

長方形積層ゴム支承を対象とした限界回転角の把握と設計式の構築

山梨大学 学生会員 ○柚木和徳, 山梨大学 正会員 吉田純司
 榎高速道路総合技術研究所 正会員 塩畑英俊
 ゴム支承協会 正会員 今井隆, 山梨大学 フェロー会員 杉山俊幸

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震を契機として免震構造への関心が急速に高まり、近年では多くの橋梁・建築物において積層ゴム支承を用いた免震構造が採用されている。橋梁における積層ゴム支承の設計方法では、既往の引張り試験結果を基に、支承全体が引張り変形を受ける場合の鉛直荷重の許容値を定めている。一方、積層ゴム支承は活荷重および死荷重による桁のたわみや、温度変化による桁の収縮により回転変形を生じ、内部のゴムに局所的な膨張変形を生じる。しかし、回転変形は実験が困難であり、実験データが希少であることから、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⁾。この制限により支承の規模が増加する傾向にありコスト増加の原因となっている。

著者らはこれまでの研究²⁾で規定断面を有する積層ゴム支承について回転限界を解析的に把握し、その結果を表す簡易な設計式を構築してきた。本研究では、その成果を発展させ、任意の長方形断面を有するゴム支承の回転限界の把握を行い、その結果を表現する設計式の構築を目的とする。

2. FEMによる長方形支承の限界回転角の把握

(1) 解析方法

本研究では、せん断弾性係数 $1.2[\text{N}/\text{mm}^2]$ の天然ゴムを用いた長方形断面を有する積層ゴム支承を対象として、3次元FEM解析³⁾により一定のせん断変形および圧縮荷重下で回転変形を付与し、積層ゴム支承の限界回転角を算出する。ここで限界回転角はゴム内部の静水圧の最小値が弾性限界である $-6[\text{N}/\text{mm}^2]$ に達したときの角度である。さらに、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⁴⁾を採用し、ゴムの材料定数は文献²⁾と同様とした。

解析モデルの断面形状は、橋軸方向を a 、橋軸直角方向を b としたとき、辺の比 $R=b/a$ が0.5, 0.75, 1.5, 2.0となるように設定した。なお、各辺の寸法は短辺を $1000[\text{mm}]$ としている。各断面形状に対して、一次形状係数 S_1 を4~16の範囲で7種類、二次形状係数 S_2 を4~28の範囲で6種類を設定し約1400ケースの解析を行った。解析では、図-1に示すような拘束条件の下、面圧 $0\sim 12[\text{N}/\text{mm}^2]$ の範囲で4種類、せん断変形率 $0\sim 70\%$ の範囲で3種類を設定し、支承中心から b 軸に向かう方向にせん断変形および回転変形を付与した。なお、その他の解析方法や条件は文献²⁾と同様とした。

(2) 解析結果

辺の比の変化による限界回転角の変化を把握するために、解析により算出した限界回転角の基準化を行う。これは、例えば一定の一次形状係数の下で辺の比を変化させた場合に、二次形状係数を一定値にすることができず、変化の傾向を追えないためである。具体的には、正方形支承($R=1$)の限界回転角 $\tilde{\theta}$ に対する長方形支承の限界回転角 θ の比 $Y=\theta/\tilde{\theta}$ で表す。ただし、 $\tilde{\theta}$ は既存の正方形支承の設計式²⁾により θ と同じ一次形状係数 S_1 、二次形状係数 S_2 、面圧 P 、せん断変形の割合 γ を用いて算出している。

図-2に一次形状係数 S_1 が4, 8, 16における二次形状係数 $S_2\cong 4$ 、面圧 $P=0[\text{N}/\text{mm}^2]$ 、せん断変形の割合 $\gamma=0$ での辺の比 R と限界回転角度の比 Y との関係を示す。図-2より全体的な傾向として辺の比 R が増加すると、限界回転角の比 Y も増加している。また、限界回転角の比 Y は直線的に増加し、 $R=1$ を境にその傾きが変化している。さらに、辺の比 R が一定の場合、一次形状係数 S_1 に依存して限界回転角度の比 Y がばらついている。 $R\leq 1$ では一次形状係数 S_1 が増加すると限界回転角度の比 Y が増加し、 $R\geq 1$ では一次形状係数 S_1 が増加すると限界回転角度の比 Y が減少している。一次形状係数 $S_1=4$ を基準とするとこのばらつきは最大で25%程度生じた。

図-3に面圧 P が0, 4, 8, 12 $[\text{N}/\text{mm}^2]$ における一次形状係数 $S_1=4$ 、二次形状係数 $S_2\cong 4$ 、せん断変形の割合 $\gamma=0$ での辺の比 R と限界回転角度の比 Y との関係を示す。図-3においても図-2と同様に辺の比 R が増加すると、限界回転角の比 Y も直線的に増加し、 $R=1$ を境に限界回転角の比 Y の増加率が変化している。また、辺の比 R が一定の場合面圧 P に依存し限界回転角度の比 Y がばらついている。 $R\leq 1$ では面圧 P の増加により限界回転角度の比 Y が増加し、 $R\geq 1$ では面圧 P の増加により限界回転角度の比 Y は減少している。面圧 $P=0[\text{N}/\text{mm}^2]$ を基準とすると最大で9%程度のばらつきが生じた。

以上より、限界回転角度の比 Y は、辺の比 R により変化し、一次形状係数 S_1 および面圧 P にも依存して変化することが分かった。設計式の構築の際には、以上のことを考慮する必要がある。なお、紙面の関係上省略するが、二次形状係数 S_2 およびせん断変形の割合 γ の変化による、限界回転角度の比 Y のばらつきは最大でも5%程度であった。

