

上路式鋼トラス橋を対象とした崩壊制御設計に用いる ケーブル式崩壊防止装置の有効性に関する検討

水野 剛規¹・後藤 芳顯²・王 慶云³・鈴木 森晶⁴

¹正会員 博士（工学） 岐阜工業高等専門学校准教授 環境都市工学科
(〒501-0495 岐阜県本巣市上真桑2236-2)

2フェロー会員 工博 名古屋工業大学プロジェクト教授 次世代耐震工学研究所
(〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)

³正会員 工博 日本車輛製造株式会社 輪機・インフラ本部技術部
(〒475-0831 愛知県半田市11号地20番地)

⁴正会員 工博 愛知工業大学教授 工学部土木工学科土木工学専攻
(〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247)

1. まえがき

山間部などにおける上路式鋼トラス橋は、融雪剤などの影響で部材に深刻な腐食のあるケースが見出されている¹⁾。しかし、このような橋梁すべてを、直ちに更新や補修を行うことは経済的な制約をはじめさまざまな理由から不可能である。したがって、架け替えか補修かの決定がなされていない場合は言うまでもなく、直ちに工事を実施できない橋梁についても、想定外の作用による大規模崩壊を防ぐための過渡的な措置を講じておくことが必要である。

過渡的な崩壊防止策としては、施工が容易であるとともに、通常の設計と崩壊制御設計を独立させるため²⁾、地震荷重や活荷重の作用で構造物の応答が終局限界を超えた場合のみにその機能が発揮され、終局限界までの構造物の応答に影響を与えないことが望ましい。このような崩壊防止策の例としては、地震時に上部構造が橋台や橋脚などの下部構造から落下するのを防止するケーブル式落橋防止装置³⁾がある。この装置は、任意方向への上部構造の移動に追従できるフレキシブルなケーブルで桁端部を下部構造と連結し、上部構造が下部構造から逸脱・落下を防ぐ簡易な方式である。また、ケーブルに弛みを持たせることで、支承、変位制限装置が終局状態に到達後に機能するように配慮されている。ただ、従来のケーブル式落橋防止装置は、上部構造が健全な場合には有効であるが、崩壊危険部材 (FCM) となる上・下弦材、斜材、接合部などの破壊で生じる上部

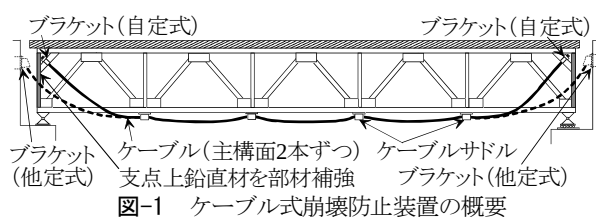


図-1 ケーブル式崩壊防止装置の概要

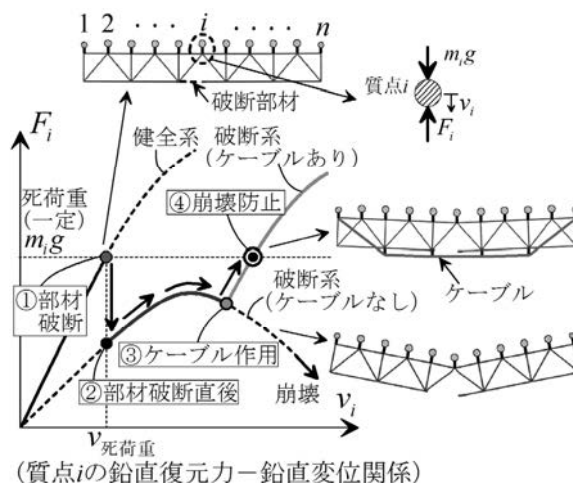


図-2 ケーブル式崩壊防止装置による崩壊防止の流れ

構造の進行性破壊に起因した落橋を防止することは困難である.

提案する崩壊防止装置^{2),4)}は、図-1のようにケーブルをトラス橋上部構造両主構面の下弦材下面のスパン方向全体に張り渡し、ケーブルのカテナリー作用で進行性破壊の生じた上部構造を支持するコンセプトである。この崩壊防止装置では、ケーブル式落橋防止装置と同様、ケーブルに適切な弛みを与える

