

大成建設(株) 正員 加々美修一
コロンビア大学 正員 篠塚 正宣

1. はじめに

現在、米国を中心とした原子炉格納容器の設計における荷重係数設計法では、材料の終局強度及びその作用荷重に対する適当な荷重係数を用いた限界状態設計法が取り入れられている。しかし、ここで用いられる荷重係数が、同レベルの信頼性を与えるものかどうか、さらに設計から決まる破壊パターンの違いが信頼性に与える影響がどの程度かなどについて、今まで十分な検討が行なわれてきたとは言えず、現在、これらの検討が行なわれつつあるのが実状である。そこで、著者らはRC格納容器を対象にその設計結果に対し、篠塚ら⁽¹⁾によって開発された手法による信頼性解析を実施し、構造物の信頼性について検討を行なった。

2. 限界状態設計法

ここで用いた限界状態設計法は、ACI 349-76及び文献⁽²⁾を基本にしている。断面耐力と設計荷重の関係は次式の通りである。

$$\phi R_n \geq \sum_{i=1}^n \gamma_i Q_i$$

ここで、 R_n : 断面耐力

ϕ : 断面耐力の低減係数

(ここでは、0.65~0.85とした)

Q_i : 各設計荷重による断面力

γ_i : 各設計荷重に対する荷重係数

(パラメータとし

0.9~3.0と変化させた)

n : 荷重組み合わせ数

具体的な断面力算定には、各作用荷重に対し、有限要素法による弾性解析を実施し、さらに地震荷重に対しては応答スペクトル法⁽³⁾を用いた。一方、断面強度としては、図1に示す鉄筋コンクリートの既往の仮定を取り入れた終局強度理論⁽⁴⁾を用い、必要鉄筋量の算定を行なった。

3. 信頼性解析法

ここで用いた解析法は、基本的には有限要素法による応力解析と、不規則振動論を組み合わせたものである。

ここで想定する限界状態は、鉄筋・コンクリートに対し、それぞれ次の条件とした。

$$f_s \geq f_y \quad f_c \geq 0.85 f'_c$$

ここで、

f_s, f_c : 鉄筋・コンクリートの応力

f_y : 鉄筋の降伏点応力

f'_c : コンクリートの圧縮強度

これを断面応力平面 (σ, m) で表わしたのが図2である。⁽⁵⁾

また、対象とする荷重についてはそれぞれ、その荷重強度分布を統計量を基に決定した分布形で近似し各組み合わせ荷重について、その初期超過確率(破壊確率)を算定するものとしている。ここでは、荷重

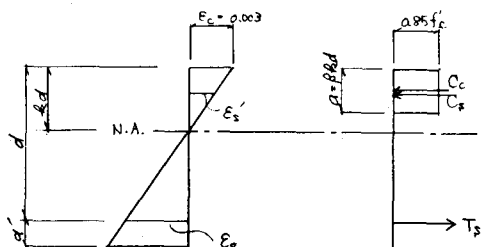


図1 RC断面 歪分布及び応力分布

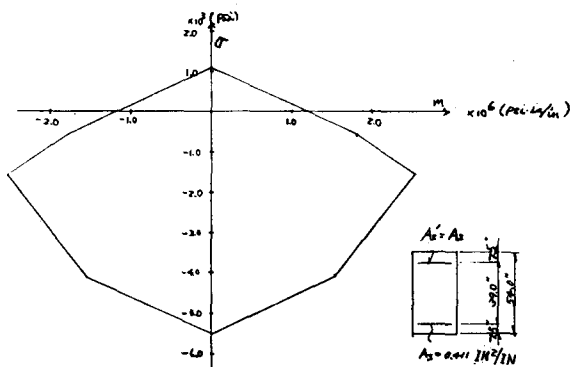


図2 限界状態境界

として死荷重, LOCA時内圧荷重, 地震 (SSE) 荷重を想定したが, このうち死荷重については, そのバラツキが十分小さいものとし, 確定値として扱った。表1に解析条件を示す。

