

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-030 改 04
提出年月日	2023年3月1日

工事計画に係る補足説明資料

(火山への配慮が必要な施設の強度に関する説明書)

2023年3月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

補足説明資料目次

I. はじめに

1. 外部事象防護対象施設（建物等を除く）の強度計算に関する補足説明資料

1.1 構造強度評価における評価対象部位の選定

2. 建物の強度計算に関する補足説明資料

2.1 原子炉建物の強度計算に関する補足説明

2.2 タービン建物の強度計算に関する補足説明

2.3 制御室建物の強度計算に関する補足説明

2.4 廃棄物処理建物の強度計算に関する補足説明

2.5 排気筒モニタ室の強度計算に関する補足説明

 : 今回提出範囲

工事計画に係る補足説明資料

2. 建物の強度計算に関する補足説明資料

2.1 原子炉建物の強度計算に関する補足説明資料

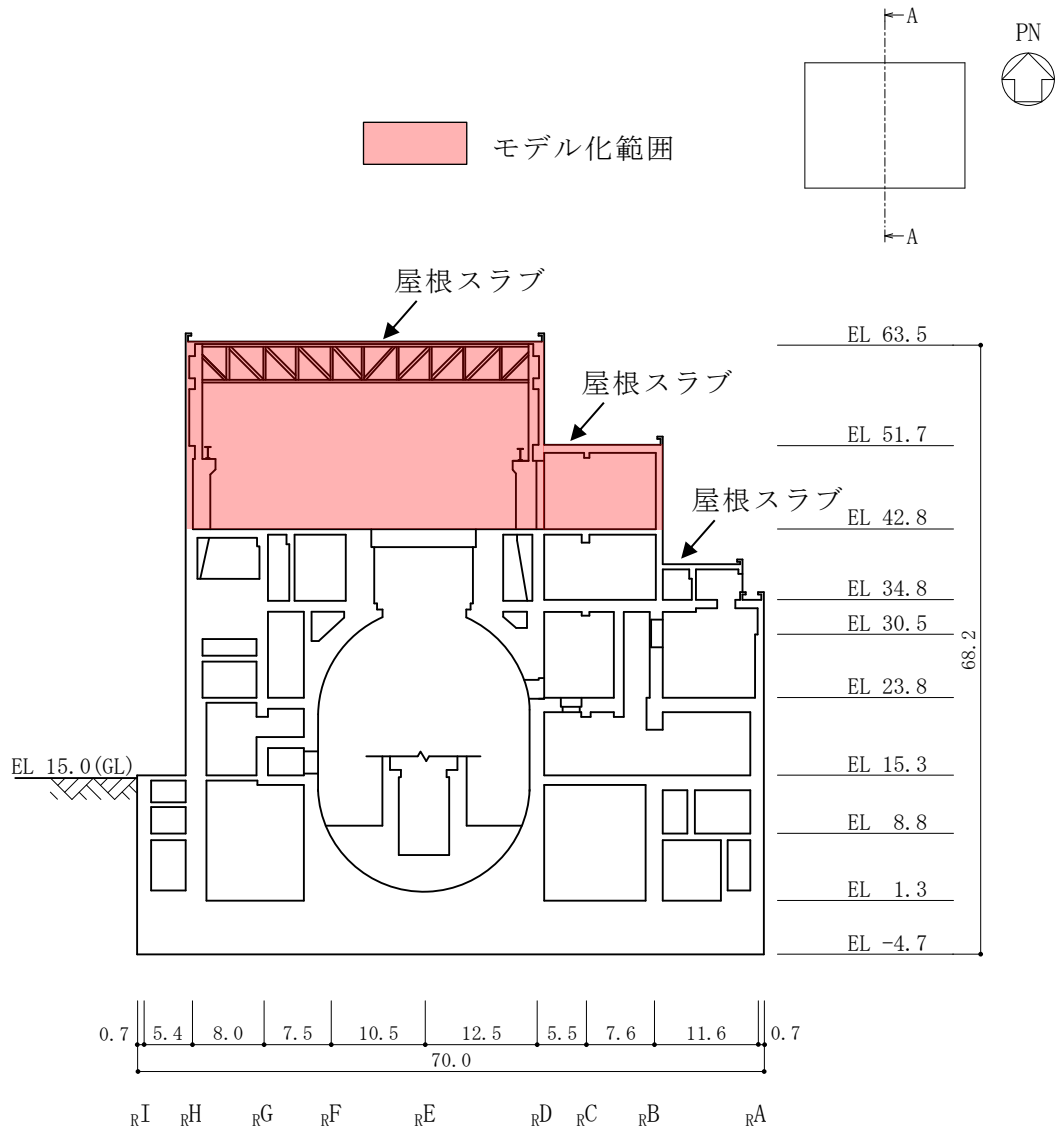
1. 概要

本資料は、原子炉建物の降下火砕物による荷重及び積雪荷重並びに風荷重による構造健全性評価に用いる3次元フレームモデルの詳細、評価部位の代表性及び鉄骨部屋根スラブの支持条件を踏まえた評価について示すものである。

2. 3次元フレームモデルの詳細説明

(1) モデル化の範囲

3次元フレームモデルのモデル化範囲を図2-1に示す。原子炉建物のEL 42.8mには厚さ0.6m～1.45mの床スラブと、主トラスを支える柱の脚部には、はりせい2.0～2.5mの大ばり又は、壁厚□～□の耐力壁が設置され、柱脚部の水平変形及び曲げ変形を拘束していることから、EL 42.8mより上部構造をモデル化する。



(単位：m)

図2-1 原子炉建物のモデル化範囲

(2) 使用要素

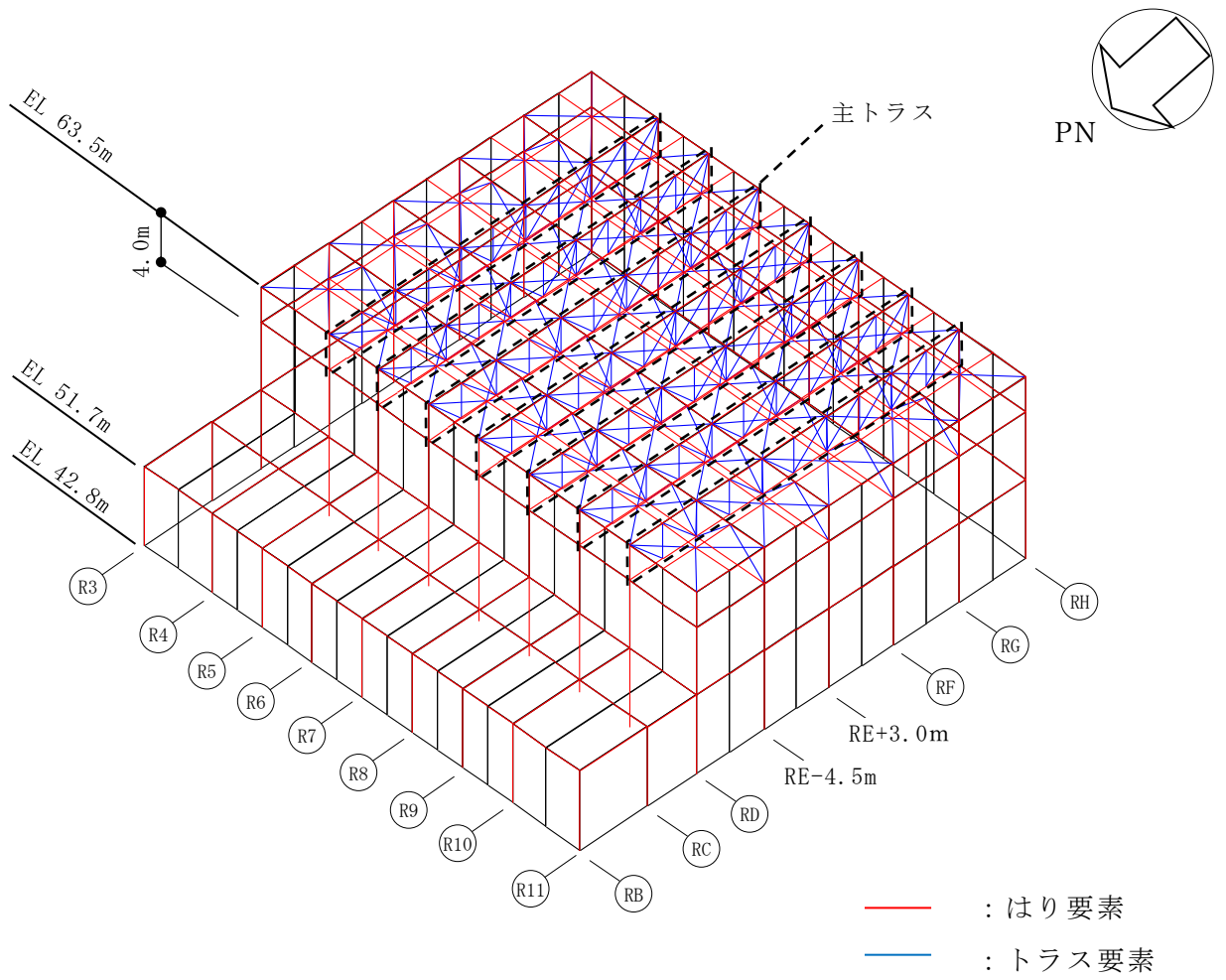
本解析で用いる使用要素を表 2-1 に示す。なお、主トラス端部の柱による曲げ拘束を適切に評価するため、耐力壁もシェル要素でモデル化する。鉄骨鉄筋コンクリート部及び鉄筋コンクリート部の柱及びはりをモデル化したはり要素及びトラス要素の解析モデル概要と、下屋部屋根スラブ及び耐力壁をモデル化したシェル要素を加えた全要素の解析モデル概要を図 2-2 に示す。なお、屋根トラス上部の荷重を全て屋根トラスに負担させるため、鉄骨部屋根スラブはモデル化しないものとし、下屋部屋根スラブについては、EL 51.7m より上部の RD 通りの外壁を支えている構造となっており、フレーム剛性にも影響するため、トラス部材への影響を適正に評価する目的でモデル化する。

鉄骨部では、主トラス上下弦材、つなぎばり上下弦材、サブビーム及びもやははり要素を、主トラス斜材、束材、つなぎばり斜材及び上弦面水平ブレースはトラス要素を用いる。

鉄筋コンクリート部及び鉄骨鉄筋コンクリート部では、耐力壁及び屋根スラブはシェル要素を、柱及びはりについてははり要素を用いる。

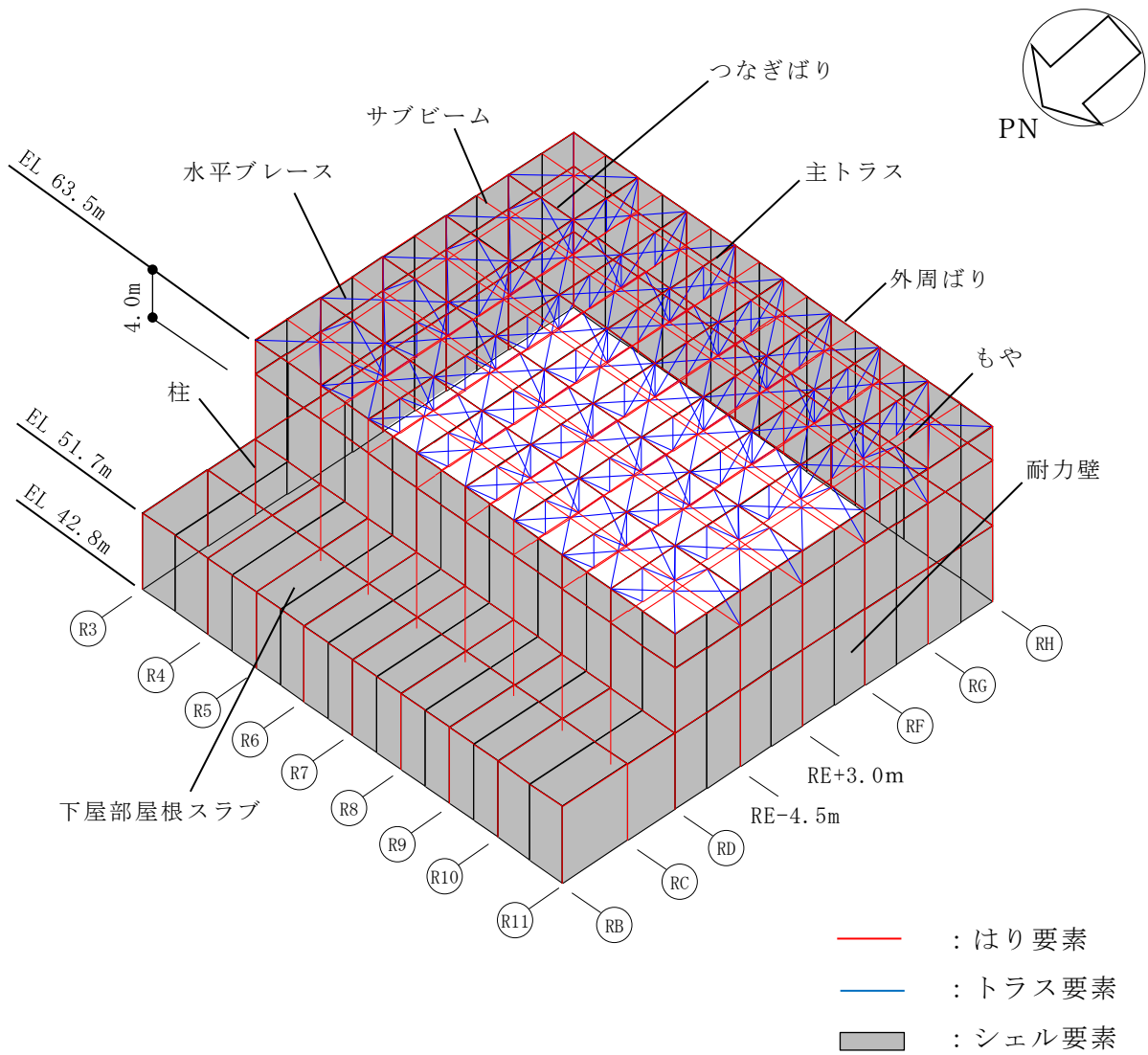
表2-1 使用要素

鉄骨部	主トラス上下弦材	はり要素
	つなぎばり上下弦材	
	サブビーム	
	もや	
	主トラス斜材・束材	トラス要素
	つなぎばり斜材	
水平ブレース		
鉄筋コンクリート部	耐力壁	シェル要素
	下屋部屋根スラブ	
鉄骨鉄筋コンクリート部 (一部鉄筋コンクリート)	柱・はり	はり要素



(a) はり要素・トラス要素

図2-2(1) 解析モデルの概要



(b) 全要素

図2-2(2) 解析モデルの概要

(3) 境界条件及び拘束条件

各部材の接続条件を表 2-2 に、部材リストを表 2-3 に示す。なお、主トラスは補強を実施しており、補強箇所については図 2-3 に示す。

本解析モデルは、EL 42.8m より上部の構造をモデル化し、解析モデル下端の全節点を固定端としてモデル化する。代表して、 R 7 通りの解析モデル図を図 2-4 に示す。

各部材の接続条件は、鉄骨フランジ部の接続の有無に応じて剛接合又はピン接合としてモデル化することとし、主トラス上下弦材と柱は剛接合とする。また、主トラスの斜材及び束材と上下弦材はピン接合とする。

シェル要素とはり要素及びトラス要素の同一座標における節点は、同一節点を用いてモデル化する。また、主トラス上弦材、下弦材、斜材及び束材は部材芯位置でモデル化することを基本とする。なお、主トラス端部の柱は、主トラス上弦材と端部斜材の交点にモデル化する。

3次元フレームモデルの各部材の寸法は竣工図を基に設定している。竣工図と解析モデル図は「5. 原子炉建物の構造図及び解析モデル図」に示す。

表2-2 解析モデルにおける部材の接続条件

部位	接続条件
主トラス上下弦材	剛接合
つなぎばり上下弦材	剛接合
サブビーム	剛接合
もや	ピン接合
主トラス斜材・束材	ピン接合
つなぎばり斜材	ピン接合
水平ブレース	ピン接合

表2-3 部材リスト

部位		記号	形状寸法	材質	断面積 ($\times 10^2 \text{mm}^2$)	断面二次 モーメント ($\times 10^4 \text{mm}^4$)
主トラス	上弦材	T1-c	H-400 \times 400 \times 13 \times 21	SM490A (SM50A)	218.7	66600
	下弦材	T1-a [´]	BH-400 \times 400 \times 19 \times 35 +2PL _S -16 \times 330*	SM490A (SM50A)	448.3	108800
		T1-a	BH-400 \times 400 \times 19 \times 35		342.7	99230
		T1-b	H-400 \times 400 \times 13 \times 21		218.7	66600
	斜材	T1-d	2CT _S -175 \times 350 \times 12 \times 19	SS400 (SS41)	173.9	—
		T1-e [´]	2CT _S -150 \times 300 \times 10 \times 15 +4L _S -90 \times 90 \times 10*		187.8	—
		T1-e	2CT _S -150 \times 300 \times 10 \times 15		119.8	—
		T1-f [´]	2CT _S -125 \times 250 \times 9 \times 14 +4L _S -90 \times 90 \times 10*		160.2	—
	束材	T1-g	2CT _S -175 \times 350 \times 12 \times 19	SS400 (SS41)	173.9	—
		T1-h	2CT _S -150 \times 300 \times 10 \times 15		119.8	—
		T1-i	2CT _S -125 \times 250 \times 9 \times 14		92.18	—

注記* : 補強工事で追加した部材

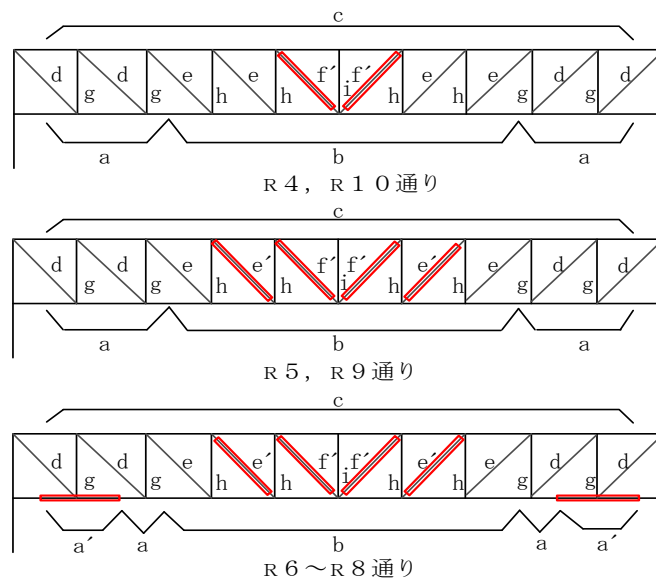


図 2-3 主トラス補強箇所

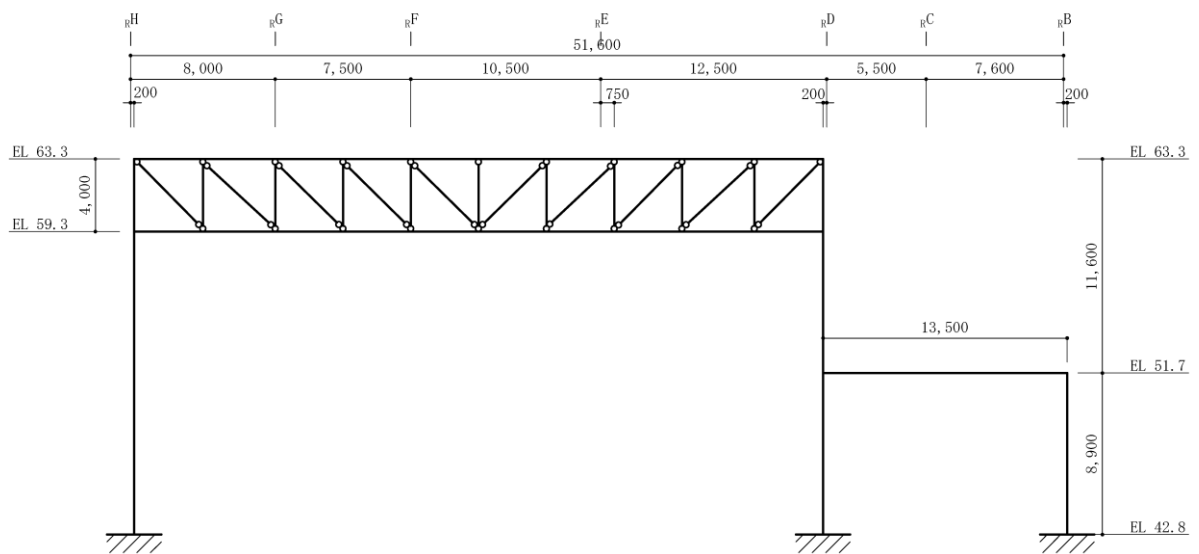


図 2-4 解析モデル図 (R 7 通り)

(4) 荷重の入力方法

屋根スラブに考慮する鉛直荷重を表 2-4 に、壁面に考慮する風荷重算定に使用する入力条件を表 2-5 及び表 2-6 に示す。

屋根に作用する鉛直荷重は、応力解析において以下のように入力する。

鉄筋コンクリート部材及び鉄骨部材の自重は、物体力として入力する。

屋根スラブ荷重については、主トラス上弦材及び外周ばりの各節点に支配面積に応じて入力する。クレーン荷重は、待機位置 (R 3 ~ R 4 通り間) における節点に振り分けて入力する。

積載荷重、降下火砕物による荷重及び積雪荷重は、主トラス上弦材、外周ばり及び下屋部屋根スラブの各節点に支配面積に応じて入力する。鉛直荷重の入力方法の概要を 図 2-5 及び 図 2-6 に示す。

壁面に作用する風荷重は、応力解析において以下のように入力する。

評価上、影響が大きいと判断される南北方向の風荷重について、風上・風下側壁面の各節点に支配面積に応じて入力する。風荷重の入力方法の概要を 図 2-7 に示す。

表 2-4 鉛直荷重一覧（主トラス）

常時作用する荷重 (F_d)	固定荷重 (G)	屋根スラブ	6.130kN/m ²
		トラス鋼材	2.647kN/m ³
		クレーン荷重	3433kN
積載荷重 (P)			0.981kN/m ²
降下火砕物による荷重 (F_a)			8.238kN/m ²
積雪荷重 (F_s)			0.7kN/m ²

