

力学的骨格に着目した連続トラス橋梁の 危機耐性構造計画手法の提案

野村 一貴¹・植村 佳大²・高橋 良和³

¹ 学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)
E-mail: nomura.kazuki.35n@st.kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

² 正会員 京都大学助教 工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)
E-mail: uemura.keita.3n@kyoto-u.ac.jp

³ 正会員 京都大学教授 工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)
E-mail: takahashi.yoshikazu.4v@kyoto-u.ac.jp

構造物の建設時、計画段階で危機耐性を考慮すべきとされているが、危機耐性を組み込んだ構造計画手法は確立されていない。本研究では、連続トラス橋梁を例に危機耐性構造計画手法の提案を行う。提案手法では、まず構造における最重要要素をロバストネスインデックスにより特定する。次に、その最重要要素が欠落した構造に対して、耐荷メカニズムへの影響が大きい部材の集合である「力学的骨格」を図式力学により選定する。そして、力学的骨格の構成部材に発生する応力と許容応力度とを比較し、許容応力度を超過する部材があれば、力学的骨格の全構成部材の応力が許容応力度の範囲内に収まるよう対策する。この手法により、設計基準外事象下における連続トラス橋梁の耐荷性能が明示化され、危機耐性構造計画が実施可能となる。

Key Words: anti-catastrophe, structural planning, mechanical skeleton, graphic statics, truss bridge

1. 背景

2011年東北地方太平洋沖地震を契機として、想定外の災害が生じて、構造物や社会システムが壊滅的な状況に陥らないために、予め対処可能な計画や設計をしておくべきという危機耐性の概念が提唱された。現在、危機耐性を実装した社会の実現を目指し、様々な検討が行われている。例えば、室野ら¹⁾は、想定外の地震の発生など不測の事態に対して、鉄道構造物において避けるべき事態を設定し、その事態の影響度とその事態に対する構造物の回避能力の積により、構造物の危機耐性を評価する手法を提案している。しかしながら、危機耐性を評価する手法の提案例は未だ少ないのが現状であり、危機耐性の定量化手法の確立には至っていない。また、土木構造物共通示方書(構造計画編)²⁾では、「設定外への対応は、現状の設計体系においては構造計画段階で行う必要がある」と述べている。これは、要求性能を満足することはもちろん、冗長性や頑強性も有する構造物を計画するよう求めており、危機耐性を構造計画に組み込む必要性を示しているといえる。更に、道路橋示方書³⁾では、構造設計上の配慮事項の一つとして、落橋など橋梁にと

って致命的な状態になる可能性に対して、補完性又は代替性を考慮した部材配置を行うよう求めている。ここで、補完性又は代替性を有する構造とは、着目する部材の機能喪失により耐荷メカニズムや構造特性が当初より異なるものになったとしても橋梁全体としては致命的な状態に陥らないような構造のことである。もし、耐荷メカニズムへの影響が大きな要素を把握することができれば、それらの要素を補強することで、補完性又は代替性を考慮した構造設計を行うことが可能となると考える。また、致命的な状態に陥らないことを目的とする設計は、構造物全体が壊滅的な状況に陥らないよう対策すべきという危機耐性を考慮した設計であるといえる。そこで本研究では、連続トラス橋梁を例に、補完性又は代替性を有する構造の実現を目的に、構造全体の耐荷メカニズムへの影響が大きい要素を把握し、それらの要素を補強することで、危機耐性の実現を目指すという構造計画手法の提案を行う。

既往の研究では、トラス橋梁のリダンダンシー及びロバスト性に関する検討が行われている。例えば、永谷ら⁴⁾は、将来的に橋梁が老朽化することを想定して、損傷シナリオ毎の危険度を事前に評価することが重要であると

考え、2つの鋼トラス橋梁を対象にリダンダンシー評価を行っている。その際、着目部材破断時の他の部材断面力を線形解析により算出し、その断面力から各部材が終局状態であるかを判定している。更に、非線形解析を行うことで線形解析の結果の妥当性についても検証している。また、梶田ら⁹⁾は、損傷を有する下部式鋼製トラス橋梁を対象に3方向同時加震の地震応答解析を行うことで、橋梁全体の挙動を把握し、部材の損傷種別と損傷箇所の違いによる橋梁全体の安全性に及ぼす影響について検討を行っている。しかし、これらの既往研究では、部材等の詳細が既知である橋梁構造に対して検討を行っており、構造物の概要が決まっていない構造計画段階での危機耐性評価手法への適用を念頭に置かれているものではない。

以上の背景をふまえ、本研究では、構造計画段階における連続トラス橋梁の危機耐性評価手法の提案に向けて、部材等の詳細が未定である橋梁構造に対して適用可能な手法を提案する。

2. 構造計画における危機耐性

(1) 構造計画の定義

土木事業を実現するためには、まず計画が立案されるが、その計画を実現するために構造物が必要となった場合、土木構造物の建設が選択される。この段階より、構造技術者が参画し、土木構造物の実現に向けた検討が行われる。構造計画は、計画理念に基づき構造物に要求される性能を確保できる構造種別や構造形式を、施工、維持管理、環境および経済性を考慮して具現化を行う行為であり、広義の意味では設計作業に含まれるものである。近年、より良い構造物を創造するためにも、設計作業の上位工程である構造計画段階での検討が最も重要であるとの認識が高まり、構造物の概要を決める構造計画と、その詳細を検討する構造設計を陽に区別するようになってきた。土木学会が策定した土木構造物共通示方書²⁾でも、構造計画編が独立した書籍として発刊されている。

構造物の概要とは、構造物の成立性を決定づける基本形式、構造、施工法、概算工費などを指し、特に詳細の検討となる構造設計段階で大きな手戻りがないよう、構造物の基本構造の材料、主要断面等の寸法を決めることが重要である。

(2) 構造計画における定量的評価

構造計画では、建設する土木構造物の構造種別や構造形式を決定するにあたり、計画理念をいかに満足しているかを示す根拠が必要となるため、様々な提案に対する定量的な評価が必要となる。また、構造計画では、構造

物の詳細ではなく、基本構造・形式に関する大まかな見積もりなどの概略解析・計算が行われる。ここでいう概算とは、正確な計算ではないという意味ではなく、構造物の特徴を表現する重要な基本構造に対して検討を行い、その実現可能性を見積もるという意味である。構造計画は構造物の概要を決定する行為であるため、詳細な断面や寸法がまだ決まっていないことから、非線形挙動などの検討を行うことは不可能である。構造物の概要に関する概算を行うことで、構造全体と部分の関係や、作用と内力の関係、抵抗メカニズムなどのマクロの関係・挙動を理解し、構造物全体に対する理解を深めることが重要であるといえる。

(3) 構造計画における危機耐性

構造計画段階では自由度が高い(制約が少ない)検討が可能であるため、構造計画で危機耐性を検討することは効果的である。道路橋示方書⁶⁾では、「設計で考慮する地震動に対して耐震設計された橋は、これらの事象に対してある程度までは抵抗特性を発揮することができると考えられるものの、極めて大きな作用に対してまで抵抗特性を確保することは困難であり、また、これらの極めて大きな作用に対しては対応できる対策にも限度がある。」と記されており、設定外の事象に対しては架橋位置や構造形式の選定により対処することが標準的な対処法とされている。また、土木構造物共通示方書(構造計画編)²⁾では、「設定外への対応は、現状の設計体系においては構造計画段階で行う必要がある」と記されており、構造物は要求性能を保持することに加えて、冗長性と頑強性を有するような構造種別や構造形式を具現化する設計を構造計画に組み込むことで、危機耐性について考慮するよう述べている。

危機耐性は、概念としては既に設計体系に取り込まれている部分も多いものの、それをいかに実現するかに関しては、未だ定まった手法はない。構造計画では、橋梁のスパン長を変化させたり、構造物の基本構造すら変化させることも可能であるため、危機耐性の検討を効果的に実現、検証することができる。その一方、構造の概要が決定していないため、詳細な解析を行うことはできないことを前提とした検討法を研究する必要があるといえる。

