

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0
提出年月日	平成30年5月18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5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

「建屋の強度計算書」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

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。

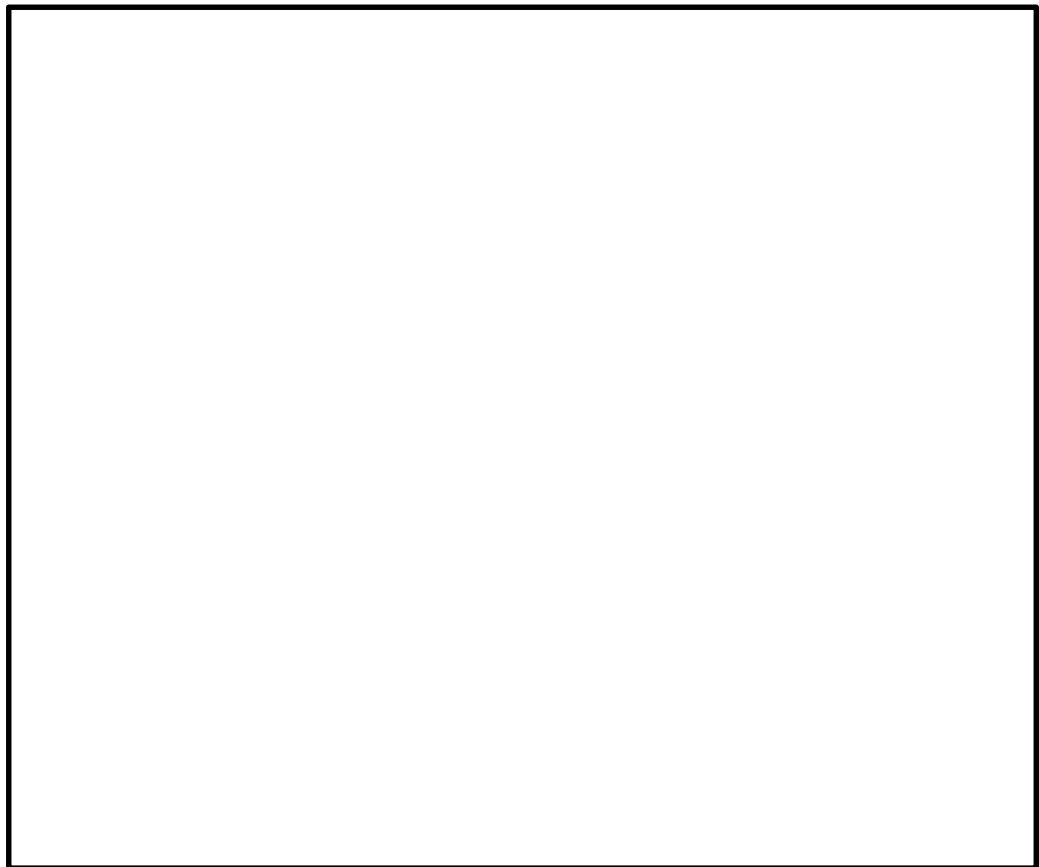


図 1.2-1 原子炉建屋原子炉棟のモデル化範囲

(2) 使用要素

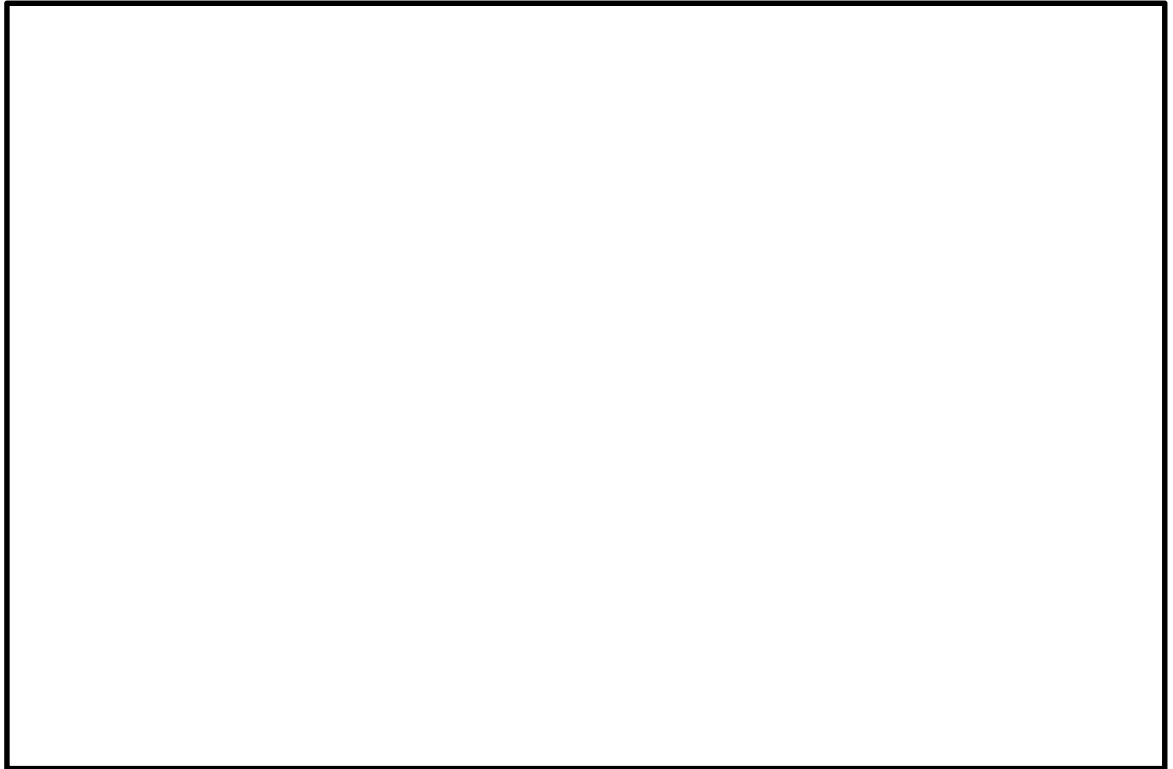
本解析で用いる使用要素を表 1.2-1 に示す。なお，3D-FEM モデルは主トラス架構に生じる曲げモーメントにより主トラス上弦材が負担する軸力を適切に評価するため，屋根スラブをシェル要素でモデル化するとともに，主トラス端部の柱による曲げ拘束を適切に評価するため耐震壁もシェル要素でモデル化する。鉄骨部及び鉄筋コンクリート部の柱・梁をモデル化した梁要素及びトラス要素の解析モデル概要と，屋根スラブ及び耐震壁をモデル化したシェル要素を加えた全要素の解析モデル概要を図 1.2-2 に示す。

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。

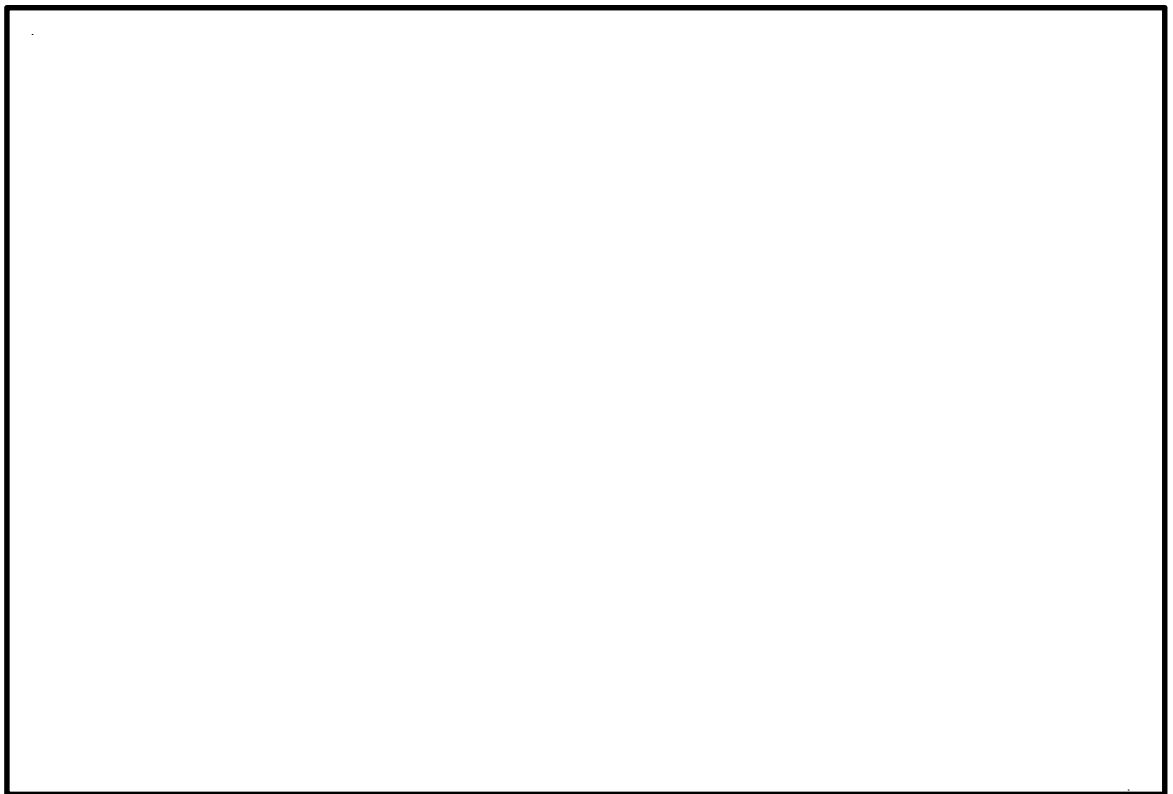
鉄筋コンクリート部では，耐震壁及び屋根トラスはシェル要素を，柱及び梁については梁要素を用いる。

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。

なお、3D-FEM モデルの各部材の寸法は構造図を基に設定している。構造図と解析モデル図を「7. 原子炉建屋原子炉棟の構造図及び解析モデル図」に示す。

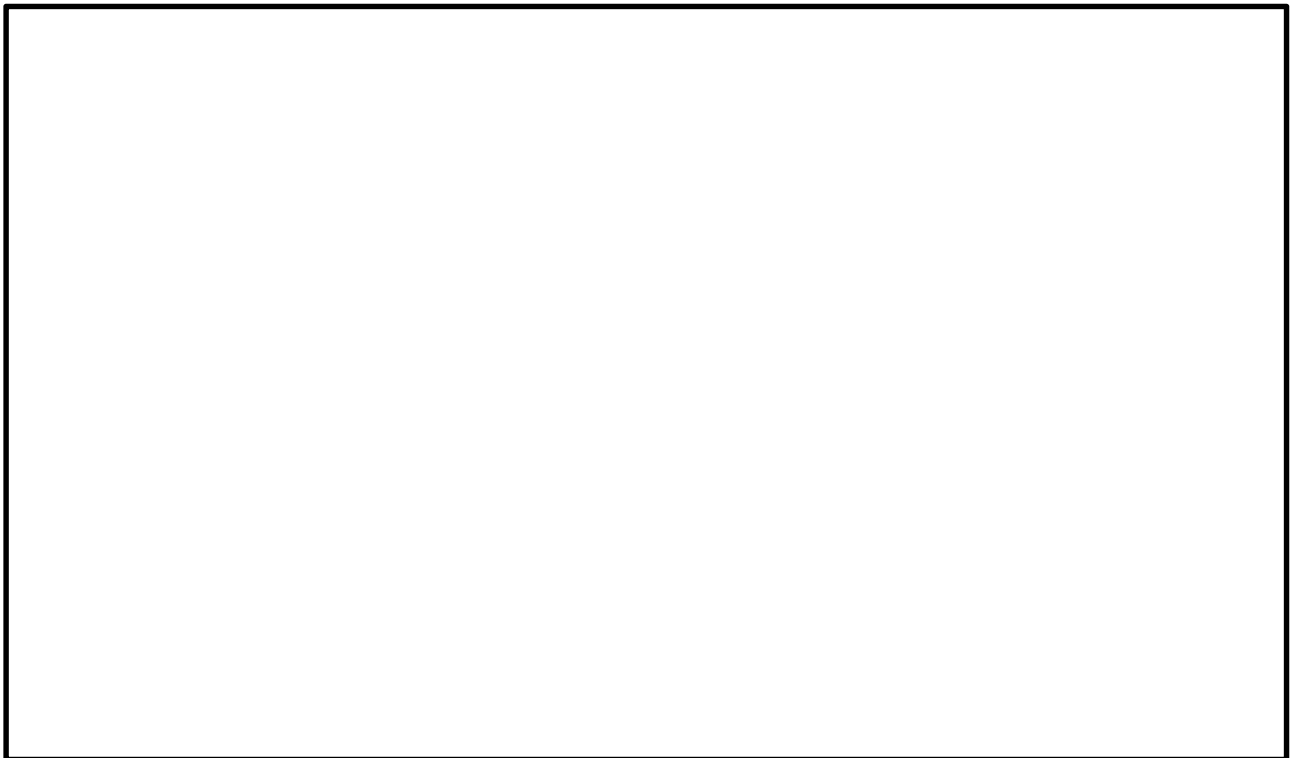


図 1.2-3 解析モデルにおける部材の接続条件（原子炉建屋原子炉棟，N 通り*）

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。その他の鉛直荷重（梁、壁等の重量）は、外周梁に等分布の線荷重として作用させる。なお、降下火砕物堆積による鉛直荷重を除く荷重合計は、質点系モデルの屋根面位置の質点重量に一致している。

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 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

1.3.1 原子炉建屋原子炉棟

(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。

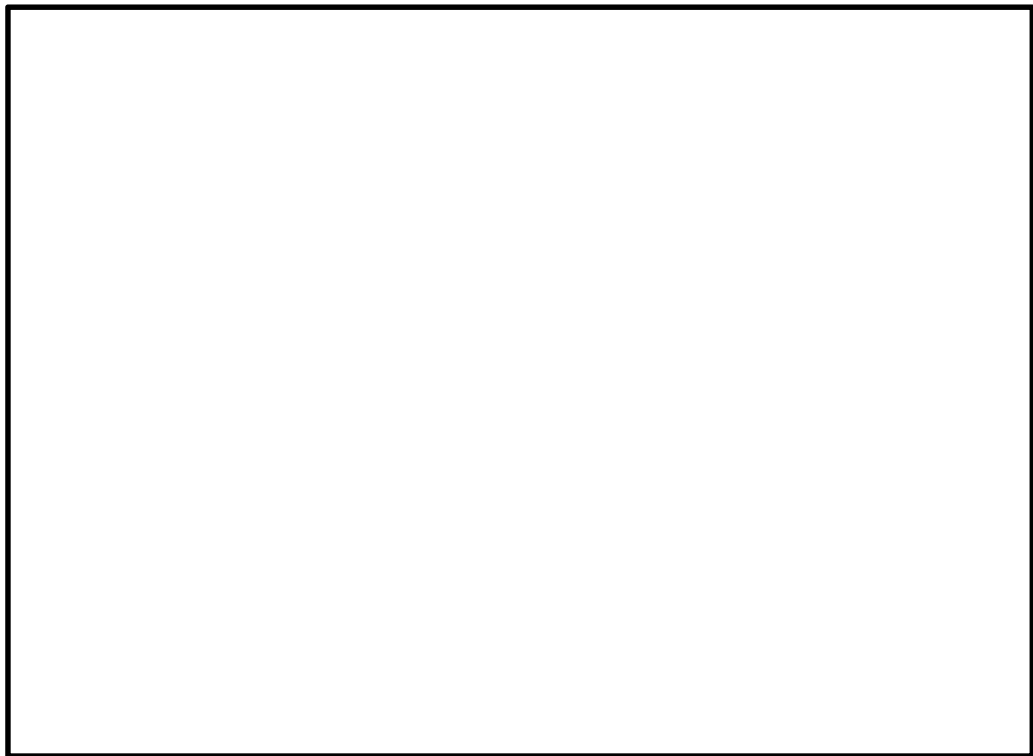


図 1.3-1 原子炉建屋原子炉棟 屋根スラブ評価部材の位置 (EL. 64.08m)

(2) 原子炉棟主トラス

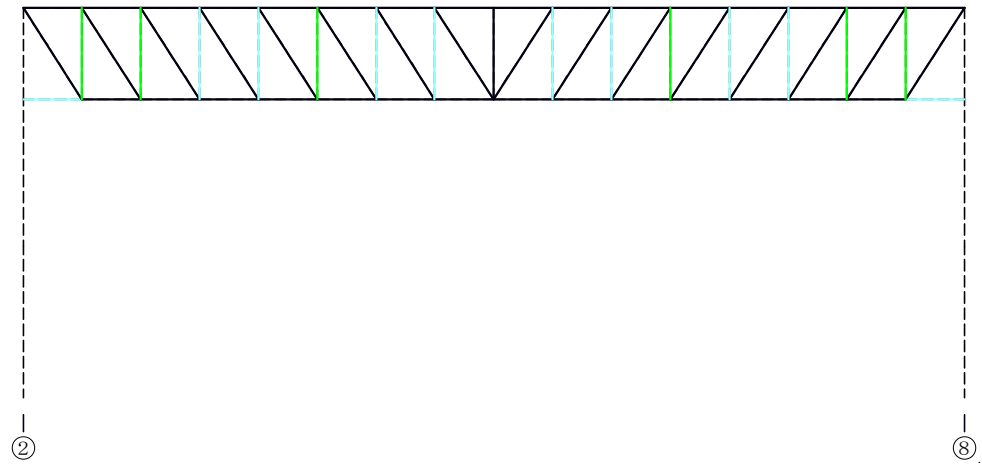
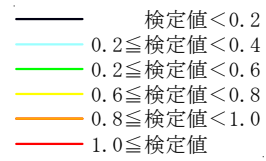
V-3-別添 2-1-6「建屋の強度計算書」には、降下火砕物に対する健全性評価の結果として、検定値が最大となる部材の評価結果のみを示した。

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。

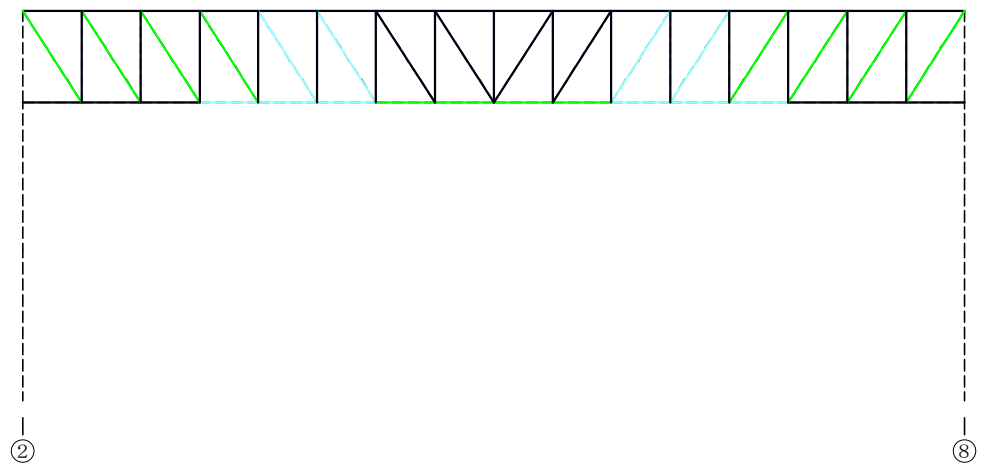
表 1.3-1 原子炉建屋原子炉棟 主トラスの評価結果

部位		発生応力	応力度 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)	検定値
EL. 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



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)



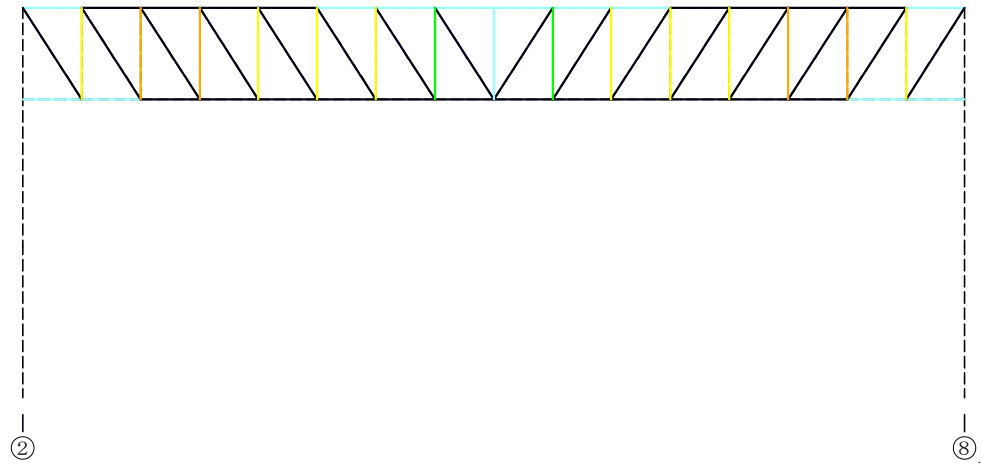
上弦材	0.16	0.10	0.04	0.04	0.05	0.05	0.07	0.04	0.04	0.07	0.05	0.05	0.04	0.04	0.10	0.16
斜材	0.43	0.48	0.48	0.48	0.34	0.27	0.15	0.04	0.04	0.15	0.27	0.34	0.48	0.48	0.48	0.42
束材		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
下弦材	0.07	0.07	0.14	0.24	0.32	0.38	0.42	0.44	0.44	0.42	0.38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

(b) 引張 (曲げ引張)

 : 最大検定値

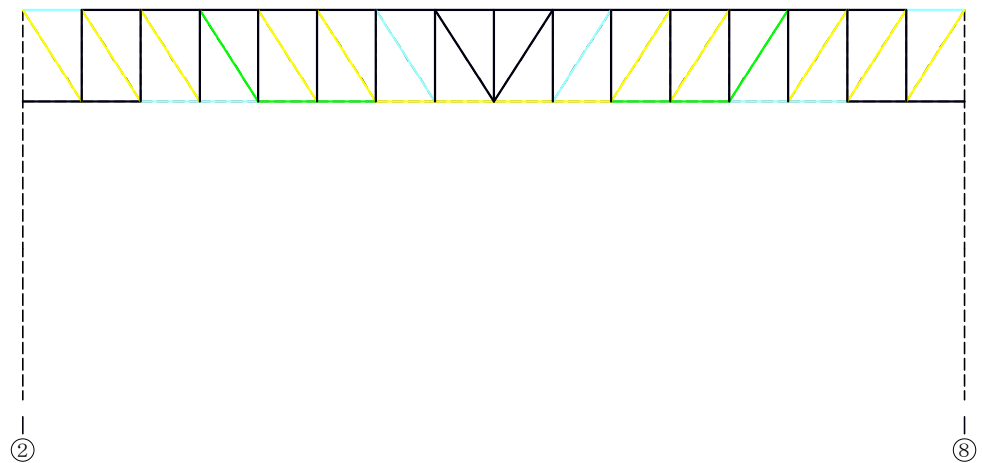
図 1.3-2 主トラスの検定比 (L 通り)

検定値 < 0.2
 0.2 ≤ 検定値 < 0.4
 0.4 ≤ 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	0.23	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)



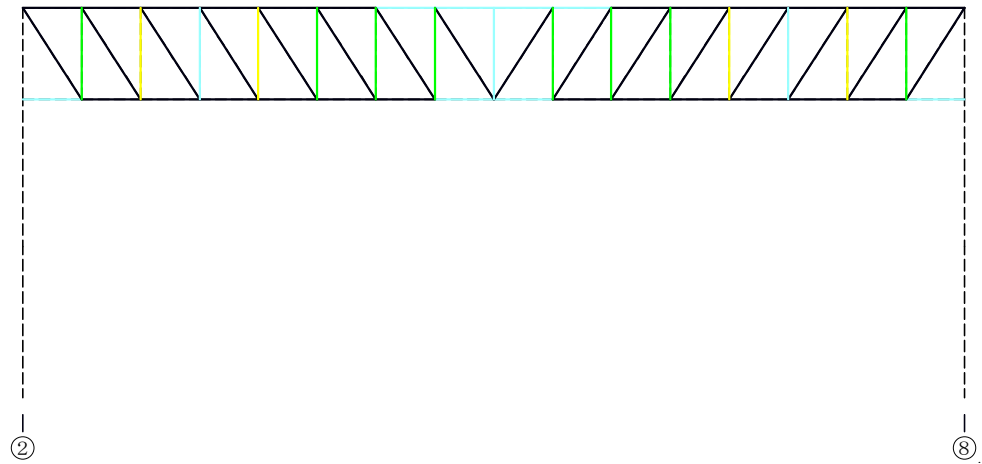
上弦材	0.23	0.11	0.02	0.07	0.04	0.10	0.13	0.09	0.09	0.13	0.10	0.04	0.07	0.02	0.12	0.23
斜材	0.66	0.78	0.66	0.58	0.69	0.63	0.35	0.09	0.09	0.35	0.63	0.69	0.58	0.66	0.78	0.66
束材		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
下弦材	0.12	0.12	0.23	0.37	0.41	0.57	0.70	0.75	0.75	0.70	0.57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

(b) 引張 (曲げ引張)

0.66 : 最大検定値

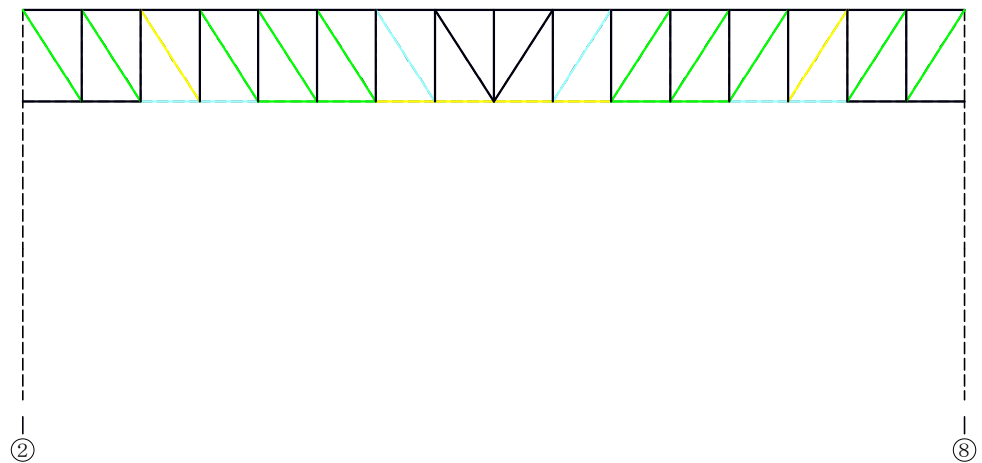
図 1.3-3 主トラスの検定比 (M 通り)

— 検定値 < 0.2
 0.2 ≤ 検定値 < 0.4
 0.4 ≤ 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	0.16	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)



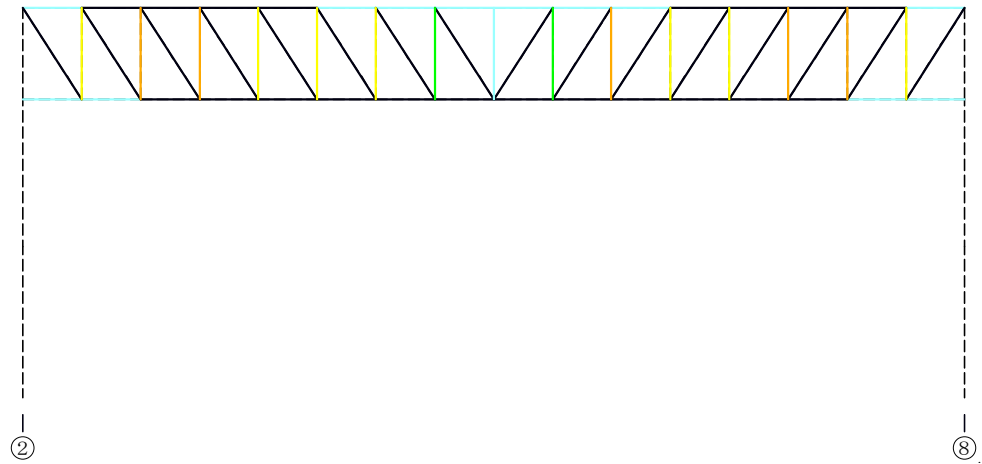
上弦材	0.15	0.10	0.05	0.06	0.06	0.05	0.07	0.12	0.12	0.07	0.05	0.06	0.06	0.05	0.10	0.15
斜材	0.52	0.58	0.61	0.59	0.56	0.45	0.37	0.13	0.13	0.36	0.45	0.56	0.59	0.61	0.58	0.52
束材		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
下弦材	0.08	0.08	0.22	0.35	0.50	0.58	0.63	0.75	0.75	0.63	0.58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

(b) 引張 (曲げ引張)

 : 最大検定値

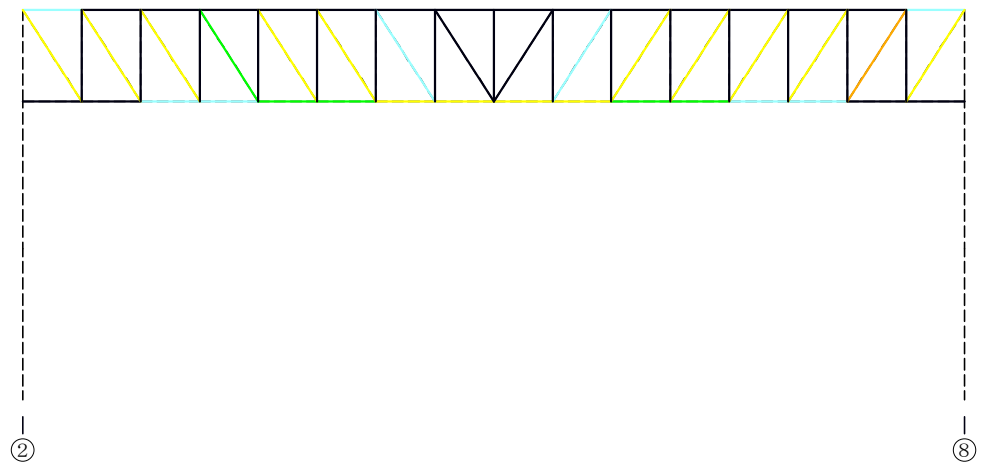
図 1.3-4 主トラスの検定比 (N 通り)

- 検定値 < 0.2
- $0.2 \leq$ 検定値 < 0.4
- $0.4 \leq$ 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	0.23	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)

