

# スティック・スリップ現象に関する実験的および 解析的研究と地震学・地震工学的考察

太田良巳\*1・藍檀オメル\*2

An experimental and theoretical study on stick-slip phenomenon with some considerations from scientific and engineering viewpoints of earthquakes

Yoshimi OHTA and Ömer AYDAN

## Abstract

Earthquakes often occur periodically with a regular or an irregular interval time. Stored mechanical deformation and the accumulation of the stress are repeated following the slippage of discontinuities such as faults in the Earth's crust as a result of stress release. This behavior is called stick-slip. Stick-slip is commonly observed in the frictional sliding of rock discontinuities. Earthquakes occurring on preexisting faults repeatedly are interpreted as a stick-slip phenomenon. In this article, the stick-slip phenomenon is investigated experimentally and theoretically. It is shown that the stiffness, static and kinetic friction coefficients, plate velocity greatly influence the recurrence time, rise time and the amplitude of ground motions. The experimental and theoretical results presented in this paper clarify many aspects of stick-slip phenomenon and they have great implications on the scientific and engineering characteristics of earthquakes.

## 1. はじめに

スティック・スリップは、岩石のせん断挙動に共通して観察することができる。スティック・スリップに関する様々な研究が岩盤工学の分野においてなされてきた (Jaeger, 1959; Jaeger and Cook, 1969など)。しかし、機械工学の分野において摩擦特性に関連して Bowden and Leben (1939) や Bowden and Tabor (1950) 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。Brace and Byerlee (1966) は、スティック・スリップ現象が地震の繰り返し発生メカニズムであると考え、地震の繰り返し発生メカニズムを説明するために、室内試験を行っている。それ以降、プレート境界面での地震挙動を考える場合に類似点が多いため、地震の発生機構との関連に注目が集まっている。Fig. 1 に地震の繰り返し発生モデルを示す。ここで見られる応答はスティック・スリップそのものである。スティック・スリップ現象は Fig. 1

(a) のように規則的な運動で地震が発生する場合と、Fig. 1(b), (c) のように不規則な運動で地震が発生する場合がある。筆者らの住む東海地域は東海地震の発生が危惧されている。東海地震・東南海地震・南海地震は100年周期で発生する海溝型地震であることが知られている。Fig. 2 に東海地震の発生履歴を示す。東海地震は1854年安政東海地震以降、約150年間発生しておらず、100年周期といっても誤差が生まれる。これは、海洋プレートの沈降速度、海洋プレートと大陸プレートとの摩擦・剛性、断層の面積などによって地震の再来周期が異なるためである。もし、これらの条件が常時一定であるならば Fig. 1(a) のような規則的な応答を示すはずである。

このように、スティック・スリップと海溝型地震の間には密接な関係が見られる。しかしながら、スティック・スリップ研究について理論的な解法に関する研究は多々報告されているが、実験結果に関する報告は大変少ないのが現状である。

そこで本論文では、スティック・スリップを検討するた

2009年7月31日受付 2009年11月18日受理

\*1 東海大学大学院総合理工学研究科総合理工学専攻海洋理工学コース (PhD candidate, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokai University)

\*2 東海大学海洋学部海洋建設工学科 (Professor, Department of Marine Civil Engineering, Tokai University)

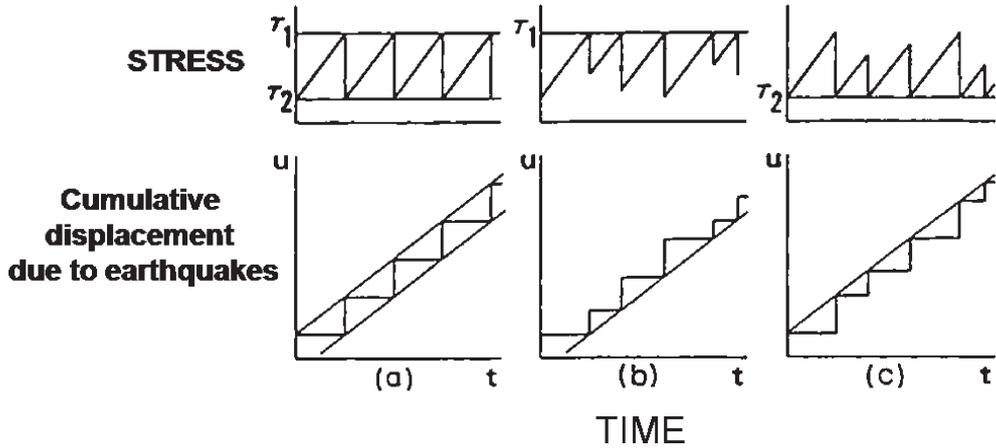


Figure 1 Conceptual models for earthquake recurrences (Shimazaki, K. and Nakata, T., 1980)

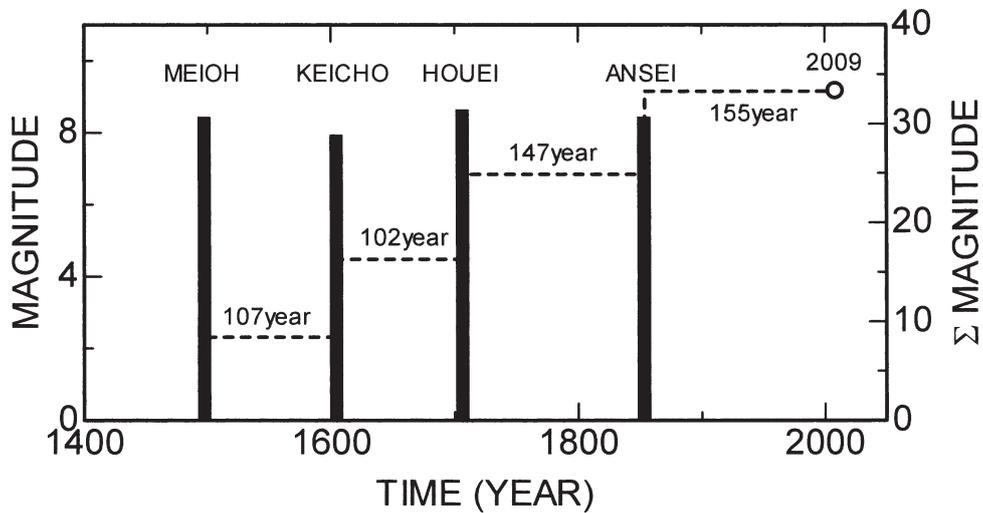


Figure 2 Recurrence interval of Tokai earthquakes

めの実験装置を製作し、特性の異なるいくつかの材料を用いた室内実験と断層のサイズ、断層の摩擦強度、弾性係数、剛性率および断層面の移動速度の各パラメータを考慮した室内実験および理論的解析を行い検討する。

## 2. スティック・スリップの力学

Fig. 3 にスティック・スリップのモデルを示す。スティック・スリップの力学について、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。ここで紹介する定式化は Bowden and Leben (1939) の定式化に基づいている。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。

$$\dot{x} = v_s, \quad F_s = k \cdot x \quad (1)$$

ここで、 $v_s$  は移動速度、 $k$  は剛性である。

スティック挙動の限界せん断抵抗は、

$$F_y = \mu_s N \quad (2)$$

ここで、 $\mu_s$  は静的摩擦係数、 $N$  はせん断面に作用する垂直力である。Fig. 3 に示すモデルにおいてはブロックの重力  $W$  に等しい。また重力は  $mg$  であり、 $m$  は質量と  $g$  は重力加速度となっている。

