

本資料のうち、枠囲みの内容は
商業機密の観点から公開できま
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-工-B-17-0025_改2
提出年月日	2021年9月2日

VI-3-別添 1-1-10-2 海水ポンプ室門型クレーンの強度計算書

02 ③ VI-3-別添 1-1-10-2 R3

2021年9月

東北電力株式会社

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
2.1 位置	1
2.2 構造概要	3
2.3 評価方針	3
2.4 適用規格	6
3. 強度評価方法	7
3.1 記号の定義	7
3.2 評価対象部位	10
3.3 荷重及び荷重の組合せ	11
3.4 許容限界	13
3.5 評価方法	14
4. 評価条件	18
5. 強度評価結果	19

1. 概要

本資料は、添付書類「VI-3-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、海水ポンプ室門型クレーンが、竜巻時及び竜巻通過後においても、海水ポンプ室門型クレーンが停留位置に固定されることにより、竜巻より防護すべき施設である原子炉補機冷却海水ポンプ等に対して、機械的な波及的影響を及ぼさないように、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

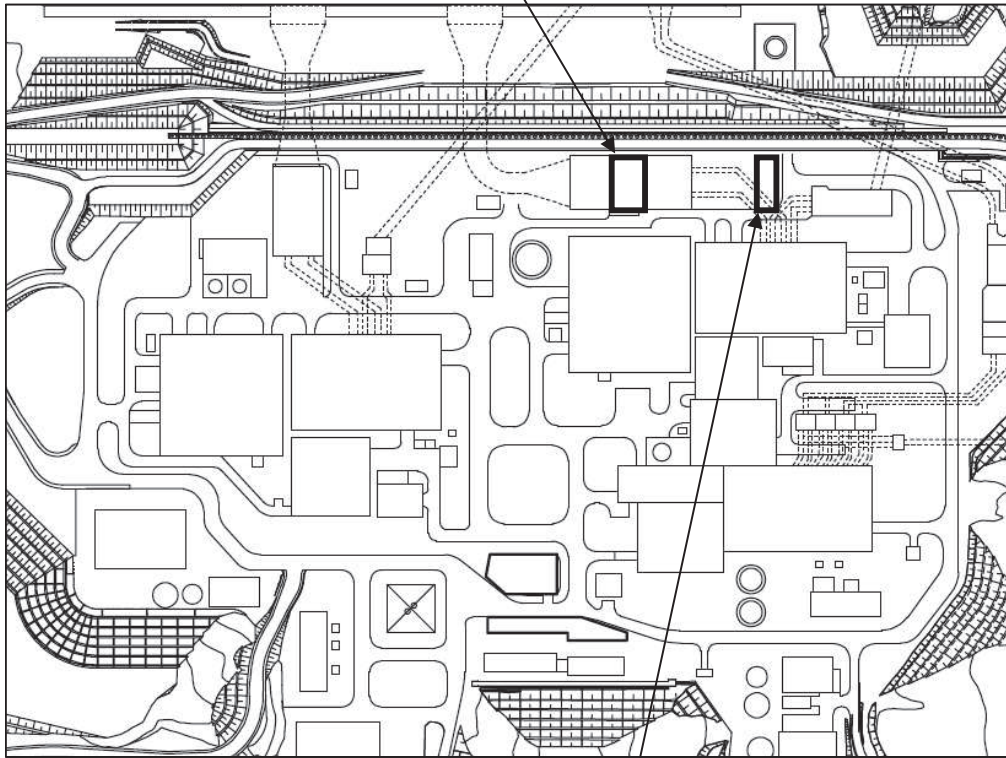
2. 基本方針

海水ポンプ室門型クレーンについて、添付書類「VI-3-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、海水ポンプ室門型クレーンの「2.1 位置」，「2.2 構造概要」，「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

2.1 位置

海水ポンプ室門型クレーンは、添付書類「VI-3-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す配置のとおり、屋外の海水ポンプ室に設置する。海水ポンプ室門型クレーンの位置図を図2-1に示す。また、海水ポンプ室門型クレーンと海水ポンプ室の位置関係を図2-2に示す。

海水ポンプ室補機ポンプエリア
(外部事象防護対象施設が設置されているエリア)



海水ポンプ室門型クレーン
(停留位置)

