

(28) 常時微動による地中空洞の検出

(財) 鉄道総合技術研究所 富田 健司

(財) 鉄道総合技術研究所 中村 豊

1. はじめに

盛土などの土構造物においては、降雨や走行車両に起因する振動などの影響で、内部に空洞が生じることがある。こうした地中空洞の存在を的確に把握し、適切な措置を施すことが重要となる。地中空洞が放置されると、その部分が降雨や地震動、あるいはその上を通過する車両の重量や振動などを受けて拡大・崩壊し、鉄道や道路にとって致命的な路盤陥没などの災害に発展するおそれがある。

現在の地中空洞の検出技術は、ボーリング調査や電磁波や特別な振動発生源からの振動などの地中からのエコーを可視化する物理探査法などが主体となっている。しかしながら、いずれも測定装置自体が高価で大掛かりであるほか、測定法、解析法が煩雑であるばかりでなく、検出精度、適用範囲などに問題が多い。

われわれは従来より、高性能振動測定装置“PIC”¹⁾を用いて測定した常時微動による表層地盤や土構造物の振動特性把握手法を提案してきた^{2),3)}。ここでは、常時微動を用いて地中空洞の存在を検知する方法について提案する。

2. 基本的な考え方

地表面で同時計測された水平方向と鉛直方向の常時微動から、表層地盤の卓越振動数や増幅倍率といった表層地盤の振動特性を求めることができる^{2),3)}。地盤の層構造は場所により異なり、複雑な層構造をなす場合も少なくないが、多くの場合、地盤を表層とそれを支える基盤層からなる2層構造に単純化して考えることができる。ここでも、図1に示すように、2層構造に単純化した地盤モデルで考えることにする。

表層地盤の卓越振動数 F_2 と増幅倍率 A_2 は、地表面で測定した常時微動の水平成分スペクトル S_H と鉛直成分スペクトル S_V の比として求められた曲線「疑似伝達関数(QTS)」の最大ピークから読み取られる。すなわち、これを式で表すと(1)式のようになる。

$$A_2 = \{S_H/S_V\}_{\max} \quad (1)$$

ここに、 $S_H = A_{H2}(\omega) \cdot a_H$ 、 $S_V = A_{V2}(\omega) \cdot a_V$ で、 $A_{H2}(\omega)$ 、 $A_{V2}(\omega)$ はそれぞれ表層地盤の水平振動、鉛直振動に対する周波数応答倍率を表し、 a_H 、 a_V はそれぞれ基盤から表層地盤に入力する振動の大きさ、 $\omega = 2\pi F$ で F は振動数である。

観測事実として、基盤では水平振動と鉛直振動の振動特性がきわめて類似していることが分かっている。すなわち、これを式で表すと(2)式のようになる。ただし、 $A_{H1}(\omega)$ 、 $A_{V1}(\omega)$ はそれぞれ基盤の水平振動、鉛直振動に対する周波数応答倍率を表す。(2)式から a_H 、 a_V の関係が(3)式のようになることが分かる。

