

動的非線形解析による鋼トラス橋の部材破断に伴う動的効果の検討

東北大学大学院工学研究科 ○学正員 塚田 健一
東北大学大学院工学研究科 正員 斉木 功
東北大学大学院工学研究科 正員 岩熊 哲夫

1. はじめに

米国の鋼トラス橋落橋事故¹⁾を契機に、リダンダンシーの評価の重要性が高まってきた。その際、部材破断が及ぼす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。その動的効果は、一般的に静的リダンダンシー解析²⁾で得られた断面力に衝撃係数を乗じることによって考慮される。現状では、この衝撃係数に URS³⁾が1自由度振動モデルにより定めた1.854という値が使用される。しかし、トラス橋の崩壊過程は極めて複雑な現象である。また、米国の事故の原因の一つとして、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が必要である。そこで、本論文では、鋼トラス橋の動的非線形リダンダンシー解析を行い、静的結果を基に、動的効果の定量化を試みる。

2. 動的非線形リダンダンシー解析手法

(1) 解析モデル

本解析は、幾何学的小および材料非線形性を考慮し、汎用有限要素解析ソフト NX NASTRAN を用いた。三重県木曽川大橋と同規模（全長 70.63 m、幅員 8.6 m、高さ 8.5 m）の単径間鋼ワーレントラス橋を解析モデルとした。本研究では、格点部の変形をより精度よく再現するために、格点部を板要素によりモデル化した。その際、計算負荷を軽減させるために破断部材周辺のみモデル化した。破断を想定する部材は、斜材と下弦材とした。それぞれの解析モデルを図-1, 2に示す。図中左から順に格点部を J1, J2 … と呼ぶ。RC床版は弾性体要素とした。鋼材は全て SM400 を想定した弾塑性体として、Mises の降伏条件、線形等方硬化則を用いて、初期降伏応力を 235 MPa、硬化係数を Young 率の 10^{-2} 倍とした。

(2) 部材破断の再現

後藤ら⁴⁾の解析手法を参考に、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 (II) を作成する。そして、このモデルを用いて、破断所要時間 T_f により断

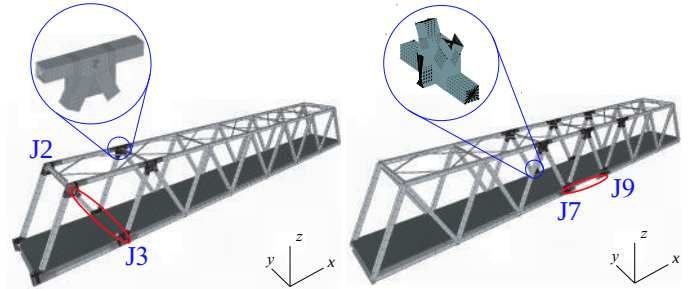


図-1 斜材破断時解析モデル 図-2 下弦材破断時解析モデル

手順	状態	部材	解析モデル
(I)	健全	有	破断想定部材
(II)	無	有	
(III)	破断過程	無	

図-3 破断の再現手法

面力 F_0 を線形にゼロ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、 $T_f = 1.0 \times 10^{-2} \text{ s}$ とした。

(3) 動的効果の定量化

道路橋示方書⁵⁾に準じ死荷重 D と活荷重 L を与える。それぞれのモデルにおける p_1 荷重の載荷位置は、破断断面に最も不利な応力が働くようにした。静的リダンダンシー解析では、死荷重 D の後に活荷重 L を荷重パラメタ f で漸増載荷させ、モデル内の相当塑性ひずみの最大値が 2% 到達時の f を静的終局荷重 f_{sta} とした。動的非線形リダンダンシー解析では、最大相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_{max}^p$ を求める。 $D + fL$ の静的解析で $\bar{\epsilon}_{max}^p$ となる f を求め、これを動的終局荷重 f_{dyn} とする。

これらより、動的効果 I を

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

と定義した。また、Rayleigh 減衰を仮定し、時間積分間隔を $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}$ とした。

Key Words: 鋼トラス橋、非線形動的 FEM、リダンダンシー、衝撃係数、動的効果

〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 構造強度学研究室

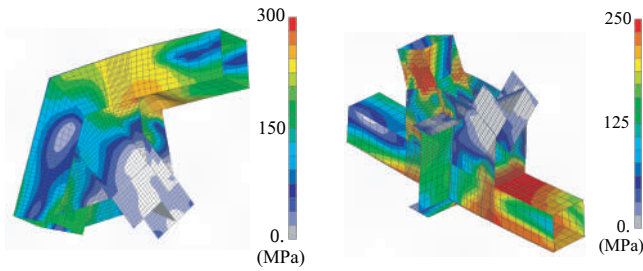


図-4 格点部 J2 の相当応力分布 ($t = 0.897$ s, 変形 10 倍)

