

鋼橋のリダンダンシーに関する 設計法と維持管理について

奥井義昭（埼玉大学）

鋼構橋のリダンダンシーに関する 設計法と維持管理について

埼玉大学 奥井義昭

1

1.リダンダンシー検討の背景

アメリカ ミネソタ州の落橋事故 (2007/8/1)



<http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge>

2

1.はじめに：国内の橋の安心・安全

木曽川大橋, 本荘大橋の部材破断 (07/6/20)

香川と徳島県境のトラス橋の落橋 (07/11/15)

NHK特集「橋は大丈夫か～しのびよる劣化～」(08/6/9放送)



3

今回の発表内容

発表内容は以下の3つのグループの研究内容を引用させていただきました。

[1]永谷他, 我国の鋼トラス橋を対象としたリダンダンシー解析の検討, 土木学会論文集A, Vol.65, No.2 (2009) p.410- 425

<http://sucra.saitama-u.ac.jp/> より検索, ダウンロード可能

[2]館石他, 鋼トラス橋のリダンダンシー評価手法の開発と合理的維持管理への適用: 鋼トラス橋のリダンダンシー評価ガイドライン(案) (2010.6)

<http://sucra.saitama-u.ac.jp/> より検索, ダウンロード可能

[3]土木学会: 鋼構造物のリダンダンシーに関する検討小委員会 (2011.7～現在活動中)

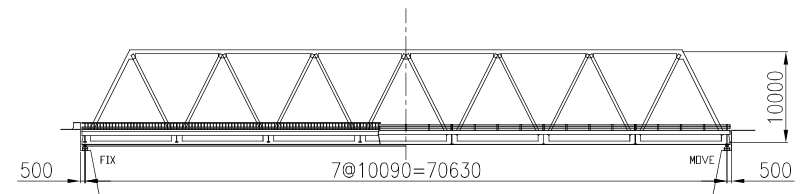
4

2.木曽川大橋の線形リダンダンシー解析 (単純下路トラス橋)

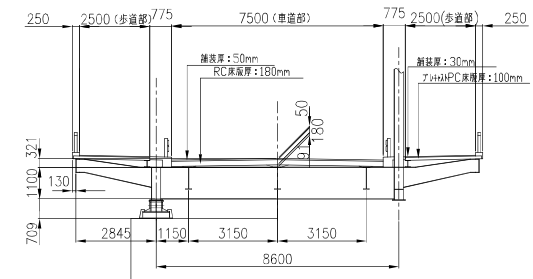
文献[1]

5

木曽川大橋の概要



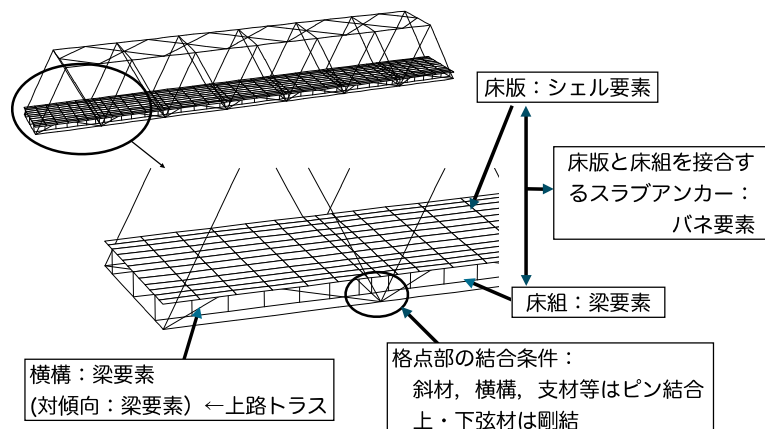
設計年次：1960年
形式：単純下路トラス
支間長：70.63m
主構高：10.00m
主構間隔 8.60m
使用鋼材 SS41, SM50
設計活荷重：TL-20



