

表層地盤 S 波速度構造の最適化における初期モデルの検討

A STUDY ON INITIAL MODEL IN OPTIMIZATION OF S-WAVE VELOCITY
PROFILES OF SURFACE GROUND

川名太*・長尾毅**・紺野克昭***

Futoshi KAWANA, Takashi NAGAO and Katsuaki KONNO

*博士 (工学) 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

**工学博士 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

***工学博士 芝浦工業大学助教授 土木工学科 (〒108-8548 東京都港区芝浦 3-9-14)

Estimating S-wave velocity profiles of surface ground with sufficient accuracy is useful not only for seismic engineering but for disaster prevention engineering.

In this study, we dealt with estimation of S-wave velocity profiles of surface ground in application of the inversion of phase velocity of Rayleigh wave obtained from the microtremors array observation. Because the phase velocity of Rayleigh wave depends on density, P-wave velocity, S-wave velocity and thickness of soil layer, the influence of these parameters was verified. Next, inversion analyses of the phase velocity were performed with the use of quasi-Newton method, Sequence Quadratic Programming method and Genetic Algorithm. The applicability of these analyses to estimate S-wave velocity profiles of surface ground was examined.

Key Words : Inversion, S-wave velocity profiles, Rayleigh wave, Surface ground

1. はじめに

地盤の S 波速度構造は地震動の増幅特性等に寄与し、地震被害との相関が高いことから、その構造を精度良く把握することは、耐震工学および防災工学において重要な課題である。地盤の S 波速度構造の把握は、PS 検層を実施すれば可能であるが、より経済的な手法の一つに常時微動観測が挙げられる。

本研究では、常時微動観測結果より得られるレーリー波の位相速度をもとに逆解析を行い、表層地盤の S 波速度構造を推定する問題を扱う。地盤の S 波速度の逆解析による推定に関する既往の研究は、特に深層地盤構造に焦点を当てたものが多く¹⁾、表層地盤構造に関する研究は少ない。表層地盤は S 波速度の増減の大きな薄層により構成される場合が多いため、位相速度による逆解析の適用性を評価する必要がある。

位相速度は地盤の密度、S 波速度、P 波速度、層厚に依存する。位相速度を用いた逆解析では、このうち S 波速度と層厚を推定対象とし、密度と P 波速度は仮定した値を用いることが一般的である。このため本研究では、まず、密度と P 波速度が位相速度に及ぼす影響について検討した。さらに、S 波速度構造の違いが位相速度に及ぼす影響を検討することで、表層地盤の S 波速度の推定問題への位相速

度を用いた逆解析の適用性を評価した。

次に表層 S 波速度構造の推定を、準ニュートン法、遺伝的アルゴリズム(GA)及び逐次二次計画法の逆解析手法を用いて行った。S 波速度構造の推定は、非線形最適化問題となることから、逆解析結果は初期モデルに依存することになる。このため初期モデルを変更して逆解析を行い、表層地盤 S 波速度構造推定に対する各逆解析手法の適用性の検討を行った。

2. レーリー波の位相速度を用いた表層地盤 S 波速度
構造推定の可能性に対する検討

2.1 ポアソン比および密度の影響

微動アレー観測よりレーリー波の位相速度が得られるが、位相速度は密度、S 波速度、P 波速度、層厚に依存する。地盤が n 個の層により構成される場合は、 $4n-1$ 個の未定定数が存在することになり、この未定定数を用いて Haskell の matrix 法²⁾により位相速度が数値的に算出される。これら未定定数のうち、密度および P 波速度は、ある値に仮定して逆解析を実施することが一般的である。従って、S 波速度構造の逆解析による推定誤差には密度や P 波速度の推定誤差が含まれていることになる。このためまず、密度や P 波速度の推定誤差の影響度合いを検討した。ここで、

