

本資料のうち、枠囲みの内容は、営業秘密あるいは防護上の観点から公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	補足-460-1 改3
提出年月日	平成30年6月11日

工事計画に係る補足説明資料

補足-460-1 【火山への配慮が必要な施設の強度に関する説明書
に係る補足説明資料】

平成30年6月

日本原子力発電株式会社

1. 添付資料に係る補足説明資料

火山への配慮が必要な施設の強度計算書に係る添付資料の記載内容を補足するための説明資料リストを以下に示す。

工認添付資料	補足説明資料
V-3-別添 2-1-6 建屋の強度計算書	<ol style="list-style-type: none"> 1. 原子炉建屋の強度計算に係る補足説明 2. タービン建屋の強度計算に係る補足説明 3. 使用済燃料乾式貯蔵建屋の強度計算に係る補足説明 4. 原子炉建屋原子炉棟の 3D-FEM モデルによる鉛直荷重の影響について 5. 屋根スラブの一方向スラブによる評価について 6. タービン建屋の荷重増分解析について 7. 原子炉建屋原子炉棟の構造図及び解析モデル図 8. タービン建屋の構造図及び解析モデル図 9. 使用済燃料乾式貯蔵建屋の構造図及び解析モデル図
V-3-別添 2-1-2 残留熱除去系海水系ストレーナの強度計算書 V-3-別添 2-1-4 ディーゼル発電機用海水系ストレーナの強度計算書	<ol style="list-style-type: none"> 10. 海水ストレーナ評価対象部位について

: 今回ご説明分

1. 原子炉建屋への強度計算に係る補足説明

1.1 概要

本資料は、原子炉建屋の降下火砕物による堆積荷重による構造健全性に用いる 3D-FEM モデルの詳細、評価部位の代表性を示すものである。

1.2 3D-FEM モデルの詳細説明

(1) モデル化の範囲

3D-FEM モデルのモデル化範囲を図 1.2-1 に示す。原子炉建屋原子炉棟の EL. 46.5m には厚さ 0.5m~1.2m の床スラブと、主トラスを支える柱の脚部には梁せい 2.2m の大梁が設置され、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. 46.5m より上部構造をモデル化する。

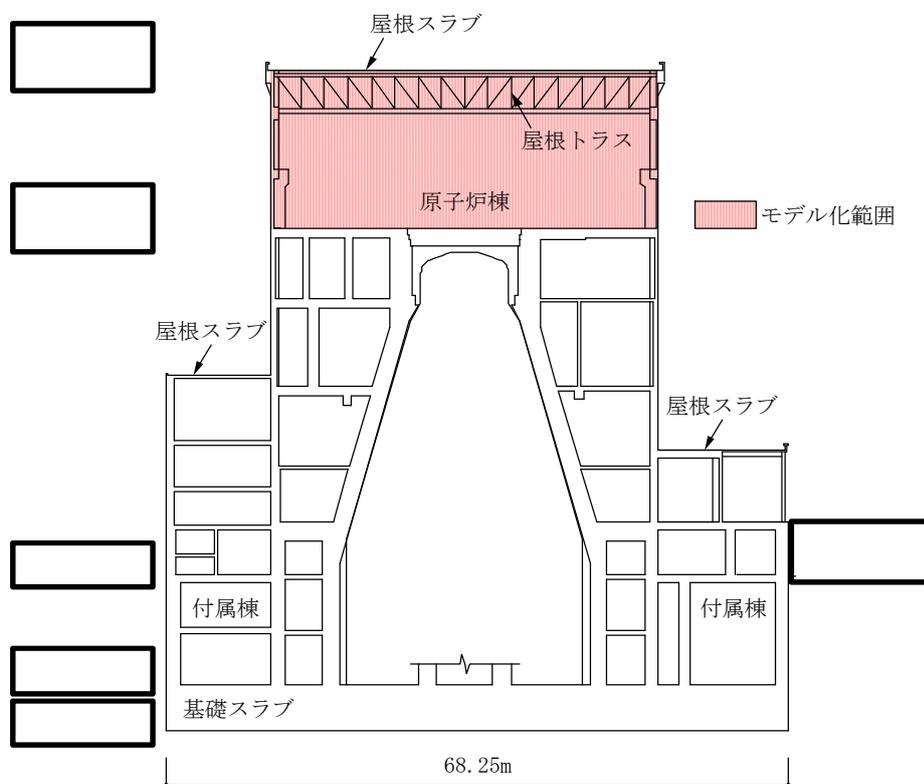


図 1.2-1 原子炉建屋原子炉棟のモデル化範囲

(2) 使用要素

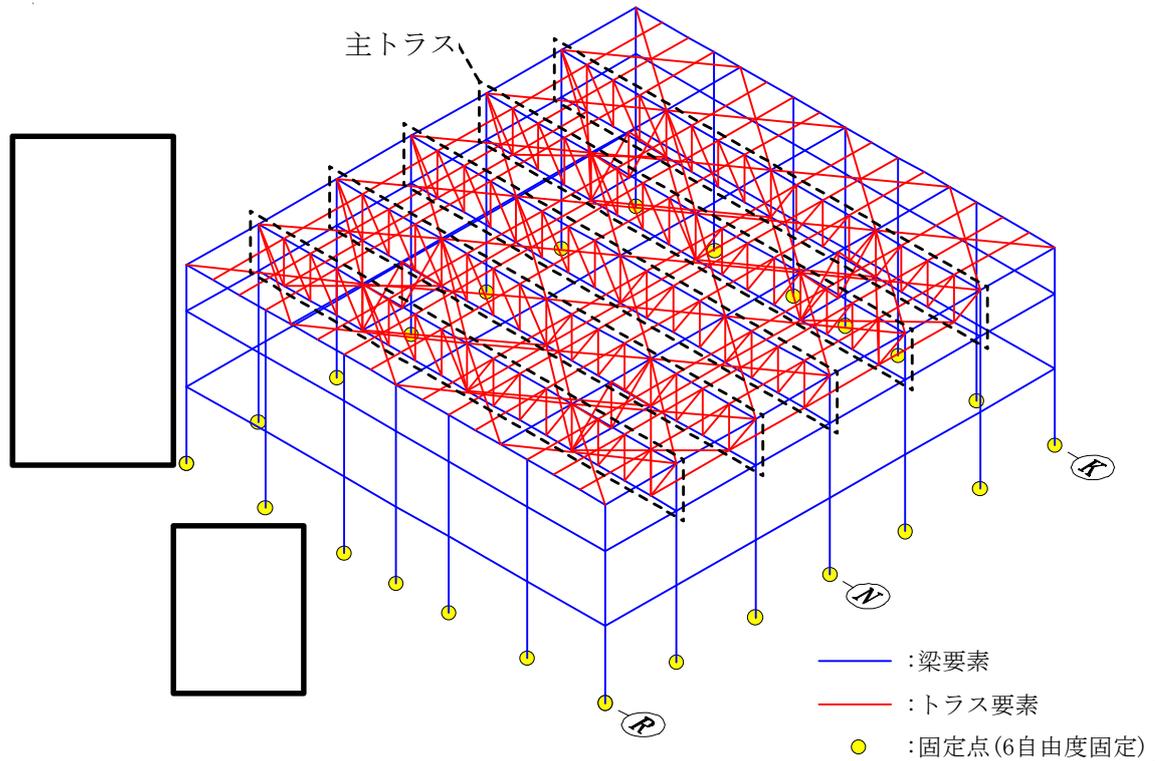
本解析で用いる使用要素を表 1.2-1 に示す。なお、3D-FEM モデルは主トラス架構に生じる曲げモーメントにより主トラス上弦材が負担する軸力を適切に評価するため、屋根スラブをシェル要素でモデル化するとともに、主トラス端部の柱による曲げ拘束を適切に評価するため耐震壁もシェル要素でモデル化する。鉄骨部及び鉄筋コンクリート部の柱・梁をモデル化した梁要素及びトラス要素の解析モデル概要と、屋根スラブ及び耐震壁をモデル化したシェル要素を加えた全要素の解析モデル概要を図 1.2-2 に示す。

鉄骨部では、主トラス弦材及び上弦面つなぎ梁は梁要素を、主トラス斜材、束材、母屋及び上弦面水平ブレースはトラス要素を用いる。

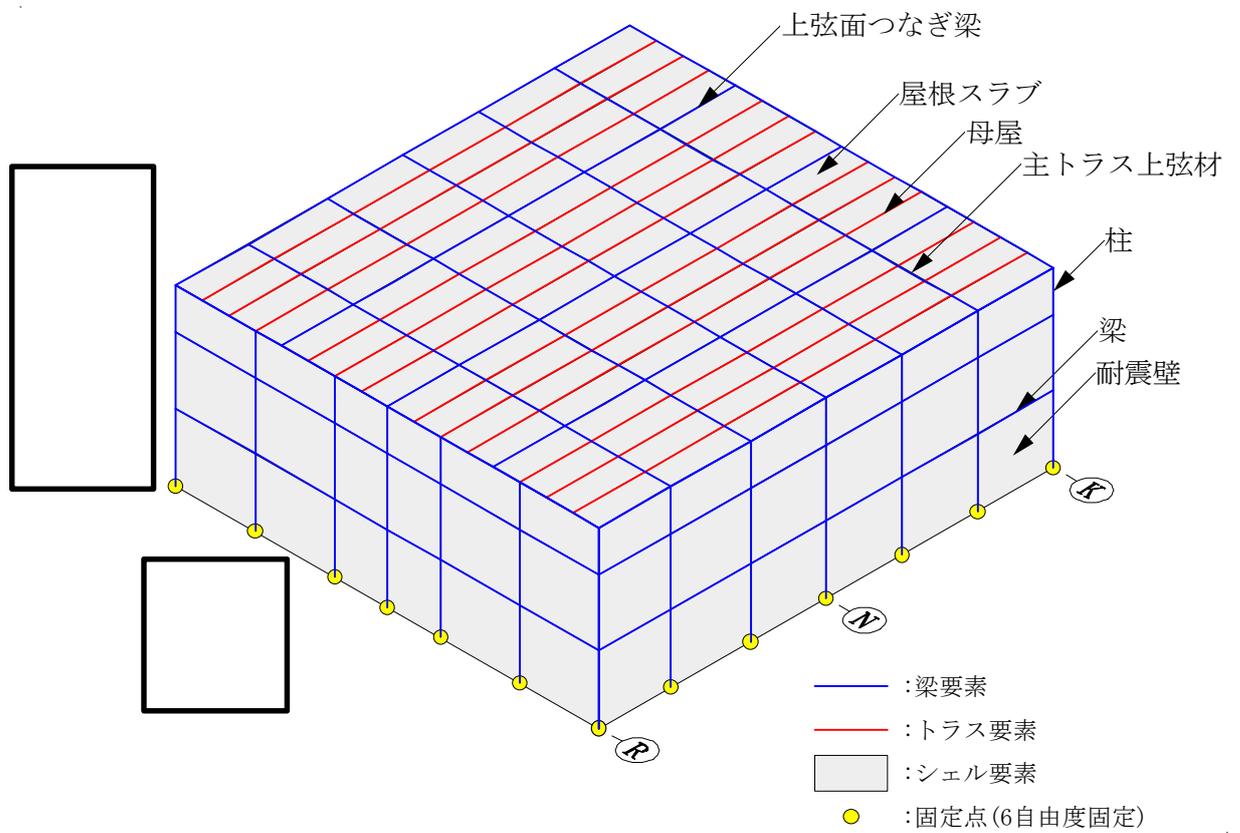
鉄筋コンクリート部では、耐震壁及び屋根トラスはシェル要素を、柱及び梁については梁要素を用いる。

表 1.2-1 使用要素（原子炉建屋原子炉棟）

鉄骨部	主トラス弦材	梁要素
	上弦面つなぎ梁	
	主トラス斜材・束材	トラス要素
	母屋	
	下弦面つなぎ梁	
	水平ブレース	
鉄筋コンクリート部	耐震壁	シェル要素
	屋根スラブ	
	柱・梁	梁要素



(a) 梁要素・トラス要素



(b) 全要素

図 1.2-2 解析モデルの概要 (原子炉建屋原子炉棟)

(3) 境界条件及び拘束条件

主トラス各部材のモデル化寸法と接続条件を図 1.2-3 に、検討部材の断面形状を表 1.2-2 に示す。

本解析モデルは、EL. 46.5m 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。

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もしくはピン接合としてモデル化することとし、主トラス上弦材と柱は剛接合、主トラス下弦材と柱はピン接合とする。また、主トラスの斜材・束材と上下弦材はピン接合とする。

シェル要素と梁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し、鉄骨材とスラブは完全に固着しているものとして解析を実施している。

また、主トラス上弦材、下弦材、斜材、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。

なお、3D-FEM モデルの各部材の寸法は施工図を基に設定している。施工図と解析モデル図（梁要素及びトラス要素）を添付-1 に示す。

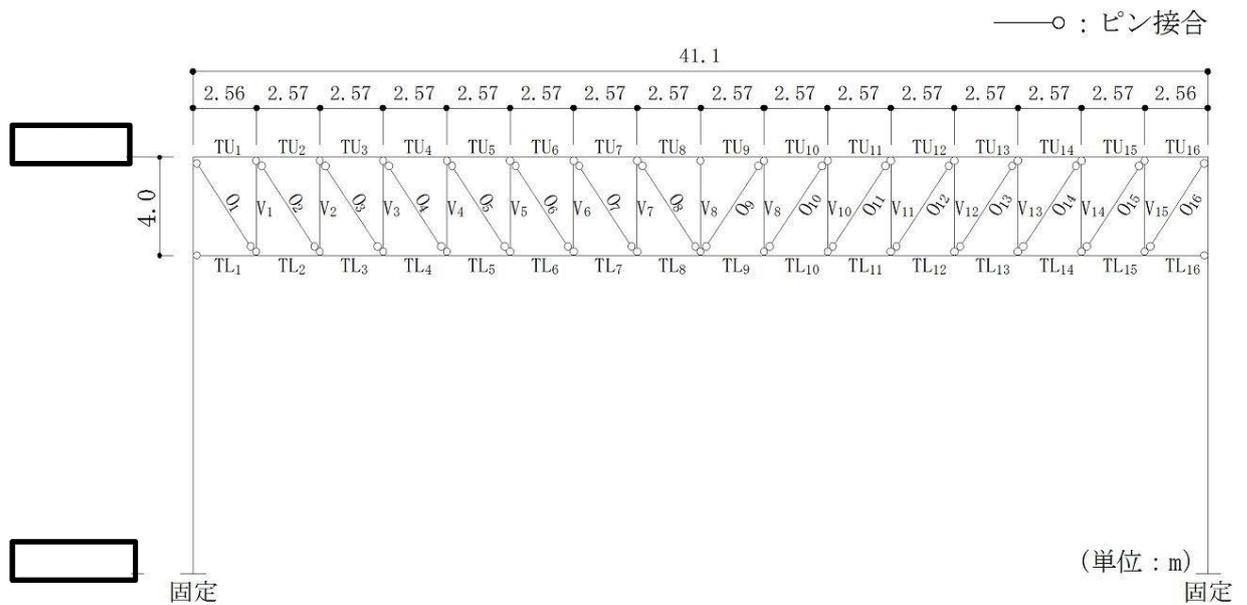


図 1.2-3 解析モデルにおける部材の接続条件（原子炉建屋原子炉棟，N 通り*）

注記 * : 全通りの断面が同じため代表として N 通りを示す。

表 1.2-2 検討部材の形状・寸法（原子炉建屋原子炉棟）

部位	部材番号	形状寸法	断面積 A (cm ²)	断面 2 次 モーメント I (cm ⁴)	材質
上弦材	TU ₁ ~TU ₁₆	H-400×400×13×21	218.7	66600	SS400 (SS41)
下弦材	TL ₁ ~T ₁₆	H-400×400×13×21	218.7	66600	
斜材	O ₁ , O ₂ , O ₁₅ , O ₁₆	2Ls-200×200×15	115.5	—	
	O ₃ , O ₄ , O ₁₃ , O ₁₄	2Ls-150×150×15	85.48	—	
	O ₅ ~O ₁₂	2Ls-150×100×12	57.12	—	
束材	V ₁ , V ₂ , V ₁₄ , V ₁₅	2Ls-200×200×15	115.5	—	
	V ₃ , V ₄ , V ₁₂ , V ₁₃	2Ls-150×150×15	85.48	—	
	V ₅ ~V ₁₁	2Ls-150×100×12	57.12	—	

(4) 荷重の入力方法

屋根に作用する鉛直荷重を表 1.2-3 に、荷重の入力方法の概要を図 1.2-4 に示す。屋根に作用する鉛直荷重は、応力解析において屋根面全体に等分布の面荷重として作用させる。その他の固定荷重（外周梁、外壁）は、外周梁に等分布の線荷重として作用させる。なお、その他の固定荷重は質点系地震応答解析モデルの質点重量から、表 1.2-3 に示す固定荷重と積載荷重を除いた重量を外周梁の長さに応じて分配した。

表 1.2-3 屋根に作用させる鉛直荷重（原子炉建屋原子炉棟）

固定荷重	屋根スラブ	343 kgf/m ²
	トラス鋼材	204 kgf/m ²
	合計	547 kgf/m ² ⇒ 5370 N/m ²
積載荷重（除灰時）	1000 N/m ²	
積雪荷重	210 N/m ²	
降下火砕物堆積による鉛直荷重	7355 N/m ²	

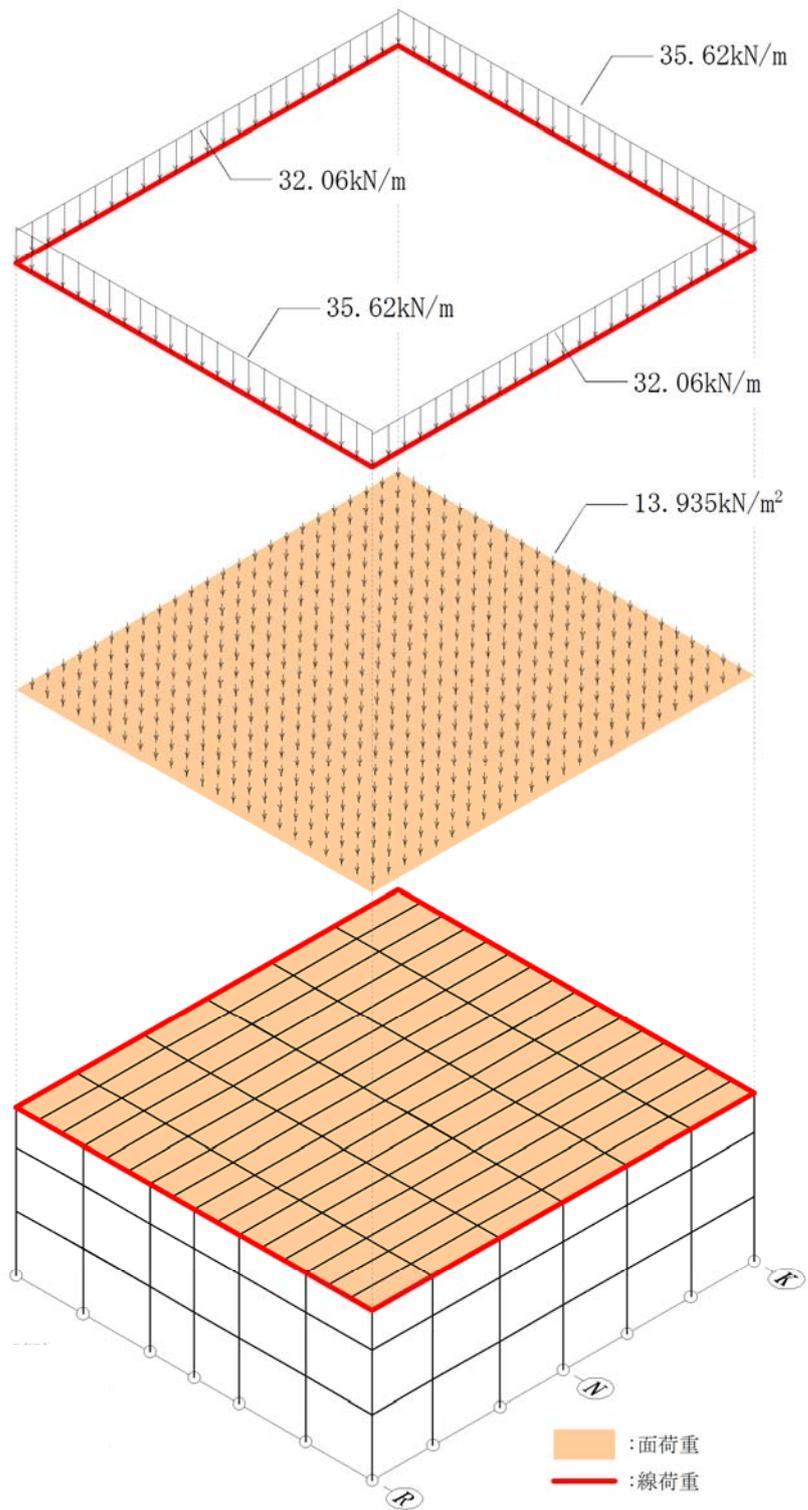


図 1.2-4 荷重の入力方法の概要 (原子炉建屋原子炉棟)

1.3 評価部位の網羅性及び代表性について

(1) 屋根スラブ

原子炉建屋原子炉棟の屋根スラブは母屋で支持された単位幅の1方向スラブを取り出し、等分布荷重を受ける両端固定梁として評価を行う。屋根スラブは単一断面であり、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。

図 1.3-1 に評価対象として抽出した最も支持スパンの大きい屋根スラブ位置を示す。

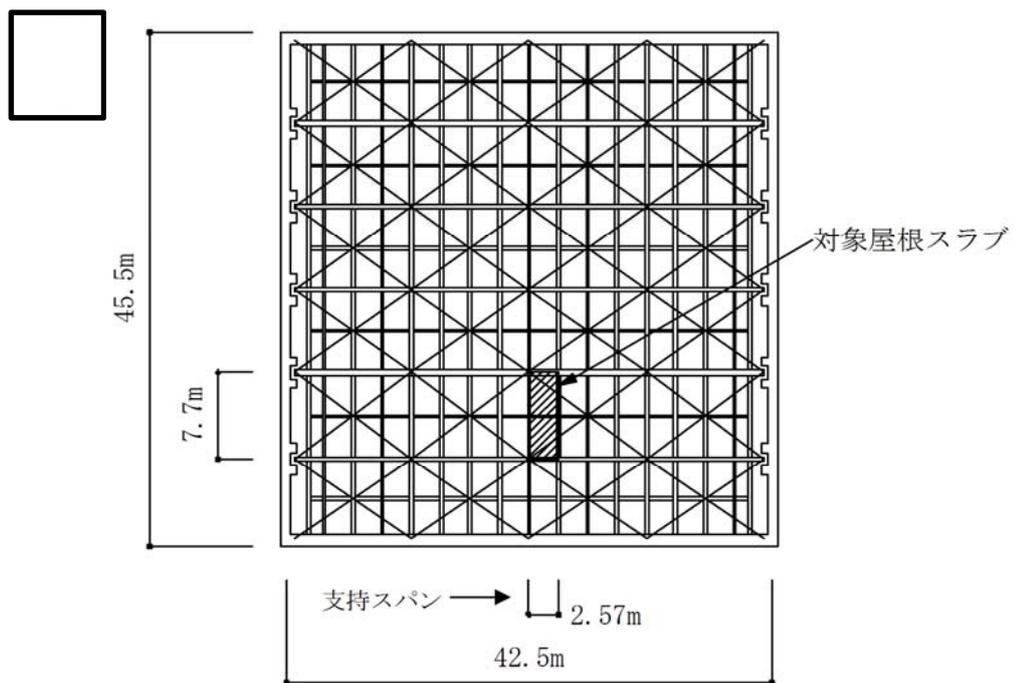


図 1.3-1 原子炉建屋原子炉棟 屋根スラブ評価部材の位置

(2) 主トラス

V-3-別添 2-1.2-6「建屋の強度計算書」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原子炉建屋原子炉棟主トラスの評価結果を表 1.3-1 に示す。また、図 1.3-2～図 1.3-6 に通りごとに全ての主トラス部材の検定値を示す。図には、各部位の最大検定値を赤枠で囲い示した。上弦材 N,P 通り、下弦材及び斜材・束材は P 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 1.3-1 の値に整合している。

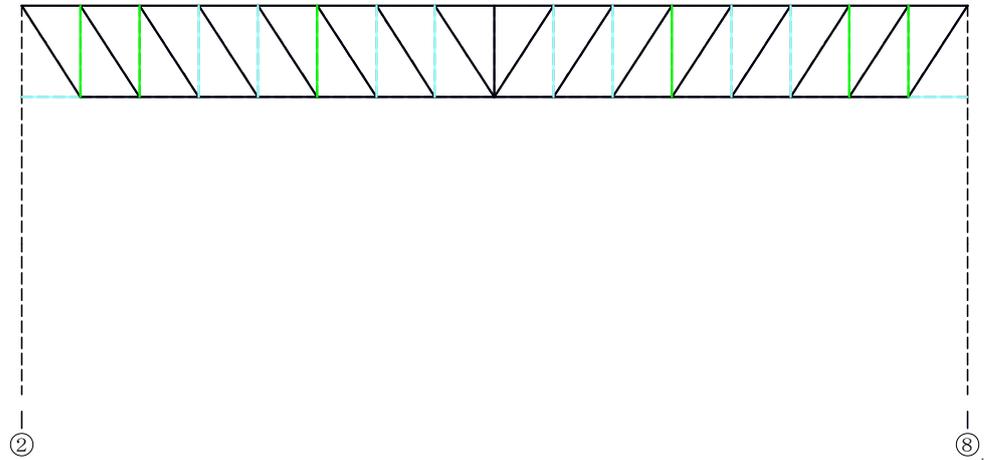
なお、許容値の算出方法については、「1.4 主トラスの許容値の算出について」に示す。

表 1.3-1 原子炉建屋原子炉棟 主トラスの評価結果

部位		発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容値* (N/mm ²)	検定値
EL. 	上弦材	圧縮	35.4	256	0.26
		曲げ	29.5	254	
	下弦材	引張	164.1	258	0.76
		曲げ	30.4	258	
	斜材	引張	204.9	258	0.80
	束材	圧縮	150.3	172	0.88

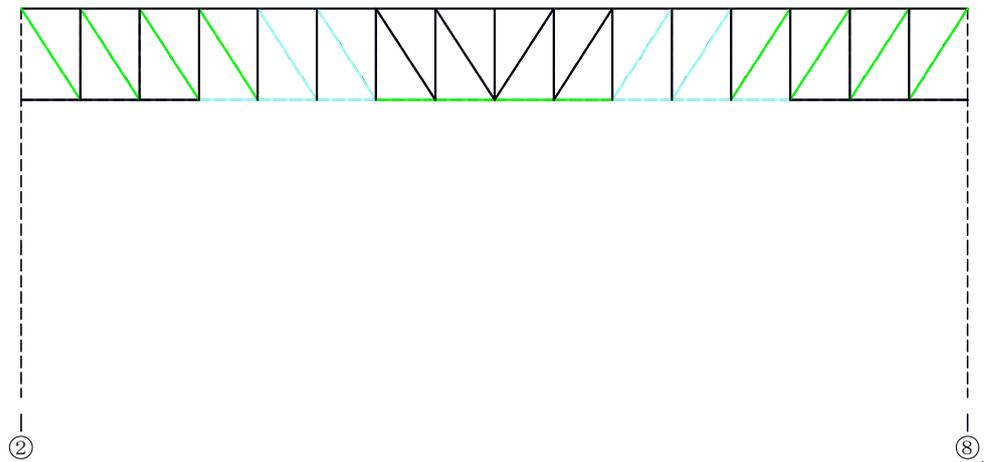
注記 * : 「鋼構造設計規準」の短期許容応力度の評価式に平成 12 年建設省告示第 2464 号に基づき F 値×1.1 を適用

- 検定値 < 0.2
- $0.2 \leq$ 検定値 < 0.4
- $0.2 \leq$ 検定値 < 0.6
- $0.6 \leq$ 検定値 < 0.8
- $0.8 \leq$ 検定値 < 1.0
- $1.0 \leq$ 検定値



上弦材	0.16	0.13	0.08	0.11	0.12	0.12	0.15	0.12	0.12	0.15	0.12	0.12	0.11	0.08	0.13	0.16
斜材	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
束材		0.43	0.52	0.30	0.39	0.43	0.34	0.20	0.08	0.20	0.34	0.43	0.39	0.30	0.51	0.43
下弦材	0.26	0.14	0.05	0.06	0.05	0.07	0.09	0.09	0.09	0.09	0.07	0.06	0.06	0.05	0.14	0.26

(a) 圧縮 (曲げ圧縮)



