

自然斜面に対する自動壁面三次元測定の実用について

On the application of automatic three dimensional location for a natural slope

北海道開発局開発土木研究所	正 員	池 田 憲 二 (Kenji Ikeda)
北海道開発局開発土木研究所	正 員	中 井 健 司 (Kenji Nakai)
北海道開発局開発土木研究所	正 員	日下部 祐 基 (Yuki Kusakabe)
(株)構研エンジニアリング	○正 員	田 尻 太 郎 (Taro Tajiri)

1. はじめに

豊浜トンネルおよび第二白糸トンネルの崩落事故を契機に北海道開発局では、岩盤斜面変状の有効な観測手法の研究開発を行っている。現状では伸縮計、傾斜計など地滑り観測に利用されていたものが岩盤変状測定に流用されているが、広範囲な岩盤斜面を計測するには限界があり、また計測機器を設置するべき変状箇所を特定することが困難であるという問題も残っている。本研究では、広範囲の岩盤斜面変状を面的に大きく把握する事を目的として研究開発が行われてきたALS（自動壁面三次元測定装置）を岩切り工事現場に対して使用し、岩切り工事前、工事中、工事後の測定データを比較して明らかになった、岩盤変状に対するALSデータの具体的運用法について報告する。

2. ALS 測定の開発経緯

1) 初期の現場測定：3.においてALS測定に際して生じる測定誤差について詳述するが、初期の現場測定では、第二白糸トンネル崩落後のALS斜面観察等において明らかとなった、同一範囲の繰返し測定で生じるALS設置誤差に注目した。設置誤差を減少させるためにALS固定架台を用意し、約1週間インターバルで4ヶ月間自然斜面の繰返し測定を行った。その結果、

- ①ほとんど全ての測定点は誤差8cm以内となった。
- ②しかしながら、数10cmの誤差を伴う測定点が無視できない数にのぼった。

この原因は機械的な測距精度は2cmであるので、ALSの旋回動作の誤差の影響が大きかったと思われる。

2) 室内試験：室内試験では、1)の結果を考慮し、ALSの基本性能を確認することを目的とし、規則的形状を持つ平面物体を用いた室内試験を行った。平面物体はALSに対して直角におかれ、測定距離を2～5m程度としたが、測定対象の設置は人力で行ったので、測定対象の設置誤差を除くために、国家検定付ステンレス（鋼巻尺）を使用した基線測量と三角網閉合法で、測定対象位置の最確値¹⁾を計算した。基線測量に関する測定誤差についてはステンレスの検査成績証に基づく各種補正¹⁾を行った。以上の条件下で平面物体同一範囲を5～10回繰返し測定したが、その結果、

- ①同一測定点に対する測定値のばらつきの標準偏差は、30mm以内にとどまった。
- ②同一点の測定値の標準偏差は測定距離よりも測定角度幅に影響され、測定角度幅を10°以内に抑えた場合、距離に関わらず20mm以内となった。

従って同一範囲の多数回測定を行えばその平均値は、真値から20～30mm程度の誤差となりALSの測距精度20mmにほぼ一致するので、ALSの基本性能は検証できたと考えられる。なおここでもALS設置用固定架台を用いた。

3. ALS 繰返し測定において生じる誤差

ALSの繰返し測定に伴う誤差には以下のものがある。

- ①ALS本体の測距性能の機械的誤差（2cm）。
- ②ALS本体の旋回性能の機械的誤差（0.02°）。
- ③ALS本体の設置点のずれによる誤差。
- ④設置後のALS本体の水平合わせに起因する誤差。
- ⑤Back点視準時の誤差。
- ⑥測定範囲開始点、終了点視準時の誤差。

