

部材破断の動的効果を考慮した鋼トラス橋の耐荷力の数値的評価

Numerical Evaluation of Load Capacity of a Steel Truss Bridge with Considering Dynamic Effect of Member Failure

塚田健一*
Kenichi TSUKADA

*構造強度学研究室 (指導教員: 斉木功 准教授)

Since the accident of the I-35W Mississippi river bridge in 2007, the importance of redundancy of bridges has been recognized. In evaluating redundancy, progressive failure phenomena should be taken into account because failure of a member has an impact to the whole structure system. Generally, the impact, i.e., the dynamic effect is considered by employing the impact coefficient in static analysis. The impact coefficient by URS(=1.854) that is obtained by the dynamic analysis of a single DOF system is widely used as far. However, since dynamic behavior of truss bridges is considerably more complex than that of single DOF system, the value of the impact coefficient (1.854) is still open to discussion. In order to investigate the impact effect, in this paper, dynamic behavior of a typical steel truss bridge arise from failure of a member is simulated by dynamic nonlinear analysis with a finite element model including gusset plate connections.

Key Words: steel truss bridge, nonlinear dynamic finite element analysis, redundancy, impact coefficient, dynamic effect

1. はじめに

2007 年, 米国で鋼トラス橋の落橋事故¹⁾が起き, 国内でもトラス橋の点検が行われ斜材破断が発見された. 国内のトラス橋が落橋に至らなかったのは, 設計において考慮されていないリダンダンシーが発揮されたためだと考えられる. そのリダンダンシーを評価する際, 一部材の損傷による構造系全体の崩壊への進展に至るまでの動的効果を含んだ進行的な破壊現象を考慮することが望ましい. その動的効果を考慮するために, 現状では, 静的リダンダンシー解析²⁾において得られた断面力に破断時の衝撃係数を一様に乗じている. この衝撃係数の大きさは, URS³⁾が 1 自由度系振動モデルの単純な減衰系の解析により定めた 1.854 という値が使用されている. しかし, トラス橋は多数の部材で構成され, 崩壊過程は 1 自由度系振動モデルと比べて極めて複雑な現象となる. そのため, URS³⁾の衝撃係数をトラス橋に適用することは合理的とはいえない. また, 米国の落橋事故の主な原因の一つとして, 格点部の不適切な設計が報告されており¹⁾, 格点部の変形を考慮した解析も必要である. そこで, 本論文では格点部の変形を考慮した鋼トラス橋の部材破断後の現象を動的非線形解析により再現する. そして, 静的非線形リダンダンシー解析を基に, 部材破断時の動的効果の定量化を試みる.

2. 解析対象および解析手順

(1) 解析対象

解析対象は, 斜材の破断損傷事例が報告された三重県の本曾川大橋と同規模 (全長 70.63 m, 幅員 8.6 m, 高

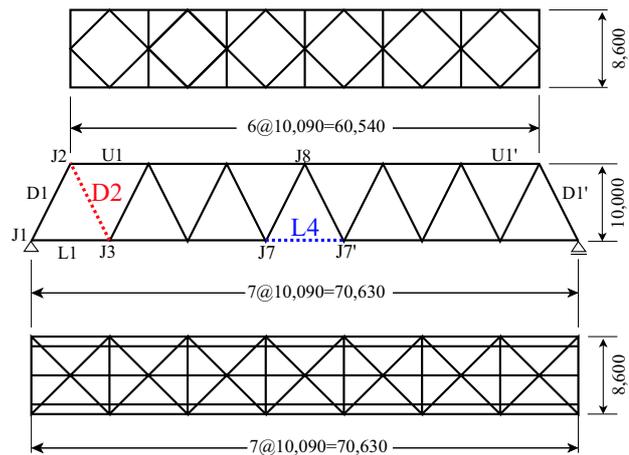


図-1 解析対象一般図 (単位: mm)

