

九州共立大学工学部 正員 三原 徹治

1. 緒言 構造要素の塑性域までを考慮し構造物のねばりに期待する設計法が種々の構造物について検討されつつある¹⁾。このため、著者らはこれまでに、骨組構造物を対象として終局荷重レベルにおける構造物の塑性崩壊耐力および弾塑性変位を設計規準とする最適弾塑性設計法に関する研究²⁾を行ってきた。それらの研究では設計への適用性からホロノミック弾塑性解析を基礎としているため、メカニズム形成に必要な要素が降伏する順序や降伏が生じる荷重レベルなどの終局荷重以下の荷重レベルにおける弾塑性挙動は直接的には考慮できない。しかし、構造物の耐用期間中に終局荷重以下でしかもいくつかの要素を降伏させるような荷重を受けることが全くないとは言えず、構造物の機能点検や維持・管理の観点から弾塑性増分解析を基礎とした新たな設計法が必要であり、しかも、その挙動の複雑さから単一目的の問題より多目的計画法の問題として取扱う必要があると考えられる³⁾。

本研究は、弾塑性増分解析を設計の基礎とし複雑な弾塑性挙動を考慮する最適設計法の一般的な開発の手始めとして、主としてメカニズムに達するまでに各要素が降伏する荷重レベルに関する最適設計法について検討するものである。すなわち、まず、構造重量の最小化、初期降伏荷重レベルと初期降伏要素以外の要素が降伏する荷重レベルの差の最大化など4種の目的関数を設定した多目的問題として最適設計問題の定式化を行い、次に、満足度均一化法⁴⁾により従来の最適化手法での取扱いが可能な単一目的問題へ変換し、最後に、簡単な骨組構造に本法を適用した計算例を示す。なお、本研究では、次の仮定を用いた。(1)各部材の内力と内変形の関係は、完全弾塑性型とする。(2)つり合い条件は変形前において求められ、微小変形理論にしたがう。(3)作用荷重は比例的に変化し、塑性崩壊以前の局部破壊等は考慮しない。

2. 設計基本式の多目的問題としての定式化

(1)目的関数 まず、設計荷重を固定すると、所望の設計条件を満足する設計の中で構造重量がより小さい設計が望ましい。これは通常の構造重量の最小化として式(1)のように表わされる。ただし、 W は構造重量である。次に、低い荷重レベルで異なる要素が次々に降伏する設計は、維持・補修の見地からも必ずしも良い設計ではないと考えられる。したがって、初期降伏が生じてから初期降伏要素以外の要素が降伏するまでの荷重レベルの差は、より大きい方が望ましく、 α を比例的に変化する作用荷重の荷重係数とすると、式(2)のような目的関数が設定される。ただし、 α^f は初期降伏荷重係数、 α^s は初期降伏要素以外の要素が降伏する荷重係数である。また、式(3)に示す目的関数は、 α^s が大きければ初期降伏要素以外の要素の降伏は生じ難くなり、構造機能の低下を極力抑えるという性質を表わしている。さらに、維持・補修の見地から初期降伏要素のみが降伏状態に達したような場合には、その要素のみを交換することにより従来の構造機能が保持されることも考えられ、そのためには初期降伏要素はできるだけ小さい方が有利と判断される(式(4))。ただし、 X_u は初期降伏要素に対応する設計変数である。

目的関数： $W \rightarrow \min.$ (1), $\delta = \alpha^s - \alpha^f \rightarrow \max.$ (2), $\alpha^s \rightarrow \max.$ (3), $X_u \rightarrow \min.$ (4).

(2)制約条件 本研究で用いた制約条件は次に示す2個のみである。

制約条件： $\alpha_0 \leq \alpha^0$ (5), $1.0 \leq \alpha^n$ (6).

ここに、式(5)は設計荷重レベル以下の荷重では構造物の塑性崩壊が生じないことを保証し、具体的には終局荷重係数 α^0 が設計荷重係数 α 以上でなければならない条件を、式(6)は補修のために初期降伏要素を取除いた場合にも他の構造要素により使用時荷重(荷重係数1.0の荷重)を受持つことができる条件をそれぞれ示している。ただし、 α^n は初期降伏要素を除去した構造の初期降伏荷重係数である。

3. 満足度均一化法による単一目的問題への変換 式(5),(6)の制約条件を満足させたいと式(1)~(4)の目的関数を追求する多目的問題は、ある目的関数をどこまで実現したいかという水準(希求水準)を各目的