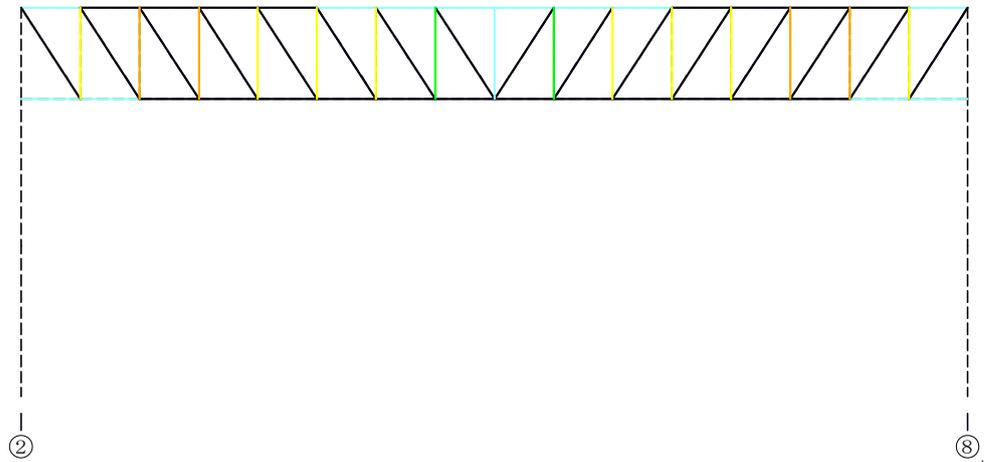
上弦材	0.16	0.10	0.04	0.04	0.05	0.05	0.07	0.04	0.04	0.07	0.05	0.05	0.04	0.04	0.10	0.16
斜材	0.43	0.48	0.48	0.48	0.34	0.27	0.15	0.04	0.04	0.15	0.27	0.34	0.48	0.48	0.48	0.42
束材		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
下弦材	0.07	0.07	0.14	0.24	0.32	0.38	0.42	0.44	0.44	0.42	0.38	0.32	0.24	0.14	0.07	0.07

(b) 引張 (曲げ引張)

: 最大検定比部材

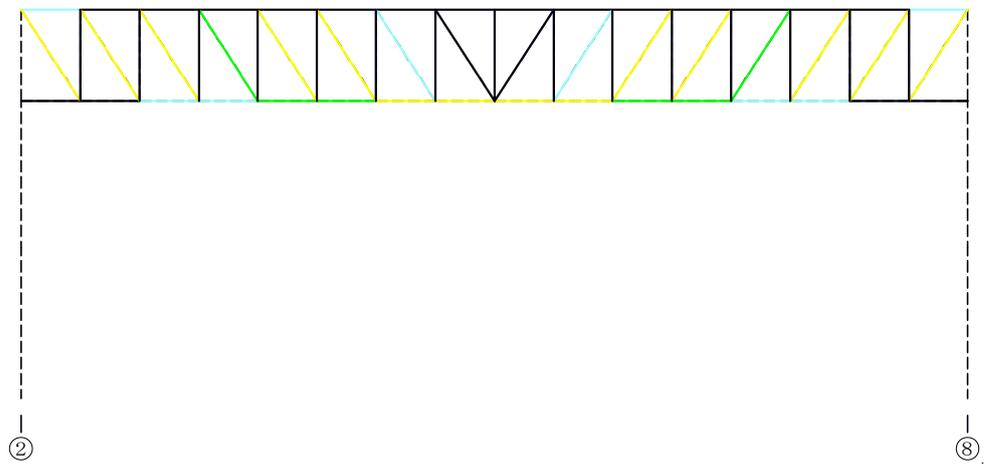
図 1.3-2 主トラスの検定比 (L 通り)

- 検定値 < 0.2
- 0.2 ≤ 検定値 < 0.4
- 0.2 ≤ 検定値 < 0.6
- 0.6 ≤ 検定値 < 0.8
- 0.8 ≤ 検定値 < 1.0
- 1.0 ≤ 検定値



上弦材	0.23	0.16	0.09	0.16	0.14	0.22	0.25	0.22	0.22	0.25	0.22	0.14	0.16	0.09	0.16	0.23
斜材	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
束材		0.66	0.84	0.86	0.72	0.73	0.79	0.45	0.20	0.45	0.79	0.73	0.72	0.86	0.84	0.66
下弦材	0.31	0.20	0.07	0.06	0.06	0.11	0.16	0.18	0.18	0.16	0.11	0.06	0.06	0.07	0.20	0.31

(a) 圧縮 (曲げ圧縮)



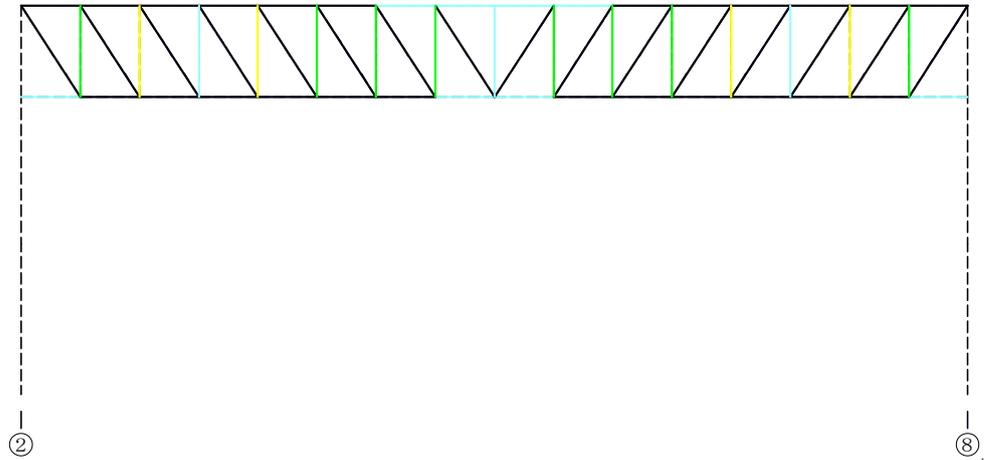
上弦材	0.23	0.11	0.02	0.07	0.04	0.10	0.13	0.09	0.09	0.13	0.10	0.04	0.07	0.02	0.12	0.23
斜材	0.66	0.78	0.66	0.58	0.69	0.63	0.35	0.09	0.09	0.35	0.63	0.69	0.58	0.66	0.78	0.66
束材		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
下弦材	0.12	0.12	0.23	0.37	0.41	0.57	0.70	0.75	0.75	0.70	0.57	0.41	0.37	0.23	0.12	0.12

(b) 引張 (曲げ引張)

: 最大検定比部材

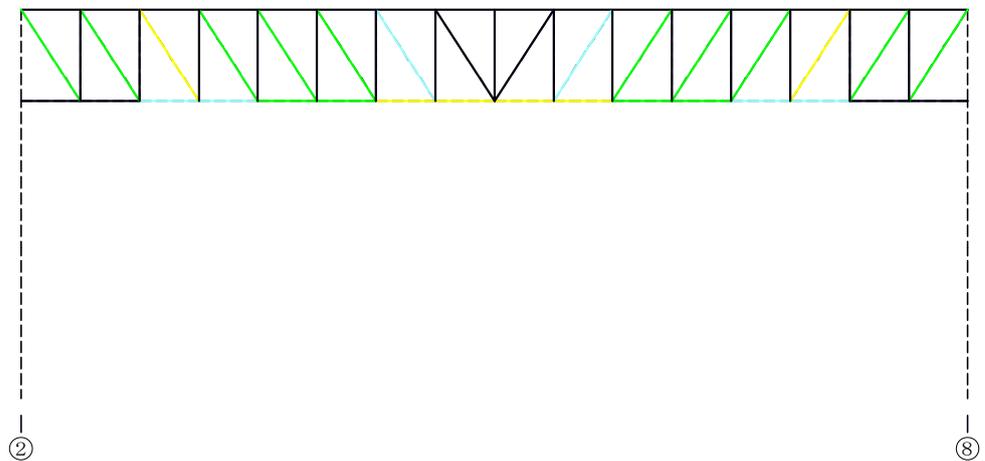
図 1.3-3 主トラスの検定比 (M 通り)

- 検定値 < 0.2
- 0.2 ≤ 検定値 < 0.4
- 0.2 ≤ 検定値 < 0.6
- 0.6 ≤ 検定値 < 0.8
- 0.8 ≤ 検定値 < 1.0
- 1.0 ≤ 検定値



上弦材	0.16	0.14	0.12	0.16	0.16	0.17	0.21	0.26	0.26	0.21	0.17	0.16	0.16	0.12	0.14	0.16
斜材	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
束材		0.53	0.61	0.39	0.61	0.45	0.53	0.46	0.30	0.46	0.53	0.45	0.61	0.38	0.61	0.53
下弦材	0.25	0.10	0.07	0.07	0.10	0.11	0.11	0.20	0.20	0.11	0.11	0.10	0.07	0.07	0.10	0.24

(a) 圧縮 (曲げ圧縮)



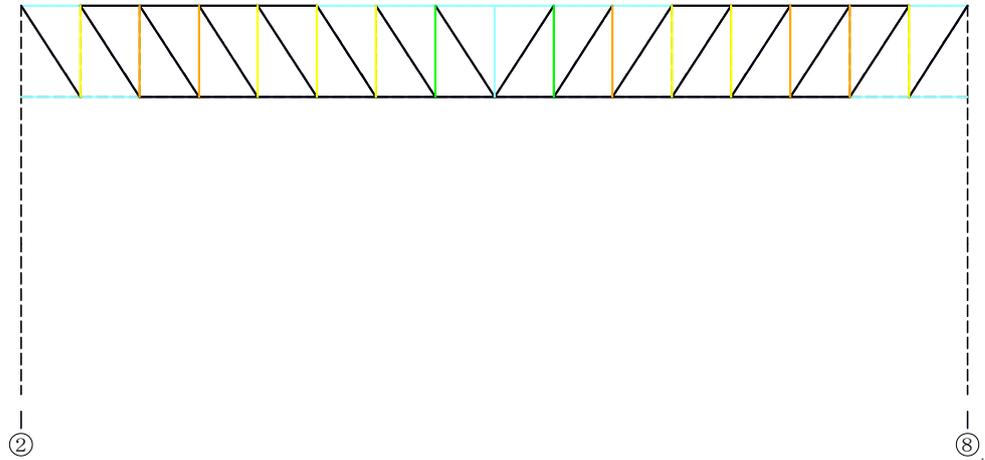
上弦材	0.15	0.10	0.05	0.06	0.06	0.05	0.07	0.12	0.12	0.07	0.05	0.06	0.06	0.05	0.10	0.15
斜材	0.52	0.58	0.61	0.59	0.56	0.45	0.37	0.13	0.13	0.36	0.45	0.56	0.59	0.61	0.58	0.52
束材		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
下弦材	0.08	0.08	0.22	0.35	0.50	0.58	0.63	0.75	0.75	0.63	0.58	0.50	0.35	0.22	0.08	0.08

(b) 引張 (曲げ引張)

 : 最大検定比部材

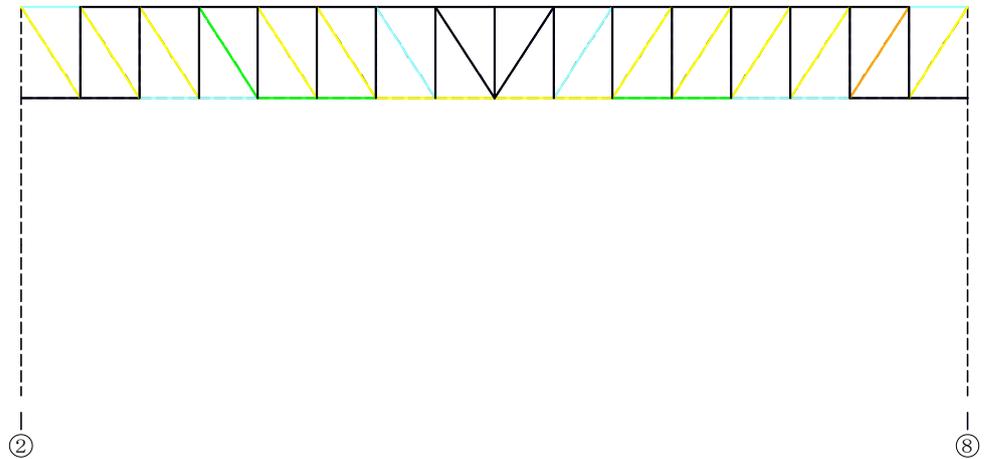
図 1.3-4 主トラスの検定比 (N 通り)

- 検定値 < 0.2
- 0.2 ≤ 検定値 < 0.4
- 0.2 ≤ 検定値 < 0.6
- 0.6 ≤ 検定値 < 0.8
- 0.8 ≤ 検定値 < 1.0
- 1.0 ≤ 検定値



上弦材	0.23	0.16	0.09	0.16	0.14	0.22	0.26	0.22	0.22	0.26	0.22	0.14	0.16	0.09	0.16	0.24
斜材	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
束材		0.67	0.85	0.87	0.72	0.74	0.79	0.45	0.20	0.46	0.80	0.74	0.73	0.88	0.86	0.67
下弦材	0.32	0.20	0.07	0.06	0.06	0.11	0.16	0.18	0.18	0.16	0.11	0.06	0.06	0.07	0.22	0.33

(a) 圧縮 (曲げ圧縮)



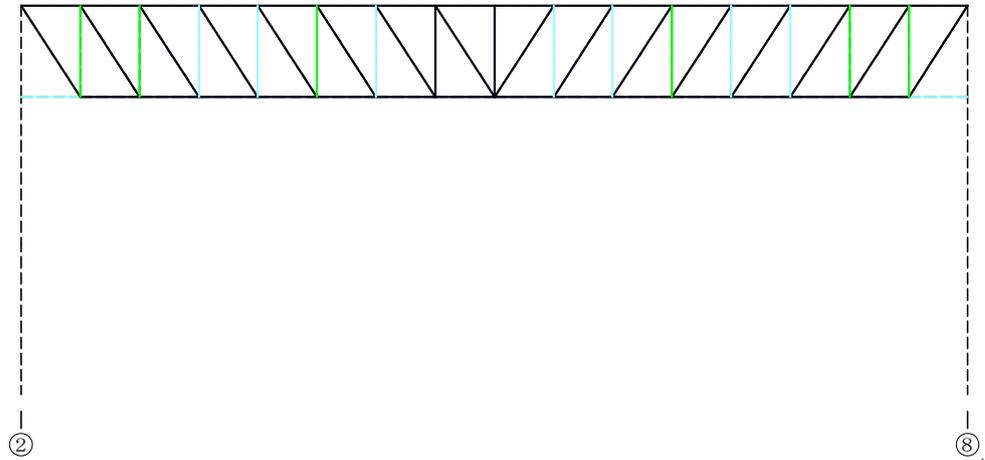
上弦材	0.24	0.12	0.02	0.08	0.04	0.10	0.13	0.09	0.09	0.13	0.10	0.04	0.08	0.02	0.12	0.24
斜材	0.66	0.79	0.67	0.59	0.69	0.63	0.35	0.09	0.10	0.36	0.63	0.69	0.60	0.68	0.80	0.67
束材		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
下弦材	0.12	0.12	0.23	0.37	0.42	0.58	0.71	0.76	0.76	0.71	0.58	0.42	0.37	0.23	0.12	0.12

(b) 引張 (曲げ引張)

 : 最大検定比部材

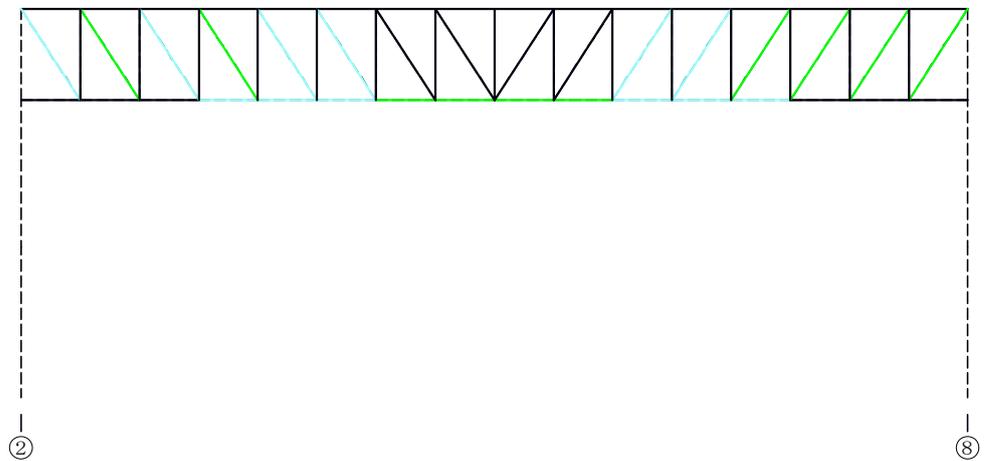
図 1.3-5 主トラスの検定比 (P 通り)

- 検定値 < 0.2
- 0.2 ≤ 検定値 < 0.4
- 0.2 ≤ 検定値 < 0.6
- 0.6 ≤ 検定値 < 0.8
- 0.8 ≤ 検定値 < 1.0
- 1.0 ≤ 検定値



上弦材	0.14	0.11	0.07	0.10	0.12	0.12	0.14	0.12	0.12	0.14	0.12	0.12	0.11	0.08	0.12	0.15
斜材	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
束材		0.45	0.50	0.39	0.38	0.43	0.33	0.19	0.08	0.20	0.34	0.43	0.39	0.29	0.51	0.43
下弦材	0.28	0.15	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.05	0.05	0.05	0.15	0.27

(a) 圧縮 (曲げ圧縮)



上弦材	0.14	0.09	0.03	0.03	0.06	0.04	0.07	0.04	0.04	0.07	0.05	0.05	0.04	0.04	0.10	0.15
斜材	0.36	0.45	0.38	0.45	0.35	0.26	0.15	0.04	0.05	0.16	0.27	0.34	0.47	0.47	0.48	0.42
束材		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
下弦材	0.08	0.08	0.12	0.24	0.32	0.37	0.41	0.43	0.43	0.41	0.37	0.30	0.23	0.13	0.07	0.07

(b) 引張 (曲げ引張)

: 最大検定比部材

図 1.3-6 主トラスの検定比 (Q 通り)

(3) 母屋

原子炉建屋原子炉棟の母屋は主トラスで支持された等分布荷重を受ける両端ピン支持の単純梁として評価を行う。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、母屋の断面が同一である場合には、支持スパンが長く、屋根面の支配面積の大きな母屋が最も厳しい条件であると判断できる。

最も支持スパンが長く、支配面積の大きな母屋の位置を図 1.3-7 に示す。

なお、原子炉棟の母屋には表 1.3-2 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いるが、図 1.3-7 に示す母屋は断面の小さい鉄骨部材 (H-390×300×10×16) であるため、この母屋を評価対象としている。

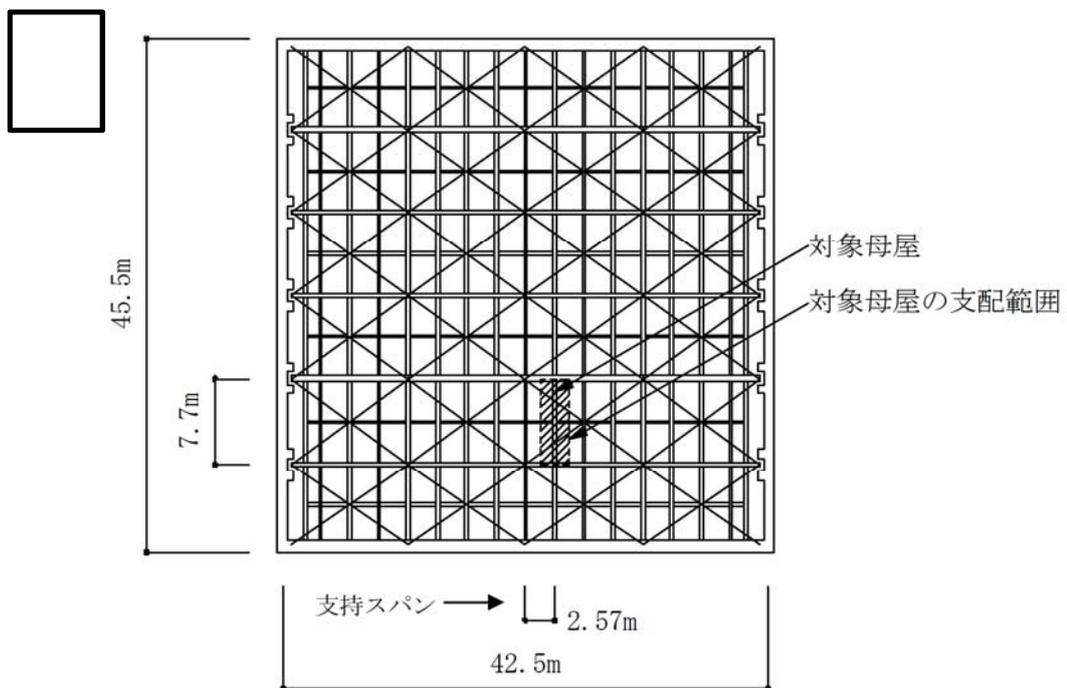


図 1.3-7 原子炉建屋原子炉棟 母屋の評価部材の位置

表 1.3-2 原子炉建屋原子炉棟 母屋使用部材断面

部材断面	断面積 (mm ²)
H-390×300×10×16	136.0
H-582×300×12×17	174.5

1.3.2 原子炉建屋付属棟

(1) 屋根スラブ

原子炉建屋付属棟の屋根スラブには、鉄骨架構上 (EL. 39.8m, 35.0m, 30.3m, 30.0m, 及び 22.0m) のスラブと、鉄筋コンクリート躯体上のスラブがある。付属棟の屋根スラブ位置を図 1.3-8 に示す。

鉄骨架構上の屋根スラブについては、母屋で支持された単位幅の 1 方向スラブを取り出し、等分布荷重を受ける両端固定梁として評価を行う。屋根スラブは単一断面であり、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。

図 1.3-9～図 1.3-11 に異なる高さの屋根面毎に、支持スパンが最大となるスラブ位置を示す。モノレールエンクロージャーの EL. 30.3m の屋根スラブの支持スパンが最も大きく、このスラブの評価を行った。

一方、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梁または壁で支持された四辺固定または三辺固定の長方形版として評価を行う。図 1.3-12～図 1.3-14 に評価対象のスラブ位置を示す。これらの屋根スラブは、場所によって部材断面と支持条件が異なるため、すべてについて評価を行った。

表 1.3-3 に付属棟屋根スラブの評価結果を示す。EL. 30.0m の鉄筋コンクリート躯体上の屋根スラブ (SE5-7) の検定値が最も大きいことがわかる。

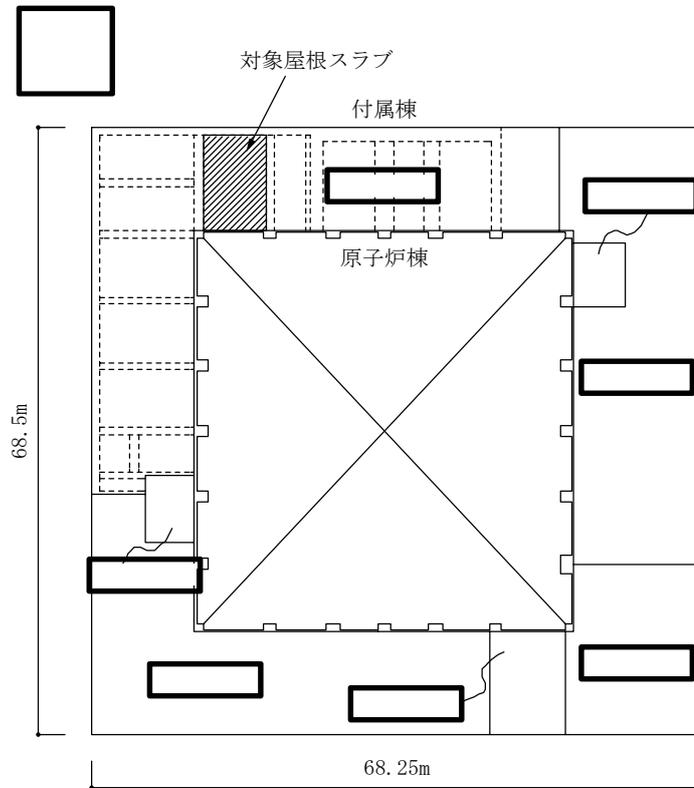


図 1.3-8 原子炉建屋付属棟 屋根スラブの位置



図 1.3-9 原子炉建屋付属棟 屋根スラブ評価部材の位置 (EL. 39.8m)

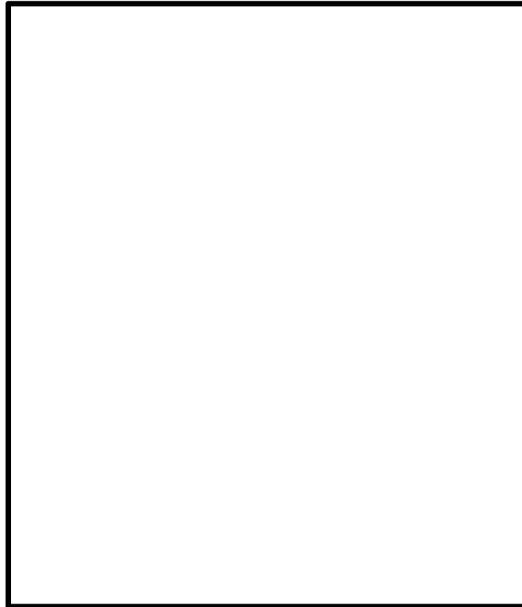


図 1.3-10 原子炉建屋付属棟 屋根スラブ評価部材の位置 (EL. 35.0m)

