



高感度傾斜計による岩盤斜面モニタリングと挙動分析*

尾原 祐三¹ 西山 えるむ² 姜 聲 承³

Monitoring and Analysis of Mechanical Behavior of Rock Slope Using a High-Resolution Borehole Tilt-Meter at an Open Pit Limestone Mine

by Yuzo OBARA^a, Erumu NISHIYAMA^b and Seong Seung KANG^c

- a. Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, Kumamoto, Japan
(Corresponding author: E-mail obara@kumamoto-u.ac.jp)
- b. Nittetsu Mining Co. Ltd., Tokyo, Japan
- c. Research Institute of Basic Sciences, Sunchon National University, Sunchon, Korea

A high-resolution borehole tilt-meter is introduced to measure the inclination of rock slope at an open pit limestone mine, and the movement of rock slope is analyzed based on the measured results from the tilt-meter and numerical results by a three-dimensional boundary element method (3D-BEM). Firstly, the applicability of tilt-meter to monitor the movement of rock slope due to a bench-cut excavation is investigated by 3D-BEM and the required accuracy of a tilt-meter is made clear. Then a high-resolution borehole tilt-meter is introduced and explained. Secondly, based on the measured results for nine months in a limestone mine, the mechanical behavior of rock slope is analyzed. The general mechanical behavior of rock slope due to excavation of a bench is then analyzed by 3D-BEM. Finally, using the results of measurement and numerical analysis, the mechanical behavior of rock slope is made clear. It is concluded that a high-resolution borehole tilt-meter is applicable to monitor the movement of rock slope in a short period.

KEY WORDS: Rock Slope, Mechanical Behavior, High-Resolution Borehole Tilt-Meter, Boundary Element Method

1. 緒 言

我が国における石灰石鉱山の露天掘り採掘は、そのほとんどにベンチカット法が採用され、採掘の大規模化が図られている。このような大規模露天掘り鉱山では、採掘が進むにつれて長大な斜面が形成されることになり、それに伴って長大残壁の環境への影響、とくに、崩壊による自然破壊の重大性から、岩盤斜面の安定性の確保とともに岩盤斜面の監視法の確立は重要な問題となっている¹⁾。

現在の岩盤斜面の監視法としては岩盤内変位計²⁾、光波測距儀³⁾、GPS⁴⁾などが用いられている。しかし、大規模な露天掘り鉱山では、これらの測定装置を用いると定常的なデータを得るまでに時間がかかり過ぎるという問題がある。また、掘削途中のある時点で緊急に斜面の状態を知ろうとする場合、岩盤内変位計、光波測距儀およびGPSなどのように、斜面の挙動の確認に長期

間を要するような装置に依ることはできない。したがって、短期的な測定で岩盤斜面の力学的挙動を把握しようとする、1回のベンチカットの掘削によって岩盤内に発生するわずかな変形や傾斜を測定できる測定装置の導入が望まれる。

上記の問題を解決するための装置の1つに高感度傾斜計がある⁵⁾。この装置の測定精度は1mR(ナノラジアン)である。したがって、わずかな掘削に対して発生する傾斜を精度よく測定することができると考えられ、この装置を用いたモニターにより短期間で岩盤斜面の力学的挙動の把握ができると期待される。

そこで、本研究では、高感度傾斜計を用いて岩盤斜面の挙動をモニタリングするとともに、その結果と3次元境界要素法を用いた解析結果を比較することにより岩盤斜面の挙動を分析し、高感度傾斜計の露天掘り鉱山への適用性を明らかにした。具体的には、まず、1回のベンチ掘削によって斜面内に発生する傾斜を3次元境界要素法によって解析し、傾斜計の具備すべき測定精度を明らかにした。つぎに、その測定精度を有する高感度傾斜計を鳥形山鉱山に導入し、9ヶ月に渡る傾斜をモニターした結果を示した。つぎに、3次元境界要素法によりベンチ掘削解析を行い、掘削の進行に伴って発生する傾斜の一般傾向を示した。最後に、測定結果と解析結果との比較を行い、モニター中の岩盤斜面の挙動を分析するとともに、高感度傾斜計の露天掘り鉱山への適用性を明らかにした。

