

1. 鋼アーチ橋の崩落事故事例

林 巖

大阪公立大学大学院工学研究科 助教

第47回鋼構造基礎講座

失敗から学ぶ ～落橋・損傷事例から知る留意点～」

土木学会 鋼構造委員会 鋼構造継続教育推進小委員会

2024年11月11日



大阪公立大学
Osaka Metropolitan University

鋼アーチ橋の崩落事故事例・ 橋梁ヘルスマニタリングに関する取り組み

© Osaka Metropolitan University All Rights Reserved.

大阪公立大学大学院	○林	徹
大阪公立大学大学院	赤星	花奈
明石工業高等専門学校	大城	雄希
大阪公立大学大学院	山口	隆司

◆ 橋梁の老朽化に伴い、アーチ橋の落橋事例が発生



和歌山県 六十谷水管橋 (2021年)



台湾 南方澳跨港大橋 (2019年)

主な 原因	複数箇所の吊材に腐食が生じ、ワイヤーや部材の破断が生じていたため。
----------	-----------------------------------



六十谷水管橋に関する発表内容

目的：水管橋の崩壊メカニズムの推定

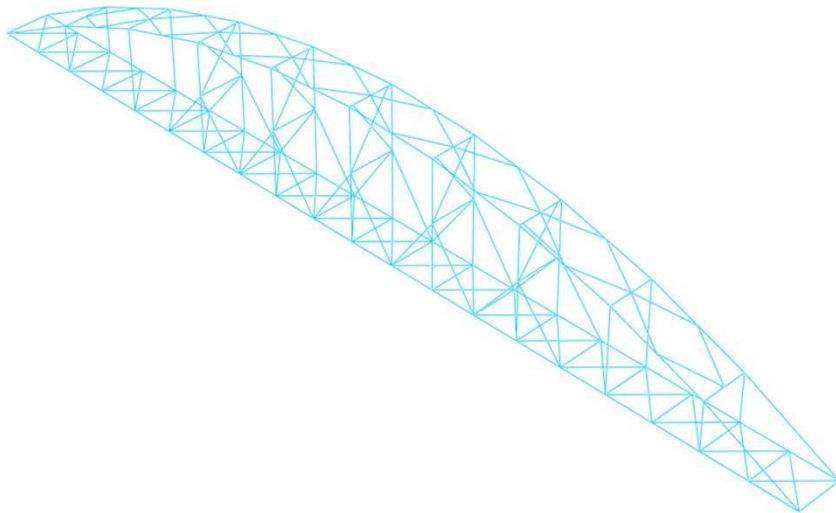
手法：有限要素解析によるシナリオ解析

解析モデル概要

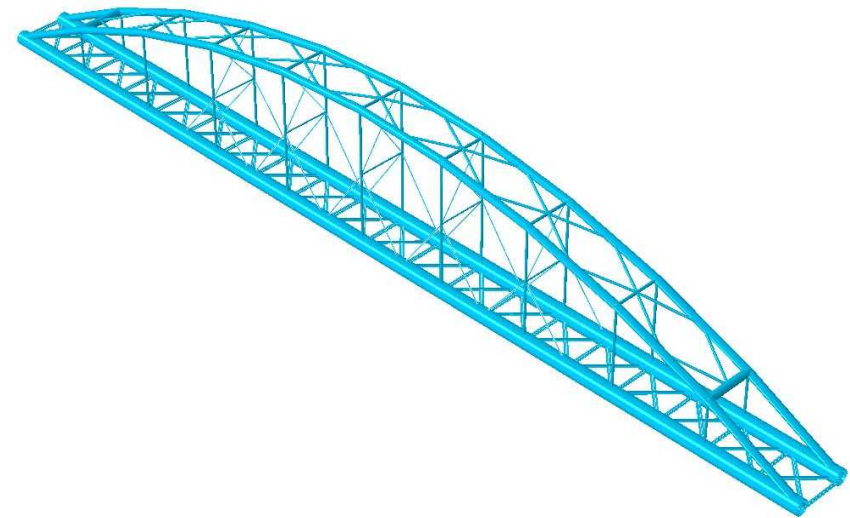
解析ソフトウェア：Abaqus2020

要素：はり要素

メッシュ間隔：270mm



解析モデル（骨組み）



解析モデル（部材断面レンダー時）

表 各部材の材料特性

	弾性係数(MPa)	降伏点(MPa)	引張強さ(MPa)
STPY400(本管)	200000	225	400
STK400(アーチリブ,上横構,吊り材)		235	400
SD345(ブレース材(不明))		345	490
SS400(下横構(不明))		245	400

設計計算書に示される設計荷重時の断面力(曲げモーメント・せん断力・軸力)と解析によって得られた断面力の結果を比較し、概ね一致することを確認した。

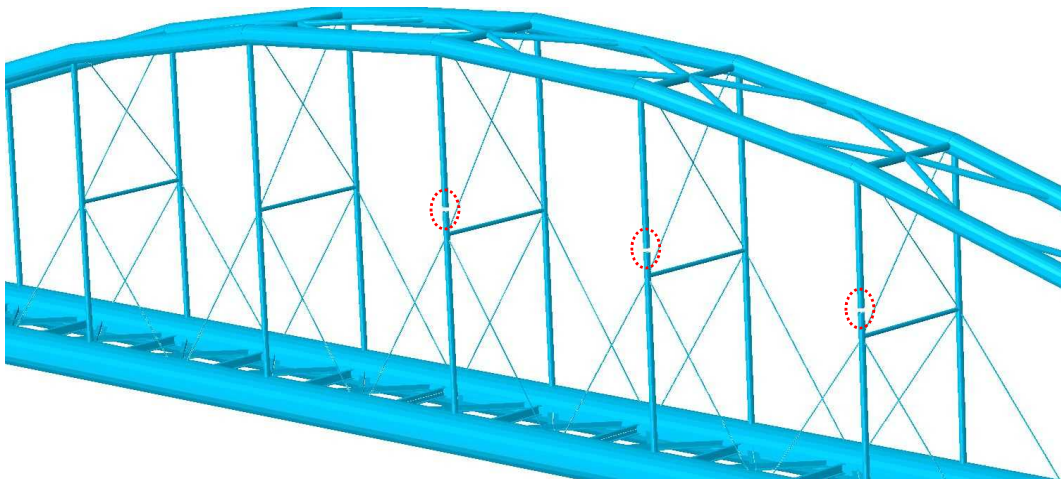
表 設計荷重条件

	本管に作用		アーチリブに作用	
死荷重(kg/m)	本管	426	アーチリブ	221
	歩廊	60	上横構および橋門構	53
	吊り材	28	その他	36
	下横構および吊環	258		
	その他	40		
活荷重(kg/m)	管内流水（満水）	1272		
	歩廊通行荷重その他	78		
総荷重(kg/m)	合計	2160		310

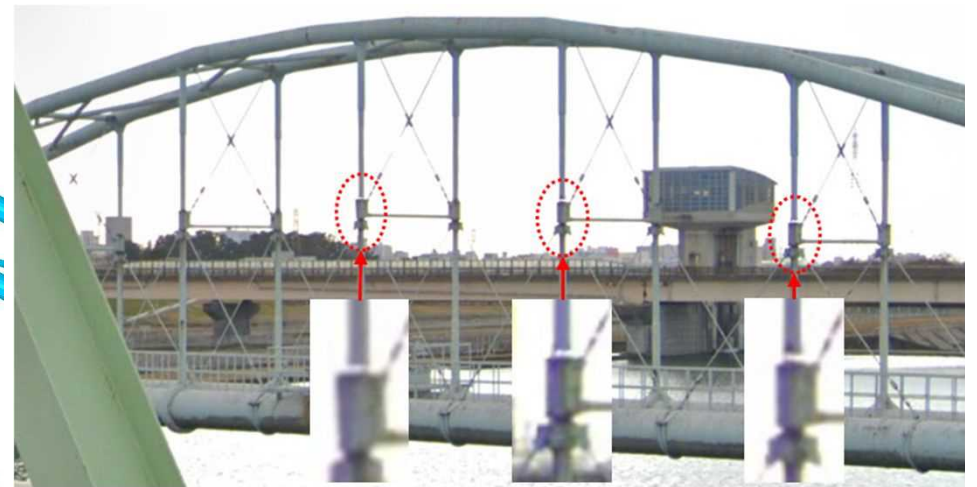
対象橋梁では**吊り材の腐食減肉による破断**が崩落の原因だと推測される。
そこで、次の解析手法によって崩壊シナリオを検証し安全性の評価を実施した。

- 下図に示すように**吊り材の要素を一部消去**することによって、腐食による部材破断を再現した。
- Google mapストリートビューの2020年12月時点における写真から、判明している吊り材の破断を再現した状態を初期状態としている。
- 初期状態に加えて、任意の組み合わせで吊り材の破断を与えた。
- 荷重条件は設計荷重とした。

※ 部材の経年腐食による減肉は考慮せず、また、部材破断時の衝撃的荷重再分配を考慮しない部材消去による静的解析であり、部材が連続的に破断するような進行性崩壊は再現できない。



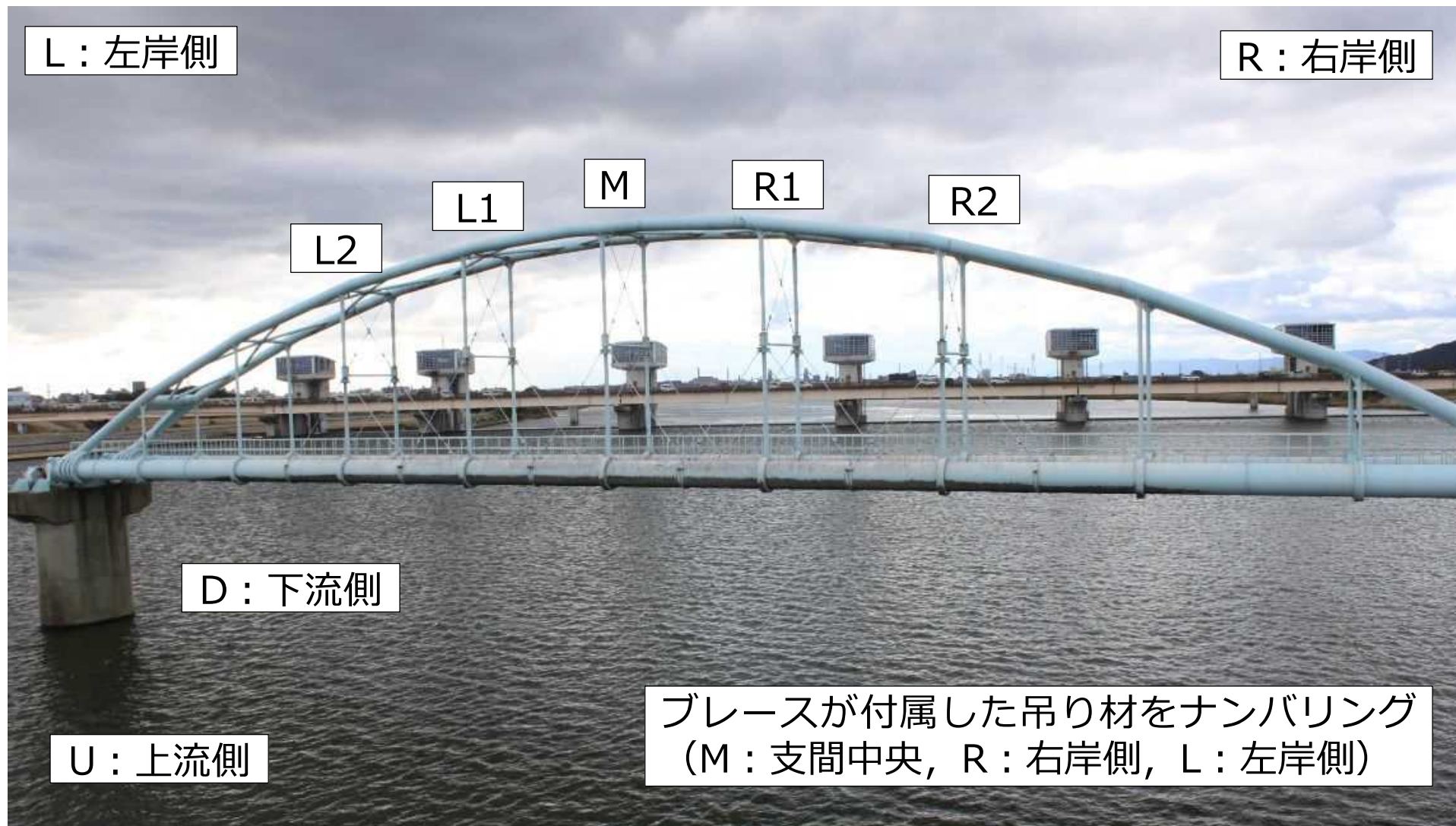
解析モデル初期状態



Google mapストリートビュー写真

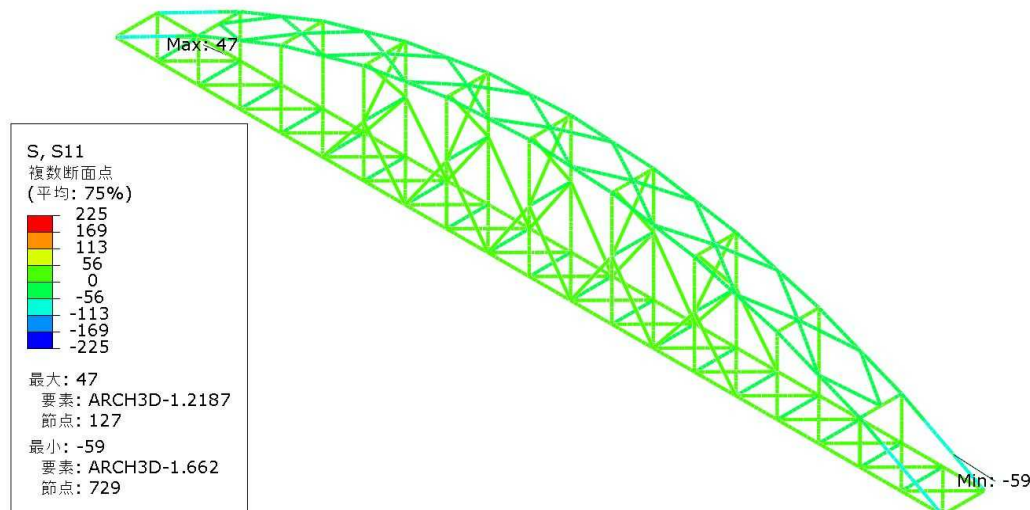
吊材の破断箇所について

対象橋梁は、吊り材にブレース材を取り付けるため接合部付近で腐食の発生が確認された。したがって、吊り材の中でもブレース材が付属したものを破断箇所の候補とし、図のように吊り材番号を定義した。

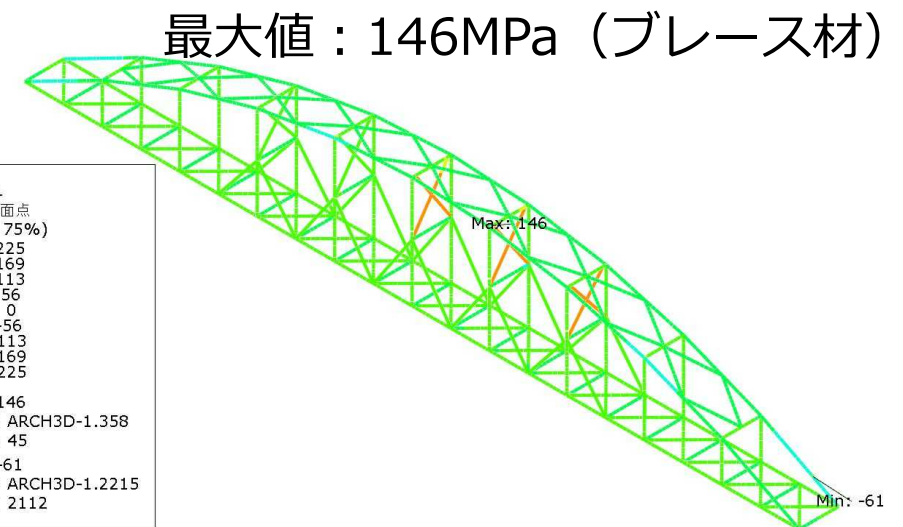


解析結果表示について

- 部材の降伏判定のため，軸応力をコンター図に示した．
- コンター図の最大（最小）値表示は最も降伏点の低いSTPY400（本管）に合わせて225MPaとしている．
- ブレース材の鋼種は不明であるためSD345相当（降伏応力は345MP）としている．



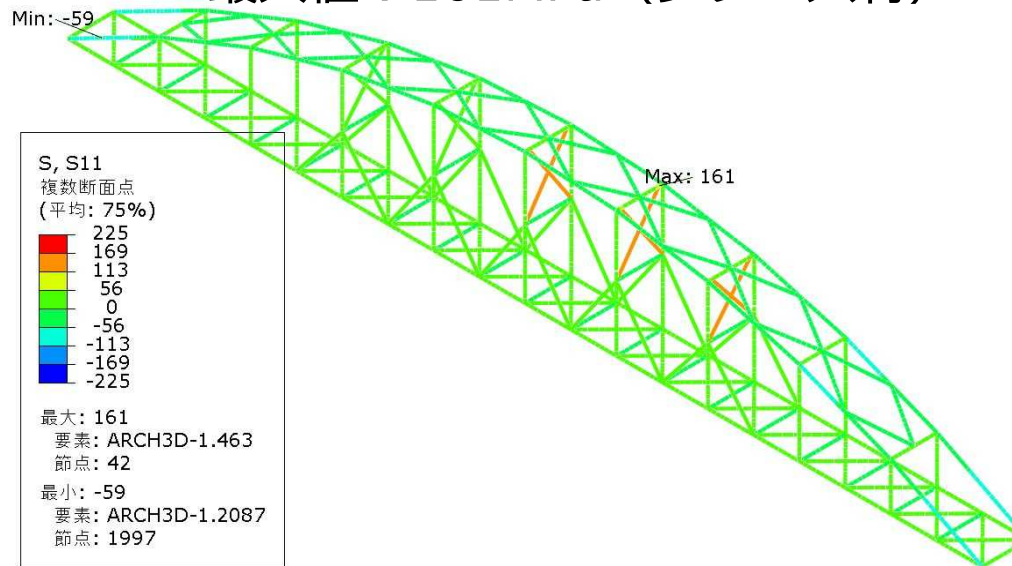
U_D（健全時）



U-M-R1-R2_D（初期状態）

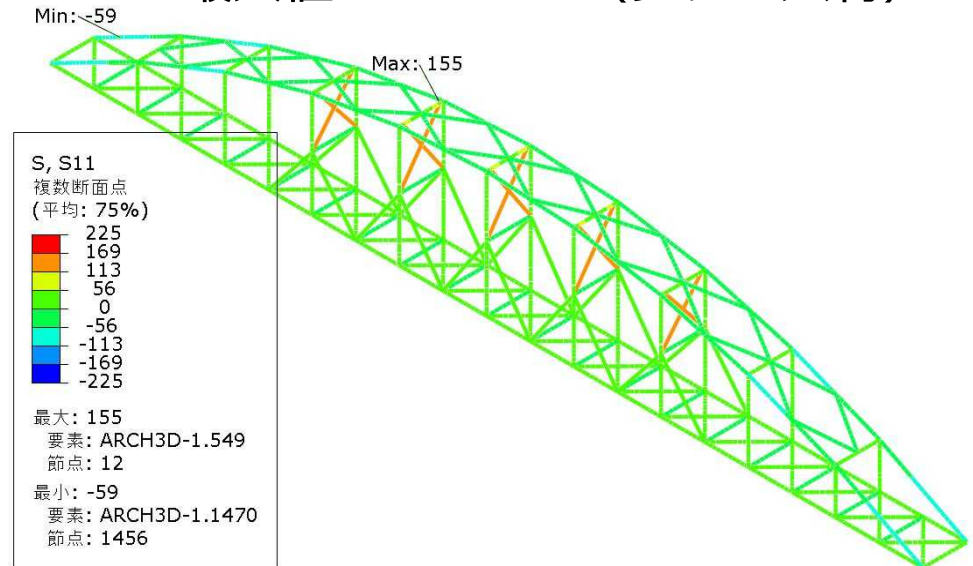
- 健全時および初期状態（Google mapストリートビュー参考）における解析結果より，設計荷重下においては**全部材**において生じる応力が**降伏点応力**を下回ることが確認できた．

