コイルばねの平行圧縮に伴う横たわみ問題*

久島 士郎^{*1}, 神足 勝英^{*2}
松田 真一郎^{*3}, 水野 正夫^{*4}

Lateral Deflection of Coiled Springs Caused by Parallel Compression

Shiroh HISAJIMA, Katsuhide KOHTARI,
Shinichiroh MATSUDA, and Masao MIZUNO

Instability theories of compression coiled springs were established some decades ago. According to these theories, when a slender coiled spring is gradually compressed, it suddenly generates a lateral deflection at the critical load. However, actual springs generate a lateral deflection gradually. When a coiled spring is compressed under condition that it is in a tube or a guided rod is inserted in it, the coiled spring may touch the wall of the tube or the rod as a consequence of lateral deflection. In this paper, compression tests were carried out for more than 200 coiled springs and lateral deflections were measured. We obtained the result that the direction and quantity of lateral deflection depends largely on the angle between the top and bottom tip-contact points of a coiled spring.

Key Words: Machine Element, Coiled Spring, Parallel Compression, Buckling, Lateral Deflection, Tip-Contact Point, Experimental Study

1. 緒 言

細長いコイルばねは、軸方向に圧縮荷重を加えていくと、ある荷重に達すると、突然横方向にたわみを生ずるという、いわゆる座屈現象を起こすことが知られている。この座屈を生じる荷重については、古くから研究が行われている⁽¹⁾⁽²⁾。しかしながら、実際に用いられている座巻を有するコイルばねは平行圧縮すると、圧縮開始と同時に横たわみが生じ始め、その荷重が座屈荷重以下であってもある程度の横たわみを生じる。また、Haringx⁽²⁾によれば、縦横比の小さなコイルばねは座屈を生じないといわれているが、これらのばねもある程度の横たわみを生じる⁽³⁾。この横たわみが、コイルばねが円管内で用いられったり、コイルばねの中にガイド棒を通して用いられったりする際にこれらと摩擦を生じる原因となっており、摩耗や破損を引き起こすこともある⁽⁴⁾。そこで本研究では、座巻を有するコ

イルばねを平行圧縮した際の横たわみに関しての基礎的な知見を得るために、コイルばねの圧縮実験を行った。その結果、平行圧縮に伴うコイルばねの横たわみ量とその方向は、Tip-Contact Pointのなす角度に大きく依存していることがわかった。本研究の意義は、従来あまり議論されてはいないが、事故等の原因となる横たわみに注目したことであり、また座巻を有するコイルばねを実験対象にしたので、この結果が実用に供せられることである。

2. 実験方法

2.1 実験装置 座巻を有するコイルばねを平行圧縮すると、図1のように横たわみを生じる。この時のばね中心線の横たわみ量の最大値を δ で表す。また座巻部とばね有効部の接触点を、Tip-Contact Point (T. C. P.) と呼び、上部 T. C. P. と下部 T. C. P. のなす角度 (右巻のばねでは図3のように測る) を、T. C. P. のなす角度 ϕ と呼ぶ。本研究を行うために、図2に示す実験装置を製作した。両端固定の端末条件を満足させるために、図1のように、ばね端部固定治具を用い、横たわみ量が増大しても、座面が平行状態を保つようにした。また、実験は非平行状態や偏心状態が生じないように留意して行われ、万能試験機を用いて圧縮

* 昭和62年4月3日 第64期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和61年8月26日。

^{*1} 正員、慶応義塾大学大学院 (〒223 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1)。

^{*2} 准員、東京ガス(株) (〒105 東京都港区芝浦1-16-25)。

^{*3} 慶応義塾大学大学院。

^{*4} 正員、慶応義塾大学理工学部。

を行った。この装置を用いての計測に関して、次のような仮定を設けた。

- (a) コイルばねの圧縮に伴うその中心線のたわみ曲線は、一平面内にあるとみなす。
- (b) コイルばねの変形は、両端から等巻数にある点に関して対称であるものとする。
- (c) 圧縮に伴うコイル平均径の増加は、無視できるものとする。

横たわみの測定方法を図3に示す。コイルばねが横たわみを生じると、これに接している2枚の板 P_1 , P_2 が回転軸 O_1 , O_2 のまわりを回転する。板の回転軸より b_1 , b_2 の距離の点にダイヤルゲージを板に直角に当て、周方向の変位 δ_1 , δ_2 を検出する。この変位より P_1 , P_2 の回転角度を求め、これより横たわみ量およびその方向を求める。このため、2枚の板は常に変形曲線の凸側でコイルばねに接していなければならない。また、凸側に、コイル両端から等巻数の点がない場合については、本実験装置では、実際の横たわみ量よりも若干小さめの計測値が得られることになる。図3に示すように記号を定めると、ばね中心線の x 方向および y 方向の移動量 δ_x , δ_y はそれぞれ式(1), (2), 横たわみの方向 ω は式(3)で与えられる。なお ω は、T. C. P. のなす角度 ϕ の二等分線を基準に、反時計回りに測る。