図 2-1 海水ポンプ室門型クレーンの位置図

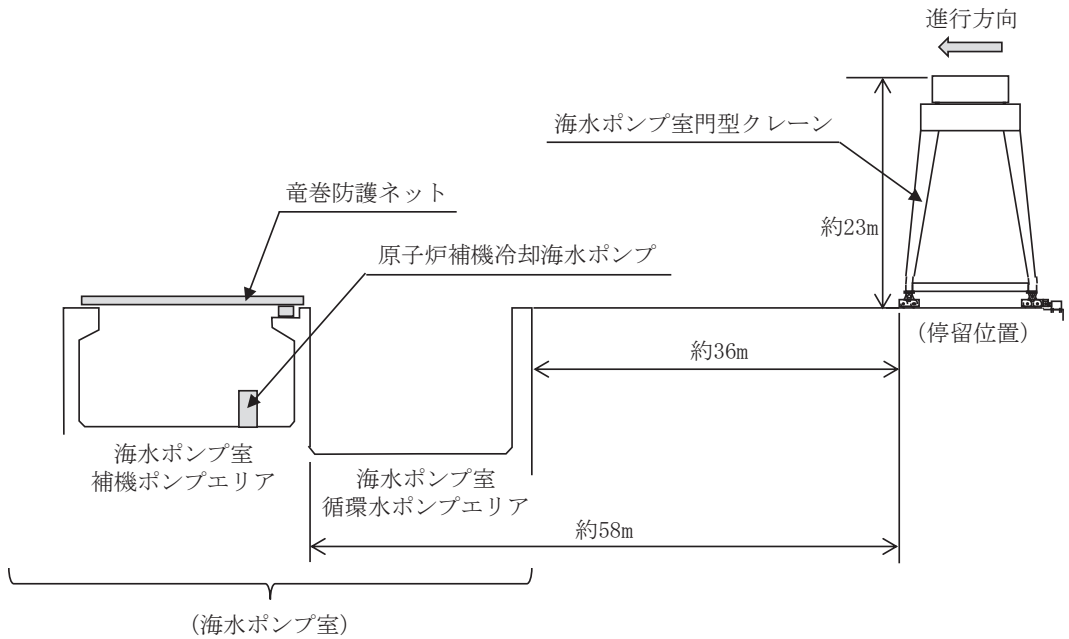


図 2-2 海水ポンプ室門型クレーンと海水ポンプ室の位置関係

2.2 構造概要

海水ポンプ室門型クレーンについて、添付書類「VI-3-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえて、構造を設定する。

海水ポンプ室門型クレーンは、脚部、ガーダ、トロリ等により構成され、停留位置において各従動輪側に1基ずつ計2基設置されているエンドストップにて海水ポンプ室門型クレーンを固定する構造である。なお、海水ポンプ室門型クレーンには脱輪防止装置及び脱線防止ローラを、トロリにはトロリストoppaをそれぞれ設置することにより、転倒及び逸走を防止する構造としている。海水ポンプ室門型クレーンの概要図を図2-3に示す。