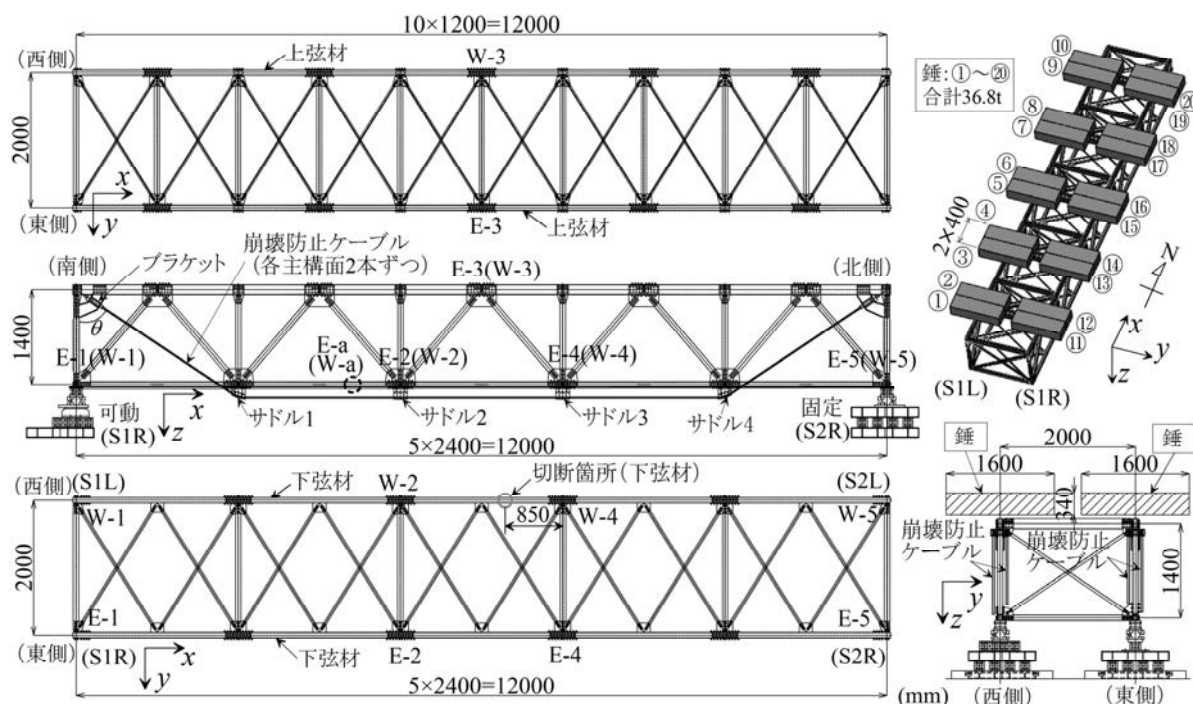


図-3 実験供試体 (縮尺 1/5)

ことで、図-2 のように、部材破壊した上部構造の応答が終局状態を超え、構造系の復元力がゼロに漸近していく崩壊挙動^{2),5)}を示すまで、装置を作用させないようにする。ケーブル両端の定着方法としては、トラス橋本体に定着する自定式(図-1)と従来の落橋防止装置のように橋台や橋脚に定着する他定式(図-1)が考えられる。

本研究では、上路式単純トラス橋上部構造を対象に、提案する汎用的なケーブル式崩壊防止装置の有効性を検証し、実用化に向けた検討を行う。ここでは、鋼上路式単純トラス橋の 1/5 スケール模型に対して崩壊防止装置を設置した上で、FCM である下弦材を破断させる比較的大規模な実験を実施する。そして、実験結果を基に崩壊防止装置の有効性を検証するとともにその挙動特性を詳細に検討し、ケーブル式崩壊防止装置の数値解析モデルを構築する。さらに、この数値解析モデルを用いて、崩壊防止装置の力学特性を検討することで実橋への適用性を考察する。

2. 模型実験による崩壊防止装置の挙動の検討

(1) 実験供試体

実験供試体は、提案した崩壊防止装置の実構造への適用を視野に入れて、上路式トラス橋および崩壊防止装置はできるだけ実物に忠実に縮尺して製作した。また、本実験が過去に前例のない崩壊実験であ

るため、供試体の補強や崩壊防止装置の設計に十分なマージンを設けて安全性を確保した。

a) トラス構造

実在する支間 60m、トラスの高さ 7m、主構間隔 10m の鋼上路式単純トラス橋を想定し、1/5 スケールの図-3 に示す支間 12m、トラスの高さ 1.4m、主構間隔 2m の供試体を製作した。供試体での載荷荷重(錘の質量の合計)は、供試体の各部材の作用応力が実大トラス橋と等しくなるように設定した。すなわち、供試体の縮尺が 1/5 であることから、実大トラス橋の死荷重と活荷重(B 活荷重)による設計荷重合計が 9446kN となることを考慮して、供試体には合計 $9446 \times (1/5)^2 = 379 \text{ kN} (38.6 \text{ t})$ の錘を設置した。

供試体では、溶接の制約やコストの観点から、既成の角形鋼管、溶接集成材による H 形鋼、山形鋼をトラスの部材に用いたが、縮尺を考慮した供試体と実橋の部材の断面積比がほぼ満足されるように既成形鋼の断面形状を選択した。供試体の各部材の諸元と材料定数を表-1 に示す。なお、崩壊防止装置は安全側の観点から床版が機能しない場合にも適用できること目標としたため、本供試体では床版を設置せず、縦桁も省略した。

トラス構造の供試体に設計荷重載荷時の実構造の応力状態を再現するために、各錘(合計で 36.8t)は上弦材の曲げ剛性に影響を与えないように固定治具を介して上弦材格点部に図-3 のごとく間接的に固定した。各錘の質量の内訳を表-2 に示す。

表-1 実験供試体の部材諸元と材料定数

部材	断面形状	web (mm)	U-flg (mm)	L-flg (mm)	ヤング係数 E (GPa)	降伏応力 σ_y (MPa)	引張強度 σ_u (MPa)
上弦材	Box	71×4.5	150×4.5	150×4.5	194*	427	486
下弦材	Box	71×4.5	80×4.5	80×4.5	197*	416	485
斜材(圧縮)	Box	75.4×2.3	80×2.3	80×2.3	200*	357	439
斜材(圧縮, 端部)	Box	71×4.5	80×4.5	80×4.5	197*	416	485
斜材(引張)	H	80×2.3	75.4×2.3	-	198*	332	483
鉛直材	H	80×2.3	75.4×2.3	-	198*	332	483
鉛直材(支点上)	H	80×9	62×9	-	200	332	483
補強PL(2枚)	PL	-	70×6	-	200	332	483
上横桁	I	145.4×2.3	75×2.3	75×2.3	200	332	483
下横桁	I	75.4×2.3	80×2.3	80×2.3	198*	332	483
対傾構	L	37×3	40×3	-	200	341	448
上横構	L	27×3	30×3	-	200	364	460
下横構	L	37×3	40×3	-	200	341	448

