

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点や防護上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-20-0121_改1
提出年月日	2021年6月7日

VI-3-別添 3-2-6 水密扉の強度計算書

2021年6月

東北電力株式会社

目 次

VI-3-別添 3-2-6 水密扉の強度計算書

VI-3-別添 3-2-6 水密扉の強度計算書

目 次

1. 概要	1
2. 一般事項	2
2.1 検討対象水密扉一覧	2
2.2 配置概要	3
2.3 構造計画	10
2.4 評価方針	11
2.5 適用規格・基準等	13
2.6 記号の説明	14
3. 強度評価	16
3.1 評価対象部位	16
3.2 荷重及び荷重の組合せ	19
3.2.1 荷重の設定	19
3.2.2 荷重の組合せ	22
3.3 許容限界	23
3.3.1 使用材料	23
3.3.2 許容限界	24
3.4 評価方法	26
3.4.1 応力算定	26
3.4.2 断面検定	40
3.5 評価条件	44
3.6 評価結果	50

1. 概要

本資料は、添付書類「VI-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に基づき、浸水防止設備である第 3 号機海水熱交換器建屋の水密扉、原子炉建屋の水密扉及び制御建屋の水密扉（以下「水密扉」という。）が、地震後の繰返しの襲来を想定した経路からの津波の浸水に伴う津波荷重及び余震荷重又は津波による溢水を考慮した浸水に伴う津波荷重及び余震荷重を考慮した荷重に対して、浸水することを防止するために十分な構造健全性及び止水性を有していることを説明するものである。

なお、水密扉の耐震評価においては、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による地殻変動に伴い、牡鹿半島全体で約 1m の地盤沈下が発生したことを考慮する。

2. 一般事項

2.1 検討対象水密扉一覧

検討対象の水密扉を表 2-1 に示す。

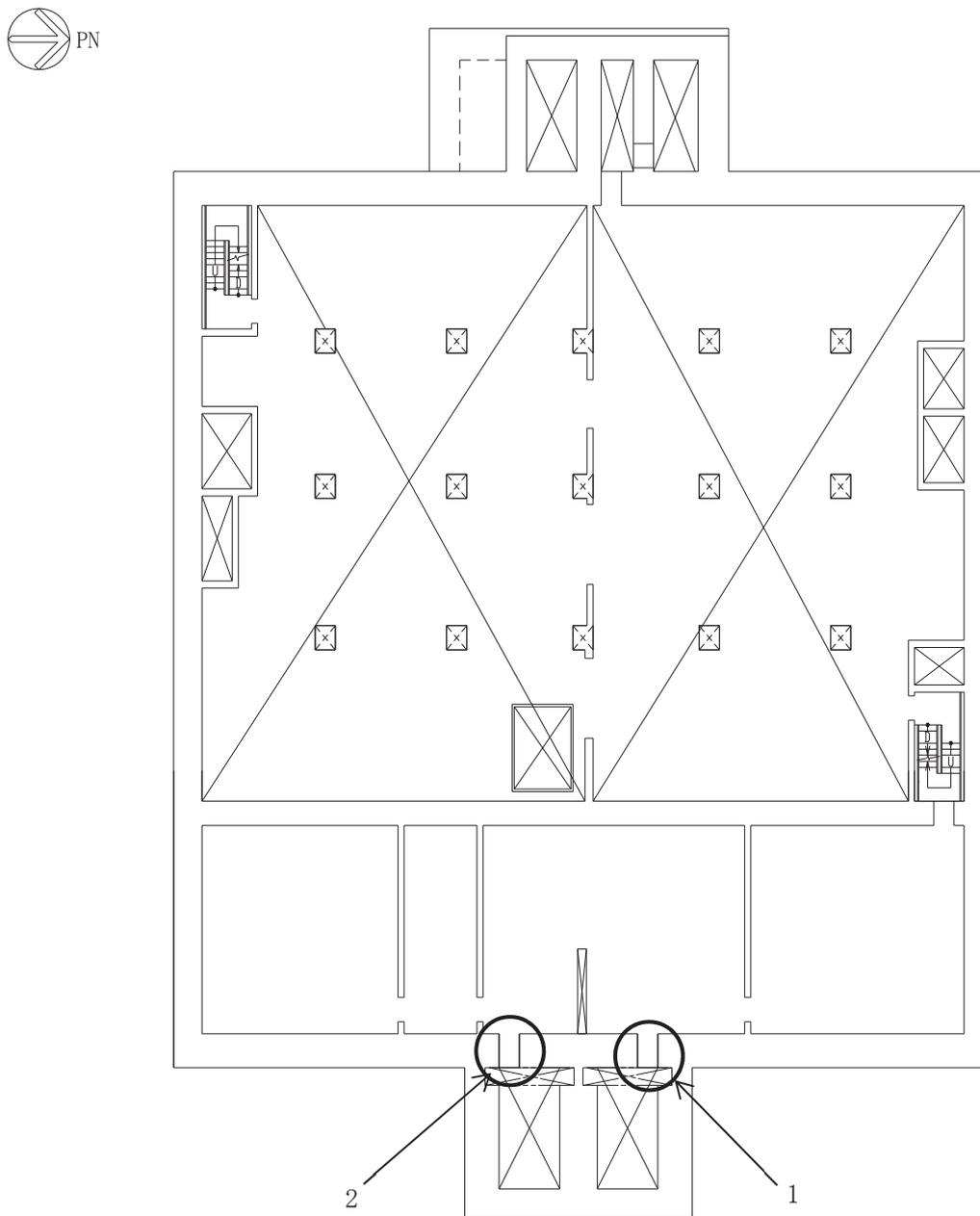
表 2-1 検討対象水密扉一覧

水密扉 No.	扉名称	設置高さ* O.P.
1	水密扉（第 3 号機海水熱交換器建屋海水ポンプ設置エリア）(No. 1)	2.00m
2	水密扉（第 3 号機海水熱交換器建屋海水ポンプ設置エリア）(No. 2)	2.00m
3	原子炉建屋浸水防止水密扉 (No. 1)	14.00m
4	原子炉建屋浸水防止水密扉 (No. 2)	14.00m
5	制御建屋空調機械 (A) 室浸水防止水密扉	0.50m
6	制御建屋空調機械 (B) 室浸水防止水密扉	0.50m
7	計測制御電源室 (B) 浸水防止水密扉 (No. 3)	7.00m
8	制御建屋浸水防止水密扉 (No. 1)	18.50m
9	制御建屋浸水防止水密扉 (No. 2)	14.00m
10	制御建屋浸水防止水密扉 (No. 3)	14.00m
11	制御建屋浸水防止水密扉 (No. 4)	14.00m
12	制御建屋浸水防止水密扉 (No. 5)	14.00m
13	第 2 号機 MCR 浸水防止水密扉	22.50m

注記*：平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による地殻変動に伴い、牡鹿半島全体で約 1m の地盤沈下が発生していることを考慮した設計とし、地盤沈下量を考慮した高さを示す。

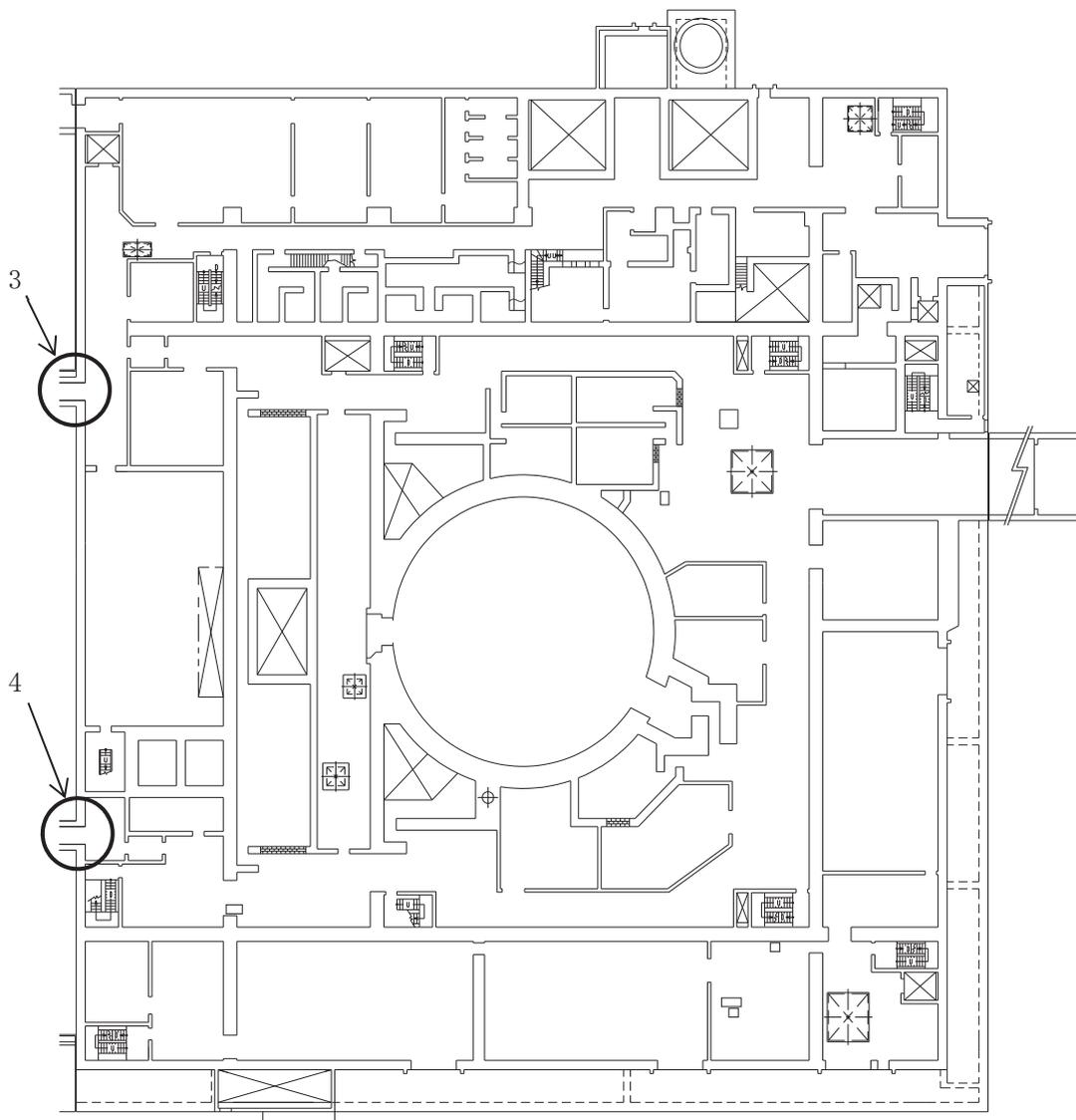
2.2 配置概要

第3号機海水熱交換器建屋の水密扉の設置位置図を図2-1に、原子炉建屋の水密扉の設置位置図を図2-2に、制御建屋の水密扉の設置位置図を図2-3に示す。



1	水密扉（第3号機海水熱交換器建屋海水ポンプ設置エリア）(No. 1)
2	水密扉（第3号機海水熱交換器建屋海水ポンプ設置エリア）(No. 2)

