

鋼トラス橋のケーブルを用いた崩壊防止構造に関する基礎的検討

岐阜工業高等専門学校 正会員○水野 剛規

名古屋工業大学 フェロー会員 後藤 芳顕
日本車両製造(株) 正会員 山田 忠信

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も取り入れていく必要がある。トラス橋においては、近年の国内外の落橋事故や部材破断事故を受け、維持管理の重要性が高まっているが、老朽化したトラス橋は山間部を含めると相当数に及び、今後これらを適切に維持管理していくには人的・物的にも限界があると考えられる。そこで本研究では、トラス橋の大規模崩壊を防止する崩壊防止構造として、低コストかつ簡易的なケーブルを用いた方法を提案し、その適用性について基礎的な検討を実施する。

2. 崩壊防止構造の概要：崩壊防止構造の概要を図-1に示す鋼上路式単純トラス橋を例に説明する。ケーブルは、トラス橋の両側面において弛みを持たせた状態で配置し、全体崩壊時にトラス橋が大きく撓んだ際に、ケーブルが緊張し橋全体を支えるようにする。このようにケーブルに弛みを持たせることにより、健全時に作用する常時荷重や地震荷重などに対して想定しているトラス橋の基本性能にケーブルが悪影響を与えないようにしている。ケーブル端部の固定については、ケーブル両端を支点部の鉛直材上端近辺に別途設置する鋼製ブラケットに固定させる。これは自己つり合いにより部材破断時に構造系に作用する死荷重を支えることを目的としたものである。支点部の鉛直材には、ケーブルを介して過大な荷重が作用することも考えられるため、部材補強を実施する(図-1)。この部材補強の必要性は後の解析で検証している。ケーブルの中間部は、下弦材の中央格点に別途設置するケーブルガイドに通される。ケーブルガイドは貫通構造となっており、ケーブルは下弦材の軸方向には自由動くことが可能である。これは崩壊時にケーブルに均等な張力が発生することを狙ったものである。

3. 数値解析モデル：検討対象は、図-1に示す支間60mの鋼上路式単純トラス橋とする。解析には非線形汎用ソフトABAQUSを用いることとし、以下に解析のモデル化方法を説明する。まず、トラス橋本体については、トラス構造は格点で剛結されていると仮定し、各部材を空間はり要素(B31)で離散化する。ただし、上下横構、対傾構の多くは、大変形領域の解の収束性を考慮して、シェル要素(S4R)で離散化している。死荷重及び活荷重は床版重心に作用する質量に置換し、剛部材を介して上弦材の格点に結合させる。活荷重は、B活荷重の50%としている。つぎに、崩壊防止構造については、ケーブルを図-2に示す材料構成則を導入した非線形ばねを用いて、図-1に示すように支点部鉛直材上端の節点と下弦材各格点下の節点において5等分して配置する(x軸に対し左側：Cabel1L~Cabel5L, 右側：Cabel1R~Cabel5R)。ここで用いた材料構成則は、文献2)の手法を用い、弛緩状態から緊張状態までのケーブルの剛性変化を忠実に再現したものである。具体的には、ユーザーエレメントによりケーブルの要素を定義し、1要素ごとに数値解析を別途実施して構成則を算定している。提案する構造ではケーブルを降伏させないので材料の降伏は無視している。ケーブルガイドは貫通構造になっているので、その挙動を近似的に再現するために、下弦材の中央格点に配置するケーブル中間節点(図-1)が下弦材の軸方向に可動になるようにしている。なお橋軸直角方向については固定している。支点部の補強する鉛直材については剛部材としている。

