

龍谷大学理工学部 *中村 宏、堀川 武

1. まえがき

昭和39年(1964年)10月1日に東海道新幹線が開業して以来、山陽、東北、上越新幹線が次々に営業運転に入り、乗客死亡事故零の記録を続けている。これは我が国が世界に誇るに足る記録であり、これまでの鉄道輸送において旧国鉄のなかに蓄えられた多くの経験と地味ではあるが、車軸の疲労強度の研究をはじめ多くの貴重な研究成果がこのような巨大システムを安全に運営する上で大きく貢献している。しかし、輝かしき記録とは裏腹に、このような地味な努力の大切さが時間とともに忘れられ、車軸は折れないとの安全神話が出来上がることを、新幹線開発当初から主として台車の安全に心を砕いてきた一人として憂慮するものである。特に、車軸は10年以上の長期にわたって使用され、車輪との圧入部分は特殊な金属疲労による損傷から免れ得ないことを思うとなおさらである。

スピードアップが華々しく報道されていることにたいして、安全走行の要である車軸の疲労強度の現状と課題についてとりまとめたので報告する。安全性の維持、向上に関係される方々のご参考になれば幸いである。

2. 車軸の疲労強度と寿命

新幹線用車軸の材質はJIS E 4502(1986)に規定され、設計はJIS E 4501(1986)に規定されている方法によって高速での走行安全性を確保している。さらに、車軸の安全性を確保する方策として3種類の定期検査[交番検査(3万Km走行または30日以内での非分解検査)、台車検査(30万Kmまたは12ヶ月以内の一部分解検査)、そして全般検査(90万Kmまたは36ヶ月以内の分解検査)]が行なわれ、圧入部分において0.3mm以上の深さのき裂が発見されれば廃却することになっている。

このように材料面、設計面、運用面での安全を確保する方策が取られているが、開業以来26年が経過していることによる経年変化、あるいは最近の高速化に対する要求などに対処しようとするときに、当時の知識で決めてきた基準や、不明であったために安全率のなかに含めてきた事柄をその後の疲労強度研究の成果を取り込んで検討することは非常に有意義であると思う。

2.1 圧入部の疲労強度

図1は東海道・山陽新幹線(0系)用車軸であり、高周波焼き入れが行なわれている。車輪圧入部分(車輪座)の直径は209mmであり、この部分では車軸と車輪ボスとの変形の差により微小なすべりが発生し、疲労強度が著しく低下する特異な疲労現象(フリッチング疲労)が発生し、この部分のき裂発生時の疲労限度を著しく低下させる。フリッチングが発生するのは内軌と外軌の2ヶ所(1本の車軸では4ヶ所)であるが、フリッチング疲労として特に問題になるのは内軌

側である。これは曲線走行時、車体の左右振動や蛇行動に基づいて車輪に作用する横圧により軸に発生する応力が内軌では追加されるためである。

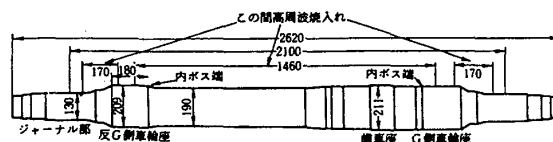


図1 0系新幹線電車車軸

小型の疲労試験片や実物を使った疲労試験が行なわれ、圧入部分の疲労特性が調べられているが、図2はその結果を圧入部直径と疲労限度の関係でとりまとめたものである¹⁾。破断とき裂発生時の疲労限度にはかなりの差があり、直径が大きくなると著しく疲労限度が低下する。また、焼きならし材(図中の実線)に比較して高周波焼き入れなどの表面硬化処理した場合(図中の一点鎖線)にはき裂発生時の疲労限度は改善されるが、破断時の疲労限度に比較してその改善程度は少ない。このような疲労試験結果から新幹線車軸のき裂発生時の疲労限度として1は約10Kgf/mm²と見なされている²⁾。

