

地震観測記録に基づく 地下の地震動伝播特性の把握

新美 勝之^{1*}・小林 伸司¹・佐藤 稔紀²・見掛 信一郎³

¹清水建設株式会社 土木技術本部 (〒104-8370 東京都中央区京橋2-16-1)

²国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター 堆積岩地質環境研究グループ
(〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432番)

³国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター 施設建設課
(〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64)

*E-mail: niimi@shimz.co.jp

日本原子力研究開発機構は、瑞浪超深地層研究所の換気立坑の地表と深度100m、300m、500mの接続部に地震計を設置して、地震動の鉛直アレイ観測を実施しており、2008年から2014年までの間に19の地震を観測している。本報告では、地層処分施設等の大深度地下構造物の耐震性を評価する際に重要となる地下深部での地震動の伝播特性を把握することを目的として、これらの地震観測記録を分析して検討した。その結果、震央距離が非常に短い直下震源地震では、一次元重複反射理論に基づく波動伝播解析と高い整合性が確認できたが、一方で震央距離が震源の深さ程度の近距離の地震では、斜め下方からの入射によると思われる影響が見られることを確認した。

Key Words : Mizunami Underground research laboratory, geological disposal, seismic wave propagation,

1. はじめに

日本原子力研究開発機構では、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の基盤となる深地層の科学的研究の一環として、岐阜県瑞浪市において結晶質岩を主な対象とした超深地層研究所計画を実施しており、その中で深地層の研究施設である瑞浪超深地層研究所（以下、研究所）の建設を行っている。超深地層研究所計画は、「深部地質環境の調査・解析・評価技術の整備」及び「深地層における工学技術の基盤の整備」を全体目標としている。後者では、次の4つの個別研究課題を設定し研究開発を進めている¹⁾。

- (1) 設計・施工計画技術の有効性の確認
- (2) 建設技術の有効性の確認
- (3) 施工対策技術の有効性の確認
- (4) 安全を確保する技術の確認

研究所では、地表と地下の深度100mと300m、500mに地震計を設置して、地震動の鉛直アレイ観測を実施しており、2008年から2014年までの間に19の地震を観測している²⁾。

本報告では、地層処分施設等の大深度地下構造物の耐震性を評価する際に重要となる地下深部での地震動の伝



図-1 瑞浪超深地層研究所レイアウト

播特性を把握することを目的として、震央距離と地震動伝播特性の関係に着目して地震観測記録を分析して、検討する。

2. 瑞浪超深地層研究所の概要

研究所は岐阜県瑞浪市の標高200m程度の丘陵地にあり、図-1に示すように、主立坑（内径6.5m）及び換気立坑（内径4.5m）と深度100m 毎に両立坑を連絡する水平坑道（予備ステージ）、ボーリング調査等を行うための水平坑道（ボーリング横坑）、深度300m研究アクセス坑道、深度500m研究アクセス北及び南坑道等の研究坑道掘削工事を行っている。研究坑道掘削工事は2003年7月に主立坑及び換気立坑の坑口付けに着手し、主立坑は2011年7月に、換気立坑は同年4月にそれぞれ深度500mに到達し、2014年2月に深度500m レベルでの水平坑道の掘削が完了した。

研究所周辺の地質は、深度167m 付近を不整合面に、基盤として分布する結晶質岩（土岐花崗岩）の上位に新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群）が分布している。

3. 地震観測の概要

地震観測は、地表2ヶ所と、換気立坑の深度100m、300m、500mの接続部、および主立坑の深度300mの接続部の計10ヶ所に地震計を設置して、地震時の加速度を鉛直アレイ観測している。地震計の設置状況を、図-2に示す。

地震観測を開始した2008年から2014年末までの間に観測した19地震について、地震発生日時と震源の位置、地震の規模、近傍の地震観測点での震度、地震計ごとに観測された加速度の最大値の一覧を、表-2に示す。深度300mと500mの地震計は、掘削工事の進捗に伴って設置している。また、地表の地震計は、2014年5月に増設している。また、地震計設置後の機器の不具合等によって、地震によっては一部の計器で観測記録がとれていないものもある。

観測した地震のうち、観測加速度が最大の地震は、2011年12月14日に岐阜県美濃東部で発生したM5.1の地震（表-1中のNo.12）で、震源位置は研究所のほぼ真下の深さ49kmにあたる。この時の最大加速度は水平東西方向（EW）66.6 Galである。



(1) 地表 A



(2) 地表 B



(3) 地下接続部（深度 100m）

図-2 地震計の設置状況

4. 地震観測記録に基づく地震動伝播特性の評価

本報告では、表-1に示した地震観測記録の中から、震源と研究所との位置関係の性質が異なるNo.12の2011年岐阜県美濃東部の地震とNo.13の2012年愛知県西部の地震の観測記録を対象に検討して、地震動伝播特性を評価して考察する。

