

体積弾性係数を考慮した円形ゴム支承の圧縮特性評価モデル

独立行政法人土木研究所 正会員 ○姫野 岳彦

独立行政法人土木研究所 正会員 運上 茂樹

1. はじめに

橋梁用のゴム支承は活荷重による桁の回転変形に追随するために1層のゴム厚が厚くなり、建築構造物に用いられる支承と比べるとその積層構成が比較的少ないものが多い。そのため、これまでは、その適用範囲に応じた特性評価法・設計法が検討され、確立されてきた。しかしながら、近年では多径間連続橋の増加に伴い、ゴム形状の大型化や積層の多層化が急速に進んでおり、このような影響を受け、従来の圧縮特性に関する設計式では多層構造の支承に対して、その精度が十分ではないことが表面化してきている。

このため、筆者らは矩形ゴム支承を対象とした検討を通して、ゴム材料の体積弾性係数 E_b を考慮した体積圧縮性モデルを適用することの必要性について先に考察している¹⁾。本文は、これと同様な手法を円形のゴム支承に対して拡張させ、体積圧縮性を考慮したモデルの理論式を誘導するなど、ゴムの圧縮特性評価法についてまとめたものである。

2. 円形ゴム支承における縦弾性係数 E_c の評価モデル

ゴム支承の圧縮特性を考えるため、ここでは図-1に示す形状係数 S をパラメーターとして整理を行う。

従来の設計においては服部・武井らによる評価式が用いられている²⁾。これはゴム材料自体には圧縮してもその体積的な変化は全く生じない、完全な非圧縮性を有するものとの仮定に基づき、微小弾性ひずみ理論の近似解として、

$$E_c^i = (3 + 4.935S^2)G \quad \dots (1)$$

と表される。また、同様な非圧縮性の仮定による理論解として、Kelly³⁾は円形ゴムに生じる応力 p に関する基礎方程式

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{12G \times \Delta t_e}{t_e^3} \quad \dots (2)$$

を示しており、この式から $p(r)$ の一般解を求め、円形ゴム支承断面全体(面積 $A = \pi R^2$) に対して積分し、整理すると、

$$E_c^i = 6GS^2 \quad \dots (3)$$

が得られる。

一方、実際のゴム材料における体積弾性係数 E_b は G と比べると非常に大きい、その数値は必ず有限な値を示す。

一般に S が小さい(積層が少ない)場合は、主として側面

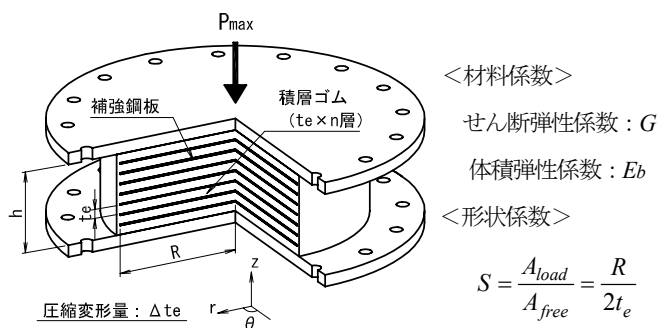


図-1 円形ゴム支承の諸元

のゴムに膨出変形が生じ、見かけの弾性係数 $E_{ap} (=E_c^i)$ により評価できるが、 S が大きい(多層の)場合には補強鋼板によるゴムの拘束効果によって、 E_b の影響が顕著となる。

そこで、円形ゴム支承に対して体積圧縮性を考慮したモデルの誘導を考えると、式(2)による基礎方程式は、

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} - \frac{12p}{t_e^2} \frac{G}{E_b} = -\frac{12G \times \Delta t_e}{t_e^3} \quad \dots (4)$$

と書き直すことができ、同様に $p(r)$ の一般解から整理すると、

$$E_c^b = E_b \left(1 - \frac{2}{\lambda R} \frac{I_1(\lambda R)}{I_0(\lambda R)} \right), \quad \lambda R = \sqrt{\frac{48G}{E_b}} \times S \quad \dots (5)$$

