

岩種の違いに着目したスティック・スリップ現象 に関する実験的検討

清田 亮二^{1*}・岩田 直樹¹・高橋 裕徳¹・藍檀 オメル²・渡嘉敷 直彦³

¹中電技術コンサルタント株式会社 (〒734-8510 広島市南区出汐2-3-30)

²琉球大学工学部 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1)

³琉球大学島嶼防災研究センター (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1)

*E-mail: kiyota@cecnet.co.jp

スティック・スリップ現象とは、物体間の接触面においてせん断変形中に発生する滑りと応力の蓄積を繰り返す現象であり、地震が繰り返し発生するメカニズムと考えられている。このため、岩石の摩擦現象と地震の発生機構を関連付けた研究がなされるようになった。本研究では、コンベアーベルトに固定した一定速度で移動する岩石ブロック上に、バネで固定したブロックを載せてスティック・スリップ現象を発生させる実験装置により、熊本珪岩およびトルコ珪岩のブロックを対象とした実験を行った。実験結果から、過去のスティック・スリップ実験や経験的に求まっている地震パラメータとの整合性、岩種の違いによるスティック・スリップ現象への影響等について検討した。

Key Words : stick-slip, discontinuity, friction, recurrence time, stress drop

1. はじめに

スティック・スリップは、接触する2面が固着（応力の蓄積）とすべり（応力の解放）を繰り返す現象である。岩盤工学の分野では、斜面移動や大規模地下空洞の不安定ゾーンのクリープ的な挙動だけでなく、地震の周期的な発生を説明するのに非常に重要である。Brace and Byerlee¹⁾は、地震が繰り返し発生するメカニズムを説明するために岩石を用いた室内試験を行い、スティック・スリップ現象がこのメカニズムであることを提唱した。それ以降、岩石の摩擦現象を地震の発生機構と関連付けた検討がなされてきた。

ただし、これらの研究はどのような条件下であればスティック・スリップ現象が発生しやすいかに関する報告が多く、拘束圧、载荷速度、試験機の剛性などの実験条件のパラメータがすべりの加速度やすべり量、応力降下量などの実験結果にどのような影響を与えるかに関する報告は少ないのが現状である。また、上記の研究では圧縮試験機を用いたものが大半であり、観測されるすべり量が $1\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ と非常に小さく、破壊時のすべり加速度のピーク値が $10^2\sim 10^5\text{m/s}^2$ の範囲と非常に高くなっており²⁾、これは中規模から大規模地震のすべり量 $10\text{cm}\sim 1\text{m}$ 程度、加速度のピーク値 $1\sim 10\text{m/s}^2$ と大きく異なっている。一方、ロータリー式せん断試験機を用いた実験³⁾では、

実際の地震時のすべり速度やすべり量に近い値の実験が行えるが、高速時の摩擦係数の低下といった摩擦メカニズムの解明を目的としており、スティック・スリップ現象を対象としたものではない。

筆者らは、これまでの室内実験よりも大きなすべり量に対するスティック・スリップ現象を観測できるように、コンベアーベルトに固定した一定速度で移動する岩石ブロックの上に、バネで固定したブロックを載せてスティック・スリップ現象を発生させる実験装置を製作し、岩石ブロックを用いて滑りブロックの移動速度、垂直応力、バネの剛性率を変えて室内実験を行った³⁾。しかしながら、この実験は花崗岩のソーカット面についてのみの実験結果であることや実験サンプル数が少ないことから、供試体の種類やバラツキによる影響が評価できていないなどの課題があった。

そこで本研究では、熊本珪岩およびトルコ珪岩のブロックを用いたスティック・スリップ実験を行い、既往の実験結果との整合性の確認や、岩種の違いによる影響検討を行った。その結果、既往の実験結果と整合した結果や、経験的な地震パラメータの相関と同様の結果が得られた。また、岩種の違いすなわち接触面の粗さや幾何学的形状の違いがスティック・スリップ現象に影響していることが分かった。

2. 実験概要

(1) 使用材料

本実験で使用する岩石ブロックの岩種は、熊本珪岩およびトルコ珪岩である。スティック・スリップ実験は、各岩種で作製した寸法 $100 \times 200 \times 40\text{mm}$ の下部ブロックの上に寸法 $100 \times 100 \times 100\text{mm}$ の上部ブロックを載せた状態で実施する。