最大値：161MPa（ブレース材）



U-M-R1-R2_D-M-R1-R2

最大値：155MPa（ブレース材）



U-L2-L1-M-R1-R2_D-L2-L1-M-R1-R2

- 本解析結果より、**吊り材の破断位置がブレース材上部の場合**，ブレース材によってアーチリブと吊り材が連結されるため部材に生じる応力は最大でも160MPa程度となり、**全ての部材が降伏点応力に達することはない**ことが確認できた。
- 上図の比較から僅かではあるが、吊り材全てが破断したケースよりも部分的に破断した方が、部材剛性比の違いにより荷重分担の傾向が異なり、発生する応力が高くなる場合があることが確認できた。

前節の解析結果より，吊り材の破断位置がブレース材の上部の場合，全ての吊り材において破断が生じても崩落に至らないことが分かった．

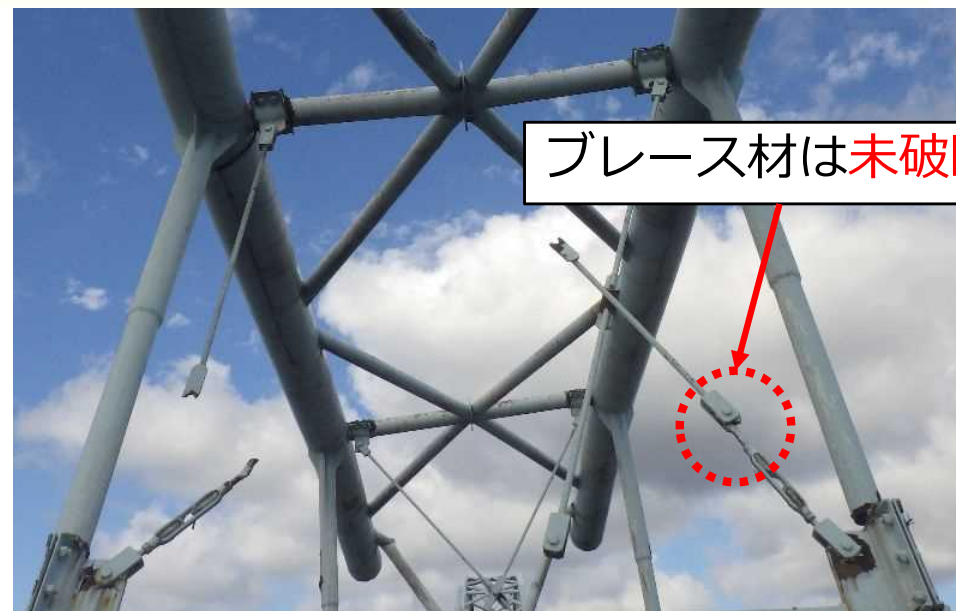
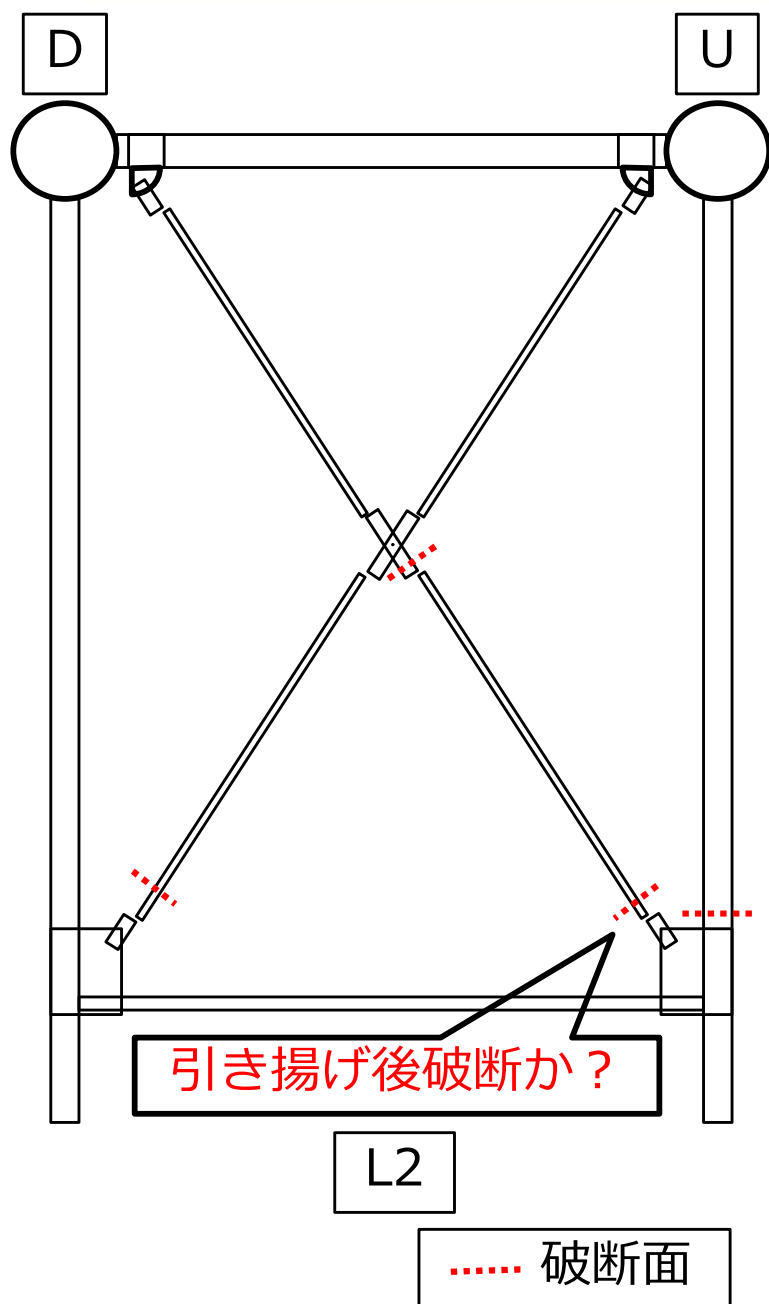


つまり，Google mapストリートビューで確認された，吊り材の破断形態とは異なる形態が，崩落の原因であると推測される．

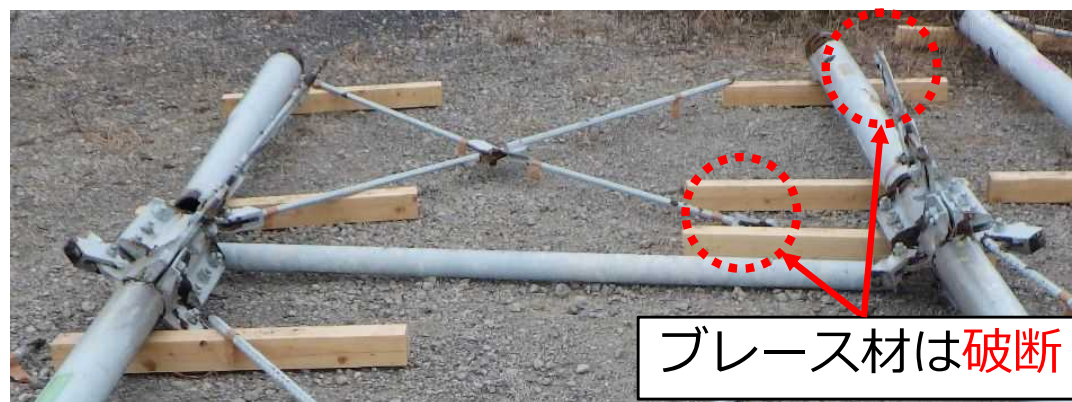


そこで，崩落後の調査結果を基に解析モデルを作成し，崩壊メカニズムの解明を試みる．

現地および回収部材調査の分析

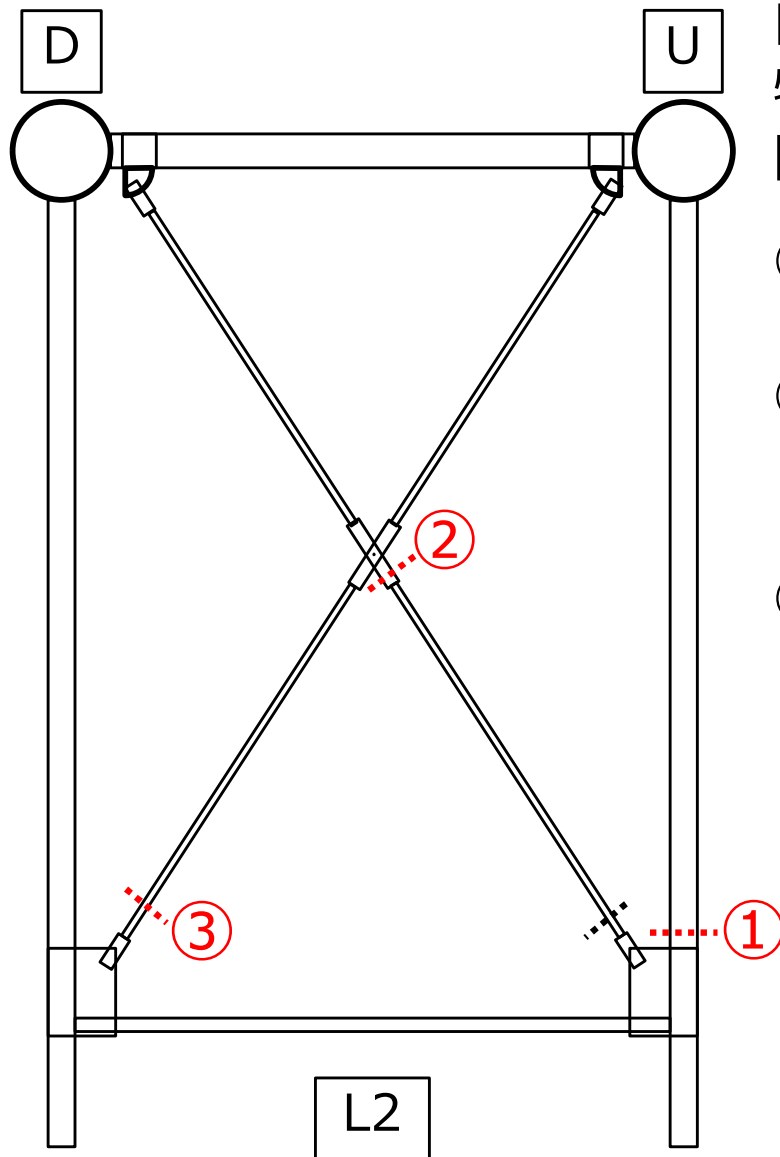


崩落現地調査



回収部材調査

現地調査結果を回収部材と照らし合わせて確認。
状態が異なる場合は現地調査を優先。



L2断面の損傷シナリオの推測

特徴：U側吊り材の上部およびブレース材が破断

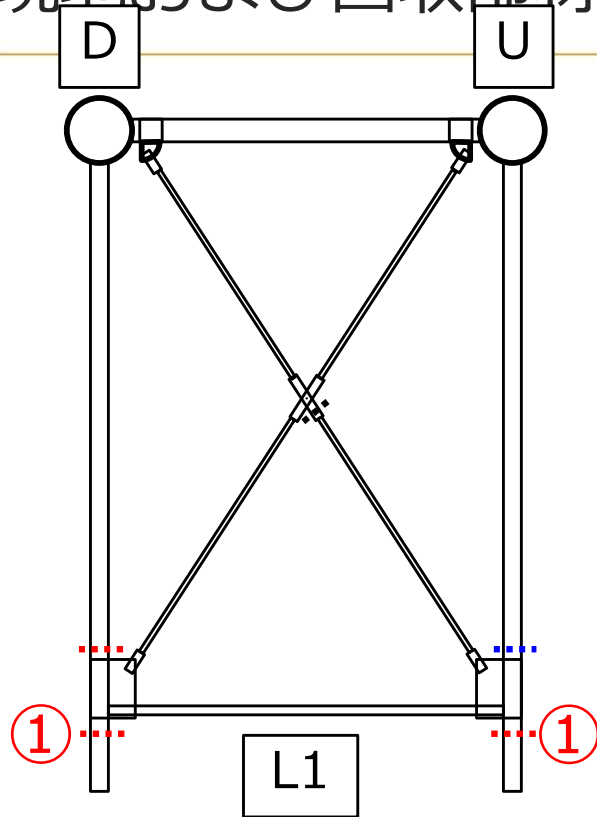
- ① U側吊り材がブレース材上部で破断し、ブレース材が荷重を伝達する。
- ② 荷重を伝達するブレース材に引張荷重を超える荷重が作用し破断する（他断面の破断による荷重の再分配の影響を受ける）。
- ③ ②が破断したことにより、荷重が増加し破断する。



L2～R2全断面の損傷シナリオを推測し、構造全体の崩壊シナリオを推測する。

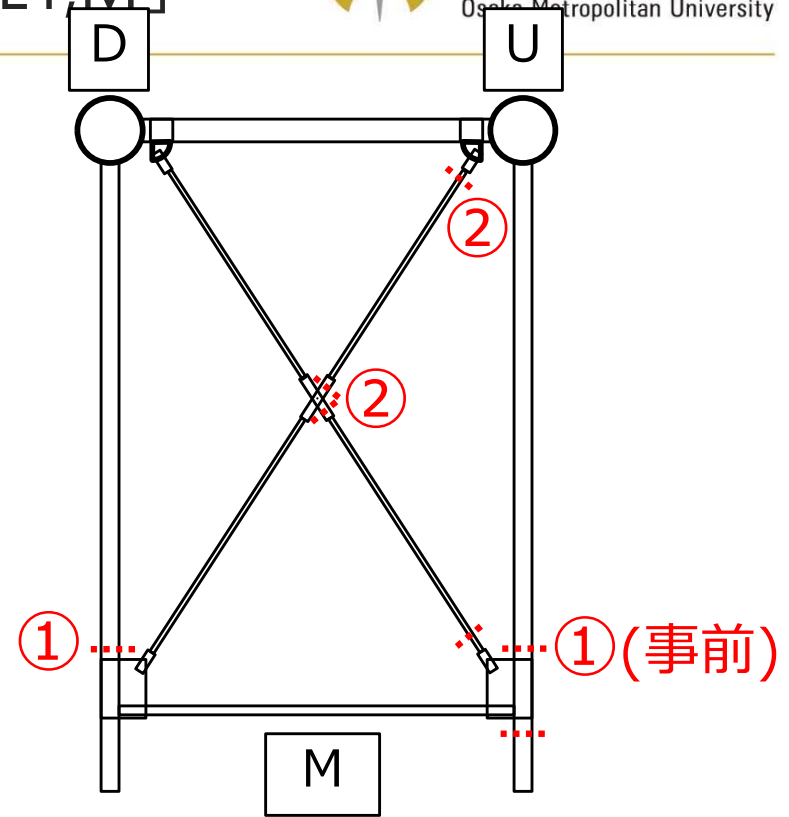
吊り材の破断種別推測

- 腐食破断（解析モデルに反映）
- 減肉断面が崩落時の衝撃により破断
- 引き上げ後破断



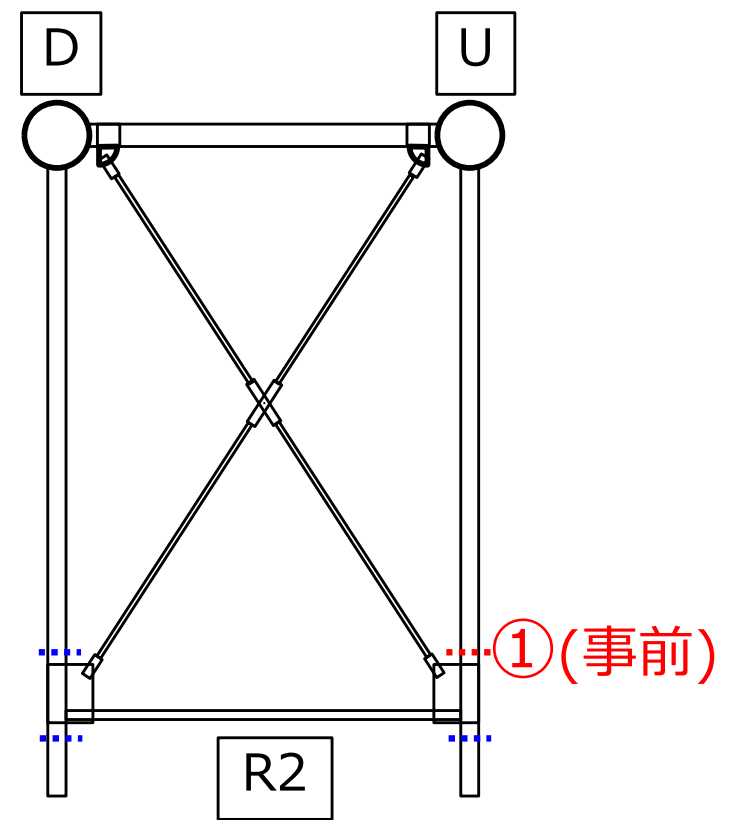
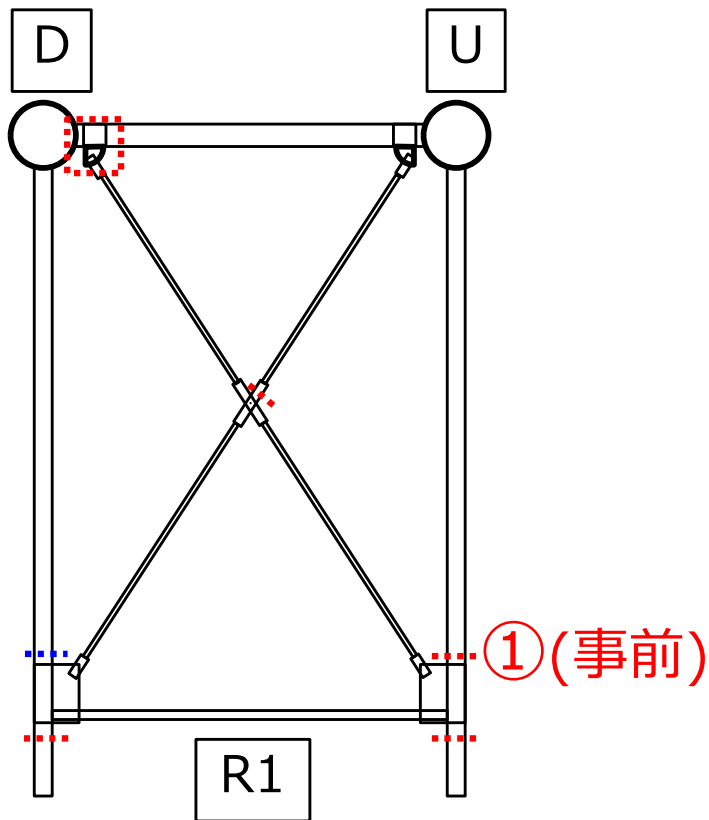
L1断面の損傷シナリオの推測
特徴：UD両側吊り材の下部が破断

- ① 吊り材がブレース材下部で破断し，荷重を伝達しないためブレース材が健全状態。



M断面の損傷シナリオの推測
特徴：UD両側吊り材の上部およびブレース材が破断

- ① 吊り材がブレース材上部で破断し，ブレース材が荷重を伝達する。
- ② ブレース材の引張荷重を超える荷重が作用し破断する。



R1断面，R2断面の損傷シナリオの推測

特徴：U側吊り材の上部が事前に破断

① 吊り材がブレース材上部で破断し，ブレース材が荷重を伝達する．

※現地調査時にR1，R2断面の部材は水面下であり破断判定が困難であった．

表 崩落後の部材破断状況

部材 \ 対象断面		L2	L1	M	R1	R2
吊り材	U（上流側）	上	(下)	上	上	上
	D（下流側）	○	(下)	上		
ブレース材		×	○	×		

各断面における吊り材とブレース材の破断状況を示す.

