

不連続面測定器の開発とその応用

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF NEW DEVICE FOR SURVEY OF DISCONTINUITIES

青木 俊朗*・藤川 富夫*・廣川 隆男**

Toshiro AOKI, Tomio FUJIKAWA, Takao HIROKAWA

The mechanical behavior of discontinuous rock mass is mainly dominated by existence of discontinuities, ie joints, faults etc. In the survey for the getting the data of the orientation of discontinuities, handheld clinometer is ordinarily used. However clinometer method tends to have the error, due to surveyer's experience and skills, and to expend much time. Then we had developed the new auto-electric device instead of clinometer according to the new principle of measurement. This method takes less time and has more accuracy in the discontinuities survey.

1. はじめに

現在、揚水発電所のための大型岩盤地下空洞や高速道路のための長大岩盤斜面といった岩盤構造物の建設が数多く計画されている。これらの岩盤構造物の安定性は、岩盤内に存在する断層や節理といった岩盤不連続面の状態に大きく影響される。したがって、岩盤構造物の建設においては、岩盤不連続面の状態を調査・評価し、その結果を構造物の安定解析、事前設計、施工に的確に反映させることが重要と考えられる。しかしながら、不連続面の調査の困難さや合理的な解析・設計手法が確立されていないことなどから、岩盤不連続面に着目した設計・施工管理は、実務的にはほとんど実施できていないのが現状である。

不連続面の状態を表現する項目、すなわち調査・評価項目^{1),2)}としては、

- ①方向 ②位置 ③粗さ ④連続性
- ⑤開口幅 ⑥頻度 ⑦挟在物 ⑧湧水

など多くの項目が挙げられ、これらは岩盤掘削工から吹付けコンクリート施工までの短い時間内に調査する必要がある。一般的には、方向以外の調査は目視観察、切羽スケッチ、切羽写真撮影などを手段として行われ、方向の調査は写真-1に例示するようなクリノメータと

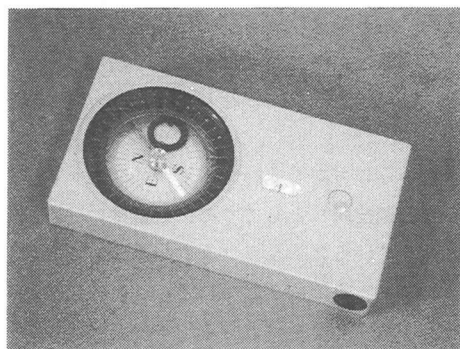


写真-1 クリノメータ

* 正会員 工博 東急建設株式会社 土木技術部

** 東急建設株式会社 土木技術部

呼ばれる装置を用いて測定がなされている。クリノメータは、磁北方位を示す磁石、重り式の指示器、気泡レベルから構成された装置であり、次のような問題がある。

- ①専門的な知識が必要で誰にでも取り扱える装置でない。
- ②測定者による測定値の差が大きい。
- ③測定に1～2分の時間を要する。
- ④磁場の乱れた場所、鋼材の近くでの測定は困難である。
- ⑤図-1に示すように点での測定となるため、通常の波打った不連続面の平均的な方向（走向・傾斜）を捉えることができない。

これが、実現場において施工サイクルの中で設計・施工管理に活用できるだけの不連続面情報の収集を困難にしている大きな要因となっている。

筆者らは、上述したような岩盤構造物の建設や不連続面の調査に関する現状と問題点を踏まえ、施工サイクル内で十分な不連続面情報の収集を可能とする調査システム（図-2参照）の構築に向けて、誰にでも迅速かつ高精度に不連続面の方向を測定できる装置（以下、不連続面測定器と呼ぶ）を開発した。なお、方向以外の項目の調査・評価については、図-2に示すようにCCDカメラにより岩盤掘削面画像データを取得し、それと目視観察結果を合わせてコンピュータ上で分析処理することで対応可能である。本文では、不連続面測定器の測定原理、測定精度および実岩盤での適用例について述べる。

