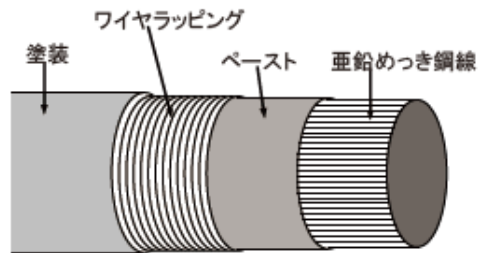


ケーブル腐食を考慮した斜張橋における 静的・動的連鎖崩壊解析

環境構造工学分野
8021807 角田晴輝

ー背景・目的ー

吊り形式橋梁における橋梁ケーブル



- 多数の亜鉛めっき鋼線
- 主要部材としての役割
- 防錆・防食処理

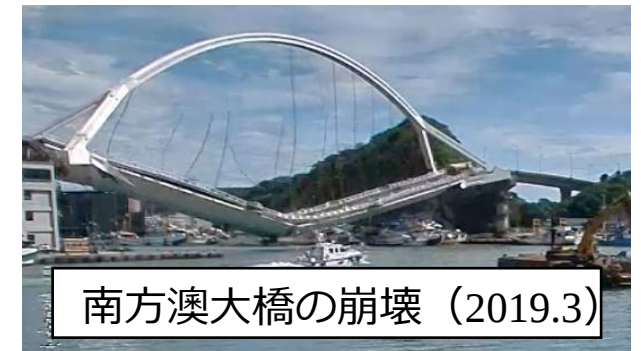
橋梁ケーブルの腐食



- ・ 引張強度
 - ・ 伸び
 - ・ 疲労強度
- ・ ケーブル腐食に関する研究が少ない

ケーブル腐食による破断・崩壊事例

- ・ 台湾の南方澳大橋 (2019.3)
- ・ 原田橋 (2012.4)
- ・ 秋田県 雪沢大橋 (2011.6)



南方澳大橋の崩壊 (2019.3)

※国交省：引張材を有する道路橋の損傷例 (2006) より抜粋

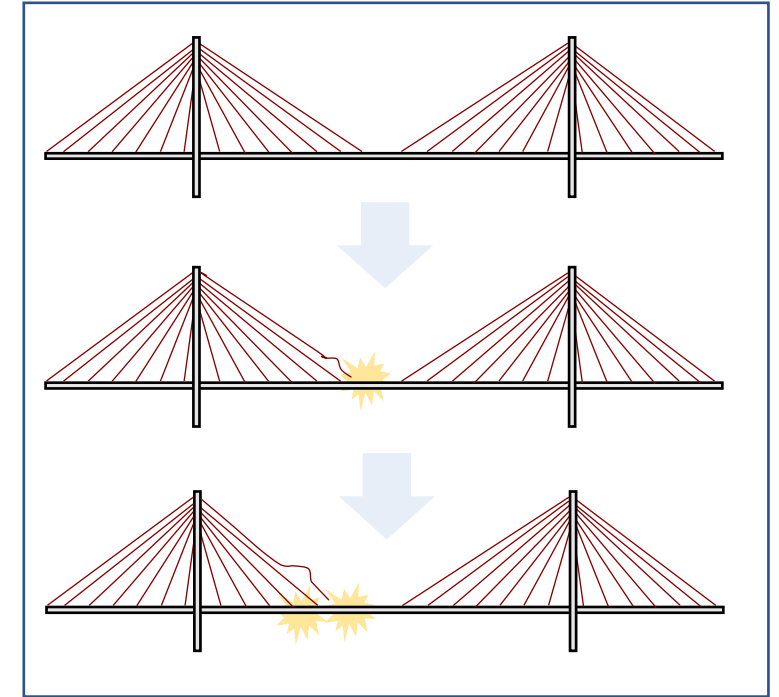
背景と目的

連鎖崩壊挙動

1 本目のケーブル
破断（健全, 腐食） → 他のケーブルが
連鎖的に破断 → 橋全体が
崩壊

ケーブルの腐食・破断に対する予防的維持管理

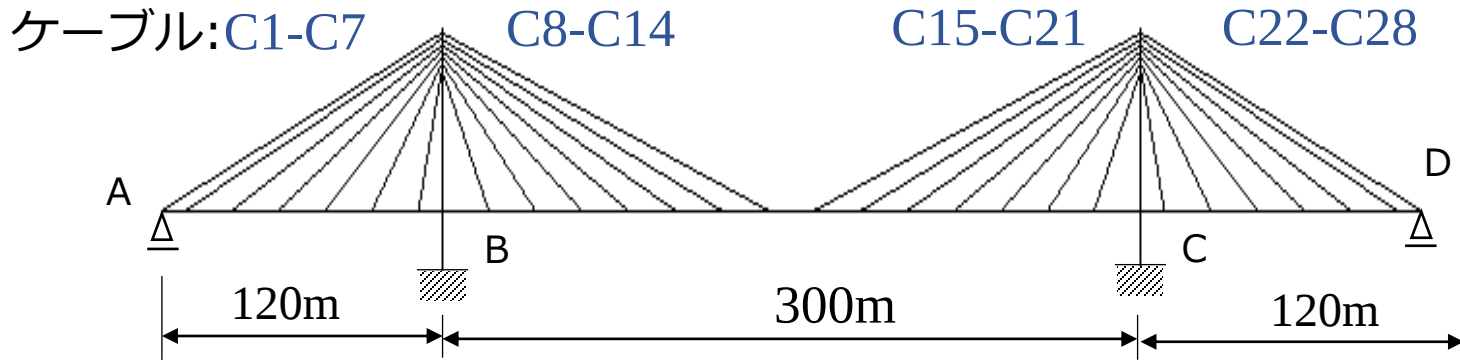
- ・長大橋：崩壊した際のリスク大
- ・安全性の評価，崩壊の対策
- ・吊り形式橋梁の長寿命化



- ◆ 特定のケーブルが破断した際の**連鎖崩壊挙動**の再現
- ◆ **腐食を考慮した**斜張橋においてケーブルが破断した場合の**連鎖崩壊形態**や**動的応答**を明らかにする

斜張橋モデル

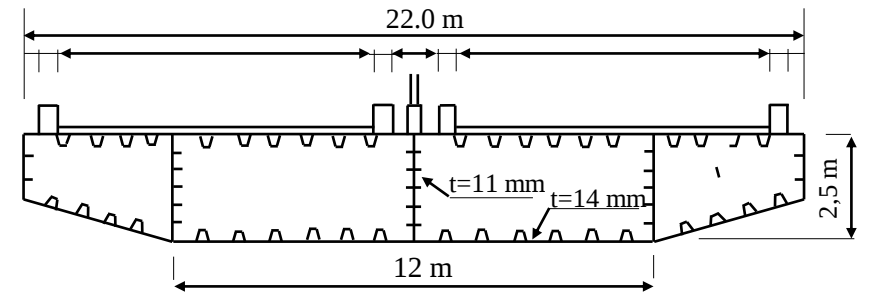
■ 構造諸元



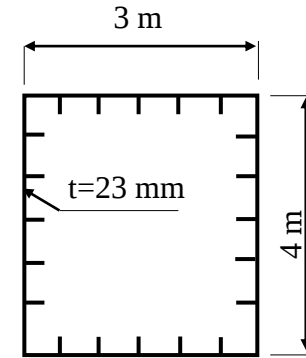
斜張橋一般図

橋梁形式	1面吊り3径間連続鋼斜張橋	橋長	540m
主桁	鋼製箱桁断面	材質	SM400
主塔	鋼製箱桁断面		SM490
ケーブル	PWS（平行線ケーブル）		ST1570

