

| | |
|---------|-------------|
| 東海第二発電所 | 工事計画審査資料 |
| 資料番号 | 補足-370-8 改1 |
| 提出年月日 | 平成30年6月28日 |

建物・構築物の耐震計算についての補足説明資料

補足-370-8 【使用済燃料プールの耐震性評価に関する補足説明】

平成30年6月

日本原子力発電株式会社

目次

| | |
|-----------------------|----|
| 1. 概要..... | 1 |
| 2. 荷重の設定方針..... | 2 |
| 3. 荷重の組合せ及び許容限界..... | 3 |
| 3.1 荷重組合せケースの選定..... | 3 |
| 3.2 荷重及び荷重組合せ..... | 7 |
| 3.3 許容限界..... | 2 |
| 4. 解析モデル及び諸元..... | 3 |
| 5. 評価方法..... | 4 |
| 5.1 応力解析方法..... | 4 |
| 5.2 断面の評価方法..... | 6 |
| 6. 評価結果..... | 10 |
| 6.1 通常運転時及び燃料交換時..... | 10 |
| 6.2 故障時..... | 15 |
| 7. 水平地震力の算定について..... | 20 |
| 7.1 評価方針..... | 20 |
| 7.2 評価方法..... | 20 |
| 7.3 算定結果..... | 26 |

1. 概要

使用済燃料プールは、資料V-2-4-2-1「使用済燃料プールの耐震性についての計算書」にて、CCV 規格に基づく荷重組合せのうち、地震時に関する荷重の組合せに対する評価を実施している。しかしながら、地震荷重と組み合わせないケースについて建設工認の記載が不足しているため、今回工認において地震荷重と組み合わせない部分について、その差分を補うこととした。本資料では、東海第二発電所の使用済燃料プールの応力解析に考慮する荷重の組合せに対する評価を実施する。

また、本資料は、以下の添付資料の補足説明をするものである。

- ・資料V-2-4-2-1「使用済燃料プールの耐震性についての計算書」

2. 荷重の設定方針

(1) 固定荷重及び積載荷重

解析モデルに考慮する固定荷重のうち、躯体重量については、鉄筋コンクリートの単位体積重量による。

また、床に作用する積載荷重のうち、使用済燃料プールの機器荷重については、使用済燃料の超密化による重量変更を考慮し、その他の部位の積載荷重及び配管荷重については、建設時の設計値による。

(2) 静水圧荷重

各部位の水位は、資料V-1-3-1「使用済燃料貯蔵槽の温度、水位及び漏えいを監視する装置の構成に関する説明書並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書」に基づき設定する。

(3) 長期ラック荷重

解析モデルに考慮する使用済燃料プール底版に作用する長期ラック荷重は、使用済燃料の超密化による重量変更を考慮して設定する。

(4) 地震荷重

地震荷重は、資料V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」で設定した建屋全体としての動的地震力及び静的地震力から、せん断力分配解析によりプール部に分配されたせん断力及び曲げモーメントを用いて算定する。

(5) 温度荷重

温度条件は建設時の設計条件に基づき設定し、1次元モデルを用いた定常温度分布解析により算出した温度分布解析結果から、各壁及び底版における表面の温度差とコンクリート基準温度からの差を設定する。

3. 荷重の組合せ及び許容限界

3.1 荷重組合せケースの選定

使用済燃料プールの荷重の組合せ及び許容限界を表 3-1 に示す。

また、先行プラントにおける荷重の組合せに対する東海第二発電所の使用済燃料プールでの要否について表 3-2 に示す。

先行 ABWR は、格納容器と一次遮蔽壁が一体的で、RCCV のシェル壁及びトップスラブが使用済燃料プールの一部の壁及び床を構成する。本資料においては、原子炉格納容器内において生じる圧力荷重、配管の熱膨張によって生じる配管荷重、逃がし安全弁作動時荷重、水力的動荷重、ジェット力及びジェット力作用時配管荷重については、使用済み燃料プールに直接作用しないため、これらを除いた荷重組合せケースについて実施することとした。原子炉格納容器内において生じる荷重については、資料「V-1-1-4-7-1 設定根拠に関する説明書（原子炉格納容器）」にて評価を実施する。

表 3-1 荷重の組合せ及び許容限界

| 荷重番号 | 荷重時名称 | 荷重の組合せ | 許容値 |
|------|---------|------------------------------|---------|
| 1 | 通常運転時 | $DL_1 + T_{11}$ | 長期許容応力度 |
| 2 | 燃料交換時 | $DL_2 + T_{12}$ | |
| 3 | 地震時 (1) | $DL_1 + T_{11} + K_1 + KH_1$ | 短期許容応力度 |
| 4 | 故障時 | $DL_1 + T_3$ | |
| 5 | 地震時 (2) | $DL_1 + K_2 + KH_2$ | 終局強度 |

注 1：荷重番号 1~4 については、温度荷重のない場合も考慮する。

注 2：温度荷重は、夏及び冬を考慮する。

注 3：地震荷重は、NS 方向及び EW 方向並びに鉛直方向を考慮する。

DL_1 ：死荷重及び活荷重（通常時）

DL_2 ：死荷重及び活荷重（燃料交換時）

T_{11} ：運転時温度荷重

T_{12} ：燃料交換時温度荷重

T_3 ：故障時温度荷重

K_1 ： S_d 地震荷重

K_2 ： S_s 地震荷重

KH_1 ： S_d 地震荷重と同時に作用する動水圧

KH_2 ： S_s 地震荷重と同時に作用する動水圧

表 3-2 荷重の組合せの要否

| 荷重番号 | 荷重時名称 | 荷重の組合せ | 許容値 | 実施要否 | 要否 |
|------|------------|------------------------------|-----------------|------|---|
| 1 | 通常運転時 | $DL_1 + T_{11}$ | 長期 許容 応力度 | ○ | 既工認に示されていないため実施（補足説明資料） |
| 2 | 燃料交換時 | $DL_2 + T_{12}$ | | ○ | 既工認に示されていないため実施（補足説明資料） |
| 3 | 逃がし安全弁作動時 | $DL_1 + T_{11}$ | | × | 格納容器に作用する荷重であり、東海第二発電所の使用済燃料プールには作用しない荷重のため不要 |
| 4 | 試験時 | DL_3 | | × | 格納容器に作用する荷重であり、東海第二発電所の使用済燃料プールには作用しない荷重のため不要 |
| 5 | 地震時 (1) | $DL_1 + T_{11} + K_1 + KH_1$ | 短期 許容 応力度 | ○ | 入力地震動の見直しにより実施 |
| 6 | 異常時 (1) | $DL_1 + T_{21}$ | | × | 格納容器に作用する荷重であり、東海第二発電所の使用済燃料プールには作用しない荷重のため不要 |
| 7 | 異常時 (2) | $DL_1 + T_{22}$ | | × | 格納容器に作用する荷重であり、東海第二発電所の使用済燃料プールには作用しない荷重のため不要 |
| 8 | 故障時 | $DL_1 + T_3$ | | ○ | 既工認に示されていないため実施（補足説明資料） |
| 9 | 地震時 (2) | $DL_1 + K_2 + KH_2$ | 終局 強度 | ○ | 入力地震動の見直しにより実施 |
| 10 | 異常時 (3) | DL_1 | | × | 格納容器に作用する荷重であり、東海第二発電所の使用済燃料プールには作用しない荷重のため不要 |
| 11 | ジェット力作用時 | DL_1 | | × | 格納容器に作用する荷重であり、東海第二発電所の使用済燃料プールには作用しない荷重のため不要 |
| 12 | (異常 + 地震)時 | $DL_1 + K_1 + KH_1$ | | × | 格納容器に作用する荷重であり、東海第二発電所の使用済燃料プールには作用しない荷重のため不要 |

注 1：荷重番号 1～3 及び 5～8 については、温度荷重のない場合も考慮する。

注 2：温度荷重は、夏及び冬を考慮する。

注 3：地震荷重は、NS 方向及び EW 方向並びに鉛直方向を考慮する。

注 4：荷重の組合せは、先行プラント（ABWR）から、圧力（P）、配管荷重（R）及び格納容器内の水力学的動荷重（H）を除いたものを示す。

- DL₁ : 死荷重及び活荷重 (通常時)
- DL₂ : 死荷重及び活荷重 (燃料交換時)
- DL₃ : 死荷重及び活荷重 (試験時)
- T₁₁ : 運転時温度荷重
- T₁₂ : 燃料交換時温度荷重
- T₂₁ : 異常時温度荷重 (30 分)
- T₂₂ : 異常時温度荷重 (24 時間)
- T₃ : 故障時温度荷重
- K₁ : S_d地震荷重
- K₂ : S_s地震荷重
- KH₁ : S_d地震荷重と同時に作用する動水圧
- KH₂ : S_s地震荷重と同時に作用する動水圧

