

補剛薄肉断面鋼部材の簡易耐震照査法の開発に関する研究

垣内 一輝¹，葛 漢彬²

¹学生会員 名城大学大学院博士課程前期課程 理工学研究科建設システム工学専攻
(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

²正会員 博士（工学） 名城大学教授 理工学部建設システム工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

1. はじめに

日本の土木構造物、特に1970年代以前の古い構造物においては鋼部材に比較的薄肉な断面部材が多く使われている。鋼製橋脚は1995年に発生した兵庫県南部地震において本格的な地震被害を受け、それ以降のこの分野に対する耐震設計は急速に発展した。現在まで耐震性能照査のため数多くの準静的載荷実験及び解析が行われており、設計に関する多くの知見が得られている。しかしながら、これは1970年代以降に用いられている比較的厚肉な断面への適用が多く、薄肉断面への適用は極々限定的なものでしかない。したがって、薄肉断面部材が鋼構造物に使われている場合における耐震性能照査法の確立が必要である。

一般に、薄肉断面を持つ鋼構造物に地震動などの繰り返し荷重が作用する場合、主要な破壊形式は局部座屈である。これについてはShell要素を用いた有限要素解析を実施すれば、局部座屈による影響を考慮でき実挙動の再現が可能と考えられる。しかしながら、Beam要素を用いたファイバーモデルによる解析においては局部座屈による影響を考慮できない。

本研究では補剛箱形断面の鋼部材を対象とした解析的検討を行う。薄肉断面部材の局部座屈を考慮して材料特性を適切に設定し、Beam要素を用いたファイバーモデルのPushover解析によって終局点を精度よく解析する手法の提案を試みる。

2. シェル解析による鋼部材の局部座屈挙動

(1) 解析モデルの妥当性の検証

西川ら¹⁾によって行われた実験供試体B14を元に作成したShellモデルで解析を行い、実験結果と比

較することにより本解析モデルの妥当性を検証する。供試体は補剛箱形断面の鋼製橋脚を対象としており、供試体諸元を表-2.1^{1),3)}に、材料定数^{2),3)}を表-2.2に、解析に用いたモデル及び断面図、要素分割数を図-2.1に示す。材質はSM490材を使用した。解析モデルは基部から高さ $3B$ までをシェル要素、残りの部分にはり要素を用いた。ここで用いた B はダイアフラム間隔である。

解析は構造と荷重の対称性から1/2モデルとして行い、残留応力、初期たわみは考慮せず、解析には耐震解析ソフトウェアSeanFEMを使用した。

構成則は図-2.2(a)に示すようにバイリニア型の応力-ひずみ関係に図-2.2(b)に示す移動硬化則を適用したもので、1次勾配を E として、2次勾配は $E/100$ とした。載荷パターンは上部構造重量を載荷した後、図-2.2(c)に示すように強制変位で漸増変位繰り返し載荷を行った。

図-2.3に実験と解析それぞれで得た水平荷重および水平変位をプロットした。グラフは横軸に供試体上端部の水平変位 δ を降伏水平変位 δ_y で無次元化したもの、縦軸に荷重 H を降伏荷重 H_y で無次元化したものである。グラフより、解析は実験とほぼ一致しており、本解析モデルの妥当性が証明された。

(2) パラメトリック解析

幅厚比パラメータ R_f ($0.5 \leq R_f \leq 0.8$)、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ ($0.3 \leq \bar{\lambda} \leq 0.5$)、軸力比 P/P_y (一次設計の値及び $0.3 \leq P/P_y \leq 0.5$ とした場合)を変化させて合計16ケースのパラメトリック解析を行う。それぞれの解析の材料定数を表-2.3に、モデルの諸元を表-2.4に示す。なお、検証用の実験供試体とは異なり、図-2.4(b)に示すように補剛材本数は1面につき2本とする。

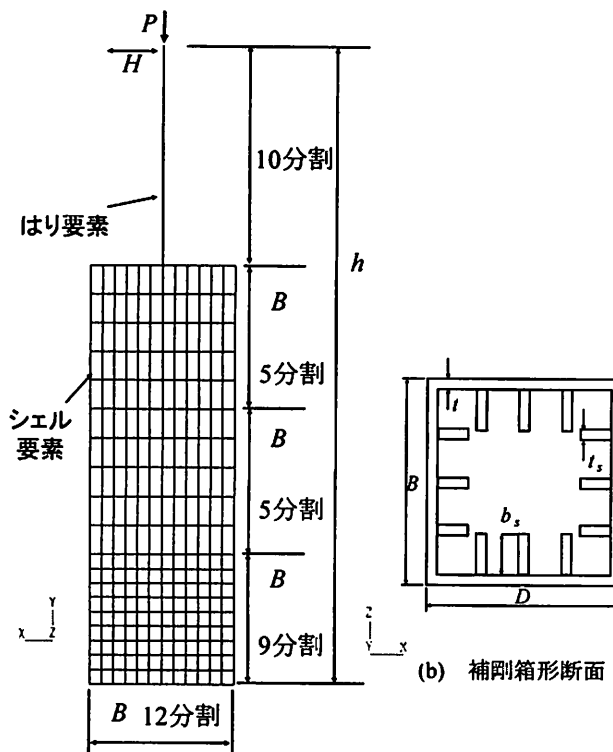
表-2.1 検証用解析モデルの諸元

R_f	0.56	h (mm)	3403
$\bar{\lambda}$	0.26	b (mm)	891
γ/γ^*	0.89	t (mm)	9.1
α	1.0	b_s (mm)	80
$\bar{\lambda}_s$	0.63	t_s (mm)	6.2
$\bar{\lambda}_s'$	0.63	P/P_y	0.122

