

鋼トラス橋のリダンダンシー解析の 維持管理への適用性評価

Applicability Evaluation of Redundancy Analysis to Maintenance of Steel Truss Bridges

永谷 秀樹*¹
Hideki NAGATANI

Summary

Triggered by the collapse of the steel truss bridge in Minnesota and a diagonal member breaking on a steel truss bridge in Japan, a Special Technical Steel Bridge Study Team was established to make proposals concerning the maintenance of steel bridges. The team performed redundancy analyses for two truss bridges, each of which having different design years and forms, to examine redundancy evaluation and the applicability of results to the maintenance of steel truss bridges. The paper introduces the effectiveness that redundancy analyses have on the selection of members for the purpose of target-focused maintenance as well as the future challenges of inspection load and modeling.

キーワード：鋼トラス橋、リダンダンシー解析、維持管理

1. はじめに

アメリカではミネソタ州の鋼トラス橋 (I-35W) が落橋し多数の死傷がでた。また、日本国内でも大きな事故には至らなかったが鋼トラス橋である木曾川大橋、本荘大橋の斜材破断が発見された。これは公に報道され、橋梁の老朽化と維持管理の重要性・必要性が、橋梁技術者のみならず社会的に認識され始めている。

このような背景から、鋼橋技術研究会では鋼橋の維持管理に関連した討論会「トークイン・日本の鋼橋を考える」が企画され、鋼橋技術研究会を構成する橋梁技術者の立場から橋梁の維持管理に関する提言を目的として、以下に示すメンバーによる特別検討チームが結成された。

リーダー 奥井 義昭：埼玉大学大学院准教授
 明石 直光：総合技術コンサルタント
 平山 博：大日本コンサルタント
 永谷 秀樹：宮地鐵工所
 宮森 雅之：川田工業
 小幡 泰弘：伊藤忠テクノサイエンス
 安田 昌宏：伊藤忠テクノサイエンス
 松田 岳憲：サクラダ
 石井 博典：横河ブリッジ
 越後 滋：川田工業（オブザーバー）
 高田 和彦：横河ブリッジ（オブザーバー）

この特別検討チームにおいて、設計年次、形式の異なる2つの鋼トラス橋である木曾川大橋と旧日本公団の標準図集の橋梁を対象とし、ミネソタ州I-35W橋の検討（以下、URSレポート¹と表す）を参考に、リダンダンシー評価を実施した。さらに、格点部の耐力検討、リダンダンシー評価に適用した解析手法の妥当性の検証を目的とした複合非線形解析を実施した。

本報告では、この特別検討チームが実施した検討内容と、その検討結果による同チームの維持管理へのリダンダンシー解析の適用性評価および維持管理に関する提言について紹介を行う。

2. 検討対象と検討フロー

実施した検討の全体フローを図-1に示す。

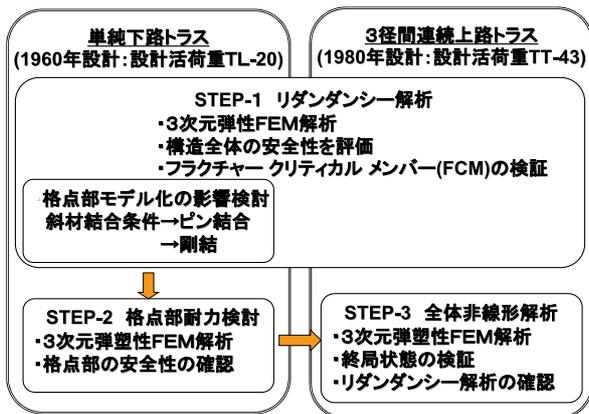
検討対象である木曾川大橋は1960年に設計された単純下路トラス橋であり、旧日本道路公団の標準図集の橋梁は1980年に設計され設計荷重TT-43に対応した3径間連続上路トラス橋である。

両橋梁に対してリダンダンシー評価を実施している。

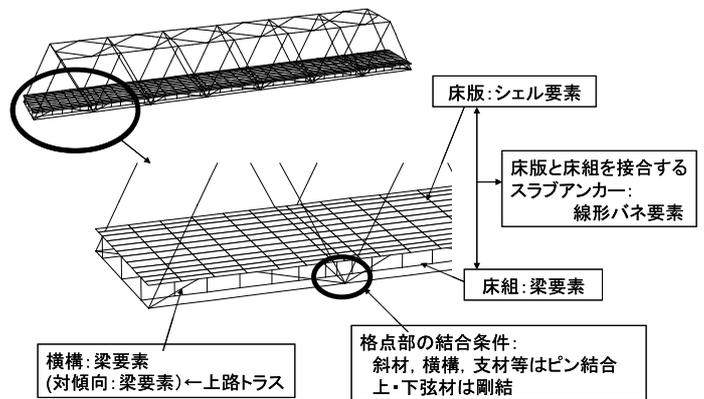
単純下路トラス橋では、格点部のモデル化の解析結果への影響を検討するため、斜材がピン結合、剛結合の2種類の場合について解析を実施した。さらに、格点部のみを切り出した3次元非線形FEM解析を実施し、格点部

*1(株)宮地鐵工所 技術本部設計部技術開発グループ課長

の耐力検討を行った。3径間連続上路トラス橋では、構造全体系において複合非線形解析を実施し、リダンダンシー解析に適用した線形解析結果と比較することにより、解析手法の妥当性の検証を行った。



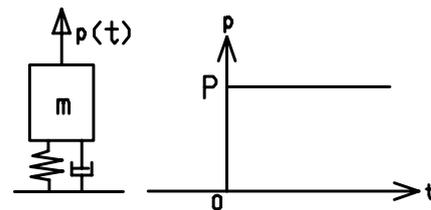
図一 検討の全体フロー



図一 2 解析モデル

2) 载荷荷重

载荷する荷重は、死荷重、活荷重（着目する破断部材の軸力が最大となるようにB活荷重を影響線線載荷）、および破断に伴う衝撃力とした。この衝撃力には、URSレポートと同様に、図一3に示されるとおり、構造全体を1自由度系振動モデル（減衰定数を5%）に近似し、瞬間的に荷重Pが作用したときの最大応答値より算出された衝撃係数1.854を採用した。



図一 3 部材破断に伴う衝撃係数算出モデル

2. リダンダンシー解析の概要

(1) 基本方針

本検討に適用したリダンダンシー解析は、URSレポートに用いられた手法を参考に、線形解析により破断想定部材が破断した場合の部材断面力を算出し、その断面力を用いて各部材が終局状態であるかを判定した。

さらに、この結果を用いて、着目破断部材が橋梁の崩壊に至らしめる決定的な部材 Fracture Critical Member（以下 FCM と表す）であるかの検討を行った。

(2) 解析手法

1) 解析モデル

解析は、立体FEMによる弾性解析によるものとし、解析モデルは図一2に示す。主構、横構および床組部材（縦桁、横桁）は梁要素、床版はシェル要素によりモデル化を行っている。桁（床組）と床版を結合するスラブアンカーは、合成効果を考慮して線形バネ要素を用いてモデル化した。なお、そのバネ定数は実験結果³⁾を基に、実橋で適用されたスラブアンカー径との比率を乗じて算定した。なお、桁と床版との付着については、繰り返し荷重による経年劣化等の理由から安全側の仮定としてモデル化に考慮しないものとした。

3) 断面力算定法

部材破断時の断面力算定法を図一4に示す。部材破断時の断面力は、解析ケース1と解析ケース2の両者を重ね合わせることで算出する。解析ケース1は健全状態の断面力を示す（载荷荷重は死荷重、活荷重）。一方、解析ケース2は破断想定部材を取り除いた構造系に、解析ケース1において破断想定部材に作用する断面力（軸力、曲げモーメント）を、前述の部材破断による衝撃係数（1.854）を乗じて逆向きに载荷する。