ここに,

○ : 健全

上 : 吊り材がブレース材上部で破断

(下) : 吊り材がブレース材下部で破断

× : ブレース材がいずれかの位置で破断

5. 崩壊シナリオの検証

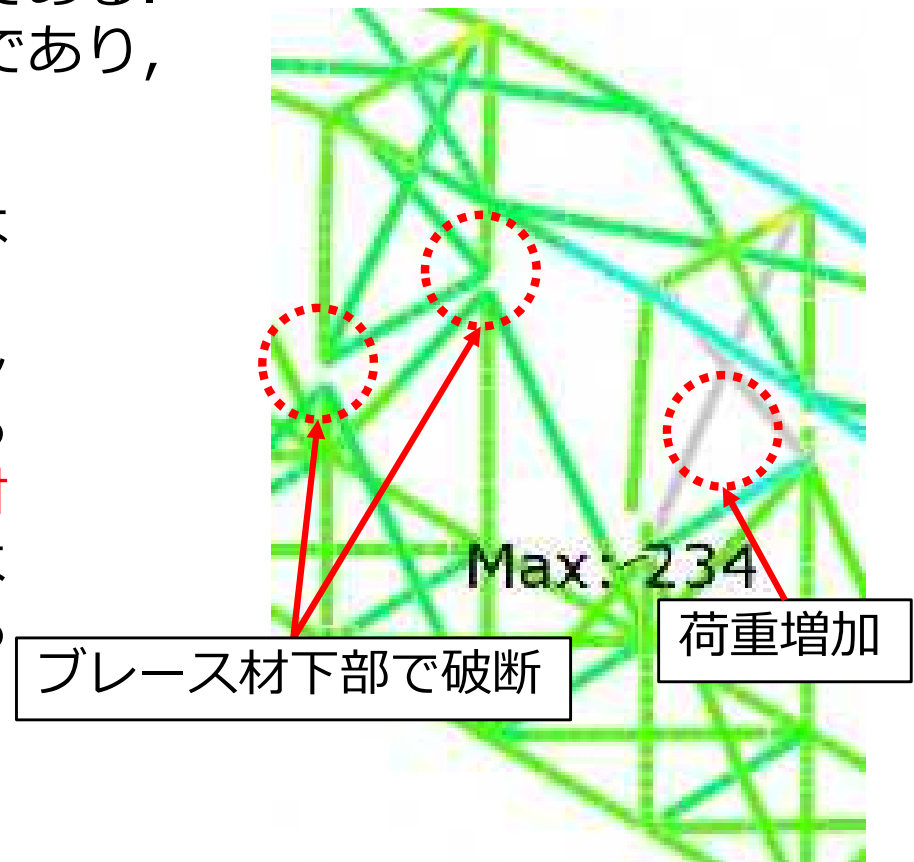
吊り材の破断位置がブレース材上部の場合、水管荷重が吊材→ブレース材→アーチリブと伝達されるため崩落しない。つまり、**水管荷重をアーチリブに伝達できない場合に水管橋が崩落する**と考えられる。荷重の伝達が断たれる経路は次の2パターンである。

- ① 吊り材の破断位置がブレース材下部である。
- ② 吊り材の破断位置がブレース材上部であり、**その後ブレース材が破断**する。

ここで、崩落径間以外のブレース材では破断が確認されなかったことから、ブレース材の腐食による強度低下は考慮しない。すなわち、**ブレース材が破断**するためには**いずれかの吊り材がブレース材下部で破断**を起こし、荷重の再分配により**ブレース材に作用する荷重が増加**する必要がある。



調査結果を基に解析を実施する。



ブレース材の荷重増加例

(シナリオの前段：共通部分)

- I. 複数箇所の吊り材がブレース材上部で破断し、ブレース材によって荷重を伝達している状態となる.
- II. いずれかの吊り材がブレース材下部で破断したことにより、ブレース材に作用する荷重が増加しブレース材が破断する.

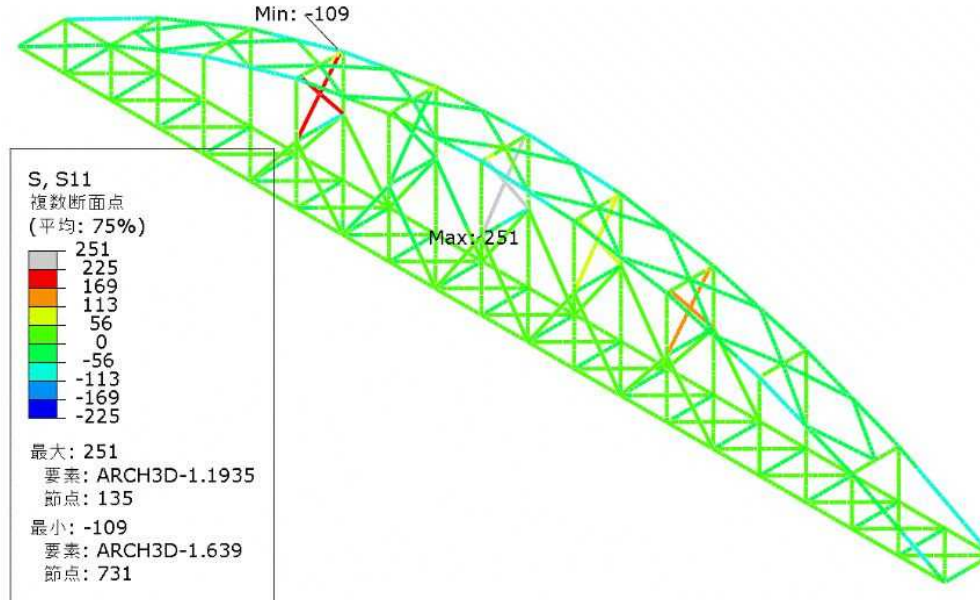
(パターン1：本管の曲げ破壊が先行)

- III. アーチリブからの支持を喪失した径間中央の**本管が曲げ破壊**し、アーチリブの径間1/4点付近で死荷重の負荷が急激に大きくなる.
- IV. **アーチリブの面内曲げ座屈**により、全径間で支持を失った本管とともに全径間が崩落する.

(パターン2：アーチリブの座屈が先行)

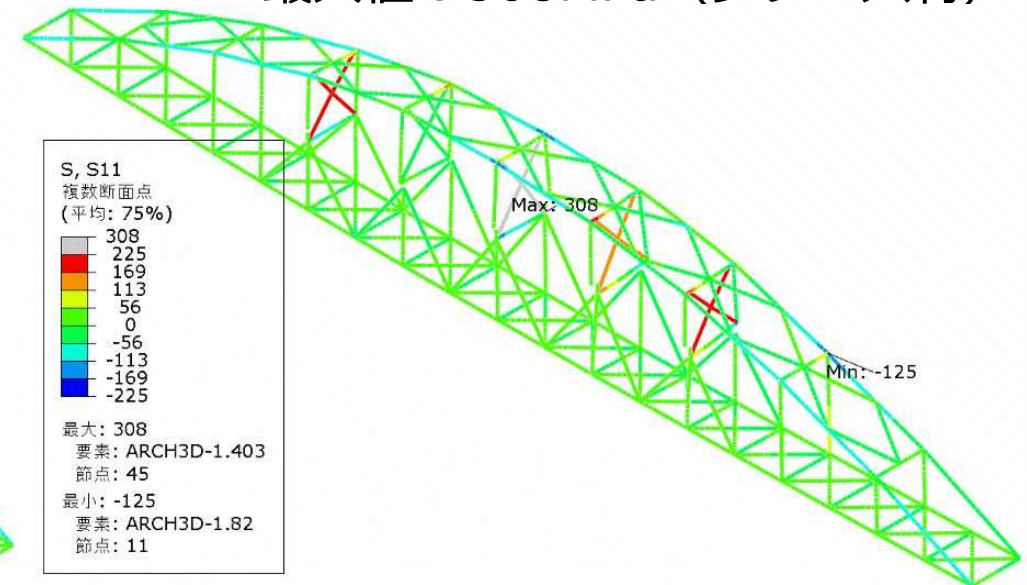
- III. アーチリブからの支持を喪失した径間中央の本管は弾性変形内に留まるが、アーチリブの径間1/4点付近での鉛直荷重の増加が、**アーチリブの面内曲げ座屈**を生じさせる.
- IV. アーチリブの面内曲げ座屈にともない、**本管は全径間で支持機能を喪失**し、アーチリブとともに全径間が崩落する.

最大値：251MPa（ブレース材）



U-L2-M-R1-R2-(L1)_D-M-(L1)
(調査結果を反映させた状態)

最大値：308MPa（ブレース材）



U-L2-M-R1-R2-(L1)_D-M-(L1-R1-R2)
(調査結果を反映させつつ最も厳しい状態)

※解析ケース名の括弧内の文字は、吊り材がブレース材下部で破断した箇所である。

- 左図は調査結果から判明している破断状況を反映させた解析結果である。これより、ブレース材に生じる応力は251MPaとなり、降伏点応力である345MPaを下回ることが確認できた。
- 右図は調査結果に加えて、水面下に位置していたR1,R2断面のD側において吊り材がブレース材下部で破断したと仮定し構造上最も厳しいケースとしている。これより、ブレース材に生じる応力は308MPaとなり、降伏点応力を下回ることが確認できた。



解析結果より、吊り材の破断状況が構造上最も厳しくなる場合においても、水管橋は崩落しないことが確認できた。したがって、吊り材の破断のみが今回の崩落の原因ではない。



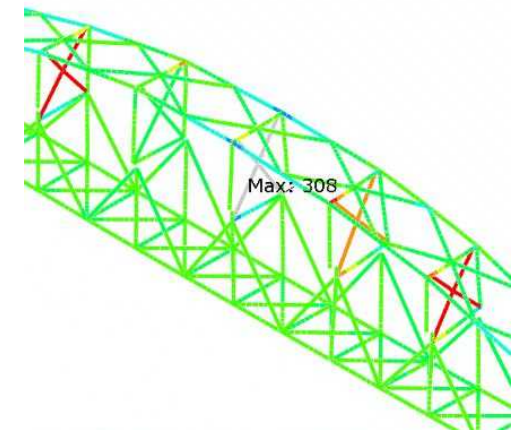
つまり、その他の部材の損傷や、腐食の進行に伴う部材の抵抗力の低下と相まって崩落したと推測できる。



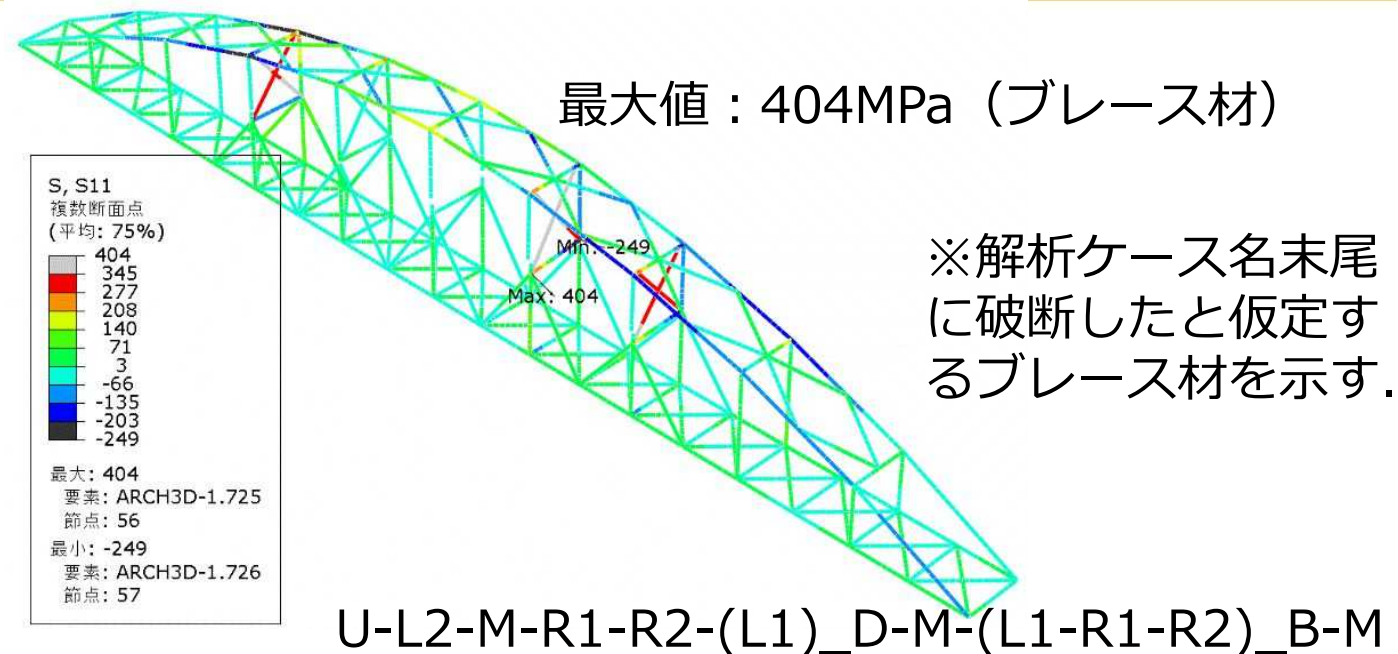
そこで、ブレース材が腐食の進行によって本来の性能を発揮できなかったと仮定し解析を実施する。ブレース材は腐食により部材抵抗力が低下しているとし、最も大きい応力が生じているブレース材を真っ先に破断させる。



最もクリティカルなケースを想定する。
前頁の解析結果（右図）より、M断面のブレース材に最大応力が生じることが確認できるため、当該部材を消去した状態で解析を実施する。

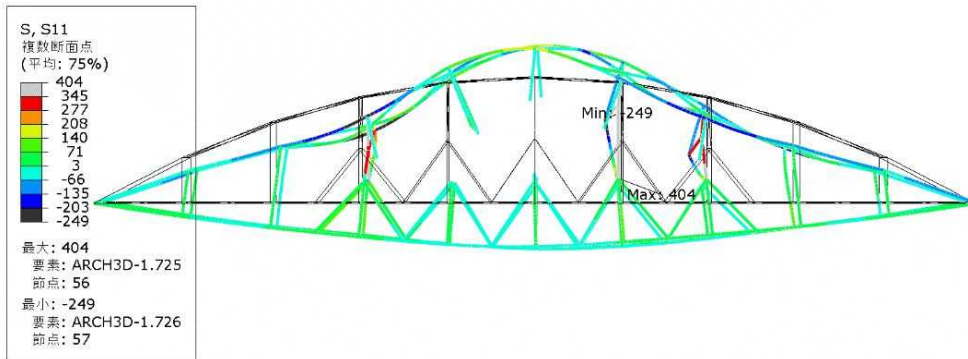


M断面内ブレース材が破断したと仮定



- 解析結果より，M断面内のブレース材が破断したと仮定したことにより，**L2,R1,R2断面内のブレース材も降伏点応力に達することが確認できた。**
- アーチリブの支間1/4点付近において限界応力-203MPaを超過する-230MPaが確認できた（限界応力は座屈設計ガイドライン参照）。
- **アーチリブ**の支点1/4点では発生応力のうち，軸力による応力が-59MPa，曲げによる応力が-82MPaとなり，合計応力が-140MPaであった。したがって，軸力と曲げが連成しつつも，**曲げが支配的となる応力状態が確認できた。**
- **本管の最大応力状態は，引張側で93MPa，圧縮側で-48MPaとなり強度上は応力的に余裕があることが確認できた。**

M断面内ブレース材が破断したと仮定



U-L2-M-R1-R2-(L1)_D-M-(L1-R1-R2)_B-M
(側面：変形倍率20倍)

崩落の瞬間映像（毎日新聞社報道）

- 解析結果の側面図（変形倍率20倍）より，毎日新聞社によって報道された水管橋崩落の定点カメラ映像から分かる変形形状と類似していることが確認できた。
- 本解析で用いた吊り材の破断状況に加えてB-Mが破断する条件では，**B-L1を除くブレース材は全て破断し**，同時に**アーチリブに面内座屈が生じること**が分かる．この時点で**本管に大きな応力が作用していないことから**，アーチリブが座屈により崩壊することによって本管が荷重に耐えきれなくなり崩壊する**パターン2**のシナリオだと推測できる。



