

地盤の地震応答解析結果に与える 初期速度構造の精度の影響

遠藤 大輔¹・上田 稔²・熊崎 幾太郎²・永坂 英明³・葛巻 亜弥子⁴

¹正会員 工修 中部電力株式会社 技術開発本部 (〒459-8522 名古屋市緑区大高町字北関山 20-1)

²正会員 工博 中部電力株式会社 技術開発本部

³株式会社シーティーアイ 科学技術部 (〒450-0003 名古屋市中村区名駅南 1 丁目 27-2)

⁴正会員 理修 株式会社シーティーアイ 科学技術部

地盤の地震応答解析を実施する際、初期の速度構造を正確に設定することが重要である。しかし、初期の速度構造を求める手法の違いによってその精度に差が生じると考えられる。本稿では 2 地点を対象に、ダウンホール方式と孔内起振受振方式によって得られる速度構造、ならびに速度構造から得られる S 波伝播時間や伝達関数から求まる固有振動数の比較を行った。次に両者の S 波検層結果を初期の速度構造とした非線形地震応答解析を実施した。その結果、速度構造の初期値として孔内起振受振方式による結果を用いた場合は地震観測記録を程良く再現するが、ダウンホール方式の結果を用いた場合ではその再現精度は不十分で、初期の速度構造の違いが、地震応答解析結果に大きな影響を及ぼす場合があることを示した。

Key Words: Shear wave logging, Shear wave velocity, Seismic response, Distribution of shear wave velocity

1. はじめに

筆者らは鉛直アレー地震観測記録が得られている区間を対象に、ダウンホール方式（以下 DH 方式）による S 波検層結果に基づいて得られる固有振動数や S 波伝播時間と、鉛直アレー観測による弱震動地震観測記録から得られるそれらとの比較を行い、両者に比較的大きな差異があることを明らかにした¹⁾。そのためダウンホール方式の S 波検層による結果を地盤の初期の速度構造として地震応答解析を実施する場合、その初期の速度構造の精度が応答解析結果に影響を及ぼすことが懸念された。そこで本稿では、DH 方式による S 波検層から得られる速度構造と、これと異なる孔内起振受振方式（サスペンション方式、以下 SP 方式）による S 波検層から得られる速度構造ならびに速度構造から得られる固有振動数および S 波伝播時間について比較を行う。次に、両者の S 波検層結果を初期の速度構造とした地震応答解析結果と地震観測記録との比較を行うことによって、初期の速度構造の精度が地震応答解析結果に及ぼす影響について調べた。

2. 対象地点

DH 方式と SP 方式の S 波検層結果が実施され、かつ鉛直アレー地震観測記録が得られている地点として、茨城県の東京電力(株)鹿島共同火力発電所構内地点²⁾（以下鹿島地点）および兵庫県の関西電力(株)高砂発電所地点³⁾（以下高砂地点）の 2 地点を対象とした。

鹿島地点は鹿島灘に面した沿岸部に位置しており、砂礫と砂からなる地盤構成となっている。高砂地点は瀬戸内海に面した高砂市沿岸部に位置し、砂礫に数層の粘土層を挟む地盤構成となっている。図-1 に調査地点の地盤構成および地震計設置位置を示す。なお、対象地点では地盤剛性および減衰のひずみ依存データが得られている。

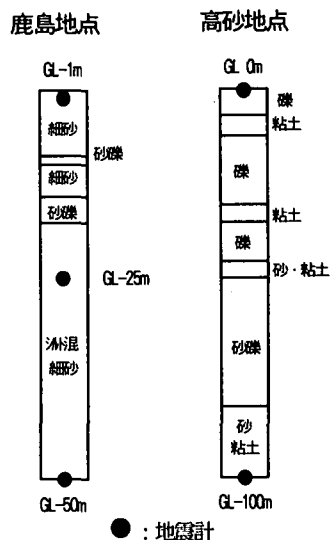


図-1 地盤構成および地震計設置位置

3. 速度構造、S波伝播時間及び伝達関数の比較

(1) 鹿島地点

図-2にSP方式とDH方式によるS波検層から得られた速度構造を示す。SP方式では詳細な層区分の速度構造が得られている。DH方式では層区分の粗い速度構造となっている。これは計測データの整理方法に起因するVsの平均化によるものと考えられる。また、G.L-17m以深ではDH方式とSP方式とでは大きな差はみとめられないが、それ以浅ではDH方式のVsの方が大きい。

