

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7添-3-015-7 改4
提出年月日	2020年7月27日

V-3-別添 3-1-7 貫通部止水処置の強度計算書

2020年7月

東京電力ホールディングス株式会社

V-3-別添 3-1-7 貫通部止水処置の強度計算書

目 次

1. 概要	1
2. 一般事項	1
2.1 位置	1
2.2 構造概要	1
2.3 評価方針	4
2.4 適用規格	10
2.5 記号の説明	11
3. 評価対象部位	16
4. 構造強度評価	16
4.1 構造強度評価方法	16
4.2 荷重及び荷重の組合せ	16
4.2.1 荷重の設定	16
4.2.2 荷重の組合せ	20
4.3 許容限界	20
4.4 設計用地震力	26
4.5 計算方法	28
4.5.1 モルタルの強度評価（荷重計算）	28
4.5.2 シール材及びブーツの強度評価（発生圧力計算）	28
4.5.3 鉄板の強度評価	28
4.5.4 ケーブルトレイ金属ボックスの強度評価	31
4.6 計算条件	33
5. 評価結果	37

1. 概要

本計算書は、V-3-別添 3-1-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に基づき、浸水防護施設のうちタービン建屋内貫通部止水処置が津波浸水による静水圧荷重及び余震を考慮した荷重に対して、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. 一般事項

2.1 位置

貫通部止水処置は、V-3-別添 3-1-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3. 構造強度設計」の構造計画に示す、タービン建屋の貫通口と貫通物とのすき間又は貫通物の周囲に施工する。

2.2 構造概要

貫通部止水処置の構造は、V-3-別添 3-1-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 構造強度設計」に示す構造計画を踏まえて、詳細な構造を設定する。

貫通部止水処置は、貫通部の位置条件及び貫通物の強度条件に応じて、シール材、モルタル、ブーツ、鉄板、フラップゲートを使用し、各貫通部止水処置の適用条件を考慮し施工する。シール材及びモルタルは壁の貫通口と貫通物のすき間に施工し、壁と貫通物を接合する構造とする。なお、シール材をケーブルトレイ貫通部の止水に用いる場合は、シール材が型崩れしないように金属ボックスをアンカーボルトで壁・床面に固定し、金属ボックスにシール材を充填、もしくは塗布する。ブーツは、伸縮性ゴムを用い、壁面に溶接した取付用座と配管を締付けバンドにて固定する構造とする。鉄板は、配管とスリーブを全周溶接する。また、フラップゲートはアンカーボルトで壁面に固定する構造とする。貫通部止水処置の構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 貫通部止水処置の構造計画(1/2)

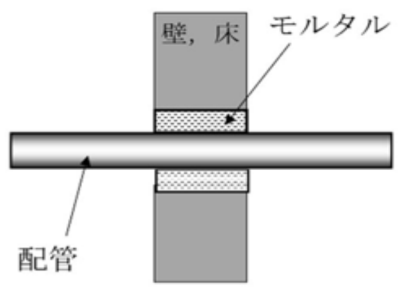
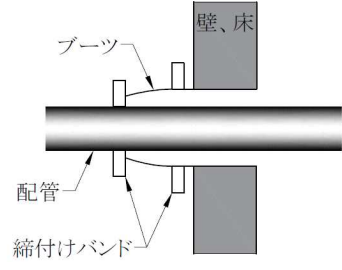
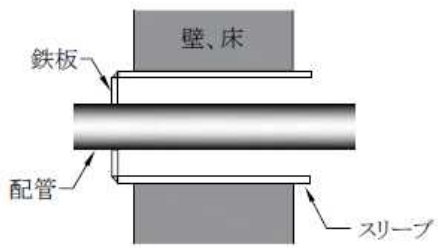
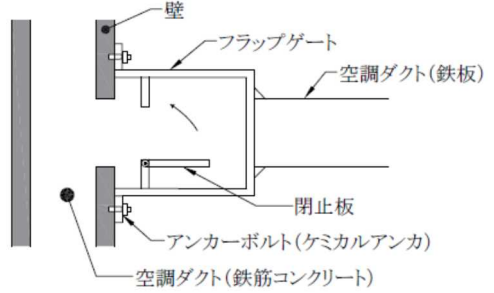
設備名称	計画の概要		概略構造図
	主体構造	支持構造	
貫通部 止水処置	モルタルにて構成する。	貫通部の開口部にモルタルを充填し、硬化後は貫通部内面及び貫通物外面と一定の付着力によって接合する。	
	ブーツと締付けバンドにて構成する。	高温配管の熱膨張変位及び地震時の変位を吸収できるような伸縮性ゴムを用い、壁面又は床面の取付用座と配管に締付けバンドにて締結する。	
	鉄板にて閉止する構成する。	貫通部の開口部に鉄板を挿入し、溶接によって接合する。	
	閉止板を内包するフラップゲートにて構成する。	空調ダクト（鉄筋コンクリート）と空調ダクト（鉄板）の間にフラップゲートを設置し、フラップゲートは空調ダクト（鉄筋コンクリート）壁面にアンカーボルトで固定する	

表 2-1 貫通部止水処置の構造計画(2/2)

設備名称	計画の概要		概略構造図
	主体構造	支持構造	
貫通部 止水処置		<p>ケーブルトレイ貫通部については、シール材が型崩れしないよう金属ボックスをアンカーボルトで壁・床面に固定し、金属ボックスにシール材を充填、もしくは塗布する。シール材は、施工時は液状であり、反応硬化によって所定の強度を有する構造物が形成される。</p>	<p>壁、床、アンカーボルト (メカニカルアンカ及びケミカルアンカ)、金属ボックス、ケーブル、シール材、ケーブルトレイ</p>
	<p>充填タイプのシール材にて構成する。</p>	<p>貫通部の開口部にシール材を充填する。施工時は液状であり、反応硬化によって所定の強度を有する構造物が形成され、貫通部内面及び貫通物外面と一定の付着力によって接合する。</p>	<p>シール材、ケーブルボックス、壁、床、電線管、ケーブル</p>
	<p>コーキングタイプのシール材にて構成する。</p>	<p>貫通部の開口部と貫通部のすき間にコーキングする。施工時は液状であり、反応硬化によって所定の強度を有する構造物が形成され、鉄板及び貫通物外面と一定の付着力によって接合する。</p>	<p>シール材、壁、床、鉄板、配管</p>

2.3 評価方針

貫通部止水処置の強度評価は、V-3-別添 3-1-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」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て、貫通部止水処置の評価部位に作用する荷重等が許容限界以下であることを「3. 構造強度評価方法」に示す方法により、「4.6 計算条件」に示す評価条件を用いて評価し、「5. 評価結果」にて確認する。

貫通部止水処置のシール材及びブーツの強度評価フローを図 2-1 に、モルタルの強度評価フローを図 2-2 に、鉄板の強度評価フローを図 2-3 に、フラップゲートの強度評価フローを図 2-4 に、シール材施工に用いるケーブルトレイ金属ボックスの強度評価フローを図 2-5 に示す。

貫通部止水処置の強度評価においては、その構造を踏まえ、地震による動水圧荷重及び余震に伴う荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価部位を設定する。強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、地震後の繰返しの襲来を想定した経路からの津波及び津波による溢水を考慮した浸水に伴う津波荷重並びに余震を考慮した荷重を考慮し、評価される最大荷重を設定する。重畳時においては、V-3-別添 3-1-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示す弾性設計用地震動 S_d を入力して得られた床応答スペクトルまたは最大応答加速度から算出した値を設計震度として用いる。なお、強度評価に当たっては、弾性設計用地震動 S_d による余震荷重を考慮した評価を実施する。

フラップゲートの評価においては、津波による浸水時、フラップゲートは水没し、フラップゲートの外部と内部は均圧される。そのため、壁面方向の水圧は、アンカーボルトを圧縮する方向だけに働き、引張力を緩和する力となる。

従って、地震時にフラップゲートに作用する荷重は地震荷重と自重となり、これは耐震計算書における荷重設定と同じである。 S_s 地震動は、 S_d 地震動より大きく、強度計算は評価の厳しい耐震計算に包絡されるため、本計算書ではフラップゲートのアンカーボルトの評価は不要とする。

