武甲山残壁における地下水位挙動と 残壁変位に与える影響*

近藤 めぐみ¹ 小澤 教良²
青山 秀夫³ 矢野 和文⁴

Relationship between the Groundwater Fluctuation and Deformation Behavior of Rock Slope at Mt. Buko

by Megumi KONDO^{a*}, Noriyoshi OZAWA^b, Hideo AOYAMA^a and Kazufumi YANO^a

a. Mitsubishi Materials Corporation, 1-3-2 Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8117, Japan

(*Corresponding author, E-mail: mkondo@mmc.co.jp)

b. Ryokoline Industry Co., Ltd., 10-2 Kanda-Tomiyamacho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0043, Japan

In the present study, the relation between groundwater fluctuations on a rock slope and the displacement of the Mt. Buko rock slope is analyzed. In general, the strength of a rock mass behavior is subject to the influence of water. Rock slope stability consequently declines due to rainfall, especially in limestone terrains, where the rain permeates quickly into the rock mass. The Une Mine has therefore drilled a large number of drainage holes, and installed monitoring devices to measure the groundwater level, in order to analyze the impact of groundwater level fluctuations on the displacement of the rock slope. In addition, the understanding of groundwater fluctuations within a rock slope is important for the purpose of obtaining appropriate locations to drill holes, promoting a more effective drainage.

Analysis of a long-term trend in groundwater level fluctuation, especially during and after rainfall, showed that areas with higher groundwater levels were linked to the geological setting of the rock slope, and were probably related to the pre-mining topography of Mt. Buko. This study also revealed that groundwater levels have clear correlations with the displacement of crack gages measured in the observation drift, where the lowering in groundwater levels correspondingly leads to a reduction in the rock slope displacement.

KEY WORDS: Slope Stability, Limestone, Groundwater Behavior, Rainfall, Crack Gage

1. 緒 言

菱光石灰工業の宇根鉱山は武甲鉱山の武甲鉱山、秩父太平洋セメントの三輪鉱山とともに武甲山で石灰石の採掘を行っている。採掘にともないカバーロック型の長大な最終残壁が形成されており、安定性の維持管理を目的として、残壁モニタリングを実施してきた。代表的な残壁計測として APS (Automated Polar System)、GPS (Global Positioning System) があるが、これらの地表面計測で台風襲来時に宇根鉱山の残壁の一部で一時的に変位が増加する傾向が確認できた¹⁾。これを受け、宇根鉱山では対策工事として水抜きボーリングを実施する一方で、残壁内に水位計を設置し、岩盤内の地下水挙動の把握に努めてきた。降雨時に変位の増加が確認できることから、岩盤に浸透した降雨が何らかの影響を与えていることは推測できるが、広大な残壁では変位の要因となる地下水位ポイントを特定することが困難である。そこで、複数の地下水位計測ポイントを設けて、その地下水位ポイントを特定するとともに地下水位が残壁の変位に影響を及ぼす要因を考察すれば、より効果的な対策工法を検討することができると考えた。

*2017 年 9 月 21 日受付 2017 年 12 月 26 日受理

1. 正会員 三菱マテリアル株式会社 技術統括本部資源部

2. 正会員 菱光石灰工業株式会社

3. 正会員 三菱マテリアル株式会社 技術統括本部資源部

4. 正会員 三菱マテリアル株式会社 金属事業カンパニー資源技術部

[著者連絡先] FAX: 03-5252-5289

E-mail: mkondo@mmc.co.jp

キーワード：残壁の安定性、石灰岩、地下水挙動、降雨、亀裂変位計

また宇根鉱山では残壁内に調査坑道を掘さくし、岩盤内部の計測も実施してきた。その中で、調査坑道内の亀裂に設置した亀裂変位計によって降雨にともなう明瞭な変位挙動が捉えられ、その亀裂変位が地表面変位と明確な関係性を有することが判明した²⁾。

以上の背景から、本研究では岩盤内の地下水位挙動の詳細を調べるために、複数の計測ポイントにおいて経時的に取得した地下水位データを分析し、降雨時における地下水位変動のメカニズムに関する考察を行った。さらに、各計測ポイントの地下水位と坑道内の亀裂変位速度の関係について調べることで、地下水挙動が残壁変位挙動に与える影響についての検討を行った。

2. 武甲山周辺の水理状況および水理計測の概要

2・1 秩父地域の降雨状況

Fig. 1 に、武甲山南側のアメダス（浦山）における 2000 年からの降水量を示す。図に示されるように、武甲山周辺の最高年間降水量は 2001 年の 2254 mm、最低年間降水量は 2003 年の 1472 mm であり、年間降水量は概ね 1600 mm 前後で推移している。

秩父地方は、夏に雨が多く冬に乾燥する関東で一般的な太平洋側気候に属している。武甲山は標高が高く、冬季は採掘切羽で降雪があるため、本論文では 3 月～11 月を雨期、12 月～2 月を乾期としている。また、7 月～10 月は台風の通過により集中した降雨量を記録することもある。

2・2 武甲山の地質

武甲山の全体の地質状況は、秩父残研の地質小委員会によって

Fig.1 Record of annual and monthly rainfall of Mt. Buko area.

