堆積地盤における上下地震動の特性と Q_p 構造

CHARACTERISTICS OF VERTICAL SEISMIC MOTIONS AND Q_p -VALUES IN SEDIMENTARY LAYERS

藤 堂 正 喜^{*1}, 羽 鳥 敏 明^{*2}, 千 葉 脩^{*3}, 高 橋 克 也^{*4}
武 村 雅 之^{*5}, 田 中 英 朗^{*6}

*Masanobu TOHDO, Toshiaki HATORI, Osamu CHIBA, Katsuya TAKAHASHI,
Masayuki TAKEMURA and Hideo TANAKA*

Using seismic records observed in 4 borehole arrays, characteristics of vertical seismic motions in sedimentary layers are investigated. The results are as follows.

- 1) P-waves having intensive effect to vertical component are propagating within sedimentary layers even after the S-wave onset time (S-wave part).
- 2) Frequency dependent Q -values for P-waves (Q_p) in Tertiary sediment layers obtained from the optimal analyses to spectral ratios have the tendency to be identical with Q -values for S-waves (Q_s) with the same wavelength.
- 3) Observed vertical motions in upper ground can be simulated by the multiple reflection theory of P-waves based on the optimized velocities and Q -values.

Keywords : sedimentary layers, vertical seismic motions, wave propagation, P-waves, Q_p -values
堆積地盤、上下地震動、波動伝播、P波、 Q_p 値

1. はじめに

地震動の強さを表わす最大値や応答スペクトルの上下地震動に関する研究は、水平地震動の研究に比べて多くはない。構造物の耐震設計の観点からその理由を見ると、重力加速度による鉛直荷重に抗して設計された部材は鉛直方向に十分な強さを有しており、上下地震動による鉛直荷重は重力によるものより小さいと考えられていることにある。ところで、鉛直振動そのものの影響が大きいと考えられる大スパン構造や原子力発電所施設等にある機器・配管系、地震応答に影響が大きい低次振動成分の固有周期が長いことにより相対的に小さくなる水平荷重に比べて低次の固有周期が短く短周期成分の寄与が大きい上下震動を受ける高層建物では、上下地震動による荷重を考慮して構造物の安全性を検討する必要がある。

上記の上下地震動の強さを表わす尺度に関する地震観測記録に基づく研究は、水平地震動に関する研究蓄積の豊富さを考慮して、絶対的な尺度は水平地震動に求め、それに対する相対的な比の形式で表わされることが比較的多い。すなわち、ある地震による当該敷地における上下地震動強さを、水平地震動の距離減衰から推定される強さに上記の比を乗じて求める考え方である¹⁾。主に地表での観測地震動による応答スペクトルの水平地震動に対する上下地震動の平均的な比に関する既往研究をみると、経験的には、0.2~1秒程度の周期領域では0.4~0.7程度の比であり、0.1秒付近では両成分のスペクトル値が同程度にもなるとの結果がまとめられている²⁾。

ところで、観測地震動は、震源、パスおよび堆積地盤による増幅特性の3つの主要な要因の影響を受けて

^{*1} 戸田建設技術研究所
プロジェクトサブマネージャー・工博

^{*2} 戸田建設技術研究所 課長

^{*3} 戸田建設技術研究所 室長・工修

^{*4} 鹿島技術研究所 主管研究員

^{*5} 鹿島小堀研究室 主任研究員・理博

^{*6} 東京電力原子力建設部 副長・工修

Technical Research Institute, Toda Corporation, Dr. Eng.

Technical Research Institute, Toda Corporation

Technical Research Institute, Toda Corporation, M. Eng.

Kazima Technical Research Institute, Kazima Corporation

Kobori Research Complex, Kazima Corporation, Dr. Sci.

Nuclear Power Construction Department, Tokyo Electric Power Company, M. Eng.

