S 波孔間弾性波トモグラフィによる空洞探査への適用性検証試験

鹿島建設株式会社　正会員　○栗原啓丞　山本拓治　小渕考晃　大畑俊輔

1．はじめに

一般に，地表面下約 30m 以深に存在する防空壕や鉱山の休廃止坑道などの空洞を物理探査で調査する技術は確立されていない．このような条件下で，現在適用可能な技術としては，調査ボーリングを利用したボアホールレーダや比抵抗探査などのレーダ・電気探査手法と，孔間弾性波トモグラフィやシングルホールイメージングなどの弾性波探査手法が挙げられる．この中でも孔間弾性波トモグラフィは，一般的に高精度だといわれるレーダ探査より解像度では劣るものの，測定距離が長く，面的な地質構造を把握できる点で優れている．また，測定間隔を密に取ることで探査精度を高めることも可能である．孔間弾性波トモグラフィでは，主に P 波を発生する水中振源が用いられるが, P 波探査では以下のような点に注意する必要がある．

- 飽和状態にある軟弱地盤では, P 波の水中伝播速度が検出される
- 地下水より上部の不飽和層では，波の減衰が大きくなり，有効な測定結果が得られにくい

そこで筆者らは，これらの地盤条件下であっても測定結果に影響を及ぼさず，高精度な探査が可能な手法として S 波を用いた孔間弾性波トモグラフィに着目した[1)]．さらに，上述した以外にも，S 波は P 波より高周波数で波長が短いため，分解能に優れているといった特長をもつ．今回，筆者らは地下空洞を探査対象とした S 波孔間弾性波トモグラフィ試験を実施し，本手法の空洞探査への適用性を確認したので，ここに報告する．

2．試験概要

本試験は, S 波孔間弾性波トモグラフィの空洞探査への適用性を検証することを目的とした. S 波の発生には, 超磁歪型発振器を用いた．以下に概要を述べる．

（1）超磁歪型発振器の S 波発生機構

図-1 は発振器の概要図である．超磁歪型発振器は内部に磁歪材料を格納し，その外部磁界を変化させることで磁歪材料を軸方向に伸縮させる．この伸縮運動に伴い発振器がボーリング孔壁を擦ることで，せん断鉛直波，つまり S 波を発生させる．

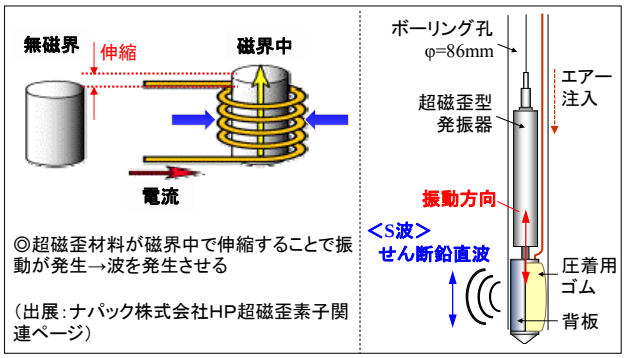

図-1　超磁歪型発振器概要図

（2）試験条件

図-2 は試験サイトにおける岩級区分断面図である．測定領域内の地質状況はデイサイトが主体であり，コア観察の結果から CM～CL 級に区分される岩盤が分布することがわかっていた．探査用ボーリング径は φ=86mm ，孔間隔は 9.5m であり，測定深度は坑道の上下に約 10m 区間をとり約 20m の区間とした．本試験で探査対象とした地下坑道は約 2m×2m の大きさであった．

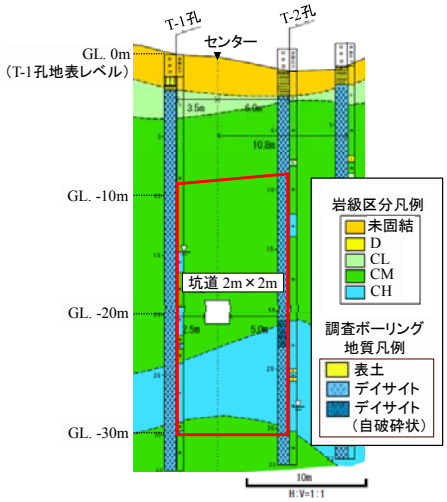

図-2　試験サイトにおける岩級区分断面図

（3）試験方法

試験方法について説明する．まず，計測装置を地表

キーワード　空洞探査，S 波，超磁歪型発振器，孔間弾性波トモグラフィ，
連絡先　〒182-0036　東京都調布市飛田給 2-19-1　鹿島建設（株）　ＴＥＬ042-489-6598

