積層ゴム支承の回転限界に関する設計式の構築

ゴム支承協会 正会員 今井隆,山梨大学 正会員 吉田純司 ゴム支承協会 正会員 西村貴明,ゴム支承協会 正会員 田中弘紀

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震以後,積層ゴム支承を用い た免震構造が橋梁に代表される社会基盤施設に広 く利用されるようになっている.積層ゴム支承は, 水平方向には柔軟で,かつ鉛直圧縮変形に対しては 高い剛性と耐荷性能を有している.しかし鉛直引張 り変形に対しては,変形が小さい間のみ弾性的な挙 動を示し,変形が増加するとゴムの一部が体積膨張 変形し耐荷性能が低下していく.このことから積層 ゴム支承の設計では,既往の支承の引張り載荷試験 データを基に,弾性限界となる引張り荷重(面圧) を定めている¹⁾.

一方,積層ゴム支承を用いている橋梁では,活荷 重による桁のたわみや,桁の温度収縮により,支承 に回転変形を生じ,その結果,内部のゴムが局所的 な体積膨張を生じる.しかし,回転変形は実験が困 難なこともあり,これまで定量的な評価が行われて おらず,設計では局所的にも引張り変形を許容しな いことを規定している¹⁾.この制限から,現状では 支承が大型化する傾向にありコスト増加の一因と なっている.

本研究では、せん断弾性係数 12[N/mm²]の天然ゴ ムを用いた積層ゴム支承を対象として、有限要素モ デルにより支承の引張り弾性限界を表す材料の力 学特性を同定し、それを応用して回転変形の限界を 表す設計式を構築する.

2. ゴム層の引張り試験と弾性限界の特定

(1) ゴム層の引張り試験

体積膨張によるゴムの弾性限界を把握するため, 図-1に示すように,上下を鋼板により拘束されてい る円型ゴム層の引張り試験を実施した.実験では, 共通の断面形状で5つの異なるゴム層厚を有するゴ ム層について,下鋼板を固定し上鋼板に引張り方向 の変位を付与している.図-2は,実験で得られた変 位-荷重関係の一例である.図をみると,一回目の載 荷では,荷重:150[kN]付近で剛性が急激に変化し, 降伏のような挙動を示している.本研究では,この 点のことを弾性限界と呼ぶことにする.図-2に示さ れるように,弾性限界を超える変形を一度でも経験 すると,その後は同一の引張り変形に対して耐荷性 能が低下していることがわかる.

(2) 引張り弾性限界を示す特徴量の特定

次に上述したゴム層の引張り変形を, FEM による 三次元解析²⁾で再現することで,弾性限界を代表す るゴムの力学特性を特定した.ただし, FEM では, ゴムの構成則として Mullins 効果を再現できる Ogden 型の準弾性モデル³⁾を採用している.また, 構成則に含まれる材料定数は,対象とするゴム材料 について単軸引張り試験,均等二軸引張り試験,一 軸固定二軸引張り試験を実施し,材料試験との差が 最小となるよう材料定数を同定した.なお,上述し た構成則では,ゴムの圧力と体積変形の関係は弾性 とし,体積弾性係数は,本節(1)で述べたゴム層で圧 縮試験を実施し,FEM による解析結果が実験結果と 一致するよう決定した.

図-3 は、2 種類のゴム層について、弾性限界とな る変形時の静水圧を FEM で再現した結果を示して いる(対称性より 1/4 円弧の解析モデル).図をみ ると、いずれのゴム層も中心位置(図では左端)で 静水圧が-6[N/mm²]を示している.この値は、他のゴ ム層の弾性限界を再現した場合も同様であった.こ のことから、本研究では、ゴムの体積膨張の弾性限 界の指標を、静水圧が-6[N/mm²]とみなすこととする.

