

マイクロ波を利用した岩盤斜面危険予知システムの検証 Verification of a Danger-Prediction-System in Rock Slopes Using Micro wave

三宅 克行*・田仲 正弘**・玉木 茂***・市川 商二郎****

Katsuyuki MIYAKE, Masahiro TANAKA, Shigeru TAMAKI, Shoujiro ICHIKAWA

In many of the rock slopes, which located in the main highway and railroad routes, exist the danger of collapse. When the slope collapse happens, it will not only be an accident involving human lives but also will give some bad effects to the society. So that, in order to keep watch on the behavior of the dangerous slopes, various methods, such as AE, Expansion gauges are developed. Here the authors, by using the characteristics of the transmission and reflection of microwaves, constructed a system which is suited to predict the minute movement of a rock slope. In this system, with a remote-sensing unit, where a transmitter gives directly the microwaves to a rock slope at a distance and gets the reflecting waves by a receiver, the minute movement of a rock slope can be calculated from the phase difference of these transmitted and reflected waves in the sensitivity of $\pm 0.1\text{mm}$. From the results of in-situ tests, suitability of this system and a few of problems were clarified. In this paper, the layout of the system and some results of the in-situ test are presented.

1. はじめに

主要道路や鉄道などの岩盤斜面は崩壊の危険個所が数多く存在している。一旦斜面が崩壊し始めると、人命にかかわる事故だけでなく社会的にも多大な影響を与える恐れがある。これまでに、AE¹⁾や伸縮計など様々な手法を用いて、斜面の監視が行われている。しかし、これらの手法は斜面に計器などを設置する必要があるため、危険な斜面ではこれらの手法の適用は困難とされている。著者らは、こうしたことを解決すべく電波であるマイクロ波²⁾の伝搬、反射特性を利用して、岩盤の微小変位量が検知できるシステムを構築した。この手法は、リモートセンシング方式で送信器から直接離れた対象岩盤へマイクロ波を発し、その反射波を受信器で受け、その送・受信波の位相変位から岩盤の移動量を求めるもので、その移動量は $\pm 0.1\text{mm}$ の分解能で測定できる。また、このシステムを用いて野外で検証実験を行った結果、微少な測定対象物の変化量を測定することが可能であることが確認され、同時にいくつかの課題点が明らかになった。ここでは、システムの概要、検証試験結果および今後の課題について、以下に報告する。

2. システムの概要

2.1 システム構成

システムの構成を図-1に示す。システムはセンサーユニット部、コントロール部、受信ユニット部から成る。測定はセンサーユニット部(写真-1参照)の送信器から周波数10.125GHz、出力電力65mWのマイクロ波(電波)を直接測定対象岩盤へ投射し、岩盤からの反射波を受信器で捉え、コントロール部でその受信

* (株)日本パブリック 技術部
** 同上 技術開発部
*** 横河電子機器(株) 技術部
**** 同上 特機開発センター

波形の感度を調整して、受信ユニット部に転送する。そして、送・受信波の位相変位を求め、岩盤の移動変位量に変換する。その結果はRS232Cを用いてパソコンへ導き、データの収録を行うとともに、ディスプレイ上に経時的な移動量の変化がモニタされる。なお、送信、受信、変化量の算出およびデータ収録までが1回の測定であり、その測定のサンプリングは30秒から任意に設定できる。

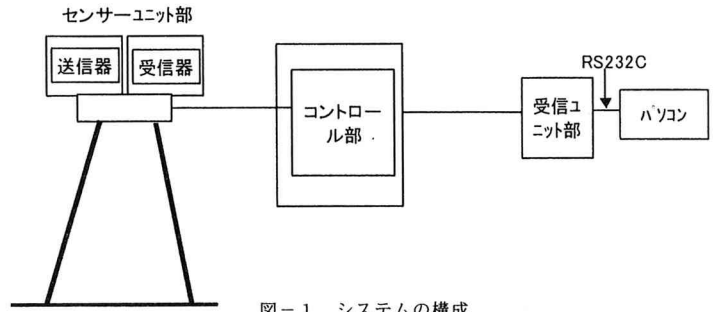


図-1 システムの構成

2.2 測定範囲

マイクロ波は図-2に示すような放射特性を持つため、マイクロ波が照射される範囲内が測定対象範囲となる。照射範囲は送信器の放射角、受信器の入射角がそれぞれ5°程度であるので、理論的には次式によって求められる。

$$\text{測定対象可能範囲の直径 (D)} = 2 \times K \times L \times \tan 5^\circ$$

ただし、上式の L = 投射距離 (m)、 $K = 0.7$ (安全係数) である。したがって、投射距離が100mの場合には照射範囲の直径はおおよそ12mとなる。

