

橋梁用高性能鋼を用いた圧縮補剛板の限界強度に関する数値解析的検討

Numerical study on ultimate strength of longitudinally stiffened steel plates for SBHS under uniaxial compression

室蘭工業大学

○ 学生員

沼田あずさ (Azusa Numata)

室蘭工業大学大学院

正 員

小室 雅人 (Masato Komuro)

室蘭工業大学大学院

学生員

瓦井 智貴 (Tomoki Kawarai)

埼玉大学

正 員

奥井 義昭 (Yoshiaki Okui)

1. はじめに

現行の道路橋示方書¹⁾に規定されている圧縮補剛板の基準耐荷力曲線は、1980年に制定されたものであり、鋼材の適用板厚に関する上限値の引き上げや橋梁用高性能鋼のJIS化などへの対応がなされておらず、現在基準耐荷力曲線の見直しが検討されている。このような背景のもと、日本鋼構造協会を中心に、圧縮補剛板の基準耐荷力曲線の見直しに関する研究が実施され、信頼性理論に基づいた限界強度の確率密度分布についての検討²⁾がなされている。また、既往の研究により、補剛板の限界強度には板の長手方向の初期たわみの他、補剛板間(パネル)の初期たわみが、限界強度に少なからず影響を与えることが報告されている³⁾。

本研究は、それら一連の検討の中で、図-1に示す多リブモデル(柱モデル)に着目し、補剛板間の初期たわみが限界強度に与える影響を調査することを目的として、それらの考慮の有無による限界強度の感度解析を実施した。ここでは、2008年にJIS化されたSBHS材(2種類)を対象に検討を行うこととした。なお、本解析には構造解析用汎用プログラムABAQUSを使用した。

2. 有限要素解析概要

2.1 形状寸法および解析モデル

図-1には、本研究で想定した多リブモデル(柱モデル)

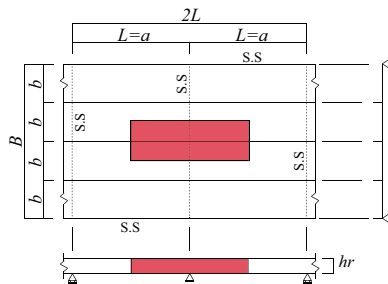


図-1 想定するモデル ($n = 4$)

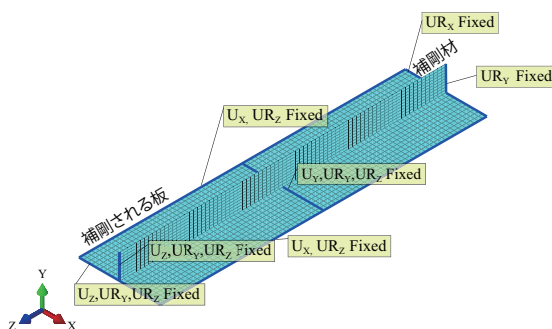


図-2 解析モデルと境界条件

を示している。補剛される板のアスペクト比 $\alpha (= a/B)$ に関しては北田らの研究成果⁴⁾を参考に限界強度がほぼ最低を示す $\alpha = 1.0$ と固定した。したがって長辺 a は短辺 $b \times$ パネル数 ($= 4$) である。また、幅厚比パラメータ R_r の式より、板厚 t と R_r を固定することで、短辺 b を算出した。ここでは、鋼種を2種類、板厚 $t = 30$ mm とし、幅厚比パラメータ R_r が $0.4 \sim 1.2$ となるように形状寸法を決定している。ただし、短辺 b が 200 mm 以下および 2500 mm 以上になるケースは非現実的であるとして、本解析では除外している。補剛材の寸法は、道路橋示方書に規定されている必要剛比を丁度満足するように決定した。なお、幅厚比パラメータ R_r は以下の式で表される。

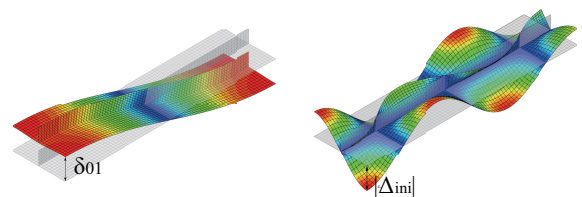
$$R_r = \frac{B}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k_R}} \quad (1)$$