写真-1に実験に用いた熊本珪岩とトルコ珪岩の上下ブロック間の接触面を示す。また、既往の実験³⁾で用いた花崗岩のブロックも示す。熊本珪岩とトルコ珪岩の接触面は自然片理面、花崗岩はソーカット面である。

(2) 傾斜実験

スティック・スリップ試験に先立ち、接触面の強度特性を把握するため、接触面の静止および動摩擦角を傾斜実験により求めた。静止および動摩擦角は、写真-2に示す傾斜試験機を用いてレーザー距離計で計測したブロックの変位応答とブロック重量より算定した。傾斜試験機の傾斜を増加させてブロックが滑り始めた時の傾斜角が静止摩擦角に相当する。また、動摩擦角は、滑り始めからの応答変位と時刻の関係について最小二乗法により求めた係数から算定した。

(3) スティック・スリップ実験

写真-3にスティック・スリップ実験装置を示す。実験装置はゴム製のコンベアーベルトと固定フレームからな

り、コンベアーベルトの移動速度は自由に変えることができる。下部ブロックはコンベアーベルトに、上部ブロックはバネを介して固定フレームに固定する。コンベアーベルトを作動させると、初期は上部と下部ブロックは共にバネが伸張する方向に移動するが、ある変位を超えると上部ブロックに接続されたバネの復元力によりすべりが生じる。この挙動の繰り返しがスティック・スリップ現象である。

実験では、スティック・スリップ時の上部ブロックに作用する力を計測するためにバネと固定フレームの間にはロードセルを設置し、コンベアーベルト移動方向の水平加速度を計測するために上部ブロックと下部ブロックの側面には加速度計を設置した。運動中の上部ブロックと下部ブロックの水平変位は、フレームに固定した非接触型レーザー変位計により固定フレームとの距離を計測した。計測サンプリング間隔は 10ms として、変位、荷重および加速度を動ひずみアンプを用いてPCに記録した。実験条件は表-1に示すケースを基本として、滑りブロックの移動速度、垂直荷重変えて実験を行った。なお、使用したバネは剛性 1.0N/mm の弾性バネである。