このシステムでの測定の対象は、上述したとおり照射範囲内の岩盤であり、その範囲内の岩盤全体の動きをマイクロ波で検知するものである。

また、送信器から対象物までの投射方向の測定可能な距離は、現行のシステムでは出力電力を65mVとしているために100m前後となる。

なお、このシステムでの測定では電波ビーム中での対象物の移動を検知することから、どの範囲を監視しているかを把握しておくことが必要であることと、投射上の経路には電波の反射、屈折および回折現象が生じさせるような物体の存在が無いようにすることが必要である。

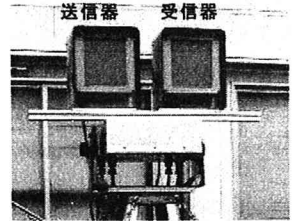


写真-1 センサーユニット

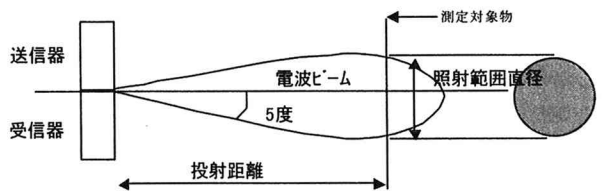


図-2 照射範囲

3. 位相変位による移動量の検知

図-3に岩塊移動の模式図を示す。この図はケースAが移動前の状態で、ケースBが送・受信器側へ $\Delta L1$ mm移動した時、ケースCがさらに $\Delta L2$ mm移動した状態を示している。同図の各ケースに対応した岩盤の移動に伴う反射波形の変化例を図-4に示す。

図-4の横軸は波長(mm)、縦軸は振幅(v)であり、太線の波形は移動前の初期反射波で、図-3に示したケースAの時のものである。点線はケースBの時の反射波で、位相が初期の反射波から $d \lambda 1$ ずれている。細線はケースCの時のもので、初期の反射波から位相が $(d \lambda 1 + d \lambda 2)$ だけずれている。これらの位相のずれは送・受信器と測定対象岩盤の相対的な距離変化を示していることから、マイクロ波の波長がわかれば、岩盤の移動量は容易に求めることができる。マイクロ波の波長はマクスウエルの方程式²⁾ 波長 $\lambda = \text{光の速度 } C (2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}) \div \text{周波数 } f$ で求められる。このシステムでは10.125GHzの周

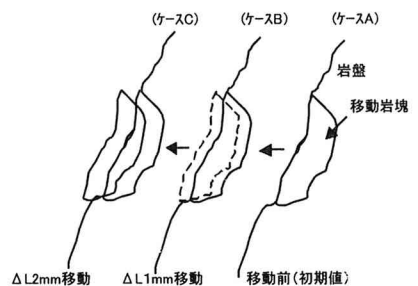


図-3 岩塊移動の模式図

波数で送信していることから、マイクロ波の1波長は上式より29.6mmとなる。したがって、ケースAからケースBへの移動量 $\Delta L1 = d \lambda 1$ となり、同様にケースBからケースCは $\Delta L2 = d \lambda 2$ となる。

以上より、定期的に受信する反射波の位相のずれ(変位)を測定することで移動量を検知することが可能となる。本システムでは受信波のピーク値の位相変化から対象物の移動量を求めている。

