

静的非線形解析により部材破断の衝撃を考慮した 橋梁のリダンダンシー評価手法の提案

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 斉木 功
熊本高等専門学校専攻科 正員 岩坪 要

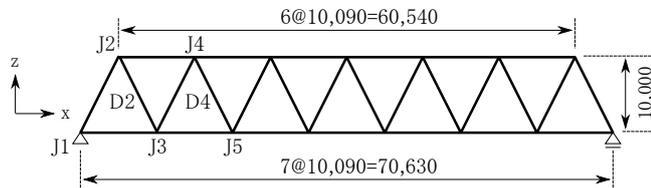


図-1 解析対象のトラス橋（単位：mm）

1. はじめに

2007年、米国のトラス橋 I-35W 橋が、格点部のガセットプレートの面外変形をきっかけに崩落するという事故が発生して以降、橋梁のリダンダンシー評価が重要視されている。後藤ら¹⁾は、2次元トラスを質点系に近似し、部材破断により生じる重力仕事と、構造系の弾性変形と塑性散逸の和を比較し、動的効果を考慮したトラスのリダンダンシーを静的解析で評価する手法を提案した。藤本ら²⁾は、この手法を質点に近似しない3次元トラス橋に適用し、その妥当性を検証した。後藤ら¹⁾や藤本ら²⁾の手法では、橋梁の自由振動の1モードを慣性力荷重として用いている。一般に橋梁には複数のモードを重ね合わせた振動が生じるが、部材破断直後は主として部材破断による不釣り合い力による強制振動が生じると考えられる。そこで本研究では、部材破断による不釣り合い力の影響を考慮した慣性力荷重のモデル化を試み、動的効果を考慮した橋梁のリダンダンシー評価手法を提案する。

2. 解析対象

本研究では、木曾川大橋と同規模の3次元鋼トラス橋を図-1のようにモデル化したものを用いた。床版は平面シェル要素、それ以外の部材は梁要素を用いてモデル化した。鋼のYoung係数210GPa、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、コンクリートについてはYoung係数26.5GPa、Poisson比0.17、質量密度 $2.35 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、初期降伏応力を22.7MPaとした。想定する破断部材として、引張材であり、橋梁全体系への影響が最も大きいと考えられる斜材D2を選択した。

3. リダンダンシー評価法

(1) 非線形静解析による評価方法

損傷のないモデルを健全系、D2を取り除いたものをD2破断系と呼ぶことにする。荷重は、死荷重と荷重倍率 k を乗じた活荷重を考え、破断想定部材が最も厳しくなるよう載荷する。活荷重に対する荷重倍率 k を変化させ、各節点に対して図-2のようなつり合い曲線を求め、活荷重倍率に対する橋梁のリダンダンシーを評価する。

- 健全系、破断系のそれぞれに、死荷重 D と荷重倍率 k を乗じた活荷重 kL に、0から1へ増加する荷重パラメータ α を乗じた荷重 $\alpha \times (D + kL)$ を作用させる。この時、健全系に荷重を漸増載荷し、 $\alpha = 1$ となった状態を状態B、破断系において $\alpha = 1$ となった状態を状態S、破断系の重心の変位が健全系の状態Bの重心変位と等しくなった状態を状態B*とする。
- D + kLに加え、破断系の i 番目の節点に対し慣性力荷重 F_i を、荷重パラメータ β を乗じて載荷する。慣性力荷重の詳細については後述する。 β が極大値を超えて減少し、 $\beta = 0$ となった状態を状態Fとする。
- 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