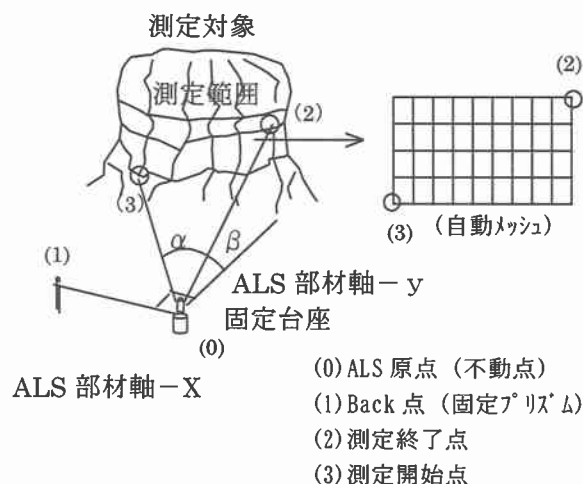


図-1 ALS 測定の概念図

図-1にALS測定の概念図を示す。ALSは測定対象への自身に対する相対座標を出力するので、機械に固有の局所座標系が必要である。機械座標系の原点(0)はALSの設置位置となりこの時3.③が生じるが、固定架台でこれを除去できる。設置後の機械の傾きの水平調整時に3.④が生じ、機械座標系のX軸角度方向((1)Back点)を視準する時に3.⑤が生じる。さらにこの時機械的に90°旋回しY軸を定めるが、これには3.②が影響する。測定範囲始終点(2)、(3)も視準により定めるが、繰返し測定の初回の視準方向は記録できるので、初回の視準方向を使い続ければ實際上この誤差は生じない。このような初期設定を行ったのちALSは、図示した自動メッシュの格子点を縦横方向に等角度間隔で自動ノンプリズム測定する。

ALS 再設置を伴う繰返し測定で問題になるのは、3. ④、⑤と 3.⑤に関連する 3.②である。これらはいずれも測定角度に関する誤差なので、特に測定距離が大きく、測定対象面が自然斜面のように不規則な場合、大きな影響を持つと考えられる。ここで、ALS 測定の実測データであるが、図－1 に示した水平角 α と鉛直角 β 、および測定点までの斜距離 R （直線距離）となる。

4. 測定対象とした自然斜面の概略

今回測定対象とした自然斜面は、標高約 210m の急崖斜面であり、その上部（標高約 130～180m）において岩切り工事が 2000 年 9 月 21 日～11 月 25 日にかけて行われた。図－2 に標高 150m 付近に形成された施工ステージ（Stage-1）の写真を示すが、写真中の施工範囲の EL が岩切り工によって降下する施工であった。

図－3 に施工ステージの降下と測定範囲を模式的に示し、施工状況と測定日を以下に述べる。測定距離は約 200m と見積もられる。

- 1) Stage-1 : EL=150m, 2000/8/10～9/21 に形成され、2000/9/4, 9/12, 9/21 に測定。岩切り施工前。
- 2) Stage-2 : EL=145m, 2000/9/21～10/16 に形成され、2000/10/16 に測定、岩切り施工中。
- 3) Stage-3 : EL=130m, 2000/10/16～11/25 に形成され、2000/11/25 に測定、岩切り施工後。

5. 同一日の繰返し測定に関する ALS 測定の信頼性
今回の測定試験では、同一日に同一斜面の同一範囲を 3～5 回繰返し測定しているが、同一日の測定では ALS 機械本体の再設置は行っていないので、