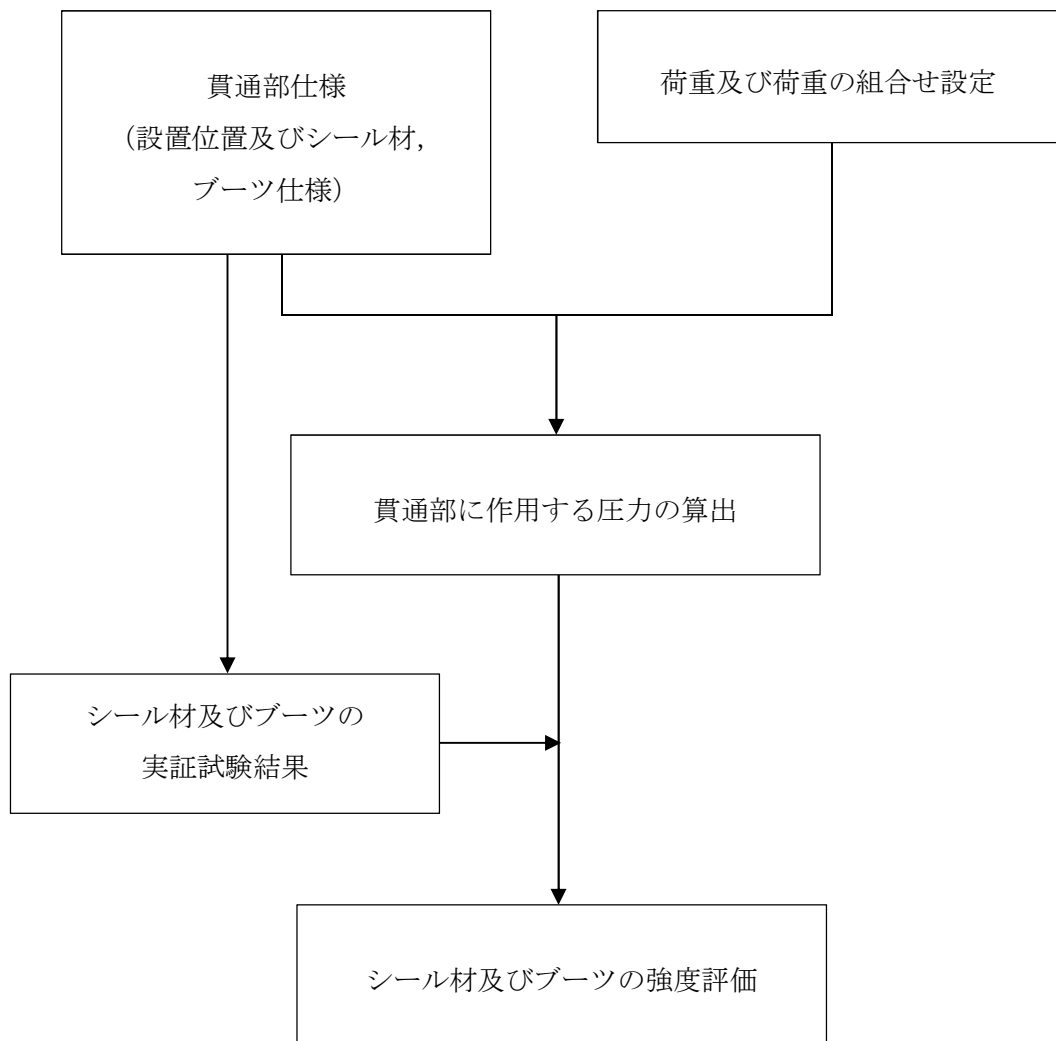


図 2-1 シール材及びブーツの強度評価フロー

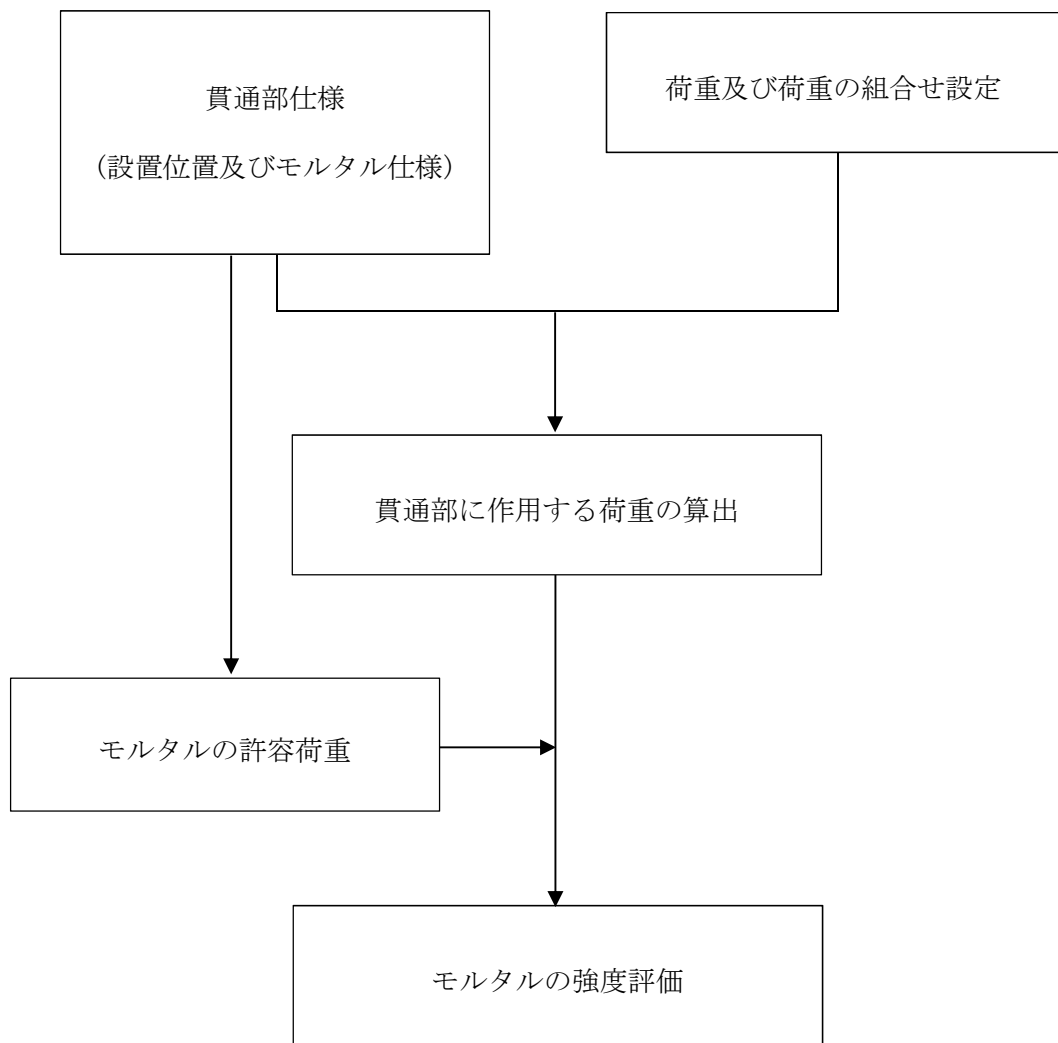


図 2-2 モルタルの強度評価フロー

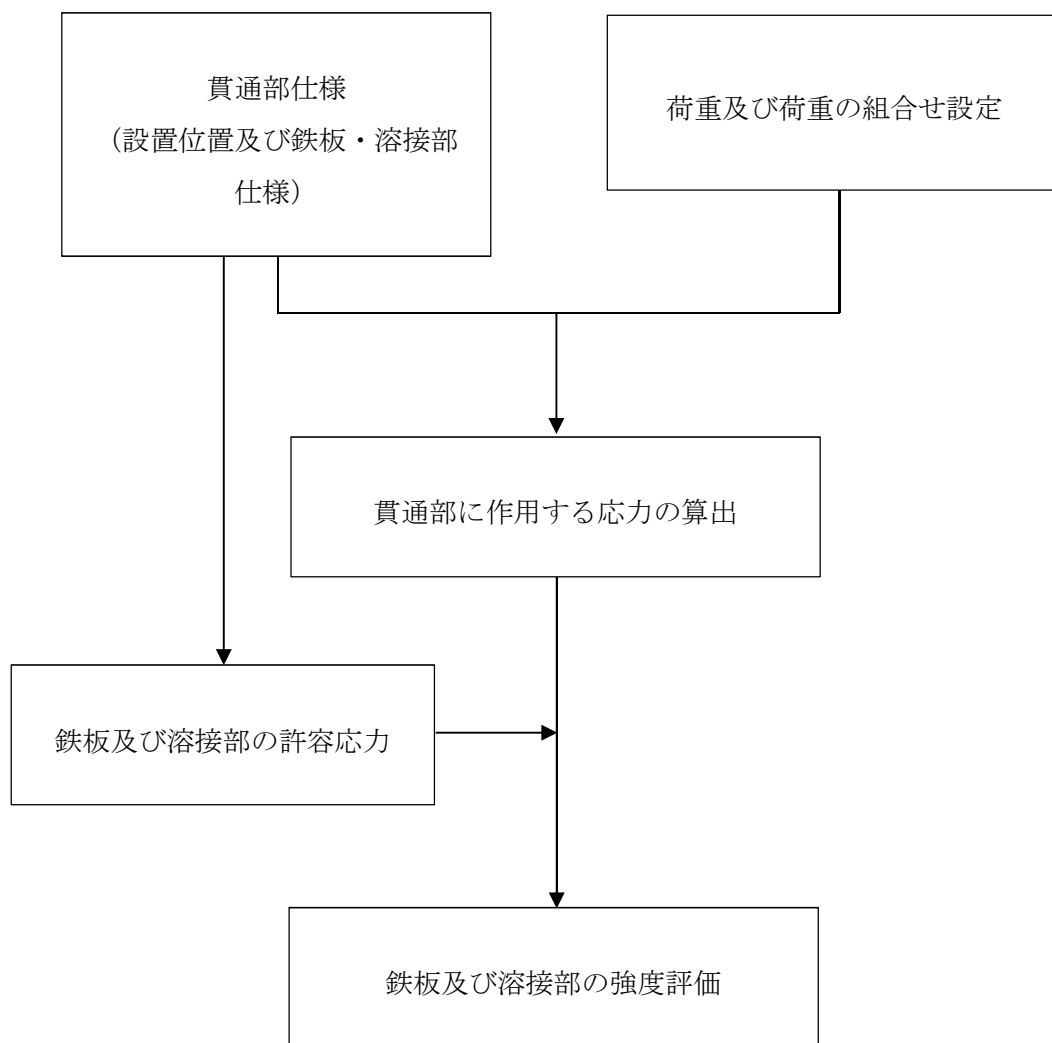


図 2-3 鉄板の強度評価フロー

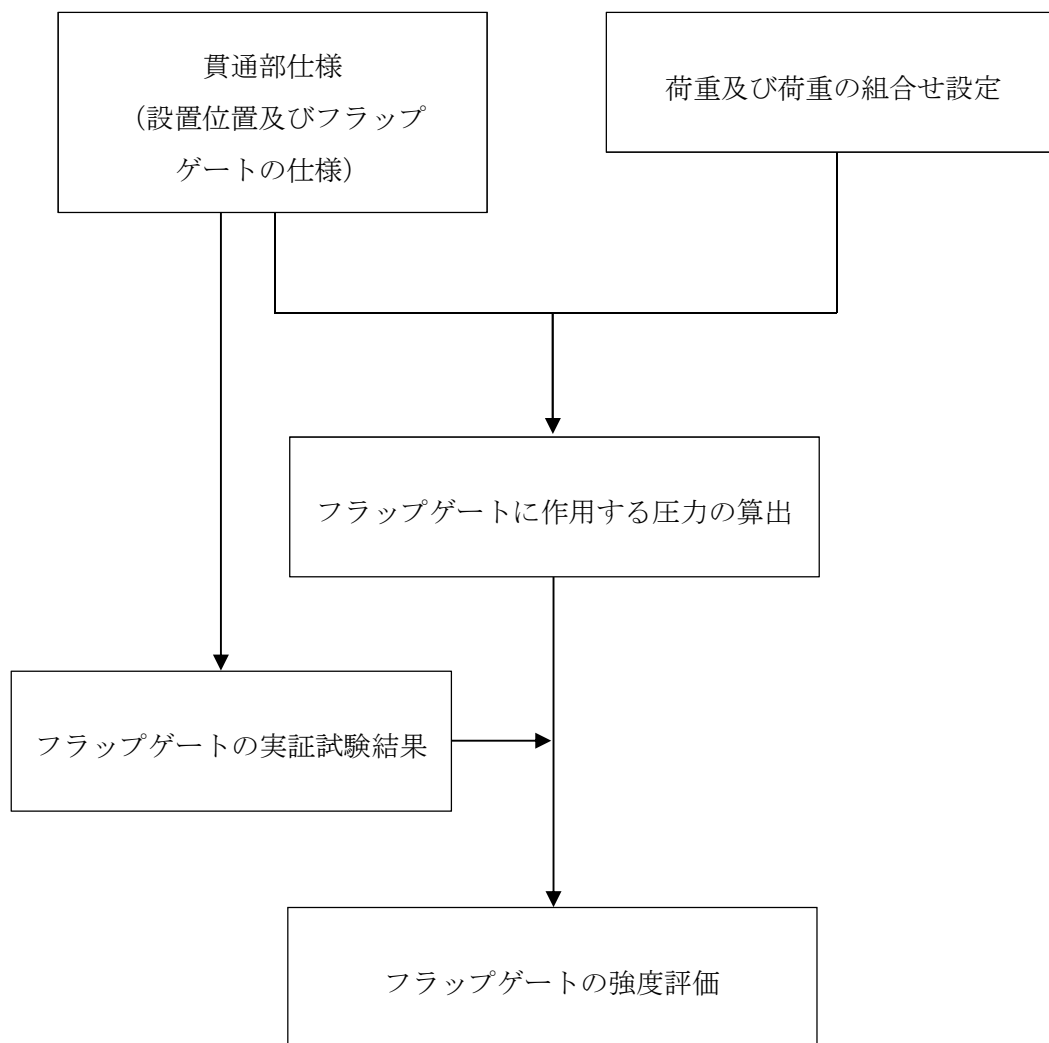


図 2-4 フラップゲートの強度評価フロー

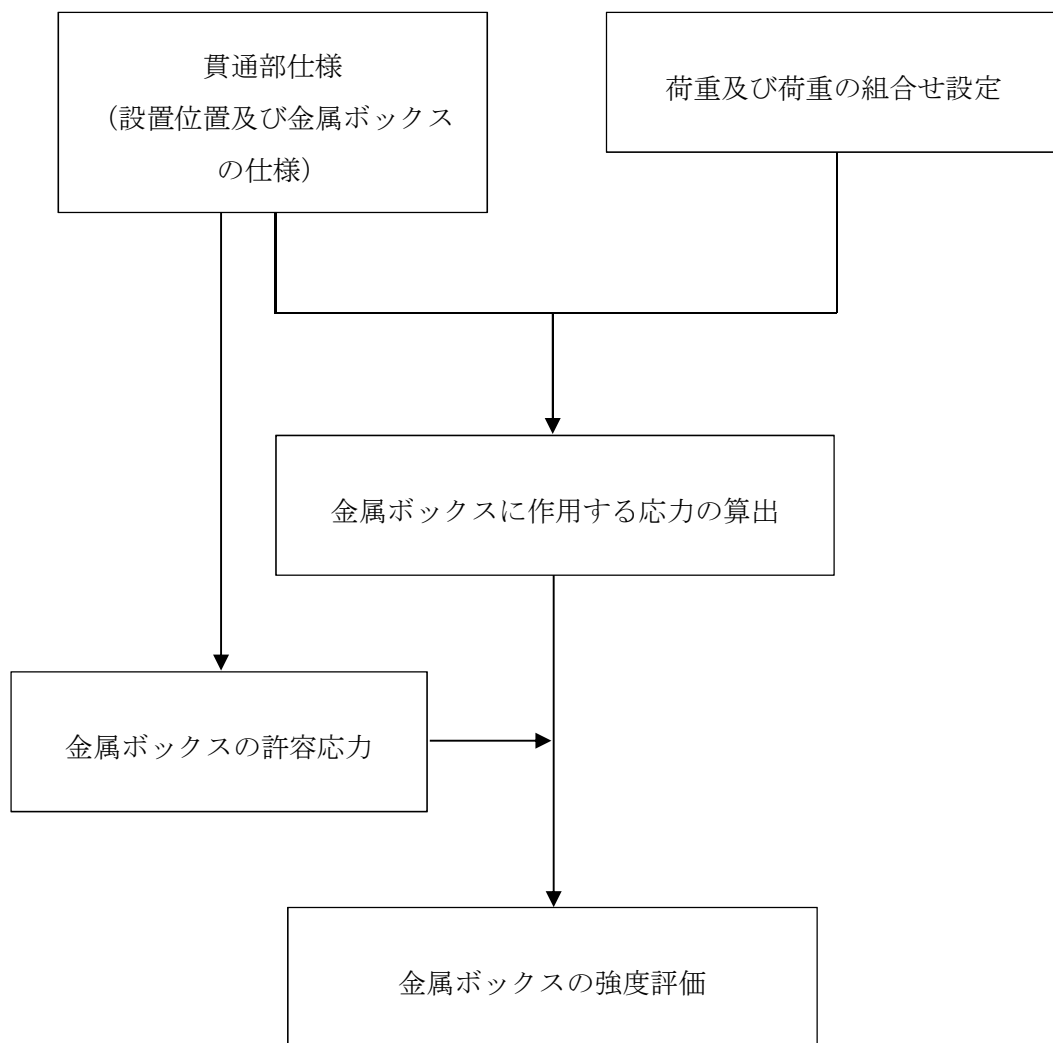


図 2-5 ケーブルトレイ金属ボックスの強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- (1) コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] 2002 年制定 ((社) 土木学会 平成 14 年 3 月)
- (2) 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2005 年版 (2007 年追補版含む。))
J S M E S N C 1 - 2005 / 2007 ((社) 日本機械学会)
- (3) 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 ((社) 日本電気協会 昭和 59 年)
- (4) 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 - 1987 ((社) 日本電気協会 昭和 62 年)
- (5) 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 ((社) 日本電気協会 平成 3 年)
- (6) 機械工学便覧 基礎編 α 3 材料力学 ((社) 日本機械学会 2005 改定)
- (7) 機械工学便覧 A 4 編 材料力学 ((社) 日本機械学会 1987)

