

B-9

P-Δ 効果を考慮した積層ゴム支承の線材モデルによる解析結果と実験結果の比較検討

Comparison of analytical values and experimental results using a wire rod model of laminated rubber bearings considering the P-Δ effect

○矢部春恵¹, 北嶋圭二², 神田亮³, 中西三和², 安達洋⁴

*Harue Yabe¹, Keiji Kitajima², Makoto Kanda³, Mitsukazu Nakanishi², Hiromi Adachi⁴

Abstract: This paper describes the fundamental behavior of the natural rubber laminated bearings under the P-Δ effect. In this paper, the experiment in the reference is compared with the analysis. As the results, the good agreements can be gotten.

1. 背景および目的

免震建物に水平力が作用した際、水平剛性の低い免震層に大きな水平変形が生じる。この結果、軸力 P の作用線にズレ Δ が生じ、設計上無視できない応力が免震層の上下の架構に生じる。一般にこの現象を、P-Δ 効果と呼ぶ。

先行研究^[1]では、積層ゴム支承を線材モデルに置き換えし、ラーメン架構柱に適用されている P-Δ 効果を含む式にせん断変形を考慮することで、積層ゴム支承の水平剛性を評価する式(1式)を導出した。

$$K_H = \frac{1}{\left(\frac{H^3}{12EI} + \frac{H}{GA} + \frac{P}{GA} \frac{H^3}{12EI}\right)} \left\{ 1 - \left(\frac{PH^2}{12EI} + \frac{P^2H^2}{12GA EI} \right) \right\} \quad (1)$$

(1)式で評価された水平剛性は、Haringx 理論による水平剛性とほぼ一致し、その妥当性が確認された。既往の研究^[2]では、積層ゴム支承の重なり面積で応力が伝達するとされている。そこで、本研究では、重なり面積による鉛直剛性の評価を解析的に把握することを目的とし、重なり面積を考慮した解析値と破断実験の比較検討を行う。なお、実験値は、鉛直荷重-鉛直変位関係を参考文献[2]、復元力-水平変位関係、沈み込み量-水平変位関係を参考文献[3]から引用した。

2. 天然ゴム系積層ゴム支承の鉛直剛性

Fig.1 に、有効支持面の重なり面積 A_e および断面二次モーメント I_e の概念図を示す。積層ゴム支承の上下面

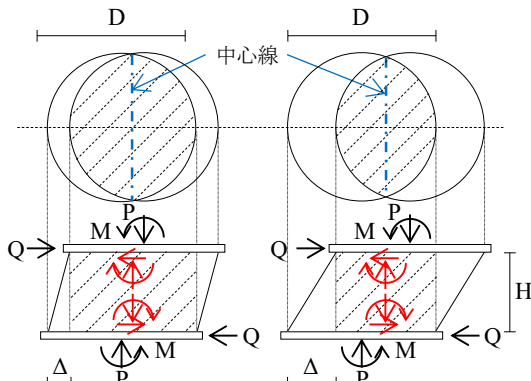


Fig.1 Overlapping area of top and bottom of laminated rubber bearing

の重なり面積を有効支持面積とし、 A_e で表す^[4]。また、有効支持面の中心線に対する断面二次モーメントを I_e で表す^[5]。有効支持面積 A_e および断面二次モーメント I_e は次式のように求められる。

$$A_e = \frac{\pi D^2}{4} \left[1 - \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{\Delta}{D} \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta}{D}\right)^2} + \sin^{-1} \frac{\Delta}{D} \right\} \right] \quad (2)$$

$$I_e = I \left\{ \frac{4}{\pi} \left(-\frac{13}{6} \sin^3 \theta_a \cos \theta_a - \frac{5}{2} \sin \theta_a \cos^3 \theta_a + \frac{1}{2} \theta_a + 2 \cos^2 \theta_a \cdot \theta_a \right) \right\} \quad (3)$$