注)・材質は全てSS400. 降伏応力 σ_y , 引張強度 σ_u はミルシート値

・※印のヤング係数 E は材料試験値. それ以外は全て200(GPa)

・ガセット(SS400): 板厚6(mm), $\sigma_y=332$ (Mpa), $\sigma_u=483$ (Mpa)(σ_y , σ_u はミルシート値)

b) ケーブル式崩壊防止装置の設置と部材補強

トラス橋供試体に設置するケーブル式崩壊防止は自定式(図-1)とした。

図-3 に示すように, 支点上鉛直材上端と上弦材端部の格点に崩壊防止ケーブルの定着点となるブラケットを設置した. 下弦材格点部には貫通構造であるケーブルサドルを配置した. また, ケーブルサドルとブラケットのケーブル定着点には通常のケーブル式落橋防止装置と同様にケーブルの局部的曲げ応力を緩和させるために偏向具(MC ナイロン製)を設置した。

崩壊防止ケーブルはSK570kNの被覆PCケーブル(降伏強度495kN, 引張強度573kN)で錘を載荷した状態のトラス橋供試体の両主構面を挟み込むように2本ずつ, 橋全体では計4本設置した. 本実験は前例がなかったため, 予期しない全体崩壊も起こり得ることを考慮し, 安全面の配慮から, 全体で4本あるケーブルのうち片側主構面の2本だけで錘全質量(36.8t)を支持できるようにした。

崩壊防止ケーブルは, 崩壊制御設計の独立性を保つために, 少なくとも, トラス橋が活荷重や地震荷重で終局状態を超えるまで機能しないことを前提条件としなければならない. したがって, 実験では, すべての錘を供試体に載荷した後に, 上記の前提条件が満たされるように適切な弛み量を与えて崩壊防止ケーブルを設置すべきである. しかし, 今回の実験では安全性を考慮して, 錘作用下でケーブルに軸力は生じないが, 部材の破断を模擬するための(3)に述べる切断開始後の早い時刻にケーブルが機能するように, 本来より小さい弛み量を設定した. すなわち, 錘作用下で全く弛みのない場合の定着点間のケーブル長12.492mに対して定着点間を12.495～

表-2 錘の質量

錘	質量(kg)	錘	質量(kg)
①	1845	⑪	1845
②	1810	⑫	1735
③	1830	⑬	1845
④	1845	⑭	1880
⑤	1858	⑮	1845
⑥	1830	⑯	1840
⑦	1855	⑰	1900
⑧	1865	⑱	1800
⑨	1865	⑲	1835
⑩	1830	⑳	1840

注)・錘の番号は図-3参照

・錘の質量は設計荷重状態に対応

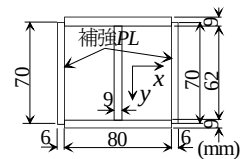


図-4 支点上鉛直材の補強

12.500mに調節することで小さい弛みを与えた。

崩壊防止ケーブルの定着部は十分な強度を持つ必要がある. したがって, 部材破断時, ケーブルから本来の設計荷重を超える過大な力が作用する支点上鉛直材は図-1のように補強を行った. すなわち, 図-4 に示すように, H断面の支点上鉛直材に6mmの補強プレート2枚を溶接で取付けた. 補強プレート寸法は, ケーブル2本の降伏軸力 T_0 (=495kN)を鉛直材が降伏することなく支持できるように, 緊張時のケーブル角度 θ (=56.29°)(図-3)から求めた軸圧縮力($2T_0 \cos \theta$)に対して決定した。

(2) 計測方法と計測位置

実験時のトラス橋供試体での計測については, 中央部の変位(図-3のE-2～E-4, W-2～W-4)は糸巻き変位計で計測した. ケーブル軸力は定着部のひずみ計測値をもとに事前のキャリブレーションで得たひずみと軸力の関係から算定した. 下弦材の弾性域での軸力は上下フランジ2箇所(図-3のE-a, W-a)の軸ひずみを測定することで求めた。

(3) 部材の破断方法

線形リダンダンシー解析⁶⁾により, 構造系に最も大きな影響を与える部材として決定された西側下弦材中央付近(図-3参照)を高速切断機で切断することで部材破断を再現した. このとき, 部材断面の切断面積が全体の約7/8に及んだ後, 切断部先端のひずみ集中部に生じた延性き裂を起点とした脆性破壊で残存断面(約20mm×20mmのL型断面)は, 切断開始から57.36秒で, 一気に破断した。