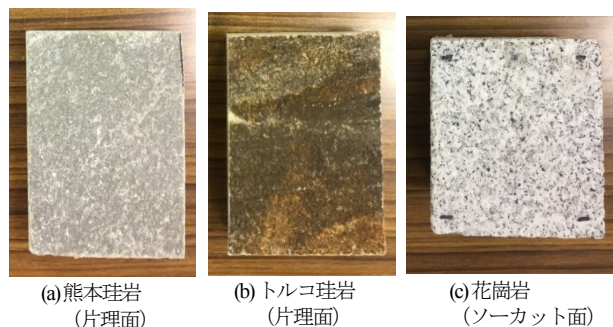


写真-1 岩石ブロックの接触面

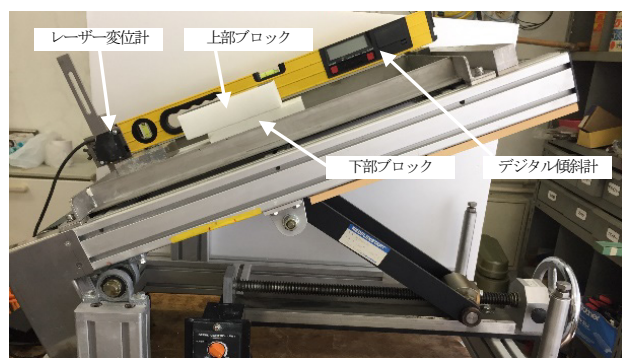


写真-2 傾斜実験装置

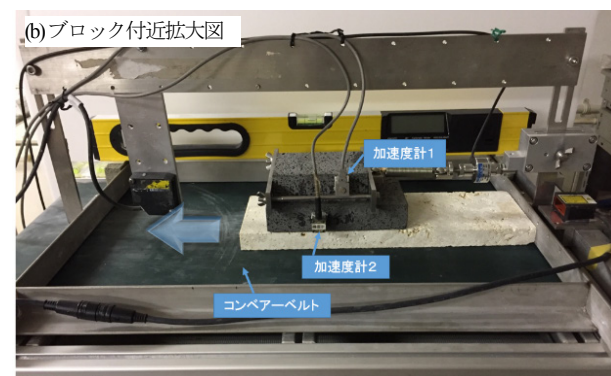
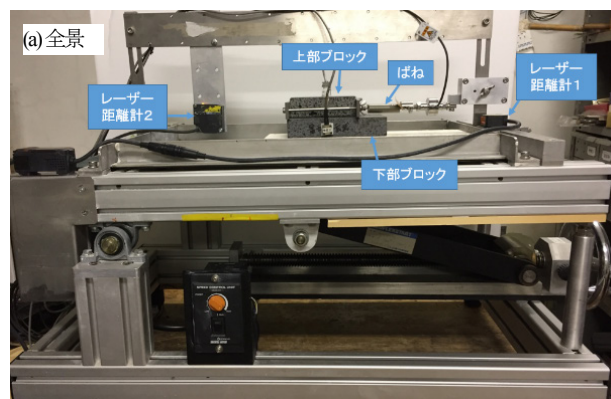


写真-3 スティック・スリップ実験装置

表-1 スティック・スリップ実験ケース

パラメータ	条件
ベルト移動速度 $v(\text{mm/s})$	0.7, 1.5, 1.9
垂直荷重 $N(\text{N})$	7.1, 10.0, 14.9, 19.8 or 19.0

3. 実験結果

(1) 傾斜実験

図-1は、傾斜実験における岩石ブロックの変位経時変化のうち、岩石ブロックの滑りが見られた時間付近の拡大図を示す。

表-2に傾斜実験結果を示す。熊本珪岩の静止摩擦角は 35.1° 、動摩擦角は 21.6° 、トルコ珪岩の静止摩擦角は 26.9° 、動摩擦角は 24.8° であり、両岩種の静止摩擦角と動摩擦角の大小関係は逆になっている。

(2) スティック・スリップ実験

図-2にバネ荷重、上部ブロックの加速度および上部ブロック変位の経時変化を一部の実験ケースについて示す。図-2(a)～(c)は熊本珪岩、図-2(d)はトルコ珪岩の結果を示している。いずれのケースも滑り発生直前のバネ荷重（以降、ピーク荷重と呼ぶ）や滑った直後のバネ荷重、また滑り前後のバネ荷重の変化量（以降、荷重降下量と呼ぶ）も定常的でなく、滑りイベント毎に大きく異なる。これはアスペリティの影響によるものである。図-2(a)と

(b)を比較すると、下部ブロックの速度が速くなった場合、荷重蓄積時間（すべり終了から次のすべり開始までの時間）が短くなり、バネ荷重およびすべり量（上部ブロックのすべり発生前後の変位差）が小さくなる傾向がある。図-2(a)と(c)を比較すると、ブロックの垂直荷重を大きくした場合、荷重蓄積時間が長くなりバネ荷重が大きくなる。図-2(d)のトルコ珪岩と図-2(a)～(c)の熊本珪岩の結果を比較すると荷重蓄積時間やすべり量は大きく異なることから、接触面の摩擦角や粗さ、幾何学的形状などの違いが影響していることが考えられる。

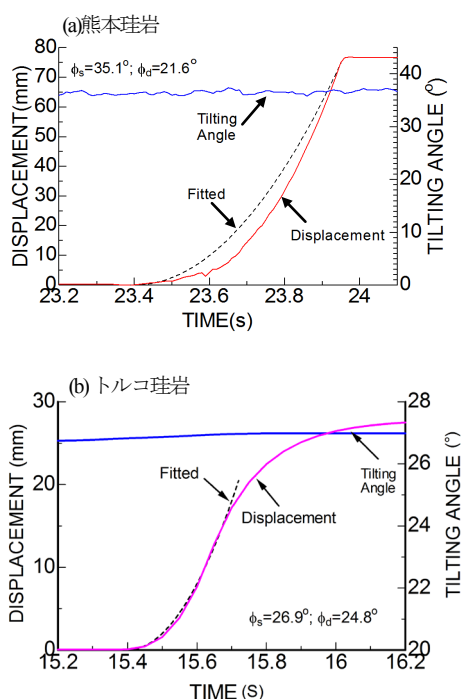


図-1 傾斜試験による変位応答

表-2 傾斜実験結果

岩種	上下ブロック 接触面	静止摩擦角 ϕ_s	動摩擦角 ϕ_d
熊本珪岩	片理面	35.1°	21.6°
トルコ珪岩	片理面	26.9°	24.8°
花崗岩 (既往実験 ³⁾)	ソーカット面	32.3°	30.3°