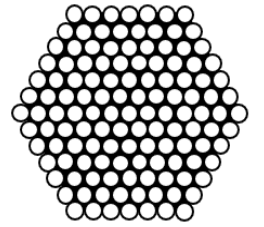
部材断面



主桁断面

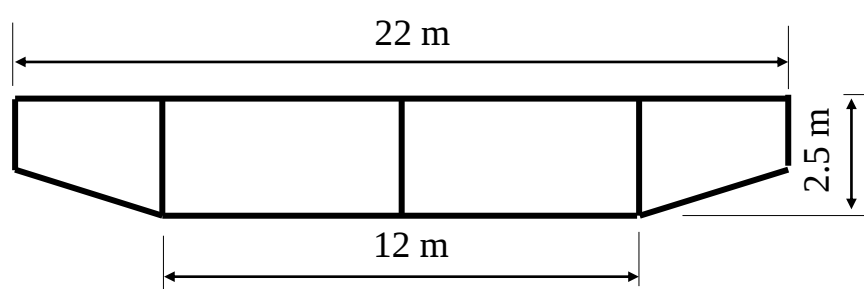
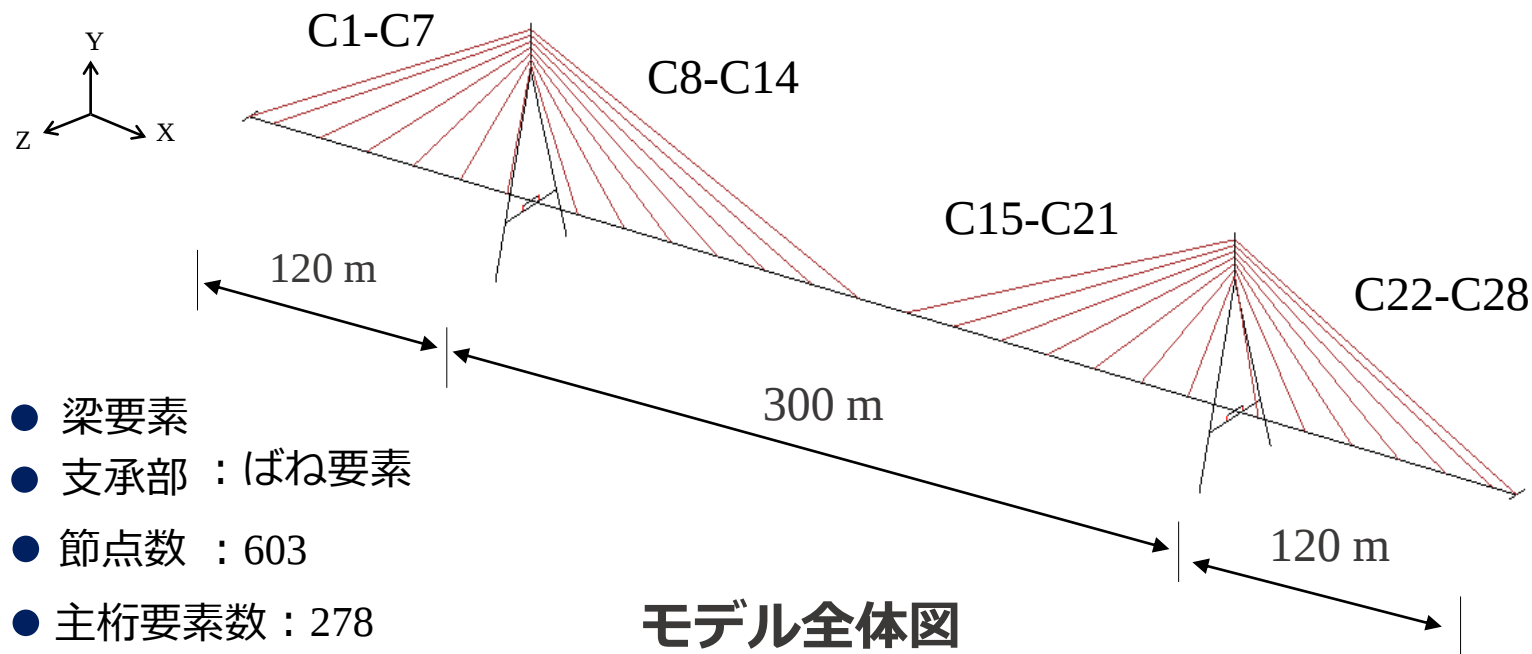


主塔断面

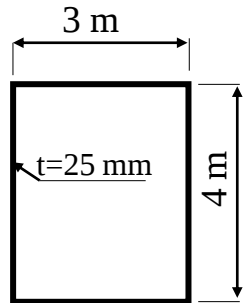


ケーブル断面 (PWS)

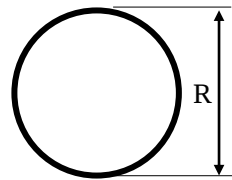
数値解析モデル



(a) 主桁

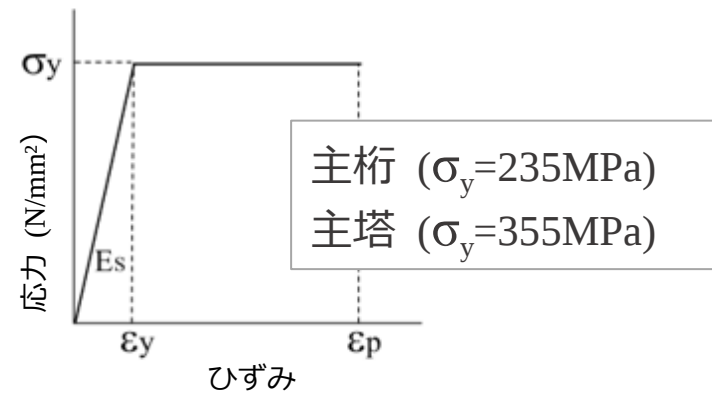


(b) 主塔

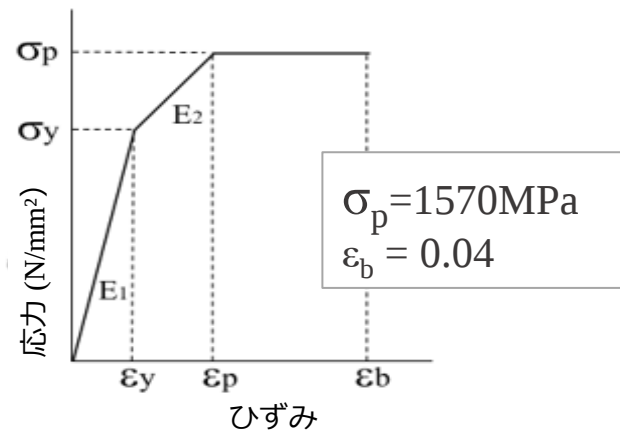


(c) ケーブル

応力ひずみ関係

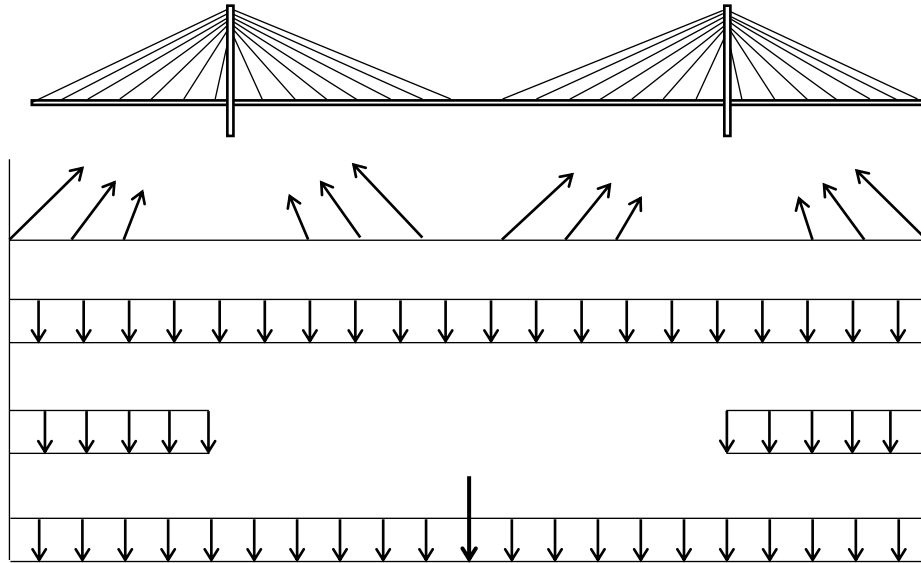


(a) 鋼材



(b) ケーブル

常時設計荷重による断面照査



全ケーブル -100°C

ケーブル
プレストレス (Pr)