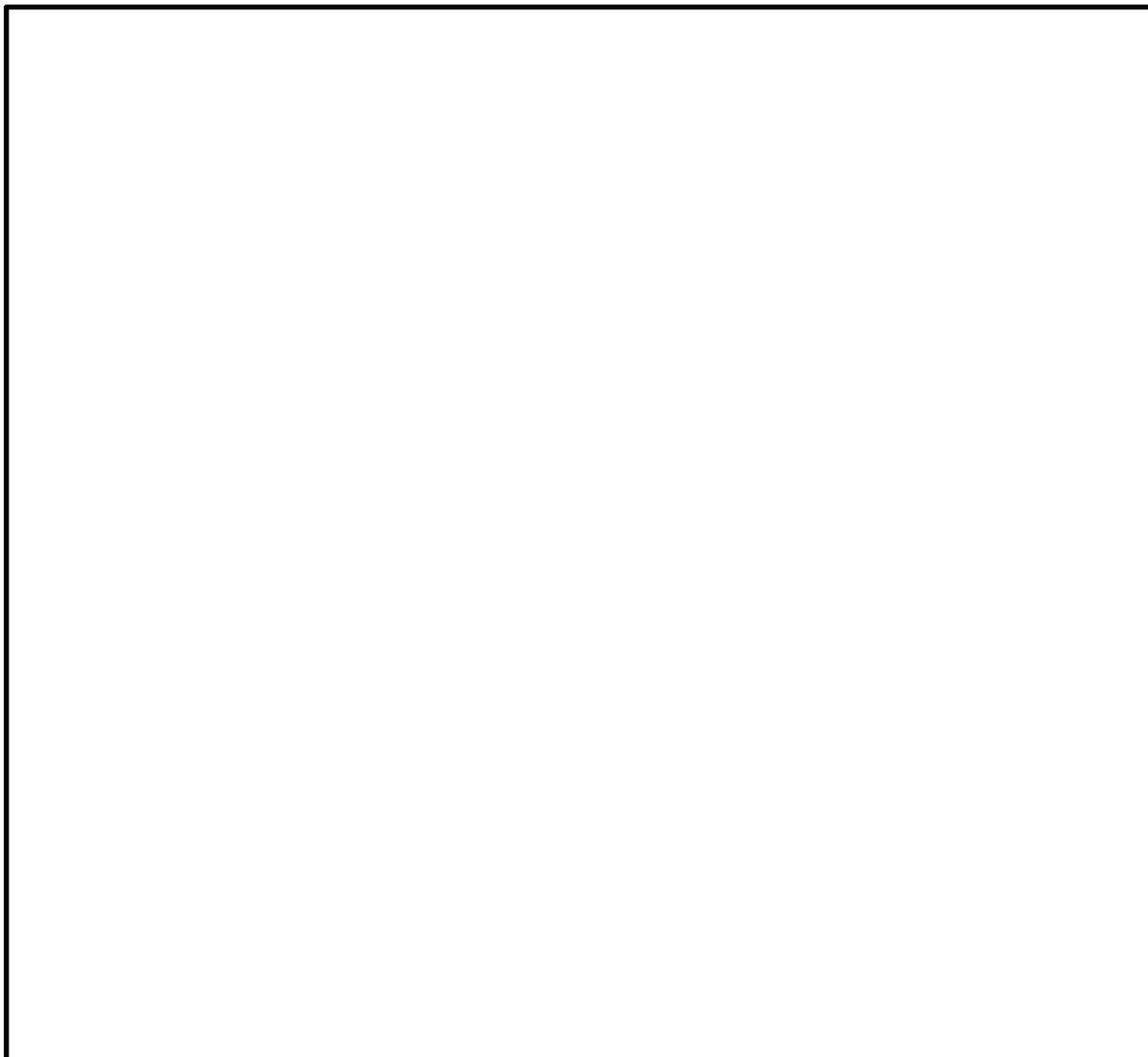
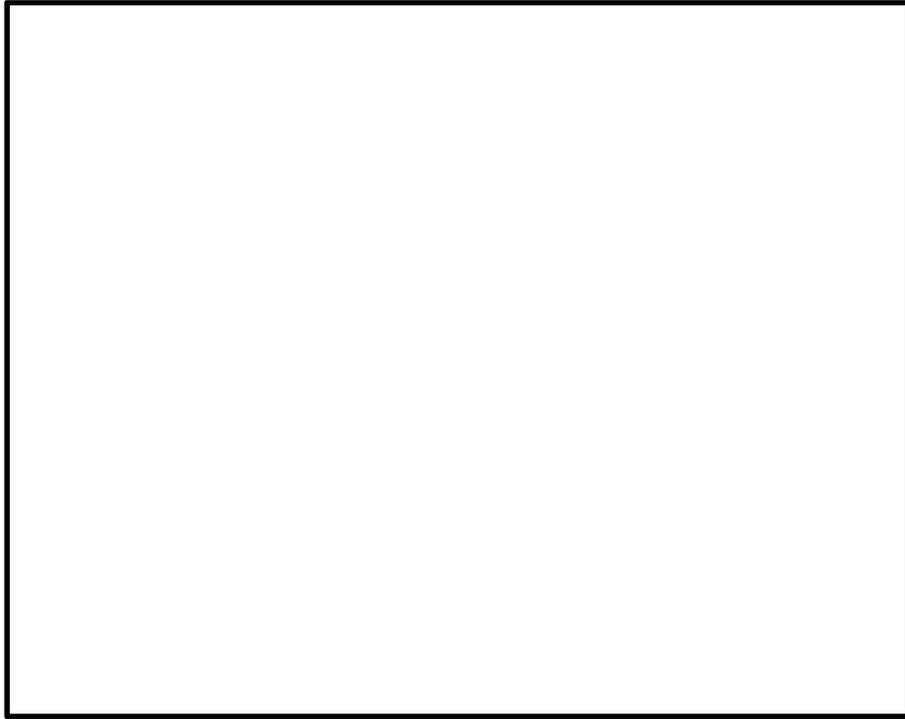
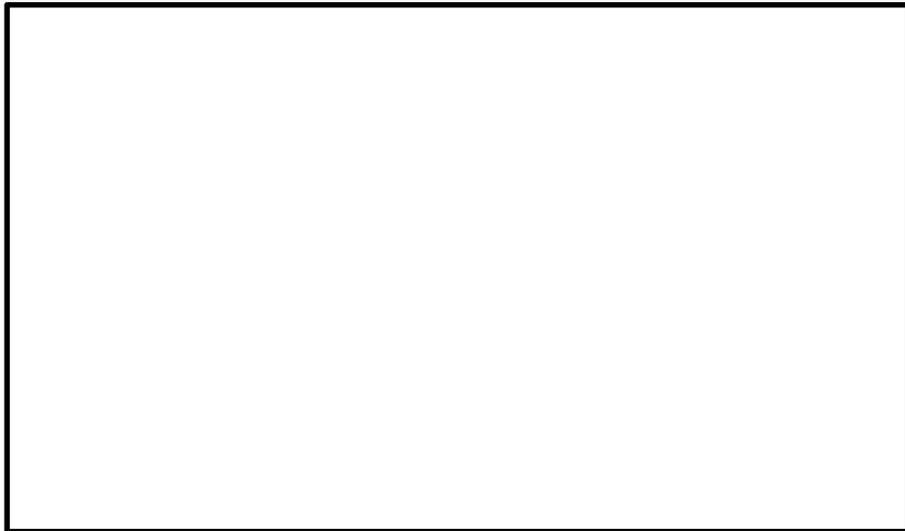


図 1.3-11 原子炉建屋付属棟 屋根スラブ評価部材の位置 (EL. 30.3m, 30.0m, 22.0m)

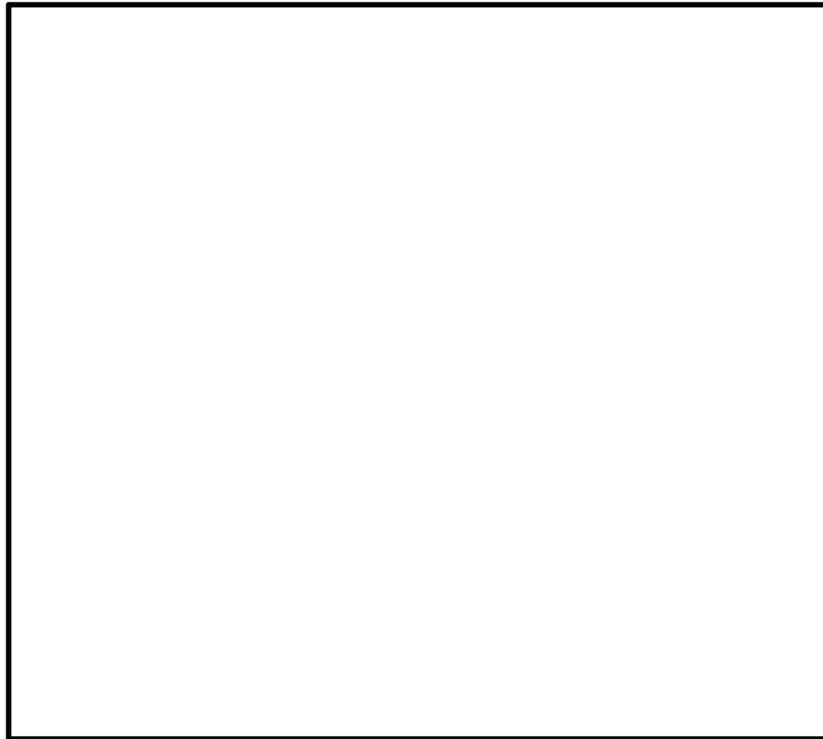


(a) EL. 29.00m 平面図

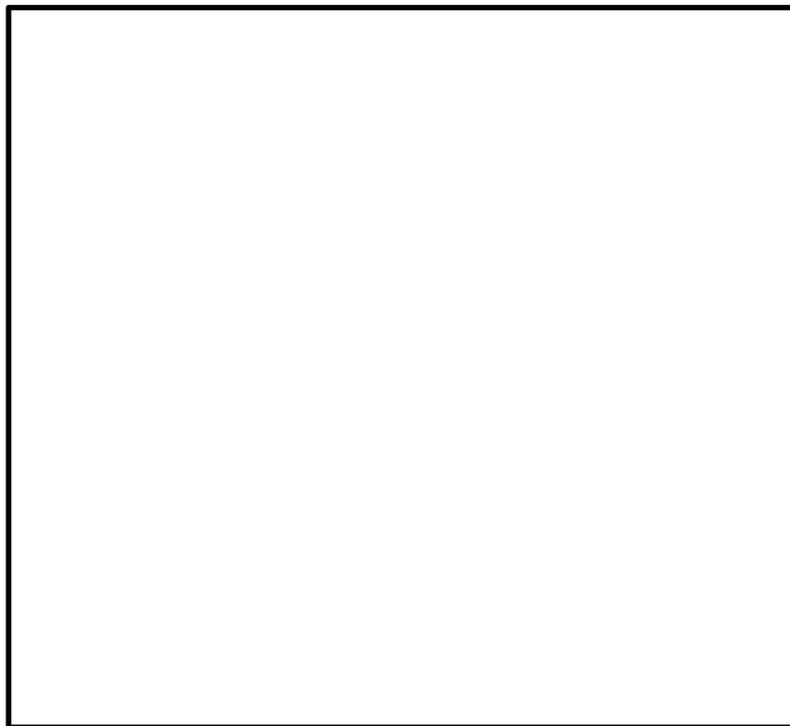


(b) EL. 23.00m 平面図

図 1.3-12 原子炉建屋付属棟 屋根スラブ評価部材の位置
(RC スラブ, EL. 30.30m)

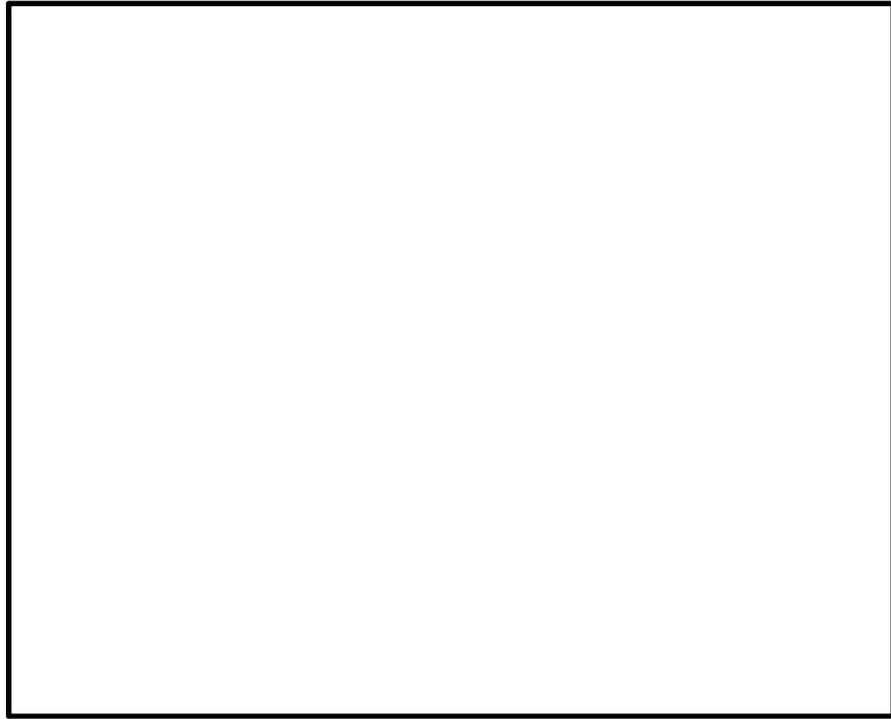


(a) EL. 20.30m 平面図

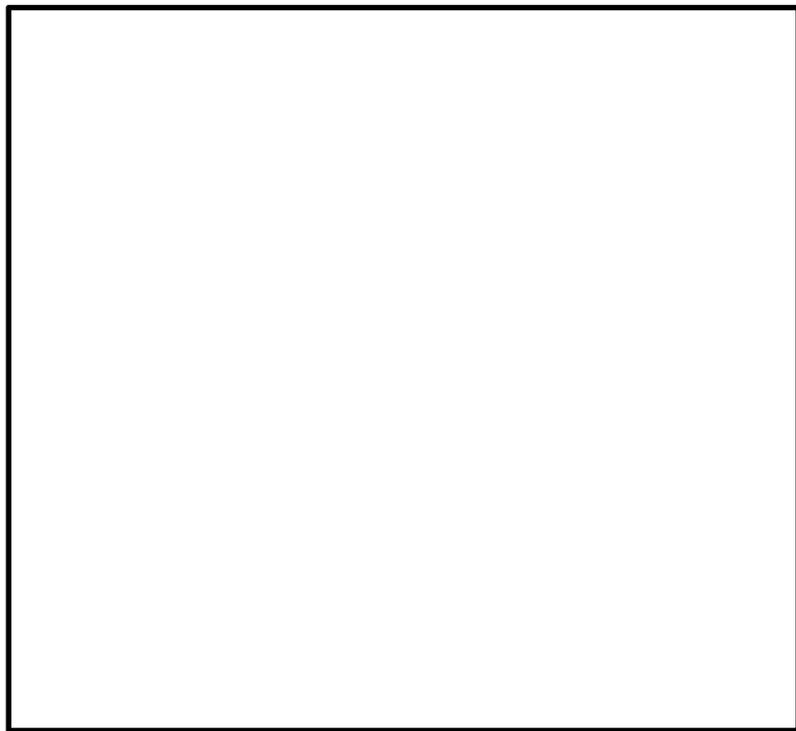


(b) EL. 14.00m 平面図

図 1.3-13 原子炉建屋付属棟 屋根スラブ評価部材の位置
(RC スラブ, EL. 22.00m, 17.20m, 12.24m, 12.00m)



(a) EL. 8.20m 平面図



(b) EL. 2.00m 平面図

図 1.3-14 原子炉建屋付属棟 屋根スラブ評価部材の位置
(RC スラブ、EL. 9.00m)

表 1.3-3 原子炉建屋付属棟 屋根スラブの評価結果

(a) 鉄骨架構上のスラブ

高さ	スラブ厚 (mm)	曲げモーメントに対する検定値*2 (せん断力に対する検定値)
EL. <input type="text"/>	100	0.36 (0.27)

(b) 鉄骨コンクリート躯体上のスラブ

高さ	記号	スラブ厚 (mm)	曲げモーメントに対する検定値*2 (せん断力に対する検定値)	
			短辺	長辺
EL. <input type="text"/>	SE5-1	400	0.50 (0.25)	0.25 (0.22)
	SE5-2	400	0.50 (0.25)	0.25 (0.22)
	SE5-3	400	0.86 (0.40)	0.43 (0.36)
	SE5-4	400	0.83 (0.39)	0.42 (0.35)
	SE5-5	400	0.83 (0.39)	0.42 (0.35)
	SE5-6	400	0.36 (0.19)	0.18 (0.17)
	SE5-7	400	0.92 (0.42)*1	0.46 (0.38)
	SE5-8	400	0.26 (0.15)	0.13 (0.13)
	SE6-1	1100	0.18 (0.09)	0.09 (0.08)
	SE6-2	1100	0.19 (0.09)	0.10 (0.09)
EL. <input type="text"/>	S8-1	800	0.17 (0.10)	0.09 (0.10)
	S8-2	800	0.17 (0.10)	0.09 (0.10)
	S8-3	800	0.20 (0.10)	0.10 (0.10)
	S9	800	0.09 (0.10)	0.05 (0.10)
EL. <input type="text"/>	Sa	2000	0.19 (0.08)	0.10 (0.06)
EL. <input type="text"/>	SM19	200	0.10 (0.09)	0.05 (0.09)
EL. <input type="text"/>	SM20	200	0.70 (0.59)	0.35 (0.60)
EL. <input type="text"/>	SB6a-1	800	0.01 (0.03)	0.01 (0.02)
	SB6a-2	800	0.02 (0.03)	0.02 (0.03)
	SB6a-3	800	0.02 (0.03)	0.02 (0.03)
	SB12a-1	1400	0.09 (0.10)	0.05 (0.10)
	SB12a-2	1400	0.07 (0.08)	0.05 (0.06)
	SB12a-3	1400	0.05 (0.07)	0.03 (0.06)
	SB12a-4	1400	0.05 (0.07)	0.04 (0.06)

注記 *1: 最大検定値

*2: 「RC-N規準」の短期許容応力度の評価式に平成12年建設省告示第2464号に基づきF値×1.1を適用

(2) 母屋

原子炉建屋付属棟の母屋は主トラスで支持された等分布荷重を受ける両端ピン支持の単純梁として評価を行う。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、母屋の断面が同一である場合には、支持スパンが長く、屋根面の支配面積の大きな母屋が最も厳しい条件であると判断できる。

原子炉建屋付属棟の母屋には表 1.3-4 に示すとおり、断面の異なる複数の鉄骨部材を使用しているため、同じ部材断面の母屋において最も条件の厳しい部位を選定し、評価を行う。

図 1.3-15 に部材断面毎に選定した母屋の評価部材位置を示す。

表 1.3-4 原子炉建屋原子炉棟 母屋使用部材断面

記号	部材断面
G1	H-594×302×14×23
G5	H-250×125×6×9
G8	H-600×200×11×17
G9	H-400×200×8×13
G10	H-350×175×7×11
G11	H-300×150×6.5×9
G16	H-350×175×7×11
G17	H-300×150×6.5×9
G19	H-250×125×6×9



図 1.3-15(1/3) 原子炉建屋付属棟 母屋評価部材の位置



図 1.3-15 (2/3) 原子炉建屋付属棟 母屋評価部材の位置

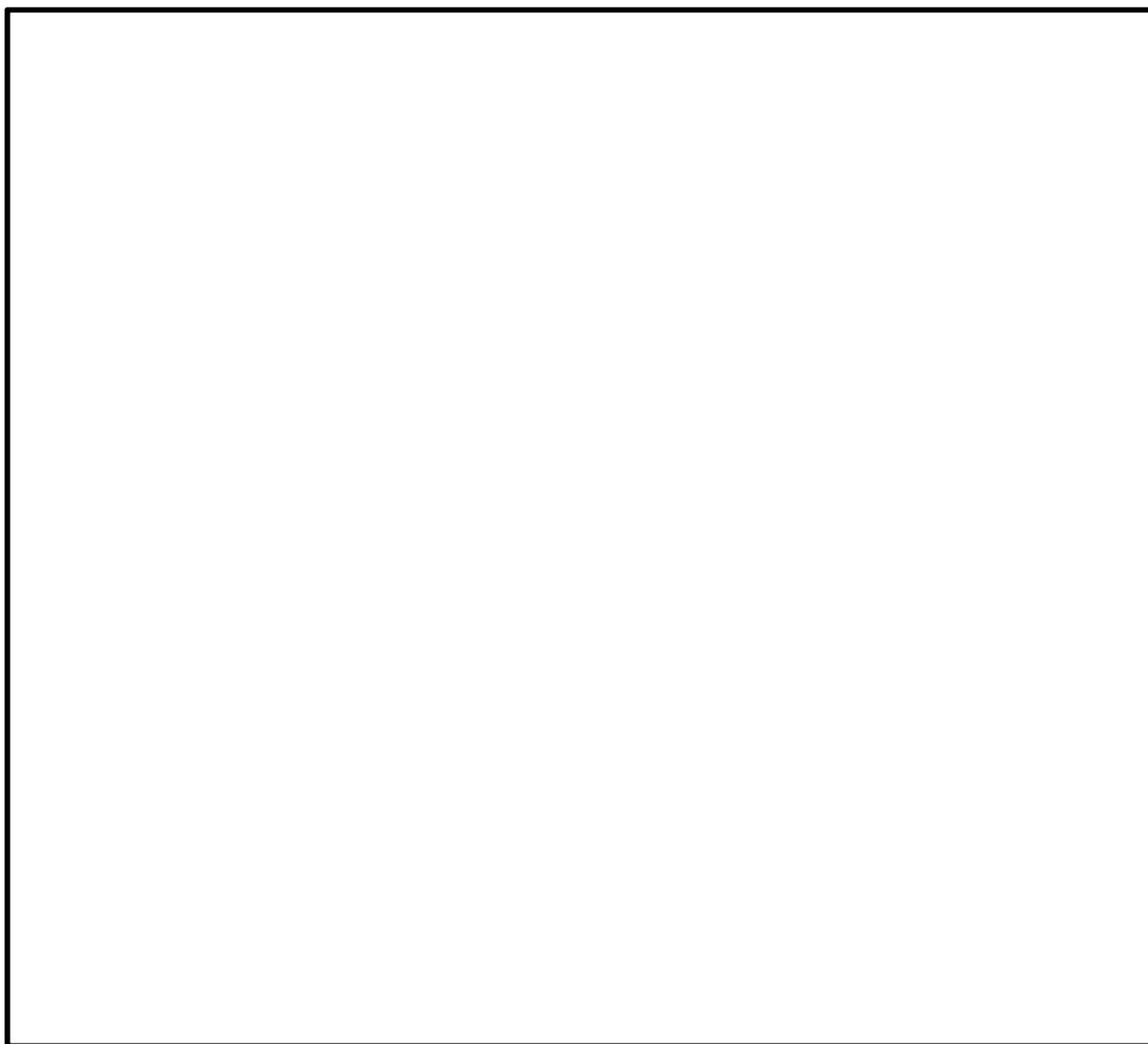


図 1.3-15 (3/3) 原子炉建屋付属棟 母屋評価部材の位置

1.4 主トラスの許容応力値について

表 1.4-1 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 1.4-1 原子炉建屋原子炉棟 主トラスの評価結果

部位		発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容値* (N/mm ²)	検定値
EL. 64.08 m	上弦材	圧縮	35.4	256	0.26
		曲げ	29.5	254	
	下弦材	引張	164.1	258	0.76
		曲げ	30.4	258	
	斜材	引張	204.9	258	0.80
	束材	圧縮	150.3	172	0.88

注記 * : 「鋼構造設計規準」の短期許容応力度の評価式に平成 12 年建設省告示第 2464 号に基づき F 値×1.1 を適用

(1) 評価式

a. 許容引張応力度

$$f_t = F / 1.5 \quad (1.4-1 \text{ 式})$$

ここに,

F : 鋼材の F 値

b. 許容圧縮応力度

$$f_c = \frac{\left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} F}{\nu} \quad (\lambda \leq \Lambda \text{ のとき}) \quad (1.4-2 \text{ 式})$$

$$f_c = \frac{0.277 F}{\left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2} \quad (\lambda > \Lambda \text{ のとき}) \quad (1.4-3 \text{ 式})$$

ここに,

λ : 圧縮材の細長比

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

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

$$f_b = \frac{1}{\nu} F \quad (\lambda_b \leq_p \lambda_b \text{ のとき}) \quad (1.4-4 \text{ 式})$$

$$f_b = \frac{\left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda_b - p \lambda_b}{e \lambda_b - p \lambda_b} \right) \right\}}{\nu} F \quad (p \lambda_b < \lambda_b \leq_e \lambda_b \text{ のとき}) \quad (1.4-5 \text{ 式})$$

$$f_b = \frac{1}{2.17 \lambda_b^2} F \quad (e \lambda_b < \lambda_b \text{ のとき}) \quad (1.4-6 \text{ 式})$$

ここに,

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

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

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

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

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

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

f_b : 許容圧縮応力度

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 : サンプナンのめじり定数 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。

部材	F 値 F (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 (mm ²)
H-400×400× 13×21	235	2.05×10 ⁵	7.90×10 ⁴	2.187×10 ⁴

断面 2 次 モーメント I _x (mm ⁴)	断面 2 次 モーメント I _y (mm ⁴)	断面係数 Z (mm ³)	座屈長 l _k (mm)	断面 2 次半径 i (mm)
6.660×10 ⁸	2.240×10 ⁸	3.330×10 ⁶	1670.5	174.5

細長比 λ (-)	限界細長比 Λ (-)	曲げ ねじり定数 I _w (mm ⁴)	ねじり定数 J (mm ⁶)	補正係数 C (-)
9.57	114.20	8.044×10 ¹²	2.732×10 ⁶	1.04

支点間距離 l _b (mm)	弾性横座屈 モーメント M _e (N・mm)	曲げ材の 細長比 λ _b (-)	塑性限界 細長比 p λ _b (-)	弾性限界 細長比 e λ _b (-)
2570	1.407×10 ¹⁰	0.25	0.32	1.29

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。

部材	F 値 F (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 (mm ²)
H-400×400× 13×21	235	2.05×10 ⁵	7.90×10 ⁴	2.187×10 ⁴

断面 2 次 モーメント I _x (mm ⁴)	断面 2 次 モーメント I _y (mm ⁴)	断面係数 Z (mm ³)	座屈長 l _k (mm)	断面 2 次半径 i (mm)
6.660×10 ⁸	2.240×10 ⁸	3.330×10 ⁶	10280	101.2

細長比 λ (-)	限界細長比 Λ (-)	曲げ ねじり定数 I _w (mm ⁴)	ねじり定数 J (mm ⁶)	補正係数 C (-)
101.58	114.20	8.044×10 ¹²	2.732×10 ⁶	1.01

支点間距離 l _b (mm)	弾性横座屈 モーメント M _e (N・mm)	曲げ材の 細長比 λ _b (-)	塑性限界 細長比 _p λ _b (-)	弾性限界 細長比 _e λ _b (-)
10280	1.277×10 ¹⁰	0.82	0.31	1.29

c. 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。

部材	F 値 F (N/mm ²)
2L _s -200× 200×15	235

d. 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。

部材	F 値 F (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 (mm ²)
2L _s -150× 150×15	235	2.05×10 ⁵	7.90×10 ⁴	8.548×10 ³

断面 2 次 モーメント I _x (mm ⁴)	断面 2 次 モーメント I (mm ⁴)	座屈長 l _k (mm)	断面 2 次半径 i (mm)	細長比 λ (-)
4.532×10 ⁷	1.776×10 ⁷	3610	45.6	79.20

限界細長比 Λ (-)
114.20

2. タービン建屋への強度計算に係る補足説明

2.1 概要

本資料は、タービン建屋の降下火砕物による堆積荷重による構造健全性に用いる 3D-FEM モデルの詳細、評価部位の選定、各部材毎の評価結果を示すものである。

2.2 3D-FEM モデルの詳細説明

(1) モデル化の範囲

3D-FEM モデルのモデル化範囲を図 2.2-1 に示す。タービン建屋の EL. 18.0m には厚さ 0.5m ~1.0m の床スラブと、主トラスを支える柱の脚部には梁せい 1.2~2.0m の大梁が設置され、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. 18.0m より上部構造をモデル化する。

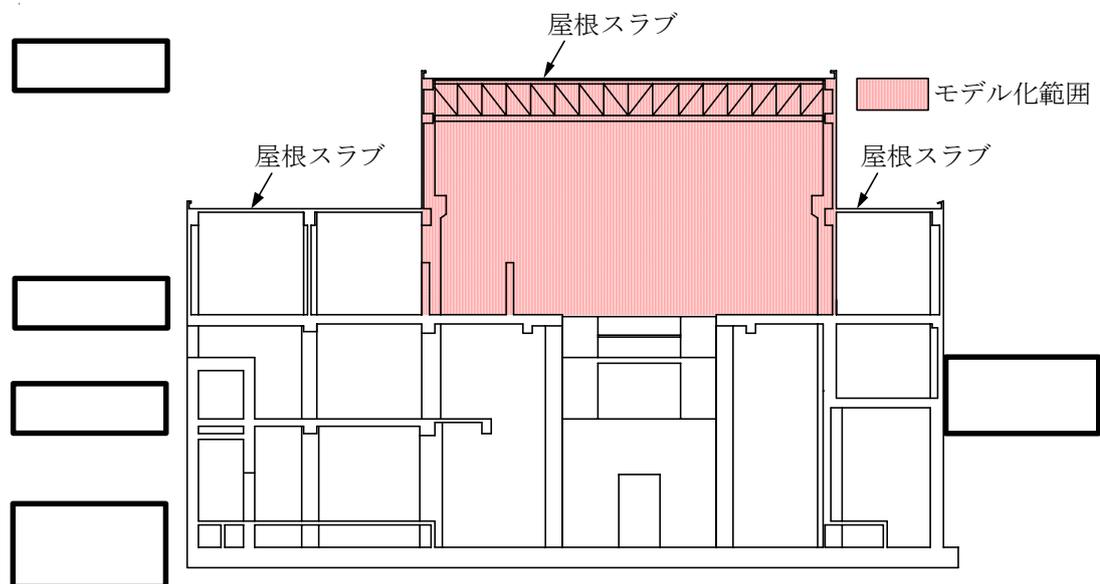


図 2-5 タービン建屋のモデル化範囲

(2) 使用要素

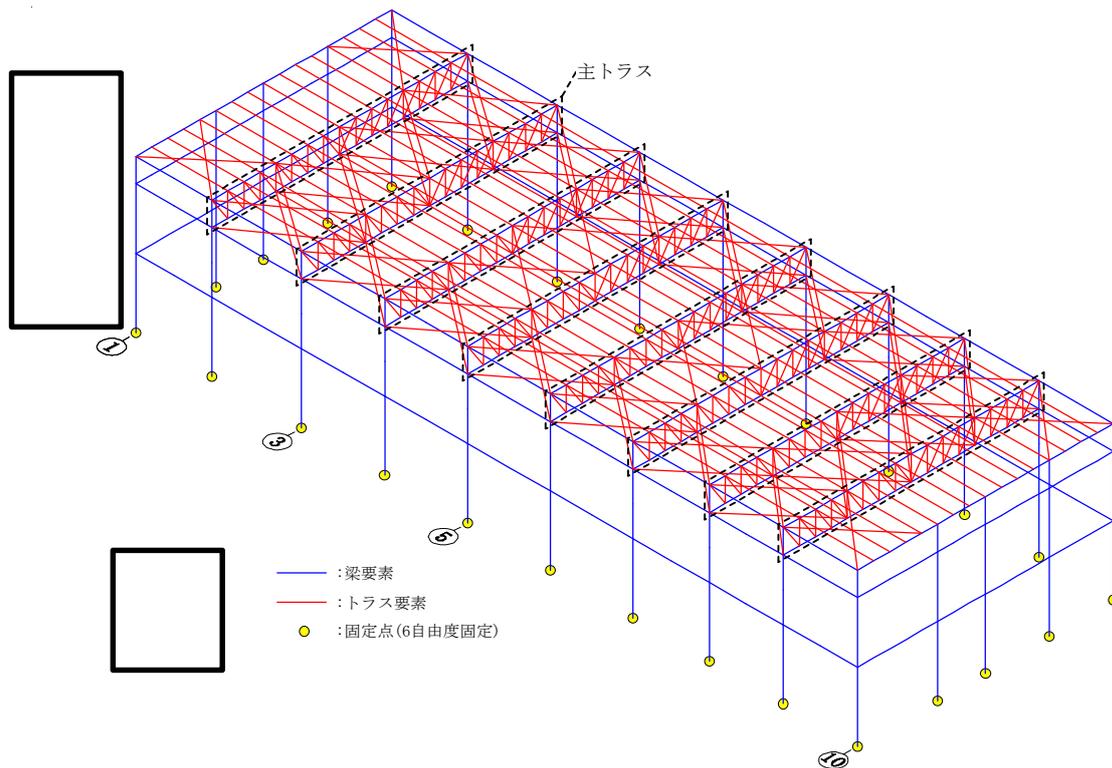
本解析で用いる使用要素を表 2.2-1 に示す。なお、3D-FEM モデルは主トラス架構に生じる曲げモーメントにより主トラス上弦材が負担する軸力を適切に評価するため、屋根スラブをシェル要素でモデル化するとともに、主トラス端部の柱による曲げ拘束を適切に評価するため耐震壁もシェル要素でモデル化する。鉄骨部及び鉄筋コンクリート部の柱・梁をモデル化した梁要素及びトラス要素の解析モデル概要と、屋根スラブ及び耐震壁をモデル化したシェル要素を加えた全要素の解析モデル概要を図 2.2-2 に示す。

