

静的線形解析による鋼トラス橋梁の冗長性評価のための 非線形強度相関式の適用性

長岡技術科学大学 ○ 櫻井滉平

長岡技術科学大学 岩崎英治

バルバ プエンテ カルロス ヒルベルト

1. はじめに

日本の橋梁は、20年後（2039年）に竣工50年を超える橋が過半数を超えてくる。そこで、橋の維持管理が重要視されている。特に鋼トラス橋梁では、一つの部材の破断でも落橋する可能性がある。過去には、米国ミネソタ州で2007年8月、ミシシッピ川に架かる州間高速道路35W号線のトラス橋が崩落して、13人が死亡した。同様の損傷を受けたが落橋していない橋もある。三重県の鋼トラス橋である木曾川大橋では、斜材が破断したが落橋せずに安定な構造を確保していた。

落橋した橋梁と落橋しなかったものの違いは冗長性の違いにあると考える。橋梁の冗長性とは、一部の主要部材が機能を失っても破断部材の負荷を他の部材が受け持つことである。近年、鋼トラス橋梁に適切な点検や維持管理をするために、橋梁の冗長性評価が重要である。

URS(2006)¹⁾と永谷ら(2009)²⁾は鋼トラス橋の静的線形解析によるリダンダンシー評価の方法を検討している。このとき、橋梁の1つの部材が破断した後、残りの部材の終局状態を判定するために線形の強度相関式を用いている。

しかし、強度相関は非線形式で表されることが、既往の多くの研究により明らかになっている。そこで、Khuyenら³⁾は、非線形の強度相関式を用いたリダンダンシー評価の方法を提案し、その有用性を示すために、下路式の鋼トラス橋を対象とし、非線形弾塑性解析との結果から、非線形相関式を用いた線形計算によるリダンダンシー評価の結果は、線形相関式による結果よりも、高い精度が得られることを明らかにした。

しかし、既存の研究では、対象橋梁形式は下路式鋼トラス橋のみであった。同じトラスでも橋の形式に

よって構造挙動が異なるため、本研究では、下路式単径間、上路式単径間、上路式2径間について非線形相関式の信頼性を検討する。また、永谷らが提案した線形相関式との比較を行う。

2. 非線形強度相関式

Khuyenら³⁾用いた非線形強度相関式を以下に示す。非線形強度相関式の式(1)は引張り部材を対象とし、式(2)は圧縮部材を対象とする。

$$R = \left(\frac{M_x}{M_{pcx}}\right)^{\alpha x} + \left(\frac{M_y}{M_{pcy}}\right)^{\alpha y} \quad (1)$$

$$R = \left(\frac{C_{mx}M_{eqx}}{M_{pux}}\right)^{\alpha x} + \left(\frac{C_{my}M_{eqy}}{M_{puy}}\right)^{\alpha y} \quad (2)$$

ここで、 M_x 、 M_y は作用曲げモーメント、 M_{pcx} 、 M_{pcy} は引張状態での全塑性モーメント、 M_{pux} 、 M_{puy} は圧縮状態での全塑性モーメントである。 M_{eqx} 、 M_{eqy} は換算曲げモーメントを示す。

引張力が働く場合（I、H型断面）

$$\frac{M_{pcx}}{M_{px}} = \min\left\{1.18\left[1 - \left(\frac{N}{N_p}\right)\right], 1\right\}$$

$$\frac{M_{pcy}}{M_{py}} = \min\left\{1.19\left[1 - \left(\frac{N}{N_p}\right)^2\right], 1\right\}$$

引張力が働く場合（box型断面）

$$\frac{M_{pcx}}{M_{px}} = \min\left\{1.20\left[1 - \left(\frac{N}{N_p}\right)\right], 1\right\}$$

$$\frac{M_{pcy}}{M_{py}} = \min\left\{1.20\left[1 - \left(\frac{N}{N_p}\right)^2\right], 1\right\}$$

圧縮力が働く場合（すべての断面）

$$\frac{M_{pux}}{M_{px}} = \left(1 - \frac{P}{P_{ux}}\right)\left(1 - \frac{P}{P_{ex}}\right)$$

$$\frac{M_{puy}}{M_{py}} = \left(1 - \frac{P}{P_{uy}}\right)\left(1 - \frac{P}{P_{ey}}\right)$$

