

テンセグリティの秘密

2年3組 那須 星羅

2年3組 宮脇 世理

2年4組 田中 美空

2年4組 前田 優空

指導者 大久 憲一

1 課題設定の理由

近年、日本では大規模地震への備えが重要な社会課題となっている。中でも南海トラフ地震は、今後30年以内の発生確率は60%~90%とされており、(令和7年9月26日)甚大な被害が予測されている。この地震の特徴の一つに、長周期地震動がある。

長周期地震動は、揺れの周期が長く、高い建物ほど大きく揺れるという特徴をもつ。そのため、高層建築物では地震動と建物の揺れが共振し、被害が拡大する可能性が指摘されている。

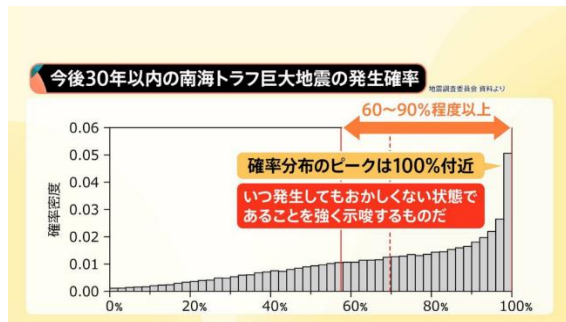
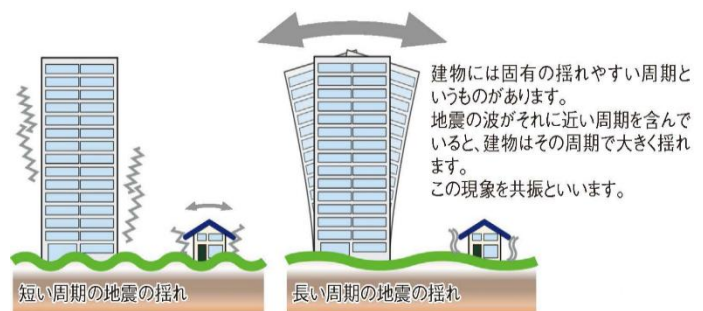


図1 政府の地震調査委員会より



地震調査研究推進本部事務局の資料

図2 長周期地震動のイメージ

一方、構造物の分野では、地震による揺れを軽減するための新しい構造の研究が進められている。その中で本研究では、テンセグリティ構造に着目した。テンセグリティ構造は、圧縮材同士が接合されず、張力材とのバランスによって全体が成立するという、一般的な構造物とは異なる特徴をもつ。また、少ない材料でも安定した立体構造を保つことができるという利点がある。

これらの特徴から、テンセグリティ構造は地震時のエネルギーを分散させ、特に長周期地震動に対して有効に働く可能性があるのではないかと考えた。そこで本研究では、テンセグリティ構造の振動特性、特に固有周期に注目し、その性質を明らかにすることで、防災への応用可能性を検討することを目的として課題を設定した。

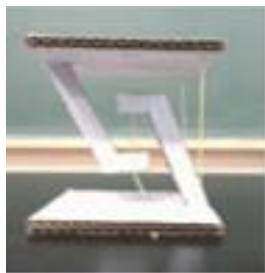
2 仮説

- (1) テンセグリティ構造は、圧縮材同士が直接接合されておらず、張力材とのバランスによって成立しているため、接合部分が少ない構造である。このため、構造全体の剛性が比較的低くなり、一般的な構造物と比べて固有振動数は小さくなると考えられる。したがって、テンセグリティ構造は長周期地震動と共振しにくく、揺れを低減できるのではないかと。
- (2) テンセグリティ構造は、少ない材料でも安定した立体構造を形成できるという特徴をもつ。この性質を活かすことで、防災用品に応用でき、材料の削減や持ち運びの容易さにつながるのではないかと。

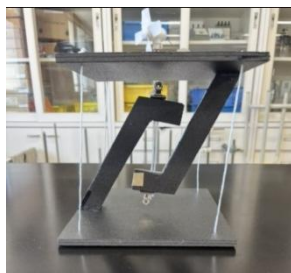
3 研究の方法

(1) テンセグリティ模型の作成

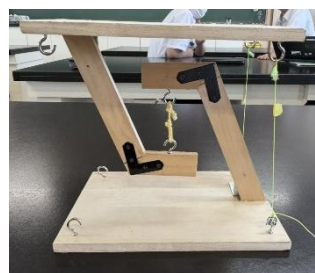
テンセグリティ構造の基本形を参考に、段ボール・カラーボード・木材を用い、張力材として刺繍糸・ミシン糸を用いた模型を作成した。(図3)



I 段ボール+ミシン糸



II カラーボード+ミシン糸



III 木材+釣り糸

図3 テンセグリティ模型

これらのテンセグリティは作成する際に個体差が出てしまい、複製することが難しかった。また、糸がすぐに抜けてしまうなど様々な問題点が見つかった。

そこで、複製可能な、図4の模型を作成し、スティック棒と糸の本数や材質の違いが固有周期に与える影響を比較できるようにした。圧縮材の長さや配置はできる限り同一条件となるように調整した。

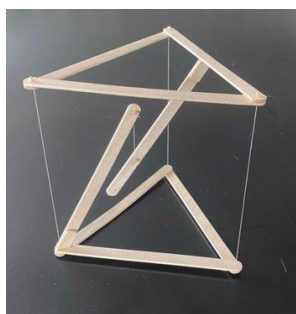


図4 複製可能な模型

(2) 振動実験の方法

作成したテンセグリティ模型を静止させた状態から、一定の大きさを揺らし、自由振動させた。その際、振動が安定してからの往復運動を観察し、一定回数(例:10回)の振動に要した時間を測定した。測定は各条件について複数回行い、誤差を小さくするようにした。

