

磁石を利用した トンネル背面空洞の検知に関する基礎的研究

大島 淳矢^{1*}・芥川 真一¹

¹神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻（〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1）

*E-mail:seiry65.kobe@outlook.jp

近年の社会資本設備の老朽化に伴い、構造物の点検や異変のモニタリングに関する技術が担う役割はますます大きなものとなっており、トンネルもその例外ではない。本研究では、特に地盤内やトンネル覆工背面のような直接目で見るのが困難な地点での土砂流出を中心とする変状をモニタリングするシステムの開発を目的とし、磁石が有する離れた点にも影響を与えるという性質を利用したモニタリングの基礎実験を実施した。実験の結果、磁力を利用することでコンクリート壁を介した離れた点での変状をモニタリングできることが確認された。

Key Words : tunnel, soil erosion, magnetic field, sensor, monitoring

1. はじめに

高度経済成長期に整備された数多くの社会資本設備が今後建設後50年を迎え、社会全体として急速なインフラの老朽化が懸念されている。このような事態を受けて構造物の点検・診断に関する技術への注目は高まっており、中でもコンクリート内部や擁壁背面、トンネル覆工背面、土中のような直接目で見るができない点のモニタリングが重要になっている。特に、トンネル覆工背面の存在については、在来工法で建設されたトンネルにおいて図-1のように問題となっており¹⁾、背面に存在する空洞の検知には電磁波を用いたもの、ボーリングなどの方法がある²⁾が、コストや簡便さの点で改善が期待されている。そこで本研究では離れた点に影響を及ぼす磁石の性質に着目し、磁力を利用したモニタリングシステムについて検討した。特にトンネル覆工背面のようにコンクリート壁の向こう側の空洞の発生をモニタリング出来るかどうかを確認するための基礎的な実験を行ったのでその概要を報告する。

2. トンネル背面空洞を検知する基本的考え方

本研究ではトンネル背面空洞の検知にあたり、磁石が持つ離れた点に影響を与える性質に着目した。特に磁場に与える影響は大きく、磁石が数センチ移動しても1m離れた点では磁場の様子が変化する。その性質を利用し、あらかじめ空洞が発生したことを

知りたい点に磁石を設置しておくことで、土が動くとともに磁石も移動し、それによる磁場の変化を検知するシステムを考案した。図-2はシステムの概念図である。



図-1 トンネル背面の空洞が持つ危険性³⁾

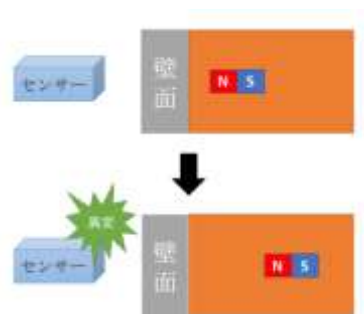


図-2 モニタリングの概念図

3. 磁石の利用について

(1) 使用する磁石について

本研究では市販のネオジウム磁石（外径22mm，高さ10mm，表面磁束密度0.45T）を使用した．ネオジウム磁石はネオジウム，鉄，ホウ素を主成分とする磁石で，同サイズのフェライト磁石の10倍以上の磁力を持つ．

(2) 磁場の測定について

磁場の変化が遮蔽物を介していても伝わることを確かめるための実験を行った．磁場の変化はガウスメーターにより計測した．ガウスメーターはホール効果を利用してその点の磁束密度を計測するセンサーである．ここで磁場とは磁束密度に空間の透磁率をかけたものであり，磁場の変化と磁束密度の変化は対応していることに留意されたい．図-3のようにネオジウム磁石とガウスメーターの間に厚さ30cmコンクリート壁を挿入し，コンクリート壁からネオジウム磁石を1cmずつ遠ざけ，そのたびに磁場の変化を計測した．結果を図-4に示す．横軸はガウスメーターとネオジウム磁石の距離である．このように，コンクリート壁があっても磁場の変化が生じることが確認された．したがって，磁石の移動に伴う磁場の向きや大きさの変化を計測できれば，コンクリート壁の反対側にある離れた点での変状がモニタリングできると考えた．したがって，磁石の移動に伴う磁場の向きや大きさの変化を計測できれば，コンクリート壁の反対側にある離れた点での変状がモニタリングできると考えた．



