

繰返し軸方向荷重を受ける補剛板の弾塑性挙動に与える鋼材特性の効果

岐阜大学工学部 正員 奈良 敬
 岐阜大学工学部 正員 村上 茂之
 大成ロテック(株) 正員○中塚 将志

はじめに

地震などによる繰返し荷重が鋼構造物に作用した場合、機能を保持し、安全を確保するため塑性変形能が要求される。鋼製橋脚の構成要素である補剛板を対象として塑性変形能の指標 $\bar{\lambda}$ ^{*)1)}、鋼材の塑性強度に着目した塑性変形能の改善^{2),3)}についての研究が見られる。兵庫県南部地震以降、鋼構造物の耐震性能向上への取り組みが活発に行われ、道路橋示方書の改訂や土木学会をはじめとする研究結果⁴⁾として公表されている。補剛板については、繰返し荷重を受ける補剛板に及ぼす影響を検討した研究は数多く行われ、延性やじん性などの鋼材の変形性能に優れた特徴を活用し、鋼材特性の観点から塑性変形能与える影響を検討する研究が進められている⁵⁾。これらの研究では、各断面パラメータの塑性変形能に及ぼす影響について検討されているが、鋼材特性が補剛板の塑性変形能に及ぼす影響については、基礎的なデータが不足している。

本研究では、補剛板の変形性能の向上に重要である幅厚比パラメータと縦補剛材剛比の他に、鋼材の降伏後の鋼材特性が重要なパラメータであることに主眼をおき、降伏比および一様伸びなどの鋼材特性を変化させる。鋼材特性が繰返し軸方向力を受ける補剛板の塑性変形能、エネルギー吸収能にどのような影響を及ぼすかを考察したので報告する。

2. 解析モデル

解析手法として、繰返し載荷時の応力ひずみ関係を単調引張試験から得られるパラメータのみで表現できる構成則を導入した弾塑性有限変位解析法⁶⁾を用いた。補剛板の解析モデルは、図-1に示すように、1本の縦補剛材とそれに隣接する板パネル部分を取り出す連続補剛板多リブモデル⁷⁾とする。断面パラメータには、板パネルの縦横比 α 、幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ 、縦補剛材剛比1本の剛比 γ を γ^* で無次元化した剛比パラメータ γ/γ^* を選ぶ。

(a) 板パネルのアスペクト比: $\alpha = a/b = 3$ (1)

(b) 板パネルの幅厚比パラメータ

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} = 0.4, 0.45, 0.5, 0.6 \quad (2)$$

(c) 縦補剛材剛比パラメータ: $\gamma/\gamma^* = 3, 5$ (3)

ここに、 ν : ポアソン比 (=0.3), E : ヤング係数, k : 座屈係数 (=4), γ^* : 弾性座屈理論に基づく必要剛比。表-1にパラメータとして用いた鋼材の機械的性質を示す。

初期たわみ波形は次式で与える。

$$W_0 = \delta \cos(\pi X/a) + W_{10} \cos(3\pi X/a) \cos(\pi Y/b) \quad (4)$$

ただし、初期たわみの最大値は、道路橋示方書⁸⁾の製作誤差の許容値で与える。それぞれ $\delta = a/1000$, $W_{10} = b/150$ となる。残留応力については、文献9)に従い補剛板全体が自己平衡を保つように与えた。繰返し載荷パターンは、図-2に示すように、ECCS¹⁰⁾に準拠した変動変位振幅繰返し載荷として与える。ただし、補剛板の初期不整を考慮するため圧縮側から載荷を与え、最大で降伏変位の5倍まで与えるパターンを用いた。

