかわらず実際にはそうならない。本研究は、細胞スケールでは最適骨組として存在していると思われるテンセグリティ骨組が建築スケールでは最適とは程遠い状態になるという、この相違について探索を行いその条件を見つけることを目的とする。部材数や不静定次数はスケールや材質に影響を受けないので、何らかの幾何学的な条件が存在するはずである。そのような条件が見つければ三角形を基とする静定トラス構造よりも最適な構造が建築スケールにも存在するという、従来の常識を変える発見につながる可能性がある。同時に、実際に建設したテンセグリティ骨組と設計時の挙動に関する比較も行う。

3. 研究の方法

本研究は、2項目の研究を行い、実際のテンセグリティの挙動を把握し、最適化計算の結果を理解する。

第1項目の研究では、既に川口等が建設した実スケールのテンセグリティ骨組のモニタリングを行い、その記録データと、設計時に予測した挙動とを比較し、その間の整合性について比較した。

第2の研究では、数値解析を用いた制約条件の探索を次の研究の主軸とする。位相最適化手法を用いて2次元トラス構造を数値計算により創生し、静定トラスとの比較を行う。主に2次元空間におけるグランドストラクチャー法を用いたトポロジー最適化を行い、徐々に部材を撤去、Maxwellの公式を満たす静定トラス構造と比べてどのように最適化されているかを検討する。

4. 研究成果

本研究は、結果的に2つの研究を行っている。前半は実大テンセグリティ構造物のモニタリングと設計時の予測との比較である。後半はグランドストラクチャー法を用いた2次元トラス構造物の最適化とテンセグリティとの比較である。以下にそれぞれの成果について述べる。

4.1. 前半研究における計測対象建物概要

本研究では張力型空間構造モデルドーム「ホワイトライノ」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左)と五角錐台型(図1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440m²、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。本研究では五角錐台型テンセグリティについて検討を行う。

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。五角錐台部分の不静定次数は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る構造となっており、本研究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x軸に対して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。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CMX270NMR、塩化ビニル樹脂コーティングガラス繊維織物である。

4.2. 検討内容

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た。本研究では五角錐台型テンセグリティにおいて、特に構造設計時に検討の対象となった強風時の挙動に関して、ひずみデータから計算される実測軸力値と構造設計時の非線形構造計算によって理論上想定されている軸力値^{[3][4]}を比較する。実測軸力値には2017年10月23日午後1時ごろに中心気圧970hPa、最大瞬間風速18m/sの台風21号が到達した際のデータを用いる。理論上想定される軸力値には、圧縮

材 S2 で実測された軸力を外力として骨組みに入力して解析を行った際に得られる軸力値を用いる。実測は静的なデータロガーによる測定であり、また風速は我孫子市の風速値を用いている。

4.3. 結果

台風到達時、圧縮材 S2 で実測された最大軸力は-132.2kN（圧縮）であった。このときの各部材軸力の実測値と設計時の数値計算値を図 3 に示す。

圧縮材 S1 に注目すると、S1-1 材を除いて実測値が計算値の 7% 範囲内に収まっているが、S1-1 材のみ 26% だけ小さくなる結果となっている。部材 S1-1 材のひずみ計測については信頼性が低いことが報告されており^[5]、この結果も同様の原因による可能性がある。

続いて引張材に注目すると、T2 材において T2-2 材が設計通りに圧縮力を負担することで、初期張力を消失し、弛緩していることがわかる。一方で、T2-2 材と同様に短期風荷重時に圧縮力を負担し軸力が減少するはずの T2-3 材の実測軸力値が設計値より大幅に大きく、設計通りに圧縮力を負担していない可能性があることがわかる。T1 材、T3 材については実測値が計算値のおおよそ 5~10% 範囲内に収まったが、残りの材については全体的な傾向は近いものの、実測値と計算値が異なる結果となった。特に、T4 材と T5 材においてはすべての実測値が計算値と比較して 10~40% 程度小さくなった。T1 材と T3 材についても T1-1 材と T3-1 材を除いて実測値が計算値より小さくなっていることがわかる。

