

本資料のうち、枠囲みの内容は
商業機密を含むため公開でき
ません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0600-40-56_改2
提出年月日	2021年 11月 11日

補足-600-40-56 使用済燃料貯蔵ラックのアンカー部評価

1. はじめに

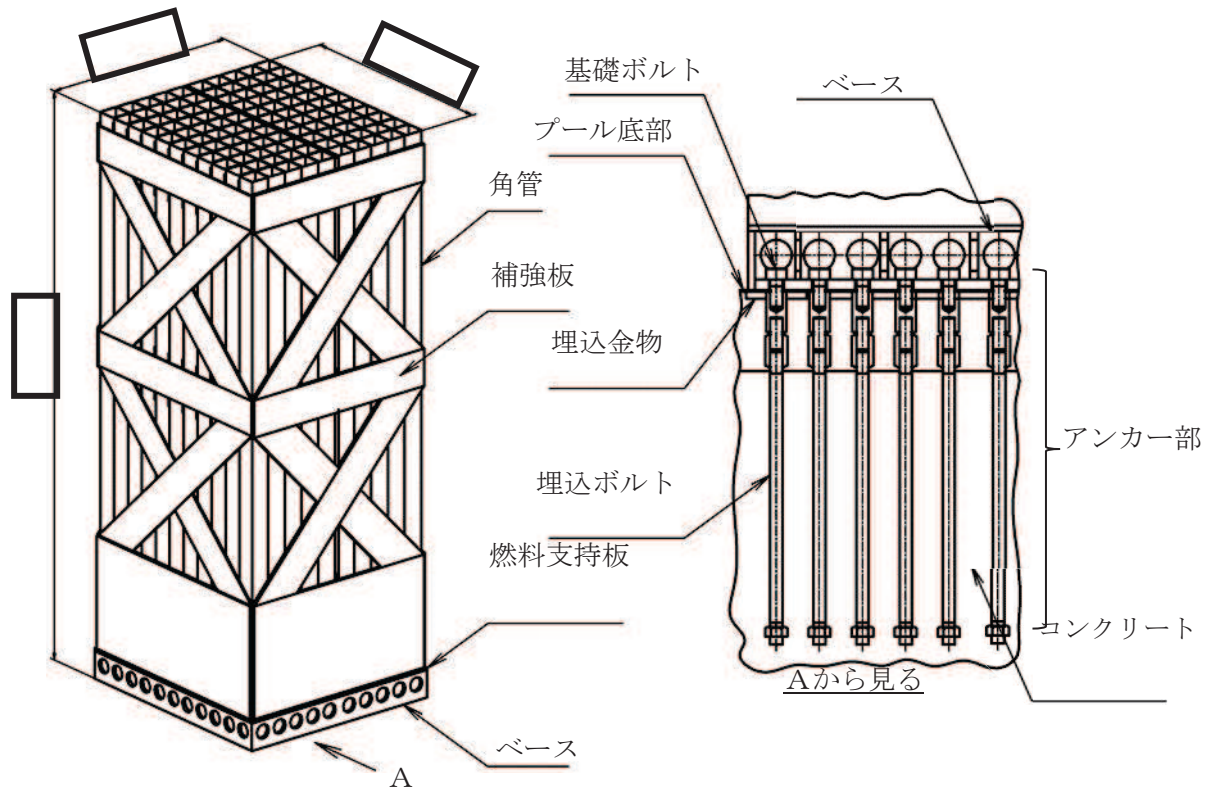
使用済燃料貯蔵ラック（以下「ラック」という。）は、設計基準対象施設においてSクラス施設に、重大事故等対処設備においては常設耐震重要重大事故防止設備及び重大事故緩和設備に分類され、添付書類「VI-2-4-2-2 使用済燃料貯蔵ラック（第1, 2号機共用）の耐震性についての計算書」にて基準地震動 S_s に対する評価を行っている。