石灰石 (2001) に詳細が記載されている³⁾。ここでは特に地下水位に影響が大きい『互層帯』について特記する。

宇根鉱山の各調査坑道における下盤境界部には、石灰岩および緑色岩類が混在する岩相が見かけ厚さ数 cm ~ 10 数 m で分布しており、秩父残研では互層帯と呼称している。互層帯内の岩相は様々ではなく、また平面的な連続性に関しても宇根鉱山残壁内に広く分布しているに対し、武甲鉱山内にはわずかな区域に確認されるのみである。Fig. 2 (a) は一例として、1000 mL における互層帯の分布範囲を示している。宇根鉱山残壁内の互層帯は石灰岩と整合関係にあるものと考えられるが、1010 m 坑道内では互層帯内部に破砕帯を確認している。このように互層帯は局所的に分布を示し、また岩相も様々でないことから、互層帯の成因については初生的な堆積構造によるものか、断層等の影響に伴い分布するものか、明確な結論は得られていない。

上記のとおり互層帯中の断層構造、あるいは互層帯の連続性を詳細に把握するには至っていないため、便宜上、Fig. 2 (b) に示すようにケース①～④の前提条件および定義を設定し、地質的な見地から互層帯を解釈している。この定義に基づいて岩相を石灰岩／互層帯／緑色岩類の3つのゾーンに分類する。

①複数の岩相が混在する区間において、互層帯の下部境界を定めた上で、当該区間の深部から浅部方向に向かって石灰岩の割合が70%を下回った石灰岩と非石灰岩の境界を互層帯の上部境界とする。ただし、周辺の試錐データ等から混在する岩相が、局所的で不連続な岩体であると判断される場合には、上記①の基準外とし、“挟み”とみなす。

②なお、石灰岩には泥質石灰岩ならびに石灰質泥岩は含めない。

③また、上記①の基準では“互層帯”とならない区間でも、周辺の試錐データ等を考慮して“互層帯”とみなす場合がある。

④石灰岩中の空洞および石灰岩の粉化した粘土、地表部等から流入した粘土については石灰岩に含めるものとし、地層境界部に存在する空洞および粘土については石灰岩には含めないものとする。

2・3 武甲山の水理状況

武甲山の地下水調査は、1990年から始まり、武甲鉱山の330mL坑道を利用して、南北方向における水理状況を計測していた。また武甲山南斜面の下盤側湧水点の調査および浸透流解析により、広域的な地下水状況の評価も行っていた。これらの結果を考慮すると、武甲山の地下水位はFig. 3のように、主に下盤の地層境界近傍に存在すると推測される。また浸透流解析の結果からも、武甲山の地下水位は概ね下盤内にあり、山頂から残壁北側に流れる傾向があることが確認されている。また、残壁内に掘さくした調査坑道において北落ちの亀裂が卓越していることが確認

(a) Distribution of intermixed zone at 1000mL in the rock mass

(b) Definition of intermixed zone based on drilling record

Fig.2 Lithological occurrences of geological boundary (intermixed zone of limestone and underlying greenstone- 'Gosotai').

Fig.3 Schematic drawing of groundwater in the rock mass (N-S section).

Table 1 Results of permeability test on limestone and greenstones.

岩盤	試験区間長 (m)	試験区間数 (区間)	ルジオン値 (Lu)	透水係数 (cm/sec)
石灰岩	78.7	12	24.5	4.12×10^{-4}
緑色岩類 A	85.0	15	0.354	4.18×10^{-6}
緑色岩類 B	15.0	3	1.98	2.62×10^{-5}

されたことから、これらの亀裂も水の流れに影響していると考えられる。

以上の結果は1990年頃の地下水調査および浸透流解析に基づいたものであるが、その後採掘が進行しても武甲山南側の湧水点に変化が見られないことから、武甲山全体の地下水位は大きく変化していないと考えられる。その一方で、2011年以降に残壁付近で行われた地下水位計測結果から、下盤以外にも宙水と呼ばれる独立した水位系が存在することが確認された。これらの計測

(a) Air photograph of full view of Mt. Buko

(b) Plan view enlarged of Une Mine

Fig.4 Location of the groundwater monitoring points (plan view).

データおよびその考察に関しては詳細を後述する。

2・4 残壁内部の透水性

残壁内部の透水性を評価するために実施したルジオン試験の結果を Table 1 に示す。表より、石灰岩は緑色岩類と比較して透水係数が大きいことがわかる。これは石灰岩に多く存在する微細な亀裂の影響であると考えられる。一般に、石灰岩のような亀裂性岩盤は亀裂の状態（数やサイズ）が透水性に大きく影響することが知られており、これまでも様々な研究が行われてきた^{4,5)}。実際に宇根鉱山内の調査坑道の地質スケッチから、ルジオン試験では評価できないようなスケールの大きい亀裂や岩の割れ目が確認されている。これらの亀裂では降雨時に多量の湧水が確認されていることから、岩盤内の主要な水みちとなっていると推察される。また、降雨時に石灰石採掘切羽に水溜りができないこと、ボーリング掘さく時にほぼ全てのボーリング孔で逸水状態になることなどを総合的に評価すると、武甲山の石灰岩は透水性が高いと推測できる。

以上の結果から、現場レベルのスケールでは、石灰岩は Table 1 で示したルジオン試験値以上の大きな透水係数を示すと考えられる。一方、下盤の緑色岩類に関しては石灰岩と比較して卓越した亀裂が少ないことから、透水係数は石灰岩より低いと考えられる。なお、互層帯は連続性に乏しく、コアレベルでは透水係数を定義できないことから、ルジオン試験は実施していない。

2・5 地下水位の計測方法

宇根鉱山では、降雨時に残壁表面変位が確認されてから、残壁挙動と地下水位の変動との関連を確認するため、残壁内において地下水位計の増設を行ってきた。地下水位を計測する機器として、

Table 2 Summary of the groundwater monitoring points.

