

自由曲面のテンセグリティ構造を2次元からの立体化により安定化させる構法研究

○木内 俊克^{*1} 小淵 祐介^{*1} 佐藤 淳^{*2} 杉田 宗^{*1} 山本朋生^{*3} 三栖 健一^{*1} 小野原大^{*1} 一居 康夫^{*3} 藤原 圭祐^{*3} 丹羽 俊介^{*3} 木村 達台^{*3}
江村 勝^{*3} 百野 泰樹^{*3} 岡本 隆秀^{*3} Ana Soares^{*1} Christopher Sjoberg^{*1} Ma Sushuang^{*1} Miguel Puig^{*1} Shin Yeonsang^{*1} Tong Shan^{*1} Zhang Ye^{*1}

キーワード: パラメトリックデザイン、物理シミュレーション、2次元からの立体化、テンセグリティ、自由曲面、デジタルファブ리케이션

■ 序

本研究は、自由曲面のテンセグリティ構造を2次元からの立体化により安定化させる構法のケーススタディとして、2012年10月から2013年10月現在までに東京大学大学院建築学専攻小淵祐介研究室（以下、小淵研）、同佐藤淳研究室（以下、佐藤研）と株式会社大林組（以下、大林）との協働にて仮設パビリオンの設計、プロトタイプ製作を行い、その成果をまとめたものである。部材加工・制作にはAnS Studio・竹中司氏の協力を得た。

2013年11月までに同成果に基づき、仮設パビリオンの本制作及び施工を行うことを予定しており、12月の口頭発表においては、同本制作及び施工での成果も合わせて報告することが予定されている。

本研究のケーススタディにおいては、パビリオンの設計及び施工検討にあたって導入された諸情報技術によりもたらされる **1. 設計プロセス** **2. 施工方法** **3. 建築構造** のそれぞれにおける革新性という観点から、本研究の成果と付随する問題点を検証し、その発展可能性を考察することにある。

■ 背景および目的

20世紀初頭以来、現在に至るまで国際的な枠組みの中で確立されてきた近現代の建築生産システムは、2次元の図面の組み合わせによる指示を基本とする、直行系の座標を持ったモジュールに従い確立されてきた。

一方で、フライ・オットーが1982年の自著の中で「今日の目標は自然な建物と都市をつくることである—中略—人間とその技術が自然と不可分であるような状態を作り上げることである」と述べている¹⁾ことに顕著だが、自然の持つ合理性を取り込むことを目的とした3次元的な曲線・曲面を基調とした有機的な建築への取り組みは、1960年代以降徐々にその例を増やし、現代では90年代後半以降の情報技術の飛躍的革新の支えを得て、一定量の事例を蓄積するに至っている。

しかしながら、3次元的な曲面を構成する建築部材の生産システム及びその施工過程は、依然として非常に複雑な生産過程や大量の仮設資材を必要とするケースや、膨大な図面による建築形状の指示に基づく職人の手作業等を必要とするケースも多く、特に経済的な観点から十分に合理的な生産過程や構法の確立には至っていないのが現状と言える。

的な生産過程や構法の確立には至っていないのが現状と言える。

本研究では、これらの問題意識に基づき、従来の建築生産システムにおける技術体系で十分に対応可能な2次元の情報で部材形状を定義し、かつ組み上げまでを平面上で行うことで煩雑な生産や仮設構造を回避しながら、簡易な施工過程のみにより3次元形状を生み出し、成果物としては有機的な曲面のもつ合理性を獲得することを目的とした。

パビリオンの具体的なデザイン、施工及び構造検討にあたっては、アントニオ・ガウディ、フライ・オットーによる一連の懸垂曲線を用いたフォームファインディングに基づく設計プロセス¹⁾、ケネス・スネルソンによるテンセグリティ構造²⁾、セシル・バルモンドによる「エレメント」展でのテンセグリティ構造を応用したインスタレーション³⁾、といった事例を先行研究として参照しつつ、後述する特定の情報技術の導入により、上述した目的の実現を試みた。

■ 研究概要

本研究は2012年10月から2013年10月までの期間に渡り展開してきており、大きく次の3段階を経て現在に至っている。

- A. テンセグリティ構造のワークショップ
[2012年10月—12月]
- B. テンセグリティ構造を応用したパビリオンデザインと縮尺模型によるプロトタイプ制作
[2013年1月—3月]
- C. 情報技術の導入による、パビリオン設計及び構造・施工検討
[2013年4月—9月]

