岸壁の空洞調査における単点常時微動観測の適用性に関する基礎的考察

伊藤 佳洋¹・長尾 毅²・山田 雅行³・森田 真弘⁴

¹正会員 (株) ニュージェック 技術開発グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)
E-mail: itoys@newjec.co.jp

²正会員 神戸大学都市安全研究センター教授 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: nagao@people.kobe-u.ac.jp

³正会員 (株) ニュージェック 技術開発グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)
E-mail: yamadams@newjec.co.jp

⁴(株) ニュージェック 技術開発グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)
E-mail: moritams@newjec.co.jp

建設後年数を経た臨海部護岸や岸壁においては、裏埋土の流出等が生じた結果、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、常時微動の活用が考えられる。これまで、60cm 程度の短いピッチで機器を配置する常時微動アレイ観測により空洞を検出できるという報告はあるが、一般に数百 m の延長を持つ岸壁を 60cm 程度のアレイ展開で観測するには多くの労力を要することは否めない。そこで、本研究では、数百 m の延長を持つ岸壁を対象として、岸壁背後の埋め立て地盤までを広く範囲に調査することを目的として、空洞を単点常時微動観測により検出する手法の適用性について検討を行った。

Key Words : microtremor measurements, cavity, fourier amplitude spectrum, quay

1. はじめに

建設後年数を経た臨海部護岸や岸壁においては、裏埋土の流出等が生じた結果、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、常時微動の活用が考えられる。常時微動とは、波浪による脈動、風などの自然現象や、工場や車両の通行等の人間活動によって発生する地盤の微小な振動を指す。常時微動は主に表面波からなり、地盤の特徴を反映した伝播速度をもつため、地盤の特徴を反映した卓越周波数や振幅が現れる。観測は携帯型観測器を用いて短時間で行えるため、実務への適用性は高いと考えられる。長尾¹⁾は、空洞部を有する舗装表面では、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、舗装部分の常時微動アレイ観測により得られる地盤の S 波速度よりも大きくなることを示し、60cm 程度の短いピッチで機器を配置するアレイ観測 (GPS 同期を行った複数の機器による同時観測) により空洞を検出できると指摘している。しかしながら、常時微動観測は簡易であるものの、一般に数百 m の延長を持つ岸壁を 60cm 程度のアレイ展開で観測するには多くの労力を要することは否め

ない。そこで、本研究では、数百 m の延長を持つ岸壁を対象として、岸壁背後の埋め立て地盤までを広く範囲に調査することを目的として、空洞を単点常時微動観測により検出する手法の適用性について検討を行った。

2. 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舗装にクラックや陥没が発生している SNS 地点を対象に観測を実施した。対象地点はこれまで約 40 年間使用されてきたケーソン式岸壁である。経年の影響で背後地盤の沈下やケーソン継ぎ目からの吸出しなどによりひび割れ、目地開き、空洞発生が確認され、地中レーダー探査により空洞の発生地点も特定されている。図-1 に SNS 地点の標準断面図、図-2 に微動観測位置および空洞位置を示す。

単点常時微動観測とは、文字通り単点で常時微動の水平成分と鉛直成分を同時観測するもので、総延長 240m の SNS 地点の岸壁(12m)のうち、南東側の約 200m 区間を対象とした。岸壁法線から 5m の位置を最も海寄りの観測点として、岸壁法線方向及び法線直角方向に 10m 間

図-2 微動観測位置および空洞位置

図-1 岸壁の標準断面図

表-1 微動観測位置の空洞の概要

空洞	岸壁法線方向,直交方向,空洞の厚さ
空洞①	7.6m,1.8m,不明
空洞②	9.3m,4.5m,38cm
空洞③	6.2m,7.4m,17cm

写真-1 微動観測状況(係船柱周辺での観測)

隔で格子点(図-2 中の青実線)を形成し、格子点上で観測を行った。観測機器の台数の制約から最大9点の同時観測とし、観測地点を13ブロック(図-2 中の緑破線)に分け

