鋼トラス橋の部材破断を起点とした全体崩壊挙動の解析と崩壊判定法

岐阜工業高等専門学校 正会員〇水野 剛規

1. はじめに:設計地震動を超える巨大地震動の作用や 腐食や疲労損傷などにより橋梁の部材破壊が生じた場 合にはこれを起点として,大規模な全体系の崩壊に進展 し落橋する可能性がある.このため,想定外の事象発生 を防止するには部材が破壊した場合も,崩壊挙動を制御 し,進行性破壊などの致命的な大規模崩壊への進展を防 止する考え方(崩壊制御設計)も早急に設計に取り入れ る必要がある.このような崩壊制御設計を行うには小さ な破壊が大規模破壊に進展する動的な破壊現象の発生 を予測しうる実用的な手法を確立することが必須であ る. 現行のリダンダンシー解析などはこのような問題を 扱うことを目的とした実用的な解析手法ではあるが変 位が小さいことを前提とした静的な解析であるため,動 的な大変形挙動や材料非線形挙動を伴う進行性破壊現 象を正確に扱うことはできない. 著者らは部材の急激な破 断がトラス橋に与える動的効果を衝撃係数の観点から検 討したが,このような挙動は動的効果を考慮した複合非線 形問題として扱うことが不可欠であることが判明した.以 上のような背景から、本研究ではトラス橋を事例として、 引張斜材が破断した場合の全体挙動を精緻な動的複合非 線形解析により検討するとともに、実務への適用を視野に 入れて、静的な複合非線形解析 (Pushover 解析) により評価 される系の吸収エネルギと部材破壊後の系の運動エネル ギをもとに崩壊の可能性を判定する実用的な静的崩壊判 定法の構築を試みた.

2. 上路式トラス橋の崩壊挙動の解析: 上路式単純トラス橋(図-1)の引 張り斜材(〇の位置)が突然破断した後の崩壊挙動を精緻な複合非線形動 的解析で検討する.トラス橋各部材の諸元を表-1 に示す.トラス橋は簡単 のため平面剛結骨組モデルを用い,部材ははり要素で離散化している.死 荷重 λ_{bi} は床版重心に作用する質量 λ_{bi}/g に置換し,剛部材を介して上弦材 の格点に結合する.解析では質量に重力加速度gを作用させた後に,図中 に示す破断箇所の部材を文献 1)と同様の手法で除去し,その後の挙動を複 合非線形動的解析により検討した.なお鋼材の材料構成則はバイリニア移 動硬化則とした.

斜材破断後の崩壊挙動の一例として床版死荷重 λ_{0i} の 2.18 倍の死荷重 λ_{bi} (=2.18 λ_{0i})を質量として考慮した場合の解析結果を図-2に示す.図-2よ り、まず、t=5.0(s)において破断箇所近傍の斜材が座屈し、つぎに垂直材が 座屈して崩壊に至っていることがわかる.斜材破断後の系の弾性固有値振 動解析の結果として得られた1次モードを図-3に示す.1次モードの形状 は図-2において崩壊が進行し始める t=5.0(s)までの形状に良く一致してお り、支配的なモードと考えることができる.

3. 実用的な崩壊判定法:本研究で提案する静的解析に基づく崩壊の簡易

判定法について説明する.本判定法は動的な崩壊解析ではなく実務でも適用が容易な静的解析に基づく手法である. すなわち,斜材破断前の健全系については,集中質点の質量比に応じた鉛直荷重モードを用いた Pushover 解析,斜 材破断後の破断系に対しては,破断後の動的挙動を考慮するために破断系の1次固有振動モードに基づく各質点で の質量比に応じた鉛直荷重モードを用いた Modal Pushover 解析²⁾を実施し,それぞれの系の各質点での図-4の

キーワード:崩壊制御設計,鋼トラス橋,崩壊解析,崩壊判定法 連絡先:〒501-0495 岐阜県本巣市上真桑 2236-2 岐阜工業高等専門学校

名古屋工業大学 フェロー会員 後藤 芳顯





表-1 部材諸元

部材番号	断面形状	weh(mm)	U-flg(mm)	L-flg(mm)	$\sigma_{\nu}(MPa)$
上弦材1-210-11	BOX	600×10	450×16	370×13	355
上弦材2-4.8-10	BOX	600×16	450×28	370×25	355
上弦材4-8	BOX	600×25	450×32	370×28	355
下弦材12-13,16-17	BOX	370×10	370×10	450×9	355
下弦材13-14,15-16	BOX	370×19	370×22	450×19	355
下弦材14-15	BOX	370×22	370×25	450×22	355
斜材12-2,10-17	BOX	316×25	368×22	368×22	355
斜材13-4,8-16	BOX	338×14	368×11	368×11	355
斜材14-6,6-15	BOX	282×9	368×9	368×9	235
斜材2-13,16-10	Н	360×16	324×12	-	355
斜材4-14,15-8	Н	300×14	330×10	-	235
垂直材1-12,11-17	Н	320×14	340×9	-	235
垂直材(上記以外)	H	300×16	336×9	-	235



