

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：53701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14718

研究課題名(和文) エネルギー基準による鋼橋の新しいリダンダンシー評価法の開発

研究課題名(英文) Development of an energy-based redundancy evaluation method for steel bridges

研究代表者

水野 剛規 (Mizuno, Yoshinori)

岐阜工業高等専門学校・環境都市工学科・准教授

研究者番号：90585093

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：トラス橋模型の下弦材破断に起因した崩壊実験により、全体系はいわゆる進行性破壊のような連鎖的な部材破断によるエネルギー吸収を期待することなく、反対側パネルの下弦材のボルト接合部が脆性的に破断することにより瞬時に大規模崩壊に至ることが確認された。そこで、部材破断に起因する全体系の大規模崩壊を防止する手法として、施工が容易で汎用的なケーブルを用いた崩壊防止装置の適用性を検討した。また、リダンダンシーの不足が懸念される少数主桁橋について、数値解析により支間中央付近の下フランジおよび腹板が脆性的に破断した場合の崩壊挙動特性を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トラス橋の大規模崩壊は甚大な被害をもたらすので、大規模崩壊を回避する何らかの方策を講じることが必要である。大規模崩壊しないようにするための本質的な方策は部材補強などにより構造系のロバスト性を向上させ構造系の吸収エネルギーを大きくすることであるが、設計荷重に対する安全性・使用性の照査を再度行うことも必要となり、工期・工費の面で適当でないといえる。そのため、施工が容易な崩壊防止策として汎用的なケーブルを用いた崩壊防止装置の適用性を検証した。

研究成果の概要(英文)：Experiments performed on the collapse of a truss bridge model due to the sudden failure of the lower chord have confirmed that brittle fracture of the bolted connections of the lower chord of the opposite panel can lead to instantaneous large-scale collapse. In addition, it was determined that the collective system could not be expected to absorb the energy generated by the collapse through a chain of member failures, as is seen in so-called progressive failures. Therefore, this study investigated the applicability of a collapse prevention system using cables that could be easily installed as a method for preventing the large-scale collapse of an entire system as a result of sudden member failure. A numerical study was also carried out to investigate the collapse behavior of minimized girder bridges with insufficient redundancy when the lower flange and web plate were suddenly fractured at the center of the span.

研究分野：構造工学

キーワード：リダンダンシー評価 エネルギー トラス橋 桁橋 崩壊挙動

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、トラス橋の落橋や部材破断事故を受け、リダンダンシー評価法の確立が重要視されている。リダンダンシー評価法として厳密な手法は、部材破壊後に構造系の崩壊現象を忠実にモデル化し、複合非線形動的解析で直接評価する方法である。しかし、この解析では極端な大変形が生じるため実務での計算は容易でない。そこで、これまでにエネルギー基準と静的な Pushover 解析に基づく実用的なリダンダンシー評価法のコンセプトを提示した。この評価法では、部材破断時の衝撃や塑性化の影響を考慮して、構造系の崩壊が精度よく判定できることを平面トラス構造を例に示した。実用化のためには、このエネルギー基準による方法を拡張し、トラス橋や桁橋などの 3 次元挙動を考慮したリダンダンシー評価を行う汎用手法を開発する必要がある。これにより、リダンダンシーを向上させる場合に、部材破断後の構造系の強度を高めるだけでなく、今まで不可能であったエネルギー吸収能を高めることで部材破断時の衝撃を低減するより合理的な構造の検討も可能になる。