(3) 部材照査

各部材の照査は、橋梁の崩壊に影響度が高いと考えられる主構（上・下弦材、斜材）に対して実施する。床組、横構、床版については本検討では照査対象外とした。

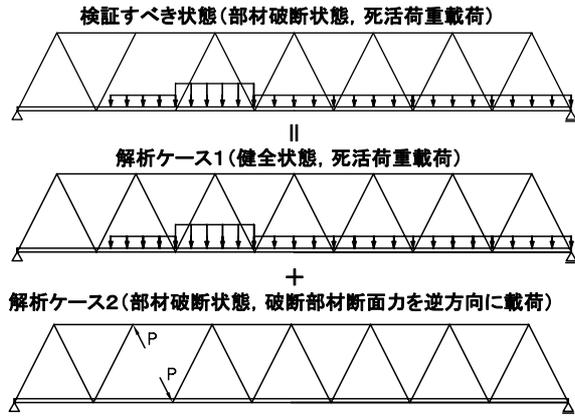


図-4 部材破断時の断面力算出方法

部材照査は、以下の算定式により得られるR値を用いて行い、 $R \geq 1.0$ の場合に部材が終局に達したものと判断した。

①作用軸力が引張の場合

作用軸力が引張の場合は、軸力と2軸曲げが作用する場合の相関強度式を表わしている。 $R = 1.0$ は全塑性状態での終局状態と評価する。

$$R = \left(\frac{P}{P_p} \right) + \left(\frac{M}{M_p} \right)_{ip} + \left(\frac{M}{M_p} \right)_{op} \quad (1)$$

ここで、P、M：作用軸力および曲げモーメント

P_p 、 M_p ：全塑性軸力、全塑性曲げモーメント
添字のipは面内、opは面外を示す。

②作用軸力が圧縮の場合

作用軸力が圧縮の場合は、付加曲げモーメントの影響を考慮した圧縮と2軸曲げモーメントを受ける部材の部材レベルでの座屈強度相関式を用いた²⁾。

$$R = \left(\frac{P}{P_u} \right) + \frac{1}{1 - (P/P_E)_{ip}} \cdot \left(\frac{M_{eq}}{M_p} \right)_{ip} + \frac{1}{1 - (P/P_E)_{op}} \cdot \left(\frac{M_{eq}}{M_p} \right)_{op} \quad (2)$$

ここで、 P_u ：道示Ⅱ 3.2.1に基づく、座屈を考慮した終局圧縮強度

P_E ：オイラー座屈軸力

M_{eq} ：換算曲げモーメント

なお、上路トラスでは床組作用の影響で部材の発生曲げモーメント放物線分布するため、その絶対最大値を用いて照査をおこなった。なお、式(2)では局部座屈による強度低減は考慮できなが、今回の検討に用いた橋梁の

部材断面では局部座屈の影響は無視できる判断のもと適用した。

3. 単純下路トラス橋（木曾川大橋）の検討

(1) 解析対象橋梁の概要

最初の解析対象橋梁は、実際に斜材の破断損傷が報告されている単純下路トラス橋である木曾川大橋であり、その概要を図-5に示す。なお、解析対象とした構造は建設当時のものであり、現在は追い越し車線側の歩道コンクリートが撤去されている。

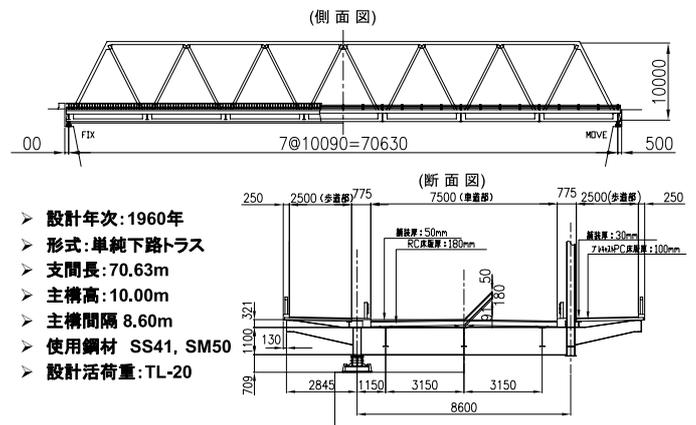


図-5 単純下路トラス橋の構造図

(2) 破断想定部材と解析モデル

1) 破断想定部材

リダンダンシー解析における損傷シナリオとして想定する破断部材は、実際に腐食により破断した斜材と上・下弦材および斜材（端柱含む）において設計軸力が最大となる部材とした。これより、損傷シナリオとして、図-6に示す以下の4ケースの部材破断を想定した（()内は設計軸力を示す）。

- ①実際に腐食により破断した斜材（引張1774kN）
- ②設計軸力が最大となる斜材【端柱】（圧縮2548kN）
- ③設計軸力が最大となる上弦材（圧縮4606kN）
- ④設計軸力が最大となる下弦材（引張4557kN）

2) 解析モデル

解析モデルは、2.にて説明したとおりである（図-2を参照）。なお、スラブアンカーはバネ定数として1本当たり $K = 659\text{kN/mm}$ を適用した。

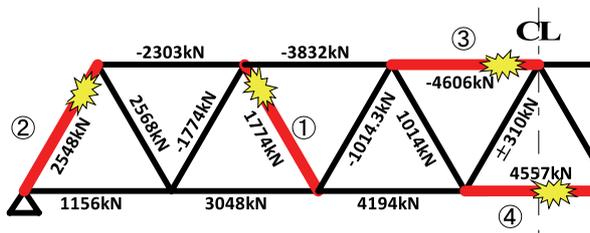


図-6 単純下路トラス橋の損傷シナリオ

荷重は死荷重 (D)、活荷重 (L)、部材破断の衝撃力を考慮し、載荷として表-1 に示す4種類の組合せケースを考慮した。

設計ではトラスの格点部はピン結合して断面力の算出しており、格点部における斜材の取付け構造においてはピン結合に近い接合条件となるように配慮されている。しかし、実構造物における格点部の結合条件は単純にピン結合と挙動しないものと考えられる。したがって、格点部のモデル化は図-7 に示すように、上・下弦材は剛結とし、斜材の結合条件をピン結合と剛結の2種類でモデル化した。

したがって、損傷シナリオの破断想定部材4ケース、載荷4ケースおよび格点部のモデル化2ケースの組合せで合計32ケースについてリダンダンシー解析を行った。

表-1 載荷ケース

載荷ケース No.	破断時の衝撃考慮	載荷荷重	
		死荷重(D)	活荷重(L)
1	○	○	○
2	○	○	×
3	×	○	○
4	×	×	×

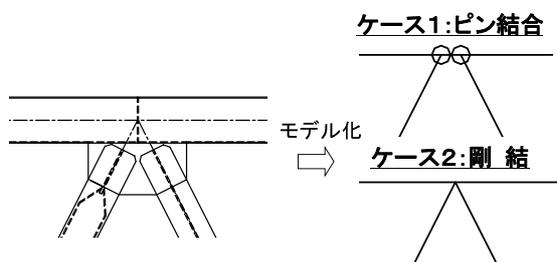


図-7 格点部のモデル化

(3) リダンダンシー解析結果および考察

1) 部材照査結果：斜材破断ケース

リダンダンシー解析における部材照査結果を、全解析ケースから代表して、破断想定部材を実際に腐食により破断した斜材とした場合の全部材のR値を図-8 に示

す。同図において上段は右主構面、下段は左主構面を表わし、Rが1.0を超える部材が終局状態に至っていると判断される。

また、() 外の数値は図-7 に示す格点部のモデル化において斜材の結合条件がピン結合の場合のR値を示し、() 内にはその結合条件を剛結とした場合のR値を示す。

なお、図-8 (a) は部材破断の衝撃を考慮した(死荷重+活荷重)の載荷ケース、図-9 (b) には実際の木曾川橋は斜材破断時に崩壊に至らなかったことに対する評価を行うため、死荷重載荷状態で斜材破断時の衝撃を考慮した載荷ケースの解析結果を示す。

