

AMP317 構造物の沈下（2023 年版）

プログラムの概要

本プログラムは、AMP302, AMP304, AMP307, AMP310, AMP318 の範囲で、沈下の劣化メカニズムによって引き起こされるコンクリート構造物への経年劣化の影響を管理するために、沈下モニタリングプログラムを実施するよう原子炉プラントに対するガイダンスを提供する[1,2]。このプログラムの目的は、プラントの寿命期間にわたって、コンクリート構造物やそれに構造的に取り付けられたシステムや部品の意図された機能を維持し、長期運転 (LTO) 目的の許認可を取得できるようにすることである。

沈下は、ほとんどが塑性ひずみで、したがって永久的なものであり、地盤の有効応力状態の変動に起因する構造物基礎の鉛直変位に対応するものである。同じ構造物の基礎が異なる値の鉛直変位を受け、構造物の応力レベル変動に起因して、構造物の歪みやコンクリートの亀裂 (主に傾斜) が発生することを差動沈下と呼ぶ。従って、差動沈下が本 AMP で扱うものであり、以下では単に沈下と呼ぶ。

沈下は、鉛直変位が下向きの場合は正、上向きの場合は負とみなされ、隆起とも呼ばれる。沈下の発生は、構造物の建設過程に固有のものであり、その大きさは基礎の種類と地質学的プロファイルに依存する。沈下は予測可能であり、プラントの構造設計に取り入れられている[5]。しかし、沈下の発生が予測された時間を超えて継続する場合には、調査が実施され、その結果がプラントの LR に考慮される。建設過程に加え、構造物の基礎付近で行われる脱水や掘削、地下水位の自然低下、さらに稀ではあるが、地質学的プロファイルに崩壊性土壌層が存在することによって、正の沈下が発生することがある。負の沈下は、構造物の除荷、地下水位の上昇、稀に地質学的プロファイルに膨張性土壌層が存在することによって発生することがある。塑性ひずみがほとんどない状態で構造物が正負の沈下を起こす場合もある。このような沈下は、地下水位の変動や、永久荷重や偶発的な荷重による応力と比較して小さな応力に対応する構造物の除荷とその後の再載荷、および両者の関連によって発生することがある。この挙動の例は、ブラジルの Angra-1 原子炉プラント[3]のケースであり、第 8 節に記載している。

膨張性及び崩壊性土壌は、ある種の粘土に関するものであり、その粘土は鉱物組成に起因して物理・化学的性質に複雑な挙動を示す。その土壌は不飽和粘土で構成され、水の存在下、すなわち含水比の増加に伴って、その挙動が急激に変化する。膨張性土壌は体積膨張を起こし、崩壊性土壌は体積圧縮を起こすため土壌の移動を発生させ、その影響として構造物を垂直方向に移動させる可能性があり、これは沈下を意味する[4]。この種の土壌は沈下を引き起こすが、移動は構造物の存在に関係なく発生する。崩壊性土壌と膨張性土壌、特に後者は AMP310 でも取り上げられているが、これは非常に珍しい現象で、そして構造物の安定性上、非常に危険である。

原子炉プラントの構造物の基礎は、通常基礎マットか杭である。安全上重要な構造物、特に原子炉建屋や保障措置建屋、これらを支える支持材としては、健全な岩盤が望ましい。しかし、敷地の地質学的特性により、同一の原子炉プラントでも、構造物の基礎は、それが基礎マットであろうと杭であろうと、土や岩盤のように異なる材料となる場合もある。同一の原子炉プラントの基礎として、基礎マットと杭、双方を用いることが必要な場合もある。

支持材が土壌である基礎マットでは、元々の土壌は通常掘削され、高密度の純砂埋め戻し材で置き換えられる。杭が基礎である場合、元々の土は維持され、地質学的構造、特に岩盤の深さに応じて、杭の先端が土の上に置かれるか、岩盤の中に設置される。

基礎の種類や支持材の種類に関係なく、健全な岩盤の場合でも沈下は必ず発生する。健全な岩盤には小さな亀裂がある場合があり、大きな荷重が加わると亀裂が収縮し、沈下が発生する[6,7]。

砂層上の基礎の沈下は、大方の場合、基礎マットであれ杭であれ、永久荷重と偶発荷重をすべて加えた直後(数日から1ヶ月程度)に収束すると考えられている。しかし、先端が砂層で支持されている杭の場合、沈下の大きさは、先端下の土壌の鉛直変位と杭の弾性変位からなり、前者と比較して後者は無視できるほど小さい。この場合、沈下の大きさは、同じ層上に基礎マットを敷設した場合よりもはるかに小さいオーダーでありながらも、予測される終局までの時間はほぼ同じである[8]。前のケースと同様、先端が岩盤内にある杭の沈下量は、先端下の岩盤の鉛直変位と杭の弾性変位からなり、このケースでは前者と比較しても後者は無視できない可能性がある。この場合、沈下量は、健全な岩盤の上に設置された基礎マットと同程度であり、砂層で支持された杭の沈下量よりも小さいと予想され、予測される終局までの時間はほぼ同じである[8]。