Note: R_f : フランジの幅厚比パラメータ, $\bar{\lambda}$: 細長比パラメータ, γ/γ^* : 補剛材剛比, α : アスペクト比, $\bar{\lambda}_s$: 補剛材細長比パラメータ, $\bar{\lambda}_s'$: 補正補剛材細長比パラメータ, h : 供試体高さ, b : 断面幅 ($= B - t$), t : 板パネル厚, b_s : 補剛材幅, t_s : 補剛材厚, P/P_y : 軸力比 (供試体に与えられる鉛直荷重 P と全断面降伏荷重 P_y の比)

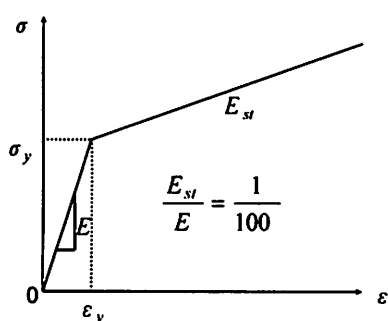
表-2.2 検証用解析モデルの材料定数

板パネル, 補剛材			
σ_y (MPa)	E (GPa)	ν	E/E_{st}
379	206	0.3	100

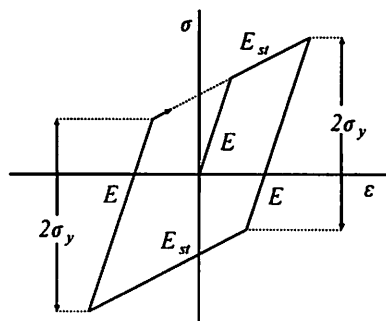


(a) 解析モデル

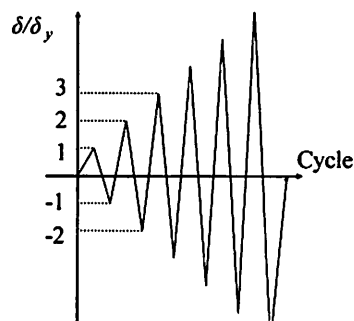
図-2.1 解析モデル諸元



(a) バイリニア型応力-ひずみ関係



(b) 移動硬化則



(c) 荷重パターン

図-2.2 材料構成則及び荷重パターン

パラメトリック解析の Shell モデルの要素分割数を図-2.4 に示す。

パラメトリック解析でも 2.(1)と同様, 図-2.2(a)に示すバイリニア型応力-ひずみ関係に移動硬化則を適用したもので, 荷重パターンは図-2.2(c)に示すように, 上部構造重量を荷重した後降伏変位 δ_y を 1δ として, 強制変位で漸増変位繰り返し荷重を行った。また, 構造と荷重の対称性から 1/2 モデルとして行った。なお, 残留応力, 初期たわみは考慮していない。

終局点の定義については, 本研究では 1)最大荷重点 (H_m と δ_m), および 2)ピーク後の最大荷重の 95%にまで下降した荷重点 (H_u と δ_u , 以降, 95%荷重点と称する), の 2 種類を考えた。

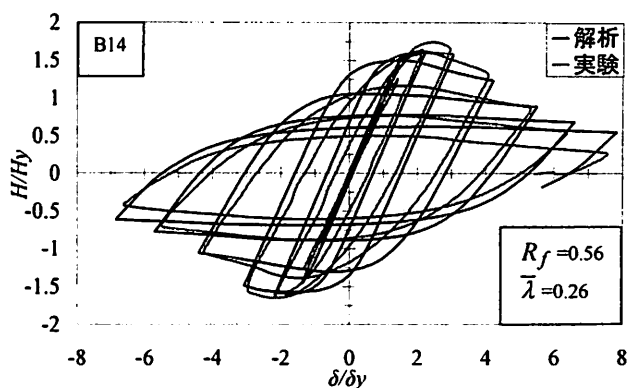


図-2.3 水平荷重-水平変位履歴曲線の比較

表-2.3 パラメトリック解析の材料定数

板パネル, 補剛材			
σ_y (MPa)	E (GPa)	ν	E/E_{st}
314	206	0.3	100

表-2.4 パラメトリック解析のモデル諸元

No.	R_f	$\bar{\lambda}$	γ/γ^*	α	$\bar{\lambda}_s$	$\bar{\lambda}_s^*$	h (mm)	b (mm)	t (mm)	b_s (mm)	t_s (mm)	P/P_y	H_y (kN)	δ_y (mm)
1	0.5	0.3	1.0	1.0	0.534	0.534	7025	1461	20	133	20	0.176	2242	30.2
2	0.5	0.4	1.0	1.0	0.534	0.534	9366	1461	20	133	20	0.139	1760	53.4
3	0.5	0.5	1.0	1.0	0.534	0.534	11708	1461	20	133	20	0.115	1449	83.9
4	0.6	0.3	1.0	1.0	0.659	0.659	8463	1753	20	140	20	0.167	2506	34.5
5	0.6	0.4	1.0	1.0	0.659	0.659	11284	1753	20	140	20	0.132	1967	61.1
6	0.6	0.5	1.0	1.0	0.659	0.659	14105	1753	20	140	20	0.109	1619	96.0
7	0.7	0.3	1.0	1.0	0.788	0.788	9901	2045	20	146	20	0.158	2721	38.1
8	0.7	0.4	1.0	1.0	0.788	0.788	13201	2045	20	146	20	0.125	2136	67.5
9	0.7	0.5	1.0	1.0	0.788	0.788	16501	2045	20	146	20	0.103	1759	106.1
10	0.8	0.3	1.0	1.0	0.935	0.935	11338	2338	20	152	20	0.148	2890	41.0
11	0.8	0.4	1.0	1.0	0.935	0.935	15118	2338	20	152	20	0.117	2269	72.7
12	0.8	0.5	1.0	1.0	0.935	0.935	18897	2338	20	152	20	0.097	1869	114.2
13	0.8	0.3	1.0	1.0	0.935	0.935	11338	2338	20	152	20	0.300	2890	41.0
14	0.8	0.4	1.0	1.0	0.935	0.935	15118	2338	20	152	20	0.300	2269	72.7
15	0.8	0.5	1.0	1.0	0.935	0.935	18897	2338	20	152	20	0.300	1869	114.2
16	0.8	0.5	1.0	1.0	0.935	0.935	11338	2338	20	152	20	0.500	2890	41.0

