

斜張橋を安全に長く使うための 構造安全性に関する研究

秋田大学大学院 理工学研究科
システムデザイン工学専攻

青木 由香利

MIDAS × Aoki

青木 由香利

Yukari AOKI

秋田大学大学院
理工学研究科
システムデザイン工学専攻
土木環境工学コース

構造デザイン「普通の中の特別」

斜張橋の安全性および長寿命化を目的とし、ケーブルの腐食による破断や連鎖崩壊の解析、強度への影響に関する実験的検討、破断時挙動や振動現象のリスク評価を行っています。実験と数値解析の両面から損傷リスクの見える化と維持管理の高度化を図るものです。

経歴	2014年～2020年	東海大学国際教育センター 講師
	2021年より現職	
学歴	2000年～2004年	東海大学 海洋学部 海洋土木工学科 卒業
	2004年～2006年	東海大学 海洋学研究科 海洋工学専攻 博士前期課程 修了
	2007年～2009年	シドニー工科大学 工学研究科 博士前期課程 修了
	2007年～2014年	シドニー工科大学 工学研究科 博士課程 修了

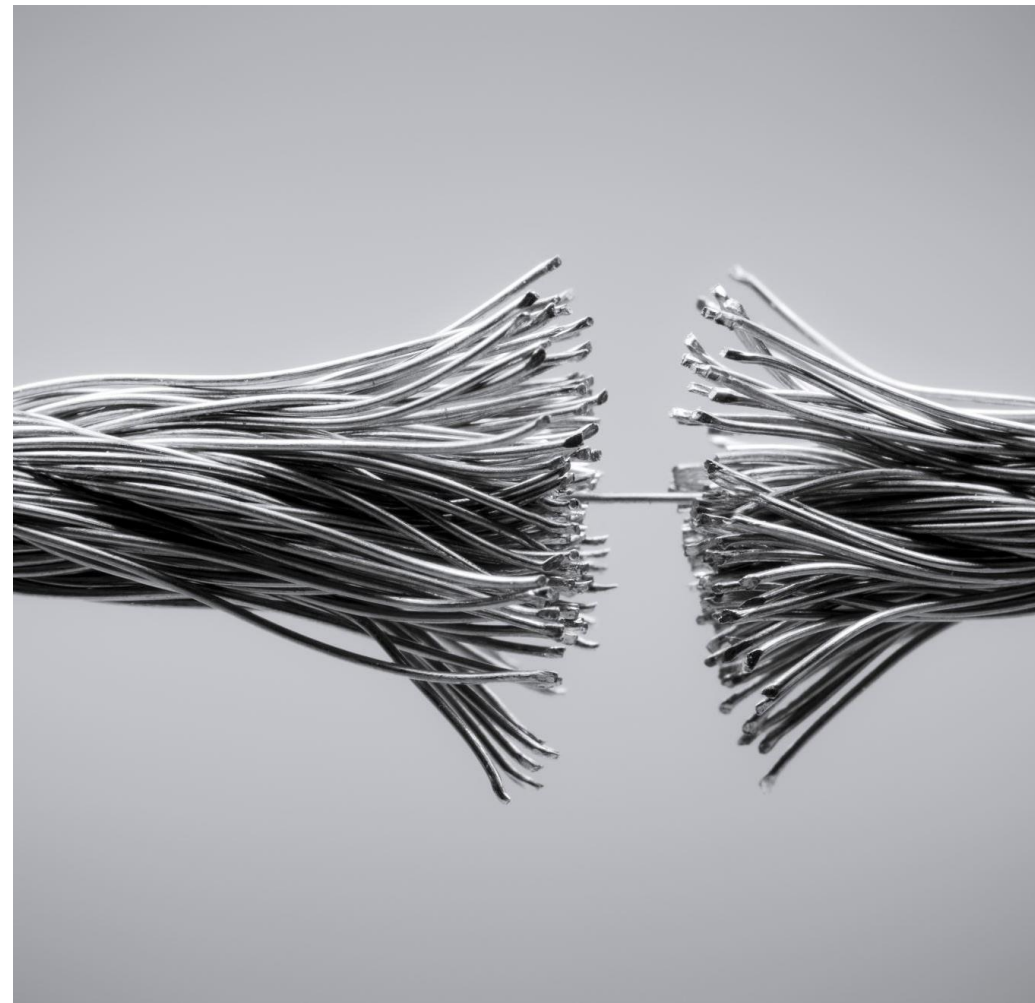
背景



本研究の目的

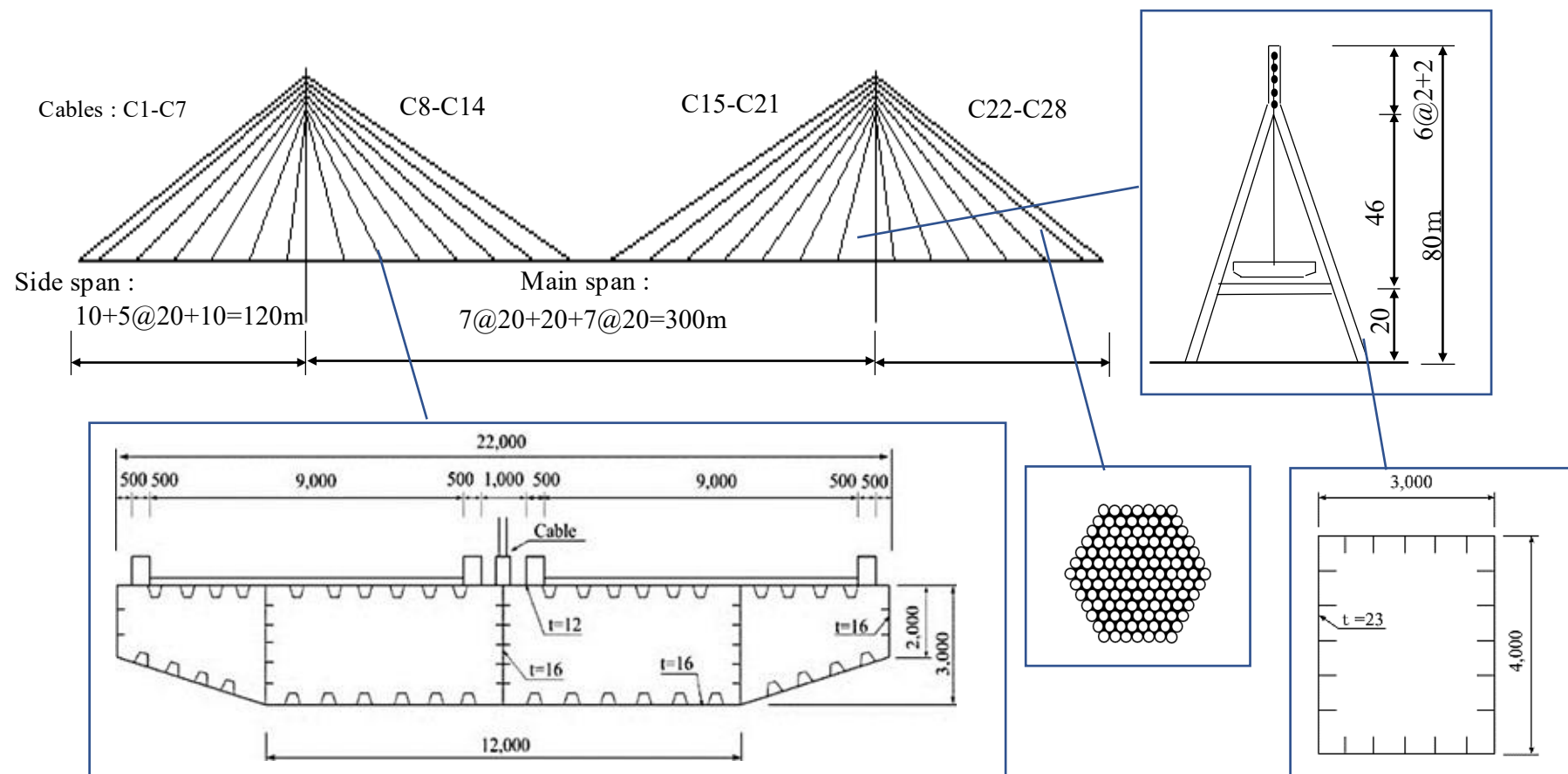
- ケーブルの破断が連鎖的に橋全体に影響を与えるかどうかを評価するための新しい解析手法を提案

→ ケーブルが腐食している場合と、していない場合の両方について、FEMを用いた動的解析を行い、特定のケーブルの破断が連鎖崩壊につながるかどうかを検討



斜張橋を安全に
長く使うための
構造安全性に関する
研究

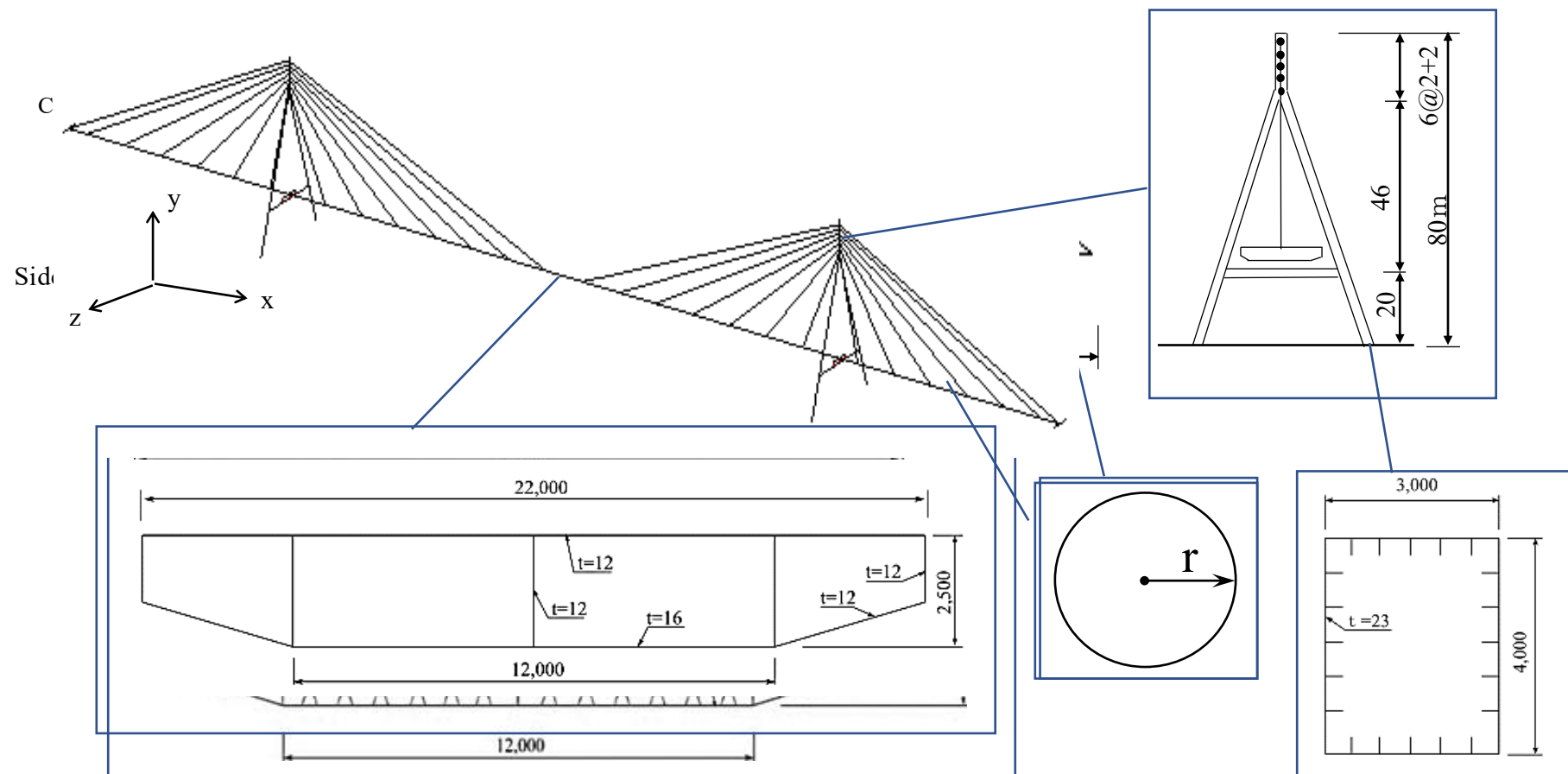
解析モデル



斜張橋を安全に
長く使うための
構造安全性に関する
研究

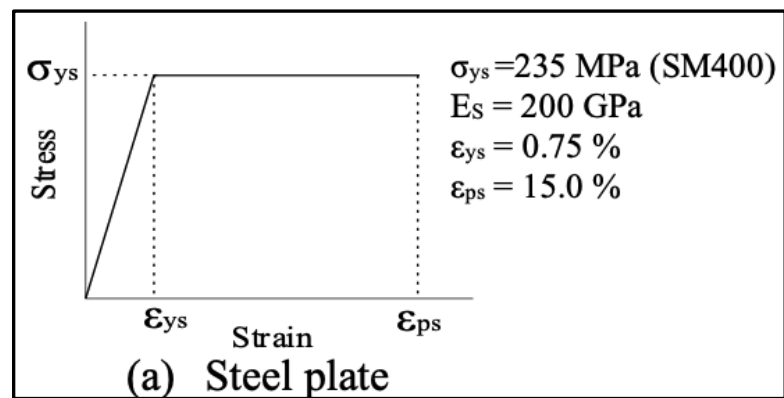
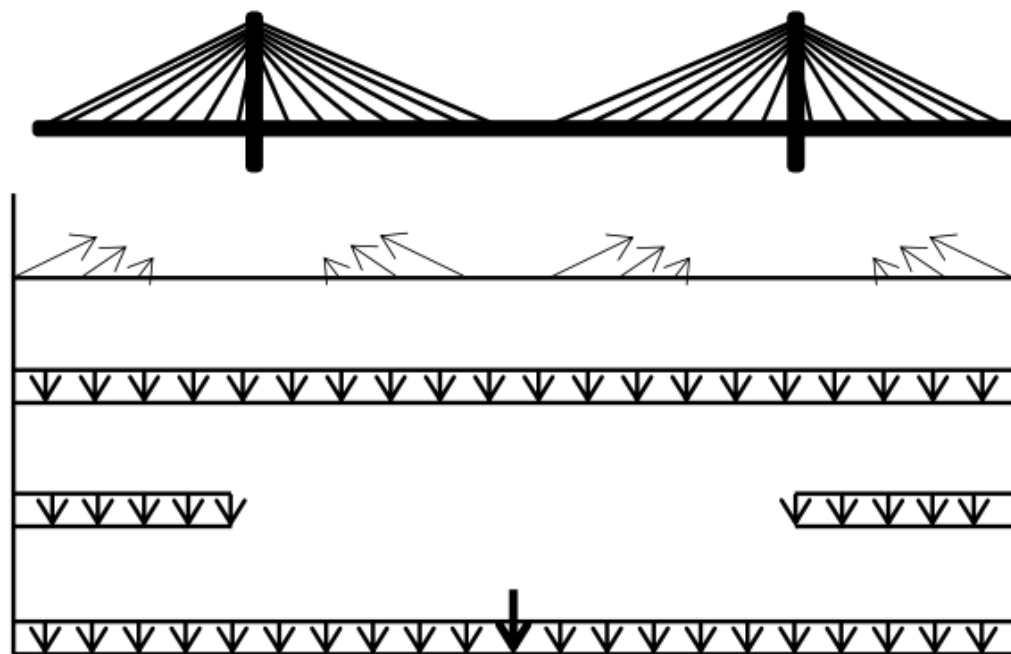
解析モデル

6



設計荷重

7



Cable Prestress (Pr)

Dead load (D)

Counter weight (CW)

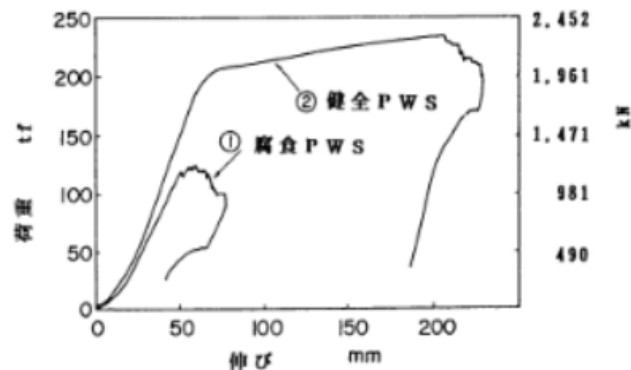
Live load (L)