が得られる。ここで、 I_1 , I_0 は Bessel 関数であり、それぞれオーダー1 および0 を示している。この式の解法は多少煩雑となるため、 S の範囲によってその近似解を求めると、

$$E_{cs}^b = \frac{1}{\frac{1}{6GS^2} + \frac{4}{3E_b}}, \quad E_{cl}^b = E_b \left(1 - \frac{2}{\lambda R} + \frac{1}{(\lambda R)^2} \right)$$

となり、 $S < 15$ では E_{cs}^b , $S > 15$ では E_{cl}^b により式(5)の E_c^b を約5%程度の誤差で精度良く表現することが可能となる。

また、建築の分野では一般に E_b を考慮した Lindley の手法が採用されており、これは下式のように与えられる⁴⁾。

$$E_c^b = \frac{1}{\frac{1}{E_0(1+2\kappa S^2)} + \frac{1}{E_b}} \quad \dots (6)$$

さらに橋梁では、式(1)では精度が低いケースがあることを受け、その改訂が予定されている道路橋支承便覧において過去の実測値をもとに実験回帰式が提案されている⁵⁾。

$$E_c^e = \alpha \beta SG = 35 \times 0.75 \times SG \quad \dots (7)$$

キーワード ゴム支承, 体積弾性係数, 縦弾性係数, 局部せん断ひずみ

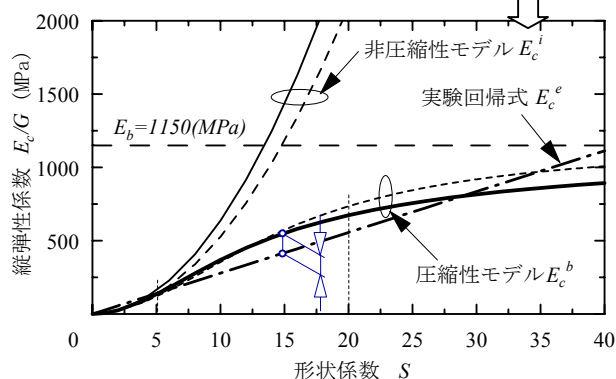
連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6 TEL 029-879-6773 FAX 029-879-6736

表-2 ゴムの材料係数

項目	係数値
せん断弾性係数 G (MPa)	1.06
ゴム材料の弾性 係数 E_0 (MPa)	4.45
ゴムの硬度による 補正係数 κ	0.57
体積弾性係数 E_b (MPa)	1150

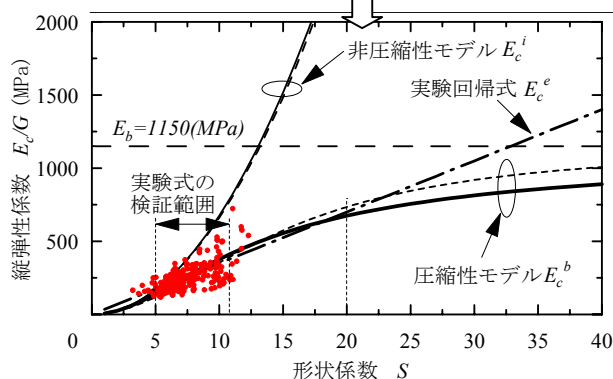
<円形ゴム支承の凡例>

非圧縮性を仮定
 - - - 式(1)-服部武井式
 - - - 式(3)-理論式
 圧縮性を考慮
 - - - 式(5)-理論式
 - - - 式(6)-Lindley式
 実験回帰式
 - - - 式(7)-実験式

図-2 E_c の特性値（円形ゴム支承）

<矩形ゴム支承の凡例>

非圧縮性を仮定
 - - - 服部武井式 $E_c^i = (3 + 6.58S^2)G$
 - - - 理論式 $E_c^i = 6.73S^2G$
 圧縮性を考慮
 - - - 理論式 $E_c^b = E_b \left(1 - \frac{1}{\beta} \tanh \beta - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\beta^2}{m^2 \beta_m^2} \frac{1}{\beta_m} \tanh \beta_m \right)$
 - - - 近似式 式(6)と同様
 実験回帰式
 - - - 実験式 $E_c^e = \alpha \beta SG = 35 \times SG$
 実測データ