参考

表-参考1 荷重の組合せ及び許容限界
(大間原子力発電所 第1号機の使用済燃料貯蔵プール)

| 荷重番号 | 荷重時名称 | 荷重の組合せ | 許容値 |
|------|-----------|---|---------|
| 1 | 通常運転時 | $DL_1 + P_1 + R_1 + T_{11}$ | 長期許容応力度 |
| 2 | 燃料交換時 | $DL_2 + T_{12}$ | |
| 3 | 逃がし安全弁作動時 | $DL_1 + P_1 + R_1 + T_{11} + H_1$ | |
| 4 | 試験時 | $DL_3 + P_0$ | |
| 5 | 地震時(1) | $DL_1 + P_1 + T_{11} + H_1 + K_1 + KH_1 + R_{41}$ | 短期許容応力度 |
| 6 | 異常時(1) | $DL_1 + P_{21} + R_2 + T_{21} + H_2$ | |
| 7 | 異常時(2) | $DL_1 + P_{22} + R_2 + T_{22}$ | |
| 8 | 故障時 | $DL_1 + P_1 + R_1 + T_3 + H_1$ | 終局強度 |
| 9 | 地震時(2) | $DL_1 + P_1 + H_1 + K_2 + KH_2 + R_{42}$ | |
| 10 | 異常時(3) | $DL_1 + 1.5 \cdot P_D + R_2$ | |
| 11 | ジェット力作用時 | $DL_1 + R_3$ | |
| 12 | (異常+地震)時 | $DL_1 + P_{21} + K_1 + KH_1 + R_{41}$ | |

注1：荷重番号1～3及び5～8については、温度荷重のない場合も考慮する。

注2：温度荷重は、夏及び冬を考慮する。

注3：地震荷重は、NS方向及びEW方向並びに鉛直方向を考慮する。

3.2 荷重及び荷重組合せ

3.2.1 荷重

(1) 固定荷重 (G) 及び積載荷重 (P)

解析モデルに考慮する固定荷重及び積載荷重は、資料V-2-4-2-1「使用済燃料プールの耐震性についての計算書」の「3.2.1 荷重」に記載の荷重に準ずるものとする。

(2) 静水圧荷重 (H_s)

各状態における使用済燃料プール、原子炉ウエル及び蒸気乾燥器・気水分離器ピット内の水の有無を表3-3に示す。また、解析モデルに考慮するプール内の静水圧荷重の算定条件を表3-4に示す。

表3-3 各状態におけるプール水の有無

| 状態 | 通常運転時 | 燃料交換時 | 故障時 |
|--------------------|-------|-------|-----|
| 使用済燃料プール | ○ | ○ | ○ |
| 原子炉ウエル | × | ○ | × |
| 蒸気乾燥器・ 気水分離器ピット | × | ○ | × |

表3-4 プールの静水圧荷重の算定条件

| 荷重 | 最大水位 (m) | 底面レベル (m) | 最大水深 (m) |
|--------------------|-------------|--------------|-------------|
| 使用済燃料プール | EL. +46.195 | EL. +34.689 | 11.506 |
| 原子炉ウエル | EL. +46.195 | — | 7.315 |
| 蒸気乾燥器・ 気水分離器ピット | EL. +46.195 | EL. +38.880 | 7.315 |

(3) 長期ラック荷重 (R_0)

解析モデルに考慮する固定荷重及び積載荷重は、資料V-2-4-2-1「使用済燃料プールの耐震性についての計算書」の「3.2.1 荷重」に記載の荷重に準ずるものとする。

(4) 温度荷重 (T_0 , T_1 , T_2)

通常運転時 (T_0)、燃料交換時 (T_1) 及び故障時 (T_2) における雰囲気温度を表 3-5 に示す。原子炉建屋内雰囲気温度は、冬季及び夏季においてそれぞれ 10 °C 及び 40 °C、外気温はそれぞれ 3 °C 及び 25.2 °C とする。

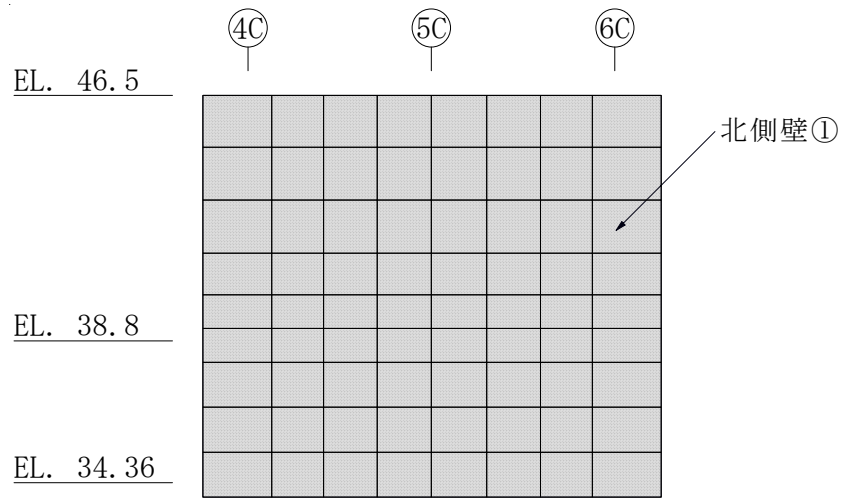
これらの条件より各部位の表面温度を一定とした定常温度分布解析を実施し、熱応力解析に用いる温度分布を算出する。

定常温度分布解析は、応力解析モデルの各部位の板厚方向に対する 1 次元モデルを用いて行う。また、熱応力解析は、資料 V-2-4-2-1 「使用済燃料プールの耐震性についての計算書」に示す 3 次元 FEM モデルを用いた弾性応答解析とし、解析コード「MSC NASTRAN ver 2016.1.1」を用いる。

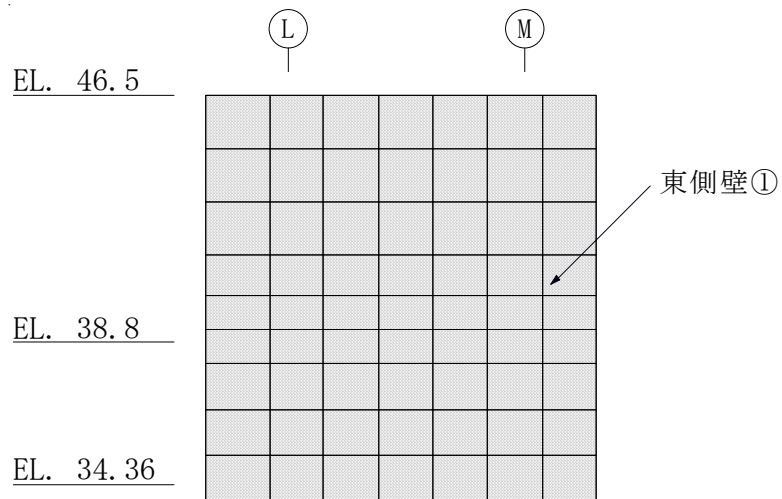
壁及び底版の温度分布設定箇所を図 3-1、壁及び底版の設定温度分布を表 3-6 に示す。

表 3-5 各状態における雰囲気温度

| 荷重 | 通常運転時 (°C) | 燃料交換時 (°C) | 故障時 (°C) |
|--------------------|---------------|---------------|-------------|
| ドライウエル | 66 | 66 | 66 |
| サプレッションプール | 32 | 32 | 32 |
| 原子炉ウエル | 66 | 52 | 66 |
| 使用済燃料プール | 52 | 52 | 65 |
| 蒸気乾燥器・ 気水分離器ピット | 10 | 52 | 10 |