さ 8.5 m) の単径間鋼下路式ワーレントラス橋とした. 対象橋梁の一般図を図-1 に示す. 図中左の固定支点側から支間中央に向けて順に上弦材を U1 ~ U3, 斜材を D1 ~ D7, 下弦材を L1 ~ L4, 格点部を J1 ~ J8 と呼ぶこととする. なお, 対象橋梁は橋軸方向において支間中央で左右対称となる構造であり, 対称な位置にある部材には () ' をつけて U1' や J7' などと呼ぶ. 本報告では, 図-1 に示すように, 斜材 D2 および下弦材 L4 の検討結果を記す.

(2) 有限要素モデル

静的および動的解析には, 汎用有限要素解析ソフト NX NASTRAN を用いて幾何学および材料非線形性を考慮した. 3次元有限要素モデルは, 梁要素と板要素, 剛体要素で作成した. 図-2 に解析モデルを示す.

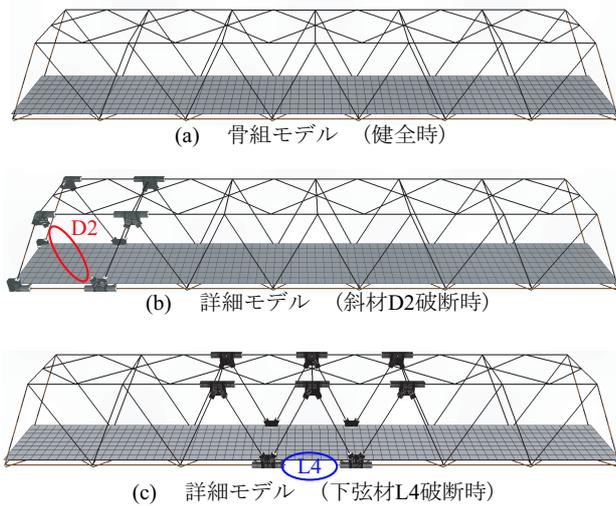


図-2 解析モデル

図-2(a)に示すように、格点部を剛結とし、床版以外のすべての部材に梁要素を用いたモデルを骨組モデルと呼ぶ。また、トラス格点部の変形をより精度よく再現するために、ガセットプレートとその近傍の連結部材を板要素によりモデル化した。これを詳細モデルと呼び、計算負荷を軽減するために破断想定部材付近の格点部のみモデル化を行った。図-2(b),(c)に斜材D2および下弦材L4破断時の詳細モデルを示す。RC床版はYoung率を26.5 GPaの弾性体とし、板要素とした。鋼材は全てSM400を用いた弾塑性体として、Young率を211 GPa、von Misesの降伏条件、線形等硬化則を用いて、初期降伏応力を235 MPa、硬化係数をYoung率の 10^{-2} 倍とした。

荷重は、道路橋示方書⁴⁾に準じ死荷重とB活荷重を与える。静的非線形リダダンシー解析では、死荷重(D)は変えずB活荷重(L)のみ任意倍した。このLに対する倍率で荷重パラメータ f を定義し、荷重の大きさを $D+fL$ とし、Dを載荷後に f をゼロから漸増させた。B活荷重は、破断想定部材の断面照査する際に最も不利に働くように載荷した。本研究では終局基準を相当塑性ひずみが2%を超えたときと定義し、このときの f を静的終局荷重 f_{sta} とした。動的非線形リダダンシー解析では、安定計算を重視し陰解法を用いた。減衰は、Rayleigh減衰を仮定し、文献⁴⁾を参考に破断想定部材を除去したモデルにおける有効質量比の上位2つの固有振動数と5%構造減衰比を用いた構造減衰系とした。また、時間積分間隔 Δt は 1.0×10^{-3} secとした。