3.④設置後の ALS 本体の水平合わせに起因する誤差は消滅する。残るのは、

- 3.①ALS 本体の測距性能の機械的誤差（2 cm）
- 3.②ALS 本体の旋回性能の機械的誤差（0.02°）
- 3.⑤Back 点視準時の誤差

である。

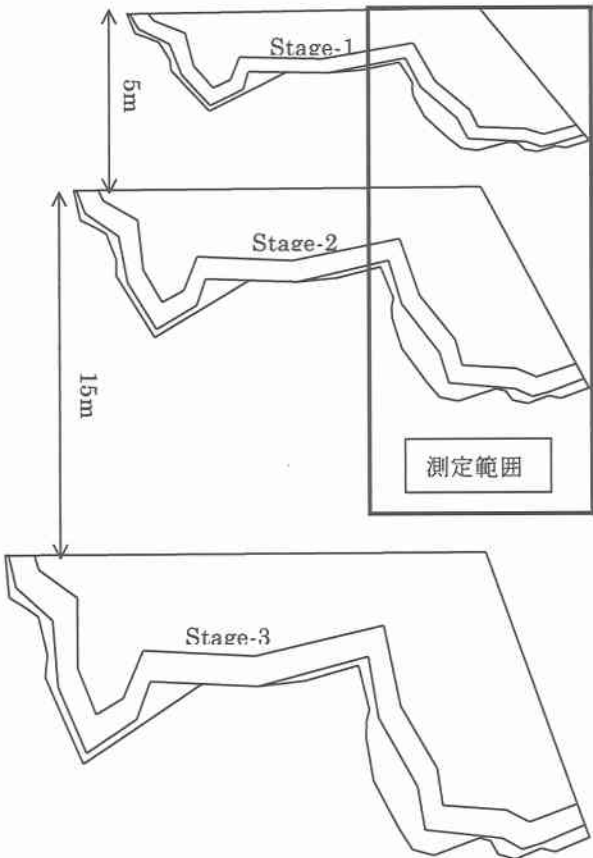
岩切り施工前の Stage-1 は 2000 年 9 月 4 日、12 日、21 日の 3 ケ日にわたって測定されている。表－1 より 3 ケ日の測定状態はほぼ同等である。

表－2 は同 3 ケ日の同一点の測定値のばらつきの最大値であるが、水平角、鉛直角のばらつきは問題なく機械的精度をクリアしている。斜距離のばらつきについては約 25cm で、測距の機械的精度 2 cm の 12.5 倍となった。

ここから誤差 3.⑤の影響を見積もると、今回の測定では斜距離は約 200m で誤差 3.①、②による影響は約 5 cm 程度となるので、誤差⑤の影響は 20cm 程度と見積もられる。誤差⑤は角度に関する誤差で、明らかに斜距離に比例して増加する傾向を持つことが予想されるので、単位距離当りの誤差 3.⑤の影響は $0.2\text{m}/200\text{m}=0.001$ 、すなわち $1\text{mm}/\text{m}$ となる。2.2) 室内試験では、最大斜距離 5m 程度で斜距離のばらつきは 2 cm 程度であった。このときの誤差 3.⑤の影響は $1\text{mm}/\text{m} \times 5\text{m}=5\text{mm}$ で、ばらつき 2 cm の大半は誤差 3.①、



図－2 施工範囲



図－3 施工状況と測定範囲

表－1 無変状時の繰返し測定回数、測定点数、1 回当たりの点数

測定日	繰返し回数	測定点数	1 回当たりの点数
2000/9/4	3	1142	381
2000/9/12	5	1845	369
2000/9/21	3	1184	395

表－2 無変状時の同一点の測定値の標準偏差の最大値

測定日	斜距離 R (m)	水平角 α (°)	鉛直角 β (°)	繰返し回数
2000/9/4	0.188	0.022	0.016	3
2000/9/12	0.297	0.011	0.013	5
2000/9/21	0.230	0.017	0.010	3
重み付平均	0.249	0.016	0.013	

