研 究

ローラチェーンの疲れ強さに及ぼすブシュ はめあい力とリンク数の影響*

中 込 昌 孝** 水 野 正 夫**

Effects of Press-fit of Bushings and Number of
Links on Fatigue Strength of Roller Chains

Masataka NAKAGOME and Masao MIZUNO

In this paper, at first the relation between the optimum interferences and the fatigue limit have been examined when the press-fit of bushings are represented by interferences. Then the influences of the number of links on the fatigue strength have been examined, and studied statistically. The results are as follows: (1) The effects of the press-fit of bushings could be estimated by fatigue limit

diagram of roller link-plates without interference. (2) The optimum interference exists that gives the most improved fatigue limit of roller chains. (3) The fatigue limit of any number of links could be estimated statistically by the life distribution of roller link-plates. (4) The tensile strength, the fatigue strength at N cycles and the fatigue limit decrease, as the number of links increases. And the ratio of decrease is in order of fatigue limit, fatigue strength at N cycles and tensile strength.

Key words: roller chain, roller link-plate, interference, number of links, fatigue strength.

1. 緒 言

ローラチェーンのブシュはめあい力を変えることによって、疲れ強さも変化することは、これまでの研究¹⁾²⁾によってある程度あきらかにされている。しかしそれらの研究では、いずれもローラリンクプレートを用いて疲れ強さに及ぼすはめあい力の影響について論じている。もちろんローラチェーンの疲れにおける破壊箇所が、主にローラリンクプレートの危険断面部であることを考えると、簡便でかつ効果的な方法であるとも言えるが、ローラチェーンが個々の部品によって構成されていることから、より正確な疲れ強さを知るためには、はめあい力の異なるチェーンを用いて調べることが必要であると考えられる。

そこで本研究では、まずはじめにはめあい力を締め代として表した場合、締め代と疲れ限度の関係を、プレート単体の場合を含めて理論的並びに実験的に調べた。

次にローラチェーンは多数の同一部分が直列につながっている機械要素であることより、その内の1個が破壊しても全体の強さに影響を及ぼすこととなり、この意味から疲れ強さに及ぼすリンク数の影響について調べ、統計的に解析し検討した。

2. 供試チェーン及び実験装置

2.1 供試チェーン

供試チェーンは、JCAS³⁾ 428に相当し、締め代と疲れ限度の関係を調べるために、ローラリンクプレート単体、1リンク（ローラリンク）、5リンク（ローラリンク3個、ピンリンク2個）、9リンク（ローラリンク5個、ピンリンク4個）の4種類とした。この内ローラリンクプレート単体については、図1に示すごとく締め代をゼロから0.165 mmまでの5種類とし、他の試験片についてはゼロから0.027 mmは組立上困難であるため、0.061, 0.105, 0.165各 mmの締め代で試験片を作製し実験した。

次にリンク数の影響を調べるために、締め代を0.105 mmとして統一し、1, 5, 9の各リンクに19リンク（ローラリンク10、ピンリンク9）を加えて実験することにした。これらの試験片のほかにローラリンクプレート材の機械的性質を調べるために平板平滑試験片を作製して用いた。また表1に部品の材質と熱処理条件を示す。

2.2 実験装置

リンクプレート及びチェーンの引張試験には、アムスラ型万能材料試験機（容量10 t）を用いた。疲れ試験は繰返し引張圧縮疲れ試験機（容量±1 t、毎分1250回転）と付属している自動停止装置を用いて行った。これらの試験機にローラリンクプレート及びチェーンを取り付けるジグを用いて実験した。また平板平滑試験片の場合には、応力・ひずみの関係をくわしく調べるために静ひず

* 原稿受付 昭和58年5月19日。昭和58年度精機学会春季大会学術講演会（昭和58年3月27日）にて発表。

** 正 会 員 慶応義塾大学理工学部（横浜市 港北区日吉3-14-1）

Table 2 Result of tensile test

Link-plate ϵ mm	Proportion- al limit MPa	Yield point MPa	Tensile strength MPa
0	679.1	981.9	1 379.5
0.027	709.4	1 069.8	1 475.2
0.061	709.9	895.2	1 509.9
0.105	788.3	1 098.0	1 452.0
0.165	1 250.0	1 394.1	1 486.5
Material	1 352.4	1 577.8	1 737.5

Tensile strength MPa			
ϵ mm	0.061	0.105	0.165
Link-plate	1 509.9	1 452.0	1 468.5
1 link	1 504.3	1 351.4	1 462.2
5 links	1 275.0	1 252.4	1 255.4
9 links	1 176.0	1 267.1	1 148.6
19 links	—	1 159.2	—

Fig. 3 Variation of hoop stress

0.061, 0.105 mm の3者を比較してみると, 締め代 0.105 mm のものは他の二つのものより比例限度と降伏点は高いが, 引張強さはほぼ同程度である。