また、指数部 α_x と α_y は以下のようになる。

・ I 断面の場合の α_x と α_y

$$\alpha_x = 1.2 + 2 \frac{N}{N_p}; \alpha_y = 2$$

・ box 断面の場合の α_x と α_y

$$\alpha_x = \alpha_y = 1.7 + 1.5 \frac{N}{N_p}$$

3. リダンダンシー評価の手順

静的線形解析において、仮想部材の破断を再現す

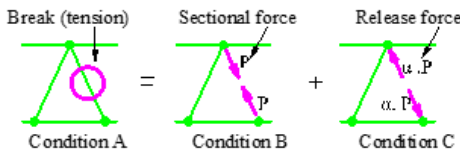


図-1 仮想部材の破断

るため、モデルから仮想部材を除去し、仮想部材の断面力を逆方向に作用した。図-1 は仮想部材除去の流れを示す。

部材破断の動的効果を考慮するため、断面力 P に、拡大係数 α を積算した（解放力=断面力 $\times\alpha$ ）。拡大係数は、断面力が圧縮の場合 $\alpha=1.000$ とし、引張の場合 $\alpha=1.854$ とした。仮想破断部材が除去された後、残りの部材はリダンダンシー R を評価するために線形相関式および非線形相関式によって評価した。 $R > 1$ の場合、その部材は作用している力以上を負うことができず、破断した。本研究では、仮想部材の除去後、線形相関式および非線形相関式で計算した R が 1 を超えた時の解放力を計算した。

URS や永谷らは、線形の強度相関式として次式を用いている。式(3)は引張部材を対象とし、式(4)は圧縮部材を対象とした。

$$R = \frac{N}{N_p} + \frac{M_x}{M_{px}} + \frac{M_y}{M_{py}} \quad (3)$$

$$R = \frac{P}{P_u} + \frac{1}{1-P/P_{ex}} \frac{M_{eqx}}{M_{px}} + \frac{1}{1-P/P_{ey}} \frac{M_{eqy}}{M_{py}} \quad (4)$$

ここで、添え字の x は面内、 y は面外を示す。また、 N 、 M は作用軸力、作用曲げモーメント。 N_p 、 M_p は全塑性軸力、全塑性曲げモーメントを示す。 P_u は道路橋示方書II3.2.1に基づく座屈を考慮した終局圧縮応力強度、 P_e はオイラー座屈軸力、 M_{eq} は換算曲げモーメントを示す。

静的線形解析による線形相関式および非線形相関式の精度を把握するために、静的線形解析より信頼性が高い、静的非線形解析を行った。静的非線形解析による仮想部材を取り除いていく中で、残り部材で座屈や全塑性が生じた時に仮想部材の解放力を計算した。静的線形解析による線形相関式および非線形相関式で計算した解放力と信頼性が高い静的非線形解析で計算した解放力を比較した。