て、ブロックを移動しながら 111 地点で観測を行った。単点常時微動観測には、サーボ型加速度計(白山工業製, JU210²⁾)を用い、ブロック内では 11 分間の同時観測をサンプリング周波数 100Hz で行った。

(2) 観測対象空洞の概要

以下では図-2 中の空洞①～③周辺の地点を中心に観測結果を示す。表-1 に地中レーダー探査およびボーリング調査により確認されている空洞①～③の規模を示す。空洞①は係船柱周辺部に発生している空洞、空洞②、③は岸壁法線より 15m 陸側付近で発生している空洞である。空洞①付近で舗装の沈下は発生していないが、空洞②、③では舗装の沈下が発生している。写真-1 に空洞①横の係船柱周辺での微動観測状況を示す。なお空洞①と同様の係船柱周辺部の空洞は観測範囲内で他に空洞④～⑦の4か所が確認されており、空洞の大きさは空洞①と同規模で、舗装の沈下は発生していない。

(3) 常時微動 H/V スペクトルによる空洞部の検出

常時微動H/V スペクトルとは単点常時微動観測の水平成分と鉛直成分のスペクトル比を算出したもので、ピーク周波数から地盤構造に関する情報を得るものである。常時微動H/V スペクトルを用いる方法は中村³⁾により提唱された方法であり、研究事例は数多い⁴⁵⁾。中村は常時微動を主に実体波の観点から議論したが、その後常時微動には表面波が卓越しているという指摘が多くあり⁶⁾、常時微動H/V スペクトルを表面波の1種であるレイリー波H/V スペクトルとみなすことで地盤構造を評価することが可能となる。空洞部直下では、構造が健全部と異なるので、H/V スペクトルのピーク周波数から空洞部および空洞部周辺と健全部を判断することができる可能性がある。

常時微動 H/V スペクトルは、同時観測記録からノイズの少ない 40.96 秒間の同時刻のデータ 5 区間を抽出し、その平均値から算出した。スペクトルの平滑化について

は、水平成分、鉛直成分ともにバンド幅0.1HzのParzen ウィンドウを用いて平滑化を行った。

図-3 に空洞①～③付近の空洞部と健全部の常時微動 H/V スペクトルを示す。常時微動 H/V スペクトルは通常水平成分はベクトル合成して解析を行うが、対象地点では法線方向成分と法線直角方向成分で振動特性が必ずしも同じではないため、成分ごとに示している。(a),(c),(d),(e)が空洞部地点、(b)が(a)と同じ最も海側ラインの健全部地点、(f)が(c)～(e)と同じ海側から1つ陸側に入ったラインの健全部地点である。同じライン上の地点では、ほぼ同じ周波数にピーク(海側ライン：青矢印、陸側ライン：赤矢印)が認められる。このことは、空洞部と健全部では伝播する表面波の特性に大きな変化がないことを示しており、当地点の空洞が表面波の大きな変化を与えるような規模の空洞ではないことを表すと考えられる。なお、空洞部と健全部でピーク振幅には違いが認められるものの、常時微動 H/V スペクトルは上述のように常時微動に表面波が卓越しているという仮定の下で、そのピークに着目することで地盤の卓越周波数を評価するために用いられるものであり、その振幅の絶対値の差異に関する議論を展開するための知見は得られていない。

(4) 単点常時微動観測による空洞部の検出

常時微動 H/V スペクトルからは空洞の検出は困難であることが分かったため、常時微動の各成分のフーリエ振

幅スペクトルに着目して空洞部が検出できるか検討した。フーリエ振幅スペクトルは常時微動 H/V スペクトルと同様の処理により算出した。

はじめに、空洞①を含む同時観測を行ったブロックの最も海側ラインの単点記録のフーリエ振幅スペクトルを図-4 に、これより1つ陸側ラインの健全部の単点記録のフーリエ振幅スペクトルを図-5 に示す。図-4 の(a)が空洞部地点、(b)および(c)が健全部地点、図-5 の(a)～(c)は図-4 の(a)～(c)各々の陸側の健全部地点である。図-4 において各成分の振幅を比較すると、上下成分には違いは認められない。一方水平成分については、健全部では高周波数側(3Hz 程度以上)で減少するのに対して、空洞部では高周波数側でも減少が認められず、顕著な違いがみられる。陸側ラインで同様に各成分の振幅を比較すると、海側ラインの空洞部のようなスペクトルの違いは認められない。