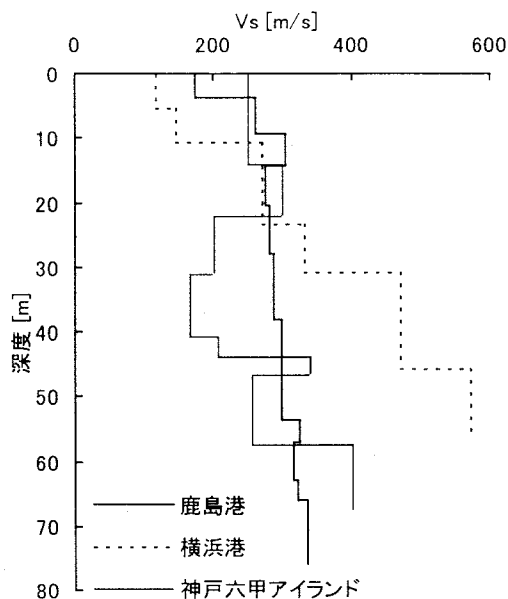


図-1 S波速度構造

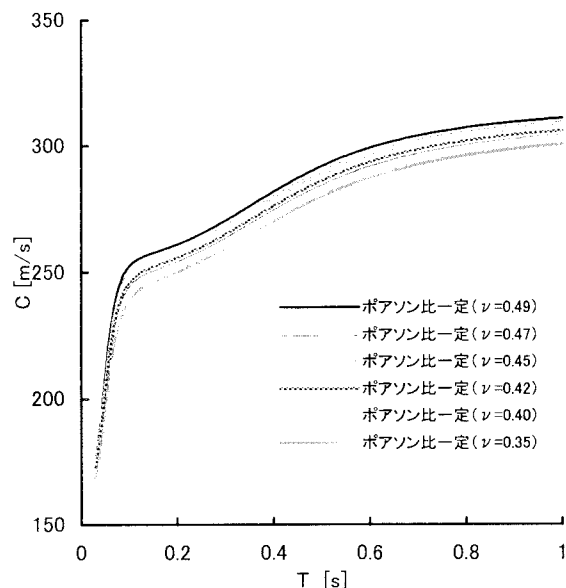


図-2 ポアソン比に伴う位相速度の変化

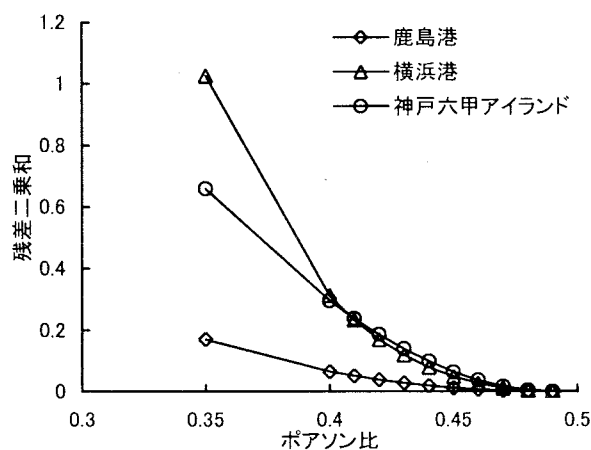


図-3 ポアソン比の影響

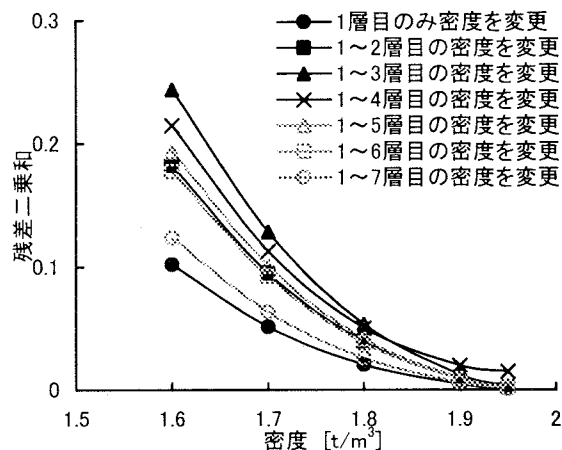


図-4 密度の影響

P波速度はS波速度とポアソン比を用いて計算されるため、以下では密度とポアソン比の位相速度に対する影響度合いを検討した。

まず、半無限の均質地盤においては、レーリー波の位相速度(C)とS波速度の比 C/V_s は、ポアソン比が0.35のとき、 $C/V_s=0.936$ 、ポアソン比が0.49のとき、 $C/V_s=0.955$ となり、層の数が少ない場合には、ポアソン比の及ぼす影響は小さいものといえる。図-1に示すS波速度構造の既知の地点である鹿島港、横浜港、神戸六甲アイランドの地盤構造を対象とした。各地盤について、各層のポアソン比を0.35および0.4~0.49まで0.01づつ変更し、Haskellのmatrix法を用いて位相速度(C)を算出した。例として、横浜港の結果が図-2に示されている。ここでは、煩雑なためポアソン比が0.49、0.47、0.45、0.42、0.40、0.35の結果のみ示している。