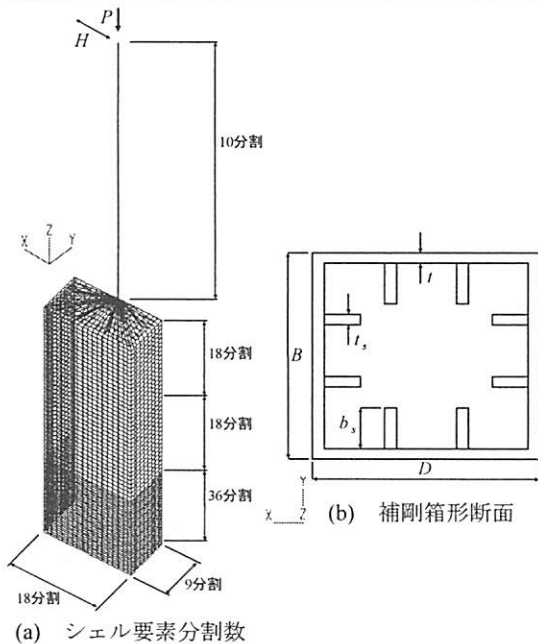


図-2.4 パラメトリック解析のモデル概要

3. ファイバーモデルによる終局点の予測に関する簡易解析手法

提案する簡易解析手法で用いるファイバーモデルは、図-3.1 に示すように分割数を 20 分割（基部から $0.7B$ までを 3 分割，残りの部分を 17 分割）とした。はり要素を用いるこの種の解析では局部座屈を考慮できないため，これまでは局部座屈による影響を軟化型の応力-ひずみ関係として近似的に考慮したモデルが提案されている（崎元ら，1997，2000；小澤ら，1999；渡辺ら，2000）。これは Shell 要素等を

用いて解析を行って局部座屈の影響を含んだ等価な平均応力-平均ひずみ関係を求め，幅厚比などの陽な関数として定義したものを応力-ひずみレベルの復元力モデルとしてファイバーモデルに導入する方法である。このようにすると，Shell 要素を用いずに局部座屈を考慮した解析が近似的に可能となることが実験との比較によっても明らかにされている。しかしながら，解の有限要素メッシュ分割への依存性等の問題がある。これらの問題に関する検討は不十分であり，一般的な構造への適用は難しく実務への導入は困難である。その後，構造諸元をもとに軟化領域を表す座屈要素長の算定式とこれに応じた軟化型の平均応力-ひずみ関係を提示することで局部座屈を考慮した Pushover 解析に適用できる手法が提案されている（小澤ら，2001，2002）。本研究では，前述の研究と同様に，薄肉断面部材の局部座屈を考慮して材料特性を適切に設定し，Beam 要素を用いたファイバーモデルの Pushover 解析によって終局点を精度よく解析するより簡便な手法の提案を試みる。

そのために，図-3.2 に示すような 3 種類の応力-ひずみ関係を用いる。Case1 は Shell モデルと同様に設定している。Case2 は降伏応力を局部座屈強度 σ_m に置き換え，二次勾配は一次勾配と同様にしている。Case3 は降伏応力を局部座屈強度に置き換えた上で，二次勾配を 0 と設定している。また，硬化則は図-2.2(b)に示す移動硬化則を用いた。図-3.2 に示す σ_m は局部座屈強度であり，補剛断面の場合，以下の経験式⁴⁾で表される。

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 1.24 - 0.54 R_f \leq 1.0 \quad (3.1)$$

このように仮定した3種のモデル(Case1~Case3)で Pushover 解析を行った。解析で得られた水平荷重—水平変位履歴曲線の結果を図-3.3 に示す。グラフは縦軸に水平荷重 H を降伏水平荷重 H_y で無次元化したもの、横軸は水平変位 δ を降伏水平変位 δ_y で無次元化したものである。なお、図には Shell モデル解析で得られた包絡線も示してある。図-3.3 から分るように、Case1 から Case2、続いて Case3 へと履歴曲線は下方に推移している。

