

常時微動を用いた護岸舗装直下の空洞の検出に関する研究

長 尾 毅*

建設後年数を経た臨海部護岸においては、裏埋土の流出が生じた結果、護岸直背後の舗装直下に空洞が生じる場合がある。このような空洞を非破壊で検出する方法として、常時微動の活用について検討した。常時微動観測により位相速度が得られるが、空洞部分と空洞のない部分で位相速度が変化することに着目し、常時微動観測を用いて空洞の検出が可能であることを示した。常時微動観測は携帯型のセンサーを用いて短時間で計測を行えるため、実務への適用性は高いと考えられる。

1. はじめに

建設後年数を経た臨海部護岸においては、長期間にわたる波浪の作用と目地部や吸出し防止工の経年劣化などにより裏埋土の流出が生じ、その結果、護岸直背後の舗装直下に空洞が生じる場合がある。このような空洞は事故の原因となるため、定期的な点検を行うなどの適切な管理が必要である。しかしながら、舗装部に窪みやクラックが生じるまでは空洞の発生を直接確認することは困難である。このため空洞の検出にあたっては何らかの非破壊検査を実施する必要がある。

非破壊検査には様々な方法が存在するが、本研究ではこれまで空洞検出には用いられてこなかった常時微動(地震動の作用がない状態での地盤の微小な振動)に着目し、常時微動の観測による空洞部の検出可能性について検討した。常時微動アレー観測は携帯型のセンサーを用いて短時間で計測を行えるため、空洞の検出が可能であれば実務への適用性は高いといえる。

2. 常時微動

常時微動とは、各種の人間活動などによって発生する地盤の微小な振動を指し、その振幅は通常 10^{-5} m/s 程度の僅かなものである。常時微動には表面波の 1 種であるレーリー波が卓越することが知られており、レーリー波は伝播方向の水平成分と鉛直成分の 2 方向成分を有する波動である。

常時微動のアレー観測とは円の中心および円周上の多点にセンサーを配置して鉛直成分の同時観測を行う方法である。ここで、鉛直成分の観測を行う理由は、表面波のもう 1 つの種類のラブ波などの影響を除去することにある。

アレー観測結果をもとに空間自己相関法 (Aki, 1957) を適用することによりレーリー波の位相速度を検出することができる。これは、アレー半径 r においてコヒーレンスの実数部分 (空間自己相関係数) を抽出し、式 (1)

の関係からベッセル関数の逆演算を用いて周波数毎の位相速度を求める方法である。なお、位相速度 C は波数 k と $C = \omega/k$ の関係にある。

$$\text{Re}[\overline{\text{coh}}(r, \omega)] = J_0(kr) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 ω : 角周波数、 k : 波数、 J_0 : 第 1 種 0 次ベッセル関数である。

なお、通常アレー観測は複数のアレー半径について行われる。これは、観測可能な波長の範囲がアレー半径に依存するため、一般的には式 (2) の関係があるとされている (宮腰ら, 1997)。

$$2r \leq \lambda \leq 10r \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 r : アレー半径 (m)、 λ : 波長 (m) である。位相速度を検討することにより地盤のせん断波 (S 波) 速度構造の推定が可能となる。これは、地盤は一般に多層系であり、このため位相速度は分散性を示し、その値は短周期側では最表層地盤の S 波速度に近い値を示し、長周期側では深部の S 波速度の影響を強く受けるためである。

ここで、本研究で対象とするような直下に空洞部を有する舗装表面において観測を実施した場合、微動を伝える媒質は空洞上部の舗装部分のみとなるため、得られる位相速度は強い分散性を示さず、かつその値は表層地盤の S 波速度よりも大きく、舗装部分の S 波速度に近い値となると考えられる。このような観点から、位相速度を検討することにより、舗装直下に空洞が生じているか否かが判定できると考えられる。

3. 研究内容

(1) 観測方法

本研究では、実際に舗装直下に空洞が生じたため、舗装にクラックや陥没が発生している F 港を対象に観測を実施した。

図一1に観測位置平面図を示す。図中の数字は護岸番号である。本地点は延長約 4000 m であり、護岸上部工の施工目地間隔は 15 m である。護岸直背後の観測は 9 地点において行ったが、本稿ではこのうち主に No. 10 および No. 40 について結果を示す。このほか、護岸背後 50 m