斜張橋を安全に
長く使うための
構造安全性に関する
研究

ケーブルのサビについて

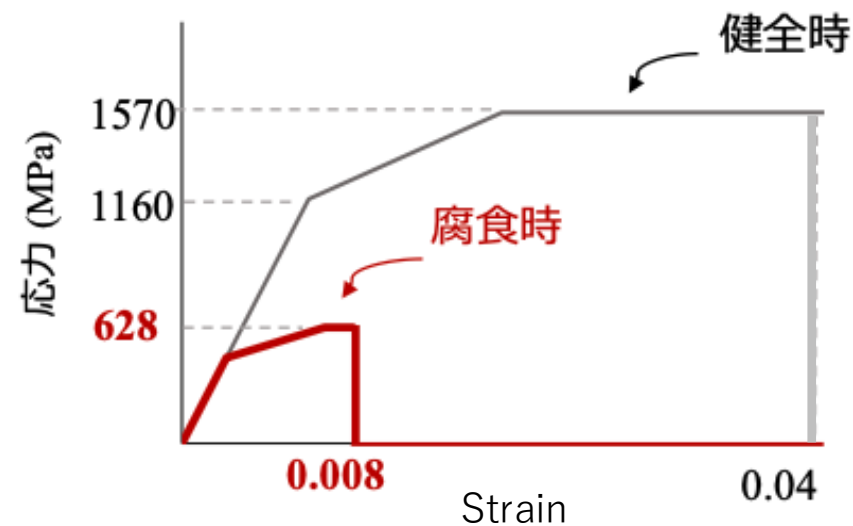
8

先行研究



PWSの引張試験結果 (三田村ら)

腐食時の破断強度は、
健全時の50%、
伸びは1/4程度まで低下する
+
亜鉛めっき鋼線の腐食

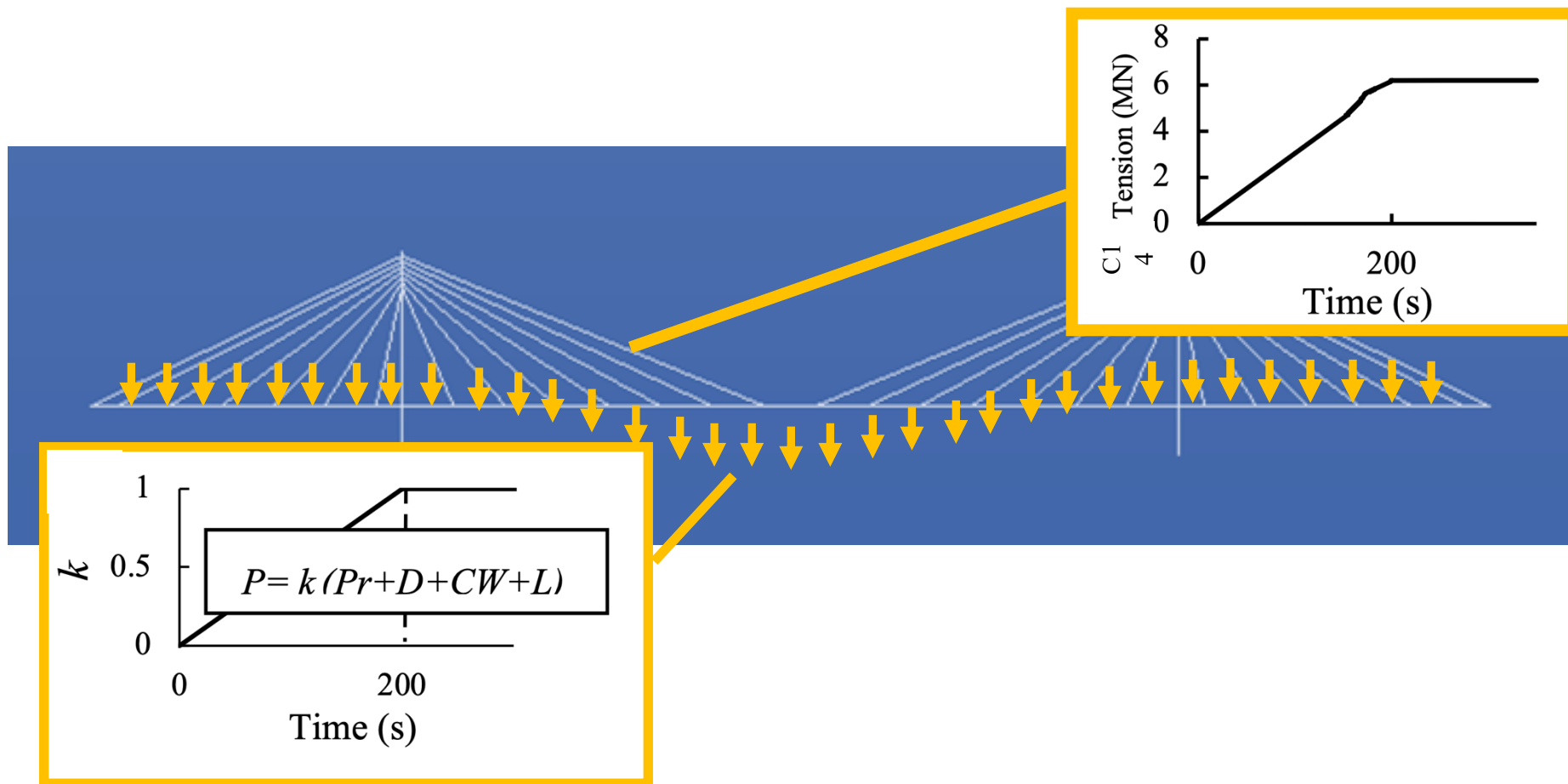


本研究ではサビを応力-ひずみ関係で
表現する

斜張橋を安全に
長く使うための
構造安全性に関する
研究

手法

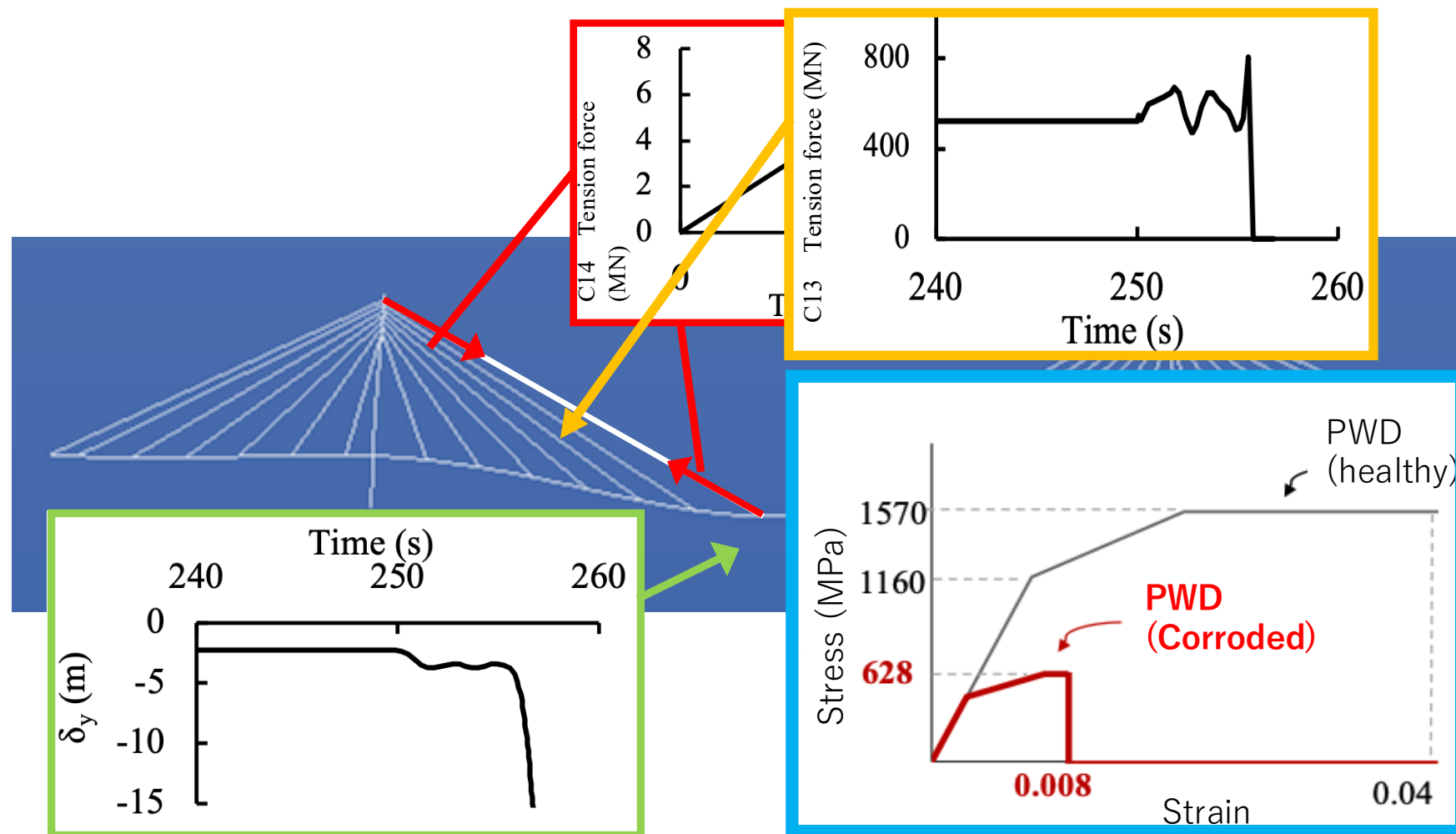
9



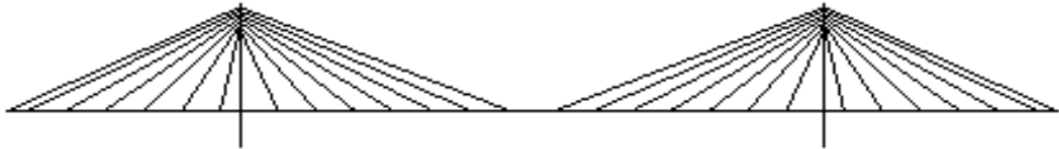
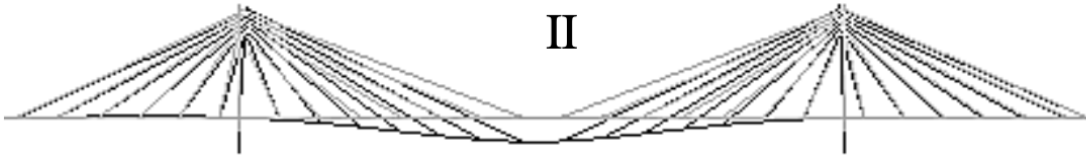
斜張橋を安全に
長く使うための
構造安全性に関する
研究

手法

10



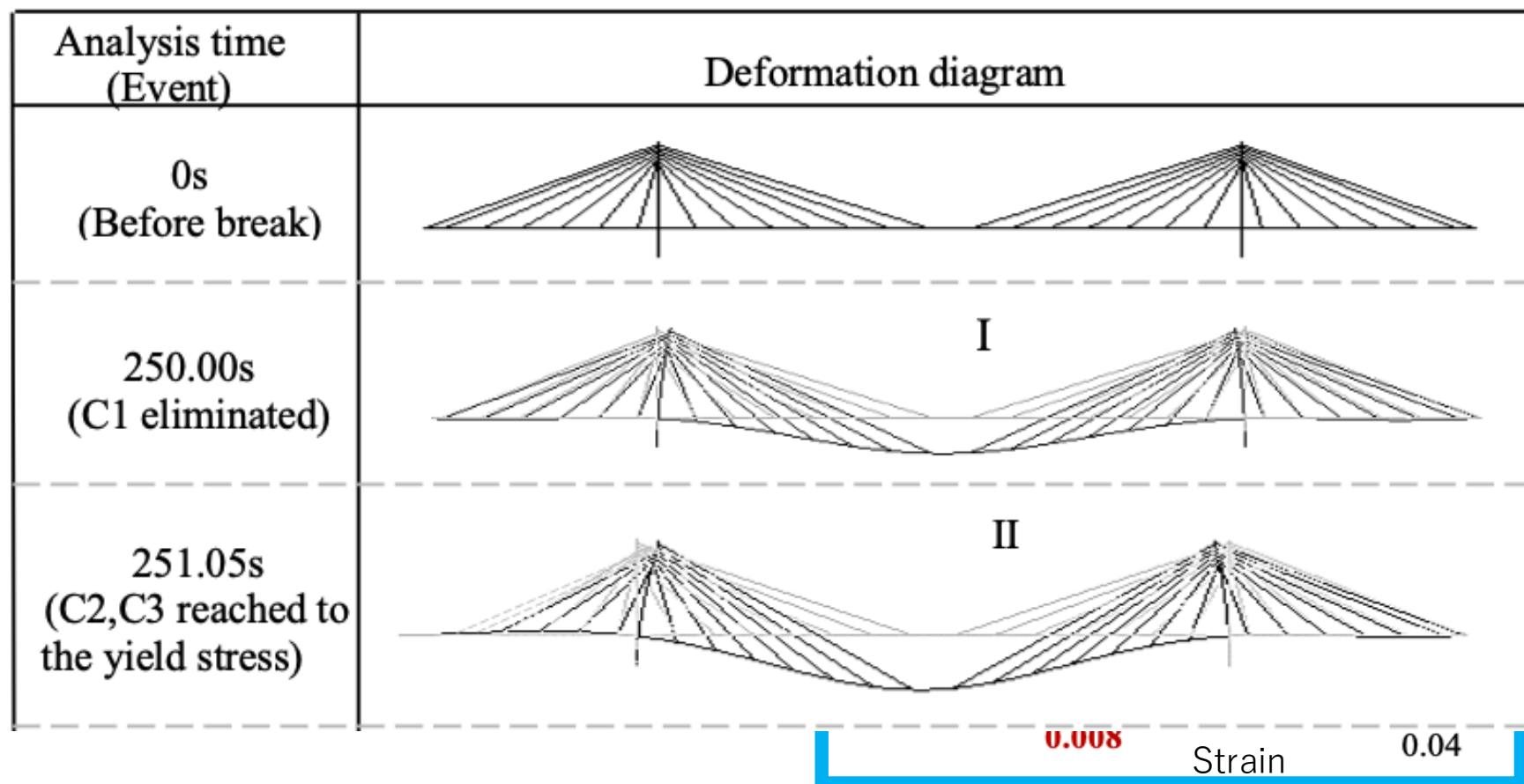
健全モデルの解析結果

Analysis time (Event)	Deformation diagram
0s (Before break)	
253.00s (C1 break)	I 
350.00s (End of analysis)	II 

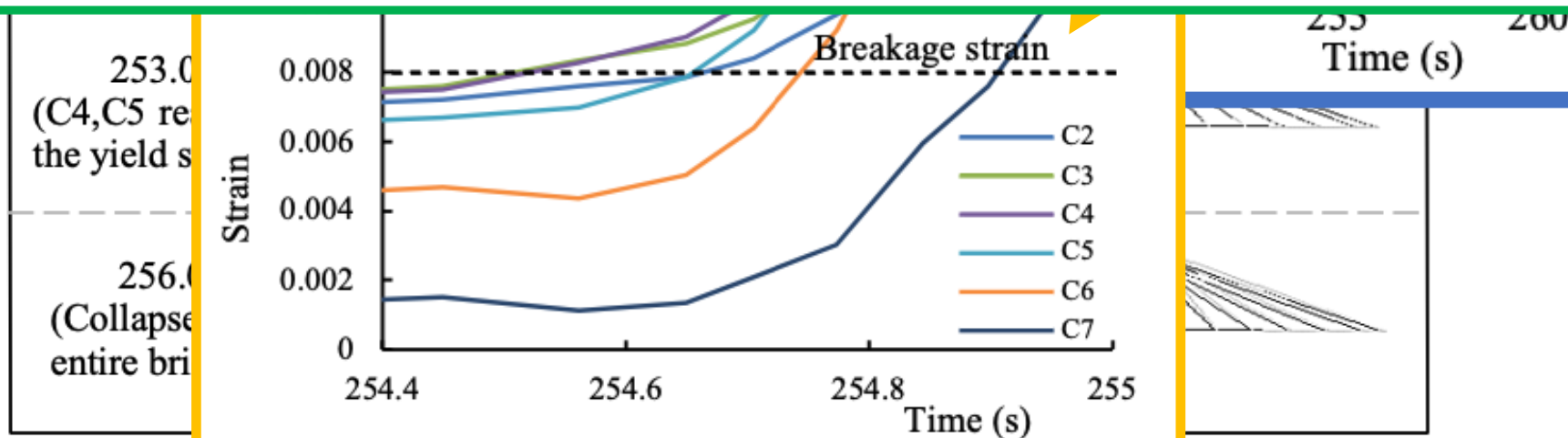
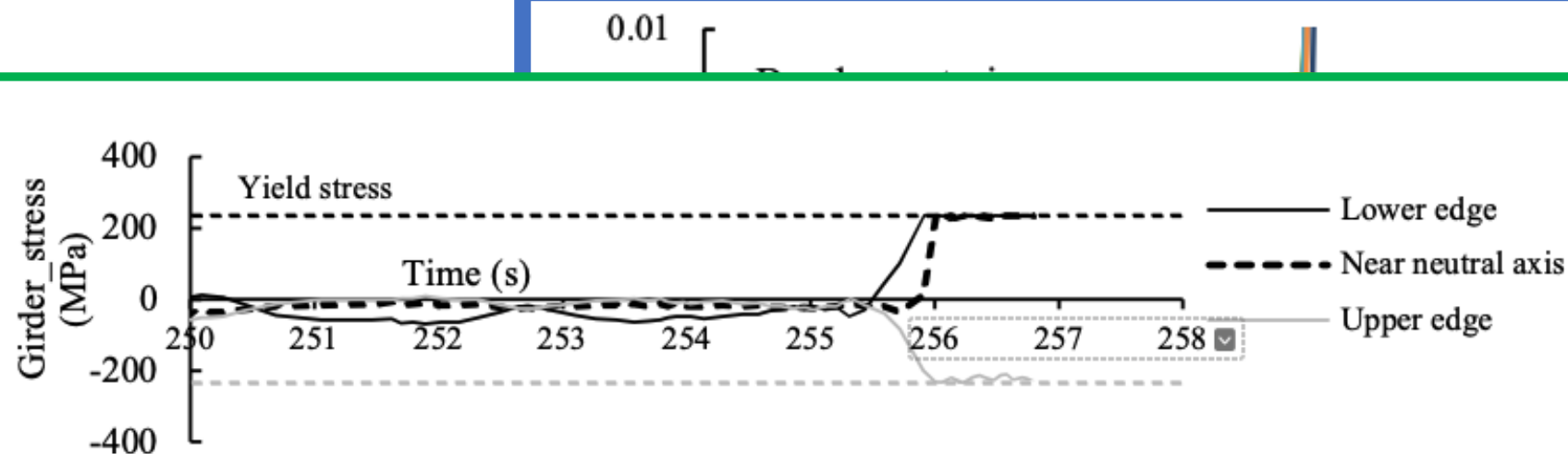
斜張橋を安全に
長く使うための
構造安全性に関する
研究

