

細長比パラメータが大きい矩形断面鋼部材の 耐震性能評価法の適用性に関する解析的研究

竹沢 洋輝¹・小野 潔²・馬越 一也³・岡田 誠司⁴

¹学会員 早稲田大学院創造理工学研究科 建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

²正会員 工博 早稲田大学教授 創造理工学部（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

³正会員 株式会社耐震解析研究所 解析技術センター（〒810-0003 福岡県福岡市中央区春吉 3-21-19）

⁴正会員 株式会社IHI インフラシステム開発部（〒108-0023 東京都港区芝浦三丁目 17 番 12 号吾妻ビル）

1. はじめに

既往の文献 1)により矩形断面鋼部材の耐震性能照査法としてひずみ照査法が提案されている。この文献 1)で提案されたひずみ照査法では、部材健全度 2(軽微な損傷)の地震後の使用性に対する照査の際は、ひずみの制限値を $2\epsilon_y$ としている。また文献 1)では、鋼部材の水平荷重－水平変位関係において、部材の応答ひずみが $2\epsilon_y$ に達する点(以下「 $2\epsilon_y$ 点」とする)は、最大荷重点に対して変形能を十分残している(十分離れている)図が示されている。このひずみ制限値 $2\epsilon_y$ は鋼アーチ橋のアーチリブなどの動的解析や補強工法の検討などに適用されている例が報告されているが、一般的にアーチリブなどの部材は細長比パラメータが大きく軸力も大きくなるため変形能が期待できない可能性がある。また、変形能が望めない部材においては、部材の最大荷重点に対して $2\epsilon_y$ 点が近くなる可能性が指摘されている²⁾。そこで本稿では、弾塑性有限変位解析を用いて細長比パラメータが大きい矩形断面鋼部材の耐震性能を把握し、ファイバーモデルを用いた解析結果と比較することでひずみ照査法のひずみ制限値 $2\epsilon_y$ の適用性を検証した。

2. 解析手法の妥当性の確認

鋼部材の耐震性能の把握に先立ち、既往の正負交番載荷実験³⁾で得られた実験結果と弾塑性有限変位解析結果とを比較することにより解析手法の妥当性を確認した。以下に詳細を述べる。

(1). 解析モデルおよびプログラム

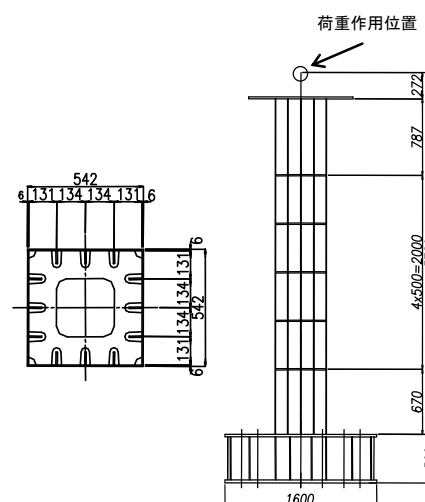


図-1 供試体³⁾断面図および寸法図

細長比パラメータが大きい供試体³⁾(S-44-15 : $\bar{\lambda}=0.44$, $R_R=0.45$, $R_F=0.42$, $N/N_y=0.15$, 補剛材の剛比 $\gamma/\gamma^*=1.19$)を対象とした。供試体の断面図および寸法図を図-1 に示す。解析モデルは適切な分割数を設定し、大阪大学で開発された解析プログラム CYNAS⁴⁾を用いた。また、鋼材の繰り返し塑性履歴を精度よく再現できる構成式を適用した。

(2). 解析条件

解析モデルは、実験と同様に SM490 に相当する構成則を適用し、既往の研究³⁾で示されている残留応力および初期たわみを導入する。残留応力は図-2 に SM490 の場合の残留応力分布を示す。矩形断面鋼製橋脚や補剛版の耐荷力解析で設定される板パネルの初期たわみの多くは、以下の式(1)で示す全体系初期たわみ W_{GI} と式