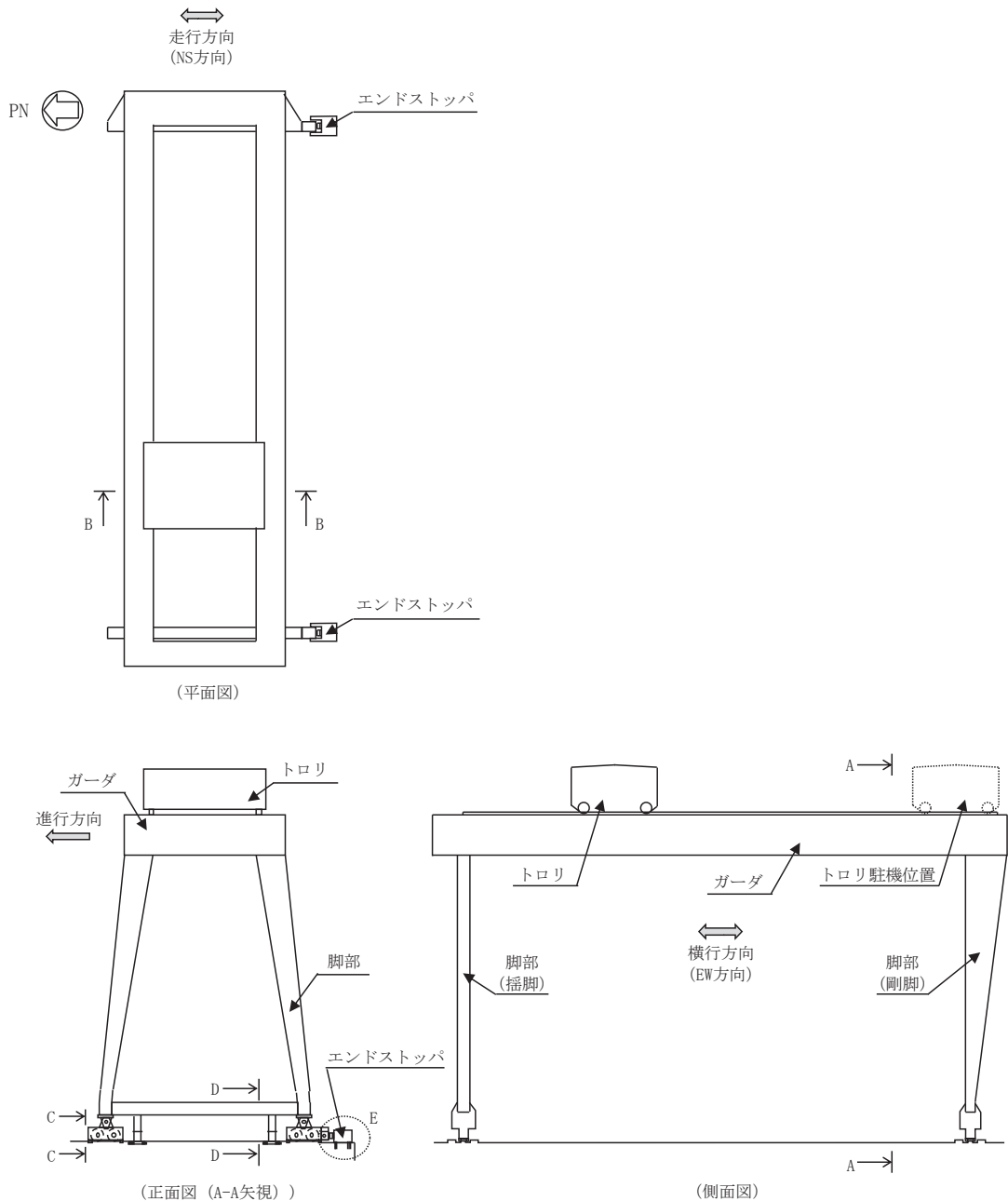


図 2-3 海水ポンプ室門型クレーンの概要図 (1/2)

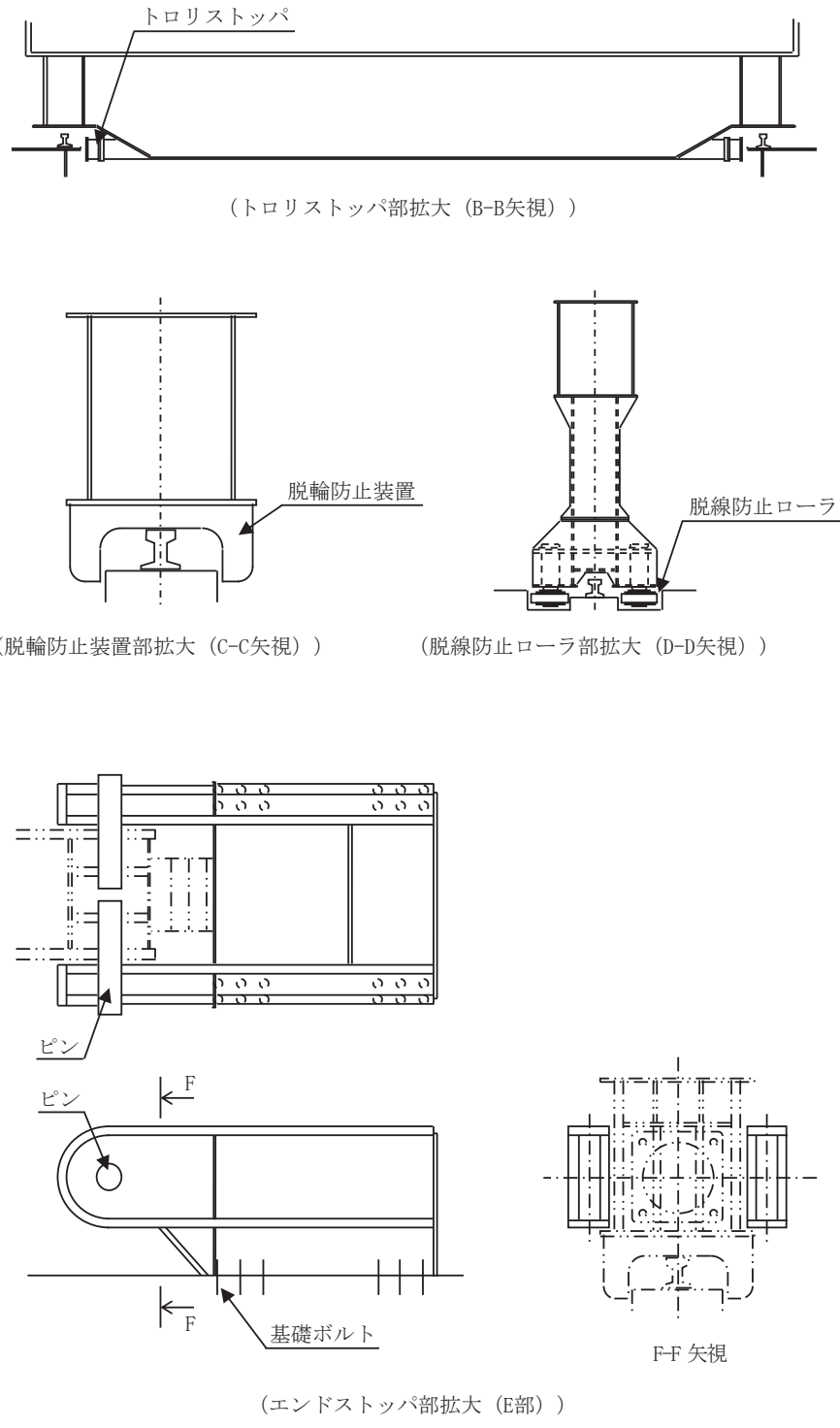


図 2-3 海水ポンプ室門型クレーンの概要図 (2/2)

2.3 評価方針

海水ポンプ室門型クレーンの強度評価は、添付書類「VI-3-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している、荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、竜巻により防護すべき施設に波及的影響を及ぼさないことを、「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