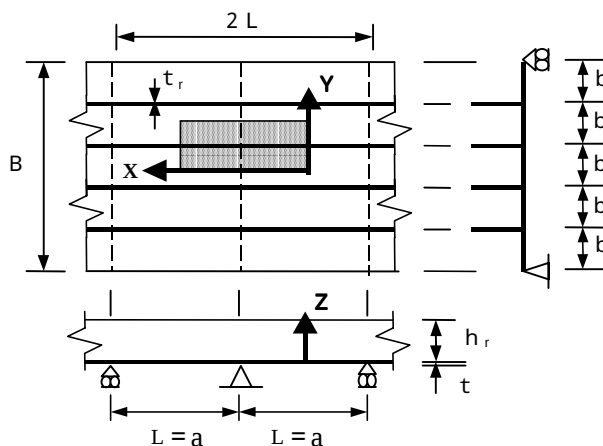


図-1 解析モデル(多リブモデル)

表-1 鋼材の機械的性質

鋼材モデル	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	YR	ε_y	ε_{HY}	ε_H	ε_u	B	n	c				
YR7U1T0	352.8	504.7	0.7	1.714×10^{-3}	0	1.714×10^{-3}	0.1	0.649	0.188	9				
YR7U2T0					5	1.714×10^{-3}	0.2	0.722	0.142	9				
YR7U1T5					0	1.029×10^{-3}	0.1	0.754	0.157	0				
YR7U2T5					5	1.029×10^{-3}	0.2	0.806	0.121	0				
YR6U1T0					0	1.714×10^{-3}	0.1	0.540	0.288	9				
YR6U2T0		5	1.714×10^{-3}		0.2	0.628	0.202	9						
YR6U1T5		588.0	0.6		1.714×10^{-3}	0	1.029×10^{-3}	0.1	0.669	0.225	0			
YR6U2T5						5	1.029×10^{-3}	0.2	0.735	0.172	0			
YR5U1T0						705.6	0.5	1.714×10^{-3}	0	1.714×10^{-3}	0.1	0.433	0.364	9
YR5U2T0									5	1.714×10^{-3}	0.2	0.532	0.274	9
YR5U1T5	0			1.029×10^{-3}					0.1	0.579	0.305	0		
YR5U2T5	5	1.029×10^{-3}	0.2	0.658	0.234				0					

σ_y : 降伏応力, σ_u : 引張強さ, YR: 降伏比, ϵ_y : 降伏ひずみ, ϵ_{HY} ($\epsilon_H - \epsilon_y$): 降伏棚の長さ, ϵ_H : ひずみ硬化開始ひずみ, ϵ_u : 一様伸び, B, n, c: 引張試験から得られる鋼材によって決まる定数

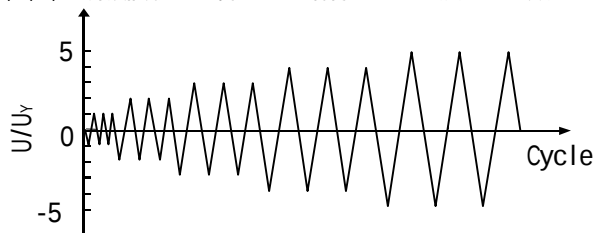


図-2 載荷パターン

キーワード(塑性変形能、補剛鋼板、繰返し荷重、鋼材特性、塑性強度)

連絡先(〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1 TEL 058-293-2405 FAX 058-293-2425)

3. 数値計算結果と考察

塑性変形性能の指標 $U_{\max}/U_Y$ の定義は、圧縮荷重のピークに至るまでの最大圧縮変位 $U_{\max}$ を降伏変位 U_Y で無次元化したものである。ここで、荷重のピークは圧縮荷重域において次式を満たしたときとする。

