

安全冷却水 B 冷却塔 飛来物防護ネット架構の波及的影響評価の考え方

1. 波及的影響評価の基本方針

- ・飛来物防護ネット架構は、安全冷却水 B 冷却塔に対する竜巻による飛来物衝突防止のため設置するもので、竜巻及び地震による荷重により当該冷却塔へ波及的影響を及ぼさないように設計する。
- ・飛来物防護ネット架構は、鉄骨造のフレーム(柱・梁)に防護ネットが取り付けられている構造で、主たる構造部材は、杭、基礎梁、上部架構のフレーム及び座屈拘束ブレースであり、これらの部材を設計対象とする。
- ・地震に対する設計においては、地震荷重、風荷重、自重及び積雪荷重によって各部材に生じる応力が許容限界内に収まるように設計する。
- ・また、フレームの最大変形量と冷却塔本体の最大変形量との合計値が、両者の最小離隔距離を下回るように設計する。このとき、フレームの変形量は、各部材に生じる応力が弾性範囲内であることを想定して部材の非線形性を考慮しない解析により求めるが、各部材に生じる応力が弾性範囲を超えた場合には、非線形性を考慮した変形量評価を行う。
- ・地震時の部材設計は、各部材の応力及びひずみに影響する上部架構の応答及び地盤の変形に着目し、各部材の設計に必要な荷重を算定するための地震応答解析モデルを構築して行う。
- ・各部材に生じる応力及びひずみは、地震応答解析から得られる応答値を用いて、3D フレーム解析、基礎梁 FEM 解析等を行って求める。

2. 地震応答解析モデル構築の考え方

- ・地震応答解析モデルは、解析負荷を軽減するために合理的なモデル（以下、「設計モデル」という。）を構築して設計に用いることとするが、これが科学的合理性を有し、波及的影響が過小評価とならないよう、モデル構築に際して合理化して設定する項目(メッシュ、形状等)が妥当性を有していること、及び、波及的影響が過小評価とならない保守性を有していることを検証する。
- ・設計における応答・反力から算出される地震荷重の部材への伝達の流れを踏まえ、改良地盤への周辺地盤からの拘束効果が低下すると上部架構の応答や地盤の変形が大きくなり、杭、基礎梁及びフレームに伝達される地震荷重が大きくなることから、拘束効果の低下による保守性に着目する。
- ・拘束効果の低下について、具体的には次の 2 つの項目に対して保守性を与え、保守性が確保されていることを検証する。
 - 埋設構造物による拘束効果：周辺構造物による拘束効果が水平方向の地震荷重

を小さくすると考えられることから、設計モデルでは埋設構造物をモデルに組み込まないことで、応答値に保守性を与える。

- ▶ 埋戻土（地盤）の剛性変化：当該施設における特徴として、埋戻土が液状化する状態（改良地盤の側面拘束が減少）が最も拘束効果が小さく、上部架構の応答が大きくなると予想されることから、埋戻土（地盤）の剛性変化による応答値の変化に着目して保守性を与える。
- ・上記は、水平方向の拘束効果に関して保守性を確保する項目であり、鉛直方向の応答については必ずしも保守的とならないため、鉛直応答に対する影響を別途確認する。
- ・設計モデルの妥当性及び保守性を検証した上で、至近の発電炉で用いられているモデルと同様のプロセスで構築したモデル(以下、「検証用モデル」という。)との比較により、設計モデルの妥当性及び保守性を総合的に検証する。

3. 設計モデルの妥当性

3. 1 妥当性検証の方針

- ・モデル構築プロセスの中で合理化可能な項目を抽出し、項目ごとの設定の妥当性を検証する。
- ・妥当性の検証は、メッシュサイズについては上部架構の振動数に照らして適切であること、改良地盤幅、上部架構、接触剥離要素、粗粒砂岩及び基礎梁高さの各項目については、それぞれの項目が影響を及ぼすと考えられる応答値が、合理化しない場合と同等か、又は保守的な評価となっていることの確認により行う。
- ・妥当性の検証に用いる検討断面は、EW 断面に比べて改良地盤幅が小さく、ロッキングの影響がより顕著と考えられる NS 断面とする。また、埋戻土の状態は、部材設計において支配的である水平方向の地震荷重が大きくなると考えられる液状化時を対象に、地盤物性は標準地盤として行う。
- ・検証に用いる地震動は、次の理由から Ss-A 及び Ss-C1 の 2 つの地震波とする。
 - ▶ Ss-A：全周期帯にわたって大きな加速度を有し、継続時間が長いことから液状化をより促進すると考えられる。
 - ▶ Ss-C1：大きな加速度がパルス的に生じることから、施設へ与える影響が大きいと考えられる。