さらに締め代の最も大きい 0.165 mm の結果をみると, 他のいずれのリンクプレートの数値よりも大きくなっている。また締め代の異なるチェーンについての結果によると, 引張強さはほぼ同程度であり, リンク数の影響はほとんど表れていないように思われる。これらのチェーンとプレート単体を比較した場合, それ程大きな差は認められなかった。なおリンクプレート材の結果も比較するために示した。

4.2 プッシュ圧入試験結果

外径の異なるプッシュをリンクプレート穴にはめあいし, その後に引張荷重を負荷して得られた結果について述べる。すなわち図3に示すごとく, 縦軸は図1のA-A断面のGの位置に接着したひずみゲージよりひずみを測定して応力に換算した。この応力をリンクプレート穴周囲に生じる円周応力とみなした。また横軸は公称引張

Fig. 4 Experimental result of fatigue limit and interference

Fig. 5 Fatigue limit diagram of link-plate ($\epsilon=0$)

応力である。

円周応力と公称引張応力が等しくなる点をはめあい効果保持限界応力とすれば, 締め代を大きくすることによってこの応力も大きくなるが, その大きさは公称引張応力の値とはほぼ一致していると言える。

4.3 疲れ試験結果

ローラリンクプレート単体に対して, 1リンク, 5リンク, 9リンクのチェーンで各々締め代を変えたときの疲れ限度に及ぼす影響を図4に示す。この図より明らかに, リンクプレート単体と1リンクについては締め代 0.10 mm が最適値であるとみられるが, 5リンク, 9リンクでは 0.07 mm が良い結果を示している。またリンク数が増加することによって, 疲れ限度は全体として低下する傾向を示している。このことは個数効果によるものであると考えられる。図5は締め代 0 のローラリンクプレートの疲れ限度線図で, 疲れ限度の理論値を求めるために必要となる傾きの絶対値を得るために作成したものである。さらにリンク数の影響について締め代は 0.105 mm とし2種類の応力振幅で時間強さを調べた。まず応力振幅 $\sigma_a=143.6$ MPa の場合は, ローラリンクプレート単体の寿命が最も長く, チェーンに組立ててリンク数を増加していくと寿命は短くなっていくことがわかった。次に応力振幅 $\sigma_a=172.3$ MPa とした場合についても, リンク数が増加すると疲れ寿命は短くなる結果が

Fig. 6 Variation of hoop stress on cross section A-A of Fig. 1 (a)

得られた。

5. 考 察

5.1 はめあい応力と疲れ限度の関係

図1(a)でブシュ内半径を r_0 、プレートとブシュの接触面半径を r_2 、締め代を ε 、ローリングプレート材の縦弾性係数を E 、影響係数を f とし、はめあい応力 σ_0 を求めると、次式のように表される⁴⁾。

$$\sigma_0 = f \cdot \frac{E(r_2 + r_1)(r_1^2 - r_0^2)}{4r_1^2(r_2^2 - r_0^2)} \cdot \varepsilon \quad (1)$$

ここでは σ_0 を初期応力とみなす。いま図6においてすでに述べたごとく円周応力 σ_t と公称引張応力 σ_N が等しくなる点を σ_{NC} とし、これをはめあい効果保持限界応力とする。要するにははめあいによって初期応力が発生し、これをさらに引張ることにより、図1(a)に示すごとく、A-A断面に生ずる円周応力 σ_t はMNLのごとき過程をたどることになる。ここで C_0 を $\sigma_N \leq \sigma_{NC}$ のときの σ_t の増大係数とすれば、繰返し引張応力 σ_1, σ_2 が作用した場合の内力振幅 σ_1', σ_2' は、図7(a), (b), (c)を参照して次式のごとく求められる。

$$\left. \begin{aligned} (a) \quad \sigma_{NC} \leq \sigma_1 \quad \sigma_1' &= \sigma_1 \quad \sigma_2' = \sigma_2 \\ (b) \quad \sigma_1 \leq \sigma_{NC} \leq \sigma_2 \quad \sigma_1' &= \sigma_0 + C_0 \sigma_1 \quad \sigma_2' = \sigma_2 \\ (c) \quad \sigma_2 \leq \sigma_{NC} \quad \sigma_1' &= \sigma_0 + C_0 \sigma_1 \quad \sigma_2' = C_0 \sigma_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

また σ_1' の初期値が σ_0 であり、 $\sigma_0, \sigma_{NC}, C_0$ の関係を次式に示す。

$$\sigma_{NC} = \frac{\sigma_0}{1 - C_0} \quad (3)$$

ここで C_0 の算出について述べると、図1(a)において引張荷重が作用したときのCD間の伸びを C_1 、はめあい力によって引張荷重が減少したときのCD間の縮みを C_2 とすれば、それぞれ次式のように表される⁵⁾。

$$C_1 = \frac{r_1 + r_2}{2E(r_2 - r_1)t} \left\{ \kappa \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{\pi} \right) + \frac{1}{(1 + \kappa)\pi} \right\} \quad (4)$$

