

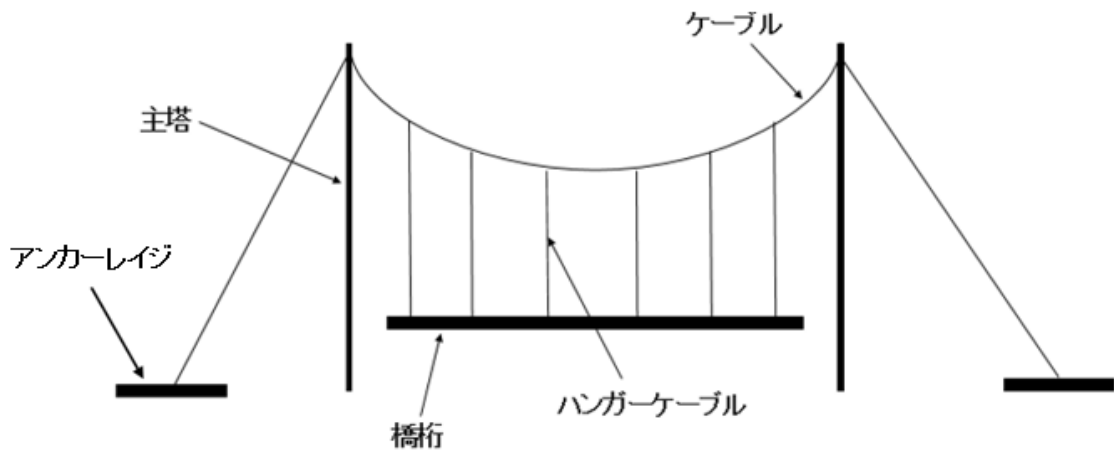
吊り橋の構造と強度についての研究

田丸 大地 小原 功太郎 萩田 一花 日向 慈皇

0. 吊り橋とは

吊り橋とは、主塔から対岸の主塔にケーブルを通した上で、そのケーブルから伸ばしたハンガーロープで橋桁を支える建設方法で建てられた橋のことである。吊り橋は風の影響を受けやすく人が渡る時には不安感を感じやすいが、数百メートル以上の大スパン建築への適性が高い特長を持っている。吊り橋は長距離の橋の建設に適した強度を持っているが、資材が多いことによるコストの高さのデメリットもある。

1. 概要



【図1】実際の橋の模式図

物理の授業でアメリカのタコマナローズ橋が崩落した映像を見た。そこで吊り橋の崩落について調べてみると荷重に耐えられずに崩落した橋が多いことが分かったので、このような事故を減らしたいと思い、この研究を始めた。まず仮説の検証を行った。実験Ⅰでは、ハンガーケーブルを等間隔に吊ることで最も荷重の最大値が小さくなるかどうかを調べ、実験Ⅱでは、ハンガーケーブルを端に吊ることでケーブルにかかる荷重が小さくなることを調べた。結果として、実験Ⅰではハンガーケーブルを等間隔に吊った構造でハンガーケーブルにかかる力の最大値が最も小さくなることが分かり、実験Ⅱではハンガーケーブルを端に吊った構造でケーブルにかかる力が最小になることが分かったので、次はハンガーケーブル同士の間隔をできるだけ等しく保ちつつ端に寄せた構造(案A、案B)を実験することにした。結果、案A、案Bともにハンガーケーブルにかかる力は等間隔と比べて大きくなったもののケーブルにかかる力は小さくなった。地盤が不安定な場所ではアンカーレイジが比較的動きやすいので、このような構造を用いてケーブルにかかる力を小さくすることが有効であると考えられる。

2. 研究目的

物理の授業でアメリカのタコマナローズ橋が崩落した映像を見て、吊り橋の崩落について調べてみたところ、人や雪の荷重が原因で多くの橋が崩落したことが分かった。そこでこのような事故を減らしたいと思い、荷重による吊り橋の崩落に着目した。研究目的は、現在非常に多くの橋で採用されているハンガーケーブルを等間隔に張る構造よりも強度の高い吊り橋の構造を見つけることである。ただし、強度の観点は次の2つにする。

