

学位論文要旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	鋼トラス橋を対象としたリダンダンシーの解析評価と向上方法に関する研究(Study on Analytical Evaluation and Improvement Method for Redundancy of Steel Truss Bridges)
氏名(Name)	田島 啓司
<p>長支間に対応できる橋梁構造のひとつである鋼トラス橋は、本土と離島を結ぶ離島架橋として広く使用されている。このような鋼トラス橋は架橋場所が海上となることから、飛来塩分の影響による厳しい腐食環境にさらされることに加え、異常を発見するための点検が容易でない箇所が多いため、部材損傷のリスクを排除することが一般的な橋梁より困難な状況にある。一方、離島架橋はいったん建設されると離島の生活に欠かせない設備となるため、島にアクセスする陸上経路がほかに整備されていない場合、離島架橋の維持は離島の生活の維持に直結する重要な課題となる。鋼トラス橋に部材損傷が生じた場合、連鎖的な損傷に発展するかまたは限定的な損傷に止まるかは、耐荷力や荷重支持に対する余裕を意味するリダンダンシー（冗長性）に左右される。リダンダンシーを有する橋梁は部材損傷が生じても連鎖的な損傷に発展せず限定的な損傷に止まるため、補修による復旧が可能となり場合によっては交通制限をしたうえでの車両の通行が可能となる。リダンダンシーは代替の交通経路を有さない離島の生活を維持するための重要な橋梁の性能であるが、離島架橋に使用される長大鋼トラス橋を対象としたリダンダンシーの評価や向上方法に関する研究の事例は少ない。</p> <p>本研究は長大鋼トラス橋を対象としたリダンダンシーの向上方法の提案を目的とし、この目的を達成するために3つの研究課題を設定した。1つめは鋼トラス橋のリダンダンシーを適切に評価するための研究課題で、トラス格点部のモデル化がリダンダンシー評価に与える影響の調査である。2つめも鋼トラス橋のリダンダンシー評価に関する研究課題で、多自由度系の振動体である鋼トラス橋の振動特性を考慮した動的応答の計算方法の開発である。3つめは長大鋼トラス橋のリダンダンシーを向上させる具体的な方法の提案である。本論文は5つの章で構成される。</p> <p>第1章の序論では、研究の背景、目的と研究課題の設定および既往の研究について述べた。</p> <p>第2章では、トラス格点部のモデル化に関する検討を述べた。部材損傷がない健全な状態の鋼トラス橋を対象とする解析では、トラス部材のフレーム要素同士をトラス格点部で単純に剛結合とした解析モデルを使用しても断面力を適切に計算できるが、部材損傷がある鋼トラス橋を対象とするリダンダンシー解析においては、格点部のガセットプレートの形状を解析モデルに反映する必要があることを示した。</p> <p>第3章では、トラス部材の破断によって生じる振動の動的応答の計算方法に関する検討を述べた。本研究では離島架橋として使用されている長大鋼トラス橋に適用できる計算方法を提案した。部材損傷の振動による動的応答を1自由度系の振動体と同じ取り扱いによって計算する事例もみられるが、部材損傷を有する鋼トラス橋の固有ベクトルを用いることによって、長大鋼トラス橋の振動特性を反映した動的応答の計算方法を開発した。この際、部材損傷によって除荷される損傷部材の断面力が鋼トラス橋に与える仕事量と鋼トラス橋に蓄えられるひずみエネルギーのつり合い式によって、動的応答を表す固有ベクトルの大きさを決定する手法を考案した。また、累積有効質量比を指標として振動</p>	

様式7号(第12条,第31条関係)

(様式7号)(Format No.7) 英語版

モードの範囲を設定し,各部材の動的応答に最も影響を与える固有ベクトルを部材ごとに選択して動的応答を計算する手法を考案した.提案した計算方法は,1自由度系の振動体と同じ取り扱いによって動的応答を計算する方法よりも時刻歴応答解析に近いリダンダンシー評価を与えることを示した.

第4章では,第3章と同じ長大鋼トラス橋を対象としたリダンダンシーの向上に関する検討を述べた.はじめにリダンダンシーの向上方法の方針を検討するために,対象橋梁のリダンダンシーを2つの視点から評価した.この評価により,部材連鎖損傷のトリガーとなる部材に対して実施する対策と,耐荷力が不足する部材に対して実施する対策の両方を組み合わせる方針とした.部材連鎖損傷のトリガー部材への対策として,補強ブレースをX字型に設置した形状の補強構造であるXブレースが複数の部材損傷のパターンに機能する効率的な補強であることを解析で調査し,この補強構造を有する試験体の載荷試験によって耐荷力を検証した.対象橋梁はXブレースを配置できるトラスパネルを18箇所所有したため,18箇所に対する配置パターンを最適化手法によって検討した.この際,Xブレースに必要な補強材料の重量と耐荷力が不足する部材に施す部材断面の増加に必要な補強材料の重量の合計を評価指標として,合計重量を最小にする最適な配置パターンを求めた.18箇所のトラスパネル全てにXブレースを設置する全配置のパターンより,鋼トラス橋の交番部の4箇所のみを設置する配置パターンのほうが補強材料の重量を低減できることを明らかにした.