3. 連続トラス橋梁の危機耐性構造計画手法の提案

(1) 提案手法の目的

本研究では、構造計画における概略解析・計算法を踏まえた線形解析に基づく危機耐性評価法を提案する。通常、橋梁は、設計基準事象に対する要求性能を満足する

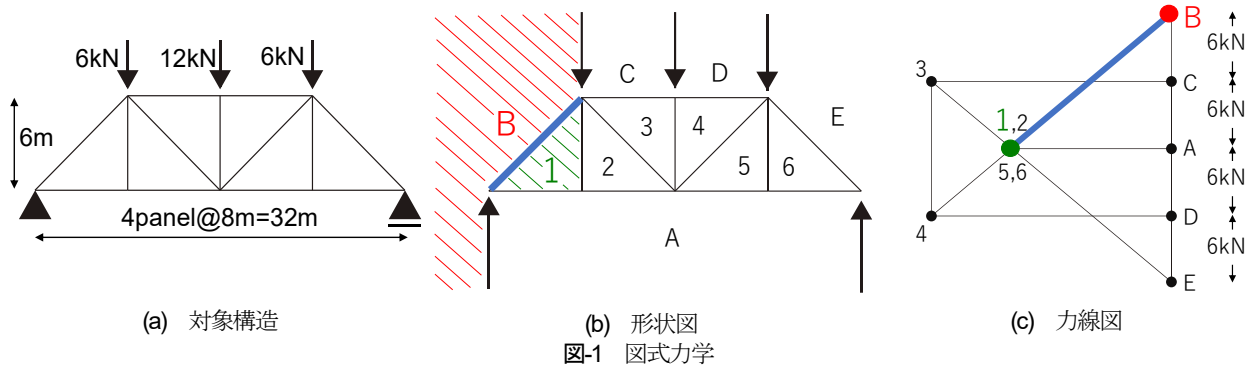


図-1 図式力学

ように設計されているが、設計基準外事象に対する性能を満足するように設計されているとは限らない。一方、不静定トラス構造において、設計基準外事象に対して損傷が発生しないようにすることは過剰設計であり、たとえ危機耐性に富んだ構造であったとしても、社会的に許容されることは困難である。そこで、提案手法では、不静定トラス橋梁の一部が損傷を受けたとしても、他の部材で最低限死荷重を支持できる構造であるか否かを確認することで、構造物の危機耐性について検討する。ここで、最低限死荷重を支持することを目的としたのは、損傷を受けた橋梁が通常通り利用されることはない想定したためである。

また本手法では、橋梁のどの部材や支承が損傷するかを想定する際、耐荷メカニズムへの影響が特に大きい要素が損傷した場合について検討する。これは、耐荷メカニズムへの影響が大きい要素が損傷すれば、他の部材が許容応力度を超えて損傷する可能性が高く、最終的には進行性破壊により落橋に至ることを想定したためである。

なお、一般的に部材損傷時でも完全な損傷でなければ、部材は力を負担するものと考えるが、本手法では、計画段階での適用を可能とするため、部材の非線形挙動は考慮せず、部材損傷は部材が消失したものとして考える。以下、本研究における部材損傷は部材消失と呼び、支承損傷は支承消失と呼ぶ。

更に、2.(3)にて構造計画段階では構造物の詳細が未定であると述べた。本提案手法では、構造形式、材料、部材断面積、死荷重、活荷重のみが既知である構造に対して適用することを考える。

(2) 提案手法で利用する既往の指標及び手法

a) ロバストネスインデックス

Biondini and Restelli⁷⁾は、構造物のロバスト性を評価するための指標「ロバストネスインデックス」を提案している。Mya and Takahashi⁸⁾は、Biondini and Restelli⁷⁾が提示したロバスト性を評価する指標（ロバストネスインデックス）を用いてトラス構造物の各部材や各支承の耐荷メカニズムへの影響の程度を評価している。その際、剛性マトリ

クス K 、固有周期 T 、変位 s の3種類についてのロバストネスインデックスを算出することでトラス構造の部材・支承の重要度を指標化している。本研究では、その中でも剛性マトリクス K によるロバストネスインデックスを活用することとした。ロバストネスインデックスは次のように定義される。

$$\rho_c = \frac{c_0}{c_1} \quad (1)$$

$$c = \frac{\max_i \lambda_i(K)}{\min_i \lambda_i(K)} \quad (2)$$

ここで、 $\lambda_i(K)$ は剛性マトリクス K の i 番目の固有値を示す。また、式(1)における c の添字において0は健全時、1は損傷時を示す。それぞれのロバストネスインデックスは、健全時と損傷時の値の比をとることで定義される。また、この指標は値が0に近ければ、耐荷メカニズムへの影響が大きいことを示し、一方で値が1に近ければ、耐荷メカニズムへの影響が小さいことを示す。このような指標を用いた構造物のロバスト性の評価を構造計画に組み込むことができれば、構造計画段階での危機耐性についての定量的な評価につながるといえる。

b) 図式力学

提案手法では、構造物に作用する荷重と構造形態の関係をベクトルを用いて図式化する図式力学を活用する。

図式力学⁹⁾¹¹⁾は、構造形状と作用する外力を示した「形状図」と構造全体の力の流れを示した「力線図」という2つの図によって構成されている。形状図の情報を元に力線図を描き、力線図上の線分の長さや角度から、特定の部材の力学的性状を把握することができる。ここで、図-1(a)の静定トラス構造を例に図式力学に利用方法を示す。図-1(a)の静定トラス構造の図式力学は、図-1(b)(c)のように描ける。ここで、形状図には、領域内に記号が割り振られているが、それらは力線図上の番号に対応している。例えば、図-1(b)の形状図上で青線で示す部材は、図-1(c)の力線図上で青線で示す線分に対応して

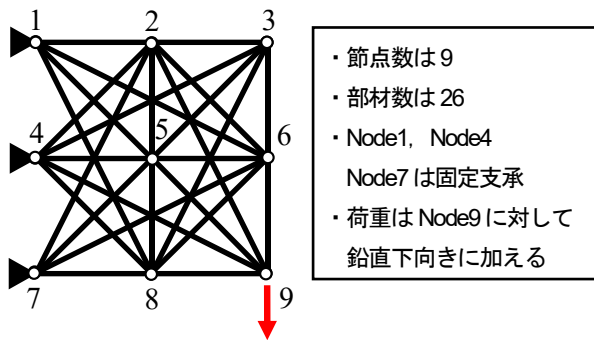


図-2 対象構造の概要

いる。このように、形状図上の領域や線分は、力線図上の点や線分に対応している。

本来、図式力学は、解析手法や計算機が未発達であった時代において、力の流れや荷重と構造形態の関係を視覚的に捉えることで、部材力の厳密解を算出するために利用された。一方で、部材力の厳密解を算出すること以外にも、図式力学を用いることで、構造全体の外力に対する耐荷メカニズムや、ある特定の部材が構造全体の耐荷メカニズムにおいて担っている役割など、構造全体および構造部材に関する力学的情報や、力の流れと構造形態の関係等を視覚的に捉えることも可能である。そのため、近年、図式力学を活用した設計手法や最適化手法の提案が盛んに行われている。例えば、Beghiniら¹²⁾は、図式力学を活用した構造の位相最適化手法を示し、その手法を利用して建築構造物の位相最適化を行っている。提案手法は、従来の最適化手法とは異なり、部材剛性や部材力の計算が不要であり、設計変数を減らすことが可能であるという利点を示している。また、Meleら¹³⁾は、解析的な検討によってではなく、幾何学的な性状から構造物の形状を決定することを目指し、図式力学の重要性を事例とともに分析している。さらに、Akbarzadehら¹⁴⁾は、従来の形状図と力線図の二次元で考えられていた図式力学による手法を構造を直感的に把握できるツールと考えた。そこでは、図式力学を三次元に拡張し、荷重などの外的要因を考慮した構造設計への適用を提案している。

そこで本研究でも、図式力学により力の流れと構造形態の関係等を視覚的に表現することで、部材の損傷前後の力の流れを可視化し、損傷が構造物の耐荷メカニズムへ与える影響を確認することとした。