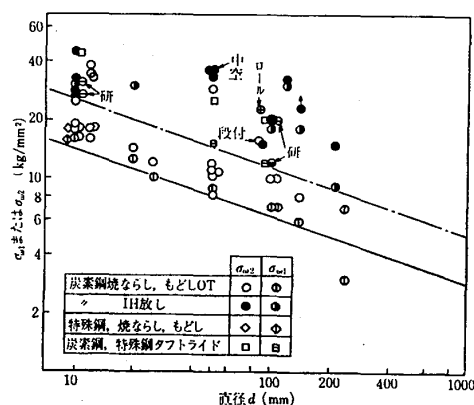


図2 圧入軸の直径と疲労限度の関係

なお、高周波焼き入れした圧入軸のS-N線図を図3に示す³⁾。大型の試験機が少なく、得られたデータは車軸の寿命を評価するにはまだまだ不足している。特に、上記の横圧を作用させて試験できる設備は鉄道総研にある輪軸疲労試験機のみである。

2.2 新幹線の車軸に発生する応力

東海道新幹線の車軸に発生する応力は東京-新大阪間をはじめ、それぞれの走行区間で測定されている。図4はその応力頻度の一例⁴⁾であり、静加重によって発生する曲げ応力 σ_s と動的応力振幅 σ_d の応力比と相対頻度で表わしている。応力比の最大はほぼ2.6~2.8であり、設計応力

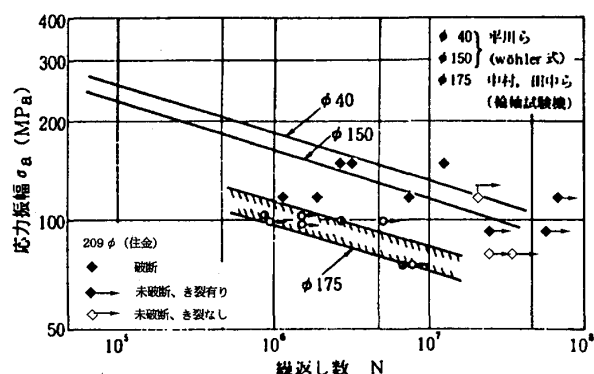


図3 高周波焼入れ軸の一定応力、き裂発生S-N線図

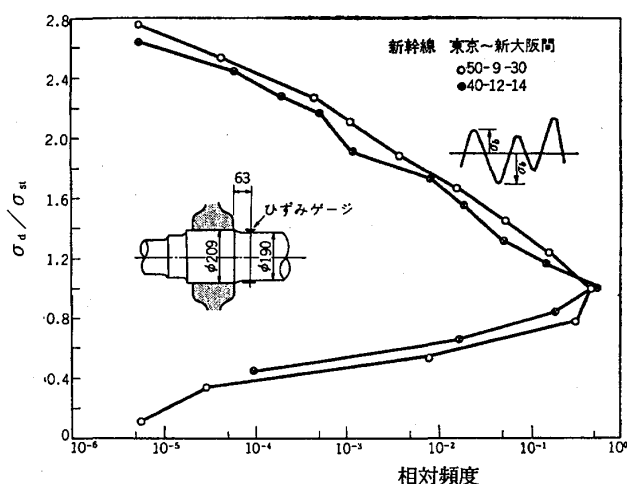


図4 車軸に発生する応力頻度

としての σ_{st} は2.2Kgf/mm²であるので、発生している最大の σ_a は約6Kgf/mm²である。この値をき裂発生疲労限度である10Kgf/mm²と比較すると発生している最大応力は疲労限度の約1/1.5であり、本来は疲労き裂は発生しないはずである。また、図4において昭和40年に測定したものより10年経過した昭和50年に測定したときの発生応力が大きくなっているが、それでも疲労限度を越える応力とはならない。

一方、図5は昭和40年当時に測定した結果を使い、応力頻度分布が対数正規分布を示すと仮定して統計処理した結果であり、発生確率99%を採用しても10Kgf/mm²を越す応力の発生は予想し難いことが分かる¹⁾。

2.3 車軸のき裂発生寿命

新幹線車軸は上述したように定期検査により微小き裂の有無を調べており、過去のデータが保存されている。JREAの昭和60年度の研究報告書によると最大420万Km走行までの総数51672本の車軸についてのき裂検査実績によると新製車軸のうち9%のものが損傷を受けずに生き残っており、11%のものが磁粉探傷で基準値を越えたために取替えられている。残りのものは検査時に軸を車輪から抜くときに発生した割れや擦傷により取り替えたものであり、疲