その挙動に関して、原子炉プラント構造物の支持土壌は、特に安全上重要な構造物では、常に(凝集性がない)砂質である。粘土質の土壌は挙動が複雑すぎるため、避けられる。地質学的プロフィールに粘土層、特に軟らかい粘土層がある場合、基礎マットやその他の浅い基礎としての使用は推奨されず、粘土層を超える深さの杭基礎の使用が推奨される。粘土層の厚さによっては、杭の負の周面摩擦が考慮される[8]。

基礎を支える層は、その強度、静的および動的ひずみパラメータを決定するため、また、健全な岩盤の場合にはその健全性を確認するために、試験に供される。人工埋め戻しがある場合、その埋め戻しは、海洋性でない高密度な純砂で構成され、その密度はプラント特有の設計基準に準拠している。密度は、粒度曲線が十分に分布し、空隙率が低いことで要求を満足することができる。岩盤は、その強度、静的ひずみ、動的ひずみパラメータを得ることを目的とした室内試験と原位置試験からなる地質学的調査の対象となる。同じことが、建設直後の埋め戻しでも行われる。

原子炉プラントのコンクリート構造物の沈下モニタリングプログラムを実施する必要性については、土壌や健全な岩盤の挙動を変化させるような事象が発生したことがない場合、埋め戻しの物理的パラメータ、強度パラメータ、静的・動的ひずみパラメータを決定するための新たな地質学的試験を実施する必要はない。構造物の建設工事の開始前に実施された地質学的調査から得られたパラメータを適用することができる[9]。しかし、プラントの安全停止地震(SSE)を超える大きさの地震のような事象が発生し、そのエネルギーによって土壌や健全な岩盤の挙動が変化した可能性がある場合、あるいはプラントの構造物が激しい鉛直変位を受けている場合は、新たな地質学的試験と新たな沈下量の計算が実施される。

評価と技術的根拠

1. 経年劣化の理解に基づく経年劣化管理プログラムの範囲：

本AMPの対象範囲は、土木構造物グループ1～9[10]、格納容器およびその部品支持部である。ただし、これら以外の構造物も沈下することを念頭に置く必要がある。

沈下によって影響を受ける可能性のあるコンクリート構造物部位は以下の通りである。

- (1) 基礎
- (2) grade wall 上下の外壁コンクリート
- (3) 内部のコンクリート壁
- (4) 梁
- (5) 柱
- (6) 床版

2. 経年劣化を最小限に抑え、管理するための予防措置：

構造物は、その建設過程、構造物の近くで行われる掘削や脱水、膨張性土壌の体積膨張、崩壊性土壌の体積圧縮、地震のような高エネルギーの動的事象の発生によって生じ得る、構造物が基礎とする土壌の有効応力状態の変動により、基礎沈下を起こす。プラント特有の要因と位置づけられる構造物の建設過程、その近傍での掘削、及び／又は、排水を除けば沈下を引き起こす原因は自然なものであり、従って回避することはできないが予測および計算することは可能である。自然が原因で発生し、その結果が予測沈下量を超える場合、不適切な仮定による計算誤差、不十分な地質学的試験による誤ったパラメータの使用、または試験結果の誤った解釈に関連する可能性がある。

従って、原子炉プラントの建設に適した場所の選択、建設開始前の適切な地質学的調査、地質学的調査から得られたパラメータの適切な使用、地質学的試験結果の正しい解釈、構造物の近くで掘削や脱水工事を実施しないよう注意することは、予防措置と考えることができる。

3. 経年劣化の検出：

沈下は、コンクリート構造物の亀裂をもたらす経年劣化メカニズムである。沈下によって生じる亀裂の主な特徴は、そのほとんどが傾斜していることである。通常、コンクリート構造物に亀裂が発生した場合、沈下調査が実施され、同調査では亀裂モニタリングプログラムから開始される。このプログラムは、標準化された手順を用いて一定の頻度で繰り返される目視検査から成り、アクセス性、物理的状态、環境暴露、予想される劣化に対する耐性などの要素を考慮して策定される。亀裂モニタリングプログラムで沈下が発生していることが確認された場合、沈下モニタリングプログラムが実施され、本 AMP 適用範囲内のコンクリート構造物を対象にその挙動が評価される。

本 AMP プログラム説明の節で述べたように、構造物に過大で予測外のひずみが発生した場合、またはプラントの SSE を超える大きさの地震が発生した場合、現状の物理的、強度、静的および動的ひずみパラメータ[4,11]を決定するために、岩盤と同様に埋込みに対して新たな地質学的試験を実施する必要がある。これらの試験の概要と沈下量の計算方法を以下に示す。

