

【研究ノート】

一葉双曲面構造の剛性、強度分析

井上采音¹, 太田垣侑亮¹, シモンズ愛花¹, 大和武晴¹, 松岡瞳¹

¹ 兵庫県立長田高等学校, 3年

一葉双曲面構造とは円柱の上下面をねじることで側面が曲線を描く構造である。先行研究から、この構造は自重に対して強いと知られているが、外力に対する剛性わかっていない。そこで、この構造の実用性を高めるため、円柱をねじった独自の模型を作成し、それぞれ模型上部を横方向に引く実験(実験1)と模型を押しつぶす実験(実験2)を行った。その結果、実験1では模型のねじる角度が60°。実験2では150°の時に最も剛性が高まった。

キーワード：一葉双曲面構造, 角度, 剛性, 強度

1. はじめに

私たちの住む神戸の象徴、神戸ポートタワーには一葉双曲面構造が用いられている。この構造は側面に美しい曲面を持つ非常に魅力的な形であるが、身近な活用例は少ないため、一葉双曲面構造の実用性を高め、社会に普及させたいと考えた。参考文献では一葉双曲面構造が自重に対して剛性を持つことが分かっている¹⁾。しかしこの構造の外力に関する先行研究は見つからなかった。そのため縦方向の外力に対する強度と横方向の外力に対する剛性は、それぞれ上面下面の円を円柱の状態から何度ねじったときに一番高くなるのかを調べ、一葉双曲面構造を最適な条件で活用できるようにしようと考えた。

2. 研究手法

2.1 模型, 装置

自作の模型を作成するために段ボールと竹串, ボンド, 髪ゴムを使用した。(図1)(以降, 上側の段ボールを上面, 下側の段ボールを下面と呼ぶ。)段ボールは上面下面ともに半径5cmの円で, 端から1cmのところ穴をあけ, 竹串を刺している。竹串は上下面の間が23cmになるよう設定した。下面はボンド, 上面は髪ゴムで竹串と段ボールを固定している。今回は模型の角度を0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°の6種類とした。模型の角度は, 円柱の状態から上面, 下面を互いに逆方向にねじった角度を示している(図2参照)。フォーステスター(図1)とは, 一定の速度で力を加えることができる機械である。物体を押し, もしくは引っ張る際にかかる力の値を計測する。



図1 フォーステスター

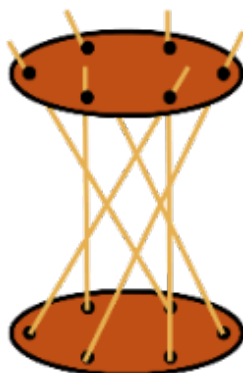


図2 模型の模式図

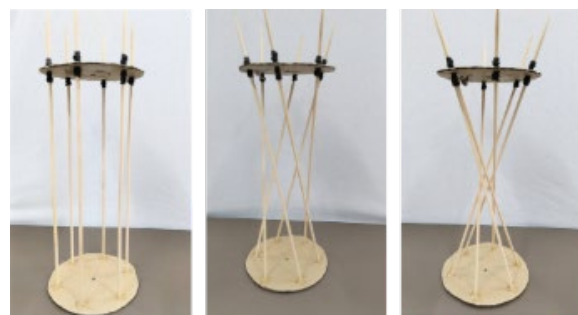


図3 模型(左から0°, 90°, 150°)

2.2 実験1

まず、模型の上面と下面を横方向にずらす外力に対する剛性を調べる実験を行った。模型の上部とフォーステスターのフックをテグス(糸)でつなぎ、定滑車を利用して横方向に力を加えた。下面は竹串とガムテープ、おもりを利用して机に固定した。フォーステスターの動く距離は 50mm に固定し、50mm 引っ張ったときにかかった力の値 (N) を計測値とした。各角度につき 10 個の模型を作って実験を行った。平均値、最大値ともに 150° で最大となった。(図5)