図からわかるように、ポアソン比が小さくなるに従い、位相速度が小さくなることからわかる。ポアソン比が0.49と0.35および0.49と0.45の場合を比較した結果、それぞれ最大で10%、2%程度の差がみられた。既往の研究³⁾では、港湾および空港地域を対象とした場合、ポアソン比は概ね0.33~0.495にあり、表層30mまでについては0.48程度以上となることが示されている。

横浜港および神戸六甲アイランドの地盤構造についても同様の検討を行い、ポアソン比が0.49の場合の位相速度とポアソン比を変更した場合の位相速度を比較した。これより得られた結果が図-3に示されている。図中、縦軸は、それぞれポアソン比を変更して算出された位相速度とポアソン比0.49の場合の位相速度の差をポアソン比0.49の場合の位相速度で除して二乗和(以下、誤差二乗和と称す)をとったものである。横軸は、ポアソン比である。各地盤

について差はあるが、どの場合にもポアソン比が小さくなるに従い誤差二乗和の増加する割合は大きくなる。しかし、各地盤ともポアソン比を 0.40~0.48 程度に変更してもポアソン比が 0.49 の場合と比べて位相速度に変化が無いことがわかる。以上のことより、表層地盤の推定に限り、ポアソン比の推定誤差は、S 波速度構造の推定誤差へほぼ影響を及ぼさないものと考えられる。

次に、密度の影響を調査するために、以下のような検討を行った。図-1 の神戸六甲アイランドの地盤構造を対象とし、各層の密度が 2.0t/m^3 の場合の位相速度を算出した。次に、表層より 1 番目の層のみ密度を 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 1.95t/m^3 と変更して、それぞれ位相速度を算出した。この際、2 番目の層以下は密度を変更していない。更に、2 番目の層まで密度を $1.6\sim 1.95\text{t/m}^3$ に変更し、3 番目の層以降の密度を変更しないで位相速度を算出した。以下同様の手順で 7 番目の層まで密度を変更し、位相速度を算出した。図-4 には、算出された位相速度と各層の密度が 2.0t/m^3 の場合の位相速度を比較した結果が示されている。横軸は、変化させた密度の値を示しており、縦軸は、密度を変更して算出された位相速度と全層の密度が 2.0t/m^3 の場合の位相速度の差を全層の密度が 2.0t/m^3 の場合の位相速度で除して二乗和をとったものを示している。

図より、1~3 層目の密度を変化させた場合、すなわち表層部の層厚の 50% 程度の密度を変化させたとき位相速度へ及ぼす影響が最も強いことがわかる。また、図-3 の六甲アイランドのポアソン比に関する検討結果と図-4 を比較すると、表層厚の 3 番目の層までを密度 1.6t/m^3 とし、それ以下の層を密度 2.0t/m^3 とした場合の誤差二乗和とポアソン比を 0.49 から 0.41 と変化させた場合の誤差二乗和が 0.24 でほぼ等しい値となっている。この結果をもとに、ポアソン比と密度の位相速度への影響度合いを P 波速度を指標として考察した。P 波速度(V_p)とポアソン比(ν)および P 波速度と密度(ρ)には以下の式(1), (2)の関係が成り立っている。

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (1)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2)$$

