

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 plates under uniaxial compression

室蘭工業大学大学院 ○学生員 成田 彩華 (Ayaka Narita)
 室蘭工業大学 正員 小室 雅人 (Masato Komuro)
 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⁾の補剛板の基準耐荷力曲線は、既往の実験結果と差があることが知られている。図-1は道路橋示方書の耐荷力曲線と既往の実験結果を比較したのもであり、縦軸に限界強度 σ_u を降伏応力 σ_y で除した値、横軸に幅厚比パラメータ R_r を取って整理したものである。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 ($= 4n^2$, n は補剛材で区切られるパネル数) である。

図より、現行の耐荷力曲線は実験結果と比較して、 $R_r \leq 0.8$ で危険側、 $R_r \geq 0.9$ で安全側の評価となっていることが分かる。また、道示の改定に伴い、1996年には耐候性鋼を除く鋼材の適用厚板の上限が 50 mm から 100 mm に変更された。さらに、2008年には橋梁用高性能鋼 SBHS500 と SBHS700 が JIS 化されるなど、鋼材を取り巻く環境は大きく変化している。

一方、図-1に示した耐荷力曲線を決定するために参照された実験データは、比較的薄い鋼材に対するものであり、厚板に対する検討はもちろん、SBHS材に対する検討もなされていない。

このような背景より、本研究では道示に規定されている補剛板の基準耐荷力曲線の見直しのための基礎資料を収集することを目的に、初期たわみと残留応力のバラツ

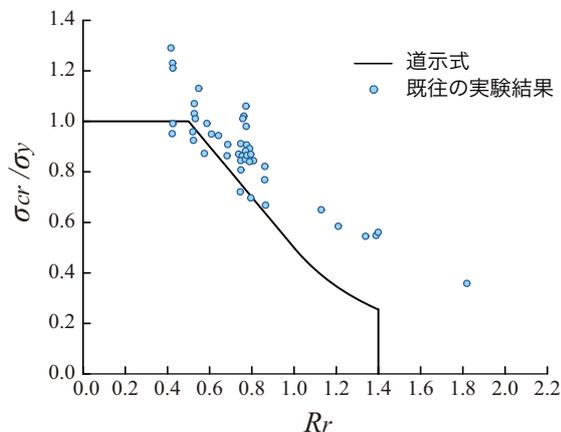


図-1 道示における基準耐荷力線と既往の実験結果の比較

キを考慮して、圧縮を受ける補剛板の限界強度を求めることにした。ここでは、SBHS材を含む6種類の鋼種について検討を行っている。

2. 有限要素解析概要

2.1 解析モデル

図-2には、解析モデルの形状寸法および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、小松・北田の研究成果²⁾を参考に限界強度がほぼ最低を示す $\alpha = 1.0$ と固定し、各鋼種、各板厚ごとに幅厚比パラメータが所定の値となるように形状寸法を決定した。補剛材については、平リブのみを考慮し、道示に規定されている必要剛比を丁度満足するように寸法を決定した。

解析には、構造解析用汎用プログラム ABAQUS³⁾を使用した。要素分割は、短辺 b を 20 分割、長辺 a を 80 分割、補剛材の高さ h_r を 10 分割とした。要素には、4 節点シェル要素 (S4R) を用い、板厚方向の積分点は 11 とした。

2.2 初期たわみと残留応力

初期たわみについては、図-3に示す座屈固有値解析より得られる低次の座屈モードを用いて、所定の初期たわみとなるように調整した。なお、初期たわみ δ_{01} に関しては、文献4)に示されている頻度分布を用いた。図-4にその分布 (平均値 $\mu = 0.0960$, 標準偏差 $\sigma = 0.4264$) を示している。

圧縮側の残留応力に関しては、図-5に示す既往の研究成果⁵⁾による頻度分布を用いた。平均値 $\mu = 0.23$, 標準偏差 $\sigma = 0.145$ である。残留応力の分布形状は補剛される板を単純支持板、補剛材を自由突出板と仮定し、図-6に示すように与えた。

