

鋼下路トラス橋における部材破断時の安全余裕度の評価

齊藤 雅充* 池田 学*

Evaluation of Safety Margin after Fracture of Member of Through Truss Bridge

Masamichi SAITO Manabu IKEDA

Steel truss bridge consists of many different trussed members and it is important to clarify the possibility of the bridge collapse after the fracture of a member. In this study, the authors evaluated the safety margin of a standard steel railway through-truss bridge after the fracture of members, by using 3-D finite element analyses. As a result, it was found out that the safety margin of the surviving members is relatively large after the fracture of the lower chord members because the floor members can make up for the lost sectional force of the fractured members. Finally, the degree of importance of each member was evaluated.

キーワード：下路トラス，部材破断，リダンダンシー，崩壊危険部材，FEM 解析

1. はじめに

近年，海外の道路橋で鋼トラス橋が格点部で破断して落橋した事例¹⁾や，国内の道路橋で鋼トラス橋の斜材が破断した事例等が報告されている²⁾。これを契機に，主に道路橋の鋼トラスについて，部材破断による落橋への影響について検討されている³⁾。この部材もしくは部材の一部が破断した後の落橋に対する耐荷性能，すなわち落橋に対する余裕度をリダンダンシーと定義されている⁴⁾。

鋼鉄道橋においては，これまで部材破断に伴い落橋した事例はないが，部材破断あるいはそれに近い状態の損傷は生じた事例はある。通常の維持管理において，このような部材の損傷を見逃さず早期に措置を施すことが前提であるが，万が一部材破断が生じた場合に，落橋に至るリスクや走行安全性への影響を最小限に留める必要がある。そのため，部材破断に伴う落橋や走行安全性への安全余裕度を明らかにし，リダンダンシーの高い構造物とすることが重要である。

各部材の落橋や走行安全性への影響が明らかになれば，部材の重要度をランク付けでき，維持管理においては，措置の優先度の指標となる。さらに，設計時において，現状は各部材の安全率を同一としているが，破断による落橋の可能性の高い部材は安全率を高く設定し，逆に落橋への可能性の低い部材は安全率を低く設定するといった方法で，部材の重要度に応じて変更することにより，従来より効率的に，落橋等に対する安全性を向上させることが可能となる。

本検討では，既設の鋼鉄道橋に多い下路トラス橋の部材破断時のリダンダンシーを把握するため，標準的な支

間の橋梁を対象に，各部材が破壊した状態を想定した三次元有限要素解析を行った⁵⁾。各解析結果を用いて算定した部材破壊時の周辺部材の照査値をもとに，落橋に対する安全余裕度の評価を行い，部材破壊した場合に落橋に至る可能性の高い部材を抽出した。さらに，列車荷重や腐食の設定の違いによる，部材破壊時の安全余裕度への影響について検討した。

2. 想定される部材破壊とリダンダンシーへの影響

既設鋼鉄道橋の代表的な3つの構造形式における，着目部材とその想定される破壊事象，およびその部材の破壊時に落橋や走行安全性への影響を表1に示す。鋼鉄道橋の場合，一つの部材が破壊した場合，落橋に対する安全確保に加え，走行安全性の確保も重要となる。また，ここで想定される破壊は，実際にこれまで生じた事例のみでなく，部材の破壊として生じ得る形態を挙げている。なお，本稿では，引張力で破壊する場合を破断，圧縮力で座屈する場合を含めていう場合は破壊を用いる。

表1中の「影響大」とは，部材の破壊が落橋等に至る可能性が高いことを示しており，上下路プレートガーダーの主桁はこれに該当する。このような場合，リダンダンシーは低いと判断される。逆に，下路プレートガーダー等で床組部材は，落橋に対して「影響小」としているが，床組部材が破壊しても桁自体の落橋が生じる可能性は低いことを示している。

下路トラスの主構部材は，多数の部材から構成されており，一つの部材の破壊によって即落橋に至る可能性は低いと想定されるが，この影響は明らかになっていない。そこで本検討では，最も重大な事象である落橋に対する

* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

表1 主な構造形式における部材破壊による落橋および走行安全性への影響

構造形式	部材	想定される部材破壊	落橋への影響	走行安全性への影響
上路プレートガーダー	主桁	・著しい腐食による破断 ・疲労き裂の進展、貫通による破断	影響大	影響大
下路プレートガーダー	主桁	・座屈（局部、部材全体）による破壊	影響大	影響大
	床組（縦桁、横桁）		影響小	（不明）
下路トラス	主構	・連結部の破壊	（不明）【検討対象】	（不明）
	床組（縦桁、横桁）		影響小	（不明）

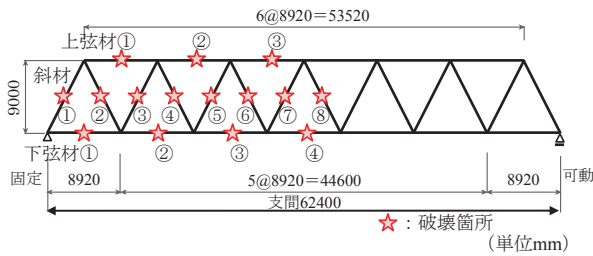


図1 対象橋梁の概要と破断箇所

安全余裕度を明らかにすることを目的に、下路トラスの主構部材の破壊による落橋への影響を検討対象とした。床組部材等の走行安全性への影響については別途報告する。

3. 部材破壊時挙動の解析の概要

3.1 対象構造物の概要

対象橋梁は、支間62mの開床式の単線鋼下路トラス橋とした。橋梁の概要を図1に示す。本橋は、旧国鉄におけるトラス橋の標準設計（WTT862）で、設計荷重はKS-18、許容応力度設計法で照査している。トラスの上弦材、下弦材および斜材（以下、主構）は、軸力部材として設計されており、曲げモーメントは考慮していない。また、格点部はガセットプレートを用いた二面添接の構造である。

3.2 評価の手順

本検討における評価は図2に示す手順で行った。

はじめに、想定する部材破壊の位置や破壊形態等のシナリオを設定する。次に、健全時および一部材破壊時のFEM解析を行い、部材の断面力を算定する。部材破壊後に、その周辺の部材の断面力が耐力以下かどうかを確認することで、部材破壊時の周辺部材の安全余裕度を照査する。本検討では、部材破壊時にその周辺部材の安全余裕度が小さい場合、部材が連鎖して破壊する可能性があると考え、落橋に至ると判断する。そこで、部材破壊に伴い周辺部材が破壊する場合、破壊想定部材を崩壊危険部材（FCM）⁴⁾と判定する。

3.3 部材破壊のシナリオ

本検討では、部材破壊として、主構の各部材の破壊を想定し、以下の3ケースを設定した。

(1) 引張部材の破壊

下弦材、斜材の引張部材について、腐食に伴い断面減

(1) 部材破壊のシナリオの設定

(2) FEM解析による部材の断面力の算定

- ・死荷重のみ作用
- ・列車荷重のみ作用
- ・破壊想定部材を除去して、破断時の衝撃力を作用

(3) 部材破壊時の周辺部材の安全余裕度の照査

(4) 崩壊危険部材（FCM）の判定および抽出

図2 本検討における評価フロー

少が生じている状態等で、列車が通過した際に引張力を受けて破断する場合を想定する。

(2) 圧縮部材の破壊

上弦材、斜材の圧縮部材について、腐食に伴い断面減少が生じている状態等で、列車が通過した際に圧縮力を受けて座屈する場合を想定する。

(3) 格点部の破壊

格点部ガセットについて、腐食に伴い断面減少が生じている状態等で、列車が通過した際に主構部材からの力を受けて取り付けリベットが破断する場合を想定する。

なお、部材破断によって、破断前の部材に作用していた断面力が急激に解放され、動的な効果により、静的解析の断面力より大きくなる可能性がある⁴⁾。本検討では、後述するように、この部材破断に伴う衝撃力を、静的解析の断面力に衝撃係数として割り増して考慮した。この衝撃力は、引張力で破断する場合、すなわち引張部材と格点部の破壊において考慮した。圧縮部材は座屈破壊を想定しているため、急激な破壊ではないと考え、このような衝撃力は作用しないものとした。

3.4 解析の概要

対象橋梁を三次元有限要素骨組モデルで表現した。解析モデルを図3に示す。主構部材はすべて線形梁要素とした。格点部の結合方法は、設計においては軸力部材としてピン結合として設計するが、本解析では、対象橋梁の格点構造等を鑑みて剛結とした。また、文献4)では、