ここに、 λ, μ : Lamé's constants

(1)式よりポアソン比が 0.49 のとき $V_p=7.14 \cdot V_s$, 0.41 のとき $V_p=2.56 \cdot V_s$ であり、P 波速度で比較すると、ポアソン比 0.41 の場合に対して 0.49 の場合の V_p は、2.79 倍となる。また、同様にして(2)式より密度が 2.0t/m^3 の場合に対して 1.6t/m^3 とした場合の V_p は 1.12 倍となる。得られた P 波速度の変化よりポアソン比に比べて密度の方が小さな変化で位相速度に同程度の誤差を生じていることがわかる。このことから、ポアソン比の推定誤差に比べて密度の推定誤差のほうが影響が大きいことがわかる。

2.2 インピーダンスコントラストの影響

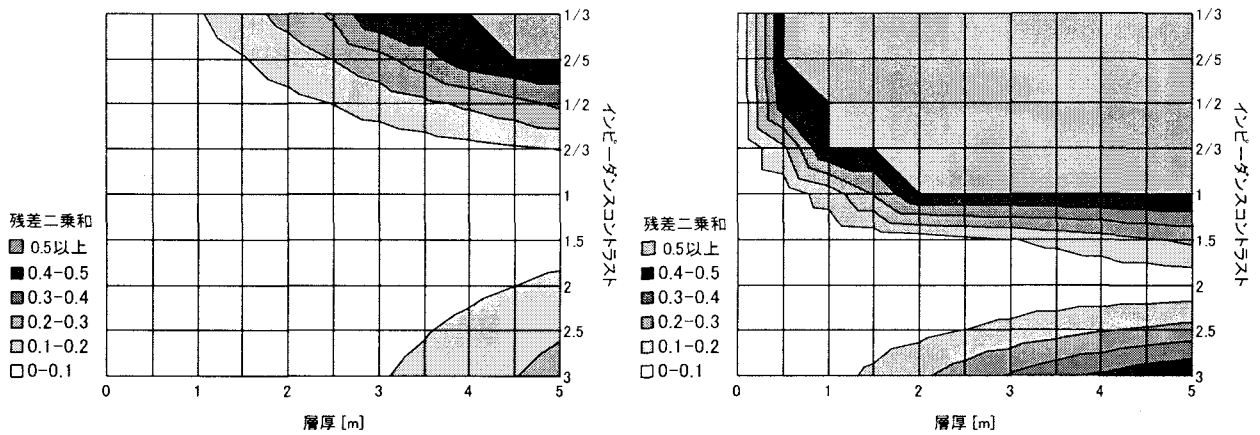
前述の通り、表層地盤は、S 波速度の増減が激しく薄層によって構成される場合が多い。このような地盤構造に対して位相速度による逆解析を適用するためには、S 波速度および層厚がレーリー波の位相速度に及ぼす影響度合いをあらかじめ調査し、検索可能な層厚および S 波速度を把握しておく必要がある。ここでは、層厚とその層のインピーダンスコントラストに注目し、これらが位相速度に与える影響について検討した。インピーダンスは、密度 ρ と S 波速度 V_s との積 $\rho \cdot V_s$ で表され、ここではインピーダンスコントラスト n は検討に用いる層のインピーダンス $\rho_1 \cdot V_{s1}$ に対するその上層のインピーダンス $\rho_2 \cdot V_{s2}$ の比として式(3)のように定義する。なお、本検討では $\rho_1=\rho_2$ としている。

$$n = \frac{\rho_1 \cdot V_{s1}}{\rho_2 \cdot V_{s2}} \quad (3)$$

図-1 の鹿島港の地盤構造を対象とし、層厚と S 波速度を変化させレーリー波の位相速度を算出した。層厚の変化は以下の手順で行った。標記の地盤構造の中位に位置する表層より 6 番目の層を分割する。分割した上部の層の層厚を 0.5~5m まで 0.5m 刻みで変更し、各々に対してインピーダンスコントラストを 1/3, 2/5, 1/2, 2/3, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 と変更して位相速度を算出した。なお、分割した下部の層の S 波速度は、もとの地盤構造の V_s と同様である。

図-5 には、鹿島港および横浜港における層厚とインピーダンスコントラストの関係が示されている。横浜港については、3 番目の層を分割している。図中の分類には、算出された各々の位相速度ともとの地盤構造における位相速度の差をもとの地盤構造の位相速度で除して二乗和した値を用いている。