2. 測定の原理

クリノメータの問題点を解決するために、近年、磁石や重りの代わりに電子機器を用いた方法³⁾や写真測量技術を応用した方法⁴⁾などが研究提案されているが、すべての問題点を克服し、実用レベルの技術にするには時間を要する状況にある。不連続面測定器は、これらとはまったく異なった測定原理に基づき方向測定が行われる。測定の原理は、航空機、ロケットなどのように動いている物体が現在どちらの方向を向いているかを認識する技術（姿勢認識技術）としてすでに航空機の分野で実用化されているストラップダウン方式の姿勢認識理論・技術⁵⁾を基礎としている。この姿勢認識技術では、加速度センサとジャイロセンサが用いられる。これらのセンサの性能は磁場や鋼材の影響を受けない特徴を持っている。以下に、本測定器の測定原理について述べる。

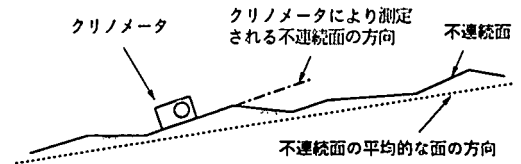


図-1 クリノメータによる点での測定

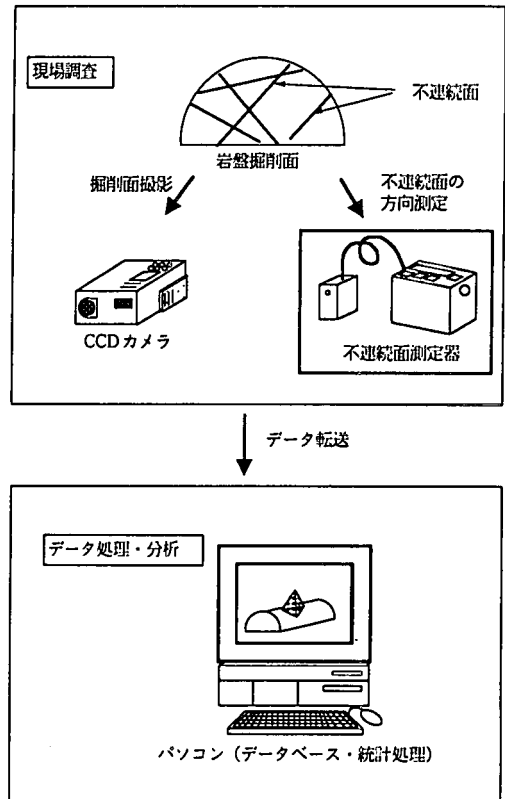


図-2 不連続面調査システム

まず、図-3 (a) に示すように測定器の3辺に固定され、計測器の移動とともに変化する相対座標系 (x,y,z) を設定する。測定器には軸回りの角速度を検出するジャイロセンサと軸方向の加速度を検出する加速度センサが3つの軸方向にそれぞれ1つずつ組み込まれる。つぎに、図-3 (b) に示すように磁場の乱れない場所で相対座標系 (x,y,z) の y 軸を磁北座標系 (X,Y,Z) （磁北向きを X 軸、鉛直上向きを Z 軸）の X 軸方向に一致させ、この相対座標系 (x,y,z) を基準座標系 (X',Y',Z') として初期設定する。このとき加速度センサの出力データを用いて磁北座標系 (X,Y,Z) と基準座標系 (X',Y',Z') との方位（回転）関係を求め、これを記憶する。つぎに、図-3 (c) に示すように測定器の移動中のある時点での測定器の傾きに対応した相対座標系 (x,y,z) が、基準座標系 (X',Y',Z') に対して何度回転したかを、ジャイロセンサと加速度センサの出力データからストラップダウン方式の姿勢認識理論に基づいて求め、相対座標系と基準座標系の方位（回転）関係を決定する。

以上の一連の操作で求められた各座標系の関係、すなわち基準座標系 (X',Y',Z') と磁北座標系 (X,Y,Z) との関係、および基準座標系 (X',Y',Z') と相対座標系 (x,y,z) との関係より、相対座標系と磁北座標系の方位（回転）関係が求められ、測定器の方向が決定されることになる。すなわち、測定器の測定面（相対座標系の xy 平面）を不連続面表面に当てることで、不連続面の方向を測定できる。この測定原理により、本測定器は、測定器を不連続面上で移動させながら1/60（秒/個）のサンプリング速度で方向データを収集できるという、従来の測定器にない特徴を有する。

