

地震動による人エバリアへの影響

第30回バックエンド夏期セミナー

2014年8月7日

原子力発電環境整備機構(NUMO)

技術部 山本 陽一



地震の"ゆれ"による人工バリアの力学的影響について, 最新の方法により評価した結果を報告する。

- 1. 背景
- 2. 実施内容
 - (1) 検討用地震動の設定
 - (2) 耐震安定解析
- 3. まとめ
- 4. 今後の課題

1. 背景

- 地層処分施設に対する地震の"ゆれ"の問題
- これまでの取組み
- ●「第2次取りまとめ」の概要と本検討の課題設定
- 目的と方法

地層処分施設に対する地震の"ゆれ"の問題





	1999	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
坑道の 耐震性評価	第2次取りまと	原子炉施設の耐	NUMO(こ) ・地下深部(・新指針を) ・耐震設計:	よる地下施 の地震動評 踏まえた地) 方法の検討	記設の耐震 ⁱ 価 電動による	髲検討 検討	N U M O 技術 東北地方太平洋	・知見収集 ・観測波に 解析	よる	レポート 技術
人エバリアの 耐震性評価	(JZC) Ø	『震設計指針の改					■レポート	評値 の村	面手法 食討	解析 検討
いずれも <mark>力学的安定性に // 訂</mark>										

ついて検討を実施



第2次取りまとめ:

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-, 核燃料サイクル開発機構(1999.11)



NUMO技術レポート(2011):

地層処分施設の耐震性評価, NUMO-TR-10-13, NUMO(2011.3)

NUMO技術レポート(2014):

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, NUMO(2014.6)

「第2次取りまとめ」の概要と本検討の課題設定

≻ 評価手法

- 有限要素法による三次元地震応答解析
- 一相系の解析(全応力解析)を中心に、土・水の二相系の解析(有効応力解析) についても実施
 - ※ 二相 ··· 土骨格(緩衝材),間隙水(緩衝材中の地下水) ⇒ 緩衝材<mark>飽和状態</mark>で重要

≻ 結論

- 緩衝材の力学的安定性の観点からは、地震によりせん断破壊する可能性は低い。
- 緩衝材に生じるせん断ひずみは微小で,非線形性は顕著に表れない。
- ▶ 入力地震波
 - エルセントロ波(1940年Imperial Valley 地震, 米国カリフォルニ州)
 - 水平1方向
 - ・東北地方太平洋沖地震以降の状況を踏まえると、わが国の最大級の地震に対して、安全性

本検討

本検討

観測記録に基づく

わが国最大級の地震動 (水平+鉛直)

最新の力学モデル

- ▶ を確認していく必要がある。
 - •水平方向のみならず鉛直方向の地震動の影響も無視できない。
- ▶ 緩衝材の動きを表現するモデル
 - 応力-ひずみモデル・・・・R-Oモデル(一次元モデルの拡張)
 - ・ダイレタンシーモデル・・・・Seedらの実験式(有効応力解析)
 - 簡便な実験式によるモデル。間隙水圧はほとんど発生しなかった。
 - ・ 今後, 有効応力および間隙水圧上昇の詳細なモデル化が必要。



■目 的

- 東北地方太平洋沖地震など、規模の大きな地震が人工バリア に与える影響を確認する。
- 「第2次取りまとめ」の見解を踏まえ、
 地震動の"ゆれ"による人エバリアの力学的安定性について、
 最新の方法により評価する。
- 今後の課題を明らかにする。

■ 方 法

 ・ 耐震安定解析・・・ 有効応力法による三次元弾塑性地震応答解析

 (緩衝材の取り扱い:土・水連成の二相系)

2. 実施内容 (1)検討用地震動の設定

- どのように地震動を選ぶの?・・・考え方と選定方法
- どんな地震動を選んだの? ・・・・3タイプの地震動

どのように地震動を選ぶの?