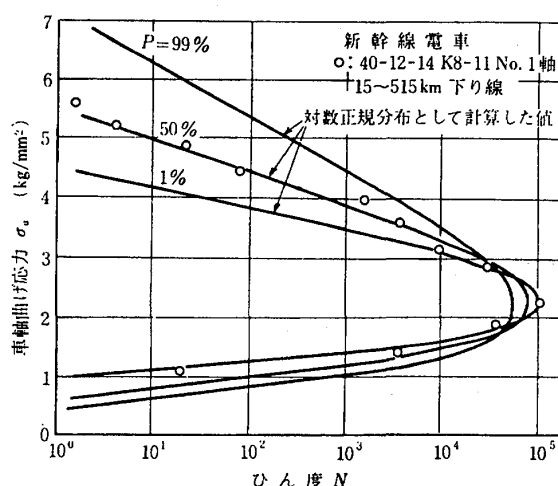


図5 車軸に発生する応力とそのばらつきの一例

労強度上の問題とはなっていない。一方、以前に80万Km走行したときに疲労き裂が発生していた例を使い、寿命の検討を行なったことがあるが、東京-新大阪間が約500Kmであるので、この走行距離は800往復となる。応力測定結果によれば最大応力は東京-新大阪間で1回しか発生しないので、き裂発生までに最大応力はたかだか1600回しか繰り返されていないことになる。しかも、その最大応力は実物車軸の疲労き裂発生疲労限度の1/1.5の応力である。疲労強度研究における定説に従えば、疲労き裂は発生しないはずであるが、現実には上述のようであり、車軸の安全性を確保するために取られている現行の定期検査システムが十分に機能し、26年間にわたり乗客死亡事故零の記録を支えているものと評価すべきである。

3. 疲労強度上の問題点

3.1 横圧の影響について

圧入部分の疲労試験は直径が10mm程度のものから40mm、150mm、175mm、及び実物を使って行なわれてきた。特に輪軸疲労試験機を使った2つの実験結果に注目する必要がある。まず第一は直径が175mmの高周波焼入れした輪軸（車軸に車輪を圧入したもの）による疲労き裂発生寿命を調べた試験¹⁾（横圧を作用させていない）であるが、この場合には内側の疲労強度が外側よりも強いという結果が出ている。第二は東海道・山陽新幹線の実物の輪軸を使い、横圧を作用させた状態での結果である。曲げ応力振幅が約8.2Kgf/mm²（負荷した垂直荷重と横圧による応力値）の試験結果では1.05x10⁸回の繰返し数（約30万Km走行に当たる）の後に圧入部分を調べると内側にフィブリルが観察され、これによるビットから多数の微小なき裂が発生していることが報告²⁾されており、内側が外側より弱い結果となっている。

前者の結果は当時は実物の新幹線車軸をそのまま試験できる試験機が無く、在来線の車軸寸法で、垂直荷重のみ作用させて試験したものである。後者の試験は輪軸試験機を改良して横圧を作用するようにして行なわれた。全く

時期を異にして行なわれた2つの結果を突き合わせてみると横圧の影響評価が重要であることを暗示している。

曲線走行時や蛇行動、左右振動によって車輪に作用する横圧のために内軌側で付加的な曲げモーメントが発生する。実際に使用された車軸においても内軌側にフィリソグロージョンによる疲労損傷が発生しており、各種の非破壊検査、表面の圧縮残留応力の追跡調査など、この部分に特に注目して行なわれている。横圧の大きさは乗客の多寡、レールの状態、車両の整備状況などによって微妙に影響され、その全体像を把握するには根気のいる調査と研究が必要であるが、東海道・山陽、東北、上越の各新幹線における相互比較から実施してゆくことも有意義と思われる。

3.2 変動荷重の影響について

疲労限度以上と以下の応力を組み合わせて作用させて疲労試験を行なう変動荷重試験が多く行なわれてきたが、圧入部分についての結果は非常に少ない。外山ら⁵⁾が行なった直径40mmの高周波焼き入れした圧入試験片による結果では図6に示すように疲労限度以下の応力がき裂発生に疲労損傷に影響を及ぼし、寿命が短くなり、修正マッテ-則を使っても累積繰返し数比は0.2～0.3程度になることがある。ただし、このような現象が現われるのは疲労限度以上の応力がある程度繰返されることが前提である。上述の2や、3.1での結果や5万本以上に及ぶ車軸の使用量を