* 正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室 長

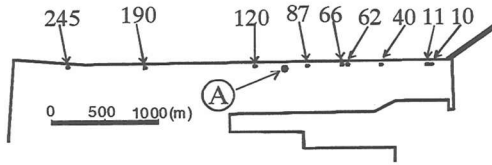


図-1 観測位置平面図

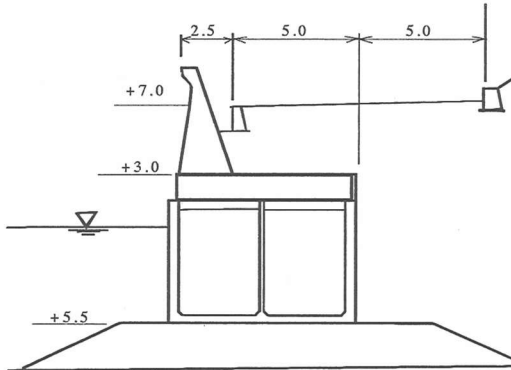


図-2 標準断面図 (単位: m)

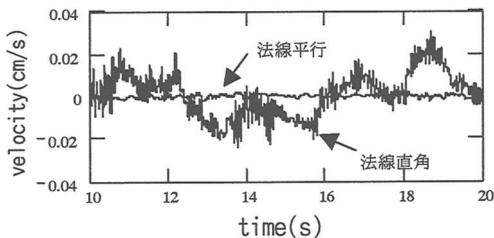


図-3 観測波形時刻歴

の地盤上 (A) においても観測を行った。この A 地点は空洞のない地盤である。図-2 には護岸の断面図を示す。重力式護岸であり、現地ではケーソン後壁位置に相当する護岸法線から約 7.5 m の位置の舗装上に法線平行方向にクラックがほぼ全面にわたり発生している。

護岸直背後における常時微動の水平成分の時刻歴波形を図-3 に示す。法線直角方向成分が圧倒的に卓越しており、その振幅は法線平行方向の 10 倍以上であることが分かる。これは当地点においては波浪の影響が常時微動の支配的な発生源であることを示す。このように常時微動の到来方向に偏りがあるときには、常時微動の到来方向にセンサーを配置する必要がある。このため、アレーの展開にあたっては法線直角方向に 60 cm 間隔に直線上にセンサーを配置した。また、A 地点においては、アレー半径を 2, 5, 10 m とし、円中心に 1 点および円周上に正三角形を構成するように 3 点センサーを配置した。ここで、A 地点で正三角形アレーを採用した理由は、護岸法線より 50 m 離れているため微動の到来方向に大き

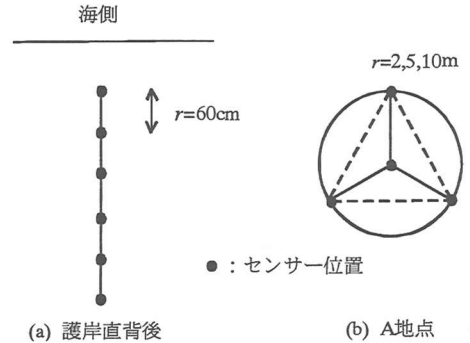


図-4 アレー展開状況



写真-1 アレー観測状況

な偏りはなく、かつ地盤の平均的な S 波速度構造を知ることが目的であるためである。図-4 にアレー展開状況を、写真-1 にアレー観測状況を示す。計測に用いたシステムの仕様から、本研究では 6 つのセンサーによる同時観測を実施している。サンプリング周波数は 500 Hz とし、観測時間は 5 分間とした。

(2) 観測対象地盤

図-5 に A 地点に最も近い土質調査地点における N 値および S 波速度の深度分布を示す。S 波速度は、土層ごとの平均 N 値をもとに、Imai (1977) の方法により換算したものである。次に得られた S 波速度構造をもとに Haskell (1953) の方法により理論位相速度を算出した。

一方、A 地点における観測結果をもとに空間自己相関法 (Aki, 1957) を適用し、観測位相速度を算出した。両者の比較を図-6 に示す。点線が理論位相速度であり、実線が観測位相速度である。

各アレー半径ごとに長周期側で周期の増加に伴い位相速度が減少を始める波長が観測限界波長である。式 (2) の関係から分かるように、長い半径を採用するほど位相速度を算出できる範囲は長周期側になる。観測位相速度と理論位相速度は調和的であり、空洞がない場合は微動観測により図-6 に示すような位相速度が得られるはず