図-3 E_c の特性値（矩形ゴム支承）

以上の各評価式による特性を検証するため、ゴムの材料係数を表-1のように設定し試算した結果を図-2に示す。また、図-3には比較のために同様な手法による矩形ゴム支承の検討結果を過去の製造実績による実測データとあわせて示す。 $S < 5$ 程度ではどの評価式もほぼ同じ特性を示しているが、 S が増加するに従い体積圧縮性の考慮の有無によって顕著な差が生じている。一方、実験回帰式は圧縮性モデルと比較的近い特性を示しているが、矩形ゴム支承の場合と比べると $S < 20$ の範囲でも30%程度の差が確認できる。この点については、現状、橋梁用ゴム支承においては円形タイプの実績の絶対数が不足しているため、今後、データの蓄積を待って詳細を検討すべき課題であると考えている。

3. 圧縮による局部せん断ひずみ γ_c の評価モデル

ゴム支承の圧縮変形は側面のゴムの膨出変形へとつながり、その結果、積層端部には局部的なせん断ひずみ γ_c が生じることになる。そこで、ここでは先と同様な思想により γ_c の評価式について検討する。

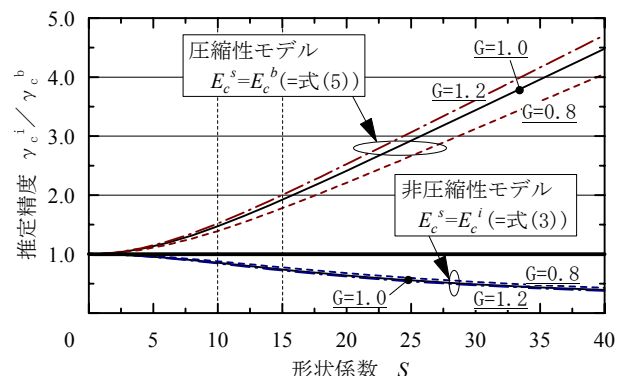
まず、非圧縮性を仮定したときの理論式を γ_c^i 、また γ_c の算出に用いる縦弾性係数を E_c^s とすると、

$$\gamma_c^i = 6S \frac{P_{\max}}{A \times E_c^s} \quad \dots (8)$$

と表現でき、一方、体積圧縮性を考慮した理論式 γ_c^b は、

$$\gamma_c^b = 6S \frac{P_{\max}}{A \times E_c^b} \left(\frac{2}{\lambda R} \frac{I_1(\lambda R)}{I_0(\lambda R)} \right) \quad \dots (9)$$

となる。ここで、これらの特性値を検証するため、式(8)に

図-4 局部せん断ひずみ γ_c の推定精度

おける E_c^s を変化させて試算を行った結果（図-4）、 E_c^b よりも E_c^i を用いた方が γ_c^b に近い値をとることが分かった。

4. まとめ

本研究では、円形ゴム支承に対してゴム材料の体積圧縮性を考慮した圧縮特性の評価モデルを示した。

謝辞

矩形ゴム支承における実測データは支承便覧分科会において、道路橋支承便覧の改訂作業に伴い検討されたものであり、本研究ではその貴重なデータを提供していただいた。ここに記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 姫野岳彦, 運上茂樹: 地震時水平力分散ゴム支承の圧縮特性に関する評価モデルの検討, 第7回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.409-414, 2004.1
- 2) 日本道路協会: 道路橋支承便覧, 1991.7
- 3) Kelly, J.M.: Earthquake-Resistant Design with Rubber, Springer-Verlag, pp.69-87, 1997
- 4) 日本建築学会: 免震構造設計指針, 1989.9
- 5) 支承便覧分科会 柴桃孝一郎, 岩立次郎: 技術情報 道路橋支承便覧の改訂について, 道路, pp.45-47, 2003.4