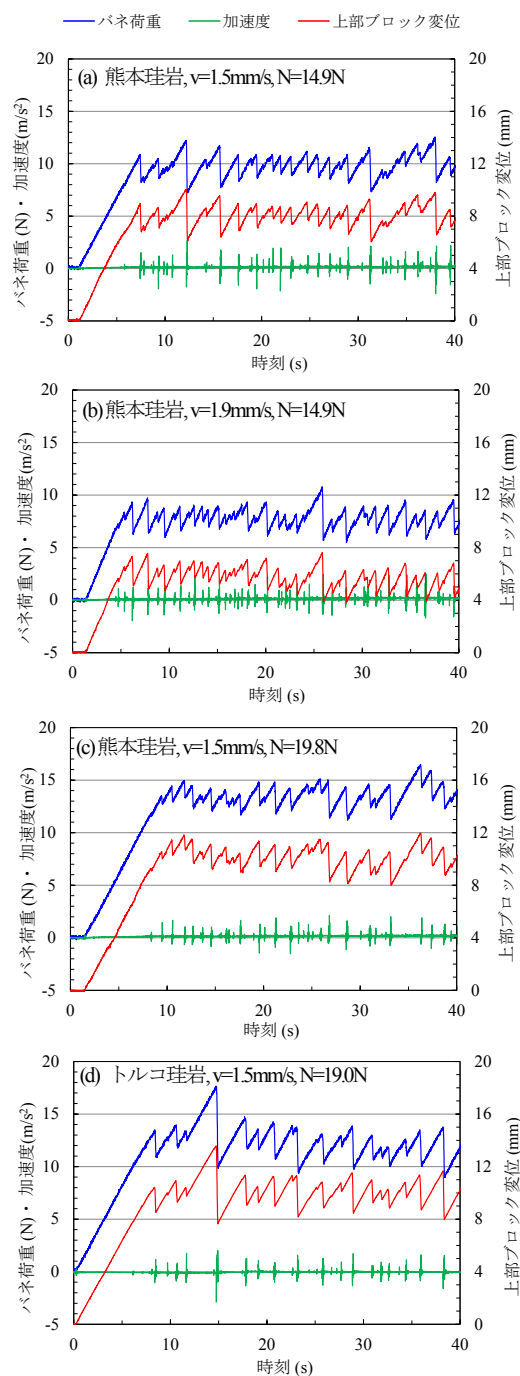


図-2 ブロック挙動の経時変化

4. 実験結果に対する考察

(1) 摩擦係数とブロック挙動の関係

図-3 は静止摩擦係数（すべり直前のバネ荷重を上載荷重で割ったもの）と荷重蓄積時間の関係を示す。この結果から、同一岩種では荷重蓄積時間が長いと静止摩擦係数が大きくなる傾向がみられ、これは、Dieterich⁴⁾や Aochi and Matsu'ura⁵⁾が示した結果と整合している。各岩種で比較すると、静止摩擦係数の大小関係は、傾斜試験で得られた静止摩擦角の大小関係と整合している。また、同一岩種では上載荷重が大きくなる（△から○）と静止摩擦係数が大きくなる傾向があるが、これは上載荷重の増加に伴ってブロック接触部のアスペリティの面積が増加し、強度が増加したことによるものと考えられる。