名称	施工標高 (mL)	石灰岩区間 (m)	互層帯区間 (m)	下盤区間 (m)	水位計位置 (mL)
M2010-2	1050	53	0	37	970
M2010-3	1050	34	18	18	990
UN88	1010	24	10.2	35.8	987 (石灰岩)
					976 (互層帯)
					940 (下盤)
UM111	1000	100	—	—	920

Fig.5 Location of the groundwater monitoring points (section).

間隙水圧計と投げ込み式水位計の2種類がある。間隙水圧計の特徴は特定区間にパッカーを設置し水圧を測定することで、区間毎の地下水位状況を把握することが可能である。一方で投げ込み式水位計は孔口を開放した状態で圧力センサーを垂直に掘さくしたボーリングに設置し、観測孔の水面の高さを測定するものである。この計測では複数の流入、流出系から成り立つ全体的な地下水位挙動を捉えている。

Fig. 4 および Fig. 5 に計測器の設置箇所を示す。水圧センサーは、間隙水圧計、水位計ともに東京測器社の KPD-PA を使用している。計測精度は 20 mm であり、1 時間毎にデータを取得している。本論文で記載されている水位計に関しては、UN88 のみが間隙水圧計、M2010-2, M2010-3, UN111 は投げ込み式水位計である。また残壁内の降水量は 1000 mL に設置した転倒ます式雨量計にて観測を行っている。測定頻度は 1 時間毎で、測定精度は 0.5 mm である。また Table 2 に各水位計の地層と水位計位置を示す。

3. 地下水位の計測結果

3・1 短期的な地下水位変化（間隙水圧計の計測結果）

Fig. 6 に、2013 年 6 月の降雨時における間隙水圧計 UN88 の計測結果を示す。図では間隙水圧計から得られた圧力 (Pa) を水頭 (m) に変換し、標高レベルで記載している。本結果より、異なる岩盤地層において下記のような特徴が窺える。

- 石灰岩は互層帯や下盤と比較して、降雨に対する反応が早いことが確認できる。また降雨前の地下水位と最大地下水位差を比較すると、石灰岩が +6.98 m、互層帯が +5.52 m、下盤が +4.39 m となり、間隙水圧の上昇幅も石灰岩が他よりも大きい。これらの結果は、石灰岩における透水性が高いことを示している。宇根鉱山ではボーリング孔内の湧水状況を確認するために、ボアホールビデオによる孔内観察を行ってきたが、この観察からも石灰岩内では小さな空洞や割れ目からの湧水が確認されている。したがって、地下水流動が複数の水みちに支配されているものと考えられる。

・互層帯は石灰岩と比較して水位が上昇し始めるのがやや遅く、緩やかに上昇、下降する傾向がある。互層帯は石灰岩と下盤が混在した状態と定義しており、挟みとして粘土を含んでいることが多い。この粘土層の影響により、強い降雨によって一時的に間隙水圧が上昇し、排水に時間を要すると考えられる。降雨前と3日後の6/29における地下水位を比較すると、石灰岩は降雨前が988.57mで3日後は989.10mであり、+0.53mまで低下している。それに対し、互層帯は降雨前が987.64mで3日後が988.67mと水位差は+1.03mであり、間隙水圧が低下するまでに時間を要していることがわかる。しかしながら互層帯は側方への連続性が乏しく、その存在範囲を定義することが難しい。実際にこれまで観測したデータで互層帯に着目すると、計測点によって挙動が異なり、互層帯全てにあてはまる水位傾向を包括的に評価することは困難である。

・下盤の間隙水圧は2, 3日かけて緩やかに上昇している。またその上昇幅も石灰岩や互層帯と比較すると小さい。これは下盤内には水みちとなる亀裂が少なく透水性が低いことを示している。この透水性の違いから、地表面から石灰岩を通過して浸透する降雨水が下盤まで浸透する可能性は少ないと考える。

以上の結果から、各層内の地下水位は独立したものと考えられる。このように地下水は各地層で個別的な流動を示すと考えられ、石灰岩や互層帯に Fig. 3 に示した地下水位と異なる宙水が存在していることが推察される。

3・2 短期的な地下水位変化（投げ込み水位計の計測結果）

Fig. 7 に、2013 年 6 月の降雨時における投げ込み式水位計 M2010-2 および M2010-3 の計測結果を示す。まず M2010-2 の計測結果に着目すると、降雨前は下盤内の 994.7mL に地下水位が存在したが、降雨により地層境界付近の 997.8mL まで上昇していることがわかる。これは透水性の高い石灰岩から降雨水が流入し、観測孔内の水位が急上昇したためと考えられる。水位上昇のピークを過ぎた後は、995.6mL 付近で地下水位が停滞し、降雨前よりも高い地下水位が長時間持続する。

一方、M2010-3 に着目すると、降雨時の水位変化は M2010-2 と比較して緩やかであることがわかる。また水位の上昇幅も小さ

く、この降雨に関しては水位の最大値が 998.96mL と互層帯付近の少量の変動で収まっている。また降雨後の水位変化も緩やかであることから、下盤と互層帯の透水性が小さいことが本結果からも示唆される。

以上のように、降雨時における短期間の地下水位変化は場所によって異なり、周囲の地質状況の影響によって複雑なものとなることがわかった。

Fig.6 Results of fluctuation of groundwater level (UN88).

