

岩盤不連続面の寸法効果がスティック・スリップ現象に及ぼす影響について

清田 亮二^{1*}・岩田 直樹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。筆者らは、スティック・スリップ現象を発生させる実験装置を作成し、様々な岩種の供試体を用いた実験を行ってきた。しかしながら、実験での供試体と実際の地震断層の不連続面の面積は大きく異なり、その寸法効果は不明である。そこで、接触面積の寸法効果を確認するため、供試体の寸法を変えたスティック・スリップ実験を行った。これらの実験結果に基づいて岩盤不連続面の寸法効果がスティック・スリップ現象に及ぼす影響について検討した。

Key Words : stick-slip, discontinuity, scale effect, joint area, friction

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のほか、地震の周期的な発生や断層面における応力降下に伴う地震モーメントや変位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、これまで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。

筆者ら^{3), 4), 5)}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（長さ 50cm ）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、バネの剛性を変えて室内実験を行った。これらの実験結果に基づいて、実験条件のパラメータがすべりの加速度やすべり量、荷重降下量などの結果に与える影響について検討した。ただし、室内実験における供試体と実際の地震断層の不連続面の面積は大きく異なるため、例えば地震断層における地震動や変位の推定や評価に対して、実験結果で得られた知見を適用するには、これらの寸法効果を考慮する必要がある。しかしながら、岩盤不連続面のせん断強度や変形特性の寸法効果に関する研究^{6), 7), 8)}はなされているが、スティック・スリップ挙動の寸法効果に関する研究はほとんどなされていない。そこで、岩石接触面の寸法効果を確認するため、これまでよりもさらに大型の実験装置（長さ 1m ）を作成し、4種類の岩種について寸法を変えた供試体を用いてスティック・スリップ実験を行った。本稿では、これらの実験で得られた結果から、岩盤不連続面の寸法効果がスティック・スリップ現象に及ぼす影響およびその要因について検討した結果を述べる。

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、斑れい岩、

花崗岩，安山岩，閃緑岩の4種類である．スティック・スリップ実験は，各岩種で作製した下部ブロックの上に，接触面積が100cm²，200cm²，300cm²となるように作製した各岩種の上部ブロックを載せた状態で実施する．ここで，接触面積とは，上部ブロックの底面積を示しており，見掛けの接触面積のことを言う．

写真-1に，実験に用いた各岩種の上部ブロックの接触面を示す．斑れい岩と花崗岩の上部ブロックと下部ブロックの接触面は人工的な亀裂面であり，安山岩と閃緑岩は自然片理面である．

表-1は，JGS 3811-2011に示される硬岩系岩盤の不連続面の粗さの区分⁹⁾を用いて，本実験で使用した各岩種の岩石ブロックの接触面の特徴を分類したものである．

(2) スティック・スリップ実験

写真-2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わることができる．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荷重計を設置し，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の上面に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接触型変位計により計測した．計測サンプリング間隔は5ms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-2に示すケースを基本として，コンベアーベルトの移動速度，垂直応力を変えて実験を行った．ここで，表-2に示す垂直応力 σ_n は，垂直荷重（上部ブロック自重と載荷した重りの重量）を見掛けの接触面積で割った見掛けの垂直応力のことを言う．なお，垂直応力は，載荷する重りの重量によって調整している．また，使用したバネは剛性1.0N/mmの弾性バネである．