表2 作用の条件

作用	部材の状態	荷重方法
死荷重	健全	質量に重力加速度を作用
列車荷重	健全	破壊想定部材の断面力が最大となる位置に荷重
部材破壊時の衝撃力	破壊想定部材を分断	破壊想定部材に、衝撃力を考慮した断面力を逆向きに荷重

注) 破壊想定部材は図1(☆箇所)を参照

表3 評価ケース

ケース	列車荷重	格点部腐食
ケース1	KS-18	なし
ケース2	KS-14	なし
ケース3	KS-14	あり

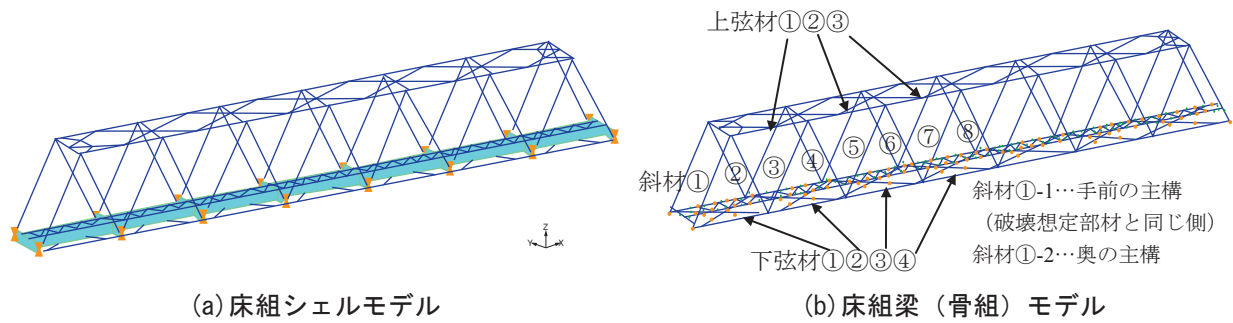


図3 三次元有限要素モデル

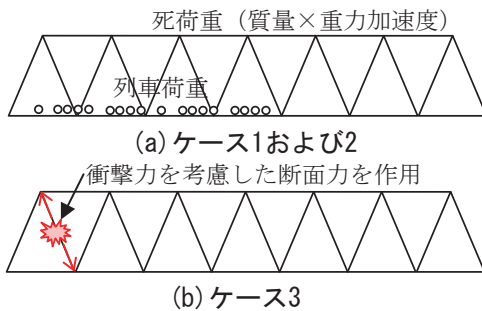


図4 各ケースの荷重方法

道路橋の床版はシェル要素でモデル化することを推奨しているが、開床式の鉄道橋においては、コンクリート床版のような平面構造ではなく縦桁と横桁からなる床組部材となっているため、本解析ではモデル化方法の検討結果への影響を確認するため、床組部材をシェル要素と梁要素の2ケースについてモデル化した。

支点は、下弦材中立軸高さおよび支承高さを考慮して固定、可動条件を設定した。また、軌道はモデル化していない。解析は線形静的解析とした。解析コードは、汎用有限要素法解析コードである MSC.Nastran 2012.1 を用いた。

作用の条件を表2に示す。作用は3ケースで、部材健全の状態において死荷重を荷重したケース、同様に列車荷重を荷重したケース、部材破断による衝撃力を考慮したケースである(図4)。解析は、図1に示す主構の各部材について、それぞれ部材破断する場合について行った。

表3に評価ケースを示す。ケース1は、列車荷重を設計荷重としてKS-18(最大軸重180kN)に設定した。ケース2は、実列車の荷重レベル相当となるKS-14に設定し、

設計荷重との余裕分を考慮したものである。ケース3は、ケース2に、さらに格点部の腐食を考慮し、格点部ガセットの板厚が半減することを想定し、板厚を一律1/2に設定した。