ここで B : 補剛板の全幅, t : 板厚, σ_y : 降伏応力, E : 弾性係数 (200 GPa), ν : ポアソン比 (0.3), k_R : 座屈係数 ($4\pi^2$, n は補剛板で区切られるパネル数) である。

図-2には、解析モデルおよび境界条件を示している。本研究では補剛材によって区切られるパネル数を $n = 4$ と固定している。補剛材の直角方向に配置されるダイヤフラムに関しては、その剛性が十分に高いものと仮定しモデル化は省略し、境界条件として設定している。また、モデルの周囲については、対称性を考慮した境界条件となっている。また、要素分割は形状寸法にかかわらず、短辺 b を 20 分割、長辺 a を 80 分割、補剛版の高さ h_r を 10 分割とした。要素には、4節点シェル要素 (S4R) を使い、板厚方向の積分点は 11 とした。なお、各鋼材の材料構成則に関しては、既往の研究で使用されているマルチリニア型の応力-ひずみ関係²⁾を与えている。

2.2 初期たわみと残留応力

本研究では、補剛材間(パネル)の初期たわみが限界強度に与える影響を確認するため、道路橋示方書で規定されている許容値と同等の値 ($|\Delta_{ini}|/b = 1/150$) を考慮する場合と考慮しない場合の2種類について数値解析を行った。なお、図-3には座屈固有値解析から得られる全体



(a) 全体座屈モード (b) 局部座屈モード

図-3 座屈固有値解析による座屈形状

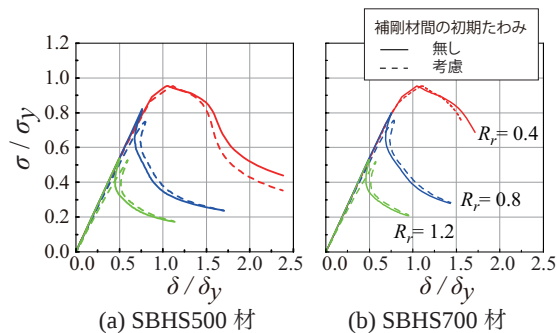


図-4 無次元応力-無次元変位関係

座屈モードおよび局部座屈モードを示している。前者は板全体の初期たわみ、後者は補剛材間の初期たわみに対応しており、本解析ではこれら低次の座屈モードを用いて、最大たわみ (δ_{01} , $|\Delta_{ini}|$) が所定の初期たわみになるように調整した。また、圧縮側の残留応力に関する分布形状は補剛される板を単純支持板、補剛板を自由突出板と仮定した²⁾。なお、本研究では、全体変形に関する初期たわみ量および残留応力には既往の研究^{5), 6)}を参考とした頻度分布の平均値を用いた。

3. 解析結果および考察

3.1 無次元応力-無次元変位関係

図-4には、各鋼種に関する幅厚比 $R_r = 0.4, 0.8, 1.2$ とした場合の無次元応力-無次元変位関係を示している。なお、実線は補剛材間の初期たわみを考慮しない場合、破線は考慮する場合を示している。

図-4 (a) に示す SBHS500 材に着目すると、幅厚比 R_r が大きくなるにつれ、限界強度が小さくなる傾向を示し、 $R_r = 0.8, 1.2$ の場合には急激に耐力が低下する性状が見取れる。また、補剛材間の初期たわみを考慮した場合には、考慮しない場合と比較して若干ではあるものの、限界強度が小さくなっていることが分かる。

図-4 (b) に示す SBHS700 材の場合にも同様に、幅厚比 R_r の増加に伴い、限界強度が減少しており、鋼種による大きな差異は見られない。

3.2 各鋼種ごとの限界強度

図-5には、縦軸に終局強度 σ_{cr} を降伏応力で除した無次元限界強度 (σ_{cr}/σ_y) を、横軸に幅厚比 R_r を取り、整理した無次元耐力曲線を示している。なお、青線は考慮しない場合 (σ_1) を、赤線は補剛材間の初期たわみを考慮した場合 (σ_2) を、黒線は現行の基準耐力曲線を示している。

