

電力中央研究所 正員 青柳 征夫
正員 大沼 博志
鹿島建設技術研究所 高橋 敏夫

1 まえがき

昭和52年4月、通産省において技術基準(案)が作成されるに伴ないコンクリート製格納容器の建設への機運が高まりつつある。格納容器の最も危険な荷重状態は、冷却材損失事故による内圧が持続しているときに、地震力が作用する状態である。本研究は、鉄筋コンクリート製格納容器を対象とし、上記の荷重状態を想定し、モデルの設計を行ない、内圧と同時に水平力を作用させ、モデルの変形状態ならびに破壊モードを調べたものである。

2. 供試体および試験方法

事故時設計内圧を 3 kg/cm^2 地震荷重による水平力を建築基準法による一般建築物に対する値の3倍として、鉄筋量を算定した結果内圧に対し1.2%せん断力に対し、0.6%の鉄筋量が必要となった。この試算結果に基づき、縦・横方向ともに鉄筋比を1.8%および2.4%とした2体の縮尺約 $1/25$ 直径160mm壁厚6mmの内筒形モデルを2体作製し試験した(図-1)。モデルの内面をゴムバックを入れてシールし、水圧ポンプにより内圧を与えた。供試体の上下には剛なスラブを取りつけ、下端を固定し、上部のスラブにジャッキにより正負交番漸増水平力を作用させ、最終的には一方方向の水平力で破壊させた。モデルはモルタルで作製し、 $\phi 6 \text{ mm}$ 異形鉄筋を配筋した。これらの材料の諸性質は、表-1示すとおりである。

表-1 モデルの諸元、材料特性値
および各種耐力

モデルの種類	C-1.8-3.0	C-2.4-3.0
圧 圧	3.0 kg/cm^2	
円周方向鉄筋比	1.8 %	2.4 %
軸方向鉄筋比	全上	全上
鉄筋の性質	D6, $\sigma_{sy} = 40.1 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_{su} = 56.8 \text{ kg/cm}^2$	
モルタル	299	386
圧縮強度 (kg/cm^2)	2.43×10^5	2.65×10^5
マンパ数		
せん断ひびわれ荷重	21.6	18.0
曲げ降伏荷重	42.0	60.0
せん断降伏(円周方向)荷重	56.0	88.3
せん断降伏(軸方向)荷重	56.0	84.0
最大荷重	92.0	108.0

3. モデルの破壊状態と耐力

水平加力に先立ち、内圧試験を行なった結果、両供試体とも約 0.8 kg/cm^2 の内圧においてまず最初に鉛直方向ひびわれの発生がみられ、 3 kg/cm^2 では鉛直および水平方向ともほぼ鉄筋の間隔に相当する間隔で $0.06 \sim 0.08 \text{ mm}$ のひびわれが発生した。水平力を加えてゆくと、せん断応力度が最大となる側壁部で水平と約 45° の方向をなす斜ひびわれの発生がみられ、このときの側壁部最大せん断応力度は、C-1.8-3.0およびC-2.4-3.0供試体でそれぞれ 14.3 および 11.9 kg/cm^2 であった。さらに水平力を増加させてゆくと固定端モーメントにより加力側の柱脚部の鉄筋が降伏し始めたがこのときの荷重は、内圧による鉄筋応力を降伏点から差し引いた値がモーメントに抵抗すると考えて $\kappa=15$ として弾性理論で計算すると、C-1.8-3.0およびC-2.4-3.0でそれぞれ 41.6 t および 62.0 t となり、実測値と比較的良好一致をみせている。次に水平荷重を増加させると、側壁高さ中央部の水平および鉛直鉄筋

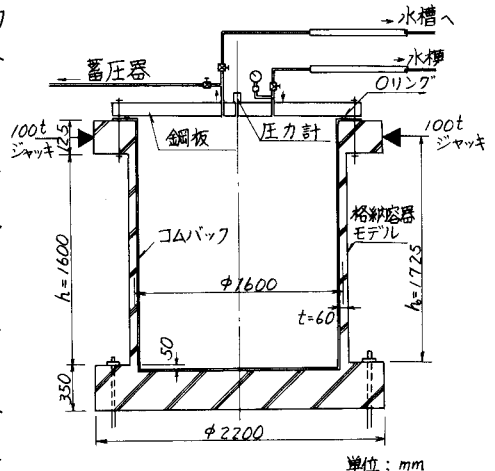


図-1 モデルの寸法と試験方法

がほとんど同時に降伏した。これをせん断降伏荷重(鉄筋 kg/cm^2 の応力度が 4000 kg/cm^2 となるとき)とし、この荷重における $F_{\text{Lügge}}^{(1)}$ 、 $Leitz^{(2)}$ および $Peter^{(3)}$ の算定式による水平鉄筋の応力度を算定するとC-18-3.0の供試体では、それぞれ2211、4263および3783 kg/cm^2 となり、C-24-3.0の供試体では、それぞれ1665、4048および3666 kg/cm^2 となる。この結果より、せん断力をすべてコンクリートに抵抗させると考える $F_{\text{Lügge}}$ の式は、鉄筋応力度を著しく過りに評価し、危険であるのに対し、せん断力がすべて鉄筋で負担されると仮定する $Leitz$ の式は、ほぼ実測値に近い値を与えることがわかる。 $Peter$ の式では、ひびわれ縁でのせん断抵抗がないとしたとき、水平および鉛直鉄筋が同時に降伏することになるが、実測結果はこのことを裏付けている。通産技術基準(案)に基づいて設計されたC-18-3.0供試体の実測耐力92.0tは、設計せん断力48.7tに対し、約1.9の安全率を与えている。