サビモデルの解析結果

12



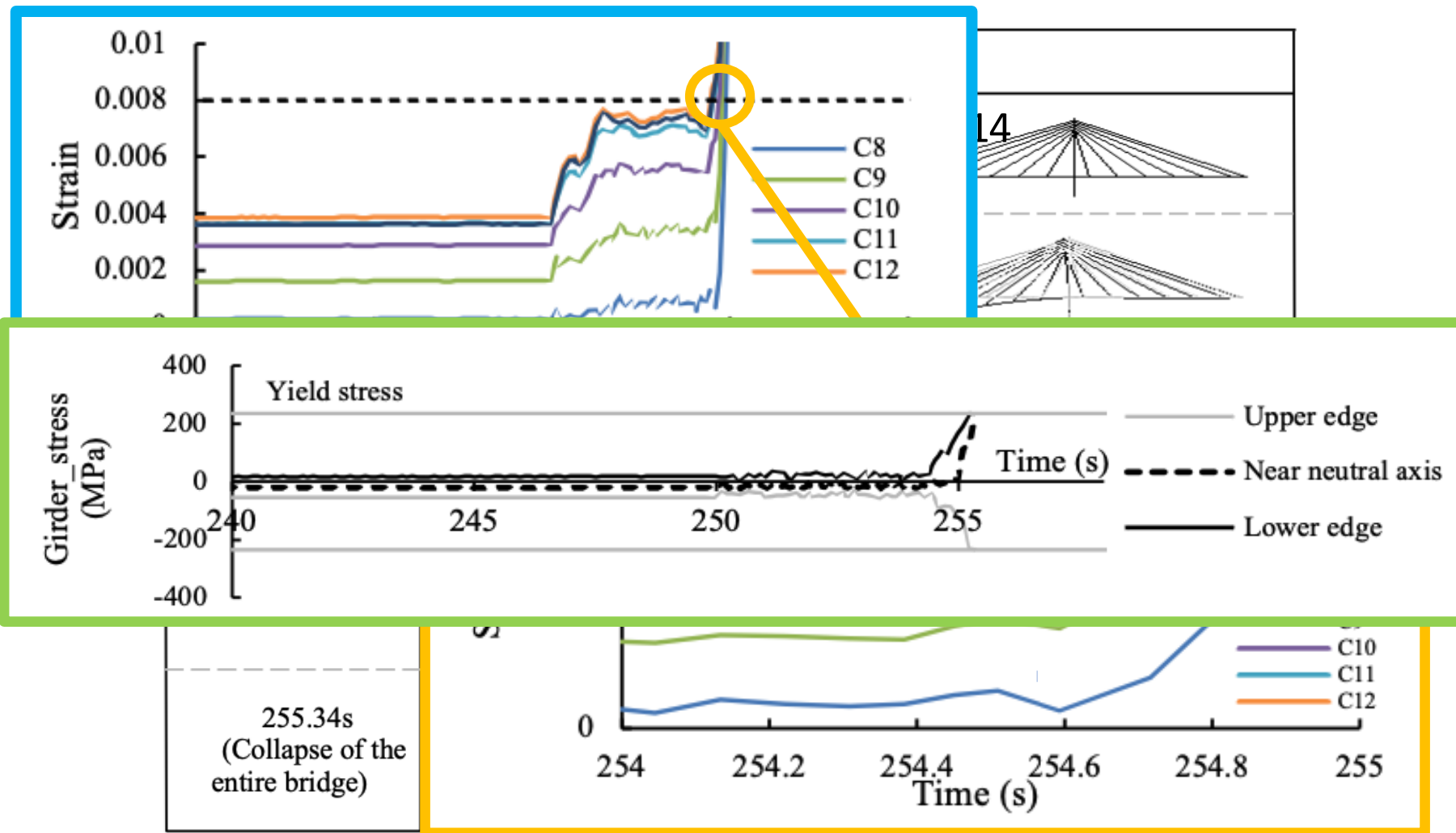
斜張橋を安全に
長く使うための
構造安全性に関する
研究



MIDAS CONSTRUCTION SEMINAR

斜張橋を安全に
長く使うための
構造安全性に関する
研究

14



実際の落橋事例

15



一本目のケーブルが切れる
↓
次々に別のも切れる。
↓
アーチ部分が崩壊
連鎖崩壊！！

これも同じ手法で解析してみる！！

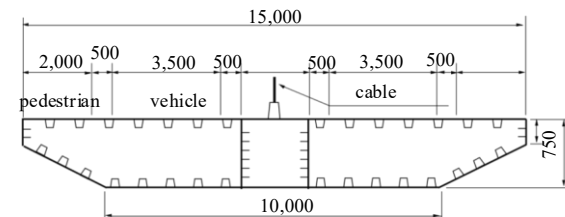
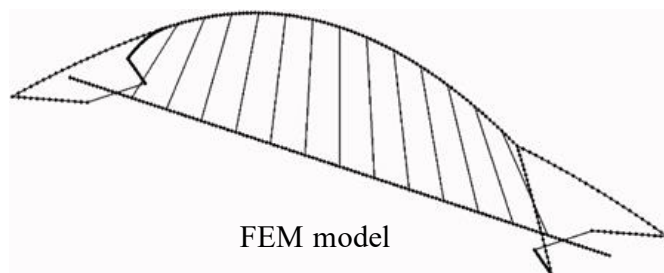
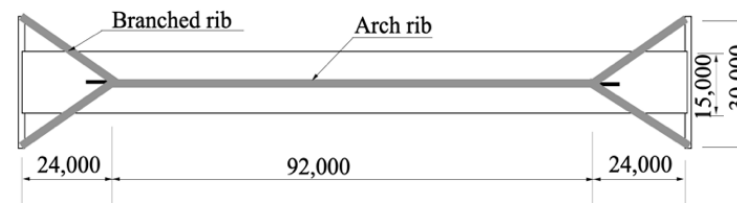
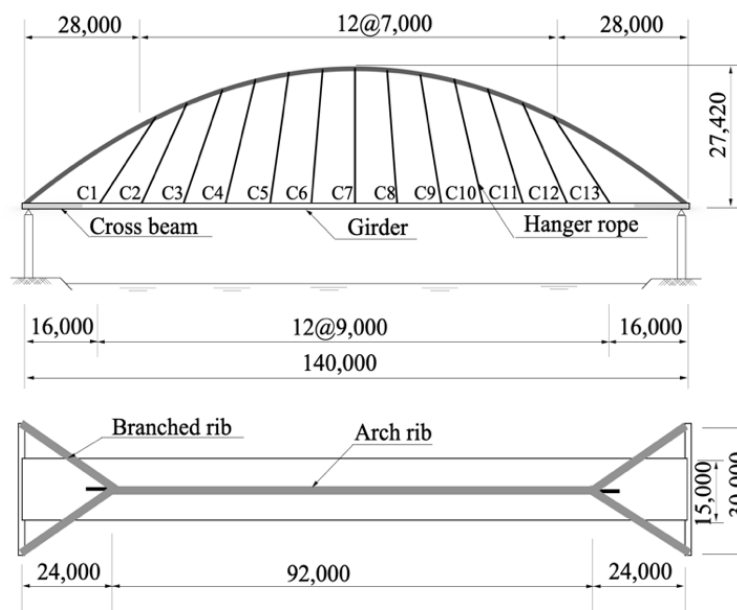


錆びていたケーブル

斜張橋を安全に
長く使うための
構造安全性に関する
研究

解析モデル

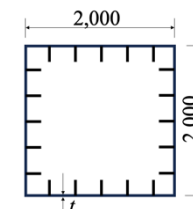
16



Girder

thickness

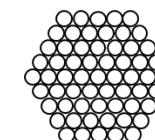
U-Flg	16
Web	16
L-Flg	20



Arch rib

thickness

Arch rib	18
Branched rib	26
Cross beam	22



PWS

Design load:

Dead load (D) + Live loads (L) + Cable pre-stress (Pr)

Elastic plastic non-linear analysis (Marc Mentat 2021)

Steel plates: Bi-linear stress-strain relation

Cables: Tri-linear stress-strain relation

Dynamic analysis:

Newmark β method, $\beta=0.25$, $\gamma=0.5$,
time interval 0.01s

斜張橋を安全に
長く使うための
構造安全性に関する
研究

ケーブル腐食の再現方法

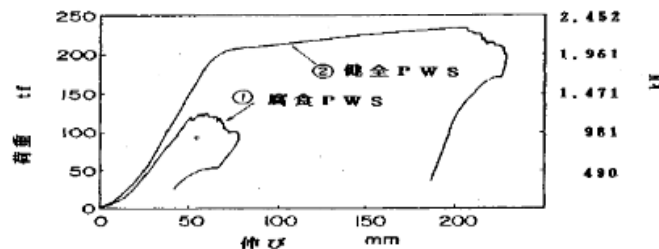
17

南方澳大橋崩壊時のケーブル

ケーブルの有効断面積が
健全時に比べ**75%減少**していた



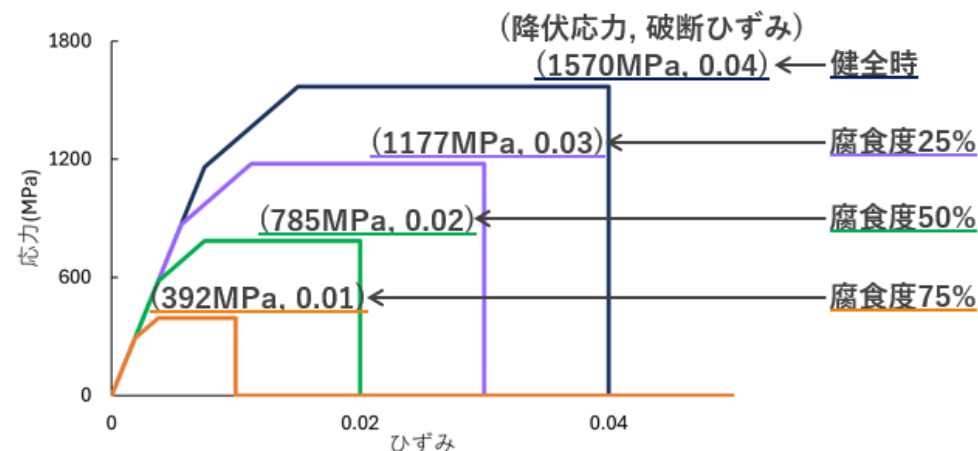
先行研究



PWSの引張試験結果(三田村ら)

腐食時の破断強度は**健全ケーブルの50%**
低下破断伸びは1/4まで低下する

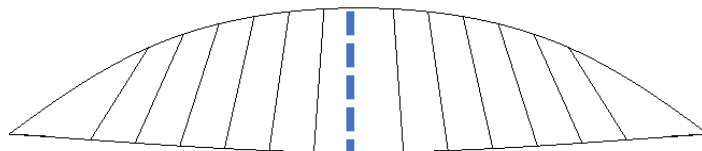
降伏応力,破断ひずみの減少



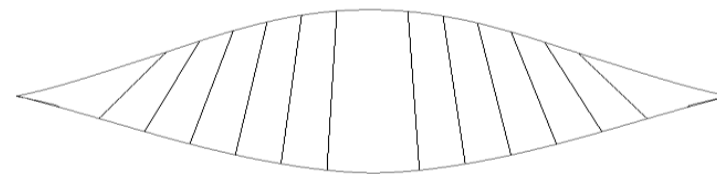
降伏応力と破断ひずみをそれぞれ
25%, 50%, 75%腐食させる

腐食度が最もひどい場合の解析結果

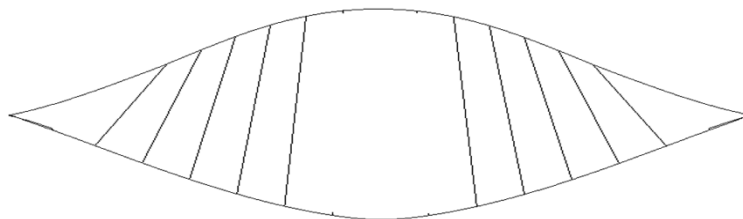
18



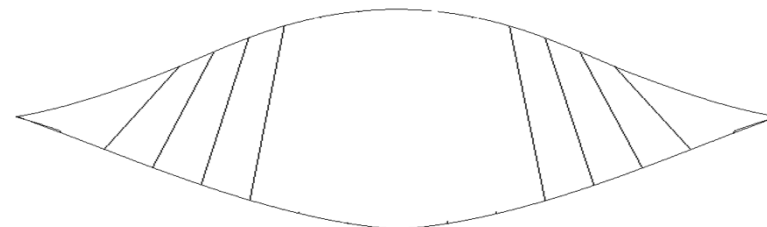
Stable stage: before cable breaks



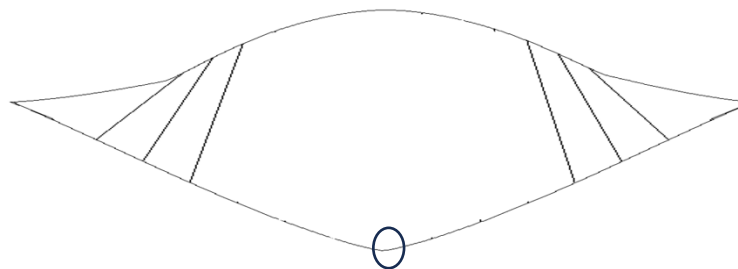
At the C7 breaks, and C6 & V8 reach to the ultimate strain



C5 & C9 reach to the ultimate strain



C4 & C10 reach to the ultimate strain



Plastic hinge forms at the center of the main girder

Chain reaction failure occurs!