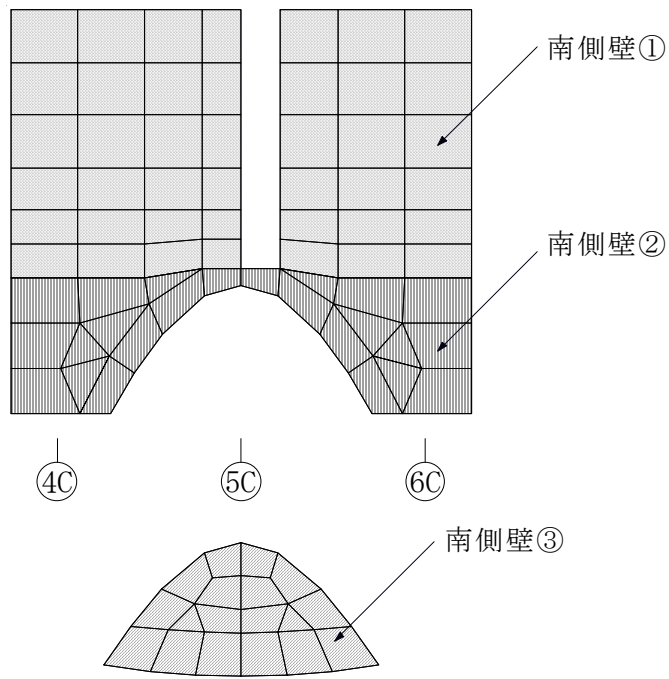


(a) 北側壁

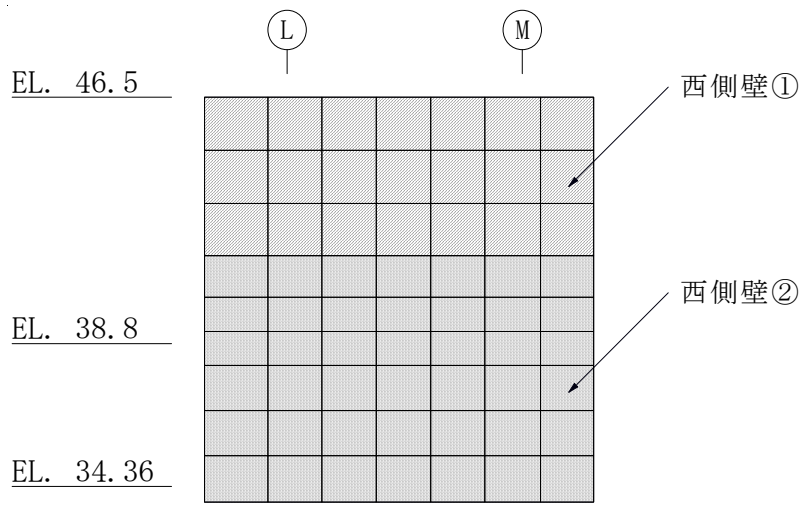


(b) 東側壁

図 3-1 (1/3) 各壁及び底版の温度分布設定箇所

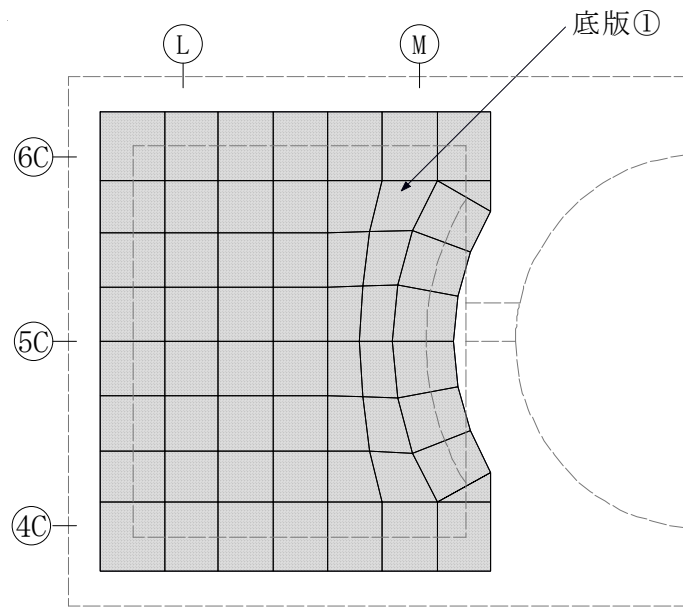


(c) 南側壁



(d) 西側壁

図 3-1 (2/3) 各壁及び底版の温度分布設定箇所



(e) 底版

図 3-1 (3/3) 各壁及び底版の温度分布設定箇所

表 3-6 設定温度分布

| 名称 | 表面温度 (°C) | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 通常運転時 | | | | 燃料交換時 | | | | 故障時 | | | |
| | 冬季 | | 夏季 | | 冬季 | | 夏季 | | 冬季 | | 夏季 | |
| | プール 内側 | プール 外側 | プール 内側 | プール 外側 | プール 内側 | プール 外側 | プール 内側 | プール 外側 | プール 内側 | プール 外側 | プール 内側 | プール 外側 |
| 北側壁① | 52.0 | 17.9 | 52.0 | 42.3 | 52.0 | 17.9 | 52.0 | 42.3 | 65.0 | 20.4 | 65.0 | 44.7 |
| 東側壁① | 52.0 | 17.5 | 52.0 | 42.1 | 52.0 | 17.5 | 52.0 | 42.1 | 65.0 | 19.8 | 65.0 | 44.4 |
| 南側壁① | 52.0 | 62.8 | 52.0 | 62.8 | 52.0 | 52.0 | 52.0 | 52.0 | 65.0 | 65.8 | 65.0 | 65.8 |
| 南側壁② | 52.0 | 62.8 | 52.0 | 62.8 | 52.0 | 62.8 | 52.0 | 62.8 | 65.0 | 65.8 | 65.0 | 65.8 |
| 南側壁③ | 52.0 | 63.2 | 52.0 | 63.2 | 52.0 | 63.2 | 52.0 | 63.2 | 65.0 | 65.8 | 65.0 | 65.8 |
| 西側壁① | 52.0 | 20.7 | 52.0 | 43.0 | 52.0 | 20.7 | 52.0 | 43.0 | 65.0 | 23.9 | 65.0 | 46.3 |
| 西側壁② | 52.0 | 17.5 | 52.0 | 42.1 | 52.0 | 17.5 | 52.0 | 42.1 | 65.0 | 19.8 | 65.0 | 44.4 |
| 底版① | 52.0 | 19.5 | 52.0 | 42.7 | 52.0 | 19.5 | 52.0 | 42.7 | 65.0 | 22.4 | 65.0 | 45.6 |

3.2.2 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 3-7 に示す。

表 3-7 荷重の組合せ

| 外力の状態 | | 荷重の組合せ |
|-------|-------|---------------------------|
| 長期 | 通常運転時 | $GP + H_{s1} + R_0 + T_0$ |
| | 燃料交換時 | $GP + H_{s2} + R_0 + T_1$ |
| 短期 | 故障時 | $GP + H_{s3} + R_0 + T_2$ |

GP : 固定荷重及び積載荷重

H_{s1} : 通常運転時静水圧荷重

H_{s2} : 燃料交換時静水圧荷重

H_{s3} : 故障時静水圧荷重

R_0 : 長期ラック荷重

T_0 : 通常運転時温度荷重

T_1 : 燃料交換時温度荷重

T_2 : 故障時温度荷重

3.3 許容限界

応力解析による評価における使用済燃料プールの許容限界は、表 3-8 のとおり設定する。

また、コンクリート及び鉄筋の許容応力度を表 3-9 及び表 3-10 に示す。

表 3-8 応力解析による評価における許容限界

| 状態 | 部位 | 許容限界 (評価基準値) |
|-------|----------------|------------------------------|
| 通常運転時 | 使用済燃料 プール躯体 | 「CCV規格」にお ける荷重状態Ⅰ の許容値 |
| 燃料交換時 | 使用済燃料 プール躯体 | |
| 故障時 | 使用済燃料 プール躯体 | 「CCV規格」にお ける荷重状態Ⅲ の許容値 |

表 3-9 コンクリートの許容応力度

| 荷重状態 | F _c = 22.1 (N/mm ²) | | | |
|------|--|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| | 応力状態 1 ^{※1} | | 応力状態 2 ^{※2} | |
| | 圧縮 (N/mm ²) | せん断 (N/mm ²) | 圧縮 (N/mm ²) | せん断 (N/mm ²) |
| Ⅰ | 7.36 | 0.711 | 9.94 | 0.711 |
| Ⅲ | 14.7 | 1.06 | 16.5 | 1.06 |

※1: 「応力状態 1」とは、各荷重状態において温度荷重により生じる応力を除いた応力が生じている状態をいう。

※2: 「応力状態 2」とは、各荷重状態において温度荷重による応力が生じている状態をいう。

表 3-10 鉄筋の許容応力度

| 荷重状態 | SD345 [※] | |
|------|--------------------------------|-------------------------------|
| | 引張及び圧縮 (N/mm ²) | 面外せん断 (N/mm ²) |
| Ⅰ | 195 | 195 |
| Ⅲ | 345 | 345 |

※: 建設当時の鉄筋の種類は SD35 であるが現在の規格 (SD345) に読み替えた応力度を示す。

4. 解析モデル及び諸元

解析モデル及び諸元は、資料V-2-4-2-1「使用済燃料プールの耐震性についての計算書」の「3.4.1 モデル化の基本方針」に準ずるものとする。

5. 評価方法

5.1 応力解析方法

使用済燃料プールについて、3次元FEMモデルを用いた弾性応力解析を実施する。

5.1.1 荷重ケース

通常運転時、燃料交換時及び故障時の応力は、単独荷重による解析で求まる応力を組み合わせて求める。

単独荷重の記号を以下に示す。

| | |
|-----------------|-----------------|
| GP | : 固定荷重及び積載荷重 |
| H _{s1} | : 通常運転時静水圧荷重 |
| H _{s2} | : 燃料交換時静水圧荷重 |
| R ₀ | : 長期ラック荷重 |
| T ₀₁ | : 通常運転時温度荷重 (冬) |
| T ₀₂ | : 通常運転時温度荷重 (夏) |
| T ₁₁ | : 燃料交換時温度荷重 (冬) |
| T ₁₂ | : 燃料交換時温度荷重 (夏) |
| T ₂₁ | : 故障時温度荷重 (冬) |
| T ₂₂ | : 故障時温度荷重 (夏) |

