

高精度 3D レーザースキャニングシステムを用いた 岩盤斜面の安定性評価手法

大阪大学 ○上野陽平 大阪大学院 谷本親伯 大阪大学院 小泉圭吾
ハイテック 朴春澤 旭地研 岩田修一

敦煌研究院 Li Zuixiong 敦煌研究院 Wang Xudong 敦煌研究院 Li Weitang

Application of 3D Laser Scanning Systems to Rock Slope Stability Assessment
Yohei UENO, Chikaosa TANIMOTO, Keigo KOIZUMI, Chunze PIAO, Syuichi IWATA,
Zuixiong LI, Xudong WANG and Weitang LI

1 緒言

岩盤斜面の崩壊は、周辺に大きな被害をもたらすこともあり、崩壊の危険性の高い斜面を事前に把握しておくことは、防災の観点から重要となる。本研究では、岩盤斜面における災害のソフト面の対策として、測量機器である高精度 3D レーザースキャナーを用い、中国敦煌莫高窟における急崖の安定性評価を行った。

2 レーザースキャニングシステム概要

3D レーザースキャニングシステムは、レーザー光線対象物をスキャンし、得られる点群の 3 次元座標データから 3 次元 CAD モデルを生成するシステムである。道路、橋梁、トンネルなどの現況図を高精度で効率的に作成して、保管管理、改造・更新計画に利用できるだけでなく、遺跡や文化財、森林や岩肌などを 3 次元 CAD モデル化してコンピュータに取り込めるので、維持管理、防災計画等に活用することが可能である。Fig.1 に莫高窟の 3D データを示す。

3D レーザースキャナーシステムを導入する最も大きな利点は、対象範囲を面的に高精度 3 次元点群データとして記録することが可能なことが挙げられる。これまでの測量機器では、計測したい点に対し、計測者が 1 点、1 点計測を行う必要があったが、HDS3000 を用いることにより、水平 360°、鉛直 270°のエリアに対し、自動的に 1 秒間に 1800 点の 3 次元点群データを取得することが可能となった。この結果、これまで点として認識されていたデータが面のデータとしても利用できることとなり、例えば、対象物の表面形状のモデリング作成などを容易に行うことができる。また、対象物体の断面図などの作成を行う際には、データを取り込んだパソコン上で、任意にその地点を指定するだけで、断面形状を確認することが可能である。

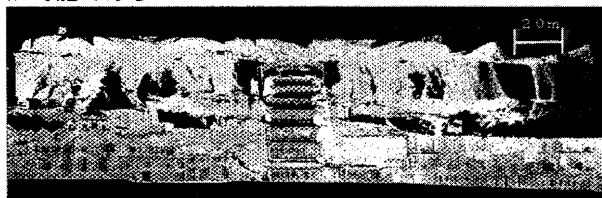


Fig.1 3D-data of Mogao Grottoes

3 研究の概要

3.1 莫高窟における岩盤斜面 莫高窟は中華人民共和国・甘粛省・敦煌市南東に位置する。莫高窟は、河川によって形成された堆積層を、大泉河が侵食してできた急崖の西側に、高さ 50m、南北約 2 km にわたって掘削された大規模な石窟群である。この堆積層は堆積状況によって、砂礫岩層である下部の Q_2 層と、砂礫層である上部の Q_3 層に分けられる (Fig.2)。また、下部の Q_2 層はさ

らに、堆積年代によって、上から A 層、B 層、C 層、D 層に分けられる。窟は比較的固結度の高い Q_2 層に掘られている¹⁾。この岩盤斜面である急崖を研究対象として、安定性評価を行った。

3.2 評価範囲 研究の対象範囲は莫高窟のうち、72 窟～108 窟間であり、南北間距離は約 230m である。この対象範囲を 10 分割し、相対的に崩壊にたいする危険性を評価する。

3.3 評価指標 莫高窟における現地調査の結果、莫高窟崖面には、崖面に鉛直に発生したき裂と共に、崖面に平行に発生したき裂も数多く確認された。莫高窟では、崖面に平行に発生したき裂によって、大規模な崖面崩落が繰り返され、現在のような垂直に近い崖面が形成されたと考えられている²⁾。現地調査においても、対象範囲内で大規模な崩落跡が確認された。そこで、本研究では、崖面崩壊の一形態である、崩落に対して安定性評価を行うとともに、岩盤斜面の安定性評価手法を新たに提案する。評価指標としては、崩落の前兆現象である、き裂、オーバーハング地形、遷急線を用いる³⁾。これらの評価指標を、3D データを独自に加工することによって定量化し、安定性評価に用いた。

