モデル軸による可逆変形の再現について*

徳 田 昭**

Akira Tokuda: Reproduction of Reversible Deflection on Model Shafts. (Study on the Reversible Deflection of Turbine Shaft Forging, 3rd Report).

Reversible deflection was reproduced on model shafts by means of a model apparatus for heat indication test. As the third report concerning our general study on the reversible deflection noticeable in steam turbine shaft forgings, the results are published herein, showing that it is possible to produce reversible deflection intentionally. With the said model apparatus for heat indication test, it was made feasible to repeat easily a series of tests under all the same conditions, saving time and money. As a result of eccentricity of heat treatments such as at non-uniform austenizing temperature or for normalizing in non-axial symmetry, reversible deflection could be produced and that only on a model shaft of steel containing Mo as alloy metal among the several steels used in the present series of tests. It was also found that the reversible deflection is not produced by the segregation in non-axial symmetry.

(Received December 22, 1960)

I. 緒 言

タービン軸および発電機軸の加熱計測試験における可逆変形の成因としては、従来一般に Barker ら⁽¹⁾の炭化物説が信ぜられていた。しかし可逆変形を示した軸材の冶金的諸性質を調べた結果と、二三の重要な実験結果⁽²⁾⁽³⁾によれば、地鉄への Mo の固溶量、換言すれば Mo の地鉄と炭化物への分配率の非軸対称な分布が可逆変形の成因ではないかと考えられる⁽³⁾。よつて前報までの考察に基づいて可逆変形を任意に再現することが出来なくてはならない。し

かし本研究の対象とする軸材の重量は 20 t を越えることも珍しくないで、実物軸材を使用して実験することは時間と費用の点から事実上不可能である。したがつて実物軸材の数分の一のモデル軸とモデル軸用の加熱計測試験装置を準備し、これらによつて可逆変形を再現し得た結果について述べる。

II. 実 験 方 法

1. 供 試 モ デ ル 軸

本実験の対象とする大容量のターボ発電機用およびタービン軸用軸材には、主として 1% Cr-1% Mo-V 鋼と 3% Ni-Mo-V 鋼が使用されている。ここでは工業的目的から上述の材質を中心に実験を進めた。製造したモデル軸の化学成分を Table 1 に示すが、高周波炉、電気炉または平炉で溶解し、3 t ハンマあるいは 1,000 t 水圧プレスで鍛造(鍛造重量約 250 kg) 焼鈍し、Fig. 1 に示す仕上形状に対

** 株式会社日本製鋼所室蘭製作所研究所

* 1960 年 6 月本会北海道支部講演会および 1960 年 10 月本会札幌大会に発表; タービン軸材の可逆変形に関する研究 (第 3 報)

(1) A. Barker, F. W. Jones: Proc. Inst. Mech. Eng., 196(1955), 853.

(2) 徳田: 本誌, 25(1961), 131.

(3) 徳田: 本誌, 25(1961), 258.

して 10 mm の余肉をつけて粗削後、熱処理、仕上機削を行い加熱計測試験に供した。

ステナイト化した。Fig.5 は Fig.4 に示す位置に緊縮した 6mm ϕ のアルメル・クロメル熱電対の示す温度記録

Table 1 Chemical compositions of tested model shaft. (*Showing the ghost zone of non-axial symmetry)

Model shaft No.	Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Reversible deflection
1	1% Cr-1% Mo-V	0.27	0.28	0.96	0.015	0.018	0.13	1.16	1.14	0.27	Appeared
2	〃	0.32	0.27	0.58	0.012	0.018	0.12	1.14	1.06	0.22	Appeared
3	3% Ni-Mo-V	0.28	0.28	0.65	0.017	0.015	3.02	0.07	0.45	0.12	Appeared
4	1% Ni-V	0.40	0.35	0.70	0.018	0.018	0.80	0.13	0.09	0.09	None
5	3% Ni-Cr	0.25	0.25	0.53	0.012	0.011	3.32	0.80	0.02	—	None
6	Carbon steel	0.36	0.28	0.50	0.013	0.014	0.01	0.04	0.02	—	None
7*	3% Ni-Mo-V	0.28	0.36	0.43	0.020	0.019	2.88	0.07	0.39	0.08	—

Fig.1 Shape of the model shaft.

