

岩盤不連続面のスティック・スリップ現象 に対する室内実験

太田 良巳^{1*}・アイダン オメル²

¹東海大学 大学院総合理工学研究科 総合理工学専攻 (〒424-8610静岡県静岡市清水区折戸3-20-1)

²東海大学 海洋学部 海洋建設工学科 (〒424-8610静岡県静岡市清水区折戸3-20-1)

*E-mail: 8atad003@mail.tokai-u.jp

岩盤不連続面において、せん断変形中に発生する運動と応力の蓄積を繰り返す現象はスティック・スリップと呼ばれ、規則的なすべりあるいは不規則なすべりを示す。スティック・スリップ現象は、岩石のせん断変形挙動に共通して観察することができる現象である。既往の研究においては、スティック・スリップ現象はせん断試験や圧縮試験において確認されている。また、岩種としては石英を多く含むものほどスティック・スリップ現象が顕著であることが報告されている。

本論文では、作製した多目的試験機(傾斜機能を有する底面摩擦実験装置)を用いて、琉球石灰岩および花崗岩ブロック間の境界面に発生するスティック・スリップ現象について実験結果を報告し、岩石の表面特性に注目して考察する。

Key Words : *stick-slip, Ryukyu-limestone, granite, discontinuity, surface friction angle, periodicity*

1. はじめに

スティック・スリップ現象は、岩石のせん断挙動に共通して観察することができる現象である。これまで、スティック・スリップ現象に関する様々な研究が報告されている。機械工学の分野において摩擦特性に関連してBowden and Leben¹⁾やBowden and Tabor²⁾がスティック・スリップ現象に関して理論的な定式化を行った。一方、Brace and Byerlee³⁾は、スティック・スリップ現象は地震が繰り返し発生するメカニズムと類似した現象であると考へ、地震の繰り返し発生するメカニズムを説明するために、室内試験を行っている。

岩盤工学の分野においても多くのスティック・スリップ現象に関する報告がなされてきた(Jaeger⁴⁾、Jaeger and Cook⁵⁾など)。既往の研究においては、スティック・スリップ現象はせん断試験や圧縮試験において確認されている。岩種としては石英を多く含むものほどスティック・スリップ現象が顕著であることが報告されている。この様に、スティック・スリップ現象は様々な分野に観察されている。スティック・スリップ現象は岩盤不連続面の様な境界面に見られる現象であるため、今後は地すべりの問題や、地震工学における繰り返し発生する周期性のある地震のアスペリティ問題などに利用されると考えられる。

本論文では、スティック・スリップ現象を確認するた

めに多目的試験機(傾斜機能を有する底面摩擦実験装置)作製した。多目的試験機を用い、琉球石灰岩ブロックおよび花崗岩ブロックの表面摩擦角のことなる材料の境界面に発生するスティック・スリップ現象について実験結果を報告し、岩石不連続面の表面特性に注目して考察する。

2. 実験概要

スティック・スリップ実験には製作した多目的試験機(傾斜機能を有する底面摩擦実験装置)を用いた。この実験装置は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傾斜角およびコンベアーベルトの速度を自由に変えることができる。コンベアーベルトはゴム製になっている。写真-1および図-1に実験装置および実験の様子を示す。実岩盤ブロック間の不連続面の摩擦を表現するために基盤ブロックはベルトに設置し、上部ブロックはスプリングで固定フレームとつなげた。基盤ブロックはコンベアーベルトと共に移動し、ある時間までは上部ブロックも同じ移動をする。ある時間になるとすべりが発生し、ばねの剛性により上部ブロックが移動する。運動時の上部ブロックの変位応答はレーザー変位計を使用し固定フレームとの距離を測定した。また、上部ブロック移動時の加速度を計測するために上部ブロックに加速度計を設置した。測定した変位応答および加速

