

京都大学防災研究所 正 員 清野純史
 京都大学防災研究所 正 員 土岐憲三
 京都大学防災研究所 正 員 佐藤忠信
 京都大学大学院 学生員 西岡 勉

1. まえがき 長大橋梁、沈埋トンネル、地中埋設管、堤防などの長大土木構造物の入力地震動を考える場合には、波の伝播にともなう入力地震動の位相差の影響を考慮しなければならない。これは長大構造物の地震応答では任意の2地点間に生ずる相対運動が問題となるからである。こうした問題を解決するために地表面に沿って伝播する波の伝播速度、すなわち位相速度が必要となる。地表面を伝播する波の速度の検出法の歴史は古く、今日まで数多くの研究がなされている¹⁾²⁾³⁾。本研究では数秒以内の周期帯域、数百mから数kmの波長を対象として、今までに提案されている位相速度の検出法とここで新たに提案する Kalman filter を用いた検出法を相互に比較検討し、実地震記録の位相速度の検出を試みた。

2. 位相速度の検出法 位相速度を求める方法は peak and trough method に端を発し、位相スペクトルから直接位相差を求める phase differences 法や、地震波形の相互相関関数から位相スペクトルを計算する cross correlation 法、時間領域で2つの地震記録に位相速度に相当する時間のずれを操作し、正弦波の性質を利用して位相差を調べる sums and differences 法や cross multiplication 法¹⁾へと発展した。これらの方法は簡便であるが、雑音の存在下では安定性に欠けており、実観測記録を用いた場合に不安定な結果を招く恐れがある。本研究では Kalman filter を用いた deconvolution 手法⁴⁾を応用して雑音の除去を行い、特に cross correlation 法と Kalman filter を用いた検出法に対し、雑音の存在下での位相速度の検出法について比較検討を行った。

3. Kalman Filterによる位相速度の検出法 震央を通る直線上に位置する2地点A,Bの地震記録と伝達関数の関係式は次式のように表される。

$$y_B(k) = \sum_{i=N}^k x_A(k-i) h_{AB}(i) + v(k), \quad N = \begin{cases} 0 & (k < L) \\ k-L+1 & (k \geq L) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 $x_A(k)$ はA点での観測波形(入力)、 $y_B(k)$ はB点での観測波形(出力)、 $h_{AB}(k)$ はA,B間の伝達関数を表す。ただし、 $v(k)$ はガウス白色雑音、 L はA点での観測波形の離散時間サンプリング数である。したがってこれを次式のような線形離散時間確率システムの観測過程に対応させて Kalman Filter Algorithm を実行すれば伝達関数を推定でき、2地点間の位相差を求めることができる。

$$x_{t+1} = \Phi_{t+1/t} x_t + G_t w_t \quad (\text{信号過程}) \quad (2)$$

$$y_t = H_t x_t + v_t \quad (\text{観測過程}) \quad (3)$$

図-1(a),(b)は、それぞれ雑音を含まない場合と含む場合の模擬地震波の各ペアから cross correlation 法によって位相速度を求めたものである。実線は仮定した位相速度の分散曲線であり、○印は cross correlation 法により検出された位相速度である。図-1(a)のように雑音が含まれていない場合には仮定した分散曲線に一致するが、雑音の含まれる図-1(b)の場合は、円振動数 ω が小さくなるにしたがって雑音による推定誤差が大きくなるのがわかる。図-1(c)は Kalman filter を用いた場合の位相速度の検出結果であり、図-1(b)と比較すると推定誤差が減少しているのが認められる。実線で示した真の位相速度との差のR.M.S.値で比較しても、図-1(b)の場合で57m/sec、図-1(c)の場合で13m/secとなり、雑音の存在下では cross correlation 法による位相速度の検出の精度が悪く、Kalman filter による検出法のように雑音を除去する必要があることがわかる。

4. 実地震波の位相速度の検出 震源と2つの観測点がほぼ同一直線上にあり、観測点間距離が数百m程度、そして同一の地震に対して強震記録が得られているという条件を満たすものとして、1971年2月に起こった San Fernand地震の際の1760 N.Orched Avenue, ground floor, Hollywood(Q236)とHollywood Storge, basement, Los Angelse(D057)の2地点の記録を用いた。観測点間の距離は1000m⁵⁾、震央距離は約30kmである。図-2は Kalman filter を用いた位相速度の検出結果である。2 π の整数倍の位相差のずれにより5本の分散曲線が得られたが、このうちの1本を選択するために図-3に示した2つの地震波のクロススペクトルから卓越振動数(2.4Hz:15rad/sec)を求め、図-4に示された2地点の地震波の相互相関関数が最大となる時間遅れ(1.7秒)に相当する速度(約590m/sec)がこの卓越振動数の位相速度と一致すると考えて破線②を選択した。同様に、cross correlation 法による位相速度の検出も行い、両者を比較したものが図-5である。全体的な傾向にあまり差はなく、特に円振動数が約10rad/sec以上の範囲ではほとんど一致しているが、円振動数10rad/sec以下では両者による位相速度の差異が数百m/secになることもあることがわかる。

