

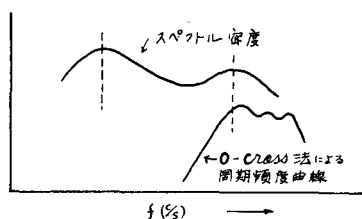
東京大学生産技術研究所 正員 工博 岡本 舜三
 首都高速道路公団 正員 玉野 治光
 首都高速道路公団 正員 工修 西山 啓伸
 愛媛大学工学部 正員 工修 O大久保 稔二

1. まえがき 地震による構造物の被害が地層により異なることは以前からよく知られていることであり、地盤の地震時における振動特性を求めることは構造物の耐震設計と結びつけて重要なことである。首都公団ではこのための一の方法としてこれまで構造物の建設予定路線の地表面において常時微動の測定を行い O-Cross 法によって地盤の卓越周期を求めてきた。しかし、この方法では地盤に常時微動を発生させている入力波が White Noise であることが必要条件であり、また O-Cross 法では地盤の周波数特性を解明する上である限界があることなどが問題となり、今回これら二点を解明するためボーリング孔を利用して孔内地震計により各地層毎の常時微動の測定を行ない、下部地層に入射する常時微動の入力波の性質及び各地層の振動特性を求める方法等を検討したので以下その概要について述べるものである。

2. 常時微動の測定 地表面の常時微動測定器として固有周期1秒の DK 型速度計を用いボーリング孔内用としては孔内用電磁式地震計（固有周期5.0%, 水平2成分内蔵加速度計）を用いた。これらの測定結果は磁気テープに収め必要に応じて積分器、磁気相関計、ペン書きレコーダー等につけ、種々の解析を行なった。測定は出来る限り測定点附近の交通、及び工場、風等の振動源がなくなった深夜、又は早朝に行なった。又、各地層の振動特性を検討するため地質や N 値の異なる境界面毎に地表と同時測定を行なった。但し N 値がほぼ 50 程度以上の地層を一応構造物の基礎の支持層と考へ、耐震設計上考へるべき基盤とし、その振動を測定した。

3. 各種地盤における測定結果 常時微動測定は首都高速道路1号線上野附近、5号線地袋附近、6号線箱崎川筋、7号線堅川筋～江戸川区春江町において行なった。二つの測定点の地質柱状図、及びその常時微動のスペクトル密度、及び同一地点の O-Cross 法による結果等を示すと次の通りであり、これらの測定結果より次のことが言える。すなわち

- (1) 同一地点においても各地層境界面におけるスペクトル密度は必ずしも一致せずお互いに相異なる。
- (2) N 値が 50 以上程度の基盤における常時微動の速度、及び加速度のスペクトル密度はすべての周波数に対して必ずしも一定ではなく 1 ～ 数個のピークを有している。
- (3) 一般に基盤においてスペクトル密度の大きい周波数では各地層においてもスペクトル密度の値は大きい。言い換えれば各地層におけるスペクトル密度はその地層の振動特性のみならず、基盤の環型特性をも含まれたものを表わしている。
- (4) スペクトル密度、及び O-Cross 法による周期頻度曲線の両者が共にある一つの周波数のみに極大値を有するような地層では両者の極大値の周波数はほぼ一致する。しかし、複数のピークを有したり、平坦なだらだらの山を作るような地層では両者の極大値の周波数は一致しない。



オ 2 図

特に、長周期と短周期においてピークを有する場合、周期数度曲線では短周期成分が卓越し易く、例えばスペクトル密度において2〜3%と7〜10%前後にピークを有するような場合、周期数度曲線では7〜10%前後に1〜数個のピークが認められるが2〜3%のピークはほとんど検出されない、この違いを模式的に表現するとオ2図のようになる。