砂地で実施された試験

砂はそのコンパクトさで特徴づけられる。一般に、砂には、緩い砂、中程度の砂、密な砂、非常に密な砂がある。砂の粒は大きいので、透水係数が高く、排水抵抗は高く

ない。そのため、砂の沈下は急速に起こり、数日から 1 ヶ月に及ぶが、これは粘土の挙動と比較すると瞬間的なものと考えられる[4]。

土壌は、砂地を含めて、レオロジー的挙動、すなわち、応力 $\times$ ひずみ $\times$ 時間に依存する挙動を示し、これはクリープが発生することを意味する。しかし、砂のクリープはほとんどの場合無視できる。

埋込み砂については、設計基準で決められているプラントの SSE を超える地震が発生した場合、その密度が臨界空隙率に相当する状態が最良の状態である。臨界空隙率とは、土壌が体積変化せずにひずみを受けることができる空隙率のことである。埋込み砂の空隙率が臨界空隙率より低いと埋込み砂が膨張し、臨界空隙率より高いと液状化する可能性があり、明らかに地下水位よりも低くなる。いずれの場合も、埋込み土の上に構築された構造物に影響を及ぼす可能性があり、このような場合には、密度、単位重量、空隙比、粒度曲線などの物理パラメータ試験がさらに実施される。これらの試験は、埋込み地盤の碎波空隙比が不明で、プラントの SSE を超えるか超えない大きさの地震が発生した場合、あるいは地震が発生しなかった場合にも実施される[12,10]。

土壌や岩盤の挙動を変化させる可能性のあるその他の事象が発生した場合、またプラントの構造物が激しい鉛直変位を受けた場合、強度、静的ひずみ、動的ひずみのパラメータを決定するための実験室試験や原位置試験が新たに実施される[4,11]。

砂に対する実験室試験の実施とは、サンプリングによって乱された試料の使用を意味する。原位置試験が砂に適しているとはいえ、実験室での三軸試験は、専門の地質学技術者によって提案された範囲の値で成形された複数の異なる相対密度を持つ試料に対して、それぞれ強度パラメータを決定することを目的に実施することもできる。三軸試験は、直接せん断試験よりも優れている。というのも、せん断試験では、土壌試料に作用する応力状態に対して、実際の破壊面ではない破壊面を課すからである[3]。

砂に対して実施される最良の原位置試験は、コーン貫通試験 (CPT) であり、既存の相関関係を通じて、強度と静的ひずみパラメータを得ることができる[9]。

共振コラム試験は、砂の動的ひずみパラメータを得るために実施できる動的な実験室試験である。しかし、サンプル成形の問題は三軸試験と同じであるため、同じ手順が適用され、地質学的な専門技術者が考えた可能性のある値の範囲でサンプルが作成される[11]。

動的原位置試験は、クロスホール法や MASW (表面波のマルチチャンネル解析) などの物理学的試験で構成される。クロスホール法では、圧縮波とせん断波の深さ方向の速度変化プロファイルが得られる。MASW 法は、表面波の記録を利用し、データを処理した結果、せん断波の深さ方向の速度プロファイルが得られる[11]。

砂に関しては、静的な実験室試験を選択した場合、原位置試験よりも動的な実験室試験が実施される。原位置試験も同様である。

粘土の試験：

粘土はその粘性によって特徴づけられる。一般に、粘土には軟質、中質、硬質が存在する。粘土の粒子は小さすぎるため、透水係数が低く、排水抵抗が高い。粘土、特に軟らかい粘土は、数十年という長期間にわたって大きな沈下を起こす[4]。砂とは異なり、粘土のレオロジー的挙動が支配的で、応力 $\times$ ひずみ $\times$ 時間に大きく依存し、クリ

ープも考慮される。従って、その挙動から、粘土は原子炉プラントの構造物、特に安全上重要な構造物を支えるための土壌としては許容されないと予想される。

わかりやすくするために、原子炉プラントの構造物を支える粘土質の埋め戻し材、または原子炉プラントの構造物が大変形するのに十分な厚さの粘土層からなる既存の地質学的プロファイルに関する架空のケースを仮定する。まず第一に、軟弱土壌に精通した地質学技術者が必要である。確かに、粘土の排水強度パラメータを取得するために、実験室での排水三軸試験が要求されるであろうし、また、沈下の総量とその期間を評価できるようにするために、圧縮性パラメータの決定に用いる複数回の圧密試験も要求されるであろう[4]。粘土質土壌のサンプリングは、乱れのないサンプルを得るために、資格を有し経験豊富な担当者が実施しなければならない。CPTu (間隙水圧を測定するコーン貫通試験) の原位置試験も、既存の相関関係を通じて、粘土の排水強度パラメータを得るため、必要となる場合がある[9]。