A及びBの過程については概略を後述するに留めるが、以下の3点が、A、Bでの成果を元にCにおいて小淵研、佐藤研、大林の協働にて獲得した主要な研究課題である。

1. 設計プロセス

パラメトリックモデルと物理シミュレーションを活用し、回転面に類する自由曲面をベースとしたフォームファ

インディングを通して、漸近的にパビリオンの幾何形状を定義する。

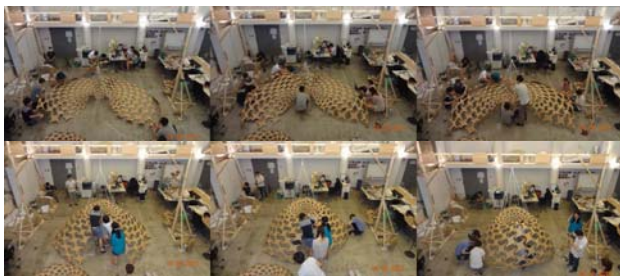
2. 施工方法

同じく物理シミュレーションを活用し、自由曲面に沿ってネットワークされたテンセグリティ構造ユニット群を近似的に展開、組立時に一切の仮設構造を要さない平面上での作業性を担保し、また軽量クレーンによる吊り上げのみにより、パビリオン形状を自由曲面へと組み上げる簡易かつ迅速な施工方法を成立させる。

3. 構造

2次元展開時の変形追従性能を担保する柔軟性と、自由曲面を形成した際に成立する十分な剛性を併せ持ったテンセグリティユニットによる構造体を実現する

A及びBの過程では、小渕研の学生が取り組む設計製図課題におけるワークショップ形式にて、パビリオンの基本的な構造単位となったX字型のテンセグリティユニットを、様々な形で面状に組み、その挙動を検討した。同ユニットは、平面あるいは展開可能な種類の柱面状に組み込まれた状態ではテキスタイルのような柔軟さを保つ一方、閉じた回転面に類する自由曲面上に沿って配置された際には飛躍的に剛性が高まり、構造体として3次元的全体形状を保つことが観察された。また回転面に類する自由曲面上に沿って配置・ネットワークされた構造ユニット群は、閉じた面を同面内の等曲線に沿って一部開くことにより、不完全な形ではあるが、ユニットの変形追従性により近似的に扇形に類する形で平面に展開可能であることが、複数の縮尺模型^[図1]による検討の結果、観察された。



【図1】縮尺模型によるパビリオンの2次元展開可能性の検討

続いて以下に、2013年10月現在までの検討による仮設パビリオンの仕様を列記する。

構造形式：

回転面に類する自由曲面に沿ったテンセグリティ構造
素材：

テンセグリティ構造部

—ステンレス薄板3枚(0.5mm厚板による両面仕上げ、サイズに応じて0.8mm、1.2mm、1.5mmの中板)を貼り合わせ、膨らませ加工した全て形状の異なる圧縮構造ユニット
—ステンレスワイヤーロープ3mm引張材

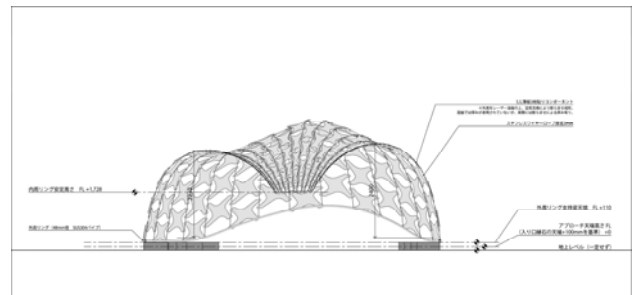
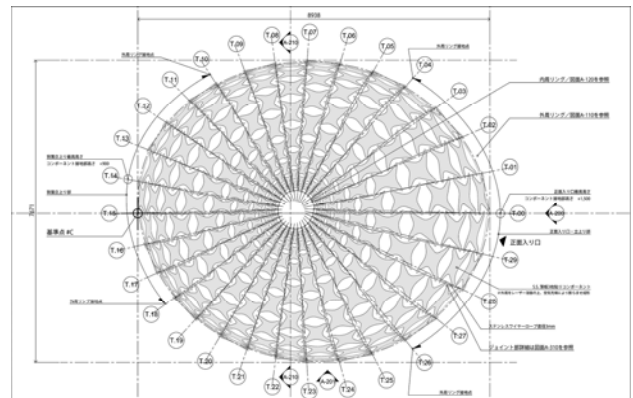
—アルミオーバルスリーブ、M6ステンレスボルト接合部
土台

