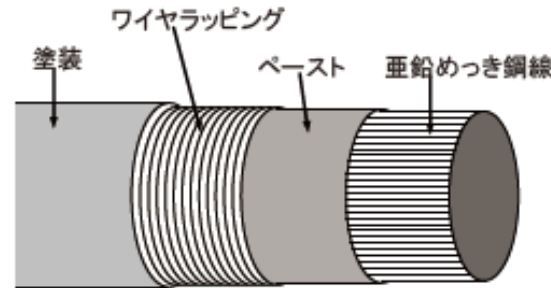


ケーブル腐食とケーブル振動を考慮した斜張橋モデルの大規模地震荷重下における動的応答解析

環境構造工学分野 8022804 秋山達哉

吊り形式橋梁の橋梁ケーブル

- ・多数の亜鉛めっき鋼線
- ・主要部材（重要!!）

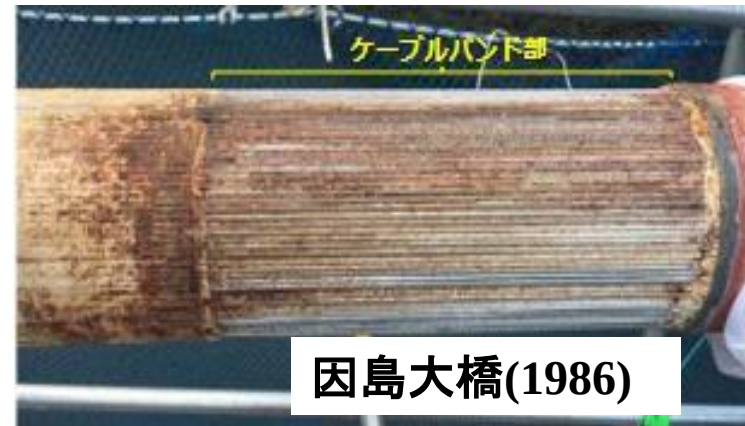


腐食事例



吊り形式橋梁の ケーブル腐食が問題

吊り橋ケーブル・腐食



既往の研究

ケーブル腐食を考慮した斜張橋

- 終局強度に与える影響
- 連鎖崩壊の解析

ケーブル腐食の影響 **大**



研究背景と目的

しかし.

ケーブル腐食時の地震応答は
まだわからない!!!

地震による橋梁の被害



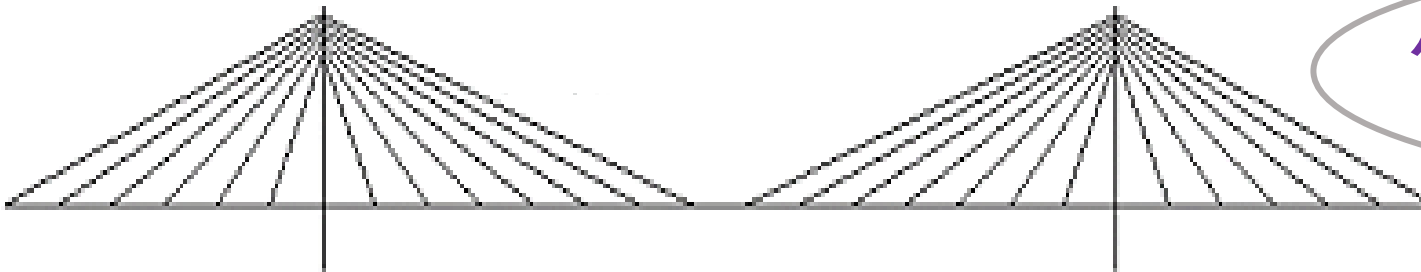
兵庫県南部地震（1995年）



熊本地震（2016年）

ケーブル腐食してるときに地震が来たら？

ケーブル破断？ 橋壊れやすい？



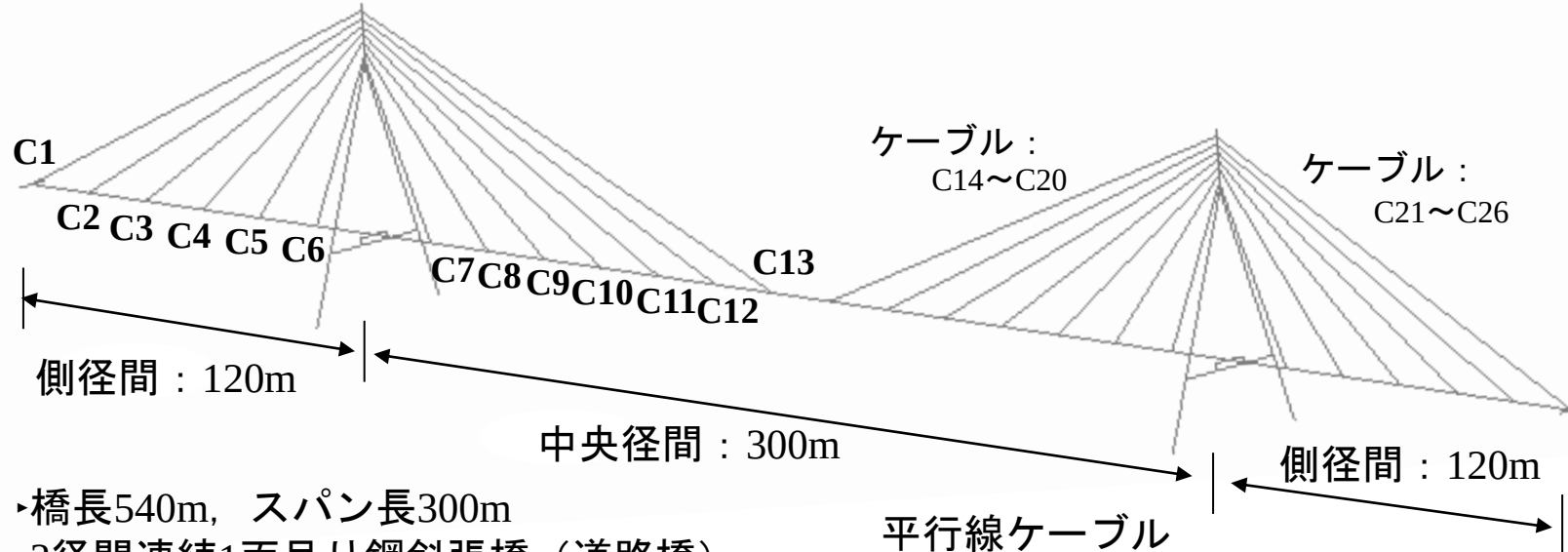
**ケーブル腐食を考慮した斜張橋の
地震応答解析**

ケーブル腐食の影響を明らかに

数値解析モデル

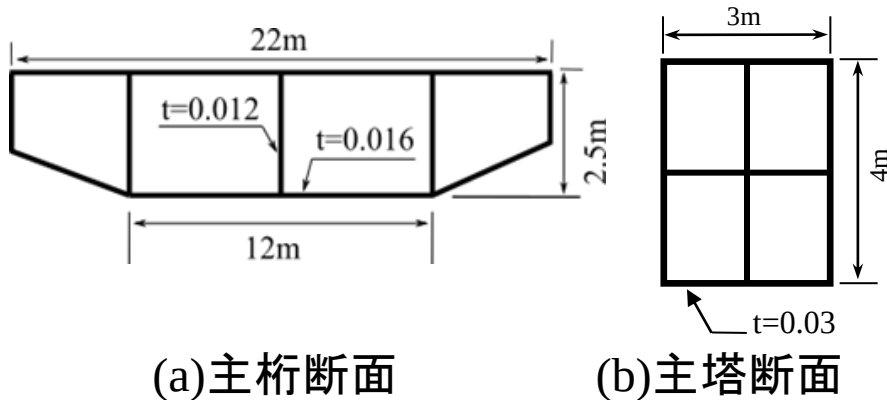
モデル全体図

※汎用FEM解析ソフトウェア Marc Mentat2021

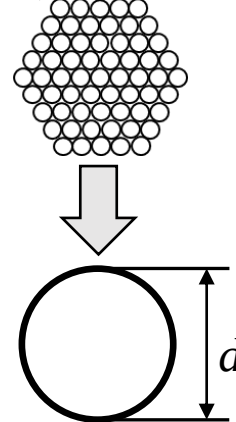


- 橋長540m, スパン長300m
- 3径間連続1面吊り鋼斜張橋（道路橋）
- 梁要素でモデル化

断面をファイバー分割



平行線ケーブル
(PWS)



(c)ケーブル

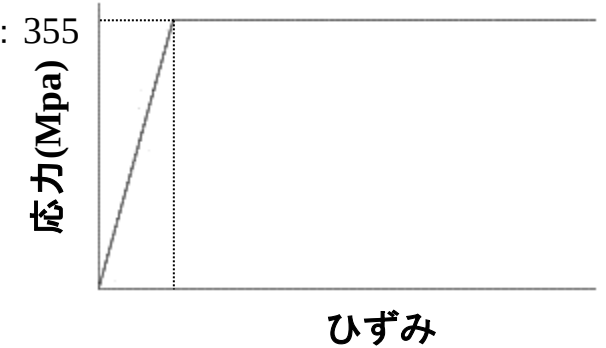
cable	d (m)
C1	0.15
C2,C3	0.127
C4,C5	0.125
C6,C7	0.085
C8-C10	0.121
C11-C13	0.124

鋼材の応力-ひずみ関係

主桁：SM400 主塔：SM490Y

ヤング率E：200GPa

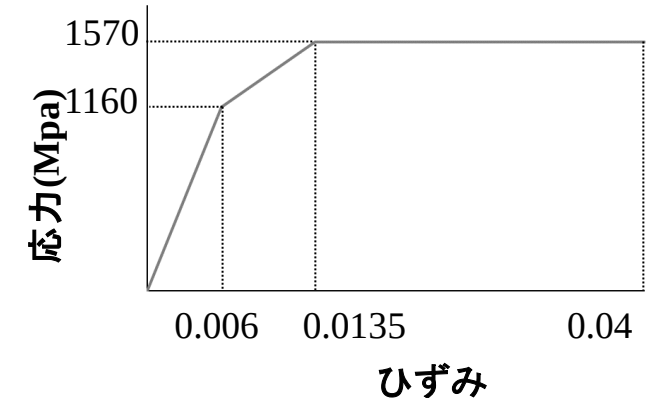
主桁：235
主塔：355



ケーブルの応力-ひずみ関係

ケーブル：ST1570

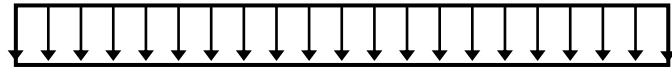
ヤング率E：195GPa



常時設計荷重による断面照査



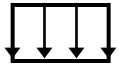
・道路橋示方書を準用(H14)



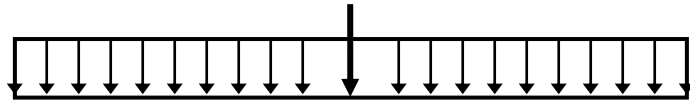
・死荷重(D)



・ケーブルプレストレス(Pr)



・カウンターウェイト(CW)



・活荷重(L)

Pr

ケーブル温度を設定
C1,C26 : -150°C
その他 : -100°C

CW

側径間に80kN/m

L

B活荷重

集中荷重 : 587.5kN

等分布荷重 : 17.625kN/m

D

重力加速度 : 9.8 m/s^2

モデル橋全体に適用

鋼部材密度 : 7850 kg/m^3

主桁部密度 : 17506.6 kg/m^3

(鋼桁, 地覆・高欄, アスファルト舗装を考慮)

許容応力度設計法

・照査値 : $r < 1$

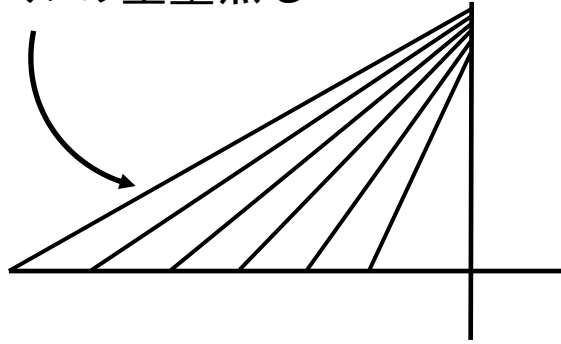
※ 照査値 $r = \frac{\text{作用応力}}{\text{許容応力}}$

