

## 高レベル放射性廃棄物処分施設の人工バリアの地震応答特性

(株)大林組 正会員 ○佐藤 伸, 伊藤 浩二  
 原子力発電環境整備機構 正会員 山本 陽一, 鈴木 寛

### 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分の閉鎖後長期の安全性を確保するためには、地震動に対する人工バリアの力学的安定性について評価しておく必要がある。この問題に対して、核燃料サイクル機構（現、JAEA）では、処分施設の耐震検討を実施して、地震が人工バリアの力学的安定性に有意な影響を及ぼさないことを確認している<sup>1)</sup>。一方、緩衝材の構成モデルに比較的簡便な方法を用いていたことから、詳細なモデル化の必要性が課題に挙げられていた。その後、動的な問題に対しても地盤工学分野における数値解析技術の進展が認められるため、人工バリアの力学安定性を詳細なモデルにより再評価することとした。本報では、高レベル放射性廃棄物処分施設の振動特性が応答値に及ぼす影響について検討した。

### 2. 検討に用いた地震動

検討用地震動は、原子力発電所耐震設計技術指針の距離減衰式に基づいた経験的な方法（耐専スペクトル）により設定する。さらに、国内で観測された最大級の地震動としてプレート間地震動と内陸地殻内地震動のタイプ別に選定する。ここで、多くの強震観測記録の中から選定を行うため、次の三つ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する。一つ目は、強震観測網 K-NET, KiK-net（公開記録）から選定、二つ目は、最大加速度（水平成分）が 500gal 以上の地震波、三つ目は  $V_s=2000\text{m/s}$  以上の剛性の高い地盤で観測された地震波から選定した。なお、KiK-net の場合は、地中の地震記録（E+F）を 2 倍したものを保守的に 2E 波と見なして、解放基盤相当の K-NET の観測記録との比較に用いた。選定の結果、プレート間地震動については、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を選定し、内陸地殻内地震動については、2000 年鳥取県西部地震における伯太（KiK-net）を選定した。解析に用いる疑似速度応答スペクトルを図-1 に示す。なお、観測波は耐専スペクトルに対し、同等あるいはそれ以上の速度スペクトルを有するように速度振幅を 1.5 倍とした。

### 3. 解析モデル

三次元解析のモデル概念図を図-2 に示す。検討モデルは、地盤、緩衝材、オーバーバック、ガラス固化体（廃棄体）をそれぞれモデル化している。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<sup>2)</sup>を用いた。本検討で着目する緩衝材の構成モデルには、下負荷面モデル<sup>3)</sup>を適用する。材料定数の設定については、文献 4) を参照いただきたい。解析において、ベントナイト系材料である緩衝材の膨潤応力は試験結

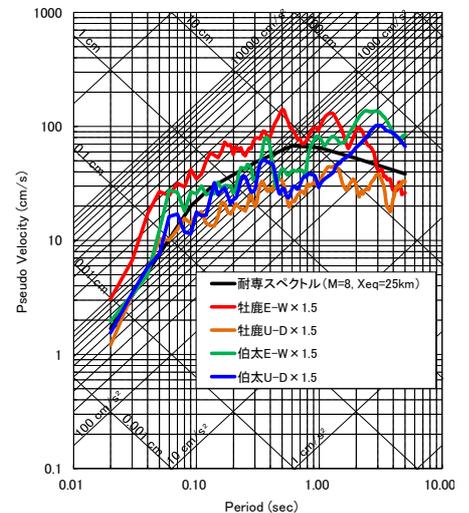


図-1 解析に用いた地震動の疑似速度応答スペクトル

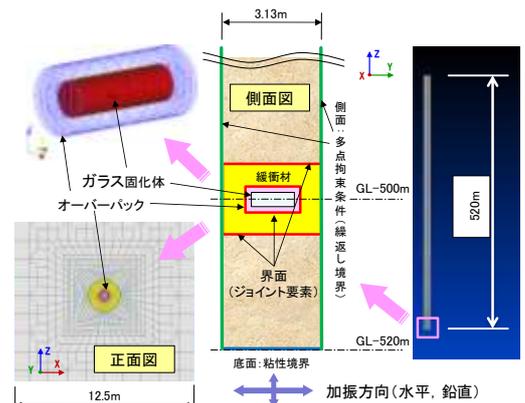


図-2 解析モデル

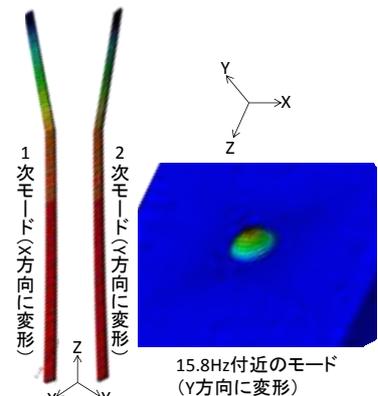


図-3 固有値解析から得られたモード図

キーワード 人工バリア, 地震応答解析, 有効応力解析, 下負荷面, ベントナイト

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 (株)大林組原子力発電環境技術部 TEL 03-5769-1309