列車荷重の荷重位置は、着目する部材にとって軸力が最大となる軸配置とし、これに列車走行による衝撃荷重を考慮して、部材に応じて1.30~1.33倍したものを用いた。

表2の各ケースで解析を行い、部材kの破断時の部材iの断面力 F_{di} を、式(1)により、各解析で得られた部材の断面力を足し合わせることで算定した。

$$F_{di} = F_{Di} + F_{Li} + i \cdot F_{fi} \quad (1)$$

ここに、

F_{Di} : 部材健全時の死荷重による部材iの断面力

F_{Li} : 部材健全時の列車荷重による部材iの断面力

i : 部材k破断時の部材iの断面力の衝撃係数

F_{fi} : 部材kが破断されたモデルに、部材kが健全時に負担していた断面力(死荷重および列車荷重荷重時)を逆向きに作用させた場合の部材iの断面力(図4)

衝撃係数*i*は、厳密には、部材破断の発生から完全に断面力を解放するまでの時間や部材破断に伴い塑性化がどの程度生じるかに大きく依存するが、一概に決定するのは難しいため、引張部材にはやや安全側の設定⁶⁾ではあるが、文献4)をもとに設定した。文献4)では、1自由度系の動的応答倍率を用いて衝撃係数を求めている。1自由度系モデルでは、瞬時に大きさ P_0 のステップ荷重が作用した場合の時刻*t*における動的応答変位 $u(t)$ は次式で与えられる。

特集：構造物技術

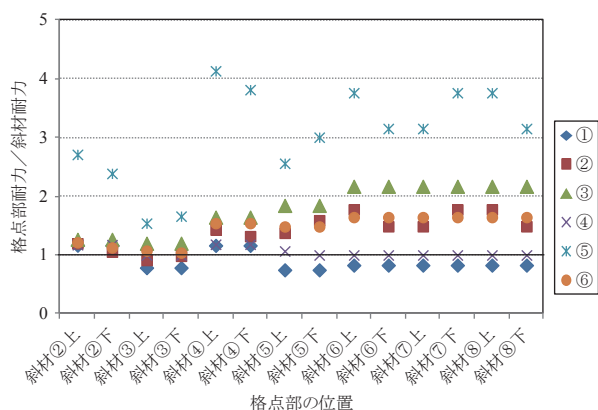


図5 格点部の各破壊耐力（格点部腐食無し）

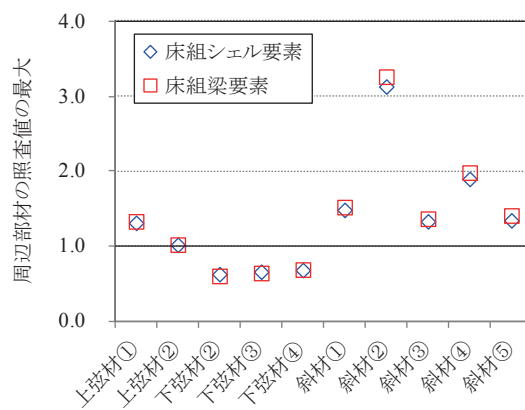


図6 床組モデル化による照査値の違い

$$\frac{u(t)}{(u_{st})_0} = 1 - e^{-\zeta \omega_n t} \left(\cos \omega_n t + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega_n t \right) \quad (2)$$

ここに、 $(u_{st})_0$ は静的変位 ($=P_0/k$, k は一自由度系のばね定数), ζ は減衰定数を表す。減衰定数 $\zeta = 0.05$ のとき、最大の動的応答倍率は 1.854 となる。そこで、本検討では、衝撃係数 i にこの数値を用いることとした。なお、圧縮力で破壊する場合には衝撃係数 i は 1.0 とした。

4. 部材健全時の評価結果

まず部材健全時（破断のない状態における死荷重+列車荷重）の部材の評価結果を示す。部材 i または格点部 i の評価は、設計標準と同様に、式 (3) により行った。

$$\gamma_i \frac{S_{di}}{R_{di}} \leq 1.0 \quad (3)$$

ここに、

S_{di} ：部材健全時の死荷重および列車荷重による部材 i または格点部 i の断面力

R_{di} ：部材 i または格点部 i の耐力

γ_i ：構造物係数で、本検討では 1.0

部材の照査は、各部材の軸力、面内曲げ、面外曲げの連成を考慮した。軸方向耐力は、引張部材は全塑性軸力、圧縮部材は全塑性軸力または座屈耐力の小さい方とした。

格点部は、以下の①～⑦の破壊から定まる耐力を算定した。各耐力の算定法は文献 4) に基づいており、ここでは詳細は割愛する。設計標準では、従来より、格点部は斜材の軸力から定まる最小板厚以上とするのみで詳細な照査は実施していないが、本検討においては格点部の照査がクリティカルとなる可能性があるため、詳細に照査を行うこととした。