度応答はパソコンにて随時記録した。その他、上部ブロックのすべり出しの前兆現象を捉えるためにAEの測定を行った。

スティック・スリップ実験には、琉球石灰岩および花崗岩ブロックを用いた。表-1 に実験に用いたばね定数および琉球石灰岩・花崗岩の境界面の摩擦角を示す。花崗岩境界面においては粗い面同士・粗い面-滑らかな面・滑らかな面同士の3 ケースを行った。粗い面は圧裂による破断面、滑らかな面はカッターによる切断面である。

表-1 材料特性

ばね定数	ϕ 6mm	90gf/cm
	ϕ 7mm	110gf/cm
	ϕ 12mm	210gf/cm
琉球石灰岩	friction angle	28~32°
	weight	400 gf
花崗岩	friction angle	
	rough-rough	30~31°
	rough-smooth	24~27°
	smooth-smooth	17~20°
	weight	1600 gf

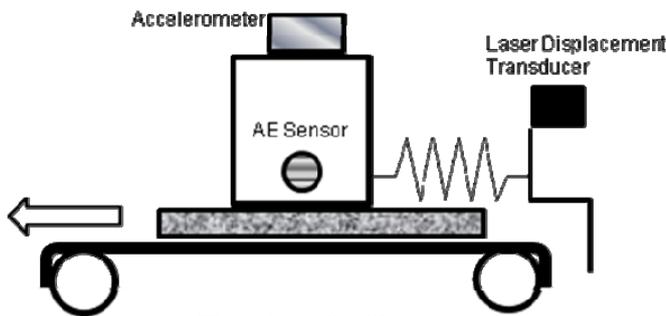


写真-1 実験の様子

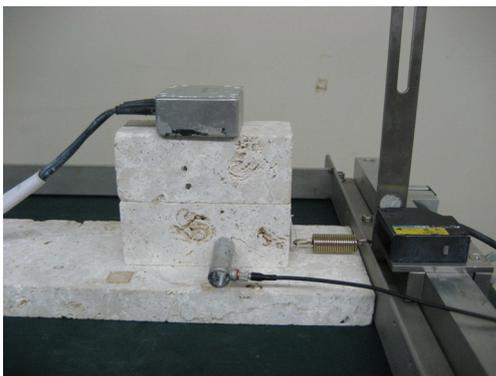


図-1 スティック・スリップ実験模式図

3. 実験結果

(1) 琉球石灰岩

琉球石灰岩ブロックを用いた際の実験結果を図-2 お

よび図-3 に示す。図-2 にばね径6mm, 図-3 にばね径7mm の場合の実験結果をそれぞれ示す。実験に使用したばねのばね定数は表-1 に示した通りである。琉球石灰岩ブロックの境界面の摩擦角は 28~32°である。基盤の移動速度は 0.45mm/s である。

琉球石灰岩ブロック境界面においてスティック・スリップ現象が確認された。応力の蓄積時間は一定にはならない。応力解放時の加速度応答についても応力の蓄積時間にばらつきが見られ一定とはならない。これらは、琉球石灰岩ブロックの表面はきれいにカットされ、一見すると滑らかな様な面に見られるが、琉球石灰岩は空隙が多く、所々で表面摩擦角が異なるためであると考えられる。一方、加速度応答は変位応答に比例して大きくなる傾向がある。

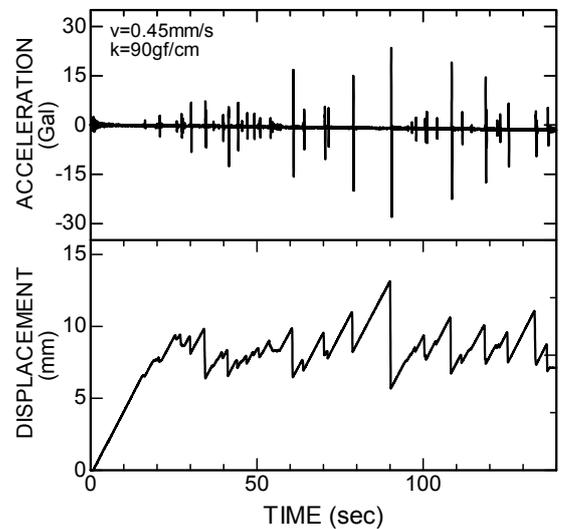


図-2 琉球石灰岩における実験結果 (ばね径6mm)