図2-1 第3号機海水熱交換器建屋の水密扉の設置位置図 O.P. 2.00m



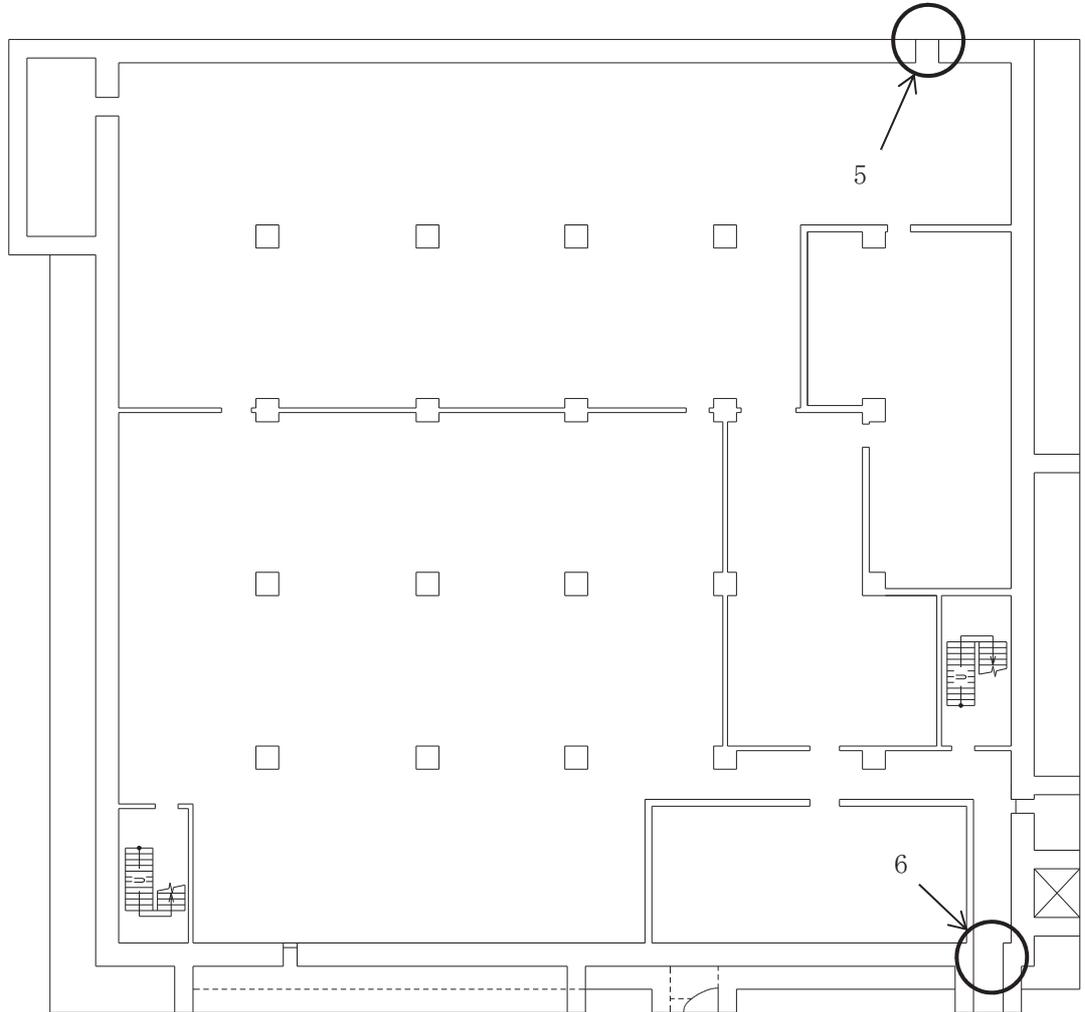
○ 2 ⑤ VI-3-別添 3-2-6 R 1

3	原子炉建屋浸水防止水密扉 (No. 1)
4	原子炉建屋浸水防止水密扉 (No. 2)

図 2-2 原子炉建屋の水密扉の設置位置図 0. P. 14. 00m



○ 2 ⑤ VI-3-別添 3-2-6 R 1

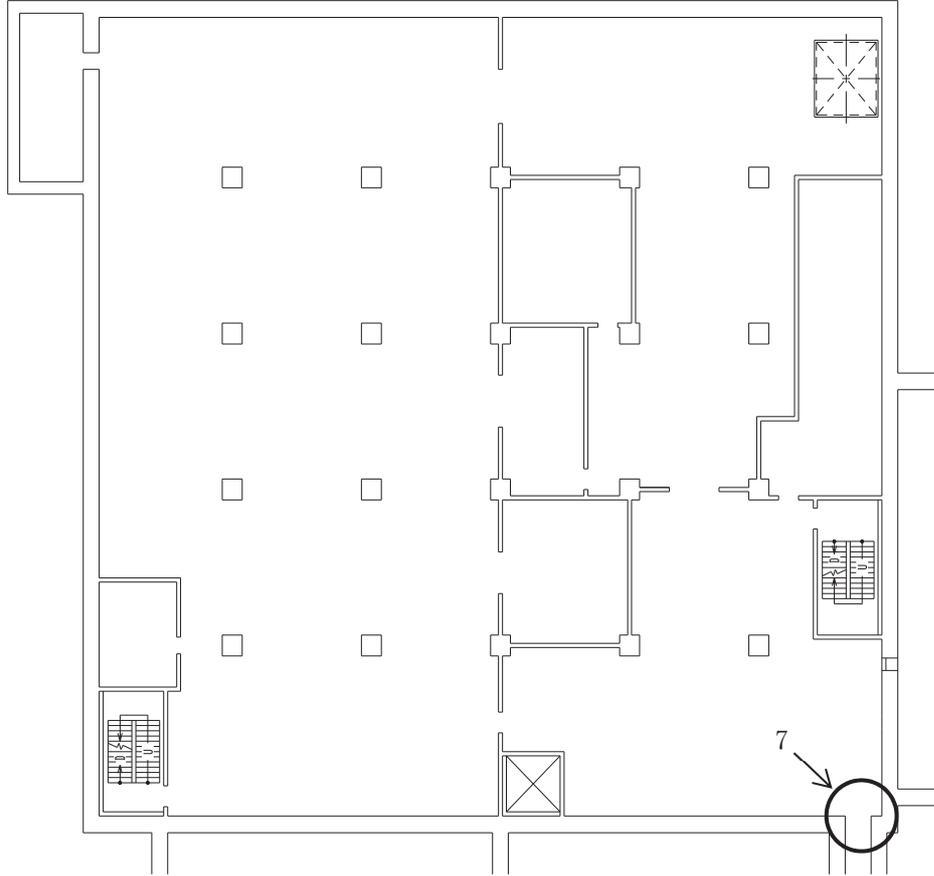


5	制御建屋空調機械(A)室浸水防止水密扉
6	制御建屋空調機械(B)室浸水防止水密扉

図 2-3 制御建屋の水密扉の設置位置図(1/5) O.P. 0.50m

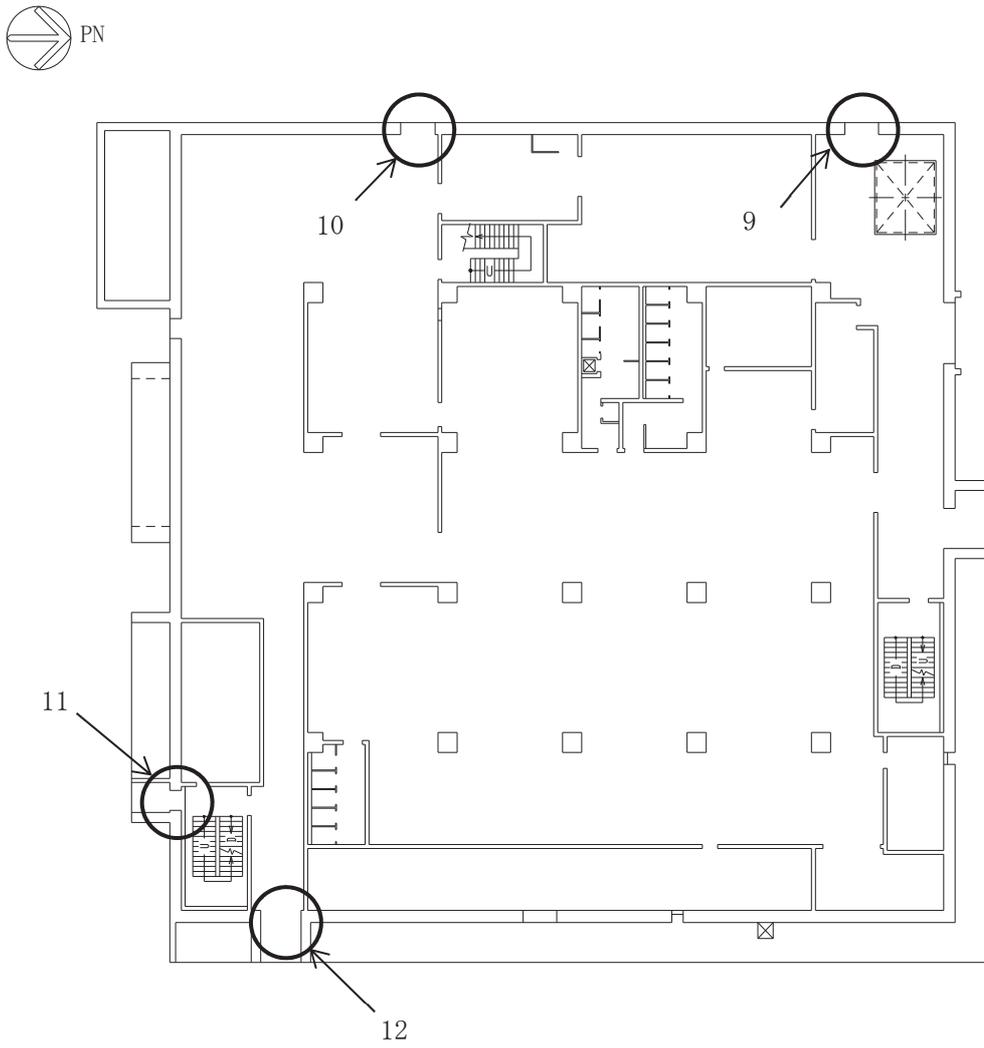


○ 2 ⑤ VI-3-別添 3-2-6 R 1



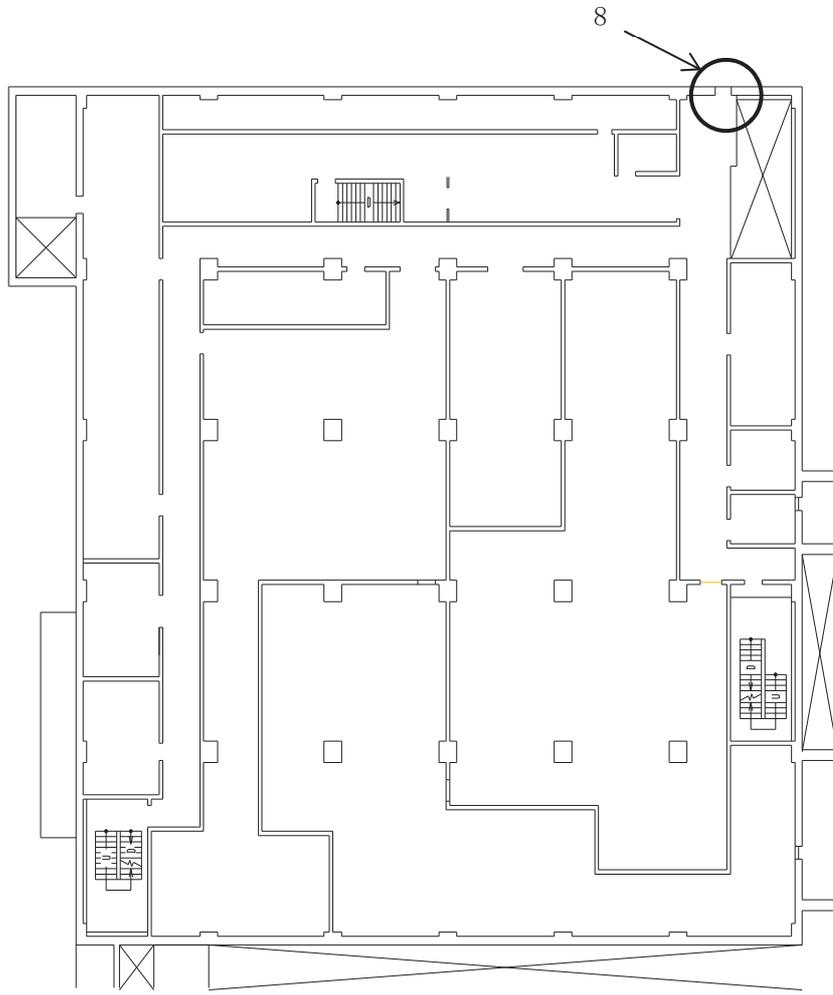
7	計測制御電源室(B)浸水防止水密扉 (No. 3)
---	---------------------------

