

電力中央研究所報告

物理探査・室内試験に基づく2004年留萌支庁南部の地震によるK-NET港町観測点(HKD020)の基盤地震動と
サイト特性評価

研究報告：N13007

平成25年12月

IR 電力中央研究所

中央研究院電機研究所



CRIEPI

Central Research Institute of
Electric Power Industry

物理探査・室内試験に基づく 2004 年留萌支庁南部の地震による K-NET 港町観測点 (HKD020) の基盤地震動とサイト特性評価

佐藤 浩章^{*1} 芝 良昭^{*2} 東 貞成^{*2}
功刀 卓^{*3} 前田 宜浩^{*3} 藤原 広行^{*3}

キーワード：2004 年留萌地震
物理探査
震源近傍
地盤非線形
基盤地震動

Key Words: The 2004 Rumoi Earthquake
Geophysical exploration
Near source region
Soil nonlinearity
Basement earthquake motion

Estimation of basement earthquake motion and site characteristics at HKD020 during the 2004 Rumoi earthquake based on geophysical exploration and laboratory tests

Hiroaki Sato, Yoshiaki Shiba, Sadanori Higashi,
Takashi Kunugi, Takahiro Maeda and Hiroyuki Fujiwara

Abstract

During the 2004 Rumoi earthquake (M6.1, Depth=9km), earthquake ground motion with the peak ground acceleration(PGA) of 1127 cm/s² and the peak ground velocity (PGV) of 74 cm/s was recorded at HKD020(K-NET by NIED). In order to clarify the effect of site amplification factor induced subsurface structure and nonlinear dynamic property of soils on such a very high-level acceleration by moderate-size earthquake, we conducted PS-logging ranging from surface to GL-300 m and laboratory tests of soils(<GL-6m) at HKD020. A new subsurface model for earthquake ground-motion estimation at HKD020 was constructed based on PS-logging data and previous surface wave dispersion curve. The basement earthquake motion at HKD020 during the 2004 Rumoi earthquake was estimated by 1D equivalent linearized method using the new subsurface model and dynamic property of soils. The PGA of the estimated basement earthquake motion was 585 cm/s² that was approximately 50 percent smaller than the surface observed record. In contrast, the PGV was 62 cm/s that was only approximately 20 percent smaller than the surface observed record. These results demonstrated that the high-level acceleration recorded at HKD020 during the 2004 Rumoi earthquake is considered to be strongly affected by site factor due to soil nonlinearity.

(Civil Engineering Research Laboratory Rep.No.N13007)

(平成 25 年 12 月 9 日承認)

*1 地球工学研究所 地震工学領域 主任研究員

*2 地球工学研究所 地震工学領域 上席研究員

*3 (独)防災科学技術研究所

背 景

2004 年 12 月 14 日午後 2 時 56 分頃に発生した北海道留萌支庁南部の地震（2004 年留萌地震；M6.1）では、震源近傍の K-NET 港町観測点 (HKD020)の地表で最大加速度 1127 cm/s^2 を観測した。M6 クラスの内陸地殻内地震によって、 $1g$ (g は重力加速度)を超える強震動が生成された要因を明確にしておくことは、強震動予測において重要な課題である。こうした高加速度記録が観測された要因については、震源特性のほかに本震時のサイト特性の影響が考えられるが、実際に、どの程度寄与したのかといった点については、地表の観測記録しか得られていないこと、また地盤構造や地盤の非線形性に関する情報が十分ではないことから不明な点が多い。

目 的

K-NET 港町観測点(HKD020)における物理探査と地盤試料の室内試験から、地盤モデルを構築し、2004 年留萌地震での基盤地震動の推計とサイト特性の評価を行う。

主な成果

1. HKD020 における基盤層の設定と地震動評価のための地盤モデルの構築

HKD020 で実施した PS 検層から、S 波速度が 700 m/s 以上となる明瞭な速度境界(基盤層)の深さは、従来評価よりも深い 41 m の設定となった(図 1)。また、検層結果および既往研究によるレイリー波位相速度に基づいて、基盤層までの地盤モデルを構築した。この地盤モデルから計算される理論伝達特性は、微動 H/V スペクトルの卓越周期を説明できることも確認し、地盤モデルの妥当性を検証した。

2. 2004 年留萌地震による HKD020 での基盤地震動の推計とサイト特性

(1) 2004 年留萌地震による HKD020 の基盤地震動を、現在得られている表層 6m までの非線形性を考慮した等価線形解析により地表記録から推計した。その結果、最大加速度は地表の約 $1/2$ の 585 cm/s^2 、最大速度は地表の約 $4/5$ の 62 cm/s となった(図 2)。これは本震時のサイト特性が、特に地表での高加速度の生成に寄与したことを示唆する。

(2)推計した基盤地震動と地表記録のフーリエスペクトルの比較から、周期約 0.08 秒から 0.3 秒では地表での増幅が大きく、約 0.08 秒以下(約 13 Hz 以上)では増幅が小さいことが分かった(図 3)。この結果は、2004 年留萌地震時の S 波部の H/V スペクトルが、弱震時の H/V スペクトルに対して低下する周期と整合し、観測事実とも矛盾しない(図 4)。

今後の展開

今回の地盤モデルよりも深部の地盤構造や非線形性の調査に基づき基盤地震動とサイト特性のより詳細な評価を行う。

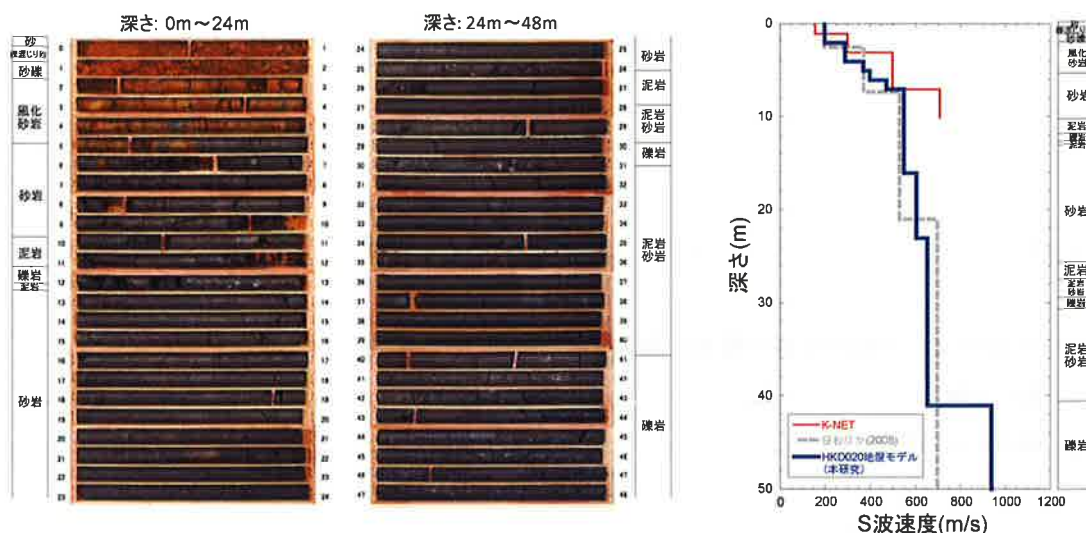


図1 HKD020 のボーリングコア (左) と S 波速度構造 (右)

岩盤は K-NET の地盤情報と同様に 5m 以深 (茶褐色から暗灰色の境界以深) でみられたが、速度は $V_s 500\text{m/s}$ 前後であった。また V_s が 700m/s 以上となる基盤層の深さは従来評価よりも深い 41m (GL-41m) となった。

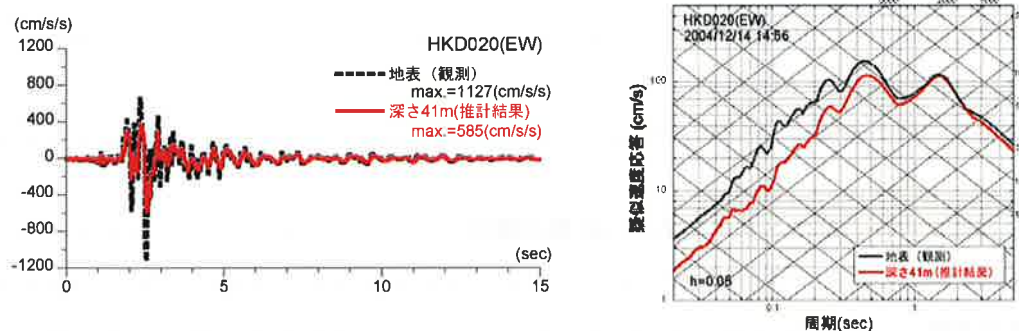


図2 2004 年留萌地震における HKD020 の地表記録と推計された基盤地震動の比較
(左：加速度波形、右：疑似速度応答スペクトル)

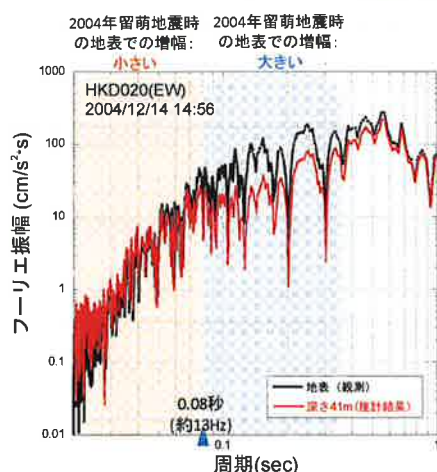


図3 2004 年留萌地震時の地表記録と推計基盤地震動のフーリエスペクトルの比較
周期約 0.08 秒から 0.3 秒では地表での増幅が大きく、約 0.08 秒以下 (約 13Hz 以上) では地表での増幅が小さい。これは本震時のサイト増幅の特徴と考えられる。

