

瑞浪超深地層研究所における地下500mまでを 対象とした地震動観測結果とその分析

松井裕哉^{1*}・渡辺和彦¹・見掛信一郎¹・新美勝之²・小林伸司²・戸栗智仁²

¹ (国研) 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)

² 清水建設株式会社 (〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1)

*E-mail: matsui.hiroya@jaea.go.jp

日本原子力研究開発機構は、地震による地下深部構造物への影響に着目し、瑞浪超深地層研究所の換気立坑を利用して、地表、深度100m、深度300mおよび深度500m地点に地震観測システムを設置し、同一地震における深度方向の地震動変化を十数年間観測した。その結果、震源位置やマグニチュードの異なる十数個の地震に対する地上から地下500mまでの間の地震動観測記録を取得し、釜石鉾山での観測などの既往の研究と同様の深度方向の地震動変化に関する知見を得た。また、得られた地震動の波形データなどを用い、地震動のフーリエ振幅と位相差の深度分布を分析したところ、直下型地震では理論値に近い結果になる一方、遠方の地震では理論値との乖離があることなどを確認した。

Key Words : observation, seismic motions, underground research laboratory

1. 緒言

日本原子力研究開発機構は、岐阜県瑞浪市において超深地層研究所計画と称する地下研究施設の建設を伴う研究プロジェクトを進めてきた。この中で結晶質岩を対象とした地下深部の構造物の設計・建設・維持に対する既往の工学技術の有効性の確認と、必要と考えられる技術の開発の一環として、地表から深度500mまでの間の地震動観測を平成15年度からこれまで実施してきた¹⁾。本報告では、この間に観測した地震動のデータやその分析結果から得られた幾つかの知見について報告する。

2. 地震動観測の概要と得られた観測結果に基づく 深度方向の地震動の変化傾向について

(1) 運用中の地震観測システム

現在の地震動計測機器の配置を図-1に示す。各測定器からは常時データが、データ収録用サーバーなどに送られているが、100m、300m地点の計測データは常時保存されない。計測時刻はGPS時計で管理。トリガーが設定された地震計は、深度100mと300mに設置している全て

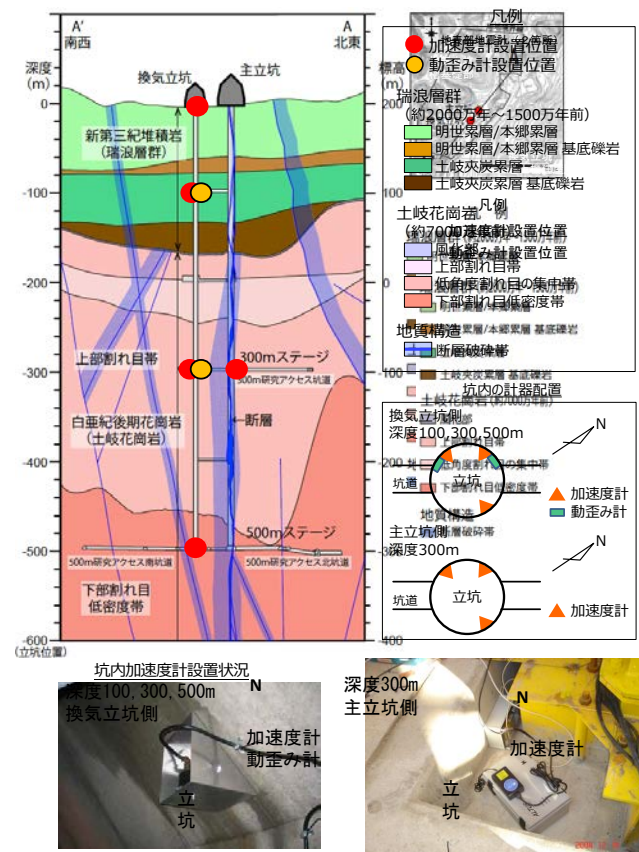


図-1 計測システムの設置場所及びレイアウト

の加速度計(9台)．9台いずれかの加速度計で 0.01m/s^2 (1Gal) 以上の振動を感知した場合、トリガー時刻の5秒前からのデータを収集・保存し、全ての加速度計が 0.01m/s^2 (1Gal) を下回ってから10秒後に収集・保存を停止するシステムとなっている。

