

テンセグリティ構造を応用した橋梁の設計に関する研究

A study on bridge design using tensegrity structures

ZHENG JIE^{*1}, 今井 弘^{*2}

Tei ketsu^{*1}, Imai Hiroshi^{*2}

ものづくり大学大学院ものづくり学研究所

Institute of technologists, Graduate School of Technologists

Email: g02421014.jz4@iot.ac.jp

あらまし：本研究は、テンセグリティ構造を歩行者橋へ応用することを目的とし、テンセグリティ吊橋の構造形式を提案した。既往研究を踏まえた構造計画を行い、自重・活荷重・地震作用を考慮した有限要素解析により妥当性を検証した。その結果、各荷重条件下において安定した構造挙動が確認され、本構造の実用可能性が示された。

キーワード：テンセグリティ構造，歩行者橋，軽量構造，構造解析

1. はじめに

近年、山岳地帯や河川流域において、歩行者専用吊橋は人々の生活動線や観光資源として重要な役割を果たしている。一方で、老朽化や過荷重、維持管理不足に起因する事故も世界各地で報告されており、従来型吊橋が抱える安全性および耐久性の課題が顕在化している。特に、地形条件が厳しい地域では、大型重機の導入が困難であり、軽量かつ施工性に優れた新たな橋梁構造の検討が求められている。

このような背景のもと、本研究では、圧縮材と圧縮材を明確に分離し、張力ネットワークによって全体が安定するテンセグリティ構造に着目する。テンセグリティ構造は、少量の材料で立体構造を成立させることが可能であり、軽量性、冗長性および独自の造形性を兼ね備えた構造形式として注目されている。

本研究の目的は、テンセグリティ構造の特性を橋梁設計に応用し、歩行者専用橋として成立し得るテンセグリティ橋の構造形式を提案するとともに、構造解析を通じてその妥当性を検証することである。

2. テンセグリティ構造と既往研究

2.1 テンセグリティ構造の概要

テンセグリティ (Tensegrity) とは、「tension (張力)」と「integrity (統合性)」を組み合わせた造語であり、圧縮同士が直接接触せず、張力のネットワークによって全体が安定する構造形式を指す。

最大の特徴は「少量の材料で安定した立体構造を成立させる」点にある。圧縮材は浮遊するように引張材に支えられ、接触することなくバランスを保つため、軽量でありながら高い剛性を実現できる。

2.2 既往研究の整理

テンセグリティ構造を歩道橋に応用する研究は、主に展開性や施工性に注目して進められてきた。Feron らは、展開可能なテンセグリティ歩道橋を対象に静的解析および最適化を行い、軽量構造としての有効性を示している。一方で、張力調整や施工誤

差への感度が課題として指摘されている。⁽¹⁾

また、Sychterz らは、ほぼ実物大のテンセグリティ歩道橋を対象に数値解析と実験を組み合わせ、張力の不均衡や接合部摩擦が全体形態に大きく影響することを明らかにしている。これらの研究から、テンセグリティ橋の実用化には、構造形式の単純化と力の流れを明確にした設計が重要であることが示唆される。⁽²⁾

3. テンセグリティ吊橋の提案

本研究では、テンセグリティ構造の原理を歩行者専用吊橋に応用したテンセグリティ吊橋を提案する。提案構造は、複数のテンセグリティユニットを橋軸方向に連続配置し、圧縮材と引張材による力のバランスによって橋全体を支持する構成とした。

圧縮材は小径かつ軽量の棒材を用い、引張材にはケーブルを使用することで、全体として浮遊感のある軽快な形態を形成している。また、ユニット間を連結する引張材を多重化することで、荷重の均等分散と剛性の向上を図っている。

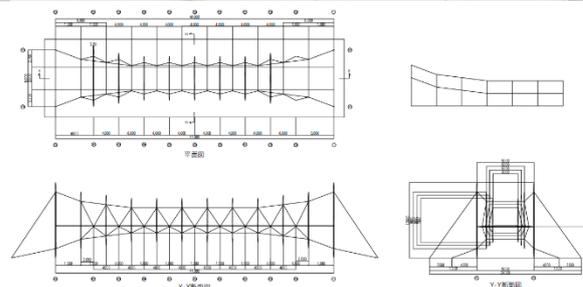
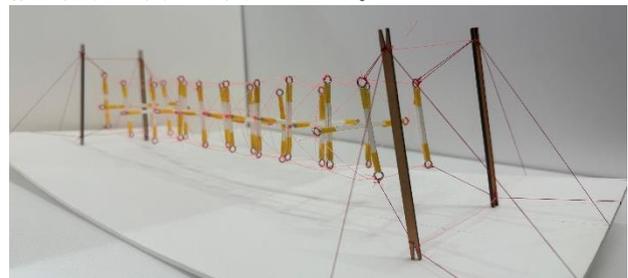


