

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

Redundancy evaluation for the steel truss bridges considering dynamic effect
by three dimensional static nonlinear analysis

藤本真明*

Masaaki FUJIMOTO

*構造強度学研究室（指導教員：齊木功 准教授）

The redundancy of bridges is getting much attention because of the accidents of bridges such as the collapse of I-35W bridge in recent years. When a member of a steel truss bridge breaks, the impact is caused. For evaluating redundancy of the bridge with consideration of the impact, the dynamic nonlinear analysis is regarded as the most accurate. However, dynamic nonlinear analysis needs a huge computational cost. In order to reduce the computational cost, static analysis with dynamic amplification factor is widely used. Although 1.854 obtained for the single degree of freedom elastic system is generally used as the amplification factor, unnecessarily expensive by the amplification factor due to the neglect of plastic dissipation.

In order to overcome the problem of the amplification factor, the redundancy evaluation based on the balance of works by gravity and inertia force, which uses nonlinear static analysis considering the dynamic effect as inertia force, has been proposed. However, the feasibility of the redundancy evaluation has been studied only for a simple mass point system. Therefore, we develop the redundancy evaluation so as to be applicable to the three-dimensional model of steel truss bridges with live loads.

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

1. はじめに

我が国のトラス橋の部材破断事故¹⁾や、近年の老朽化橋梁の急増などから、橋梁のリダンダンシーを評価することの重要性が高まっている。例えば鋼トラス橋の部材が腐食等により破断すると、まず一次振動として、解放された軸力がひずみの縦波となり高速で伝わる。その後構造系全体の剛性低下により二次振動が生じ、新たなつり合い状態へと振動しながら移行する。構造系の挙動に与える一次振動の影響は小さいが、二次振動は構造系に動的増幅を与え、崩壊の進行に影響を与える²⁾。こうした振動現象は、動的非線形解析により再現できる。しかし動的非線形解析は計算コストが膨大となるため、実務での利用が困難である。

計算コストを削減するために、動的な効果を動的増幅率により考慮する静的解析が一般的に用いられている。動的増幅率としては、1自由度系の振動の応答から得られる1.854が広く用いられている³⁾が、多自由度系では必ずしも妥当ではないこと²⁾と過度に補強される結果を導くことが多い。

こうした背景から、耐震設計における震度法のように、破断に伴う振動の影響を慣性力としてモデル化し、静的な非線形解析を行い、重力と慣性力による仕事の比較から崩壊危険性を判定する方法が提案された⁴⁾。しかしその妥当性の検証は、平面トラス構造を多質点系に置き換え、死荷重のみを考慮した簡易なモデルの場合に限

定されている。また、慣性力を求めるために弾性剛性を用いた固有振動解析を行っているが、部材破断直後に塑性化が進行する場合は、剛性は弾性除荷と塑性載荷の2通りがあり一意には定められない。

そこで本研究では、全ての有限要素に質量を与えた3次元トラスモデルにおいて慣性力を考慮した静的非線形解析を行い、構造系が崩壊する荷重を適切に評価できるか検討する。また慣性力の定義方法がリダンダンシー評価に影響を与える可能性があると考え、除荷剛性を用いた固有振動解析に加えて、部材塑性化後の載荷方向の剛性を用いた固有振動解析も行い、慣性力を算定する方法について検討する。

2. 解析対象とモデル化

(1) 解析対象

斜材破断事故¹⁾が発生した木曾川大橋と同規模(全長70.63 m, 幅員8.6 m, 高さ10.0 m)の単純支持鋼下路式ワーレントラス橋をモデル化し、解析対象とした。解析対象の一般図を図-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、モデル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。本研究では、破断想定部材を斜材D2とした。

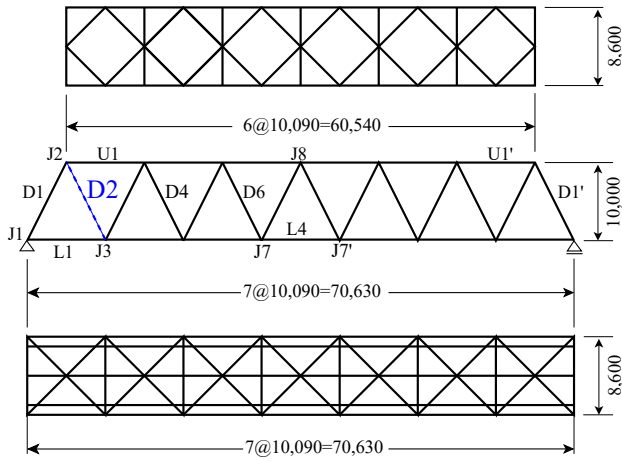


図-1 解析対象一般図 (単位: mm)