6

構造解析モデル

解析モデル：弾性解析（微小変形）

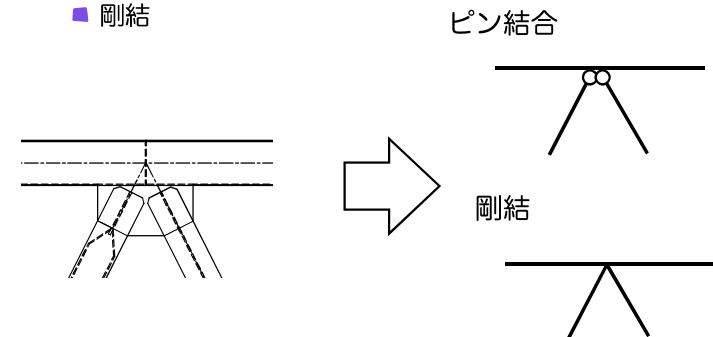


7

格点のモデル化

解析における格点部の斜材結合条件

- ピン結合
- 剛結



8

部材破断時の応力・変形状態

検証すべき状態：

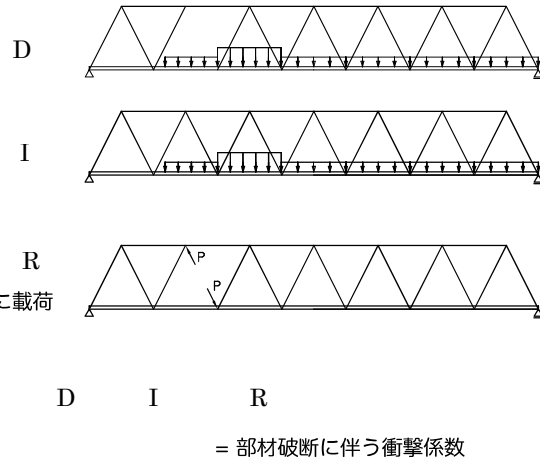
- ・死活荷重載荷
- ・部材破断

解析ケース1：

- ・死活荷重載荷
- ・健全状態

解析ケース2：

- ・部材破断状態
- ・破断部材断面力を逆方向に載荷



9

載荷荷重

■ 死荷重

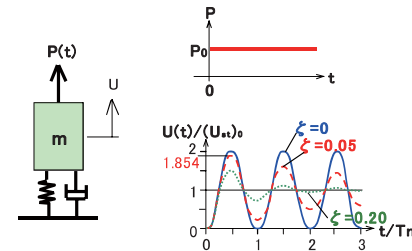
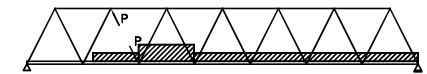
架設系を考慮(床版の合成有無)

■ 活荷重：L 荷重（B 活荷重）

破断部材軸力が最大となる状態

■ 破断時の衝撃

衝撃係数 1.854（下図参照）



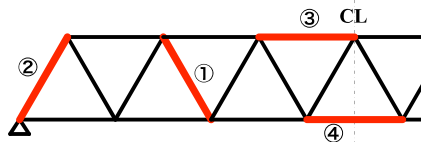
- ① 構造全体を 1 自由系に近似
- ② 構造全体の減衰を 5% と仮定
- ③ 瞬間的に荷重 P が作用