図 2-3 制御建屋の水密扉の設置位置図(2/5) 0.P. 7.00m



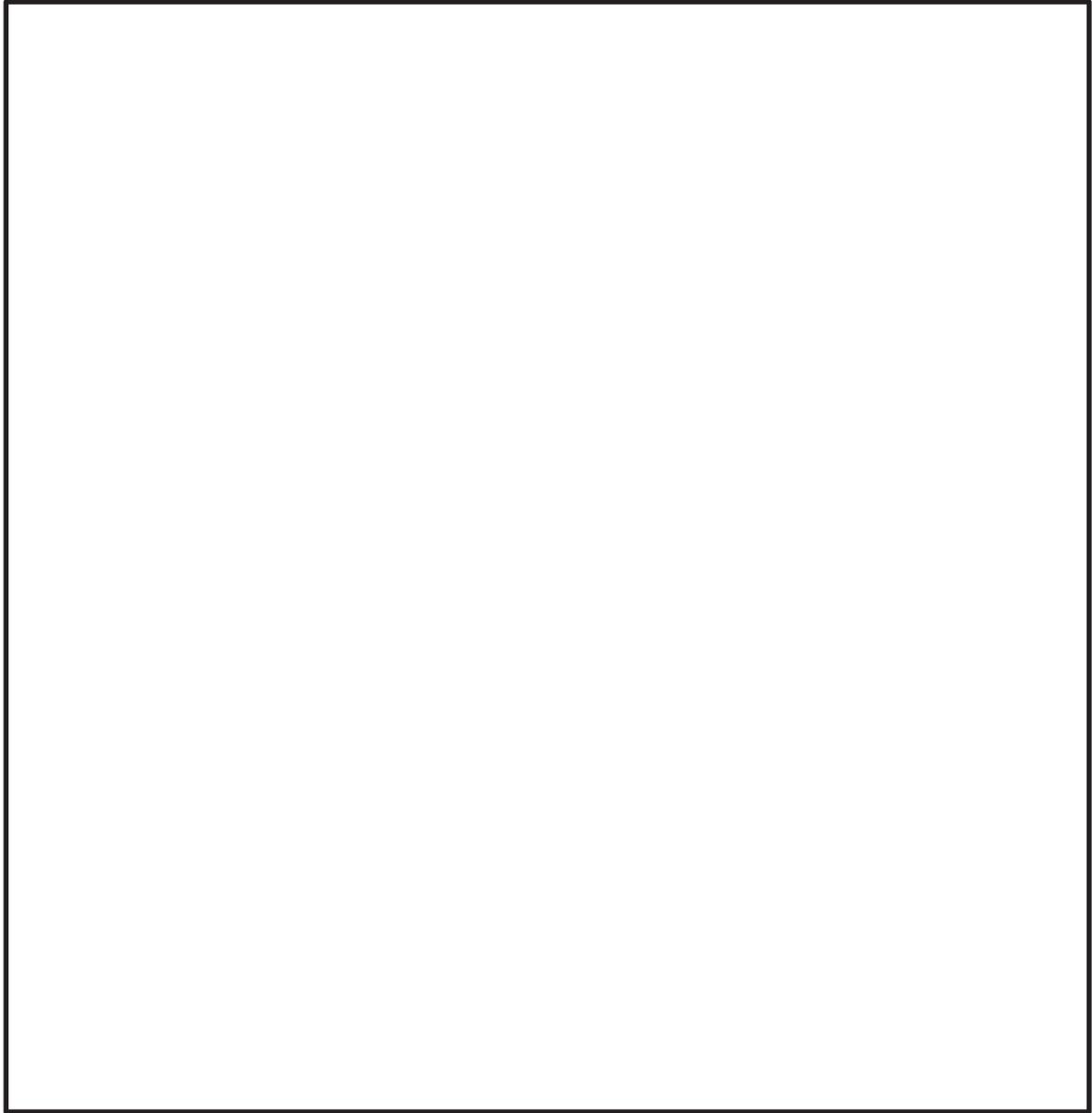
9	制御建屋浸水防止水密扉 (No. 2)
10	制御建屋浸水防止水密扉 (No. 3)
11	制御建屋浸水防止水密扉 (No. 4)
12	制御建屋浸水防止水密扉 (No. 5)

図 2-3 制御建屋の水密扉の設置位置図 (3/5) O.P. 14.00m



8	制御建屋浸水防止水密扉 (No. 1)
---	---------------------

図 2-3 制御建屋の水密扉の設置位置図 (4/5) 0.P. 18. 50m



13	第 2 号機 MCR 浸水防止水密扉
----	--------------------

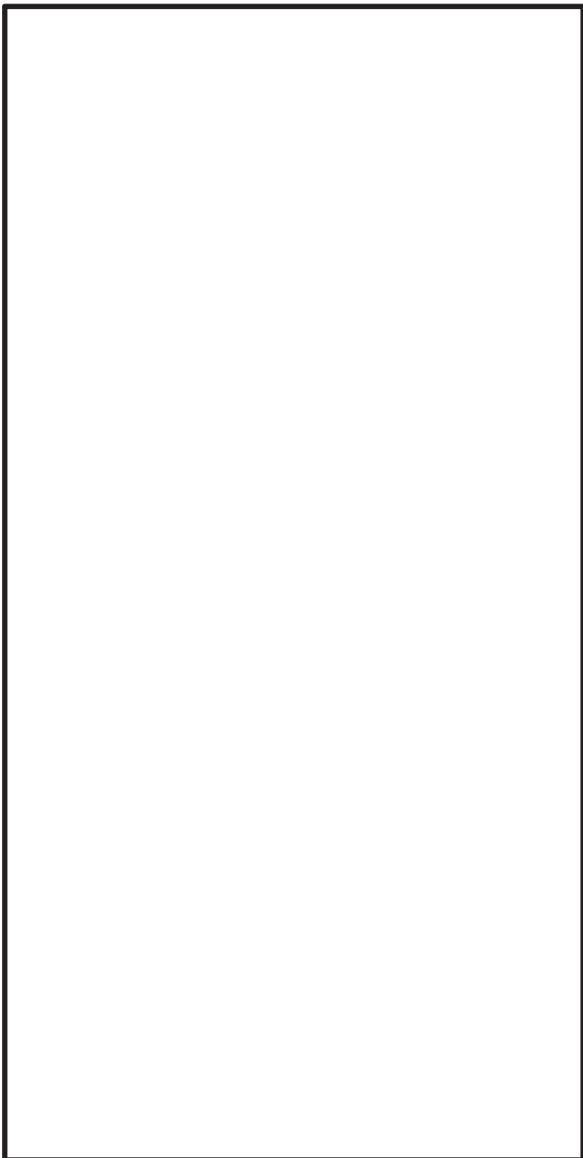
図 2-3 制御建屋の水密扉の設置位置図(5/5) 0.P. 22. 50m

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

2.3 構造計画

水密扉は、片開き型の鋼製扉とし扉板の背面に芯材を配した構造である。また、閉止状態において、カンヌキ及びカンヌキ受けにより固定され止水性を確保しており、アンカーボルトによって建屋躯体に固定された扉枠にて支持する構造とする。水密扉の構造計画を表 2-2 に示す。

表 2-2 水密扉の構造計画

計画の概要		説明図
基礎・支持構造	主体構造	
<p>扉開放時においては、ヒンジにより扉が扉枠に固定され、扉閉止時においては、カンヌキにより、扉と扉枠を一体化する構造とする。</p> <p>扉枠はアンカーボルトにより建屋躯体へ固定する構造とする。</p>	<p>片開き型の鋼製扉とし、鋼製の扉板に芯材を取付け、扉に設置されたカンヌキを鋼製の扉枠に差込み、扉体と扉枠を一体化させる構造とする。</p> <p>また、扉と建屋躯体の接続はヒンジを介する構造とする。</p>	

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

2.4 評価方針

水密扉の強度評価は、以下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、水密扉の評価対象部位に作用する応力等が許容限界内に収まることを、各設備の「3. 評価方法」に示す方法により、「3.5 評価条件」に示す評価条件を用いて評価し、応力評価の確認事項を「3.6 評価結果」にて確認する。

水密扉の強度評価フローを図 2-4 に示す。水密扉の強度評価においては、その構造を踏まえ、静水圧荷重及び余震に伴う荷重の作用方向及び伝達経路を考慮し、評価対象部位を設定する。

強度評価においては、荷重を静的に作用させることにより、扉板、芯材、カンヌキ部（カンヌキ、カンヌキ受けピン、カンヌキ受けボルト）及び扉固定部（扉付固定ボルト、枠付固定ボルト）の発生応力並びにアンカーボルトの発生荷重を算定し、許容限界との比較を行う。

なお、扉付固定ボルト及び枠付固定ボルトはカンヌキ受けボルトと同じ評価方法とする。

アンカーボルトは壁に埋め込まれた方向によって下記のとおりと呼ぶこととする。

- ・0° 方向配置：アンカーボルトが壁の厚さの直交方向に配置されている場合
- ・90° 方向配置：アンカーボルトが壁の厚さの方向に配置されている場合

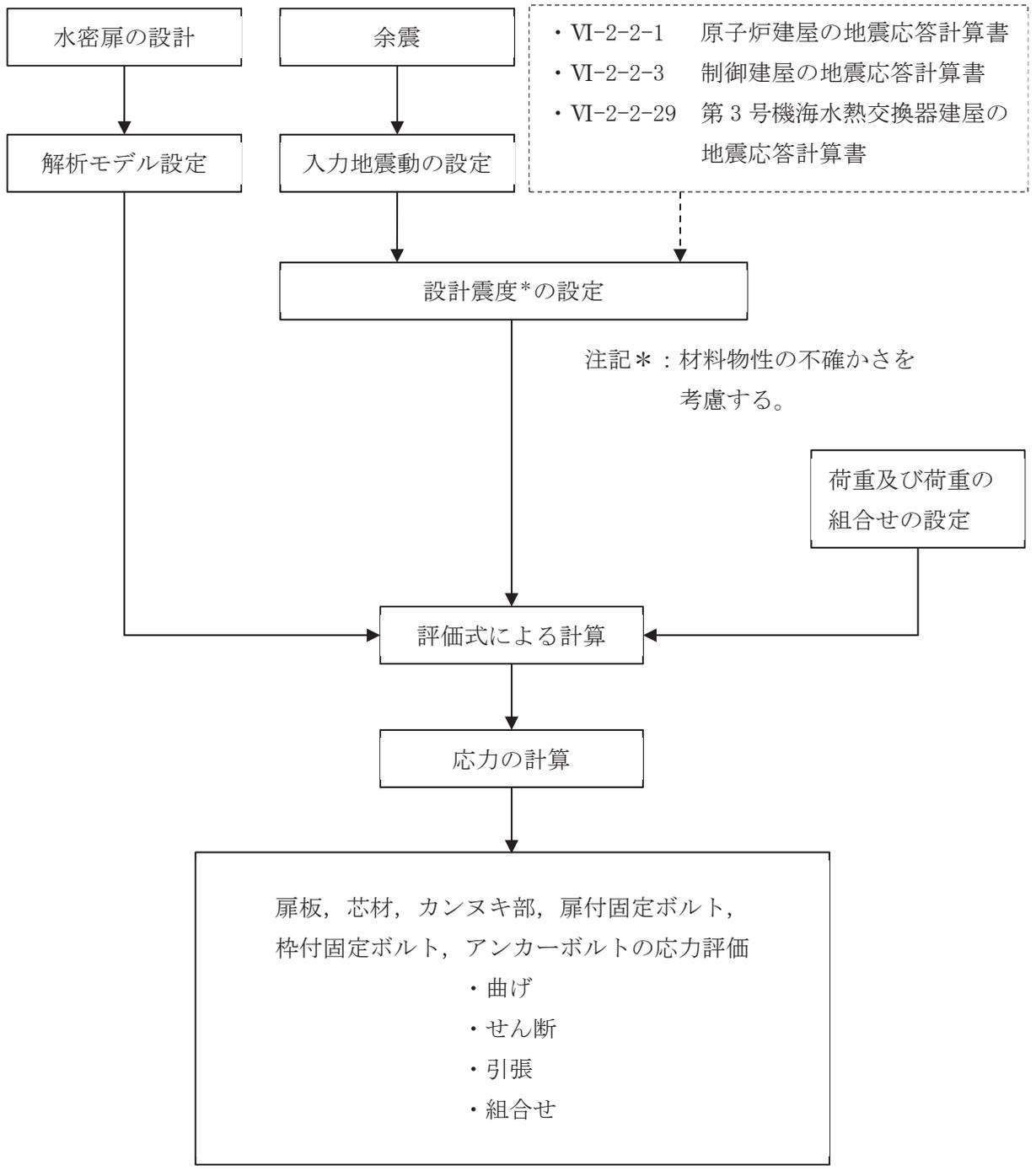


図 2-4 水密扉の強度評価フロー

2.5 適用規格・基準等

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法（昭和 25 年 5 月 24 日法律第 201 号）
- ・ 建築基準法施行令（昭和 25 年 11 月 16 日政令第 338 号）
- ・ 日本建築学会 2005 年 鋼構造設計規準 一許容応力度設計法一
- ・ 日本建築学会 2010 年 各種合成構造設計指針・同解説
- ・ 日本機械学会 機械工学便覧
- ・ 日本水道協会 2009 年 水道施設耐震工法指針・解説

2.6 記号の説明

水密扉の強度評価に用いる記号を表 2-3 に示す。

表 2-3 強度評価に用いる記号(1/2)