鋼アーチ橋のSHMに関する取り組み

目的：鋼アーチ橋の損傷推定

◆ 損傷検知手法とその課題

- 固有振動数と振動モードを利用した損傷検知
→ 振動モードを計測するには**センサを多数配置する必要がある。**
- 荷重に対する各地点の変位・回転を指標にすることによる損傷位置や程度の推定。
→ **応答が複雑なアーチ橋梁**に対して適用は未検討。
どの部材に損傷が生じているのかを判断できない。

目的

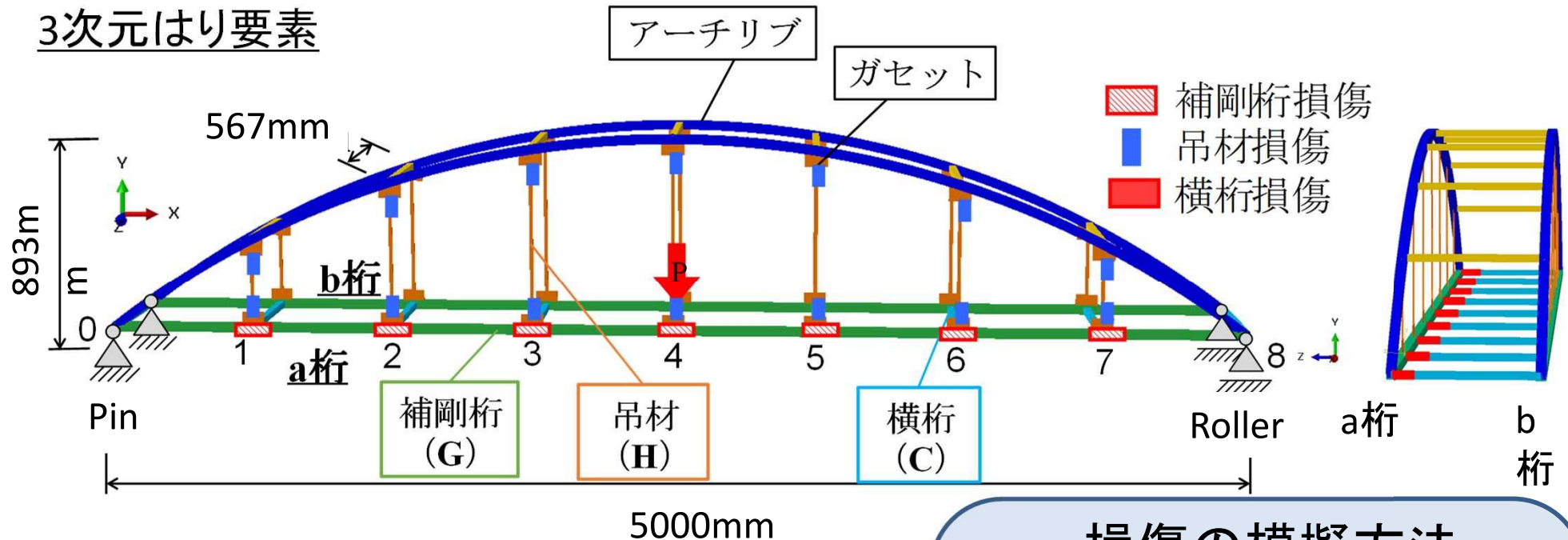
固有振動数や橋梁の**応答値**を用い、
少数のセンサでアーチ橋模型の吊材の損傷を
検知するための基礎的な検討を行う。



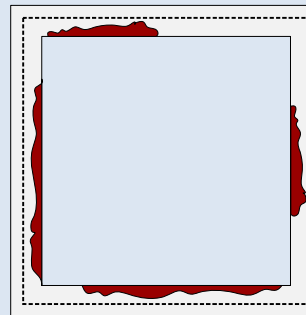
使用した鋼アーチ橋模型

目的 一力所の損傷が各指標に及ぼす影響を明らかにする

3次元はり要素

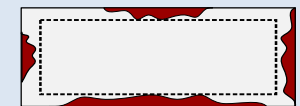


損傷の模擬方法



補剛桁・横桁

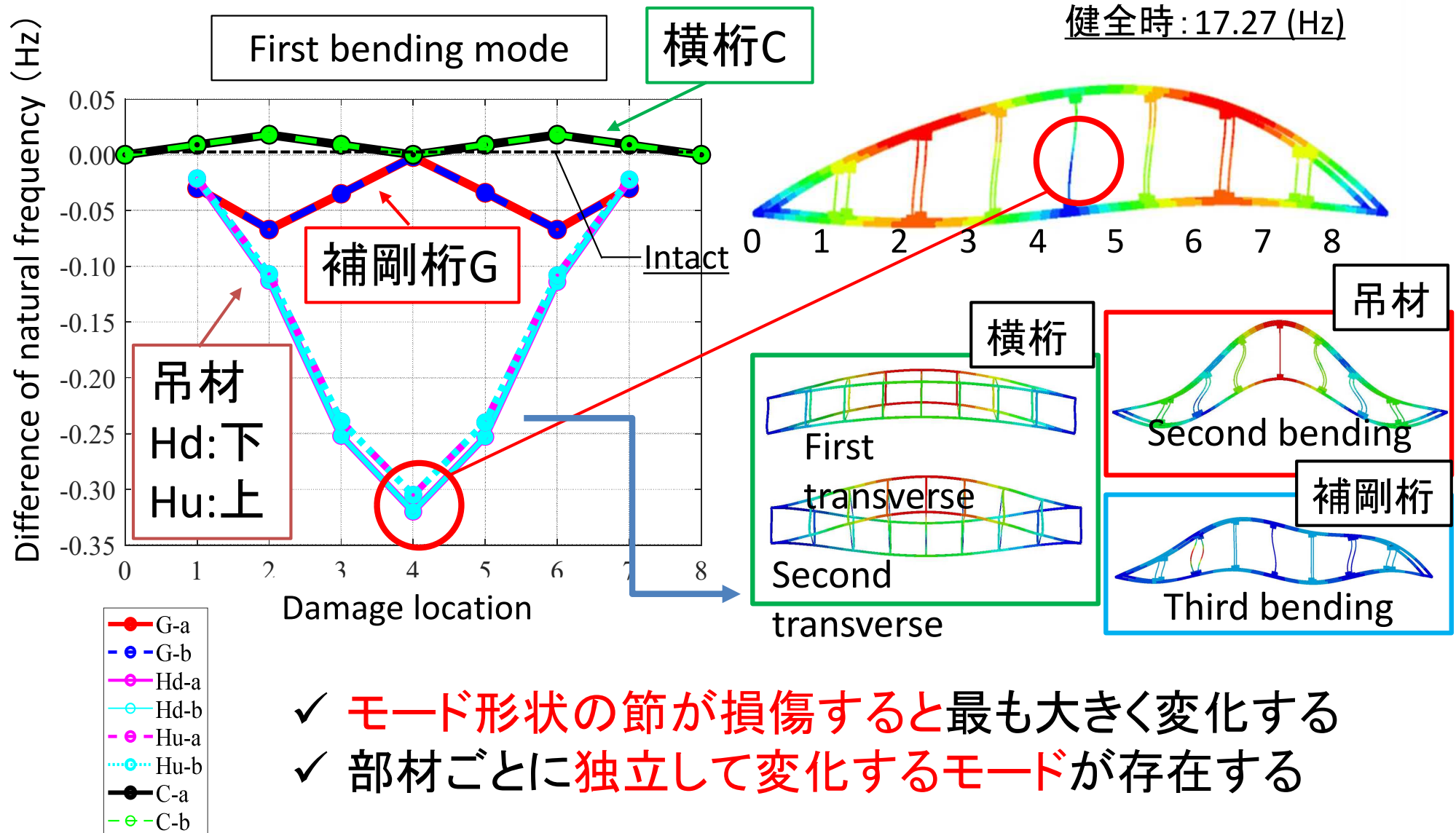
25%, 50%, 75%
の板厚減肉



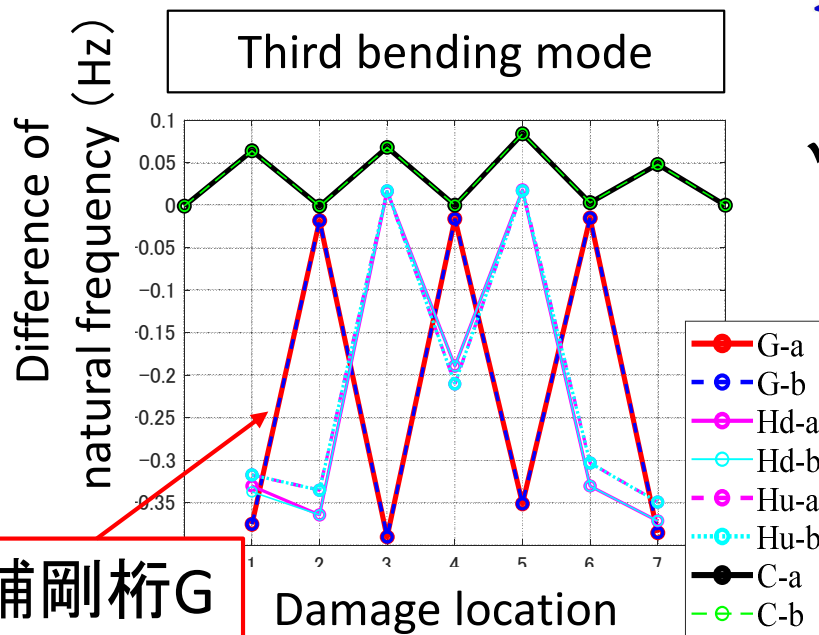
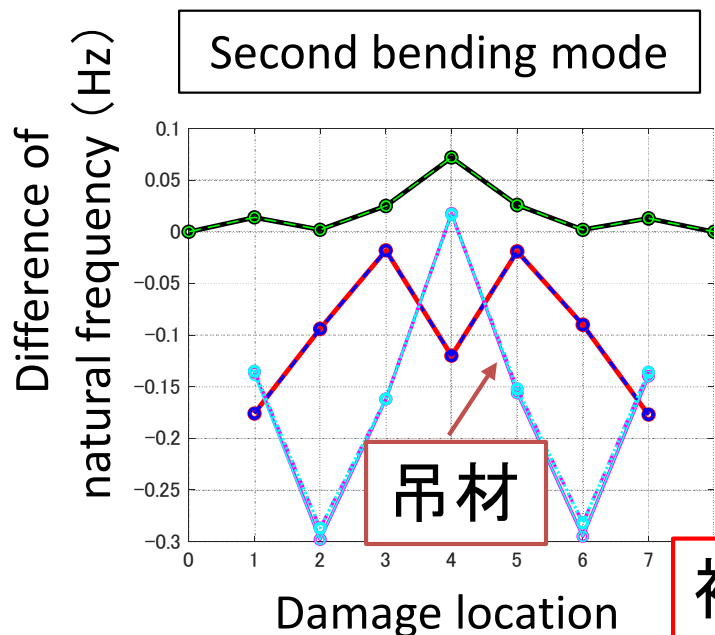
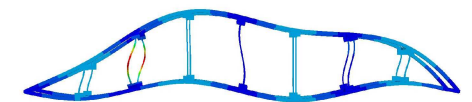
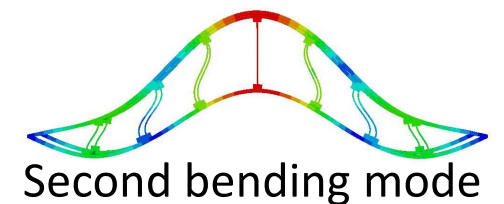
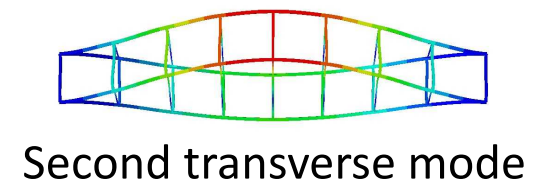
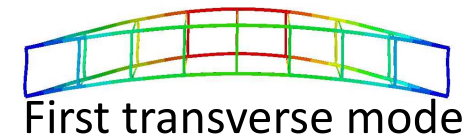
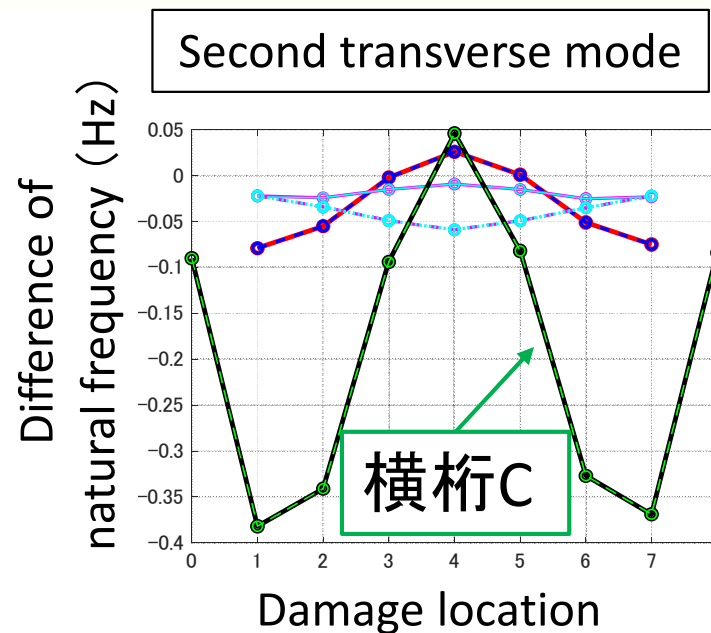
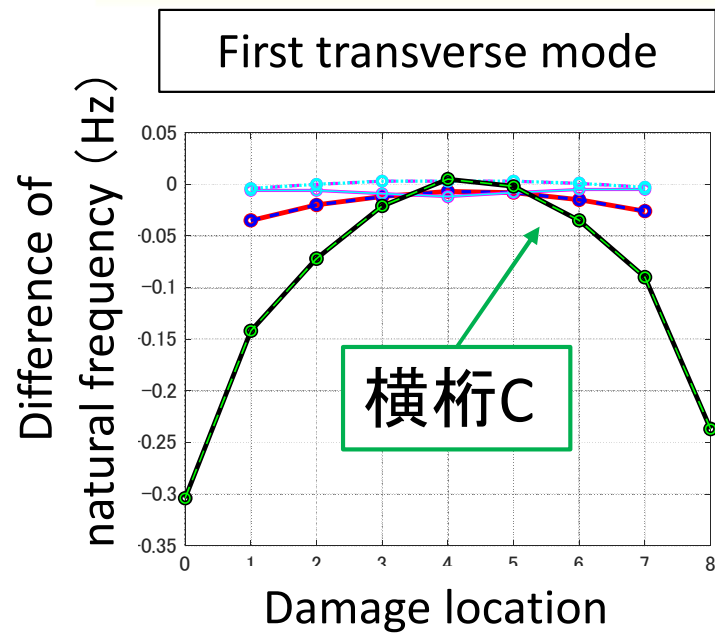
吊材

- パラメータ: 損傷位置, 程度, 部材
- 解析ケース: 各部材の格点部の計60力所 × 3段階 (25%, 50%, 75%)
- 固有値解析と静的弾性解析を実施

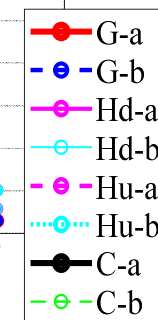
➤ 損傷を与えたときの，損傷と固有振動数の関係について考察



FEM解析の結果（単数損傷）-固有振動数



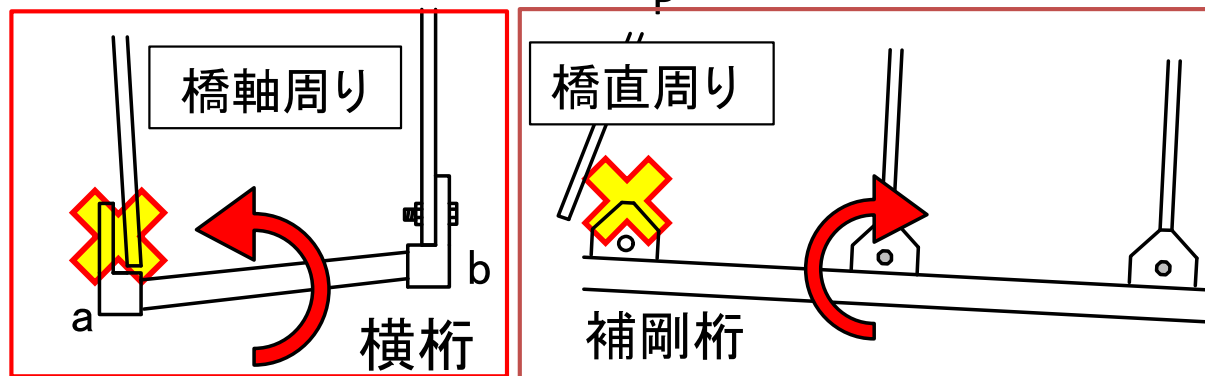
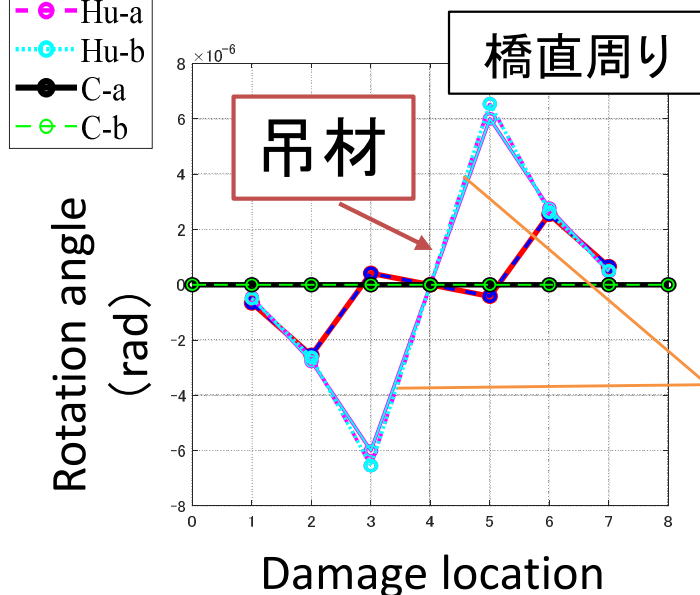
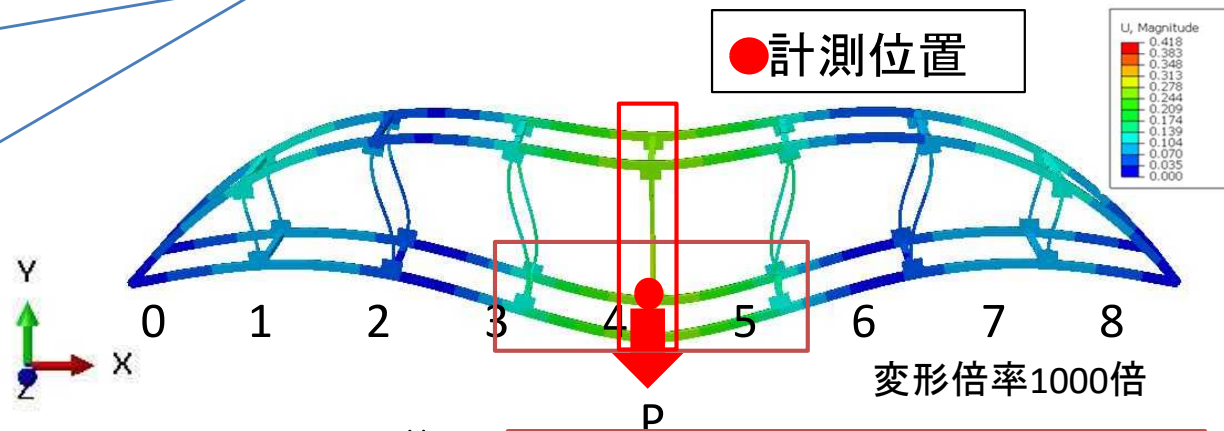
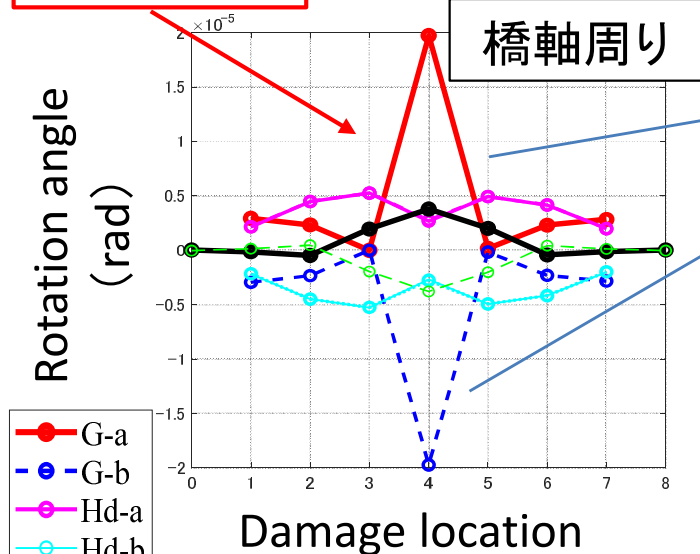
✓ 低次のモード
での変化の大小を比較することで
損傷部材、位置の特定の可能性