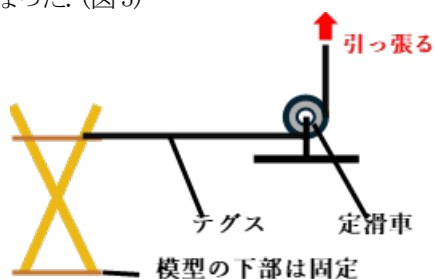


図4 実験1の模式図

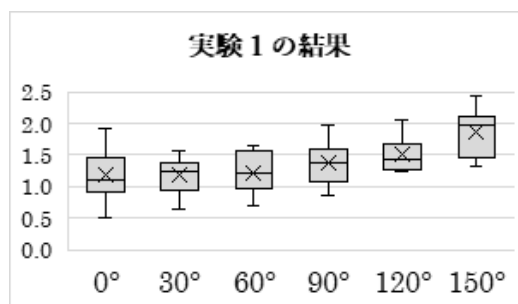


図5 実験1の結果

2.3 実験2

構造を縦方向に押しつぶす外力に対する強度を調べる実験を行った。模型の竹串全てに均等に力を加えるため、フォーステスターと模型の間に木の板とスポンジを挟んだ。(図6) この実験では竹串が壊れて模型にかかる力が下がる瞬間の値 (N) を計測値とした。実験1と同様に各角度につき 10 個の模型を作って実験を行った結果、平均値、最大値ともに 60° で最大となった。(図7)

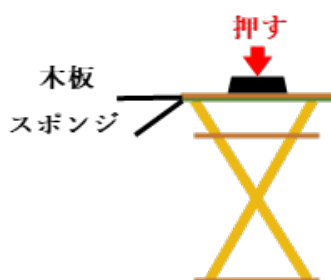


図6 実験2の模式図

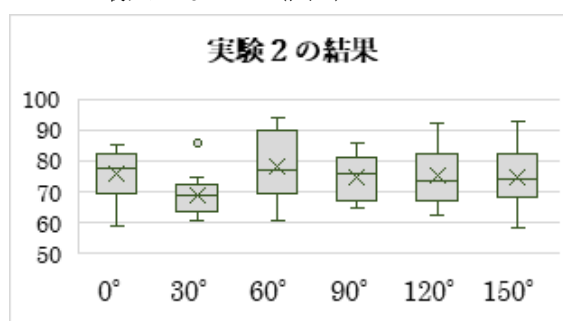


図7 実験2の結果

2.4 実験3

実験2の結果から、一葉双曲面構造の縦方向の外力に対する強度は模型の角度が $\{360 \div (\text{柱の本数})\}^\circ$ のときに最大となるという仮説を立てた。そこで模型に用いる竹串の本数を6本から4本に減らし、各角度に対して4回実験を行った。平均値、最大値、90°の時に最大となった。(図8)

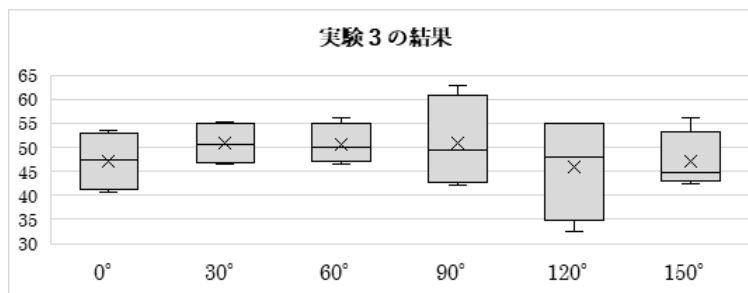


図8 実験3の結果

3. 考察

まず実験1では、横向きに引っ張った力を竹串に対して垂直な方向と平行な方向に分解して考えることができる。模型をねじる角度が大きくなるにつれて竹串の傾きは大きくなり、竹串に垂直な方向の力は小さくなる。模型の上面と下面をずらす時に大きな力を必要とするのは、ねじった模型であることがわかるため、角度が大きくなるごとに剛性が増し、150°で最大となったと考えられる。(図9)