鉄骨部では、主トラス弦材及び上弦面つなぎ梁は梁要素を、主トラス斜材、束材、母屋及び上弦面水平ブレースはトラス要素を用いる。

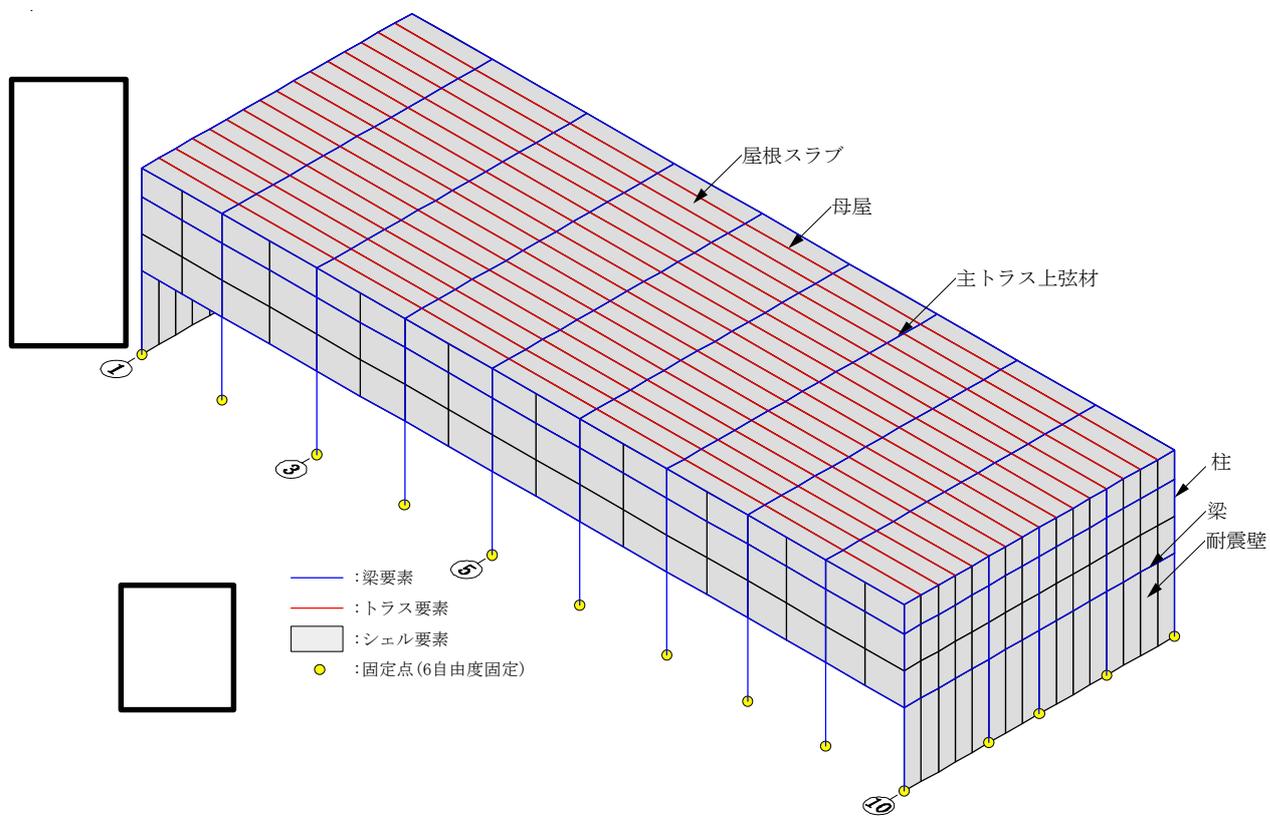
鉄筋コンクリート部では、耐震壁及び屋根トラスはシェル要素を、柱及び梁については梁要素を用いる。

表 2.2-1 本解析で用いる使用要素（タービン建屋）

鉄骨部	主トラス弦材	梁要素
	主トラス斜材・束材	トラス要素
	母屋	
	下弦面つなぎ梁	
	水平ブレース	
鉄筋コンクリート部	耐震壁	シェル要素
	屋根スラブ	
	柱・梁	梁要素



(a) 梁要素・トラス要素



(b) 全要素

図 2.2-2 解析モデルの概要 (タービン建屋)

(3) 境界条件及び拘束条件

主トラス各部材のモデル化寸法と接続条件を図 2.2-3 に、検討部材の断面形状を表 2-5 に示す。

本解析モデルは、EL. 18.0m 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。また、EL. 28.0m の柱・梁の節点は、屋根スラブの拘束を考慮し、Y(NS)方向の並進自由度を拘束したピン・ローラー支持とした。

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もしく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・束材と上下弦材はピン接合とする。

シェル要素と梁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し、鉄骨材とスラブは完全に固着しているものとして解析を実施している。

また、主トラス上弦材、下弦材、斜材、束材は部材芯位置でモデル化することを基本とするが、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。

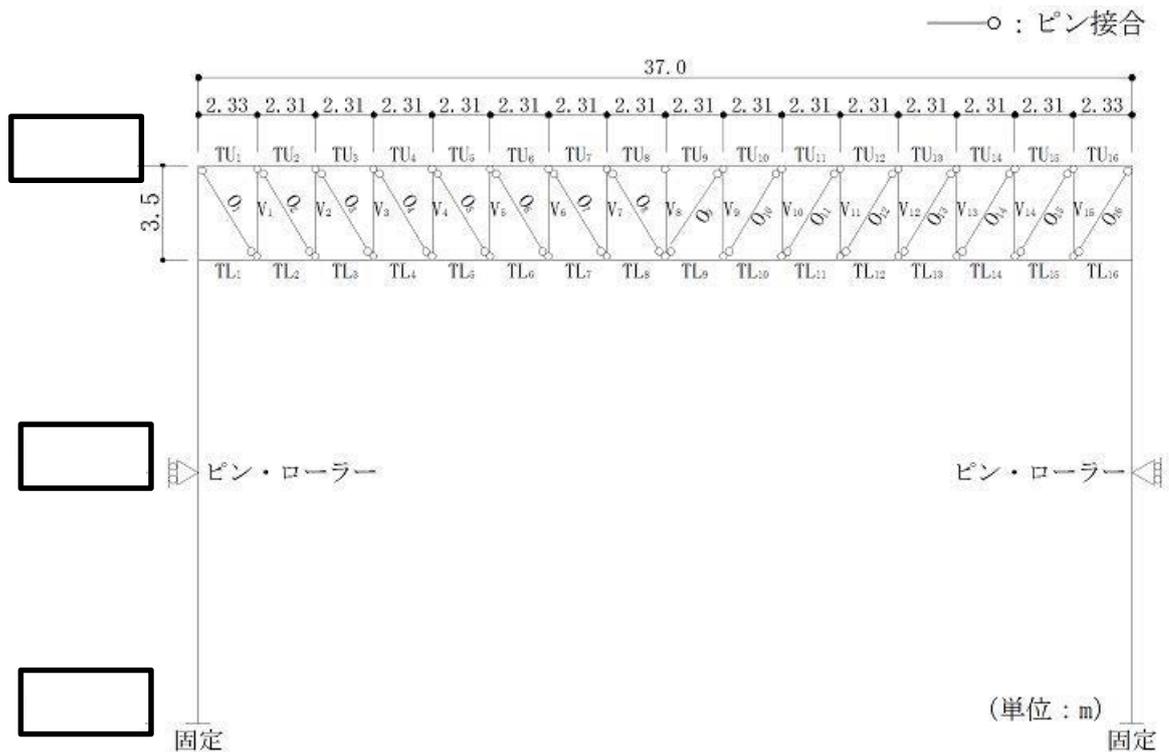


図 2.2-3 解析モデルにおける部材の接続条件 (タービン建屋, 8 通り*)

注記 * : 全通りの断面が同じため代表として 8 通りを示す。

表 2.2-2 検討部材の形状・寸法（タービン建屋）

部位	部材番号	形状寸法	断面積 A (cm ²)	断面 2 次 モーメント I (cm ⁴)	材質
上弦材	TU ₁ ~TU ₁₆	H-428×407×20×35	360.7	119000	SS400 (SS41)
下弦材	TL ₁ ~T ₁₆	H-428×407×20×35	360.7	119000	
斜材	O ₁ ~O ₃ , O ₁₄ ~O ₁₆	2Ls-200×200×20	152.0	—	
	O ₄ , O ₅ , O ₁₂ , O ₁₃	2Ls-150×150×19	106.8	—	
	O ₆ , O ₁₁ ,	2Ls-130×130×12	59.52	—	
	O ₇ ~O ₁₀	2Ls-100×100×10	38.0	—	
束材	V ₁ , V ₂ , V ₁₄ , V ₁₅	2Ls-200×200×20	152.0	—	
	V ₃ , V ₄ , V ₁₂ , V ₁₃	2Ls-200×200×15	115.5	—	
	V ₅ , V ₆ , V ₁₀ , V ₁₁	2Ls-150×150×15	85.48	—	
	V ₇ ~V ₉	2Ls-130×130×9	45.48	—	

(4) 荷重の入力方法

屋根に作用する鉛直荷重を表 2.2-3 に、荷重の入力方法の概要を図 2.2-4 に示す。屋根に作用する鉛直荷重は、応力解析において屋根面全体に等分布の面荷重として作用させる。その他の固定荷重（外周梁、外壁）は、外周梁に等分布の線荷重として作用させる。なお、その他の固定荷重は質点系地震応答解析モデルの質点重量より、表 1.2-3 に示す固定荷重と積載荷重を除いた重量を外周梁の長さに応じて分配した。

表 2.2-3 屋根に作用させる鉛直荷重（タービン建屋）

固定荷重	屋根スラブ	454 kgf/m ²
	トラス鋼材	125 kgf/m ²
	合計	579 kgf/m ² ⇒ 5680 N/m ²
積載荷重（除灰時荷重）		1000 N/m ²
積雪荷重		210 N/m ²
降下火砕物堆積による鉛直荷重		7355 N/m ²

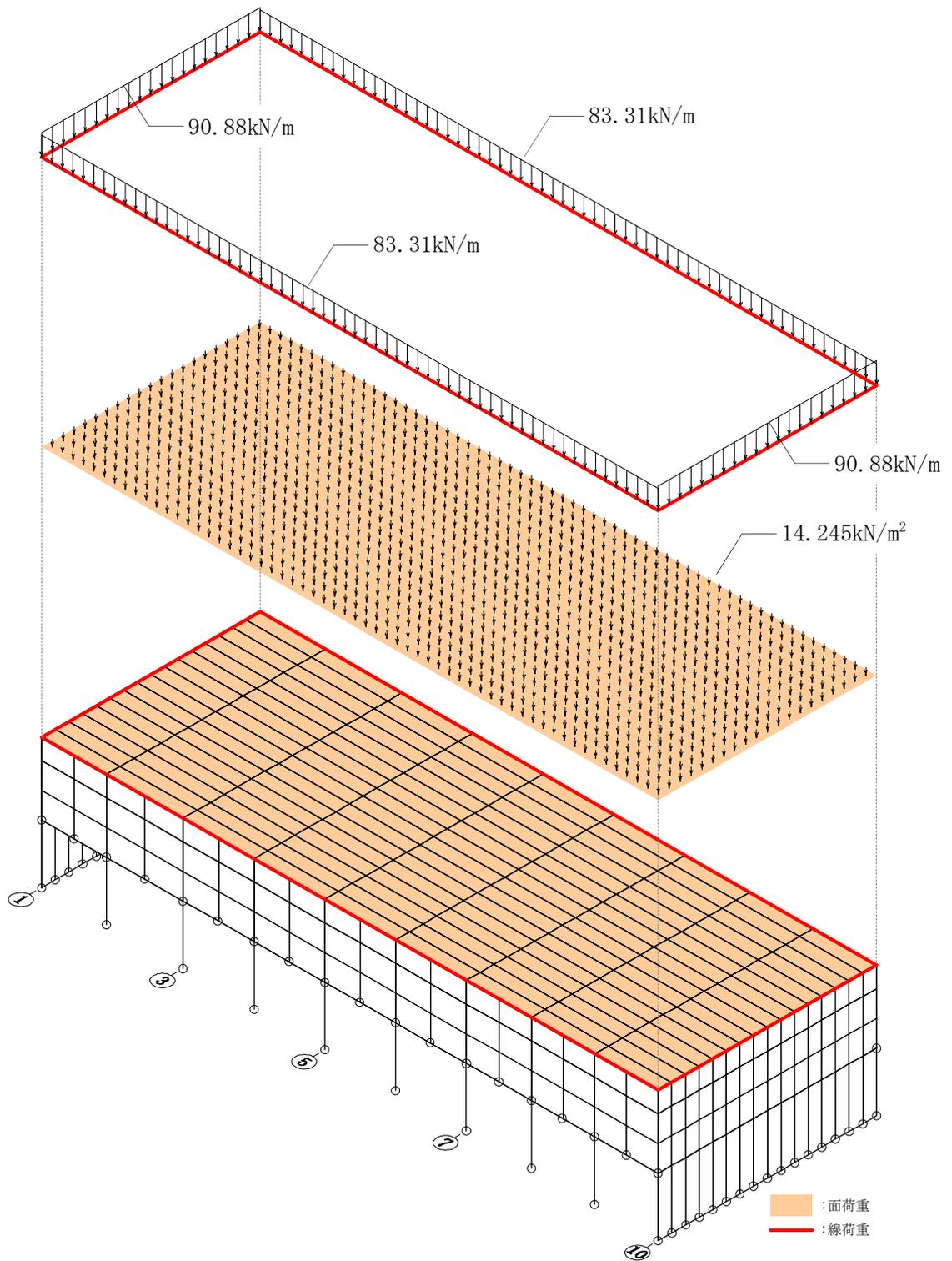


図 2.2-4 荷重の入力方法の概要 (タービン建屋)

2.3 評価対象部位の代表性について

(1) 屋根スラブ

タービン建屋の屋根スラブには、主トラス上のスラブ (EL. 40.45m) と、鉄筋コンクリート躯体上のスラブ (EL. 28.0m, 33.0m) がある。

主トラス上の屋根スラブ (EL. 40.45 m) については、母屋で支持された単位幅の1方向スラブを取り出し、等分布荷重を受ける両端固定梁として評価を行う。屋根スラブは単一断面であり、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。

図 2.3-1 に評価対象として抽出した最も支持スパンの大きい屋根スラブ位置を示す。

一方、図 2.3-2 に示すように、鉄筋コンクリート躯体上の屋根スラブ (EL. 28.0 m, 33.0 m) は、鉄筋コンクリートの大梁または壁で支持された四辺固定の長方形版として評価を行う。屋根スラブは単一断面であり、屋根面に作用する荷重は屋根面全体で均一な等分布荷重であるため、支持スパンが縦横で最大の屋根スラブが、最も厳しい条件であると判断できる。

図 2.3-2 に評価対象として抽出した最も支持スパンの大きい屋根スラブ位置を示す。NS、EW 方向の支持スパンともに最大 (NS : 11.0m、EW : 13.0m) である。

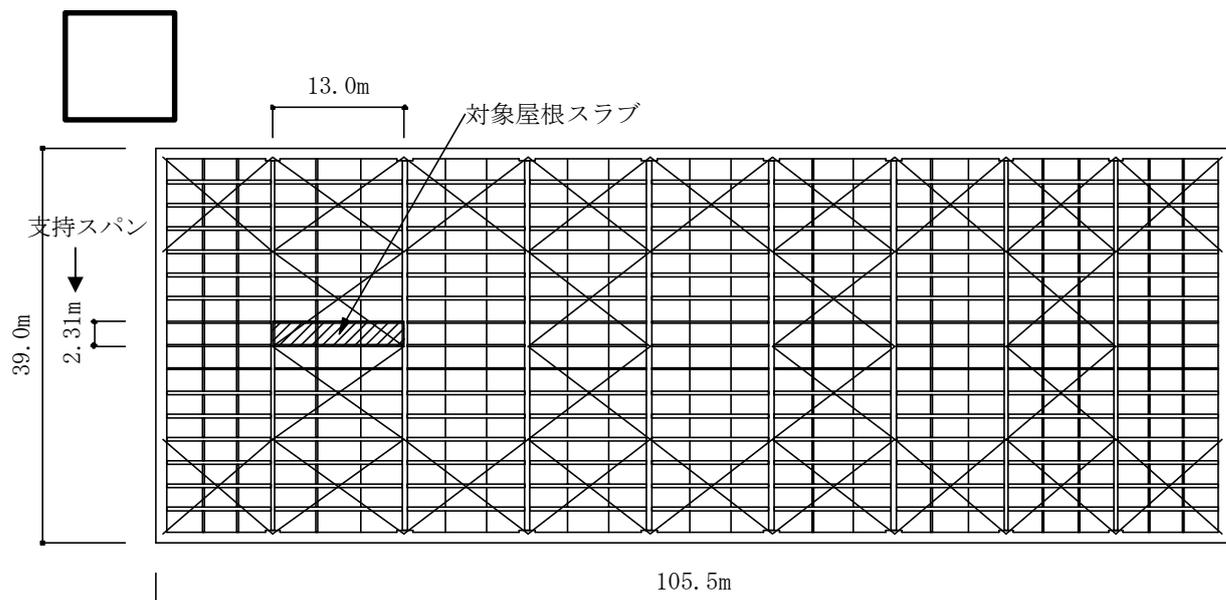


図 2.3-1 タービン建屋 屋根スラブ評価部材の位置 (EL.)

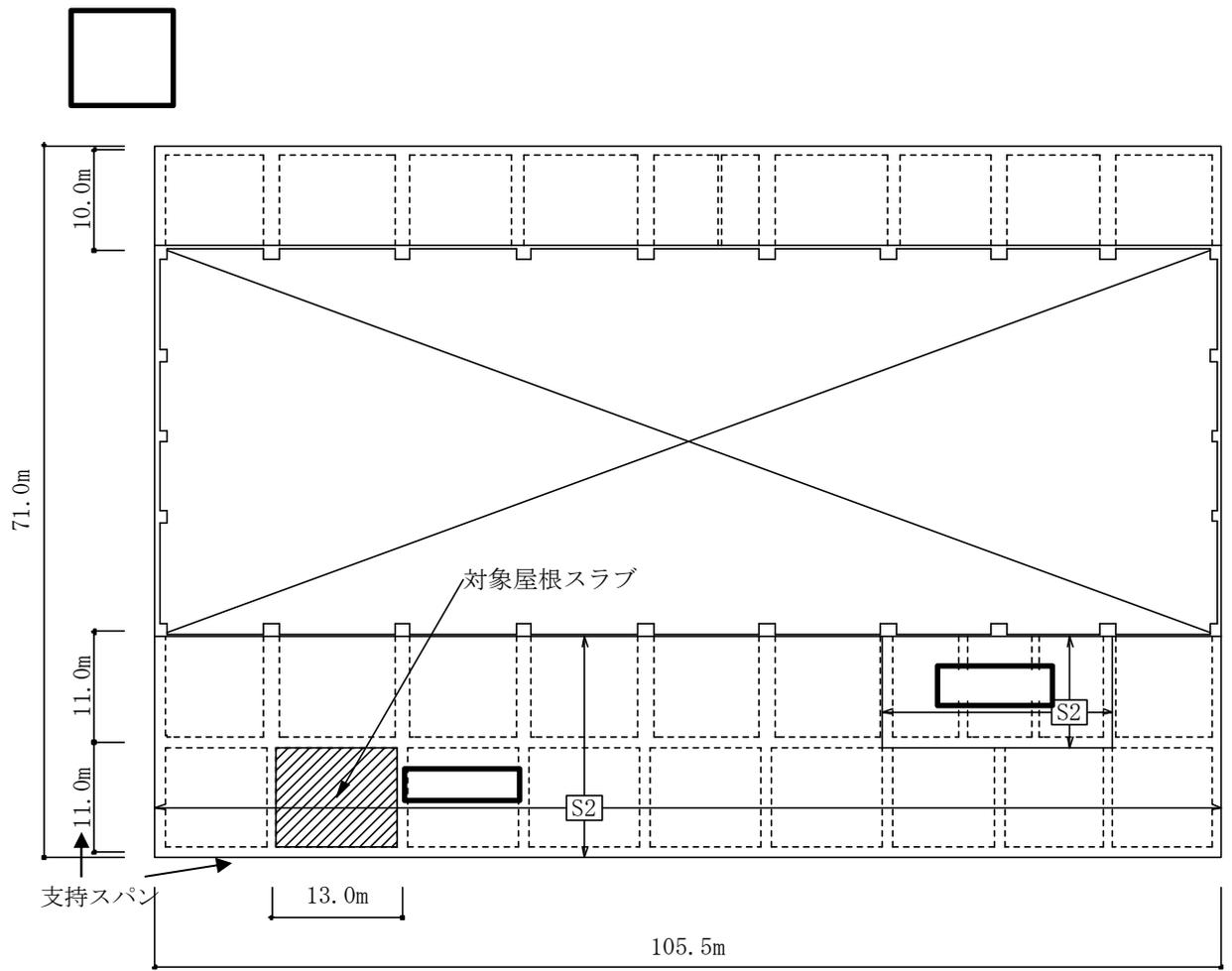


図 2.3-2 タービン建屋 屋根スラブ評価部材の位置 (EL.)

(2) 主トラス

V-3-別添 2-1-6「建屋の強度計算書」には、降下火砕物に対する主トラスの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。

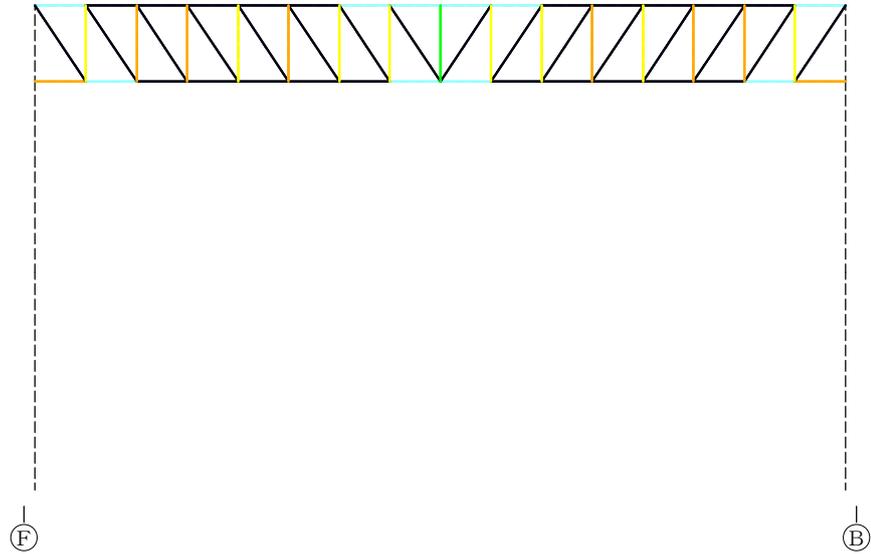
強度計算書に記載したタービン建屋主トラスの評価結果を表 2.3-1 に示す。また、図 2.3-3～図 2.3-10 に通りごとに全ての主トラス部材の検定値を示す。図には、各部位の最大検定値を赤枠で囲い示した。上下弦材及び斜材・束材は、3 通りにおいて検定値が最大となる部材があり、それらの値は表 2.3-1 の値に整合している。

表 2.3-1 タービン建屋 主トラスの評価結果

部位		発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容値* (N/mm ²)	検定値
EL. 	上弦材	圧縮	40.9	257	0.37
		曲げ	49.2	255	
	下弦材	圧縮	68.0	154	0.92
		曲げ	116.3	242	
	斜材	引張	229.3	258	0.90
	束材	圧縮	171.4	176	0.98

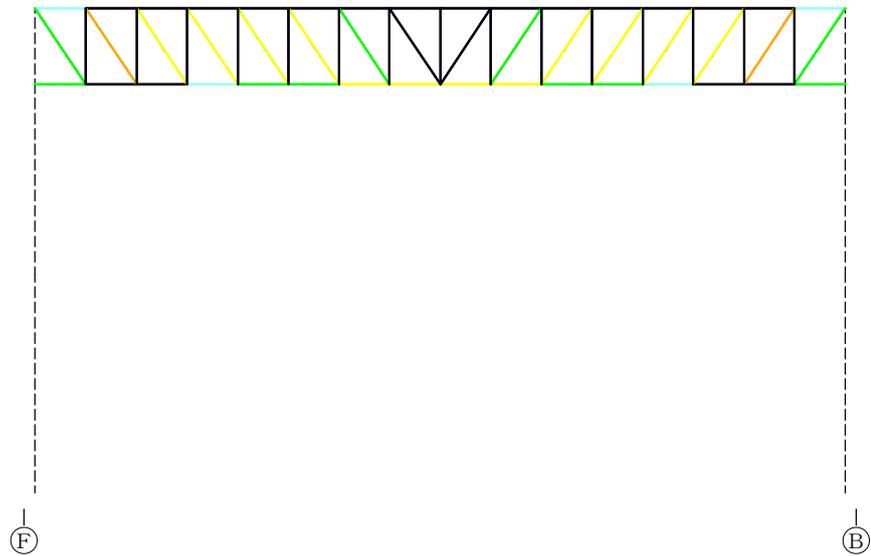
注記 * : 「鋼構造設計規準」の短期許容応力度の評価式に平成 12 年建設省告示第 2464 号に基づき F 値×1.1 を適用

- 検定値 < 0.2
- 0.2 ≤ 検定値 < 0.4
- 0.2 ≤ 検定値 < 0.6
- 0.6 ≤ 検定値 < 0.8
- 0.8 ≤ 検定値 < 1.0
- 1.0 ≤ 検定値



上弦材	0.32	0.16	0.09	0.14	0.16	0.16	0.23	0.30	0.30	0.23	0.16	0.16	0.14	0.09	0.16	0.32
斜材	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
束材		0.65	0.86	0.82	0.72	0.86	0.61	0.62	0.50	0.61	0.61	0.86	0.72	0.82	0.87	0.65
下弦材	0.84	0.28	0.04	0.08	0.08	0.10	0.15	0.24	0.24	0.15	0.10	0.08	0.08	0.04	0.29	0.84

(a) 圧縮 (曲げ圧縮)

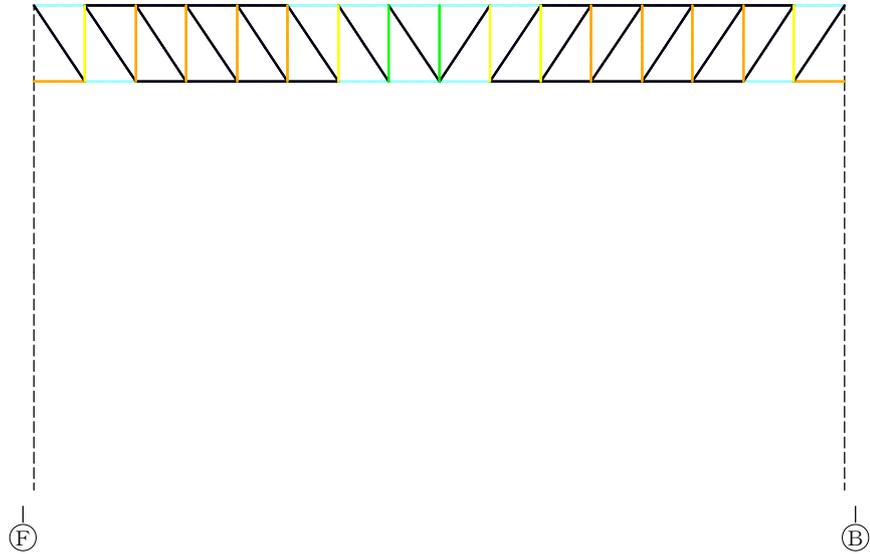


上弦材	0.32	0.12	0.02	0.05	0.05	0.04	0.11	0.17	0.17	0.11	0.04	0.05	0.05	0.02	0.12	0.32
斜材	0.58	0.80	0.63	0.71	0.61	0.68	0.57	0.16	0.16	0.57	0.69	0.61	0.71	0.63	0.80	0.58
束材		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
下弦材	0.40	0.10	0.12	0.30	0.41	0.52	0.62	0.73	0.73	0.62	0.52	0.41	0.30	0.12	0.10	0.40