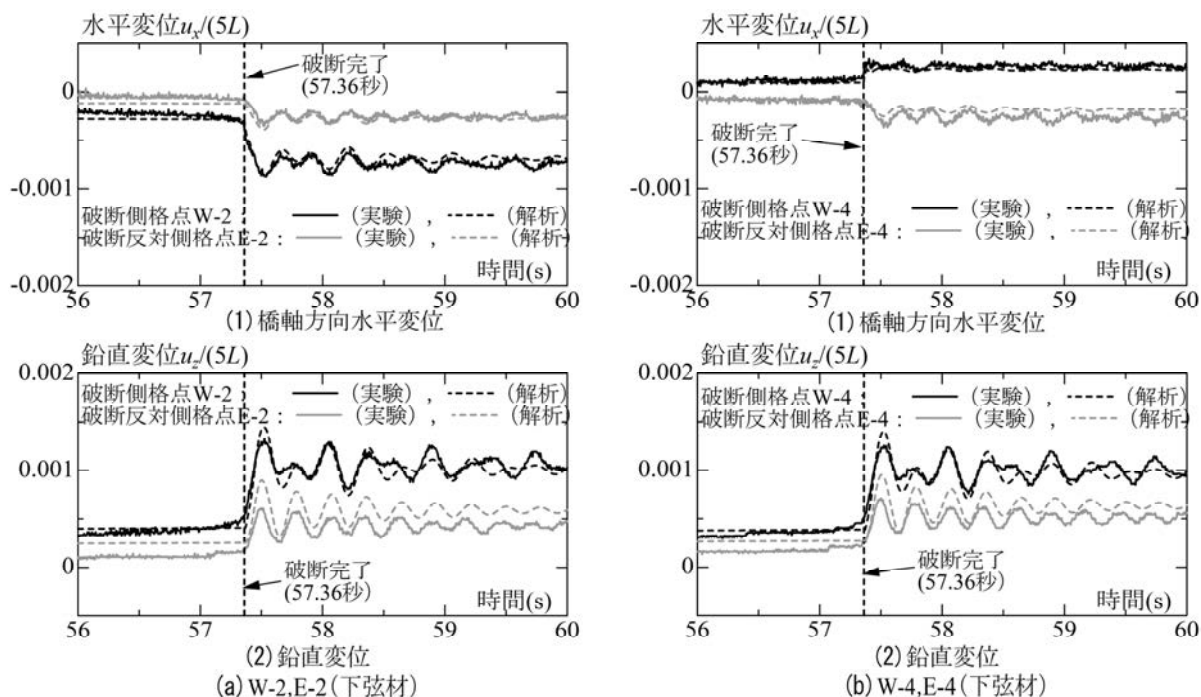


図-5 部材破断後の応答変位の時刻歴応答（増分量）

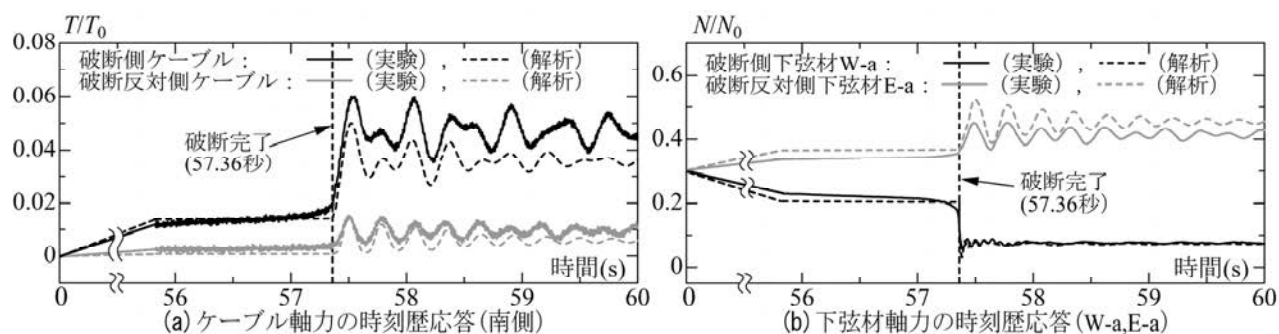


図-6 ケーブルと下弦材軸力の時刻歴応答

(4) 実験結果と考察

実験結果として、トラス構造の下弦材破断による下弦材各格点の応答変位を図-5に、下弦材と崩壊防止ケーブルの応答軸力を図-6に示す。ここで、変位や軸力は錘を設置した状態からの増分量で表した。また、図-5の変位成分はいずれも支間長(5L=12.0m)で、図-6のトラス構造下弦材と崩壊防止ケーブルの軸力はそれぞれ対応する降伏軸力 N_0 、 T_0 で無次元化した。なお、図-5、6には(5)のモデルを用いた数値解析結果も示しているが、これについては(5)で考察する。

破断により生じる格点の応答変位の特性を破断させた下弦材近傍の格点について考察する。図-5(a)(2)、5(b)(2)より、下弦材格点の鉛直変位は破断前後を通じて破断させた下弦材の可動支承側の格点W-2の変位が固定支承側格点W-4の変位よりやや大きく生じている。一方、橋軸に関して対称位置にある破断させていない下弦材（破断反対側の下弦

材）の格点E-2、E-4の鉛直変位は破断側格点W-2、W-4より小さいが、ほぼ等しい応答を示した。

下弦材格点の橋軸方向変位は図-5(a)(1)、5(b)(1)より、破断させた下弦材の可動支承側格点W-2と固定支承側格点W-4とでは変位の方法が異なり、可動支承方向の変位が大きく生じている。これは、部材破断で下弦材の格点W-2とW-4の間隔が広がったことを意味している。これに対し、破断反対側の下弦材の格点E-2、E-4の水平変位の応答はほぼ等しい。これらの変位の大きさはW-2より小さいが、いずれもW-2とほぼ等しい応答特性を示しており、変位した格点W-2に引っ張られた形になっている。

下弦材の破断によりトラス構造の各下弦材格点は上記のような変位応答を示すが、いずれも残留変位が生じている。その後、崩壊防止ケーブルで支持された各格点は残留変位を中心に弾性減衰振動をしており安定状態にあることがわかる。