海水ポンプ室門型クレーンの強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を選定する。

海水ポンプ室門型クレーンの強度評価フローを図2-4に示す。竜巻の襲来が予想される場合、海水ポンプ室門型クレーン作業の中止及び海水ポンプ室門型クレーン停留についての運用手順を定めることとしていることから、海水ポンプ室門型クレーンが停留位置にてエンドストッパにより停留されている状態での評価を実施する。また、海水ポンプ室門型クレーンは外部事象防護対象施設等ではなく、停留位置においては原子炉補機冷却海水ポンプ等との離隔が十分に取られているため、原子炉補機冷却海水ポンプ等への波及的影響を防止する観点から、海水ポンプ室門型クレーンが停留位置にてエンドストッパで支持されることにより、海水ポンプ室方向に逸走せず原子炉補機冷却海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさないことを確認する。強度評価においては、海水ポンプ室門型クレーンのエンドストッパがその支持機能を維持可能な構造強度を有することを確認する。エンドストッパは各駆動輪側に1基ずつ計2基設置されていることから、飛来物による衝撃荷重によってエンドストッパを1基損傷させたモデルとして考慮することとし、海水ポンプ室門型クレーンに作用する設計荷重により評価対象部位に生じる応力が許容限界以下であることを確認する。また、各部材の強度評価には、設計荷重は水平方向及び鉛直方向に作用する荷重という観点で地震荷重と同様なものと考え、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編（J E A G 4 6 0 1・補-1984）」、「原子力発電所耐震設計技術指針（J E A G 4 6 0 1-1987）」及び「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）」（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）の横型ポンプ及び支持構造物の評価方法を準用し、添付書類「VI-3-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。

海水ポンプ室門型クレーンの強度評価における許容限界は、添付書類「VI-3-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、J E A G 4 6 0 1の許容応力状態IV_ASとする。

「J S M E S N C 1-2005/2007 発電用原子力設備規格 設計・建設規格」（以下「設計・建設規格」という。）付録材料図表Part5, 6の表にて許容応力を計算

する際は，周囲環境温度に応じた値を取るものとする。

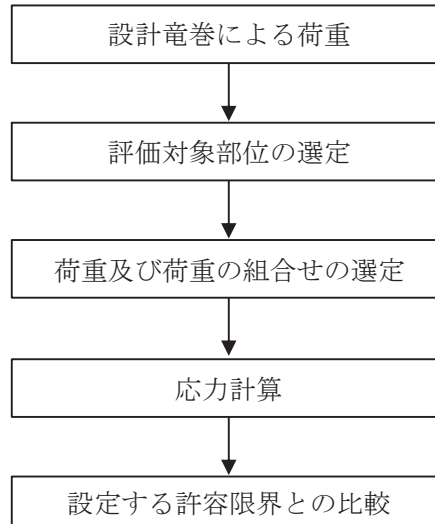


図 2-4 海水ポンプ室門型クレーンの強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・原子力発電所耐震設計技術指針重要度分類・許容応力編（J E A G 4 6 0 1 ・補-1984）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針（J E A G 4 6 0 1 -1987）
- ・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）
- ・J S M E S N C 1 -2005/2007 発電用原子力設備規格 設計・建設規格
- ・日本建築学会 2004年 建築物荷重指針・同解説
- ・クレーン構造規格（平成7年12月26日労働省告示第134号）
- ・U.S.Nuclear Regulatory Commission:REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision1, March 2007

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

波及的影響に関する強度評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 強度評価に用いる記号(1/3)

記号	単位	定義
A_b	mm ²	ボルト軸部断面積
A_{bt}	mm ²	エンドストッパ突出部の引張応力計算に用いる断面積
A_{cs}	mm ²	ピン穴部のせん断応力計算に用いる断面積
A_{ct}	mm ²	ピン穴部の引張応力計算に用いる断面積
A_{ps}	mm ²	ピンのせん断応力計算に用いる断面積
B	mm	ピン穴部せん断断面寸法
C	mm	ピン穴部引張断面寸法
D	mm	ピン穴径
d_b	mm	ボルトの呼び径
d_p	mm	ピン径
F	MPa	設計・建設規格 SSB-3121.1 により規定される値
F_b	N	ボルトに作用する引張力 (1本当たり)
$f_{b'}$	MPa	設計・建設規格 SSB-3121.1 により規定される供用状態 A 及び B での許容曲げ応力に対し、設計・建設規格 SSB-3121.1(1)a.本文中「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点」を「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点の 1.2 倍」と読み替えて算出した値
$f_{s'}$	MPa	設計・建設規格 SSB-3121.1 により規定される供用状態 A 及び B での許容せん断応力に対し、設計・建設規格 SSB-3121.1(1)a.本文中「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点」を「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点の 1.2 倍」と読み替えて算出した値
$f_{t'}$	MPa	設計・建設規格 SSB-3121.1 により規定される供用状態 A 及び B での許容引張応力に対し、設計・建設規格 SSB-3121.1(1)a.本文中「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点」を「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点の 1.2 倍」と読み替えて算出した値
$f_{ts'}$	MPa	引張力とせん断力を同時に受ける基礎ボルトの許容引張応力

表 3-1 強度評価に用いる記号(2/3)

