岩盤不連続面のスティック・スリップ現象の 速度依存性摩擦を考慮したシミュレーション

清田 亮二1*・岩田 直樹1・藍檀 オメル2

¹中電技術コンサルタント株式会社 原子力プロジェクト室 (〒734-8510 広島市南区出汐2-3-30) ²琉球大学工学部工学科 社会基盤デザインコース (〒903-0213 沖縄県中頭群西原町千原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.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、岩石ブロックを用いたスティック・スリップ実験を行ってき た.これらの実験結果からブロック全体の挙動の特徴を把握することはできたが、接触面における応力降 下の過程やそのメカニズムについては明確ではない.そこで本検討では、スティック・スリップ現象の数 値シミュレーションとして、摩擦係数のすべり速度・状態依存特性を考慮したNewmark法による解析を行 った.この結果、スティック・スリップ実験における加速度、速度、変位応答を再現することができた.

Key Words: stick-slip, discontinuity, slip weaking, rate-dependent friction, Newmark method

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1µm~ 1mmと非常に小さく、破壊時のすべり加速度のピーク値 が10²~10⁵m/s²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10cm~1m程度,加速 度のピーク値1~10m/s²と大きく異なっている.

筆者らは、地震断層の破壊過程を考慮した地震動推定 に関する検討の一環として、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 測できように、コンベア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を行った^{3,4)}.また、ブロックの岩種による違い^{9,}やすべり面の接触面積の寸法効果⁹の影響を検討した.これらの実験結果からブロック全体のスティック・スリップ挙動の特徴を把握することはできたものの、接触面における応力降下の過程やそのメカニズムについては明確ではない.

本検討では、実験結果を基にスティック・スリップ現 象の数値シミュレーションを試みた.解析手法としては、 これまで1質点系の振動モデルや運動方程式など様々な 手法が提案されているが、スティック・スリップ挙動を 考える上では、すべり弱化の特性をいかに評価するかが 重要な課題の一つである.この中で、すべり時の摩擦係 数は速度や状態に依存することが知られている.そこで 本検討では、すべり速度・状態依存を考慮した摩擦特性 を導入したNewmakのβ法により、スティック・スリッ プ実験結果のシミュレーションを実施し、実験結果とシ ミュレーション結果の比較および本手法の適用性につい て検討を行った. 実際のスティック・スリップ現象を説明するには、 様々な要因が影響するため複雑なものになるが、ここで は簡易な力学モデルとして、Bowden and Leben⁷が定式化 した減衰のないバネで支持された1質点系の振動モデル について述べる. 図-1に力学モデルの概念図を示す.ス ティック・スリップの力学については、応力が蓄積され るスティックの部分と、応力が開放されて再び応力が蓄 積され始めるまでのスリップの部分を考える.

スティックの部分については次式のように記述するこ とができる.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{v}_s, \quad F_s = k \cdot \mathbf{x} \tag{1}$$

ここで、vsは移動速度、kはバネ剛性である。

スティック挙動の限界せん断抵抗は、次式のとおりで ある.

$$F_{v} = \mu_{s} N = \mu_{s} mg \tag{2}$$

ここで、µは静止摩擦係数、Nはせん断面に作用する 垂直力であり、図-1に示すモデルにおいてはブロックの 重力W(=mg)に等しい.mはブロックの質量、gは重 力加速度である.一方、スリップ中のブロックの運動方 程式は次式のように記述できる.

$$-kx + \mu_k mg = m \frac{d^2 x}{dt^2}$$
(3)

ここで、kはバネ剛性、 μ は動摩擦係数を示す. ブロ ックが滑る直前の静止摩擦力 ($F_y = \mu_s mg$) とバネ力が釣 り合った状態を初期条件として、滑りが生じた瞬間に摩 擦力が静止摩擦から動摩擦に低下すると仮定すると、ス リップ中の変位x、速度 \dot{x} 、加速度 \ddot{x} は式(3)の運動方程 式の解より、次式で算定される.



図-1 スティック・スリップの力学モデル

$$x = -\left[(\mu_s - \mu_k)g/\omega^2\right]\cos\omega t + (\mu_s - \mu_k)g/\omega^2 \qquad (4)$$

$$\dot{x} = [(\mu_s - \mu_k)g/\omega]\sin\omega t$$
(5)

$$\ddot{x} = (\mu_s - \mu_k)g\cos\omega t \tag{6}$$

ここで、 μ は静止摩擦係数、 ω は円振動数(= $\sqrt{k/m}$)である.