つぎに、下弦材破断による下弦材と崩壊防止ケー

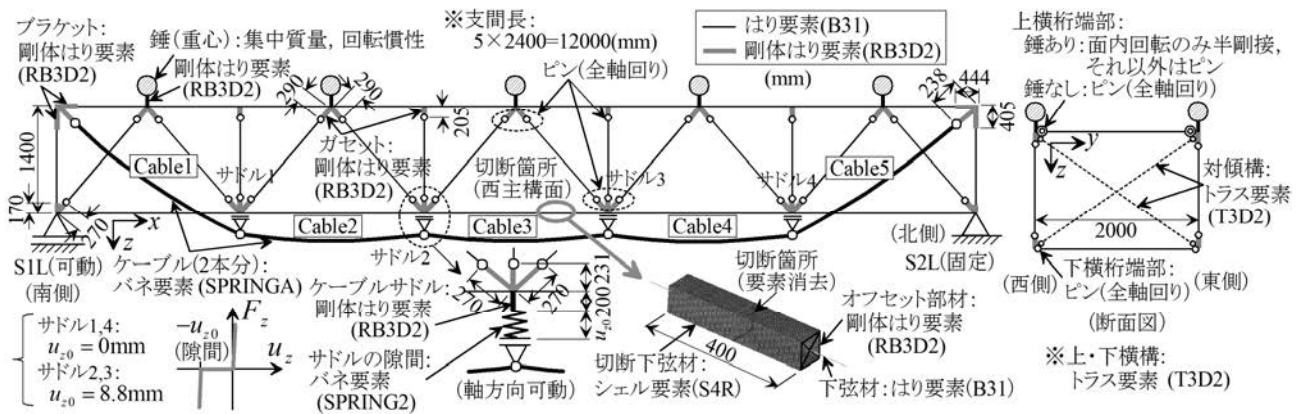


図-7 解析のモデル化

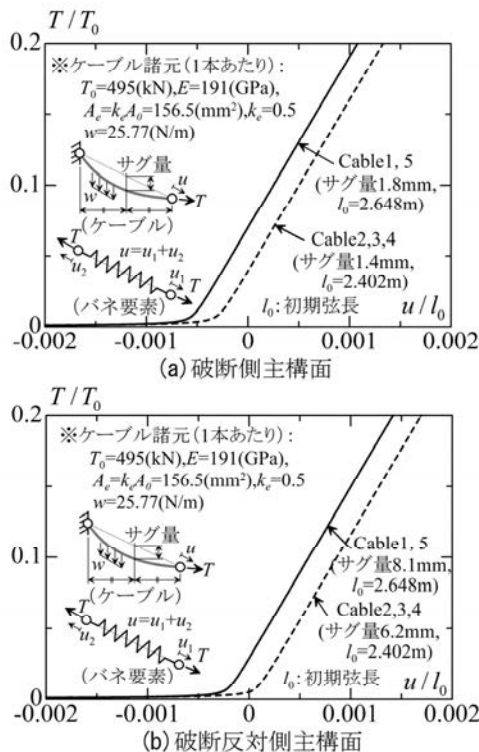


図-8 バネ要素に用いるケーブルの構成則

ブル間の荷重の再配分について考察する。図-6 より、西側下弦材の破断により破断側の下弦材 W-a の軸力が大きく減少するのとほぼ同時に破断側のケーブル軸力が急増している。同時に、破断反対側のケーブル軸力も増加するが増加量は破断側ケーブルの20%程度である。これは、健全な破断反対側の下弦材にも荷重が再配分されるからである。なお、急増したケーブル軸力や下弦材軸力は鉛直変位と同様に増加した平均軸力を中心に弾性減衰振動をしている。これより、下弦材の破断後、破断側主構が負担していた荷重は破断側ケーブルに配分されるとともに、破断反対側の主構やケーブルにも幾分か配分され、構造系の安定性が保たることがわかる。

(5) ケーブル式崩壊防止装置の挙動の数値解析

ケーブル式崩壊防止装置を上路式トラス橋に適用する場合、合理的な設計を行うとともに有効性・安全性を照査するには、崩壊防止装置によるトラス橋の崩壊防止挙動を再現できる数値解析ツールが必要である。ここでは、実験で観察された崩壊防止挙動が再現できる解析モデルの構築を検討した。

a) 上路式トラス橋模型のモデル化

解析に非線形汎用ソフト ABAQUS⁷⁾を用いることを前提に、図-7 をもとにモデル化の方法を説明する。上路式トラス橋模型本体については、上弦材と下弦材は空間はり要素 (B31)、斜材、鉛直材、上・下横構、対傾構、支材は3次元トラス要素 (T3D2) でモデル化した。格点部はガセット部分を剛域と仮定し、トラス要素は剛域境界にピン結合した。なお、ケーブル定着用のブラケットを設けた支点上鉛直材と上弦材との格点にはブラケット設置のための部材を設け補剛しているが、この補剛領域も剛域とした。鋼材の構成則は降伏点を剛性変化点とするバイリニア移動硬化則とした (1次勾配 E 、2次勾配 $E/100$)。

b) ケーブル式崩壊防止装置のモデル化

崩壊防止ケーブルはトラス構造の主構面を挟み込むように2本設置するが、ここでは簡単のため、2本のケーブルについて断面積を2倍にした1本のケーブルとしてモデル化した。図-7 に示すようにケーブルは定着部と4個のサドル点で区分された5区間で各々弛みを持つように設置されているので、ケーブルを Cable1～Cable5 の要素に分割し、両端の定着点を固定ヒンジ支承、サドルを可動ヒンジ支承でモデル化する。各ケーブル要素 Cable1～Cable5 は近似的にケーブルの荷重-変位関係を持つ引張のみに抵抗する非線形ばね要素でモデル化する。各ばね要素に用いる構成則は次のように設定した。まず、ケーブルモデル^{8),9)}から有効断面積を $A_e = 0.5A_0$ (A_0 :