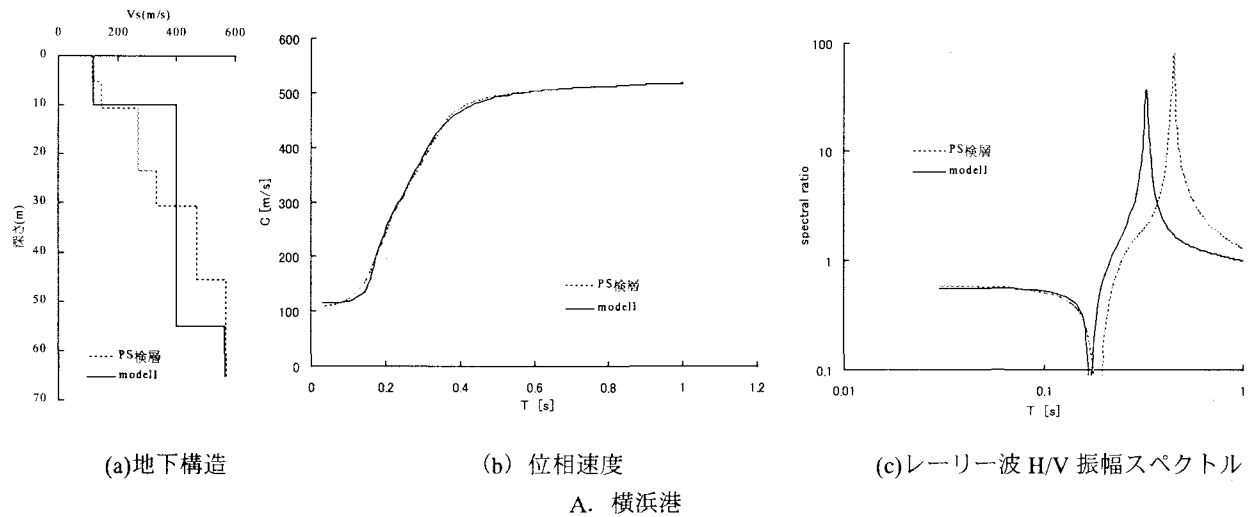
図-5 の結果より共通して、インピーダンスコントラストが 1 以下のとき誤差二乗和の値が大きくなっており位相速度への影響が大きいことがわかる。このことより、低速層は薄層であっても逆解析により推定できる可能性が高いと考えられる。図-5(a)の鹿島港の場合、例えば層厚が 0.5m でインピーダンスコントラストが 3.0 と大きな場合であっても、誤差二乗和の値はポアソン比でいえば 0.49 から 0.48 程度に変化した場合と同程度であり、このような薄層があっても位相速度にあまり差が生じないことがわかる。インピーダンスコントラストが 1.5 のとき、層厚が大きくなるに従い、誤差二乗和は 0.0005~0.049 と変化する。これは、ポアソン比の変化でいえば、0.49 から 0.46 程度の変化に相当し、鹿島港の場合には、1.5 程度のインピーダンスコントラストでは、5m 程度の層厚であっても位相速度に差が現れず、逆解析で表層地盤構造を推定するのは困難であると考えられる。また、図-5(b)の横浜港の場合には、インピーダンスコントラストやわずかな層厚の変化にも敏感であり、増減の激しい表層 S 波速度構造の推定が可能であると考えられる。