5.1.2 荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表5-1及び表5-2に示す。

表5-1 荷重の組合せケース (通常運転時及び燃料交換時)

| | 荷重状態 | ケース No. | 荷重の組合せケース |
|--------|-------|---------|------------------------------|
| 応力状態 1 | 通常運転時 | 1-1 | $GP + H_{s1} + R_0$ |
| | 燃料交換時 | 1-2 | $GP + H_{s2} + R_0$ |
| 応力状態 2 | 通常運転時 | 冬 | $GP + H_{s1} + R_0 + T_{01}$ |
| | | 夏 | $GP + H_{s1} + R_0 + T_{02}$ |
| | 燃料交換時 | 冬 | $GP + H_{s2} + R_0 + T_{11}$ |
| | | 夏 | $GP + H_{s2} + R_0 + T_{12}$ |

表5-2 荷重の組合せケース (故障時)

| 荷重状態 | ケース No. | 荷重の組合せケース |
|------|---------|------------------------------|
| 故障時 | 冬 | $GP + H_{s1} + R_0 + T_{21}$ |
| | 夏 | $GP + H_{s1} + R_0 + T_{22}$ |

5.1.3 荷重の入力方法

荷重の入力方法は、資料V-2-4-2-1「使用済燃料プールの耐震性についての計算書」の「3.5.1 応力解析方法」に準ずるものとする。

5.2 断面の評価方法

使用済燃料プールの断面の評価に用いる応力は、3次元FEMモデルを用いた応力解析により得られた各荷重による応力（軸力、曲げモーメント及びせん断力）とする。

5.2.1 壁

軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートの応力度、軸力による圧縮応力度、面内せん断力並びに面外せん断力を算定し、「CCV規格」に準拠して設定した各許容値を超えないことを確認する。

【軸力、曲げモーメント及び面内せん断力に対する断面の評価方法】

軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートの応力度の算定においては、「CCV規格」のCVE-3511に基づき次の2つの計算式に示す等価膜力を考慮した上で、「CCV規格」のCVE-3511.1に基づき、表3-9及び表3-10に示す各許容値を超えないことを確認する。膜力と面内せん断力の関係図を図5-1に示す。

$$N_{\phi}^* = N_{\phi} \pm |N_{\phi\theta}|$$
$$N_{\theta}^* = N_{\theta} \pm |N_{\phi\theta}|$$

ここで、

N_{ϕ}^* , N_{θ}^* : ϕ , θ 方向の等価膜力

N_{ϕ} , N_{θ} : ϕ , θ 方向の膜力

$N_{\phi\theta}$: 面内せん断力

(ϕ 方向は子午線方向, θ 方向は円周方向とする)

上記の式のうち、「子午線方向」は「縦方向」に、「円周方向」は「横方向」にそれぞれ読み替えることとする。

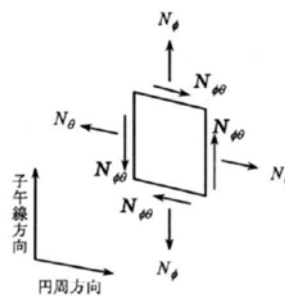


図5-1 膜力と面内せん断力の関係図

【面内せん断力に対する断面の評価方法】

面内せん断力については、「CCV規格」の CVE-3512.1 に基づき、評価対象部位に生じる面内せん断応力度が、次の 2 式により計算した終局面内せん断応力度のいずれか小さい方の値に対し、荷重状態Ⅰにおいては 0.5 倍、荷重状態Ⅲにおいては 0.75 倍の値を超えないことを確認する。

$$\begin{aligned}\tau_u &= 0.5\{(p_{t\phi} \cdot f_y - \sigma_{0\phi}) + (p_{t\theta} \cdot f_y - \sigma_{0\theta})\} \\ \tau_u &= 1.10\sqrt{F_c}\end{aligned}$$

ここで、

τ_u : 終局面内せん断応力度 (N/mm²)

$p_{t\phi}$: 子午線方向主筋の鉄筋比

$p_{t\theta}$: 円周方向主筋の鉄筋比

$\sigma_{0\phi}$: 外力による子午線方向の膜応力度 (N/mm²) (引張の場合のみを考慮し、符号を正とする)

$\sigma_{0\theta}$: 外力による円周方向の膜応力度 (N/mm²) (引張の場合のみを考慮し、符号を正とする)

f_y : 鉄筋の許容引張応力度及び許容圧縮応力度であり、表 3-9 に示す値

F_c : コンクリートの設計基準強度 (N/mm²)

上記の式のうち、「子午線方向主筋」は「縦方向主筋」に、「円周方向主筋」は「横方向主筋」にそれぞれ読み替えることとする。また、「子午線方向の膜応力度」は「縦方向の軸応力度」に、「円周方向の膜応力度」は「横方向の軸応力度」にそれぞれ読み替えることとする。

【面外せん断力に対する断面の評価方法】

面外せん断力については、「CCV規格」の CVE-3513.1 に基づき、評価対象部位に生じる面外せん断応力度が、次の 2 式により計算した終局面外せん断応力度のいずれか小さい方の値に対し、荷重状態Ⅰにおいては 0.5 倍、荷重状態Ⅲにおいては 0.75 倍の値を超えないことを確認する。

$$\begin{aligned}\tau_R &= \Phi\{0.1(p_t \cdot f_y - \sigma_0) + 0.5p_w \cdot f_y + 0.235\sqrt{F_c}\} \\ \tau_R &= 1.10\sqrt{F_c}\end{aligned}$$

ここで、

τ_R : 終局面外せん断応力度 (N/mm²)

p_t : 主筋の鉄筋比

σ_0 : 外力による膜応力度 (N/mm²) (引張の符号を正とする)

p_w : 面外せん断力に対する補強筋の鉄筋比であって、次の計算式により計算した値

$$p_w = a_w / (b \cdot x)$$

a_w : 面外せん断力に対する補強筋の断面積 (mm²)

b : 断面の幅 (mm)

x : 面外せん断力に対する補強筋の間隔 (mm)

Φ : 低減係数であり、次の計算式により計算した値 (1 を超える場合は 1, 0.58 未満の場合は 0.58 とする)

$$\Phi = 1 / \sqrt{M / (Q \cdot d)}$$

M : 曲げモーメント (N・mm)

Q : せん断力 (N)

d : 断面の有効せい (mm)

なお、 F_c 及び f_y は、表 3-9 及び表 3-10 による。

上記の式のうち、「外力による膜応力度」は「外力による軸応力度」に読み替えることとする。

5.2.2 底版

軸力、曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートの応力度並びに面外せん断力を算定し、「CCV規格」に準拠して設定した各許容値を超えないことを確認する。

【軸力及び曲げモーメントに対する断面の評価方法】

軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートの応力度の算定については、「CCV規格」の CVE-3521.1 に基づき、表 3-9 及び表 3-10 に示す各許容値を超えないことを確認する。

【面外せん断力に対する断面の評価方法】

面外せん断力については、「CCV規格」の CVE-3522 に基づき、評価対象部位に生じる面外せん断力が、次式により計算した値を超えないことを確認する。

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

ここで、

Q_A : 許容面外せん断力 (N)

b : 断面の幅 (mm)

j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

$c f_s$: コンクリートの許容せん断応力度で、表 3-9 に示す値 (N/mm²)

p_w : 面外せん断力に対する補強筋の鉄筋比であり、次の計算式に

より計算した値（0.002 以上とし、荷重状態 I では 0.006 を、荷重状態 III では 0.012 を超える場合はそれぞれの値を 0.006 または 0.012 とする）

$$p_w = a_w / (b \cdot x)$$

a_w : 面外せん断力に対する補強筋の断面積 (mm²)

x : 面外せん断力に対する補強筋の間隔 (mm)

${}_w f_t$: 面外せん断力に対する補強筋の許容引張応力度であり、表 3-10 に示す値 (N/mm²)

α : 割増係数であり、次式により計算した値（2 を超える場合は 2、1 未満の場合は 1 とする）

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

M : 曲げモーメント (N・mm)

Q : せん断力 (N)

d : 断面の有効せい (mm)

6. 評価結果

「4.2 断面の評価方法」に基づいた断面の評価結果を以下に示す。使用済燃料プールの配筋一覧は、資料V-2-4-2-1「使用済燃料プールの耐震性についての計算書」の「4. 評価結果」に記載の配筋一覧に準ずるものとする。

6.1 通常運転時及び燃料交換時

断面の評価結果を記載する要素を、以下のとおり選定する。

(1) 壁

軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートの応力度、面外せん断力並びに面外せん断力に対する評価については、発生値に対する許容値の割合が最小となる要素をそれぞれ選定する。

