

トラス橋の部材破断時の動的効果を重力仕事により

考慮したリダンダンシー評価の検討

東北大学工学部 学生員 ○村田 悠仁
 東北大学大学院工学研究科 正員 齊木 功
 東北大学大学院工学研究科 正員 山本 剛大

1. まえがき

2007年8月1日、米国ミネソタ州のミシシッピ川にかかる鋼トラス橋 I-35W 橋が中央径間のガセットプレートの変形をきっかけに崩落するという事故が発生した。このような事故を背景に、構造物の設計手法において損傷時の安全性を評価することの必要性が認識されている¹⁾。部材破断時には、設計時に想定されていたよりも大きな部材力が生じるため、動的効果をどのように考慮するかが議論されてきた。リダンダンシー評価のガイドライン²⁾では、破断のない状態に破断想定部材に生じていた断面力を、衝撃係数を用いて部材破断時に生じる衝撃を表現している。

トラス橋を対象とした研究では後藤ら³⁾が、2次元トラスを多質点系に近似し、部材破断後につり合い状態が移行する際に生じる振動を、固有振動モードで表現するモデル化により非線形静解析でリダンダンシーを評価する手法を提案した。藤本ら⁴⁾は、後藤ら³⁾の手法を3次元トラスに適用し、載荷剛性と除荷剛性の2種類を用いて固有値解析を行ったが、2つの剛性による固有振動モードの違いは、リダンダンシー評価に有意な影響を与えないとした。しかし、後藤ら⁴⁾や藤本ら³⁾が用いた手法はトラス中の1点の荷重変位関係に着目する手法であり、構造全体の変形は考慮されていない。また、部材破断の衝撃による慣性力を固有値解析によって算定するという手順が煩雑である。

本研究では、固有振動モードではなく変位差を用いて慣性力を考慮することで手順を簡略化し、さらに構造全体の重心に注目することで構造全体の変形を考慮した手法を提案する。

2. 解析対象とモデル

本研究では日本国内で斜材の破断が生じた木曾川大橋と同規模のワーレントラス橋の主構部分のみを取り出したものを図-1のようにモデル化し、解析対象とした。破断想定部材は、健全時に重力を作用させた際に最も大きな部材力が生じる斜材 D2 とした。図-1 に D2

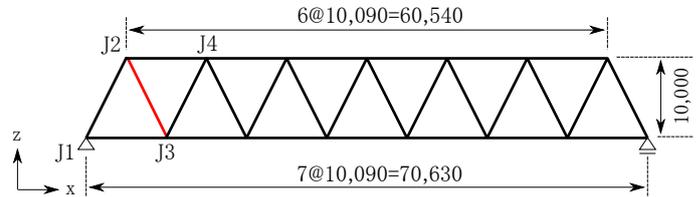


図-1 解析対象（単位：mm）

を赤色で示した。部材はすべて SM400 を用いた梁要素とし、Young 率 200GPa、Poisson 比 0.3、質量密度 $7.85 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、初期降伏応力を 235MPa とした。支点部を除く下弦材の格点には、厚さ 180mm、質量密度 $2.35 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ の RC 床版の質量のうち、格点から両側 1/2 パネル分の質量の半分を質量要素として考慮した。D2 の損傷を考えないモデルを健全系、D2 の要素を排除し、D2 の質量を半分ずつ両端の格点に質量要素として配置したモデルを破断系と呼ぶ。なお、重力加速度は $g = 9.8 \text{m/s}^2$ を用いた。

3. リダンダンシー評価法

(1) 非線形静解析による照査方法

非線形静解析でのリダンダンシー評価の手順を示す。

- 健全系、破断系のそれぞれに、荷重パラメータ α 、荷重倍率 k を乗じた重力加速度 $\alpha k g$ を作用させる。この時、破断系の重心が荷重に伴って鉛直下向きに移動し、健全系の重心変位と等しくなった状態を B^* 、破断系に重力を漸増載荷し、 $\alpha = 1$ となった状態を S とする。
- 破断系の i 番目の節点に対して、 B^* 、 S 状態の変位差の方向に、荷重 F_i を

$$\beta F_i = m_i \times (v_{Si} - v_{B^*i}) \times \beta \quad (1)$$

と定義する。ここで、 m_i は各節点の質量、 v は各状態での鉛直変位、 β は荷重パラメータである。 F_i はトラスの全節点が B^* 、 S と変形した際の慣性力を表し、部材破断の衝撃によって静的なつり合