2.5 記号の説明

強度評価に用いる記号を表 2-2, 表 2-3, 表 2-4 に示す。

表 2-2 モルタルの強度評価に用いる記号

記号	定義	単位
A'	モルタルが水圧を受ける面積 (受圧面積)	mm^2
f_s	モルタルの許容付着荷重	N
f'_{bok}	モルタル付着強度	MPa
f'_{ck}	モルタルの圧縮強度	MPa
F_H	基準地震動 S_d により生じる貫通物の軸方向に作用する荷重	N
F_S	貫通物の反力によりモルタルに生じるせん断荷重	N
F_{Stotal}	モルタル部に生じる合計せん断荷重	N
g	重力加速度	m/s^2
h	貫通部にかかる水頭	m
H	貫通部設置エリアの浸水深さ	m
K_{sd}	弾性設計用地震動 S_d に伴う余震荷重	N
L	モルタルの充填深さ	mm
P_d	動水圧	MPa
P_h	浸水津波荷重	MPa
C_H	余震による水平方向の設計震度	—
C_{Hw}	動水圧算出用の水平方向震度	—
C_V	余震による鉛直方向の設計震度	—
S	貫通物の周長	mm
W	貫通物の支持間隔の質量	kg
β	浸水エリアの幅と水深の比による補正係数	—
ρ	海水の密度	kg/m^3
γ_c	材料定数	—

表 2-3 鉄板の強度評価に用いる記号(1/2)

記号	定義	単位
A_0	水圧を受ける鉄板の面積	mm^2
A_1	鉄板と貫通物の付着面積	mm^2
A_2	鉄板と貫通物との溶接部の付着面積	mm^2
A_3	鉄板とスリーブとの溶接部の付着面積	mm^2
C_D	抗力係数	—
d	鉄板貫通物の外径	mm
D	鉄板の外径	mm
D_0	スリーブの内径	mm
f_b	鉄板及び溶接部の許容曲げ応力	N
f_s	鉄板及び溶接部の許容せん断応力	N
f_t	鉄板及び溶接部の許容引張応力	N
f_{total}	鉄板及び溶接部の許容組合せ応力	N
F	設計・建設規格 SSB-3121.1 に定める値	MPa
F_1	評価部位に加わるせん断力	N
F_2, F_3	評価部位に加わる引張力	N
F_{s1}	鉄板及び溶接部に生じる軸方向せん断力	N
F_{s2}, F_{s3}	鉄板及び溶接部に生じる軸直方向せん断力	N
g	重力加速度	m/s^2
h	貫通部位置における水圧作用高さ	m
L_1, L_2	鉄板から直近の支持装置までの距離または評価上考慮する配管長	mm
M_{s2}, M_{s3}	鉄板及び溶接部に生じるモーメント	Nmm
P_h	静水圧荷重	MPa
P_{sd}	余震による慣性力	MPa
P_t	突き上げ荷重	MPa
t_1	鉄板の板厚	mm
t_2	鉄板と貫通物との溶接部の有効のど厚	mm
t_3	鉄板とスリーブとの溶接部の有効のど厚	mm
U	鉄板に加わる流体の流速	m/s
w	貫通物の支持間隔の単位長さ当たりの質量	kg/m
Z_1	鉄板の断面係数	mm^3
Z_2	鉄板と貫通物との溶接部の断面係数	mm^3
Z_3	鉄板とスリーブとの溶接部の断面係数	mm^3

表 2-3 鉄板の強度評価に用いる記号(2/2)

記号	定義	単位
C_H	基準地震動 S d により生じる貫通物の水平方向設計震度	m/s^2
C_V	基準地震動 S d により生じる貫通物の鉛直方向設計震度	m/s^2
τ	評価部位に加わるせん断応力	MPa
σ_b	評価部位に加わる曲げ応力	MPa
σ_t	鉄板に加わる引張応力	MPa
σ_{total}	鉄板に加わる組合せ応力	MPa
ρ	海水の密度	kg/m^3

表 2-4 ケーブルトレイ金属ボックスの強度評価に用いる記号(1/2)

記号	定義	単位
A_f	評価上水圧荷重及びせん断力を受けるとして期待するアンカーボルトの総断面積	mm^2
A_{fH}	評価上引張力を受けるとして期待するアンカーボルトの総断面積（転倒方向：水平）	mm^2
A_{fV}	評価上引張力を受けるとして期待するアンカーボルトの総断面積（転倒方向：鉛直）	mm^2
a	金属ボックス評価部の短辺方向長さ	mm
B	水面の幅	mm
C_H	水平方向設計震度	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
F	設計・建設規格 SSB-3121 及び SSB-3131 に定める値	MPa
f_b	金属ボックス評価部に生じる許容曲げ応力	MPa
f_{sb}	せん断力のみを受けるとして期待するアンカーボルトの許容せん断応力	MPa
f_{to}	引張力のみを受けるとして期待するアンカーボルトの許容引張応力	MPa
f_{ts}	引張力とせん断力を同時に受けるとして期待するアンカーボルトの許容引張応力	MPa
g	重力加速度	m/s^2
h_1	据付面又は取付面から重心までの距離	mm
h_2	水頭から設置高さまでの水深	mm
H	水頭から最下層までの高さ	mm
H_1	金属ボックスの高さ方向長さ	mm
l_1	重心と下側アンカーボルト間の鉛直方向距離	mm
l_2	上側アンカーボルトと下側アンカーボルト間の鉛直方向距離	mm
l_3	左側アンカーボルトと右側アンカーボルト間の水平方向距離	mm
L_1	金属ボックスの幅	mm
m	金属ボックスの質量（充填もしくは塗布されているシール材質量を含む）	kg
P_h	静水圧荷重	MPa
P_d	Westergaard 式による動水圧荷重	MPa
P_w	金属ボックスの単位長さ辺りにかかる地震分布荷重	MPa
Q_{b1}	水平方向地震によりアンカーボルトに作用するせん断力	N
Q_{b2}	鉛直方向地震によりアンカーボルトに作用するせん断力	N
t	金属ボックス評価部の金属の厚さ	mm

表 2-4 ケーブルトレイ金属ボックスの強度評価に用いる記号(2/2)

記号	定義	単位
β	浸水エリアの幅と水深の比による補正係数 (B/H)	—
β_1	金属ボックス評価部の最大応力係数	—
ρ	溢水の密度	kg/m ³
ρ_b	金属ボックス評価部に加わる曲げ応力	MPa
ρ_{ss}	金属ボックスの単位厚さあたりの質量	kg/m ²
σ_b	アンカーボルトに作用する引張応力	MPa
σ_{b1}	鉛直方向地震及び金属ボックス取付面に対し、左右方向の水平方向地震によりアンカーボルトに作用する引張応力	MPa
σ_{b2}	鉛直方向地震及び金属ボックス取付面に対し、前後方向の水平方向地震によりアンカーボルトに作用する引張応力	MPa
σ_{b3}	金属ボックス取付面に対し、逆圧によりアンカーボルトに作用する引張応力	MPa
τ_b	アンカーボルトに作用するせん断応力	MPa

3. 評価対象部位

貫通部止水処置の評価部位は、V-3-別添 3-1-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示している評価対象部位を踏まえて、「2.2 構造概要」に示す構造計画にて設定している構造に基づき、荷重の方向及び伝達過程を考慮し設定する。

津波による静水圧及び余震を考慮した荷重は、止水処置全体へ伝達される。このことから、シール材、ブーツ、モルタル、鉄板及びフラップゲートを用いた止水処置の全体を評価部位として設定する。

モルタルについては、管の反力が大きいプロセス配管のうち、作用する荷重が最も大きい貫通部を代表として評価を行う。シール材及びブーツについては、作用する圧力が最も大きい貫通部を代表として評価を行う。さらに、ケーブルトレイ貫通部については、金属ボックスに対して逆圧がかかる場合が、金属ボックスを壁・床面に固定するアンカーボルトに最も大きな引張力がかかることから、逆圧がかかり、かつ、最も水圧が大きい貫通部を代表として評価を行う。鉄板については、静水圧荷重と余震を考慮した荷重に加えて、津波の突き上げ荷重が作用し、荷重の種類が最も多い貫通部を代表として評価を行う。なお、フラップゲートについては一箇所のみであるため、その箇所の評価を行う。

4. 構造強度評価

4.1 構造強度評価方法

貫通部止水処置の強度評価は、V-3-別添 3-1-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」にて設定している方法を用いて実施する。

貫通部止水処置の強度評価は、「3. 評価部位」に示す評価部位に対し、「4.2 荷重及び荷重の組合せ」及び「4.3 許容限界」に示す荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、「4.5 計算方法」に示す方法を用いて評価を行う。