No.12の2011年岐阜県美濃東部の地震は、震源は研究所のほぼ真下で、その深さは49kmである。そのため、地震動の実体波は、ほぼ鉛直下方から入射するものと考えられる。一方、No.13の2012年愛知県西部の地震は、震央距離が21km、震源の深さが45kmであり、研究所から震源は、鉛直に対して約25度斜め下方に位置している。

両者の波動伝播特性を比較することにより、地下深部での地震動の伝播特性について検討する。

(1) 検討方法

地震動伝播特性の評価は、地表と地下の地震観測記録から、フーリエスペクトル比と位相差を算出して検討する。まず、各深度で観測された加速度時刻歴データのうち水平EW方向成分について、フーリエ変換によりフーリエ振幅と位相を算出する。そして、深度の異なるフーリエスペクトルからフーリエスペクトル比を算出するとともに位相差にも着目して、深度間の地震動の伝播特性を把握する。スペクトルの比較は、深度100mと深度300mの観測記録を基準として、地表A地震計の観測記録

表-1 観測した地震の一覧

No	発生日時*	震源*	瑞浪市の震度*	最大加速度 [Gal]、方向				
				地表A	地表B	GL-100m	GL-300m	GL-500m
1	2008.11.24 06:15	岐阜県美濃東部 深さ11km、M3.9	1	12.0 EW	—	6.6 EW	—	—
2	2009.5.25 20:26	静岡県西部 深さ26km、M4.7	2	5.6 EW	—	3.1 EW	1.8 NS	—
3	2009.7.14 03:57	岐阜県美濃東部 深さ50km、M3.5	2	6.5 EW	—	3.2 EW	1.9 NS	—
4	2009.7.27 09:44	愛知県西部 深さ41km、M4.0	2	8.2 NS	—	3.1 NS	1.9 EW	—
5	2009.8.11 05:07	駿河湾 深さ23km、M6.5	3	30.8 EW	—	14.7 NS	6.6 EW	—
6	2011.3.11 14:46	三陸沖 深さ24km、M9.0	3	10.4 NS	—	7.7 NS	5.0 UD	—
7	2011.3.11 15:15	茨城県沖 深さ43km、M7.6	2	2.3 EW	—	2.0 NS	1.3 UD	—
8	2011.3.12 03:59	長野県北部 深さ8km、M6.7	2	4.8 NS	—	2.4 NS	1.0 NS	—
9	2011.3.15 22:31	静岡県東部 深さ14km、M6.4	2	9.1 EW	—	4.2 NS	1.8 NS	—
10	2011.4.11 17:16	福島県浜通り 深さ6km、M7.0	1	1.3 NS	—	1.0 NS	0.58 NS	—
11	2011.8.1 23:58	駿河湾 深さ23km、M6.2	2	—	—	5.7 EW	1.9 UD	—
12	2011.12.14 13:01	岐阜県美濃東部 深さ49km、M5.1	3	66.6 EW	—	39.6 EW	28.6 EW	—
13	2012.5.5 18:56	愛知県西部 深さ45km、M4.3	2	12.0 EW	—	4.9 EW	4.4 NS	2.3 NS
14	2013.2.6 13:42	愛知県西部 深さ48km、M4.1	1	7.9 EW	—	4.6 EW	3.9 NS	1.9 EW
15	2013.8.3 09:56	遠州灘 深さ34km、M4.9	2	8.3 NS	—	3.4 NS	1.5 EW	0.88 NS
16	2014.3.14. 02:06	伊予灘 深さ78km、M6.2	1	2.8 NS	—	1.8 EW	0.46 NS	0.24 NS
17	2014.9.16 12:28	茨城県南部 深さ47km、M5.6	2	—	2.6 NS	0.97 EW	0.43 NS	0.21 NS
18	2014.11.22 22:08	長野県北部 深さ5km、M6.7	2	4.5 NS	5.1 NS	2.1 NS	0.88 UD	—
19	2014.12.3 23:19	愛知県西部 深さ45km、M4.2	2	—	13.4 NS	—	—	—

*「発生日時」「震源」「瑞浪市の震度」は、気象庁ホームページ (<http://www.data.jma.go.jp>) 「震度データベース検索」より引用

との間で評価した。

また、地上からの調査予測研究段階³⁾の際に実施した換気立坑の耐震設計で用いた推定地盤構造に対して、一次元重複反射理論による地盤の地震応答解析(SHAKE)⁴⁾により伝達関数と位相差の理論値を算出して、これを観測記録から得られたフーリエスペクトル比と比較して、考察を加える。解析に用いる地盤構造を、表-2に示す。