地表部及び深度500mの加速度計は、独立して常時データを収集・保存しているため、必要に応じ上記のトリガーがかかった時刻及びデータ収集されている範囲と同じ時刻のデータを抜き出し解析できるようになっている。

地表と深度500mのデータ収録・保存の方法が他と異なるのは、地表の加速度計で 0.01m/s^2 (1Gal) をトリガーレベルとした場合、掘削工事作業などに伴う振動で頻繁にトリガーレベルを超えてしまうことと、500mに加速度計を設置できたのが平成25年度であり、10年以上前に構築した100mと300mの計測システムに組み入れられなかったためである。

(2)地震動観測結果について

これまで観測された地震動のうち、深度300mの地震計設置以降で全深度で地震動が取得された地震の一覧を表-1に示す。観測された地震については、図-2に示す瑞浪超深地層研究所との距離で見ると直下型に近い近傍から2011年三陸沖の東北地方太平洋沖地震といった600km以上離れた地点のものまで存在しているが、マグニチュードが小さいものや熊本地震など内陸型の遠隔地の地震は全深度で感知されていない。

表-1に示した地震の成分毎の最大加速度の深度分布を図-3に、それらを最深部の値で無次元化した増幅率の震度分布を図-4に示す。図-2に示したように、観測された地震の震源位置は研究所からの距離が異なるものの、深

表-1 これまでに観測された地震の一覧

No.	震源	瑞浪市の震度	発生日時
1	静岡県西部 深さ26km M4.7	2	2009.05.25 20:26
2	岐阜県美濃東部 深さ50km M3.5	2	2009.07.14 03:57
3	愛知県西部 深さ41km M4.0	2	2009.07.27 09:44
4	駿河湾 深さ23km M6.5	3	2009.08.11 05:07
5	三陸沖 深さ24km M9.0	3	2011.03.11 14:46
6	茨城県沖 深さ43km M7.6	2	2011.03.11 15:15
7	長野県北部 深さ8km M6.7	2	2011.03.12 03:59
8	静岡県東部 深さ14km M6.4	2	2011.03.15 22:31
9	福島県浜通り 深さ6km M7.0	1	2011.04.11 17:16
10	岐阜県美濃東部 深さ49km M5.1	3	2011.12.14 13:01
11	愛知県西部 深さ45km M4.3	2	2012.05.05 18:56
12	愛知県西部 深さ48km M4.1	1	2013.02.06 13:42
13	遠州灘 深さ34km M4.9	2	2013.08.03 09:56
14	伊予灘 深さ78km M6.2	1	2014.03.14 02:06
15	茨城県南部 深さ47km M5.6	2	2014.09.16 12:28
16	長野県北部 深さ5km M6.7	2	2014.11.22 22:08
17	鳥取県中部 深さ11km M6.6	2	2016.10.21 14:07
18	長野県南部 深さ7km M5.6	—	2017.06.25 07:02

度方向の分布の傾向は同じであり、深度の増加につれ最大加速度値は小さくなることがわかる。図-5には、既往の研究事例として同じ結晶質岩を対象に実施した岩手県釜石鉱山での観測結果を示すが花崗岩体としての地質構造や内在する不連続構造の性状は異なるものの、傾向としては全く同じであることから、少なくとも結晶質岩では深度が深くなるにつれ地震動は小さくなることは一般的な傾向と捉えることができると考えられる。

図-6には、地質状況の異なる主立坑と換気立坑の深度300mで取得された同一地震による加速度波形を示す。主立坑は、主立坑断層沿いに掘削され、換気立坑と比べ脆弱な地質状況であったが、観測された加速度波形やその大きさに顕著な差は見られなかった。これは、地震計をコンクリート覆工に設置しており、地質状況よりも覆工の強度・変形特性に依存する観測値となったためと思われる。

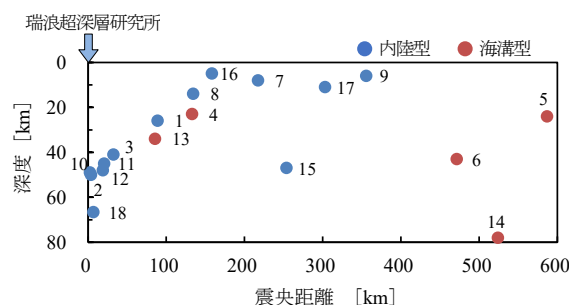


図-2 研究所と観測された地震の震源位置との関係 (番号は表-1のNo.に対応)

