

I-130

座屈制約と構造形態に依存する弾性及び塑性設計の最適特性

通商産業省 正員 坂本 敏幸
 東京大学 正員 長谷川彰夫
 関東学院大学 正員 佐藤 尚次

1 まえがき 近年、耐震設計の分野において、構造物の弾性限界のみならず、最終的な崩壊荷重をも設定できることが着目され、土木構造物に対する塑性設計の適用が期待されている。ところで、塑性設計においては、部材に塑性ヒンジが形成され最終的な崩壊機構に至るまで、局部座屈、横座屈等の不安定現象が起きないことが前提とされているため、塑性設計は自ずから弾性設計より厳しい座屈制約を受けることになる。また、建築構造物では、不静定次数が高く、設計上の自由度が低いという構造形態に起因して、弾性限界から塑性限界までの余剰耐荷力が期待できるのに対し、土木構造物は一般に建築構造物とは逆の構造形態を持っており、両設計の役割が対象とする構造物の構造形態にも依存することが予想される。そこで本研究では、最大荷重設計法により、両設計の最適特性を耐荷力とエネルギー吸収量の立場から定量的に把握する。

2 最適断面特性の決定 Fig.1 に示すようなSS41の2軸対称H型断面の梁-柱部材を考える。偏心距離 e は、部材長 l を使って $e = \kappa \cdot l$ で与え、偏心比 κ をゼロ（純圧縮）から無限大（純曲げ）まで変化するパラメータとする。さらに、部材のスレンダーネスのパラメータとして一般化細長比 R を、断面積 A と部材長 l を使って $R = l^2/A$ で定義する。

(1) 弾性設計に最適な断面特性：これは、道路橋示方書¹⁾により決定する。ただし、局部座屈を許す設計と許さない設計との差異が僅かであること²⁾と計算の簡素化とを考え、ここでは初期降伏まで局部座屈を許さない幅厚比を採用する。すなわち

$$b/t_f = 26.2 \quad h/t_w = 39.6 \cdot f \quad (1)$$

ここに f は応力勾配による係数である。

(2) 塑性設計に最適な断面特性：塑性設計では、局部座屈に対する制約をさらに厳しく設定する必要がある。そこで、この最適断面を設定するにあたって、文献3)より以下の幅厚比制限を採用した。

$$b/t_f = 20 \quad h/t_w = \begin{cases} 71 - 26 \cdot (A/A_w) \cdot (P/P_y) & (P/P_y \leq A_w/A) \\ 45 & (P/P_y > A_w/A) \end{cases} \quad (2)$$

ここに A_w はウェブ断面積、 P 、 P_y はそれぞれ作用軸力及び降伏軸力である。

(3) 両設計用最適断面の耐荷力性能の比較：ここに、形状係数 f を、同一断面積から得られる、塑性設計に最適な断面の全塑性モーメントと弾性設計に最適な断面の降伏モーメントの比として定義する。Table 1において、すべての偏心比に対し形状係数が1より小さいことは注目に値する。これは、実際に塑性ヒンジの形成を保証するには幅厚比をかなり小さく抑えなければならない、その結果得られる全塑性モーメントは、部材の塑性域を期待しないために幅厚比を大きくとれる断面の降伏モーメントを上回ることができないことを示唆するものである。

Table 1 Shape Factors $f = M_p/M_y$ at Optimum

κ	0	0.07	0.30	∞
f	0.92	0.85	0.76	0.71

3 骨組構造例の断面配分の最適化

(1) 1層1スパンラーメン：建築構造物の構造形態を代表する例としてFig. 2のような門形ラーメンを選ぶ。構造物の総体積を与える一般化細長比 R は、実際の建築設計例から算出し、 $R = 2000, 4000, 8000$ の3ケース

について最適化を行った。R=2000の場合の荷重変位関係がFig. 3、終局耐荷力とともに、使用性と耐震性の目安として弾性限界及びエネルギー吸収量の比較を示したのがTable 2である。これから、不静定次数が高く、断面配分の自由度が低い建築構造物では、塑性最適設計で得られる使用性が弾性最適設計より低下するものの、終局耐荷力は両最適設計ともほぼ同じ値になることがわかる。また、耐震性は塑性最適設計により向上することが期待される。

