

トラス橋における引張部材破断時の衝撃力評価に関する検討

山口大学大学院 学生会員 ○河村圭祐 井上龍一
山口大学大学院 正 会 員 麻生稔彦
エム・エムブリッジ 正 会 員 田島啓司

1. はじめに

I-35W 橋（米国）の落橋事故を契機として、耐荷力の余裕の指標であるリダンダンシーが重要視されるようになった。リダンダンシーを評価することにより、一部の部材が損傷しても耐荷力の余裕によって落橋や崩落を回避できるか否かの判断が可能となる。

リダンダンシーを精度良く評価するには、引張部材破断時の衝撃の影響を適切に算出する必要がある。一般的な算出方法には、衝撃係数 1.854 を用いた静的解析による方法や時刻歴応答解析による方法がある。前者は、簡易的な方法だが、減衰定数 5% の 1 自由度系振動モデルの振動性状をもとにしたものであり、既往の研究¹⁾によって、適用性に問題があることが示された。後者は、算出精度は高いが、解析には時間を要する。そこで本研究では、橋長 50m のワーレントラス橋で、振動モードを利用した衝撃の影響の評価法について検討する。

2. 1 対象橋梁

表-1 に対象橋梁の諸元を示す。解析モデルは、鋼部材をはり要素、コンクリート床板をシェル要素とし、部材結合条件は剛結合とした。解析は、構造解析ソフト SAP2000 を用いて線形解析により、リダンダンシー解析を実施した。図-1 に、損傷を仮定する部材を示す。損傷部材は、部材破断時の衝撃の影響を考慮する必要のある引張部材のみとした。損傷解析では、この引張部材を 1 部材ずつ損傷させ、全 7 ケースの解析を行う。

表-1 対象橋梁の諸元

形式	ワーレントラス橋
支間長 (m)	50.0
最大構造高 (m)	6.5
床版幅員 (m)	6.5

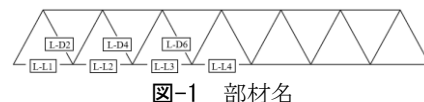


図-1 部材名

2. 2 断面力の算出

リダンダンシー解析では、次に示す解析 I、II の結果を足し合わせて部材破断後の断面力を算出する。

① 解析 I (健全状態): 健全モデルに対し、死荷重を載荷した解析である。

② 解析 II (部材損傷の影響):

損傷部材を除いた橋梁モデルに対し、解析 I において損傷部材の両端に作用する断面力の反作用断面力(以後、解放力)を作用させて断面力を求める。損傷部材の作用軸力が引張の場合、部材破断時の衝撃の影響を考慮する。この衝撃の影響は衝撃係数 1.854 を用いた静的解析による方法 (Case A)、時刻歴応答解析による方法 (Case B)、振動モードを利用した方法 (Case C) の 3 つの方法で算出する。

ここで、Case B は多自由度系の振動モデルに適応し、複数の振動モードの連成も考慮される方法である。そこで本研究では Case B に対する Case A および Case C の違いを評価する。

Case C は、部材破断時の外部エネルギー(式(1))と内部エネルギー(式(2))のつり合いに着目して算出する。部材破断時に解放力が橋梁に与える外部エネルギー E_1 は、橋梁のひずみエネルギー E_2 と運動エネルギー E_3 の和に置き換わるが、 $E_3 = 0$ の時に断面力が極値をとる。この時の橋梁の変位を式(3)で表現し、式(4)の条件を満たすモード倍率 α を振動モードごとに求めて、部材破断時の衝撃の影響を算出する。振動モードを与える変位 δ_{bi} は固有値解析を 20 次モードまで実施し、その最大値を採用した。なお、式(1)～(4)を以下に示す。

$$E_1 = P_1 \delta'_1 + P_2 \delta'_2 \quad (1) \quad E_2 = \frac{1}{2} \sum f_i \delta_i \quad (2) \quad \delta_i = \delta_{ai} + \delta_{bi} \times \alpha \quad (3) \quad E_1 = E_2 \quad (4)$$

δ'_i : 橋梁の変位, δ_{ai} : 解放力を静的に作用した時の変位, f_i : 橋梁の変位を δ_i とした時の拘束力

キーワード リダンダンシー, トラス橋, 衝撃, 振動モード

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学工学部社会建設工学科 TEL 0836-85-9323

3. リダンダンシーの評価方法

算出した断面力から損傷度 R を算定してリダンダンシーを評価する。損傷度 R は、既往の研究²⁾をもとに、軸力が引張力の場合は式(5)、圧縮力の場合は式(6)により求める。

$$R = R(N) + R(M_{in}) + R(M_{out})$$

$$= \frac{N}{N_p} + \left(\frac{M}{M_p} \right)_{in} + \left(\frac{M}{M_p} \right)_{out} \quad (5)$$

$$R = R(N) + R(M_{in}) + R(M_{out})$$

$$= \frac{N}{N_u} + \left(\frac{1}{1 - (P/0.8P_E)} \cdot \frac{M_{eq}}{M_p} \right)_{in} + \left(\frac{1}{1 - (P/0.8P_E)} \cdot \frac{M_{eq}}{M_p} \right)_{out} \quad (6)$$

