講 義

タイヤコードの疲労について*

実験的知見(その1)

会 員 藤 本 枝 太**

1. はじめに

タイヤコードは化学繊維工業の発達とともに急速に需要が増大され、戦前独の時であった綿はほとんど駆逐される状態である。

タイヤコードの用途は自動車および自転車のタイヤに使用され、また伝動用およびコンベア用ベルトにも大量に使用されている。綿を駆逐した強力人絹が、さらに急速に発達した合成繊維に浸蝕される状態に至りつつある。

このタイヤコードの時代の流れに応じた変遷の理由はどこに潜在していたか、さらにタイヤコードの現状から将来への変遷に対して何らかの予想はできないだろうか。

タイヤコードの発展の理由としてとくに耐疲労性の向上を取り上げなくてはならない。

以上の観点からタイヤコードの疲労について著者の行なった従来の実験データを基にして、最近の内外の文献などを引用し、総合検討し、繊維製造技術者ならびにタイヤコード使用技術者に対して、タイヤコードの特性として何らかのめやすとなるものをつかんでいただくことができれば幸である。

2. タイヤコードの疲労の意義

タイヤコードして必要な具備すべき性能は、その使用目的によっていろいろ変わり、またそれら各性能の重要度も異なってくる。

タイヤコードは単独で 사용되는場合は少なく、ほとんどの場合ゴム状物質(以下ゴムと称する)との貼合わせまたは組合せの状態で使用されるため、ゴムとの化学的および機械的相互作用において考えなければならない。タイヤコードの実際的使用においてはコード-ゴム

間の接着問題が他の諸性能に優先し、この接着性がタイヤコードの性能を支配しているといわれる時代もあったが、最近接着技術の進歩に伴って、コード自体の耐疲労性がクローズアップされてきた。

疲労は繰返しかけられる外力によって、見掛上の老化または脆化現象を意味するもので、Fatigue と称され生物、無生物ともに同じ言葉で表現されているが、両者間の疲労においては根本的な差のあると考えなければならぬ。生物における疲労は一般に休止時間の経過とともにある程度回復する現象が見られるが、無生物においてはこのような疲労の回復は見られない。すなわち生物においては、発生した疲労は細胞の生活ないしは分裂によって回復するが、無生物の死滅している細胞においては疲労の回復は期待できない。

タイヤコードに連続的および断続的に繰返し外力が与えられて起こる疲労寿命は差のないことが報告されている。¹⁾

しかしある程度の疲労後に与えられる経過時間において何らかの処理、たとえば膨潤、熱処理、緩和、Drawing などによって起こるかも知れない微細構造に対する変化は、現象として幾らかの疲労の回復(伸度の回復を除き)があるかも知れない。

3. タイヤコードの疲労機構

無生物における疲労は一般にかけられた外力によってエネルギーを吸収し、その結果組織の変化または破壊などのために見掛けの強度が減少する。その原因としては、エネルギーの吸収による発熱、重合度低下、その他の化学的変化に付随して起こる結晶性の変化、Void またはきれつによる不連続面の発生、摩耗、部分的破壊などが材質の機械的または化学的耐久性を低下したものと考えられている。

* Fatigue Phenomenon of Tire Cord. Experimental Aspects (1). 本稿は1, 2, 3月号に連載の予定。

** S. Fujimoto, Member. 帝人繊維加工研究所

ゴム中において起こるコードの疲労の機構としては、^{2,3)} 摩耗、単繊維の部分的破壊などが主として起こり、本質的疲労現象として考えられる微細構造、すなわち重合度、結晶化度、配向度、分子構造などの変化は前者の原因に対しては比較的小さい割合を占めているにすぎない。このことは普通作用される外力はだいたい 10^3 c/s 以下の大きい周期をもち、分子構造の固有振動数の 10^{13} c/s のオーダーと遠く離れているためかも知れない。