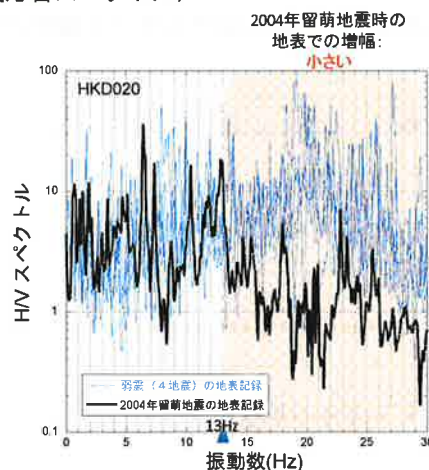


図4 HKD020 での弱震と 2004 年留萌地震時の地表記録の S 波部の H/V スペクトルの比較
弱震時は 4 つの地震ではほぼ同様であるが、2004 年留萌地震では約 13Hz から低減し、本震時のサイト増幅の低下を示唆する。これは本研究で得られたサイト増幅の特徴と調和的である。

目 次

1. はじめに	1
2. 2004 年留萌支庁南部の地震の観測記録および HKD020 の概要	1
2.1 観測記録	1
2.2 HKD020 の概要	2
3. HKD020 における物理探査と地盤モデル	3
3.1 ボーリングコア	3
3.2 PS 検層結果による基盤層の設定	3
3.3 地震動評価のための地盤モデル	5
4. 表層地盤における強震時の非線形特性	7
5. 基盤地震動レベルの推計とサイト特性の影響の検討	8
5.1 基盤地震動の推計方法	8
5.2 解析条件	9
5.3 基盤地震動の推計結果	10
5.4 高加速度記録に対するサイト特性の影響の考察	11
6. まとめ	12
謝辞	13
参考文献	14
(付録) 上下成分の基盤地震動の推計	16

1. はじめに

我が国の強震観測網は、1995 年兵庫県南部地震による大震災を契機として、防災科学技術研究所による K-NET、その後の KiK-net により空間的な密度が高まることとなった。それにより、これまで取得が難しかった震源近傍の強震観測記録についても入手可能となり、地震規模（マグニチュード）がそれほど大きくない地震でも $1g$ (g は重力加速度) を超える高加速度の強震動が得られるといった事例がみられるようになってきた。

2004 年 12 月 14 日午後 2 時 56 分頃に発生した北海道留萌支庁南部を震源とする地震 (M6.1, 深さ 9 km) では、震央距離 8.6 km の K-NET 港町観測点（以下、HKD020 と称す）で最大加速度 1127 cm/s^2 (最大速度約 74 cm/s) を観測した。この地震による HKD020 での高加速度、高速度の地震記録の発生要因については、これまでいくつかの検討が行われてきた [1][2]。Maeda and Sasatani[1]によれば、HKD020 における高加速度、高速度の要因については、観測点が強震動生成域に近いことやディレクティビティ効果の影響を受けやすい位置であることなど震源特性が支配的であったことを指摘している。ただし、震源モデルに基づく計算結果は、最大速度については良好な再現性が確認できるが、 $1g$ を超える高加速度については、若干過小な部分も見受けられることから、サイト特性による影響の可能性も考えられる。しかしながら、2004 年留萌地震時に HKD020 のサイト特性については、地盤の非線形性により変化し、弱震時と比べて異なる増幅特性になったことは指摘されているが [1]、どの程度、最大加速度の増幅に寄与したのかといった点については、地表の観測記録しかないこと、また地盤に関する情報が十分でないことから不明な点が多い。M6 クラスの内陸地殻内地震によって、 $1g$ を超える高加速度の強震動が生成される要因として、対象

地点が震源に近いこと以外の要因、すなわち震源過程やサイト特性の影響を明確にしておくことは、今後の強震動予測において重要な知見を与えると考えられる。特に、サイト特性については、詳細な地盤調査を実施することによって、その影響を定量的に把握できる可能性が期待できる。

そこで我々は、2004 年北海道留萌支庁南部の地震での HKD020 における高加速度、高速度の地表観測記録に対するサイト特性の影響を明らかにするため、当該地点にて詳細な物理探査と地盤の室内試験を実施した。物理探査としてはボーリング孔を用いた PS 検層、室内試験については強震時のサイト特性に影響を及ぼす地盤の非線形特性（動的変形特性）の測定を現地にて採取した地盤試料に対して行った。本報告書は、現在までに得られた調査・試験結果、およびそれらの結果に基づき実施した基盤地震動の推計とサイト特性の影響評価についての検討結果について、速報的にとりまとめたものである。

2. 2004 年留萌支庁南部の地震の観測記録および HKD020 の概要

2.1 観測記録

図 1 に、2004 年留萌支庁南部の地震（以下、2004 年留萌地震と称す）の震央位置と HKD020 の位置を示す。2004 年留萌地震は、M6.1 (Mw5.7) の内陸地殻内地震で、逆断層タイプの地震である。地震後の余震分布は、東落ちの傾斜を示し、それに基づく推定断層面から HKD020 までの断層最短距離は約 3.8 km と推定される。図 2 には、2004 年留萌地震の際に、防災科学技術研究所の K-NET および KiK-net で得られた地表記録の最大加速度と断層最短距離の関係を、司・翠川 [3] による両者の経験的な関係と比較して示す。図から、HKD020 での最大加速度 (EW 成分) は、経験的な関係の平均 + 標準偏差を上回る大きさで

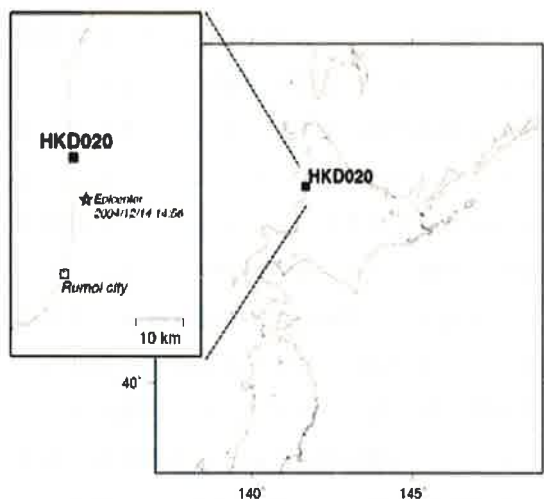


図 1 HKD020 地点と 2004 年留萌地震の震央の位置

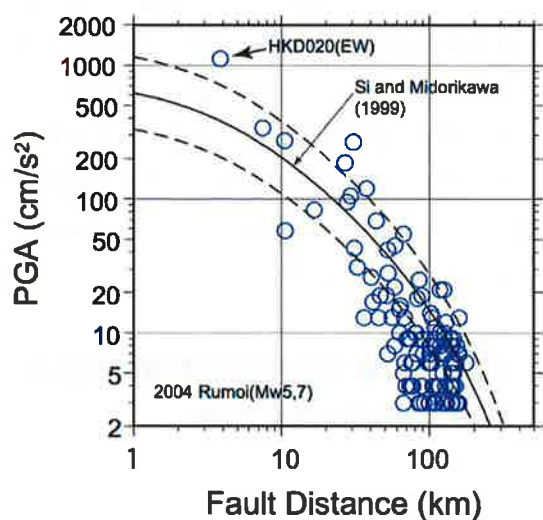


図 2 2004 年留萌地震(Mw5.7)の K-NET, KiK-net 観測点の最大加速度の距離減衰と既往の距離減衰式(実線が平均, 破線が平均±標準偏差)[3]との比較

あったことが分かる。図 3 には、2004 年留萌地震の際の HKD020 で観測された加速度記録を示す。S 波主要動の継続は 2~3 秒程度であるが、EW（東西）成分で最大加速度 1127 cm/s^2 を記録し、NS（北南）成分の最大加速度 536 cm/s^2 の約 2 倍となっている。また、UD（上下）成分の最大加速度は 368 cm/s^2 であり、EW 成分と UD 成分の最大加速度比は 3.06 倍で、岩盤上の観測点で通常 1.5 倍から 2 倍程度、震源距離が小さい場合はさらに倍率が小さくなるという既往の研究[4]

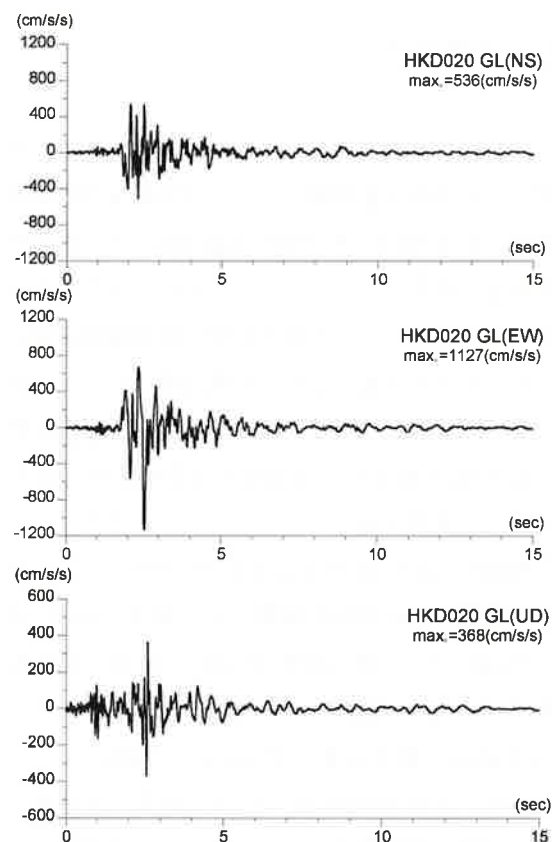


図 3 2004 年留萌地震の HKD020 の観測記録 (上: NS 成分, 中: EW 成分, 下: UD 成分)

