高レベル放射性廃棄物地層処分施設の耐震性評価のための 地下深部地震動特性

駒 田 広 也*

Characterisity of Seismic Waves at Deep Underground for Earthquake Resistance Evaluation of Geological Disposal Facility of High Level Radioactive Waste

Hiroya KOMADA*

Key words : 地層処分 geological disposal, 耐震観測 earthquake observation, 地下深部
deep underground, 耐震性 earthquake resistance

Abstract

The deep underground seismic characteristics which will play an important role in assessing the earthquake resistance of high-level waste geological disposal facilities were examined based on the results of seismic observations conducted at the Shiroyama Underground Hydroelectric Power Station and Hosokawa Mine, and the following results were obtained.

- (1) Little amplification is recognized in the acceleration of seismic motion from the deep underground part to the neighborhood of 100 m below the surface, but amplification in the seismic motion increases in the surface layer. That is, the maximum acceleration in the underground part deeper than 100 m below the surface decreases to about 1/2 of that on the surface part.
- (2) The frequency spectra of seismic motion in the underground part have a simplified shape as compared with those in the surface part. Furthermore, the values of the response spectra in the underground part decrease more than those on the ground surface as the epicentral distance becomes shorter.
- (3) The vertical angle of incidence of seismic waves in the deep underground part is about 35° max. against the vertical direction. On a seismic design input to geological disposal facilities, therefore, it will be necessary to examine the incidence directin of seismic waves as a parameter.
- (4) In the caverns whose size is similar to that of tunnels in the geological disposal facilities, it can be judged that there is little amplification in the seismic motion due to the effect of the caverns.

1. ま え が き

高レベル放射性廃棄物地層処分は、数百 m から1000

m の地下深部に廃棄物を埋設処分することが一般的な概念となっている。また、処分施設の建設が開始されると予想される西暦2030年頃までに発生する廃棄体は4万本程度が見込まれており、仮に深部坑道内における廃棄体の設置間隔を5 m として考えると、坑道の総延長は200 km にも及ぶことになる。さらに、坑道の離間距

* 銚電力中央研究所 我孫子研究所 原燃サイクル部
Nuclear Fuel Cycle Department, Abiko Research Laboratory, CRIEPI.

離を8m(坑道径を4mとして、2×坑道径を離間距離とした)として単純に矩形配置した場合、その平面的広がり約1.6km×1.6kmにも達する。つまり、大規模な坑道群が地下深部に建設されることになり、例を示すと図-1のようになる。

ここでは地層処分施設の耐震性評価の概念を示し、耐震性評価に重要な地下深部地震動特性を地下地震観測結果から考察する。

2. 地層処分施設の耐震性評価概念

地層処分施設のうち、耐震性評価の対象とする施設を立坑、坑道等の地下施設に限定した場合、耐震性評価を検討するに当たって、以下に示す評価概念に着目する必要がある。

(1) 閉鎖前と閉鎖後

地層処分施設を構成する各坑道は、廃棄物の搬入後埋め戻されるため、埋め戻しの前後で施設の形態が異なる。そのため、耐震検討の目的および対象が変わる。特に、閉鎖後処分場の安全性に関する担保期間が数万年に及ぶ。閉鎖前では、立坑、坑道の地震時安定性評価が必要であり、評価対象期間は約百年と考えられる。

閉鎖後は、人工バリアと天然バリアの安全性能に影響を及ぼす事象を挙げる必要がある。まず処分ピットに着目すると、廃棄体周囲の緩衝材に対する影響として地震時の慣性力や間隙水圧の変化に伴って変形が生じ、性能上必要な緩衝材の厚みが失われるという懸念が考えられる。次に処分坑道をはじめとする各坑道に対しては、埋め戻し材への繰り返し発生する地震の影響として、埋め戻し材が塑性変形し、やがて水みちとなる空隙が生じるという懸念が考えられる。一方、天然バリアである岩盤に対しては、地下坑道群が建設されることによる岩盤応力の変化が引き金となって新たな亀裂が地震時に発生する事象が考えられる。このとき、数千年から一万年の間に引き起こる最大規模の地震力の設定が従来にはない問題となる。

(2) 立坑と地下深部坑道

数百mから1000mの長さを持つ地上と地下を連絡する立坑への地震の影響としては、地層が変わることで動的物性が変化し、この場合通常の動的解析を実施すると、動的物性に応じた形で地盤の応答が得られる。この結果、層界面を境にしてギャップが生じ、垂直搬入装置や配管等の設備に支障をもたらすことが懸念される。