記号	単位	定義
F_h	N	エンドストップパに作用する水平方向荷重
F_v	N	エンドストップパに作用する鉛直方向荷重
F_v'	N	駆動輪に作用する鉛直方向荷重
g	m/s^2	重力加速度 (=9.80665)
h_1	mm	トロリ重心高さ
h_2	mm	ガーダ重心高さ
h_3	mm	脚部重心高さ
h_p	mm	据付面からピン中心までの距離
L_d	mm	エンドストップパ突出部とピン中心間の水平方向距離
L_L	mm	車輪間の水平方向距離
L_s	mm	エンドストップパと車輪間の水平方向距離
L_p	mm	転倒支点とピン中心間の水平方向距離
L_i	mm	転倒支点とボルトの水平方向距離 * 1
m_T	kg	トロリ質量
m_G	kg	ガーダ質量
m_L	kg	脚部質量
M_s	$N \cdot mm$	安定モーメント
M_t	$N \cdot mm$	転倒モーメント
n	—	ボルトの本数
n_f	—	評価上引張力を受けるとして期待するボルトの本数
Q_b	N	ボルトに作用するせん断力
S_u	MPa	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 の表にて規定される設計引張り強さ
S_y	MPa	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 の表にて規定される設計降伏点
T	mm	エンドストップパ突出部の部材板厚
W_1	N	トロリに発生する風荷重
W_2	N	ガーダに発生する風荷重
W_3	N	脚部に発生する風荷重
Z_b	mm^3	エンドストップパ突出部の断面係数
μ	—	摩擦係数 (=0.3)
π	—	円周率

表 3-1 強度評価に用いる記号(3/3)

記号	単位	定義
σ_b	MPa	ボルトに生じる引張応力
σ_c	MPa	ピン穴部に生じる引張応力
σ_d	MPa	エンドストップ突出部に生じる引張応力
σ_m	MPa	エンドストップ突出部に生じる曲げ応力
σ_t	MPa	平均引張応力
${}_c\sigma_b$	MPa	圧縮側曲げ応力
${}_t\sigma_b$	MPa	引張側曲げ応力
τ_b	MPa	ボルトに生じるせん断応力
τ_c	MPa	ピン穴部に生じるせん断応力
τ_p	MPa	ピンに生じるせん断応力

注記*1 L_i の添え字 i の意味は、転倒支点となるボルトより最も遠いボルトから $i = 1, 2, 3$ とする。

3.2 評価対象部位

海水ポンプ室門型クレーンの評価対象部位は、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す評価対象部位を踏まえ、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

設計荷重は、海水ポンプ室門型クレーン本体に作用し、ピンを介してエンドストッパ及びエンドストッパの基礎ボルトに作用する。荷重を受ける各部位のうち、支持断面積の小さな部位に大きな応力が生じることから、以下の部位を強度評価の評価対象部位として選定する。

- ・エンドストッパ（ピン、ピン穴部、エンドストッパ突出部）
- ・基礎ボルト

海水ポンプ室門型クレーンの強度評価における評価対象部位を図 3-1 に示す。

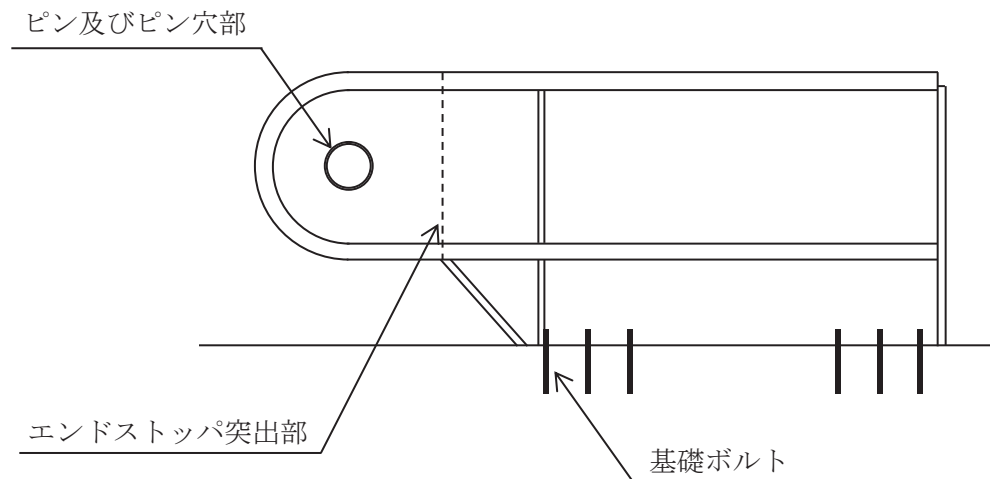


図 3-1 海水ポンプ室門型クレーンの評価対象部位

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、添付書類「VI-3-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 荷重の設定