$$|N_{i+1} - N_i| / |U_{i+1} - U_i| \leq 0.01 \quad (5)$$

エネルギー吸収能の指標 W_N は、圧縮側の極限強度に至るまでの繰り返し回数 n におけるエネルギー吸収量の累積で定義する。

塑性変形能とパラメータの関係を図 - 3 ~ 5 に示す。図中の 1 点線は、 ε_U が 0.1 における現行の道路橋示方書で規定する設計基準

($\bar{\lambda}_p = 0.4, \gamma/\gamma^* = 3$) を構造諸元を持つモデルの解析結果を示し、2 点線は ε_U が 0.2 における解析結果である。図-3 の降伏比 YR が 0.7 では、 $0.4 < \bar{\lambda}_p < 0.45$ において設計基準を満たす範囲で塑性変形能を期待できる。YR が 0.5 の場合、図 - 4 に示すように $\bar{\lambda}_p = 0.5$ かつ ε_U が 0.1 を満たす範囲で高い塑性変形能を期待できる。しかし、 $\bar{\lambda}_p = 0.6$ では塑性変形能が設計基準より大きく低下する。この理由として、 $\bar{\lambda}_p = 0.6$ かつ $\gamma/\gamma^* = 3$ の断面では板厚が薄く、かつ、板パネルと補剛材との剛性が低い点が考えられる。図 - 8 の荷重 - 変位曲線で剛比パラメータの違いにより荷重のピークを迎えた後の履歴に強度劣化の差が大きく現れている。このことから、補剛板の断面形状が座屈しやすい条件下では、鋼材特性を考慮しても塑性変形能を大きく低下させる要因となる。図 - 5 に示す $\bar{\lambda}_p = 0.6$ の場合において、 γ/γ^* を 5 まで大きくすることにより、 ε_U が 0.1 のモデルでは、塑性変形能を設計基準まで改善できる。

エネルギー吸収能を図 - 6、図 - 7 に示す。図 - 6 では、 $\bar{\lambda}_p = 0.45$ において設計基準のエネルギー吸収能を確保できるものの、 $\bar{\lambda}_p = 0.5$ の範囲でエネルギー吸収能は大きく低下し、図 - 7 に示すように剛比パラメータを大きくしても設計基準を構造諸元に持つモデルにおけるエネルギー吸収能は期待できないことが確認できる。

図 - 6、図 - 7 に示す。図 - 6 では、 $\bar{\lambda}_p = 0.45$ において設計基準のエネルギー吸収能を確保できるものの、 $\bar{\lambda}_p = 0.5$ の範囲でエネルギー吸収能は大きく低下し、図 - 7 に示すように剛比パラメータを大きくしても設計基準を構造諸元に持つモデルにおけるエネルギー吸収能は期待できないことが確認できる。

4. 結論

鋼材特性が重要なパラメータであることに主観をおき、繰り返し軸方向荷重を受ける補剛板の鋼材特性が塑性変形能やエネルギー吸収能に与える影響に対し、以下のことが分かった。

現行の道路橋示方書の設計基準に準拠した設計を行った場合、鋼材特性を活用することにより補剛板の塑性変形能の向上を期待できる。 $\bar{\lambda}_p$ が 0.6 の場合、鋼材特性を降伏比が 0.5 で、かつ降伏棚を無しとすることにより、縦補剛材剛比パラメータを適切に与えることで塑性変形能の向上が期待できる。 $\bar{\lambda}_p$ が 0.45 以下で γ/γ^* が 3 を満たす断面では、降伏比が小さく降伏棚を有しない場合に高いエネルギー吸収能を期待できる。幅厚比パラメータおよび縦補剛材剛比パラメータに加え、鋼材特性を有効に考慮することにより、塑性変形能の向上が一層期待できる。