N ：作用軸力， N_p ：全塑性軸力， N_u ：終局圧縮強度， M ：作用曲げモーメント， M_p ：全塑性曲げモーメント， M_{eq} ：換算曲げモーメント， P ：作用軸圧縮力， P_E ：オイラー座屈強度， in ：面内， out ：面外

4. 解析結果

表-2 に各損傷部材を損傷させた時に他の部材に発生する損傷度 R の最大値を示す。表中の振動モードは、 δ_{bi} が最大となった時の振動モードである。表-2 より、L-D2 では、Case B で算出した損傷度 R との一致率が低いものの、全損傷部材で、Case C が Case A よりも Case B に近い損傷度 R を算出できた。また、表-3 に全主構部材中で Case C が Case A よりも Case B に近い損傷度 R を算出できた部材の割合を示す。表-3 より、全解析ケースでその割合が 50%以上であることが確認できた。したがって、橋長 50m のワーレントラス橋において、Case C は適用可能であろう。

ここで、L-D2 の Case C の一致率が低い要因について検討する。まず、固有値解析の実施範囲を 20 次モードまでとしたことの妥当性を検証するため、固有値解析を 20 次モードから 50 次モードまで拡張し、再解析を行った。図-2 に L-D2 における振動モードとモード倍率の関係を示す。図-2 より、モード倍率は、15 次モードから変化が小さくなる。また、図-3 に L-D2 における振動モードと有効質量比の関係を示す。有効質量比も 15 次モードから変化が小さくなる。図-2、図-3 と同様の結果が他の損傷部材でも確認されたことから、固有値解析の実施範囲は 20 次モードまでで妥当であろう。表-4 に Case B で算出した損傷度 R に占める $R(N)$ 、 $R(M_{in})$ 、 $R(M_{out})$ の割合を示す。ここで、 $R(N)$ 、 $R(M_{in})$ 、 $R(M_{out})$ は式(5)、式(6)に示すように、損傷度への軸力、面内曲げモーメント、面外曲げモーメントの各成分を表す。表-4 より、Case B で算出した損傷度 R との一致率が高い部材では、 $R(N)$ が支配的であるのに対し、一致率が低い L-D2 では、 $R(N)$ が支配的ではないことが明らかになった。

5. まとめ

橋長 50m のワーレントラス橋について、振動モードを利用した衝撃の影響の評価法が適用可能であることを明らかにした。また、 $R(N)$ が支配的ではない部材の解析精度向上については今後の課題である。

参考文献

- 井上龍一：トラス橋のリダンダンシー解析における部材破断時の衝撃に関する研究，平成 30 年度山口大学卒業論文，2019。
- 岩崎英治：線形解析によるトラス橋のリダンダンシー評価に関するケーススタディ，第 17 回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，pp.21-32，2014。

表-2 損傷度 R の比較結果

損傷部材	L-D2	L-D4	L-D6	L-L1	L-L2	L-L3	L-L4
R_A	1.65	0.78	0.67	0.59	0.59	0.59	0.59
R_B	3.50	1.27	0.86	0.61	0.62	0.65	0.65
R_C	2.30	1.14	0.86	0.60	0.62	0.65	0.65
振動モード(次)	15	7	10	20	11	7	6
$R_A/R_B(\%)$	47	61	78	97	94	91	89
$R_C/R_B(\%)$	66	90	100	99	100	100	100

R_A : Case A で求めた損傷度 R R_B : Case B で求めた損傷度 R R_C : Case C で求めた損傷度 R

表-3 Case B に近い損傷度 R を算出できた部材の割合

損傷部材	L-D2	L-D4	L-D6	L-L1	L-L2	L-L3	L-L4
割合(%)	51	71	70	77	58	55	68

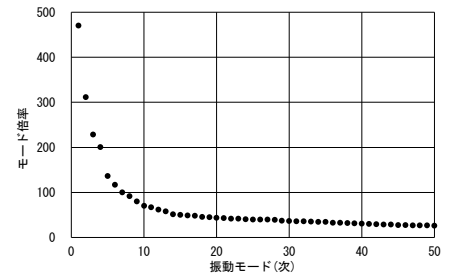


図-2 振動モードとモード倍率の関係

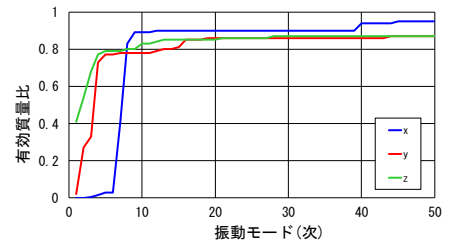


図-3 振動モードと有効質量比の関係

表-4 損傷度 R に占める 3 つの成分の割合(%)

損傷部材	L-D2	L-D4	L-D6	L-L1	L-L2	L-L3	L-L4
$R(N)$	2	86	91	96	97	96	94
$R(M_{in})$	23	4	3	2	2	2	3
$R(M_{out})$	75	11	6	3	2	2	2