図-5 (a) に示す SBHS500 材に着目すると、補剛材間初期たわみの量にかかわらず、道示式における $R_r > 0.6$ 領域では安全側、 $0.4 \leq R_r \leq 0.6$ の領域では危険側の評価となっていることが分かる。また、幅厚比 $R_r = 0.6, 0.8, 1.0$ においては初期たわみを考慮することで、考慮しない場合と比較して限界強度は低下していることが分かる。

図-5 (b) に示す SBHS700 材に着目すると、SBHS500 材と同様な傾向を示しているものの、初期たわみの考慮の有無による限界強度の低下率は SBHS500 材よりも若干小さい。

図-6には、横軸には幅厚比 R_r を、縦軸には補剛材間の初期たわみを考慮する場合と考慮しない場合の限界強度の低下率 (σ_2/σ_1) を取って、整理したものである。図よ

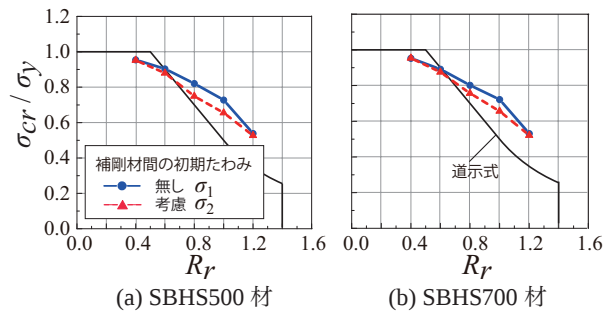


図-5 道示式と各鋼種の限界強度比較

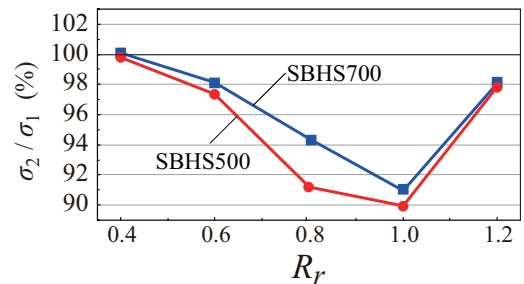


図-6 限界強度の減少率

り、初期たわみを考慮することにより、いずれの鋼種も限界強度が低下する傾向にあることが分かる。また、その割合は幅厚比 $R_r = 1.0$ において最も大きく、約 10% である。さらに、低下割合は SBHS700 材よりも SBHS500 材の方が全幅厚比に渡って大きいことが見て取れる。

4. まとめ

本研究では、補剛材間の初期たわみが圧縮補剛板の限界強度に与える影響を調査することを目的として、三次元弾塑性有限要素解析を実施した。その結果、初期たわみを考慮することで、考慮しない場合と比較して限界強度は低下する傾向にあることを確認した。また、その低下割合は最大で 10% 程度を示すことを明らかにした。

今後は、本研究の結果を踏まえ、残留応力や全体および補剛材間の初期たわみをパラメータにした数値解析を行うとともに、それらの結果より得られる応答曲面を用いたモンテカルロ・シミュレーションを実施することで、限界強度の確率密度分布、平均値および標準偏差を算出する予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路示方書・同解説 (I 共通編・II 鋼橋編)
- 2) 日本鋼構造協会：鋼橋の性能評価と強度設計の合理化, JSSC テクニカルレポート, No.105, 2015
- 3) Rahman, M., Okui, Y., Shoji, T., and Komuro, M.: Probabilistic ultimate buckling strength of stiffened plates, considering thick and high-performance steel, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 138, pp. 184-195, 2017.
- 4) 北田 俊行, 中井 博, 越智 内士: 高張力鋼を用いた圧縮版・圧縮補剛版の終局強度に関する研究, 構造工学論文集 Vol.41A, 2000.3
- 5) Fukumoto, Y. and Itoh, Y.: Basic compressive strength of steel plates from test Data, *Proc. of JSCE*, No.344/I-1, pp. 129-139, 1984.
- 6) 村越 潤, 梁取 直樹, 有馬 敬育, 清水 英樹, 小森 大資: 鋼材料・鋼部材の強度等に関する統計データの調査, 土木研究所資料, No.4090, 2008.3