スリップの部分については次式のように記述することができる。

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

ここで、 $\mu_k$  は動的摩擦係数である。

上式の微分方程式の解は以下のように与えられる。

$$x = A_1 \cos \Omega t + A_2 \sin \Omega t + \mu_k \frac{W}{k} \quad (4)$$

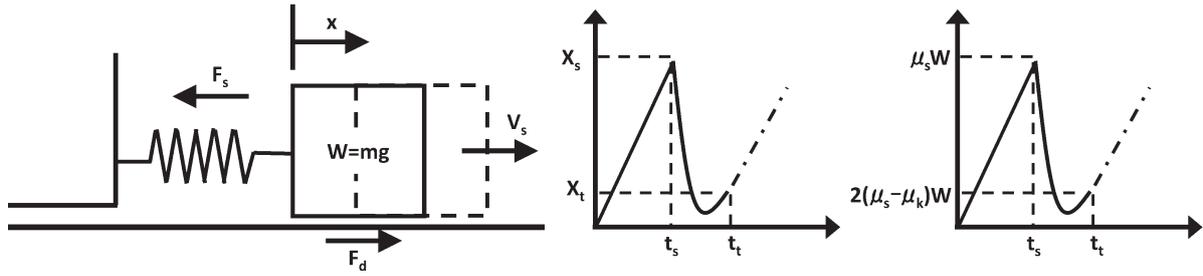


Figure 3 Mechanical model for stick-slip phenomenon

(4) 式は初期条件と  $t=t_s$ ,  $x=x_s$  と  $\dot{x}=\nu_s$  より積分定数が求めることができ、以下のように書くことができる。

$$\begin{aligned} x &= \frac{W}{k} (\mu_s - \mu_k) \cos \Omega(t - t_s) + \frac{\nu_s}{\Omega} \sin \Omega(t - t_s) + \mu_k \frac{W}{k} \\ \dot{x} &= \frac{W}{k} (\mu_s - \mu_k) \Omega \sin \Omega(t - t_s) + \nu_s \cos \Omega(t - t_s) \\ \ddot{x} &= -\frac{W}{k} (\mu_s - \mu_k) \Omega^2 \cos \Omega(t - t_s) - \nu_s \Omega \sin \Omega(t - t_s) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで,  $\Omega = \sqrt{k/m}$  と  $x_s = \mu_s \frac{W}{k}$  である。

$t=t_t$  において  $\dot{x}=\nu_s$  である条件を導入すると次の関係式が得られる。

$$t_t = \frac{2}{\Omega} \left( \pi - \tan^{-1} \left( \frac{(\mu_s - \mu_k) W \Omega}{k \cdot \nu_s} \right) \right) + t_s \quad (6)$$

ここで,  $x_s = \nu_s \cdot t_s$  である。

すべりの継続時間ライズタイムは次式で与えられる。

$$t_r = t_t - t_s \quad (7)$$

式 (7) と式 (6) を利用すれば具体的に次のように得られる。

$$t_r = \frac{2}{\Omega} \left( \pi - \tan^{-1} \left( \frac{(\mu_s - \mu_k) W \Omega}{k \cdot \nu_s} \right) \right) \quad (8)$$

もし,  $\nu_s \approx 0$  であるならば, ライズタイムは次のように求めることができる。

$$t_r = \pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (9)$$

ずれ変位量は次式のように求めることができる。

$$x_r = |x_t - x_s| = 2 \frac{W}{k} (\mu_s - \mu_k) \quad (10)$$

また, すべりに伴う力の変化は次のように得られる。

$$F_d = 2(\mu_s - \mu_k) W \quad (11)$$

### 3. 実験装置および実験概要

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、コンベアーベルトの速度を自由に変えることができる。ベルトはゴム製になっている。Fig. 4 に実験装置・実験の様子を示す。Fig. 4a) に示す実験装置で琉球石灰岩およびプラスチック、岩盤模型実験材料を用いたスティック・スリップ実験を行った。Fig. 4b) に示す実験装置で砂を用いたスティック・スリップ実験を行った。Fig. 4b) の実験装置は、上下に分かれたせん断箱に砂を納め、下の箱はコンベアーベルトに上の箱はバネを通して固定フレームに固定している。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礎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がれた。基礎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。加速度計は Fig. 4 に示した方向が正である。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・スリップ実験に用いた材料は、プラスチックブロック、琉球石灰岩、砂、モデル試験用材料である。Table 1 に実験に用いたばね定数およびプラスチック・琉球石灰岩の境界面の摩擦角を示す。

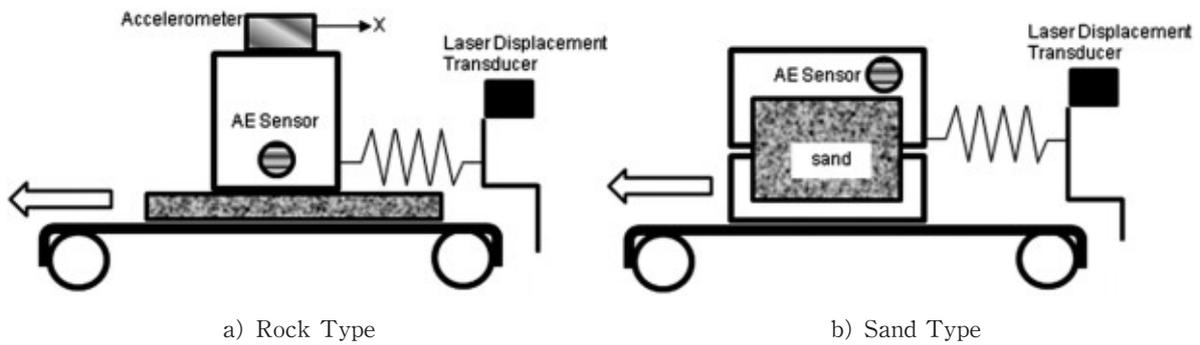


Figure 4 A view and a sketch of experimental device

Table 1 Properties of materials

Spring stiffness	$\phi$ 4mm	8.8kgf/m
	$\phi$ 6mm	20kgf/m
	$\phi$ 7mm	35kgf/m
Plastic-foam interface	friction angle	16~18°
	mass	0.25 kg
Ryukyu Limestone interface	friction angle	28~32°
	mass	0.40 kg

## 4. スティック・スリップ実験結果

### 4.1 プラスチックブロック

プラスチックブロックを用い、基盤の移動速度は0.45 mm/sの際の実験結果を Fig. 5 に示す。プラスチックブロックの境界面の摩擦角は16~18°である。応力の蓄積時間は約10秒で、ほぼ一定である。応力解放時の加速度応答は約40galとなっており、バネの回復量に比例して大きくなる。Fig. 6 にプラスチックブロックを用い、基盤の移動速度を1.04mm/sのときの実験結果を示す。基盤の移動速度が速くなると応力の蓄積時間が短くなり、地震の再来周期は早くなる。応力の蓄積時間は約4秒となっている。

### 4.2 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 Fig 7 と 8 に示す。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。実験に用いたバネはそれぞれ、ばね径6mmとばね径7mmを用いた。応力の蓄積時間はプラスチックブロックでの応答と異なりかなりのばらつきが見られ一定にはならない。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るため一定とはならない。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一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。

Fig. 9 に琉球石灰岩を用いた実験の際の変位応答と AE

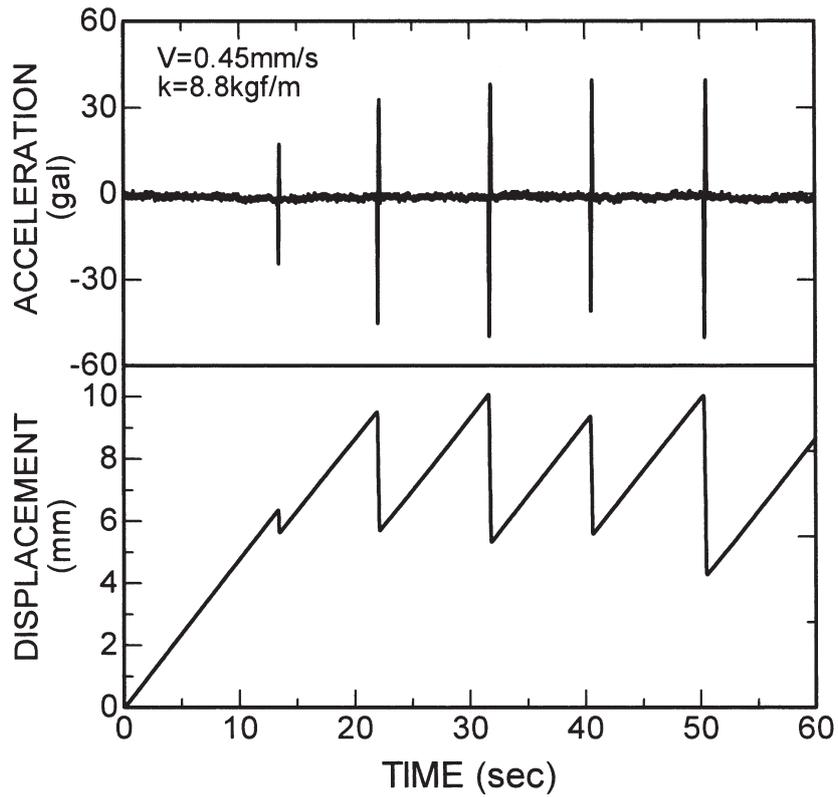


Figure 5 Relation between acceleration and displacement responses for plastic-foam interface experiment (0.45mm/s)