3. 摩擦係数のすべり速度依存性を考慮したモデル

スリップの部分について、式(4)~(6)に示す1質点系の 簡易な振動モデルによりシミュレーションを行った場合、 計算ではすべりが生じた瞬間に静止摩擦から動摩擦に低 下すると仮定しているため、瞬間的に大きな荷重が作用 して最大加速度が生じる.しかしながら、実験⁴⁰⁰では、 すべり変位の発生に伴って徐々に加速度が増加する.す なわち、変位の増加に伴って摩擦力が減少し、徐々に荷 重が作用するため応答が小さくなっていると考えられる. 摩擦係数の変化については、例えばDieterich⁸⁰やRuina⁹が 定式化した速度と状態に依存する摩擦則(rate and state dependent friction low)などが知られている.本検討でも、 すべり速度と状態の依存特性を考慮した摩擦係数を導入 するが、導入に当たっては、次式に示すHiguchi and Ozaki¹⁰により提案された塑性すべり速度と摩擦係数の関 数による時間発展則を参考とした.

$$\dot{\mu} = -\kappa \left(\frac{\mu}{\mu_k} - 1\right)^m \|v_p\| + \eta \left(1 - \frac{\mu}{\mu_s}\right)^n \tag{7}$$

ここで、µはスリップ中の摩擦係数、ゅは塑性すべり 速度を示す.また、κ(mm⁻¹)およびmは摩擦係数の減少、 η(s⁻¹)およびnは摩擦係数の増加を規定するパラメータで ある.式(7)の右辺第1項は摩擦抵抗のすべり弱化、第2項 は静止摩擦の時間回復を表している.なお、パラメータ mおよびnについては、速度依存への対応はm=n=1で十 分であることが確認されているため、本検討でもm=n= 1を採用する.また、vpについては後述する実験におけ る上部ブロックのすべり速度vと下部ブロックの移動速 度vaの相対速度として考える.以上を踏まえると式(7)は 次式のように記述され、これを本検討のシミュレーショ ンに導入する.

$$\dot{\mu} = -\kappa \left(\frac{\mu}{\mu_k} - 1\right) |v - v_s| + \eta \left(1 - \frac{\mu}{\mu_s}\right) \tag{8}$$

次に図-1に示す系のシミュレーション手法について述べる.スティック部分については,式(1)および式(2)により,ブロックが一定速度 いで移動する定常状態をバネ

荷重 $F_s(=kx)$ が限界せん断抵抗力 $F_y(=\mu_smg)$ に達するまで計算し、その後スリップ部分に移行する.スリップ部分については、式(3)を基本として次の運動方程式で考える.

$$m\alpha_t = k(U - u_t) - \mu \, mg \tag{9}$$

ここで、 α およびuは時刻tにおけるブロックの加速 度およびすべり変位、Uは限界せん断抵抗時(静止摩擦 カピーク時)のバネの伸びを示す.また、 μ は式(8)によ り算定される各時刻のすべり速度に応じた摩擦係数を代 入する.式(9)の運動方程式の解法は、一般的な数値積 分方法であるNewmark¹¹⁾の β 法(β =1/6とした線形加速度 法)を採用し、系の時刻歴応答を得る.時刻tにおける ブロックのすべり加速度 α 、速度vおよび変位uは次式 で与えられる.

$$\alpha_t = \frac{k(U-u_t) - \mu \, mg}{m} \tag{10}$$

$$v_t = v_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t}{2} \left(\alpha_{t-\Delta t} + \alpha_t \right) \tag{11}$$

$$u_t = u_{t-\Delta t} + v_{t-\Delta t} \Delta t + \frac{\Delta t^2}{6} \left(2\alpha_{t-\Delta t} + \alpha_t \right)$$
(12)

すべりが発生した後、ブロックのすべり速度 wがゼロ になるまで式(10)-(12)の計算を繰り返し逐次応答計算を 行い、速度 wがゼロになった後は、再び定常状態のステ ィック部分に移行する.

4. スティック・スリップ実験の概要

本検討では、過去に実施したスティック・スリップ実験結果⁴⁰⁰に対するシミュレーションを行う.以下に実験の概要を述べる.

