

10 データで 9%、5 データで 13% の差が出ることが分かった。

今後の走時解析においては、以上の結果を参照しつつ進める必要がある。

参考文献

鈴木宏芳, 1993, 東京湾北部地域の基盤構造—江東観測井の検層結果—, 地震学会講演予講集, No 1.
214.

首都圏基盤構造研究グループ, 1989, 夢の島人工地震実験資料集, 277pp.

山水史生・高橋 博・後藤典俊・太田 裕, 1981, やや深い構造の S 波速度 (Ⅲ) —府中 2,750 m
観測井における測定とまとめ, 地震 2, 34, 465—479.

表 4

| Vo(m/s) | k(1/s) | Vm(m/s) | Hm(km) | V(m/s) | H(km) | Hm/H |
|---------|--------|---------|--------|-----------|-------|------|
| 1788 | 0.22 | 2145 | 1.62 | 1814 ± 13 | 1.43 | 1.13 |
| 1794 | 0.1 | 1941 | 1.47 | 1808 ± 9 | 1.42 | 1.04 |
| 1796 | 0.19 | 2099 | 1.59 | 1835 ± 6 | 1.46 | 1.09 |
| 1792 | 0.1 | 1939 | 1.47 | 1795 ± 13 | 1.40 | 1.05 |
| 1800 | 0.1 | 1948 | 1.48 | 1783 ± 13 | 1.39 | 1.06 |
| 1780 | 0.22 | 2134 | 1.61 | 1818 ± 10 | 1.44 | 1.12 |
| 1782 | 0.17 | 2044 | 1.54 | 1812 ± 7 | 1.43 | 1.08 |
| 1798 | 0.1 | 1946 | 1.48 | 1812 ± 13 | 1.43 | 1.03 |
| 1792 | 0.1 | 1939 | 1.47 | 1792 ± 5 | 1.40 | 1.05 |
| 1800 | 0.1 | 1948 | 1.48 | 1808 ± 8 | 1.42 | 1.04 |

表 5

| Vo(m/s) | k(1/s) | Vm(m/s) | Hm(km) | V(m/s) | H(km) | Hm/H |
|---------|--------|---------|--------|----------|-------|------|
| 1791 | 0.17 | 2056 | 1.56 | 1812 ± 7 | 1.43 | 1.09 |
| 1791 | 0.1 | 1938 | 1.47 | 1799 ± 4 | 1.41 | 1.04 |
| 1801 | 0.11 | 1966 | 1.50 | 1818 ± 4 | 1.44 | 1.04 |
| 1794 | 0.1 | 1941 | 1.47 | 1799 ± 7 | 1.41 | 1.04 |
| 1798 | 0.1 | 1946 | 1.48 | 1789 ± 6 | 1.40 | 1.06 |
| 1791 | 0.14 | 2003 | 1.51 | 1812 ± 8 | 1.43 | 1.06 |
| 1794 | 0.1 | 1941 | 1.47 | 1808 ± 4 | 1.42 | 1.04 |
| 1793 | 0.1 | 1940 | 1.47 | 1802 ± 7 | 1.41 | 1.04 |
| 1792 | 0.11 | 1955 | 1.48 | 1802 ± 5 | 1.41 | 1.06 |
| 1797 | 0.1 | 1945 | 1.48 | 1805 ± 5 | 1.42 | 1.04 |

IV おわりに

屈折法による地震探査で、定速度層を速度が深さと共に増大するいわゆるミラージ層と仮定して解析した場合にどの程度の誤差が生ずるかを調べるため、夢の島爆破実験の観測データをモデルとして数値実験による検討を行った。

その結果、走時の読み取り誤差が無い場合、観測点間隔 1 km、5 観測点の粗い観測でも決定される層厚の誤差は 4 % 程度である事が分かった。

より現実に近いするため、観測データに 0.02 ~ -0.02 秒の乱数を加えた新しいデータ群を作り同様の検討を行った。推定される層厚は、観測データが 10 km の範囲にあるときデータ数が 10 でも 20 でも 4 % 程度の差で推定できることが分かった。しかし、データが 5 km の範囲になると