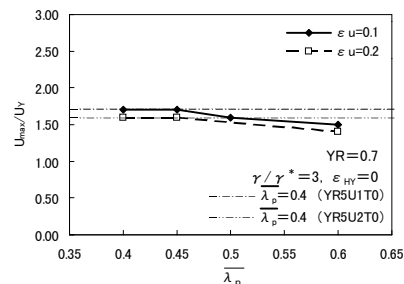


図 - 3 塑性変形能 - 幅厚比パラメータ

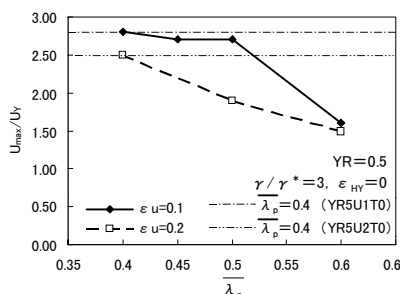


図 - 4 塑性変形能 - 幅厚比パラメータ

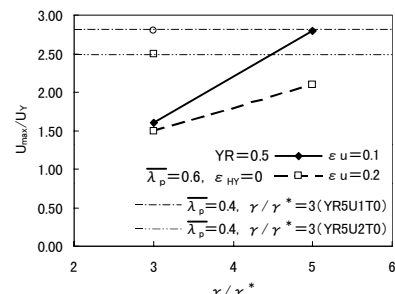


図 - 5 塑性変形能 - 剛比パラメータ

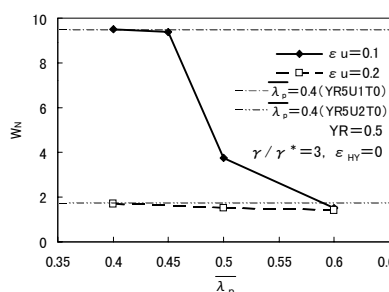


図 - 6 エネルギー吸収能 - 幅厚比パラメータ

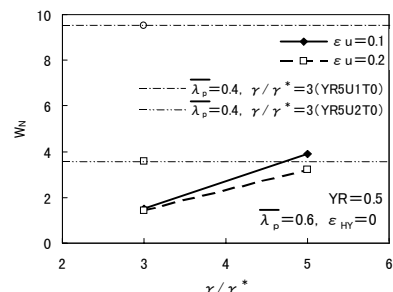


図 - 7 エネルギー吸収能 - 剛比パラメータ

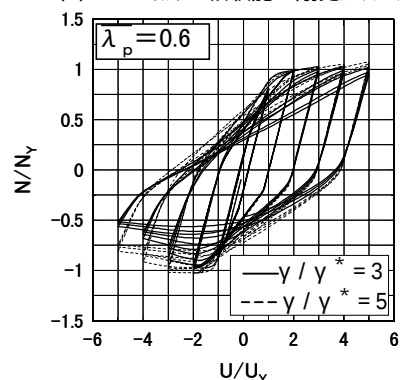


図 - 8 荷重-変位曲線

参考文献 1) Nara, S. and Fukumoto, Y., Evaluation of Ultimate Strength and Ductility of Longitudinally Stiffened Plates under Uniaxial Compression, proceedings of 1991 Annual Technical Session, SSRC, pp.391-401, April 15-17, 1991, Chicago Illinois. 2) 奈良敬, 梅村哲男, 服部松利, 森脇良一: 鋼材特性を考慮した圧縮補剛板の極限強度と変形性能, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.125-115, 1993 年 3 月. 3) Nara S.: Steel properties for improvement in ultimate strength and ductility of longitudinally stiffened plates under uniaxial compression, Proceedings of 1994 Task Group Technical Session, SSRC, Bethlehem, Pennsylvania, June 20-22, pp.355-364, 1994. 4) 土木学会鋼構造委員会鋼構造新技術小委員会: 鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術, 1996 年. 5) 小野徹郎, 上之郷貴重, 吉田文久, 岩田衛, 林賢一: 金属系素材の素材特性及び履歴挙動に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 498 号, pp.137-143, 1997 年 8 月. 6) 奈良敬, 村上茂之, 小西隆史: 引張試験に基づく材料定数をパラメータとする鋼材の繰り返し構成則, 鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, 第 3 回, 土木学会鋼構造委員会鋼構造物の耐震検討小委員会, pp.105-112, 2000 年 1 月. 7) 奈良敬, 小松定夫, 北田俊行: 連続補剛板の極限圧縮強度特性に関する研究, 土木学会論文集, 第 392 号, pp.273-280, 1988 年 4 月. 8) 日本道路協会: 道路橋示方書, 同解説, 丸善, 1996 年 12 月. 9) 小松定夫, 牛尾正之, 北田俊行: 補剛板の溶接残留応力および初期たわみに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 265 号, pp.25-34, 1977 年 9 月. 10) Eurocode 3: Common Unified Code of Practice for Steel Structures, draft, 1983.