(3) 力学的骨格

a) 力学的骨格の定義

本研究では、特定の荷重作用下における構造全体の耐荷メカニズムに対して影響の大きい部材の集合を、その

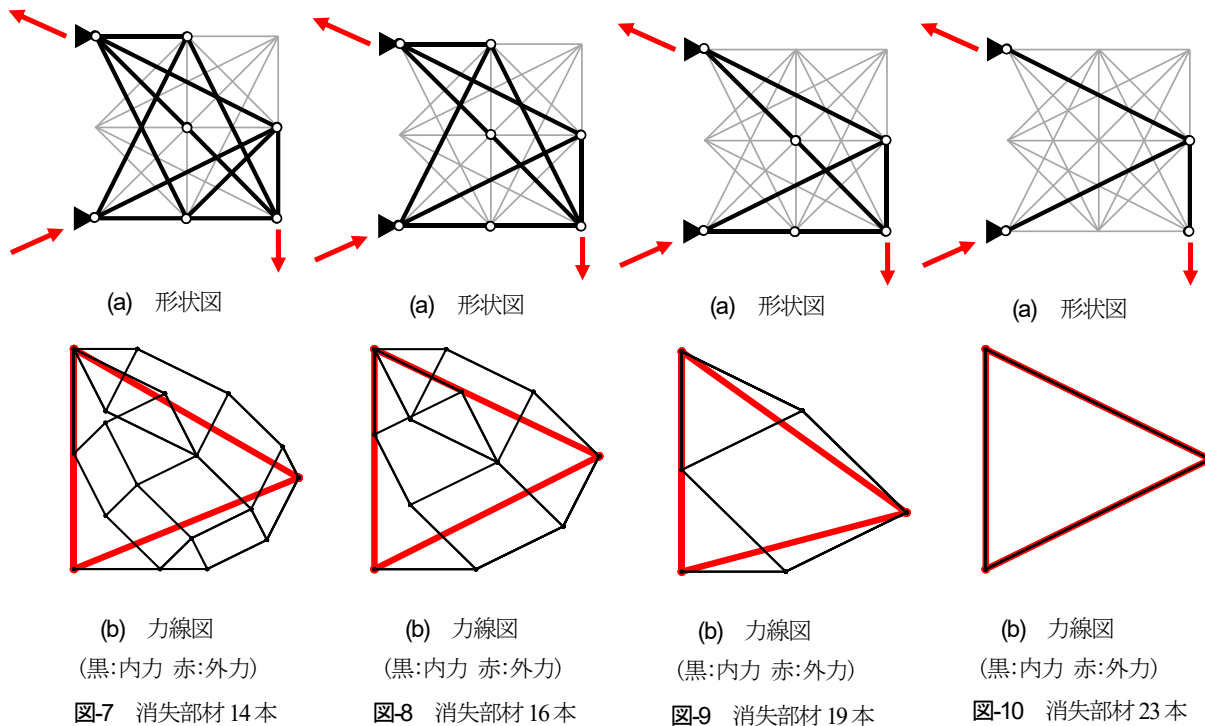
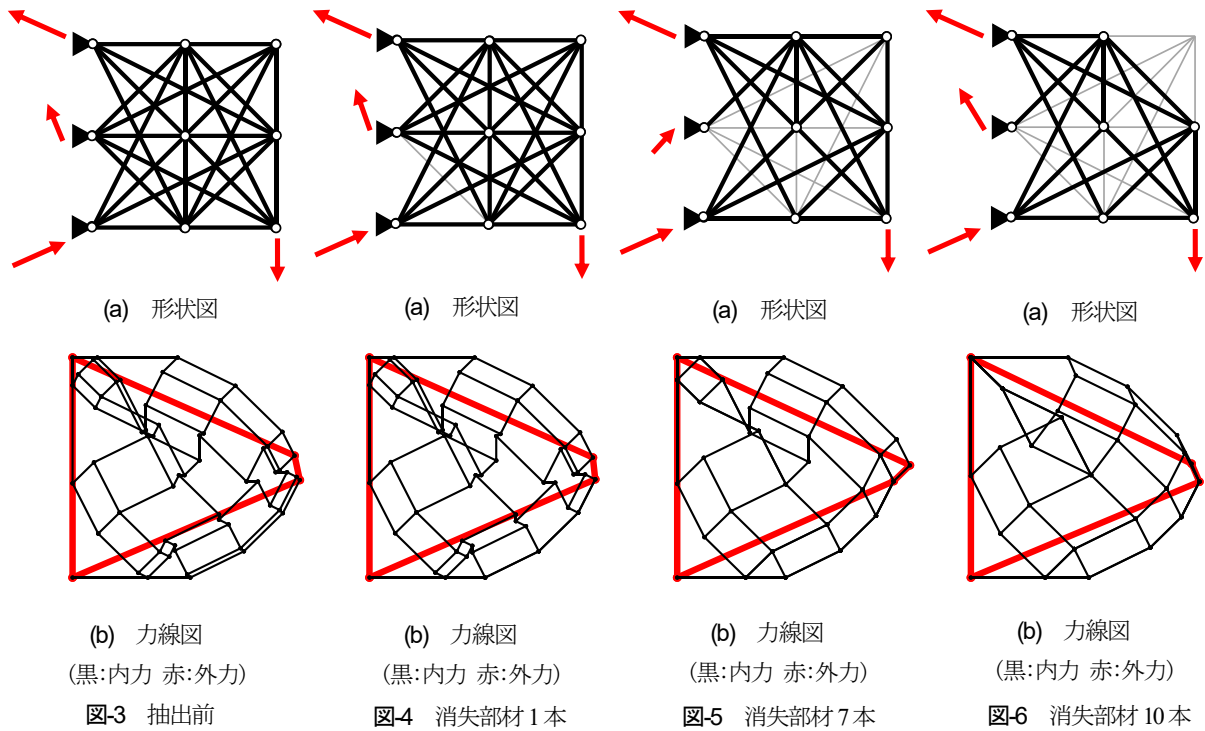
構造の「力学的骨格」と定義する。ここで、耐荷メカニズムに対して影響の大きい部材とは、もし消失すれば他の部材が負担する軸力を大きく変化させる、又は軸力の圧縮引張を反転させる部材のことを指す。つまり、力学的骨格の構成部材の消失は、耐荷メカニズムへ大きな影響を与えるため、力線図の形状変化も顕著となる。一方、力学的骨格でない部材の消失は、耐荷メカニズムへあまり影響を与えないため、力線図の形状変化は小さいと考えられる。本研究ではこの性質を利用して力学的骨格の抽出を行うこととする。なお、抽出された力学的骨格は、一般的には不安定構造とみなされる可能性がある。これは、最終的に得られる力学的骨格が、特定の荷重下においてのみ成立する構造であればよいためである。

また、力学的骨格は特定の荷重作用下における構造全体の耐荷メカニズムに対して影響の大きい部材の集合である。そのため、特定の荷重作用下に対する構造全体の耐荷性能を照査する場合には、力学的骨格の構成部材に対してのみ照査すればよいと考えられる。

b) 力学的骨格の抽出方法

本項では、図-2の不静定トラスを例に力学的骨格の抽出手順を示す。対象構造は、左端の3点を固定支承とし、部材のヤング率や断面積は全て同じとした。荷重は、図-2で示すように右端下部の節点に鉛直下方向に加えた。

まず、構造全体のうち軸力の絶対値が最小となる部材を消失させる。もし、その部材が消失しても、構造全体が現在考慮している荷重条件に対して不安定にならず、かつ他の構成部材の圧縮引張が反転しなければ、対象構造から着目部材を消去する。そして、着目部材を消去した構造について再度解析を行い、同様の手順にて部材消去を繰り返す。例では、図-3(a)の構造において軸力が最小である部材は、図-4(a)にて灰色で示す部材である。着目部材は消去されても、不安定構造にはならず、かつ他の構成部材の圧縮引張は反転しなかったため、図-4(a)にて示す構造に対して上記の手順を繰り返す。もし、部材消去により不安定構造になる、或いは他の構成部材で圧縮引張の反転が発生すれば、着目部材は消去せず、着目部材の次に軸力の絶対値が小さい部材を消失させ、構造が不安定化しないことと他の部材で圧縮引張反転しないことが確認できるまで、この操作を繰り返す。そして、部材消去が不可能になるまでこの手順を繰り返し、最終構造に至るまでに示された構造形式が力学的骨格の候補となる。例示する構造では、図-4(a)から図-9(a)で示した構造が抽出過程の構造形式の一部であり、図-10(a)で示した構造形式が最終構造となる。なお、図-10(a)にて示す構造は、一般的には不安定と見なされる構造である。これは2.(3) a)で示したように、力学的骨格が特定の荷重に対して成立する構造であればよいためである。



c) 力学的骨格の選定

図-2にて示す構造に対して、設計基準外事象への対策を目的とした力学的骨格の選定方法について述べる。その際、対象構造は既に設計基準事象に対して合理的に設計された構造であると仮定する。力学的骨格を選定する際は、3.(3)a)にて述べた、力学的骨格の構成部材が消失すると力線図の形状が大きく変化するという特徴を利用

する。具体的には、着目部材の消去前後で力線図の形状変化に注目した際に、形状変化が大きければ耐荷メカニズムが大きく変化すると判断し、着目部材の消去前での構造を力学的骨格と選定する。ここで、力線図の形状変化の許容範囲については、設計者や設計方針に委ねられる。ここで、対象構造(図-3(a))から最終的に特定される構造(図-10(a))に至る過程にて抽出される各構造の力線図

を、それぞれ図-3(b)から図-10(b)に示す。但し、力線図中の赤線は外力を、黒線は部材軸力を示しており、以後同様の表示を用いる。

例えば、図-7(b)の力線図は元の構造の力線図(図-3(b))と類似していると判定し、図-8(b)の力線図は元の構造の力線図(図-3(b))と類似していないと判定した場合、設計者が選定した力学的骨格は図-7(a)の構造となる。一方、力線図の形状変化度合の許容範囲は設計者や設計方針により選定基準によっては、図-8(b)の力線図は元の構造の力線図(図-3(b))と類似していると判定しても構わない。そして、最終的に選定された力学的骨格に対し、必要な補強を行うことで、力学的骨格のみで特定の荷重条件に対する最低限の性能を発揮できる構造が実現でき、不静定トラス構造の危機耐性を合理的に向上させることが可能となる。

なお、力学的骨格の構成部材は耐荷メカニズムへの寄与が大きい部材であることから、設計基準事象に対する構造最適化へ適用できる可能性があると考ええる。これは、図-2にて示す構造が設計基準事象に対して最適化される前の構造であった場合、図-10(a)にて示す構造が、与えた外力に対する最適構造であると考え、構造最適化につなげることができるためである。

d) 単径間複斜材トラスに対する力学的骨格の選定例

本検討では、既往の研究¹⁹⁾を参考に図-11で示す単径間複斜材トラスに対し、設計基準外事象への対策を目的とした本手法の適用例を示す。対象構造の部材断面は表-1に示すとおりであり、Node2は固定支承、Node18は移動支承である。また、解析の際は、トラス構造の節点は全てヒンジでモデル化し、鋼材のヤング率は 2.0×10^5 N/mm²、鋼材の質量を 7.75 t/m^3 として、全ての部材の自重の合計 66.96 t を死荷重とした。その際、各部材の断面積を考慮し、Node2からNode18の偶数番号の節点に相応の荷重を載荷した。各節点に載荷した荷重は表-2に示す。そして、図-11の形状図と力線図をそれぞれ図-12(a)(b)に示す。