(a) 鹿島港

(b) 横浜港

図-5 インピーダンスコントラストの影響

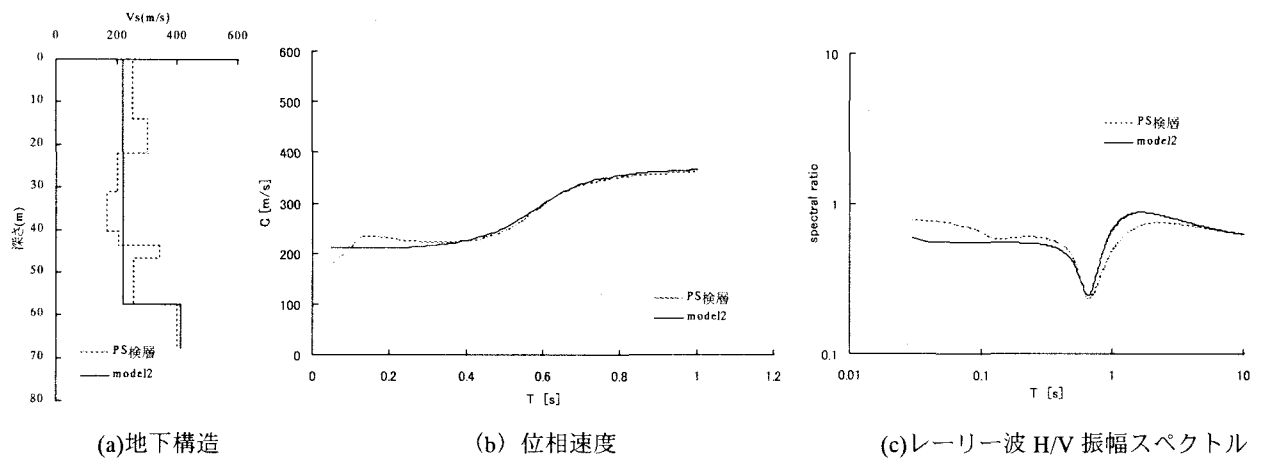


(a) 地下構造

(b) 位相速度

(c) レーリー波 H/V 振幅スペクトル

A. 横浜港



(a) 地下構造

(b) 位相速度

(c) レーリー波 H/V 振幅スペクトル

B. 神戸六甲アイランド

図-6 異なる地下構造のレーリー波位相速度

2.3 S波速度構造の影響について

2.1 および 2.2 では、各層の物性やインピーダンスコントラストに注目して位相速度の差異について検討し、表層地盤のレーリー波位相速度を用いた逆解析の適応性を検討

した。ここでは、地盤構造の違いが位相速度に与える影響について調査した。図-6 には、S 波速度構造が異なるが位相速度がほぼ同様になる例を示している。A. の横浜港の場合、図(b)に示される位相速度が図(a)に示されるど

らの S 波速度構造に対してほぼ同様であり、位相速度を用いた逆解析によって推定された地盤構造が目的とする地盤構造となる保証はない。

常時微動アレー観測を行う際には、水平 2 成分、鉛直 1 成分の 1 地点 3 成分常時微動観測を同時に実施することが多い。得られた記録より、水平動と上下動のスペクトル比（以下、微動 H/V スペクトルと称す）を算出する。微動にはレーリー波が卓越することから、レーリー波の H/V 振幅スペクトルと微動 H/V スペクトルは一致する。また、レーリー波の H/V 振幅スペクトルの卓越周期は地盤の卓越周期と一致することから、微動 H/V スペクトルより地盤の固有周期を求めることができる。従って、位相速度のみでは判断できない場合には、これらを考え合わせて、推定された地下構造の妥当性を検討する必要がある。

図(c)には、図(a)の各地盤構造についてのレーリー波 H/V スペクトルが示されている。得られた結果より、PS 検層の結果については、0.42 秒付近で、また、図中、model1 と称した S 波速度構造については 0.32 秒付近で卓越しており、卓越周期の違いに注目して S 波速度構造が判断できる可能性がある。

また、B. の神戸六甲アイランドの結果については、レーリー波 H/V 振幅スペクトルの谷の周期は、ほぼ 0.7 秒で一致しているが、PS 検層の結果については 2.3 秒付近に、また、model2 と称する S 波速度構造については 1.7 秒付近に卓越周期がみられ、横浜港と同様な検討を行うことで、妥当な S 波速度構造が得られる可能性がある。

3. 表層地盤 S 波速度構造推定に関する逆解析手法の比較

本節では、表層 S 波速度構造の推定に対する逆解析手法の適用性について検討した。表層 S 波速度構造の推定は、非線形最適化問題となることから、多くの局所解が存在することになる。そのため、逆解析結果は初期モデルに依存することになる。このため初期モデルを変更して逆解析を行い、表層地盤 S 波速度構造推定に対する各逆解析手法の適用性の検討を行った。