3. 2 妥当性検証の結果

- ・メッシュサイズについて上部架構の振動数に照らして適切であり、改良地盤幅、上部架構、接触剥離要素、粗粒砂岩及び基礎梁高さの各項目について、それぞれの項目が影響を及ぼすと考えられる応答値は、合理化しない場合と同等か、又は保守的な評価となることを確認した。
- ・以上のことから、設計モデルにおいて合理化した項目の妥当性を確認した。

4. 設計モデルの保守性

4. 1 保守性検証の方針

- ・拘束効果、鉛直応答への影響及び地盤の剛性変化について、以下に各項目の設定の考え方を示す。

(1) 拘束効果

イ) 周辺構造物：周辺構造物をモデル化対象としないことで、地震挙動を拘束する効果が低下し、水平方向の応答値は大きくなると考え、洞道等の周辺構造物に代えて埋戻土の地盤物性を用いる。

ロ) 杭：杭をモデル化対象としないことで、杭の剛性/根入れを無視することとなり、改良地盤の剛性は低く評価され、地震挙動を拘束する効果が低下し、水平方向の応答値は大きくなると考え、杭を考慮しない。

ハ) MMR：地中について MMR を含まない断面の方がモデル全体の剛性が低く評価され、地震挙動を拘束する効果が低下し、水平方向の応答値は大きくなると考え、MMR に代えて改良地盤の物性値を用いる。

(2) 鉛直応答への影響

拘束効果の低下が鉛直応答へ与える影響について配慮する。

(3) 地盤の剛性変化

埋戻土の剛性変化に伴い拘束効果が変化し、この施設では上部架構の固有周期帯において応答値は非液状化で最小、液状化で最大となると考え、地盤物性については、非液状化、液状化及び中間状態での解析条件を設定し、地震荷重の差異を確認する。

4. 2 拘束効果

4. 2. 1 拘束効果の保守性検証の目的及び条件

- ・拘束効果に係る周辺構造物、杭及び MMR に関して、水平方向の応答値が保守的となるよう設定した項目について、それぞれの項目が影響を及ぼすと考えられる応答値の保守性を検証する。
- ・拘束効果に係る保守性の検証は、妥当性検証と同じ地震動、検討断面及び地盤物性を用いて行う。

4. 2. 2 拘束効果の保守性検証の結果

- ・拘束効果のうち、周辺構造物の有無による地震荷重への影響を確認した結果、水平方向成分である層せん断力および屋根部の付加曲げは、周辺構造物を考慮しない設計モデルが保守的であることを確認した。
- ・拘束効果のうち、杭及び MMR の影響について、それぞれの項目が影響を及ぼすと考えられる応答値は、いずれも考慮する場合と同等か、または保守的な評価となることを確認した。
- ・以上のことから、設計モデルにおいて水平方向の拘束効果に関して保守性を確保することを意図した項目の保守性を確認した。

4. 3 鉛直応答への影響

4. 3. 1 鉛直応答への影響の確認

- ・前項では拘束効果の低下により、水平方向の保守性が確保されることを確認したが、鉛直方向においては必ずしも保守的とならない可能性がある。
- ・そのため、拘束効果の低下が鉛直応答へ与える影響を確認する。
- ・確認の結果、拘束効果のうち埋設構造物を考慮しない設計モデルでは、屋根部の鉛直加速度が小さく評価された。
- ・上記の原因及び部材設計への影響度合いを次項で確認する。

