武甲山残壁の表面変位のモニタリング*

中谷 剣¹ 藤巻 宏太² 平澤 祐介³
秋山 文孝⁴ 宮 弓泰輔⁵ 田中 恭平⁶

Monitoring of the Surface Displacements of the Final Slope at Mt.Buko

by Tsurugi NAKATANI^a, Kota FUJIMAKI^b, Yusuke HIRASAWA^c, Fumitaka AKIYAMA^c,
Taisuke MIYAYUMI^d and Kyohei TANAKA^d

- a. Ryoko Lime Industry Co., Ltd., Une Mine 357-1 Yokoze, Yokoze Town, Saitama, Japan, Currently at Mitsubishi Materials Co., Ltd. (Corresponding author, E-mail: ntsurugi@mmc.co.jp)
b. Ryoko Lime Industry Co., Ltd., Une Mine 357-1 Yokoze, Yokoze Town, Saitama, Japan
c. Boko Mining Co., Ltd., Boko Mine, 48-1 Yokoze, Yokoze Town, Saitama, Japan
d. Chichibu Taiheiyo Cement Co., Ltd., Minowa Mine, 1800 Onohara, Chichibu City, Saitama, Japan

This study examines reliable methods to monitor and manage the stability of a limestone rock slope. The surface displacement of the rock slope of Mt. Boko has been measured over the past 20 years, employing several tools and methods including automated polar system (APS), global positioning system (GPS), and leveling. The rock slope of Mt. Boko will eventually reach gigantic proportions; it will be 800 m high $\times$ 5 km long at the end of mining operations. Monitoring work was often associated with data that oscillated irregularly due to negative influences from environmental factors such as temperature, atmospheric pressure, and humidity. However, APS measurements have provided the less fluctuation data by calculating differences in slope distance. The differences in slope distance are obtained by subtracting the slope distance at a reference point in the least displaced area from those at other points. GPS measurements have provided baseline analysis data by setting the reference point in the least area. The GPS data can be converted into slope distance and compared with APS data, and the result of this has shown there are no discrepancies between two types of data. Employing APS and GPS has enabled highly accurate monitoring that produced reliable data due to cross comparisons of each data source.

KEY WORDS: Limestone Mining, Bench-cut, Final Slope, Rock Slope Monitoring, Surface Displacements

1. はじめに

武甲山では、菱光石灰工業(株)、秩父太平洋セメント(株)、武甲鉱業(株)の三社(以下、武甲山三社と称する)が協調して石灰石の採掘を行っている。現在、採掘切羽の最下部レベルは870 mLで、最終的には500 mLまでの採掘を計画しており、高さ800 m幅5 kmと他に類がない長大残壁が形成されることとなる。そのため武甲山三社で秩父地区残壁研究会(以下、秩父残研と称する)を組織し、残壁の管理を行っている¹⁾。

秩父残研では残壁の応力異常や変位異常等を早期に察知するため、1994年11月にモニタリングシステムを導入²⁾して以降、表面変位計測を中心として様々な手法を取り入れながら残壁挙動のモニタリングを行ってきた。残壁の表面変位計測には種々の手法が検討されたが、現在の武甲山では主にAPS(自動光波距離計)、GPS(全地球測位システム)によるモニタリングや、残壁管理道路における定期的な水準測量を行っている。APSおよびGPSでは連続監視による数mm程度の計測が可能である。現在計測し

ているAPSおよびGPSの設置位置をFig. 1に示す。

表面変位計測のほか秩父残研では残壁内部に設置した挿入式傾斜計、亀裂変位計やエクステンソメーターによる地下変位計測や、アンカー荷重計による力学的挙動の計測、間隙水圧計および水位計による水理学的なモニタリングも行っている。

本論文では、まず武甲山における表面変位計測および挿入式傾斜計の計測手法について述べる。次に、各計測結果とモニタリング結果から読み取れる残壁の全体的な挙動の考察、および各計測手法の信頼性について検討した。最後に、これらのモニタリング手法を用いた、残壁対策工事の効果検証等の残壁管理への有用性について報告する。