4. 野外試験での検証

このシステムを用いて野外でアルミ板と花崗岩の2種の反射板を移動させ、その時の移動量を測定し、システムの検証を行ったので、以下に報告する。

4.1 試験の概要

試験は反射特性の優れているアルミ板(縦60cm×横50cm×厚み0.5cm)と実際の岩盤面を考慮した花崗岩板(縦60cm×横80cm×厚み3cm)の2種類の測定対象物を用いて行った。送・受信器と反射板は図-5に示すように設置し、測定対象物をハンドル付きのボルトによって前後に移動させて、その変位量を検出する。なお、離間距離は30m、50mおよび80mの3通りとする。移動量の測定は初期反射波を記録したあと、測定対象物をまず、送・受信器側へ1cm単位で5cm往復させ、次に、システムと離れる方向へ同様に1cm単位で3cm往復させる。マイクロ波による移動量の読み取りは往路、復路ともに行うものとする。写真-2はアルミ板を用いた時で、離間距離が50m時の測定風景である。また、対象物の移動の記録には、マイクロ波での読み取り値と比較できるように対象物に直接取り付けたいずみ式の変位計(100分の1mmの精度)も併せて使用する。

また、照射範囲の確認を行うため、図-6に示したように送・受信器とアルミ反射板の離間距離を80mとり、送・受信器を中心として、測定対象物を時計回りに0、2、4、5、6、7度回転させてから対象物を前後に動かして移動量の測定を行い、測定範囲の限界を調べる。

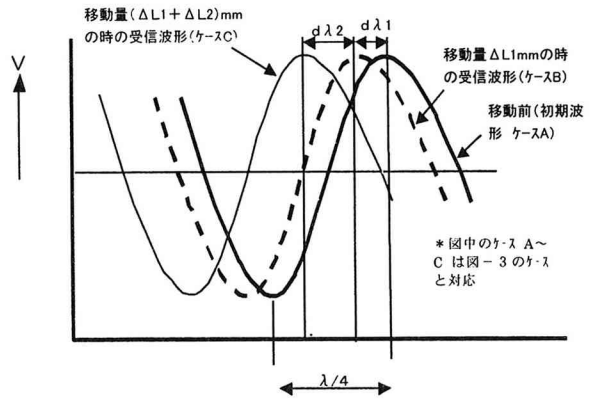


図-4 岩盤の移動に伴う反射波形

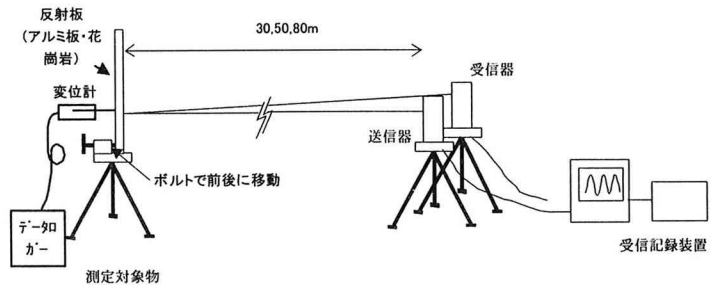


図-5 測定方法



写真-2 測定風景

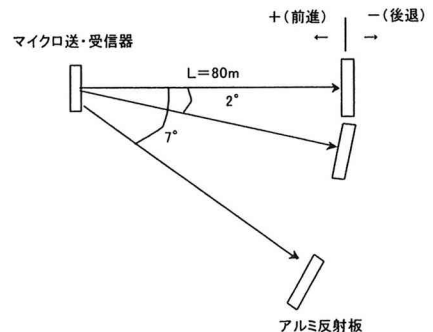


図-6 照射範囲の確認

4.2 移動量の検知

図-7(1)にアルミ板、(2)に花崗岩を測定対象物とした時の移動量検知結果を示す。これらの図の横軸はひずみ式の変位計で、縦軸がマイクロ波で読み取った時の移動量(mm)である。なお、この結果は移動の往復路の測定結果を併せてプロットしている。

図-7(1)の3つの図は、上から順に離間距離が30, 50, 80mの結果である。離間距離が30mの結果を見ると、マイクロ波とひずみ計での検知結果はほぼ直線になっており、双方での読み取り値は往路、復路ともに比較的良く一致しているものと思われる。また、離間距離が50, 80mの時でも30m時と同様な結果が得られている。