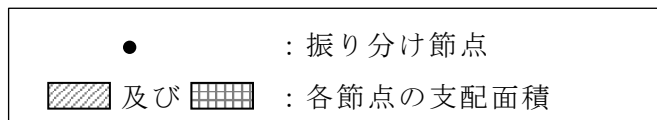
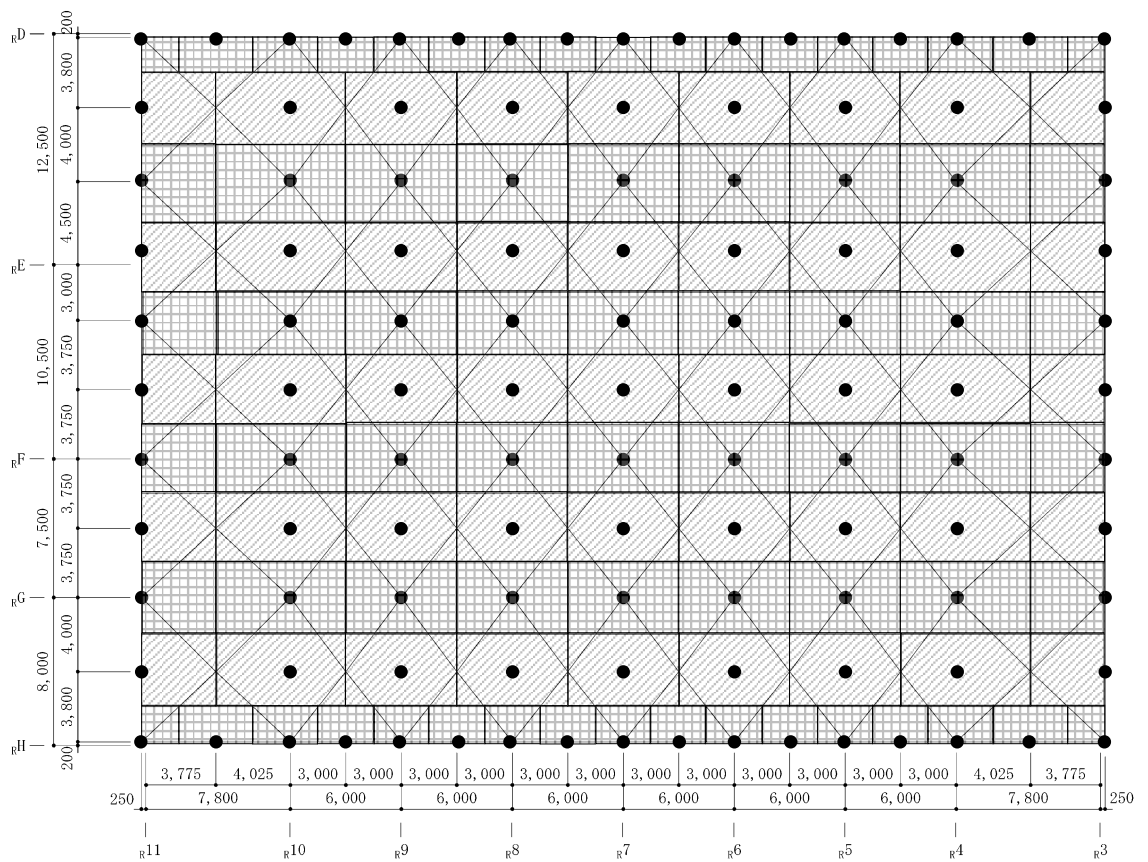


図 2-5 鉛直荷重の入力方法の概要（屋根スラブ，EL 63.5m）

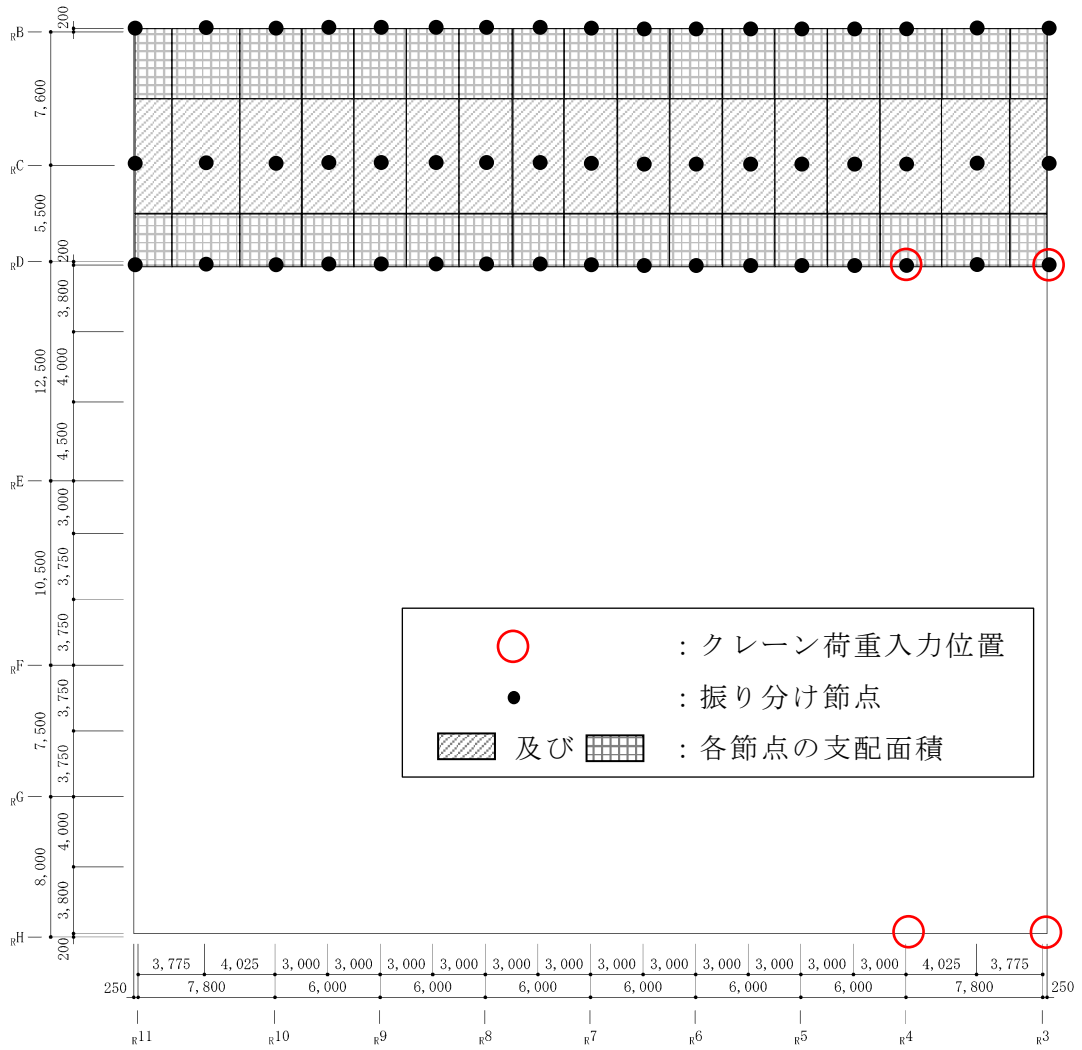


図 2-6 鉛直荷重の入力方法の概要（下屋部屋根スラブ，EL 51.7m）

表 2-5 設計風荷重の条件

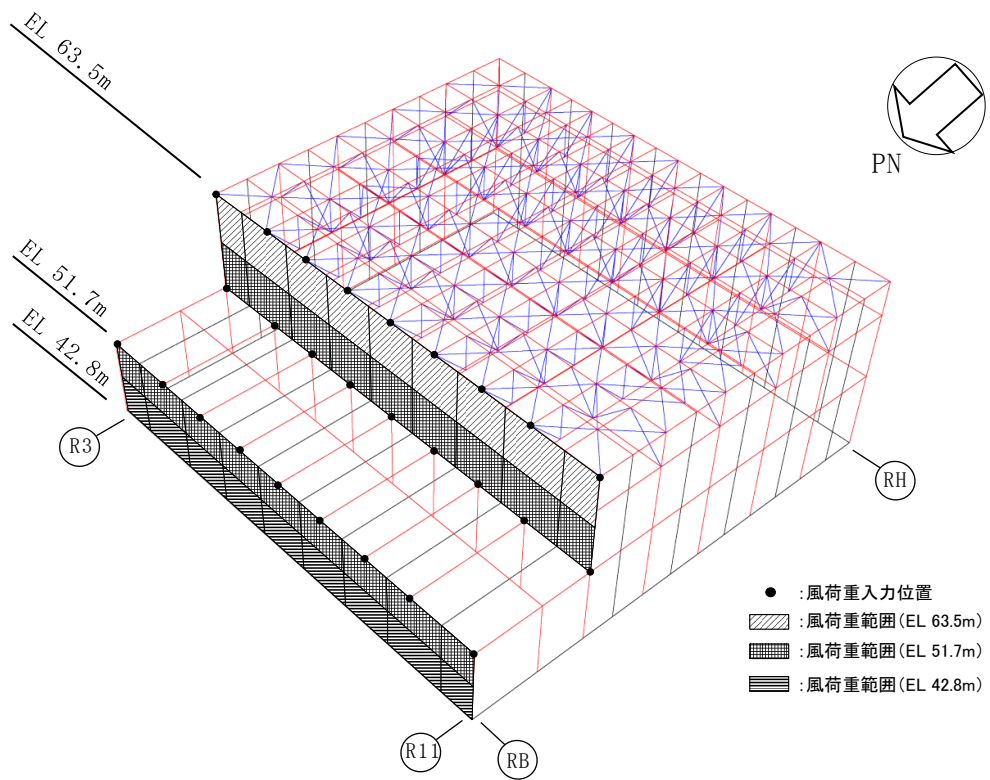
施設名称	基準風速 V_D (m/s)	全高 H (m)	Z_G (m)	α	ガスト 影響係数 G	設計用 速度圧 q (N/m ²)
原子炉建物	30	50.035	350	0.15	2.0	1742.0

表 2-6 原子炉建物の風力係数及び受圧面積

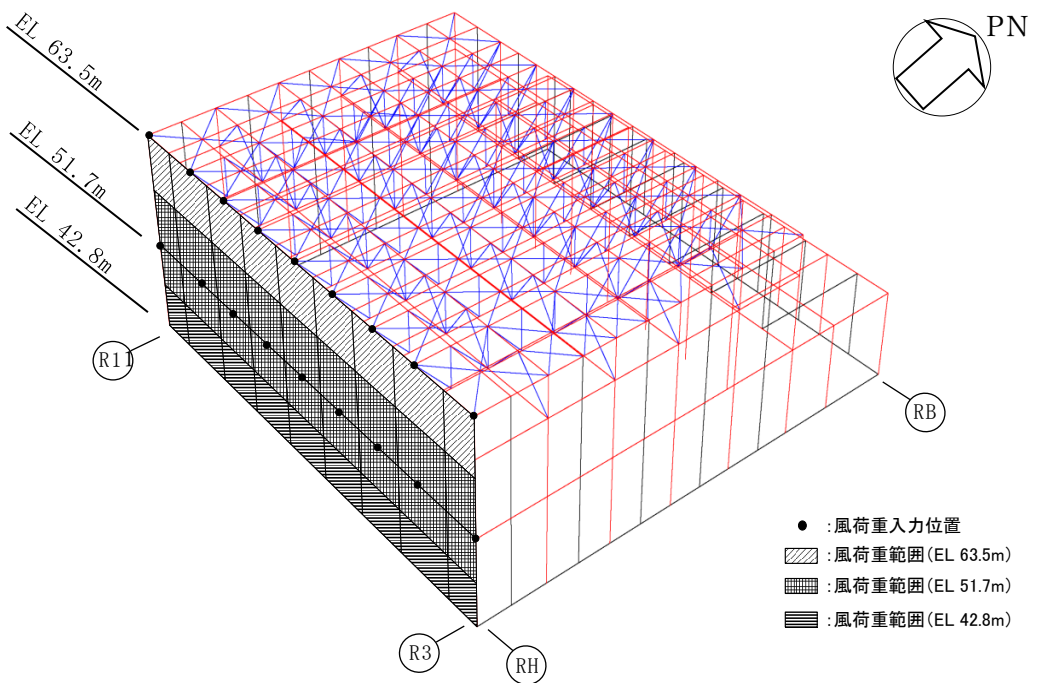
(a) 南北方向

高さ (EL) (m)	風力係数 C		受圧面積 A_1 (m ²)	
	風上*	風下	風上	風下
65.035~57.60	0.800	0.4	400	400
57.60~47.25	0.729	0.4	557	557
47.25~42.80	0.670	0.4	309	309

注記* : C (風上) は基準階での値を示す。



(a) 北側壁面



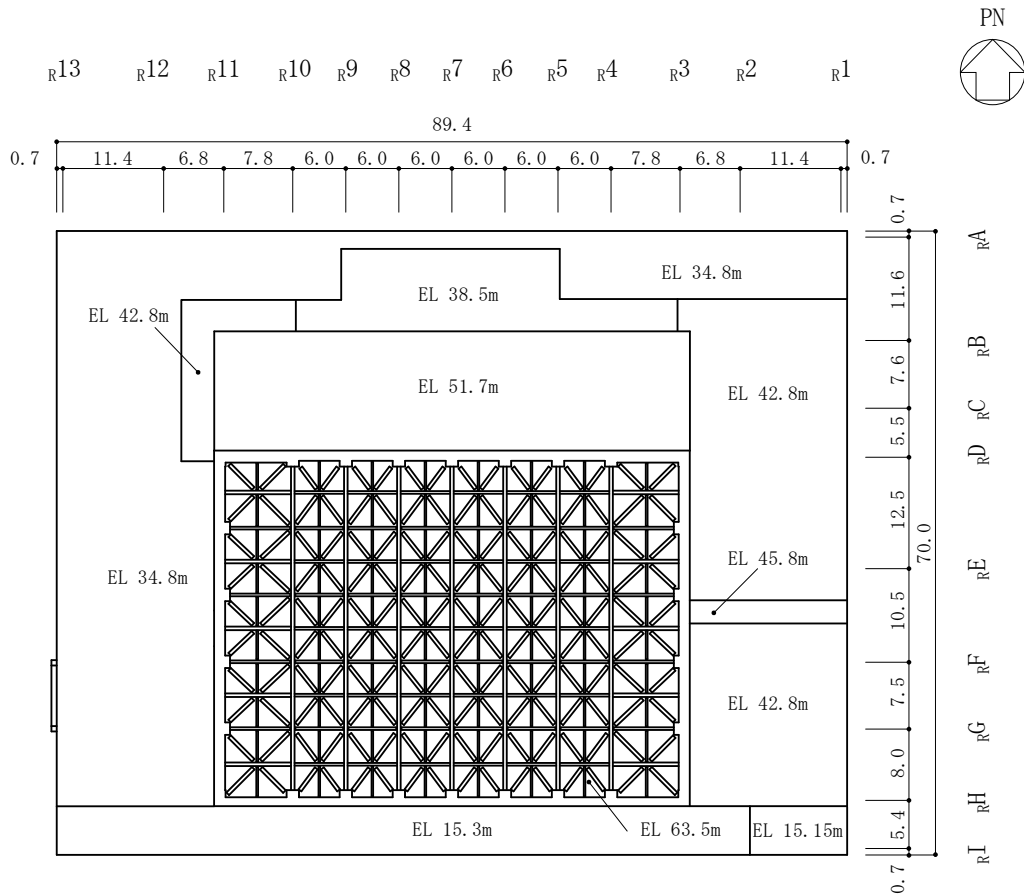
(b) 南側壁面

図 2-7 風荷重の入力方法の概要 (主トラス)

3. 評価部位の網羅性及び代表性について

(1) 屋根スラブ

原子炉建物の屋根面の概略平面図を図 3-1 に示す。



(単位：m)

図 3-1 原子炉建物の概略平面図

(a) 鉄骨部屋根スラブ

原子炉建物の鉄骨部屋根スラブは、屋根トラスで支持され、厚さが同じでスパンがほぼ均等なスラブが連続しており、その外周がスラブに比べて十分剛性の大きい鉄筋コンクリート造の壁に接合されていることから、支持点の間隔を長さとした両端固定ばりの一方向スラブとして評価する。屋根スラブは中央部と外周部で配筋が異なるが、屋根面に作用する等分布荷重は屋根面全体で均一であるため、各々の配筋部において支持スパンの長い屋根スラブが最も厳しい条件であると判断できる。スラブ記号図を図 3-2 に、スラブ断面リストを表 3-1 に示す。

図 3-3 に評価対象箇所として抽出した最も支持スパンの長い屋根スラブ位置を示す。

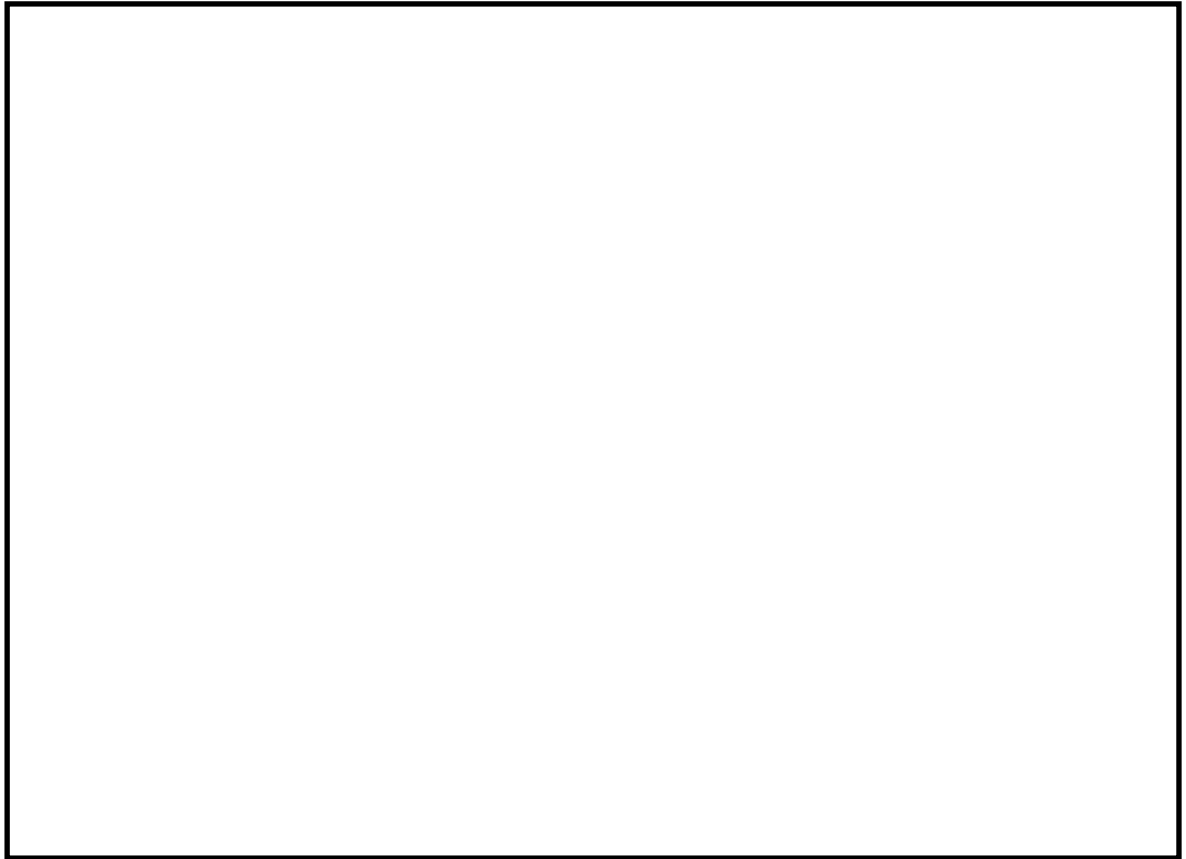
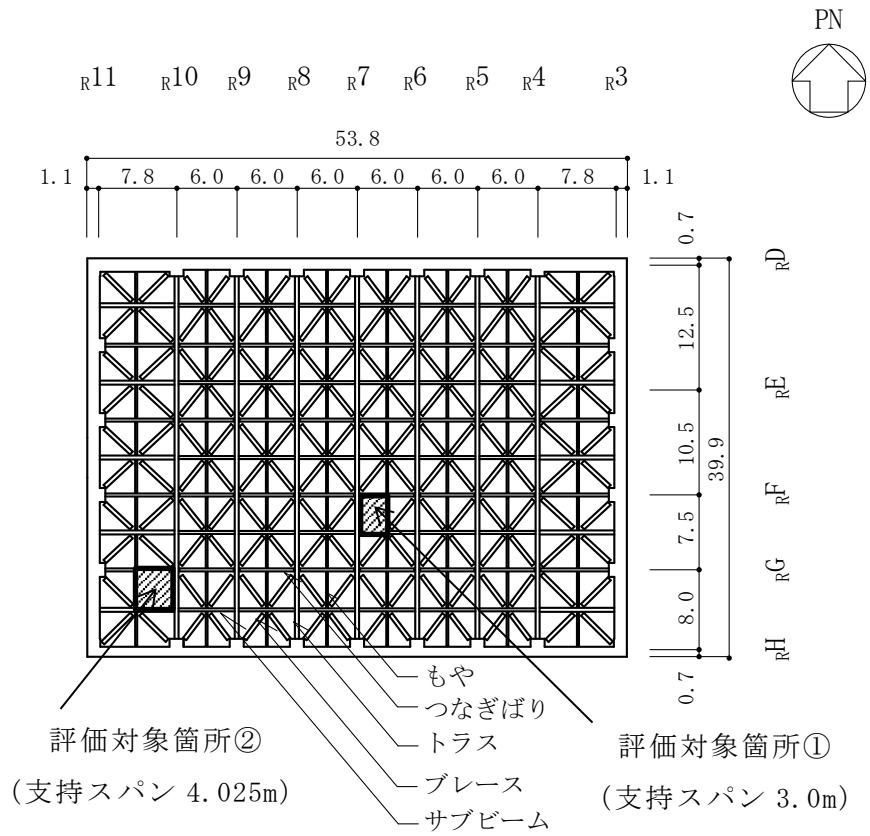


図 3-2 スラブ記号図 (鉄骨部屋根スラブ, EL 63.5m)

表 3-1 スラブ断面リスト (鉄骨部屋根スラブ, EL 63.5m)

スラブ記号	スラブ厚 (mm)	E W 方向	N S 方向
□	□	D13@200*	D13@200*
□	□	D13@100*	D13@100*

注記* : 上ば筋, 下ば筋とも同一配筋



(単位：m)

図 3-3 評価対象箇所 (鉄骨部屋根スラブ, EL 63.5m)

