

# 原子炉格納容器のジェット力に対する強度

## Strength of Reactor Containment Vessel for Jet Force

浜田 邦雄\* 好永 俊昭\*  
Kunio Hamada Toshiaki Yoshinaga

林 勉\* 宇梶 秀夫\*  
Tsutomu Hayashi Hideo Ukaji

### 要 旨

原子炉格納容器内に収納されている配管の破断仮想事故時には、配管中の高圧水の放出によって発生するジェット力が格納容器に加わることが考えられる。日立製作所では実機製作の前に圧力抑制形格納容器の鋼製ドライウェルについて、仮想ジェット力に対する強度を実物大のモデル実験によって検討した。実験結果によれば、ジェット力によってドライウェルは塑性変形を生ずるが、最大50 mmのギャップを介してコンクリート遮蔽(しゃへい)体によってバックアップさせれば、ドライウェルには強度上じゅうぶん余裕があることを確認した。

### 1. 緒 言

沸騰水形原子炉の格納容器は、図1に示されるように、原子炉圧力容器および一次系を格納しているトックリ状のドライウェルと、事故時に蒸気を凝縮するための水をたくわえたドーナツ状のトラスから構成されている。原子炉格納容器は原子力発電プラントにおいて最も大きな鋼製圧力容器であって、万一一次系配管が破断するような事故の場合にも放射性物質の外部への放散を防ぐために、じゅうぶんな気密性が要求されるたいせつな安全設備である。したがってあらゆる荷重を考慮して、じゅうぶんな強度のあることを保証するための詳細な解析が必要である。特にジェット力は、ドライウェル球形部の強度上重要な課題となっている。ドライウェルに関するおもな仕様は表1に示すとおりであるが、これらは昭和43年6月に完成したGETSCO社納東京電力株式会社福島原子力発電所1号機用の仕様を参考にして設定した。

ドライウェル内の一次系配管が破断した事故を仮想してみると、配管中の高圧水が破断部から放出され、これがジェット力となってドライウェルに加わることになる。以下ジェット力の大きさとしては表1に示した値を用いるが、これはドライウェル内にある最大径の配管通路断面積とその配管内の一次冷却材の圧力との積として求められた値で、しかもこれが静的に加わるものと仮定するので、この値はじゅうぶん安全側に設定されていることになる。ジェット力はドライウェルに対しては比較的大きな荷重であり、しかも受圧面積は小さい。したがって検討方法としては、ジェット力の加わる容器壁には局部的な塑性変形を許容する。ただし、この塑性変形はドライウェルの外側に打設される生体遮蔽コンクリートでバックアップさせることによって、過度の変形を拘束して容器壁が破断に至らないように考慮される。

ジェット力に対しては、コンクリートをできるだけドライウェルの容器壁に近づけて打設することが望ましいが、一方では最大仮想事故時における内圧および熱による膨張がコンクリートによって拘束され、容器に座屈を生じないようにギャップを設けることが必要である。ここでは容器の膨張に対する逃げを考えて、ドライウェルとコンクリートとの間のギャップを44 mm ± 6 mm と設定している。容器の膨張およびジェット力によるドライウェル全体の変形によるギャップの減少を安全側に考えて無視すれば、ドライウェルが最大50 mmまで局部的に変形されたとしても、破壊を生ずるまでにはじゅうぶんな余裕のあることが証明されればよい。複雑な塑性変形を含む強度の検討では、解析を理論的に行なうことは不可能で