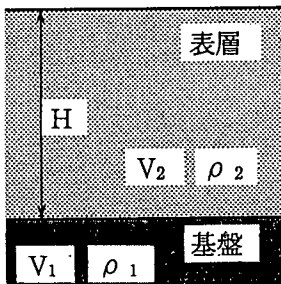


図1 表層と基盤層からなる2層構造に単純化した地盤

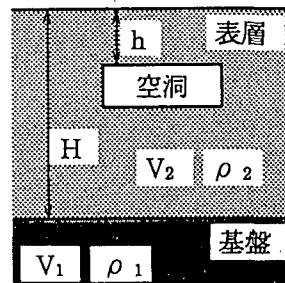


図2 表層地盤内に空洞がある地盤

$$A_{H1}(\omega)=A_{V1}(\omega) \quad (2)$$

$$a_H=a_V \quad (3)$$

よって、(3)式の関係から、(1)式が(4)式ようになる。

$$A_2=\{A_{H2}(\omega)/A_{V2}(\omega)\}_{\max} \quad (4)$$

$A_{H2}(\omega)$ の最大応答倍率 A_{H2} は、(5)式のときに現れる。

$$\omega H/V_{S2}=\pi/2 \quad (5)$$

ここに、 H は表層地盤の層厚、 V_{S2} は表層地盤の S 波速度である。

$\omega=2\pi F_2$ を(5)式に代入し、 F_2 について解くと、 $A_{H2}(\omega)$ が最大応答倍率 A_{H2} となる F_2 が、(6)式で与えられる。

$$F_2=V_{S2}/(4H) \quad (6)$$

このときの A_{H2} の値は、(7)式で与えられる。

$$A_{H2}=2(V_{S1}\rho_1)/(V_{S2}\rho_2) \quad (7)$$

ここに、 V_{S1} は基盤の S 波速度、 ρ_1 、 ρ_2 はそれぞれ基盤と表層地盤の単位体積重量である。

表層地盤の卓越振動数 F_2 と増幅倍率 A_2 は、それぞれ(8)式と(9)式で近似できる。

$$F_2=V_{S2}/(4H) \quad (8)$$

$$A_2=A_{H2}/2=(V_{S1}\rho_1)/(V_{S2}\rho_2) \quad (9)$$

いま、図2のように、地表面から深さ h の表層地盤内に直方体形状の空洞がある場合を考える。空洞の寸法は水平長辺方向を L_a 、水平短辺方向を L_b 、高さ方向を L_c とする。空洞の直上で水平方向と鉛直方向の常時微動を同時測定した場合を想定する。測定される常時微動は、空洞の存在がない場合の表層地盤の振動に、空洞の上部にある薄い表層地盤の振動が重ね合わされたものになることが想像できる。以下、空洞の上部にある薄い表層地盤の振動について述べる。

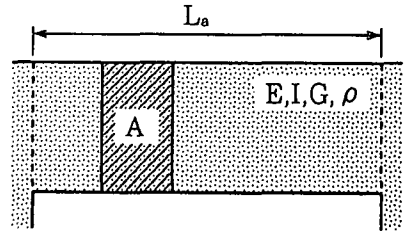


図3 両端固定はりの

この部分の振動を考える際、いくつかの構造形式の適用が考えられるが、ここでは簡単のため、図3に示すように、空洞の水平長辺方向をはりの長さとする両端固定はりの曲げせん断振動の考え方を適用する^{5),6)}。一様断面はりの横振動に関する微分方程式は(10)式で表される。

$$EI(\partial^4 z/\partial x^4)+\rho A(\partial^2 z/\partial t^2)-\rho I(1+E/(k'G))(\partial^4 z/(\partial x^2 \partial t^2))+(\rho I/(k'G))(\partial^4 z/(\partial t^4))=0 \quad (10)$$

ここに、 E はヤング係数、 I は断面2次モーメント、 ρ は単位体積重量、 A は断面積、 k' は断面形状に関する係数、 G はせん断弾性係数である。

両端固定はりの境界条件のもとで(10)式を解いて、回転慣性とせん断変形の影響を考慮した1次の固有振動数 f を求めると、(11)式で与えられる。

$$f=(1/(2\pi))(c\lambda^2/L_a^2)/\{1+\lambda^2 r^2/L_a^2+(\lambda^2 r^2/L_a^2)(E/(k'G))\}^{0.5} \quad (11)$$

ここに、 $c=[EI/(\rho A)]^{0.5}$ 、 λ は振動モードに関する値で1次モードは $\lambda=4.730$ 、 L_a ははりの長さ、 $r^2=I/A$ 、 k' は断面形状が矩形であるから $k'=5/6$ 、 $G=\rho V_{S2}^2/g$ で V_{S2} ははりの S 波速度、 g は重力加速度である。