* 2006年8月1日受付 11月8日受理

1. 普通会员 工博 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 環境保全工学専攻

2. 普通会员 日鉄鉱業(株) 資源開発部

3. Ph.D. Sunchon National University Assistant Professor Research Institute of Basic Sciences

[著者連絡先] FAX: 096-342-3686

E-mail: obara@kumamoto-u.ac.jp

キーワード: 岩盤斜面, 力学的挙動, 高感度傾斜計, 境界要素法

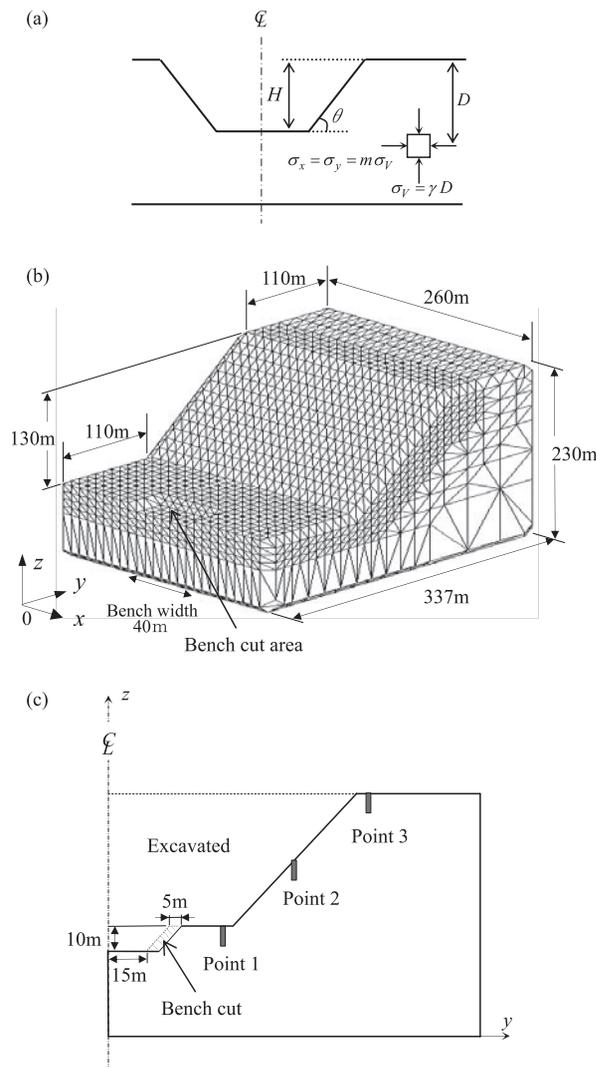


Fig.1 Concept of excavation of rock slope and numerical model by 3D boundary element method; (a) excavation model and initial stress condition, (b) 3D boundary element model to analyze inclination within rock slope, (c) location of tilt-meter to measure inclination due to a bench cut excavation.

2. 高感度傾斜計の適用性の検討

水平な地盤の一部が掘削されて斜面が形成されると仮定し、3次元境界要素法を用いて地盤内の力学挙動を解析する。とくにここでは、1回のベンチカットの掘削によって発生する斜面内の傾斜について注目し、短期的な傾斜測定から岩盤斜面の挙動の推定が可能かどうか検討する。

露天掘鉱山における岩盤斜面の掘削の様子を模式的に示すと Fig. 1 (a) のようである。水平地盤の中央部を掘削する場合を考慮し、解析では中央線の右半分のみを用いる。岩盤はヤング率 E 、ポアソン比 ν の均質等方弾性体であると仮定する。

解析モデルの断面図を Fig.1 (c) に示す。解析では、水平地盤が掘削されて長大な岩盤斜面が傾斜角 48° で形成された状態の後、斜線部がベンチカット法により掘削される場合の岩盤内の傾斜を解析する。掘削はベンチ高さ 10m 、奥行き 5m 、幅 40m である。傾斜計は3箇所、測点1～3に設置されると仮定する。測点1は斜面底面に位置し、掘削場所から約 30m 離れている。測点2および3は高さ 130m の斜面の斜面表面および斜面上面に位置して

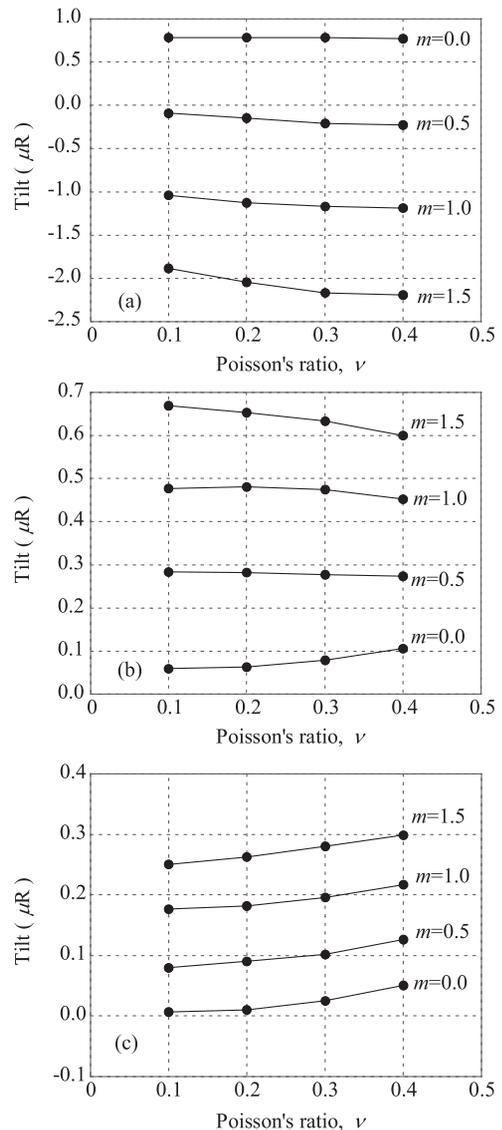


Fig.2 Relations between inclination and Poisson's ratio; (a) Point 1, (b) Point 2, (c) Point 3.