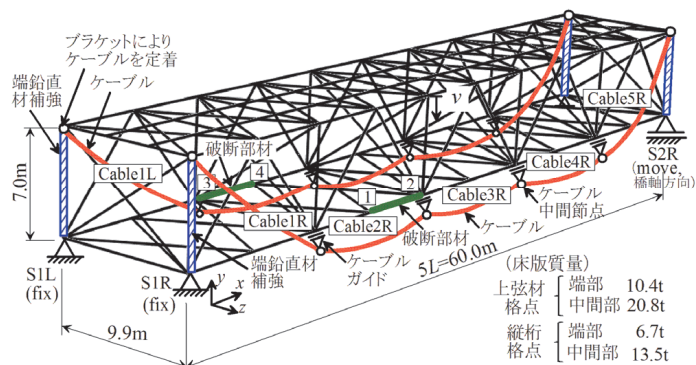


図-1 上路式トラス橋のケーブルによる崩壊防止構造

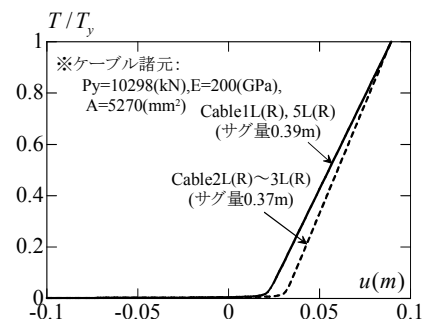


図-2 ケーブルの構成則

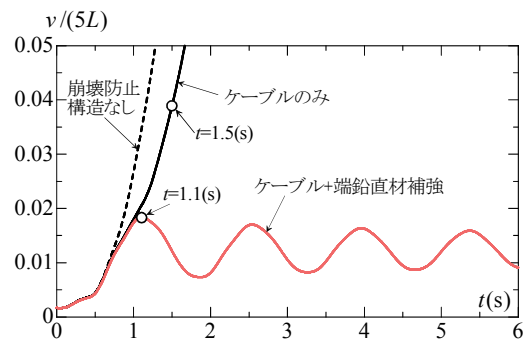


図-3 支間中央の鉛直変位の時刻歴

キーワード：リダンダンシー、鋼トラス橋、崩壊防止構造、ケーブル
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

4. 検討方法: 解析では床版重心に作用する質量に重力加速度を作用させた後に、破断部材を除去し、その後の挙動を複合非線形動的解析により求めている。本検討では、左右の下弦材 2 本が破断する場合を想定した。まず図-1 に示す 1-2 番の下弦材 (1 本目) がまず破断し、つぎに最大軸力が生じる 0.35 秒時に 3-4 番の下弦材 (2 本目) が瞬時に破断する場合を想定した。減衰モデルは、レーリー減衰を用い鋼部材の粘性減衰定数を 1% とした。このとき 1-2 番の下弦材が破断した際の 1 次と 2 次の固有振動モードに減衰定数 $h=0.01$ を設定し係数 α, β を求めている。検討ケースとして、「崩壊防止構造なし」、ケーブルに加え支点部の鉛直材を補強する「ケーブル+端鉛直材補強」、支点部の鉛直材を補強しない「ケーブルのみ」の 3 ケースを設定する。

5. 崩壊防止構造の適用性: 解析結果として、支間中央の鉛直変位 v (上弦材側、図-1 参照) の時刻歴を図-3 に示す。「崩壊防止構造なし」のケースは、単調に鉛直変位が増大し崩壊に至っている。一方、「ケーブル+端鉛直材補強」のケースでは、0.6 秒程度までは、「崩壊防止構造なし」と同様の挙動を示しているが、以降は、鉛直変位が徐々に減少していき、1.1 秒付近で鉛直変位が折り返した後、弾性振動している。「ケーブルのみ」のケースについては、1.0 秒程度までは「ケーブル+端鉛直材補強」と一致し、その後は、「崩壊防止構造なし」と同様に単調に鉛直変位が増大し崩壊に至る。これらの変形図を示したものが図-4 である。図-4(a)の「崩壊防止構造なし」のケースでは、破断部材近傍の上弦材、同じく破断部材近傍の対傾構及び下横構などの 2 次部材が大きく変形し崩壊に至っていることが確認できる。一方、図-4(b)は「ケーブル+端鉛直材補強」についての図-3 における鉛直変位の折り返し地点 (1.1 秒) の変形図であるが、ケーブルが効果的に作用し、トラス橋全体を支えていることが確認できる。端鉛直材補強を実施しない「ケーブルのみ」のケースについては、図-4(c)より、ケーブルに作用する力により端鉛直材補強が座屈し、崩壊の挙動を示していることが確認できる。このことから、支点部の端鉛直材の補強は必須である。なお、設計では、ケーブル降伏軸力と緊張時のケーブル角度から求められる断面力をもとに端鉛直材の補強断面を決定すればよい。

図-5 に「ケーブル+端鉛直材補強」、「ケーブルのみ」の各ケースにおけるケーブル軸力 (全死荷重 $\sum m_{dj}g$ で無次元化) の時刻歴応答を示す。左図 (図-5(a)(1),(b)(1)) が、図-1 において橋軸方向である x 軸に対し左側に配置されるケーブル (Cabel1L~Cabel5L) を示し、右図 (図-5(a)(2),(b)(2)) が、同様に右側に配置されるケーブル (Cabel1R~Cabel5R) を示している。図

