歯車強度設計とコンプライアンス*

日本機械学会論文集(C編)
76巻 761号(2010-1)久 保 愛 三^{*1}

Load Carrying Calculation of Gears and Compliance

Aizoh KUBO^{*2}^{*2} The Research Institute of Applied Sciences,
49 Ooi-cho, Tanaka, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto, 606-8202 Japan**Key Words:** Gear Strength Calculation, Design Manual, Virtual Reality, Compliance

歯車の強度設計において確立していると考えられているものに、歯の折損に対する曲げ強度計算法と耐歯面接触疲労計算法がある。前者は等強さ片持ち梁の考えを歯に対して適用した1892年のルイス W. Lewis の提案によるもので⁽¹⁾、歯元の最大曲げ応力発生箇所(危険断面と称する)から歯が折損するモードを対象としたものである。後者は、1908年にヴィデキ E. Videky がヘルツの弾性体接触応力を歯面のピッチング発生指標として採用したことによるもので⁽²⁾、滑らかな歯面の接触により、その箇所から歯面が疲労損傷するモードを対象としたものである。

これらの考え方の妥当性は、その後、多くの研究によって確認され、恐らく今から50年以上も前に世界的に定説化された歯車強度計算法となった。現在、世界的に制定され、使用されている歯車強度計算法規格も全てこの考えを踏襲しており、日本においても年間何億個と生産され使用されている歯車の強度は、この考えにより検討されている。

この考えに基づく歯車の強度計算法に於いては、歯の折損と歯面の疲労損傷は全く独立したモードとして取り扱われている。研究に於いても、歯車のかみ合い運動を無視して、例えば、歯の曲げ疲れについてはパルセータにより行う歯の曲げ疲労試験、歯面の疲労試験については2円筒の転がり滑り接触疲労試験、と言

ったように、歯の折損と歯面の疲労損傷は全く独立した損傷モードとして取り扱われて、基礎データが集積されてきた。歯車強度計算に於いて、歯元曲げ応力、歯面接触応力に基づくこの検討手法があまりに一般化し、いわばマニュアル化された形で歯車強度計算が行われるようになったため、「2000年以上も前から使われている歯車についてまだ研究することがあるの?」という話にもなってくるのである。

近年、歯車装置に対しても小形軽量化の要求は強く、それに対応するため高強度歯車材料が開発されてきた。それとともに、30年ぐらい前から、浸炭焼入れをして高強度を狙った歯車に於いて、歯の折損と歯面の疲労損傷とが独立したモードとしては考えられないような損傷事故が増えてきている(図1、図2参照)。歯面損傷に於ける潤滑油膜と歯面粗さの効果は考慮されるようになったものの、ヘルツの接触応力値と歯面温度の寄与率は半々近くだねーとか言う現場熟練技師の話もちろほら出てくるようになった。ところが、歯車の強度設計は相変わらず歴史的な手法に依っており、事故が起こると「安全率の取り方が小さすぎたのでしたかねー」なんて、反省がなされる。

そのような話を聞いたときには、何時もこのように答えることにしている:「損傷は物理現象で、強度計算というのは、計算結果がある値を超えないようにすると、その損傷の起こる確率が今までの経験からかなり小さくなるという、物理現象とは無関係の、紙の上の(今ならコンピュータの中の世界の)話なんですよ」。

強度設計とは、損傷という現実世界の話と計算した数値という仮想世界の話が一对一対応しているという

* 原稿受付 2009年8月26日。

^{*1} 正員、フェロー、(財)応用科学研究所(〒606-8202 京都市左京区田中大堰町49)。[著者略歴] 1943年10月17日生まれ。京都工芸繊維大学において歯車運動性能シミュレーションの開発研究、京都大学において運動ならびに動力の機械的伝達技術に関わる機構設計、機械要素の損傷原因の究明と対策立案、機械部品の精度測定技術に従事。2007年まで京都大学、現在(財)応用科学研究所。
E-mail: aizokubo@hera.eonet.ne.jp

Fig. 1 過大歯面接触応力が原因でない歯面損傷の例

Fig. 2 過大歯元応力が原因でない歯折損事故の例

信心の上に立って、行われているものである。しかし本当は、その対応があるのは、現実世界と仮想世界の当該事項に関するモードが対応しているある限られた領域内ではなく、また、その対応も完全なことはあり得ず、80%も当たるインデックスが計算されるなら有り難いものである。そして、絶対安全の要求に反するこの不確実さをカバーするのが安全率である。