LTO の認可取得を目指す原子炉プラントのように、ほぼ 40 年も構造物の負荷を受けた粘土層の場合、非排水強度パラメータを取得するための非排水実験室試験は無意味である。

地震が発生した場合の粘土の挙動については、間隙水圧の上昇によって粘土の有効応力状態が低下し、その結果、強度の低下、そしてせん断応力による過大なひずみが生じる。

岩石の試験：

岩盤の強度パラメータを取得するために、岩盤からコアサンプルを採取し、実験室で圧縮試験を行う。動的ひずみパラメータを得るための地球物理学的試験や、岩石の内部破壊の程度の評価に用いる 360°ビデオを実施するため、岩石にボーリング孔が掘削される[6]。岩石に対する試験が必要な場合は、岩石力学の専門知識を持つ地質学的な工学者によって実施され、解釈される。

砂地盤の沈下：

砂地盤上に構築された構造物の沈下量の計算は、弾性理論[13]を用いて行われるが、これには第 3 節で扱った試験から得られた静的ひずみパラメータが必要である。保守的な計算を行うため、純粋な砂は常に凝集性がないとみなされる。

砂地盤の沈下は急速に起こり、数日から長くて 1 ヶ月程度であるため、沈下はほとんど瞬間的と考えられる。この事実に基づけば、地質学的プロフィールが健全な岩盤の上に砂の層だけを示している場合、この層の上に建設された構造物が、LTO の目的で NPP の認可が要求される耐用年数 40 年前後に、まだ沈下している可能性は極めて低い。しかし、構造物が垂直方向に移動しているという証拠があれば、沈下モニタリングプログラムが実施される。

粘土層の沈下：

飽和粘土の挙動は、応力 $\times$ ひずみ $\times$ 時間に大きく依存する。応力状態に曝された際に粘土のひずみを遅らせるメカニズムは 2 つある。すなわち、粘土孔を満たす水の排水抵抗 (体積ひずみ) と吸着水の粘性 (ゆがみと体積ひずみ) である。後者のメカニズムは、最近、粘土のレオロジー[14]でいくつかの研究の対象となっている。

Terzaghi の理論は、圧密研究の参考にはなるが、非保存的な沈下予測値を導く可能性がある[4]。このため、粘土の沈下計算は、間隙水圧が無視できる値になりそれに続く遅

延メカニズムが粘性のみとなった後も、圧縮過程の連続性を考慮した最新の圧密理論を用いて行われる[14]。

静的ひずみパラメータは、第3節で取り上げた試験から得られる。

動的作用による沈下：

この場合、沈下量の計算は、3次元有限要素法による土壌 - 構造物相互作用ソフトウェアによって実行され、その結果は、動的荷重によって土壌 - 構造物システムに発生した応力を提供する。

4. 経年劣化のモニタリングと傾向分析：

亀裂はコンクリートの経年劣化の一つであり、その劣化メカニズムの一つは沈下である。コンクリート構造物の亀裂は、目視検査によって検出でき、亀裂が活動的かどうかを確認し、その根本原因を特定するためにモニタリングされる。活動的な亀裂については、その進展を分析し、根本原因を特定し、必要に応じて是正措置を講じることが目的として、亀裂モニタリングプログラムが実施される。沈下が亀裂の根本原因の一つであることが証明された場合、沈下モニタリングプログラムが実施される[3]。

沈下モニタリングプログラムの目的は、構造物が受ける垂直変位の値を決定し、プランツの設計基準で設定された値と比較した歪みを評価することである。沈下モニタリングプログラムでは、最も精度の高い結果を導くことができるすべての関連情報を考慮し、日射による温度変化、校正されていない測定機器、人為的エラーなどの外因的要因の影響を避けるために慎重に実施される。

構造物の挙動傾向は、沈下モニタリングプログラムの測定キャンペーンにより決定される。構造物の沈下が深刻であると想定された場合、測定間の時間間隔を短縮することが望ましい(第4.6節)。

本節の残りの部分では、ブラジルの Angra-1 原子炉プラント(第8節)[3]のケースに基づいて、それほど深刻ではない沈下に関するモニタリングプログラムを示す。

地形調査：

沈下モニタリングプログラムは、現場の規制要件に準拠した地形調査によって実施される。地形調査は、最低5年の認定経験を持つ専門のサービスプロバイダー会社によって実施される。

使用される地形調査機器とその付属品は、サービスの要件によって異なり、対応する現場の規制要件によって定められている。

各測定の開始前に、サービスプロバイダー会社は機器の校正証明書を提示し、そのコピーは測定報告書に含まれる。校正の頻度は、対応する現場の規制要件で決定される。良い地形測量を行うために、すべての測定で同一の測定機器を使用する。しかし、機器の交換が必要な場合は、次のような要件を満たす必要がある。