$$\delta_x = \frac{-1}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} \times \{R_o \sqrt{\tan^2 \theta_1 + 1} + R_o \sqrt{\tan^2 \theta_2 + 1} - a \tan \theta_2\} - a/2 \quad (1)$$

$$\delta_y = \frac{-1}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} \times \{\tan \theta_1 \cdot R_o \sqrt{\tan^2 \theta_2 + 1} + \tan \theta_2 \cdot R_o \sqrt{\tan^2 \theta_1 + 1} - a \tan \theta_1 \cdot \tan \theta_2\} \quad (2)$$

図1 コイルばねの横たわみ

$$\omega = \tan^{-1}(\delta_y/\delta_x) + \pi/2 \quad (3)$$

$$\theta_1 = \theta + \tan^{-1}(\delta_1/b_1) \quad (4)$$

$$\theta_2 = \theta + \tan^{-1}(\delta_2/b_2) \quad (5)$$

$$\theta = \sin^{-1}(2R_o/a) \quad (6)$$

ここで、 R_o は、コイルばねの外半径、 a は、回転軸間の距離である。本実験では、 $R_o = 22.5$ mm, $a = 400$ mm である。

2.2 供試コイルばね 本実験で用いたコイルばねの仕様を、以下に示す。

線径	d : 5 mm
コイル平均直径	D : 40 mm
材質	: SWPB
ピッチ角	α : $3.0^\circ \sim 11.9^\circ$
巻方向	: 右巻
自由高さ	H : 縦横比が3~7になるようにした
座巻	: 両端 1巻ずつ クローズドエンド (研削) 先端厚さ $d/4$
外側面の傾き	: JIS B 2707 の1級

- ① DEFLECTION TRANSDUCER
- ② DIAL GAGE
- ③ LOADCELL
- ④ PLATE
- ⑤ ROTATION AXIS
- ⑥ JIG
- ⑦ STRAIN METER
- ⑧ A/D CONVERTER
- ⑨ PERSONAL COMPUTER

図2 実験装置の概略図

図3 横たわみの測定方法

3. 実験結果および考察

図4に、コイルばねを軸方向に δ_c 圧縮したときの横たわみ量 δ を示す。これらのばねは、T. C. P.のなす角度とピッチ角をそれぞれほぼ等しくし、縦横比のみを異なるように製作してある。これより、圧縮につれて横たわみが増大していくばねと、圧縮につれて横たわみが増大した後に、減少していくばねがあることがわかる。この傾向の分岐点は、縦横比が5と5.5との間にあることがわかる。この結果は、Haringx⁽²⁾の理論による、両端固定の端末条件では、縦横比5.24以下のコイルばねは座屈を生じないということと相通じるところがある。

図5に、自由高さの20%の軸方向圧縮量を与えたときの、T. C. P.のなす角度 ϕ_0 と、横たわみが生じる方向 ω との関係を示す。

これより、T. C. P.のなす角度 ϕ_0 が 0° から 260° 付近までのばねの場合には、 ω は 180° 、すなわち横たわみは巻数の少ない方向に生じ、 ϕ_0 が 260° 付近から 360° では、 ω は 0° (360°)、すなわち巻数の多い方向にたわむことがわかる。これは、T. C. P.のなす角度が 260° 付近を境として、横たわみの生じる方向が異なることを示している。仮定(b)によれば、たわむ方向はT. C. P.のなす角度の二等分線上(0° , 180°)になるは

ずである。実際のばねでは、T. C. P.から等ピッチに到るまでの不等ピッチ部分の形状が上端部、下端部で微妙に異なるので、圧縮によりT. C. P.が移動すると、T. C. P.のなす角度の二等分線方向が若干ずれる。そのためデータのばらつきが生ずると考えられる。

図6に、縦横比6のばねについて、自由高さの20%の軸方向圧縮を与えたときの、T. C. P.のなす角度 ϕ_0 と圧縮によるT. C. P.のなす角度の減少量 $-\Delta\phi$ との関係を示す。これらのばねは高さを等しくし、T. C. P.のなす角度のみを変化させてある。

コイルばねを圧縮していくと、ばね素線同士の間隔が小さくなっていくので、T. C. P.は有効巻数を減じる方向に移動する。よって、T. C. P.のなす角度は小さくなっていく。データの平均値は約 170° であり、ばらつきが、 ϕ_0 とあまり相関のないことより、20%圧縮では、横たわみは、ばね端部付近での変形にはあまり影響をあたえていないと考えられる。