図-4は動摩擦係数（スリップ中の加速度がゼロのときのバネ荷重を上載荷重で割ったもの）と最大速度の関係を示す。上載荷重が大きくなる（△から○）と動摩擦係数と同様に動摩擦係数も大きくなる傾向がある。また、いずれの岩種、ケースとも最大速度が変わっても動摩擦係数の変化は見られない。Reches and Lockner⁶⁾によれば、ロータリーせん断試験機による高速摩擦試験では、すべり速度 10^2 m/s以下では動摩擦係数は低下傾向、すべり速度 10^1 m/s以上では増加傾向となり、すべり速度 $10^2 \sim 10^1$ m/sの範囲では動摩擦係数の低下から増加への変遷区間となり、動摩擦係数はおおむね横ばいの傾向となり変化は見られない。本実験で得られた最大速度の範囲は $10^2 \sim 10^1$ m/sであり、動摩擦係数の変化が見られないことから上記の結果と整合している。

(2) 荷重降下量とすべり量の関係

図-5は荷重蓄積時間と荷重降下量（上部ブロックに接続されているバネのすべり発生前後の荷重差）の関係を

示す。この結果、いずれのケースも、荷重蓄積時間が増加すると荷重降下量が増加する傾向がみられる。このことは、Kanamori and Anderson⁷⁾, Molnar⁸⁾が示している地震再来期間は地震モーメントと正の相関があり、地震モーメントも荷重降下量に比例することから、地震再来期間が荷重降下量と正の相関があることと整合している。移動速度の異なるケースについて比較すると、移動速度が大きい場合、荷重蓄積時間が短くなるため、データ群（×）は左下側に分布し、移動速度が遅い場合、データ群（○）は右上側に分布する。荷重降下量は静止摩擦係数と動摩擦係数の差分によって決まるため、各岩種の荷重降下量と接触面の摩擦角の大小関係は必ずしも整合するとは限らない。

図-3に示した結果から荷重蓄積時間が大きくなると静止摩擦係数が大きくなるため、すべり発生直前のピーク荷重も大きくなる。また、前述のように荷重蓄積時間が大きくなると荷重降下量も大きくなることから、荷重降下量をピーク荷重で割った荷重降下率とすべり量との関係を整理した結果を図-6に示す。いずれのケースもすべり量と荷重降下率が線形関係にある。Ohnaka²⁾によると、摩擦すべりにおけるせん断応力降下率とすべり変位量の間には式(1)の関係がある。

$$\frac{\Delta\tau_b}{\tau_p} = \beta \left(\frac{D_c}{\lambda_c} \right)^M \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\tau_b$ はせん断応力降下量、 τ_p はせん断応力のピーク値、 D_c は限界すべり変位量（応力降下に要する変位量）、 λ_c は摩擦面の幾何学的凹凸を代表する特性波長、 β および M は無次元パラメータを示す。式(1)のせん断応力降下率 $\Delta\tau_b/\tau_p$ および限界すべり量 D_c をそれぞれ図-6の荷重降下率およびすべり量と読み替えれば、両者は線形関係にあることから式(1)の関係と整合する。ただし、岩種毎に線形の傾きが異なっているが、これは式(1)で限

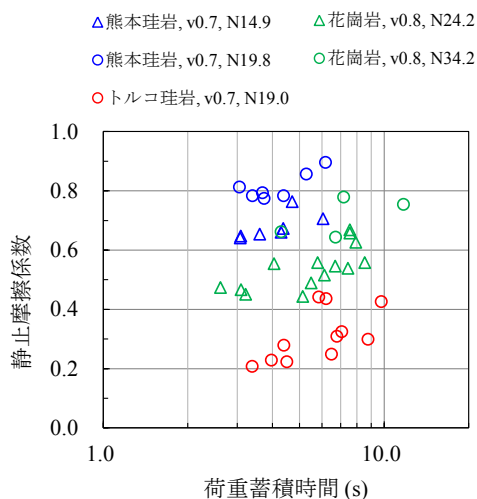


図-3 荷重蓄積時間と静止摩擦係数の関係

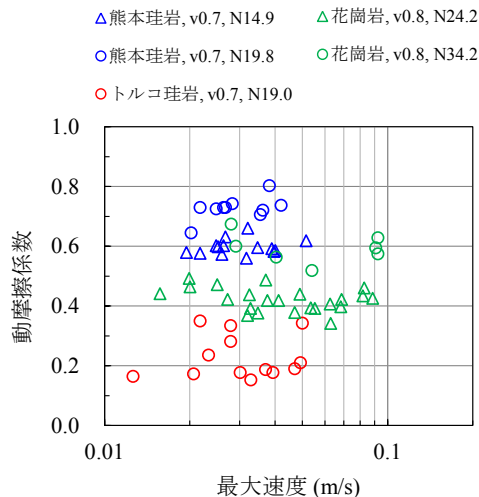


図-4 最大速度と動摩擦係数の関係

界すべり量 D_c を摩擦面の凹凸を代表する特性波長 λ_c で規格化しているように、岩種毎の接触面の粗さや幾何学的形状の影響によるものと考えられる。今後はこれらの影響を加味した評価を行ってきたい。