第5章では本研究のまとめと今後の展開を述べた.

(和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度)
(about 800 words)

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	鋼トラス橋を対象としたリダンダンシーの解析評価と向上方法に関する研究(Study on Analytical Evaluation and Improvement Method for Redundancy of Steel Truss Bridges)
氏 名(Name)	TAJIMA Keiji
<p>Steel truss bridges, which are one of the bridge structures applicable to long spans, are widely used as marine bridges connecting mainland and remote island. Since such steel truss bridges are built on the sea, they are exposed to severe corrosive environment due to the influence of airborne salt. In addition, there are many parts where it is not easy to inspect to detect abnormalities, so it is more difficult to eliminate the risk of member damage in such steel truss bridges than in general bridges. On the other hand, once the marine bridges are built, they become an indispensable facility for the life of the island. Therefore, if there are no other traffic routes to access an island, the sustainability of the marine bridge is an important issue that is directly linked to the sustainability of the remote island life. When member damage occurs in a steel truss bridge, it depends on redundancy, which means the margin for the load-bearing capacity and load-bearing function, whether the damage develops into chain damage or remains limited damage. Bridges with redundancy could be restored by repairing even if the member damages occurred, because they did not develop into chain damages. In some cases, vehicles could pass through with traffic restrictions. Although redundancy is an important performance for maintaining life on remote islands that have no alternative traffic routes, there are few studies on evaluation and improvement methods of redundancy for long steel truss bridges used for marine bridges.</p> <p>The purpose of this study is to propose a method for improving the redundancy of long steel truss bridges, and three research subjects are set to achieve this purpose. The first study subject is the investigation of the effect of truss joint modeling on redundancy evaluation, and is the subject to appropriately evaluate the redundancy of steel truss bridges. The second is also the subject related to the redundancy evaluation of steel truss bridges, and is the development of dynamic response calculation method that considers the vibration characteristics of steel truss bridges, which are vibration systems with multiple degrees of freedom. The third study subject is a proposal for methods to improve the redundancy of long steel truss bridges. This paper consists of five chapters.</p> <p>Chapter 1 is an introduction, and describes the background of the research, the setting of the purpose and research subjects, and the previous studies.</p> <p>Chapter 2 describes the study on the modeling of the truss joint. In the analysis of healthy steel truss bridges with no member damage, the sectional forces can be calculated appropriately even with analysis modeling in which frame elements of truss members are rigidly connected at the truss joints, simply. On the other hand, in the redundancy analysis of steel truss bridges with member damages, it is shown that it is necessary to consider the shape of the gusset plates at the truss joints in analysis modeling.</p> <p>Chapter 3 describes the study on the calculation method of dynamic response caused by damage of truss members. There are cases where the dynamic response due to member damage is calculated in the same way</p>	

as a single-degree-of-freedom vibration system. However, this study develops a dynamic response calculation method considering the vibration characteristics of long steel truss bridges by using the eigenvector of steel truss bridges with member damage. A method is proposed to set the magnitude of the eigenvector using balance equation of the work given to the steel truss bridge by the sectional force unloaded from damaged member and the strain energy stored in the steel truss bridge. In addition, a method is proposed to calculate the dynamic response by setting the range of vibration modes using the sum of effective mass ratio, and selecting the eigenvector that has the greatest effect on the dynamic response for each member. It is shown that the proposed calculation method gives redundancy evaluation closer to time-history-response analysis than the method that calculates the dynamic response in the same way as a single-degree-of-freedom vibration system.

Chapter 4 describes the study on redundancy improvement for a long steel truss bridge. A combination of the countermeasure against members that trigger chain damage and the countermeasure against members with insufficient load-bearing capacity is planned. Analysis clarifies that the X bracing, which is a reinforcing structure in X shape, is an efficient reinforcement that works against multiple member damage cases as the countermeasure against the trigger member of member chain damage. Also, the load-bearing capacity is verified by a loading test of specimens with reinforced structures. Since the subject bridge has 18 truss panels where X bracing can be installed, the placement patterns were examined by the optimization method. It is clarified that the weight of reinforcing material can be reduced by installing X-braces only at four truss panels in the alternating areas, rather than installing at all 18 truss panels.

Chapter 5 describes the summary of this study and future developments.

(様式 14 号)