4. 3. 2 鉛直応答への影響の確認の条件

- ・前項のとおり、周辺構造物の有無が拘束効果に与える影響（ロッキング）は、水平方向と鉛直方向とで異なり、周辺構造物を考慮しない設計モデルでは、屋根部の鉛直加速度が小さく評価されることが確認された。
- ・鉛直応答については、設計モデルが、水平応答に対し保守性を確保するモデルとしたことを踏まえ、水平方向地震力に起因したロッキングが屋根部の鉛直方向の応答へ与える影響を再現する解析モデル（以下、「鉛直確認モデル」という。）を用いて影響の程度を確認し、鉛直成分の波及的影響評価への寄与の観点から、部材設計への設計モデルの適用の可否を検討する。
- ・鉛直応答には改良地盤の左右の鉛直挙動の相違が影響するため、鉛直確認モデルは拘束効果のうち改良地盤の左右に非対称性を有する周辺構造物を考慮し、上部架構のモデルに1軸の質点系モデルに代えて門型タイプを採用する。
- ・全13波を対象に設計モデルを用いて各応答値を求めた結果、水平方向の応答値はSs-A又はSs-C1の場合に最大となったが、屋根部の鉛直加速度はSs-C2の場合に最大となった。このため、鉛直確認モデルによる解析では、妥当性検証と同じ地震動2波にSs-C2を加えた3波を対象とする。
- ・検討断面は、周辺構造物の状況の相違を踏まえNS・EWの2断面とし、その他地盤物性等は、妥当性検証と同じとする。

4. 3. 3 鉛直応答への影響の確認結果

- ・周辺構造物を考慮した鉛直確認モデルと設計モデルとで地震荷重の鉛直方向成分（屋根部の鉛直加速度）を比較した結果、検討に用いた3波のいずれも周辺構造物を考慮しない設計モデルで屋根部の鉛直加速度が小さく評価されることを確認した。

【鉛直応答への影響の確認結果を踏まえた考察】

- ・設計モデルで屋根部の鉛直加速度が小さく評価される原因は、設計モデルにおいて周辺構造物をモデル化しないことにより、施設を中心として左右の地盤が対称

性を有することとなり、その結果、改良地盤左右の鉛直挙動が相殺され、屋根部の鉛直応答にロッキングの影響を受けにくいため、と判断した。

- ・地震荷重の各方向成分が部材設計に及ぼす影響を総合的に検討するため、全13波を対象に設計モデルを用いて NS・EW の2断面について各部材の応力評価を行い、部材ごとに各方向成分の最大値を求めた。
- ・波及的影響評価の観点から、水平方向の変形量に影響する部材としてフレーム部材のうちの柱及び大梁に着目して各方向成分の最大値を比較した結果、水平成分に対する鉛直成分の比率は十分小さく、水平成分が支配的であることを確認した。
- ・また、対象施設はフレーム架構であり、鉛直荷重による影響が大きい床等が無い。
- ・以上のことから、部材設計においては、鉛直成分の波及的影響評価への寄与は小さく、水平成分の保守性に包含されることから、安全冷却水 B 冷却塔 飛来物防護 ネット架構の波及的影響評価において設計モデルを部材設計のインプットの算出に用いることに問題ないことを確認した。

4. 4 地盤の剛性変化

4. 4. 1 地盤の剛性変化の検討目的及び条件

- ・地盤の剛性変化について、液状化と非液状化との間の中間状態において地震荷重が最大とならないことを確認する。中間状態において地震荷重が最大となる場合には、当該地震波の持つ特徴が各部材の応答値に及ぼす影響を考察する。また、地盤の剛性変化に伴う地震荷重の増減について詳細に分析し、中間状態が最大となる要因について考察し、設計への影響を検討する。
- ・中間状態として、液状化状態から埋戻土の液状化状態を抑制した場合(状態 b1)及び非液状化状態から埋戻土の剛性を下げた場合(状態 b2)の2つの中間状態を設定する。
- ・上記の検討は、妥当性検証と同じ地震動、検討断面及び地盤物性を用いて行う。

4. 4. 2 地盤の剛性変化の検討結果

- ・液状化、非液状化及び2つの中間状態(b1、b2)において、それぞれ部材ごとの地震荷重を求めた結果、地震波が Ss-A の場合には、いずれの地震荷重も液状化で概ね最大となることを確認した。
- ・一方、Ss-C1 では、一部の地震荷重について非液状化時又は状態 b1 (液状化状態を抑制した場合) で大きくなった。

【地盤の剛性変化の検討結果を踏まえた考察】

(Ss-C1 加振時の応答値に関する考察)

- ・Ss-C1 は、パルスのような瞬間的に増幅する地震動であり、Ss-A とは異なり、入力地震動の加速度スペクトルの傾向と類似した応答スペクトルとなる。このため、改良地盤近傍の埋戻土の液状化時と非液状化時とにおいて、各地震荷重に明確な