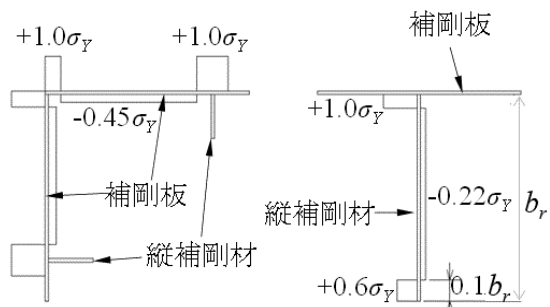


図-2 SM490における残留応力分布

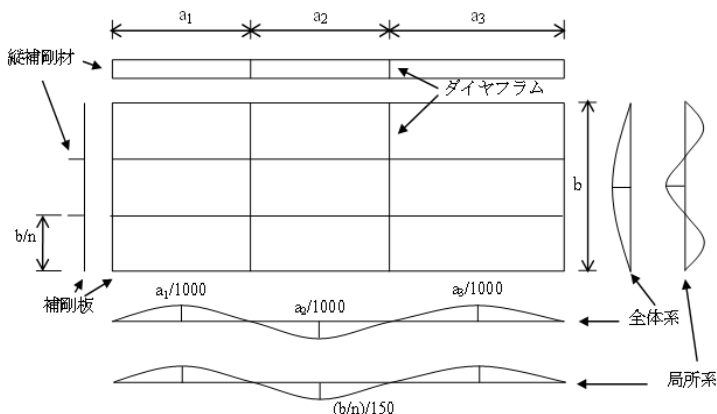


図-3 式(1), 式(2)で表現される初期たわみ

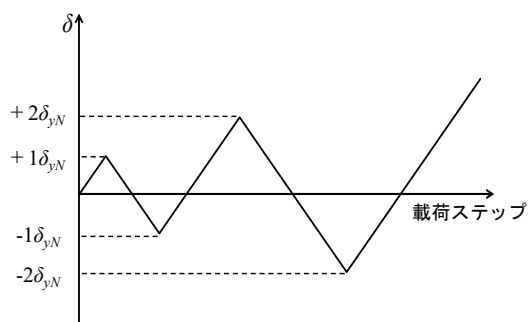


図-5 载荷パターンの概念図

(2)で示す局所系初期たわみ W_L の和である。式(1)および式(2)で表現される補剛板の初期たわみの模式図を図-3に示し、初期たわみを導入した解析モデルを図-4に示す。载荷パターンについては、実験条件と同様に一定軸力下における降伏水平変位 δ_y の整数倍を片振幅とした繰り返し漸増の強制変位を与えた。繰り返し漸増量 δ_y はベルヌイ・オイラーの降伏水平変位とした。図-5に示すように各 δ_y における繰り返し载荷回数は1回とした。

$$W_{G1}(x,y) = \frac{a}{1000} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \quad (1)$$

$$W_L(x,y) = \frac{(b/n)}{150} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (2)$$