- (1) ハンガーケーブルにかかる力の最大値が小さいこと

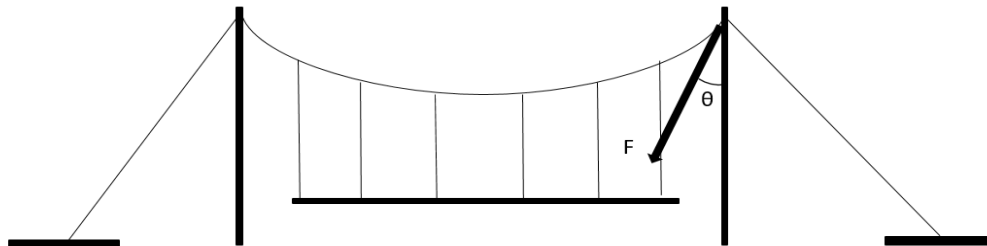
(2) ケーブルにかかる力が小さいこと

3. 分かっていること

現在、次の2つのことが分かっている。

(1) 現在ほとんどの橋が等間隔に吊られている

(2) 橋の主塔の高さが高くなるほど主塔とケーブルのなす角が小さくなり、ケーブルにかかる力が小さくなる



【図2】 吊り橋の模式図

\vec{F} はケーブルの接線方向
 mg は橋桁とハンガーケーブルの重さ
 θ は主塔と \vec{F} のなす角($0^\circ < \theta < 90^\circ$)

$$4 \times F \cos \theta = mg$$

$$F = \frac{mg}{4 \cos \theta}$$

よって私たちは、ハンガーケーブルの間隔の変化によるケーブルへの影響について調べることにした。

4. 実験 I

(1) 仮説 I

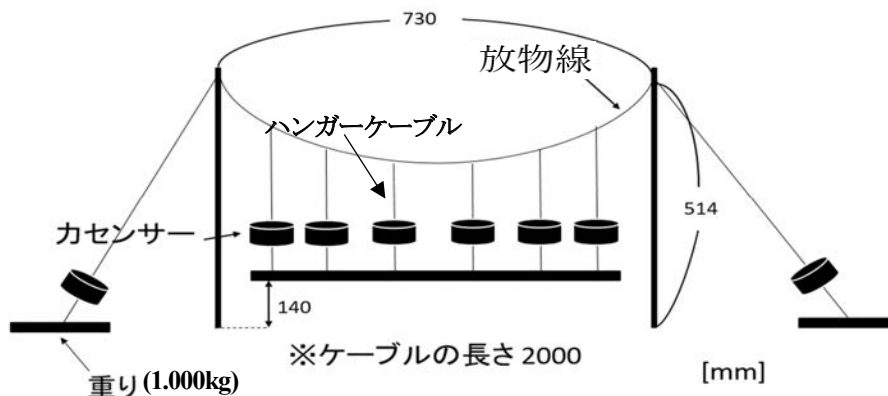
ハンガーケーブルにかかる力に偏りを無くするためにハンガーケーブルはできるだけ等間隔に張ったほうが、1本のハンガーケーブルにかかる力の最大値が小さくなると考えた。

(2) 内容

目的： 仮説 I の検証

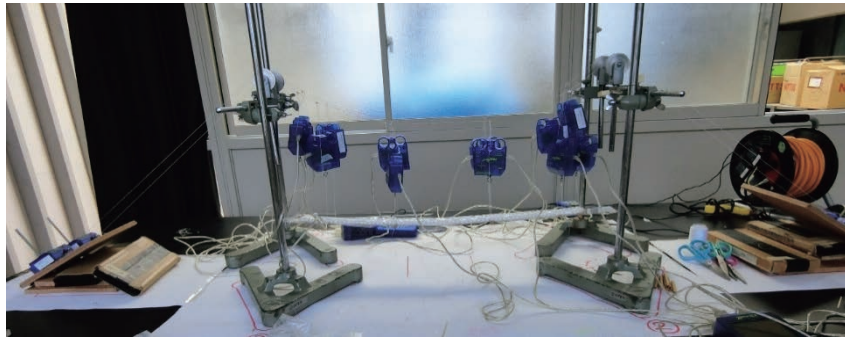
準備物： 重り(2.1g), 重り(1.000kg), PE ライン, カセンサー, アクリル板, スタンド, グルーガン

