

地震動による人工バリアへの影響

山本陽一^{*1} 鈴木覚^{*1} 安保英範^{*1} 藤原啓司^{*1}

地層処分における人工バリアの耐震安定性について、有効応力法による三次元弾塑性地震応答解析を適用した検討を行った。検討においては、わが国最大級の地震動に対して評価を行うこととした。解析の結果、人工バリアは周辺岩盤と一体となって振動していること、人工バリアに破壊が問題となる応力の発生は認められず十分な裕度を有していることが示された。これらの結果から、地震動により人工バリアの力学的安定性が損なわれる可能性は低いことを確認した。

Keywords: 地層処分, 人工バリア, 有効応力解析

Seismic impacts on the engineered barrier system of the geological disposal were examined by means of the three-dimensional elastic-plastic seismic response analysis based on effective stress method. In this study, it was evaluated against the largest ground motions recorded in Japan. The numerical analysis results showed that the engineered barrier system and the surrounding bedrock were shaken together and it had sufficient robustness for the failure state. Thus we confirmed the low possibility of a reduction in the mechanical stability of the engineered barrier system due to the ground motion.

Keywords: geological disposal, engineered barrier, effective stress analysis

1 緒言

2011年東北地方太平洋沖地震が発生し、その教訓として想定事象の設定のあり方など、地層処分事業に反映すべき重要な事項が少なからずもたらされた。これを踏まえ、原子力発電環境整備機構（以下、NUMO）では、地震・断層活動が地層処分システムに与える影響要因を、「断層のずれ」、「地震動のゆれ」、「地震に伴う地下水変化」に分類し、これらに対する地層処分の安全性について再確認するための検討を進めている。本稿では、このうち「地震動のゆれ」が人工バリアの力学的安定性に及ぼす影響について、三次元地震応答解析により検討した結果を報告する。

検討においては、わが国最大級の地震動に対して評価を行うことで、大規模な地震が人工バリアに及ぼす影響について確認することを第一の目的とした。そして、地盤工学の分野における数値解析技術の進展を踏まえて、人工バリアの力学的安定性を最新の方法により評価することとした。

2 検討用地震動の設定

本検討では、地層処分施設の地下坑道における地震時空洞安定性の問題を対象としたNUMOの既往検討[1], [2]に用いた地震動（以下、耐専波）に加えて、わが国の強震観測網（K-NET, KiK-net）で観測された国内最大級の地震動を検討用地震動として選定した。国内で観測された最大級の地震動としては、プレート間地震動と内陸地殻内地震動の地震タイプ別にそれぞれ選定した。ただし、多くの強震観測記録の中から選定を行うため、以下の条件を設けこれらを満たすものを検討用地震動の選定候補として抽出した。

- ・最大加速度（水平成分）が500gal以上
 - ・ $V_s=2000\text{m/s}$ 以上の剛性の高い地盤で観測された地震波
- そして、抽出した検討用地震動候補の擬似速度応答スペクトルを比較し、地層処分システムに与える影響が最も大

きいと考えられるものを検討用地震動とした。ここでは、地層処分システムに与える影響として、後でモデル化する人工バリア、地盤それぞれの一次固有周期に相当する0.06秒付近および1秒～3秒付近の擬似速度応答スペクトルの大きさを考慮した。なお、KiK-netの観測記録は2倍して2E波相当に換算した上で、K-NETの観測記録と比較している。

耐専波は、原子力発電所耐震設計技術指針[3]において基準地震動の策定方法の1つとして用いられている、距離減衰式に基づいた経験的な方法（耐専スペクトル）により設定した。ここでは、人工バリアを対象とした場合に最も大きな地震入力となる擬似速度応答スペクトル、 $M=8.0$, $X_{eq}=25\text{km}$ のコントロールポイントを採用している。

プレート間地震動と内陸地殻内地震動については比較検討の結果、2011年東北地方太平洋沖地震における牡鹿（K-NET）で観測された地震動と2000年鳥取県西部地震における伯太（KiK-net）で観測された地震動をそれぞれ選定した。

