

講演内容

伊藤学賞受賞者講演

鋼橋の座屈・耐荷力 に関する二、三の話題

2024年10月4日
銀座ブロッサム(中央会館)ホール

東京都立大学 客員教授
野上 邦栄

1. 腐食劣化の生じた鋼トラス橋
格点部の残存耐荷力特性
2. 水平荷重を受ける鋼 I 桁橋の
耐荷力特性
3. 小規模吊橋のハンガー損傷時の
構造安全性

1

腐食劣化の生じた鋼トラス橋 格点部の残存耐荷力特性



1962 竣工
5径間ゲルバートラス橋

- 1) 野上邦栄, 山本 憲, 山沢哲也, 依田照彦, 笠野英行, 村越 潤, 遠山直樹, 澤田 守, 有村健太郎, 郭 路: 鋼トラス橋の上弦材側格点部の腐食計測とその腐食形態の特徴, 構造工学論文集, Vol.58A, 679~691, 2012
- 2) (国研) 土木研究所・早稲田大学・首都大学東京の共同研究: 腐食劣化の生じた実橋梁部材を活用した鋼トラス橋の耐荷性能評価手法に関する研究, 国土交通省建設技術研究開発費補助金総合研究報告書, 2013

3

研究背景

腐食に伴う鋼トラス橋等の主部材の破断などの橋全体の安全性に直結する損傷事例が相次いで発生

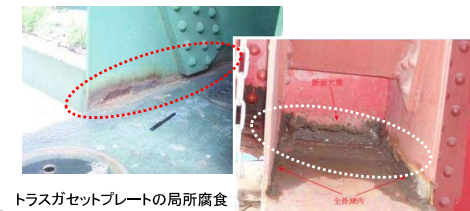
劣化部材を含む橋の診断技術は未確立



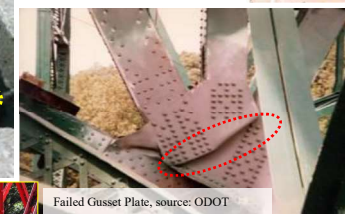
トラス斜材の腐食・破断
(国道・交通規制)



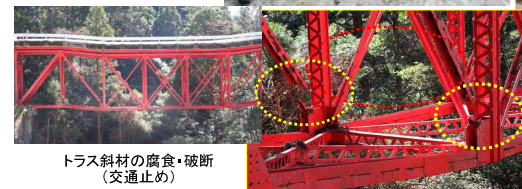
トラス斜材の腐食・破断
(国道・交通止め)



トラスガセットプレートの局所腐食



Failed Gusset Plate, source: ODOT



トラス斜材の腐食・破断
(交通止め)

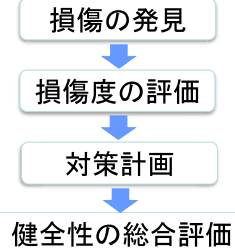
3) NTSB Highway Accident
Report: Collapse of I-35W
Highway Bridge, 2007



格点部の座屈損傷
事例(米国)³⁾

研究の目的

○ 点検、診断



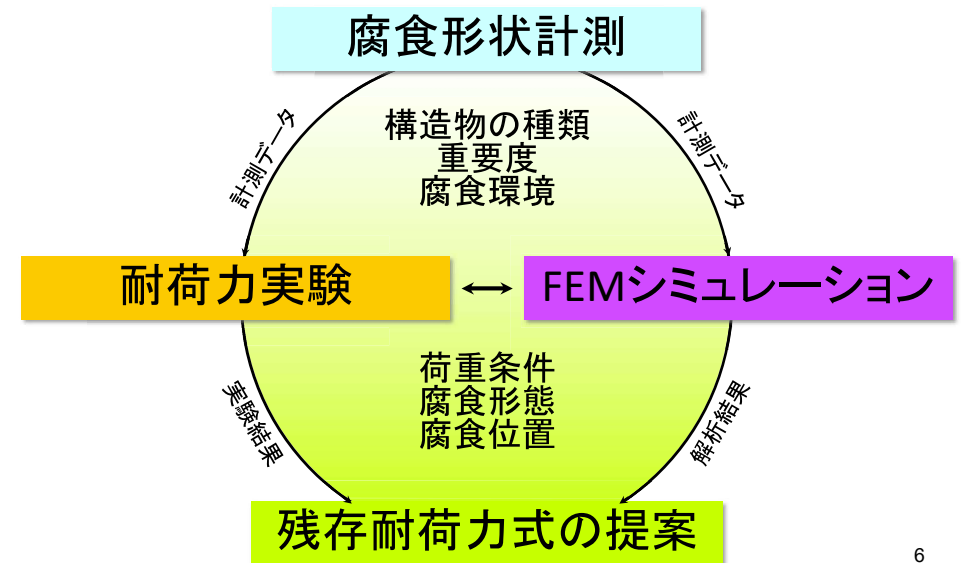
- 損傷度の1次評価
(日常点検、定期点検、臨時点検)
- ・ 損傷程度の把握・評価
 - ・ 健全性の診断
 - ・ 進行性の判断
 - ・ リダンダンシーの判断
 - ・ 影響の重大さの判断
- 損傷度の2次評価 (詳細点検)
- ・ 専門技術者による調査
 - ・ 定量的判断・評価
 - ・ 損傷原因の究明

○ 鋼トラス橋格点部の腐食損傷挙動と残存耐荷性能評価法の提示

- ・ 実橋から撤去した格点部の載荷試験と弾塑性有限変位解析
- ・ 崩壊形式を考慮した適切な評価指標を用いた耐荷力評価式の提示

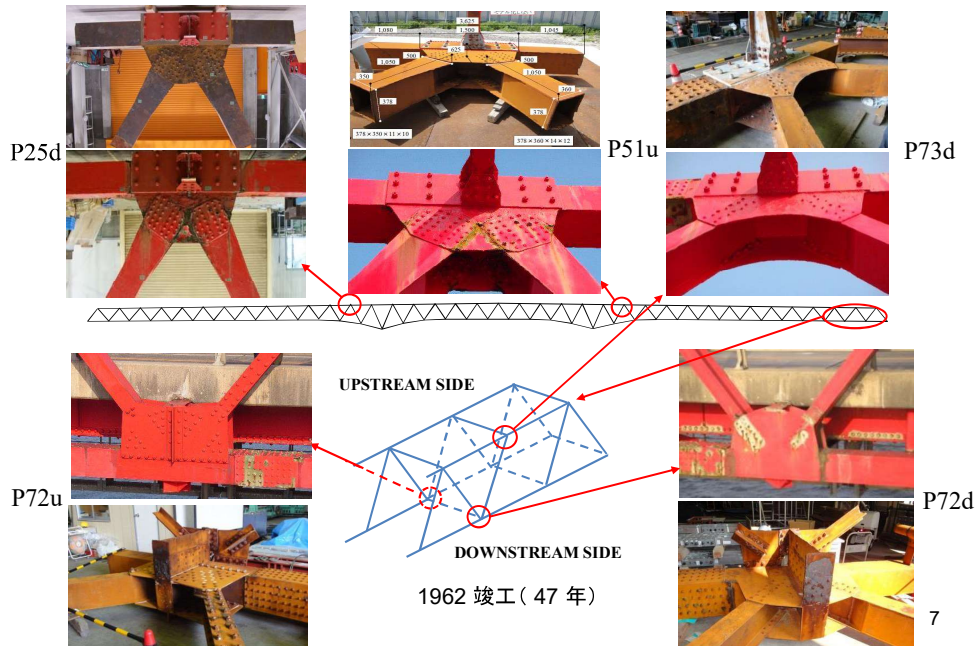
5

残存耐荷力予測手法の確立



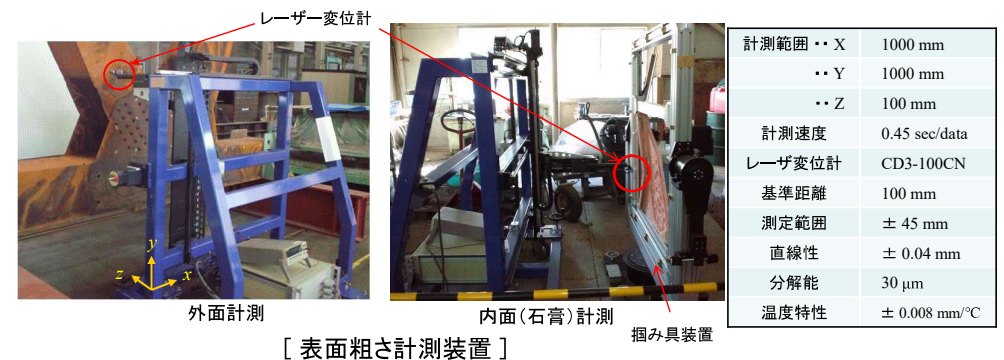
6

対象格点部

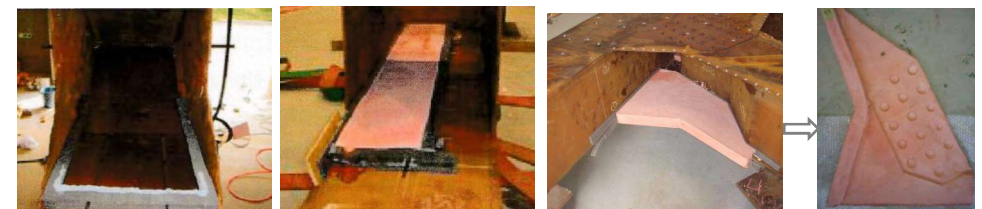


7

格点部の腐食形状の計測方法



[表面粗さ計測装置]