ここまでのまとめ

この研究では、**動的過渡解析**を用いた
新しい連鎖破壊解析手法を提案・検討した。

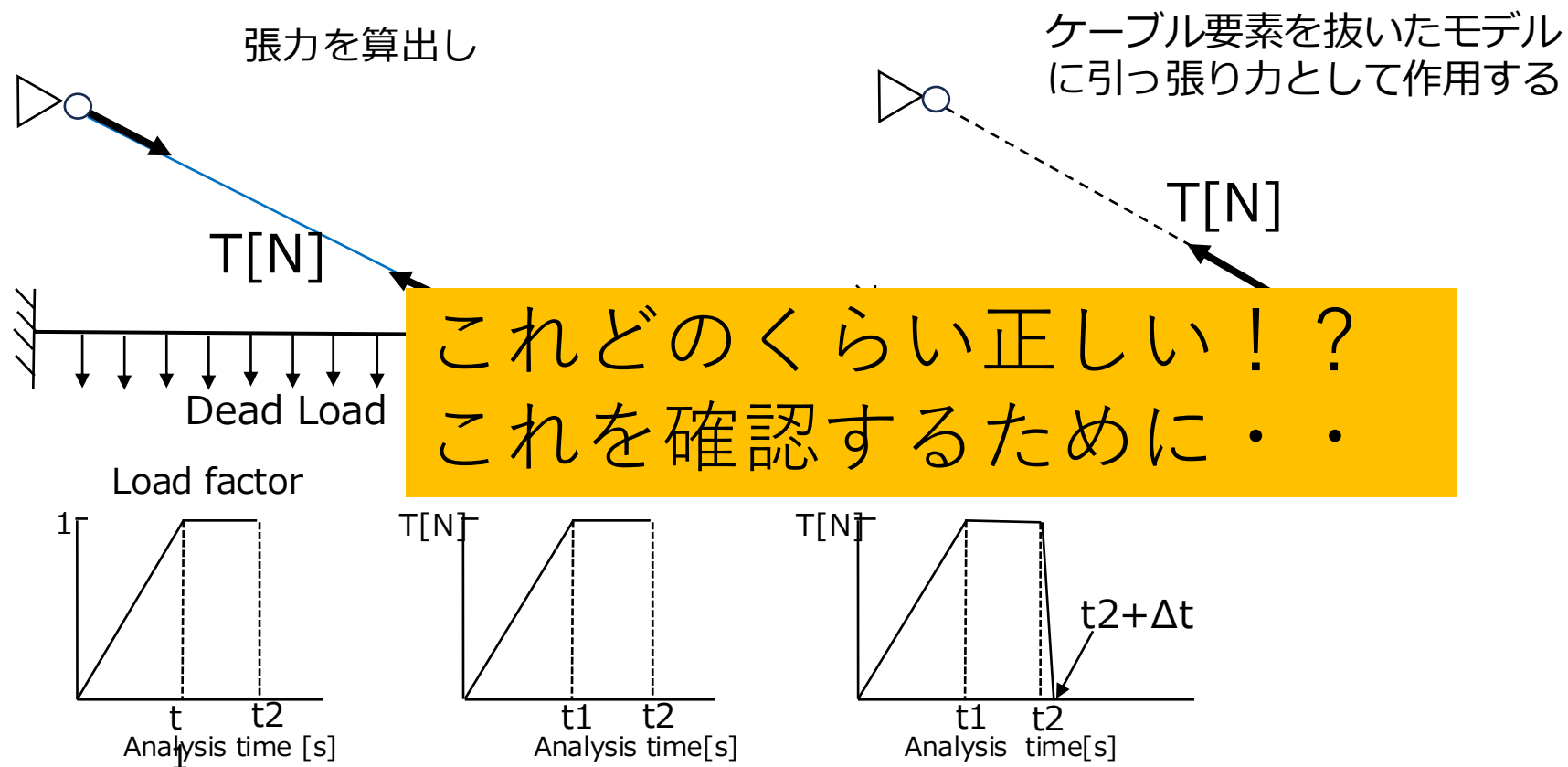
- この手法を使うことで、**斜張橋における連鎖的な破壊現象**を再現することが可能
- **ケーブルの腐食**は、提案した構成則（材料モデルを用いることで再現可能である
- **アンカレッジ部に接続されたケーブル**が破断した場合、**連鎖破壊が発生**した（すべてのケーブルが接続されていると仮定）。

ここまでのまとめ

- **桁の中央に接続されたケーブルが最初に破断した場合でも、ケーブルがすべて腐食していると仮定すると、連鎖破壊が発生した。**
- 一方で、ケーブルが腐食していない場合には、**連鎖破壊は発生しない。**
- アーチ橋でも腐食度が進んでいると連鎖崩壊が発生した。

ここで疑問

21



ここで疑問

22

実験 1 : 1 自由度モデル

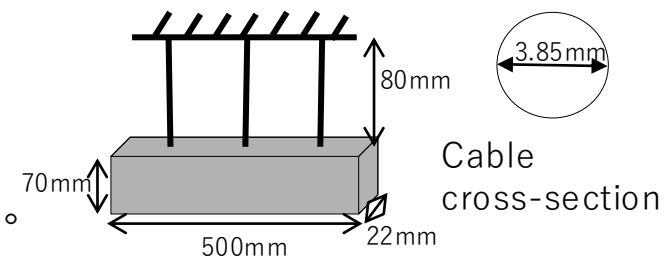
実験モデル



実験方法

3本のバネで吊るし、
真ん中のバネを切る。
その後の揺れを確認する。

解析モデル



Material properties	Mass(kg)	Density (ton/m ³)	Yang's module(MPa)
steel	7.3	9.48	205×10^3
cable(spring)	3.26×10^{-3}	3.5	5.12

FEM Analysis Tool : Salome-Meca

結果

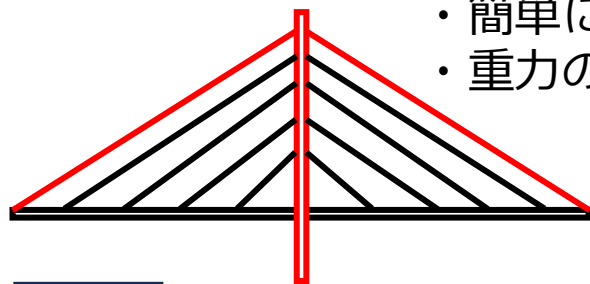
	Maximum displacement	Relative error
実験	68mm	4.4%
解析	65mm	

斜張橋を安全に
長く使うための
構造安全性に関する
研究

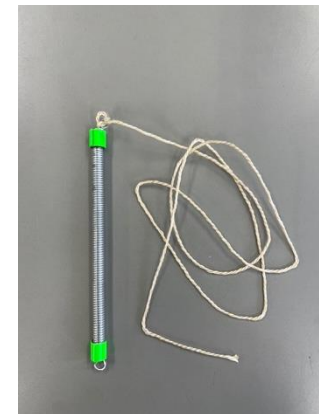
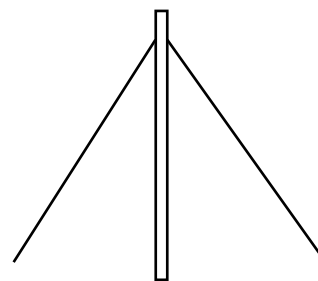
ここで疑問

23

橋モデル (斜張橋のタワーとケーブルをモデル化)



- ・簡単にできて
- ・重力の影響も少ない

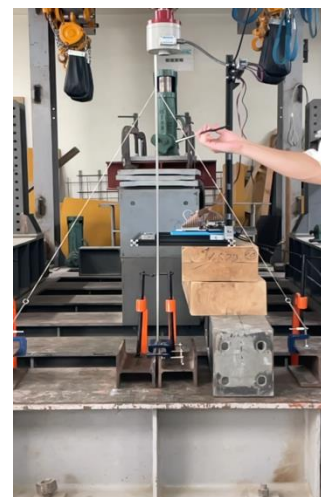


実験

ケーブル1本

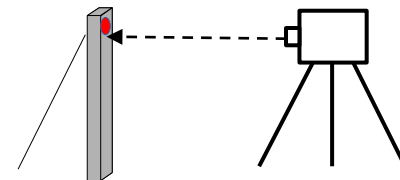


ケーブル2本



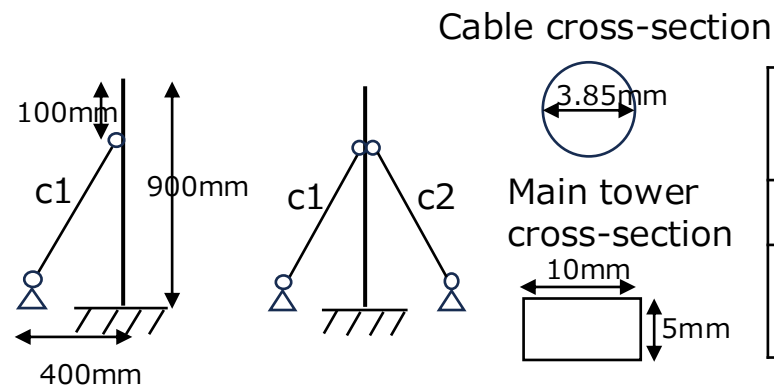
ケーブルはバネと糸で再現

糸を切って、振動の
様子を超音波カメラ
で観測



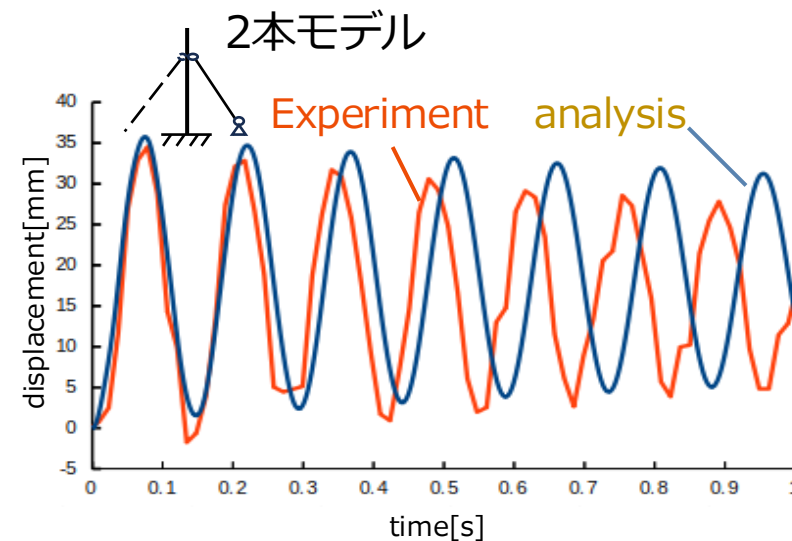
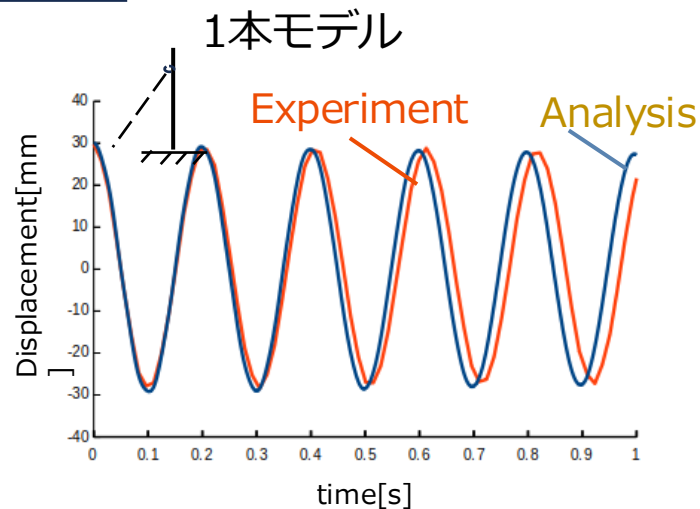
斜張橋を安全に 長く使うための 構造安全性に関する 研究

解析モデル



Material properties	Mass(kg)	Density(ton/m ³)	Yang's module(MPa)
Main tower	0.3834	7.668	200×10^3
Cable(spring and aramid fiber yarn)	3.26×10^{-3}	3.37	40.04

結果の比較

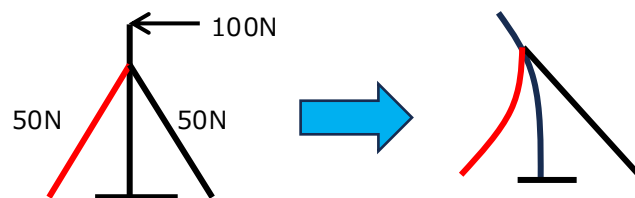


ここで疑問

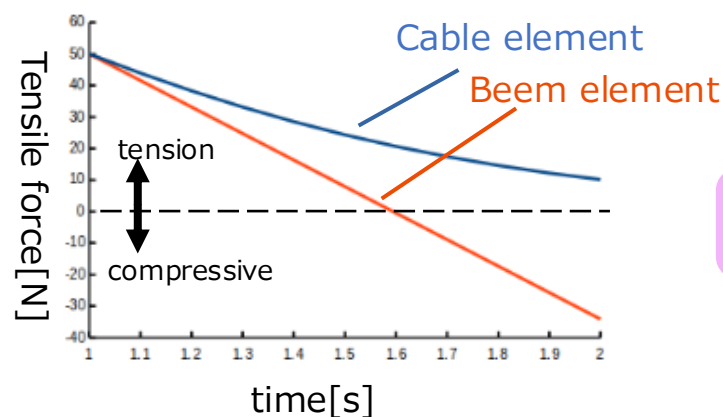
25

検討事項

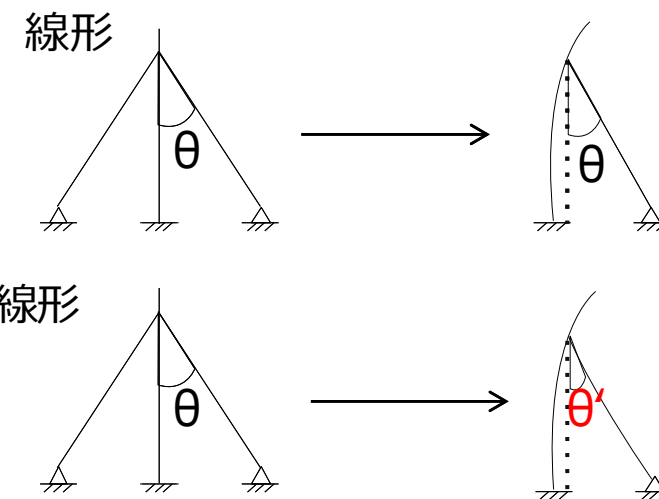
解析ではケーブルに圧縮がでていた・・・



引っ張りのみで検討する必要あり



幾何学的非線形性



実験の改善点

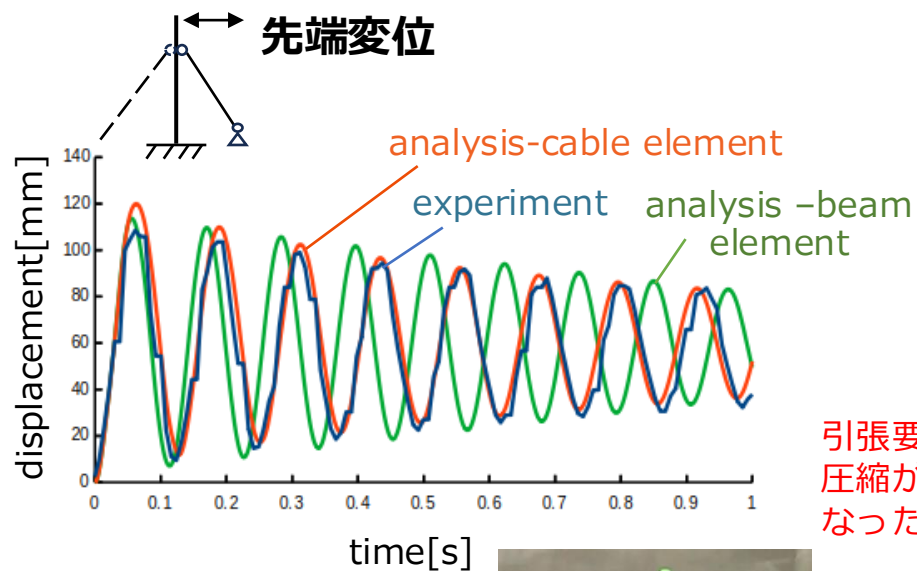
超音波カメラではなく，スローモーションで撮影し，
画像解析で変位を検討する

斜張橋を安全に
長く使うための
構造安全性に関する
研究

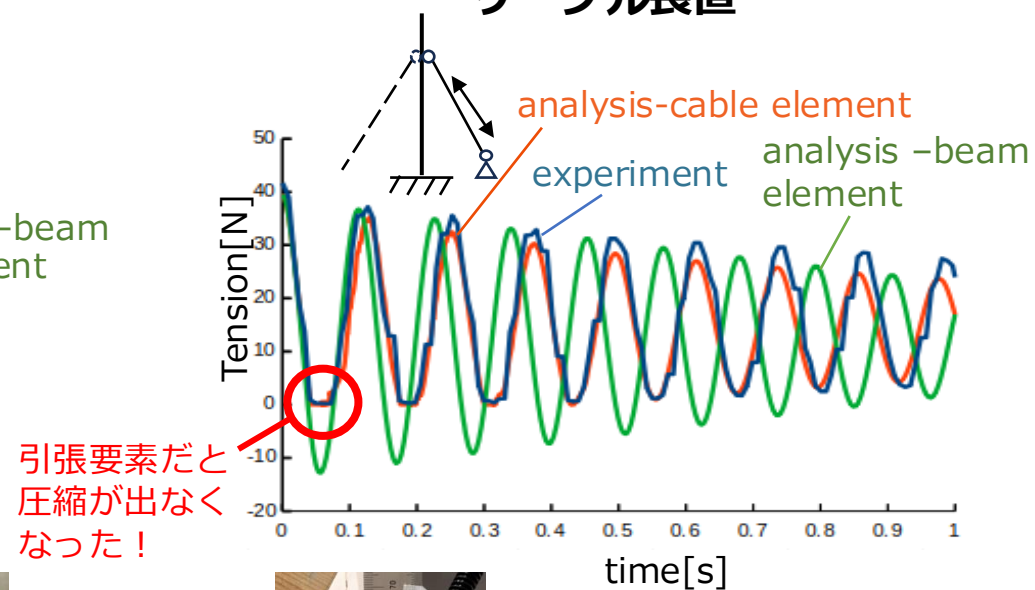
ここで疑問

26

改善モデルでの検討



ケーブル長直



引張要素だと
圧縮が出なく
なった！

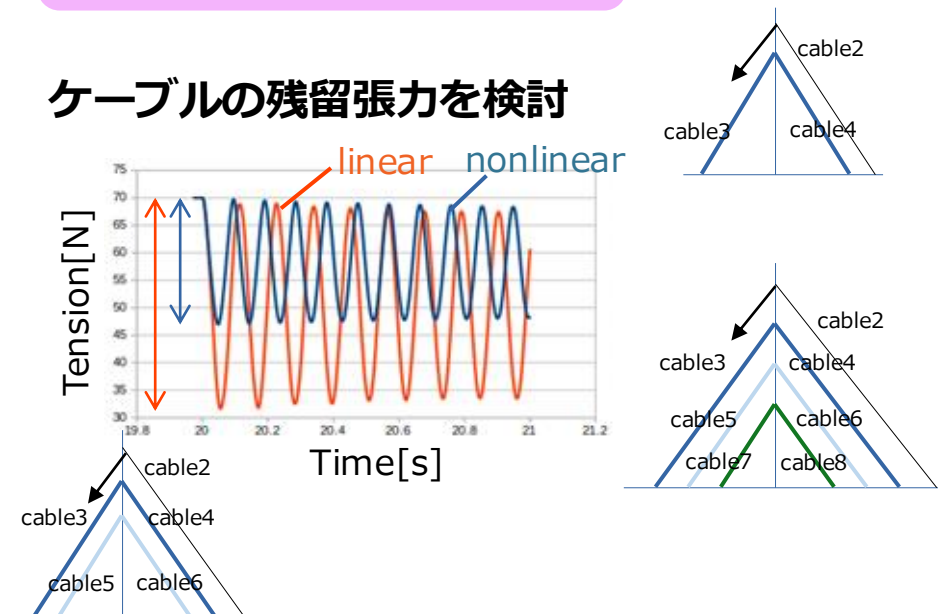


ここで疑問

27

幾何学非線形の検討

ケーブルの残留張力を検討



Six-cable model	Linear[N]	Relative error	Nonlinear [N]	Relative error
cable2	31.2		18.3	
cable3	27.7	0.0%	19.7	18.3%
cable4	27.7		16.1	
cable5	24.2	0.0%	17.8	16.3%
cable6	24.2		14.9	

