

氏名	MAHMUDUR RAHMAN
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学位記号番号	博理工甲第 1132 号
学位授与年月日	平成 31 年 3 月 20 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Reliability-based design for buckling strength of stiffened steel plates: ultimate and serviceability limit states (鋼補剛板の座屈強度に関する信頼性設計：終局限界と使用限界)
論文審査委員	委員長 教授 奥井 義昭 委員 教授 松本 泰尚 委員 教授 牧 剛史 委員 教授 長田 昌彦

論文の内容の要旨

The compressive strengths of stiffened steel plates at Ultimate Limit State (ULS) and the Serviceability Limit State (SLS) were investigated in this research by employing a combination of numerical and probabilistic approaches. Due to lack of specific criteria to determine the compressive strength at SLS, a rational criterion has been proposed based on elastic buckling strength and fabrication tolerance. Two distinct behavior of stiffened plates under compression, i.e. the column-like behavior and the plate-like behavior were addressed. Three stiffened plate models with three, two, and one flat plate longitudinal stiffeners, corresponding to Model-1, Model-2, and Model-3 were considered for the study, where Model-1 and Model-2 shows column-like behavior and Model-3 exhibits plate-like behavior. Relative stiffness of the longitudinal stiffener for all of the three models conforms to the required relative stiffness of JSHB ($\gamma_1/\gamma_{1,req} = 1$).

In case of Model-1, to achieve the column behavior, aspect ratio was set to one and an unconnected strut consisting of a longitudinal stiffener and the associated subpanel width was considered, neglecting the effect of longitudinal edge supports. After carrying out the numerical and probabilistic analysis, major findings are as follows:

- Comparing to the Model-1 ULS strength with a 5% non-exceedance probability ($p_f = 5\%$), the JSHB, AASHTO, and Canadian Code overestimates the strengths for $R_R < 0.8$ and is significantly conservative for $R_R > 0.8$. [R_R is the JSHB reduced slenderness parameter]
- Eurocode column-like buckling strengths shows good agreement with the ULS strengths corresponding to $p_f = 5\%$.
- The mean values of the SLS strengths at $R_R = 1.0, 1.2, \text{ and } 1.4$ are 18%, 29%, and 34% lower than those of the ULS strengths, respectively.
- The SLS strengths with $p_f = 5\%$ are lower than the current ULS strengths of the JSHB.

Model-2 investigates the effect of longitudinal edge support on column-like behavior. A simply supported boundary conditions along the longitudinal edges were considered for Model-2 stiffened plates. After carrying out the probabilistic analysis, results were compared with different design codes and the key observations are the followings:

- Compared to the Model-2 ULS strength with a $p_f = 5\%$, the JSHB, AASHTO and Canadian Code overestimates the strength for $R_R \leq 0.6$, and underestimate it for $R_R \geq 0.6$.
- The ULS strengths with a $p_f = 5\%$ agree well with those of Nara et al. and those of Eurocode, except for R_R values in the range of 0.8-1.2.
- The mean SLS strength at $R_R = 1.0$ is 92.6% of mean ULS strength, while the same at $R_R = 1.4$ is 80.4%.
- The JSHB strength curve for ULS remarkably matches well with the SLS strengths for a $p_f = 5\%$.

Model-3 stiffened plates are selected so as to exhibit plate-like behavior, where the plates possess a large post-buckling strength reserve. To achieve the plate behavior, aspect ratio was set to three and simply supported boundary conditions were considered along the two longitudinal edges. Employing an approximate estimation procedure, first-order mean values and first-order variances were obtained for both ULS and SLS strengths. Important remarks on Model-3 stiffened plates are presented below:

- The mean value (μ) ULS strengths of Model-3 are in good agreement with the Eurocode plate-like buckling strength or interpolated final strength.
- Comparing to the mean value (μ) ULS strengths, the AASHTO and Canadian code overestimates the strength in the range of $0.6 < R_R < 1.4$.
- JSHB strength curve is significantly conservative for Model-3 stiffened plates.
- With the increase of the R_R values, the difference between the mean value (μ) strengths of ULS and SLS also increased.

The coefficient of variance (CoV) of the SLS strengths are found to be higher than that of the ULS strengths.

A comparison of the probabilistic information of the three stiffened plate models were also carried out. It is expected that the column-like buckling strength will be smaller than the plate-like buckling strength, due to the difference in the post-buckling strength reserve. Reflecting to the expectation, mean value strength of Model-1 and Model-2 was found to be smaller than that of Model-3, for the both ULS and SLS. Furthermore, due to consideration of simply supported boundary conditions along the longitudinal support edge, it is also desired that the Model-2 strengths will be slightly higher strength than that of Model-1. For both ULS and SLS, this phenomenon was observed for $R_R \geq 1.0$.

The uniqueness of this research is that the effect of thick plates and SBHS steels were included. Furthermore, rather than deterministic strengths, probabilistic strengths are provided for column-like behavior and plate-like behavior, which can be used as an important reference for developing a reliability-based design strength curve.