—ステンレスパイプΦ48mm、ステンレス金物・M8ステンレスボルト接合部

基礎 プレキャストコンクリートブロック独立基礎
形状：

構造物は、平面上でつなぎ合わせた状態では半径7mの扇形におさまり、これを16トン軽量クレーンにより吊り上げて成形、基礎に緊結、固定する。

3次元に組み上げられた状態では9m X 7.8mにおさまる楕円形の平面形状、最高高さ4m。中心部のリングは地面に接しておらず中空に浮いた形状とし、地上への応力伝達は外周の土台リングのみによる。



【図2】パビリオンの平面図及び、短手断面図

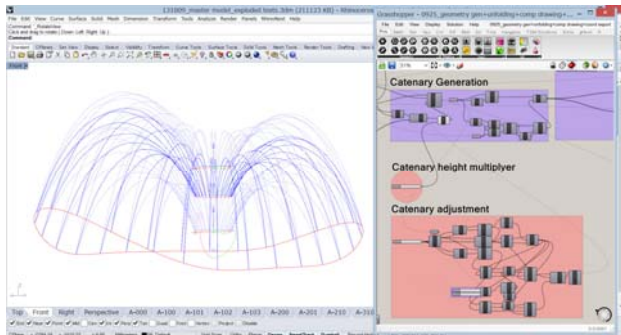
■ 設計プロセス、施工・構造検討における情報技術使用

1. 設計プロセス

前項において指摘したとおり、構造体としては回転面に類する自由曲面に沿ってテンセグリティユニットを配置・ネットワークした際に飛躍的にパビリオンの剛性が高まる傾向が観察されたことから、設計プロセスにおいては、第一に、3次元CADとしてRhino5.0を用い、同ソフトウェアのプラグインであるGrasshopperによるパラメトリックモデル上で、回転面に類する自由曲面のバリエーションを、変数を用いてモデリングした。

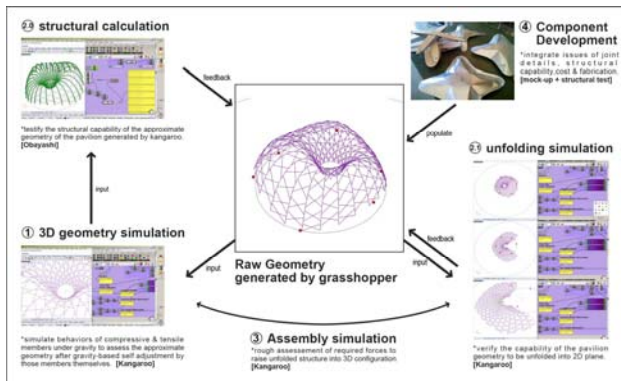
自由曲面は、意匠的な観点から形状決定した内外周リングを起点に、同リングを互いに対応する同数の点で分割した後、対応する内外周の分割点をつなぐ形で、Z軸正方向

に凸な懸垂曲線を定義、これらを連続的につないだ面とした。入力値である内外周リングの形状及び高さ、内外周分割点間の距離に対する各懸垂曲線の長さ比、後述する物理シミュレーションによる検討で用いた懸垂曲線形状の補正用変形値、^[図3]が変数として取り扱われた。



〔図3〕 懸垂曲線によるパビリオン形状の定義（画面左）を行う、Grasshopper内プログラム内の一部位（画面右）

次に、Grasshopper上でモデリングした同自由曲面上に、同じ単一のGrasshopperプログラム内で、懸垂曲線を引張材として置き換え、隣接する引張材の間にX字型の圧縮材を互い違いに配置した。さらに、Grasshopper上での物理シミュレーションを可能にするKangarooというプラグインを用い、同構造ユニット群のネットワークが重力下で示す挙動を、同単一のGrasshopperプログラム内でシミュレーションした。^[図4]