いる。従って、上記の既往研究にみられる水平地震動に対して上下地震動のスペクトル比が周期領域で一定の比ではなく周期特性を有している傾向は、両成分が受ける上記3要因のいずれかの周期特性が異なっていることを示唆している。このことから判断すると、単に上記のような平均的なスペクトル比を水平地震動のスペクトルに乗じて得られる上下地震動のスペクトル特性は、上記の3要因を適切に反映しているとは考えられない。

ここで、震源から伝播してある敷地付近の地震基盤に達する直達P波または直達S波では水平成分、上下成分に関わらず理論的に震源とパスの影響はほぼ同一であるといえる。たとえば、物理的意味に基づく応答スペクトルの距離減衰式³⁾を用いた水平地震動と上下地震動各々の観測記録に基づく回帰分析結果は上記の結論を支持している⁴⁾。従って、前述のようにスペクトル比が周期特性を有する原因は、水平地震動と上下地震動が受ける地盤増幅特性の違いによる所が大きいと考えられる。

本研究は、上下地震動に及ぼす堆積地盤の影響として、地盤内における波動伝播特性、およびそれへの影響が大きい地盤内のP波のQ値(Q_p)について鉛直アレー観測記録を用いて検討したものである。これらは、本論文で用いるのと同じ観測地点における水平地震動記録によるS波のQ値(Q_s)に関する検討結果⁵⁾と対比して議論される。

2. 解析に用いたデータ

用いたデータは、Fig.1に示す4観測地点における鉛直アレー観測によるものである。各観測地点にて実施したP S検層による地盤の速度構造⁶⁾とボアホール内に加速度計を設置した測点位置をFig.2に示す。

各観測地点における最深測点は、TMKとIWKではS波速度 V_s が約3km/s、P波速度 V_p が約5.5km/sの花崗岩の地層に位置し、HMYとSZJでは新第三紀中新世の地層に位置している。ここで、各観測地点で3つの黒丸で示した測点のうち中間に位置する測点は、地表近傍の第四紀層や風化層と古第三紀または新第三紀中新世の地層との境界付近に位置し、以後中間点と呼ぶ。

用いた観測記録は、1980年から1990年の間に得られた、マグニチュードが5.5以上(最大7.0)、震源深さが60km以下で震央距離が200km以下となる33地震によるものである。それらの震央位置をFig.1に示す。

3. 深い鉛直アレー観測記録の解析

鉛直アレーが最も深いTMKの地盤は、Fig.2(a)からわかるように V_s が約3km/sの基盤層のすぐ上の深さが920m~830mの位置で速度構造の変化が大きい。TMKの観測記録を例に、堆積地盤内における上下地震動の波動伝播の特徴を以下に示す。

用いる記録は、直達P波および直達S波がパルス的でフェーズが識別しやすい1984年6月26日の地震(マグニチュード4.5、震源深さ50km)による加速度記録で、それを積分して求めた速度波形である。その地震の震央をFig.1(a)に併記した。この記録のP波初動付

Fig.1 Location of observation stations and epicenters of earthquakes used in the analyses.

Fig.2 Velocity structures for P- and S-waves of the ground obtained from the PS-logging, which are shown by thick solid and dotted lines, respectively. The thin solid lines indicate the optimized results for P-wave velocity. The records at the points shown in solid circles are used in the analyses.

近の上下動波形をFig.3(a)に示す。またS波初動付近の上下動波形と水平動2成分から合成したラジアル成分の波形をFig.3(b)に示す。横軸の時間は観測記録の開始時間からのものである。Fig.3(a)と(b)のように、震源から伝播してきた直達P波と直達S波ならびにそれに続く部分をここではP波部、S波部と称する。

Fig.3(a)の実線は、GL-950mの最深点の直達P波の到達時刻を基準に、Fig.2(a)のP波速度構造に従って上昇、下降する主な波の理論走時を示している。実線にはそれぞれの深さでパルスが対応し、基盤から入射したP波が地表やGL-470m、基盤層上面など顕著な地層境界で多重反射している様子がよく分かる。

Fig.3 Wave forms of vertical array records at TMK, which are pasted up following the travel time calculated from the P-wave velocities shown in Fig.2(a). The left (a) and right (b) figures show the initial parts on the records of the P-wave part and the S-wave part, respectively.

Fig.4 Spectral ratios of records between ground surface and the deepest observation point at TMK (a) and IWK (b). The chained and solid lines are obtained due to vertical components in P- and S-wave part, respectively. The dotted line shows ratios for the S-wave part of horizontal components.

