

原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT FUNDING AND RESEARCH CENTER TOPICS

2013.9.NO.107

目次

| | |
|------------------------------------|---|
| センターの活動状況 | ① |
| 地下空洞型処分施設の地震応答解析について—地震時の挙動の解析的検討— | ② |

センターの活動状況

I 成果等普及活動の実施状況

平成25年度 第2回原環センター講演会の開催

平成25年度第2回原環センター講演会「地下空洞型処分施設の地震応答解析について—地震時の挙動の解析的検討—」を以下のとおり開催しました。地下空洞型処分施設の地震時挙動の特徴を把握し、解析的に評価することを目的に、二次元有限要素法による地震応答解析を行い同施設の地震時挙動について検討した結果を報告し、会場との質疑応答を行いました。

開催日時：平成25年9月27日（金）15:30～17:00

会場：公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター 第1,2会議室

演題：地下空洞型処分施設の地震応答解析について—地震時の挙動の解析的検討—

講演者：L1チーム 山田 淳夫



地下空洞型処分施設の地震応答解析について —地震時の挙動の解析的検討—

1. はじめに

原環センターでは、平成17年度以来、地下50m以深の大断面の地下空洞にコンクリートの処分ピットを構築し、その周囲をベントナイト等の緩衝材で覆う地下空洞型処分施設の設計や施工技術に関する確認試験に取り組んでいる^{[1]~[2]}。

本検討は、その一環として、地震動が建設・操業段階の地下空洞型処分施設に与える影響を把握するため、動的解析を行ったものである。この検討では、建設・操業段階での構築物の地震時の応答挙動を把握するため、仮想的に設定した地震動の大きさを変化させた。

2. 解析条件の設定

2.1 解析モデルおよび物性値の設定

解析に用いたモデルの概念図を図1と図2に示す。

図1は地盤のモデルであり、地下空洞型処分施設周辺の深さ250m、幅250mの鉛直2次元断面の地盤を模擬し、水平成層とした。モデルの側方および底面の境界は、半無限地盤への地震波動の逸散を考慮する（モデル境界での波動の反射の影響を無くす）ため、ダッシュポットを用いた粘性境界とした。

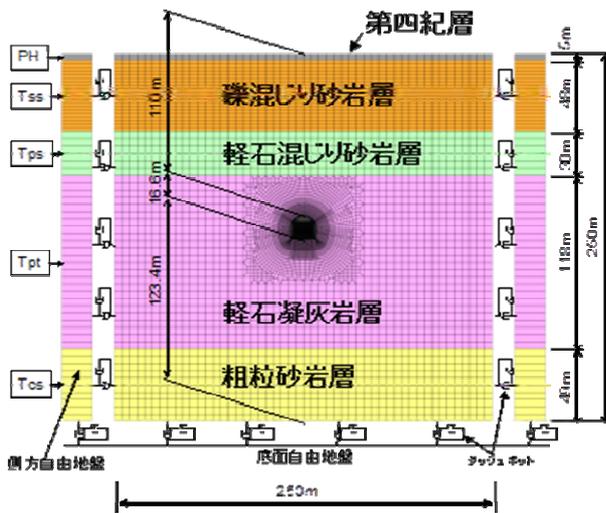


図1 仮想地盤モデルの概念図

図2は地下空洞型処分施設のモデルである。同施設の部材の寸法形状は、確認試験^{[1]~[2]}の施設に準拠し、高さ11m、幅14m程度とした。部材構成は図2に示したように、コンクリートピットの周囲を低拡散材・緩衝材の人工バリアで囲み、これらの部材と空洞との隙間を埋戻し材で埋めるものとした。埋戻し