2. 加熱計測試験モデル装置

本装置は実物試験装置と原理的には全く同じであるが撓みの測定精度を飛躍的に向上させるため、ダイヤルインジケータの読み取り方式から非接着抵抗線型変換器と連続記録計を併用する記録式に変更した結果、測定精度は必要ならば容易に $\pm 0.5\mu$ にし得た。本装置の外観を Photo.1 に、略図を Fig.2 に示す。Fig.2 においてモデル軸①は胴部のみを電気炉②内に入れて、2rpm の回転をギヤード・モータ③で与えながら加熱、高温保持、冷却し、その間の撓みを測定する。撓みはモデル軸表面に一端を接したシリカ棒④の変位を天秤⑤に伝え、非接着抵抗線型変換器⑥で検出し、記録計⑦にて得られる Fig.3 に示すようなチャートより求める。すなわちモデル軸が撓むとシリカ棒とモデル軸は円形カムと略々同様な運動をするため Fig.3 のような記録が得られ、このチャートから軸材の撓みを求めることが出来る。

III. 実験結果

以下の実験をはじめに際して考慮した点は現在主に使用されている鋼種 (1% Cr-1% Mo-V 鋼および 3% Ni-Mo-V 鋼) に何故可逆変形が出現するかという問題である。

全長が 5,000 mm、直径が 1,000 mm を越すことが珍しくない実物軸材を軸対称に均一な熱処理を実施するには、それだけの設備と高度の技術が必要である。しかし Fig.1 に示すような小型のモデル軸に非軸対称な熱処理を行うこともまた著しく困難なことである。Table 1 に示したモデル軸のうち No.1, 4, 5 の 3 本を Fig.4 に示すようにセットして横型炉に入れてオー

Photo.1 Model equipment for heat indication test (cf. Fig.2).

である。すなわちオーステナイト化温度に保持中は最初甚だしい非軸対称な偏加熱になっていたが、時間の経過とともに上下の温度差はなくなり焼準直前には殆んど同一温度になった。焼準は Fig.4 に示したような状態のまま炉外に

Fig.2 Model equipment for the heat indication test.

① Model shaft, ② Furnace, ③ Geared motor, ④ Silica rod, ⑤ Lever, ⑥ Unbonded strain gauge type transducer, ⑦ Automatic recorder of strain, ⑧ Thermo-couple, ⑨ Automatic recorder of temperature.

Fig.3 Record of deflection by the model equipment of heat indication test.

引出して空放し、非軸対称な偏冷却を行った。つぎに直径 700 mm の整型電気炉の中心にモデル軸を移し、620° ×

20 hrs A.C. の正常なテンパーを行い、Fig.1 に示す形状に旋削した。前述の加熱計測試験モデル装置による試験

Fig.4 Setting of model shaft No.1, 4 and 5 for eccentric normalizing.

Fig.5 Temperature record of eccentric normalizing of model shaft No. 1, 4, and 5 (cf. Fig.4).

結果は、モデル軸 No.1 では Fig.6† に示すように急冷側に凸の可逆変形が再現されたが、略々同様な熱処理を行つたと考えられるモデル軸 No.4, 5 には可逆変形が全く認められなかった。

モデル軸 No.2, 3, 6 について非軸対称なよりゆつくりした偏冷却を実施したところ、モデル軸 No.2, 3 は Fig.7, 8

Fig.6 Results of model shaft No.3 eccentrically normalized (bowed convexly in faster cooling side).

に示すように可逆変形を示すが、モデル軸 No.6 には認められなかった。

† Fig.6 の 1st test の昇温時に認められる大きい、撓みは可逆変形とは全く別の成因による A タイプの撓みである。また Fig.7, 8 も同様であるが撓みはモデル軸中央で測定したものを示す。

非軸対称な偏析のある軸材のモデルとして、Photo.2 に示すように直径の一端側にのみ輪状ゴースト^{††}を示し、他の一端には鋼塊の中心線がくるように製作したモデル軸 No.7 を正常な熱処理をして加熱計測試験を実施した結果可逆変形は認められなかった。

IV. 考 察

前報において⁽³⁾可逆変形を示

Fig.7 Results of model shaft No.2.

Fig.8 Results of model shaft No.3.

す軸材の熱膨張率の分布が軸対称でなく、凸に撓んだ側が凹に撓んだ側より 0.2×10^{-6} 大きいことが知られ、この結果は Burton⁽⁴⁾, Barker⁽¹⁾ の結論とも一致する。さらにこのような熱膨張率の差異が一般論としてではなく、実用軸材で起る原因が地鉄に固溶している Mo の偏在にあると考えられる⁽³⁾。ここで対象としている大型軸材には必ず Mo を添加しているところから上述のような考察は容易に領けるところである。

†† このモデル軸は 75 t の鋼塊より製作したものであるから、ここに示される偏析は実用に供せられている大型軸材と略々同程度である。

(4) H.H.Burton, J.E.Russel: Proc. Forgemasters' Meeting, Spec. Rep. No.60 (1957), 17, Iron and Steel Inst.

