

(9) 周波数領域での相乗平均を用いた地震波形の内挿方法

埼玉大学工学部 正会員 川上英二

埼玉大学工学部 学生員 ○佐藤誠一

埼玉大学工学部 正会員 茂木秀則

1. 序文

トンネル、パイプライン、地中埋設管等の地震波の伝播に伴う動的応答解析、耐震設計を行う場合、まず、管路・地盤・基盤を力学的にモデル化し、地盤または基盤における地震動を入力する必要がある。地盤または基盤からの地震入力、管路に沿った各点で与える必要があり、この各点での入力の時刻歴を、つまり、時間及び空間の関数として地震波形を、どのように想定するかは、管路の応答に支配的な影響を及ぼすため重要な問題である。筆者らは、これまでに本問題をクロススペクトルを満足する条件付きシミュレーションの問題と位置付けいくつかの手法を提案している^{1)~5)}。

本研究では、クロススペクトルを想定せず、波形を単に内挿するという立場¹⁾から、2地点で観測された地震波のデータをFFTによって周波数領域に変換し、重み付き相乗平均を用いて、内挿波形を算出する方法を提案する。

2. フーリエ変換を用いる内挿方法

観測点0, Lの波形データを $f_0(t), f_L(t)$ とする。これらのフーリエ変換 $C_0(\omega), C_L(\omega)$ は、

$$C_0(\omega) \equiv |C_0(\omega)| \exp[i\phi_0(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f_0(t) \exp(-i\omega t) dt$$
$$C_L(\omega) \equiv |C_L(\omega)| \exp[i\phi_L(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f_L(t) \exp(-i\omega t) dt \quad (1)$$

ここで、 $\phi_0(\omega), \phi_L(\omega)$ は位相である。

この $C_0(\omega), C_L(\omega)$ の重み付き相乗平均をとることにより内挿を行う。観測点間の距離をLとした場合、観測点0から距離 $x(0 \leq x \leq L)$ の地点での内挿波形を次式のように表す。

$$f_x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \{C_0(\omega)\}^{(L-x)/L} \{C_L(\omega)\}^{x/L} \exp(i\omega t) d\omega \quad (2)$$

さらに、式(1)を代入すると、次式を得る。

$$f_x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} |C_0(\omega)|^{(L-x)/L} |C_L(\omega)|^{x/L} \cdot \exp[i\phi_0(\omega) + i(x/L)\{\phi_L(\omega) - \phi_0(\omega)\}] \exp(i\omega t) d\omega \quad (3)$$

式(3)から、角振動数 ω に関する位置 x における振幅 $|C_x(\omega)|$ 、位相 $\phi_x(\omega)$ はそれぞれ、

$$|C_x(\omega)| = |C_0(\omega)|^{(L-x)/L} |C_L(\omega)|^{x/L} \quad (4)$$

$$\phi_x(x) = \phi_0(\omega) + (x/L)\{\phi_L(\omega) - \phi_0(\omega)\} \quad (5)$$

と表され、振幅は重み付き相乗平均、位相は重み付き相加平均で与えられていることがわかる。

3. 位相差の算定方法

式(1)より、 $\phi_L(\omega) - \phi_0(\omega)$ を求める場合、三角関数は 2π の周期性を持っているため、観測波形 $f_0(t), f_L(t)$ だけでは一意に定まらない。そこで、見かけの波速 c での波の伝播を考え、式(3)を次のように近似する。

$$f_x(t) \approx \int_{-\infty}^{\infty} |C_x(\omega)| \exp\{i(\phi_0(\omega) - x\omega/c)\} \exp(i\omega t) d\omega \quad (6)$$

ここで、式 (5) と (6) の位相項を比較すると、

$$x\omega/c = \{\phi_0(\omega) - \phi_L(\omega)\} \cdot x/L \quad (7)$$

つまり、 $\phi_0(\omega) - \phi_L(\omega)$ は $\omega L/c$ を中心とする $\pm\pi$ の間

$$\frac{\omega L}{c} - \pi \leq \phi_0(\omega) - \phi_L(\omega) < \frac{\omega L}{c} + \pi \quad (8)$$