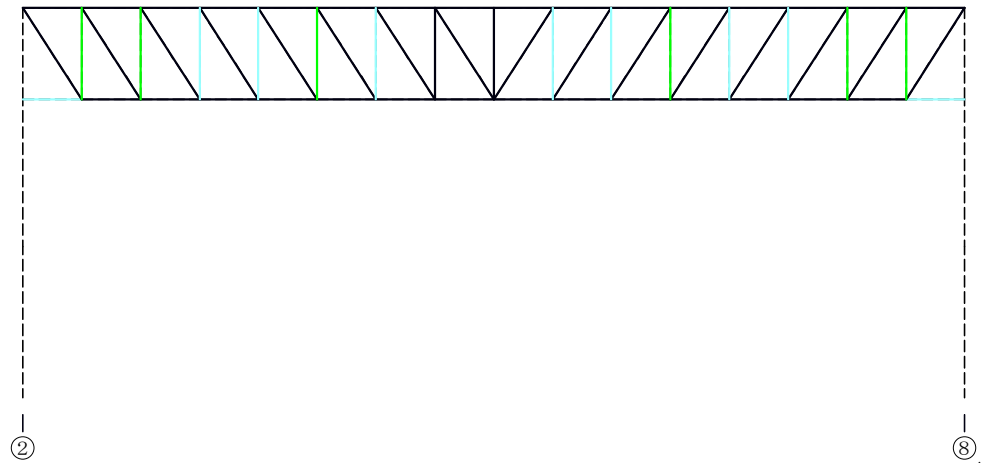
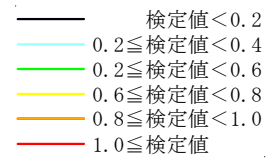


上弦材	0.24	0.12	0.02	0.08	0.04	0.10	0.13	0.09	0.09	0.13	0.10	0.04	0.08	0.02	0.12	0.24
斜材	0.66	0.79	0.67	0.59	0.69	0.63	0.35	0.09	0.10	0.36	0.63	0.69	0.60	0.68	0.80	0.67
束材		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
下弦材	0.12	0.12	0.23	0.37	0.42	0.58	0.71	0.76	0.76	0.71	0.58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

(b) 引張 (曲げ引張)

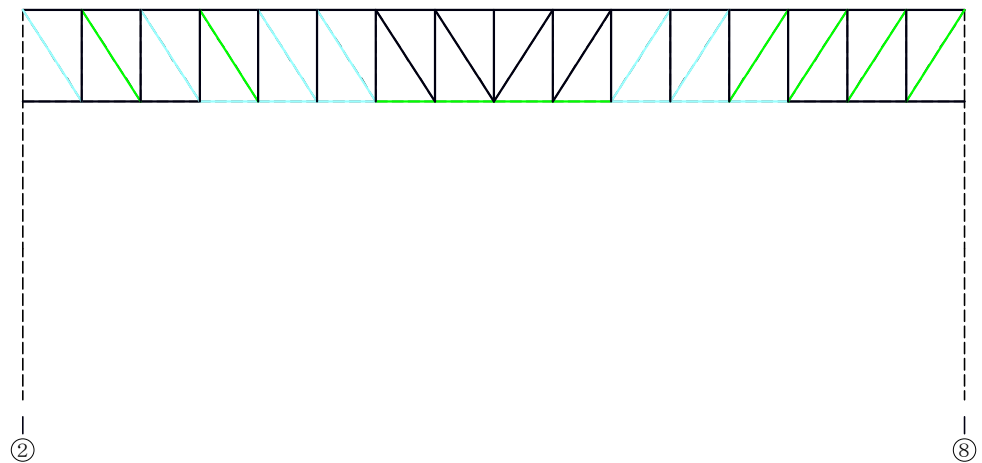
 : 最大検定値

図 1.3-5 主トラスの検定比 (P 通り)



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)

 : 最大検定値

図 1.3-6 主トラスの検定比 (Q 通り)

(3) 原子炉棟母屋

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（EL. 64.08m）

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。

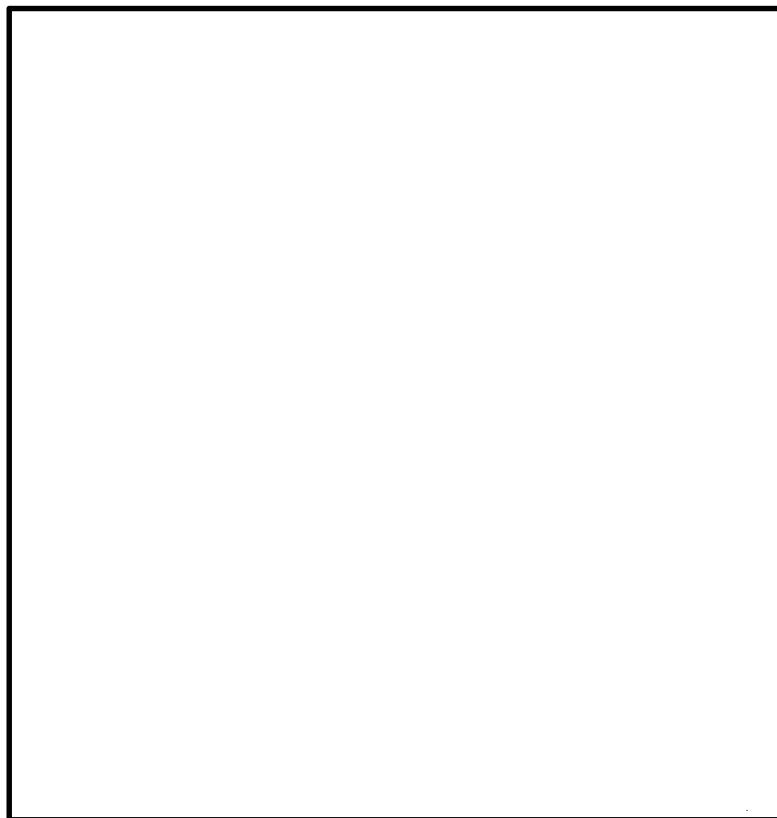


図 1.3-8 原子炉建屋付属棟 屋根スラブの位置 (EL. 39.8m ～ EL. 8.2m)



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)

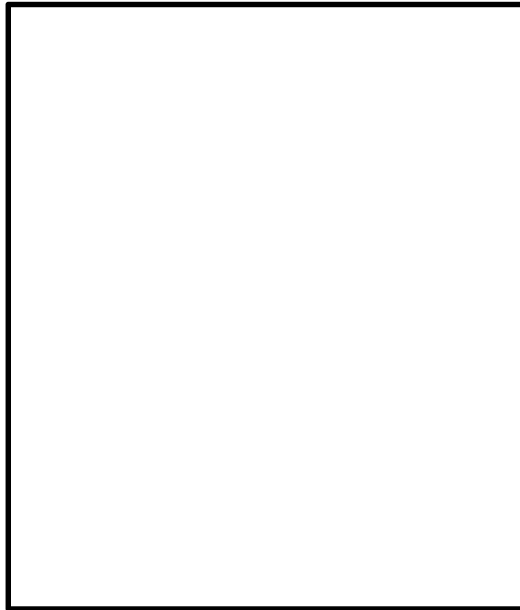
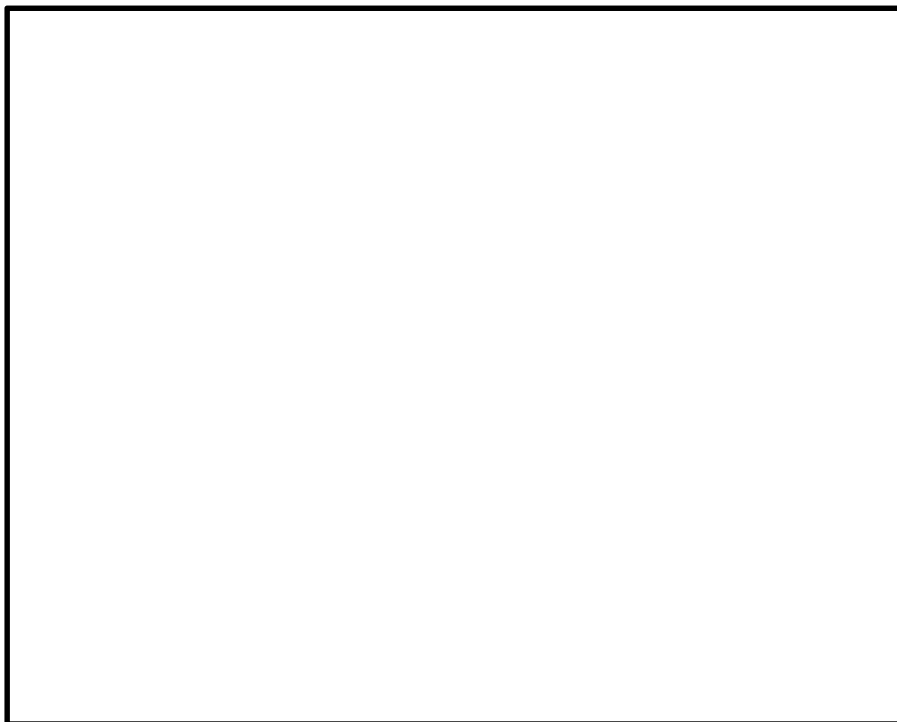


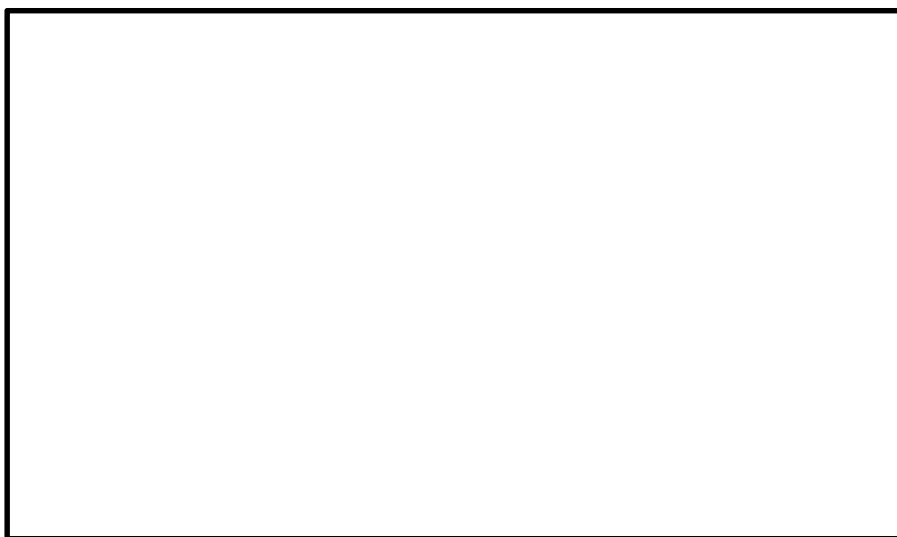
図 1.3-10 原子炉建屋付属棟 屋根スラブ評価部材の位置 (EL. 35.0m)



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)

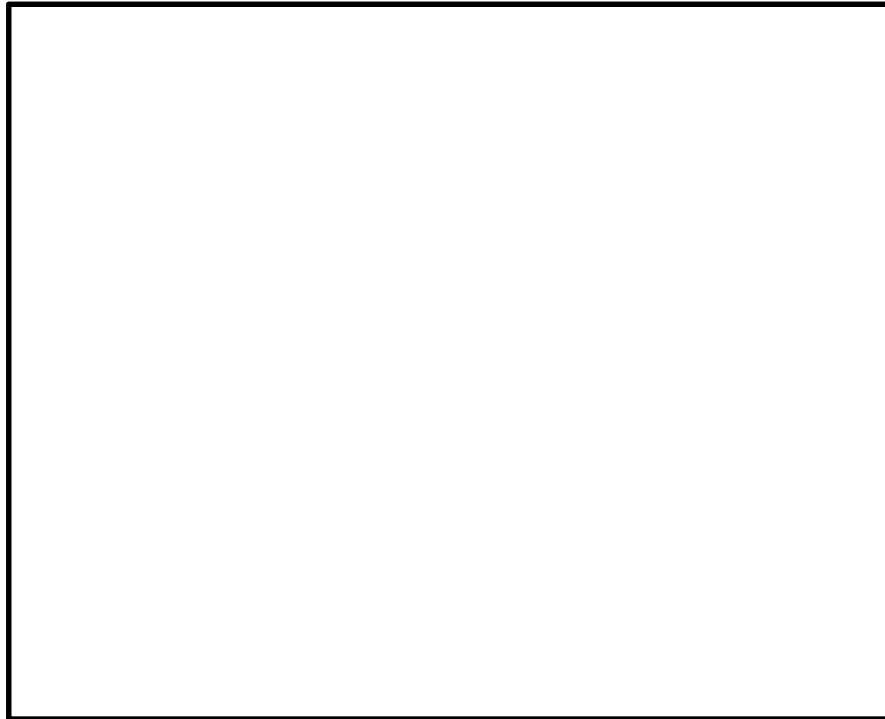


(a) EL. 20.30m 平面図



(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 (せん断力に対する検定値)
EL. 30.0m	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 (せん断力に対する検定値)	
			短辺	長辺
EL. 30.0m	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)	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. 22.0m	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. 17.2m	Sa	2000	0.19 (0.08)	0.10 (0.06)
EL. 12.0m	SM19	200	0.10 (0.09)	0.05 (0.09)
EL. 12.24m	SM20	200	0.70 (0.59)	0.35 (0.60)
EL. 9.0m	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)

※太字は最大検定値

(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～図 1.3-17 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

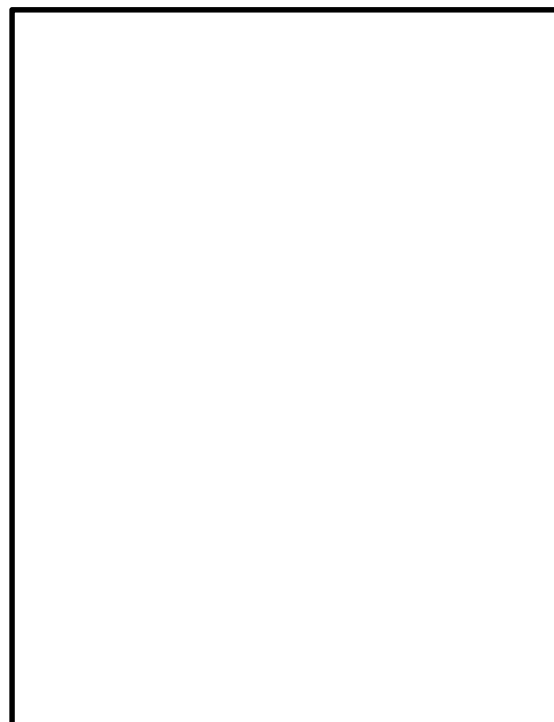


図 1.3-15 原子炉建屋付属棟 母屋評価部材の位置 (EL. 39.8m)



図 1.3-16 原子炉建屋付属棟 母屋評価部材の位置 (EL. 35.0m)

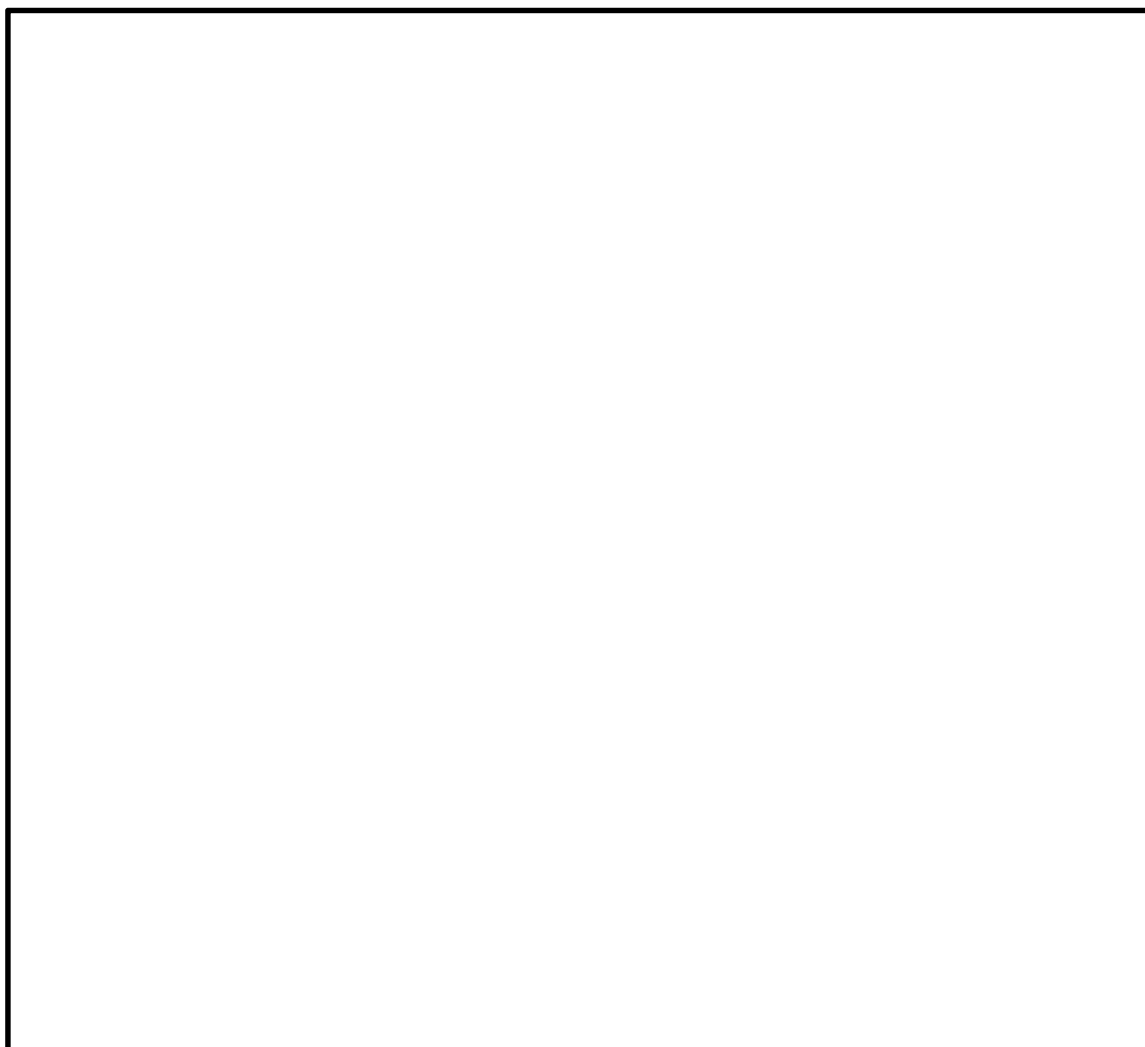


図 1.3-17 原子炉建屋付属棟 母屋評価部材の位置 (EL. 30.3m, 30.0m, 22.0m)

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

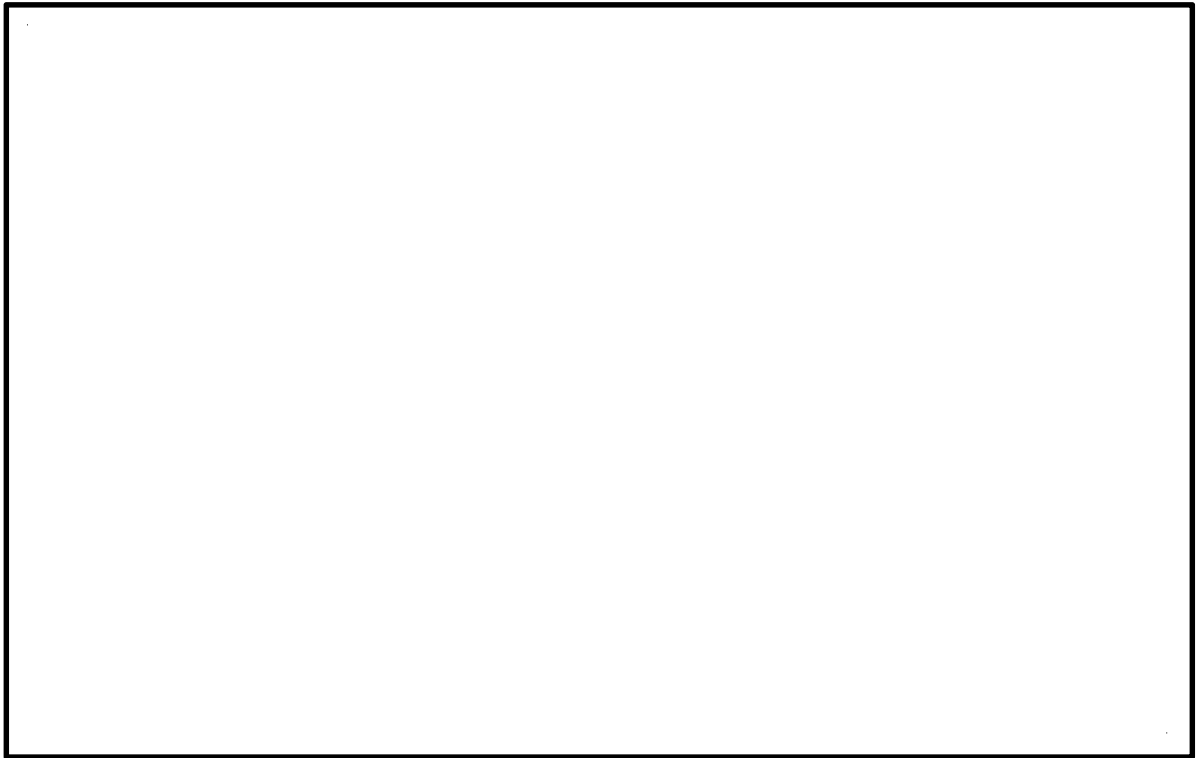
本解析で用いる使用要素を表 2.2-1 に示す。なお、3D-FEM モデルは主トラス架構に生じる曲げモーメントにより主トラス上弦材が負担する軸力を適切に評価するため、屋根スラブをシェル要素でモデル化するとともに、主トラス端部の柱による曲げ拘束を適切に評価するため耐震壁もシェル要素でモデル化する。鉄骨部及び鉄筋コンクリート部の柱・梁をモデル化した梁要素及びトラス要素の解析モデル概要と、屋根スラブ及び耐震壁をモデル化したシェル要素を加えた全要素の解析モデル概要を図 2.2-2 に示す。

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。

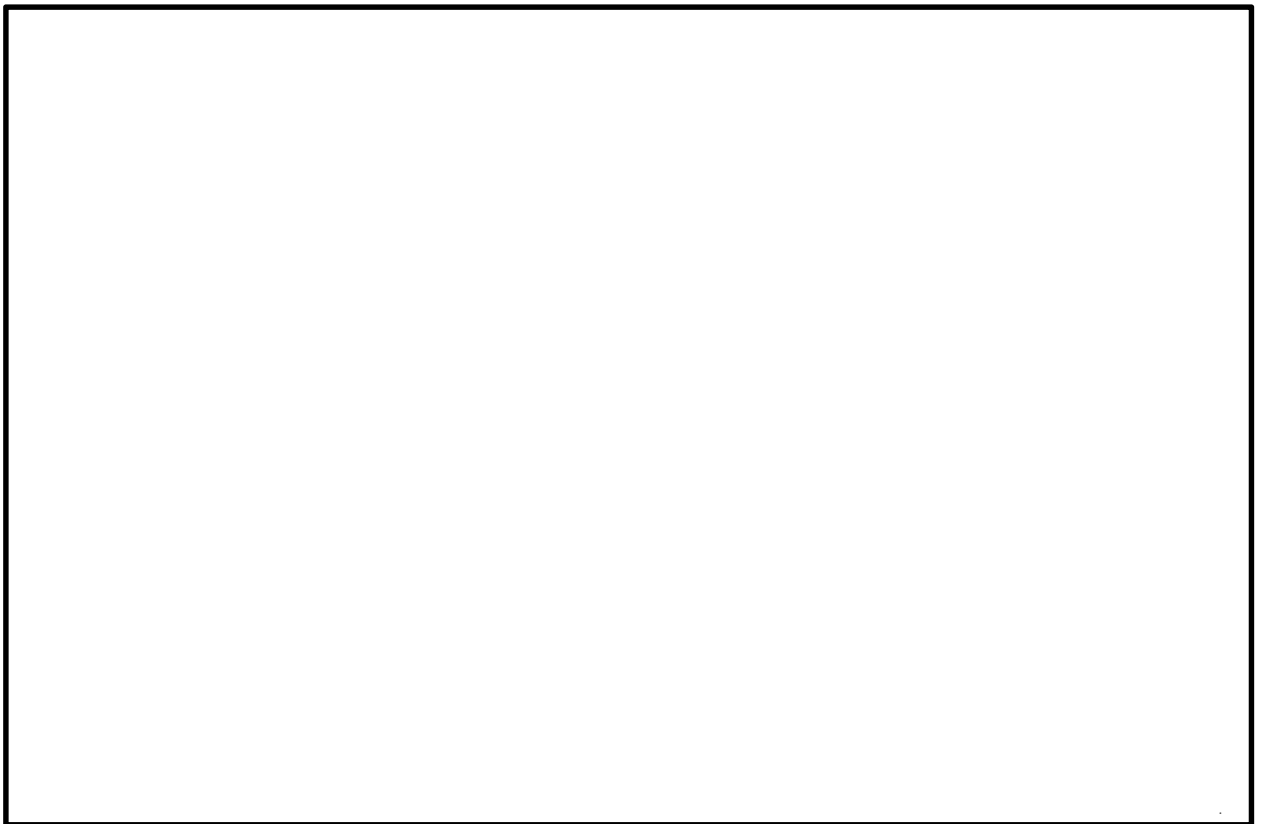
鉄筋コンクリート部では、耐震壁及び屋根トラスはシェル要素を、柱及び梁については梁要素を用いる。

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。

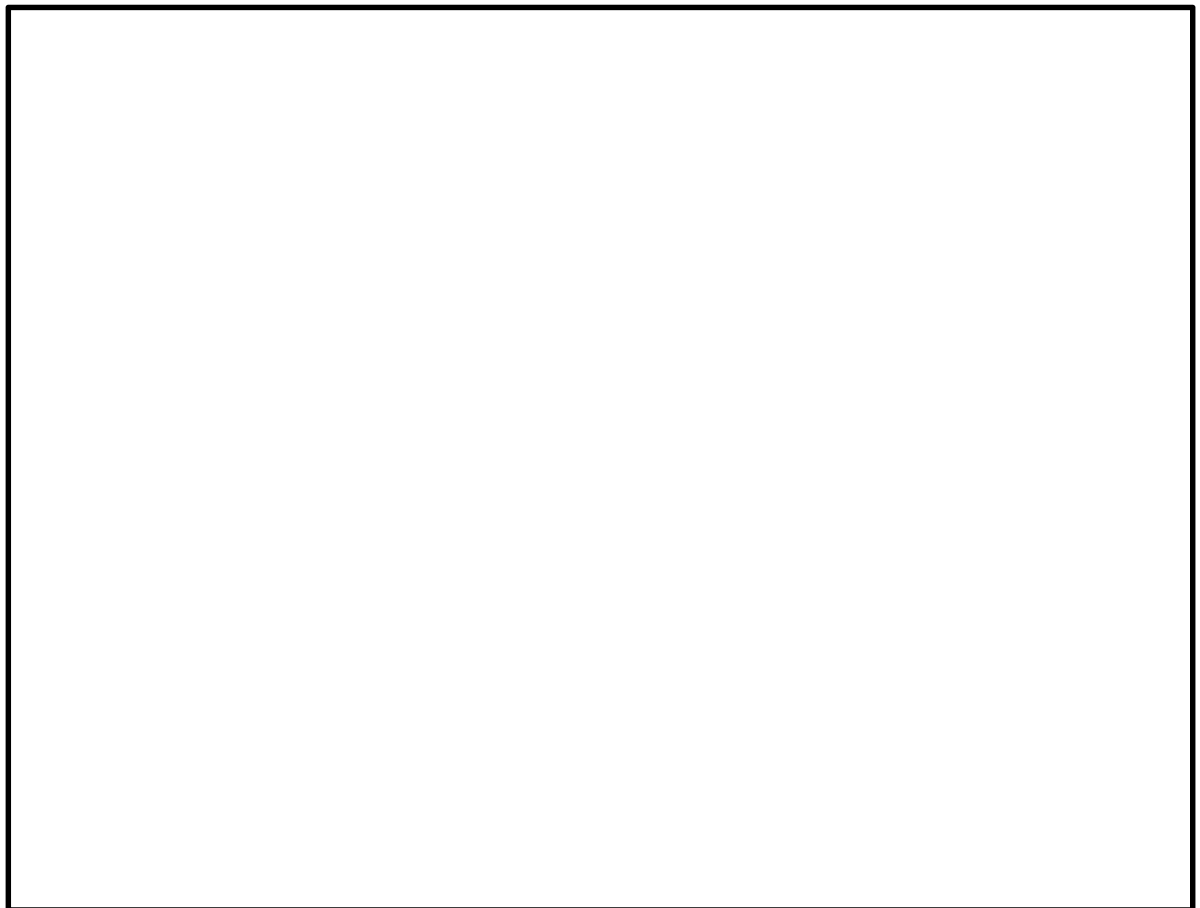


図 2.2-3 解析モデルにおける部材の接続条件（タービン建屋，8 通り^{*}）

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。その他の鉛直荷重（梁、壁等の重量）は、外周梁に等分布の線荷重として作用させる。なお、降下火砕物堆積による鉛直荷重を除く荷重合計は、質点系モデルの屋根面位置の質点重量に一致している。