Four-cable model	linear[N]	Relative error	Nonlinear [N]	Relative error
cable2	38.4		23.0	
cable3	35.0	0.0%	27.2	23.5%
cable4	35.0		20.8	

Eight-cable model	Linear[N]	Relative error	Nonlinear [N]	Relative error
cable2	28.5		16.8	
cable3	24.9	0.0%	17.5	16.6%
cable4	24.9		14.6	
cable5	20.9	0.0%	15.1	13.9%
cable6	20.9		13.0	
cable7	17.1	0.0%	12.7	11.0%
cable8	17.1		11.3	

幾何学非線形を考慮することで、
復元力が再現できている

手法は良さそう・・・！？

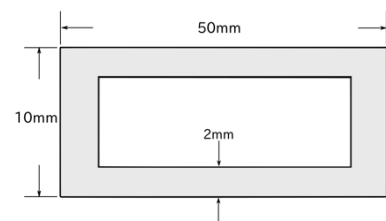
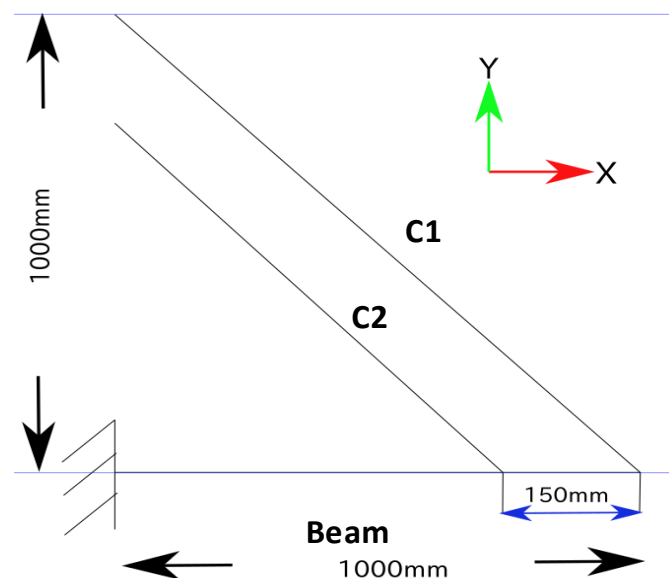
次の疑問は・・・

腐食って全部のケーブルで、

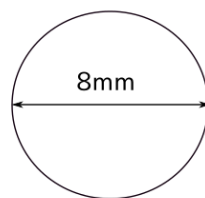
全体に起こる！？

一部分だけ腐食していることを検討する

29

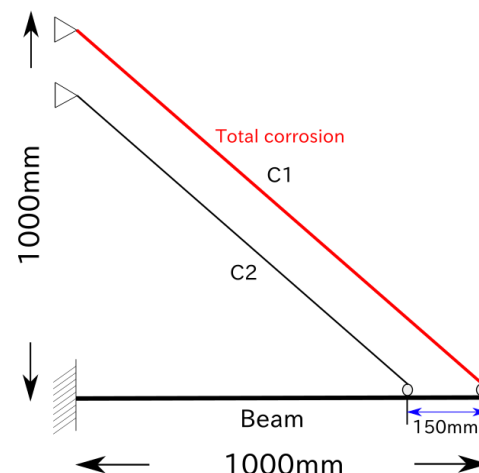


Beam section

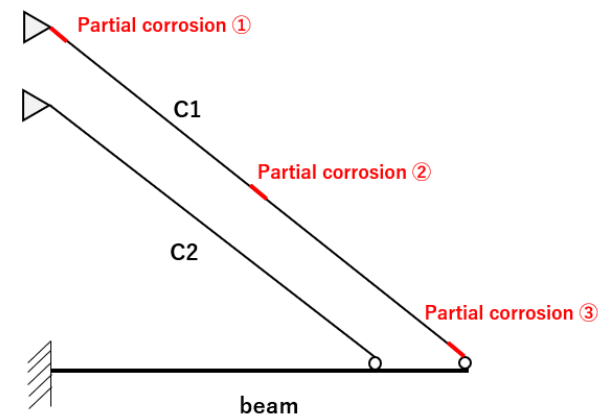


Cable section

・腐食部をパラメータとする



total corrosion
model



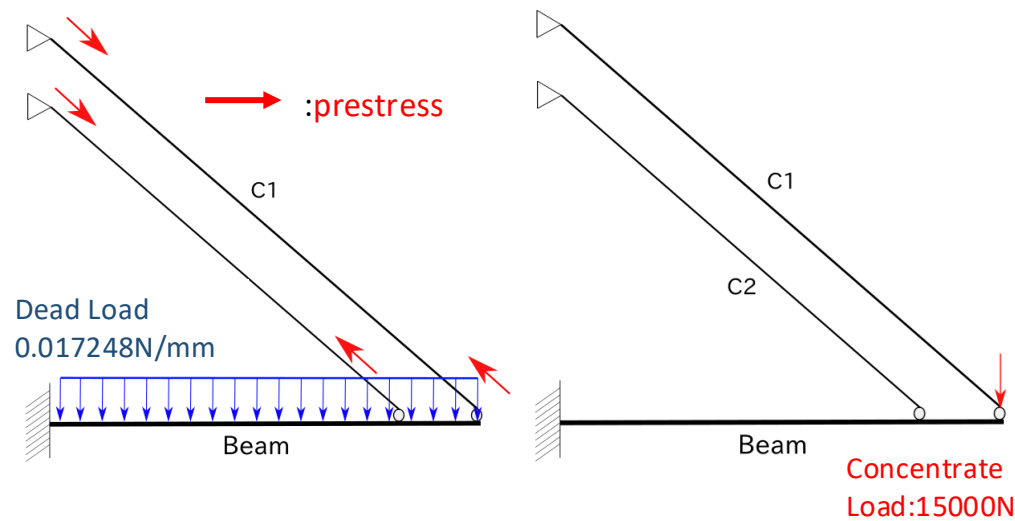
partial corrosion
model

Material property
beam: 200GPa
cable: 195GPa
prestress (C1: -100°C, C2: -90°C)
Cable: considering geometric nonlinear

斜張橋を安全に
長く使うための
構造安全性に関する
研究

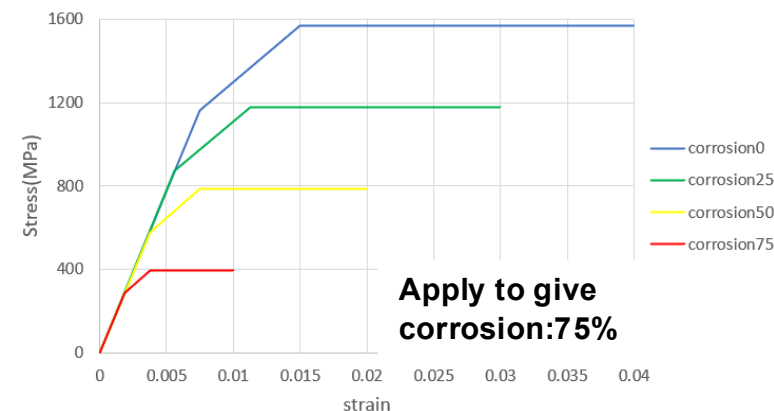
解析モデル

30

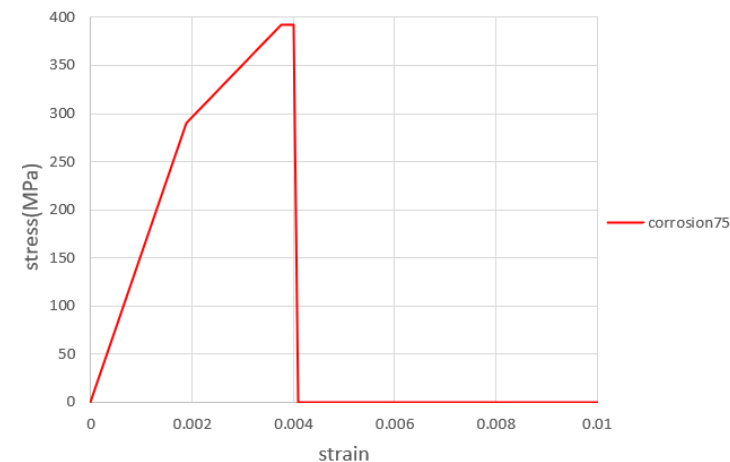


Loading condition

- 0~100s : loading prestress and Dead load (load a long time to protect model vibration)
- 100s~110s : stable model
- 110s~130s : loading concentrate load at beam tip



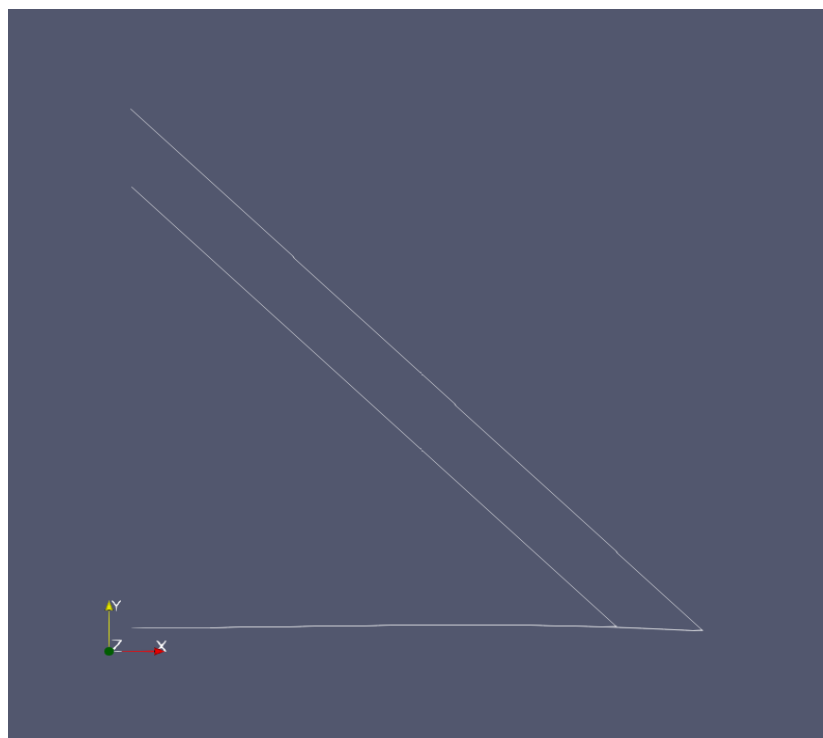
ケーブルが切れるように設定



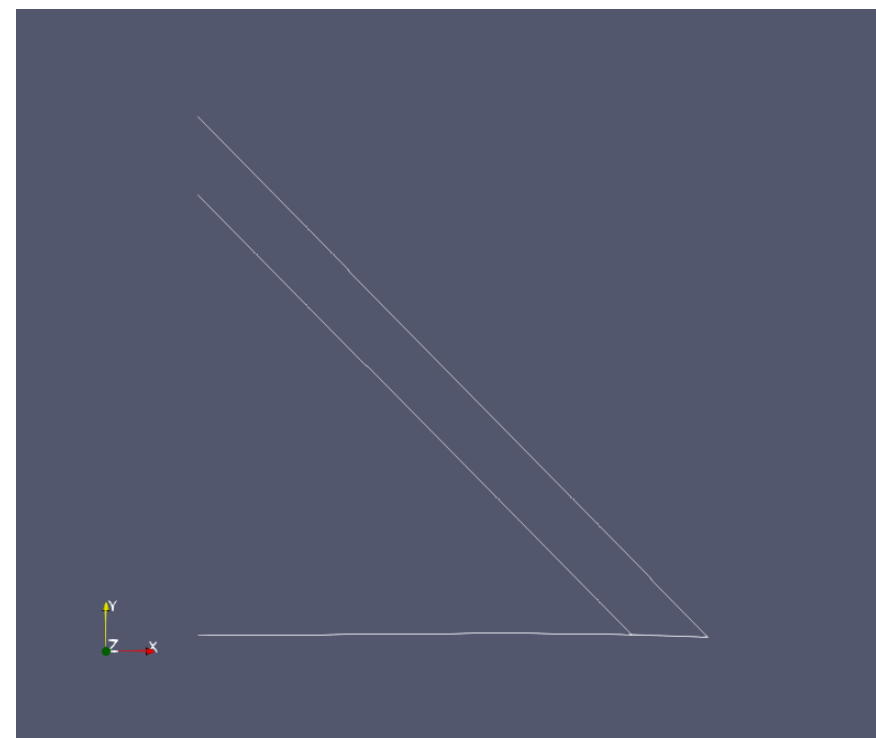
動的応答

31

Total corrosion



Partial corrosion③

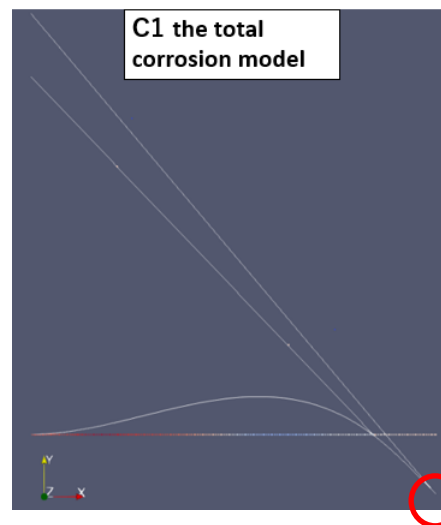


解析結果

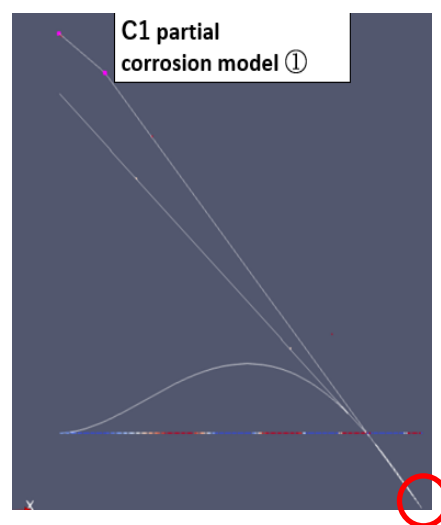
32

displacement at beam tip

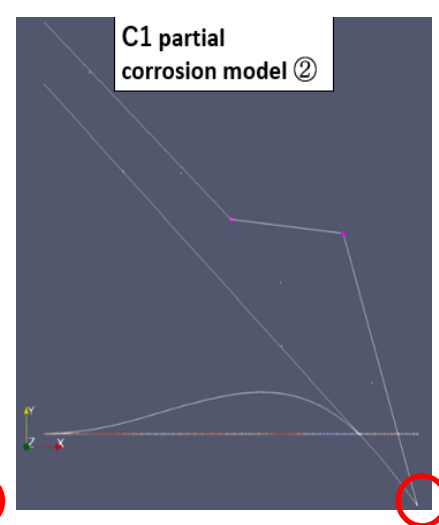
Final behavior models



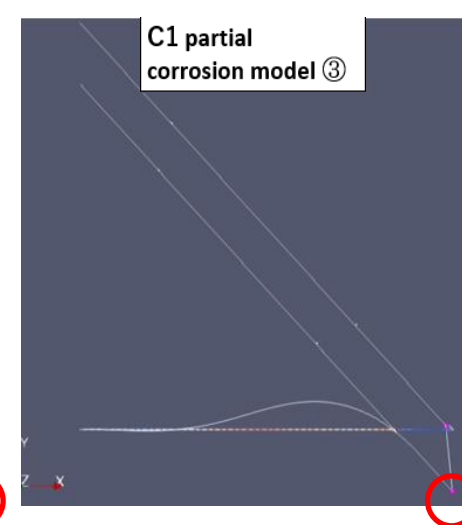
変位:-141.8mm



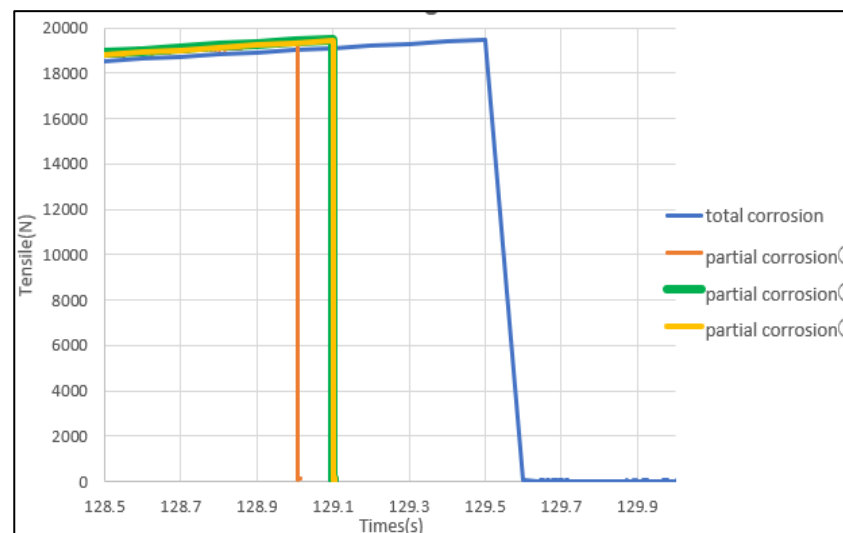
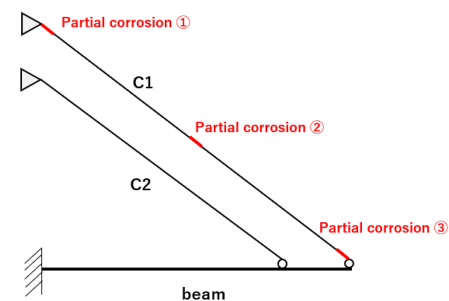
変位:-143.4mm