で一意に算定する。ここで、 c は地表面での見かけの伝播速度であるから、相互相関関数のピーク、または、低振動数での位相差を用いて決定することができる。

4. 単純な波形を用いた解析例

ここで、単純な波形を用いて、提案した解析方法の妥当性を示す。Fig. 1 では振幅、周期ともに 1 で、波の数が 4 波分の sin 波を観測点 0, L=1 において観測した（図中太線）として解析した。波形 $f_0(t)$ に対し $f_L(t)$ の立ち上がり時間が 2 秒遅れている場合を考え、観測点間の距離を 1 としているので、波速 c を 0.5 として解析を行った。内挿波形の立ち上がり前後の誤差がほとんど見られず、また、立ち上がり時間がなめらかに変化しており、理想的な内挿波形が得られている。

次に、Fig. 2 では、Fig. 1 と同様の sin 波を用い、観測波形の継続時間が異なる場合を考え、内挿波形の算出を行った。この場合も、観測点間距離を 1 とし、観測波形の立ち上がり時間の違いから、波速を 0.5 として解析を行った。この図を見ると、Fig. 1 と同じく立ち上がり時間はなめらかに変化していることがわかる。

さらに Fig. 3 では、矩形波の場合を考えた。この場合も Fig. 1, 2 と同様に立ち上がり時間を 2 秒ずらし、波速を 0.5 として内挿波形を算出している。ほぼ Fig. 1 と同様な理想的な結果が得られている。

5. 実際の地震波データを用いた解析例

提案した方法を実際の二つの地震波のデータに適用した。

- (1) まず、千葉県東方沖地震（1987）の際、東京大学生産技術研究所千葉実験所でアレー観測されたものを使用した。観測点 0, L はそれぞれ P6, P2 の観測点⁷⁾を示し、2 点間の距離は約 150m である。また、振動の方向は N-S 方向である。この二地点で観測された地震波の相互相関関数を Fig. 4 に示す。図の一番上と下はそれぞれ $f_0(t)$ と $f_L(t)$ の自己相関の波形であり、上から二番目、三番目の波形が相互相関関数である。上から三番目の相互相関関数 $E[f_L(t)f_0(t+\tau)]$ では、ピークはずれ時間 $\tau=0$ sec 付近に現れていることより、2 点間がごく近距離であることを併せて考え、 $L/c=0$ として解析した。Fig. 5 は観測点間を 10 等分し、その各点について内挿波形を算出したものである。図を見ると、波形がなめらかに変化しており、妥当な内挿波形が得られていると考えられる。

Fig. 7 は Fig. 5 で用いた 2 つの観測波形のうち P2（観測点 $x/L=1$ ）のみを 2 秒遅らせて、内挿波形を求めたものである。波形が変化しながら伝播する様子が認められ、ほぼ妥当な内挿波形が得られている。

- (2) 次に、兵庫県南部地震（1995）の際、関西地震動観測研究協議会によって福島と森河内で観測された速度波形を用いて解析を行った。観測点 0, L はそれぞれ福島と森河内の観測点で、2 点間の距離は約 7km、振動の方向は N-S 方向である。観測された地震波の相互相関関数を Fig. 8 に示す。これを見ると、ピークは $\tau \approx 0.65$ sec 付近に現れていることがわかり、このことから見かけの波速 $7/0.65$ km/s を用いて解析を行った。Fig. 9 は観測点間を 10 等分し、その各点について内挿波形を算出したものであ

る。波の立ち上がり時間がなめらかに変化し、また、波形そのものも変化しながら伝播の様子が認められ、ほぼ妥当な結果が得られているものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、二つの地点での観測波形を用いて、二地点間の各点での内挿波形を求めることを試みた。そして、

- (1) 周波数領域の複素振幅の重み付き相乗平均を用いる方法を提案した。
- (2) 提案した方法で、単純な波形と実際の地震波の数例について計算を行い、ほぼ妥当な内挿波形が得られることを示した。