選定された力学的骨格を図-13(a)に示す。また、力学的骨格の力線図を図-13(b)に示す。選定された力学的骨格は、元の構造から9の部材が消失した構造であり、元の構造の力線図と力学的骨格の力線図を比較した結果、両図には大きな差がないことがわかる。また、抽出過程で、部材の引張圧縮が反転することなかったため、図-13(a)にて示される構造を力学的骨格と選定した。

また、対象構造から図-14(a)にて、灰色で示す中央付近の上弦材(O4)を消去した構造の力線図を描くと図-14(b)となる。元の不静定トラス構造の力線図と比較すると、図形が大きく変化したことが確認できる。このことから、消去した上弦材は力学的骨格を構成する部材であることがわかる。

(4) 連続トラス橋梁の危機耐性構造計画手法の手順

本項では、図式力学を用いたトラス橋梁に対する危機耐性構造計画手法を提案する。以下に本提案手法の手順を示す。

a) 手順1：ロバストネスインデックスを算出して、キーエレメントを特定する

部材消失や支承消失によるロバストネスインデックス ρ_c は、ある荷重条件に対するその部材の重要性を示すと考えられ、その値が0に近いほど、その部材の重要度が高いことを意味する。本研究では、式(1)に示す ρ_c の値を基にキーエレメントとなる部材や支承を定義する。そこで、本手法ではまず、トラス橋梁を構成する全部材・全支承のロバストネスインデックス ρ_c を算出し、キーエレメントを特定する。

b) 手順2：キーエレメントを消去した構造に死荷重が作用した際の力線図を描く

手順1で特定したキーエレメントが消失する状況は、トラス橋梁の死荷重支持性能を維持する上で、危機的な状況であるといえる。そこで、キーエレメントを消去した構造に死荷重が作用したときの各部材の軸力を数値解析で算出し、その結果を元に死荷重作用下における対象構造の力線図を描く。その際、構造計画段階では各部材の詳細な情報が確定していないことを考慮し、線形解析により、各部材の軸力を算出する。

なお、本提案手法でキーエレメントでない部材や支承が損傷を受けた場合では、構造全体の耐荷メカニズムへの影響は小さく、落橋に至る可能性は低いと考え、キーエレメント以外の損傷については検討しないこととした。

しかし、キーエレメントを1つであると仮定する必要はなく、近接複数部材の損傷を危機として想定する場合は、キーエレメントが複数あると仮定すればよい。

c) 手順3：キーエレメントを消失した状態での死荷重作用時の対象構造における力学的骨格を抽出する

本手法では、キーエレメントが消失した状態で死荷重が支持できる構造の概算を目的としているが、例えば、手順2での結果を元に、許容応力度以上の応力が発生している全部材を補強すると、「キーエレメントが消失したとしても全ての構造部材に損傷が発生しない」ことを目指すこととなり、不静定構造物の補強法としては、コスト面から考えて過度な対策となってしまう。そこで、本手法では手順2での解析結果において、許容応力度以上の応力が発生している全部材を補強するのではなく、3.(3)で述べた力学的骨格を構成する部材が確実に機能することを確認し、必要に応じて補強を行う。そこで手順3では、キーエレメントが消失した状態での、対象構造の死荷重に対する力学的骨格を抽出する。

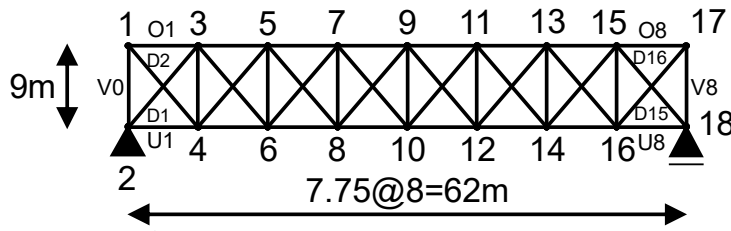


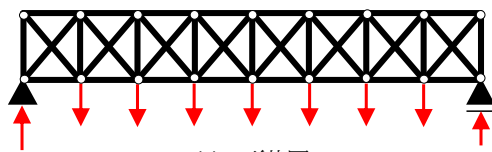
図-11 適応対象となる単径間複斜材トラス

表-2 各節点にかかる荷重

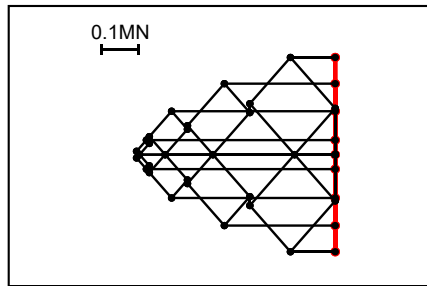
Node	荷重(kg)	Node	荷重(kg)	Node	荷重(kg)
Node2	5336.91	Node8	8365.98	Node14	7990.12
Node4	7590.64	Node10	8393.08	Node16	7590.64
Node6	7990.12	Node12	8365.98	Node18	5336.91

表-1 対象構造の各部材断面積

	部材名	断面積(mm ²)
上弦材 (O)	O1,O8	2.51×10 ⁴
	O2,O7	3.41×10 ⁴
	O3,O6	4.42×10 ⁴
	O4,O5	5.06×10 ⁴
下弦材 (U)	U1,U8	2.68×10 ⁴
	U2,U7	3.06×10 ⁴
	U3,U6	4.47×10 ⁴
	U4,U5	4.92×10 ⁴
鉛直材 (V)	V0,V8	2.58×10 ⁴
	V1-V7	7.20×10 ³
斜材 (D)	D1,D2,D15,D16	2.07×10 ⁴
	D3,D4,D13,D14	1.71×10 ⁴
	D5,D6,D11,D12	1.29×10 ⁴
	D7,D8,D9,D10	9.72×10 ³

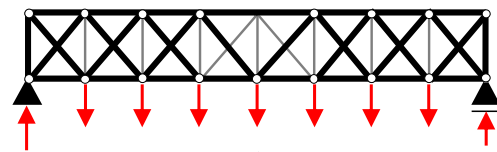


(a) 形状図

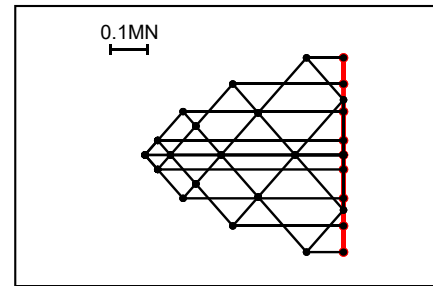


(b) 力線図(黒:内力 赤:外力)

図-12 単径間複斜材トラスに対する図式力学



(a) 形状図



(b) 力線図(黒:内力 赤:外力)

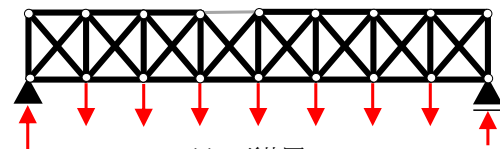
図-13 単径間複斜材トラスの力学的骨格に対する図式力学

- d) 手順 4: 力学的骨格を構成する各部材に生じている応力と許容応力度を比較し、対策を講じる

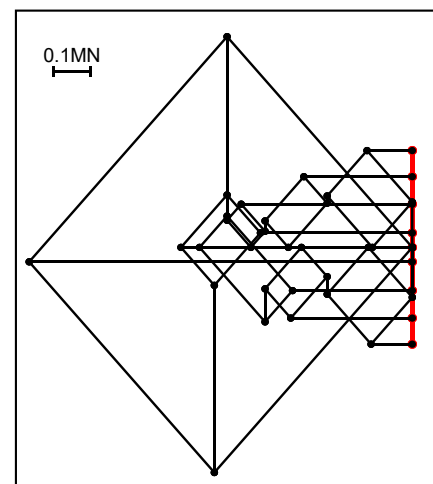
力学的骨格を構成する各部材に生じている応力と許容応力度を比較する。そして、部材に生じている応力が許容応力度を超えている場合は対策を講じる。その際、許容応力度を超えている部材の断面積の増大や、新たな部材の追加、構造形式の変更など、状況に応じた適切な対策を講じる。

- e) 手順5: 補強後の構造に対して数値解析を実施し、補強効果を確認する

補強後の構造に対し、手順2と同様の数値解析を行って対象構造の力線図を描くとともに、各部材に発生している応力と許容応力度を比較することで、手順4における補強の効果を確認する。もし、補強後、発生している応力が許容応力度内に収まっていない部材がある場合は、再度対策を講じる。この手順を力学的骨格を構成する全部材の応力が許容応力度内に収まるまで繰り返す。