2.3 応力-ひずみ関係

本解析における応力-ひずみ関係は、表-1で定義され

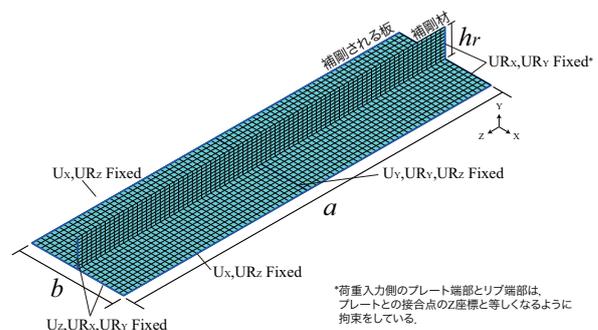


図-2 解析モデルの形状寸法と境界条件

表-1 無次元化した応力-ひずみ関係

	SM400		SM490		SM490Y		SM570		SBHS500		SBHS700	
	ϵ/ϵ_y	σ/σ_y										
1	1	1.00	1	1.00	1	1.00	1	1.00	1	1.00	1	1.00
2	12	1.00	12	1.00	10	1.00	3	1.00	3	1.00	11	1.00
3	32	1.26	25	1.16	23	1.14	15	1.12	15	1.10	25	1.06
4	90	1.47	70	1.36	50	1.28	32	1.17	32	1.13		
5	200	1.47	130	1.36	100	1.28	50	1.17	45	1.13		
E_{st}/E_s	0.0130		0.0123		0.0108		0.0100		0.00833		0.00610	

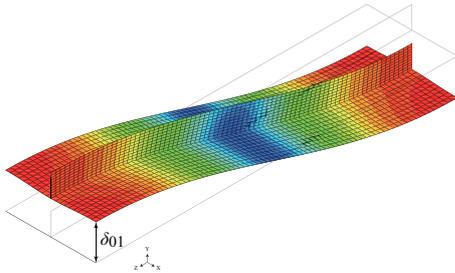


図-3 初期たわみモード

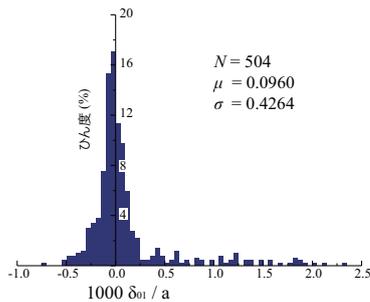


図-4 初期たわみの頻度分布

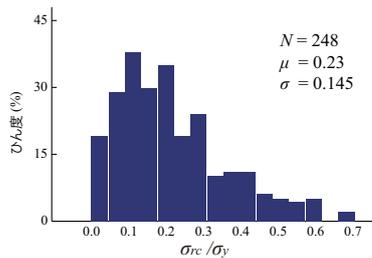


図-5 圧縮側残留応力の頻度分布

るものを用いた⁶⁾。表に示すように応力-ひずみ関係は、すべて降伏応力 σ_y と降伏ひずみ ϵ_y で無次元化された形で定義し、材質および板厚によって異なる降伏応力に対しても対応できるものである。同表にはひずみ硬化域での無次元化された勾配 E_{st}/E_s も参考のため示してある。図-7には、表-1で定義される応力-ひずみ関係を公称降伏応力を用いて図化した結果を示している。

2.4 解析パラメータ

表-2には、本解析で使用した解析ケースを一覧にして

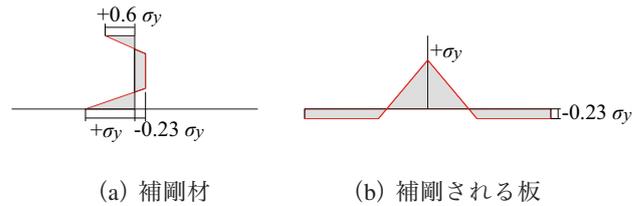


図-6 残留応力分布

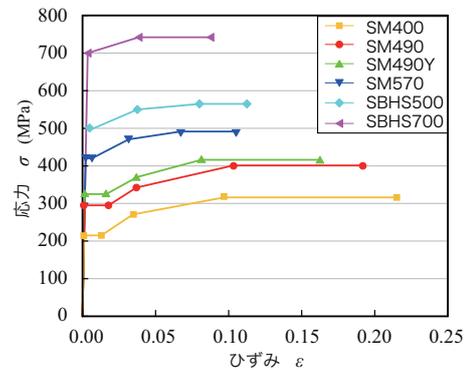


図-7 応力-ひずみ関係のモデル

表-2 解析パラメータ

鋼種	SM400, SM490, SM490Y SM570, SBHS500, SBHS700
板厚 t (mm)	10, 30, 50, 70, 90
幅厚比パラメータ R_r	0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4
圧縮側残留応力 σ_{rc}/σ_y	$\mu, \mu+\sigma$
初期変形 $1000\delta_{01}/a$	$\mu, \mu+\sigma$