鋼桁・主塔重量 (69.7 kN/m)

地覆・高欄 (24.5 kN/m)

死荷重 (D)

側径間に30 kN/m 等分布載荷

カウンターウェイト
(CW)

道路橋示方書のB活荷重

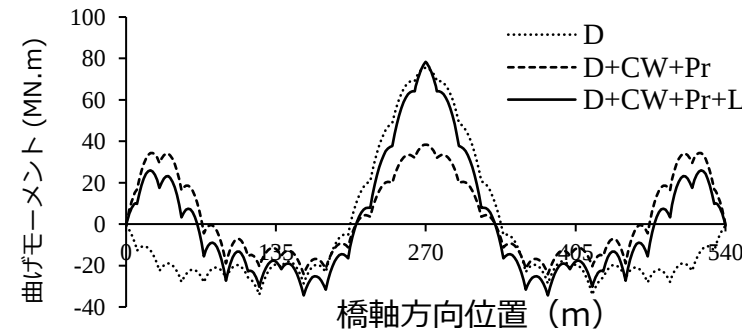
活荷重 (L)

587.5 kN の集中荷重, 17.625 kN/m 等分布荷重

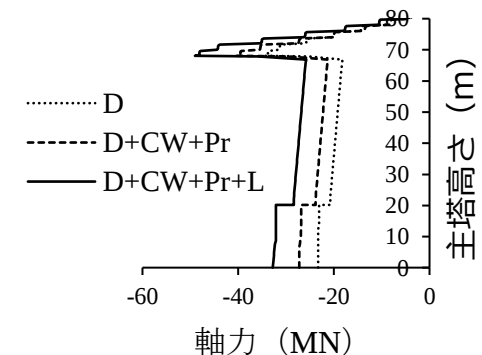
モデル橋の照査

- 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



主桁曲げモーメント分布図



主塔軸力分布図

動的解析手法

時刻歴応答解析

1本ケーブルを意図的に破断



他のケーブルに荷重が分配

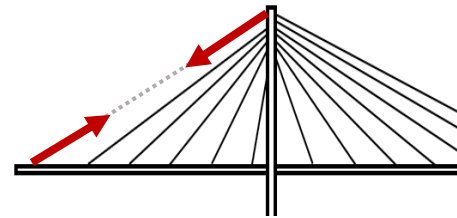


連鎖的に破断し全体崩壊する
動的挙動を再現

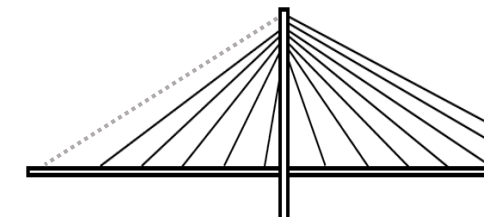
- ◆ 直接積分法：
ニューマークβ法 $\beta = 1/4$
- ◆ 時間刻み： $\Delta t = 0.01\text{sec}$
- ◆ 非線形解析：Newton-Raphson法
- ◆ $h = 0.0032$ (Rayleigh減衰)
- ◆ 材料非線形および幾何学非線形を考慮

ケーブル破断挙動の再現方法

ケーブル破断時に生じる
衝撃荷重を考慮



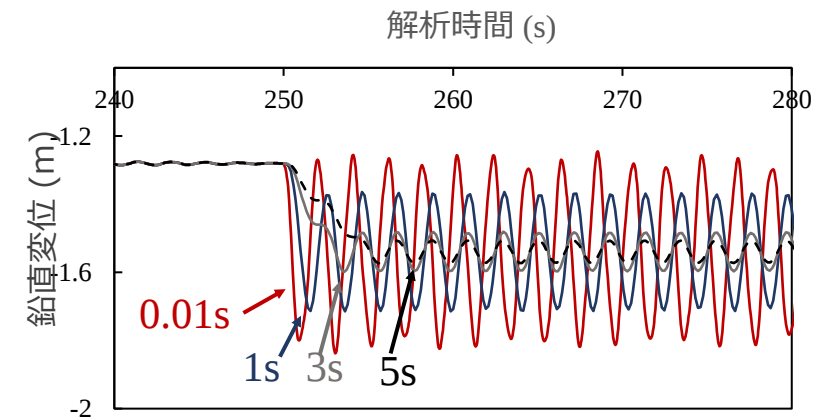
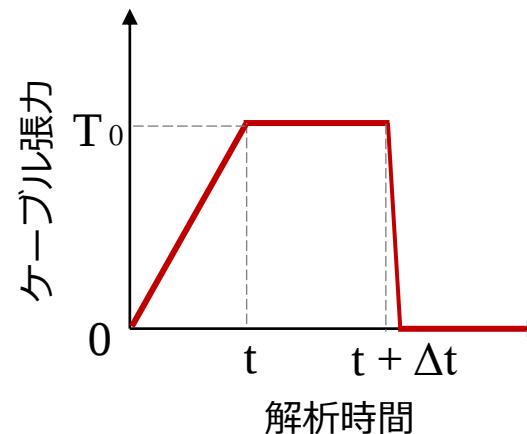
STEP 1



STEP2

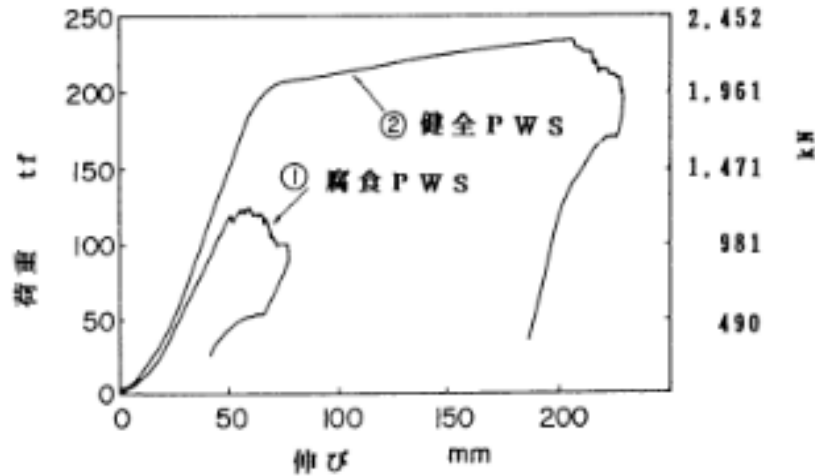
STEP 1： 初期ケーブル張力を載荷

STEP 2： 載荷した張力を Δt 秒でゼロとする



ケーブル腐食のモデル化

先行研究



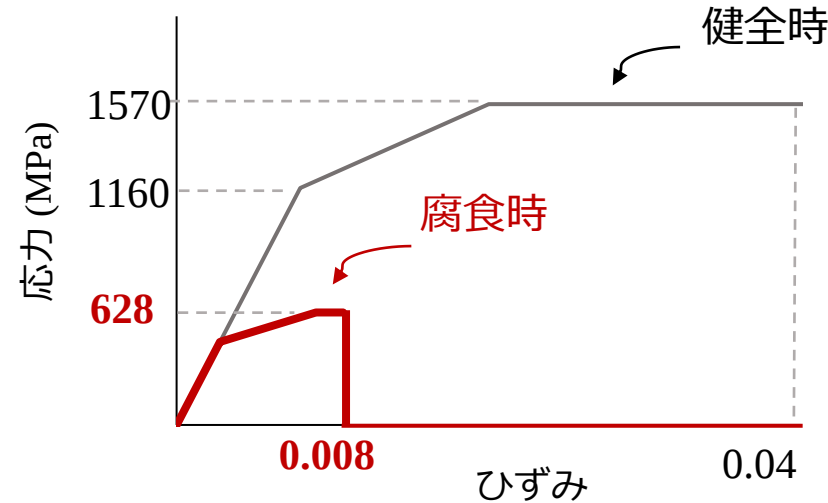
PWSの引張試験結果（三田村ら）

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

ケーブル腐食・破断の再現



ケーブルの応力ひずみ関係

- ① 健全時 $\sigma_y = 1570\text{MPa}$
 $\epsilon_b = 0.04$
- ② 腐食時 $\sigma_y = 628\text{MPa}$
 $\epsilon_b = 0.008$