検討用地震動として選定した耐専波、牡鹿波、伯太波の擬似速度応答スペクトルをFig. 1に、加速度波形をFig. 2に示す（いずれも水平成分）。ここで、牡鹿波、伯太波については軟岩系の地盤条件で影響が大きいと考えられる1秒付近の周期帯で原波形の応答スペクトルが耐専波のそれを

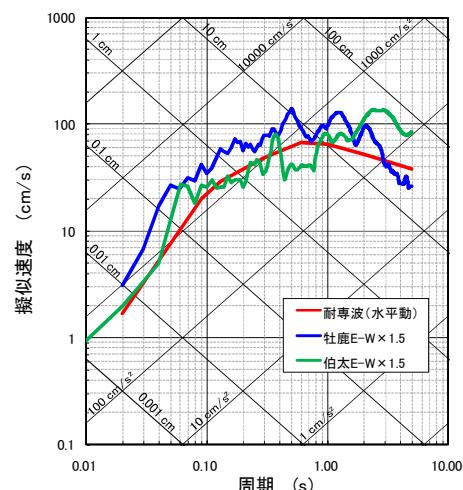


Fig. 1 Pseudo velocity response spectrums of horizontal ground motion components

Seismic impact on engineered barrier system of geological disposal by Yoichi YAMAMOTO (yyamamoto@numo.or.jp), Satoru SUZUKI, Hidenori ABO, Keiji FUJIHARA

*1 原子力発電環境整備機構 技術部

Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)

〒108-0014 東京都港区芝4-1-23 三田NNビル2階

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第30回夏期セミナーにおける講演内容に加筆したものである。

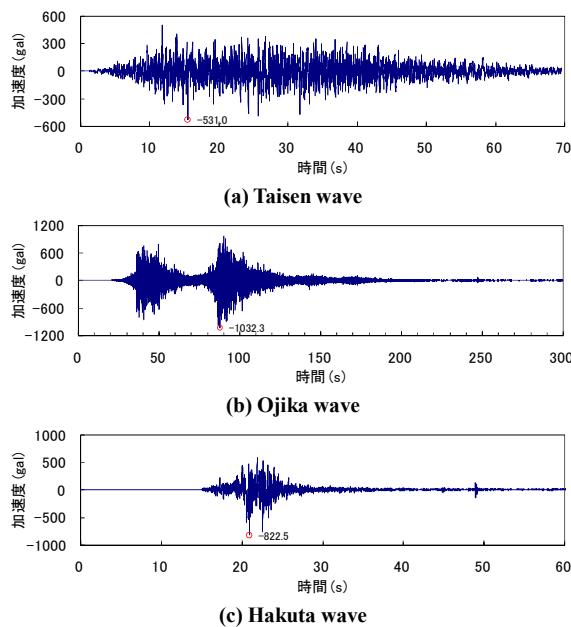


Fig. 2 Acceleration waveform

下回っていたこと、本検討では処分場の閉鎖後長期における人工バリアの問題を扱うことから、この周期帯の応答スペクトルが耐専波を上回る程度には保守的になるよう、原波形の速度振幅を1.5倍したものを解析に用いることとした。

3 解析検討条件と解析方法

3.1 検討条件

本検討では、高レベル放射性廃棄物の廃棄体定置方法として、処分坑道横置き定置方式を対象に人工バリアのモデル化を行う。次に、人工バリアの状態は時間の経過とともに変遷することになるが、今回の解析では閉鎖後長期の人工バリアの状態として最も基本的なケースと考える、以下の状態を対象とする。