(a) 形状図



(b) 力線図(黒:内力 赤:外力)

図-14 上弦材(部材 O4)を消去した構造に対する図式力学

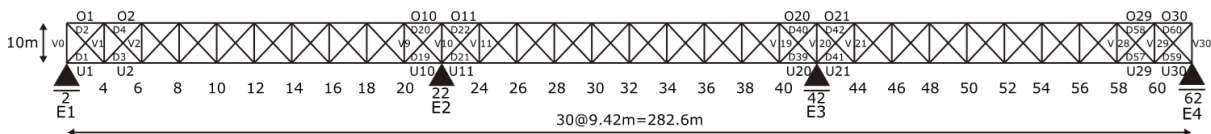


図-15 解析対象となる3径間複斜材式トラス

表-3 各節点にかかる荷重

Node	荷重(kg)	Node	荷重(kg)	Node	荷重(kg)
Node2	9840.31	Node24	13748.19	Node44	22370.811
Node4	20289.721	Node26	12214.69	Node46	20774.631
Node6	20602.141	Node28	11662.1	Node48	21065.601
Node8	21427.721	Node30	11481.66	Node50	21909.041
Node10	21963.641	Node32	10974.28	Node52	22067.171
Node12	22067.171	Node34	11481.66	Node54	21963.641
Node14	21909.041	Node36	11662.1	Node56	14360.32
Node16	21065.601	Node38	12214.69	Node58	13534.74
Node18	20774.631	Node40	13748.19	Node60	13222.32
Node20	22370.811	Node42	24933.14	Node62	9840.31
Node22	24933.14				

表-4 対象橋梁の各部材材断面積

	部材名	断面積(mm ²)
上弦材 (O)	1,2,8-14,17,23,29,30	5.48×10 ⁴
	15,16	5.77×10 ⁴
	3,28	6.44×10 ⁴
	7,24	6.93×10 ⁴
	6,25	7.56×10 ⁴
	4,5,26,27	8.01×10 ⁴
下弦材 (U)	1,9,13,18,22,30	4.01×10 ⁴
	12,19	4.09×10 ⁴
	14,17	4.26×10 ⁴
	8,23	4.38×10 ⁴
	2,15,16,29	4.98×10 ⁴
	10,21	5.52×10 ⁴
	11,20	6.11×10 ⁴
	7,24	6.27×10 ⁴
	3,28	6.69×10 ⁴
	6,25	7.24×10 ⁴
鉛直材 (V)	1-9,11-19,21-29	1.54×10 ⁴
	0,30	4.85×10 ⁴
	10,20	1.32×10 ⁵
斜材 (D)	7-10,51-54	9.71×10 ³
	29-32	1.11×10 ⁴
	11,12,49,50	1.33×10 ⁴
	5,6,27,28,33,34,55,56	1.39×10 ⁴
	13,14,25,26,35,36,47,48	1.71×10 ⁴
	4,24,37,57	1.93×10 ⁴
	3,23,38,58	1.99×10 ⁴
	17,26	2.23×10 ⁴
	1,16,45,60	2.25×10 ⁴
	22,39	2.40×10 ⁴
	2,21,40,59	2.43×10 ⁴
	17,18,43,44	2.71×10 ⁴
	19,42	3.33×10 ⁴
	20,41	3.33×10 ⁴

4. 提案手法の適用例

(1) 対象構造及び解析条件

本検討の対象構造は、既往の研究^{8),16)-18)}を参考に図-15で示す3径間複斜材トラスとする。この構造は、過去に爆撃による局所的な損傷を想定し、内的不静定性を高めた構造として提案されており、鷹部屋^{16),17)}が対象構造の耐爆性について定性的な評価を行っている。また、高橋ら¹⁸⁾も、対象構造の架設条件を整理しつつ、実際の被害を踏まえた耐弾性能について検証している。この構造は損傷を前提としている点で、危機耐性に通ずると考え、そこで本研究においても、この3径間複斜材トラスを検討対象に選定した。

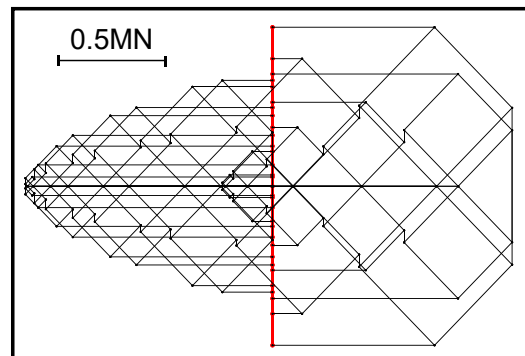
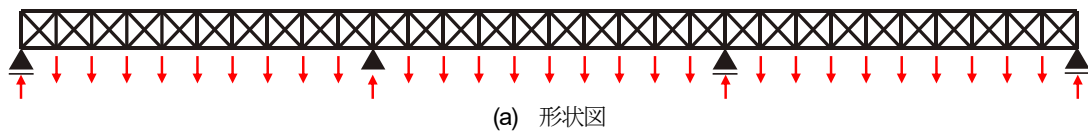
次に解析条件を示す。トラス構造の節点は全てヒンジとしてモデル化し、鋼材のヤング率は 2.0×10^5 N/mm²、鋼材の質量を 7.75 t/m³として、全ての部材の自重の合計 436.46 tを死荷重とした。その際、各部材の断面積を考慮し、Node2からNode62の偶数番号の節点に相応の荷重を載荷した。各節点に載荷した荷重は表-3に示す。また、対象構造の部材断面は表-4に示す通りであり、Node22は固定支承、Node2とNode42とNode62は移動支承である。そして、構造形式や荷重条件を基に、対象構造の図式力学を描くと、図-16に示すとおりになる。また、許容引張応力度は 117.72 N/mm²、許容圧縮応力度は表-5に示す。表中で※で表示している箇所は、既往の研究⁹⁾から値を得られなかった箇所である。

(2) ロバストネスインデックスによるキーエレメントの特定

式(1)によるロバストネスインデックスの算出結果を図-17に示す。縦軸がロバストネスインデックス ρ_c 、横軸が節点の番号を示しており、部材や支承の大まかな位置を示している。

まず、対象構造の部材配置は左右対称であるにも関わらず、計算結果は非対称になっている。これは、Node22が固定支承、Node2とNode42とNode62が移動支承であり、拘束条件が非対称であるためである。

図より、部材においては側径間に位置する上弦材・下弦材や中央径間に位置する上弦材・下弦材のロバストネスインデックス ρ_c が比較的小さいことがわかる。



(b) 力線図(死荷重作用下)

図-16 健全時の図式力学

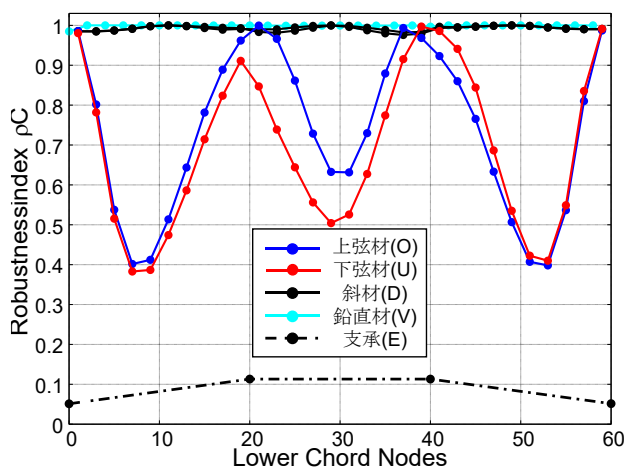


図-17 剛性マトリクスによるロバストネスインデックス

(3) 部材消失に対する適用例

本節では、部材消失に対する適用例として、中央径間の中央部に位置する部材 U15 をキーエレメントとしたケース 1、側径間の中央部に位置する部材 U5 をキーエレメントとしたケース 2 の計 2 ケースについて検討を行った。

また、図-17を見ると、支承のロバストネスインデックス ρ_c は、部材のロバストネスインデックス ρ_c と比較して、明らかに小さいことがわかる。構造物の建設地点付近に断層が存在している場合、支承 E1 の損傷は考慮すべき事象であると考えられる。よって本検討では、支承消失に対する適用例として、支承 E1 消失に対する検討を併せて行う。

a) ケース1(部材U15消失時)の適用結果

対象構造から部材 U15 が消失した際の、図式力学における形状図を図-18(a)に、力線図を図-18(b)に示す。図-18(a)の構造から力学的骨格を抽出すると、最終的には図-19(a)に示す構造に至る。この構造は、元の構造から 33 の部材が消失した構造であり、解析上、更に部材を