オーステナイトよりの焼準に際して非軸対称な熱処理をすれば Table 1 に示したように Mo を合金元素として有

Photo.2 Sulphur print of model shaft No.7.

する鋼種にのみ可逆変形が再現され、Mo を含まない鋼では出現していない。しかし Mo を含む鋼でも正常な熱処理を行えば勿論可逆変形は出現しない。この事実は第 2 報⁽³⁾の結果とよく一致する。可逆変形の成因として凸に焼んだ側には主炭化物として熱膨張率の大きい M_3C が、凹に焼んだ側には主炭化物として $M_{23}C_6$ に比較して熱膨張率の小さい $M_{23}C_6$ が存在するため、全体として前者の熱膨張率が大きく、後者のそれが小さいという Barker ら⁽⁴⁾の炭化物説が一般に信ぜられていた。しかし炭化物説にとつて最も重要な炭化物自体の熱膨張率の測定結果を Barker らは示していない。著者の測定結果では炭化物の熱膨張率は M_3C が略々 12×10^{-6} , $M_{23}C_6$ が 20×10^{-6} であつて⁽²⁾, Barker らが考察した結果とは全く逆であり、また著者が可逆変形を示す軸材について調査した結果では、凸に焼んだ側と凹に焼んだ側との間に炭化物の偏在は認められず、いずれの側の主炭化物も M_3C である。さらに著者の実施した実験結果から考察すると、彼らが対象とした軸材 (C: 0.30%, Mo: 0.6% の Mo 鋼) は、凹に焼んだ側が凸に焼んだ側に比較して焼準時に除冷されたために、凸に焼んだ側に比較して凹に焼んだ側に $M_{23}C_6$ がより多く生成されたに過ぎないと考えられ、したがつて可逆変形の成因としての炭化物説は甚だ疑問となる。然し Barker らが対象とした軸材も著者の実験結果から考察すれば略々矛盾なく説明し得ると思われる。

(5) M. C. Caplan, L. B. W. Jolley, J. Reeman: Symposium on Internal Stresses in Metals and Alloys, (1948), 139, Inst. Metals.

また可逆変形の成因として軸材の軸心に対して偏心して存在する偏析帯を Caplan ら⁽⁵⁾が考えたが、大型鍛造品にはある程度以上は必在する偏析帯を非軸対称に存在せしめたのみでは可逆変形は示されない。よつて鋼塊の軸心と軸材軸心とが一致しないような偏心鍛造を行つても、そのみが原因で可逆変形が起るとは考えられない。

V. 結 言

蒸気タービン軸などの加熱計測試験において出現する可逆変形の成因についての総合的研究の第 3 報として、可逆変形を再現せしめた経過について示した。(1) 実験条件を正しく制御するため実物軸材の数分の一の大きさのモデル軸を使用し、またモデル軸用の加熱計測試験装置を新しく準備し、これらによつて実験条件を正しく把握し、あわせて経費と時間の節約をはかった。モデル試験を採用したことは本問題の解決を容易ならしめた大きい因子である。(2) 可逆変形の直接の原因は非軸対称な熱処理にあり、非軸対称な焼準によつて可逆変形が再現された。(3) しかし可逆変形の再現は本実験に使用した鋼種の範囲内では、Mo を合金元素として添加されているものに限られる。(4) 非軸対称な偏析のみでは可逆変形の成因とはなり得ない。

本報の結論と前報までの結果を総合すると、可逆変形の成因として従来示されていた炭化物説、偏析説には疑問点の多いことを指摘し、非軸対称な熱処理のため主として Mo の炭化物と地鉄の分配率が非軸対称となり、地鉄の Mo 濃度の高い方に凸の可逆変形が示されることが知られた。

ここで得られた可逆変形を示すモデル軸の物理的性質、また軸対称な焼準を実施したとしても非軸対称なテンパーをすれば第 1 報で示した結果より、容易に可逆変形の出現が予想されるが、これらについての実験と考察は改めて報告する。

本研究の発表を許可せられた日本製鋼所室蘭製作所長皆川孝光氏、同所副所長伊佐治勝利氏、御指導御鞭撻をいただいた同所研究所長下田秀夫博士ならびに同研究所の諸氏に深く感謝する。