- ・地下水の浸透により、緩衝材は飽和している
- ・緩衝材の膨潤により、処分孔と緩衝材は密着している
- ・オーバーパックの腐食膨張はまだ発生していない

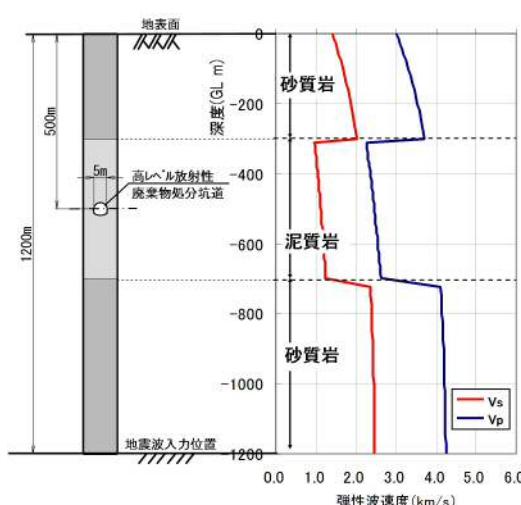


Fig. 3 Elastic wave velocity of the model ground

検討地盤は、Fig. 3に弾性波速度分布を示す砂質岩-泥質岩-砂質岩の三層構造からなる地盤モデルとした。この地盤モデルは、地層処分研究開発第2次取りまとめ[4]（以下、「第2次取りまとめ」）の軟岩系岩盤モデルに相当する。

3.2 解析方法

本検討では、人工バリアの耐震性を三次元弾塑性地震応答解析により評価する。また、解析は緩衝材を土骨格と隙隙水の二相系の連成問題として扱った有効応力解析を適用する。

解析検討フローをFig. 4に示す。検討地盤はFig. 3に示したように、地表からGL-1200mの岩盤モデルを対象とする。三次元解析は、地盤、緩衝材、オーバーパック、ガラス固化体をモデル化する。処分深度はGL-500mとし、ガラス固化体の中心をこの位置に設定する。Fig. 5に三次元解析のモデル概念図を示す。解析モデルは、廃棄体が一定間隔で配置され、かつ、連接する坑道も一定間隔に配置されるものとし、廃棄体1つを解析モデルの対象とする。ここで、三次元解析に用いる地盤をGL-1200mの全深度にわたり詳細にモデル化するのは非効率であることから、地盤は地表からGL-520mまでをモデル化することとした。このため、別途一次元の波動伝播解析を実施して求められた地震動を、GL-520mのモデル底面に入力する。また、地震応答解析における加振方向は、坑道軸方向と鉛直方向の2方向同時加振として、地震波を入力する。