図-8 (a) の最も厳しい載荷条件による部材照査結果では、格点部をピン結合とした場合には、破断想定部材と同一構面での9部材が破断する判断され、Rの最大値は破断想定部材の直近の上弦材で2.66となっている。したがって、斜材破断により橋梁全体がほぼ崩壊するような状態を表わしているものと考えられる。

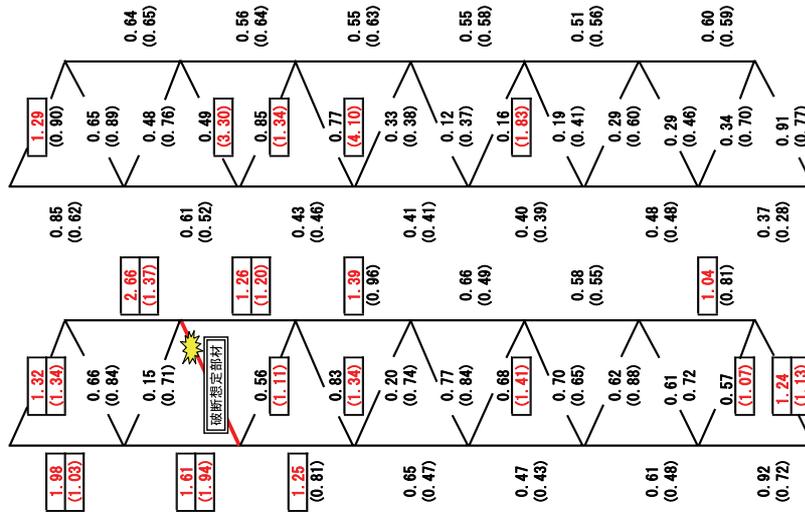
これに対し、図-8 (b) の活荷重を考慮せず、格点部がピン結合の場合では、終局状態であると判断される部材は破断想定斜材と同一構面の上・下弦材の各1部材のみであり、Rの最大値は1.36と比較的小さなものである。

また、格点部を斜材結合条件をピン結合とした場合と剛結した場合を比較すると、上・下弦材、斜材における終局状態と判断される部材数、R値に明確な差異が生じている。

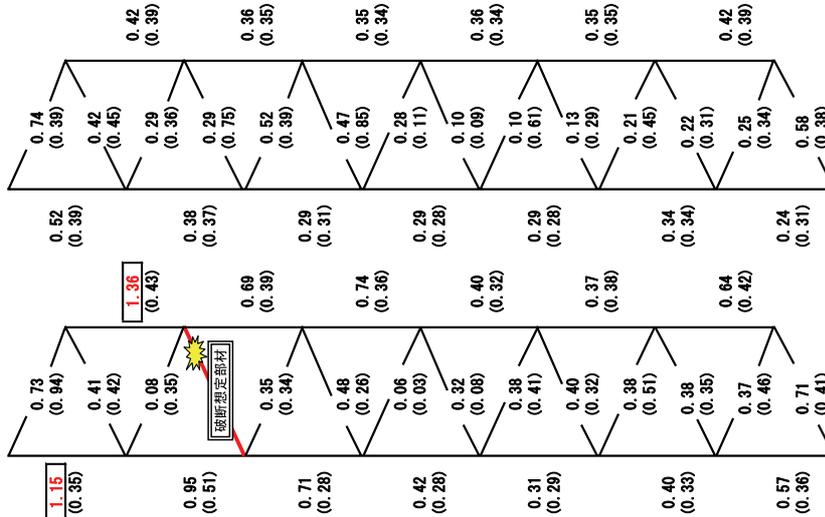
以上より、リダンダンシー評価結果は、想定する荷重、格点部のモデル化により、大きく影響を受けると考えられる。また、部材破断による衝撃の影響も少なくない。そこで、以下に荷重ケース、格点部のモデル化等を変化させた全ての解析結果について、リダンダンシー評価へのこれらの影響について比較検討を行う。

2) リダンダンシー評価に対する考察

今回実施したリダンダンシー解析による部材照査結果(全32ケース)を表-2、3に示す。この表は、想定される部材の破断により、Rが1.0を超えた部材数とRの最大値を示している。なお、表-2では、部材破断時の発生曲げモーメントに照査結果への影響を確認するため、R算出時に曲げモーメントを無視した結果も示している。



(a) 死荷重+活荷重+部材破断による衝撃の载荷ケース（上段は右側、下段は左側主構を示す）



(b) 死荷重+部材破断による衝撃の载荷ケース

図-8 単純下路トラス橋の部材照査結果（実際に腐食により破断した斜材の破断を想定）

表-2 終局状態に達した部材数とRの最大値(曲げの影響)

		軸力、曲げモーメントを考慮				軸力のみ考慮				
		①斜材破断	②端柱破断	③上弦材破断	④下弦材破断	①斜材破断	②端柱破断	③上弦材破断	④下弦材破断	
		R(max)	R(max)	R(max)	R(max)	R(max)	R(max)	R(max)	R(max)	
衝撃あり	D+L	上弦材	2.66	3.07	3.36	1.28	R<1	2.15	3.15	R<1
		下弦材	4	1	11	0	0	0	1	0
	D	上弦材	1.36	1.61	2.19	R<1	R<1	2.19	R<1	
		下弦材	1	1	10	0	0	0	0	
衝撃なし	D+L	上弦材	1.63	1.71	1.86	R<1	R<1	1.55	R<1	
		下弦材	2	3	10	0	0	0	0	
	D	上弦材	R<1	R<1	1.16	R<1	R<1	R<1	R<1	
		下弦材	0	0	2	0	0	0	0	

表-3 終局状態に達した部材数とRの最大値(格点部の影響)

		①斜材破断		②端柱破断		③上弦材破断		④下弦材破断		
		斜材ピンモデル	剛結モデル	斜材ピンモデル	剛結モデル	斜材ピンモデル	剛結モデル	斜材ピンモデル	剛結モデル	
		R(max)	R(max)	R(max)	R(max)	R(max)	R(max)	R(max)	R(max)	
衝撃あり	D+L	上弦材	2.66	4.10	3.07	3.15	3.36	18.16	1.28	1.70
		下弦材	4	2	1	1	11	9	0	0
	D	上弦材	1.36	R<1	1.61	R<1	2.19	11.07	R<1	R<1
		下弦材	1	1	3	0	10	5	0	0
衝撃なし	D+L	上弦材	1.63	2.69	1.71	2.09	1.86	10.29	R<1	1.42
		下弦材	2	1	3	1	2	1	0	0
	D	上弦材	R<1	R<1	R<1	R<1	1.16	6.21	R<1	R<1
		下弦材	0	0	0	0	2	0	0	0

表-2に示す結果より、以下の事項が考察される。

- ・ 損傷シナリオで想定する破断部材が異なることにより、 R が1.0を超える部材数および R の最大値には明確な差異が生じる。
よって、リダンダンシー解析結果は破断想定部材の構造全体の安定性に対する影響度を示していると判断され、FCMの選定に有効であると考えられる。
なお、 R 算出時に曲げモーメントを無視した場合には、 R が1.0を超える部材は大きく減少する。実橋では、断面の塑性化に伴う剛性低下（塑性ヒンジの生成）により、部材発生曲げモーメントは小さくなると想定され、その挙動はここで示した曲げモーメントを無視した場合と考慮した場合の中間的なものになると推測される。
- ・ 設計軸力の大きな端柱、支間中央の上弦材を破断想定部材とした場合、比較的設計軸力の小さい斜材を破断想定材とした場合に比べ R が1.0を超える部材数が多くなる。ただし、床版が直接軸力を代替できる下弦材については設計軸力が大きいても R は小さくなる。
よって、鋼トラス橋のFCMの選定を効率的に行うには、設計軸力の大きな部材（ただし、下弦材を除く）を破断想定部材とするのがよいと考えられる。
- ・ 載荷荷重の違いにより、 R が1.0を超える部材数は大きく異なる。特に、死荷重に活荷重および部材破断の衝撃を考慮して荷重が最大となるケースでは、全ケースにおいて R が1.0を超える部材が生じ、 R が1.0を超える部材数も他の載荷ケースに比べ多くなる。また、実橋で斜材が破断しても他の部材が終局状態に至らなかった事実を考え合わせると、活荷重と部材破断による衝撃を同時に載荷荷重として照査を行うことは過度に安全側の評価となる恐れがある。
よって、リダンダンシー評価における載荷荷重をどのレベルに設定するかについて、検討する必要がある。
- ・ 下弦材を破断想定部材とした場合、 R が1.0を超える部材は他の破断想定部材に比べ少ない。これは、破断した下弦材に作用していた軸力を床版および床組が負担するためであると考えられる。
よって、床版は構造全体の冗長性に大きく寄与しているものと考えられ、モデル化および照査方法が今後の課題と考えられる。
また、表-3に示す格点部のモデル化における斜材接合条件の違いによる照査結果の比較より、以下の事項が考察される。