\* 日立製作所日立工場

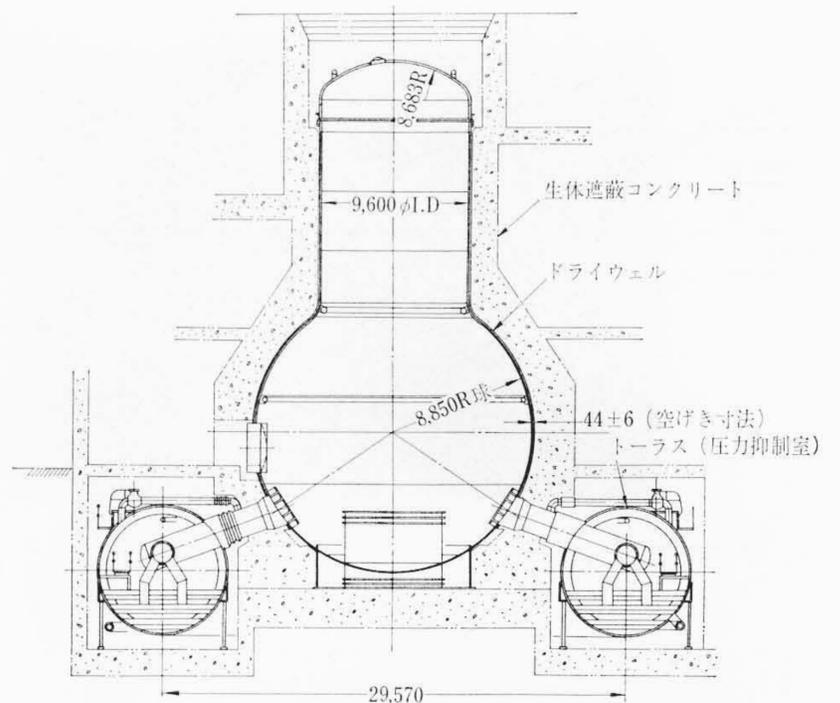


図1 原子炉格納容器外形図

表1 ドライウェル球形部の設計条件

寸法	球形部内直径	17,700 mm
	球形部板厚	16, 18, 24 mm
	空 げ き 寸 法	44 ± 6 mm (最大 50 mm)
荷重 温度	設 計 内 圧	4.35 kg/cm <sup>2</sup> G
	設 計 外 圧	0.14 kg/cm <sup>2</sup> G
	設 計 温 度	138 °C
	球形部に対するジェット力(相当面積)	207 t (0.237 m <sup>2</sup> )

あるため、実物大のモデルによる実験結果を用いて検討することにした。

### 2. 実 験 方 法

#### 2.1 供 試 モ デ ル

ドライウェル容器壁を代表するものとしては、内半径が8,850 mmの球面に成形された直径4,000 mmの球形板を2枚用意した。その板厚には規格上の最小必要板厚16 mmを採用している。材質としては実製品と同様にボイラ鋼板 ASME SA-212, Gr. B (SA-516, Gr. 70 相当) を用いた。

ジェット力を受けるドライウェルには多数の貫通ノズルが取り付けられていることを考慮して、図2に示すように貫通ノズルのない場合とある場合との2種類のモデルを作製した。