- ① リベットのせん断破壊
- ② 最外縁リベット部におけるガセットプレートの降伏または破断

- ③ ガセットプレートのブロックせん断破壊
- ④ 斜材等の降伏または破断
- ⑤ 圧縮部材の先端部におけるガセットプレートの局部座屈
- ⑥ ガセットプレートのせん断降伏
- ⑦ ガセットプレート自由辺と斜材や弦材等に囲まれたガセットプレートにおける座屈

図 5 に、各斜材の格点部について、上記①～⑥の破壊耐力の算定結果を、斜材の軸方向耐力に対する比で整理して示す。なお、⑦はガセットプレートの幅厚比で確認する項目であること、座屈に対して安全側の評価であることを考慮し、この項目の照査を省略した。図 5 より、ガセットが腐食していない場合（表 3 のケース 1 と 2）は①が最小耐力となることがわかる。また、大半の格点部で 1.0 を下回っており、格点部の耐力は斜材より小さい。このことは、設計時の想定以上の外力が作用した場合に、場所によっては斜材より先に格点部が破壊する可能性があることを示している。この理由は、設計時に部材の許容応力度やガセットの必要板厚といった異なる観点で部材断面が設定されているためと考えられる。

部材健全時の照査値（式 (3) の左辺）は、結果は割愛するが、最大でも 0.5～0.6 程度となった。これは、許容応力度で設計されたものであるため、本検討のように限界値を破壊耐力とし、かつ安全率 1.0 で照査すると、限界値に対してこの程度の余裕のある結果となっている。

5. 部材破壊時の安全余裕度の評価結果

5.1 床組のモデル化による結果の違い

図 6 に、床組の 2 つのモデル化による照査値（式 (3) の左辺）を比較して示す。この照査値は、各部材破壊時の周辺部材の照査値のうち最大を示している。図 6 より、床組を梁要素でモデル化しても、シェル要素でモデル化する場合と同等または若干安全側の結果であることが明らかになった。このことから、本検討において、開床式