とは、HKD020 の観測記録が震源近傍である点からも差異は大きい。以上のように、HKD020 での観測記録の EW 成分にみられる高加速度は、既往の研究による距離減衰式や最大加速度比の経験的な値との乖離が大きいことから、震源過程やサイト特性による影響を強く受けた記録である可能性が考えられる。

2.2 HKD020 の概要

HKD020 は、留萌市中心部から北に約 30 km の小平町の海岸段丘上の標高約 40 m に位置し、地表に地震計が設置されている。図 4 に示す既往の K-NET の地盤情報によれば、設置地点では 5 m の深さに岩盤層が存在し、その上部を礫質土と砂質土の土質地盤が覆っている。速度構造について

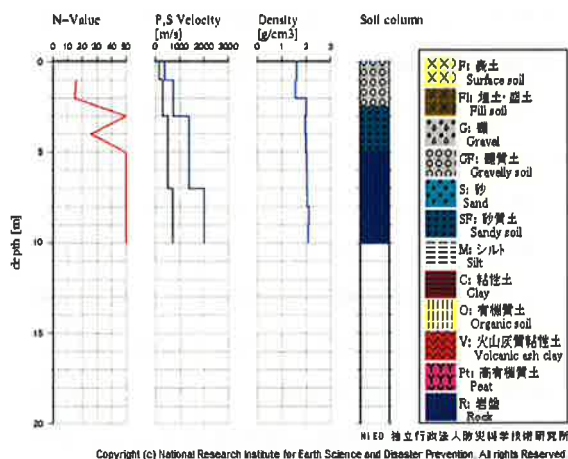


図 4 K-NET による HKD020 の地盤情報[5]

は、7 m から 10 m の深さの岩盤層が、S 波速度（以下、 V_s と称す）で 710 m/s、それ以浅の地層の V_s が 160 m/s~500 m/s である。平均 S 波速度は、表層 10 m までの平均(V_{s10})で 398 m/s、表層 30 m までの平均 S 波速度(V_{s30})は、深さ 7 m から 10 m の 710 m/s の岩盤層が 30 m まで続いていると仮定すると、563 m/s となる。

3. HKD020 における物理探査と地盤モデル

3.1 ボーリングコア

HKD020 でのボーリングは、当該地点の地質、地質構造および速度構造の把握を目的として、地震計設置地点の北西約 5 m の同一標高位置にて、300m までの深さ (GL-300 m) のボーリング掘削をオールコア採取で行った。地下水位は、ボーリング孔内の水位と PS 検層による P 波速度から、約 2 m と考えられる。図 5 には、ボーリング結果の例として、48 m の深さまでのコア写真を示す。図から、コアの色調は深さ 5 m 付近までが茶褐色で、それ以深で暗灰色となる。暗灰色となる 5 m の深さから岩盤層 (5 m の深さでは砂岩) であり、図 4 に示されている既往の HKD020 の地盤情報と今回の調査結果は整合する。5 m 以浅について

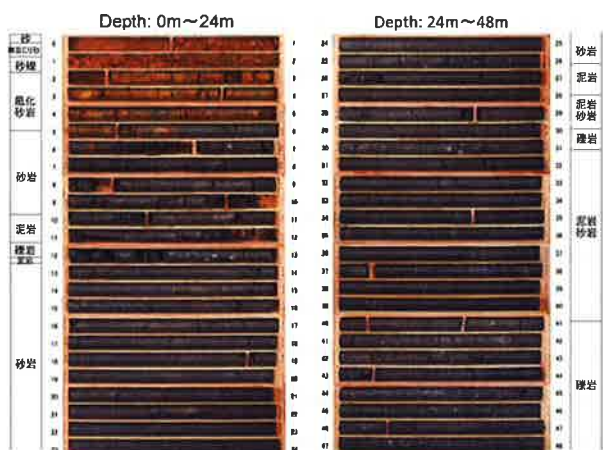


図 5 HKD020 におけるボーリングコア写真
(左: 深さ 0m~24m, 右: 深さ 24m~48m)

は、ごく表層の 2.5 m 付近の深さまでは砂、礫まじり砂、砂礫といった礫が含まれる層で構成されており、図 4 の該当部分が礫質土であることと調和的である。また、2.5 m から 5 m の深さにおいて、今回の調査結果が風化砂岩、図 4 では砂質土で、砂主体の層である点も両者は整合している。以上の調査結果から、図 4 の K-NET による岩盤層以浅の地質 (土質) 構造の妥当性を確認することができる。さらに、K-NET の地盤情報において速度は得られているが、土質 (岩質) の詳細が得られていない 5 m 以深についても、今回の調査では把握することができた。図 5 によれば、25 m 付近の深さまでは砂岩層が主体であり、そのうち 10 m から 13 m に部分に薄い泥岩層と礫岩層がみられる。図 5 のコア写真から、13 m 付近の深さまでの岩盤は亀裂が多く、岩盤が脆いことを示唆している。それ以深の岩盤層については、泥岩・砂岩の互層が主体で、そのうち 30 m 付近、さらに、41 m 以深に礫岩層が存在する構成となっていることが分かる。

3.2 PS 検層結果による基盤層の設定

PS 検層は、現在までの 300 m の深さのボーリング孔に対して、150 m までについてはダウンホ

ール法とサスペンション法, 300 m までについてはサスペンション法による結果が得られている。図 6 には, 300 m の深さまでの PS 検層結果を示す。なお, 表層 6 m より浅いダウンホール法の結果については, 佐藤・他[8]による調査結果の後に別途実施した, 表層のみを対象とした調査ボーリングでの結果を示している。また, 図 6 には微動アレイ探査および表面波探査に基づき推定された既往の研究による HKD020 の S 波速度構造[7]も併せて示す。深さ 50 m 付近までにおいては, 3.1 節のボーリングコアでみられるように, 土質, 岩質の変化が大きいため, 微動アレイ探査に基づく構造は, 今回の調査による S 波速度構造と十分に対応はしていない。しかしながら, 58 m 以深の泥岩・砂岩互層が続く部分の V_s については, 本調査のサスペンション法による大局的な速度とほぼ対応している。

本調査のダウンホール法による速度構造によれば, 深さ 41 m 付近の礫岩層で V_s の変化が顕著にみられる。この礫岩層の V_s は 938 m/s で, 上

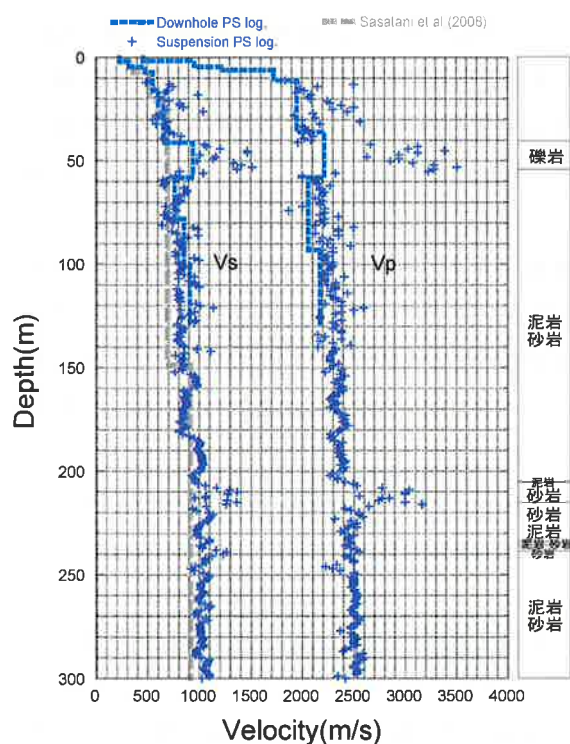


図 6 HKD020 における PS 検層結果と既往の研究[7]による S 波速度構造モデル

部の砂岩・泥岩互層の V_s は 653 m/s である。深さ 41 m の礫岩層は, 55 m 付近まで続き, 再び泥岩・砂岩互層となり, その V_s は 58 m の深さで 761 m/s に低下する。それ以深は, 泥岩・砂岩互層が続く, 図 6 のサスペンション法の結果によれば, 深さ 300 m までの V_s は, 深さに応じてなだらかに増加する漸増構造の様相を呈し, 深さ 300 m の位置で V_s が 1000~1100 m/s となる。よって, PS 検層による S 波速度構造からみれば, V_s が 700 m/s 以上となる明瞭な速度境界としての基盤層は, V_s が 938 m/s となる 41 m の深さに設定することが妥当と考えられる。

図 6 には, P 波速度(V_p)も併せて示されている。基盤層と考えられる深さ 41 m の礫岩層に着目すると, ダウンホール法による V_p は 2215 m/s で, 上部の砂岩・泥岩互層の V_p は 1947 m/s である。図 7 には, 今回の調査のサスペンション法およびダウンホール法の結果に基づく V_p と V_s の関係を示す。 V_p - V_s 関係は, 地下水の存在により V_p が 1500 m/s 相当を境に変化する。よって, V_p が 1500 m/s より大きい範囲で比較すると, ダウンホール法とサスペンション法の V_p - V_s 関係は調和的である。図 7 には, 狐崎・他[6]による既往の経験式も示されている。狐崎・他[6]の関係式か