2. 残壁表面変位のモニタリング手法

2・1 APS

APS(Automated Polar System)とは光波測距儀と自動制御高精度モータセオドライトを組み合わせて自動的に距離を計測するシステムであり、安価で広域の監視に適している。しかし、光波による測定を行っているため、光波を遮る強い雨や濃いガスが存在すると、観測データを得ることが難しくなる。1994年以降、秩父残研では残壁のモニタリングを目的として、APSによる残壁各部の斜距離変化のモニタリングを連続的に行っている。計測点は山頂(1,304 mL)と1,200 mL, 1,100 mL, 1,050 mL, 1,000 mLの犬走り上に約100 mの間隔でブリズムを設置している。その他、1,010 mLの調査坑道坑口や970 mLの一部にもブリズムを設置している。2017年5月末時点で観測対象としているのは53箇

*2017年9月5日受付 2017年12月26日受理

1. 正会員 菱光石灰工業株式会社 資源事業本部 宇根鉱山(現:三菱マテリアル株式会社 金属事業カンパニー 資源事業部技術部)

2. 正会員 菱光石灰工業株式会社 資源事業本部 宇根鉱山

3. 武甲鉱業株式会社 武甲鉱業所

4. 武甲鉱業株式会社 武甲鉱業所

5. 秩父太平洋セメント株式会社 鉱山部

6. 秩父太平洋セメント株式会社 鉱山部

[著者連絡先] E-mail: ntsurugi@mmc.co.jp

キーワード: 石灰石採掘, ベンチカット, 最終残壁, 残壁モニタリング, 表面変位

Fig.1 Location of APS and GPS monitoring points on the rock slope of Mt. Buko. —the numbers shown in circles present the monitoring points.

Fig.2 The line of the sight of APS and a view of Mt. Buko from the Total Station.

Fig.3 The prism and the total station of APS monitoring system.

所である。実際に光波測定を行うトータルステーションは、採掘の影響を受けない地点である残壁から約 4.5 km 離れた標高 270 m の横瀬町寺坂浄水場に設置し、1 日に 12 回、自動かつ連続的にデータを取得している (Fig. 2 参照)。使用するトータルステーションにはライカ社製 TPS1200 シリーズのタイプ TCA1201 を設置しており、測距精度は $5 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \times D$ (D : 測定距離) である (Fig. 3 参照)。

トータルステーションでは気温および気圧を測定しており、光波計測した斜距離に以下のような補正をかけている。なお、湿度については 60% で一定と仮定している。

$$D' = D + (D \times \mu \times 10^{-6})$$

$$\mu = 285.93 - \left(\frac{0.29493 \times p}{(1 + \alpha \times t)} - \frac{4.126 \times 10^{-4} \times h}{(1 + \alpha \times t)} \times 10^x \right)$$

D' : 補正斜距離 (m)

D : 測定斜距離 (m)

μ : 補正係数

p : 気圧 (hPa)

t : 温度 ($^{\circ}\text{C}$)

h : 相対湿度 (%)

$$x = \left(\frac{7.5 \times t}{237.3 + t} \right) + 0.7857$$

$$\alpha = \left(\frac{1}{273.15} \right)$$

例えば気温 30°C 、気圧を 1 気圧 (1,013 hPa) とした場合は上記の式により補正値は約 $+70.0 \text{ mm}$ 、 5°C 、1 気圧とした場合は約 -29.0 mm の補正を行う。しかし、各計測点とトータルステーションとの標高差が約 800 m と大きいので、トータルステーションで

Fig.4 (a) Slope distances of observation points on 1,200 mL. (b) 365 days moving average of slope distance of the same points.

Fig.5 Slope distance differences of APS on 1,200 mL.

Fig.6 A GPS antenna and its receiver.

取得した気象条件と残壁との光路中の気象条件が異なる。そのため、Fig. 4 (a) からわかるように年周期的な変動が生じてしまい、完全には補正ができない。また、トータルステーションで取得した気温ではなく、残壁の観測ミラー付近の気温を加味した温度補正も実施したが、完全には補正できなかった³⁾。この変動は前365日間の移動平均を取ることによって、取り除かれることから季節変動であることがわかる (Fig. 4 (b) 参照)。この365日間の移動平均で残壁のモニタリングを行うことも可能ではあるが、もし急激な残壁の挙動が発生した場合に瞬時に把握することができないといった問題も生じる。