果から 500kPa とし、これを緩衝材の初期有効応力と考え緩衝材の土骨格に作用させている。

4. 固有値解析

固有値解析で用いた解析コードは Abaqus とし、境界条件は、側面が図-2 に示す地震応答解析と同様に多点拘束として底部は固定とした。固有値解析結果として、1 次から 5 次までの周波数と有効質量比を表-1 に示す。また、有効質量比の大きい代表的な変形モード図を図-3 に示す。ここで、低周波数における変形モードは岩盤の振動モードであることが分かる。一方で、後述の水平方向の地震応答解析結果では 15Hz から 16.5Hz 付近の振動数にピークが生じたことからこの付近の振動モードについても分析を行う。対象周波数領域の固有周波数と有効質量を表-2 に示し 15.8Hz 付近の固有振動モード図を図-3 に示す。ここで、この付近の周波数域では人工バリアが振動するモードとなっているのが分かる。

5. 地震応答解析結果

固有値解析の結果から、低周波数領域は岩盤が応答する周波数領域であり、16Hz 付近は人工バリアが振動する周波数領域であることが分かった。そこで、解析から得られたオーバーパック部の時刻歴加速度応答波形のフーリエスペクトル作成し図-4 に示す。ここで、先ほど示した固有値解析で人工バリアが振動する周波領域（16Hz 付近）でフーリエスペクトルのピークが生じる結果となっているのが分かる。フーリエ振幅の大きさとしては、入力地震動のスペクトルと同様に牡鹿波、伯太波及び耐専波の順に大きくなっている。また、伯太波については 16Hz 付近の振幅が卓越する。

次に、地震動に対する緩衝材の健全性について考える。緩衝材中央下部におけるそれぞれの検討地震動に対する有効応力経路を、平均有効応力  $p'$  と偏差応力  $q$  の関係にして、図-5 に示す。ここで、応力比が最も大きくなるのは伯太波による解析結果である。これは、入力地震動が岩盤の卓越振動数帯に比べ人工バリアの卓越振動数帯にピークを持っており、岩盤の固有周期である 1Hz~2Hz 付近のスペクトルが小さいために人工バリアがより振動しやすい結果になったと考えられる。一方で牡鹿波については、地震動の継続時間が 150 秒と他の地震波よりも長く、繰返し回数が多いことから、有効応力が 30kPa 程度低下する結果となった。ただし、本検討から得られた応答値は伯太波における最大でも限界状態線に対して 0.108 倍の比率であり、十分に裕度があることを示している。

6. おわりに

本検討では、放射性廃棄物処分施設の有効応力法による耐震検討を地震動特性と振動特性に着目して検討を行った。検討の結果、岩盤の固有周期帯のスペクトルが比較的に低く、人工バリアの固有周期帯付近に卓越周期を有する地震波が入力された場合が最も人工バリアに影響を及ぼすことが分かった。ただし、これまでに経験した最大級の地震動が人工バリアに入力されても緩衝材の限界状態に対して十分に裕度があることが分かった。今後は下負荷面モデルの緩衝材への適用性とパラメータの取得方法を要素試験の再現解析等により行っていく予定である。

参考文献 1)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—, JNC TN1400 99-022, 1999., 2) 伊藤, 江尻：地震時および地震後の液状化対策地盤の変状評価, 大林組技術研究所報, No.78, 2014., 3)Hashiguchi and Chen：Elastoplastic constitutive equation of soil with the subloading surface and rotational hardening, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., vol.22, 197-227, 1998., 4) 山本, 鈴木, 佐藤, 伊藤：地震動が地層処分システムの人工バリアに及ぼす影響検討, 第34回地震工学研究発表会講演論文集 (CD-ROM), 2014.

表-1 1次から5次までの有効質量比

NO	周波数	有効質量		
		X方向成分	Y方向成分	Z方向線分
1	0.5554	<b>37923</b>	3.03906E-12	1.95453E-23
2	0.5556	3.03989E-12	<b>37915</b>	4.5416E-23
3	1.2265	2.01019E-23	3.16743E-23	<b>37790</b>
4	2.1107	<b>3341.9</b>	1.62504E-16	1.70876E-24
5	2.1118	1.59018E-16	<b>3342.2</b>	1.34015E-23

表-2 人工バリアが振動するモードの有効質量比

NO	周波数	有効質量		
		X方向成分	Y方向成分	Z方向線分
182	15.253	1.57566E-24	2.5982E-24	<b>266.91</b>
196	15.787	4.77185E-20	<b>12.753</b>	7.47172E-21
204	16.055	<b>56.184</b>	1.56598E-19	3.21747E-21
212	16.313	2.04147E-20	<b>38.893</b>	1.78402E-20

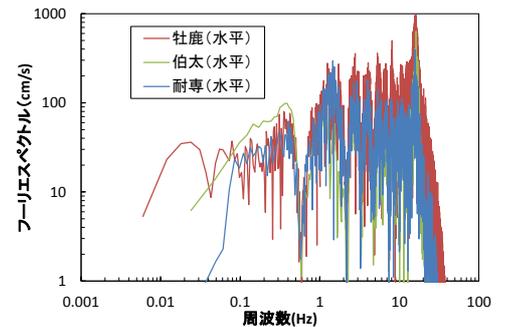


図-4 フーリエスペクトル

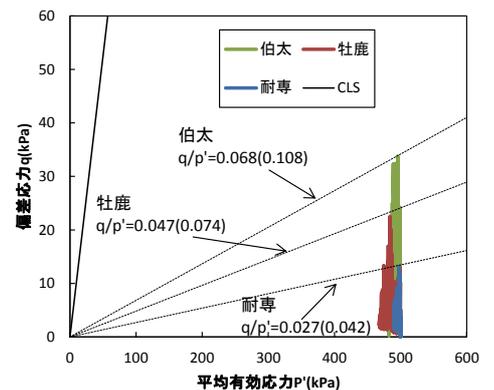


図-5 有効応力経路