ここで求められた f が、空洞の上部にある薄い表層地盤の1次モードの固有振動数である。2次以上のモードの固有振動数についても(11)式で求められるが、ここでは、1次モードのみを扱う。

空洞直上の地表面で測定された常時微動測定結果から、表層地盤の卓越振動数として F_2 が、そして、空洞の存在を示す付加振動の振動数として f が得られる。これらは、QTS に F_2 と f の2つの明瞭なピークとして現れる。よって、QTS 上の f のピークの有無を見ることで、まず、地中空洞の有無が判定できる。 f の値には、

3. 模擬地中空洞檢出實驗

図5を見ると、地中空洞の直上の4測点(No.3, 7, 11, 15)でのQTSの形状が他の測点と明らかに異なるのが分かる。すなわち、空洞の直上の4測点のQTSだけに、54~63Hz付近に第1ピークと同程度のピークが見られる。これが、地中空洞の存在に伴う付加振動の影響である。いま、表層地盤の単位体積重量 ρ_s として平均的な土

の単位体積重量である $2,000 \text{ kg/m}^3$ を仮定し、両端固定はりの長さ L_0 として空洞の水平長辺方向の寸法 0.5 m 、断面として空洞の水平短辺方向長 $L_b \times$ 土被り厚さ h をとり、(11) 式より付加振動の 1 次の固有振動数を求め