(3) 部材破断の再現および動的効果の定量化

部材破断の再現は後藤ら⁵⁾の解析手法を参考にした。図-3に示す手順で部材の破断をモデル化した。まず、破断部材の格点に作用していた断面力 F_0 を求める(I)。次に、 F_0 を外力として与えることで破断前におけるモデルを作成する(II)。そして、(II)で作成したモデルを用いて、破断所要時間 T_f により断面力 F_0 を線形にゼロ

手順	状態	部材	解析モデル
(I)	健全	有	線形解析により破断想定部材の両端格点部に作用する断面力を求める
(II)			部材を除去し、(I)で得られた断面力を作用させ、破断前モデルを作成する
(III)	無	破断過程	(II)で作用させた断面力を、破断所要時間 T_f でゼロへ

図-3 破断の再現手法

へ減少させ破断を再現する(III)。つまり、破断過程における断面力 F を、時刻 t 、破断所要時間 T_f を用いて、 $F = F_0 \times (1 - t/T_f)$ とした。本研究では、 $T_f = 1.0 \times 10^{-2}$ sとし、 $t = 0.0$ sで部材を破断させた。

本研究では、動的効果の大きさについて、静的非線形リダダンシー解析における静的終局荷重 f_{sta} に対する倍率として衝撃係数 I を定義した。具体的には次のような手順をとる。

- 手順1 静的非線形リダダンシー解析を行う。静的終局荷重 f_{sta} を求める。
- 手順2 静的線形解析を行う。健全なモデルを用いて、 $D+f_{sta}L$ を載荷し、破断想定部材の格点部に作用する断面力 F_0 を求める。
- 手順3 動的非線形リダダンシー解析を行う。 $D+f_{sta}L$ を載荷し破断させる。静的終局基準を満たす部材の最大相当塑性ひずみを ϵ_{max}^p を求める。
- 手順4 静的非線形リダダンシー解析を行う。相当塑性ひずみが ϵ_{max}^p に到達したとき、 f を動的効果を考慮した動的終局荷重 f_{dyn} とする。
- 手順5 以下の式で衝撃係数 I を算出する。

$$I = \frac{f_{dyn}}{f_{sta}} = \frac{\text{動的終局荷重}}{\text{静的終局荷重}}$$

本研究では、同部材位置で衝撃係数 I を算出した。

3. 静的非線形リダダンシー解析結果

(1) 斜材D2の破断ケース

骨組モデルでは、静的終局荷重 $f_{sta} = 1.10$ であった。破断斜材D2の反対側斜材D2で相当塑性ひずみが増加し、終局に至る。RC床版・床組が破断した斜材が受け持つ部材力を伝達したと考えられる。

詳細モデルでは、静的終局荷重 $f_{sta} = 0.56$ であった。格点部J2近傍の上弦材U1の下フランジが、曲げモーメントの増加により面外方向に座屈し、塑性ヒンジが形成され終局に至る。

(2) 下弦材L4の破断ケース

骨組モデルでは、静的終局荷重 $f_{sta} = 4.00$ であった。格点部J7'に連結する横桁で相当塑性ひずみが増加し、その部材が終局に至る。下弦材L4がないことで、J7'に連結している横桁の縦桁および下弦材との交点には水