モデル橋が設計基準を
満たしていることを確認

ケーブルのモデル化（要素分割）

角田（2023.秋田大学修士論文）

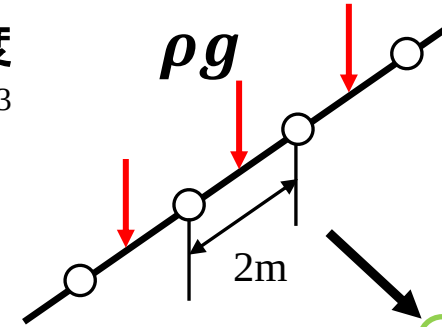
- ・ ケーブルは1要素
- ・ ケーブルの重量無し



ρ : ケーブル密度
7850kg/m³

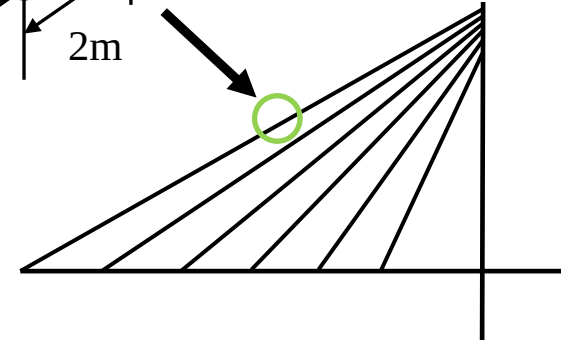
g : 重力加速度
9.8m/s²

重力荷重
→要素に与える

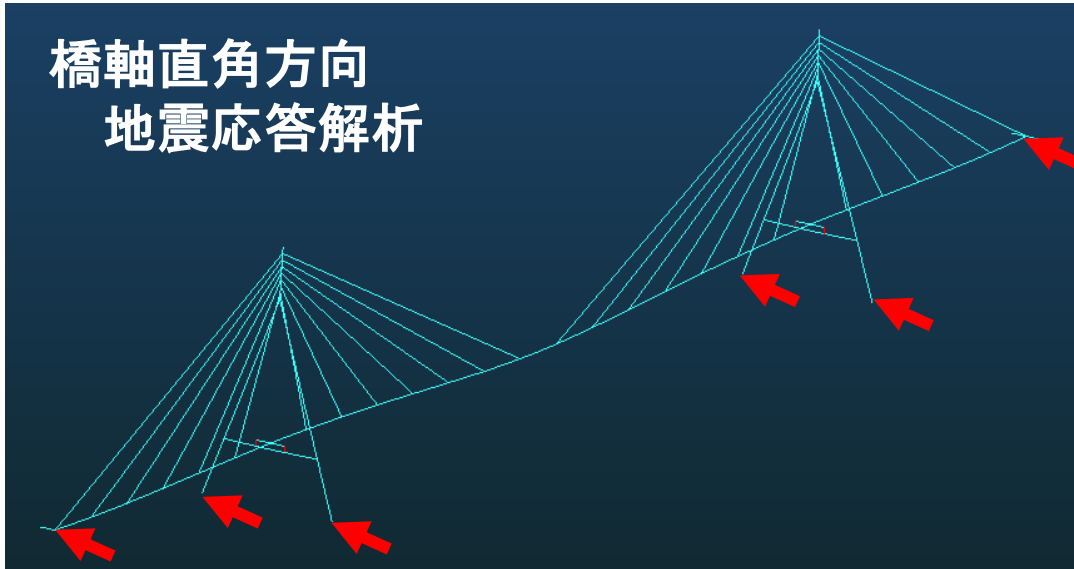


ケーブルを要素分割

& ケーブル重量考慮

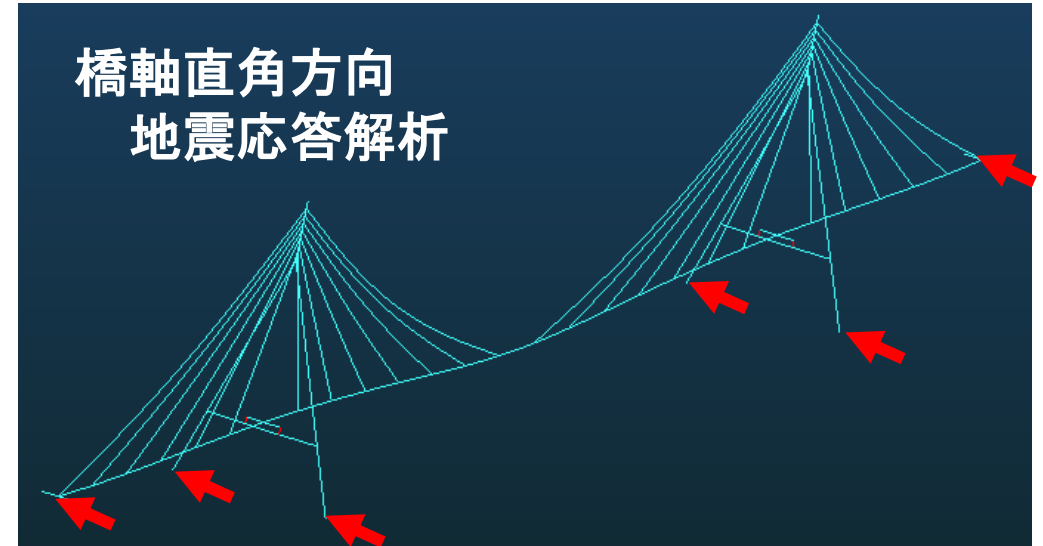


橋軸直角方向
地震応答解析



1要素じゃ揺れない!!!

橋軸直角方向
地震応答解析



ケーブルの振動も再現可能!!!

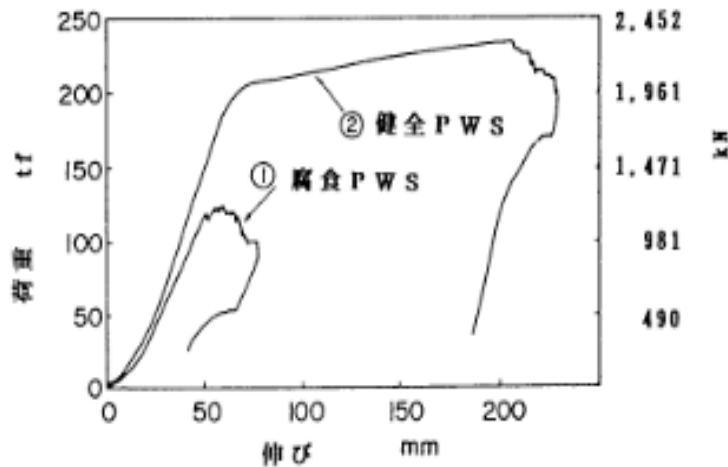
ケーブル腐食の再現方法

ケーブル腐食の再現

- 破断ひずみを減少
- 応力-ひずみ関係減少

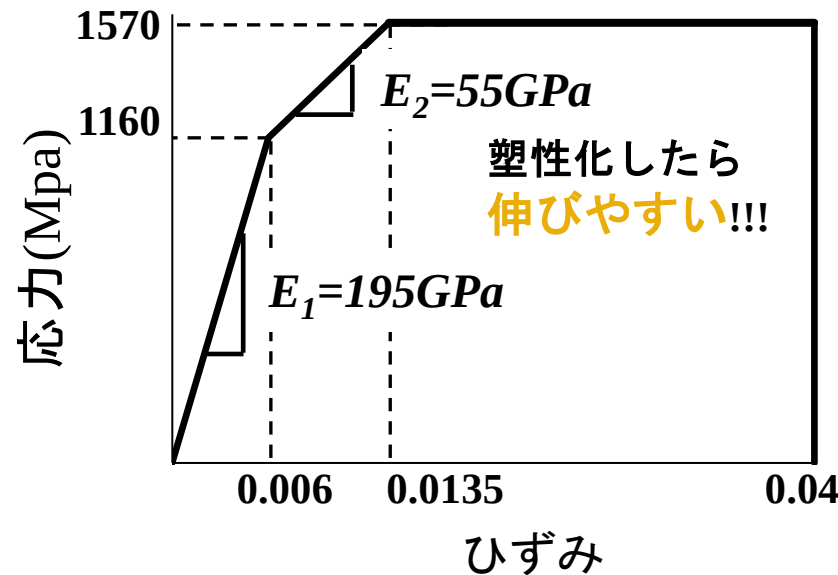
腐食したPWS

引張試験結果（三田村ら）



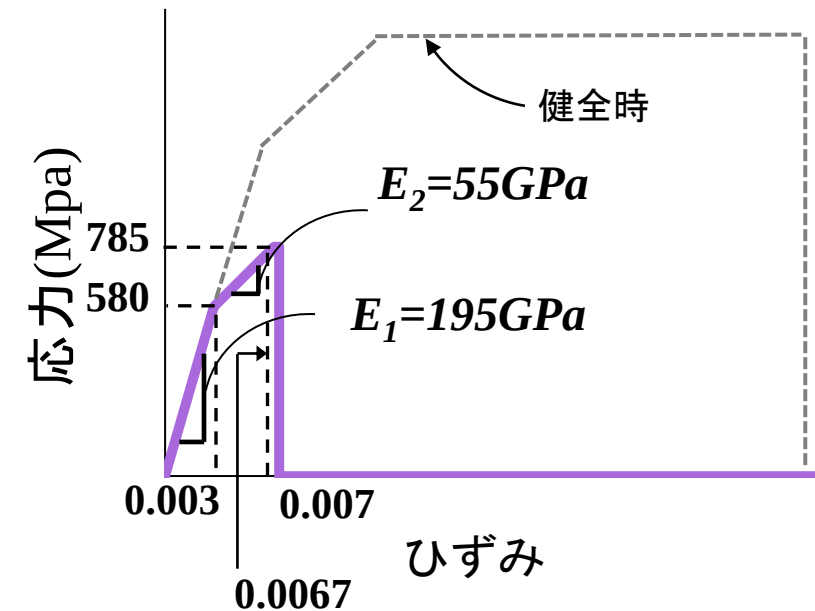
破断強度は1/2程度,
伸びは1/4程度まで減少

健全時



塑性化したら
伸びやすい!!!

腐食時



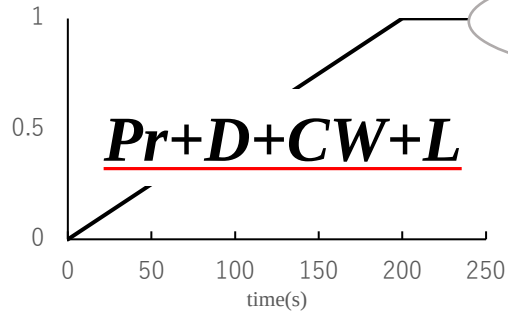
ケーブル破断の再現

破断ひずみに到達したら応力0にする

全ケーブルに適用

地震応答解析手法①

設計荷重



モデル橋の振動を防ぐため

200秒の時間をかけて
徐々に載荷し、
50秒間かけて安定を確認

時刻歴応答解析

- 汎用FEM解析ソフトウェア Marc Mentat2021
- 直接積分法, ニューマーク β 法
 $\beta = 0.25$ $\gamma = 0.5$
- 時間刻み: $\Delta t = 0.01s$
- 全解析時間: 280s
- 減衰定数: 0.005
- 材料非線形を考慮

30秒の地震波

強制変位を支点部
(主桁両端, 主塔基部)に

3方向それぞれ解析

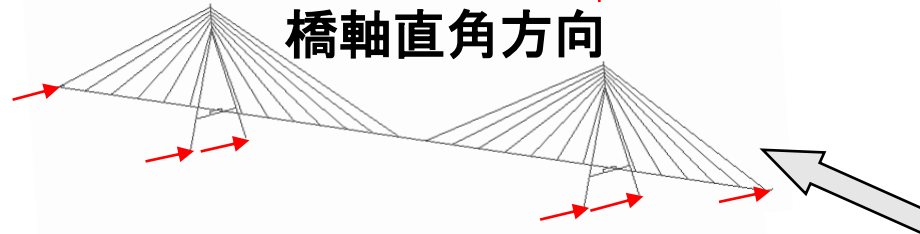
地震波

兵庫県南部地震
(兵庫県神戸市中央区山手)

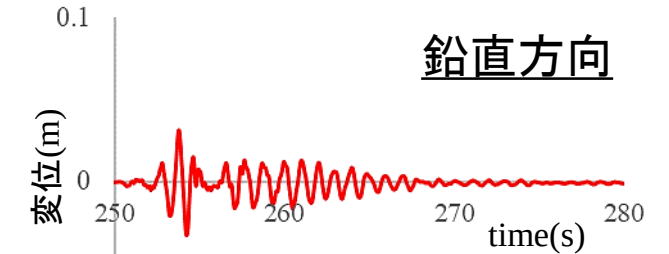
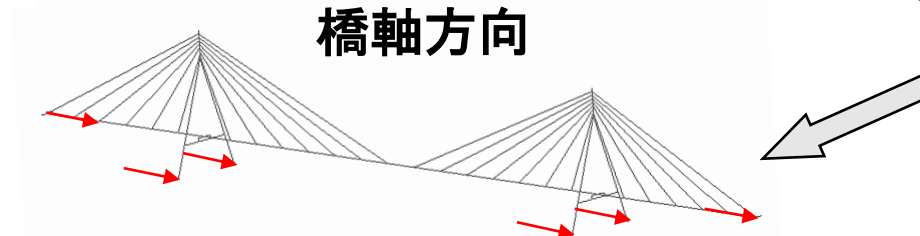
鉛直方向



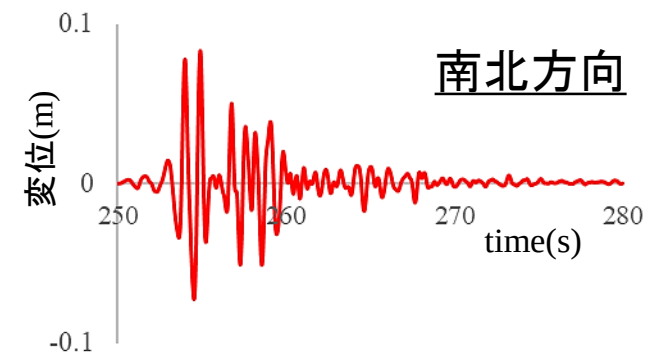
橋軸直角方向



橋軸方向



鉛直方向



南北方向

地震応答解析手法②

兵庫県南部地震
(兵庫県神戸市中央区山手)

国土交通省気象庁HPより

加速度 → 変位に変換

うまくいかず...