FEM解析の結果（単数損傷）-回転角

補剛桁G

a側, b側の違いが正負として表れる.

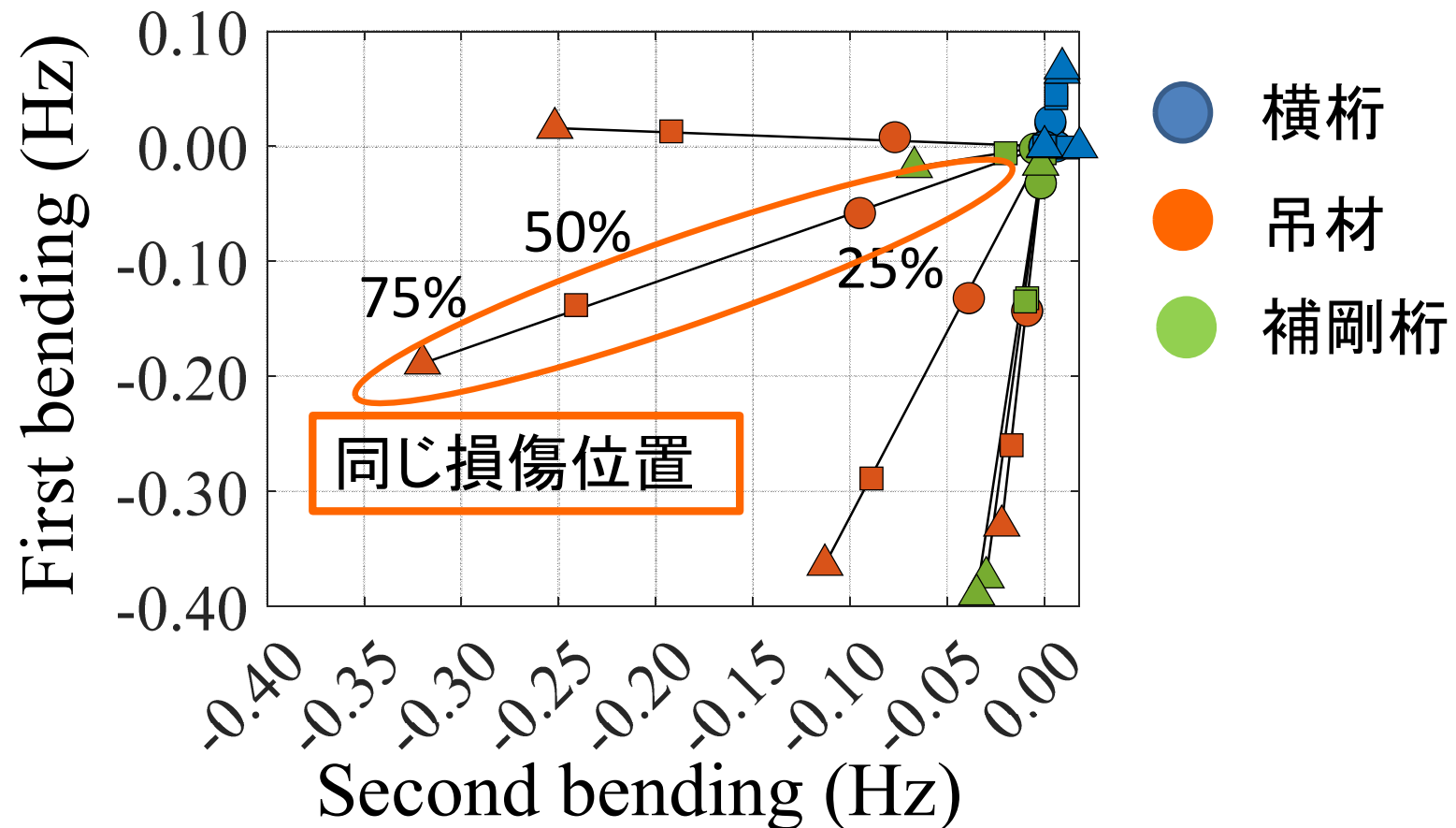


桁の左右の違いが唯一現れる

✓ 固有振動数で判別できない**対称位置**にある損傷を判別することができる



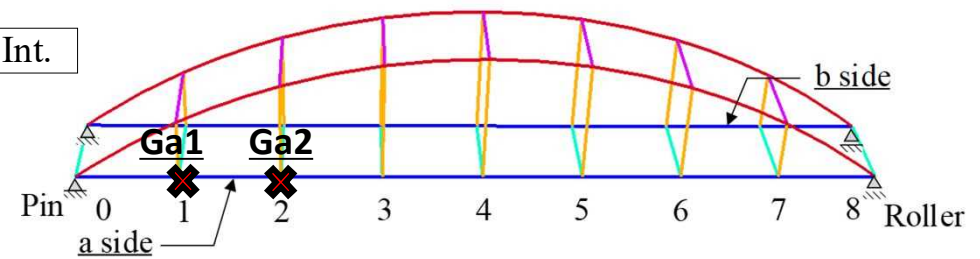
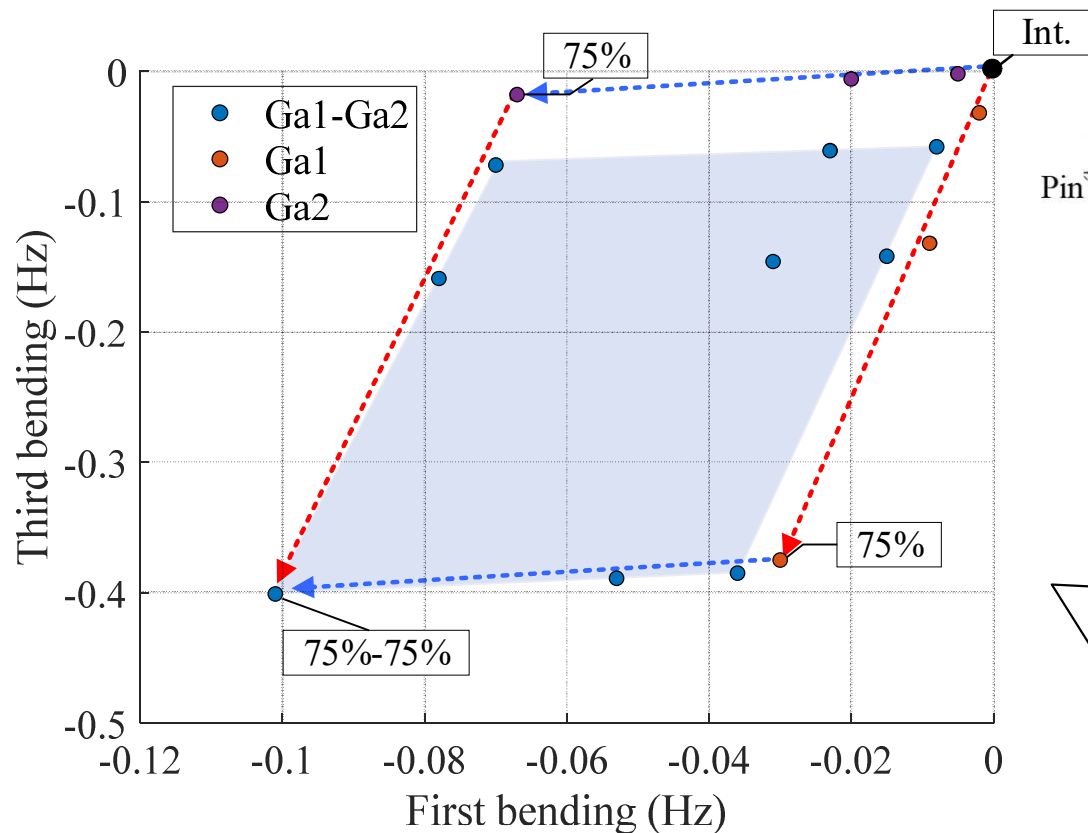
固有振動数



- ✓ 損傷程度が変化させると、**直線に近い**曲線状に変化した。
- ✓ 何程度かの損傷の値が決まればその後の値を**予測する**ことが可能である。

目的 複数損傷判別の可能性について検討する

- 単数損傷として対象とした箇所を2カ所組み合わせた複数損傷を与え，固有値解析を行う。
- 78パターン×9段階＝計702ケース

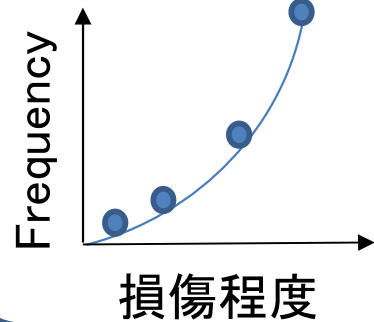


✓ 2カ所で損傷が発生すると，それぞれの損傷が単数で発生した時の**重ね合わせ**となることが確認できた。

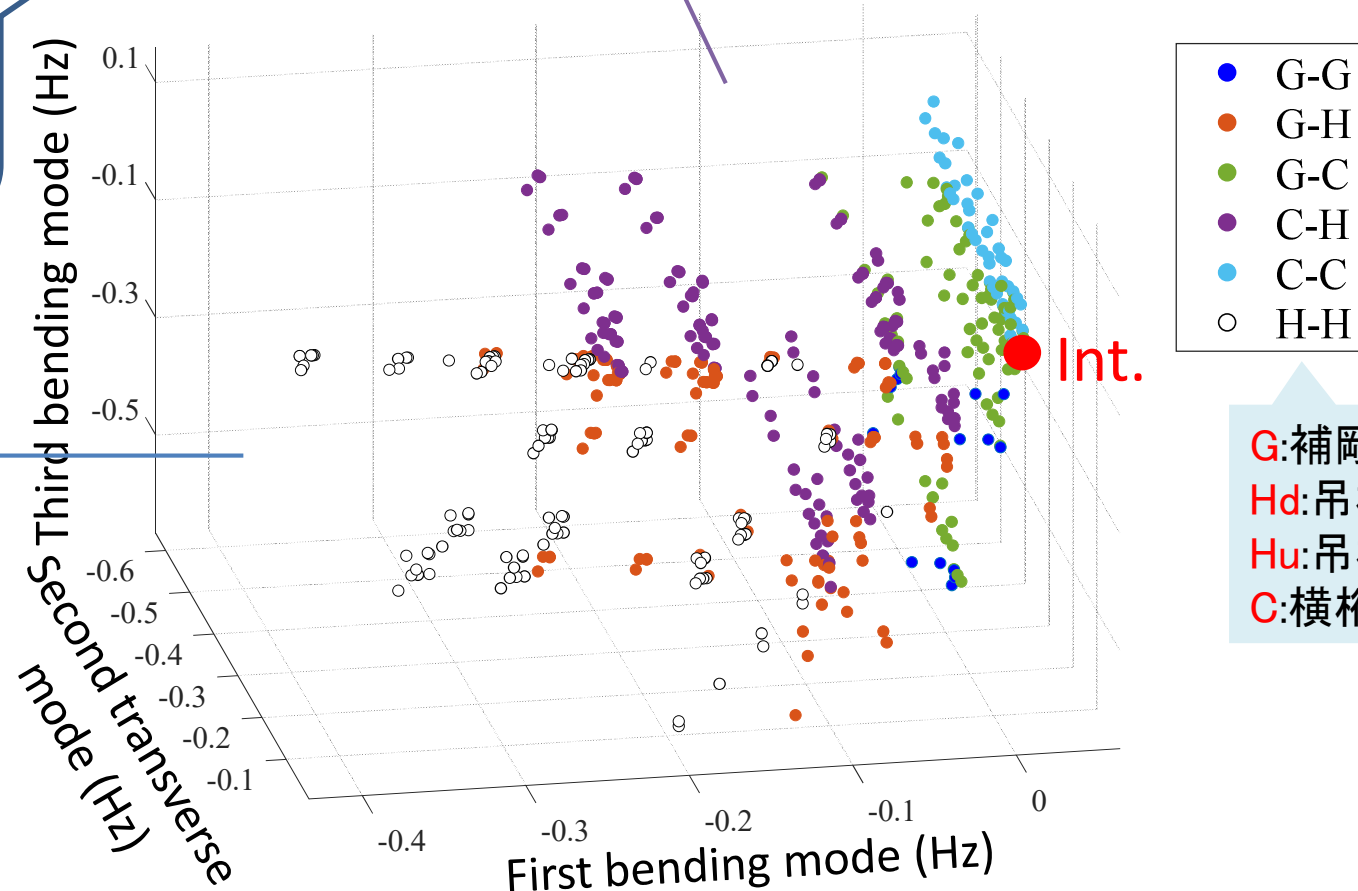
FE解析の結果-複数損傷の分類

➤ 部材で特徴が出るモードの固有振動数の変化を用いて比較

同じ損傷であれば**同じ平面上**に現れる



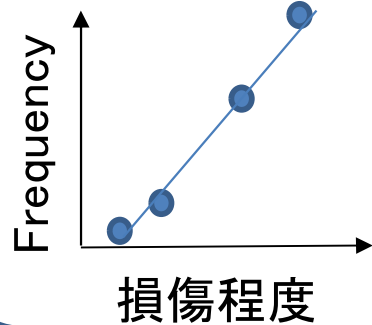
色分けが
できている
⇒ **部材の判
別が可能**



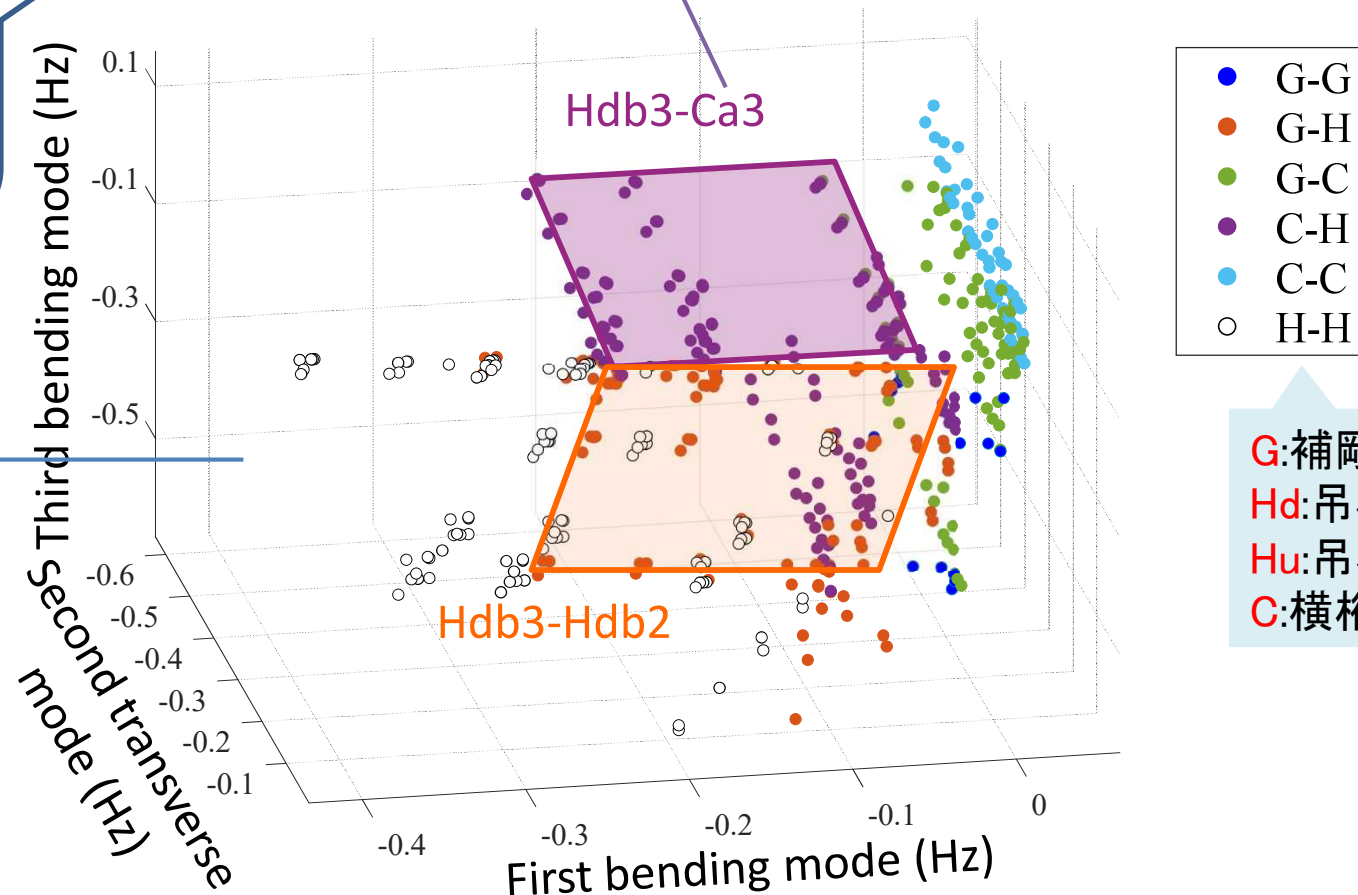
➡ 低次の固有モードを併せて比較することで、複数損傷の分類ができる可能性がある。