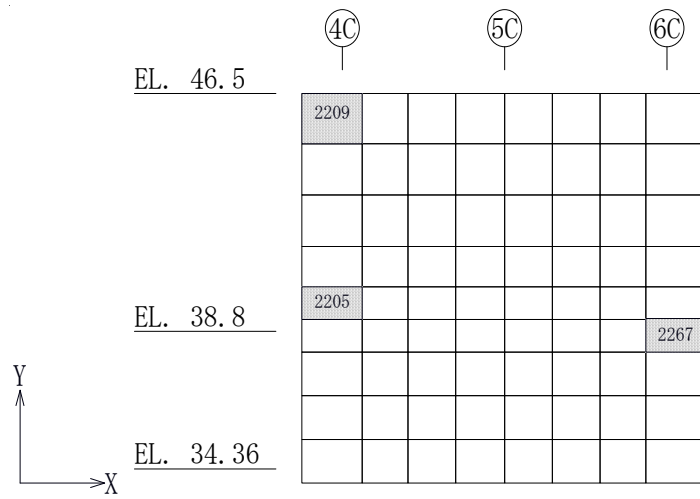
(2) 底版

軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートの応力度並びに面外せん断力に対する評価については、発生値に対する許容値の割合が最小となる要素をそれぞれ選定する。

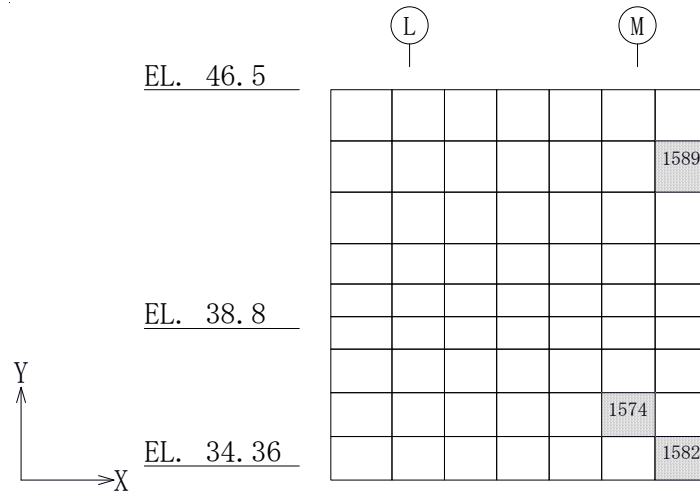
選定した要素の位置を図6-1に、評価結果を表6-1に示す。

通常運転時及び燃料交換時において、壁については、軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートの応力度、面内せん断力並びに面外せん断力が、各許容値を超えないことを確認した。

また、底版については、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートの応力度並びに面外せん断力が、各許容値を超えないことを確認した。

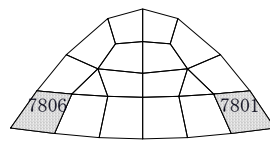
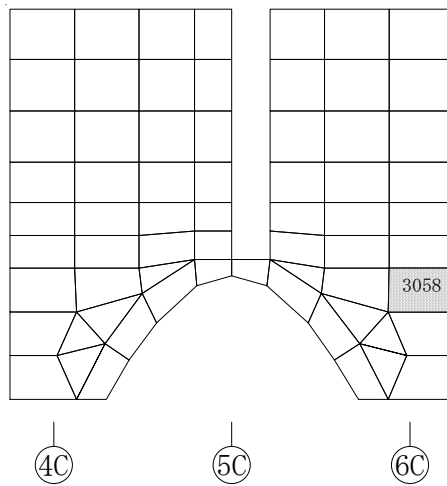


(a) 北側壁

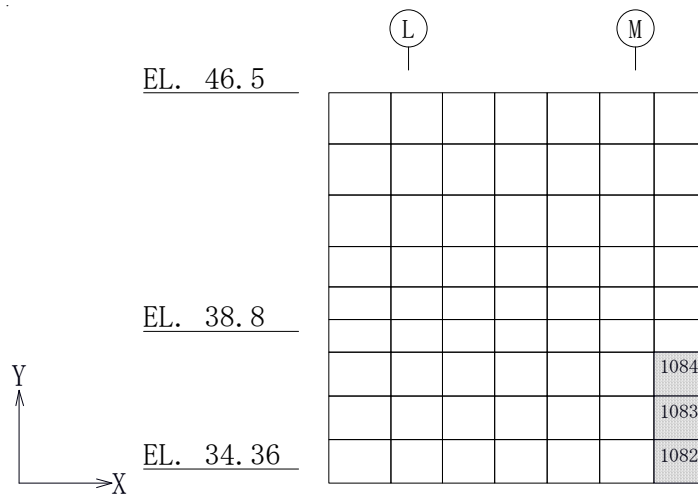


(b) 東側壁

図 6-1 (1/3) 結果を記載する要素の位置 通常運転時及び燃料交換時



(c) 南側壁



(d) 西側壁

図 6-1 (2/3) 結果を記載する要素の位置 通常運転時及び燃料交換時

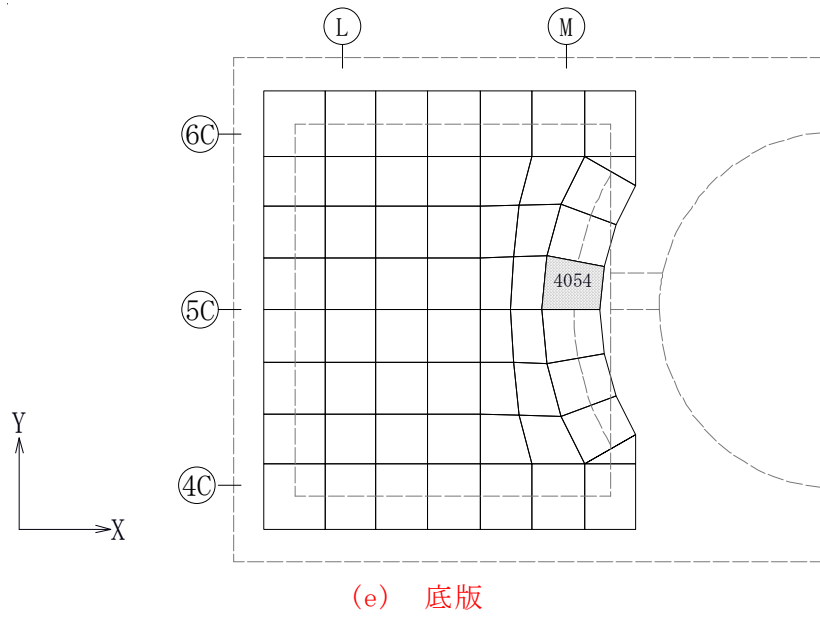


図 6-1 (3/3) 結果を記載する要素の位置 通常運転時及び燃料交換時

表 6-1 評価結果 通常運転時及び燃料交換時

| | | 評価項目 | 要素位置 | 組合せケース | 解析結果 | 許容値 | 備考 |
|------------------------------------|-----|----------------------------------|------|--------|-------|-------|-----|
| 軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力※ | 北側壁 | コンクリート (N/mm ²) | 2267 | 1-3 | 6.66 | 9.94 | 圧縮側 |
| | | 鉄筋 (N/mm ²) | 2267 | 1-3 | 60.0 | 195 | 引張側 |
| | 東側壁 | コンクリート (N/mm ²) | 1582 | 1-3 | 6.54 | 9.94 | 圧縮側 |
| | | 鉄筋 (N/mm ²) | 1582 | 1-5 | 55.8 | 195 | 引張側 |
| | 南側壁 | コンクリート (N/mm ²) | 7806 | 1-3 | 5.36 | 9.94 | 圧縮側 |
| | | 鉄筋 (N/mm ²) | 7806 | 1-3 | 75.2 | 195 | 引張側 |
| | 西側壁 | コンクリート (N/mm ²) | 1082 | 1-3 | 6.50 | 9.94 | 圧縮側 |
| | | 鉄筋 (N/mm ²) | 1083 | 1-3 | 55.3 | 195 | 引張側 |
| | 底版 | コンクリート (N/mm ²) | 4054 | 1-4 | 5.07 | 9.94 | 圧縮側 |
| | | 鉄筋 (N/mm ²) | 4054 | 1-3 | 38.3 | 195 | 引張側 |
| 面内せん断力 | 北側壁 | 面内せん断応力度 (N/mm ²) | 2205 | 1-3 | 0.579 | 1.11 | |
| | 東側壁 | 面内せん断応力度 (N/mm ²) | 1574 | 1-5 | 0.737 | 1.15 | |
| | 南側壁 | 面内せん断応力度 (N/mm ²) | 3058 | 1-3 | 1.67 | 2.50 | |
| | 西側壁 | 面内せん断応力度 (N/mm ²) | 1084 | 1-6 | 0.797 | 1.16 | |
| 面外せん断力 | 北側壁 | 面外せん断応力度 (N/mm ²) | 2209 | 1-5 | 0.665 | 0.718 | |
| | 東側壁 | 面外せん断応力度 (N/mm ²) | 1589 | 1-5 | 0.499 | 0.585 | |
| | 南側壁 | 面外せん断応力度 (N/mm ²) | 7801 | 1-3 | 0.735 | 1.07 | |
| | 西側壁 | 面外せん断応力度 (N/mm ²) | 1082 | 1-3 | 0.503 | 0.536 | |
| | 底版 | 面外せん断応力度 (N/mm ²) | 4054 | 1-3 | 1.09 | 1.93 | |