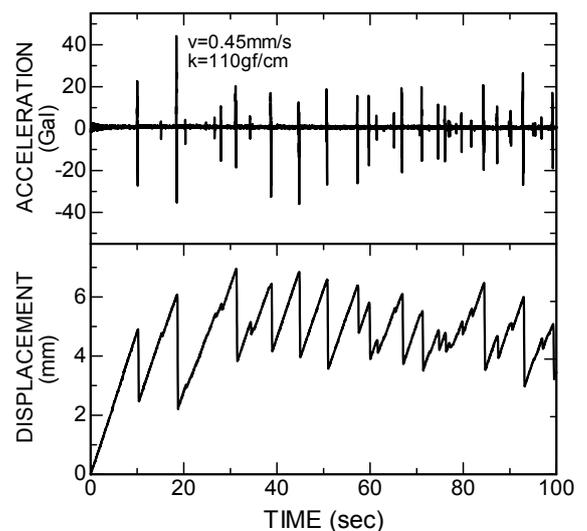


図-3 琉球石灰岩における実験結果 (ばね径7mm)

図-4に琉球石灰岩を用いた実験の際の加速度応答と変位応答およびAE応答の関係を示す。上部ブロックがすべる際にAEが発生している。上部ブロックが運動する際に見られるAEの発生は大変興味深いものである。

図-5に琉球石灰岩における回復量と加速度応答の関係を示す。ブロックの移動速度が同じ場合、剛性が大きくなると上部ブロックのすべりに伴う加速度応答は大きくなる傾向が見て取れる。

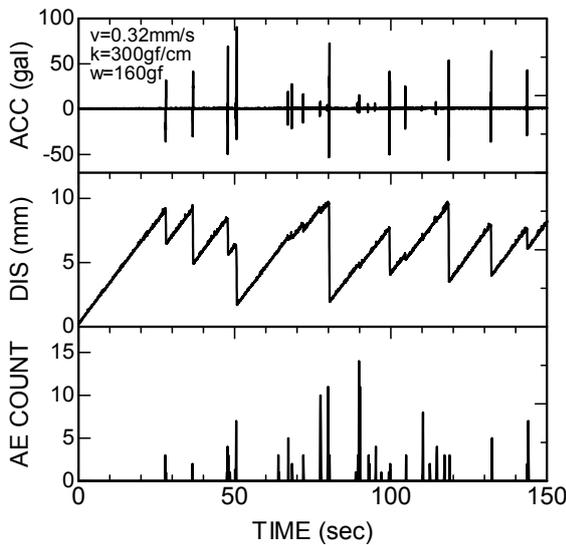


図-4 琉球石灰岩におけるスティック・スリップ現象とAE応答の関係

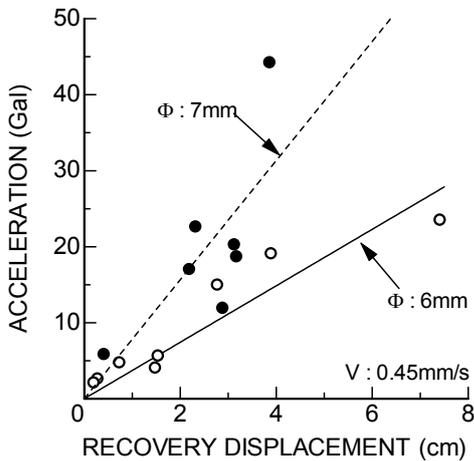


図-5 回復量と加速度応答の関係

(2) 花崗岩

花崗岩を用いた際の実験結果を図-6、図-7、図-8にそれぞれ示す。図-6に表面摩擦角30~33°、図-7に表面摩擦角24~27°、図-8に表面摩擦角17~20°の場合の実験結果をそれぞれ示す。実験に使用したばねのばね定数は