強度評価に用いる荷重は、以下の荷重を用いる。

a. 常時作用する荷重

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重を考慮する。

b. 設計竜巻による荷重

設計竜巻による荷重として、風圧力による荷重を考慮する。海水ポンプ室門型クレーンは屋外施設であり閉じた施設ではないため、気圧差による荷重を考慮しない。また、「2.3 評価方針」に示すとおり、海水ポンプ室門型クレーンは外部事象防護対象施設等ではなく、停留位置においては原子炉補機冷却海水ポンプ等との離隔が十分に取られているため、原子炉補機冷却海水ポンプ等への波及的影響を防止する観点から、海水ポンプ室門型クレーンが停留位置にてエンドストップにより支持されることを評価する方針とする。

飛来物の衝突による海水ポンプ室門型クレーンのエンドストップの支持機能の確認としては、エンドストップが各駆動輪側に1基ずつ計2基設置されていることを踏まえ、飛来物の衝突によってエンドストップ1基が損傷し、支持機能を喪失することを仮定する。残りのエンドストップ1基にて海水ポンプ室門型クレーンの支持機能を維持可能な構造強度を有することを評価することとし、飛来物による衝撃荷重 $W_M=0$ とする。

風圧力による荷重 W_W は、添付書類「VI-3-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1(3)c.(a) 風圧力による荷重」に示す式に従い、算出する。風力係数 C は、「クレーン構造規格」に準じて設定する。

c. 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せは、添付書類「VI-3-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」にて設定している荷重の組合せを踏まえ、海水ポンプ室門型クレーンの評価対象部位に対して設定する。

海水ポンプ室門型クレーンのエンドストップ及び基礎ボルトには、自重及び風圧力による荷重が作用する。強度評価に用いる荷重の組合せを表3-2に示す。

表 3-2 強度評価に用いる荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
外部事象防護対象 施設等に波及的影 響を及ぼす可能性 がある施設	海水ポンプ室 門型クレーン	エンドストッパ	①自重 ②風圧力による荷重
		基礎ボルト	①自重 ②風圧力による荷重

3.4 許容限界

海水ポンプ室門型クレーンの許容限界は、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位ごとに、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界及び機能損傷モードを踏まえて、J E A G 4 6 0 1に基づく許容応力状態IV_ASの許容応力を用いる。

海水ポンプ室門型クレーンの許容限界は、J E A G 4 6 0 1を準用し、「その他の支持構造物」の許容限界を適用し、許容応力状態IV_ASから算出した許容応力を許容限界とする。J E A G 4 6 0 1に従い、設計・建設規格付録材料図表 Part5,6 の表にて許容応力を評価する際は、周囲環境温度に応じた値をとるものとするが、温度が設計・建設規格付録材料図表記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。ただし、設計・建設規格付録材料図表 Part5,6 で比例法を用いる場合の端数処理は、小数点第1位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

海水ポンプ室門型クレーンの許容限界を表 3-3 に示す。

表 3-3 許容限界

許容 応力 状態	温度 条件 (°C)	許容限界*1 (ボルト以外)			許容限界*1 (ボルト等)	
		一次応力			一次応力	
		引張	せん断	曲げ	引張	せん断
IV _A S	40	$1.5 f_t'$	$1.5 f_s'$	$1.5 f_b'$	$1.5 f_t'$	$1.5 f_s'$

*1 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対しても評価を行う。

また、引張力とせん断力を同時に受ける基礎ボルトの許容引張応力 f_{ts}' は以下のとおり。

$$f_{ts}' = \text{Min} \{ 1.5 f_t', 2.1 f_t' - 1.6 \tau_b \}$$

引張力と曲げモーメントを受ける部材の組合せ応力については、以下の式により評価する。

$$\frac{\sigma_t + \sigma_b}{1.5 \cdot f_t'} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{c \sigma_b - \sigma_t}{1.5 \cdot f_b'} \leq 1$$

3.5 評価方法

海水ポンプ室門型クレーンの強度評価は、添付書類「VI-3-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定している評価式を用いる。

(1) 計算モデル

設計竜巻の風圧力による荷重及び自重により発生するモーメントに対する、海水ポンプ室門型クレーンのエンドストップの構造健全性を1質点系モデルとして計算を行う。なお、設計竜巻の風圧力による荷重は、図 2-1 及び図 2-2 より、波及的影響を確認する原子炉補機冷却海水ポンプ等が設置される海水ポンプ室との位置関係を考慮して、海水ポンプ室側への進行方向に南側から荷重がかかるものとし、設計飛来物による衝撃荷重は、2基あるエンドストップのうち1基を損傷させたモデルとして考慮する。また、1質点系モデルの強度計算において、海水ポンプ室門型クレーンとエンドストップのピン支持点に集中荷重として作用するものとする。海水ポンプ室門型クレーンのモデル図を図 3-2 及び図 3-3 に示す。