↓
最大応答値 → 衝撃係数

10

破断想定部材

- ① 斜材破断ケース（木曽川で破断した部材）
- ② 端柱破断ケース
- ③ 上弦材破断ケース
- ④ 下弦材破断ケース

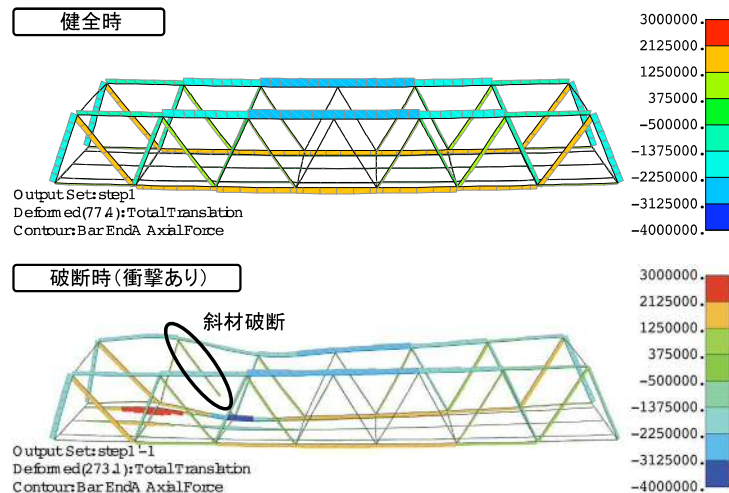


11

部材破断時の断面力

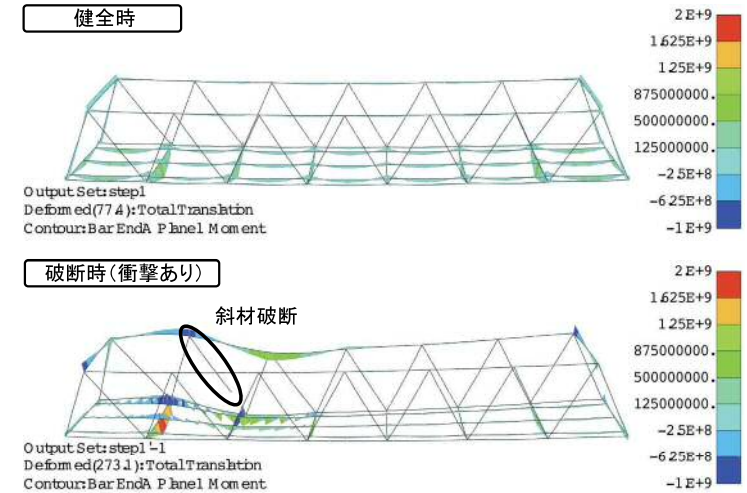
12

斜材破断時の軸力図（死荷重載荷）



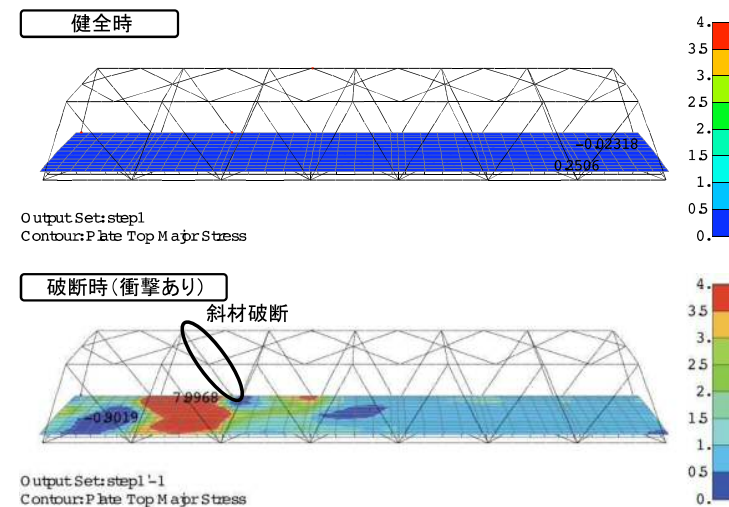
13

斜材破断時の曲げモーメント図（死荷重載荷）



14

斜材破断時の床版応力図（死荷重載荷）



15

リダンダンシーの評価

16

リダundancy解析における部材照査(1)

作用軸力が引張の場合

$$\frac{P}{P_p} \quad \frac{M}{M_p} \quad \frac{M}{M_p}$$

軸力 面内曲げ 面外曲げ

P, M : 作用軸力, 作用曲げモーメント
 P_p, M_p : 全塑性軸力, 全塑性曲げモーメント



$R > 1.0$ で終局状態と判断

17

リダundancy解析における部材照査(2)

作用軸力が圧縮の場合

$$\frac{P_u}{P_E} \quad \frac{M}{M_p} \quad \frac{M}{M_p}$$

軸力 面内曲げ 面外曲げ

P, M : 作用軸力, 作用曲げモーメント
 P_u : 道示3.2.1に基づく、座屈を考慮した圧縮の終局強度
 P_E : オイラー座屈軸力
 M_p : 全塑性曲げモーメント

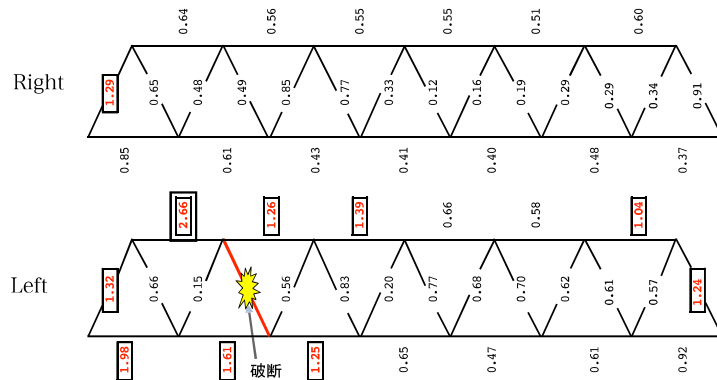


$R > 1.0$ で終局状態と判断

18

斜材破断時のR値の算出結果

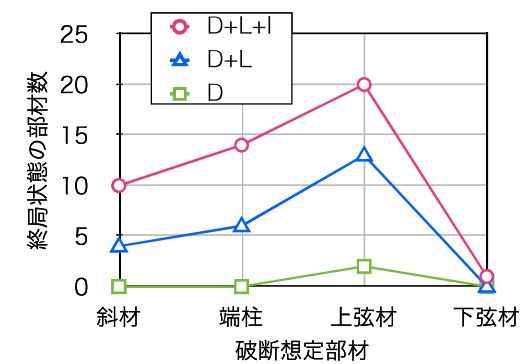
D + L (衝撃あり)