- ・ 格点部の斜材接合条件が剛結の場合は、ピン結合に比較して R が1.0を超える斜材は増加する。これは、剛結の場合、部材破断により非常に大きな曲げモーメントが発生することに起因する。このため、主構をピントラスとして設計している場合には、健全状態では発生曲げモーメントは小さく問題ないが、部材破断時には非常に大きな曲げモーメントが発生するため R が1.0を超える。
よって、リダンダンシー解析における格点部のモデル化の影響は非常に大きく、実際の構造を反映した格点部のモデル化も今後の検討課題と考えられる。

3) 部材破断による発生断面力および床版応力の変化

ここでは、健全時と部材破断時の発生断面力および床版応力を比較し、部材破断の断面力、床版応力への影響と線形解析の適用性について検証した。他の解析ケースでも同様の傾向を示すことが確認されているため、代表して、実橋で破断した斜材を破断想定部材とし衝撃を考慮した死荷重載荷ケースにおける解析結果を図-9に示す。なお、格点部の斜材接合条件はピン結合である。

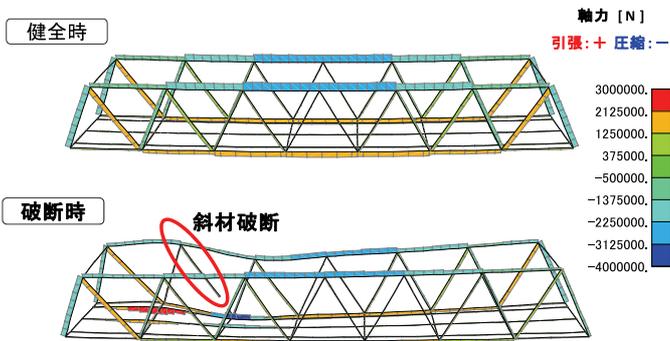
図-9(a)に示すように、想定した部材破断による主構の軸力増加は全体的に小さい。これに対し、図-9(b)に示すように、主構内でも曲げモーメントは破断想定斜材近傍の上弦材において著しく増加する。また、図-9(c)は床版に発生する主応力を示しており、上弦材の曲げモーメント同様に破断想定斜材近傍の応力が著しく増加し、最大7.99N/mm²の引張応力が発生している。

今回実施したリダンダンシー解析は線形解析であるため、鋼部材の塑性化に伴う剛性低下、床版のひび割れと鉄筋降伏は考慮していない。そのため、この解析では鋼部材の発生曲げモーメントや床版剛性を過大評価しているものと推測される。よって、線形解析のリダンダンシー解析への適用性については、3径間連続上路トラスにおいて部材の降伏と床版ひび割れと鉄筋降伏を考慮した非線形解析を実施し検討することとした。

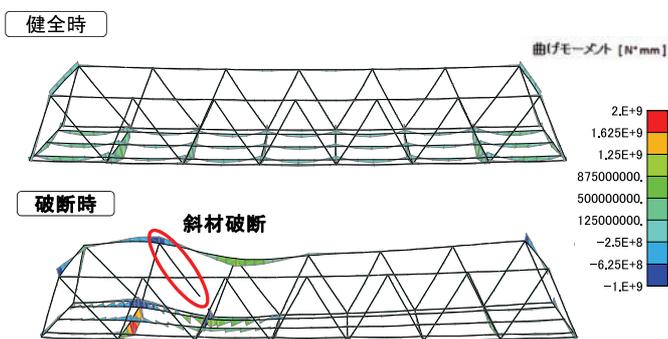
(4) 格点部の耐力検討

前節までのリダンダンシー解析では、部材の耐力照査は行ったが、格点部の耐力評価はできていない。部材破断時に格点部が終局状態となった場合には、格点部の損傷から構造全体が崩壊する危険性もある。

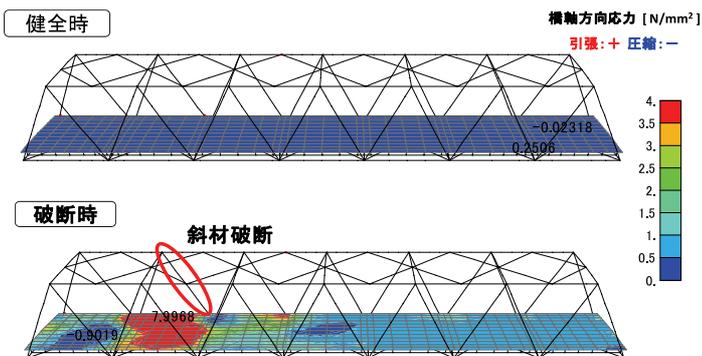
そこで、部材破断時の格点部の安全性を検証するため



(a) 部材発生軸力



(b) 部材発生曲げモーメント



(c) 床版応力

図-9 発生断面力の健全時と部材破断時の比較

格点部近傍のみを切り出した3次元FEM解析を実施した。本解析では、図-10に示す斜材が破断した際に断面力が最大となる格点部を解析対象とした。FEM解析では格点部近傍を薄肉シェル要素を用いてモデル化し、弾塑性モデルとしてはvon Misesの降伏条件、関連流れ則、等方硬化則を用い、降伏応力は315N/mm²、加工硬化は初期弾性率の1/100と仮定した。また、本橋のガセット部の添接板の板厚は忠実に考慮したが、接合している個々のリベットは考慮せず、リベット接合部において全

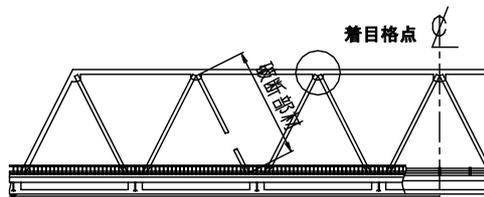
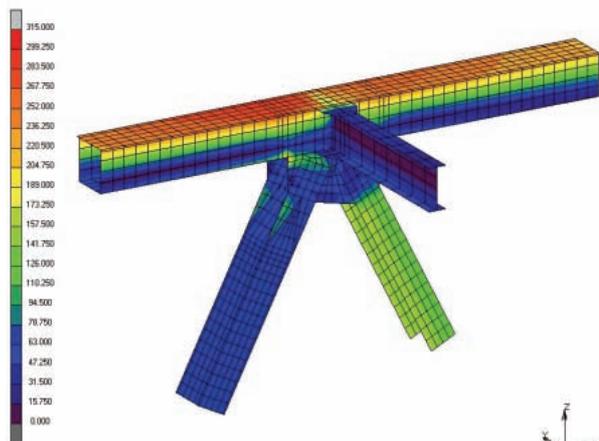
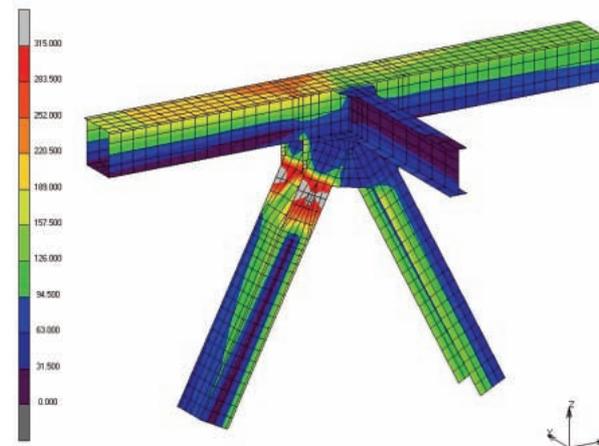