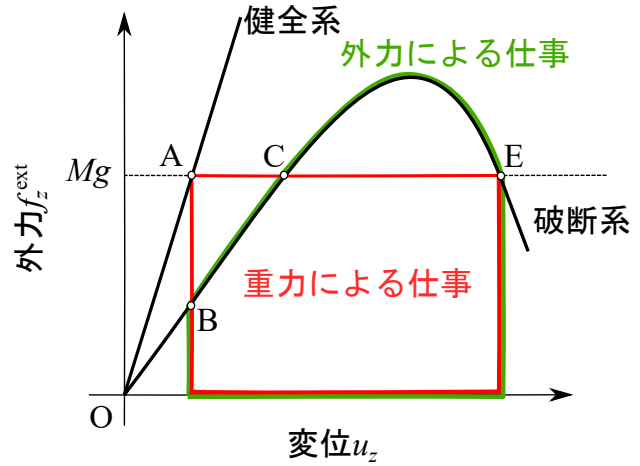


図-3 節点における鉛直方向のつり合い曲線

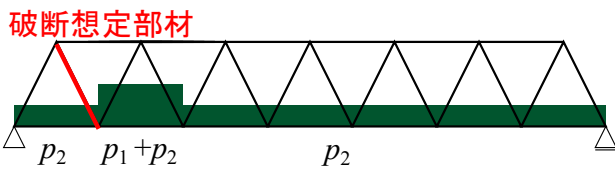


図-2 活荷重の荷重方法

(2) 有限要素モデル

鋼部材は全て SM400 を模擬した梁要素でモデル化した。材料定数は、Young 係数 210 GPa, Poisson 比 0.3, 質量密度 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 初期降伏応力 235 MPa, 硬化係数 2.10 GPa とし, von Mises の降伏条件, 等方硬化則を用いた。RC 床版は平面シェル要素でモデル化し, Young 係数 26.5 GPa, 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⁵⁾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 α を用い, $D + \alpha L$ の荷重を載荷した。斜材 D2 に最も不利な応力が生じるように, p_1, p_2 荷重を図-2 に示すように載荷した。

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する。ある節点での変位ベクトルおよび外力ベクトルをそれぞれ $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)^T$, $\mathbf{f}^{ext} = (f_x^{ext}, f_y^{ext}, f_z^{ext})^T$ と表し, 重力加速度の大きさを g とする。また, 床版上の節点において活荷重が仕事や慣性力に与える影響を考慮するために, 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 α に対してつり合い経路を求める。図-3 はつり合い経路のうち, ある節点における z 軸方向の外力 f_z^{ext} と変位 u_z の関係の概念図である。

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

手順 2 破断系に 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 は斜材 D2 を取り除いて斜材 D2 が破断した瞬間を再現しているため, モデル全体に不つり合い力が生じる。この不つり合い力 f_B を求める。

手順 3 状態 B で作用する外力 f^{ext} が, 手順 2 で求めた f_B であるとする。一方, 破断系の静的つり合い状態 C は外力として死荷重・活荷重 $D + \alpha L = Mg$ のみが作用する状態であるとする。そして状態 B から状態 C まで荷重パラメータ λ が 0 から 1 まで線形に変化すると仮定し外力 f^{ext} を

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

と定義する。

手順 4 状態 C における固有振動解析を行う。固有振動解析の詳細は 4. で述べる 2 通りの方法を用いる。得られた 2 通りの固有値ベクトルそれぞれについて以下のように外力 f^{ext} を定義する。固有値ベクトルのうち, 節点に関する併進 3 成分を Φ とする。そして外力 f^{ext} を死荷重・活荷重と慣性力の和

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

で定義し, 荷重パラメータ μ に関するつり合い経路を求める。ここで図-3 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。

(2) リダンダンシーの照査

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。一方で崩壊しない限界は, 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エネルギーに変換され、状態Eにおける運動エネルギーが0であると仮定する。この条件は、ひずみエネルギーと塑性散逸エネルギーの和が外力 f^{ext} による仕事と等しいことから、重力加速度ベクトルを $g = (0, 0, g)^T$ として

$$M \int_A^E \mathbf{g} \cdot d\mathbf{u} \leq \int_A^E \mathbf{f}^{ext} \cdot d\mathbf{u} \quad (3)$$

