620. 178. 322. 3-181. 2 : 539. 431. 016. 2

大形試験片による疲れ試験結果*

(第2報, 圧入試験片について)

中村 宏**, 甘粕達雄**, 湯田三郎***

Fatigue Test Result of Large Scaled Test Piece

(2nd Report, Force-Fitted Test Piece)

by Hiroshi NAKAMURA, Tatsuo AMAKASU,
and Saburō YUDA

The authors have conducted fatigue tests on the force-fitted specimens 50 mm or 10 mm in diameter and the plain specimens, 65 mm or 10 mm in diameter.

The experimental results are summarized in the following.

(i) Even when there is a difference between the fatigue limits of the force-fitted specimens and the plain specimens, 10 mm in diameter, there is no difference between the fatigue limits of the force-fitted specimens 50 mm in diameter.

(ii) The fatigue strength of the force-fitted specimens 50 mm in diameter, which were made of the wheel-axle of the car broken while running, is not lower than the fatigue strength in the former experiment (i) and the old experiment in 1950.

Therefore, we could not understand from this experiment the reason why the running shaft have broken.

1. 緒 言

車両用車軸の強度を論ずる場合に, その発生応力と車軸各部の疲れ強さが問題になる. このうち, 前者については最近各種の機会をえて資料をうるようになった^{(1)~(4)}が, 寿命または安全率を算出しようとするに疲れ強さの資料が必要になる.

車軸の場合, 実物大もしくはそれに近い大いさの試験片の疲れ強さの資料が必要であるのに, これまでに発表された実験結果の一例は第1表^{(5)~(8)}に示すように, 実験者や材料によってかなり値が異なり, 設計の際いずれの値を採用すべきかという判断に迷うことがある. 要するにまだ資料が少ないのであってもう少し資料を追加する必要がある. 幸いここに機会をえて直径 50~65 mm の試験片と事故車軸から切り出した同様の試験片についての実験結果をうることができたので, ここに報告する. まだ, 理想からほど遠いが, 車軸の強度に関する研究の一部をになうものである. また, ここでは第1表の σ_{w1} にも注意して調査した.

2. 実験結果 (その1)

第2表の静的機械性質を有する炭素鋼を用いて第1図(a)に示す直径 65 mm の平滑試験片と, 第1図(b)に示す直径 50 mm の圧入試験片をつくり, 疲れ試験を行なった. 用いた試験機は東京衡機製 1.6 t m 回転曲げ疲れ試験機⁽⁹⁾である.

疲れ試験の結果は第2図に示した. また, この図には以前行なった実験結果⁽⁶⁾も併記した.

第2図および後述3の実験結果から疲れ限度 (σ_{w2})

第1図 試験片形状

* 昭和 34 年 10 月 16 日 東京秋期講演大会において講演, 原稿受付 昭和 35 年 5 月 20 日.

** 正員, 鉄道技術研究所 (東京都北多摩郡国分寺町平兵衛新田).

*** 鉄道技術研究所.

のみを一括して集めると, 第3表, 第3図を得る. これらの図, 表から次のことがわかる.

(i) 同一チャージから切り出した試験片であるのかかわらず, 異常に早く折損したものが2本ある(第2図, 左下方). これは圧入トン数との比較では原因を見出すことはできなかったが, 疲れ試験にかけたとき, 異常に熱が上昇したことから, 圧入部の工作が何か不良で圧入面の摩擦が激しかったためと推定される.

(ii) この実験では, 平滑試験片で寸法効果の大きくでる材料は圧入試験片でも寸法効果が大きくでている.

(iii) 小形試験片では, 圧入試験片および平滑試験片の疲れ限度にかなり差があっても, 直径 50 mm くらいの圧入試験片になると σ_{w2} にあまり差が認められない.

(iv) 寸法効果の大きい今回の材料のほうは圧入試験片の β_k は小さくでている.

(v) 引張強さの高いほうが, 直径 50 mm の圧入試験片の疲れ限度は高いとは限らない.