材は施設の底部と側部はセメント系材料、施設の上部は土質系材料とした。

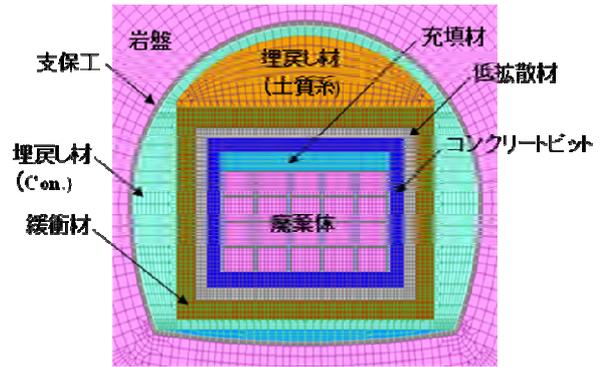


図2 地下空洞型処分施設の仮想モデル

解析に用いた物性値は、確認試験時の試験結果^[2]や参考文献^{[3]~[7]}を参考にして設定した。地盤および緩衝材の動的物性のひずみ依存性には修正R-Oモデル^[8]を適用し、それ以外の構造物は弾性モデルとした。表1および表2に、解析に用いた物性値の一覧表を示す。

表1 解析用物性値（セメント系材料・埋戻し材）

| | 単位体積重量 γ [kN/m ³] | 弾性係数 E [MPa] | ポアソン比 |
|--------------|---|-----------------|-------|
| コンクリートピット | 24.5 | 37,900 | 0.20 |
| 低拡散材 | 23.0 | 29,300 | 0.20 |
| 廃棄体内部 | 40.6 | 12,500 | 0.30 |
| 廃棄体容器 | 77.0 | 200,000 | 0.30 |
| 充填材 | 23.0 | 33,100 | 0.20 |
| 上部充填材 | 24.5 | 39,100 | 0.20 |
| 支保工 | 24.5 | 28,600 | 0.20 |
| 埋戻し材（コンクリート） | 24.5 | 38,900 | 0.20 |
| 埋戻し材（土質系） | 22.7 | 40 | 0.40 |

表2 解析用物性値（地盤・緩衝材）

| | 単位体積重量 γ [kN/m ³] | 弾性係数 E [MPa] | 初期せん断剛性 | ポアソン比 | |
|-----|---|-----------------|-------------|-------|------|
| | | | G_0 [MPa] | | |
| 地盤 | PH | 19.0 | 410 | 140 | 0.47 |
| | Tss① | 17.8 | 1,600 | 550 | 0.45 |
| | Tss② | 18.0 | 2,110 | 740 | 0.43 |
| | Tps | 16.8 | 2,880 | 1,020 | 0.41 |
| | Tpt① | 15.2 | 2,810 | 1,010 | 0.40 |
| | Tpt② | 15.2 | 3,000 | 1,080 | 0.39 |
| | Tpt③ | 15.2 | 3,190 | 1,160 | 0.38 |
| | Tpt④ | 15.2 | 3,400 | 1,230 | 0.38 |
| Tcs | 19.9 | 5,560 | 2,030 | 0.37 | |
| 緩衝材 | 19.0 | 850 | 300 | 0.41 | |

2.2 地震動の設定

地震動の大きさは、解放基盤表面で水平方向最大加速度を250gal (2E) および450gal (2E) とした。本検討では、250galをレベル1、450galをレベル2の地震動とよぶ。

平成22年8月9日制定の「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」^[9]によると、地下空洞型処分施設は耐震設計上の重要度分類のCクラスの施設に対応するものとしているので、地下の施設位置でCクラスの施設に適用される地震層せん断力係数が0.2^[10]相当となる250gal (解放基盤表面での値、2E) を基本とした。

原子力発電所の耐震設計時の静的地震力の評価法^[11]によれば、地下では地震動の低減が考えられるため、実際にはこれよりもさらに小さい地震力となるものと考えられる。