Fig.3(b)の950m測点の波形に注目すると、11.5秒付近にみられるフェーズはSV波の振動方向を示している。これら上下、ラジアル成分による粒子軌跡から、その入射角は約30度と推定される。このフェーズを基準にP波速度およびS波速度で上昇、下降する波の理論走時をそれぞれ実線と破線で示す。上下動成分では主に実線に沿ってフェーズが確認できるのに対し、ラジアル成分では破線に対応したフェーズがよく見える。すなわち上下動では基盤に入射したSV波がGL-920m～830mにかけてのインピーダンスの変化が大きい基盤層上面でP波に変換した波（SP変換波）が支配的となり⁷⁾、一方ラジアル成分では基盤層上面で透過したS波が支配的となることを示している。

上記の現象が上下地震動のスペクトル特性に及ぼす影響をみるために、Fig.1(a)のTMKにおける13地震の上下動と水平動の観測記録を、S波初動以後のS波部とP波初動からS波初動前までのP波部に分離して、各記録のフーリエ振幅スペクトルの950m測点に対する地表のスペクトル比を求めた。それらS波部とP波部におけるスペクトル比の幾何平均をFig.4(a)に実線と一点鎖線で示す。図中の破線は水平動のS波部におけるスペクトル比である。これと上下動のS波部のスペクトル比を比較すれば両者は明らかに異なっており、1次卓越ピークの周期は水平動が2.92秒であるのに対し上下動は1.49秒である。2次のピーク周期も上下動は水平動に比べて1/2程度の周期に出ており、地表近傍地盤の影響が大きい0.1秒以下においても上下動は水平動に比べてより短周期まで大きな比となっている。このS波部の上下動スペクトル比を、一点鎖線で示したP波部の上下動スペクトル比と比較すると、1次ピークの周期は一致しており2次ピークの周期もほぼ対応している。このように上下動のP波部とS波部のスペクトル比は、絶対値はやや異なるもののピークの位

置など全体的に類似した傾向を示している。

同様に、Fig.1(b)に示すIWKにおける観測記録から、330m測点に対する地表の平均スペクトル比を求め、その結果をFig.4(b)に示す。1次卓越ピークの周期は、水平動S波部では0.82秒であるが、上下動S波部ではP波部の0.42秒に近い0.5秒付近の周期に現れている。また、それぞれの成分の2次ピークの周期はともに1次ピーク周期の約1/3である。

このように、上下動S波部のスペクトル比は、水平動とは異なり上下動P波部のスペクトル比と良く似ている。つまり、S波部であっても上下動では基盤層の上面でSV波からP波に変換した波が支配的で、P波部と同様にP波が多重反射することによって特徴付けられると考えられる。

4. 堆積地盤における地震P波の地盤減衰特性

3章で述べたように堆積地盤内における上下地震動についてはS波部であっても地盤内で多重反射するP波の影響が大きい。従って、上下動の地盤震動特性について定量的な検討を行うためには、P波の地盤減衰特性を適切に設定する必要がある。

鉛直アレー観測記録を用いて、異なる深さにおける観測記録のスペクトル比とQ値を変数とした多重反射理論による計算結果を直接比較して、地盤のQ値を求めることはS波については多く行われている^{5), 8), 9)}。この際、目標とする観測スペクトル比として、複数の地震記録による平均値を用いる方法^{5), 8)}と個々の地震による観測スペクトル比に対して地盤定数を求める方法⁹⁾があり、前者では一組の地盤定数が得られるのに対して後者では個々の結果をサンプルとする統計量としての地盤定数が得られる。これらの地盤定数を用いる地盤応答の観点からは、前者では確定的に、後者では確率・統計的に地盤の応答解析を実施することを

Fig.5 Spectral ratios of seismic motions at ground surface to those at underground. The thin solid and dotted lines indicate the average ratios and ratios considering one standard deviation due to the P-wave part of observed vertical components, respectively. The thick solid line is the ratios calculated by the multiple reflection theory of P-waves using the optimized velocities and Qp-values.