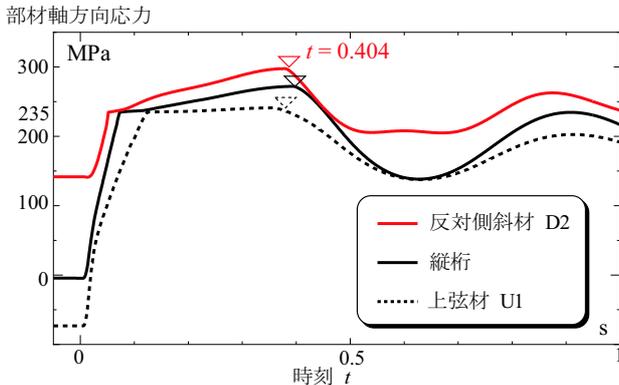


図-4 D2 破断時骨組モデルの部材ごとの軸方向応力の時刻歴

平変位差が生じた。これより、間隔の狭い縦桁と下弦材間に大きなせん断力が生じ、横桁に塑性化が進行した。

詳細モデルでは、静的終局荷重 $f_{sta} = 3.80$ であった。骨組モデルと同様の終局モードで、格点部 J7' そのものは終局に至らなかった。

4. 動的非線形リダダンシー解析結果

(1) 斜材 D2 の破断ケース

骨組モデルでは、動的終局荷重 $f_{dyn} = 1.50$ となり、衝撃係数 I は 1.37 となった。反対側斜材 D2、上弦材 U1 および縦桁が曲げの影響を受け終局状態に至った。その部材内で軸方向応力が最大となる要素の軸方向応力の時刻歴を図-4 に示す。破断直後、破断部材が受け持っていた荷重が直接それらの部材に伝達され、応力が 0.1 s 程度で増加し、降伏応力 (235MPa) に到達するといえる。その後、どの部材の軸方向応力も $t = 0.4$ s 近傍で最大振幅となった。時間が十分経過し、静的つり合い状態となった骨組モデルの相当塑性ひずみ分布を図-5 (a) に示す。図中、RC 床版は非表示にした。静的解析における終局時の図-5 (b) と比較しても、動的効果により増大した曲げの影響を強く受け、反対側斜材 D2 だけではなく、上弦材 U1 と縦桁にも相当塑性ひずみが増加している。このことから、静的解析で弾性範囲内として健全部材と判断された部材も、動的効果によって終局状態と同程度の塑性変形を生じる可能性があることがわかった。また、図-5 (a) に示す動的解析から得られた相当塑性ひずみ分布と、静的解析で $D+f_{dyn}L$ を載荷させたときに得られた相当塑性ひずみ分布はよく一致していた。そのため、動的効果を静的解析の倍率として $f_{sta} \times I$ と捉えることの妥当性は十分にあるといえる。

詳細モデルでは、動的終局荷重 $f_{dyn} = 0.71$ となり、衝撃係数 I は 1.27 となった。格点部 J2 近傍の上弦材 U1 板要素の上下フランジが曲げの影響を受け終局に至った。時間が十分経過し、静的つり合い状態となった格点部 J2 の相当塑性ひずみ分布を図-6 (a) に、詳細モデル全体の梁要素の相当塑性ひずみ分布を図-7 (a) に示す。図-6 (b) に示す静的解析における終局時の格点部 J2 と比較しても、上下フランジに塑性化が進展し、曲げの影響

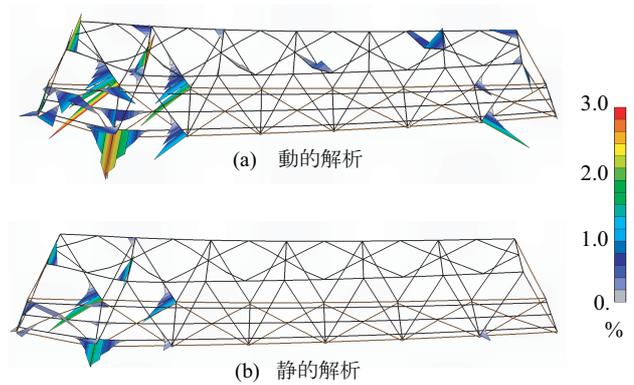


図-5 D2 破断時骨組モデルの相当塑性ひずみ分布の比較 (変形 10 倍)

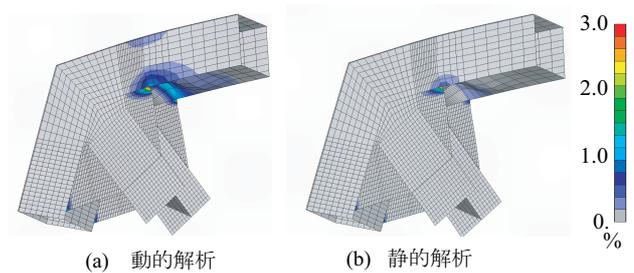


図-6 D2 破断時格点部 J2 の相当塑性ひずみ分布の比較 (変形 10 倍)