(b) 下屋部屋根スラブ

原子炉建物の鉄筋コンクリート躯体上（EL 15.3m（一部 EL 15.15m）, EL 34.8m, EL 38.5m, EL 42.8m, EL 45.8m, EL 51.7m）にある下屋部屋根スラブは、屋根面ごとに端部の支持状況に応じたモデル化（例えば、四辺固定版）により応力算出を行う。

鉄筋コンクリート躯体上の屋根スラブは、鉄筋コンクリートの大ばり、小ばり又は壁で支持された長方形版として評価を行う。スラブ記号及び評価モデルが同一のスラブから、各々支持スパン又は荷重が最大のものを選定し評価を行った。スラブ記号図を図 3-4～図 3-8 に、スラブ断面リストを表 3-2～表 3-6 に示す。

屋根スラブの評価対象箇所を図 3-9～図 3-13 に示す。表 3-7 に下屋部屋根スラブの評価結果を示す。

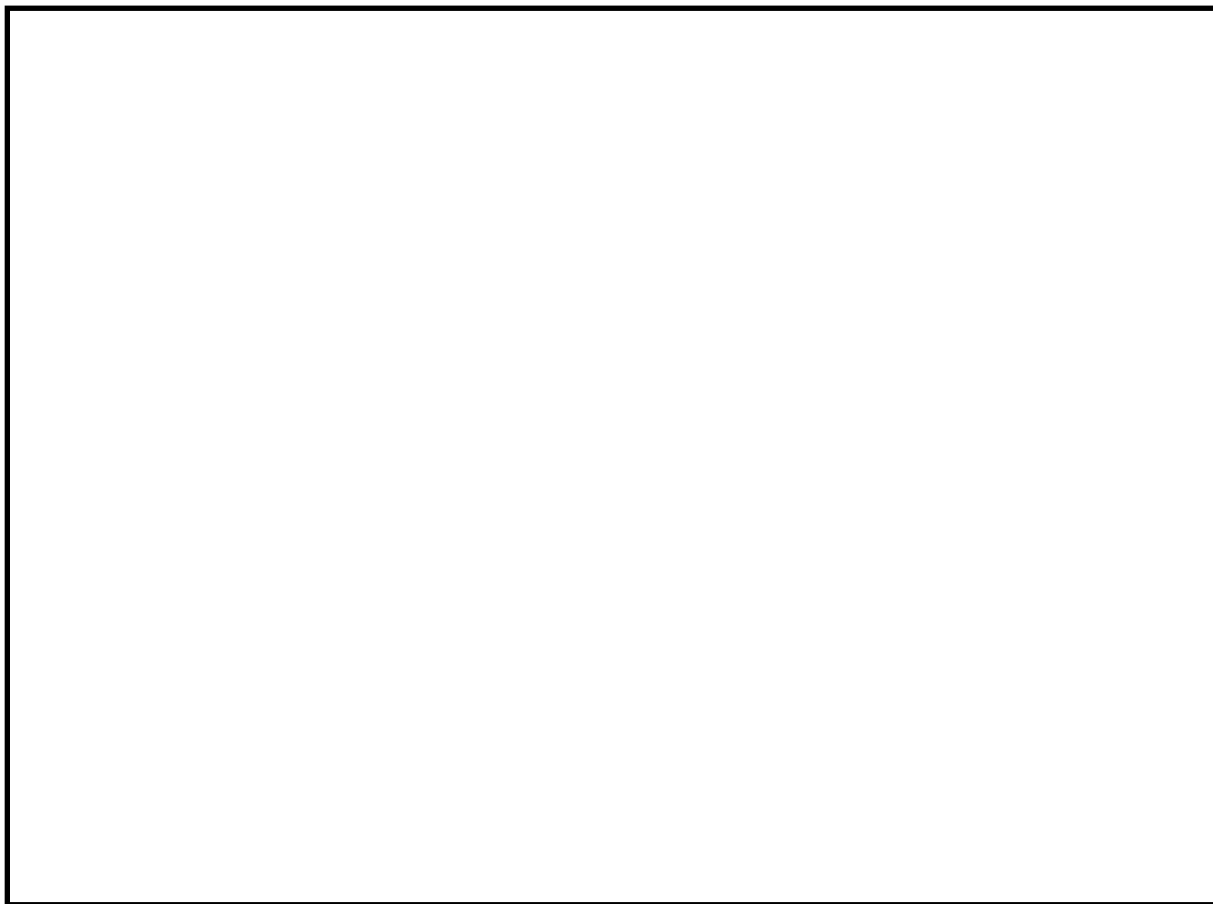


図 3-4 スラブ記号図（下屋部屋根スラブ，EL 15.3m（一部 EL 15.15m））

表 3-2 スラブ断面リスト（下屋部屋根スラブ，EL 15.3m（一部 EL 15.15m））

スラブ記号	スラブ厚(mm)	E W方向	N S方向
□	□	D25@200*	D25@200*
□	□	D25@200*	D25@200*

注記*：上ば筋，下ば筋とも同一配筋

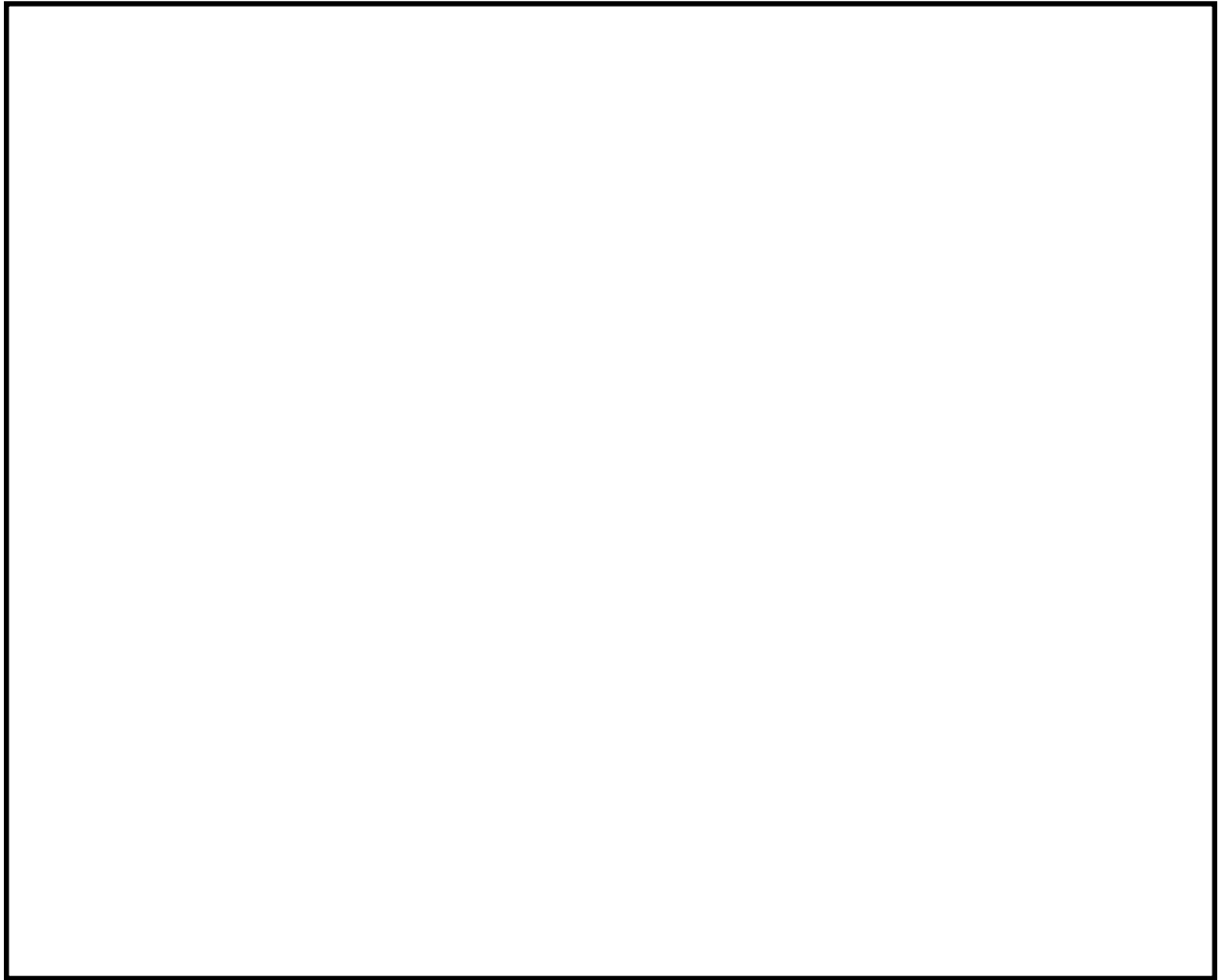


図 3-5 スラブ記号図（下屋部屋根スラブ，EL 34.8m）

表 3-3 スラブ断面リスト（下屋部屋根スラブ，EL 34.8m）

スラブ記号	スラブ厚 (mm)	E W 方向	N S 方向
		D25@200* ¹	D25@200* ¹
		D25@100* ¹	D25@200* ¹
		D25@200* ²	D25@200* ²
		D29@200* ¹	D29@200* ¹

注記*1：上ば筋，下ば筋とも同一配筋

*2：上ば筋のみ D25+D19 交互@100

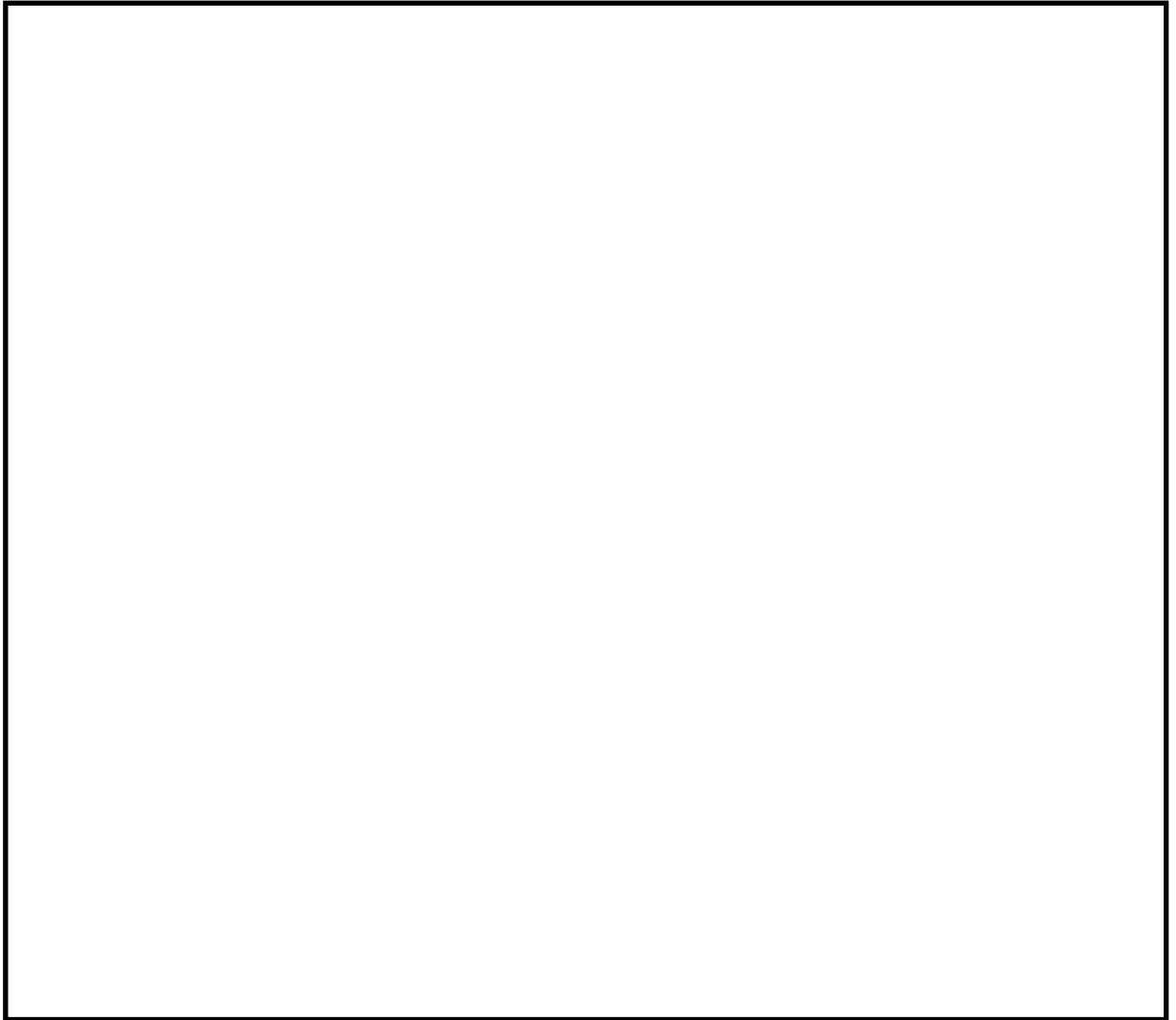


図 3-6 スラブ記号図 (下屋部屋根スラブ, EL 38.5m)

表 3-4 スラブ断面リスト (下屋部屋根スラブ, EL 38.5m)

スラブ記号	スラブ厚 (mm)	E W 方向	N S 方向
□	□	D19@200*	D19@200*
□	□	D25@200*	D25@200*

注記* : 上ば筋, 下ば筋とも同一配筋

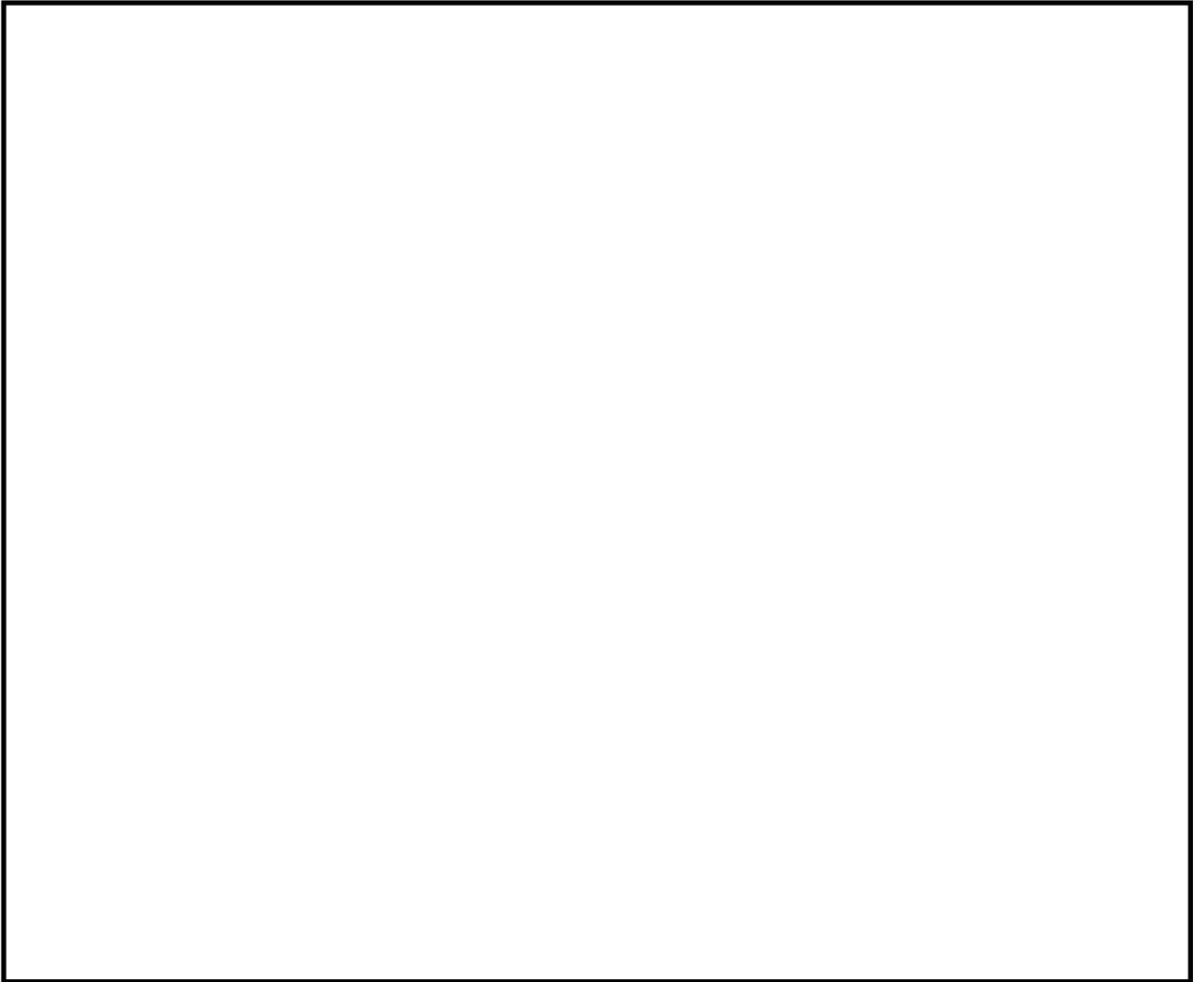


図 3-7 スラブ記号図 (下屋部屋根スラブ, EL 42.8m, EL 45.8m)

表 3-5 スラブ断面リスト (下屋部屋根スラブ, EL 42.8m, EL 45.8m)

スラブ記号	スラブ厚 (mm)	E W 方向	N S 方向
		D19@200* ¹	D19@200* ¹
		D13@200* ²	D13@200* ²
		D25@200* ³	D25@200* ³

注記*1: 上ば筋, 下ば筋とも同一配筋

*2: 上ば筋のみ D13@100

*3: 上ば筋のみ D25+D19 交互@100

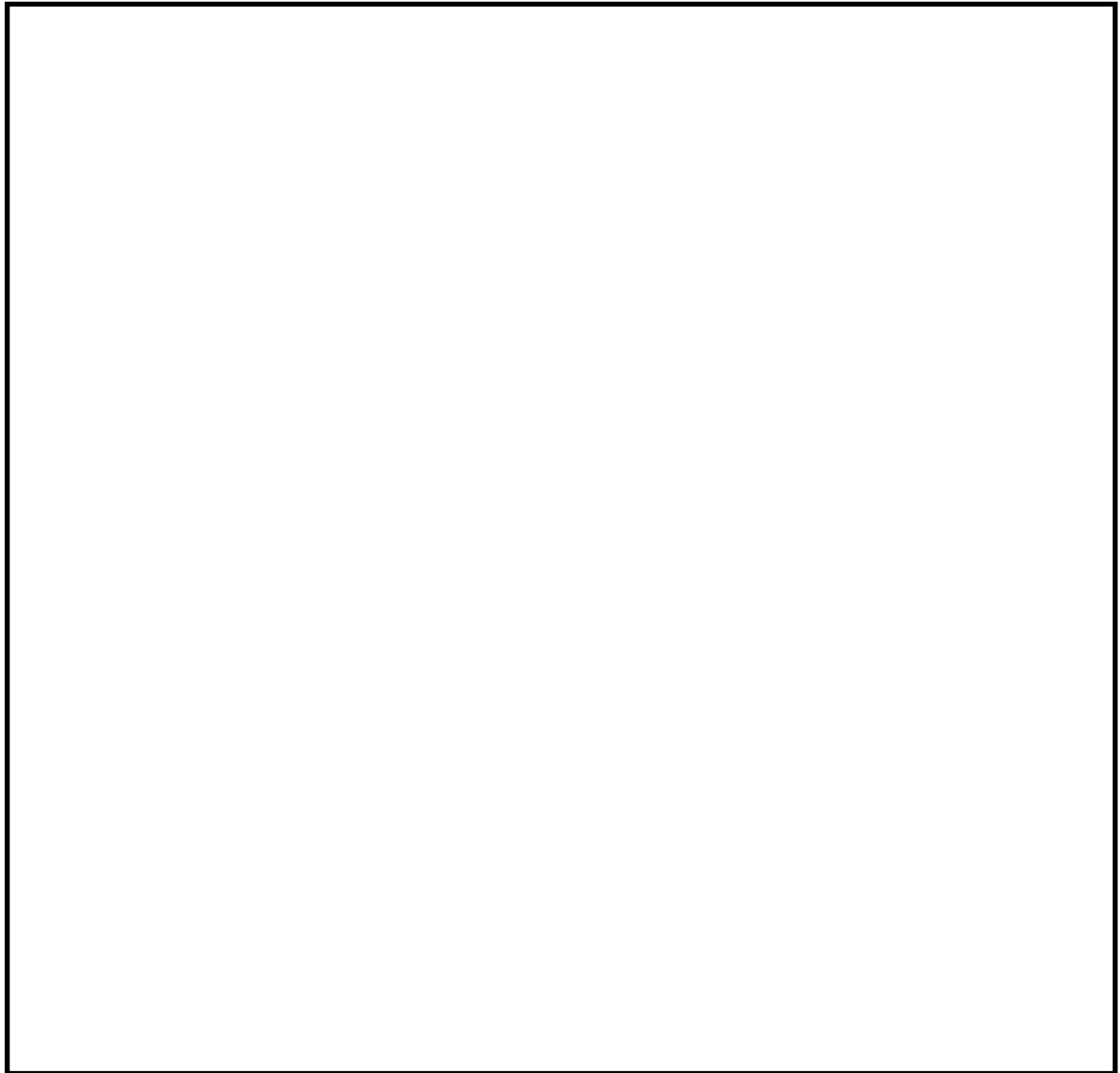




図 3-8 スラブ記号図 (下屋部屋根スラブ, EL 51.7m)

表 3-6 スラブ断面リスト (下屋部屋根スラブ, EL 51.7m)