そこで秩父残研では、各計測点と同じ標高に設置している比較的小変位の微小な計測点を不動点とみなし、これを基準とした斜距離差を計算することによって気温による測定誤差を大幅に小さくした上で、残壁の挙動把握に努めている。例えば、1,200 mL に設置しているプリズムでは残壁の東端にある APS2 が最も変位が小さいため、この点を基準として 1,200 mL での計測点の斜距離差を算出している (Fig. 5 参照)。他の標高においても同様の手法で斜距離差を算出しており、1,100 mL では APS9 を、1,050 mL では APS22 を、1,000 mL では APS48 を基準点としている。斜距離の計測および斜距離差の算出は自動で行われ、秩父残研のネットワークにて解析結果を共有するシステムを構築している。また、Fig. 5 の 2007 年 5 月前後で斜距離差データのバラつきに違いがあるが、これはこの時期にライカ社製 WILD シリーズの光波測

距儀 DI3000 から、現状のトータルステーションへ更新し、測定精度を向上させた為である。これにより APS3 における 2007 年 1 月 1 日から 1 週間分の斜距離差の標準偏差は 2.94 mm であったのに対して、更新後の 2008 年 1 月 1 日から 1 週間分のデータの標準偏差は 0.12 mm となった。

2・2 GPS

石灰石鉱山における GPS による変位モニタリングシステムは、秋芳鉱山 (山口県秋芳町) 等で実施されてきており、武甲山におけるトータルステーションと同程度の精度で変位を計測できることが示されている^{4,5)}。武甲山では、2001 年以降、1,200 mL 西側に設置した APS7 (宇根鉱山内) における斜距離の短縮傾向が強くなることが確認されたことから、2003 年に表面変位の三次元的変化を捉えるために、GPS による計測を開始した (Fig. 6 参照)。GPS によるモニタリングは導入コストが高く、現場で電源の供給を必要とし、また雷によるトラブルも多いが、トータルステーションの設置地点からは見えない残壁下部における挙動を計測可能である。また APS による計測では雲などの視界不良時に計測が不可能となるが、GPS では気象の影響を受けないといった利点もある⁶⁾。GPS による計測点は残壁に設置している APS の計測結果から注視すべき箇所を選定し、通常は APS のプリズムと同位置に設置しているが、プリズム周辺に十分なスペースを確保できない場合は多少位置をずらして計測を行っている。現在では残壁対策工事の影響で計測を中止しているが 970 mL の残壁下部

Fig.7 Transition from GPS-based control station analysis to final slope in-line analysis (GPS15).

にも計測点を設けていた。その他、1,010 mL の調査坑道坑口には APS42' と同位置に GPS90 を設置している。

GPS 設置当初は国土地理院の秩父電子基準点及び大滝電子基準点からの電子基準点解析を利用した計測を行っていた。電子基準点解析とは座標値が既知である GPS 連続測量点を基準とし、基準点の変位量で武甲山に設置している各計測点の変位量を補正する手法である。武甲山残壁では水平距離約 4 km、標高差約 800 m である秩父電子基準点を XY 座標の相対測位の基準とし、水平距離約 15.5 km、標高差 100 m 以内の大滝電子基準点を Z 座標の相対測位の基準とした。ここで、X 座標は南北方向、Y 座標は東西方向、Z 座標は鉛直方向を表している。しかし、これらの基準点では武甲山との距離が十分に近いとは言えず、特に Z 変位の誤差が大きいため、残壁の挙動という微小な変位を捉えるには精度が不十分であった (Fig. 7 参照)。Z 座標で見られる年周期的な変動は衛星から発信される GPS 電波の大気遅延⁷⁾が原因だと考えられる。また電子基準点の計測データは計測から 3 日後に WEB 上で公開されるため、豪雨時等に残壁の挙動をリアルタイムに計測できないことが欠点であった。そのため、2010 年以降は残壁に設置した変位の微小な GPS を基準点とした残壁内基線解析へと変更し、計測を行っている。これにより基準点と各計測点の距離は水平距離が最大でも 1 km 以内となり、Fig. 7 から分かるように 2010 年以降のデータのばらつきは比較的小さくなった。そのため GPS15 における 2009 年 1 月 1 日の 1 時間毎データの標準偏差は X 座標が 4.31 mm、Y 座標が 2.80 mm、Z 座標が 8.68 mm であったのに対して、2012 年 1 月 1 日の同様のデータでは X 座標が 1.4 mm、Y 座標が 0.8 mm、Z 座標が 3.1 mm となった。この手法の変更は武甲山残壁に比較的小さい変動の少ない計測点を有していたため可能であった。武甲山残壁で GPS の基準点は 2 点設定されており、1,200 mL 以上の GPS 計測点は GPS3 (1,200 mL) を基準とし、それ以外の計測点は GPS33 (1,000 mL) を基準としている。2017 年 5 月末時点で GPS 計測を行っているのは、基準点を含めて 19 点である。