- 交換する機器は、元々の機器と同じクラスでなければならない。
- サービスプロバイダー会社は、原子炉プラントに機器の交換について通知する。
- サービスプロバイダー会社は、測定の開始前に機器の校正証明書を提示する。
- 機器の校正証明書のコピーを測定報告書に添付する。

ステンレス製の沈下ピン：

沈下ピンは、地形調査中の鉛直変位の測定に使用されるステンレス製の工具で、その形状は、測定の不確かさを最小限に抑えることを目的として選定されている。これらのピンは、沈下測定が必要な構造物のコンクリートに埋め込まれ、日射による温度変化の影響を避けるため、構造物の内部に設置されることが望ましい。

沈下ピンの設置箇所は、プラントの地質学的工学者が決定する。構造物の平面図と断面図からなる図面が発行される。

ベンチマーク：

日射による温度変化の影響や物理的な損傷を避けることができるため、深さのあるベンチマークの使用は適切な地形調査に不可欠である。深さのあるベンチマークの先端は健全な岩盤の 1.00 m 以上、上端は地表から 0.20 m 以上とする。また、物理的損傷から保護するためのコンクリートボックスの上部は、地面から少なくとも 0.15 m の高さとする。

地下水位のモニタリング：

地下水位は土壌の沈下挙動に影響を与えるため、地下水位モニタリングは沈下モニタリングプログラムに不可欠である。海に近い原子炉プラントでは、ブラジル Angra-1 プラント (第 8 節)[3]のように、潮汐の影響は一般的に無視できるものの、確認が求められる。

地下水位計は、騒音計を使って地下水位を測定できるよう、プラントの敷地全体に設置されている。ピエゾメーターは、土壌層の過剰な空隙水圧を測定するために使用されるが、水圧が静水圧である場合には、ピエゾメトリック地下水位を測定するために使用されることもある。地下水位のモニタリングは、沈下の最初の測定の少なくとも 3 ヶ月前に開始することが重要である。

地下水位の測定は、週 3 回、同じ時間帯、できれば早朝に行うことが適切と考えられる。この作業は、プラントの従業員が行うことができ、その従業員は、測定に用いた局所基準水位を記録し保存する。この局所基準水位は、次の測定時に、地形調査によってベンチマークとの関係で補正される。その結果、その後の 2 回の測定の間に得られた地下水位値はすべて、ベンチマークに関連するように補正される。

最初の測定が始まってから最後の測定まで、地下水位の測定は、測定の日を除き、週に 2 回、プラントの従業員が前回と同じ時間に行うことができる。この場合、地下水位測定は、地形調査サービスプロバイダー会社の責任において、ベンチマーク測定後直ちに実施される。

「地下水位モニタリング表」(GMT) スプレッドシートを付録 1 に添付した。このスプレッドシートは、天候、温度、プラントの運転状況、沈下がモニタリングされる構造物内の重量物の移動など、関連するすべての情報を収集することを意図している。

測定キャンペーン

測定は、外的要因の変動が結果に及ぼす影響を低減することを目的として、一定の時間、できれば早朝に、同等の条件下で実施される。

測定中、ベンチマークの領域および沈下ピン近傍の温度を測定し、その値を付録 2 に示す「沈下モニタリング表」(SMT) スプレッドシートに記録する。

効果的な沈下モニタリングプログラムを実施するには、NPP ユニットの参加と協力が不可欠である。沈下モニタリングプログラムが実施されている間、NPP ユニットは、燃料交換のための停止など、運転状態を変化させる事象の発生を知らせる具体的な報告書を提出する。

ブラジル Angra-1 NPP (第 8 節)[3]の場合、凝縮水冷却の入口および排出流路は、総容量が 23250 kN の負荷に相当し、ETG 建屋の基礎マットを通過する。燃料交換のために停止している間、これらの流路は部分的または全体的に空になり、また再稼働時に満杯の状態に戻る。容積の減少により構造物は除荷され、流路が満たされる過程で容積が増加し再載荷される。従って、プラントの運転状態に依存し構造物の垂直変位に影響を与える可能性のあるこのような流路の容積変化も報告される。

さらに、このユニットでは、沈下がモニタリングされ高い偏心荷重につながる可能性のある構造物内の重量物の動きも報告する。重量物とは、例えば天井クレーンによる運搬やメンテナンスのためのターボ発電機の解体によるものなどである。いずれの場合も、プラントは荷重値だけでなく、元の場所と新しい仮置き場の寸法を含む平面図と断面図からなる図面を提供することが求められる。

プラントが提供するこれらのデータはすべて、開始日時と終了日時を周知するものであり、サービスプロバイダー会社にとっては、測定日まで利用可能なものである。サービスプロバイダー会社は、この情報を SMT スプレッドシートに記載しなければならない。