(b) 引張 (曲げ引張) : 最大検定比部材

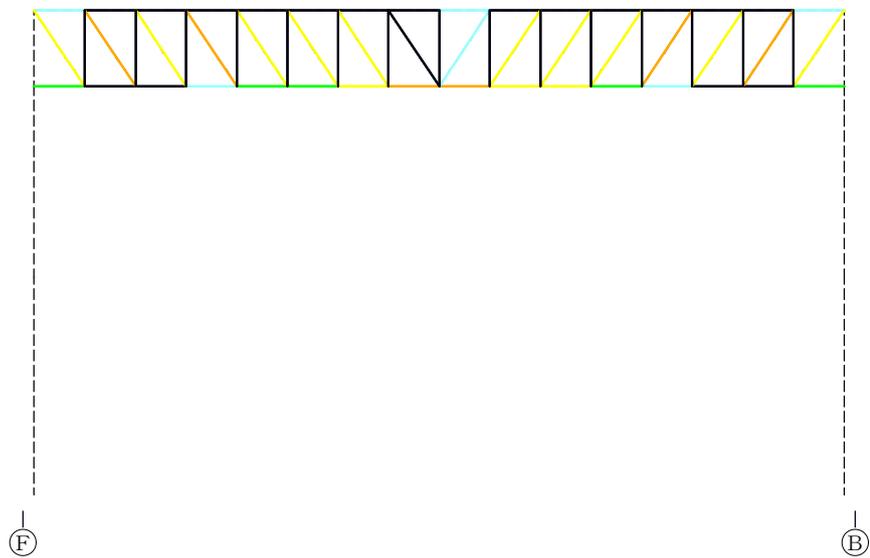
図 2.3-3 主トラスの検定比 (2通り)

- 検定値 < 0.2
- 0.2 ≤ 検定値 < 0.4
- 0.4 ≤ 検定値 < 0.6
- 0.6 ≤ 検定値 < 0.8
- 0.8 ≤ 検定値 < 1.0
- 1.0 ≤ 検定値



上弦材	0.34	0.18	0.10	0.16	0.19	0.21	0.28	0.34	0.36	0.28	0.19	0.19	0.16	0.11	0.18	0.34
斜材	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
束材		0.72	0.96	0.92	0.80	0.98	0.65	0.40	0.53	0.72	0.69	0.97	0.80	0.92	0.96	0.71
下弦材	0.93	0.31	0.04	0.09	0.09	0.10	0.21	0.25	0.24	0.17	0.11	0.09	0.09	0.04	0.30	0.92

(a) 圧縮 (曲げ圧縮)

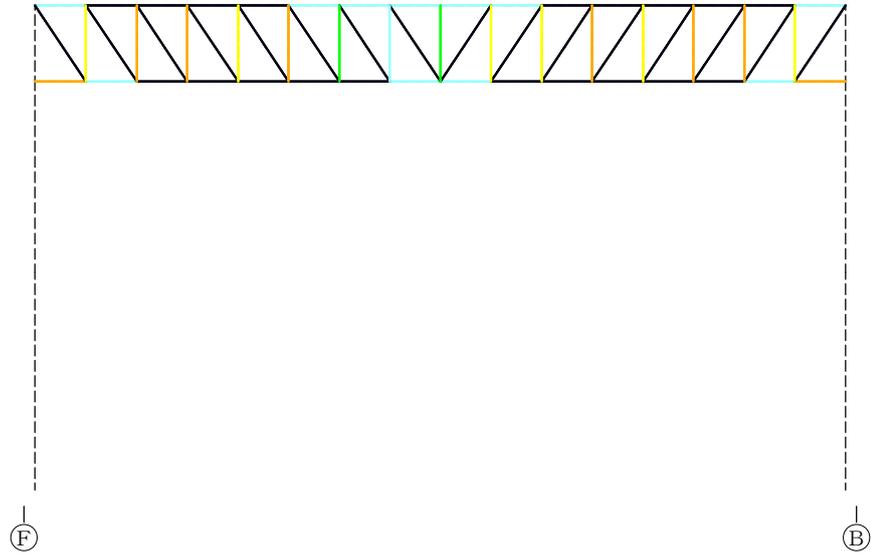


上弦材	0.33	0.13	0.02	0.05	0.06	0.06	0.12	0.18	0.20	0.12	0.04	0.06	0.05	0.02	0.13	0.33
斜材	0.64	0.89	0.71	0.80	0.69	0.77	0.68	0.17	0.20	0.64	0.78	0.68	0.80	0.70	0.89	0.64
束材		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
下弦材	0.46	0.11	0.13	0.34	0.46	0.58	0.74	0.80	0.80	0.70	0.60	0.47	0.34	0.14	0.11	0.45

(b) 引張 (曲げ引張) 0.36 : 最大検定比部材

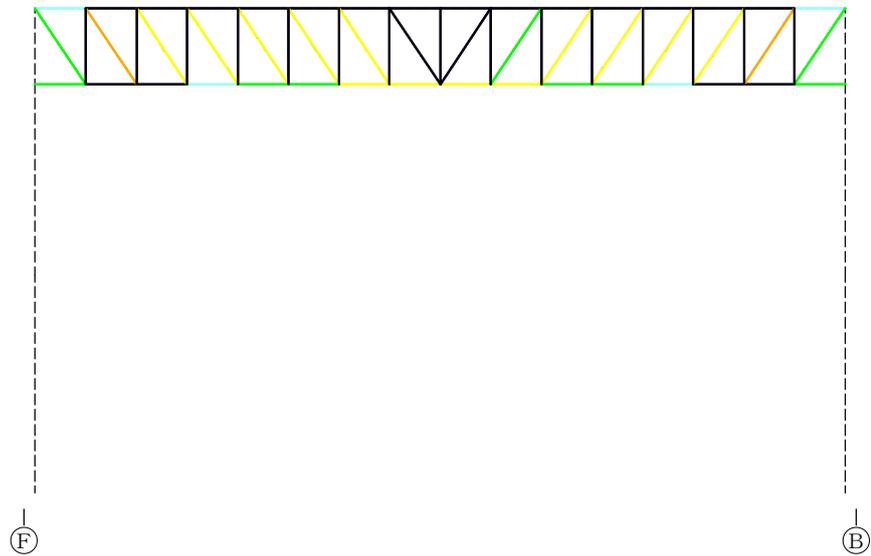
図 2.3-4 主トラスの検定比 (3 通り)

- 検定値 < 0.2
- 0.2 ≤ 検定値 < 0.4
- 0.4 ≤ 検定値 < 0.6
- 0.6 ≤ 検定値 < 0.8
- 0.8 ≤ 検定値 < 1.0
- 1.0 ≤ 検定値



上弦材	0.31	0.17	0.10	0.16	0.18	0.20	0.26	0.32	0.33	0.26	0.19	0.18	0.16	0.10	0.17	0.31
斜材	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
束材		0.66	0.88	0.85	0.73	0.89	0.59	0.36	0.47	0.65	0.63	0.88	0.73	0.84	0.88	0.66
下弦材	0.86	0.28	0.04	0.09	0.09	0.10	0.19	0.23	0.22	0.16	0.11	0.09	0.09	0.04	0.27	0.85

(a) 圧縮 (曲げ圧縮)

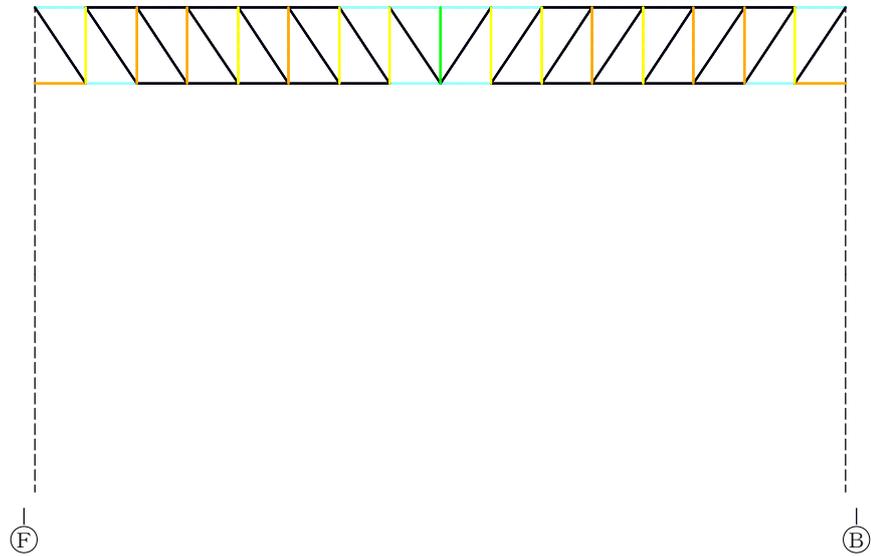


上弦材	0.30	0.12	0.02	0.05	0.05	0.06	0.11	0.16	0.18	0.11	0.04	0.06	0.05	0.02	0.12	0.30
斜材	0.59	0.82	0.65	0.73	0.63	0.69	0.62	0.16	0.18	0.58	0.70	0.62	0.73	0.65	0.82	0.59
束材		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
下弦材	0.43	0.10	0.13	0.32	0.44	0.55	0.69	0.74	0.74	0.65	0.56	0.44	0.32	0.13	0.10	0.42

(b) 引張 (曲げ引張) : 最大検定比部材

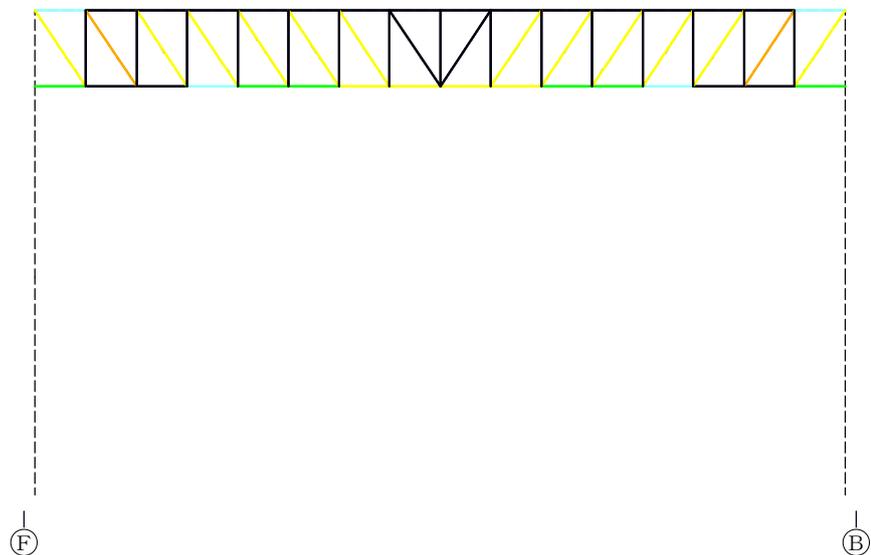
図 2.3-5 主トラスの検定比 (4 通り)

- 検定値 < 0.2
- 0.2 ≤ 検定値 < 0.4
- 0.4 ≤ 検定値 < 0.6
- 0.6 ≤ 検定値 < 0.8
- 0.8 ≤ 検定値 < 1.0
- 1.0 ≤ 検定値



上弦材	0.32	0.17	0.10	0.16	0.18	0.19	0.27	0.34	0.34	0.27	0.19	0.18	0.16	0.10	0.17	0.32
斜材	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
束材		0.68	0.90	0.87	0.76	0.91	0.65	0.66	0.53	0.66	0.65	0.91	0.76	0.87	0.90	0.68
下弦材	0.87	0.28	0.04	0.09	0.09	0.11	0.17	0.26	0.26	0.17	0.11	0.09	0.09	0.04	0.28	0.87

(a) 圧縮 (曲げ圧縮)

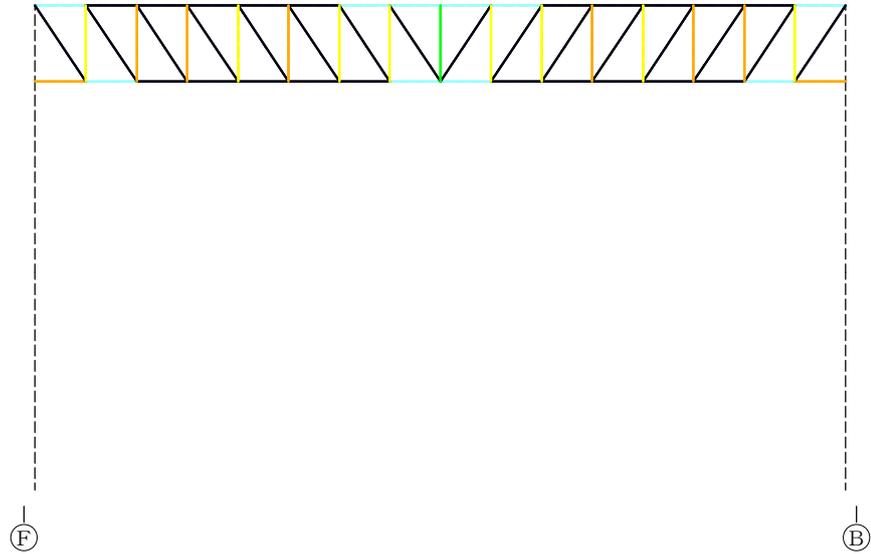


上弦材	0.31	0.13	0.02	0.05	0.06	0.04	0.11	0.18	0.18	0.11	0.04	0.06	0.05	0.02	0.13	0.31
斜材	0.61	0.84	0.67	0.75	0.64	0.73	0.61	0.17	0.17	0.61	0.73	0.64	0.75	0.67	0.84	0.61
束材		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
下弦材	0.43	0.10	0.13	0.33	0.45	0.57	0.67	0.79	0.79	0.67	0.57	0.45	0.33	0.13	0.10	0.43

(b) 引張 (曲げ引張) : 最大検定比部材

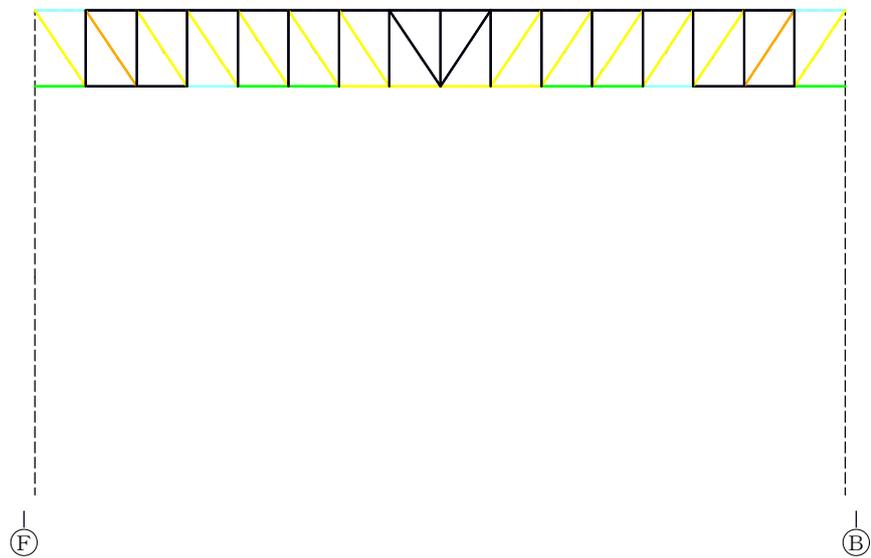
図 2.3-6 主トラスの検定比 (5 通り)

- 検定値 < 0.2
- 0.2 ≤ 検定値 < 0.4
- 0.4 ≤ 検定値 < 0.6
- 0.6 ≤ 検定値 < 0.8
- 0.8 ≤ 検定値 < 1.0
- 1.0 ≤ 検定値



上弦材	0.32	0.17	0.10	0.16	0.18	0.19	0.26	0.33	0.33	0.26	0.19	0.18	0.16	0.10	0.17	0.32
斜材	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
束材		0.68	0.90	0.86	0.75	0.90	0.64	0.65	0.53	0.65	0.64	0.90	0.75	0.86	0.90	0.68
下弦材	0.87	0.28	0.04	0.09	0.09	0.11	0.16	0.25	0.25	0.16	0.11	0.09	0.09	0.04	0.28	0.87

(a) 圧縮 (曲げ圧縮)

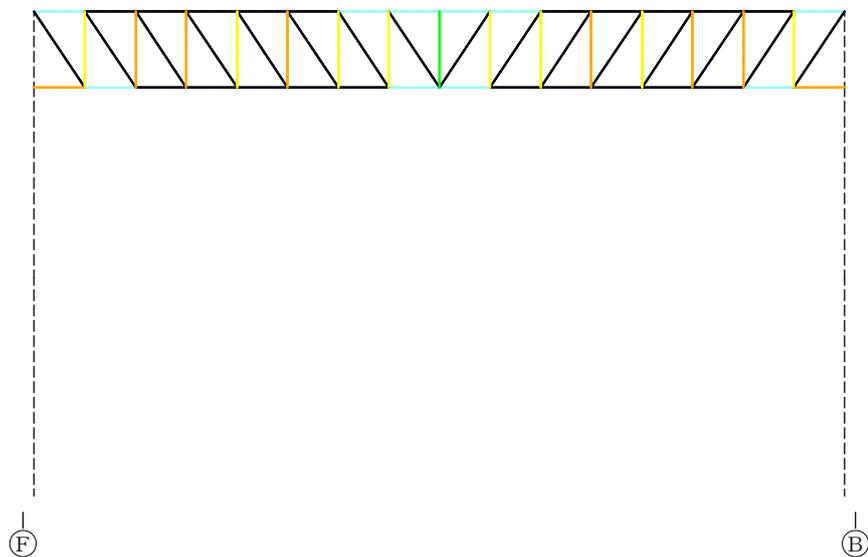


上弦材	0.31	0.12	0.02	0.05	0.06	0.04	0.11	0.18	0.18	0.11	0.04	0.06	0.05	0.02	0.13	0.31
斜材	0.60	0.84	0.66	0.74	0.64	0.73	0.60	0.17	0.17	0.60	0.72	0.64	0.74	0.66	0.84	0.60
束材		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
下弦材	0.43	0.10	0.13	0.32	0.44	0.56	0.67	0.78	0.78	0.67	0.57	0.44	0.32	0.13	0.10	0.43

(b) 引張 (曲げ引張) : 最大検定比部材

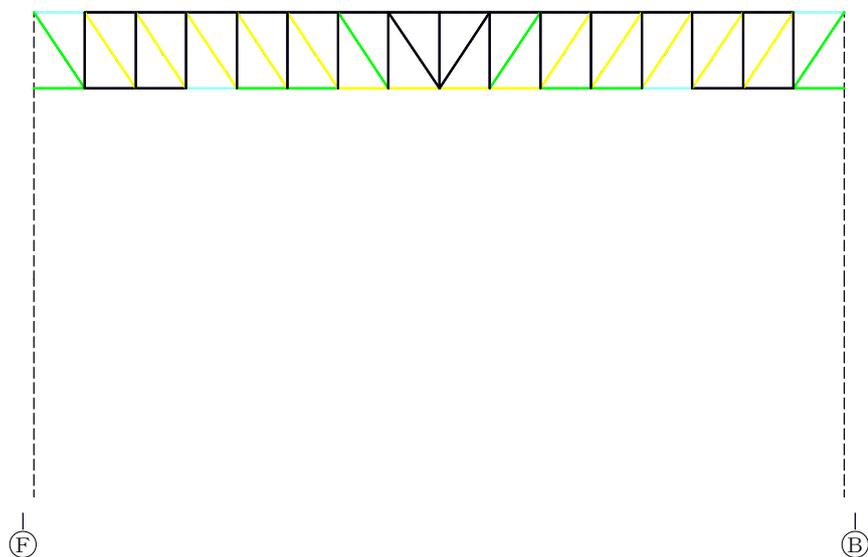
図 2.3-7 主トラスの検定比 (6 通り)

- 検定値 < 0.2
- 0.2 ≤ 検定値 < 0.4
- 0.4 ≤ 検定値 < 0.6
- 0.6 ≤ 検定値 < 0.8
- 0.8 ≤ 検定値 < 1.0
- 1.0 ≤ 検定値



上弦材	0.30	0.16	0.10	0.15	0.18	0.18	0.26	0.32	0.32	0.26	0.18	0.18	0.15	0.10	0.16	0.30
斜材	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
束材		0.64	0.85	0.81	0.71	0.85	0.60	0.61	0.50	0.61	0.60	0.85	0.71	0.81	0.85	0.64
下弦材	0.82	0.26	0.04	0.08	0.08	0.10	0.16	0.24	0.24	0.16	0.10	0.08	0.08	0.04	0.27	0.82

(a) 圧縮 (曲げ圧縮)

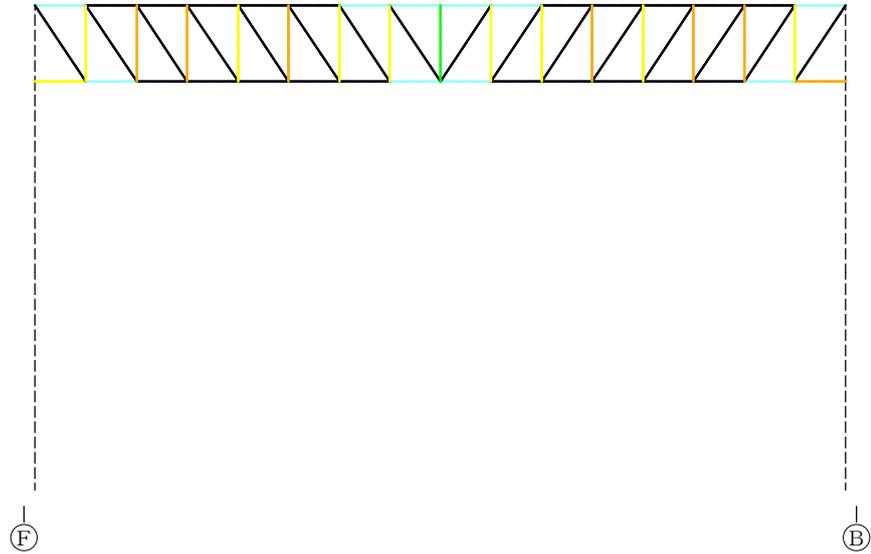


上弦材	0.29	0.12	0.02	0.05	0.05	0.04	0.11	0.17	0.17	0.11	0.04	0.05	0.05	0.02	0.12	0.29
斜材	0.57	0.79	0.62	0.70	0.60	0.68	0.57	0.16	0.16	0.57	0.68	0.60	0.70	0.62	0.79	0.57
束材		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
下弦材	0.41	0.09	0.12	0.31	0.42	0.53	0.63	0.74	0.74	0.63	0.53	0.42	0.31	0.12	0.10	0.41

(b) 引張 (曲げ引張) : 最大検定比部材

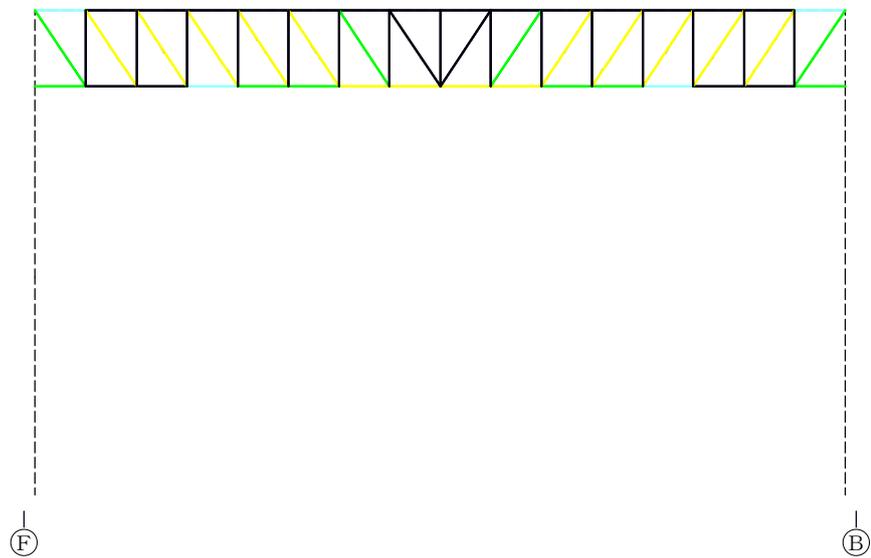
図 2.3-8 主トラスの検定比 (7 通り)

- 検定値 < 0.2
- 0.2 ≤ 検定値 < 0.4
- 0.2 ≤ 検定値 < 0.6
- 0.6 ≤ 検定値 < 0.8
- 0.8 ≤ 検定値 < 1.0
- 1.0 ≤ 検定値



上弦材	0.29	0.16	0.10	0.15	0.18	0.19	0.26	0.32	0.33	0.26	0.18	0.18	0.15	0.10	0.16	0.30
斜材	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
束材		0.63	0.83	0.80	0.70	0.84	0.60	0.60	0.50	0.62	0.61	0.85	0.71	0.81	0.84	0.63
下弦材	0.79	0.24	0.04	0.08	0.08	0.10	0.16	0.24	0.24	0.15	0.10	0.08	0.08	0.04	0.26	0.81

(a) 圧縮 (曲げ圧縮)

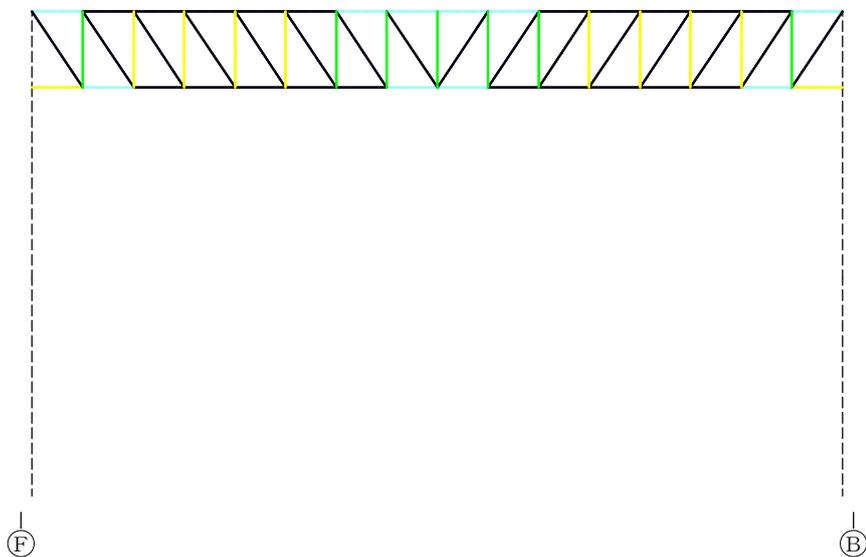


上弦材	0.29	0.12	0.02	0.05	0.05	0.04	0.11	0.17	0.17	0.11	0.04	0.05	0.05	0.02	0.12	0.29
斜材	0.56	0.78	0.61	0.69	0.60	0.67	0.56	0.15	0.17	0.57	0.69	0.60	0.70	0.62	0.78	0.56
束材		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
下弦材	0.40	0.09	0.13	0.31	0.41	0.53	0.62	0.73	0.73	0.62	0.52	0.41	0.31	0.12	0.09	0.40

(b) 引張 (曲げ引張) : 最大検定比部材

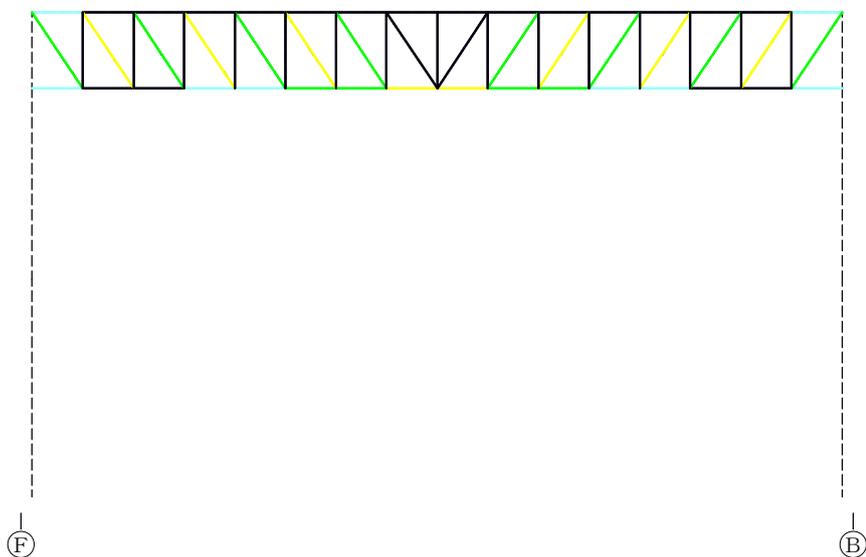
図 2.3-9 主トラスの検定比 (8 通り)