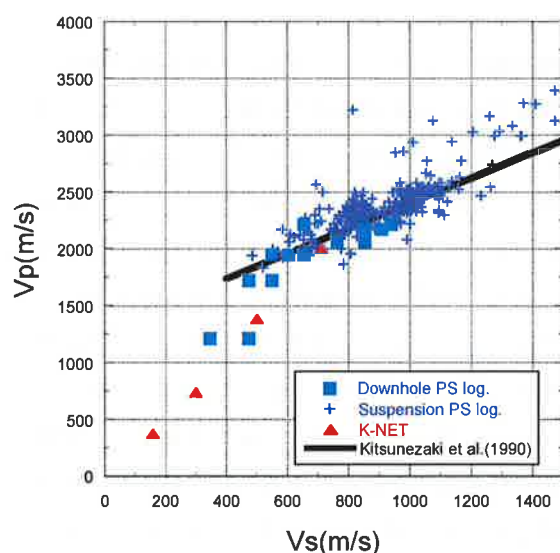


図 7 HKD020 の PS 検層結果による V_p - V_s 関係と既往の経験式[6]の比較

ら、 V_s が 700 m/s 以上では、 V_p が 2000 m/s を超えることが分かる。今回の調査から、 V_p が 2000 m/s を超えるのは、上面深度が 38 m と V_s よりも 3 m だけ浅いが、同じ礫岩層が主体の層に該当する。よって、 V_p の観点からみても、基盤層は 41 m の深さに設定することが妥当と考えられる。

3.3 地震動評価のための地盤モデル

図 8 に、深さ 50 m までの S 波速度構造について、今回の調査結果と既往の K-NET による地盤情報および笹谷・他[7]による結果との比較を示す。今回の調査結果から、 V_s が 700 m/s 以上となる明瞭な速度境界としての基盤層は、深さ 41 m での設定が妥当と考えられる。一方、K-NET による地盤情報で約 5 m の深さに存在する岩盤層の V_s は、K-NET の 5~7 m が 500 m/s、7~10 m が今

回の調査による深さ 41 m の V_s と同様の 700 m/s となっている。今回の調査結果においても、同様の約 5 m の深さに岩盤層が現れるが、 V_s については、ダウンホール法の 5~7 m の部分は概ね同様であるが、7 m より深い部分は 550 m/s 程度であり、K-NET よりも小さい。また、サスペンション法による 10~12 m 付近の V_s が 500~550 m/s、笹谷・他[7]の 7 m より深い部分の V_s が 530 m/s 程度であり、これらの結果もダウンホール法の結果と同様に K-NET より小さく、K-NET のみが乖離している。こうした差異が生じた要因としては、HKD020 の観測点周辺の表層部に、場所によって局所的に砂岩層よりも速度が 2~3 割大きく、厚さが最大でも 1 m 程度の薄い礫岩層の存在が確認できていることから、その層に該当している可能性が考えられる。今回の調査は、ボーリングコアを採取して、速度構造と対比するとともに、ダウンホール法とサスペンション法を併用することで妥当性を確認している。よって、HKD020 における地震動評価（サイト特性評価）のための地盤モデルは、本研究による調査結果に基づき作成することとした。

地震動評価のための HKD020 の地盤モデル化にあたっては、地震学的なデータとの整合性が必要となることから、それについては既往の研究[7]で得られた HKD020 のレイリー波基本モードの分散曲線と本研究で実施した K-NET 強震計の設置基礎上的微動 H/V スペクトルを用いた。本研究におけるモデル化の方法は、次の通りである。まず、ダウンホール法による PS 検層結果を、基本モデルとする。この基本モデルに対して、レイリー波の理論位相速度を計算し、既往の研究[7]で得られた HKD020 のレイリー波基本モードの位相速度と比較する。両者の比較から、既往の研究で得られた位相速度に対して、基本モデルによる理論位相速度のずれが生じている位相速度値を基本モデルにおける V_s 値の誤差と考える。そこで、基本モデルにおける、その V_s 値に近い値

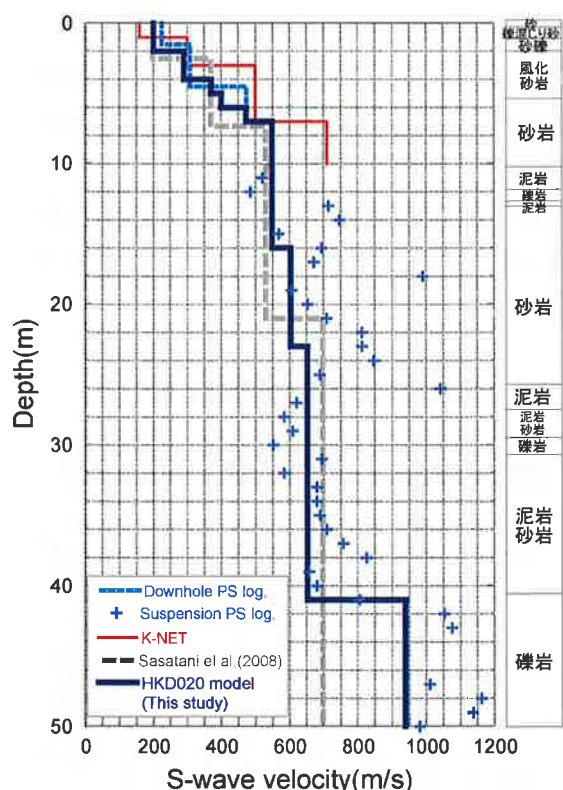


図 8 HKD020 における地盤構造(S 波速度構造)の比較

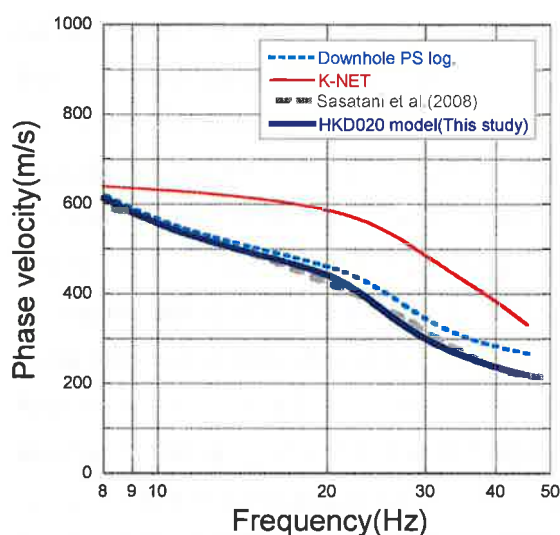


図9 HKD020 におけるレイリー波位相速度の比較

の層に対して、理論位相速度が既往の研究[7]の位相速度に近接するまで V_s を修正する。最後に、修正した地盤モデルから SH 波の理論増幅特性を計算し、微動 H/V スペクトルと卓越周期の比較を行い、極端なずれが生じていないことを確認し、最終的なモデルとするという手順である。なお、SH 波の理論増幅特性と微動 H/V スペクトルの卓越周期は、表層に軟弱地盤を有するような速度コントラストが大きな地盤ではよく対応するため[9]、地盤モデルの妥当性を確認する有効な手法として、本研究では用いることとした。

図9には、ダウンホール法の PS 検層結果によるレイリー波位相速度の理論分散曲線と笹谷・他[7]による HKD020 のレイリー波位相速度の分散曲線の比較を示す。図9によれば、ダウンホール法による位相速度は、笹谷・他[7]による位相速度よりも 500 m/s 以下の位相速度において、やや大きい傾向にある。なお、図9には K-NET の地盤情報による位相速度の分散曲線も併せて示されているが、笹谷・他[7]による位相速度との乖離は大きい。そこで、ダウンホール法による PS 検層結果の V_s が 500 m/s 以下の深さ 6 m までの S 波速度を、笹谷・他[7]による位相速度を説明できるように若干修正し、HKD020 の地盤モデルを

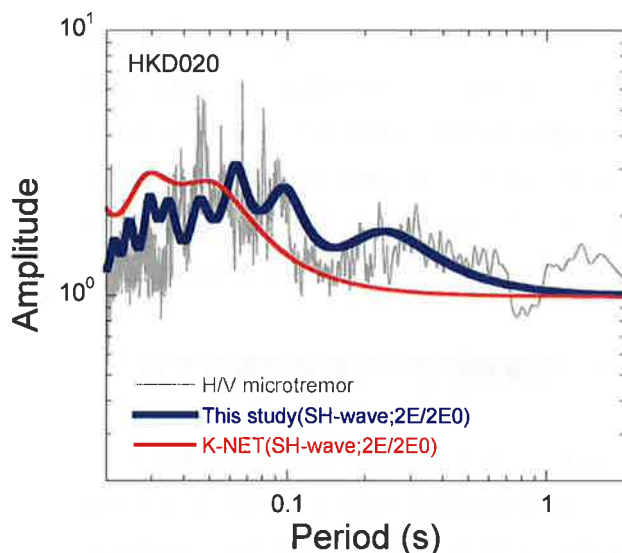


図10 HKD020 における微動 H/V スペクトルと地盤モデルに基づく SH 波の理論増幅特性の比較

作成した。作成された地盤モデルは、図8に併せて示されており、このモデルから計算されるレイリー波の理論位相速度は、図9のとおり、ダウンホール法による位相速度よりも笹谷・他[7]による位相速度を説明できるようになっていることが分かる。

図10には、表1に示す本研究の HKD020 の地盤モデルによる SH 波の理論増幅特性と HKD020 の微動 H/V スペクトルの比較を示す。ここで、表1の V_p はダウンホール法による PS 検層結果、密度 ρ については、表層 5 m までは、後述する4章の室内試験により密度が得られていることから、

表1 HKD020 における地震動評価モデル

上面深度 (m)	P波速度 V_p (m/s)	S波速度 V_s (m/s)	密度 ρ (10^3 kg/m^3)	層厚 H(m)	減衰 定数 h	非線形 特性
0	457	200	1.90	0.5	0.02	砂
0.5		200	2.00	0.5	0.03	礫混じり砂
1		200	2.00	1.0	0.02	礫1
1.5	952					
2		290	2.00	1.0	0.01	礫2
3		290	2.00	1.0	0.01	風化砂岩1
4		370	2.00	1.0	0.01	風化砂岩2
5		400	2.00	1.0	0.01	風化砂岩2
6	1722	473	2.00	1.0	0.01	—
7		549	2.00	9.0	0.01	—
16		604	2.06	7.0	0.01	—
23						—
38	2215	653	2.06	18.0	0.01	—
41		938	2.13	—	0.01	—

地下水位(2 m)以浅は湿潤密度と乾燥密度の平均的な値, 地下水位以深は湿潤密度を用いた. また, 2 m から 5 m の地下水以深の室内試験による湿潤密度と K-NET による地盤情報[5]の密度がほぼ同様であったことから, 5 m から 10 m は K-NET による情報, 10 m より深い部分は, V_p を用いた既往の関係式[10]により設定した. 減衰定数 h は, 室内試験により得られた減衰定数のひずみ依存特性を後述する HD モデルでフィッティングした際の減衰定数の下限に相当する値を用いた.