前述したように、終局点は最大荷重点と 95%荷重点の2つを仮定する。終局点の判定のために、著者らが行った圧縮—一軸曲げを受ける補剛箱形断面の有限要素解析より得られた終局圧縮ひずみ ε_m (最大曲げモーメント $M_{\max}$ 時のひずみ)と ε_u (95% $M_{\max}$ 時のひずみ)の算定式(3.2)^{5,7)}、(3.3)⁸⁾を用いる。

$$\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_y} = \frac{1.41}{\left(R_f \bar{\lambda}_s^{0.18} - 0.21\right)^{0.462}} + 0.38 \leq 20.0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y} = \frac{0.7}{\left(R_f \bar{\lambda}_s^{0.18} - 0.18\right)^{1.3}} + \frac{3.2}{(1 + P/P_y)^{2.2}} \leq 20.0 \quad (3.3)$$

$$(0.3 \leq R_f \leq 0.8, \quad \gamma/\gamma^* \geq 1.0, \quad 0.0 \leq P/P_y \leq 0.5)$$

解析モデルにおいて有効破壊長領域（基部から $0.7B$ ）の3つの要素に対し、断面の圧縮最外縁中心のひずみを平均したものを ε_{avg} とおく。そして ε_{avg} が $\varepsilon_m, \varepsilon_u$ となる変位をそれぞれ終局変位 δ_m, δ_u と定義し、荷重—変位関係履歴曲線において終局変位 δ_m, δ_u をとる荷重をそれぞれ終局荷重 H_m, H_u と定義する。図-3.3 に求めた終局点の例を示す。

ファイバーモデル解析の各ケースの終局点 (δ_m, H_m) 及び (δ_u, H_u) を Shell モデルの対応する終局点と比較したものをそれぞれ図-3.4、図-3.5 に示す。

図-3.4(a), (c), (e)で荷重の比較を行う。Case1 では一次設計した12モデルのうち11モデルが10%以内の誤差で、高軸力の4モデルのうち1モデルが10%~20%、3モデルが20%以上の誤差である。ただし、全般的に高めの評価となっている。Case2, Case3 では若干安全側の評価ではあるが、高軸力の場合の1モデルを除いてすべてのモデルが20%以内の誤差に収まり精度が向上した。

変位の比較では図-3.4(b), (d), (f)より、Case1 では一次設計したモデルの12モデル全てが10%以内の誤差に収まっているが、高軸力の場合の4モデル

のうち3モデルが過大評価され20%以上の誤差を出している。Case2, Case3 では、一次設計した場合の12モデルがすべて20%以内の誤差にあり、高軸力の場合も20%程度の誤差があるものの予測精度の改善が見られた。

一方、95%荷重点の場合、図-3.5(a), (c), (e)での終局荷重の比較では、10%以内の誤差に収まっているのは Case1 で一次設計した7モデル、Case2 は一次設計した全てのモデルと高軸力の場合の2モデル、Case3 では一次設計した10モデルと高軸力の場合の3モデルとなった。Case2 は局部座屈強度の影響で、一次設計したモデルの精度が大幅に改善されたことがわかる。Case3 は Case2 とほぼ同様な結果となり、2次勾配の影響は小さい。

図-3.5(b), (d), (f)で終局変位を比較すると、誤差10%以内のモデルは Case1 で一次設計した3モデルと高軸力の1モデル、Case2 は一次設計した6モデルと高軸力の1モデル、Case3 は一次設計した8モデルと高軸力の1モデルという結果となった。終局変位も局部座屈強度を適用した場合が精度よく再現できている。しかし、高軸力の場合は精度の向上が大幅には見られないため、更なる考慮が必要である。

図-3.4、図-3.5より、幅厚比パラメータ R_f 毎に各終局荷重、終局変位の解析精度を表-3.1、表-3.2としてまとめる。以下の表は図-3.4と図-3.5から導き出したもので、シェルモデルとファイバーモデルの終局点を比較し、その誤差が10%以内のもの(図-3.4、図-3.5で誤差10%を示すラインの内側にあるもの)を○、誤差が11%~20%のもの(同図で誤差10%を示すラインと20%を示すラインの間にあるもの)を△、誤差が20%以上のもの(同図で誤差20%を示すラインの外側にあるもの)を×として示したものである。

表-3.1では一次設計したモデルのみで比較した場合、Case1が最大荷重点を概ね再現できている。Case2とCase3ではグラフに大きな変化は見られないが、幅厚比パラメータ R_f が0.7以上になると精度が低下して10%の誤差を超えてしまうモデルが見られた。ただし、これらは安全側の評価となっている。また、最大荷重ではCase1と比較して高軸力の場合で誤差10%以内のモデルが3モデルあり、Shellモデルを概ね再現できている。最大荷重時変位においては再検討が必要である。表-3.2では、幅厚比パラメータ R_f が0.5ではどのケースも終局点を概ね再現できているが、0.6以上では終局点を過大評価してしまい、終局変位で10%以上の誤差を出してしまう。その中でもCase2がシェルモデルの終局点を概ね再現できていたことから、本解析ではCase2が終局点を精度よく求めることができる結果となった。