図-6 に空洞①と同じ海側ラインで係船柱周辺に空洞が確認されている空洞④～⑦の単点記録のフーリエ振幅スペクトルを示す。図-4 と同様に水平成分の高周波数側では減少が認められない。空洞部の高周波数側には固有のピークが現れないことから、基礎の固有振動が原因とは考え難く、係船柱基礎の背後の空洞と基礎の干渉の影響である可能性が考えられる。このように、本研究の範囲では、単点常時微動を利用して係船柱基礎の背後の空洞の有無を検出可能であるといえる。

次に空洞②周辺および空洞③周辺で行った単点記録

図-4 空洞①を含むブロックの海岸ラインの同時観測のフーリエ振幅スペクトル

図-5 空洞①を含むブロックの陸側ライン健全部の同時観測のフーリエ振幅スペクトル(凡例は図-4 と同様)

図-6 空洞①と同じ海側ラインの係船柱周辺空洞部のフーリエ振幅スペクトル(凡例は図-4 と同様)

図-7 空洞②および空洞③周辺のフーリエ振幅スペクトル(凡例は図-4 と同様)

図-8 位相速度算出区間(①~⑥)および空洞位置

図-9 空間自己相関係数

図-10 位相速度

のフーリエ振幅スペクトルを図-7に示す。図-2を参照して(a)が空洞②の左側, (b)が空洞②の右側, (c)が空洞③上, (d)が空洞③の右側の地点の観測結果で, (a)~(c)が空洞部地点, (d)が健全部地点である。このうち(c)と(d)が同時観測記録である。空洞部の(a)~(c)と健全部の(d)を比較すると上下成分に大きな違いは認められない。水平成分については、海側ライン空洞部に比べると高周波数側の振幅が大きいが、健全部でも高周波数側が大きいことから、空洞の影響ではないと判断される。海側ライン空洞部と

健全部のようなスペクトルの違いは認められない。これは、空洞②および空洞③においては係船柱基礎との干渉の影響が少ないためと考えられ、このような地点における空洞の検出方法の確立は今後の課題である。

(5) アレイ観測による空洞部の検出

ブロック内の同時観測記録をアレイ観測記録とみなして空間自己相関(SPAC)法⁷⁾を用いて空洞部を含む区間および健全部の位相速度の算出を行った。空間自己相関法では、アレイ形状は円形とし、センサーを円中心及び円周上の複数点に設置する。アレイ半径を r 、極座標表示におけるアレイ中心(0,0)と円周上(r, θ)の観測点で同時に得られた常時微動記録をそれぞれ $u(t, 0, 0)$, $u(t, r, \theta)$ とするとき、空間自己相関関数 $S(r, \theta)$ を式(1)により定義する。

$$S(r, \theta) = E[u^*(t, 0, 0)u(t, r, \theta)] \quad (1)$$

ここに、 E は平均、 $*$ は複素共役である。空間自己相関関数をアレイ内で方位平均し、これを常時微動のパワースペクトルで除したものを空間自己相関係数 $\rho(\omega, \theta)$ とする。式(2)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が求められる。なお、位相速度 C は波数 k と $C = \omega/k$ の関係にある。

$$\rho(\omega, \theta) = J_0(kr) \quad (2)$$

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。

以上のように通常は様々な方向に伝播する表面波から位相速度を推定するためにアレイ形状は円形とするが、本研究では空洞上の舗装表面を伝播する空洞部の表面波と地盤構造に対応した速度で伝播する健全部の表面波の位相速度の差から空洞を検出することを目的とすることから、表面波の方向を限定した2点間に空間自己相関法を適用した。