本書は、ラックのアンカー部が、基準地震動 S_s に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。

2. 評価項目

耐震評価は、アンカー部の最小裕度評価項目であるコーン状破壊について行う。

ラックのアンカー部概略構造図を図1に示す。



寸法は110体ラックの値（単位：mm）

図1 アンカー部概略構造図

3. 評価条件・評価方法

表1に耐震計算書*1とアンカー部評価の評価条件・評価方法の比較を示す。

アンカー部評価にあたっては、より精緻な評価条件として、方向別のS s 7波のうち最大震度の地震波を用いて、ラックの据付レベルで線形補間した震度を適用する。また、ラックは水中に設置される構造物であることから排除水体積質量による応答低減効果を考慮する。

表1 耐震計算書とアンカー部評価の評価条件・評価方法の比較

項目	評価条件・評価方法	
	耐震計算書*1	アンカー部評価
評価に適用した地震動（水平）	原子炉建屋の0.P.22.50mと0.P.15.00mにおける設計用床応答曲線（S s 7波）から得られる震度のうち最大値を適用する。	原子炉建屋の0.P.22.50mと0.P.15.00mにおける地震波S s -D 2*2の方向別の床応答曲線を用いて、ラックの据付レベル（0.P.21.38m）で線形補間した震度を適用する。
評価に適用した地震動（鉛直）	原子炉建屋の0.P.22.50mと0.P.15.00mにおける設計条件（S s 7波）での1.2ZPAのうち最大値を適用する。	水平方向の地震波と合わせてS s -D 2*2の1.2ZPAを用いて、原子炉建屋の0.P.22.50mと0.P.15.00mの1.2ZPAをラックの据付レベル（0.P.21.38m）で線形補間した値を適用する。
解析手法	はり要素及びシェル要素を用いた有限要素法モデルによるスペクトルモーダル解析	同左
解析コード	「MSC NASTRAN」	同左
解析モデル	添付書類「VI-2-4-2-2 使用済燃料貯蔵ラック（第1, 2号機共用）の耐震性についての計算書」の解析モデル	同左
固有周期	添付書類「VI-2-4-2-2 使用済燃料貯蔵ラック（第1, 2号機共用）の耐震性についての計算書」の固有周期	同左
減衰定数	水平：7% 鉛直：-	同左
水の付加質量の考慮	有	同左
排除水体積質量の考慮	無	有

注記*1：添付書類「VI-2-4-2-2 使用済燃料貯蔵ラック（第1, 2号機共用）の耐震性についての計算書」を指す。

*2: 添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」では、基準地震動 $S_s - D1, D2, D3, F1, F2, F3, N1$ から求めた応答スペクトル (ケース1) に対し、材料物性の不確かさ等を考慮 (ケース2~6) して作成したものを設計用床応答曲線としている。本評価では、より詳細に評価を実施するため、以下の個別条件を適用する。

- 水平方向の地震動については、方向別の地震波のうち最大震度の $S_s - D2$ ケース5を用いる。
- 鉛直方向では建屋の初期剛性の不確かさを考慮しないので $S_s - D2$ ケース5の1.2ZPAは存在しない。そのため、地盤物性が同様の $S_s - D2$ ケース2の1.2ZPAを用いる。

4. 評価用震度

アンカー部の評価は、各固有周期に対する応答加速度に排除水体積質量による応答低減効果を考慮した場合の低減係数（以下「低減係数」という。）を乗じた評価用震度を用いる。

低減係数は、「補足-600-40-40 耐震評価における流体中の構造物に対する付加質量及び応答低減効果の考慮」に記載の無限水中を想定する場合の考え方を用いて、以下のように表される。なお、110 体ラック及び 170 体ラック共に鉛直方向は剛であるため、鉛直方向については低減効果を考慮しない。

$$\text{低減係数} : \frac{M_1 - M_d}{M_1 + M_{11}}$$

M_1 : 質量

M_{11} : 水の付加質量

M_d : 排除水体積質量 (=水中での浮力と同等)

なお、水の付加質量 M_{11} は表 2（機械工学便覧の付加質量）の断面形状が長方形の場合の、単位長さ当たりの付加質量から以下のように表せる。

$$M_{11} = m_H \cdot N$$

$$m_H = \pi \cdot K_1 \cdot \rho_W \cdot (a_0/2)^2 \cdot L$$

m_H : 角管一本当たりの水の付加質量

N : 角管の本数

K_1 : 角管の断面形状から定まる係数 (=1.51, $a=b$ のため)