図 10 から, 表 1 に示す本研究の HKD020 の地盤モデルによる SH 波の理論増幅特性の卓越周期は, 微動 H/V スペクトルの卓越周期と周期 0.02 秒程度のごく短周期までよく対応している. 図 10 には, S 波速度構造として K-NET の地盤情報による SH 波の理論増幅特性も併せて示されているが, その卓越周期は, 微動 H/V スペクトルの卓越[13]を説明できない. 以上から, 本研究による HKD020 の地盤モデルは, より妥当なモデルであると結論づけられる.

4. 表層地盤における強震時の非線形特性

2004 年留萌地震による HKD020 での観測記録は, 高加速度, 高速度の強震動であった. そのため, 表層の軟弱地盤では, S 波速度(地盤剛性)の低下, 減衰の増大といった強震時の非線形性が生じた可能性が考えられる. そこで本研究では, 深さ 6 m までの土質地盤の 6 点について, GP サンプルングにより試料採取し, 0.2 Hz の正弦波による繰り返し三軸試験[11]によって地盤の剛性 G および減衰定数 h のひずみ γ 依存性を取得した. なお, 10 回目と 5 回目の繰り返しサイクルの結果との比較では, 両者に大きな差異はみられなかったため, 10 回目の繰り返しサイクルの結果を用いた.

図 11 には, 深さ 0~0.5 m の最表層の砂, 深さ

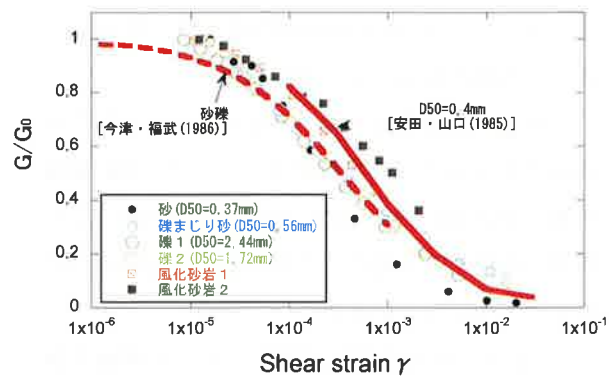


図 11 HKD020 における表層地盤の G/G_0 のひずみ依存性と既往の経験式の比較

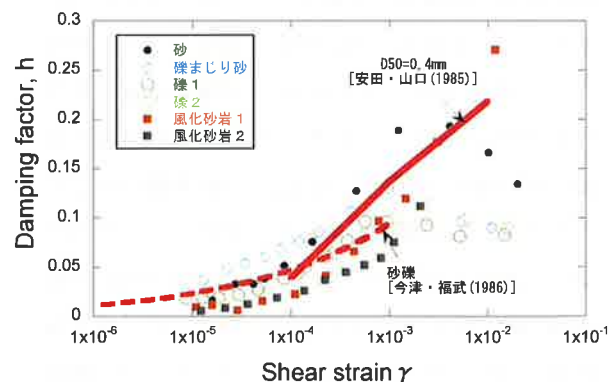


図 12 HKD020 における表層地盤の減衰定数 h のひずみ依存性と既往の経験式の比較

0.5~1 m の礫混じり砂, 深さ 1~2 m および 2~3 m の礫, および深さ 3~4 m, 4~5 m の風化砂岩についての G/G_0 のひずみ依存特性を示す. ここで, G_0 は, 各試料の実験結果の最も低ひずみにおける剛性 G の値を用いた. 図 11 から, ひずみレベルが 10^{-4} オーダーで G/G_0 が 0.6 程度, すなわち初期の剛性から 6 割程度に低下する結果が得られた. 図 11 には, 既往の経験的な G/G_0 のひずみ依存性[12][13]が併せて示されている. 安田・山口[12]の経験式は 50%通過粒径(D_{50}), 今津・福武[13]は土質によって特性が分類されており, 図 11 に示されているのは, それぞれ D_{50} が 0.4 mm の安田・山口[12]の砂に該当する特性および今津・福武[13]による砂礫の特性である. 図 11 から HKD020 における砂が主体の層は, D_{50} が 0.37 mm の最表層および深さ 3~5 m の風化砂岩であるが, 安田・

山口[12]の砂($D_{50}=0.4\text{ mm}$)の特性とは、最表層の砂よりも風化砂岩がよく対応している。よって、この風化砂岩の剛性には、砂層としての土質的な特性を有することが指摘できる。また、HKD020の礫主体の層については、今津・福武[13]による砂礫の特性とよく対応しており、一般的な礫の特性を示しているといえる。

図 12 は、図 11 と同じ試料についての減衰定数のひずみ依存特性を示す。減衰定数は、ひずみが 10^{-5} 以下の微小ひずみレベルにおいて、0.01 から 0.03 程度の値を示しており、ひずみレベルが 10^{-4} オーダーで 0.05 から 0.1 程度に増加することが分かる。図 12 には、また図 11 と同様の経験的な特性も併せて示されている。安田・山口[12]の砂($D_{50}=0.4\text{ mm}$)の特性は、 G/G_0 では最表層の砂よりも深さ 3~5 m の風化砂岩によく対応していたのに対し、減衰定数については、 D_{50} が 0.37 mm の最表層の砂に近い特性を示している。一方、礫主体の層については、減衰定数についても今津・福武[13]による砂礫の特性と類似している。以上から、少なくとも室内試験を実施した砂、礫混じり砂、礫、風化砂岩に対応する深さ 6 m 程度までの地盤は、強震時に非線形性を生じやすい特性を有していると考えられる。

5. 基盤地震動レベルの推計とサイト特性の影響の検討

2004 年留萌地震において、HKD020 では地表面において最大加速度 1127 cm/s^2 (最大速度約 74 cm/s) を観測した。地震規模のそれほど大きくない地震によって $1g$ を超える最大加速度の強震動が観測された要因の一つに、地盤の非線形に起因したサイト特性が加速度振幅の増幅に寄与した可能性が指摘されている。本研究で実施した一連の調査から、上述のように、HKD020 における詳細な地盤情報を得ることができた。そこで本章では、表 1 に示されている HKD020 の地盤モデルの深

さ 41 m の基盤での EW 成分の地震動レベルの推計を、現状までの調査結果に基づく HKD020 の地盤モデルおよび非線形特性 (動的変形特性) を用いて行い、2004 年留萌地震時の高加速度記録に対するサイト特性の影響について考察を行った。

5.1 基盤地震動の推計方法

地表の観測記録から地中の観測記録を逆算するには、1 次元地盤モデルを用いた 1 次元波動論 (重複反射理論) [14] による周波数領域での地盤応答解析法が一般的である。この 1 次元波動論に基づく地盤応答解析では、SHAKE[15] に代表される等価線形化法の考え方を導入することにより、強震時の地盤の非線形性 (S 波速度の低下と減衰定数の増大) を考慮した地中波 (E+F 波) ならびに表層地盤をはぎとった基盤地震動 (基盤入射波の 2 倍; 2E 波) の逆算も可能である。

図 13 には、2004 年留萌地震による HKD020 の EW 成分の地表観測記録 (最大加速度 1127 cm/s^2) を地表面入力として、表 1 に示されている HKD020 の地盤モデルを用いた線形解析で、地中波を計算する過程において得られた最大せん断ひずみの深さ分布を示す。図 13 によれば、線形解析で想定される地盤のせん断ひずみレベルとして、

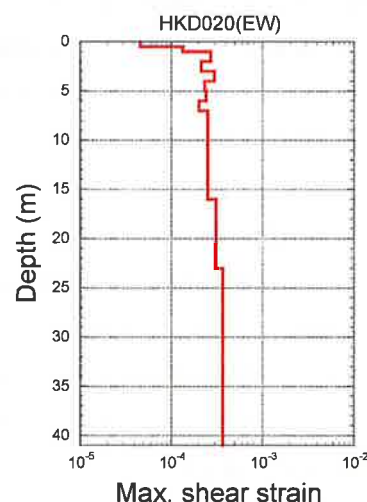


図 13 2004 年留萌地震時の地盤の最大せん断ひずみの深さ分布の試算結果 (線形解析)

$2\sim 3\times 10^{-4}$ (0.02~0.03%)が得られている。このレベルを図 11 および図 12 に示す動的変形特性でみれば、剛性は半分程度の低下、減衰定数は 0.05 から 0.08 程度となるという結果に該当する。図 13 は、2004 年留萌地震時に発生したひずみレベルのオーダーを試算するために実施した線形解析のため、厳密ではないが、この結果から本震時の基盤地震動を推計するには、少なくとも動的変形特性が得られた表層 6 m までの地盤については、非線形性を考慮する必要があると考えられる。そこで本研究では、等価線形化法を用いた 1 次元波動論による地盤応答解析により、高加速度を記録した EW 成分の地表観測記録から深さ 41 m の基盤層への入射波すなわち基盤地震動の推計を行った。