4 各評価指標の抽出

4.1 抽出方法 評価指標のうち、き裂は、発生位置、発生本数、連続性を示すトレース長を現地で 3D データ上に付加した。また、オーバーハング地形、遷急線は、3D データから作成した断面図より、対象地形を抽出した。Fig.3 に断面図の例を示す。3D レーザースキャナーシステムの特徴を活かすことで、対象範囲の任意点で断面図を作成することが可能であり、パソコン上で対象地形を容易に抽出することが可能である。

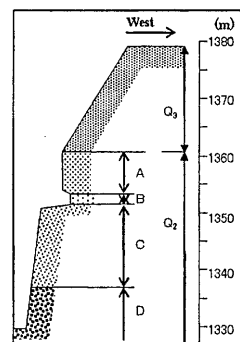


Fig.2 Geological layer of Mogao Grottoes

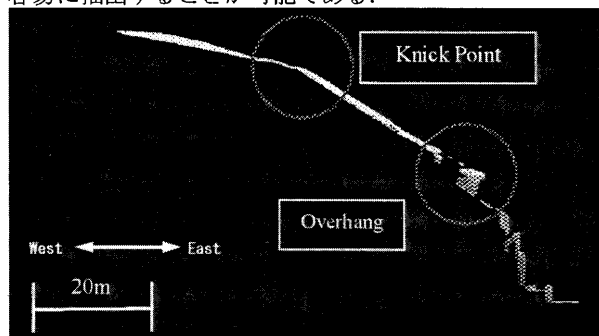


Fig.3 Sample of Section view

4.2.1 き裂 き裂が発生し、伸展していくと、崖面にゆるみが生じる。そのため、崖面崩壊には、き裂の発生と伸展が大きく関係してくる³⁾。そこで、き裂の発生本数と、連続性を示すトレース長の両方を利用して、き裂頻度を算出する。式(1)に、き裂頻度の算出式を示す。

$$\text{き裂頻度} = \frac{a+b}{x \times y} \left(\frac{1}{m} \right) \dots \dots \text{式(1)}$$

ここで、き裂頻度とは、き裂の総トレース長を面積で除した値とする。Fig.4にき裂頻度の概念図を示す。き裂頻度を算出する範囲の横・縦幅をそれぞれxとyとする。また、き裂のトレース長をaとbとする。Fig.4に示すように、範囲内に始点と終点の両方を持つき裂だけでなく、終点を範囲外に持つき裂も算出の対象とする。また、連続性を考慮することから、終点が範囲外にあっても、始点から終点までのトレース長を計算に用いる。トレース長は、解析ソフトを用いると、パソコン上で3Dデータから容易に抽出可能である。

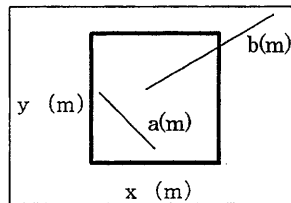


Fig.4 Frequency of cracks(Basic concept)

4.2.2 オーバーハング地形 オーバーハング地形において崖面から突出している部分（以後、オーバーハングブロックとする。）は、下部の浸食が進むことと、背後のき裂の伸展によってゆるみが進行することにより崩落する³⁾。これは自重によるモーメントの作用が大きく関わっていると考えられる。オーバーハングブロック下部の浸食が進行すると、自重によるモーメントの作用が大きくなる。また、断面2次モーメントの概念から、オーバーハングブロックを正面から見た断面積が横長であるほど、自重によるモーメントの作用が大きくなる。よって、以下の式(2)、式(3)によりオーバーハングブロック崩落の危険性を定量化する。

下部の浸食の程度を考慮した体積 (V')

$$V' = \frac{a}{c} \times V \text{ (m}^3\text{)} \dots \dots \text{式(2)}$$

ただし a:奥行き(m) c:高さ(m)

断面2次モーメントを考慮した体積 (V')

$$V' = \frac{b}{c} \times V \text{ (m}^3\text{)} \dots \dots \text{式(3)}$$

ただし b:幅(m) c:高さ(m)

3Dレーザースキャニングシステムから得られる3Dデータの利点は、解析ソフトを用いてオーバーハングブロックの体積を算出できることである。このことにより、これまでの評価手法とは異なり、体積を安定性評価に用いることが可能となる。