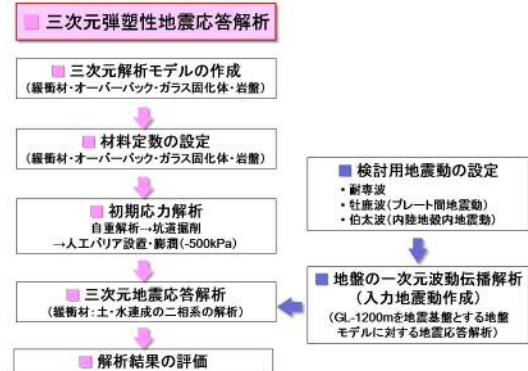


Fig. 4 Flow of this study

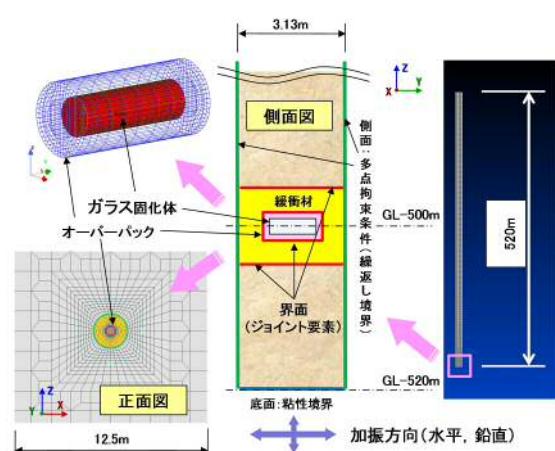


Fig. 5 Schematic diagram of the analysis model

解析コードには有効応力法による三次元の弾塑性地震応答解析が可能な Final-geo[5]を用いた。モデル化するそれぞれの材料に適用する構成モデルについては、ガラス固化体のみを弾性とし、その他はいずれも弾塑性構成モデルを適用する。オーバーパックと岩盤の降伏判定は、前者に von Mises モデル、後者に Drucker - Prager モデルを適用する。界面のジョイント要素に適用した構成モデルは弾塑性体とし、粘着力は考慮せず、摩擦係数は考慮した。また、本検討で着目する緩衝材には、Hashiguchi ら[6]によって提案された繰返し載荷に対する弾塑性構成モデルである下負荷面モデルを適用する。

それぞれの材料定数は、第 2 次取りまとめ[4]の検討で用いられたものを参考に設定した。ここで、材料定数における緩衝材の動的物性については、今回規模の大きな地震動を対象とした検討を行うことから、緩衝材の破壊状態も考慮した設定を行うこととした。この場合、通常は非排水繰返せん断試験を行い、土の動的な強度を表す繰返せん断応力比と繰返し回数の関係を求める、この関係に一致するよう構成モデルによる要素シミュレーションを行い、パラメータを同定することになる。しかしながら、現時点での同定に必要な緩衝材の動的強度は得られていないので、本検討では緩衝材と類似の土質材料である粘性土に対する既往の動的試験結果[7]を参考にして設定した。

4 解析結果

GL-500m の同一深度における地盤、ガラス固化体、緩衝材のそれぞれの検討地震動に対する水平変位時刻歴の比較を、Fig. 6 に示す。ここで、水平変位は解析モデル底面 (GL-520m) との相対変位を表している。それぞれの検討

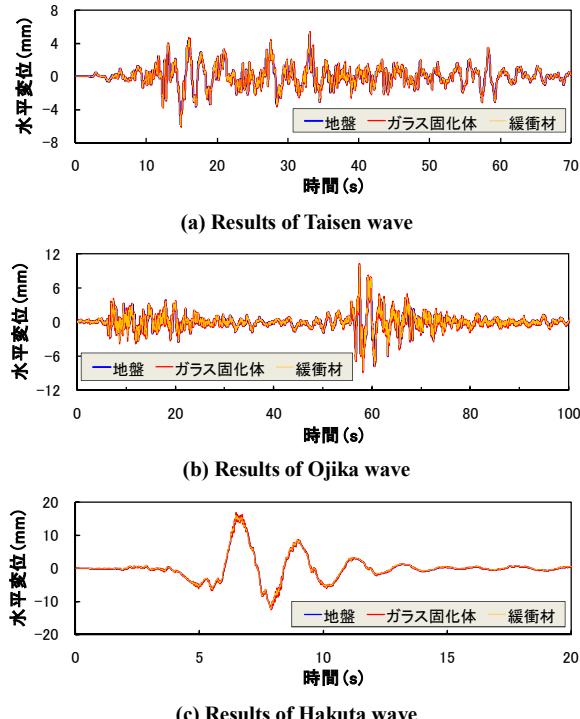


Fig. 6 Horizontal displacement of engineered barrier and hostrock

用地震動による変位量は、伯太波の結果が最も大きく、以下、牡鹿波、耐専波の順になっている。また、水平変位波形における部材毎の比較からは、変位量および位相は一致していることが分かる。つまり、地震時に人工バリアと周辺地盤は、一体となって振動していると言える。

最終時刻における緩衝材の体積ひずみ分布と過剰間隙水圧の分布について、牡鹿波に対する結果を Fig. 7 に示す。ここで、体積ひずみについて、正の表示は膨張を負の表示は圧縮を表す。図の体積ひずみの分布は、最大でも 3.6×10^{-3} % と非常にわずかな量ではあるが、ほぼ緩衝材全体にわたって正の体積ひずみを生じており、地震動中に緩衝材はわずかに膨張することを表している。一方、過剰間隙水圧の分布はほぼ緩衝材全体にわたって負圧が生じていることを表している。その大きさは最小で -200kPa と緩衝材の初期膨潤応力 (-500kPa) の4割程度で、体積ひずみの場合とは異なり比較的大きな発生量である。また、緩衝材における体積ひずみと過剰間隙水圧の分布性状は同じであり、両者に強い関連性のあることが示されている。