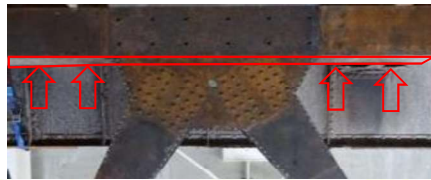
[狭隘部内面のレプリカ法(石膏型どり法)による計測方法]

8

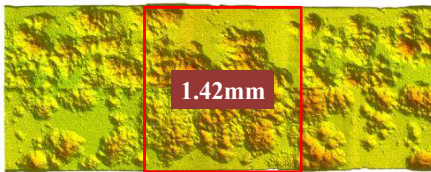
格点部の腐食深さ分布(上弦材側格点 P25d)



[上弦材腹板]

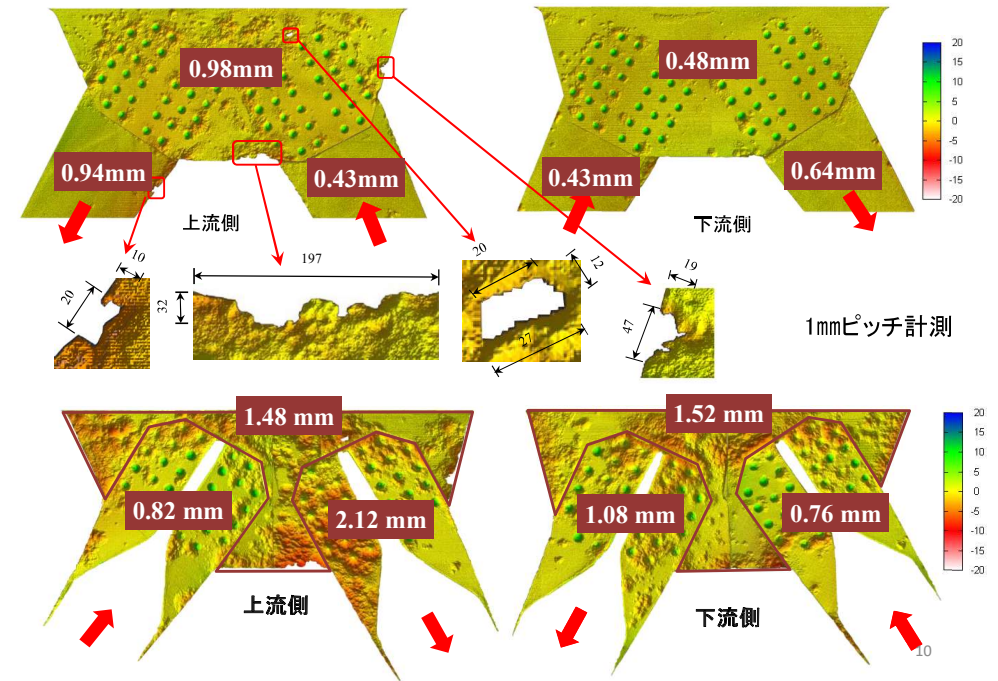


1mmピッチ計測



[上弦材下フランジ]

[ガセットプレートと斜材]



鋼トラス格点部の載荷試験の概要

○ 試験概要

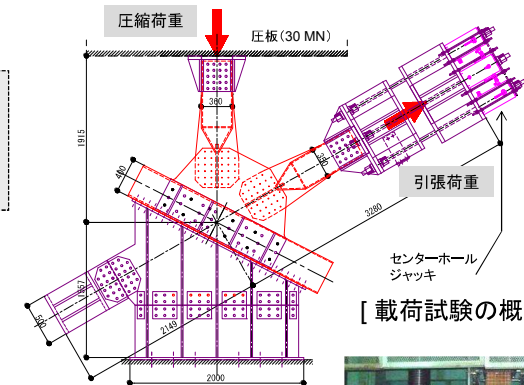
(2方向載荷)
 圧縮荷重⇒ 30 MN大型
 構造物万能試験機
 引張荷重⇒センターホール
 ジャッキ

○ 載荷条件

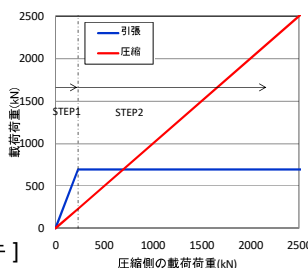
STEP1: 設計荷重の比率で増大
 引張荷重の最大値までは圧縮
 荷重および引張荷重は1:3の比
 率で載荷

STEP2: 圧縮側のみ増大

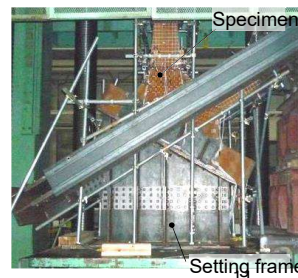
引張荷重が 600 kNに達した段
 階で引張荷重を固定し、圧縮荷
 重のみ増大



[載荷試験の概要図]

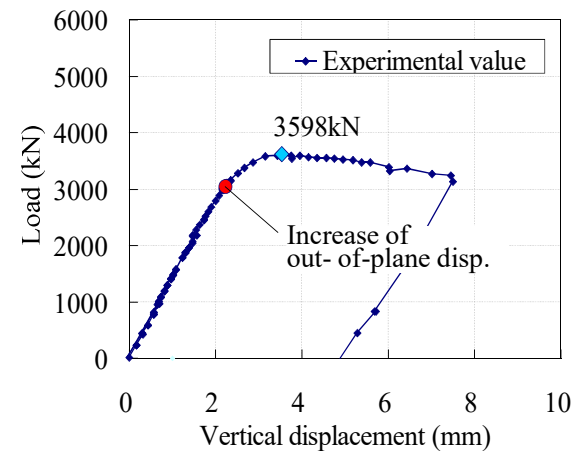


[載荷条件]



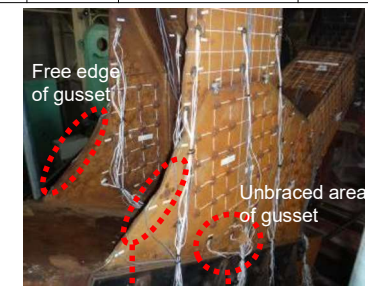
[30 MN大型構造物万能試験機]

実験結果(1) (上弦材側格点 P25d)



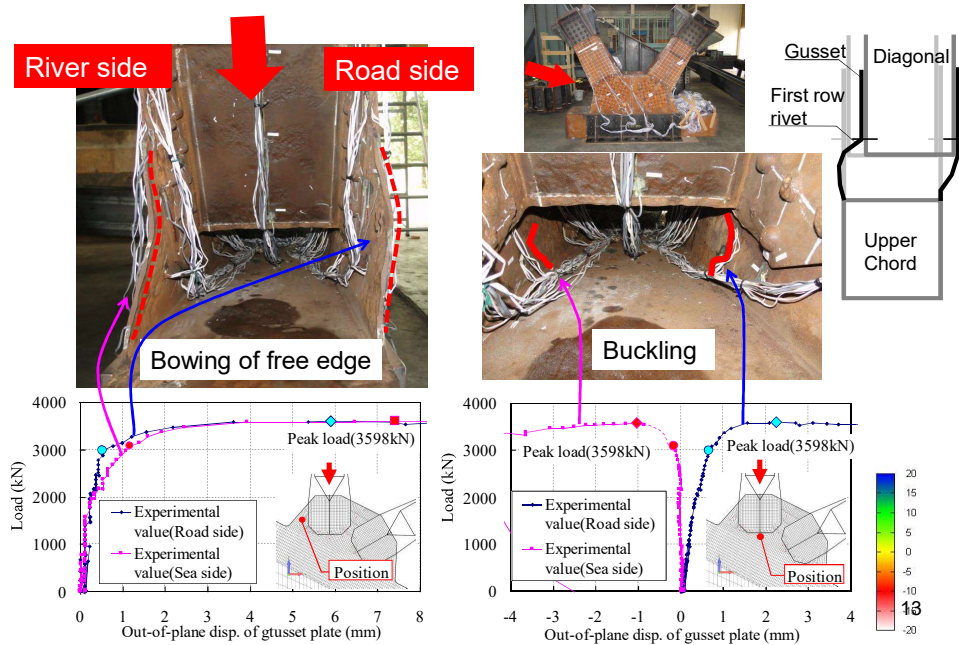
[圧縮荷重一鉛直変位曲線]

	Size		Material
上弦材	溶接位置 から右側	400×400×10×10	SS400
	溶接位置 から左側	404×400×18×12	
斜材	引張(箱桁)	378×350×11×10	
	圧縮(箱桁)	378×360×14×12	
ガセット プレート		625×1500×12	