いる。測定は埋設型傾斜計により地表下 12m に位置で行われると仮定し、水平方向の y 方向の変位を v 、 x 方向の変位を u とするとき、 v および u の鉛直方向 (z 方向) の変位勾配 dv/dz および du/dz を傾斜と定義する。したがって、 z の正の方向に y あるいは x 方向変位が増加するような場合の傾斜が正となる。

岩盤内の傾斜は、斜面の幾何形状 (斜面高さや角度) やベンチ掘削の場所、範囲、容積だけではなく、岩盤の材料特性や初期応力状態に対応して変化すると考えられるが、ここでは、標準的な斜面角度を有する高さが 100m 程度の斜面において $1 \sim 2$ 発破のベンチ掘削を対象として岩盤のポアソン比と初期応力が傾斜に及ぼす影響を分析した。

解析における初期応力は、鉛直応力 $\sigma_v = \gamma D$ と仮定した。ここに、 γ は単位体積重量であり、解析では 27kN/m^3 とし、 D は斜面上面からの深さとした。また、水平応力は $\sigma_x = \sigma_y = m\sigma_v$ と仮定した。ここに、 m は側圧比であり、解析では $0.0, 0.5, 1.0, 1.5$ として4通りに変化させた。一方、岩盤のヤング率は E は変位に影響は与えるものの、ヤング率に反比例する。そこで、 $E=10\text{GPa}$ と一定とし、ポアソン比 ν を $0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ の4通りに変化させ、合計 16 ケースの解析を実施した。

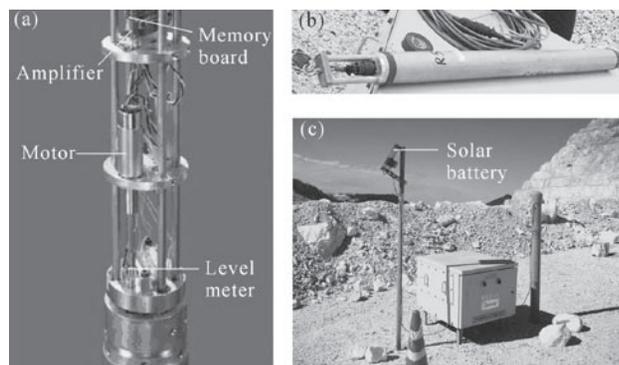


Fig.3 High-resolution borehole tilt-meter; (a) inside view; (b) outside view; (c) solar battery for a power supply.

解析においては、それぞれの座標軸に垂直なモデル底面および側面において、その座標軸方向の変位を固定する変位境界条件を与えた。また、掘削解析は初期応力に対応する掘削相当外力を斜面の境界要素に表面力として与え、ベンチカット前の斜面の掘削解析を行った後にベンチ掘削解析を行った。以下に示す結果はベンチ掘削解析のみを行ったときの結果である。

解析結果を Fig. 2 (a) ~ (c) に示す。図の縦軸は傾斜、横軸はポアソン比である。傾斜の単位は μR である。掘削領域に最も近い斜面底面にある測点 1 の結果である Fig.2 (a) をみると、ポアソン比が大きくなるとともに傾斜が小さくなっていることがわかる。また、ポアソン比の増加による傾斜の減少は側圧比が増加すると大きくなっている。さらに、側圧比が小さいほど傾斜は大きくなっている。つぎに、Fig. 2 (b) に示す斜面の中腹に設定した測点 2 の結果をみると、側圧比が 0.0, 0.5 の場合は下に凸の曲線を描くが、側圧比が 1.0, 1.5 の場合は反対に上に凸となっている。最後に、掘削域に最も遠い測点 3 の結果の Fig.2 (c) では、ポアソン比が大きくなるとともに傾斜が大きくなり、その程度は側圧比に依存しないことがわかる。しかし、いずれの点においても、側圧比の影響に比較してポアソン比の影響が小さくなっている。

3 測点の傾斜の絶対値を比較すると、測点 1 で最も大きく、掘削域からの距離が大きくなるとともに小さくなっている。しかし、わずかな掘削体積であるにもかかわらず、130m 離れた測点 3 においてもそのオーダーは μR である。また、これらの結果は岩盤のヤング率を 10GPa と仮定したときの結果であるが、傾斜は岩盤のヤング率に反比例する。岩盤のヤング率は最大でも 50GPa と考えられるので、その場合でも図に示した結果の 1/5 程度の値となる。これを考慮すると、3 測点における傾斜はすべて $0.01\mu R$ 以上の値になるといえる。

これらの結果を総合すると、掘削領域の近い場所での測定は、傾斜角が大きいため、精度の高い装置は必要とされない。しかし、近い場所での測定は、発破や積み込み作業などに支障をきたす恐れがある。一方、測定距離が大きいと傾斜角は小さくなる。しかし、遠い場所での測定は切羽近くの作業に支障をきたすことなく、また、短期から長期に亘っての測定が可能と考えられ、 $0.01\mu R$ の測定精度があれば十分と考えられる。そこで、本研究では、掘削領域から離れた場所での測定を行い、1 回のベンチ掘削による傾斜の変化を捉えることを前提にした傾斜計の導入を試みた。

3. 高感度傾斜計

石油開発の分野における利用を目的としてピナクル社 (米国) によって開発された傾斜計で、 $1nR$ の測定精度を持つ装置として Fig. 3 に示すような高感度傾斜計がある⁵⁾。わが国には、1997

Table 1 Specification of high-resolution borehole tilt-meter.