4. 常時微動による地層の周波数特性の解析 3.の常時微動測定結果より我々が基盤層と考えたN値がほぼ50以上の地盤における常時微動はある周期で極大となる振動特性を有し、その振動特性がそのまゝ地表面に表われていることが明らかとなった、このことは地表面の常時微動測定結果のみからその地層の振動特性を判定することは非常に危険を伴うことを意味している。又、スペクトル密度とO-CROSS法による結果との比較よりO-CROSS法ではその解析の手法上どうしても短周期のピークが出やすく、振動特性の正確なスペクトルパターンを示すとは言いがたい、そこで次に、各層毎に測定した常時微動のスペクトル密度を用いて、その地盤の振動応答特性を求める方法について考察してみよう。

$$\text{--- } S_A(\omega) \text{ ---}$$

地層：A, $H_A(\omega)$

$$\text{--- } S_B(\omega) \text{ ---}$$

地層：B,

オ 3 図

$$\text{--- } S_A(\omega) \text{ ---}$$

地層：A, $H_A(\omega)$

$$\text{--- } S_B(\omega) \text{ ---}$$

地層：B, $H_B(\omega)$

$$\text{--- } S_C(\omega) \text{ ---}$$

地層：C,

オ 4 図

いまオ3図の如き二層構造の地盤を考える。地層Aを一つの弾性体と考え、この弾性体の周波数特性関数を $H_A(\omega)$ で表わすことにすると不規則振動理論により、地盤Bに $S_B(\omega)$ なるスペクトル密度をもった波が入射した場合、地層Aの表面に生ずるレスポンス波のスペクトル密度： $S_A(\omega)$ は次式で表わすことができる。

$$S_A(\omega) = |H_A(\omega)|^2 S_B(\omega), \quad |H_A(\omega)|^2 = \frac{S_A(\omega)}{S_B(\omega)} \quad \text{--- (1)}$$

又、オ4図の如き三層構造の地盤では、地層Bのスペクトル密度： $S_B(\omega)$ は

$$S_B(\omega) = |H_B(\omega)|^2 \cdot S_C(\omega) \quad \text{地層Aのスペクトル密度：} S_A(\omega) \text{は}$$

$$S_A(\omega) = |H_A(\omega)|^2 \cdot S_B(\omega) = |H_A(\omega)|^2 |H_B(\omega)|^2 \cdot S_C(\omega)$$

$$\therefore |H_A(\omega)|^2 \cdot |H_B(\omega)|^2 = \frac{S_A(\omega)}{S_C(\omega)} \quad \text{--- (2)}$$

ここに $H_A(\omega)$ 、 $H_B(\omega)$ はそれぞれ地層A、及びBの周波数特性関数である。したがって式(1)及び(2)より、地層の周波数特性関数 $H(\omega)$ は、求めようとする地層 γ 上下二つの境界面において同時に測定したスペクトル密度を各周波数ごとに比を求めることより得られることがわかる。この考えに基づいて実測データより求めた各地層の周波数特性関数の例をオ5図に示す。この周波数特性関数と実測した地表におけるスペクトル密度を比較すると、これらのピークの周期及び相対的な大きさは必ずしも一致せず、特に周波数特性関数では長い周期の波においてもその地層によって拡大されている波の周期をはっきりと識別することができる。

5. 地層の周波数レスポンス関数の理論的考察 4.で求めた地層の周波数レスポンス関数も理論的に検討するためPt B-7-2, Pt B-7-6における各層の密度及びS波の速度を土質試験結果及び参考図表よりオ6図及びオ7図の如く推定した、今、この地層モデルの基盤：Cにオ8図に示す

ような振動の Unit Impulse が入射し、各層において多重反射するものとする。一般のバネ系では、その地表面における振動の時間的変化 $h(t)$ がその Unit Impulse-response 関数となり、そのフーリエ変換が周波数レスポンス関数となる。すなわち

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3)$$

Fig. B-7-2 及び B-7-6 における Unit Impulse による $|H(\omega)|^2$ の計算結果及び実験によるそれとを比較すると Fig. 8 の如くになり、両者のピークは極めて一致しているといえる。

6. 地盤の常時微動測定の耐震設計への応用 次に 4. 及び 5. にあって求めた常時微動による地盤の周波数特性関数を構造物の耐震設計に適用する一つの方法について考察してみよう。いま構造物の基礎を支持する地層 (Fig. 9A) にスペクトル密度 $S_E(\omega)$ をもつ地震動 $X_E(t)$ が入射するものとする。地層 GB における地震動 $X_E(t)$ は GB の地表面で $S_G(\omega) = |H_B(\omega)|^2 S_E(\omega)$ なるスペクトル密度を有する振動を与える。ここに $|H_B(\omega)|^2$ は (2) 式又は (3) 式等により常時微動測定結果より求めた地層 GB の周波数特性関数である。構造物の基礎がコンクリート杭や鋼管杭等の曲げ剛性の小さな基礎では、その地震動 $X_E(t)$ による振動は地層 GB の振動にほぼ一致するものと考えられる。次に構造物の