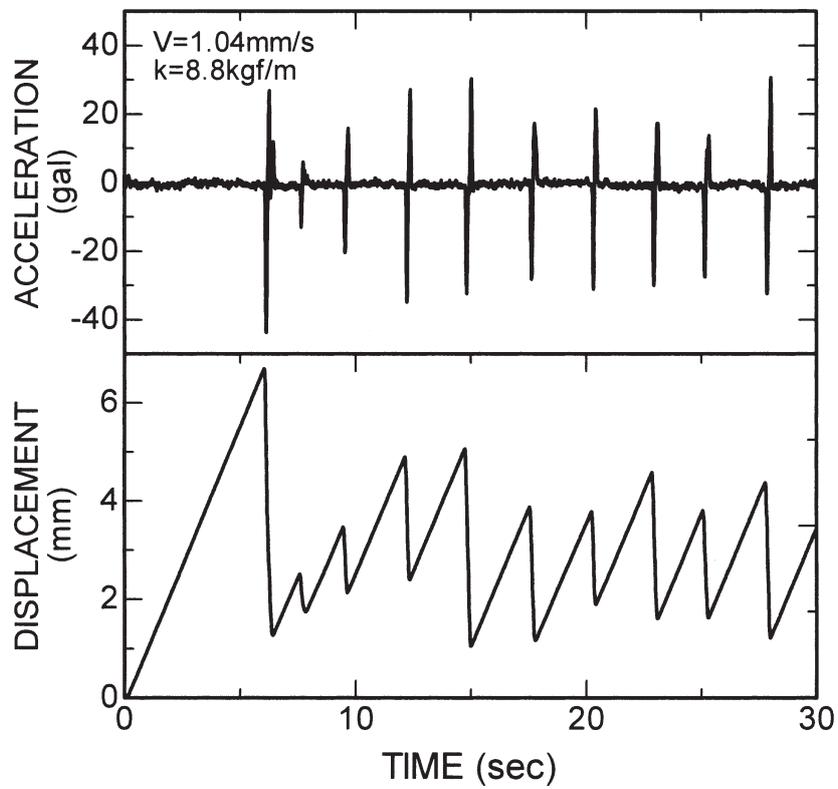


Figure 6 Relation between acceleration and displacement responses for plastic-foam interface experiment (1.04mm/s)

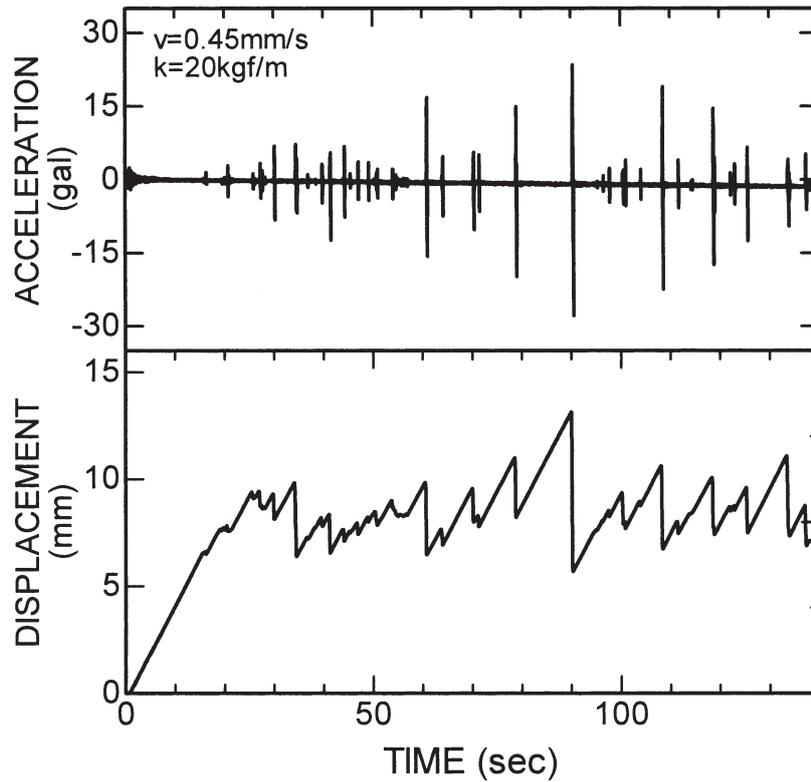


Figure 7 Relation between acceleration and displacement responses for Ryukyu limestone (stiffness: 20kgf/m)

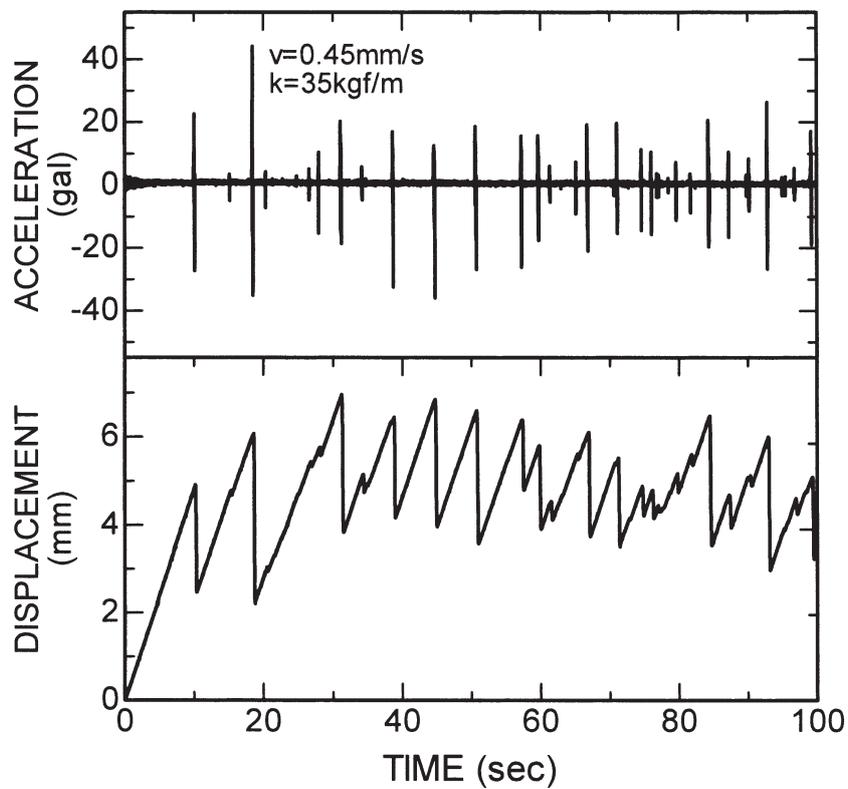


Figure 8 Relation between acceleration and displacement responses for Ryukyu limestone (stiffness: 35kgf/m)

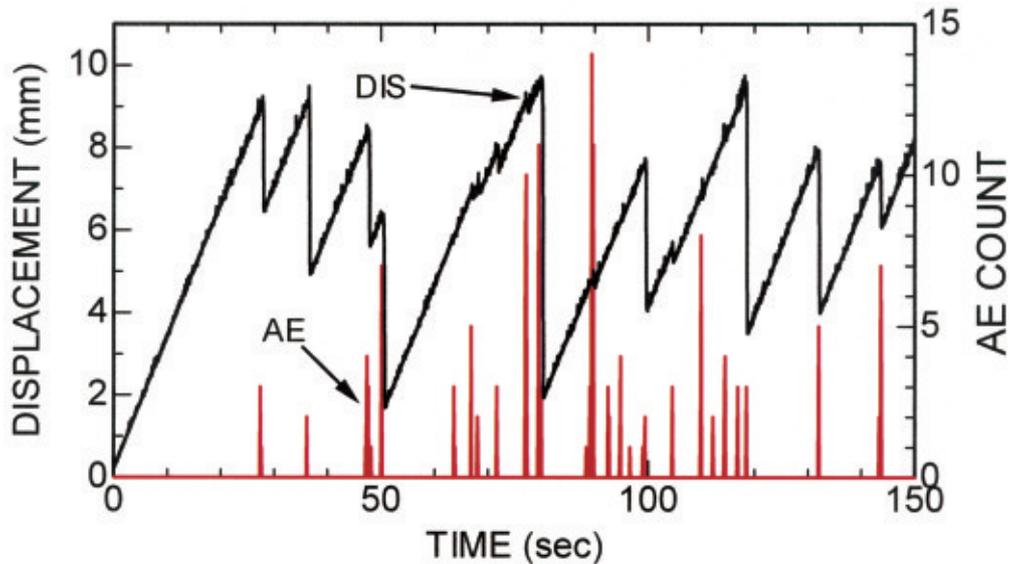


Figure 9 Relation between displacement and AE responses for Ryukyu limestone

応答の関係を示す。上部ブロックがすべる直前に 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。

続面の場合と同様である。せん断応力は、せん断面に働くせん断力をせん断面の断面積で割った値である(たとえば Jaeger and Cook, 1969)。

#### 4.3 砂のせん断試験

Fig. 10 に砂のせん断試験時の応力と AE 応答の関係を示す。Fig. 4B に示す実験装置を用いてスティック・スリップ実験を行った。砂のせん断試験時においてもスティック・スリップ現象が見取れる。また、せん断試験時の AE の状況も見て取ることができた。粒状体である砂のせん断試験で見られるスティック・スリップ現象は岩盤不連