※：底版については、面内せん断力は考慮しない。

6.2 故障時

断面の評価結果を記載する要素を，以下のとおり選定する。

(1) 壁

軸力，曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートの応力度，面外せん断力並びに面外せん断力に対する評価については，発生値に対する許容値の割合が最小となる要素をそれぞれ選定する。

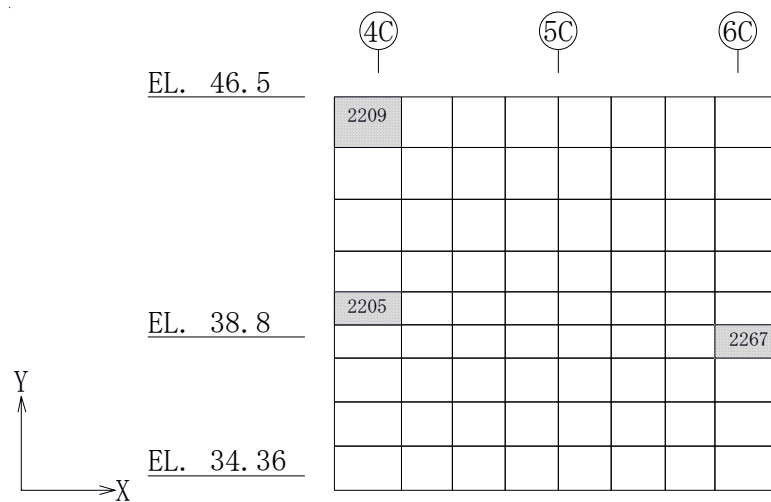
(2) 底版

軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートの応力度並びに面外せん断力に対する評価については，発生値に対する許容値の割合が最小となる要素をそれぞれ選定する。

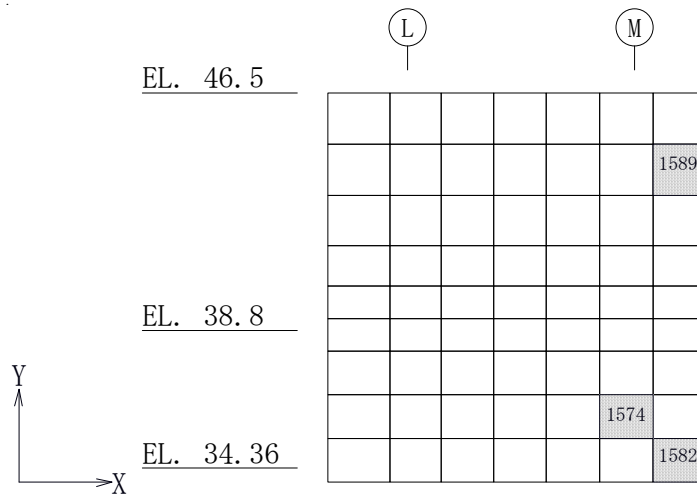
選定した要素の位置を図 6-2 に，評価結果を表 6-2 に示す。

故障時において，壁については，軸力，曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートの応力度，面内せん断力並びに面外せん断力が，各許容値を超えないことを確認した。

また，底版については，軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートの応力度並びに面外せん断力が，各許容値を超えないことを確認した。

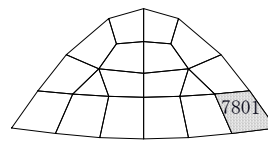
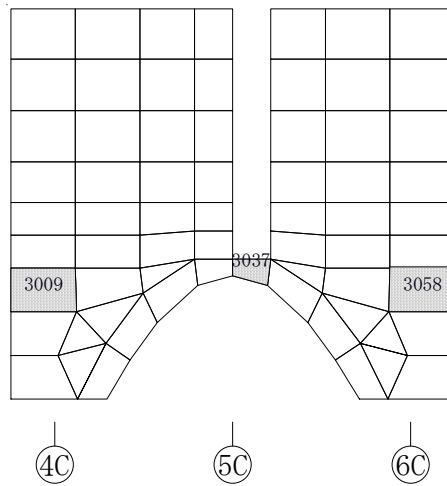


(a) 北側壁

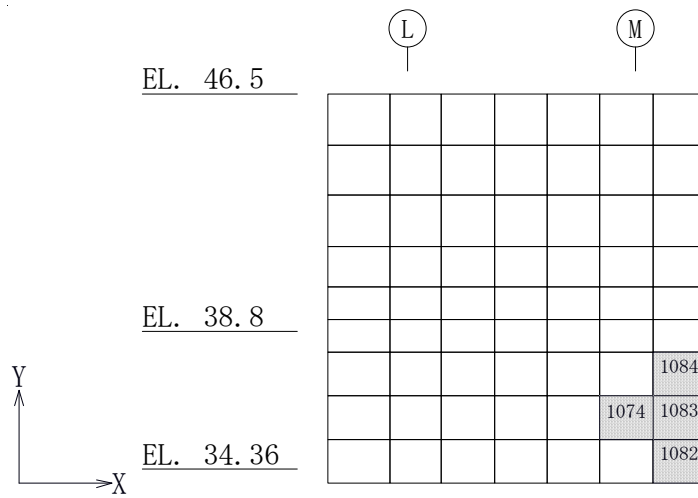


(b) 東側壁

図 6-2 (1/3) 結果を記載する要素の位置 故障時



(c) 南側壁



(d) 西側壁

図 6-2 (2/3) 結果を記載する要素の位置 故障時

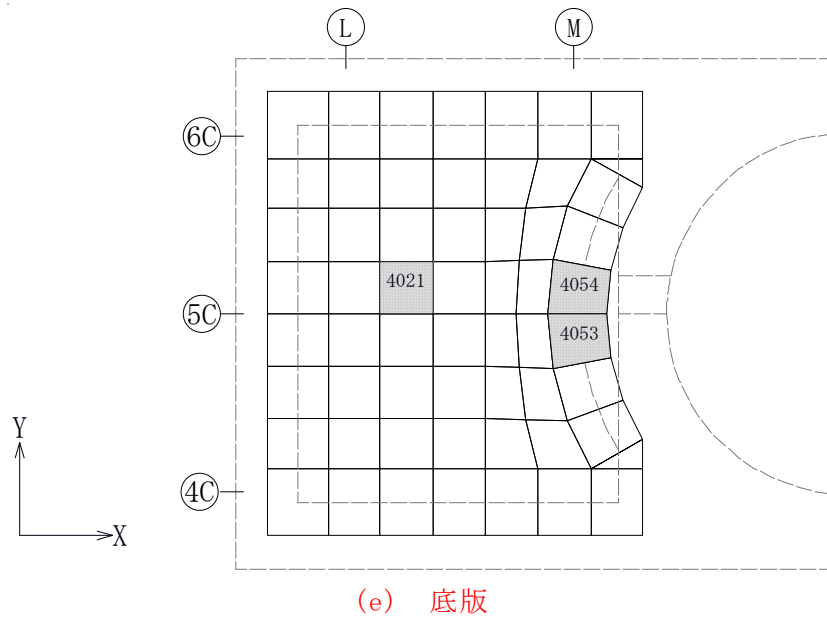


図 6-2 (3/3) 結果を記載する要素の位置 故障時

表 6-2 評価結果 故障時

| | | 評価項目 | 要素位置 | 組合せケース | 解析結果 | 許容値 | 備考 |
|------------------------------------|-----|----------------------------------|------|--------|-------|-------|-----|
| 軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力※ | 北側壁 | コンクリート (N/mm ²) | 2267 | 2-1 | 8.82 | 16.5 | 圧縮側 |
| | | 鉄筋 (N/mm ²) | 2267 | 2-1 | 79.4 | 345 | 引張側 |
| | 東側壁 | コンクリート (N/mm ²) | 1582 | 2-1 | 7.50 | 16.5 | 圧縮側 |
| | | 鉄筋 (N/mm ²) | 1582 | 2-1 | 59.8 | 345 | 引張側 |
| | 南側壁 | コンクリート (N/mm ²) | 3037 | 2-1 | 5.97 | 16.5 | 圧縮側 |
| | | 鉄筋 (N/mm ²) | 3009 | 2-1 | 78.7 | 345 | 引張側 |
| | 西側壁 | コンクリート (N/mm ²) | 1082 | 2-1 | 7.47 | 16.5 | 圧縮側 |
| | | 鉄筋 (N/mm ²) | 1084 | 2-1 | 59.0 | 345 | 引張側 |
| | 底版 | コンクリート (N/mm ²) | 4021 | 2-1 | 5.30 | 16.5 | 圧縮側 |
| | | 鉄筋 (N/mm ²) | 4053 | 2-1 | 38.6 | 345 | 引張側 |
| 面内せん断力 | 北側壁 | 面内せん断応力度 (N/mm ²) | 2205 | 2-1 | 0.663 | 1.67 | |
| | 東側壁 | 面内せん断応力度 (N/mm ²) | 1574 | 2-1 | 0.801 | 1.74 | |
| | 南側壁 | 面内せん断応力度 (N/mm ²) | 3058 | 2-1 | 2.10 | 3.75 | |
| | 西側壁 | 面内せん断応力度 (N/mm ²) | 1074 | 2-1 | 0.774 | 1.74 | |
| 面外せん断力 | 北側壁 | 面外せん断応力度 (N/mm ²) | 2209 | 2-1 | 0.843 | 1.09 | |
| | 東側壁 | 面外せん断応力度 (N/mm ²) | 1589 | 2-1 | 0.543 | 0.869 | |
| | 南側壁 | 面外せん断応力度 (N/mm ²) | 7801 | 2-1 | 0.992 | 1.64 | |
| | 西側壁 | 面外せん断応力度 (N/mm ²) | 1083 | 2-1 | 0.400 | 0.658 | |
| | 底版 | 面外せん断応力度 (N/mm ²) | 4054 | 2-1 | 1.14 | 1.82 | |