図-10 着目格点



(a) 斜材がピン結合の場合



(b) 斜材が剛結の場合

図-11 格点部の Von Mises の相当応力分布図

ての節点が共有されているものとした。

境界条件については、図-11示す格点部近傍のみを取り出したモデルにおいて、上弦材の左端を固定し、他の部材の部材端に対して、Rが1.0を超える部材が生じる死荷重と活荷重を載荷荷重としたダンダンシー解析による断面力を作用させた。また、その断面力は斜材の結合条件がピン結合の場合と剛結の場合の2種類を用いてFEM解析を実施し比較している。

図-11に、解析結果としてvon Misesの相当応力を示す。この図より、結合条件をピン結合とした場合には

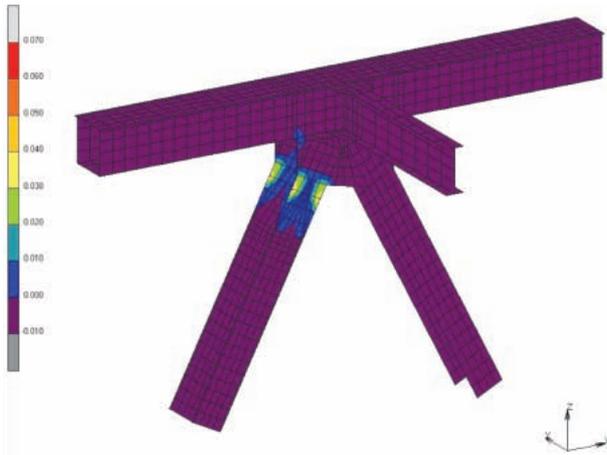


図-12 格点部の相当塑性ひずみ布図（剛結の場合）

格点部は弾性状態である。一方、剛結とした場合には、ガセット内部は弾性状態であるが、斜材の取付け部が塑性化している。

さらに、格点が剛結とした場合の相当塑性ひずみを図-12に示す。斜材取り付け部の相当塑性ひずみの最大値は7%以下であり、鋼材の破断ひずみには達しておらず、塑性回転変形性能を保持していると推測される。実際の部材破断時における格点部の挙動は、部材の塑性化によりピン結合と剛結の中間的性状となることが予想される。したがって、格点部から構造全体の崩壊につながるような損傷は生じないと判断され、リダンダンシー解析の結果がFCMの評価に有効であることが考えられ

る。なお、幾何学的非線形性の影響を考慮した検討も行っており、同様の結論が得られている。

しかしながら、今回の3次元FEM解析のモデル化で省略した添接部のリベットの耐荷力や、回転変形性能の評価については今後の課題と考える。

4. 3径間連続上路トラス橋の検討

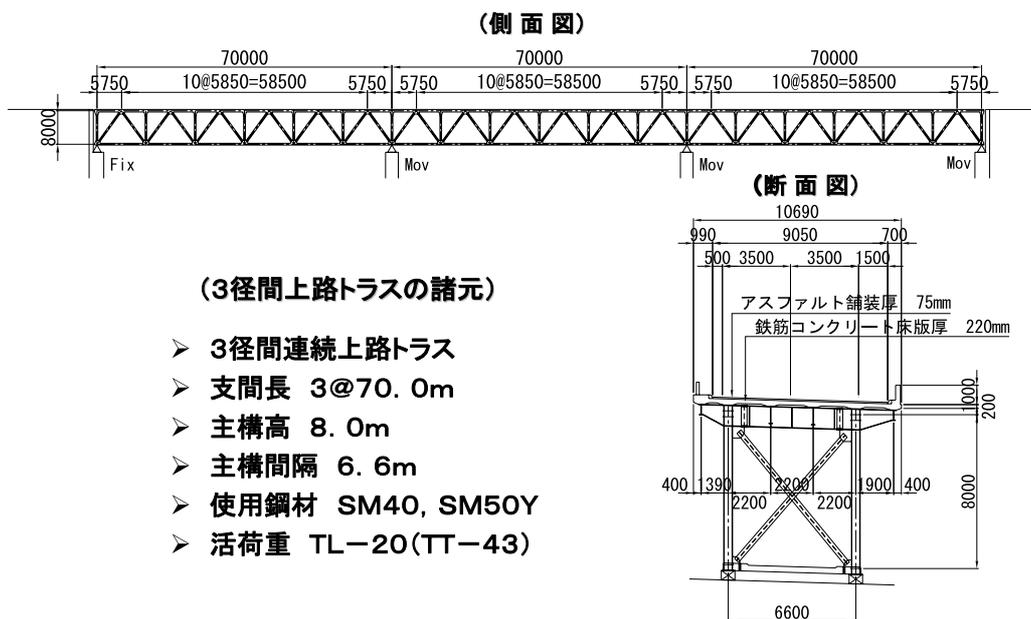
(1) 解析対象橋梁の概要

続いての解析対象橋梁は、図-13に示す3径間連続上路トラス橋であり、支間長3@70.0m、設計活荷重TT-43考慮の2主構トラスである。これは、旧日本道路公団の標準図集⁴⁾を参考にしており、設計年次は1980年と前述の単純下路トラスよりも新しい。

(2) 破断想定部材と解析モデル

破断を想定した部材は、2主構のうちの1主構の1部材のみとし、図-14に示す以下の6ケースの部材破断を想定した。なお、同図に設計軸力も示している。

- ①引張軸力が6667kNと最大となる中間支点上の上弦材
- ②引張軸力が4952kNと最大となる支間中央の下弦材
- ③端支点部の軸力の大きい斜材（圧縮3378kN）
- ④支間中央部の軸力の大きい斜材（圧縮1042kN）
- ⑤中間支点部の圧縮軸力の大きい斜材（圧縮4859kN）
- ⑥中間支点部の引張軸力の大きい斜材（引張4244kN）



(3径間上路トラスの諸元)

- 3径間連続上路トラス
- 支間長 3@70.0m
- 主構高 8.0m
- 主構間隔 6.6m
- 使用鋼材 SM40, SM50Y
- 活荷重 TL-20(TT-43)