表-5 各部材の許容圧縮応力度

	部材名	許容圧縮応力度(N/mm ²)
上弦材 (O)	1,2,8-14,17-23,29,30	-112.95
	15,16	-113.18
	3,28	※
	7,24	※
	6,25	※
下弦材 (U)	4,5,26,27	-112.26
	1,9,13,18,22,30	-112.88
	12,19	-112.90
	14,17	※
	8,23	-112.97
	2,15,16,29	-112.56
	10,21	-112.40
	11,20	-112.67
	7,24	※
	3,28	※
	6,25	※
	4,27	※
鉛直材 (V)	5,26	-112.10
	1-9,11-19,21-29	※
	0,30	※
斜材 (D)	10,20	-108.50
	7-10,51-54	-94.87
	29-32	-94.91
	11,12,49,50	※
	5,6,27,28,33,34,55,56	※
	13,14,25,26,35,36,47,48	-100.76
	4,24,37,57	-98.56
	3,23,38,58	-98.34
	17,26	-97.50
	1,16,45,60	-99.46
	22,39	-99.26
	2,21,40,59	-98.19
	17,18,43,44	-100.60
	19,42	-100.19
	20,41	-99.63

消去することはできなかった。本検討では、図-19(b)に示す力線図が図-18(b)に示す力線図と類似していると判断したため、この構造を力学的骨格と選定した。そして、

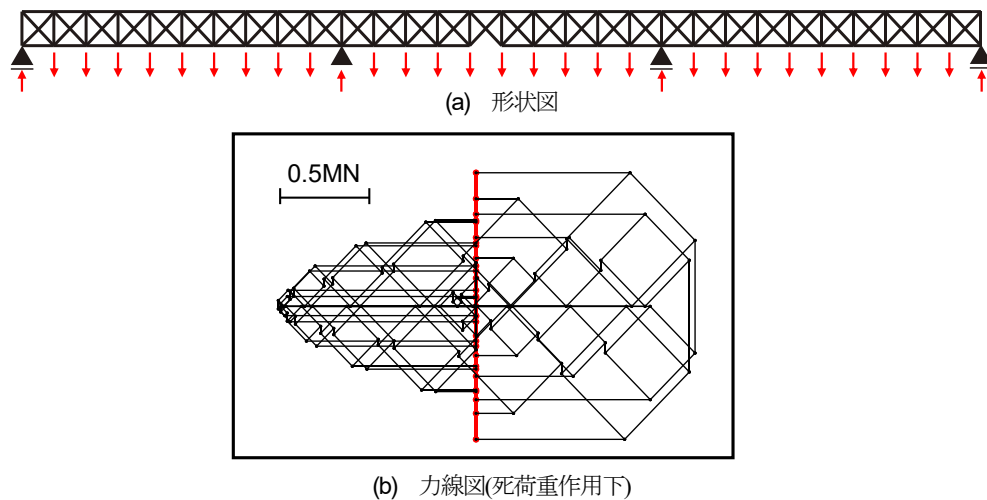


図-18 部材 U15 が消失した構造の図式力学

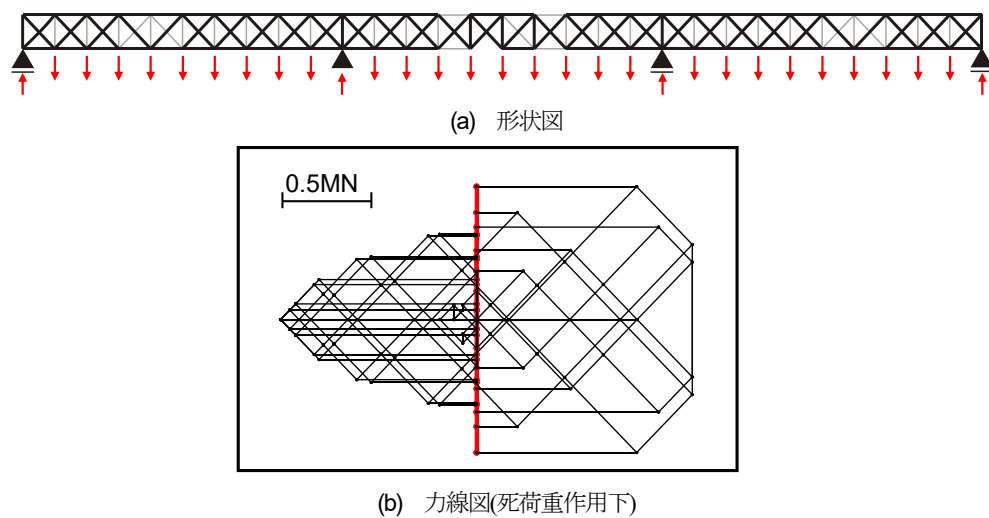


図-19 ケース 1(部材 U15 消失時)で選定された力学的骨格の図式力学

選定された力学的骨格を構成する各部材に生じている応力と許容応力度を比較した結果、全部材で許容応力度の範囲内に収まっていることが確認された。

なお、本検討ケースでは図-16(b)と図-18(b)を比較すると、部材U15がキーエレメントであるにも関わらず、部材消失前後で力線図の形状に大きな変化が生じていないことがわかる。これは、側径間に作用する荷重が中央構造にとってのカウンターウェイトとなり、着目部材の消失による構造全体への耐荷メカニズムに対する影響を小さくしているためと考えられる。事実、鷹部屋^{16,17)}による検討においても、中央径間に位置する部材が損傷しても、側径間部がカウンターウェイトとして作用することで、中央径間部の墜落が防止されていることが定性的に示されている。本提案手法により、この鷹部屋の主張が定量的に表現されたといえる。

b) ケース2(部材U5消失時)の適用結果

対象構造から部材U5が消失した際の、図式力学における形状図を図-20(a)に、力線図を図-20(b)に示す。図-20(a)の構造から力学的骨格を抽出すると、最終的には

図-21(a)に示す構造に至る。この構造は、元の構造から34の部材が消失した構造であり、解析上、更に部材を消去することはできなかった。本検討では、図-20(b)に示す力線図が図-21(b)に示す力線図と類似しているため、この構造を力学的骨格と選定した。そして、選定された力学的骨格を構成する各部材に生じている応力と許容応力度を比較した結果、ケース2でも全部材で許容応力度の範囲内に収まっていることが確認された。

なお、部材U5の消失前後の力線図(図-16(b)と図-20(b))を比較すると、部材消失前後で力線図の形状が大きく変化していることがわかる。これは、側径間に位置する下弦材が消失すれば構造全体の耐荷メカニズムが大きく変化すること、つまりケース1で確認されたカウンターウェイトのような作用が、ケース2では生じていないことを示している。