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

$$W_G \equiv \sum_{i=1}^n (D + kL)_i \times (v_{zF} - v_{zB^*})_i \quad (2)$$

と定義する。ここで、 n は節点数、 P_{zi} は各節点に作用する荷重の鉛直成分、 v_{zi} は各状態での各節点の変位 v_i の鉛直成分である。

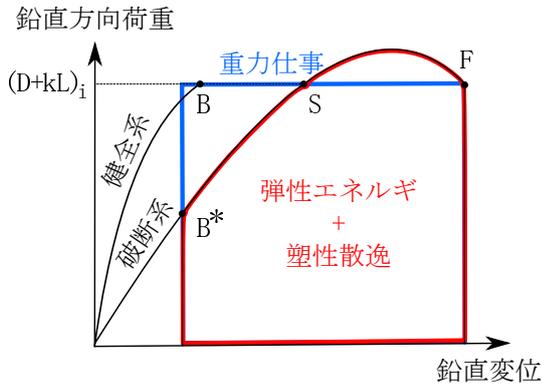


図-2 節点*i*の荷重-変位関係

4. 式(1), (2)から求めた E_A , W_G を用いてリダンダンシー指標 I を

$$I \equiv E_A / W_G \quad (3)$$

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、 $I < 1$ の時には橋梁が崩壊すると判定する。

(2) 非線形静的解析に用いる慣性力荷重

3通りの慣性力荷重を用いて非線形静的解析を行った。状態 B^* と状態 S の変位差を用いて慣性力荷重をモデル化する手法を手法1, 状態 B と状態 S の変位差を用いる手法を手法2, 固有振動モードを用いる手法を従来手法と呼ぶことにする。非線形静的解析の手順2で用いる慣性力荷重は,

$$F_i = m_i u_i \quad (4)$$

$$u_i = \begin{cases} v_{Si} - v_{B^*i} & \dots(\text{手法1}) \\ v_{Si} - v_{Bi} & \dots(\text{手法2}) \\ \Phi_i & \dots(\text{従来手法}) \end{cases} \quad (5)$$

と表される。ここで、 m_i は各状態での節点 i の質量、 v_i は各状態での節点 i の変位、 Φ_i は固有振動モードのうち、節点 i の変位である。

(3) 非線形動的解析

本研究では動的解析での結果をリダンダンシー評価の参照解とする。以下に動的解析での解析手順を示す。

- 健全系に $D + kL$ を作用させ、破断想定部材の両端の格点に生じる軸力 N_1 , N_2 を求める。
- 破断系に $D + kL$ 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⁾。

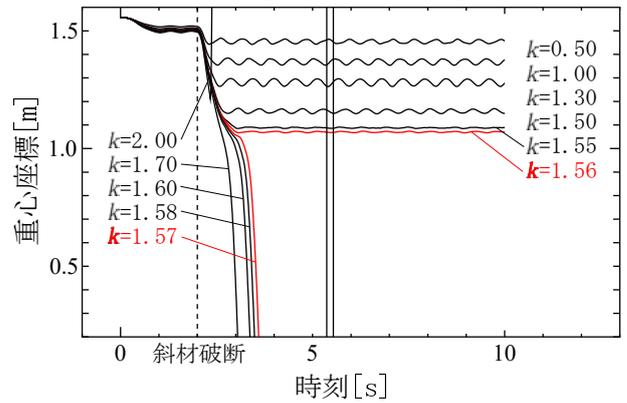


図-3 D2 破断系の動的解析結果

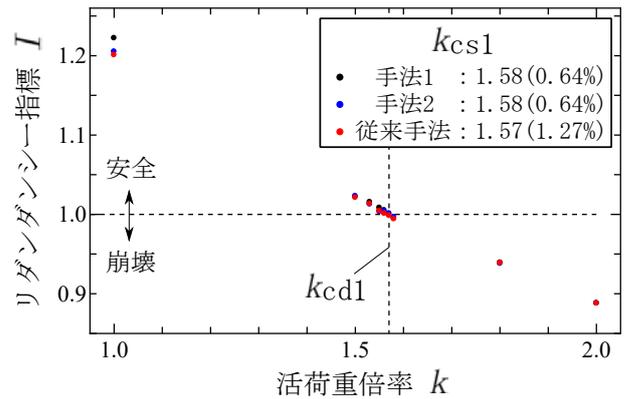


図-4 D2 破断系の静的解析結果

4. 結果

D2 破断系に対して非線形動的解析を行い、重心変位の時刻歴を求めた結果を図-3に示す。 $k \geq 1.57$ では重心の変位が増加し続け、D2 破断系が崩壊する最小の活荷重倍率の参照解 k_{cd1} が求められた。

前述した3種類の慣性力荷重を用いた非線形静的解析によって算定したリダンダンシー指標 I を図-4に示す。また、図には静的解析により算出された最小崩壊活荷重倍率 k_{cs1} と、それらの参照解 k_{cd1} に対する相対誤差も示している。活荷重倍率 k が増加するとリダンダンシー指標 I が減少し、図中に示した荷重倍率で $I < 1.00$ となり、橋梁が崩壊すると判定された。 k_{cs1} の k_{cd1} に対する誤差は手法1, 手法2で0.64%, 従来手法で1.27%であり、変位差を用いた慣性力荷重により、橋梁のリダンダンシーを適切に評価することができた。

参考文献

- 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.
- 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.