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

$$K_i \equiv M_i \int_A^E \mathbf{g} \cdot d\mathbf{u}_i, \quad W_i \equiv \int_A^E (\mathbf{f}^{ext})_i \cdot d\mathbf{u}_i \quad (4a, b)$$

と定め、節点数 n の構造についてリダダンシー指標 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. 破断に伴う慣性力

3. (1)の手順4において、破断系に作用する慣性力を評価するために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荷重方向の剛性（荷重剛性）の2種類による固有振動解析ができる。

状態Cにおける変形と、鋼部材の塑性ひずみ ϵ^P の分布を図-4に示す。斜材D2に近いJ1からJ4の格点付近や、反対の支点側の格点J2'付近から鋼材の塑性化領域が広がっている。除荷剛性による固有振動解析では、塑性ひずみ分布に関わらず、全ての要素について線形弾性状態の剛性を用いる。よって活荷重の大きさによらず図-5のような格点J3付近が大きくたわみねじれるような固有振動モードが得られた。荷重剛性による固有振動解析では、塑性化した要素については降伏後の鋼材の剛性を用いる。そのため図-6のように、格点J3付近が大きくたわみ、かつ塑性化した部分の振幅が相対的に大きくなるような固有振動モードが得られた。

3. (1)の手順4では、このような方法で得た除荷剛性と荷重剛性の2通りによる固有振動モードをそれぞれの活荷重倍率 α のモデルに対して適用し、慣性力を定義する。

5. 解析結果

(1) 動的非線形解析

静的非線形解析を用いた照査の比較対象とするために、文献⁹⁾と同様の動的非線形解析を用いて基準となるトラスの挙動を求める。この挙動をトラスの部材破断後の正しい挙動とする。

まず破断想定部材の健全時の格点部に作用する軸力 N_0 を求める。次に破断部材を取り払ったモデルの破断部材が接続されていた格点部に、軸力 N_0 を外力として重力とともに滑らかに作用させて破断前の状態を保つ。

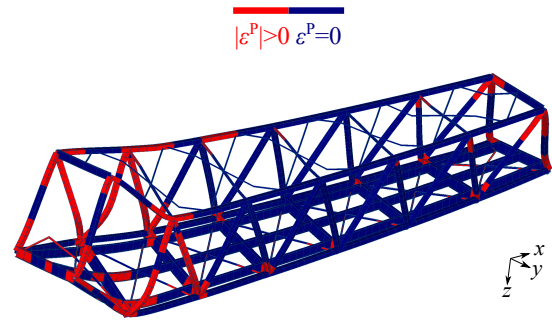


図-4 $\alpha = 3.00$ の状態Cにおける変形(5倍)と塑性ひずみ分布

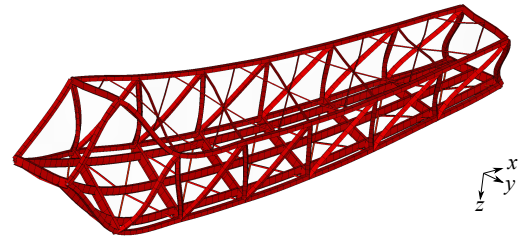


図-5 除荷剛性による1次の固有振動モード

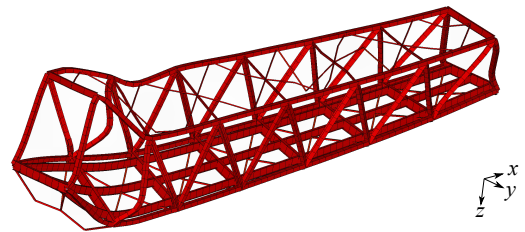


図-6 $\alpha = 3.00$ の荷重剛性による2次の固有モード

そして1つの時間積分間隔で N_0 を0へ減少させて破断を再現する。なお時間積分間隔は0.01sとした。また構造減衰5%のRayleigh減衰を考慮する。Rayleigh減衰係数は1次と2次の除荷剛性による固有振動モードの減衰が5%という条件から設定した。

そして活荷重倍率が $\alpha = 1.00, 2.00, 2.50, 2.75, 2.80, 2.85, 2.90, 3.00$ の8通りのモデルでトラスの時刻歴応答を求めた。斜材D2が下弦材と交わる格点J3において得られたたわみの時刻歴を図-7に示す。横軸は時刻 t 、縦軸はスパン長 $l = 70.63$ m で正規化した鉛直変位 $\frac{w}{l}$ である。 $t = 2.60$ s からの0.01s間で N_0 を0に変化させ斜材D2の破断を再現している。