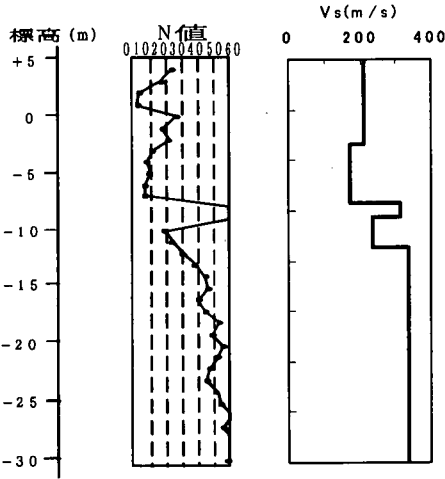


図-5 土質柱状図

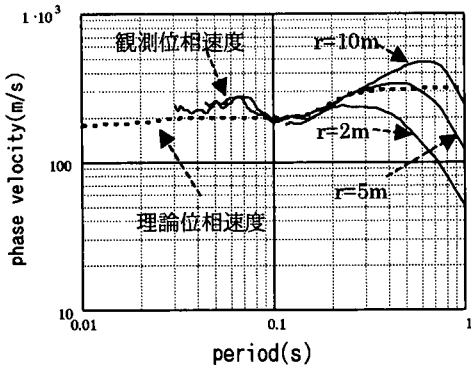


図-6 位相速度の比較

である。なお、0.3秒以上の範囲でアレー半径10mの観測位相速度が理論位相速度を上回っているが、これは理論位相速度を計算している地盤構造の範囲が標高-30mまでであることによると考えられる。すなわち、標高-30m以深で300 m/s以上の大きなS波速度を有する土層が存在していると考えられる。

(3) 観測結果

以下に護岸直背後の各観測地点における結果を示す。

なお、上述のように護岸直背後での観測は局所的な空洞検出が目的であるため、以下では60 cm間隔で配置した2つずつのセンサーの記録をもとに整理している。

まずNo.40における結果を示す。この地点は、図-7に示すように、直径50 cm程度の穴(ハッチ部分)が舗装表面に生じており、舗装下部に1 m四方程度の空隙が生じていることを実際に確認している。

図-8に測線7, 8, 10, 11における空隙部分(実線)と空隙のないと考えられる部分(点線)それぞれの位相速度 C を、図-9には空間自己相関係数 ρ を示す。式(1)

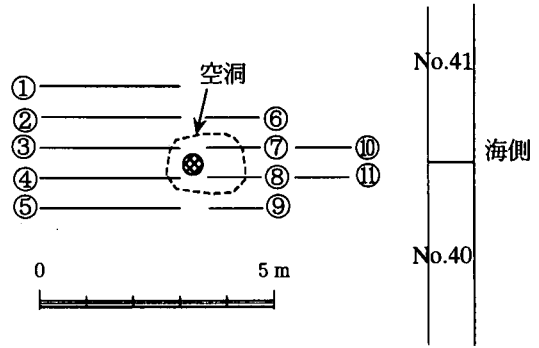


図-7 No. 40 地点

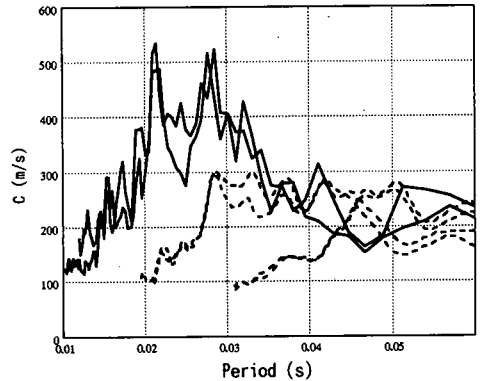


図-8 位相速度 (No. 40 測線 7, 8, 10, 11)

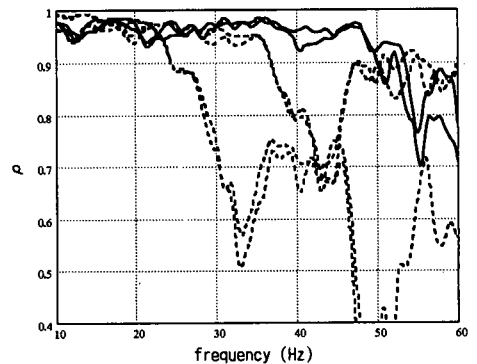


図-9 空間自己相関係数 (No. 40 測線 7, 8, 10, 11)

に示したように、アレー半径の10倍程度の波長が観測限界であるといわれているが、長尾・紺野(2002)の事例では15倍程度まで観測できる場合があることを確認している。いま観測限界波長を $15r$ とするとほぼ10mとなるため、ここでの結果のうち波長10m以上の値には信頼度が低い。これは、図-8の位相速度では0.04秒以上の値に相当する。そこで、0.03秒付近の値を確認すると、実線の空洞部分では350~450 m/s程度の大きな位