方法： 1. 吊り橋の模型を製作する
 2. 模型のハンガーケーブルにカセンサーを取り付けてかかる力を測定する
 3. 3回実験して平均値を出す



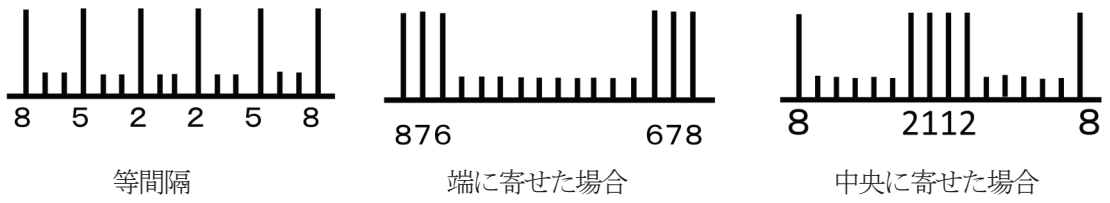
【図3】 実験で使用する吊り橋の模型

※アクリル板は軽すぎたため、アクリル板の上に2.1gの重り66個を3列並べた。

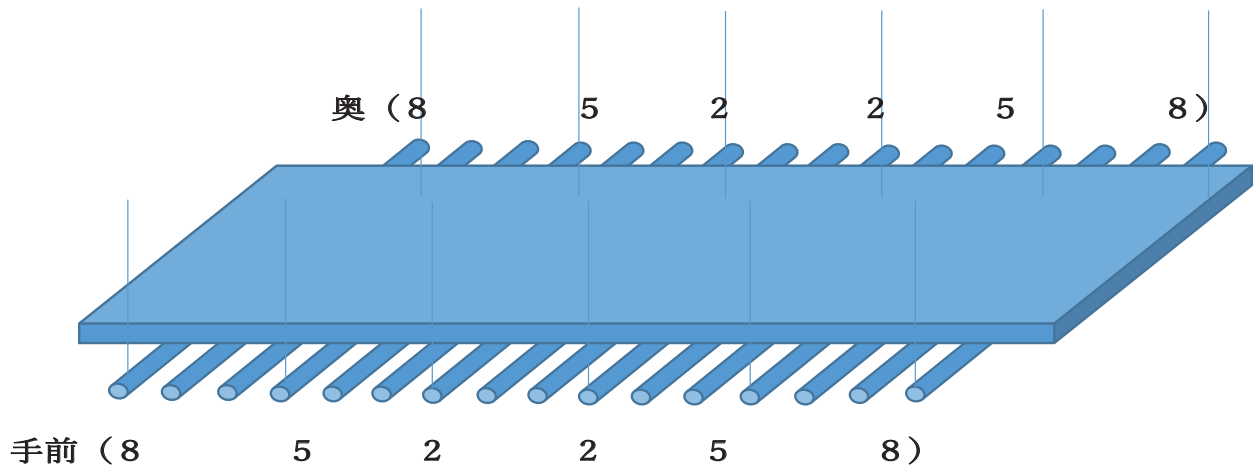


【図4】実験中の様子

構造： 実験する構造は以下の3つとする。
橋桁を17等分して中央から1から8までの番号をつける。

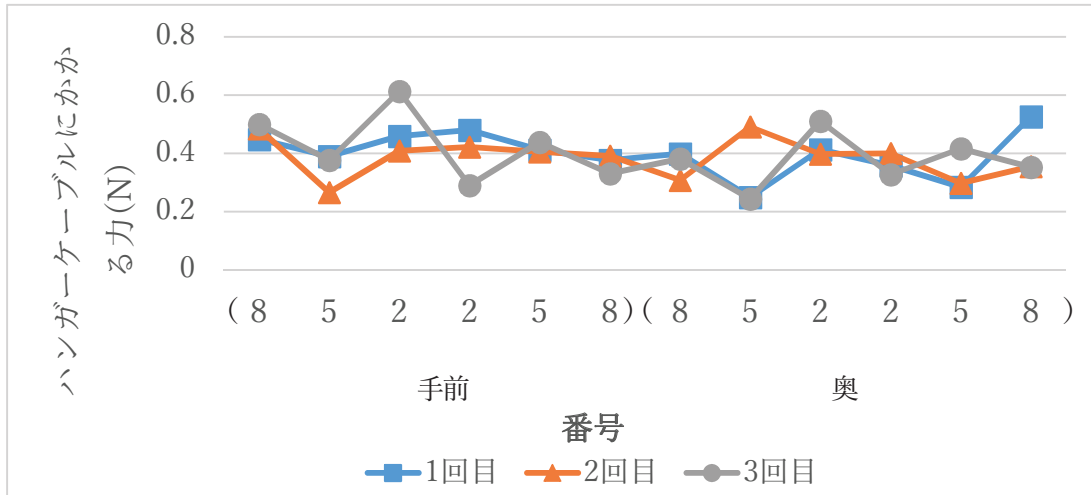


【図5】実験で用いる3つの構造

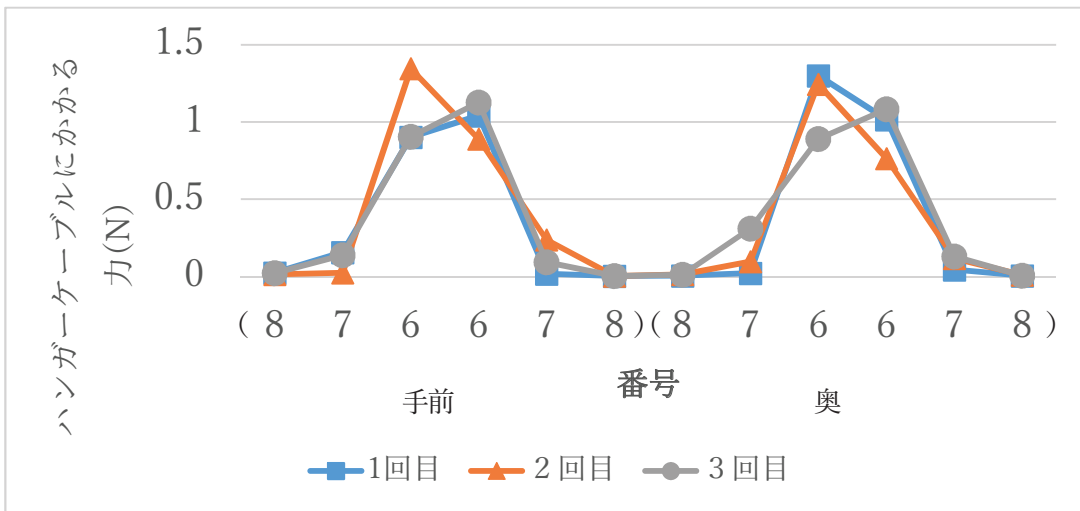


【図6】番号のつけ方

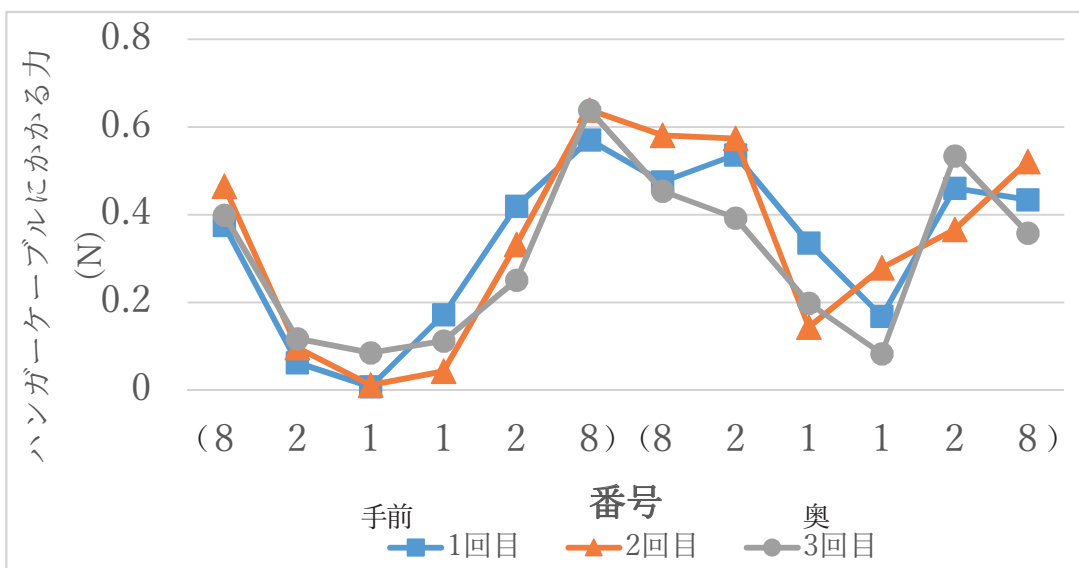
(3) 結果



【グラフ1】 等間隔のときにそれぞれのハンガーケーブルにかかる力