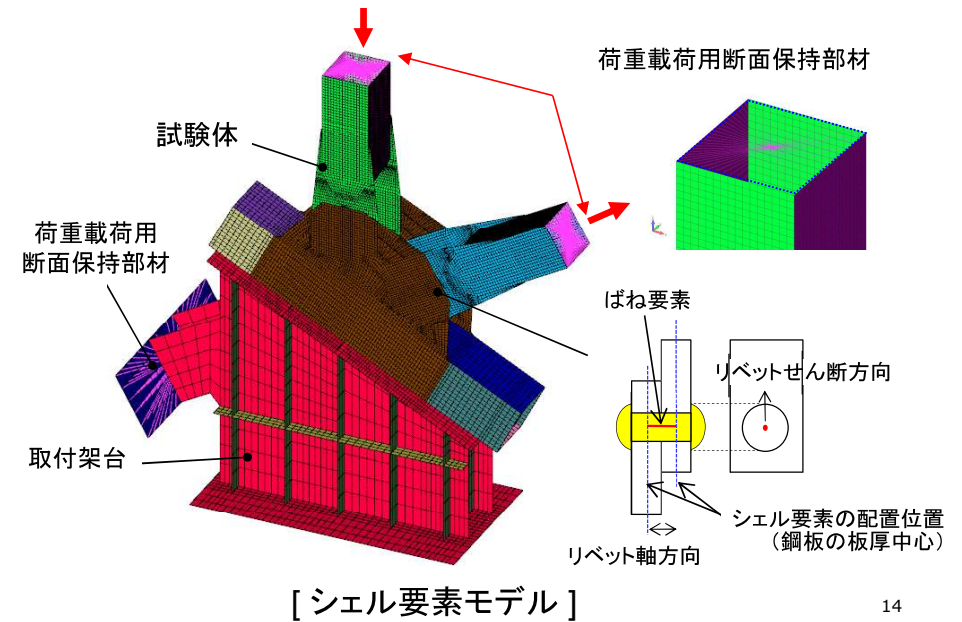


[実験後の
崩壊状況]

実験結果(2)

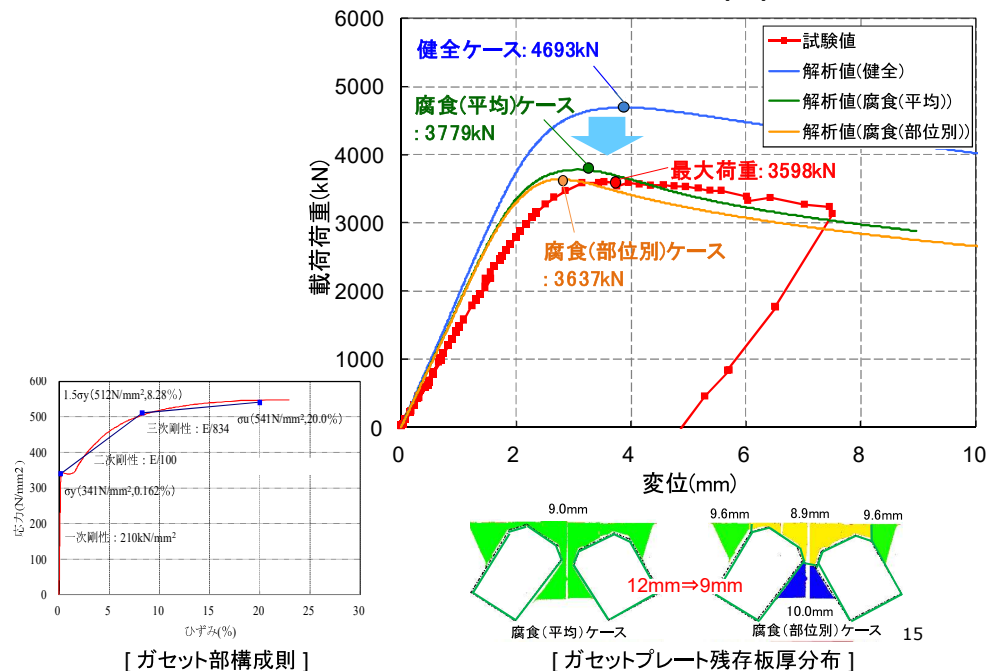


解析モデル



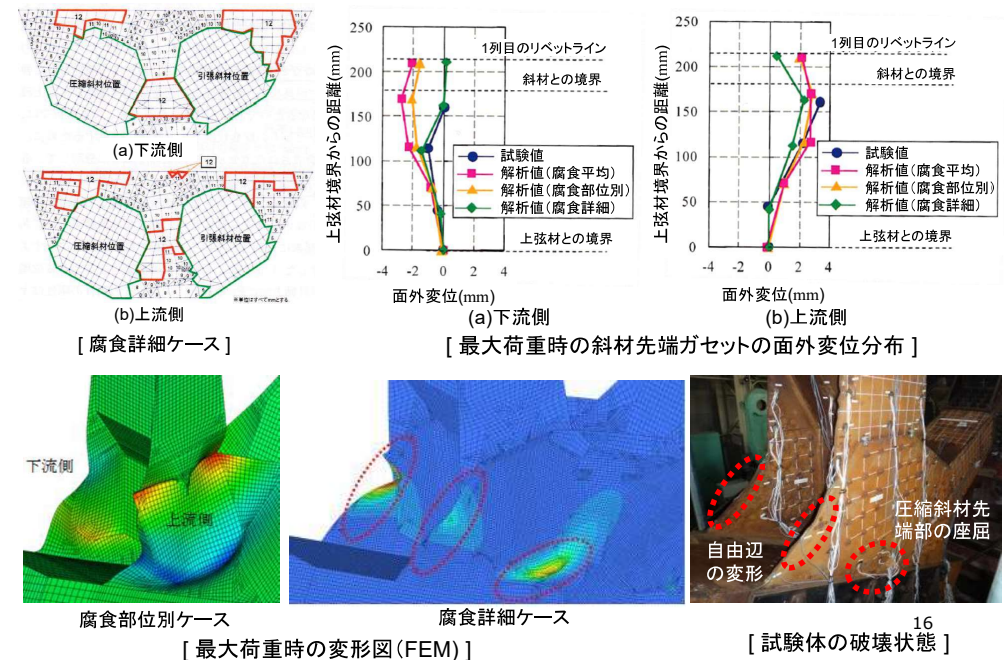
14

実験と解析結果の比較(1)



15

実験と解析結果の比較(2)



16

圧縮側のガセットプレートの局部座屈強度

(a) 圧縮斜材端部

$$P_{gcr1} = \sigma_y A_0 \quad \bar{\lambda} \leq 1.0$$

$$P_{gcr1} = \frac{1}{\lambda^2} \sigma_y A_0 \quad \bar{\lambda} > 1.0$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \frac{\beta L_c}{r_s}$$

$$r_s = \sqrt{I_g / A_g}$$

$$L_c = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3}$$

ここに、

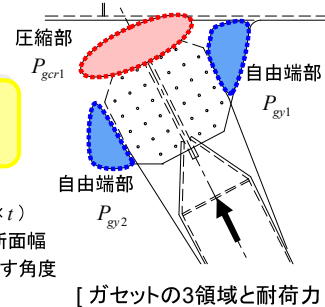
A_0 : 有効幅を有する板の断面積 ($=b_0 \times t$)
 b_0 : 斜材幅
 t : ガセット板厚
 σ_y : 鋼材の降伏点
 λ : 細長比パラメータ
 E : ヤング係数
 β : 柱の有効座屈長係数 ($=0.65$)
 r_s : 断面2次半径
 L_c : 有効座屈長

(b) 外側自由端

$$P_{gy1} = \sigma_y A_1 \sin \theta_1$$

ここに、

A_1 : 平板の断面積 ($=b_1 \times t$)
 b_1 : 外側自由端の抵抗断面幅
 θ_1 : 斜材と抵抗断面のなす角度 ($=30^\circ$)



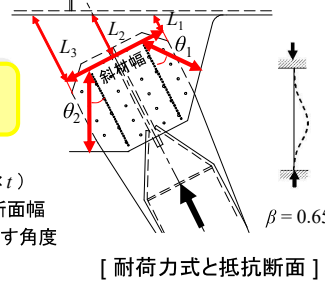
[ガセットの3領域と耐荷力]

(c) 内側自由端

$$P_{gy2} = \sigma_y A_2 \sin \theta_2$$

ここに、

A_2 : 平板の断面積 ($=b_2 \times t$)
 b_2 : 内側自由端の抵抗断面幅
 θ_2 : 斜材と抵抗断面のなす角度 ($=30^\circ$)



[耐荷力式と抵抗断面]

まとめ

(1) 格点部の腐食形状

- ・ ガセットプレート先端部との境界部の斜材フランジには、上下流側ともに激しい腐食損傷が発生
- ・ 狭隘部内面には、全体的に激しい不均一腐食が発生

(2) 載荷試験結果

- ・ ガセットの降伏荷重までは線形挙動し、それ以降、勾配が緩やかになり最大荷重に達した。最大荷重以降は、急激な荷重低下は見られなかった
- ・ 腐食(部位別)ケースの解析による耐荷力は、健全ケースの耐荷力の約77%であり、ガセット部の腐食が耐荷力に影響
- ・ 最大荷重や全体挙動の解析結果は、試験結果と概ね一致。腐食の影響を平均的な残存板厚でモデル化することにより耐荷力を概ね推定可能

(3) 格点部の耐荷性能評価

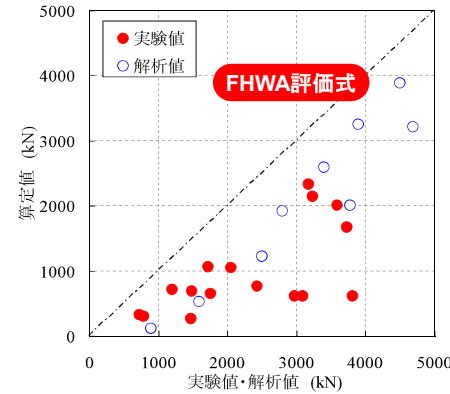
- ・ ガセットの圧縮斜材端部の領域および自由端の領域を考慮した実用的な耐荷力評価式を提案
- ・ ガセットの腐食状態や構造諸元をパラメータとして変化させた場合の解析結果は、評価式の算定値と良い一致を示した