スラブ記号	スラブ厚 (mm)	E W 方向	N S 方向
		D29@200*	D29@200*

注記* : 上ば筋, 下ば筋とも同一配筋

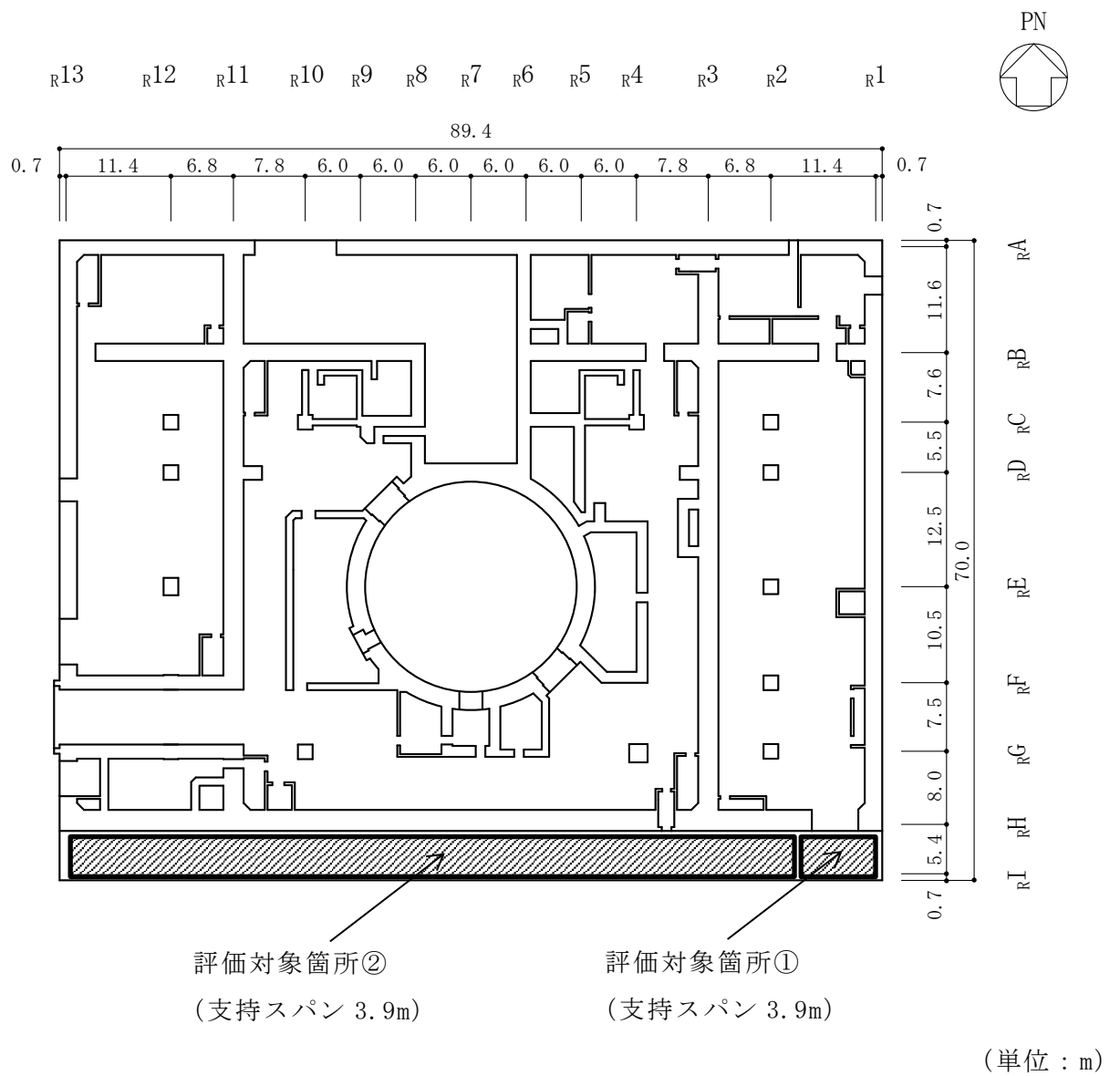


図 3-9 評価対象箇所（下屋部屋根スラブ，EL 15.3m（一部 EL 15.15m））

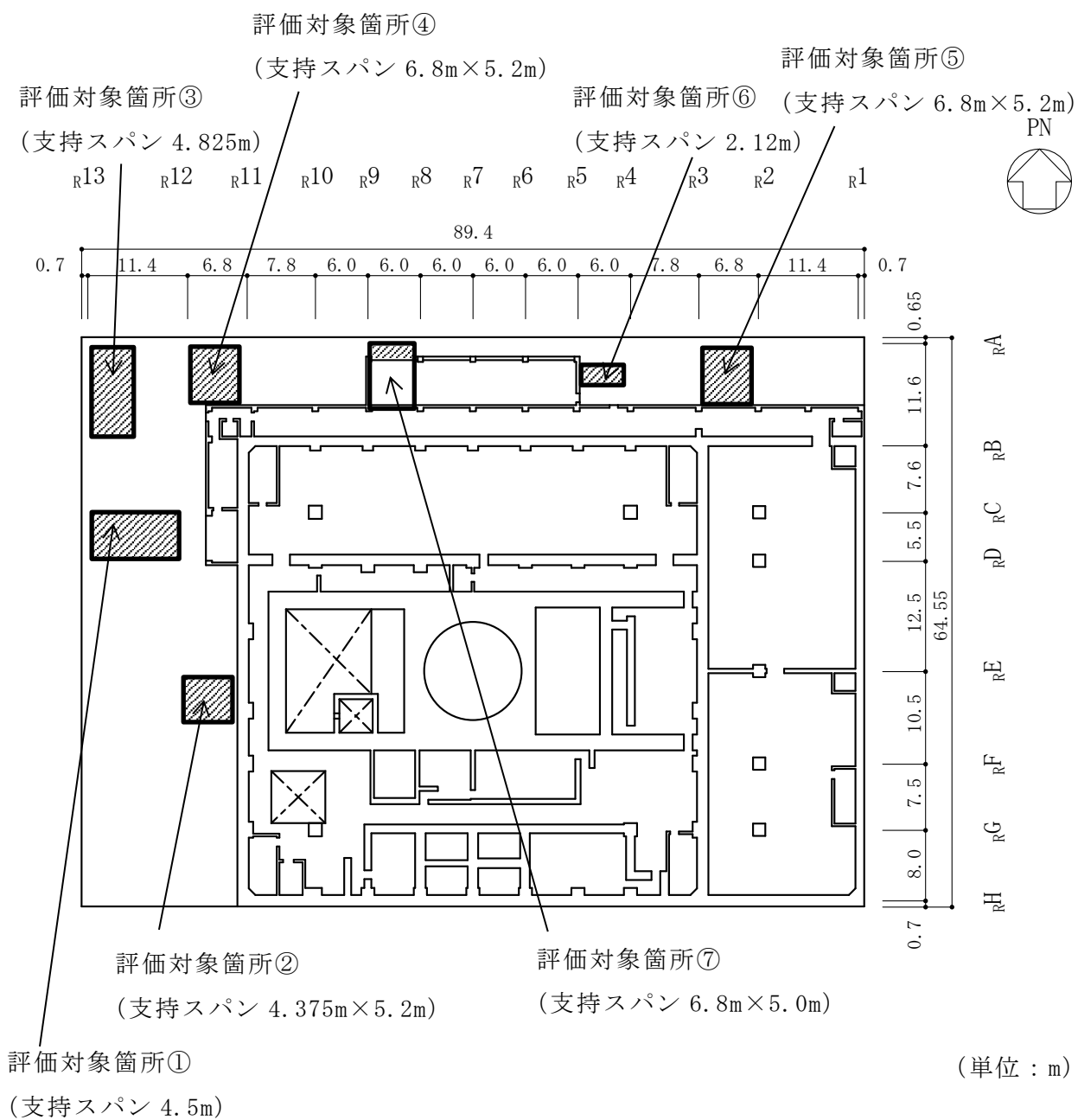
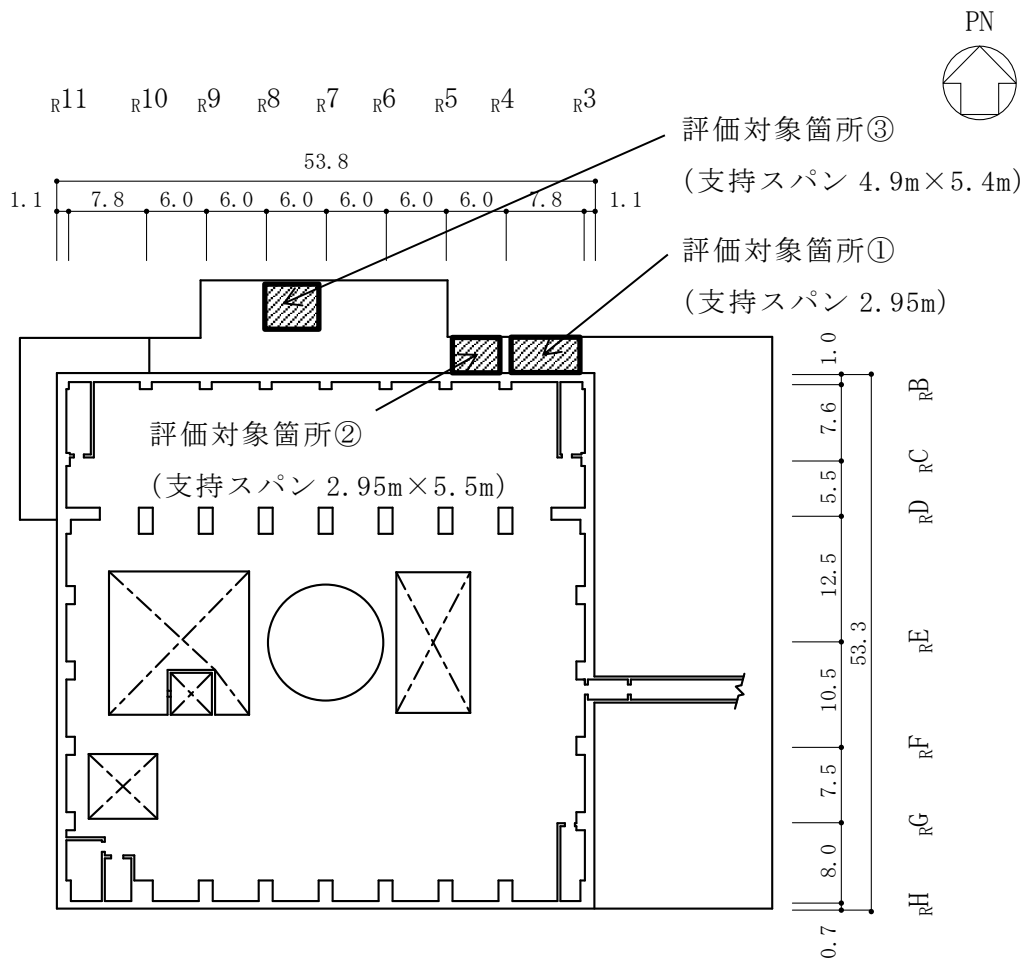
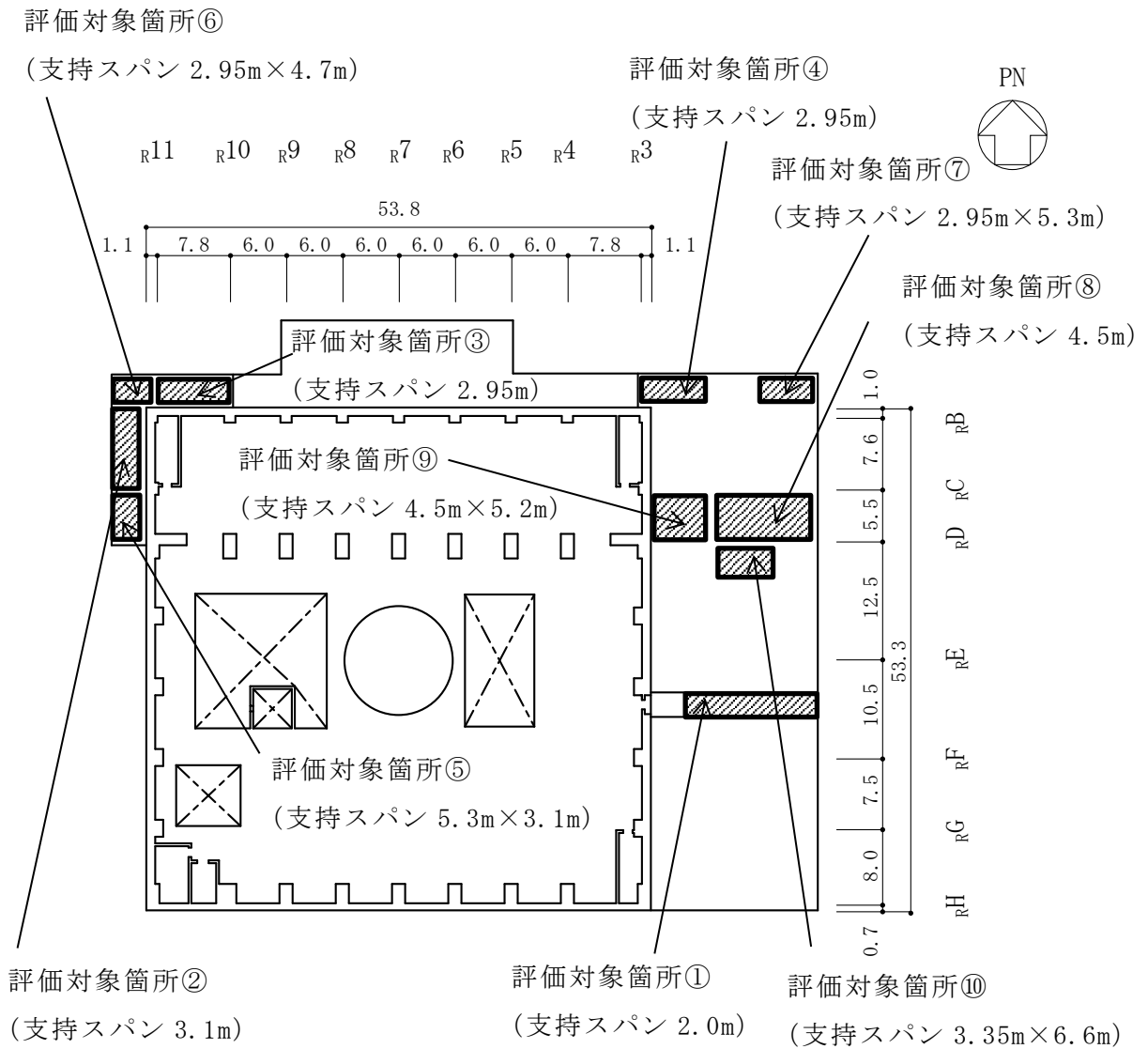


図 3-10 評価対象箇所 (下屋部屋根スラブ, EL 34.8m)



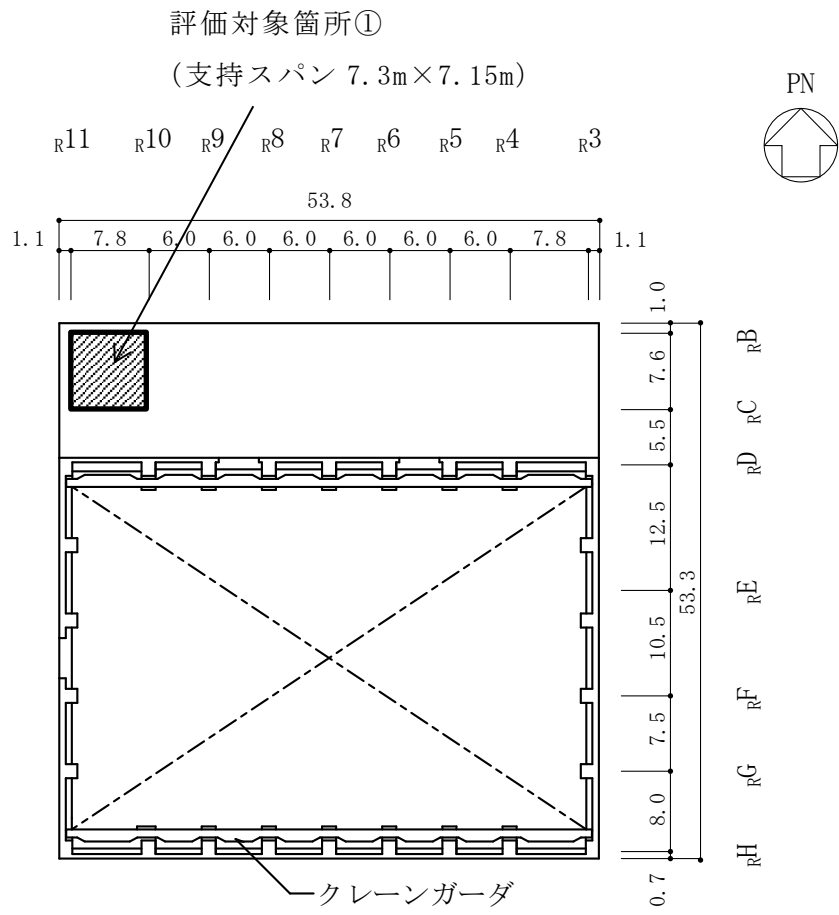
(単位：m)

図 3-11 評価対象箇所 (下屋部屋根スラブ, EL 38.5m)



(単位 : m)

図 3-12 評価対象箇所 (下屋部屋根スラブ, EL 42.8m, EL 45.8m)



(単位 : m)

図 3-13 評価対象箇所 (下屋部屋根スラブ, EL 51.7m)

表 3-7(1) 原子炉建物の下屋部屋根スラブの評価結果
(EL 15.3m (一部 EL 15.15m) , EL 34.8m)

EL(m)	評価対象箇所	スラブ記号	モデル		検定値		備考
					曲げモーメント	面外せん断力	
15.3 (15.15)	①		一方向版		0.11*	0.10*	EL 15.15m 図 3-9
	②		一方向版		0.09	0.07	図 3-9
34.8	①		一方向版		0.09	0.10	図 3-10
	②		四辺固定	短辺方向	0.06	0.08	図 3-10
				長辺方向	0.04	0.07	
	③		一方向版		0.16	0.11	図 3-10
	④		四辺固定	短辺方向	0.14	0.10	図 3-10
				長辺方向	0.10	0.09	
	⑤		四辺固定	短辺方向	0.07	0.10	図 3-10
長辺方向				0.10	0.09		
⑥		一方向版		0.03	0.04	図 3-10	
⑦		四辺固定	短辺方向	0.28*	0.17*	図 3-10	
			長辺方向	0.09	0.11		

注記* : 同一 EL のスラブで、検定値が最大となる箇所を表す。

表 3-7(2) 原子炉建物の下屋部屋根スラブの評価結果
(EL 38.5m, EL 42.8m, EL 45.8m)

EL(m)	評価対象箇所	スラブ記号	モデル		検定値		備考
					曲げモーメント	面外せん断力	
38.5	①		一方向版		0.22*	0.18*	図 3-11
	②		四辺固定	短辺方向	0.20	0.17	図 3-11
				長辺方向	0.10	0.09	
	③		四辺固定	短辺方向	0.15	0.17	図 3-11
				長辺方向	0.12	0.13	
	42.8 (45.8)	①		一方向版		0.11	0.09
②			一方向版		0.18	0.13	図 3-12
③			一方向版		0.18	0.14	図 3-12 有効せいより選定
④			一方向版		0.20*	0.16*	図 3-12 荷重条件より選定
⑤			四辺固定	短辺方向	0.16	0.12	図 3-12
	長辺方向			0.10	0.10		

注記* : 同一 EL のスラブで、検定値が最大となる箇所を表す。

表 3-7(3) 原子炉建物の下屋部屋根スラブの評価結果
(EL 42.8m, EL 51.7m)

EL (m)	評価対象箇所	スラブ記号	モデル		検定値		備考
					曲げモーメント	面外せん断力	
42.8	⑥		四辺固定	短辺方向	0.16	0.14	図 3-12 有効せいより選定
				長辺方向	0.08	0.08	
	⑦		四辺固定	短辺方向	0.18	0.15	図 3-12 荷重条件より選定
				長辺方向	0.09	0.08	
	⑧		一方向版		0.09	0.10	図 3-12
	⑨		四辺固定	短辺方向	0.06	0.08	図 3-12
				長辺方向	0.05	0.07	
	⑩		四辺固定	短辺方向	0.05	0.07	図 3-12
				長辺方向	0.03	0.06	
	51.7	①		四辺固定	短辺方向	0.13	0.12*
長辺方向					0.13*	0.12	

注記* : 同一 EL のスラブで、検定値が最大となる箇所を表す。

(2) 主トラス

添付書類「VI-3-別添 2-5 原子炉建物の強度計算書」には、降下火砕物に対する健全性評価の結果として、検定値が最大となる部材の評価結果のみを示した。

ここでは、全ての部材の評価結果を網羅的に示し、強度計算書に示した結果の代表性を確認する。

強度計算書に記載した主トラスの評価結果を表 3-8 に、評価位置を図 3-14 に示す。また、通りごとの主トラス部材の検定値を図 3-15～図 3-21 に示す。図には、各部位の最大検定値を赤枠で囲い示した。R 7 通りにおいて検定値が最大となる部材があり、それらの値は表 3-8 の値に整合している。

なお、許容値の算出方法については、「4. 主トラスの許容応力値について」に示す。

表3-8 原子炉建物主トラスの評価結果 (EL 63.5m)

評価対象部位	No.	発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容限界 (N/mm ²)	検定値
上弦材	1	引張り	49.09	325	0.37
		曲げ	71.03	325	
下弦材	2	圧縮	85.56	217	0.60
		曲げ	61.17	304	
束材	3	圧縮	102.71	176	0.59
斜材	4	引張り	169.66	235	0.73

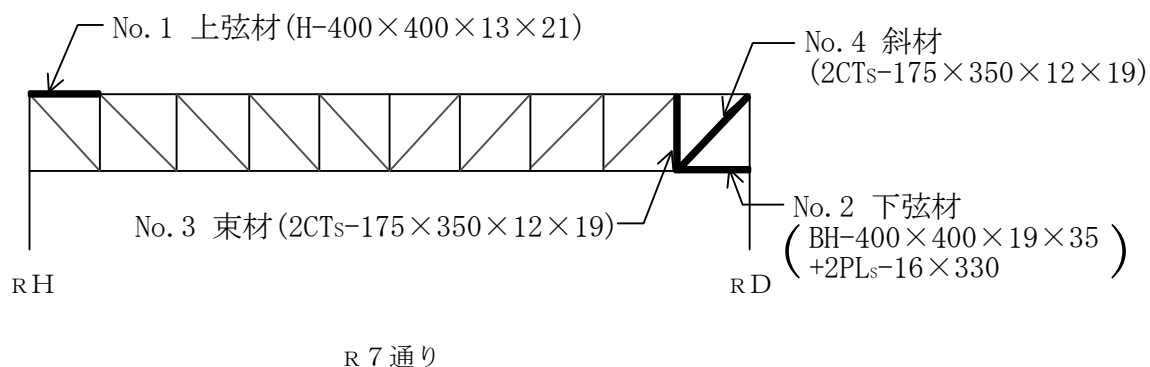
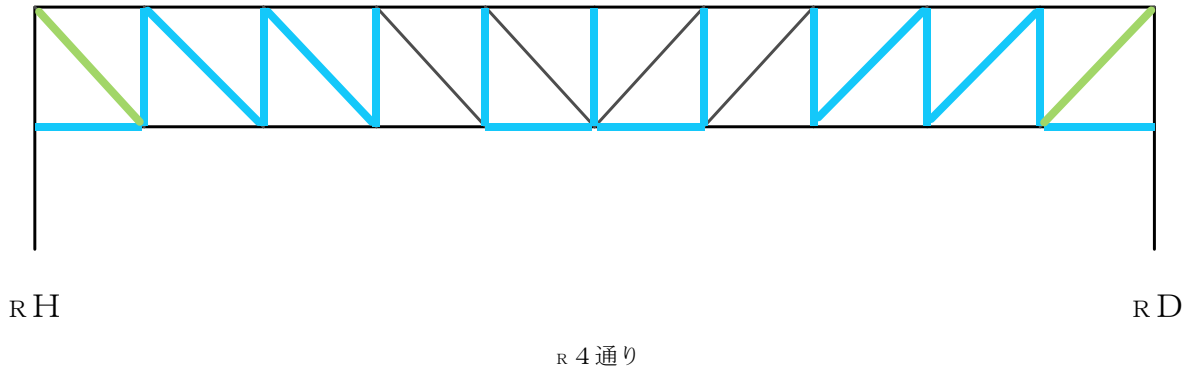


