タフトライド処理鋼の疲労限推定 に関する一検討 (その 1)*

浅 見 克 敏** 寺 沢 正 男**

A Study on the Prediction of Fatigue Limit of Tufftrided Steel (1)

by

Katsutoshi ASAMI and Masao TERASAWA

(Musashi Institute of Technology, Tokyo)

In the previous study, the authors proposed the following prediction equation on the fatigue limit of the smoothed specimen made of tufftrided steel, and clarified the validity of the equation from the experimental data.

$$\sigma_{w,t} = \left\{ C_1 \left(\frac{h}{a-h} \right) + (1 + C_2) \right\} \sigma_{w,nt}$$

where, $\sigma_{w,t}$: fatigue limit of tufftrided specimen

$\sigma_{w,nt}$: fatigue limit of non-tufftrided specimen

h : hardened depth

a : distance from the surface to the center of specimen

C_1 : a constant which indicates the hardening due to cyclic stress

C_2 : a constant which indicates the degree of improvement of fatigue limit due to residual stress

In this paper, the authors describe the results of the fatigue tests on specimens with various a and h , and discuss the limitation of the applicability of this prediction equation from the experimental data.

The results of the discussion are summarized as follows:

- (1) The applicable range of the equation is $0.01 \leq h/(a-h) \leq 0.6$, when the material is 0.15 % carbon steel and the rotating bending stress is applied.
- (2) In case of $h/(a-h) < 0.01$, the fatigue limit is hardly improved.
- (3) In case of $h/(a-h) > 0.6$, the improvement of fatigue limit is saturated.

(Received Aug. 31, 1973)

1 緒 言

著者らは従来よりタフトライド処理鋼の疲労挙動に^{1)~6)}関し種々の面から検討を行なってきた。その結果、タフトライド処理による疲労強度の向上は、(1)圧縮残留応力の発生、(2)窒素による材質上の強化、(3)繰返し応力による硬化の3因子に起因することが明らかとなった。⁷⁾前報ではこの結果に基づき平滑材の疲労限を硬化深さより推定する式を提案した。そして、推定式の妥当性と適用性を実験より調べ、著者らの提案した疲労限の推定式は実用上役立ちうることを報告した。

しかしながら、本推定式が適用できうる範囲および

塩浴処理後の冷却方法、焼もどし、平均応力といった疲労限に影響を及ぼす諸因子の推定式への考慮などさらに検討すべき多くの問題が残されている。そこで本報ではまず第一段階として前報に引き続き、試片の寸法と処理時間（いいかえるならば硬化深さ）をより広い範囲にわたって組み合わせた疲労試験を行ない、タフトライド処理鋼平滑材における疲労限推定式の適用限界やタフトライド処理の最適条件について検討した。その結果、タフトライド処理鋼を実際に用いる上で有益と思われる知見が得られたので報告する。

2 材料および実験方法

実験に供した材料は化学組成を Table I に示す低炭素鋼で、前報と同一のものである。試片はその形状⁷⁾

* 原稿受理 昭和48年8月31日

** 正 会 員 武蔵工業大学 東京都世田谷区玉堤

Table I. Chemical compositions of specimen (%).

C	Si	Mn	P	S
0.15	0.19	0.43	0.018	0.023

Fig. 1. Shape and dimension of specimen.

寸法を Fig. 1 に示す平滑丸棒材で、今回の実験には 6 ϕ , 10 ϕ , 14 ϕ および 18 ϕ の 4 種類を用いた。このように機械加工後、900℃、40分の真空焼なましを施し、その後タフトライド処理を行なった。タフトライド処理条件は塩浴の温度を 570℃とし、処理時間は 1, 10, 90, 180, 360 および 600 分の 6 段階としたが、10 ϕ の試片についてはさらに 0.5 分処理を加えた。塩浴処理後の冷却はすべて水冷である。なお、タフトライド処理していない焼なましのみの試片も用意したが、以後図中には 0 分と記し、無処理材と称する。