記号	単位	定義
h	mm	扉の水圧作用高さ
ρ_o	t/m ³	液体の密度
g	m/s ²	重力加速度
L_{PL}	mm	扉板の短辺長さ
β	—	浸水エリアの幅と水深の比による補正係数
t	mm	扉板の厚さ
W_D	kN	扉重量
L_D	mm	扉の幅
H_D	mm	扉の高さ
w_D	N/mm ²	扉下端に作用する静水圧荷重及び余震を考慮した荷重
β_1	—	四辺支持長方形板の応力係数
R_1	N	静水圧荷重及び余震荷重に対する反力
w'	N/mm	芯材に作用する等分布荷重
b	mm	芯材に作用する荷重の負担幅
L	mm	芯材の支持間距離
Z	mm ³	断面係数
A_s	mm ²	せん断断面積
n_2	本	カンヌキの本数
n_b	本	ボルトの本数
L_5	mm	カンヌキの突出長さ
L_p	mm	カンヌキ受けピンの軸支持間距離
L_{c1}	mm	躯体開口部の高さ
L_{c2}	mm	躯体開口部の幅
M	N・mm	曲げモーメント
T	N	引張力
Q	N	せん断力
L_1	N	カンヌキ部に作用する静水圧荷重及び余震荷重に対する反力
σ	N/mm ²	曲げ応力度
σ_t	N/mm ²	引張応力度
τ	N/mm ²	せん断応力度
P	N/mm ²	動水圧荷重
S_d	N/mm ²	余震による地震荷重

表 2-3 強度評価に用いる記号(2/2)

記号	単位	定義
R_a	N	左右もしくは上下のアンカーボルトに作用する荷重
T_d	N	アンカーボルト 1 本あたりに生じる引張力
Q_d	N	アンカーボルト 1 本あたりに生じるせん断力
T_a	N	アンカーボルト 1 本あたりの短期許容引張力
Q_a	N	アンカーボルト 1 本あたりの短期許容せん断力
n_{a1}	本	0° 方向 左右もしくは上下のアンカーボルト本数
n_{a2}	本	90° 方向 左右もしくは上下のアンカーボルト本数

3. 強度評価

3.1 評価対象部位

水密扉の評価対象部位は、「2.3 構造計画」に示す構造上の特徴を踏まえ選定する。

水密扉を閉める方向から作用する静水圧荷重及び余震に伴う荷重は、扉板から芯材を介し扉枠に伝わり、扉枠を固定するアンカーボルトを介し、開口部周囲の建屋躯体に伝達されることから、評価対象部位は扉板、芯材及びアンカーボルトとする。

水密扉を開く方向から作用する静水圧荷重及び余震に伴う荷重は、扉板から芯材に伝わり、カンヌキ部（カンヌキ、カンヌキ受けピン、カンヌキ受けボルト）及び扉固定部（扉付固定ボルト、枠付固定ボルト）に伝達され、扉枠及び扉枠を固定するアンカーボルトを介し、開口部周囲の建屋躯体に伝達されることから、評価対象部位は扉板、芯材、カンヌキ部及び扉固定部並びにアンカーボルトとする。

アンカーボルトについては、荷重を伝達する芯材の取付け方向または扉板の辺長比を踏まえ、水平方向に芯材を配置する構造若しくは扉板の短辺方向へ支配的に荷重を伝達する構造である場合はヒンジ側及び扉開閉側のアンカーボルトを、鉛直方向に芯材を配置する場合は扉上部側及び扉下部側のアンカーボルトを評価対象部位として選定する。

なお、ヒンジは静水圧荷重及び余震に伴う荷重の伝達経路とならないため、評価対象外とする。

また、結果が厳しい評価対象部位を有する水密扉を代表として評価するものとし、水密扉 No. 2, 8 及び 13 を抽出した。

水密扉に作用する荷重の作用図を図 3-1 に示す。

←----- : 評価対象部位に作用する荷重
[-----] : 評価対象部位

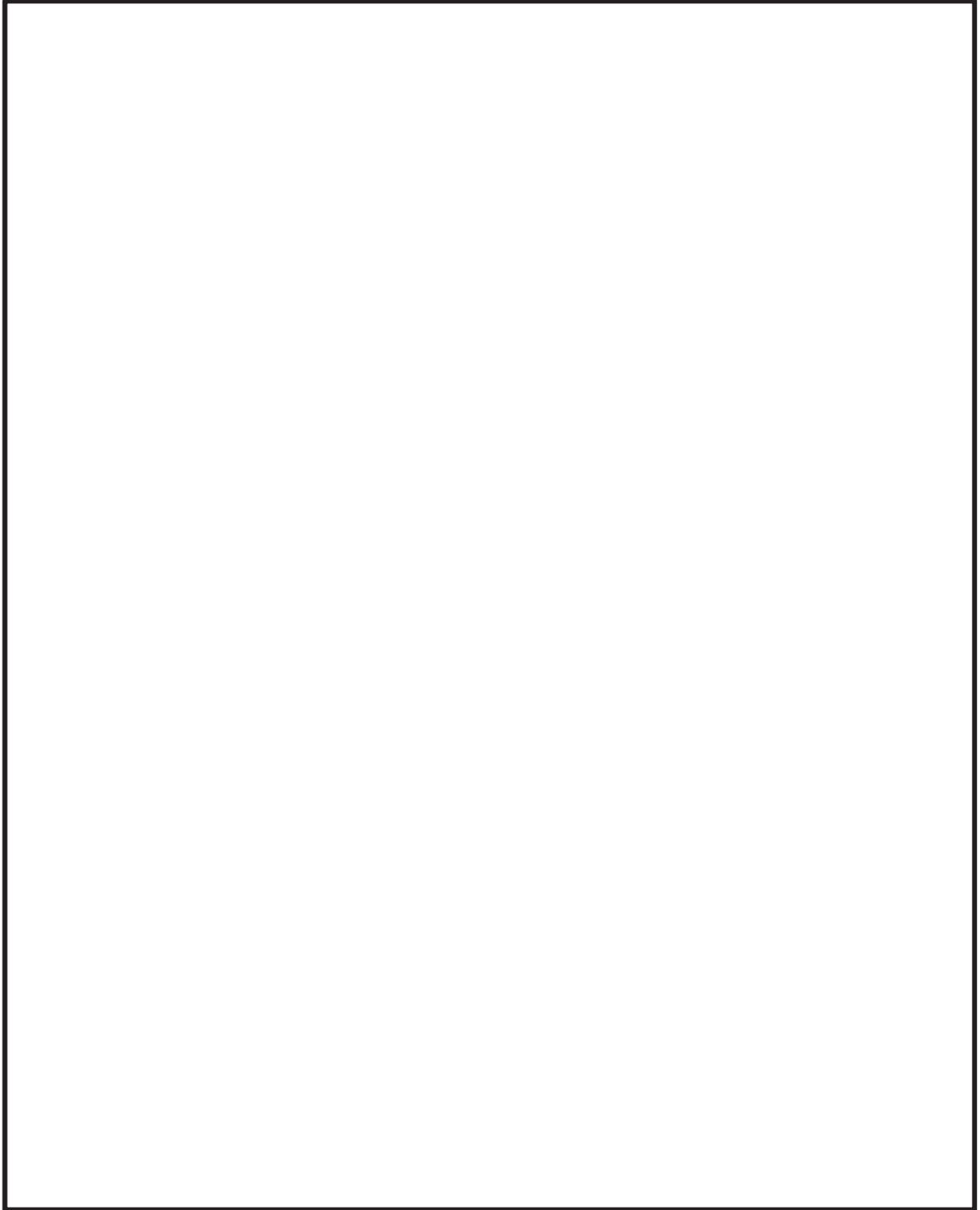


図 3-1 水密扉に作用する荷重の作用図(1/2)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

←----- : 評価対象部位に作用する荷重
----- : 評価対象部位

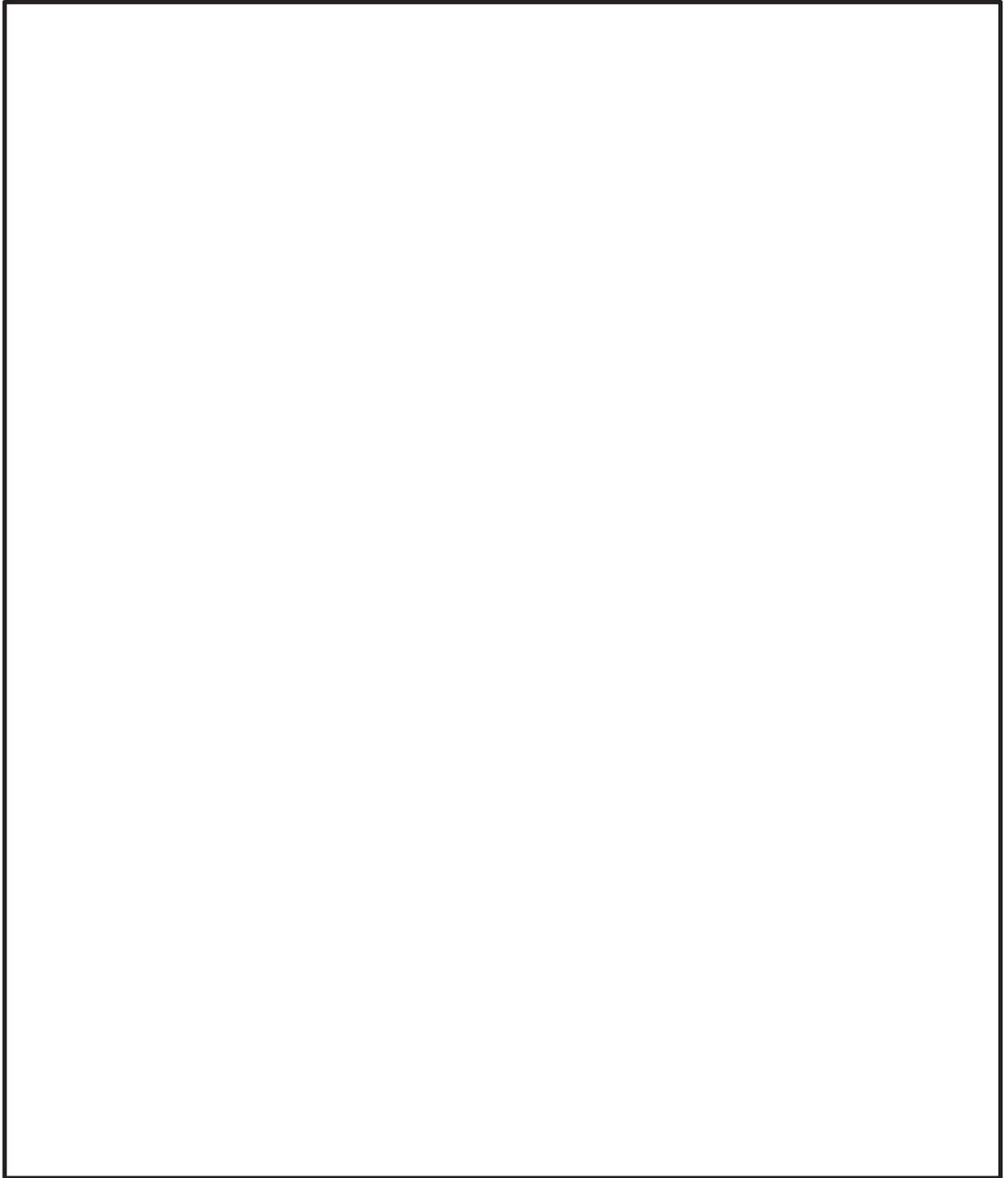


図 3-1 水密扉に作用する荷重の作用図(2/2)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

3.2 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 3-1 津波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」にて示している荷重及び荷重の組合せを踏まえて設定する。

3.2.1 荷重の設定

強度評価に用いる荷重を以下に示す。

(1) 静水圧荷重 (P_h)

浸水に伴う静水圧としての静水圧荷重を考慮する。静水圧荷重は、評価対象部位周辺の水の密度に当該部分の浸水深さを考慮した水圧作用高さを乗じた次式により算出する。

$$P_h = \rho_o \cdot g \cdot h \cdot 10^{-6}$$

ここで、

P_h : 静水圧荷重 (N/mm²)

(2) 余震荷重 (K S d)

余震荷重として、弾性設計用地震動 S d - D 2 による地震力及び動水圧を考慮する。余震荷重は、水密扉の設置位置における水平方向の最大応答加速度から設定する震度を用いて評価する。最大応答加速度を保守的に評価するために、最大応答加速度の抽出位置は水密扉設置階の上階の値とする。