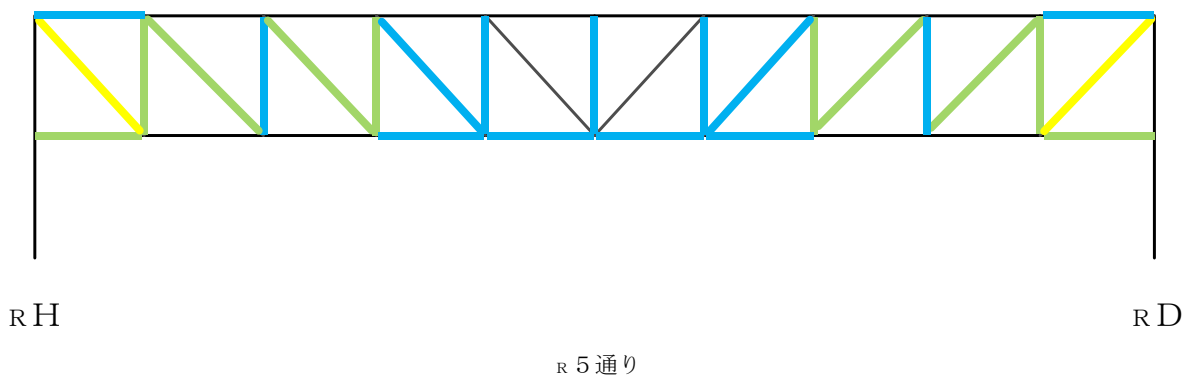
図 3-14 部材評価位置

- : (検定比) < 0.2
- : $0.2 \leq$ (検定比) < 0.4
- : $0.4 \leq$ (検定比) < 0.6
- : $0.6 \leq$ (検定比) < 0.8
- : $0.8 \leq$ (検定比) < 1.0



上弦材	0.17	0.11	0.12	0.13	0.16	0.16	0.13	0.12	0.12	0.16
斜材	0.42	0.27	0.27	0.04	0.14	0.15	0.05	0.27	0.27	0.42
束材		0.35	0.31	0.27	0.33	0.33	0.34	0.27	0.31	0.35
下弦材	0.33	0.08	0.09	0.17	0.20	0.20	0.16	0.08	0.09	0.33

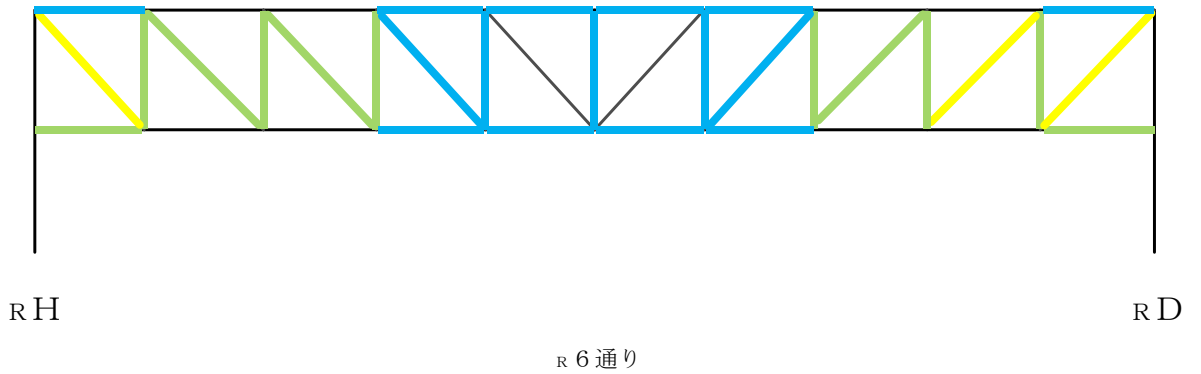
図 3-15 主トラスの検定値 (R 4 通り)



上弦材	0.29	0.14	0.13	0.19	0.19	0.19	0.19	0.13	0.14	0.29
斜材	0.60	0.48	0.43	0.22	0.14	0.15	0.22	0.43	0.48	0.60
束材		0.48	0.38	0.41	0.30	0.32	0.30	0.41	0.38	0.48
下弦材	0.49	0.14	0.08	0.22	0.30	0.30	0.22	0.08	0.14	0.49

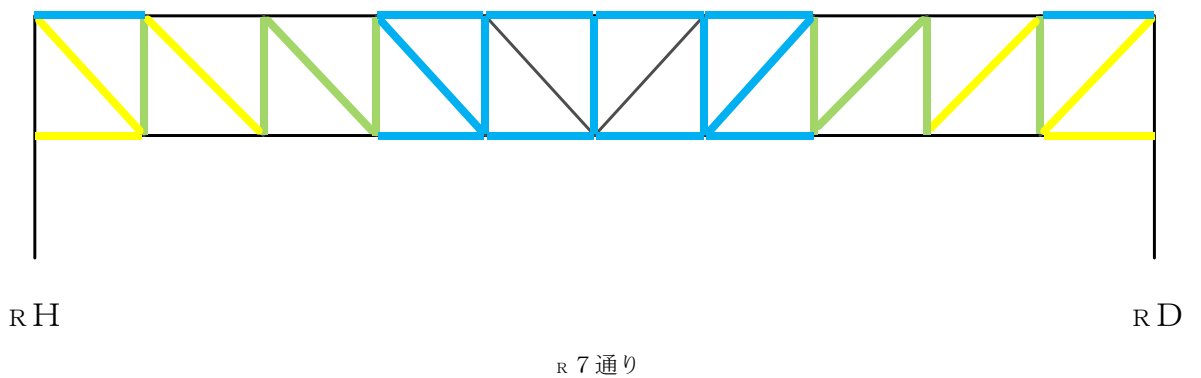
図 3-16 主トラスの検定値 (R 5 通り)

- : (検定比) < 0.2
- : $0.2 \leq$ (検定比) < 0.4
- : $0.4 \leq$ (検定比) < 0.6
- : $0.6 \leq$ (検定比) < 0.8
- : $0.8 \leq$ (検定比) < 1.0



上弦材	0.36	0.15	0.14	0.22	0.21	0.21	0.22	0.14	0.15	0.36
斜材	0.70	0.59	0.52	0.31	0.15	0.15	0.31	0.52	0.60	0.70
束材		0.56	0.43	0.50	0.31	0.31	0.31	0.50	0.43	0.56
下弦材	0.57	0.17	0.07	0.24	0.35	0.35	0.24	0.08	0.17	0.57

図 3-17 主トラスの検定値 (R 6通り)

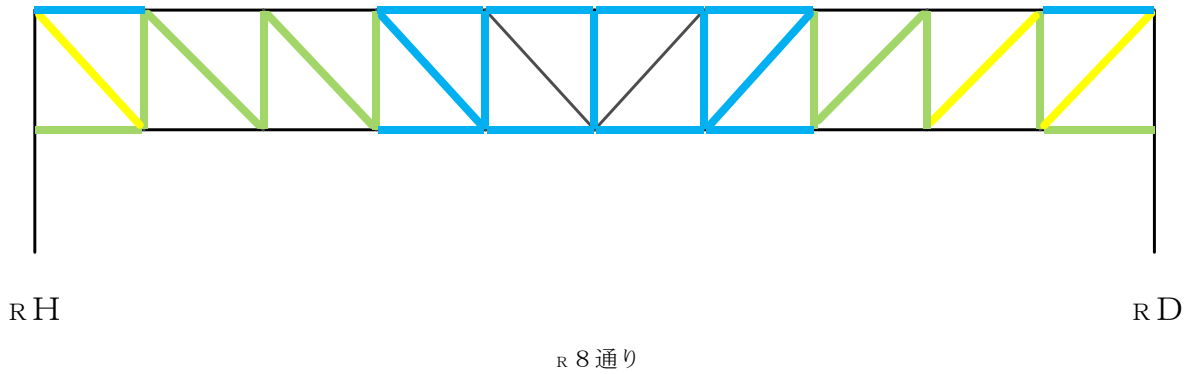


上弦材	0.37	0.16	0.15	0.23	0.22	0.22	0.23	0.15	0.16	0.37
斜材	0.73	0.63	0.55	0.34	0.15	0.15	0.34	0.55	0.63	0.73
束材		0.59	0.45	0.53	0.31	0.32	0.31	0.53	0.45	0.59
下弦材	0.60	0.18	0.07	0.24	0.36	0.36	0.24	0.07	0.19	0.60

: 最大検定値部材 (表3-8は、応力度最大箇所を記載)

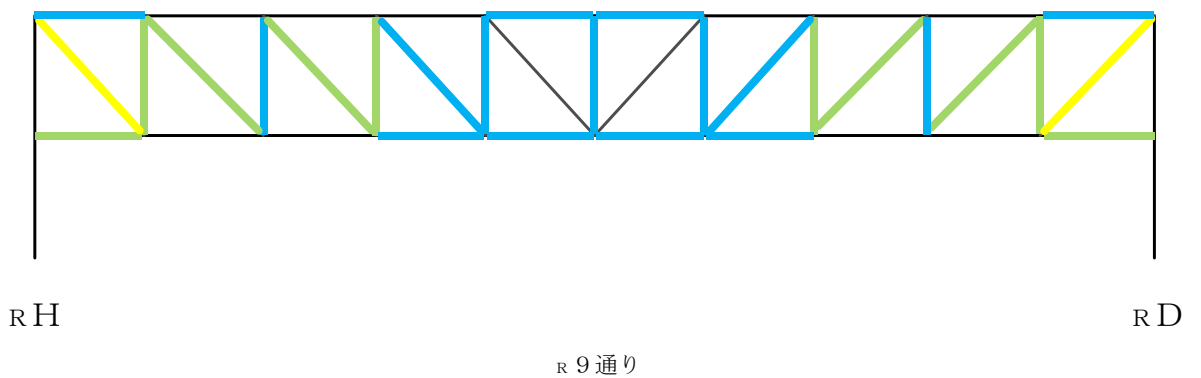
図 3-18 主トラスの検定値 (R 7通り)

- : (検定比) < 0.2
- : 0.2 ≦ (検定比) < 0.4
- : 0.4 ≦ (検定比) < 0.6
- : 0.6 ≦ (検定比) < 0.8
- : 0.8 ≦ (検定比) < 1.0



上弦材	0.36	0.15	0.14	0.22	0.21	0.21	0.22	0.14	0.15	0.36
斜材	0.70	0.59	0.52	0.31	0.15	0.15	0.31	0.52	0.60	0.70
束材		0.56	0.43	0.50	0.31	0.31	0.31	0.50	0.43	0.56
下弦材	0.57	0.17	0.07	0.24	0.35	0.35	0.24	0.08	0.17	0.57

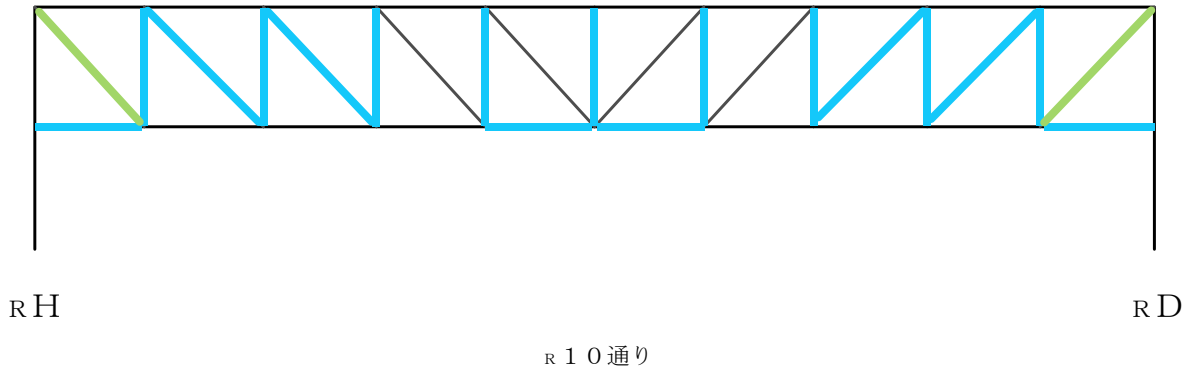
図 3-19 主トラスの検定値 (R 8 通り)



上弦材	0.29	0.14	0.13	0.19	0.20	0.20	0.19	0.13	0.14	0.29
斜材	0.60	0.48	0.43	0.22	0.14	0.15	0.22	0.43	0.48	0.60
束材		0.48	0.38	0.41	0.30	0.32	0.30	0.41	0.38	0.48
下弦材	0.49	0.14	0.08	0.22	0.30	0.30	0.22	0.08	0.14	0.49

図 3-20 主トラスの検定値 (R 9 通り)

- : (検定比) < 0.2
- : $0.2 \leq$ (検定比) < 0.4
- : $0.4 \leq$ (検定比) < 0.6
- : $0.6 \leq$ (検定比) < 0.8
- : $0.8 \leq$ (検定比) < 1.0



上弦材	0.17	0.11	0.12	0.13	0.16	0.16	0.13	0.12	0.12	0.16
斜材	0.42	0.27	0.27	0.04	0.14	0.15	0.05	0.27	0.27	0.42
束材		0.35	0.31	0.27	0.33	0.33	0.34	0.27	0.31	0.35
下弦材	0.33	0.08	0.09	0.17	0.20	0.20	0.16	0.08	0.09	0.33

図 3-21 主トラスの検定値 (R10通り)

(3) 二次部材

強度計算書に記載した二次部材の評価対象箇所を図 3-22 に、部材リストを表 3-9 に示す。

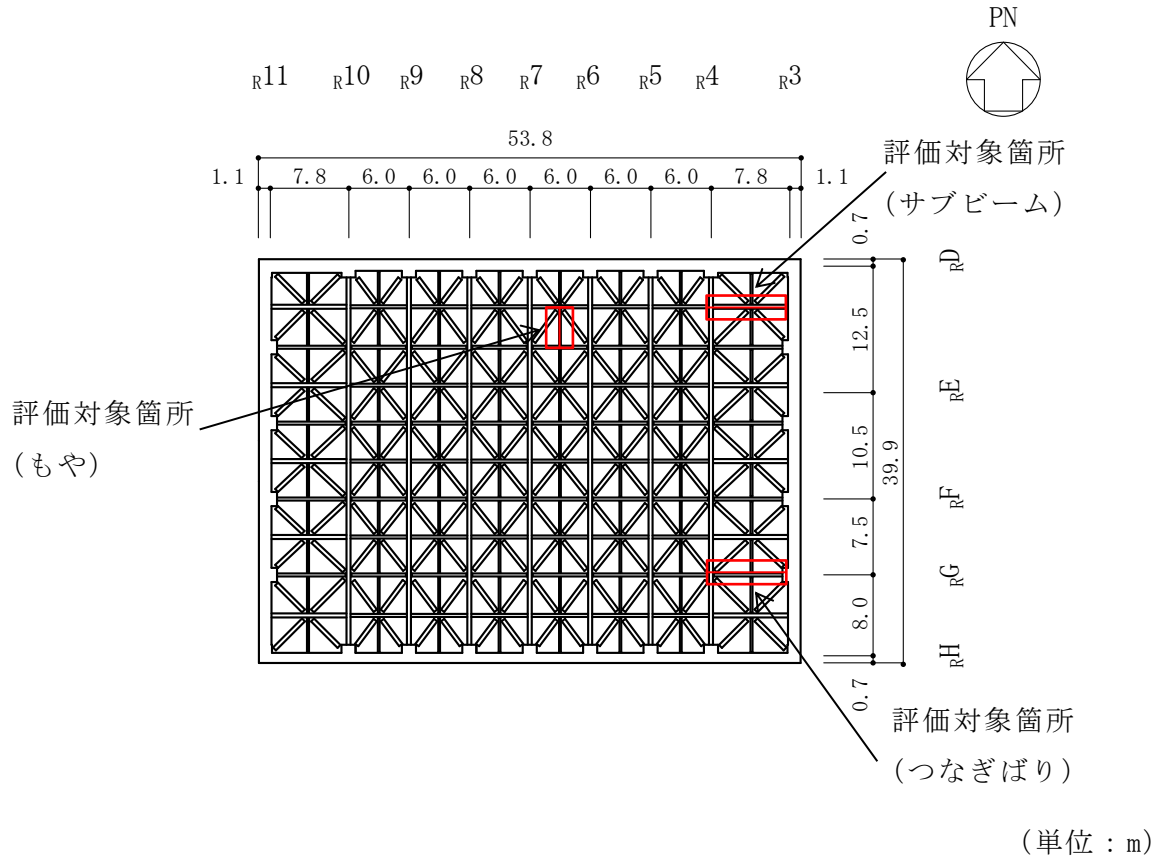


図 3-22 評価対象箇所 (二次部材, EL 63.5m)

表 3-9 原子炉建物 部材リスト (二次部材)

部位		記号	形状寸法	材質	断面積 ($\times 10^2 \text{mm}^2$)	断面二次 モーメント ($\times 10^4 \text{mm}^4$)
もや		sb24	H-294 \times 200 \times 8 \times 12	SS400 (SS41)	72.38	11300
		sb23	H-244 \times 175 \times 7 \times 11	SS400 (SS41)	56.24	6120
つなぎ ばり	上弦 材 下弦 材	sT-a	H-390 \times 300 \times 10 \times 16	SS400 (SS41)	136.0	38700
	斜材	sT-b [*]	2CT _s -125 \times 250 \times 9 \times 14 +4L _s -65 \times 65 \times 6*	SS400 (SS41)	122.3	—
		sT-b	2CT _s -125 \times 250 \times 9 \times 14	SS400 (SS41)	92.18	—
サブビーム		sb21	H-400 \times 400 \times 13 \times 21	SS400 (SS41)	218.7	66600
		sb22	H-390 \times 300 \times 10 \times 16	SS400 (SS41)	136.0	38700

注記* : 補強工事で追加した部材

(a) もや

もやは、支配幅を取り出し、等分布荷重を受ける単純ばり（両端ピン支持のほり）として評価を行う。検討スパンは、接合部の現況を考慮した有効長さとして評価する。屋根面に作用する等分布荷重は屋根面全体で均一であるため、支持スパンが長く、屋根面の支配面積の大きな箇所を選定する。

なお、もやは、表 3-9 に示すとおり、断面の異なる 2 種類の鉄骨部材を使用しており、各々支持スパンが長く、屋根面の支配面積の大きな箇所を評価対象としている。もやの評価対象箇所を図 3-23 に、評価結果を表 3-10 に示す。

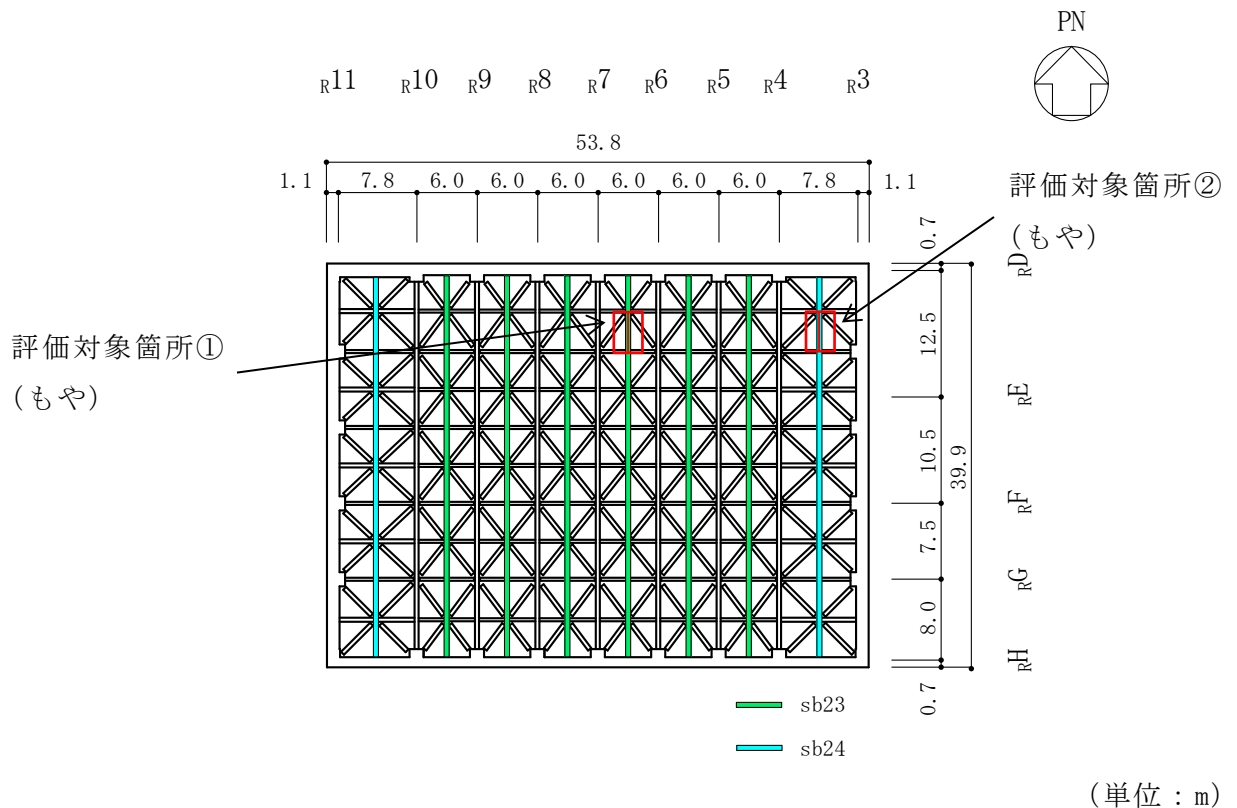


図 3-23 評価対象箇所（もや，EL 63.5m）

表 3-10 二次部材（もや）の短期許容応力度に基づく評価結果 (EL 63.5m)

