

氏 名	Dang Viet Duc
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学 位 記 号 番 号	博理工乙第 212 号
学位授与年月日	平成 25 年 9 月 20 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学 位 論 文 題 目	FLEXURAL CAPACITY OF COMPOSITE GIRDERS: DESIGN EQUATION ACCOUNTING FOR BRIDGE HIGH PERFORMANCE STEELS (合成桁の曲げ強度：橋梁用高性能鋼を考慮した設計式)
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 准 教 授 牧 剛史 委 員 准 教 授 齊藤 正人

論文の内容の要旨

The steel-concrete composite girder is one of the most common super-structural types for highway and railway bridges. In composite girders under un-shored construction method, which is very common for composite girders, first, a steel girder only resists a bending moment due to dead loads of steel and wet concrete. The local buckling of the top flange plate in the steel girder due to the initial bending moment critically dominates the flexural resistance of the composite girders in the construction state. Besides, application of bridge high performance steels SBHS500, SBHS700 and hybrid steel girders is expected to be an economical solution for composite girder bridges. Steels SBHS500 and SBHS700, with yield strengths of 500 and 700 MPa, respectively, have been standardized in 2008 in Japanese Industrial Standards (JIS). They present the advantage of high yield strength and good weldability. However, if compared to conventional (normal) steels, they possess different inelastic behavior, such as almost no yield plateau, smaller ductility, and a greater yield-to-tensile strength ratio. The bending moment capacity of a composite girder largely depends on local buckling of compressive components, such as flange plates and web plates. Hence, the local buckling strength of simply supported steel plates and section classifications based on the web slenderness limits of composite girders with SBHS steels for homogeneous as well as hybrid sections are investigated in the current study.

In this dissertation, a probabilistic distribution of buckling strengths for compressive plates with normal and bridge high performance steels was obtained through numerical analyses to propose nominal design strength and a corresponding safety factor. In the numerical analyses, Monte Carlo based simulation, which is combined with the response surface method, was employed to reduce exertion of finite element analyses. For each of 10 width-to-thickness parameter R values ranging from 0.4 to 1.4, a response surface of the normalized compressive strength was identified based on 114 finite element analysis results, which include 4 normal and 2 high strength steel grades with different residual stresses and initial deflections. The response surface is approximated as a simple algebraic function of the residual stress and the initial deflection. For the Monte Carlo based simulation in the current study, a pair of variables

of residual stress and initial deflection is generated randomly in accordance with the probabilistic characteristics reported by Fukumoto and Itoh (1984). The LBS is evaluated deterministically by means of the response surface for the generated random variables. The probabilistic distribution of LBS is obtained from simulating 10,000 pairs of the random variables. The mean values obtained from results of LBS probabilistic distribution in the current study agree to those from experiments reported by Fukumoto and Itoh (1984). The obtained standard deviations of the current study exhibit about half of experimental results in a range of $0.6 \leq R \leq 1.2$. Regarding each of 6 steel grades, the mean LBS of SBHS steel plates is greater than that of the normal steel plates. For $R > 0.55$ the standard deviation of LBS for SBHS steel plates is lower than that of normal steel plates. Judging from this behavior, the design normalized LBS of steel plates will attain higher value with application of SBHS steels than normal steels for $R > 0.55$. In the range of $0.4 \leq R \leq 0.85$, the variance of LBS is more sensitive with initial deflection than residual stress. Whereas in the range of $R > 0.9$, the variance of LBS is more sensitive with residual stress than initial deflection. If the nominal strength is assigned to the mean value, the partial safety factors are obtained as 1.11, 1.13, and 1.16 for 5.0, 3.0, and 1.0% respectively of non-exceedance probabilities of the probabilistic LBS with respect to the nominal LBS.

For investigation of web slenderness limits for section classifications of composite girders, the positive bending moment capacity of composite girders is examined through parametric study employing elasto-plastic finite element analyses. The section classification based on web slenderness limits for composite homogeneous and hybrid steel girders with bridge high performance steel SBHS500 are explored. Besides, the effects of the initial bending moment due to unshored construction method on the web slenderness limit are investigated. For section classification of composite hybrid girders, the yield moment that is calculated from the yield moment of the corresponding composite homogeneous girders and hybrid factor are essential quantities. However, the hybrid factor specified in AASHTO has been proposed without considering the initial bending moment. In the current study, the modified hybrid factor is proposed to determine the yield moment of hybrid sections from the corresponding homogeneous sections. It is shown that the compact-noncompact web slenderness limits in conventional design standards are over-conservative for both composite SBHS500 homogeneous and SBHS500-SM490Y hybrid steel girders. Many composite sections, which are classified as slender by current specifications, demonstrate sufficient flexural capacity as noncompact. The compact-noncompact web slenderness limit of composite SBHS500-SM490Y steel sections is greater than that of composite SBHS500 homogeneous steel sections. However, the noncompact-slender web slenderness limit for SBHS500-SM490Y hybrid sections is a little lower than that of SBHS500 homogeneous sections. For composite girders with noncompact sections with the initial bending moment, the proposal hybrid factors are slightly lower than those obtained from FEM analysis results, and the difference is about 5%. With considering a higher level of the initial bending moment, the hybrid factors using in AASHTO shows un-conservativeness. The investigation of section classification for web slenderness limits of composite girders with SBHS500 steel for both homogeneous and hybrid steel girders shows that the web plate of steel girder can be designed with higher slenderness than requirements of current specifications such as AASHTO and Eurocode.