ここに、 a ：ダイヤフラム間隔、 b ：補剛板幅、 n ：パネル数

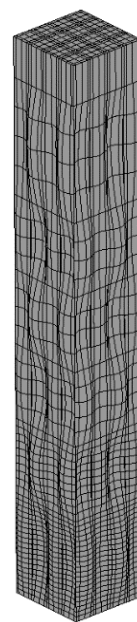


図-4 式(1), 式(2)で表現される初期たわみを導入した解析モデル

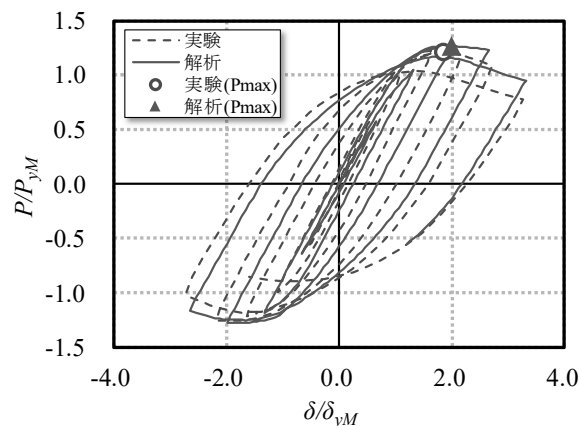


図-6 実験と解析の比較

(3). 実験結果と解析結果の比較

実験結果と解析結果の比較にあたり、軸力を考慮した降伏水平荷重 P_y をそれぞれの履歴曲線から得られる初期勾配で除した値である δ_y を算出し、無次元化した指標を用いた荷重－変位関係を用いた。実験結果と解析結果の比較を図-6に示す。図から最大荷重に至るまでの履歴はほぼ一致していることがわかる。したがって、弾塑性有限変位解析による解析手法の妥当性が確認できた。

3. 弾塑性有限変位解析による鋼部材の耐震性能の把握

妥当性を確認した解析手法および解析条件を用いて、細長比パラメータの大きい鋼部材($\bar{\lambda}=0.50$)の耐震性能を調査した。その際、変形能に関わる諸要因の一つであ

表-1 解析モデルの諸元

	P-33-10	P-53-10	P-55-10
鋼種	SM490Y		
外形寸法 (mm)	921×921	913×913	913×913
フランジ厚 (mm)	21	13	13
ウェブ厚 (mm)			
縦リブ幅 (mm)	150	140	103
縦リブ厚 (mm)	20	18	13
高さ (mm)	6,600	6,500	6,700
リブ枚数	2	2	2
補剛材の剛比 γ/γ^*	1.01	2.79	1.00
軸力比 N/N_y	0.10	0.10	0.10
細長比パラメータ $\bar{\lambda}$	0.50		
幅厚比パラメータ R_R	0.30	0.50	0.50
幅厚比パラメータ R_F	0.30	0.30	0.50

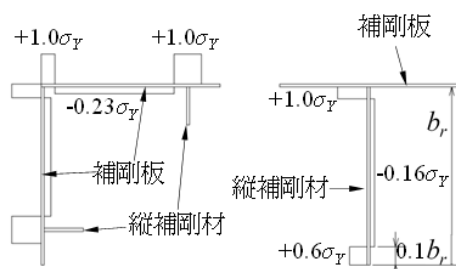


図-7 SM490Y における残留応力分布

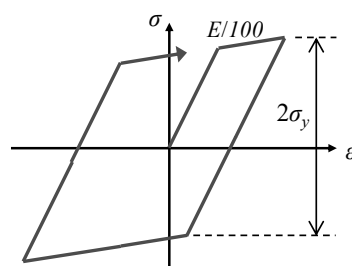


図-9 バイリニア型移動硬化則

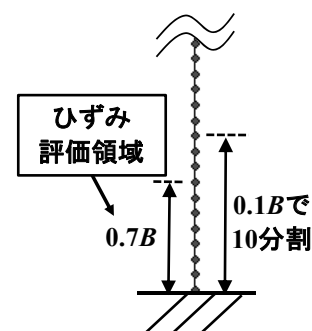


図-10 ひずみ評価領域の分割数

る補剛板の幅厚比パラメータ R_R , R_F が異なるモデルを対象とした。解析モデルの構造諸元を表-1 に示す。幅厚比パラメータ R_R , R_F は道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編³⁾を参照し、0.30 および 0.50 の組み合わせとなるよう以下の要領で設定した。まず縦補剛材間の長さを固定し、 $R_F=0.30, 0.50$ となるよう補剛板の板厚を決定した。また、 $\gamma/\gamma^* \geq 1.0$ の範囲で $R_F=0.30, 0.50$ となるようにダイヤフラム間隔を固定し、縦補剛材寸法を変更して 3 断面を設定した。さらに、 $\bar{\lambda}=0.50$ となるように部材長を決定した。ただし、リブ枚数は 2 枚としリブの幅厚比パラメータは 0.7 以下とした。鋼種は SM490Y とし、残留応力は図-7 に示す SM490Y の場合の残留応力分布を適用した。また、式(1)および式(2)で表現された初期たわみを適用した。解析結果を図-8 に示す。解析結果は無次元化した指標を用いた荷重-変位関係であり、最大荷重点もあわせて示す。この図から、幅厚比パラメータ R_R , R_F が増加するほど耐力および変形能が低下していることがわかる。