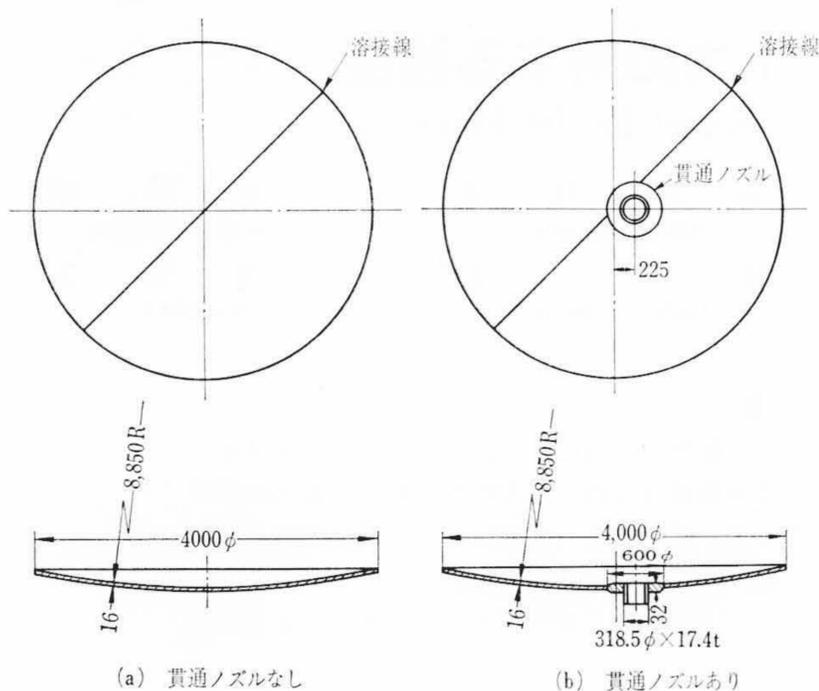


図2 供試モデル

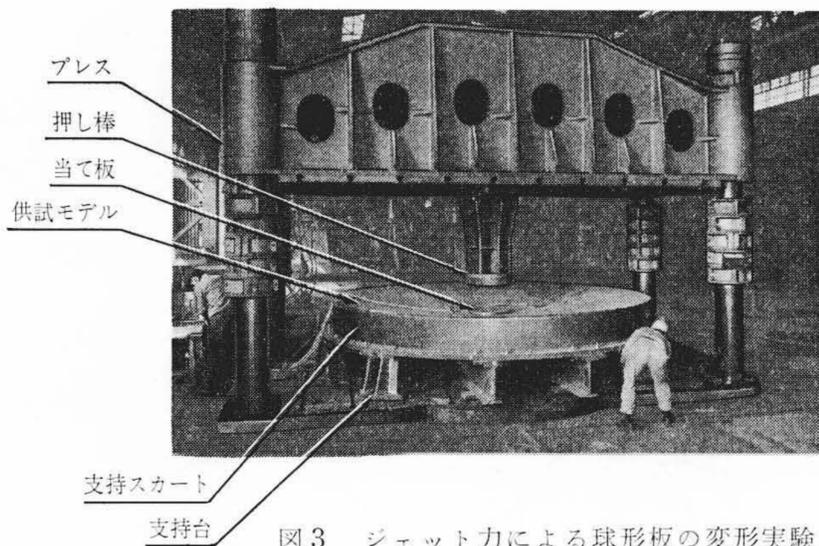


図3 ジェット力による球形板の変形実験

(1) 貫通ノズルのない球形板： 図2(a)

実製品と同様の方法で溶接された溶接線が中央部に設けられている。この溶接線には全線に放射線透過試験を行なったほか、全表面には磁粉探傷試験を行なって有害な欠陥のないことを確認した。本モデルは、実験結果の考案を容易にすることを考慮に入れて単純な形状とするとともに、溶接線の強度の検討を行なうことを目的とした。

(2) 貫通ノズルのある球形板： 図2(b)

中央部の溶接線は(1)と同様であるが、さらに代表的寸法(12インチ)の貫通ノズルが加えられている。実製品と同様にして、貫通する管とその周囲の板厚32mmの補強板は、あらかじめ完全溶け込み溶接をして焼鈍を行なった。次に、貫通ノズルを球形板に溶接してから、その溶接部に放射線透過試験を行なうとともに、全溶接表面に磁粉探傷検査を施行した。なお、補強板と管の材質は球形板と同じである。(1)の実験結果によって溶接部の強度は問題のないことが確認されていたため、貫通ノズルを偏心して取り付けることによって、偏心した変形による強度の減少の具合を調査することをおもな目的とした。

2.2 実験方法

実験装置の概要と実験状況を図3に示す。ジェット力による変形が支持部の影響を受けにくくするように、供試モデルの外周を厚肉の支持スカートに溶接で固定した。ジェット力はモデルの中央に置かれた直径550mmの当て板を介して、油圧プレスに取り付けられた押し棒によって加えられ、荷重の読みとしては抵抗線圧力変換器とブルドン管式油圧計を併用した。荷重の加え方は200tまでは

