

# 振動解析を用いた木橋の劣化状態の予測

秋田大学  
秋田大学大学院

根本 柊哉  
及川 大輔  
青山 昌樹  
後藤 文彦  
青木 由香利

## 研究背景

### 近代木橋 (1980年代後半～)



主要部材：大断面集成材

利点：環境に優しい

CO2削減など

欠点：雨などにより  
腐朽しやすい

重要

劣化状況の把握



くり抜いて応力試験

非破壊で調べたい

### 固有振動数 (強度, 剛性と関連)

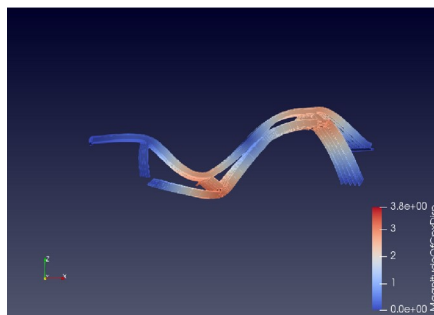
実験



砂袋落下試験  
(2019年調査)

鉛直方向の振動モードと  
固有振動数を測定  
(各測点3回ずつ)

解析



振動解析

実橋をモデル化し、  
モード解析を行うことで、  
固有振動数を算出

## 対象橋梁



石川県民の森

### かじか橋

(上路式アーチ道路橋)

竣工1987年12月

34年経過

## 調査



これまでに5度の調査を行っている

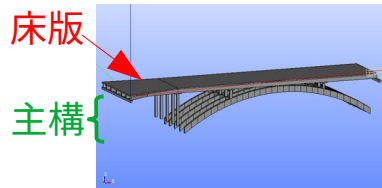
砂袋落下試験  
(2019年調査)

### 2019年の調査

| 振動モード   | 実験値(Hz) |
|---------|---------|
| 水平一次    | 2.73    |
| 鉛直逆対称一次 | 8.69    |
| 鉛直一次    | 15.38   |
| 鉛直二次    | 17.18   |

## 昨年の研究

実験値と解析値から2019年当時の推定ヤング率を導出



木橋全体のヤング率を一様に下げる

同様に固有振動数も下がる

実験値(固有振動数)に解析値を合わせる

その時の設定ヤング率 = 2019年当時の推定ヤング率

竣工時ヤング率

|    |          |
|----|----------|
| 主構 | 9.6GPa   |
| 床版 | 10.29GPa |

2019年の推定ヤング率

|    |         |
|----|---------|
| 主構 | 2.93GPa |
| 床版 | 3.14GPa |

70%減少

## 今回の研究

ヤング率減少率…………… 70%減少

2019年の推定ヤング率

|    |         |    |         |
|----|---------|----|---------|
| 主構 | 2.93GPa | 床版 | 3.14GPa |
|----|---------|----|---------|

※秋田県 めおと橋

20%減少で建て替え

現実的に考えにくい……

解析の方法を変える必要がある

欠損を含めた振動解析

# 解析モデルの設定

解析ツール：Salome-Meca

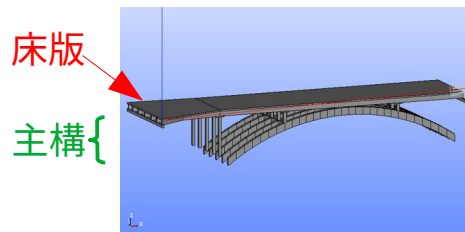
## かじか橋（2019年）



### 2019年の調査

| 振動モード   | 実験値(Hz) |
|---------|---------|
| 水平一次    | 2.73    |
| 鉛直逆対称一次 | 8.69    |
| 鉛直一次    | 15.38   |
| 鉛直二次    | 17.18   |