第1表 これまでの実験結果の一例

実験者	Buckwalter ら ⁽⁵⁾			中村 ⁽⁶⁾			小田, 西岡 ⁽⁷⁾		Horger ⁽⁸⁾
材料	3% Ni 鋼 $\sigma_B = (64.0 \sim 66.7) \text{ kg/mm}^2$ $\epsilon = 25 \sim 36 \%$			C=0.41% 鋼 $\sigma_B = 67.0 \text{ kg/mm}^2$ $\epsilon = 27.0 \%$			C=0.32% 鋼 $\sigma_B = 57.8 \text{ kg/mm}^2$ $\epsilon = 32 \%$		C=0.50% 鋼 $\sigma_B = 67.4 \text{ kg/mm}^2$ $\epsilon = 46 \%$
$\sigma_{w1} \text{ kg/mm}^2$ *		7.4 以下	7.0						約 3.5
$\sigma_{w2} \text{ kg/mm}^2$ *	38.9	11.3	12.3	27.0	18.0	10.5	22	13.8	約 7.5
試験片直径 mm	6.35	292	50.8	50	10	50	70		241
試験片形状	平滑	圧入		平滑	圧入		平滑	圧入	圧入

* 切欠き底に疲れき裂が発生する最小の応力振幅を σ_{w1} とし, 発生した疲れき裂が進展せず, したがって疲れ破断がおこらない応力振幅の最大値を σ_{w2} とする.

第2表 供試材の化学成分および静機械的性質

C	Si	Mn	P	S	Cu	$\sigma_s \text{ kg/mm}^2$	$\sigma_B \text{ kg/mm}^2$	$\epsilon \%$	$\phi \%$	H _{RB}
0.52	0.25	0.78	0.018	0.012	0.12	39.3	69.3	26.8	48.7	86.9

第2図 疲れ試験の S-N 曲線

(a) 疲れ限度と直径との関係

(b) 引張強さと圧入試験片疲れ限度の関係

第3図

調べたが、これについてはきず入りを認めえなかった。

第8図はき裂付近の顕微鏡組織である。規格に指定されているように十分焼ならしされた組織とは言い難い層状のパーライト組織がみられる。

この実験から次のことがわかった。

折損車軸から切り出した試験片では小形平滑試験片の疲れ限度はかなり低いだが、直径 50 mm の圧入試験片の疲れ限度は以前に行なった実験および2章で実験したものに比べて低いとはいえない。

折損が車輪圧入部で生じているのに、比較的直径の大きい圧入試験片の疲れ限度比較では差がでなかった理由については、この実験だけでは不明である。

3.2 補足実験

第5図の折損車軸の図面に示すように、折損箇所と反対側ボス付根にもきずを認めたので、このきずをのこしたき裂試験片をつくり、これについて疲れ試験を行なった。

第9図(a)はき裂試験片を取り出した場所、第9図(b)は試験片形状である。疲れ試験の結果を第4表に示す。

この実験結果から、この車軸に生じていたきず(深さ約 0.13 mm)を有する小形試験片の疲れ限度は 12~13 kg/mm² とみられる。すなわち、直径 50 mm の圧入試験片の疲れ限度には近い。

なお、破面の一例を第10図に、き裂近傍の顕微鏡写真を第11~12図に示す。

第7図 圧入試験片ボス端部きず入り状況

軸表面からき裂のはいた部分

第8図 折損車軸から切出した圧入試験片のき裂近傍の顕微鏡組織

第9図 きずを試験片表面に残した
回転曲げ試片

第 4 表

試片番号	応 力 kg/mm ²	繰 返 し 回 数	折 損 の 有 無	備 考
1	12.0	7.6×10^6	折損す	
2	12.0	10^7	折損せず	
〃	14.0	1.05×10^6	折損す	
3	13.9	8.4×10^5	〃	
4	12.0	10^7	折損せず	
〃	14.0	2.1×10^6	折損す	チャック部から折損し き裂部からの折損はなし