なお、不連続面の方向の表現法としては、図-4に示すように、走向と傾斜を用いるものと、傾斜方位と傾斜を用いるものの2つの方法があるが、本測定器では傾斜方位と傾斜を用いて表現する。

3. 不連続面測定器の構成および特長

不連続面測定器の構成を図-5および写真-2に示す。本測定器は、測定作業の操作性を配慮し、計測部と制御部とに分けられている。計測部には、振動

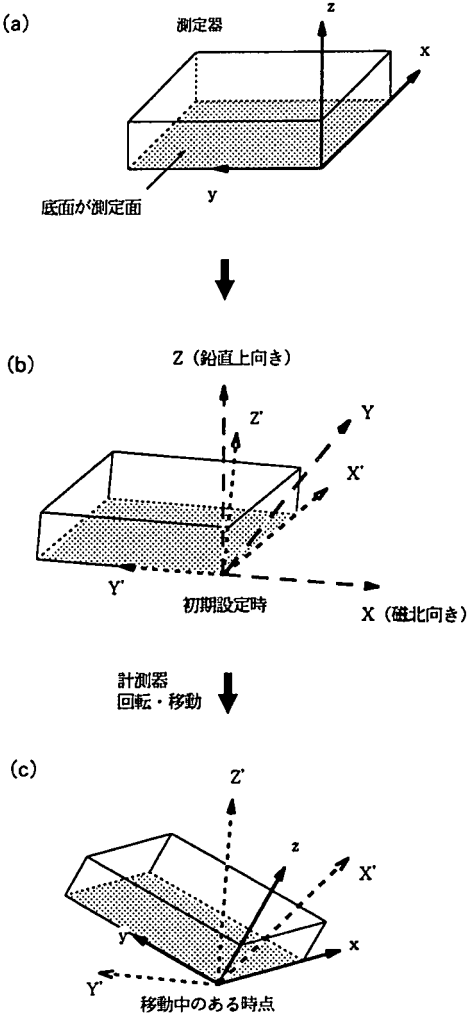


図-3 各座標系の関係

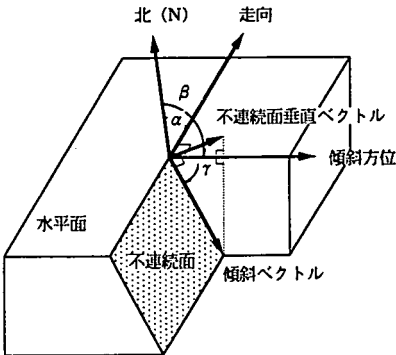


図-4 不連続面の方向の表現法

ジャイロセンサと加速度センサを相対座標系 (x, y, z) の3つの軸方向にそれぞれ1つずつ、それと測定の開始・終了を指示する計測スイッチを組み込んでいる。この2種類のセンサにより検出された角速度および加速度のデータはケーブルを介して制御部に送られる。一方、制御部には、演算装置、記憶装置、表示装置、外部出力装置、バッテリーおよび制御用スイッチ類が組み込まれている。計測部から送られたデータは演算装置で解析処理され、計測部の傾斜方位・傾斜がリアルタイムに算出される。ただし、この時点では計測部測定面の傾斜方位・傾斜が算出されているだけであり、不連続面の方向測定は、写真-3に示すように岩盤掘削面に現れた不連続面の表面に計測部測定面を当て、計測スイッチを押下することにより、実行されることになる。この測定結果は表示部に表示されるとともに記憶装置にも記憶され、RS232C ケーブルを介して容易にパソコンに取り込むことができる。なお、記憶装置は約300個の不連続面の方向に関するデータを記憶できる。また、動作電源は制御部に組み込まれたバッテリーからとり、どこでも調査測定が可能である。

本測定器の特長をまとめると以下の通りである。

- ①測定は、測定面を不連続面表面に当て計測スイッチを押下するだけでよく、誰にでも1秒程度で測定できる。
- ②図-6に示すように波打った不連続面の方向測定において、不連続面に沿って測定器を移動させながら連続測定しその結果を統計処理することで、不連続面の平均的方向を容易に捉えることができる。
- ③測定結果は記憶装置に記憶されるので、測定毎に結果を記帳する必要がなく、調査時間の短縮が図れる。
- ④測定器は磁場の乱れや鋼材の影響を受けないので、支保工などの鋼材や重機などが数多い坑内においても、信頼性の高い測定ができる。