➤ 部材で特徴が出るモードの固有振動数の変化を用いて分類

同じ損傷であれば**同じ平面上**に現れる



色分けが
できている
⇒ **部材の判
別が可能**

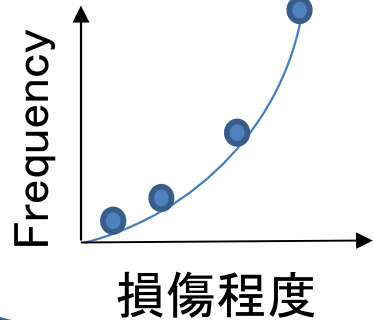


➡ 低次の固有モードを併せて比較することで、複数損傷の分類ができる可能性がある。

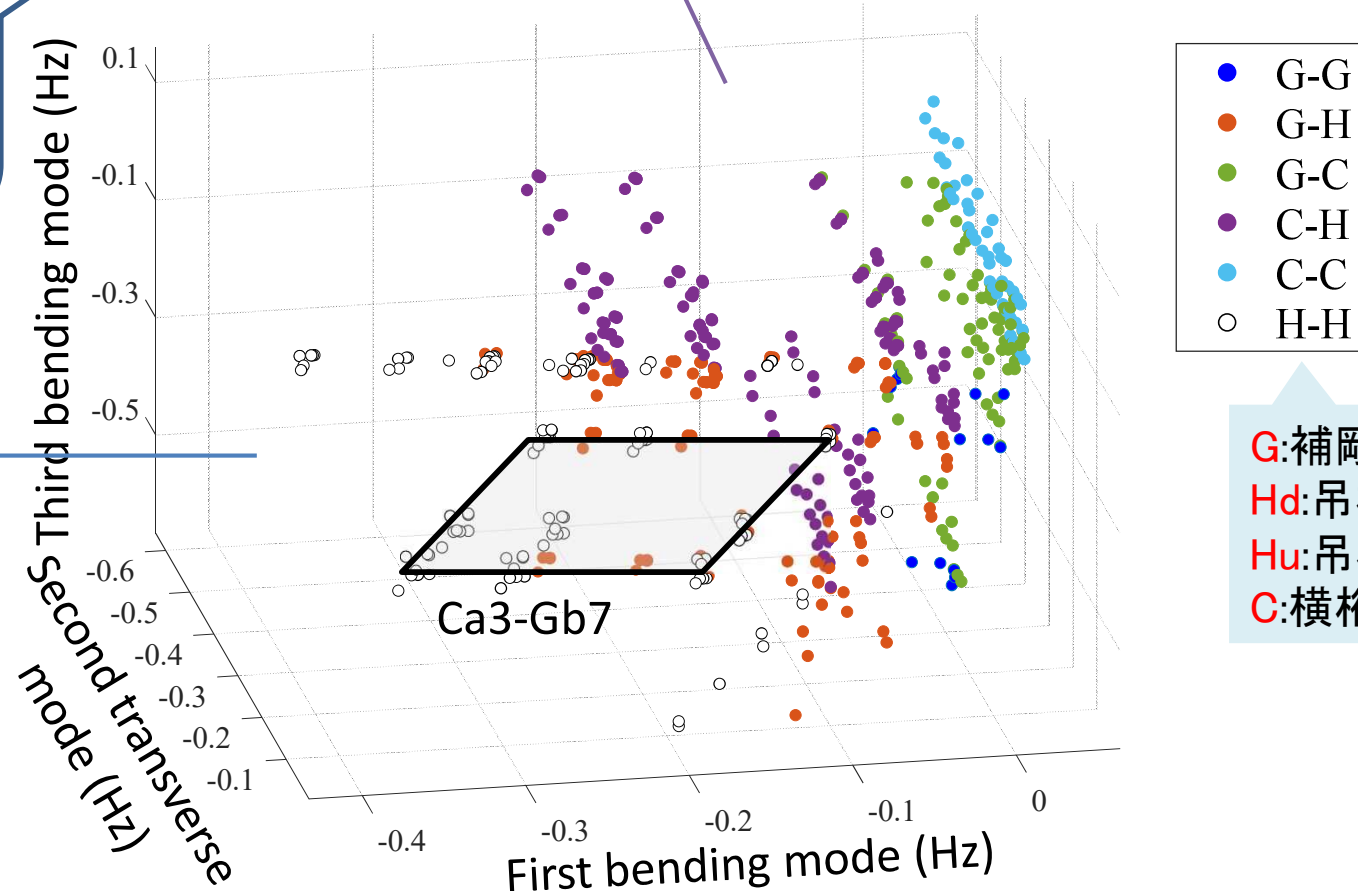
FE解析の結果-複数損傷の分類

➤ 部材で特徴が出るモードの固有振動数の変化を用いて分類

同じ損傷であれば**同じ平面上**に現れる



色分けが
できている
⇒ **部材の判
別が可能**



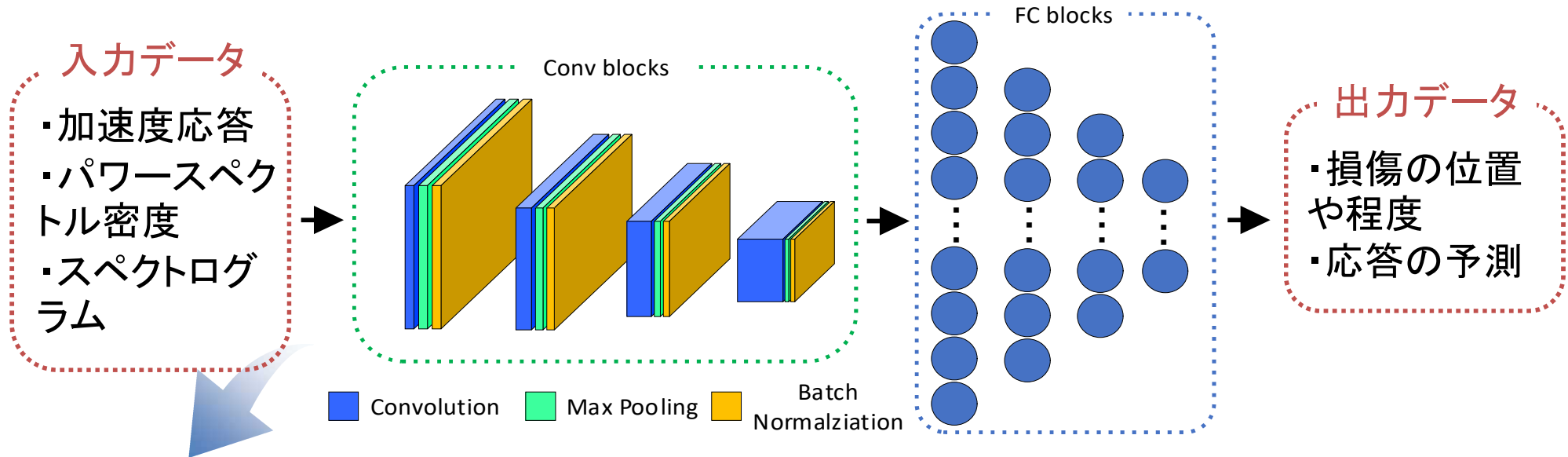
G:補剛桁
Hd:吊材下
Hu:吊材上
C:横桁

➡ 低次の固有モードを併せて比較することで、複数損傷の分類ができる可能性がある。

本研究では鋼製アーチ橋の振動特性および回転角の変化に着目して、損傷によるそれらのパラメータの変化を明らかにする。

- ✓ アーチ橋モデルでは、横桁損傷時には、橋直1・2次モード、吊材は、曲げ1・2次モード、補剛桁は、曲げ3次モードが、独立して変化することがわかり、損傷位置が**モード形状の節**であるほど大きな変化が出ることが分かった。
- ✓ 中央横桁の回転角を用いることで固有振動数では分類できない**対称位置にある損傷**を判別することができた。
- ✓ 複数損傷の場合、それらの損傷の変化を**重ね合わせた値**となる。特徴的な固有モードを併せて用いることで、**複数損傷を分類できる可能性**があった。

○畳み込みニューラルネットワークを活用した損傷検知手法



特徴量の抽出を行う

特徴量を事前に抽出する必要がなく、見逃されていた特徴も抽出できるため、少ないセンサでも損傷検知できる可能性がある

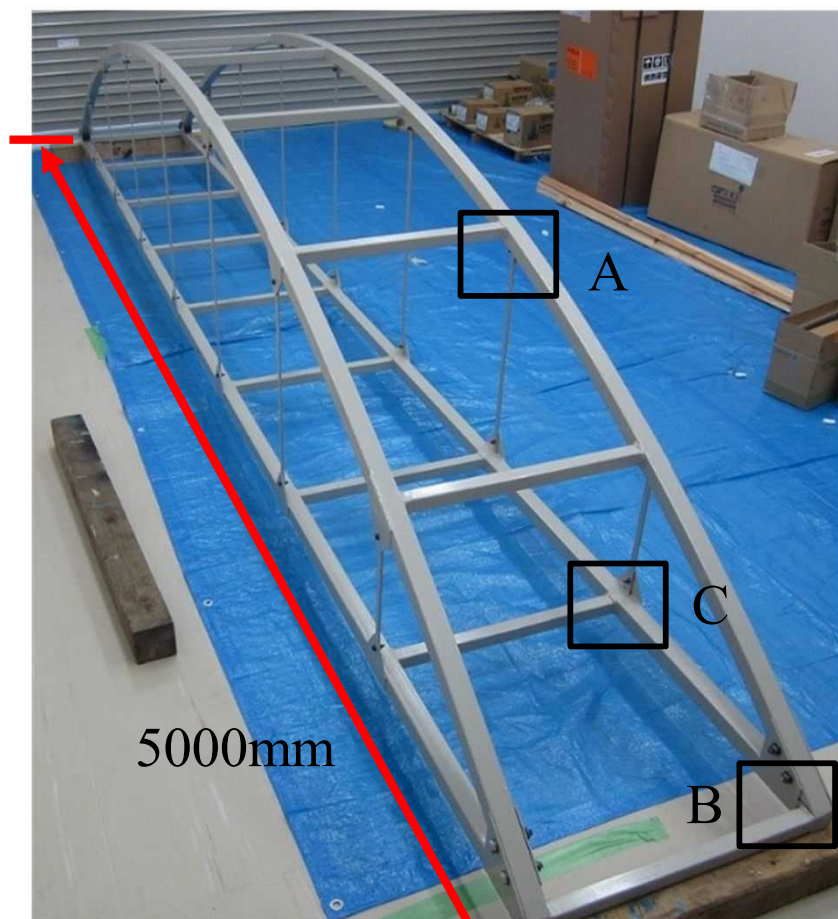
課題

損傷の位置やと応答の関係が未解明 → 最も効果的な周波数範囲が未解明

目的

FEMを利用して最も効果的な周波数範囲を明らかにし、畳み込みニューラルネットワークを活用した損傷の位置の分類を行う

○ 75mのランガーアーチ橋の1/15模型



A

B

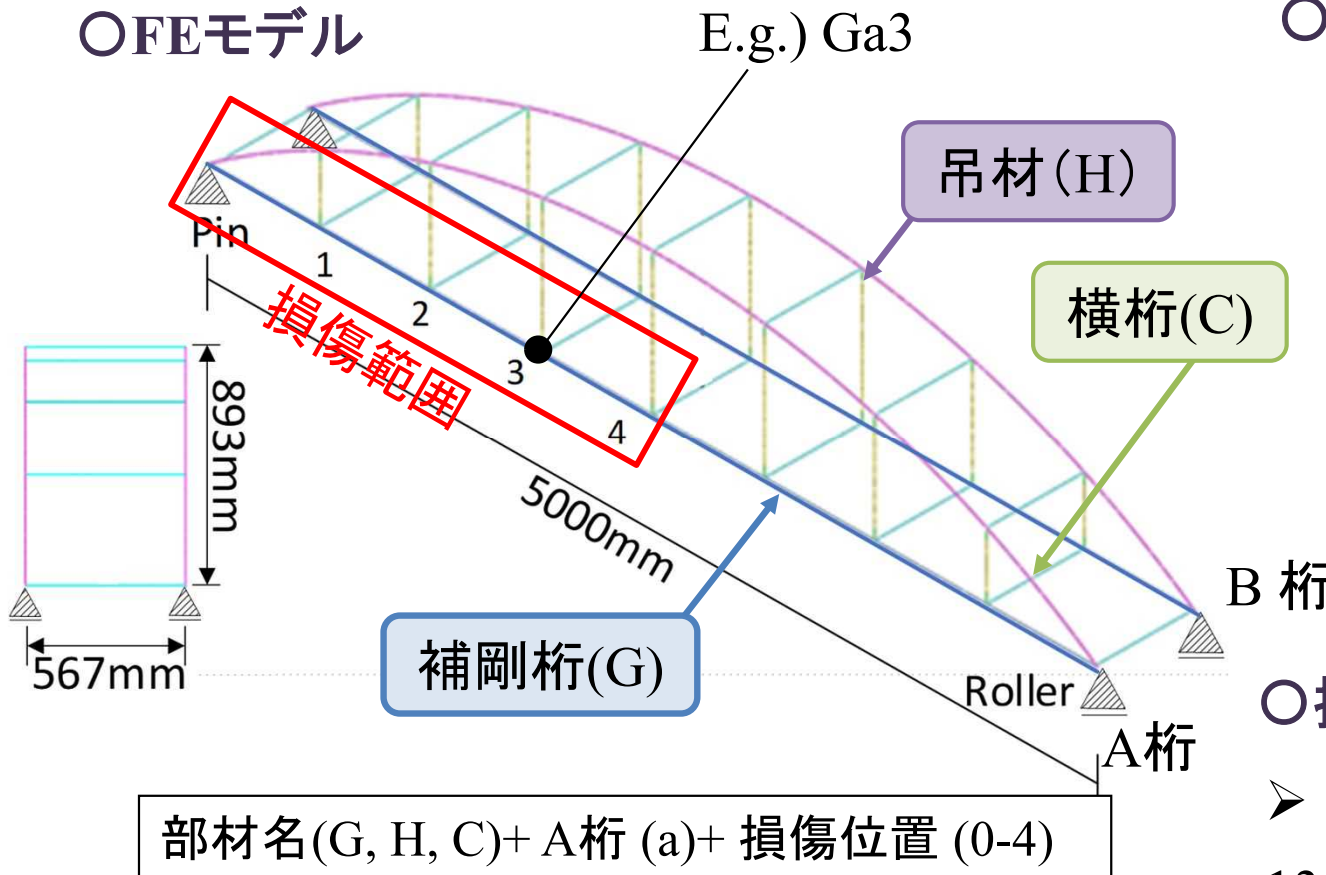
C

表-1 断面形状

Member	b×h×t (mm)	Cross section
Stiffening girder	40×40×1.6	
Arch rib	40×40×2.0	
Cross girder	30×30×1.6	
Hanger	16(b)×4.5(t)	
Gusset	t=3	

- ◆ 全長 : 5000mm, 幅員 : 567mm
- ◆ 質量 : 65kgf

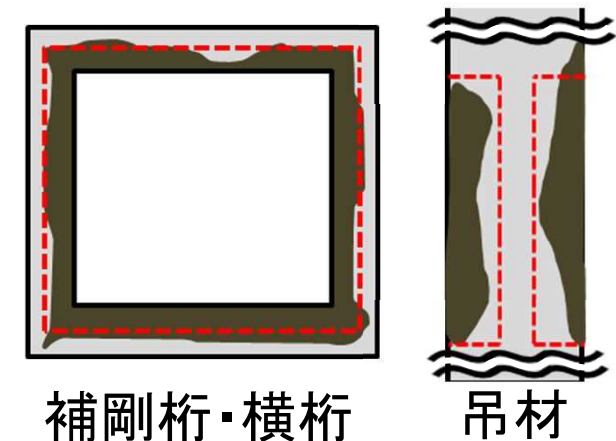
○FEモデル



○解析条件

- 解析ソルバー：EEPAS/USSP
- 材料特性
弾性係数：200GPa, ポアソン比：0.3
密度：7.87g/cm³

○損傷(格点部)のモデル化



○損傷シナリオ

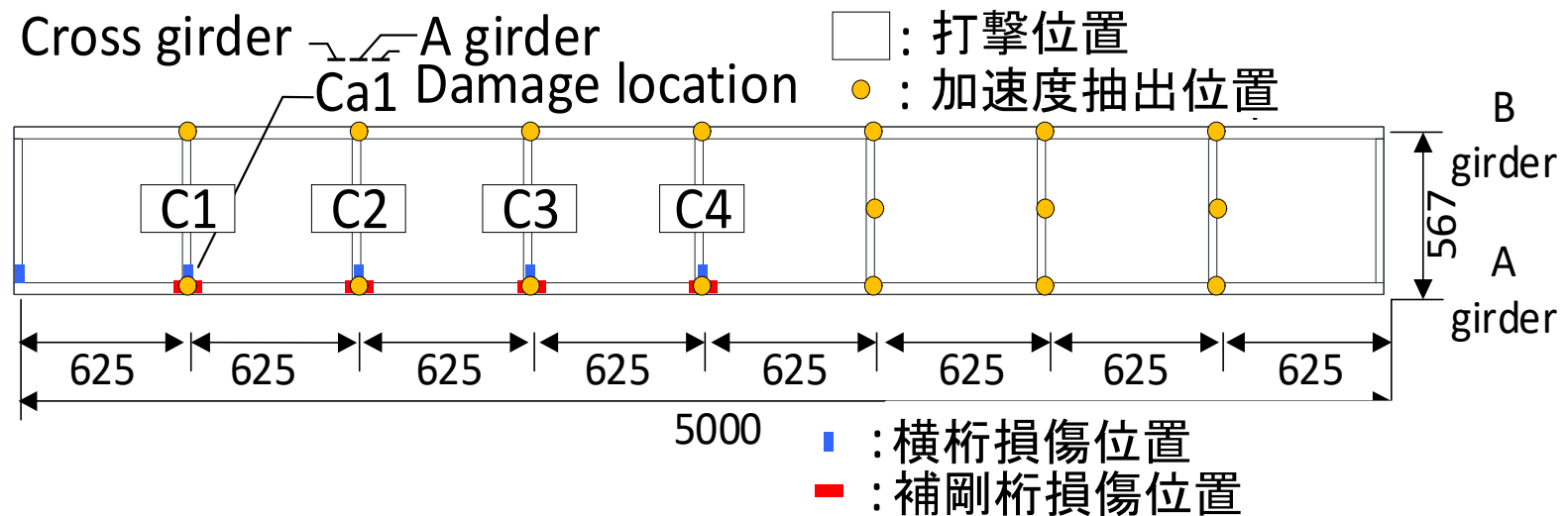
➤ 単数損傷

13カ所×5程度=75ケース
(10%, 20%, 30%, 40%, 50%)