No. 1 $\left\{ \begin{array}{l} \sigma = 12 \text{ kg/mm}^2 \\ N = 7.6 \times 10^6 \end{array} \right.$ No. 2 $\left\{ \begin{array}{l} \sigma = 13.9 \text{ kg/mm}^2 \\ N = 8.3 \times 10^5 \end{array} \right. \times 1.6$

第10図 実際車軸に生じていたき裂を残した試験片
をつくり疲れ破壊せしめたときの破面
(上部黒色部は最初にあったき裂)

×72

第11図 実際車軸圧入部に生じたきず入り
近傍の顕微鏡組織(硝酸2%ア
ルコール溶液にての腐食)

×150

第12図 実際車軸圧入部に生じたきず入り
近傍のかたさ分布(マイクロビッカ
ース 500g)

第11図はき裂発生部の顕微鏡写真の概況で2%ピクリン酸アルコール溶液で腐食したものであり、き裂近傍が異常な組織を呈しているのが認められる。

第12図は異常組織の実体を調べるために微小かたさ計でかたさを測定したもので、マルテンサイトになったところが $H_V = 890$ くらい、マルテンサイトとトールスタイトの混在組織と認められるところで $571 \sim 685$ を示し、普通層状に現われているパーライトとフ

ェライトの部分は $236 \sim 223$ 程度である*。

いずれにしても、急速加熱急冷の組織で、車輪圧入部にこのような組織を認めたのは興味がふかい。

4. 実験結果に対する簡単な考察

4.1 直径 50 mm 圧入試片の疲れ限度が材料によっ

* この試験片はき裂部から折損しなかった。(10)の文献でみるように、き裂があっても高周波焼入れ(急速加熱急冷の一例)すると疲れ限度が著しく上昇することと関連があると思われる。

第5表 き裂試験片の疲れ限度比較

実験者	中村, 甘粕, 上田 ⁽¹⁰⁾	中村 他 ⁽⁹⁾	石橋 ⁽¹³⁾	大内田 ⁽¹²⁾			
鋼種	C=0.18%	C=0.35%	C=0.08%	C=0.36~0.38%			
直径 mm	10	50	17	12.5	50	15.5	56
き裂の種類	全周(疲れによる)	全周(疲れによる)	全周(疲れによる)	部分的な円周き裂(人工)		全周(人工)	
疲れ限度 kg/mm ²	10	約 7	13	約 13	10	8	7
備考	$\lambda=0.12\text{mm}$ (き裂深さ)		300°C 30分加熱 $\lambda=0.5\text{mm}$				

てあまり変化がないことについて 今回の実験から平滑試片の疲れ限度, 小形圧入試片の疲れ限度がかなり変化しても, 直径 50 mm 程度の圧入試片の疲れ限度はあまり変化がないことが判明した. また, 第3報第2図でのべる実験でつかみ部が焼けついて疲れ破壊したときの応力と折損までの回数も今回の圧入試片の S-N 曲線上にほぼのっている(第2図⊕印).

上の実験をどのように説明するかは, これまでの知識からは次のように解釈される.

圧入部に曲げモーメントが働くとボス内面と軸外面がすれあい, 焼食が生じ, その結果きずがはいる. このきずのはいり方については材料の引張強さ, 平滑試片の疲れ限度の大小によってあまり関係がなく, きずがはいったあとのき裂試験片の疲れ限度もあまり引張強さ, 平滑試片の疲れ限度の大小によって変化がないと解釈すると理解できる.

4.2 焼食について 焼食については昔からいろいろいわれており, 焼食部に熱がでることは認められているが, 今回のように実際の車軸について圧入部が変態点以上に温度が上昇している事実を見出したのは最初である. 例がまだ1件しかないから詳細を知ることにはできないが, このように単に 5~10 kg/mm² 程度面圧をうけているところに変態点以上の熱が発生しているのは非常に重要なことがらである.

圧入試片の疲れ限度は直径が大きいほど⁽⁹⁾低下しているが, 焼食は直径が大きいほど発生しやすいと考えれば理解できる. 実物車軸で高温が発生していたことも, 直径が大きいほど焼食が生じやすいと考えることをある程度納得せしめる.

