

使用済燃料プール壁における面内せん断力及び面外せん断力の許容値について

1. 概要

添付書類「V-4-4-2-1 使用済燃料プールの耐震性についての計算書」において使用済燃料プールの壁の面内せん断力及び面外せん断力に対する評価において、発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格（(社)日本機械学会，2003）（以下「CCV規格」という。）のシェル部評価式を用いることの妥当性について確認する。妥当性の確認は、CCV規格のシェル部評価式と原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（(社)日本建築学会，2005）（以下「RC-N規準」という。）に基づく評価式の許容値の比較により行う。

2. 面内せん断力について

以下にRC-N規準とCCV規格の面内せん断に対する許容値の評価式を示す。両式を比較すると、直交する各方向のせん断補強筋比が異なるとき、RC-N規準については鉄筋比の小さい方向の値を用いるため、発生する膜応力度によっては、RC-N規準の許容値がCCV規格の許容値を下回る場合がある。

直交する各方向のせん断補強筋比が異なる断面について、膜応力度を無視した場合のCCV規格の許容値に対するRC-N規準の許容値の比率を求め、 S_d 地震時及び S_s 地震時の検定比がその比率以上の裕度を有していることを確認する。

鉄筋の許容応力度を表 1 に、各断面の配筋一覧を表 2 に、評価結果を表 3 に示す。 S_d 地震時及び S_s 地震時の検定比は、各壁における最大値を記載する。 S_d 地震時及び S_s 地震時の検定比がCCV規格の許容値に対するRC-N規準の許容値の比率以上の裕度を有していることを確認した。

【RC-N規準における付帯ラーメンのない耐震壁の許容水平せん断力】

$$Q_A = r p_s A_e s f_t$$

ここで、

r : 開口に対する低減率

$$r = \min \left(\begin{array}{l} 1 - \frac{l_0}{l_w} \\ 1 - \sqrt{\frac{h_0 l_0}{h_w l_w}} \end{array} \right)$$

t : 壁板の厚さ

l_w : 壁板の長さ

h_w : 壁板周辺のスラブ中心間距離

l_0 : 開口部の長さ

h_0 : 開口部の高さ

p_s : 壁板の直交する各方向のせん断補強筋比のうち小さいほうの値

A_e : 耐震壁のせん断力に対抗する有効な断面積でウェブ壁部分の断面積をとる。

$$A_e = t l_w$$

$s f_t$: 壁筋のせん断補強筋用短期許容引張応力度

【CCV規格における荷重状態IVの面内せん断応力度に対する許容値】

$$\tau_u = 0.5 \{ (p_{t\phi} \cdot f_y - \sigma_{0\phi}) + (p_{t\theta} \cdot f_y - \sigma_{0\theta}) \}$$

ここで、

$p_{t\phi}$: 子午線方向主筋の鉄筋比

$p_{t\theta}$: 円周方向主筋の鉄筋比

$\sigma_{0\phi}$: 外力による子午線方向の膜応力度 (N/mm²)
(引張の場合のみを考慮し、符号を正とする)

$\sigma_{0\theta}$: 外力による円周方向の膜応力度 (N/mm²)
(引張の場合のみを考慮し、符号を正とする)

f_y : 鉄筋の許容引張応力度及び許容圧縮応力度 (N/mm²)

表 1 鉄筋の許容応力度

外力の状態	SD345*
	引張及び圧縮 (N/mm ²)
S _d 地震時 S _d 地震時+温度 S _s 地震時	345

注記 * : 建設当時の鉄筋の種類は SD35 であるが現在の規格 (SD345) に読み替えた許容応力度を示す。

表 2 各断面の配筋一覧

部位	レベル EL. (m)	壁厚 (cm)	配筋			鉄筋量 (m ² /m)	
			縦筋		横筋	縦筋	横筋
北側壁	34.689~ 39.191	200	D35@200 2段 内 D29@200 2段 外		D29@200 2段 内外共	0.01599	0.01285
東側壁	34.689~ 39.191	215.4	D35@200 2段 内 D29@200 2段 外		D29@200 2段 内外共	0.01599	0.01285
西側壁	34.689~ 39.191	215.4	D35@200 2段 内 D29@200 2段 外		D29@200 2段 内外共	0.01599	0.01285
	43.198~ 46.5	137.2	D29@200 2段 内外共		D29@150 2段 内外共	0.01285	0.01713