念頭においていることになる。本研究では、観測スペクトル比の平均値を対象とする方法を採用して、求めた地盤定数が地盤応答に及ぼす影響をシミュレーションによって把握することとする。

Fig.1の地震による各観測地点の記録波形のうちP波初動からS波初動の前までのP波部の波形を取り出し、それらのフーリエ振幅スペクトルからスペクトル比を求めた後、各観測地点の全記録からスペクトル比の幾何平均を求めた。中間点および最深測点に対する観測スペクトル比の平均値と標準偏差をFig.5に示す。

Fig.3(a)に示した例のように、P波部の上下動は主

に成層地盤内を多重反射するP波によって構成されている¹⁰⁾。従って、基盤へのP波の鉛直入射を仮定し多重反射理論を適用して計算されるスペクトル比が観測された平均スペクトル比にできるだけ適合するように、最適化によって地盤定数を定める。具体的には、(1)式の誤差関数Jに対して準ニュートン法による非線形最小二乗法を適用する。

$$J = \sum_k \{ \langle \bar{A}(T_k) \rangle - A(T_k; x) \}^2 \quad (1)$$

Tkはある周期、 $\langle \bar{A}(Tk) \rangle$ はFig.5に示す平均スペクトル比またはその逆数である。 $A(Tk; x)$ は、未知変数である地盤定数 x を含む地盤構造モデルを用いて計算されるスペクトル比またはその逆数である。ここで、最適化手順や初期値を決めるに当たって実施した予備解析から、Fig.5(a)に示すTMKの950m測点に対する観測スペクトル比を対象とした場合、後述するQ値の表現によっては図示した周期範囲の観測値に適合させられる計算結果を得ることは困難であることがわかった。そこで本研究では、短周期領域における地盤震動を重視して、1秒以下の周期領域におけるスペクトル比を最適化の対象とする。(1)式の誤差関数に用いるサンプル周期は、0.05秒から1秒までの周期範囲から、周期の対数値がほぼ等間隔となる300個の周期を選択した。ただし、IWKの21m測点に対しては、平均スペクトル比のピークが0.05秒以下の短い周期にみられることから、0.03秒から0.2秒の周期範囲を対象とした。

最適化は、P波速度、Q値の順に、まず中間点に対する地表のスペクトル比を用いて地表から中間点までの未知変数を求めて固定し、次に最深測点に対する地表のスペクトル比を用いて中間点から最深測点までの間の未知変数を求める手順で実施した。ただし、TMKとIWKについてはP波速度の決定に中間点から最深測点の間に存在する測点に対するスペクトル比も参考に用いた。ここで、P波速度の最適化ではスペクトル比の逆数を対象とし¹¹⁾、Q値の最適化ではスペクトル比を用いた。その際、密度は密度検層結果を固定して用いた。P波速度の最適化における初期値としては、P S検層結果に基づくFig.2の地盤構造をやや粗い層に分割し各層について平均した値を用いた。Q値は、周波数依存性を仮定し、 $Qp(f) = Qp_0 \cdot f^n$ (f in Hz)と表現し⁵⁾、前述の中間点より上層と下層の地層に大

きく区別して求める。ただしTMKでは下層をさらに新第三紀と古第三紀の2層に区分してQ値を求めた。Q値の初期値は、同じ地盤の観測記録を用いたQsの値とした⁵⁾。

最適化によって得られたP波速度をFig.2に、QpをFig.6に示す。これらの地盤定数を1秒以上にも外挿して用いて、多重反射理論から得られたスペクトル比をFig.5に併記した。いずれの場合も最適化の対象とした1秒以下の周期範囲において計算値と観測値との対応は良い。Fig.2から分かるように最適化によるP波速度は、初期値として与えたP S検層結果に基づく速度を殆ど変更することなく得られている。成層地盤の波動の多重反射に関わる一つのファクターとして基盤層への波の入射角の影響が考えられるが、上記P波速度の結果は今回用いたデータが十分鉛直入射の仮定を満足するものであることを間接的に示している。

2章に示した4観測地点において、トランスバース成分記録のスペクトル比に対してSH波の多重反射理論を適用した最適化により、すでにQs値が求められている⁵⁾。Fig.6に同一観測地点のQs値を併記する。観測地点毎にQp値とQs値を比較すると、周波数依存性を示す傾き n はいずれの地点でもほぼ同じである。また n の範囲は0.3~1.0となる。これに対し、同一の周波数においてはいずれの観測地点においても $Qp < Qs$ である。このこととFig.4のように上下動P波部と水平動S波部のスペクトル比がピークを呈する周期が波動種別に応じて異なることを考えあわせると、Q値がスペクトル比のピークに及ぼす影響は対象となる波動の波長に関係していることが推察される。そこで、Q値の最適化で区分した地層のP波とS波それぞれの速度の平均値を使って波長を求め、P波の波長とQp値およびS波の波長とQs値の関係をFig.7に示した。

Fig.6 Frequency dependent Q values (Qp) for P-wave of the ground obtained from the optimal analyses in comparison with Qs for S-wave (Ref.5).