4.4. 前半結論

本研究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解析軸力値を比較した。その結果、実測値と解析値が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り、多くの部材において実測値が解析値より小さくなった。実際の架構と構造計算用にモデル化した架構は完全には一致しておらず、実測値と設計値は必ずしも一致するものではないが、施工時の張力導入時にはこれらの値はよく一致していたことを考えると、これらの違いは、その後 S1-1 材等の一部のひずみゲージに発生したと考えられる不具合や、データ計測時に部材ごとに厳密な時刻同期が行われてないことによるわずかな時刻のずれが影響したものと見られる。

本研究では各部材で 10 分ごとにひずみ計測を行なった。本研究で対象とした風荷重のような動的な荷重による応力を計測するには計測のサンプリングレートをより細かくし、より詳細な計測・検討を行うことで動的な応力挙動などの情報が得られると考えられ、今後のさらなる研究が期待される。

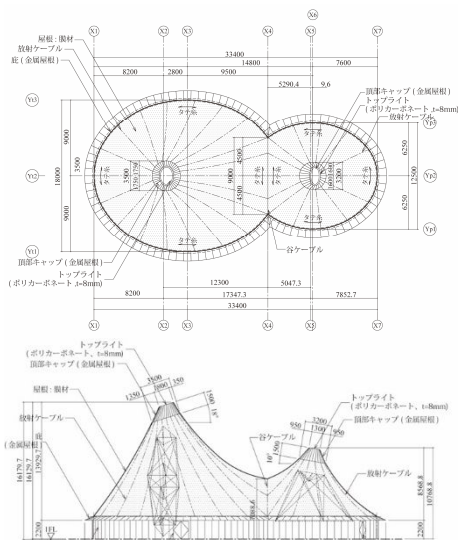


図 1 ホワイトライノ 平面図・立面図

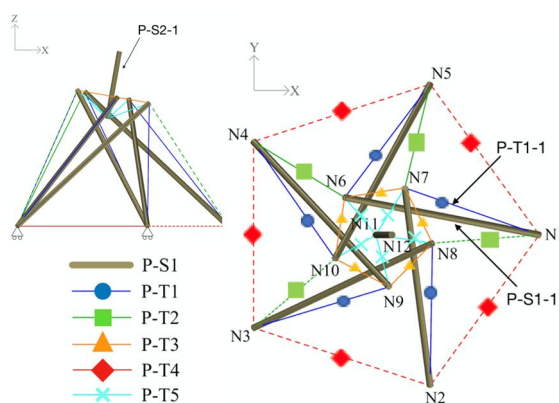


図 2 ホワイトライノ 部材構成図

4.5. 後半研究概要

本報では、ストラットの不連続性を制約条件とせずともテンセグリティ架構が「最適な」形状として現れるような条件があるかを検討するため、構造位相最適化手法として用いられているグランドストラクチャ(以下 GS)法[4]を用いて、短部材制約を用いた際の最適化によって得られる形状を考察する。

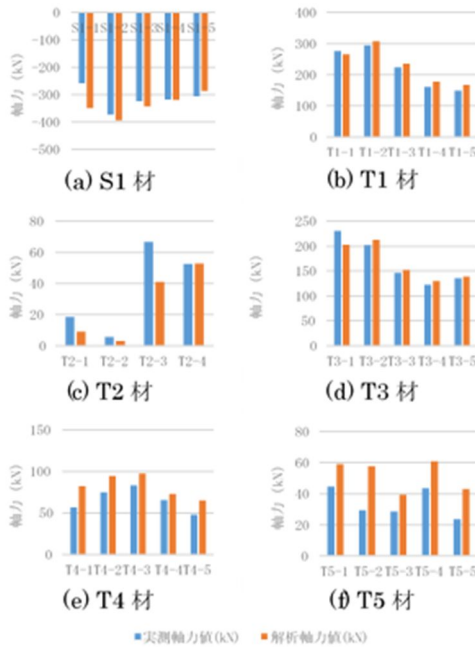


図3 各部材軸力の実測値と解析値の比較

前半参考文献

- [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 人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] 榛葉達彦, “テンセグリティ骨組みの初期張力と張力導入手順に関する基礎的研究,” 東京大学修士論文, 2016 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] 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.