示している。ここでは、鋼種を6種類、板厚を5種類とし、幅厚比パラメータ R_r が0.4~1.4となるように形状寸法を決定している。

3. 解析結果と考察

ここでは、6鋼種の中でSM490Y材およびSM400材を対象にして、解析結果について述べる。さらに、各鋼種ごとに限界強度の比較を行う。

3.1 SM490Y材

図-8(a)には板厚 t を30mmに固定した場合、同(b)には R_r を0.4に固定した場合の無次元応力-無次元変位関係を示している。(a)図より、 R_r の増加と共に限界強度が

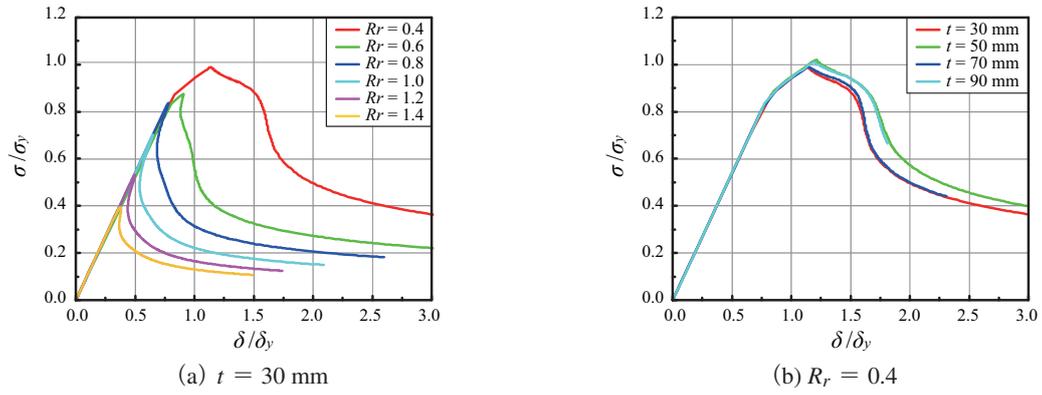


図-8 無次元応力と無次元変位の関係

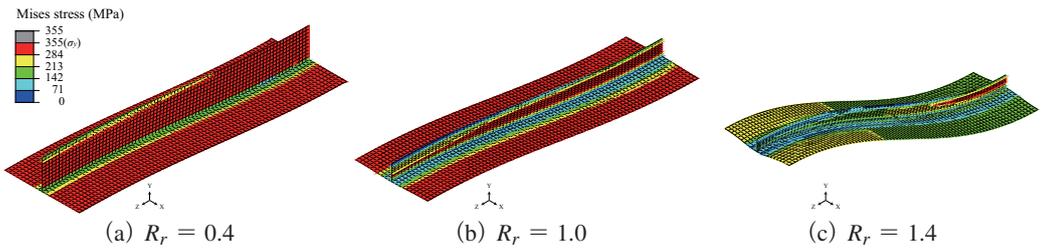


図-9 限界強度時における Mises 応力分布

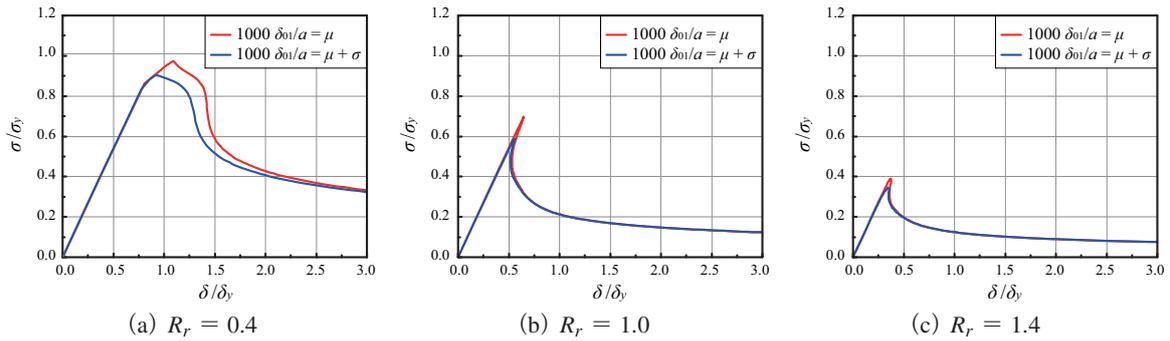


図-10 初期たわみを変化させた場合の無次元応力-無次元変位曲線 (SM400, $\sigma_{rc}/\sigma_y = \mu$)