2. 研究の目的

トラス橋模型の下弦材破断に起因した崩壊実験(図1)により、全体系はいわゆる進行性破壊のような連鎖的な部材破断によるエネルギー吸収を期待することなく、反対側パネルの下弦材のボルト接合部が脆性的に破断することにより、全体系は瞬時に大規模崩壊に至ることが確認された。このようにエネルギー吸収を必ずしも期待できないことが明らかとなったため、部材破断に起因する全体系の大規模崩壊の防止できる簡易的な手法を検討する。桁橋については、リダンダンシーの不足が懸念される少数主桁橋を対象に、支間中央付近の下フランジおよび腹板が脆性的に破断した場合における崩壊挙動特性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) トラス橋が大規模崩壊しないようにするために、施工が容易な崩壊防止策として汎用的なケーブルを用いた崩壊防止装置の適用性を検討する。ここではトラス橋模型の実験結果を用いて、トラス橋全体系の下弦材破断後の挙動特性をほぼ再現できる数値解析モデルを構築する。つぎに、この数値解析モデルを用いて、実大構造を対象に下弦材破断時にケーブルが有効に機能しうるかを数値解析により検証する。

(2) ガセットのボルト接合部における下弦材の脆性的な部材破断を防止できる方策を検討するため、接合部を模擬した実験供試体の載荷試験を実施するとともに、実験結果を用いて接合部の終局挙動を再現できる数値解析モデルの構築を行う。

(3) 単純鋼 2 主桁橋を再現した数値解析モデルを作成し、FE 解析により支間中央付近の下フランジおよび腹板が脆性的に破断した場合の崩壊挙動特性を検討する。

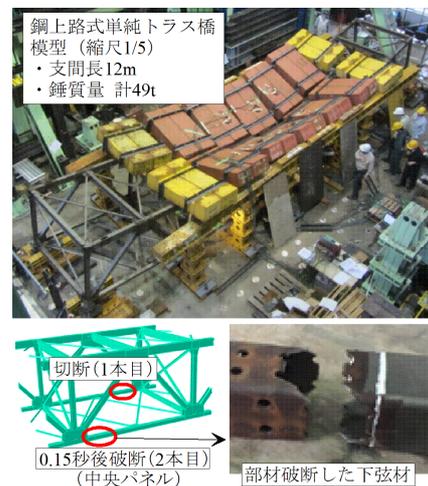


図1 部材破断させたトラス橋模型の実験後の様子

4. 研究成果

(1) トラス橋のケーブル式崩壊防止装置

①概要: ケーブル式崩壊防止装置は、図2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ことで、上部構造の応答がその終局状態を超え、構造系の復元力がゼロとなり崩壊挙動を示すまで、装置を作動させないようにする。

②数値解析モデルの構築: 図1と同諸元の実験供試体(錘計36.8t)にケーブル式崩壊防止装置を設置し、中央パネルの下弦材を破断させた実験結果を用いて、トラス橋の崩壊防止挙動の特性を再現できる数値解析モデルを構築した。数値解析モデルは、トラス橋本体については、上弦材と下弦材を空間はり要素(B31)、斜材、鉛直材、上下横構、対傾構、支材を3次元トラス要素でモデル化した。格点部はガセット部分を剛域と仮定した。鋼材はバイリニア移動硬化則(2次勾配E/100)を用いた。ケーブルは、弛緩状態から緊張状態を表現できるように非線形のばね要素でモデル化した。図3に中央パネルにおける下弦材格点部の鉛直変位とケーブル軸力の時刻歴応答を実験結果と比較して示す。図3より、本解析モデルは崩壊防止装置のケーブルに作用する軸力をやや低めに評価するが、崩壊防止挙動の主要な部分をほぼ精度よく再現できた。

③実大橋への適用性: ②で構築した数値解析モデルを用いて、実大構造(支間60m、主構間隔9.9m、主構トラス高さ7.0m)を対象にケーブル式崩壊防止装置の適用性を検討した。実大トラス構造の

