

AMP 316 地中人工埋め戻し材（2020 年版）

プログラムの概要

この経年劣化管理プログラム (AMP) は、埋込構造物の意図した機能が運転中に損なわれないことを確実にするために、地中人工埋め戻し材に対するプラント特有の経年劣化管理プログラムを開発するためのガイダンスを提供する。これは、設計及び建設段階で実施された土壌と構造物の相互作用に関する解析結果が継続的に有効であることを確認することによって行われる。

経年劣化には、人工埋め戻し材原位置における材料特性の変化など、主要な地盤工学的特性の変化が含まれる。本 AMP は、原子炉の安全性に関連する構造物の基礎が埋め込まれている人工埋め戻し材の原位置試験で構成されている。代表的なサンプルの機械的試験と目視検査が原位置試験を補完する。地下水の化学組成を分析する試験も、AMP306 及び AMP307 で扱われているものと同様の手順で実施される。すべての試験は、適切な資格と経験を有する職員によって実施される。代表サンプルは、原位置での材料と同じもので作られる。また、原位置材料と同じ経年劣化条件に曝されるような保管と取り扱いが行われる。地震発生時及び発生後に、安全上重要な構造物や設備が本来の機能を果たせるよう地中人工埋め戻し材が地震動を制限する能力を評価するため、静的特性と動的特性の両方を得るための試験が実施される。静的特性の例としては、飽和密度、乾燥密度、凝集力、内部摩擦角、静的ヤング率 (E)、ポアソン比、鉛直剛性、水平剛性が挙げられる。動的特性の例としては、動的ヤング率、動的ポアソン比、基準ひずみ、減衰係数、動的鉛直剛性、動的水平剛性がある。目視検査は、地中材料の劣化または地中人工埋め戻し材料の特性変化を検出するために実施される。

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：

本プログラムの対象範囲には、意図された機能を果たす原子炉アイランド構造物のコンクリート基礎の下（またはその周辺）に位置する地中人工埋め戻し材が含まれる（すなわち、AMP は原子炉アイランドの安全性に関連する構造物を対象とする）。本 AMP は、特に原子炉アイランドのコンクリート基礎の下（または周囲）にある人工埋め戻し層を対象とする。人工埋め戻し材は、例えば、指定されたバインダー含有量を持つ締固めた土とバインダーの混合物から構成される。典型的な劣化メカニズムには、密度低下、人工埋め戻し材からのバインダー材料の溶出、浸食などがある。コンクリート基礎部材は本 AMP の対象外であり、AMP306 に準拠して検査される。

2. 経年劣化を最小限に抑え、管理するための予防措置：

地中埋め戻し材のモニタリングプログラムは、状態監視プログラムである。しかし、経年劣化につながる可能性のある劣悪な環境条件への暴露を制限するなどの予防措置 (もしあれば) は、必要に応じて実施することができる。

3. 経年劣化の検出：

液状化に対する抵抗力低下を含む経年劣化を検出する上で、供用期間中の検査 (目視検査、試験、モニタリングを含む) と監視は不可欠な要素である。地中人工埋め戻し材の主な検査方法は目視検査であり、代表的なサンプルが存在する場合には、そのサンプルを用いた機械的試験が補完する。いくつかの加盟国では、原位置の人工埋め戻し材から小口径コアの形で試験サンプルを抽出し、化学分析と機械的試験を行っている。また、一部の加盟国では、原位置試験も実施されている。地震発生後、原位置での物理試験は必須である。

試料は、目視検査によって物理的状态を評価し、体積と密度の測定により評価される。各サンプルの外側の円筒表面は、表面形状、表面テクスチャー、浸出、浸食、色、直径などの変化について調べられる。各サンプルのデータは、測定された体積と計算された密度で表され、許認可文書から得られた元の値に対する割合も含まれる。このデータは、サンプルの体積と密度の変化を傾向分析し把握する目的で使用される。

人工埋め戻し材のパラメータは、関連する国家民間規格・基準、推奨ガイドライン及び試験マニュアル (例えば、参考文献[1,2,3])、特にプラント設計限界について想定される経年劣化予測に準拠してモニタリングされる。基礎と上部構造の具体的な設計に対応して、モニタリングされるパラメータの典型的な例には、地中人工埋め戻し材の弾性係数とポアソン比、及びそれらの深さとひずみレベルによる変化などが含まれる。

地震クロスホール試験は、原位置の材料に対して、許認可基準で指定された頻度で実施される。定期試験の頻度は、様々なキャンペーンの結果に依存する。一般的に、傾向分析により異常や材料特性の変化が発生していると考えられる場合、頻度は高くなる。