図-13 3径間連続上路トラス橋の構造図

解析モデルは、2.にて説明したとおりである。格点部の斜材の結合条件はピン結合とした。

荷重は死荷重 (D)、活荷重 (L)、部材破断の衝撃力を考慮し、荷重は表-1 に示す4種類の組合せケースを

考慮した。したがって、荷重4ケースと想定破断部材6ケースの組合せにより24ケースのリダンダンシー解析を実施した。

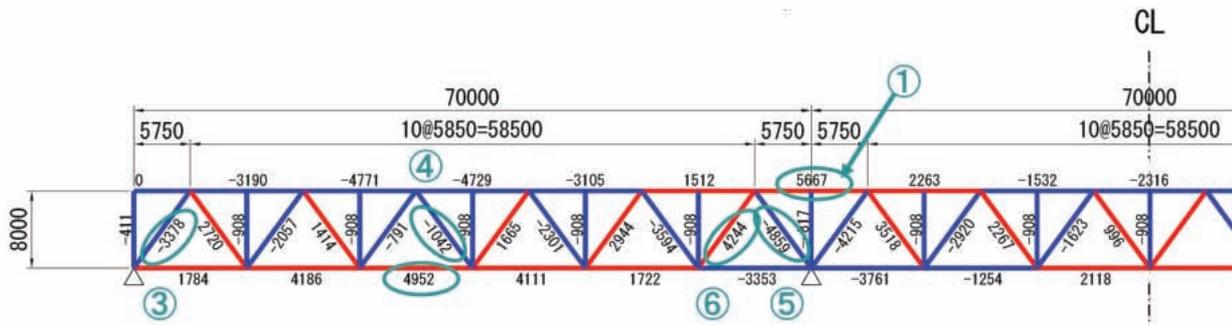


図-14 3径間連続上路トラス橋の損傷シナリオ

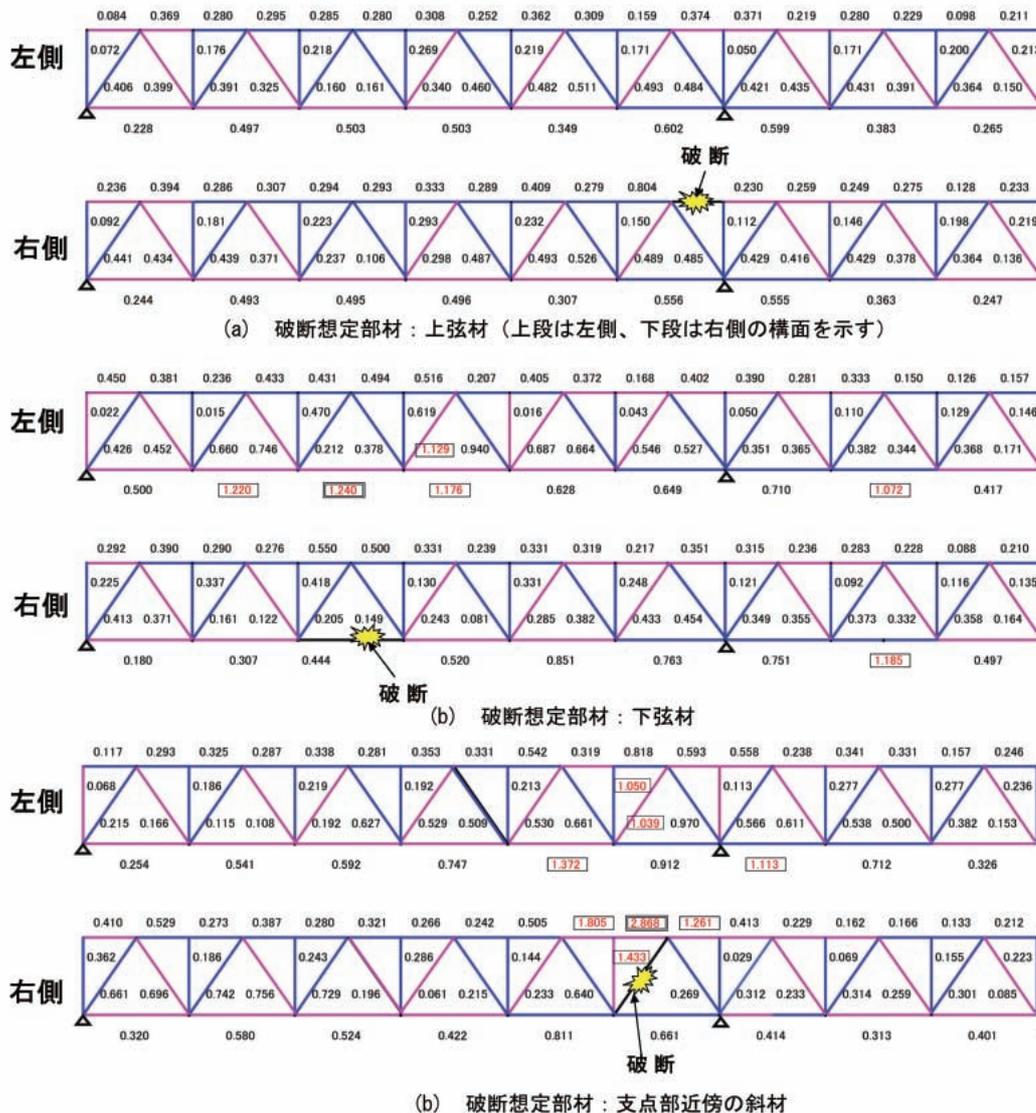


図-15 3径間連続上路トラス橋の部材照査結果（死荷重+活荷重+部材破断時の衝撃の荷重ケース）

(3) リダンダンシー解析結果および考察

1) 部材照査結果

部材照査結果は、傾向がよく分かるように、最も厳しい荷重ケースである部材破断による衝撃を考慮した（死荷重+活荷重）の荷重ケースのR値を図-15に示している。

図-15 (a) に破断想定部材が上弦材の場合の部材照査結果を示す。この図より、上弦材が破断した場合に、最も厳しい荷重ケースにおいても、他の部材は終局状態に達していないことが分かる。

図-15 (b) に破断想定部材が支間中央の下弦材とした場合の照査結果を示す。この図から、破断部材と反対構面で下弦材と斜材が終局状態に達しており、Rの最大値は1.24であった。また、隣の径間の下弦材にもRが1.0を超える部材がある。したがって、この荷重ケースではこの下弦材はFCMに選定されうるがRの最大値が比較的小さいため、前述の荷重荷重に関する考察から、FCMとは断定できない。

図-15 (c) に破断想定部材が中間支点上の引張軸力で設計された斜材とした場合の照査結果を示す。この図より、破断斜材の直上の上弦材でRが2.87と大きな値を示す。また、破断部材近傍の斜材、鉛直材および反対構面の下弦材でもRが1.0を超える部材がある。したがって、この荷重ケースでは中間支点上の引張軸力で設計された斜材はFCMであると判断される。

2) リダンダンシー評価に対する考察

今回実施全24ケースのダンダンシー解析による部材照査結果を、単純下路トラスと同様に表-4に示す。

表-4に示す結果より、以下の事項が考察される。

- ・死荷重、活荷重および部材破断の衝撃を考慮した最も厳しい荷重ケースでは、上弦材の破断想定ケースを除く全ての破断想定ケースで複数の部材が終局状態に達している。一方、死荷重のみの荷重ケースではほぼ全ての破断想定ケースで終局状態に達する部材は生じていない。

したがって、前述の単純下路トラスと同様に、荷重荷重レベルにより照査結果が過度に安全側の評価となる恐れがあり、リダンダンシー評価における荷重荷重をどのレベルに設定するかについて、検討する必要がある。

- ・(a)の上弦材が破断したケース、および(b)、(g)の支間中央の下弦材と斜材が破断したケースでは、最大荷重荷重ケースを除く全ての荷重ケースでRは1.0より小さくなっている。一方、(c)、(e)、(f)の支点上の斜材が破断したケースでは死荷重のみの荷重ケースを除く全ての荷重ケースでRが1.0を超える。したがって、上下弦材よりも、支点近傍の斜材のほうがFCMとなる危険性が高く、この斜材を重点的に管理する必要があると考えられる。

- ・上路トラスでは上弦材が破断すると、上弦材に作用していた断面力を床版および床組が負担するため、今回実施した線形解析を用いたリダンダンシー解析では、Rが1.0を超える部材は発生していない。