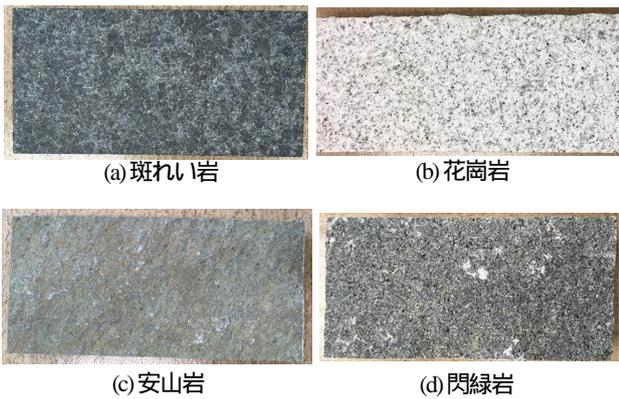


写真-1 岩石ブロックの接触面

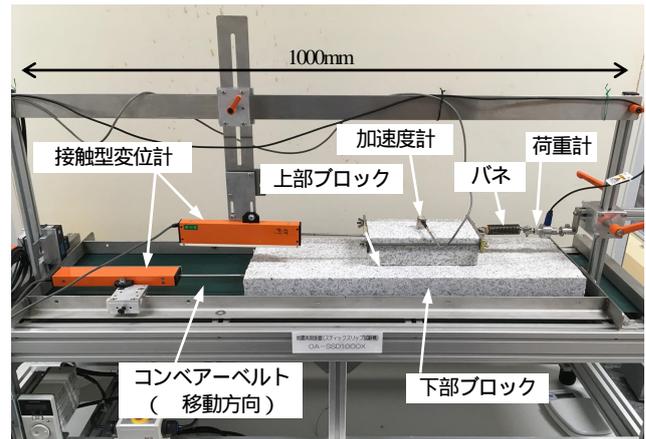


写真-2 スティック・スリップ実験装置

表-1 JGSに基づく不連続面の粗さの区分⁹⁾

小スケール (10cm) 大スケール (1~2m)	粗い:r	やや粗い:m	滑らか:s
階段状:s 	r_r	r_{sm}	r_{ss}
波状:w 	r_{wr} (閃緑岩)	r_{wm} (安山岩)	r_{ws}
平面状:p 	r_r	r_{pm} (花崗岩)	r_{ps} (斑れい岩)

()は本実験で用いた岩石ブロックの接触面を分類した結果を示す．

表-2 スティック・スリップ実験ケース

岩種	上下ブロック 接触面積 (cm ²)	垂直応力 σ_n (kPa)	ベルト 移動速度 (mm/s)
斑れい岩	100, 200	15, 20	0.5, 1.0, 1.5, 3.0
花崗岩	100, 200, 300	15	
安山岩	100, 200, 300	15, 20	
閃緑岩	100, 200, 300	20	

3. 実験結果

図-1に各岩種および各ブロックサイズにおけるバネ荷重の経時変化を示す。また、図-2に上部ブロックの累積滑り量(=下部ブロックの変位-上部ブロックの変位)を示す。累積滑り量は、上下のブロックが固着して移動しているときはゼロであり、滑りが生じたときに加算される。このため、累積滑り量とバネ荷重の関係は、累積滑り量が一定の状態ではバネ荷重のみが増加した後、バネ荷重がピーク荷重に達すると累積滑り量の増加に伴ってバネ荷重が低下することを繰り返す。

図-1および図-2より、上部ブロックサイズの違いすなわち接触面積の違いによりバネ荷重の大きさおよびすべり量が異なる。また、岩種によりスティック・スリップ挙動は大きく異なり、接触面が粗くなるにつれて、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)

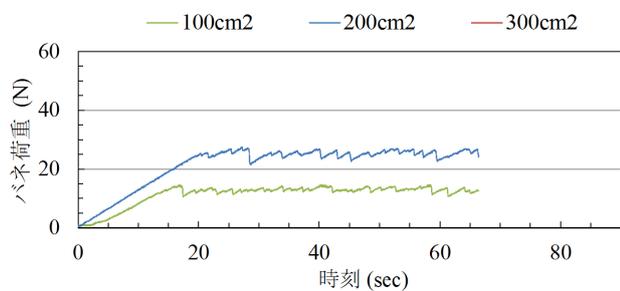
は長く、滑り前後のバネ荷重の変化量(以降、荷重降下量と呼ぶ)やすべり量が大きくなる傾向を示している。このように、岩種の違いすなわち表-1で示した接触面の粗さなどのアスペリティの状態がスティック・スリップ挙動に影響していることが考えられる。