論文の審査結果の要旨

本学論文は鋼補剛板の終局強度と使用強度を検討したものである。鋼板に縦リブと横リブを溶接した補剛板は軽量でかつ高い圧縮耐荷性能を有することから、船舶の船体や、橋梁の主要要素として用いられている。溶接技術の発展に伴い、長スパンの箱桁橋梁が海外、特に欧州において1970年初頭になり多く建設された。しかし、設計基準の不備から補剛板の座屈現象が発生し、落橋事故が相次いだ。この事故を契機に研究が進み補剛板の座屈設計法が飛躍的に発展した。特に、無荷重状態における補剛板のゆがみ（以下、初期変位）や応力（以下、残留応力）が座屈強度に大きく影響を及ぼすことが知られる様になった。現在、日本を含め、欧州や米国で使用されている圧縮補剛板の設計式は、初期変位や残留応力などの初期不整の影響を考慮に入れた設計式となっている。

しかし、現行の設計式が制定された1980年当時の状況に比べて、補剛板を取り巻く現在の状況は以下の点で変化している。

- (1) 橋梁用高性能鋼（SBHS）のJIS化（2008年）に伴う橋梁での適用例の増加
- (2) 鋼板の板厚制限が50mmから100mmへ変更（1996年）
- (3) 信頼性設計理論の設計基準への適用

SBHS鋼材は以前から使用されていた通常鋼に比べて降伏強度は高いものの、降伏後の引張強度の上昇が少ない鋼材である。また、現行の日本の設計基準は鋼板の板厚が10数mm程度の比較的薄い通常鋼の実験結果に基づいて提案されている。そのため上記(1)、(2)の影響は考慮されないまま、1980年に制定された設計基準が現在まで使用されている。さらに、1980年以降、海外では信頼性設計理論に基づき安全係数を決定し、設計基準に導入することが趨勢となっているが、そのためには強度のバラツキなどの統計データが必要であるが、その点も考慮されていない。

このような背景から本学位論文では、上記の要因を考慮した圧縮補剛板の研究を数値解析に基づき検討し、さらに今まで殆ど研究がされていない使用性に関する強度についても研究している。

本論文の構成は以下の通りである。

1章では、研究背景、既往の研究のレビュー、諸外国の設計基準の調査を行い、本研究の必要性を明確にし、研究目的を設定している。

2章では、柱座屈モードにおける終局強度と使用強度の検討を行っている。補剛板の座屈モードは大別して柱座屈モードと板座屈モードに分類できるが、本章で扱う柱座屈モードは比較的幅広の補剛板で発生する座屈モードである。初期不整を種々変化させた有限変位弾塑性解析より限界強度と初期不整の相関関係を求め、それを応答曲面法で近似し、初期不整を確率変数としたモンテカルロシミュレーションにより、強度の確率密度関数を算定している。

次に、この確率密度関数を用いて目標とする破壊確率に応じた公称強度と安全係数を提案している。さらに、この検討は使用強度に関しても行われている。使用強度では、弾性座屈強度もしくは面外変位がある既定値に達する時の応力レベルの2者から低い方を使用強度と定義している。得られた結果は国内基準、国外基準と比較し、その妥当性を考察している。

3章では、補剛板の両側端が単純支持され、縦補剛材で区切られるサブパネルの数が3の場合について、2章と同様な検討を行っている。このような補剛板は柱モードと板モードの中間的な座屈強度となることが知られている。まず、既往の実験結果と非線形FEM解析結果を比較し、解析手法の妥当性を検証している。その後、同じモデル化を行い、パラメトリックに入力パラメータを変化させたFEM解析から、応答曲面を

算定し、モンテカルロシミュレーションより、強度の確率密度関数を求めている。

4章では、比較的幅の狭い補剛板で発生する板座屈モードに関して終局強度と使用強度の検討を行っている。この種の補剛板は近年増加している狭幅箱桁に用いられているが、板座屈モード用の設計式が無いことから、強度が過小評価されている状況にある。板座屈モードの場合、局部座屈モードの初期面外変位の変化によって、座屈強度が大きく変化する。そのため、確率変数として板座屈モードと局部座屈モードの面外変位、残留応力の3つを考慮する必要がある。前章までと同様な方法を用いて応答曲面を構築するためには非常に多くの非線形FEM解析が必要になることから、差分近似を用いた手法で強度の平均値と標準偏差のみを求めている。

最後に、第5章において上記3つのケース、すなわち柱座屈モード、中間領域、板座屈モードについて終局強度と使用強度の平均値、標準偏差を、補剛板サブパネルの幅厚比パラメータ毎に表してまとめ、現行の国内外の設計基準との比較から妥当性と問題点を議論している。さらに、今後の課題について言及している。

なお、本論文の成果は、審査制度のある国際的な学術雑誌（J. of Constructional Steel Res., Int. J. of Steel Struct.）に2編掲載済み、同じく国際学術雑誌（J. of Struct. Eng. ASCE）に1編査読中である。さらに、国内および海外における国際会議において5編掲載されている。

以上のように、本論文では鋼橋の主要部材の一つである補剛板の終局強度と使用強度に関する有益な知見を見だし、信頼性設計を構築するための重要なデータを提供している。よって、本学位論文審査委員会は、本論文を博士（学術）の学位論文として価値あるものと認め、合格と判定した。