- ・破断ひずみに到達後、
応力をゼロにする
- ・すべてのケーブルに
適用



連鎖的な破断挙動を再現

解析手順

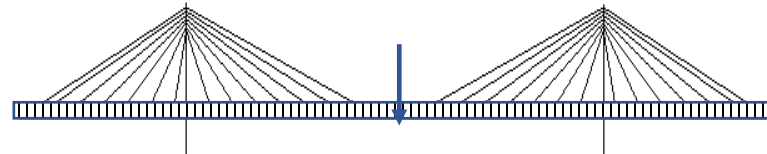
Pr : ケーブルプレストレス
D : 死荷重
CW : カウンターウェイト
L : 活荷重

初期モデルの解析 (ケーブル破断前)

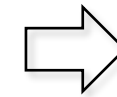
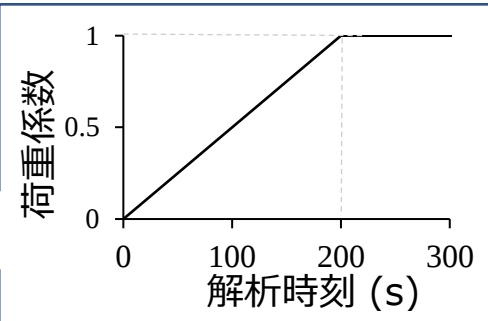
Step 1

設計荷重

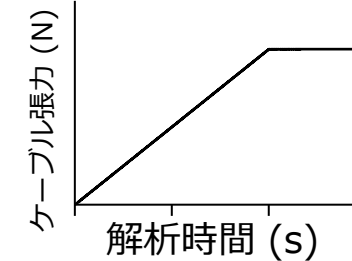
$$P = Pr + D + CW + L$$



初期モデル



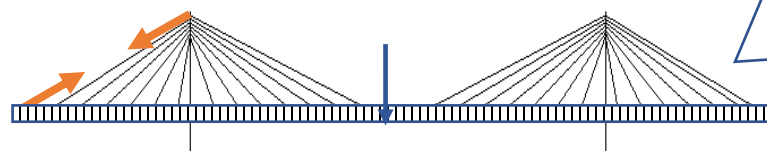
得られる結果



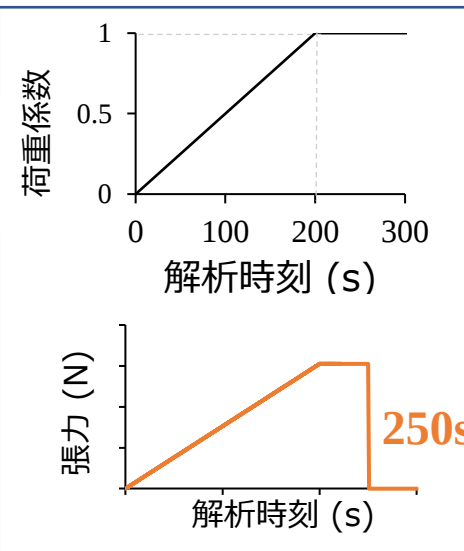
連鎖崩壊解析

Step 2

ケーブル張力 (N)

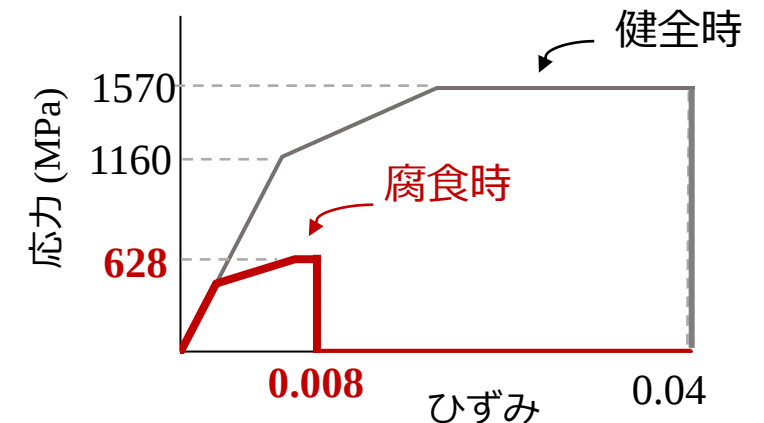


ケーブル破断モデル



+

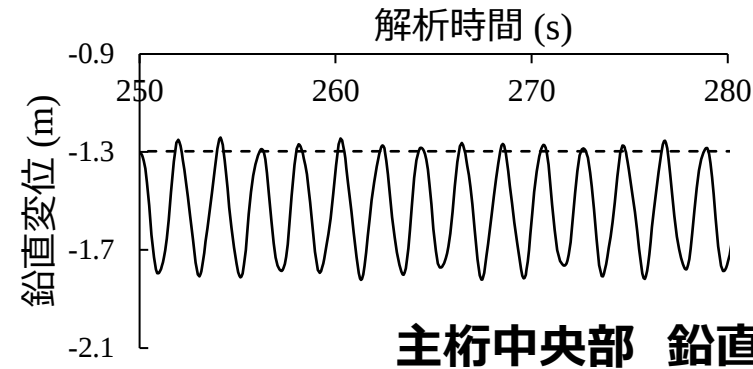
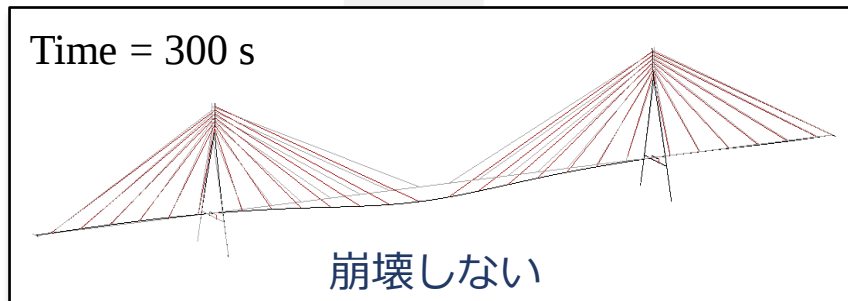
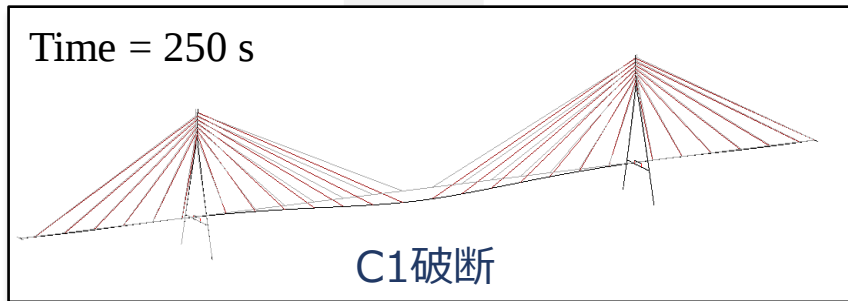
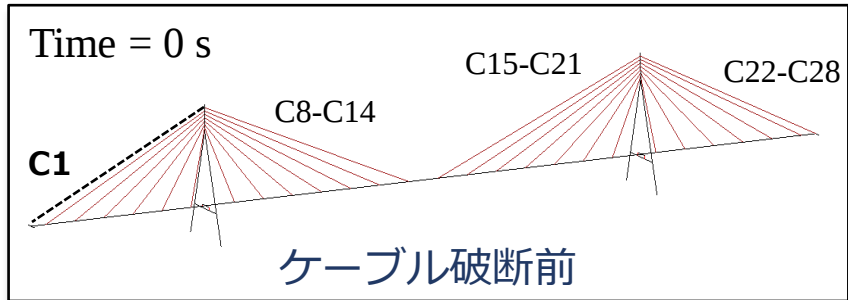
ケーブルの応力ひずみ関係