4.2.3 遷急線 遷急線は、斜面の傾斜が急に変化して、下側が急傾斜となる境界を表す遷急点を結んだ線を指す。遷急線は連続性が発達するほど、崩壊に対する危険地域を拡大させることから、崖面を不安定化させる。また、連続性と同様に、崖面を不安定化させる遷急線の特徴として、上部・下部斜面の傾斜が考えられる。斜面は水平であれば最も安定であり、傾斜が鉛直に近づく程不安定であるため、斜面崩壊は急傾斜であるほど発生し易いことから、崖面の崩壊に対する安定性を評価する指標として、トレース長、遷急線上部の傾斜角度、遷急点における傾斜角の変化量を抽出する。また、斜面の限界傾斜角度は地質によって異なるため、同じ傾斜角でも地質により崩壊の危険性は異なる。よって、Fig.2を参考に遷急線

を地質によって3種に分類する。

遷急線 Q₃: 遷急線の上部・下部斜面が共に Q₃層

遷急線 Q₂: 遷急線の上部・下部斜面が共に Q₂層

遷急線 Q_{2,3}: 遷急線の上部が Q₃層・下部が Q₂層

5 崩壊危険箇所の抽出

5.1 方法 3指標共、値の大きな方が崩落に対する危険性が大きなことを示すため、下式を用いて無次元化を行い、評価値を求める。

$$x = \frac{Ai - A_{min}}{A_{max} - A_{min}}$$

ただし x: 評価値 A: 評価指標の値

この式で無次元化すると、各値を相対的な大きさを示す、0から1までの値に変換できる。1は、相対的危険度が最も大きいことを示す評価値であり、0は、相対的危険度が最も小さいことを示す評価値である。

5.2 結果 この評価値を、72~108窟間を10分割した評価範囲毎に算出し、崩壊危険箇所を抽出する。結果をFig.5にレーダーグラフで示す。レーダーグラフの項目は、1き裂頻度、2オーバーハング地形、3遷急線 Q₃、4遷急線 Q_{2,3}、5遷急線 Q₂、の各評価値を示す。グラフより、研究対象範囲の中央付近に、岩盤斜面を不安定化する要素が集中していることが分かる。大規模な崩落跡が残っている箇所も、72窟~108窟間の中央付近であり、崩壊危険箇所の抽出結果としては、ある程度の信頼性はあると考えられる。

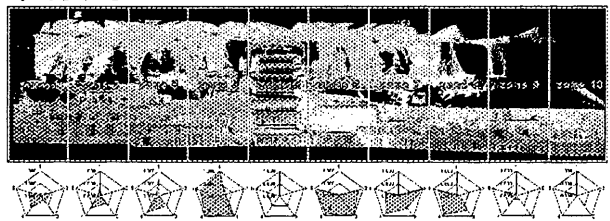


Fig.5 Profile

6 結 言

本研究では、測量システムである3Dレーザースキャニングシステムから作成された3次元データを利用した、急崖部の崩壊に対する安定性評価を行う手法を提案した。HDS3000を用いることで、南北幅230m、高さ60mの対象崖面を、座標精度6mm、点と点の間隔約3cmの点群データとして、4日間で測量し、データ化することができた。従来の測量技術では、この期間で、同量の形状データを得ることは不可能である。

また、3次元データは断面図の作成が任意点で可能であることが、従来の測量技術とは異なる大きな利点であった。さらに、体積や距離が計測できることから、安定性評価方法として新たな手法を考案できると考えられる。このシステムを用いた崖面の安定性評価は初の試みであり、まだ基礎段階ではあるが、今回の評価方法により、岩盤斜面の安定性に対し、一定の評価を行うことができた。今後はこの評価方法を発展させることにより、様々な岩盤斜面の危険地判読に応用できると考えられる。

参考文献

- 1) 朴春澤: 衛星データによる敦煌莫高窟周辺地質および水分移動の調査, 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 平成12年度修士論文, 2001.
- 2) 谷本親伯・朴春澤・小泉圭吾・岩田修一・舩屋直・李最雄・王旭東: 敦煌, 莫高窟周辺の水文・リモートセンシングと断層調査, 材料 別冊 第52巻 第5号
- 3) 土木学会: 岩盤斜面の調査と対策, 土木学会, 1999.