➤ 2カ所損傷

78組×4程度=312ケース
(20%, 30%の組合せ) ³⁶

○ それぞれの損傷ケースに対して動的解析を実施



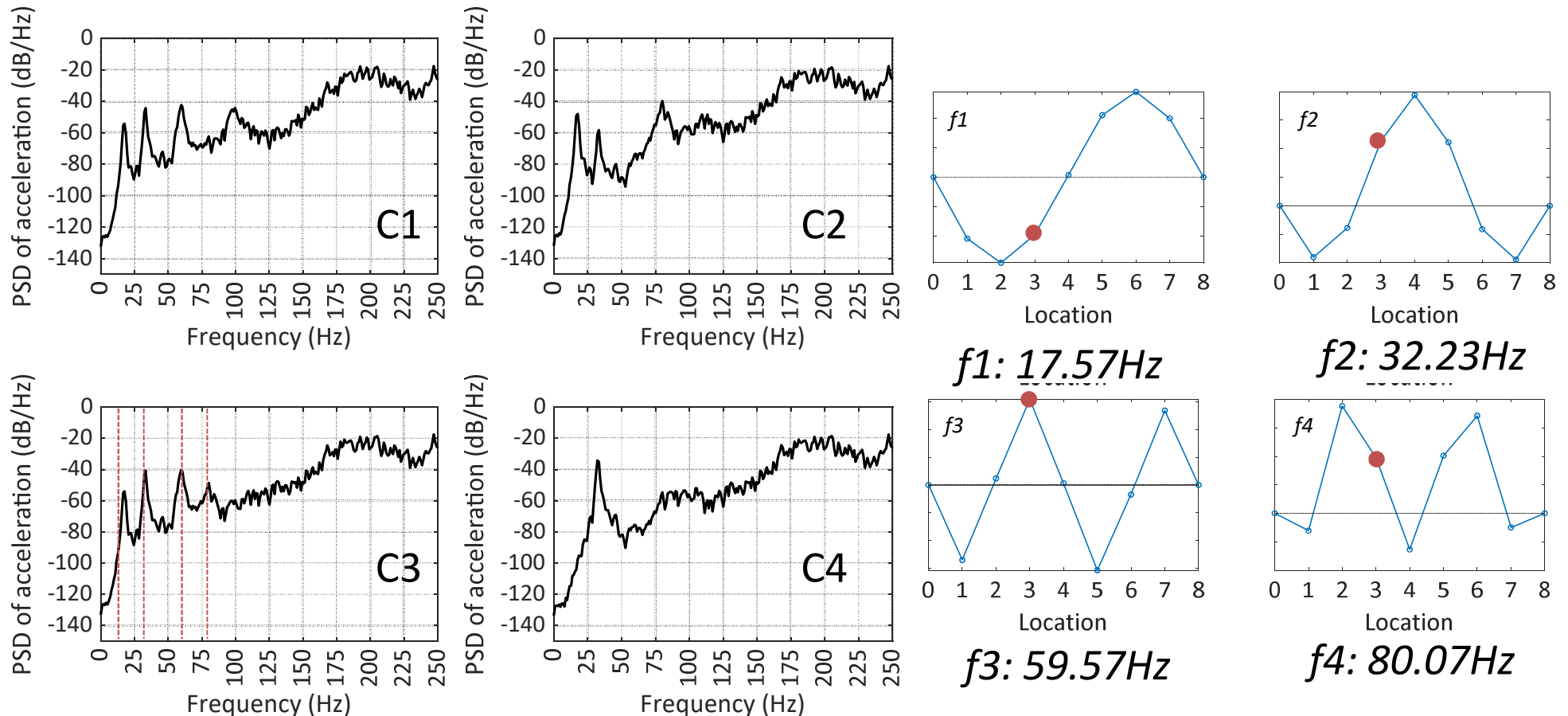
◆ 加振位置 (C1~C4)

→ ホワイトノイズによって加振

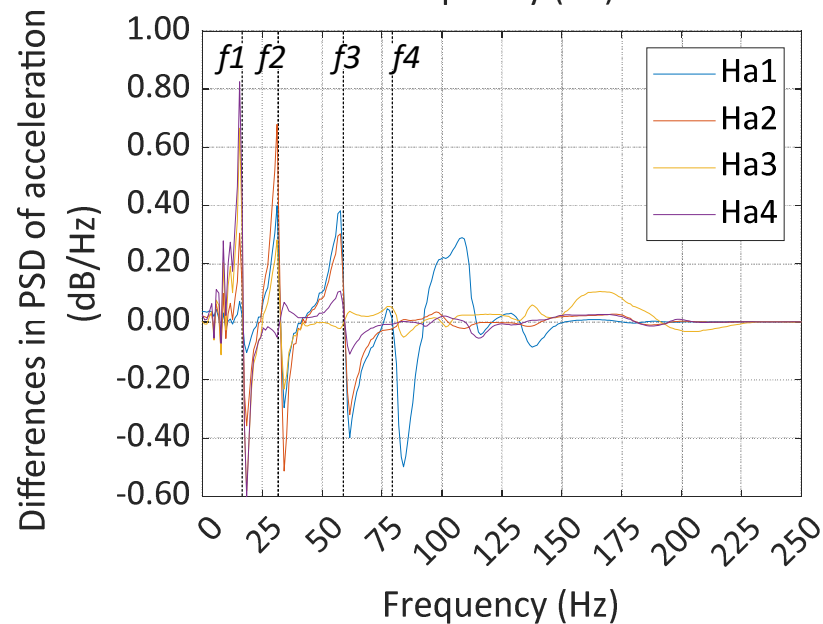
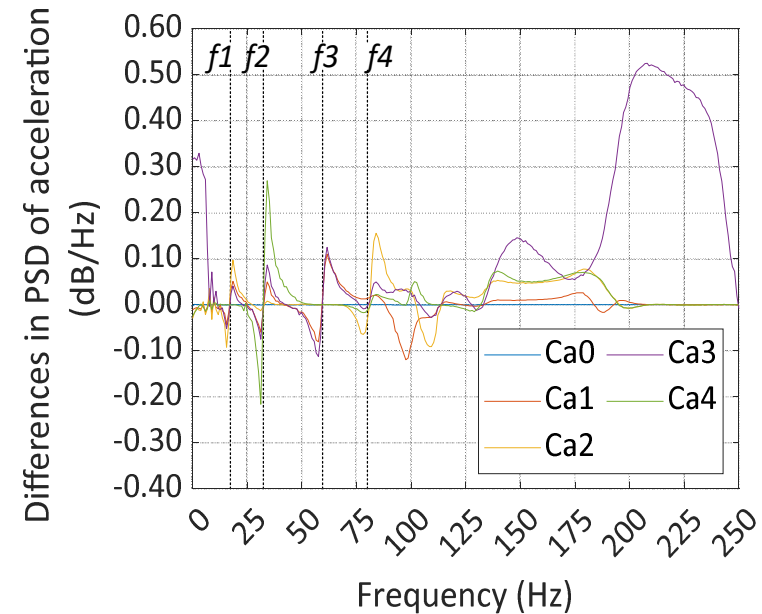
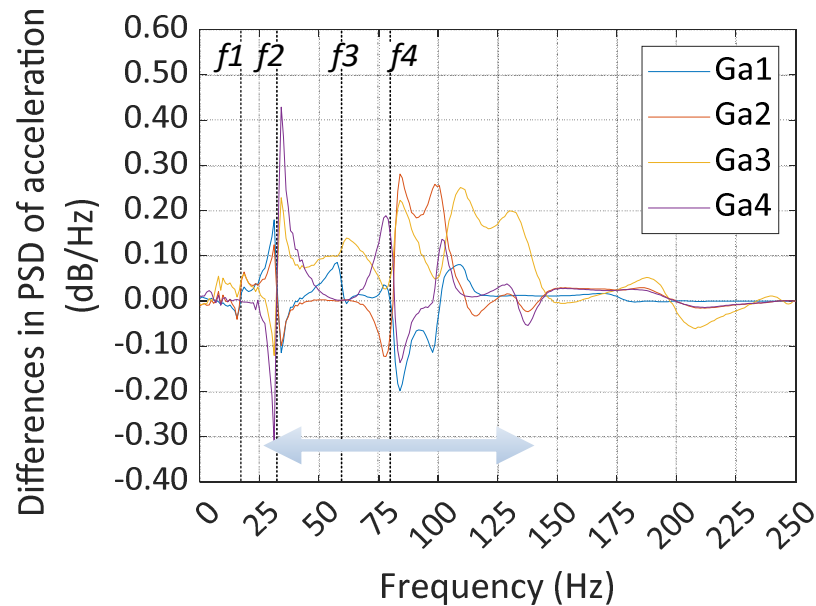
◆ 計測位置 : 21カ所

→ 鉛直方向の加速度を抽出 (500Hz)

○ 鉛直方向の加速度にFrequency domain decomposition (FDD)手法を適用

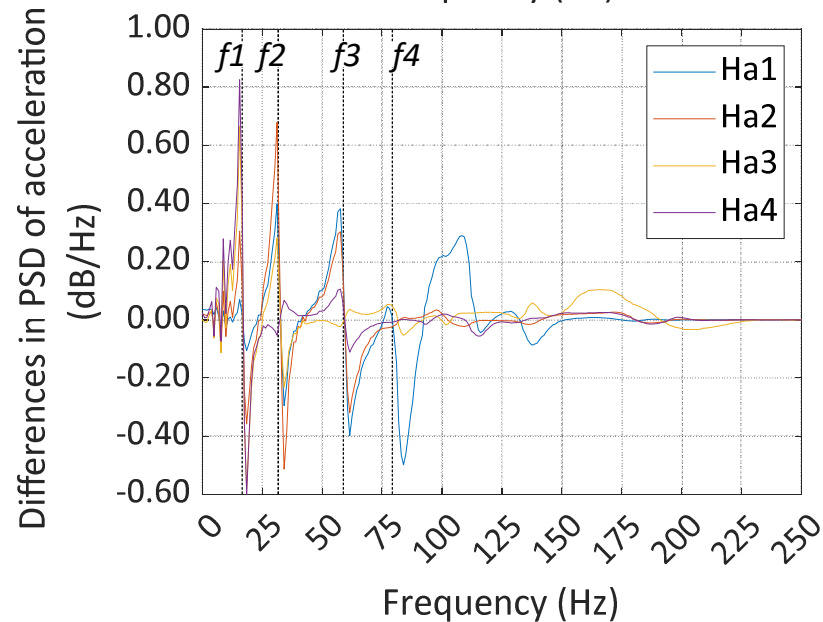
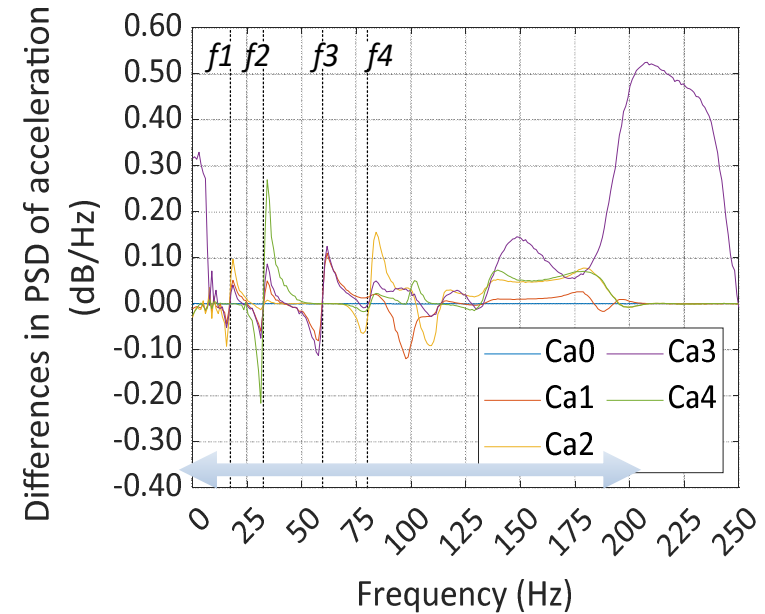
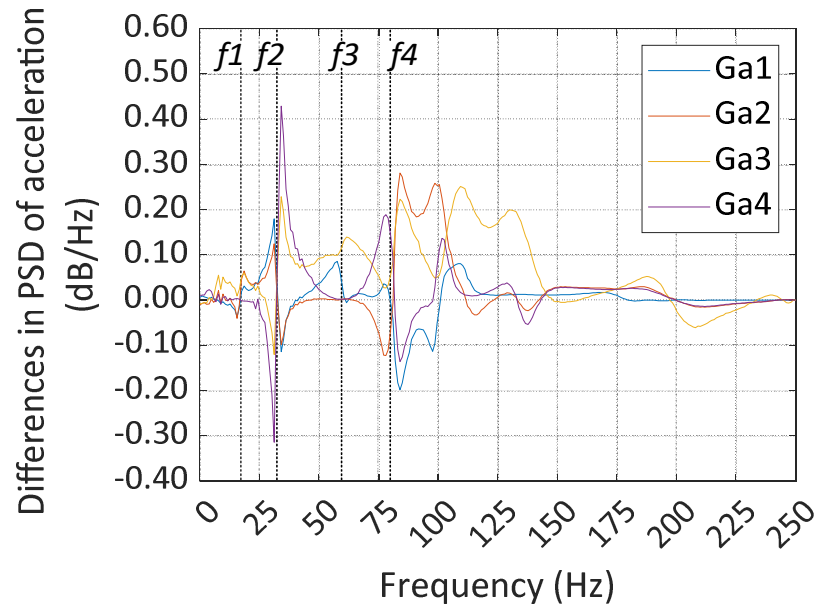


✓ C3を加振することによって、4つすべてのモードを卓越させることができるため、C3を加振位置として決定。



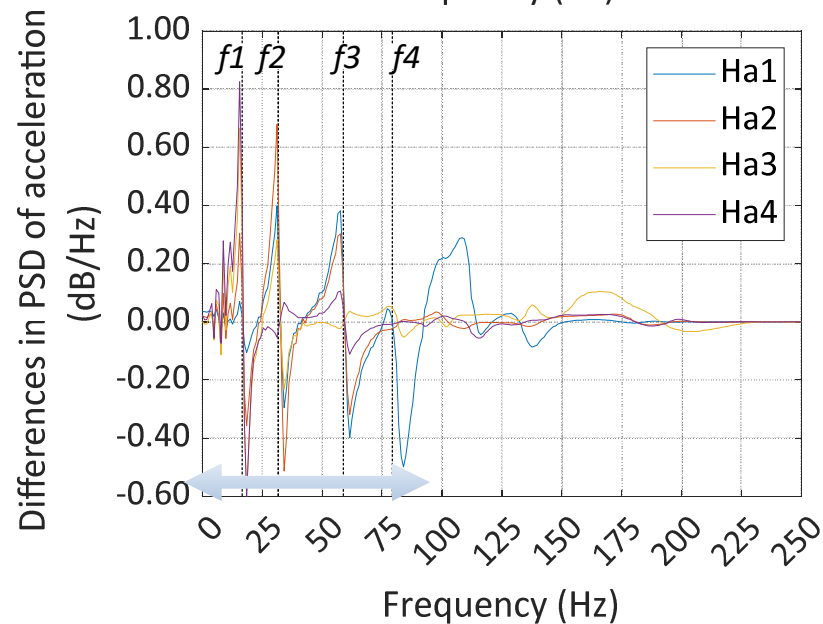
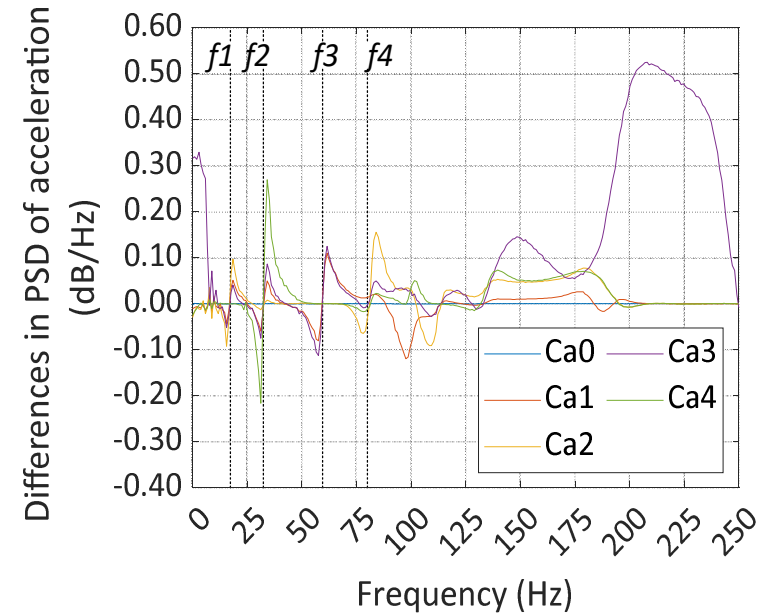
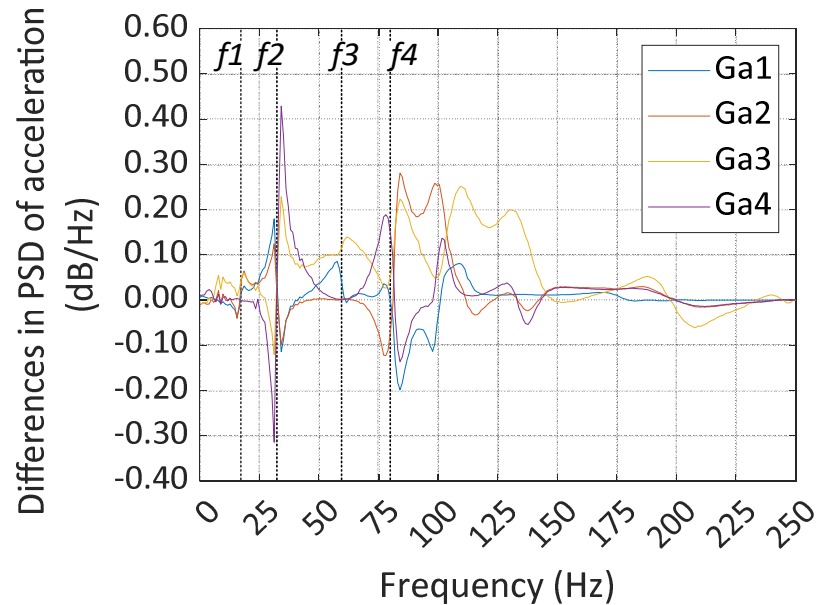
- ◆ 補剛桁: 2次モード以降～150Hz間への影響が大きい.
- ◆ 吊材: 1次モード～4次モードへの影響が大きい.
- ◆ 横桁: 200Hzまでへの影響が大きい.