Fig.7 Results of fluctuation of groundwater level (M201-2, M2010-3).

Fig.8 Long term fluctuation of groundwater level (M2010-2, M2010-3, UN111).

3・3 長期的な地下水位変化

Fig. 8 に、投げ込み式水位計 M2010-2, M2010-3 および UN111 による計測で得られた長期的な水位変化を示す。Table 2 に示すように M2010-2 および M2010-3 の 2 つの水位計の観測孔は下盤内まで掘さくを行っているのに対し、水位計 UN111 は石灰岩中に 100 m 削孔したボーリング孔を計測孔として使用している。

まず M2010-2 および M2010-3 に着目すると、降雨時に水位が一時的に上昇する一方で、冬季に徐々に地下水位が低下する傾向を読みとることができる。武甲山山頂では 12～2 月は積雪期となるため、冬季は残壁表面からの水の浸透は極めて少ないと考えられる。したがって、この期間の地下水位の変動は降雨に由来しないものと考えられるが、冬季の計測データより下盤内で地下水位が変動しており、この低下傾向も計測地点によって異なることがわかる。

一方 2013 年 3 月から計測を開始した水位計 UN111 の計測結果に着目すると、降雨がない場合の水位は水位計設置深度の 920 mL 以下に存在していることがわかる。しかしながら、降雨時には地下水位が一時的に急上昇した後に急降下する傾向があり、水位上昇は現在計測中の地下水位計で一番大きい。これは水位計 UN111 を設置したボーリング孔付近が、降雨時に集水しやすい地形であることに加えて、石灰岩の大きな透水性によるものであると考えられる。

以上のように、長期間の地下水位の変化も周囲の地質状況のみならず、季節や降雨状況を反映したものであることがわかる。

4. 降雨量が地下水位に与える影響

4・1 さまざまな降雨状況における地下水位変化

3. で示したように、同じ残壁内に設置した水位計でも設置位置により水位変化の傾向が異なる。その要因は地下水位の偏在性、周辺岩盤の透水性の違い、地層など多岐にわたると考えられる。ここではさまざまな降雨状況（降雨強度、継続時間）において、各位置の水位の上昇・下降の傾向を比較することによって、周囲の岩盤の透水性や地質・地形が地下水位に与える影響について検討した。

地下水位の測定期間中から、地下水の上昇が確認できた降雨を 3 つ抽出し（2012 年 6 月、2013 年 9 月、2013 年 10 月）、それぞれの期間の降雨強度（mm/h）と地下水位の関係を調べた。Fig. 9 に、各豪雨期間における降雨強度と M2010-2 および UN111 による地下水位の計測結果を示す。2012 年 6 月の降雨時は UN111 の設置前であるため M2010-2 の結果のみを示している。

まず M2010-2 の結果に着目すると、いずれの降雨期間でも、降り始めからの降雨量が数 10 mm 程度では地下水位の上昇が発生しないことがわかる。この要因としては降雨が岩盤に浸透するタイムラグが考えられる。数 10 mm の降雨が単独であった場合でも地下水位に変化がないことから、残壁そのものが保水力や排水能力を保有しており、岩盤が完全飽和状態になった段階で地下水位の上昇が始まると考えられる。降雨強度および継続時間と地下水位変化との関係は明確ではないが、Fig. 9 の結果から判断すると、20 mm/h 以上の降雨が 4、5 時間継続すると急激に地下水位が上昇することが確認できる。

次に UN111 の計測結果に着目する。Fig. 8 で示したように UN111 は降雨がない場合は水位計の設置深度以下に地下水位が落ち、水位上昇が大きいことを述べたが、Fig. 9 から降雨時は M2010-2 より少量の降雨でも水位が上昇することが再度確認できる。また同じ降雨で比較した場合、水位の上昇幅は M2010-2 より大きく、上昇のタイミングが早い。これは UN111 周辺の集水しやすい地質状況や石灰岩の透水性の良さを示している。

(a) June, 2012 (Total 167.0 mm, Max 49.0 mm/h)

(b) September, 2013 (Total 191.0 mm, Max 22.5 mm/h)

(c) October, 2013 (Total 192.5 mm, Max 29.0 mm/h)

Fig.9 Relations between groundwater level and intensity of rainfall.

以上から、降雨時の地下水位変化は周囲の地質状況だけでなく降雨状況（降雨強度、継続時間）にも影響を受けることがわかる。

4・2 地下水位の上昇および下降速度

台風のような豪雨の場合、通常の降雨以上に残壁変位が大きく上昇する傾向がある。この際、地下水位も通常の降雨より速く上昇することから、豪雨時の特異的な地下水状況が残壁変位に影響を与えている可能性がある。そこで水位計（M2010-2 および UN111）で計測した豪雨時のデータから水位の変化速度（m/h）を求め、降雨状況および地質状況との関係について考察した。

Fig. 10 (a) に、Fig. 9 で示した 3 回の降雨期間における水位計 M2010-2 の計測結果から求めた水位変化速度（m/h）を示す。図では地下水位が最大になった時刻を 0 h とし、横軸が負の領域を地下水位の上昇時、正の領域を地下水位の下降時として表している。また、Fig. 10 (b) に M2010-2 の計測データから求めた水位変化速度と地下水位の関係を示す。

Fig. 10 (a) に示されるように、水位が上昇する時は、降雨開始から徐々に水位変化速度が増加する。2012 年 6 月、2013 年 9 月、

(a) Change of velocity of fluctuation of groundwater with time

(b) Relations between velocity of fluctuation and groundwater level

Fig.10 The result of measurements of groundwater (M2010-2).