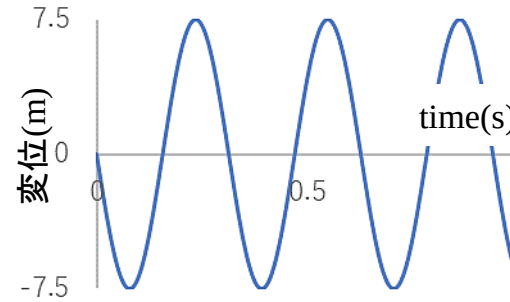
変位だと解析可能
→ 妥当性検討!!!

例題

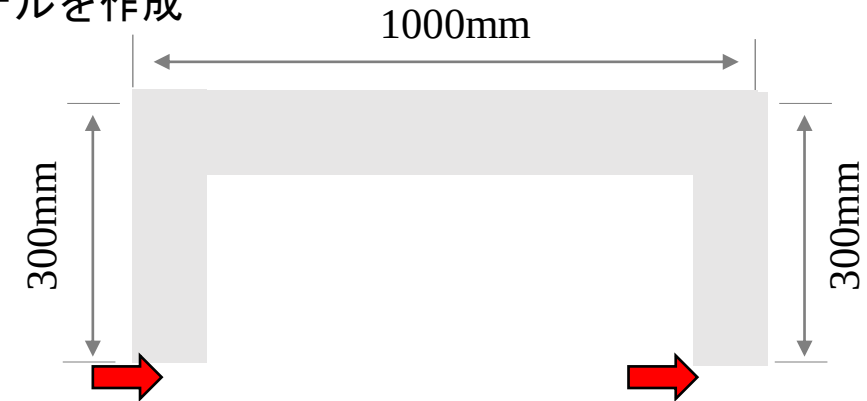
ばね定数 $k=1000\text{t/m}$ の柱で支持される
重量 $W=10\text{t}$ の一層ラーメンが地動加速度
 $\alpha=3000\omega\text{ mm/s}^2$ ($\omega=20\text{ rad/s}$) を受けるときの
ラーメンの水平変位が**5.15(mm)**である。

小坪清真, 土木振動工学,
森北出版株式会社, 1974年11月20日, p76 より

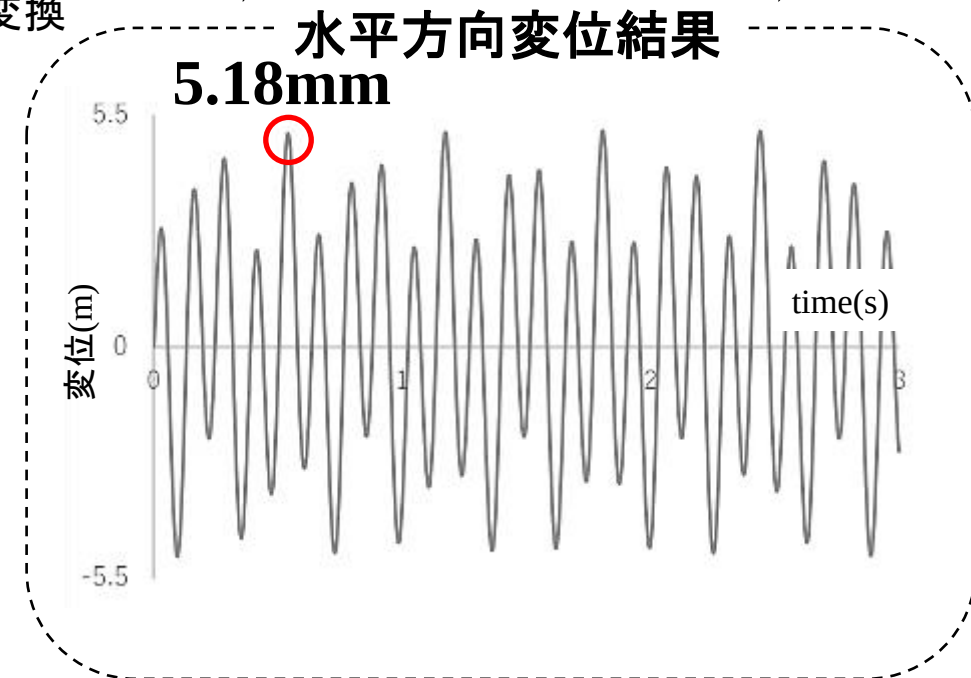
同条件となるようにモデルを作成



加速度 $3000\omega\text{ mm/s}^2$ を変位に変換



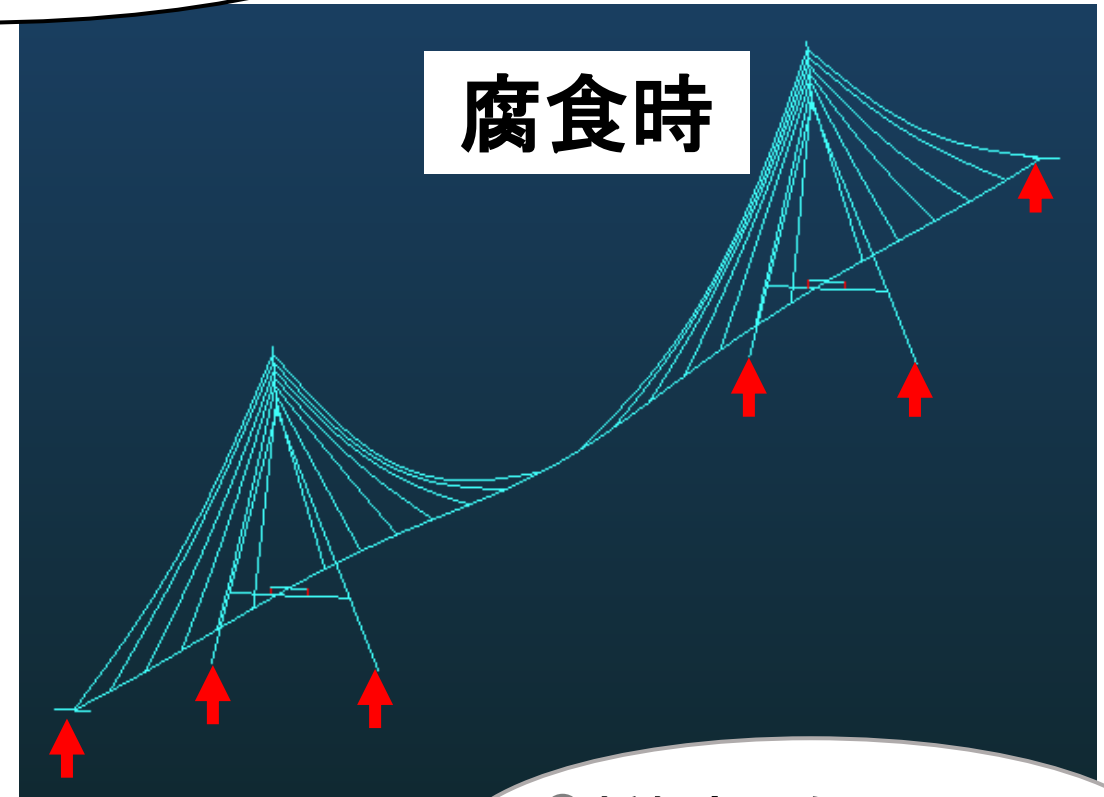
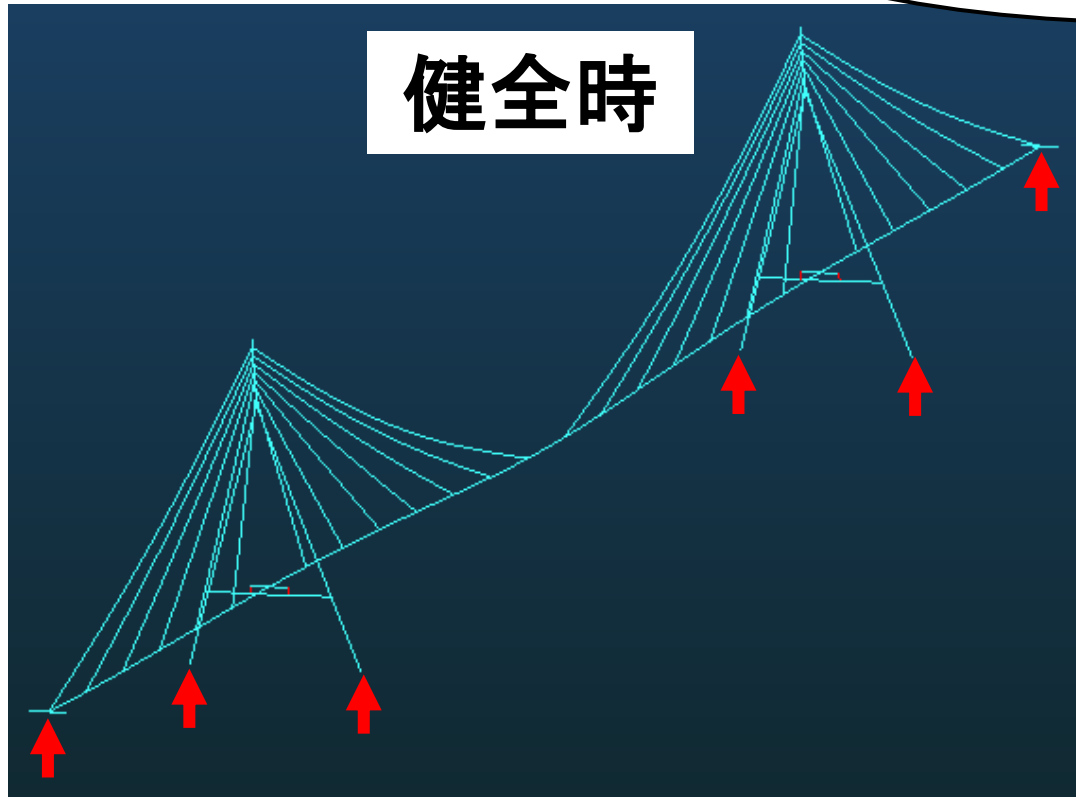
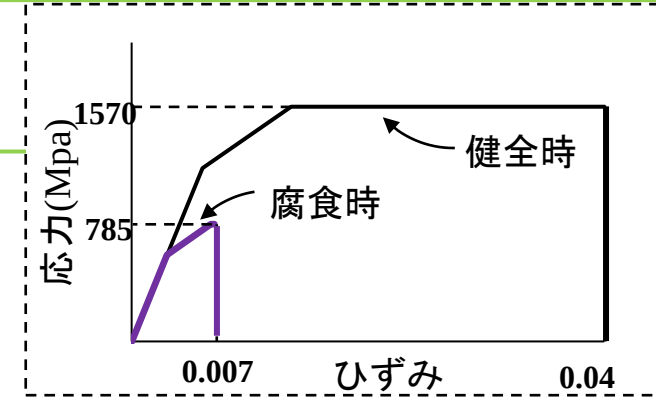
水平方向変位
誤差1%!!!



変位で与える方法が**妥当**であると判断

地震応答解析結果

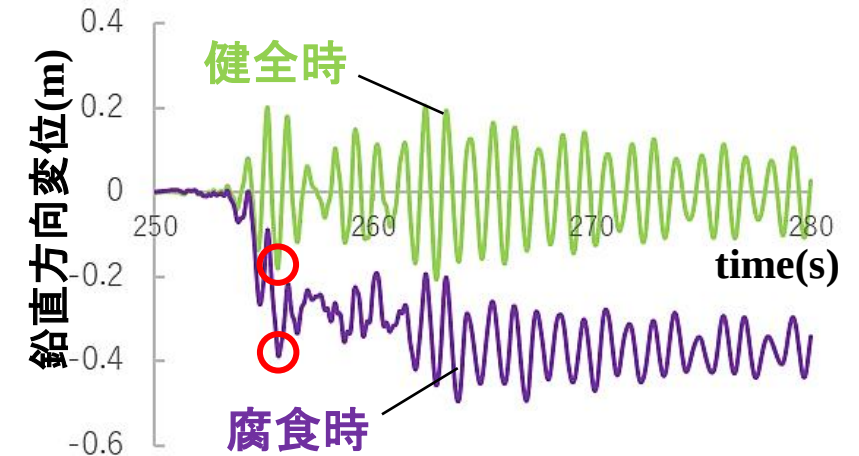
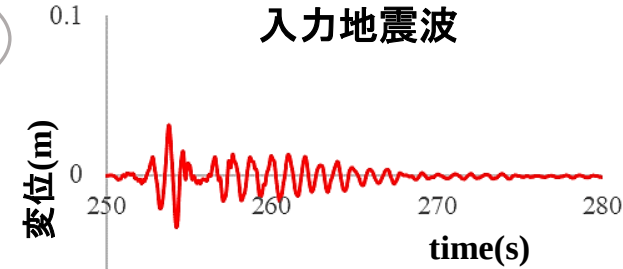
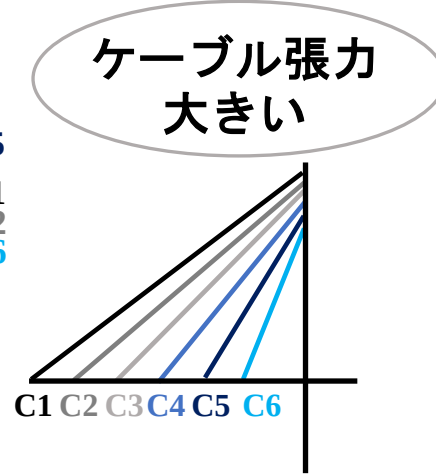
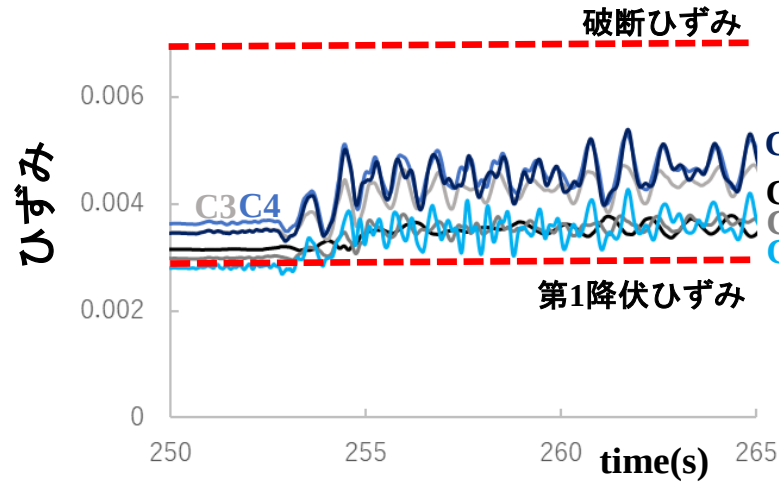
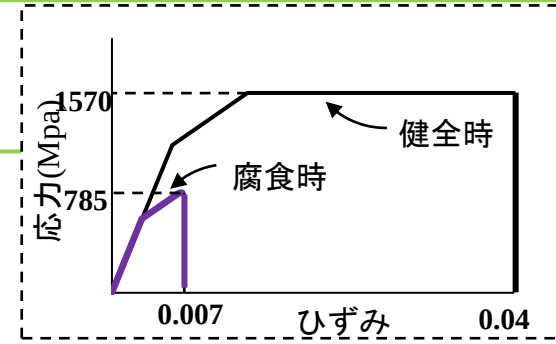
鉛直方向の解析結果