- 検定値 < 0.2
- 0.2 ≤ 検定値 < 0.4
- 0.4 ≤ 検定値 < 0.6
- 0.6 ≤ 検定値 < 0.8
- 0.8 ≤ 検定値 < 1.0
- 1.0 ≤ 検定値



上弦材	0.29	0.15	0.08	0.13	0.15	0.15	0.22	0.28	0.28	0.22	0.15	0.15	0.13	0.08	0.15	0.29
斜材	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
束材		0.58	0.77	0.74	0.64	0.76	0.54	0.55	0.45	0.55	0.54	0.76	0.64	0.74	0.77	0.58
下弦材	0.73	0.24	0.04	0.08	0.08	0.09	0.14	0.21	0.21	0.14	0.09	0.08	0.08	0.04	0.24	0.73

(a) 圧縮 (曲げ圧縮)



上弦材	0.29	0.11	0.02	0.05	0.05	0.04	0.10	0.15	0.15	0.10	0.04	0.05	0.05	0.02	0.11	0.29
斜材	0.52	0.72	0.56	0.63	0.54	0.61	0.51	0.14	0.15	0.51	0.61	0.54	0.63	0.56	0.72	0.52
束材		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
下弦材	0.36	0.09	0.11	0.28	0.37	0.48	0.56	0.66	0.66	0.56	0.47	0.37	0.28	0.11	0.09	0.36

(b) 引張 (曲げ引張) : 最大検定比部材

図 2.3-10 主トラスの検定比 (9 通り)

(3) 母屋

タービン建屋の母屋は主トラスで支持された等分布荷重を受ける両端ピン支持の単純梁として評価を行う。すべての母屋は表 2.3-2 に示す鉄骨部材を使用し同一断面であり、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母屋が最も厳しい条件であると判断できる。

図 2.3-10 に評価対象として抽出した最も支持スパンが長く、支配面積の大きな母屋の位置を示す。

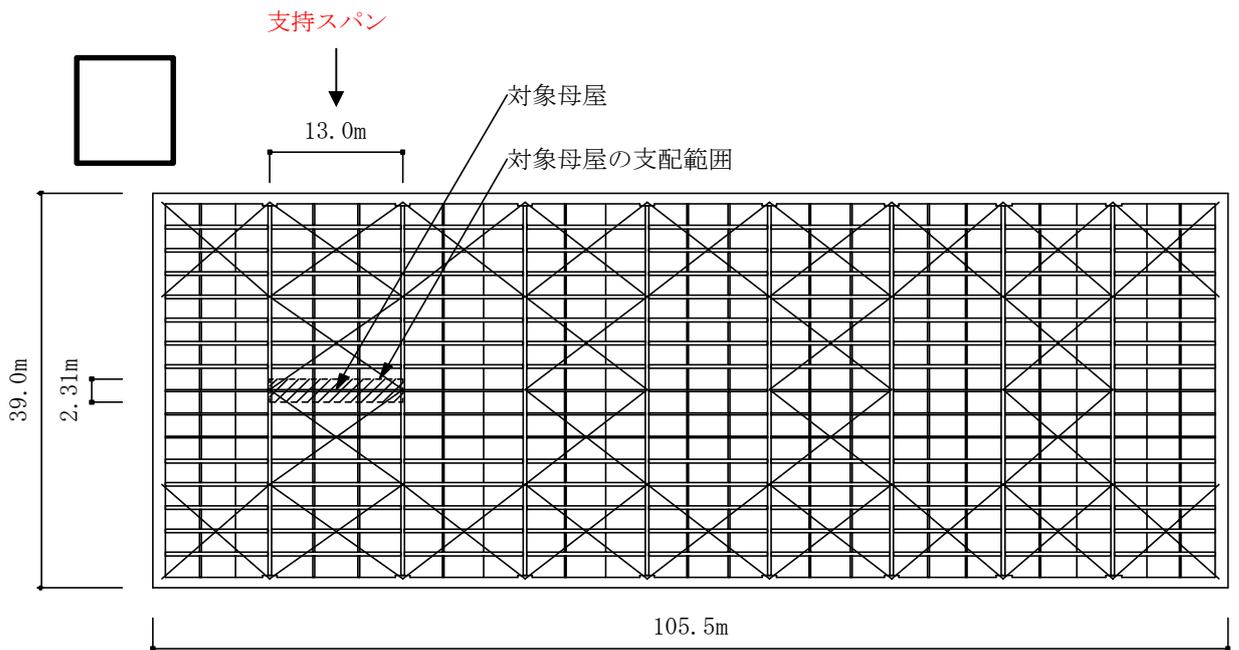


図 2.3-10 タービン建屋 母屋の評価部材

表 1.3-2 タービン建屋 母屋使用部材断面

部材断面	断面積 (mm ²)
H-396×302×12×19	161.9

1.4 主トラスの許容応力値について

表 1.4-1 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 1.4-1 タービン建屋 主トラスの評価結果

部位		発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)	検定値
EL. 	上弦材	圧縮	40.9	257	0.37
		曲げ	49.2	255	
	下弦材	圧縮	68.0	154	0.92
		曲げ	116.3	242	
	斜材	引張	229.3	258	0.90
	束材	圧縮	171.4	176	0.98

注記 * : 「鋼構造設計規準」の短期許容応力度の評価式に平成 12 年建設省告示第 2464 号に基づき F 値×1.1 を適用

(1) 評価式

a. 許容引張応力度

$$f_t = F / 1.5 \quad (1.4-1 \text{ 式})$$

ここに、

F : 鋼材の F 値

b. 許容圧縮応力度

$$f_c = \frac{\left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} F}{\nu} \quad (\lambda \leq \Lambda \text{ のとき}) \quad (1.4-2 \text{ 式})$$

$$f_c = \frac{0.277 F}{\left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2} \quad (\lambda > \Lambda \text{ のとき}) \quad (1.4-3 \text{ 式})$$

ここに、

λ : 圧縮材の細長比

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

E : ヤング係数

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

c. 許容曲げ応力度

$$f_b = \frac{1}{v} F \quad (\lambda_b \leq_p \lambda_b \text{ のとき}) \quad (1.4-4 \text{ 式})$$

$$f_b = \frac{\left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda_b - p \lambda_b}{e \lambda_b - p \lambda_b} \right) \right\}}{v} F \quad (p \lambda_b < \lambda_b \leq_e \lambda_b \text{ のとき}) \quad (1.4-5 \text{ 式})$$

$$f_b = \frac{1}{2.17 \lambda_b^2} F \quad (e \lambda_b < \lambda_b \text{ のとき}) \quad (1.4-6 \text{ 式})$$

ここに,

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

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

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

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

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

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

f_b : 許容圧縮応力度

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 : サンプナンのめじり定数 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。

部材	F 値 F (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 (mm ²)
H-428×407× 20×35	235	2.05×10 ⁵	7.90×10 ⁴	3.607×10 ⁴

断面 2 次 モーメント I _x (mm ⁴)	断面 2 次 モーメント I _y (mm ⁴)	断面係数 Z (mm ³)	座屈長 l _k (mm)	断面 2 次半径 i (mm)
1.190×10 ⁹	3.940×10 ⁸	5.570×10 ⁶	1501.5	181.6

細長比 λ (-)	限界細長比 Λ (-)	曲げ ねじり定数 I _w (mm ⁴)	ねじり定数 J (mm ⁶)	補正係数 C (-)
8.27	114.20	1.519×10 ¹³	1.259×10 ⁷	1.00

支点間距離 l _b (mm)	弾性横座屈 モーメント M _e (N・mm)	曲げ材の 細長比 λ _b (-)	塑性限界 細長比 _p λ _b (-)	弾性限界 細長比 _e λ _b (-)
2310	3.176×10 ¹⁰	0.21	0.30	1.29

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。

部材	F 値 F (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 (mm ²)
H-428×407× 20×35	235	2.05×10 ⁵	7.90×10 ⁴	3.607×10 ⁴

断面 2 次 モーメント I _x (mm ⁴)	断面 2 次 モーメント I _y (mm ⁴)	断面係数 Z (mm ³)	座屈長 l _k (mm)	断面 2 次半径 i (mm)
1.190×10 ⁹	3.940×10 ⁸	5.570×10 ⁶	9260	104.5

細長比 λ (-)	限界細長比 Λ (-)	曲げ ねじり定数 I _w (mm ⁴)	ねじり定数 J (mm ⁶)	補正係数 C (-)
88.60	114.20	1.519×10 ¹³	1.259×10 ⁷	1.52

支点間距離 l _b (mm)	弾性横座屈 モーメント M _e (N・mm)	曲げ材の 細長比 λ _b (-)	塑性限界 細長比 _p λ _b (-)	弾性限界 細長比 _e λ _b (-)
8960	5.637×10 ⁹	0.51	0.53	1.29

c. 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。

部材	F 値 F (N/mm ²)
2L _s -200× 200×15	235

d. 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。

部材	F 値 F (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 (mm ²)
2L _s -150× 150×15	235	2.05×10 ⁵	7.90×10 ⁴	8.548×10 ³

断面 2 次 モーメント I _x (mm ⁴)	断面 2 次 モーメント I (mm ⁴)	座屈長 l _k (mm)	断面 2 次半径 i (mm)	細長比 λ (-)
4.078×10 ⁷	1.776×10 ⁷	3500	45.6	76.79

限界細長比 Λ (-)
114.20

3. 使用済燃料乾式貯蔵建屋への強度計算に係る補足説明

3.1 概要

本資料は、降下火砕物及び積雪の堆積時の構造健全性において、応力解析モデルを用いた評価を行っている、使用済燃料乾式貯蔵建屋の応力解析手法についての概要を示すものである。

3.2 3D-FEM モデルの詳細説明

(1) モデル化の範囲

3D-FEM モデルのモデル化範囲を図 3.2-1 に示す。主トラスを含む上部構造 (EL. 8.30m～EL. 29.20m) 及び基礎スラブ (EL. 5.80m～EL. 8.30m) , 杭及び地盤 (EL. -15.90m～EL. 5.80m) の建屋全体をモデル化している。

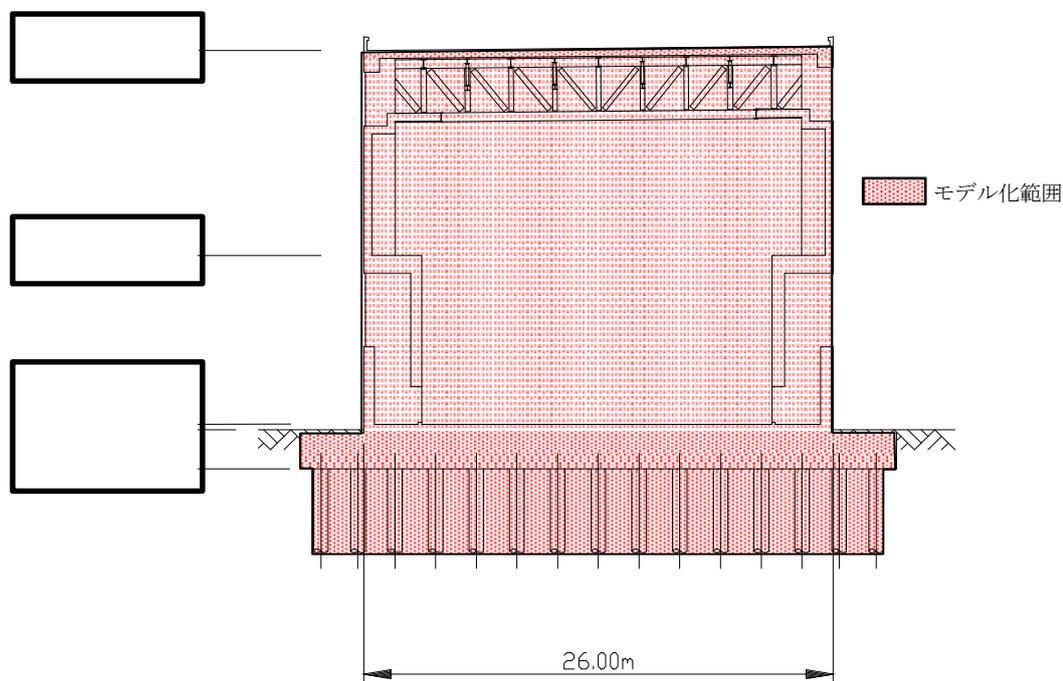


図 3.2-1 使用済燃料乾式貯蔵建屋のモデル化範囲

(2) 使用要素

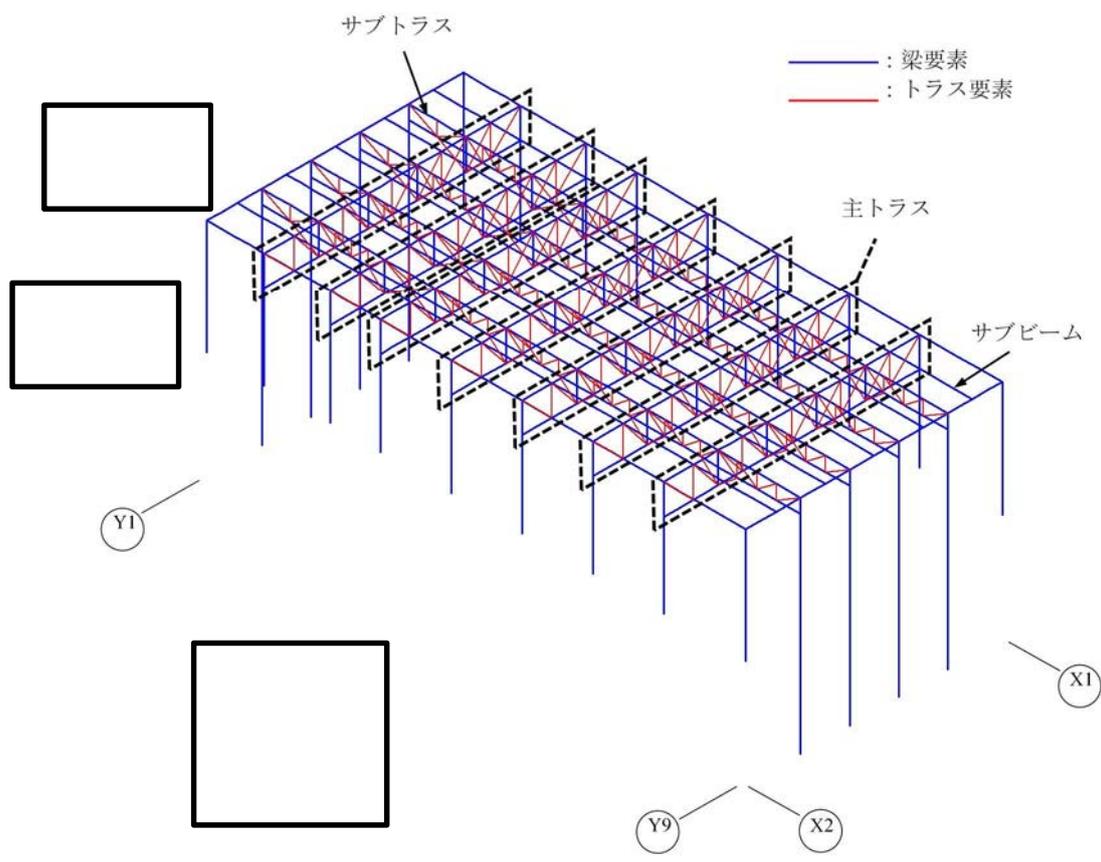
本解析で用いる使用要素を表 3.2-1 に示す。なお、3D-FEM モデルは主トラス架構に生じる曲げモーメントにより主トラス弦材が負担する軸力を適切に評価するため、屋根スラブをシェル要素でモデル化するとともに、主トラス端部の柱による曲げ拘束を適切に評価するため柱及び耐震壁をモデル化する。鉄骨部及び鉄筋コンクリート部の柱・梁をモデル化した梁要素及びトラス要素の解析モデル概要と、屋根スラブ及び耐震壁をモデル化したシェル要素を加えた全要素の解析モデル概要を図 3.2-2 に示す。なお、本 3D-FEM モデルは耐震評価モデルを兼用しているため、基礎スラブ及び杭をモデル化しているが、本評価において影響がある要素ではない。

鉄骨部では、主トラス弦材、サブトラス弦材、サブビームは梁要素を、主トラス斜材、垂直材及びサブトラス斜材、垂直材はトラス要素を用いる。

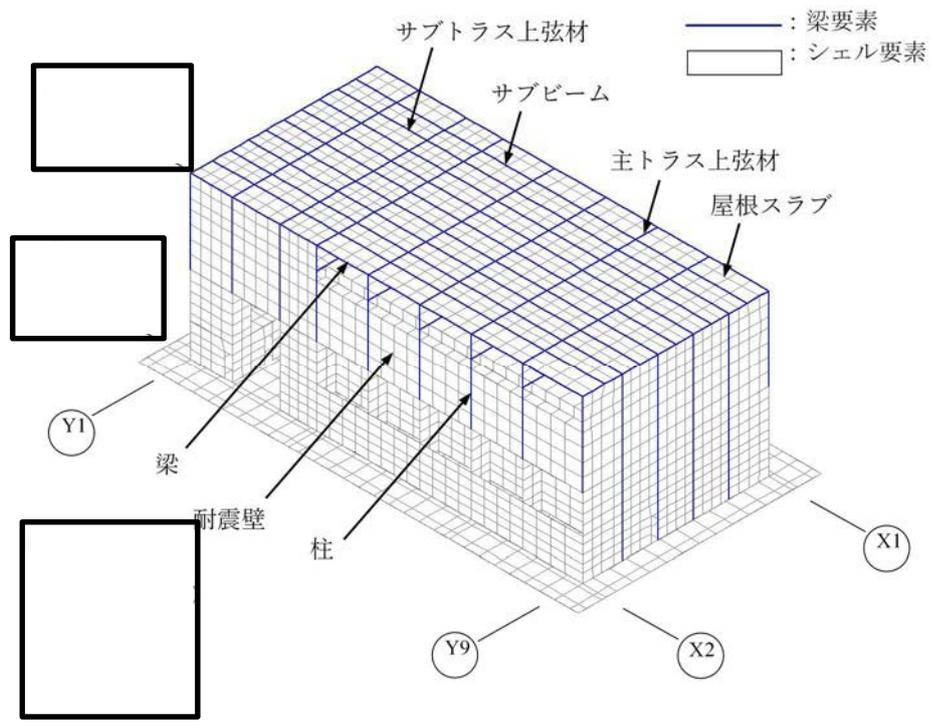
鉄筋コンクリート部では、耐震壁及び屋根スラブはシェル要素を、柱及び梁については梁要素を用いる。

表 3.2-1 使用要素（使用済燃料乾式貯蔵建屋）

鉄骨部	主トラス弦材	梁要素
	サブトラス弦材	
	サブビーム	
	主トラス斜材・垂直材	トラス要素
	サブトラス斜材・垂直材	
鉄筋コンクリート部	耐震壁	シェル要素
	屋根スラブ	
	基礎スラブ	
	柱・梁	梁要素
杭（鋼管杭）		ばね要素



(a) 梁要素・トラス要素



(b) 全要素

図 3. 2-2 解析モデルの概要 (使用済燃料乾式貯蔵建屋)

(3) 境界条件及び拘束条件

主トラス各部材のモデル化寸法と接続条件を図 3.2-3 に、検討部材の断面形状を表 3.2-2 に示す。

主トラス上下弦材の端部と柱との接合条件は剛接合とする。主トラス垂直材及び斜材の端部の接合条件はピン接合とする。

シェル要素と梁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し、鉄骨材と屋根スラブは完全に固着しているものとする。また、柱脚部は EL. 17.75m にて鉄筋コンクリート部材に固定する。

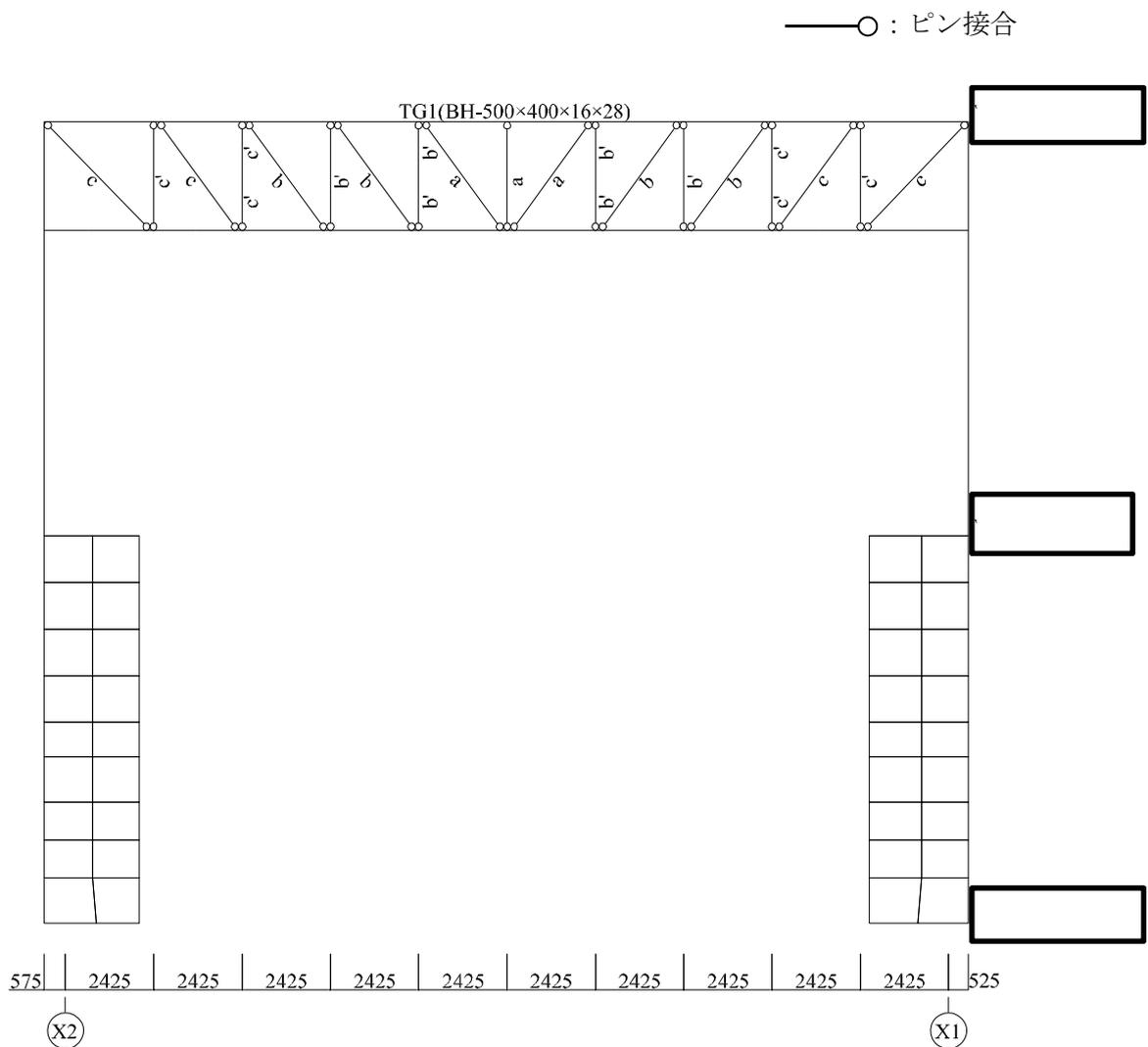


図 3.2-3 解析モデルにおける主トラス部材の接続条件* (使用済燃料乾式貯蔵建屋)

注記 *:モデルの主トラス部を記載

表 3.2-2 検討部材の形状・寸法（使用済燃料乾式貯蔵建屋）

部位	部材 番号	形状寸法	材質	断面積 A (cm ²)	断面 2 次 モーメント (cm ⁴)
上弦材	—	BH-500×400×16×28	SM400A	295.0	137000
下弦材	—	BH-500×400×16×28		295.0	137000
斜材	a	BH-250×250×9×14		92.18	—
	b	BH-300×300×12×16		130.9	—
	c	BH-350×350×12×19		173.9	40300
垂直材	a	BH-250×250×9×14		92.18	—
	b'	H-298×299×9×14		109.5	18600
	c'	H-344×348×10×16		144.0	32800

(4) 荷重の入力方法

屋根に作用する鉛直荷重を表 3.2-3 に、荷重の入力方法の概要を図 3.2-4 に示す。屋根に作用する鉛直荷重は、応力解析において屋根面全体に等分布荷重として作用させる。なお、その他の鉛直荷重（耐震壁，柱，梁等）については要素そのものに材料密度（単位体積重量）を与えることによって実状に即した荷重状況を再現している。

表 3.2-3 屋根に作用させる鉛直荷重（使用済燃料乾式貯蔵建屋）

固定荷重	屋根スラブ	1274 kgf/m ²
	トラス鋼材	150 kgf/m ²
	合計	1424 kgf/m ² →14000 N/m ²
積載荷重（除灰時荷重）		1000 N/m ²
積雪荷重		210 N/m ²
降下火砕物堆積による鉛直荷重		7355 N/m ²

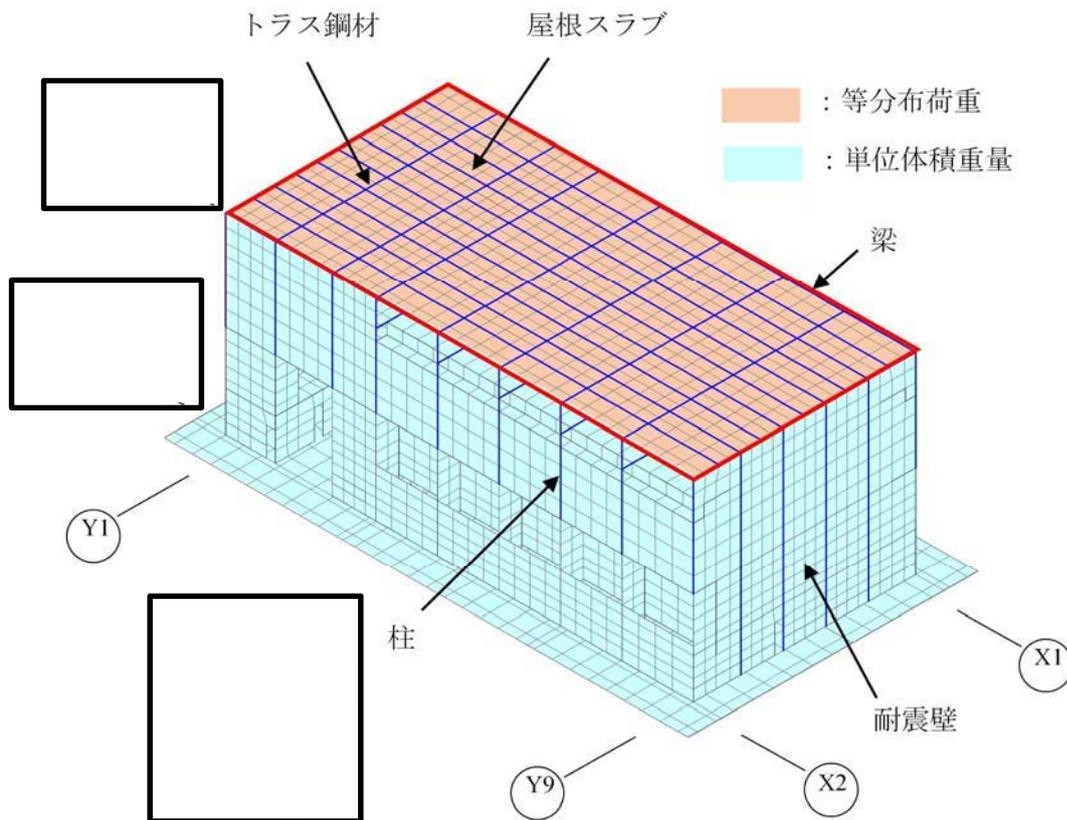


図 3.2-4 荷重の入力方法の概要（使用済燃料乾式貯蔵建屋）

3.3 評価対象部位の代表性について

(1) 屋根スラブ

使用済燃料乾式彫像建屋の屋根スラブは母屋で支持された単位幅の1方向スラブを取り出し、等分布荷重を受ける両端固定梁として評価を行う。屋根スラブは単一断面、単一支持スパン及び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、配筋量が最も少ない部位が最も厳しい条件であると判断できる。

図 3.3-1 に評価対象として抽出した最も配筋量が少ない屋根スラブ位置を示す。また、図 3.3-2 に屋根スラブの配筋諸元（竣工図）、図 3.3-3 に配筋の断面図、図 3.3-4 に配筋マップを示す。評価対象部位が屋根内で最も鉄筋が少ない箇所であることは図 3.3-3、図 3.3-4 から確認できる。