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	

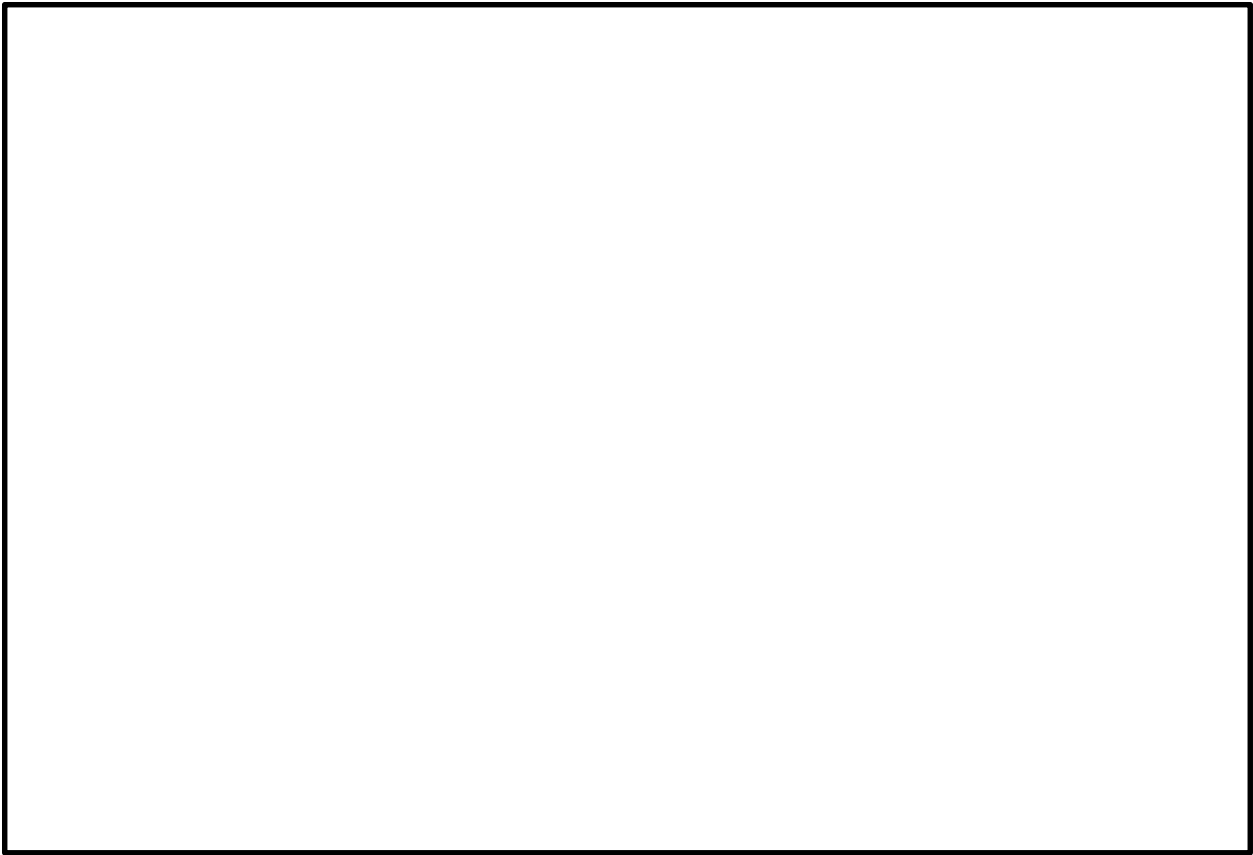


図 2.2-4 荷重の入力方法の概要（タービン建屋）

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、屋根トラス上のスラブ（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。

屋根トラス上のスラブ（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. 40.45 m）

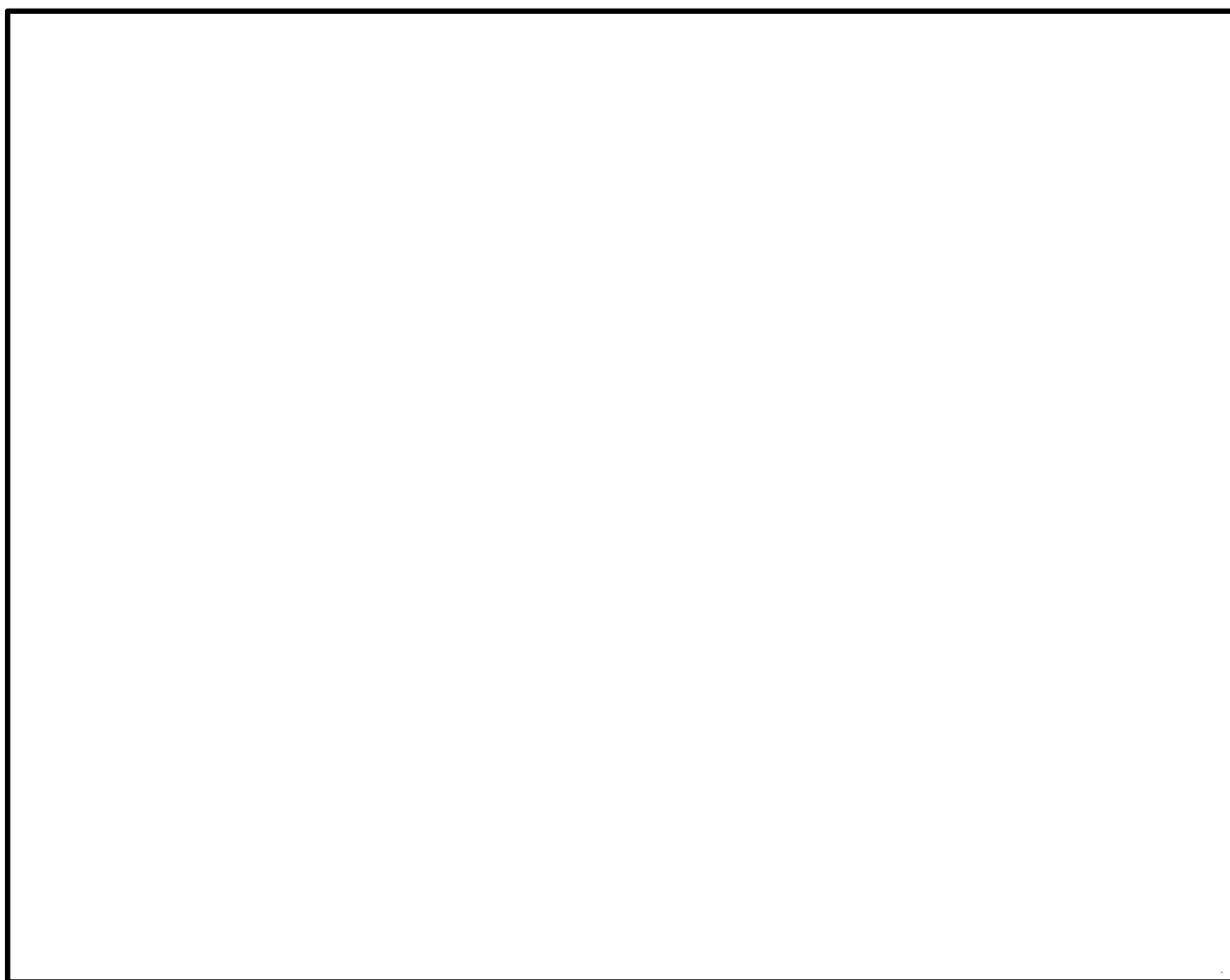


図 2.3-2 タービン建屋 屋根スラブ評価部材の位置 (EL. 28.0 m)

(2) 主トラス

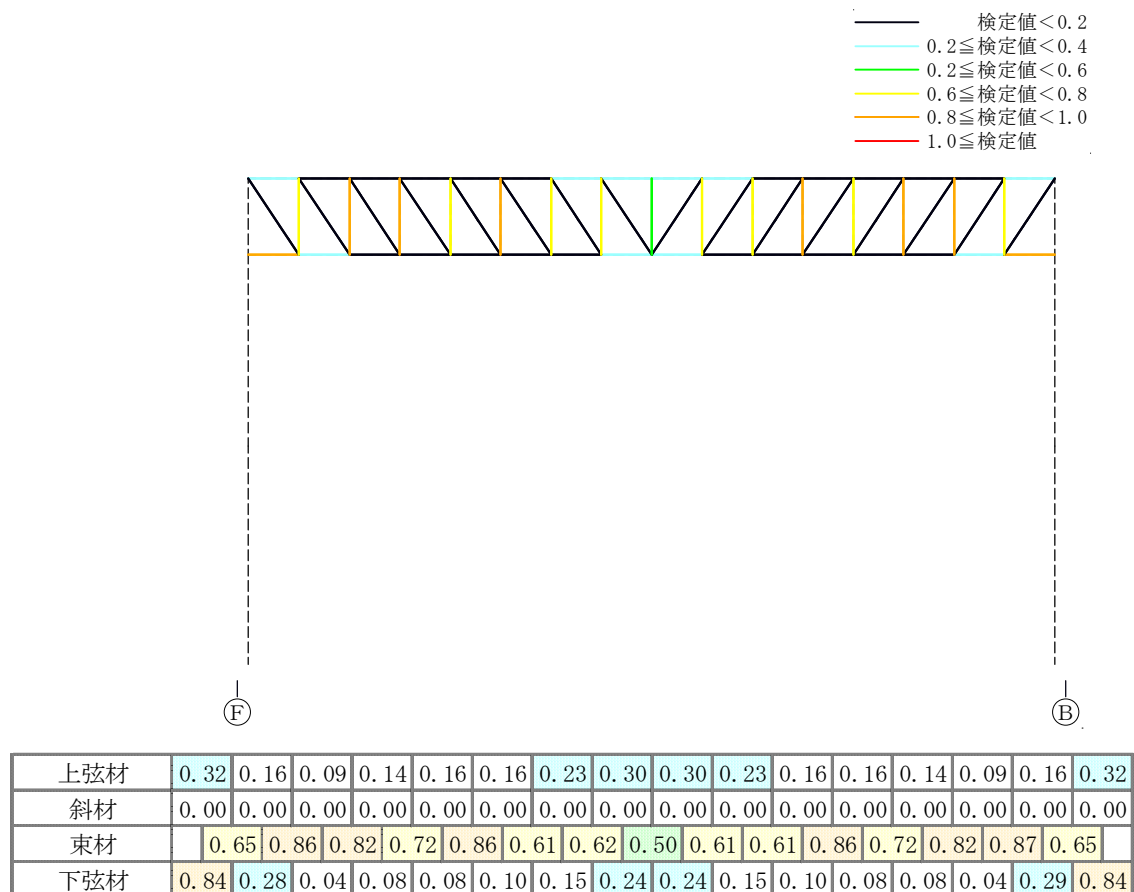
V-3-別添 2-1-6「建屋の強度計算書」には、降下火砕物に対する主トラスの健全性評価の結果として、検定値が最大となる部材の評価結果のみを示した。

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。

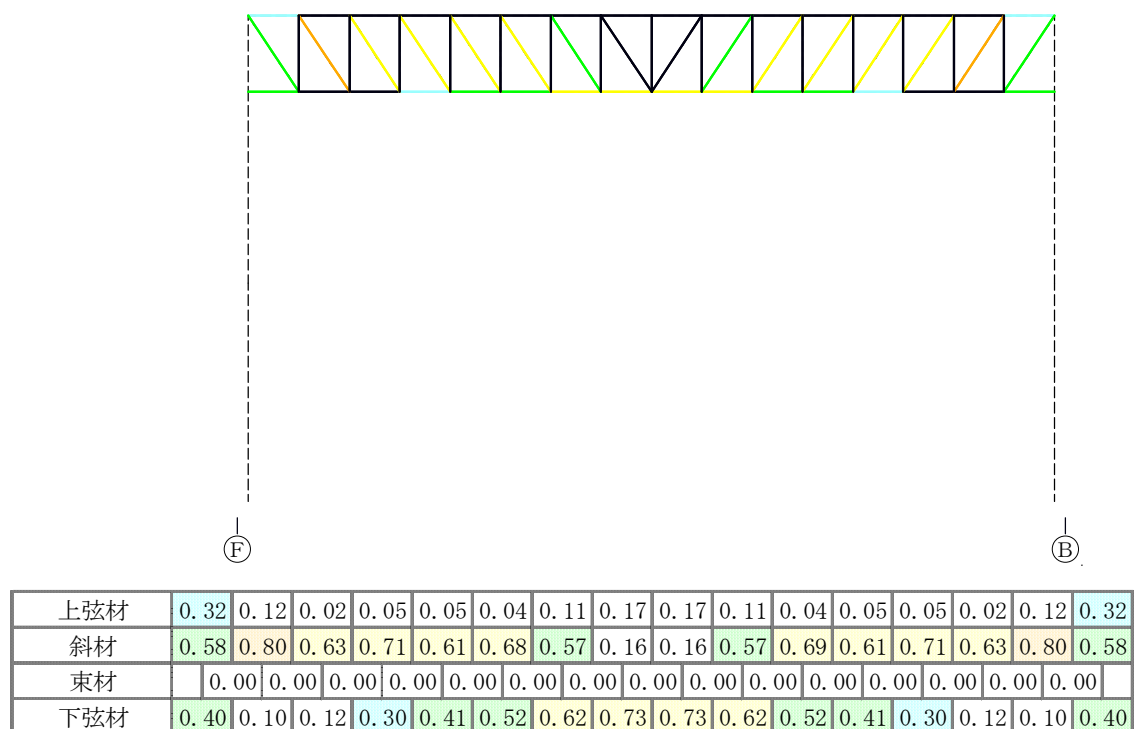
強度計算書に記載したタービン建屋主トラスの評価結果を表 2.3-1 に示す。また、図 2.3-3～図 2.3-10 に通りごとに全ての主トラス部材の検定値を示す。図には、各部位の最大検定値を赤枠で囲い示した。上下弦材及び斜材・束材は、3 通りにおいて検定値が最大となる部材があり、それらの値は表 2.3-1 の値に整合している。

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. 40.45 m	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

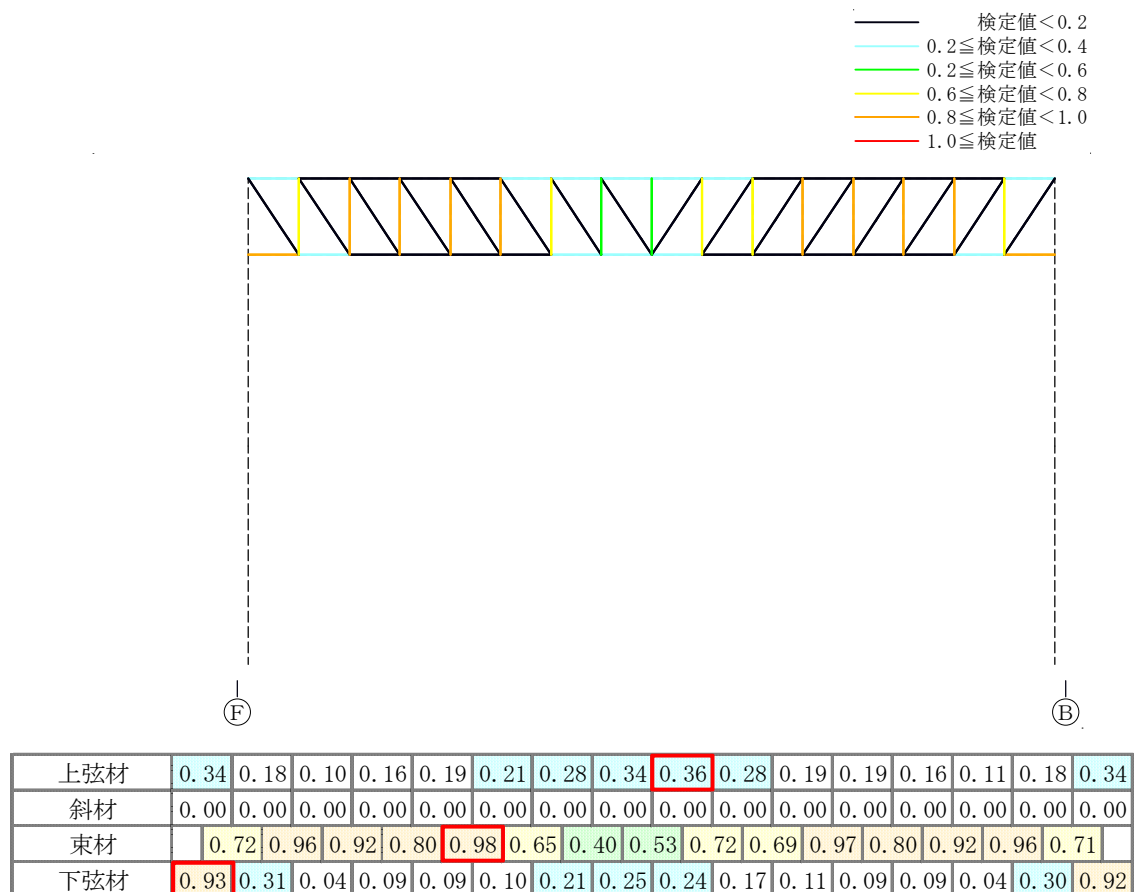


(a) 圧縮（曲げ圧縮）

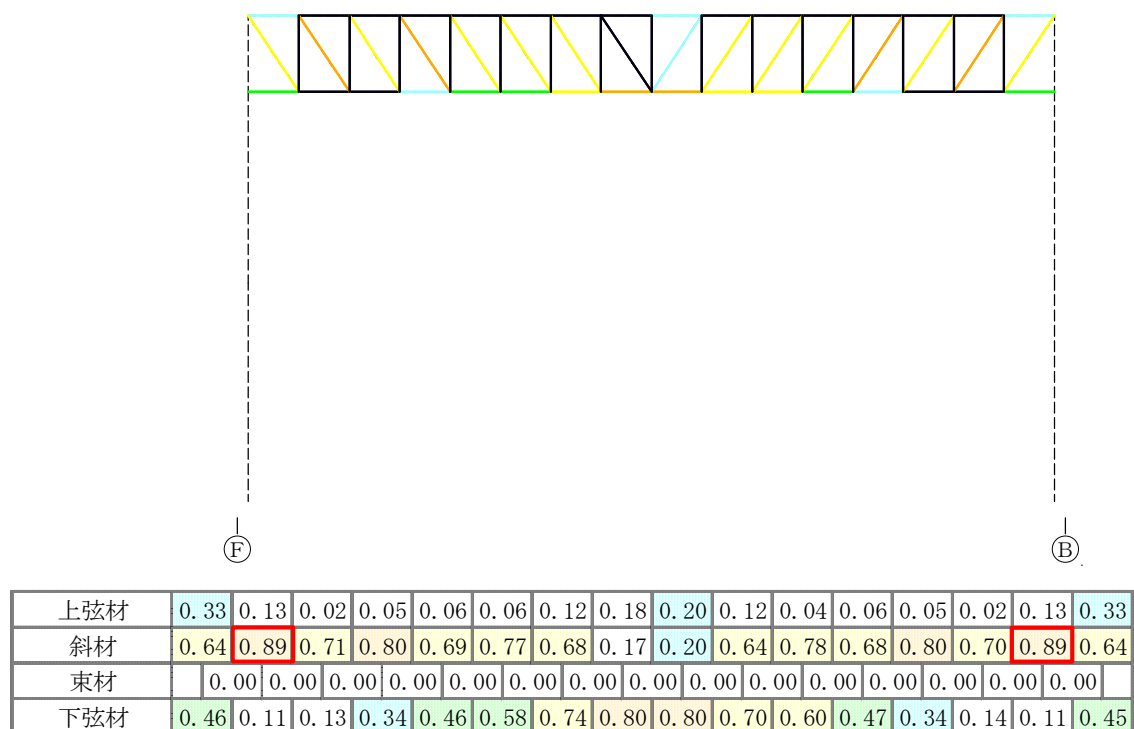


(b) 引張（曲げ引張） : 最大検定値

図 2.3-3 主トラスの検定比（2 通り）

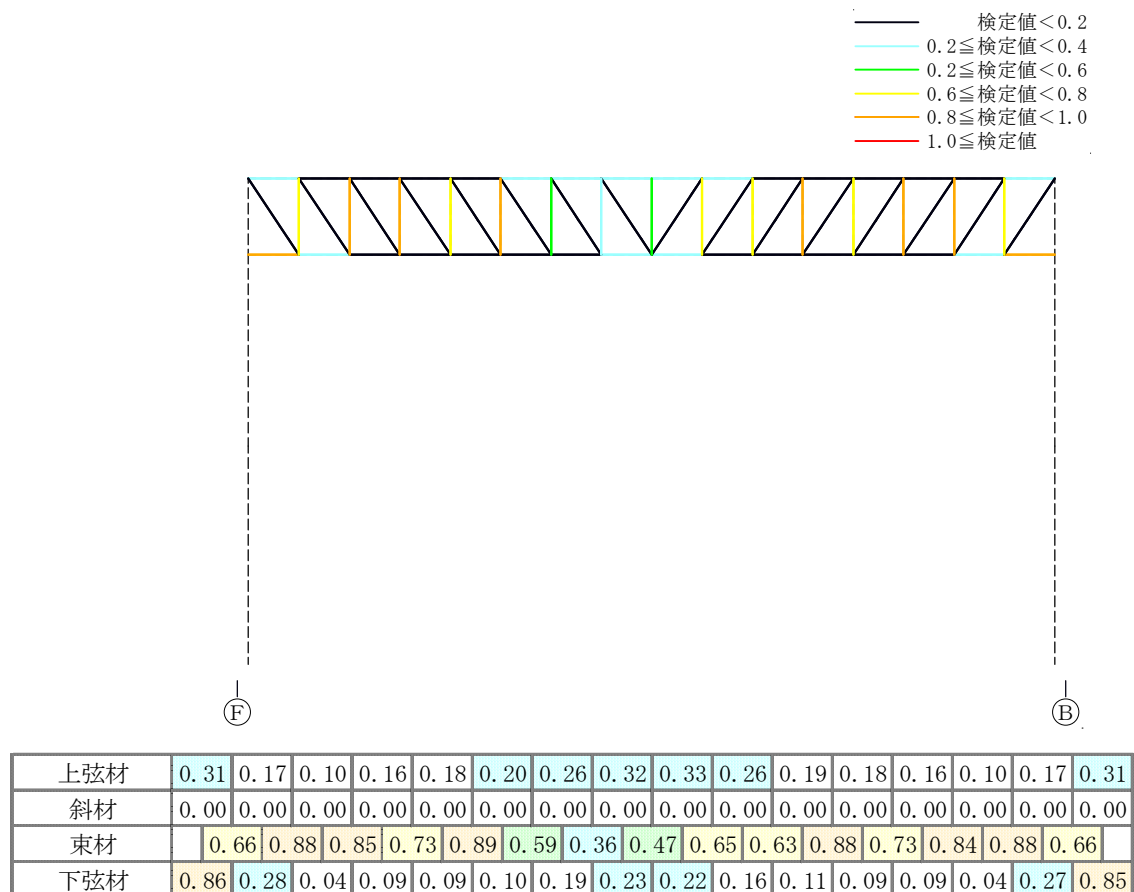


(a) 圧縮（曲げ圧縮）

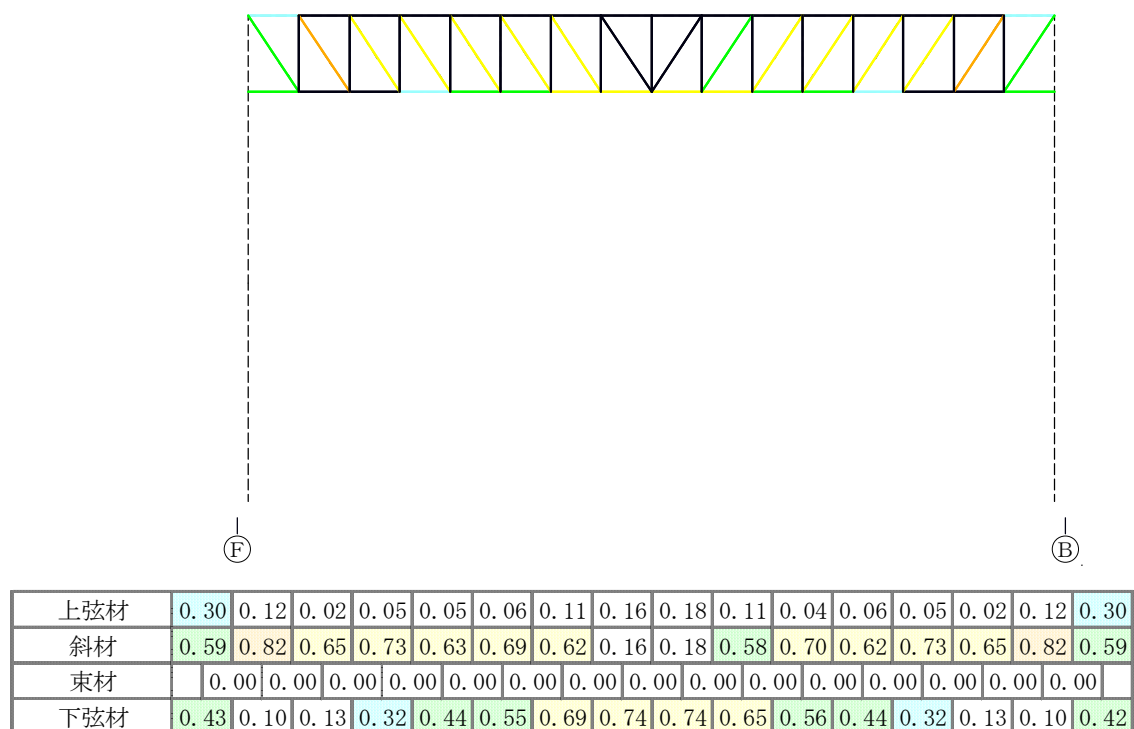


(b) 引張（曲げ引張） : 最大検定値

図 2.3-4 主トラスの検定比（3 通り）



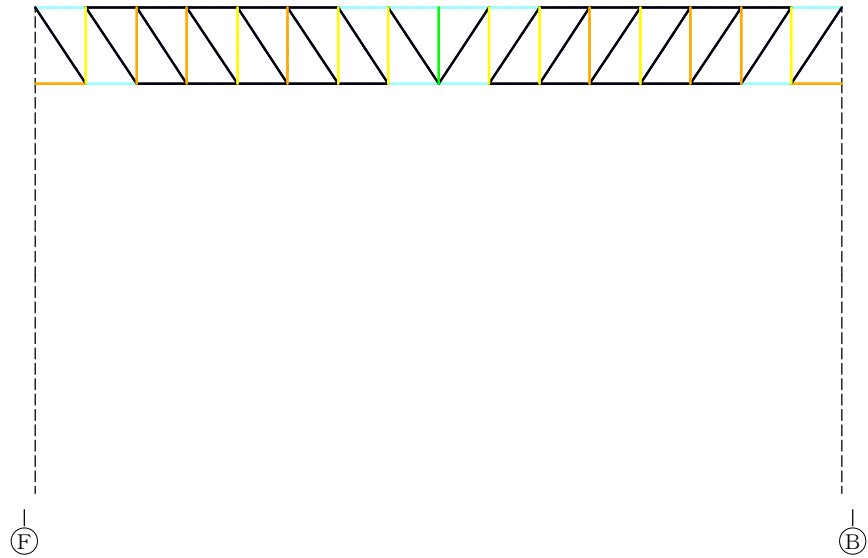
(a) 圧縮（曲げ圧縮）



(b) 引張（曲げ引張） : 最大検定値

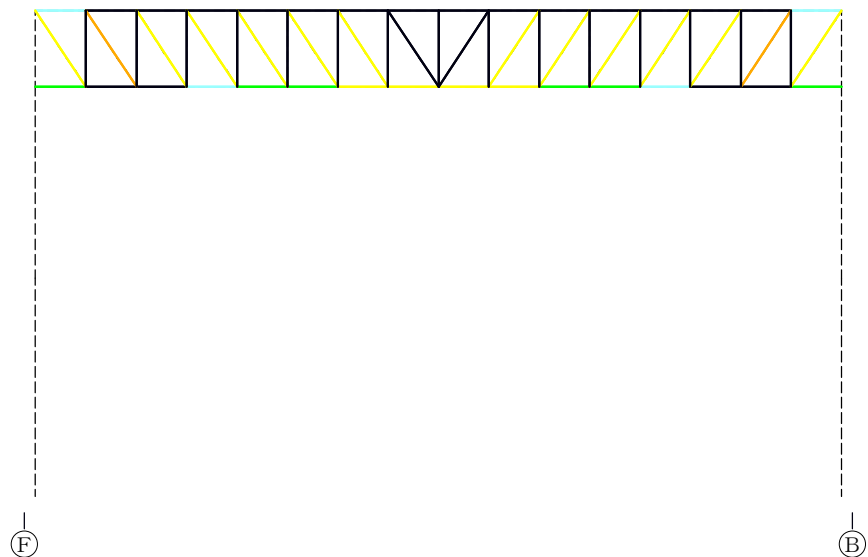
図 2.3-5 主トラスの検定比（4 通り）

— 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

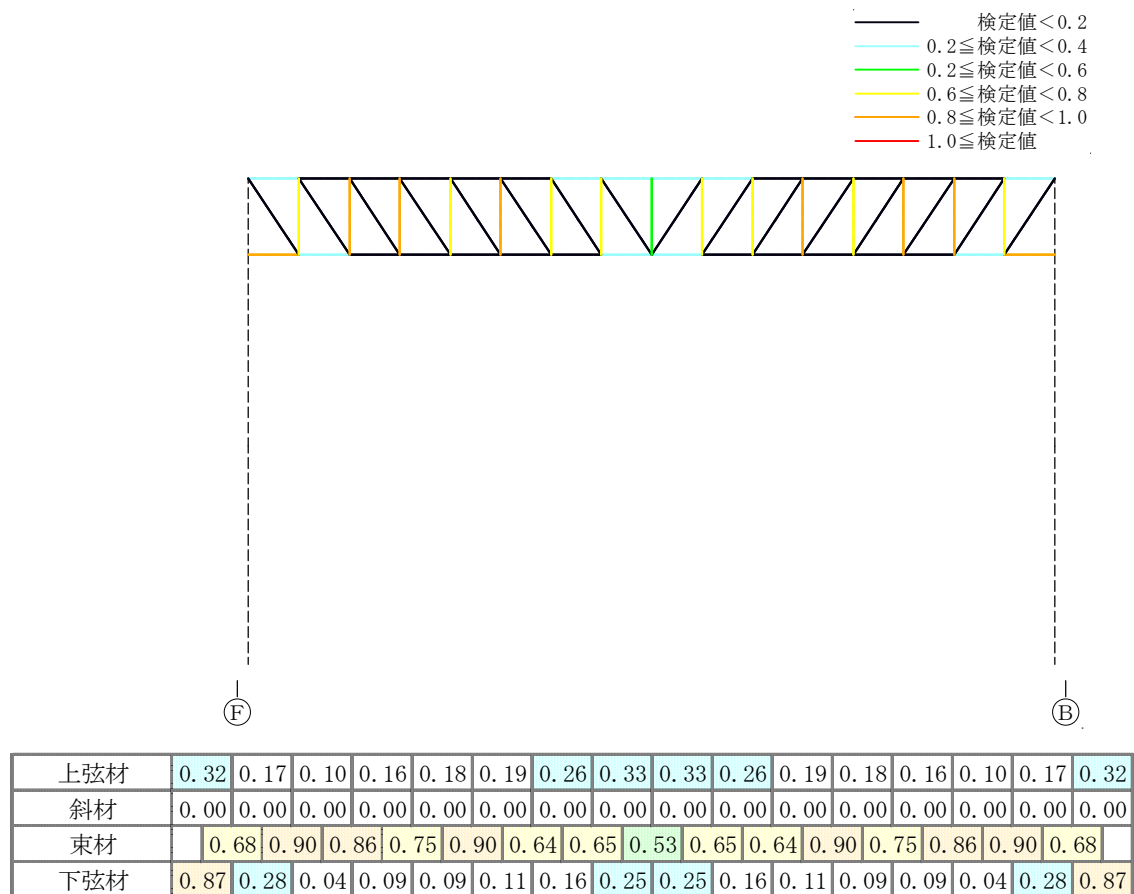
(a) 圧縮（曲げ圧縮）



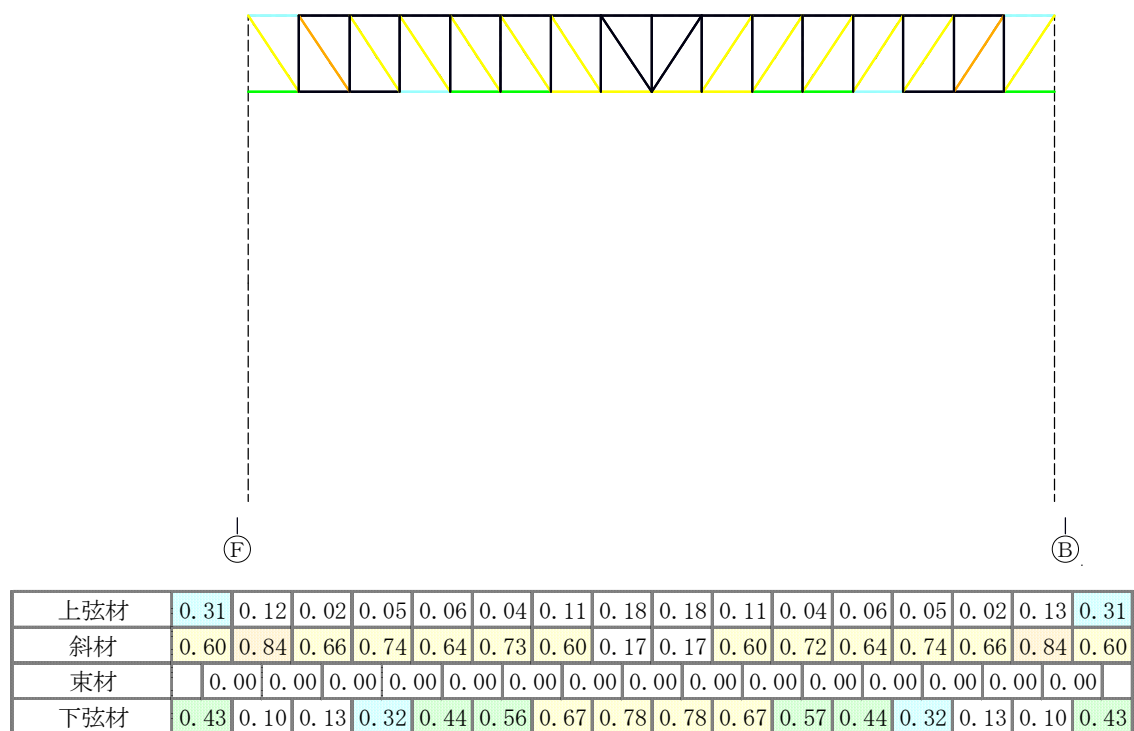
上弦材	0.31	0.13	0.02	0.05	0.06	0.04	0.11	0.18	0.18	0.11	0.04	0.06	0.05	0.02	0.13	0.31
斜材	0.61	0.84	0.67	0.75	0.64	0.73	0.61	0.17	0.17	0.61	0.73	0.64	0.75	0.67	0.84	0.61
束材		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
下弦材	0.43	0.10	0.13	0.33	0.45	0.57	0.67	0.79	0.79	0.67	0.57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