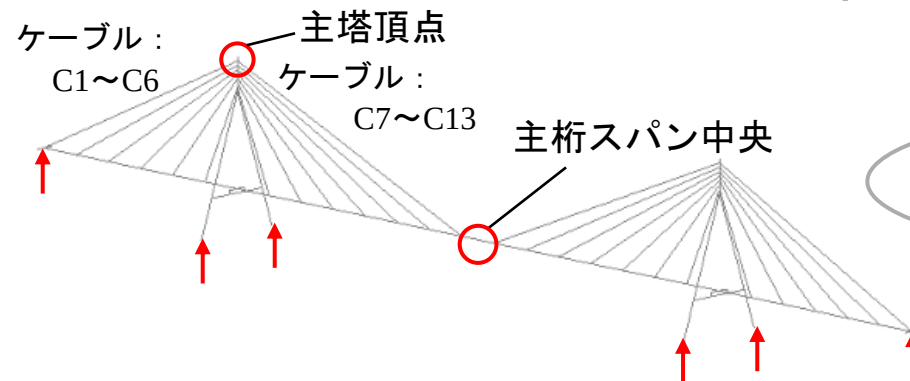
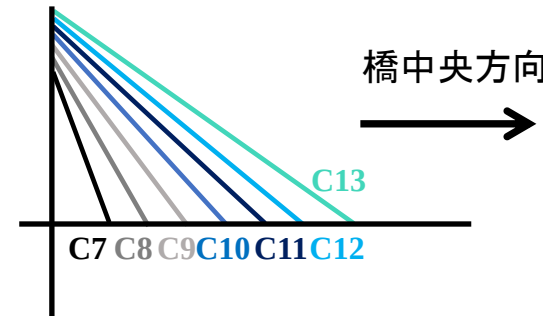
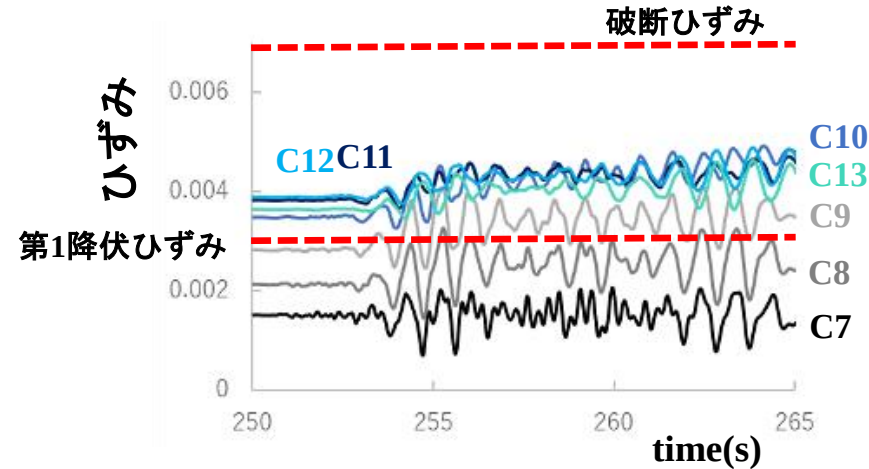
(スケール5倍)

- 揺れ方に違い
- ケーブル伸びている？

地震応答解析結果・橋軸鉛直方向①



主桁スパン中央部・鉛直方向変位

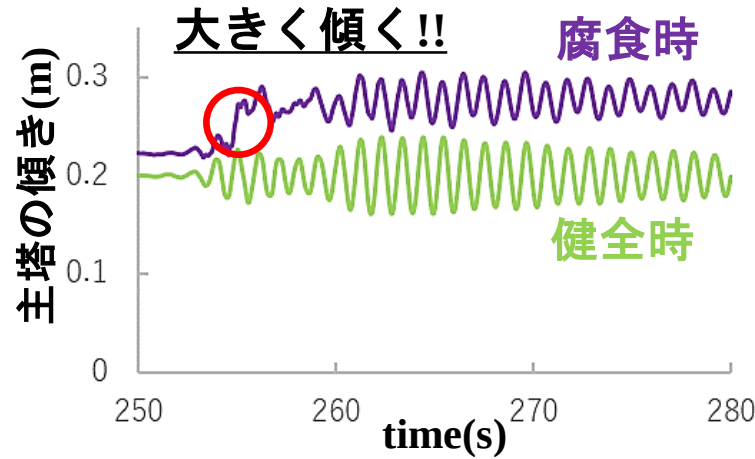


腐食によって揺れ方が変化

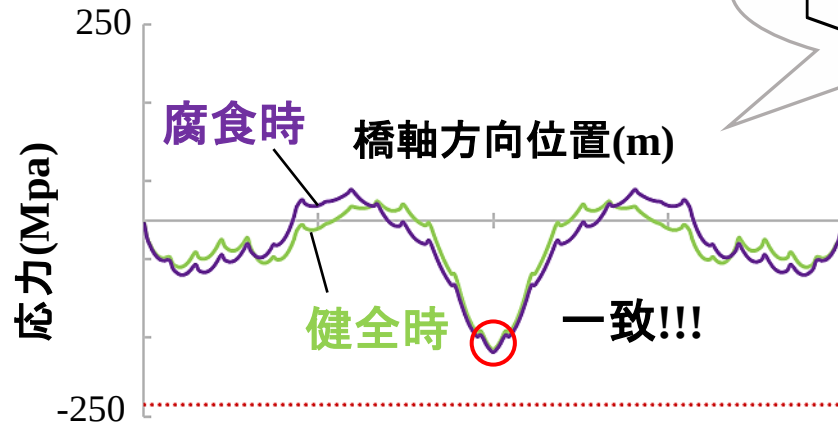
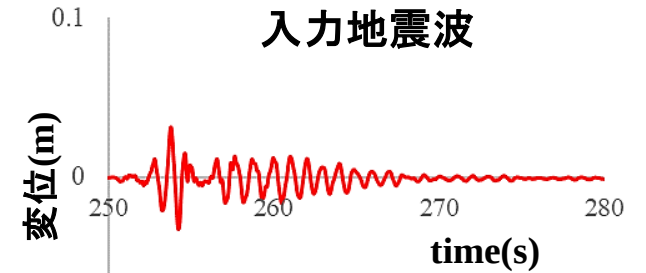
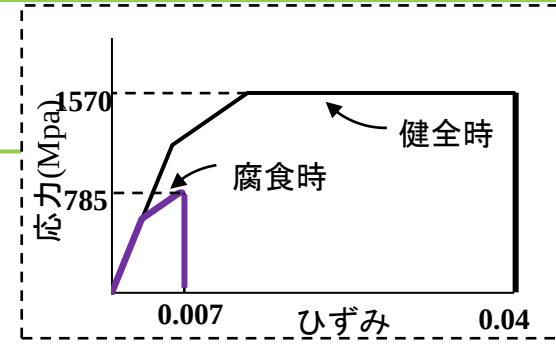
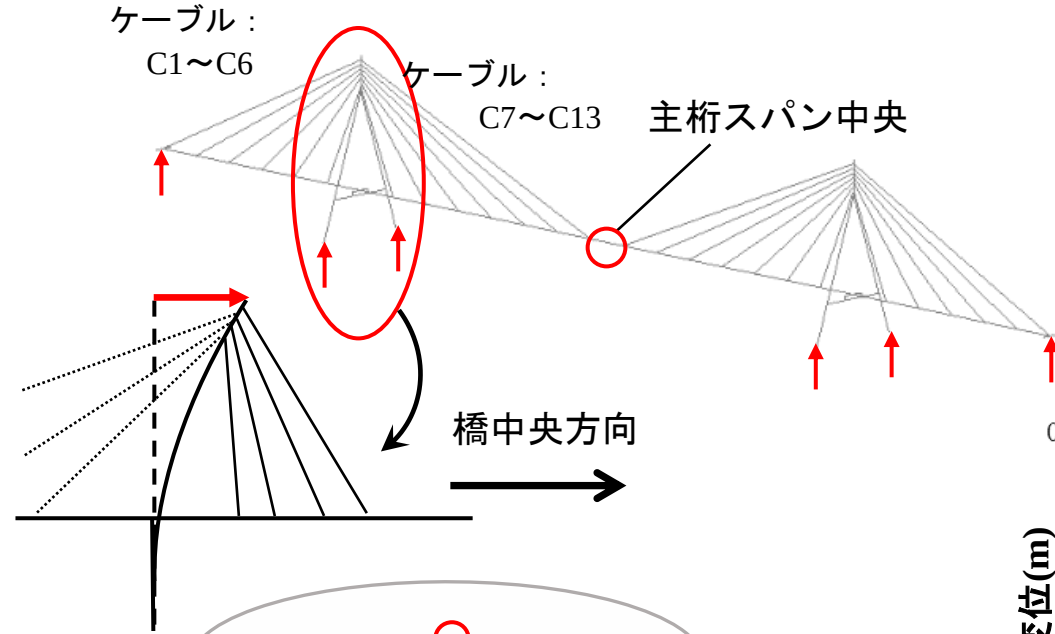
腐食時の各ケーブルのひずみ

ケーブル伸びている

地震応答解析結果・橋軸鉛直方向②



主塔の傾き



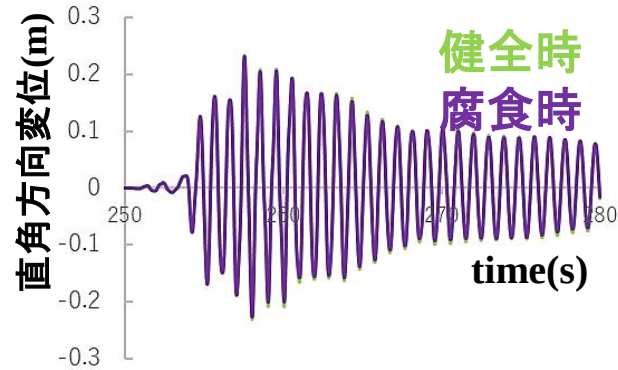
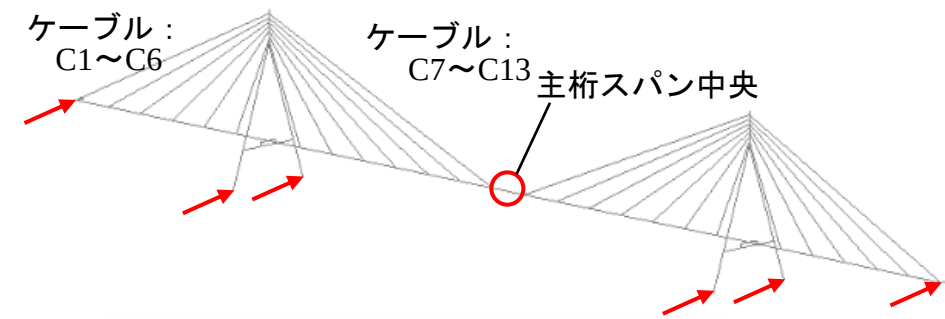
地震による力が
MAXの時刻

主桁全体の応力
(上フランジ)