逆解析手法として、準ニュートン法、逐次二次計画法、遺伝的アルゴリズムを用いた。目的関数は、PS 検層結果をもとにして算出された位相速度 C_{PS} と推定された S 波速度構造に対する位相速度 C より、以下の式(4)のように与え、目的関数を最小とするような地盤構造を求めた。

$$\sum (C_{PS} - C)^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

準ニュートン法は、勾配法的一种であり、式(4)により定義される目的関数の導関数を Taylor 展開を用いて 2 次の項まで求め、これを用いて目的関数が最小となるような方向を検索する手法である。また、収束する場合には、収束速

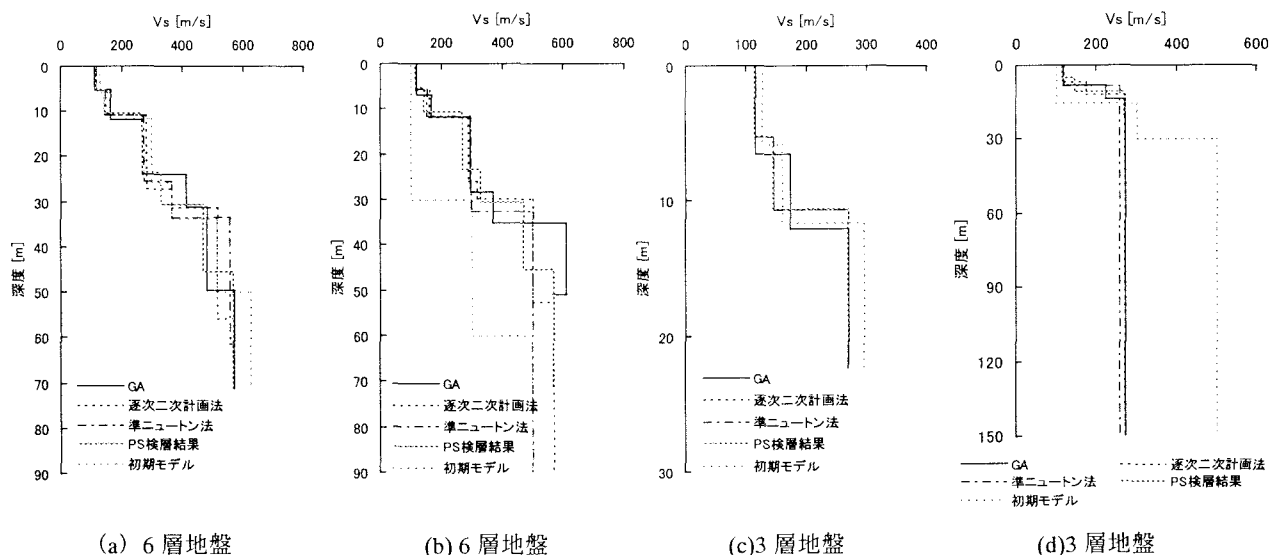
度が非常に速く、初期モデルの設定が適切であれば大域的な最適解の探索も可能であると考えられ、有利な手法であるといえる。逐次二次計画法は、ある制約条件のもとで目的関数を最小化させる方法であり、物理的な条件が満足されるような最適解を求めることができる。本研究では、制約条件として未知数となる層の S 波速度及び層厚に、下限値と上限値が設定されている。遺伝的アルゴリズムは、生物の進化のメカニズムを模擬し、選択、交差、突然変異等の遺伝的操作により解を進化させ、目的関数が最小値になるような最適解を検索する方法である。この手法では、初期集団の中から適応度の高い解を選択して進化させるので初期値の設定に依存せず、また、探索範囲を広くとることができるので、大域的な最小値を検索することができる。しかし、他の手法に比べて多くの計算時間が必要になる。ここでは、交差確率を 0.75、突然変異確率を 0.05 として解析を行っている。

対象とする構造は横浜港の 6 層地盤とした。PS 検層より得られている地盤構造をもとにレーリー波の理論位相速度を算出した。未知数は、層厚と横波速度とし、最下層の層厚を除いて 11 個とした。密度は PS 検層により得られた値を用いた。また、P 波速度は、S 波速度とポアソン比より与えている。