2013 年 10 月の降雨で変化が異なるが、この水位変化速度は、降雨状況に依存する部分が大きく、豪雨ごとに異なる経路をたどることがわかる。Fig. 9 の降雨強度のグラフに示されるように降雨状況が異なり、例えば、2012 年 6 月の降雨では最大地下水位に至る 5 ～ 6 時間前から増加が観られ、3 時間前後で急激に増加して、水位変化速度は最大 5.2 m/h に至る。このような大きな水位変化を示したのは、2012 年 6 月 18 日 0 時から短時間に降った降雨強度 49.0 mm/h の雨によって引き起こされたものである。一方、2013 年 9 月は不連続な降雨、2013 年 10 月は降雨強度 10 mm/h 以下の雨が継続的に降ったことが観測されており、その結果、両期間の水位変化速度が最大値に至るまでの時間が長くなったと推察される。地下水位が最大値を迎えた後は水位変化速度が負となり、地下水位が下降を始める。また、いずれの降雨期間においても水位の最大値を示した 3 ～ 5 時間後に極小値を迎え、その後水位変化速度は 0 m/h に収束することがわかる。

Fig. 10 (b) に示される M2010-2 の水位変化速度と地下水位の関係より、いずれの降雨期間においても、水位が 1003 ～ 1004 mL 付近で水位変化速度が最大となることがわかる。その後、水位変化速度は低下するものの地下水位は上昇を続け、1010 mL 前後で最大水位に至る。また水位上昇時は、水位変化速度と地下水位の関係性を示す軌道の形は類似しているが、降雨強度の違いで異なる軌道をもって地下水位の最大値へ至ることがわかる。水位の下降時は水位上昇時よりも軌跡が一致していることから、下降速度は降雨条件にあまり影響されないと考えられる。

次に Fig. 11 (a) および (b) に示す水位計 UN111 の計測結果から求めた水位変化速度の時間変化および地下水位との関係に着目する。水位変化速度の算出方法および横軸の時間の定義は Fig. 10 と同様である。計測孔が石灰岩中に存在する UN111 の結果では、計測孔が下盤に到達している M2010-2 の結果と比較して、水位変化速度が大きく、地下水位との関係を表した軌跡も大きなものとなっている。これは前節で考察したように、設置位置の集水力

(a) Change of velocity of fluctuation of groundwater with time

(b) Relations between velocity of fluctuation and groundwater level

Fig.11 The result of measurements of groundwater (UN111).

が大きく、かつ周辺岩盤の透水性の大きい UN111 の方が降雨の影響を受けて変化しやすいことを示している。

4・3 旧地形および断層の影響

これまでに M2010-2 と UN111 の計測結果を比較して、UN111 の方が降雨の影響を受けて水位が上昇しやすい傾向があることを述べてきた。この要因として、武甲山の旧沢地形（採掘前に存在していた沢の位置）と W4 断層という特異な地形が影響すると考えられる。

武甲山の代表的な沢線系として、武甲鉱山内に存在する白沢と、宇根鉱山のアケビ沢がある。両沢はかつてグローリーホール採掘に利用され、その後ベンチカット採掘への移行に伴い斜坑が掘さくされた経緯がある。これらの斜坑からは降雨時に多量の湧水発生が確認されている。一方、その後施工された立坑は延命を目的に尾根内に掘さくした。これらの立坑からは出水が少ないことから、沢系の深部には水みち系が多く発達していることが推測できる。これまでの水抜きボーリング孔からも、旧沢地形周辺では降雨時に特に多くの出水が確認できている。Fig. 12 は採掘前の武甲山の地形図である。水位計 M2010-2 と UN111 はかつてのアケビ沢に位置することが確認できる。

また W4 断層は宇根鉱山宇遠地区から武甲鉱山内を貫き宇根鉱山中央部にかけて、西北西－東南東方向、北へ急傾斜の構造をもって分布する断層である。武甲山中央部（宇根鉱山東部）の 990 ～ 950 mL の最終残壁面には粘土混じりの破碎部が露出しており、当該箇所における W4 断層の幅は数 10 m に達していると想定されていたが、930 mL の坑道掘削、またはボーリング結果から、当該区域の W4 断層は、幅 1 m 未満の急傾斜を成す破碎部が複合（8 本程度）した断層群よりなる脆弱帯であり、一般にその破碎幅と程度は弱いことがわかった。当断層は石灰岩内に粘土を含んでおり、調査坑道の様子から断層部分は透水性が低く遮水壁のような働きをしていると考えられる。アケビ沢付近では沢線と直角をなすように、北側に W4 断層が横断している。したがって南側か

Fig.12 Pre-mining topography of Mt. Buko.