## 前回のモデル



木橋全体のヤング率を**一様**に下げる

実験値と解析値の一致

推定ヤング率を導出

|    |         |
|----|---------|
| 主構 | 2.93GPa |
| 床版 | 3.14GPa |

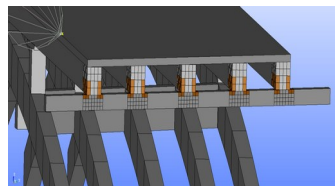
## 今回のモデル



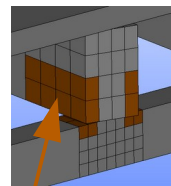
縦桁・枕梁接合部



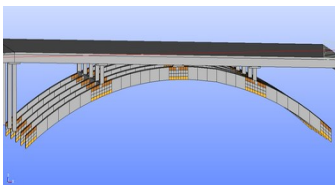
アーチ接合部



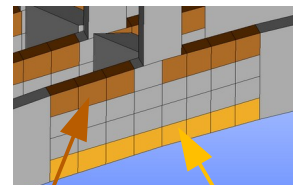
縦桁・枕梁接合部



欠損



アーチ欠損箇所



欠損1

欠損2

欠損を含めて木橋全体のヤング率を**一様**に下げる

実験値と解析値の一致

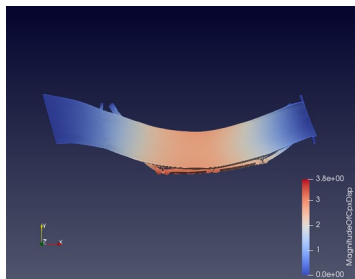
推定ヤング率を導出

接合部に欠損を設定

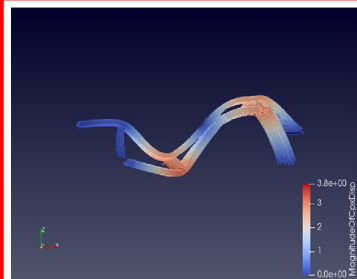
## 解析結果

### 振動モード

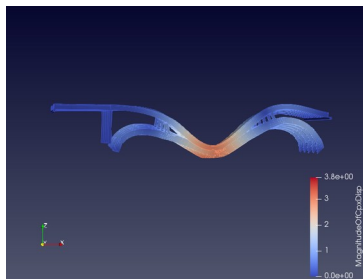
#### 卓越モード



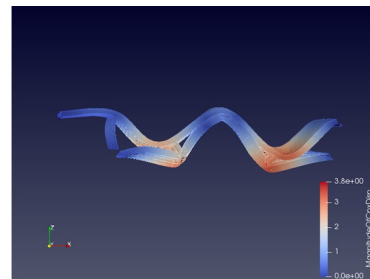
水平一次



鉛直逆対称一次



鉛直一次



鉛直二次

4つの振動モードを検知

### ヤング率の推定

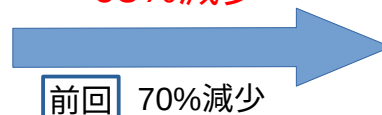
※括弧内は測定値に対する相対誤差

|              | 他部材のヤング率減少率 | 鉛直逆対称一次 (Hz) |
|--------------|-------------|--------------|
| 実験値(2019年調査) |             | 8.69         |
| アーチ・縦桁・枕梁欠損  | 0%          | 14.24(63.9%) |
|              | 30%         | 11.92(37.2%) |
|              | 50%         | 10.07(15.9%) |
|              | 60%         | 9.01(3.7%)   |
|              | 62.8%       | 8.69(0%)     |