著者のひとり⁽¹¹⁾はかって疲れの機構として, 応力の繰返し中に変態が生じ一種の組織変化がおり, これが蓄積されて疲れ破壊に至ると考えたことがあるが, 今回の事実*は上のような推論が全く無意味でないことを示唆している.

4.3 き裂試験片の強さについて 筆者らはかって

* 今回の摩擦面でのマルテンサイトの形成であるが, 結晶のすべり面での発熱変態ということも考え方の点で類似の点がある.

疲れき裂の疲れ程度について実験した⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾. また, 大内田氏は人工き裂⁽¹²⁾について, 石橋教授⁽¹³⁾は疲れき裂について実験をされている. これらの結果をまとめると第5表のようで, 今回の実際に生じたき裂(部分的な円周き裂)の疲れ強さは大内田氏の部分的な人工円周き裂の小形試片のものに近いことがわかる.

以上のことは, 実際車軸運用中に生じたき裂を有する小形試片の疲れ強さのおおよその評価をするには, ほぼ同じ形の人工き裂についての疲れ強さを知ればよいことを示している.

4.4 車軸折損の理由について 3章で疲れ試験に用いた車軸は約3年で折損したものであるが, 今回の実験でみるように必ずしも直径 50 mm の圧入試片の疲れ限度は低くない. 一方, 車輪圧入部から折損しているのが事実であることを考えると, 今回の実験のみでは供試材にした車軸の折損原因をつかむことはできない.

貨車車軸に働く応力⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾および他の車種の車軸の走行中応力^{(1)~(4)}と第2図の S-N 曲線からは3年で本車軸が折損するということは, いまのわれわれの知識では求めることができない. したがって, この車軸折損の理由については, 今後なおいっそうの研究を必要とするが, 現段階では次の原因が重なったものと推定される.

(i) 3.2 の例や, 第2図左下方●印でみるように著しく早く折れた例があることから, 圧入時の工作がまずくて焼食が著しく早く生じたのではないか.

(ii) 材料がよくなくて平滑試験片の疲れ限度が低いことから考えて, 圧入部に焼食が発生したあとの寿命**が, 普通の疲れ試験では差がないが, 実際のように若干衝撃的応力が働くときにはきず入り後の寿命が著しく短かったものと推定される***.

(iii) この車軸に働いていた荷重および寸法, 車種から考えて, 応力およびそのひん度が普通の車軸に比

** 第4報で発表するが, 圧入部のきず入りは案外早く破断までの回数の約1割以下の繰返し回数で既にきずがはっている.

*** 材質がわるく衝撃値がひくいとき裂を含む試片の強さは著しく減少する⁽¹⁶⁾.

べてかなり大きいことがありうること*。

(iv) 冷蔵貨車のために腐食疲れが激しいこと*。

4.5 σ_{w1} について Horger の実験⁽⁸⁾では σ_{w1} が最低 3.5 kg/mm² のものがあるのに、われわれの実験では 10 kg/mm² 程度はあるようである。直径が前者のものは 241 mm であることと、繰返し数が 10⁸ 回近くであるのに、われわれのは直径が 50 mm、繰返し数が 10⁷~2×10⁷ 回程度であることに差があるが、 σ_{w1} の差がかなり著しいことについての理由についてはもう少し実験を多くやらねばわからない。しかし、今回の実験で圧入条件およびボス端部での局部すべりに伴う摩擦熱の影響がかなり大であることがわかったので、このあたりに問題のキーがあるように思われる。

5. 結 言

試験用の材料および折損事故をおこした車軸から切り出した直径 50 mm の圧入試片などについての疲れ試験を行ない、上述のごとき実験結果を得、またそれについての簡単な討論を加えたが、十分な討論をするにはまだ資料が少ないので、今後多くの資料を出したいと考えている。