4.2 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の種類及び荷重の組合せに関して以下に示す。

4.2.1 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。

(1) 固定荷重 (G)

固定荷重として、貫通軸上の貫通物（配管等を示す。以下同じ。）の質量及内容物の質量を考慮する。

(2) 静水圧荷重 (P_h)

静水圧荷重として、津波による水位を用いた静水圧を考慮する。

$$P_h = \rho \cdot g \cdot h$$

(3) 余震荷重 (K_{s d})

余震荷重は、V-3-別添 3-1-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、弾性設計用地震動 S_d に伴う地震力（動水圧含む。）とする。

a. モルタル

(a) 余震による地震力

イ. 貫通物による地震荷重

貫通物からモルタルに作用する荷重として、支持構造物間の固定荷重及び地震力を考慮する。図 4-1 にモルタルへの付着方向の地震力（余震荷重）の作用図を示す。

また、貫通物は柔構造となる場合があることから、貫通物の設置場所における床応答スペクトルを用いて設計震度を算出する。

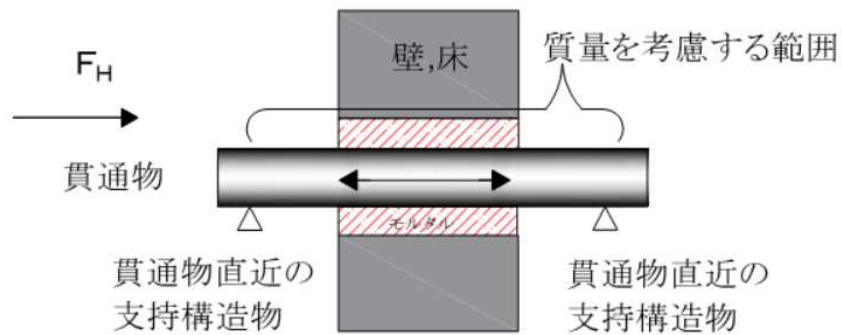


図 4-1 モルタルへの付着方向の余震荷重作用図

ロ. 評価において考慮する貫通部

評価においては、イ.に基づく地震荷重と最も荷重が大きくなる貫通物を考慮して算出する。

ハ. モルタルに作用する付着荷重

モルタルに作用する余震による付着荷重については、イ.に示す支持構造物間の貫通物に作用する地震荷重から算出する。

(b) 余震による動水圧

余震による動水圧がモルタルに作用することを考慮する。

$$P_d = \beta \cdot \frac{7}{8} \cdot \rho \cdot C_{Hw} \cdot g \cdot \sqrt{H \cdot h}$$

b. 鉄板

(a) 余震による地震力

イ. 貫通物による地震荷重

貫通物から鉄板に作用する荷重として、支持構造物間の固定荷重及び地震力を考慮する。図 4-2 に鉄板へのせん断方向の地震力（余震荷重）の作用図を示す。

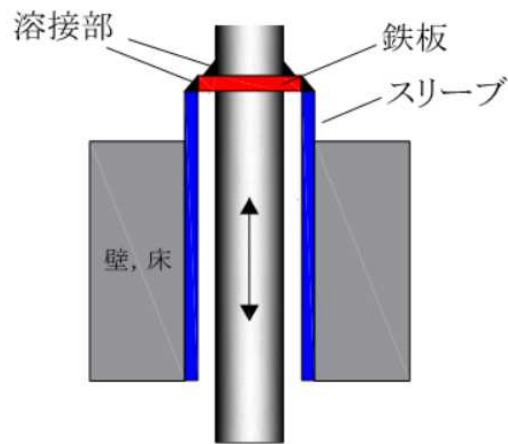


図 4-2 鉄板へのせん断方向の余震荷重作用図

ロ. 評価において考慮する貫通部

評価においては、イ. に基づく地震荷重と荷重の種類が最も多い貫通物を考慮して算出する。

ハ. 鉄板に作用するせん断荷重

鉄板に作用する余震によるせん断荷重については、イ. に示す支持構造物間の貫通物に作用する地震荷重から算出する。

(b) 余震による動水圧

慣性力として津波による静水頭が余震を受けて慣性力となる分を考慮する。

$$P_{sd} = h \cdot \rho \cdot g \cdot C_v$$

P_{sd} : 慣性力

h : 貫通部位置における浸水深さ

C_v : 地震加速度

(c) 突き上げ津波荷重

突き上げ荷重として津波による水圧を考慮する。

$$P_t = 1/2 \cdot C_D \cdot \rho \cdot U^2$$

P_t : 突き上げ荷重

C_D : 抗力係数 (=2.01)

U : 流速 (=1.5m/s)

c. ケーブルトレイ金属ボックス

(a) 余震による地震力

ケーブルトレイ金属ボックスは、アンカーボルトによって固定されていることから、アンカーボルトには固定荷重と余震荷重が作用し、金属ボックスが水平方向及び鉛直方向へ転倒する力が働く。アンカーボルトに作用する余震荷重作用図を図4-3に示す。

また、固有値解析の計算結果 (V-2-10-2-4-2「貫通部止水処置の耐震性についての計算書」の「4. 固有周期」「4.3 固有値解析結果」を参照) から固有周期が0.05秒以下で剛構造のため、金属ボックスの設置場所における最大応答加速度を用いて算出する。

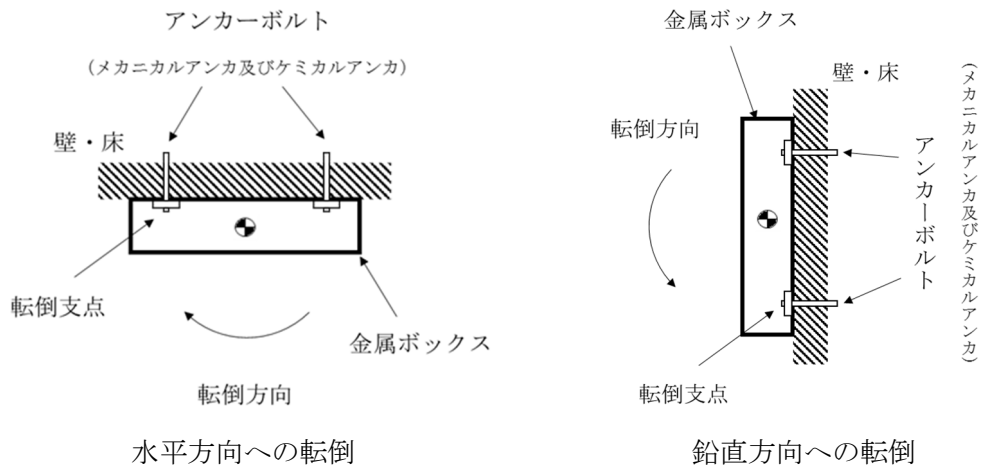


図4-3 ケーブルトレイ金属ボックスの荷重作用図

(b) 余震による動水圧

余震による動水圧が金属ボックスに作用することを考慮する。

$$P_d = \beta \cdot \frac{7}{8} \cdot \rho \cdot C_H \cdot g \cdot \sqrt{H \cdot h_2}$$

4.2.2 荷重の組合せ

貫通部止水処置の荷重の組合せを表 4-1 に示す。

表 4-1 荷重の組合せ

施設区分	機器名称	荷重の組合せ*
浸水防護施設 (浸水防止設備)	タービン建屋内 貫通部止水処置	$G + P_h + P_t + K_{S_d}$

注記* : G は固定荷重, P_h は静水圧荷重, P_t は突き上げ荷重, K_{S_d} は弾性設計用地震動 S_d による余震荷重 (慣性力 P_{sd}) を示す。

4.3 許容限界

(1) モルタル

各評価部位の許容値は, コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] 2002 年制定 ((社) 土木学会平成 14 年 3 月) に規定される許容限界を用いる。

貫通部止水処置の許容限界を表 4-2, 許容限界評価条件を表 4-3, 貫通部止水処置の許容限界算出結果を表 4-4 に示す。また, モルタルの施工例を図 4-4 に示す。

表 4-2 貫通部止水処置の許容限界 (許容荷重)