Fig.7 Comparison of Q_p with Q_s in terms of the wavelength of P- and S-wave for Q_p and Q_s respectively. The left (a) and right (b) figures indicate Q values for the shallower and deeper strata, respectively.

ここで(a)は中間点より浅い地層、(b)は深い地層における関係である。これらの結果でまず注目される点は、Fig.7(b)の新第三紀以前の比較的硬い地層においてはSZJを除く3地点で同一波長に対し $Q_p \div Q_s$ の関係が成り立つことである。この関係はP波とS波が一波長進む間のエネルギー損失がほぼ同一であることを意味しており、基盤層以深の伝播経路において求められた Q_p と Q_s の関係¹²⁾に類似している。つまり Q_p と Q_s に関して以下の関係が成り立つことになる。

$$Q_p(f) = Q_s(f) \cdot (V_s/V_p)^n \quad (2)$$

ただし、上記のように n は0.3から1.0の範囲にある。

Yoshimoto et al.¹³⁾は、 V_p が1km/s~4km/s、 V_s が0.5km/s~2km/sにある風化花崗岩の約15mのボアホールにおける最深点と地表間で求めた上下動P波および水平動S波のスペクトル比に対し、多重反射理論を適用している。その際、 $Q_p = Q_s/2$ で上下動P波のスペクトル比がよく説明できると指摘している。(2)式において上記 V_p と V_s の関係を考慮すると $n \div 1$ の場合に対応し、本研究の結果とほぼ整合する。

一方、Fig.7(a)の第四紀層や風化層に対応した比較的軟らかい地層においては(2)式の関係がややくずれ、同じ波長に対する Q_p と Q_s は平均して $Q_p \div Q_s/1.5$ の関係になる。またSZJでは第三紀層においても同一波長に対し Q_p は Q_s に比べてかなり小さく、第四紀層ではその差はさらに拡大する。SZJは他の3地点と異なり火山性の堆積物によって地層の連続性が悪く、特に Q_s を求める際のスペクトル比の最適化の精度が良くない⁵⁾。従って上記のような他地点との Q 値の関係の差が、最適化の精度の悪さから生まれたものか地層

そのものの性質から来るものか現状ではよく分からない。後者の場合には先に指摘した他地点の第四紀層と第三紀層との違いおよび沖積世にいたる地盤における特性¹⁴⁾も含め、地震波の減衰機構との関連で今後検討されるべき重要課題であると考えられる。

5. 堆積地盤における上下地震動のシミュレーション

4章で求めた地盤のP波速度と Q_p 値による地盤構造から、地盤内で多重反射する上下地震動をいかに再現しえるかを判断するために、各上下動記録のP波部についてシミュレーション解析を行った。検討の対象は地盤定数の最適化範囲に応じた1秒以下の周期範囲であるが、1秒以上も外挿した Q 値を用いて計算した。解析法は4章で用いた基盤へのP波鉛直入射による多重反射理論であり、各観測地点における最深測点の記録波形を理論計算による地中内測点位置の応答と同一においた入力としている。

計算結果の一例として、TMKの地表における計算加速度波形と記録波形、およびそれらによる減衰定数5%の擬似速度応答スペクトルの比較をFig.8に示す。計算波形は最大値を含む記録波形の経時変化を良く再現している。計算波形による応答スペクトルも検討対象の1秒以下では観測値をほぼ説明し得ている。4観測地点の地表について、各記録波形に対する計算波形の応答スペクトルの比を求め、全記録から平均値と標準偏差を求めてFig.9に示す。計算波形による応答スペクトルは平均的に25%以内の差で観測値に対応し、比の変動は20%程度以下と小さい。このようにシミュレーション解析によって上下動P波部の応答スペクトルが良く推定されていることが分かる。

一方、3章で指摘したようにS波部における上下動

Oct. 14, 1986 (M=5.7, Depth=52km, Δ =36km)
 Fig.8 An example of the comparison of the vertical accelerogram synthesized by the multiple reflection theory of P-waves with the observed record for P-wave part at TMK, shown in the left figure. The right figure shows the response spectra with 5% critical dampings due to their accelerograms.