表-1に両者のS波検層から得られた速度構造のS波伝播時間を示す。このS波伝播時間は深度方向のVs分布とそれに対応する地層厚を用いて算出しており、G.L-25m～50m間およびG.L-1m～25m間のS波伝播時間を示した。G.L-25～50mではDH方式、SP方式による結果に差は認められない。しかし表層側のG.L-1～25mにおいてはDH方式の方がS波伝播時間が早い。

図-3は両者の速度構造をもとにG.L-1mのG.L-50mに対する伝達関数を示したものである。両者の固有振動数を比較すると、1次固有振動数にほとんど差

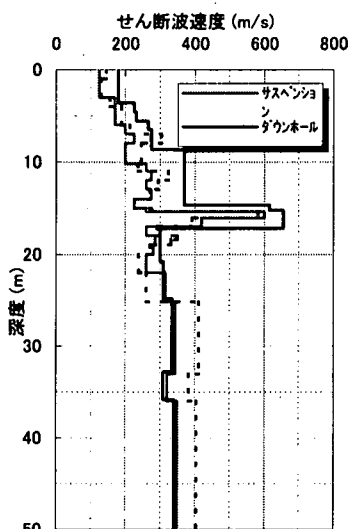


図-2 速度構造の比較 (鹿島地点)

表-1 S波伝播時間の比較

鹿島地点	伝播時間(s)	
区 間	-25～50m	-1～25m
サスベンション	0.074	0.105
タウンホール	0.074	0.079
地震記録	0.067	0.094
同定結果	0.065	0.101

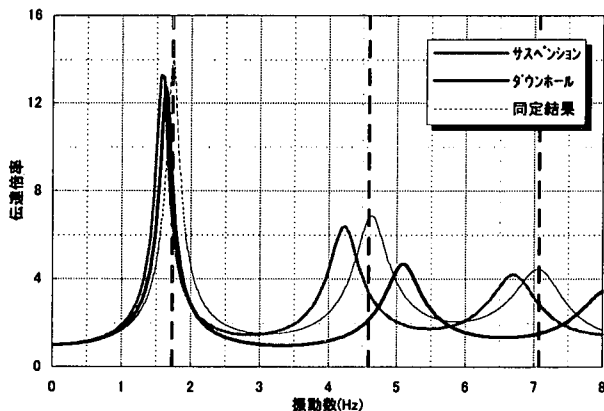


図-3 伝達関数の比較 (鹿島地点)
(図中縦破線は地震の各次固有振動数を示す)

はなく、2次固有振動数では約1Hz、3次固有振動数では約1.5Hzの差がある。

(3) 高砂地点

図-4に速度構造を示すが、SP方式では詳細な層区分でVs分布が得られており、局所的なVs変化をとらえた結果となっている。一方、DH方式の結果は粗い層区分となっており、SP方式の結果とはVsの分布形状が異なっている。表-2は両者のG.L.0m～100m間のS波伝播時間を示したものであるが、SP方式とDH方式のVs分布の相違に反して両者にはほとんど差は認められない。これは両者のG.L.0m～100m間における地盤平均Vs値が一致したためと考えられる。図-5に両者の速度構造のG.L.0mのG.L-100mに対する伝達関数を示すが、両者はほとんど一致しておりVs分布の違いが伝達関数には反映されない結果となった。

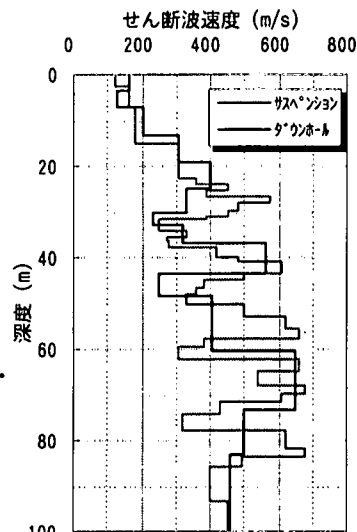


図-4 速度構造の比較 (高砂地点)

