

Practical Method for Prediction of Geomechanical Failure-time

(地盤力学的破壊時刻の実用的予測方法)

学位論文内容の要旨

The issue of predictability of landslides and rock slope failures, which are major geo-hazards, is of great concern. It is a challenge to date in the rock mechanics field to precisely predict failure-time of geo-hazards, and geo-hazards still pose major threat to life and major loss in terms of economics. In the geotechnical field, structures are monitored to ascertain their stability, but the question, "When is geomechanical failure going to occur?" is still an issue. Various monitoring equipment and devices such as Global Positioning System (GPS), Slope Stability Radar (SSR), extensometers, survey stations, and others are used yet somehow "failure" still occurs unanticipated. Hence there is a need, to develop simple, quick and reliable geomechanical failure-time prediction methods that can find extensive application under different failure mechanisms, geometrical and hydrogeological complexity, etc. Needless to mention, it is of paramount importance to understand the causative agents (pre-failure processes) affecting rock mass deformation; this helps us verify, why it failed? However, chiefly, this dissertation seeks to address the question, When will geomechanical failure occur?

Chapter 1 introduces the problem at hand, background, literature review and objectives of this dissertation. Overall, with the aid of slope monitoring systems, there is a need to focus on simple and quick prediction methods that are extensive in application and with minimal sensitivity to different lithology, sizes/volumes of failure and more importantly to failure mechanisms. Pre-failure processes affecting rock mass deformation were also covered.

Chapter 2 reveals a new proposed geomechanical failure-time prediction method. The proposed method utilizes the divergence phenomenon of measured displacement or strain prior "failure" so that I could predict geomechanical failure-time irrespective of failure mechanism, lithology and any other parameters. The method can find use in planning and disaster management in the geotechnical field and in predicting other phenomena. These may include crack movements, landslides, and rock mass and rock slope failures. A simple proposed conceptualised model representing "safe" and "unsafe" prediction is discussed.

Chapter 3 presents practical application of the new proposed method to case history studies of geomechanical failure. Of essence the proposed SLO method gave slightly unsafe errors compared to the INV method (large unsafe errors) with regards to initial predictions. Generally, a gradual decrease of predicted failure-times T_{fp} s towards the actual failure-time T_f is observed. Both methods, particularly SLO, were applicable (safe predictions) under different time scales, from minutes in rock mass failure,

hours in Asamushi landslide, and lastly, days in Vaiont landslide. As a setback, in all the cases, predictions using a varying t_0 approach were unreliable; it not reasonable to extrapolate a safe T_f under linear fits; T_{fp} are scattered away from the actual life expectancy.

Chapter 4 contains experimental/laboratory studies on prediction of rock failure-time. Under compression and tensile creeping mechanisms (Brazilian creep test and uniaxial compression creep test), safe predictions were observed. However, for Inada granite, (dominantly brittle in nature), the methods tend to show limited reliability. Using the varying t_0 approach, some of the predictions were meaningless if T_{fp} is less than t_m .

Chapter 5 involves a discussion on performance of prediction methods. It was found that both methods, particularly SLO, were applicable (safe predictions) under different time scales, from seconds in SWT, minutes in rock mass failure, hours in Asamushi landslide, and lastly, days in Vaiont landslide. Prediction results also revealed scale-independency of SLO and INV in predicting failure-time across the spectrum, from small scale laboratory creep tests to real-life large failures, such as the 500 m³ of rock mass failure, 100,000 m³ for Asamushi landslide and the 270 million m³ for Vaiont landslide. Furthermore, increasing deformation rates tend to increase the likelihood of safe predictions.

Chapter 6 investigates the precursors affecting rock mass deformation. A case study from a cool temperate region in Japan was presented. Field measurements of natural rock slope deformation across fractures predominantly in a chert rock mass, using six surface fracture displacement sensors (ch1-ch6) were conducted. The results indicate that, after thermal correction of field data, under corrected displacement, ch1 gave a clear rock mass movement, which could be related to fracture growth. Ch3 and 5, exhibit very small temperature-induced permanent fracture displacements (due to thermal change) over a period of over two years. Ch4 was gradually opening whilst ch6 was generally closing. Insignificant influences of weather conditions on fracture/rock mass movement were observed.

Chapter 7 contains a numerical approach to get a better insight into the deformation of a fracture under temperature variation. It was found that in the rock mass model, tensile stresses that were large enough to induce fracture growth appeared at the fracture tip when temperature lowered. And, the small tensile stresses in the rock slope model would be sufficient to cause fracture growth along planes of weakness. I tentatively suggest that freezing effects on deformation of rock slope (predominantly in chert rock mass) are little or insignificant, and minor permanent fracture deformations occur under temperature variation across 0 degrees centigrade; and, the permanent fracture deformations were dominantly caused by thermal fatigue.