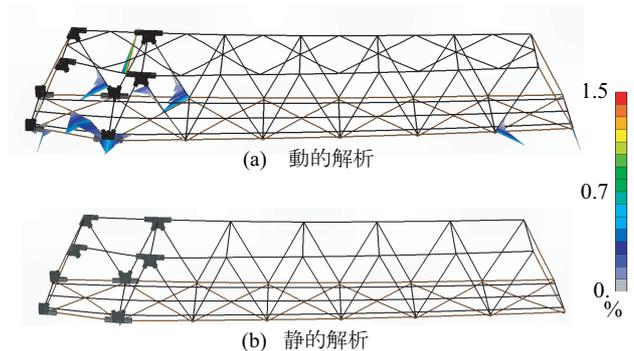


図-7 D2 破断時詳細モデルの梁要素の相当塑性ひずみ分布の比較 (変形 10 倍)

を強く受けたことがわかる。また、図-7 (b) に示す静的終局時と比較すると、静的終局時に弾性範囲内であった格点部 J4 付近の上弦材 U1、反対側斜材 D2 および縦桁は、骨組モデル同様に、動的効果によって曲げの影響を強く受け、終局基準に近い 1.5% の相当塑性ひずみが発生した。これは、格点部 J3 および J4 では塑性化が進展しなかったために、それらの格点部の隣接する部材への荷重伝達が行われ、二次応力としての曲げモーメントが梁要素に作用したためと考える。一方で、骨組モデルとは異なり、格点部 J2 付近の上弦材 U1 の梁要素では相当塑性ひずみが発生しなかった。これは、格点部 J2 の塑性化が進行して塑性ヒンジが形成されたためであると考えられる。このことから、骨組モデルと同様に、損傷の小さい格点部付近の部材も終局状態となる可能性があること

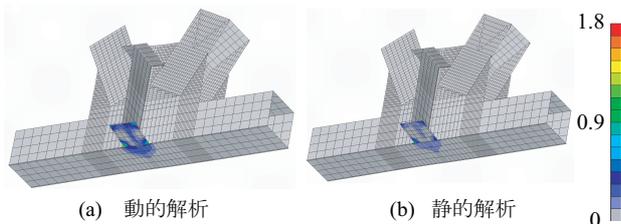


図-8 L4 破断時格点部 J7' の相当塑性ひずみ分布の比較 (変形 10 倍)

がわかった。

(2) 下弦材 L4 破断のケース

骨組モデルでは、動的終局荷重 $f_{dyn} = 4.10$ となり、衝撃係数 I は 1.03 となった。終局部材は静的解析と同様に格点部 J7' に連結している横桁であった。

詳細モデルでは、動的終局荷重 $f_{dyn} = 3.95$ となり、衝撃係数 I は 1.03 となった。骨組モデルと同様の終局モードで、格点部 J7' は終局に至らなかった。時間が十分経過し、静的つり合い状態となったときの格点部 J7' の相当塑性ひずみ分布を図-8(a) に示す。図-8(b) に示す静的解析における終局時の格点部 J7' と比較しても、塑性化している箇所は同じであり、広範囲に進展していないことがわかる。

斜材 D2 破断時と比較すると、下弦材 L4 破断時の方が衝撃係数 I は小さくなった。これは、荷重を伝達する能力が大きい RC 床版と縦桁が下弦材 L4 の軸力を主に負担したためである。部材に破断が生じて、その後の構造系が荷重経路冗長性を有していれば、動的効果は小さくなるといえる。