しかし将来、より高い周波数、または高速度の外力が与えられるような場合には直接微細構造ないしは分子構造に変化を与えるに至ることは想像に難くない。

現に $10^4 \sim 10^6$ c/s さらにそれ以上の超音波振動によって、固体または液体の高分子化合物に対し、いろいろな変化が起こることを利用した研究も行なわれている。

またマイクロウェーブまたはレーダ関係における材料として使用される場合には、高周波領域における誘電体損失の形において高周波エネルギーの吸収が起こり、その結果、電波傷害、絶縁破壊などとなって表われるが、これらについては本研究の対象外である。

繊維材料において起こる疲労は、外部から加えられたエネルギーの吸収によって起こると考えられているが、本質的なミクロは分子構造におよぶ変化または破壊よりもマクロな繊維の微細構造に変化を与える場合の方が多い。したがって実際的には疲労の結果としては、摩耗による機械的な劣化によって生じた強伸度の低下、ヤング率の増加などの形となって表われている。

⁴⁾ タイヤコードにおける疲労は理論的解釈も多くあるが、一般に上述のように繊維分子の本質的疲労とは異なった状態で起こるため、実際上必ずしも理論的に取り扱えない場合が多い。

4. タイヤコードの疲労の評価

繰返し与えられた外力によって起こるタイヤコードの疲労は、結局ある時間後コードの劣化または破壊となって表われる。この劣化または破壊は、長い時間または多数の繰返し回数によって起こった疲労のため最初の強さが低下し、引き続き加えられる外力に耐えられなくなった結果破壊するものである。

この場合に加えられたエネルギーとしての外力と、コードの強さの低下の関係をもって疲労状態を評価することができる。

4.1 タイヤコードの疲労の表示

疲労の研究は元来金属の疲労の思想がそのまま繊維に流用されたものと考えられ、したがってその考え方、表

わし方などにおいても金属の場合と同様である。しかし繊維はその構造から見て金属と同じ考え方がなされる場合もあるが、全然異なった挙動を示す場合もあるので、将来研究の進むにつれて繊維独自の疲労に対する考え方を取り入れなければならない。

金属における疲労の表わし方として古くから用いられている方法は、いわゆる $S-N$ の曲線として第1図に示

(第1図) $S-N$ 曲線

されるものである。これは材料にある外力が繰返し作用される場合において、作用される外力と、材料が破壊するまでの時間または回数との関係を示すもので、普通 S は作用する荷重で静的の場合は死荷重、動的繰返しの場合には最大荷重で示され、試料の単位断面積当りで表わされる。 N は普通対数値で表わされ、静的の場合には時間で、動的繰返しの場合には繰返し回数または時間で表わされ、これを一般に疲労寿命と称している。

第1図においては金属の場合 $S-N$ 曲線は一般に2つの直線からなり立っているとみなされる。 S の減少に応じ N の増加する状態を表わした直線部分と、これに続いて S の下部限界において N に無関係な水平部分とである。両曲線の折曲点における S の値を疲労限界荷重と称し、これ以下の荷重においては材料は無限大の疲労寿命をもつことを意味する。この疲労限界荷重を設計上の基準として、これに必要な安全係数をかけた強さをもつ材料が実際に使用されるものである。

疲労限界荷重の値は材料によって大体個有の値で、一般に材料の荷重—伸張曲線における弾性限界として最初の直線部分の限界（降伏点）の値に相当する。

繊維材料の場合の $S-N$ 曲線の形態は金属の場合と大体似ているが、金属の場合のように2つの直線で表わすことができないで、一般に図に示されるように連続的形態を示す。しかし $W-\log_{10} N$ の曲線のある範囲は大体直線関係を示すが、 W の減少に対して明瞭な折曲点を示

さず、連続的な漸近線の形態を示す。このことは金属材料においては一般に比較的均質な材料が得られやすく、また弾性限界も明瞭であるが、繊維材料においては一般に各単繊維が均一性に乏しく、かつ荷重—伸張曲線の弾性限界が金属に比較して不明瞭で、多くの場合多数の繊維の集束状態で使用されることが原因しているものと考えられる。