(b) 引張（曲げ引張） : 最大検定値

図 2.3-6 主トラスの検定比（5 通り）



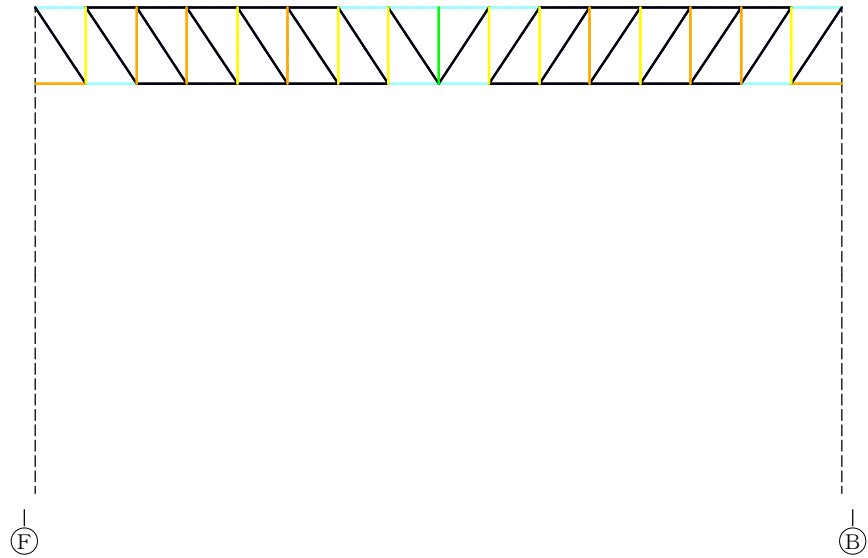
(a) 圧縮（曲げ圧縮）



(b) 引張（曲げ引張） : 最大検定値

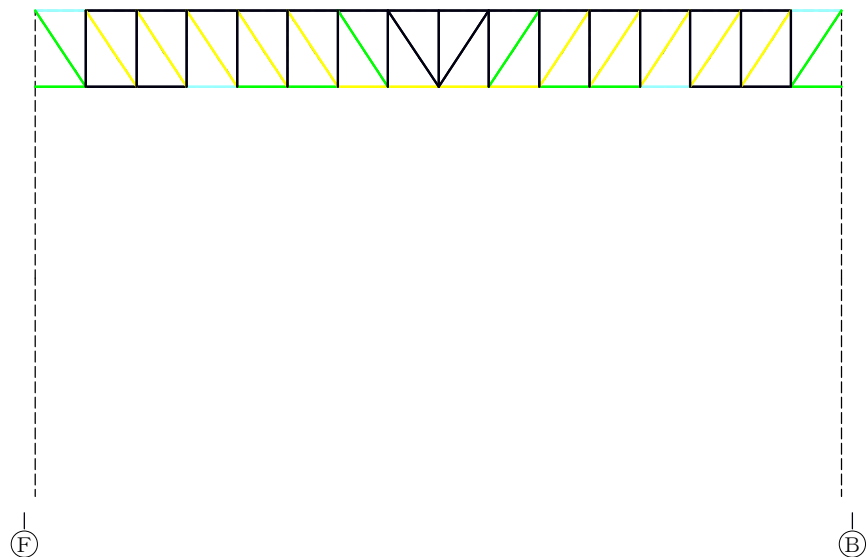
図 2.3-7 主トラスの検定比（6 通り）

— 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

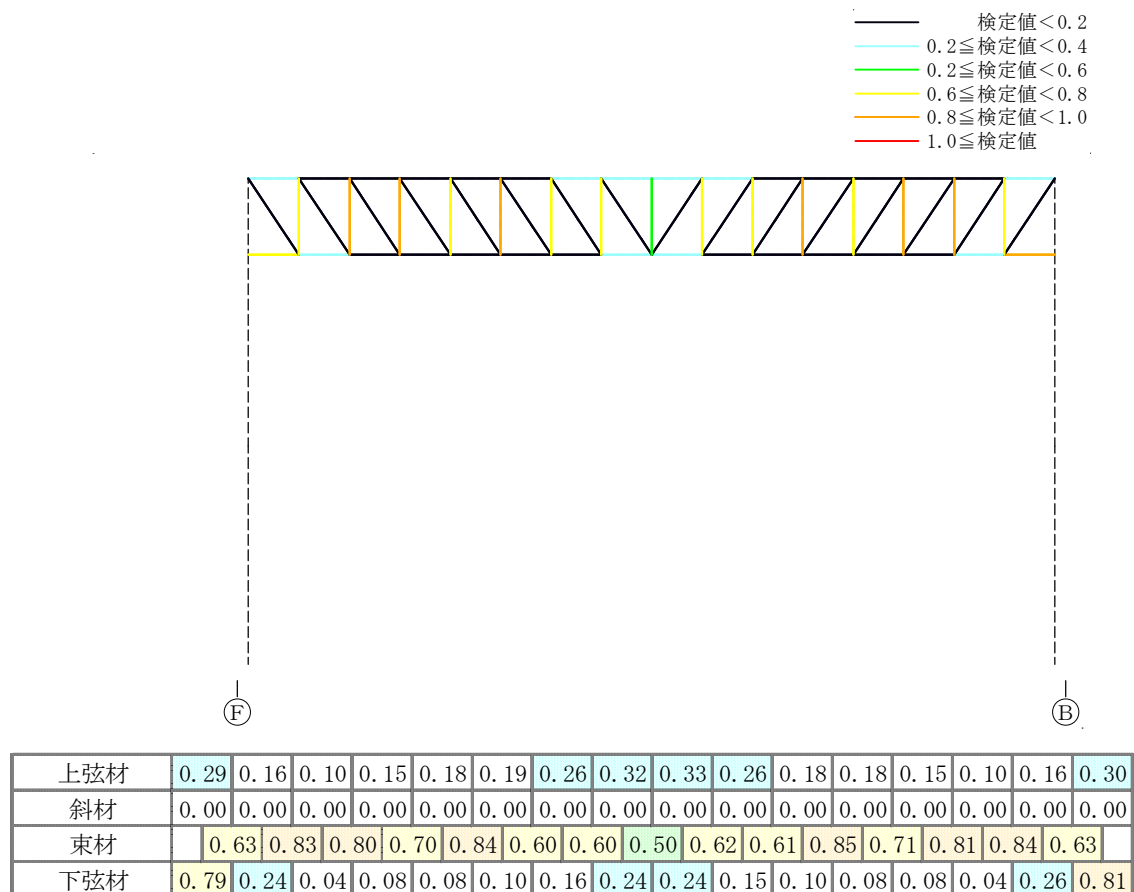
(a) 圧縮（曲げ圧縮）



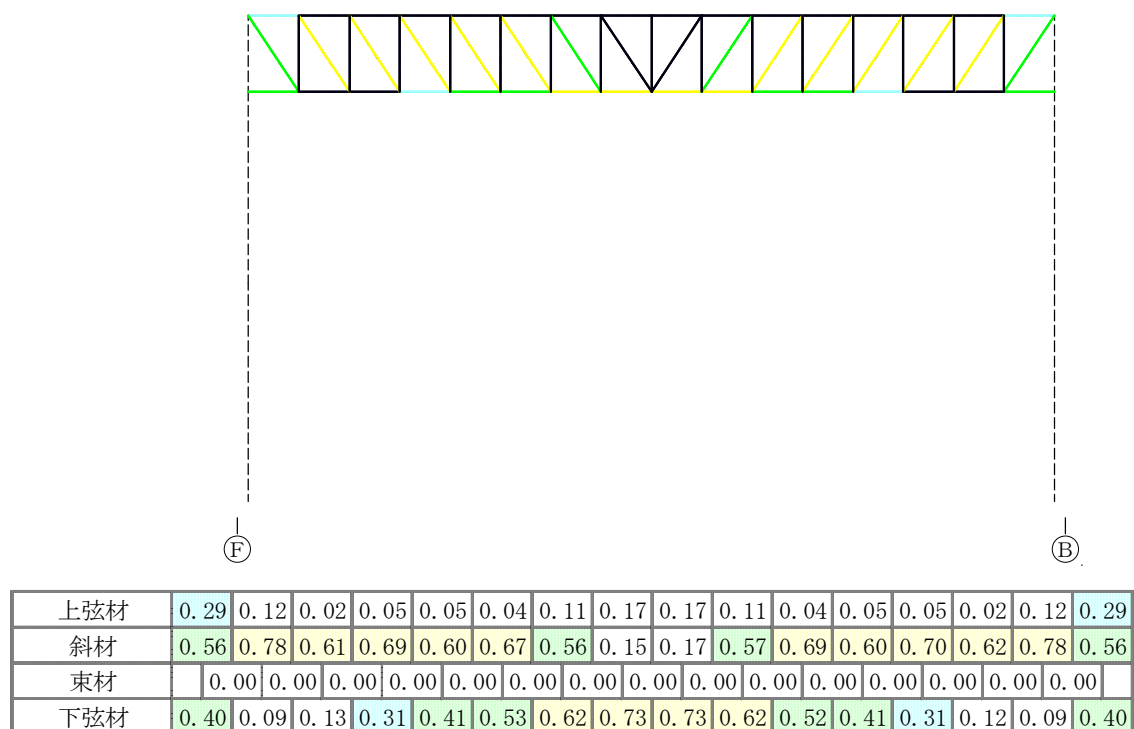
上弦材	0.29	0.12	0.02	0.05	0.05	0.04	0.11	0.17	0.17	0.11	0.04	0.05	0.05	0.02	0.12	0.29
斜材	0.57	0.79	0.62	0.70	0.60	0.68	0.57	0.16	0.16	0.57	0.68	0.60	0.70	0.62	0.79	0.57
束材		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
下弦材	0.41	0.09	0.12	0.31	0.42	0.53	0.63	0.74	0.74	0.63	0.53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

(b) 引張（曲げ引張） : 最大検定値

図 2.3-8 主トラスの検定比（7 通り）

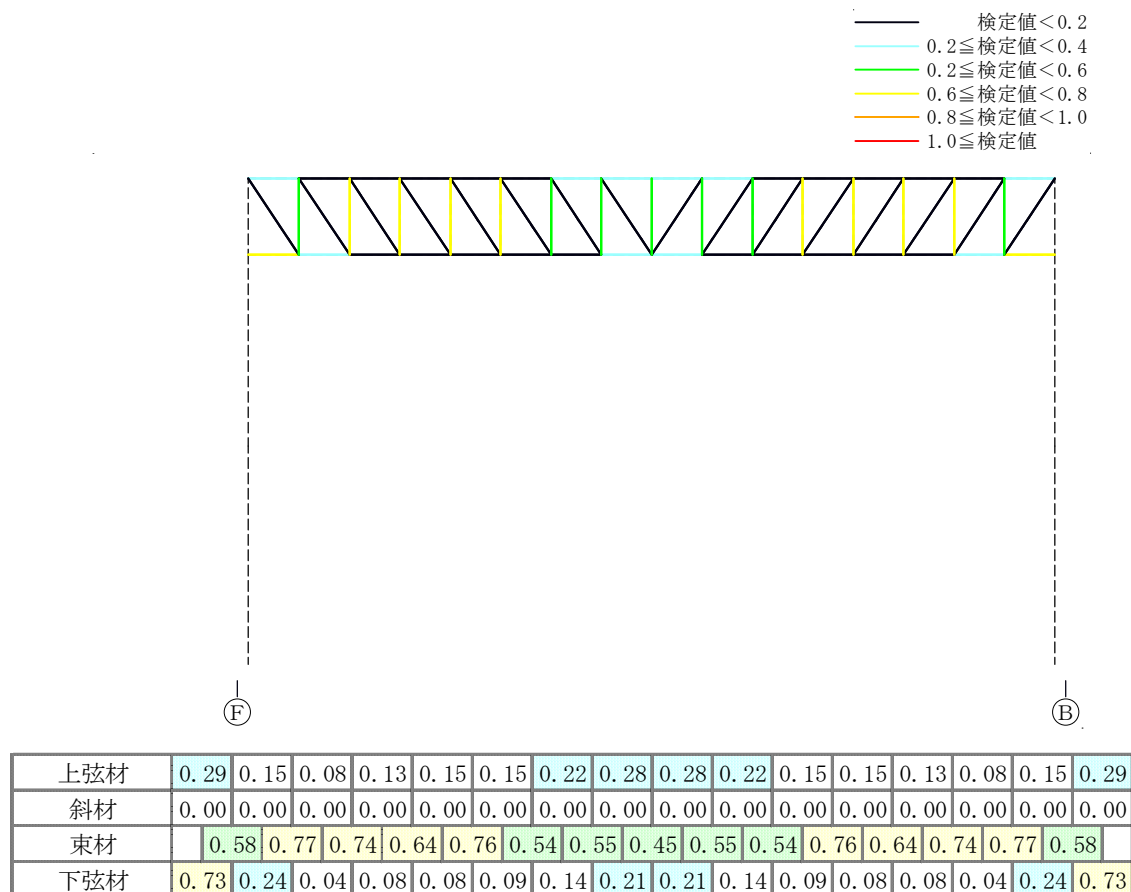


(a) 圧縮 (曲げ圧縮)

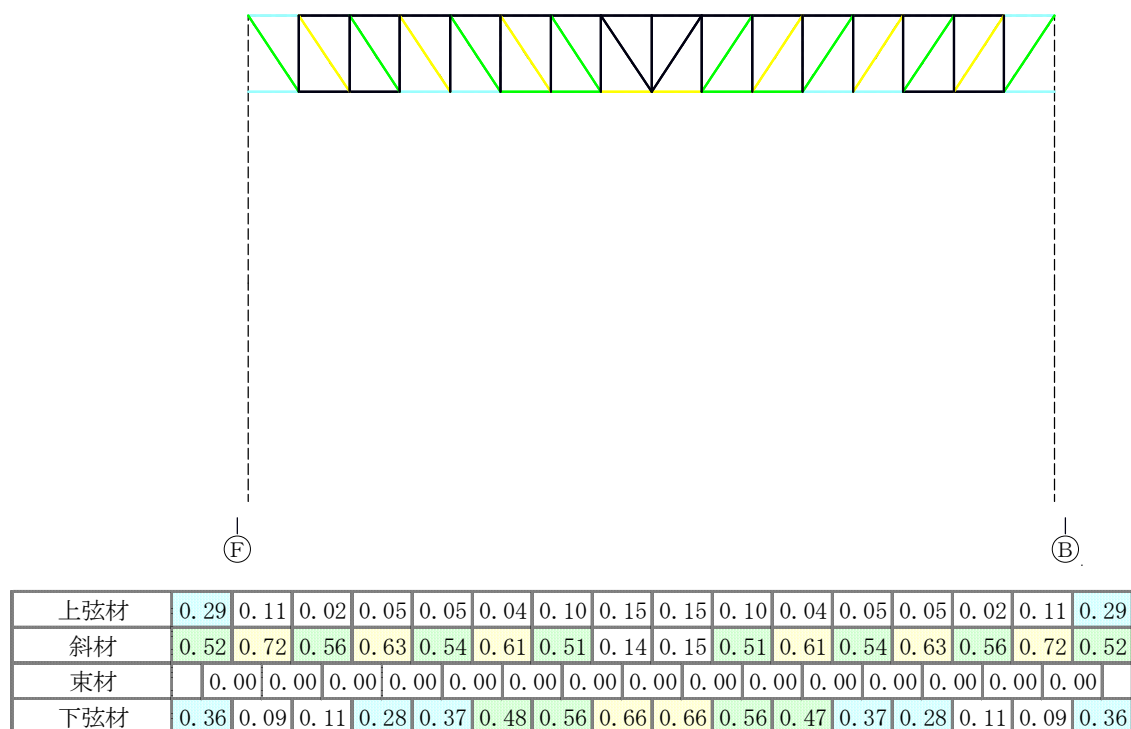


(b) 引張 (曲げ引張) : 最大検定値

図 2.3-9 主トラスの検定比 (8 通り)



(a) 圧縮 (曲げ圧縮)



(b) 引張 (曲げ引張) : 最大検定値

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。

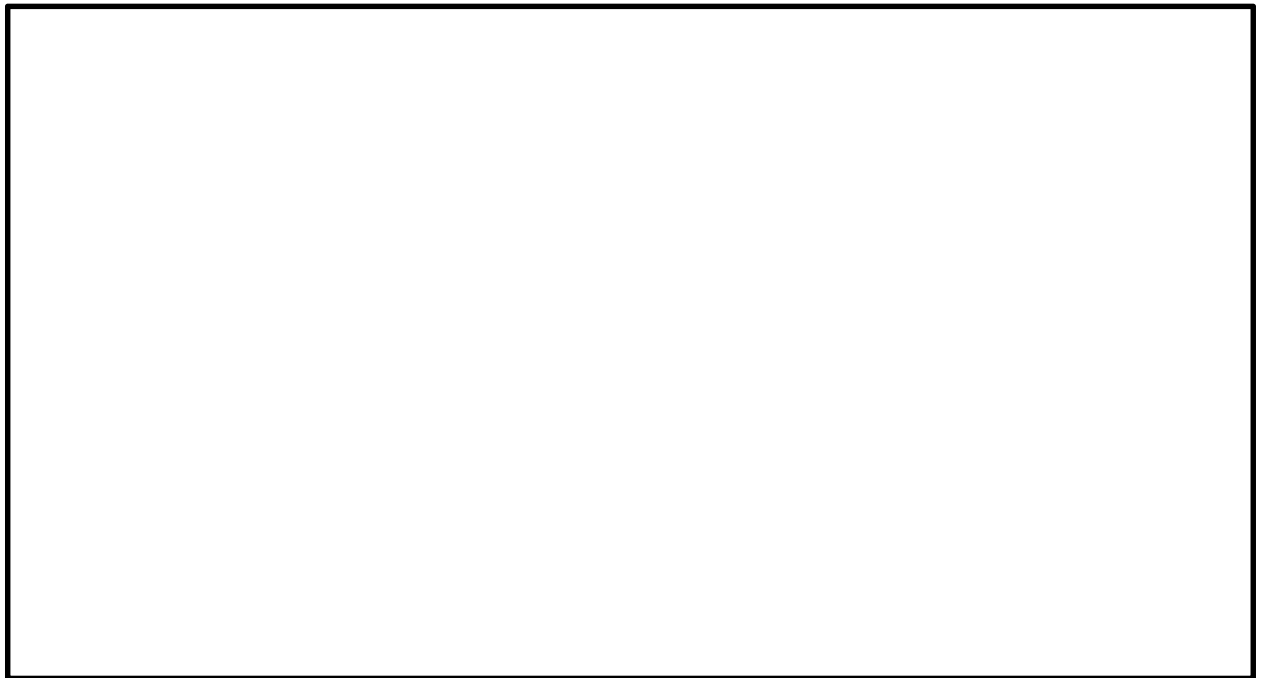


図 2.3-10 タービン建屋 母屋の評価部材

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

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，降下火碎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

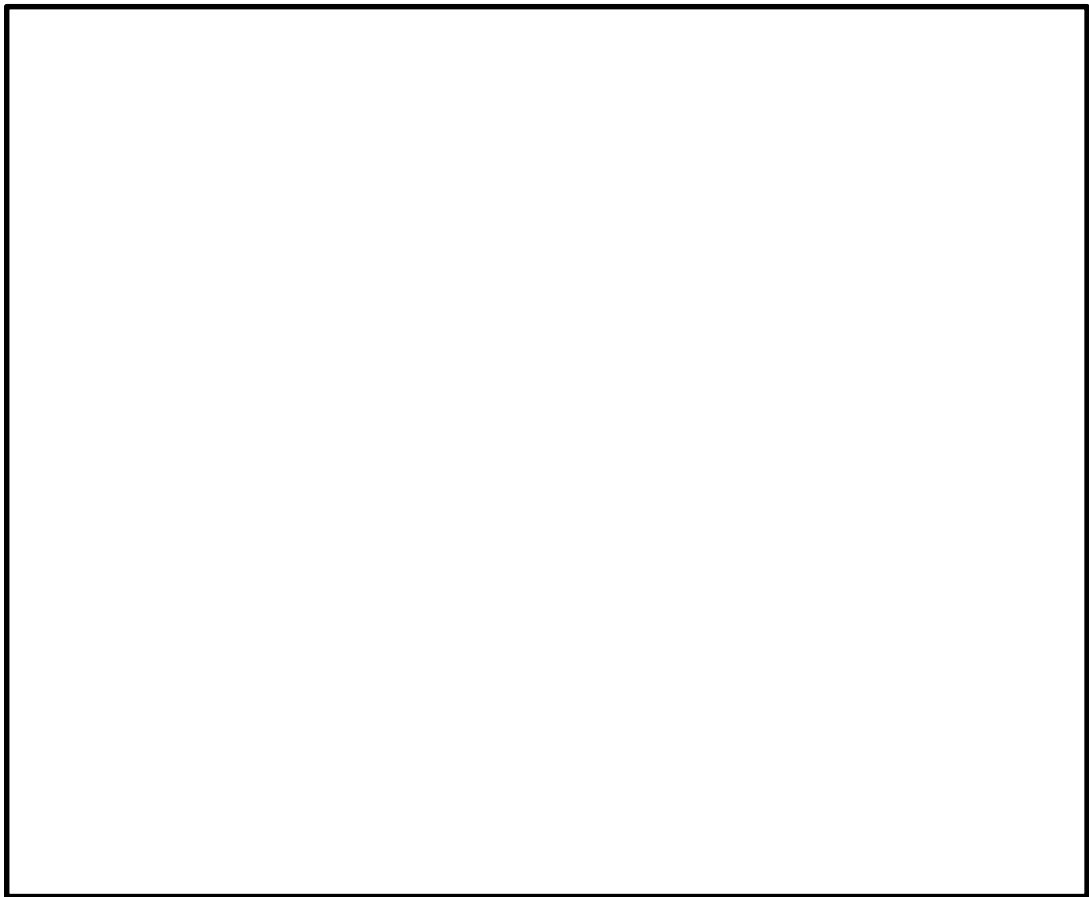
本解析で用いる使用要素を表 3.2-1 に示す。なお、3D-FEM モデルは主トラス架構に生じる曲げモーメントにより主トラス弦材が負担する軸力を適切に評価するため、屋根スラブをシェル要素でモデル化するとともに、主トラス端部の柱による曲げ拘束を適切に評価するため柱及び耐震壁をモデル化する。鉄骨部及び鉄筋コンクリート部の柱・梁をモデル化した梁要素及びトラス要素の解析モデル概要と、屋根スラブ及び耐震壁をモデル化したシェル要素を加えた全要素の解析モデル概要を図 3.2-2 に示す。なお、本 3D-FEM モデルは耐震評価モデルを兼用しているため、基礎スラブ及び杭をモデル化しているが、本評価において影響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

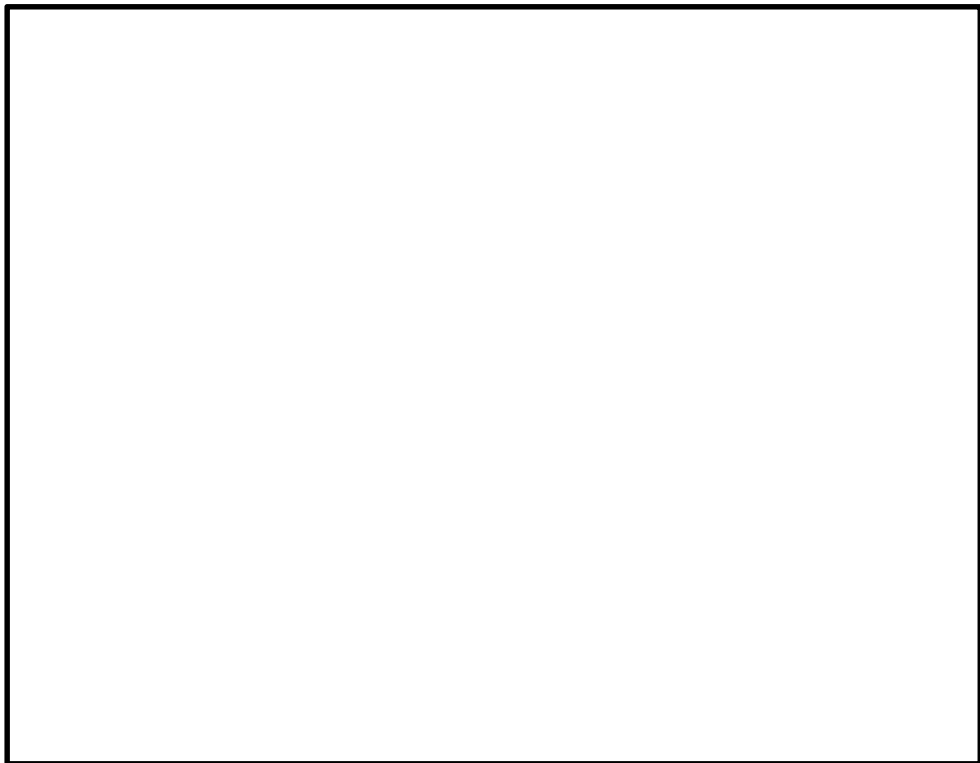
鉄筋コンクリート部では、耐震壁及び屋根スラブはシェル要素を、柱及び梁については梁要素を用いる。

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。

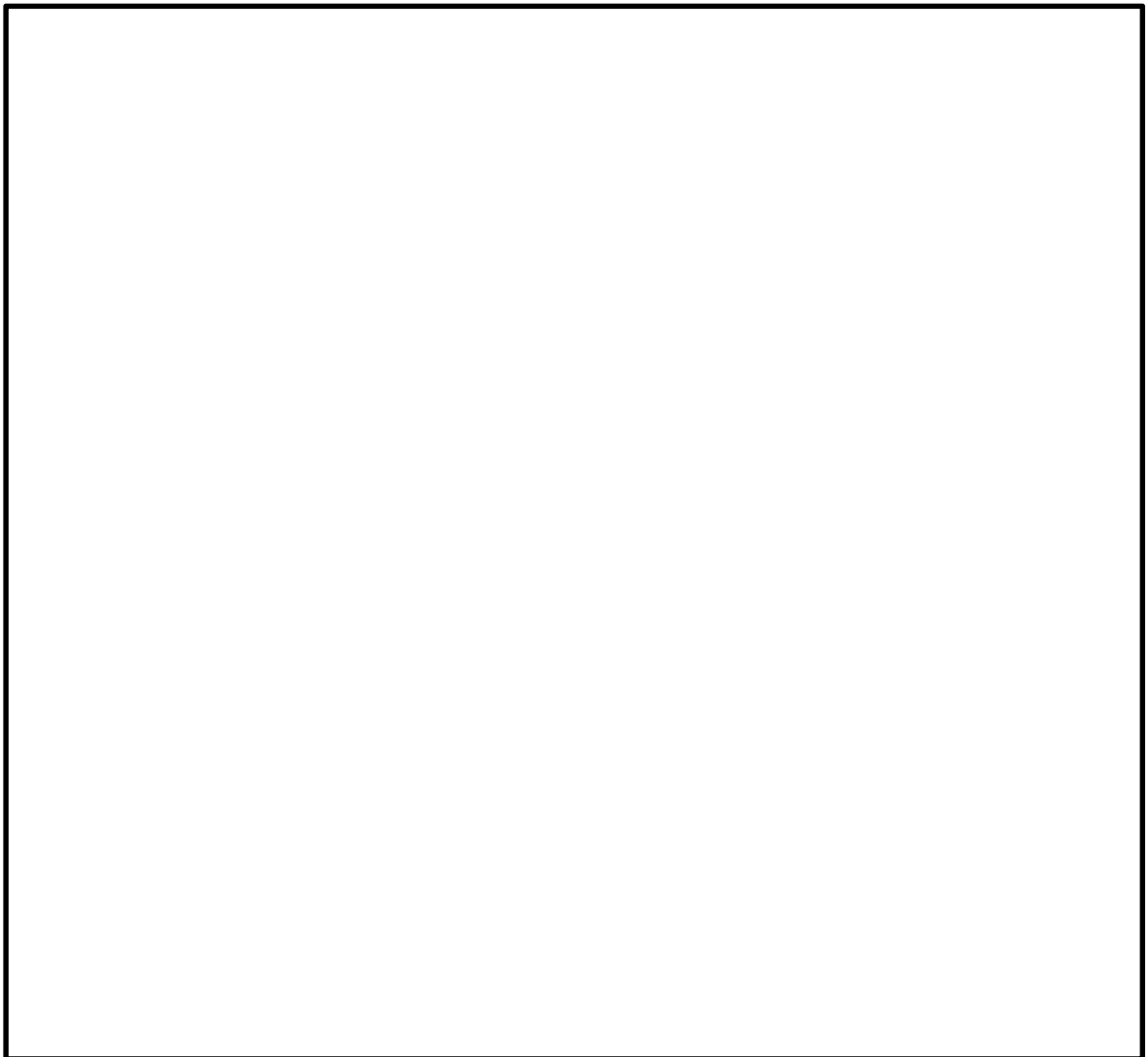


図 3.2-3 解析モデルにおける主トラス部材の接続条件*（使用済燃料乾式貯蔵建屋）

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、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	