Fig.9 The ratios of response spectra of synthesized vertical accelerograms at the ground surface to those of observed records for P-wave part. The solid and dotted lines show the average ratio and the deviation, respectively.

は、基盤層へ入射したSV波によって生じていると考えられ、表層地盤内においては変換P波の多重反射による影響を強く受けている。このことは、S波部についても、地表に近い表層地盤においてはP波の多重反射を仮定して上下動の波動伝播特性を把握できる可能性を示唆している。その点の確認も含め、各観測地点における中間点にP波が鉛直入射すると仮定して、中間点より浅い表層地盤における上下動のS波部のシミュレーション解析を行った。計算に際しては、中間点における上下動記録波形を理論計算による地中内応答と同一においた入力として地表の観測記録を推定した。

計算結果の一例として、Fig.8と同じ記録のS波部について、中間点である100m測点の記録波形を入力として求めた地表の加速度波形と記録波形、およびそれ

らによる応答スペクトルをFig.10に示す。実線が観測値、破線が計算値である。計算波形の経時特性は記録波形によく対応しており、応答スペクトルについてもFig.8の例と同程度により対応を示す。比較のために同じ記録についてSV波の斜め入射によるシミュレーション解析も行った。この場合には、GL-950mにいたる地盤構造を対象として950m測点が位置する基盤層にSV波が斜め入射すると仮定し、理論計算の中間点における応答がその測点の上下動記録と同一となるように入力を設定した。基盤に入射するSV波の角度は、950m測点記録波形のS波立ち上がり付近の粒子軌跡から23度とした。これによる計算から求めた地表における波形とその応答スペクトルをFig.10に併記した。先の結果と比較すれば、両者は観測記録を同程度に再現

Fig.10 Comparisons of the vertical accelerograms synthesized by the multiple reflection theory due to P-wave or inclined SV-wave incidence and their response spectra with those of the observed record for S-wave part at TMK.

Fig.11 The ratios of response spectra of vertical accelerograms at the ground surface synthesized by the multiple reflection theory of P-wave to those of observed records for S-wave part, which are shown by the drawings similar to Fig.9.

していることがわかる。このことはS波部の上下動では表層地盤の上層であたかもP波が下層から鉛直入射したような現象が起っていることを意味する。

4 観測地点における各上下動記録のS波部について、中間点以浅の地盤にP波が鉛直入射すると仮定して求めた地表の計算波形による応答スペクトルの観測値に対する比の平均と標準偏差をFig.11に示す。シミュレーション結果はFig.9と比べほぼ同程度の精度であり、ファクター1.5以内で地表の応答スペクトルが推定されていることが分かる。

6. まとめ

地表近くの第四紀層と深層の第三紀層から構成される4観測地点の鉛直アレー観測記録を用いて、上下地震動の堆積地盤内における波動伝播特性を検討した。主な結果を以下にまとめる。

- 1) P波初動に続くP波部では基盤に入射したP波が表層地盤で多重反射の様子がTMKで確認できる。また他の地点も含め最深点と地表とのスペクトル比はP波の多重反射によってよく説明できる。
- 2) S波初動に続くS波部では、基盤に入射したSV波が基盤と表層との境界でP波に変換し、そのP波が多重反射の様子がTMKの上下動成分で確認でき