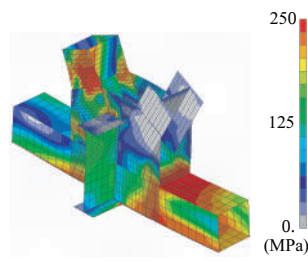


図-5 格点部 J3 の相当応力分布 ($t = 0.365$ s, 変形 10 倍)

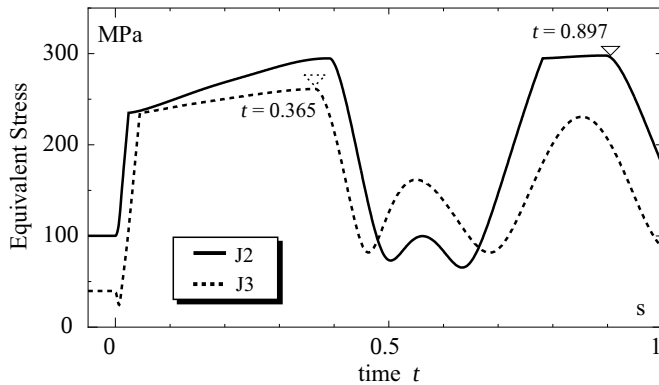


図-6 斜材破断時の J2, J3 の相当応力の時刻歴

3. 動的非線形リダンダンシー解析結果及び考察

(1) 斜材破断のケース

$f_{sta} = 0.586$ となり、格点部 J2 の上弦材とガセットプレートとの連結部で局部座屈が生じた。一方で、 $f_{dyn} = 0.710$ となり、動的效果 I は 1.21 となった。破壊モードは静的非線形リダンダンシー解析結果と一致した。モデル内で相当応力が大きくなった J2, J3 の相当力分布をそれぞれ図-4, 5 に示す。また、J2, J3 の最大相当応力となる要素の相当応力の時刻刻歴を図-6 に示す。J2 の相当応力は、 $t = 0.4$ s 近傍で極大となるものの、その後の $t = 0.897$ s で最大値をとった。その時刻における格点部 J2 の相当塑性ひずみ分布を図-7 に示す。J2 が面外方向に座屈し、塑性ひずみも 3% まで大きくなり、塑性化する領域も静的リダンダンシー解析と比較して広範囲に及んだ。一方、格点部 J3 では静的リダンダンシー解析と比較して塑性ひずみの進展を確認できなかった。図-6 に示すように、J3 の相当応力は $t = 0.365$ で最大値をとったが、その時刻以降も格点部 J2 と比較して小さいことがわかる。これは、付近の縦桁や下横構に塑性ひずみが発生していたことから、床組構造が荷重を受け持ったことが要因である。

(2) 下弦材破断のケース

$f_{sta} = 3.80$ となり、破断部材の格点部に連結している横桁が鉛直軸まわりの曲げにより終局に至る。一方で、

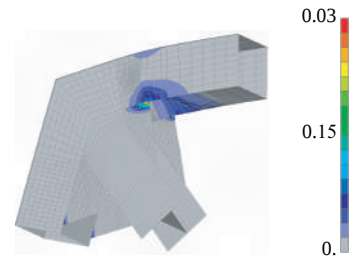


図-7 斜材破断時の格点部 J2 の相当塑性ひずみ分布 ($t = 0.897$ s, 変形 10 倍)

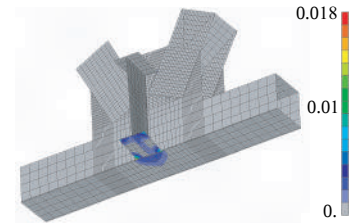


図-8 下弦材破断時の格点部 J9 の相当塑性ひずみ分布 ($t = 0.309$ s, 変形 10 倍)

$f_{dyn} = 4.00$ となり、動的效果 I は 1.05 となった。その横桁が連結されている格点部 J9 は、静的リダンダンシー解析結果同様に終局基準を満たさなかった。相当応力が最大となる $t = 0.309$ s のときの格点部 J9 の相当塑性ひずみを図-8 に示す。静的リダンダンシー解析結果と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かった。静的リダンダンシー解析において格点部が破壊に繋がる恐れがないとき、動的效果を考慮しても格点部が起因となる崩壊の可能性は低いことがわかった。

4. まとめ

破断を想定する部材ごとに動的效果 I は異なった。斜材破断時と比較し、下弦材破断時の方が動的效果 I は小さくなった。これは、下弦材に破断が生じて、床版や縦桁といったいくつかの周辺部材に荷重が伝達されたためと考察できる。つまり、部材に破断が生じて、その部材が受け持っていた荷重を他の部材に再分配する荷重経路があれば、動的效果は小さくなるといえる。

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) 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.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, 丸善, 2012.