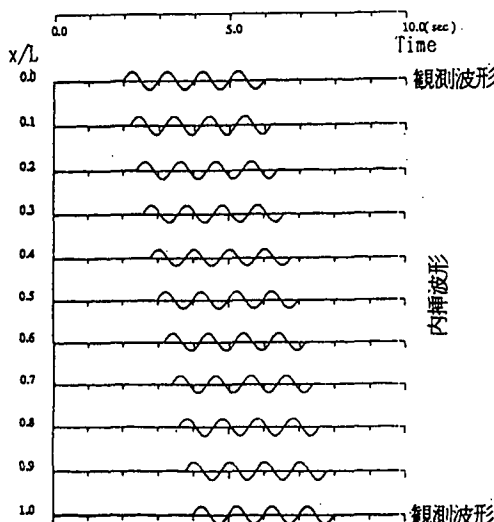


Fig. 1 sin波(4波)の場合の内挿波形

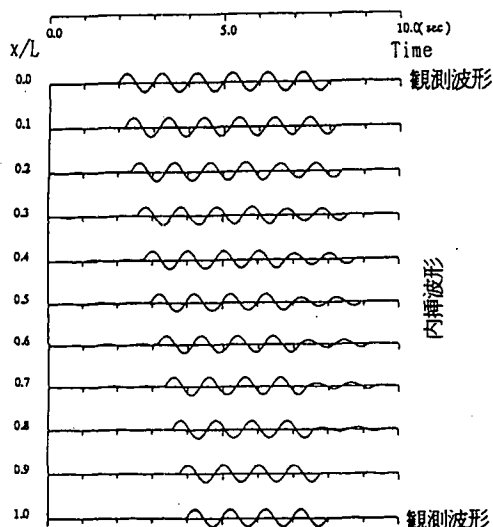


Fig. 2 sin波(6, 4波)の場合の内挿波形

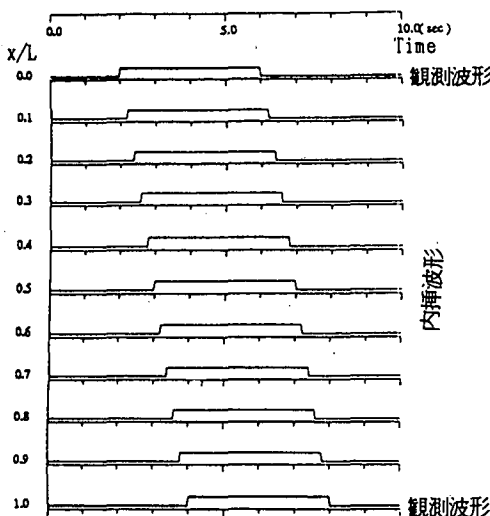


Fig. 3 矩形波の場合の内挿波形

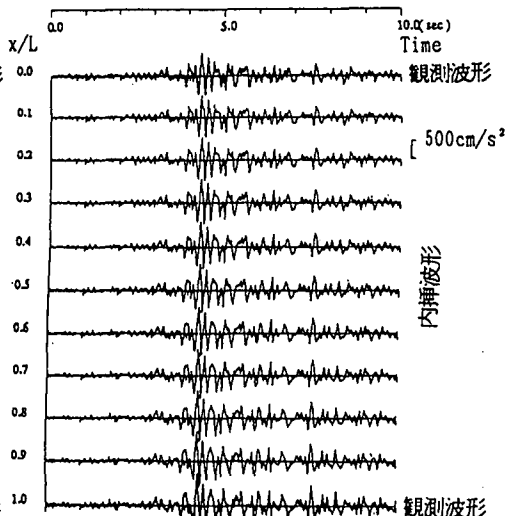


Fig. 5 千葉県東方沖地震の場合の内挿波形($L/c=0$ 秒)