同図の(2)の花崗岩反射板では、離間距離が30, 50, 80m時ともに、アルミ反射板と同様な結果が得られている。

また、反射波の感度は、アルミ板では最小から最大振幅間の感度が5vであったのに対して、花崗岩では、4.7vと、その差は0.3v程度であり、反射特性の優れているアルミ板と大きな差異がないことがわかった。

この結果から、花崗岩でもアルミ板と同程度に移動量の検知が可能であることから、実際の岩盤面でも、本システムが使用できる可能性があることがわかった。

4.3 照射範囲の確認

図-8に測定結果を示す。この結果はアルミ反射板で離間距離が80mの場合でのマイクロ波の照射範囲を示すものである。図の横軸はひずみ計、縦軸はマイクロ波での移動量である。この図を見ると、送・受信器と反射板の振り角が $0^{\circ} \sim 6^{\circ}$ の範囲では、移動量は十分に検知されているが、振り角が 7° になると、10mmの移動量を検知する時点で3mm程度の誤差が生じ、20, 30mmの移動量となると測定不能となっている。今回用いている送・受信器の放射および入射角の特性は 5° であることから、照射範囲の計算は 5° で行っている。しかし、この結果からわかるように、放射角は 6° であることから、実際の照射範囲は計算上よりも大きくなっているものと考えられる。したがって、システムを作製する際には、照射範囲を確認しておくために、上記のよう

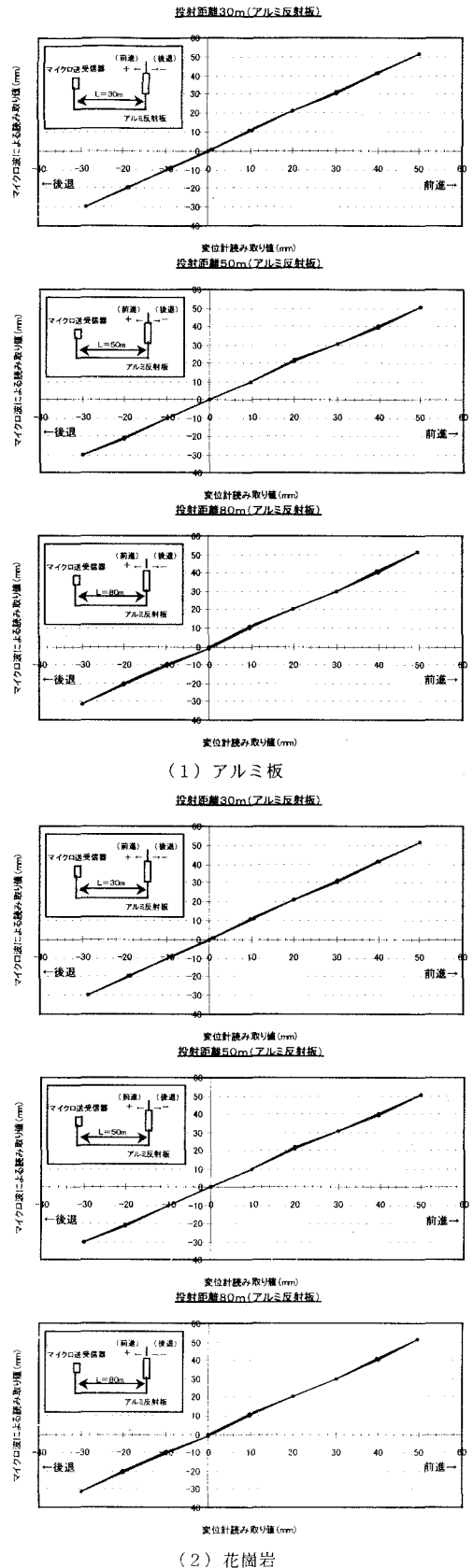


図-7 移動量の検知結果

な試験を行う必要がある。

5. 測定値の検証

図-9に測定値の検証結果を示す。この図の(1)がアルミ反射板、(2)が花崗岩の結果である。これらの図の横軸は移動量(mm)、縦軸は2軸で、図中の○記号の折れ線がひずみ計とマイクロ波で読み取った移動量の差であり、もうひとつの×記号の折れ線が、その差をそれまでの移動量で除した割合を百分率で表示したものである。なお、この結果は移動の往復路の測定結果をプロットしている。