構造全体として不安定となる可能性がある。

19

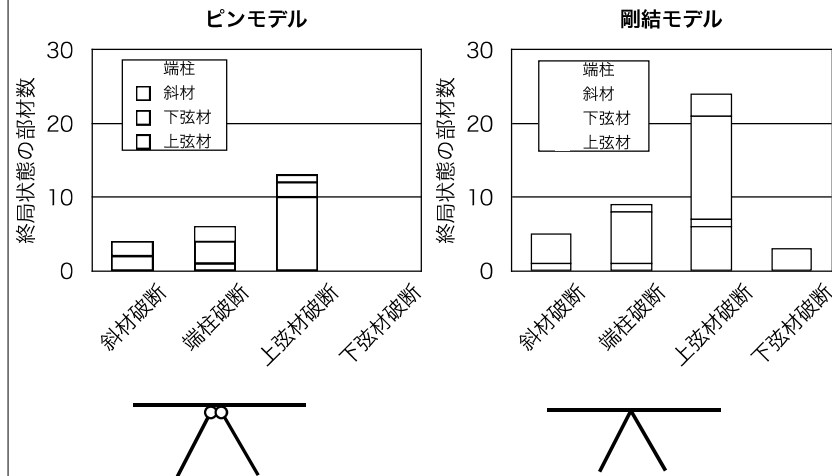
リダundancy解析のまとめ



斜材：ピン結合

20

斜材の結合条件の影響



21

Fracture Critical Memberの検討

22

米国におけるFCMの扱い

- ▶ FCMの定義(AASHTO LRFD) :
component in tension whose failure is expected to result in the collapse of the bridge...
- ▶ 米国の鋼橋のうち約11%がFCMを持つFracture Critical Bridge (FCB)
- ▶ FCBは通常の橋梁より厳しい点検要求
(FHWA Bridge Inspection Standards)
- ▶ 実際にはFCMの定義あいまい
 - ▶ 活荷重を何処まで考慮
 - ▶ 部材破断にともなう衝撃の扱い
 - ▶ 橋梁管理者と設計者が協議

23

木曽川大橋のFCM

- 端柱, 上弦材→圧縮部材→FCMでない
- 斜材, 下弦材→引張部材
 - 斜材 →FCM ($D+0.15L$ で $R=1$)
 - 下弦材
 - → $D+L$ だとFCMでない
 - → $D+L+I$ だとFCM

24

これを行った時の検討結果のまとめ

- リダンダンシー解析の結果、斜材はFCMとなった。しかし、実橋では斜材が破断しても落橋しなかったわけで、この差が何から生じたのか検討する必要がある。
- D+L+I(衝撃値=1.85)を考慮したリダンダンシー解析では、部材破断を過大評価する可能性がある。照査荷重については今後の検討課題と考えられる
- 格点部のモデル化(結合条件)のリダンダンシー解析結果に与える影響は大きい。
- 床版と合成された下弦材破断時のR値が小さいことから、床版は構造全体の安定に大きく寄与している。
- リダンダンシーの評価で用いることが出来るガセット部の終局耐力の評価手法を開発する必要がある。

25

リダンダンシー評価の課題

- 非線形性の影響（線形リダンダンシー解析の適用範囲）
 - ▶ 線形解析＋設計レベルの耐力評価
 - ▶ 非線形解析
- 格点部関係の問題
 - ▶ モデル化、格点部の耐力照査、格点部が破壊の起点となるか？
- 想定する活荷重レベル
- 部材破断に伴う衝撃や連鎖崩壊の検討
- 他形式の橋梁（桁橋、アーチなど）
- 損傷シナリオの問題
- ガイドラインの作成

26

3.非線形性の影響 (線形解析の適用範囲)

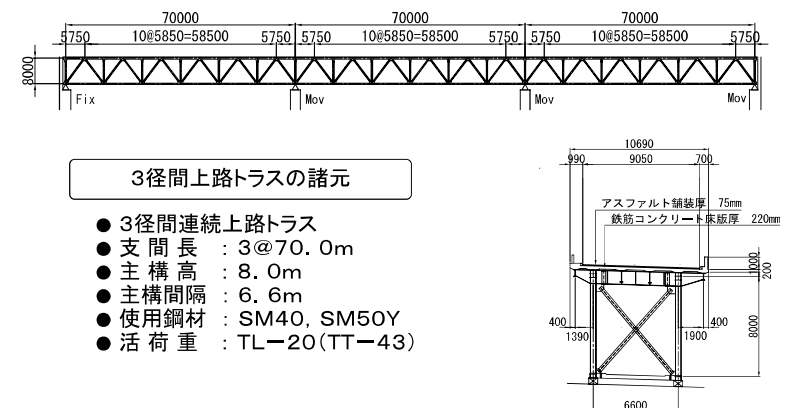
文献[1][2]