ケーブル断面積) とするとともに各ケーブル要素 Cable1～Cable5 の弛みに応じたサグ量を設定し、ケーブル要素の軸力 T と両端部節点を結ぶ方向(弦方向)の変位 u の関係を図-8 のように算定した。つぎに、サグが小さいことから近似的に軸力 T を弦方向の力とみなして各非線形ばね要素に用いる構成則($T-u$ 関係)を設定した。ここで、図-8 には各ケーブル要素 Cable1～Cable5 のサグ量が示されているが、各サグ量は実際の値ではなく、上路式トラス橋の崩壊防止実験で得られた図-5, 6 の変位や軸力などの応答値が解析モデルにより精度良く再現されるようにキャリブレーションを行うことで決定している。

c) 下弦材の破断過程と崩壊防止挙動の解析

(4) で述べた実験での部材の切断から破断に至る過程は下弦材破断後の上部構造や崩壊防止ケーブルの応答に影響を与えることから、切断箇所を中心に 400mm の範囲の下弦材をシェル要素で細かく離散し(図-7)、切断の進行を該当する部分のシェル要素を順次休止することで再現した。解析は複合非線形動的解析を実施した。減衰はレーリー減衰とした。係数 α, β は、減衰定数 5% として、下弦材が破断したトラス構造の 1 次(橋軸直角方向変位モード)と固有周期と 2 次(鉛直方向変位モード)の固有周期($T=0.42(s)$, $T=0.28(s)$) から決定した。

d) 実験結果による解析精度の検証

まず、下弦材の破断による下弦材格点の増分変位応答の解析結果を検討する。図-5 より、初期状態から徐々に切断が進行する過程はいうまでもなく、下弦材の完全破断による上部構造重量のケーブルへの衝撃的作用に対する各格点の複雑な動的応答についても、解析でほぼ精度よく再現されている。ただ、破断反対側の格点 E-2, E-4 の鉛直変位は実験値よりやや大きく算定されている。

つぎに、下弦材の破断によるケーブルと下弦材間の荷重の再配分挙動の解析結果を検討する。図-6 より、解析で算定された下弦材破断後の下弦材とケーブルの軸力変動について、破断側の崩壊防止ケーブルの軸力増分がやや小さめに算定される一方で、破断反対側の下弦材の軸力増分はやや大きい。それ以外については、実験での荷重再配分性状は精度よく解析で再現されている。

ケーブル式崩壊防止装置によるトラス構造の崩壊防止過程の解析では、トラス部材の破断挙動からトラス部材ならびにケーブル式崩壊防止装置に衝撃的荷重が作用する崩壊防止挙動までを扱うため、多くの支配パラメータが関与する複雑な複合非線形問題となる。ここでの検討から、提示した解析モデルは

下弦材破断後の破断側の崩壊防止ケーブルの崩壊防止挙動における軸力増分をやや低めに評価する以外は、複雑な崩壊防止挙動を概ね精度よく再現するとともに数値的にも安定していることが判明した。したがって、本解析モデルはケーブル式崩壊防止装置をトラス橋に用いる場合の有効性・安全性を照査するためのシミュレーションツールとなりうる。

3. 提案した崩壊防止装置の実大構造への適用性

2. (5) で検証された数値解析手法を用いて、ケーブル式崩壊防止装置の実橋への適用性を検討する。

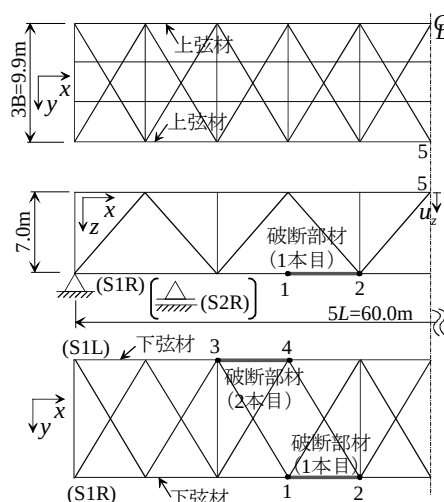


図-9 トラス橋モデル

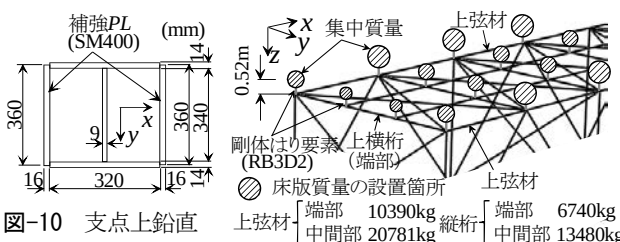


図-10 支点上鉛直材の補強

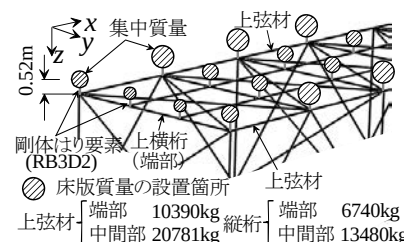


図-11 床版質量

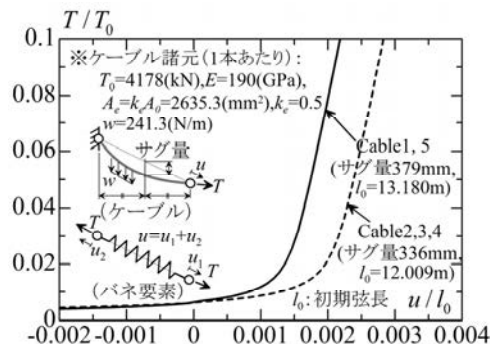


図-12 バネ要素に用いるケーブルの構成則(ケーブル全長 62.500m)