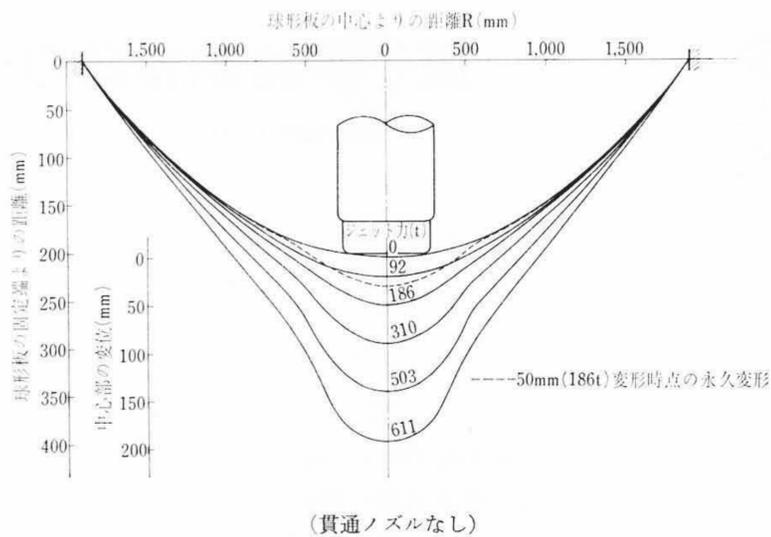


図4 ジェット力による変形

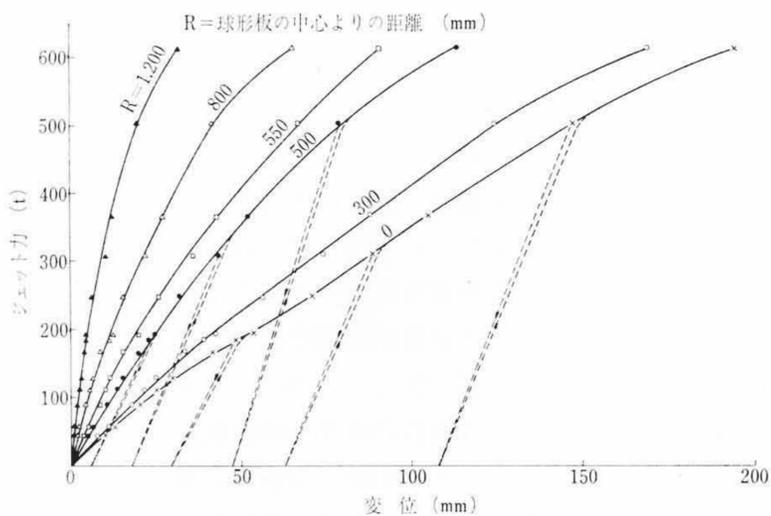


図5 ジェット力と変位との関係

約20tごとに、200t以上では約50tごとに段階的に増加し、各点での変形およびひずみを測定した。さらに、中央部の下方への変位がそれぞれ50mm、100mm、150mm近辺に達したときには荷重をゼロに戻して、永久変形量の測定および液体浸透試験による欠陥発生の有無のチェックを行なった。

変形は球形板の下面に適当に配置した変位計によって測定した。変位計は抵抗線形で、測定範囲は100mmである。ひずみの測定には塑性域の測定も可能な2軸の抵抗線ひずみゲージを用い、貫通ノズルのない場合には29枚を、また貫通ノズルのある場合は41枚を上下両面にはり付けた。ただし、ここでは膨大な実験データをすべて記述することは困難であるので、検討に必要なおもなものに限った。

3. 実験結果とその検討

3.1 ジェット力と変形、ひずみの関係

3.1.1 貫通ノズルのない場合

変位計によって得られた荷重と変位との関係を、球形板の中心からの距離Rによって整理して示したのが図4および図5である。図5によれば荷重と変位との関係は、荷重が500t以下ではほぼ直線的な関係にあるが、図4よりわかるように変形の過程は複雑である。すなわち、初めは球面が次第に引き延ばされて円すい状に変形するとともに、荷重の増加にともなってその変形が次第に外周へと拡大されていく。一方荷重が200tを越えたあたりから、中央部の局所的な塑性ふくらみが急激に増大してくる。変形量のうち塑性変形量がどのようにになっているかを示すため、図4では186tにおいて、また図5ではR=0およびR=500mmに対して、荷重除去時の永久変形を点線で示してみた。これらからわかるように荷重が小さい時点でもすでにかかなりの塑性変