伊藤，鋼トラス橋のリダンダンシー解析手法の検討，埼玉大学大学修士論文，2010

27

線形解析と非線形解析の比較

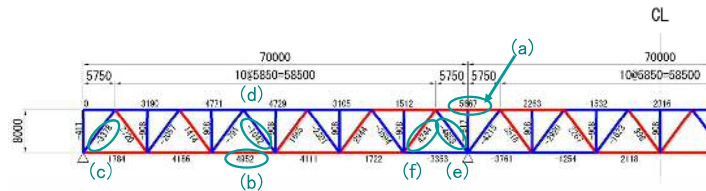
解析対象：3径間上路トラス(JH標準図1980年)



28

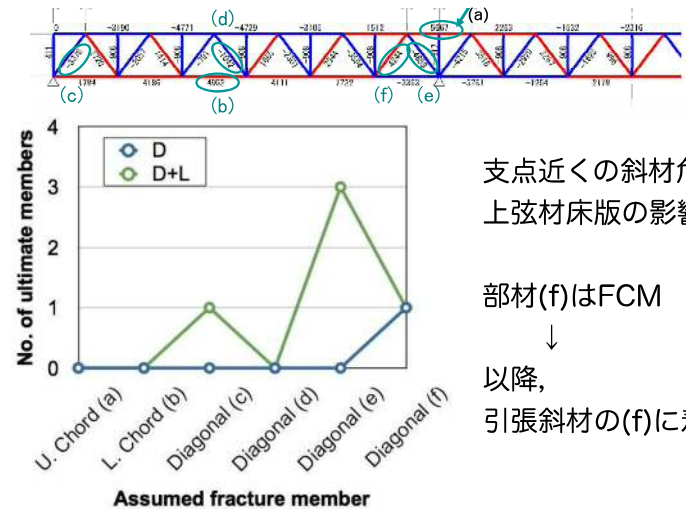
解析条件

- 材料非線形考慮
鋼材, コンクリート (引張側のみ), スラブアンカー
- 幾何学的非線形考慮
- トラス部材: ファイバーモデルでモデル化
- 破断想定部材