ρ_W : 水の密度

a_0 : 角管の辺の長さ

L : 角管の全長

また、排除水体積質量 M_d は以下のように表せる。

$$M_d = m_W + m_R \cdot \rho_W / \rho_{\text{sus304}} + V_F \cdot \rho_W \cdot N$$

ρ_{sus304} : ボロン添加ステンレス鋼の密度

ρ_W : 水の密度


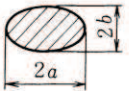
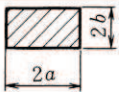
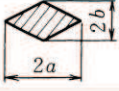

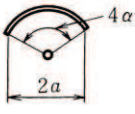

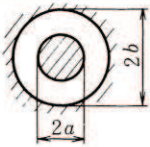
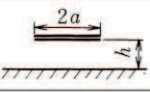
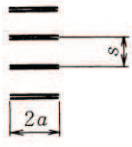
m_W : ラックに含まれる水の質量

m_R : ラックの質量

V_F : 燃料の体積

N : 燃料貯蔵本数 (110 体又は 170 体)

表 2 柱状物体の単位当たりの付加質量 (機械工学便覧抜粋)

断面形状		付加質量
円		$\pi\rho a^2$
だ円		$\pi\rho a^2$ $\pi\rho b^2$
長方形		$\pi K_1\rho a^2$
ひし形		$\pi K_2\rho a^2$
平板		$\pi\rho a^2$
円弧翼		$\frac{\pi\rho a^2}{2}\left(1+\frac{1}{\cos^2 a}\right)$ $\frac{\pi\rho a^2}{2}\tan^2 a$
ジェーコフスキー対称翼		$\frac{\pi\rho a^2}{4}\left(4+\frac{k-2}{k+1}\right)$ $\frac{\pi\rho a^2}{4}(k-2)(k+1)$
同心固定同筒内の円		$\pi\rho a^2\left(\frac{b^2+a^2}{b^2-a^2}\right)$
固定壁近くの平板		$\pi\rho a^2 K_3$
平板列		$\frac{2\rho s^2}{\pi}\log\left\{\cosh\left(\frac{\pi a}{s}\right)\right\}$

備考

b/a	0	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
K_1	1.00	1.14	1.21	1.36	1.51	1.70	1.98	2.23

b/a	0.5	1	2	5
K_2	0.85	0.76	0.67	0.61

$h/2a$	∞	2.5	0.5
K_3	1.00	1.03	1.165

以上の低減係数を考慮した 110 体ラック及び 170 体ラックの評価用震度を表 4 に示す。また、適用する床応答曲線を図 2 に示す。

表 4 評価用震度

ラック種類	方向	地震力*		地震力（低減係数考慮）		低減係数
		水平方向	鉛直方向	水平方向	鉛直方向	
110 体ラック	短辺	4.51	1.46	2.80	1.46	0.62
	長辺	2.73	1.46	1.70	1.46	
170 体ラック	短辺	4.51	1.46	2.76	1.46	0.61
	長辺	2.58	1.46	1.58	1.46	

注記*：原子炉建屋の O.P. 22.50m と O.P. 15.00m における地震波 S s - D 2 ケース 5 の方向別の床応答曲線を用いて、ラックの据付レベル(O.P. 21.38m) で線形補間した震度。