疲労試験は容量の異なる 3 種の小野式回転曲げ疲労試験機で行ない、試験機の容量は 6 ϕ 試片で 1.5 kg-m, 10 ϕ 試片で 10 kg-m, 14 ϕ および 18 ϕ 試片で 30 kg-m である。

各タフトライド処理時間による硬化深さを知るため、微小かたさ計（荷重 100 g）を用い断面かたさ分布を求めた。

なお、各試験結果の一部はすでに前報で報告したものである。

3 実験結果

3.1 疲労試験

各材の S-N 曲線を処理時間をパラメータとして試片の径別に整理した例が Fig. 2 と 3 である。Fig. 2 は 10 ϕ の場合を示すが、0.5 分といった極端に短い処理では疲労強度の向上はほとんど望めないことがわかる。しかし、1～10 分処理程度になると比較的短時間の処理にもかかわらずかなりの向上が認められ、さらに処理時間が長くなるほど疲労強度は向上する。このような傾向は 14 ϕ , 18 ϕ でも同様であった。一方、Fig. 3 に示した 6 ϕ は 10 ϕ ～18 ϕ と様子が若干異なる。つまり、処理時間が 180 分までは処理時間の増加とともに疲労強度も向上するが、180 分処理以上になると処理時間に関係なく疲労強度はほぼ一定となり、それ以上の向上は期待できない。つぎに、試片の径をパラメ

Fig. 2. S-N curves of specimen with 10mm diameter.

Fig. 3. S-N curves of specimen with 6mm diameter.

Fig. 4. S-N curves of 180 min tufftrided specimens.

ータとして処理時間別に整理した S-N 曲線の例を Fig. 4 に示す。この図は 180 分処理の場合であるが、試片の径が小さくなるほど疲労強度は大となっている。この傾向は他の処理時間についても同様であった。

一般に疲労強度のうち設計の基準になるのは疲労限である。そこで上述の各 S-N 曲線より疲労限を求め、

Table II. Fatigue limit of each specimen.
(kg/mm²)

	0 min	0.5 min	1 min	10 min	90 min	180 min	360 min	600 min
6φ	18.8	—	27.5	32.4	45.4	52.5	52.8	52.8
10φ	18.4	20.3	25.6	29.4	35.1	37.9	43.9	46.8
14φ	18.0	—	24.8	28.8	33.2	35.3	37.8	40.0
18φ	17.8	—	24.0	27.8	31.8	32.8	34.5	35.8

Fig. 5. Relation between fatigue limit and tuffriding time.

まとめた結果が Table II である。各材の疲労限を縦軸に、処理時間を横軸にとって整理すると Fig. 5 のようになる。短時間の処理で疲労限は著しく向上するが、その後向上はしだいに緩慢になる。そして、さらに処理時間が長くなると疲労限の向上は飽和する様相を呈し、特に 6φ で明らかに示される。6φ より太い他の径の試片でも今回の実験よりさらに処理時間を長くすれば 6φ と同じになることが予想せられる。しかしながら、Fig. 5 から明らかなように径の大きいものほど疲労限の向上を飽和させる処理時間は極端に長くなるので、実際には寸法の大きな品物に長時間のタフトライド処理することは経済面であまり望ましいとはいえない。なお、試片の径を横軸にとって整理し直したのが Fig. 6 で、いわゆる一種の寸法効果を表わしてい

Fig. 6. Relation between fatigue limit and diameter of specimen.