地盤の非線形解析としての等価線形化法の適用にあたっては、今回の解析対象が、中ひずみの領域と考えられることから、ひずみの周波数依存性については考慮していない。また、適用の可否に関わる液状化の有無については、Maeda and Sasatani[1]によれば、HKD020 では 2004 年留萌地震の本震時に非線形影響により応答特性の変化がみられるものの、その 100 秒後の地震ではすでに線形時の応答特性に戻っていたことから、物性の回復に時間がかかる液状化[16]のような非線形性は生じなかったことを指摘している。

5.2 解析条件

等価線形化法による地盤応答解析では、まず、表 1 に示されている S 波速度 V_s と密度 ρ から ρV_s^2 によって計算される剛性 G_0 および減衰定数 h を初期物性値として用いた地盤応答解析から、各層中央での最大ひずみ γ_{max} を計算する。ここで得られた各層の γ_{max} に一定の定数 α を乗じた有効ひずみ $\gamma = \alpha \gamma_{max}$ に対応する G/G_0 と h を、各層にそれぞれ設定した非線形特性 ($G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$) から読み取り、それを次回の物性値として用いて地盤応答解析を行う。この地盤応答解析の反復計算を、現在回で使用した剛性と次回使用する剛性の変化率 β が、設定した閾値以下となるまで続ける。これが本研究で使用した等価線形化法における計算の概略である。よって、解析条件としては、最大ひずみ γ_{max} から有効ひずみを計算する係数 α と反復計算を打ち切るための β の閾値を設定する必要がある。本研究では、 α を 0.65、 β の閾値を 0.01 とした。

図 14 は、表 1 の表層 6 m までの層に設定された非線形特性 ($G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$) を示す。図 14 には、図 11 および図 12 の室内試験で得られた動的変形特性を用いて、土質地盤に対する説明性のよい Hardin-Drnevich モデル (以下、HD モデル)

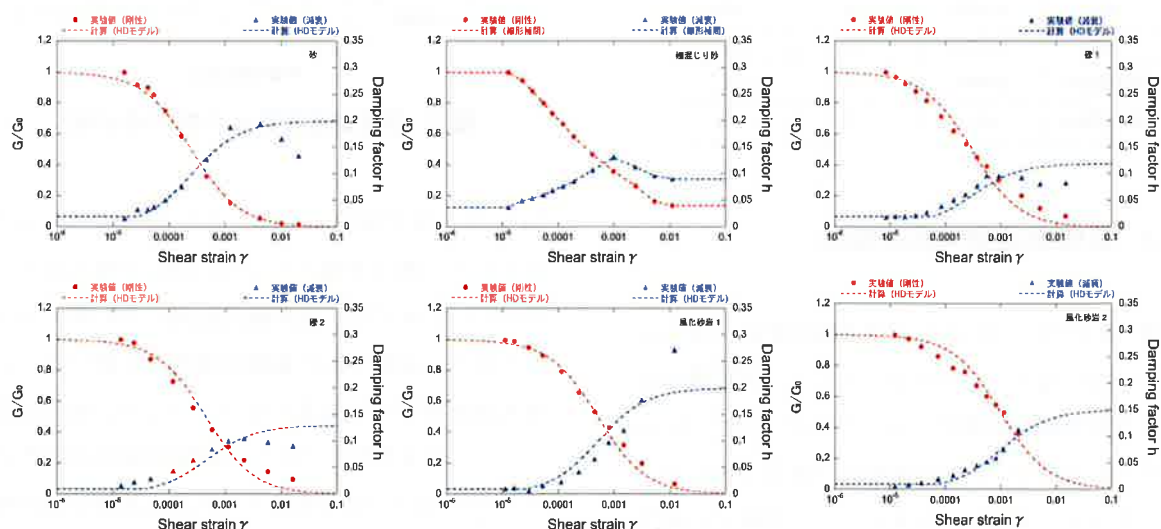


図 14 等価線形解析において設定した地盤の非線形特性

[17]によって実験結果をフィッティングした結果も併せて示されている。なお、HD モデルは次式の通りである。

$$G/G_0 = 1/(1 + \gamma/\gamma_r)$$

$$h = h_{\max} (1 - G/G_0)$$

ここで、 γ_r は基準ひずみと呼ばれる G/G_0 が 0.5 となるひずみ、 $h_{\max}$ は減衰定数の最大値に対応する。また、上式には現れないが、減衰定数 h については、下限値 $h_{\min}$ も設定している。表 2 には、各非線形特性における HD モデルのパラメータを示す。本研究の地盤応答解析では、表 2 に示す HD モデルでフィッティングした非線形特性を原則として用い、HD モデルのフィッティング結果と実験値の乖離が大きかった礫混じり砂については、図 14 に示すように対数軸上の線形補間による特性を用いた。また、減衰定数については、図 14 のひずみに依存する履歴減衰（材料減衰）のほかに、周波数に依存する減衰の寄与も考えられるが、強震時にはひずみの増大により履歴減衰が大きくなり、減衰の周波数依存性の影響が相対的に小さくなると考えられるため考慮していない。

表 2 HD モデルで用いたパラメータ

	γ_r	$h_{\max}$	$h_{\min}$
砂	0.00025	0.2	0.02
礫1	0.0003	0.12	0.02
礫2	0.00045	0.13	0.01
風化砂岩1	0.0005	0.2	0.01
風化砂岩2	0.001	0.15	0.01

5.3 基盤地震動の推計結果

図 15 には、EW 成分の地表観測記録（最大加速度 1127 cm/s^2 ）を地表面に入力し、等価線形化法による地盤応答解析によって推計された 41 m の深さの基盤層における地震動（基盤入射波の 2 倍）を示す。図 15 に示すように、基盤での地震動として、最大加速度 585 cm/s^2 が得られた。図

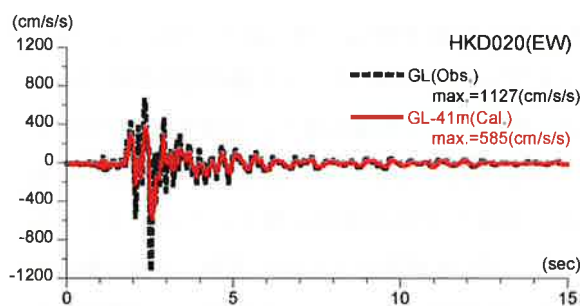


図 15 推計された基盤地震動と地表観測記録の比較

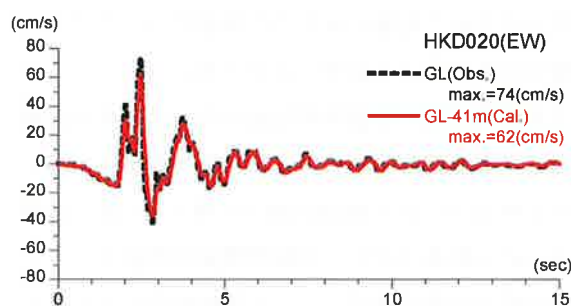


図 16 速度に変換した基盤地震動と地表観測記録の比較

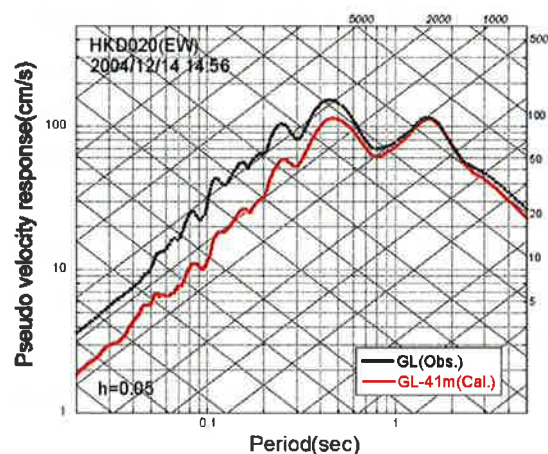


図 17 疑似速度応答スペクトルの比較

16 には、数値積分して得られた速度波形も示されており、最大速度として 62 cm/s が得られた。図 15 と図 16 には、地表観測記録も合わせて示されており、推計された基盤地震動と比較すると、最大加速度は 1/2 程度となっているが、最大速度については 4/5 程度であり、2004 年留萌地震時のサイト特性は、最大速度よりも最大加速度値の増加に影響を及ぼしている可能性を指摘できる。図

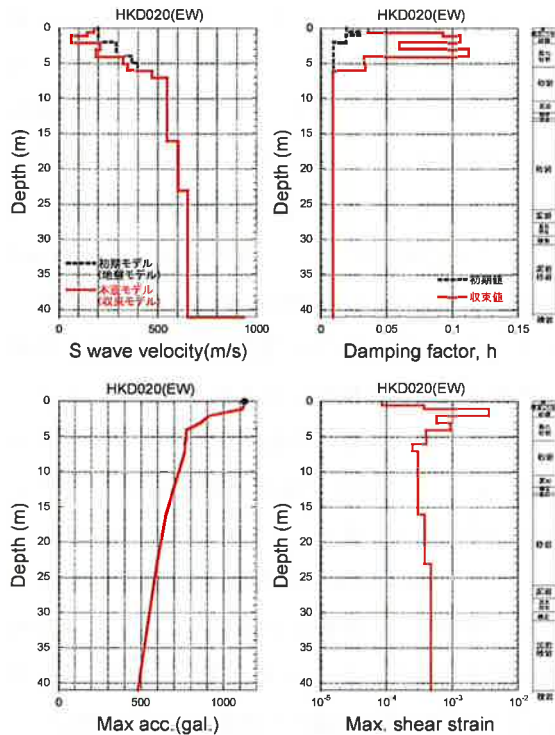


図 18 S 波速度(上段左)と減衰定数(上段右)の初期モデルと収束物性値の深さ分布, および地中波(E+F 波)の最大加速度※(下段左)と最大ひずみ(下段右)の深さ分布
(※ E+F 波の最大加速度のため深さ 41m での最大加速度は 2E 波である基盤地震動の最大加速度とは一致しない)