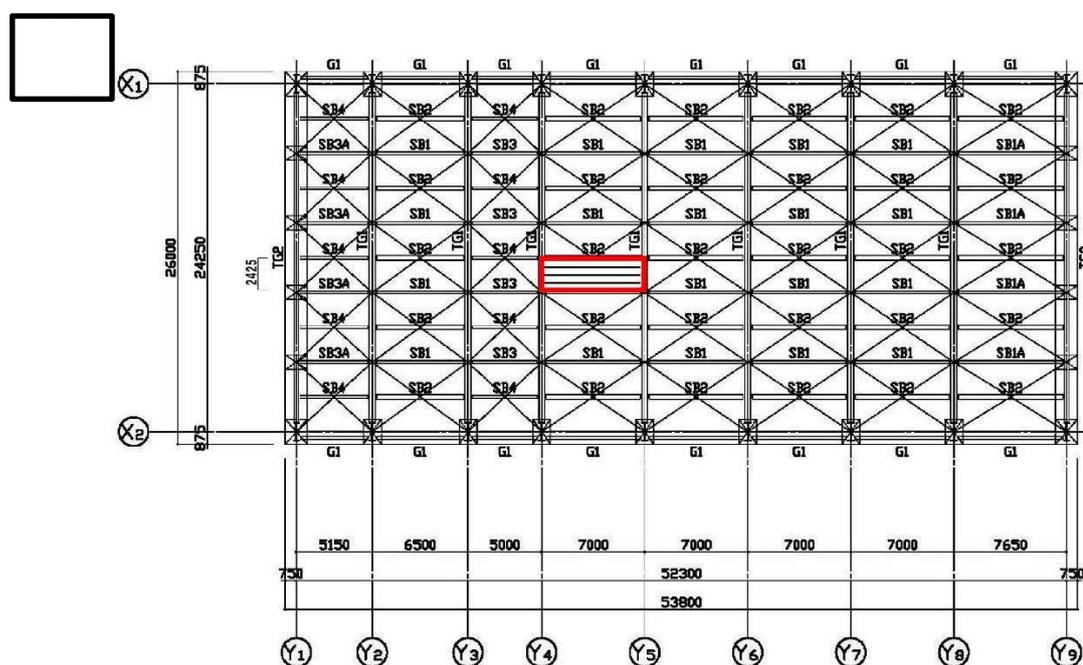


図 3.3-1 使用済燃料乾式貯蔵建屋 屋根スラブ評価部材の位置

床配筋リスト				屋根スラブ配置図 S45A~D チッキプレート ALK23 使用	
床厚 (mm)	床 符 号	配 筋		屋根スラブ配筋要領	
		NS方向配筋	EW方向配筋		
300	S30	D16@250	D16@250		
450	S45A	D19@250	D19@250		
	S45B	D19@250+500	D19@250		
	S45C	D19@250+250	D19@250		
	S45D	D19@250+500	D19@250+500		
	S45E	D19@250	D19@250		
500	S50	D19@250	D19@250		
700	S70	D19@250	D19@250		

図 3.3-2 使用済燃料乾式貯蔵建屋 屋根スラブ配筋諸元 (竣工図)

断面種類	床厚 (mm)	NS 方向配筋	EW 方向配筋	NS 方向配筋断面図	EW 方向配筋断面図
S45A	450	D19@250	D19@250		
S45B	450	D19@250+500	D19@250		
S45C	450	D19@250+250	D19@250		
S45D	450	D19@250+500	D19@250+500		

図 3.3-3 使用済燃料乾式貯蔵建屋 屋根スラブ配筋の断面図



図 3.3-4 使用済燃料乾式貯蔵建屋 屋根スラブ配筋マップ

(2) 主トラス及びサブトラス

V-3-別添 2-1.2-6「建屋の強度計算書」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。

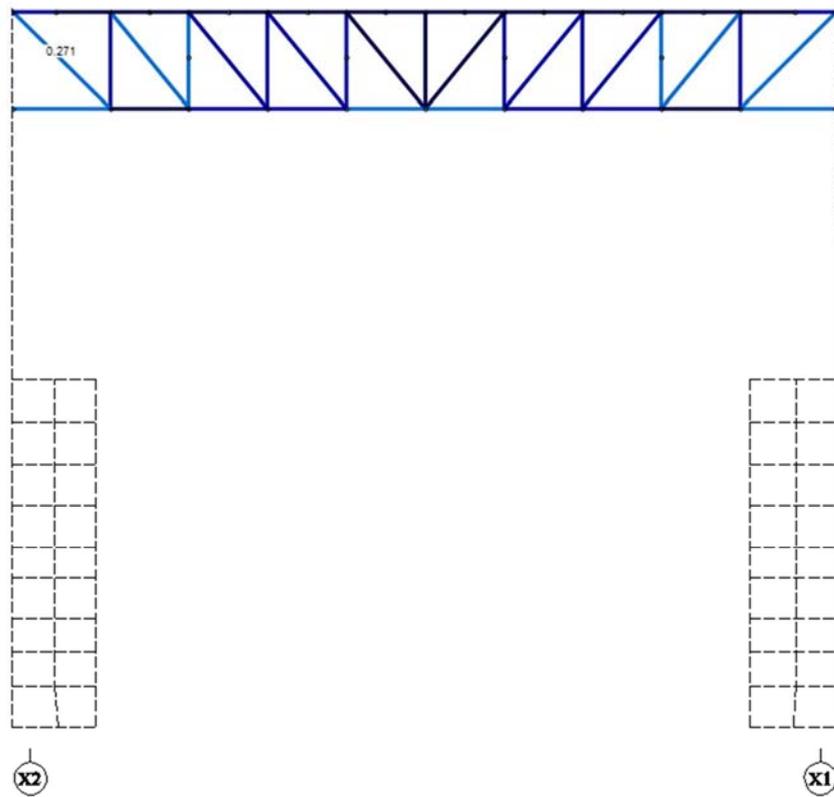
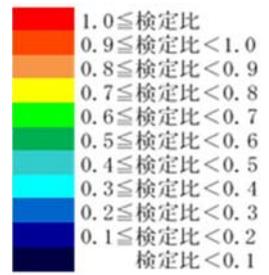
強度計算書に記載した使用済燃料乾式貯蔵建屋主トラスの評価結果を表 3.3-1 に、サブトラスの評価結果を表 3.3-2 に示す。また、通りごとにすべての主トラス部材の検定値を図 3.3-5～図 3.3-11 に、すべてのサブトラス部材の検定値を図 3.3-12～図 3.3-15 に示す。図には、各部位の最大検定値を赤枠で囲い示した。主トラス部材について上弦材は Y3, Y5, Y6, Y7 通り、下弦材は Y6 通り、斜材は Y3 通り、垂直材は Y5, Y6, Y7 通りにおいて検定値が最大となる部材があり、それらの値は表 3.3-1 の値に整合している。また、サブトラス部材について上弦材は Xb, Xc 通り、下弦材は Xb, Xc 通り、斜材は Xc 通り、垂直材は Xd 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 3.3-2 の値に整合している。

表 3.3-1 使用済燃料乾式貯蔵建屋 主トラスの評価結果

部位		発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)	検定値
EL. 	上弦材	圧縮	1.6	219	0.24
		曲げ	53.4	233	
	下弦材	引張	96.7	235	0.54
		曲げ	28.6	233	
	斜材	引張	95.3	235	0.41
	垂直材	圧縮	90.3	227	0.40

表 3.3-2 使用済燃料乾式貯蔵建屋 サブトラスの評価結果

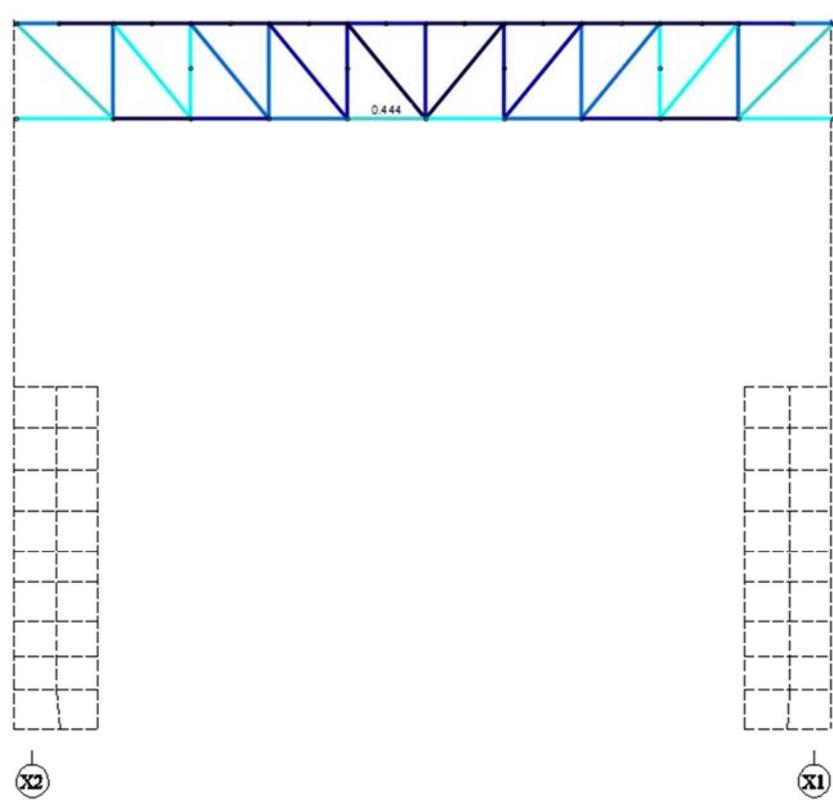
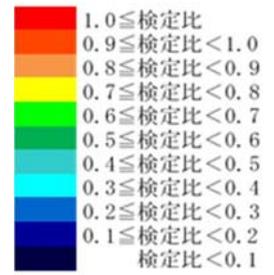
部位		発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)	検定値
EL. 	上弦材	引張	2.2	235	0.12
		曲げ	24.5	230	
	下弦材	圧縮	62.8	93	0.78
		曲げ	23.6	230	
	斜材	圧縮	89.2	98	0.92
	垂直材	圧縮	56.5	180	0.32



上弦材	0.17	0.05	0.05	0.06	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.17
斜材	0.28	0.21	0.17	0.11	0.04	0.05	0.11	0.17	0.21	0.27
垂直材		0.19	0.220	0.16	0.14	0.07	0.14	0.17	0.22	0.19
下弦材	0.25	0.03	0.12	0.17	0.27	0.21	0.17	0.12	0.03	0.25

: 最大検定比

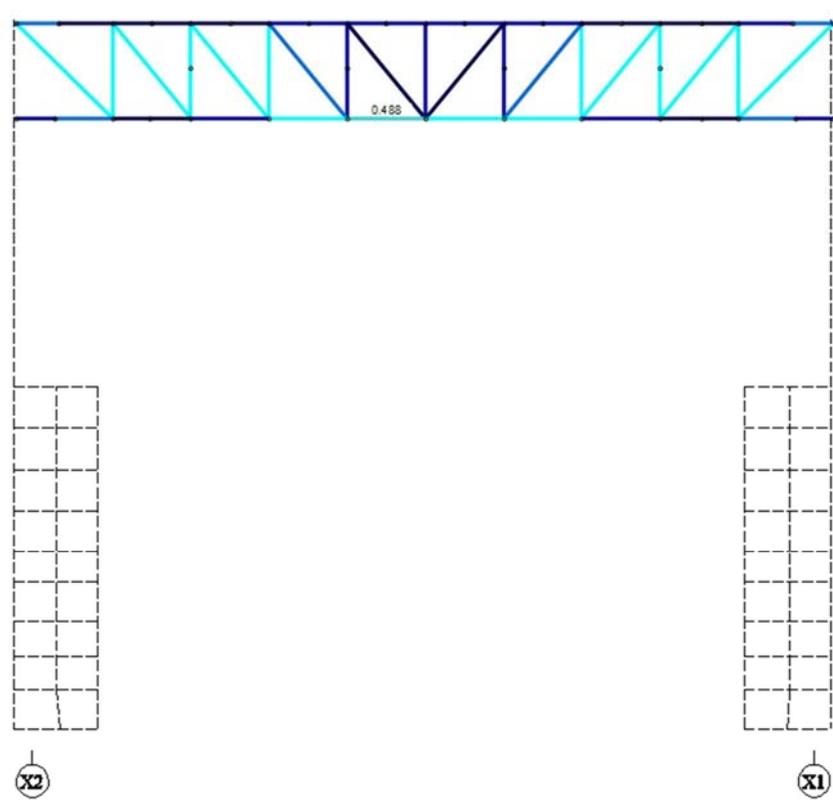
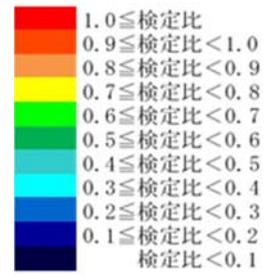
図 3.3-5 主トラスの検定比 (Y2 通り)



上弦材	0.24	0.06	0.08	0.1	0.12	0.1	0.1	0.08	0.06	0.24
斜材	0.41	0.33	0.28	0.19	0.07	0.08	0.19	0.29	0.33	0.41
垂直材		0.29	0.31	0.27	0.18	0.12	0.19	0.28	0.31	0.29
下弦材	0.37	0.04	0.18	0.28	0.45	0.34	0.28	0.18	0.04	0.37

0.24 : 最大検定値

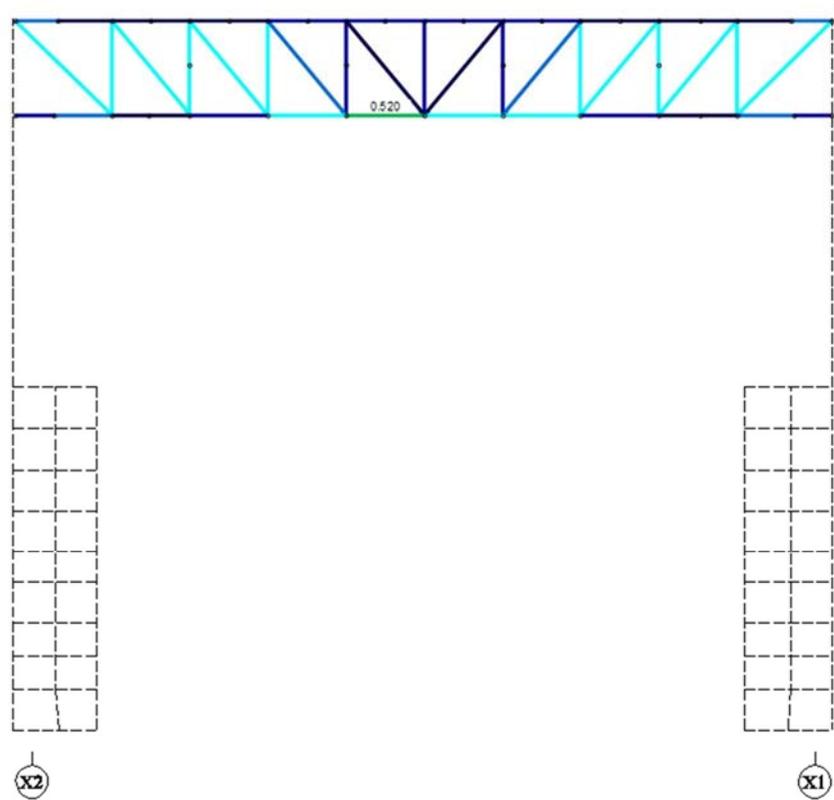
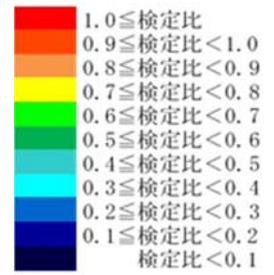
図 3.3-6 主トラスの検定比 (Y3 通り)



上弦材	0.23	0.06	0.08	0.11	0.14	0.12	0.11	0.08	0.06	0.23
斜材	0.40	0.37	0.32	0.22	0.08	0.08	0.22	0.32	0.36	0.40
垂直材		0.35	0.33	0.31	0.19	0.14	0.19	0.31	0.33	0.34
下弦材	0.28	0.09	0.19	0.31	0.49	0.38	0.31	0.19	0.09	0.28

: 最大検定値

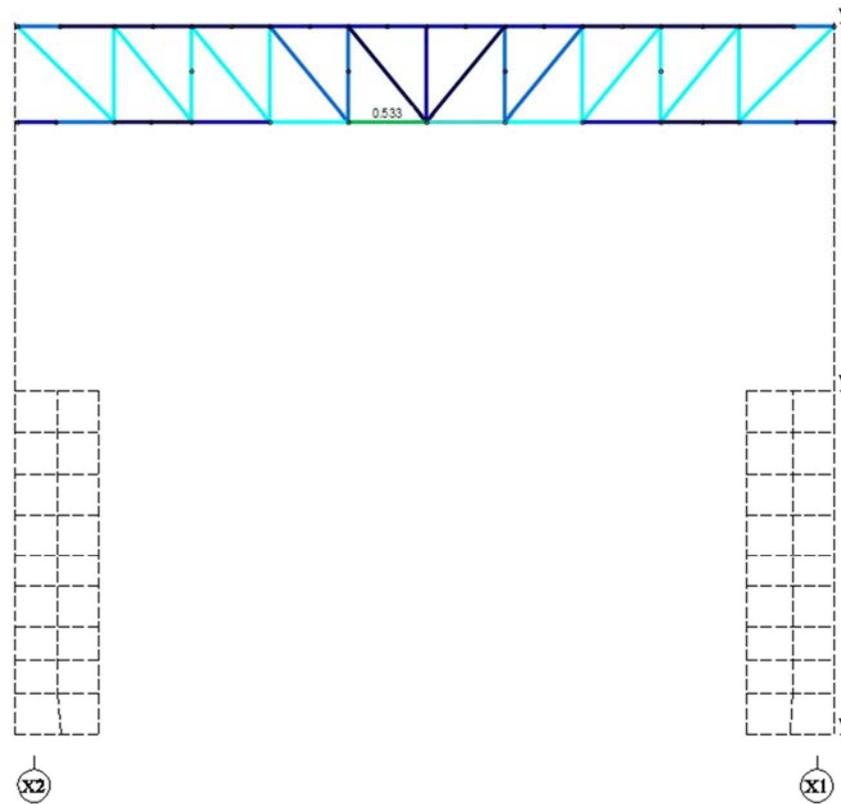
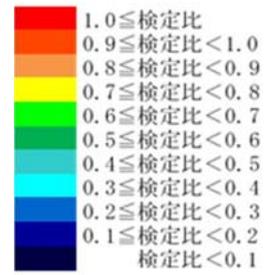
図 3.3-7 主トラスの検定比 (Y4 通り)



上弦材	0.24	0.05	0.09	0.12	0.15	0.12	0.12	0.09	0.05	0.24
斜材	0.40	0.40	0.36	0.25	0.09	0.09	0.25	0.36	0.40	0.40
垂直材	0.40	0.36	0.34	0.20	0.15	0.20	0.34	0.36	0.40	
下弦材	0.24	0.05	0.19	0.32	0.52	0.40	0.32	0.19	0.05	0.24

: 最大検定値

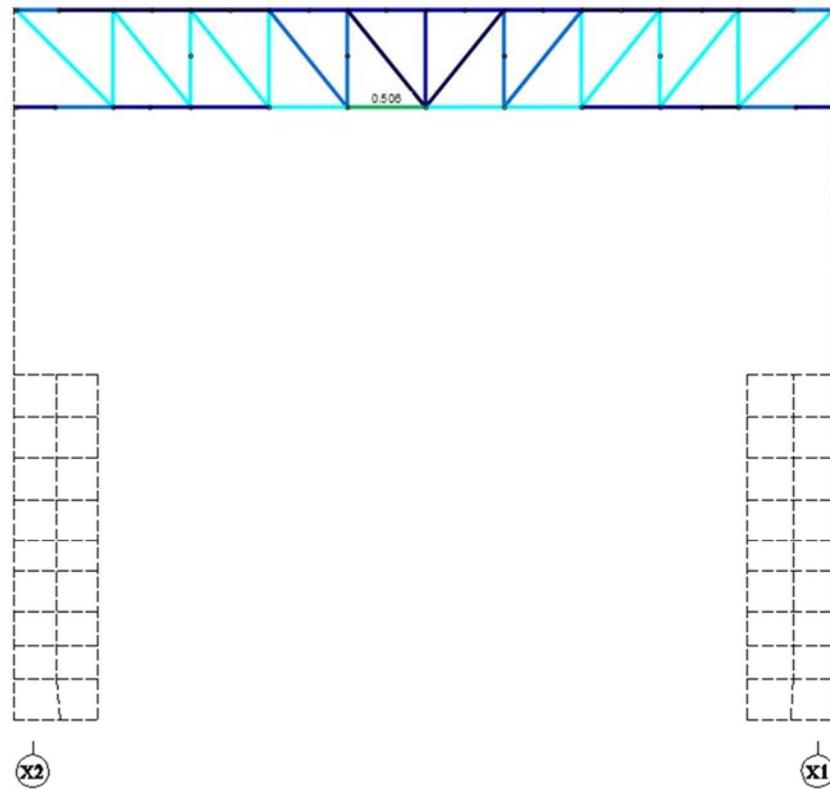
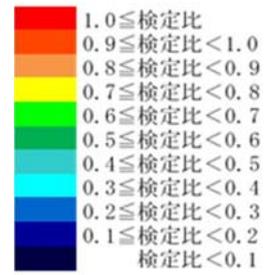
図 3.3-8 主トラスの検定比 (Y5 通り)



上弦材	0.24	0.05	0.09	0.12	0.15	0.12	0.12	0.09	0.05	0.24
斜材	0.40	0.40	0.36	0.25	0.09	0.09	0.25	0.36	0.40	0.40
垂直材	0.40	0.36	0.34	0.21	0.15	0.21	0.34	0.36	0.40	
下弦材	0.24	0.05	0.20	0.33	0.54	0.41	0.33	0.20	0.05	0.24

 : 最大検定値

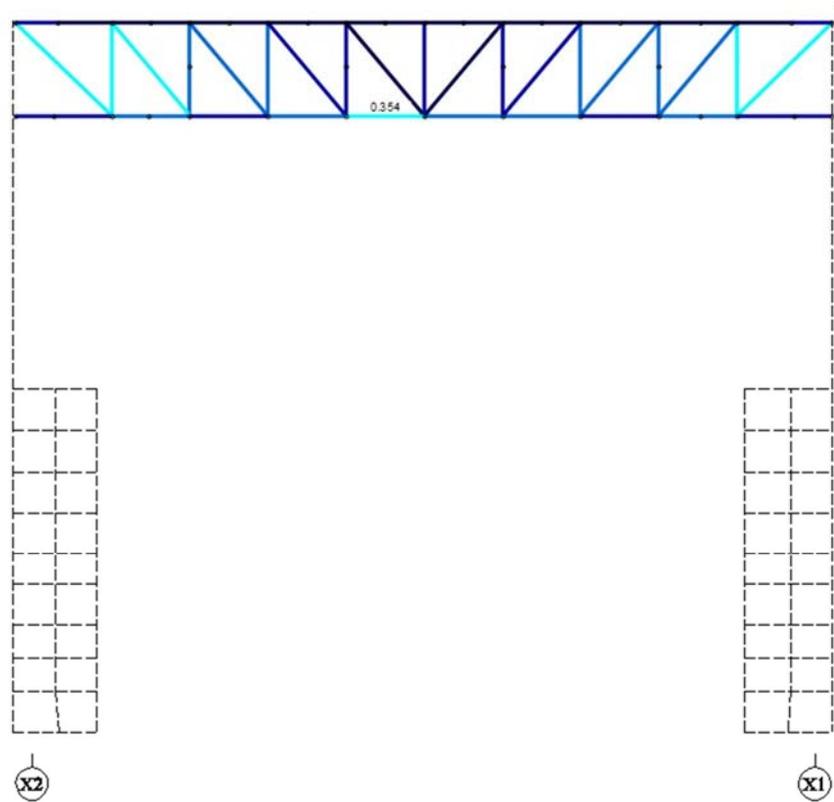
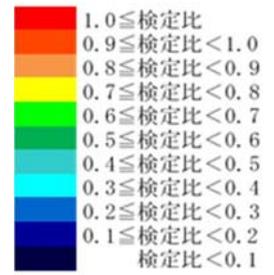
図 3.3-9 主トラスの検定比 (Y6 通り)



上弦材	0.24	0.05	0.08	0.12	0.14	0.12	0.12	0.08	0.05	0.24
斜材	0.40	0.39	0.35	0.24	0.09	0.09	0.24	0.35	0.39	0.39
垂直材	0.40	0.36	0.33	0.21	0.15	0.21	0.33	0.36	0.39	
下弦材	0.24	0.11	0.18	0.31	0.51	0.39	0.31	0.18	0.11	0.24

0.24 : 最大検定値

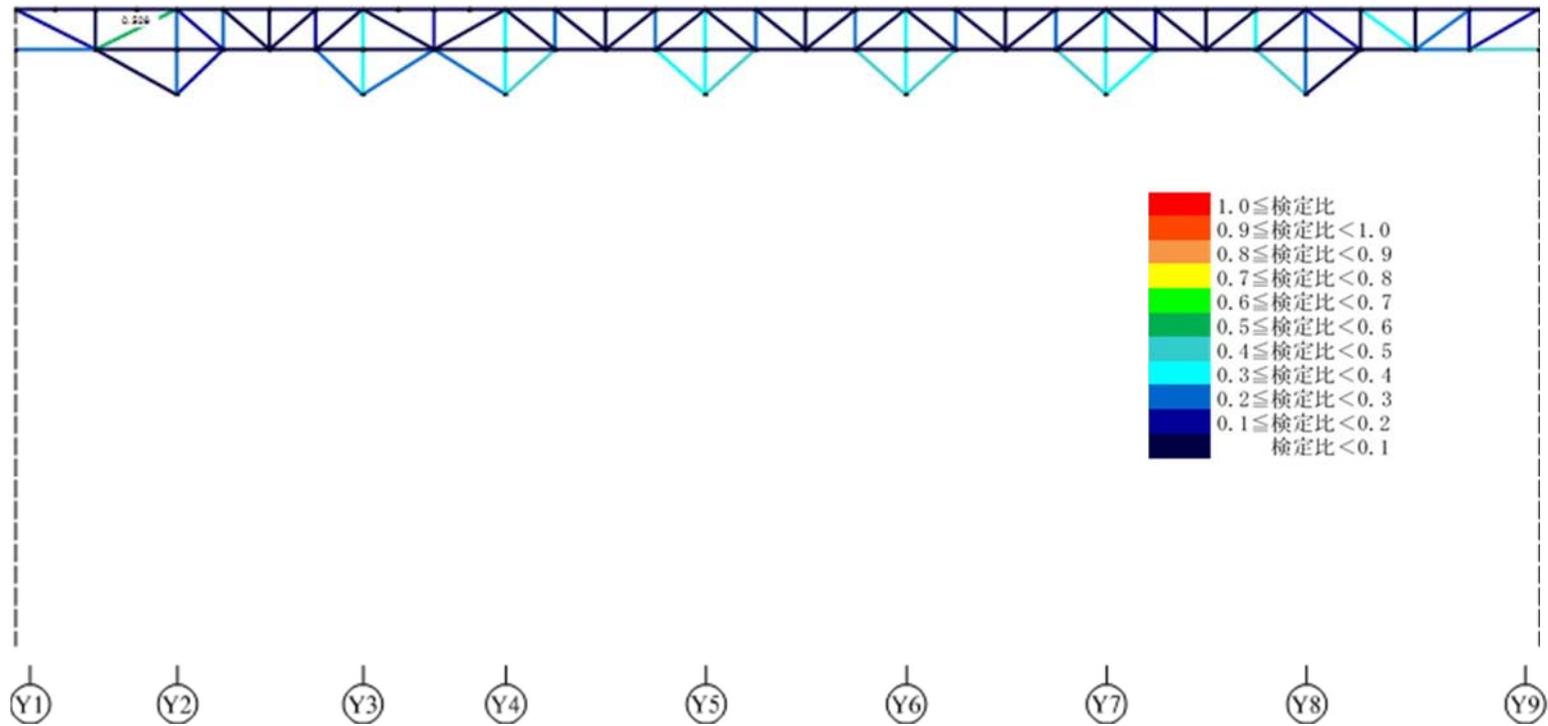
図 3.3-10 主トラスの検定比 (Y7 通り)



上弦材	0.20	0.05	0.07	0.09	0.10	0.09	0.09	0.07	0.05	0.20
斜材	0.33	0.31	0.26	0.17	0.07	0.07	0.17	0.26	0.30	0.32
垂直材		0.32	0.29	0.25	0.17	0.11	0.17	0.25	0.28	0.32
下弦材	0.19	0.30	0.16	0.21	0.36	0.28	0.21	0.16	0.30	0.19

: 最大検定値

図 3.3-11 主トラスの検定比 (Y8 通り)