4.6. 数値計算概要

図 1 に示す柱構造の位相最適化を考える。最適化対象の柱長を $L=1,000\text{mm}$ 、グリッド単位を $a=200\text{mm}$ とし、同一平面内に 6 行 3 列の合計 18 点の節点を配置する。下端中央点を支点とし、上端中央点に鉛直下向きの力 100kN を作用させる(図 1_(a))。各節点間を結ぶ要素のうち、鉛直方向要素を取り除いたものを GS-A(図 1_(b))、さらに部材長が $L/2$ 以上の部材を取り除いたものを GS-B(図 1_(c))とし、構造材として使用できる要素の上限長さが異なる 2 種の GS に対し、最適化を行う。ただし、要素同士で重複区間があり長さの異なるものはともに GS に含むものとする。要素密度 ρ を設計変数として次の定式化を行なった。

$$\begin{cases} \min & C(\rho) \\ \text{subject to} & m(\rho) < \bar{m}, \rho \geq 0 \end{cases}$$

(1)

ここに $C(\rho)$ はコンプライアンス、 $m(\rho)$ は部材体積、 \bar{m} は体積制約を表す。最適化計算には SLP 法を用いた。上記最適化計算を終えた後、得られた形状を初期形状として、支点と外力作用点を除く節点位置 \mathbf{x} を変数とし最適化を行い、さらなる最適形状を探索した。この最適化計算は MATLAB の非線形計画法ソルバーで内点法を使用した。

$$\begin{cases} \min & C(\mathbf{x}) \\ \text{subject to} & \Delta x_i \leq \bar{x} \quad \text{and} \quad l_i \leq L, L/2 \end{cases} \quad (2)$$

4.7. 最適化結果

図 2 に各最適化の結果を示す。上段は GS-A を用い、下段は GS-B を用いたものである。(a) は GS 法による最適化の結果であり、(b),(c) は(a)を初期形状とし、さらに節点位置移動距離の制約 \bar{x} を 50mm , 150mm とし再最適化した結果である。上段(GS-A)では、節点を移動させたところ、菱形の頂点が柱の中央点方向に移動し、幅の狭い形状に変化している。これはいずれの場合も制約条件の最大値 50mm , 150mm で狭い方向へ移動した結果である。制約条件不安定次数、不静定次数はともに 0 である。下段(GS-B)では、要素の最大長さが $L/2$ であるため上図とは形状が異なり、(Ba)では菱形で構成された圧縮材群 2 つが張力材によってバランスされた形状となっている。また(Bb)は(Ba)の幅を狭くした形状になっている。しかし、(Bc)では鉛直方向の中心線上の節点距離が縮まり、初期解で見られた張力材の三角形はなくなっている。不安定次数は 0、不静定次数は 1 となった。以上のことより、GS 法による最適化後に節点を動かすことで、様々な形態が創生されることがわかる。基本的には中央の一本の鉛直柱に近い形状に収束し、節点移動距離が大きくなった際に張力材が圧縮材に変わることによりコンプライアンスが小さくなる形状に変化することもわかった。

4.8. 初期点位置の乱数発生

以上までの数値解析例では初期点の位置は整形グリッド状に配置していたが、より多様な初期形状からの収束解を把握するため、初期点のグリッド配置をランダムに移動させて、同様な形状の探索を行なった。図 3 に GS と得られた最適解の一例を示す。GS 作成前の節点の移動は、水平方向、鉛直方向ともに 50mm までの範囲で乱数を用いて行なった。(a)に GS を示す。非対