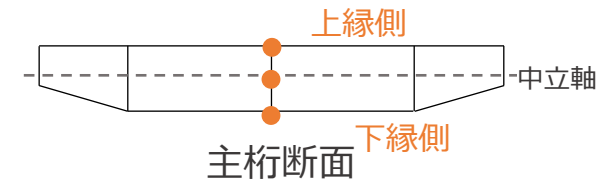
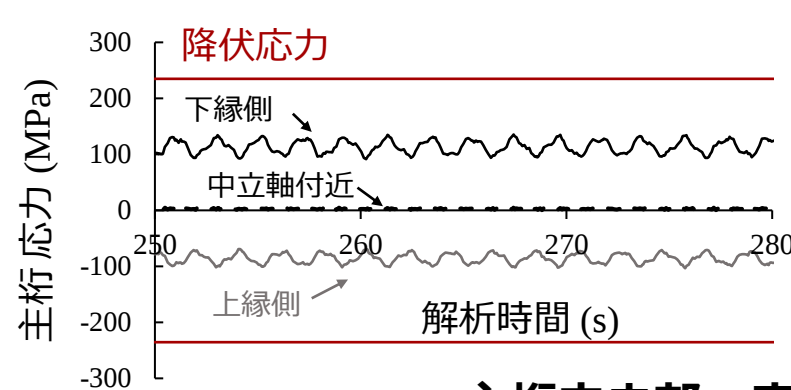
ケーブル健全時の動的応答

① 健全時 : $\sigma_p = 1570\text{MPa}$
 $\varepsilon_b = 0.04$

C1 (アンカーケーブル) 破断時



- 250s でC1 が破断
- 変位は発散せず一定の周期



- 引張・圧縮側ともに降伏応力には到達しない

一般的に斜張橋は不静定次数が高く、冗長性に優れる
→ **全体崩壊を惹き起こすことにはならない**

2本同時に破断させても、全体崩壊には至らない

ケーブル腐食時の動的応答

② 腐食時 : $\sigma_p = 628\text{MPa}$
 $\varepsilon_b = 0.008$

0 s
 (C1破断前)

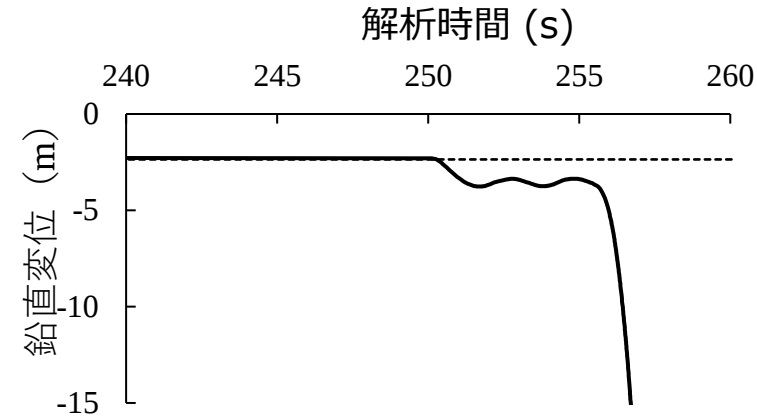
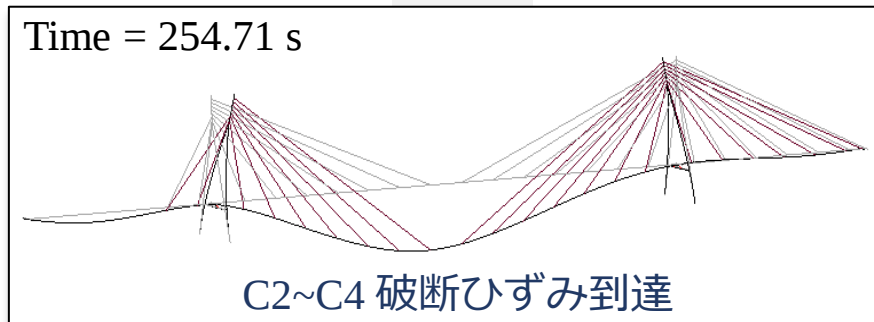
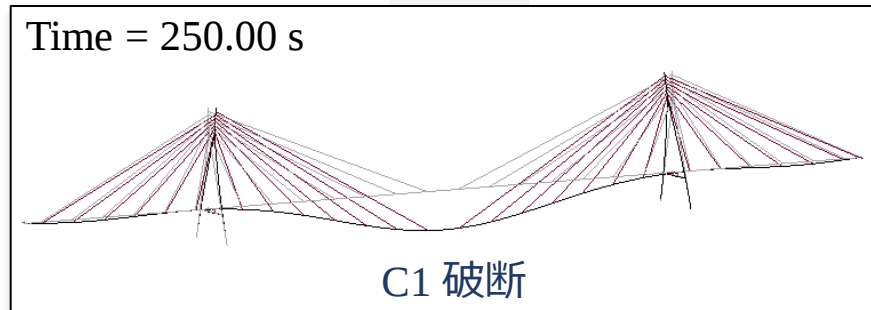
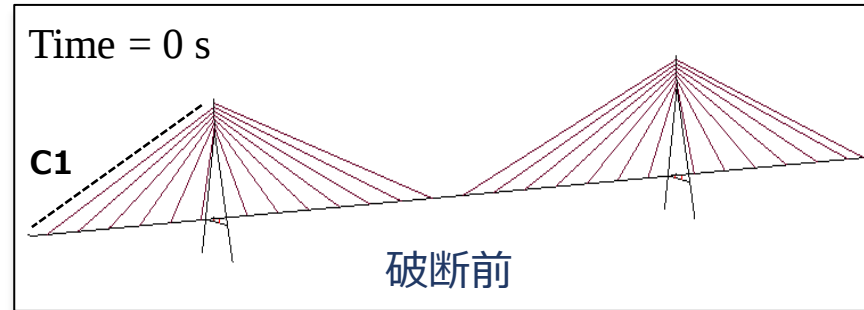
250.s
 (C1破断)

252.75s
 (C2~C5 :
 第2降伏)