c) まとめ

以上より、対象とした3径間複斜材トラス橋梁は、部材の中で重要度が大きい部材U15や部材U5が消失したとしても、最低限死荷重を支持できる構造であることが示

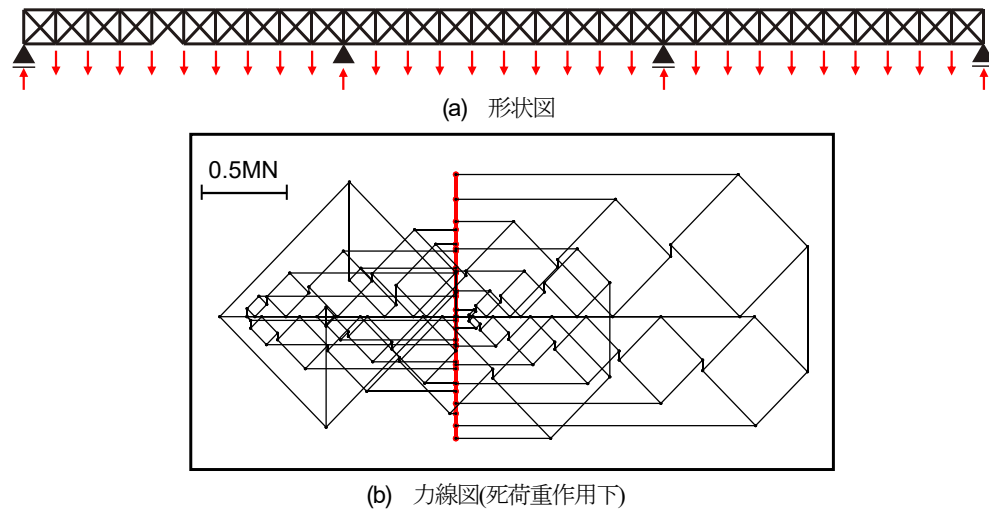


図-20 部材 U5 が消失した構造の図式力学

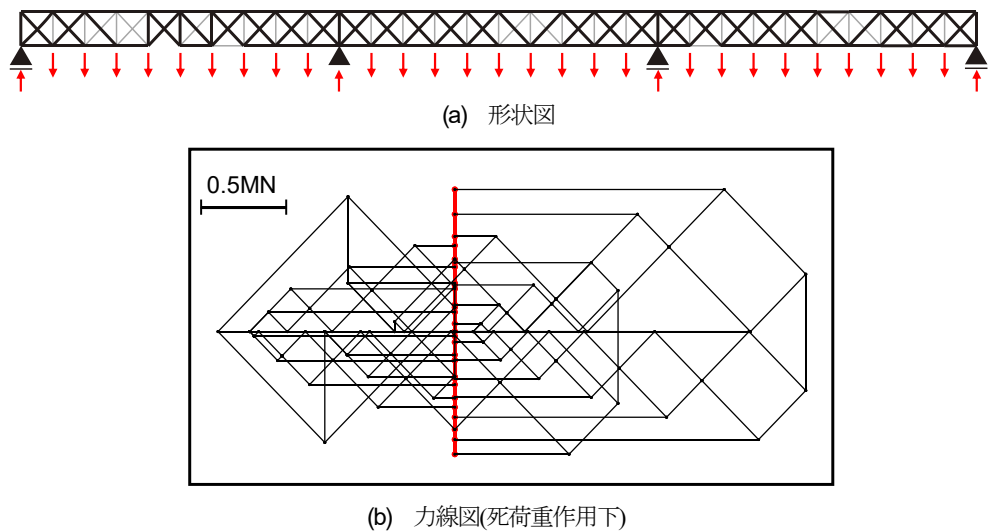


図-21 ケース 2 (部材 U5 消失時) で選定された力学的骨格の図式力学

されたといえる．このように，本手法を適用することで，設計基準外である特定のシナリオに対して，構造物が提供できる機能を計画段階で明示化することが可能となる．

(4) 支承消失に対する適用例

a) ケース3 (支承E1消失時)の適用結果

対象構造から支承E1が消失した際の，図式力学における形状図を図-22(a)に，力線図を図-22(b)に示す．図-22(a)の構造から力学的骨格を抽出すると，最終的には図-23(a)に示す構造に至る．この構造は，元の構造から34の部材が消失した構造であり，解析上，更に部材を消去することはできなかった．本検討では，図-23(b)に示す力線図が図-22(b)に示す力線図と類似していると判断したため，この構造を力学的骨格と選定した．

しかしながら，そもそも支承消失が橋梁に対して大きな影響を与えることは自明であり，一見すると対策の余地がないように見える．ここで，健全時の構造に対して死荷重と活荷重が作用した場合の図式力学における力線

図を図-24(b)に示す．その際，活荷重は既往の研究¹⁵⁾より7.5t/mとし，死荷重同様，Node2からNode62の偶数番号の節点に相応の荷重を載荷した．図-22(b)と図-24(b)とを比較すると，両図のスケールは極端に異なるわけではないことがわかる．これは，支承E1が消失した構造に対して死荷重のみが作用する場合の要素の部材と，健全時の構造に死荷重+活荷重が作用する場合の要素の部材力の大きさが同程度のレベルであることを意味する．故に，死荷重+活荷重作用下での構造物の成立性が保証されることを考慮すると，支承E1消失に対する落橋防止策では，一部部材についてのみの対策で済むと判断でき，コスト面でも現実的な範囲で対応できる可能性が高いと言える．実際，選定された力学的骨格を構成する各部材に生じている応力と許容応力度を比較すると，許容応力度を超える応力が発生していることが確認された部材は，部材U9と部材U12のみであることが確認された．そこで次項にて，部材U9と部材U12に生じる応力を低減させるための対策を講じる．

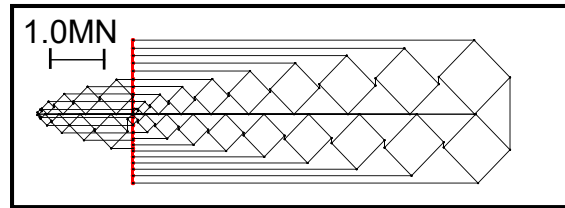
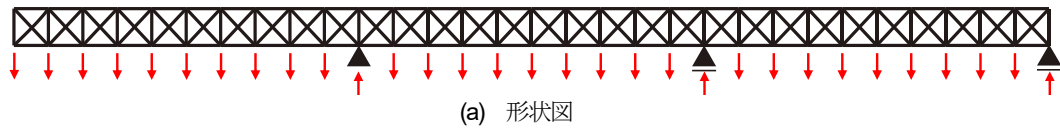


図-22 支承 E1 が消失した構造の図式力学

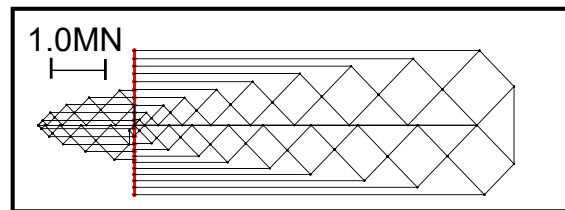
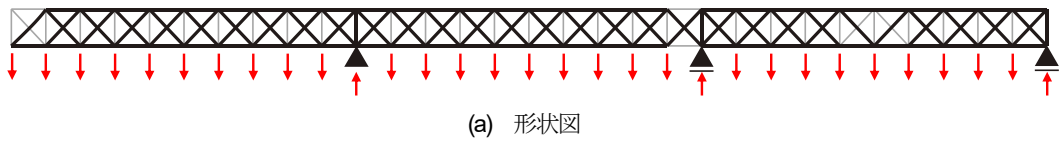


図-23 ケース 3(支承 E1 消失時)で選定された力学的骨格の図式力学

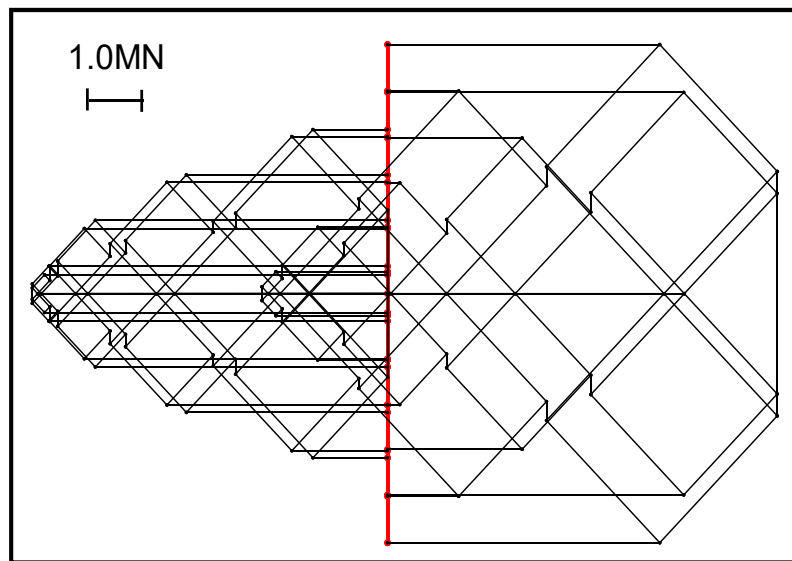
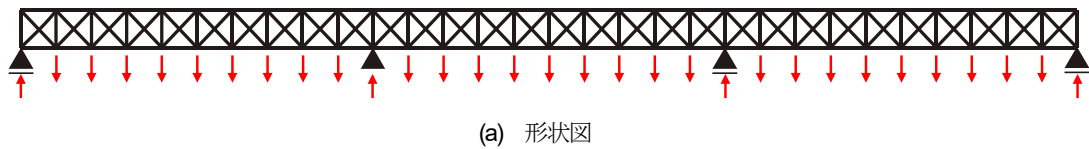


図-24 健全時の図式力学

b) 対策例

本項では、構造計画段階での検討であることを踏まえ、着目部材の断面積を増大させるといった容易に実施可能な対策だけではなく、新しい部材の追加や構造形式の変更とするといった設計段階では実施困難な対策を施すことを試みる。具体的には、着目部材の断面積を増大させる方法に加え、支承位置を変更する方法と元の構造に吊り弦材を追加する方法の3種類の対策を適用し、それぞれの効果を検討することとする。

まず、着目部材である部材U9と部材U12の断面積を増大させる方法について検討を行う。その際、元の断面積を、[部材に生じている応力/許容応力度]倍させた後に、再度線形解析を行い、力学的骨格を構成する全部材について許容応力度との比較を行う。もし、補強後も許容応力度を超過している部材が存在する場合、再度同様の手順を繰り返す。本検討では、4回の繰り返し計算を経て、部材U9とU12の断面積をそれぞれ8.6%と25.8%増加させた際に、力学的骨格を構成する全部材で許容応力度に収まることが確認された。3回目の補強後の力線図を図-25(b)に示す。部材U9を示す線分には緑で、部材U12を示す線分には青で着色している。補強前後で力線図を比較しても、形状変化を明確には確認できない。しかし、補強した部材の軸力は断面積の増加率と比較すると小さく、結果、応力は小さくなり、全部材で許容応力度内に収まる結果となった。

次に、支承の位置を変更する方法についての検討を行う。支承E2をNode22からNode20に移動させた場合(図-26(a))に対して検討を行った。橋梁構造における支承位置の変更も、構造設計段階では行うことができず、構造全体の詳細が未定である構造計画段階ならではの対策といえる。Node20に移動させた場合の力線図を図-26(b)に示す。まず、対策前の力線図(図-22(b))と支承E2をNode20に移動させた場合の力線図(図-26(b))を比較する。図より支承移動前の力線図と比較して、Node20への移動後の力線図は縮小したことが確認できる。ここで、部材の応力と許容応力度とを比較すると、力学的骨格を構成する全部材で許容応力の範囲内にあることが確認できた。