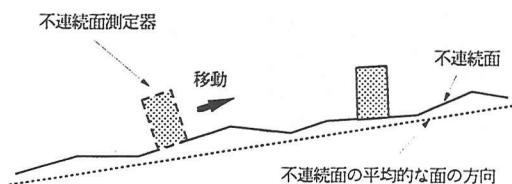


図-6 不連続面測定器による連続測定

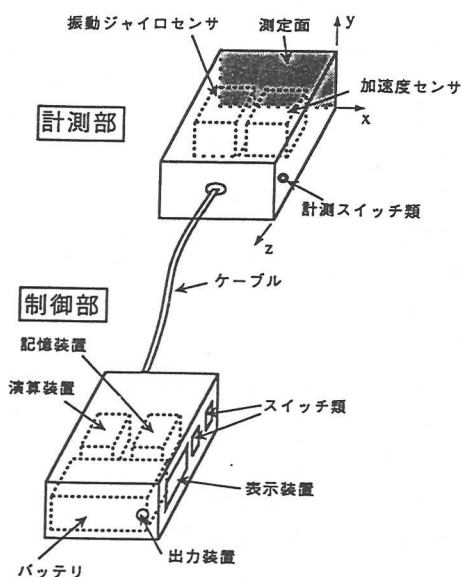


図-5 不連続面測定器の構成

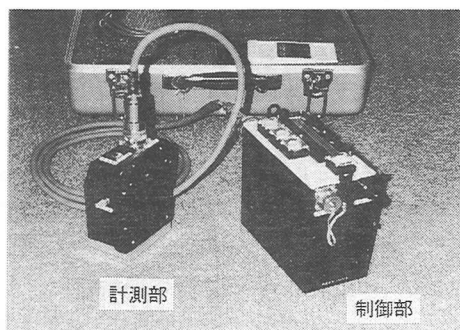


写真-3 岩盤不連続面の方向測定状況

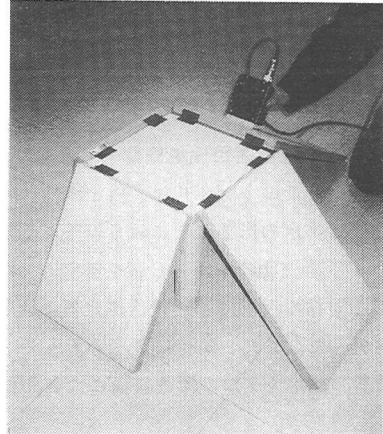
4. 測定精度

測定精度を検討するために、以下の手順で試験を行った。

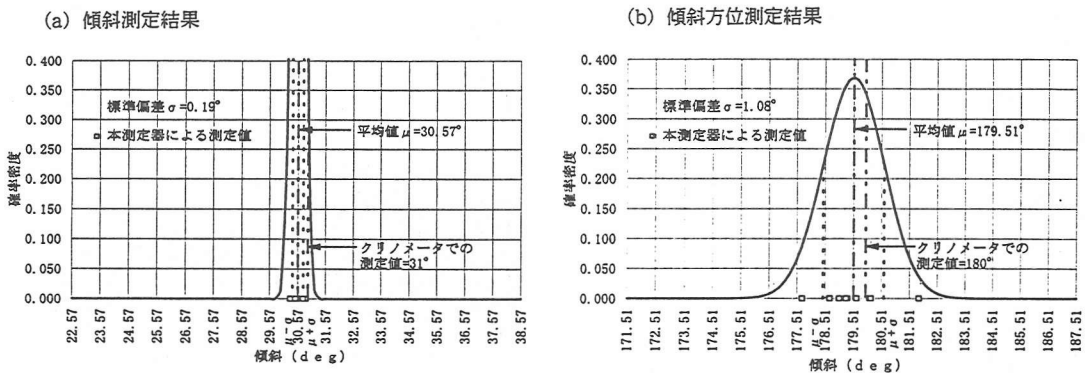
- ①不連続面測定器を磁北方向に設置し、初期設定する。
- ②不連続面測定器により、写真－４に示すような測定台の４つの斜面（各斜面はそれぞれ約 30° 、 45° 、 60° 、 75° の傾斜をもつ）の方位傾斜・傾斜をそれぞれ３回づつ測定する。
- ③上述の①、②の操作を１セットとし、この操作を３セット行う。