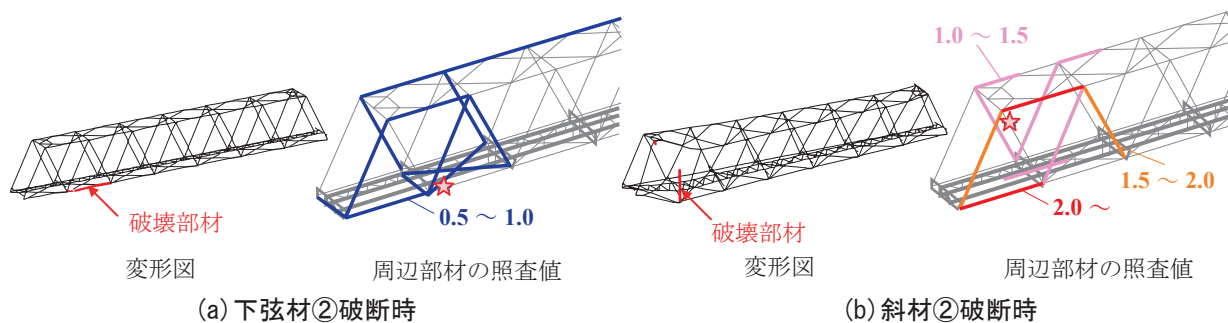


図7 部材破壊時の解析結果の一例

表4 部材破壊時の周辺部材の照査値の最大とその部材

破壊部材	照査結果	ケース1		ケース2		ケース3	
		最大の照査値	部材	最大の照査値	部材	最大の照査値	部材
上弦材	①-1	1.33	斜材③-2	1.22	斜材③-2	1.22	斜材③-2
	②-1	1.02	上弦材③-2	0.91	上弦材③-2	1.06	格点部L2
	③-1	1.10	上弦材③-2	0.98	上弦材③-2	0.98	上弦材③-2
下弦材	①-1	0.58	上弦材①-2	0.47	上弦材①-2	0.47	上弦材①-2
	②-1	0.61	上弦材①-2	0.53	格点部L2	1.06	格点部L2
	③-1	0.64	上弦材③-2	0.55	下弦材①-1	1.06	格点部L2
	④-1	0.69	上弦材③-2	0.58	上弦材③-2	1.05	格点部L2
斜材	①-1	1.52	斜材③-2	1.41	斜材③-2	1.41	斜材③-2
	②-1	3.26	斜材③-2	3.05	斜材③-2	3.05	斜材③-2
	③-1	1.37	斜材②-1	1.29	斜材②-1	1.29	斜材②-1
	④-1	1.98	下弦材②-1	1.94	下弦材②-1	1.94	下弦材②-1
	⑤-1	1.41	斜材④-1	1.33	斜材④-1	1.33	斜材④-1
	⑥-1	0.87	斜材⑤-2	0.75	斜材⑤-2	0.75	斜材⑤-2
	⑦-1	0.54	斜材⑤-2	0.47	斜材⑤-2	0.47	斜材⑤-2
	⑧-1	0.73	下弦材④-1	0.70	下弦材④-1	0.70	下弦材④-1

注) 網掛は、照査値が1.0を超える部材が10以上ある場合に青色，5以上ある場合に薄青色としている。

の下路トラス橋の解析は床組を梁要素でモデル化しても問題ないことが確認された。

5.2 部材破壊時の安全余裕度

解析結果の一例として、床組を梁要素でモデル化した場合、下弦材②(図1参照)破断時を図7(a)に、斜材②破断時を同図(b)に示す。いずれも、破断時の変形図と、部材破断時の周辺の各部材の照査値(式(3)の左辺)を示している。照査値は、0.5刻みの範囲ごとに色分けして表示している。

ある部材の破断時に、照査値が1.0を超えている部材が存在する場合、連鎖破壊が生じて落橋に至る可能性が高いと考えられる。

下弦材②破断時には、周辺の部材の照査値は1.0以内となった。これは、下弦材の負担していた軸力が、下横構および縦桁・横桁を介して伝達され、破断部材と反対側のトラス面の下弦材も負担していることによると考えられる。一方、斜材②破断時には、下弦材や上弦材で照査値2.0を超える値となり、他の斜材等も照査値1.0を超えるものとなった。破断した部材と反対側の主構の上

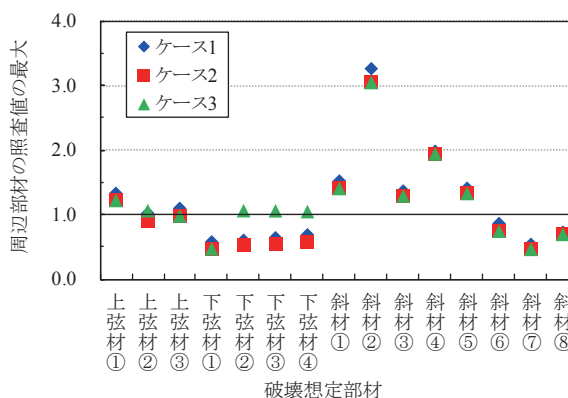
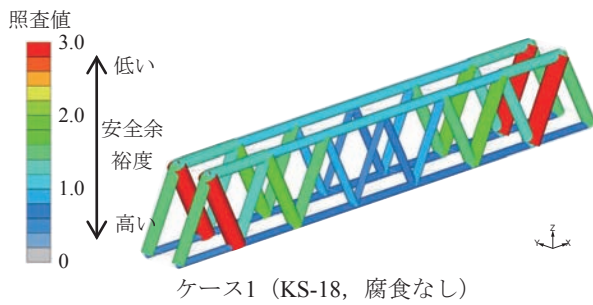


図8 部材破壊時の周辺部材の照査値の最大

弦材と斜材においても照査値が1.0を超えている。

各部材が破壊したときの、周辺部材の照査値の最大を、表4および図8に示す。表4には、照査値が最大となる部材や照査値が1.0以上となる部材数も示している。

支点部に近い斜材や上弦材が破壊する時の周辺部材の照査値が大きくなり、照査値が1.0を超える部材数も多い傾向が見られた。下弦材は、いずれにおいても照査値



ケース1 (KS-18, 腐食なし)