図-2に実験装置を示す.実験装置はゴム製のコンベア ベルトと固定フレームからなり、コンベアベルトの移動 速度は自由に変えることができる.供試体は岩盤ブロッ ク間の不連続面を模擬するため、上部と下部ブロックに 分割し、下部ブロックはコンベアベルトに、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(バネ荷重)を計測するためにバネと固定フ レームの間に荷重計を設置し、コンベアベルト移動方向



図-2 スティック・スリップ実験装置

表─1 実験条件		
	ケース1	ケース2
岩種	花崗岩	安山岩
上部ブロック サイズ	100×100×100 mm	100×200×25 mm
上部ブロック 質量 <i>m</i>	2470 gf	4024 gf (重り 2700 gf 含む)
コンベアベルト 移動速度 vs	0.84 mm/s	1.00 mm/s
バネ剛性 k	1.0 N/m	1.0 N/m

 $20\,\mathrm{ms}$

 $5 \,\mathrm{ms}$

計測時間間隔 ∆t





図-3 上部ブロック挙動の経時変化

の水平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.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変位計により計測した.

本検討では、表-1に示すとおり実験条件が異なる2つ のケースを対象にシミュレーションを行う. 図-3にバネ 荷重、上部ブロックの加速度および変位の経時変化を示 す. 図-3(a)に示すケース1は、スリップイベント毎に挙 動が異なる. 図-3(b)に示すケース2は、ケース1よりも 大きな変位を示し、概ね規則的な挙動を示している. ま た、図-4にケース1の28.3秒付近で生じたスリップ部分 の拡大図を示す. なお, 速度は変位データを基に算定し たものである. 図-4より、加速度応答はすべりの発生に 伴って急激に大きくなるのではなく徐々に大きくなって いる.これは、静摩擦係数から動摩擦係数に不連続に変 化するのではなく、すべり量に従ってなだらかに変化し ていっているものと考えられる. これは速度と状態に依 存する摩擦則^{8,9}と対応した挙動となっている.加速度 応答は、速度応答が最大となった以降反転し、これとと もに速度は減少する. これは、Newmark法¹¹⁾において、 抵抗力に相当する動摩擦係数がバネが引っ張る荷重を上 回り、ブロックの運動にブレーキが掛かっている状態と 同様に考えることができる.

5. シミュレーション結果

(1) 簡易な1質点系の振動モデル

ブロックに滑りが生じて荷重が開放され再び荷重が蓄 積され始めるまでのスリップの部分について、式(4)~ (6)に示した簡易な1質点系の振動モデルによる解析結果 を確認する. 図-5にケース1の28.3秒付近のスリップ部分 の解析結果を示す、ここで、各応答値および時刻につい てはすべり開始点をゼロとし,速度と変位については図 -4で示した実験結果と符号を反転して表示している.ま た、ブロックが滑る直前のバネ荷重より静止摩擦係数µ は0.657(静止摩擦角 øs=33.3°),加速度がゼロのとき のバネ荷重より動摩擦係数µkは0.473 (動摩擦角 øk= 25.3°)とした. 図-5より、計算ではすべりが生じた瞬間 に静止摩擦から動摩擦に低下すると仮定しているため, 初期に瞬間的に大きな荷重が作用して最大加速度が生じ る. しかしながら実験では、すべり変位の発生に伴って 徐々に加速度が増加する. すなわち, 変位の増加に伴っ て摩擦力が減少し、徐々に荷重が作用するため応答が小 さくなっていると考えられる.

(2) 摩擦係数の速度依存性を考慮したNewmark法

式(8)~(12)に示した摩擦係数の速度・状態依存性を考慮したNewmark法によるシミュレーション結果を示す.



図-6 Newmark 法による解析結果 (ケース1の28.3 秒付近)

ここで、パラメータの値については $\kappa=2mm^1$ 、 $\eta=0.01s^1$ を設定した。図-6にケース1の28.3秒付近の解析結果を示す.また、静止摩擦係数と動摩擦係数は、1質点系の振動モデルと同値とした。図-6より、摩擦係数の速度・状態依存性を考慮したNewmark法により、初期段階の過程およびすべり変位量も含めた一連の挙動を概ね再現できていることが確認できる.ただし、加速度のピーク付近

で実験値との乖離があるが,解析では時間刻みΔrをlms としているのに対して,実験では計測時間間隔が20ms であるため,実際のピーク部分が計測できていないこと が考えられる.なお,紙幅の関係でここでは図示してい ないが,ケース2の1回のスリップ部分における加速度, 速度および変位の解析結果についても,実験結果と概ね 整合する結果を得ている.