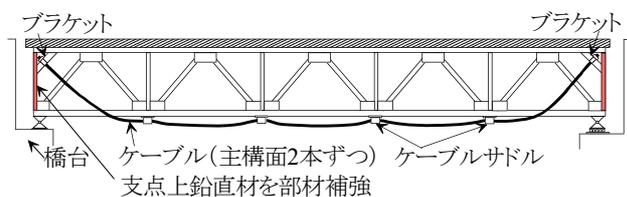


図2 ケーブル式崩壊防止装置

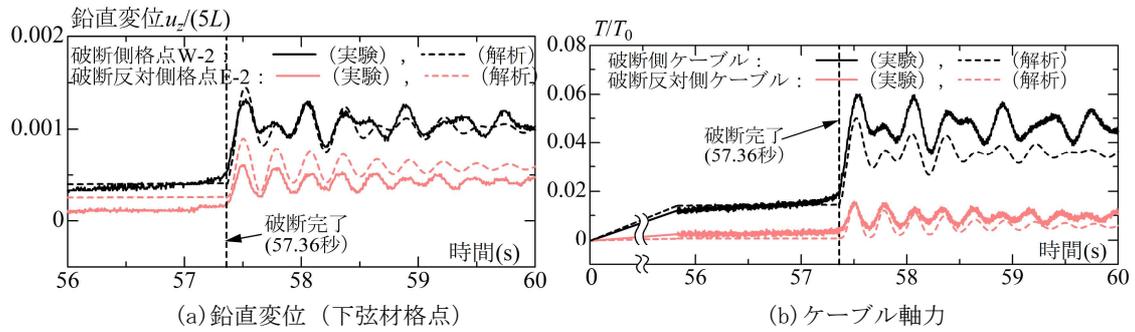


図3 鉛直変位とケーブル軸力の時刻歴応答

部材破断シナリオとしては、実験よりも厳しい両主構面の下弦材2本を破断させる場合を想定した。検討ケースとして、ケーブル式崩壊防止の設置に加え支点上の鉛直材を補強する「ケーブル+部材補強」の他に、「崩壊防止装置なし」、ケーブル式崩壊防止のみ設置し、支点上の鉛直材を補強しない「ケーブルのみ」の3ケースを設定した。

図4に支間中央の上弦材鉛直変位の時刻歴応答を示す。「崩壊防止装置なし」のケースは、単調に鉛直変位が増大し崩壊に至っている。「ケーブル+部材補強」のケースでは、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、弾性振動している。「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」とほぼ同じ挙動であるが、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。これは支点上鉛直材が座屈したためである。

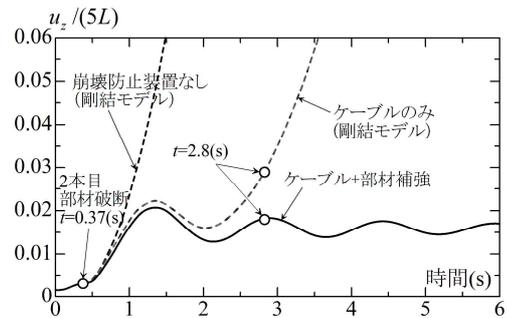
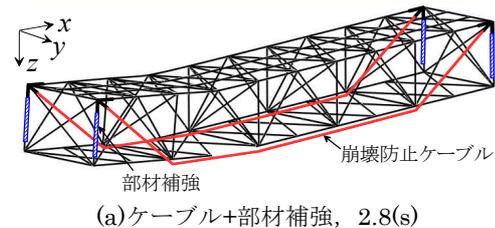


図4 支間中央の上弦材鉛直変位の応答の時刻歴



(a)ケーブル+部材補強, 2.8(s)

図5 下弦材破断時のトラス橋の変形図 (ケーブル+部材補強, 2.8(s))

図5に「ケーブル+部材補強」のケースの変形図を示す。図4に示す2.8秒時の変形図である。これより、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、ケーブル式崩壊防止装置の実大構造への適用性が検証された。

(2)下弦材のボルト接合部の実験と解析

ガセットのボルト接合部における下弦材の脆性的な部材破断を防止できる方策を検討するため、接合部を模擬した実験供試体の载荷試験を実施するとともに、実験結果を用いて接合部の終局挙動を再現できる数値解析モデルの構築を行った。