ここで κ は断面係数である。

$$C_2 = \frac{(1 - \nu)r_1^2 + (1 + \nu)r_0^2}{E(r_1^2 - r_2^2)t} \quad (5)$$

(a) $\sigma_{NC} \leq \sigma_1$

(b) $\sigma_1 \leq \sigma_{NC} \leq \sigma_2$

(c) $\sigma_2 \leq \sigma_{NC}$

Fig. 7 Relation between external stress, internal stress and variation of initial stress

Fig. 8 Effect of initial stress on force ratio and critical nominal stress

また C_0 は、引張荷重が作用したときの図1(a)に示すA-A断面の受け持つ荷重の比に相当し、 C_1, C_2 を用いて次式のように求めることができる。

$$C_0 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \quad (6)$$

式(3)の理論値と実験値の関係を図8に示す。これより C_0 の実験値は σ_0 の増大に伴い減少し理論値とは異なるが、この原因はブシュの自己拡張効果による影響ではないかと思われる。以上の結果より、はめあい力のないローリングプレートの疲れ限度線図をもとに、任意

Fig. 9 Nomograph for finding stress amplitude with the initial stress

Fig. 10 Variation of initial stress and force ratio

のはめあい力におけるローラリンクプレートの疲れ限度は図9に示すごとく求められる。なお図9は式(2), (b)の場合である。いま、はめあい力のないローラリンクプレートの疲れ限度を σ_{a0} 、はめあい力を有するローラリンクプレートの疲れ限度を σ_{a1} とすると、各々の場合における疲れ限度比は次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} 1) \quad \sigma_{NC} \leq \sigma_1 & \quad \frac{\sigma_{a1}}{\sigma_{a0}} = 1 \\ 2) \quad \sigma_1 \leq \sigma_{NC} \leq \sigma_2 & \quad \frac{\sigma_{a1}}{\sigma_{a0}} = \frac{5+6m}{11(1+m)-C_0(1-m)} \\ & \quad \times \left[(1-m)\frac{\sigma_0}{\sigma_w} + 2 \right] \\ 3) \quad \sigma_2 \leq \sigma_{NC} & \quad \frac{\sigma_{a1}}{\sigma_{a0}} = \frac{1}{C_0} \left(1 - m \frac{\sigma_0}{\sigma_w} \right) \\ 3)' \quad \sigma_y \leq \sigma_2 & \quad \frac{\sigma_{a1}}{\sigma_{a0}} = \frac{1}{C_0^*} \left(1 - m \frac{\sigma_0^*}{\sigma_w} \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

但し、 $\sigma_{a0} = \sigma_w / (1 + 1.2m)$ であり、 σ_0^* および C_0^* は、図10を参照し、以下の式を用いて算出される。

$$\sigma_0^* = \sigma_0 - (1 - C_0) \left\{ \left(\frac{C_0}{C_0'} - 1 \right) \sigma_2 - \frac{C_0}{C_0'} D \right\} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} C_0^* = & \frac{C_0}{\sigma_2 - \sigma_0} \left[\left\{ 2 - C_0 - \frac{C_0}{C_0'} (1 - C_0) \right\} \sigma_2 \right. \\ & \left. - \sigma_0 - \frac{C_0}{C_0'} D (1 - C_0) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

Fig. 11 Relation between fatigue limit ratio and interference ratio

なお両式において、 $D = \sigma_y (1 - C_0 / C_0')$ 、また C_0' は σ_y を越えたときの増大係数である。

式(7)の計算結果と実験結果を図11に示す。図中に示したJIS 50については、すでに得られた結果¹⁾を再度今回の実験結果と比較する意味でプロットしたものである。この図より理論線と実験値を比較すると、締め代比が最適となる2.5~3.5の範囲までは両者ともよく一致しているものとみなされる。また総体的にも傾向としてほぼ合致していると思われる。

5.2 リンク数の影響

同じ部分が多数集まって形成される機械要素において、その破壊確率をワイブル確率紙⁶⁾を用いて部分の数を n で表す。またこれまでの疲れ破壊確率の解析⁷⁾⁸⁾を参照して、部分の疲れ寿命を求める。

いま生き残りの確率を $l(x)$ 、 x を繰返し数とすれば

$$l(x) = \exp \left[- \left(\frac{x - e}{v - e} \right)^{m_0} \right] \quad (10)$$