評価対象箇所	発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容限界 (N/mm ²)	検定値
① (sb23)	曲げ	122.7	181	0.68*
	せん断	49.9	135	0.37*
② (sb24)	曲げ	103.8	190	0.55
	せん断	47.4	135	0.36

注記*：検定値が最大となる箇所を表す。

(b) サブビーム

サブビームは、主トラスで支持された支配幅を取り出し、中央集中荷重を受ける単純ばり（両端ピン支持のはり）として評価を行う。屋根面に作用する荷重は屋根面全体で均一であるため、支持スパンが長く、屋根面の支配面積の大きな箇所を選定する。

なお、サブビームは、表 3-9 に示すとおり、断面の異なる 2 種類の鉄骨部材を使用しており、各々支持スパンが長く、屋根面の支配面積の大きな箇所を評価対象としている。サブビームの評価対象箇所を図 3-24 に、評価結果を表 3-11 に示す。

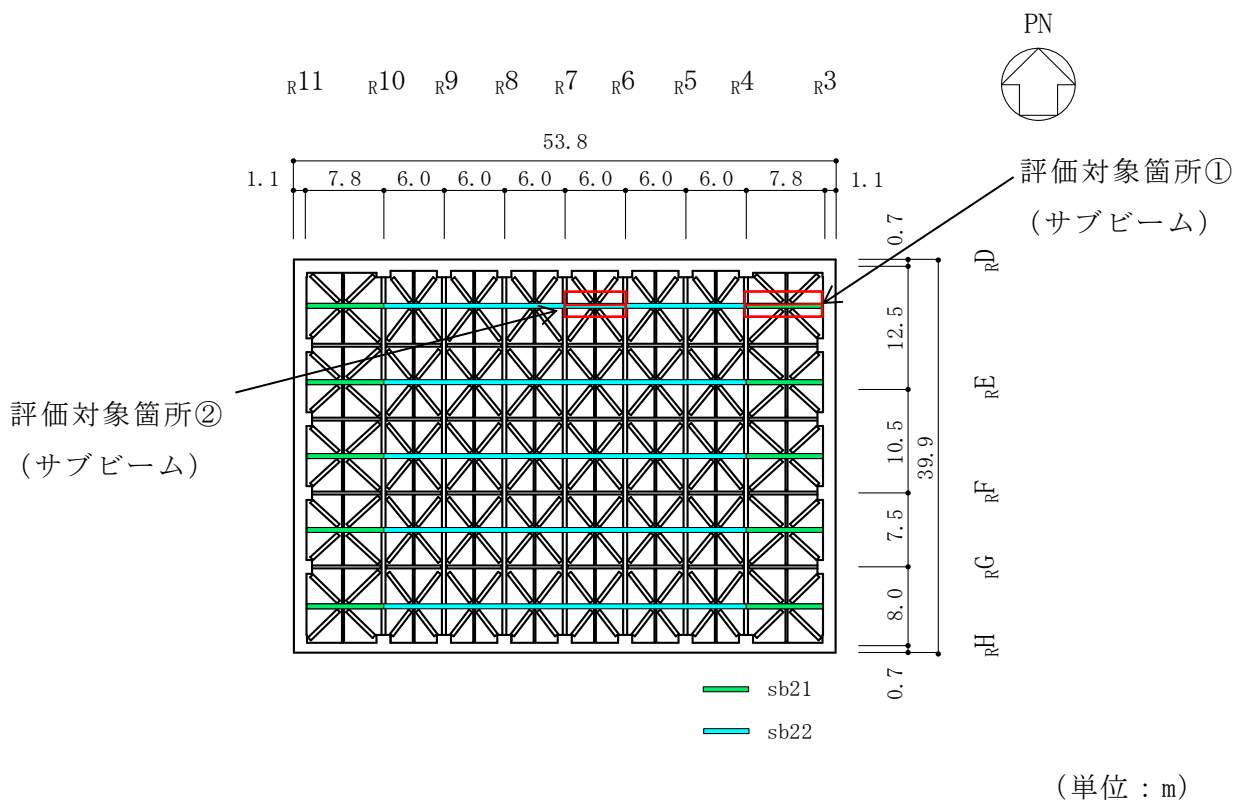


図 3-24 評価対象箇所 (サブビーム, EL 63.5m)

表 3-11 二次部材 (サブビーム) の短期許容応力度に基づく評価結果 (EL 63.5m)

評価対象箇所	発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容限界 (N/mm ²)	検定値
① (sb21)	曲げ	173.7	220	0.79*
	せん断	30.9	135	0.23*
② (sb22)	曲げ	162.3	217	0.75
	せん断	30.0	135	0.23

注記*：検定値が最大となる箇所を表す。

(c) つなぎばり

つなぎばりは、支配幅を取り出し、中央集中荷重を受ける上弦材、下弦材及び斜材からなる単純支持トラス（両端ピン支持）として評価を行う。検討スパンは、通り芯間距離として評価する。屋根面に作用する荷重は屋根面全体で均一であるため、支持スパンが長く、屋根面の支配面積の大きな箇所を選定する。

なお、つなぎばりは、表 3-9 に示すとおり、斜材に対し補強を行っており、補強状況により断面形状が異なるため、補強状況を踏まえ、各々支持スパンが長く、屋根面の支配面積の大きな箇所を評価対象としている。つなぎばりの評価対象箇所を図 3-25、補強箇所を図 3-26、評価結果を表 3-12 に示す。

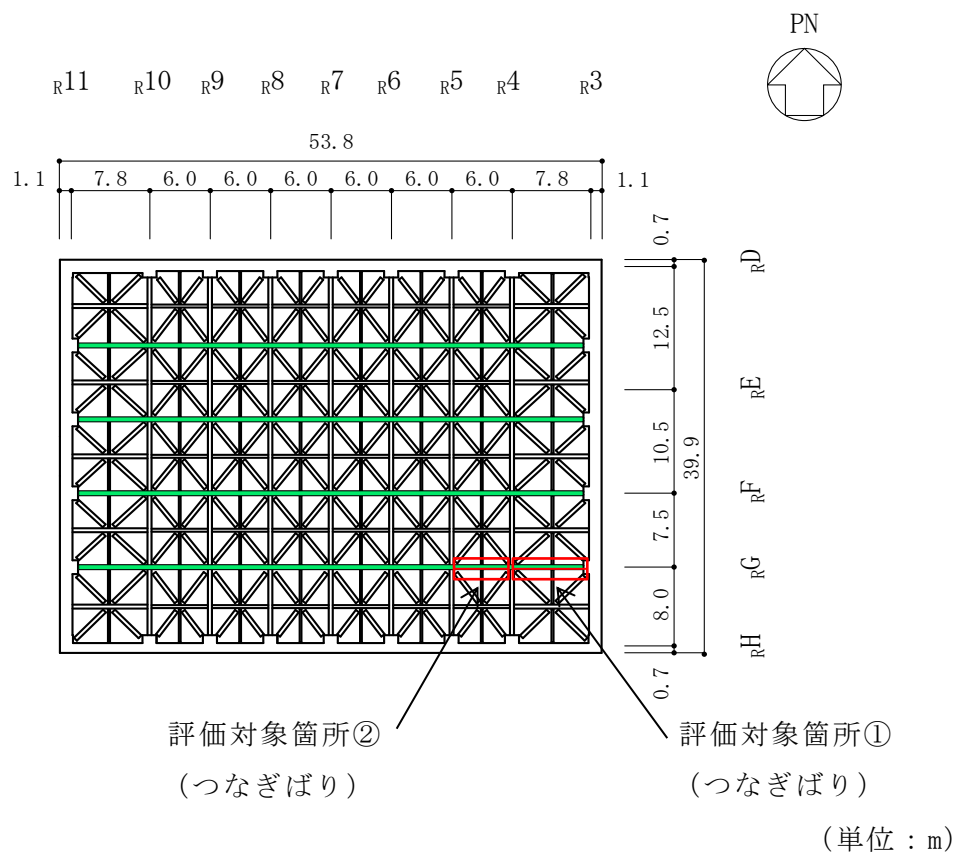
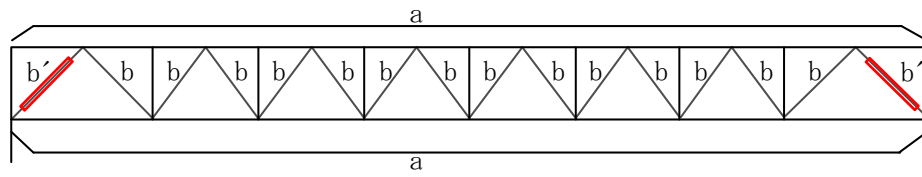
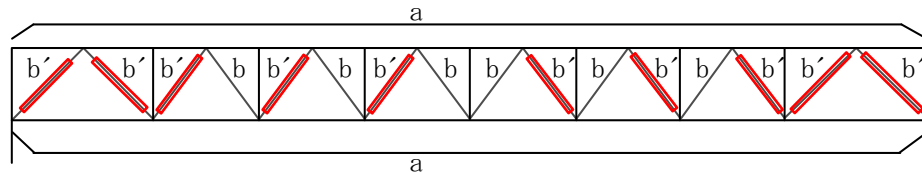


図 3-25 評価対象箇所 (つなぎばり, EL 63.5m)



RE 通り-4500, RG 通り



RE 通り+3000, RF 通り

図 3-26 つなぎばり補強箇所

表 3-12 二次部材（つなぎばり）の短期許容応力度に基づく評価結果 (EL 63.5m)

評価対象箇所		発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容限界 (N/mm ²)	検定値
①	上弦材	圧縮	21.7	226	0.10*
	下弦材	引張り	46.3	235	0.20*
	斜材	圧縮	45.0	79	0.57*
		引張り	53.3	235	0.23*
②	上弦材	圧縮	12.1	231	0.06
	下弦材	引張り	34.6	235	0.15
	斜材	圧縮	29.6	102	0.30
		引張り	35.0	235	0.15

注記*：検定値が最大となる箇所を表す。

4. 鉄骨部屋根スラブの支持条件を踏まえた評価について

鉄骨部屋根スラブについて、主トラス及びもや位置で境界条件を固定端として、両端固定ばりの一方向スラブにより応力を評価することの妥当性を確認するために、FEMモデルにより算定した応力と両端固定ばりの一方向スラブとして算定した応力を比較する。

(1) 解析モデル概要

評価用モデルは「2. 3次元フレームの詳細説明」の3次元フレームモデルから、図4-1に示す R_E-R_F 、 R_9-R_{11} 間の一部を抜き出した図4-2に示すモデルとする。ただし、保守的な評価とするため、サブビーム及びつなぎばり間のスパンは3次元フレームモデルで最大寸法である4000(mm)に変更する。

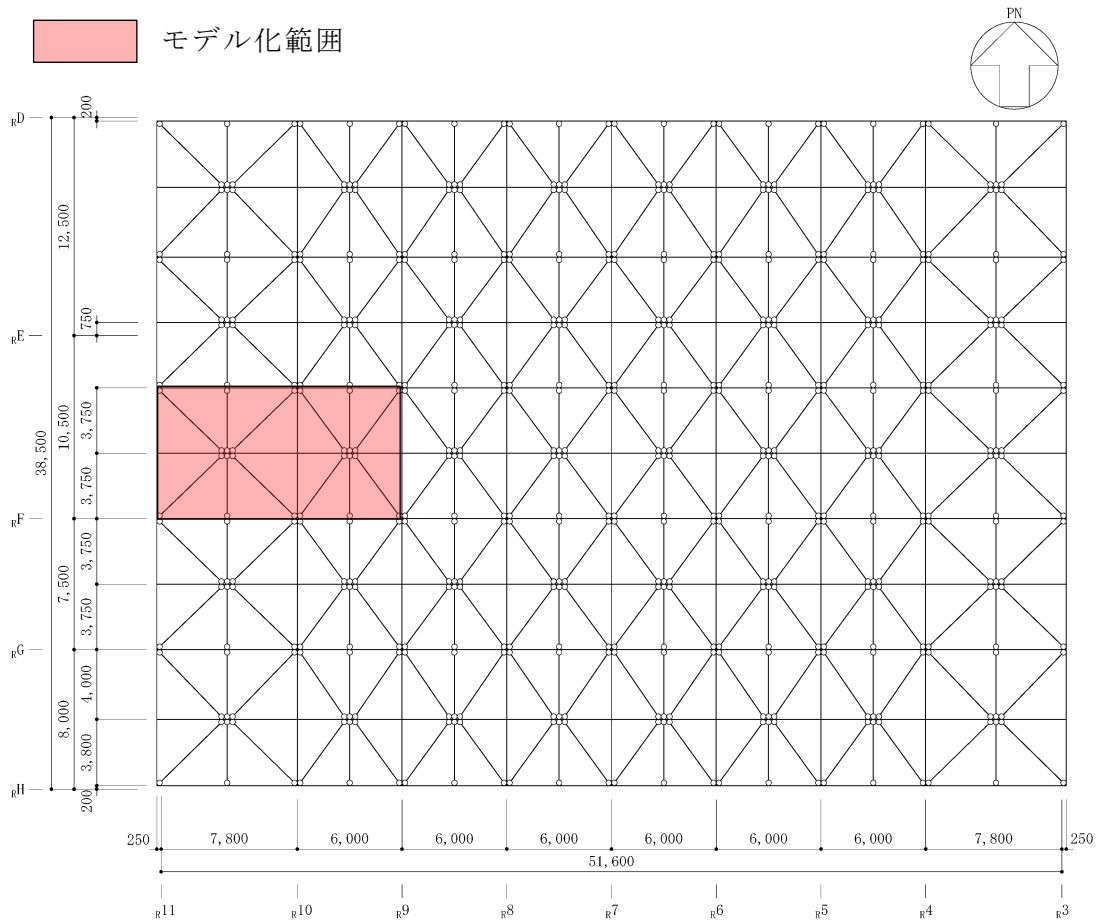
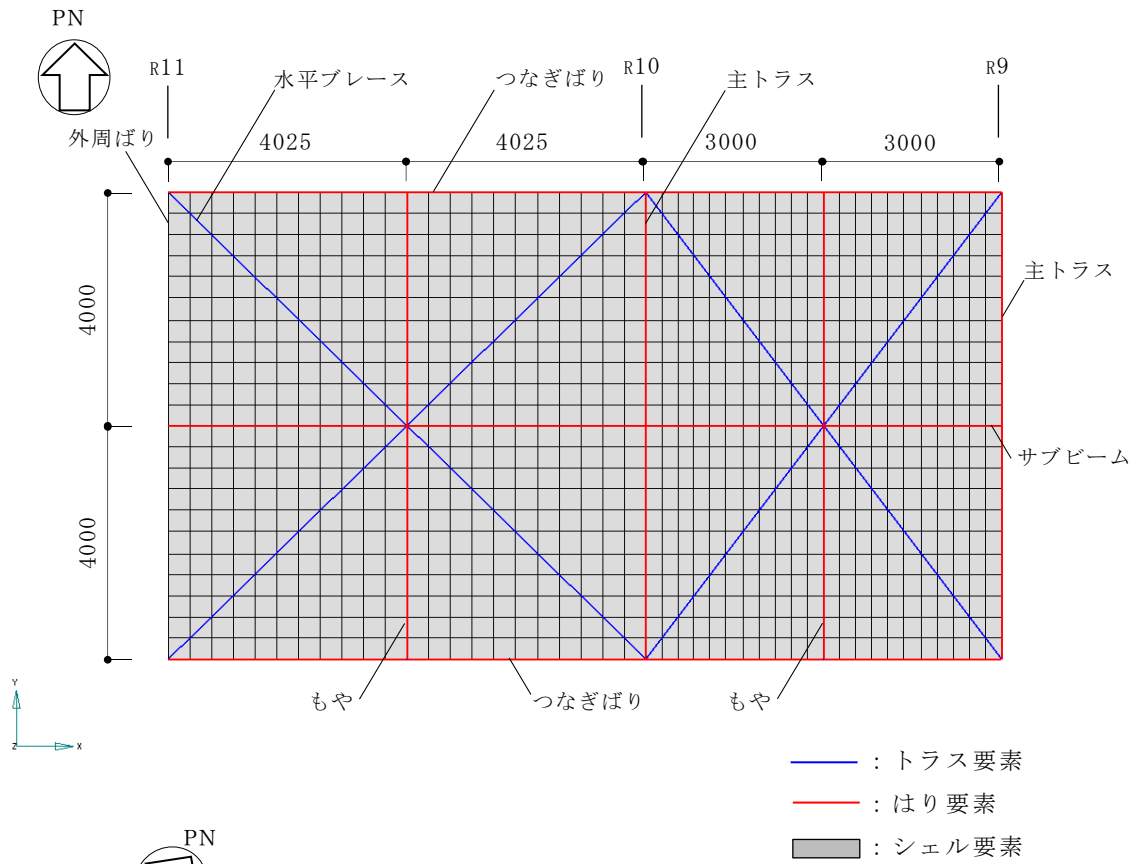
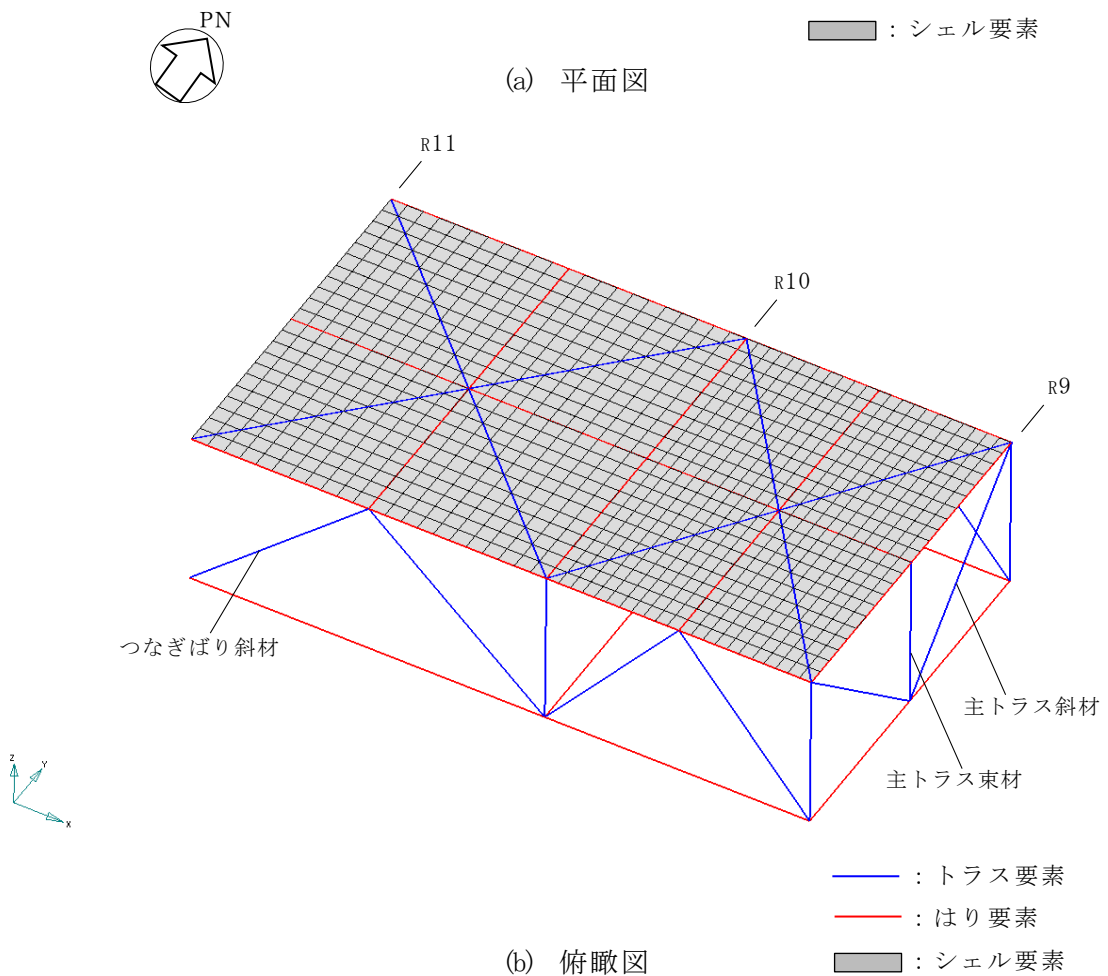


図4-1 解析モデル抽出位置



(a) 平面図



(b) 俯瞰図

図4-2 解析モデルの概要

(2) 使用要素

本解析で用いる使用要素を表 4-1 に示す。使用要素は、「2. 3次元フレームの詳細説明」の解析モデルの鉄骨部の使用要素及び鉄骨部屋根スラブをモデル化したシェル要素とする。

表4-1 使用要素

鉄骨部	主トラス上下弦材	はり要素
	つなぎばり上下弦材	
	サブビーム	
	もや	
	主トラス斜材・束材	トラス要素
	つなぎばり斜材	
	水平ブレース	
鉄筋コンクリート部	鉄骨部屋根スラブ	シェル要素

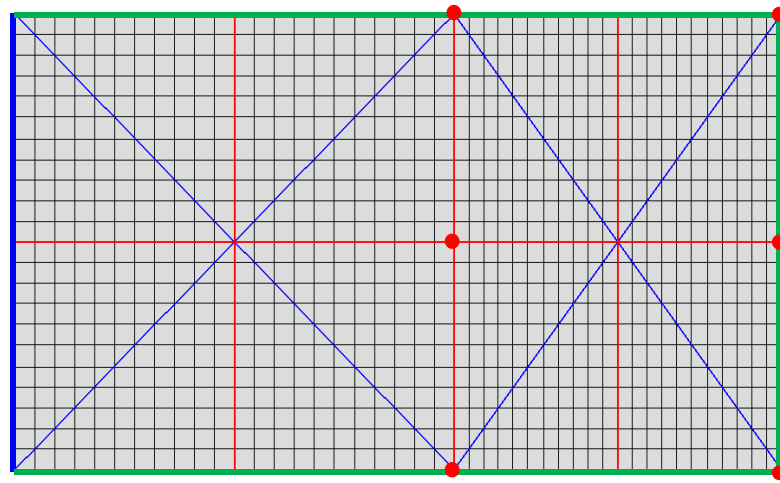
(3) 境界条件及び拘束条件

境界条件は、外周ばり位置はその拘束効果を考慮して、固定とし、その他のモデル外周部は、連続性を考慮した対称条件とする。また、主トラスの束材位置は、鉛直方向の拘束効果を考慮して、鉛直方向のみ固定条件とする。境界条件を図 4-3 に示す。各部材の接続条件は、鉄骨フランジ部の接続の有無に応じて剛接合又はピン接合としてモデル化することとする。

