蒸気タービン用ダイアフラムの強度と破壊機構 Strength and Fracture Mechanism of Steam Turbine Diaphragm

ダイアフラムは回転体にいちばん近く接しており,溶接部の多い複雑な形状をしている。したがって,回転体との摺損による運転不可,あるいはタービン破損という大事故につながる危険性が大であり,変形(たわみ)及び破壊の特性と特徴をよく 把握し長期安全運転への立証を行なうことは重要な事項である。この認識から, 1,000 t 大形構造物試験機による強度確認と破壊機構の解明とを行なった。

この結果,(1)破壊形態は水平接合面に近いノズル翼から順に破壊が進むが, 脆性破壊的には破壊しない。(2)摺損に対しては, 強度面よりもたわみを重視すればよいことを確認した。このことから, 長期定期検査に対しては, 水平接合面部のたわみ変化を, ノズル翼については, 水平接合面近傍の欠陥の有無を特に重点的に監視してゆけばよいことが判明した。

小池二郎* 河田安司*		Koike Jirô
		Kawada Yasuji
駒谷	貢**	Komatani Mitsugu

1 緒 言

蒸気タービン本体の研究は、その心臓部ともいうべき回転 体については従来より数多くの試験、研究が行なわれている。

一方,静止体であるダイアフラムについては,使用条件,強度,その他の点に関する試験,研究のデータ¹⁾はわずかにみら

件も過酷となり,信頼性を確保するためにも十分その強度を 把握しておく必要がある。しかし,一般の構造物のような単 純な形状ではなく,溶接部の多い複雑な形状を呈しておりそ の強度を知ることはなかなか難しい。

れる程度で、あまり行なわれていないのが現状である。しか し、回転体と静止体間の間隙は、効率上蒸気漏れを少なくす るためできるだけ小さくする必要があり、効率向上を要求さ れる昨今、この要求度は特に著しい。また、ダイアフラムの 変形及び破壊は、温度による伸び差とも相まって、回転体に 対する摺損という大事故につながることも考えられる。すな わち、間隙を小さくしたい要求と、小さくし過ぎて摺損に至 らぬようにする両面をバランスさせることは、重要な事項で ある。近年、蒸気タービンの大容量化に伴って、その使用条 本稿は実機規模ダイアフラムについて, 1,000 t 大形構造物 試験機を用いて, 静荷重試験, 繰返し荷重試験及び静的破壊 試験を行なった結果について報告する。

2 ダイアフラム

2.1 機 能

蒸気タービン本体の構成を図1に示す。静止体であるダイ アフラムは、各々ケーシングに組み込まれており、ボイラか らケーシング内部に入ってきた蒸気は、ダイアフラムのノズ

37



高圧外部ケーシング 高圧ロータ 低圧外部ケーシング 低圧ロータ

図 | 蒸気タービン断面図 蒸気タービン本体の構成を示すもので、ケーシングに組み込まれたダイアフ ラムは、ノズル翼を通過する蒸気を熱膨張させることにより、ロータへ回転力を与える機能を持っている。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所電力事業本部

902 日立評論 VOL. 58 No. 11(1976-11)

ル翼を通過する。このとき、蒸気が熱膨張して蒸気の持つ熱 エネルギーは運動エネルギーとなって、ロータに取り付けら れている動翼に入り、回転エネルギーとなってロータを回転 させる。このように衝動式タービン ダイアフラムの機能は ロータに最も効率よく回転力を与えることである。



2.2 構造と特長

通常ダイアフラムは、ケーシングで支えられる外輪と蒸気 を膨張させるためのノズル翼及びこのノズル翼を固定させる スペーサと内輪とで構成されており、これらはすべて溶接に より一体化される。なお組立、分解の必要上から、水平面を 境として上半ダイアフラムと下半ダイアフラムとに2分割さ れた半円形状を呈し、水平接合面に位置するノズル翼は半割 形状となっている。図2にその構造を示す。

3 強度試験

3.1 試験方法

試験は静荷重試験,繰返し荷重試験及び静的破壊試験の3 種類について行ない,試験方法をまとめると表1に示すよう になる。各試験はすべて室温で行なった。図3は荷重試験中 の状況を示したものであるが,実機規模ダイアフラムは,ブ ロックで支持され,このブロックはベースにボルトで固定さ れている。荷重点である内輪には,油圧ジャッキが置かれジ ャッキを介して試験機の圧盤により荷重が加えられる。これ はダイアフラムのたわみが不均一になっても,一様な荷重を 常に加えることができるように考慮したものである。