キーワード：積層ゴム支承、長方形断面、回転変形、せん断変形、FEM解析、設計式

連絡先：〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11 山梨大学工学部 土木環境工学科 Tel:0554-220-8521

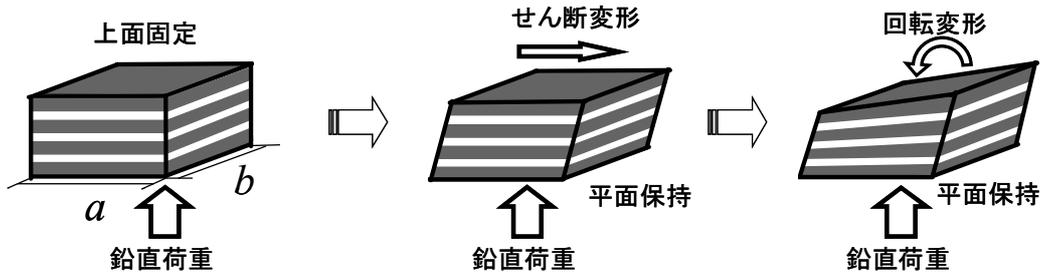


図-1 解析条件

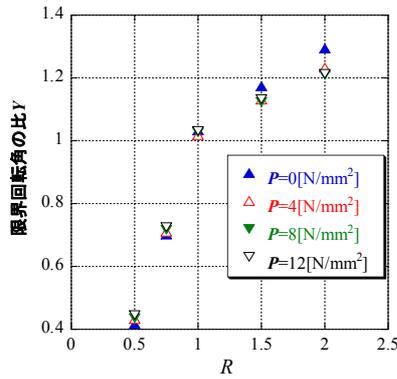
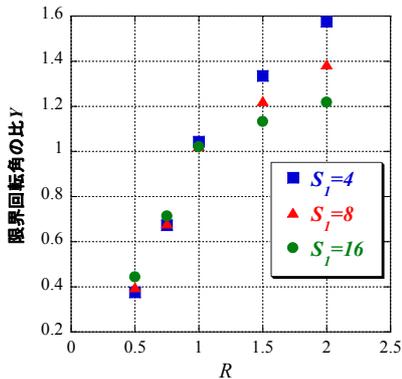


表-1 未知係数の同定結果

a_0	1.7714	d_0	0.5726
a_1	3.2726	d_1	-0.0213
a_2	138.8654	d_2	-0.0034
b_1 [N/mm ²]	5.1943	e_0	1.3880
b_2 [N ² /mm ⁴]	-707.1693	e_1	-0.0160
c	0.1302	e_2	-0.0025

図-2 一次形状係数別の限界回転角の比と辺の比との関係

図-2 面圧別の限界回転角の比と辺の比との関係

3. 任意の断面に対応する長方形支承の設計式

上述した限界回転角度の比 Y は正方形支承の限界回転角 $\tilde{\theta}$ を基準としたときの、長方形支承の限界回転角 θ の割合を表している。よって、本研究では正方形支承の設計式²⁾に限界回転角度の比 Y を掛け算することで、長方形支承の限界回転角 θ を表すことにした。限界回転角度の比 Y の増加率は辺の比 $R=1$ を境に変化していることから式を $R \geq 1$ と $R \leq 1$ の2つに分けて表す。また、限界回転角度の比 Y は2.(2)で明らかとなったように一次形状係数 S_1 および面圧 P に大きく依存し、二次形状係数 S_2 およびせん断変形の割合 γ によるばらつきは少なかった。よって本研究では、限界回転角度の比 Y は、辺の比 R 、一次形状係数 S_1 および面圧 P の関数であると考え、具体的には以下のように長方形支承の回転限界角を予測する設計式を設定した。

$$\theta(S_1, S_2, P, \gamma, R) = Y(R, S_1, P) \cdot \tilde{\theta}(S_1, S_2, P, \gamma) \quad (1)$$

$$\tilde{\theta}(S_1, S_2, P, \gamma) = Z(\gamma) \cdot F(P) \cdot H(S_1, S_2) \quad (2)$$

$$H(S_1, S_2) = \left(a_0 + \frac{a_1}{S_1} + \frac{a_2}{S_1^2} \right) \frac{1}{S_2} \quad (3)$$

$$F(P) = 1 + \frac{P}{b_1} + \frac{P^2}{b_2} \quad (4)$$

$$Z(\gamma) = 1 - c\gamma^2 \quad (5)$$

$$Y(R, S_1, P) = \begin{cases} 1 + (d_0 + d_1 S_1 + d_2 P)(R - 1) & R \geq 1 \\ 1 + (e_0 + e_1 S_1 + e_2 P)(R - 1) & R \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

ただし、限界回転角 θ および $\tilde{\theta}$ と面圧 P の単位は、そ

れぞれ[度]および[N/mm²]である。また、 a_i ($i=0,1,2$), b_1 , b_2 , c , d_j ($j=0,1,2$), e_k ($k=0,1,2$) は未知係数であり、FEM解析による限界回転角と設計式による限界回転角の差の二乗の和が最小となるように決定した。

表-1に未知係数の同定結果を示す。構築した設計式と限界回転角の解析結果とを比較すると最大誤差は8.85%、平均誤差が2.75%となった。

4. まとめ

本研究では、せん断弾性係数1.2[N/mm²]の天然ゴムを用いた任意の長方形断面を有する積層ゴム支承を対象として、限界回転角をFEMにより把握し、それらを表す簡易な設計式を提案した。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋支承便覧，丸善，2004.
- 2) 柚木和徳，吉田純司，塩畑英俊，今井隆，杉山俊幸：有限要素モデルを用いた積層ゴム支承の回転限界の把握と設計式の構築，土木学会論文集 (in press)
- 3) 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.717/1-61, pp.37-52, 2002.
- 4) 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.