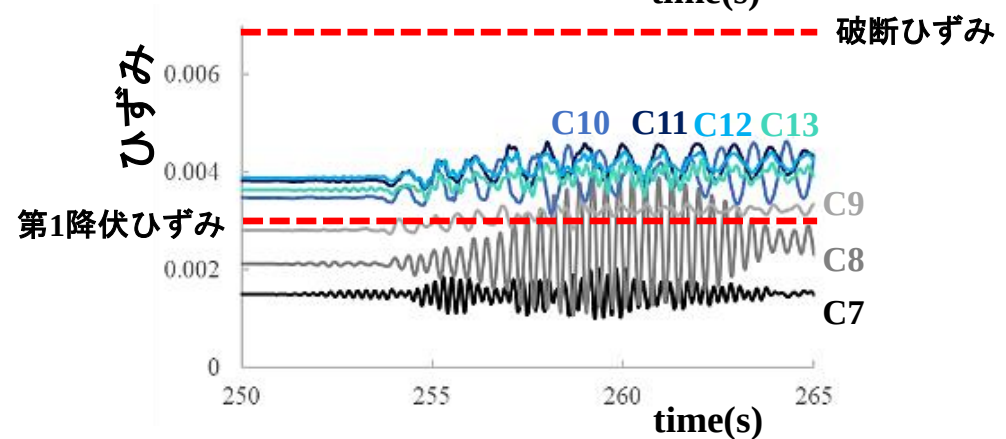
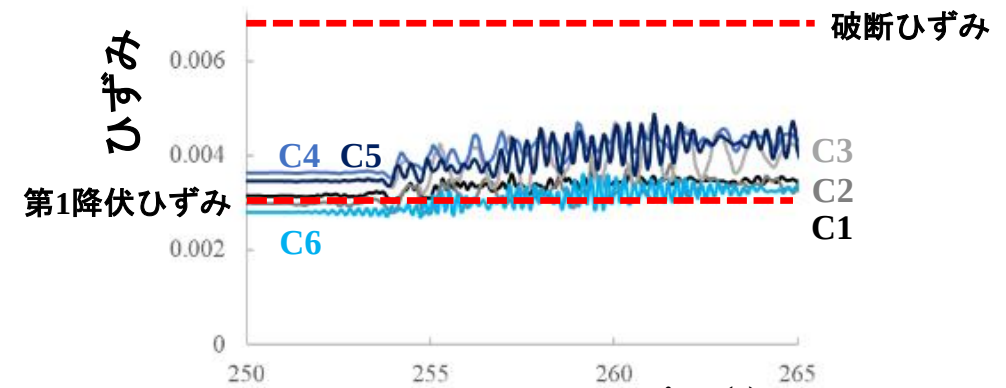
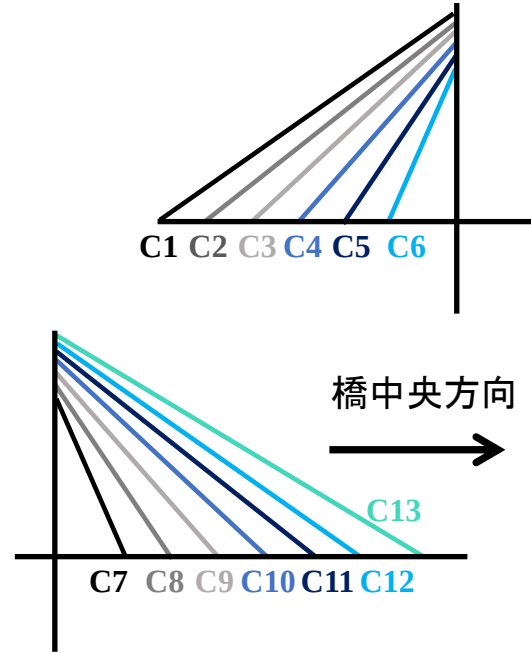
ケーブル腐食

- 揺れ方が異なる
- 主塔が大きく傾く
- ケーブルが伸びやすくなる
- 主桁応力には大きな影響はない

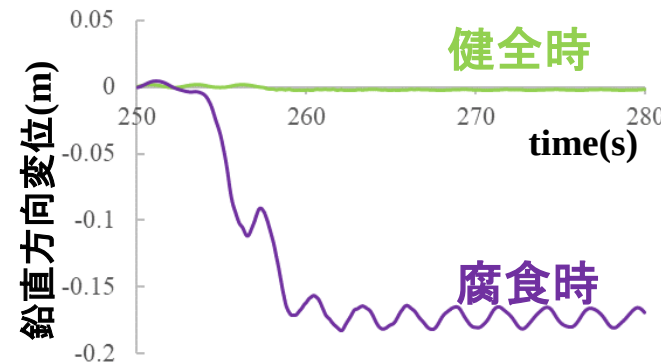
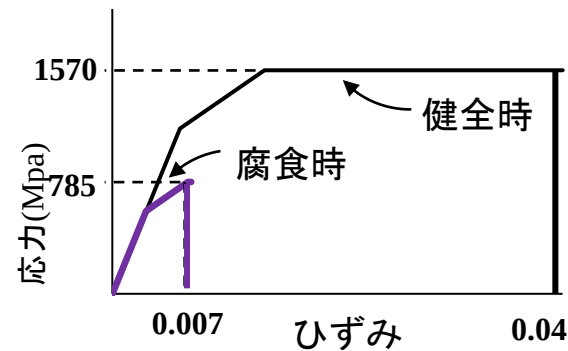
地震応答解析結果・橋軸直角方向①



主桁スパン中央部・直角方向変位



腐食時の各ケーブルのひずみ



主桁スパン中央部・鉛直方向変位

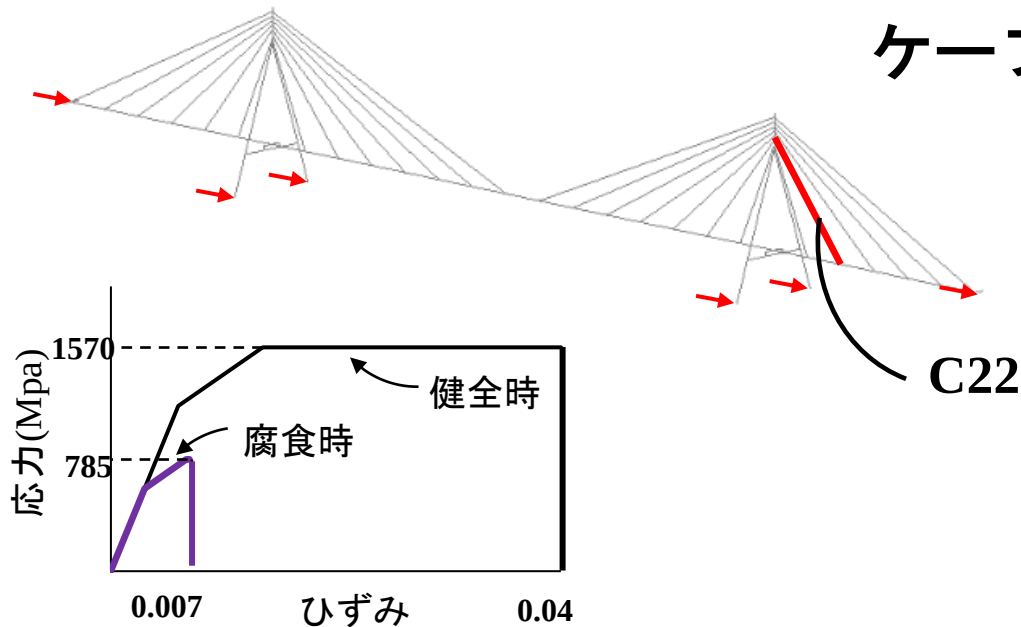
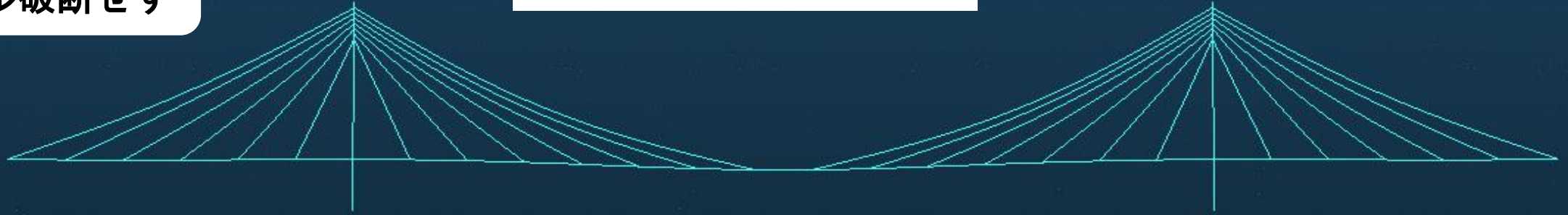
ケーブル腐食

- 桁が下にたわむ
- ケーブルが伸びやすくなる
- 主桁応力には大きな影響はない

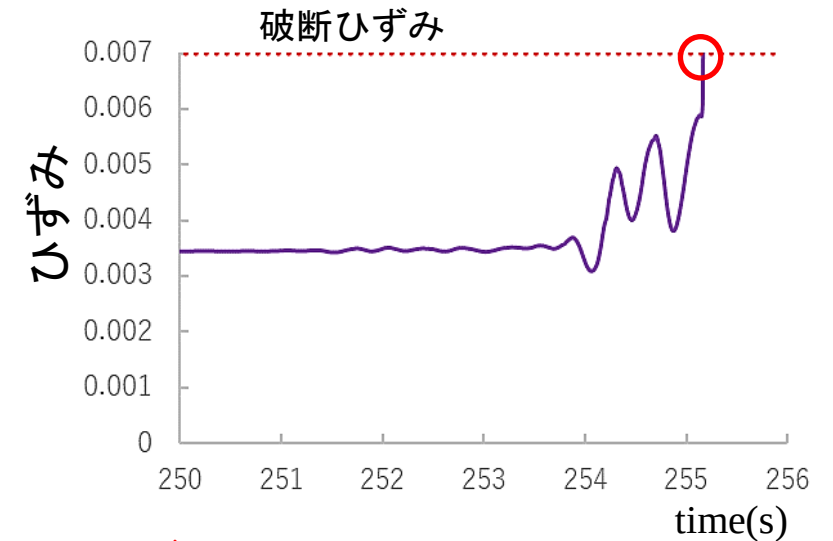
地震応答解析結果・橋軸方向

健全時
ケーブル破断せず

腐食時の解析結果



ケーブル腐食時の
C22のひずみ



腐食時にケーブル破断!!!!

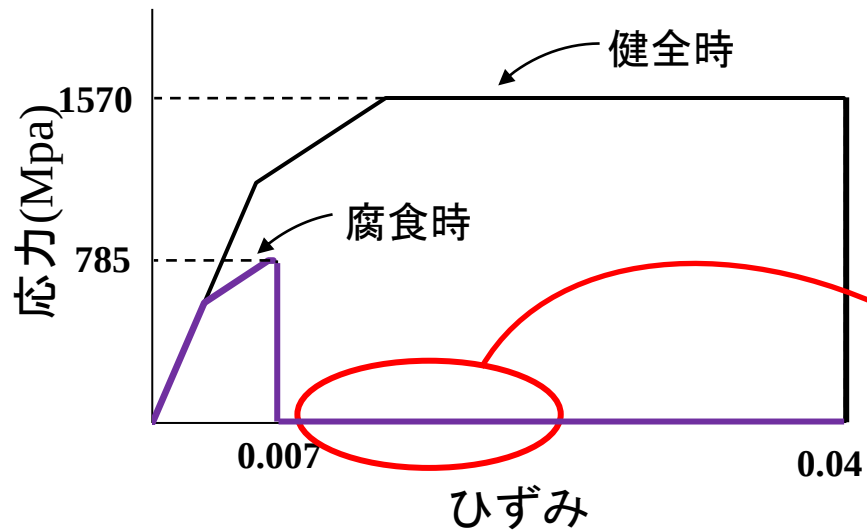
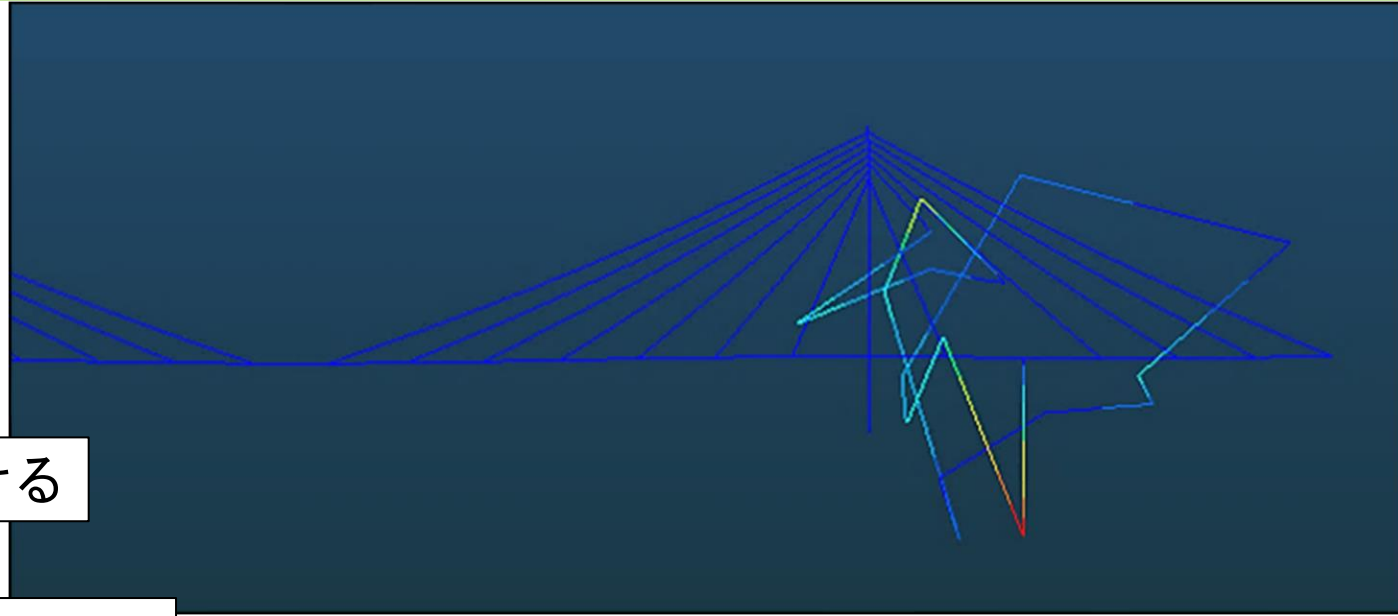
塑性化するとケーブルが伸びる