周波数レスポンス関数を $H_S(\omega)$ とすると、構造物の地層 (基礎) の振動 $S_G(\omega)$ による振動応答 $Y_S(t)$ のスペクトル密度 ($S_S(\omega)$) は、 $S_S(\omega) = |H_S(\omega)|^2 S_G(\omega)$ となる。今、 $Y_S(t)$ が Stationary Normal 又は Gaussian Process であると仮定すれば $Y_S(t)$ が単位時間にある値 a を越える確率 V_a は次式で表わされる。 $V_a = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial y}{\partial y} \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (4)$ ここに、

$$\sigma_y^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_S(\omega) d\omega, \quad \sigma_{\dot{y}}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 S_S(\omega) d\omega$$

したがって何らかの形で入射する地震動 $X_E(t)$ 又は、そのスペクトル密度、及び Random 波による構造物の材料及び構造系としての破壊に対する $a-V$ 関係が求まれば (4) 式より地震動 $X_E(t)$ による構造物の破壊に対する確率を求めることが出来る。

7. あとがき 本研究はこれまで地表面において多く行われてきた常時微動測定をボーリング孔を用いて各地層毎に測定し、その自己相関関数及びスペクトル密度を求めることにより基礎に入射する波は必ずしも周波数に關係なく constant なスペクトル密度をもつた波ではなく、1~数個の極大値をもつた波であること、その波の振動特性が地表面の常時微動にも表われること、したがって地表面のみの常時微動より、その地層の振動特性を判断することは極めて危険であること、各地層における振動特性は各層毎のスペクトル密度の比を計算することにより求めることが出来ること等を示し、更にその結果を耐震設計に適用する一つの方法について述べた。今後、種々地層における常時微動の観測に際してはそれと平行して種々問題はあろうけれども代表的な地層における波の速度を