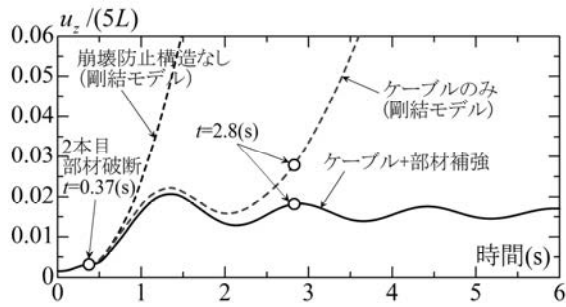


図-13 支間中央の上弦材鉛直変位の応答の時刻歴 (格点5)

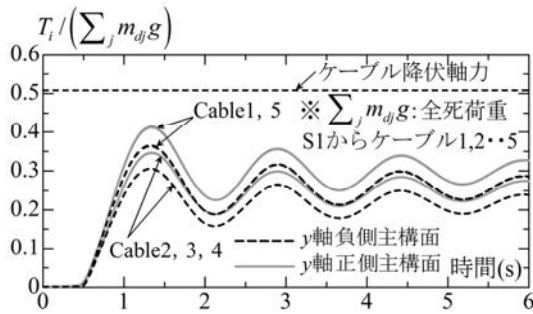


図-15 崩壊防止装置のケーブル軸力の時刻歴応答 (ケーブル+部材補強)

(1) トラス橋モデルとケーブル式崩壊防止装置

対象として、図-9 に示す実在する支間 60m の上路式単純鋼トラス橋を用いる。本トラス橋は、前章のトラス橋 1/5 縮尺模型に対応する実大モデルである。適用するケーブル式崩壊防止装置は図-3 と同様である。すなわち図-3 に示すようにトラス橋の両側の主構面（腹材）の下弦材下面に、弛みを持たせた崩壊防止ケーブルをそれぞれ 2 本配置（両側で計 4 本）し、各ケーブル両端部は支点上鉛直材上端に設置したブラケットに定着する。そして、下弦材破断後に下方に運動（落下）する上部構造を下弦材下面に設けたサドルを介してケーブルで支持する。

ケーブルとしては一般的な落橋防止装置で用いられている降伏強度 4178kN の PC ケーブル (F500TD) を想定している。ケーブルのサグ量 (図-12 参照) は、トラス橋の健全時に作用する常時荷重（死荷重と活荷重載荷時）や地震荷重（レベル 2 地震動による地震応答解析）などによる安全限界までの応答に対してケーブルが機能しないように決定した。支点上鉛直材は図-10 のように補強した。

(2) 数値解析モデル

解析モデルについては、基本的には実験で妥当性が検証された 2. (5) で説明し図-7 に示したものと同様である。ただし、端部のケーブルサドル 1, 4 の下弦材格点部については、両主構面の下弦材を破断させたので、片側主構面の下弦材を破断させた実験時

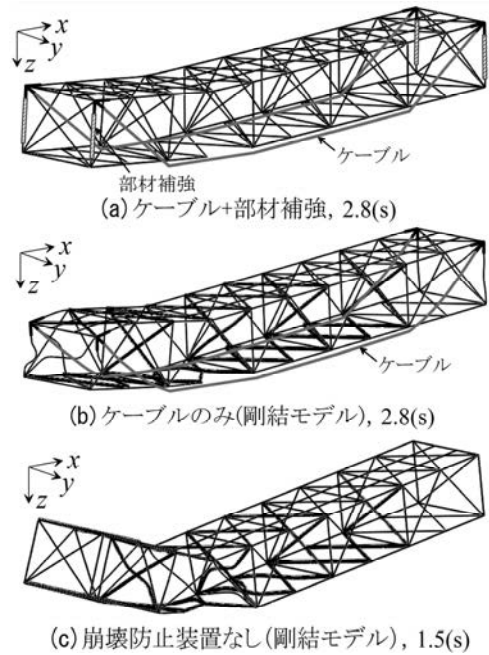


図-14 下弦材破断時のトラス橋の変形図 (変形率1倍)

とは異なり、端部サドルには大きな鉛直支持力が作用し、格点部を補強する必要性が生じた。そのため、ここでは本箇所については補強により鉛直材と斜材が格点部に補剛されてるものとみなし、剛結としている。

死荷重および活荷重は図-11 のように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する。このとき、活荷重は B 活荷重の 50% を最初の破断部材である下弦材 1-2 (図-9) に対して最も厳しくなるように載荷する⁶⁾。バネ要素に用いるケーブルの構成則は実験と同様に図-12 のように設定した。ここで、ケーブルの有効断面積は実験供試体と同様に $A_t = 0.5A_0$ とした。