Accuracy	1nR
Range of measurement	$\pm 0.175R (\pm 10^\circ)$
Maximum gain	1000 mV/ μR
Method of leveling	Auto leveling
Storable data (30second sampling)	30days
A/D converter	24 bits
Scale	$\phi 6.4 \text{ cm} \times 107 \text{ cm}$
Weight	4 kg

年ごろ地熱探査技術等検証調査のために導入⁶⁾されて以来、火山活動のモニタリングなどに使用されている⁷⁾。また、最近では地下石油岩盤タンクにおける微小傾斜の計測⁸⁾、露天掘鉱山における原位置変形試験^{9, 10)}などにも用いられている。本研究ではこの装置を用いることとした。装置全体の様子を Fig.3 (b) に示す。直径 64mm、長さ 1070mm のステンレス管を用いて Fig.3 (a) に示す傾斜計の内部を保護している。測定は電解質溶液を用いた気泡型の水準計によって行われ、気泡の動きを電極を用いて測定し、それをアンプにより増幅させることによって測定精度を向上させている。また、内部にはメモリーとゼロ点調整用のモータを備えている。

本装置は、ノイズを低減させるために深さ約 12m 程度のボアホール内に設置される。まず、穿孔されたボアホールに直径約 10cm の底付き塩ビパイプを挿入し、その周囲にセメントミルクを充填して固定する。つぎに、塩ビパイプの下部に高感度傾斜計を挿入し、乾燥砂により装置を埋設・固定する。パイプの上部は水が入らないように蓋をする。装置の埋設・固定に砂を用いているので装置の再利用が可能である。装置への電力供給は、Fig.3 (c) に示すように、ソーラーパネルとバッテリーの併用によって外部から行う。

高感度傾斜計の主な仕様を Table 1 に示す。センサーの精度は $1nR$ と高性能であり、重量も 4kg と軽く取り扱いが容易である。

4. 鉱山概要

鳥形山鉱山の残壁に高感度傾斜計を設置した。鉱山の全景を Fig. 4 に示す。鳥形山鉱山は高知県にある標高 1459m の鳥形山の山頂に位置している石灰石鉱山である¹¹⁾。掘削方法はベンチカット法である。計測を開始したときの掘削レベルは標高 1205m ~ 1235m であり、東西に 2.5km、南北 1.0km に採掘切羽が展開されていた。Fig.4 の四角で囲まれた部分が残壁である。

残壁の様子を Fig. 5 に示す。残壁の平均傾斜は 45 度であり、標高 1335m の残壁上面に高感度傾斜計が設置されている。計測を開始した当時の残壁高さは約 100m であり、計測は現在も継続されている。

残壁付近の平面図を Fig. 6 に示す。縦軸に北、横軸に東を示している。残壁の法肩より 36m 奥部の位置に高感度傾斜計が設置されている。図中の座標軸は高感度傾斜計の結果を表すための座標軸 (X, Y) であり、真北より反時計回り 6 度の方向に高感度傾斜計の Y 軸を定めている。また、高感度傾斜計設置位置を含む断面 a-a' を Fig. 7 に示す。

5. 高感度傾斜計によるモニタリング

データ分析期間は 2001 年 4 月から 2001 年 12 月までの 9 ヶ月である。2001 年 4 月を基準とした高感度傾斜計の計測結果を Fig. 8 (a) に示す¹²⁾。全体的には、Y 方向の傾斜は最初ほとんど変化していないが、9 月頃から増加し始めている。一方、X 方向

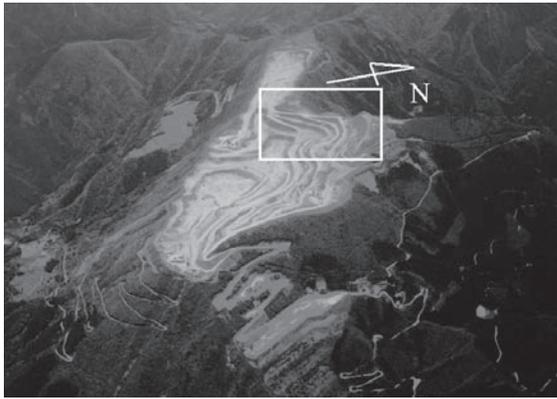


Fig.4 Panoramic view of the Torigata open pit limestone mine at Mt. Torigata.

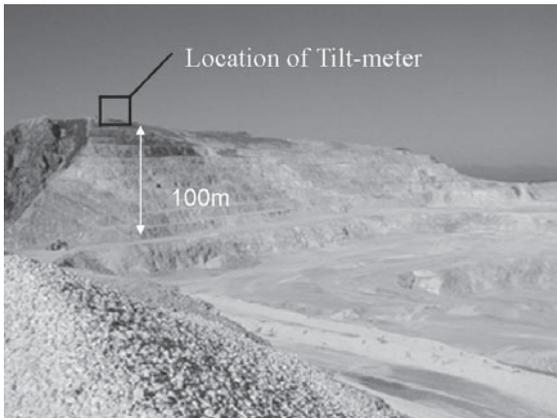


Fig.5 View of Rock slope with high-resolution borehole tilt-meter.

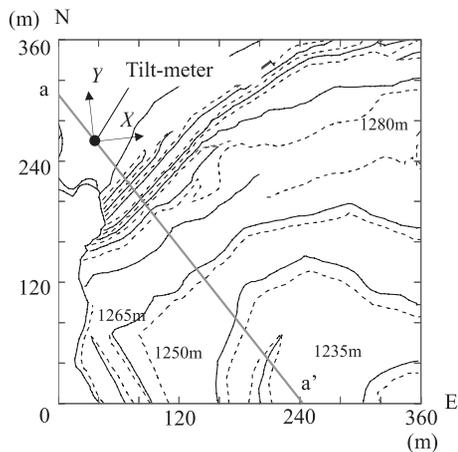


Fig.6 Plan diagram near rock slope with high-resolution borehole tilt-meter.