表 1

| Vo(m/s) | k(1/s) | Vm(m/s) | Hm(km) | V(m/s) | H(km) | Hm/H |
|---------|--------|---------|--------|--------------|-------|------|
| 1788 | 0.1 | 1934 | 1.46 | 1801 \pm 2 | 1.41 | 1.04 |
| 1787 | 0.1 | 1933 | 1.46 | 1803 \pm 2 | 1.42 | 1.03 |
| 1783 | 0.1 | 1929 | 1.46 | 1793 \pm 2 | 1.42 | 1.03 |
| 1786 | 0.1 | 1932 | 1.46 | 1804 \pm 2 | 1.42 | 1.03 |
| 1786 | 0.1 | 1932 | 1.46 | 1793 \pm 2 | 1.40 | 1.04 |
| 1787 | 0.1 | 1933 | 1.46 | 1800 \pm 2 | 1.41 | 1.04 |
| 1788 | 0.1 | 1934 | 1.46 | 1804 \pm 2 | 1.42 | 1.03 |
| 1787 | 0.1 | 1933 | 1.46 | 1800 \pm 2 | 1.41 | 1.04 |
| 1786 | 0.1 | 1932 | 1.46 | 1802 \pm 2 | 1.41 | 1.04 |
| 1785 | 0.1 | 1931 | 1.46 | 1800 \pm 2 | 1.41 | 1.04 |

表 2

| Vo(m/s) | k(1/s) | Vm(m/s) | Hm(km) | V(m/s) | H(km) | Hm/H |
|---------|--------|---------|--------|--------------|-------|------|
| 1797 | 0.1 | 1945 | 1.48 | 1795 \pm 7 | 1.41 | 1.05 |
| 1796 | 0.14 | 2010 | 1.53 | 1812 \pm 7 | 1.43 | 1.07 |
| 1797 | 0.1 | 1945 | 1.48 | 1797 \pm 8 | 1.41 | 1.05 |
| 1787 | 0.14 | 1998 | 1.51 | 1797 \pm 7 | 1.41 | 1.07 |
| 1802 | 0.1 | 1951 | 1.49 | 1787 \pm 8 | 1.40 | 1.06 |
| 1803 | 0.1 | 1952 | 1.49 | 1815 \pm 6 | 1.43 | 1.04 |
| 1798 | 0.14 | 2012 | 1.53 | 1821 \pm 4 | 1.44 | 1.06 |
| 1799 | 0.1 | 1947 | 1.48 | 1802 \pm 8 | 1.41 | 1.05 |
| 1789 | 0.15 | 2018 | 1.53 | 1801 \pm 6 | 1.41 | 1.09 |
| 1796 | 0.1 | 1944 | 1.48 | 1799 \pm 2 | 1.41 | 1.05 |

表 3

| Vo(m/s) | k(1/s) | Vm(m/s) | Hm(km) | V(m/s) | H(km) | Hm/H |
|---------|--------|---------|--------|--------------|-------|------|
| 1784 | 0.1 | 1930 | 1.46 | 1797 \pm 4 | 1.41 | 1.04 |
| 1786 | 0.1 | 1932 | 1.46 | 1806 \pm 3 | 1.42 | 1.03 |
| 1784 | 0.1 | 1930 | 1.46 | 1798 \pm 4 | 1.41 | 1.04 |
| 1782 | 0.1 | 1928 | 1.46 | 1798 \pm 3 | 1.41 | 1.04 |
| 1786 | 0.1 | 1932 | 1.46 | 1793 \pm 4 | 1.40 | 1.04 |
| 1788 | 0.1 | 1934 | 1.46 | 1807 \pm 4 | 1.42 | 1.03 |
| 1786 | 0.1 | 1932 | 1.46 | 1810 \pm 3 | 1.43 | 1.02 |
| 1786 | 0.1 | 1932 | 1.46 | 1801 \pm 5 | 1.41 | 1.04 |
| 1782 | 0.1 | 1928 | 1.46 | 1800 \pm 3 | 1.41 | 1.04 |
| 1784 | 0.1 | 1930 | 1.46 | 1799 \pm 3 | 1.41 | 1.04 |