強度評価に用いる震度は、材料物性の不確かさを考慮したものとして添付書類「VI-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」、添付書類「VI-2-2-3 制御建屋の地震応答計算書」及び添付書類「VI-2-2-29 第3号機海水熱交換器建屋の地震応答計算書」によることとし、建屋の階ごとの設計震度を表 3-1 に示す。

また、動水圧荷重は「日本水道協会 2009 年 水道施設耐震工法指針・解説」に基づき、次式により算出する。動水圧荷重の算出結果は表 3-2 に示す。

$$P = \beta \cdot 7/8 \cdot \alpha_H \cdot \rho_o \cdot g \cdot h \cdot 10^{-6}$$

ここで、

P : 余震に伴う動水圧荷重(N/mm²)

β : 浸水エリアの幅と水深の比による補正係数(1.0)

α_H : 水平方向の設計震度

表 3-1 設計震度

建屋	階	O.P.*	弾性設計用地震動 Sd-D2 設計震度	
			水平方向 α_H	鉛直方向 α_{UD}
原子炉建屋	CRF	41.20m	2.01	0.89
	3F	33.20m	1.31	0.82
	2F	22.50m	0.92	0.73
	1F	15.00m	0.80	0.60
	B1F	6.00m	0.60	0.46
	B2F	-0.80m	0.53	0.38
	B3F	-8.10m	0.40	0.33
制御建屋	RF	29.15m	1.58	1.02
	3F	22.95m	1.34	0.90
	2F	19.50m	1.23	0.78
	1F	15.00m	1.04	0.63
	B1F	8.00m	0.72	0.46
	B2F	1.50m	0.64	0.35
第3号機 海水熱交換器建屋	B1F	8.00m	1.17	0.64

注記* : 各建屋の地震応答計算書における O.P. を示す。

表 3-2 動水圧荷重の算出結果

水密扉 No.	扉名称	動水圧荷重 P (N/mm ²)
1	水密扉（第 3 号機海水熱交換器建屋海水ポンプ設置エリア）(No. 1)	0.18
2	水密扉（第 3 号機海水熱交換器建屋海水ポンプ設置エリア）(No. 2)	0.18
3	原子炉建屋浸水防止水密扉 (No. 1)	0.003
4	原子炉建屋浸水防止水密扉 (No. 2)	0.003
5	制御建屋空調機械 (A) 室浸水防止水密扉	0.11
6	制御建屋空調機械 (B) 室浸水防止水密扉	0.07
7	計測制御電源室 (B) 浸水防止水密扉 (No. 3)	0.004
8	制御建屋浸水防止水密扉 (No. 1)	0.05
9	制御建屋浸水防止水密扉 (No. 2)	0.04
10	制御建屋浸水防止水密扉 (No. 3)	0.04
11	制御建屋浸水防止水密扉 (No. 4)	0.004
12	制御建屋浸水防止水密扉 (No. 5)	0.004
13	第 2 号機 MCR 浸水防止水密扉	0.05

3.2.2 荷重の組合せ

水密扉の強度評価に用いる荷重の組合せは、添付書類「VI-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」を踏まえて下記のとおりを設定する。

$$P_h + K S d$$

ここで、

P_h : 静水圧荷重 (N/mm²)

$K S d$: 余震荷重 (N/mm²)

3.3 許容限界

許容限界は、「3.1 評価対象部位」にて設定した部位に対し、添付書類「VI-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」にて設定している許容限界を踏まえて設定する。

3.3.1 使用材料

水密扉を構成する扉板、芯材、カンヌキ部、扉固定部及びアンカーボルトの使用材料を表 3-3 に示す。

表 3-3 使用材料

部位		材質 強度区分	仕様 (mm)
扉板		SS400 SUS304	PL-12, 16, 19, 25, 115
芯材		SS400 SUS304	FB-38×200 [-250×90×9×13 [-180×75×7×10.5 [-200×100×10 [-300×90×9×13
カンヌキ部	カンヌキ	SUS304N2 SCM440 SUS304	径 50, 60, 65, 90
	カンヌキ受けピン	SUS304N2 SCM435 SUS304	径 30, 40, 60
	カンヌキ受けボルト	10.9 (SCM435, SCM440) 12.9 (SCM435)	M16, M20
扉固定部	扉付固定ボルト	10.9(SCM435)	M20
	枠付固定ボルト	10.9(SCM435)	M20
アンカーボルト		SS400 SUS304	M16, M20, M24

3.3.2 許容限界

(1) 鋼材の許容応力度

鋼材の許容応力度は、「日本建築学会 2005 年 鋼構造設計規準 ー許容応力度設計法 ー」を踏まえて表 3-4 の値とする。

表 3-4 鋼材の許容限界

材質・強度区分*1	短期許容応力度(N/mm ²)	
	曲げ・引張	せん断
SS400 (t ≤ 40) *2	235	135
SS400 (100 < t) *2	205	118
SUS304	205	118
SUS304N2	345	199
S45C	345	199
SCM435	651	375
SCM440	686	396
10.9 (SCM435, SCM440)	728	420
12.9 (SCM435)	854	493

注記*1：許容応力度を決定する基準値 F は、J I S に基づき算定する。

*2：t は板厚(mm)を示す。

(2) アンカーボルトの許容限界の算定値

アンカーボルトの許容限界は、「3.1 評価対象部位」に記載したアンカーボルトに作用する荷重の向きを踏まえて、「日本建築学会 2010 年 各種合成構造設計指針・同解説」に基づき算定した、表 3-5 の値とする。

なお、評価対象部位のアンカーボルトが引張力を受ける場合においては、アンカーボルトの降伏により決まる許容応力、及び付着力により決まる許容応力を比較して、いずれか小さい値を採用する。また、評価対象部位のアンカーボルトがせん断力を受ける場合においては、アンカーボルトのせん断強度により決まる許容耐力、定着したコンクリート躯体の支圧強度により決まる許容耐力及びコーン状破壊により決まる許容応力を比較して、いずれか小さい値を採用する。

表 3-5 アンカーボルトの許容限界の算定値

水密 扉 No.	扉名称	許容耐力 (N/本)	
		引張	せん断
2	水密扉 (第 3 号機海水熱交換器建屋海水ポンプ設置エリア) (No. 2)	25950 (0°) 34348 (90°)	22529 (0°) 13317 (90°)
8	制御建屋浸水防止水密扉 (No. 1)	66229 (0°) 67315 (90°)	41465 (0°) 58068 (90°)
13	第 2 号機 MCR 浸水防止水密扉	— (0°) 57575 (90°)	6635 (0°) 40302 (90°)

3.4 評価方法

水密扉の強度評価は、以下に設定する評価式を用いる。

3.4.1 応力算定

(1) 扉板

扉板に生じる応力は、等分布荷重が作用する四辺支持の矩形板として、「日本機械学会機械工学便覧」に基づき、「3.4.2 断面検定」にて算定する。なお、この時、実際に作用する静水圧荷重及び動水圧荷重は、台形分布もしくは、三角形分布であるが、扉最下部の最大静水圧が等分布に作用するものとして安全側に評価する。また、余震による地震荷重は扉板の重量のみならず、芯材及びカンヌキを含めた扉重量が面積当たりに等分布に作用するものとして安全側に評価する。扉板に作用する荷重の例を図3-2に示す。

$$w_D = P_h + P + S_d$$

$$P = \beta \cdot \frac{7}{8} \cdot \alpha_H \cdot \rho_o \cdot g \cdot h \cdot 10^{-6}$$

$$S_d = \frac{W_D \cdot \alpha_H \cdot 10^3}{L_D \cdot H_D}$$

ここで、

w_D : 扉下端に作用する静水圧荷重及び余震を考慮した荷重(N/mm²)

P_h : 静水圧荷重(N/mm²)

P : 動水圧荷重(N/mm²)

S_d : 余震による地震荷重(N/mm²)

W_D : 扉重量(kN)

α_H : 水平方向の設計震度

L_D : 扉の幅(mm)

H_D : 扉の高さ(mm)

←----- : 評価対象部位に作用する荷重
[-----] : 評価対象部位

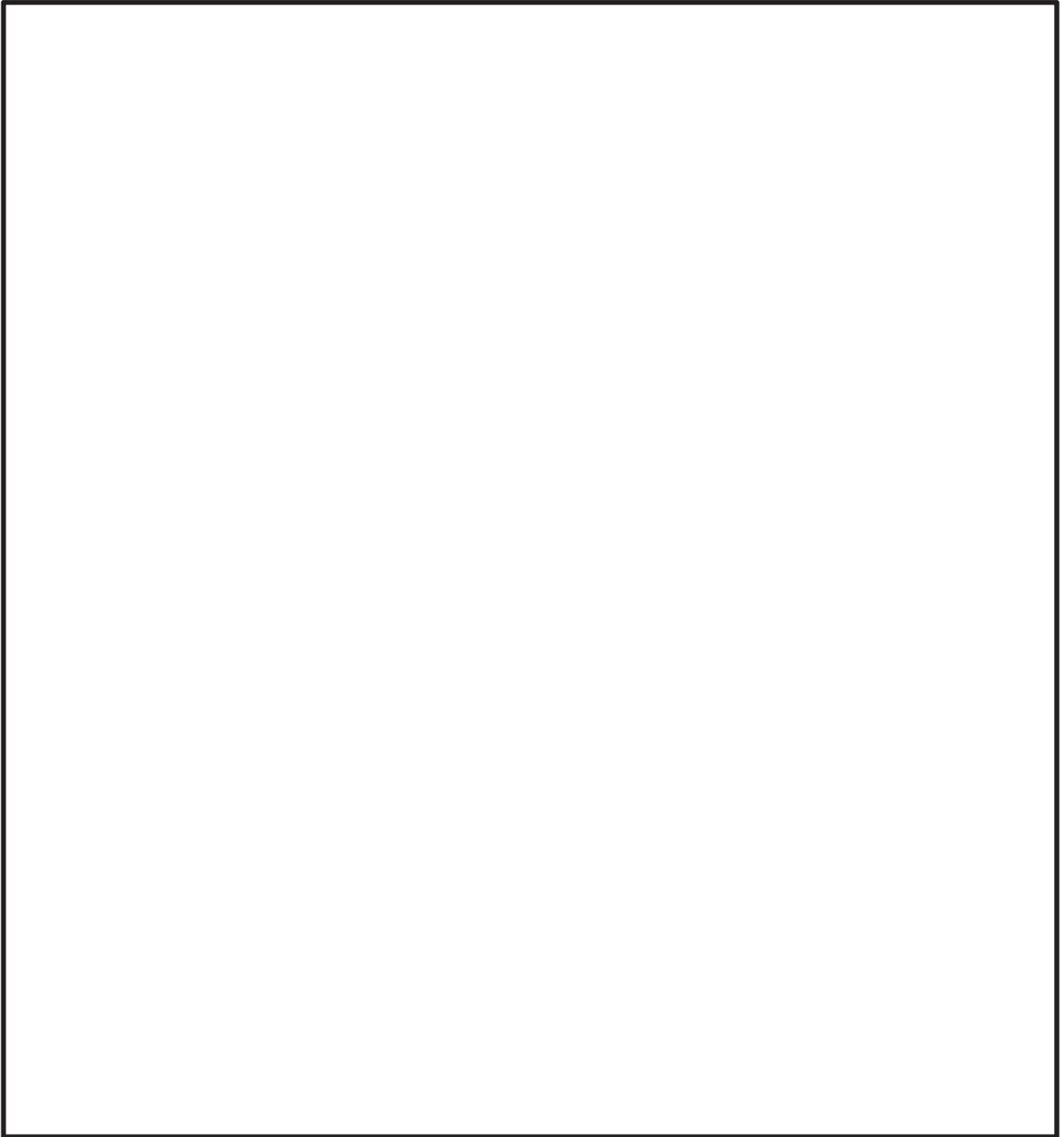


図 3-2 扉板に作用する荷重の例

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(2) 芯材

芯材に生じる応力は、等分布荷重を受ける両端単純支持の梁として算定する。なお、芯材の取付け方向は、水平・鉛直の2方向があるが、両者とも上述の静水圧荷重と動水圧荷重を加えた水圧に、芯材に作用する荷重の負担幅（＝間隔）を乗じた荷重が等分布に作用するものとし、芯材の支持間距離は保守的に扉幅として安全側に評価する。芯材に作用する荷重の例を図3-3に示す。

$$M = \frac{w' \cdot L^2}{8}$$

$$Q = \frac{w' \cdot L}{2}$$

ここで、

w' : 芯材に作用する等分布荷重(N/mm) [$w' = w_D \cdot b$]

w_D : 扉下端に作用する静水圧荷重及び余震を考慮した荷重(N/mm²)

b : 芯材に作用する荷重の負担幅(mm)