C3,C4破断

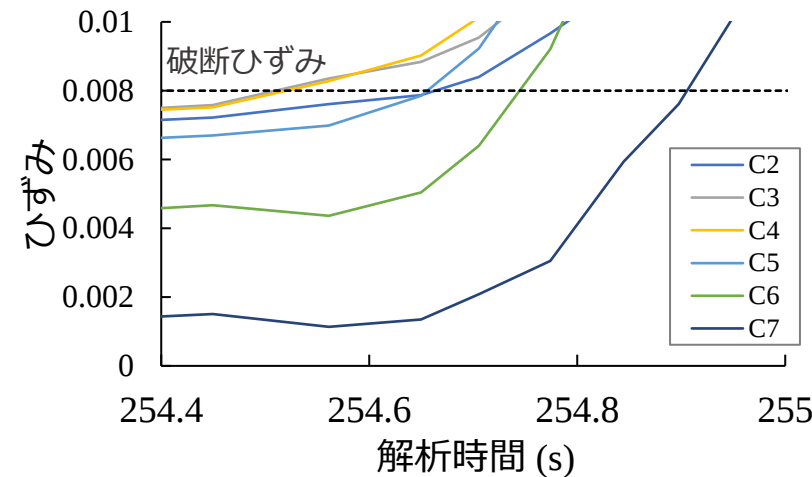
C2,C5破断

C6,C7破断



主桁中央部 鉛直変位時刻歴

- 255s付近, 鉛直変位が急増
- 剛性低下 → 崩壊

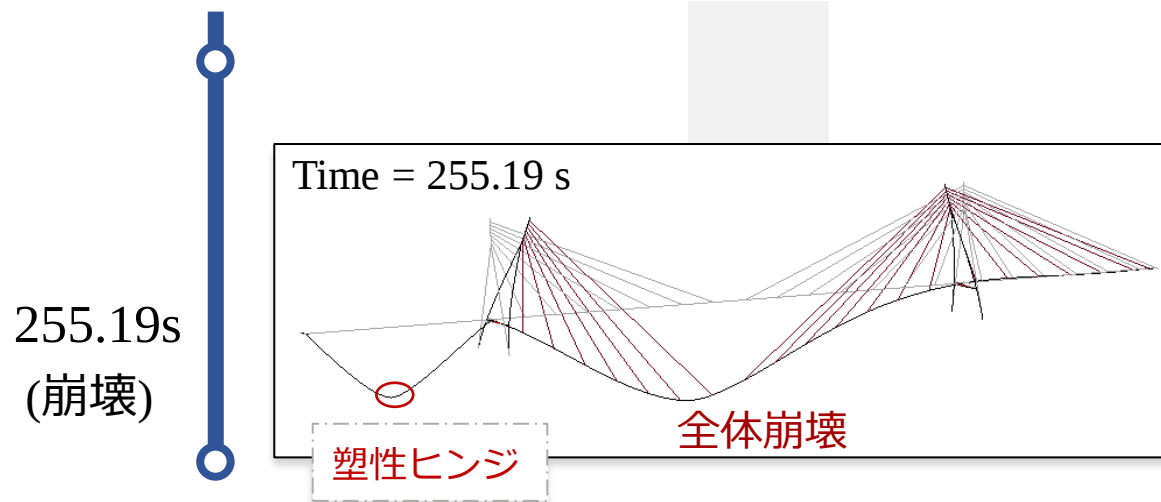


C2~C7のひずみ時刻歴

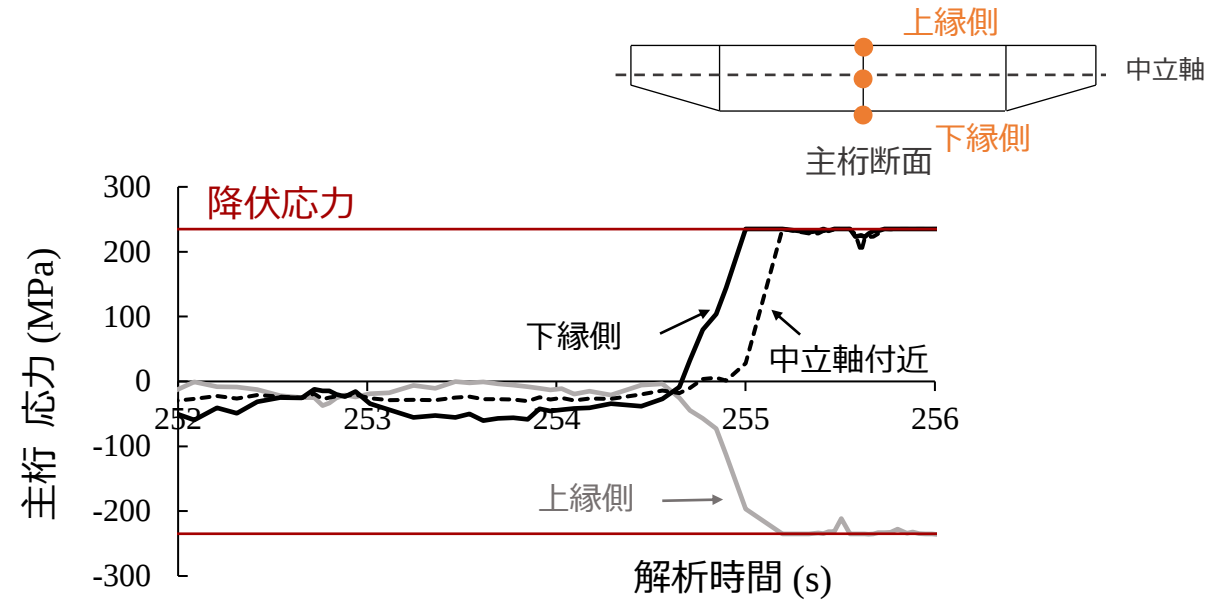
- 254s付近 C3, C4, C2, 破断ひずみ到達
- 左径間側のケーブルが順次破断

ケーブル腐食時の動的応答

② 腐食時 : $\sigma_p = 628\text{MPa}$
 $\varepsilon_b = 0.008$



- 中立軸を境に引張・圧縮側降伏 (235MPa)
- 塑性ヒンジが形成され、橋全体が崩壊



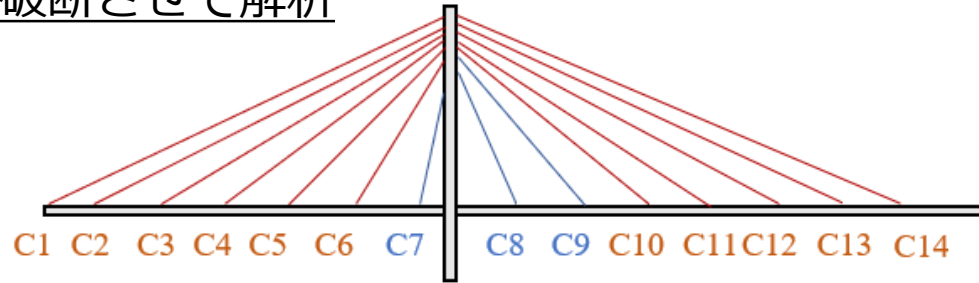
C4付近主桁 応力時刻歴

一連鎖崩壊過程一

C1が破断すると、**C3,C4,C2,C5の順で破断ひずみに到達し、**
左径間側すべてのケーブルが破断する。その後、**C4付近の主桁**
に塑性ヒンジが形成され崩壊に至った。

ケーブル破断箇所の影響

1本ずつ破断させて解析

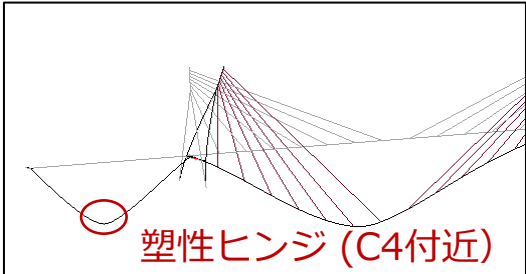
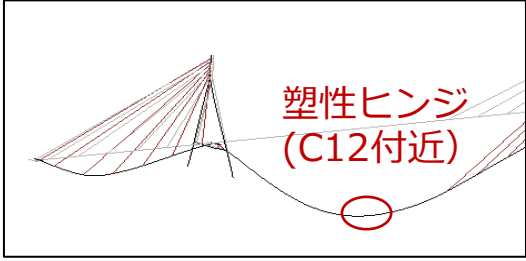


- C2~C6, C10~C14が1本破断すると橋全体が連鎖崩壊に至る.
- C7,C8,C9（主塔付近）が1本破断しても連鎖崩壊に至らない

他のケーブルに比べ初期ケーブル張力が小

➡ 破断しても、分配される応力および衝撃力が限定的

破断するケーブルによって連鎖崩壊挙動が異なる

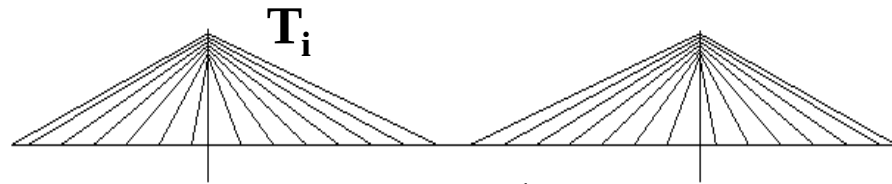
破断ケーブル	崩壊	塑性ヒンジ形成箇所
C2 C6	○	 塑性ヒンジ (C4付近)
C7 C9	×	—
C10 C14	○	 塑性ヒンジ (C12付近)

動的増幅率 (DAF) と 荷重再分配率 (LRR)

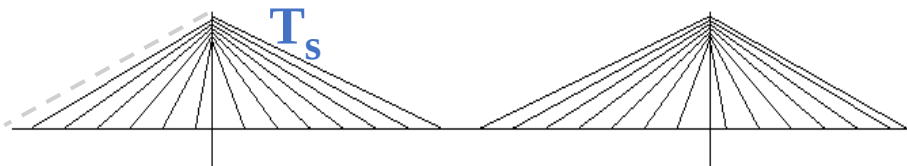
T : ケーブル張力

DAF (Dynamic Amplification Factor)