ないのである。

ミラーズ層を仮定した場合と、定速度層を仮定した場合に推定される層厚の変化を見るために、仮に今回のモデルを夢の島での表層地盤であるとして見よう。夢の島周辺の観測データを見直した結果によれば（未発表）、第2層の原点走時は1.18秒、P波速度 2.8 km/s が得られている。(2)、(3)、(4)、(5)の V_0 及び k から推定される表層最深部でのP波速度 V_m はそれぞれ、1931、1943、1931、1944 m/s、そして地表層の厚さ H はそれぞれ 1.46、1.48、1.46、1.48km となる。一方、(6)、(7)、(8)、(9)を仮定した場合の地表層の厚さはいずれも 1.41 km となる。これから、観測走時の読み取り誤差無しの場合でも、実は一定速度層であるものを誤ってミラーズ層と仮定することにより生ずる誤差は 5% 程度であり、層厚を厚く見積ることとなる。

III より現実的なモデルによる検討

先にも述べたように、本報告では爆破点からの距離がそれ程遠くない地点での観測データを考えている。よって、記録の読み取り精度は 1/100 秒以下と考えてよい。しかし、現実的には速度がどこでも一様であるような理想的な地層は存在しないのではなかろうか。すなわち、局地的には低速度或は高速度の表層があり調査している範囲での平均的な速度が 1.8 km/s とするほうがより真実に近いものと思われる。そこで、先の走時のデータに 0.02 ~ -0.02 秒の乱数を加えた新しいデータを10例づつ作り、同様の計算を行った。表1には 20 点のデータを用いた場合の V_0 及び k 、 V_m 、層厚 H_m 、速度一定とした場合の V （最小自乗法による）及び層厚、 H 、 H_m/H が示してある。(2)、(4)とほぼ同じ結果が得られ、この例の場合ではデータに前記の程度のバラツキがあっても問題無いことが分かった。同様のテストを 5 km までの 10 点のデータで試みた。表2はその結果で 10 例の内 4 例で k が大きく推定される。当然の事ではあるが、データがカバーする距離の範囲が大きく効いて来ることが分かる。次に、震源距離 1 km より 1 km 間隔で 10 点及び 5 点の観測データについて同様なバラツキがある場合の計算を行った。10 点の場合を表3に、5 点の場合を表4に示す。観測点数が少なくカバーする範囲が小さい場合、定速度層であっても k が 0.2 を越えるミラーズ層と区別がつかないことが分かる。観測データを増すことはもちろんであるが、データがカバーする範囲を広げることが如何に重要であるかが分かる。

推定される層厚は観測データが 10 km の範囲にあるときはデータ数が 10 でも 20 でも 4% 程度の差で推定できることが分かる。しかし、データが 5 km の範囲によるとデータ数が 10 の場合、表2の例では 9%、データ数が5の場合、表4によれば、13% の差が出る事になる。現実的には、この様な観測点間隔一定の観測は困難な場合が多い。このことは、更に推定誤差を大きくする要因になると考えられる。

参考のため、1 km 間隔の 5 観測点データに 0.01 ~ -0.01 秒の乱数を加えて同様の解析をした結果を表5に示す。それほど改善はされないが、表2とほぼ同じの精度となる。

1/100 s 以下であった。人工的雑音の多い都会地での観測のため大量の火薬を用いた為、爆破点近傍ではこの様に精度の高い観測が行われたのである。一方与えられたデータは、カバーする震源距離の範囲が広ければ広いほど、地表層の性質を記述する上で都合がよい。そこで震源距離が 5 km、10 km (観測点間隔 500 m、データ数それぞれ10、20) のケースで検討を行う。なお、現実にはこの様に密な観測は期待できないことが多いので、半分のデータしか得られない場合を想定し (観測点間隔 1 km、データ数をそれぞれ 5、10)、データが少なくなったとき結果に与える影響を見ることとした。

ミラージ層を想定するに当たり地震波速度は $V = V_0 + kZ$ で深さ Z と共に増加するものとする。ここに、 V_0 、 k はそれぞれ、地表での速度、比例常数である。震源からの距離を x 、走時を T とすれば、

$$T = 2/k \cdot \sinh^{-1} (kx / 2 V_0) \quad (1)$$

で与えられる。この式を用いて、予測走時と観測走時の差の自乗和 r^2 が最小になるように、 V_0 、 k を求めると、観測点が 500 m 間隔の時

$$V_0 = 1785 \text{ m/s}, k = 0.1 \text{ 1/s}, r^2 = 3.7 \times 10^{-3} \text{ s}^2 \text{ (20 data)} \quad (2)$$

$$V_0 = 1796 \text{ m/s}, k = 0.1 \text{ 1/s}, r^2 = 1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^2 \text{ (10 data)} \quad (3)$$