学位論文審査の結果及び試験，試問の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	田 島 啓 司
審 査 委 員	主 査： 麻 生 稔 彦
	副 査： 中 村 秀 明
	副 査： 吉 武 勇
	副 査： 中 島 伸 一 郎
	副 査： 渡 邊 学 歩
論 文 題 目	鋼トラス橋を対象としたリダンダンシーの解析評価と向上方法に関する研究(Study on Analytical Evaluation and Improvement Method for Redundancy of Steel Truss Bridges)
<p>【論文審査の結果及び試験，試問の結果】</p> <p>橋梁のリダンダンシーを確保することは、橋梁の安全性および橋梁利用者の生活を維持する上で大変重要である。本論文では離島架橋に使用される長大トラス橋のリダンダンシーの向上を目的に、トラス格点部のモデル化がリダンダンシー解析に与える影響、リダンダンシー解析におけるトラス橋の振動特性を考慮した断面力の算出法、長大トラス橋のリダンダンシーを向上させるための補強方法について検討している。本論文は5章から構成されている。</p> <p>第1章では、研究の背景および目的と既往の研究について述べられている。</p> <p>第2章では、トラス格点部のモデル化に関する検討が述べられている。部材損傷がない健全な状態の鋼トラス橋を対象とする解析では、トラス部材のフレーム要素同士をトラス格点部で単純に剛結合とした解析モデルを使用しても断面力を適切に計算できるが、部材損傷がある鋼トラス橋を対象とするリダンダンシー解析においては、格点部のガセットプレートの形状を解析モデルに反映する必要があることを示した。</p> <p>第3章では、トラス部材の破断によって生じる部材力の動的応答の計算法に関する検討が述べられている。従来の評価法では部材損傷の振動による動的応答を1自由度系の振動体と同じ取り扱いによって算出されているが、部材損傷を有する鋼トラス橋の固有ベクトルを用いることによって、長大鋼トラス橋の振動特性を反映した動的応答の計算法を提案した。この手法では、部材損傷によって除荷される損傷部材の断面力が鋼トラス橋に与える仕事量と鋼トラス橋に蓄えられるひずみエネルギーのつり合い式によって、動的応答を表す固有ベクトルの大きさを決定する手法が考案されている。また、累積有効質量比を指標として振動モードの範囲を設定し、各部材の動的応答に最も影響を与える固有ベクトルを部材ごとに選択して動的応答を計算する手法が提案された。提案された計算法は、1自由度系の振動体と同じ取り扱いによって動的応答を計算する方法よりも時刻歴応答解析に近いリダンダンシー評価を与えることを示した。</p>	

(様式 14 号)

第4章では、長大鋼トラス橋を対象としたリダンダンシーを向上させる方法に関する検討が述べられている。リダンダンシーの向上方法の方針を検討するために、対象橋梁のリダンダンシーを2つの視点から評価した。この評価により、部材連鎖損傷のトリガーとなる部材に対して実施する対策と、耐荷力が不足する部材に対して実施する対策の両方を組み合わせる方法とした。部材連鎖損傷のトリガー部材への対策として、補強ブレースをX字型に設置した形状の補強構造であるXブレースが複数の部材損傷のパターンに機能する効率的な補強であることを解析で調査し、この補強構造を有する試験体の载荷試験によって耐荷力を検証した。対象橋梁はXブレースを配置できるトラスパネルを18箇所所有したため、18箇所に対する配置パターンを最適化手法によって検討した。この際、Xブレースに必要な補強材料の重量と耐荷力が不足する部材に施す部材断面の増加に必要な補強材料の重量の合計を評価指標として、合計重量を最小にする最適な配置パターンを求めた。18箇所のトラスパネル全てにXブレースを設置する全配置のパターンより、鋼トラス橋の交番部の4箇所にのみ設置する配置パターンのほうが補強材料の重量を低減できることを明らかにした。

第5章では本研究のまとめと今後の展望が述べられている。

公聴会には学内外より33名の参加があった。公聴会における主な質問内容は、対象橋梁のモデル化に関するもの、最適化プロセスに与える初期値の影響に関するもの、実務として解析・評価に必要な期間に関するもの、損傷部材の与え方に関するもの、などであった。いずれの質問に対しても発表者からの確かな回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士(工学)の論文に十分値するものと判断した。

試験および試問として、3名の副査から以下の内容の課題が課された。

1. 国内外のトラス橋の設計・施工・維持管理技術の変遷
2. 他のインフラ施設あるいはシステムに関する冗長性評価方法
3. 制約付き非線形最適化問題の解法について

これらの試問に対し、丁寧なレポート形式での解答がなされ、また口頭試問に対しても満足のいく回答がなされた。語学については英文論文3編が発表されており、その内容から判断して、十分な外国語能力を有するものと判断された。

論文内容および審査会、公聴会での試問応答など総合的に判断して、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記の通りである。(関連論文 計3編)

- 1) KEIJI TAJIMA, NAOYUKI OKA, KAZUAKI UCHIYAMA and TOSHIHIKO ASO, INFLUENCE OF MEMBER CONNECTION MODELING FOR REDUNDANCY ANALYSIS OF TRUSS BRIDGES, *Proceedings of 9th International Structural Engineering and Construction Conference*, St-31, 2017.
- 2) Keiji. Tajima, Hirokazu. Ishiguro, Toshihiko. Aso, Study on Redundancy Improvement for Truss Bridges Focusing on the Geometry and Placement Pattern of Additional Braces, *International Journal of Steel Structures* 21(4), pp.1145-1158, 2021.
- 3) Keiji Tajima, Ryuichi Inoue, Rina Hasuike, Toshihiko Aso, Calculation of Dynamic Response Using Eigenvectors in Redundancy Analysis of Truss Bridges, *Archive of Applied Mechanics* 93(3), pp.881-890, 2023.