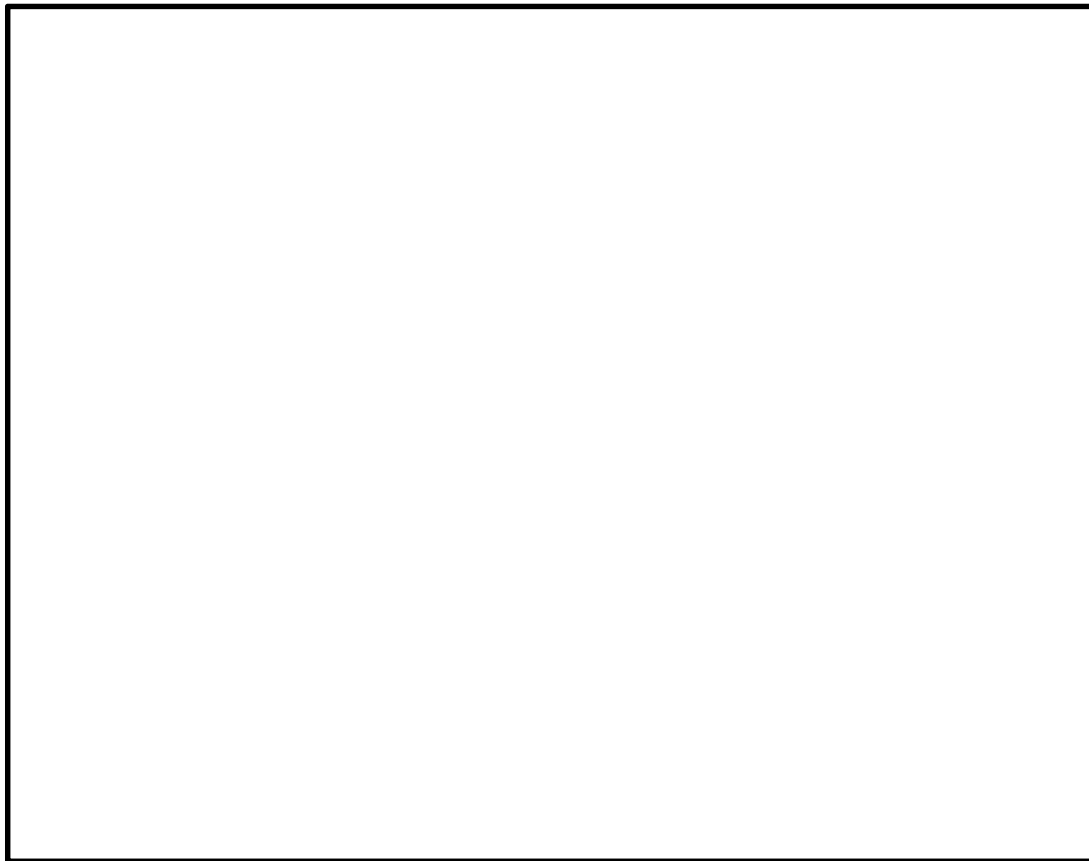


図 3.2-4 荷重の入力方法の概要（使用済燃料乾式貯蔵建屋）

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（EL. 29.2 m）

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

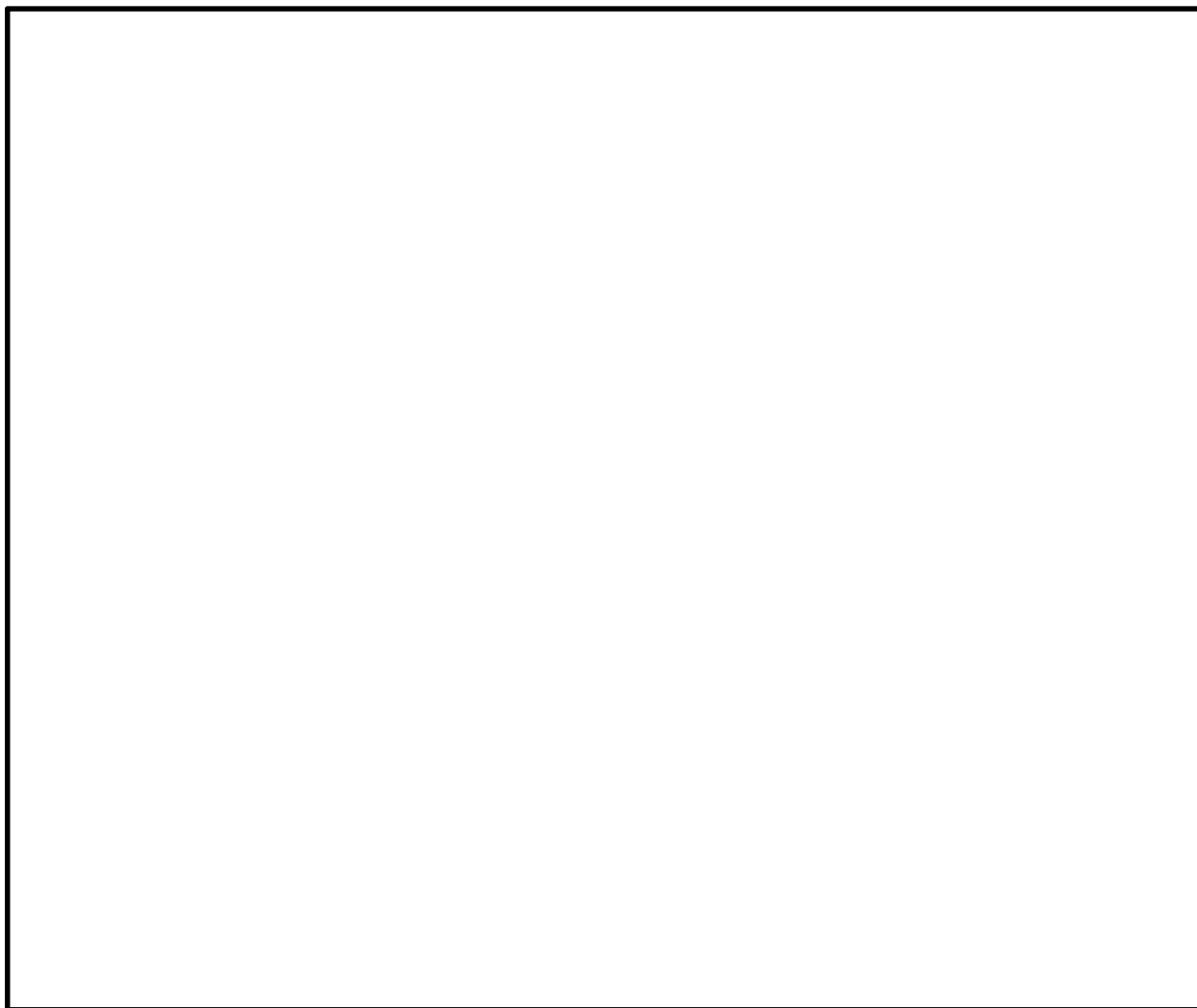


図 3.3-4 使用済燃料乾式貯蔵建屋 屋根スラブ配筋マップ

(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. 29.20 m	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. 29.20 m	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

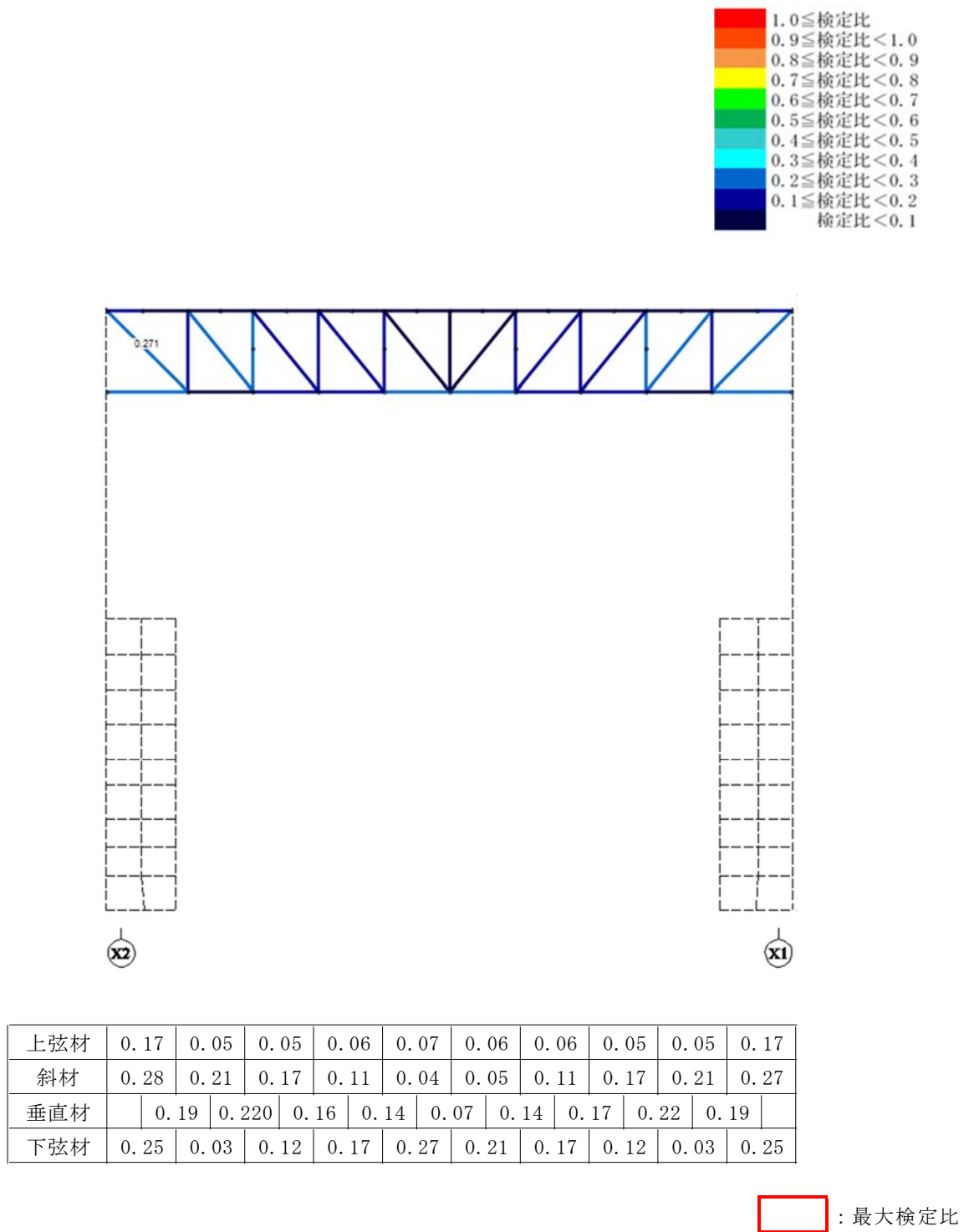
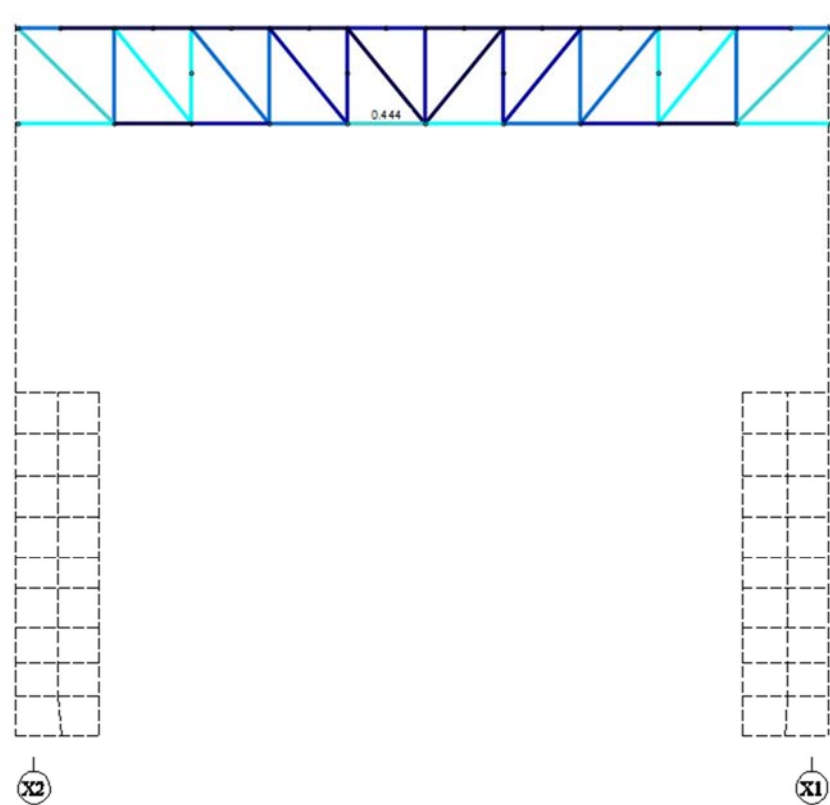
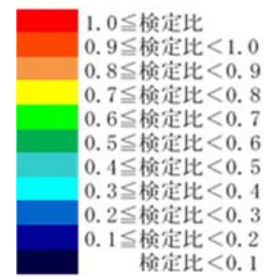


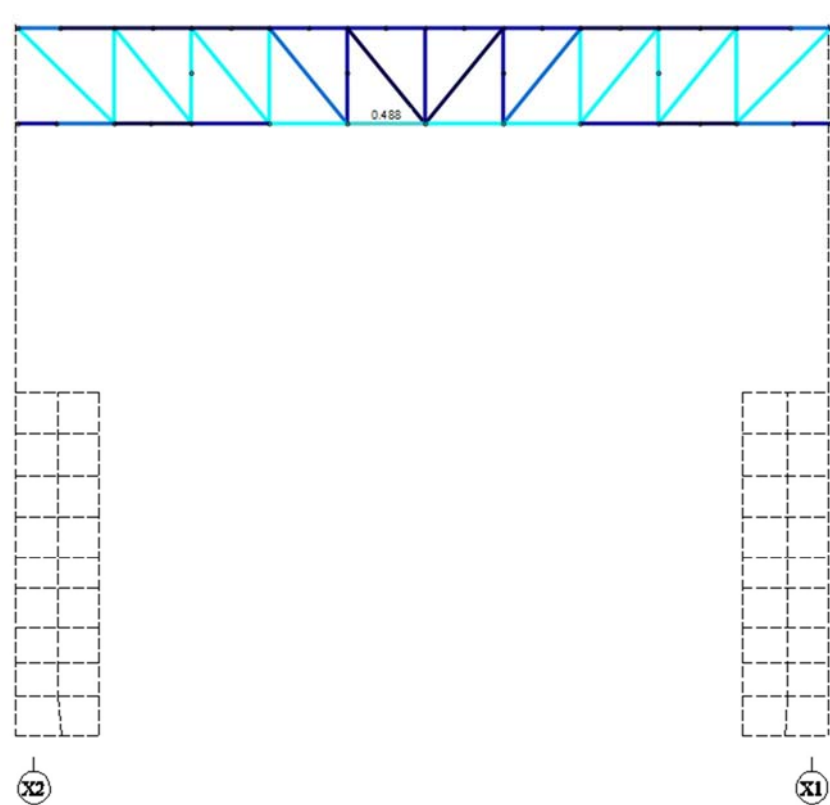
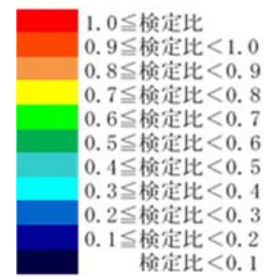
図 3.3-5 主トラスの検定比 (Y2 通り)



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

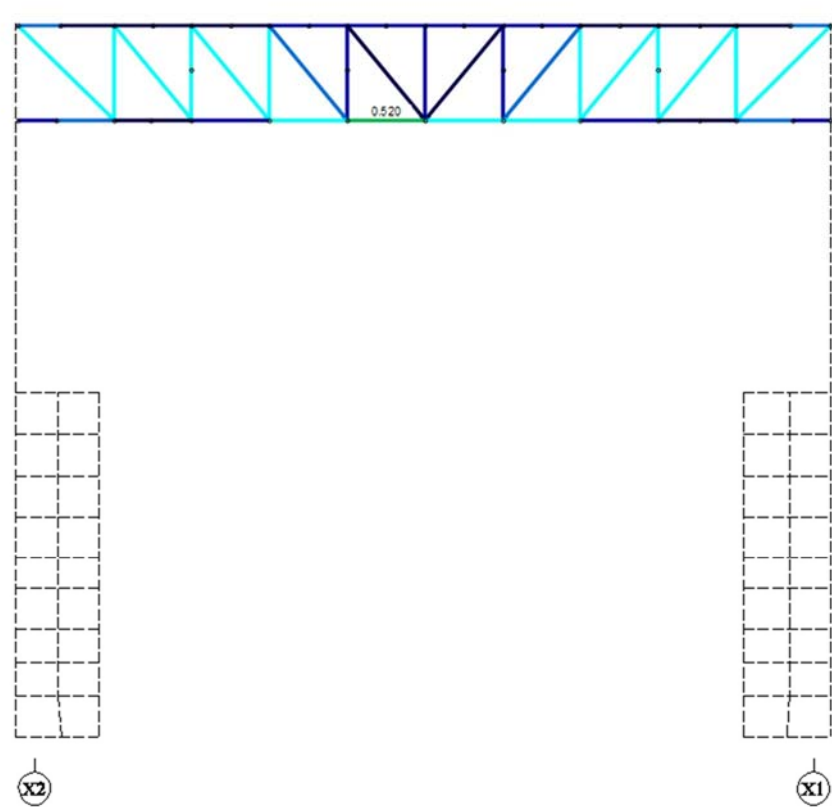
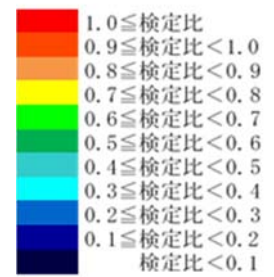
図 3.3-6 主トラスの検定比 (Y3 通り)



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

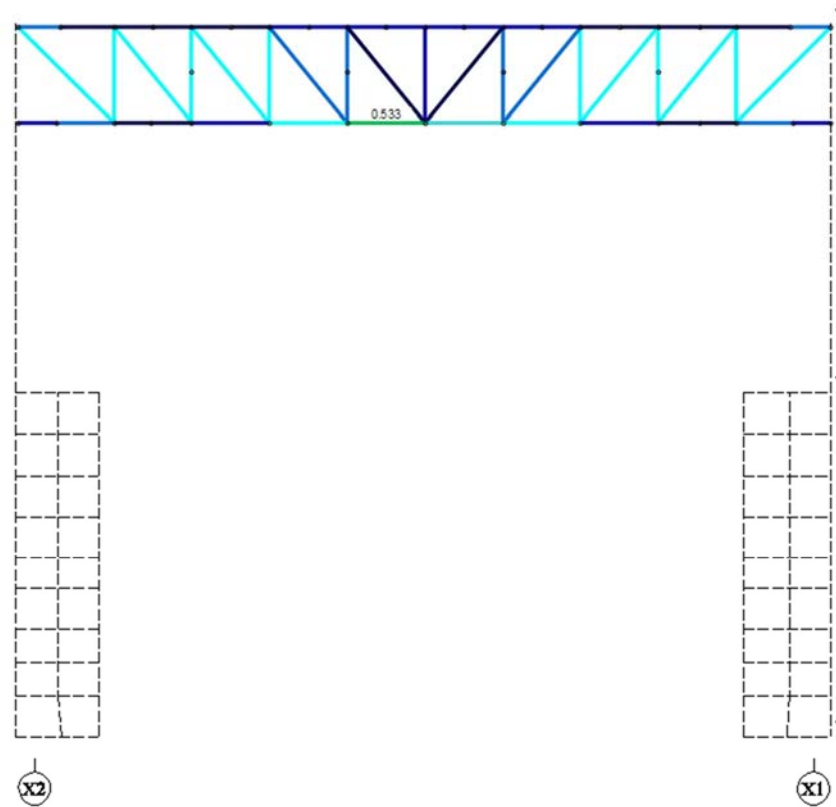
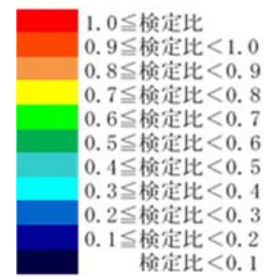
図 3.3-7 主トラスの検定比 (Y4 通り)



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

0.24 : 最大検定値

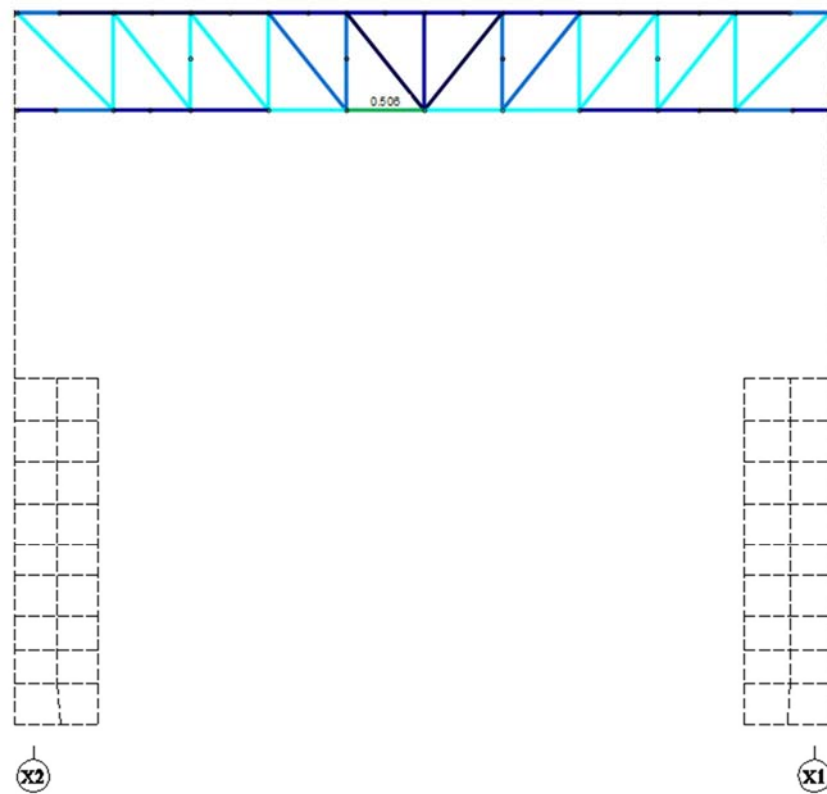
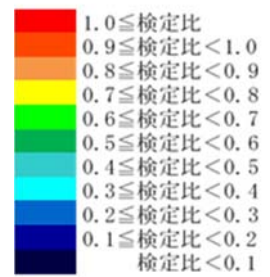
図 3.3-8 主トラスの検定比 (Y5 通り)



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

0.24 : 最大検定値

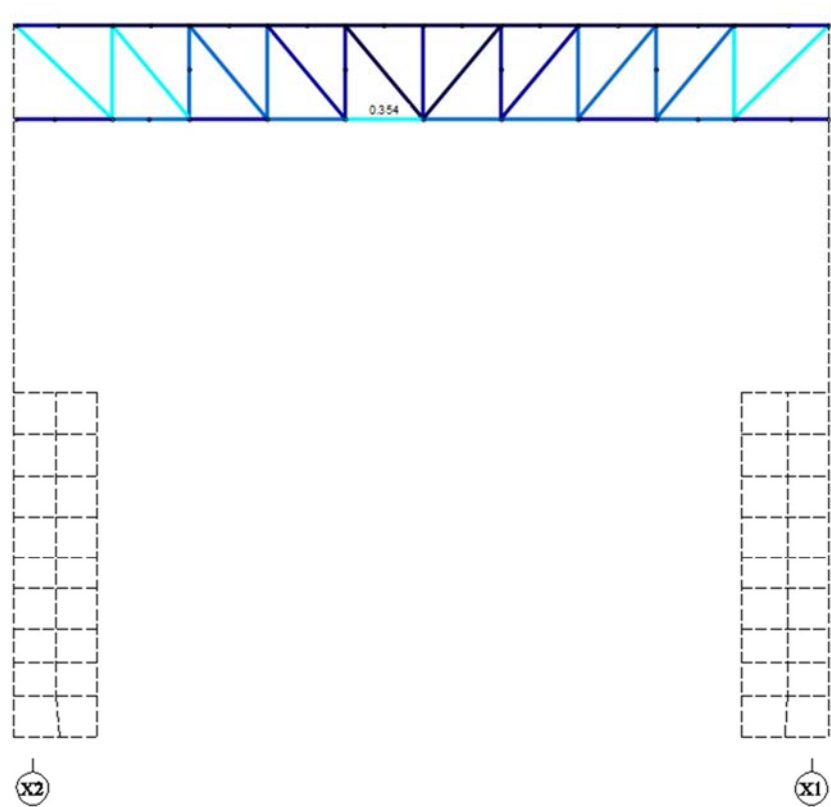
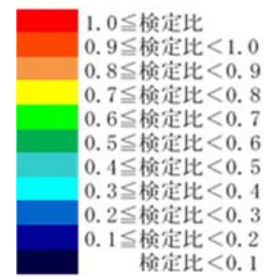
図 3.3-9 主トラスの検定比 (Y6 通り)



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)