3.2 試験結果

(1) 内輪のたわみ分布

たわみ測定は図4に示す変位計で行なった。この変位計

図2 ダイアフラムの構造 ノズル翼はスペーサに固定され、スペーサ は各々半円形状の内輪と外輪に、溶接によって一体化されている。 は、鋼板製のカンチレバーで、表裏にひずみゲージをはり付け、ダイアフラムがたわむと曲げられるため、このひずみ値を電気的に感知し変位量を求めるようにしたものである。たわみは支持点から最も離れた内輪の端部で大きくなり、この部分の周方向たわみ分布は図5に示すとおりである。これで明らかなように最大たわみは、水平接合面に位置する内輪端であり、90度の位置から0度及び180度(水平接合面)に近づくに従ってたわみは大きくなり、90度の位置を基準にとるとHP

表 | 試験方法 高圧及び低圧ダイアフラムの各々につき,静荷重試験,繰返し荷重試験及び静的破壊試験の3種類について大形構造物試験機による強度確認と破壊機構を究明する。



蒸気タービン用ダイアフラムの強度と破壊機構 903





図3 荷重試験中の実機規模ダイアフラム 荷重試験状況を示す。 圧盤とダイアフラム間に設置してある連動油圧ジャッキは、たわみが不均一と なっても一定荷重が加わることを考慮したものである。

図4 変位計 ダイアフラムがたわむとカンチレバーが曲げられるので、 ひずみ値により変位量を求める。

39



図 5 内輪たわみ分布 内輪の周方向の分布を示す。90度の位置に対し0度及び180度(すなわち水平接合面)の位置のほうが119%から131%大きい。

904 日立評論 VOL. 58 No. 11(1976-11)

ダイアフラムの場合119%, LPダイアフラムの場合131%と それぞれ増加している。このように水平接合面部の内輪たわ みが大きくなるのは, 組立の必要上から半割構造となっており, 水平面の剛性が弱いためである。

(2) ノズル翼の応力分布

図6にノズル翼の応力分布状態を示す。ノズル翼の最大応 力値は、水平接合面部であることが分かる。分布状態につい ても、先に述べた内輪たわみ分布同様水平接合面に近いほど 大きくなっていることが分かる。またノズル翼の応力は、外 輪蒸気流入側と内輪蒸気流出側が引張応力、外輪蒸気流出側 と内輪蒸気流入側は圧縮応力となっており、内輪のたわむ方 向から推定される応力方向と合致している。次にノズル翼の 表面応力についてその軸方向応力分布状態を図7に示す。HP ダイアフラムでは、内輪蒸気流入側の応力が高く、LPダイ アフラムでは、外輪蒸気流入側の応力が高い。更に水平接合 面から離れるに従い、中立軸の傾きが変化している。これは 内輪のたわみ分布でも分かるとおり、90度の位置よりも水平 接合面のたわみのほうが大きいため変化するものと思われる。

またノズル翼表面の応力分布は、ノズル翼断面の形状と長さ 及び内外輪の剛性の差異により大きく変化するものと考える。

ノズル翼の応力及び内輪たわみの分布は,水平接合面に近づ くほど大きくなることが分かったが,これは前述のようにダ イアフラムが半割であるという形状特性によるもので,水平 接合面の剛性を高める方法としては,上下各ダイアフラムを ボルトで一体に締め付けるなど,必要に応じて行なえばよい ことが分かる。 (3) 繰返し荷重による内輪たわみの変化

繰返し数N = 500回の繰返し荷重に対する内輪のたわみ変 化を図8に示す。繰返し荷重試験は,装置の大きさから室温 で実施せざるを得なかったため,繰返し荷重は安全を見て, ノズル翼の応力が許容応力値となる荷重(これを設計荷重と いう)より大きくとり,HPダイアフラムは設計荷重の200%, LPダイアフラムは設計荷重の150%とした。これは予想され る破壊荷重を高温における許容応力低下率分だけ考慮したも のである。図8によると,HP及びLP両ダイアフラムとも繰 返し数N = 500回の繰返し荷重でたわみは増加しないことが 分かった。なお、ノズル翼のひずみ振幅の最大値は1,600 μ で あり、これから考えて $N = 10^4$ 回でもき裂の発生及びたわみの 増加はないものと考えられたが、一応確認のためN = 500回 まで行なったものである。