レベル2のものは施設の振動性状をより強調して把握するために上述のように設定した250galの地震動の2倍程度の大きさの水平加速度になるように設定した。

地震動の波形は図3に示したものとし、公開文献^[12]を参考とした。鉛直方向の地震動は、水平方向加速度の波形の振幅の2/3となるように設定した。

なお、解放基盤表面は図1のTps層の上面として、一次元重複波理論に基づく応答解析を実施して地盤モデル底面に引戻した波を入力することとした。

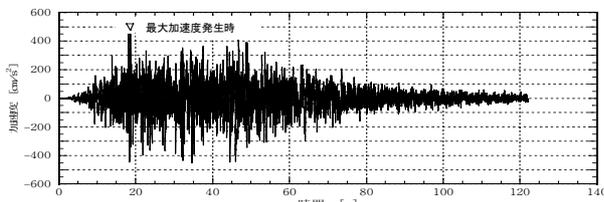


図3 地震波形

2.3 解析検討ケース

解析検討ケースを表3にまとめて示す。建設・操業の進捗に応じた施設の形状とした。建設時をPhase1、廃棄体定置直後をPhase2、充填材充填直後をPhase3、そして施設の上部の埋戻し材まで埋戻した直後の状態をPhase4とした。地震動レベル1および

2と合わせて、解析ケース名はPhase3_450のように表記することとした。

3. 解析結果と施設の地震時挙動

3.1 地震時の挙動の概要

地下空洞型処分施設とその周辺の空洞の地震応答挙動の特徴を図4と図5に示す。図4に代表例としてPhase1 (廃棄体定置前) を、図5にPhase4 (埋戻し直後) の例を示した。

地下空洞は左右交番に斜め上に引張上げられるような挙動を示した。これに伴う空洞内部に設置されている処分施設の挙動はPhaseによらずほぼ同様の挙動を示した。

Phase1では地下空洞と処分施設との挙動は逆位相で振動することが特徴的であり、空洞に対して処分施設は相対的に逆に変位し、回転するような挙動を示した。このような相対的に逆に変位が生じる挙動は、処分施設の側壁部分と空洞と間に間隔のあるPhase2、Phase3でも示された。

空洞と処分施設との間の間隔が緩衝材 (ベントナイト) で埋戻されたPhase4では、拘束されているので、空洞に対して処分施設が相対的に逆に変位する変位量や回転する量が小さくなった。

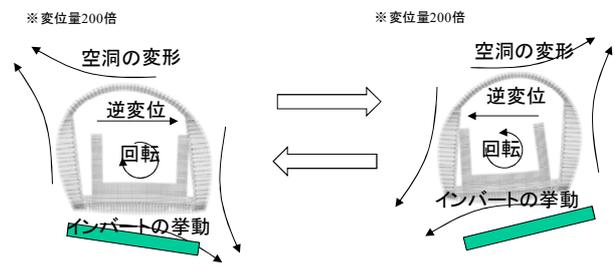


図4 Phase1における地震時の挙動の特徴

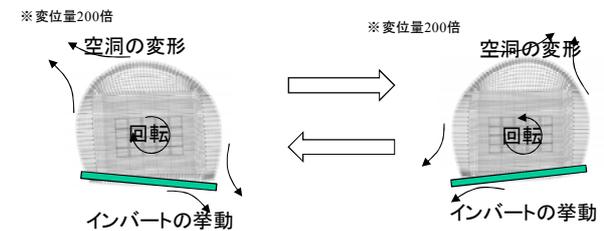


図5 Phase4における地震時の挙動の特徴

表3 解析検討ケース一覧表

| 解放基盤面での 最大水平加速度 (2E) a_{max} | 施設形状 | | | |
|---|---------------|----------------|-------------|--------------|
| | Phase1 廃棄体定置前 | Phase2 廃棄体定置直後 | Phase3 充填直後 | Phase4 埋戻し直後 |
| レベル1 250gal | Phase1_250 | Phase2_250 | Phase3_250 | Phase4_250 |
| レベル2 450gal | Phase1_450 | Phase2_450 | Phase3_450 | Phase4_450 |