210gf/cmである。基盤の移動速度は0.45mm/sで一定とした。応力の蓄積時間は一定にはならない。

花崗岩ブロックの境界面においてスティック・スリップ現象が確認できた。図-6に示す花崗岩の粗い面と粗い面の境界に発生するスティック・スリップ現象は、表面摩擦角が大きく、応力蓄積時間が長くなり比例して応力解放時に発生する加速度応答も大きくなる。図-7に示す花崗岩の粗い面と滑らかな面の境界に発生するスティック・スリップ現象は不定期に発生する。粗い面と滑らかな面におけるスティック・スリップ現象は応力が蓄積され、小刻みに応力が解放された後、大きく応力が解放されている。図-8に示す花崗岩の滑らかな面と滑らかな面の境界に発生するスティック・スリップ現象は表面摩擦角17~20°と小さいため定期的に発生する。応力蓄積時間は約10秒間隔で、定期的に応力が解放されている。

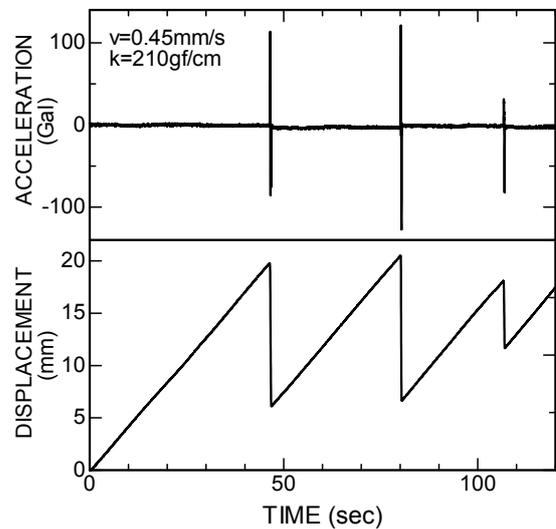


図-6 花崗岩における実験結果 (表面摩擦角30~33°)

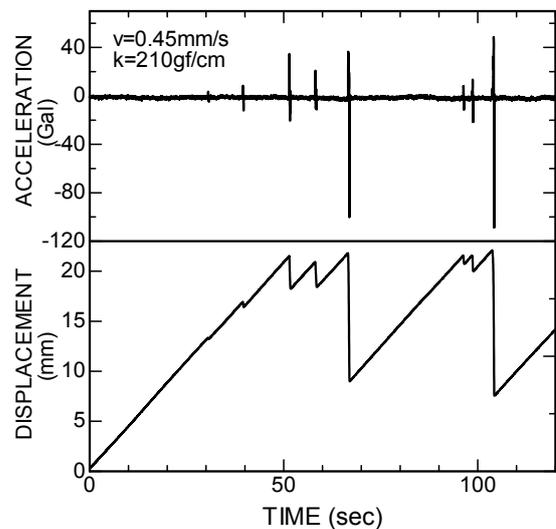


図-7 花崗岩における実験結果 (表面摩擦角24~27°)

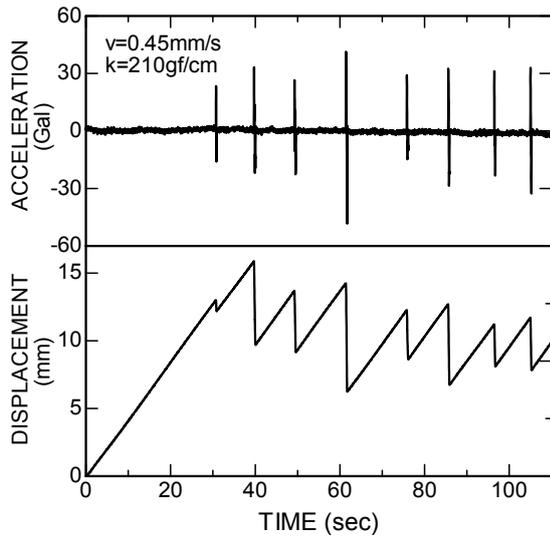


図-8 花崗岩における実験結果 (表面摩擦角 $17\sim 20^\circ$)