(4) 静的破壞試験

破壊試験はN=500回の繰返し荷重試験を終えたものについて行なった。破壊に至るまでの荷重と内輪最大たわみの関係を図9に示す。設計荷重を1とすると、最大破壊荷重は、HPダイアフラム6.9倍、LPダイアフラム2.8倍であり、HP ダイアフラムのほうがLPダイアフラムより約2倍程度高い強度を持っている。実機の使用条件を考えた場合、高温での許容応力値の減少を考慮すると、実質的な両者間の差異はないと推定する。ここで最大破壊荷重とは、荷重-たわみ線図で荷重が飽和する起点であり、内外輪及びノズル翼が破断する状態ではない。次に破壊変形状態を、図10、11に示す。ノズル翼の破壊は水平接合面で著しく、破壊起点となるのは、



図 6 ノズル翼の応力分布状態 設計荷重時におけるノズル翼の周方向の分布を示す。たわみ分布同様 90度の位置よりも水平接合面のほうがやはり大きい。

40







外輪側

外輪側

図 8

(a) HP/ズル翼

(b) LPノズル翼

図7 ノズル翼表面の応力分布 設計荷重時におけるノズル翼表面の軸方向応力分布状態を示す。内輪 側と外輪側では応力符号が逆となっている。また、水平接合面と90度の位置では中立軸が変化している。

外輪蒸気流入側と内輪蒸気流出側であることが、図10の破面 より明らかである。また図11から外輪の変形は少ないが、内 輪は水平接合面で大きく変形していることが分かる。

ダイアフラムの破壊過程は,水平接合面の応力の高い半割 翼がまず破壊し、次に接合面に近いノズル翼から順に破壊が 進む。これは試験中ノズル翼で、1本ずつ順に破壊音が聞こ えたことから確認できた。水平接合面近傍のノズル翼が破壊







図9 荷重-たわみ線図 最大破壊荷重は,設計荷重に対しHPダイアフ ラムで6.9倍、LPダイアフラムで2.8倍を示しているが、使用条件を考慮する と両者間に差異はないと推定する。

41

内輪たわみ (mm)

内輪たわみと繰返し数の関係 HPダイアフラム, LPダイアフ ラムとも、内輪のたわみは増加しない。すなわち、塑性変形は見られない。

906 日立評論 VOL. 58 No. 11(1976-11)



図10 ノズル翼の破壊状態 ノズル翼の周方向の破壊は,水平接合面に 近いほど著しい(HPダイアフラム)。



図11 内輪の変形状態 水平接合面に近いほど変形が著しい(HPダイア フラム)。



図12 蒸気タービン用ダイ アフラムの破壊機構 ス ペーサ付根部のノズル翼表面か ら不溶接部へ破面が連なって破 壊することを示す。

すると、荷重は他の破壊していない/ズル翼で支えられるが、 破壊翼の数が増すと遂には荷重を支えることが不可能となり, このとき、ダイアフラムは破壊した状態となる。このように 脆性破壊的な破壊はしない。次にノズル翼の破壊形態は図12 に示すとおりで、内外輪とスペーサ及びノズル翼は溶接によ って一体となるが、内外輪の開先ルート部に不溶接部があり、 破壊起点である外輪蒸気流入側及び内輪蒸気流出側とこの不 溶接部が連なってノズル翼は破壊している。

4 結 言

溶接式ダイアフラムについては,形状が複雑であるうえ, 溶接構造物であるため,従来からあまり報告されていない分 野であり,破壊の機構などよく知られていなかった。今回の 実機規模ダイアフラムの試験結果を要約すると次のとおりで

(3) 摺損に対しては、強度面よりもたわみのほうを重視して 考えればよいことを把握した。

これらのことから長期定期検査に対しては、ダイアフラム 水平接合面部のたわみ変化を,またノズル翼については水平 接合面近傍の欠陥の有無を重点的に監視し, 万一ノズル翼に 欠陥が発生した場合,外輪の蒸気流入側と内輪の蒸気流出側 については, 補修の必要性が大であることが分かった。

以上,今回の研究で,長期間隔定期検査に対する安全性と 永年使用に対する安全性監視のポイントが把握できた。これ を機に、今後いっそう信頼性の高い製品とする努力を続けて ゆく考えである。終わりに、本研究の遂行に当たって御助力 をいただいた関係各位に対し、深謝の意を表わす次第である。

ある。

(1) ダイアフラムのたわみ及びノズル翼の応力とも、水平接 合面部が最大となる。

(2) ダイアフラムの破壊形態は、水平半割翼がまず破壊して 水平接合面に近い/ズル翼から順に破壊が進むが, 脆性破壊 的には破壊しない。

参考文献

- 1) V. C. Tayler, "Stress and Deflection Test of Steam Turbine Diaphragm", TRANSACTION of THE ASME (1951 - 10)
- 本文献は小径低圧ダイアフラムについての試験報告であるが、全 面均一荷重方法(変位に対する自由度を拘束)を採用している。