なお、図-1および図-2は、いずれもコンベアーベルトの移動速度が1.0mm/sのケースを示しているが、本稿ではこのケースの結果について考察する。

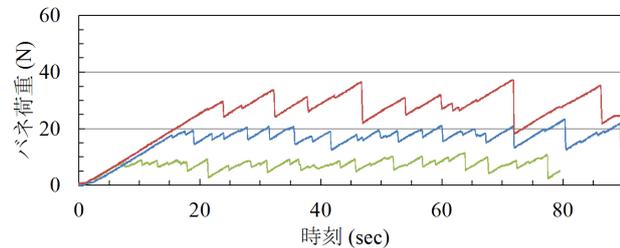
4. 実験結果に対する考察

(1) 摩擦係数と接触面積の関係

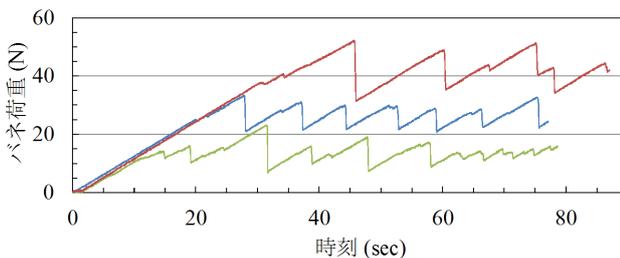
接触面積の違いによるスティック・スリップ挙動への影響を確認するために、摩擦係数(バネ荷重を垂直荷重