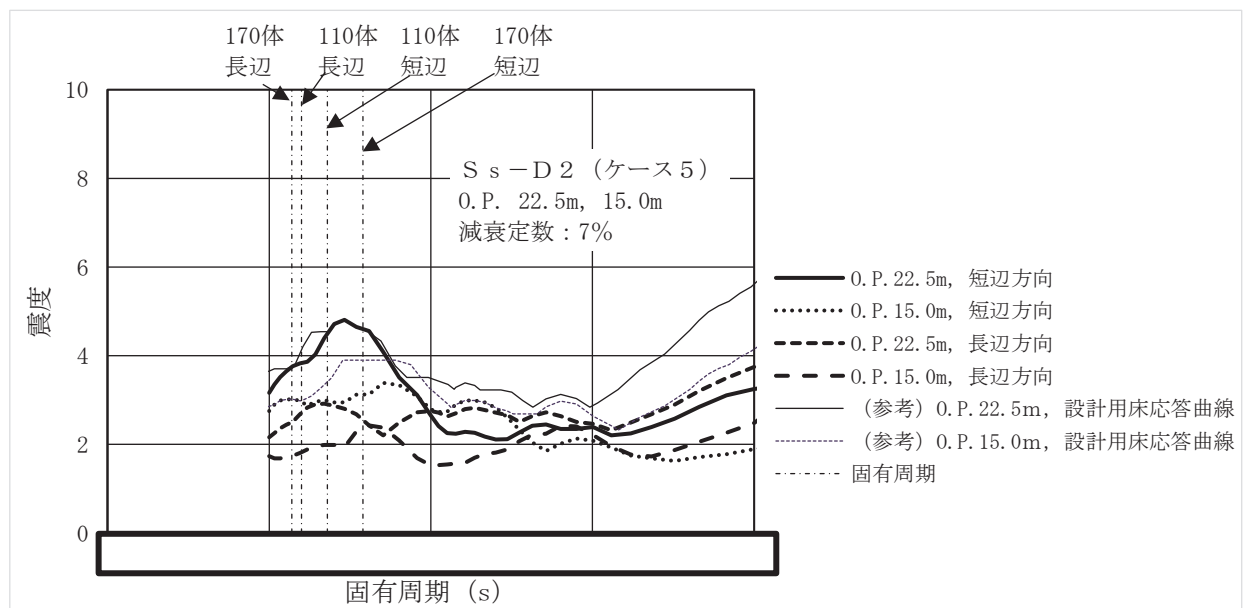


図 2 床応答曲線

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

5. アンカー部評価

原子力発電所耐震設計技術指針（J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版）に基づいたアンカー部の評価方法を以下に示す。また、アンカー部評価に用いる諸元を表 5 に示す。

$$p \leq p_a = \text{Min}(p_{a1}, p_{a2})$$

$$p_{a1} = 0.31 K_1 A_c \sqrt{F_c}$$

$$p_{a2} = K_2 \alpha A_o F_c$$

p : 埋込ボルト 1 本当りの引張荷重(N)

p_a : 埋込ボルト 1 本当りのコンクリート部の許容引張荷重(N)

p_{a1} : コンクリート躯体がコーン状破壊する場合の埋込ボルト 1 本当りの許容引張荷重(N)

p_{a2} : 埋込ボルト頭部に接するコンクリート部が支圧破壊する場合の埋込ボルト 1 本当りの許容引張荷重(N)

K_1 : コーン状破壊する場合の引張耐力の低減係数

K_2 : 支圧破壊する場合の引張耐力の低減係数

F_c : コンクリート強度(設計基準強度)

A_c : 埋込ボルト 1 本当りのコンクリートのコーン状破壊面の有効投影面積(mm²)

α : 支圧面積と有効投影面積から定まる係数 ($=\sqrt{A_c/A_o}$ かつ 10 以下)

A_o : 支圧面積(mm²)

なお、コンクリートのコーン状破壊面の有効投影面積を図 3 及び図 4 に示す。埋込ボルトは、使用済燃料貯蔵プール底部に密に設置されているため、コーン状破壊面の有効投影面積は隣接する燃料ラックの影響を考慮して、隣接するラックの境界までを設定する。

表 5 アンカー部評価に用いる諸元

記号	入力値	
	110 体ラック	170 体ラック
p_{a1}	89010 (N)	102500 (N)
p_{a2}	334700 (N)	356600 (N)
K_1	0.6	0.6
K_2	0.75	0.75
F_c	32.4 (N/mm ²)	32.4 (N/mm ²)
A_c		
α		
A_o		