M : 芯材に生じる最大曲げモーメント(N・mm)

L : 芯材の支持間距離(mm)

Q : 芯材に生じる最大せん断力(N)

←----- : 評価対象部位に作用する荷重
----- : 評価対象部位

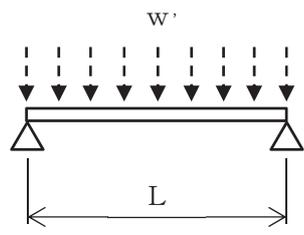


図 3-3 芯材に作用する荷重の例

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(3) カンヌキ部

カンヌキ部は、カンヌキ、カンヌキ受けピン及びカンヌキ受けボルトで構成されており、カンヌキ部に生じる応力は次式により算定する。ここで、静水圧荷重及び余震荷重に対する反力は、扉最下部の最大静水圧に、動水圧荷重及び扉重量による余震荷重を加えた荷重をカンヌキ部が等分布に負担するものとして算定する。カンヌキ部に作用する荷重の例を図3-4に示す。

$$R_1 = \frac{L_D \cdot H_D \cdot w_D}{n_2}$$

ここで、

R_1 : カンヌキ部静水圧荷重及び余震荷重に対する反力(N)

L_D : 扉の幅(mm)

H_D : 扉の高さ(mm)

w_D : 扉下端に作用する静水圧荷重及び余震を考慮した荷重(N/mm²)

n_2 : カンヌキの本数

←----- : 評価対象部位に作用する荷重
----- : 評価対象部位

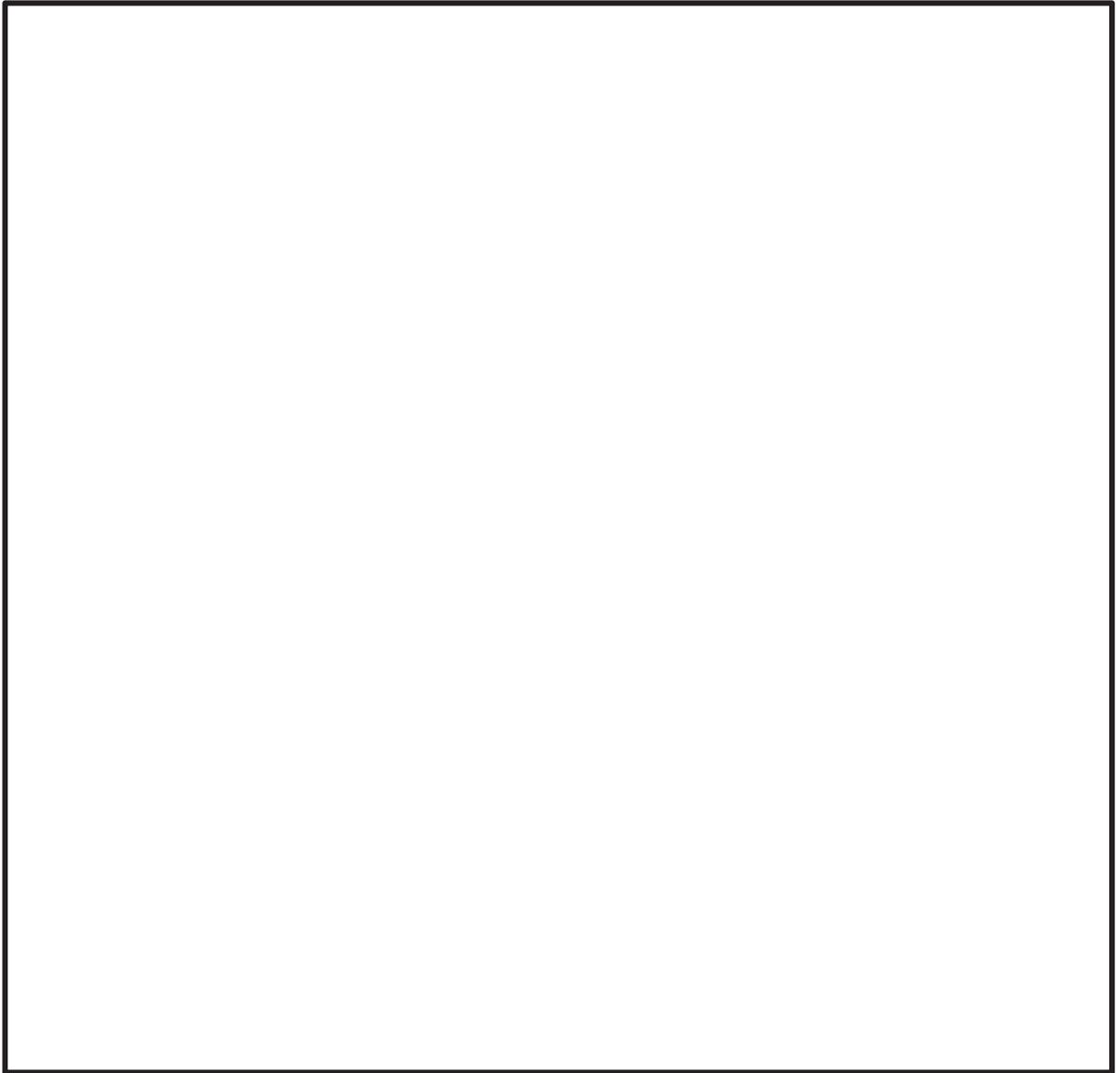


図 3-4 カンヌキ部に作用する荷重の例

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

a. カンヌキ

カンヌキに生じる応力は、次式により算定する。なお、算定にあたっては、カンヌキ受けピン中心位置を固定端とした片持ち梁として評価し、カンヌキの取付部位に応じて生じる応力を考慮する。カンヌキに作用する荷重の例を図 3-5 に示す。

$$M = R_1 \cdot L_5$$

$$Q = R_1$$

ここで、

M : カンヌキに生じる最大曲げモーメント (N・mm)

R_1 : カンヌキ部に作用する静水圧荷重及び余震荷重に対する反力 (N)

L_5 : カンヌキの突出長さ (mm)

Q : カンヌキに生じる最大せん断力 (N)

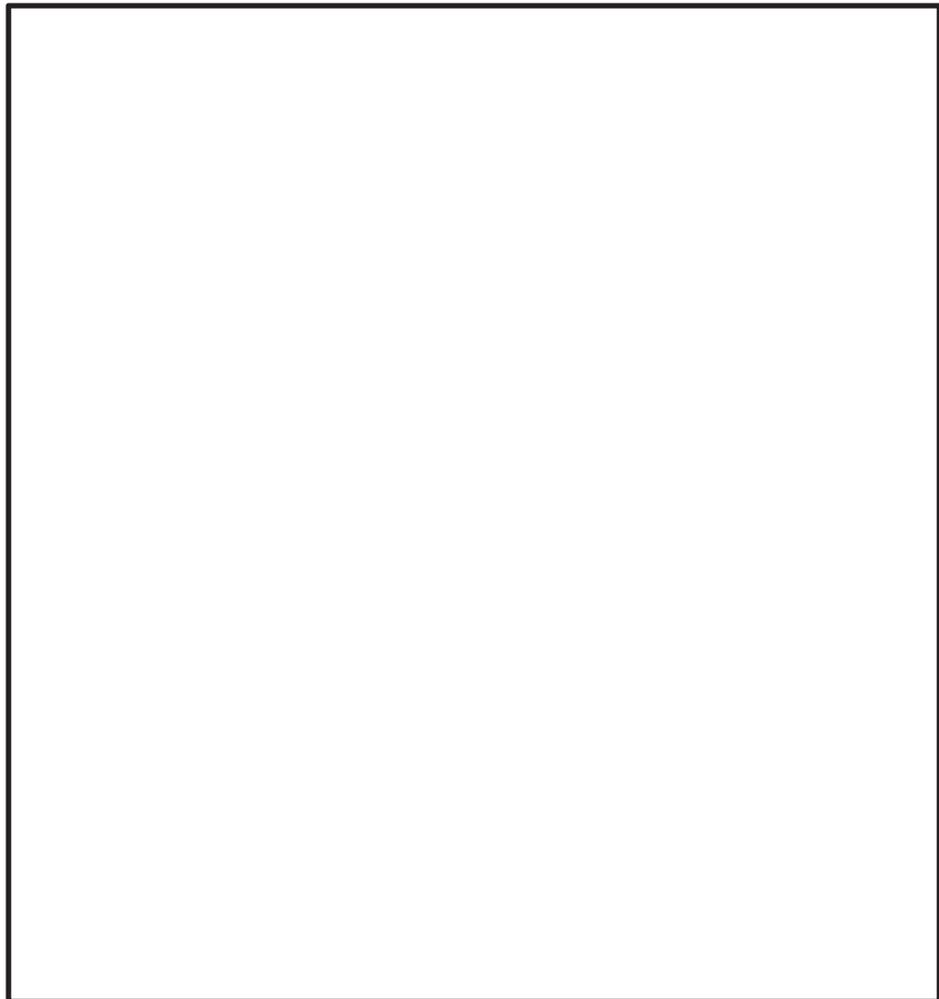


図 3-5 カンヌキに作用する荷重の例

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

b. カンヌキ受けピン

カンヌキ受けピンに生じる応力は、カンヌキ受けピンを集中荷重が作用する単純梁とみなし、次式により算定する。カンヌキ受けピンに作用する荷重の例を図3-6に示す。

$$M = R_1 \cdot L_p \cdot \frac{1}{4}$$

$$Q = R_1 \cdot \frac{1}{2}$$

ここで、

M : カンヌキ受けピンに生じる最大曲げモーメント (N・mm)

R₁ : カンヌキ部に作用する静水圧荷重及び余震荷重に対する反力 (N)

L_p : カンヌキ受けピンの軸支持間距離 (mm)

Q : カンヌキ受けピンに生じる最大せん断力 (N)

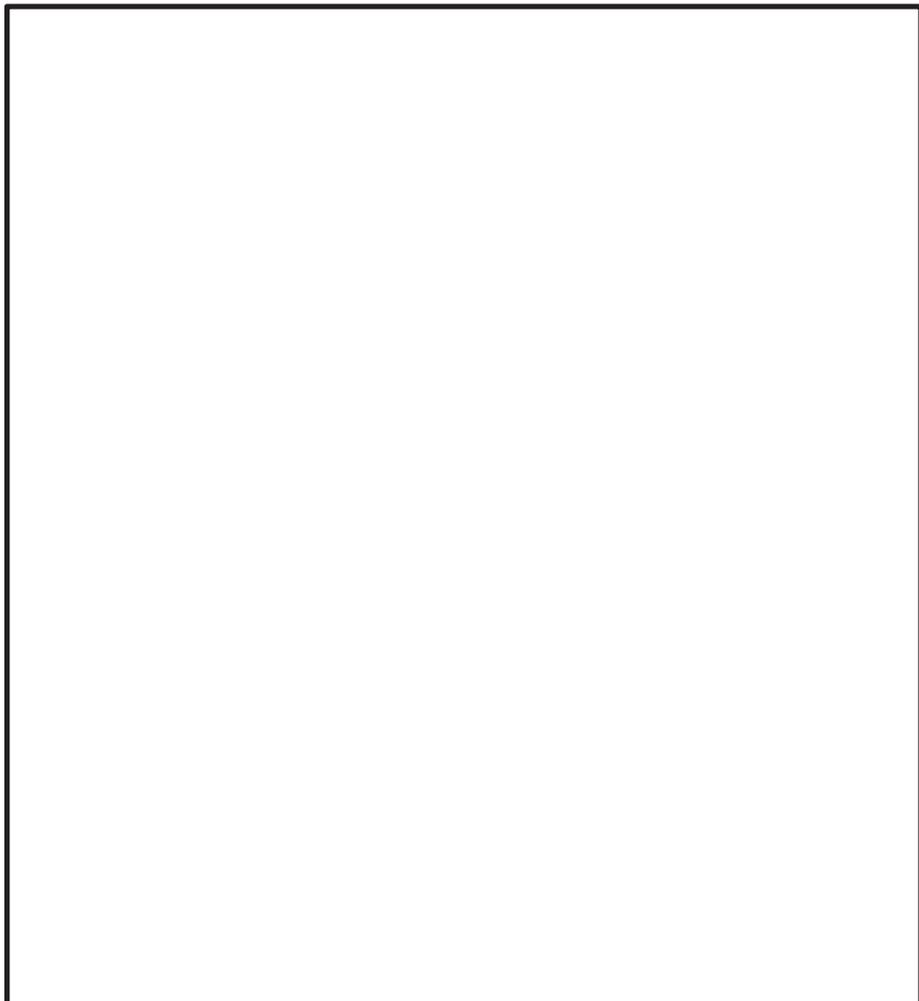


図3-6 カンヌキ受けピンに作用する荷重の例

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

c. カンヌキ受けボルト，扉付固定ボルト及び枠付固定ボルト

カンヌキ受けボルト，扉付固定ボルト及び枠付固定ボルトに生じる応力は，次式により算定する。カンヌキ受けボルトに作用する荷重の例を図3-7に，扉付固定ボルト及び枠付固定ボルトに作用する荷重の例を図3-8に示す。

$$T = \frac{R_1}{n_b}$$

$$Q = \frac{L_D \cdot H_D \cdot w_D}{n_b}$$

ここで，

T : ボルトに生じる最大引張力(N)