②の影響であり、さらに誤差 3.②も角度に関する誤差であることを考慮すれば、室内測定試験の斜距離の

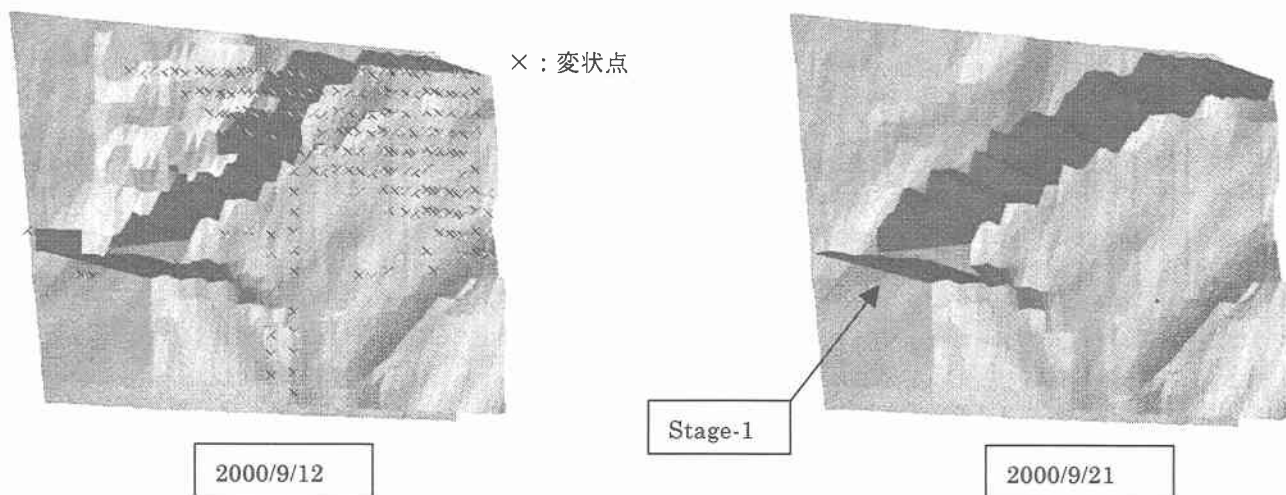


図-4 2000/9/12 → 2000/9/21, 岩切り施工前, 施工ステージ Stage-1 の形成

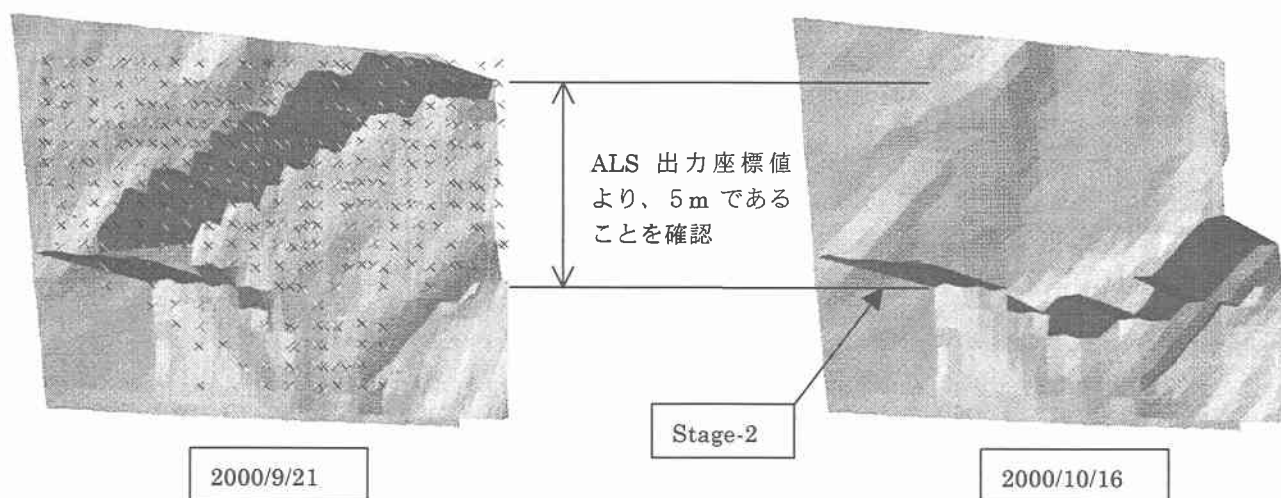


図-5 2000/9/21 → 2000/10/16, 岩切り施工中, Stage-1 から Stage-2 への変化 (EL 5m 降下)

