

大成建設(株) 正員 ○川上 純
 コロンビア大学 正員 篠塚正宜

1. まえがき

近年、構造物の設計において、従来の許容応力度設計法にかわり、信頼性理論に基づいた設計法が各国の構造物設計基準に取り入れられつつある。これは高信頼度を要求される原子力発電所の構造物についても同様であり、種々の研究がなされている。本報告は、信頼性解析に関するコロンビア大学とブルックヘブン国立研究所(BNL)との共同研究の1部であり、典型的な既存の原子炉格納容器(Containment)の信頼性解析の結果である。

2. 構造物及び外力

解析の対象とした原子炉格納容器は、PWR型の鉄筋コンクリート製の構造物であり、図-1に示すように円筒型の壁と半球型のドームから構成されている。円筒型の壁は厚さ2.7mの底盤につづいているが、底盤はほぼ剛体と考えられるので、解析においては円筒壁の下部は固定とした。主鉄筋は水平、鉛直およびそれに45°の対角方向の3方向に配置されており、鉄筋量は下部が多く上部は少なくなっている。

解析で考慮した荷重は、自重による死荷重(D)、冷却水逸水事故時に発生する内圧力(P)、および地震荷重(E)の3種類である。死荷重はそれのみによる構造物の限界状態確率はほぼ0であるので確定量として取り扱った。事故時の内圧力は正規変数とし、内壁に一樣に作用する静的荷重とした。地震荷重は、次のような金井-田治見スペクトル $S_{ggxx}(\omega)$ を持つ定常ガウス過程とし、水平1方向入力とした。

$$S_{ggxx}(\omega) = S_0 \frac{1 + 4\zeta_g^2(\omega/w_g)^2}{[1 - (\omega/w_g)^2]^2 + 4\zeta_g^2(\omega/w_g)^2} \quad \text{---(1)}$$

ここで w_g , ζ_g はそれぞれ地盤の卓越角振動数および減衰定数であり、 S_0 は強度を表す定数である。例年の地震加速度の分布関数 $F_A(a)$ をタイプIIの極値分布と仮定すると、地震のピーク加速度 A_1 の分布関数 $F_{A1}(a)$ は、

$$F_{A1}(a) = 1 - \left(\frac{a_0}{a}\right)^\alpha \quad a \geq a_0 \quad \text{---(2)}$$

となる。 (a_0) は考慮した最小加速度)そして、ピーク加速度は金井-田治見スペクトルの標準偏差 σ_g の3倍と仮定し $F_{A1}(a)$ の分布形を求めた。表-1に各荷重の諸元を示す。

3. 解析方法

解析は、i)有限要素法による応力解析、ii)限界状態関数の作成 iii)限界状態と応力を用いた信頼度解析、の3つに分けられる。

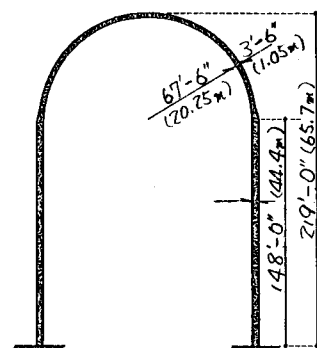


図-1格納容器のスケッチ

表-1 荷重の諸元

荷 重	諸 元
死荷重(D)	確 定 値
事故時の 内圧力(P)	発生率 $\lambda_P = 2.16 \times 10^{-3}/\text{年}$ 継続時間 $\mu_{dp} = 1200 \text{ 秒}$ 正規分布 $\bar{P} = 2.92 \text{ kg/cm}^2$ $\sigma_P = 0.35 \text{ kg/cm}^2$
地震荷重 (E)	金井-田治見スペクトルを持つ 定常ガウス過程 $w_g = 8\pi$ $\zeta_g = 0.6$ $F_{A1}(a) = 1 - \left(\frac{a_0}{a}\right)^\alpha$ $a_0 = 0.05, \alpha = 3.14$ $a_{max} = 0.71g$ 発生率 $\lambda_E = 1.64 \times 10^{-2}/\text{年}$ 継続時間 $\mu_{dE} = 15 \text{ 秒}$

i) 有限要素法による解析. 構造物を23層540ヶの薄肉シェルの有限要素でモデル化し, 死荷重による応力 $\{\tau\}_D$ および単位内圧力による応力 $\{\tau\}_{P=1}$ を計算した. 動的荷重は, まずモード解析を行い, そのモードの中から1次と2次の曲げモードを抽出した. そして後の信頼度解析に用いるモーダルマトリックスや剛性マトリックス等を抽出した. 鉄筋コンクリートは, 種々の荷重を受けるとクラックを生じるが, そのパターンを予測するのは困難である. ここでは線形解析を行ったのでクラックによる剛性低下の効果を1/2 と仮定した.