Chapter 8 presents the conclusions of this dissertation and suggestions for the future research.

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 藤 井 義 明
副 査 教 授 金 子 勝 比 古
副 査 特任教授 米 田 哲 朗

学 位 論 文 題 名

Practical Method for Prediction of Geomechanical Failure-time

(地盤力学的破壊時刻の実用的予測方法)

人命・財産・経済活動等の保全の観点から土砂崩れ・地すべり・岩盤斜面崩壊といった地盤工学的破壊現象の時刻の予測が望まれている。従来、計測された変位に基づいて破壊時刻を予測するためのいくつかの方法が提案されているが、一般的に用いられているとはいえない状況にある。その原因は、これらの方法により破壊時刻が十分な精度で予測できることの実証が十分でないためと思われる。

本論文では、従来提案されている変形速度の逆数を用いた方法 (INV) と、筆者が新たに開発した 2 種類の方法 (NLO、SLO) の計 3 種類の方法について、石灰岩鉱山における岩盤崩壊、浅虫地滑り、Vaiont 地滑り、一軸圧縮および圧裂引張のクリープ試験について、破壊時刻の予測の妥当性を検討し、筆者が開発した SLO が従来の方法 (INV) や、筆者が新たに開発したもう一つの方法 (NLO) よりも、早期にかつ安全側の予測を与えることを示したものである。

破壊に伴う変位の発散を表す基本式としては、大久保と福井により提案された三次クリープにおける残存寿命と変位の関係を表す式を用いており、これを時刻で微分した後、変形することによって上記 3 方法による破壊時刻の予測を実行した。

INV は、従来から提案されている変形速度の逆数を用いる方法である。破壊時には変形速度の逆数が 0 になるので、横軸に時間、縦軸に変形速度の逆数をとったグラフを作成し、変形速度が無限、すなわち、変形速度の逆数が 0 になる x 切片を破壊時刻として推定する方法である。変形初期における小さい変形速度に対応する大きい逆数に影響され、危険側の破壊時刻の推定値が得られる欠点があることを筆者は明らかにした。

NLO は、筆者が開発した、非線形最小二乗法により力ずくで破壊時刻を求めるものであり、解を収束させるのが難しく、実用には向かないことを筆者は明らかにした。

SLO は横軸に変形速度、縦軸に変形速度と時刻の積を取ったグラフを作成し、データの回帰直線の傾きを破壊時刻とする方法である。実行が簡単で、精度もよく、早期に安全側の破壊時刻が得

られることが明らかになった。

筆者が検討した事例は、時間的なスケールで秒から日まで、破壊寸法のスケールで cm から数 100 m のオーダーであり、岩種も花崗岩・石灰岩・凝灰岩など多岐にわたり、破壊のメカニズムも地滑り・引張破壊・弱面におけるせん断など多様である。これらについていずれも正確な破壊時刻の予測ができたことは、長期的な変形挙動に大きく影響すると思われる破壊寸法・岩種・破壊メカニズムなどの差異は、破壊直前の変位の発散挙動に関しては大きな影響を与えず、筆者の開発した破壊時刻の予測方法を用いることができることを示しているものと思われる。

また、筆者は、過去の文献に示されるデータも含めて、破壊体積と破壊の最終段階にかかる時間や臨界変形速度についてまとめ、それぞれ両対数グラフ上でほぼ 1 本の直線上に乗ることを示した。これらのグラフを利用すれば、予想される破壊体積から破壊の最終段階にかかる時間や臨界変形速度を見積もり、SLO とあいまって危険回避に生かすことができる。また、逆に、破壊にかかる時間や変形速度から破壊体積を見積もることもできる可能性がある。あるいは、破壊体積があらかじめ予想できれば、必要な計測機器の測定精度の決定に生かすこともできよう。

さらに筆者は、温度変化による岩盤斜面変形の例として、付加体のチャートで構成される岩盤斜面における変形メカニズムについて、亀裂の長期モニタリング結果と数値解析に基づいた考察も試みている。この事例では変位の顕著な増加がみられず破壊時刻の予測を行うことはできていないが、温度変化に伴う変位を軽減する方法、間隙水の凍結を考慮した数値解析方法など、筆者の工夫が随所にみられる。

これを要するに、著者は、従来の方法よりも簡単に実行でき、また、早期に安全側の予測を得ることのできる地盤工学的破壊時刻の予測方法を開発したものであり、岩盤工学の発展に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。