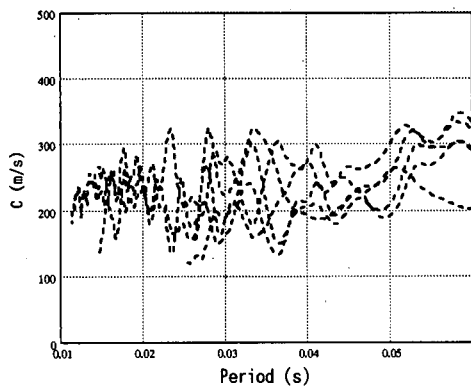


図-10 位相速度 (No. 40 測線 3)

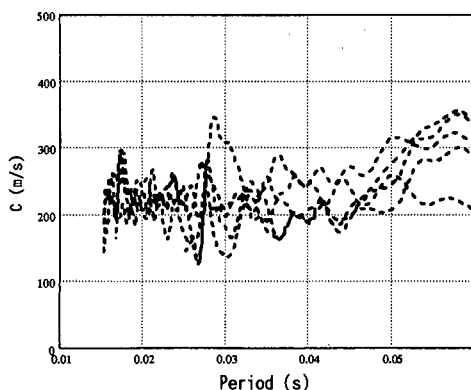


図-11 位相速度 (No. 40 測線 4)

相速度が算出されているのに対して、点線の空洞のない部分では 250 m/s 程度の値であることがわかる。空洞のない部分の位相速度は図-6 に示した A 地点の位相速度と調和的で、地盤構造に対応した値となっている。空洞部分の位相速度は、明らかに地盤の S 波速度よりも大きい。ρ の値も 30 Hz 以上では空洞部分は空洞のない部分と比較して大きい。350 m/s という値は舗装表面のアスファルトの S 波速度と比較するとかなり小さいが、これは空洞の規模が小さいために空洞のない部分と比較して位相速度が大きくは変化しなかったためと考えられる。図-10～図-11 には測線 3, 4 の結果を示したが、他の測線では大きな位相速度を示す領域は認められなかった。図-7 に示したように、測線 3, 4 においては陥没箇所に接した領域で非常に限定的ながら空洞が存在している。しかしながら、その規模がアレー半径以下の非常に小さいものであったために位相速度の変化が生じなかったものと考えられる。このことは、次節で検討する。

図-12～図-14 には、地点 10 の測線 3, 4, 5, 6 における結果を示す。ρ および位相速度が他の部分と比較して明らかに大きい箇所が存在し、これが空洞部分と考え

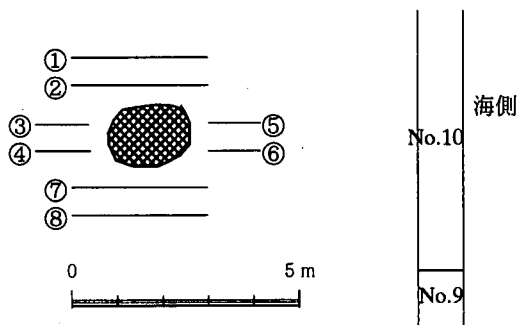


図-12 No. 10 地点

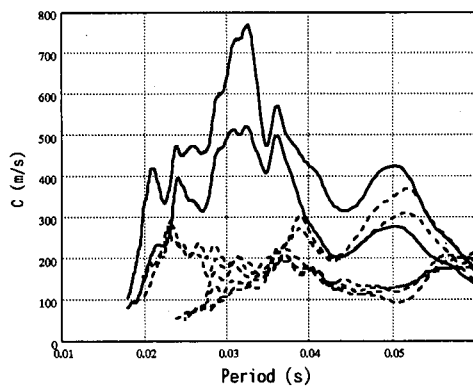


図-13 位相速度 (No. 10 測線 3, 4, 5, 6)

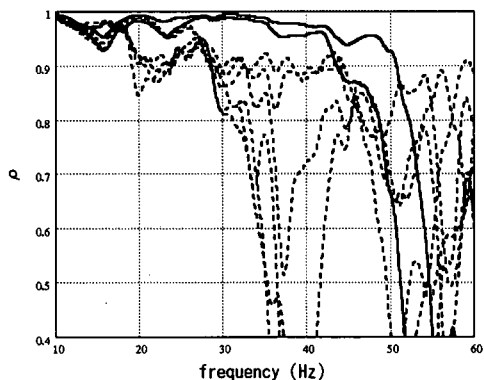


図-14 空間自己相関係数 (No. 10 測線 3, 4, 5, 6)