状態	許容限界*
	付着荷重
短期	f_s

注記* : モルタルの許容限界は、コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] 2002 年制定 ((社) 土木学会平成 14 年 3 月) によりモルタルの許容付着荷重 f_s , モルタル付着強度 f'_{bok} を算出する。モルタル圧縮強度 f'_{ck} は設計値を用いる。また、評価において最も荷重が大きくなる貫通物の口径 = 200A, モルタル充填深さ $L=1000\text{mm}$ とする。

$$f_s = f'_{bok} \cdot S \cdot L / \gamma_c$$

$$f'_{bok} = 0.28 \cdot f'_{ck}{}^{2/3} \cdot 0.4$$

表 4-3 貫通部止水処置の許容限界評価条件

評価部位	f'_{ck} *	γ_c *
モルタル	32.3	1.3

注記* : f'_{ck} : モルタル圧縮強度, γ_c : 材料定数を示す。

表 4-4 貫通部止水処置の許容限界算出結果

状態	評価部位	許容限界
		付着荷重 (kN)
短期	モルタル	593

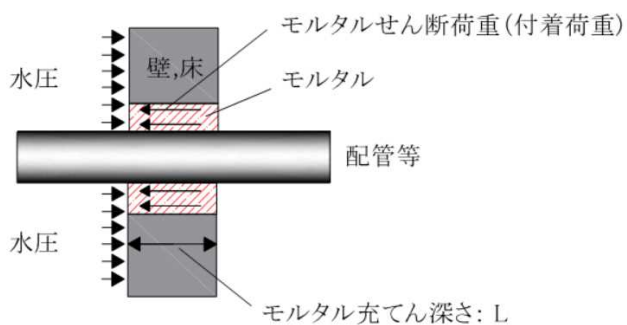


図 4-4 モルタルの施工例

(2) シール材

シール材の許容限界値は、実機で使用している形状、寸法の試験体にて静水圧を付加した水圧試験に基づく結果を用いる。シール材の水圧試験の概要を図4-5に示す。実機施工時には、試験検証済みの許容限界寸法以上となるように施工する。これにより試験で得られた許容限界値以上の耐圧性を有し、かつ、想定する浸水高さから求まる静水圧が、許容限界値以内であることを確認し確実に耐圧性を確保する。

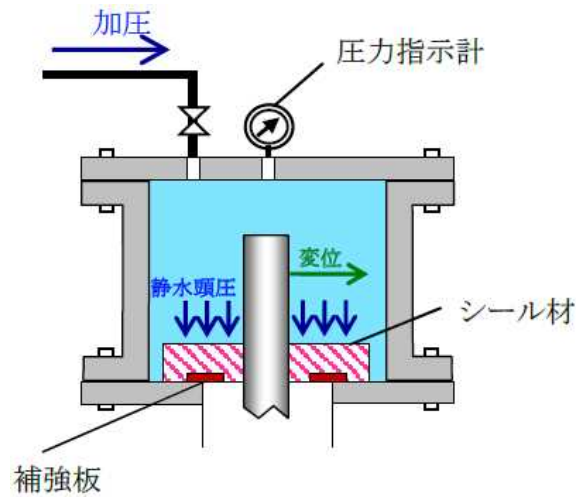


図4-5 シール材の水圧試験の概要

(3) ブーツ

ブーツの許容限界値は、実機で使用している形状、寸法の試験体にて静水圧を付加した水圧試験に基づく結果を用いる。また、実機の施工状況を考慮し、受圧面がブーツ内側又は外側のどちらの場合でも止水機能が確保できることを確認するため、内圧試験及び外圧試験の両ケースを実施する。ブーツの水圧試験の概要を図4-6に示す。

実機施工時には、試験検証済みの寸法以下で施工する。

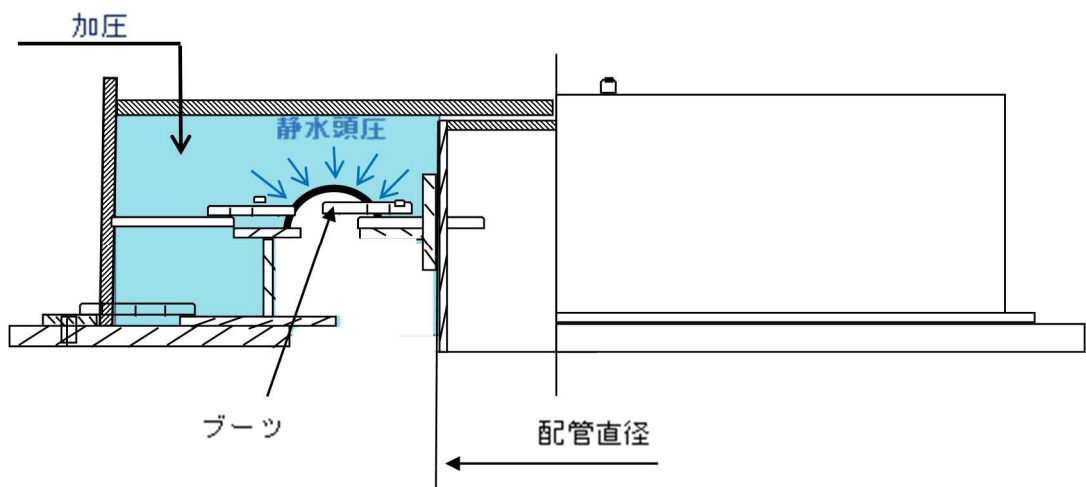


図4-6 ブーツの水圧試験の概要

(4) 鉄板

各評価部位の許容値は設計・建設規格に規定される許容値を用いる。鉄板の許容荷重を表 4-5, 許容限界荷重評価条件を表 4-6, 許容限界算出結果を表 4-7 に示す。

表 4-5 鉄板の許容限界

評価部位	許容応力状態	許容限界*			
		引張応力 f_t	せん断応力 f_s	曲げ応力 f_b	組合せ応力 f_{total}
鉄板	Ⅲ _A S	$\frac{F}{1.5} \cdot 1.5$	$\frac{F}{1.5\sqrt{3}} \cdot 1.5$	$\frac{F}{1.5} \cdot 1.5$	$\frac{F}{1.5} \cdot 1.5$
配管と鉄板との溶接部		$\frac{F}{1.5\sqrt{3}} \cdot 1.5$	$\frac{F}{1.5\sqrt{3}} \cdot 1.5$	$\frac{F}{1.5\sqrt{3}} \cdot 1.5$	$\frac{F}{1.5\sqrt{3}} \cdot 1.5$
鉄板とスリーブとの溶接部					

注記* : 当該の応力が生じない場合, 規格基準で省略可能とされている場合及び他の応力で代表可能である場合は評価を省略する。

表 4-6 鉄板の許容限界評価条件

評価部位	材料	温度条件 (°C)		F (MPa)
		周囲環境温度		
鉄板	SUS304	周囲環境温度	40	205
配管と鉄板との溶接部	SUS304 (配管, 鉄板)	周囲環境温度	40	205
鉄板とスリーブとの溶接部	SGP (スリーブ)	周囲環境温度	40	147

表 4-7 鉄板の許容限界算出結果

評価部位	許容限界			
	引張応力 f_t (MPa)	せん断応力 f_s (MPa)	曲げ応力 f_b (MPa)	組合せ応力 f_{total} (MPa)
鉄板	204	117	204	204
配管と鉄板 との溶接部	117	117	117	117
鉄板とスリーブ との溶接部	84	84	84	84

(5) フラップゲート

フラップゲートの許容限界値は、実機で使用しているフラップゲートと同構造で寸法の異なる試験体にて静水圧を付加した水圧試験に基づく結果を用いる。

(6) ケーブルトレイ金属ボックス

各評価部位の許容値は設計・建設規格に規定される許容値を用いる。金属ボックス及びアンカーボルトの許容応力を表 4-8、許容限界荷重評価条件を表 4-9、金属ボックスの許容限界算出結果を表 4-10 に示す。また、ケーブルトレイ金属ボックスの施工例を図 4-7 に示す。

表4-8 金属ボックス及びアンカーボルトの許容限界

評価部位	許容応力状態	許容限界*1, *2		
		一次応力		
		引張応力 f_{t0}	せん断応力 f_{sb}	曲げ応力 f_h
金属ボックス	Ⅲ _A S	—	—	$\frac{F}{1.3} \cdot 1.5$
アンカーボルト		$\frac{F}{2} \cdot 1.5$	$\frac{F}{1.5\sqrt{3}} \cdot 1.5$	—

注記*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。

*2：当該の応力が生じない場合、規格基準で省略可能とされている場合及び他の応力で代表可能である場合は評価を省略する。

表 4-9 金属ボックス及びアンカーボルトの許容限界評価条件

評価部位	材料	温度条件 (°C)		F (MPa)
		周囲環境温度		
金属ボックス	SS400 相当	周囲環境温度	40	215
アンカーボルト	SS400 相当	周囲環境温度	40	215