-5(a)の「ケーブル+端鉛直材補強」のケースでは、左右ケーブルにおいてそれぞれの要素 (Cabel1L(R)~Cabel5L(R)) に作用する張力の応答は比較的近い値を示している。これは、想定した部材破断モードとケーブルガイドが貫通構造であることによると考えられる。各ケーブル張力は降伏軸力内で $T_i / \sum m_{dj}g \approx 0.70$ 近傍を中心に最大片側振幅 0.70 程度で弾性振動をしていることから、各ケーブルは死荷重の 140% 程度を負担し、衝撃係数は 1 程度になる。図-5(b)の「ケーブルのみ」のケースでは、鉛直材が座屈し始める 1 秒付近でケーブル軸力が喪失し、その後の軸力は、ほぼ生じていないことから、ケーブルがほとんど機能していないことがわかる。

6. おわりに: 老朽化したトラス橋の大規模崩壊を防止する崩壊防止構造として、簡易的なケーブルを用いた方法を提案し、その適用性を解析的に確認した。その結果、ケーブルをトラス橋の両側面に配置し、支点部の鉛直材補強も併せて実施した場合には有効に機能することが明らかとなった。

【参考文献】 1) 後藤芳顕: トラス橋の崩壊防止構造, 特開 2015-183351, 2015.

2) 後藤茂男: 柔ケーブルの接線剛性方程式について, 土木学会論文報告集, 第 270 号, pp.41-49, 1978.

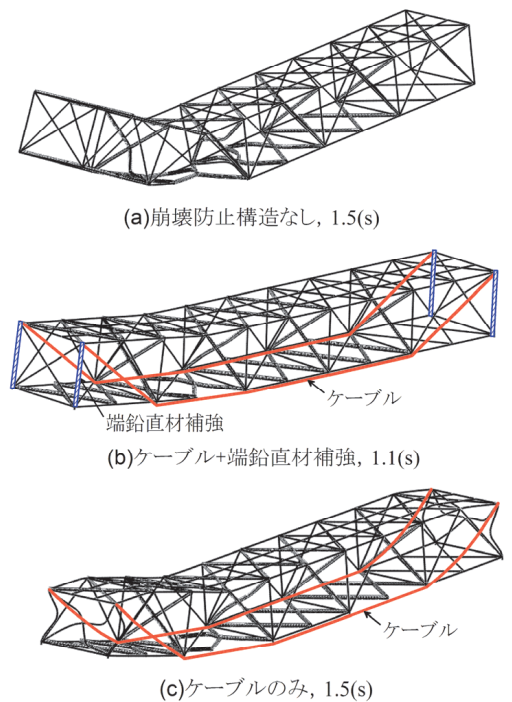


図-4 ケーブル作動時の変形図(変形率1倍)

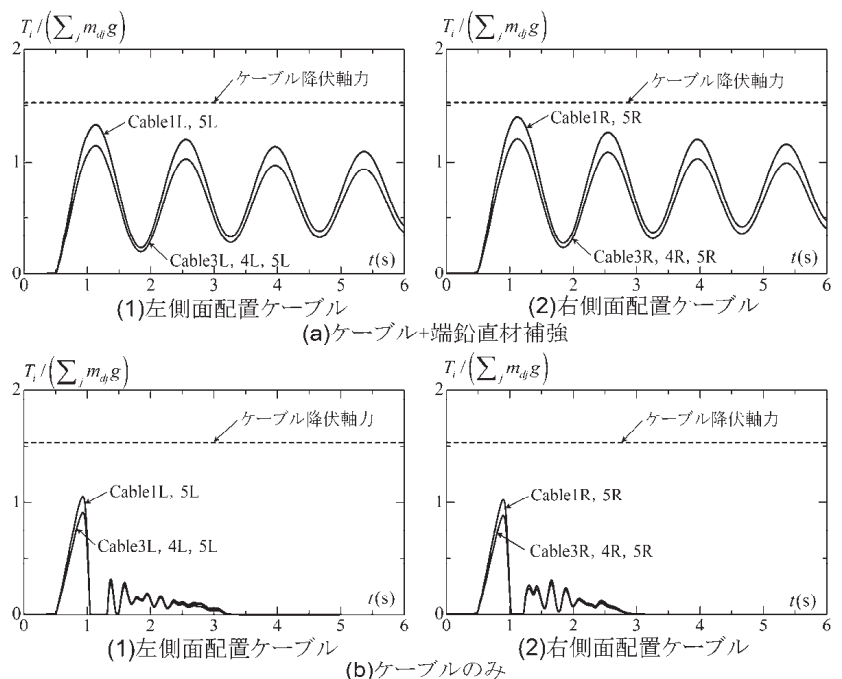


図-5 ケーブル軸力の時刻歴応答