目視検査の頻度は、安全上の重要性和基礎システムの状態に依存する。一般的に、目視検査は一定の間隔 (例えば、構造物モニタリング-AMP306 と整合させるために 2~5 年ごと) で、代表的なサンプルや原位置の地中人工埋め戻し材に対して実施される。目視検査は、浸出及び浸食などその他の表面劣化メカニズムの視覚的影響を判定するために実施される。範囲としては、AMP306 及び AMP307 で網羅されているものと同様の手順を用いて地下水質の検査も含まれる。これは、地中人工埋め戻し材の健全性及び長期的性能に悪影響を及ぼす可能性のある周囲及び環境条件の発生を検出するために行われる。洪水や地震などの例外的な事象については、その重要性や種類に応じて、(目視以上の) 特別な検査が必要となる場合がある。洪水は、地下水位が地表に達しない限り、土壌の応力状態以外には影響を及ぼさない。達した場合には、土壌の応力状態には関係がなくなる。従って、洪水を土壌に影響を及ぼす事象と捉えるのならば、地下水位が非常に低くなければならない。地震発生後、原位置での物理的試験は必須である。

4. 経年劣化のモニタリングと傾向分析：

経年劣化管理プログラムは、以下の要素から構成される。

- 目視検査：代表的なコアサンプルの状態を検査することにより実施する。これらの検査は、原位置の地中人工埋め戻し材の状態を追跡し、その状態のあらゆる劣化を検知することを目的としている。体積と密度測定も補完的に行われる。
- 耐震クロスホール試験：地中人工埋め戻し材原位置での試験を定期的の実施し、人工埋め戻し材の圧縮波 (P) 及びせん断波 (S) 速度を測定し、これらのパラメータが運転期間を通じて設計基準内にあるかどうかを判定する。得られた試験結果は傾向分析され、外挿に用いられる。外挿値は、許認可基準文書に記載された設計値と比較される。
- 機械試験：せん断ひずみの関数として、静的弾性係数、静的ポアソン比、動的弾性係数、動的ポアソン比、密度、動的せん断弾性係数、スペクトル増幅係数 (減衰、加速度、速度、変位)、せん断弾性係数の減少など、設計基準に使用される様々な機械的特性を評価するために、1 つ以上の機械的試験が、地中人工埋め戻し材の代表的なサンプルに対して実施される場合がある。
- 水質検査：地下水サンプルは、原子力アイランド基礎の下の対象深度まで、地中人工埋め戻し材に埋め込まれたボーリング孔とピエゾメーターから採取される。サンプルに対して実施される試験には、AMP306 に準拠した水位、pH、温度、化学分析が含まれる。
- 水文学的条件の変化：プラントの耐用年数にわたるサイトの水文学的特性の変化 (浸透方向の変化) もモニタリングされ、許認可基準で決められた許容基準に照らして評価される。
- 大規模な外部事象後の検査：洪水、地震、地滑り、局地的な猛烈な降雨などの重大な自然現象の発生後、ケースバイケースで特別検査または特別調査が実施される場合がある。発電所の SSE を超えるような地震発生後、新たな地質学的調査が実施され、土の静的・動的パラメータを新たに評価・決定するための実験室試験及び原位置試験、ならびに岩石の原位置試験が実施される。

5. 経年劣化の緩和：

この AMP は状態監視プログラムであり、経年劣化の影響を緩和するための一般的な推奨も具体的な推奨も提供していない。しかし、観察または検出された劣化の進行具合が許容基準を超える場合、詳細なモニタリングと傾向分析、及び劣化の根本原因を緩和するため、あるいは構造性能への影響を評価するための構造解析に基づき、プラント特有の対策を指定することができる。緩和措置には、基礎の下にセメントグラウトを注入して土壌を補強することも含まれる。

6. 許容基準：

地中人工埋め戻し材の経年劣化管理プログラムでは、意図された機能が失われる前に、是正措置の必要性を確実に発見するために、人工埋め戻し材に関する選択された許容基準に基づいて、資格を有する技術者が検査結果を評価することを求めている。この基準は、各国の民間規格・基準、及び該当する場合は設計に関する規格・基準に準拠して導出され、業界とプラントの運転経験を考慮する。

耐震設計の観点から、地中人工埋め戻し材の3つの側面が注目される。

- 耐久性
- 機械的特性
- 強度マージン

耐久性

人工埋め戻し材や地下水に含まれる潜在的に有害な物質による化学的攻撃や、潜在的なアルカリ骨材反応によって凝集力が損なわれてはならない。従って、プラント寿命にわたる地下水の化学的性質、及び／又は、水文学的性質(滲出方向の変化)の著しい変化は、モニタリングされ、許認可基準で設定された許容基準に照らして評価される。

機械的特性

動特性解析に必要な以下の特性は、プラントの寿命期間中に考慮すべき機械的特性に重大な変化がないことを明らかにするため、モニタリングされ、許認可基準によって決められた許容基準に照らして評価される。