圧縮力を受ける格点部の耐荷力算定式

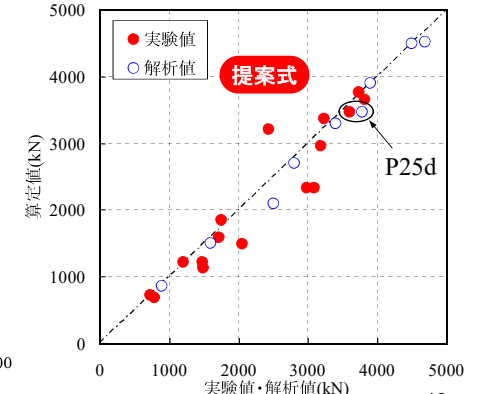
- ・ 従来の前面(圧縮部)だけでなく3つの領域を考慮した耐荷力算定式を提案
- ・ これまでの実験結果を、概ね把握できることを確認

$$P_{gcr} = P_{gcr1} + P_{gy1} + P_{gy2}$$

P_{gcr} : 圧縮側ガセットの局部座屈
 P_{gcr1} : 圧縮斜材端部の座屈耐荷力
 P_{gy1} : 外側自由端の降伏耐荷力
 P_{gy2} : 内側自由端の降伏耐荷力



[算定値と実験値・解析値の相関性]



今後の課題

- 各種の橋梁形式および格点構造に対する実橋データの蓄積
- 格点部の破壊性状に対する残存耐荷力評価法の改善
- 実橋の狭隘部・計測し難い箇所計測方法?
- 部材レベル・橋全体レベルの残存耐荷力およびリダンダンシー評価

水平荷重を受ける鋼I桁橋 の耐荷力特性



端対傾構の斜材座屈



応急復旧後の端対傾構

2001 開通
仙台東部道路
東部高架橋²⁾

2) 宮越信: 東日本大震災に伴う
橋梁応急の概要, 土木学会東
北支部技術研究発表会, 1-7,
2011.

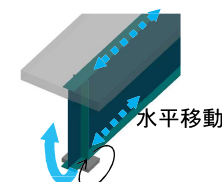
1) 片山智貴, 村越潤, 野上邦栄, 岸祐介: 地震水平荷重を受ける既設鋼I桁橋の損傷過程と耐荷力に関する解析的
検討, 土木学会論文集, Vol.80, No.8, 23-00126, 1~18, 2024

21

研究背景

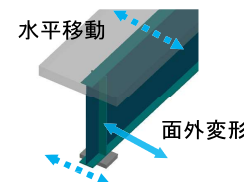
- 2000年以降の地震における鋼桁橋支点部の損傷例
- ・ 交通供用に支障、機能回復への影響など復旧性に課題

地震名 (発生年)	橋梁名	適用 基準	架設 年次	支承 形式	損傷状況 損傷の種類
新潟県 中越地震 (2004)	和南津橋	-	-	-	破断 (腐食有) 破断 (腐食有)
	鱈の大橋	-	1998	-	座屈
	西倉橋	-	1973	-	座屈
東北地方 太平洋沖地震 (2011)	仙台東部道路 東部高架橋	平成 8年	2001	ゴム	座屈
	一関大橋	昭和 48年	1976	BP	面外変形 溶接部のき裂 欠け落ち 面外変形 変形
熊本地震 (2016)	木山川橋	昭和 48年	1976	ピン	破断 座屈 座屈 座屈 隙間発生
	並柳橋	昭和 55年	1989	ピン	面外変形 変形
	阿蘇口大橋	昭和 55年	1995	BP	変形 変形 変形 座屈 座屈 ボルトのずれ
	扇の坂橋	平成 8年	2000	ゴム	変形 はらみ出し 変形



橋軸方向地震時

3) 国土交通省道路局国道課: 新潟県中越地
震による道路橋の緊急調査結果, 2004.



橋軸直角方向地震時

4) 国土技術政策総合研究所・(独)土木研究所:
平成28年熊本地震土木施設被害調査報告,
国総研資料 No.967, 土研資料No.4359, 2017.



新潟中越地震(木沢川橋)³⁾



東北地方太平洋沖地震
(仙台東部道路)



熊本地震(並柳橋)⁴⁾

研究目的・検討内容

○ 研究目的

- ・ 地震時の桁端部の損傷により、交通供用に影響
- ・ 水平力に対する桁端部の耐荷性能の評価手法も研究途上

水平力作用時の橋全体系の損傷挙動(限界状態)と耐荷性能評価法の提示

○ 検討内容

(1) 水平力に対する上部構造の損傷過程の把握

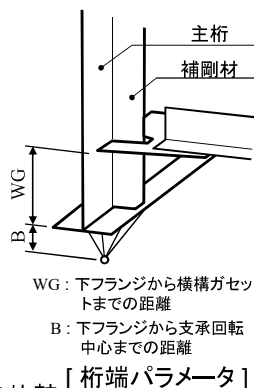
- ・ 上部構造全体系に対するプッシュオーバー解析
: 部材の損傷過程の解明, 限界状態の設定

(2) 桁端構造細目等の耐荷性能への影響評価

- ・ 桁端諸元をパラメータとしたプッシュオーバー解析
- ・ 水平荷重載荷(残留変形後)⇒活荷重載荷解析
: 限界状態に対する耐荷力への影響評価

(3) 支点部材の応答値算出法の提示

- ・ 既往式を参考にした支点部モーメント計算値と解析値の比較

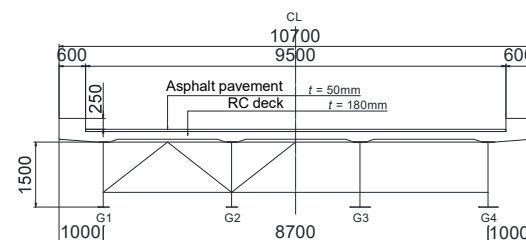


WG: 下フランジから横構ガセット
までの距離
B: 下フランジから支承回転
中心までの距離
[桁端パラメータ]

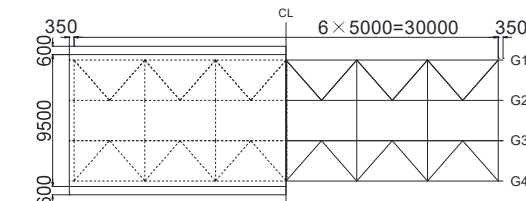
23

対象橋梁

- 昭和39年道示適用の単純合成鋼I桁橋(支間30m, 幅員9.5m)
- 桁端部材の構造詳細は、主に昭和40年代の標準図集を参考に決定

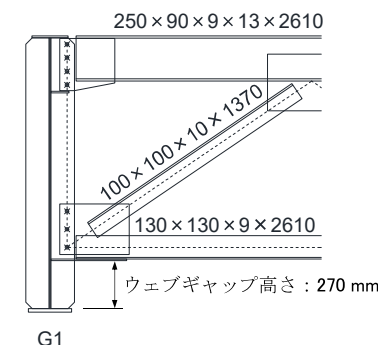


[断面図]



[平面図]

- 逆V形式の端対傾構
- RC床版の端対傾構上弦材への打ち下し無



[桁端部材の構造諸元]

24

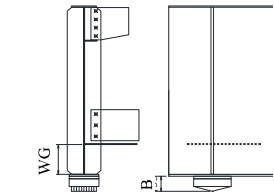
解析モデルと解析ケース

[境界条件]

支点部 境界条件	並進			回転		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Fix	○	○	○	○	●	○
Mov.	●	○	○	○	○	○

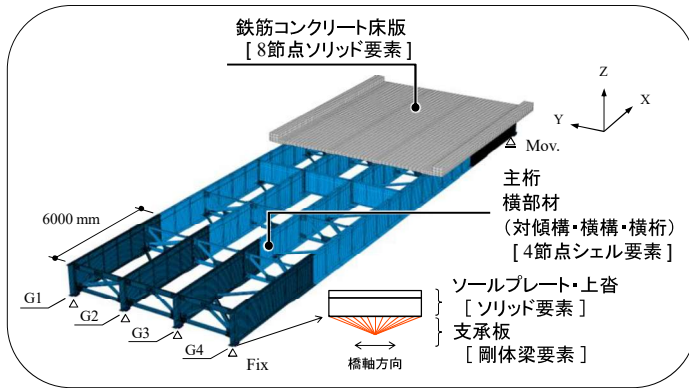
●：自由 ○：固定

[解析ケース]



解析ケース			荷重載荷ケース
構造細目	記号	条件(単位)	
ウェブギャップ高さ	WG	270, 200 (mm)	1)~7)全パターンをそれぞれに載荷(次頁を参照)
支承高さ*	B	135, 108, 167 (mm)	
小型補強リブ	R	設置の有無	

* 支承回転中心-下フランジ上面間の距離



[材料特性と材料構成則]

構成部材	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン 比	降伏強度 (N/mm ²)	構成則
RC床版	2.65×10^4	0.2	-	弾性体
主桁フランジ・ウェブ	2.00×10^5	0.3	315	バイリニア
補剛材・横部材等	2.00×10^5	0.3	235	バイリニア
ソールプレート・上沓	2.00×10^5	0.3	-	弾性体