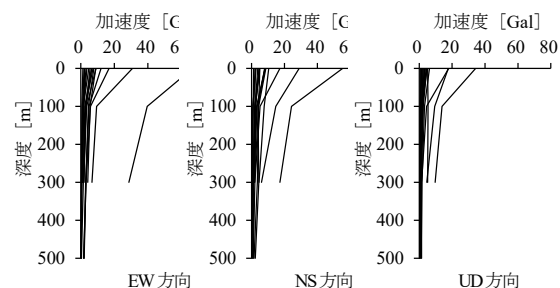


図-3 最大加速度の深度分布

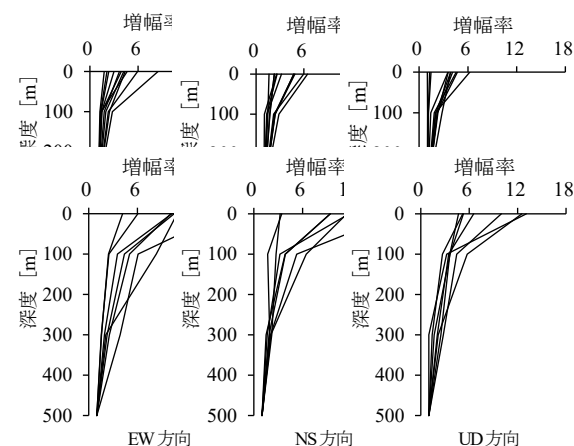


図-4 加速度増幅率の深度分布 (最深部の加速度値で無次元化して表示)

3. 地震動観測記録の分析

2で述べたように、定性的な一般的傾向として、結晶質岩においては深度が深くなるにつれ、地震動が小さくなることは確認された。ここでは、別途実施してきた地下構造物の耐震評価手法の妥当性検討の観点で実施した観測波形の分析結果等を述べる。

(1) 観測点からの距離と観測される地震動特性との関係

これまで、観測された地震の一部を対象に、観測記録を分析するとともに、地下の地震動伝播特性について検討を試みてきたが^{4,5)}、ここではその概要を示す。

地震観測記録の分析では、加速度の時刻歴からフーリエスペクトルを算出して、地震動の周波数特性を把握する。同じ地震で観測地点の深度が異なる記録のフーリエ

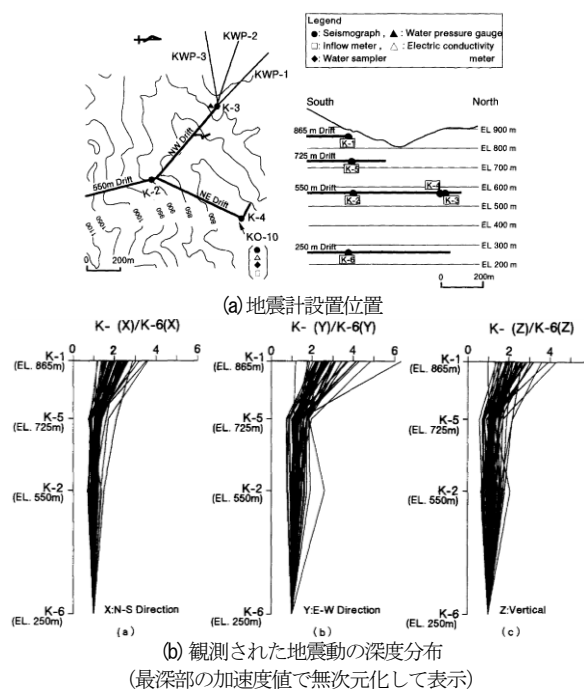


図-5 釜石鉱山での地震動観測結果²⁾

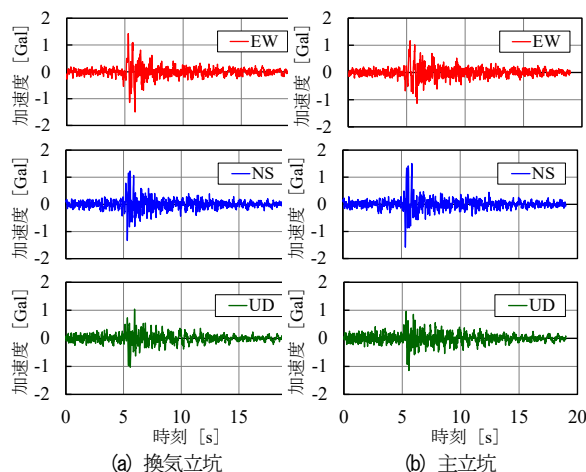


図-6 換気立坑および主立坑の深度 300m における同一地震動計測結果例 (遠州灘, 2013 年)³⁾

スペクトルの比を算出することで、深度間の波動伝播特性を評価することができる。地盤が水平成層で、入射する地震動が鉛直上昇波の場合には、このフーリエスペクトル比は、一次元重複反射解析で理論的に得られる伝達関数と対応することとなる。