で表される。ここで v は特性値、 e は最小寿命、 $1/m_0$ は尺度係数である。式(10)をもとに n 枚で構成されるチェーンの場合を考えると

$$l_{(n)}(x) = [l(x)]^n = \exp \left[- n \left(\frac{x - e}{v - e} \right)^{m_0} \right] \quad (11)$$

となる。

またワイブル確率紙において分布関数 $F(x)$ は、

$$F(x) = 1 - \exp \left[- n \left(\frac{x - e}{v - e} \right)^{m_0} \right] \quad (12)$$

で表される。ここで実験結果をワイブル確率紙にプロットして比較したのが、図12(a)および(b)である。

二つの図における右側の縦軸は $Y = \ln \ln [1/l(x)]$ で、横軸は $X = \log X$ で表されている。また表3に各々の場合の計算に必要な特性値 $\log v$ と尺度係数 $1/m_0$ の数値を示す。

図12(a)および(b)について比較すると、実験値は理論線に良く一致した分布を示し、両者ともリンク数の

(a) $\varepsilon=0.105$ mm, $\sigma_a=143.6$ MPa, $\sigma_m=172.3$ MPa (b) $\varepsilon=0.105$ mm, $\sigma_a=172.3$ MPa, $\sigma_m=206.8$ MPa**Fig. 12** Relation between number of link-plates and fatigue life**Table 3** Parameter of fatigue life

Stress amplitude σ_a ($\sigma_m/\sigma_a=1.2$)	(a) 143.6 MPa	(b) 172.3 MPa
Scale parameter $1/m_0$	0.752	0.503
Characteristic number $\log v$	5.95	5.40

増加に伴って疲れ寿命は低下していく傾向を示している。さらに各リンク数異なる場合の平均疲れ寿命について調べて表 4 に示す。これらの結果から、リンク数を増加した場合、強さの平均値があまり変わらなくてもばらつきが多ければ、個数効果によって平均値は急激に減少するために、疲れ寿命が低下するものと思われる。また実験値と理論線が良く合致していることから、ワイブル分布を導入することによって疲れ寿命を予測できることがわかった。なおこれまでの結果をまとめて図 13 に示す。この結果よりリンク数を増加することにより、引張強さ、時間強さおよび疲れ限度とも低下することが確

Table 4 Mean fatigue life of test piece

Test piece	Mean fatigue life ($\times 10^4$)	
	(a) 143.6 MPa	(b) 172.3 MPa
Roller link-plate ($n=1$)	82.710	22.418
1 link ($n=2$)	50.086	16.127
5 links ($n=6$)	23.894	9.924
9 links ($n=10$)	15.164	7.443
19 links ($n=20$)	8.914	5.006

Fig. 13 Effect of number of roller link-plates

められた。

6. 結 論

本研究を行った結果、以下の結論が得られた。

- (1) 疲れ限度におけるはめあい応力の効果を、はめあいのない場合の疲れ限度線図から理論的に予測することができた。
- (2) はめあい力を締め代として表した場合、疲れ限度における最適締め代が存在し、その範囲はプシュ・プレートの接触面半径の 2~3% であることが理論的並びに実験的に明らかになった。
- (3) 同一部分の多数がつながって成るローラチェーンの場合、その疲れ寿命はローラリンクプレートの寿命分布をもとに個数の関数として統計的に推定することができた。
- (4) リンク数を増加することにより、引張強さ、時間強さおよび疲れ強さのすべてが低下する。さらにその低下する度合は、疲れ限度、時間強さ、引張強さの順に大きいことがわかった。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、試験片の提供をはじめ種々御助力下された高砂チェーン株式会社舟橋泰夫氏、およ

び熱心に御協力下さった当時慶応義塾大学大学院学生台
場丈一君, 豊嶋孝二君に対し感謝の意を表します。

文 献

- 1) 中込昌孝, 水野正夫: ローラチェーンリンク プレートの
予荷重及びプシユ嵌合力が疲労強度に 及ぼす影響, 精密
機械, **43**, 10 (1977) 1161.
- 2) 柴原正夫: ローラチェーン のリンクプレート形状とプシ
ユはめ合い による初期応力のリンク強さに及ぼす影響,
精密機械, **26**, 2 (1960) 100.
- 3) 日本チェーン工業会: 日 本 チェーン工業会規格, 二輪自
動車用チェーン, 1 (1981) 24.
- 4) 大越 諄: ローラチェーン, コロナ社 (1960) 164.
- 5) 河本 実ほか: 圧力嵌合 を有する環状端部の疲労強度に
ついて, 材料試験, **3**, 17 (1954) 19.
- 6) 真壁 肇: ワイブル確率紙の使い方, 日本規格協会(1965)
15.
- 7) 日本材料学会: 金属材料疲れ試験便覧, 養賢堂(1968)63.
- 8) 日本材料学会: 金属材料疲労設計便覧, 養賢堂 (1978) 9.