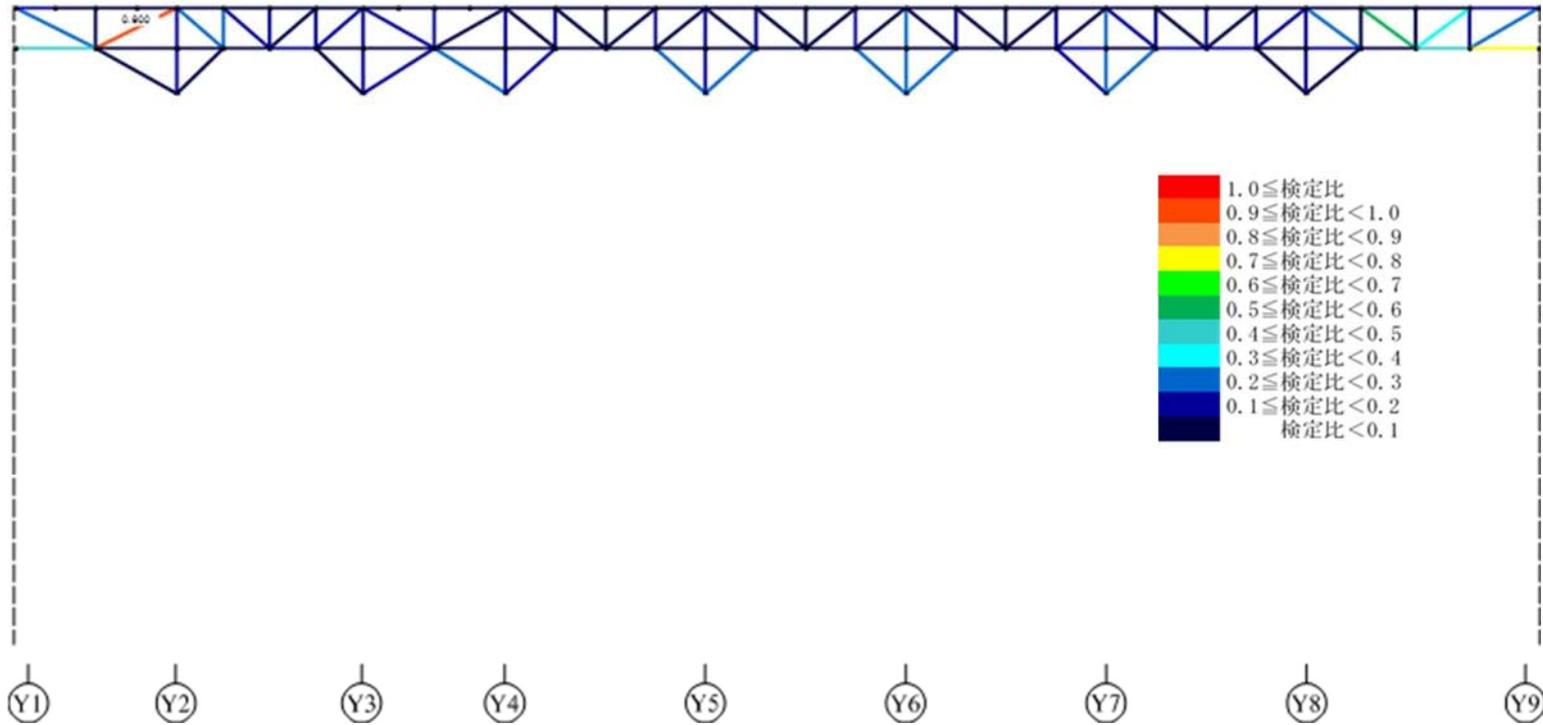


上弦材	0.08	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.04	0.08	
斜材	0.17	0.53	0.15	0.08	0.04	0.07	0.08	0.02	0.04	0.05	0.04	0.03	0.02	0.05	0.03	0.01	0.03	0.05	0.03	0.02	0.04	0.02	0.08	0.09	0.11	0.34	0.29	0.20
垂直材		0.01	0.22	0.21	0.10	0.20	0.31	0.17	0.33	0.24	0.07	0.22	0.36	0.25	0.07	0.23	0.36	0.24	0.07	0.25	0.36	0.19	0.09	0.31	0.28	0.03	0.08	0.14
下弦材	0.30	0.02	0.02	0.06	0.07	0.08	0.08	0.06	0.05	0.07	0.06	0.05	0.06	0.09	0.08	0.05	0.06	0.07	0.06	0.07	0.08	0.06	0.05	0.07	0.10	0.08	0.27	0.50
斜材		0.10	0.15			0.26	0.29	0.30	0.42			0.40	0.47			0.43	0.43			0.47	0.32			0.49	0.02			
束材			0.22				0.31		0.33				0.36				0.36				0.36				0.28			

■ : 主トラス兼用部材であり主トラス部材として評価済のためサブトラス部材評価からは除く

□ : 最大検定値

図 3.3-12 サブトラスの検定比 (Xa 通り)

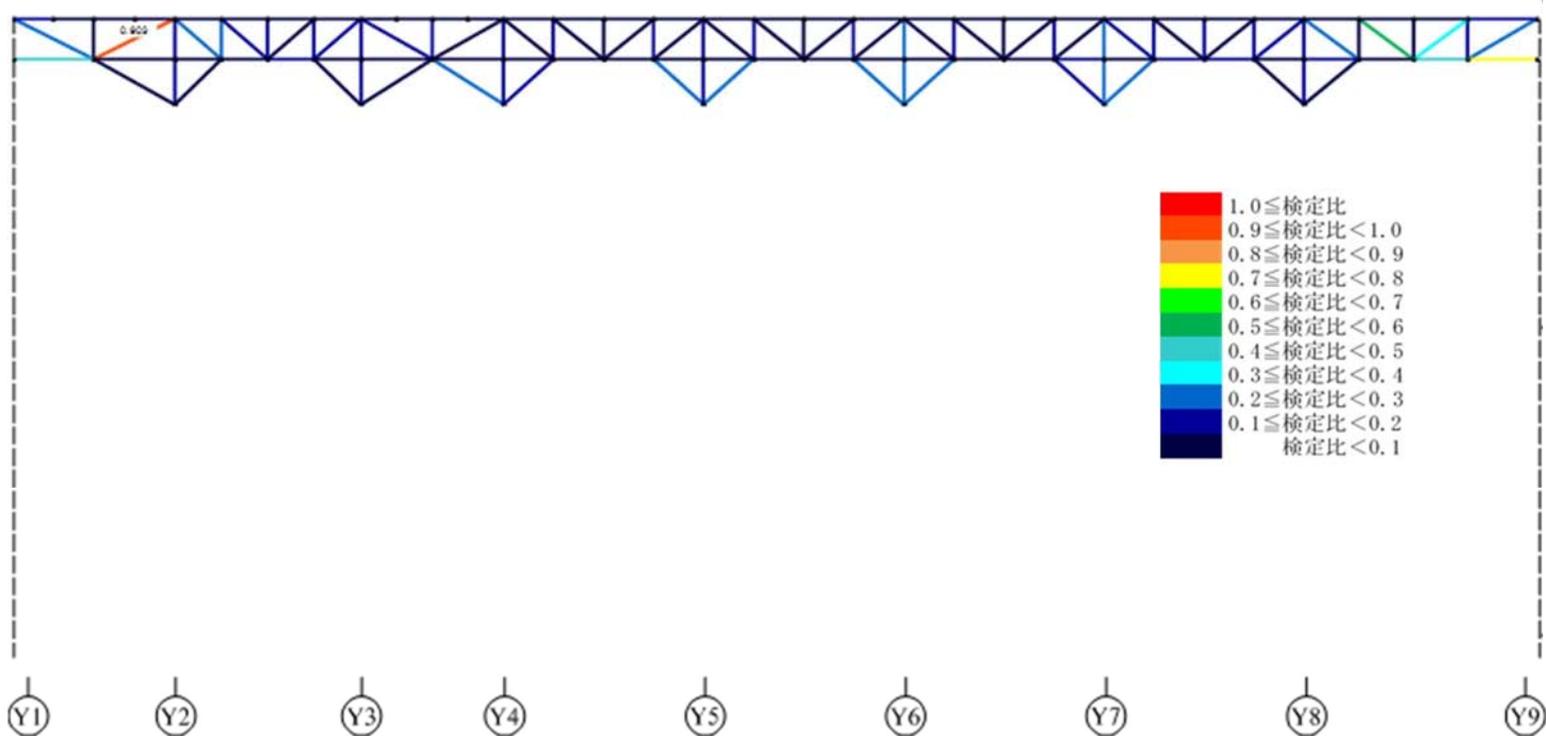


上弦材	0.11	0.03	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.12	
斜材	0.25	0.91	0.26	0.12	0.04	0.12	0.11	0.07	0.06	0.04	0.07	0.07	0.05	0.05	0.04	0.04	0.08	0.10	0.01	0.02	0.12	0.10	0.05	0.15	0.22	0.53	0.40	0.23
垂直材		0.07	0.14	0.22	0.14	0.15	0.18	0.11	0.19	0.14	0.09	0.18	0.20	0.16	0.08	0.16	0.21	0.20	0.08	0.11	0.21	0.20	0.12	0.15	0.17	0.05	0.08	0.16
下弦材	0.46	0.05	0.04	0.10	0.13	0.09	0.08	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.09	0.11	0.10	0.13	0.14	0.10	0.11	0.06	0.50	0.78
斜材		0.02	0.01			0.10	0.11	0.25	0.20			0.27	0.26			0.26	0.27			0.20	0.21			0.06	0.07			
垂直材			0.14				0.19		0.19			0.20				0.21				0.21				0.17				

■ : 主トラス兼用部材であり主トラス部材として評価済のためサブトラス部材評価からは除く

□ : 最大検定値

図 3.3-13 サブトラスの検定比 (Xb 通り)



上弦材	0.11	0.03	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.12
斜材	0.25	0.92	0.27	0.12	0.04	0.12	0.11	0.07	0.06	0.04	0.07	0.07	0.05	0.05	0.04	0.04	0.08	0.10	0.01	0.02	0.12	0.10	0.05	0.15	0.22	0.53	0.40	0.23								
垂直材		0.07	0.14	0.22	0.14	0.15	0.18	0.11	0.19	0.14	0.09	0.18	0.20	0.16	0.08	0.16	0.21	0.20	0.08	0.11	0.21	0.20	0.12	0.15	0.17	0.05	0.08	0.16								
下弦材	0.47	0.05	0.04	0.10	0.13	0.09	0.08	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.09	0.11	0.10	0.13	0.14	0.10	0.11	0.06	0.50	0.78								
斜材		0.02	0.01			0.10	0.10	0.24	0.20			0.27	0.26			0.26	0.26			0.20	0.21				0.06	0.07										
垂直材			0.14				0.18		0.19			0.20				0.21				0.21				0.17												

■ : 主トラス兼用部材であり主トラス部材として評価済のためサブトラス部材評価からは除く

□ : 最大検定値

図 3.3-14 サブトラスの検定比 (Xc 通り)

1.4 主トラスの許容応力値について

表 1.4-1 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 1.4-1 使用済燃料乾式貯蔵建屋 主トラスの評価結果

部位		発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)	検定値
EL. 	上弦材	圧縮	1.6	219	0.24
		曲げ	53.4	233	
	下弦材	引張	96.7	235	0.54
		曲げ	28.6	233	
	斜材	引張	95.3	235	0.41
	垂直材	圧縮	90.3	227	0.40

(1) 評価式

a. 許容引張応力度

$$f_t = F / 1.5 \quad (1.4-1 \text{ 式})$$

ここに、

F : 鋼材の F 値

b. 許容圧縮応力度

$$f_c = \frac{\left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} F}{\nu} \quad (\lambda \leq \Lambda \text{ のとき}) \quad (1.4-2 \text{ 式})$$

$$f_c = \frac{0.277 F}{\left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2} \quad (\lambda > \Lambda \text{ のとき}) \quad (1.4-3 \text{ 式})$$

ここに、

λ : 圧縮材の細長比

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

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

$$f_b = \frac{1}{\nu} F \quad (\lambda_b \leq_p \lambda_b \text{ のとき}) \quad (1.4-4 \text{ 式})$$

$$f_b = \frac{\left\{1 - 0.4 \left(\frac{\lambda_b - p \lambda_b}{e \lambda_b - p \lambda_b} \right)\right\}}{\nu} F \quad (p \lambda_b < \lambda_b \leq_e \lambda_b \text{ のとき}) \quad (1.4-5 \text{ 式})$$

$$f_b = \frac{1}{2.17 \lambda_b^2} F \quad (e \lambda_b < \lambda_b \text{ のとき}) \quad (1.4-6 \text{ 式})$$

ここに,

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

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

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

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

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

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

f_b : 許容圧縮応力度 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 : サンプナンのめじり定数 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。

部材	F 値 F (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 (mm ²)
BH-500×400 ×16×28	235	2.05×10 ⁵	7.90×10 ⁴	2.950×10 ⁴

断面 2 次 モーメント I _y (mm ⁴)	断面係数 Z (mm ³)	座屈長 l _k (mm)	断面 2 次半径 i (mm)	細長比 λ (-)
2.988×10 ⁸	5.298×10 ⁶	3395	100.6	33.73

限界細長比 Λ (-)	曲げ ねじり定数 I _w (mm ⁴)	ねじり定数 J (mm ⁶)	補正係数 C (-)	支点間距離 l _b (mm)
119.79	1.663×10 ¹³	6.460×10 ⁶	1.00	2425

弾性横座屈 モーメント M _e (N・mm)	曲げ材の 細長比 λ _b (-)	塑性限界 細長比 _p λ _b (-)	弾性限界 細長比 _e λ _b (-)
5.823×10 ¹⁰	0.15	0.81	1.29

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。

部材	F 値 F (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 (mm ²)
BH-500×400 ×16×28	235	2.05×10 ⁵	7.90×10 ⁴	2.950×10 ⁴

断面 2 次 モーメント I _y (mm ⁴)	断面係数 Z (mm ³)	座屈長 l _k (mm)	断面 2 次半径 i (mm)	細長比 λ (-)
2.988×10 ⁸	4.201×10 ⁶	3395	100.6	33.73

限界細長比 Λ (-)	曲げ ねじり定数 I _w (mm ⁴)	ねじり定数 J (mm ⁶)	補正係数 C (-)	支点間距離 l _b (mm)
119.79	1.663×10 ¹³	6.460×10 ⁶	2.30	2425

弾性横座屈 モーメント M _e (N・mm)	曲げ材の 細長比 λ _b (-)	塑性限界 細長比 _p λ _b (-)	弾性限界 細長比 _e λ _b (-)
5.823×10 ¹⁰	0.13	0.86	1.29

c. 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。

部材	F 値 F (N/mm ²)
B H-350×350 ×12×19	235

d. 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。

部材	F 値 F (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 (mm ²)
H-344×348× 10×16	235	2.05×10^5	7.90×10^4	1.440×10^4

断面 2 次 モーメント I _y (mm ⁴)	座屈長 l _k (mm)	断面 2 次半径 i (mm)	細長比 λ (-)	限界細長比 Λ (-)
1.124×10^8	2100	88.4	23.77	119.79

6. タービン建屋の荷重増分解析

6.1 概要

主トラスが、想定した降下火砕物堆積による鉛直荷重に対して、適切な裕度を有していることを確認するために、鉛直荷重に対する弾塑性解析（荷重増分解析）を実施した。

6.2 解析条件

(1) 解析モデル

解析モデルは、主トラス部材の検討に用いた応力解析モデルに以下の変更を加える。なお、主トラス部材には、主トラス部材の検討と同様に、軸力に対して修正若林モデルによる非線形性を考慮している。

- ・屋根スラブの剛性を無視する。
- ・主トラスの上下弦材には、剛塑性回転ばね付き梁要素を使用する。剛塑性回転ばね付き梁要素では、要素端部における2軸曲げを考慮し、次式に示すM-Nインタラクション曲面を降伏判定に用いる。

$$\frac{|M_1|}{M_{y1}} + \frac{|M_2|}{M_{y2}} + \frac{|N|}{N_y} \leq 1 \quad (6.2-1 \text{ 式})$$

ここに、

M_1, M_{y1} : 材端モーメント及び降伏モーメント（1軸）

M_2, M_{y2} : 材端モーメント及び降伏モーメント（2軸）

N_1, N_2 : 軸力及び降伏軸力

降伏後は材端に塑性ヒンジができるものとする。図6.2-1に塑性ヒンジの想定位置、図6.2-2に剛塑性回転ばねの非線形特性の概念図を示す。また、解析モデルを図6.2-3に示す。

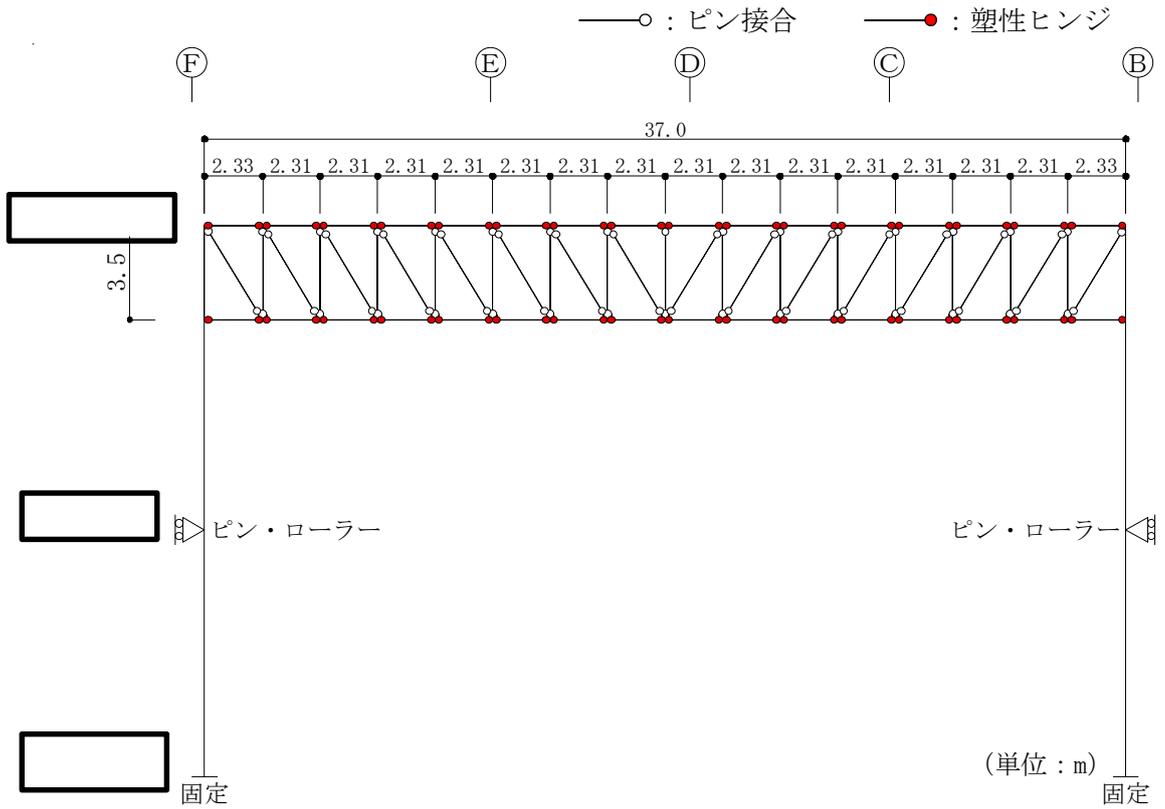
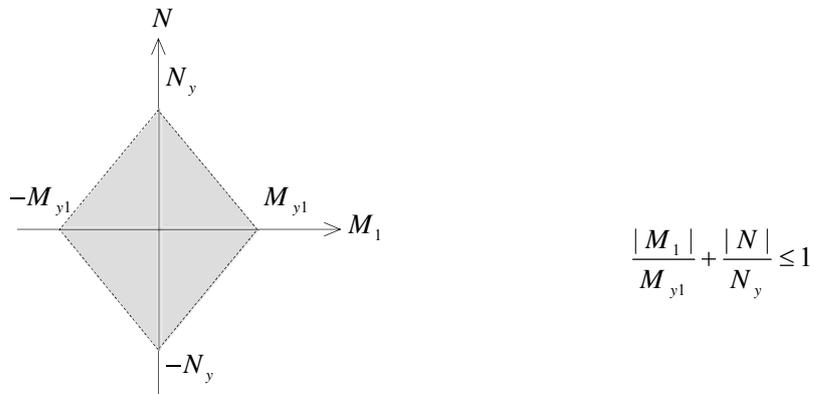
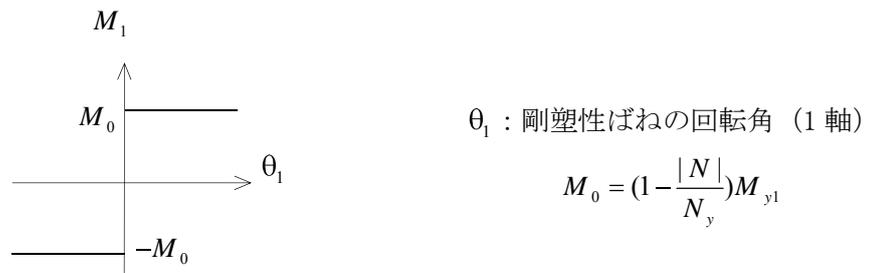


図 6.2-1 塑性ヒンジの想定位置



(a) 降伏曲面



(b) $M - \theta$ 関係

図 6.2-2 剛塑性回転ばねの非線形特性 ($M_2 = 0$)

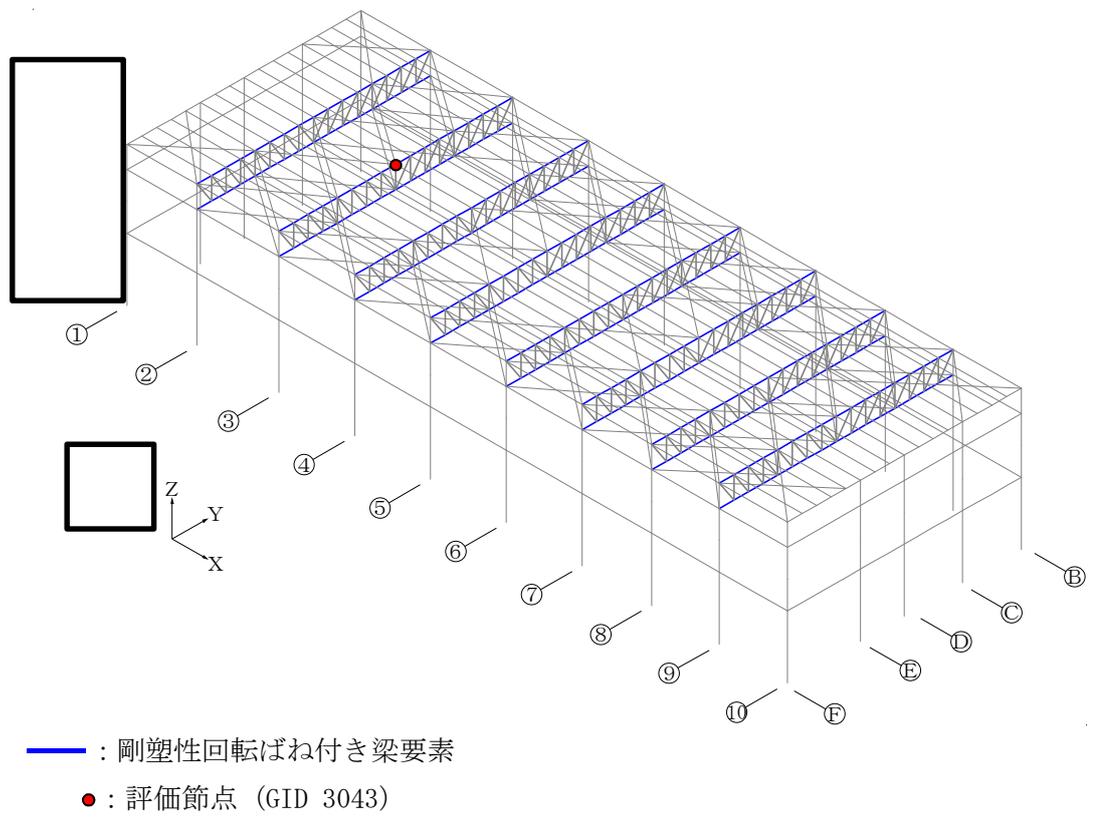


図 6.2-3 解析モデル

(2) 鉛直荷重

鉛直荷重は、以下の①～④の組合せとし、降下火砕物堆積による鉛直荷重に割増係数 k を乗じた増分解析を実施する。図 6.2-4 に荷重組合せと荷重合計を示す。

- ① 固定荷重 (F_d) : 5680 N/m²
- ② 積載荷重 (F_l) : 1000 N/m²
- ③ 積雪荷重 (F_s) : 210 N/m²
- ④ 降下火砕物堆積による鉛直荷重 ($F_v' = k F_v$) : 7355 × k N/m²

k : 降下火砕物堆積による鉛直荷重の割増係数

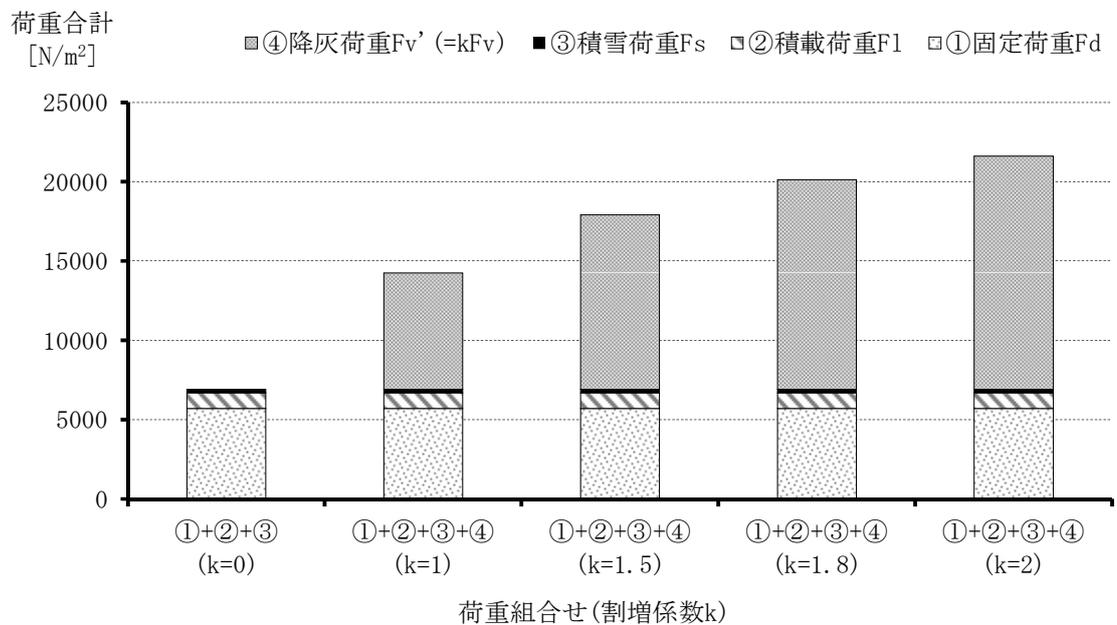


図 6.2-4 荷重組合せと荷重合計

6.3 解析結果

(1) 解析結果

主トラス中央の節点変位と割増係数による荷重－変形関係を図 6.3-5 に示す。評価節点は、図 6.2-4 に示すように、全トラス中で支配幅の最も広い 3 通り主トラス中央部の節点とした。

図 6.3-1 より、割増係数 k が 1.5 程度を超えると線形関係が崩れ、1.8 程度で荷重が頭打ちとなった後、変形が増大する。

(2) 評価結果

解析結果より、タービン建屋の主トラスは、降下火砕物堆積による鉛直荷重に対して、1.8 倍程度の裕度があるものと判断できる。

— : 評価節点 (GID 3043) の荷重－変位関係
- - - : 初期勾配

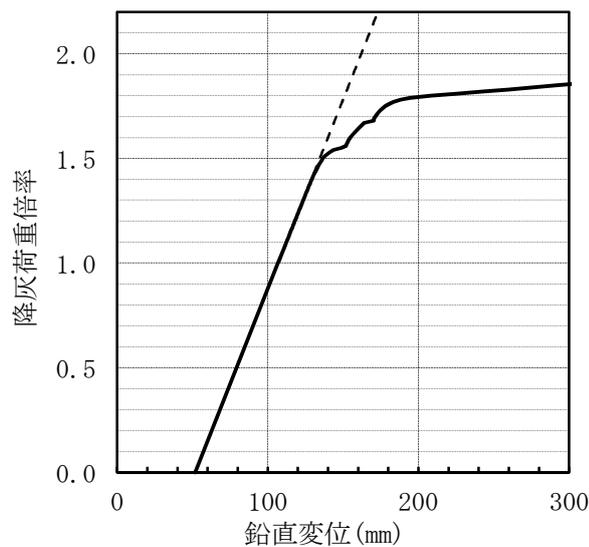


図 6.3-1 主トラス中央節点における荷重－変位関係