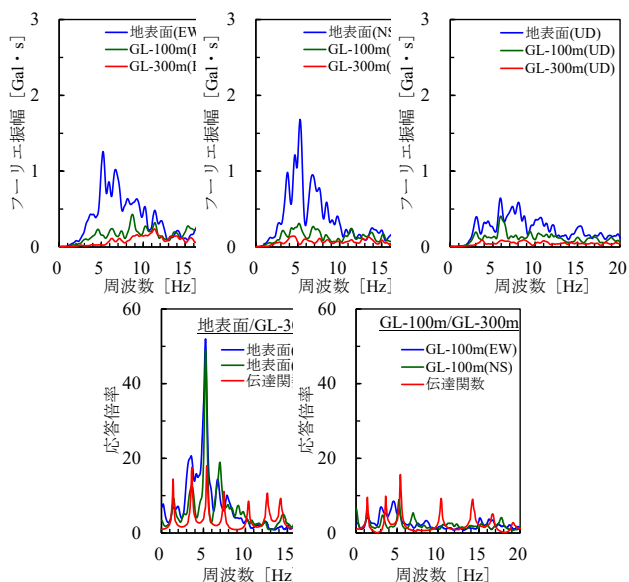
しかし、実際は、震源と観測点の位置関係から、観測される加速度は鉛直上昇波によるものだけではなく、斜め上昇波や反射や屈折をした波動、表面波などが含まれることとなるため、これらを定性的に分析し、地下深部での地震動の伝播について検討した。なお、実際の地震動の伝播経路は不明であるため、ここでは震央距離で整理した。また、本観測システムの加速度計は、深度 100m と 300m, 500m にそれぞれ 3 セットずつ設置されているが、それぞれの深度で横坑との位置関係を考慮して横坑の影響が最も少ないと考えられる加速度計の記録を検討に用いた。また、加速度観測記録は、研究所近傍に設置された防災科学技術研究所の観測点での記録と比較して方位補正を施し、フーリエスペクトルを算出する際には、0.5Hz の Parzen window で平滑化した⁴⁾。比較に用いた伝達関数は、後述する解析モデルを用いた一次元重複反射解析で算出した。

図-7 に研究所からの震央距離の異なる地震に関する検討例を示す。深度 300m を基準にしたフーリエスペクトル比は、震央距離が短い地震ほど、ピークが明瞭に表れていて、周波数によるスペクトル比の変化が大きい傾向が見られる。例えば、2009 年岐阜県美濃東部の地震 ($\Delta 4\text{km}$) や 2009 年愛知県西部の地震 ($\Delta 33\text{km}$) では、応答倍率のピークが 30 を超えているが、1 から 2 程度の周波数帯もある。一方、震央距離が長い 2011 年三陸沖の地震 ($\Delta 587\text{km}$) などでは、周波数による応答倍率の変化は小さく、ピークの値も小さい。

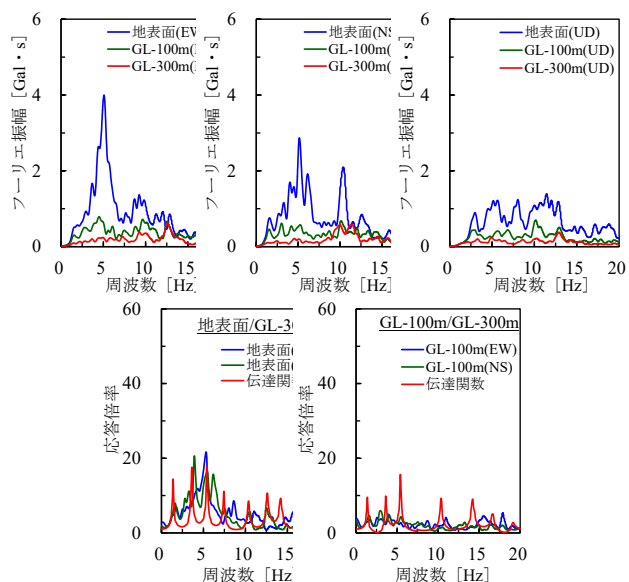
次に、深度 300m を基準にしたフーリエスペクトル比の最大値に着目し、震央距離との関係を示したものを図-8 に示す。地表面の場合は、震央距離が 200km 以下の地震では震央距離が短いほどフーリエスペクトル比の最大値も大きくなる傾向が認められる。一方、震央距離が 200km 以上の震源が遠方の地震では、震央距離の違いによる傾向は認められないが、全体的に水平方向成分のスペクトル比が大きい。深度 100m では、特徴的な傾向が認められない。これらのことから、それぞれの地震の地震動伝播は、定性的には次のような特徴を持つものと考えられる。