る。処理時間が 0 分、つまり無処理材の寸法効果はわずかであるが、タフトライド処理されると非常に顕著となる。たとえば、180 分処理では 6φ の疲労限 52.5 kg/mm² に対し 18φ では 32.8 kg/mm² となり、19.7 kg/mm² もの差がある。処理時間が 180 分以上になると 6φ の疲労限がほぼ一定になるため寸法効果はやや緩和される。それでも無処理材に比べるとかなり著しく、タフトライド処理では品物の寸法を特に考慮すべきである。

以上の結果より、タフトライド処理鋼では処理時間と寸法により疲労強度は著しく左右されることがわかる。したがって、タフトライド処理鋼を実際に用いる際には処理時間だけではなく品物の大きさをも充分考慮しなくてはならない。そして、タフトライド処理を耐疲労性の面でより有効に用いるにはこの両者を適当に組み合わせることが大切といえよう。

3・2 かたさ試験

各処理時間における疲労前の断面かたさ分布の例として 10φ の場合を Fig. 7 に示す。0.5 分のタフトライド処理ではほとんど硬化が認められず、1 分処理程度から若干の硬化がみられる。そして、処理時間が長くなるほど硬化は著しくなる。しかし、表面近傍のかたさ値は処理時間が 180 分以上になるとほぼ同じ値 (Hv 300) を示し、それ以上の増加は望めないようである。

Fig. 7. Distributions of hardness on tuffrided specimens.

タフトライド処理鋼では表面から内部に向かって双曲線的にかたさ値は減少し、その後母材のかたさ値に一致する。著者らは母材のかたさ値と一致するところまでの表面からの距離をタフトライド処理鋼の硬化深さと定義したが、硬化深さは Fig. 7 から明らかなように処理時間が長くなるほど大となる。なお、前報で提案したタフトライド処理鋼平滑材の疲労限推定式ではこの硬化深さを推定的手段に用いたわけである。そこで Table III に各材の断面かたさ分布より求めた硬化深さをまとめて示す。

Table III. Hardened depth of each specimen.
(mm)

	0 min	0.5 min	1 min	10 min	90 min	180 min	360 min	600 min
6φ	—	—	0.1	0.5	0.9	1.1	1.5	1.6
10φ	—	0	0.09	0.5	1.0	1.2	1.5	1.6
14φ	—	—	0.1	0.5	1.0	1.3	1.4	1.5
18φ	—	—	0.1	0.5	1.0	1.3	1.5	1.7

4 疲労限推定式に関する一検討

従来より著者らが行なってきた研究結果に基づき、タフトライド処理鋼平滑材の疲労限を硬化深さより推定する式を前報で提案した。推定式を導いた考え方の詳細は前報にゆずるが、以下に簡単に述べておく。

推定式を導くに際して三つの仮定をおいた。

(1) タフトライド処理による硬化によって疲労限が向上するほか、繰返し応力による試料内部の硬化のためさらに疲労限の向上が予想される。そして、この両硬化による疲労限の向上は従来の表面硬化材で硬化深さより幾何学的に求められた疲労限にある定数を掛けることによって表わされる。

(2) タフトライド処理によって発生する圧縮残留応力の値は多くの場合同程度である。そのため残留応力による疲労限の向上は処理時間や試片の大きさにかかわらず同程度になる。

(3) タフトライド処理鋼平滑材では疲労破壊は試料の内部より生じる。

以上の三点を仮定することより次の疲労限推定式が導かれる。

$$\sigma_{w,t} = \left\{ C_1 \left(\frac{h}{a-h} \right) + (1+C_2) \right\} \sigma_{w,nt} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_{w,t}$ ：タフトライド処理鋼平滑材の疲労限

$\sigma_{w,nt}$ ：無処理材の疲労限

h ：硬化深さ

a ：試料の表面から中立軸までの距離

C_1 ：繰返し応力による硬化によって向上した疲労限に関係する定数

C_2 ：残留応力によって向上した疲労限に関係する定数

なお、S15C、回転曲げの場合には $C_1=2.35$ 、 $C_2=0.38$ であった。 C_1 は材質や荷重負荷様式などにより異なるが、 C_2 はほぼ同じであった。