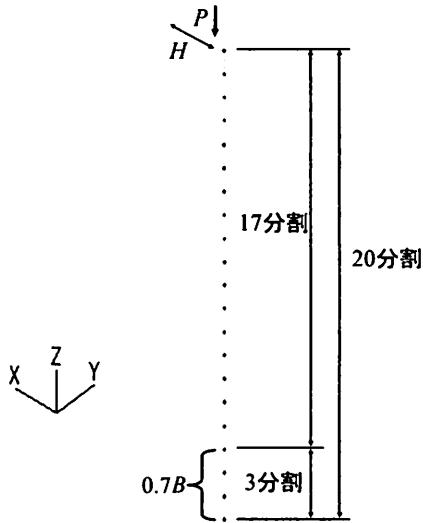


図-3.1 ファイバーモデル概要

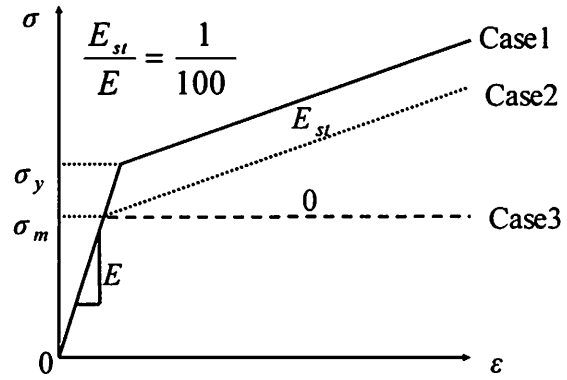
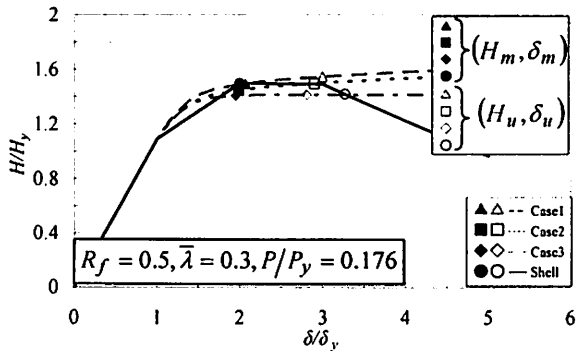
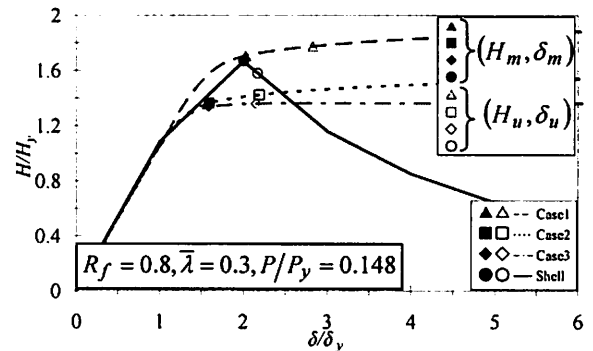


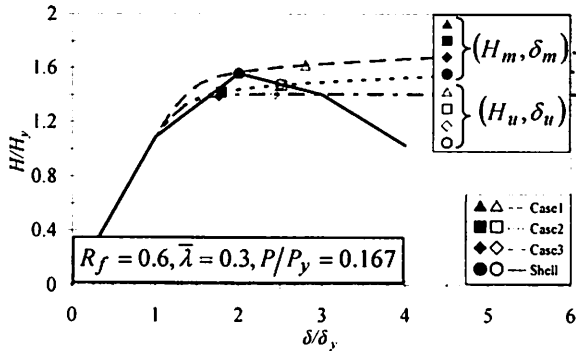
図-3.2 Case1~Case3 で用いる応力-ひずみ関係



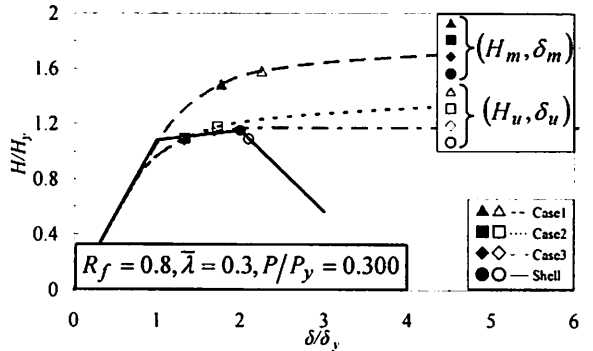
(a) 水平荷重-水平変位関係(No.1)



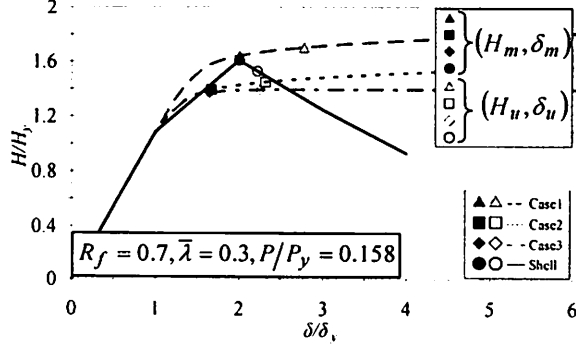
(d) 水平荷重-水平変位関係(No.10)



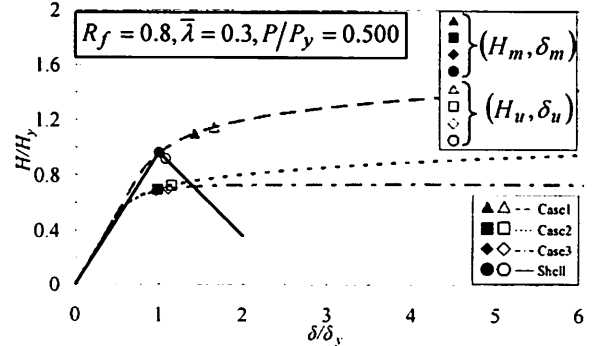
(b) 水平荷重-水平変位関係(No.4)



(e) 水平荷重-水平変位関係(No.13)