最後に、トラス構造に吊り弦材を追加する方法について検討を行う。Mya and Takahashiの研究⁹⁾で解析対象に用いられた鴨緑江橋梁を参考に、吊り弦材を追加する対策について検討する(図-27(a))。本検討で追加する吊り弦材は、実際の構造物において橋梁の耐弾性能の向上を期待して追加された構造であり、既往の研究^{8),16),18)}にてその補強効果が定性的に示されている。追加した吊り弦材は、4.(1)で示した鋼材と同様のものを用いることとし、吊り弦材の断面積は、主塔部分を $1.32 \times 10^6 \text{ mm}^2$ 、ケーブル部分を $5.13 \times 10^5 \text{ mm}^2$ 、ハンガー部分を $1.24 \times 10^4 \text{ mm}^2$ とした。また、この構造では吊り弦材の質量を考慮した荷重をか

けているが、その合計は、541.58tである。橋梁構造における新たな構造の導入は、構造設計段階では行うことができず、構造全体の詳細が決定していない構造計画段階ならではの対策であるといえる。図-27(b)に、吊り弦材を追加した構造の力線図を示す。対策前の力線図(図-22(b))と比較すると、吊り弦材を追加することで力線図の変化が小さくなっており、吊り弦材による効果が力線図上で確認できる。これは、支承消失による耐荷メカニズムへの影響波及を、吊り弦材が抑制しているということの意味する。実際、部材の応力と許容応力度とを比較すると、力学的骨格を構成する全部材で許容応力の範囲内にあることが確認できた。

5. まとめ

構造計画では、構造の大意が未定であることのために詳細な解析ができず、構造物の危機耐性を考慮した構造計画を行う場合、概算が重要となる。本研究では、連続トラス橋梁を例に線形解析を前提とした危機耐性構造計画手法を提案した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 本検討では、不静定トラス構造内で耐荷メカニズムへの影響が大きい部材の集合を「力学的骨格」と定義した。そして、図式力学における力線図を利用して、力学的骨格を選定する方法を示した。
- トラス構造全体の中で耐荷メカニズムへの影響が大きい部材の集合である「力学的骨格」を定義した。そして、最低限死荷重を支持することを目指し、力学的骨格の構成部材のみを補強すれば、危機耐性を考慮した合理的な構造が実現可能であることを示した。また、図式力学における力線図を形状変化を確認することで、抽出された構造形式から力学的骨格を選定する方法を示した。
- 本研究で提案した連続トラス橋梁の危機耐性評価手法の手順は以下の通りである。まず、対象のトラス構造を構成する各部材・各支承のロバストネスインデックスを計算することで、キーエレメントを特定する。そして、キーエレメントが消失した構造に対し、力学的骨格を選定する。そして、力学的骨格の構成部材の応力と許容応力度とを比較し、許容応力度を超過した部材があれば、力学的骨格の全構成部材の応力が許容応力度の範囲内に収まるように対策を施す。

提案手法の適用例を示し、キーエレメントが消失した構造物が崩壊しないための具体的な対策案を示した。その際、構造計画段階であることから、支承位置の変更や構造形式自体の変更といった自由度の高い対策を講じた。

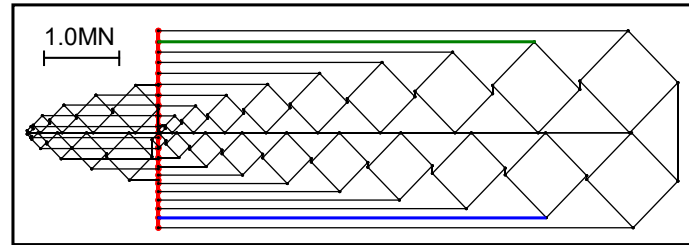


図-25 着目部材の断面積増大

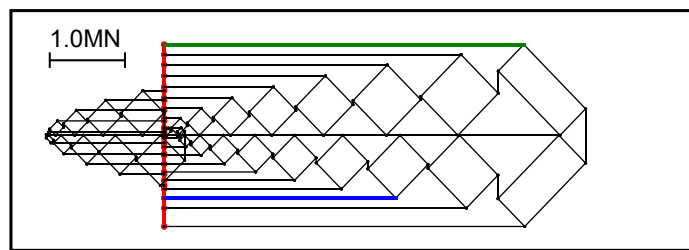


図-26 支承 E2 移動

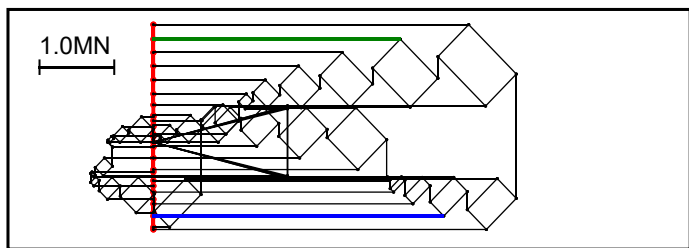


図-27 吊り弦材導入

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(A)21H04574の助成を受けて実施した。謝意を表します。

参考文献

- 1) 室野剛隆, 田中浩平, 齊藤正人, 坂井公俊, 豊岡亮洋：鉄道構造物の耐震設計における危機耐性の定量評価法の提案, 土木学会論文集 A1, Vol. 75, No. 3, pp. 336-349, 2019.
- 2) 土木学会：土木構造物共通示方書(構造計画編), 2016.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 共通編, 2017.
- 4) 永谷秀樹, 明石直光, 松田岳憲, 安田昌宏, 石井博典, 宮森雅之, 小幡泰弘, 平山博, 奥井義昭：我国の鋼トラス橋を対象としたリダンダンシー解析の検討, 土木学会論文集 A, Vol. 65, No. 2, pp. 410-425, 2009.
- 5) 梶田幸秀, 大塚久哲, 坂口和弘：損傷を有する下部式鋼製トラス橋の耐震性に関する基礎的検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 65, No. 1, pp. 317-324, 2009.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編, 2017.
- 7) Biondini, F. and Restelli, S.: Damage propagation and structural robustness, *Life-Cycle Civil Engineering*, Taylor & Francis Groups, 2008.
- 8) Mya, S. W. and Takahashi, Y.: Robustness evaluation of double diagonal ten panel three span continuous air-raid proof bridge, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake)*, Vol. 76, No. 4, pp. 1-320-1-336, 2020.
- 9) Maxwell, J. C.: On reciprocal figures and diagrams of forces, *Philos. Mag.*, Vol. 27, pp. 250-261, 1864.
- 10) 平野正雄：圖式力学, 丸善, 1916.
- 11) 大藤高彦, 近藤泰夫：構造強弱学 下巻, pp. 20-23, 1930.
- 12) Beghini, L. L., Carrion, J., Beghini, A., Mazure, A. and Baker, W. F.: Structural optimization using graphic statics, *Struct. Multidisc. Optim.*, Vol. 49, pp. 351-366, 2014.
- 13) Mele, T. V., Lachauer, L., Rippmann, M. and Block, P.: Geometry-based understanding of structures, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structure*, Vol.53, 2012.
- 14) Akbarzadeh, M., Mele, T. V. and Block, P.: On the equilibrium of funicular polyhedral frames and convex polyhedral force diagrams, *Computer-Aided Design*, Vol. 63, pp. 118-128, 2015.
- 15) 小田彌之亮：複斜材式構ノ應力, Vol. 1, 丸善, 1941.
- 16) 鷹部屋福平：耐弾性新型長大径間の橋梁に就て, 土木学会誌, Vol. 27, No. 10, pp. 889-895, 1941.
- 17) 鷹部屋福平：時局と構造物一特に「橋」, 土木雑誌, Vol. 2, No. 9, pp. 3-9, 1941.
- 18) 高橋良和, 小嶋進太郎, Mya, S. W.: 朝鮮総督府鉄道局による複斜材型トラス橋梁の開発と耐弾性能, 土木学会論文集 D2 (土木史), Vol. 76, No. 1, pp. 16-31, 2020.

(Received October 25, 2021)

(Accepted March 2, 2022)

ANTI-CATASTROPHE PERFORMANCE ORIENTED STRUCTURAL PLANNING OF CONTINUOUS TRUSS BRIDGES BASED ON MECHANICAL SKELETON

Kazuki NOMURA, Keita UEMURA and Yoshikazu TAKAHASHI

When constructing civil structures, it is said that anti-catastrophe performance should be taken into account at the stage of structural planning. However, a structural planning for anti-catastrophe performance has not been established. Therefore, in this paper, we propose an anti-catastrophe performance structural planning for a continuous truss bridge. In the proposed method, firstly, we identify the most important elements of the bridge structure by the robustness index. Secondly, the mechanical skeleton, which is a set of components that have a large impact on the load-bearing mechanism, is selected for the structure lacking the identified most important elements by using graphic statics. Thirdly, the load-bearing capacity of the structure is then verified by comparing the stresses in the components of the key structure with the allowable stresses. If any member exceeds the allowable stress, we take measures in order to keep the stresses of all the members of the key structure within the allowable stress. This method clarifies the load carrying capacity of a continuous truss bridge under non-standard design situations and enables the structural planning for anti-catastrophe performance.