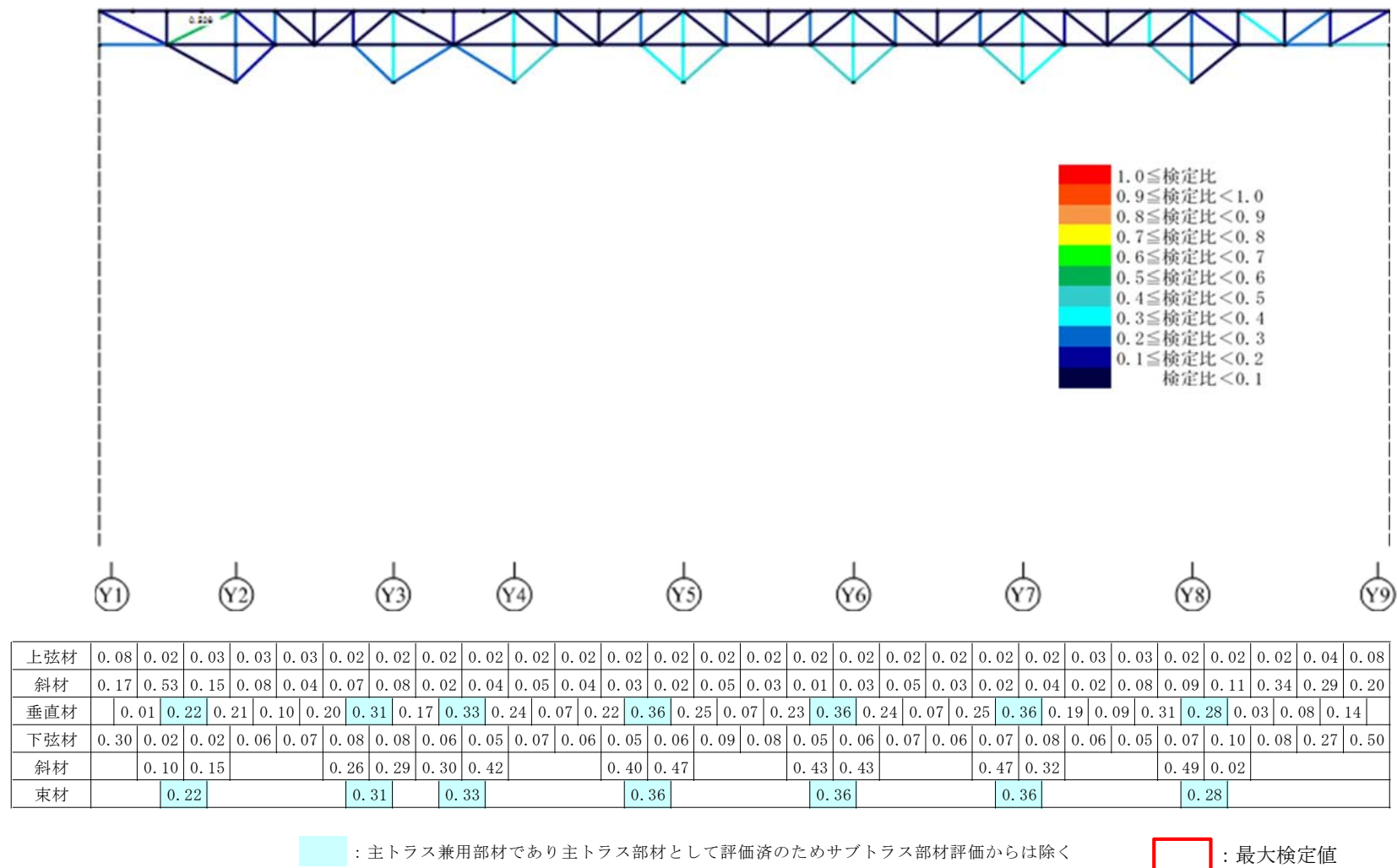
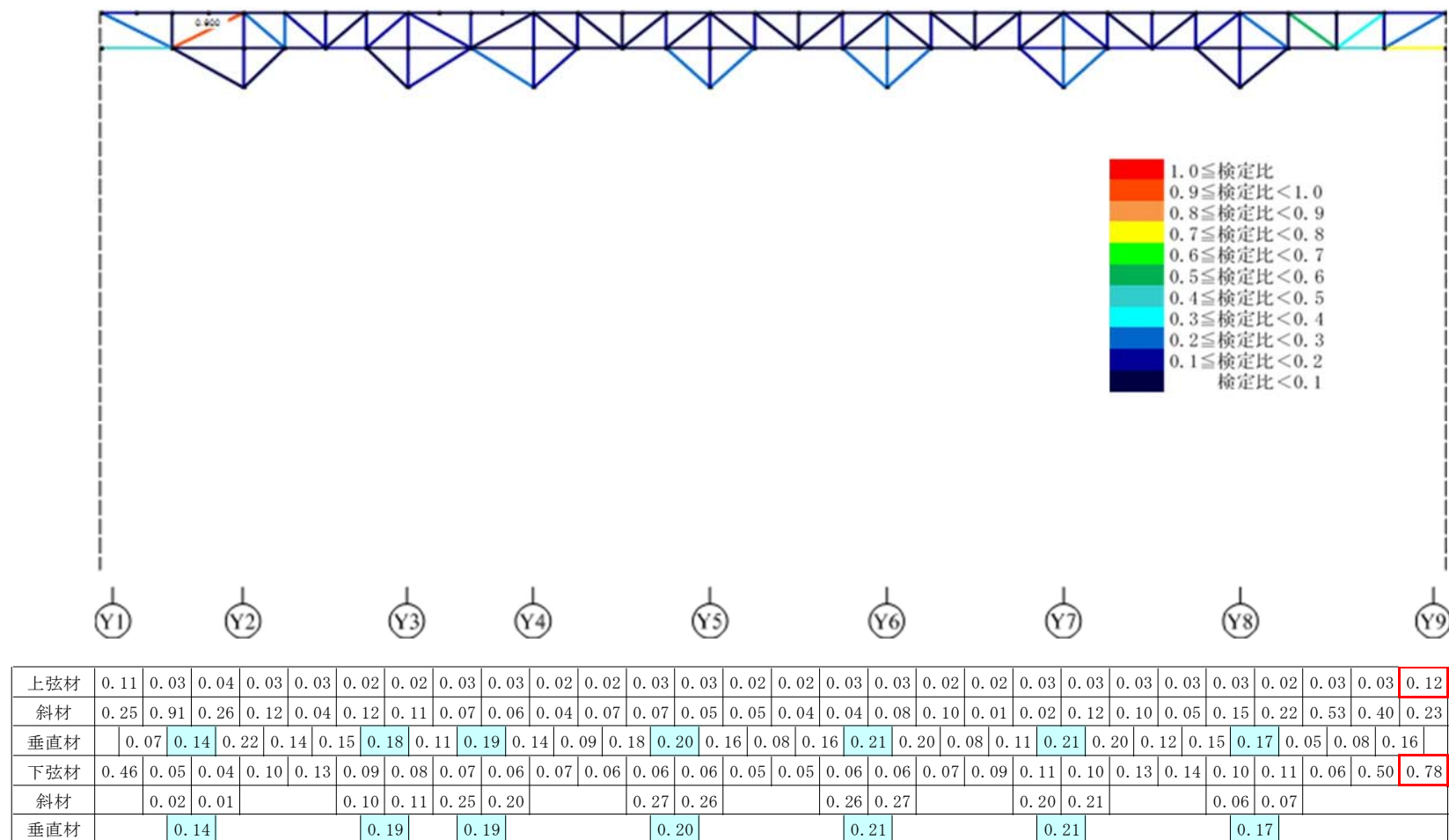
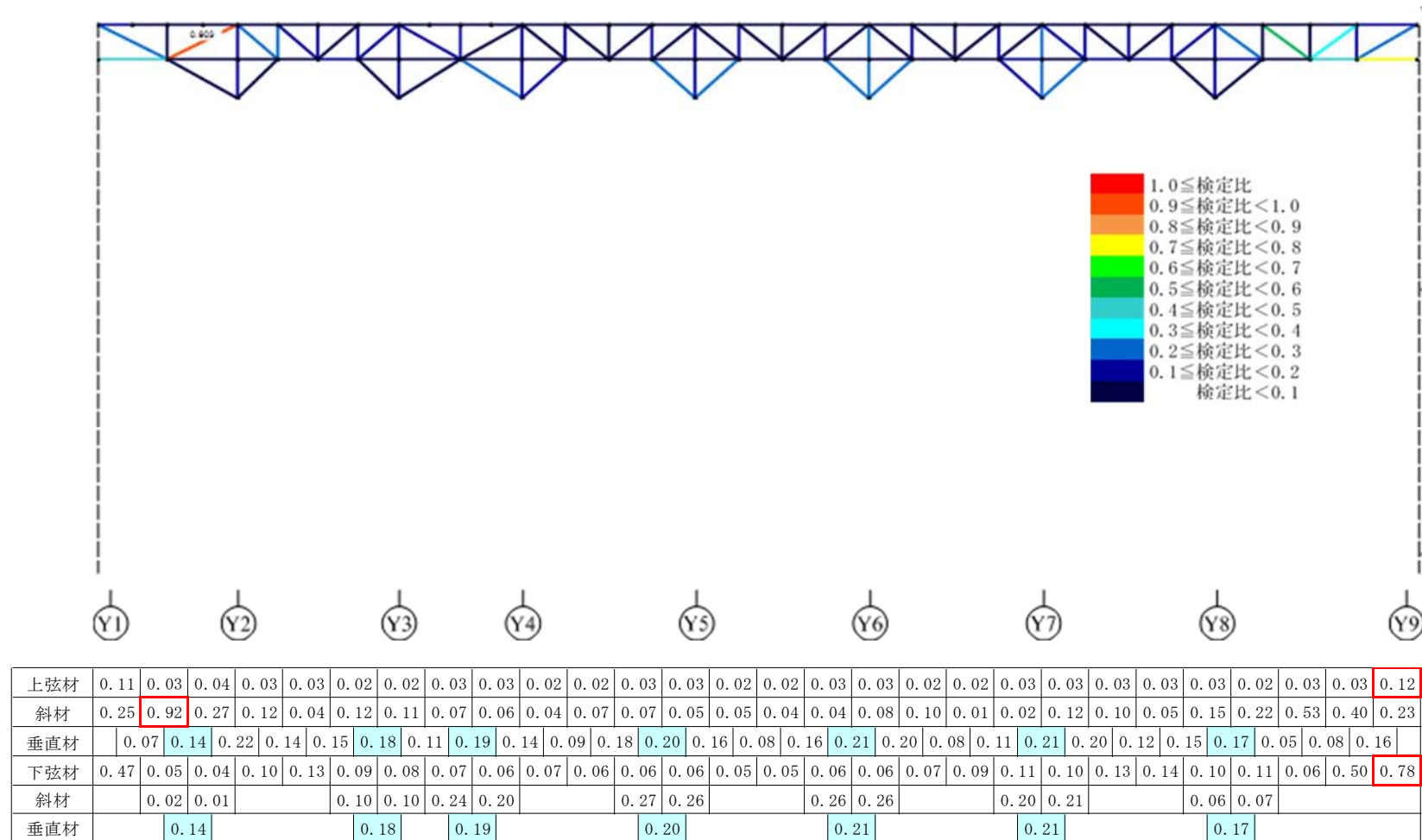


図 3.3-12 サブトラスの検定比 (Xa 通り)



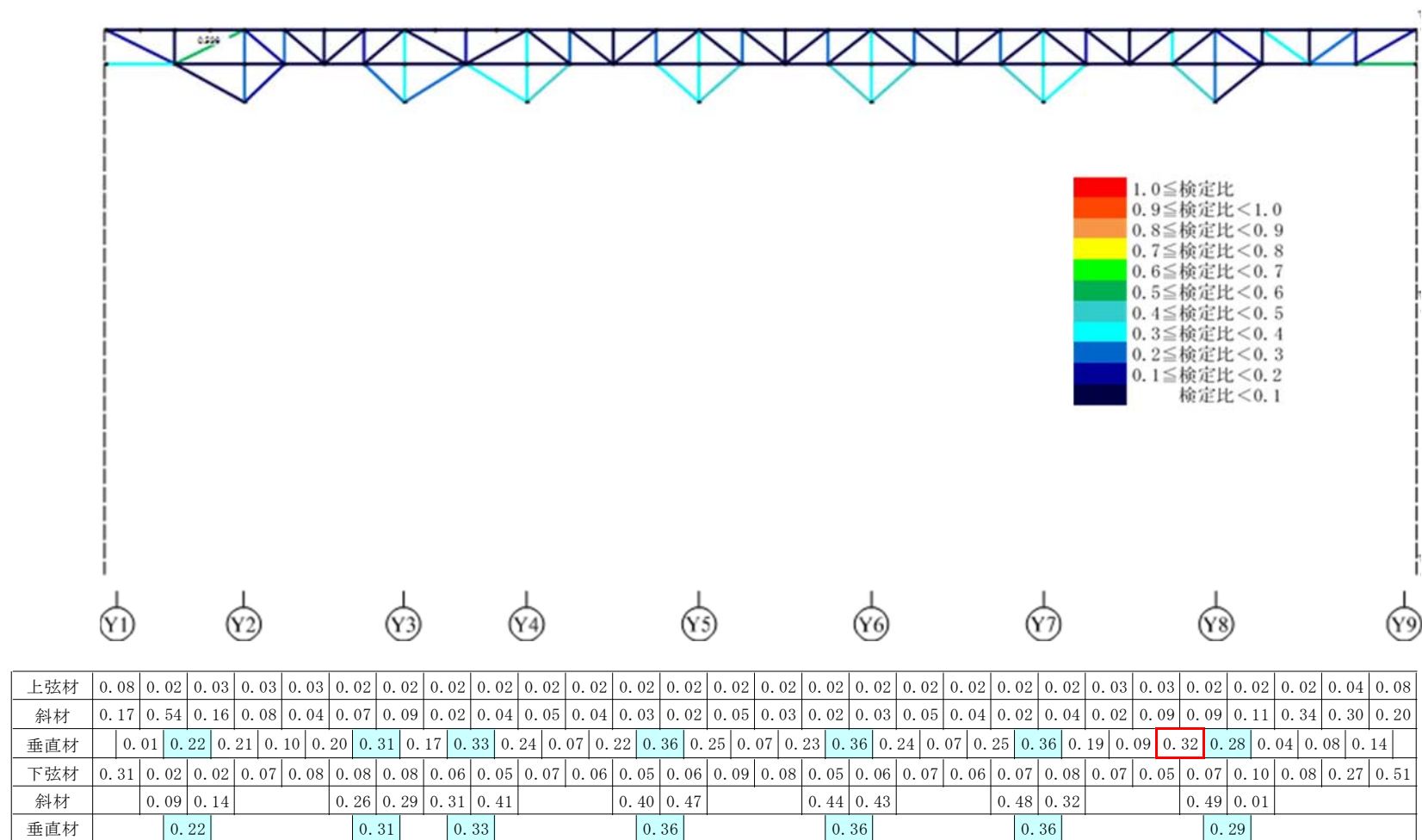
 : 主トラス兼用部材であり主トラス部材として評価済のためサブトラス部材評価からは除く
 : 最大検定値

図 3.3-13 サブトラスの検定比 (Xb 通り)



0.14 : 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
 0.92 : 最大検定値

図 3.3-14 サブトラスの検定比 (Xc 通り)



: 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 3.3-15 サブトラスの検定比 (Xd 通り)

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

4.1 鉛直荷重による主トラスの変形状態及び応力状態について

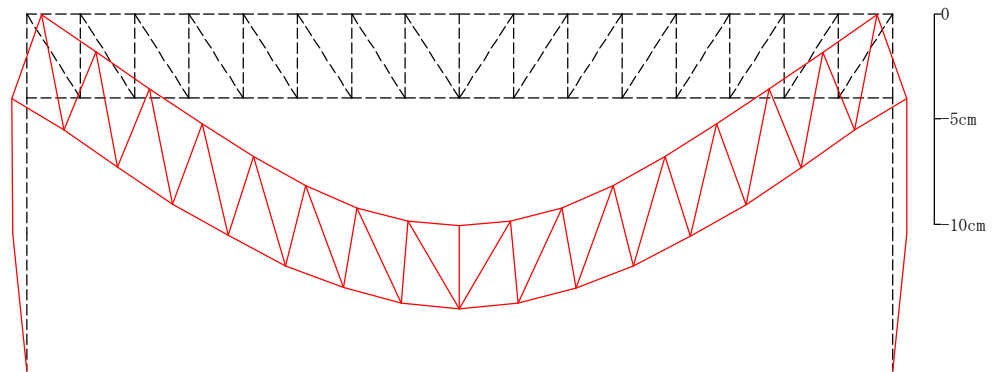
ここでは、屋根スラブの剛性を考慮した場合と剛性を考慮しない場合の主トラス架構の変形状態及び各応力状態を比較することにより、屋根スラブの剛性を考慮したことによる主トラスへの応力負担の軽減について確認する。原子炉建屋原子炉棟の主トラスとする。

(1) 屋根トラスの変形

降下火砕物の堆積荷重によって発生する主トラス（N 通り）の変形を図 4.1-1 に示す。

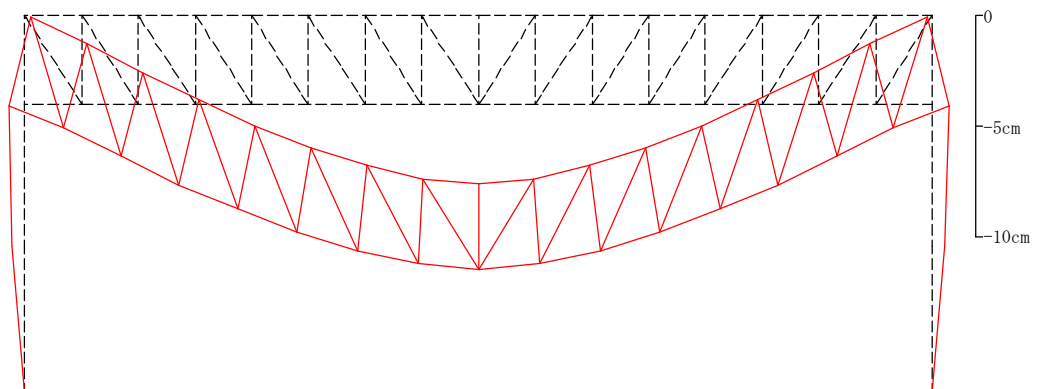
屋根面に作用する鉛直荷重によって、主トラス端部には曲げモーメントが発生し、主トラスを受ける柱に曲げが生じる。さらに、柱の曲げによって、主トラス上弦材は建屋内側に向けて変形する。そのため、主トラスの上弦材及び屋根スラブには圧縮軸力が作用することになる。また、屋根スラブの剛性を考慮することにより、主トラスの中央部の変形（撓み）が減少し、主トラス上弦材の端部節点の内側への移動が減少する。

-1.0cm 0 1.0cm



(a) 屋根スラブ剛性無視

-1.0cm 0 1.0cm



(b) 屋根スラブ剛性考慮

図 4.1-1 主トラス（N 通り）の変形図* *：変形を 100 倍に拡大

(2) 主トラスの軸力分布

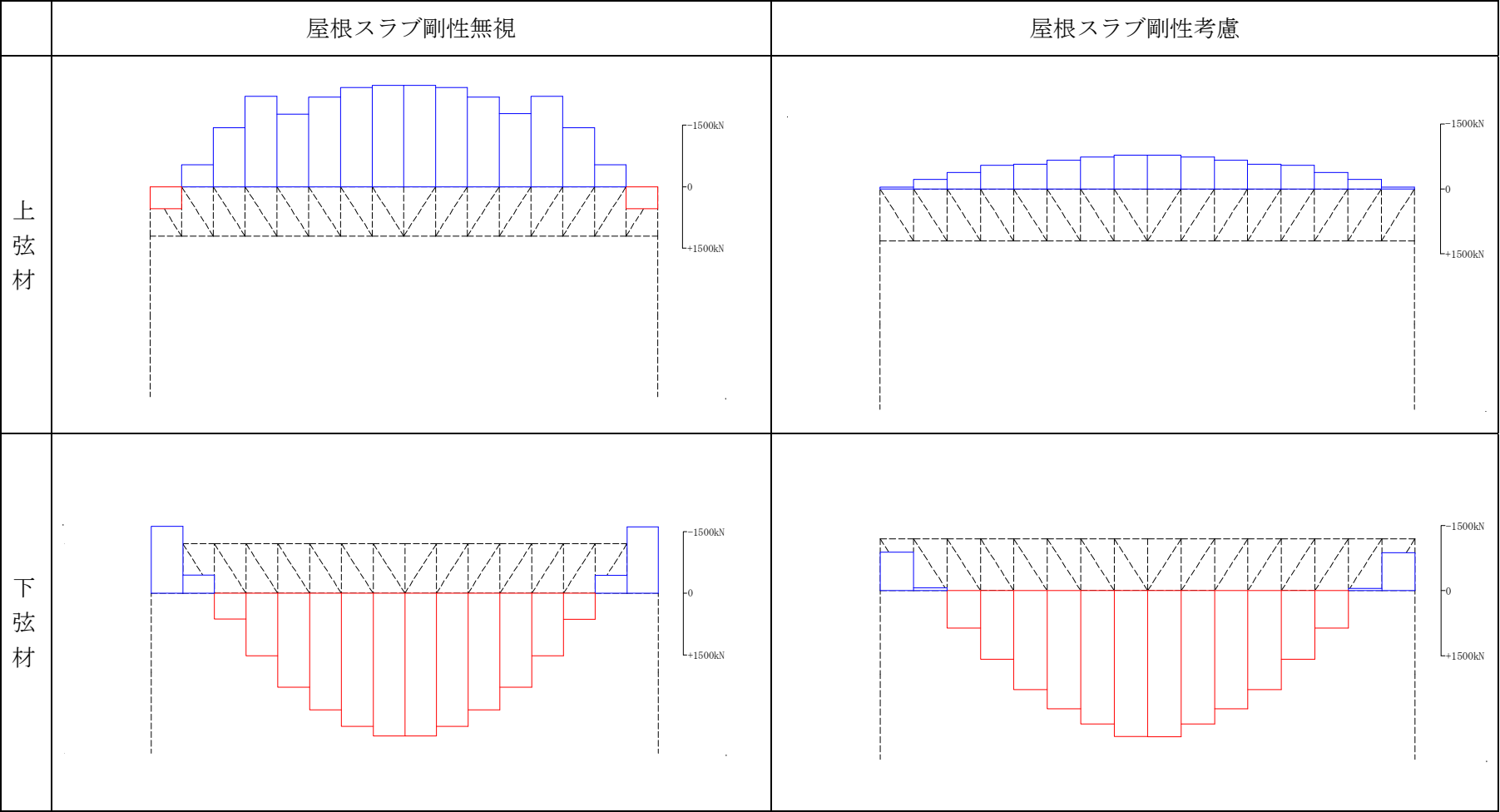
屋根スラブの剛性を考慮した場合と考慮しない場合の主トラスの軸力分布の比較を表 4-1 に示す。

屋根スラブの剛性を考慮した場合の主トラスの材軸方向に発生する応力状態を見ると、主トラス上弦材は、中央部の圧縮軸力が最大で、端部にかけて次第に圧縮軸力が減少している。一方、下弦材では、端部で圧縮軸力が発生し、中央部にかけて圧縮軸力が減少し、引張軸力に転じている。主トラス端部の上下弦材の応力レベルを比較すると、上弦材よりも下弦材の方が、圧縮軸力レベルは大きくなっており、差異が見られる。また、主トラス中央部では、上弦材の圧縮軸力よりも下弦材の引張軸力のレベルの方が大きくなっており、引張軸力が支配的である。

屋根スラブの剛性考慮の有無で比較すると、屋根スラブの剛性を考慮することによって、上弦材の圧縮軸力が顕著に減少していることが分かる。

表 4-1 主トラス (N 通り) の軸力分布の比較

—: 引張 (正) —: 圧縮 (負)



(3) 主トラスの曲げモーメント分布

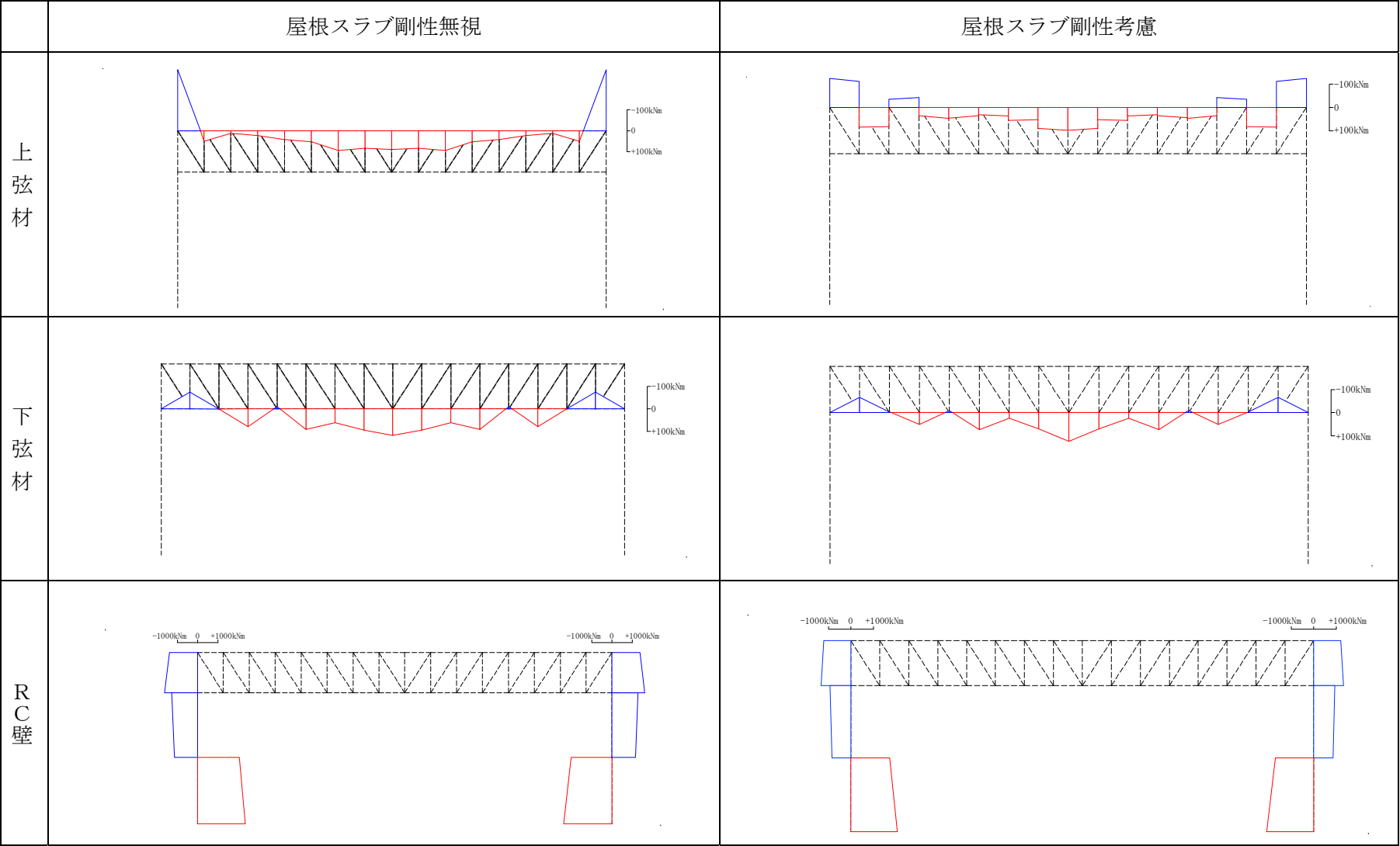
屋根スラブの剛性を考慮した場合と考慮しない場合の主トラスの曲げモーメント力分布の比較を表 4-2 に示す。

屋根スラブの剛性を考慮しない場合は、上弦材の端部で顕著に負の曲げモーメント作用し、屋根スラブの剛性を考慮する場合は、曲げモーメントが減少していることが分かる。また、上下弦の中央部については、双方で顕著な差異は見られない。

(2)、(3)における屋根スラブ剛性考慮の有無による軸力及び曲げモーメント分布の比較から、屋根スラブの剛性を考慮したことにより、主トラスへの負担が軽減されていることが確認された。

表 4-2 主トラス (N 通り) の曲げモーメント分布の比較

— : 正曲げ — : 負曲げ



4.2 鉛直荷重による屋根スラブの影響について

(1) 応力解析結果

3D-FEM モデルによる応力解析から算出される原子炉建屋原子炉棟の屋根スラブに発生する軸応力*を図 5-1 に示す。屋根スラブに発生する軸応力は、ほぼ全域で圧縮軸力が作用する結果（-364 kN/m ～ 5 kN/m）となっている。

前項で記載のとおり，降下火砕物等の鉛直荷重によって主トラス上弦材及び主トラスを受ける柱が建屋内側に変形することによって，屋根スラブでは，圧縮軸力が支配的である。

注記＊：単位長さ当たりの軸力。正の値を引張，負の値を圧縮として示す。

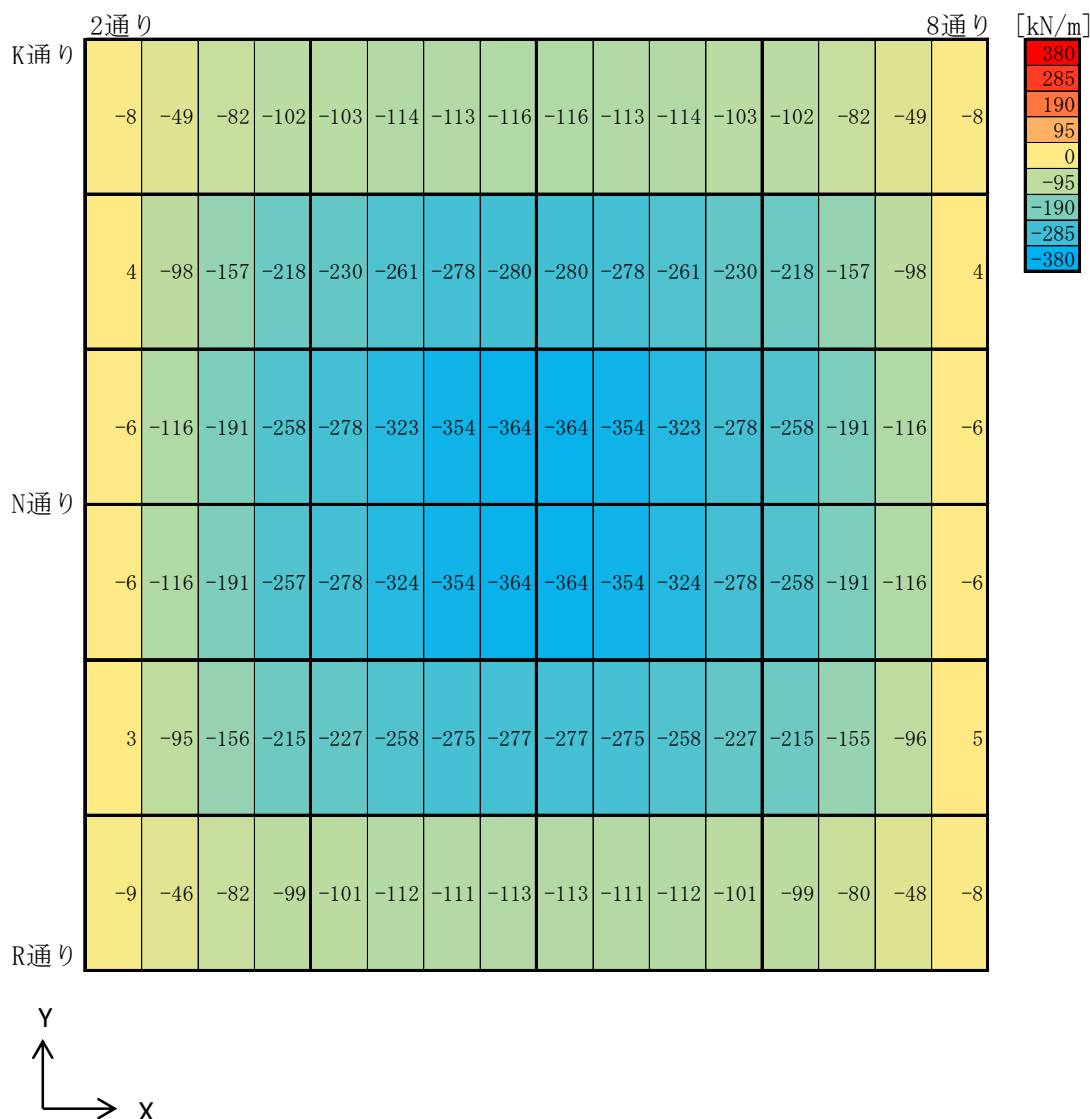


図 4.2-1 原子炉建屋原子炉棟 屋根スラブの軸応力分布（Nx／主トラス方向／引張が正）

(2) 発生する軸応力の影響について

強度計算書における屋根スラブの検討に用いた曲げモーメント 5.1 kN・m から求めたコンクリートの縁応力度は $\pm 3.06 \text{ N/mm}^2$ となる。

一方、3D-FEM モデルによる応力度は $-3.64 \text{ N/mm}^2 \sim 0.05 \text{ N/mm}^2$ となり、軸応力を考慮してその応力度を足し合わせると、ほぼ全域で全断面圧縮状態であることがわかり、引張力に対する鉄筋の負担が緩和される。

また、最大の圧縮応力度は 6.70 N/mm^2 であり、コンクリートの長期許容圧縮応力度 (7.3 N/mm^2) に達しないレベルに納まっており、軸応力の影響はない。

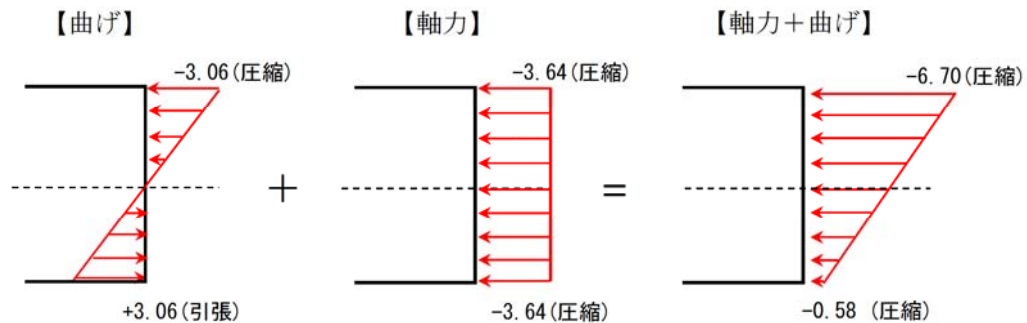


図 4.2-2 軸力を考慮した場合の応力度

(3) 強度計算書における屋根スラブ検討への影響

強度計算書で実施している屋根スラブの検討では、スラブの軸応力を考慮せず、曲げ応力のみを考慮し評価している。(2)で記載したとおり、3D-FEM モデルの結果としてスラブのほぼ全域で全断面圧縮状態であることを踏まえると、強度計算書に示す曲げ応力のみを考慮した屋根スラブの評価結果（検定値：0.49）から得られる判定に影響はないことが確認できた。参考として、曲げ応力のみを考慮した屋根スラブの評価結果を表 4.2-1 に示す。

