

## 鋼トラス橋の静的非線形リダンダンシー解析における動的効果の考慮

東北大学大学院工学研究科 ○学生会員 藤本真明  
 東北大学大学院工学研究科 正会員 斉木 功  
 東北大学大学院工学研究科 正会員 山本剛大

## 1. まえがき

トラス橋の部材破断事故<sup>1)</sup>を契機に、部材損傷後の耐荷性能であるリダンダンシーを評価することの重要性が認識され、評価方法が検討<sup>2)</sup>されている。鋼トラス橋の動的効果を考慮したリダンダンシー解析は、動的非線形解析により行われる。しかし動的非線形解析は計算コストが大きく、実務に用いることは困難である。これに対し、固有振動解析の結果から慣性力を定義し、重力と慣性力による仕事を用いてリダンダンシーを評価する手法<sup>3)</sup>が提案されている。この手法は静的非線形解析を用い、部材破断後の衝撃を弾塑性変形により吸収することを考慮できる。しかしその妥当性の検証は、平面上の簡易な質点系モデルに死荷重のみを考慮した場合に限定されている。そこで本研究では3次元の有限要素でモデル化したトラスに死荷重と活荷重を考慮し、静的非線形解析を用いて重力と慣性力を再現する方法によるリダンダンシー評価について考察する。

## 2. 解析モデル

木曾川大橋と同規模(全長70.63m, 幅員8.6m, 高さ10.0m)の単純支持鋼下路式ワーレントラス橋を対象として数値解析を行った。破断のない通常モデルを「健全系」、最大の引張力が生じる斜材を破断想定部材とし、それを取り払ったモデルを「破断系」と呼ぶ。

鋼材は全てSM400を模擬した梁要素とし、Young係数 $2.10 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、Poisson比0.3、質量密度 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、初期降伏応力 $235 \text{ N/mm}^2$ 、硬化係数 $2.10 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 、von Misesの降伏条件、等方硬化則を用いた。RC床版は平板要素でモデル化し、Young係数 $2.65 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、Poisson比0.17、質量密度 $2.35 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ を材料定数とし、Drucker-Pragerの降伏条件、等方硬化則を採用した。

荷重は道路橋示方書<sup>4)</sup>に準じ、死荷重 $D$ ・活荷重 $L$ ( $B$ 活荷重 $L$ 荷重)を与えた。構造が崩壊する荷重を求めるにあたり、活荷重倍率 $\alpha$ を用い、 $D + \alpha L$ の荷重を載荷した。破断想定部材に最も不利な応力が生じるように、 $p_1, p_2$ 荷重を図-1に示すように載荷した。

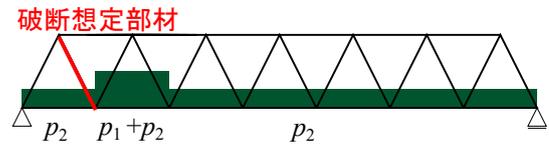


図-1 活荷重の載荷方法

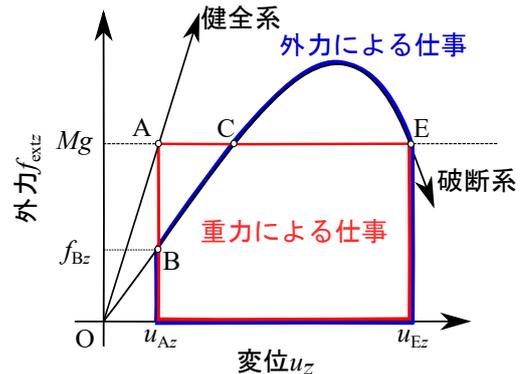


図-2 節点における鉛直方向のつり合い曲線

## 3. 部材破断後の安全性照査方法

## (1) つり合い経路の追跡

$xy$ 平面を変形前の床版と同一平面上に、 $z$ 軸を鉛直下向きに定義し、ある節点の変位ベクトルを $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)^T$ 、外力ベクトルを $\mathbf{f}_{\text{ext}} = (f_{\text{ext}x}, f_{\text{ext}y}, f_{\text{ext}z})^T$ とする。また、節点に作用する死荷重・活荷重相当の質量を $M \equiv \frac{D+\alpha L}{g}$ と定義する。そして以下の静的非線形解析により、ある活荷重倍率 $\alpha$ に対してつり合い経路を求めることで、例えばある節点の $z$ 軸方向については図-2のようなつり合い曲線を得る。

手順1 健全系に対して死荷重・活荷重 $D + \alpha L$ を作用させ、健全系のつり合い状態Aにおける変位 $\mathbf{u}_A$ を求める。

手順2 破断系に $\mathbf{u}_A$ を強制変位として作用させ、この状態をBとする。状態Aはつり合い状態であるが、破断系の状態Bは健全系で存在していた破断想定部材が存在しないため、モデル全体につり合い力が生じる。このつり合い力 $\mathbf{f}_B$ を求める。

手順3 状態Bで作用する外力 $\mathbf{f}_{\text{ext}}$ が、手順2で求めた $\mathbf{f}_B$ であるとする。一方、破断系の静的つり合い状