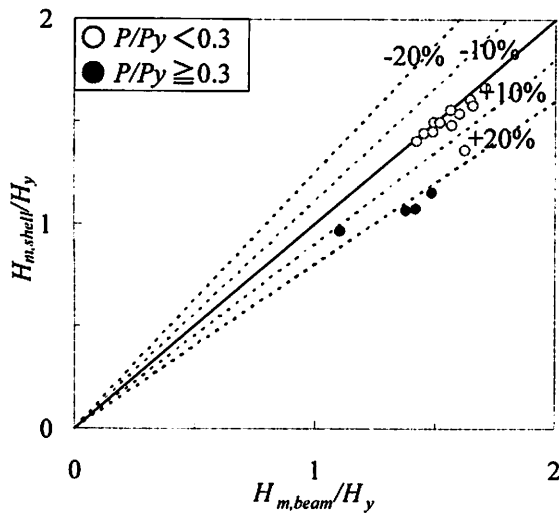


(c) 水平荷重-水平変位関係(No.7)

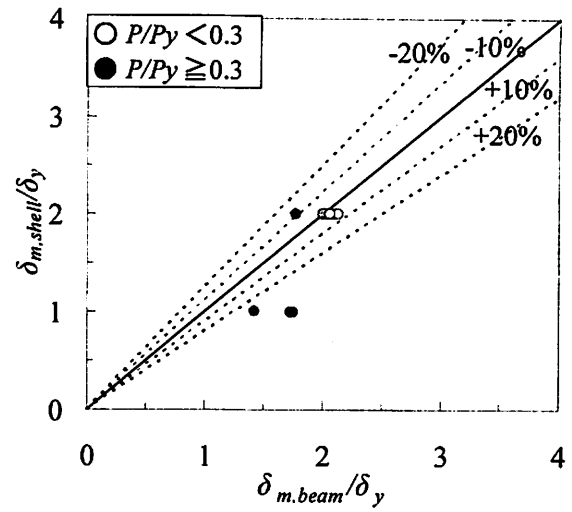


(f) 水平荷重-水平変位関係(No.16)

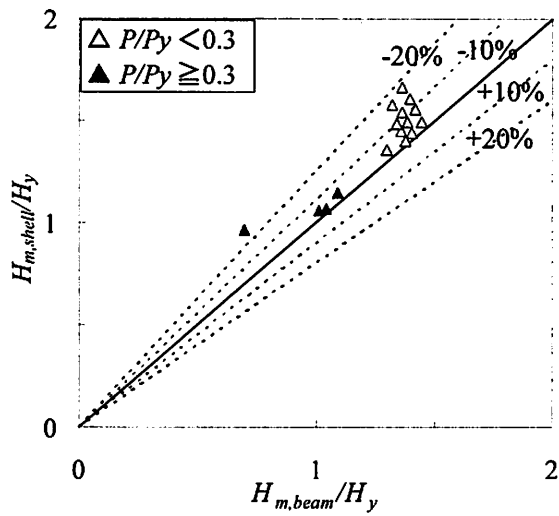
図-3.3 ファイバーモデルと Shell モデルによる水平荷重-水平変位曲線の比較