このような緩衝材の地震時挙動からは、次のような理解ができる。緩衝材は振動中わずかではあるが、体積膨張する。体積膨張は緩衝材土骨格の接触を緩めることになるので、強度低下をもたらすことになる。この時、緩衝材中の間隙水は透水係数が非常に小さいので、振動中に移動することができない。つまり、非排水とみなせる状態にある。このような状態では、わずかな量であったとしても、体積の膨張は間隙水に比較的大きな負の間隙水圧を生じさせることになる。負圧の発生は、土骨格に対しては、拘束力を

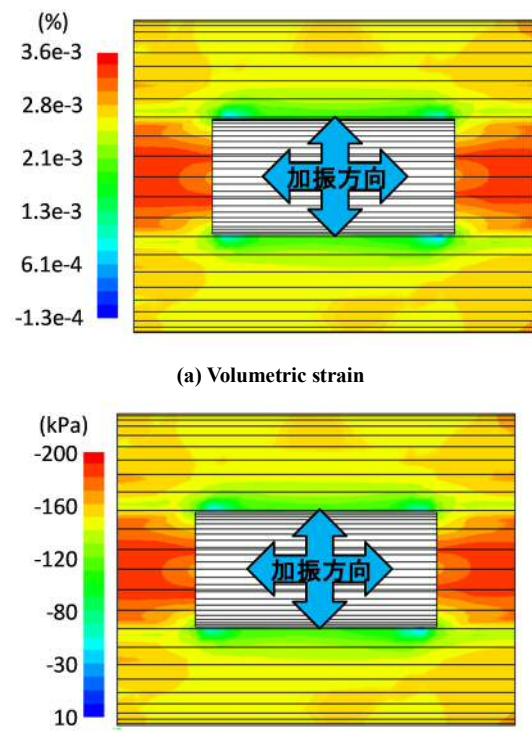


Fig. 7 Distribution of volumetric strain and excess pore water pressure of buffer material in final time (Results of Ojika wave)

高める方向に作用するので、間隙水の存在は強度増加をもたらすことになる。つまり、緩衝材が飽和している状態では、土骨格と間隙水の相互作用により、地震動に対して強度低下（有効応力の消失）しにくい状態にあると考えられる。このことは、人工バリアの耐震検討において、緩衝材を二相系の問題として取り扱うことの重要性を示唆しているものと考えられる。

次に、地震動に対する緩衝材の健全性について考える。Fig. 8 に、伯太波に対する緩衝材中央下部における有効応力経路を、平均有効応力 p' と偏差応力 q の関係にして示す。図中の直線は、緩衝材の限界状態応力比 ($M=0.63$) と地震動中最大の有効応力比 ($q/p'=0.068$) を表している。 p' は先の理由により、初期有効拘束圧 (500kPa) から 20kPa 程度の、わずかな低下に止まっていることがわかる。 q/p' が M と等しくなるかそれに近い状態になると、緩衝材は繰返しせん断破壊に至ったとみなされるが、この応力比が最も大きくなった伯太波の場合でも限界状態応力比の 1 割程度に過ぎない。このことから、本検討条件において、人工バリアを構成する緩衝材は十分な裕度をもって、地震動に対する健全性を示していると言える。

Fig. 9 に、伯太波に対するオーバーパック Mises 応力の最大応答値分布を示す。それぞれの検討用地震動に対する Mises 応力の最大応答値は、耐専波で $\sigma_{max}=0.91\text{MPa}$ 、牡鹿波で $\sigma_{max}=1.07\text{MPa}$ 、伯太波で $\sigma_{max}=1.69\text{MPa}$ であった。ここで最も大きな値を示した伯太波の場合で、オーバーパックの降伏応力 $\sigma_y=175\text{MPa}$ に対して 1/100 程度の応力に止ま