らアケビ沢に沿って流れてきた浸透水が W4 断層で遮断される。その結果、断層南側で地下水位が急激に上昇し、Fig. 13 に示す水位上昇イメージ線のようにになっていると考えられる。

4・4 水位上昇のメカニズム

これまでに述べてきた地下水位の考察から、武甲山残壁における水位上昇のメカニズムは下記のように考えられる。

- ・武甲山の地下水位は山頂から残壁側に向かう水頭勾配をもつ。
- ・石灰岩、互層帯、下盤がそれぞれ異なる挙動を示す地下水位を持ち、とりわけ亀裂が多い石灰岩層は透水性が高い。
- ・旧沢地形では降雨時の集水効果が高い。
- ・宇根鉱山ではアケビ沢とその北側に、断層粘土の挟みにより透水性が低い W4 断層がある。この断層が遮水壁のように働き、とりわけ水位が上昇しやすい状況になっている。

上記のような複数の要因が重なり、宇根鉱山残壁東側では水位が上昇しやすい状況にあると考えられる。

5. 地下水位と亀裂変位速度

武甲山ではモニタリングデータから降雨時に残壁表面変位が増加する傾向が確認できている。また宇根鉱山では残壁岩盤内の亀裂変位の計測を目的として、調査坑道の主要な亀裂に亀裂変位計を設置している。その中でも 1010 mL 調査坑道の互層帯付近に設置した No.5 亀裂変位計の測定結果は地表面変位と良い相関性を示していることから、残壁挙動を示す指標として使用できると考えている²⁾。加えて 4. で述べてきた通り、地下水位変化のほとんどは降雨に関連した短時間の変化であるから、降雨時の短時間の変位挙動を分析する必要がある。しかしながら APS、GPS などの残壁表面変位の測定手法では、天候によるデータ欠損が多く、計測精度も十分でないことから降雨中の短時間の地下水位分析には不適切である。そこで短時間の降雨時でも高精度のデータを連続して取得できる亀裂変位計が最適であると考え、亀裂変位計による変位速度の計測結果と地下水位との関係について検討を行った。なお、本論文で使用している亀裂変位計は東京測器社の KG-5A であり、計測精度は 1.4×10^{-3} mm、計測頻度は 1 時間毎である。

5・1 残壁上部の地下水位と亀裂変位速度の関係

Fig. 14 は、Fig. 9 で示した 3 回の降雨期間での、残壁上部に位置する水位計 M2010-2 による地下水位の計測結果と、No.5 亀裂変位計の計測結果から求めた亀裂変位速度を時間軸で示したものである。亀裂変位速度 (mm/h) は 1 時間ごとの変位量の差である。図より、全ての降雨期間において地下水位の上昇とほぼ同じタイミングで亀裂変位速度も上昇していることがわかる。また 3 回の

Fig.13 Influence of geologic structure on rising groundwater level.

降雨期間の内、2013 年 9 月のものが最も地下水位が上昇したが、亀裂変位速度も同様に最高値を記録している。このように、いずれの降雨期間においても地下水位と亀裂変位速度の密接な関係性が確認できる。先に述べたように、No.5 亀裂変位計で計測した変位と残壁表面変位との間に高い相関性が確認できていることから、地下水位の変化が残壁変位発生の因子であることは明らかである。

Fig. 15 は、Fig. 14 の結果に対して横軸の亀裂変位速度と縦軸の地下水位の関係を上昇時と下降時にわけて示したものである。亀裂変位速度と地下水位の関係は降雨ごとに異なるが、共通する傾向として以下のものがある。

- ・地下水位と亀裂変位速度のピークのタイミングが一致している。
- ・水位の上昇とともに亀裂変位速度が増加し、水位が高い状況ではその増加率も増加する。

以下では、上記の特徴を詳細に分析するために、地下水位の上昇時および下降時を区別して考え、地下水位と亀裂変位速度の関係性を考察する。

5・2 地下水位の上昇時における亀裂変位速度

Fig. 15 (a) に M2010-2 における水位上昇時の地下水位と亀裂変位速度の関係を示す。地下水位が約 1005 mL 以上では亀裂変位速度が急激に増加することがわかる。台風のような豪雨時には通常の降雨以上に変位が大きく生じることが報告されていたが、これは M2010-2 においては 1005 mL 以上に地下水位が上昇した状況であると考えられる。これより、急激な変位の発生を防ぐためには M2010-2 の水位を 1005 mL 以下に抑制することが重要である。

また降雨ごとの軌跡に着目してみても、地下水位の上昇に伴い亀裂変位速度が増加する傾向は共通するが、一定ではないことが読み取れる。例えば 2012 年 6 月と 2013 年 10 月の結果を比較すると、2012 年 6 月のグラフは全体的に右側にプロットされている。これは同じ地下水位の状況にあった場合でも、2012 年 6 月は亀裂変位速度がより高速であったことを示している。M2010-2 の地下水位が概ね 1005 mL に上昇した際に亀裂変位速度の増加が顕著となることから、この地下水位以上となるような雨を通常の降雨と区別して、『豪雨』とよび、以下の考察に使用する。

5・3 地下水位の下降時における亀裂変位速度

地下水位の下降時における地下水位と亀裂変位速度の関係を Fig. 15 (b) で示した。地下水位の下降時は亀裂変位速度がピーク値から落ちると、地下水位と亀裂変位速度の関係が線形になり、水位は 997 mL 付近に、亀裂変位速度は 0.02 mm/h 程度に収束する傾向がある。また、収束する際の傾きは降雨ごとに異なるが、

Fig. 14 Relations between velocity of crack gage displacement and groundwater level during rainfall.