相違が出にくい地震動である。

- ・基礎梁上端の水平加速度応答スペクトルでは、液状化すると加速度は長周期化するが、短周期では非液状化時が最大となる傾向があり、最大水平加速度については、液状化時のみではなく、非液状化時の応答値も考慮する必要がある。
- ・上部架構の付加曲げ及び屋根部の最大鉛直加速度について状態 b1 が最大となった理由は、Ss-C1 の入力地震動に非対称性があるため、埋戻土の過剰間隙水圧比もわずかに左右非対称となった影響により、拘束効果と同じ現象（非対称性によるロッキング）が発生したことが要因の一つとなった可能性がある。
- ・上部架構の付加曲げ及び屋根部の最大鉛直加速度並びに改良地盤の変形が状態 b1 において最大となったが、上部架構の付加曲げ及び屋根部の最大鉛直加速度は、鉛直応答に関して検討したとおり設計において支配的な荷重ではないこと、状態 b1 と液状化時との応答値の差は小さいことから、設計への影響は軽微である。また、改良地盤の変形は、杭の設計において層せん断力及び水平加速度と組み合わせた状態で用いられ、組合せ荷重として設計応力を算定すると、液状化時において最大となる。
- ・以上のことから、Ss-C1 について、中間状態 b1 及び b2 を設計上配慮する必要は無く、液状化/非液状化の状態で評価することが出来る。

(地盤の剛性変化に伴う地震荷重の増減についての詳細な分析)

- ・Ss-C1 で中間状態において一部の地震荷重が最大となったことを踏まえ、Ss-A 及び Ss-C1 以外の地震波に対しても中間状態を含めた部材ごとの地震荷重を求め、他にも同様の現象が生じていないか確認した。
- ・その結果、全 13 波を対象とした部材ごとの地震荷重は液状化状態で最大であったが、地震波ごとに見ると、Ss-B4、Ss-B5 及び Ss-C3(EW)でも、同様に一部の地震荷重について中間状態が最大となった。
- ・中間状態が最大となった地震荷重について、Ss-B4 加振時の層せん断力を例に時々刻々の変化を分析したところ、長い周期の変動において概ね液状化状態が大きくなっているが、その長い周期の変動に時折短い周期の変動が重なり、中間状態が大きくなっていることが確認された。

(中間状態が最大となる要因についての考察)

- ・この短い周期の変動は高次モードに起因するものであり、長い周期の変動と合成される際の時刻歴上での位相特性の影響で、たまたま短い周期の凸が長い周期の凸に重なり、最大荷重の発生時刻において中間状態が最大となったものと考えられる。
- ・また、応答スペクトル上での細かい高次モードのピークが、地盤剛性の変化に伴うわずかな周期特性のシフトにより移動し、結果的に液状化時を上回る形で応答スペクトルに現れたことも要因の一つと考えられる。
- ・上記のことから、地盤剛性の中間状態において地震荷重が最大となったのは、偶然が重なったことによると推定されるが、地盤剛性の中間状態における地震荷重

の大小関係について特異な現れ方をした地震動における地震荷重の現れ方の規則性を確認するため、特に【状態 b1】近傍の中間状態に着目して【状態 b3】（【液化化】と【状態 b1】との中間）及び【状態 b4】（【状態 b1】と【状態 b2】との中間）の 2 つの中間状態を追加設定し、対象の地震動として複数の地震荷重で中間状態が最大となった地震動 Ss-B4 及び Ss-C3(EW)、並びに、水平方向の地震荷重が最大となった地震動 Ss-A および Ss-C1 の合計 4 波を用いて、部材ごとの地震荷重を検討した。

- その結果、地盤剛性の変化に伴う地震荷重の増減の現れ方について、一定の規則性は認められず、増減の振れ幅も地震荷重に対して十分に小さいことが確認された。また、地震荷重が状態 b1 において最大となる地震動について、状態 b1 の前後の中間状態において状態 b1 をさらに上回るような特異な挙動は確認されなかった。

(設計への影響の検討)

- 地盤剛性の中間状態において最大となる地震波の地震荷重については、当該地震荷重が最大となる他の地震波による荷重が十分に大きく、地盤剛性の変化に伴う地震荷重の増減の幅を踏まえても、地盤剛性の中間状態は設計上支配的ではない。
- 以上のことから、液化化と非液化化との間の中間状態については、安全冷却水 B 冷却塔 飛来物防護ネット架構の波及的影響評価において配慮する必要は無く、液化化又は非液化化の状態で評価できることを確認した。