4. 数値解析方法

本研究は鋼トラス橋形式3式の橋梁で検討を行った。橋梁Aは下路式単径間であり、橋梁Bは上路式単径間であり、橋梁Cは上路式2径間である。

非線形相関式と線形相関式の信頼性を比較するために、各橋梁モデルで5ケースを設定した。各ケースで一つの仮想部材の破断を再現し、一つの静的線形

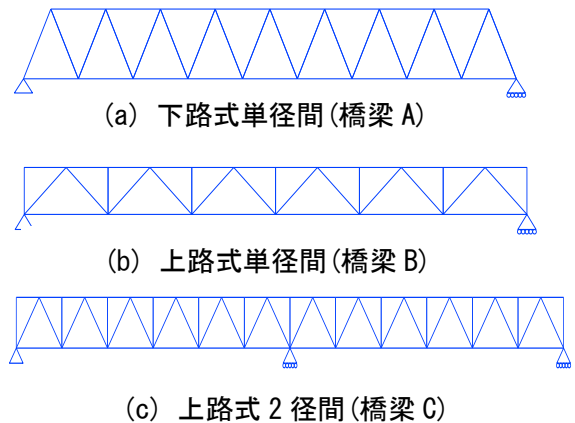


図-2 検討橋梁

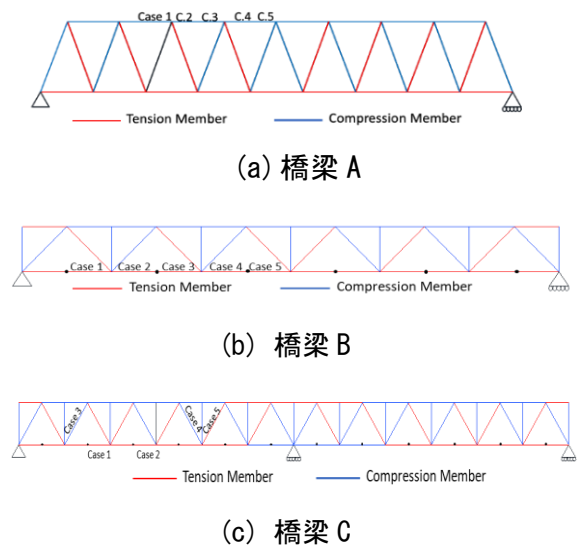


図-3 解析対象部材

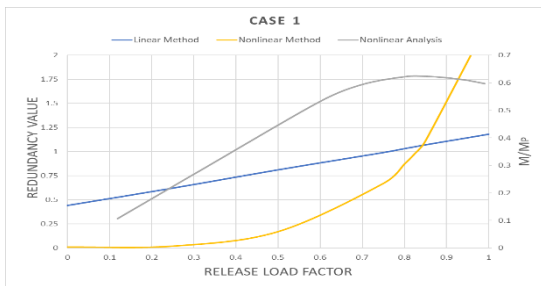
解析を行った。

強度相関式によるリダンダンシー評価に用いる静的線形解析およびこの評価結果の妥当性を確認するための静的弾塑性非線形解析を行う。それぞれの解析では、コンクリート床版はシェル要素として表し、トラス部材はビーム要素として表した。トラス接合部は剛結と仮定した。静的弾塑性非線形解析では、トラスの主要部材のみ鋼材の弾塑性体として扱った。また、各部材の断面内での塑性域の広がりをつめるために部材断面を 10×10 層に分けた。

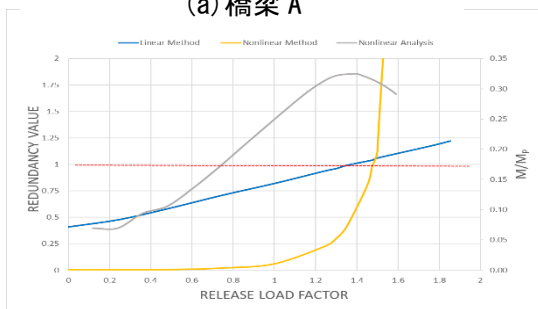
5. 解析結果

図-3 に各モデルの損傷箇所を示す。Case1~5 の場所は、橋にとって不利な損傷箇所とした。デッキシステムが設置されている部材は、部材の損傷が起きても、悪影響が少ないと考え、対象から外した。

