

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1 |
| 提出年月日 | 2021年 11月9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

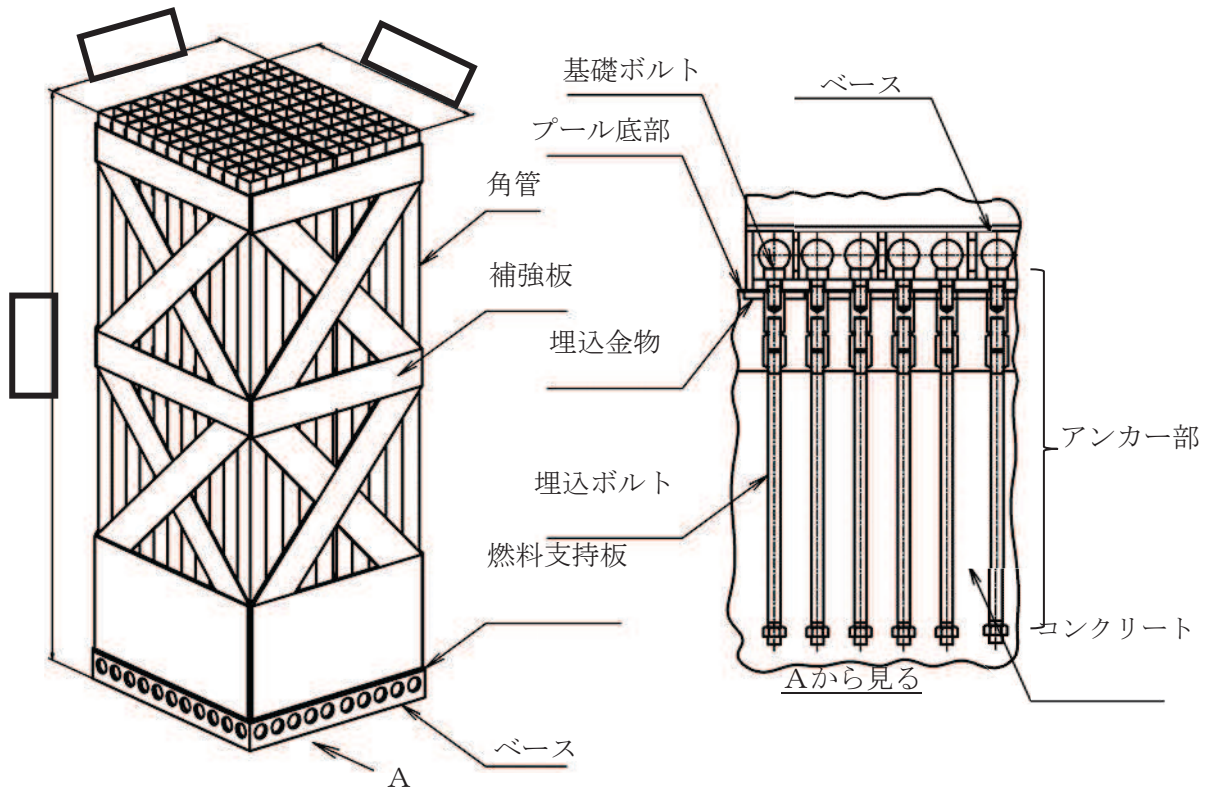
使用済燃料貯蔵ラック（以下「ラック」という。）は、設計基準対象施設においてSクラス施設に、重大事故等対処設備においては常設耐震重要重大事故防止設備及び重大事故緩和設備に分類され、添付書類「VI-2-4-2-2 使用済燃料貯蔵ラック（第1, 2号機共用）の耐震性についての計算書」にて基準地震動 S_s に対する評価を行っている。

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。また、表2に排除水体積質量による応答低減効果を考慮したスペクトルモーダル解析の解析フローを示す。

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 O.P. 22.50m と O.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 O.P. 22.50m と O.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（O.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 O.P. 22.50m と O.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 O.P. 22.50m と O.P. 15.00m の 1.2ZPA をラックの据付レベル（O.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-D 1, D 2, D 3, F 1, F 2, F 3, N 1 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。