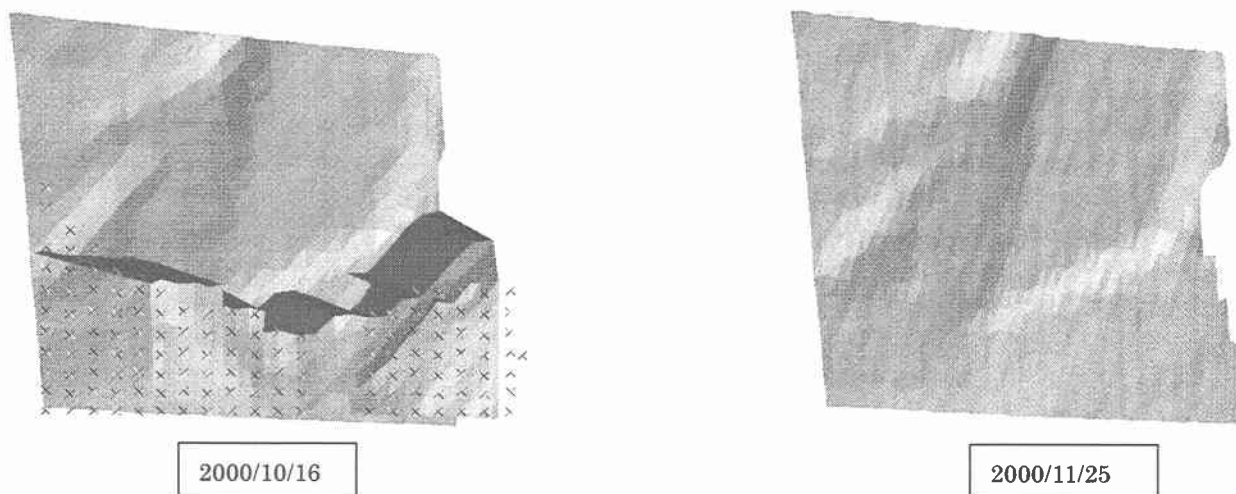


図-6 2000/10/16 → 2000/11/25, 岩切り施工後, Stage-2 から Stage-3 への変化
(EL 15m 降下, 測定範囲外, 施工ステージ消失)

ばらつきは、誤差 3.①が主要な原因であることが予想できる。従って誤差 3.⑤を除去できればという条件付ではあるが、斜距離が 40～100 倍になっても測定斜距離に関するばらつきはほぼ変化しないという結論になり、同一範囲の多数回の測定の平均値の誤差は測定距離に関わらず最大 20mm 程度になるという、2.2) の室内試験の予想を裏づけるものとなる。以上より再設置を伴わない ALS の繰返し測定については、自然斜面に対する現場測定であってもその信頼性を確認できたと考える。

6. 全測定データの信頼性

表－3 は、各測定日における繰返し測定回数、測定点数、1 回当たりの点数である。表－3 より、ALS 測定が完全でないために生じた測定点数のばらつきがわかる。

合計 18 回の測定の範囲設定は、

水平角：28.50°～31.00°

鉛直角：35.00°～37.50°

の 2.50°×2.50° を角度インターバル 0.15° 刻みの角度モードで測定した。測定が完全であれば 1 回当たり測点数は、18 点×18 点の 324 点となるはずであるが、表－3 の結果は 19 点×19 点～20 点×20 点の範囲にある。角度インターバルに直せばほぼ 0.13° に相当し、ALS の機械的旋回精度 0.02° に対応するものと考えられる。全測定値を用いた場合の測定値のばらつき程度を表－4 に示す。表－4 によれば、水平角、鉛直角は ALS の機械的精度 0.02° にほぼ等しい。斜距離については岩切り工等の影響と明確にわかるものについては除いた結果であるが、測距性能の機械的誤差 2 cm のほぼ 50 倍の標準偏差が得られた。全測定データには同一日以外の測定値も全て含まれるため、3.④設置後の ALS 本体の水平合わせに起因する誤差、3.⑤Back 点視準時の誤差、の影響と考えられる。5. との違いは 3.④のみなので、同影響は 4 mm/m と思われる。