シェル要素とはり要素及びトラス要素の同一座標における節点は、同一節点を用いてモデル化する。また、主トラス上弦材、下弦材、斜材及び束材は部材芯位置でモデル化することを基本とする。各部材の接続条件を表 4-2 に、接続条件がピン接合の位置を図 4-4 に示す。

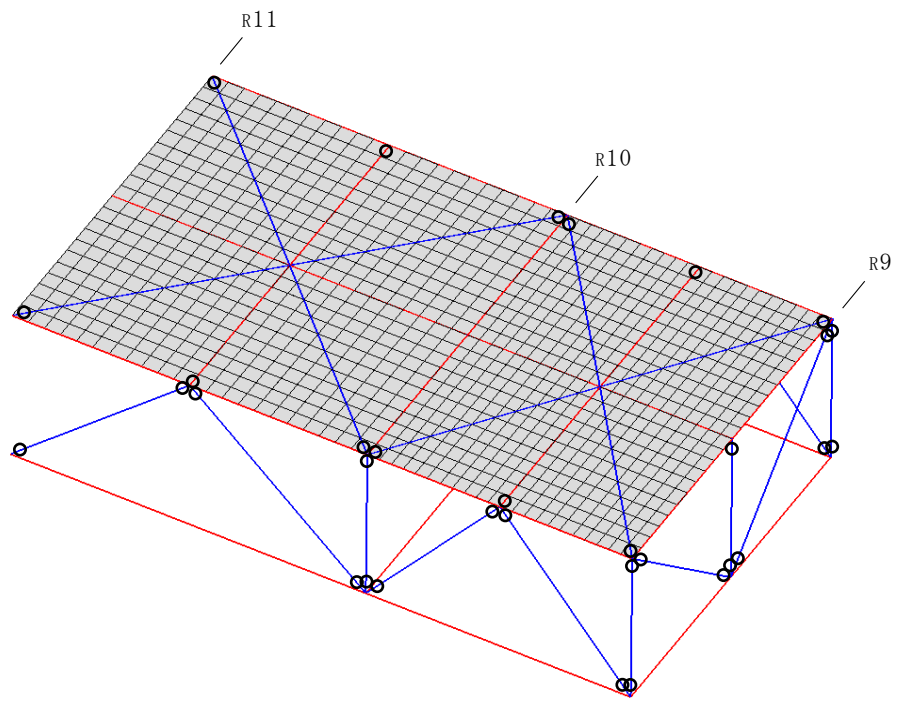
表4-2 解析モデルにおける部材の接続条件

部位	接続条件
つなぎばり上下弦材	剛接合
サブビーム	剛接合
もや	ピン接合
主トラス斜材・束材	ピン接合
つなぎばり斜材	ピン接合
水平ブレース	ピン接合



- : 固定条件
- : 対称条件
- : 鉛直方向固定条件

図4-3 境界条件



○: ピン接合

図4-4 接続条件 (ピン接合位置)

(4) 評価結果

FEMモデルの応力算出位置は両端固定ばりの一方向スラブの応力が最大となる位置に合わせ、サブビーム及びつなぎばり間の中央位置である図 4-5 に示す位置とする。

FEMモデルにより算定した応力と両端固定ばりの一方向スラブとして算定した応力の比較を図 4-6 に示す。曲げモーメント、せん断力ともにFEMモデルでの評価結果は、両端固定ばりの一方向スラブの公式による評価結果を下回っていることを確認した。

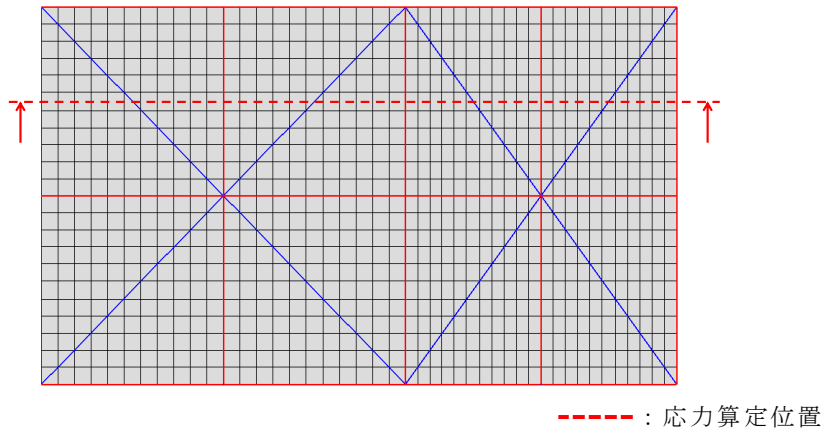
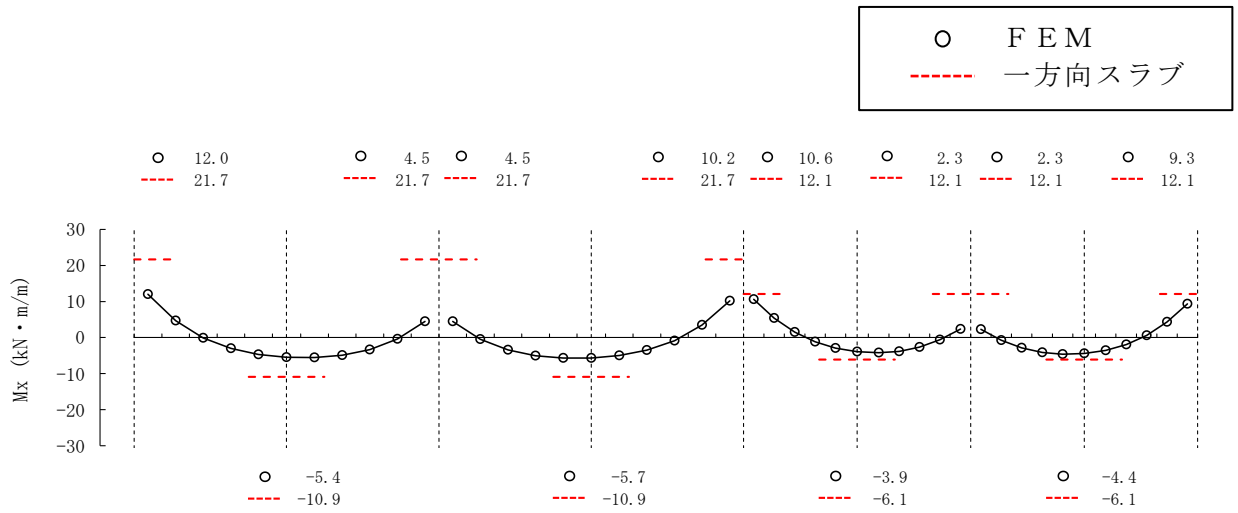
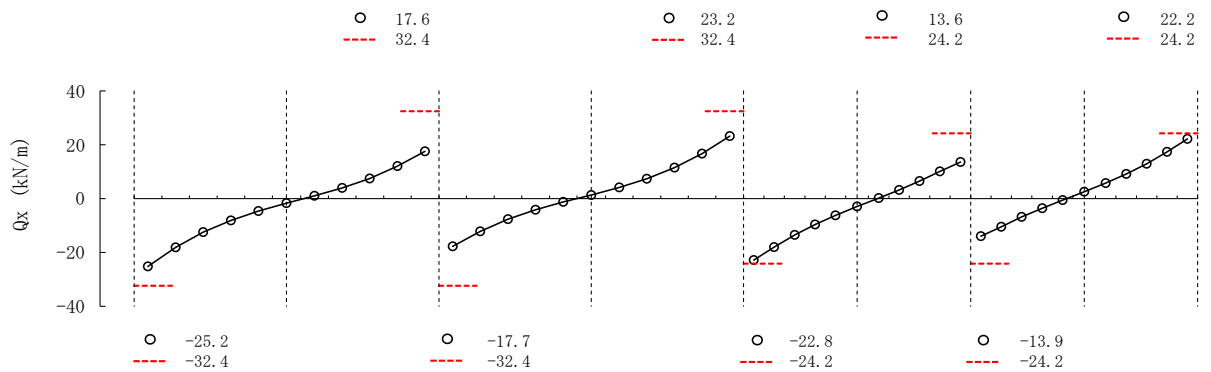


図 4-5 FEMモデルの応力算定位置



(a) 曲げモーメント (M_x) ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$)



(b) せん断力 (Q_x) (kN/m)

図 4-6 FEMモデルの応力と一方向スラブの応力比較

5. 主トラスの許容応力値について

表 5-1 に示す検定値が最大となる各部位の許容値について、許容値の評価式及び算出条件を示す。

表 5-1 主トラスの短期許容応力度に基づく評価結果 (EL 63.5m)

評価対象部位	No.	発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容限界 (N/mm ²)	検定値
上弦材	1	引張り	49.09	325	0.37
		曲げ	71.03	325	
下弦材	2	圧縮	85.56	217	0.60
		曲げ	61.17	304	
束材	3	圧縮	102.71	176	0.59
斜材	4	引張り	169.66	235	0.73

(1) 評価式

a. 許容引張応力度

$$f_t = F / 1.5 \quad \dots \dots \dots (4-1 \text{ 式})$$

ここに、

F : 鋼材の F 値

b. 許容圧縮応力度

$$f_c = \frac{\left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} F}{\nu} \quad (\lambda \leq \Lambda \text{ のとき}) \quad \dots \dots \dots (4-2 \text{ 式})$$

$$f_c = \frac{0.277 F}{\left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2} \quad (\lambda > \Lambda \text{ のとき}) \quad \dots \dots \dots (4-3 \text{ 式})$$

ここに、

f_c : 許容圧縮応力度

λ : 圧縮材の細長比

Λ : 限界細長比 $\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6 F}}$

E : ヤング係数

$$\nu = \frac{3}{2} + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

c. 許容曲げ応力度

$$f_b = \frac{1}{\nu} F \quad (\lambda_b \leq_p \lambda_b \text{ のとき}) \quad \dots\dots\dots (4-4 \text{ 式})$$

$$f_b = \frac{\left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda_b -_p \lambda_b}{e \lambda_b -_p \lambda_b} \right) \right\}}{\nu} F \quad ({}_p \lambda_b < \lambda_b \leq_e \lambda_b \text{ のとき}) \quad \dots\dots\dots (4-5 \text{ 式})$$

$$f_b = \frac{1}{2.17 \lambda_b^2} F \quad (e \lambda_b < \lambda_b \text{ のとき}) \quad \dots\dots\dots (4-6 \text{ 式})$$

ここに,

$$\lambda_b = \sqrt{\frac{M_y}{M_e}}$$

$$e \lambda_b = \frac{1}{\sqrt{0.6}}$$

$${}_p \lambda_b = 0.6 + 0.3 \left(\frac{M_2}{M_1} \right)$$

$$C = 1.75 + 1.05 \left(\frac{M_2}{M_1} \right) + 0.3 \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^2 \leq 2.3$$

$$M_e = C \sqrt{\frac{\pi^4 E I_y \cdot E I_w}{l_b^4} + \frac{\pi^4 E I_y \cdot G J}{l_b^2}}$$

$$\nu = \frac{3}{2} + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda_b}{e \lambda_b} \right)^2$$

- | | |
|----------------------------|---------------------------------|
| f_b : 許容曲げ応力度 | λ_b : 曲げ部材の細長比 |
| l_b : 圧縮フランジの支点間距離 | $e \lambda_b$: 弾性限界細長比 |
| ${}_p \lambda_b$: 塑性限界細長比 | C : 許容曲げ応力度の補正係数 |
| M_e : 弾性横座屈モーメント | Z : 断面係数 |
| I_y : 弱軸周りの断面 2 次モーメント | |
| I_w : 曲げねじり定数 | G : せん断弾性係数 |
| J : サンプナンのねじり定数 | M_y : 降伏モーメント ($F \cdot Z$) |

なお、部材端部の曲げモーメントの大きいほうを M_1 、小さいほうを M_2 とし、この 2 つのモーメントが単曲率の場合は、 M_2/M_1 の符号を負に、複曲率の場合は M_2/M_1 の符号を正にしている。

(2) 許容値の算出

a. 上弦材

検定値が最大となる上弦材の許容値を算出するために必要なパラメータを以下に示す。

形状寸法	F 値 (N/mm ²)
H-400×400×13×21	325

b. 下弦材

検定値が最大となる下弦材の許容値を算出するために必要なパラメータを以下に示す。

形状寸法	F 値 (N/mm ²)	ヤング率 E (N/mm ²)	せん断 弾性係数 G (N/mm ²)	断面積 A (×10 ² mm ²)
BH-400×400×19×35 +2PL _S -16×330* ¹	325	205000	79000	448.3

形状寸法	座屈長 l _k (mm)	断面 2次半径 i (mm)	細長比 λ (-)	限界細長比 Λ (-)
BH-400×400×19×35 +2PL _S -16×330* ¹	7800	112	69.64	101.86

形状寸法	断面2次 モーメント I _y * ² (mm ⁴)	曲げ ねじり定数 I _w * ² (mm ⁶)	ねじり定数 J* ² (mm ⁴)	補正係数 C (-)
BH-400×400×19×35 +2PL _S -16×330* ¹	3.74×10 ⁸	1.246×10 ¹³	1.227×10 ⁷	1.00

形状寸法	断面係数 Z* ² (mm ³)	支点間距離 l _b (mm)	弾性横座屈 モーメント M _e * ² (N・mm)	曲げ材の 細長比 λ _b * ² (-)
BH-400×400×19×35 +2PL _S -16×330* ¹	4.96×10 ⁶	3800	1.193×10 ¹⁰	0.368

形状寸法	塑性限界 細長比 _p λ _b (-)	弾性限界 細長比 _e λ _b (-)
BH-400×400×19×35 +2PL _S -16×330* ¹	0.30	1.291

注記*1：補強工事で追加した部材

*2：補強部材を考慮しないパラメータ

c. 束材

検定値が最大となる束材の許容値を算出するために必要なパラメータを以下に示す。

形状寸法	F 値 (N/mm ²)	ヤング率 E (N/mm ²)	せん断 弾性係数 G (N/mm ²)	断面積 A (×10 ² mm ²)
2CT _S -175×350×12×19	235	205000	79000	173.9

形状寸法	座屈長 l _k (mm)	断面 2次半径 i (mm)	細長比 λ (-)	限界細長比 Λ (-)
2CT _S -175×350×12×19	4000	57.6	69.44	119.79

d. 斜材

検定値が最大となる斜材の許容値を算出するために必要なパラメータを以下に示す。

形状寸法	F 値 (N/mm ²)
2CT _S -175×350×12×19	235

6. 原子炉建物の構造図及び解析モデル図

(1) 屋根トラス平面

原子炉建物の屋根トラス平面の構造図を 図 6-1 に、解析モデル図を 図 6-2 に示す。

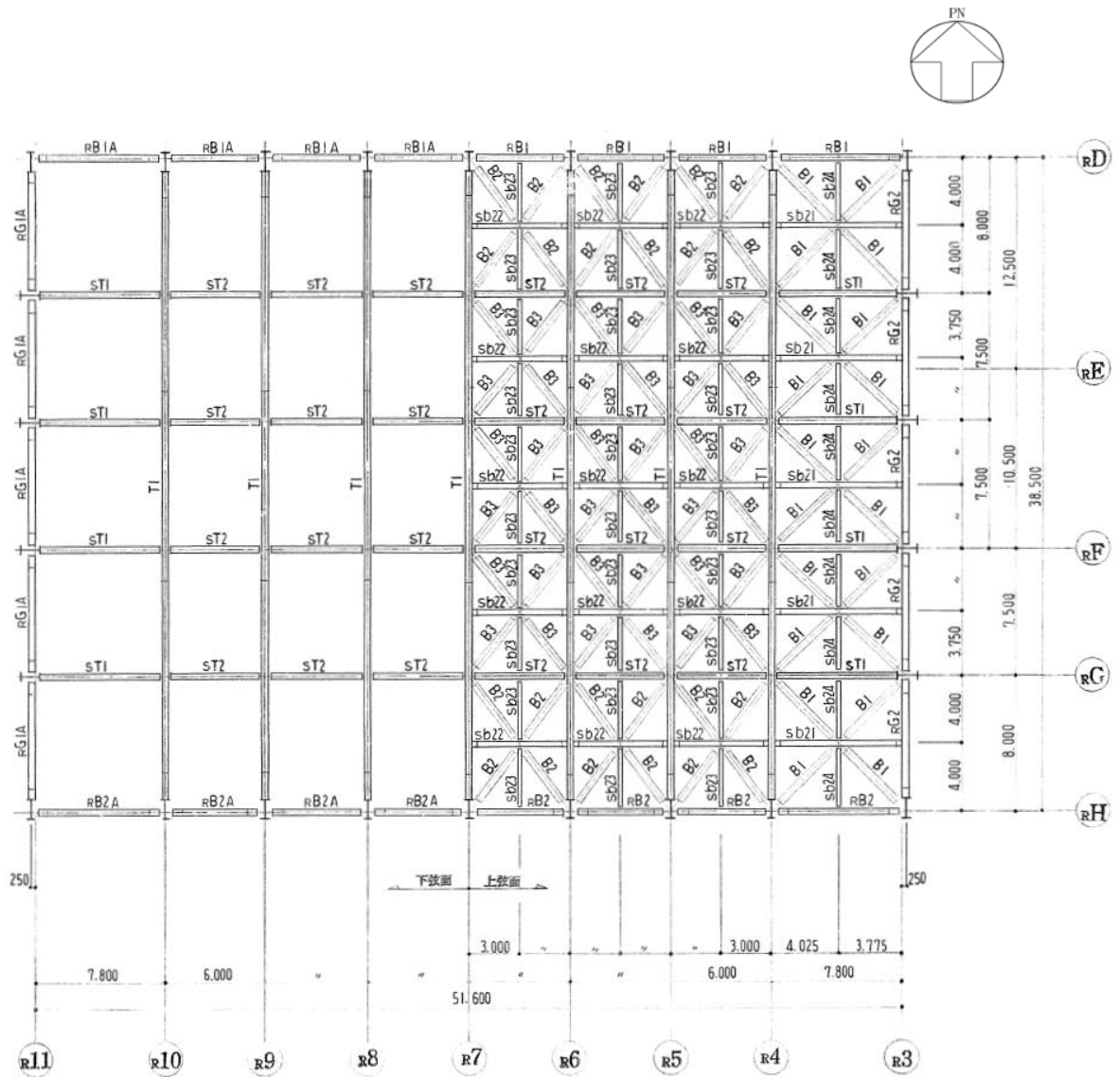


図 6-1 屋根トラス平面 構造図

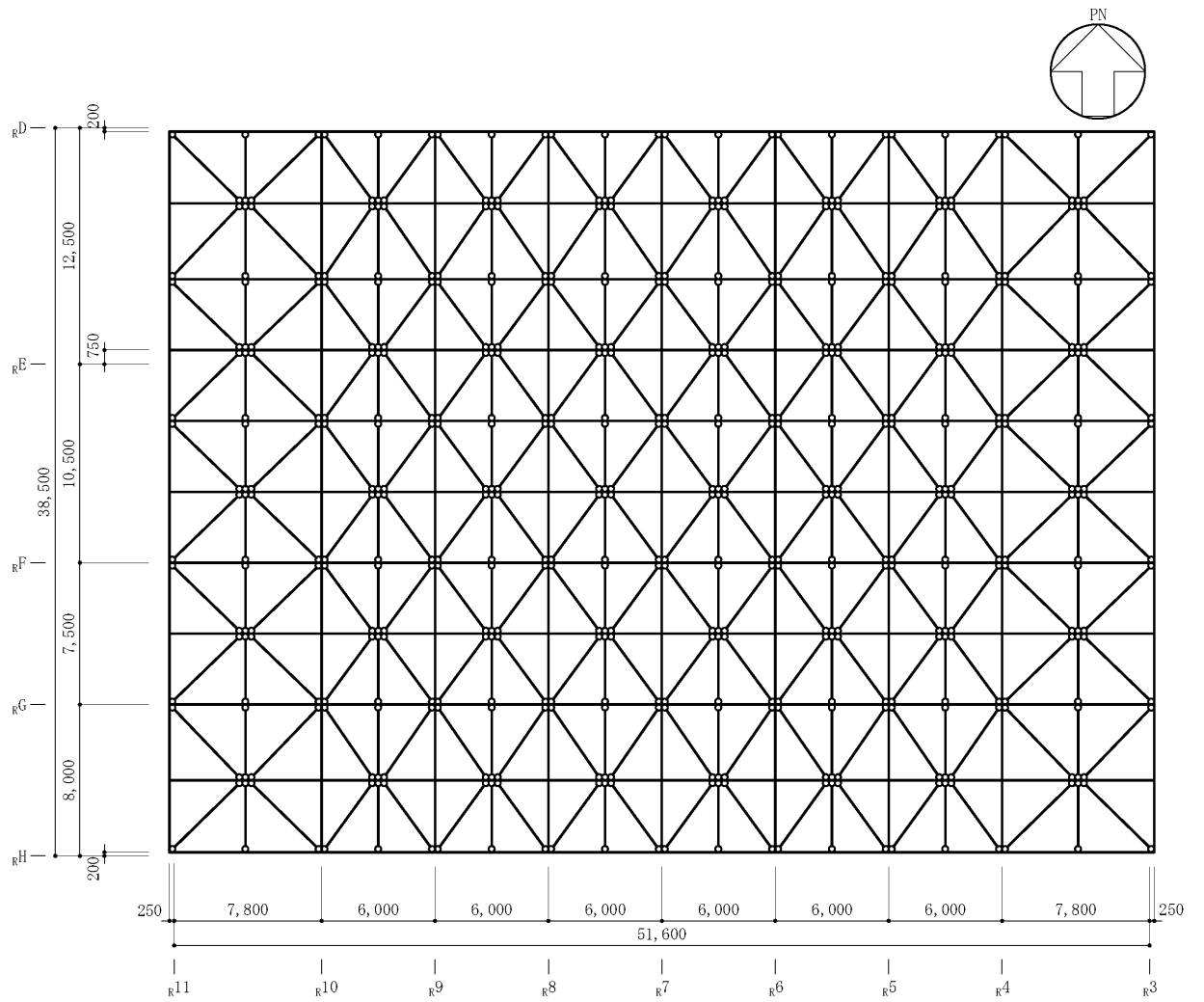


図 6-2 屋根トラス平面 解析モデル図 (はり要素及びトラス要素)