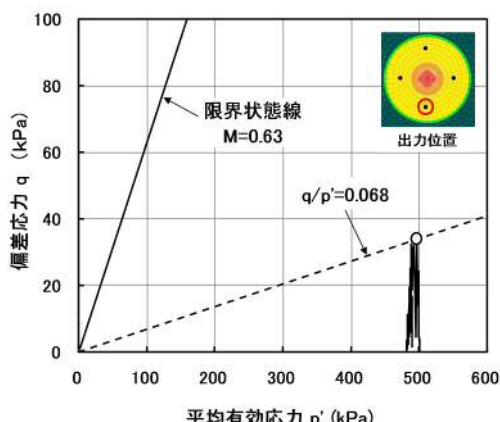


Fig. 8 Effective stress path of a buffer material element
(Result of Hakuta wave)

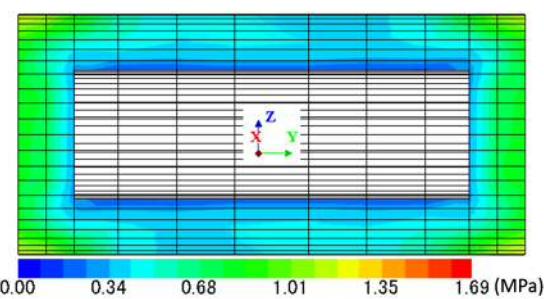


Fig. 9 Maximum Mises stress distribution of overpack
(Result of Hakuta wave)

っており、地震動に対して十分な裕度を示す結果となっている。オーバーパックは鋼製材料であるが、周りに剛性の低い緩衝材が配置されているため、初期状態の剛性比で $1/12500$ の非常に柔らかいものに包まれて設置されている。そのため、地震動によって振動してもオーバーパックに大きな応力変化は生じないことになる。よって、オーバーパック周辺の緩衝材が文字通り、地震時の振動による影響を緩衝する効果を発揮していると言える。このように、本検討条件からは、オーバーパックは地震動により放射性物質の閉じ込め性を消失するような状態には至らないと考えられる。

5まとめ

地震・断層活動が地層処分システムに与える影響に関する NUMO の検討状況のうち、「地震動のゆれ」が人工バリアの力学的安定性に及ぼす影響について、三次元地震応答解析により検討した結果について報告した。本検討からは、大規模な地震動に対しても人工バリアの力学的安定性が損なわれる可能性は低いと考えられた。今後の課題としては、緩衝材に用いられているベントナイトの動的物性の取得と拡充をはじめとして、オーバーパックの腐食による耐震安定性への影響の評価等が挙げられる。これに工学規模の実験による検証等を加えながら、更なる信頼性向上に向けた取り組みを行っていく予定である。

参考文献

- [1] 原子力発電環境整備機構：地層処分施設の耐震性評価, NUMO-TR-10-13 (2011)
- [2] 原子力発電環境整備機構：操業期間中における地層処分施設の地震時空洞安定性に係る検討, NUMO-TR-14-02 (2014)
- [3] 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針, JEAG4601-2008 (2008)
- [4] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－ 分冊 2 地層処分の工学技術. JNC TN1400 99-022 (1999)
- [5] 米澤健次, 穴吹拓也, 橋口俊一, 伊藤浩二, 堤内隆広, 江尻謙嗣：3 次元大自由度モデルによる地盤-構造物連成系の地震応答 FEM 解析, 大林組技術研究所報, No.76 (2012)
- [6] K.Hashiguchi and Z. P. Chen : Elastoplastic constitutive equation of soils with the subloading surface and the rotational hardening, *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, vol. 22, 197-227 (1998)
- [7] 兵動正幸：砂から粘土に至る広範な粒度から成る土の繰返しせん断強度, 地盤と建設, Nol.29, No.1, pp.1-9 (2011)