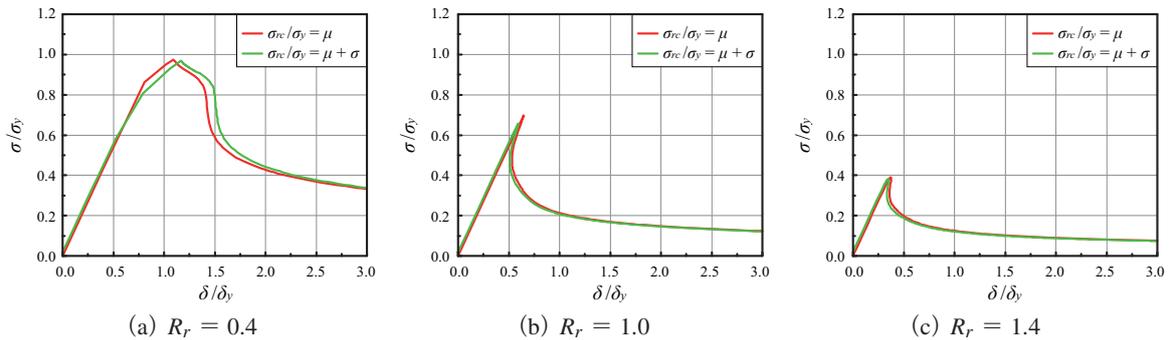


図-11 残留応力を変化させた場合の無次元応力-無次元変位曲線 (SM400, $1000\delta_{01}/a = \mu$)

小さくなる傾向にあることが分かる。一方、(b) 図より、 $R_r = 0.4$ の場合には、限界強度に及ばず板厚の影響は小さい。

図-9 には、図-8(a) で示した限界強度時の Mises 応力分布を示している。なお、図は板表面の応力分布であり、

変形倍率は 50 倍である。まず、 R_r が最も小さい $R_r = 0.4$ に着目すると、限界強度時に板全体が降伏応力状態にあることが分かる。次に、 $R_r = 1.0$ に着目すると、 $R_r = 0.4$ の場合と比較して降伏応力まで達する領域が小さくなっているものの、全体的な分布性状は類似しており、板全