表-2 S波伝播時間の比較

高砂地点	伝播時間(s)
区 間	0～100m
サスベンション	0.289
タウンホール	0.292

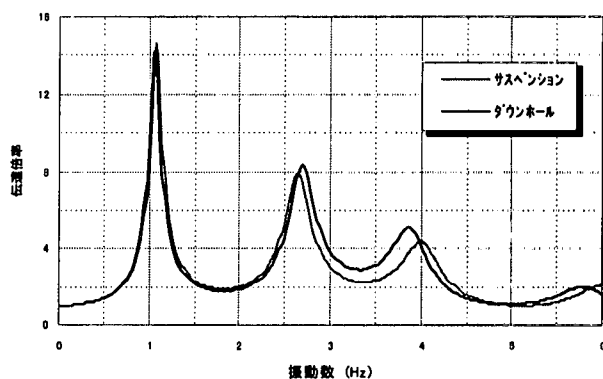


図-5 伝達関数の比較 (高砂地点)

4. 地震応答解析結果の比較

(1) 解析手法と解析条件

用いた解析手法は、室内要素試験による G_{eq} 、 $h \sim \gamma$ 関係から地盤の剛性と減衰ひずみ依存性を高精度に再現するMDMモデルを適用した非線形全応力解析手法である。この手法の応答再現精度についてはいくつか

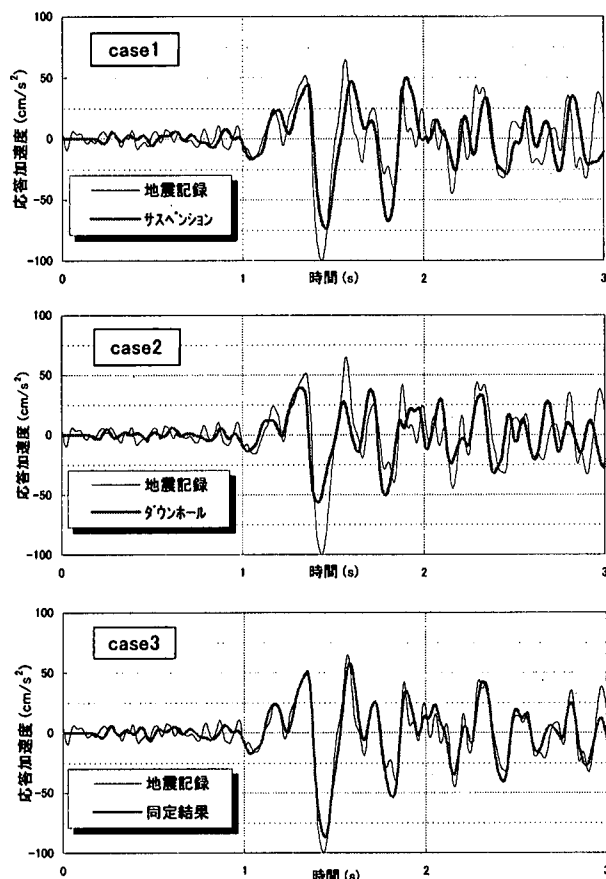


図-6 解析結果と地震観測記録の加速度時刻歴波形の比較
(鹿島地点)

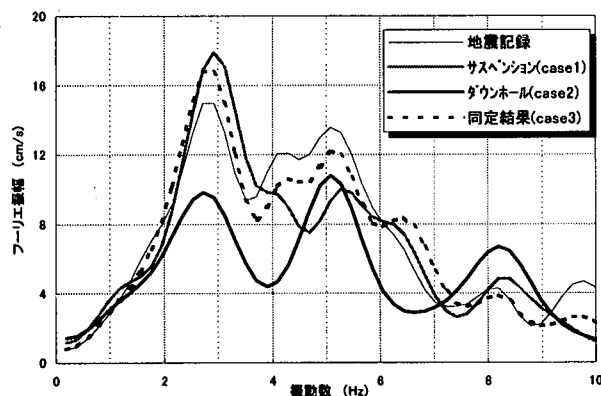


図-7 解析結果と地震観測記録のフーリエスペクトルの比較
(鹿島地点)

の地点で実証されている⁴⁾。

応答解析に際しては下部地震計で観測された地震観測記録を入力し、地表面の地震計設置位置における応答解析結果を得る。この解析結果と地表面での地震観測記録を比較した。なお、地震観測記録は、鹿島地点は茨城県南西部を震源とする地震観測記録²⁾、高砂地点は兵庫県南部地震観測記録³⁾である。