(2) 主トラス断面

原子炉建物の主トラス断面の構造図を 図 6-3 に、解析モデル図を 図 6-4 に示す。

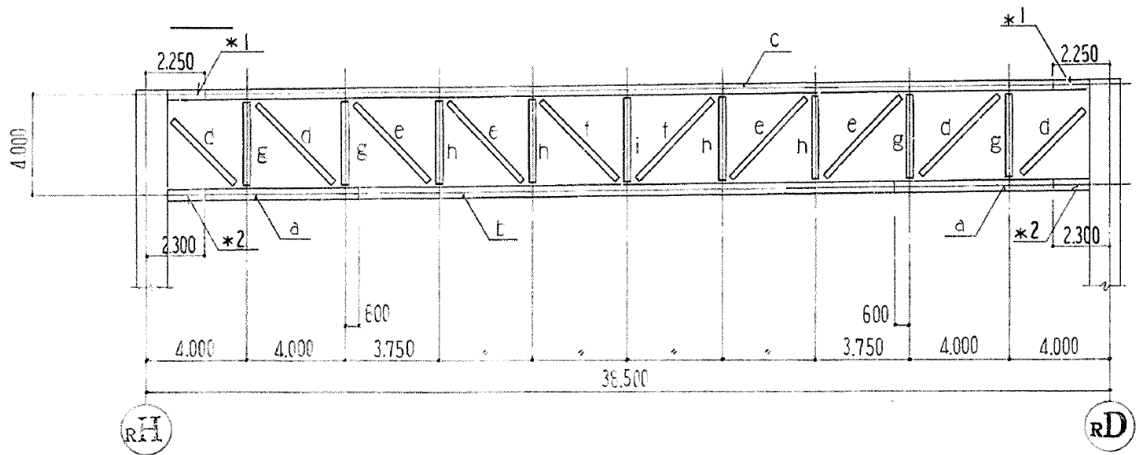


図 6-3 主トラス断面 構造図

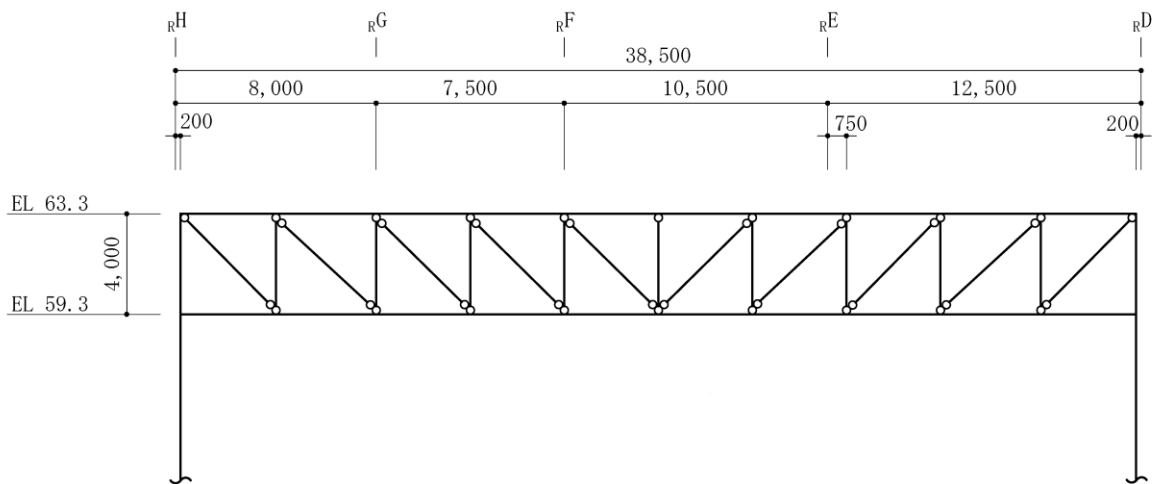


図 6-4 主トラス断面 (R7 通り) 解析モデル図 (はり要素及びトラス要素)

2.3 制御室建物の強度計算に関する補足説明

1. 概要

本資料は、制御室建物の降下火砕物による荷重及び積雪荷重による構造健全性評価に用いる評価部位の代表性及び屋根スラブ評価に対する支持条件を踏まえた評価について示すものである。

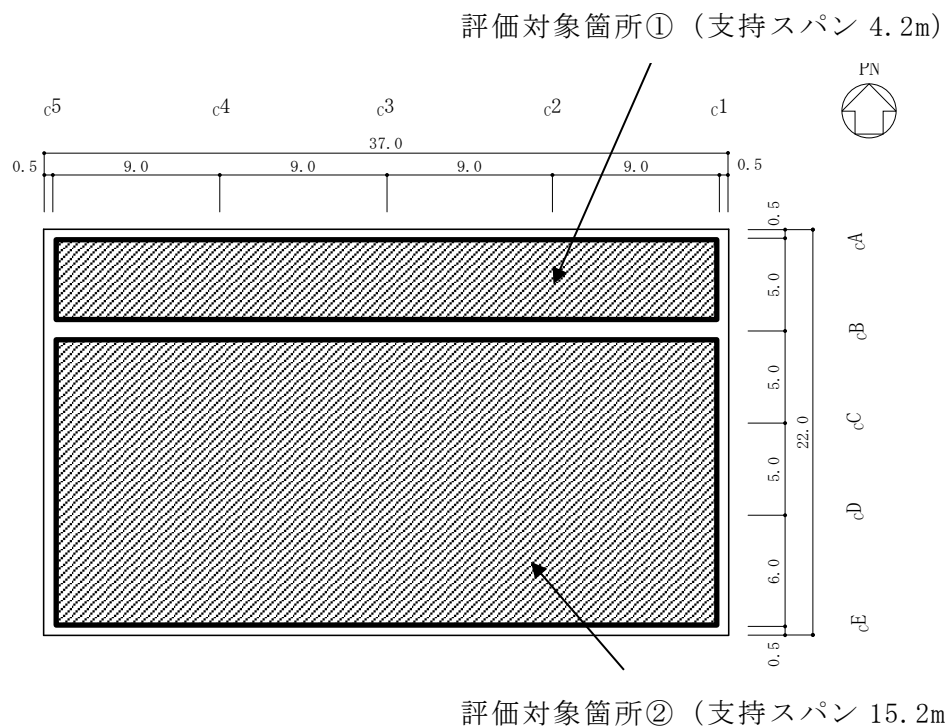
2. 評価部位の網羅性及び代表性について

(1) 屋根スラブ

制御室建物の屋根スラブは大はり又は壁で支持された単位幅の一方方向スラブを取り出し、等分布荷重を受ける両端固定ばりとして評価を行う。これらの屋根スラブは、断面及び支持スパンの異なる2種類の部材を使用しているため、各々評価を行った。

図2-1に屋根スラブの評価対象箇所を示す。

表2-1に制御室建物屋根スラブの評価結果を示す。



(単位：m)

図2-1 評価対象箇所 (屋根スラブ, EL 22.05m)

表 2-1 制御室建物屋根スラブの評価結果 (EL 22.05m)

EL (m)	評価対象箇所	厚さ (mm)	配筋	モデル	検定値		備考
					曲げモーメント	面外せん断力	
22.05	①		D22@300* ¹	一方向版	0.17	0.06	図 2-1
	②		D29@150 (D29@100)* ²	一方向版	0.66* ³	0.35* ³	図 2-1

注記*1：上ば筋，下ば筋とも同一配筋

*2：下ば筋を表す。

*3：同一 EL のスラブで，検定値が最大となる箇所を表す。

3. 屋根スラブ評価に対する支持条件を踏まえた評価について

屋根スラブを支持する4階（EL 22.05m～EL 16.9m）の外壁が屋根スラブの厚さよりも薄いことから、外壁を固定端として境界条件を設定し、両端固定ばりの一方向スラブにより応力評価を行うことの妥当性の確認として、3次元FEMモデルにより応力解析を行い、断面の評価を行う。

(1) 解析モデル及び諸元

(a) 解析モデル概要

応力解析は、3次元FEMモデルを用いた弾塑性応力解析とする。解析には、解析コード「FINAL」を用いる。

3次元FEMモデルは、NS2-補-025-09「中央制御室遮蔽の耐震計算書の補足説明資料」の別紙1-2「応答増幅を考慮した天井スラブの耐震評価」にて設定した解析モデルと同一とし、制御室建物4階（EL 16.9m）より上部の鉄筋コンクリート造の屋根スラブ、壁、柱及びはりをモデル化する。解析モデルを図3-1に示す。

(b) 使用要素

解析モデルに使用するFEM要素は、屋根スラブ及び壁については積層シェル要素、柱及びはりについてはファイバー要素とする。各要素は、鉄筋層をモデル化した異方性材料による要素である。

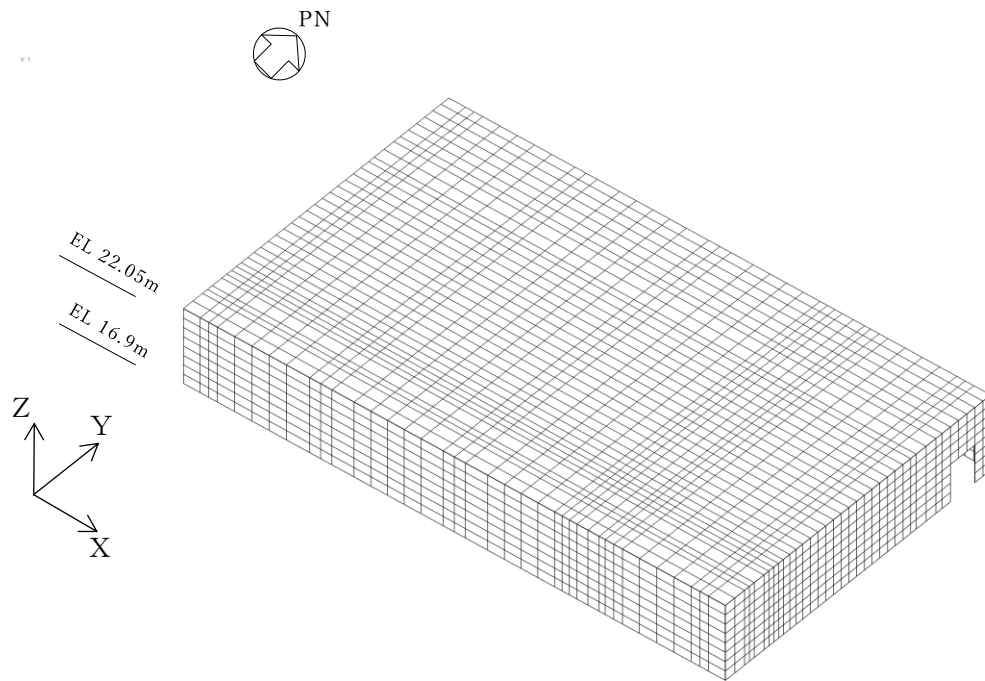
各要素には、板の曲げと軸力を同時に考えるが、板の曲げには面外せん断変形の影響も考慮する。

(c) 境界条件

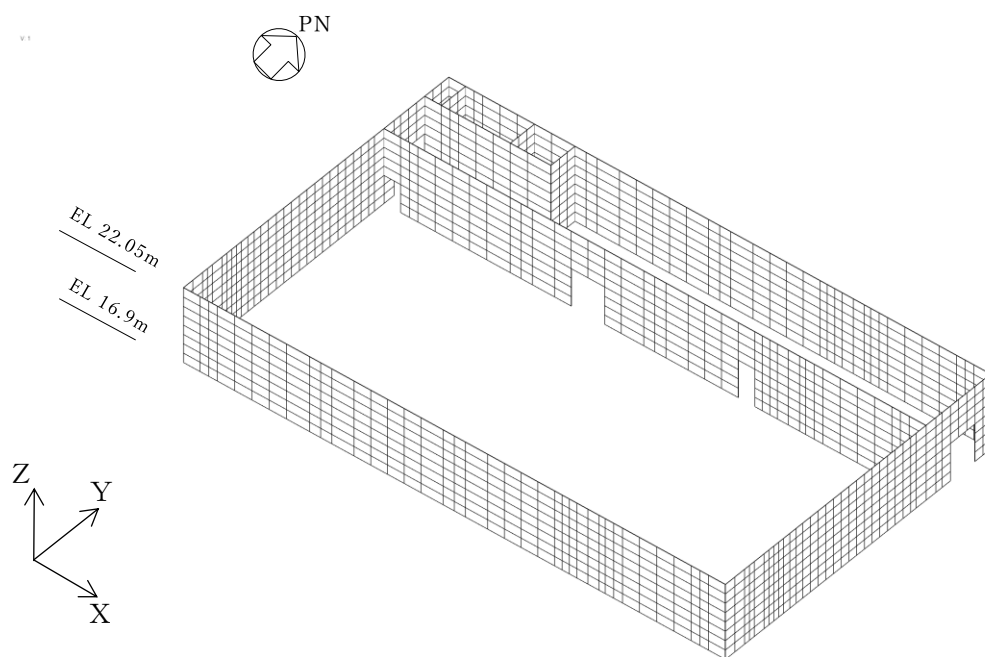
3次元FEMモデルのEL 16.9mの位置を固定とする。

(d) 解析諸元及び材料構成則

解析諸元及び材料構成則は、NS2-補-025-09「中央制御室遮蔽の耐震計算書の補足説明資料」の別紙1-2「応答増幅を考慮した天井スラブの耐震評価」にて設定した解析諸元及び材料構成則に示す内容と同一である。



(a) 鳥瞰図 (屋根スラブ表示)



(b) 鳥瞰図 (屋根スラブ非表示)

図 3-1 解析モデル

(2) 荷重及び荷重の組合せ

荷重及び荷重の組合せは、VI-3-別添 2-7「制御室建物の強度計算書」の「3.2 荷重及び荷重の組合せ」に示す内容と同一である。

(3) 許容限界

屋根スラブ及び壁の許容限界を「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005 制定）」（以下「RC-N規準」という。）に基づき表 3-1 に、コンクリート及び鉄筋の短期許容応力度を表 3-2 及び表 3-3 に示す。

表 3-1 許容限界

要求機能	機能設計上の性能目標	部位	機能維持のための考え方	許容限界（評価基準値）
—	構造強度を有すること	屋根スラブ	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N規準」に基づく短期許容応力度*
		壁	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N規準」に基づく短期許容応力度*
遮蔽性	遮蔽体の損傷により遮蔽性能を損なわないこと	屋根スラブ	部材に生じる応力が遮蔽性を維持するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N規準」に基づく短期許容応力度*
		壁	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N規準」に基づく短期許容応力度*

注記*：許容限界は終局強度に対し妥当な安全余裕を有したものとして設定することとし、さらなる安全余裕を考慮して短期許容応力度とする。

表 3-2 コンクリートの短期許容応力度

(単位：N/mm²)

設計基準強度 F _c	圧縮	せん断
22.1	14.6	1.06

表 3-3 鉄筋の短期許容応力度

(単位：N/mm²)

種別*	引張り及び圧縮	せん断
SD35 (SD345 相当)	345	345

注記*：建設当時の鋼材の種類を、現在の規格に読み替えた許容応力度を示す。

(4) 断面の評価方法

a. 軸力及び曲げモーメントに対する断面の評価方法

軸力及び曲げモーメントによる鉄筋の引張応力度が，短期許容応力度を超えないことを確認する。

b. 面外せん断力に対する断面の評価方法

断面の評価は，「RC-N規準」に基づき行う。

面外せん断力が，次式を基に算定した許容面外せん断力を超えないことを確認する。

$$Q_A = b \cdot j \cdot \{ \alpha \cdot f_s + 0.5 \cdot w f_t (p_w - 0.002) \}$$

ここで，

Q_A : 許容面外せん断力 (N)

b : 断面の幅 (mm)

j : 断面の応力中心間距離で，断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

α : 許容せん断力の割増し係数

(2 を超える場合は 2, 1 未満の場合は 1 とする。また，引張軸応力度が 2N/mm^2 を超える場合は 1 とする。)

$$\alpha = \frac{4}{M / (Q \cdot d) + 1}$$

M : 曲げモーメント (N・mm)

Q : せん断力 (N)

d : 断面の有効せい (mm)

f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度で，表 3-2 に示す値 (N/mm^2)

$w f_t$: せん断補強筋の短期許容引張応力度で，表 3-3 に示す値 (N/mm^2)

p_w : せん断補強筋比で，次式による。(0.002 以上とする。*)

$$p_w = \frac{a_w}{b \cdot x}$$

a_w : せん断補強筋の断面積 (mm^2)

x : せん断補強筋の間隔 (mm)

注記* : せん断補強筋がない領域については，第 2 項を 0 とする。

(なお，制御室建物の屋根スラブには，面外せん断補強筋は入っていない。)

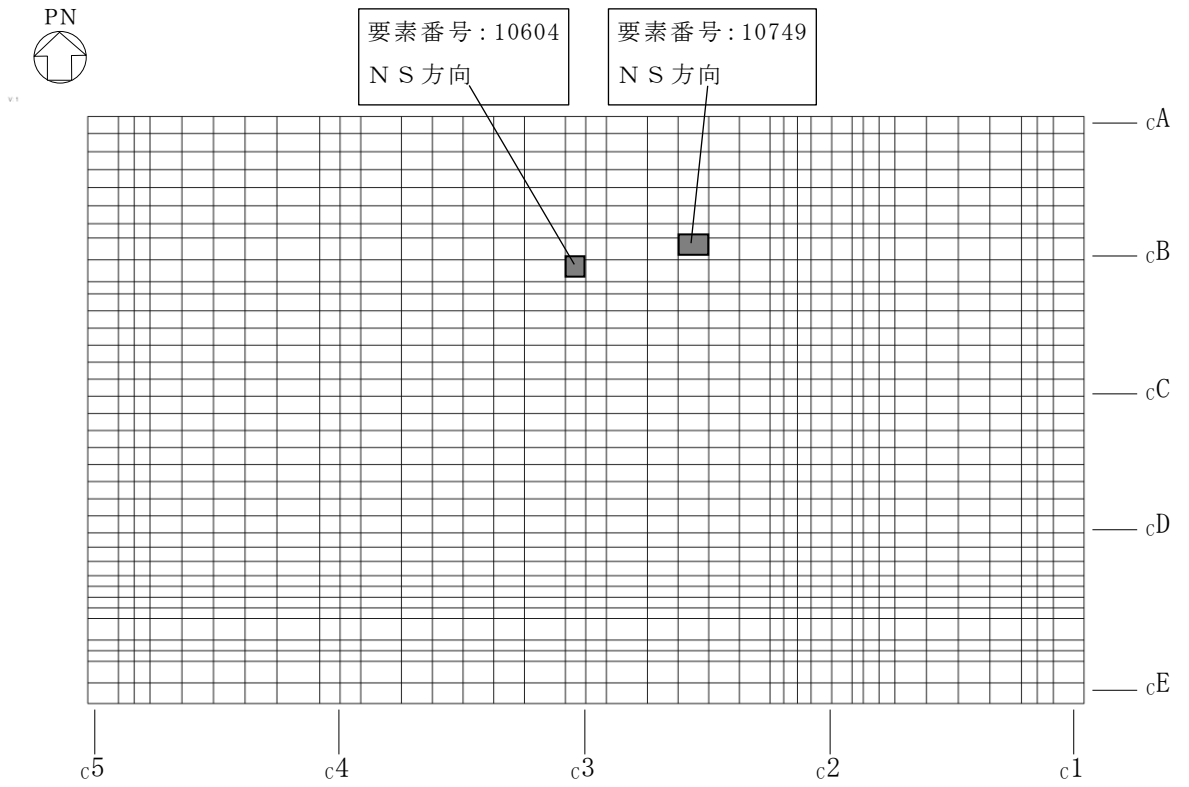
(5) 応力解析による評価結果

「(4) 断面の評価方法」に基づいた断面の評価結果を以下に示す。

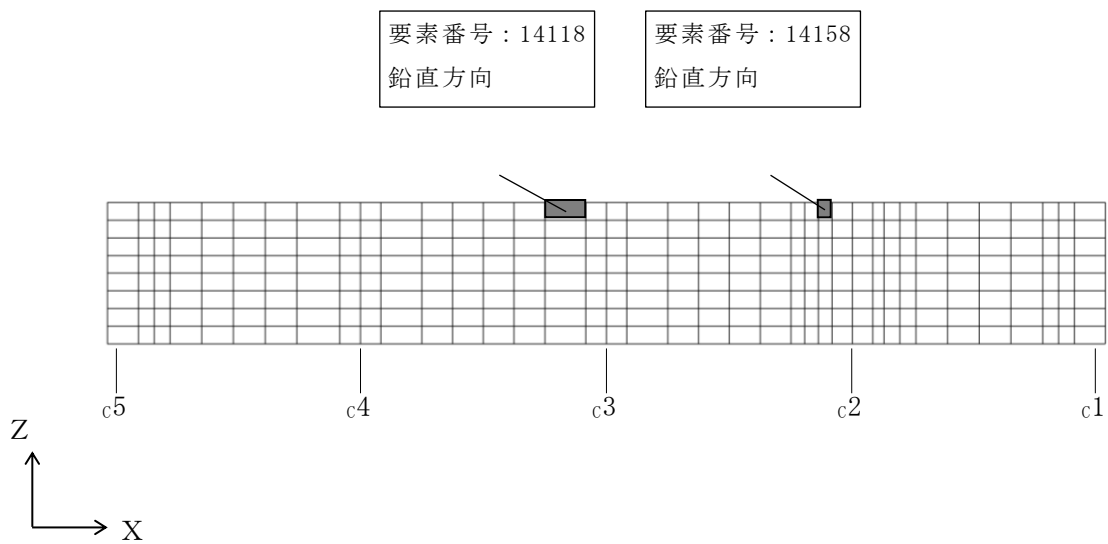
断面の評価結果を記載する要素は、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋の引張応力度及び面外せん断力に対する評価において、検定値（許容値に対する発生値の割合）が最大となる要素とする。

選定した要素の位置を図 3-2 に、評価結果を表 3-4 に示す。

軸力及び曲げモーメントによる鉄筋の引張応力度及び面外せん断力が、各許容値を超えないことを確認した。



(a) 屋根スラブ



(b) 壁 (c E 通り)

図3-2 選定した要素の位置

表3-4 評価結果

部位	評価項目		方向	要素 番号	発生値	許容値
屋根スラブ	軸力 + 曲げモーメント	鉄筋 引張応力度 (N/mm ²)	N S	10749	108.3	345
	面外せん断力	面外せん断力 (kN/m)	N S	10604	482.4	1246.4
壁	軸力 + 曲げモーメント	鉄筋 引張応力度 (N/mm ²)	鉛直	14118	93.9	345
	面外せん断力	面外せん断力 (kN/m)	鉛直	14158	111.1	380.2