#### 4.4 岩盤模型実験材料

Fig. 11 に岩盤模型実験材料を用いて作成したブロック間の境界面に対する実験結果を示す。岩盤模型実験材料は硫酸バリウム (BaSO<sub>4</sub>)、酸化亜鉛 (ZnO)、白色ワセリンを 70:21:9 の重量比で配合した粉末状のものである(川本ら, 1983)。締め固め圧力の程度により模型材料の強度を簡単に变化させることができる。モデル試験用材料を使

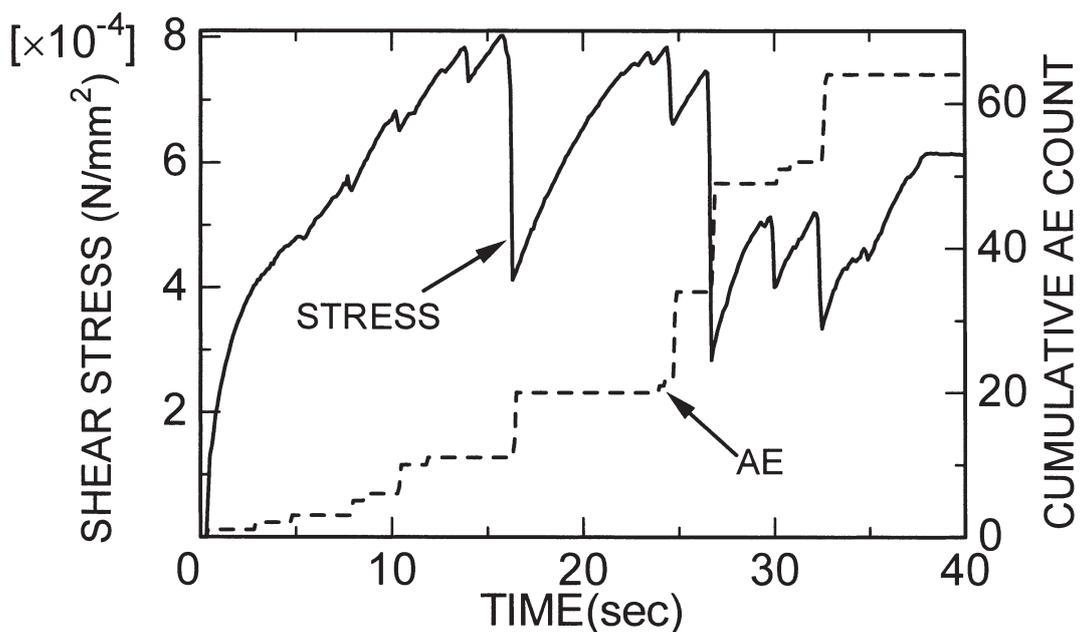


Figure 10 Stick-slip phenomenon during shearing of sand

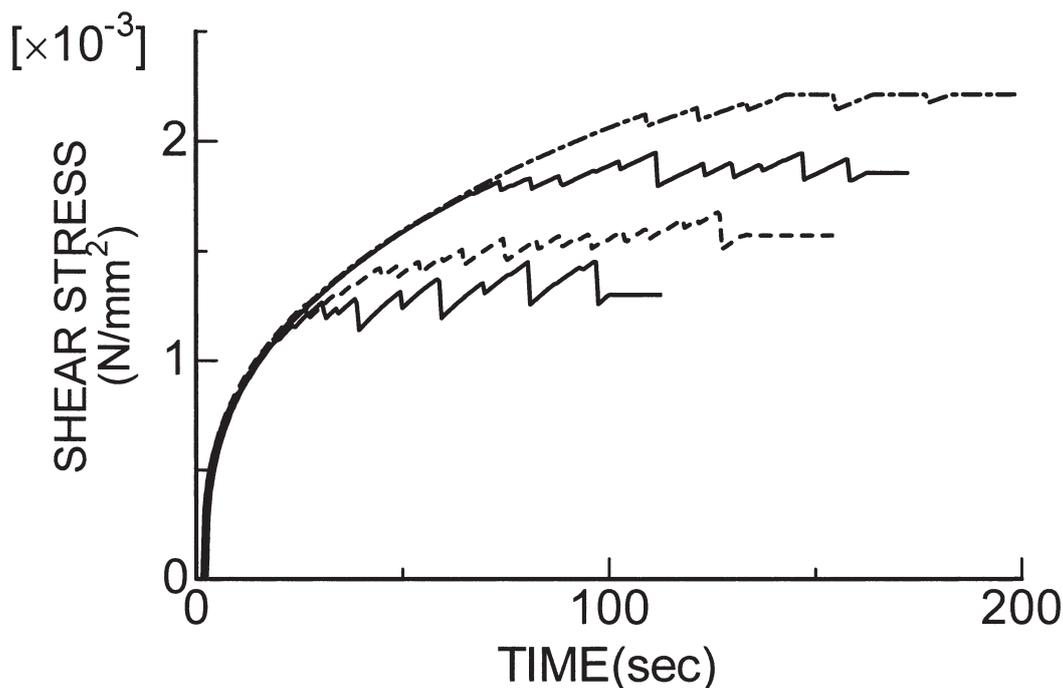


Figure 11 Stick slip respond of block interface of material for Rock model experiments

用して試験用ブロックを作成しスティック・スリップ試験を行った。岩盤模型試験用材料ブロックを用いて岩石と同様の試験をおこなった際にもスティック・スリップ現象は発生することが確認できた。

## 5. スティック・スリップ実験考察

Fig. 12 にプラスチックブロックの際の応力蓄積時間と加速度応答の関係を示す。応力蓄積時間は上部ブロックが滑った後、運動が停止しバネが伸び再び上部ブロックが運動するまでの時間のことである。実験に用いた上部ブロックと基礎ブロックの材料および表面摩擦角、バネ径、上部ブロックの質量は一定で、基礎ブロックの移動速度 0.45 mm/s および 1.04mm/s と変化させた。移動速度 0.45 mm/s と 1.04mm/s を比較すると移動速度が速い方が運動の際の加速度応答が大きくなることがわかる。

Fig. 13 に琉球石灰岩を用いた際のバネ径 7 mm およびバネ径 6 mm の場合の変位応答と加速度応答の関係を示す。実験に用いた上部ブロックと基礎ブロックの材料および表面摩擦角、上部ブロック、基礎ブロックの移動速度は一定で、バネ径を変化させた。バネ径が大きくなるとバネの剛性が大きくなる。その結果、移動量は同じであっても、上部ブロックの移動で得られる加速度応答はバネ径の大きな場合の方が大きな応答が得られている。

Fig. 14 および Fig. 15 にライズタイムと加速度応答の関係、ライズタイムと変位応答の関係をそれぞれ示す。ライズタイムとはすべりの継続時間であり、上部ブロックの運動スタート時の時間と運動停止時の時間の差である。ライ

ズタイムが同じであっても、基礎ブロックの移動速度が遅い方が加速度応答および変位応答ともに大きな値を示している。基礎の移動速度 0.45mm/s および 1.04mm/s を比較すると同じライズタイムであっても運動に伴う加速度応答は 0.45mm/s の方が大きくなる。また、そのときの変位応答も 0.45mm/s の方が大きくなる。以上の実験結果より断層面の面積、剛性が同じ断層があった場合に沈み込むプレートの速度がゆっくりとした断層の方が大きな地震を発生させることが考えられる。しかし、地殻の剛性が小さいと加速度の値が大きくなることを意味する。