図-2 λ_{bi}/λ_{0i}=2.18 の死荷重を与えた トラスモデルの崩壊挙動

荷重-変位関係を求める.部材破断による構造系の釣り合い状態の移行(健全系から破断系への飛び移り)に伴い 生じる位置エネルギの変化から破断系の持つ運動エネルギを算定する.そして,この運動エネルギの総和が Modal Pushover 解析で求めた破断系の各質点での荷重-変位関係から算定される総吸収エネルギの限界値より大きいと崩 壊と判定する.図-4 はある質点 *i* の鉛直荷重 λ, 一鉛直変位関係 ν, から求められるエネルギの概念図である.ここで,

 $\lambda_i = f_0(v_i)$ は健全系の荷重-変位関係, $\lambda_i = f_1(v_i)$ は破断系のもの を示している. 図中のA点は部材破断点である. 破断後の系がB 点で持つ運動エネルギの総和 K_B は,系がA点からB点に飛び移 ることによる各質点iの位置エネルギの減少分 W_{pi} (図-4参照) の和に破断によりA点で解放される健全系のひずみエネルギ W_{IA} を加えたものから破断系がB点までに吸収するエネルギ量 $W_{IB} = \sum_{0} \int_{0}^{v_{Bi}} f_1(v_i) dv_i$ (ひずみエネルギ+塑性仕事)を差し引い たものとなる.すなわち系の運動エネルギの総和 K_B は

$$K_{B} = \sum_{i} W_{pi} + (W_{IA} - W_{IB})$$
(1)

上式は部材破断により解放されたひずみエネルギ全てが破断系 への飛び移りの際の運動エネルギに転換したと考えたものであ る.このため,運動エネルギを実際よりも多めに見積もるが判定 としては安全側の結果を導く.

一方, B 点以降の破断系が吸収可能な正味の全エネルギ W_a は 各質点iに関して鉛直荷重が軟化域の釣り合い点D 点までにな す仕事から系の位置エネルギの減少分を差し引いた W_{ai} (図-4 参照)を総和することより、以下のように表される.なお、D 点は静的な死荷重を破断系が支えることができる限界である.

$$W_a = \sum_{i} W_{ai} \tag{2}$$

破断系の運動エネルギ K_B が D 点までの全吸収エネルギ W_a を 超えると系は死荷重を支えられなくなるので崩壊と判定される. すなわち

(崩壊)	$K_B > W_a$	(3a)
(崩壊しない)	$K_{B} \leq W_{a}$	(3b)

<u>4. 崩壊判定法の適用性:</u>図-1の上路式トラス橋を対象に上述 した実用的な崩壊判定法の適用性を検討する.はじめに、トラ ス橋の健全系に作用する死荷重 *λ_h*の大きさを変化させて斜材

破断後の挙動を精緻な動的複合解析により解析した.この解析より $\lambda_{bi}/\lambda_{0i} \ge 2.175$ のとき破断系が崩壊に至ることが 判明した.この崩壊が提案した実用的崩壊判定法で予測できるかを検討してみた.その結果を図-5に示す.実用的 な崩壊判定法としては図-4に示す鉛直荷重の軟化域の釣り合い点D点までの吸収エネルギを用いた判定法とともに 安全側の判定法として図-4に示す鉛直荷重のピーク点Cまでの吸収エネルギを用いた判定法も検討した.図-5の縦軸 のSF はK_B/W_aを示し、1.0を越える場合は式(3)の判定法で崩壊と判定される場合である.一方、横軸 $\lambda_{bi}/\lambda_{0i}$ は上 弦材格点に作用する死荷重の大きさ(床版死荷重に対する比率)を示している.トラス橋に作用する死荷重 λ_{bi} の大 きさを変化させた実用的な崩壊判定法による検討より、ここで提案したD 点までの吸収エネルギを用いる崩壊判定 法による崩壊開始死荷重は動的判定法による崩壊死荷重 $\lambda_{bi}/\lambda_{0i} = 2.175$ とよく一致していることがわかる.このこと は複合非線形解析動的解析を実施せずとも固有値解析と静的な複合非線形解析のみで精度のよい崩壊判定が可能で あることを示している.また、C点までの吸収エネルギを用いる崩壊判定法では $\lambda_{bi}/\lambda_{0i} = 2.04$ となり、妥当な安全 側の判定が出るので、実務設計においては吸収エネルギを求める際の解析が比較的容易なピーク点までを対象とす ることも考えられる.

5. まとめ:崩壊制御設計の確立を目指し,部材破断が橋梁全体系の大規模崩壊に進展するか否かを判定するための実用的な手法を提案しその妥当性を検討した.この手法は弾性固有値解析と静的な複合非線形解析のみに基づく簡易な手法であるが,鋼トラス橋の引張斜材破断時を対象とした検討によると,崩壊判定結果は精緻な動的複合非線形解析による結果とよく一致し,手法の有効性が確認できた.【参考文献】1)後藤芳顯ら: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, 2010. 2)Anil K. Chopra and Rakesh K. Goel: A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings, *Earthquake Engng and Struct. Dyn*, 31:903-927, 2004.



図-3 1次モードの形状



図-4 荷重変位曲線から求められるエネルギ





図-5 実用的な崩壊判定法の妥当性