称形状になっていることがわかる。なお、ここで扱うGSは、GS-Bの節点を移動させたものである。(b)はGS法による最適化の結果である。ここでも菱形で構成された圧縮材群2つが張力材の三角形によってバランスされた形状となっているが、対称性が崩れたため、張力材が1本少なくなり、不静定次数が0の形状となっている。(c)は(b)を初期形状とし、節点位置移動ベクトルを設計変数として再度最適化したもので、 $\bar{x} = 150\text{mm}$ としている。(c)では上下2箇所節点の重なりが起きており、不静定次数が0の静定トラス構造となっている。このように、非対称形を開始点とすることにより、対称形を開始点とするときと異なる解が得られることがわかった。しかし、(c)では、(b)で得られる張力の三角形がなくなっており、より単純な静定トラス構造になっている。

4.9. まとめ

骨組構造の位相最適化において、使用できる部材の長さに制約を導入し、グラウンドストラクチャの対称性を崩した検討を行なった。部材長が制約されると、グラウンドストラクチャの対称性によらず、圧縮材同士を張力材によって連結するような構造形状が得られた。しかし、そこから節点を移動させてさらに最適な形状を探索すると静定トラス構造に形状が変化する。今後は初期張力の効果やさらに短い圧縮材しか使用できないような場合の最適化を行い、テンセグリティ架構の最適性につながる条件があるかどうかを探索したい。

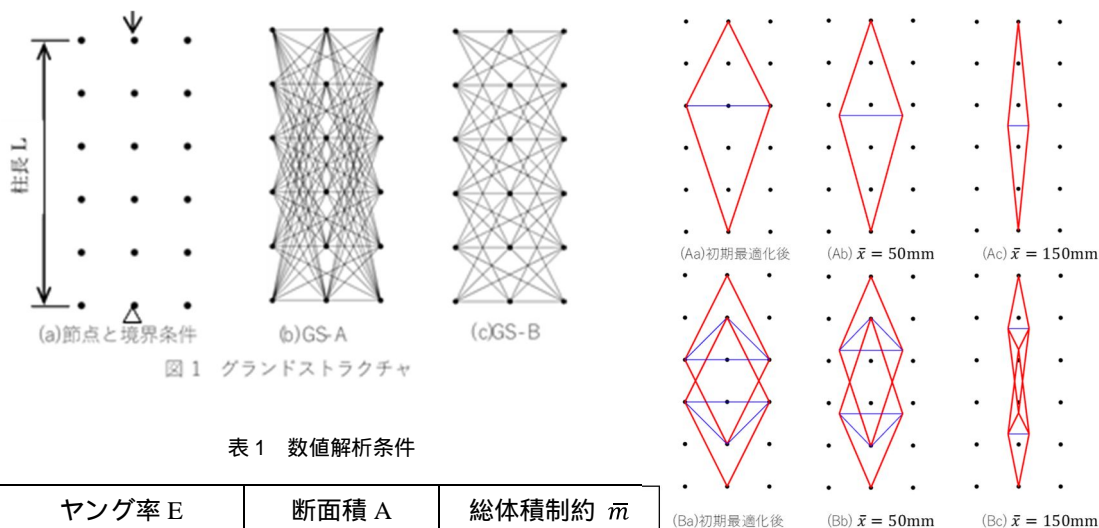
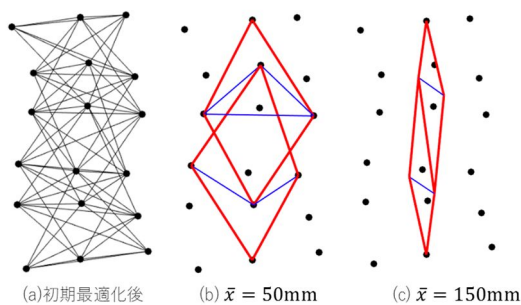