が得られる。また、観測点が 1 km 間隔の場合

$$V_0 = 1785 \text{ m/s}, k = 0.1 \text{ 1/s}, r^2 = 2.3 \times 10^{-3} \text{ s}^2 \text{ (10 data)} \quad (4)$$

$$V_0 = 1795 \text{ m/s}, k = 0.1 \text{ 1/s}, r^2 = 0.0 \times 10^{-4} \text{ s}^2 \text{ (5 data)} \quad (5)$$

となる。採用した地盤モデルが読み取り誤差が無い場合はデータ数が半分になっても問題はなさそうである。一方同じデータを用いて最小自乗法により速度を一定とした場合の速度 V 及び原点走時 t_0 を決定すると(2)、(3)、(4)、(5)に対応して

$$V = 1801 \pm 0.6 \text{ m/s}, t_0 = 1.0 \pm 1.0 \times 10^{-3} \text{ s} \text{ (20 data)} \quad (6)$$

$$V = 1801 \pm 1.5 \text{ m/s}, t_0 = 1.3 \pm 1.4 \times 10^{-3} \text{ s} \text{ (10 data)} \quad (7)$$

$$V = 1801 \pm 1.0 \text{ m/s}, t_0 = 1.3 \pm 1.5 \times 10^{-3} \text{ s} \text{ (10 data)} \quad (8)$$

$$V = 1802 \pm 2.0 \text{ m/s}, t_0 = 3.0 \pm 2.2 \times 10^{-3} \text{ s} \text{ (5 data)} \quad (9)$$

が得られる。ミラージ層を仮定すると、速度一定の地層の場合でも見かけ上 k が決ってしまう。この例の場合、少なくとも $k > 0.1$ 以上の結果が得られなければそれがミラージ層とは断定でき

ミラージ層近似による層厚決定の誤差

嶋 悦 三

On Computation Errors Due to the Mirage Layer Assumption.

Etsuzo Shima

I はじめに

原則的には地震波速度は深さと共に増大する。このことは、実際に、深井戸に於ける実測結果〔例えば、山水他 (1981)、鈴木 (1993)〕に見られる通りである。このように深さと共に地震波速度が増大するような地層はミラージ層と呼ばれ、その地層を伝わる地震波の走時の解析法が古くから議論されてきた。ところで、我々が首都圏でこれまでに実施してきた屈折法による地震探査〔首都圏基盤構造研究グループ (1989)〕では、速度層内における地震波速度は一定と仮定して地下構造を解析してきた。このことは観測の主目的が先第三紀層、いわゆる地震基盤に至る大局的な地下構造を把握する事にあり、特に初期の段階ではミラージ層の諸元を観測データから逆問題として決めるためにはデータが不足していた事が主な理由であった。又、一方では、ミラージ層は各層内の地震波速度が順々に増加する多層構造で近似できるはずであり、観測の誤差を考えればそのような取扱いの方が解析がはるかに容易であると言う主張も有ると考えられる。

その後、爆破点近傍における観測データも蓄積され、逆問題としてのミラージ層の検討も可能になったように思われる。しかし、観測は誤差を伴うものであるから、その解析には限界が考えられる。そこで、この問題を検討するために数値実験を行った。

II シュミレーションによるミラージ層の検討

首都圏における観測では地表層を伝わる地震波速度は $1.8 \sim 2.0$ km/s と得られている。下層からの屈折波が初動として観測されるのは爆破点から $5 \sim 10$ km 離れた地点からである。そこで、シュミレーションに用いる地表層のモデルとして夢の島爆破実験を参照して 1.8 km/s の速度層を考え、爆破点の深度を 50 m、観測点間隔は 500 m として 10 km までの 20 点で観測するものとし、理論走時の小数点以下 3 位を四捨五入して得られるものをデータとして用いることにした。

夢の島爆破地震動観測の経験によれば、上記のモデルの震源距離での初動走時の読み取り誤差は