図6に実験供試体を示す。供試体は、M12の高力ボルトを使用したので、 $s=M12/M22=0.5455$ を縮尺として板厚および諸寸法を設定した。本供試体に対して引張载荷試験を実施した。

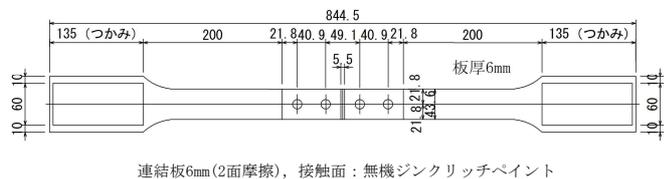


図6 実験供試体

つぎに、数値解析のモデル化について

では、長手方向の対称性を考慮し、図7に示すようなハーフモデルを設定した。母材、連結板および高力ボルトをソリッド要素(C3D8R)で離散化した。このとき母材と連結板、ボルトと母材および連結板の接触面の接触・すべり挙動は考慮した。鋼材の材料構成則はマルチリニア等方硬化則を用いた。ボルトには初期導入軸力として、実験と同様に、降伏軸力の75%を与えた。解析では、図7に示すようにモデル端部に強制変位を与えた。

実験供試体の载荷試験の結果として、供試体の全体変位と引張荷重の関係を、実験と解析を比較して図8に示す。本図には、ボルト軸力から算定した接合部のすべり荷重についても示している。実験のボルト軸力は、埋め込み型ひずみゲージの計測値から算定した。図8より、荷重と変位の関係はすべりが生じるまではほぼ一致した結果となっており、降伏挙動、すべり挙動、支圧状態に至る過程を比較的再現できている。本数値解析モデルを用いることで、ボルト接合部における下弦材の変形能を確保するための部材形状の検討が可能となる。

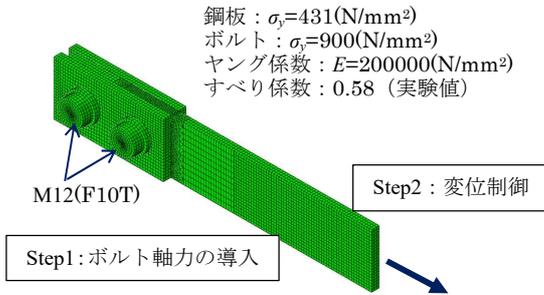


図7 数値解析モデル

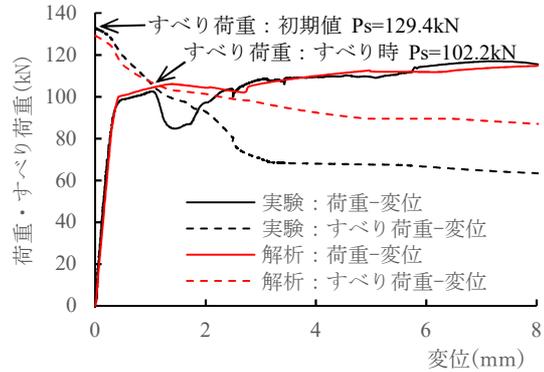


図8 荷重-変位関係

(3) 少数主桁橋の部材破断時の崩壊挙動特性
支間長 33m, 桁高 2m の単純鋼 2 主桁橋を
対象に, 部材破断時における崩壊挙動特性
を数値解析により検討した.

解析のモデル化として, 対象が単純桁で
あるため, 対称性を考慮し近似的に図 9 に
示すハーフモデルを設定した. 主桁, 横
桁, 床版は, シェル要素を用いてモデル化
した. このとき床版のシェル要素は上フラン
ジ面に配置し, シェルの中央面を床版中
心にオフセットした. 床版の質量は, 集中
質量で離散化して与えた. 材料構成則とし
て, 鋼材はバイリニア移動硬化則 (2 次勾
配 $E/100$) とし, コンクリートは損傷塑性
モデルを用いた.