GPS 受信機はトプコン社製 2 周波受信機 (GB-1000, GB-500, LEGACY-E, HiPer-SR) を使用しており、精度は水平方向で $3\text{ mm} + 1\text{ ppm} \times D$ 、垂直方向で $5\text{ mm} + 1.5\text{ ppm} \times D$ (D: 測定間の距離) である。計測方法は相対測位法であるスタティック法を用い、1 時間毎に座標データを自動で取得し、無線ネットワークを介して鉱山事務所に設置してある PC にて基線解析を行っている。解析結果は APS と同様にネットワークを介して、秩父残研で共有している。

Fig.8 Insertion-type Borehole Incliner.

2・3 水準測量

GPS 計測では計測点のみの鉛直変位を捉えているが、広域的な鉛直変位傾向を確認するため、残壁管理道路の水準測量を実施している。計測は測量技術者が行うため、測定者の技量によって精度が左右される。そのため絶対値での評価は難しいものの、全体的な傾向を把握する観点および GPS 計測の補完と位置付けている。

残壁の鉛直方向変位を捉えるために、積雪で計測ができない時期を除く毎月 (年間 10 回程度)、1,200 mL、1,090 mL、1,050 mL、1,000 mL で標高毎に水準測量を実施している。測量箇所は基本的に APS 計測点と同じ箇所に設けているが、1,100 mL の APS 計測点周辺には、生育した植物があるため水準測量の障害となっている。そのため、10 m 下の 1,090 mL で水準測量を行っている。各標高毎の側線長は、1,200 mL が約 580 m、1,090 mL は約 1,050 m、1,050 mL は約 1,250 m、1,000 mL は約 1,480 m である。

2・4 挿入式傾斜計

岩盤内部の亀裂等による変位箇所の標高および深度の特定及び水平方向変位量の計測のため、1,090 mL、1,050 mL、1,010 mL の管理道路におけるボーリング孔に径 50 mm の測定管 (以下、ガイド管) を埋設し、挿入式傾斜計による計測を、年間 10 回程度実施している。計測箇所を Fig. 1 に示す。ただし、M2004-1, 2, M2007, M2010-1 はガイド管変形により閉塞し、現在は計測不能になっている。

挿入式傾斜計は、東京測器社製 KB-5HC (2 軸タイプ、容量 $\pm 5^\circ$) (Fig. 8 参照) を使用している。測定は、ガイド管に挿入した傾斜計を孔底から 50 cm ごと引き上げて行う。区間ごとに得られる傾斜角を水平方向の変位量に換算し、孔底を基準 (下盤を不動点) として地表部まで累加することで、ガイド管全体の形状変化を求め、岩盤内部の変位量を初期値 (最初に埋設した際のガイド管の形状) とその後の計測値の差から求めている。

3. モニタリング結果

3・1 APS 計測結果

APS の計測点を残壁にほぼ等間隔に設置しており、それらの斜距離差計測結果から武甲山残壁での変位の分布状態を示すために、APS の 2012 年度の年間斜距離差変位速度の等値線図を Fig. 9 に示す。この図は各 APS の計測結果から当該年度の前年度 3 月の平均変位量から当該年度 3 月の平均変位量の差を 365 で除すことで年間平均変位速度を示している。2012 年度の結果から、APS7 を中心とした武甲山中央部～西部にかけて斜距離差の短縮量が大きい領域が確認できる。これは計測開始後から現在まで継

Fig.9 A contour map of measured displacement in FY2012.