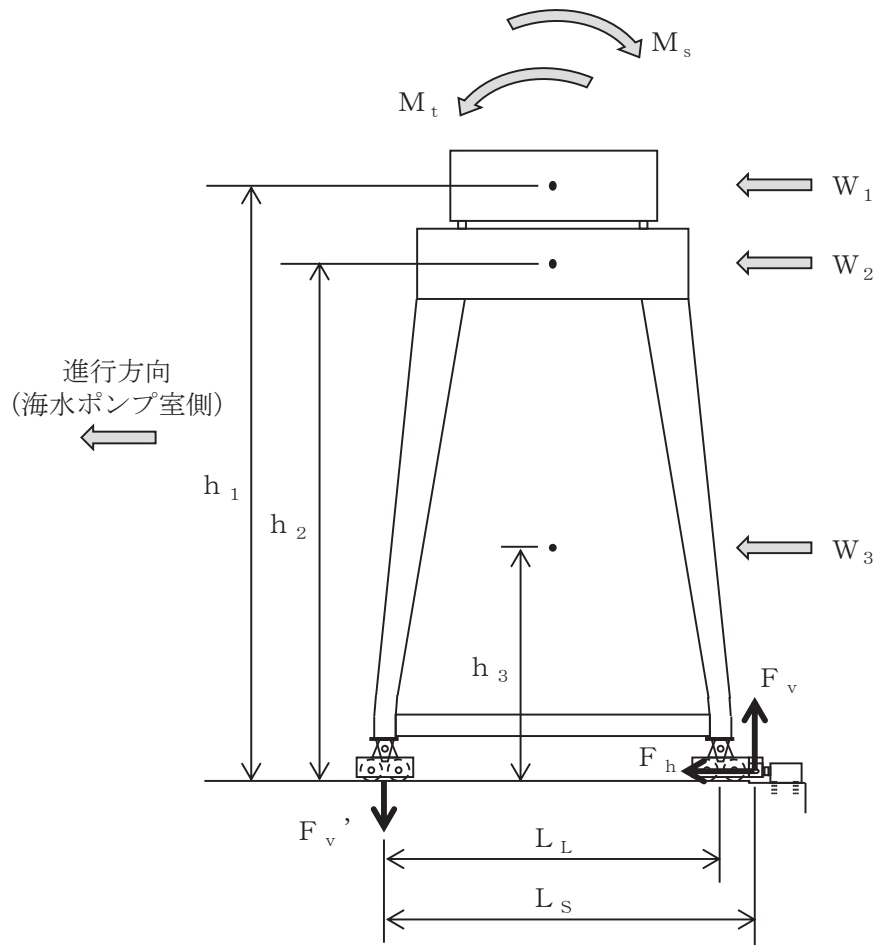


図 3-2 海水ポンプ室門型クレーンのモデル図

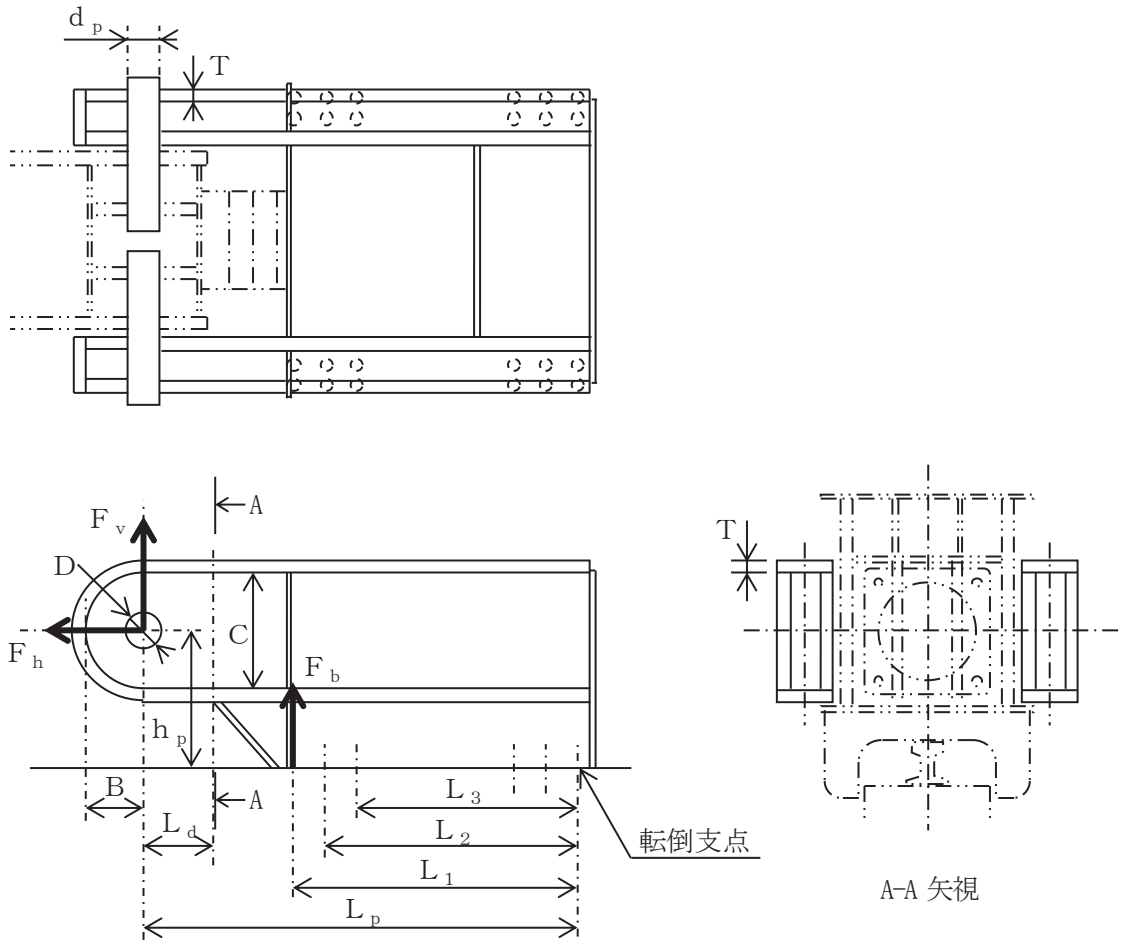


図 3-3 海水ポンプ室門型クレーン（エンドストップ部拡大）のモデル図

(2) 計算方法

- a. 設計竜巻により門型クレーンに発生する転倒モーメント
 設計竜巻により作用するモーメントは以下の式により算定する。

$$M_t = W_1 \cdot h_1 + W_2 \cdot h_2 + W_3 \cdot h_3$$

- b. 自重による安定モーメント
 自重により作用するモーメントは以下の式により算定する。

$$M_s = (m_T + m_G + m_L) \cdot g \cdot \frac{L_L}{2}$$

- c. エンドストップに負荷する荷重
 転倒モーメントと安定モーメントのつり合いにより，エンドストップに負荷される鉛直荷重 F_v 及び水平荷重 F_h は以下の式により算定する。

$$F_v = \frac{(M_t - M_s)}{L_s}$$

$$F_h = (W_1 + W_2 + W_3) - \mu \cdot \left\{ \frac{(m_T + m_G + m_L) \cdot g}{2} + F_v \right\}$$

d. エンドストップに生じる応力

(a) ピン穴部に生じる応力

イ. 引張応力

ピン穴部に対する引張応力は以下の式により算定する。

ここで、

ロ. せん断応力

ピン穴部に対するせん断応力は以下の式により算定する。

ここで、

(b) ピンに生じる応力

イ. せん断応力

ピンに対するせん断応力は以下の式により算定する。

ここで、

(c) エンドストップ突出部に生じる応力

イ. 引張応力

エンドストップ突出部に対する引張応力は以下の式により算定する。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



ロ. 曲げ応力

エンドストッパ突出部に対する曲げ応力は以下の式により算定する。



e. 基礎ボルトに生じる応力

(a) 基礎ボルトに負荷する荷重

イ. 引張応力

基礎ボルトに対する引張力は、最外列のボルトを支点とする転倒を考え、以下の式により算定する。

・引張力

$$F_b = \frac{L_1 (F_v \cdot L_p - F_h \cdot h_p)}{n_f (L_1^2 + L_2^2 + L_3^2)}$$

・引張応力

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_b}$$

ここで、

$$A_b = \frac{\pi}{4} \cdot d_b^2$$

ロ. せん断応力

基礎ボルトに対するせん断力はボルト全本数で受けるものとして、以下の式により算定する。

・せん断力