図-9 に花崗岩の滑らかな面と滑らかな面の境界において、ブロックの移動速度を 0.88mm/s ・ 0.68mm/s ・ 0.45mm/s と変化させた場合に発生するスティック・スリップ現象を示す。剛性が同じである場合、基盤の移動速度が速くなるとスティック・スリップの周期は短くなる。一方、基盤の速度が遅くなるとスティック・スリップの周期が長くなっていることが見て取ることができる。

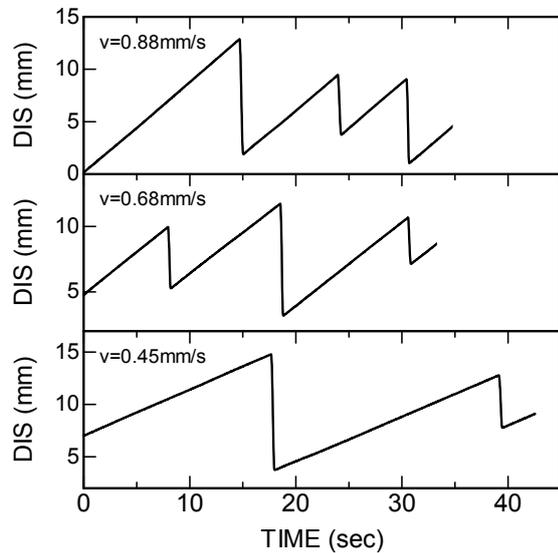


図-9 花崗岩における移動速度と変位応答の関係 (表面摩擦角 $17\sim 20^\circ$)

図-10 に花崗岩を用いた実験の際の加速度応答と変位応答およびAE応答の関係を示す。上部ブロックがすべる際にAEが発生している。上部ブロックが運動する際に見られるAEの発生は大変興味深いもの

である。

図-11 に花崗岩におけるライズタイムと加速度応答の関係を示す。ブロックの移動速度および剛性が同じ場合、境界面における表面摩擦角の大きさに比例して上部ブロックのすべりに伴う加速度応答は大きくなる傾向が見て取れる。粗い面と滑らかな面の境界面に発生するスティック・スリップ現象におけるライズタイムと加速度応答の関係には、ばらつきが見られる。これは、粗い面の表面には凹凸が存在しているため滑りやすい部分・滑りにくい部分があるためであると考えられる。