の傾斜は期間を通して徐々に減少している。これらの変化を細かく見ると、大きな変動の中に瞬時の変動が見られ、その変動も回復しているものと回復していないものがある。この変動は発破の影響と考えられ、その影響を取り除く必要がある。そこで、データから瞬時の変動を削除するとともに、回復していない傾斜を変動前の値にスライドして修正した^{6,7)}。このようにして得られたデータを Fig.8 (b) に示す。以下ではこのデータを計測結果として分析する。

つぎに、最大傾斜角とその方位を Fig. 9 の極座標グラフに示す。

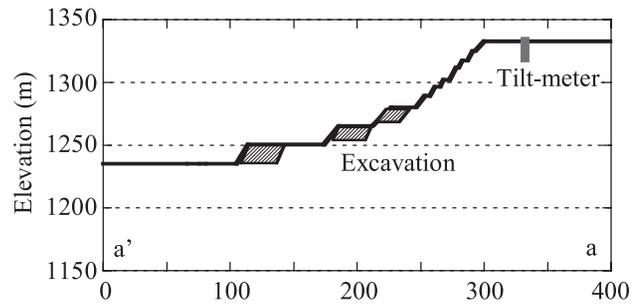


Fig.7 Cross section of rock slope of a-a' in Fig.6.

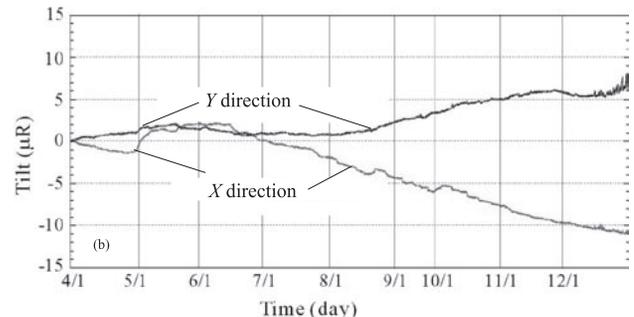
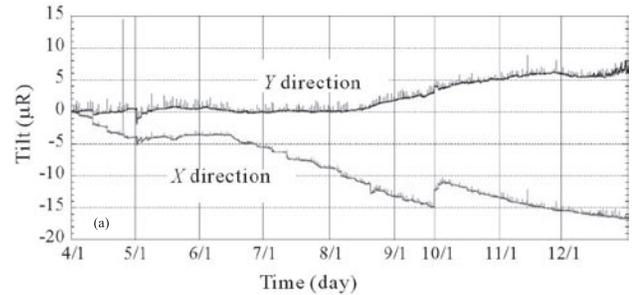


Fig.8 Relations between inclination and elapsed time; (a) original data, (b) modified data.

例として Fig.9 (a) に示すように、 X 方向のみプラスの方向に $1\mu R$ 傾斜した場合を仮定すると、最大傾斜角とその方位は Fig.9 (b) のような極座標にプロットされるものと定義する。図の縦軸を北、横軸を東とし、本図を最大傾斜角方位図と呼ぶことにする。さて、Fig.8 (b) のデータを最大傾斜角方位図にプロットすると Fig.9 (c) のようである。期間を通して、北西の方角に傾斜している。すなわち、残壁の走向に対してほぼ垂直な面内において斜面の頂上部の奥部が沈み込み、法肩が浮き上がるような挙動を示していると考えられる。この挙動は斜面下部の掘削に伴い、斜面下部表面が浮き上がったためと考えられる。

6. 3次元境界要素法によるベンチ掘削解析

高感度傾斜計で観測されたデータによって残壁の挙動を分析するために、斜面がベンチ掘削される場合の傾斜変化を3次元境界要素法により単純化したモデルを用いて解析した¹³⁾。Fig. 10 (a) に示すように、破線の四角で示された領域を単純化した境界要素モデルを Fig.10 (b) に示す。初期応力は、2章と同様に仮定し、側圧比 m を 0.0, 0.5, 1.0 と変化させて解析を行った。また、傾斜に対する側圧比の影響に比較してポアソン比の影響が小さいことが示されたので、ここでは便宜上、岩盤のポアソン比を 0.1 とするとともに、ヤング率を 10GPa, 単位体積重量を 27kN/m^3 の均質等方弾性体と仮定した。

解析では、まず、水平地盤が (b) のモデルになるように掘削さ

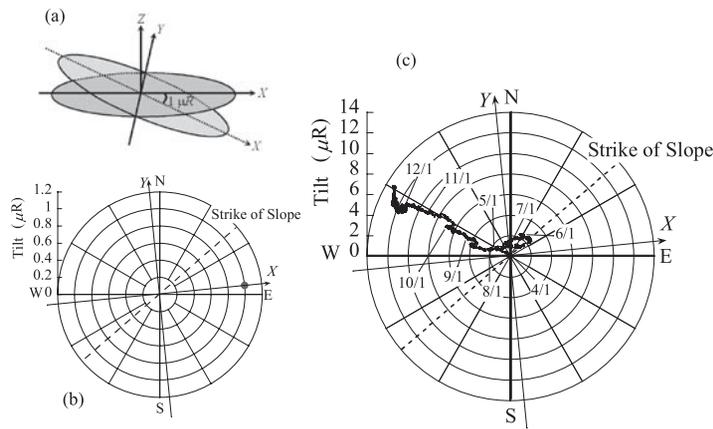


Fig.9 Magnitude and direction of the maximum inclination projection; (a) schematic diagram of an inclination, (b) example of magnitude and direction of the maximum inclination projected on polar coordinates, (c) magnitude and direction of the maximum inclination projected on polar coordinates from April to December as shown in Fig.8(b).