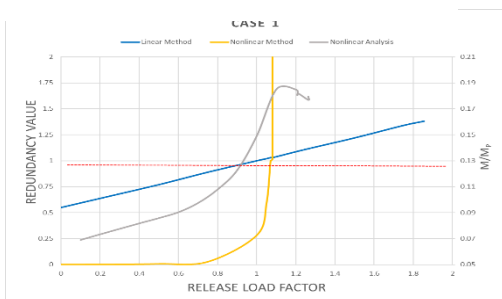
図-4 には解析結果の例として Case1 の部材破断に



(a) 橋梁 A

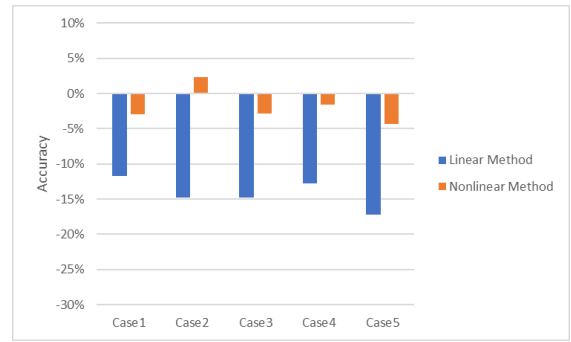


(b) 橋梁 B

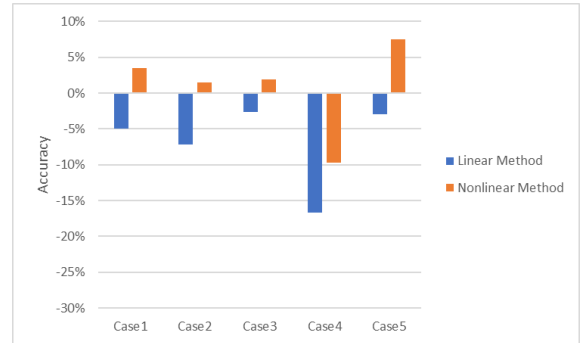


(c) 橋梁 C

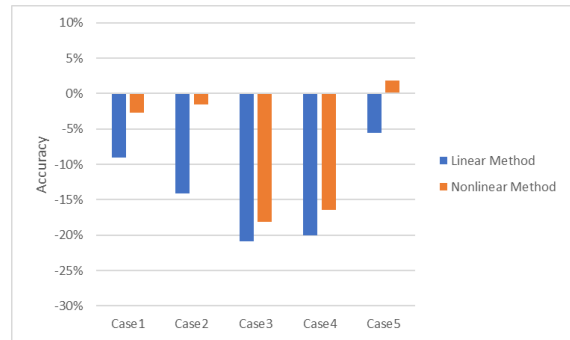
図-4 解析結果



(a) 橋梁 A



(b) 橋梁 B



(c) 橋梁 C

図-5 線形と非線形相関式の非線形との差

よる解放率と強度相関式によるリダンダンシー指標 R および、弾塑性非線形解析による部材の曲げモーメントの関係を示している。これより、各橋梁とも非線形強度相関式によるリダンダンシー指標 $R=1$ になる時の解放率は、線形の強度相関による $R=1$ の解放率よりも、弾塑性非線形解析による曲げモーメントが最大値になる時の解放率に近い値を得ていることが分かる。また、図-5 に $R=1$ になる時の解放率と弾塑性非線形解析による曲げモーメントが最大になる時の解放率の非線形法との差をパーセントで示す。

橋梁 A の損傷対象部材は圧縮部材である。橋梁 B の損傷対象部材は引張部材である。橋梁 C の損傷対象部材は Case3 と 4 は圧縮部材であり、その他は引張

部材である。圧縮部材は、座屈が発生するため精度が低下する傾向にある。

下路式である橋梁 A では、線形相関式は、-10～17%の精度があり、非線形相関式は±5%以内の精度を確保することが分かった。

橋梁 B は、Case4 以外は線形・非線形相関式ともに、橋梁 A 同等の精度であった。

橋梁 C では、圧縮部材である Case3, 4 は、橋梁 A より精度が低く、特に非線形相関式の場合は-15%以上の精度であった。引張部材は、非線形相関式で±5%以内の精度を発揮した。

橋梁 A,B,C で精度が変わるのは、鋼トラス橋梁の形式によって、構造的な挙動が異なるという理由である。

6. 結論

以上のことより、引張部材の場合、非線形相関式は様々な鋼トラス橋のリダンダンシー評価で適応できるとわかった。ただし、圧縮部材は線形・非線形相関式ともに、座屈の発生により精度が低いと考えられる。

圧縮部材の結果を比較すると、橋梁 C は橋梁 A より精度が低いことが分かる。

参考文献

1) URS Corporation, "Fatigue evaluation and redundancy analysis, Bridge No.9340, I-35W over Mississippi river," 2006.

2) 永谷秀樹, 明石直光, 松田岳憲, 安田昌宏, 石井博典, 宮森雅之, 小幡泰弘, 平山博, 奥井義昭: 我国の鋼トラス橋を対象としたリダンダンシー解析の検討, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, 2009.

3) Hoang Trong Khuyen , Iwasaki Eiji : Linear Redundancy Analysis Method Considering Plastic Region for Steel Truss Bridges, J. Bridge Eng, ACSE, Vol.22, No.3, 2017.