る。このため基盤と地表とのスペクトル比はS波部といえどもP波部のそれによく似ており、S波部の水平動を用いて求められたスペクトル比とは異なっている。

- 3) P波部の上下動観測スペクトル比から最適化によってQp値を求めると、一部の例外を除き、表層地盤の下層にあたる第三紀層では、 $Qp(f) = Qp0 \cdot f^n$ と $Qp(f) = Qs(f) \cdot (Vs/Vp)^n$ ($n=0.3 \sim 1.0$)の関係がほぼ成り立つ。この関係はQpとQsの周波数依存性がほぼ同じであることおよび同一波長に対して考えるとQp値とQs値の絶対値がほぼ同じになることを示している。このような性質は基盤層以深の伝播経路で求められているQpとQsの関係とほぼ同じである。これに対し表層地盤の上層にあたる第四紀層では $Qp(f) = Qp0 \cdot f^n$ の関係は同様に成り立つが、同一波長に対するQpの値はQs値よりやや小さくなる。限られた地点の結果でありこれらの性質が多くの地点に成り立つかどうか断定はできないが、P波の影響が大きい上下動の性質を考える上で興味ある結果である。
- 4) 最適化による地盤構造を用いて、S波部の上下動の予測精度を考えるために中間点の観測記録を用いて地表の観測記録をシミュレーションした。1つは中間点以浅にP波の鉛直入射を仮定した多重反射理論を適用したもの、他の1つは基盤層にSV波が斜め入射したとの仮定のもとに多重反射理論を適用したものである。TMKの記録に対する結果から、両者がほぼ同程度に地表の観測記録をシミュレーションできることが分った。さらに前者の方法による4観測地点における多数の地表の記録のシミュレーションを行った結果は観測記録の応答スペクトルを平均値でファクター1.5以内に推定しえており、この予測精度はP波部に対し基盤からP波の鉛直入射を仮定して求めた結果とほぼ同程度である。このことは、表層地盤の上層では上下動に対しP波があたかも鉛直入射したような現象が起っていることを意味し、2)の結論と整合する。

謝辞

本論文の原稿を丁寧に査読していただいた2人の審査員に深く感謝いたします。なお、本研究は電力共通研究による成果に基づくものである。関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 例えば、Watabe, M., M. Tohdo, O. Chiba and R. Fukuzawa; Peak accelerations and response spectra of vertical strong-ground motions from near-field records in USA, 8th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp. 301-306, 1990
- 2) 丹羽正徳、芳賀勇治、横田治彦、田村保、阿世賀宏、藤堂正喜、平澤光春; 東京湾岸部における動的設計用入力地震動の検討、シンポジウム/ウォーターフロントにおける地震動特性と地盤に関わる諸問題、日本建築学会関東支部構造部会、pp. 51-56, 1991. 9
- 3) 武村雅之、太田外気晴、稗圃成人; 地震動の平均応答スペクトルを評価する経験式の物理的基礎、日本建築学会構造系論文報告集、第375号、pp. 1-9, 1987
- 4) 藤堂正喜、羽鳥敏明、高橋克也、渡辺孝英、色摩康弘; 硬質地盤における応答スペクトルの距離減衰式、その2 上下動、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 365-366, 1994
- 5) 武村雅之、池浦友則、高橋克也、石田寛、大島豊; 堆積地盤における地震波減衰特性と地震動評価、日本建築学会構造系論文報告集、第446号、pp. 1-11, 1993
- 6) 例えば、飯塚節夫、太田外気晴、足立憲彦、高橋克也、広野進、石田寛、戸井田克; 富岡1,000m地震観測孔における検層結果、物理探査、第39巻、第2号、pp. 79-94, 1986
- 7) 藤堂正喜、羽鳥敏明、千葉脩、高橋克也、西村功; アレー地震観測記録にもとづく上下地震動特性の検討、その4 地表付近の上下動に影響が大きいSP変換波の特定、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 81-82, 1993
- 8) 横田治彦; 東京の軟弱地盤における地中地震観測、第5回地盤地震動シンポジウム、pp. 39-44, 1977
- 9) 石田勝彦、小堤治; 剛性・減衰にゆらぎをもつ物理系における平均化に関する一考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 723-724, 1988
- 10) 横田治彦; 軟弱な表層地盤の振動性状(水平動および上下動の伝達特性)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 605-606, 1977
- 11) 太田裕; 地震工学への最適化法の適用、八戸港湾SMAC設置点の地下構造推定、日本建築学会論文報告集、第229号、pp. 35-42, 1976
- 12) 佐藤春夫; ランダムな不均質による地震波の散乱、地震、Vol. 44, pp. 85-97, 1991
- 13) Yoshimoto, K., H. Sato, S. Kinoshita and M. Ohtake; High-frequency site effect of hard rocks at Ashio, Central Japan, J. Phys. Earth, Vol. 41, pp. 327-335, 1993
- 14) 例えば、阿部康彦、小林喜久治、天池文男; 地盤のP波減衰モデルに関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 141-142, 1993

(1994年11月8日原稿受理、1995年5月22日採用決定)