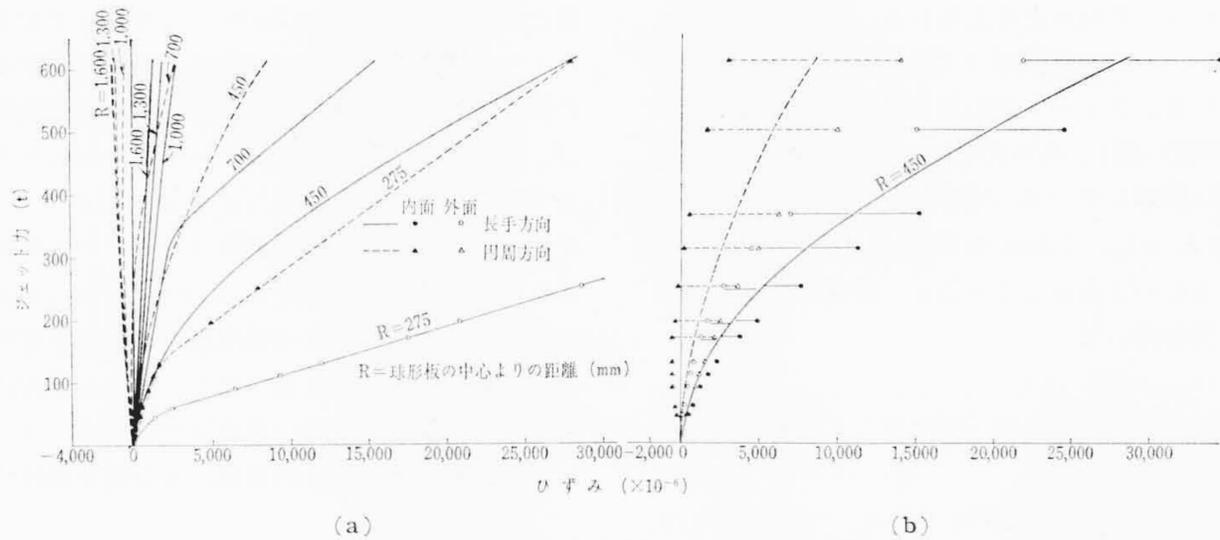


図6 ジェット力と平均ひずみの関係

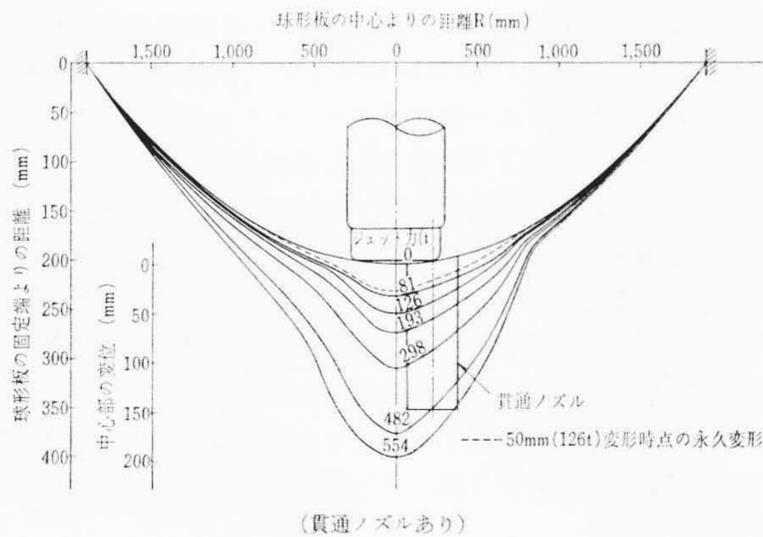


図7 ジェット力による変形

形が含まれていることがわかる。弾性変形<sup>(1)</sup>は理論的に容易に計算できたが中央部では一致せず、また塑性理論の検討<sup>(2)</sup>も一部加えてみたがこれも実験値との一致は良くなかった。この理由は前述したように変形の過程が複雑であってしかも変形量が大きいため、破断にいたるまでの変形を理論的に追求することは現状では困難である。

荷重とひずみとの関係を図6に示す。図6(a)では、 $R=275$  mmが外面のみの測定であるのを除き、内外面ともに測定しているため内外面の平均値を示している。この平均値は全ひずみのうちの曲げ成分を除いた膜成分のみを示していることになる。長手方向のひずみは荷重点に近いほど大きく、またその傾向は図5と似ている。円周方向のひずみは中央部の局部的変形部以外は小さく、外周では負(圧縮)の値となっている。 $R=450$  mmに対しては図6(b)に平均ひずみのほかに内外面のひずみを示してみた。これよりわかることは、曲げ成分が荷重の増加とともに増加してくるが、長手方向では荷重が約300 tになるとその増加は少なくなり、以後膜成分だけが增加して破断に至るのがその特長である。なお球形板の外周支持点近くでは、荷重が大きくなっても変形、ひずみともに小さく、本実験に採用した球形板がじゅうぶんに大きく支持端部の影響の少ないことを示している。

3.1.2 貫通ノズルのある場合

荷重と変位との関係を図7に示す。貫通ノズル補強板の板厚は球形板の板厚の2倍あるので、比較的剛性が高く変形はしがたい。この貫通ノズルを中心よりずらして取り付けてあるので、全体の変形の様相はさらに複雑となる。図7からわかるように、貫通ノズルのない側(図7の左側)に変形が起こりやすく、中央部の局部的塑性変形は貫通ノズルのない図4の場合と比べてやや大きい。一方、貫通ノズルのある側(図7の右側)では、補強板があまり変