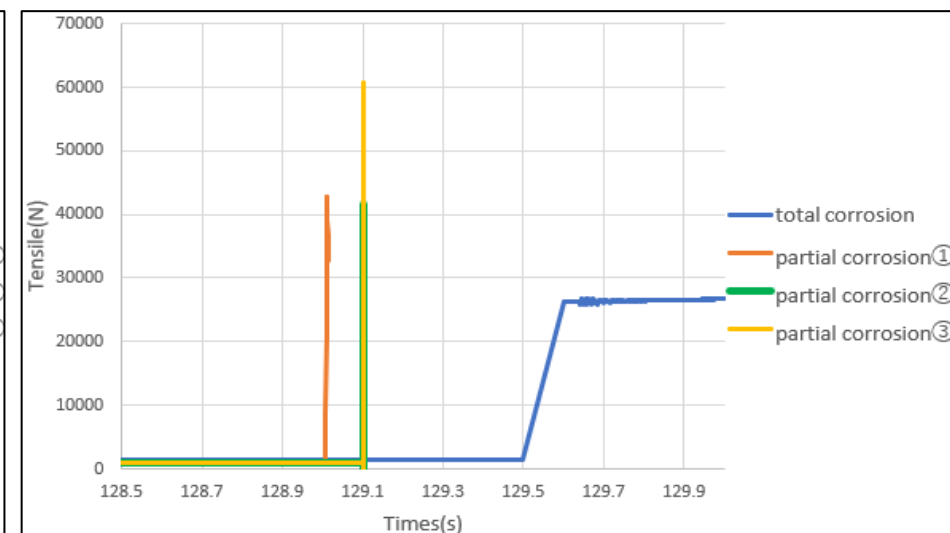
変位:-105.3mm



変位:-160.2mm



C1 corrosion tension

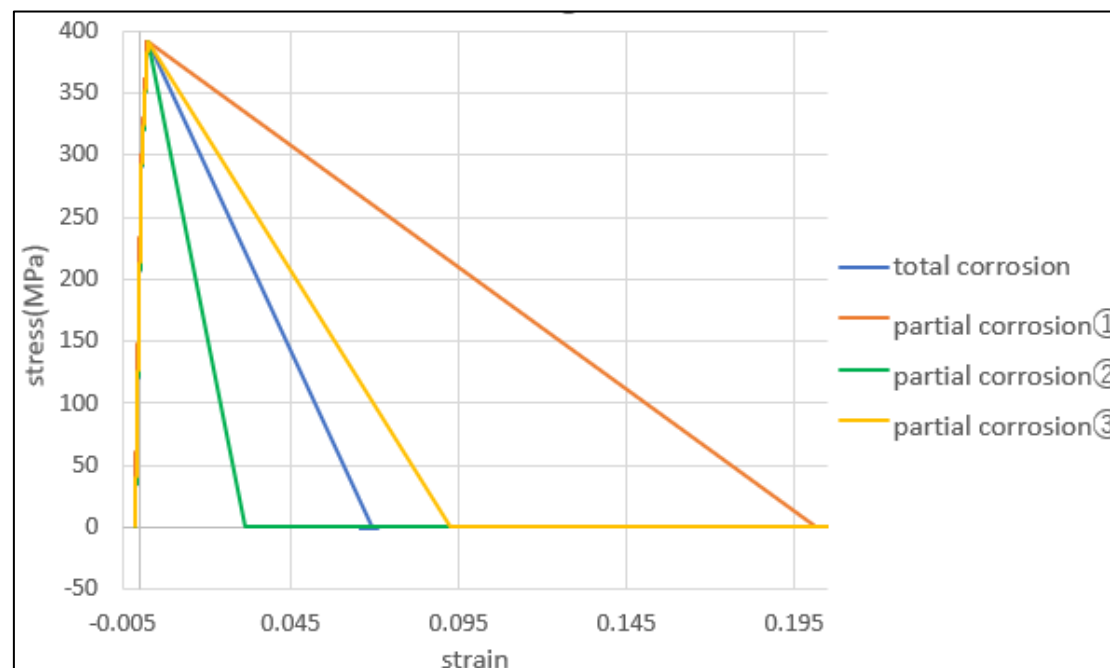


C2 tension

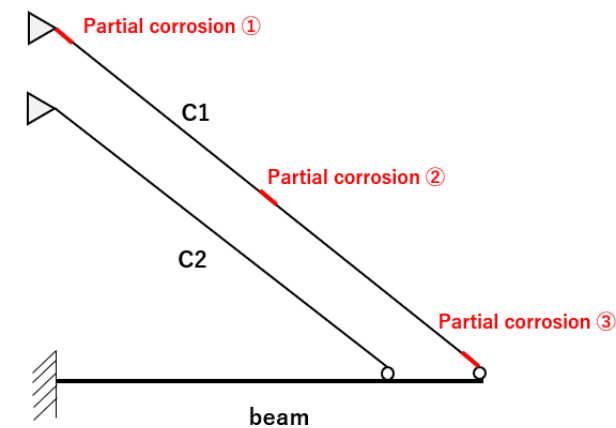
斜張橋を安全に
長く使うための
構造安全性に関する
研究

応力-ひずみ関係

34



C1 corrosion stress-strain



次に部分的に腐食したケーブル系橋梁の連鎖崩壊

35

何故、部分腐食なのか？

ケーブルの全体腐食は極端な例（現実的ではない。）

➡ 現実に近い状態で連鎖崩壊の解析を行うため、部分的に腐食を与えたモデルを検討。

先行研究 斜張橋のケーブルが腐食した場合

- ・「終局強度に与える影響」
（現在、取り組んでいる）
- ・「連鎖崩壊の挙動や動的応答の確認」



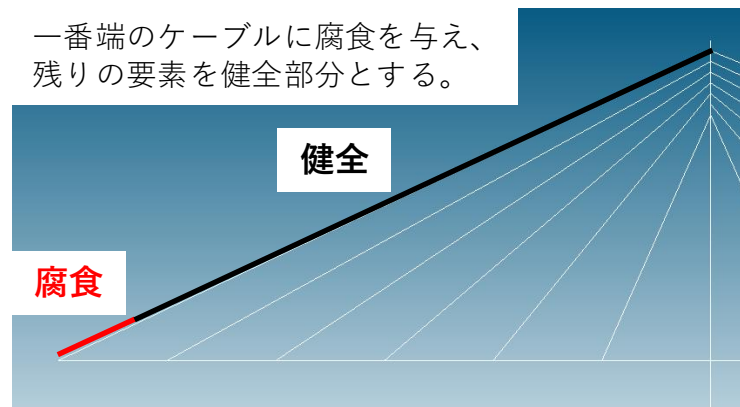
部分腐食モデルで解析を行い、既存研究と比較する！

部分腐食モデルの再現法(検討中)

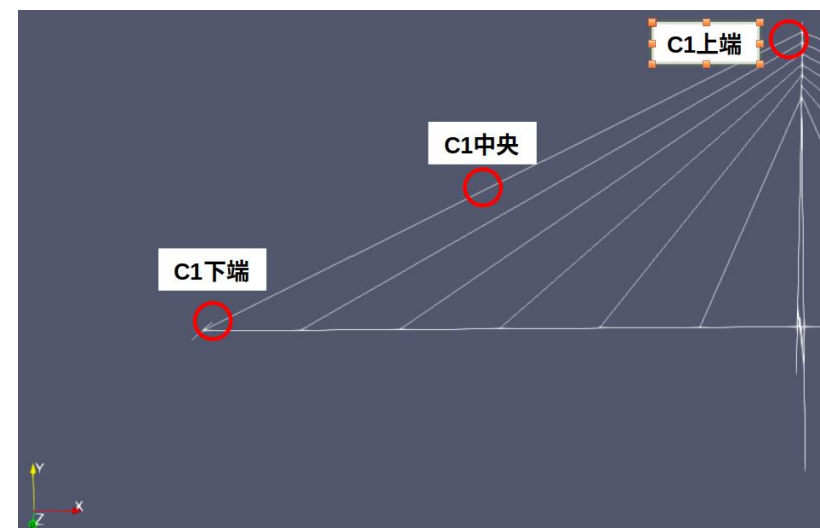
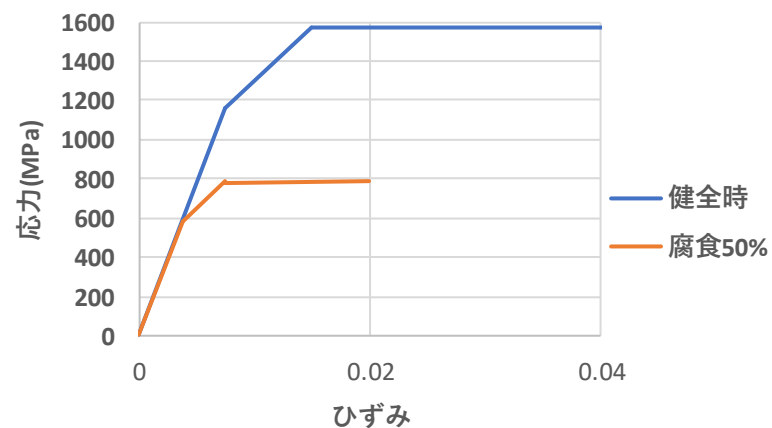
36

ケーブルを要素分割し、要素分割した一部分に腐食を与える。

一番端のケーブルに腐食を与え、
残りの要素を健全部分とする。



腐食ケーブル,健全ケーブル,
それぞれの応力ひずみ関係を入れる.(腐食率50%を想定.)



部分腐食はケーブル上端,下端,中央部に与えた,
それぞれ3パターンでの解析を行う。

斜張橋を安全に
長く使うための
構造安全性に関する
研究

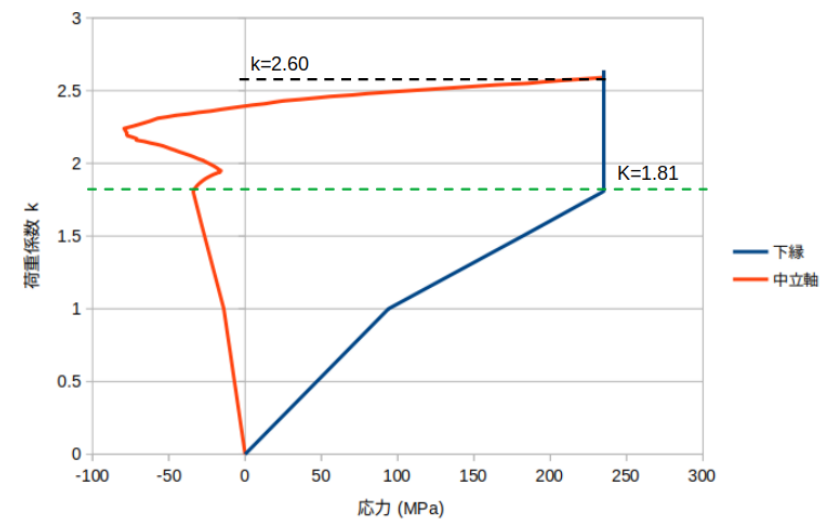
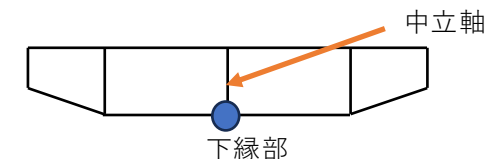
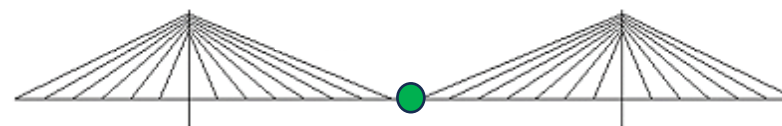
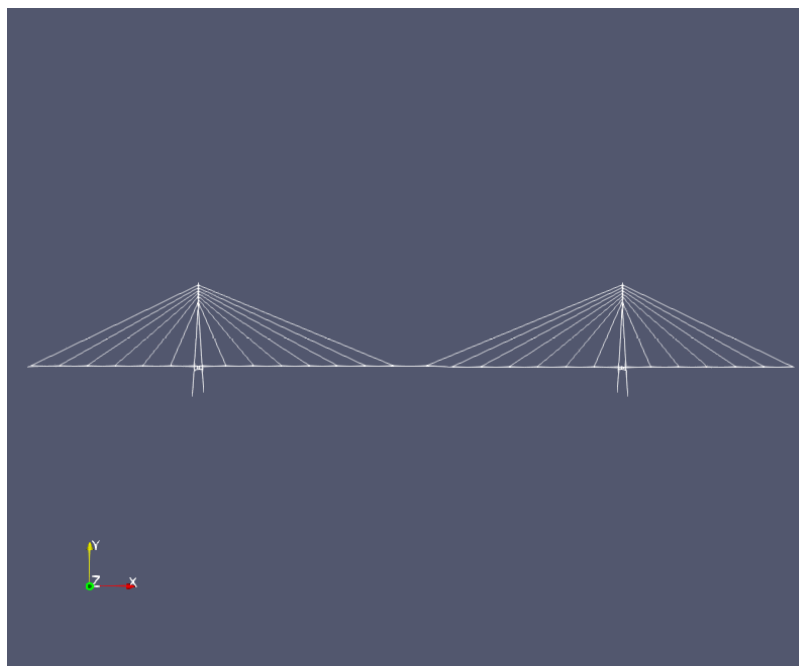
解析結果