(3) 固有周期の算出

測定した時間を振動回数で割ることで、1回あたりの振動時間を求め、これを固有周期とした。得られた数値は条件ごとに整理し、糸の種類や本数の違いによる固有周期の変化を比較した。また、測定結果は表およびグラフにまとめ、視覚的に比較できるようにした。

(4) 荷重実験の結果と考察

テンセグリティ構造の耐荷重特性を調べるため、上部に10円玉を1枚ずつ載せる実験を行った。

4 結果と考察

(1) テンセグリティ構造の固有周期の測定結果

糸の種類及び中心本数を変えたテンセグリティ模型について、固有周期を10回測定しその平均値を表1に示す。

表 1 張力材の種類と中心本数の違いによる固有周期

張力材の種類	固有周期 (s)
ミシン糸中心1本	0.3537
ミシン糸中心2本	0.4262
釣り糸中心1本	0.1463
釣り糸中心2本	0.1563

(2) 糸の種類による固有周期の比較

糸の材質や本数によって固有振動が大きく変化することが分かる。釣り糸を用いた場合、ミシン糸と比べて固有周期が小さくなる傾向が見られた。これは、釣り糸が伸びにくく、張力が安定して保たれるため、振動時の変形が小さくなったことが原因であると考えられる。一方、ミシン糸は比較的伸びやすいため、振動の際に構造全体の変形が大きくなり、固有周期が長くなったと考えられる。

(3) 荷重実験の結果と考察

表 2 テンセグリティ構造の耐荷重

10円玉の枚数	力 F (N)	たるみ量 $\Delta \ell$ (cm)	たるみ定数 $\Delta \ell / F$ (cm/N)	安定性
5	0.22	0.2	0.91	安定
10	0.44	0.5	1.14	やや不安定
15	0.66	1	1.52	やや不安定
20	0.88	1.2	1.36	不安定
25	1.1	2.3	2.09	崩壊寸前
30	1.32	—	—	崩壊

※ 表中のたるみ定数は $k = \Delta \ell / F$ (cm/N) と定義する。これは 1N あたりの糸の伸びを表す量である。

本研究では、テンセグリティ構造の耐荷重特性を調べるため、上部に 10 円玉を 1 枚ずつ載せる実験を行った。その結果、10 円玉 30 枚（約 135g）まで構造を保持することができたが、荷重が増加するにつれて、特定の糸にたるみが集中する様子が観察された。

表 2 から分かることを以下に示す。

- ・ 5～20 枚 (0.22～0.88N) では、たるみ定数は大きくは変化せず、糸はほぼ弾性限界内にあると考えられる。
- ・ 25 枚 (1.10N) では、たるみ定数が急激に増加しており、比例関係が崩れ、弾性限界に近づいたことが分かる。
- ・ 30 枚では力のつり合いが成立せず、構造は崩壊した。
- ・ 糸のたるみ量は、加えた重力にほぼ比例して増加した。
- ・ 約 1.1N を超えると弾性限界に達し、構造的に崩壊寸前になった。よって、この構造が安定に支えられる最大の力は 約 1N 程度である。

特に、10 円玉を 10 枚以上載せた段階から、1 本または複数の糸のたるみが大きくなり、構造全体の安定性が低下した。これは、テンセグリティ構造が「圧縮材」と「張力材」のバランスによって成り立っているため、一部の糸の張力が弱まることで、全体の力のつり合いが崩れやすくなるためであると考えられる。

また、崩壊直前には糸のたるみが急激に増加し、構造の変形が目に見えて大きくなった。このことから、テンセグリティ構造には、耐荷重の限界に近づくにつれて変形が顕著になるという特性があることが分かった。したがって、糸の種類とその張力を均一に保つことが、テンセ

グリティ構造の耐荷重性を高めるうえで非常に重要であると考えられる。

これらの結果は、テンセグリティ構造の固有周期を調整することで、長周期地震動との共振を避けられる可能性を示している。南海トラフ地震に代表される長周期地震動は、高層建築物に大きな影響を与えるとされているが、テンセグリティ構造のように振動特性を制御できる構造は、防災・減災の観点から有効であると考えられる。

一方で、本研究にはいくつかの課題もある。今回の実験は模型を用いたものであり、実際の建築物とはスケールや材質が異なる。また、振動の与え方や測定方法による誤差も完全には除去できていない。今後は、模型の大きさや形状を変えた実験や、荷重実験と組み合わせた検討を行うことで、テンセグリティ構造の実用性をより詳しく評価する必要がある。

5 まとめと今後の課題

テンセグリティ構造は、振動特性と構造的安定性の両面から、長周期地震動に対する防災・減災に貢献できる可能性をもつ構造であると結論づけられる。今後は、より実際の構造物に近い条件での実験を行うことで、実用化に向けた検討が期待される。

本研究を進めるにあたり実験に使用するテンセグリティ構造の作成をはじめ、多くの御助言をいただいた大久憲一先生に、この場をお借りして感謝申し上げます。

6 参考文献

- <https://www.jishin.go.jp/>
- <https://www.risuuhakusyo.com/dannseigenndo>
- https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/jishin/choshuki/choshuki_eq1.html
- https://think-with-kids.com/tensegrity-intro/#google_vignette