表 3 各断面の評価結果

部位	レベル EL. (m)	RC-N規準		CCV規格			許容値 の比率*2	検定比	
		鉄筋比 (%)	許容値*1	鉄筋比 (%)		許容値		S _d 地震時	S _s 地震時
				縦筋	横筋				
北側壁	34.689~ 39.191	0.642	2.21	0.800	0.642	2.49	0.891	0.343	0.345
東側壁	34.689~ 39.191	0.596	2.06	0.742	0.596	2.31	0.892	0.553	0.605
西側壁	34.689~ 39.191	0.596	2.06	0.742	0.596	2.31	0.892	0.573	0.625
	43.198~ 46.5	0.936	3.23	0.936	1.249	3.77	0.857	0.573	0.625

注記 *1 : RC-N規準の許容値は単位面積あたりの許容水平せん断力とする。

*2 : CCV規格に対するRC-N規準の許容値の比率。

3. 面外せん断力について

以下にRC-N規準とCCV規格の面外せん断に対する許容値の評価式を示す。

表4に示す主筋の鉄筋比が最小の断面及び最大の断面を代表断面として、各評価式による許容値の算定結果を図1に示す。なお、CCV規格による許容値算定では、膜応力度は無視する。また、RC-N規準及びCCV規格の許容値算定では、せん断補強筋による項は無視した。

図1に示すようにせん断スパン比が同一であれば、CCV規格のシェル部評価式による許容値はRC-N規準による許容値以下となり、CCV規格の方が保守的な評価となる。

【RC-N規準の許容せん断力】

$$Q_{AS}=bj\{\alpha f_s+0.5 f_w f_t(p_w-0.002)\}$$

ただし、

$$\alpha=\frac{4}{\frac{M}{Qd}+1}, \quad 1\leq\alpha\leq 2$$

p_w の値が1.2%を超える場合は、1.2%として許容せん断力を計算する。

ここで、

b : 部材幅。

j : 応力中心距離で、 $(7/8)d$ とすることができる。

d : 有効せい

p_w : せん断補強筋比

f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度

$f_w f_t$: せん断補強筋の短期許容引張応力度で、 390N/mm^2 を超える場合は 390N/mm^2 として許容せん断力を計算する。

α : せん断スパン比に $\frac{M}{Qd}$ よる割増係数

M : 設計する壁の最大面外曲げモーメント

Q : 設計する壁のの最大面外せん断力

【CCV 規格における荷重状態Ⅲの面外せん断応力度に対する許容値】

荷重状態Ⅲのシェル部の面外せん断応力度に対する許容値は、荷重状態Ⅳに定める計算式により計算した終局面外せん断応力度の 0.75 倍の値とする。

【CCV 規格における荷重状態Ⅳの面外せん断応力度に対する許容値】

荷重状態Ⅳのシェル部の面外せん断応力度に対する許容値は、次の 2 式により計算した終局面外せん断応力度のいずれか小さい方の値とする。

$$\tau_R = \Phi \{ 0.1(p_t \cdot f_y - \sigma_0) + 0.5p_w \cdot f_y + 0.235\sqrt{F_c} \}$$

$$\tau_R = 1.10\sqrt{F_c}$$

ここで、

τ_R : 終局面外せん断応力度 (N/mm²)

p_t : 主筋の鉄筋比

σ_0 : 外力による膜応力度 (N/mm²) (引張の符号を正とする)

p_w : 面外せん断力に対する補強筋の鉄筋比であって、次の計算式により計算した値

$$p_w = a_w / (b \cdot x)$$

a_w : 面外せん断力に対する補強筋の断面積 (mm²)

b : 断面の幅 (mm)

x : 面外せん断力に対する補強筋の間隔 (mm)