3.2 建設・操業時 (Phase1~Phase3) の状態

Phase1~Phase3におけるコンクリートピット・低拡散材の圧縮強度と発生した圧縮応力との比の分布を、解析結果の例として図6に示す。この図に示すように、これらセメント系材料の部材は、地震動による圧縮応力に対しては安全であることがわかった。また、450galを入力した場合でも同様であった。

コンクリートピット・低拡散材の引張強度と発生した引張応力との比についても評価した。その結果、コンクリートピット・低拡散材の側壁部分が直立した状態で水平方向に自由に振動する形状となっているPhase1とPhase2において、付け根部分である隅角部内側のごく一部において引張応力が高くなる結果が得られた。今回の検討の地震動では、この引張応力は引張強度には達していなかった。また、コンクリートピットの外側に配置されている低拡散材に発生する引張応力は、さらに小さいレベルである結果が得られた。

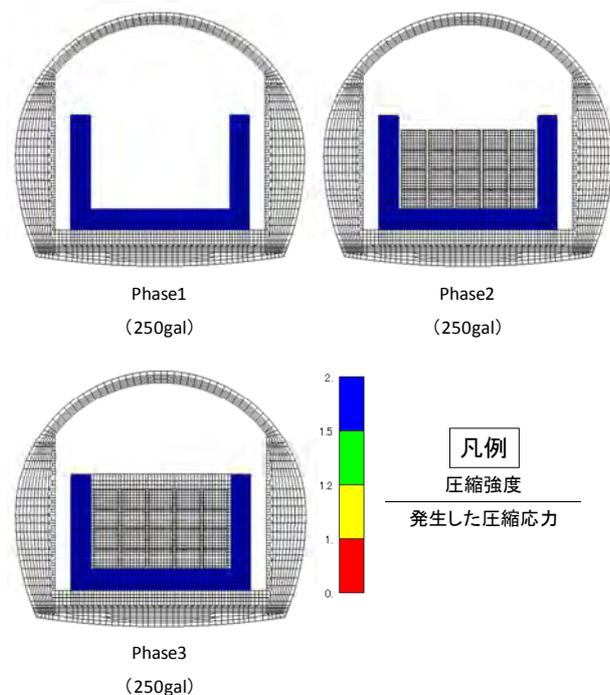


図6 圧縮強度と圧縮応力の比の分布の例
(入力地震動450gal：コンクリートピット・低拡散材)

緩衝材についてせん断強度と発生したせん断応力の比の分布の例を図7および図8に示す。せん断強度は、Mohr-Coulomb式にならない、拘束圧が大きくなるとせん断強度も大きくなるものとした。Phaseが進み、処分施設の自重が大きくなると、また、地震動レベルが大きくなると、コンクリートピット・低拡散材が載っていない底部緩衝材の左右端（図中の赤丸部分）でせん断強度を超過する応力状態となった。

コンクリートピット・低拡散材の上載荷重が無い部分は、拘束圧が小さいため、小さいせん断応力で

せん断強度を超過する状態にある。上載物（コンクリートピット・低拡散材）の慣性力によりその直下の部分の底部緩衝材に水平方向の外力が加えられ、この外力により底部緩衝材の左右端にせん断応力が発生したものと推察される。すなわち、間接的にコンクリートピット・低拡散材が底部緩衝材の左右端を押しつぶすような状態となった。