a) 震源が直下の地震

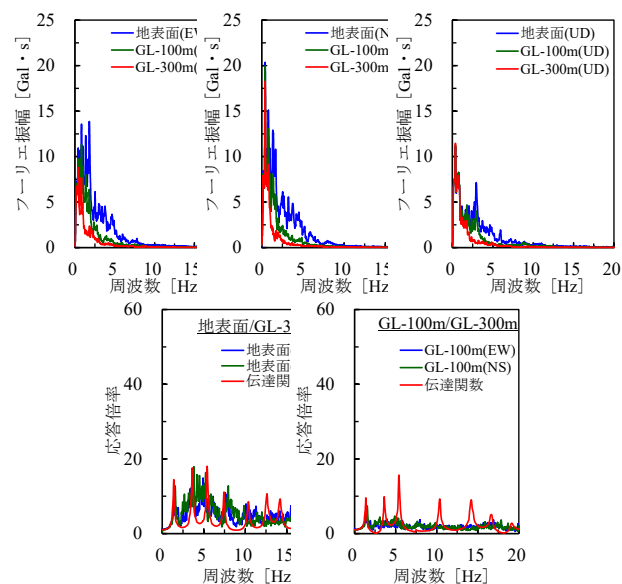
震央距離が非常に短く、震源がほぼ直下の地震では、鉛直方向に上昇する直達の実体波が卓越しており、波動伝播現象としては比較的単純で、耐震設計の地震動評価の際に一般的に用いられている一次元重複反射理論に基づく波動伝播現象との整合性が高いものと考えられる。



(a) 震源が直下の地震 (2009年岐阜県美濃東部, $\Delta 4\text{km}$)



(b) 震源が近距離の地震 (2012年愛知県西部, $\Delta 33\text{km}$)



(c) 震源が遠方の地震 (2011年三陸沖, $\Delta 587\text{km}$)

図-7 震源距離の異なる地震動のフーリエスペクトル例

b) 震源が近距離の地震

震源が直下ではないが震央距離が比較的に短い地震では、観測地点に斜め下方から入射する直達の波動が、観測地震動に与える影響が大きいものと考えられる。

c) 震源が遠方の地震

震源の深さに比べて震央距離が長い遠方の地震では、直達の実体波は拡散などにより減衰し、その他の直達ではない実体波や反射波、表面波が重なり合って観測されるものと考えられる。特に、震央距離が数百km以上でも観測できるような巨大地震では、表面波が支配的であるとされている。

これらの特徴を踏まえつつ、さらに細かく地震動観測結果の分析を行った結果を図-9に示す。ここでは、後述する解析モデルを用い、一次元重複反射理論で得られた理論値と、震源距離の異なる地震動観測結果から得られるフーリエ振幅と位相について比較した。周期毎のフーリエ振幅と位相差の深度分布を、図で表現したものである。地表面を基準として、フーリエ振幅を円の大きさと、位相差を半径の直線の角度で示している。

この結果から、震源が観測地点の直下とみなせる地震については、観測結果から得られるフーリエ振幅は、深くなるほど理論の振幅よりも小さくなり、短周期ほど、その傾向が強い。また、振幅の傾向と位相差は理論とよく一致している(図-9a)。震源距離が比較的に近い地震動観測結果については、地下の振幅は小さく(図-9b)、震源距離が遠い地震の場合は、地下の振幅は小さく、特に短周期が小さい(図-9c)。これは長周期成分が支配的な表面波が卓越している影響と考えられる。