続して確認されてきた傾向である。

秩父残研では APS 計測で得られた斜距離差を用いて前 31 日間の変位量から回帰直線の勾配 (変位速度 mm/day) を求め、中長期的な管理指標として残壁管理に役立てている。Fig. 10 に各標高における最も変位が認められる計測点の前 31 日変位速度と前 31 日降雨量を示す。2007 年に APS のトータルステーションを更新した後は過去に比べると測定値のバラツキが小さくなり、変位速度についても同様となった。計測開始以降、ゆるやかな変位を計測してきたが、2007 年にこれまでの傾向とは異なる急激な変位を初めて捉えた。このとき武甲山では台風による集中豪雨 (連続降雨量 403.5 mm) を受けており、最も挙動の大きかった APS7 では変位速度は -1.34 mm/day に達した。この台風以降、武甲山残壁の西側では豪雨時に一時的な短期変位が計測されるようになり、2011 年台風時にも急激な変位が認められた。

また前 31 日間の変位速度に加えて、より長期的な傾向を捉えるために、同様の手法で前 365 日間の計測値から変位速度を算出している。各標高において最も変位が認められる計測点の前 365 日間変位速度の推移を Fig. 11 に示す。2000 年台初頭では年間変位速度は -0.02 ~ -0.05 mm/day 付近を推移していたが、急激な変位が計測された 2007 年の台風時には変位速度は -0.19 mm/day に達した。その後、2011 年の台風時にも大幅な斜距離差の短縮速度の上昇を計測した。前 31 日間での変位速度に比べて、365 日で行うため変位速度は平滑化されるが、それでもなお 2007 年、2011 年での台風時の斜距離差の短縮速度は他の期間に比べると際立って大きくなる。

上記の計測結果から APS 計測による斜距離差の短縮傾向は降雨との関係が強いと認識している。

3・2 GPS 計測結果

Fig. 12 に残壁基線解析を開始した GPS による 2010 年以降の水平方向変位図を示す。水平方向変位においては、全体として北方向の変位が大きい。ここで図中の各 GPS の変位量は 2010 年以降の設置開始からの累積変位量であり、各 GPS の測定開始時期はばらばらであることに注意されたい。変位量は残壁中心部より西側で相対的に大きく、APS での斜距離差の短縮が認められる領域とおおむね一致している。また、山頂南側に設置している GPS に関してはデータのばらつきはあるものの特定の方向への変位は現状では認められない。

次に残壁中央部～西部の変位が比較的大きい箇所の断面図を Fig. 13 に示す。残壁上部に設置している GPS7 では計測開始から北方向へ一定に沈下していることが読み取れ、GPS15 は GPS7 と同様に全体として北方向の沈下傾向を示し、2012 年に沈下角度が大きくなった。また、残壁下部に設置している GPS42、90

Fig.10 31 days displacement velocities at representative observation points of each level by APS and monthly rainfall at Mt. Buko.

Fig.11 365 days displacement velocity at Mt. Buko.

では残壁上部に設置している GPS と比較すると全体として沈下角度が浅く、水平に近い方向に変位を示している。さらに残壁下部の 970 mL に設置してあった GPS72 は現在では測定中止となっているが、計測結果では隆起する傾向が見られた。

3・3 APS と GPS 計測結果の比較

残壁という大きな対象物を計測する上では、その手法ごとに特有な誤差を持つことが考えられるため、APS および GPS の計測結果を比較し、各計測結果の信頼性を確認する。Fig. 14 に代表的な計測点の変位量を時系列で示す。GPS の計測結果については残壁内基線解析へと変更した後の高精度な座標を APS のトータルステーション方向への斜距離変位量に換算したものを使用する。ここにあげた計測点の斜距離差の短縮傾向は APS と GPS ではほぼ同様であるが、計測点 15 に関しては変位量に乖離が見られる。

Fig. 15 に Fig. 14 の計測結果を用いて横軸に APS の斜距離差変位量、縦軸に GPS の斜距離に換算した変位量を対比したものを示す。その結果、両者の計測結果は非常に高い相関を持ち、変位の傾向が一致していることがわかる。このことから両者の計測結果は互いに精度が高く、信頼性が高いことが確認できる。

計測点 15 に見られるように回帰係数が 1 に一致しない理由としては、APS15 の基準 APS と GPS15 の基準 GPS が同一箇所を利用していない為、各基準点で生じるわずかな変位が影響し、計

Fig.12 Horizontal displacement vectors obtained by GPS measurement on a plan view of the rock slope.