図7に、自由高さの20%の軸方向圧縮量を与えたときの、T. C. P.のなす角度 ϕ_0 と、横たわみ量 δ との関係を示す。これらのばねは、高さを等しくし、T. C. P.のなす角度のみを変化させてある。

これより、T. C. P.のなす角度 ϕ_0 が、 80° 付近のばねが最も大きな横たわみを生じ、 ϕ_0 が、 260° 付近のばねが最も小さな横たわみを生じ、 δ は ϕ_0 に関して

図4 軸方向圧縮量と横たわみ量との関係

図6 T. C. P.のなす角度とT. C. P.の移動との関係

図5 T. C. P.のなす角度と横たわみの方向との関係

図7 T. C. P.のなす角度と横たわみ量との関係

図 8 ピッチ角と横たわみ量との関係

周期性を持っていることが観察される。

また、T. C. P.のなす角度が等しい、 0° と 360° では、 0° のほうが横たわみ量が大きいことがわかる。これは、 0° のほうが、巻数が少ないためと考えられる。

図 6、図 7 の結果より、縦横比 6 のばねに関して、無荷重時に T. C. P.のなす角度 ϕ_0 が、 80° 、 260° のばねは 20 % 圧縮時には、そのときの T. C. P.のなす角度 ϕ はそれぞれ 270° 、 90° になっていることがわかる。すなわち、最も横たわみ量が小さいとき、そのときの ϕ は約 90° であると考えられる。

図 8 に、自由高さの 20 % の軸方向圧縮量を与えたときの、コイルばねのピッチ角 α と、横たわみ量 δ との関係を示す。

これより、ピッチ角が大きいほど、横たわみ量が大きくなることがわかる。同一縦横比のばねで、ピッチ角が大きいということは、巻数が少ないことを意味するので、この図より、巻数が少ないばねほど大きな横たわみを生ずると考えることもできる。

図 9 に、自由高さの 1 % の横たわみ量を生じたときの、縦横比（コイルばねの自由高さとコイル平均直径との比）と軸方向圧縮量 δ_c/H との関係を示す。

図中、破線で示したものは、Haringx⁽²⁾ による臨界圧縮量である。これより、従来ばねの横たわみが生じる基準の一つとして考えられてきた、Haringx の臨界荷重以下においても、ある程度の横たわみ量が生じていることがわかる。また、JIS⁽⁵⁾ で推奨されている縦横比 4 以下のばねでも横たわみが生じているのがわかる。図中、軸方向圧縮量の値が大きな幅を持つのは、図 7、図 8 よりわかるように、T. C. P.のなす角度やピッチ角の違いにより横たわみ量が大きく変化するためと考えられる。

コイルばねを平行圧縮すると、その荷重の作用線はコイルばねの中心軸を通らずに、偏心荷重となること

図 9 縦横比と軸方向圧縮量との関係

が知られており⁽⁶⁾⁽⁷⁾、荷重の偏心量は、コイルばねの巻数と縦横比の関数であるとされている⁽⁸⁾。これらのことと、今まで述べてきた結果を合せ考えると、本研究は、座巻による偏心荷重の作用を実験的に明らかにしたといえる。

4. 結 言

(1) コイルばねを圧縮すると、座屈するばねは、座屈荷重以下の荷重でも、また座屈しないばねも、相当量の横たわみを生じる（図 4、図 9）。

(2) コイルばね自由高さの 20 % の軸方向圧縮量では、

(i) コイルばねは、その T. C. P.のなす角度が約 260° 以下では、巻数の少ない方向にたわみ、約 260° 以上では、巻数の多い方向にたわむ（図 5）。

(ii) その T. C. P.のなす角度が約 80° であるコイルばねが最も横たわみ量が大きく、約 260° であるコイルばねが最も横たわみ量が小さい（図 7）。

(iii) 圧縮され移動した T. C. P.のなす角度が 90° であるときに最も横たわみが小さい（図 6、図 7）。

(iv) ピッチ角が大きいほど、横たわみ量は大きい（図 8）。

終わりに、本研究用のコイルばねの製作に協力いただいた、(株)日東発条 尾上芳充氏に深く感謝する。

文 献

- (1) Hurlbrink, E., *VDI Band 54*, Nr4, (1910), 133.
- (2) Haringx, J. A., *Philips research reports*, 3(1948), 401.
- (3) Huhnen, J., *Wire Issue* 94, (1968), 73.
- (4) Leech, W. J., *RE-TR-68*, (1971-11) (AD-739914).
- (5) JIS B 2704 圧縮・引張コイルばね設計基準.
- (6) Keysor, H. C., *Trans. ASME*, (1940-5), 319.
- (7) Kuhn, R., *Wire Issue* 112, (1971), 51.
- (8) 下関・ほか 3 名, 機論, 45-396, C(昭 54), 901.