R₁ : ボルトに作用する静水圧荷重及び余震荷重に対する反力(N)

n_b : ボルトの本数

Q : ボルトに生じる最大せん断力(N)

L_D : 扉の幅(mm)

H_D : 扉の高さ(mm)

w_D : 扉下端に作用する静水圧荷重(N/mm²)



図 3-7 カンヌキ受けボルトに作用する荷重の例

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

←----- : 評価対象部位に作用する荷重
----- : 評価対象部位



図 3-8 扉付固定ボルト及び枠付固定ボルトに作用する荷重の例

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(4) アンカーボルト

アンカーボルトに生じる応力は、静水圧荷重に余震荷重を加えた荷重を左右もしくは上下に配置されたアンカーボルトに分配する。アンカーボルトに作用する荷重の例を図3-9に示す。

$$R_a = L_{c1} \cdot L_{c2} \cdot w_D$$

ここで、

R_a : 左右もしくは上下のアンカーボルトに作用する荷重(N)

L_{c1} : 躯体開口部の高さ(mm)

L_{c2} : 躯体開口部の幅(mm)

w_D : 扉下端に作用する静水圧荷重及び余震を考慮した荷重(N/mm²)

アンカーボルトの方向

(0° 方向配置の場合)

$$Q_d = \frac{R_a}{n_{a1}}$$

(90° 方向配置の場合)

$$T_d = \frac{R_a}{n_{a2}}$$

(0° 方向配置及び90° 方向配置の複合配置の場合)

$$\frac{R_a}{Q_a \cdot n_{a1} + T_a \cdot n_{a2}}$$

ここで、

T_d : アンカーボルト1本あたりに生じる引張力(N)

T_a : アンカーボルト1本あたりの短期許容引張力(N)

Q_d : アンカーボルト1本あたりに生じるせん断力(N)

Q_a : アンカーボルト1本あたりの短期許容せん断力(N)

n_{a1} : 0° 方向 左右もしくは上下のアンカーボルトの本数

n_{a2} : 90° 方向左右もしくは上下のアンカーボルトの本数

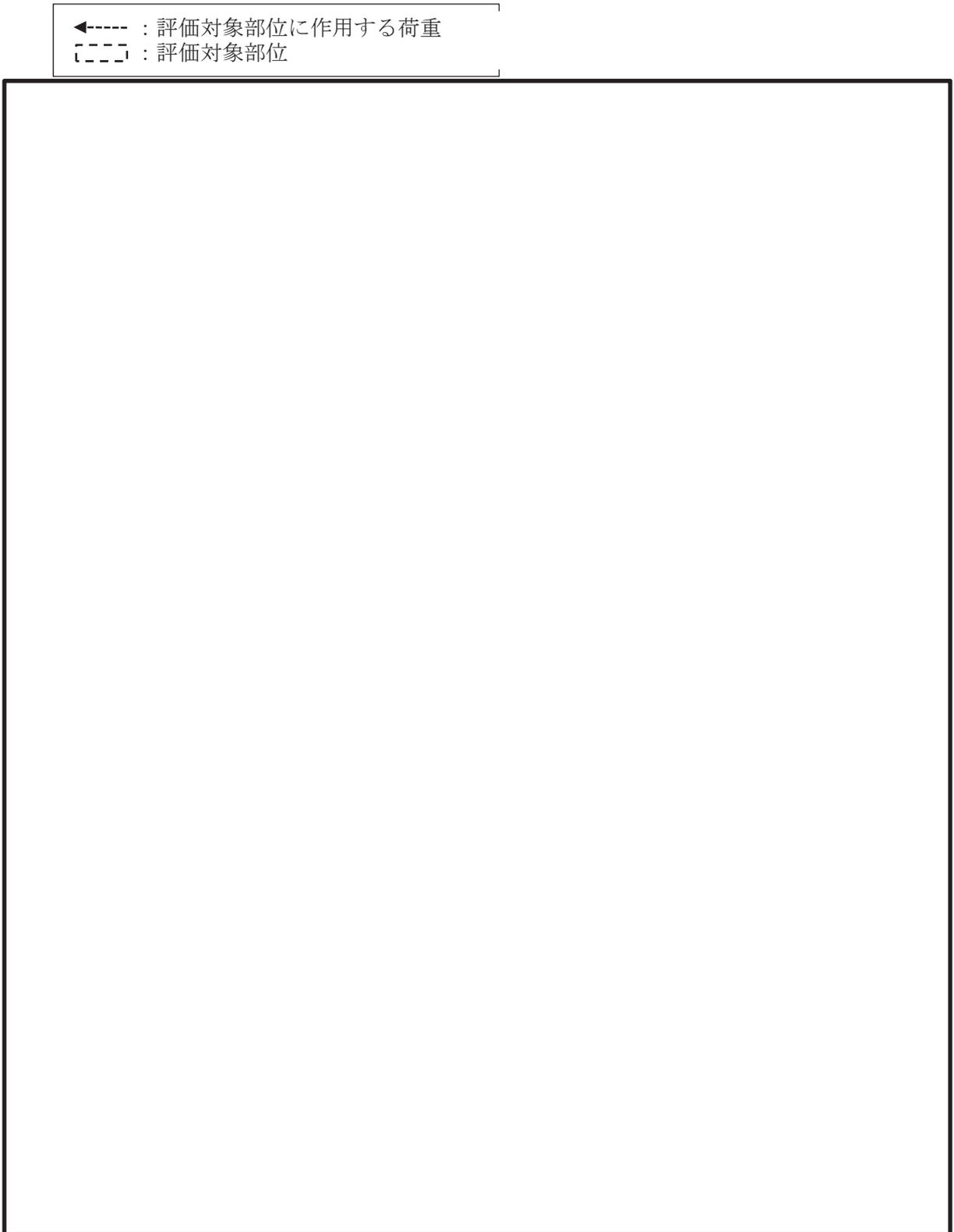


図 3-9 アンカーボルトに作用する荷重の例 (1/2)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

←----- : 評価対象部位に作用する荷重
[-----] : 評価対象部位

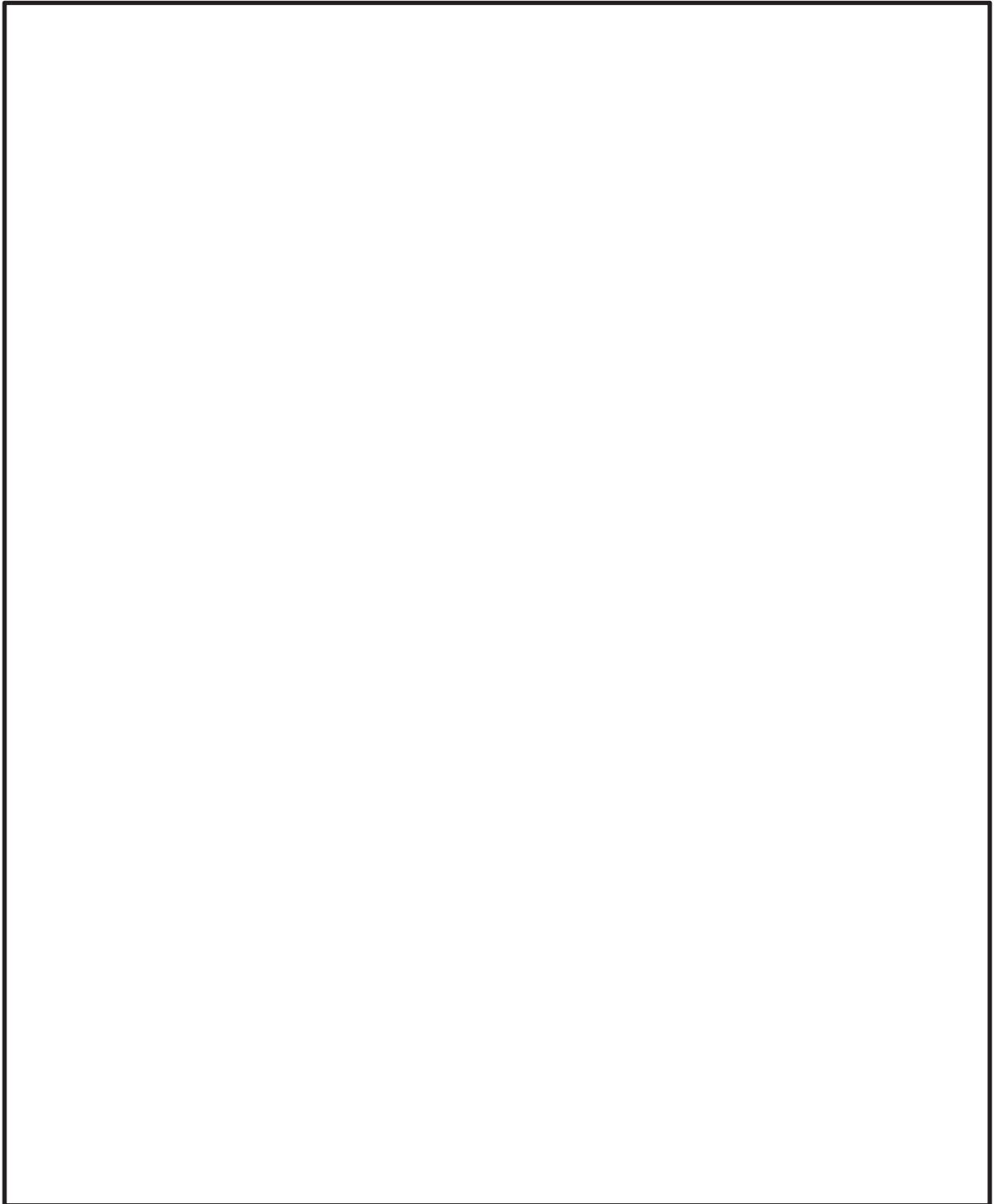


図 3-9 アンカーボルトに作用する荷重の例 (2/2)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

3.4.2 断面検定

評価対象部位に生じる応力より算定する応力度及び荷重が、許容限界値以下であることを確認する。

(1) 扉板

扉板に生じる曲げ応力度を「日本機械学会 機械工学便覧」により算定し、扉板の短期許容応力度を下回ることを確認する。

$$\sigma = \beta_1 \cdot \frac{w_D \cdot L_{PL}^2}{t^2}$$

ここで、

σ : 扉板に生じる最大曲げ応力度 (N/mm²)

w_D : 扉下端に作用する静水圧荷重及び余震を考慮した荷重 (N/mm²)

β_1 : 四辺支持長方形板の応力係数

L_{PL} : 扉板の短辺長さ (mm)

t : 扉板の板厚 (mm)

(2) 芯材

芯材に生じる曲げ応力度及びせん断応力度を算定し、芯材の短期許容応力度を下回ることを確認する。

$$\sigma = M / Z$$

$$\tau = Q / A_s$$

ここで、

σ : 芯材に生じる曲げ応力度 (N/mm²)

M : 芯材に生じる最大曲げモーメント (N・mm)

Z : 芯材の断面係数 (mm³)

τ : 芯材に生じる最大せん断応力度 (N/mm²)

Q : 芯材に生じる最大せん断力 (N)

A_s : 芯材のせん断断面積 (mm²)

(3) カンヌキ部

a. カンヌキ

カンヌキに生じる曲げ応力度及びせん断応力度から、組合せ応力度を「日本建築学会 2005 年 鋼構造設計規準 一許容応力度設計法一」に基づく次式により算定し、カンヌキの短期許容応力度を下回ることを確認する。

$$x = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

ここで、

$$\sigma = M / Z$$

x : 組合せ応力度 (N/mm²)

σ : カンヌキに生じる最大曲げ応力度 (N/mm²)

M : カンヌキに生じる最大曲げモーメント (N・mm)

Z : カンヌキの断面係数 (mm³)

$$\tau = Q / A_s$$

τ : カンヌキに生じる最大せん断応力度 (N/mm²)