ただし、 θ_a は $\cos^{-1} \Delta/D$ である。

水平変形の生じた積層ゴム支承の有効支持面積 A_e によって鉛直剛性が変化するという仮定を解析的にも定量的に把握するため、実験値 1 と解析値 1 の比較検討を行った。実験値 1 は、直径 440mm の 50 トン用の天然ゴム系積層ゴム支承を上下に 2 つ重ね、鉛直荷重を載荷しながら、水平方向にせん断変形を与えた実験である^[2]。解析値 1 は、(2)式を用いて水平変位が 0, 50, 100, 150mm の時の有効支持面積を考慮し鉛直荷重を増加させ、各鉛直変位を算出した。Fig.2 に、実験値 1 と解析値 1 を比較して示す。Fig.2 から、各水平変位の実験値 1 と解析値 1 の鉛直剛性が概ね一致していることがわかる。また、水平変位の増加に伴い、傾きが減少していることがわかる。ゆえに、水平変位の増加に伴い、鉛直剛性が低下することがわかった。このこと

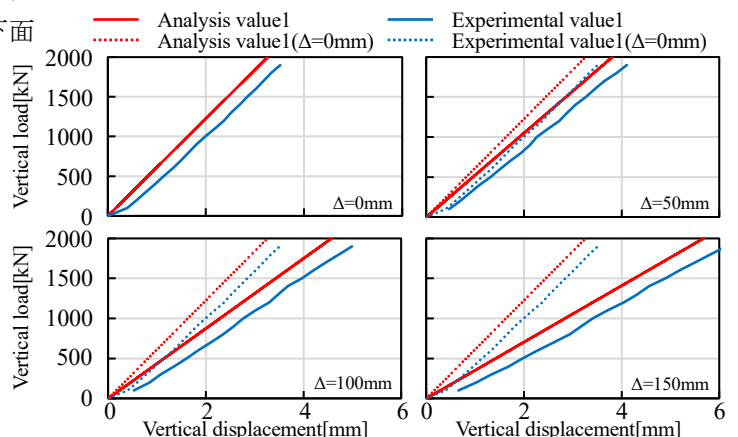


Fig.2 Vertical load and Vertical displacement relationship

1 : 日大理工・院(前)・海建 2 : 日大理工・教員・海建 3 : 日大生産工・教員・建築 4 : 日大・名誉教授

から、有効支持面積と鉛直剛性は比例していることが解析的にも表現できることがわかった。

3. 天然ゴム系積層ゴム支承の破断実験^[3]

3.1 実験概要および解析概要

ここでは、既往の研究で行われた天然ゴム系積層ゴム支承の破断実験(実験値 2)と(1), (2), (3)式より算出した解析値 2 を比較検討する。実験値 2 は参考文献[3]から引用する。Fig.3 にせん断破断実験装置を示す。実験概要は以下の通りである。天然ゴム系積層ゴム支承を Fig.3 のように、上下対象に 2 つ重ね軸力は一定載荷とし、水平方向にせん断変形を与えた実験である。計測項目は、積層ゴム支承の復元力、鉛直荷重、水平変位、沈み込み量である。なお、沈み込み量は 2 つの積層ゴム支承の平均値を計測値としている。さらに、積層ゴム支承の特性値は以下の通りである。ゴム外径 $d_0=240\text{mm}$ (断面積 $A_r=4.52 \times 10^4\text{mm}^2$)、ゴム総厚さ $H_r=64.8\text{mm}$ 、ゴム一層厚さ 2.4mm、全高さ $H=96\text{mm}$ 、せん断弾性率 $G=0.58\text{N/mm}^2$ 、補正係数 $\kappa=0.85$ である。解析値 2 は、各水平変位に対する断面二次モーメント I_e を考慮し、(1)式を用いて天然ゴム系積層ゴム支承の水平剛性を算出した。沈み込み量に関しては、(2)式を用いて算出した。なお、解析値 2 では積層ゴム支承の水平剛性が 0 となり座屈現象が起こるまでを追跡した。

3.2 実験値 2 および解析値 2 の比較検討

Fig.4 に復元力-水平変位関係、Fig.5 に沈み込み量-水平変位関係の実験値 2 と解析値 2 を比較して示す。Fig.4 より、実験値 2 には水平変位が 200mm 以降、ハードニング効果が発生している。ハードニング効果以前は、実験値 2 と解析値 2 がよい一致を示している。また、解析値 2 は水平変位が 200mm 以前で水平剛性が 0 となることがわかる。Fig.5 より、実験値 2 は有効支持面積 A_e の減少によって沈み込み量の急激な増加が見られる。水平変位 200mm 以前に関しては概ね実験値 2 と解析値 2 が一致している。

4. まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す。

Fig.2 より、実験値と解析値の鉛直剛性が概ね一致していることから、有効支持面で鉛直荷重を伝達することが解析的に明らかになった。Fig.4 から、ハードニング効果の発現以前において、解析値が概ね実験値を追跡できることがわかった。Fig.5 より、水平変位が 200mm 以前において、解析値は実験値を追跡可能である事がわかった。

[謝辞]

参考文献の引用をご快諾頂きました東京電機大学藤田聡教授には深く感謝の意を示します。

[参考文献]

- [1]矢部春恵, 北嶋圭二, 中西三和, 安達洋: ラーメン架構の柱及び免震部材の P- Δ 効果に関する研究, 日本大学理工学部学術講演会予稿集, pp.48-49, 2019.12.
- [2]藤田隆史, 藤田聡, 鈴木重信, 芳沢利和: 建築免震用の積層ゴムに関する実験的研究(第 1 報, 50 トン用積層ゴムの静的加力実験), 日本機械学会論文集(C 編), 53 巻 485 号(昭和 62-1)
- [3]藤田隆史, 藤田聡, 鈴木重信, 芳沢利和: 建物免震用の積層ゴムに関する実験的研究(第 3 報, 100 トン用積層ゴムの破断実験), 日本機械学会論文集(C 編), 54 巻 507 号(昭和 63-11)
- [4]多田英之: 「4 秒免震への道」, 理工図書, 2007.
- [5]三山剛史: 積層ゴム支承の上下面に回転角を与えた場合の力学性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 556 号, pp.43-50, 2002.6.

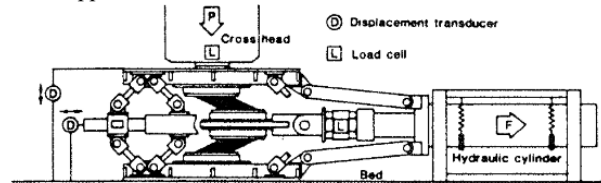


Fig.3 Shear failure experiment

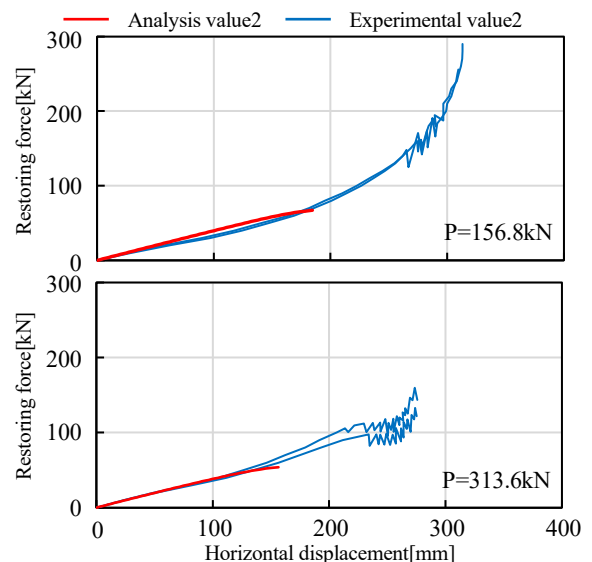


Fig.4 Restoring force and Horizontal displacement

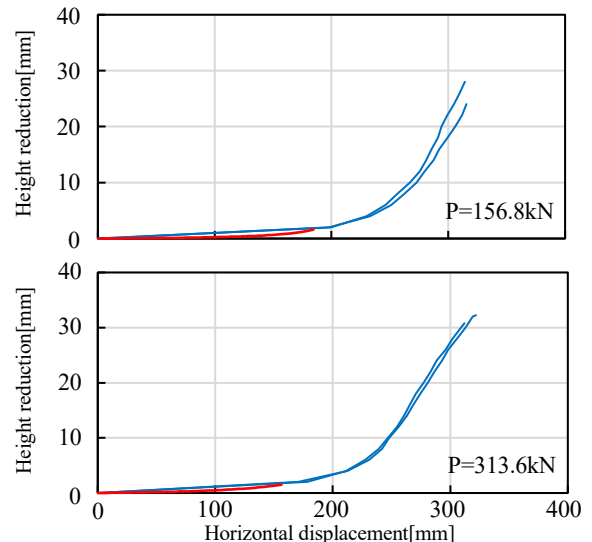


Fig.5 Height reduction and Horizontal displacement