(3) すべり量、最大速度、最大加速度の関係

図-7は、各岩種ブロックの1回の滑りにおけるすべり量と滑り時の最大速度および最大加速度の関係を示す。この結果から、何れの岩種もすべり量と最大速度、すべり量と最大加速度に正の相関がある。また、このことから、最大速度と最大加速度の間にも正の相関があることが推察される。この結果はOhnaka²⁾が示した圧縮試験装置の実験結果とも整合している。本実験では弾性バネを使用していることから、すべり量と荷重降下量との関係は線形となる。このため、図-7(a)の関係は、すべり量を荷重降下量と読み替えることで、荷重降下量と最大速度が線形であることも示しており、この結果は、Kanamori

and Anderson⁷⁾による地震記録から得られている結果とも整合している。岩種の違いについて見ると、すべり量と最大速度の関係では各岩種間に有意な差異は見られない。すべり量と最大加速度の関係では、ソーカット面の花崗岩の加速度が小さく、自然片理面では熊本珪岩の最大加速度が若干大きくなっている。これらの関係は、各岩種の接触面の摩擦角の大小関係とも整合していないことから、前述のように接触面の粗さや幾何学的形状の影響も考えられる。

5. おわりに

本研究では、岩種の違いに着目したスティック・スリップ現象を実験結果から検討した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 静止摩擦係数は荷重蓄積時間が長いと大きくなり、各岩種の静止摩擦係数の大きさは、傾斜試験で得られた静的摩擦角の大小関係と整合する。
- 2) 動摩擦係数は本実験における最大速度の範囲内では顕著な変化が見られない。
- 3) 荷重降下量は荷重蓄積時間が長いほど大きくなる。ただし、各岩種の荷重降下量の大きさは接触面の摩擦角の大小関係と必ずしも整合しない。