表2 排除水体积質量による応答低減効果を考慮したスペクトルモード解析 *1

| 計算結果 | 流れ | 入力諸元 |
|--------------------------|---------------------------------|--|
| | 解析モデル設定 | 要素長さ, 質量 (水の付加質量含む), せん断断面積, 断面二次モーメント, 縦弾性係数, ポアソン比, ばね定数, 境界条件 |
| [K] | ↓ 剛性マトリクスの計算 | |
| { ω }, [ϕ] | ↓ 固有値・固有モードの計算 | [M] *2, [K] |
| { β } | ↓ 刺激係数の計算 | [M] *2, [ϕ] |
| San | ↓ 各固有振動数に対する応答加速度 | { ω }, 設計用床応答スペクトル |
| San* | ↓ 排除水体积質量による応答低減効果を考慮した応答加速度 | San, 低減係数*3 |
| {Un} | ↓ 各振動モードの最大応答の計算 | { β }, { ω }, [ϕ], San* |
| {qn} | ↓ 各振動モードの部材力の計算 | {Un}, [K] |
| せん断力, モーメント | ↓ モード組合せによる最大応答の計算 | {qn} |

注記*1: 表中で使用している記号の定義は以下のとおり。

[K]: 剛性マトリクス, [M]: 質量マトリクス, { ω }: 固有円振動数

[ϕ]: 固有モードマトリクス, { β }: 刺激係数

San: n 次の固有振動数に対する応答加速度

San*: 低減係数*3をSanに掛けて算出した応答加速度

{Un}: n 次の振動モードにおける各質点の最大変位

{qn}: n 次の振動モードにおける部材力

*2 : 水の付加質量が含まれる入力諸元。

*3 : 排除水体积質量による応答低減効果を考慮した場合の低減係数。

4. 評価用震度

排除水体积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。)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 : 排除水体积質量 (=水中での浮力と同等)

なお、水の付加質量 M_{11} は表3(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、排除水体积質量 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


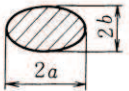
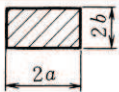
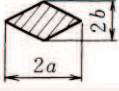

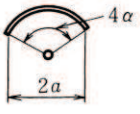

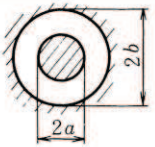
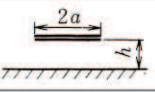
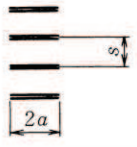
m_W : ラックに含まれる水の質量

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 3 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 |

上記を用いて低減係数を算出すると以下のとおりとなる。なお、低減係数の計算に用いる諸元を表4に示す。

・110体ラック

$$m_H = (\pi \times \text{[redacted]})$$

$$M_{11} = \text{[redacted]}$$

$$M_d = \text{[redacted]}$$

$$\frac{M_1 - M_d}{M_1 + M_{11}} = \text{[redacted]}$$

・170体ラック

$$m_H = (\pi \times \text{[redacted]})$$

$$M_{11} = \text{[redacted]}$$

$$M_d = \text{[redacted]}$$

$$\frac{M_1 - M_d}{M_1 + M_{11}} = \text{[redacted]}$$

表4 低減係数の計算に用いる諸元

| 記号 | 110体ラック | 170体ラック |
|------------------------|---|---|
| N | 110 (本) | 170 (本) |
| ρ_w | 1.0×10^{-6} (kg/mm ³) | 1.0×10^{-6} (kg/mm ³) |
| ρ_{sus304} | 7.93×10^{-6} (kg/mm ³) | 7.93×10^{-6} (kg/mm ³) |
| a_0 | | |
| L | | |
| M_1 | | |
| m_w | | |
| m_R | | |
| V_F | | |

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

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 5 に示す。また、適用する床応答曲線を図 2 に示す。