## 6. スティック・スリップ現象に対する解析的考察

### 6.1 実験の再現

Fig. 5 and 6 に示したプラスチック材料によるスティック・スリップ実験の再現を行った。Table 2 に解析に用いた各種パラメータを示す。Fig. 16 に Fig. 5 の実験結果の再現を示す。Fig. 5 では安定したすべりの際に約 3 cm の変位応答が測定され、解析結果では約 2.2cm と実験結果に比べて若干小さい応答となった。しかしながら、運動の際の加速度はほぼ同等の値である。Fig. 17 に Fig. 6 に示した実験結果の再現を示す。Fig. 17 では Fig. 6 で見られる再来周期が再現されている。Fig. 18 に一つのスリップについての解析結果を示す。速度はスリップの始まりから始まり、スリップが停止すると 0 に戻る。一方、加速度はスリップの開始と停止のときに最大値をとる。

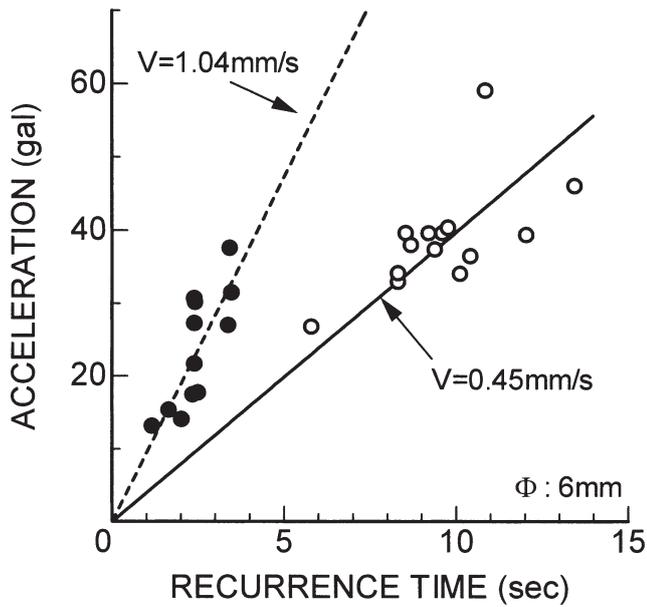


Figure 12 Relation between recurrence time and maximum acceleration

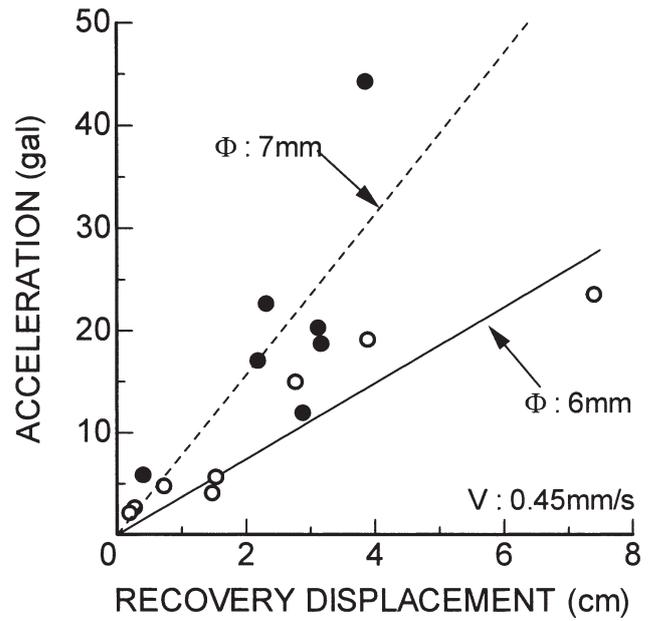


Figure 13 Relation between recurrence displacement and maximum acceleration

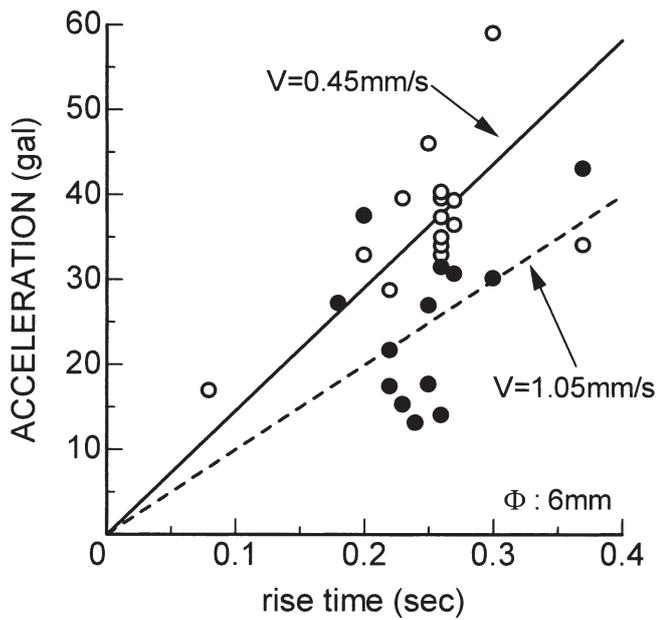


Figure 14 Relation between Rise-time and maximum acceleration

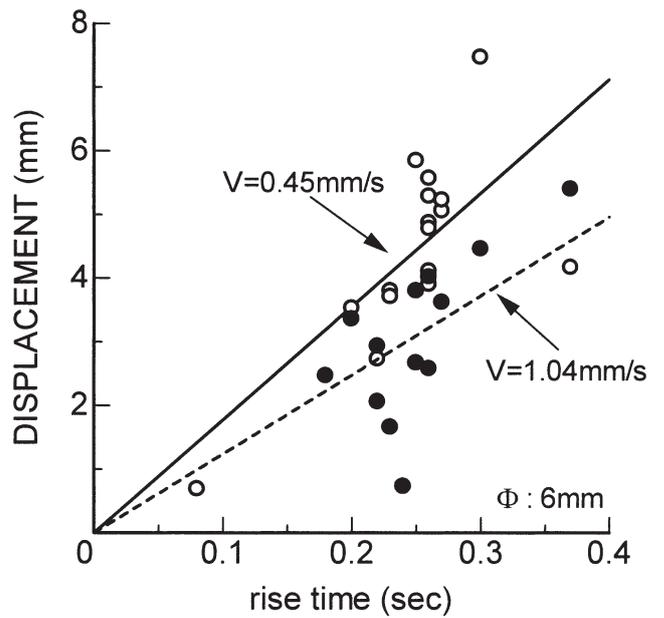


Figure 15 Relation between Rise-time and maximum displacement

Table 2 Parameter of material

k (gf/cm)	L (cm)	W (g)	$\mu_s$	$\mu_k$	$V_m$ (mm/s)
88	5.0	250	0.325	0.287	0.45
88	5.0	250	0.325	0.287	1.04

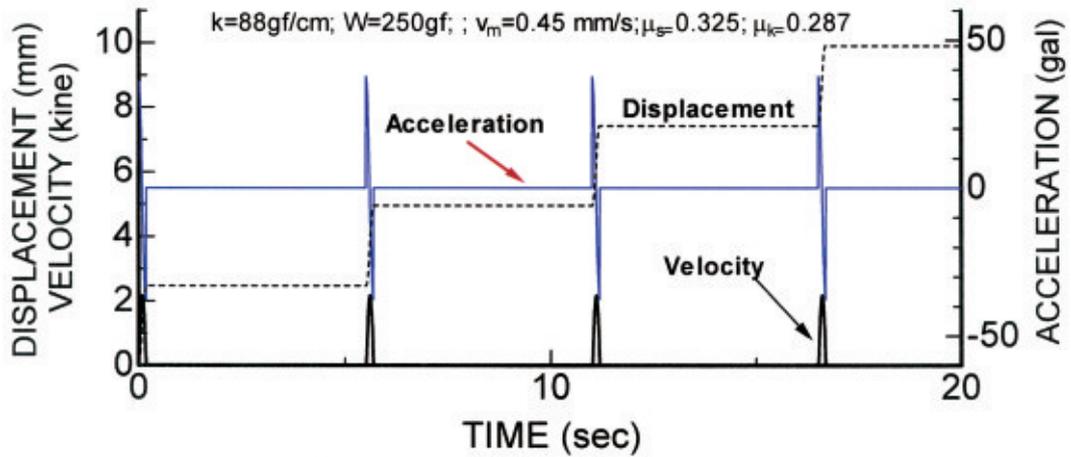


Figure 16 Numerical simulation of a stick-slip experiment for plastic-foam interface (0.45mm/s)