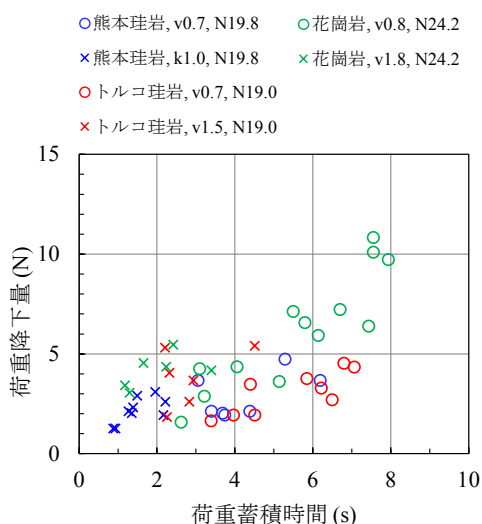


図-5 荷重蓄積時間と荷重降下量の関係

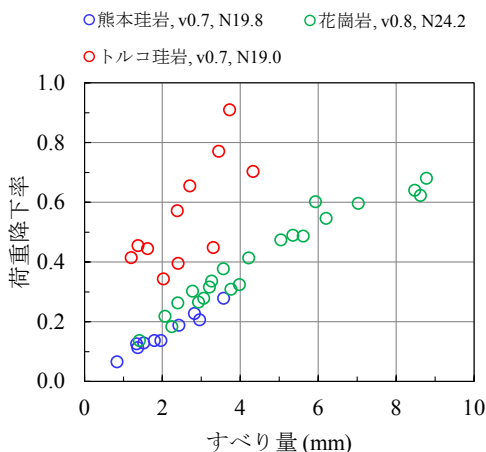


図-6 荷重降下率とすべり量との関係

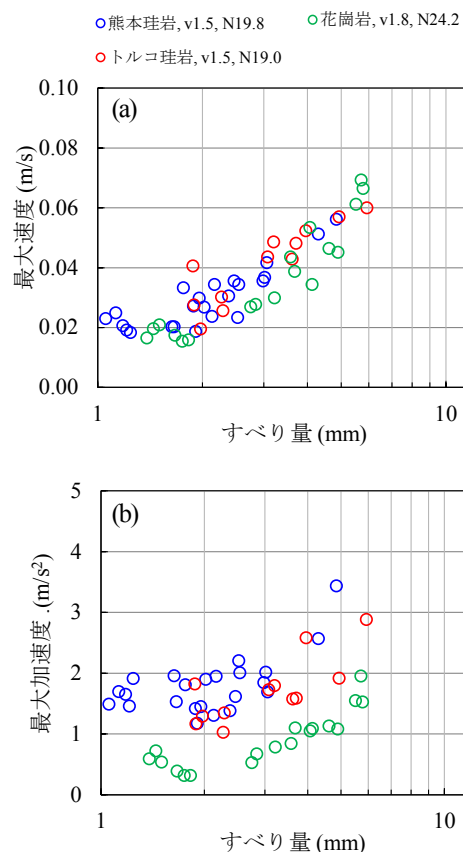


図-7 すべり量と最大速度および最大加速度の関係

- 4) 荷重降下率はすべり量に比例するが、傾きは岩種毎に異なる。
- 5) ブロックの最大速度および最大加速度は、すべり量に比例して増加するが、各岩種の最大速度および最大加速度の大小関係は接触面の摩擦角の大小関係と必ずしも整合しない。

以上のように、過去のスティック・スリップ実験と整合した結果となるとともに、経験的に求まっている地震パラメータの相関と同様の結果が得られた。また、岩種の違いすなわち接触面の粗さや幾何学的形状の違いがスティック・スリップ現象に影響していることが分かった。今後は、接触面の粗さや幾何学的形状の影響も加味した評価を行っていききたい。

参考文献

- 1) Brace, W. F. and Byerlee, J. D. : Stick-slip as a mechanism for earthquakes, *Science*, 153, pp.990-992, 1966.
- 2) Ohnaka, M. : A constitutive scaling law and a unified comprehension for frictional slip failure, shear fracture of intact rock, and earthquake rupture, *J. Geophys. Res.*, 108(B2), pp.6-1-21, 2003.
- 3) 岩田直樹, 高橋裕徳, 足立光, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦 : スティック・スリップ現象の断層運動への適用性に関する実験的および解析的検討, 第 14 回岩の力学国内シンポジウム講演集, 講演番号 71, 2017.
- 4) Dieterich, J. H. : Modeling of rock friction, 1. Experimental results and constitutive equations, *J. Geophys. Res.*, 84, pp.2161-2168, 1979.
- 5) Aochi, H. and Matsu'ura, M. : Slip- and time-dependent fault constitutive law and its significance in earthquake generation cycles, *Pure Appl. Geophys.*, 159, pp.2029-2044, 2002.
- 6) Reches, Z. and Lockner, D. : Fault weakening and earthquake instability by powder lubrication, *Nature*, 467, pp.452-455, 2010.
- 7) Kanamori, H. and Anderson D.L. : Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 65(5), pp.1073-1095, 1975.
- 8) Molnar, P. : Earthquake recurrence intervals and plate tectonics, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 69(1), pp.115-133, 1975.

EXPERIMENTAL STUDY ON STICK-SLIP BEHAVIOR BY DIFFERENCE IN ROCK TYPE

Ryoji KIYOTA, Naoki IWATA, Yasunori TAKAHASHI, Ömer AYDAN and Naohiko TOKASHIKI

The stick-slip phenomenon is used to explain as a mechanism of earthquake recurrence. A number of stick-slip experiments have been performed to clarify the mechanism of recurring slip instabilities and slip weakening. The authors have developed a new experimental setup, in which blocks move on a conveyor belt and is restrained by the spring, and conducted stick-slip experiments. This experimental setup is able to simulate conditions in actual earthquakes better than previous stick-slip experimental devices. The results of this experiment are quite similar to the relations of the earthquake parameters decided from earthquake observations, and are consistent with those of previous stick-slip experiments.