一方 $S-N$ 曲線の變形として、応力繰返し回数または時間に応じた残存強力の低下の状態を表わす場合もある。これを第2図に示す。 S は普通強力または最初の強力に対する % で示され、よこ軸は繰返し外力の回数を

(第2図) 疲労による残留強力の変化⁵⁾

示す。曲線の傾斜は疲労によって起こる残存強力の低下の程度、すなわち疲労の進行速度を意味し、一般的にみてこの曲線の傾斜の急なほど疲労進行速度が大きいことを意味する。

4.2 与えられる疲労の条件

短時間内に長時間において起こる疲労と同じか、または相対的のデータを得ることが疲労実験の目的であるが、測定時間の短縮に際しては細心の注意を払わなければならない。

測定時間の短縮のためには、一般に材料に実際にかかると思われる条件よりもはるかにこくな条件を与えられることが普通である。たとえば温度を上昇し、繰返し周波数(単位時間当たり)を増加し、荷重または圧力を増加し、光の強さまたは薬品の濃度を増加するなどの手段が構ぜられている。

このように試料に対して与えられるかこくな条件下に

おける疲労が、実際に使用される条件における疲労現象と比例的または相対的關係にあれば、この場合のデータは十分価値あるものといえることができる。しかし疲労を加速する目的で、与えられた条件が実際の使用に適合しないで、かつこの与えられたかこくな条件において、その材料の特性が実際の条件下における場合と大幅に異なる場合には、その測定値の信頼性は低下する。繊維材料においては温度、湿度、荷重、薬品の濃度などについては、とくに敏感な場合が多いので測定および測定値の取り扱いに際してはこれらの点を考慮し、十分注意しなければならない。

同じ条件において疲労が与えられた場合においても、これを受け入れるコードの状態によってひき起こされる疲労は大幅に異なる。すなわち、繊維の性能、コードの大きさ、より数、各種の処理方法などについても同時に検討しなければならない。

4.3 残存強力から見た疲労の連行状態

コードに与えられた疲労はそのときの条件によっていろいろの形で現われる。もっとも一般的に考えられることは、見掛けの強力の低下である。この低下の原因はコードを構成している単繊維の摩耗、脆化または切断による場合が多いことが多くの報告に見られている。^{2,6,7,8)}

ゴム中に埋没されたコード中の単繊維の切断は疲労によって単繊維の脆化または繰返し屈曲による破壊、ゴムとの接着の末端における切断など多くの原因が挙げられている。^{3,6)}

単繊維の摩耗を防ぐ目的で普通単繊維の表面に適当量の油剤が付着されているが、この油剤がないか、または少ない場合にはコードの屈曲疲労寿命は、大幅に短縮されることは強人コードにおいて認められている。^{7,8)} しかし単繊維相互間の摩耗を低下する目的で付着された油剤は一般にコードとゴムの接着の障害になる。その結果コードとゴムのはく離を起こした場合には、ゴムとの摩耗によってコードの破壊が派生的に起こる可能性が多いので、油剤の種類を検討とともにその付着量についても適当な点で協しなければならぬ。

単繊維の部分的切断は直接コードの見掛けの強力低下となることは少なく、ある程度以上の単繊維の切断からコードの強力に影響をおよぼすにいたる。

普通強力人絹コード(1650 d/2)において、コードの状態で屈曲疲労を与えた場合、見掛けのコード強力の低下におよぼす単繊維の切断数の限界は第3図に示されるように、単繊維 720 本中約 500 本で、未切断単繊維約 200 本以上残存している間は見掛けのコード強力の低下

(第3図) コードの残存強度と単繊維の切断

は見られない。同じコードで、油剤を十分除いて同じ条件下で屈曲疲労を行なった場合においては、疲労寿命は約1/100に短縮されるが、コードの強度低下は、同じく単繊維の切断が約500本以上において見られる。