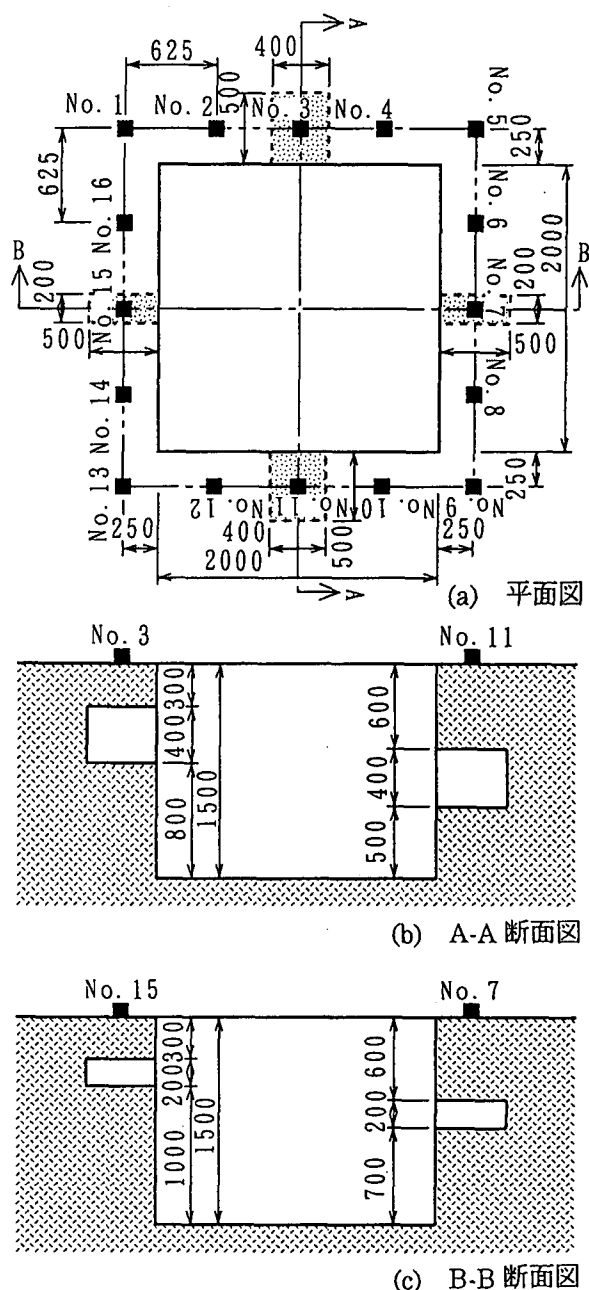


図4 模擬地中空洞の形状・寸法ならびに測定位置図

る。表 1 に測定結果の f と(11)式から求められた f を比較して示す。

表 1 に示したように、大体予想したとおりの結果が得られた。ただし、測定結果を見ただけでは、空洞の平面的な広がり寸法 $L_a \times L_b$ と土被りの厚さ h の差異の検出が十分になされたとはいいいにくい。この原因はいろいろ考えられるが、空洞掘削に伴う空洞の上部にある薄い表層地盤の緩みなど、理論にのらない要因の影響も無視できないと思われる。また、測定結果の f と(11)式から求められた f が異なるのは、この部分の振動が単に両端固定はりの振動だけで表現しきれものではないので当然のことではあるが、見方によっては両者にそれほど大きな差異があるともいえず、両端固定はりの曲げせん断振動がこの部分の振動形態を比較的良好に表現しているといえる。

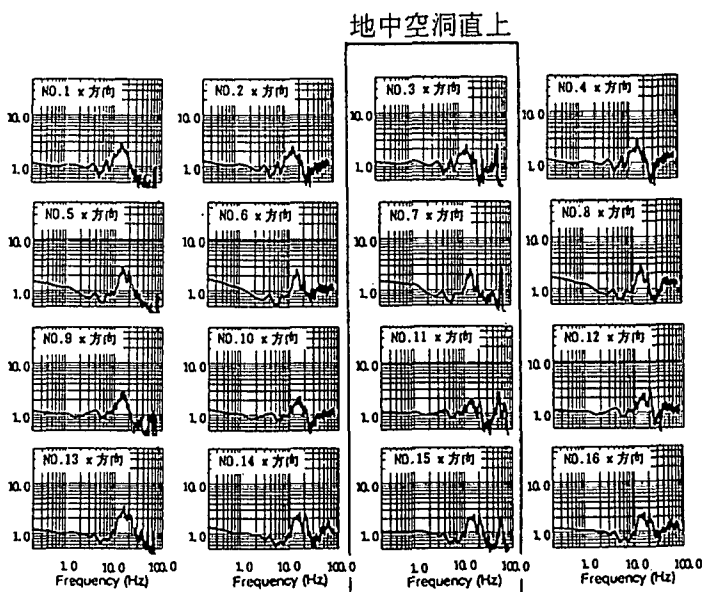


図 5 各測点における疑似伝達関数(QTS)

表 1 測定結果の f と(11)式から求められた f の比較

測 点	No.3	No.7	No.11	No.15
$L_b \times h$ (m)	0.4×0.3	0.2×0.6	0.4×0.6	0.2×0.3
L_a (m)	0.5	0.5	0.5	0.5
測定結果の f (Hz)	63	63	54	60
(11)式から求められた f (Hz)	52	58	58	52

4. まとめ

地表面の常時微動を測定することにより、地中に存在する空洞を検出できる確証を得た。模擬実験の結果では、空洞の平面的な広がり寸法 $L_a \times L_b$ と土被りの厚さ h の差異の検出までは十分になされたとはいえなかったが、空洞の存在による付加振動を明瞭に識別できることを確認した。今後はそれら要因の差異が判別できるよう、多くの検証実験を行うとともに、本研究の深度化を図っていく。

《参考文献》

- 1) 中村・小島・新谷：携行型振動測定器 PIC の開発，土木学会第 42 回年次学術講演概要集 I，1987 年 9 月
- 2) 中村：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.4，1988 年 4 月
- 3) 中村・滝沢：常時微動による表層厚と基盤および表層地盤の S 波速度の推定，鉄道総研報告，Vol.4，No.9，1990 年 9 月
- 4) 土質工学会編：土質調査法 第 2 回改訂版，1982 年 12 月
- 5) 土木学会構造工学委員会編：構造力学公式集 昭和 61 年版，1986 年 6 月
- 6) ティモシェンコ他著・谷口他訳：新版 工業振動学，コロナ社，1977 年 8 月