3. 支承の回転変形に関する設計式

(1) FEM を用いた支承の回転変形の解析

平面寸法が $1m \times 1m$ の矩形断面を有する積層ゴム 支承を対象に、上述した FEM モデルを用いて、一 定の圧縮荷重作下で回転変形を付与し、内部のゴム が弾性限界となる回転角を同定した.ただし解析で は、文献 4)を参考に一次形状係数 S_1 を 4~14 の範囲 で、二次形状係数 S_2 を 4~8 の範囲で変動させ、合 計 72 ケースでの限界回転角を求めた.また、圧縮 荷重の違いによる回転限界についても把握するた め、面圧 0[N/mm²]、4[N/mm²]、8[N/mm²]、12[N/mm²] の場合について上記の解析を実施している.

図-4 は、面圧 $0[N/mm^2]$ の場合および $8[N/mm^2]$ の場合に、解析から特定した限界回転角を示している. 図をみると s_1 の増加に対して限界回転角は反比例 して減少し、また s_2 の増加に対して限界回転角は全 体的に減少する.これらの傾向は面圧が異なる場合 にも同様であり、面圧が増加すると限界回転角は全 体的に増加する.これらの性質は、全解析ケースに ついて共通であった.

(2) 設計式の構築

上述した解析で得られた限界回転角は、一次形状 係数 S_1 、二次形状係数 S_2 、面圧Pに依存して変化す る.そこで、(1)で述べた S_1 、 S_2 、Pに対する限界 回転角の変化の傾向を基に、限界回転角を予測する 以下のような設計式を構築した.

キーワード:免震構造,積層ゴム支承,回転変形,FEM解析,引張り弾性限界,設計式,静水圧 連絡先:〒104-0033 東京都中央区新川 2-13-9 TEL:03-3523-5862, FAX:03-3523-5866



(a) 面圧:0[N/mm²](b) 面圧:8[N/mm²]図-4 一定の圧縮荷重下での回転変形において積層ゴム内部のゴムの静水圧が-6[N/mm²]に達するときの回転角

表-1 設計式に含まれる未知係数の値

$a_{01} = 22.3$	$a_{11} = -3.56$	$a_{21} = 0.186$	$a_{31} = -0.000314$
$a_{02} = -47.1$	$a_{12} = 1.38$	$a_{22} = 0.558$	$a_{32} = -0.0350$
$a_{03} = 266$	$a_{13} = -38.2$	$a_{23} = 2.41$	$a_{33} = -0.0759$
$b_1 = 0.175$		$b_2 = -0.000802$	

$$\tilde{\theta}(S_1, S_2, P) = F(P) \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{a_{0i} + a_{1i}S_2 + a_{2i}S_2^2 + a_{3i}S_2^3}{S_1^i}$$
(1)

$$F(P) = 1 + b_1 P + b_2 P^2$$
 (2)

ただし、上式において限界回転角の予測値 $\tilde{\theta}$ および 面圧 Pの単位は、それぞれ[度]、[N/mm²]である.ま た、 a_{ki} (k = 0,1,2,3; i = 1,2,3)および b_k (k = 1,2)は、 未知係数であり FEM 解析で得られた限界回転角と、 $\tilde{\theta}$ との差の二乗の和が最小となるよう同定した.同 定した係数は、表-1 のような値である.

4. まとめ

本研究では、材料試験に基づく積層ゴム支承の有 限要素モデルを用いて、支承の回転限界を表すゴム の力学特性を同定した.また、その特性を基に面圧、 一次形状係数、二次形状係数の変化に対する支承の 限界回転角を算出し、それを予測するための設計式 を構築した.

参考文献

- 1) 日本道路協会:道路橋支承便覧,丸善,2004
- 吉田純司,阿部雅人,藤野陽三:高減衰積層ゴム支承の3 次元有限要素解析法,土木学会論文集,No.717/I-61, pp.37-52, 2002
- Ogden, R.W. and Roxburgh, D.G.: A pseudo-elastic model for the Mullins effect in filled rubber, *The Royal Society of London*, A-455, pp.2861-2877, 1999.
- 4) 松田泰治,大塚久哲,北村幸司:FEM を用いたゴム材料の 圧縮性を考慮した積層ゴム支承の局部せん断ひずみ評価に 関する研究,構造工学論文集 Vol.50A, pp.575-584, 2004.