Structural Design of Variable Stiffness with Load Switch

学 ○田和 聡典 (阪大[院])
正 松本 健志 (阪大基礎工)

正 内藤 尚 (阪大基礎工)
正 田中 正夫 (阪大基礎工)

Toshinori TAWA, Osaka University, 1-3, Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka
Hisashi NAITO, Osaka University
Takeshi MATSUMOTO, Osaka University
Masao TANAKA, Osaka University

1.はじめに 主荷重方向とは異なる方向に力を加える事で作動する荷重スイッチにより主荷重方向の剛性を切替可能な可変剛性構造体の設計手法を提案する。いくつかの基本構想に基づき、それを実現する構造最適化アルゴリズムを提案する。設計例を通じてその有効性を確認する。

2.基本構想 可変剛性設計では、荷重の増加による構造内部境界での位相変化を利用して剛性を可変とする。剛性が上昇するハードニング可変剛性構造では、無負荷状態で開口状態にある内部境界が、閾値を超える荷重が作用すると閉口状態へと変化させる。本研究では、作用荷重とは別に剛性切替のスイッチの役割を果たす荷重を印加することで、剛性が上昇する構造を考える。すなわち、スイッチ荷重が作用していないとき、作用荷重が印加されても内部境界は開口状態のままであり、剛性は変化しない。一方、スイッチ荷重を印加することで、内部境界状態が変化し、作用荷重閾値を超えると内部境界が開口状態から閉口状態へと変化し、剛性の上昇、すなわちハードニングを起こす。

3.ハードニング可変剛性の位相最適化 境界 Γ_i に荷重 t_i が作用する連続体領域 Ω が、内部境界 Γ_c を有する場合を考える。作用する負荷の大きさを表すパラメータとして荷重係数 α を導入し、この構造に作用する荷重 t_i を参照荷重 t_i^0 と α を用いて $t_i^D = \alpha^D t_i^0$ と表す。添え字 D は荷重の種類を区別し、 $D=w$ は主荷重、 $D=s$ はスイッチ荷重を表すとする。荷重増加にともない内部境界における開口/閉口状態が変化する時の荷重係数を α^{D*} とし、次に示す3つの内部境界の状態を区別して取り扱い、それらの状態を表すために添え字 m を用いる。

- $m=0$:主荷重は作用せず、スイッチ荷重が α^{s*} まで作用する($\alpha^w=0, 0 \leq \alpha^s \leq \alpha^{s*}$)。
- $m=1$:スイッチ荷重作用下で、主荷重が作用するが、内部境界 Γ_c 上に閉口境界 Γ_c' は存在せず、口開き状態である($\alpha^w < \alpha^{w*}, \alpha^s \geq \alpha^{s*}$)。
- $m=2$:スイッチ荷重の作用下で内部境界 Γ_c 上に閉口境界 Γ_c' が存在し、そこで固着状態となる($\alpha^{w*} \leq \alpha^w, \alpha^s \geq \alpha^{s*}$)。

スイッチ荷重作用下でのみ主荷重に対してハードニング可変剛性を示す構造設計問題を以下のように定式化する。

$$\begin{aligned} &\text{minimize} \quad \int_{\Omega} \rho \, d\Omega \quad \text{with respect to} \quad \rho \in \Omega \\ &\text{subject to} \quad \rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max} \\ &\quad \alpha^{D*} = \min_{\Gamma_c, \neq \emptyset} \alpha^D \\ &\quad a(u_k^{(m)D}, v_i^{(m)D}) = L(t_i^D, v_i^{(m)D}) \quad \forall v_i^{(m)D} \in U_0 \\ &\quad L(t_i^D, u_i^{(m)D}) = L^{(m)D}, \\ &\quad \alpha^D (u_i^{(0)D} (x_+^D) + u_i^{(0)D} (x_-^D)) = x_{-i}^D - x_{+i}^D \\ &\quad x_{-i}^D \in \Gamma_{c-}, \quad x_{+i}^D \in \Gamma_{c+}, \quad \alpha^D \geq \alpha^{D*} \end{aligned}$$

ここで、 $\rho, \rho_{\min}, \rho_{\max}$ はそれぞれ体積分率とその下限値、上限値である。制約条件は、体積分率 ρ に関する制約、

荷重係数 α^{D*} に関する制約、平衡状態に関する制約、剛性の指標である平均コンプライアンス $L^{(m)D}$ に関する制約、および内部境界 Γ_c' における変位に関する制約である。この問題を有限要素で離散化し、SIMP法⁽²⁾を用いて位相設計を行う。逐次線形計画法(SLP)と外点ペナルティ法による反復解法により、体積最小化を目的として設計を行う。

4.設計例 設計領域は、 $100 \times 100[\text{mm}]$ の正方形板とし、対称性から設計領域を4等分した $50 \times 50[\text{mm}]$ の第一象限を考える。構造材として、樹脂系等方性材料(ヤング率 $E=3.1\text{GPa}$, ポアソン比 $\nu=0.34$, 厚さ 5mm)を想定する。主荷重として、この正方形板に可変剛性特性を横方向(x 方向)荷重を、スイッチ荷重として、縦方向(y 方向)荷重を考える。スイッチ荷重作用下でのみ可変剛性を示す構造を考える。開口状態として y 軸上に軸と垂直なスリット状内部境界を導入する。参照荷重として、左右方向($D=w$)に $t^{w(0)}=1[\text{N}]$ の圧縮集中荷重、上下方向($D=w$)に $t^{w(0)}=1[\text{N}]$ の圧縮集中荷重が作用する場合を考える。Fig.1(b)で表される設計領域を、 $25\text{mm} \times 25\text{mm}$ の8節点4角形有限要素に離散化した。なお、初期体積分率分布は線分AA'より原点側では $\rho=1.0$ 、反対側では $\rho=0.1$ であるとする(Fig.1)。要素密度は、 $[0.1, 1.0]$ のグレースケールで示す。以上の条件で位相設計を行った結果をFig.2に、また、平均コンプライアンスの目標値と設計した値と体積とそれが切り替わる荷重係数をTable.1に示す。平均コンプライアンスは、目標値を達成しており、スイッチ荷重が作用することでコンプライアンスすなわち剛性を可変とできていることが分かる。

Fig.1 Quarter of design domain Fig.2 Optimal topology

Table 1 Force-dependent stiffness

	Vol [%]	$L^{(before)W}$ [Nmm]	$L^{(after)W}$ [Nmm]	α^{*w}	L^s [Nmm]	α^{*s}
Target		3.00×10^{-3}	1.50×10^{-3}		1.50×10^{-3}	
Initial	100	5.03×10^{-4}	4.36×10^{-4}	3258	5.04×10^{-4}	3836
Optimal	92	3.00×10^{-3}	1.49×10^{-3}	859	1.52×10^{-3}	2737
Error		+0.15%	-0.71%		+1.2%	

参考文献

- (1) 田中ら3名, 機論, 68-673, A(2002), pp.1407-1412.
- (2) Rozvany, G.I.N. et al., *Structural Optimization*, Vol. 4(1992), pp. 250-252.