表 4-10 金属ボックスの許容限界算出結果

評価部位	許容限界
	曲げ応力 (MPa)
金属ボックス	248

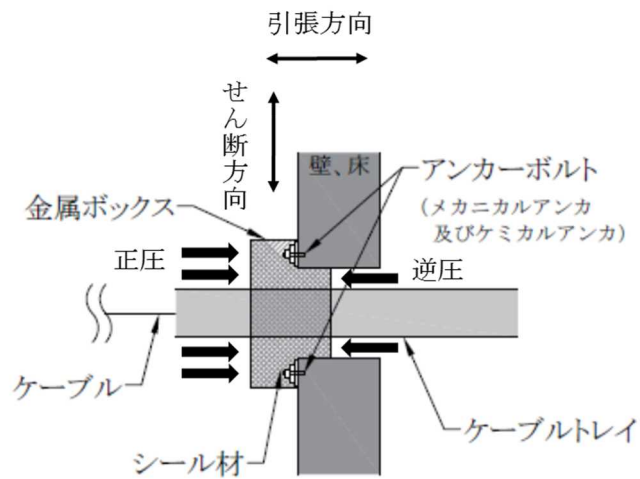


図 4-7 ケーブルトレイ金属ボックスの施工例

4.4 設計用地震力

(1) モルタル

モルタルの強度評価に使用する弾性設計用地震動 S_d に伴う地震力については、V-2-1-7「設計用床応答曲線の作成方針」に基づき策定した設計用床応答曲線を用いる。また、減衰定数はV-2-1-6「地震応答解析の基本方針」に記載の減衰定数を用いる。貫通部止水処置の強度計算に用いる設計震度を表 4-11 に示す。

表 4-11 モルタルの設計震度

地震動	設置場所及び 床面高さ (mm)	余震による設計震度*1	
		弾性設計用地震動 S _d	タービン地下中 2 階 T. M. S. L. 500 (T. M. S. L. 4900*2)
		鉛直方向 C _V	3.57

注記*1：モルタル止水処置は評価対象箇所が多いことから、設計震度の算出が合理的となる様に全周期帯の最大加速度とした。また、保守的な評価となる様に設置場所の床応答曲線は減衰定数 0.5% を適用した。

*2：設置場所の基準床レベルを示す。

(2) 鉄板

鉄板の強度評価に使用する弾性設計用地震動 S_d に伴う地震力については、V-2-1-7「設計用床応答曲線の作成方針」に基づき策定した設計用床応答曲線を用いる。また、減衰定数はV-2-1-6「地震応答解析の基本方針」に記載の減衰定数を用いる。貫通部止水処置の強度計算に用いる設計震度を表 4-12 に示す。

表 4-12 鉄板の設計震度

地震動	設置場所及び 床面高さ (mm)	余震による設計震度*1	
		弾性設計用地震動 S _d	タービン地下 1 階 T. M. S. L. 3500 (T. M. S. L. 4900*2)
		鉛直方向 C _V	1.56

注記*1：鉄板止水処置は取水槽水位計のバブラー管の設置場所の床応答曲線 (T. M. S. L. 4900mm, 減衰定数 0.5%) から貫通物の固有周期 () に対応した加速度を設計震度とした。

*2：設置場所の基準床レベルを示す。

(3) ケーブルトレイ金属ボックス

ケーブルトレイ金属ボックスの強度評価に使用する弾性設計用地震動 S d に伴う地震力については、V-2-1-7「設計用床応答曲線の作成方針」に示す最大床応答加速度を考慮して設定する。ケーブルトレイ金属ボックスの強度計算に用いる設計震度を表 4-13 に示す。

表 4-13 ケーブルトレイ金属ボックスの設計震度

地震動	設置場所 及び 床面高さ (mm)	余震による設計震度*1	
		水平方向 C _H	
弾性設計用地震動 S d	タービン地下 2 階 T. M. S. L. -3350 (T. M. S. L. -1100*2)	水平方向 C _H	0.51
		鉛直方向 C _V	0.44

注記*1：ケーブルトレイ金属ボックスは固有周期が 0.05 秒以下であり剛構造のため、基準床の最大応答加速度の 1.2 倍を設計震度とした。

*2：設置場所の一階層上の基準床レベルを示す。

4.5 計算方法

4.5.1 モルタルの強度評価（荷重計算）

(1) 貫通物の反力により生じる荷重

固定荷重及び地震時の貫通物の反力によりモルタルに生じる荷重は次のとおり算出する。せん断荷重は、水平反力と貫通軸上の貫通物の質量から次のとおり算出する。

$$F_H = W \cdot g \cdot (1 + C_H)$$

$$F_S = F_H$$

(2) 合計荷重

モルタルに発生する合計せん断荷重 F_{Total} は次のとおり算出する。

$$F_{\text{Total}} = F_S + (P_h + P_d) \cdot A'$$

4.5.2 シール材、ブーツ及びフラップゲートの強度評価（発生圧力計算）

シール材及びブーツについては設置箇所がタービン建屋内となることから、津波による溢水の浸水津波荷重 P_h を考慮するとともに、余震による動水圧 P_d を考慮する。

$$P_{\text{total}} = P_h + P_d$$

4.5.3 鉄板の強度評価

(1) 鉄板を貫通する配管の反力により生じる荷重

固定荷重及び地震時の貫通物の反力により鉄板に生じる荷重は次の通り算出する。

a. 鉄板に掛かる荷重

$$\begin{aligned} \text{軸方向引張力} : F_{s1} &= w(1 + C_v)(L_1 + L_2) \cdot g \\ \text{軸直方向せん断力} : F_{s2} = F_{s3} &= 5/8 w(1 + C_H)L_1 \cdot g \\ &\quad + w(1 + C_H)L_2 \cdot g \\ \text{モーメント} : M_{s2} = M_{s3} &= 1/8 w(1 + C_H)L_1^2 \cdot g \\ &\quad + 1/2 w(1 + C_H)L_2^2 \cdot g \end{aligned}$$

C_v : 鉄板に加わる鉛直方向の地震加速度

C_H : 鉄板に加わる水平方向の地震加速度

(2) 鉄板にかかる水圧により生じる荷重

津波による水圧により鉄板に生じる荷重は次の通り算出する。

a. 静水圧 (P_h)

$$P_h = \rho \cdot g \cdot h$$

b. 突き上げ荷重 (P_t)

$$P_t = 1/2 \cdot C_p \cdot \rho \cdot U^2$$

C_p : 抗力係数 (= 2.01)

U : 鉄板にかかる津波速度 (= 1.5 m/s)

c. 慣性力 (P_{sd})

$$P_{sd} = \rho \cdot g \cdot h \cdot C_v$$

(3) 鉄板にかかる荷重の合力

鉄板にかかる固定荷重，地震荷重及び水圧荷重の各軸方向の合力は次の通り算出する。

軸方向引張力 (F_1)

$$F_1 = F_{s1} + (P_h + P_t + P_{sd}) \cdot A_0$$

静水圧を受ける鉄板の面積 (A_0)

$$A_0 = (D_0^2 - d^2) \pi / 4$$

D_0 : スリーブ内径

d : 鉄板貫通物の外径

(4) 鉄板にかかる応力

鉄板及び溶接部に生じる応力は次の通り算出する。

a. 鉄板に掛かる応力

(a) 引張応力 : $\sigma_t = F_1 / A_1$

$$A_1 = \pi d \cdot t_1$$

t_1 = 鉄板板厚

(b) せん断応力 : $\tau_{2,3} = 2 \cdot F_{s2,s3} / A_1$

$$\tau = \sqrt{\tau_2^2 + \tau_3^2}$$

(c) 曲げ応力 : $\sigma_{b2,3} = M_{s2,3} / Z_1$

$$\sigma_b = \sqrt{\sigma_{b2}^2 + \sigma_{b3}^2}$$

(d) 組合せ応力 : $\sigma_{\text{total}} = \sqrt{(\sigma_t + \sigma_b)^2 + 3\tau^2}$

b. 鉄板と配管との溶接部に生じる応力

(a) 引張応力 : $\sigma_t = F_1 / A_2$

$$A_2 = \pi d \cdot t_2$$

t_2 = のど厚

(b) せん断応力 : $\tau_{2,3} = 2 \cdot F_{s2,s3} / A_2$

$$\tau = \sqrt{\tau_2^2 + \tau_3^2}$$

(c) 曲げ応力 : $\sigma_{b2,3} = M_{s2,3} / Z_2$

$$\sigma_b = \sqrt{\sigma_{b2}^2 + \sigma_{b3}^2}$$

(d) 組合せ応力 : $\sigma_{\text{total}} = \sqrt{(\sigma_t + \sigma_b)^2 + \tau^2}$

c. 鉄板とスリーブとの溶接部に生じる応力

(a) 引張応力 : $\sigma_t = F_1/A_3$

$$A_3 = \pi d \cdot t_3$$

$t_3 =$ のど厚

(b) せん断応力 : $\tau_{2,3} = 2 \cdot F_{s2,s3}/A_3$

$$\tau = \sqrt{\tau_2^2 + \tau_3^2}$$

(c) 曲げ応力 : $\sigma_{b2,3} = M_{s2,3}/Z_3$

$$\sigma_b = \sqrt{\sigma_{b2}^2 + \sigma_{b3}^2}$$

(d) 組合せ応力 : $\sigma_{total} = \sqrt{(\sigma_t + \sigma_b)^2 + \tau^2}$

4.5.4 ケーブルトレイ金属ボックスの強度評価

(1) 余震によりボルトに生じる応力

固定荷重，弾性設計用地震動 S_d 及び逆圧により，アンカーボルトに生じる応力は次の通り算出する。

a. アンカーボルトに生じる応力

イ. 引張応力の計算

固定荷重，弾性設計用地震動 S_d によりアンカーボルトに生じる引張力は，最も厳しい条件として，図 4-3 で片側のボルト列を支点とする転倒を考え，これをもう片側のボルト列で受けるものとして計算する。