(1)式がタフトライド処理鋼平滑材の疲労限推定に実用上役立つことは前報の実験より明らかにされた。この推定式によれば、 a が一定の場合には硬化深さ h が大になるほどタフトライド処理鋼の疲労限は向上することになる。しかしながら、Fig. 3 の $S-N$ 曲線および Fig. 7 のかたさ分布より明かなように硬化深さは処理時間とともに大となるにもかかわらず 180 分処

理以上の 6ϕ では疲労限が同程度である。このように硬化深さを大にしても疲労限の向上には限度がみられ、本推定式が適用できない場合がある。この理由は次のように考えられよう。

処理時間を長くして Fig. 7 に示されるように表面近傍のかたさ値は増加せず、したがって表面近傍の強度向上には限度があると考えられる。そのため硬化深さ h が a に対して大きな割合を占める。つまり $h/(a-h)$ が大になると疲労破壊は試料の内部ではなく表面より生じることも当然考えられるわけである。その場合には上述の仮定のうち(3)の仮定が成り立たず、したがって本推定式が適用できない場合があることになる。

タフトライド処理による残留応力の発生は主として 570℃ の塩浴から水冷されたことによる熱ひずみに依存する。そのため処理時間が極端に短い場合や試料が著しく大きい場合には試料が充分に加熱されにくいことなどから熱ひずみの発生が少なくなり、したがって残留応力の発生も少ないことが予想される。実際に本実験の 10ϕ 、0.5 分処理について X 線応力測定法により表面の残留応力を測定してみると約 -10 kg/mm^2 であり、他の場合の $-30 \text{ kg/mm}^2 \sim 40 \text{ kg/mm}^2$ に比してかなり残留応力の発生は少ない。この場合には(2)の仮定が成立しないことになり、本推定式が適用できない場合が考えられる。

以上、著者らの提案したタフトライド処理鋼平滑材の疲労限推定式には h と a の組み合わせ方により適用できない限界が存在することが予想される。そこでこれらの適用限界について本実験結果より以下で検討する。

(1)式の両辺を無処理材の疲労限 $\sigma_{w,nt}$ で除すと次のようになる。

$$\frac{\sigma_{w,t}}{\sigma_{w,nt}} = C_1 \left(\frac{h}{a-h} \right) + (1+C_2) \quad (2)$$

(2)式から明かなように本推定式は疲労限向上率 $\sigma_{w,t}/\sigma_{w,nt}$ と $h/(a-h)$ が一本の直線関係にあることを示す。しかし、すでに述べてきたようにタフトライド処理による疲労限の向上には限度があり、また処理時間の短い場合などでは C_2 の値にも変化があると予想されるので $\sigma_{w,t}/\sigma_{w,nt}$ と $h/(a-h)$ は一本の直線では表わしえないであろう。いいかえるならば、本実験のような S15C、回転曲げの場合には前報で得られた $C_1=2.35$ 、 $C_2=0.38$ の直線が成り立ちうる範囲が本推定式の適用限界といえる。そこで Table II に示した各材の疲労限と Table III に示した各材の硬化深さに基づき、縦軸に $\sigma_{w,t}/\sigma_{w,nt}$ を、横軸に $h/(a-h)$ をとって整理したのが Fig. 8 である。 $\sigma_{w,t}/\sigma_{w,nt}$ と $h/(a-h)$ の間には予想どおりの結果が認められ、推定式には明らかに適用上の限界があることがわかる。Fig. 8 より

Fig. 8. Relation between σ_{wt}/σ_{wt} and $h/(r-h)$.