位相速度算出区間を図-8に示す。①-②および④-⑤区間は健全部、②-③および⑤-⑥区間は空洞部である。図-9に各区間の空間自己相関係数、図-10に各区間の位相速度を示す。空間自己相関係数は、健全部と空洞部ともに3Hz付近から低下し、10Hz付近で0.5となる。健全部と空洞部の違いは認められない。位相速度も健全部と空洞部ともに0.1秒付近で300~400m/sとなり違いは認められない。空洞部の②-③および⑤-⑥区間の位相速度は地盤の速度を表していると考えられる。長尾¹⁾は直径50cm程度の空洞に対してアレイ半径120cmのアレイ観測では観測区間の一部に空洞が含まれていても空洞の検出が困難であること指摘している。同様にSNS地点で

も空洞の規模に対してアレイ半径が 10m と長かったため位相速度では検出できなかったものと考えられる。

3. まとめ

本研究では単点常時微動観測を用いた岸壁背後の空洞の検出の可能性について検討した。その結果、本研究の範囲では係船柱周辺の空洞が単点常時微動観測により検出可能であることがわかった。アレイ観測では空洞規模に対してアレイ半径が長いと空洞を検出できないことが確認された。アレイ半径を短くすると空洞検出が容易になると考えられるが、計測・解析の負荷が大きく、広大なエリアをカバーするにあたっては現実的ではない。一方、単点常時微動観測では10mピッチの観測で空洞検出の可能性のあることから、効率的な空洞検出の観点からは、本研究の範囲では単点常時微動観測の有利性が指摘できる。重力式岸壁の係船柱周辺においては、堤体上に設置される基礎部分とそれ以外の部分で沈下特性が異なるため空洞が生じることが多く、そのような地点における空洞検出に本研究の方法は適用性が高いといえる。ただし、今後は係船柱基礎周辺以外の個所に生じる空洞の検出方法についても検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 長尾毅：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, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.1376-1380, 2003.
- 2) 先名重樹, 安達繁樹, 安藤浩, 荒木恒彦, 飯澤清典, 藤原広行：微動探査観測システムの開発, 物理探査学会学術講演会講演論文集, Vol.115, pp.227-229, 2006.
- 3) 中村 豊：常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定, 鉄道総研報告 Vol.2, No.4, pp.18-27, 1988.
- 4) Bard, P.-Y. : Microtremor measurements: A tool for site effect estimation?, The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Irikura, Kudo, Okada and Sasatani (eds), Balkema, pp.1251-1279, 1999.
- 5) Kudo, K., Sawada, Y. and Horike, M. : Current studies in Japan on H/V and phase velocity dispersion of microtremors for site characterization, Proc. 13WCEE, Paper No.1144, 2004.
- 6) 時松孝次, 宮寺泰生：短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係, 日本建築学会構造系論文報告集 No.439, pp.81-87, 1992.
- 7) Aki, K.: Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, Bull. Earthq. Res. Inst., University of Tokyo, Vol.35, pp.415-456, 1957.

(2016.2.4 受付)

A FUNDAMENTAL STUDY OF A CAVITY DETECTION METHOD AROUND QUAY WALLS USING MICROTREMOR MEASUREMENTS

Yoshihiro ITO, Takashi NAGAO, Masayuki YAMADA and Masahiro MORITA

Tidal suction and consolidation settlement in the coastal area often result in the occurrence of cavities beneath the pavement around quay walls. As it is difficult to detect the cavities by eyesight, establishment of the method for the detection of cavities efficiently is strongly required. This study focuses the application of microtremor measurement to the detection of cavities. Spectral characteristics of horizontal component of microtremor were found to be different from the points above cavities to the points without cavities. Considering the measurement and analysis load, the proposed method is thought to be highly applicable to the maintenance practice.