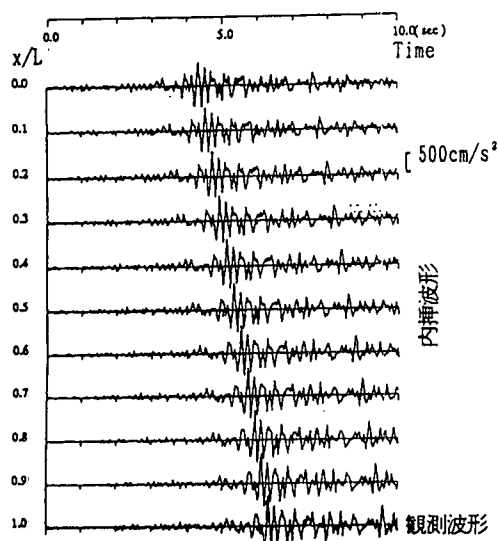


Fig. 7 千葉県東方沖地震（2 秒移動後）の内挿波形

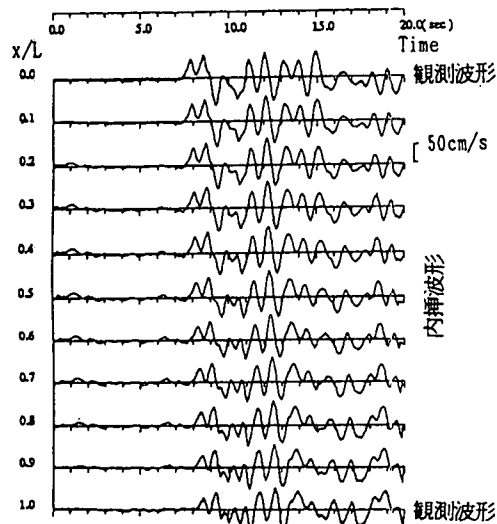


Fig. 9 兵庫県南部地震の場合の内挿波形

謝辞 本研究では、(財) 震災予防協会、強震動アレー観測記録データベース推進委員会/作業部会による強震動アレー観測記録（1992年10月）から東京大学生産技術研究所片山研究室提供のデータベース並びに、関西地震観測研究協議会提供の強震記録のデータベースを使用いたしました。

参考文献

- 1) 川上：土木学会論文集、No. 410/1-12, 1989
- 2) 川上・小野：土木学会論文集、No. 441, 1992
- 3) 川上・小野：土木学会論文集、No. 489a, 1994
- 4) 川上・小野：土木学会論文集、No. 489b, 1994
- 5) 川上・小野・楊：第 9 回日本地震工学シンポジウム、1994
- 6) 高田・高谷他：構造工学論文集、1994
- 7) 片山・山崎他：東大生研報告、1990

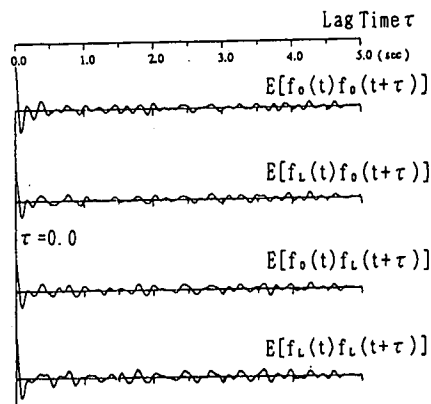


Fig. 4 千葉県東方沖地震の相関関数

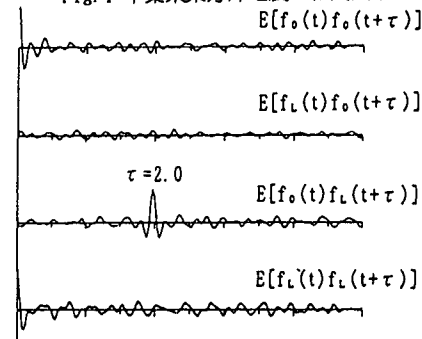


Fig. 6 千葉県東方沖地震（2 秒移動後）の相関関数

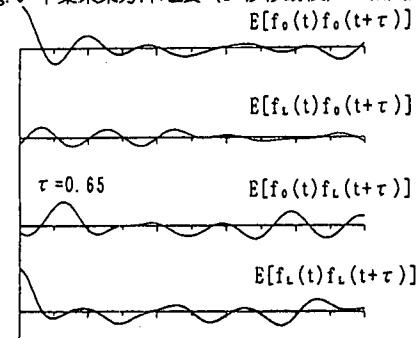


Fig. 8 兵庫県南部地震の場合の相関関数