(2) 鹿島地点

SP 方式による S 波検層結果を初期の速度構造として地震応答解析した場合を case1、DH 方式による S 波検層結果を初期の速度構造にした解析を case2 とし、そ

の加速度応答波形を図-6 に、これらに対応したフーリエスペクトルを図-7 に示す。フーリエスペクトルは Hanning ウィンドウによって平滑化しており、処理回数は全て 10 サイクルに統一した。

case2 については最大加速度における地震観測記録との差は 50cm/s^2 と 5 割近くも応答が小さい。また加速度時刻歴波形に対応したスペクトル振幅も 2~6Hz で小さくなっており地震観測記録の再現精度は低い。

case1 については位相ズレはほとんどなく、応答加速度について概ね良好にピークをとらえている。スペクトルも地震観測記録に近く、比較的精度良く地震観測記録を再現できているが、地震観測記録に比べて 1.4s 付近の最大加速度が観測記録の 3/4 程度と小さく、スペクトルも 4~6Hz 付近でやや小さくなっている。

そこで、地震観測記録により S 波伝播時間と伝達関数を算出し、SP 方式のそれと比較を試みた。地震観測記録の S 波伝播時間は下部地震計と上部地震計における水平動記録の相互相関関数が、最大値となる時間差として算出した。

算出した結果を S 波伝播時間、伝達関数をそれぞれ表-1、図-3 に示すが、両者には差異が認められる。そこで、SP 方式による速度構造の固有振動数を弱震動地震観測記録の固有振動数に合わせるように逆解析をおこない速度構造を同定した。図-2 に同定された速度構造を示す。この同定結果を初期の速度構造として地震応答解析を実施した結果が case3 である。地震観測記録の加速度時刻歴波形とスペクトルにほぼ一致しており再現精度は非常に高い。このことから、SP 方式による地震応答解析結果にも速度構造に起因する誤差が含まれていると判断される。

(3) 高砂地点

SP 方式による S 波検層結果を初期の速度構造として地震応答解析した場合を case1、S 波検層結果を初期の速度構造にした解析を case2 として加速度時刻歴波形を図-8 に、これに対応するフーリエスペクトルを図-9 に示す。

case1 の応答解析結果は加速度時刻歴波形、それに対応したフーリエスペクトルが示すとおり地震観測記録に良く一致しており非常に再現精度が高い。しかし、case2 では 7s 付近以降で応答が低下しており地震観測記録の再現精度は著しく低い。

図-10 に case1、case2 の深度方向における最大ひずみ分布を示す。深度方向に大きなひずみが発生しているのは case1、case2 いずれも地表面近くで、case1 では G.L.2.3m、case2 では G.L.6.4m である。

図-8 に示すとおり case1、case2 で解析結果と大きな

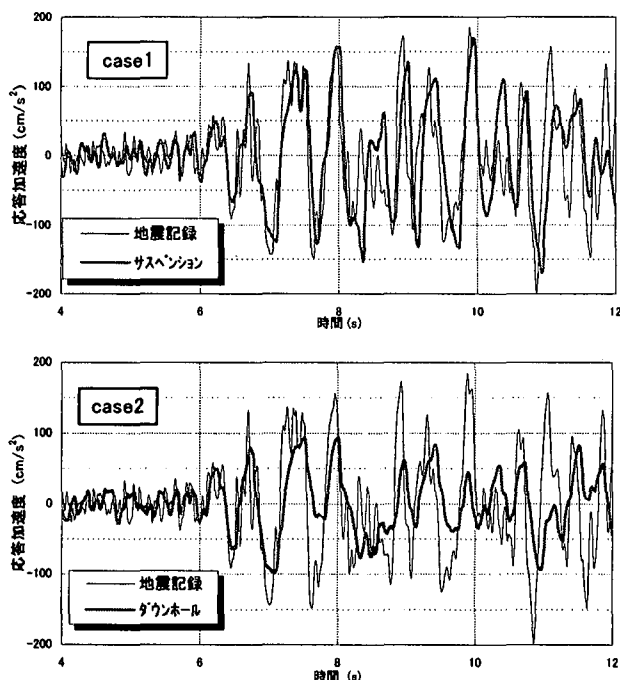


図-8 解析結果と地震観測記録の加速度時刻歴波形の比較 (高砂地点)