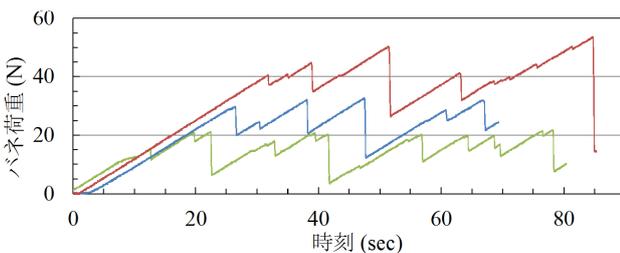
(a) 斑れい岩, $\sigma_n=2.0\text{kPa}$



(b) 花崗岩, $\sigma_n=1.5\text{kPa}$

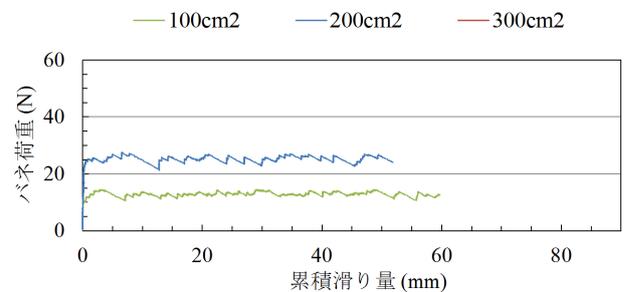


(c) 安山岩, $\sigma_n=2.0\text{kPa}$

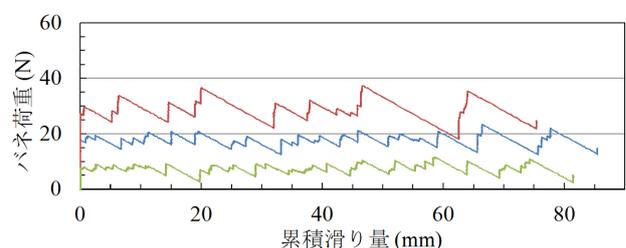


(d) 閃緑岩, $\sigma_n=2.0\text{kPa}$

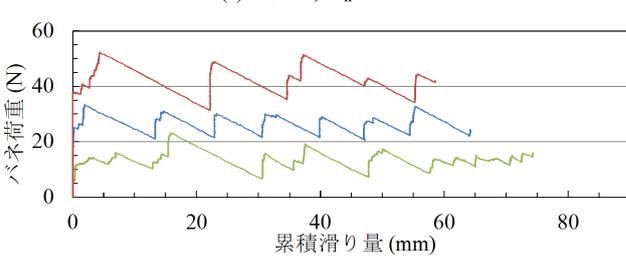
図-1 バネ荷重の経時変化



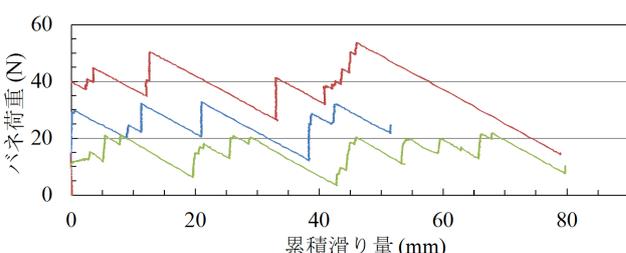
(a) 斑れい岩, $\sigma_n=2.0\text{kPa}$



(b) 花崗岩, $\sigma_n=1.5\text{kPa}$



(c) 安山岩, $\sigma_n=2.0\text{kPa}$



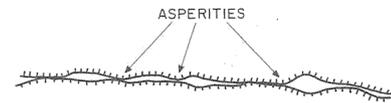
(d) 閃緑岩, $\sigma_n=2.0\text{kPa}$

図-2 累積滑り量とバネ荷重の関係

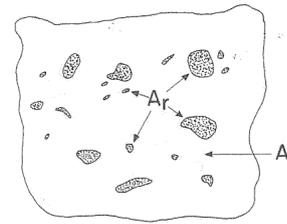
で割ったもの)による比較を行った。図-3は、すべり発生直前のバネ荷重(ピーク荷重)時における摩擦係数すなわち静止摩擦係数を接触面積ごとにプロットしたものである。図-3(a)や(b)に示す接触面が滑らかもしくは面全体が平面状の斑れい岩や花崗岩では、接触面積の違いによる静止摩擦係数の大きさに差異はない。一方、図-3(c)や(d)に示す接触面が粗いもしくは面全体が波状の安山岩や閃緑岩では、接触面積が小さい100cm²から200cm²の範囲で静止摩擦係数が急激に低下し、接触面積200cm²から300cm²の範囲では静止摩擦係数の変化は小さい。吉中ら⁸⁾は、ソーカットした花崗岩の平滑面のせん断抵抗角は静的摩擦角に相当し、せん断面積の影響は無いこと、また、人工的に作成した花崗岩の破断面のピークせん断強度は、せん断面積が概ね1,000cm²以下の小さい範囲で、せん断面積の増加に伴う著しい低下が生じることを確認している。本実験結果も、これらのせん断強度に関する寸法効果の特徴と概ね一致している。

図-4は、不連続面の接触部分の概念図¹⁰⁾を示す。実際の不連続面における接触部分は、見掛けの接触面積Aのうち、アスペリティの数点の真の接触面積A_rの領域のみである。また、不連続面の摩擦力は真の接触面積A_rのせん断強度の総和となる¹⁰⁾。写真-3に斑れい岩および閃緑岩の上下ブロックの接触部を示す。写真-3(a)に示す斑れい岩は、上下ブロックとも表面が滑らかで面全体も平面状である。接触面の形状にばらつきが少ないため、見掛けの接触面積Aが大きくなっても真の接触面積A_rの割合はほとんど変わらない。このため、見掛けの接触面積Aが大きくなっても摩擦係数は変わらない

ことになる。写真-3(b)および(c)に示す閃緑岩は、上下ブロックとも表面が粗く、かつ面全体も長い波長での波状となっている。写真-3(b)の接触面積100cm²の場合、接触面の凹凸のばらつきも多いが、固着時に噛み合った状態になれば滑らかな表面に比べて真の接触面積A_rの割合が大きくなる。このため、摩擦力すなわち摩擦係数も大きくなりやすい。写真-3(c)の接触面積300cm²の場合、表面の粗さに加えて、面全体形状の波長の影響もあり、上下ブロック面が接触しにくくなる。このように、接触面の凹凸の大小の波長のばらつきが多い場合は、見掛けの接触面積Aが大きくなると真の接触面積A_rの割合は小さくなり易いことから、摩擦係数も小さくなる傾向となる。ただし、見掛けの接触面積がさらに大きくなり、面全体の形状波長が見掛けの接触面内にある程度の波長数を含む場合は、見掛けの接触面積Aが大きくなっても真の接触面積A_rの割合の変化は少なくなると推察される。