(3) RC 床版の材料非線形性が衝撃係数 I に与える影響

RC 床版を弾性体としてモデル化すると、RC 床版は際限なく荷重を負担してしまうため、終局荷重を過大評価する恐れがある。ここでは、RC 床版を粘着力 12.58MPa、摩擦角 10° として Drucker-Prager の降伏条件を用いて弾塑性体として、材料非線形性が衝撃係数 I に与える影響を骨組モデルの斜材 D2 の破断ケースで考察した。

まず、RC 床版を弾塑性体としたモデルと弾性体としたモデルで、それぞれの RC 床版内の相当応力が最大値をとる時刻の相当応力分布を、図-9(a), (b) に示す。図-9 より、相当応力の最大値は RC 床版を弾性体とした方が大きくなっている。RC 床版が降伏したために、剛性が低下したといえる。次に、時間が十分経過し、静的つり合い状態となった RC 床版の相当塑性ひずみ分布を図-10 に示す。図-10 に示すように、RC 床版は曲げの影響を受けて支承付近で塑性化が進行している。しかし、鋼部材の損傷状態は、RC 床版を弾性体としたときと比較して変化は見られず、動的効果や塑性化する箇所も全く同じであった。そのため、衝撃係数 I は RC 床版を弾性体としたときと一致した。このことから、RC

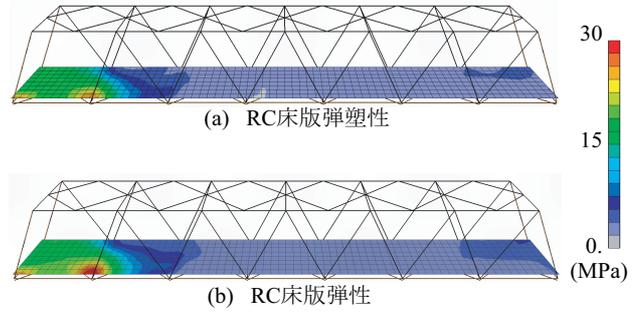


図-9 RC 床版の材料のモデル化による相当応力分布の比較 (変形なし)

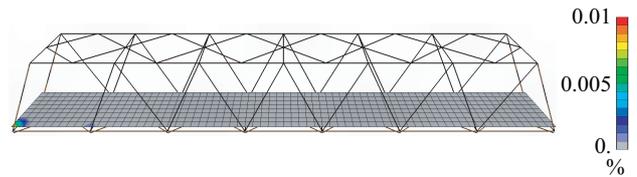


図-10 RC 床版の相当塑性ひずみ分布 (変形なし)

床版が降伏した後も、破断した荷重を他の部材へと再分配する能力を十分に持っていることがわかる。他の破断ケースや詳細モデルでも衝撃係数 I は一致したことより、RC 床版の非線形性が衝撃係数 I に与える影響は無視できるほど小さいといえる。

5. 結論

得られた知見として、以下のことを結論づける。

- 破断する部材に応じて、動的効果の大きさが異なる。このことから、一律な衝撃係数を用いることは、トラス橋の耐荷力を過大・過小に評価してしまう恐れがある。
- 破断部材が受け持っていた荷重を他の部材に伝達させる荷重経路冗長性を有している場合、その破断による動的効果は小さいといえる。
- RC 床版の損傷が小さいとき (ひびわれ等)、RC 床版を弾塑性体としてモデル化しても、それが動的効果に与える影響は無視できるほど小さい。

参考文献

- 1) Owen, E. D.: Minneapolis bridge collapse exposes inspection failures, *New Civil Engineer*, No.8, 2007.
- 2) 永谷秀樹, 赤石直光, 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.
- 3) URS corporation: *Fatigue evaluation and redundancy analysis, Bridge No.9340, I-35W over Mississippi river, Draft report*, 2006.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・解説 I 共通編 II 鋼橋編, 丸善, 2012.
- 5) 後藤芳顕, 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, Vol.56A, pp.792-805, 2009.

(2015 年 2 月 4 日 提出)