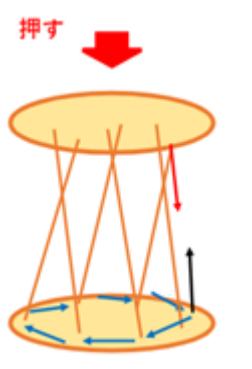


図9 実験1の考察

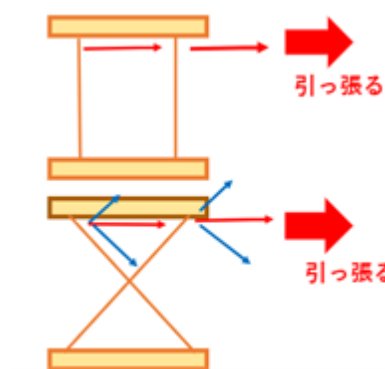


図10 実験2の考察

次に実験2では、上から模型を押しつぶした時に竹串に力が働く。また、この力の反作用として机から逆向きの力も竹串に対して働く。この戻そうとする力を鉛直成分と水平成分(図10の青矢印)に分解したとき水平成分が、模型の角度が60°の時にちょうど隣の竹串の方向を向き、支えあうような形となる。そのため60°で強度が最大となったと考えた。(図9)

子の考察は実験3のときも同様に成り立つ。そのため模型の強度が最大となるのは模型の角度が $\{360 \div (\text{柱の本数})\}^\circ$ のときであるという仮説は正しいと考えられる。

4. 展望

横方向の実験結果より、建物の柱に一葉双曲面構造を導入することで地震の横揺れに対して耐えられる建物を作ることができると考えた。また縦方向の実験の結果より、一葉双曲面構造は円柱と比べて

縦方向の外力に強いことがわかった。そのため建物の上層階からの圧力に耐える必要がある、下層階の柱に活用できると考えている。今回の探究活動では、実験効率や材料の入手、加工のしやすさを考慮した結果、ダンボールと竹串で模型を作成した。今回の結果を竹と同様に自然素材である木材を使った建築に活かし、安全かつ持続可能な生活に近づくことができるかもしれないと考えた。また、これからは現在建築物に主に使用されている金属やコンクリートなどの素材を用いて同様の実験を行い、一葉双曲面構造の活用の実現可能性を考えたい。

5. 参考文献

- 1) Peter Debney: hyperboloid structures in GSA, Research Gate, 2012,
https://www.researchgate.net/publication/236670120_Hyperboloid_Structures_in_GSA (参照 2024-8-08)

Note:

How to Make a Strong Building ~ The Twist Needed to Strengthen a Hyperboloid Structure ~

Inoue Ayane¹, Otagaki Yusuke¹, Simmonds Aika¹, Matsuoka Hitomi¹, Yamato Takeharu¹

¹ Hyogo Prefectural Nagata High School Humanities and Mathematics Research Type Students

Abstract

A hyperboloid structure is a structure which takes the shape of a cylinder with curved laterals. Currently there are no researches about the strength and stiffness of this structure against external forces. Therefore, conducting research on this topic will enable the utilization of this structure in architecture. A series of experiments using original models were conducted. The models first formed a cylinder and then were twisted at the top and bottom in six different degrees of rotation, from 0° to 150° in thirty-degree intervals. The results were analyzed to find the breaking point under compression and the force needed to pull the model. From the results, the overall strength of each version of the structure was determined. In experiment 1, the models were compressed. In experiment 2, a strong string was tied to the top of the model and pulled. In experiment 1, the degree at which the resistance was maximized was 60° and in experiment 2 at 150°. Both results were caused by the decomposition of external forces on the models. From these results, we are looking to utilize this structure in small parts of buildings, such as the pillar, to improve the buildings' stability against earthquakes.

Keywords: Hyperboloid structure, Degree, Stiffness, Strength