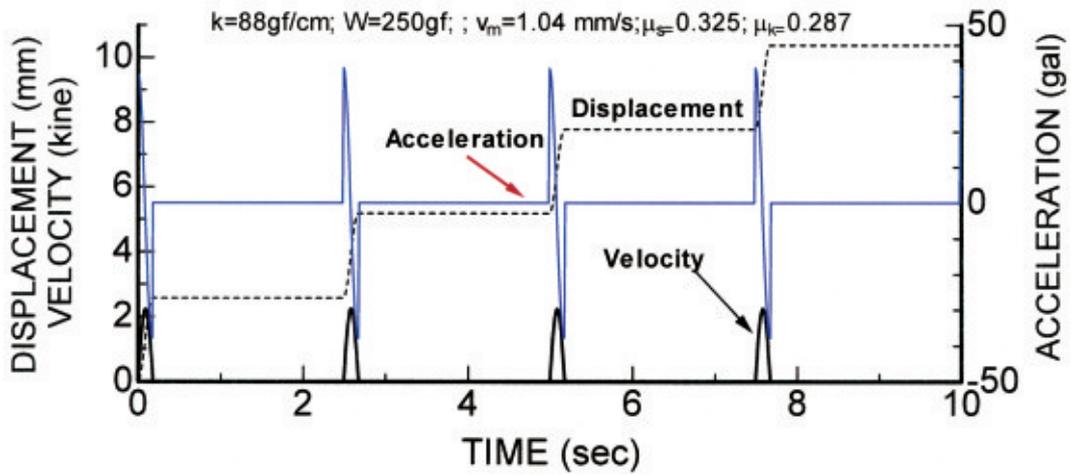


Figure 17 Numerical simulation of a stick-slip experiment for plastic-foam interface (1.04mm/s)

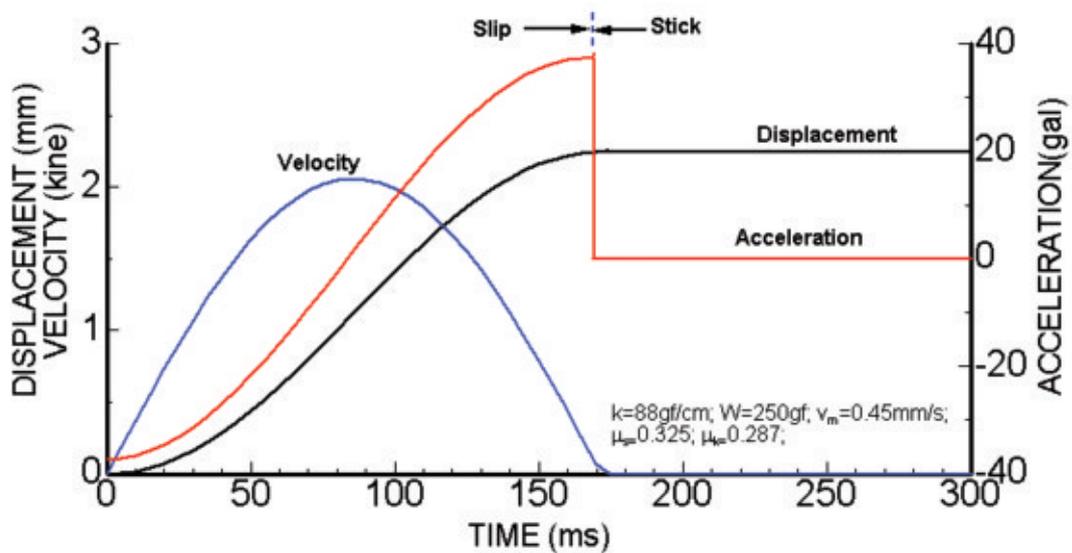


Figure 18 A typical displacement, velocity, acceleration responses during slip phase for plastic block-foam interface (0.45mm/s)

### 6.2 地震への適応

本論文で紹介した方法を実際の地震への適応を行った。理論と数値モデルの適応として、周囲の媒体の剛性に注目した。実際の地震と比較してすべりの周期が非常に短くなっている。室内実験においてもバネ剛性が大きくなると上部ブロックがすべりやすくなり、すべりの周期が短くなることが確認されている。Fig. 19 に地震発生メカニズムのモデル図を示す。地殻の角振動数は次式より求める。

$$\Omega = \sqrt{\frac{G}{\rho h^2}} = \frac{V_s}{h} \quad \dots (12)$$

ここで、 $G$  はせん断弾性係数、 $\rho$  は密度、 $h$  は有効変形範囲の長さ、 $V_s$  は地殻の平均せん断弾性波速度を表している。このモデルは基礎プレートが一定の速度  $V_m$  で移動し、弾性的な媒体であると仮定している。また、基礎プレートと大陸プレートは相対的に運動が異なり、大陸プレートの運動がスティック・スリップ現象としてモデル化されると仮定している。異なる状況も取り扱うことが簡単なようにここでは有限差分法を用いた。

Table 3 に解析に用いた各種パラメータを示す。case1 と case2 では剛性、case2 と case3 ではプレートの沈降速度、case3 と case4 では有効変形範囲の長さ、case4 と case5 では摩擦角についてそれぞれ着目して解析を行った。

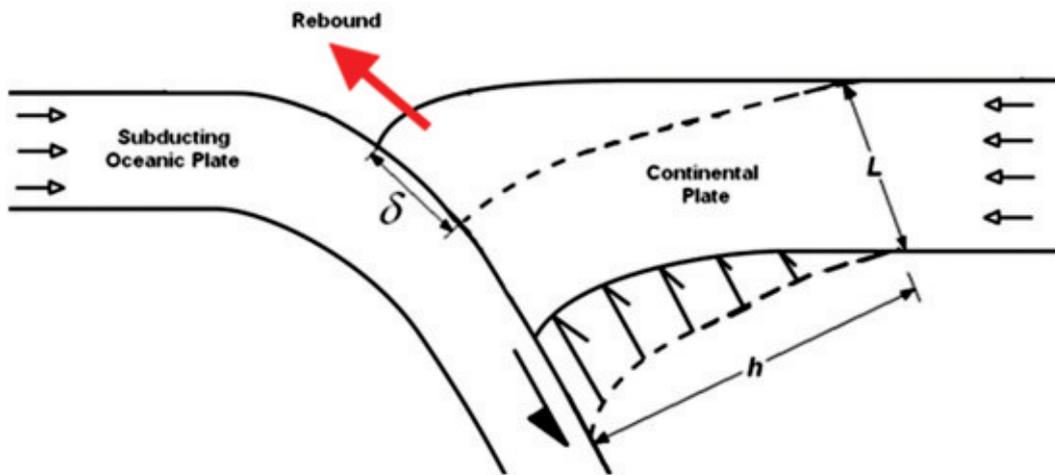


Figure 19 Modeling of seismogenic mechanism

Table 3 Various parameters used for analysis

Case Number	G (GPa)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> )	h (km)	$\mu_s$	$\mu_k$	$V_m$ (m/s)
1	1.0	2.5	1.0	0.577	0.364	0.10
2	3.0	2.5	1.0	0.577	0.364	0.10
3	3.0	2.5	1.0	0.577	0.364	0.15
4	3.0	2.5	2.0	0.577	0.364	0.15
5	3.0	2.5	2.0	0.577	0.466	0.15

各ケースにおける計算結果を Fig. 20 から Fig. 24 に示す。Fig. 20 と Fig. 21 を比較すると、媒体の剛性が増加するとスリップする間隔が短くなる。また、すべる際に発生する速度は小さくなる。Fig. 21 と Fig. 22 では移動速度を変化させた。結果としては剛性などの条件が同じで移動速度が速くなるとすべる周期が短くなる。Fig. 22 と Fig. 23 では有効変形範囲の長さを変化させた。二つの図を比較すると有効変形範囲が長くなると地震発生の周期が長くなり、発生する速度も大きくなる傾向にある。この結果より有効変形範囲の長さはすべりの周期に影響を及ぼすことがわかった。Fig. 24 は case 4 の条件から動的摩擦係数を 0.364 から 0.466 に変化させて解析を行った。Fig. 23 と Fig. 24 を比較するとスリップイベントにおいてすべりの周期が小さくなっている。動的摩擦係数が大きくなるとすべりの周期が短くなり速度も小さくなる。