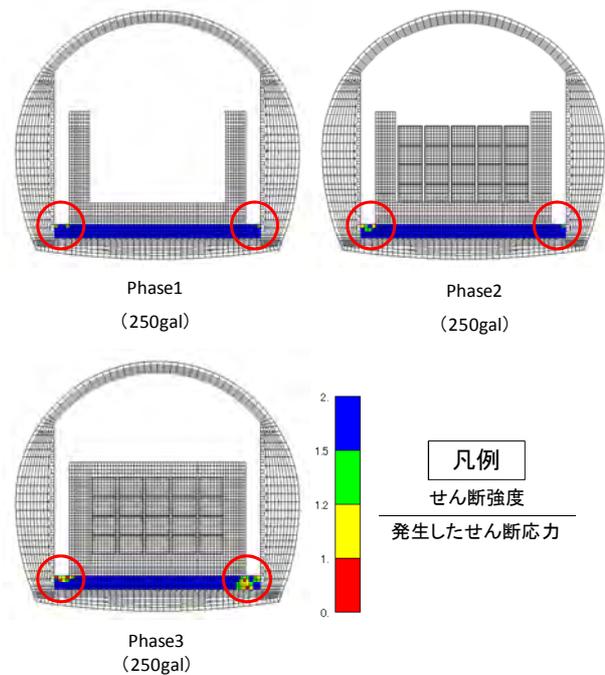


図7 せん断強度とせん断応力の比の分布の例
(入力地震動250gal：緩衝材)

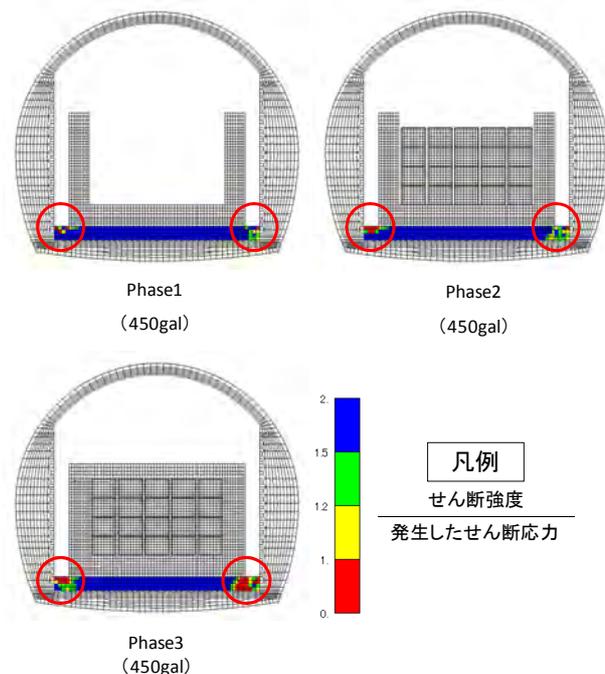


図8 せん断強度とせん断応力の比の分布の例
(入力地震動450gal：緩衝材)

緩衝材に発生した引張応力の分布の例を図9に示す。引張応力についても、上載物の慣性力によりその直下の部分の底部緩衝材に水平方向の外力が加えられ、この外力により底部緩衝材の左右端で引張応力が高くなったと考えられる。

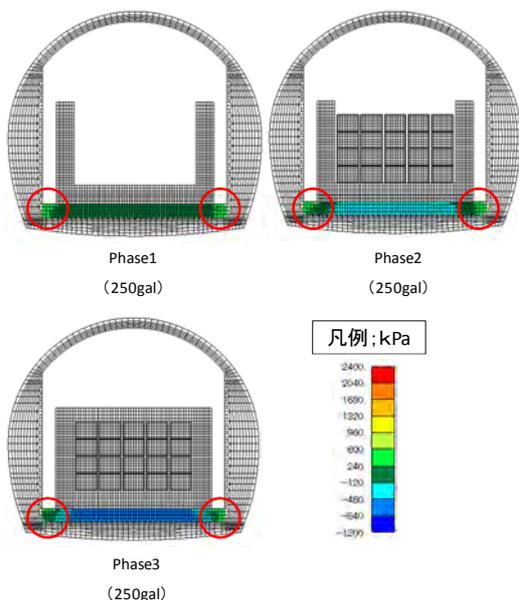


図9 引張応力の分布の例
(入力地震動250gal：緩衝材)