図9 照査値のマップ
(各部材破壊時の周辺部材の照査値の最大)

が1.0を下回っており、これは床組の荷重分担効果と考えられる。斜材の破壊時の傾向を調査すると、同一面内の主構部材では曲げが大幅に増大し、反対側の主構部材では軸力が大幅に増大して、照査値が大きくなる傾向にあることがあった。

5.3 列車荷重および格点部の腐食による安全余裕度への影響

列車荷重の設計荷重と実列車荷重の違いに着目し、表4および図8よりケース1とケース2の評価結果を比較すると、列車荷重の大きさの比(1.29倍)ほどではないが、1割ほど断面力が減少していることがわかる。周辺部材で照査値の最大となる部材位置や照査値が1.0を超える部材数に若干の違いはあるが、その差異は小さい。

さらに、格点部の腐食の有無に着目し、表4および図8においてケース2とケース3の結果を比較すると、腐食の有無で照査値に大差は生じていないものの、当然ではあるが格点部に腐食を想定した場合には格点部の耐力が減少し、斜材や弦材に先行して格点部が破壊する場合も生じている。格点部が破壊すると、複数の部材が結合する部位のため、落橋に至る可能性は高くなる。ただし、本検討では格点部が腐食により板厚が半減することを想定したが、格点部の照査値の最大が1.06であるため、腐食の程度がこれ以下であれば格点部の破壊が生じる可能性は低い。

5.4 FCMとなりうる部材の抽出

図9に、部材破壊時の周辺部材の照査値の最大を部材の色および太さで表現したマップを示す。図より、斜材②(端部から二番目)が破断したときの周辺部材の照査値が最も大きく、次いで、斜材①、④の破壊時の照査値が大きいことがわかる。全体的には、支点近くの斜材および上弦材の照査値が高い傾向にあり、これらがFCMとなりうる部材と判定できる。

図9のような図をもとに、例えば、維持管理上の対策の優先順位として、照査値の高い部材を優先するのが、落橋に対して効果的であると考えられる。

6. おわりに

標準的な既設鉄道鋼下路トラス橋を対象に、主構の各部材の落橋に対する安全余裕度を把握することを目的に、各部材破壊時の挙動を3次元FEM解析により求め、その周辺部材の照査値を算定した。本検討において得られた知見を以下に示す。

- (1) 開床式の鋼下路トラス橋について、主構部材の破壊による安全余裕度を評価するための解析モデルは、床組部材をシェル要素と梁要素のいずれにモデル化しても解析結果は同等である。
- (2) 列車荷重を設計荷重でなく実荷重相当とした場合、列車荷重の大きさの比ほどではないが、部材破壊時の周辺部材の照査値は若干軽減する。
- (3) 格点部ガセットの腐食は、本検討では健全時の板厚の50%まで一様に腐食した状態を設定したが、腐食の有無で照査値に大差はないものの、格点部破壊が先行するなど破壊のシナリオに変化がみられた。
- (4) 本橋においては、端部から二番目の斜材が破壊時の落橋に対する安全余裕度が一番低い。全体的には支点近くの斜材と上弦材が安全余裕度は低く、これらの部材を崩壊危険部材(FCM)になりうる判定できる。逆に下弦材は安全余裕度が高い傾向にある。

文献

- 1) 国土交通省米国ミネアポリス橋梁崩壊事故に関する技術調査団：米国ミネアポリス橋梁崩壊事故に関する技術調査報告，2007
- 2) 玉越隆史：道路橋設計におけるリダンダンシーの評価に向けた取り組み，第17回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，2014
- 3) 例えば、永谷秀樹，明石直光，松田岳憲，安田昌宏，石井博典，宮森雅之，木幡泰弘，平山博，奥井義昭：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，pp.410-425，2009
- 4) 鋼構造物のリダンダンシーに関する検討小委員会：リダンダンシー評価ガイドライン(案)，土木学会 鋼構造委員会，2014
- 5) 斉藤雅充，池田学，田島文彦，由井幸司：開床式鋼下路トラス橋のリダンダンシー解析，第71回土木学会年次学術講演会，2016
- 6) 後藤芳頭，川西直樹，本多一成：リダンダンシー解析における鋼トラス橋の引張り斜材破断時の衝撃係数，構造工学論文集，56A，2010