以上の試験により、各斜面について９個の傾斜方位・傾斜の測定値を収集した。また、クリノメータとの測定値と比較するために、４つの斜面の走向・傾斜を１回だけ測定した。

図－７（ａ）は傾斜測定結果の一例である。この図から、測定値のばらつきはかなり小さくクリノメータの測定値とほぼ等しいことが分かる。４つの斜面の傾斜の測定結果をまとめると表－１に示す通りである。傾斜測定の標準偏差値 σ は $0.19^{\circ} \sim 0.31^{\circ}$ の間にあり、精度（再現性）は良好と判断される。また、測定値の平均値とクリノメータによる測定値との差は、 $-0.69^{\circ} \sim 0.52^{\circ}$ の間にあり、クリノメータの目盛りの刻みが 2° であることを考慮すると、不連続面測定器とクリノメータの測定値はほぼ一致していると判断される。



写真－４ 測定精度試験状況



図－７ 方向測定結果の確率密度分布図（測定面傾斜＝ 30° の場合）

表－１ 傾斜測定結果一覧表

項目 \ 測定斜面	傾斜 30°	傾斜 45°	傾斜 60°	傾斜 75°
標準偏差値	0.19°	0.22°	0.26°	0.31°
③平均値	30.56°	46.07°	61.31°	75.52°
⑤クリノメータ測定値	31°	46°	62°	75°
③－⑤	-0.44°	0.07°	-0.69°	0.52°

表－２ 傾斜方位測定結果一覧表

項目 \ 測定斜面	傾斜 30°	傾斜 45°	傾斜 60°	傾斜 75°
標準偏差値	1.08°	1.72°	1.76°	1.05°
③平均値	179.51°	270.24°	359.52°	88.79°
⑤クリノメータ測定値	180°	270°	360°	89°
③－⑤	-0.49°	0.24°	-0.48°	-0.21°

図-7 (b) は傾斜方位測定結果の一例である。傾斜測定結果に比べ、多少測定値のばらつきがみられる。4つの斜面の傾斜方位の測定結果をまとめると表-2に示す通りである。傾斜方位測定の標準偏差値 σ は $1.05^{\circ} \sim 1.76^{\circ}$ の間にあり、傾斜測定に比べると若干大きい結果となっている。これは、測定の原理に起因するものである。また、測定値の平均値とクリノメータによる測定値の差は、 $-0.49^{\circ} \sim 0.24^{\circ}$ の間にあり、不連続面測定器による傾斜方位測定の測定値とクリノメータの測定値はほぼ一致していると判断される。

したがって、クリノメータの精度が標準偏差で良くても 2° 程度という現場報告から判断すると、不連続面測定器はクリノメータと同等あるいはそれ以上の精度(再現性)・正確さで不連続面の方向を測定できることがわかる。

5. 現場適用例

本測定器の現場適用性を確認するため現場試験を行った。現場試験は、水力発電所の仮排水路トンネル内で実施した。このトンネルは、約30年前にほぼ均質な砂岩系堆積岩中に建設された無巻きのトンネルであり、岩盤壁面は排水の影響などにより若干風化していた。現場適用性試験は、写真-5に示すように岩盤壁面に現れている不連続面の中から6個を選定し(測定位置を丸印で指定)、これらの不連続面について4章の測定精度試験と同様の手順で不連続面測定器による傾斜方位・傾斜の測定を行い、1つの不連続面につき9個の測定値を収集した。また、同時にクリノメータによる走向・傾斜の測定も1つの不連続面につき9回ずつ行った。

測定結果をまとめると表-3の通りである。表中の測定精度(平均標準偏差値)は、6個の不連続面の測定においてそれぞれ標準偏差値を算出し、それらを算術平均したものである。4章の結果と比較すると多少精度が落ちた結果となっている。これは、実在の岩盤不連続面は測定台の斜面とは違い、湾曲しているためと考えられる。ただし、不連続面測定器の標準偏差値とクリノメータのそれとを比較すると、本測定器の方が 1° 以上小さな値となっており、クリノメータ以上の測定精度を有していることが確認できる。また、表-3より所要測定時間を比較すると、本測定器はクリノメータより3倍程度速く測定できることが確認される。なお、今回のクリノメータでの測定では、測定者は測定値を記録していないので、記録時間を考慮すると所要時間の差はさらに大きくなると考えられる。