表 5 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 | |

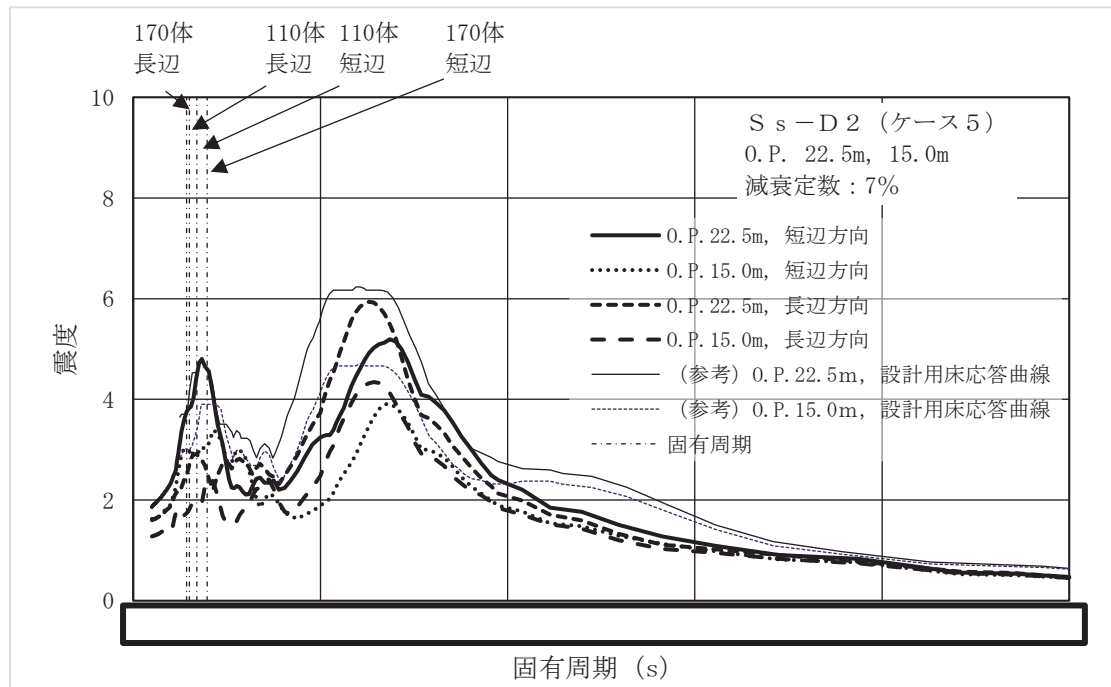


図 2 床応答曲線

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 6 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 6 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。