(2) 震源が観測地点の直下の地震

震源が観測地点直下の地震として、No.12の2011年岐阜県美濃東部の地震の観測記録を用いて検討する。

深度300mと深度100mの観測記録を基準とした場合の地表の観測記録とのスペクトル比と位相差を、図-3に示す。なお、図には解析で得られた理論曲線も併せて示した。

深度300mを基準としたケースでは、スペクトル比は設定した地盤モデルの理論曲線に対して、ピークの値は小さいが、概ね良く一致した結果となっている。一方、観測記録から評価した位相差は、周期0.1秒から長周期側ではほぼ連続的に変化しており、理論曲線と比較すると周期0.4秒前後で反転が見られるが、その部分を除けば良好な対応が見られる。なお、周期0.4秒前後の反転の理由は不明である。

深度100mを基準としたケースでは、スペクトル比及び位相差に、深度300mの場合ほど評価値と理論曲線との良い対応が見られていないが、観測記録から評価した位相差は、周期0.3秒から長周期側ではほぼ連続的に変化しており、理論曲線との良い一致が見られる。

これらのことから、地震動が直下からまっすぐ鉛直方向に上昇してくる波動伝播現象が卓越しており、一次元重複反射理論で想定している波動伝播現象との整合性が高いことが確認できた。

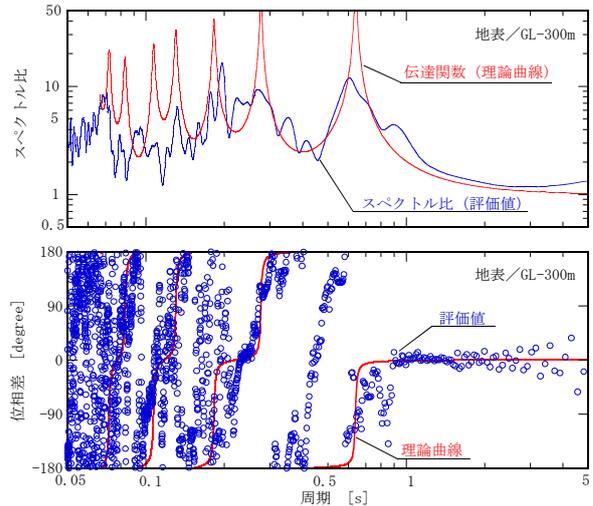
(3) 震源が観測地点の斜め下方の地震

震源が観測地点から斜め下方の地震として、No.13の2012年愛知県西部の地震の観測記録を用いて検討する。

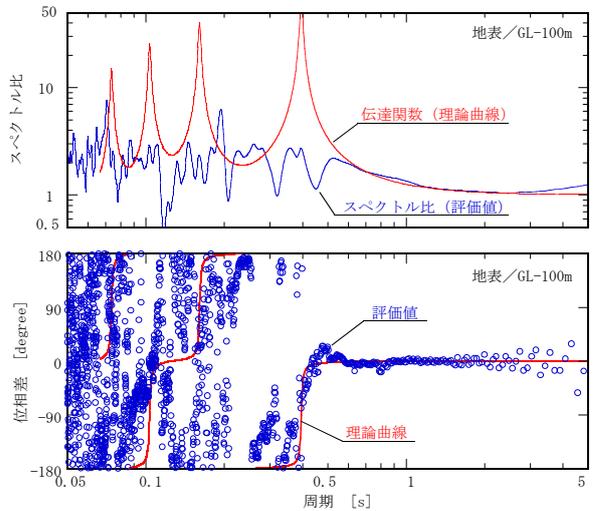
深度300mと深度100mの観測記録を基準とした場合の

表-2 解析に用いる地盤構造

No	地層レベル [m]		岩種	せん断波速度 [km/s]
	上端	下端		
1	0.0	7.5	表層	0.3
2	7.5	63.2	砂岩・泥岩	1.0
3	63.2	79.2	礫岩	1.1
4	79.2	124.2	砂岩・泥岩	1.0
5	124.2	175.2	礫岩	1.1
6	175.2	—	花崗岩	2.3