ケーブルのうち1要素が破断ひずみ到達

塑性化し、伸びが増加

ケーブルは永遠に伸び続ける

解析終了

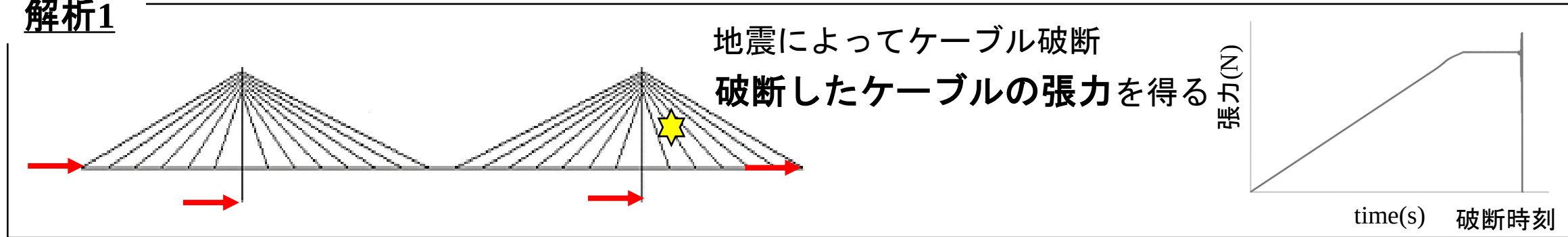


ケーブル破断後の
モデル橋の応答を確認したい

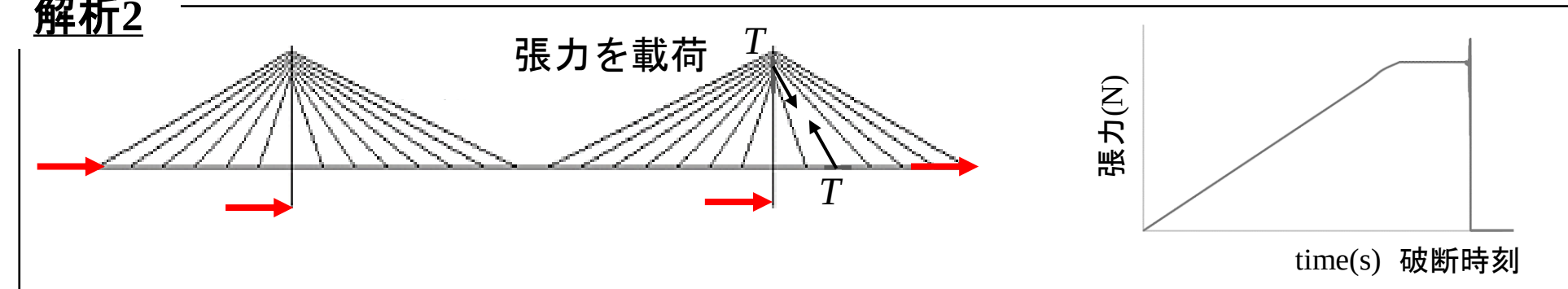
破断したら
伸び続ける!!!!

張力を引き継いで再計算

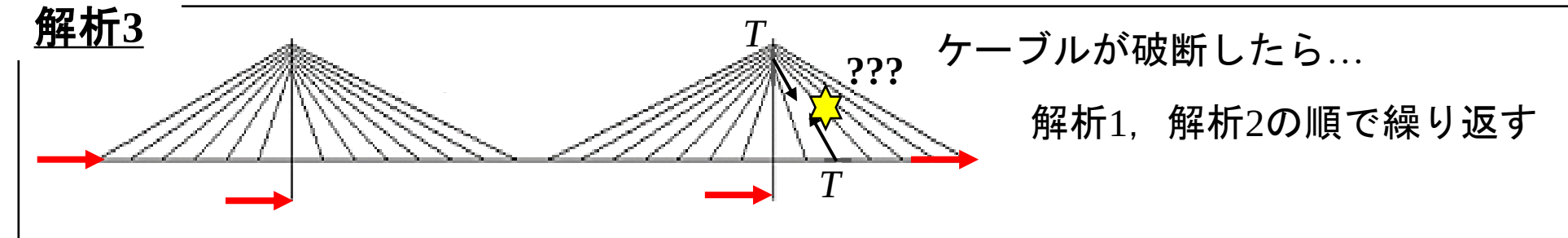
解析1



解析2



解析3



繰り返し地震応答解析を実施

張力を引き継いだ方法の解析結果・ケーブル腐食時

地震発生

5.17秒

C22破断

5.66秒

C4破断

5.76秒

C3, C5破断

5.84秒

C6, C23破断

5.93秒

C2, C21, C24破断

6.02秒後

C25破断

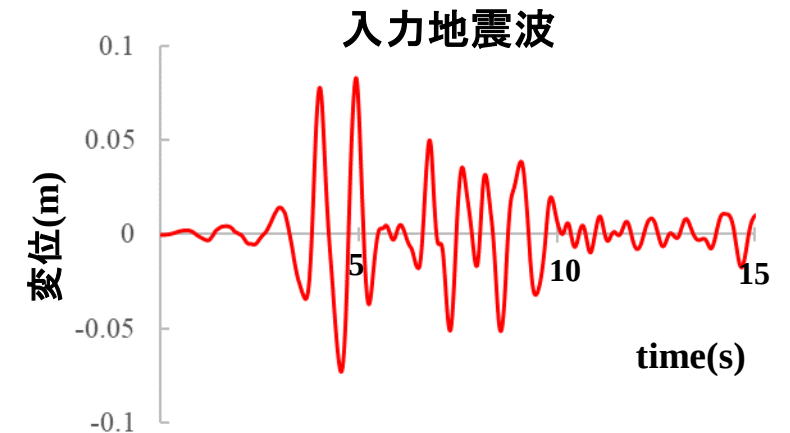
6.06秒

C1, C26破断

6.21秒

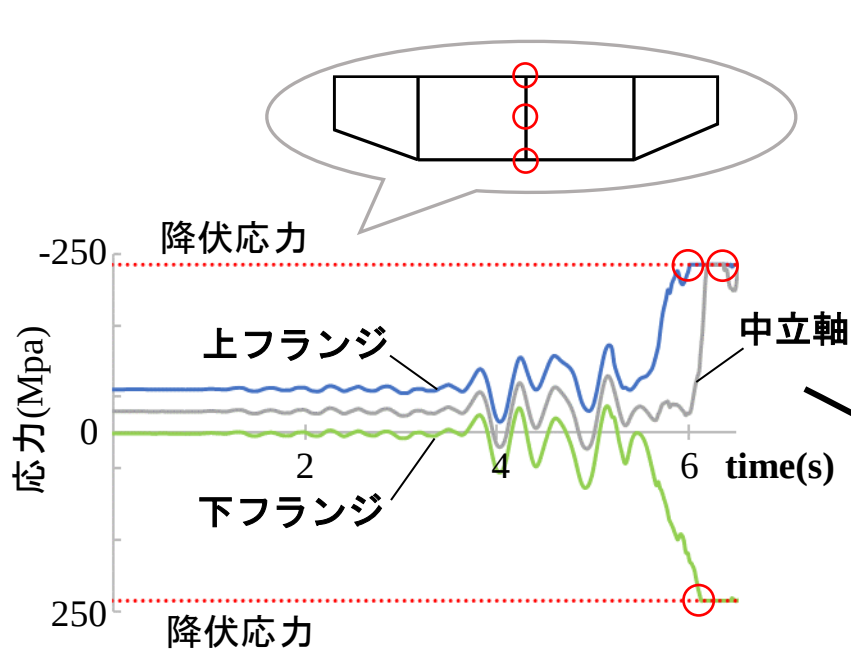
塑性ヒンジ
形成

モデル橋崩壊



張力を引き継いだ方法の解析結果・ケーブル腐食時

地震



主桁C3付近部・応力履歴

健全時
モデル橋は
崩壊しない

腐食時
地震荷重
+
ケーブル破断の衝撃

連鎖崩壊が発生

6.02秒後

C25破断

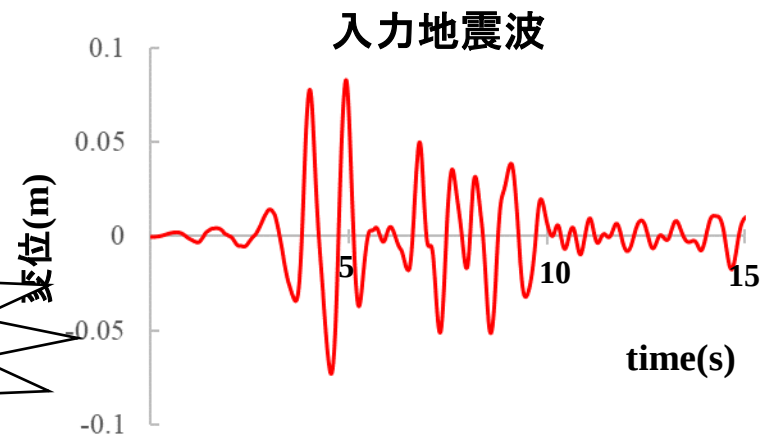
6.06秒

C1, C26破断

6.21秒

塑性ヒンジ
形成

モデル橋崩壊

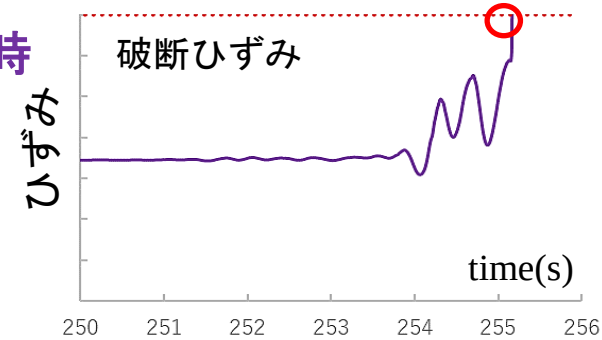


まとめ

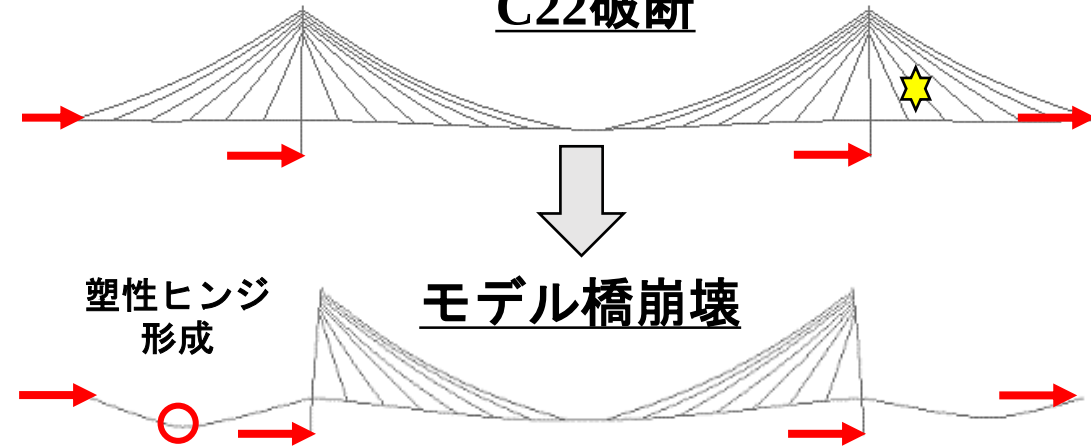
▶ 斜張橋で、ケーブル腐食時の地震応答解析により、腐食の影響を確認する

- ケーブルを要素分割し、重力荷重を考慮することでケーブルの振動を再現することができた
- ケーブル腐食はモデル橋の応答に大きな影響を与える
- ケーブル腐食時に橋軸方向に地震が作用した際、ケーブルは破断ひずみに到達する
- ケーブル腐食時に地震が作用しケーブルが破断した後、隣接ケーブルが次々と破断し、最終的にモデル橋は崩壊する