※：底版については、面内せん断力は考慮しない。

7. 水平地震力の算定について

7.1 評価方針

使用済燃料プールに作用する水平地震力は、資料V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」で設定した建屋全体としての動的地震力から、せん断力分配解析によりプール部に分配されたせん断力及び曲げモーメントを用いて算定する。解析には、「MSC NASTRAN ver 2016.1.1」を用いる。

7.2 評価方法

7.2.1 応力解析方法

原子炉建屋について、シェル壁、内部ボックス壁及び外部ボックス壁をそれぞれ曲げ及びせん断剛性を評価した梁要素としてモデル化し、弾性応力解析を実施する。

(1) 解析モデル

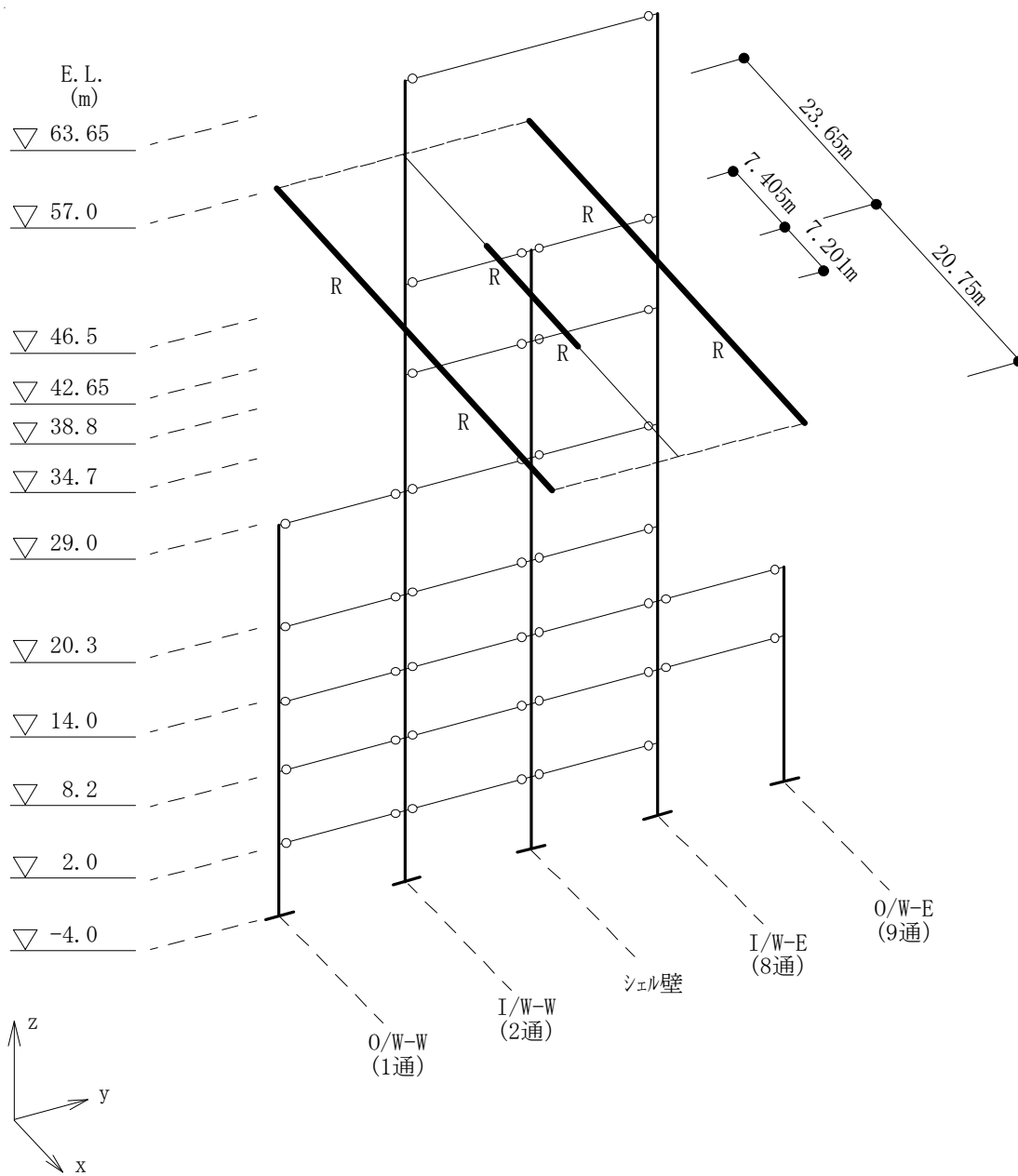
解析モデルは、シェル壁、内部ボックス壁及び外部ボックス壁をそれぞれ曲げ及びせん断剛性を評価した梁要素とする5軸モデルとし、NS方向及びEW方向についてそれぞれ設定する。