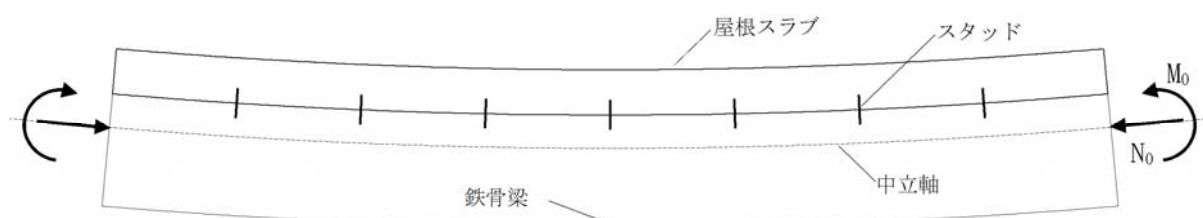
表 4. 2-1 原子炉建屋原子炉棟 屋根スラブ評価結果

部位		EL. 64. 08 m
厚さ t (mm)		100
有効せい d (mm)		50
配 筋 (鉄筋断面積)		D13@180 (703. 9 mm ²)
曲 げ モー メント	発生曲げモーメント M (kN・m)	5. 1
	鉄筋応力度 σ_t (N/mm ²)	165. 7
	許容値 (N/mm ²)	345
	検定値	0. 49
せん 断 力	発生せん断力 Q (kN)	13. 5
	せん断応力度 τ (N/mm ²)	0. 309
	せん断スパン比によ る割増し係数 α	1. 00
	許容値 (N/mm ²)	1. 06
	検定値	0. 30

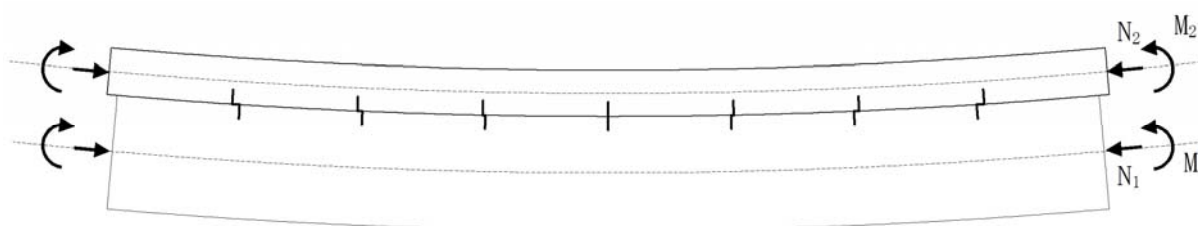
4.3 鉄骨材とスラブの接合部状況について

3D-FEM モデルによる応力解析では，トラス架構全体が負担する曲げによる軸力をスラブにも軸力として負担させている。主トラス上弦材と屋根スラブの要素軸芯は同位置でモデル化しているため，両者には偏心に伴い曲げ変形より生じる軸方向変形の差は発生せず，仮にスタッドをモデル化したとしてもスタッドにせん断力は発生しない結果となる。一方，梁上においてコンクリートスラブは連続しており，スラブの軸力は周辺のスラブや外周の躯体に伝達されるため，スラブは軸力を負担し続けることが可能である。図 4.3-1 にスタッドが梁の応力分配に与える影響の概念図を示す。

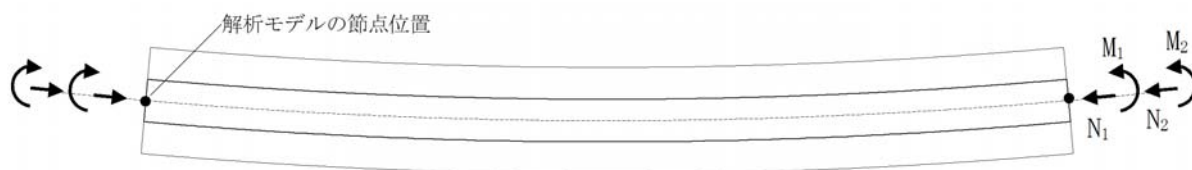
なお，降下火砕物等の鉛直荷重は，鉛直下向きに荷重が作用するため，スタッドの軸方向に引抜きが発生することがないため，降下火砕物等の鉛直荷重を十分支持可能である。



(a) スタッドがせん断力を伝達し，鉄骨梁と屋根スラブが合成梁を構成する場合



(b) スタッドにせん断変形が生じ，鉄骨梁と屋根スラブが個別に荷重を支持する場合



(c) 解析モデルにおける応力の負担状況

$$N_0 = N_1 + N_2 \quad (E_0 A_0 = E_1 A_1 + E_2 A_2) \quad , \quad M_0 = M_1 + M_2 \quad (E_0 I_0 > E_1 I_1 + E_2 I_2)$$

N : 軸力, M : 曲げモーメント, E : ヤング係数, A : 軸断面積, I : 断面 2 次モーメント

図 4.3-1 スタッドが梁の応力分配に与える影響

4.4 3D-FEM モデルの柱壁剛性について

主トラスを支える柱壁の剛性について、3D-FEM モデルと原子炉建屋の質点系モデルの比較を行った。なお、ここでは簡単のため、3D-FEM モデルの屋根スラブ剛性は無視する。

図 4.4-1 に鉛直方向の質点系モデルを示す。主トラス部の端部には、柱による回転拘束を考慮して、回転ばねがモデル化されている。回転ばねの剛性 K_{θ} は、原子炉建屋 6 階面 (EL. 46.5m) より上部の柱を対象に、図 4.4-2(a) に示すように A 点をピン、B 点を固定端とし、A 点作用する曲げモーメント M_A と回転角 θ_A の関係より求めている。

$$K_{\theta} = M_A / \theta_A = 4E I / l \quad (= 5.62 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}) \quad (4.4-1) \text{ 式}$$

一方、屋根トラスの解析モデルでは、主トラス上下弦材端部の軸力と変位により、主トラス端部の回転剛性 K_{θ}' が求められる。

$$K_{\theta} = \sum_i M_i / \theta_i \quad (4.4-2) \text{ 式}$$

ここに、

$$M_i = (N_{ui} - N_{bi}) a / 2$$

$$\theta_i = (d_{ui} - d_{bi}) / a$$

N_{ui} , N_{bi} : 主トラス i 端の軸力 (u : 上弦材, b : 下弦材)

d_{ui} , d_{bi} : 主トラス i 端の水平変位 (u : 上弦材, b : 下弦材)

a : 主トラスのせい

屋根スラブ剛性は無視した 3D-FEM モデルでは、(4.2-2)式により、回転剛性 K_{θ}' を求めると、 $K_{\theta}' = 15.6 \times 10^6 \text{ [kN} \cdot \text{m/rad]}$ となり、質点系モデルの回転剛性よりも 2.78 倍大きい。

大きくなることの要因としては、3D-FEM モデルでは柱だけでなく、外壁や外周梁もモデル化されていることが考えられる。そこで、外壁及び屋根面位置の外周梁の剛性を屋根スラブと同様に無視したモデルを用いて回転剛性を算定すると、 $K_{\theta}' = 6.90 \times 10^6 \text{ [kN} \cdot \text{m/rad]}$ となり、質点系モデルの回転剛性に対して 1.23 倍となる。

質点系モデルの回転ばね剛性は端部に作用する曲げモーメントに対する $M-\theta$ 関係に基づいているが、(4.4-2)式は図 8-2(b)に示すように、主トラス下弦材位置に集中荷重 P が作用する場合に近い。集中荷重 P と A 端の反力を主トラス弦材の軸力と捉え(4.4-2)式を適用すると、

$$K_{\theta}' = M_A' / \theta_A' = K_{\theta} \times \frac{1}{2b^2} \left\{ 1 + \frac{b^2(2l+a)}{2l^3} \right\} \quad (4.4-3) \text{ 式}$$

ここに、

$$R_A = \frac{b^2(2l+a)}{2l^3} P$$

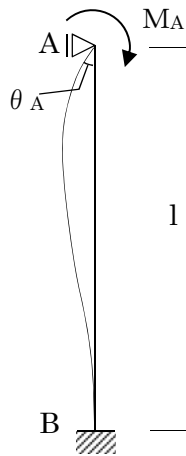
$$\theta_A' = \frac{ab^2P}{4El_i}$$

Figure 1 illustrates the structural model of the main structure. The model consists of a vertical wall (外壁・シエル壁部) and a horizontal roof truss (屋根トラス部). The wall is fixed at the base (基礎スラブ(11)) and has a rotational stiffness K_{θ} at the top. The roof truss is supported by a central column (C.L.) and has a rotational stiffness K_1 at the base. The diagram shows the elevation (EL. in m) and horizontal distance (m) for each node.

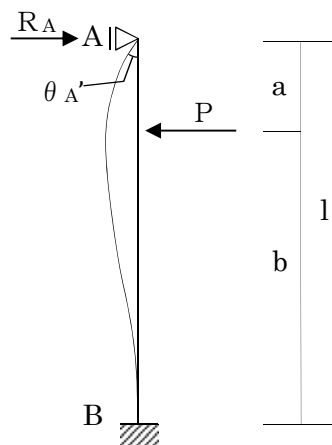
Node	EL. (m)	Horizontal Distance (m)
1	63.65	0.00
2	57.00	0.00
3	46.50	0.00
4	38.80	0.00
5	34.70	0.00
6	29.00	0.00
7	20.30	0.00
8	14.00	0.00
9	8.20	0.00
10	2.00	0.00
11	-4.00	0.00
12	-9.00	0.00
21	63.65	5.13
22	63.65	10.27
23	63.65	15.41
24	63.65	20.55
25	63.65	20.55

- ・ 数字は質点番号を示す。
- ・ () 内は要素番号を示す。

図 4.4-1 質点系モデル (鉛直方向)



(a) 主トラス上端位置に曲げモーメントが作用する場合



(b) 主トラス下端位置に集中荷重が作用する場合

図 4. 4-2 柱の回転拘束ばね剛性算定モデル

5. 屋根スラブの一方向スラブによる評価の妥当性について

5.1 固定端モデルと連続梁モデルの比較

原子炉建屋原子炉棟及びタービン建屋の主トラス母屋で支持された屋根スラブは、両端固定の一方向スラブ（固定端モデル）として応力を算定している。

原子炉建屋原子炉棟の屋根スラブを対象に、屋根スラブ全体の連続梁モデルとして応力を算定した場合と応力の算定結果を比較した（図 5.1-1）。

曲げモーメントの最大値は、固定端モデルは $5.1 \text{ kN}\cdot\text{m}$ に対し、連続梁モデルの $4.8 \text{ kN}\cdot\text{m}$ と、概ね同程度となっている。せん断力の最大値は、固定端モデルは 13.5 kN に対し、連続梁モデルの 16.7 kN と大きくなっているが、固定端モデルによる屋根スラブの検定値は 0.30 であり、十分余裕がある。

6. タービン建屋の荷重増分解析

6.1 概要

主トラスが、想定した降下火碎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

解析モデルは以下を考慮する。解析モデルを図 6.2-1 に示す。

- ・屋根スラブの剛性を無視する。
- ・主トラスの両端の上下弦には、剛塑性回転ばね付き梁要素を使用する。

(2) 鉛直荷重

鉛直荷重は、以下の①～④の組合せとし、降下火碎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。鉛直荷重①～④の詳細は、V-3-別添 2-1-6「建屋の強度計算書」の「3.2.1 荷重の設定」に示す。図 6.2-2 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 降下火碎物堆積による鉛直荷重 ($F_v' = k F_v$) : 7335 × k N/m²

k : 降下火碎物堆積による鉛直荷重の割増係数

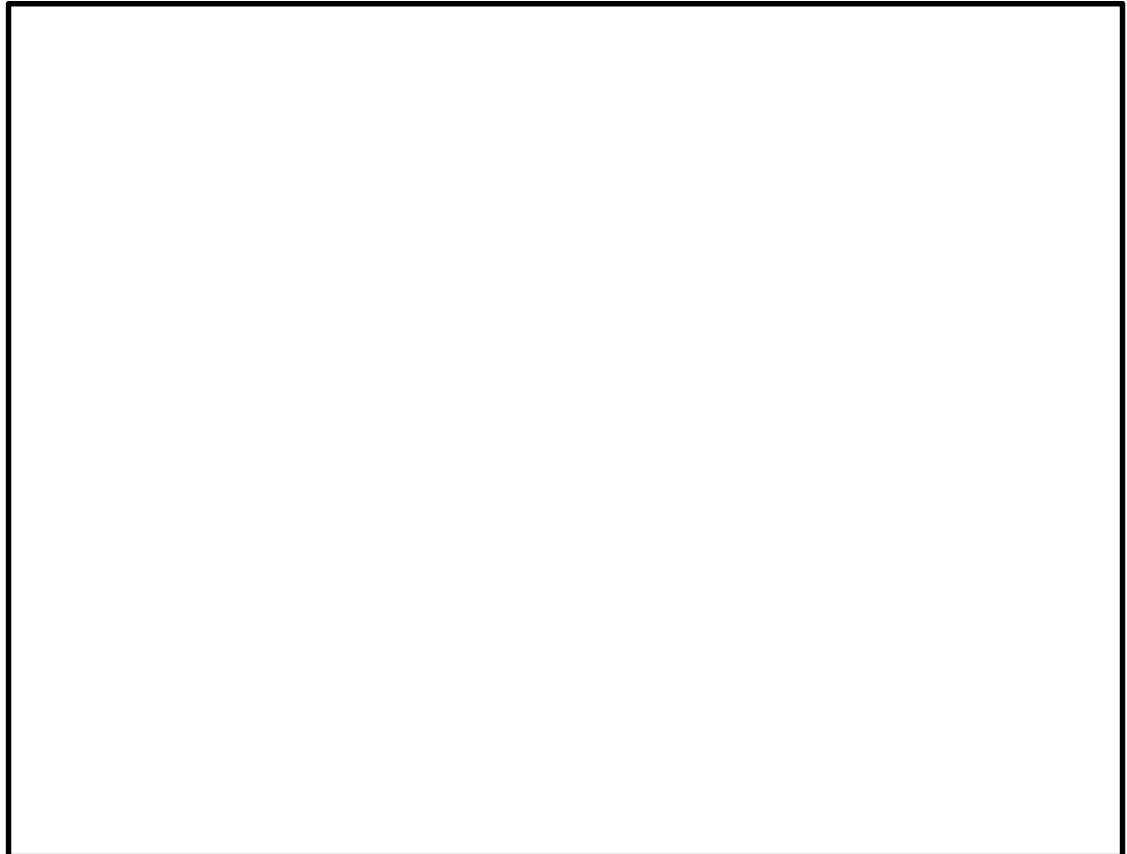


図 6.2-1 解析モデル

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 6.3-1 に示す。評価節点は、図 6.2-1 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 6.3-2 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。

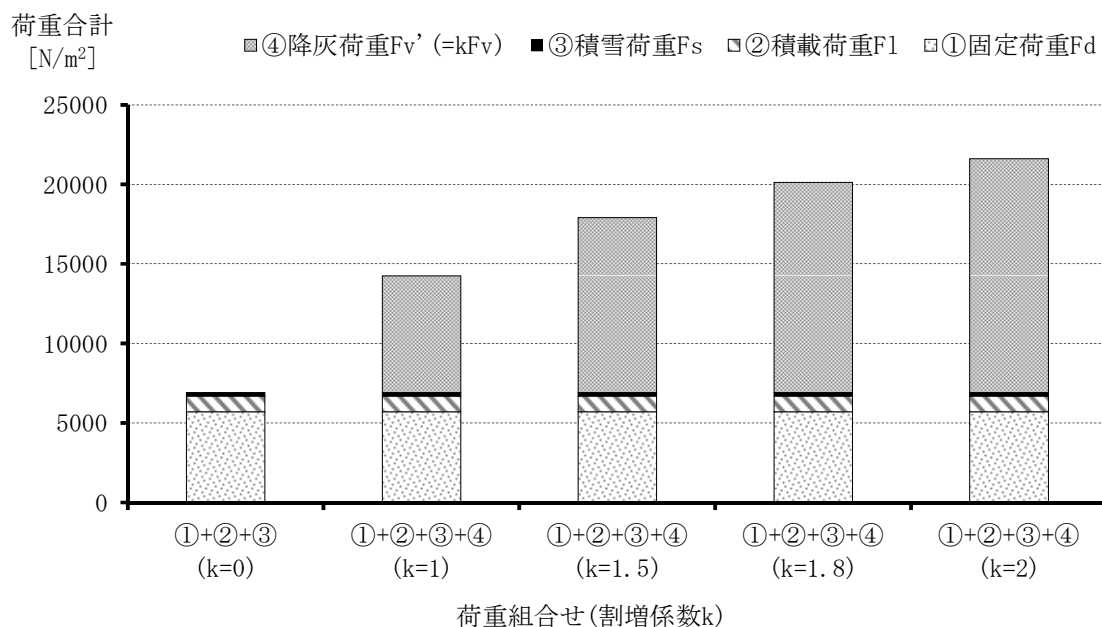


図 6.3-1 荷重組合せと荷重合計

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

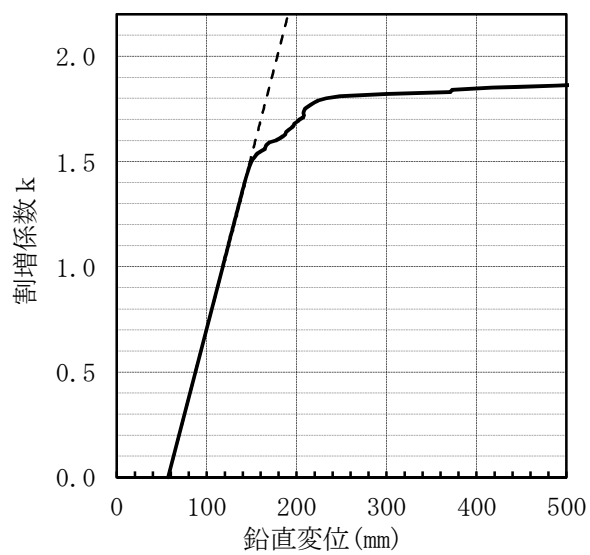


図 6.3-2 主トラス中央節点における荷重－変位関係

7. 原子炉建屋原子炉棟の構造図及び解析モデル図

原子炉建屋原子炉棟の構造図及び解析モデル図を以降に示す。

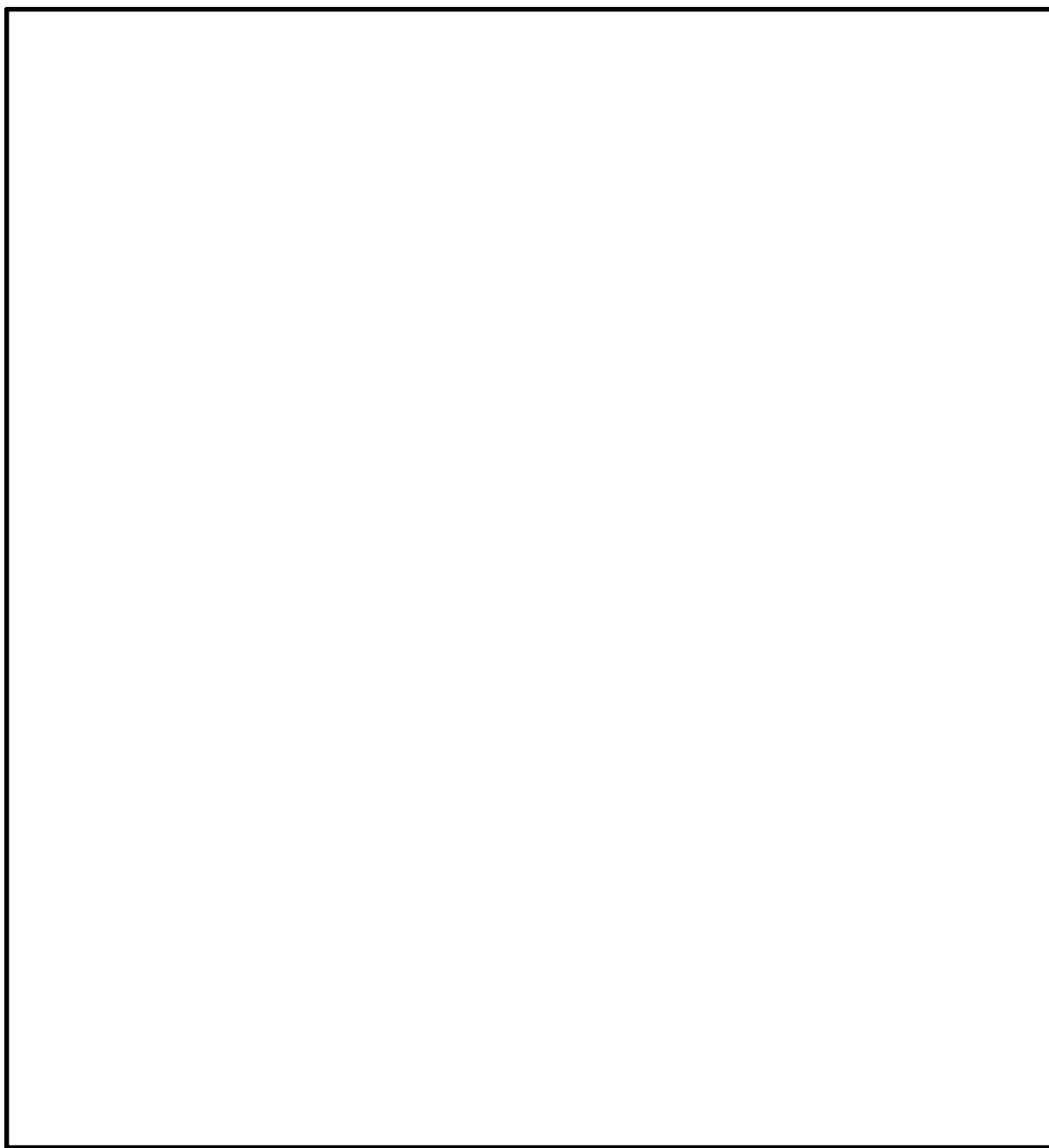


図 7-1 屋根トラス平面 (EL. 63. 65m) 構造図

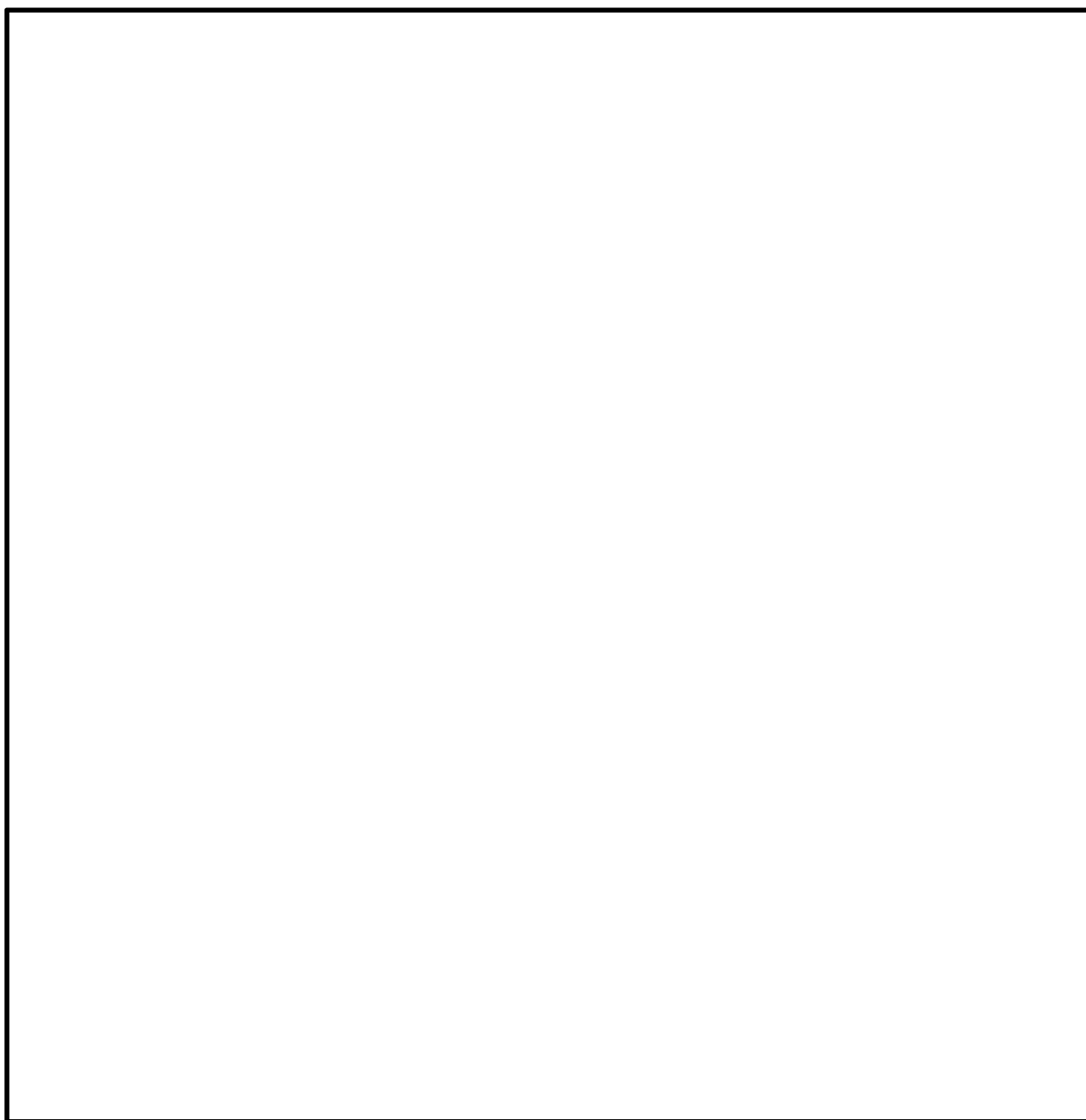


図 7-2 屋根トラス平面 (EL. 63. 65m) 解析モデル図 (梁要素及びトラス要素)

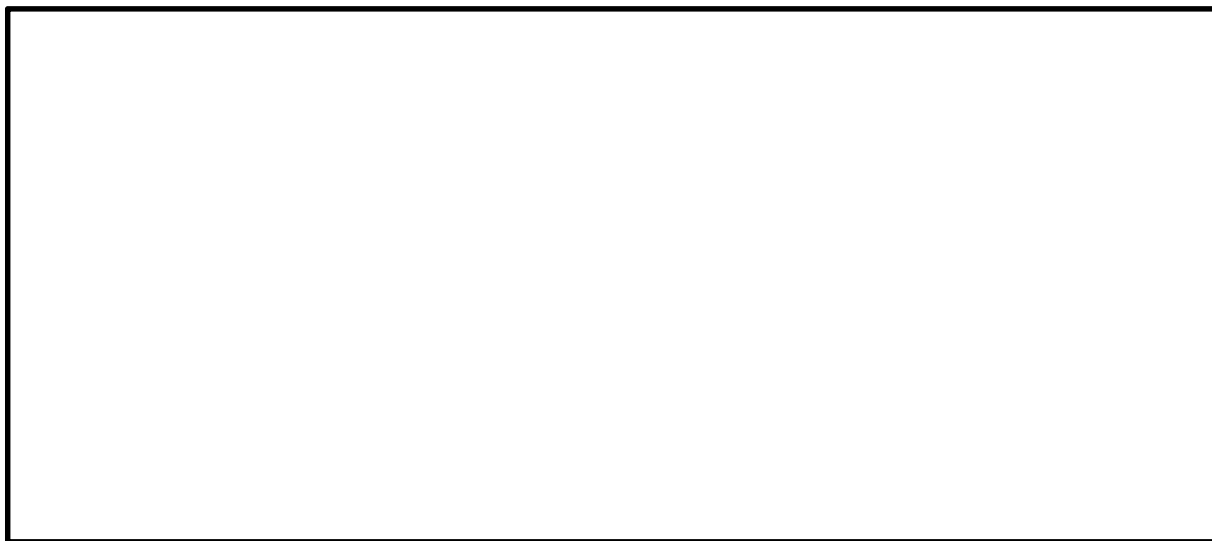


図 7-3 屋根トラス断面 (N 通り) 構造図

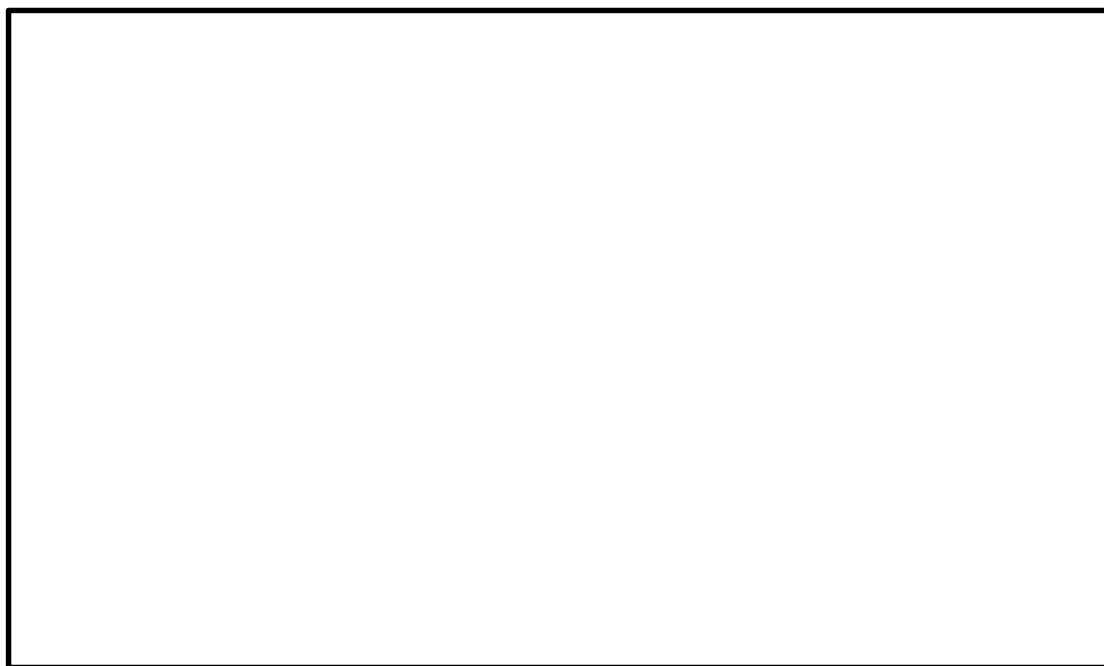


図 7-4 屋根トラス断面 (N 通り) 解析モデル図 (梁要素及びトラス要素)