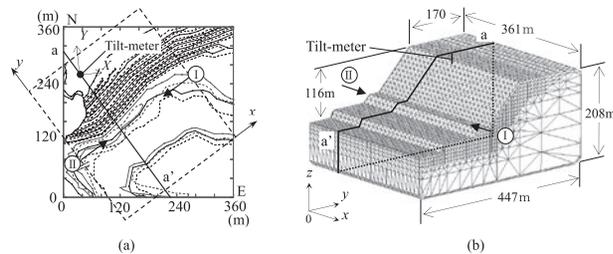


Fig.10 Boundary element model to analysis tilt; (a)analyzed region for numerical analysis on plan diagram and coordinate systems, (b) 3-D BEM model and case of excavation of bench.

れた後、矢印で示されるベンチが掘削される場合の高感度傾斜計設置位置における傾斜を解析した。斜面の掘削がIの矢印の方向から進行する場合を掘削I、その反対方向から掘削が進行する場合を掘削IIとし、I、IIともに5段階で掘削される。このときの変位境界条件としては、それぞれの座標軸に垂直なモデル底面および側面において、その座標軸方向の変位を固定した。

まず、掘削に伴う傾斜変化を Fig. 11 に示す。解析結果は傾斜計に定めた座標軸に変換して示している。両ケースともに掘削に伴ってX方向の傾斜は減少する。一方、Y方向の傾斜は両ケースともに増加するが、掘削Iは下に凸の曲線を描き、掘削IIでは上に凸の曲線を描くように増加している。

つぎに、最大傾斜角とその方位を Fig. 12 に示す。ケースIの結果を黒塗りで、ケースIIの結果を白抜きでプロットしている。両ケースともに側圧比が0.0の場合の最大傾斜方位は、0.5、1.0の場合と比較して大きな変化を示していることがわかる。また、ケースIでの最大傾斜の方位は、はじめに西の方向へ傾斜した後、北西の方向、すなわち斜面の走向に対して垂直な方向へ変化している。一方、ケースIIでの最大傾斜の方位は、はじめに北西の方向へ傾斜した後、西の方向へ移動している。これらの結果を総合すると、傾斜計設置位置より東側を掘削した場合は西の方向に、西側を掘削した場合は北の方向に傾斜し、傾斜計の真下を掘削した場合は北西の方向（斜面の走向に垂直な方向）に傾斜することがわかる。しかし、ベンチの掘削が終了すると、どちらのケースにおいても最大傾斜の方位は、最終的には斜面の走向に垂直な方向、すなわち北西の方向に傾斜し、法先が浮き上がる挙動を示す

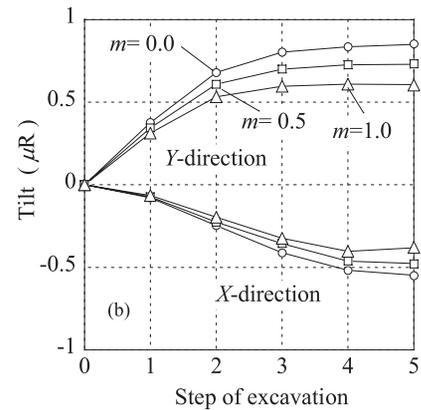
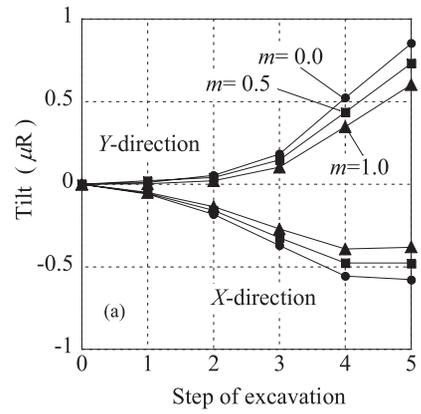


Fig.11 Changes in inclination of the X and Y directions defined at a position of a high-resolution borehole tilt-meter with step of excavation; (a) Excavation I, (b) Excavation II.

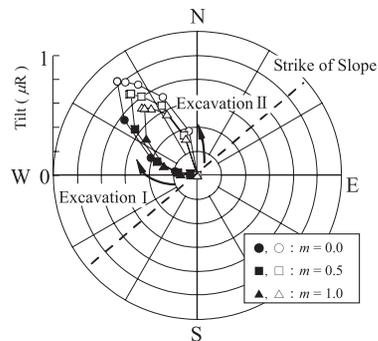


Fig.12 Change in magnitude and direction of the maximum inclination projected on polar coordinates on Excavation I and II.