一方、2km四方程度の面的な広がりを持つ地下深部坑道に関しては、地震波入力による単一の空洞の安定性のほかに、空洞間の干渉の問題がある。特に、斜め入射

図-1 高レベル放射性廃棄物地層処分施設の例

による影響は検討すべき事項である。例えば、一定距離間隔で続く坑道が、特定の周期の地震波に対して横方向に干渉し合い、坑道周辺の岩盤に大きなせん断変形を生じさせる懸念がある。

(3) 空洞の安定性と地下水挙動

空洞の安定性に関しては、(1)および(2)で示した事象がすべてとおおむね考えられるので、放射性物質の移動の観点から、地震による地下水流動の変化を考慮する必要がある。

地震現象に伴う地下水の変化は、これまでの地上付近の記録においては見られるが、どの程度の深さまで影響を及ぼしているかは定かでない。仮に影響があるとする、天然バリアである岩盤中の地下水流動場が変化したことを意味するので、重要な事象と考えられる。

3. 地下地震観測例

我が国で水力地下発電所、鉱山、トンネル等の岩盤内構造物を利用して、地下地震観測を実施している観測点を図-2に示す。これら観測点の深さは地表からせいぜい500m程度であり、地層処分施設の対象となる1000m程度の深さにおける観測データは得られていない。しかし、これらの観測データから、1000m程度の地下深部における地震動を推定することはある程度可能と考える。

図-4 山頂地表部と地下空洞底部との最大加速度比

図-5 山頂地表部と山麓との最大加速度比

図-6 地下空洞底部と山麓との最大加速度比

図-7 地下空洞底部と地下空洞中高部側壁との最大加速度比

3.2 細倉鉱山²⁾

細倉鉱山は宮城県北部に位置し、地震観測の対象とした地点付近には急峻な山もなく、岩盤は良好な安山岩、石英安山岩、凝灰岩から成っている。地震計が設置されている立坑付近では地表から深度400 mにかけて V_p は3.5~4.7 km/sである。加速度地震計の配置は図-10に示すように、8箇所の測点で地表から深さ383 mにおいて420 m, 600 m, 720 mの各辺をもつ三角形を形成し、この平面上の3点と上部の測点によって三角錐状の立体アレー観測を実施した。

これまでに得られた結果は以下のとおりである。

(1) 地表付近岩盤に対する地下の最大加速度は、地下約180 mまでにおいて、水平方向で約6割、鉛直方向で約7割に減少するが、それ以後さらに減少する傾向はほとんど認められない(図-11)。この現象は、前述の城山水力地下発電所地点とはほぼ同様な結果であり、また、解析結果から水平方向の地中震度分布を定式化した提案式³⁾を併記した。地表部の観測点 H-1 が地表下39 mであり、地表の震度よりすでに低減していることを考慮すると、観測値は提案式におおむね一致してい

D : 震源距離 M : マグニチュード
図-8 絶対加速度応答スペクトル

図-10 細倉鉱山における地震計の位置

図-9 地下空洞内の底部と中高部側壁の加速度波の位相関係 (地下空洞短軸方向の位相相関)

図-11 細倉鉱山の測点 H-1 を基準とした各測点の加速度振幅比

る。したがって、地層処分施設の対象となる地下数百 m 深部における地震力の推定に、この提案式を用いることが可能であると判断される。

なお、上述の提案式は以下の通りである。すなわち、成層構造を示す硬質岩盤での地震観測記録に基づき、数

$$H_1 = \frac{1}{4} V_s \cdot T$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} \sqrt{1 + (V_s/V_B)^2}$$

ここに

V_s : 基盤より表層の S 波速度

V_B : 基盤の S 波速度

T : 入射波の加速応答スペクトルの卓越周期

加速度 (正規化震度)

図-12 地中地震動の深さ方向低減特性提案式³⁾

値解析によって地中地震動の低減値を図-12のように提案した。図-12に対して、細倉鉱山での地盤特性を考慮して、 $V_s=1000$ m/s, $V_B=2000$ m/s, $T=0.4$ s とすると $H_1=100$ m, $\alpha=0.56$ を得る。

(2) 観測地震波の周波数特性は地震毎にかなり異なるが、地下深部から地表部への地震波伝達特性は地震によらずほぼ同じ特性となることが得られた (図-13)。したがって、地盤特性に応じて設定した伝達特性を用いて、地表付近で観測された地震波から地下深部施設の耐震設計入力波を推定できることが確認された。