図1 グラウンドストラクチャ

表1 数値解析条件

ヤング率 E	断面積 A	総体積制約 \bar{m}
$2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$	100mm^2	10^5 mm^3



	(b)	(c)
$C(\mathbf{p})$ or $C(\mathbf{x})$ ($\times 10^5 \text{ N}\cdot\text{mm}$)	97	9.6
$m(\mathbf{p})$ or $m(\mathbf{x})$ ($\times 10^5 \text{ mm}^3$)	1	0.65

図3 最適形状とコンプライアンス値

		(a)	(b)	(c)
GS-A	$C(\mathbf{p})$ or $C(\mathbf{x})$ ($\times 10^5 \text{ N}\cdot\text{mm}$)	22	7.4	6.3
	$m(\mathbf{p})$ or $m(\mathbf{x})$ ($\times 10^5 \text{ mm}^3$)	1	0.93	0.82
GS-B	$C(\mathbf{p})$ or $C(\mathbf{x})$ ($\times 10^5 \text{ N}\cdot\text{mm}$)	100	16	10
	$m(\mathbf{p})$ or $m(\mathbf{x})$ ($\times 10^5 \text{ mm}^3$)	1	0.87	0.65

図2 最適形状とコンプライアンス値

後半の参考文献

- [1] 川口健一：一般逆行列と構造工学への応用，コロナ社，2011
- [2] 三木優彰：三項法と双対推定，日本建築学会大会構造系論文集，第77巻，pp611-618，2012
- [3] 寒野善博：混合整数計画を用いたテンセグリティ構造の最適設計法，日本建築学会大会学術講演梗概集，20452，pp903-904，2012
- [4] 藤井大地：グラウンドストラクチャ法による建築構造の形態創生，日本建築学会大会構造系論文集，第73巻，pp1967-1973，2008

4.10. 研究成果全体のまとめ

本研究では2つの研究を実施した。1は実際に東京大学柏キャンパス内に建設したテンセグリティ実構造物の張力変動の観測。軸力を10分毎に計測し、設計時の挙動と比較を行った。2019年の大型台風による風力も、設計時の最大荷重時の軸力の7割程度であったことが分かった。2はテンセグリティの最適性を検証するため、2次元のグラウンドストラクチャ法による位相最適化数値解析を実施した。節点移動も含めた最適化を行ったところ、全体としてはテンセグリティではなく静定トラスに近づく傾向が分った。目的関数をコンプライアンスではなく別の関数に置き換える必要があると考えられる。今後は、さらに数値解析による研究を進め、テンセグリティが最適化構造として得られるような条件について研究を進めたいと考えている。これらの結果は日本建築学会大会における梗概集論文として報告した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 梅田直哉, 川口健一	4. 巻 構造I
2. 論文標題 短部材制約を用いた柱状トラス構造のグランドストラクチャ法による形状決定の数値解析例と基礎的考察	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020年度日本建築学会大会(北陸)学術講演会梗概集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 坪井洸太, 川口健一, 水谷圭佑	4. 巻 構造I
2. 論文標題 実大テンセグリティ構造物の強風時実測軸力値と構造解析値との比較に関する基礎的研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020年度日本建築学会大会(北陸)学術講演会梗概集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 路越, 川口健一, 水谷圭佑	4. 巻 構造I
2. 論文標題 実大テンセグリティ構造物の実測値に基づく軸力変動に関する基礎的研究 その1 五角形型テンセグリティの軸力入れ替わり現象について	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019年度日本建築学会大会(北陸)学術講演会梗概集	6. 最初と最後の頁 937, 938
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中楚 洋介 (Nakaso Yousuke) (70756361)	東京大学・生産技術研究所・特任講師 (12601)	