4. ファイバーモデル解析によるひずみ照査法の適用性の検証

ファイバーモデル解析により $2\epsilon_y$ 点を算出し、弾塑性有限変位解析で得られた結果と比較することでひずみ照査法のひずみ制限値 $2\epsilon_y$ の適用性を確認した。

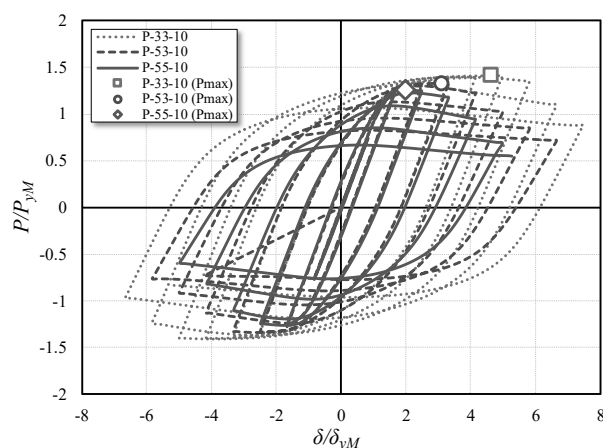


図-8 幅厚比パラメータの影響

(1). ファイバー解析プログラムおよび解析モデル

ファイバー解析プログラム、ScanFEM⁶⁾を用い、 $2\epsilon_y$ 点を算出した。ファイバー解析に導入する材料特性は、図-9 に示す降伏後勾配が $E/100$ のとなるバイリニア型の移動硬化則とし、弾塑性有限変位解析と同様に漸増繰り返し载荷を行った。また、ひずみ照査法が適用される実務設計を想定し、残留応力および初期たわみの設定は行わないものとした。要素・断面分割に関しては、既往の研究⁷⁾において妥当な精度で収束解が得られることが確認された分割数を満たすように設定する。要素分割は $B_E/5$ 以下の要素長とし ($B_E = (B_F + B_W)/2$, B_F : フランジ幅, B_W : ウェブ幅), 断面分割に関しては、フランジおよびウェブの板幅方向は 10 分割以上、縦リブの板幅方向は 2 分割以上、フランジ、ウェブおよび縦リブの板厚方向は 1 分割以上行うこととした。特に、図-10 に示したフランジ幅分の高さの 0.7 倍の領域(ひずみ評価領域)における平均応答圧縮ひずみを解析するため、フランジ幅分の高さの領域を 10 分割とした。

(2). ひずみ照査法の適用性の検証

ファイバーモデル解析にあたり、ひずみ評価領域における平均応答圧縮ひずみが $2\epsilon_y$ に達した時点を $2\epsilon_y$ 点として算出した。図-11~13 に弾塑性有限変位解析によって得られた解析結果と最大荷重点、ならびにファイ