37

健全状態の終局強度

主径間中央に着目

主桁断面



荷重係数 $k=1.81$ ：断面下縁部が降伏
荷重係数 $k=1.93$ ：断面上縁部が降伏
荷重係数 $k=2.60$ ：中立的軸付近が降伏

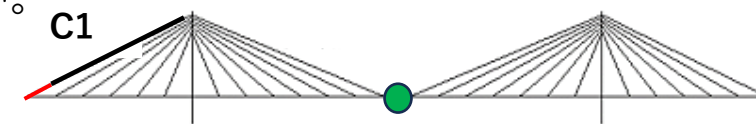
$k=2.60$ で塑性ヒンジが形成



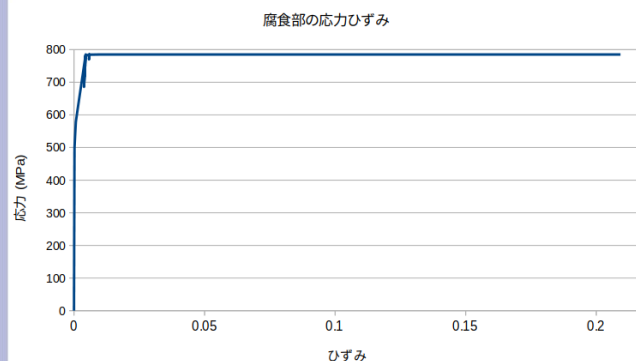
先行研究では、 $k=2.63$ で塑性ヒンジが形成

部分腐食の終局強度 → 現状、上手くいっていない。

C1下端部に腐食を与えた結果

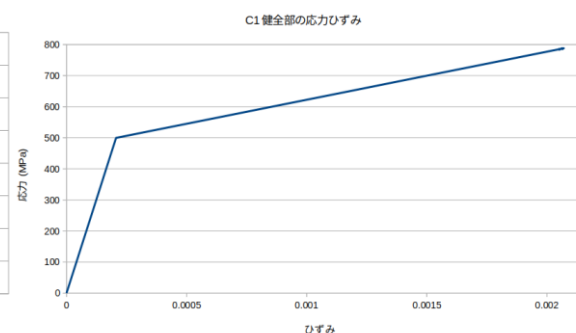


腐食部の応力ひずみ



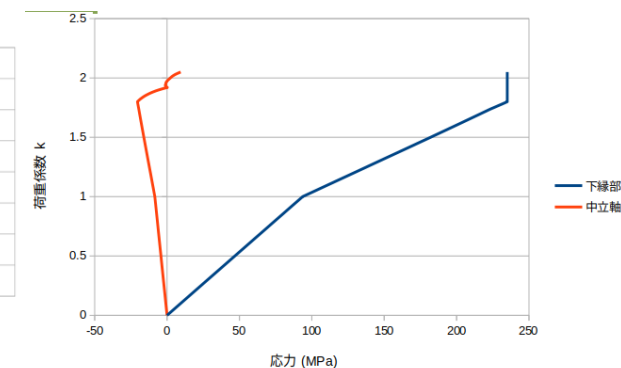
降伏応力に達した後、
ケーブルが伸びる挙動に。

健全部の応力ひずみ



腐食ケーブルが降伏に達した後、
健全ケーブルは応力-ひずみが
ほぼ変化しない状態に

桁の荷重係数と応力



k=1.8で主桁下縁部が
降伏応力に達する
→ 中立軸は降伏に達する前に
解析停止。

塑性ヒンジの形成が見られない。

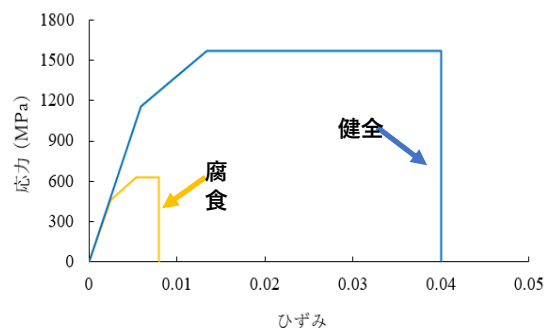
健全時より小さい荷重係数で解析終了
→ 構造物の崩壊が見られない。

斜張橋を安全に
長く使うための
構造安全性に関する
研究

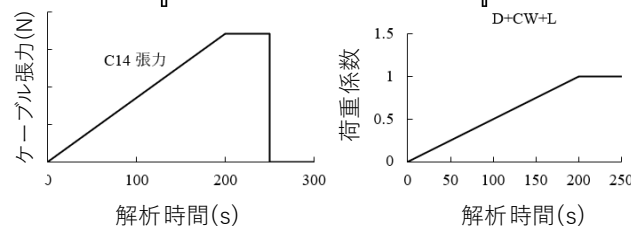
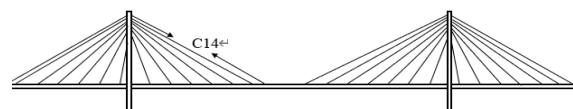
まとめ

39

連鎖崩壊解析の再現



応力ひずみ減少による,
ケーブル腐食のモデル再現



時刻歴応答解析による解析手法

ケーブルが切れる場所によって連鎖崩壊挙動が異なることを確認

破断ケーブル (最初)	連鎖崩壊の有無	塑性ヒンジの位置
C1	○	
C2	○	
C3	○	
C4	○	
C5	○	
C6	○	
C7	×	-
C8	×	-
C9	×	-
C10	○	
C11	○	
C12	○	
C13	○	
C14	○	

- ・ ケーブルに全体腐食を与えた場合での結果.
→ 部分的な腐食の場合はどうなる？
- ・ 部分腐食のモデル再現の検討,解析を行う.
→ 結果を比較！

さらに・・・

- ・ アーチ橋の解析では、
崩壊挙動を再現できていたように見えたが・・・

アーチ橋の崩壊には面外方向の座屈が
関係しているはず！？

斜張橋を安全に
長く使うための
構造安全性に関する
研究

初期不整による面外座屈を考慮したアーチ橋の 連鎖崩壊解析の手法の検討

41

背景・目的

再現する橋梁



崩壊



南方澳大橋, 台湾, 2019年10月

タンクローリーが
橋を通過

腐食していた
ケーブルが1本破断

他のケーブルが
次々と破断

アーチリブが崩壊

落橋

連鎖崩壊の典型的な事例

先行研究では腐食を考慮した
アーチ橋の連鎖崩壊解析を
行った

しかし、連鎖崩壊が起こる前に
面外座屈が起こるのではないかと

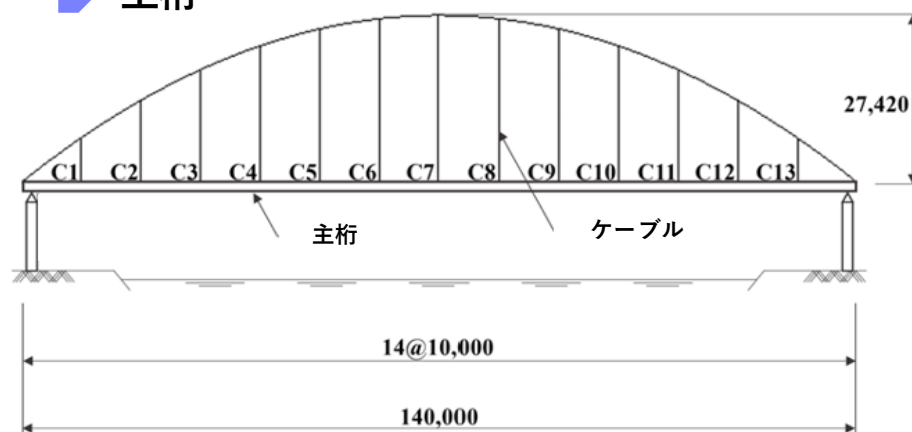
面外座屈を考慮した連鎖崩壊
解析の検討を行う

また、実際の落橋事故との比較を
して、解析の有用性の検討する

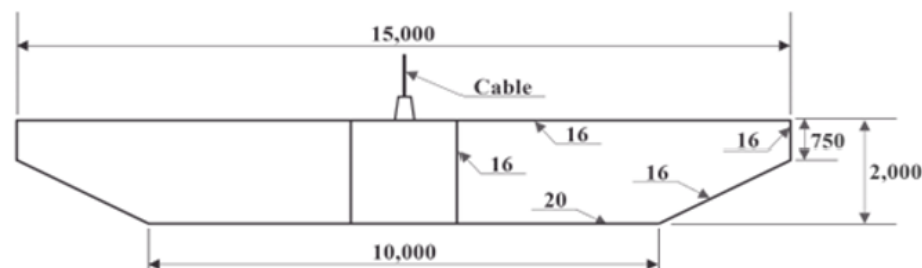
検討モデル

42

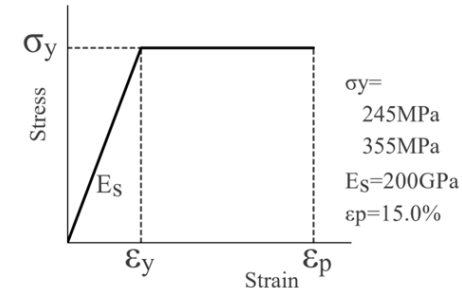
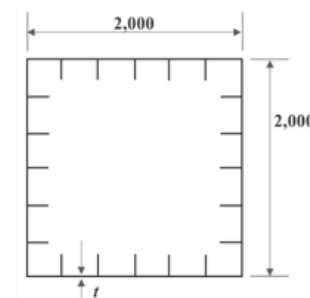
主桁



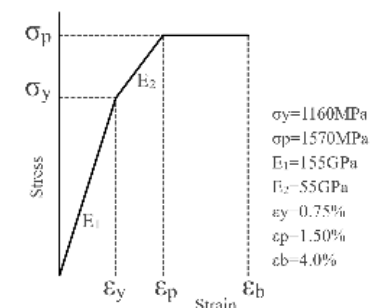
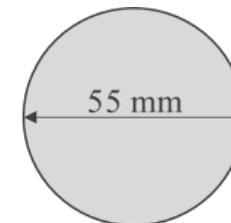
主桁断面



アーチ断面



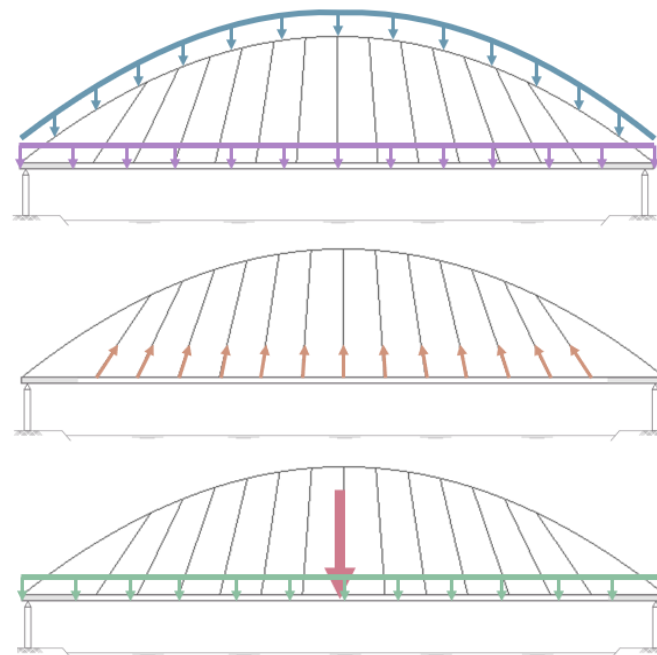
ケーブル断面



	断面形式	材質	構成則
主桁	鋼製箱断面	SM400	Bilinear
アーチリブ	鋼製正方形箱断面	SM490Y	
ケーブル	平行線ストランド	ST1570	Trilinear

設計荷重

43



死荷重 (D)

主桁：鋼桁重量 (61.3 kN/m), 地覆 (24.5 kN/m),
アスファルト舗装 (11.0 kN/m), RC床版 (4.9 kN/m)
合計101.7kN/mを主桁に等分布载荷

アーチリブ：アーチリブに鋼重 (14.3 kN/m)
を等分布载荷

ケーブルプレストレス (Pr)

ケーブルプレストレス：全ケーブルに $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$
→ 鋼材の線膨張で張力を与え、
アーチと主桁の均衡をとる

道路橋示方書のB活荷重 (L)

p1：10kN/mを主桁に载荷
p2：23.1 kN/m²を主桁に载荷

モデル橋の照査

- 道路橋示方書を準用
- 照査値： $r < 1$ を確認

モデル橋が設計基準を
満たしていることを確認

	N (MN)	M (MN.m)	σ_n (MPa)	σ_b (MPa)	γ
主桁中央 下縁	13.9	25.4	26.3	48.9	0.54
アーチリブ分岐部 上縁	-10.8	-11.8	-75.0	-126.0	0.93
ケーブル C2	1629.1		685.7		0.99
ケーブル C7	1073.7		451.9		0.72

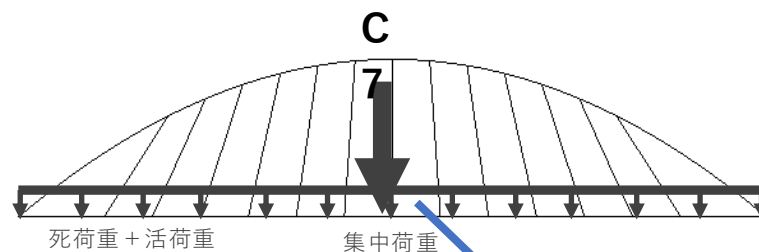
注)N:軸力, M:曲げモーメント, σ_n :軸応力, σ_b :曲げ応力, γ :照査値

連鎖崩壊解析手法

44

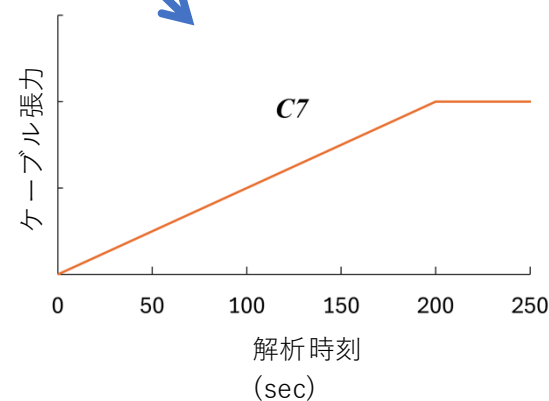
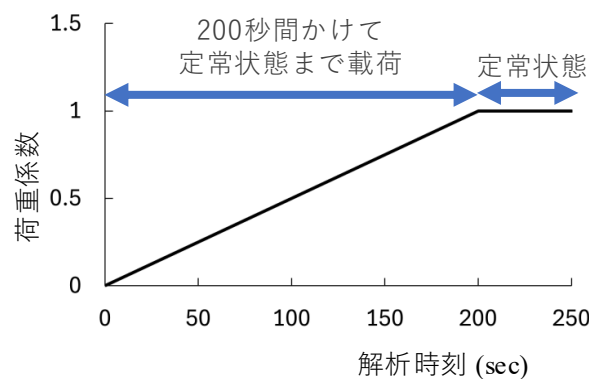
STEP1

ケーブルの破断がない健全モデル

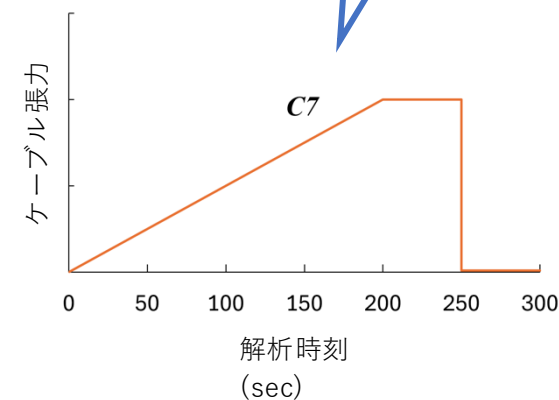


- ・直接積分法: ニューマーク β 法
 $\beta = 0.25$ $\gamma = 0.5$
- ・時間間隔: 0.01秒
- ・減衰定数: 0.5%
- ・非線形解析: Newton-Raphson法
- ・材料非線形を考慮

破断させたいケーブルのケーブル
張力の時刻歴応答値を抽出



解析時間250秒で瞬間的に
ケーブル張力が **0** になるように設定

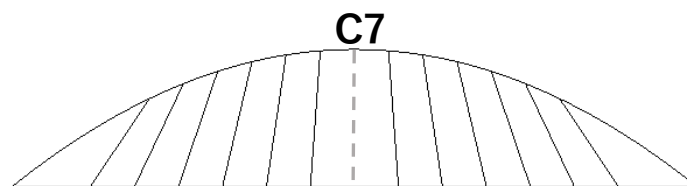


連鎖崩壊解析手法

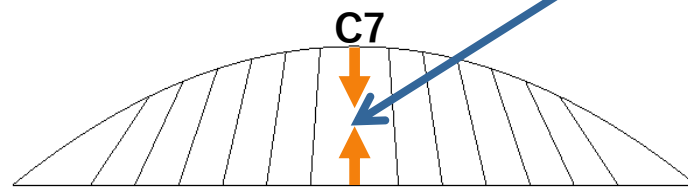
45

STEP2

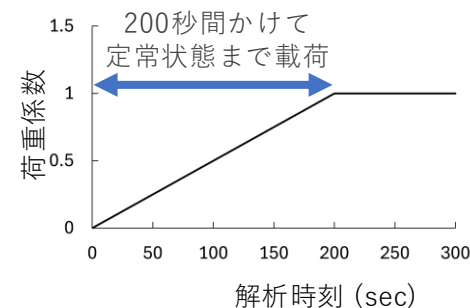
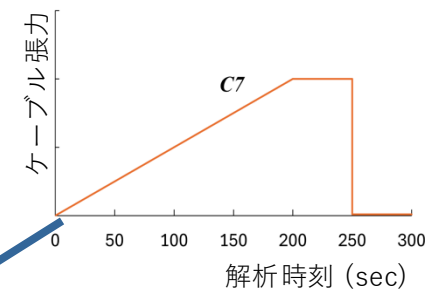
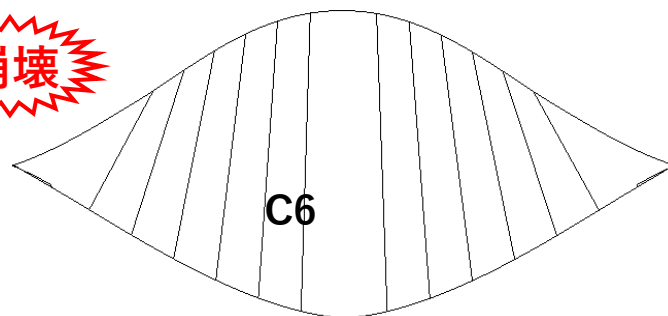
ケーブル要素を取り除いたモデル