竣工時ヤング率

|    |          |
|----|----------|
| 主構 | 9.6GPa   |
| 床版 | 10.29GPa |

63%減少



2019年の推定ヤング率

欠損有り

|    |         |
|----|---------|
| 主構 | 3.57GPa |
| 床版 | 3.83GPa |

前回 70%減少

欠損有りでもヤング率が63%減少（これも有り得ない）

何が影響した？

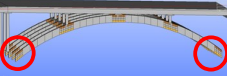
どこの接合部の欠損が全体の固有振動数に影響を及ぼしたのか

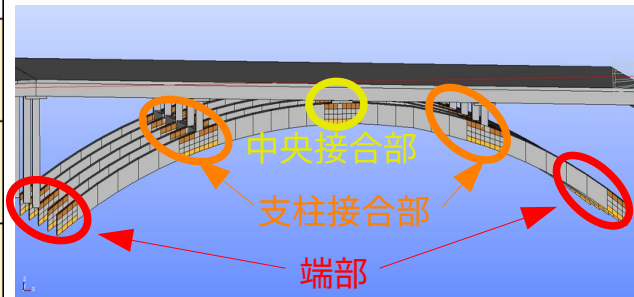


# 支点部・継手部の腐朽劣化が与える影響度

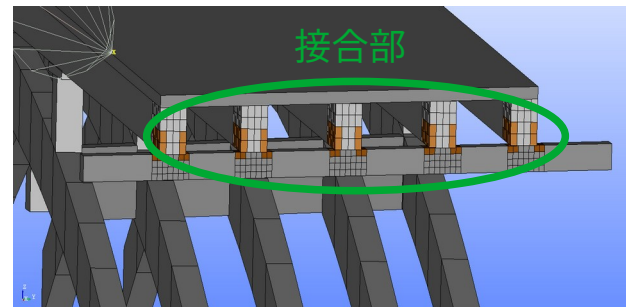
※腐朽劣化箇所以外の部材・部位は健全状態とする  
 ※要素数30万程度

## 欠損箇所のパターン化

| パターン | 部材    | モデル                                                                                | 欠損箇所           |
|------|-------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 1    | アーチ   |   | 端部             |
| 2    |       |   | 支柱接合部          |
| 3    |       |   | 中央接合部          |
| 4    |       |   | 端部・支柱接合部       |
| 5    |       |   | 端部・中央接合部       |
| 6    |       |   | 支柱接合部・中央接合部    |
| 7    |       |   | 端部・支柱接合部・中央接合部 |
| 8    | 縦桁・枕梁 |  | 接合部            |



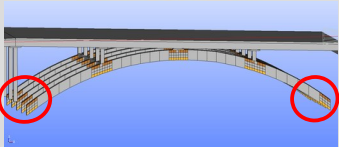
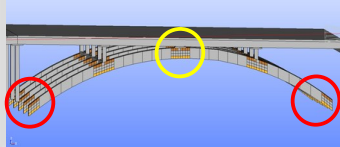
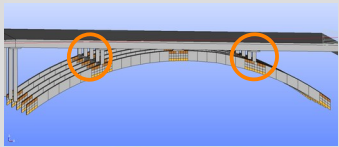
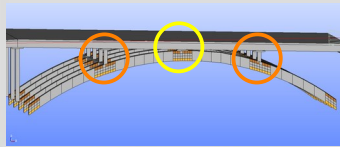
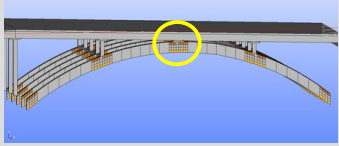
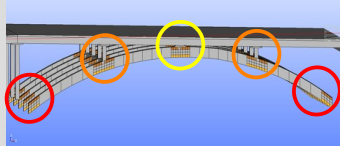
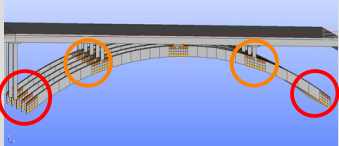
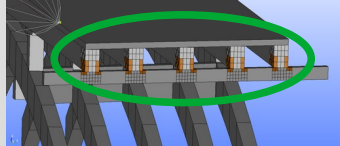
アーチ欠損箇所

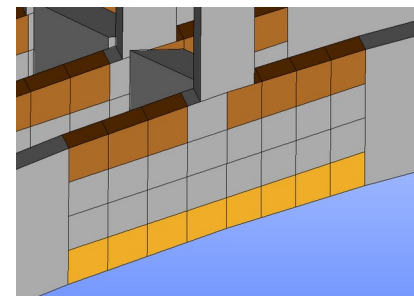
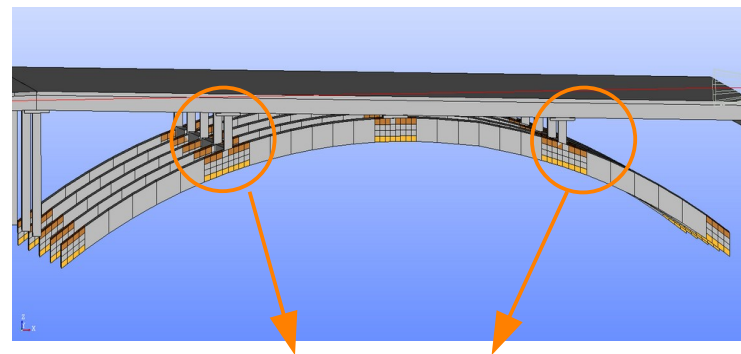