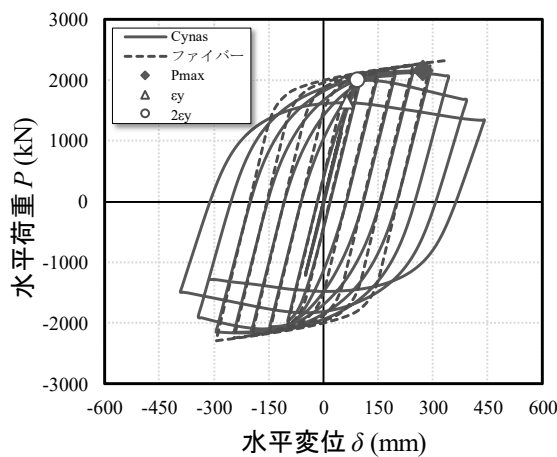


図-11 P-33-10における比較

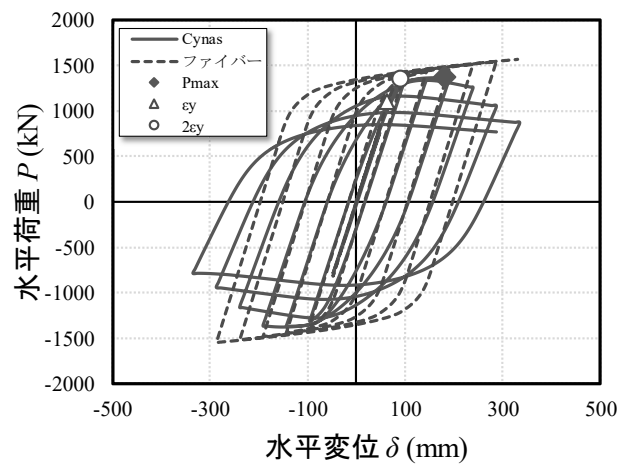


図-12 P-53-10における比較

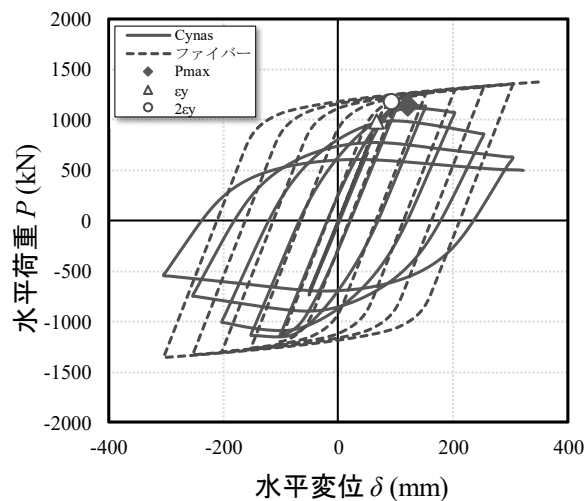


図-13 P-55-10における比較

バー解析から算出された ϵ_y 点および $2\epsilon_y$ 点を比較した図を示す。幅厚比パラメータ R_R , $R_F=0.30$ の場合(図-11)は文献1)に示された通り $2\epsilon_y$ 点と最大荷重点は離れていることが確認できるが、幅厚比パラメータ R_R , $R_F=0.50$ の場合(図-13)においては $2\epsilon_y$ 点が最大荷重点とほぼ同等であり、変形能に余裕はみられない。図から、幅厚比パラメータが増加するにつれて $2\epsilon_y$ 点は最大荷重点に近づいていく傾向が確認できる。

5. 結論

本稿では細長比パラメータの大きい鋼部材を対象に弾塑性有限変位解析を用いて耐震性能を把握し、ファイバーモデル解析結果と比較することでひずみ照査法のひずみ制限値 $2\epsilon_y$ の適用性を検証した。その結果、細長比パラメータおよび幅厚比パラメータが大きい鋼部材の場合、 $2\epsilon_y$ 点が最大荷重点に近づく傾向が確認された。ただし、本稿は特定の条件下の部材のみ対象としたものであるため、具体的なひずみ制限値 $2\epsilon_y$ の適用範囲の検討に関しては今後の課題となる。

参考文献

- 1) 宇佐美勉編著：鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン、(社)日本鋼構造協会、2006。
- 2) 小野潔，橋本亮，西村宣男，山口栄輝：ファイバーモデルを用いた補剛矩形断面鋼部材の耐震性能照査法に関する一提案，橋梁と基礎，pp.26-33，2007。
- 3) 岡田誠司，小野潔，谷上裕明，徳永宗正，西村宣男：高圧縮軸力が作用する矩形断面鋼部材の耐震性能評価に関する研究，土木学会論文集 A，Vol.66(3)，pp.576-595，2010。
- 4) 西村宣夫，小野潔，池内智行：単調載荷曲線を基にした繰り返し塑性履歴を受ける鋼材の構成式，土木学会論文集，No.513/I-31，pp.27-38，1995。
- 5) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012。
- 6) (株)耐震解析研究所：SeanFEM (ver.1.2.3)，2006。
- 7) (社)日本鋼構造協会：ファイバーモデルを用いた鋼橋の動的耐震解析の現状と信頼性向上，鋼橋の合理化構造・設計法研究委員会，2011。