図-3 実験のようす

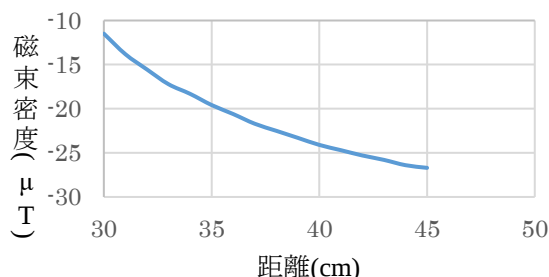


図-4 実験の結果

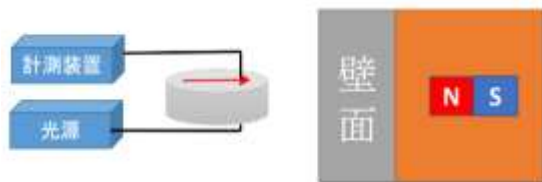


図-5 装置を使った計測のイメージ

(3) モニタリング装置について

磁場の変化を見るために方位磁石を使用して装置を作成した．装置を組み立てるにあたり方位磁石以外のすべての部材は磁力の影響を受けないものを使用した．プラスチックプレート同士を固定するためのボルトはSUS304にのっとった，ステンレス製のものを使用した．方位磁石はその点の磁場の向きを指す性質があり，普段は地球が作る磁場のため南北方向を指している．しかし，磁石や電流により周囲の磁場の向きに変化があれば，方位磁石は新しい磁場の影響を受け，指す向きも変化する．この性質を使い，磁場の向きの変化を測定しようと考えた．また，その変化を定量的に評価するとともにわかりやすく可視化するために光ファイバーを組み合わせた．方位磁石の上下面それぞれに光ファイバーを接続し，下部のファイバーは光源から光を伝達している．上部ファイバーはその光を受光して光の強さを測定する装置に接続している．

図-6のように，方位磁石内部の磁針が磁場の変化を受けて回転し光を徐々に通すようにふるまうことで受光ファイバーに届く光の量は増加していく．よって磁針が下部ファイバーから伝えられる光を完全に遮った状態を初期状態とすれば，磁針の動きにつれて計測される光は徐々に強いものとなるはずである．このような仕組みに基づき，装置を用いて以下の実験を行った．



図-6 磁針が回転する様子



図-7 作成した装置

4. 装置を用いた実験

以下、すべての実験で光の強さは無単位で表記している。

(1) 基礎実験

磁針が光を遮らない限界の方向を指している状態を初期状態とした。方位磁石と同じ平面内で磁針に垂直な方向からネオジム磁石のN極を秒速およそ1mmで1.2m離れた点から接近させ、光の変化を測定した。

結果は図-8のようになり、磁石の移動に伴って光が変化することが見てとれた。磁針はファイバーが光を伝える部分よりも幅が広いので、しばらくの間光を遮り続け、光強度は最低で推移している。また磁場の大きさは磁石との距離の2乗分の1に比例するため、より距離が近づいた過程では光は急激に変化した。

(2) 指向性に関する実験

モニタリングに際し、磁石の移動による影響を最も感度良く受けるように磁石と方位磁石の位置を決定する必要がある。そこで、磁針に対して全8方向からネオジム磁石を接近させ光の変化を測定した。磁針が光を完全に遮った状態を初期状態とし、装置から1m離れた点からネオジム磁石を近づける。その際、2mm近づけるたびに5秒静止させる操作を繰り返した。

磁針が動くと最終的に光強度は全光の強さで一定となるため、測定の終了点は光強度に変化が見られなくなった点とした。

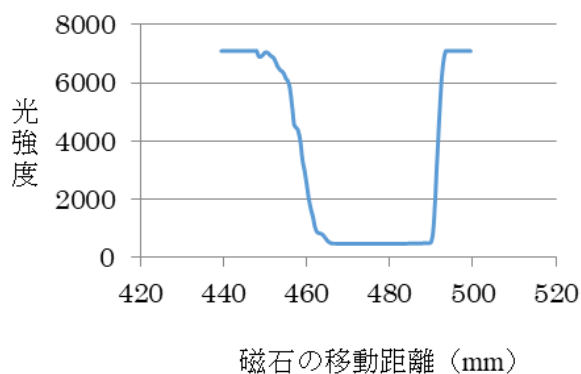


図-8 基礎実験の結果

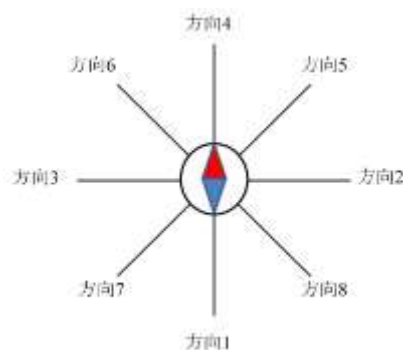


図-9 磁石を接近させた方向

図-10が示すように方向によって磁針が動き出す距離が異なることが分かった。終点の光強度が異なるのは数回に分けて実験したため、装置の位置が最大2m程度違っているためである。そのため室内の照明の影響が異なり、終点光強度も異なっている。