金属ボックスが水平方向に転倒する場合の引張応力

$$\sigma_{b1} = \frac{m \cdot C_H \cdot h_1 \cdot g}{A_{fH} \cdot \ell_3} + \frac{m \cdot (1+C_V) \cdot h_1 \cdot g}{A_{fV} \cdot \ell_2}$$

金属ボックスが鉛直方向に転倒する場合の引張応力

$$\sigma_{b2} = \frac{m \cdot C_H \cdot \ell_1 \cdot g + m \cdot (1+C_V) \cdot h_1 \cdot g}{A_{fV} \cdot \ell_2}$$

逆圧による引張力は，ボルト全本数で受けるものとして計算する。

$$\sigma_{b3} = \frac{(P_h + P_d) \cdot H_1 \cdot L_1}{A_f}$$

引張応力

$$\sigma_b = \text{Max}((\sigma_{b1} + \sigma_{b3}), (\sigma_{b2} + \sigma_{b3}))$$

ロ. せん断応力の計算

アンカー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計算する。

水平方向の力

$$Q_{b1} = C_H \cdot m \cdot g$$

鉛直方向の力

$$Q_{b2} = (1+C_V) \cdot m \cdot g$$

せん断応力

$$\tau_b = \frac{\sqrt{Q_{b1}^2 + Q_{b2}^2}}{A_f}$$

(2) 余震により金属ボックスに生じる応力

津波による溢水を考慮した浸水水圧及び余震により金属ボックスに生じる曲げ応力は次の通り算出する。なお、正圧による曲げ応力と逆圧による曲げ応力の内、大きい側の応力で評価を行う。

a. 金属ボックスに掛かる荷重

イ. 静水圧荷重 (P_h)

$$P_h = \rho \cdot g \cdot h_2 \cdot 10^{-9}$$

ロ. 動水圧荷重 (P_d)

$$P_d = \beta \cdot \frac{7}{8} \cdot \rho \cdot C_H \cdot g \cdot \sqrt{H \cdot h_2} \cdot 10^{-9}$$

ハ. 金属ボックスの単位長さあたりにかかる地震分布荷重

$$P_w = \rho_{ss} \cdot g \cdot t \cdot C_H \cdot 10^{-9}$$

b. 金属ボックスに生じる曲げ応力

$$\rho_b = \beta_1 (P_h + P_d + P_w) \cdot \frac{a^2}{t^2}$$

4.6 計算条件

(1) モルタル

モルタルの強度評価に用いる貫通部の仕様及び津波荷重に関わる計算条件を除く計算条件を表4-14に示す。

表4-14 貫通部の仕様及び津波荷重に関わる計算条件を除く計算条件（モルタル）


貫通部箇所 (貫通部仕様)	浸水エリアの幅と 水深の比による 補正係数 β	海水の密度 ρ (kg/m ³)	貫通部位置における 浸水深さ H (m)
タービン建屋 地下中2階 (モルタル)	1	1030	21.8

貫通部にかかる水頭 h (m)	貫通物の支持間隔 の質量 W (kg)	モルタルが水圧を 受ける面積 A' (m ²)	動水圧算出用の 水平方向震度 C _{HW} (-)
11.99		0.043	0.47

(2) 鉄板

鉄板の強度評価に用いる貫通部の仕様及び津波荷重に関わる計算条件を表 4-15 に示す。

表 4-15 鉄板の強度評価に関する荷重評価条件

貫通部箇所 (貫通部仕様)	海水の密度 ρ (kg/m ³)	貫通部位置における 水圧作用高さ h (m)	貫通物の支持間隔の 単位長さ当たりの質 量 w (kg/m)
タービン建屋 地下 1 階 (鉄板)	1030	5.5	

鉄板から直近の支持 装置までの距離 L ₁ (mm)	鉄板から直近の支持 装置までの距離 L ₂ (mm)	鉄板の外径 D (mm)	スリーブの内径 D ₀ (mm)
1164	240	160	155.2


鉄板貫通物の外径 d (mm)	鉄板の断面係数 Z ₁ (mm ³)	鉄板と貫通物との 溶接部の断面係数 Z ₂ (mm ³)	鉄板とスリーブとの 溶接部の断面係数 Z ₃ (mm ³)
48.6	9461	7791	57316

鉄板の板厚 t ₁ (mm)	溶接部ののど厚 t ₂ (mm)	溶接部ののど厚 t ₃ (mm)
4	3.8	2.8

(3) ケーブルトレイ金属ボックス

ケーブルトレイ金属ボックスの強度評価に関する荷重評価条件を表 4-16 に示す。

表 4-16 ケーブルトレイ金属ボックスの余震時の評価に関する荷重評価条件(1/2)

貫通部箇所	質量 m (kg)	重心距離 h ₁ (mm)	重心高さ ℓ ₁ (mm)
タービン建屋 地下 2 階 (ケーブルトレイ)		200*	1355*

評価上引張力を受けるとして期待する鉛直方向のアンカーボルトの総断面積 (転倒方向：水平) A _{FH} (mm ²)	評価上引張力を受けるとして期待する水平方向のアンカーボルトの総断面積 (転倒方向：鉛直) A _{FV} (mm ²)	上側アンカーボルトと下側アンカーボルト間の鉛直方向距離 ℓ ₂ (mm)	左側アンカーボルトと右側アンカーボルト間の水平方向距離 ℓ ₃ (mm)
942	1049	1355	1660

評価上水圧荷重及びせん断力を受けるとして期待するアンカーボルトの総断面積 A _F (mm ²)	重力加速度 g m/s ²	金属ボックスの 高さ方向長さ H ₁ (mm)	金属ボックスの幅 L ₁ (mm)
4660	9.80665	1355	1660

溢水密度 ρ (kg/m ³)	浸水エリアの幅と水深の比による補正係数 β	水頭から最下層までの高さ H (mm)	水頭から設置高さまでの水深 h ₂ (mm)
1030	1.0	3500	7185

注記*：重心位置を保守的な位置に設定して評価する。

表 4-16 ケーブルトレイ金属ボックスの余震時の評価に関する荷重評価条件(2/2)

金属ボックスの単位 厚さあたりの質量 ρ_{ss} (kg/m ²)	最大応力係数 β_1	金属ボックス 評価部の 短辺方向長さ a (mm)	金属ボックス 評価部の 金属の厚さ t (mm)
7850	0.75	275	6.4

5. 評価結果

モルタル、シール材、ブーツ、鉄板、フラップゲート及びケーブルトレイ金属ボックスの強度評価結果をそれぞれ表5-1、表5-2、表5-3、表5-4、表5-5、表5-6、表5-7に示す。モルタル、シール材、ブーツ、鉄板、フラップゲート及びケーブルトレイ金属ボックスの発生荷重、発生圧力又は発生応力は、許容荷重、許容圧力又は許容応力以下であることを確認した。

表5-1 モルタルの津波による溢水に対する強度評価結果

評価部位	発生荷重 (kN)		許容荷重 (kN)
モルタル	せん断荷重 (付着荷重)		593

表5-2 シール材の津波による溢水に対する強度評価結果

評価部位	発生圧力 (MPa)	許容圧力 (MPa)
シール材	0.30	0.32

表5-3 ブーツの津波による溢水に対する強度評価結果

評価部位	場所	発生圧力 (MPa)	許容圧力 (MPa)
ブーツ	タービン建屋	0.12	0.4

注記：溢水への配慮が必要な施設においては、廃棄物処理建屋の発生圧力が最も大きく0.17MPaになる。

表5-4 鉄板の経路からの津波に対する強度評価結果

評価部位	引張応力 (MPa)		せん断応力 (MPa)		曲げ応力 (MPa)		組合せ応力 (MPa)	
	発生	許容	発生	許容	発生	許容	発生	許容
鉄板		204		117		204		204
配管と鉄板との溶接部		117		117		117		117
配管とスリーブとの溶接部		84		84		84		84

表 5-5 フラップゲートの津波による溢水に対する強度評価結果

評価部位	発生応力 (MPa)	許容圧力 (MPa)
フラップゲート	0.09	0.2

表 5-6 ケーブルトレイ金属ボックスのアンカーボルトの津波による溢水に対する強度評価結果

応力	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
引張応力		$f_{ts} = 129^*$
せん断応力		$f_{sb} = 99$

注記* : $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$

表 5-7 ケーブルトレイ金属ボックスの津波による溢水に対する強度評価結果

評価部位	曲げ応力 (MPa)	許容曲げ応力 (MPa)
金属ボックス		248