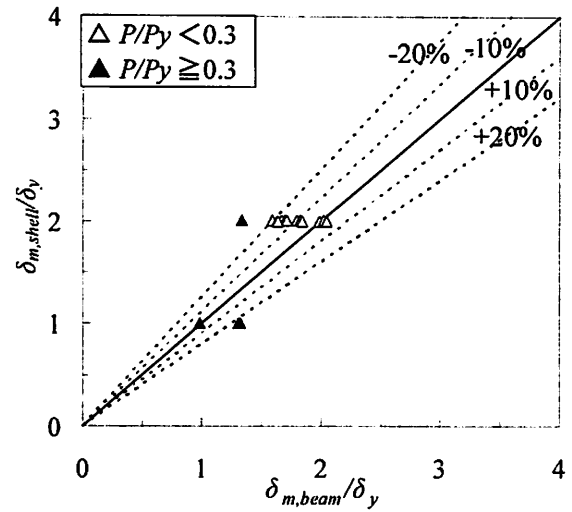
(a) Case1 の終局荷重



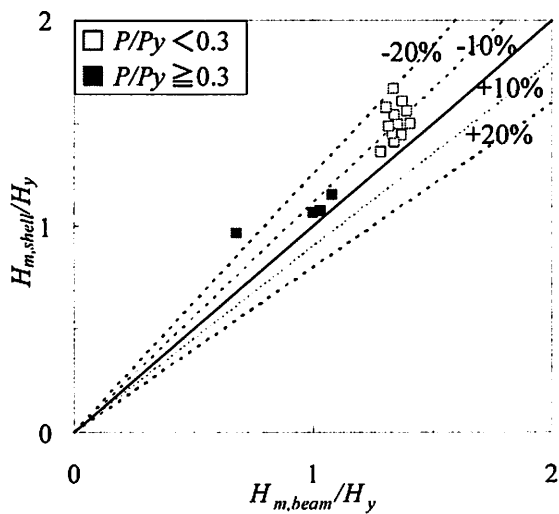
(b) Case1 の終局変位



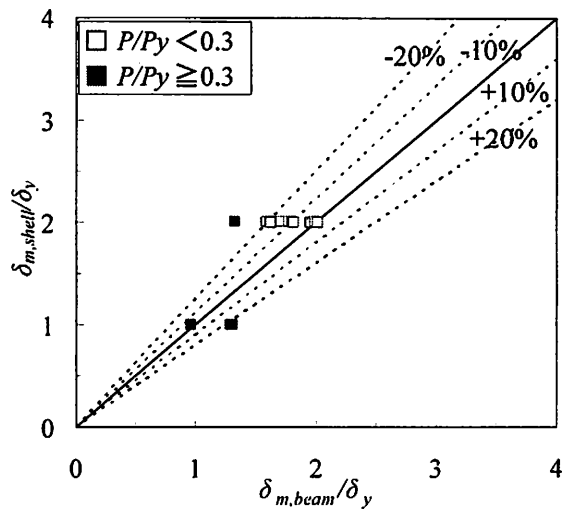
(c) Case2 の終局荷重



(d) Case2 の終局変位

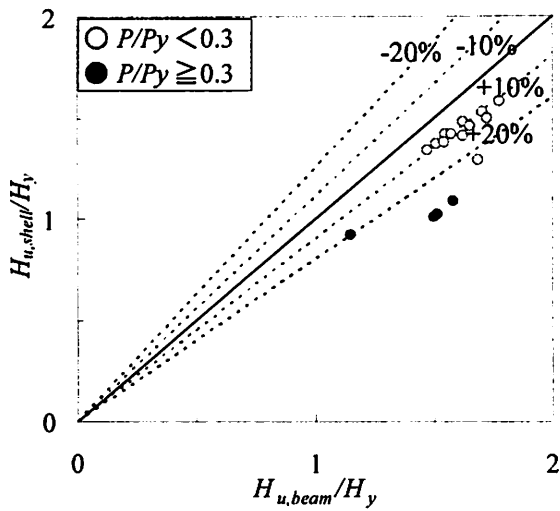


(e) Case3 の終局荷重

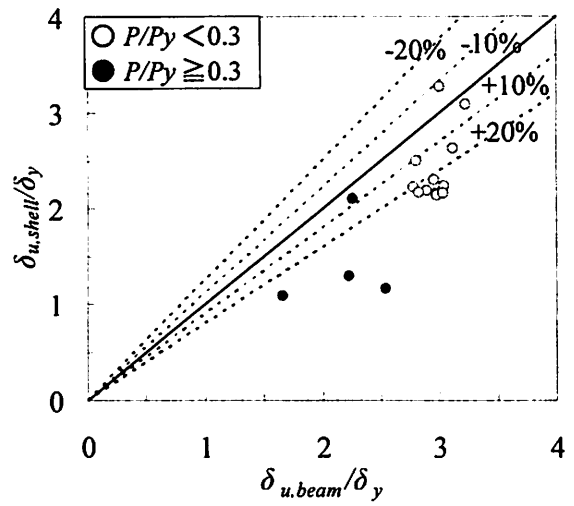


(f) Case3 の終局変位

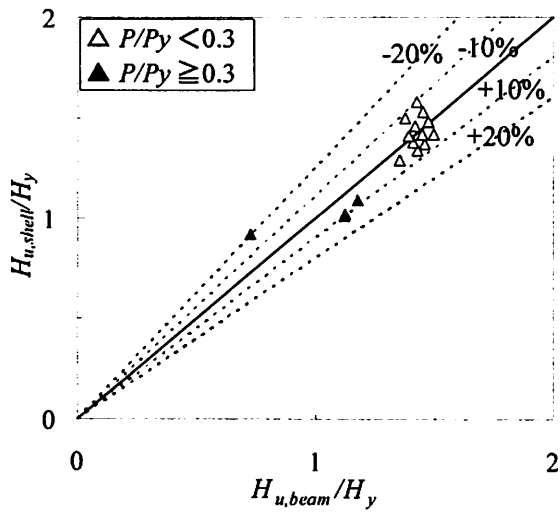
図-3.4 Shell モデルの最大荷重点とファイバーモデルの終局点(δ_m, H_m)の比較