基本的な考え方

- NUMO技術レポート(2011)の検討用地震動(以下,「2011検討地震動」)に 加えて、プレート間地震と内陸地殻内地震をそれぞれ選定する。
- これまでに観測された国内最大級の地震動を選定する。

選定方法

- わが国の強震観測網K-NET¹⁾, KiK-net²⁾(公開記録)から選定
- V_s=2,000m/s 以上の地盤(岩盤)で観測された地震波から選定
 - ⇒ 地震基盤の条件に近く、処分深度の地震動を考える場合の基準に成り得る。
- ・最大加速度(水平成分)が500gal以上

⇒「2011検討地震動」の最大加速度は 531gal

- 1) K-NET:全国強震観測網。強震計は地表に設置。
- KiK-net:基盤強震観測網。強震計を地表と地中に設置。 KiK-netは観測点が深く,地表面の反射波が小さいと考えられること から(F≒0),観測記録を2倍したもので((E+F)×2=2E), K-NETの観測記録(2E)と比較する。

■ 選定した3タイプの地震動

タイプ	地震名	観測点	設定 最大加速度 (gal)	設定方法
2011検討 地震動	_	-	水平:531 鉛直:308	距離減衰式に基づく経験的な方法 (耐専スペクトル適合波) ・マグニチュード:Mj=8.0 ・等価震源距離:Xeq=25km
プレート間 地震動	2011年 東北地方 太平洋沖 地震	牡鹿 (K−NET)	水平:1032 鉛直:381	閉鎖後長期の問題を扱うため, 原波形の加速度振幅を保守的に 1.5 <mark>倍</mark> にした波形を設定
内陸地殻内 地震動	2000年 鳥取県西部 地震	伯太 (KiK−net)	水平:823 鉛直:589	閉鎖後長期の問題を扱うため, 原波形の加速度振幅を保守的に 1.5倍にした波形を設定

どんな地震動を選んだの?(2)・・・検討用地震動の比較(水平動)

2011検討地震動,プレート間地震動,内陸地殻内地震動



P.10

2. 実施内容 (2)耐震安定解析

- どういう条件で解析するの?・・・・・解析条件
- どんな解析をするの?・・・・・・解析方法
- どんなモデルで解析するの?・・・・・解析モデル
- 物性はどのように設定したの?・・・・物性設定
- どんな結果が得られたの?・・・・・・解析結果

どういう条件で解析するの?・・・・解析条件

■ モデル化する人エバリアの方式:HLW横置き定置方式



人工バリアの状態:緩衝材が飽和, OPの腐食が発生していない状態

	条件	状態
状態1	不飽和	定置後緩衝材の膨潤が完了する前。処分孔と緩衝材の間 に隙間が残存する状態。
状態2	飽和	緩衝材は飽和しているが,オーバーパックの腐食が発生し ていない状態。処分孔と緩衝材は密着している。
状態3	飽和	オーバーパックが腐食が進展し、腐食膨張が発生した状態。

どんな解析をするの?・・・・解析方法



NUMO

どんなモデルで解析するの?(1)・・・地盤モデル

地盤モデル:NUMO技術レポート(2011)の検討地盤(第2次取りまとめ軟岩系岩盤モデル)



どんなモデルで解析するの?(2)・・・三次元解析モデル ・三次元解析モデルは、地表から深度-520mまでをモデル化 ・前出地盤モデルに対して、一次元地震応答解析を実施し、深度-520mの加速度波形を三次元 モデルの底面に入力 3.13m ・加振方向は、水平および鉛直の二方向 Γ^Zγ ■ 人エバリア 緩衝材(*o* 2220) 側面図 側 ・オーバーパック(ϕ 820 × 1730) 面 ガラス固化体(*d* 440 × 1350) 多 点 緩衝を 拘束 深度-500m ガラス固化体 520m条件(繰 オーバーパック 返 界面 L (ジョイント要素) 境界 正面 深度-520m 底面:粘性境界 12.5m加振方向(水平,鉛直の2方向)

物性はどのように設定したの?