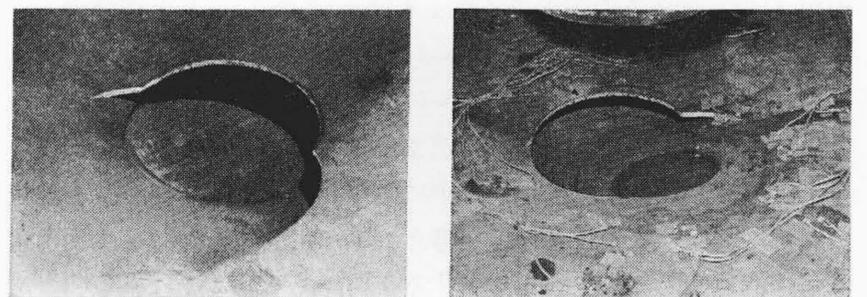


図8 ジェット力による球形板の破断状態

表2 破断時の荷重と変位

供試モデル	破断時の荷重と変位		ドライウェル強度に対する安全率	
	最大荷重 F	最大変位 δ	荷重 (F/207)	変位 (δ/50)
貫通ノズルなし	731 (t)	260 (mm)	3.5	5.2
貫通ノズルあり	665 (t)	236 (mm)	3.2	4.7

形しないままで傾き、しかも  $R=800$  mm 以上付近からの変位はかなり小さくなっている。図6に相当する荷重とひずみの関係はここでは省略したが、貫通ノズルのない場合と比べてのおもな相異点は、中央部近くでの円周方向のひずみが大きく、またひずみのうち曲げ成分の占める割合が多かった。これらの事実は変形がより偏心的なものであることを意味している。

3.2 破断時の検討

貫通ノズルのある場合とない場合との両者について、破断時の最大荷重と最大変位を表2の左の欄に、また破断部の状況を図8に示した。破断面はいずれの場合も純せん断破面であった。

3.2.1 貫通ノズルがない場合

3.1.1における検討および破断面の状況から、円周方向に均一に荷重を受け溶接線の位置とは特に関係なく破断を生じているものと判断された。ここで、ジェット力の加わる部分の外径 ( $d=550$  mm) の全周に沿ってせん断破壊を生ずるものとすれば、球形板の板厚を  $t$  (16 mm) として、破断を生ずるための荷重  $F$  は次式で与えられる。

$$F = \pi d \cdot t \cdot \tau_{max} = 788 (t) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $\tau_{max}$  としては材料の実際の引張強さ  $57 \text{ kg/mm}^2$  の1/2を用いた。この値は表2に示した最大荷重と一致していることから、破断に対する上記の仮定がかなり妥当なものであることを示している。

3.2.2 貫通ノズルのある場合

表2に示されるように破断に対する最大荷重および最大変位ともノズルのない場合よりも小さい。これは剛な貫通ノズルによ

て変形がより局部的になったためと考えられる。破断は貫通ノズルのない側より開始し、一端は溶接部でまた他端はノズル補強板のところで止まっている。ジェット力の加わる部分の外周のうち  $S_1=1,100\text{ mm}$  が球形板に接し、 $S_2=300\text{ mm}$  が補強板に接する。ここでノズル補強板は板厚が厚いので破断の可能性は少ないため、破断可能長さを  $S_1$  とし、しかも全荷重のうち  $S_1/(S_1+S_2)$  だけが破断に寄与するものと仮定してみると、破断に至る荷重は(1)式と同様の考え方をを用いて

$$F=(S_1+S_2)t\cdot\tau_{\max}=638(t) \dots\dots\dots(2)$$

となり、実際の破断時最大荷重とほぼ一致することがわかる。

3.3 安全率の検討

ここで考えている設計ジェット力は 207 t であり、またドライウェルは 50 mm のギャップを介してコンクリートによってバックアップされている。実験結果によれば、207 t では中央の変位が 50 mm を少し越えるのでドライウェルはコンクリートと接触することになるが、コンクリートがなかったとしても破断することはない。ジェット力に対するドライウェルの強度に関しては、ここに示された実験によってかなり大きな荷重まで吸収できることが明らかになった。一方、鋼材または溶接部中に潜在し得る欠陥、各ノズル形状の影響、製作寸法の精度などを考えれば、実験値を実製品に利用するためには適当な安全率を考慮する必要がある。内圧による引張応力に対して規格上期待される安全率は約 4 であるが、以下ジェット力に対しても安全率を 4 と安全側に仮定して検討を加えてみる。破断時の荷重および変位の実験値を 207 t および 50 mm でそれぞれ割れば、荷重および変位に対する安全率が得られることになる。これらの値を表 2 の右の欄に示した。