以上、実際の岩盤壁面においても本測定器は不連続面の方向を高精度かつ短時間に測定できることが確認された。したがって、本測定器を用いることにより、施工サイクル内で設計・施工管理に活用できる不連続面情報の収集が可能になる。

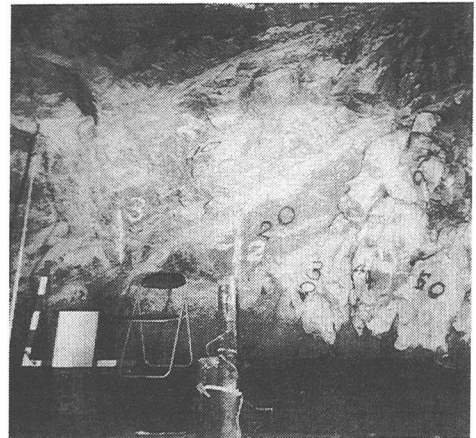


写真-5 現場試験箇所の岩盤壁面

表-3 現場適用試験結果一覧表

測定方法		不連続面測定器	クリノメータ
項目			
平均測定所要時間		15 (秒/個)	39 (秒/個)
測定精度 (平均標準偏差)	傾斜	1.67°	3.00°
	方位	2.58°	3.70°

6. おわりに

岩盤掘削面に現れた断層や節理などの岩盤不連続面の三次元的方向（傾斜方位・傾斜）を誰でも極めて短時間に高精度で測定できる測定器（不連続面測定器）を開発し、その測定原理、測定精度および現場適用例について述べた。

測定精度試験および現場適用試験の結果、不連続面測定器は従来のクリノメータによる方法に比べ、1/3以下の測定時間で、同等以上の測定精度を持って不連続面方向を測定できることが確認された。また、本測定器は、波打った不連続面上を移動させながら連続的に傾斜方位・傾斜を測定することで、不連続面の平均的な傾斜方位と傾斜を容易に捉えることができ、不連続面の方向をより正しく評価することが可能である。したがって、キーブロック解析法⁹⁾、DDA法、DEM法などの不連続体解析による岩盤地下空洞や岩盤斜面の安定解析をより高精度に行える信頼性の高いデータの収集や岩盤不連続面調査の省力化が可能となるとともに、合理的かつ経済的な岩盤構造物の設計・施工管理の実現に大きく貢献できるものと考えられる。また、不連続面上の場所による方向の変化は、不連続面の評価項目の1つである粗さを表現する1つのパラメータと考えられるので、本測定器を用いて粗さを定量的に評価する方法について今後検討する予定である。

最後に本研究を行うにあたり、京都大学工学部・大西有三教授、電源開発(株)・橋本信雄氏、同社・本江誠治氏ならびに(株)開発計算センター・大塚俊男氏から有益なご助言、ご指導を賜わった。ここに記して感謝の意を表します。

7. 参考文献

- 1) ISRM COMMISSION ON STANDARDIZATION OF LABORATORY AND FIELD TESTS: SUGGESTED METHODS FOR THE QUANTITATIVE DESCRIPTION OF DISCONTINUITIES IN ROCK MASSES, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., pp.319~368, 1978.
- 2) 金子 勝比古、青木 俊朗、大見 美智人：岩盤の不連続性評価，日本鉱業会秋季大会分科研究会資料，N-1，1986.
- 3) 福島 晴夫：電子式クリノメータの開発と岩盤計測への適用，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.265~270，1994. 1.
- 4) 藤原 弘一：「精密写真測量手法を用いた岩盤不連続面計測に関する研究」，京都大学大学院工学研究科修士論文，1996. 2.
- 5) 加藤 昭英：「新航空工学講座13 航空電子装備（下巻）」，（社）日本航空技術協会，1986.
- 6) 藤川 富夫：「不連続性岩盤における掘削面の安定に関する基礎的研究」，信州大学博士論文，1994. 7.