- 解析ソフトウェア: MSC Marc 2020.
- 残留応力, 初期たわみ: 考慮しない

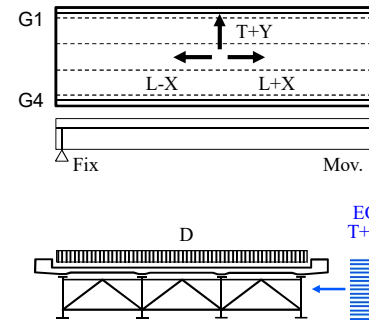
荷重載荷ケース

○ 地震水平荷重 EQ

- ・ 橋軸方向(L), 橋軸直角方向(T)に対するプッシュオーバー解析
- ・ 質量密度に応じた水平慣性力を載荷
- ・ 弧長増分法により一方向に漸増載荷

○ 鉛直荷重(活荷重) VL

- ・ 水平荷重による損傷を受けた後の活荷重載荷を想定
- ・ 被災後に, 設計活荷重(B活荷重 × 荷重倍率 α)を漸増載荷



載荷ケース: EQT+Y

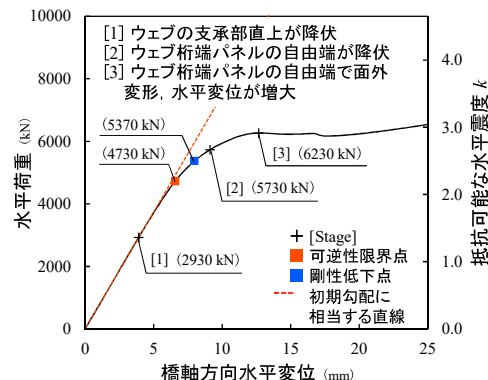
[載荷ケース]

載荷ケース名	載荷荷重(○)			水平荷重 載荷方向
	死荷重	水平荷重	活荷重	
1) EQL+X	○	○	-	橋軸 (Fix→Mov.)
2) EQL-X	○	○	-	橋軸 (Mov.→Fix)
3) EQT+Y	○	○	-	橋軸直角 (G4桁→G1桁)
4) EQL+X_VL	○	○	○	橋軸 (Fix→Mov.)
5) EQL-X_VL	○	○	○	橋軸 (Mov.→Fix)
6) EQT+Y_VL	○	○	○	橋軸直角 (G4桁→G1桁)
7) VL	○	-	○	

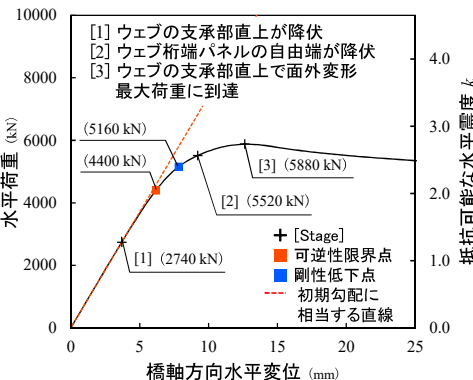
注) EQL: 橋軸方向水平荷重, EQT: 橋軸直角方向水平荷重, VL: 活荷重, ±X, Y: 載荷方向
※全ケースについて死荷重D (2150 kN)を考慮

26

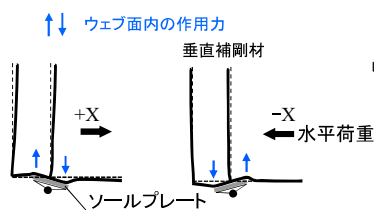
橋軸方向載荷時の挙動



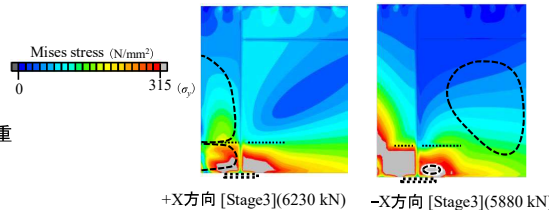
[水平荷重-変位関係(橋軸+X方向)]



[水平荷重-変位関係(橋軸-X方向)]



[固定支点周辺の挙動イメージ]

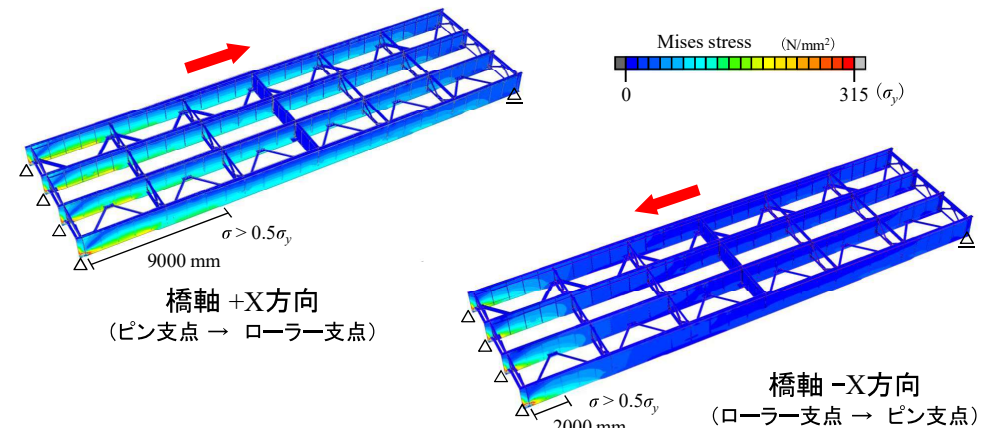


[G1桁のミーゼス応力分布と変形図(倍率5倍)]

橋全体の挙動(橋軸方向)

○ 上部構造全体の挙動(Stage[3] 時点)

- ・ 降伏, 変形部位は限定的
- ・ 全桁端(ピン支点側)で概ね同様の損傷挙動



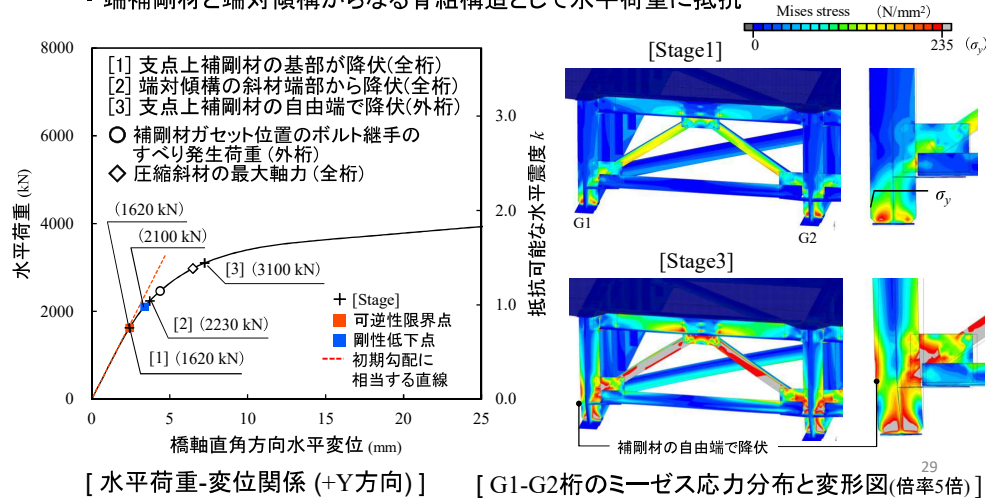
[ミーゼス応力分布と変形図(倍率5倍)]

28

橋軸直角方向載荷時の挙動

○ 桁端部材の損傷過程

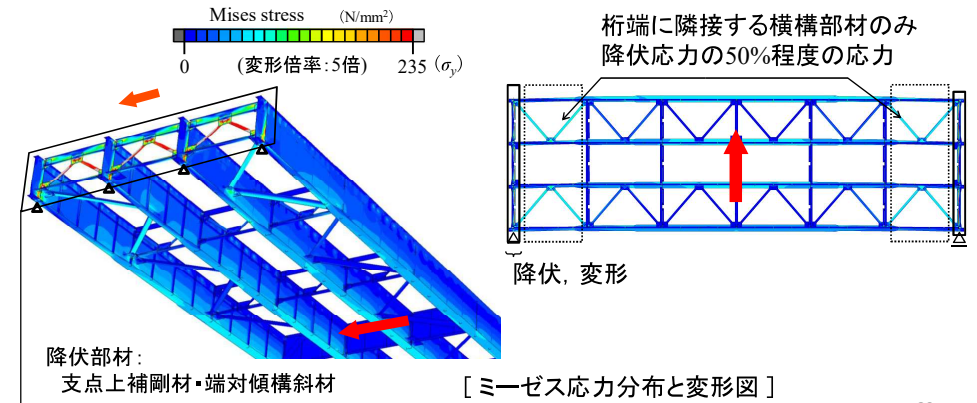
- ・ 端補剛材の基部で曲げによる初期降伏 ($k=0.8$)
- ・ 端対傾構斜材の取付部で局所降伏 ($k=1.0$)
- ・ 外桁のガセット取付部で降伏 ($k=1.4$)
- ・ 端補剛材と端対傾構からなる骨組構造として水平荷重に抵抗



橋全体の挙動(橋軸直角方向)

○ 上部構造全体の挙動(Stage[3]時点)

- ・ Stage[3]までは、横構圧縮・引張の両部材の軸力は道示の圧縮強度特性による軸力 N_{crge} (山形断面部材) に対して最大0.8倍程度、横構は弾性範囲
- ・ Stage[3]で支点上補剛材と端対傾構(斜材)のみ降伏
- ・ 変位増大後に桁端に隣接する横構でも降伏



上部構造の限界状態の設定(1)