17 には, 推計された基盤地震動と地表観測記録の疑似速度応答スペクトルの比較を示す。図から, 疑似速度応答スペクトルのピーク周期 0.4-0.5 秒よりも短周期において, 地表観測記録と推計された基盤地震動の差異は大きくなっている。

図 18 には, 等価線形化法による地盤応答解析において収束した最終的な S 波速度と減衰定数の深さ分布, ならびに地中波 (E+F 波) の最大加速度と最大ひずみの深さ分布を示す。本研究での解析からは, 2004 年留萌地震時に地盤に発生したひずみは, 深さ 1~2 m の砂礫層で 3×10^{-3} (0.3%) と最も大きく, それに応じて当該層の S 波速度も初期モデルから大きく低下し, 減衰定数も初期モデルより増大している。また, 深さ 3~4 m の風化砂岩層でも最大ひずみ 1×10^{-3} (0.1%) が発生しており, この層の物性値の変化も大きい。なお, 実

際の地盤の非線形性は, 時々刻々と変化するひずみレベルに応じた物性の変化として現れることが考えられるが, 等価線形化法の収束値は, それらの平均的な物性値と考えられる。よって, 今回得られた収束物性値は, 2004 年留萌地震時の HKD020 の平均的な物性値と位置づけられる。

5.4 高加速度記録に対するサイト特性の影響の考察

表層地盤における強震時の非線形性は, 減衰定数の増大をもたらすことから, 高周波数成分を低減させる効果があり, 軟弱地盤では最大加速度が基盤から地表にかけて低減する場合もある。今回の推計では, 地盤が非線形化し, 上述のように減衰定数の増大が生じた。結果として, 最大速度については大きな増大はみられなかったが, 最大加速度は 41 m の深さから地表にかけて 2 倍程度大きくなる結果が得られた。そこで, 今回の推計結果で得られた増幅の特徴について, 地表観測記録と深さ 41 m の推計された基盤地震動のフーリエスペクトルの比較により検討した。図 19 に, 両者の加速度フーリエスペクトルの比較を示す。図 19 から, 基盤での推計地震動と地表観測記録で

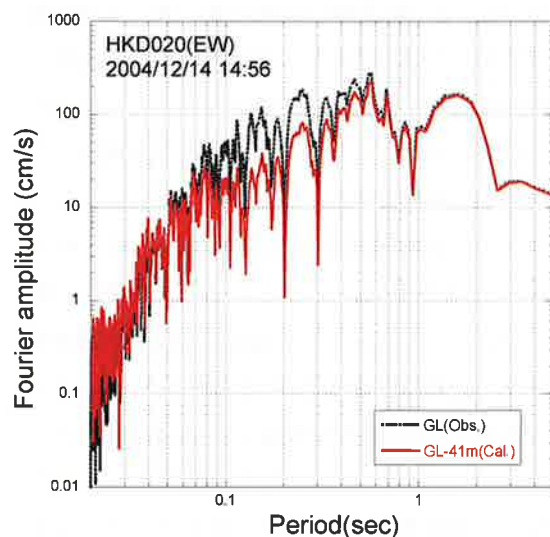


図 19 推計した基盤地震動と地表観測記録の加速度フーリエスペクトルの比較

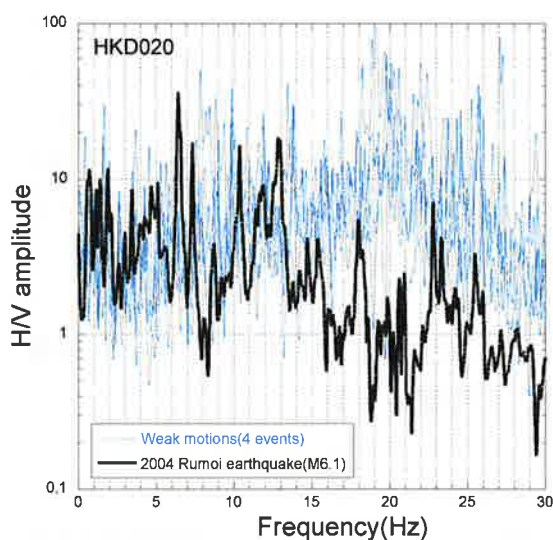


図 20 HKD020 地点における弱震時と 2004 年留萌地震(強震)時の S 波主要動部の H/V スペクトルの比較

は、周期約 0.08 秒から 0.3 秒 (約 3 Hz から 13 Hz) の範囲で地表観測記録のスペクトルが大きく、41 m の深さの基盤から地表への増幅としてサイト特性が寄与したことを示している。よって、最大加速度の増幅は、この周期帯域によるサイト特性の影響であると考えられる。一方、周期約 0.08 秒より短周期 (約 13 Hz より高周波数側) では、基盤での推計地震動と地表観測記録に変化はみられず、基盤から地表への増幅度が低下していることが分かる。この短周期 (高周波数) 側での増幅特性の落ち込みは、従来から指摘されている地盤の非線形性でみられる高周波数側におけるサイト特性の低減に対応すると考えられ [18]、本震時のサイト特性の特徴と考えられる。

そこで、基盤地震動の推計の過程で得られた 2004 年留萌地震時のこのようなサイト特性の特徴について、その妥当性を実際の 2004 年留萌地震時の HKD020 における S 波部の H/V スペクトルの特徴との比較から検討した。図 20 には、HKD020 における 2004 年留萌地震時と 4 つの弱震時の S 波初動から 5 秒間の H/V スペクトルを示す。ここで、解析に用いた弱震記録は、2004 年留萌地震と同様に、HKD020 近傍の内陸で発生し

た深さ 10 km 以浅の地震で、最大加速度が 100 gal 以下の記録を対象としている。図 20 から、S 波部の H/V スペクトルについては、弱震 (線形) 時には地震によって変化せず、強震時にのみ変化することから、サイト特性の変化を理解することに用いられ [19]、図 20 と同様の比較は Maeda and Sasatani [1] においても HKD020 を対象に行われている。なお、図 20 は高周波数側での変化を詳細に把握するために横軸を周波数で示している。この図から、約 13 Hz (周期約 0.08 秒) より高周波数側において、2004 年留萌地震時の H/V スペクトルは弱震時より低下していることが分かる。このことは、2004 年留萌地震時に周期約 0.08 秒より短周期側では、地盤の非線形性によりサイト増幅の低下が発生したことを示唆しており、図 19 において地震動が基盤から地表にかけて増幅していない (フーリエ振幅が変化しない) こととよく整合する。以上から、今回の基盤地震動の推計において得られた収束物性値によるサイト特性は、地表観測記録とも矛盾しない妥当な結果の一つと考えられる。

6. まとめ

2004 年留萌地震の際に HKD020 で観測された高加速度、高速度記録の発生要因に寄与したサイト特性の影響について検討するため、HKD020 における物理探査として PS 検層および強震時のサイト特性に大きな影響を及ぼす表層の土質地盤の室内試験を実施した。また、現状までの調査結果に基づき、基盤地震動を推計するとともにサイト特性の影響について検討した。得られた知見は以下の通りにまとめられる。

- (1) HKD020 で実施した物理探査のうち、これまでに得られている深さ 300 m までの PS 検層から $V_s 700$ m/s 以上となる明瞭な速度境界、すなわち基盤層の深さは、従来評価よりも深い 41 m の設定となった。それ以降の S 波速

度は、深さに応じてなだらかに増加する漸増構造の様相を呈しており、深さ 300 m の位置での V_s は 1000~1100 m/s 程度であった。

- (2) PS 検層結果および既往研究によるレイリー波位相速度に基づいて、深さ 41 m の基盤層までの地震動評価のための地盤モデルを構築した。この地盤モデルから計算される理論伝達特性は、HKD020 の地震計設置位置での微動 H/V スペクトルの卓越周期を説明できることも確認し、地盤モデルの妥当性を検証した。
- (3) 強震時のサイト特性に影響を及ぼす地盤の非線形性（動的変形特性）を、表層の深さ 6 m までに分布する砂、礫混じり砂、礫、風化砂岩に対して実施した。これらの土質の特性は、既往の経験式とも概ね対応しており、少なくとも深さ 6 m 程度までの地盤については、強震時に非線形性を生じやすい特性を有していることが分かった。
- (4) 2004 年留萌地震時の HKD020 における地表観測記録から、深さ 41 m の基盤地震動（基盤入射波の 2 倍；2E 波）を、現状までで得られている表層 6 m の非線形性を考慮した等価線形解析により推計した。その結果、今回の条件による推計では、最大加速度は地表の約 $1/2$ の 585 cm/s^2 、最大速度は地表の約 $4/5$ の 62 cm/s が得られた。これは HKD020 のサイト特性が、地表での高加速度の生成に寄与したことを示唆する。
- (5) 推計した基盤地震動と地表記録のフーリエスペクトルの比較から、2004 年留萌地震時の増幅特性について検討した結果、周期約 0.08 秒から 0.3 秒では、地表での増幅が大きく、約 0.08 秒以下（約 13 Hz 以上）では増幅が小さくなることが分かった。このサイト増幅は、従来から指摘されている地盤の非線形性によって生じる高周波数側のサイト特性の低減に対応する HKD020 での本震時の特徴と考えられる。

- (6) 2004 年留萌地震時と弱震時の S 波部の H/V スペクトルの比較から、本震時に周期約 0.08 秒より短周期側では、地盤の非線形性によりサイト増幅が低下を示唆する結果を得た。これは、(5)で得られた周期約 0.08 秒（約 13 Hz）より短周期において、地表での増幅度が低減する結果と整合する。このことは、基盤地震動を推計した収束地盤モデルが、観測事実とも矛盾しない妥当な結果の一つに位置づけられることを示唆する。