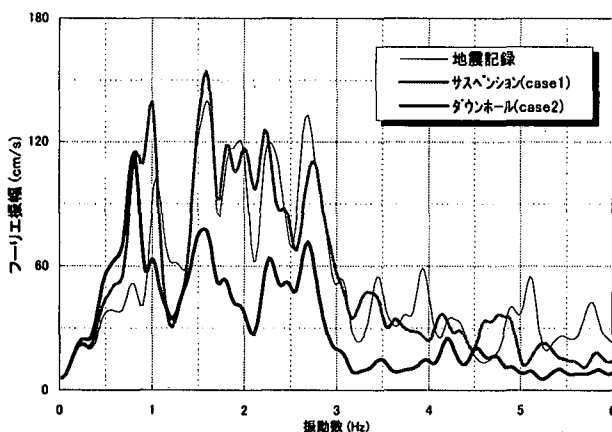


図-9 解析結果と地震観測記録のフーリエスペクトルの比較 (高砂地点)

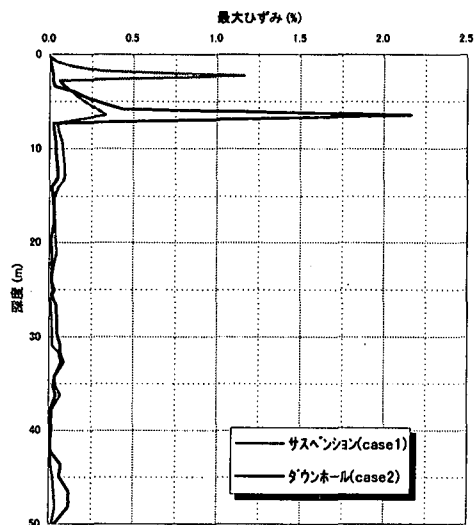


図-10 最大ひずみの深度方向分布 (高砂地点)

差異を生じているのは 7s 程度以降である。紙面の都合で割愛するが、この 7s 程度以降に case1, case2 とともに上記深度位置で徐々にひずみが大きくなっている。このひずみの集中が生じている位置は、図-4 の速度構造で、case1 は表層から 1 層目に、case2 では 2 層目に対応し、1, 2 層目の速度値は case1 と case2 で大小関係が逆転している。

case2 の解析で、表層から 1, 2 層目の速度構造だけ case1 のものに変更して解析を実施した場合には、7sec 程度以降の応答は図-8 に比べ大きなものであった。

以上のことから、7s 程度以降で case1 と 2 で大きな応答差異が生じているのは表層部の速度構造の差異に大きく起因し、case2 の場合、2 層目でのひずみの集中が大きく剛性の低下と減衰の増大が大きいため 7s 程度以降の応答が小さくなっていると考えられる。

5. まとめ

鉛直アレー地震観測記録が得られている鹿島地点と高砂地点の 2 地点において、サスペンション方式とダウンホール方式による S 波検層結果を初期の速度構造とした非線形地震応答解析結果と地震観測記録との比較を実施した。その結果、サスペンション方式による S 波検層結果を初期の速度構造とした地震応答解析結果は地震観測記録を程良く再現するが、ダウンホール方式による結果を初期の速度構造とした解析結果は再現精度が著しく低下する場合があることを示した。

その再現精度が低いのは、ダウンホール方式の S 波検層では速度構造の詳細な把握がなされない場合があり、S 波速度伝播時間や地盤の固有振動数が正確にとらえられなかったり、ひずみが集中して剛性の低下と減衰の増大が生じる層の深度やその程度が異なる場合があるためである。

参考文献

- 1) 遠藤, 上田, 熊崎ら: S 波検層結果と鉛直アレー地震観測記録から求めた地盤の固有振動数および波動伝播時間の比較第 36 回地盤工学研究発表会, 2001.6
- 2) 金谷, 当麻, 矢島: 地震観測記録に基づく地盤の非線形解析手法(NAFFS)の適用性の検討ー鹿島地点での地震観測とその数値シミュレーションー, 電力中央研究所報告 U95027, 1996.3
- 3) 副田, 玉井, 仲津ら: 鉛直アレー強震記録とその伝播特性に関する解析的一考察, 第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, pp273-276, 1999.7
- 4) 熊崎, 上田ら: MDM モデル依存非線形全応力解析による北海道釧路沖地震のアレー観測記録の再現と液状化判定, 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, 2001.8