5. 設計モデルの妥当性・保守性の総合的な検証

5. 1 設計モデルの妥当性・保守性の総合的な検証の方針

- 設計モデルの妥当性・保守性の総合的な検証のため、施設周辺の状況をより細かくモデル化した検証用モデルを構築し、設計モデルとの応答の比較を行う
- 設計モデルの妥当性・保守性の総合的な検証に当たり、検証に用いる検証用モデルの妥当性を、モデルの構築プロセスの発電炉との比較及び有効応力解析における FLIP の適用性検討により確認する。
- 総合的な検証に用いる地震動及び地盤物性は、妥当性検証と同じとする。検討断面は、周辺構造物の状況の相違を踏まえ、NS・EW 各々の断面を対象とする。

5. 2 検証用モデルの妥当性

- 柏崎刈羽原子力発電所における中越沖地震のシミュレーション解析モデルとの比較において、地盤の傾斜（水平成層）、地盤物性 V_s (剛性) 等において特異な差異がなく、解析対象の施設についても対称性及び整形性が見られることから、先行する発電炉と同様のプロセスにより検証用モデルの構築を行っている。
- また、検証用モデルの構築に当たっては、FEM モデルの基本となるモデル化領域及びメッシュサイズについて JEAG4601-1991 に基づき設定するとともに、施設の構造や周辺状況を踏まえ、実態に即して周辺構造物である洞道や地盤改良範囲

を適切にモデル化している。

- ・当社が設定している FLIP の液状化強度曲線は、FLIP 研究会から示されている事例や先行発電炉における FLIP の検証事例において設定されている液状化強度曲線の範囲内であることから、当社の埋戻土に対して FLIP の適用が可能だと判断した。
- ・また、FLIP による要素シミュレーションを行い、埋戻土を対象とした液状化試験との対比を実施した結果、飛来物防護ネット架構の解析における埋戻土の設定は液状化試験に比べ液状化しやすい設定であることを確認した。
- ・以上のとおり、検証用モデルは発電炉と同様のプロセスにより構築されていること、及び、有効応力解析において FLIP の適用が可能と判断できることから、検証用モデルを設計モデルの検証に用いることの妥当性を確認した。

5. 3 設計モデルの妥当性・保守性の総合的な検証の結果

- ・設計モデルと検証用モデルとで応答値を比較した結果、設計モデルは水平方向の応答値を保守的に評価する一方で、頂部の付加曲げ及び屋根部の鉛直加速度は、検証用モデルよりも小さく評価することを確認した。

【設計モデルと検証用モデルとの応答値の比較結果を踏まえた考察】

- ・検証用モデルと設計モデルとで地震荷重の各方向成分を求め、鉛直応答に対する確認結果を踏まえた考察において求めた水平成分に対する他の成分の比率から、水平成分相当の合算応答値を求めて比較した結果、いずれの地震波についても検証用モデルに比べて設計モデルの方が大きくなることを確認した。
- ・このように、頂部の付加曲げ及び屋根部の鉛直加速度は、部材設計において支配的な応答値ではないため、それらを小さく評価することによる影響は小さく、水平方向の応答値の保守性に包含される。
- ・以上のことから、部材設計においては鉛直成分の波及的影響評価への寄与は小さく、検証用モデルとの比較の結果から水平成分の保守性に包含されることから、安全冷却水 B 冷却塔 飛来物防護ネット架構の波及的影響評価において設計モデルを部材設計のインプットの算出に用いることに問題ないことを確認した。

6. まとめ

- ・上部架構の応答及び地盤の変形に着目し、部材設計に必要な荷重を算定するための解析モデルとして、設計モデルを構築した。
- ・設計モデルの構築に当たっては、科学的合理性を有し、波及的影響が過小評価とならないよう、設定する項目が妥当性を有すること、及び、水平方向に着目した場合に保守性を有することを確認した。
- ・一方、設計モデルは、単に鉛直応答だけを比較した場合には、ロッキングの影響を受けにくいことにより小さめの結果を与えることを確認したが、波及的影響評

価においては、部材設計に対する鉛直応答の影響は小さく、水平応答の保守性に包含されることを確認した。

- 地盤の剛性変化に係る保守性検証の結果を踏まえて、部材設計では有効応力解析及び全応力解析を実施する。
- 以上のことから、部材設計を行うに当たり、インプットとなる地震荷重を算定するモデルに設計モデルを用いることは、妥当であることを確認した。
- なお、設計モデルは、安全冷却水 B 冷却塔に対する飛来物防護ネット架構の波及的影響評価のために構築したモデルであることから、他の施設の耐震評価に適用するに当たっては、適用の可否を個別に判断することとする。

以 上