○ H29道示を踏まえた限界状態 (LS) の設定

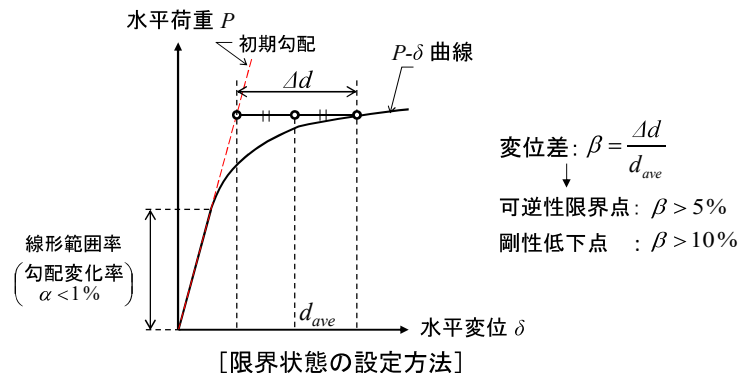
- ・ 荷重～変位曲線と損傷状態(構成部材の塑性化の進行状況および残留変位など)により、限界状態を定義

◎ 可逆性限界点(道示基準:LS1)

- ・ 構造として($P-\delta$ 曲線において)可逆性を喪失しない

◎ 剛性低下点(道示基準:LS2)

- ・ 一部の部材で損傷が生じて部分的に荷重支持能力が低下
- ・ 可逆性の喪失が耐力力への影響は限定的。設計で制御可能な範囲

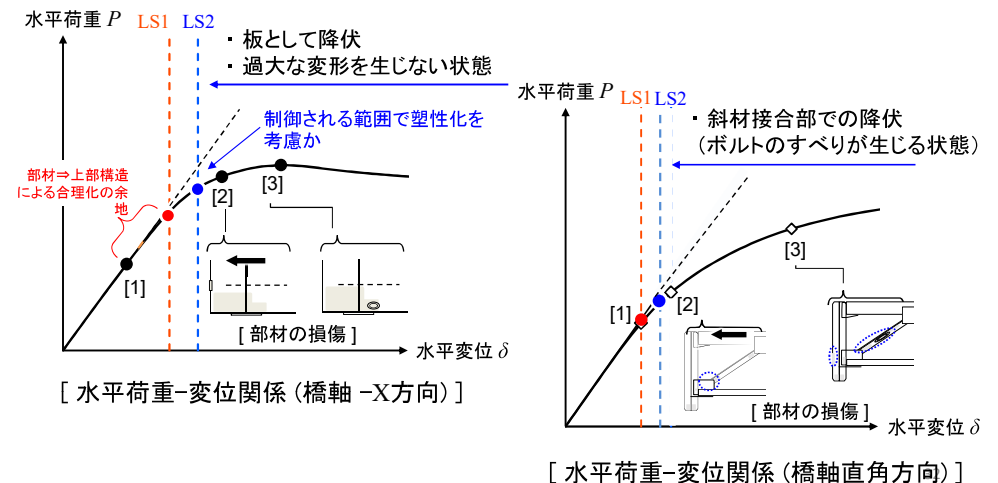


上部構造の限界状態の設定(2)

・ 可逆性限界点(道示基準:LS1)

・ 剛性低下点(道示基準:LS2)

(限界状態3は、橋軸方向は最大荷重点で代表できる可能性があるが、構成部材の塑性化進展状況や高力ボルト接合接手のすべり後挙動の検討が必要)

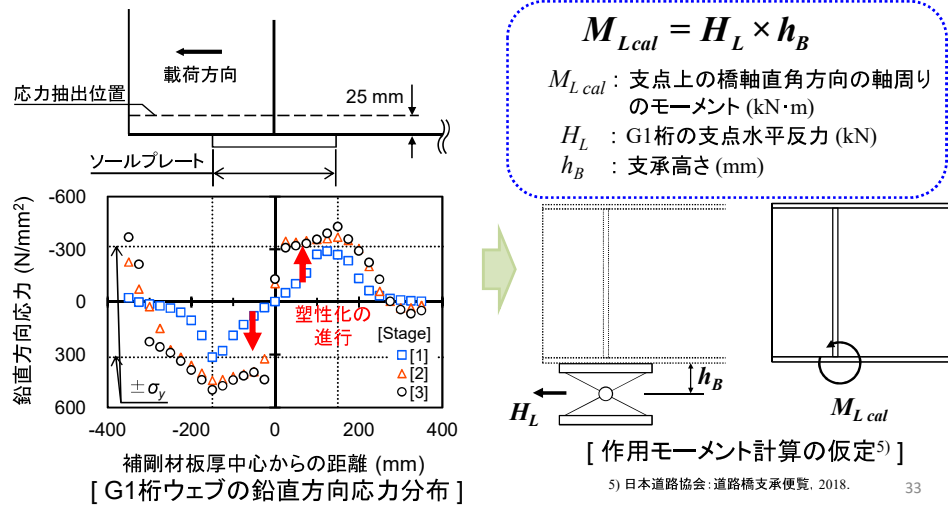


[水平荷重-変位関係(橋軸直角方向)]

可逆性限界点における支点部作用モーメント(橋軸方向)

○ 桁端部の応力状態の評価と、作用モーメントの計算法を検討

- ・ 支承部の設計計算で用いられる簡易式(計算値)と解析から得られる応答値を比較
- ・ 支点部モーメントの橋軸方向への積分値が簡易式と概ね一致



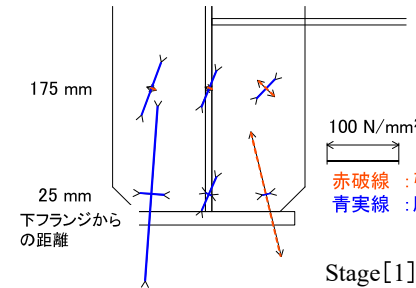
支点上補剛材基部の応力状態(橋軸直角方向)

○ 端補剛材ウェブギャップ部の主応力

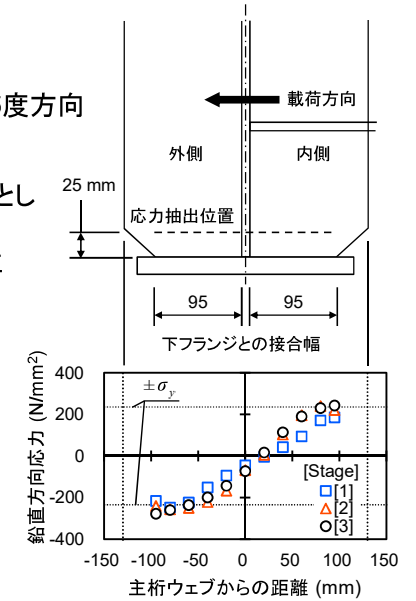
- ・ 基部の主応力は概ね鉛直方向
- ・ 中間部の内桁側の主応力方向は概ね45度方向

⇒ 下フランジ固定の十字柱としての挙動

- ・ 端補剛材基部では、水平荷重による柱としての曲げが支配的
- ・ ウェブギャップ部ではせん断変形も発生



[端補剛材ウェブギャップの主応力]

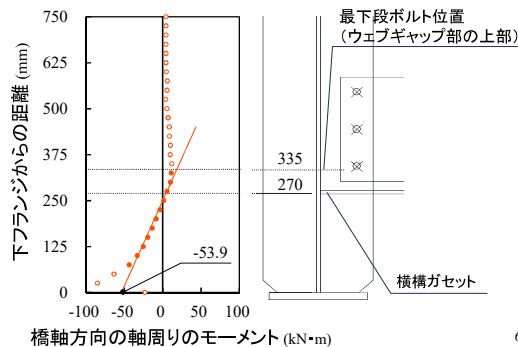


[端補剛材基部の鉛直方向応力分布]

可逆性限界点における支点部作用モーメント(橋軸直角方向)

○ 解析に基づく作用モーメントと、計算法を比較

- ・ 解析では、ガセット位置よりもやや上方でモーメント極値をとる
- ・ 端対傾構の骨組モデルによるガセット位置の上部の作用モーメントを考慮



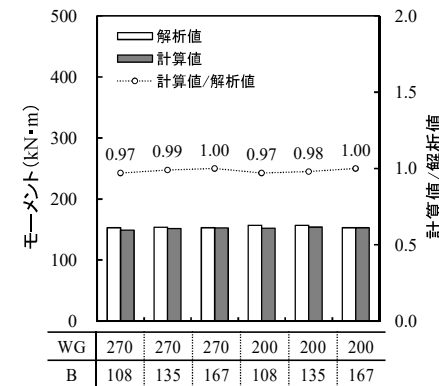
[G1桁の十字柱の曲げモーメント分布]

支点部作用モーメントと計算値の比較

(可逆性限界点)

○ 橋軸方向

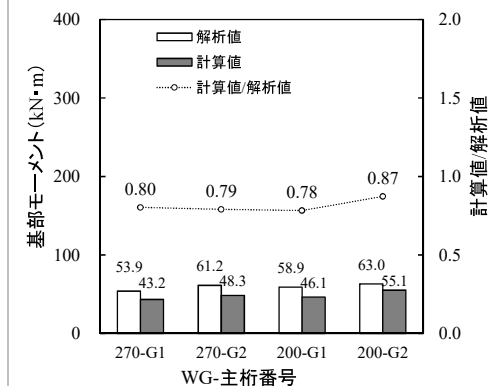
- ・ 支点上の主桁ウェブの作用モーメントは支承高を考慮することで評価可能



[解析値と計算値の比較(橋軸-X方向)]

○ 橋軸直角方向

- ・ ウェブギャップ部の作用モーメントを考慮することにより、解析値に対して比較的近い評価



[解析値と計算値の比較(橋軸直角方向)]