7. 変状点の抽出

表－4 は、3.①～3.⑤の全ての誤差を含んだ測定データのばらつきを表している。水平角、鉛直角に関しては、0.022°、0.025° のばらつきは ALS の機械的精度であり、精度内で測定点の空間的方向はほぼ正確に特定されていることがわかる。従って同一点の斜距離の変化のみに注目して変状部分を抽出できる可能性がある。表－4 の無変状点の測定斜距離の標準偏差の最大値が約 1 m であることから、隣り合った測定日の同一点の斜距離変化が 1 m 以上であるとき、その点を変状点とみなす。ただし、同一日の繰返し測定の平均をもって同日の測定値とした。これは 2.2) および 5. の結果を考慮したものである。以上のデータを用い、ALS 測定座標から Cad 上に作成された、測定斜面立体図と、抽出された変上点を図－4、5、6 に示す。図中の × 点が抽出された変状点となる。

1) 図－4：岩切り施工前、施工ステージ形成時

施工ステージ Stage-1 を形成するために、斜面右上方

表－3 各測定日における繰返し測定回数、測定点数、1 回当たりの点数

測定日	繰返し回数	測定点数	1 回当たりの点数
2000/9/4	3	1142	381
2000/9/12	5	1845	369
2000/9/21	3	1184	395
2000/10/16	3	1175	392
2000/11/25	4	1584	396
合計	18	6930	385

表－4 全測定値の標準偏差の最大値

3成分	斜距離 R (m)	水平角 α (°)	鉛直角 β (°)
同一点の測定値の標準偏差の最大値	0.938	0.022	0.025

の部分が、掘削、廃土、自然崩落、法面保護工打設等により変化した。変状点はそこに集中している。

2) 図－5：岩切り施工中、施工ステージは 5 m 降下

岩切り工により施工ステージは、Stage-1 から Stage-2 へ 5 m 降下した。ALS 出力座標値より 5 m の降下を確認できた。変状点は岩切り部分に分布し、無変化部分にはみられない。

3) 図－6：岩切り施工後、施工ステージは 15 m 降下

岩切り工により施工ステージは、Stage-2 から Stage-3 へ 15 m 降下し、測定範囲外となった。施工ステージの消失を確認できた。変状点の分布は 2) と同様である。

8. まとめ

ALS（自動壁面 3 次元測定）の繰返し測定を岩切り施工現場で行い、繰返し測定の自然斜面に対する適用性、運用法を検討した。

(1) ALS 機械本体の設置位置誤差は固定架台を用いて除去できる。

(2) 不規則な自然斜面を遠距離から測定する場合、特に角度に関する誤差の影響が大きい。

(3) 本測定前に再設置を伴う形で対象斜面を多数回（5 回以上¹⁾）測定し、ALS 測定の対象斜面への適用範囲を決定するキャリブレーションは可能と思われる。

(4) キャリブレーションにより対象斜面に対する適用範囲を決定できれば、本測定においては繰返し測定は不要と考えられる。

(5) 今回の例では、適用範囲は 1 m 以上の変状で、測定距離の 1/200 程度である。

(6) 現在ノンプリズム測定の精度、ALS の旋回精度は向上しつつあるので、今後自動壁面 3 次元測定の精度向上を期待できる。

参考文献

1) 測量学 I 基礎編、森忠次、丸善株式会社、1979。