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

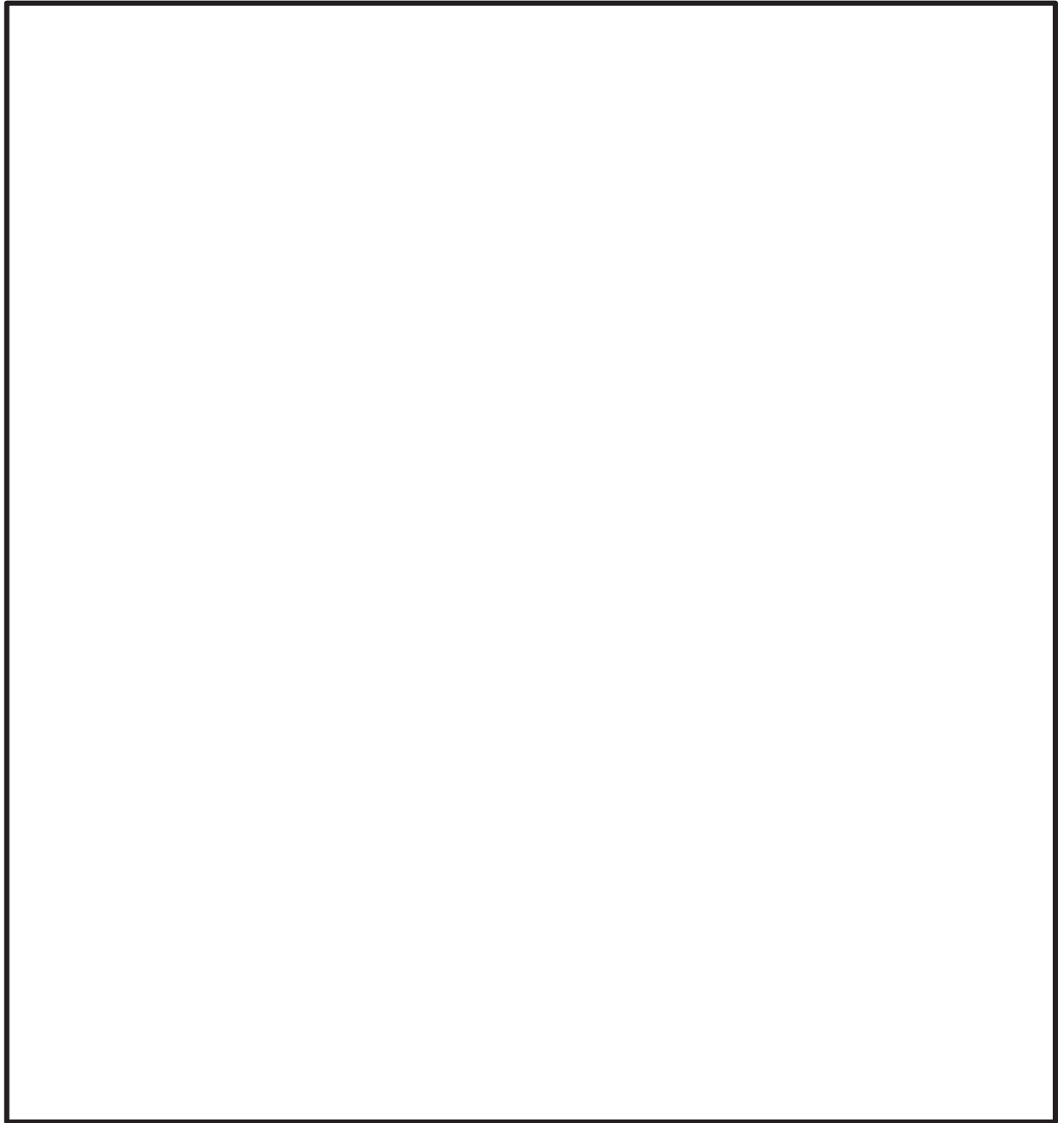


図3 110体ラックの有効投影面積

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

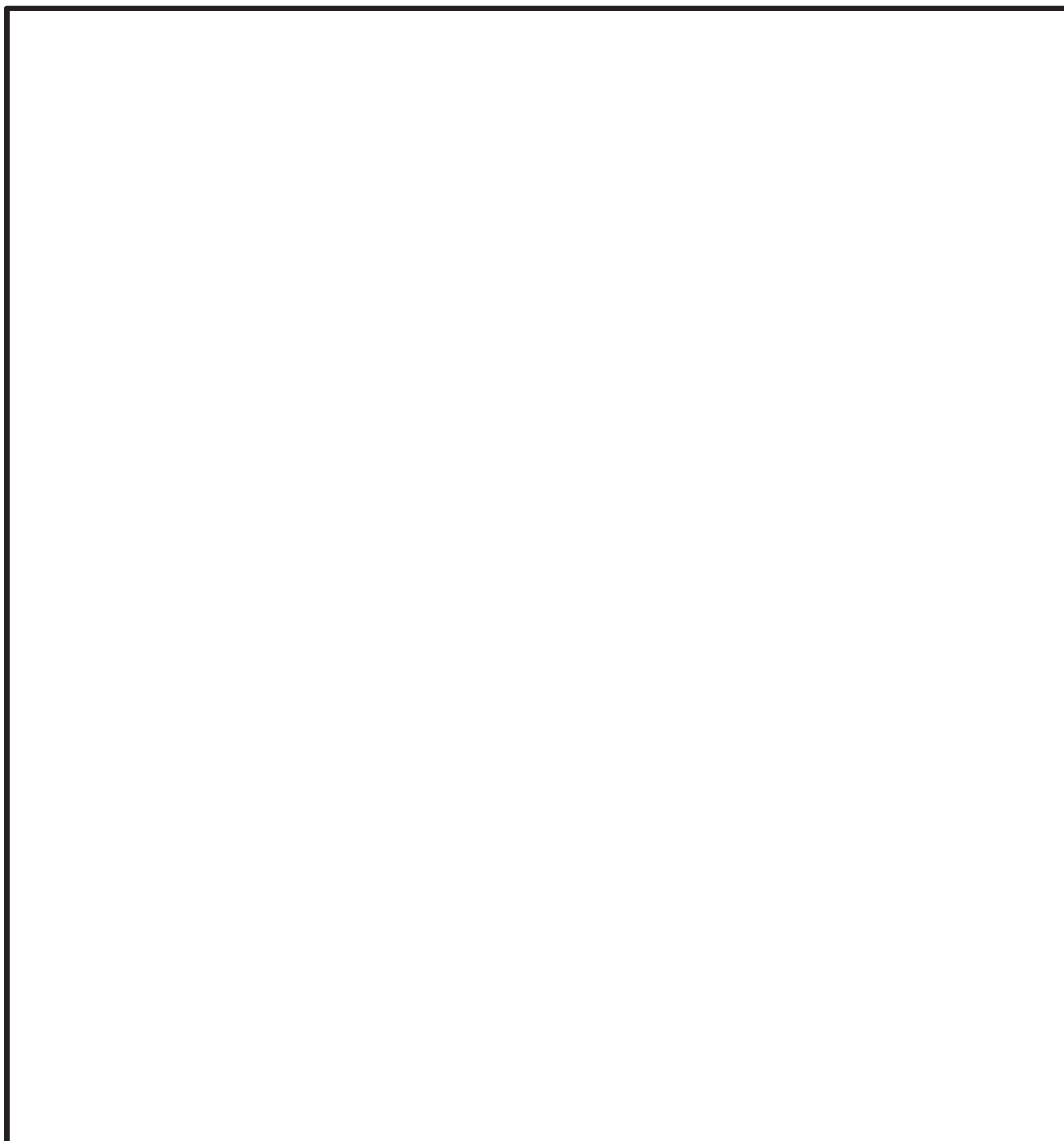


図 4 170 体ラックの有効投影面積

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

6. 評価結果

110 体ラック及び 170 体ラックのアンカー部耐震評価結果を表 6 に示す。引張荷重は、許容引張荷重以下であり、十分な構造強度を有していることを確認した。

表 6 アンカー部の評価結果

ラック種類	方向	引張荷重(N)	アンカー部のコーン状破壊 許容引張荷重(N)	
			許容荷重	裕度
110 体ラック	短辺	80430	89010	1.10
	長辺	34500	89010	2.58
170 体ラック	短辺	90580	102500	1.13
	長辺	26400	102500	3.88