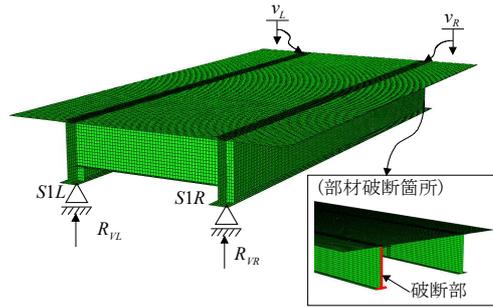


図9 解析モデル (ハーフモデル)

部材破断箇所は, 図 9 に示すよう
に, 最も厳しい破断パターンとして,
疲労亀裂の進展により支間中央付近の
下フランジおよびウェブが脆性的に破
断した場合を想定した. 検討ケースと
して, 床版の載荷質量を死荷重質量で
除した, 載荷質量比 k を 1.0 から 3.2
まで変化させた 7 パターンを設定し,
部材破断後の動的応答を複合非線形動
的解析により求めた.

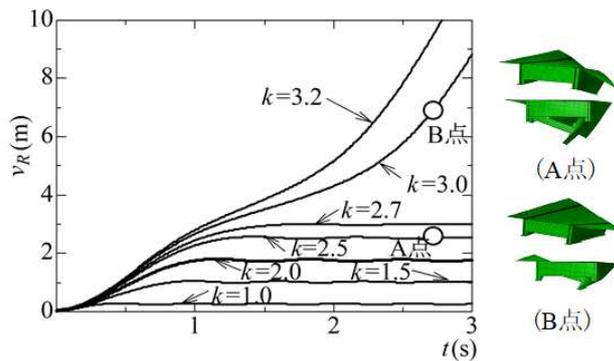


図10 支間中央の鉛直変位 v_R の時刻歴

解析結果として, 図 10 に部材破断
側の支間中央の鉛直変位の時刻歴応答
を示す. 図 10 より k が 1.0~2.7 の場
合, 鉛直変位は途中まで単調に増加
し, 最大値に到達後, 自由振動してい
ることが確認できる. 載荷質量比 k が大きいほど鉛直変位は大きくなり自由振動に至るまでの
時間を要している. 一方, k が 3.0, 3.2 のときは鉛直変位がそのまま単調に増加し, 崩壊に至
っている. そのため最小崩壊質量は, $k=2.7\sim 3.0$ に存在すると考えられる. $k=2.5, 3.0$ の 2.8
秒時点 (A 点, B 点) における変形図を確認すると, いずれのケースも部材破断側の主桁 (部材破
断側) が大きく撓んでいることが確認できるが, $k=3.0$ は $k=2.5$ よりもさらに大きな鉛直変位が
生じており, このモードで崩壊が進行していくことがわかる.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 水野剛規, 後藤芳顯, 王慶云, 鈴木森晶 | 4. 巻 Vol. 22 |
| 2. 論文標題 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 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 第22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 | 6. 最初と最後の頁 pp. 313-320 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 大野凌雅, 水野剛規 |
| 2. 発表標題 少数主桁橋の部材破断時における動的特性に関する検討 |
| 3. 学会等名 平成30年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 水野剛規, 後藤芳顯, 山田忠信, 鈴木森晶, 森下健一 |
| 2. 発表標題 トラス橋の崩壊防止手法開発のための大規模実験 |
| 3. 学会等名 土木学会第72回年次学術講演会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 河合惟大, 後藤芳顯, 山田忠信, 水野剛規, 鈴木森晶, 嶋口儀之 |
| 2. 発表標題 下弦材が破断したトラス橋の崩壊挙動解明のための大規模実験 |
| 3. 学会等名 土木学会第72回年次学術講演会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田忠信, 後藤芳顯, 海老澤健正, 水野剛規, 嶋口儀之 |
| 2. 発表標題 トラス橋の格点部を含めたパネルの終局強度に関する研究 |
| 3. 学会等名 土木学会第72回年次学術講演会 |
| 4. 発表年 2017年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
| | | | |