測定の頻度

それほど深刻でない沈下では、測定の頻度は、以下の通りである。

- 最初の 6 ヶ月間は、月 2 回、15 日ごとに 1 回
- 次の 6 ヶ月間は、月 6 回、30 日に 1 回
- 次の 12 ヶ月間は 3 ヶ月に 1 回、次の 12 ヶ月間は 6 ヶ月に 1 回、次の 12 ヶ月間は 1 回。

4 年間で合計 25 回の測定を実施する。ただし、結果次第では、この頻度を変更することもあり得る。

報告書の発行：

測定の報告書は、プラントとの合意に基づいて設定されたスケジュールに準拠して、サービスプロバイダー会社により発行される。これらの報告書に記載されたデータは、プラントの地質学技術者によって分析・解釈され、沈下挙動傾向に関する報告書も発行される。

5. 経年劣化の緩和：

この AMP は状態監視プログラムであり、具体的な緩和措置はない。

6. 許容基準：

沈下の許容基準は、最大沈下量と最小沈下量の差と発生点間距離の比に相当する最大構造ひずみである。原子炉プラントの建設区域は非常に広いため、最大ひずみがすべ

ての構造物で同じでない可能性があり、その場合、許容基準が異なることになるが、構造物毎に基準値が設定される。構造物の最大ひずみは、プラント特有の設計基準で決定される。

7. 是正措置：

是正措置が必要な場合は、非常に深刻な沈下であることを意味する。是正措置は、土壌処理、構造補強、さらには建替えである。

許容基準を超える場合は沈下計算が再評価されることを意味し、その結果、構造設計が新たな最大ひずみに対して再評価され、配管やダクトのフレキシブル支持部の設置または交換、配管やダクトの断面間の継手の設置または交換、貫通継手の設置または交換などの是正措置が必要となる。是正措置は、プラントの構造工学と地質学が共同で決定し[15]、それは 10 CFR Part 50 の Appendix B[16]に沿った内容である。

8. 運転経験のフィードバック及び研究開発結果のフィードバック：

この AMP は、業界全体の一般的な経験に対応する。関連するプラント特有の運転経験は、AMP がプラントにとって適切であること確認するために、プラント AMP の開発において考慮される。定期的にプラント及び業界全体の運転経験と研究開発 (R&D) の結果を評価するフィードバックプロセスを実施し、必要に応じて、プラント AMP を修正するか、あるいは、経年劣化管理の継続的な有効性を確保するための追加措置 (例えば、新しいプラント固有の AMP を開発する) をとる。

ブラジル Angra-1NPP の運転経験事例[17]：

ブラジルでは、Angra-1NPP への IAEA プレ SALTO ミッションの間に、ターボ発電機建屋 (ETG) の沈下問題が浮上した。

参考文献[17]によると、ターボ発電機建屋 (ETG)、燃料建屋 (ECB)、原子炉建屋 (ERE)、保障措置建屋 (ESE)、補助建屋北 (EAN) および補助建屋南 (EAS)、これらから構成される 6 つの隣接した Angra-1 建物群の沈下が評価された。

これら 6 つの建屋の基礎は、異なる地質学的材料の上に築かれた基礎マットである。ERE 棟と ESE 棟は健全な岩盤の上に基礎があり、ECB 棟、EAN 棟、EAS 棟、ETG 棟は、健全な岩盤の上に高密度の純砂を埋め戻した上に基礎がある。ETG 棟の下、埋め戻しと岩盤の間には、薄い残土壌があることが地盤のプロファイルからわかる。ETG 棟は EAN、ESE、EAS の各棟に接しており、伸縮継手によって隔てられている。ETG 棟は ESE 棟の基礎に過負荷をかけ、EAN 棟と EAS 棟の基礎は ETG 棟と ESE 棟の基礎に過負荷をかけている。ETG 棟の基礎は、厚さ 1.45 m 以上、最も深い基礎レベルが -10.75 m の段差のある基礎マットで、レベル+ 5.15 m から上には、レベル+ 37.5 m の棟最上部まで伸びる伸縮継手がある。その外形寸法は約 80 m × 36.5 m で、基礎マットの上部から 0.85 m の高さに、ターボ発電機テーブルと呼ばれるターボ発電機を支える新しい構造物がある。建物全体の高い振動を避けるため、伸縮継手がこのテーブルと他の構造物を分離している。凝縮水冷却の入口と排出流路は、ETG 棟の基礎マットを貫通している。これらの水路の総容量は 2270 m³ の塩水で、23250 kN の荷重に相当する。ETG 棟の沈下は、建設終了後、すなわちすべての永久荷重および偶発荷重が加わった後、モニタリングされてきた。ETG 棟の基礎は砂の埋め込みの上に築かれているため、