29

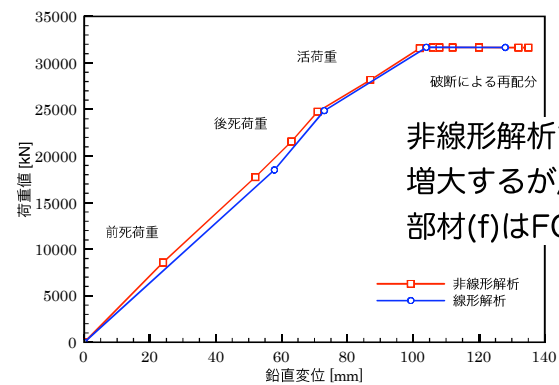
線形リダダンシー解析のまとめ



30

荷重-変位関係の比較

引張斜材(f)をしたケース



非線形解析ではたわみは
増大するが崩壊せず
部材(f)はFCMでない

31

4. 格点部関係の問題

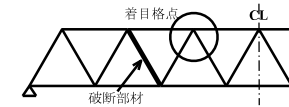
32

4.1 格点部のモデル化：ピン/剛結？

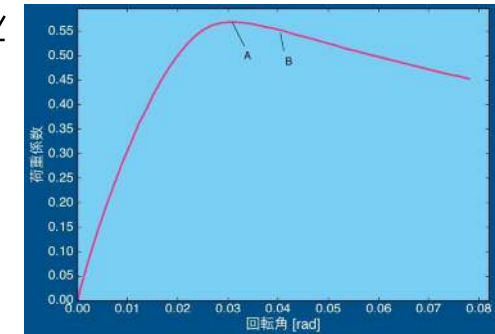
33

格点部耐力検討（3次元弾塑性FEM解析）

斜材破断時の格点部の応力分布図（D+L【衝撃なし】）



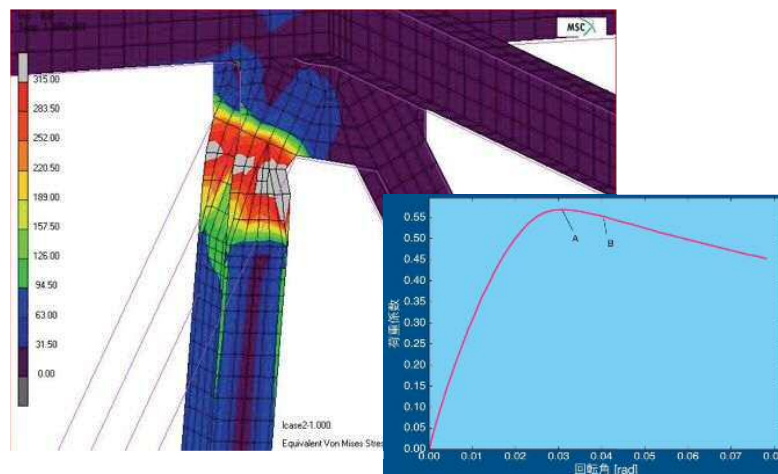
荷重係数 = 1
骨組み解析時の断面力



斜材の回転角

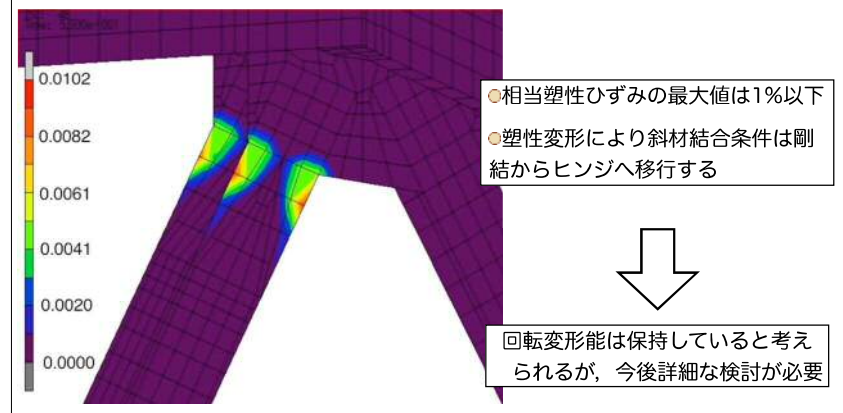
34

相当応力分布(ピーク荷重時)



35

斜材破断時の格点部の相当塑性ひずみ分布図 (死活荷重載荷【衝撃なし】)



36

4.2 ガセット部の照査

37

ガセットプレート照査式

文献[2]では本四基準に基づき以下の3つの照査式を提案

- 斜材もしくは鉛直材の軸力と曲げモーメントによるガセットプレートの照査
- ガセットプレートの合成応力の照査
- ガセットプレートの局部座屈の照査

38

4.3 トラス格点部は破壊の 起点となるか？

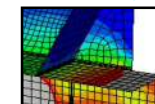
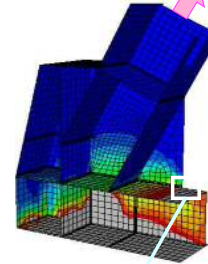
文献[2]名古屋大学舘石先生検討結果

39

応力集中部の抽出

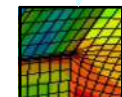
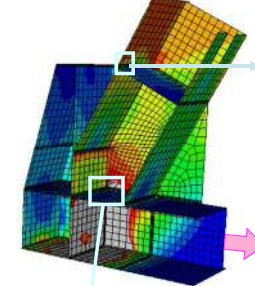
■ 解析結果(支点格点部)

<下弦材引張>

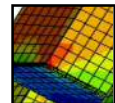


下弦材上フランジ
と
支点ダイヤフラム

<斜材引張>



下弦材上フランジ
と
ダイヤフラム

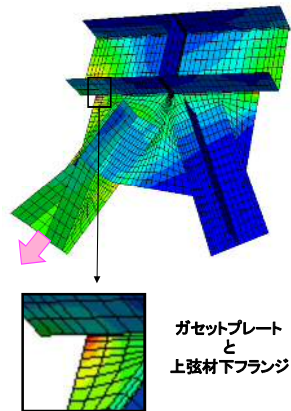


40

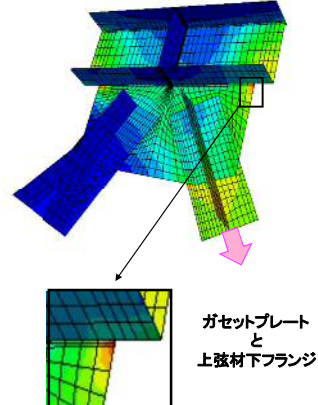
応力集中部の抽出

■ 解析結果(中間格点部)

<下弦材左引張>



<下弦材右引張>

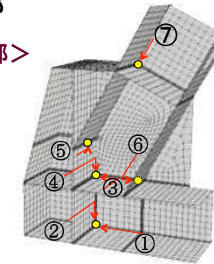


41

ホットスポット応力の着目点

■ 着目部

<支点格点部>



下弦材下フランジと支点ダイヤフラムの交差部

- ①: 下弦材下フランジ側の溶接止端部
- ②: ダイヤフラム側の溶接止端部

下弦材上フランジと支点ダイヤフラムの交差部

- ③: 下弦材上フランジ側の溶接止端部
- ④: ダイヤフラム側の溶接止端部

斜材上フランジと支点ダイヤフラムの交差部

- ⑤: ダイヤフラム側の溶接止端部

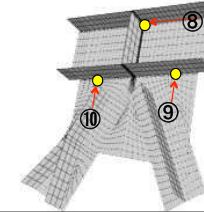
斜材下フランジと下弦材上フランジの交差部

- ⑥: 下弦材上フランジ側の溶接止端部

斜材とダイヤフラムの交差部

- ⑦: 斜材ウェブ側の溶接止端部

<中間格点部>



上弦材上フランジとダイヤフラムの交差部

- ⑧: 上弦材上フランジ側の溶接止端部

ガセットプレートと上弦材下フランジの交差部

- ⑨, ⑩: ガセットプレート側の溶接止端部
(ガセット端部から約170mm位置)