Fig.13 Northward and vertical displacement vectors obtained by GPS measurement on a cross sectional view of the rock slope.

測点の変位ベクトルに影響を及ぼしていると考えられる。

3・4 水準測量による計測結果

2009年以降の水準測量で最も変位が認められる計測点の計測結果を Fig. 16 に示す。この図中では水準測量の計測結果を丸印で表しており、計測点 7, 42, 43 の結果は GPS の基準点と同一の点を基準とした変位量である。計測点 15 の結果については同レベルに GPS の基準点がない為、最も変位の少ない計測点 9 を

基準としている。

残壁 1,200 mL では残壁西側の計測点 7 での沈下量が最も大きい。1,090 mL では計測点 14, 15 での沈下が大きく、1,050 mL では 27, 28, 29 で最も沈下が大きい。いずれも残壁中央部よりやや西部の領域に位置しており、1,090 mL, 1,050 mL で沈下の認められる箇所は 1,200 mL で最も沈下していた計測点 7 から残壁の造成方向にほぼ垂直の方向に位置している。現状では残壁の上部

Fig.14 Time series comparison of slope distance differences measured by APS and GPS.

Fig.16 Vertical displacements measured by GPS and leveling —GPS results are presented by lines, leveling results are presented by symbols.

から中間部では沈下傾向が見られるのに対して、1,000 mL で得られた計測結果では全体として隆起している傾向が確認されている。計測点 43 を中心にして隆起していることが確認されているが、隣接している計測点 42 では沈下している結果が得られた。

沈下傾向は残壁上部に行くにつれて強くなり、残壁下部に行くにつれて沈下傾向は弱くなる。これに対して1,000 mL では隆起傾向が確認され、一部残壁上部に比べて弱い沈下傾向が確認された。この結果は GPS による計測結果に調和的である (Fig. 13 参照)。

3・5 GPS (Z) と水準測量の比較

3・3 と同様に GPS の Z 座標の計測結果および水準測量の結果を比較し、各計測結果の信頼性を確認する。Fig. 16 には水準測量の計測結果のほかに、GPS による鉛直方向変位の時系列変化についても実線で示している。どちらも年周期的に変動はしているが概ね変位の傾向は一致していることが確認できる。

そこで Fig. 16 の計測結果を用いて、横軸に水準測量結果を、縦軸に GPS の Z 成分の結果をプロットして対比した (Fig. 17 参照)。GPS の Z 変位データは 2010 年 11 月以降の残壁内基線解析に移行した後のデータを使用し、水準測量を実施した月の月平均データを用いている。水準測量は APS のような誤差を軽減するデータ処理を行っていないため、データのバラツキが大きい、変位の傾向は一致していることが確認できた。ただし計測点 42

Fig.15 Comparison between slope distance displacements obtained by GPS measurements and measured by APS.

Fig.17 Comparison between vertical displacements of GPS measurement result and leveling survey displacements.

では沈下量が少ないため、この比較からは相関の有意性は確認できない。

3・6 挿入式傾斜計による計測結果

2004 年以降に、M2004-1, 2 および M2007 の 3 箇所計測を行い、残壁内部の変位状況を評価したところ、主に地層境界周辺部で変曲区間を確認した。1,090 mL で計測した M2007 の結果を Fig. 18 に示す。2009 年 1 月に 51 m 以深がガイド管変形により計測不能になったため、それ以降は深度 51 m までの計測結果を表している。地層境界付近の深度 31.5 m において、南北方向の変曲点が認められる。

この計測結果を踏まえ、秩父残研では 2010 年に、地層境界周辺部のすべり面を想定した場合、その平面的な広がりを確認するために、新たに計 3 箇所 (M2010-1 ~ 3) で計測を開始した。この内、M2010-1 は変位の中心部に、M2010-2 と M2010-3 は変位の東西境界付近にそれぞれ配置した。これらの測定の結果、1,050 mL で計測した M2010-2, 3 では顕著な変曲点は認められなかったが、1,010 mL で計測した M2010-1 では Fig. 19 に示すとおり、石灰岩中 (深度 31.5 m 付近) に変曲箇所が確認できた。この変曲箇所のボーリングコア観察の結果では、亀裂が多く、RQD も低い岩盤不良部が約 3 m 存在することが確認された。

Fig.18 NS displacement measured by Insertion-type Borehole Inclinometer (M2007).