図1 テンセグリティ吊橋 模型と図面



図2 テンセグリティ吊橋 パース図

4. 構造解析による妥当性の検証

本節では、提案したテンセグリティ吊橋について、有限要素解析ソフト MIDAS iGen に基づく構造的妥当性の検証結果を示す。

固定荷重、活荷重および地震作用を考慮した解析を行い、変位および部材応力の観点から、本構造が歩道橋として要求される使用性および安全性を満足していることを確認した。

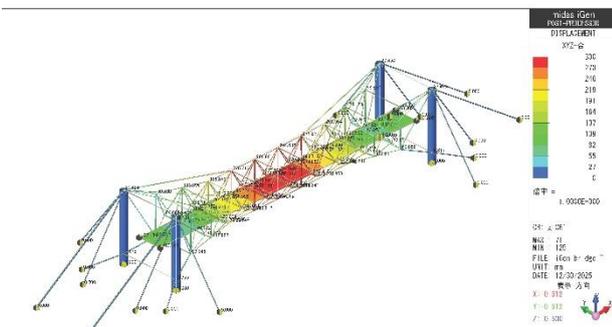


図3 固定荷重+活荷重による変形図

図2は、固定荷重および活荷重作用時における変位分布を示したものである。本橋の最大変位は支間中央付近に生じており、その値は歩道橋の設計ガイドラインに示される $\delta \leq L/500$ の使用性基準を満たしている。(3)

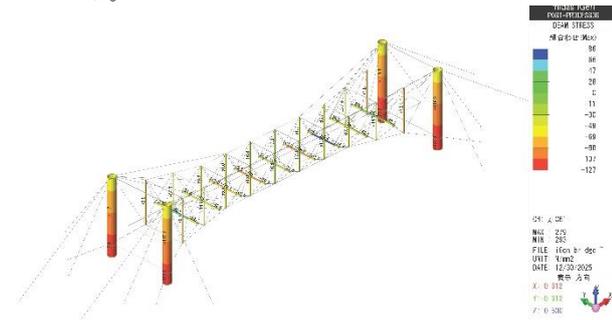


図3 荷重組み合わせによる部材応力分布図

図3は、歩道橋の設計活荷重 3.5 kN/m^2 を含む固定荷重および活荷重の荷重組み合わせ時における部材応力分布を示したものである。活荷重を考慮した場合においても、局所的な過大変形や応力集中は確認されず、最大応力度は SN400 鋼材の簡易許容応力度（降伏応力度の $1/3$ ）を下回っており、構造安全性の観点から本構造は合理的であることが確認された。

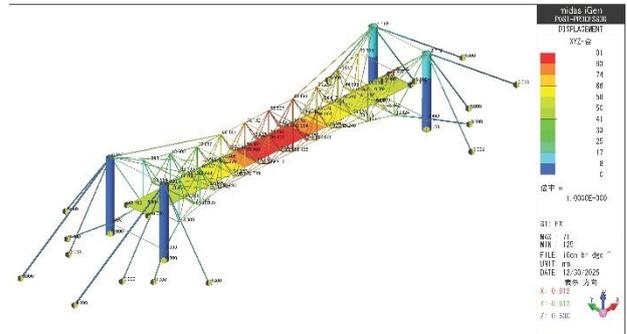


図4 地震動EXによる変形図

日本道路協会『道路橋示方書V 耐震設計編』では、稀に発生し得る強い地震動（レベル2地震動）を対象として、橋梁の耐震性能を評価することが示されている。(4)

図5は、この考え方にに基づき、レベル2地震動を想定した地震作用に対する構造解析を行った。その結果、地震時においても橋全体に著しい変形は生じておらず、構造挙動は安定していることが確認された。

5. まとめ

本研究では、テンセグリティ構造の特性に着目し、歩道橋への応用可能性について検討を行った。

圧縮材と引張材を組み合わせた吊橋形式のテンセグリティ歩道橋を提案し、構造計画および形態の整理を行った上で、有限要素解析による検証を実施した。解析の結果、自重、活荷重、地震動を考慮した各条件下において、変位および部材応力はいずれも設計基準を満足し、提案構造が歩道橋として必要な使用性および安全性を有することを確認した。

以上より、本研究で提案したテンセグリティ吊橋は、実橋を想定した構造形式として十分に成立し得る可能性を有しており、今後のテンセグリティ構造橋梁の設計に対する一つの有効な指針を示すものである。

参考文献

- (1) Feron, J., Menegeot, P., Latteur, P. (2021). 展開可能なテンセグリティ歩道橋 — 静的設計と最適化.
- (2) Sychterz, A. C., Smith, (2018). テンセグリティ歩道橋における展開と形態変化 — 実大実験と数値解析.
- (3) 歩道橋の設計ガイドライン (Guidelines for the Design of Footbridges), 土木学会, 丸善出版, 2010.
- (4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 丸善出版, 2017.