破断後に $\alpha \leq 2.80$ の場合は振動しながら新たな釣り合い状態に移行した。 $\alpha \geq 2.85$ の場合は破断後に変位

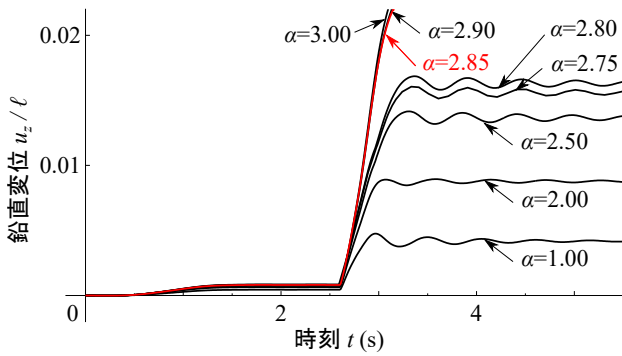


図-7 格点J3の時刻歴応答

が増加し続けた。よって参照解とする動的的非線形解析による最小崩壊活荷重倍率は $\alpha = 2.85$ とする。

(2) 静的解析の結果

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た。

$\alpha = 3.00$ の場合のつり合い経路を図-8に示す。縦軸は外力 f^{ext} の鉛直方向成分を重力で正規化した $\frac{f_z^{\text{ext}}}{Mg}$ であり、横軸は正規化した鉛直変位 $\frac{u_z}{l}$ である。状態Cを超えた後、除荷剛性と載荷剛性の場合で徐々につり合い経路に差が出ているが、その差は極大点において載荷剛性の場合が除荷剛性の場合に対して荷重が0.5%小さい程度であった。つり合い経路の差は、固有振動モードにより与えた慣性力の違いによるものである。固有振動モードの差が比較的大きいのは、4.で述べた通り上弦材、斜材といった主要部材であり、それらの質量 M は活荷重が作用する床版の実質的な質量 M と比べて小さいため、剛性の違いによるつり合い経路の差が0.5%程度と小さくなったと考えられる。

次に、式(5)によりリダンダンシー指標 I を計算した結果を図-9にまとめた。横軸は活荷重倍率 α 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、5.(1)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⁴⁾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。動的非線形解析では粘性減衰を考慮しているが、静的非線形解析では粘性減衰力やそれによる仕事を考慮していないため、安全側の照査ができると考えられる。

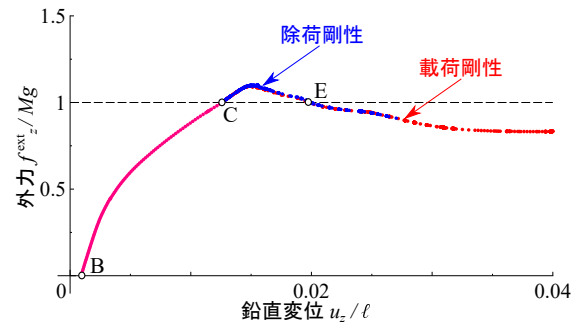


図-8 $\alpha = 3.00$ の場合の鉛直方向の外力-変位関係

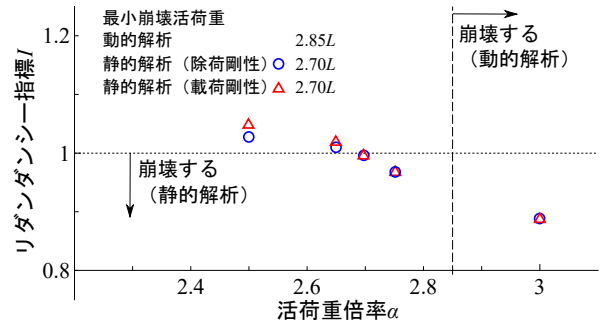


図-9 活荷重倍率とリダンダンシー指標の関係

6. 結論

鋼トラス橋の引張斜材破断時の動的効果を3次元静的非線形解析により再現し、得られたつり合い経路から重力による仕事と外力による仕事の大小関係を求めてリダンダンシーを評価する手法を提案した。また、2通りの固有振動解析により慣性力を定義し、それらの適用可能性についても考察した。その結果、以下の知見を得た。

- 除荷剛性と載荷剛性の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。
- 提案手法を用いることにより、動的非線形解析による参照解に対して5%程度の安全側で崩壊照査ができる。

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) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説I共通編，丸善，2017.

(2018年2月1日提出)