ii) 限界状態関数の作成. 鉄筋コンクリートの終局耐力 (圧縮ひずみ $\varepsilon = 0.003$) を限界状態とし, 構造物のある部分において限界状態に達した時に, 構造物全体が限界状態に至ったと定義した. この限界状態面は断面に作用する応力 $\{\tau\} = \{N, M\}^T$ (N : 軸方向力 M : モーメント) で表わすことができる. 各有限要素では個々の限界状態面を持つ. 解析ではこれを, 8本の直線で近似し, 以下の式で表わした.

$$R_j - \{A_j\}^T \{\tau^{(e)}\} = 0 \quad (j=1, 2, \dots, 8) \quad \text{----- (3)}$$

耐力は確定量とした. iii) 信頼度解析. 各要素に発生する応力 $\{\tau^{(e)}\}$ は, 死荷重による応力 $\{\tau^{(e)}\}_D$, 内圧力による応力 $\{\tau^{(e)}\}_{P=1}$ および地震による応力 $\{\tau^{(e)}\}_E$ の和で表わされる.

$$\{\tau^{(e)}\} = \{\tau^{(e)}\}_D + P \cdot \{\tau^{(e)}\}_{P=1} + \{\tau^{(e)}\}_E \quad \text{----- (4)}$$

(3)式と(4)式から, 各荷重の組み合わせ時の限界状態確率 P_{fi} を求めることができる. なお地震荷重での限界状態確率は, モーダルマトリックスと金井-田治見スペクトルから求まるOut-Crossing Rate と地震加速速度の分布関数から求めた. ²⁾

4. 解析結果

各荷重組み合わせ下における各要素の限界状態確率 P_{fi} を図-3に示す. 構造物としての限界状態確率 P_f は, 前に記したように, 最大の P_{fi} を持つ要素 (クリティカル要素) に等しいとして表-2を得た. 内圧力時ではドーム下部が, 地震時では円筒壁下部が, また内圧力と地震の組み合わせ時ではドーム下部がクリティカル要素である.

5. あとがき

以上, 現在の設計基準に暗にふくまれている信頼度レベルを評価するために, 既存の構造物の解析を行った. この解析では種々の仮定を用いたが, これにより当然結果も影響を受けている. 今後これらの仮定を改善しつつ, いくつかの格納容器を解析し, 信頼度レベルの合理的評価を行うことが必要である.

- 1) Chang, M. Proc. 7th SMIRT Conf. 1983
- 2) Kako, T. Proc. 7th SMIRT Conf. 1983

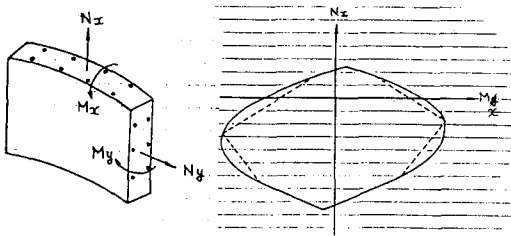


図-2 限界状態面

なお, 今回の解析では, コンクリートの圧縮強度および鉄筋の降伏強度等, 構造物の

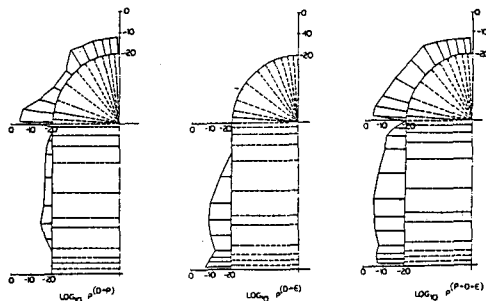


図-3 限界状態確率

表-2 耐用期間40年での限界状態確率

荷重の組合せ	発生回数	条件付 限界状態確率	限界状態確率 P_f
D + P	8.64×10^{-7}	3.99×10^{-7}	3.46×10^{-8}
D + E	6.56×10^{-1}	1.02×10^{-8}	6.72×10^{-9}
D + P + E	5.46×10^{-8}	$(1.57 \sim 1.68) \times 10^{-5}$	$(8.55 \sim 9.12) \times 10^{-13}$
全体	—	—	4.13×10^{-8}