このような作用により生じた変形量はピット側壁と埋戻し材との間の間隔が最大1~2mm程度伸縮するという計算結果となった。

3.3 埋戻し直後 (Phase4)

Phase4の計算結果の例として、コンクリートピット・低拡散材に発生した引張応力と引張強度との比の分布の例を図10に示す。450galのケースでも、引張強度に達するような引張応力は発生しなかった。圧縮側でも同様に、圧縮応力がコンクリートピット・低拡散材の圧縮強度に到達しなかった。

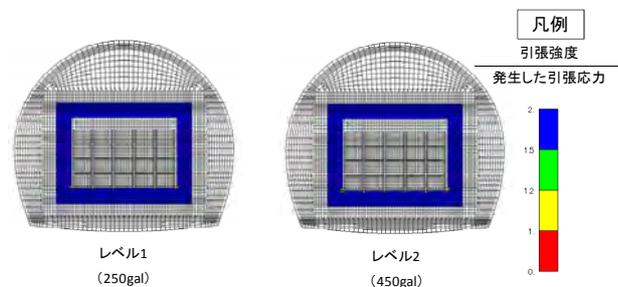


図10 引張強度と引張応力の比の例
(Phase4：コンクリートピット・低拡散材)

Phase4は、先述のとおり、施設と地下空洞の間の隙間が全て埋め戻されているが、コンクリートピット・低拡散材は地下空洞に対して相対的に回転する

ような挙動を示す。また、コンクリートピット・低拡散材は、粘土系材料のベントナイトを締め固めて構築される緩衝材の内側に設置され、この緩衝材よりも剛であり、ひとかたまりとして挙動する。コンクリートピット・低拡散材の回転挙動により、緩衝材の内部は複雑な応力状態を呈する。

緩衝材に発生する応力の解析結果のうち、せん断強度とせん断応力の比の分布の例を図11に示す。ここでもせん断強度は、Mohr-Coulomb式になった。コンクリートピット・低拡散材の回転挙動により、その四隅の部分(図中の赤丸部分)を中心に、せん断強度を超過する応力状態となった。また、地震動レベルが大きくなるとせん断応力も大きくなり、このような範囲も広くなる傾向が見られた。

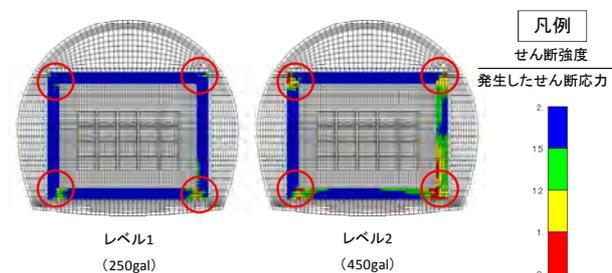
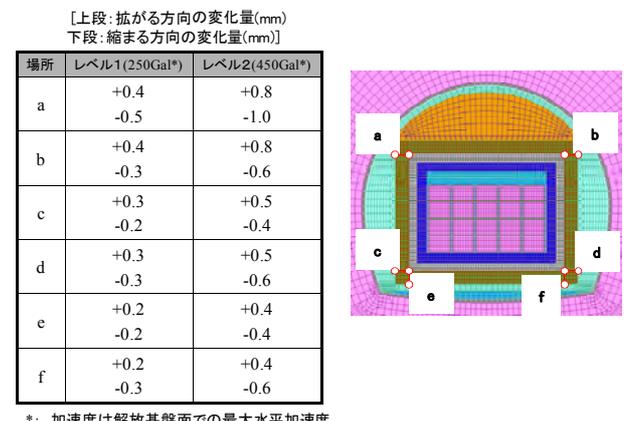


図11 せん断強度とせん断応力の比の分布の例
(Phase4：緩衝材)