【グラフ2】 端のときにそれぞれのハンガーケーブルにかかる力



【グラフ3】 中央のときにそれぞれのハンガーケーブルにかかる力

| | | | | | | |
|----------|---|--------------|---|-------|---|--------------|
| 等間隔 | 8 | 0.405 | 5 | 0.356 | 2 | 0.424 |
| 端に寄せた場合 | 8 | 0.010 | 7 | 0.116 | 6 | 1.043 |
| 中央に寄せた場合 | 8 | 0.464 | 2 | 0.370 | 1 | 0.171 |

【表1】ハンガーケーブルにかかる力の平均値(N)

※値の表記の仕方について

表の各値は橋桁の同じ番号の位置にかかる力の平均である

ハンガーケーブルにかかる力の最大値の大きさは 端>中央>等間隔 となる。

(4) データのばらつきについて

等間隔のときのばらつきと比べて、端や中央のときのばらつきが小さいのは試行回数を増やすうちに、各系の長さが設計図に近い模型を製作することができるようになったことが原因であると考えられる。

5. 実験Ⅱ

(1) 仮説Ⅱ

「3分かっていること」からθが小さいほうがケーブルにかかる力は小さくなるのでハンガーケーブルはできるだけ橋桁の端に吊ったほうがケーブルにかかる力が小さくなると思った。

(2) 内容

目的： 仮説Ⅱの検証

準備物： 重り(2.1g), 重り(1.000kg), PE ライン, カセンサー, アクリル板, スタンド, グルーガン, 粘土

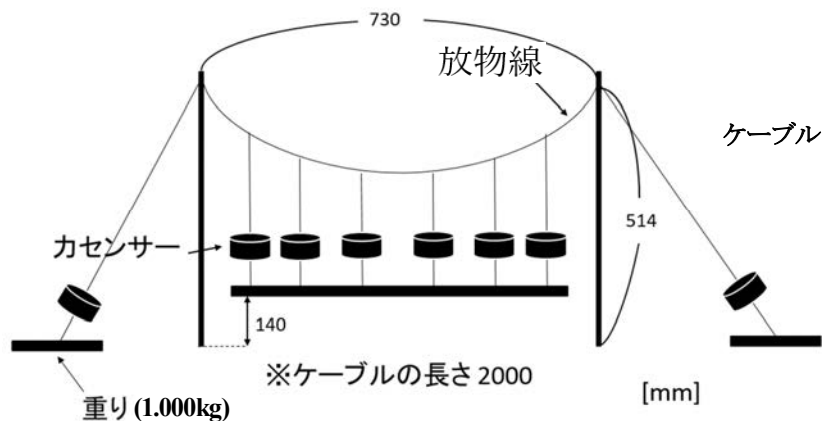
方法： 1. 吊り橋の模型を製作する

※重りを乗せた橋げたの代わりに、実験Ⅰで求めたハンガーケーブルにかかる力の大きさと同じ重さの粘土をハンガーケーブルにつける

2. 模型のケーブルにカセンサーを設置し、かかる力を測定する

3. 4つのセンサーの平均をとる

構造： 実験する構造は実験Ⅰと同じである。



(3) 結果

| | |
|----------|------|
| 等間隔 | 6.60 |
| 端に寄せた場合 | 5.95 |
| 中央に寄せた場合 | 6.69 |

【表2】ケーブルにかかる力の平均値 (N)