以上の結果は、現状までの物理探査および室内試験結果に基づき得られた知見である。Maeda and Sasatani[1]によれば、より深部の 300 m 以深において速度境界が存在する可能性が指摘されており、それによるサイト特性が地表観測記録に影響を及ぼしている可能性も考えられる。また、表層の 6 m より深い部分について、今回の解析では非線形性を考慮していないが、強震時に堆積軟岩が非線形性を呈す可能性は指摘されている[20]。つまり、表層の 6 m より深い層の強震時の非線形性が HKD020 の地表観測記録に影響している可能性も考えられる。これらの点については、今後の調査を踏まえて検討する予定である。なお、巻末には付録として、2004 年留萌地震時の HKD020 の深さ 41 m における上下成分の基盤地震動の推計結果を掲載しているので、参照されたい。

謝辞

現地の調査にあたっては、おにしか更生園、小平町役場の方々に、多大なるご協力をいただきました。調査の実施では、北電総合設計にご尽力をいただきました。ここに記して、深甚なる謝意を表します。また、佐藤清隆上席研究員、青柳恭平主任研究員には、丁寧に原稿を読んでいただき、大変有益なコメントをいただきました。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Maeda, T. and T. Sasatani (2009) : Strong ground motions from an Mj 6.1 inland crustal earthquake in Hokkaido, Japan: the 2004 Rumoi earthquake, *Earth Planets Space*, 61, 689-701.
- [2] 宮腰研・前田宜浩・笹谷努・釜江克宏・入倉孝次郎 (2010) : 2004 年留萌地震(Mj6.1)における HKD020 の大振幅地震動の生成メカニズム, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会予稿集, SSS016-P22.
- [3] 司宏俊・翠川三郎 (1999) :断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 523, 63-70.
- [4] 例えば, 佐藤浩章・芝良昭(2000) :岩盤上記録における上下動と水平動最大値の出現時間差に関する基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), 構造 2, 211-212.
- [5] 防災科学技術研究所 : 強震観測網 (K-NET, KiK-net) , <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>.
- [6] 狐崎長琅・後藤典俊・小林芳正・井川猛・堀家正則・斉藤徳美・黒田徹・山根一修・奥住宏一 (1990) : 地震動予測のための深層地盤 P・S 波速度の推定, 自然災害科学, 9-3, 1-17.
- [7] 笹谷努・前田宜浩・高井伸雄・重藤迪子・堀田淳・関克郎・野本真吾(2008) : Mj6.1 内陸地殻内地震によって大加速度を観測した K-NET(HKD020)地点での S 波速度構造の推定, 物理探査学会第 119 回学術講演会講演論文集, 25-27.
- [8] 佐藤浩章・芝良昭・東貞成・功刀卓・前田宜浩・藤原広行 (2013) : M6 クラスの内陸地殻内地震による強震記録の要因解明に向けた K-NET(HKD020)港町観測点での物理探査, 物理探査学会第 129 回学術講演会講演論文集, 35-38.
- [9] 例えば, 日本建築学会 (2004) : 地盤震動-現象と理論-.
- [10] Gardner, G.H.F., L.W. Gardner and A.R. Gregory (1974) : Formation velocity and density -the diagnostic basis for stratigraphic traps, *Geophysics*, 39-6, 770-780.
- [11] 地盤工学会(2000):地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験方法, 地盤工学会基準, JGS0542.
- [12] 安田進・山口勇(1985) : 種々の不攪乱土における動的変形特性, 第 20 回土質工学研究発表会講演集, 539-542.
- [13] 今津雅紀・福武毅芳(1986): 動的変形特性のデータ処理に関する一考察, 第 21 回土質工学研究発表会講演集, 533-536.
- [14] 例えば, Haskell, N.A. (1960): Crustal reflection of plane SH waves, *J. Geophys. Res.*, 65, 4147-4150.
- [15] Schnabel, P.B., J. Lysmer and H.B. Seed (1972): SHAKE a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, *EERC*, 72-12.
- [16] Aguirre, J. and K. Irikura (1997) : Nonlinearity, liquefaction, and velocity of soft soil layers in Port Island, Kobe, during the Hyogo-ken Nanbu earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87, 1244-1258.
- [17] Hardin, B.O. and V.P. Drnevich(1972) : Shear modulus and damping in soils, *Proc. ASCE*, 98-SM7, 667-692.
- [18] 例えば, Noguchi, S., H. Sato and T. Sasatani, (2012) : Characterization of Nonlinear Site Response Based on Strong Motion Records at K-NET and KiK-net Stations in the East of Japan, 15th WCEE, Lisbon, September 24-28, No. 3846.
- [19] Wen, K.L., T. T.M. Chang, C.M. Lin and H.J. Chiang (2006) : Identification of nonlinear site response using the H/V spectral ratio method,

Terr. Atmos. Ocean. Sci., 17, 533-546.

- [20] 福元俊一・吉田望・佐原守(2009): 堆積軟岩の動的変形特性, 日本地震工学会論文集, 9-1, 46-64.

(付録) 上下成分の基盤地震動の推計

上下成分の深さ 41 m の基盤面における地震動の推計は以下のように行うことができる。圧縮波である P 波が主体となる地表付近の上下動については、地盤の鉛直方向の軸ひずみが強震時にそれほど増大せず、上下動の地盤応答解析に必要なしなことが指摘されている[付 1]。弾性論に基づけば、P 波速度 V_p と P 波の減衰定数 ($h_p = 1/2Q_p$) は、以下のように表される。

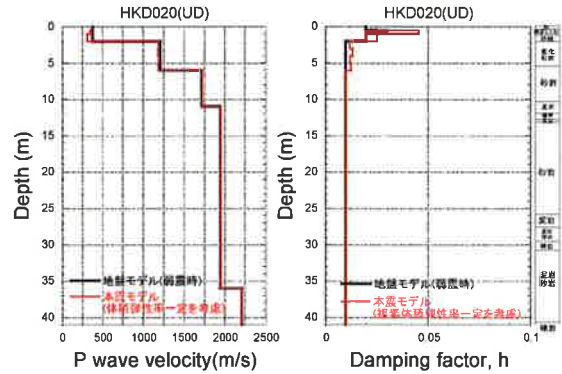
$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}}$$

$$Q_p^{-1} = Q_K^{-1} + \frac{4}{3} \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2 (Q_s^{-1} - Q_K^{-1})$$

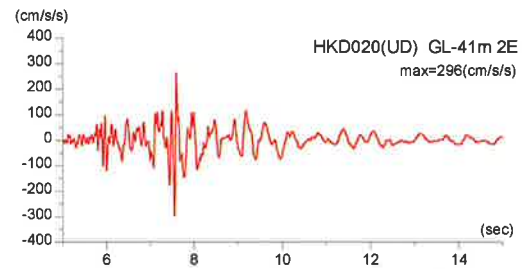
ここに、 K は体積弾性率、 Q_K^{-1} は体積弾性率の履歴による減衰を表し、1 次元波動論に基づく周波数領域での解析では、複素体積弾性率の実部と虚部の比で設定できる[付 2]。上式から、 V_p と h_p は、強震時に変化する S 波の物性である V_s (G) と Q_s^{-1} に関係づけられることから、強震時の V_p と h_p は、それらの変化の影響を受け、若干の変化が生じることが考えられる。Sato et al.[付 3]では、強震時に体積ひずみがほとんど変化しないことから、弱震時の地盤モデルの V_s 、 V_p 、 Q_s^{-1} 、 Q_p^{-1} から得られる複素体積弾性率 (K 、 Q_K^{-1}) を強震時に用いることを提案した。また、弱震時の複素体積弾性率と強震時の V_s (G) および Q_s^{-1} から、上式を用いて強震時の V_p と h_p を設定し、それを用いた強震時の上下動シミュレーションが良好なシミュレーション結果を与えることを示している。

そこで、Sato et al.[付 3]の方法に基づくと、弱震（微小ひずみ）時に $Q_s^{-1} = Q_p^{-1}$ とすれば、HKD020 地点の弱震時の複素体積弾性率 (K 、 Q_K^{-1}) が表 1 の地盤モデルから得られる。次に、複素体積弾性率と 2004 年留萌地震時の EW 成分の収束物性値から、2004 年留萌地震時の V_p と $h_p (= 0.5Q_p^{-1})$ が、上式から付図 1 のように得られ

る。最終的に、この V_p と h_p を用いて上下成分の地表の観測記録を入力とした 1 次元波動論に基づく線形解析を行うことにより、上下成分の基盤地震動の推定は可能となる。結果は付図 2 に示す通りである。



付図 1 2004 年留萌地震時の P 波速度と減衰定数



付図 2 上下成分の基盤地震動の推計結果

[付1] 國生剛治・佐藤清隆・松本正毅 (1995):1995 年兵庫県南部地震での地盤の非線形震動特性, 土と基礎, 43-9, 39-43

[付2] 例えば、佐藤浩章・金谷守 (2006):地震観測記録に基づく地震動の減衰特性 (その 2) -強震時の減衰特性を考慮した等価線形解析による上下動評価法の提案-, 電力中央研究所報告 N05010.

[付3] Sato, H., M. Kanatani and K. Sato(2006):Proposal of new equivalent linearized method for precise vertical motion simulation of ground, Proc. of 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (a joint event of 13 th ECEE and 30 th General Assembly of the ESC), Paper No.322.

電力中央研究所報告

[不許複製]

編集・発行人 一般財団法人電力中央研究所
地球工学研究所長
千葉県我孫子市我孫子1646
電話 04 (7182) 1181 (代)
e-mail cerl-rr-ml@criepi.denken.or.jp

発行・著作・公開 一般財団法人電力中央研究所
東京都千代田区大手町1-6-1
電話 03 (3201) 6601 (代)

印刷所 株式会社ユウワビジネス
東京都千代田区神田須田町1-1
電話 03 (3258) 9380

ISBN978-4-7983-1148-7