縦桁・枕梁欠損箇所

# 各パターンの解析結果

※括弧内は健全(欠損無し) の固有振動数に対する相対誤差

|                                                                                              | 鉛直逆対称一次(Hz)       |                                                                                               |                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| 健全(欠損無し)                                                                                     | 20.85             |                                                                                               |                   |
| パターン1<br>   | 20.54<br>(-1.5%)  | パターン5<br>   | 20.36<br>(-2.3%)  |
| パターン2<br>   | 17.88<br>(-14.2%) | パターン6<br>   | 17.63<br>(-15.4%) |
| パターン3<br>   | 20.51<br>(-1.6%)  | パターン7<br>   | 17.56<br>(-15.8%) |
| パターン4<br> | 17.8<br>(-14.6%)  | パターン8<br> | 20.78<br>(-0.34%) |



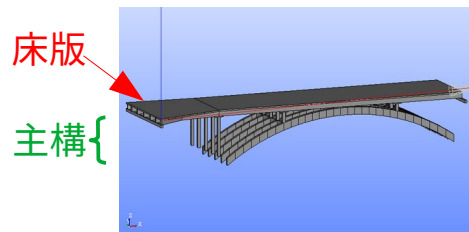
アーチ支柱接合部



固有振動数に対する影響(大)

## まとめ

### 昨年の研究



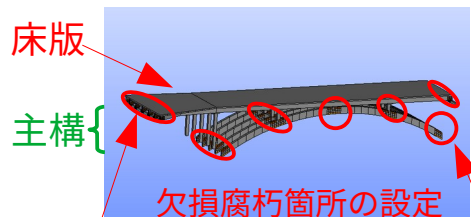
木橋全体のヤング率を一様に下げる

実験値と解析値の一致

推定ヤング率を導出

|    |         |                |
|----|---------|----------------|
| 主構 | 2.93GPa | ヤング率減少率<br>70% |
| 床版 | 3.14GPa |                |

### 今回の研究



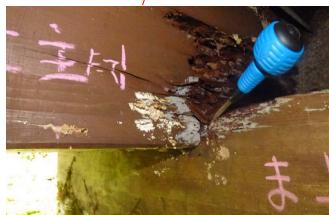
欠損を含めて

木橋全体のヤング率を一様に下げる

実験値と解析値の一致

推定ヤング率を導出

|    |         |                |
|----|---------|----------------|
| 主構 | 3.57GPa | ヤング率減少率<br>63% |
| 床版 | 3.83GPa |                |

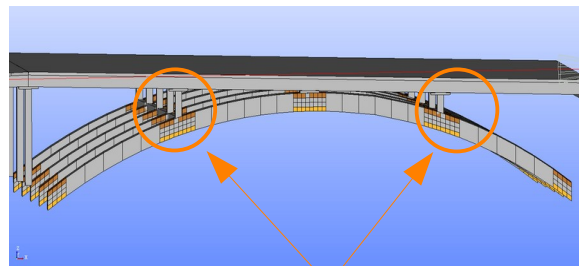


縦桁・枕梁接合部



アーチ接合部

### 接合部劣化の影響



アーチ支柱接合部

固有振動数に対する影響(大)

### 今後の課題

- 腐朽劣化範囲の拡大
- 床版以外の部材における異方性の適用
- 影響の大きかったアーチ支柱接合部の劣化範囲拡大, 解析の向上

## 参考文献

- 1) 青山 昌樹，及川 大輔，後藤 文彦  
「木橋の劣化診断のための振動解析モデルの検討」  
令和2年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集(CD-ROM), I-2, 2021.
- 2) 及川 大輔，故 菅沼 源二郎，本田 秀行，後藤 文彦  
「経年による木製アーチ道路橋(かじか橋)の構造性能と健全度調査」  
木材工学論文報告集19, pp.72-79, 2021/2.