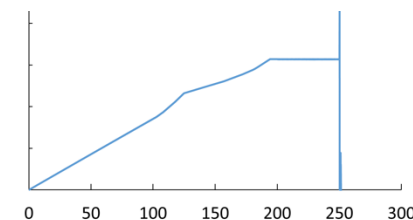
解析時間250秒で瞬間的に0になるように
設定したケーブル張力



崩壊



崩壊時のその他のケーブル張力



引っ張り力として
作用させる

破断による衝撃力を再現

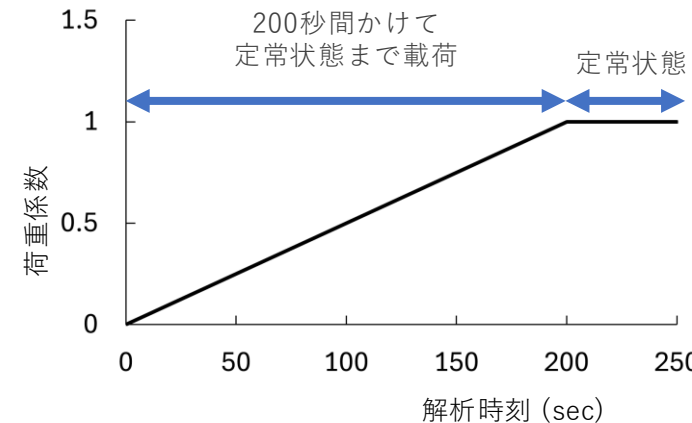
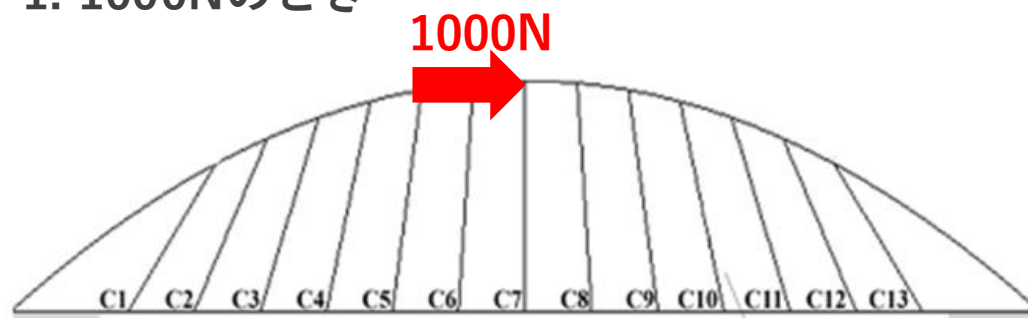
再び、荷重係数が
1になるまで载荷する

破断ひずみに達した時点で張力
を失うように設定

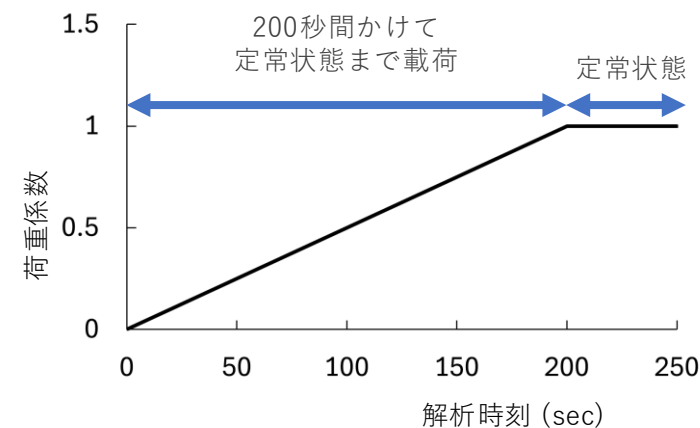
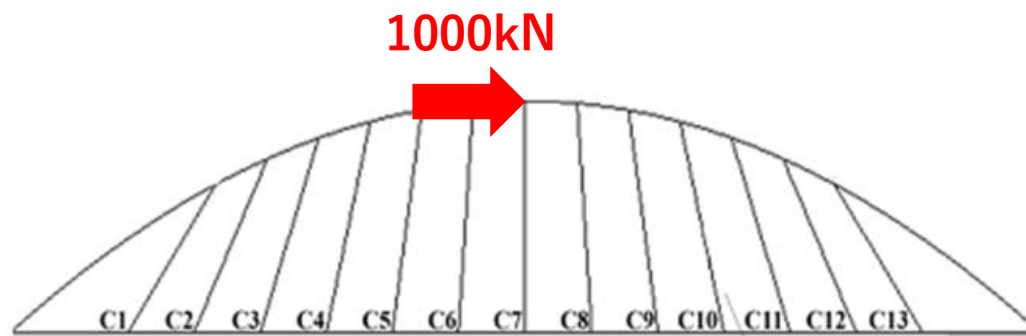
1本目の破断から順次破断する
連鎖崩壊を再現

面外座屈の考慮

1. 1000Nのとき



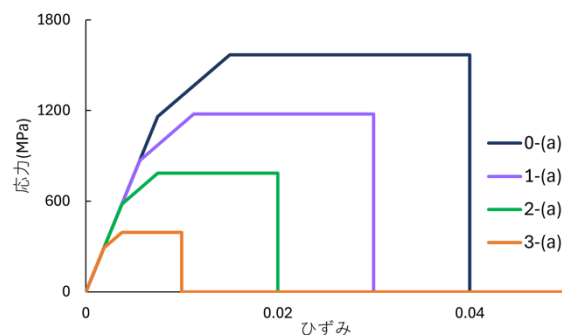
2. 1000kNのとき



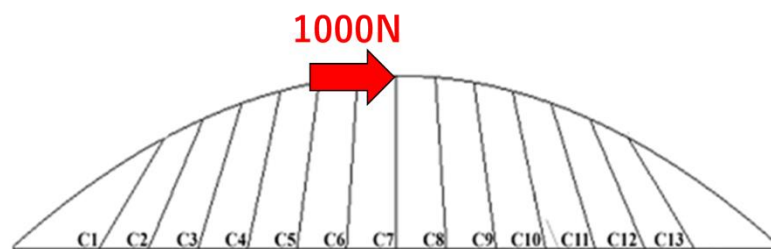
検討パラメーター

47

1. 腐食レベル



2. 面外座屈

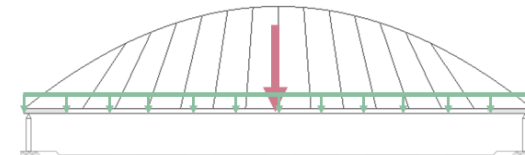


3. 荷重パターンの追加

今回



渋滞とタンクローリー(C7)



今後



渋滞とタンクローリー(C11)



タンクローリー(C7)

C11: 南方澳大橋の事故で
最初に破断したケーブル

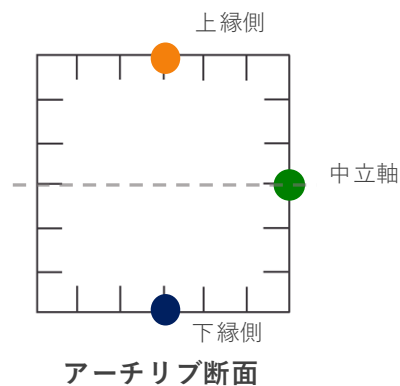


荷重パターンの
追加が必要

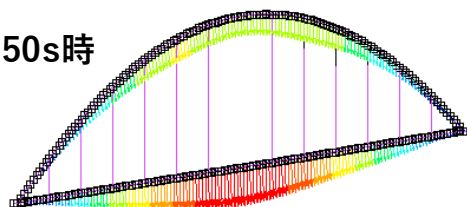
数値解析結果

48

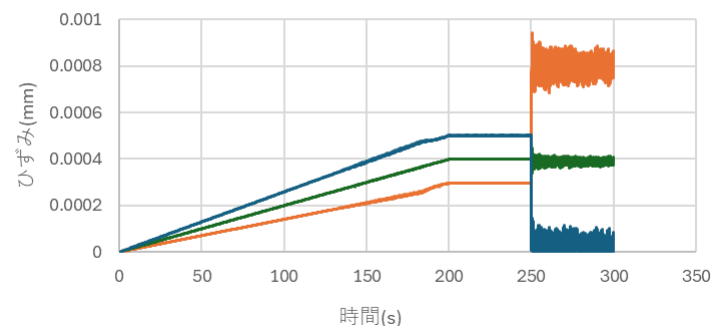
面外方向 なし(50%腐食)



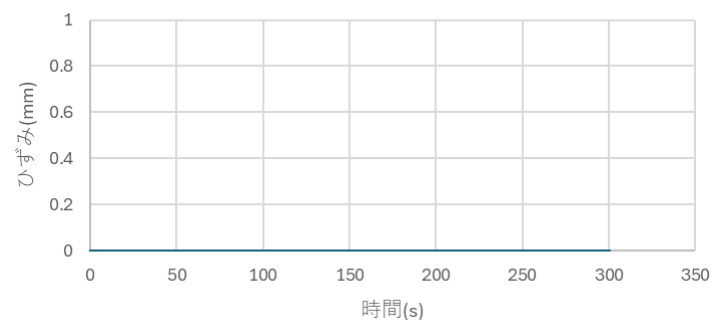
250s時



面外無し弾性域



面外無し塑性域

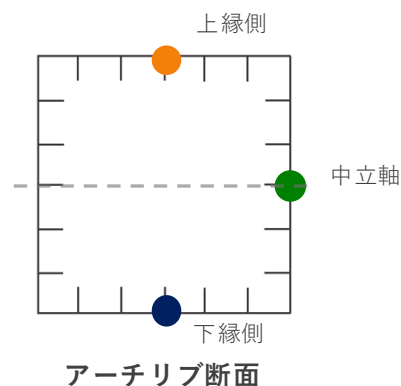


崩壊挙動は
見られなかった

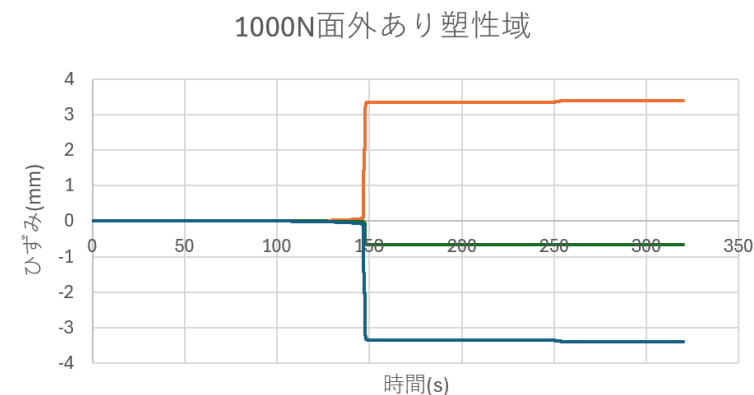
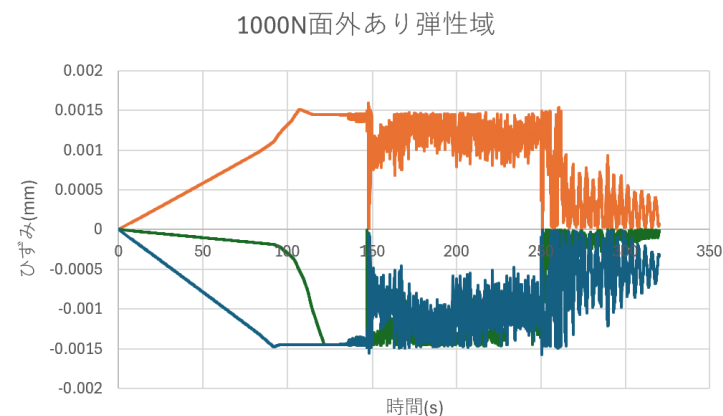
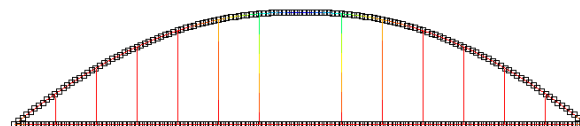
数値解析結果

49

面外方向1000Nのとき(50%腐食)



148s

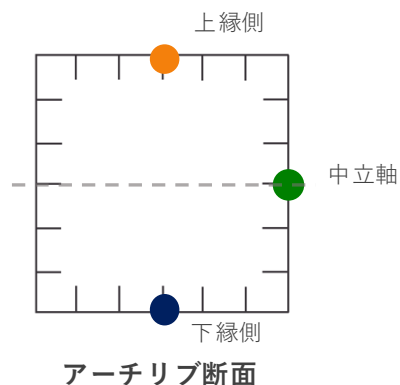


150s前に崩壊挙動を示したことがわかる

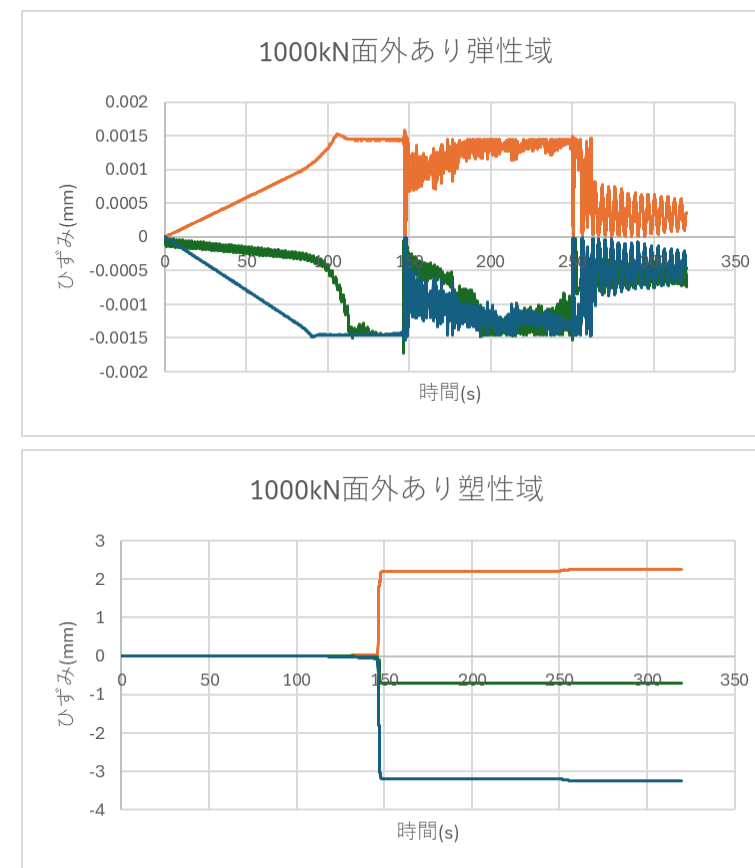
数値解析結果

50

面外方向1000kNのとき (50%腐食)



同様に150s前に崩壊挙動を示したことがわかる

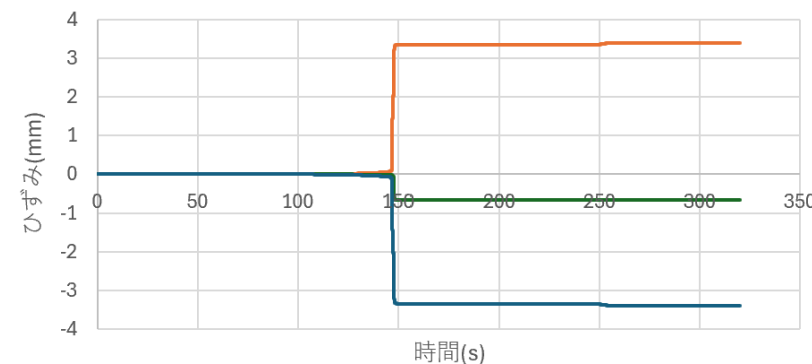


まとめ

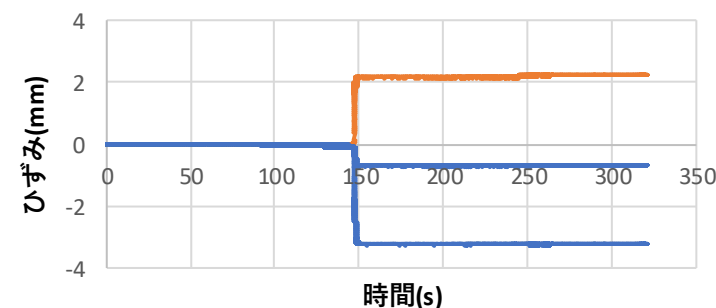
51

- ・ 面外方向の力の影響により崩壊の可能性は大きくなる
- ・ 面外あり50%腐食の際に150秒のときに崩壊挙動を示した
→ 要検証
- ・ 1000Nのときと1000kNのときで大きさは違えど同じような挙動での崩壊挙動を示した

1000N面外あり塑性域



1000kN面外あり塑性域

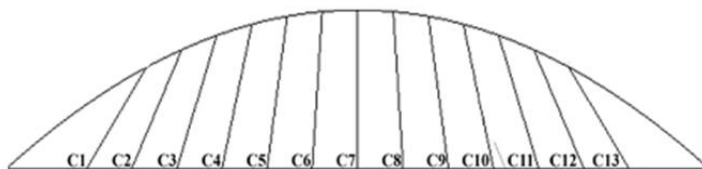


斜張橋を安全に
長く使うための
構造安全性に関する
研究

今後の課題

52

検討モデルの追加

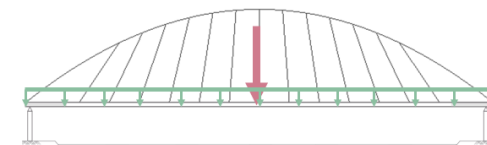


荷重パターンの追加

今回



渋滞とタンクローリー (C7)



今後



渋滞とタンクローリー (C11)



タンクローリー (C7)

今後も橋の安全を守るため、
色々な研究を行なっていききたいと
思います。

ご清聴
ありがとうございました。

斜張橋を安全に長く使うための構造安全性に関する研究
秋田大学大学院理工学研究科 青木 由香利 先生