

傾斜機能材料からなる柱部材の単純圧縮問題の理論解析

大分工業高等専門学校	学生会員	○日野明日香
大分工業高等専門学校	正会員	名木野晴暢
豊橋技術科学大学	非会員	足立忠晴
金沢大学	非会員	樋口理宏

1. 研究目的

「空間的に一つの機能から他の機能へと連続的または段階的に変化する一体の材料」と定義されている傾斜機能材料¹⁾は、我が国で開発された不均質な複合材料である。この材料は比較的新しい材料であり、熱応力緩和を目的として開発された背景もあつてか、建設材料として活用された事例がない。また、現在の設計技術は鋼材やコンクリートなどの等質(均質)・等方な材料を中心として構築されているため、不均質材料である傾斜機能材料に現状の設計指針をそのまま適用することができない。よって、構造物の主要部材に傾斜機能材料を適用するためには、傾斜機能材料からなる構造部材の力学的挙動を把握することが不可欠になる。

本論文では傾斜機能材料からなる柱部材(以下、傾斜機能柱)を想定し、圧縮力を受ける傾斜機能柱の単純圧縮挙動を明らかにすることを目的としている。

2. 数値実験モデル

図-1に、圧縮力 P を受ける傾斜機能柱と座標系および縦弾性係数の不均質性を示す。ここで、 L は柱の長さ、 A は柱の断面積であり、 $u(x)$ は x 軸方向の変位成分である。線形弾性である傾斜機能柱の下端($x=0$)は固定されており、その上端($x=L$)は x 軸線上に圧縮力 P を受けているモデルを考える。また、傾斜機能柱の断面に生じる垂直応力は一定分布を仮定し、その単純圧縮挙動は微小変形であるとする。

x 軸方向の縦弾性係数の不均質性は、次のように仮定する。

$$E(x) = E_b \Phi_E(x). \quad (1)$$

ただし、 E_b は下端での縦弾性係数であり、 $\Phi_E(x)$ は縦弾性係数の分布形状を表す関数(以下、形状関数)である。本論文では、形状関数 $\Phi_E(x)$ を次のように仮定する。

$$\Phi_E(x) = \exp\left(p \frac{x}{L}\right), \quad p = \ln \Gamma, \quad \Gamma = \frac{E_t}{E_b}. \quad (2)$$

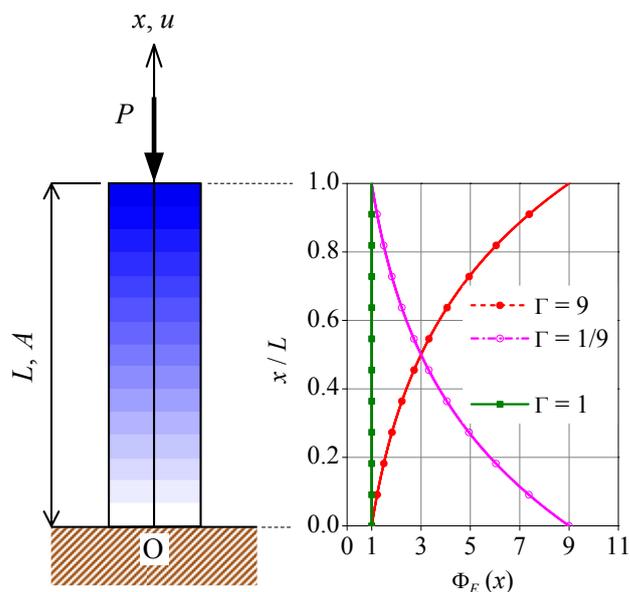


図-1 圧縮力を受ける傾斜機能柱と座標系および縦弾性係数の不均質性

ここで、 E_t は上端での縦弾性係数である。縦弾性係数比 Γ を $\Gamma=9, 1/9$ に設定した時の形状関数 $\Phi_E(x)$ の分布を図-1に示す($\Gamma=1$ は均質材料を意味する)。

3. 傾斜機能柱の基礎方程式と境界条件

傾斜機能柱の基礎方程式は、次のように表される。

$$E_b A \left\{ \frac{d\Phi_E(x)}{dx} \frac{du(x)}{dx} + \Phi_E(x) \frac{d^2 u(x)}{dx^2} \right\} = 0. \quad (3)$$

また、境界条件は、

$$u = 0 \quad (x=0), \quad (4)$$

$$N = -P \quad (x=L). \quad (5)$$

である。ただし、 N は合応力(軸力)である。式(3)に式(2)を代入することにより、傾斜機能柱の変位成分 $u(x)$ と垂直ひずみ $\varepsilon(x)$ の厳密解を次のように求めることができる。

$$u(x) = -\frac{1}{p} \left\{ 1 - \exp\left(-p \frac{x}{L}\right) \right\} \times \frac{PL}{E_b A}, \quad (6)$$

$$\varepsilon(x) = -\exp\left(-p \frac{x}{L}\right) \times \frac{P}{E_b A}. \quad (7)$$