降雨量が多く、かつ最大亀裂変位速度が大きい場合に小さくなる。グラフに示している3つの降雨では2013年9月の亀裂変位速度が0.165 mm/hで最大であったが、その時の傾きが133.1 m/mm/hであった。それに対し、2013年10月は最大変位速度0.106 mm/h、傾きは172.9 m/mm/hであった。Fig. 15 (b)に示す地下水位と亀裂変位速度の関係において傾きが小さいことは、同じ地下水位でも亀裂変位速度が大きく、降雨後もより高速な変化を維持していることを意味している。

以上の結果から、地下水位の下降時の変位速度は過去の変位履歴が影響している可能性が示唆される。5・2の結果と併せて考えると、水位上昇時と下降時で変位速度変化が異なることから、上昇時と下降時には地下水位が亀裂変位に及ぼす影響度合いが異なると考えられる。

5・4 残壁下部の水位と亀裂変位速度

Fig. 12に示したように、UN111は宇根鉱山の旧沢地形（アケビ沢）に位置し、豪雨時のみに水位が急上昇する水位計である。Fig. 16は豪雨時における地下水位上昇時のUN111による水位

Fig. 15 Relations between velocity of crack gage displacement and groundwater level (M2010-2).

測定結果と亀裂変位計の測定結果から得られた地下水位と変位速度の関係を示したものである。UN111はFig. 15 (a)で示したM2010-2の結果とは異なり、豪雨の様態にかかわらず、共通した軌跡を示すことが、M2010-2と異なる点であり、940 mLを超えたあたりから亀裂変位速度が増速し始め、950 mLを超えると亀裂変位速度の増加が著しいことがわかる。M2010-2観測孔は下盤まで掘削し、水位計は下盤内に設置している。そのため、当観測孔の地下水位は、複数の流入、流出系から成り立つため、降雨条件によって軌道がばらつくと考えられる。それに対し、水位計UN111は石灰岩内に掘止めた水位観測孔であり、M2010-2と比較して地下水位に変化を与える要因が少ないと考えられる。また、少雨の場合は地下水変化がなく、豪雨時のみの地下水位を捉えている点も、UN111の豪雨時における地下水位と変位速度の関係性が一対一となる理由と考える。この結果から、豪雨時に変位が増加する主要因は、水位計UN111周辺で表される残壁下部の地下水位が急激に上昇することであると推測される。

また、豪雨時に水位計UN111周辺で地下水位が急上昇するのは旧沢地形とW4断層の影響だと考えられる。Fig. 17に示す水位上昇量等値線図は、2014年の降雨時のデータを使って作成した、豪雨の水位上昇量を表している。この場合の水位上昇量は、降雨前の水位とピーク時水位の差を意味している。図より、豪雨

Fig.16 Relations between velocity of crack gage displacement and groundwater level (UN111).

時の変位発生要因と考えられる UN111 付近で水位上昇量が大きくなっており、Fig. 12 の旧地形図と比較すると、その中心が旧沢地形（アケビ沢）に位置していることがわかる。この図から旧沢地形の集水範囲が平面的にも広がりがあることが確認できる。水位計の設置数が少なく、等値線の精度の低さは否めないが、今後水位計を増設し、上昇範囲やメカニズム解明に努めていきたい。

このように残壁に影響を与える要因は、地下水位だけでも複数あることが示唆され、豪雨時に残壁下部の変位速度発生を抑制するためには UN111 付近の降雨時の水位上昇を 940 mL 以下に抑制する必要がある。

5・5 水位感度曲線

武甲山では、APS の変位速度を用いて残壁の管理基準を作成している。これは長期にわたるモニタリングの傾向から、残壁の変形挙動は変位速度で評価・管理すべきであると考えられてきたからである⁶⁾。しかしながら、本論文で示してきた考察から、降雨の影響を一回の降雨により生じる最大の変位速度として定量化できると考えて、地下水位と変位速度の最大値の関係性を考察することとする。

Fig. 18 は Fig. 15 の 3 事例以外の降雨事例もあわせて、複数の雨における M2010-2 の地下水位の最大値と亀裂変位速度の最大値をプロットしたものであり、今まで論じてきた豪雨については緑色で示している。加えて豪雨ほど地下水位が上昇しなかった降雨についても黄色でプロットしている。図より、豪雨と降雨の各々のプロットで、高い相関性を持つ線形の近似曲線が得られることがわかる。以後、これらの近似曲線を水位感度曲線とよぶ。

通常の降雨の場合、直線の傾きが大きいことから地下水位上昇による変位速度の増加は少ない。またピークに至るまでの水位上昇時の過程は、亀裂変位が小さく、計測器が変位速度を議論できる精度を有さないが、ピーク値の高い相関性から見て M2010-2 の水位と亀裂変位速度の関係を示唆するものとなっている。これより降雨時は M2010-2 周辺の地下水位が 1005 mL を超えるか超えないものであるかが、残壁挙動に大きく影響する。

一方、豪雨時の場合は、Fig. 15 (a) で示したように、一定レベルの水位以上に上昇しにくくなるが、地下水位上昇に伴って亀裂変位速度が急激に上昇するようになり、亀裂変位速度も地下水位も最大値に至る。また降雨時より、豪雨時の水位感度曲線の勾配が緩やかになることから、亀裂変位速度の上昇率が大きくなっていると考えられる。この結果は、豪雨時においては M2010-2 付近の地下水位ではなく、5・4 で述べた UN111 付近の地下水位と考えられる。

UN111 は豪雨のみの水位変化が捉えている一方で、M2010-2 は降雨時と豪雨時の水位変化が捉えられており、降雨時と豪雨時の水位上昇に関係性がある亀裂変位が複合的に表れている。結果として、この要因の違いが水位感度曲線の豪雨と降雨の変曲点を

Fig.17 Distinct rising of groundwater level during rainfall on the lower part of the rock slope of Une Mine.