## かじか橋諸元



- ・ 所在地：石川県加賀市石川県民の森
- ・ 橋長22.8m 支間16.4m 有効幅員3.0m
- ・ 用途，設計荷重 車道6t
- ・ 竣工 1987年12月（2022年2月時点で34年経過）
- ・ 使用材料 ヒバ集成材（本橋骨組部材：アーチ）

アカマツ（高欄・踏板部材）

### ヤング率

|        | ヤング率(GPa) |
|--------|-----------|
| 主構(健全) | 9.6       |
| 床版(健全) | 10.29     |

### ポアソン比，密度

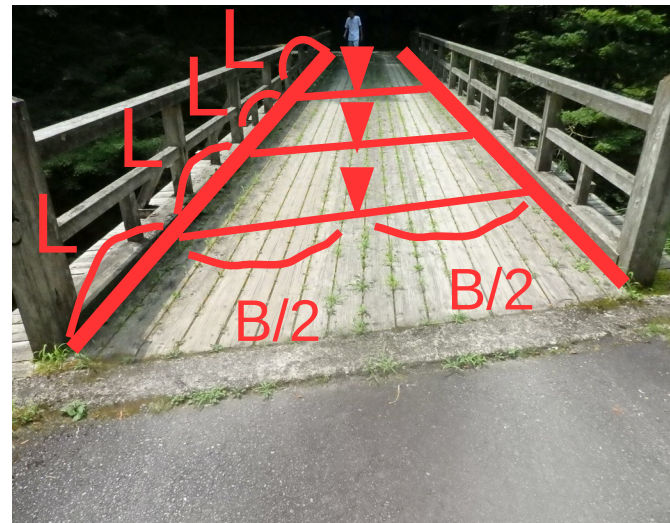
|         |                          |
|---------|--------------------------|
| ポアソン比   | 0.4                      |
| 密度(他部材) | 45.9(kg/m <sup>3</sup> ) |
| 密度(床版)  | 54.1(kg/m <sup>3</sup> ) |

## 1,動的調査

- 1) 砂袋落下衝撃試験 —▶ 橋の幅員中央，アーチ支間長 $L$ として $L/4$ ， $L/2$ ， $3L/4$ の3箇に，約10kgfの砂袋を高さ20cmの位置からさせて，橋梁に鉛直方向の振動を与える．  
鉛直方向の固有振動数と振動モードの同定に有効

- 2) 人力鉛直加振試験 —▶ 橋の高欄部，上流側 $L/4$ と下流側 $3L/4$ の2箇所を鉛直方向に人力で揺らす．  
鉛直ねじれ固有振動数と振動モードの同定に有効