(2) 地下施設の耐震性検討方法の妥当性について

図-10は、瑞浪超深地層研究所の耐震性を検討した際のフロー図である。この検討では、一次元成層地盤解析が重要なポイントであり、本節で紹介する耐震設計手法の妥当性検討は、この部分に特化し実施している^{4,6)}。

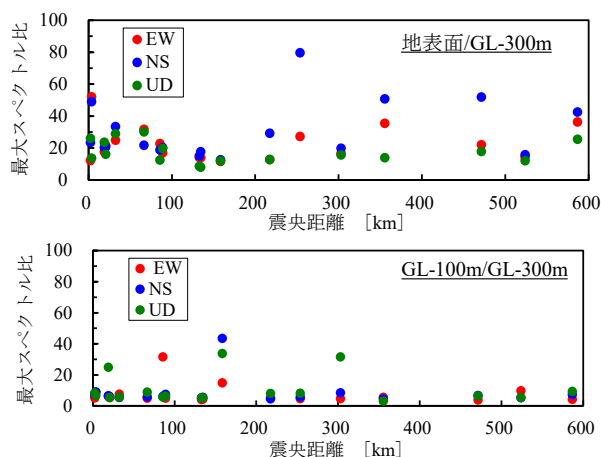
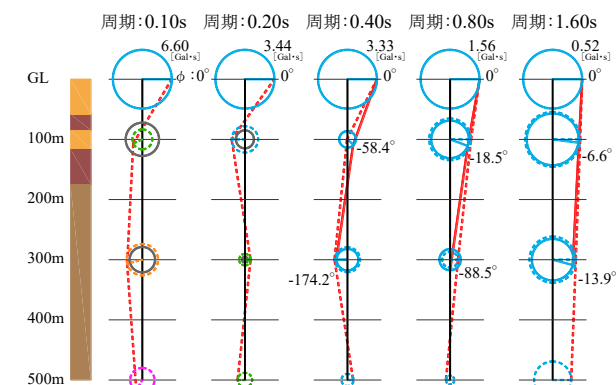


図-8 フーリエスペクトル比の最大値と震源距離との関係⁴⁾

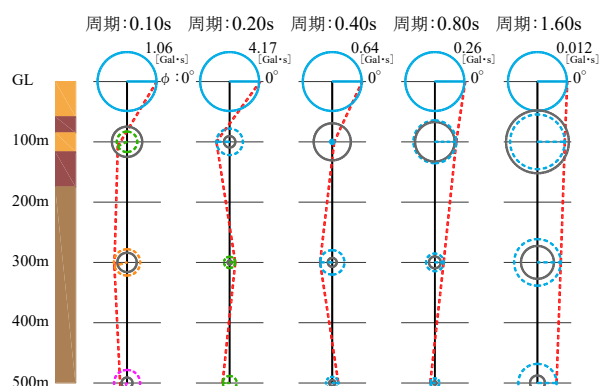
具体的には、解析に用いているSHAKEは十分な適用実績があるため、表-2と図-11に示す解析用の地盤モデルの精度向上を図りつつ、観測した地震動との比較検討を行った。

その一例を図-12に示す。この地震は、震源が比較的近い地震の一つであるが、一次元重複反射理論解析で得られた伝達関数のピークの大きさは、観測記録から評価したスペクトル比より大きい。これは、解析で設定した減衰が、実際よりも小さいためと考えられる。一方、ピークが現れる周波数は、概ね一致しており、地盤の土層

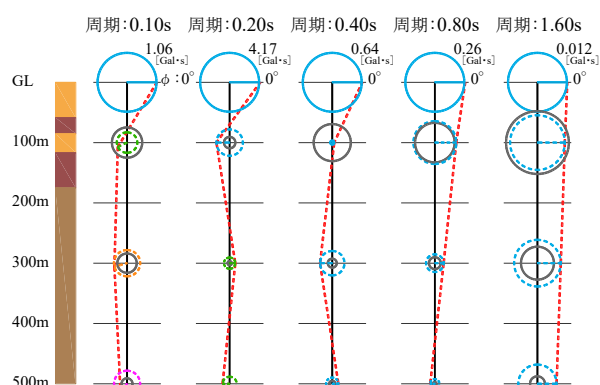
構成や層厚、せん断波速度の設定は、実際と合致しているものと考えられる。特にEW方向では、6Hz程度の3次までが良く一致している。この他、地震動観測記録そのもののシミュレーションも行いほぼ一致する結果を得ている⁹⁾ことから、一次元重複反射理論に基づく図-10の耐震性検討は、ほぼ妥当なものであったと考えられる。なお、観測記録から評価した地表のスペクトル比に関してEW方向とNS方向を比較すると、EW方向は2~3Hzで応答倍率が著しく小さくなっていることが確認できる。これは、換気立坑の坑口にあるやぐらのEW方向固有振動数が2.3Hzであることから、やぐらの基礎上面に設置した地表の加速度計の観測記録が、やぐらの固有振動の影響を受けているためと考えられる。



