

DISS. ETH NO. 21960

DISCRETE ELEMENT MODELING OF  
TRIGGERED SLIP IN FAULTS WITH  
GRANULAR GOUGE: APPLICATION TO  
DYNAMIC EARTHQUAKE TRIGGERING

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES OF ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

BEHROOZ FERDOWSI

M.Sc. in Civil Engineering, Tehran Polytechnic

born on 13.06.1985  
citizen of Iran

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Jan Carmeliet, examiner  
Dr. Michele Griffa, co-examiner  
Dr. Paul A. Johnson, co-examiner  
Prof. Dr. Xiaoping Jia, co-examiner

2014

# Abstract

Recent seismological observations based on new, more sensitive instrumentation show that seismic waves radiated from large earthquakes can trigger other earthquakes globally. This phenomenon is called dynamic earthquake triggering and is well-documented for over 30 of the largest earthquakes worldwide. Granular materials are at the core of mature earthquake faults and play a key role in fault triggering by exhibiting a rich nonlinear response to external perturbations. The stick-slip dynamics in sheared granular layers is analogous to the seismic cycle for earthquake fault systems. In this research effort, we characterize the macroscopic scale statistics and the grain-scale mechanisms of triggered slip in sheared granular layers. We model the granular fault gouge using three-dimensional discrete element method simulations. The modeled granular system is put into stick-slip dynamics by applying a confining pressure and a shear load. The dynamic triggering is simulated by perturbing the spontaneous stick-slip dynamics using an external vibration applied to the boundary of the layer. The influences of the triggering consist in a frictional weakening during the vibration interval, a clock advance of the next expected large slip event and long term effects in the form of suppression and recovery of the energy released from the granular layer. Our study suggests that above a critical amplitude, vibration causes a significant clock advance of large slip events. We link this clock advance to a major decline in the slipping contact ratio as well as a decrease in shear modulus and weakening of the granular gouge layer. We also observe that shear vibration is less effective in perturbing the stick-slip dynamics of the granular layer. Our study suggests that in order to have an effective triggering, the input vibration must also explore

---

the granular layer at length scales about or less than the average grain size. The energy suppression and the subsequent recovery and increased activity period in our model explain the abundance of observations that support the hypothesis of the delayed dynamically triggered earthquakes, as well as provide clues for improving the methods for identifying triggered earthquakes. The results of our simulations also provide a physical basis for the methods suggesting time intervals of increased hazard following the occurrence of major earthquakes.

# Zusammenfassung

Letzte seismologischen Beobachtungen auf der Grundlage neuer, empfindlicher Instrumente zeigen, dass seismische Wellen von grossen Erdbeben abgestrahlten anderen Erdbeben weltweit auslösen. Dieses Phänomen wird als dynamische Erdbeben Triggerung und ist für mehr als 30 der grössten Erdbeben weltweit gut dokumentiert. Körnige Materialien sind der Kern der reifen Erdbeben Fehler und spielen eine Schlüsselrolle bei der Fehler Auslösung durch eine reiche nichtlineare Reaktion auf externe Störungen aufweisen. Die Stick-Slip-Dynamik in gescherten Körnerschichten ist analog zu der seismischen Zyklus für die Erdbebenstörungssysteme. In diesem Forschungsaufwand charakterisieren wir die makroskopischen Skala Statistiken und die Korn angelegten Mechanismen ausgelöst Schlupf in gescherten Körnerschichten. Wir modellieren das granulare Fehler Beitel unter Verwendung von dreidimensionalen diskreten Elemente-Methode -Simulationen. Die modellierte körnigen System wird durch Anlegen einer Druckbelastung und einer Scherbelastungin Stick-Slip Dynamik gesetzt. Die dynamische Ansteuerung wird durch Stören der spontanen Stick-Slip- Dynamik unter Verwendung einer externen Vibration auf der Grenze der Schicht aufgebracht simuliert. Die Einflüsse der Auslösung einer Reibungsschwächungbestehen während der Vibration Intervall eines Takt vor dem nächsten erwarteten grossen Schlupfereignis-und Langzeitwirkungen in Form der Unterdrückung und der Rückgewinnung der Energie aus der körnigen Schicht freigegeben. Unsere Studie legt nahe, dass oberhalb einer kritischen Amplitude, Vibration verursacht einen erheblichen Uhr vor der grossen Rutsch Veranstaltungen. Wir verbinden diese Uhr vorab zu einem grossen Rückgang der Rutschkontaktverhältnissowie eine Abnahme der

---

Schubmodul und Schwächung der Granulatschicht. Wir beobachten auch, dass die Scherschwingung ist weniger wirksam bei der Störung der Stick-Slip- Dynamik der Körnerschicht. Unsere Studie legt nahe, dass, um eine effektive Auslösung haben, die Eingangs Vibrationen muss auch die Körnerschicht erkunden bei Längenskalen zu oder weniger als die mittlere Korngrösse. Die Energie, die Unterdrückung und die anschließende Erholung und erhöhte Aktivität Zeit in unserem Modell erklären, die Fülle der Beobachtungen, die Hypothese der verzögerten dynamisch ausgelöst Erdbeben, sowie Anhaltspunkte für die Verbesserung der Methoden zur Ermittlung ausgelöst Erdbeben zu unterstützen. Die Ergebnisse unserer Simulationen bieten auch eine physikalische Grundlage für die Methoden darauf hindeutet, Zeitintervalle der erhöhten Gefahr nach dem Auftreten von grossen Erdbeben.