構成要素	力学モデル	材料定数の設定方法
緩衝材	弾塑性(二相系)	・第2次取りまとめ ・既往粘性土繰返し試験結果(兵動, 2011)
オーバーパック	弾塑性	•炭素鋼物性(SF340A)
ガラス固化体	弾性	・第2次取りまとめ
地盤(岩盤)	弾塑性	・NUMO-TR-10-13(2011) ・第2次取りまとめ

■ 緩衝材の材料定数の設定

- ・大きな地震動 ⇒ 緩衝材が破壊することも考慮した設定
- ・緩衝材(ベントナイト)の動的強度が得られていない

粘性土に対する既往の繰返し三軸試験データから設定

兵動正幸(2011):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, Vol. 29, No.1, pp.1-9, 2011.

どんな結果が得られたの?

- 緩衝材はどんな動きをしているの?
- 人工バリアと岩盤は一緒に動いているの?
- 人工バリアは地震で壊れるの?

緩衝材はどんな動きをしているの?(1)

最終時刻における緩衝材の体積ひずみと過剰間隙水圧の分布 (牡鹿波:プレート間地震動)



■ 正の体積ひずみの発生(ひずみ量はわずか)⇒ 緩衝材は<mark>膨張している。
 ■ 負の間隙水圧の発生(初期拘束圧の約4割と大きい)
</mark>



人工バリアと岩盤は一緒に動いているの?





緩衝材の有効応力経路(偏差応力と平均有効応力の関係)

出力位置

 $oldsymbol{eta}$



人工バリアは地震で壊れるの?(2)・・・オーバーパック オーバーパックのミーゼス応力の最大応答値分布 2011検討地震動 ■ ミーゼス応力:多方向から荷重が作用するような¦ max 0.91MPa 応力場において、一軸の引張り応力または圧縮 (1/192)応力に置き換えた値 ※ ()は<mark>降伏応力 175MPa</mark> に対する割合 0.00 0.18 0.37 0.55 0.73 牡鹿波(プレート間地震動) 伯太波(内陸地設内地震動) max 1.07MPa max 1.69MPa (1/163)(1/104)X Y 0.68 1.01 0.34 1.35 0.00 1.69 0.43 0.64 0.00 0.22 0.86 1.07 オーバーパックは降伏に至っていない。 オーバーパックは地震の"ゆれ"で壊れない NUMO





「第2次取りまとめ」の見解を踏まえ、地震動の"ゆれ"による人エバリアの力学的安定性について、最新の方法により評価した。

- 検討用地震動
 - 検討用地震として、「2011検討地震動」に加えて、わが国最大級の地震観測記録から「牡 鹿波(プレート間地震動)」、「伯太波(内陸地殻内地震動)」を選定した。

■ 耐震安定解析

- 最新の力学モデルを用いた二相系の解析により、地震動中の緩衝材の詳細な"ふるまい"
 を知ることができた。
- 人工バリアと周辺岩盤が一体となって振動していることを確認した。
- 地震動により発生する応力は、「伯太波」、「牡鹿波」、「2011検討地震動」の順で大きいものであった。
- わが国最大級の地震動にもかかわらず、いずれのケースについても、人工バリアの破壊が問題となるような応力の発生は、認められなかった。





Ⅰ耐震安定解析

- 閉鎖後長期の問題である状態3(飽和後腐食膨張)における評価を実施し、人工バリアの挙動と地震による影響を照査する。
- 閉鎖後長期の地震影響評価手法の検討(類似施設の評価手法との整合)

|緩衝材の物性

- ベントナイトの動的強度の取得等,繰返しせん断特性に関する試験データの 拡充
- ・ 地震のような応力履歴を繰り返し受けることによる、透水性や圧密特性への影響等について、試験データの取得

工学規模の実験

 相似則により実規模相当の実験が可能な遠心載荷模型実験による実証的な 検討

更なる信頼性の向上