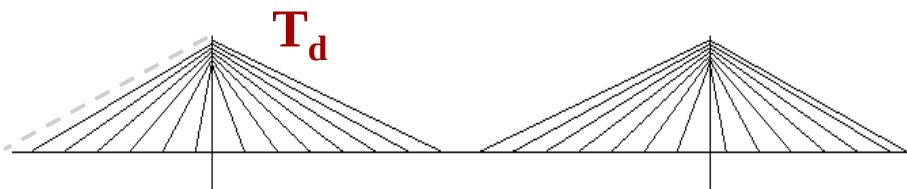
LRR (Load Redistribution Rate)



(a) 初期モデル



(b) ケーブル破断モデル (静的応答値)



(c) ケーブル破断モデル (動的応答値)

$$DAF = \frac{T_d - T_i}{T_s - T_i}$$

動的増幅率

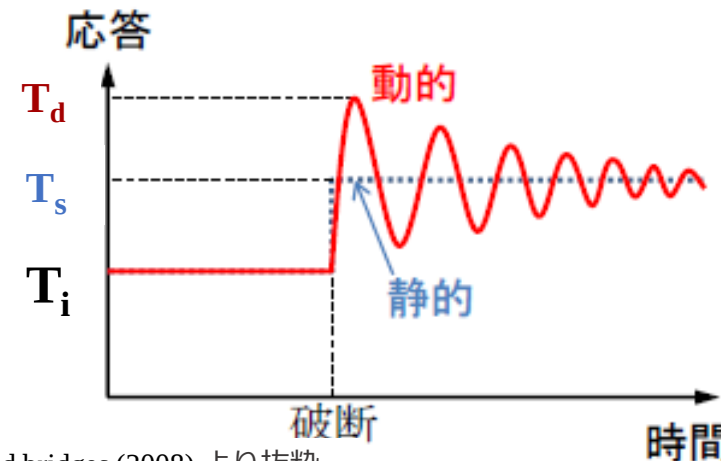
$$LRR = \frac{T_s}{T_i}$$

荷重再分配率

T_i : (a) 初期モデルのケーブル張力

T_s : (b) ケーブル破断モデルの静的ケーブル張力

T_d : (c) ケーブル破断モデルの動的ケーブル張力



海外の設計基準 (DAF=2.0)

Design guideline	DAF
PTI (2012)	Static analysis : DAF = 2.0
	Dynamic analysis (Nonlinear) : DAF ≥ 1.5
SETRA (2002)	Instant rupture : DAF = 2.0
	Progressive rupture : 1.5 ≤ DAF ≤ 2.0

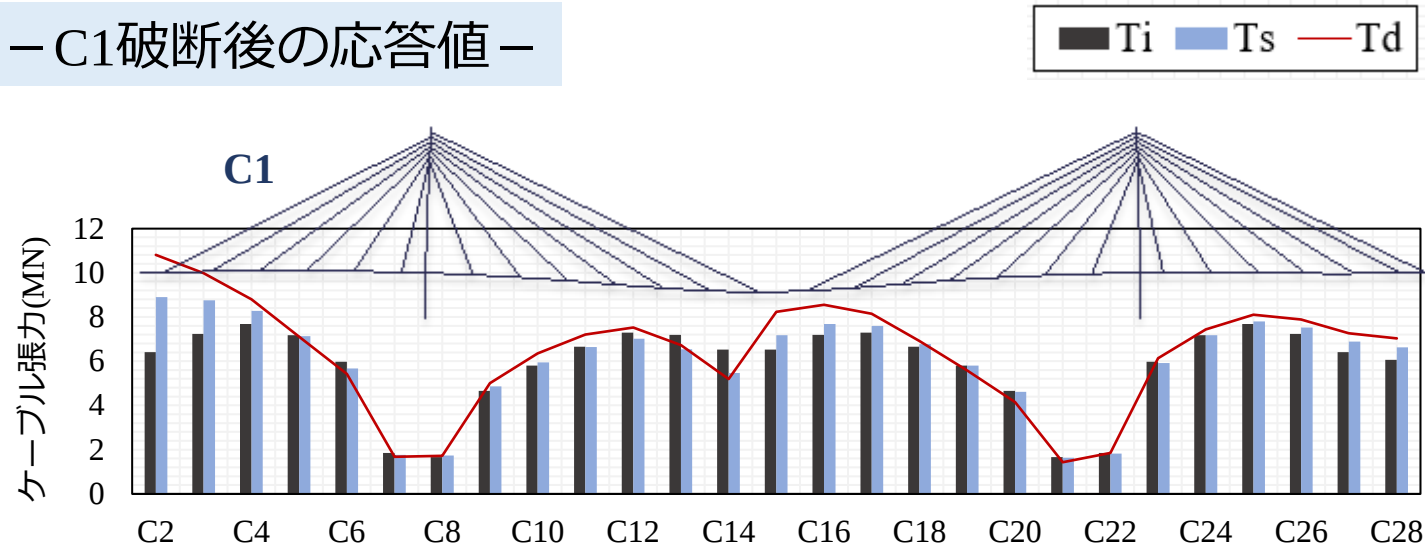
ケーブル健全時の DAF・LRR

海外の設計基準 (DAF=2.0)

DAF: 動的増幅率

Ti: 初期 Ts: 静的 Td: 動的

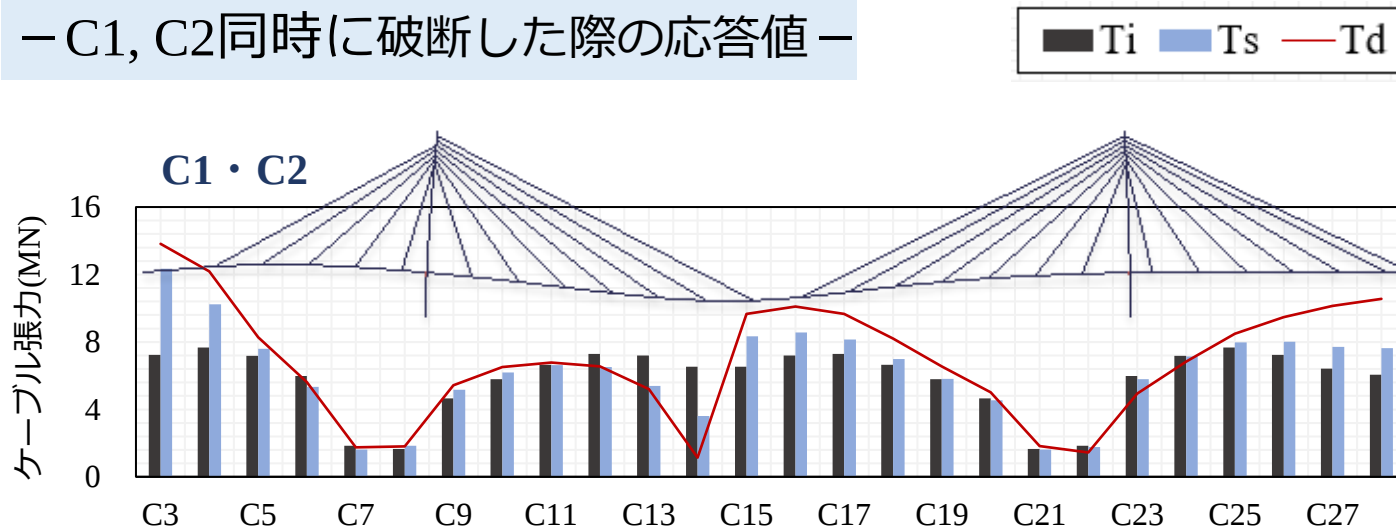
— C1破断後の応答値 —



動的応答値 (253.05s)

Cable	DAF	LRR
C1	-	-
C2	1.77	1.39
C3	1.80	1.21
C4	1.85	1.08
C5	1.50	0.99

— C1, C2同時に破断した際の応答値 —



動的応答値 (251.31s)