8. タービン建屋の構造図及び解析モデル図

タービン建屋の構造図及び解析モデル図を以降に示す。

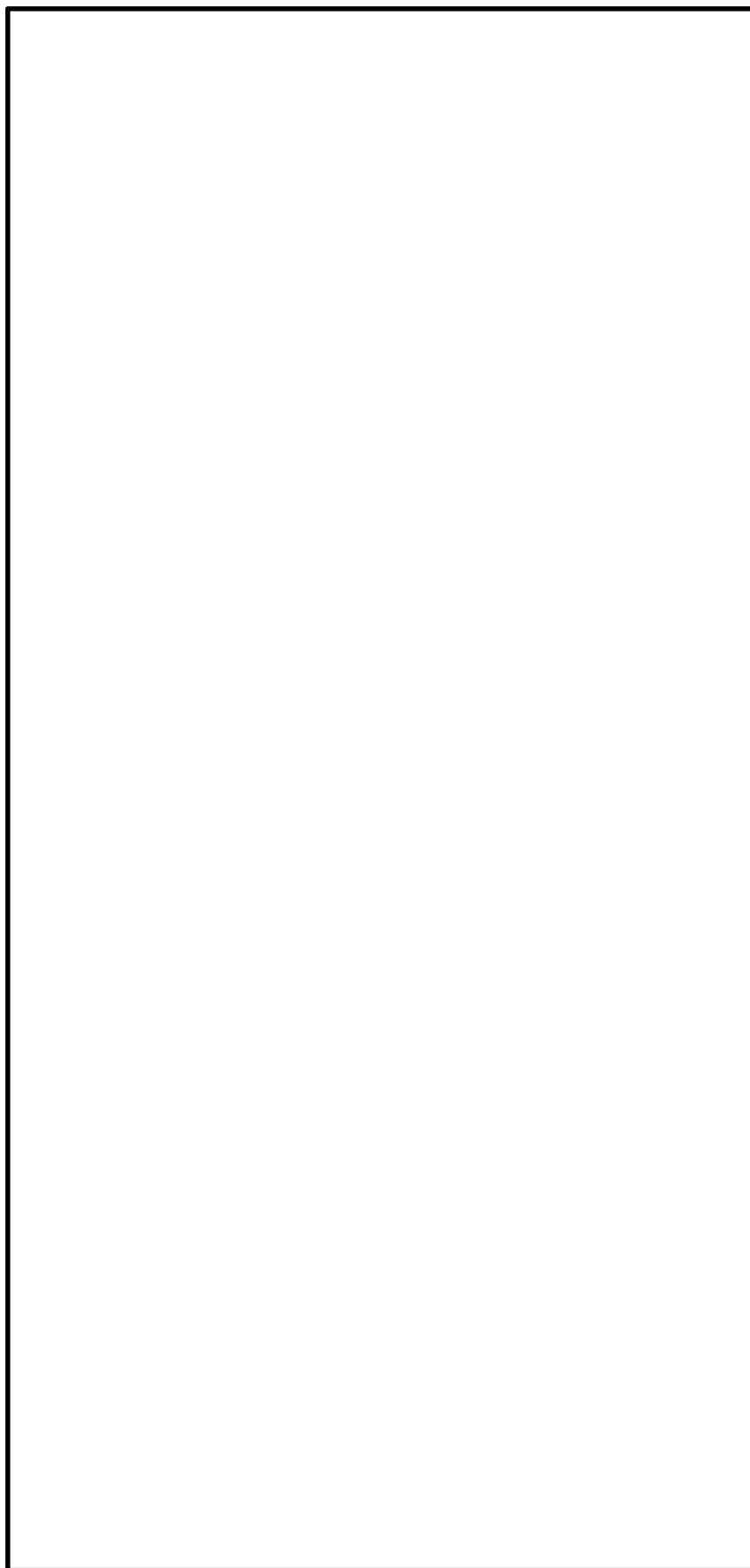


図 9-1 主トラス平面 (EL. 40.3m) 構造図

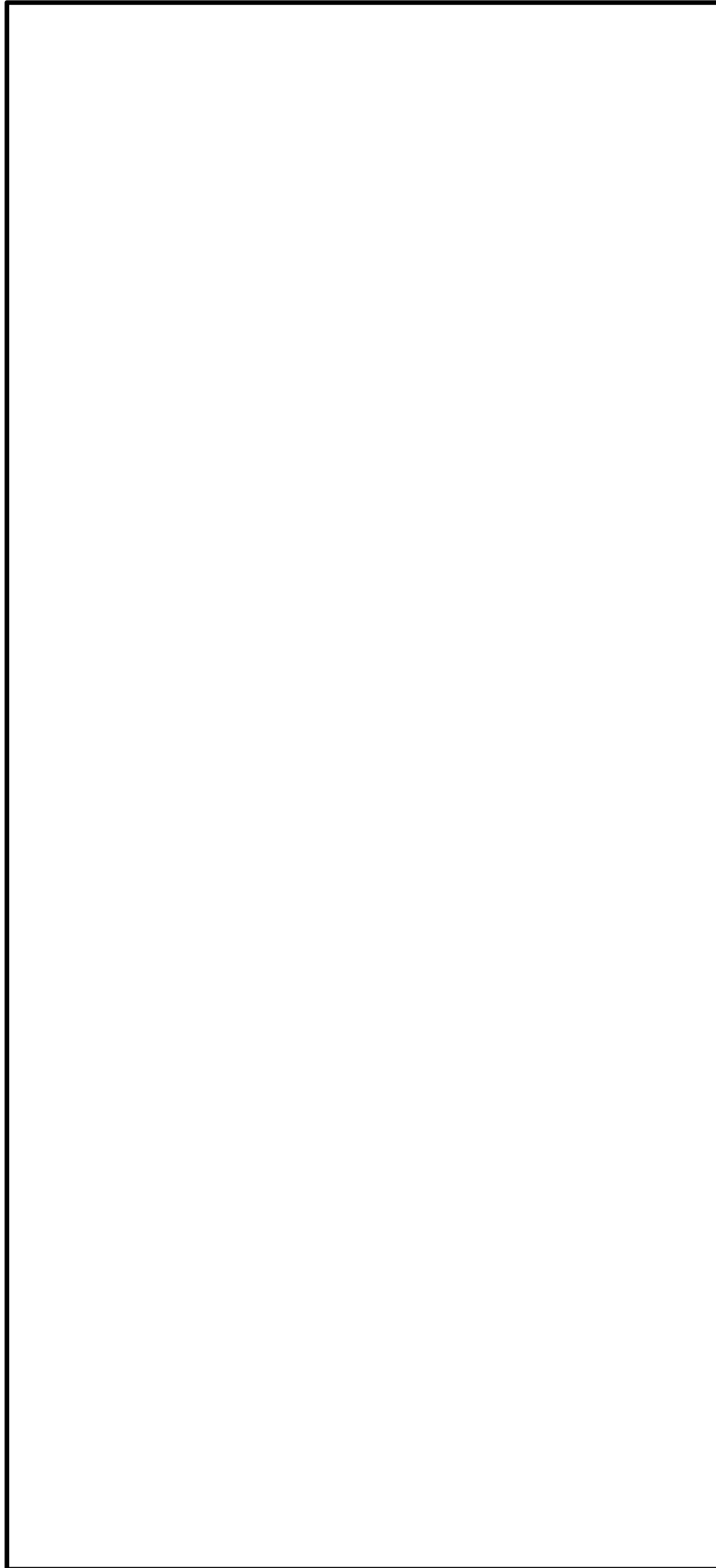


図 9-2 主トラス平面 (EL. 40. 3m) 解析モデル図 (梁要素及びトラス要素)

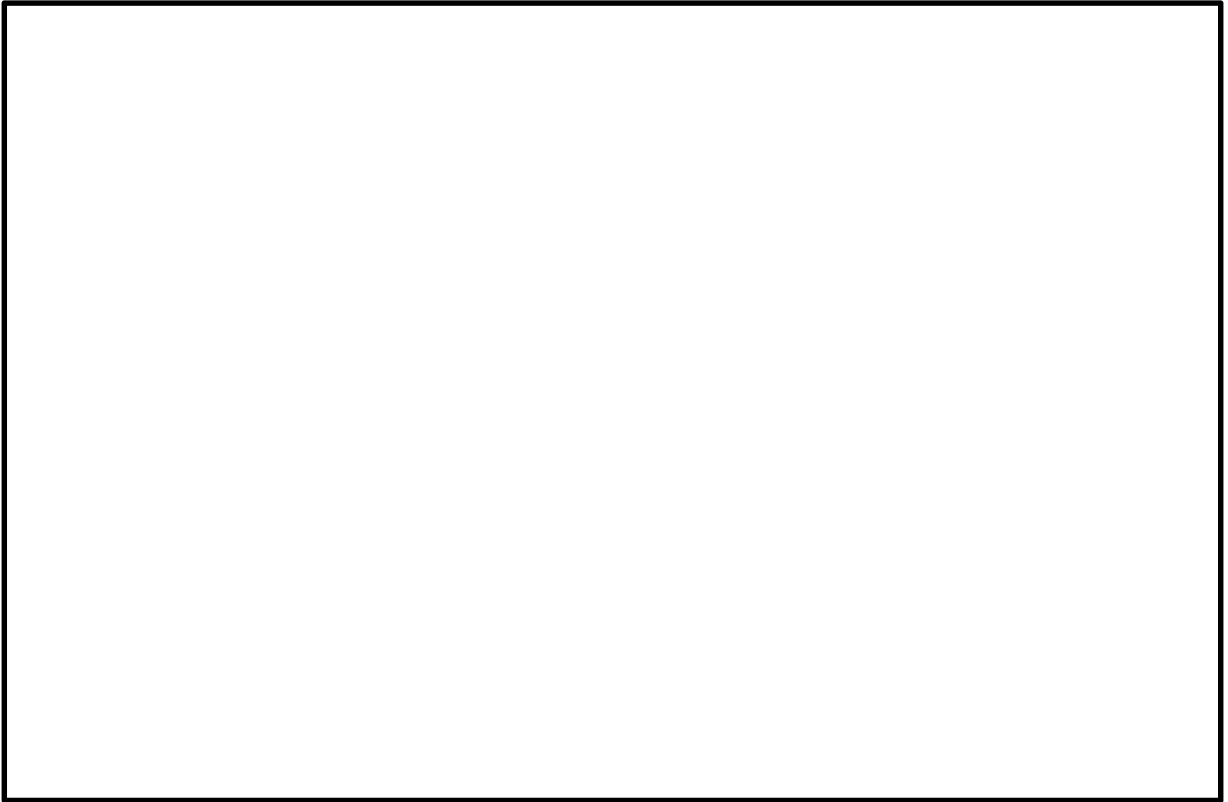


図 9-3 主トラス断面（5 通り） 構造図

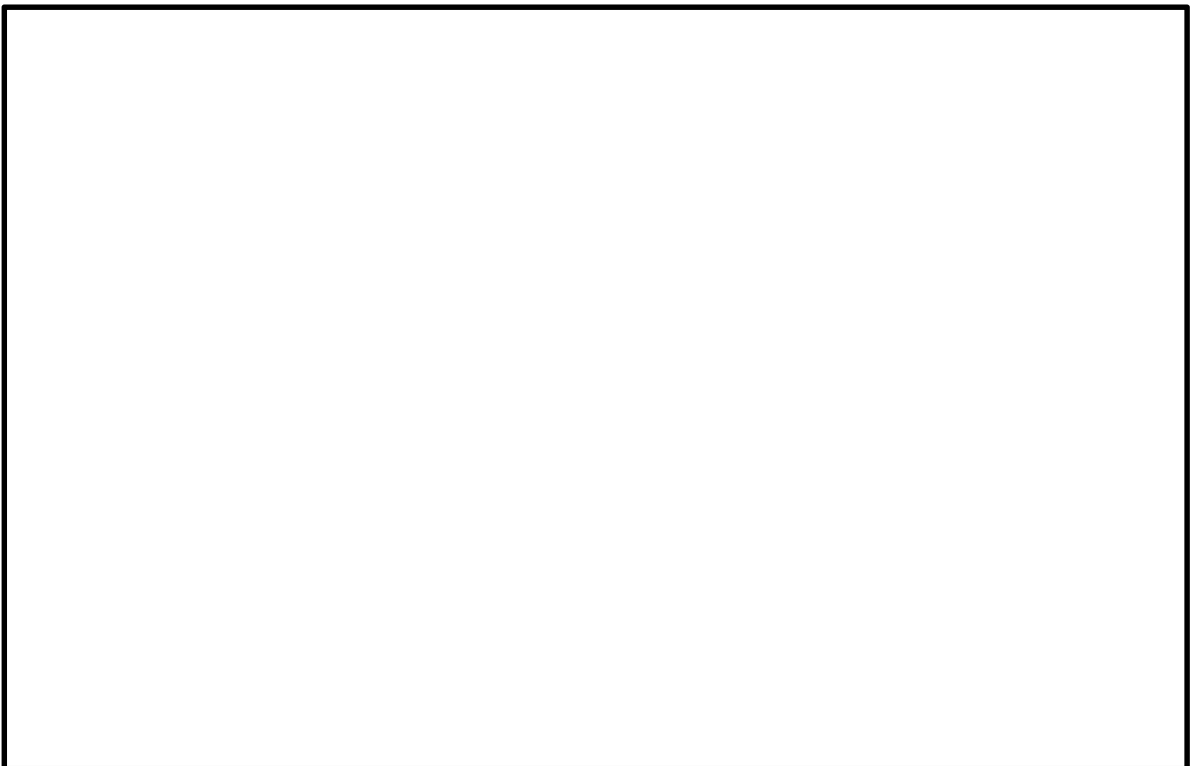


図 9-4 主トラス断面（5 通り） 解析モデル図（梁要素及びトラス要素）

9. 使用済燃料乾式貯蔵建屋の構造図及び解析モデル図

使用済燃料乾式貯蔵建屋の構造図及び解析モデル図を以降に示す。

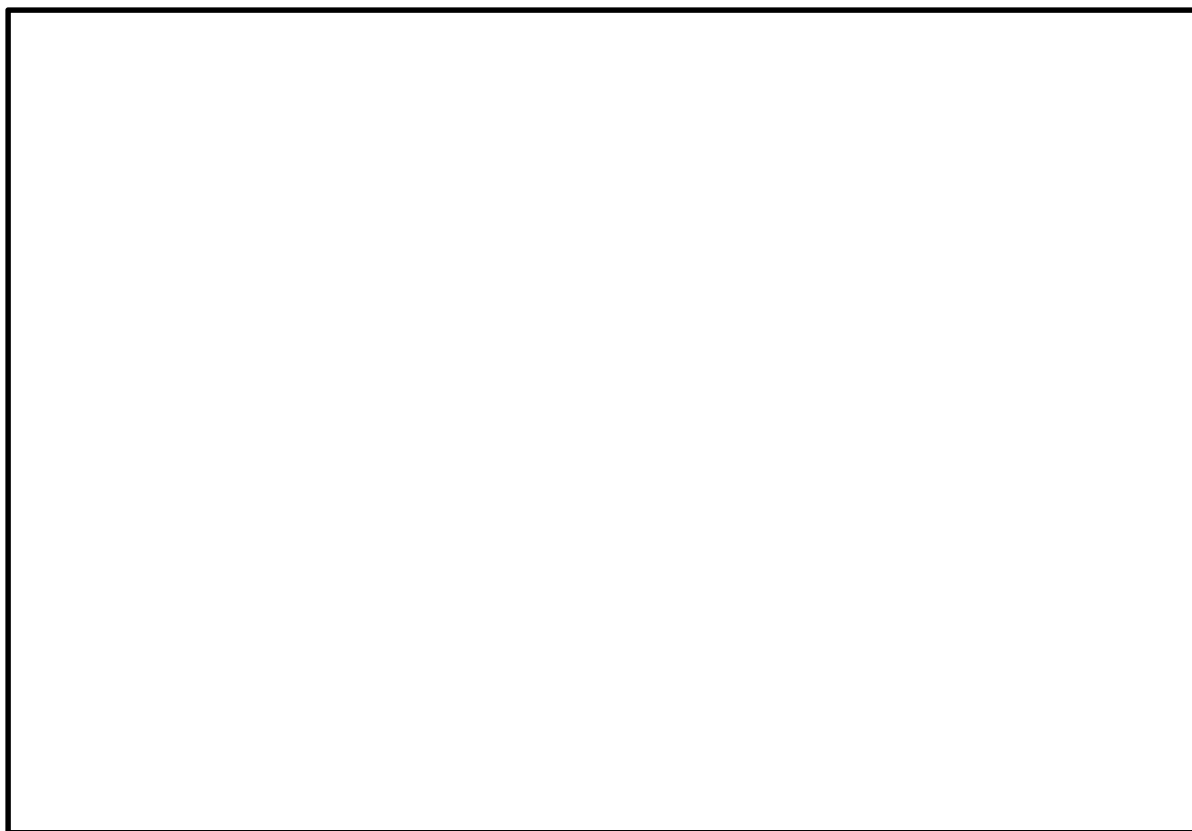


図 9-1 主トラス平面 構造図

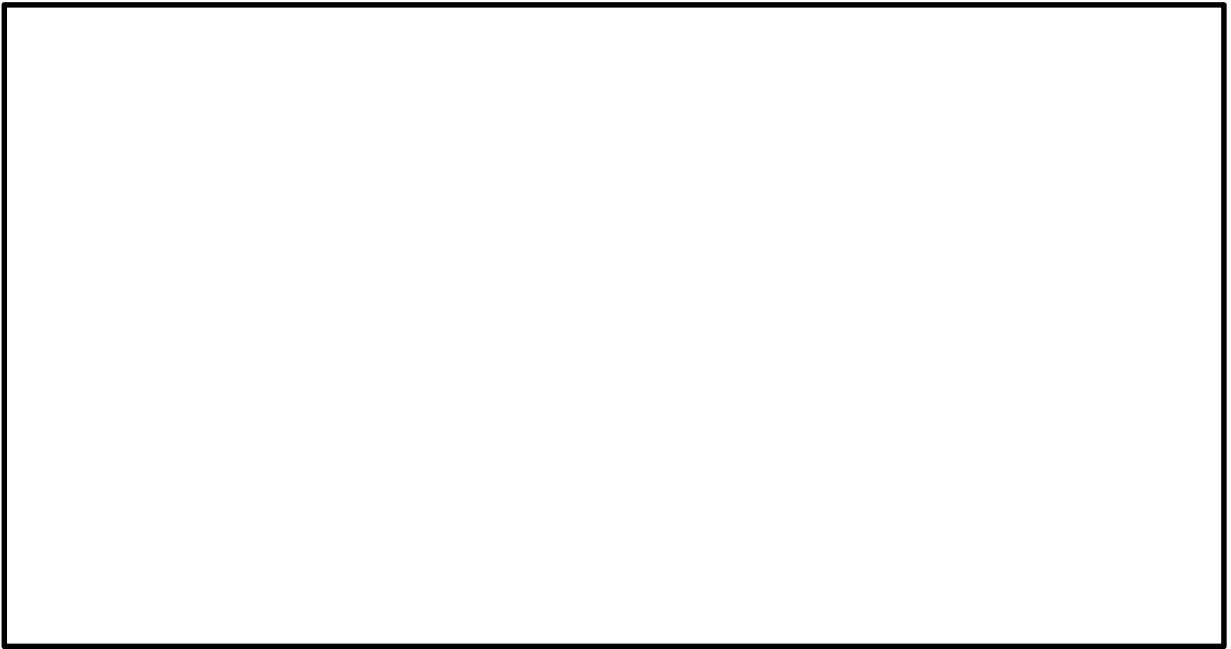


図 9-2 主トラス平面 解析モデル図（鉄骨部上限材及びサブビーム）

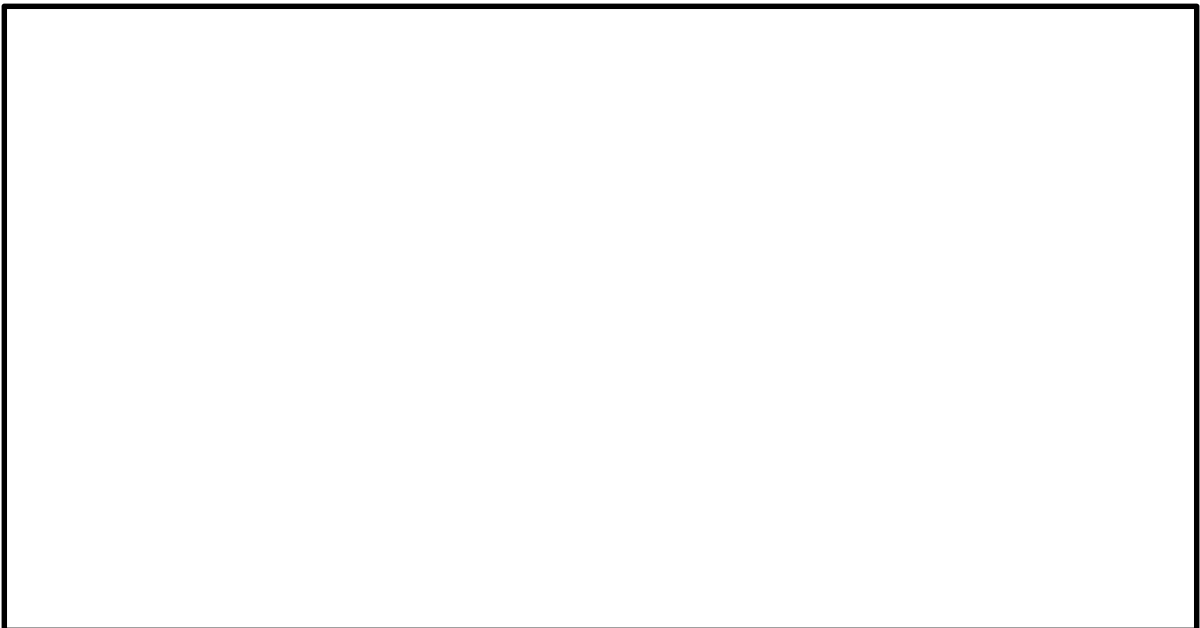


図 9-3 主トラス平面 解析モデル図（鉄骨部下弦材）

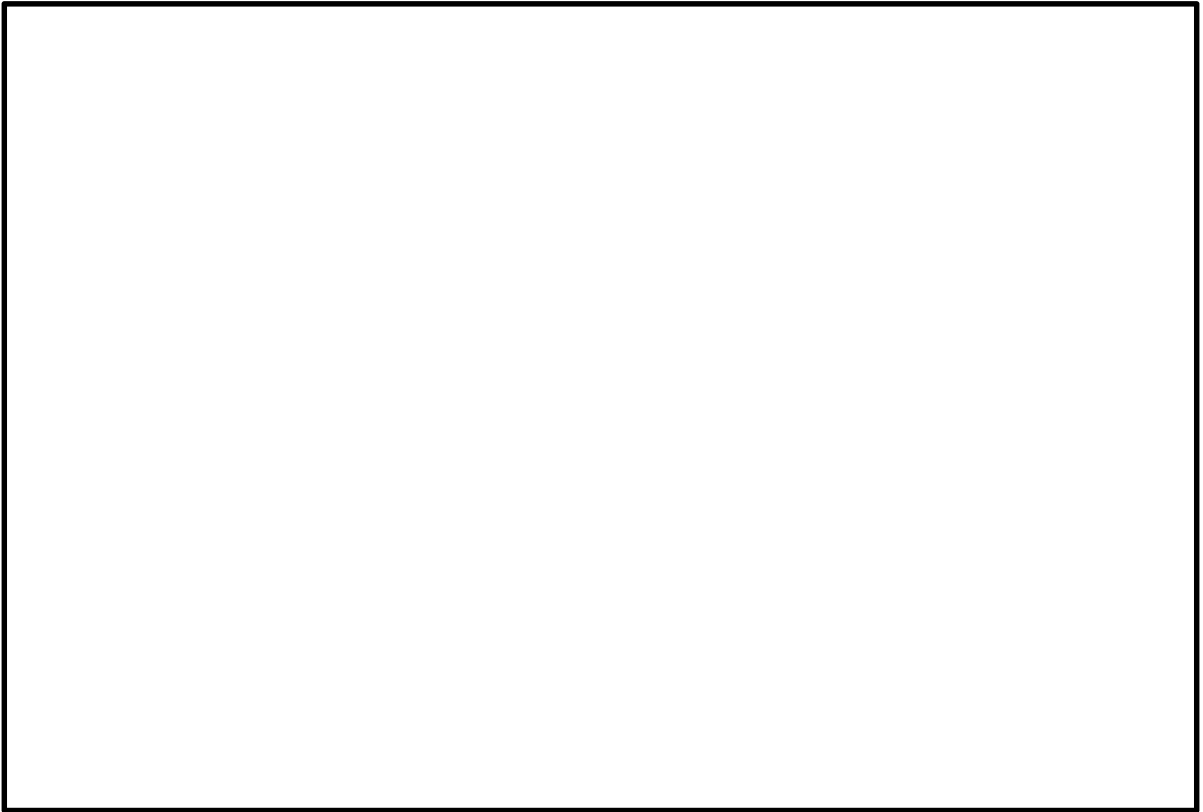


図 9-4 主トラス断面 構造図 (Y2～Y8 通り)

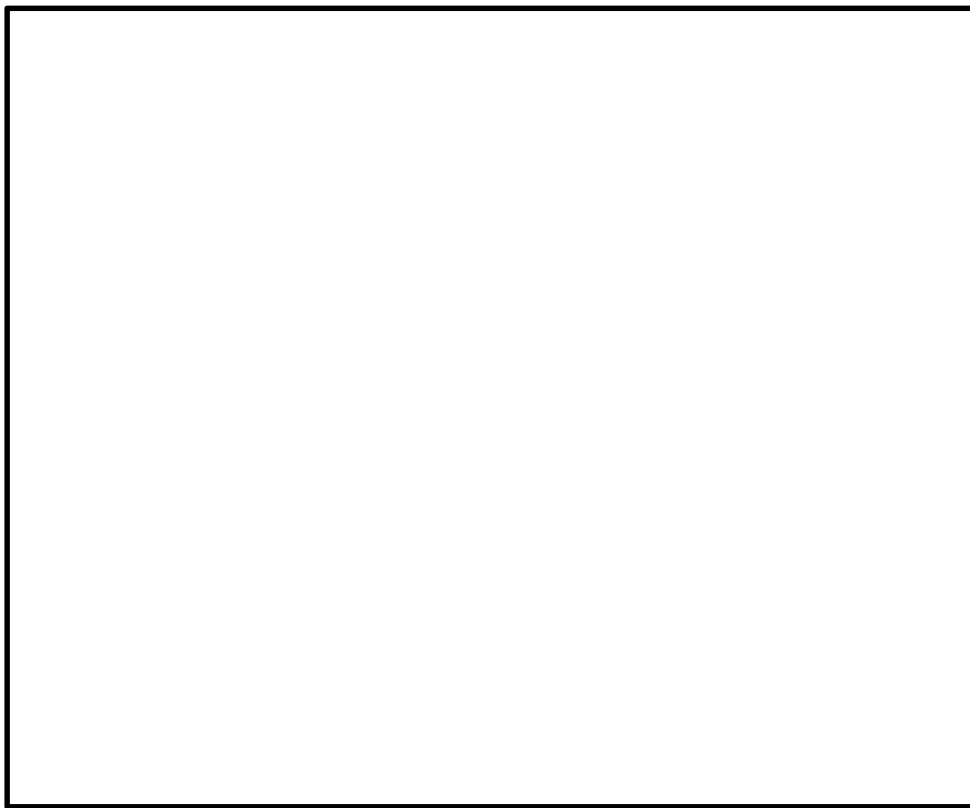


図 9-5 主トラス断面 解析モデル図 (Y2～Y8 通り)

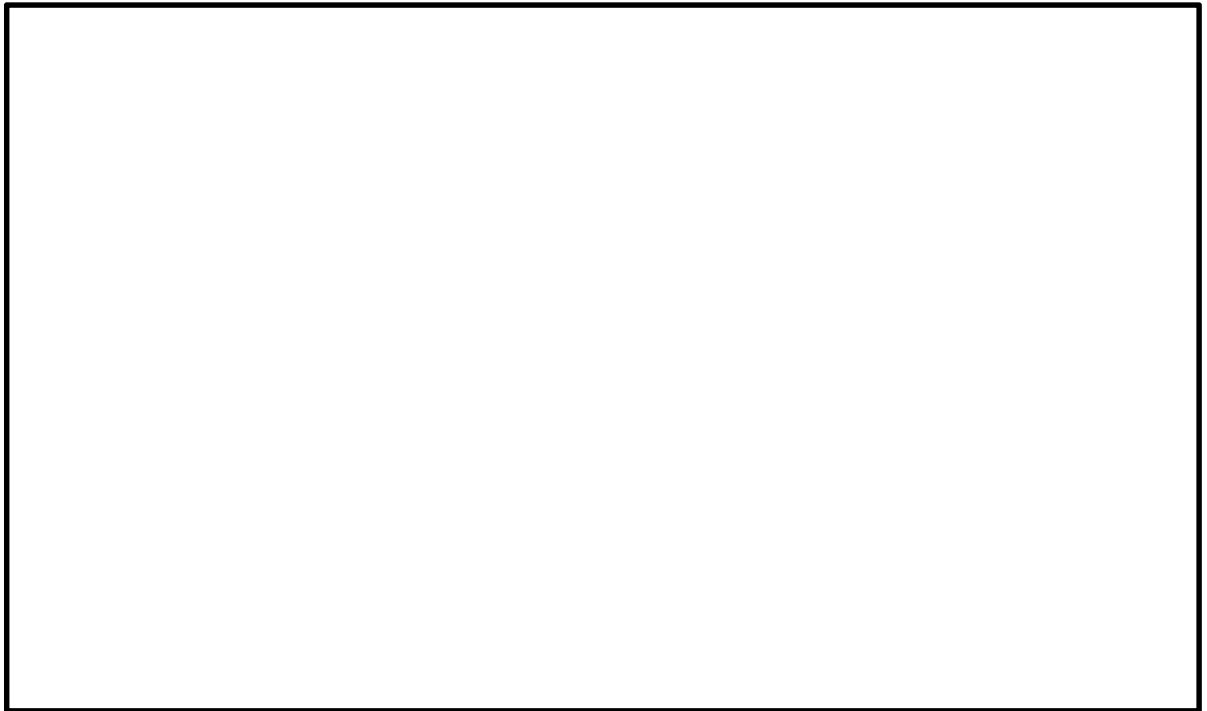


図 9-7 サブトラス断面 解析モデル図