(a)断面図



(b)平面図, Aは見掛けの接触面積。点描された領域A_rはアスペリティが接触している真の接触面積を示す。

図-4 接触する表面の概念図¹⁰⁾

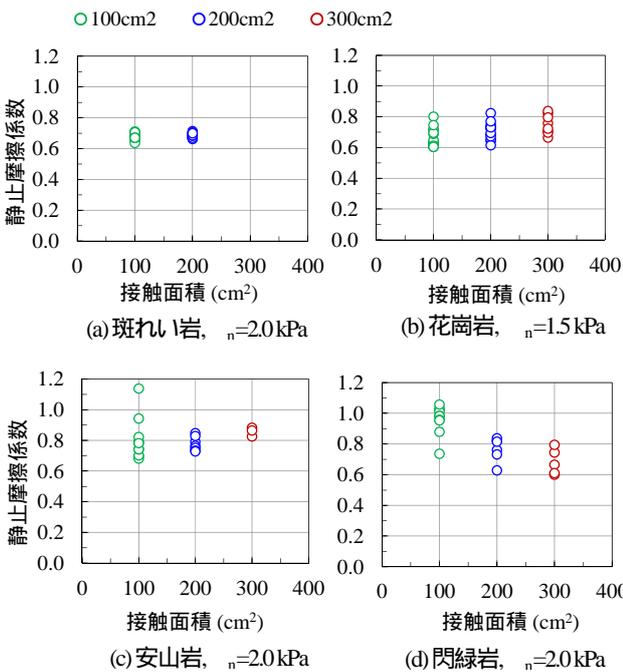


図-3 接触面積と静止摩擦係数の関係



(a) 斑れい岩, 接触面積 200cm²



(b) 閃緑岩, 接触面積 100cm²



(c) 閃緑岩, 接触面積 300cm²

写真-3 上下ブロックの接触状況

(2) すべり量，最大速度，最大加速度の関係

図-5および図-6は，各滑りイベント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している．この結果から，いず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．

本実験では弾性バネを使用していることから，図-2の関係からも分かるとおり，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-5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 Anderson¹¹⁾による地震記録から得られている結果とも