4. モデル変形

内圧によるモデルの高さ中央部のふくらみの実測値と計算値の比較を図-2に示す。円周方向の膜剛性の算定式には、ソ連RC設計基準による次式を用いた。

$$E_{sm} = (1 - 0.7 \sigma_{tu} / p_{fs}) E_s \quad (1)$$

ここに、 E_{sm} ；鉄筋の全周にわたる平均ひずみ、 σ_s ；ひびわれ断面の鉄筋の応力度、 E_s ；ひびわれ断面の鉄筋のひずみ、 P ；鉄筋比、 σ_{tu} ；コンクリートの引張強度(1)式のような平均軸剛性の考え方に基づけば、内圧による変形を比較的良好な精度で推定できることがわかる。水平力による上面の変位は、モデルを片持りと仮定し、曲げ変形とせん断変形を考慮し、次式で算定した。

$$\delta_c = \frac{QH^3}{3E_c I_{os}} + \frac{QH(2H_0 - H)(H_0 - H)}{2E_c I_{os}} + \frac{QH^2(H_0 - H)}{2E_c I_{os}} + \frac{QH}{G_c \pi R t} \quad (2)$$

ここに、 δ_c ；水平加力位置での変位、 Q ；水平力、 H 、 H_0 ；図-3参照、 E_c ；コンクリートの弾性係数(表-1の値の $1/2$ とする)、 I_{os} ；コンクリートの引張を無視した円環断面の慣性モーメント、 G_c ；コンクリートのせん断剛性率(一面せん断試験の結果に基づくせん断剛性の実測値から決定) R ；モデルの半径(80cm)、 t ；モデルの厚さ(6cm)。弾性係数およびせん断剛性の低減を実際に即して考慮したにもかかわらず、水平変位の実測値は計算値の2倍以上となっており、共存する引張張力、繰返し荷重、基礎版からの鉄筋の抜け出し等が変形に大きな影響を及ぼしていると考えられるが、格納容器の地震力に対する剛性評価に関しては、今後の研究によって解明してゆく必要があるものと思われる。

参考文献

- (1) Static und Dynamic der Schalen. 2. Auflage Springer Verlag Berlin 1957
- (2) Zum Stand der Berechnung kreuzweise bewehrten Platten. Bauing. 1925, Heft 32.
- (3) Zur Bewehrung von Scheiben und Schalen für Hauptspannungen. Die Bautech. 5, 6/1966
- (4) 斎藤、山田「せん断引張荷重下における鉄筋コンクリートのせん断耐力」第33回土木学会年次学術講演会概要

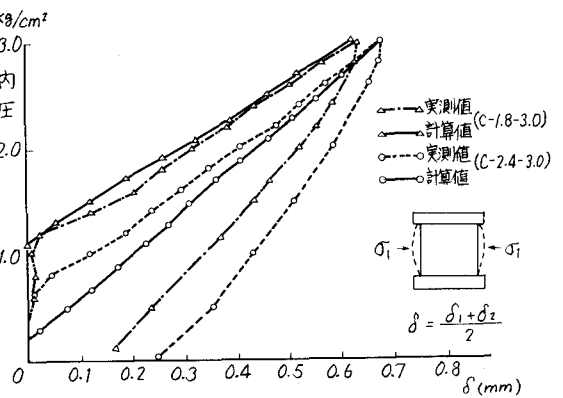


図-2. 円筒高さ中央におけるふくらみと内圧の関係

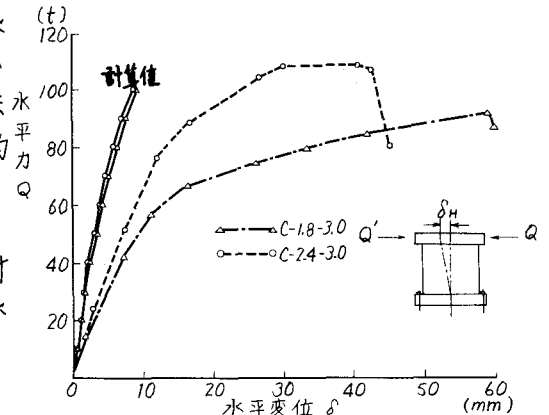


図-3. 水平力と水平変位の関係