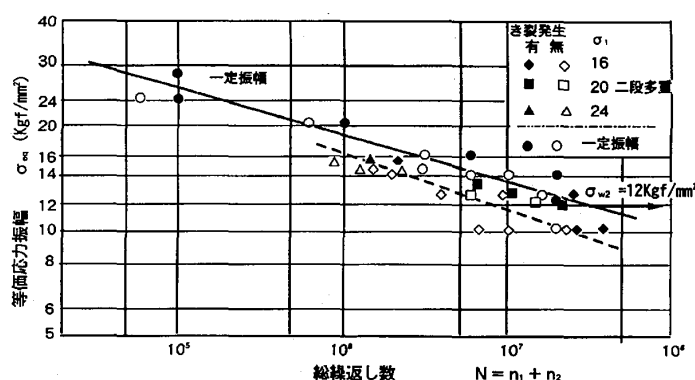


図6 圧入軸の変動荷重疲労試験結果 (外山、阪本)

考えたとき疲労強度のばらつきも当然あるはずであり、発生する最大応力が特定の車軸では結果的には疲労限度を越えていることも有り得ると仮定すれば変動荷重の影響についての研究成果と実際の現象の間には関連性が出てくる。

いずれにしても、実物車軸を使った変動荷重下の疲労試験を実施して寿命推定の資料を得るようになるまでにはき裂発生に疲労限度を確定することをはじめとして幾つかの解明すべき課題が残されている。

3.3 疲労き裂進展、その他

高周波焼き入れされている車軸の表面には非常に高い圧縮残留応力が発生しており、フィリソグ 疲労によって発生した微小なき裂の進展を抑えて、停留させることに大きく寄与している。走行距離と圧縮残留応力の変化に関する調

査結果によれば若干の残留応力の減衰は見られるが、殆ど問題にはならない程度である。疲労き裂進展の問題は車軸の廃却基準とからんで重要な問題である。田中らが行なった放電加工により故意的に作った人工き裂を有する0系新幹線の新製輪軸を用いた疲労試験結果では30万Km走行に相当する繰返しの後に人工き裂の底から30～80μm程度の疲労き裂が発生するが、若干進展して停留することが確認されている。一般的には、疲労き裂進展に関する膨大な研究と資料が得られており、上記のように実物に即した研究が行なわれているが、現在採用されているき裂深さ0.3mmの廃却基準を見直すにはデータ不足であり、圧縮残留応力の変化や低い応力の下で長時間かかって進展する疲労き裂進展特性についての解明が今後必要である。

4. 高速化に対する提言

新幹線の高速化の技術的課題のうちで筆者らの研究分野に深く関わりのある車軸の疲労強度に関して若干の見解を述べた。実物車軸による疲労試験、実車の応力測定などを行なっても車軸に発生するき裂について説明が付かない部分が残っている。今後の高速化の要求に対して、考えていることを述べる。

先ず第一に定期的な応力測定と実物車軸による疲労試験の実施と継続である。このことにより仮定していたき裂発生にS-N線図がより確実なものとなり、将来のバ下重量の軽減に対する車軸の軽量化につながってゆく。

第二はデータの公開である。差し支えない範囲での関連資料を公開し、各種の研究機関で協力して研究を行なうことにより早期に問題の真実が明確になり、地味で長時間のかかる問題解決の早道となる。

第三はこれまでの経験を生かすことである。機械装置に発生するトラブルは幾つかの原因が競合して発生することが多く、完全に解明されない事例であっても、何かの判断を下さなければならない立場になったときに、多くの事を経験していることが非常に役立つ。

5. あとがき

これまでに機械、装置の疲労強度評価や寿命の問題に携わってきたものとして、資料をとりまとめた過程において、標題の事柄について考えを述べた。種々の理由からすぐに実行出来ないこともあるが、安全走行が全てに優先することであり、最近、時速400Km高速列車の開発が報道されていることとも関連して関係者のご参考になれば幸いである。

[参考文献]

- 1) 中村、田中共著：機械の疲れ寿命算出法、(昭47)養賢堂
- 2) 石塚、他6名：鉄道総研報告、3-9(1989-9)45
- 3) 田中、手塚：鉄道総研報告、2-10(1988)2
- 4) 田中、初野：機械設計、21-7(1977-7)55
- 5) 外山、阪本：日本材料学会疲労部門委員会資料