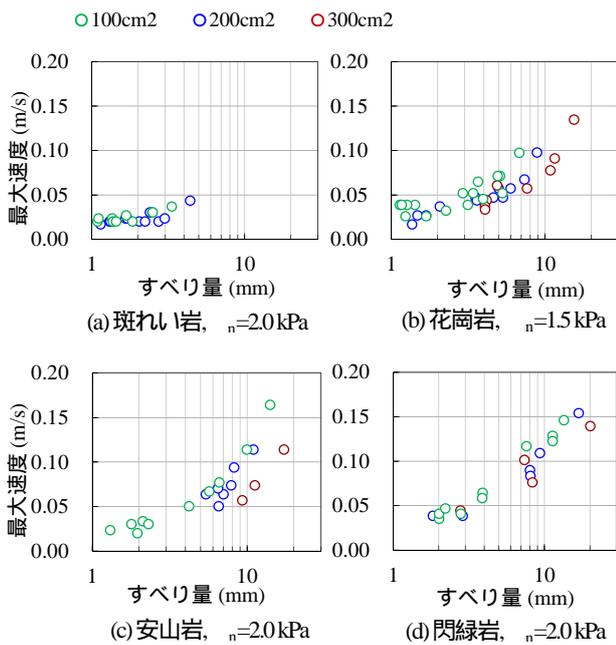


図-5 すべり量と最大速度の関係

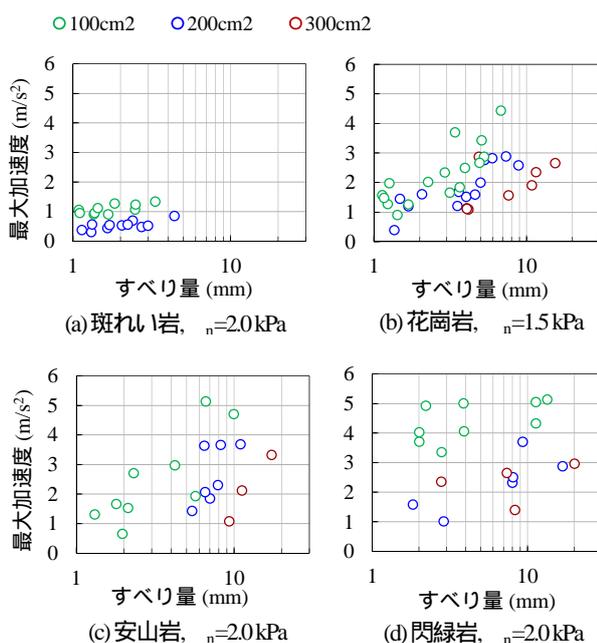


図-6 すべり量と最大加速度の関係

整合している．接触面積の違いについて見ると，いずれの岩種もすべり量と最大速度の関係では有意な差は見られない．図-6の関係では，接触面が粗くなるほど関係のばらつきや接触面積の大きさによる最大加速度の差異が大きくなっている．滑り時の摩擦力は，接触面の摩擦係数と垂直荷重の関係により表すことができるが，運動方程式で考えるとブロック重量と加速度の関係からも表すことができる．このことから，滑り時の最大加速度の傾向は，図-3で示した摩擦係数のばらつきや接触面積の違いによる傾向と関連していると推察される．

(3) 荷重降下量とすべり量の関係

地震モーメントは断層面における荷重降下量に比例する^{11) 12)}ことから，本実験で得られた荷重降下量の特徴について確認した．図-7は，各滑りイベントの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．これは，Ohnaka²⁾が示した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関係や筆者ら^{4), 5)}による過去の実験結果からも確認されている．ここで，垂直応力が同じ図-7(a),(c),(d)のケースでは，同じ接触面積同士では線形の傾きはほぼ同じである．また，同じ岩種内での接触面積毎の線形の傾きの大きさは，いずれの岩種においても概ね接触面積の逆比となっていることから，単位面積当りの荷重降下率とすべり量の関係は一律である．したがって，荷重降下率とすべり量の関係は，寸法効果による影響はほとんどなく，接触面積に比例し，垂直応力と弾性バネの剛性の大きさにより決まるものと考えられる．

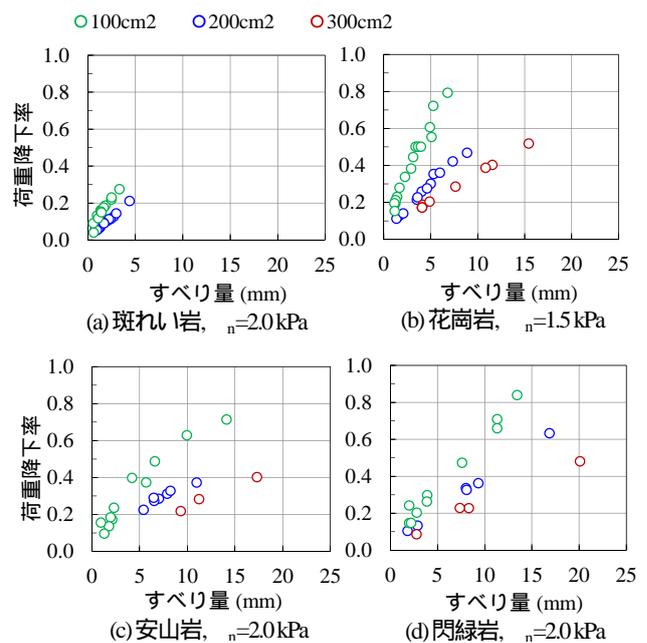


図-7 すべり量と荷重降下率の関係

5. おわりに

本研究では、岩盤不連続面のスティック・スリップ挙動における寸法効果を確認するため、4種類の岩種について接触面積の異なる岩石ブロックを用いたスティック・スリップ実験を行った。実験結果およびこれらの考察により、以下の知見が得られた。