変形量については、図12に示したとおり、コンクリートピット・低拡散材と埋戻し材との部材間距離(=緩衝材の厚さ)の変形量は、最大でも1mm以下となった。

コンクリートピット・低拡散材は、本検討の地震動レベルでは、ひび割れ等が発生しない結果となり、十分に安全であることがわかった。緩衝材に関しては、コンクリートピット・低拡散材との界面で接点を共有するモデルとしているため、実際よりも過大な応力が作用している可能性がある。次節でこの影響について検討した結果を示す。



*: 加速度は解放基盤面での最大水平加速度

図12 部材間距離の変化量

3.4 緩衝材界面の滑り・剥離を考慮したケース

図13に示したように、緩衝材の界面に滑り・剥離を考慮できる接点ジョイントを組み込んだモデルで検討を行った。検討は、Phase1とPhase4の形状とし、地震動は、影響がより大きく出る450galとした。

滑りは境界面にせん断耐力以上のせん断応力が加わった場合に発生し、剥離は界面に作用している軸力（地震動を加える前の状態として評価するために、行う構築解析による緩衝材の初期応力より各節点ジョイントの支配面積あたりの軸力を換算している）を超える引張力が加わった場合に発生するものとした。

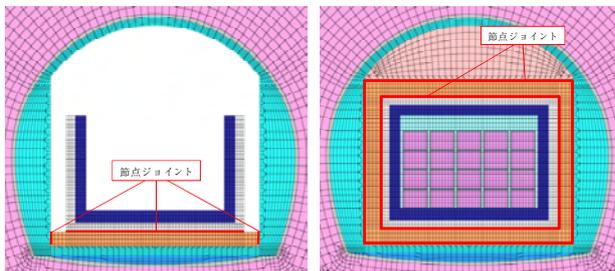
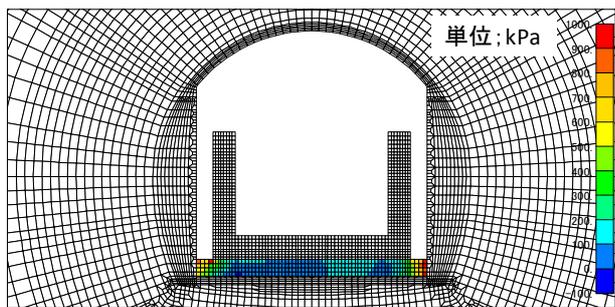
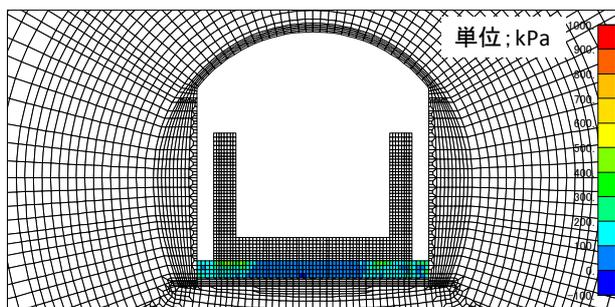


図13 緩衝材界面の接点ジョイント

図14に示したとおり、界面の滑り・剥離を考慮することで、発生する引張応力が小さくなる結果となった。また、図15に示したような応答加速度（図では応答加速度のフーリエスペクトル）や、変形量には大きな差は生じることが無い結果となった。



剥離・すべりを考慮しないケース (Phase1_450)



剥離・すべりを考慮するケース (Phase1_450_J)