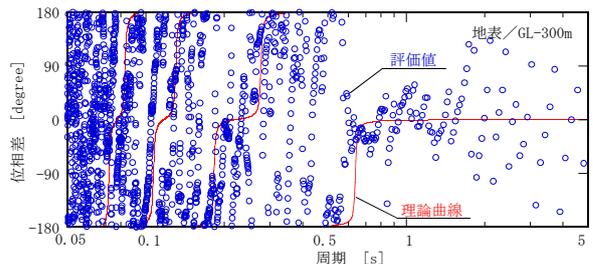
(1) 深度 300m の観測記録を基準



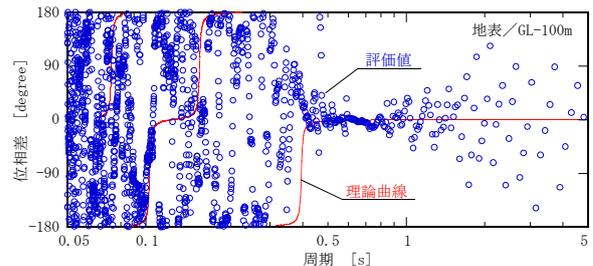
(2) 深度 100m の観測記録を基準

図-3 スペクトル比と位相差の比較

(2011年岐阜県美濃東部)



(1) 深度 300m の観測記録を基準



(2) 深度 100m の観測記録を基準

図-4 位相差の比較 (2012年愛知県西部)

地表の観測記録との位相差を図-4に示す。どちらのケースも位相差には乱れが生じていて、周期1.0秒以下の短周期帯域では連続性は見られるものの、理論曲線と比較すると細かく反転していることが分かる。また、周期0約0.3秒の一次モード付近での理論曲線との対応も悪い。これは、鉛直上昇波以外の直達の実体波が卓越していることを示唆しており、地表面付近においても地震動が斜めに入射している影響が現れているものと考えられる。一方で、周期1.0秒以上の長周期帯域でも、位相差は大きく変動している。この原因としては、地表面の地震動には、直達ではない実体波や表面波、反射波等が影響を及ぼしているということが考えられる。特に、長周期で位相差が生じる理由としては、地表面に斜めに入射した地震動が反射する際に発生する、長周期成分が卓越する表面波の影響が大きいものと考えられる。

5. おわりに

地震動の鉛直アレイ観測で得られた記録を、震央距離と波動伝播現象の関係に着目して分析した。その結果、震央距離が非常に小さい直下震源地震では、鉛直方向に上昇する直達の実体波が卓越しており、一次元重複反射理論に基づく波動伝播現象との整合性が高いことがわかった。一方、震源が直下ではなく斜め下方にある地震の観測記録の分析では、理論値との乖離が見られ、直達の実体波以外の波動の影響もあることが推察された。

地上構造物や地表付近にある地下構造物の耐震設計では、地震動の実体波は地表面付近で近似的に鉛直方向から入射するものと仮定することが多い。これは、一般に

地盤のせん断波速度は深度に応じて大きくなることから、地中深くの震源で発した実体波は、震源がある程度遠ければスネルの法則によって反射や屈折が起こり、地表面付近では地表面に対して垂直に入射する傾向が強くなるためである⁵⁾。

しかし、本検討の結果から、直下地震でなければ深度100mや300mの浅い地点においても、地震動が斜め下方から入射することがあることが示唆された。地層処分施設が建設されるような地下深部では、この影響は更に強まるものと考えられる。

今後は、地震観測を継続して有意な観測記録の収集に努めると共に、地震観測記録から地下深部の地震動伝播特性を分析して、地層処分施設の耐震設計に役立てる。

参考文献

- 1) 日本原子力研究開発機構東濃地科学ユニット：超深地層研究所地層科学研究基本計画，JAEA-Review 2010-016，2010。
- 2) Niimi, K., Kobayashi, S., Nobuto, J., Matsui, H., Yamamoto, M.: Analysis and Numerical Simulation of Seismic Events Recorded in the Ventilation Shaft at the Mizunami URL, *Proceedings of European Rock Mechanics Symposium (EUROCK 2012)*, CD-ROM, 2012
- 3) 瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討（核燃料サイクル開発機構委託研究成果報告書）JNC TJ7400 2002-010，清水建設株式会社ほか，2003。
- 4) Schnabel, Per B.; Lysmer, John; Seed, H. Bolton : SHAKE - a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, *Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC 72-12*, University of California, Berkeley, 1972
- 5) 土木学会：実務に役立つ耐震設計入門，pp.12，2011。

EVALUATION OF GROUND MOTION PROPAGATION CHARACTERISTICS BASED ON THE SEISMIC RECORD

Katsuyuki NIIMI, Shinji KOBAYASHI, Toshinori SATO, Shinichiro MIKAKE

Japan Atomic Energy Agency is pursuing an underground research project, called the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) Project focused on crystalline rock environment, in order to establish scientific and technological basis for geological disposal of High-level Radioactive Wastes. Seismometers have been placed at surface, and at 100m, 300m and 500m depth in the Ventilation Shaft. In this study, frequency and wave propagation characteristics were analyzed using observation data for earthquakes recorded with these seismometers.