### 6.3 スティック・スリップにおける永久変形の算出

Fig. 25 に実測さ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。Fig. 25 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。加速度応答から数値積分法を用いて変位応答を導くには、ベースラインの修正が必要である。ベースラインの修正を行わずに積分を行うと、得られる変位応答は発散し、実際とは異なる応答が得られる。そこで

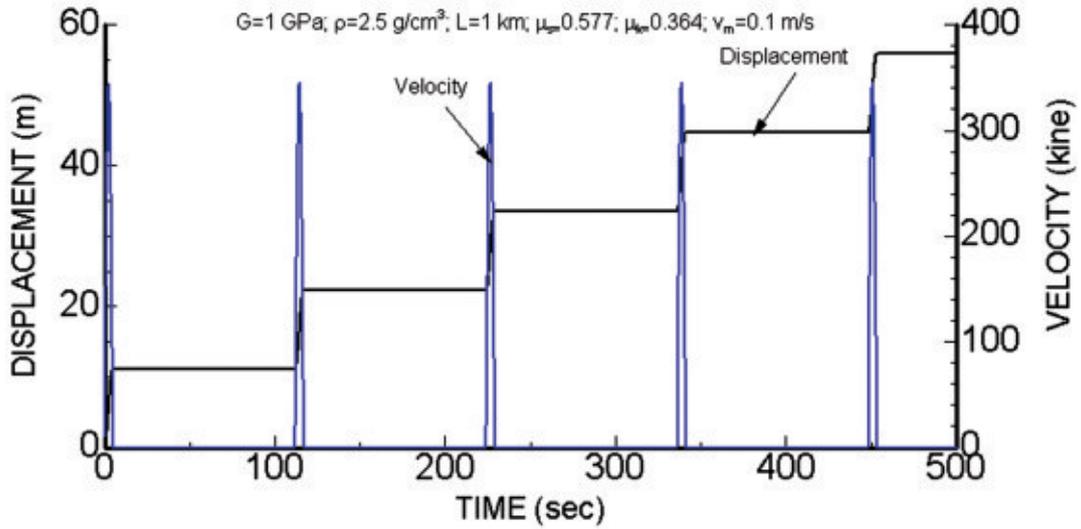


Figure 20 Numerical simulation of displacement and velocity responses for CASE 1

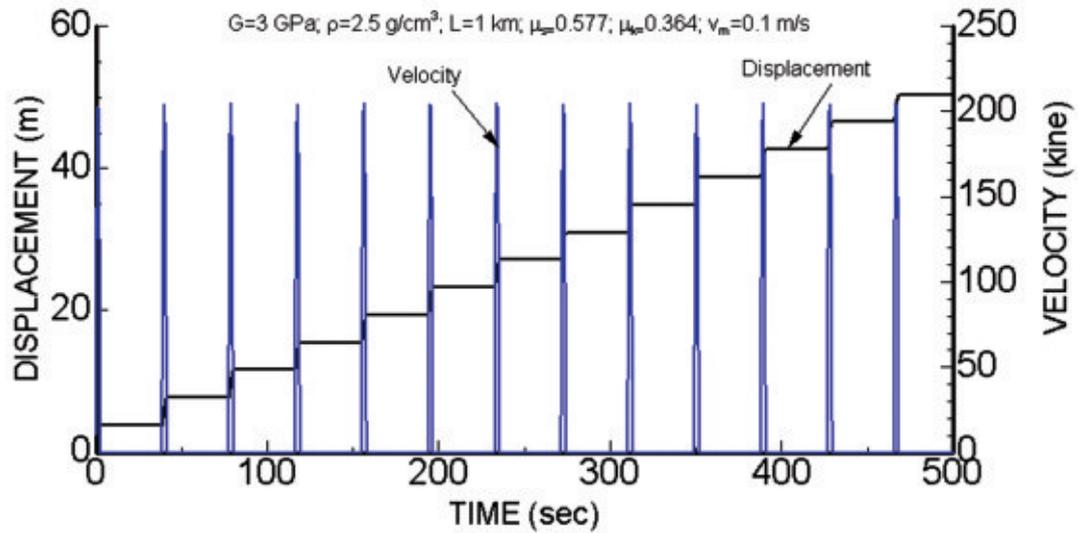


Figure 21 Numerical simulation of displacement and velocity responses for CASE 2

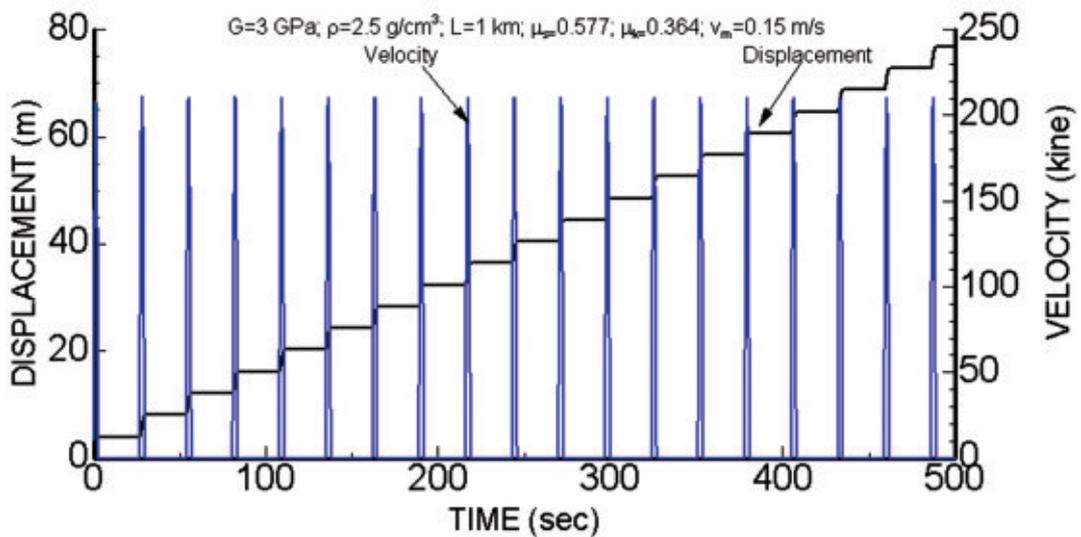


Figure 22 Numerical simulation of displacement and velocity responses for CASE 3

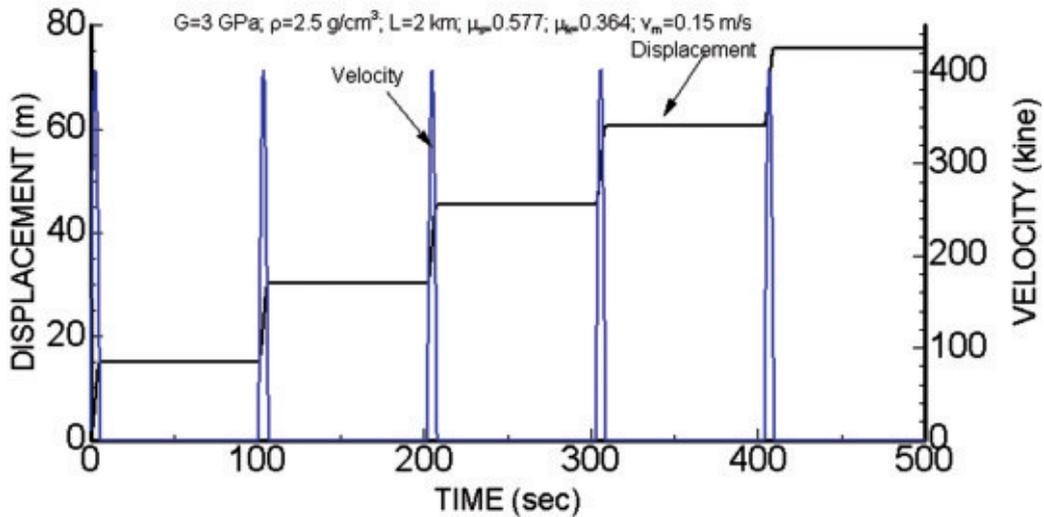


Figure 23 Numerical simulation of displacement and velocity responses for CASE 4

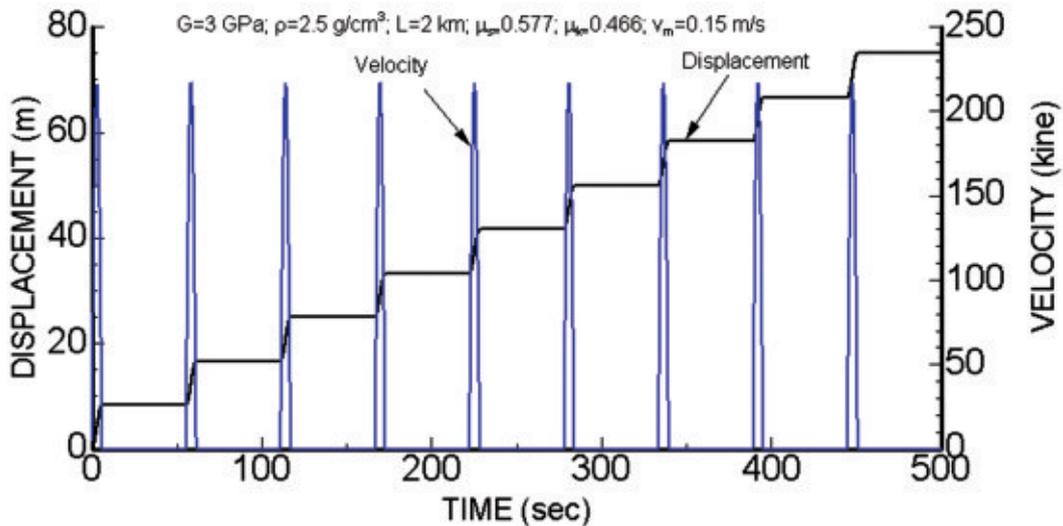


Figure 24 Numerical simulation of displacement and velocity responses for CASE 5

EPS法(太田・アイダ、2007;アイダ・太田、2006)を用いて加速度応答を積分し変位応答を求めた。Fig. 25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とほぼ同様である。この比較から著者らが提案したEPS法による地震に伴う地殻の永久変位を求めることが可能であることが再度確認できたことになる。

## 7. 結論

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全く同じものであった。基盤の移動速度の増加に伴いスリップ周期とスリップ量は縮小される傾向にある。また、断層面の剛性率の増加はスリップ周期が同じであっても発生する地震加速度応答は大きくなる。断層面の動摩擦係数が増加するとスリップ周期とスリップ幅が小さくなる

傾向にある。断層面の残留強度が最大強度に近づくとき、断層は連続的にスリップを起こす。周辺の媒体が柔らかい弾性体ならば地震の再来周期と変位量は、より大きくなる。周辺の剛性が高いと地震の再来周期と変位量は小さくなる。

以上の結果より、インドネシアで発生した2004年スマトラ沖地震および2005年ニース島沖地震における地震の特徴(Aydan *et al.* 2005a, 2005b; Aydan 2009)を十分に説明できる。スマトラ沖地震ではマグニチュードが大きいが地震動は小さく、海底での断層変位量約20mとそれに伴う津波が特徴であり、ニース島沖地震はスマトラ沖地震に比べてマグニチュードが小さいが非常に大きな地震動が特徴であった。これは、地震発生場所は非常に近いが、周りの剛性率の違い(Triyoso, 2005)により地震動に大きな違いが表れたと考えられる。スマトラ沖地震の場合は周りの剛

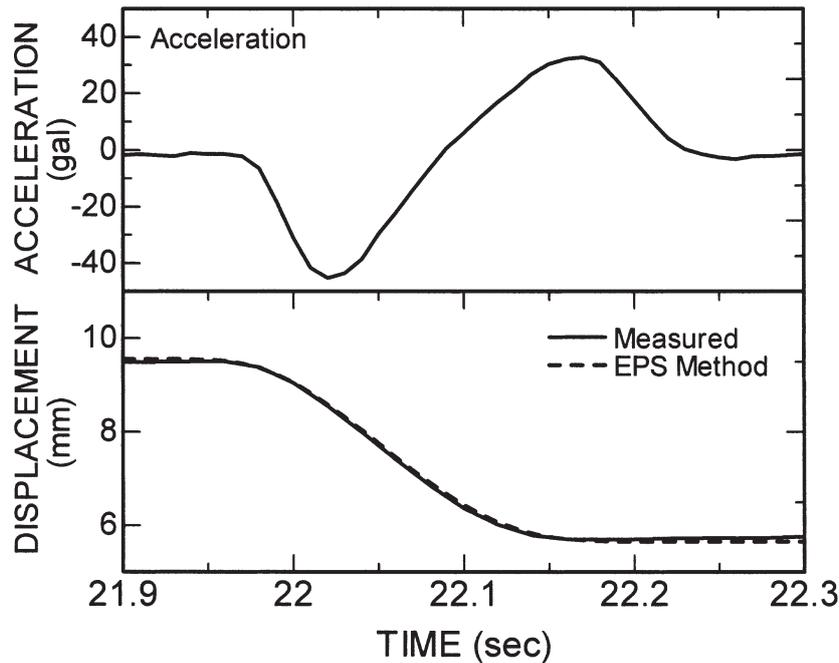


Figure 25 Comparison of displacement response computed from EPS method with measured displacement response

性率が小さいため、大きな変位が見られたが地震動は小さくなったと考えられ、ニアス島沖地震の場合は周りの剛性が大きく変位は小さくても地震動が非常に大きくなったものと考えられる。

#### 参考文献

Aydan, Ö., Hamada M., Suzuki, Y. (2005a): Some observations and considerations on the damage induced by the tsunami of the 2004 Sumatra earthquake on structures and coast. *Journal of The School of Marine Science and Technology*, No.1, Vol. 3, 79-94.