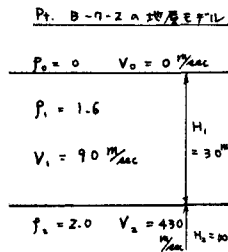


Fig. 6

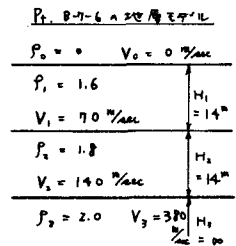


Fig. 7

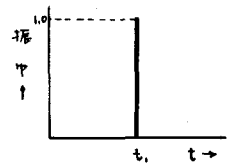


Fig. 8

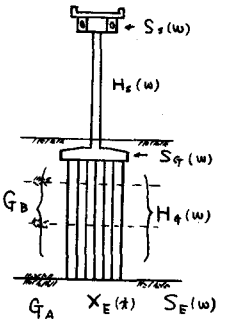
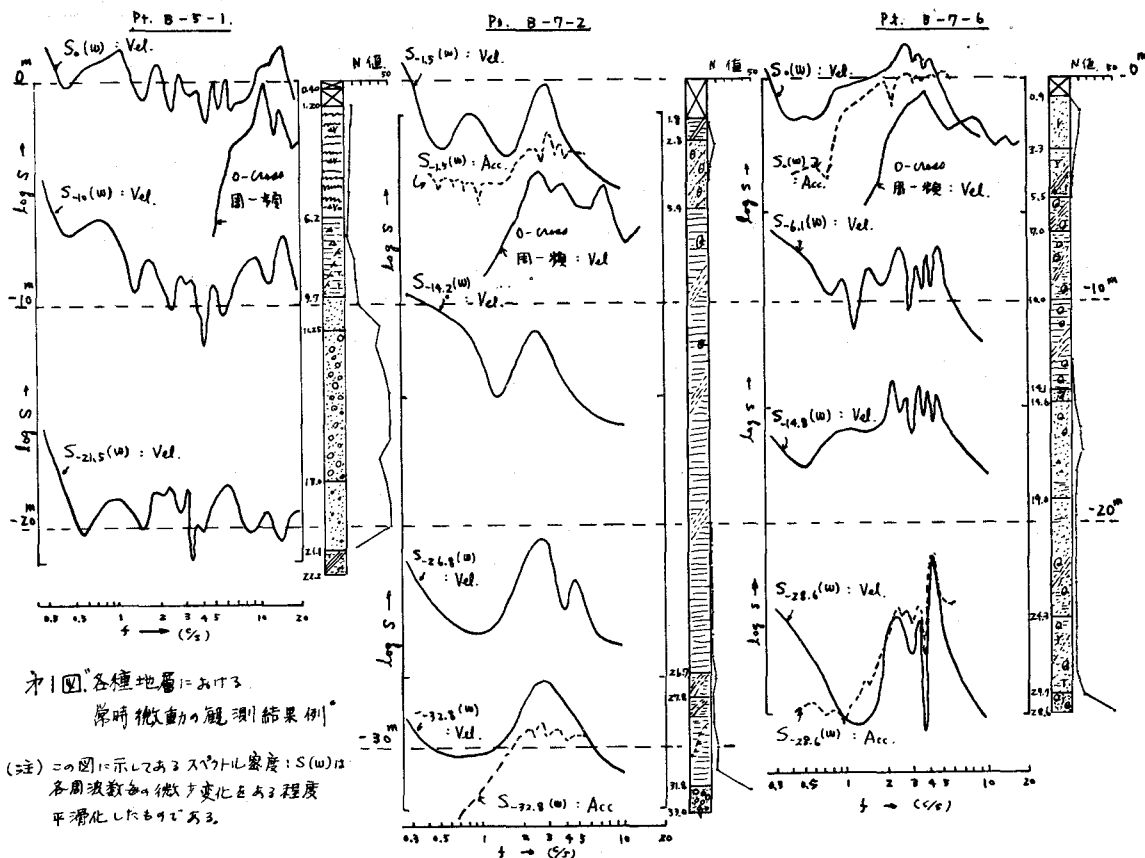


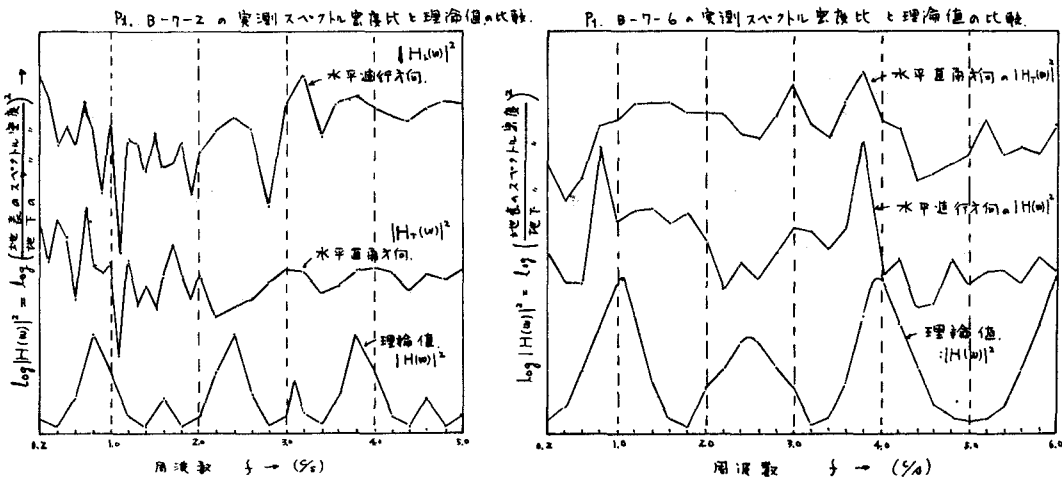
Fig. 9

も測定することが必要であろう。さらにこれまで行なってきた地表面と構造物上における地震動観測のみならず構造物の支持地盤と其の地表における地震動の同時観測をも併せて行なう必要があることをここに提案したい。



才1図 各種地層における
常時微動の観測結果例

(注) この図に示してあるスペクトル密度: $S(w)$ は
各周波数毎の微小変化による程度
平滑化したものである。



才5図