- 3) 人力水平加振試験 —▶ 橋の高欄部， $L/2$ を水平方向に人力で揺らす．  
水平方向の固有振動数と振動モードの同定に有効



## 健全度調査



アーチ端部

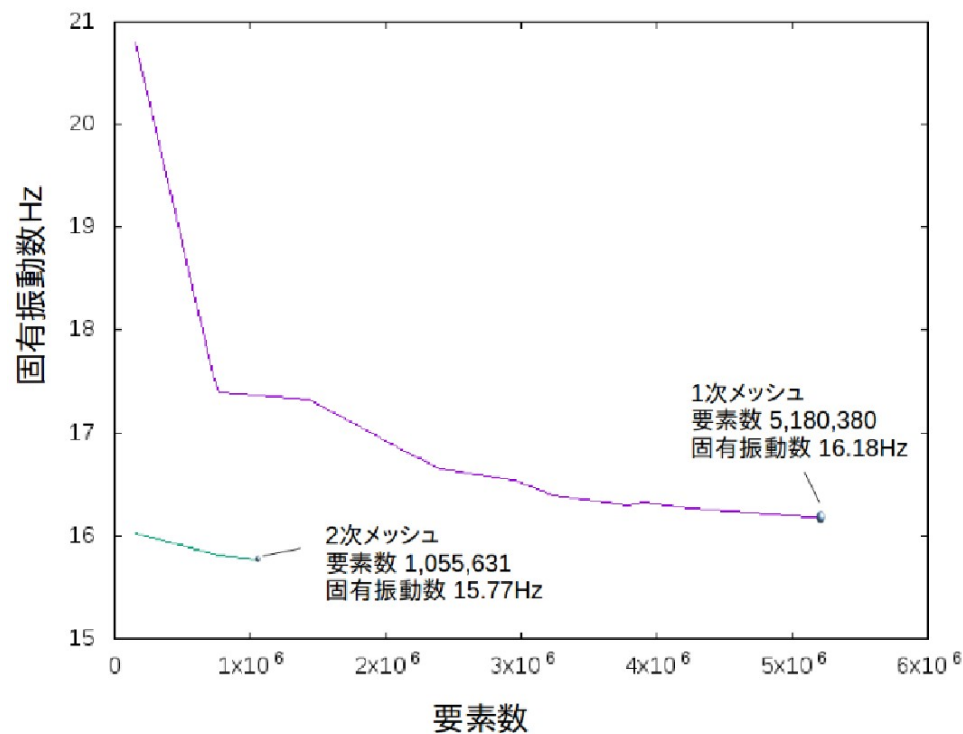


縦桁・枕梁接合部



アーチ支柱接合部

## 解析モデルの要素数



- 要素数を大きくするほど、固有振動数が収束していく
- 一次メッシュより二次メッシュの方が解析精度が高い



1) 推定ヤング率の導出

→ 2次メッシュで100万程度

2) 支点部・継手部の腐朽劣化が与える影響度

→ 単純比較のため、  
一次メッシュで30万程度



## 逆解析について

実験値（固有振動数）

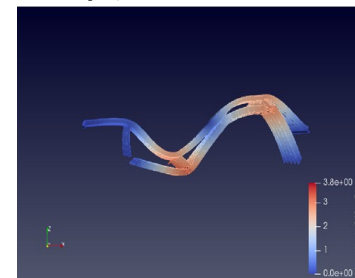
2019年・・・8.69Hz

解析値（固有振動数）

8.69Hz

値を合わせる

卓越モード



鉛直逆対称一次

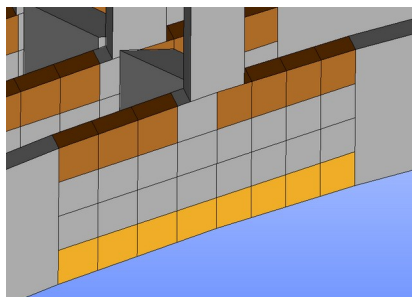
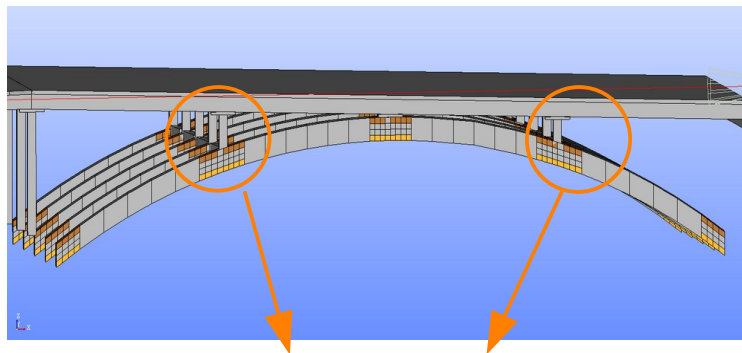
当時の推定ヤング率

そのときに解析上で設定したヤング率

逆解析

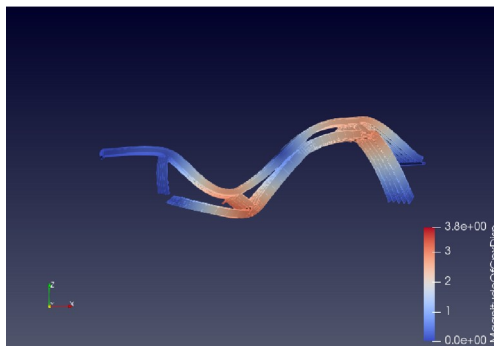


## アーチ支柱接合部の欠損が全体の固有振動数に最も影響を与えた理由



アーチ支柱接合部

### 卓越モード



鉛直逆対称一次

- ・ 振動モードで1/4と3/4となる場所
- ・ 腹の位置（最も大きく振動する点）にあるから

## 橋の剛性として許容できるヤング率減少率



秋田県 めおと橋

旧めおと橋  
(27年経過)