実際には、床版のひび割れによる健全性の低下や床組の疲労損傷が生じている場合もあるため、床版による橋梁全体の冗長性を過度に期待してはならないと考えられる。

表-4 終局状態に達した部材数とRの最大値

		上弦材破断ケース	下弦材破断ケース	斜材破断ケース					
		①中間支点 (引張)	②支間中央 (引張)	③端支点 (圧縮)	④支間中央 (圧縮)	⑤中間支点 (圧縮)	⑥中間支点 (引張)		
衝撃あり $\alpha=1.854$	D+L	R < 1	1.240	2.663	1.007	3.006	2.868		
		上弦材: 0 下弦材: 0 鉛直材: 0 斜材: 0	上弦材: 0 下弦材: 5 = 3+2 鉛直材: 0 斜材: 1	上弦材: 2 下弦材: 1 鉛直材: 1 斜材: 2 = 1+1	上弦材: 0 下弦材: 0 鉛直材: 1 斜材: 0	上弦材: 4 下弦材: 3 = 1+2 鉛直材: 2 斜材: 2 = 1+1	上弦材: 3 下弦材: 2 = 1+1 鉛直材: 2 = 1+1 斜材: 1		
	D	R < 1	R < 1	1.519	R < 1	1.852	1.766		
		上弦材: 0 下弦材: 0 鉛直材: 0 斜材: 0	上弦材: 0 下弦材: 0 鉛直材: 0 斜材: 0	上弦材: 1 下弦材: 0 鉛直材: 0 斜材: 0	上弦材: 0 下弦材: 0 鉛直材: 0 斜材: 0	上弦材: 2 下弦材: 0 鉛直材: 1 斜材: 0	上弦材: 2 下弦材: 0 鉛直材: 0 斜材: 0		
衝撃なし	D+L	R < 1	R < 1	1.182	R < 1	1.494	1.614		
		上弦材: 0 下弦材: 0 鉛直材: 0 斜材: 0	上弦材: 0 下弦材: 0 鉛直材: 0 斜材: 0	上弦材: 1 下弦材: 0 鉛直材: 0 斜材: 0	上弦材: 0 下弦材: 0 鉛直材: 0 斜材: 0	上弦材: 2 下弦材: 0 鉛直材: 1 斜材: 0	上弦材: 1 下弦材: 0 鉛直材: 0 斜材: 0		
	D	R < 1	R < 1	R < 1	R < 1	R < 1	1.022		
		上弦材: 0 下弦材: 0 鉛直材: 0 斜材: 0	上弦材: 0 下弦材: 0 鉛直材: 0 斜材: 0	上弦材: 0 下弦材: 0 鉛直材: 0 斜材: 0	上弦材: 0 下弦材: 0 鉛直材: 0 斜材: 0	上弦材: 0 下弦材: 0 鉛直材: 0 斜材: 0	上弦材: 1 下弦材: 0 鉛直材: 0 斜材: 0		

3) 部材破断による断面力および床版応力の変化

ここでは、単純下路トラス橋と同様に、部材破断の断面力、床版応力への影響と線形解析の適用性について検証した。代表して、破断想定部材は⑥、荷重ケースは（死荷重+活荷重）の場合の解析結果を図-16に示す。

図-16 (a) に示すように、曲げモーメントは破断部材近傍の上弦材において著しく増加する。また、図-16 (b) に橋軸方向の床版応力を示しており、上弦材の曲げモーメントと同様に破断部材近傍の床版応力が著しく増加している。

線形解析では、鋼部材の塑性化、床版のひび割れおよび鉄筋降伏による影響は考慮できない。よって、これらのリダンダンシー評価に対する影響を検証するため、次節で非線形解析を用いた部材破断時のシミュレーションを行う。

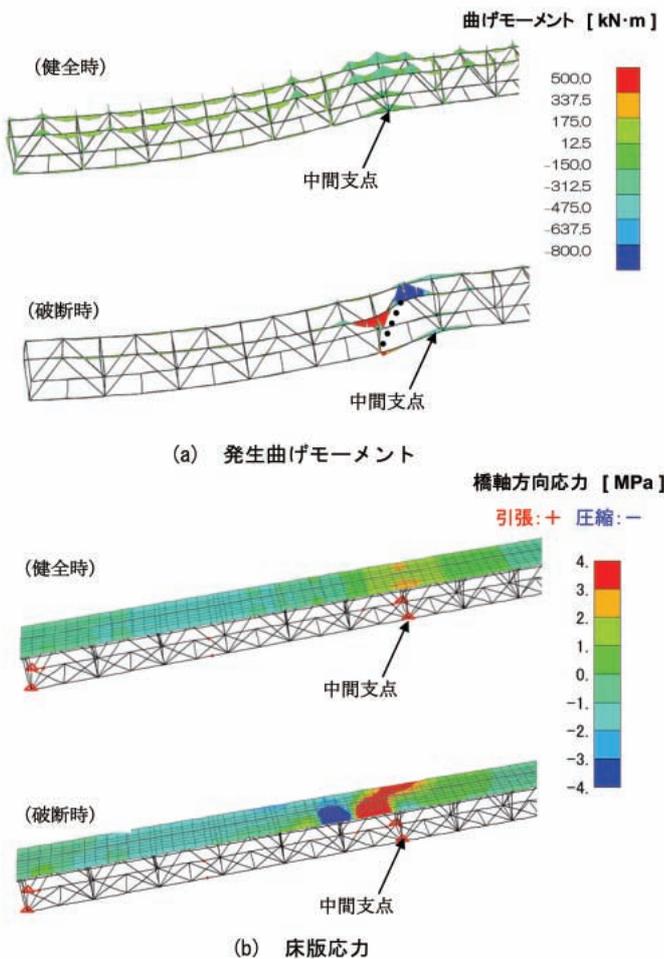


図-16 発生断面力の健全時と破断時の比較

4) 非線形解析によるリダンダンシー解析評価

a) 解析目的とモデル

前節で示した線形解析を用いたリダンダンシー解析において考慮されていない鋼部材の塑性化の影響を検証する目的で、複合非線形解析を実施し、線形解析との比較を行った。

解析ケースは、破断想定部材は⑥、載荷荷重が（死荷重+活荷重）の場合であり、同一載荷荷重では他の破断想定部材に比較してRの最大値となるケースを選定した。

解析モデルは、線形解析と同様に、床版以外の鋼部材は梁要素としたが、床版はソリッド要素を用いた。床版の材料特性は作用応力が 2.0N/mm^2 までは鉄筋とコンクリートが抵抗するものとし、それ以上は鉄筋のみで抵抗するものとした。鋼部材はファイバーモデルを用い、鋼材の材料特性はバイリニアモデルを用い、降伏以降の加工硬化を弾性係数の1/100の勾配でモデル化した。

また、スラブアンカーも非線形バネ要素でモデル化を行っている。また、格点部の斜材の結合条件は剛結とした。

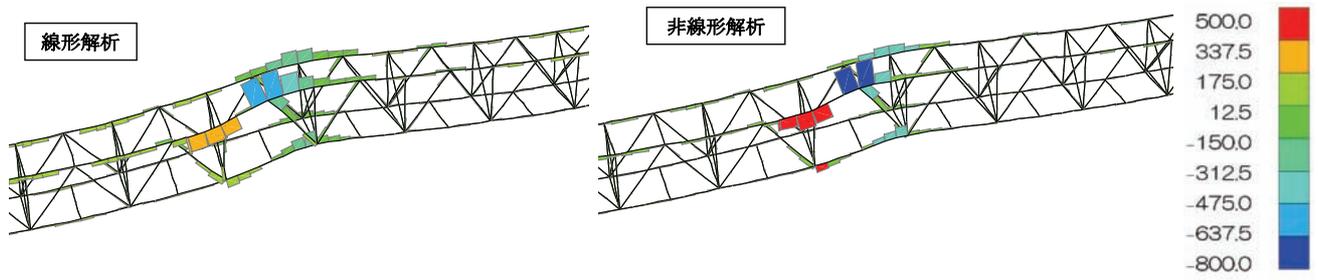
幾何学非線形性を考慮しているため、無応力状態の形状を設計図面の寸法に対して、キャンバーを上げ越した形状としている。