方向1及び方向4はネオジム磁石が作る新しい磁場が地磁気と同じ、または真逆であるため他方向とは異なる挙動を示したが、全6方向でそれぞれ光強度の推移を測定できた。全体として、初め北を指している方位磁石を上から見た時に中心線から左右対称な方向同士（方向5と方向6など）を比較すれば、いずれも西側から磁石を近づけた時の方がより早く変化が表れている。また、光強度が変化を始めてから変化が終わるまでの磁石の移動距離も、西側から近づけた時の方が短い傾向にあった。これは装置に用いた方位磁石そのものの特性であり、時計回りよりも反時計回りに対してより大きな抵抗があると考えられる。このように磁石を近づける方向ごとに振る舞いが変わる指向性の存在は確認できた。しかしこの性質は使用する方位磁石それぞれで異なると考えられ、モニタリングに最も効果的な方向は一概には言えない点に注意が必要である。

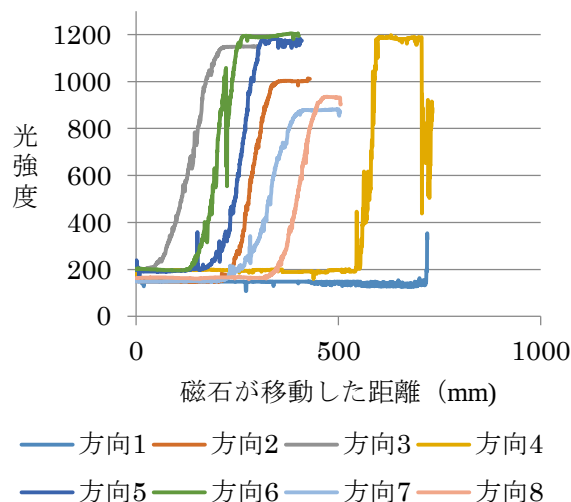


図-10 方向ごとの光強度の変化

(3) コンクリート壁を介した実験

装置を厚さ30cmのコンクリート壁に近接して設置する。磁針が光を遮った状態を初期状態とし、装置から125cm離れたコンクリート壁面側の方向からネオジウム磁石をN極を向けて近づけた。近づけ方は(2)指向性に関する実験と同様である。実験開始前、磁針が光を遮らない状態で光強度は970であったため、そこに到達した時点で実験を終了した。図-11が示すように、遮蔽物があっても同様に変化を測定できた。

(4) 現場を想定した実験

最後に、図-12のような実際の現場での使用を想定した実験を行った。実験室の壁面にN極を向けた状態でネオジウム磁石を5つ30cm間隔で並び、15.5cmの壁を隔てて反対側に装置を5つ設置した。装置は等間隔に並んでいないが、これは装置がいずれも近傍のネオジウム磁石が作る磁場の影響を受けるので、磁針が光を遮った初期状態に設定する過程で微調整が必要だったためである。

右から2番目のネオジウム磁石を動かすと、図-13のように光の強さが変わり明るくなったことが見て取れ、右3つの装置が影響を受けたといえる。このように背面での変状を光の強さの変化により肉眼でははっきりと認識することができる。

