

トラス橋の部材破断時の衝撃を重力仕事により 考慮した静的非線形リダンダンシー解析

Static nonlinear redundancy analysis of truss bridge
considering impact of member failure by gravity work

村田悠仁*
Yuto MURATA

*構造強度学研究室（指導教員：齊木功 准教授）

トラス橋の部材が破断し、破断前の状態からつり合い状態が移行する際、トラスには動的効果により静的つり合い時より大きな変位や部材力が生じ、構造全体の崩壊につながるおそれがある。崩壊の進展を対象とした数値解析には一般的に動的解析が用いられることが多いが、本研究では、破断前のモデルである健全系と破断後のモデルである破断系を用いて、トラスの変形による弾性エネルギーと塑性散逸の和を重力仕事と比較し、静的解析で動的効果を考慮できるリダンダンシー評価法を提案する。

Key Words: 鋼トラス橋, リダンダンシー解析, 非線形静解析, 動的効果

1. はじめに

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外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。部材破断時には、衝撃や振動などの動的効果によって静的つり合い時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。

後藤ら¹⁾は 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の慣性力を固有振動モードでモデル化することで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²⁾は、後藤ら¹⁾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²⁾や藤本ら¹⁾が用いた手法は固有値解析を行う手順が煩雑であることに加え、つり合い状態が移行する際の振動を自由振動モードで近似することが最適ではないと考えられる。また、非線形静解析で崩壊現象を追跡するために必要な荷重の極大点以後のつり合い経路を追跡するのは非常に困難である。

そこで本研究では、固有振動モードではなく、破断前後のつり合い位置の変位差を用いて部材破断後の慣性力を定義し、崩壊の基準をトラスの崩壊メカニズムが成立した状態とすることで非線形静解析のつり合い経路の追跡の煩雑さを軽減する手法を提案する。

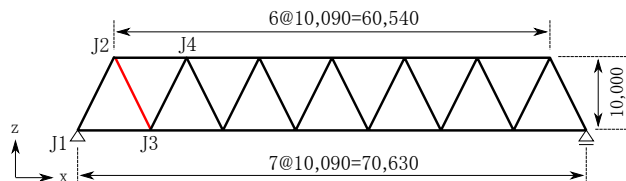


図-1 解析対象（単位：mm）

2. 解析対象と照査方法

(1) 解析対象

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 を赤色で示した。部材はすべて SM400 を用いた梁要素とし、Young 係数 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

死荷重に対する荷重倍率 k を変化させ、 k の値ごとにトラスのリダンダンシーを定量的に評価する。非線形静

的解析では、それぞれの節点の荷重変位関係が図-2のように求められると想定し数値解析を行う。以下に、非線形静的解析による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 αkg を作用させる。この時、破断系の重心が载荷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状態 B^* 、破断系に重力を漸増载荷し、 $\alpha = 1$ となった状態を状態 S とする。
- 破断系の i 番目の節点に対して、状態 B^* と状態 S 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。 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状態 B^* から状態 S へ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) で表される荷重を、 β を漸増させつつ载荷し、格点 J1, J2, J3, J4 の付近の要素の全断面が塑性化して4つの塑性ヒンジが形成した状態を状態 F とする。

- 図-2 に示した状態 B^* から状態 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、 M は系の総重量である。

- 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。 $I \geq 1$ の時には十分なリダンダンシーがあると判定し、 $I < 1$ の時にはトラスが崩壊すると判定する。

(2) 非線形動的解析

非線形動的解析を用いた解析結果を参照解とする。変位の時刻歴応答を計算し、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。以下に動的解析の手順を示す。

- 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 N_1 、 N_2 を求める。
- 破断系に kg と N_1 、 N_2 を作用させ、部材破断前の状態を再現する。
- 0.01s の間に N_1 、 N_2 だけをゼロにする³⁾。

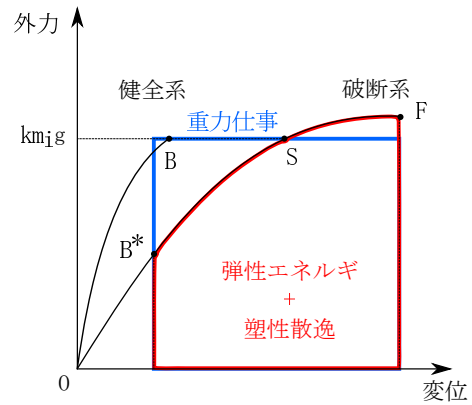


図-2 節点 i の荷重 - 変位関係

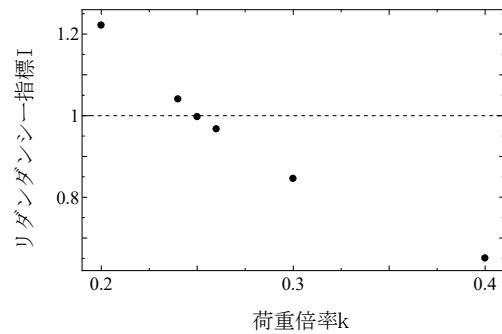


図-3 荷重倍率とリダンダンシー指標の関係

4. 結果

0.20 \leq $k \leq$ 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-3 に示す。破線は $I = 1$ を表しており、崩壊判定の閾値である。 $k = 0.24$ では $I = 1.040$ 、 $k = 0.25$ では $I = 0.997$ となり、 $I = 1$ となる k は 0.24 と 0.25 の間にあると推測できる。動的解析においては $k = 0.24$ で J3, J4 は塑性ヒンジとなるが、J1, J2 は塑性ヒンジとならず、崩壊していない。 $k = 0.25$ ではさらに J1, J2 が塑性ヒンジ化し、崩壊すると判定された。したがって、動的解析での最小崩壊荷重倍率も 0.24 と 0.25 の間にあると推測できる。以上から、動的解析で得られた最小崩壊荷重倍率と静的解析で $I = 1$ となる荷重倍率は、0.01 以下の範囲で一致している。

参考文献

- 後藤芳顕, 水野剛規, 山田忠信: トラスの部材破断時の衝撃と非弾性挙動を考慮したエネルギーによるリダンダンシー評価, 土木学会論文集 A1, Vol.71, pp.367-386, 2015
- 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.
- 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.

(2019年2月5日提出)