Aydan, Ö., S. Miwa, H. Kodama and T. Suzuki (2005b): The Characteristics of M8.7 Nias Earthquake of March 28, 2005 and Induced Tsunami and Structural Damages, *Journal of The School of Marine Science and Technology, Tokai University*, Vol.3, No.2, pp.66-83.

Aydan, Ö. (2009): Characteristics of Ground Liquefaction and Lateral Spreading Caused by Great Off-Sumatra Earthquakes. *Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference. XVIIth International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypt.

アイダン オメル, 太田良巳 (2006): 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.

Bowden, F. P. and Leben, L. (1939): The Nature of sliding and the analysis of friction, *Proc. Roy. Soc. London*, A169, pp.371-391.

Bowden, F. P. and D. Tabor (1950): *The Friction and Lubrication of Solids*, Clarendon Press, Oxford.

Brace, W. F., and J. D. Byerlee (1966): Stick-slip as a mechanism for earthquakes, *Science*, 153, pp.990-992.

Jaeger, J. C. (1959): The Frictional Properties of Joints in Rock, *Geol. Pura Appl.*, Vol.43, pp.148-158.

Jaeger, J. C. and N. G. W. Cook (1969): *Fundamentals of Rock Mechanics*, first edition, Methuen, London, pp.593.

川本眺万, 尾原祐三, 市川康明 (1983): 底面摩擦模型装置および模型材料の力学特性 不連続面を有する岩盤構造物の力学特性に関する基礎的研究, *日本鉱業会誌*, vol.99, No.1139, pp.1-6.

太田良巳, アイダン オメル (2007): 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.

Shimazaki, K. and Nakata, T. (1980): Time-predictable recurrence model for large earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 7, pp. 279-282.

Triyoso, W. (2005): Understanding the potency of giant thrust earthquake along Sumatra subduction zone: The effect of sudden stress/strain loading, *EMSC*, <http://www.emsc-csem.org/index.php?page=home>

## 要 旨

地震は断層の密集している地域において規則的な時間間隔あるいは不規則な時間間隔で繰り返し発生する。断層のような不連続性岩盤の接合面やクラックなどでせん断運動中におこる運動と応力の蓄積を繰り返す現象はスティック・スリップと呼ばれる。既往の室内試験の結果においてすべりの性質として一定の時間間隔で発生することが確認されている。繰り返し発生する地震とスティック・スリップは同様の現象であると考えられる。本論文ではスティック・スリップ現象と繰り返し発生する地震を室内実験および工学的なモデル化により関連づけた。

傾斜機能を有する底面摩擦実験装置を用いた室内実験では、プラスチックブロックおよび琉球石灰岩ブロックを用いたスティック・スリップ実験を行った。ばねの剛性が大きくなる、または移動速度が速くなるとすべりの周期は短くなることが確認できた。この結果は解析的な検討でも確認することができた。