ヤング率20%低減  
5~6GPaの範囲内

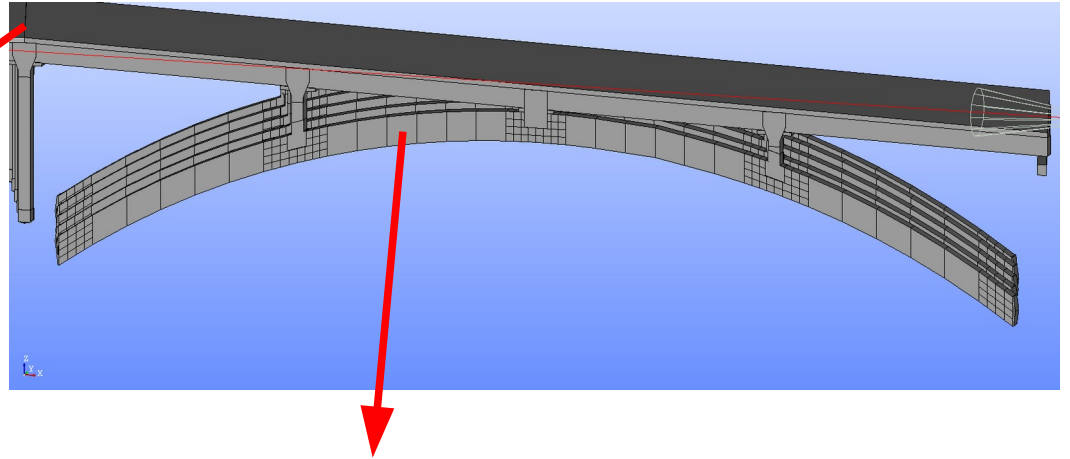


建て替え

## アーチ部分を異方性として解析に適用できない理由

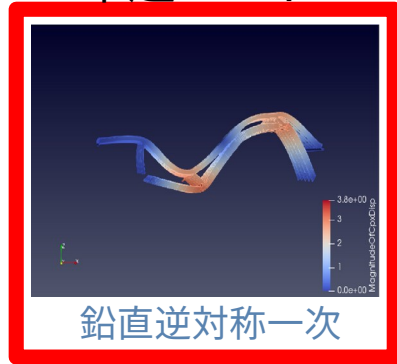
木材の材質・・・直交異方性

梁の場合，直交異方性は解析上で可能



直交異方性をアーチに適用させると，  
アーチを何個も区切って直交異方性を  
適用させなければいけないので，  
今の段階では難しい

## 卓越モード

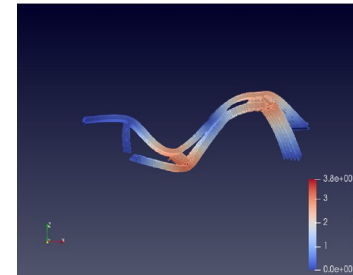


について

なぜ鉛直逆対称一次が  
かじか橋の卓越モードなのか



アーチの構造上，鉛直方向に振動しやすく，  
鉛直逆対称一次が最も振動しやすいため

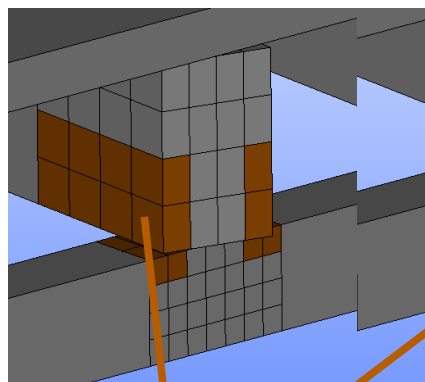


鉛直逆対称一次

## 欠損部分のヤング率

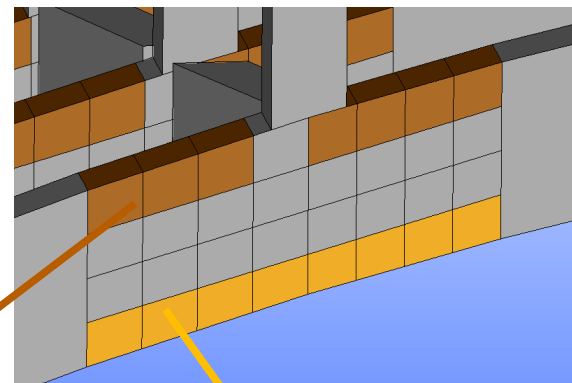
### ヤング率（健全）

|        | ヤング率(GPa) |
|--------|-----------|
| 主構(健全) | 9.6       |
| 床版(健全) | 10.29     |



欠損1

[ヤング率：0.96MPa]



欠損2

[ヤング率：9.6MPa]



## 各材料のヤング率



ヒバ（木材）：9.6GPa

ポリスチレン：2.7~4.2GPa

ゴム：1.5~5MPa