部の試験エリア内に設置した．次に，超磁歪型発振器と受振器をそれぞれ T-1 孔と T-2 孔に設置した．発振器は圧着用ゴムを空気圧で膨らませて孔壁へ固定した．受振器は 12 連式の速度計を使用し，一緒に挿入したホースを空気圧で膨らませることで圧着させた．発振作業は測定領域の最深部から地表に向かって 0.5m ピッチで順次行った．1 発振点につき 3～5 回のスタッキング（重合処理）を行い SN 比の向上を図った．また，受振間隔は 0.5m ピッチとした. 写真-1 はそれぞれ計測装置，超磁歪型発振器，計測状況である。

写真-1　計測装置(左上)，発振器(左下)，計測状況(右)

3．試験結果

図-3（左）は現地試験で取得した波形の一例である．取得波形から読み取った S 波の直達波走時と，発受振距離から解析領域内の速度構造（以下，初期速度モデルと呼ぶ）を推定した．初期速度モデルは地質断面図から，S 波速度 Vs=1600m/s の均質条件モデルとした．図-3（右）に構築した初期速度モデルを示す.

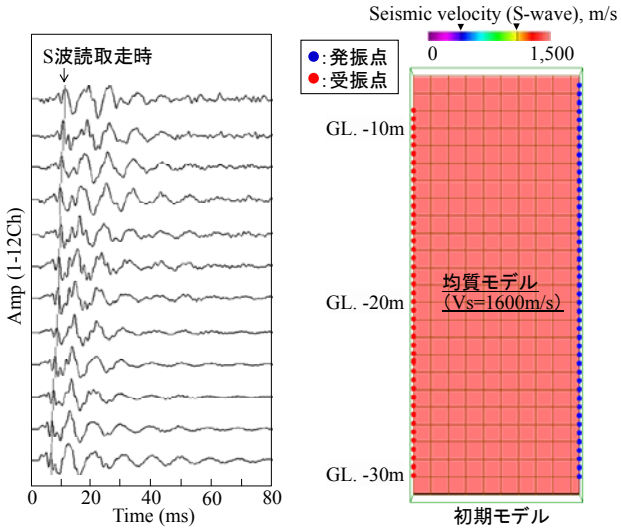

図-3　取得波形(左)と初期速度モデル(右)

図-4 はトモグラフィ解析により求められた弾性波の取得波路と弾性波速度分布である．本結果より，岩盤領域での S 波速度分布は Vs=1500～1800m/s 程度であった. 別途実施された調査結果より T-2 孔沿いの P 波速度は Vp=2300～3200m 程度であることが分かっており，一般的な P 波-S 波の相関関係から [2]，本試験で得られた S 波速度値は整合的であった.

また，GL.-20m 付近に Vs=900～1000m/s 程度の低速度領域が現れており，岩盤領域との弾性波速度値の差から坑道位置を捉えられた．さらに，取得波路をみると，GL.-20m 付近において波路がやや粗な状態となっている．弾性波速度分布の他にも，この取得波路の粗密状態から空洞位置を推定できる可能性がある.

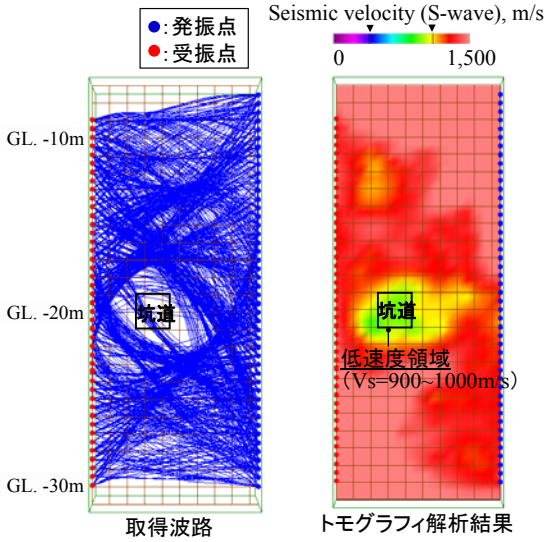

図-4　取得波路(左)とトモグラフィ解析結果(右)

4．おわりに

本試験の結果から得られた知見を以下にまとめる.

- 本試験で得られた S 波速度値は別途実施された P 波観測結果と整合的であった.
- 本試験より， S 波孔間弾性波トモグラフィは空洞探査として有効な手法であることが分かった.
- トモグラフィ解析で得られる弾性波速度分布の他にも，取得波路の粗密状況から空洞位置を推定できる可能性があることがわかった.
- 今後は，さまざまな地質条件，あるいは測定条件で実適用を重ね，地盤深部の空洞探査技術として確立を目指す所存である.

参考文献

1） 戸井田克ほか:超磁歪型振源を用いた孔内 S 波トモグラフィに関する基礎的検討，第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，土木学会，2008
2） 物理探査学会：図解　物理探査，1989，pp.211-212