- 強度
- 密度
- 動的ヤング率
- ポアソン比
- せん断ひずみによるせん断弾性率の変化

強度マージン

人工埋め戻し材の強度と液状化に対する抵抗性は、以下のような方法で得られる。

- より高密度になるまで締め固め、その効果が永続的で化学的劣化やその他の有害な影響を受けないようにする。
- 本質的な凝集力(及び結合材がある場合は、その添加によってもたらされる凝集力)

地震を含む様々な付加荷重における応力解析の結果、要求される最小安全率を超えるかなりの安全裕度があるよう、合理的に大きな安全率が得られることが必要である。

耐久性は、(代表サンプルの)目視検査と水質試験によって評価される。許容基準は、浸食、変色、浸出、地下水領域の不適切な変化などによる劣化の可能性がないと結論づける適格な工学的評価に基づいている。機械的特性と強度のマージンに関する許容基準は、設計段階で使用された限界値に基づいて決定される。試験結果は、設計基準で使用された限

界値と比較される。試験結果が許容基準を満たさない、すなわち劣化の可能性を示す場合、プラント是正措置プログラムの対象となり、さらなる評価が行われる。

7. 是正措置：

確立された基準を満たさない検査結果については、評価が実施される。是正措置は、評価結果がその必要性を示した場合に開始される。この措置には、劣化の根本原因を軽減するための評価も含まれる。是正措置に関するプラント特有の要求事項がない場合、参考文献 [4] の要求事項を用いて是正措置を実施することができる。

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 がプラントに適切であることを確認するため、プラント AMP の開発において考慮される。プラント及び業界全体の運転経験と研究開発 (R&D) 結果を定期的に評価するための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、高経年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、プラント特有の新しい AMP の開発) をとる。

南アフリカの Koeberg 原子炉プラントサイトでは、岩盤の上にある原位置の砂は、あるレベルの地震誘発地震動下で液状化する可能性があるかと判断された。このリスクは、岩盤レベルと下部ラフト基礎の下面との間に液状化しない下部基礎を設けることで対応した。砂は岩盤まで掘削され、代わりにソイルセメントによる基礎が設けられた。ソイルセメントによる埋め戻しは、敷地の「上部の砂」で準備された。クロスホール地震試験を長年にわたって実施した結果、建設後最初の 10～15 年間は P 波と S 波の速度が低下し、その後は P 波と S 波の速度が着実に上昇することが明らかとなった。

ベルギーでは、Tihange 原子炉プラント 1 号機で、事業者は、既存の建屋と安全性に関連する機械を収容する新しい建屋をつなぐ新しい地下ギャラリーを建設する必要があった。これは、長期運転に向けたプラント改造の一環であった。事業者は、ジェットグラウティングと呼ばれる建設技術を使用した。同技術は、高い運動エネルギーを持つジェットを用いて地盤を破壊し、壊れた地盤とセメント系グラウトを混合させるものである。この工法は、安全解析報告書 (SAR) に記載された土壌の特性、並びに以前このサイトで同技術が事故なく使用されたことに基づき選定された。しかし、ジェットグラウティングで 10 本の地下柱を建設した後、目視点検を行ったところ、既設建屋の 1 階で、補助給水系統のタービン駆動ポンプや計装空気系統のコンプレッサーが設置されている部屋の床スラブに亀裂が入るなど、複数の損傷が見つかった。フル稼働中であった 1 号機は停止され、調査のためにジェットグラウティング作業が中断された。事業者が実施した地質学的及び鉱物学的調査の結果、不均質な埋め戻し材が存在することが判明した。さらに、土壌の特性が SAR で提供された情報とは異なっていることも判明した。SAR の情報では、圧縮された沖積層や安定化した埋め戻し材が存在するとされていた。建屋内の安全性に関連する機器に対して必要な修繕を施し、局所的な土壌補強を追加で処置した後、約 8 ヶ月の停止期間を経て、規制機関の同意を得て、ユニットの再稼働が許可された。

この AMP が作成された時点では、関連する研究開発は確認されていない。

9. 品質管理：

管理統制、品質保証手順、レビュー、承認プロセスは、各国の規制要件 ([4,5]など) に準拠して実施されている。

References

- [1] ASTM D4428/D4428M – 14, 2014, “Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing,” ASTM International.
- [2] Day, Robert W.E., 2001, “Soil Testing Manual,” McGraw-Hill Professional.
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Geotechnical Aspects of Site Evaluation and Foundations for Nuclear Power Plants, Safety Standards Series No. NS-G3.6, IAEA, Vienna (2004).
- [4] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 10 CFR Part 50, Appendix B, Quality Assurance Criteria for Nuclear Power Plants and Fuel Reprocessing Plants, National Archives and Records Administration, USNRC, Latest Edition.
- [5] National Nuclear Regulator (2008), Quality and Safety Management Requirements for Nuclear Installations. RD-0034, Rev 0. Centurion