Fig.18 Sensitivity curve of groundwater level (M2010-2) on velocity of crack gage displacement.

生み出している。水位感度曲線は降雨状況による残壁変形挙動の相違を明確にしたものであり、両者の変形メカニズムの相違を良く表している。

また、水位感度曲線を用いると、最大地下水位から変位速度を予測することも可能である。既に述べたように武甲山では残壁の管理基準として変位速度で残壁安定性を評価しているが、同時に地下水位のモニタリングを行うことにより、降雨時における緊急性の判断に繋がることが期待される。

以上より、降雨時の変位速度は残壁上部の水位によって決定されると考えられるが、豪雨時は普段は地下水位が観測されていない残壁下部に水が急激に集水することにより、一時的に変位速度が高くなると考えられる。一般に地下水位が亀裂変位速度に与える影響として、岩盤が水を含有することで物性値が低下する⁷⁾、水圧が亀裂に作用するなどが論じられている^{8,9)}。しかしながら、ここで示した地下水位と変位速度の関係性について、その要因は未だ明らかではなく、メカニズムの解明は今後の課題である。

6. 結 言

本論文では武甲山の残壁変形挙動に関して、主に地下水位との関係に焦点を当て、特徴やその要因について論じてきた。本研究により得られた知見をまとめると以下である。

- (1) 武甲山では、石灰岩、互層帯、下盤で独立した地下水位を有しており、石灰岩は亀裂および割れ目の影響で透水係数が高い。
- (2) 石灰岩の水みちは亀裂の影響を強く受け、水位計の挙動は一様ではない。
- (3) 宇根鉱山残壁東側では旧沢地形の影響を受け、降雨時に水が集水しやすい状況となっている。また残壁下部を東西に走る断層が遮水壁となり、より地下水位が上昇しやすい構造となっている。
- (4) この旧沢地形沿いの急激な地下水位上昇と亀裂変位速度増速が類似した挙動を示すことから、地下水が残壁変位に何らかの影響を与えている。
- (5) 地下水位と亀裂変位速度を分析したところ、通常の降雨の場合、残壁上部の水位 (M2010-2) が変位の発現に対して支配的であり、豪雨時は残壁下部の水位 (UN111) が支配的となる。したがって、残壁の変位挙動は複数の地下水挙動により構成されていると考えられる。

以上、本論文では、地下水位変化と変位速度の関係を検討した結果、降雨時の複数の地下水位変化が変位速度に影響を与えていることが明らかになった。地下水位をコントロールすることにより、残壁変位が抑制できる可能性があるが、これにはそれぞれの地下水位への対応と対策をわけて考える必要がある。一般に、鉱山の残壁では効率的な水抜きが求められるが、今回のデータ解析では優先的に水位上昇抑制対策を実施すべき箇所、および基準と

なる水位レベルを定量的に表すことができた。今後はこれらの解析結果に基づいて降雨対策を計画することにより、より効果的な降雨時の変位抑制対策ができると考える。

謝辞 本論文は宇根鉱山を中心とした水位観測データと残壁挙動をまとめたものである。これは秩父残壁研究会で長期に渡る残壁モニタリングの管理経験やデータの解釈を参考になされたものであり、これまでご尽力頂いた多くの技術者に感謝申し上げる。また長きに渡りご指導頂いた、前座長である東京大学の山口梅太郎名誉教授、現座長である東京大学の山富二郎名誉教授にも心より感謝申し上げます。また貴重なご意見を頂いた先生方、計測に関わる工事、管理等にご協力頂いた武甲鉱山、三輪鉱山の両鉱山にも感謝申し上げます。

References

- 1) J. Yamatomi, et al.: Proc. MMIJ Annual Meeting (2016), Vol.3, No.2, [1111].
- 2) M. Kondo, et al.: Proc. MMIJ Annual Meeting (2016), Vol.3, No.2, [1112].
- 3) 秩父残壁地質小委員会：石灰石, **310** (2001), 55-71. [Chichibu zanken chishitsu shouinukai: Sekkaiseki, **310** (2001), 55-71.]
- 4) K. Koike, et al.: Journal of MMIJ, **112** (1996), 907-914.
- 5) Y. Noguchi, et al.: Journal of MMIJ, **107** (1991), 428-433.
- 6) J. Yamatomi, et al.: Proc. MMIJ Annual Meeting (2016), Vol.3, No.2, [1109].
- 7) 地下水ハンドブック編集委員会：改訂地下水ハンドブック, (建設産業調査会, 1998), p.1504. [Kaitei Chikasui Handbook, (Kensetsu Sangyo Chousakai, 1998), p.1504.]
- 8) K. Matsuki et al.: Journal of MMIJ, **114** (1998), 895-900.
- 9) M. Yamada et al.: Landslides (2000), **36** (4), pp.22-31.