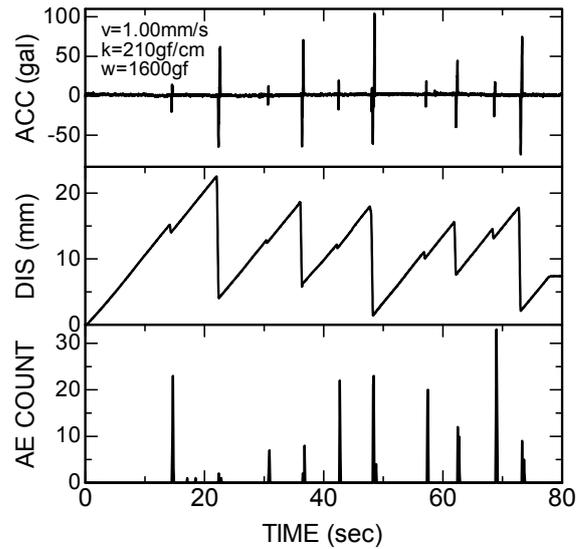


図-10 花崗岩におけるスティック・スリップ現象とAE応答の関係

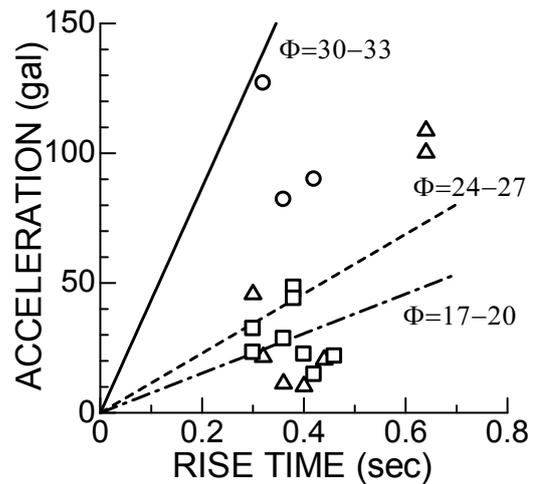


図-11 花崗岩におけるライズタイムと加速度応答の関係

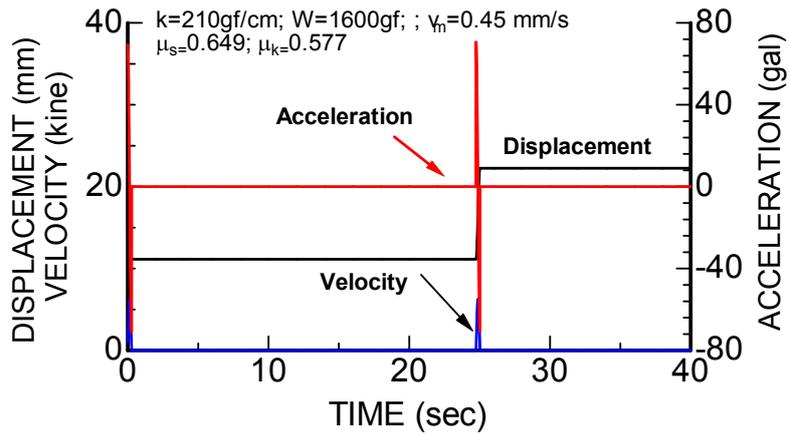


図-12 花崗岩境界面におけるスティック・スリップの数値シミュレーション（表面摩擦角30～33°）

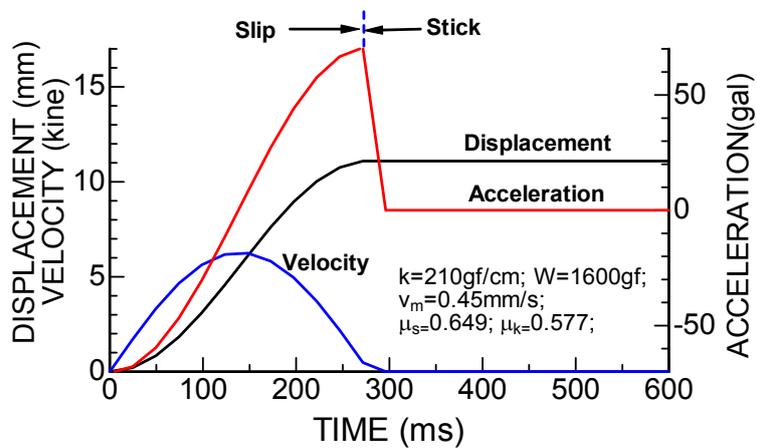


図-13 花崗岩におけるスリップ時の変位・速度・加速度応答（表面摩擦角30～33°）

4. スティック・スリップ現象の理論的考察

4.1 実験の再現

花崗岩における図-6に示した、表面摩擦角30～33°の場合のスティック・スリップ現象の再現を行った。その結果を図-12に示す。運動するブロックの運動方程式を有限差分法によって解いた。実験結果ではスリップ周期が約30秒であった。解析結果ではスリップ周期が約25秒と若干短く計算された。変位応答および加速度応答は実験値とほぼ同等の値が再現されている。図-13に一つのスリップに注目して解析を行った結果を示す。速度応答はスリップが始まると応答が開始され、スリップが停止すると0に戻る。加速度応答はスリップの開始と停止のときに最大値をとる。

4.2 永久変形の算出

図-14にスティック・スリップ実験より得られた変位応答と加速度応答を数値積分して求められた変位応答の関係を示す。図-14に示した波形はスティック・スリップ実験結果より1つの地震波形に注目した図である。