まず、同図の(1)をみると、 $-30\text{mm} \sim +50\text{mm}$ の変化の中で、マイクロ波とひずみ計との読み取り差は $\pm 1\text{mm}$ 程度となっている。また、その差と移動量分の割合をみると、若干のばらつきもみられるが $\pm 5\%$ 以内で収まっている。

次に、同図の(2)をみると、アルミ板と同様な結果が得られており、割合も $\pm 5\%$ 以内となっている。

6. おわりに

岩盤斜面の監視技術として、マイクロ波の反射特性を用いたシステムを構築して、本システムを用いて野外試験を行い、システムの検証を行った。その結果、(1)マイクロ波の位相変位を読み取ることで、測定対象物の移動検知が可能となり、測定とほぼ同時に移動量をモニタリングできるようになった。なお、マイクロ波には放射特性があるため、監視する対象はマイクロ波が照射する範囲内となる。したがって、測定する際には、その照射範囲を把握することが必要である。(2)このシステムを用いて野外試験を行ったところ、別途測定したひずみ計とマイクロ波の読み取り値との差

異は 5% 以内であった。(3)今後の課題として、原位置でも十分に対応できるようにマイクロ波の出力電力を増強して投射距離を延ばすこと、照射範囲を把握する方法の確立などの検討が急務であるものと思われる。また、以上よりマイクロ波による斜面監視システムは原位置の斜面監視に有効であり、今後、実際の岩盤斜面でのデータを数多く蓄積するとともに、改良を加え本システムの信頼性を高めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 塩谷智基・青木朋也・藤井清司: AB 斜面崩壊予測手法における基礎研究, 土木学会論文集 No.523/III-32, pp163~173, 1995, 9
- 2) 宮内一洋・赤池正巳・石尾秀樹共著: マイクロ波・光工学, コロナ社

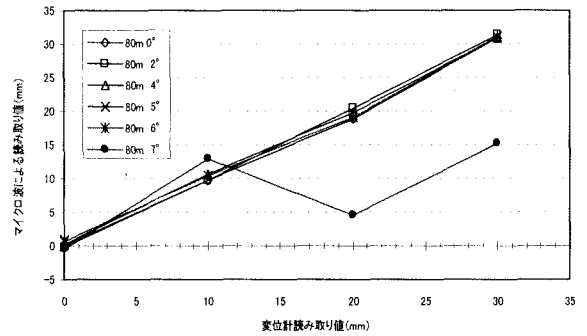
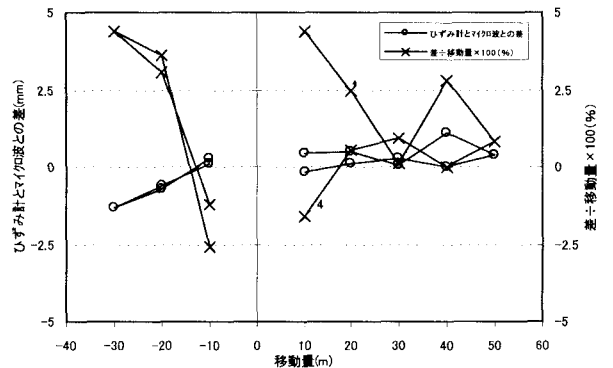
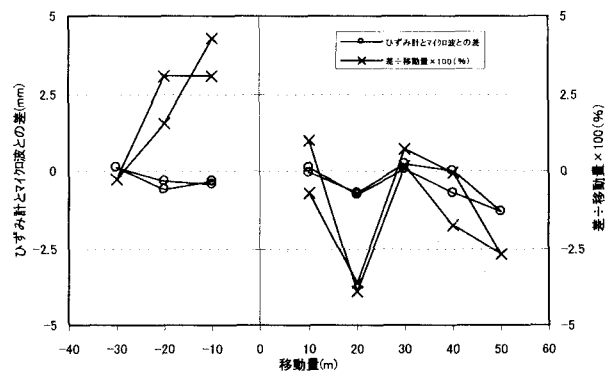


図-8 照射範囲の確認結果



(1) アルミ板



(2) 花崗岩

図-9 測定値の検証