42

疲労照査

破断までの荷重繰返し数(疲労寿命N) ≤ 疲労設計荷重の載荷回数

$$\Delta\sigma^m \cdot N = C_0$$

$$C_0 = 2 \times 10^6 \cdot \Delta\sigma_f^m$$

m: 疲労設計曲線の傾きをあらわすための定数
C₀: 疲労設計曲線を表すための定数

$$nt_i = ADTT_{SLi} \cdot \gamma_n \cdot 365 \cdot Y$$

$$= 1.5 \times 10^4 \cdot 0.03 \cdot 365 \cdot 100$$

$$\approx 16.4 \times 10^6 \text{ cycle}$$

ADTT_{SLi}: 1方向あたりの日大型車交通量

疲労詳細位置	疲労強度等級	①				②				⑤	⑦
		E	F	G	H	E	F	G	H	H	H
ホットスポット応力範囲 (MPa)		21.5	21.5	21.5	21.5	22.4	22.4	22.4	22.4	8.3	3.6
2×10 ⁶ 基本許容応力範囲 (MPa)		80	65	50	40	80	65	50	40	40	40
疲労設計荷重の 載荷回数	(×10 ⁶)	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4
照査位置の 疲労寿命	(×10 ⁶)	103	55.3	25.2	12.9	91.1	48.9	22.2	11.4	221	2669
年数	(年)	628	337	153	78	555	298	135	70	1347	16268

43

まとめ

トラス格点部は破壊の起点となるか？

- 格点部から疲労損傷が発生する危険性は低い
- 今後必要な検討として,
 - ルート部に着目した疲労照査
 - 曲げの影響を考慮した疲労照査

44

5.ガイドラインの検討

文献[2]

45

リダンダンシー評価ガイドライン目次（案）

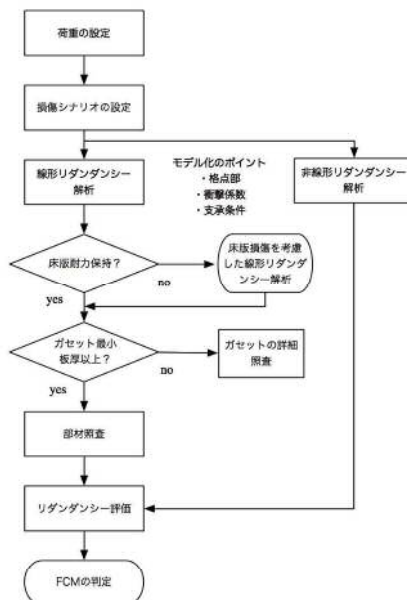
- | | |
|----------------------------|-------------------------------------|
| 1. 適用の範囲 | 8. 格点部の照査 |
| 2. 用語の定義 | 8.1 腹材の軸力と曲げモーメント
によるガセットプレートの照査 |
| 3. リダンダンシー解析の手順 | 8.2 ガセットプレートの合成応力
の照査 |
| 4. 荷重 | 8.3 ガセットプレートの局部座屈
の照査 |
| 5. 線形リダンダンシー解析 | 9. リダンダンシーの評価とFCMの同
定 |
| 6. 線形リダンダンシー解析における
モデル化 | 10. 非線形リダンダンシー解析 |
| 6.1 弦材, 斜材, 鉛直材 | |
| 6.2 格点部 | |
| 6.3 二次部材 | |
| 6.4 床版 | |
| 6.5 ずれ止め | |
| 6.6 支承 | |
| 7. 部材照査 | |