まとめ

(1) 桁端部の挙動

- ・ 橋軸方向: 支点上主桁ウェブに支承高さに起因する上下方向偶力が作用し、塑性化が進行
- ・ 橋直方向: 支点部(柱断面)と端対傾構の構成部材の降伏・変形による水平変位の増加

(2) 上部構造の限界状態

- ・ 限界状態 1, 2 に相当する限界点として、可逆性限界点および剛性低下点を設定
- ・ 橋直方向の水平耐荷力は、橋軸方向に対して、40～74%耐荷力が低いことを確認

(3) 支点部作用モーメントの計算式の適用性

- ・ 上部構造の可逆性限界点(初期降伏部位)での作用モーメントの算出方法を提示
 - ・ 橋軸方向: 支承高さをアーム長とする計算値は、解析値とほぼ一致
 - ・ 橋直方向: 端補剛材と端対傾構の骨組構造としてのガセット部に生じる曲げモーメントを考慮した計算値は、解析値と比較的に近い値を確認

37

今後の課題

- 支承構造の損傷を考慮した橋全体系のモデル化による評価
- 限界状態(剛性低下点および限界状態3)の適切な設定
- 各種の桁端構造および横構構造に対する実績データの蓄積 など
- 桁端構造としての破壊メカニズムに基づく合理的な照査法の構築

38

小規模吊橋のハンガー損傷時の構造安全性



1955年竣工
重床式吊橋(人道橋)

- 1) 東條はづき, 村越潤, 野上邦栄, 岸祐介: 小規模人道吊橋におけるケーブル部材の損傷が構造安全性に及ぼす影響, 鋼構造年次論文報告集, No31, 37～46, 2023
- 2) 東條はづき, 村越潤, 野上邦栄, 岸祐介: 小規模人道吊橋の維持管理状況調査とケーブル部材損傷時の構造安全性に関する解析的検討, 鋼構造年次論文報告集, No32, 2024 (掲載予定)

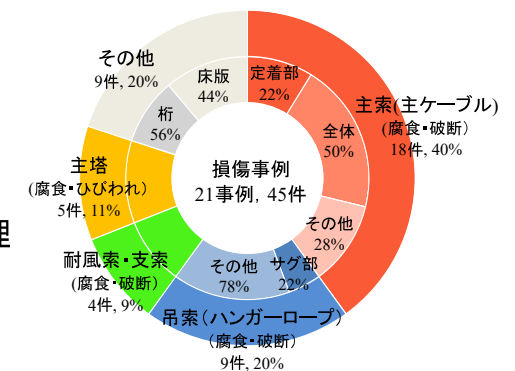
39

研究背景・目的

- ・ 市町村道の橋は、高齢化に伴う深刻な変状がすでに顕在化
- ・ 現在、市町村道の吊橋は 706橋³⁾(道路橋全体776橋)
- ・ 小規模吊橋においても腐食・破断事例が多く報告されている

○ 小規模吊橋は、市町村が管理

- ・ ケーブル部材の損傷に留意した維持管理
- ・ 部材や部位ごとの影響度を勘案した点検
- ・ 維持管理の質を確保し、点検の効率化が不可欠



[調査事例中の主な損傷・部位²⁾]



[ケーブル定着部腐食⁴⁾]

[サグ部ハンガーの破断⁴⁾]

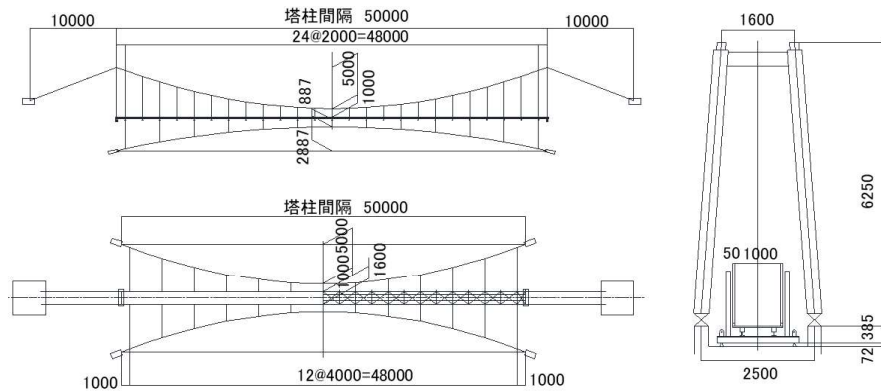
ケーブル部材の損傷に着目し、橋全体の挙動・構成部材の構造安全性の解明

³⁾ 国土交通省道路局監修「道路統計年報2022」

⁴⁾ 四国地整, 国総研: 小規模吊橋等の点検に関する管理者のための参考資料(案) Ver.1.0, 2016.3.2

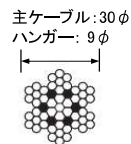
40

解析対象橋梁



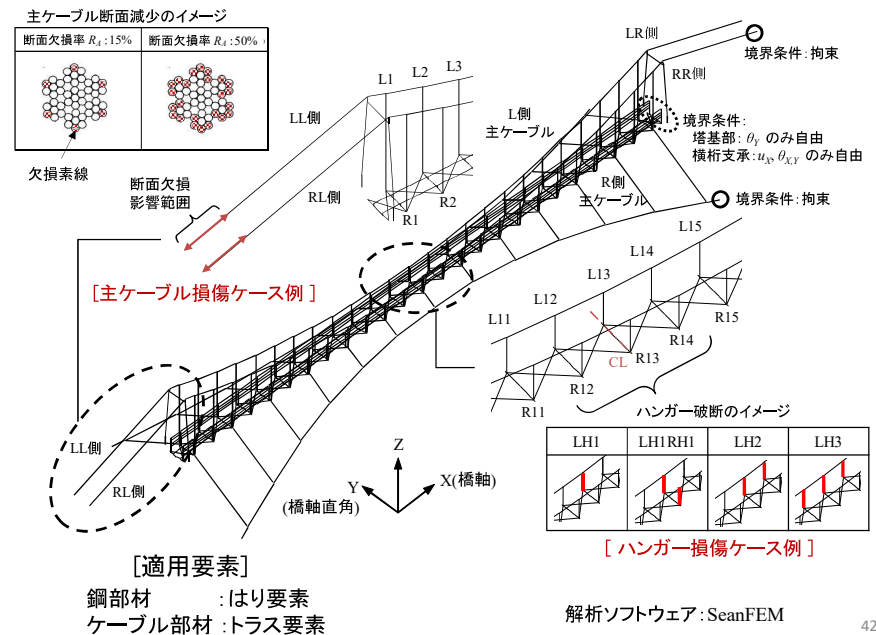
○ 日本道路協会 小規模吊橋指針・同解説(1984.4) 設計計算例

- ・ 単径間無補剛吊橋, 支間50m, 幅員1m, サグ比1/10
- ・ 活荷重(群集荷重) 3.0kN/m²
- ・ 鋼種
 - ・ 主塔, 床組種: SS41,
 - ・ ケーブル部材(主ケーブル, ハンガー, 耐風索): ST1470



41

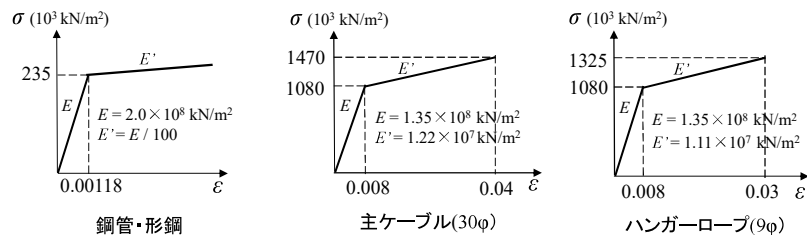
解析モデルと損傷部位



解析ソフトウェア: SeanFEM

42

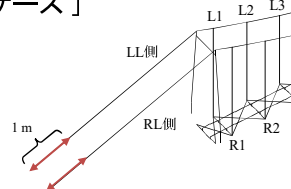
構成則と主ケーブル断面欠損ケース



[構成則のバイリニアモデル]

[主ケーブルの断面欠損ケース]

損傷箇所	断面欠損影響範囲	断面欠損率 R_A
1箇所 (LL側主ケーブル)	1m	健全状態を0%として5%刻みで減肉
2箇所 (LL・RL側主ケーブル)	1m	健全状態を0%として5%刻みで減肉



・ 断面欠損率:

$$R_A = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100$$

ΔA : 欠損断面面積
 A_0 : 健全時断面積

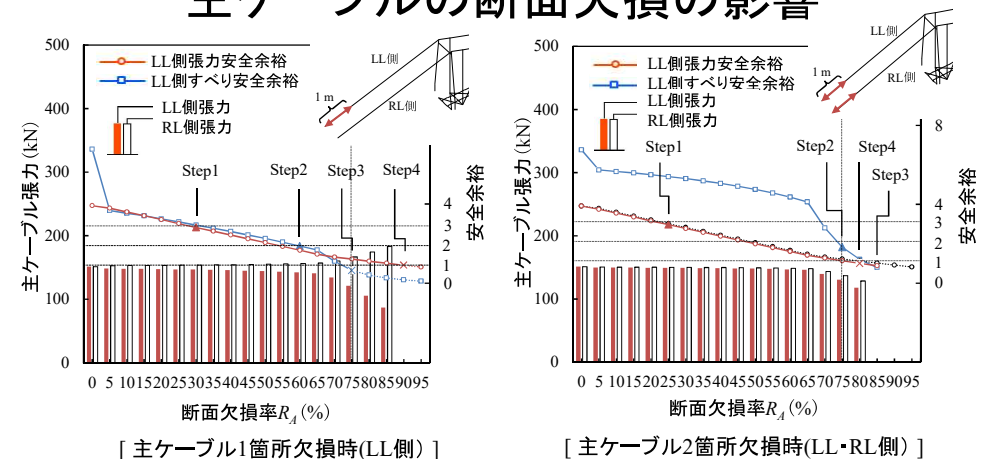
・ 載荷荷重:

設計荷重 (3kN/m²) を支間全長満載



43

主ケーブルの断面欠損の影響



[主ケーブル1箇所欠損時(LL側)]

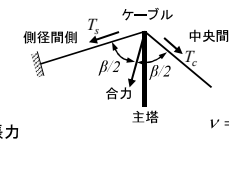
[主ケーブル2箇所欠損時(LL・RL側)]

○ 主ケーブルの安全余裕
(設計安全率 3.0)

$$\nu = \frac{T_g / A_0}{T / A_c}$$

T_g : 破断荷重
 T : 断面欠損後主ケーブル張力
 A_c : 断面欠損後断面積

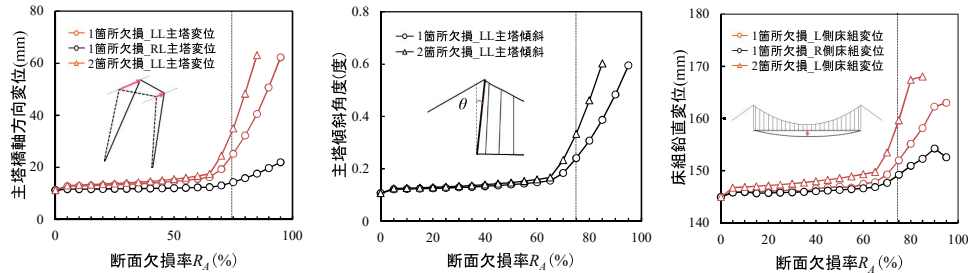
○ 塔頂サドル上のすべりの安全余裕
(設計安全率 2.0)



$$\nu = \frac{\mu(T_g + T_s) \cos(\beta/2)}{T_0 \sin(\beta/2)}$$

T_0 : $|T_g - T_s|$
 T_s : 側径間側の主ケーブル張力
 T_g : 中央径間側の主ケーブル張力
 μ : サドルとケーブルの摩擦係数(0.15),
 β : 中央径間側と側径間側ケーブル接線の交角

橋全体系の変形挙動への影響



[断面欠損率の橋全体系の変形挙動への影響]

○ 主塔橋軸方向変位・傾斜角度

- 支間中央側へ倒れるように変位が増加
- 断面欠損L側と健全R側で変位差が発生
- 面外にねじれる挙動
- 主塔傾斜角 $R_A=0\% : 0.1^\circ \rightarrow R_A=5\% : 0.12^\circ$

○ 床組鉛直変位

- 鉛直下向きにたわむように変位が増加
- L側とR側で変位差が発生

○ 点検時に橋全体系の挙動を継続的に計測することで、腐食等による損傷を間接的に捉えられる可能性

45

ハンガー破断ケースと破断処理

○ ハンガーロープ破断ケース

- ・ 中央径間サグ部付近のハンガーに着目
- ・ ハンガー破断ケース(破断ケース例参照)
 - ・ 片側破断 1~6本
 - ・ 両側 1、3本

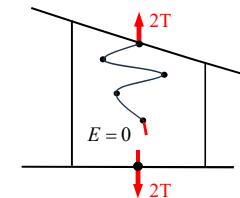
破断ケース	破断本数		破断ハンガー
	L側	R側	
LH1	1	0	L13
LH2	2	0	L12,13
LH3	3	0	L12,13,14
LH4	4	0	L11,12,13,14,15
LH5	5	0	L11,12,13,14,15,16
LH6	6	0	L11,12,13,14,15,16,17
LH1RH1	1	1	L13,R13
LH3RH3	3	3	L12,13,14,R12,13,14

[ハンガー破断ケース 例]

ケース名	片面1本	両面1本	片面2本	片面3本
イメージ				
破断箇所	L側	L13	L12,13	L12,13,14
	R側	-	R13	-

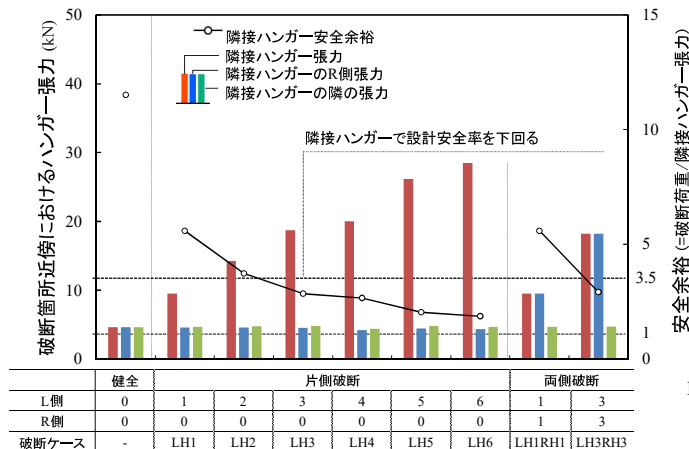
● 破断処理

- ・ 破断要素の弾性係数をゼロ
- ・ 衝撃効果は、破断前張力の2倍を主ケーブル側と桁側の節点に逆向きに作用



46

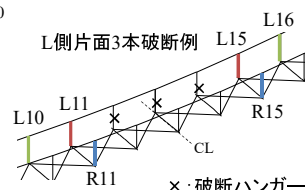
ハンガー破断の影響



[破断による近傍ハンガー張力と安全率への影響]

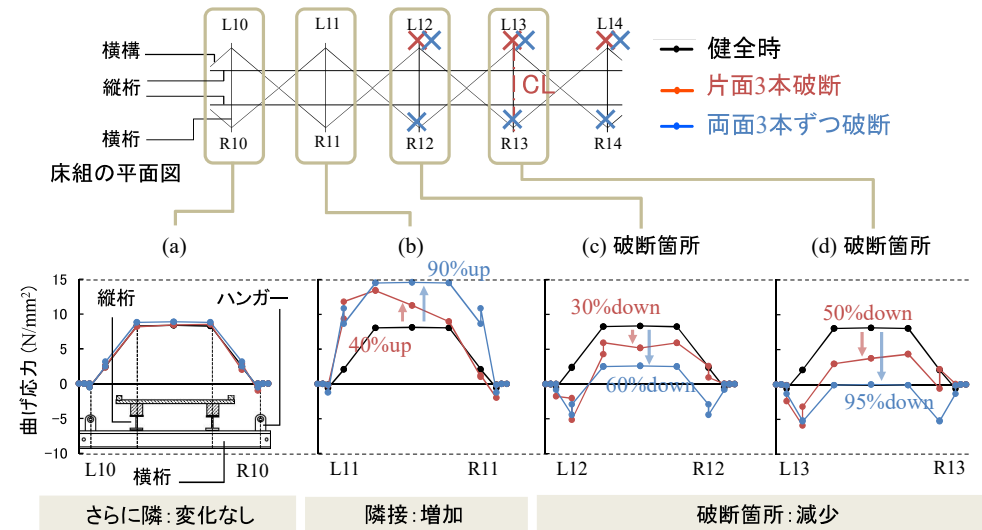
○ 安全余裕

- 片面3本以上破断: 安全率(3.5)を下回る
- 破断荷重を超えるケースはない
- 破断したハンガーの支持荷重はその隣接するハンガーに分担



47

床組の挙動と安全余裕(支間全長載荷)



[破断付近のハンガーが支持する横桁の曲げ応力変化]

○ ハンガーと同様に、横桁の曲げ応力も隣接する横桁のみに影響

48

まとめ

(1) 主ケーブル断面欠損の影響

- 断面欠損した主ケーブルの支持荷重は、橋軸対面側に分担
- 点検時に主塔の角度や床組の変位等の橋全体系の挙動を継続的に計測することで腐食等による損傷を、間接的に捉えられる可能性がある

(2) ハンガー破断の影響

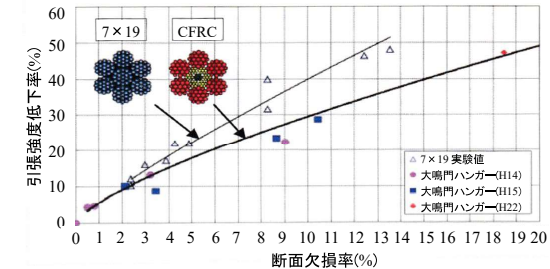
- 破断したハンガーの支持荷重は、同じ面の隣接するハンガーに分担
- 破断により隣接ハンガーが破断荷重を超えるケースはなかった
- ハンガー破断時には、破断箇所に隣接する横桁のみ曲げ応力が変化。しかし、降伏強度を超える部材は確認されなかった

49

今後の課題

○ 小規模吊橋の主ケーブルおよびハンガーロープの管理基準の検討

- ・ スtrandロープの断面欠損が、構造安全性に与える影響
- ・ ハンガーロープの破断による衝撃力(衝撃係数)の評価



[実橋ハンガーロープの断面減少率と引張強度低下率の関係⁵⁾]

⁵⁾ 金澤高宏、貴志友基、長尾幸雄:定着部が腐食したハンガーロープの詳細調査と維持管理、本四技報、Vol.40、No.126、2016

○ 部材などの損傷が各限界状態における耐荷性能および耐震性能に与える影響評価 など

50

ご清聴
ありがとうございました