腐食時



C22破断



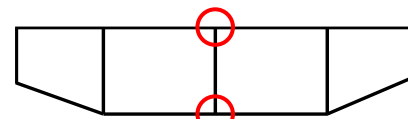
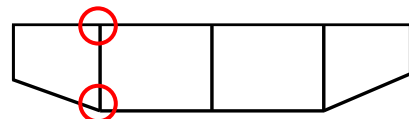
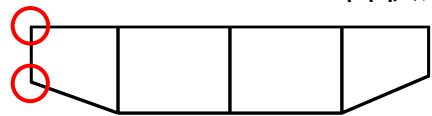
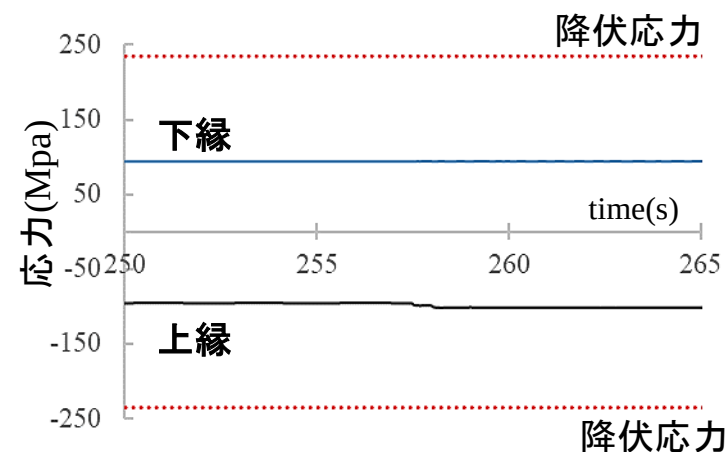
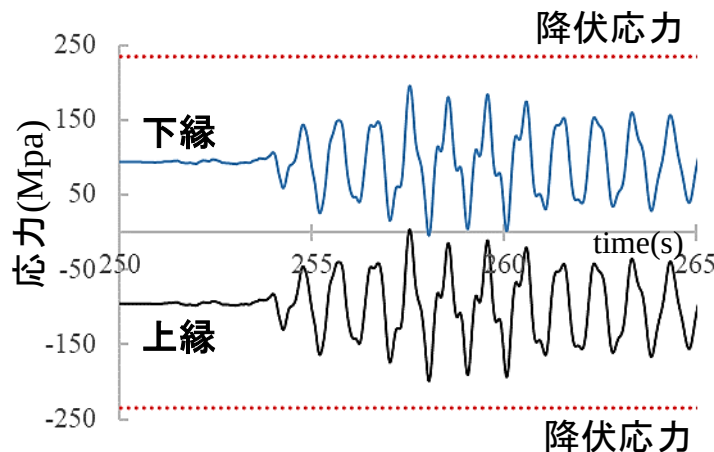
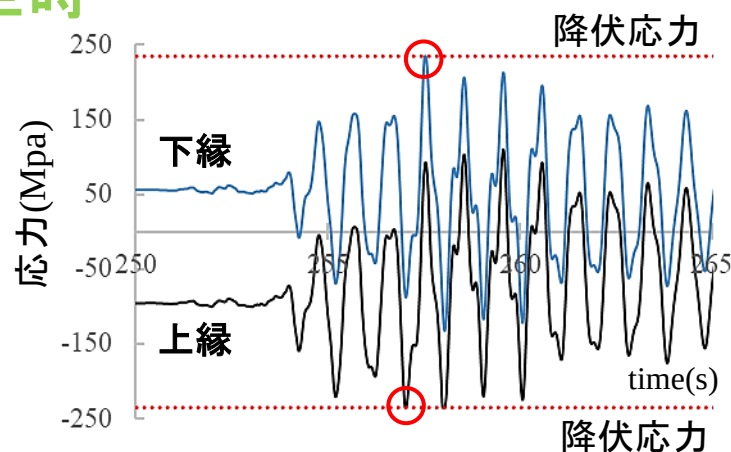
今後の課題

- ・ケーブルのモデル化について更なる検討
- ・異なる斜張橋形式や地震波による検討

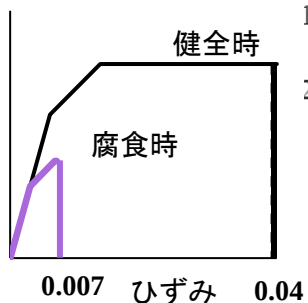
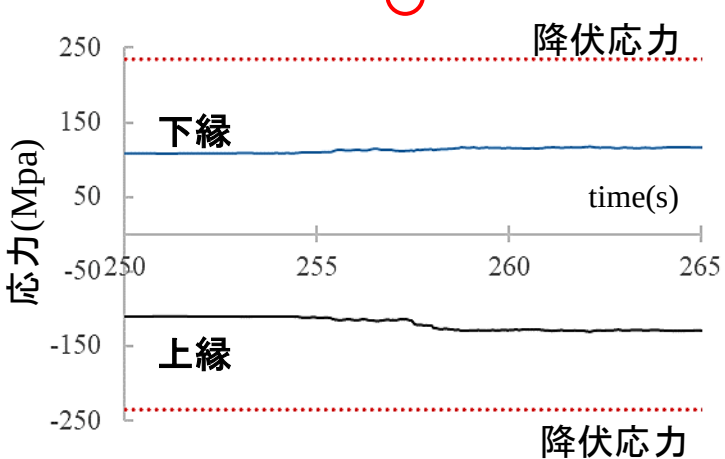
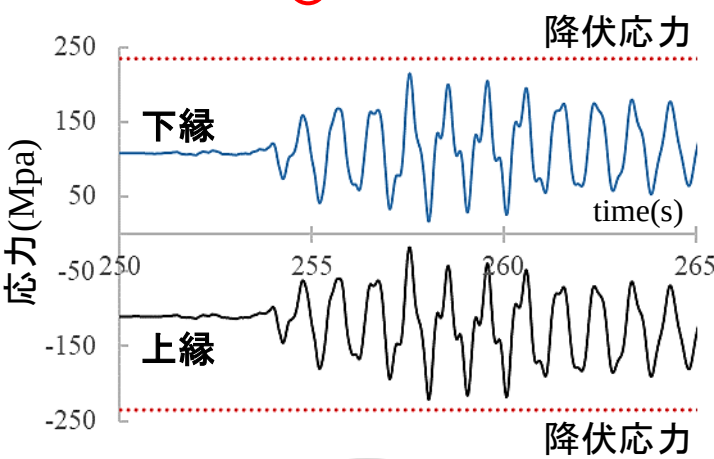
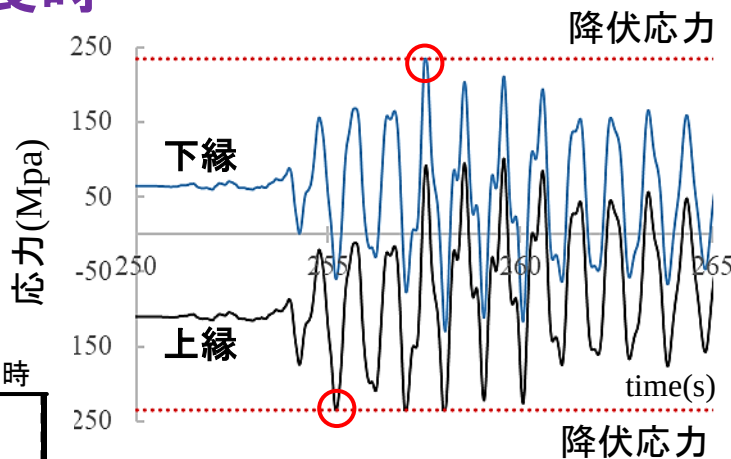
主桁スパン中央部応力履歴（橋軸直角方向）



(1) 健全時



(2) 腐食時



崩壊せず

ケーブル腐食

主桁応力にはそこまで影響しない

時刻歴応答解析

時刻歴応答解析とは、入力された力や振動に対して構造物が時間とともにどのように応答するかを解析する手法

1. **動的**：時間の経過に伴う構造物の動きを考慮した動的解析構造物の慣性力と減衰効果を考慮します。
2. **時間ベース**：時間に基づいて解析する。入力される力や振動を時間ごとに変化させ、構造物の応答を時間経過とともに計算する。
3. **非線形**：時刻歴応答解析では、構造物の非線形挙動を考慮する。材料特性、形状などが構造物の応答に与える影響を考慮する。
4. **精度高**：時刻歴応答解析は、動的な力に対する構造物の応答を正確に予測可
5. **時間がかかる**：時刻歴応答解析は、特に大規模な構造物や複雑な荷重条件の場合、計算コストがかかる場合がある。

動的問題の解法

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{U}(t) = \mathbf{F}(t)$$

1. モード重ね合わせ法（線形問題では有利）
2. 直接積分法（非線形問題では実用的）

- **陽解法**

中央差分法，非常に短時間で変形（衝撃），
陰解法と比べて計算コストは小さい，解が不安定となりやすい
特に複雑な構造物や荷重条件では精度が低

- **陰解法**

ニューマークβ法，HHT法（α法）
長周期に及ぶ事象に適している．安定している

直接積分法

直接積分法とは、運動方程式を地震動時刻歴の時間軸に沿って直接的に数値積分することにより、逐次、時刻歴の応答を求めていく手法

構造物の材料特性が時間で変化していくような材料非線形の解析が可能

汎用FEM解析ソフトウェア Marc Mentat2021 では

- ニューマーク β 法
- 一般化 α 法
- モード重ね合わせ法

に対応

ニューマークβ法

長所

安定性：この方法は数値的に安定しており、大きな時間ステップを扱うことができるため、計算時間を節約し、より効率的に解析を行うことができる

精度が良い：ニューマークベータ法は、幅広い荷重条件に対して正確で信頼性の高い結果を提供できるため、多くの工学的用途で利用されています。

広範な材料に適用可能：ニューマークベータ法は、線形材料と非線形材料の両方を含む広範囲の材料に適用でき、汎用性の高い方法です。

短所

減衰に依存する：ニューマークベータ法は減衰に敏感であり、構造物の減衰比によって結果が大きく左右される可能性がある

反復解法を必要とする：ニューマークベータ法は、反復解法プロセスを必要とするため、大規模または複雑な問題では計算コスト大

数値的なノイズ：数値ノイズを発生させることがあり、結果の精度に影響を与える可能性があります。（高周波成分を含む問題）

無条件安定が実現できる！！

But. . .

数値減衰が付与されることから、高い周波数の現象については解析精度が犠牲となる。
このため、安定性を過度に追求すると、対象としたい周波数領域の現象まで解析精度が損なわれることになるため、パラメータを適切に設定する必要がある。

モード重ね合わせ法

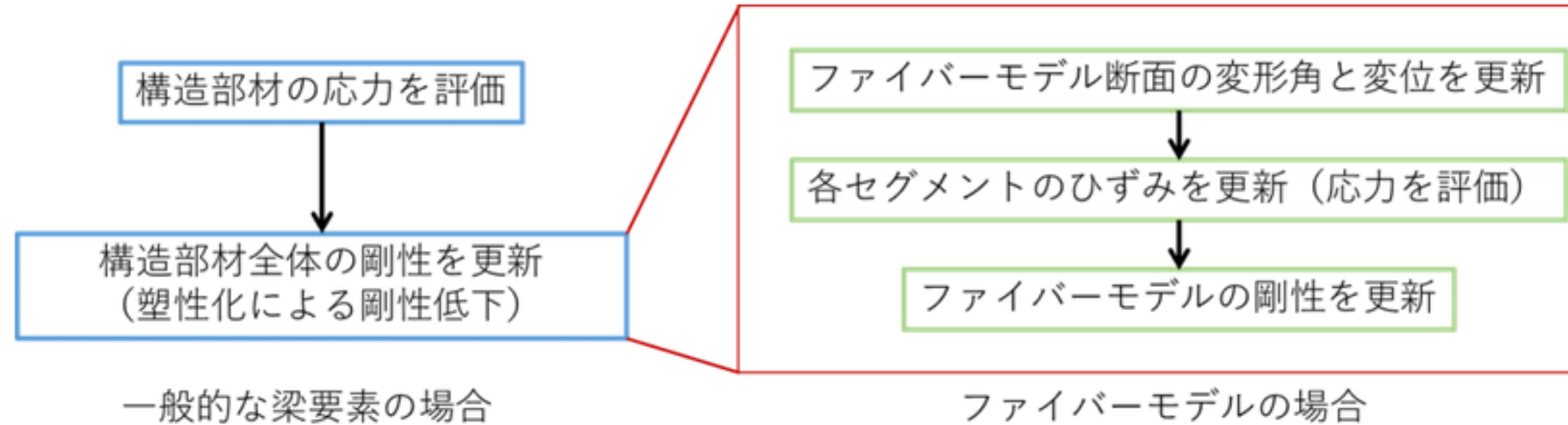
モード重ね合わせ法は構造物の変位を，お互いの変位形状の線形組み合わせを仮定する

これを通して選択されたモードに対するより簡単な時間積分方程式を利用して動的応答が計算できる．モード重ね合わせ法は構造解析プログラムで多く使用され、大型構造物の線形動的解析に少ない計算コストで動的応答が計算できる効果的な手法

But. . .