られる。紙幅の関係で省略するが、他の観測地点についても同様の結果が得られ、本地点においては広範囲にわたり局所的な空洞が発生していることが分かった。

(4) 観測アレー半径の検討

次に、観測アレー半径について検討する。図-7～図-9 に示した No. 40 地点の測線 7, 8 の結果について、60 cm 間隔に配置したセンサーのうち 120 cm の距離にある 2 つのセンサーを用いて結果を整理した。センサー距

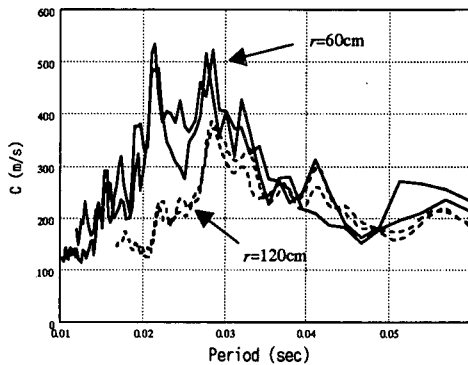


図-15 アレー半径の影響 (位相速度)

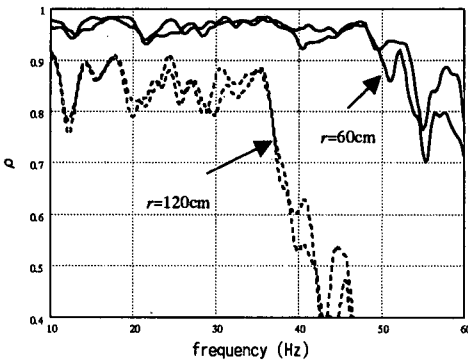


図-16 アレー半径の影響 (空間自己相関係数)

離 120 cm のうち少なくとも半分は空洞である。すなわち、図-8 の実線部分である。図-15~図-16 に、それぞれアレー半径 60 cm の場合と 120 cm の場合の位相速度と空間自己相関係数をあわせて示す。実線が 60 cm アレーの結果であり、点線が 120 cm アレーの結果である。アレー半径が 120 cm の場合は、周期 0.028 秒以上の範囲ではアレー半径 60 cm の結果と調和的であるが、周期 0.020~0.028 秒の範囲では空洞のない地盤における結果と同程度の結果を与える。これは空洞の規模が小さいことによる影響と考えられ、たとえ一部に空洞が含まれていてもアレー半径を広げた場合は空洞の検出は困難であることが分かる。このため、本地点におけるような限定的な範囲の空洞の検出にあたってはアレー半径をなる

だけ短くすることが必要であるといえる。

以上の結果をまとめると、アレー半径を 60 cm 程度の短い半径とした常時微動観測により舗装直下の空洞の検出は可能であるといえる。これは、空洞部分と空洞のない部分では微動が伝わる媒質が異なり、このため位相速度が変化することによる。ただし、非常に局所的な空洞の生じている場合は位相速度の変化度合いは小さく、このため常時微動からの空洞の検出は困難と考えられる。なお、空洞面積が小さいほどアレー半径は小さくする必要があり、解析対象となる周波数帯域は高くなる。このため、計測システムに高い精度が求められるといえる。

4. ま と め

本研究では常時微動観測を用いた護岸背後の空洞の検出可能性について検討した。その結果、非常に局所的な空洞の検出については困難であるものの、事故などの原因となる 60 cm 程度の幅の比較的大きな空洞については検出が可能であることが分かった。常時微動は観測装置もコンパクトであり、観測が容易かつ経済的に行えるとともに、観測結果の整理も比較的容易に行えることから、今後実務への適用が期待される。

謝辞：常時微動の観測において、国土技術政策総合研究所岩田直樹氏ほかの協力を得たことに感謝します。

参 考 文 献

- 長尾 毅・紺野克昭 (2002): 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, pp. 225-235.
- 宮腰 研・岡田 広・凌 颯群 (1997): 微動探査法における推定可能な微動中の表面波位相速度の波長範囲, 科研報告 (地震時の地盤震動特性評価のための微動の活用に関する研究), pp. 73-79.
- Aki, K. (1957): Space and time spectra of stationary stochastic wave, with special reference to microtremors, Bulletin, Earthquake research Institute, Vol. 35, pp. 415-456.
- Haskell, N. A. (1953): The dispersion of surface waves on multilayered media, Bulletin, Seismological Society of America, 43, pp. 17-34.
- Imai, T. (1977): P and S wave velocities of the ground in Japan, Proc. IXth ICSMFE, 1977.