Fig.19 NS displacement measured by Insertion-type Borehole Inclinometer (M2010-1).

3・7 GPS と挿入式傾斜計による計測結果の比較

M2004-1, 2 および M2007 では、GPS の残壁内基線解析を開始した同時期にガイド管が閉塞して計測不能になったため、残壁表面変位との関連を詳細に評価できなかった。

M2010-1 では石灰岩中に変曲箇所が確認できたため、GPS の結果と比較して、測定結果の解釈を行った。M2010-1 の深度 28 m (変曲点の上部) における測定結果と GPS90 水平変位の計測結果を Fig. 20 に示す。地表面変位と深さ 28 m 地点の変位が同程度に推移していることから、28 m 以深の岩盤内変位が地表面変位に影響していることが分かる。28 m 以深の変位の内、深度 28 m ~ 32 m の区間変位に限れば、地表面変位の 75% 程度の変位が認められた。さらに、GPS90 の鉛直変位には、2011 年 9 月前後から沈下傾向 (約 10 度程度北傾斜) が生じ始めたことから、この期間前後に当該区間にせん断変位が生じてきた可能性が疑われた。

この結果および本特集号の青山らの論文で述べている調査坑道内の石灰岩内の亀裂挙動結果から、残壁上部では地層境界周辺に挙動要因が認められるものの、残壁下部においては、石灰岩内にも残壁挙動に影響を及ぼす不安定な岩盤ブロックが存在することが想定された。したがって、宇根鉱山では当該石灰岩内の亀裂または想定せん断面対策として、鋼管杭工事、あるいは盛石工事による安定化対策工事⁸⁾を施工している。

4. モニタリング結果から見た対策工事の効果

APS のモニタリング結果計測からは降雨と残壁の挙動には関係性が見られ、また GPS の計測結果からは残壁の挙動メカニズムの概要が計測結果から得られた。そこで 2013 年以降、残壁の対策工事として武甲山三社で各社鉱区内における施工を開始した。対策工事の施工内容の詳細については近藤他⁸⁾に述べられているため、この章では対策工事直前の 2012 年度および、対策工事の効果の得られた 2013 年以降のモニタリング結果について触れる。

2012 年度以降の APS の前 31 日間の計測結果から変位速度を Fig. 21 に示す。この図から通常時の変位速度についても徐々に変位速度が 0 に近づいていることが分かるが、特に降雨時における収縮速度の増加が少なくなっていることが読み取れる。そこで APS7 における年間変位量をその年度での年間降水量で除した雨量あたり変位量を算出し、各年度で比較した (Fig. 22 参照)。すると各年度の年間降水量は 1,500 mm 前後と変化が少なくにもかかわらず、雨量あたり変位量は毎年減少を見せており、2012 年度の -0.022 に対して、直近の 2016 年度では約 4 分の 1 の -0.005

Fig.20 Horizontal displacements measured by GPS90 and Insertion-type Borehole Inclinometer (M2010-1, 28 m depth).

という結果になっている。

また、Fig. 9 と同様の手法で 2016 年度の変位箇所の分布を Fig. 23 に示す。Fig. 9 と比較すると、秩父残壁で行っている残壁管理基準⁹⁾による変位速度のフェイズ区分での、フェイズ 2 (-0.02 mm ~ -0.10 mm/day) の領域が小さくなり、残壁上部の APS7 の周囲と残壁下部の APS41 の周辺にのみ、この領域を残している。

5. まとめと今後の課題

武甲山では残壁表面変位の計測に APS、GPS や水準測量などの手法を用い、20 年間以上の長期に渡って計測してきた。現在造成中の残壁は幅約 2 km、高さ約 400 m と長大である。そのためモニタリングを行う上で周囲の環境の影響を受けやすく、残壁の挙動という精密なモニタリングを行うことに課題があった。そこで APS においては各計測点で計測した斜距離から変位量の小さな基準点の斜距離を引いた斜距離差を算出し、気温の変化に伴う測定誤差を小さくすることができ、高精度な計測が可能となった。この斜距離差を用いて変位速度を算出し、残壁管理に役立てている。また GPS においては残壁に基準点を設ける残壁内基線解析を行うことで、精度の高い計測を行っている。これらの手法を取り入れることで計測データの精度が向上した。