Q : カンヌキに生じる最大せん断力 (N)

A_s : カンヌキのせん断断面積 (mm²)

b. カンヌキ受けピン

カンヌキ受けピンに生じる曲げ応力度及びせん断応力度を算定し、カンヌキ受けピンの短期許容応力度を下回ることを確認する。なお、カンヌキ受けピンは単純梁による評価であることから、曲げとせん断は同時に作用しない為、組合せ応力度については考慮しない。

$$\sigma = M / Z$$

$$\tau = Q / A_s$$

ここで、

σ : カンヌキ受けピンに生じる最大曲げ応力度 (N/mm²)

M : カンヌキ受けピンに生じる最大曲げモーメント (N・mm)

Z : カンヌキ受けピンの断面係数 (mm³)

τ : カンヌキ受けピンに生じる最大せん断応力度 (N/mm²)

Q : カンヌキ受けピンに生じる最大せん断力 (N)

A_s : カンヌキ受けピンのせん断断面積 (mm²)

c. カンヌキ受けボルト，扉付固定ボルト及び枠付固定ボルト

カンヌキ受けボルト，扉付固定ボルト及び枠付固定ボルトに生じる引張応力度又はせん断応力度を次式により算定し，カンヌキ受けボルト，扉付固定ボルト及び枠付固定ボルトの短期許容応力度を下回ることを確認する。

$$\sigma_t = T / A$$

$$\tau = Q / A_s$$

ここで，

σ_t : ボルトに生じる最大引張応力度 (N/mm²)

T : ボルトに生じる最大引張力 (N)

A : ボルトの断面積 (mm²)

τ : ボルトに生じる最大せん断応力度 (N/mm²)

Q : ボルトに生じる最大せん断力 (N)

A_s : ボルトのせん断断面積 (mm²)

(4) アンカーボルト

アンカーボルト 1 本あたりに生じる引張力またはせん断力を算定し、アンカーボルトの許容荷重を下回ることを確認する。

(0° 方向配置の場合)

$$\frac{Q_d}{Q_a} \leq 1.0$$

(90° 方向配置の場合)

$$\frac{T_d}{T_a} \leq 1.0$$

(0° 方向配置及び 90° 方向配置の複合配置の場合)

$$\frac{R_a}{Q_a \cdot n_{a1} + T_a \cdot n_{a2}}$$

ここで、

R_a : 左右もしくは上下のアンカーボルトに作用する荷重(N)

T_d : アンカーボルト 1 本あたりに生じる引張力(N)

T_a : アンカーボルト 1 本あたりの短期許容引張力(N)

Q_d : アンカーボルト 1 本あたりに生じるせん断力(N)

Q_a : アンカーボルト 1 本あたりの短期許容せん断力(N)

n_{a1} : 0° 方向左右もしくは上下のアンカーボルトの本数

n_{a2} : 90° 方向左右もしくは上下のアンカーボルトの本数

3.5 評価条件

「3.4 評価方法」に用いる評価条件を表 3-6 に示す。

表 3-6 強度評価に用いる評価条件(1/6)

対象部位	記号	単位	定義	水密扉 No.	
				2	
共通	h	mm	扉の水圧作用高さ	17500	
	ρ_o	t/m ³	液体の密度	1.03	
	g	m/s ²	重力加速度	9.80665	
扉板	β	—	浸水エリアの幅と水深の比による補正係数	1.0	
	α_H	—	水平方向の設計震度	1.17	
	w_D	N/mm ²	扉下端に作用する静水圧荷重及び余震荷重	0.37	
	L_D	mm	扉の幅	900	
	H_D	mm	扉の高さ	2055	
	L_{PL}	mm	扉板の短辺長さ	505	
	t	mm	扉板の板厚	19	
	β_1	—	応力係数	0.6	
	W_D	kN	扉重量	7.85	
芯材	w'	N/mm	芯材に作用する等分布荷重	161.88	
	b	mm	芯材に作用する荷重の負担幅	437.5	
	L	mm	芯材の支持間距離	900	
	Z	mm ³	芯材の断面係数	231000	
	A_s	mm ²	芯材のせん断断面積	1800	
カンヌキ部	共通	n_2	本	カンヌキの本数	8
	カンヌキ	L_5	mm	カンヌキの突出長さ	68.5
		σ	N/mm ²	曲げ応力度	277
		τ	N/mm ²	せん断応力度	31
	カンヌキ 受けピン	L_p	mm	カンヌキ受けピンの軸支持間距離	72
		σ	N/mm ²	曲げ応力度	246
		τ	N/mm ²	せん断応力度	35
	カンヌキ 受けボルト	n_b	本	カンヌキ受けボルトの本数	2
		σ_t	N/mm ²	引張応力度	175

表 3-6 強度評価に用いる計算条件(2/6)

対象部位	記号	単位	定義	水密扉 No.
				2
アンカーボルト	L_{c1}	mm	躯体開口部の高さ	2000
	L_{c2}	mm	躯体開口部の幅	1000
	n_{a1}	本	0° 方向 左右もしくは上下の アンカーボルト本数	18
	n_{a2}	本	90° 方向 左右もしくは上下の アンカーボルト本数	24
	Q_a	N/ 本	0° 方向 アンカーボルト 1 本当たりの 短期許容せん断力	22529
			90° 方向 アンカーボルト 1 本当たりの 短期許容せん断力	13317
	T_a	N/ 本	0° 方向 アンカーボルト 1 本当たりの 短期許容引張力	25950
			90° 方向 アンカーボルト 1 本当たりの 短期許容引張力	34348

表 3-6 強度評価に用いる評価条件(3/6)

対象部位	記号	単位	定義	水密扉 No.	
				8	
共通	h	mm	扉の水圧作用高さ	4000	
	ρ_o	t/m ³	液体の密度	1.00	
	g	m/s ²	重力加速度	9.80665	
扉板	β	—	浸水エリアの幅と水深の比による補正係数	1.0	
	α_H	—	水平方向の設計震度	1.34	
	w_D	N/mm ²	扉下端に作用する静水圧荷重及び余震荷重	0.10	
	L_D	mm	扉の幅	1406	
	H_D	mm	扉の高さ	2037	
	L_{PL}	mm	扉板の短辺長さ	650	
	t	mm	扉板の板厚	19	
	β_1	—	応力係数	0.7	
	W_D	kN	扉重量	13.93	
芯材	w'	N/mm	芯材に作用する等分布荷重	64.50	
	b	mm	芯材に作用する荷重の負担幅	645	
	L	mm	芯材の支持間距離	1279	
	Z	mm ³	芯材の断面係数	153000	
	A_s	mm ²	芯材のせん断断面積	1260	
カンヌキ部	共通	n_2	本	カンヌキの本数	6
	カンヌキ	L_5	mm	カンヌキの突出長さ	61.5
		σ	N/mm ²	曲げ応力度	139
		τ	N/mm ²	せん断応力度	17
	カンヌキ 受けピン	L_p	mm	カンヌキ受けピンの軸支持間距離	72
		σ	N/mm ²	曲げ応力度	137
		τ	N/mm ²	せん断応力度	19
	カンヌキ 受けボルト	n_b	本	カンヌキ受けボルトの本数	2
		σ_t	N/mm ²	引張応力度	153

表 3-6 強度評価に用いる計算条件(4/6)

対象部位	記号	単位	定義	水密扉 No.
				8
アンカーボルト	L_{c1}	mm	躯体開口部の高さ	2100
	L_{c2}	mm	躯体開口部の幅	1400
	n_{a1}	本	0° 方向 左右もしくは上下の アンカーボルト本数	5
	n_{a2}	本	90° 方向 左右もしくは上下の アンカーボルト本数	7
	Q_a	N/本	0° 方向 アンカーボルト 1 本当たりの 短期許容せん断力	41465
			90° 方向 アンカーボルト 1 本当たりの 短期許容せん断力	58068
	T_a	N/本	0° 方向 アンカーボルト 1 本当たりの 短期許容引張力	66229
			90° 方向 アンカーボルト 1 本当たりの 短期許容引張力	67315

表 3-6 強度評価に用いる評価条件(5/6)

対象部位	記号	単位	定義	水密扉 No.	
				13	
共通	h	mm	扉の水圧作用高さ	4000	
	ρ_o	t/m ³	液体の密度	1.00	
	g	m/s ²	重力加速度	9.80665	
扉板	β	—	浸水エリアの幅と水深の比による補正係数	1.0	
	α_H	—	水平方向の設計震度	1.58	
	w_D	N/mm ²	扉下端に作用する静水圧荷重及び余震荷重	0.11	
	L_D	mm	扉の幅	2030	
	H_D	mm	扉の高さ	2600	
	L_{PL}	mm	扉板の短辺長さ	2030	
	t	mm	扉板の板厚	115	
	β_1	—	応力係数	0.5	
	W_D	kN	扉重量	79.43	
芯材	w'	N/mm	芯材に作用する等分布荷重	—	
	b	mm	芯材に作用する荷重の負担幅	—	
	L	mm	芯材の支持間距離	—	
	Z	mm ³	芯材の断面係数	—	
	A_s	mm ²	芯材のせん断面積	—	
カンヌキ部	共通	n_2	本	カンヌキの本数	—
	カンヌキ	L_5	mm	カンヌキの突出長さ	—
		σ	N/mm ²	曲げ応力度	—
		τ	N/mm ²	せん断応力度	—
	カンヌキ 受けピン	L_p	mm	カンヌキ受けピンの軸支持間距離	—
		σ	N/mm ²	曲げ応力度	—
		τ	N/mm ²	せん断応力度	—
	カンヌキ 受けボルト	n_b	本	カンヌキ受けボルトの本数	—
		σ_t	N/mm ²	引張応力度	—
扉固定部	扉付固定 ボルト	n_b	本	扉付固定ボルトの本数	11
		τ	N/mm ²	せん断応力度	216
	枠付固定 ボルト	A	mm ²	枠付固定ボルトの断面積	245
		σ_t	N/mm ²	引張応力度	216

表 3-6 強度評価に用いる計算条件(6/6)

対象部位	記号	単位	定義	水密扉 No.
				13
アンカーボルト	L_{c1}	mm	躯体開口部の高さ	2630
	L_{c2}	mm	躯体開口部の幅	1900
	n_{a1}	本	0° 方向 左右もしくは上下の アンカーボルト本数	25
	n_{a2}	本	90° 方向 左右もしくは上下の アンカーボルト本数	40
	Q_a	N/本	0° 方向 アンカーボルト 1 本当たりの 短期許容せん断力	6635
			90° 方向 アンカーボルト 1 本当たりの 短期許容せん断力	40302
	T_a	N/本	0° 方向 アンカーボルト 1 本当たりの 短期許容引張力	—
			90° 方向 アンカーボルト 1 本当たりの 短期許容引張力	57575

3.6 評価結果

水密扉の強度評価結果を表 3-7 に示す。水密扉の各部材の断面検定を行った結果、発生応力度又は荷重は許容限界値を下回ることから、水密扉が構造健全性を有することを確認した。

表 3-7 水密扉の強度評価結果

水密扉 No.	評価対象部位		発生値 (応力度, 荷重) (N/mm ² , N)	許容限界値 (N/mm ² , N)	発生値/ 許容限界値	備考
2	扉板		157	205	0.77	曲げ
	芯材*1		41	118	0.35	せん断
	カンヌキ部	カンヌキ*2	283	651	0.44	組合せ
		カンヌキ受けピン*1	246	345	0.72	曲げ
		カンヌキ受けボルト	175	728	0.25	引張
	アンカーボルト*3		—	—	0.61	組合せ
8	扉板		82	235	0.35	曲げ
	芯材*1		87	235	0.38	曲げ
	カンヌキ部	カンヌキ*2	143	205	0.70	組合せ
		カンヌキ受けピン*1	137	345	0.40	曲げ
		カンヌキ受けボルト	153	728	0.22	引張
	アンカーボルト*3		—	—	0.44	組合せ
13	扉板		18	205	0.09	曲げ
	芯材*1		—	—	—	—
	カンヌキ部	カンヌキ*2	—	—	—	—
		カンヌキ受けピン*1	—	—	—	—
		カンヌキ受けボルト	—	—	—	—
	扉固定部	扉付固定ボルト	216	420	0.52	せん断
		枠付固定ボルト	216	728	0.30	引張
アンカーボルト*3		—	—	0.23	組合せ	

注記*1：曲げ及びせん断のうち、評価結果が厳しい方の値を記載する。

*2：曲げ、せん断及び組合せのうち、評価結果が最も厳しい値を記載する。

*3：引張、せん断及び組合せのうち、評価結果が最も厳しい値を記載する。