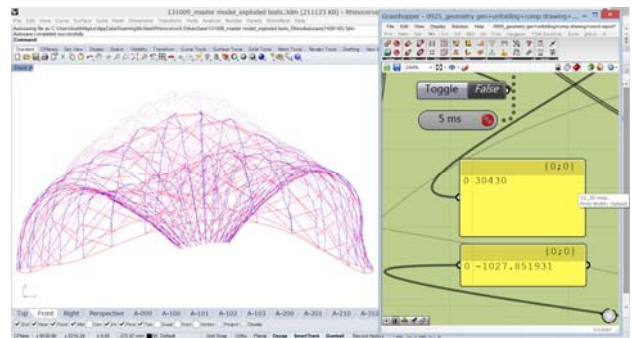


〔図4〕 Grasshopperによる懸垂曲線を用いたパラメトリックモデリング、Kangarooによる3次元自由曲面形成時のシミュレーションを含む、プロジェクト全体のワークフローダイアグラム

シミュレーションの結果、パビリオンの全体形状は、純粋な懸垂曲線から、土台となる外周リング側でパビリオン外部に向かって膨らみ、内周リングは一定の割合でZ軸負方向に沈み込んだ後、内周リング付近の面がごくゆるやかな負の曲率に変形した断面形状で安定することが確認された。

また、外周リング側での膨らみを相殺する目的で、事前に懸垂曲線を補正し、より鋭利な凸形状をZ軸正方向に与えるスタディを試みた^[図5]が、懸垂曲線から一定以上変形を

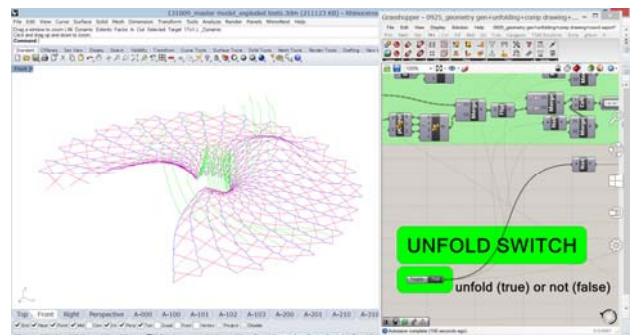
与えると、同方向に向かって座屈を生じ、安定が得られないことが確認された。



〔図5〕 懸垂曲線頂部で最大30%、各懸垂曲線の中心に向かって平面的に縮小し、鋭利な凸型を形成した幾何学形状のシミュレーション結果。採用案でほぼ安定する30,000イテレーション後で1,027mm内周リングが沈み込み、右手土台の外周リング上に座屈が見られる

2. 施工方法

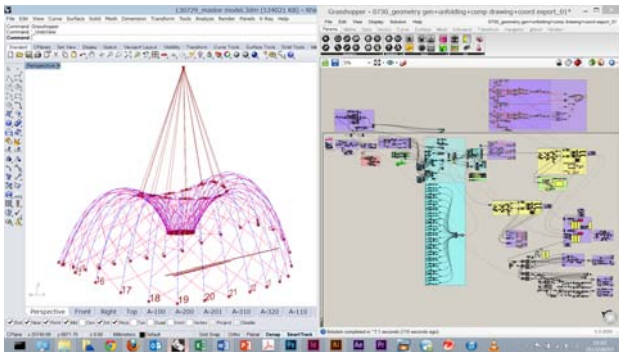
設計プロセスにて、構造体としての安定性が確認されたモデルに対し、同じく単一Grasshopperプログラム内での物理シミュレーションを活用し、モデリングされた自由曲面内の等曲線に沿って面を開き、同テンセグリティ構造ユニット群を近似的に平面に展開可能であるかをシミュレーション^[図6]した。



〔図6〕 等曲線に沿って展開されたパビリオンのシミュレーション。緑色の線が、3次元自由曲面形状からの展開を示す軌跡を描いたもの。

自由曲面が最高高さを通る等曲線に沿って開いた場合は、特に平面上で180°反対側に位置する部位が膨らんだまま、展開しきれていないことが確認されたが、上記最高高さを通る等曲線に加え、平面上で180°反対側に位置する懸垂曲線頂部を通る等曲線も同時に開き、二分割した状態で展開することで、大きな歪みを伴わずに展開可能であることが確認された。（なお、シミュレーションにあたっては、各モデルの支持点に重力を与えた上、補助的に外周リングに接続する端部をパビリオン外側に向かって引っ張る力を同時に与えている。）

更に、展開可能性が確認できたモデルに対して、クレーンによる一定のプロセスに基づいた2次元の展開時から3次元形状への施工過程を、同様にGrasshopperプログラム内の物理シミュレーションを用いて行った。^[図8]