ことがわかった。

7. 岩盤斜面の挙動分析と考察

解析結果と測定結果および採掘実績との比較により残壁挙動の分析を行った。期間を4-6月、7-9月、10-12月の3期に分けて分析する。なお、実際のベンチ掘削の範囲や容積は解析のそれと異なっているので、傾斜の値についての比較は困難である。このため、ここでは定量的な検討は行わない。

それぞれの期間における最大傾斜角方位図と掘削状況を表す平面図を Fig. 13 (a) - (c) に示す。まず、4-6月の傾斜の値はそれ以降の値に比較して小さいことがわかる。また、4月は北西の方角へ傾斜する挙動を示した後に、5月になると北西から北東の方に

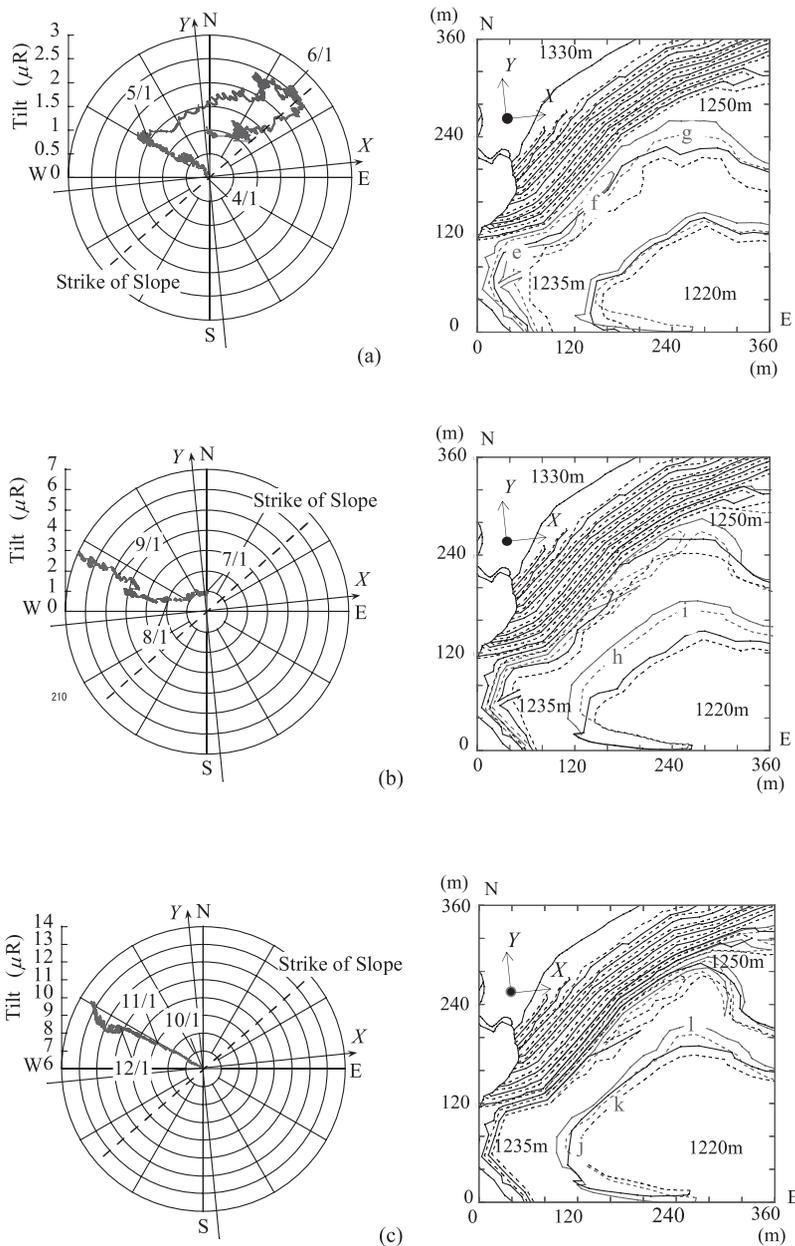


Fig.13 Magnitude and direction of the maximum inclination topographic map in the period of; (a) 2001.4 ~ 6, (b) 2001.7 ~ 9, (c) 2001.10 ~ 12.

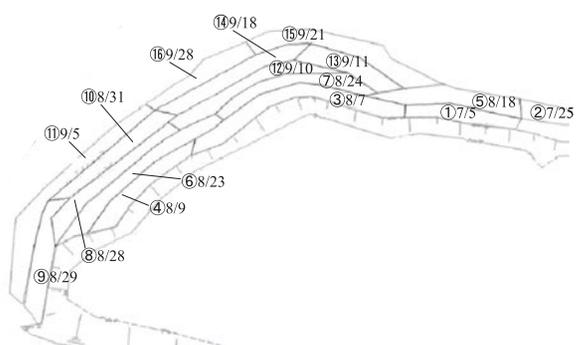


Fig.14 Order of excavation area in the period of 2001.7 ~ 2001.9 on topographic map of Torigata mine.

変化した後、6月には北に向いて挙動している。解析結果では傾斜計設置断面付近を掘削したときに北西の方角へ傾斜する挙動を示していたので、4月は平面図のfの領域が主に掘削され、5月は平面図のeの領域が主に掘削されたと考えられる。6月は西の方角へ傾斜する挙動を示しており、g領域が主に掘削されたと予想される。そこで、採掘実績によると、最大傾斜方位の挙動から予想したような掘削状態になっていたことが確かめられた。とくに5月には、岩盤斜面からも非常に近いeの領域で運搬道路の取り付けや拡幅が行われていた。領域eの上部は斜面ではなく崖となっているため、解析で示されたような穏やかな挙動とは異なり、北西から北東へと大きく変化したと考えられる。

つぎに、7-9月の最大傾斜角方位図をみると、7月から8月の中旬までは初め西の方角へ傾斜し、その後北西の方角へ傾斜する解析結果の掘削Iと同様の挙動を示している。したがって、この期間は平面図のiからhへ進む掘削が行われたと考えられる。そこで、掘削実績を調査し、iとh付近のベンチを発破した日付とその順番をFig. 14に示す。7月のはじめにこの領域の東側が採掘され、下旬にはさらに東が採掘された後8月には③、④とiからhへ進む掘削が行われた。しかし、8月下旬の⑥、⑦では反対にhからへi進む掘削となっており、その結果、最大傾斜角方位がわずかであるが、北に向かう傾向を示している。その後の掘削は測定断面を挟んだ東西の領域で掘削され、iとhの領域のベンチが平均的に残壁側に進行したことが確認された。これらの結果は測定結果と調和的であることがわかる。