関数に設定してすべての目的関数の満足度を均一化する次のような単一目的問題へ変換できる⁴⁾。

$$\text{目的関数： } D (= \max D_i) \longrightarrow \min. \quad (7a)$$

$$\text{制約条件： } D_1 = (W - W_s) / (W_a - W_s) \geq 0, \quad D_2 = (\delta - \delta_s) / (\delta_a - \delta_s) \geq 0 \quad (7b, c)$$

$$D_3 = (\alpha^s - \alpha^s_s) / (\alpha^s_a - \alpha^s_s) \geq 0, \quad D_4 = (X_u - X_{us}) / (X_{ua} - X_{us}) \geq 0 \quad (7d, e)$$

$$\alpha_o \leq \alpha^o, \quad 1.0 \leq \alpha^n. \quad (7f, g)$$

式(7)は式(1)～(4)の目的関数を希求水準および理想点を用いて制約条件（式(7b)～(7e)）として表わし、それらの中で最も大きな値、すなわち希求水準に対して最も満足度の低い目的を改善するために本来の制約条件（式(7f, g)）をも満足させながら最小化を図る（式(7a)）Min-Max問題を示しており、従来の最適化手法により取扱うことができ、最終的には各目的が同程度に満足される。ただし、添字aおよびsはそれぞれ希求水準および理想点を示す。

4. 計算例 図-1に示す1層2スパンラーメン（ $P=5.0\text{tf}$, $\alpha_o=1.7$, $L=4.0\text{m}$, 降伏応力度 $\sigma_y=2.4\text{tf/cm}^2$ ）の各塑性モーメント容量を設計変数として本法を適用した。設計計算に用いた理想点、希求水準および初期値並びに得られた解および最終的な D_i 値を表-1に示す。各目的の D_i 値から、設定した希求水準が δ および $X_u(=X_s)$ に対して厳しく、 W に対しては若干緩い値であったことがわかり、各目的の満足度をより均一化するためにはさらに希求水準を変更する余地があることもわかる。また、図-2には得られた解に対する弾塑性増分解析結果から最大節点変位 u ～荷重係数関係（実線）を示す。同図には初期降伏要素（中央柱）を除去した構造の初期降伏荷重係数 α^n 以下の同様な関係（一点鎖線）も示す。終局荷重係数 $\alpha^o(=1.70)$ は設計荷重係数 α と等しく、 $\alpha^n(=1.238)$ も1.00以上であり、得られた解は設定した制約条件を満足していることがわかる。

4. 結 言 本研究は、弾塑性増分解析を設計の基礎としてメカニズムに達するまでに各要素が降伏する荷重レベルに関する最適設計法を多目的問題として提示したものであり、さらにトレードオフ⁴⁾による設計の改良や弾塑性変形量に関する検討も含めて今後の課題としたい。

謝 辞 本研究に対して、山口大学古川浩平教授およびカナダ・ウォータールー大学グリアソン教授より貴重な助言を賜りました。記して感謝の意を表します。

参考文献 1)例えば砂防・地すべりセンター鋼製砂防構造物委員会：鋼製砂防構造物の設計便覧，昭和62年。
2)三原，北小路，石川，太田：感度解析を用いた最適弾塑性設計法とその応用例，土木学会論文集，1988。 3)三原，古川：先行降伏要素を導入した骨組構造物の最適塑性設計，土木学会年講，1988。 4)中山：多目的計画に対する満足化トレードオフ法の提案，計測自動制御学会論文集，1984。

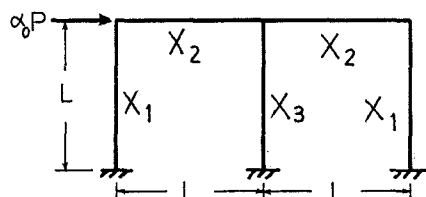


図-1 構造・载荷形式

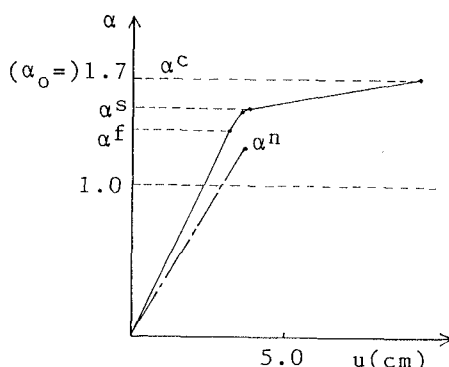


図-2 弾塑性増分解析結果

表-1 設計計算に用いた数値と解

	$W(\text{t} \cdot \text{m}^2)$	δ	α^s	$X_u(\text{t} \cdot \text{m})$	$X_1(\text{t} \cdot \text{m})$	$X_2(\text{t} \cdot \text{m})$	$X_3(\text{t} \cdot \text{m})$
理想点	0.0	1.000	1.700	0.00			
希求水準	250.0	0.240	1.500	4.00			
初期値	204.0				8.50	8.50	17.00
解	221.1	0.131	1.494	4.57	16.75	8.60	4.57
D_i 値	0.811	1.143	1.028	1.145			