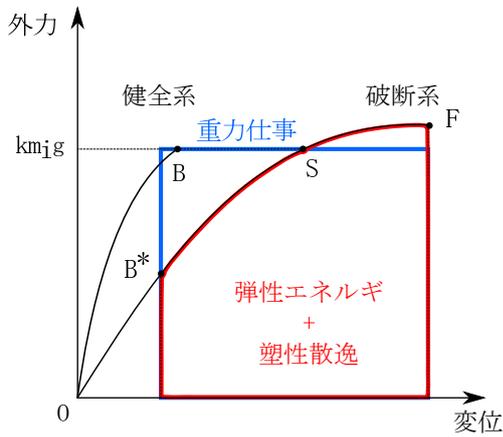


図-2 節点*i*の荷重 - 変位関係

い状態よりも大きな部材力が生じることを再現している。状態*S*での荷重*kg*に加えて式(1)で表される*F_i*を漸増载荷し、格点*J1*, *J2*, *J3*, *J4*の付近の要素が全塑性状態となった状態を*F*とする。

3. 図-2に示した*B**から*F*の状態に至るまでの系の弾性エネルギー増分と塑性変形による散逸の和*E_A*, 重力による仕事*W_G*を

$$E_A \equiv \sum_{i=1}^n \int_{B^*}^F F_{zi} \cdot dv_{zi} \quad (2)$$

$$W_G \equiv kmg \times (G_F - G_{B^*}) \quad (3)$$

と定義する。ここで、*F_{zi}*は*F_i*の鉛直成分、*v_{zi}*は*v_i*の鉛直成分、*G*は各状態での重心の鉛直変位である。

4. 式(2), (3)から求めた*E_A*, *W_G*を用いてリダンダンシー指標*I*を

$$I \equiv E_A / W_G \quad (4)$$

と定義する。*I* ≥ 1の時には十分なりダンダンシーがあると判定し、*I* < 1の時にはリダンダンシーが不十分と判定する。

(2) 非線形動的解析

本研究では、非線形動的解析を用いた解析結果を参照解とする。動的解析では、図-3のような時刻の関数である荷重パラメータを重力加速度、軸力に乗じて荷重とする。なお動解析に関しては、変位の時刻歴応答を*t*=10.0sまで計算し、*J1*, *J2*, *J3*, *J4*の付近の要素が全塑性状態となっているとき、崩壊しているとする。

1. 健全系に*kg*を作用させ、破断想定部材の両端格点に生じる軸力を*N₁*, *N₂*とする。

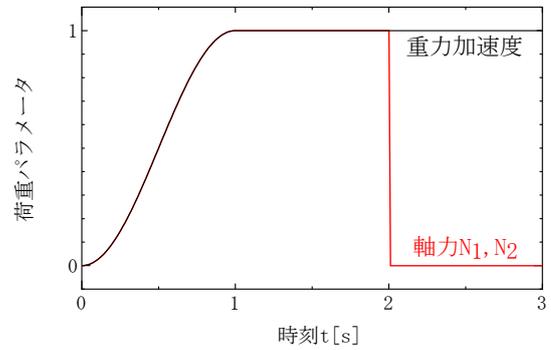


図-3 動的解析の荷重パラメータ

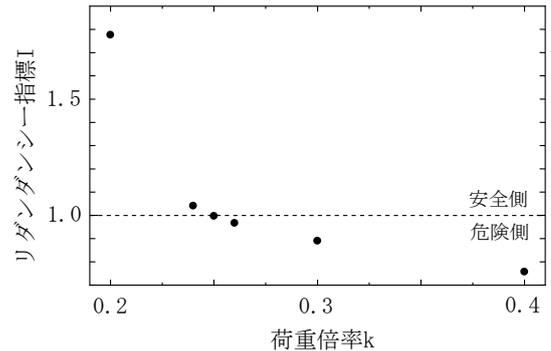


図-4 荷重倍率とリダンダンシー指標の関係

2. 破断系に*kg*と*N₁*, *N₂*を作用させ、部材破断前の状態を再現する。(0.00 ≤ *t* ≤ 2.00)
3. 0.01sの間に*N₁*, *N₂*だけをゼロにする⁵⁾。(2.00 ≤ *t* ≤ 2.01)

4. 結果

0.20 ≤ *k* ≤ 0.40での荷重倍率*k*と式(4)で表されるリダンダンシー指標*I*の関係を図-4に示す。図-4から、*k* = 0.25付近で*I* = 1となっている。動解析では*k* = 0.25の時、*J1*, *J2*, *J3*が全塑性状態となったが*J2*は全塑性状態とならず、静解析による結果は安全側の結果であるといえる。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会：鋼構造物のリダンダンシーに関する検討小委員会報告書，2014.
- 2) 土木学会鋼構造委員会：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)，2008.
- 3) 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.
- 4) 藤本真明，斉木功，山本剛大：3次元静的非線形解析による鋼トラス橋の動的効果を考慮したリダンダンシー評価，鋼構造年次論文報告集，vol.26，pp.312-319，2018.
- 5) 塚田健一，斉木功，岩熊哲夫：動的非線形解析による鋼トラス橋の部材破断に伴う衝撃係数に関する数値的評価，土木学会全国大会技術研究発表会講演概要集，2015.