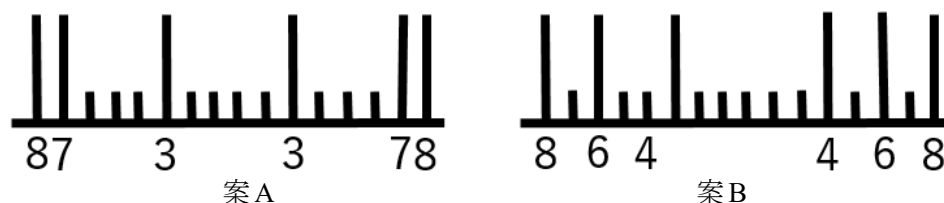
ケーブルにかかる力の大きさは 中央 > 等間隔 > 端 となる。

(4) データの信頼性について

実験Ⅰとは異なり、ハンガーケーブルの長さが結果に影響しないので、実験回数を増やしても実験Ⅰで見られたようなデータのばらつきは見られないと考えた。

6. 考察

実験Ⅰ，Ⅱから，ハンガーケーブルにかかる力の最大値を小さくするには，ハンガーケーブル同士の間隔をできるだけ等しくすればよく，ケーブルにかかる力を小さくするにはハンガーケーブルをできるだけ端に寄せれば良いことが確認できた。したがって，ハンガーケーブル同士の間隔をできるだけ等しくしつつハンガーロープを端に寄せれば，総合的に見て等間隔に優る吊り橋の構造となるのではないかと考えた。



【図7】2つの構造案

7. 実験Ⅲ

(1) 内容

目的： 実験Ⅰ.Ⅱの考察を検証すること

準備物： 実験Ⅰと同じ

方法： 1.模型のハンガーケーブル，ケーブルにそれぞれ力センサーをつけてかかる力を測定する

構造： 案A，案B

(2) 結果

| | ハンガーケーブル | | | | | | ケーブル |
|-----|----------|-------|---|-------|---|-------|------|
| | 8 | 0.081 | 7 | 0.351 | 3 | 0.736 | |
| 案A | 8 | 0.153 | 6 | 0.332 | 4 | 0.700 | 6.11 |
| 案B | 8 | 0.405 | 5 | 0.356 | 2 | 0.424 | 6.12 |
| 等間隔 | 8 | | | | | | 6.60 |

【表3】ハンガーケーブルとケーブルにかかる力の平均値(N)

現在ほとんどの橋に採用されている，ハンガーケーブルを等間隔に張る構造と比較すると，ハンガーケーブルにかかる力は案Aでは0.312N，案Bでは0.276N大きくなった。またケーブルにかかる力は案Aでは0.49N，案Bでは0.48N小さくなった。

(3) データの信頼性について

本研究では時間が足りなかったため1度しか実験できなかった。ハンガーケーブルにかかる力のデータの信頼性の低さが問題である。そのため試行回数を増やすことが必要である。

8. 考察

○等間隔

案Aや案Bと比べ糸が均等に配置されているため，糸1本あたりにかかる力の偏りが最も小さくなり，ハンガーケーブルにかかる力の最大値は最小となった。また，ケーブルにかかる力の大きさは案A，案Bと比べ大きな差はなかったことから，基本的には最も優れている。

○案A，案B

等間隔よりも端よりにハンガーケーブルが配置されていたため，ケーブルにかかる力の大きさは等間隔よりも小さくなった。

9. 結論

等間隔と比べて1本のハンガーケーブルにかかる力の最大値は大きいケーブルにかかる力が小さくなるような構造を見つけることができた。

10. 今後の展望

地盤が不安定な場所ではアンカーレイジが比較的動きやすいので、案 A、案 B の構造を用いてケーブルにかかる力を小さくすることが有効であると考えられる。

11. 実験で注意した点

- 橋桁をハンガーケーブルに取り付けた際、橋桁が地面に対して水平になるようにハンガーケーブルの下端が床から 140mm になるように統一した。
- ケーブルとハンガーケーブルを結び、実験中移動しないように接合部分をグルーガンで固定した。
- ケーブルにかかる力を正確に測定するために、力センサーのフックの部分とケーブルの接合部分が一直線となるように力センサーを取り付けた。

12. 参考文献

- 言葉の違いが分かる読み物 (<https://meaning-difference.com/>)