(3) 検討ケース

実大上路式トラス橋の崩壊防止構造として、実験で対象とした崩壊防止ケーブルと部材補強を併用するケーブル式崩壊防止装置「ケーブル+部材補強」を中心に検討するが、部材補強を行わないケーブル式崩壊防止装置「ケーブルのみ」の場合についても検討する。その他、崩壊防止装置を全く設置しない「崩壊防止装置なし」の場合も検討した。なお、「ケーブルのみ」、「崩壊防止装置なし」の解析モデルも、基本的には(2)の「ケーブル+部材補強」のモデル化に従うが、部材破断後に崩壊挙動を示したため、数値解析の安定化を図るため、崩壊時の大変形挙動を表現できるように、変形が大きな部材についてはシェル要素 (S4R) に置換した (図-14(b))、

(c)) . それ以外の部材は全てはり要素 (B31) として、格点部に剛結した。

(4) トラス橋下弦材の破断シナリオ

ここでは、両主構面の下弦材 2 本が次のようなシナリオで破壊する場合を考える。まず、図-9 に示す下弦材 1-2 (1 本目) が突然破断し、つぎに、破断後に最大軸力が作用する下弦材 3-4 の最大応答時刻である最初の破断から 0.37 秒経過時に下弦材 3-4 (2 本目) が突然破断する場合を想定する。

解析は 2. (5) の実験解析と同様の複合非線形動的解析を実施する。また、レーリー減衰の係数は、減衰定数 5% として、下弦材 1-2 が破断したトラス橋モデルの 1 次と 2 次の固有周期から決定した。

(5) ケーブルを用いた崩壊防止装置の有効性

解析結果として、下弦材破断による各ケースの支間中央の上弦材の鉛直変位 (図-9 における格点 5) の時刻歴応答を図-13 に示す。「崩壊防止装置なし」のケースは、2 本目の下弦材破断後、単調に鉛直変位が増大しトラス橋は崩壊に至っている。「ケーブル+部材補強」のケースでは、2 本目の部材破断後、0.5 秒程度まで、「崩壊防止装置なし」と同様な挙動を示しているが、以後は、ケーブル式崩壊防止装置で支持され鉛直変位の増加率が徐々に減少し、1.3 秒付近で最大点に到達後、鉛直変位は減少に転じ、安定的な弾性振動をしている。「ケーブルのみ」のケースについては、2.0 秒程度までは「ケーブル+部材補強」とほぼ同じ挙動で、一旦、鉛直変位が減少するが、その後は、「崩壊防止装置なし」と同様に単調に鉛直変位が増大してトラス橋は崩壊に至り、崩壊防止装置が機能していないことがわかる。

各ケースの変形図を示したのが図-14 である。

「崩壊防止装置なし」では、図-14(c) より、破断部材近傍の上弦材の他、近傍の対傾構および下横構などの 2 次部材が大きく変形し崩壊に至ったことがわかる。一方、「ケーブル+部材補強」のケースにおける、図-13 に示す 2.8 秒時の変形図を図-14(a) に示す。これより、支点上鉛直材が健全でケーブルが効果的にトラス構造全体を支えていることを確認できる。支点上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-14(b) より、ケーブルが定着されている鉛直材がケーブルからの作用力により座屈している。これが原因で、崩壊防止装置が有効に機能していない。

図-15 に「ケーブル+部材補強」のケースにおけるケーブル軸力の時刻歴を示す。すなわち、最初に

破断した下弦材の主構面 (y 軸正側) に配置した崩壊防止ケーブル 2 本の合軸力の応答、ならびに次に破断した下弦材の主構面 (y 軸負側) に配置したケーブル 2 本の合軸力の応答を図中に示す。合軸力は、いずれも、図-7 に示す Cabel1~Cabel5 までの 5 要素について示している。図-15 より、図-13 の変位応答に応じてケーブル軸力も降伏軸力以内の範囲で弾性振動しており、崩壊防止装置のケーブルが有効に機能していることを確認できる。

4. あとがき

上路式鋼トラス橋の崩壊制御に用いる過渡的なケーブル式崩壊防止装置を提案しその有効性を検証した。まず、提案した崩壊防止装置を設置した 1/5 スケールの上路式鋼トラス橋の模型実験を実施するとともに、実験結果をもとに、ケーブル式崩壊防止装置の有効性と挙動特性を検討するとともに数値解析モデルを構築した。そして、数値解析モデルを用いて、ケーブル式崩壊防止装置の実橋への適用性を明らかにした。

謝辞：本研究の一部は文部科学省科学研究費（基盤研究(A) (一般) 16H02359) ならびに名古屋工業大学と日本車輛製造(株)との共同研究の援助を受けた。

参考文献

- 1) 国土交通省 中部地方整備局 高山国道事務所
Web ページ(http://www.cbr.mlit.go.jp/takayama/syoutkai/pdf/h19/h19_102901.pdf), 2007.
- 2) 鋼・合成構造標準示方書 耐震設計編, 土木学会, 2018.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 丸善, 2012.
- 4) 後藤芳顯：トラス橋の崩壊防止装置, 特許 6304809 号, 2018.
- 5) 後藤芳顯, 海老澤健正, Nguyen Van Bach：地震動が作用する鋼製橋脚の 3 次元倒壊挙動と予測, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.3, pp.512-531, 2017.
- 6) 土木学会 鋼構造委員会：リダンダンシー評価ガイドライン(案), 鋼構造物のリダンダンシーに関する検討小委員会, 2014.
- 7) Dassault Systemes Simulia Corp., ABAQUS/Standard user's manual, 2014.
- 8) 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.
- 9) Nguyen Van Bach, 後藤芳顯, 海老澤健正：本震で損傷した鋼製橋脚の余震による倒壊特性とケーブルによる倒壊防止の基礎的検討, 第 18 回 性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 65-72, 2015.