全体応答の正確性は使用された固有モード数に左右されるので計算に必要な固有モード数を適切に選択する必要がある

ファイバーモデル



ファイバーモデルは、ファイバーに分割することでモデルが構築されます。ファイバーモデルは部材断面を微小断面に分割し、各々の分割要素に応力-ひずみ関係と分担面積を与えることで非線系部材を設定するものであり、梁の変形状態(軸歪みと曲率)から梁に作用する断面力を求める。各ファイバーに作用する力とモーメントを解析し、各ファイバーの変形と応力を考慮して構造物の挙動を決定する。

節点は、構造物の力と変位を評価する空間上の点である。各節点での変形や応力を考慮しながら、各要素に作用する力とモーメントを解析することで、構造物の挙動が決定される

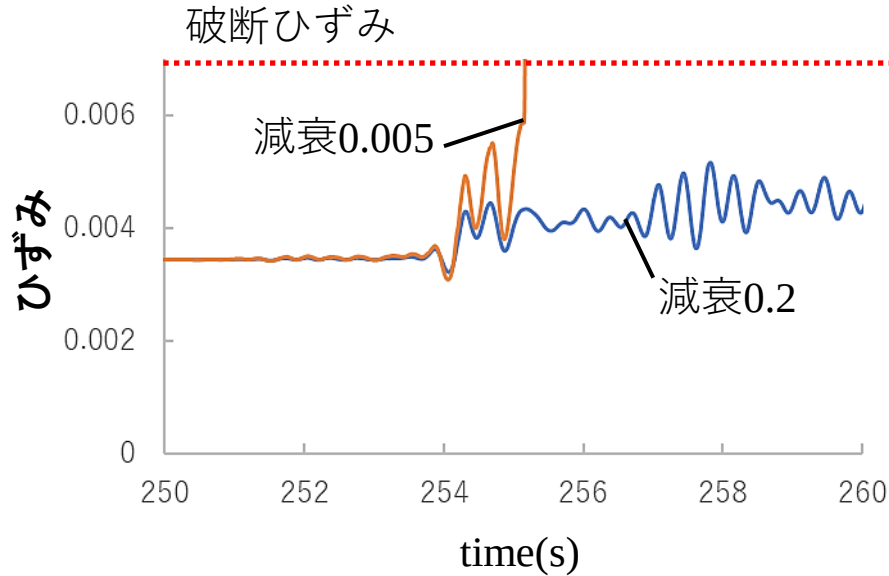
どちらのアプローチにも利点と欠点があり、問題の特定の要件に応じて使用される

地震作用下でのケーブル破断応答

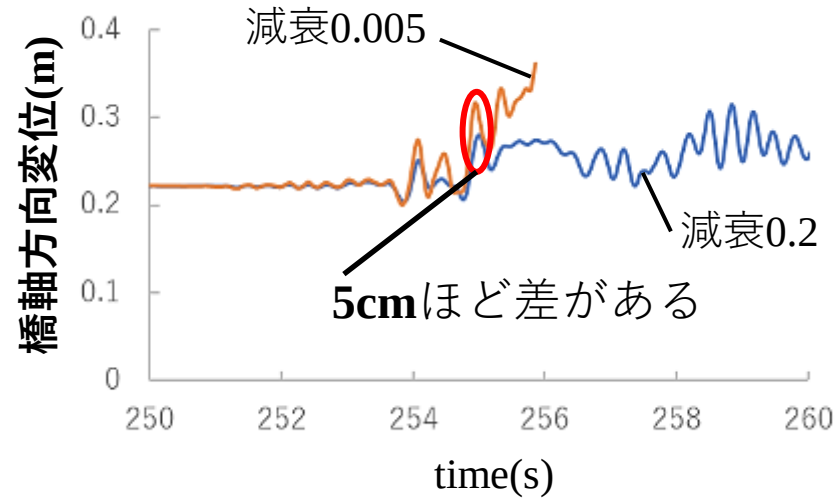
橋軸方向に地震作用 + ケーブル減衰0.2

ケーブル腐食時の応答

解析結果・C22中央部

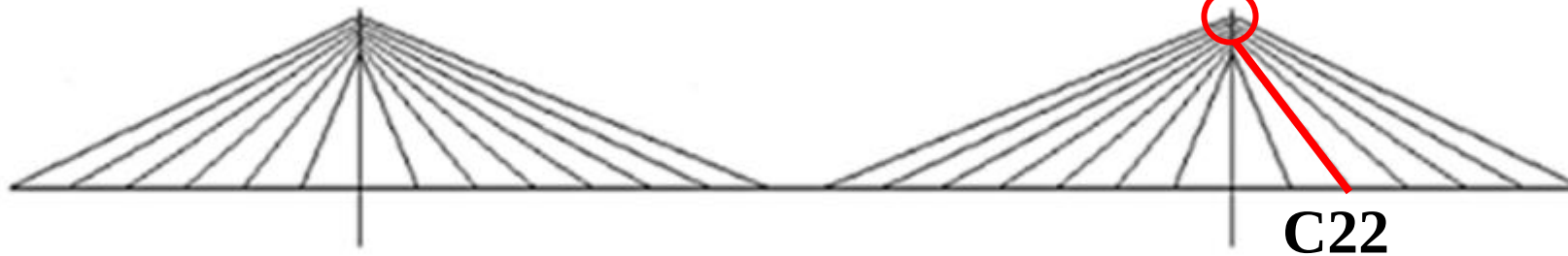


解析結果・主塔頂点の橋軸方向変位



減衰が変化
することで
振動の仕方に
大きな影響有

主塔頂点



ケーブルは
破断しない!!!

連鎖崩壊的検討

ケーブルの減衰を上げる方法は妥当なのか．．．．．
ケーブル破断による荷重分配はできているのか．．．．．

既往の研究

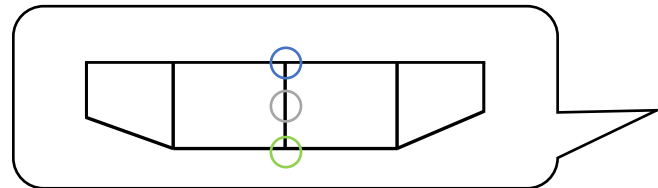
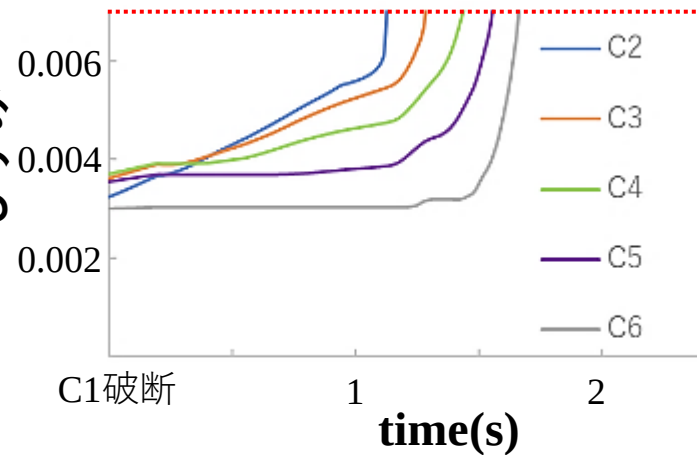
ケーブル腐食を考慮した斜張橋
連鎖崩壊の解析

減衰0.2

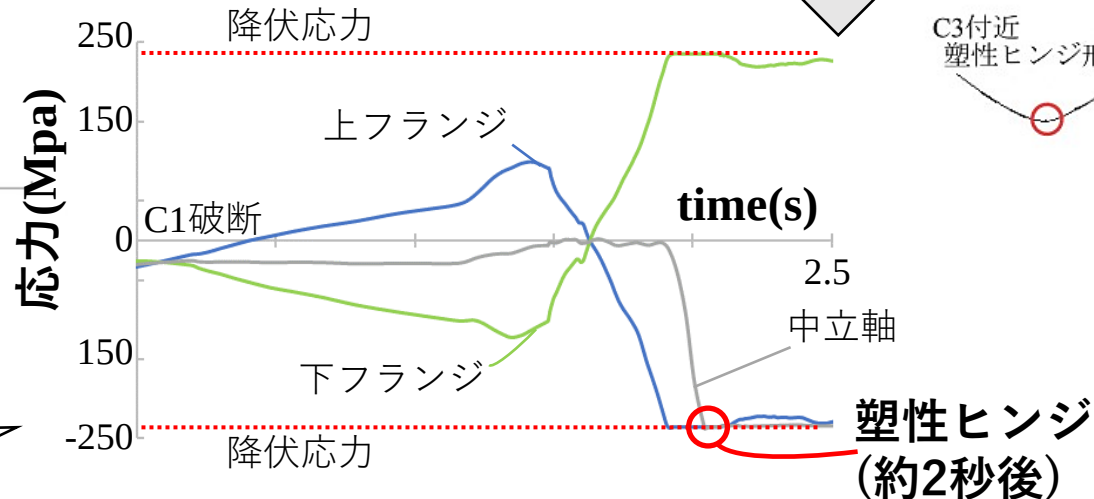
同様の結果が
得られるか検討

ひずみ履歴

破断ひずみ



主桁C3付近部・応力履歴



解析結果

破断前



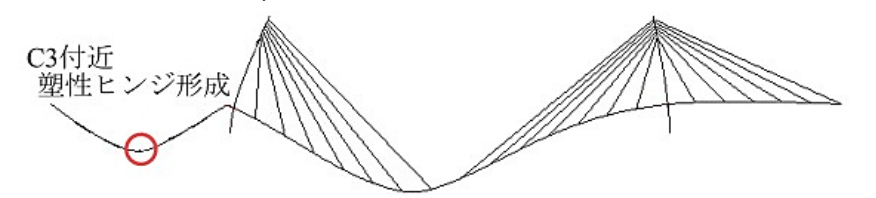
C1破断



C2,C3破断



C4~C6破断, 塑性ヒンジ形成



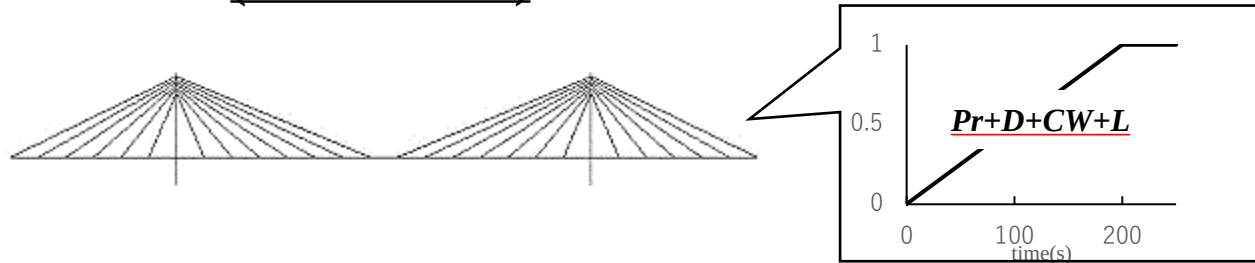
妥当!!!

連鎖崩壊解析手法

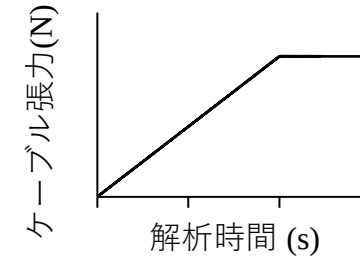
1本目のケーブル破断の再現

step1

設計荷重($Pr+D+CW+L$)を徐々に载荷

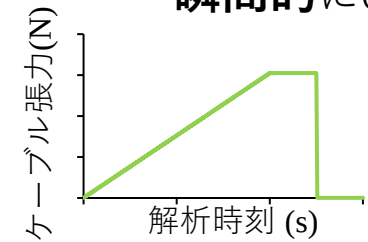


意図的に破断させるケーブルの
張力履歴を獲得



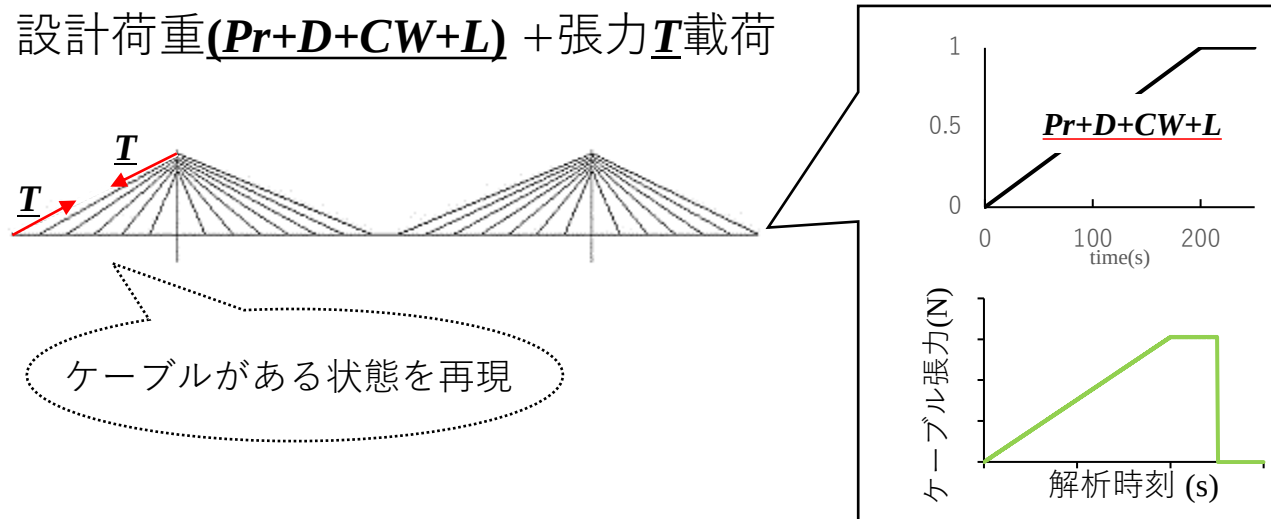
ケーブル破断の再現

張力を
瞬間的に0へ



step2

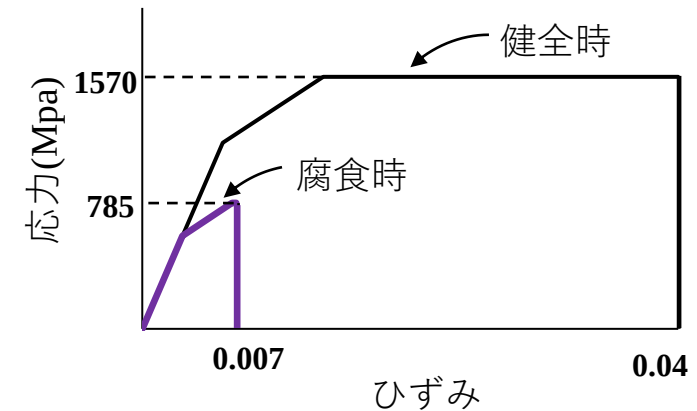
設計荷重($Pr+D+CW+L$) + 張力 T 载荷



ケーブルがある状態を再現

その他のケーブル

破断ひずみに
到達したら応力0に!!



ケーブルの応力ひずみ関係