このことから、コードの強度は単繊維の総合的協力によって支配されていることはいうまでもないが、単繊維相互間の摩擦力によって維持されていることを見逃してはならない。単繊維相互間の摩擦力は、大きすぎれば繰返し屈曲中において単繊維相互間の摩擦が促進され、また摩擦力が小さ過ぎれば、単繊維の部分的切断によって起こる滑脱のため、コード強度の低下の程度が大きくなると考えられ、⁸⁾ 両者の間には自ら だ協点が見出されなくてはならない。

これらの状態は疲労の結果として、たとえコードの内部においても局部的に単繊維の破壊が起っているにもかかわらず、見掛けの強度に変化が現われていない。すなわちコード内部に発生した疲労は、コードの見掛けの強度の変化からそのまま評価できないことを物語るものである。

また、ある静荷重下において与えられた屈曲疲労とコードの残存強度（見掛けの引張強度）の測定において第4図に示されるような関係がある。これはある静荷重下において繰返し与えられた屈曲疲労の結果起こる残存強度の低下は、静荷重の大きくなるに伴って早期に起こり屈曲回数の増加に伴って残存強度は低下する。その低下したコードの最低限界強度は、図からわかるように与えられていた静荷重よりはるかに大きい値を示している。すなわち静荷重1.5、2.0および2.5 kgにおける残存最低限界強度はそれぞれ約6、7および8 kgを示しており、それ以下の値は見出されていない。このことは静荷重にそれぞれ4.5、5.0および5.5 kgに相当する未知の張力が付加されたと思なざるを得ない。ゴム中にコードを埋没して行なういわゆるチューブテスト、ディスクテストともに同様な結果が見られている。

これらのことは、屈曲疲労の進行によってコードの強度は次第に低下するが、屈曲疲労中にかかけられていた静荷重よりはるかに大きい残存強度を維持しているにも

(第4図) 静荷重と残存強度

かわらず、切断するといわなければならない。すなわち、動的屈曲を伴っている場合におけるコードの切断は与えられている静荷重に、動的屈曲によって別に発生したと見なされる荷重が付加されたものと認めざるを得ない。これらの現象は、走行中一部破壊したタイヤから取り出したコードの最低残存強度が約5.5 kg（最初の強度に8～9 kg）と一般にいわれていることと一致しており、ナイロン、テトロンコードなどにおいても同様の現象が見られている。（この問題については別の機会に発表する予定）

これらの結果から、コードの疲労を研究する場合、単にコードの残存強度の測定のみでははなはだ不十分で、同時に別の適切な視野からの検討がなされるべきことが示唆される。また疲労寿命は与えられた条件下において、コードが破壊するまでの時間または回数をもって表わされているが、この場合疲労条件が異なれば、たとえ同じ荷重下において切断した場合においても、コードの残存強度は必ずしも同じとはいえない。

要するに疲労によって起こるコードの破壊は、その動的疲労の与えられる条件によって大幅に異なるもので、単に残存強度または疲労寿命だけでコードの疲労性は、正確には表現できない性格のものと考えざるを得ない。

参考文献

- 1) R. C. Waller and W. E. Roseveare; J. Appl. Phys., 17, 6, 482 (1946)
- 2) K. L. Floyd; J. Text. Inst., 53, 10, T449 (1962)
- 3) 鬘斗, 城口; 本誌, 16, 11, 828 (1963)
- 4) たとえば W. J. Lyons; Text. Res. J., 28, 2, 127 (1958)
- 5) G. Kemnitz; J. Appl. Polym. Sci., 6, 22, 373 (1962)
- 6) W. J. Lyons; Text. Res. J., 32, 9, 750 (1962)
- 7) 岡村, 藤本; 材料試験, 7, 52, 64 (1958)
- 8) C. B. Budd; Text. Res. J., 21, 3, 174 (1942)