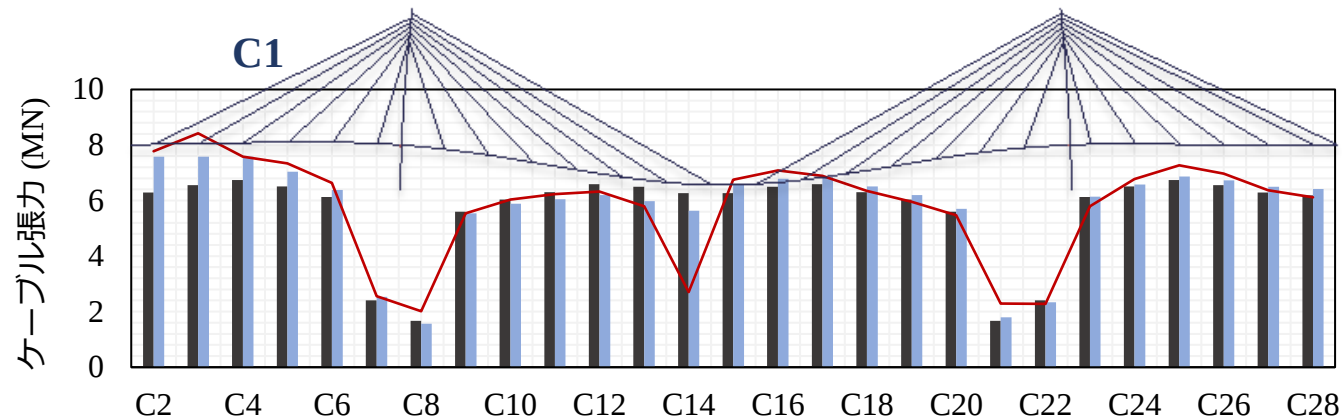
Cable	DAF	LRR
C1	-	-
C2	-	-
C3	1.80	1.21
C4	1.85	1.08
C5	1.50	0.99

ケーブル腐食時の DAF・LRR

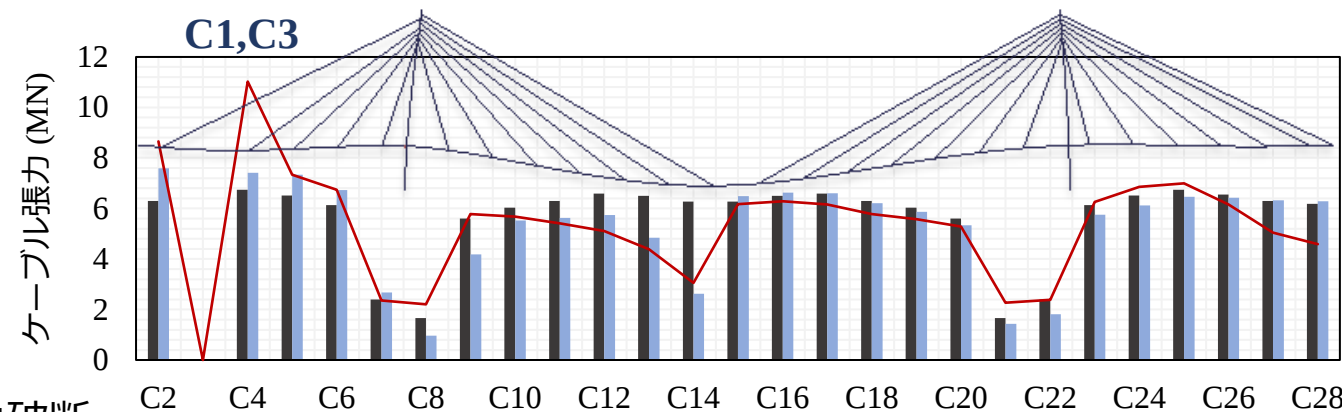
海外の設計基準 (DAF = 2.0)

DAF : 動的増幅率

－ C1破断後のC3破断直前の応答値－



－ C3破断後のC4破断直前の応答値－



連鎖崩壊挙動

C1破断 → C3, C4, C2の順で破断 → 崩壊

動的応答値 (254.55s)

Cable	DAF	LRR
C2	1.15	1.21
C3	1.81	1.16
C4	1.00	1.12

動的応答値 (254.61s)

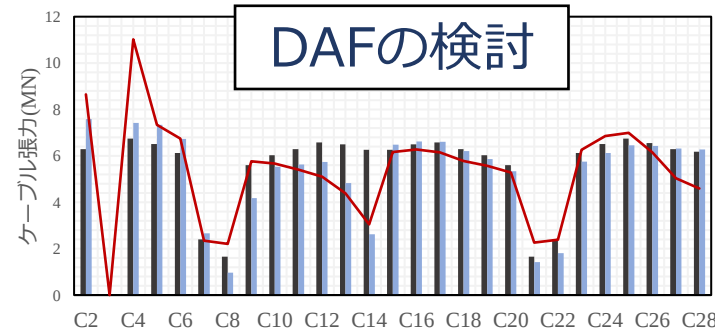
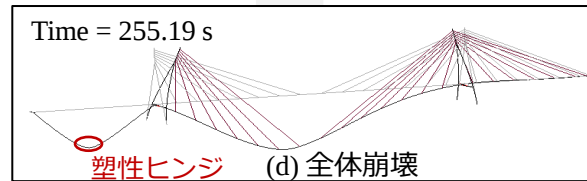
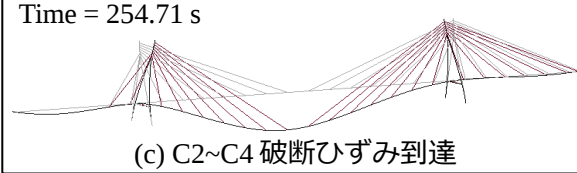
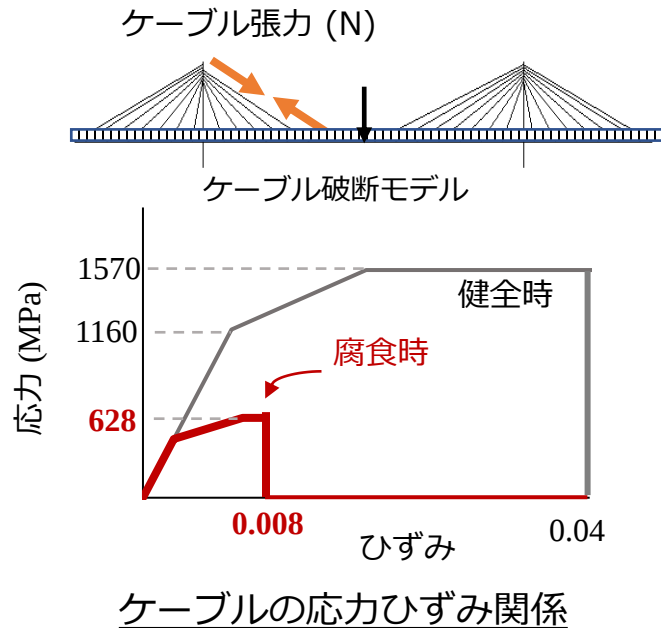
Cable	DAF	LRR
C2	1.83	1.21
C3	-	-
C4	6.35	1.10
C5	1.00	1.13

健全・2本同時に破断 → 1.8程度
腐食・連鎖的に破断 → **6.3**
動的増幅率は大きくなる

まとめ

腐食を考慮しケーブルが破断した場合の連鎖崩壊挙動の再現

動的解析手法の提案



- ケーブル**健全時**は二本同時に破断しても**全体崩壊しない**
- **腐食を考慮**しケーブルを破断させると、隣接ケーブルが順次破断し、崩壊する**連鎖的崩壊挙動に至る**
- ケーブル破断箇所によって**連鎖崩壊挙動**が異なる
- **腐食を考慮し連鎖的に破断した場合のDAFは最大で6.3程度と大きくなる**

今後の研究課題

- ◆ 本解析手法の妥当性 ,ケーブル破断時に生じる衝撃力
—— **実験的検討 (実験値と解析値との比較)**
- ◆ 斜張橋形式による影響 —— **連鎖崩壊を踏まえた最適な設計**