各軸の水平変位は、各階の床位置において同一とする。なお、NS方向モデルについては、プール壁がシェル壁の曲げ変形を拘束する影響を評価する。

せん断力分配解析モデルを図7-1に、解析モデル諸元を表7-1に示す。

(2) 解析モデル

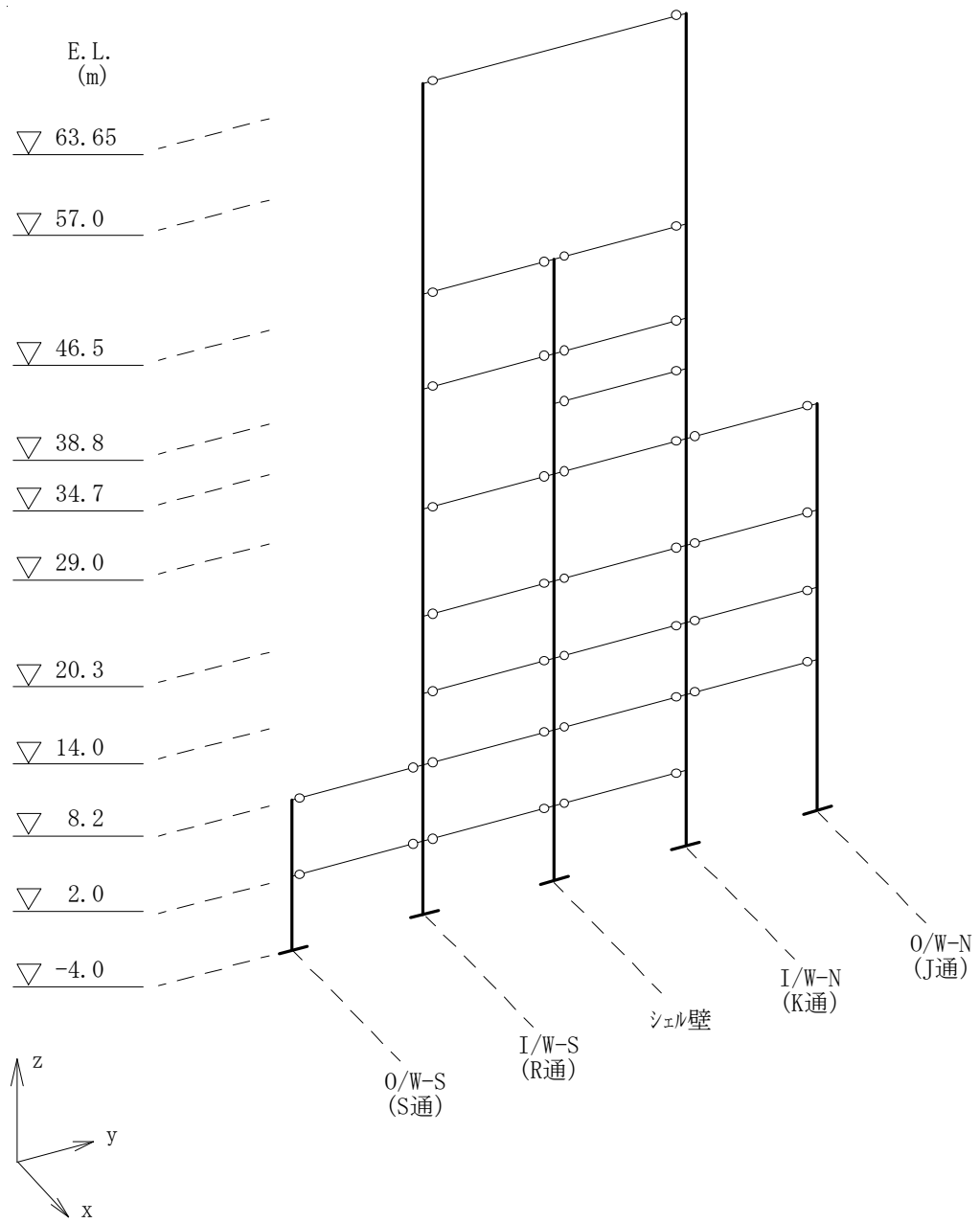
せん断力分配解析モデルの各軸の下端を固定とする。



Rは剛棒を示す
 ----は多点拘束を示す

(a) NS 方向モデル

図 7-1 (1/2) せん断力分配解析モデル



(b) EW 方向モデル

図 7-1 (2/2) せん断力分配解析モデル

表 7-1 (1/2) 解析モデル諸元

(a) NS 方向

| EL. (m) | せん断断面積 (m ²) | | | | | 断面二次モーメント (×10 ³ m ⁴) | | | | |
|------------|-----------------------------|-------|------|-------|-------|---|-------|------|-------|-------|
| | O/W-W | I/W-W | S/W | I/W-E | O/W-E | O/W-W | I/W-W | S/W | I/W-E | O/W-E |
| 63.65 | | | | | | | | | | |
| 57.0 | | 13.65 | | 13.65 | | | 10.2 | | 10.2 | |
| 46.5 | | 13.65 | | 13.65 | | | 10.2 | | 10.2 | |
| 38.8 | | 21.0 | 170 | 21.0 | | | 13.3 | 37.8 | 13.3 | |
| 34.7 | | 28.5 | 76.0 | 28.5 | | | 20.6 | 3.8 | 20.6 | |
| 29.0 | | 28.5 | 86.0 | 28.5 | | | 20.6 | 4.2 | 20.6 | |
| 20.3 | 36.0 | 41.0 | 100 | 41.0 | | 8.2 | 26.4 | 16.6 | 26.4 | |
| 14.0 | 36.0 | 45.5 | 115 | 45.5 | | 8.2 | 27.9 | 22.3 | 27.9 | |
| 8.2 | 40.0 | 68.5 | 115 | 68.5 | 102 | 9.1 | 40.4 | 30.4 | 40.4 | 58.2 |
| 2.0 | 102 | 68.5 | 123 | 68.5 | 102 | 58.2 | 40.4 | 21.2 | 40.4 | 58.2 |
| -4.0 | 102 | 68.5 | 123 | 68.5 | 102 | 58.2 | 40.4 | 21.6 | 40.4 | 58.2 |

(b) NS 方向 プール壁モデル諸元

| | せん断断面積 (m ²) | 断面二次モーメント (m ⁴) |
|--------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 使用済燃料プール | 57.8 | 1380 |
| 蒸気乾燥器・ 気水分離器ピット | 25.5 | 346 |

表 7-1 (2/2) 解析モデル諸元

(c) EW 方向

| EL. (m) | せん断断面積 (m ²) | | | | | 断面二次モーメント (×10 ³ m ⁴) | | | | |
|------------|-----------------------------|-------|------|-------|-------|---|-------|------|-------|-------|
| | O/W-S | I/W-S | S/W | I/W-N | O/W-N | O/W-S | I/W-S | S/W | I/W-N | O/W-N |
| 63.65 | | | | | | | | | | |
| 57.0 | | 12.75 | | 12.75 | | | 9.2 | | 9.2 | |
| 46.5 | | 12.75 | | 12.75 | | | 9.2 | | 9.2 | |
| 38.8 | | 19.5 | 115 | 19.5 | | | 12.0 | 10.7 | 12.0 | |
| 34.7 | | 32.5 | 76.0 | 32.5 | | | 17.3 | 2.7 | 17.3 | |
| 29.0 | | 32.5 | 91.0 | 32.5 | | | 17.3 | 4.1 | 17.3 | |
| 20.3 | | 44.0 | 96.0 | 44.0 | 53.0 | | 23.1 | 12.1 | 23.1 | 14.6 |
| 14.0 | | 42.5 | 104 | 42.5 | 35.0 | | 25.1 | 17.3 | 25.1 | 10.1 |
| 8.2 | | 64.0 | 115 | 64.0 | 102 | | 36.4 | 23.8 | 36.4 | 50.8 |
| 2.0 | 102 | 64.0 | 122 | 64.0 | 102 | 57.4 | 36.4 | 20.9 | 36.4 | 57.4 |
| -4.0 | 102 | 64.0 | 122 | 64.0 | 102 | 57.4 | 36.4 | 21.3 | 36.4 | 57.4 |

7.2.2 地震荷重の算定方法

せん断力分配解析より求まる層せん断力及び曲げモーメントに対し、ねじれ補正係数を乗じて建屋の各部の偏心を評価する。ねじれ補正係数は、次式により算定し、1.0以上とする。

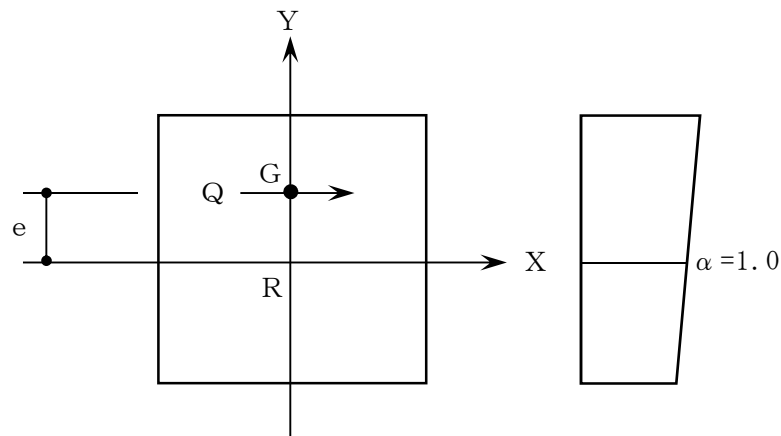
NS方向の地震力のうち、プール壁モデルに生じる応力は、プール壁に作用するせん断力として評価する。

EW方向の地震力のうち、プール壁に生じるねじれは、S/W軸に対するI/W軸の相対回転角により評価する。

$$\alpha = 1 + \frac{\sum D_x \cdot e}{J_x + J_y} \cdot Y$$

ここで、

- α ねじれ補正係数
- D_x X方向の各耐震壁の剛性
- D_y Y方向の各耐震壁の剛性
- J_x $\sum(D_x \cdot y^2)$
- J_y $\sum(D_y \cdot x^2)$
- e 偏心距離
- G 重心（層せん断力作用中心）
- R 剛心
- Q 層せん断力



7.3 算定結果

「6.2 評価方法」に基づいて算定した使用済燃料プール部の地震荷重として、 S_d 地震時及び S_s 地震時について、せん断力、曲げモーメント、NS 方向地震力によるプール側壁に作用するせん断力及び EW 方向地震力によるプール壁端部の相対変形角を表 7-2～表 7-5 に示す。

表 7-2 地震荷重 (せん断力)

(a) NS 方向

| EL. (m) | せん断力 (kN) | |
|------------|--------------------|--------------------|
| | S _d 地震時 | S _s 地震時 |
| 46.5 | 37900 | 65100 |
| 38.8 | -2110 | -2190 |

(b) EW 方向

| EL. (m) | せん断力 (kN) | |
|------------|--------------------|--------------------|
| | S _d 地震時 | S _s 地震時 |
| 46.5 | 21000 | 32200 |
| 38.8 | 2350 | 4860 |

表 7-3 地震荷重 (曲げモーメント)

(a) NS 方向

| EL. (m) | 曲げモーメント (kN・m) | |
|------------|--------------------|--------------------|
| | S _d 地震時 | S _s 地震時 |
| 46.5 | 84300 | 151000 |
| 38.8 | 9560 | 17600 |

(b) EW 方向

| EL. (m) | 曲げモーメント (kN・m) | |
|------------|--------------------|--------------------|
| | S _d 地震時 | S _s 地震時 |
| 46.5 | 29700 | 67000 |
| 38.8 | 4370 | 11300 |

表 7-4 プール壁に作用するせん断力

| 部位 | せん断力 (kN) | |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| | S _d 地震時 | S _s 地震時 |
| 使用済燃料プール | 14100 | 24500 |
| 蒸気乾燥器・ 気水分離器ピット | 5770 | 10100 |

表 7-5 プール壁端部の相対変形角

| 変形角 ($\times 10^{-5}$ rad.) | |
|------------------------------|--------------------|
| S _d 地震時 | S _s 地震時 |
| 1.15 | 1.95 |