積分にはEPS法(アイダン・太田⁶⁾, 太田・アイダン⁷⁾)を用いて加速度応答を積分し変位応答を求めた。EPS法は加速度記録より特殊な補正を行って相対変位量を求めるための数値積分手法である。図-14において実測された変位応答はEPS法より求められた変位応答はほぼ同様である。

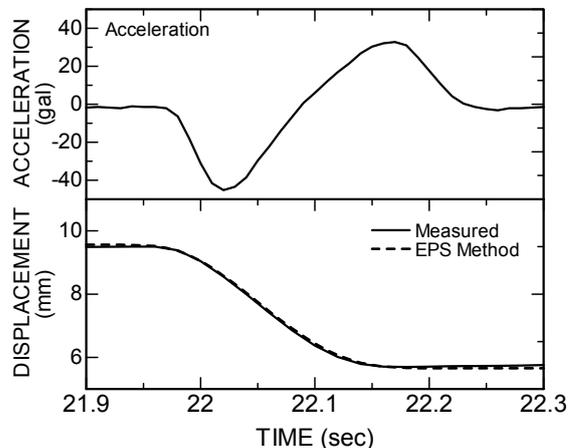


図-14 EPS法による変位応答と実測値の比較

5. 結論

本論文では底面摩擦実験装置を用いて、琉球石灰岩および花崗岩の境界面におけるスティック・スリップ現象について実験・解析・検討をおこなった。

スティック・スリップ現象は琉球石灰岩および花崗岩の境界面において観察することができた。室内実験の結果で見られた傾向と理論的解析で見られた傾向は同じものであった。基盤の移動速度の増加に伴いスリップ周期は縮小される傾向にある。また、剛性率が増加するとスリップ周期が同じであっても発生する加速度応答は大きくなる。摩擦係数が増加するとスリップ周期とスリップ幅が大きくなる。粗い面と粗い面および滑らかな面と滑らかな面のように表面摩擦角が同じ面の境界に発生するスティック・スリップ現象はスリップの周期がほぼ一定の応答が見られる。一方、粗い面と滑らかな面の表面摩擦角が異なる二面の間には発生するスティック・スリップにおけるスリップ周期は一定にはならない。

参考文献

- 1) Bowden, F. P. and Leben, L. : The Nature of sliding and the analysis of friction, Proc. Roy. Soc. London, A169, pp.371-39, 1939.
- 2) Bowden, F. P. and D. Tabor : The Friction and Lubrication of Solids, Clarendon Press, Oxford, 1950.
- 3) Brace, W. F., and J. D. Byerlee : Stick-slip as a mechanism for earthquakes, Science, 153, pp.990-992, 1966.
- 4) Jaeger, J. C. : The Frictional Properties of Joints in Rock, Geol. Pura Appl., Vol.43, pp.148-158, 1959.
- 5) Jaeger, J. C. and N. G. W. Cook: Fundamentals of Rock Mechanics, first edition, Methuen, London, pp.593, 1969.
- 6) アイダン オメル, 太田 良巳 : 地震断層近傍における地震動の特徴とその評価. 「近年の国内外で発生した大地震の記録と課題 (II)」シンポジウム, 東京, 土木学会, pp.114-120, ISBN 4-8106-0600-7, 2006.
- 7) 太田 良巳, アイダン オメル : 加速度から変位を求める積分手法と実地震への適用, 「海-自然」東海大学紀要海洋学部 Vol.5, No.2, pp.1-12, 2007.

AN EXPERIMENTAL ON STICK-SLIP PHENOMENON ON ROCK DISCONTINUITIES

Yoshimi OHTA, Ömer AYDAN

This study is concerned with the stick-slip phenomenon of rock discontinuities of Ryukyu limestone and granite with different surface morphology and the factors affecting their displacement, acceleration and acoustic emissions responses. Furthermore, precursory responses are investigated using a very advanced monitoring system. The experimental results clearly indicates that the surface morphology of discontinuities of great importance for stick-slip responses and it is hoped that this research will further provide information for the complex behavior of rock engineering structures as well as earthquake prediction studies.