- 1) 接触面が滑らかもしくは面全体が平面状の場合は、寸法効果による影響は少ないが、接触面が粗いもしくは面全体が波状の場合は、接触面積が小さい範囲で、接触面積の増加に伴う摩擦係数の著しい低下が生じ、さらに接触面積が大きくなると摩擦係数の変化は小さくなる。
- 2) 滑り時のブロックの最大速度および最大加速度は、すべり量と正の相関があるが、最大速度については、接触面の粗さに関わらず、寸法効果による影響は少ない。一方、最大加速度については、摩擦係数と同様に、接触面が粗いもしくは面全体が波状になるほど、寸法効果の影響が大きい。
- 3) すべり量と荷重降下量は線形関係にあるが、接触面の粗さに関わらず、寸法効果の影響は少なく、線形の傾きは垂直応力とバネの剛性により決まる。

以上より、岩盤不連続面等におけるスティック・スリップ現象の特性を推定するには、不連続面の表面の凹凸が一樣に平滑でばらつきが少ない場合は、今回の実験のように数100cm²程度の接触面積での実験でも把握できると考えられるが、凹凸が複雑でばらつきが多い場合は、接触面積をある程度大きくした実験結果により評価を行うことが望ましい。ただし、今回の検討は定性的な評価となっているため、今後は接触面の凹凸の幾何学的な形状やパターンについて定量的に評価を行い、これらを加味した実験や評価を行っていきたい。

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) Ohta, Y. and Aydan, Ö. : The dynamic responses of geomaterials during fracturing and slippage. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(6), pp.727-740, 2010.
- 4) 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.
- 5) 清田亮二, 岩田直樹, 高橋裕徳, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦 : 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, 第 45 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.13-18, 2018.
- 6) 吉中龍之進, 吉田淳, 清水昭男, 新井元, 蟻坂俊英 : 岩盤不連続面の強度・変形特性の寸法効果に関する研究, 第 8 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.91-96, 1990.
- 7) Yoshinaka, R., Yoshida, J., Shimizu, T., Arai, H., and Arisaka, S. : Scale effect in shear strength and deformability of rock joints, *Proc. 7th ISRM Congr.*, pp.371-374, 1991.
- 8) 吉中龍之進, 吉田淳, 佐々木猛, 佐々木勝司 : 寸法効果を考慮した岩盤不連続面の設計用物性値の設定, 土木学会論文集 C, Vol.62, No.2, pp.457-470, 2006.
- 9) 地盤工学会 : 岩盤の工学的分類方法 JGS3811-2011, 地盤調査の方法と解説, 地盤工学会, Vol.62, No.2, pp.60-76, 2013.
- 10) Scholz, C. H. : 地震と断層の力学 第二版, pp.51-97, 古今書院, 2010.
- 11) Kanamori, H. and Anderson D.L. : Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 65(5), pp.1073-1095, 1975.
- 12) Molnar, P. : Earthquake recurrence intervals and plate tectonics, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 69(1), pp.115-133, 1975.

SCALE EFFECT IN ROCK DISCONTINUITIES ON STICK-SLIP BEHAVIOR

Ryoji KIYOTA, Naoki IWATA, Ömer AYDAN and Naohiko TOKASHIKI

The stick-slip phenomenon is used to explain as a mechanism of earthquake recurrence. The authors have developed an experimental setup, in which blocks move on a conveyor belt and is restrained by the spring, and conducted stick-slip experiments. However, the amplitude of slippage and acceleration observed in these experiments were quite smaller than actual earthquakes. Therefore, a large-scale experimental device was improved to be able to experiment with a larger rock blocks, and the experiment which changed the size of the rock blocks was conducted. In this study, the scale effect of rock discontinuities on the stick-slip phenomenon was investigated.