最後に、10-12月の最大傾斜角方位図を見ると、10月、11月は最大傾斜の方位にほとんど変化は見られず、残壁の走向に直行する方向、すなわち北西の方角へ移動し、その値は大きくなっている。これは、ベンチが残壁に向かって掘削された結果と考えられる。一方、12月においては解析結果の掘削Iと同様の挙動を示している。したがって、この期間に平面図のlからk、jへと進む掘削が行われたと推察される。掘削実績によると推測した掘削が行われていたことが確認できた。

以上のように、傾斜の測定データから得られた最大傾斜方位によって掘削の順序と位置を推定した結果は、発破日誌よりまとめた掘削実績と調和的であることが確かめられ、高感度傾斜計の有効性が確かめられた。また、この結果は、分析対象期間の残壁は3次元弾性体として挙動していることを示しており、永久残壁は安全であったと結論される。もし残壁になんらかの異常がある場合には、3次元数値解析から推定される結果とは異なる挙動を示すことになり、その場合には詳細な安定性評価を行う必要があると考えられる。

以上のように、傾斜の測定データから得られた最大傾斜方位によって掘削の順序と位置を推定した結果は、発破日誌よりまとめた掘削実績と調和的であることが確かめられ、高感度傾斜計の有効性が確かめられた。また、この結果は、分析対象期間の残壁は3次元弾性体として挙動していることを示しており、永久残壁は安全であったと結論される。もし残壁になんらかの異常がある場合には、3次元数値解析から推定される結果とは異なる挙動を示すことになり、その場合には詳細な安定性評価を行う必要があると考えられる。

8. 結 言

本研究では、高感度傾斜計の現場計測結果を分析し、短期間における岩盤斜面監視のための本装置の適用性を明らかにした。また、高感度傾斜計の現場計測結果と掘削に伴う岩盤斜面の傾斜の3次元境界要素解析結果とを比較検討し、測定される最大傾斜方位から掘削領域の推定が可能であること示し、推定した結果は掘削実績と調和的であることを示し、分析期間の残壁は3次元弾性体として挙動していたと論じた。この結果、高感度傾斜計の露天掘り鉱山への導入は、ベンチ掘削のような短期的な幾何学変化に対する測定結果から岩盤斜面の力学的挙動を把握しようとする場合に有効であると結論された。また、ベンチ掘削を考慮した弾性解析を行い、あらかじめ発生する傾斜を予想しておき、その結果と測定結果を比較することによって、掘削中の岩盤斜面の安定性を確認することが可能であると考えられ、数値解析から推定される結果とは大きく異なる挙動を示した場合には岩盤斜面になんらかの異常が発生したとして、より詳細な安定性評価を行う必要があると論じた。

本研究で導入した高感度傾斜計での測定は1点であり、その結果から残壁の挙動を評価したが、さらに多くの測定点を設置して、

より詳細な検討を行うことが望ましい。また、装置の精度は1nRと高性能であるが、1段のベンチ掘削で測定された傾斜のオーダーは μR であった。したがって、 μR 程度の測定精度をもつ傾斜計を用いても測定は十分可能と考えられる。

References

- 1) Shigen Sozai Gakkai: Handbook on rock slope in open pit mine, 2005. (in Japanese)
- 2) K. Kaneko, Y. Noguchi, T. Sota, R. Hazuku: Shigen-to-Sozai (Journal of MMIJ), **112**(1996), 915-920. (in Japanese)
- 3) K. Kawabata, T. Ito, M. Tonsho: Limestone, **297**(1999), 20-27. (in Japanese)
- 4) N. Shimizu, S. Oyama, H. Ono, K. Miyashita, Y. Mizuta: Shigen-to-Sozai (Journal of MMIJ), **113**(1997), 549-554. (in Japanese)
- 5) S. Hunter: University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Science & Technology(1997), Review, pp.14-15, Oct.
- 6) T. Akibayashi, H. Fujii, T. Tosha, O. Nakagome: Shigen-to-Sozai (Journal of MMIJ), **118**(2002), 452-459. (in Japanese)
- 7) M. Churei, H. Yuyama: Bulletin of the Volcanological Society of Japan, **51**(2006), 91-101.
- 8) K. Jodai, K. Uede, S. Hirooka, H. Kanbara, H. Sakakibara, S. Takemura, T. Matsuoka, K. Tsukada: J. of The Soc. Mat. Sci., **55**(2006), 523-528.
- 9) K. Sugawara, L. Faramarzi, N. Nakamura: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **43**(2006), 179-191.
- 10) K. Sugawara, L. Faramarzi, N. Nakamura: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **43**(2006), 192-202.
- 11) Y. Obara, N. Nakamura, S. S. Kang and K. Kaneko: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **37**(2000), 1211-1221.
- 12) Y. Obara: Proc. of The 64th Meeting of Limestone Association of Japan (2005), pp.144-149, (in Japanese)
- 13) E. Nishiyama, S. S. Kang, Y. Obara: A. Hirata, Proc. of EUROCK2005 (2005), pp.413-418.