また折損車軸の真の折損原因についても、今度の疲れ試験のみによってははっきりしなかったもので、今後

* しかし、応力が大きいだけや腐食疲れが激しいだけの理由では、この車軸のみが折れる原因とはならない。

応力測定および多種の疲れ試験とその解釈を行なってよりいっそう明白にしたいと考えている。

終りに望み、本試験の試料作製に協力された鉄研試作工場、本社修車課、大宮工場の関係者に謝意を表します。

文 献

- (1) 中村, 西村, 松本, 鉄道技術研究所中間報告, 3, 88 (昭 28-10), 1.
- (2) 中村, 小西, 上田, 他 4 名, 機械学会論文集, 25, 155 (昭 34-7), 695.
- (3) 中村, 材料試験, 8, 72 (昭 34-9), 731.
- (4) 中村, 小西, 材料試験, 7, 55 (昭 33-4), 188.
- (5) T.V. Buckwalter, O.J. Horger, & W.C. Sanders, Trans. ASME, 60 (1938), 335.
- (6) 中村, 機械学会論文集, 18, 75 (昭 27-10), 64, 70. または鉄道業務研究資料, 8, 18 (昭 26-11), 1.
- (7) 小田, 西岡, 住友金属, 10 (昭 33), 37.
- (8) O.J. Horger, Surface Stressing of Metals (1946), 85.
- (9) 中村, 甘粕, 田村, 他 2 名, 機械学会論文集 25, 151 (昭 34-3), 214.
- (10) 中村, 甘粕, 上田, 機械学会論文集, 23, 135 (昭 32-11), 863.
- (11) 中村, 鉄道業務研究資料, 13, 1 (昭 31-1), 1.
- (12) 大内田, 機械学会誌, 62, 484, (昭 34-5), 722.
- (13) 石橋, 金属の疲労と破壊の防止 (昭 29), 132, 養賢堂.
- (14) 小西, 石野, 鉄道技術研究所中間報告, 6, 102 (昭 30-8), 1.
- (15) 中村, 小西他, 未発表.
- (16) 石橋, 機械学会論文集, 21, 103 (昭 30), 212.

国際自動車技術会議において日本の 8 論文発表

アメリカの SAE (Society of Automotive Engineering) 主催で 1 月 9 日から 13 日までの 5 日間、デトロイトのコボホールで初の国際自動車技術会議が開かれたが、わが国からも論文が提出され、発表された。

この SAE の第 1 回国際会議は 14 箇国, 22 の団体代表が 1 万 5 000 人を収容する新設のコボホールに集まったわけであるが、わが国からは東京農工大 山本峰雄, 日産自動車 中村弘道, 東大生産技研 石原智男, 運輸技研所長 中田金市の 4 氏の論文が SAE の招待で研究発表されたほか、東工大 松岡 信, 東大航研 浅沼 強, 岡山大 大東俊一, 慶大 渡部精一氏の論文も分科会で研究内容が紹介された。

なお分科会では合計 202 件の研究論文が発表されたが、主要テーマつぎのとおり、

第 1 日 = 将来の地対空間輸送問題(新式輸送機等), ガスタービン圧縮機, XM 521 実験用トラックなど。

第 2 日 = 新しい非金属材料, 小形エンジン用交流発電機およびバッテリー, 生産方式に関する新アイディ

ア, 空中ロケットおよび原子エネルギー発生機, 熱交換器の進歩, さびない全金属ボデー, 超高速道路用トラックの設計(時速 200 km 前後), 標準測定単位(メートル法採用)など。

第 3 日 = や金的観察による敏速試験法, 自動車工業における信頼性の問題(安全性, 設計, コストの面から), 1961 年の自動変速機, 1960 年における技術教育の問題(これは産業の変遷に関して配置転換にそなえる技術者の再教育問題を 取上げている), 生産設備(専用機の最大効果と最大転換性の問題)など。

第 4 日 = 荷役のコンテナ化, 原子力による土建産業への応用, 月旅行計画, 将来の自動車用燃料電池, ディスクブレーキとアンチスキッドデバイス, トランジスタ点火器, 61 年形ニューエンジンの発表(アルミダイカストエンジン)など。

第 5 日 = 交通容量の理論, 燃料電池と原子動力, 軍用小形自動車用ポータブル原子動力, 小形トラック討論会など。
(服部敏夫)