文献[2]より,
土木学会委員会にて検討中

46

リダンダンシー評価 のフローチャート 文献[2]より

土木学会委員会にて検討中



47

6. 土木学会：鋼構造物のリダンダンシーに関する検討小委員会（2011.7～現在活動中） で検討中のテーマ

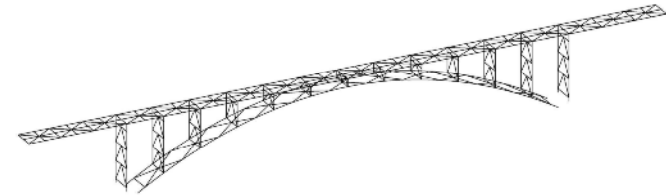
48

主な検討テーマ

- 桁橋、アーチ橋のリダンダンシー解析ケーススタディ
- 連鎖崩壊型リダンダンシー解析
- 活荷重レベルの問題
- ガイドラインの作成

49

鋼アーチ橋のケーススタディ



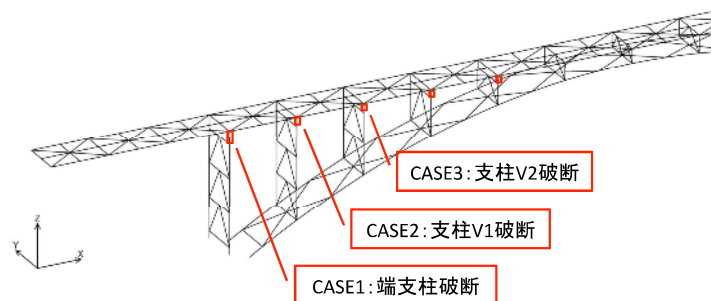
対象橋梁

- 鋼上路式アーチ橋
- 橋長173m, アーチ支間114m, アーチライズ16.87m
- 「JSSCテクニカルレポートNo.93」と同橋梁

50

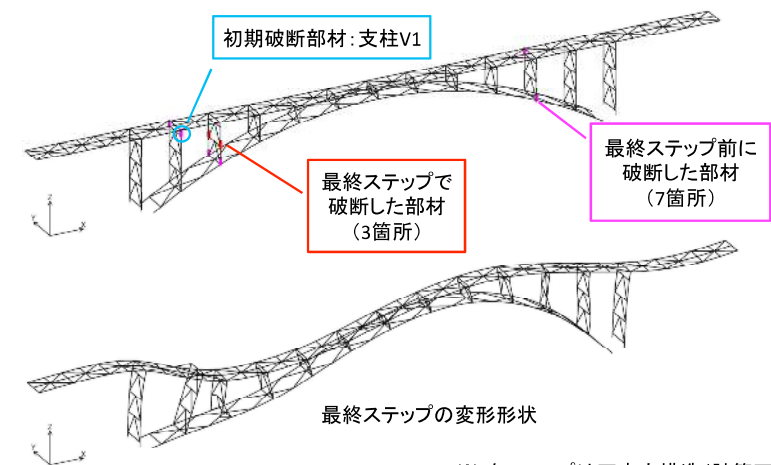
解析条件

- 支柱上端部材の破断（部材撤去）を初期状態、損傷の進行を確認（死荷重＋活荷重）
- 耐力照査NGの部材を破断と判定して部材撤去していく
- 部材破断時の衝撃力は考慮しない
- 初期の破断箇所を変えて、損傷の進行度を比較
- 解析は線形解析



51

CASE2：支柱V1破断時



※ 次ステップは不安定構造(計算不可)

52

活荷重レベルの問題

NCHRP Report 406: Redundancy in Highway Bridge
Superstructuresより

4つの限界状態を定義、その状態における活荷重係数を以下の記号で表す。

1) 部材破壊: LF_1

橋梁全体系に荷重を増加させてゆき最初にある部材が終局状態に達した状態。

2) 終局限界状態: LF_u

橋梁全体系としての終局状態。通常、橋梁全体系の非線形解析より算出される。

3) 機能限界状態: LF_f

橋の機能面からみた終局状態で、たわみがスパン長の1/100に達した状態と仮定する。

4) 損傷時限界状態: LF_d

部材を1つ除去した状態における限界耐力の状態

53

System Reserve Ratios (系の余耐力比)

リダンダンシーを表す指標として次の3つのSystem Reserve Ratioを定義し、所要値を設定

$$R_u = \frac{LF_u}{LF_1} \geq 1.30$$

$$R_f = \frac{LF_f}{LF_1} \geq 1.10$$

$$R_d = \frac{LF_d}{LF_1} \geq 0.50$$

大雑把に言うと、
部材破断時の活荷重倍率は
通常の設計時の活荷重倍率の50%
でよい

54

落橋させないためには...

55

I-35W橋の落橋の経緯と教訓

- ミネアポリスI-35W橋：リダンダンシー解析実施されていた。しかし、損傷シナリオとして部材破断のみ考慮
- ガセット通常の半分の板厚→2003年の時点でガセット面外変形→2007年補修工事→ガセットの破壊が橋梁全体の崩壊



56

橋梁を崩壊させないために何が重要か？

設計段階

設計時に想定した終局までの余裕度

維持管理段階

- 個々の破壊シナリオの構造系としての重要度
- リダンダンシー評価
- 補修の履歴

情報を共有するシステム

- 管理者
- 設計者
- 検査者
- 補修工事担当