b) 解析結果と考察

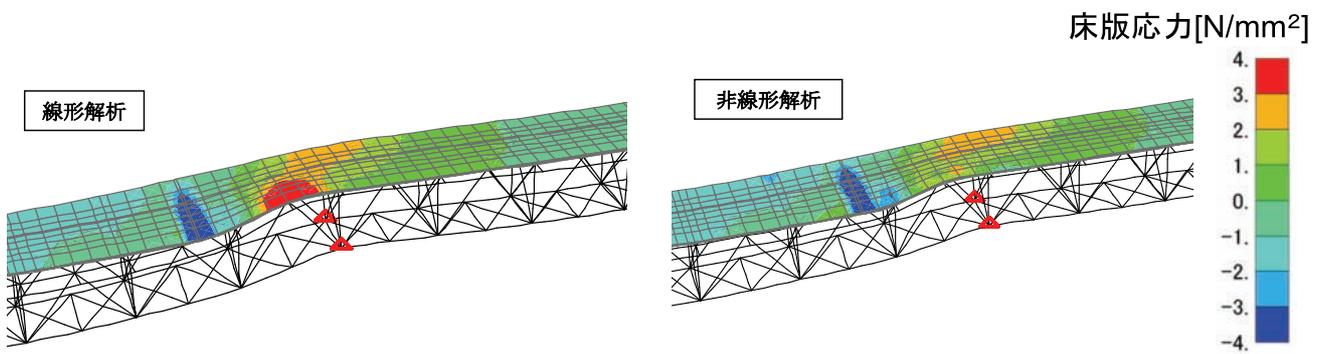
図-17 (a) に中間支点近傍の主構の面内曲げモーメント分布図を示す。大きな曲げモーメントが発生する部材は、線形解析と非線形解析は同様に破断した斜材付近の上弦材に限られている。さらに、線形解析によるリダンダンシー評価において終局状態に至ると判断された部材が、非線形解析では全塑性状態には至らず、構造全体系としては耐力を有していることが確認された。

図-17 (b) に橋軸方向の床版応力を示す。破断部材近傍の床版において、線形解析では 10.0N/mm^2 を超える引張応力が発生していたが、非線形解析では3.0まで抑えられている。また、図-18に床版の主ひずみ分布図を示す。この図より、床版はひび割れが生ずるが鉄筋の降伏までは至っておらず、床版は剛性低下するが余耐力は有していると判断される。

以上より、線形解析によるリダンダンシー評価は、非線形解析結果と比較して構造全体としての安全性の評価に極端な差は生じていないことが確認できた。ただし、発生断面力に対する両者の差は限定された範囲ではある

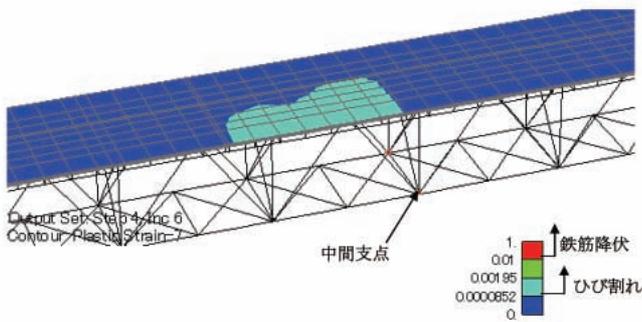


(a) 面内曲げモーメント



(b) 床版応力

図一 17 線形解析結果と非線形解析結果の比較



図一 18 床版のまひずみ分布

が大きいため、リダンダンシー解析における床版のモデル化や照査方法は今後さらに検討が必要であると考えられる。

5. まとめと今後の課題

以上、国内の新旧形式の異なる鋼トラス橋対象に、リ

ダンダンシー解析と部材照査、格点部の耐力評価、非線形解析による検証を実施した。これらの検討結果により得られた知見は以下のとおりである。

- ① 支点付近の斜材（単純下路トラス橋では端柱）が損傷すると、橋梁全体の崩壊につながる危険性が高い。
- ② 単純下路トラス橋では、上弦材は圧縮部材であるため部材が破断する可能性は極めて低い、ひとたび破断すると橋梁の他の部材が終局状態に達する割合が他の部材に比べ最も高い。
- ③ 3径間連続トラス橋は設計年次が新しく、単純下路トラスに比べ、設計荷重TT-43大きく、不静定次数も高いことから、リダンダンシーが高いことが確認された。
- ④ 床組および床版の耐力が橋梁全体の安全性評価に与える影響は大きい。特に、上路トラスの上弦材、下路トラスの下弦材が破断すると、破断した部材に作用していた断面力を床組と床版が負担する。このため、弾性解析に基づくリダンダンシー解析による照査結果では、これらの部材破断により橋梁全体の崩壊に至らない結果となっている。しかし、非線形解析

による検証結果では、床版の材料非線形性を考慮することにより、鋼部材に発生する断面力が部分的に増加しており、床版はモデル化および照査方法について今後さらなる検討が必要であると考えられる。

⑤線形解析を用いたリダンダンシー解析では、斜材の結合条件（ピン結合、剛結合）による影響が冗長性評価に大きく影響することが確認できた。したがって、格点部の塑性化時の回転性能がリダンダンシー評価に与える影響は大きく、格点部耐力検討からもその評価の必要性が確認された。よって、格点部の耐力・変形性能の評価と、リダンダンシー解析のモデル化への反映については今後の課題と考える。

⑥リダンダンシー解析に用いる載荷荷重において、活荷重および部材破断による衝撃を組合せた場合には、照査結果が過度に安全側となる可能性がある。今後、載荷荷重については活荷重の載荷方法、衝撃係数の値について更なる検討を行う必要がある。

また、今回の検討の基づき、特別検討チームからの橋梁の維持管理に関して以下の提言を行った。

①今後限られた予算の中で膨大な橋梁群の維持管理を効率的に行うには、個々の橋梁に対するFCMを選定し、重点的に点検する必要がある。そのためには、リダンダンシー解析を適用した維持管理手法を検討すべきと考える。

②リダンダンシー解析は、部材損傷した場合の橋梁全体の崩壊に対する危険性についての判断材料となるとともに、交通規制の方法などの具体的な対応策を策定する上でも有効であると考えられる。

今後の課題としては、維持管理計画の指標としてリダンダンシー解析結果を用いるためには、標準的な解析手法を確率する必要があるものと考えられる。今回の検討結果より、以下の事項が解析結果に大きく影響することが確認できており、これら事項の評価方法について指針等を作成することも、標準的な解析手法の確立と合理的なリダンダンシー評価を行うための課題と考えられる。

- ・格点部のモデル化
- ・格点部の耐力・変形性能評価とリダンダンシー解析における取り扱い
- ・載荷荷重（部材破断の衝撃）
- ・終局時における材料非線形特性の評価手法

謝辞：木曾川橋の図面使用を許諾していただいた国交省中部地方整備局道路部道路管理課の方々、本検討を進める上で貴重な助言をいただいた鋼橋技術研究会会長の藤野陽三教授、ならびに越後滋運営幹事、高田和彦運営幹事に心から謝意を表します。

<参考文献>

- 1) URS corporation: Fatigue evaluation and redundancy analysis, Bridge No.9340, I-35W over Mississippi river, Draft report, 2006.
- 2) 座屈設計ガイドライン改定小委員会：座屈設計ガイドライン，改定第2版，土木学会，2005.
- 3) 榊田智子，平城弘一，渡辺滉，高田嘉秀，宮地真一，牛島祥貴:スラブアンカーの静的ずれ耐力特性に関する実験的研究，構造工学論文集，土木学会，Vol.47A，pp.1373-1380，2001.
- 4) 日本道路公団：鋼橋標準設計 鋼3径間連続トラス橋，1981.
- 5) 鋼橋技術研究会特別検討チーム：なぜ日本の橋は落ちていないのか？ーリダンダンシーが橋を救うー，鋼橋技術研究会緊急企画“トークイン日本の鋼橋を考える”予稿集，pp.95-116，2007.
- 6) 永谷秀樹，明石直光，松田岳憲，安田昌宏，石井博典，宮森雅之，小幡泰弘，平山 博，奥井義昭:我が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，土木学会論文集投稿中.

2009.3.23 受付