**Key Words:** 鋼トラス橋, リダンダンシー解析, 非線形静的有限要素解析, プッシュオーバー解析

〒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

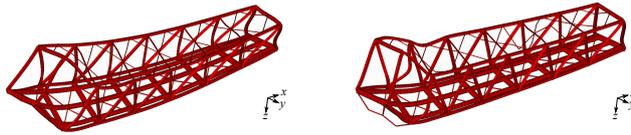


図-3 除荷剛性による1次の固有モード  
図-4  $D+3.00L$  載荷時の剛性による2次の固有モード

状態Cにおいては外力が死荷重・活荷重  $D + \alpha L$  のみであるとする。そして状態Bから状態Cまで外力  $f_{ext}$  が線形に変化すると仮定し

$$f_{ext} = (1 - \lambda) f_B + \lambda(0, 0, D + \alpha L)^T, \quad \lambda: 0 \rightarrow 1 \quad (1)$$

と定義する。

手順4 状態Cにおける固有振動解析を行う。その際、除荷剛性と、部材が塑性化した後の載荷方向の剛性（載荷剛性）のそれぞれによる固有振動解析ができ、図-3, 4のような2通りの卓越する固有振動モードが得られるため、それぞれについて以下のように慣性力を定義する。得られた固有値ベクトルのうち、節点における3成分を  $\Phi$  とする。そして死荷重・活荷重と慣性力の和

$$f_{ext} = (0, 0, D + \alpha L)^T + \mu M \Phi \quad (2)$$

を載荷し、荷重パラメータ  $\mu$  に関するつり合い経路を求める。図-2のようにつり合い曲線において外力が極大点を超えて減少し、 $\mu = 0$  となった状態を限界状態Eと定義する。除荷剛性と載荷剛性の2通りにより、状態Cから状態Eまでつり合い経路を求めてリダンダンシー評価を行う。

## (2) 安全性照査式

崩壊する場合は状態Eにおいて運動エネルギーが存在すると考えられる。一方で崩壊しない場合は、状態Aから状態Eまでの位置エネルギー減少分が全てひずみエネルギーと塑性散逸に変換され、状態Eにおける運動エネルギーが0であると仮定する。ひずみエネルギーと塑性散逸の和が外力  $f_{ext}$  による仕事と等しいので、この条件は

$$Mg(u_{Ez} - u_{Az}) \leq \int_A^E f_{ext} \cdot du \quad (3)$$

と表せる。ここで節点  $i$  における重力と外力による仕事をそれぞれ

$$K_i \equiv M_i g(u_{Ez} - u_{Az}), \quad W_i \equiv \int_A^E f_{exti} \cdot du_i \quad (4a, b)$$

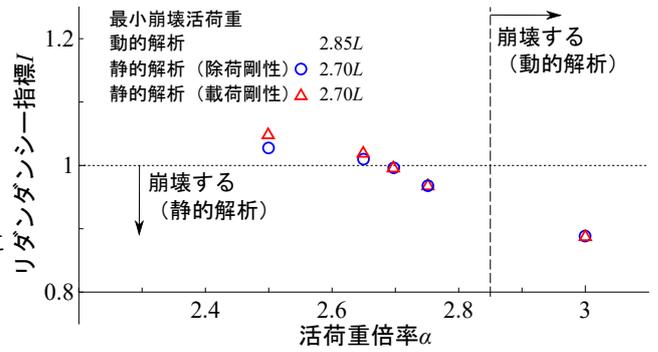


図-5 活荷重倍率とリダンダンシー指標の関係

と定め、節点数  $n$  の構造についてリダンダンシー指標  $I$  を定義し

$$I \equiv \left( \sum_{i=1}^n W_i \right) \left( \sum_{i=1}^n K_i \right)^{-1} \geq 1 \quad (5)$$

が成り立つとき、崩壊しないと判定する。

## 4. 解析結果

活荷重倍率  $\alpha = 2.50, 2.65, 2.70, 2.75, 3.00$  のそれぞれの場合について除荷剛性と載荷剛性による2通りのつり合い経路を求め、式(5)によりリダンダンシー指標  $I$  を計算した。その結果を図-5にまとめた。横軸は活荷重倍率  $\alpha$  で、縦軸はリダンダンシー指標  $I$  である。丸印が除荷剛性、三角印が載荷剛性による結果である。

本研究の静的非線形解析では、除荷剛性と載荷剛性のいずれの場合も  $\alpha = 2.70$  でリダンダンシー指標が  $I < 1$  となり、崩壊すると評価された。除荷剛性と載荷剛性の結果に差が生じなかった原因としては、固有振動モードに違いのある主要部材には活荷重が作用しないため、トラス全体の挙動に与える影響が小さかったことが考えられる。また、文献<sup>3)</sup>と同様の動的非線形解析により、最小崩壊活荷重倍率  $\alpha = 2.85$  を得た。これに対し静的非線形解析では  $\alpha = 2.70$  を得ており、死荷重下の平面構造の場合で報告<sup>3)</sup>された5%と同程度の安全側で照査ができることが分かった。

## 参考文献

- 1) 山田健太郎：国道23号木曾川大橋の斜材の破断，橋梁と基礎，Vol.41, No.9, pp.26-27, 2008.
- 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，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.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説I共通編，丸善，2017.