初期モデルは、PS 検層結果をもとにして設定している。(a)として、各層の初期値がもとの地盤構造に対して 10% 大きな場合と、(b)として、もとの地盤構造と比較して極端に構造が異なる場合の二通りを扱った。また、未知数の個数による影響を考慮して、(c)、(d)では、上部の 3 層目までの層を用いて、逆解析を実施した。この場合、未知数の数は 5 個となる。

図-7 には、各初期モデルに対する逆解析結果が示されている。(c)、(d)の 3 層地盤の推定結果を比較すると準ニュートン法の場合、(c)の初期値をもとの構造に対して 10% 大きくした場合の結果では、PS 検層結果とほぼ同じ値が得られたが、(d)では、深度 5.3m 以下で誤差が大きくなる。このことより、準ニュートン法では、初期解の設定が適切に行われれば良好な推定結果が得られることを確認した。(c)では、逐次二次計画法の推定結果は PS 検層の結果とほぼ同じ値が得られ、GA については、層厚、S 波速度とも最高で 20% 程度の誤差が生じているが、概ねどの逆解析手法でも良好な結果が得られているものといえる。また、計算時間の観点からいえば、GA に比べて他の逆解析手法は格段に速い。よって、このような層数が少ない場合で、適切に初期解が得られていれば、準ニュートン法や逐次二次計画法の適用が妥当であるといえる。

6 層地盤の結果(a)、(b)では、表層 30m 程度までの推定結果は良好であるのに対し、それ以下では、誤差が大きくなっている。これにより、6 層地盤に比べて 3 層地盤の方が推定精度が良く、未知数の個数が推定精度に及ぼす影響を確認した。また、6 層地盤の推定においては、遺伝的アルゴリズムによる逆解析の誤差が、他の手法の誤差と比べ



図一7 逆解析結果

て小さくなっており、未知数の多い場合には、有効な手法であると考えられる。どの程度の未知数の個数まで精度良く推定できるかは、今後の課題である。

4. まとめ

本研究では、常時微動観測結果より得られるレーリー波の位相速度をもとに逆解析を行い、表層地盤のS波速度構造を推定する問題を扱っている。その際に、表層地盤はS波速度の増減の大きな薄層により構成される場合が多く、位相速度による逆解析の適用性を評価する必要がある。ここでは、未定定数として扱われる密度やポアソン比やインピーダンス比、S波速度構造が推定精度に及ぼす影響度合いについて調査した。また、表層地盤推定のための逆解析手法として、準ニュートン法、逐次二次計画法、遺伝的アルゴリズムの検討を行った。これにより、以下の結論が得られた。

- ①密度とポアソン比について逆解析における推定精度への影響度合いを比較した結果、密度の方が大きく、ポアソン比はほぼ影響を及ぼさないことが確認された。
- ②インピーダンスコントラストの影響は、コントラストが1以下の場合に大きく、薄層であっても位相速度への影響が強いことが分かった。
- ③表層地盤S波速度構造推定への逆解析手法の適用性について検討した結果、層数の少ない場合には、準ニュートン法、逐次二次計画法および遺伝的アルゴリズムのどの逆解析手法においても比較的推定精度は良好

であった。しかし、計算時間の観点から、適切に初期解が設定されていれば、準ニュートン法や逐次二次計画法の適用が妥当であるといえる。また、未知数が多い場合には遺伝的アルゴリズムが有効であることを確認した。

今後は、誤差を含む実際に観測されたレーリー波位相速度を用いて、逆解析による表層地盤S波速度構造を推定する予定である。また、本検討では、0.03～1.00秒の位相速度より逆解析を実施したが表層地盤S波速度構造推定のための逆解析に必要なレーリー波位相速度の周期帯についても調査する予定である。

謝辞：本研究は運輸施設整備事業団基礎研究制度の助成を受けて行ったものであり、記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1)山中浩明，石田寛：遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析，日本建築学会構造系論文集，第468号，9-17，1995. 2
- 2)N. A. Haskell：The dispersion of surface waves on multilayered media, Bull., Seismol., Soc., Am., 43, pp.17-34
- 3)長尾毅，紺野克昭：常時微動アレー観測に基づく表層地盤の平均S波速度推定精度に関する研究，土木学会論文集，No. 696/I-58，225-235，2002.