推定式の適用できる限界（範囲）は $0.01 \leq h/(a-h) \leq 0.6$ となる。 $h/(a-h) > 0.6$ では疲労限の向上は一定（約2.8倍）となり、 $h/(a-h) = 0.6$ がタフトライド処理鋼平滑材において最高の疲労限を与える最適条件となる。いいかえるならば、 $h/(a-h)$ を0.6以上にしても疲労限の向上は望めず、そのようなタフトライド処理は無意味なことになる。また、 $h/(a-h) < 0.01$ では残留応力の発生が少ないため推定式の適用範囲から外れる。Fig. 8においては $0 \leq h/(a-h) \leq 0.01$ の範囲を直線で表わしたが、この範囲が直線となりうるかいはさらに多くの h と a の組合せによる検討を必要としよう。しかし、この範囲での疲労限の向上はわずかであるから直線で表わしておいても実用上大差ないと考えられ、かつ実際にこの範囲でタフトライド処理鋼が用いられることはまずないといえる。

以上、タフトライド処理鋼平滑材の疲労限推定式には適用できる限界（範囲）があることを明らかにし、疲労の面で用いる際の硬化深さと品物の寸法に関する最適タフトライド処理条件をも明確にできた。

なお、中村らは著者らの推定の考え方で従来の結果を整理している。その結果をFig. 9に示すが、図中の破線は本実験より得られた著者らの結果である。また、図中で P.B. は平面曲げ、R.B. は回転曲げを意味す

Fig. 9. Relation between σ_{wt}/σ_{wt} and $h/(a-h)$.

る。この図から明らかなように材質や負荷応力の種類により推定式の係数 C_1 , C_2 および適用の限界などは異なってくることが予測される。この理由については前報で若干触れたが、主として疲労過程中的試片内部での硬化に差異があるためと現在のところ考えている。したがって、さらに本推定式を幅広く用いるには材質や負荷応力の種類のみならず塩浴処理後の冷却方法、焼もどし、平均応力などの推定式への影響について今後検討を進める必要がある。現在実験を行っているので、この点については別の機会に報告したいと考えている。

5 結 論

前報で提案したタフトライド処理鋼平滑材の疲労限推定式の適用上の問題点について硬化深さ h と試片の寸法 a をより広く組み合わせた疲労試験より検討を加えた結果、以下の結論が得られた。

(1) 推定式には適用限界があり、S15C、回転曲げの場合には $0.01 \leq h/(a-h) \leq 0.6$ の範囲でのみ成り立つ。

(2) $h/(a-h) > 0.6$ では試片表面近傍の強度向上が限度に達するため疲労破壊は表面から生じると考えられ、そのため疲労限は一定値を示すようになり、それ以上の疲労限向上（約2.8倍）は望めない。

(3) $h/(a-h) < 0.01$ では残留応力の発生が少ないため推定式の適用範囲から外れる。

本研究遂行にあたり実験に協力された武蔵工業大学学生（当時）鈴木 敬、中村 崇、神田幸男、高梨正喜の四君に謝意を表する。また、タフトライド処理をご担当いただいた日本パーカーライジング会社ならびに鋼材をご提供くださった日本鋼管会社の関係者各位に感謝する。

（昭和48年5月22日 日本材料学会第22期総会学術講演会にて講演）

参 考 文 献

- 1) 寺沢正男, 吉岡靖夫, 浅見克敏, 材料, **16**, 991 (1967).
- 2) 寺沢正男, 吉岡靖夫, 浅見克敏, 材料, **17**, 1114 (1968).
- 3) 寺沢正男, 吉岡靖夫, 浅見克敏, 材料, **18**, 1081 (1969).
- 4) 寺沢正男, 吉岡靖夫, 浅見克敏, 材料, **19**, 1086 (1970).
- 5) 寺沢正男, 吉岡靖夫, 浅見克敏, 日本材料学会第20期学術講演会前刷, p. 15 および p. 49 (1971).
- 6) Terasawa, M., Y. Yoshioka, and K. Asami, 15th Proc. Japan Cong. Mat. Res., p. 80 (1972).
- 7) 浅見克敏, 吉岡靖夫, 寺沢正男, 材料, **22**, 359 (1973).
- 8) 岡崎章三, 中村 宏, 堀川 武, 日本材料学会シンポジウム疲労における最近の諸問題, p. 118 (1973).