$$Q_b = F_h$$

・せん断応力

$$\tau_b = \frac{Q_b}{n \cdot A_b}$$

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1 及び表 4-2 に示す。

表 4-1 許容応力評価に用いる条件

材料	温度 (°C)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	F (MPa)	$1.5 f_{t'}$ (MPa)	$1.5 f_{s'}$ (MPa)	$1.5 f_{b'}$ (MPa)
SM570 (ピン穴部, エンド ストッパ突出部)	40	450	570	399	399	230	399
SCM440 (ピン)	40	835	980	686	—	396	—
S45C (基礎ボルト)	40	490	690	483	362	278	—

表 4-2 海水ポンプ室門型クレーンの入力条件

B (mm)	C (mm)	D (mm)	T (mm)	A_{bt} (mm ²)
185	370	122	40	43680

d_b (mm)	d_p (mm)	h_1 (mm)	h_2 (mm)	h_3 (mm)	h_p (mm)
30	120	21040	18370	7190	447

L_d (mm)	L_L (mm)	L_s (mm)	L_p (mm)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)
220	11000	12078	1372	900	800	700

m_T (kg)	m_G (kg)	m_L (kg)	W_1 (N)	W_2 (N)	W_3 (N)	Z_b (mm ³)
28800	80800	70100	1.090×10^5	1.042×10^6	5.661×10^5	4.139×10^6

n (本)	n_f (本)
24	4

5. 強度評価結果

強度評価結果を表 5-1 に示す。

エンドストップ及び基礎ボルトに発生する応力は許容限界以下である。

表 5-1 強度評価結果

評価部位		材料	応力	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
エンドス トッパ	ピン穴部	SM570	引張	27	399
			せん断	18	230
	ピン	SCM440	せん断	24	278
	エンドス トッパ 突出部	SM570	引張	25	399
			曲げ	70	399
			組合せ (引張+曲げ)	$\frac{\sigma_t + \sigma_b}{1.5 \cdot f_t} \leq 1$	
				0.24	
				$\frac{c \sigma_b - \sigma_t}{1.5 \cdot f_b} \leq 1$	
0.12					
基礎ボルト	S45C	引張	218	362	
		せん断	63	278	
		組合せ	218	362	