(a) 震源が直下の地震 (2009年岐阜県美濃東部, Δ4km)



(b) 震源が近距離の地震 (2012年愛知県西部, Δ33km)



(c) 震源が遠方の地震 (2014年茨城県南部)

破線:理論値 0°~360° -360°~-720° -720°~-1080° -1080°~-1440° 測定不能

図-9 地震観測記録の分析例⁷⁾

(周期毎のフーリエ振幅と位相差の深度分布を、図で表現。地表面を基準として、フーリエ振幅を円の大きさと、位相差を半径の直線の角度で示す)

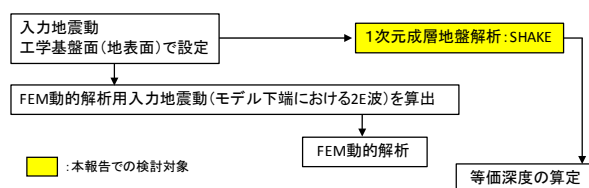


図-10 設計時に実施した耐震性検討のフロー⁸⁾

表-2 妥当性検証のための盤物性値⁹⁾

地層深度 [m]		岩種	単位体積重量 [kN/m ³]	弾性波速度 Vs [km/s]	減衰 [%]
上端	下端				
0.0	63.2	砂岩・泥岩	18.6	1.0	1.0
63.2	79.2	礫岩	21.6	1.1	
79.2	124.2	砂岩・泥岩	18.6	1.0	
124.2	175.2	礫岩	21.6	1.1	
175.2	500.0	花崗岩	25.5	2.3	
500.0	—	花崗岩	25.5	2.3	

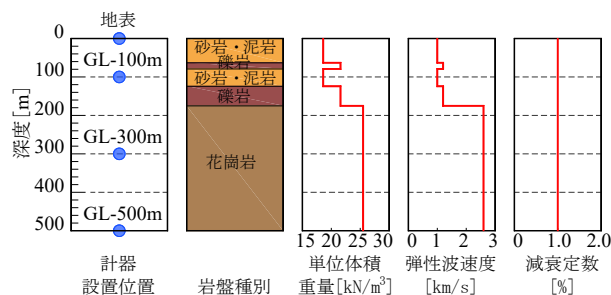


図-11 妥当性検証のための地盤モデルと物性値⁹⁾

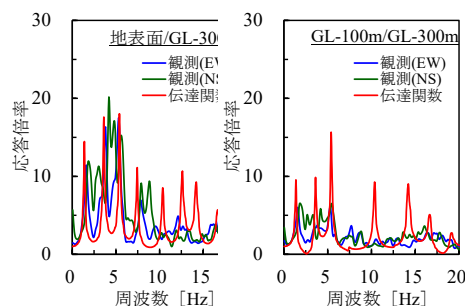


図-12 観測記録のスペクトル比⁹⁾と解析で得られた伝達関数の比較例(深度 300m 地点基準)

4. まとめ

本報告では、瑞浪超深地層研究所の立坑を利用し、我が国で頻発する地震の地表から深度500mまでの間の地震動特性に関する十数年に渡るデータ取得の結果を示し、既往の研究と同様に、地質性状の違いや震源距離によらず、結晶質岩盤では深度が深くなると地震動は地表に比べ小さくなることを確認するとともに、より詳細な分析の結果として、少なくとも震源が直下あるいは非常に近い場合には、工学的には一次元重複反射理論によりその影響を解析評価できることを示した。