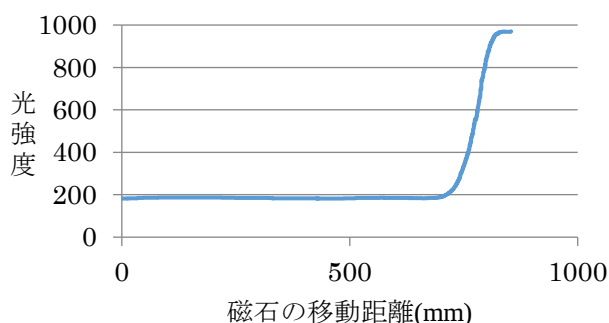


図-11 コンクリート壁を隔てた実験の結果

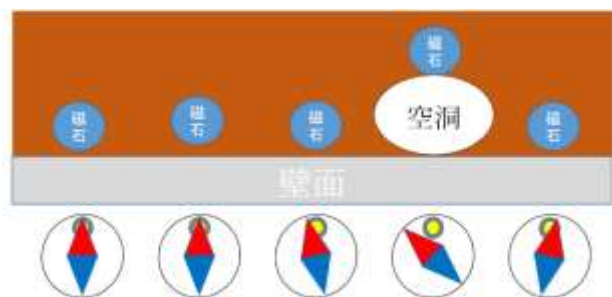


図-12 現場でのモニタリングのイメージ

5. 精度に関する考察

ここまで装置を用いて各種実験を行い、この装置がインフラのモニタリングに活用できないか検討してきた。本章ではこの装置の測定の精度について考察する。

3. (3)のコンクリート壁を隔てた実験ではネオジウム磁石が14cm動く間に光強度は最小から最大まで変化した。今回の実験で使用した光源の光は、最大値712、磁針が光を遮っているとき最小値3を示す。つまり光強度について710のプロットが取れる。先の14cmを710で除せば0.20mm/光1単位となり、離れた点の0.2mm単位の移動をモニタリングできる可能性がある。

しかし、実際には3.(1)で述べたように磁場は磁石との距離の2乗分の1に比例する。それは磁針を回転させる力も同様であるため、ネオジウム磁石との距離が近くなるにつれて磁力の変化は大きくなり、磁針も急激に動くと考えられる。したがって、ネオジウム磁石がより近い点に存在するとき、光強度1単位ではより小さな離れた点での移動を表現できる。そのため、実際の使用にあたり、装置と磁石を設置する際にその距離を明らかにしておく必要がある。

6. まとめ

磁石が移動することによる周辺磁場の変化を拾うことで離れた点での変状をモニタリングできることが分かった。磁石は遮蔽物があっても力を及ぼすため、擁壁の背面やトンネル覆工背面にあらかじめ磁石を設置し、方位磁石を使ったセンサーを設置することで土砂の流出に起因する空洞の発生状況などを可視化することができる。特に新しくインフラを整備する際に磁石を組みこむことで、この手法は容易に適用できる。

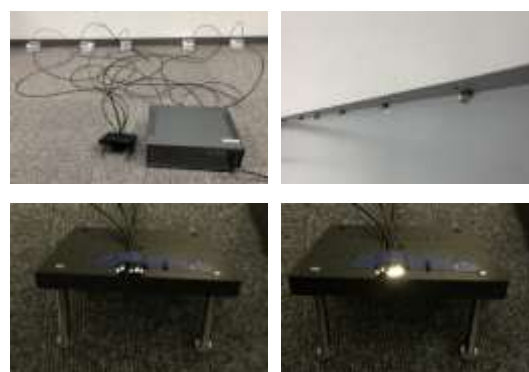


図-13 現場を想定した実験

一方で本研究では離れた点での磁石の移動を方位磁石と同一平面内で起こるものに限定して実験を行ったため、3次元での計測にはさらなる検討が必要である。磁場の向きの変化が磁針を上下に傾けるようなものであった時、このセンサーではそれを検知することは難しいためである。また、遮蔽物に鉄筋のような強磁性体があった場合の影響や磁石の土中での振る舞いなどについても検討しなければならない。そのほかにも課題は多いが、新しいモニタリング手法の可能性を見出すことができた。

参考文献

- 1)安田尚俊，塚田和彦，朝倉俊弘：背面空洞がトンネル覆工に及ぼす力学的影響の理論的考察，土木学会論文集F1（トンネル工学），Vol. 72, No. 3, 1_63-1_73, 2016
- 2)田中正吾：電磁波レーダを用いたトンネルの高精度リアルタイム非破壊検査，計測と制御，第44巻，第3号，2005年3月号，p173-p179, 2005
- 3)高田正弘，竹田茂，水島秀明：既設トンネル（在来工法）覆工背面空洞における裏込め注入の施工について－裏面排水の閉塞防止について－，第57回（平成25年度）北海道開発技術研究発表会，2013
- 4)大島淳矢，芥川真一：磁力を利用したインフラの変状検知に関する基礎的研究，第53回土木学会全国大会，2018

Fundamental Study on Detection of Infrastructure Deformation Using Magnetic Force

Junya OSHIMA, Shinichi AKUTAGAWA

This study attempted to utilize magnetic force for monitoring various variations that may occur in infrastructure such as small movement and cavity generation. Magnetic force has the property of transmitting even if there is a shield. So, a movement of a magnet can be felt by a magnetic sensor at a distance over the arbitrary shield. Using the property of azimuth magnets, we made a measuring device combining azimuth magnets and optical fibers. We experimented with a neodymium magnet and succeeded in measuring the change of the magnetic field due to the movement of the magnet as a change in light intensity. We found there is a possibility that the yield and deformation of the reinforcing bars can be felt.