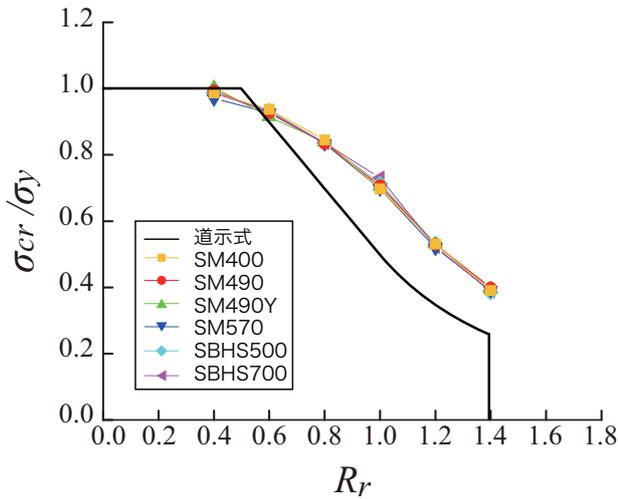


図-12 各鋼種の限界強度

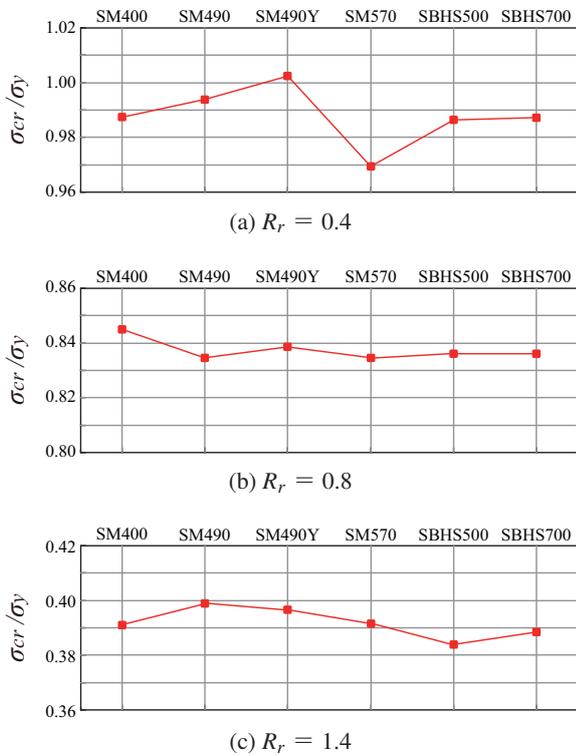


図-13 各鋼種の限界強度比較

体が降伏応力状態に近いことが分かる。一方、 $R_r = 1.4$ の場合には、補剛材の一部のみが降伏応力状態であり、前者と異なる分布を呈している。

3.2 SM400 材

図-10には、圧縮側の残留応力を $\sigma_{rc}/\sigma_y = \mu$ と固定し、初期たわみを変化させた場合の無次元応力-無次元変位曲線の一例として、 $R_r = 0.4, 1.0, 1.4$ の結果を示している。図より、初期たわみが大きいほど限界強度は小さくなり、その傾向は R_r が小さい方が顕著であることが分かる。

図-11には、初期たわみを固定し、残留応力 σ_{rc} を変化させた場合の無次元応力-無次元変位曲線を示している。図より、 $R_r = 0.4$ の場合には、限界強度時の変位に差が見

られるものの、限界強度に及ぼす残留応力 σ_{rc} の影響は極めて小さいことが確認される。

3.3 各鋼種ごとの限界強度

図-12には、残留応力 $\sigma_{rc}/\sigma_y = \mu$ 、初期たわみ $1000\delta_{01}/a = \mu$ の場合の限界強度を各鋼種ごとに示している。図より、限界強度に及ぼす鋼種の影響は、 R_r にかかわらず小さいことが分かる。

また、解析結果を道示式と比較すると、道示式は $R_r > 0.6$ の領域では安全側、 $0.4 \leq R_r \leq 0.6$ の領域では危険側の評価を与えることが分かる。

図-13には、 $R_r = 0.4, 0.8, 1.4$ における限界強度を鋼種ごとに比較して示している。図より、 $R_r = 0.4$ の場合にはバラツキが大きいものの、 R_r が大きくなると、バラツキが小さくなる傾向がうかがえる。

既往の研究⁷⁾によると、無補剛板の限界強度は鋼種によって異なり、高強度鋼材の方が限界強度は高くなる傾向にあることが報告されている。しかしながら、本数値解析で対象とした補剛板においては、このような傾向は見られなかった。

4. まとめ

本研究では、道示に規定されている補剛板の基準耐力曲線の見直しのための基礎資料を収集することを目的に、初期たわみと残留応力のバラツキを考慮して、圧縮を受ける補剛材の限界強度とそれらの影響について検討を行った。本研究の範囲内で得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 限界強度に及ぼす板厚の影響は小さい。
- 2) 初期たわみが大きいほど限界強度は小さくなるが、残留応力が限界強度に及ぼす影響は小さい。
- 3) 限界強度に及ぼす鋼種の影響は小さい。

謝辞

本研究の実施には、一般社団法人日本鉄鋼連盟による補助を受けて実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説(I 共通編・II 鋼橋編)
- 2) 北田 俊行, 中井 博, 越智 内士：高張力鋼を用いた圧縮板・圧縮補剛材の終局強度に関する研究, 構造工学論文集 Vol.41A, 2000.3
- 3) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver. 6.13, ABAQUS Inc., 2014
- 4) Fukumoto.Y. and Itoh.Y. : Basic Compressive Strength of Steel Plates from Test Data, Proc. of JSCE, No.344/I-1, pp.129-139, 1984.4
- 5) 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
- 6) 小室 雅人, 奥井 義昭, 野阪 克義, 宮下 剛, 野上 邦栄, 長井 正嗣：初期たわみと残留応力の統計データを用いた自由突出板の限界強度に関する数値解析的検討, 構造工学論文集 Vol.60A, 2014.3