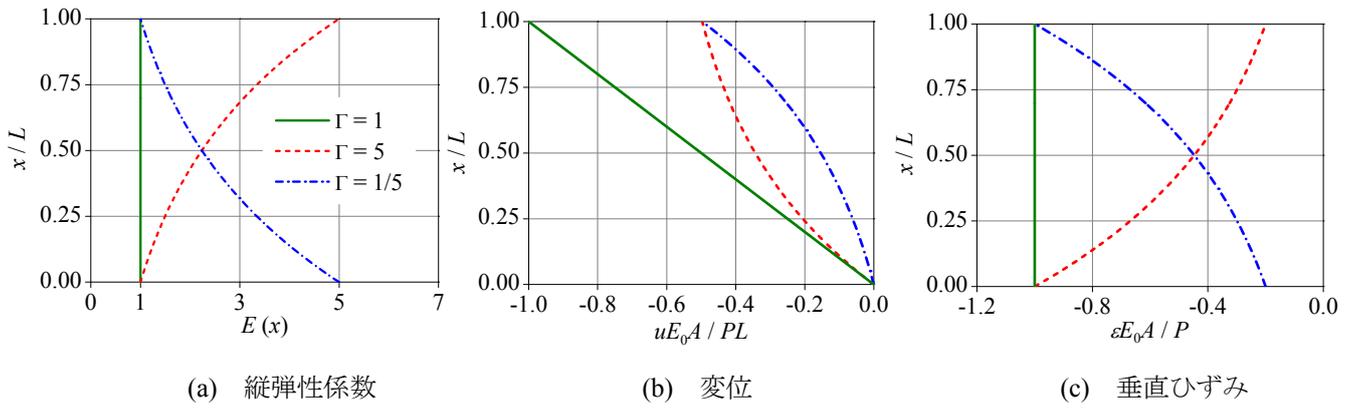


図-2 圧縮力を受ける傾斜機能柱の軸方向の変位および垂直ひずみに与える縦弾性係数比の影響

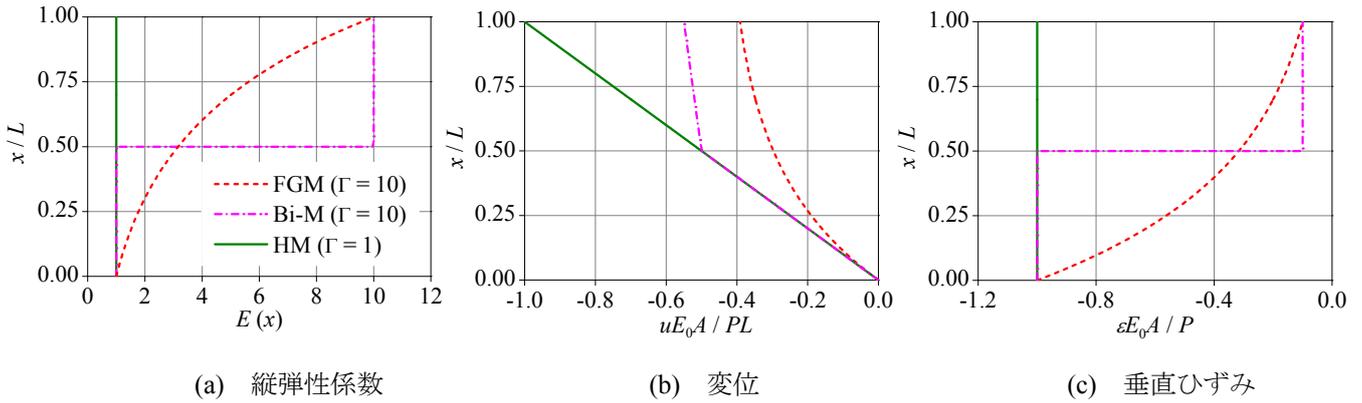


図-3 圧縮力を受ける柱部材の軸方向の変位および垂直ひずみ分布に与える材料の影響

4. 理論解析および考察

まず、圧縮力を受ける傾斜機能柱の静力学的特性に与える材料の不均質性について検討する。

図-2は、圧縮力 P を受ける傾斜機能柱の軸方向の変位 u および垂直ひずみ ϵ 分布に与える縦弾性係数比 Γ の影響を示したものである。図-2の E_0 は基準とする縦弾性係数であり、本論文では E_b と E_t の小さい方の値を取っている。ここで、 $\Gamma = 5, 1/5$ に設定し、比較のために均質材料の結果($\Gamma = 1$)も示してある。参考までに、数値実験モデルとして設定した傾斜機能柱の軸方向の縦弾性係数 E 分布を図-2(a)に示してある。

これより、縦弾性係数の配置にかかわらず、傾斜機能柱は均質材料からなる柱(以下、均質柱)よりも変位および垂直ひずみの値を小さくすることができる。また、下端の縦弾性係数 E_b と上端の縦弾性係数 E_t を入れ換えても、傾斜機能柱の最大圧縮変位の値は同じである。

次に、傾斜機能材料の材料特性の連続的な変化が柱部材の圧縮変形挙動に与える影響・効果について検討する。

図-3は、圧縮力 P を受ける柱部材の軸方向の変位 u

および垂直ひずみ ϵ 分布に与える材料の影響を示したものである。ここで、材料は均質材料($\Gamma = 1, \text{HM}$)、2層材料($\Gamma = 10, \text{Bi-M}$)および傾斜機能材料($\Gamma = 10, \text{FGM}$)に設定した。参考までに、数値実験モデルとして設定した柱部材の軸方向の縦弾性係数 E 分布を図-3(a)に示してある。

これより、均質柱および2層材料からなる柱(以下、2層柱)の軸方向の変位分布は直線または折線であるが、傾斜機能柱の軸方向の変位分布は曲線分布である。また、傾斜機能柱の変位の値は、均質柱および2層柱のそれよりも小さくなる。更に、2層柱の軸方向の垂直ひずみ分布は部材の接合面で不連続になるのに対して傾斜機能柱のそれは連続的かつ滑らかであり、垂直ひずみの急激な変化が生じないことがわかる。

謝辞：本研究は、2013年度 公益社団法人 LIXIL 住生活財団 調査研究助成を受けて行われました。

参考文献

- 1) 上村ら：傾斜機能材料の開発と応用, pp.1-32, シーエムシー出版, 2003.