4. 解析結果

解析対象を図4に, 解析結果の一例を図5及び表2に示す。

表1 解析条件

コンクリート	$f_c = 5249(\text{psi})$ (48.5MPa)
鉄筋	$f_y = 71000(\text{psi})$ ()
死荷重	$W_d = 150(\text{lb/ft}^2)$ (4870N)
LOCA時内圧	炉心: 圧縮力 内圧平均: 0.9 PA (PA: 1500N/4770N) C.O.T.: 0.12 $\lambda_p = 1.6 \times 10^{-3}$ 解析時間: 1200 (sec)
地震 (SSE) 荷重	地震面 (N) から温度 方向: 水平方向 最大地震: 0.17 (g) 方向: 解析面 O 全長: 地震面から 解析面 解析時間: 10 (sec) HAZARD 曲線: 図3

a. 死荷重+内圧 (D+P)

内圧に対する荷重係数を1.0とした場合においては, その破壊確率は 5×10^{-5} 程度にあることを示しているが, これは設計から求めた必要最小鉄筋量を導入した場合の値であり, 通常の設計余裕を考えると, さらに信頼性の向上が望める。(図5)

ここで特に注目されるのは, 設計で求めた円周方向, 軸方向の断面に対する信頼性解析の値がかなり異なる点であり, これは断面の破壊パターンの違い (全断面引張破壊と引張鉄筋降伏+コンクリート圧壊による破壊) が, その鉄筋量算定に影響を与えていることによるものと考えられるが, このことは内圧荷重に対し最大引張力の生ずる容器側壁中段部の円周方向鉄筋量より, 側壁下端の軸方向鉄筋量に, 設計的余裕をもたせることの必要性を示していると言える。

b. 死荷重+地震荷重 (D+Ess)

内圧荷重に比べ, 地震荷重に対する破壊確率はかなり大きな値を示しているとともに, 荷重係数の変化に対する破壊確率の変化が, あまりセンシティブでないことを示している。また軸方向と周方向との破壊確率は, 内圧の場合と違いほぼ同程度である。

以上のことからここで示した信頼性解析から見た場合, 限界状態設定法から決まる設計値にも, 作用荷重・限界状態の違いから異なる破壊確率が与えられるとともに, その荷重係数のセンシティブリティも異なったものになることが考えられる。

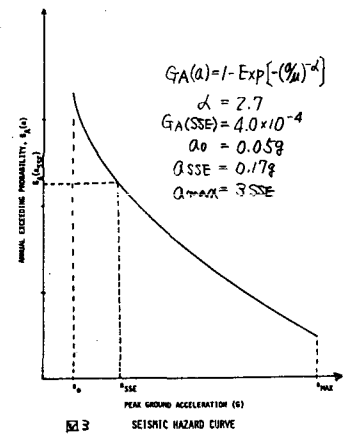


図3

5. 参考文献

- (1)Shinozuka, M., Kako, T. et al. "Estimation of Structural Reliability Under Combined Loads" SMIRT 7 Conf. Aug. 1983
- (2)MacGregor, J.G. "Load and Resistance Factors for Concrete Design" ACI JOURNAL / Jul - Aug 1983
- (3)U.S. Atomic Energy Commission, Regulatory Guide 1.60
- (4)Winter, G., Nilson, A.H. "Design of Concrete Structures" McGraw Hill
- (5)Chang, M., Kako, T. et al.

"Structural Modelling and Limit State Identification for Reliability Analysis of RC Containment Structures" SMIRT 7 Conf. Aug. 1983

表2 解析結果 (破壊確率)

	D + P		D + Ess	
	0.9D+1.0P	0.9D+1.2P	(0.9D+1.0E) (1.2D+1.0E)	(0.9D+1.0E) (1.2D+1.0E)
軸方向	ELM. 1-34 5.59×10^{-5}	ELM. 1-34 7.89×10^{-5}	ELM. 6 6.66×10^{-3}	ELM. 6 1.61×10^{-7}
周方向	ELM. 47-128 1.63×10^{-7}	ELM. 47-128 2.93×10^{-7}	ELM. 470 3.26×10^{-7}	ELM. 470 1.27×10^{-7}

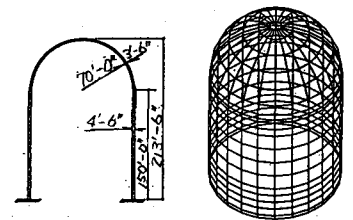


図4 解析対象及び要素分割図

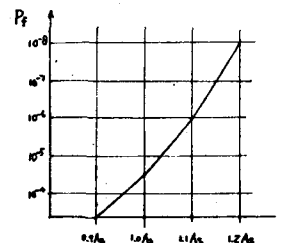


図5 鉄筋余裕と信頼性