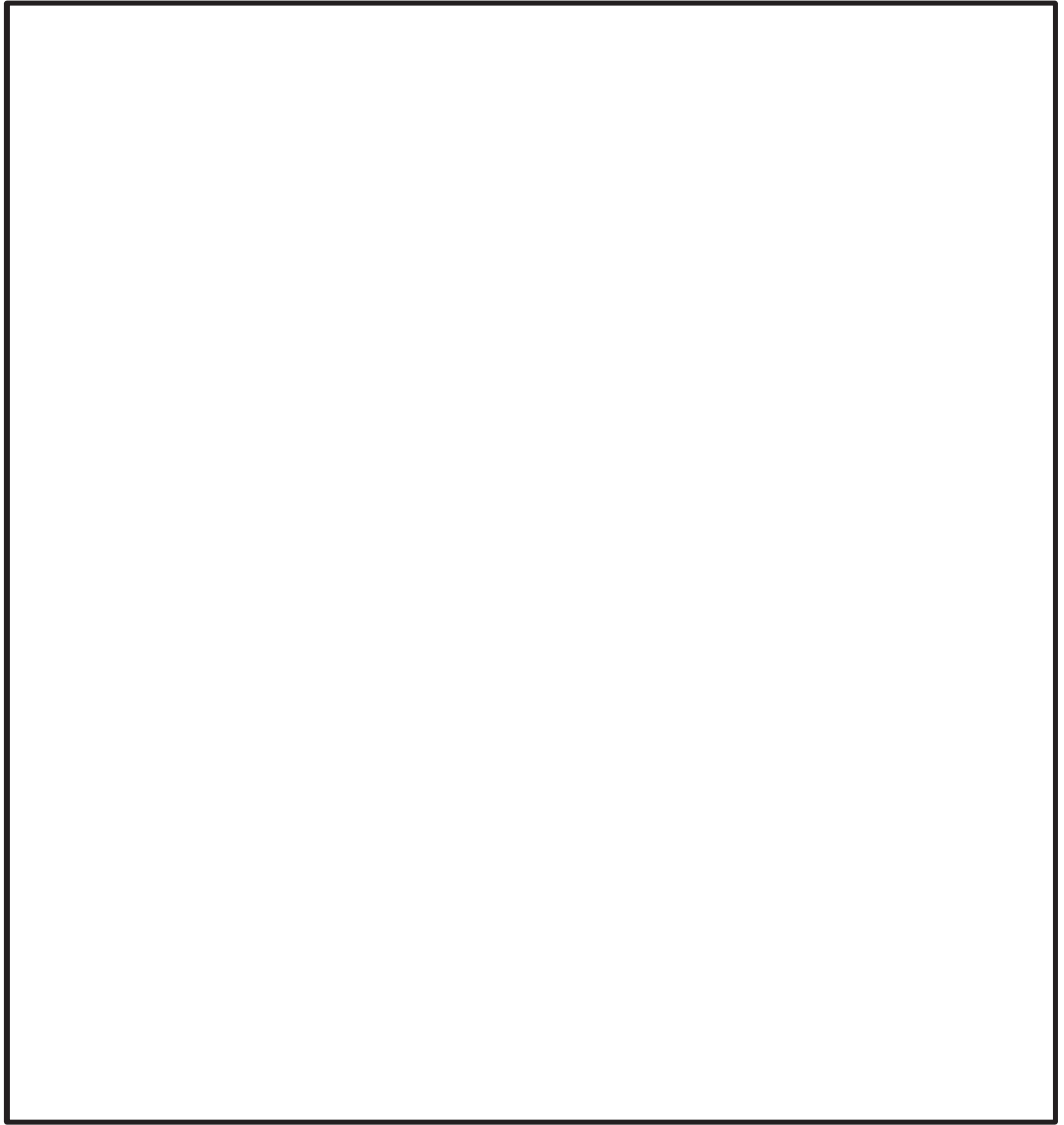


図3 110体ラックの有効投影面積

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

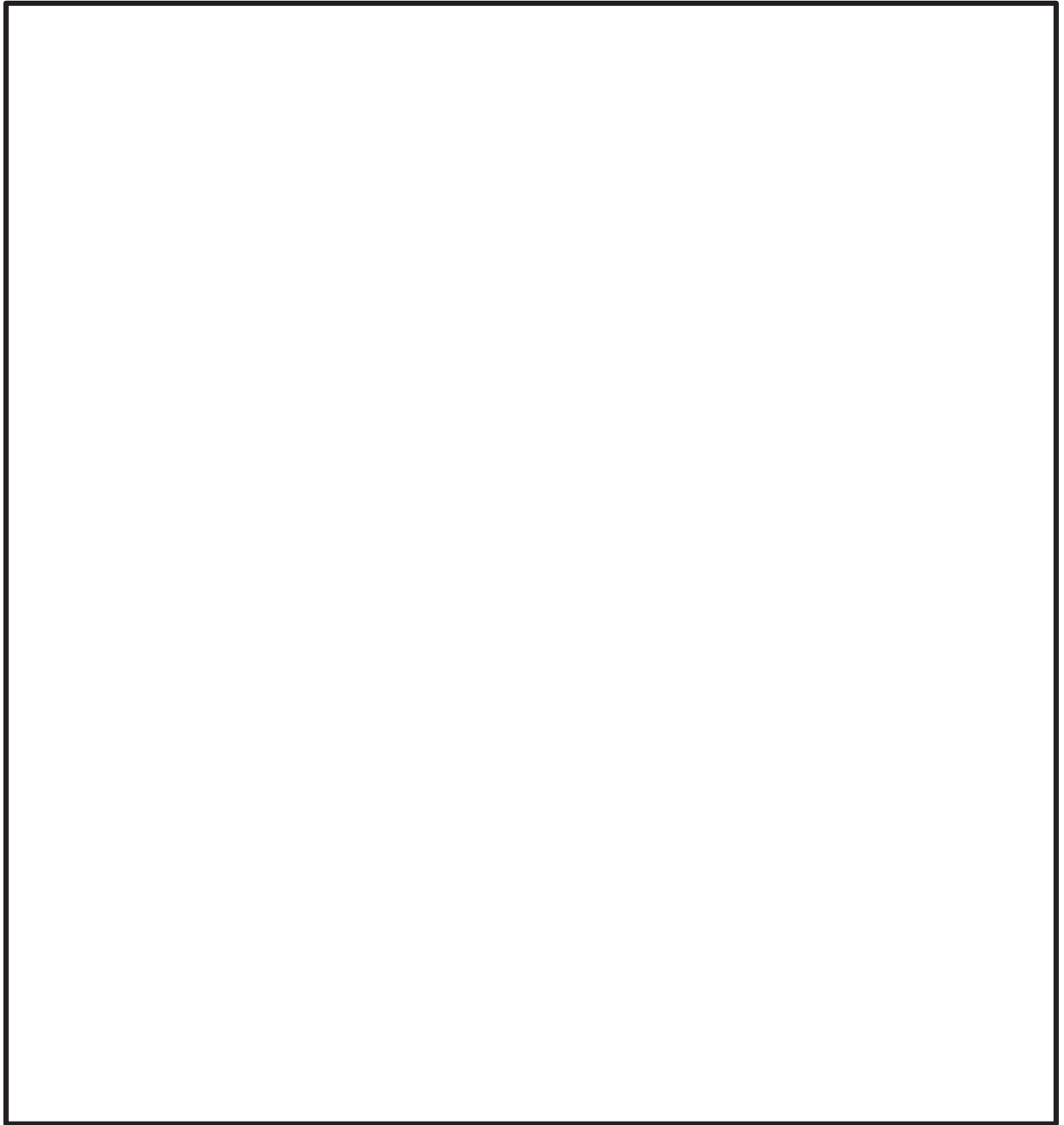


図 4 170 体ラックの有効投影面積

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 7 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 7 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 |