一方、今後同様の地震動観測が必要な場合は、以下の点に留意したシステム構築等が望ましいと考える。

- ・今回の地震観測システムでは、地震計のいくつかは壊れており、地表に比べ高温多湿な環境で十数年間の長期使用に耐えうるシステムではなかった。地震発生が予測できない現状では、地下環境に対する対策を十分施した観測装置を用いることが肝要である。
- ・トリガーレベルを設定した地震動の観測は、トリガーがかからない場合データが取得されないため、今回深度方向の観測点全てでデータが取れないケースが相当数あった。近年のデータ記憶装置の大幅な大容量化なども考慮すると、時間同期だけ確実にを行い常時データ収録を行うようなシステムの方がデータ欠損が生じにくいと考える。
- ・地震発生が予測できない現状で、ある地点の地下構造物の耐震性評価などが必要な場合は、地下構造物建設前数年以上は該当深度での地震動観測を行い事前にデータの蓄積を図ることが、構造物の設計・建設時の耐震性評価の信頼性向上や合理的な対策工につながるものと考えている。このような観測では、ボーリング孔を用いて高精度の観測が行える装置は開発・実用化されている*ため、これを利用することで対応可能である。

謝辞：地震動計測にあたっては、清水・鹿島・前田共同企業体に多大な協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 例えば、三枝博光, 松井裕哉, 濱 克宏, 佐藤稔紀, 鶴田忠彦, 竹内竜史, 國丸貴紀, 松岡稔幸, 水野 崇: 超深地層研究所計画における調査研究の考え方と進め方—深度500mまでの調査研究計画—, JAEA Review 2011-022, pp.47-71, 2011.
- 2) Shimizu, I., Osawa, H., Seo, T., Yasuike, S. and Sasaki, S.: *Earthquake-related ground motion and groundwater pressure change at the Kamaishi Mine*, Engineering Geology Vol.43, pp.107-118, 1996.
- 3) 深谷正明, 納多 勝, 畑 浩二, 竹田宣典, 秋好賢治, 石関嘉一, 金田 勉, 佐藤 伸, 柴田千穂子, 上田 正, 戸田亜希子, 小林伸司, 新美勝之, 沖原光信, 辻 正邦, 山田俊子, 佐藤稔紀, 見掛信一郎, 堀内泰治, 橋詰 茂: 瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討(平成24年度), JAEA Technology 2014-019, pp.232~265, 2014.
- 4) 小林伸司, 新美勝之, 辻 正邦, 山田俊子, 青柳芳明, 佐藤稔紀, 見掛信一郎, 大澤英昭: 瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討(平成26年度)—設計・施工計画および施工対策技術の開発—, JAEA Technology 2015-039, pp.3~74, 2015.
- 5) 新美勝之, 小林伸司, 佐藤稔紀, 見掛信一郎: 地震観測記録に基づく地下の地震動伝播特性の把握, 第44回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.325~329, 2016.
- 6) 小林伸司, 新美勝之, 沖原光信, 辻 正邦, 山田俊子, 佐藤稔紀, 見掛信一郎, 堀内泰治, 青柳芳明: 瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討(平成25年度)—設計・施工計画および施工対策技術の開発—, JAEA Technology 2014-035, pp.3~85, 2014.
- 7) 日本原子力研究開発機構: 平成27年度 東濃地科学センター地層科学研究 情報・意見交換会 資料集, JAEA Review 2015-041, pp.51~52, 2015.
- 8) 核燃料サイクル開発機構: 瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討, JNC TJ7400 2002-010, pp.461~pp.611, 2003.
- 9) Niimi, K., Kobayashi, S., Nobuto, J., Matsui, H. and Yamamoto, M.: *Analysis and Numerical Simulation of Seismic Events Recorded in the Ventilation Shaft at the Mizunami URL*, Proc. of EUROCK 2012, 2012.

* <http://www.tries.jp/activity/2016051616135655.html> (参照 2019.8.30)

RESULT OF SEISMIC MOTION OBSERVATION FROM GROUND SURFACE TO 500M DEPTH AT MIZUNAMI UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY AND ITS DETAILED ANALYSIS

Hiroya MATSUI, Kazuhiko WATANABE, Shinichiro MIKAKE, Katsuyuki NIIMI, Shinji KOBAYASHI and Satohito TOGURI

Japan Atomic Energy Agency has been observed seismic motions induced by earthquakes, at ground surface, galleries at 100m, 300m and 500m depth of Mizunami underground research laboratory for over 10 years. The results suggested that the amplitude of the seismic motion decreases with depth as the previous study on crystalline rock at Kamaishi mine indicated. Detailed analysis on the observed seismic motions shows that the Fourier amplitude and the phase difference of the earthquake occurred near epicenter correspond with the one calculated by one-dimensional multiple reflection theory.