運転開始後に 30 年を超えると、沈下はもはや発生しないと考えられている。従って、なぜ鉛直変位が発生し続けるかを評価することは非常に重要である。

地下水位の自然上昇に伴う隆起応力、また地下水位の低下に伴う再載荷応力を計算した結果、ETG 棟が上方 (隆起) と下方 (沈下) に鉛直変位を受ける原因となっているという結論に達した。隆起圧力と再載荷応力の値の大きさは、構造荷重と比較すると極めて小さいため、隆起と沈下は土壌の弾性域内で発生し、従って永久的な塑性ひずみは発生しない。隆起圧力と再載荷応力の計算に加え、Angra-1 NPP は海に近いため、潮汐の影響も計算されたが、これは無視できると判断された。地下水位の自然変動に関連して、ETG 棟に隆起や沈下が発生する可能性があるもう一つの事実は、その構造除荷である。これは燃料交換のための停止中に発生する可能性があり、その際、基礎マッ通过本次の凝縮水冷却入口および排出チャンネルが部分的または全体的に容積減少を起こす可能性がある。プラントの再稼働時には、これらの流路は再充填され、構造物の再載荷につながる。

地下水位の自然変動、ETG 棟の除荷と再載荷、および異なる基礎支持材を考慮することを目的として、上記の 6 つの Angra-1 建屋の 3 次元有限要素モデルが構築された。

このモデルにはまだ若干の調整が必要であるが、地下水位の自然変動と ETG 構造物の除荷・再載荷が建物の沈下 (主に ETG 棟の沈下) に及ぼす影響を証明することができた。このモデルでは、ETG 棟内部の重量物の移動や、発生する偏心荷重を考慮することも可能であり、近日中に実施する予定である。

次のステップは、本 AMP で提案したように、Angra-1 の 6 棟の沈下モニタリングプログラムと地下水位モニタリングプログラムを実施することである。これらのモニタリングプログラムを通じて得られた地下水位と鉛直変位の値、および ETG 構造への除荷と再載荷、および構造物内部の重量物の移動を考慮することができる運転状況に関するプラントの報告書は、実際の現場測定値と比較するために、建物の沈下に関する解析結果を提供する 3 次元有限要素モデルに適用される。

中国の NPP 2 基の運転経験事例：

中国では、NPP の 2 基で沈下が確認された。この NPP の原子力アイランド建屋は軟岩の上に建てられている。

沈下量は、当初予測された値とは異なっていたため、測定の頻度が増加し、補完的な測定も実施された。

沈下がシステムや機器に及ぼす影響が評価され、隣接する建屋を通過する配管の差動変位に関する是正措置が取られた。

沈下傾向は、最新の解析ツールを用いて再評価され、経験豊富な専門家によるピアレビューが実施された。

9. 品質管理：

SSG-48 に沿って[18]、IGALL 安全報告書の 4.9 項では、(a) 管理統制、(b) 安全分析報告書の補足、(c) パフォーマンス指標、(d) 確認 (検証) プロセス、(e) データ収集と記録保持、これらの観点からこの属性に期待される内容に関する一般的な情報を提供している。さらなるガイダンスは、SSG61 の Paras 3.13.16 - 3.13.17 の安全解析報告書の補足[19]、GS-G3.1 の確認プロセス (予防措置については Paras 6.76-6.77、是正措置について

は Paras 6.66-6.75) にあり[20]、SRS No.106 の第 2 章には経年劣化管理のためのデータ収集と記録保存に関するグッドプラクティスが記載されている[21]。