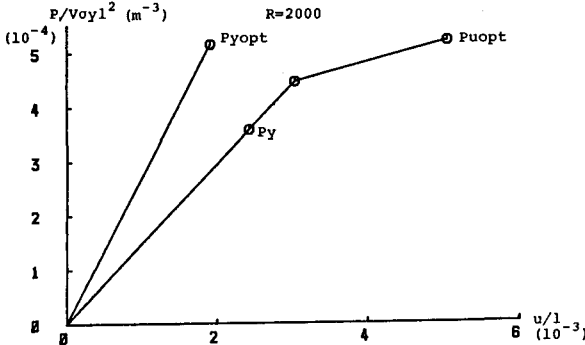


Fig.3 Load-Displacement Relations of 1-Story 1-Span Frame

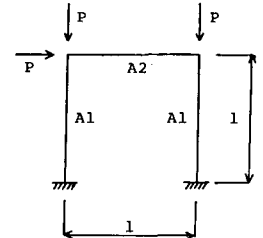


Fig.2 1-Story 1-Span Frame

Table 2 Comparison between Elastic and Plastic Designs of 1-Story 1-Span Frame

Slenderness Ratio R	2000	4000	8000
Puopt/Pyopt	1.01	0.96	0.92
Py/Pyopt	0.69	0.69	0.66
$\frac{(\text{Energy Absorption})_{\text{uopt}}}{(\text{Energy Absorption})_{\text{yopt}}}$	3.4	3.1	2.8

Pyopt; Elastic Limit by Elastic Optimization
Puopt; Plastic Limit by Plastic Optimization
Py; Elastic Limit by Plastic Optimization

(2) 2径間連続梁：土木構造物の構造形態を代表する例としてFig. 4のような2径間連続梁を選ぶ。断面配分の自由度の差異による最適特性を把握するためにNumber of Variables=1, 2, 4, 8の4ケースを考える。構造物の総体積を与える一般化細長比Rは、実際の一等道路橋設計例からR=12000, 20000, 26000の3ケースを採用した。R=12000の場合について結果をまとめたのがFig. 5とTable 3である。これから、不静定次数が低く、断面配分の自由度が高い土木構造物では、塑性最適設計を実行することにより、使用性のみならず終局耐荷力も低下し、耐震性もほとんど向上されないことがわかる。

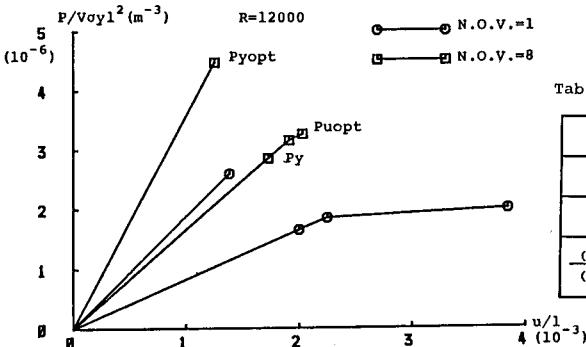


Fig.5 Load-Displacement Relations of 2-Span Beam

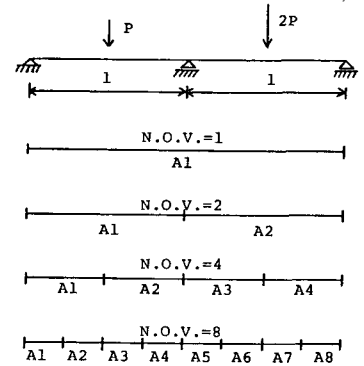


Fig.4 2-Span Beam

Table 3 Comparison between Elastic and Plastic Designs of 2-Span Beam (R=12000)

Number Of Variables	1	2	4	8
Puopt/Pyopt	0.77	0.79	0.72	0.73
Py/Pyopt	0.63	0.54	0.67	0.64
$\frac{(\text{Energy Absorption})_{\text{uopt}}}{(\text{Energy Absorption})_{\text{yopt}}}$	2.6	2.1	1.2	1.3

4 まとめ 弾性及び塑性設計に最適な断面特性を評価し、その耐荷力性能の比較から、部材レベルでは塑性設計が必ずしも有利な設計につながらないことを指摘した。さらにこの断面特性を利用した骨組構造例の最適化からは、両設計の役割は対象とする構造物の構造形態に大きく依存し、これを無視して土木構造物に塑性限界荷重を設定しても、その限界性能を悪化させる恐れがあることに注意を喚起した。

参考文献 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、1980年 2) Hasegawa, A. et.al., Optimum Cross-Sectional Shapes of Steel Compression Members with Local Buckling, Struct. Eng./Earthq. Eng. Vol. 2 April 1985 3) 日本建築学会：鋼構造塑性設計指針、1975年