図14 剥離・すべりを考慮したことによる発生した引張応力の変化の例

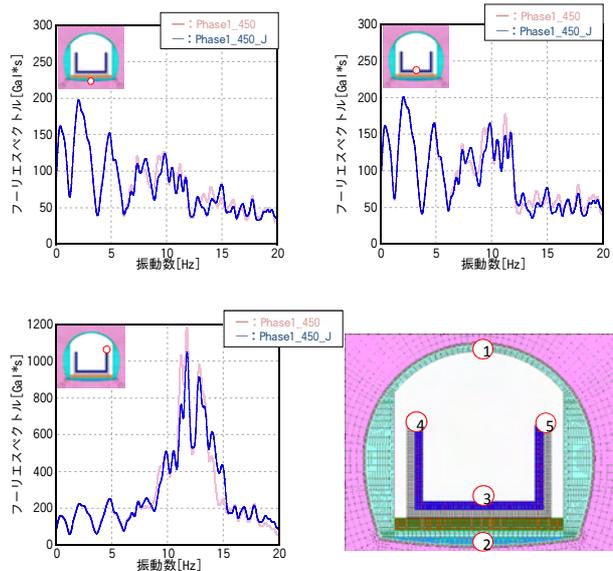


図15 剥離・すべりを考慮したことによる応答加速度のフーリエスペクトルの変化

4. おわりに

コンクリートピット・低拡散材は地震時に発生する圧縮・引張応力に対して十分に安全である解析結果が得られた。緩衝材はせん断や引張による変形が発生するような応力状態となったが、変形量は最大でも1~2mm程度伸縮するという結果となった。

緩衝材に関して、滑り・剥離を考慮するモデルで検討を進めたが、今後、塑性変形を考慮するなど、より現実に即したモデルを適用して検討する予定である。

本稿は、平成25年度第2回原環センター講演会の講演内容を再構成したもので、経済産業省資源エネルギー庁からの委託による「平成24年度管理型処分技術調査等事業（地下空洞型処分施設性能確認試験）」の成果に基づいて作成した。

(L1チーム 山田 淳夫)

- [1] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成17年度 地層処分技術調査等 TRU廃棄物関連処分技術調査 地下空洞型処分施設性能確認試験 報告書、2006
- [2] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成18~24年度 管理型処分技術調査等事業 地下空洞型処分施設性能確認試験 報告書、2007~2013
- [3] 富田敦紀・岩見忠輝・鈴木康正：余裕深度処分埋施設本格調査のうち試験空洞の支保設計および挙動、電力土木、No.325、2006.9
- [4] 富田敦紀他：低拘束圧下における堆積軟岩空洞の破壊現象の考察、土木学会論文集、Vol.63、2007

-
- [5] 原子力安全委員会：原子力安全委員会 地震動解析技術等作業会合 議事次第 配布資料 資料第40-2号「日本原燃株式会社 再処理施設及び特定廃棄物管理施設「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」等の改訂に係る耐震安全性評価報告 コメント回答（基礎地盤の安定性）」、平成22年6月、
http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/senmon/shidai/kaisekigijutu/kaisekigijutu40/kaisekigijutu_si40.htm
- [6] 土木学会：【2007年制定】コンクリート標準示方書 [設計編]、2007
- [7] 雨宮清他：ベントナイトクニゲルGXの基本特性試験（その5）動的力学特性に関する検討、土木学会第64回年次学術講演会、2009
- [8] 地盤工学会：地盤の動的解析－基礎理論から応用まで－、2007
- [9] 原子力安全委員会：改訂13版 原子力安全委員会指針集 「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」、大成出版社、2011年3月
- [10] 原子力安全委員会：改訂13版 原子力安全委員会指針集 「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」、大成出版社、2011年3月
- [11] 社団法人日本電気協会 原子力規格委員会：原子力発電所耐震設計技術規定、JEAC4601-2008、平成21年12月
- [12] 原子力安全委員会：第43回原子力安全委員会臨時会議 配布資料（2）「日本原燃株式会社再処理施設及び特定廃棄物管理施設の「耐震設計審査指針」等に照らした耐震安全性評価の確認結果について」、平成21年7月、
<http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/anzen/shidai/genan2009/genan043/genan-si043.htm>

編集発行

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

〒104-0052 東京都中央区月島1丁目15番7号（パシフィックマークス月島8階）

TEL 03-3534-4511（代表） FAX 03-3534-4567

ホームページ <http://www.rwmc.or.jp/>