0～200Hzまでの周波数帯を利用
(実際の橋梁であれば約60Hz)



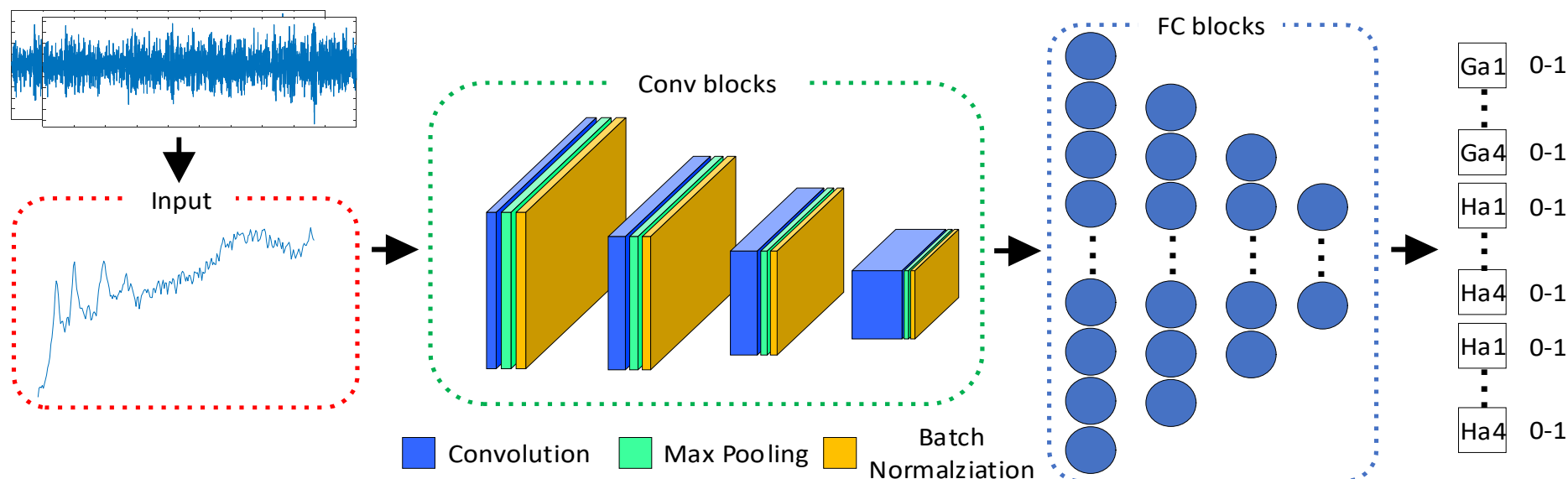
- ◆ 補剛桁: 2次モード以降～150Hz間への影響が大きい.
- ◆ 吊材: 1次モード～4次モードへの影響が大きい.
- ◆ 横桁: 200Hzまでへの影響が大きい.

0～200Hzまでの周波数帯を利用
(実際の橋梁であれば約60Hz)



- ◆ 補剛桁: 2次モード以降～150Hz間への影響が大きい.
- ◆ 吊材: 1次モード～4次モードへの影響が大きい.
- ◆ 横桁: 200Hzまでへの影響が大きい.

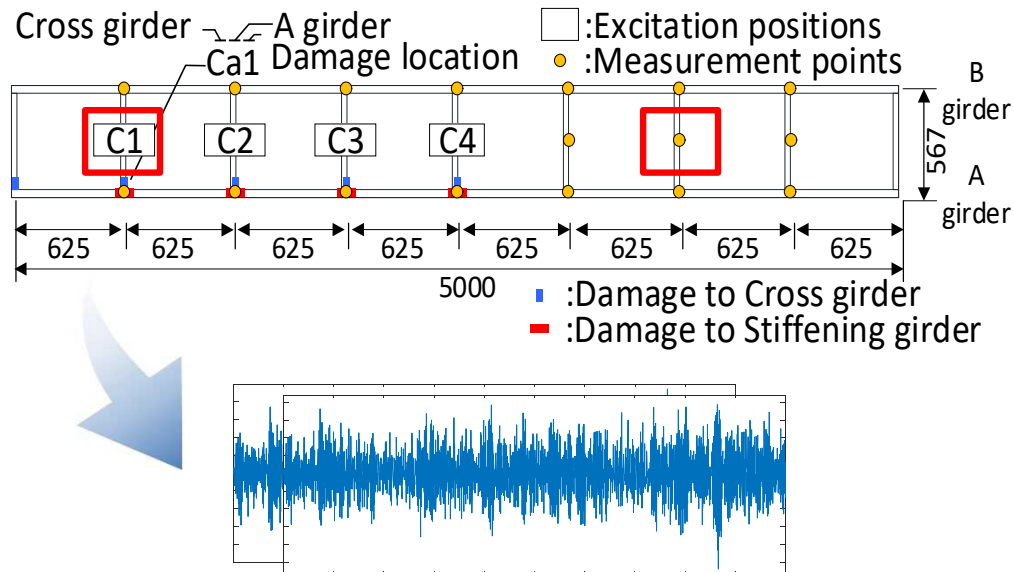
0～200Hzまでの周波数帯を利用
(実際の橋梁であれば約60Hz)



畳込みニューラルネットワークの構造

- ◆ 畳込み層: 16, 32, 64, 124
- ◆ 全結合層: 240, 240, 240, 360 (sigmoid, tanh, tanh, linear)
- ◆ 最適化アルゴリズム: SGD (The stochastic gradient descent function)
- ◆ 学習率: 0.05
- ◆ 学習回数: 3000回
- ◆ 損失関数: 平均二乗誤差 (MSE)

① 加速度応答の抽出



鉛直方向の加速度応答

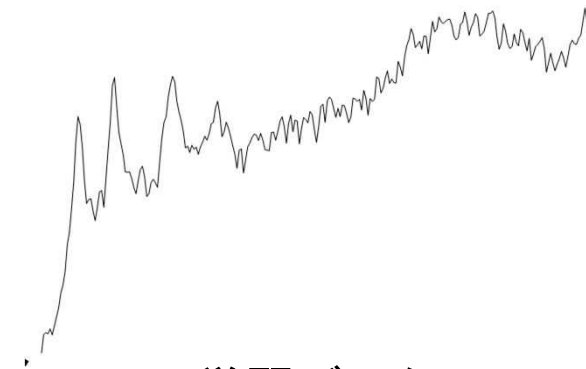
- ◆ 少ないセンサを想定し、加速度を抽出する箇所は2カ所

② ホワイトノイズの追加

- ◆ 学習データ数を拡張するため、1%~2%のホワイトノイズを加速度に追加→20倍

③ 画像データの作成

加速度応答にFDD法を適用
→グレースケールに変更



学習データ

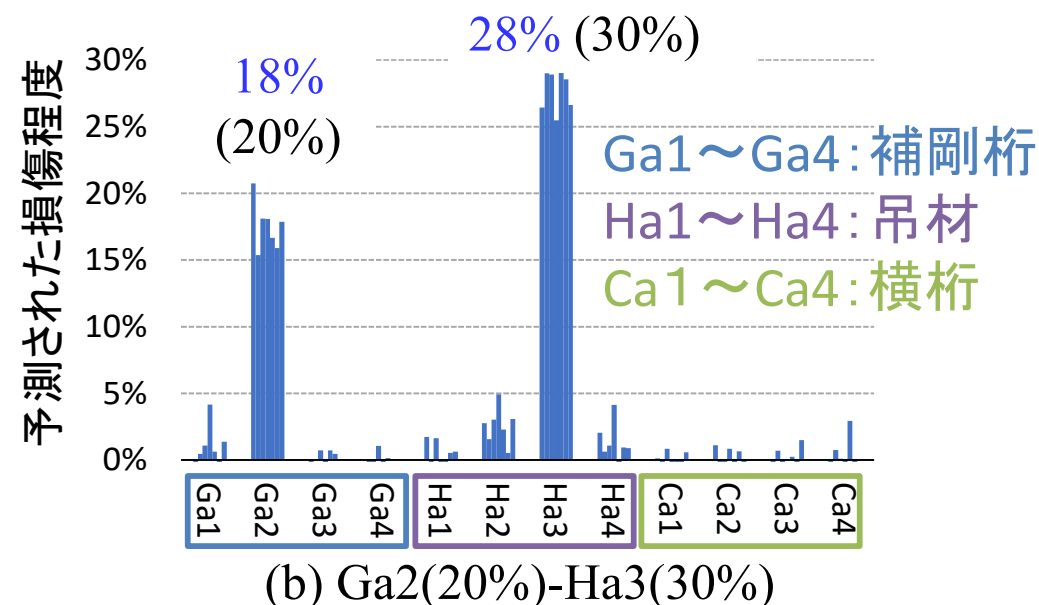
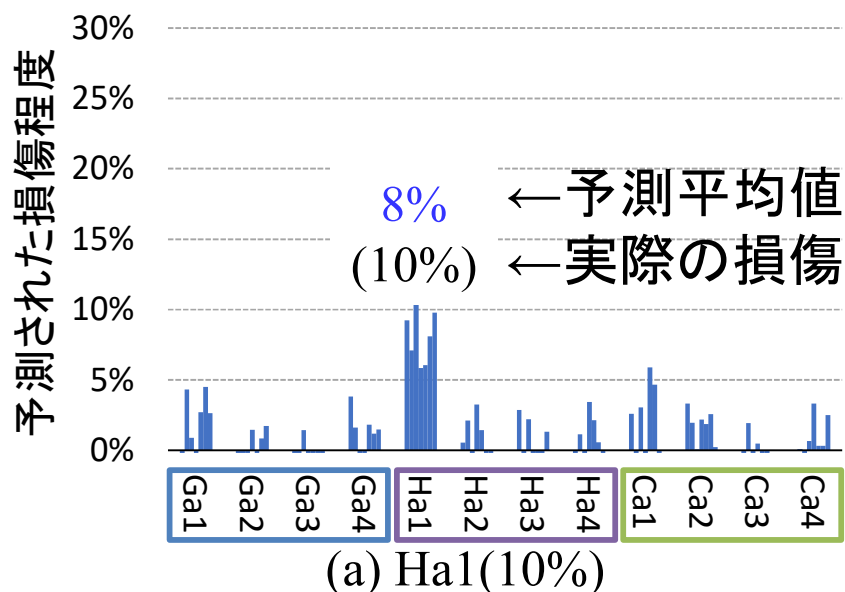
④ ラベルの付与

損傷位置と損傷程度のラベル付与

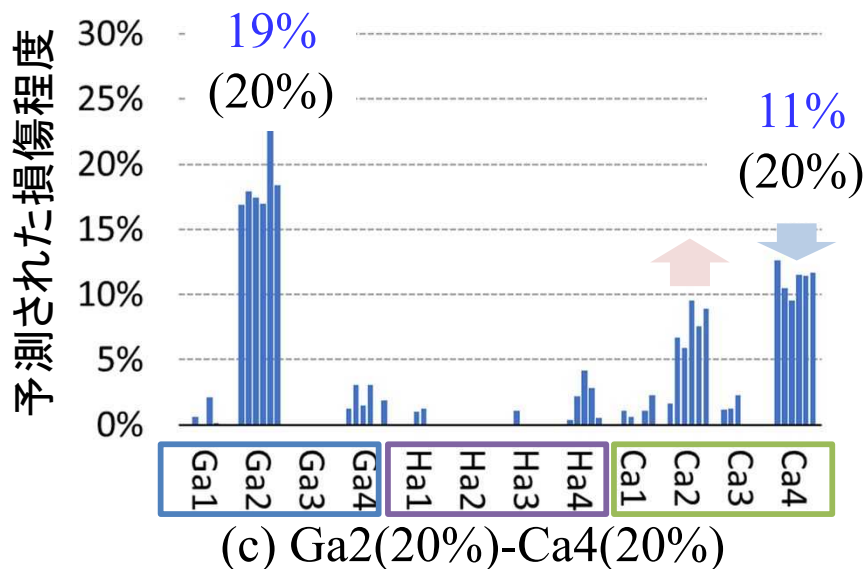
⑤ データの分割

学習データ: 70%
検証データ: 30%

学習結果 (検証データ)



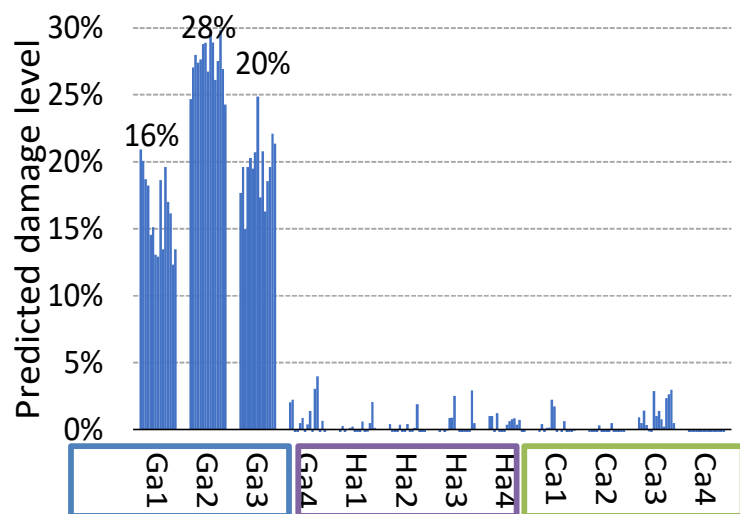
◆ 吊材と補剛桁は10%～50%までの単数損傷と20%～30%の2カ所損傷を認識



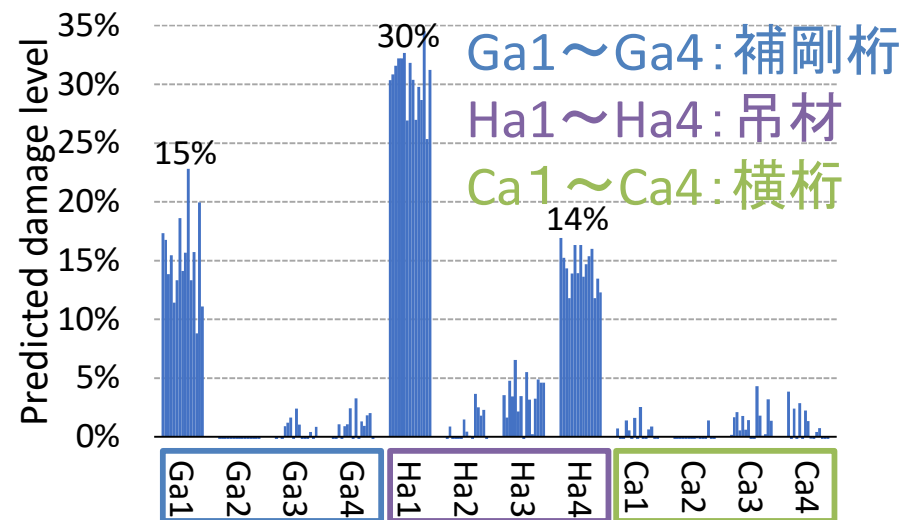
◆ 横桁と補剛桁が損傷すると、予測される**損傷程度が減少**し、健全部材が誤認識される。

→**横桁の特徴**が少なく、補剛桁の影響が混合すると、分類することが困難になる

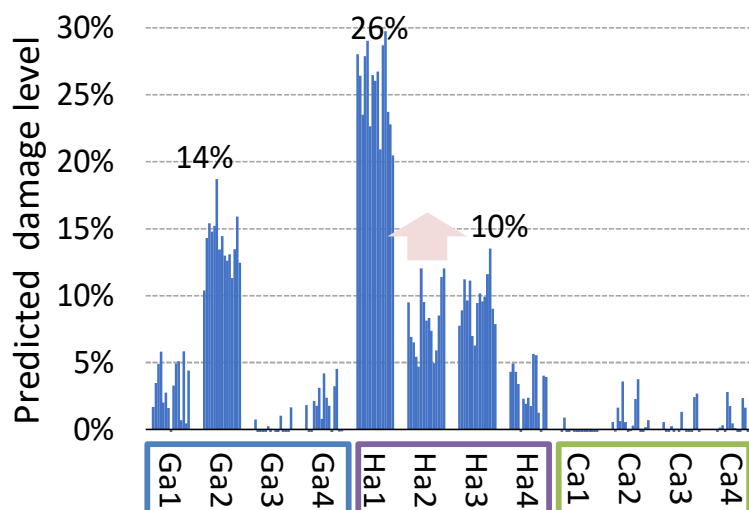
○学習させていない3カ所の損傷のデータを作成



(a) Ga1(20%)-Ga2(30%)-Ga3(20%)



(b) Ga1(20%)-Ha1(30%)-Ha4(20%)



(c) Ga2(20%)-Ha1(30%)-Ha3(20%)

- ◆ (a)(b)すべての損傷位置を認識することができた。
- ◆ 損傷が密集する場合，誤認識される部材があるが，実際の損傷部材の隣の部材であり，およその損傷範囲を推定可能。

本研究では、損傷がパワースペクトル密度に及ぼす周波数範囲を決定し、その範囲を用いて畳み込みニューラルネットワークを学習させ、複数損傷の位置の特定を行った。

- 補剛桁の損傷は2次モードから150Hzの間、吊材の損傷は、1次から4次モードの間、横桁の損傷は、200Hzまでのパワースペクトル密度への影響が大きいことが分かった。
- 吊材と補剛桁の1カ所および2カ所の損傷は、畳み込みニューラルネットワークに2つの位置から抽出した鉛直方向加速度の200Hzまでのパワースペクトル密度を学習させると、損傷の分類が可能であった。
- 損傷の程度は、10%の損傷まで予測することが可能であった。
- 3カ所の損傷については、損傷が密集していると、健全部材が損傷部材と誤認識されるケースがあった。

<今後の検討>

- ・鉛直方向のみではなく、橋直方向の加速度応答を利用し、複数損傷における認識精度を向上を図る。
- ・実験を実施し、決定した周波数範囲の妥当性を検討する。