(3) 非定常スペクトル分析により地震波特性時間変化

$$\text{伝達特性} = \frac{\text{地表部フーリエスペクトル}}{\text{地下最深部フーリエスペクトル}}$$

図-13 地下深部より地表部への伝達特性の震源地による比較

図-14 非定常スペクトルの地表部と地下最深部の比較

を調べた。地下深部においても、地表部と同様に時間の経過とともに低周波数（0.7 Hz 以下）成分が卓越するが、地表付近の複雑な地層や地形の影響によると考えられる地表部での高周波（1 Hz 以上）成分が地下深部では減衰している（図-14）。この現象から地下深部における地震波スペクトルは地表部より単純化されることがわかる。

(4) 立体アレー観測記録から地下深部における地震波の入射方向を解析した。地震波の平面入射方向は観測点からの震央方向とはほぼ一致している。一方、地震波の鉛直入射角は鉛直に対して約 $3\sim 35^\circ$ の範囲となり、また、震源と観測点間の構造から求めた理論値約 $26\sim 33^\circ$ に照らしても、地下深部では鉛直入射角を有することが明らかとなった（図-15、表-1）。したがって、地下深部構造物に対しては斜め入射の影響が考えられ、耐震設計入力には地震波の入射方向をパラメータとする検討の必要性が示唆された。

4. 地下地震動の特性

これまでに得られた城山地下発電所、細倉鉱山、その他の岩盤内地下構造物で観測された結果から、地下地震動について以下のような知見が得られている。

(1) 城山および沼原⁴⁾の地下発電所での観測結果から、100 m 以深の地下における最大加速度は地上の $1\sim 1/2$ 程度になることが得られている。一方、落合⁵⁾および池原⁴⁾の地下発電所での観測結果から、100 m 以浅の地下における最大加速度は、深い場合に比較して、地下での地震の低減が小さいことが得られている。

(2) 地下深部から表層100 m 付近までは、地震動の加速度振幅の増幅はほとんど見られないが、表層付近では地震動の増幅が大きくなる。

(3) 地下部での地震動の低減には地震波の周波数が高くなる程大きくなる傾向にある。

(4) 地表付近では、地形や地盤特性が複雑であるのに

図-15 立体アレー観測による平面入射方向

対して、地下部ではこれらの影響が少なく、地下部における地震動の周波数スペクトルの形状は地表部に比較して単純化される。さらに、地下部の応答スペクトル値は地上に比べて震源距離が短いほど減少している。

(5) 地下深部における地震波の鉛直入射角は鉛直に対して最大 35° 程度となり、地下深部構造物に対する耐震設計入力には、地震波の入射方向をパラメータとする検討の必要性が示唆された。

(6) 地震波の周波数特性は地震毎にかなり異なるが、地下深部から地表部への地震波伝達特性は地震によらず、同一観測地点ではほぼ同じ特性となることが得られた。したがって、地盤特性に応じて設定した伝達特性を用いて、地表付近で観測された地震波から地下深部施設の耐震設計入力波を推定できることが確認された。

(7) 地下処分施設における坑道程度の大きさの空洞では、空洞の影響による地震動の増幅はほとんどないと判断できる。

表-1 地震波鉛直入射角の観測値と理論値の比較

地震番号	観測記録から算定	地殻構造理論から算定
5	26.4°	26.8°
6	2.9°	31.5°
9	25.1°	29.5°
14	36.1°	29.5°
16	17.6°	31.1°
18	22.4°	32.1°
22	27.9°	32.3°

5. お わ り に

高レベル放射性廃棄物地層処分のうち、地下施設の耐震性評価のための深部地震動特性を、岩盤内地下構造物で観測された結果に基づいて考察した。

ここで考察した深部地震動特性の一般化を図るには、さらに多くの地点での観測データを蓄積する必要がある。さらに、地層処分を対象とした場合、現状ではデータはほとんどない深さ1000 m 程度における地震波を観測する必要がある。

なお、本研究の一部は電力中央研究所が動力炉・核燃料開発事業団と共同研究したものであり、資源素材学会・地震に関する調査研究委員会（委員長 京大佐々宏一）で審議された。

参 考 文 献

- 1) 駒田「地下空洞における地震観測—横型地下空洞の地震時挙動—」電中研報告385043, 昭和61年6月
- 2) 駒田, 他「立体アレー観測による地下深部の地震挙動—細倉鉱山における地震観測—」電中研報告 U88074, 平成元年8月
- 3) 佐藤, 他「地中地震動の深さ方向の低減特性とその定式化」電中研報告 U385043, 昭和61年6月
- 4) 市川, 他「地下空洞の耐震設計」電源開発(株)調査資料 No. 71
- 5) 駒田, 他「地下空洞における地震観測—円筒ビット立型地下空洞の地震時挙動—」電中研報告 U86031, 昭和62年3月

(1991年8月15日受付, 1991年11月30日受理)