秩父残壁では APS、GPS や水準測量といった複数の計測手法を取り入れることで、相互の計測結果を比較し、お互いの計測結果の信頼性を確認できるシステムを構築している。また、これらの計測手法は視界不良や電源の遮断といった外的要因によって、データの欠損が生じることがある。そのため複数の手段で計測す

Fig.21 31days displacement velocities measured by APS and 31days rainfall at Mt. Buko during FY2012 and FY2016.

Fig.22 Changes of annual displacement over annual rainfall.

ることでこれらの欠点を相互に補うことができる。

今後残壁の規模の増大に伴い、監視対象範囲が広がる。したがって適宜適切なモニタリング箇所の選定、増設および手法の選択を行っていく必要がある。また、秩父残研でモニタリングしている手法は全て離散点で取得したデータとなっている。先に述べたように面積の増大につれて、より効果的にデータの取得を行うために、近年開発が進んでいるレーダーを利用した面的なモニタリングシステムの導入も検討する必要がある。このような面的な監視は現在挙動の確認できている箇所以外の新たな挙動や計測点の隙間の変位を確認できるため、より詳細な残壁モニタリングが行えることが期待される。

以上のようなデータの精度向上および連続的な監視により、残壁挙動の予測や各種対策工事の検討を行うことができ、効果をあげている。そのため、今後も継続して精度の高いデータの取得に努め、効果的な対策の検討に取り組んでいく所存である。

謝辞 本論文は、秩父残壁研究会に係った多くの技術者によって、20年以上の長期間に渡って残壁挙動のモニタリングデータを取得し、データの蓄積、分析、考察がなされてきた成果をまとめたものである。平成3年より約23年間、秩父残研の座長としてご指導頂き、武甲山残壁のモニタリングに踏み切られた東京大学の山口梅太郎名誉教授をはじめ、初代座長である東京大学の下村弥太郎名誉教授、現座長である東京大学の山富二郎名誉教授には心より感謝申し上げます。データの取得方法の改善や考察するにあたってご指導頂いた先生方、ご尽力された秩父残研の諸先輩方、関係官庁の方々には深く御礼申し上げます。

Fig.23 A contour map of measured displacement in FY2016.

References

- 1) 秩父地区残壁研究会：石灰石，**258** (1992)，61-77. [Chichibu chiku zanpeki kenkyukai: Sekkaiseki, **258** (1992)，61-77.]
- 2) 秩父地区残壁研究会：Journal of MMIJ, **112** (1996)，665-669. [Chichibu chiku zanpeki kenkyukai: Journal of MMIJ, **112** (1996)，665-669.]
- 3) 川畑一洋，伊藤岳志，頼所幹宏：石灰石，**297** (1999)，20-27. [K. Kawabata et al.: Sekkaiseki, **297** (1999)，20-27.]
- 4) N. Shimizu, H. Ono, H. Kondo and Y. Mizuta: Journal of MMIJ, **112** (1996)，283-288.
- 5) N. Shimizu, S. Koyama, H. Ono, K. Miyashita, H. Kondo and Y. Mizuta: Journal of MMIJ, **113** (1997)，549-554.
- 6) 菅原勝彦：石灰石，**307** (2000)，43-62. [K. Sugawara: Sekkaiseki, **307** (2000)，43-62.]
- 7) S. Nakashima, T. Namba, S. Itagaki, H. Soda, T. Iwasaki, N. Shimizu and M. Ono: Journal of MMIJ, **130** (2014)，479-487.
- 8) M. Kondo, T. Nakatani, K. Mikami: Proc. MMIJ Annual Meeting (2016), Vol.3, No.2, [1112].
- 9) T. Sugiyama, K. Mikami, T. Wakisaka, J. Yamatomi, K. Kawazu: Proc. MMIJ Annual Meeting (2016), Vol.3, No.2, [1110].