まず荷重に対する安全率から考えると、表 2 より貫通ノズルのある場合でも安全率は 3.2 であるので、コンクリートのバックアップがなかったとしても破断しないことが期待できるが、前述の安全率 4 を確保するものとするれば、コンクリートによるバックアップが必

要となる。次に、最大 50 mm のギャップを介して設置されるコンクリート構造物がジェット力に抵抗するものとして、ドライウェルの強度に対して表 2 に示す変形に対する安全率を用いることにすれば、安全率は 4.7 以上であるから 4 よりも大きく、じゅうぶんに安全であることになる。ドライウェル壁がコンクリート壁に接触してからは、ジェット力は直接コンクリートに伝わるから、ドライウェルの強度は材料の靱性(じんせい)によって大きく支配される。ゆえに、ここで用いたと同程度以上の靱性を有する材料であれば、同様の安全性が確保される。また、ジェット力に対する設定値が本実験に用いた値より大きい場合についても、コンクリートのバックアップがあれば本実験と同程度の安全性を期待することができよう。

4. 結 言

仮想ジェット力に対するドライウェルの強度を実物大のモデルを用いた実験によって検討した。破断強度への安全率を 4 として実験結果を検討してみると、50 mm のギャップを設けて生体遮蔽コンクリートを打設してこれを強度上のバックアップとして用いれば、じゅうぶんな品質管理下で製造されたドライウェルはジェット力に対してじゅうぶんな強度を有することが明らかになった。

今後の課題としては、ここで用いたジェット力の値、強度に対する安全率など全般にかなり安全側に仮定を置いた場合が多いのでこれらをより正しく評価するとともに、合理的な理論式を開発してこの種の安全解析に備えることが大切である。

終わりに、本研究を実施するにあたり種々のご援助、ご協力をいただいた日立製作所日立工場、日立研究所の関係各位に対し謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 浜田, 林ほか: 日立評論 50, 503 (昭 43-6)
- (2) E. T. Onat, R. M. Haythornthwaite: J. Appl. Mech., 23, 49 (Mar. 1956)



新 案 の 紹 介



登録実用新案 第792695号

宮崎尚文・清水邦彦  
黒田勝三

開 閉 器 用 電 気 接 触 子

従来は図 1 に示すように、可動接触子 1 がそう入できる間げきを介して相対向するように設けられた固定接触子 2, 2 は貫通孔 2a, 2a に設けられたガイドピン 3 とばね 4 によって、可動接触子 1 との接触圧力が与えられ、また固定接触子 2, 2 の下部内面には耐弧メタル 5 がろう付され、アークによる接触子材料の侵食に対処している。

このような構成をもつ挟接形開閉器においては、開路動作時に固定接触子 2, 2 が瞬間的に内側に向かって移動する。この際、耐弧メタル 5 をろう付する際の加熱によって固定接触子 2, 2 の下部は焼鈍され、機械的性能が低下しているため、貫流孔 2a, 2b 付近より下の部分が慣性力により点線で示すように変形することがあり、可動接触子 1 の固定接触子 2, 2 へのそう入を困難とし、投入不能事故を誘起する危険があった。

このため、本案では図 2 に示すように、固定接触子 2, 2 の下部、耐弧メタル 5 を有する外面部に複数本の印圧加工痕(こん) 2b を打

撃、または押力により設けることにより、機械的強度を増大し、上記変形を防止し、可動接触子 1 のそう入を容易ならしめるようにした。(鈴木)

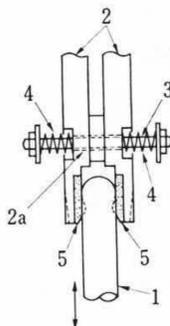


図 1

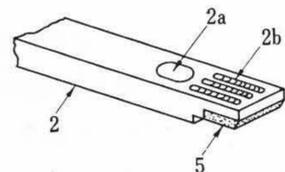


図 2