論文の審査結果の要旨

本論文の審査委員会は2013年8月20日に論文発表会を開催し、その発表会を含めて学位論文の審査を行った。本論文の概要と審査結果は以下の通りである。

本論文では、鋼・コンクリート合成桁の曲げ強度の算定のための、圧縮フランジの局部座屈強度と断面クラスの判定式の検討を行ったものである。

我が国の橋梁設計基準で現在用いられている圧縮無補剛板の局部座屈強度式は1980年に制定されたものであるが、それ以降、鋼橋を取り巻く環境は大きく変化している。例えば、当時の設計基準では鋼板の最大板厚は50mmに制限されていたため、局部座屈の基準強度を制定するために参照された実験結果は板厚22mm以下のものであり、多くのデータは板厚10mm程度の実験結果であった。しかし、1996年以降、設計基準における最大板厚制限は100mmまで緩和され、50mmを超える圧縮フランジを持つ板桁も普通に製作されるようになってきている。さらに、2000年以降、橋梁用高性能鋼材(SBHS)が開発され、SBHS500とSBHS700が2008年にJIS化されている。橋梁用高性能鋼材は降伏強度が高く、溶接施工性や靱性が改善されているため、鋼橋の経済性に寄与するものと期待されている。しかしSBHS500とSBHS700ともに降伏比が高く、降伏棚が殆ど無いなどの、他の鋼材と異なる性質があり、現在、道路橋や鉄道橋の設計基準には規格化されていない。このように現在の国の設計基準は、実際の鋼材の使用状況や新たな鋼材の開発状況を反映してない問題がある。

さらに、設計基準を取り巻く国内外の状況も大きく変化している。現在の設計基準の国際的趨勢は限界状態設計法を用い、部分係数法のフォーマットで照査式が書かれ、各部分係数は確率論的な裏付けを持って設定される、いわゆるレベル1信頼設計法を用いている。そのため、材料強度のバラツキに起因する不確定性と強度算定式そのものの不確定性を分離して、強度の確率分布を評価する必要がある。しかしながら、これらの点を考慮している国内の研究成果は殆ど無い状況である。

1章では上記した研究の背景と日本、米国およびヨーロッパにおける橋梁構造物の設計法（限界状態設計法や許容応力度設計法）や設計基準のフォーマットと部分係数についてレビューを行っている。

2章では鋼板の局部座屈強度に関する既往の研究を調査し、橋梁用高性能鋼材と厚板化に対応したレベル1信頼性設計法を構築するための局部座屈強度に関する確率論的検討の必要性を明らかにした。さらに、ハイブリッド桁に関する既往の研究を調査し、橋梁用高性能鋼材を用いたハイブリッド桁の研究や、活荷重合成桁における初期曲げモーメントの影響を考慮したハイブリッド桁に関する断面クラスの検討が必要であることを明らかにし、上記2つ内容を本論文の研究目的に設定している。

3章では4辺単純支持圧縮無補剛板の局部座屈強度の確率密度分布を有限要素法解析と応答曲面法を用いたモンテカルロシミュレーションにより算定している。局部座屈強度式自身の不確定性と部分係数を算定する目的で材料強度のバラツキ以外で局部座屈強度に変動を与える要因として、初期変位と残留応力のみを確率変数として考慮した。また、この2つの変数は確率論的に独立として扱い、既往の計測結果から各々ワイブル分布と対数正規分布と仮定した。鋼種に関しては低強度軟鋼のSM400から橋梁用高性能鋼材SBHS700までの6種類を考慮しさらに、実用的な範囲の幅厚比パラメータの値10点で検討を行った。これらの結果から各、幅厚比パラメータにおける局部座屈強度の確率密度分布を求めた。また、平均強度を基準強度に設定した場合について、得られた標準偏差を用いて実強度に対する非超過確率が5%になるような安全係数を求めている。さらに有限差分近似を用いた近似解法によって、確率変数（初期変位と残留応力）毎の局部座屈強度の分散を求め、バラツキの要因分析とモンテカルロシミュレーションの結果の妥当性を検証している。

4章では、まず活荷重合成桁を対象に架設時に鋼桁単体に作用する初期曲げモーメントの影響を考慮した

ハイブリッド桁の曲げ強度に関して検討を行っている。ハイブリッド桁とは腹板に低強度、フランジに高強度の鋼材を用いた板桁であり、フランジと腹板に同強度の鋼材を用いたホモジニアス桁に較べて、経済的であると言われている。本論文では、ハイブリッド桁の降伏強度をホモジニアス桁のそれから簡便に計算するための係数いわゆるハイブリッド係数を提案し、FEM 解析結果との比較から、その妥当性を検証している。次に、橋梁用高性能鋼材 SBHS500 を用いたホモジニアス I 桁および SM490Y と SBHS500 の組み合わせによるハイブリッド桁に対して、既往の断面クラス分類式の適用可能性を弾塑性有限変位 FEM 解析によって検証した。

5 章では、各章で得られた知見をまとめて、本論文の結論を要約し、今後の課題をまとめている。

以上のように、本論文では橋梁用高性能鋼材を用いた合成合成桁の曲げ強度の算定に関して有益な知見を導き、設計法の開発および提案を行っている。

本研究の成果は、審査制度のある海外学術雑誌に 1 編 (International Journal of Steel Structures) に投稿中で、現時点で査読意見に対する修正原稿を送付した状態である。査読者からの修正意見は比較的軽微で掲載を前提としての修正依頼となっている。また、この論文以外に査読付き国際会議論文 3 編に発表済みである。

以上の論文内容および論文発表の状況を勘案し、2013 年 8 月 30 日に開催予定の博士後期課程コース会議までに掲載可の連絡を得ることを前提として、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。