【図8】2次元展開時から3次元形状に至るまでのクレーンの吊り上げシミュレーション。上記では中心に吊元を集めて吊り上げる方法を模索していたが、10月現在ではクレーン、パビリオン間に吊り治具をかませ、極力垂直に近い形で引き上げる案を採用した。

同シミュレーションでは、クレーンに設置できる吊り上げ用ロープを、設計された3次元形状に到達した際の各吊り点の高さから、吊り治具までの距離として定義した固定長さによっていることを反映させ、①施工過程で最高高さ部位に近い位置から徐々に吊り上げがはじまり、②全構造体が一度すべて浮いた状態まで吊り上げ、③外周の土台リングに足元を固定し、④開いていた等曲線に沿ってシームをつなぐ、といった段階的なプロセスに沿った形で施工プロセスの検討を行った。

検討事項としては、第一に特定の展開された形状がクレーンによる吊り上げにより組立て可能か、第二に、可能な場合、何ヶ所の吊り点をどこに配置すればそれが可能かを検討した。二分割した状態で展開したそれぞれの構造ユニット群に対し、安定した吊りを担保する最小限の数である各3ヶ所の吊り点を、同点を通る等曲線の最高高さ部位に設置することで、シミュレーション上問題なく吊り上げられることが確認された

なお、上記の施工方法は、物理シミュレーションの後、縮尺模型での実験により、酷似した挙動が観察できることを、合わせて確認した。

3. 建築構造

通常のテンセグリティ構造は立体的な構成をもち、圧縮材と引張材の接合点を固定すれば、部材自体の変形を無視すれば一切の変形を許容しないが、本研究では、2次元で構造体を組み、3次元形状に至り、一定の安定性を獲得するまでは積極的に変形を許容する構造システムであることが要求された。

具体的な構造検討のプロセスとしては、完成時の3次元形状、施工過程の物理シミュレーションにより得られる、クレーンによる吊り上げ時形状を、3次元CAD上の線データとして非線形解析に入力、同解析により得られる各構造部位の変形と、各部材支持点における応力分布を求めることで、3次元形状に至るまでの変形追従性から不可抗的に発生する安定時の沈み込みが十分な許容範囲内にあること、設計された構造ユニット部材の耐力が、応力分

布に対して十分なものであることを確認した。

■ 成果と問題点、及び発展可能性

冒頭に記載したとおり、本研究に基づいた仮設パビリオンの本制作及び施工については、2013年11月を待たねばならず、最終的な成果の確認には至っていないが、ここまでの設計プロセス、施工方法及び構造検討において、物理シミュレーションを統合したパラメトリックモデリングにより、懸垂曲線をベースにしたフォームファインディング、2次元から3次元までの変形追従性を持った構造体のデザイン、その施工過程の詳細な検討、及び施工過程までも包含した構造検討用データのシームレスな作成、といった作業が可能となったことは、冒頭に「背景」と共にして掲げた「従来の技術体系で対応可能な2次元情報による部材定義、平面上での組みによる煩雑な生産・仮設物回避、簡易な施工過程による3次元形状の達成、3次元曲面のもつ合理性の獲得」といった項目を一定程度達成できた点で成果を確認でき、同過程を統合的に実践したケーススタディとして、本研究の革新性が指摘できる。

一方で、今回物理シミュレーションの演算に用いたKangarooでは、厳密な意味での力学的な挙動を定量的に反映するには至っておらず、Kangaroo内でのシミュレーションの妥当性については、別途縮尺模型との照応、構造計算による確認といった作業の上に担保している点を指摘しておく必要がある。

今後これらシミュレーションの妥当性をプロモートできれば、より有機的な設計・施工・構造検討の一体化した、建築におけるシームレスなデザインプロセスが可能になり、本研究で課題とした2次元から3次元の曲面形状へスムーズに移行する構造体といった事例を含む、より広範かつ革新的な建築生産の可能性が広がるものと考えられる。

【参考文献】

- 1) SD選書201「自然な構造体」(1986年、フライ・オットー他著、岩村和夫訳、鹿島出版会)
- 2) Kenneth Snelson; Art and Ideas (Web Publication: Kenneth Snelson ©2013 Kenneth Snelson)
- 3) 『『エレメント』構造デザイナー セシル・バルモンドの世界』展(2010年1月16日—3月22日、東京オペラシティアートギャラリー)

- *1 東京大学工学系研究科建築学専攻小淵研究室
 *2 東京大学工学系研究科建築学専攻佐藤研究室
 *3 大林組本社 *4 大林組東京本店