以上は1回のスリップ部分について確認したものであ るが、次にスティック部分からスリップ部分への移行す なわちスティック・スリップイベントの繰り返しの再現 性を確認する.ここで、静止摩擦係数と動摩擦係数につ いては、実験結果から各イベントのうち代表的な値を設 定した.図-7にNewmark法によるバネ荷重の経時変化を 示す.また、図-8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)とバネ荷重の関 係を示す.累積すべり量は、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 算されると同時にバネ荷重が低下することを繰り返す. バネ荷重が低下して再び荷重が蓄積され始めるまでに要 した変位がすべり弱化における臨界すべり量Dcに相当 する.図-7および図-8より,解析では各イベントとも静 止摩擦係数および動摩擦係数は一律としているため,バ ネ荷重およびすべりの増減は定常的な挙動となる.この ため、挙動が不規則なケース1では、解析によるバネ荷 重の経時変化およびすべり量ともに、実験結果とは整合 しない.しかしながら、その接触面のおける標準的な荷 重降下およびすべり量はある程度は推測可能である.挙 動が規則的なケース2では、解析結果と実験結果が概ね 整合している.

以上のとおり,接触面における静止摩擦係数と動摩擦 係数を把握することができれば,本検討で提案したシミ ュレーション手法により,その接触面のスティク・スリ ップ挙動をある程度推定することが可能であることが分 かった.なお,静止摩擦係数と動摩擦係数については, 例えば傾斜実験で得られる摩擦角により確認することが 可能であり,Aydanら¹⁰は,傾斜実験による摩擦係数と スティック・スリップ実験による摩擦特性が概ね整合す ることを確認している.











図-8 累積すべり量とバネ荷重の関係

6. おわりに

本検討では、岩盤不連続面のスティック・スリップ挙 動のシミュレーションとして、すべり速度・状態依存を 考慮した摩擦特性を導入したNewmark法により、実験結 果の再現解析を実施した.この結果、接触面の静止摩擦 係数と動摩擦係数を既知とした場合、提案した手法によ り、すべり速度に依存する摩擦係数の変化を評価するこ とが可能となり、スティック・スリップ挙動に伴う加速 度、速度、変位が概ね再現できることを確認した.また、 スティック部分からスリップ部分への移行も評価できる ため、繰り返し挙動も再現することが可能である.

ただし、本検討では、室内実験の数ケースに対する評価であることや、他にも様々な摩擦特性のすべり速度・ 状態依存構成則やすべり弱化構成則が提案されているため、さらに合理的な手法を模索する余地があると考える. また、断層運動モデルに適用する場合、室内実験結果と 実断層とのスケール効果の評価方法も課題である. 今後 は、これらを踏まえて実験や評価を行っていきたい.

参考文献

- 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.

- 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,髙橋裕徳,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.
- Kiyota, R., Iwata, N., Takahashi, Y., Adachi, K. & Aydan, Ö. : Stick-slip behavior of rock discontinuities by difference in rock types, *Proc. of the 3rd International Confrence on Rock Dynamics and Applications (RocDyn-3), Trondheim*, pp.563-568, 2018.
- Kiyota, R., Iwata, N., Aydan, Ö. & Tokashiki, N. : Experimental study of scale effect in rock discontinuities on stick-slip behavior, *Proc. of 2019 Rock Dynamics Summit in Okinawa (2019RDS)*, pp.118-123, 2019.
- Bowden, F.P. and Leben, L.: The Nature of sliding and the analysis of friction, *Proc. Roy. Soc. London*, A169, pp.371-391, 1939.
- Dieterich, J. H. : Modeling of rock friction, 1. Experimental results and constitutive equations, *J. Geophys. Res.*, 84, pp.2161-2168, 1979.
- Ruina, A.: Slip instability and state variable friction laws, J. Geophys. Res., 88, pp.10359-10370, 1983.
- Hashiguchi, K. and Ozaki, S. : Constitutive equation for friction with statickinetic friction transition, J. Appl. Mech., JSCE, Vol.9, pp.503-511, 2006.
- Newmark, N.M.: Effect of earthquake on dams and embankments, Geotechnique, Vol.15, No.2, pp.139-160, 1965.
- 12) Aydan, Ö., Ohta, Y., Iwata, N., Kiyota, R. : The evaluation of static and dynamic frictional properties of rock discontinuities from tilting and stickslip tests, *Proc. of 46th Symposium on Rock Mechanics, JSCE*, pp.105-110, 2019.

SIMULATION OF STICK-SLIP BEHAVIOR OF ROCK DISCONTINUITIES CONSIDERING RATE-DEPENDENT FRICTION

Ryoji KIYOTA, Naoki IWATA, Ömer AYDAN

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. Although the characteristics of the behavior of the entire block could be confirmed from these experimental results, the process of the stress drop at the contact surface and its mechanism are not clear. Therefore, in this study, reproduction analysis of stick-slip behavior was performed by the Newmark method, which introduced frictional characteristics considering rate and state dependence.