この AMP に関する追加的な情報はない。

References

- [1] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Report on Evaluation and Repair of Existing Nuclear Safety-Related Concrete Structures, ACI 349.3R-18, Farmington Hills, MI, 2018.
- [2] ELETRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Long-Term Operations: Subsequent License Renewal Aging Effects for Structures and Structural Components (Structural Tools), EPRI Technical Report 3002013084, Palo Alto, CA, 2018.
- [3] ELETRONUCLEAR, Procedimento para Execução do Programa de Monitoramento de Recalques do ETG, EAN, EAS e ECB, Incluindo Monitoramento do Nível d'Água Subterrâneo (In Portuguese), Technical Report BP/1/PGE/200022, 2020.
- [4] LAMBE, T.W. and WHITMAN, R.V., Soil Mechanics, John Wiley & Sons, New York, 1969.
- [5] SCOTT, R.F., Foundation Analysis, Prentice-Hall, Inc., 1981.
- [6] INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS, Basic Geotechnical Description of Rock Masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol.18, pp 85 to 110, Pergamon Press Ltd., 1981.
- [7] HOEK, E., Practical Rock Engineering, E-book, 2006.
- [8] FLEMING, W.G.K., WELTMAN, A.J., RANDOLPH, M.F., ELSON, W.K., Piling Engineering, Surrey University Press, 1985.
- [9] SCHNAID, F., ODEBRECHT, E., In Situ Tests and their Application to the Foundation Engineering (In Portuguese), 2nd Edition, Oficina de Textos, 2012.
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Ageing Management for Nuclear Power Plants: International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL), IAEA Safety Reports Series No. 82 (Rev. 2), IAEA, Vienna, Preprint.
- [11] RICHART Jr., F.E., HALL Jr., J.R. and WOODS, R.D., Vibrations of Soils and Foundations, Prentice-Hall, Inc., 1970.
- [12] ATKINSON, J.H., Foundations and Slopes – An Introduction to Applications of Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill Book Company Limited, UK, 1981.
- [13] SELVADURAI, A.P.S., Elastic Analysis of Soil-Foundation Interaction - Developments in Geotechnical Engineering, Vol.17, Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.
- [14] MARTINS, I.S.M., SANTA MARIA, P.E.L. and LACERDA, W.A., A Brief Review about the Most Significant Results of COPPE Research on Rheological Behaviour of Saturated Clays Subjected to One-Dimensional Strain, Proceedings of the International Symposium on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, Rio de Janeiro, Brazil, 25-27 June 1997, A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield, 1997.
- [15] THORBURN, S. and HUTCHISON, J.F., Underpinning, Surrey University Press, 1985.

- [16] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Quality Assurance Criteria for Nuclear Power Plants and Fuel Reprocessing Plants, 10CFR Part 50, Appendix B, National Archives and Records Administration, latest edition.
- [17] ELETRONUCLEAR, Análise de Recalques do Conjunto de Estruturas de Angra 1 Composto pelo ETG, EAN, ESE, EAS, ERE e ECB, com Posterior Modelagem pelo Programa ANSYS (In Portuguese), Technical Report BP/1/PGE/200021, 2020.
- [18] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Ageing Management and Development of a Programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-48, IAEA, Vienna, 2018.
- [19] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Format and Content of the Safety Analysis Report for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-61, IAEA, Vienna, 2021.
- [20] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of the Management System for Facilities and Activities, IAEA Safety Standards Series No. GS-G-3.1, IAEA, Vienna, 2006.
- [21] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Ageing Management and Long Term Operation of Nuclear Power Plants: Data Management, Scope Setting, Plant Programmes and Documentation, IAEA Safety Reports Series No. 106, IAEA, Vienna, 2022.

PAGE 1 / --

GROUNDWATER LEVEL MONITORING TABLE - GMT

COMPANY:
RESPONSIBLE EMPLOYEE:
SIGNATURE:

MEASUREMENT No.	GROUNDWATER GAUGE OR WELL		DATE	HOUR	GROUNDWATER LEVEL [m]				WEATHER CONDITION			PLANT CONDITION			LOAD MOVEMENT	
	No. xx	No. yy			TEMPERATURE [°C]	SUNNY DAY	RAINY DAY	CLOUDY DAY	OPERATING	OUTAGE	REASON OF THE OUTAGE	YES	NO			
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																
17																
18																
19																
20																
21																
22																
23																
24																
25																
26																
27																
28																
29																
30																

SETTLEMENT MONITORING TABLE - SMT

NAME OF THE STRUCTURE

SPINS No.:
BENCHMARK (BMK):

COMPANY:
RESPONSIBLE EMPLOYEE:
SIGNATURE:

CAMPAIGN No.	EQUIPMENT		LAST CALIBRATION	PLANT CONDITION			LOAD MOVEMENT		GROUNDWATER LEVEL	
	TYPE	SERIAL NUMBER		OPERATING	OUTAGE	REASON OF THE OUTAGE	YES	NO	GAUGE No. x	GAUGE No. y
1			--- / --- / ---							
2			--- / --- / ---							
3			--- / --- / ---							
4			--- / --- / ---							
5			--- / --- / ---							
6			--- / --- / ---							
7			--- / --- / ---							
8			--- / --- / ---							
9			--- / --- / ---							
10			--- / --- / ---							
11			--- / --- / ---							
12			--- / --- / ---							

[illegible]

[illegible]

PINS No.: _____
BENCHMARK (BMK): _____

CAMPAIGN No.	EQUIPMENT		LAST CALIBRATION	PLANT CONDITION			LOAD MOVEMENT		GROUNDWATER LEVEL	
	TYPE	SERIAL NUMBER		OPERATING	OUTAGE	REASON OF THE OUTAGE	YES	NO	GAUGE No. x	GAUGE No. y
19			— / — / —							
20			— / — / —							
21			— / — / —							
22			— / — / —							
23			— / — / —							
24			— / — / —							
25			— / — / —							

[illegible]