近年、コンピュータを利用したシミュレーションで設計の高度化と効率化を図ることも多くなされている。しかし、これも処理内容が複雑になっているだけで、本質的には上の話と何も変わらない。すなわち、シミュレーションを設計に利用すると言うことは、コンピュータ(脳)という仮想現実の世界の中で、現実世界の事象に対応すると思われるモードを構築し、シミュレーションでパラメータを振って得られた結果を、現実世界のアクションとして採用し、現実世界の状態を変化させ、その結果が、仮想現実の世界で示されていた予言と一致することを期待するものである。これは、仮想現実世界の答えが、現実世界の答えに正確に対応すると言う信仰に他ならない。これがコンピュータ利用の本質である。そして、設計式もコンピュータシミュレーションも、現実世界の現象を評価する一つの物差し以外の何物でもない。もっとも、仮想現実の世界と現実世界を行き来して状況に対処できるよ

うになったのは、人間が他の動物から抜き出られた根本的要因であり、人間が“Homosapiens”たる所以であるから、よしとすべきものである。

「今回の歯車事故の場合、この設計式と物理現象の対応がある程度保証されている領域内での話なんですか？ それで事故が起こったとすれば設計の時のチョンボですね。もし、設計時点で考えていなかったようなことが起こっての事故ならば、その設計式で検討するなんてナンセンスじゃないですか。先ず、損傷のモードがどうであったかを確認しましょうや。損傷のモードが設計式で考えていたモードと異なれば、その設計式で適切な強度評価は、原理的に出来るはずがないですよー」。

近年の高強度歯車の損傷は、歯の自由端が相手歯面に当たる、異物を噛み込む等と言った何らかの引き金で、あるいは、高温・高圧・高滑り接触でトライボケミカルおよび冶金学的変化も関係する歯面損傷が起こり、あるいは、歯の自由端の稜・角の欠けが起こり、そこから表面下き裂が進行して最終的に歯が折れると言う場合が多い⁽³⁾。これらの損傷は、損傷が損傷状況をより進行させるというポジティブフィードバックのかかった、かなりの長い経過的損傷を経て、歯車の寿命の終わりを決める最終損傷に至るものである(図3参照)。このようなモードの損傷は、材料強度が低く製作精度も悪かった、歯車強度計算式の大本が作られた昔にはほとんどなかったモードで、この損傷モードに関する評価方法はマニュアル化されたものの中にはない。ところが“authority”によって決められた法令に準ずるもののようなマニュアルに対する信心が、昔からの設計法に何らの疑問も抱かせず、「安全率の取り方が小さすぎたのでしたかねー」なんてことになるのである。

このようなマニュアルに対する信仰はどの様にして出来たのであろうか。恐らく、一つは自分で何も考えることはせず、決められた手順の処理をするだけのことが一番楽であると言う怠惰、あるいは、考える能力の無さ、もう一つは、マニュアル通りにやっていれば、結果が悪くてもそれは自分の責任ではないと言う責任回避の本能、が原因であろう。新しい事象が出てきたときに、マニュアルに従っている限り進歩はない、状況の変化に対応するには臨機応変の処置が必要である、と言う前進的考えは、労多くして何の個人的利益ももたらさない。ましてや、失敗すれば責任を問われる。そんなことをやるのは馬鹿だ、と言う今風考

経過損傷と最終損傷

Fig. 3 歯車損傷のモード

えである。

このことは歯車の強度設計に限ったことではない。マニュアルとは、想定したモードの中で、その通りのことをすればほとんどの場合、問題なく処置が可能であるという手順を書いたものである。環境が変化し、あるいは、状況が変化した場合、いわゆる想定外の場合には、マニュアルで根拠としたモードと異なる事態が一般に発生し、進行する。この時には、長年の経験により培われてきた本能に近い類推から、大局にとって一番良い結果になるような処置を思い付き、それにより処理しなくては事態に対処できないが、これは今の世の中では処罰の対象である。一方、何の役にも立たない、時には大局に害のある対処でも、マニュアル通りにやれば、罰せられることはない。いかなるシステムもこのようにして、しだいに、負けるものは負け、滅びるものは滅びてゆくのが自然の掟、理である。

歯車の強度設計法も、マニュアル化した現状を一步離れて見、現物に起こっている物理現象をよく見、論理的に理解することに努める必要がある。歯車の試験法も、それが損傷モードに対応しているかどうかを常に吟味する必要がある。そして、現実にかかる損傷モードに対応した強度計算が出来るよう、色々な提案がなされなければならない。

文 献

- (1) Lewis, W., Investigation of the strength of gear teeth, *American Machinist*, Vol. 16 (1893), May 4, p. 3, May 10, p. 10.
- (2) Videky, E., Beitrage zur Berechnung der Zahndrucke, *Zeitschrift Oesterr. Ing. Archiv*, Ver. 60 (1908), S. 579.
- (3) JSME RC 156, RC 184, RC 205, RC 218, RC 230 Reports and Annexes.