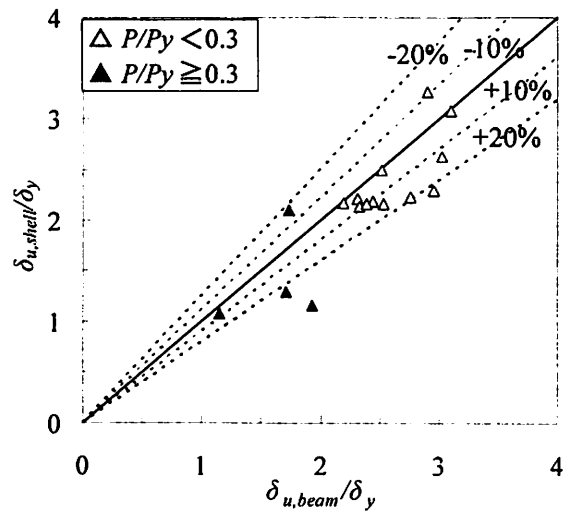
(a) Case1の終局荷重



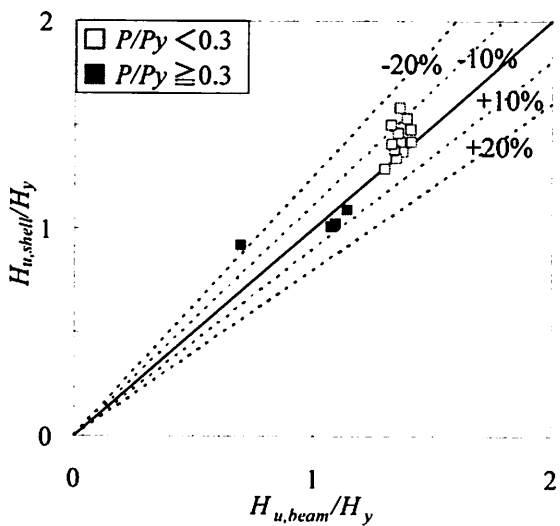
(b) Case1の終局変位



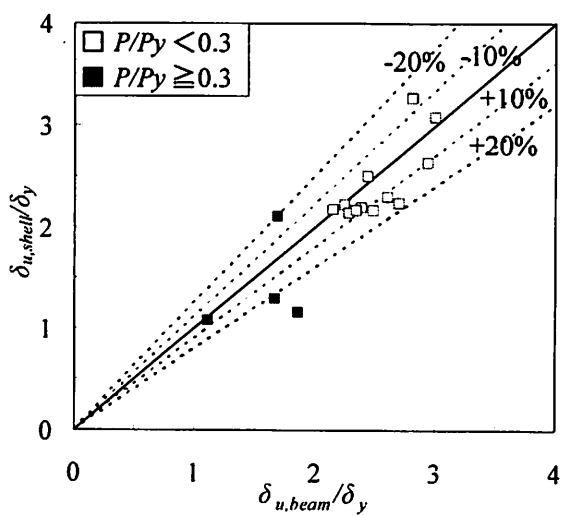
(c) Case2の終局荷重



(d) Case2の終局変位



(e) Case3の終局荷重



(f) Case3の終局変位

図-3.5 Shell モデルの 95%荷重点とファイバーモデルの終局点(δ_u, H_u)の比較

表-3.1 Shell モデルの最大荷重点とファイバーモデルの終局点(δ_m, H_m)による解析精度のまとめ

	終局荷重	終局変位	終局荷重	終局変位
R_f	0.5		0.7	
Case1	○	○	○	○
Case2	○	○	△	△
Case3	○	○	△	△
R_f	0.6		0.8	
Case1	○	○	○	○
Case2	○	○	△	△
Case3	○	○	△	△
	終局荷重		終局変位	
R_f	0.8($P/P_y = 0.3$ or 0.5)			
Case1	×		×	
Case2	○		×	
Case3	○		×	

表-3.2 Shell モデルの 95%荷重点とファイバーモデルの終局点(δ_u, H_u)による解析精度のまとめ

	終局荷重	終局変位	終局荷重	終局変位
R_f	0.5		0.7	
Case1	○	△	△	×
Case2	○	△	○	○
Case3	○	△	△	×
R_f	0.6		0.8	
Case1	○	×	△	×
Case2	○	○	○	○
Case3	○	×	△	×
	終局荷重		終局変位	
R_f	0.8($P/P_y = 0.3$ or 0.5)			
Case1	×		×	
Case2	○		△	
Case3	×		×	

5. 結論

本研究は、薄肉の断面を有する鋼構造物の簡易耐震性能照査法の確立を目的とし、橋梁の部材等に用いられる鋼部材を対象とした解析を行った。Shell モデルの繰り返し載荷解析から得られた終局点に、Beam 要素を用いたファイバーモデルによる Pushover 解析によって得られた終局点を近づけるため、局部座屈を考慮した材料特性を用いた簡易解析手法の提案を行った。本研究で得られた主な知見を以下にまとめる。

1) 実験との比較を目的とした Shell モデルの薄肉断面鋼製部材の解析においては、バイリニア型の構成則で十分な挙動を再現することが可能である。

2) Shell 要素を用いた繰り返し載荷解析と Beam 要素を用いたファイバーモデルによる Pushover 解析による終局点の比較において、幅厚比パラメータ R_f による影響が大きく、細長比パラメータ λ による影響は小さい。

3) Beam 要素を用いたファイバーモデルにおいて、本研究で対象とした補剛断面の場合では局部座屈強度を適用した構成則を用いた Case2 の場合の終局点が Shell 要素を用いた解析による結果に近い値となる。

4) 高軸力の場合での終局変位の評価において更なる検討が必要である。

参考文献

- 1) 西川和廣, 山本悟司, 名取暢, 寺尾圭史, 安波博道, 寺田昌弘: 既設鋼製橋脚の耐震性能改善方法に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.975-986, 1996 年 3 月。
- 2) 葛漢彬, 宇佐美勉, 高聖彬: 鋼製補剛箱形断面橋脚の繰り返し弾塑性挙動に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.109-118, 2000 年 3 月。
- 3) 葛漢彬, 高聖彬, 宇佐美勉: 鋼構造物の繰り返し弾塑性解析用構成則の実験データによる検証, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.201-210, 1998 年 3 月。
- 4) 宇佐美勉: 鋼平面ラーメン構造物の極限強度評価式の実験データによる検証, 構造工学論文集, Vol.36A, pp.79-88, 1990 年 3 月。
- 5) 葛漢彬, 河野豪, 宇佐美勉: 圧縮と曲げを受ける鋼部材セグメントの終局ひずみと鋼アーチ橋の動的耐震照査への応用, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.1479-1488, 2004 年 3 月。
- 6) 宇佐美勉 編著: 鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン, 日本鋼構造協会, 2006 年 9 月。
- 7) 土木学会: 鋼・合成構造標準示方書(耐震設計編), 2008 年 1 月。
- 8) Yi ZHENG, Tshutomu USAMI, Hanbin GE: A SEISMIC DESIGN METHODOLOGY FOR THIN-WALLED STEEL STRUCTURES THROUGH THE PUSHOVER ANALYSIS, September, 2000.
- 9) 鈴木森晶, 宇佐美勉: 繰り返し荷重下における鋼製橋脚モデルの強度と変形能の推定式に関する研究, 土木学会論文集, No.519/I-32, pp.115-125, 1995 年 7 月。