Φ : 低減係数であり、次の計算式により計算した値

(1 を超える場合は 1, 0.58 未満の場合は 0.58 とする)

$$\Phi = 1 / \sqrt{M / (Q \cdot d)}$$

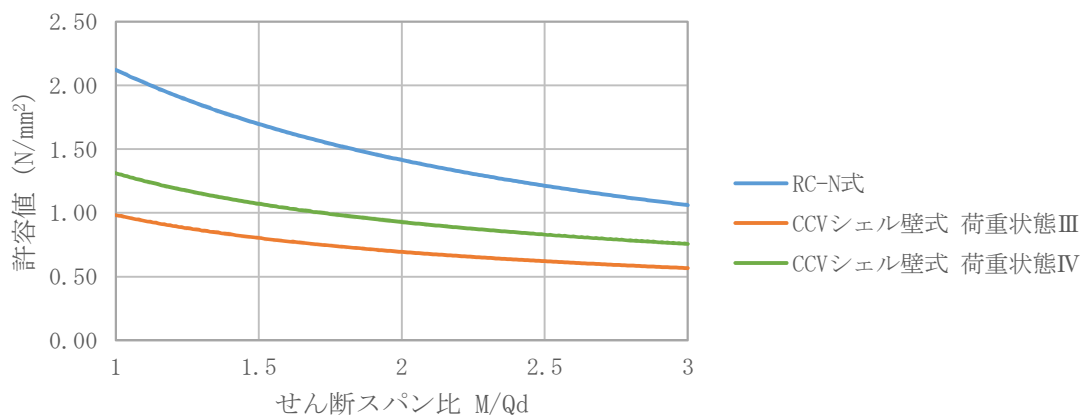
M : 曲げモーメント (N・mm)

Q : せん断力 (N)

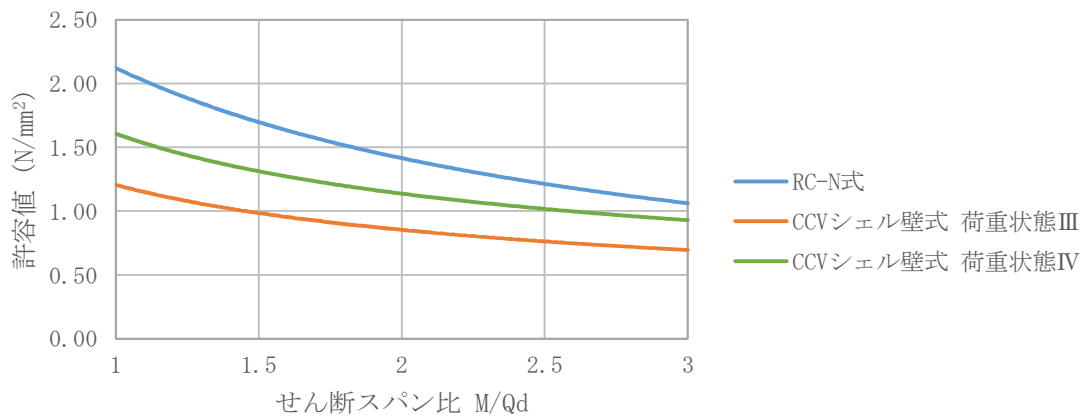
d : 断面の有効せい (mm)

表4 代表断面の配筋

部位	レベル EL. (m)	壁厚 (cm)	方向	配筋	鉄筋比 (%)
西側壁	39.191～ 41.547	215.4	縦筋	D29@200 2段 内外共	0.596
南側壁	34.689～ 46.5	157.6	縦筋	D38@200 2段 内外共	1.45



(a) 鉄筋比が最小の断面 (西側壁, EL. 39.191～41.547 m)



(b) 鉄筋比が最大の断面 (南側壁, EL. 34.689～46.5 m)

図1 面外せん断力の許容値