参考文献 1)Bloch,S. and A.L.Hales:Bull.Seism.Soc.Am.,Vol.58,No.3,1968. 2)Dziewonski,A.M. and A.L.Hales:Geosciences Division,Univ. of Texas,1973. 3)佐藤:弾性波動論,岩波書店,1978. 4)土岐・佐藤・清野・市原:京都大学防災研究所年報,第29号B-2,昭和61年. 5)Michael J., M.ASCE, G.Castro and I.Hossain:Jour.of Geotech.Eng.,Vol.110,No.9,1984.

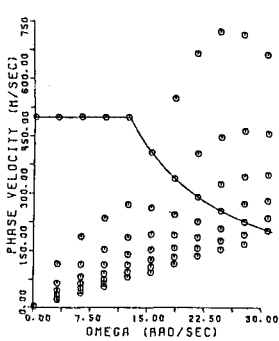


図-1 (a) 位相速度(雑音を含まない)

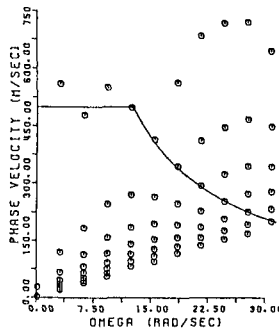


図-1 (b) 位相速度(雑音を含む)

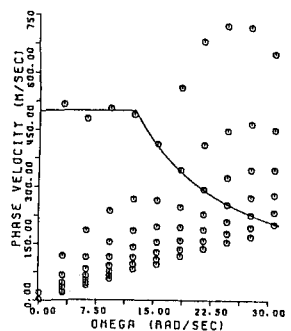


図-1 (c) 位相速度(Kalman filter)

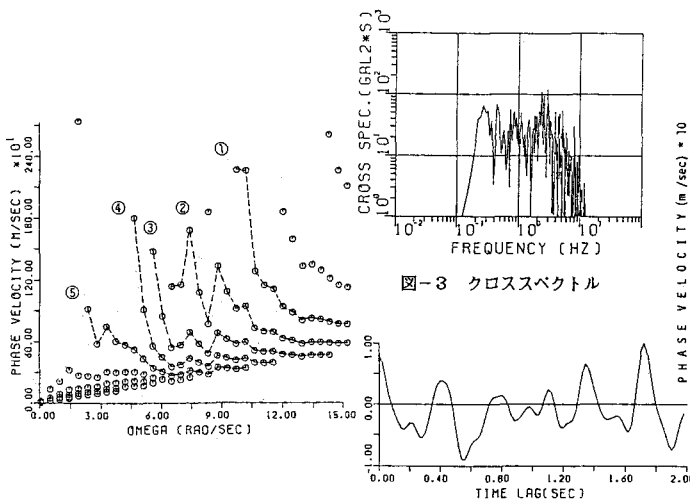


図-2 分散曲線(Kalman filter)

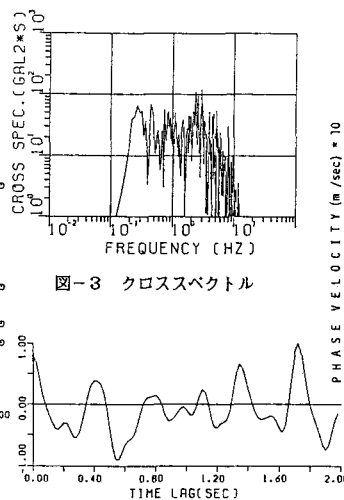


図-3 クロススペクトル

図-4 相互相関関数

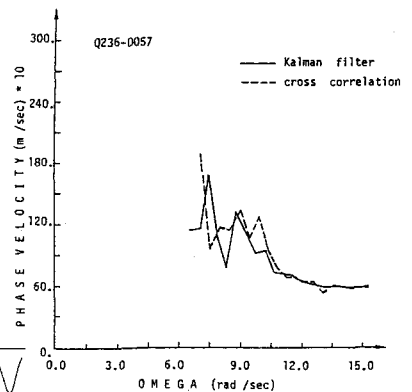


図-5 分散曲線の比較