ETH zürich

ETH Library

Physics of dynamic rupture pulses and macroscopic earthquake source properties in elastic and plastic media

Doctoral Thesis

Author(s):
Gabriel, Alice-Agnes

Publication date:
2012

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-009761502

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

DISS. ETH NO. 20567

PHYSICS OF DYNAMIC RUPTURE PULSES AND MACROSCOPIC EARTHQUAKE SOURCE PROPERTIES IN ELASTIC AND PLASTIC MEDIA

A dissertation submitted to
ETH ZÜRICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

ALICE-AGNES GABRIEL
Diplom Physikerin, Technische Universität Dresden, Germany

06 July, 1983

German

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Domenico Giardini	ETH Zürich	Referent
Dr. Luis A. Dalguer	ETH Zürich	Korreferent
Prof. Dr. Jean-Paul Ampuero	California Institute of Technology	Korreferent
Prof. Dr. P. Martin Mai	King Abdullah University of Science and Technology	Korreferent
Prof. Dr. Raul Madariaga	École Normale Supérior	Korreferent

2012

Abstract

This dissertation concerns complexities in earthquake source dynamics and the resulting implications for seismic ground motion. Its findings are based on numerical and analytical investigations that are validated by comparison with seismic observations. The core of this work is a comprehensive set of 2D in-plane dynamic rupture simulations with a spectral element method incorporating faults. The fault rheology is governed by a velocity-and-state-dependent friction law, utilising severe velocity-weakening at high slip rates and a homogeneous initial stress state. Seismological observations, laboratory experiments, and theoretical models indicate that earthquakes can operate in different manners. We classify a diversity of rupture styles based on their stability (decaying, steady, or growing), rupture speed (subshear or supershear), healing properties (cracks or pulses), and complexity (simple or multiple fronts). Such rupture styles and their transitions depend on the state of stress and on the strength of the fault, and their identification in earthquake observations may inform about rheological parameters along active fault zones. We study the alteration of macroscopic rupture properties by off-fault energy dissipation into plastic deformation, which may be triggered by high stress concentrations at earthquake rupture fronts. Investigating in detail the energy balance and equation of motion of self-similar pulse-like ruptures, we are able to define quantitative relations between off-fault energy dissipation and macroscopic source properties. These findings contribute to a self-consistent theoretical framework for the study of the earthquake energy balance based on observable earthquake source parameters. The emanated seismic wave fields contain signatures of rupture styles and plasticity in near-field seismograms and source spectra. The asymmetrically induced plastic strain fields result in characteristic damage patterns off the fault and contribute to the total seismic moment. Identifying the diversity of rupture patterns in real earthquakes poses an interesting observational challenge. The long-term perspective of this work is to provide physical constraints with respect to the source of earthquakes applicable in strong ground motion prediction, seismic hazard analysis, and source inversion methods.

Zusammenfassung

Diese Dissertation untersucht Komplexitäten in der Erdbebenherd-Dynamik und die daraus resultierenden Implikationen für seismische Bodenbewegungen. Sie basiert auf numerischen und analytischen Untersuchungen, die durch Vergleiche mit seismischen Beobachtungen validiert werden. Im Kern der Arbeit steht ein umfassendes Set von zweidimensionalen bidirektionalen dynamischen Bruchsimulationen, welche mit einer spektralen Elemente Methode ausgeführt werden und dabei eine Implementation von Bruchlinien erlaubt. Die Bruchzonenrheologie wird durch eine homogene Vorspannung und ein geschwindigkeits- und zustandsabhängiges Reibungsgesetz beschrieben, welches eine starke Geschwindigkeitsabschwächung bei hohen Bewegungsraten bewirkt. Motiviert durch seismologische Beobachtungen, Laborexperimente und theoretische Modelle, die darauf hinweisen, dass sich Erdbeben in verschiedenen Bruchstilen ausbreiten können, klassifizieren wir eine Vielfalt von Stilen im Hinblick auf ihre Stabilität (abfallend, stabil, oder wachsend), Bruchgeschwindigkeit (subshear oder supershear), heilenden Eigenschaften (Risse oder Pulse) und Komplexität (einfache oder mehrfache Bruchfronten). Diese Bruchstile und deren Übergänge sind abhängig vom Spannungszustand sowie von der Stärke der Bruchzone und ihre Identifikation in seismologischen Beobachtungen kann dazu beitragen, über rheologische Parameter entlang aktiver Störungszonen zu informieren. Darüber hinaus repräsentieren sie mögliche 'Bausteine' für komplexere Herdbruchmuster unter heterogenen Anfangsbedingungen. Wir untersuchen im Detail die Änderungen der makroskopischen Eigenschaften des Erdbebenherds durch Energiedissipation in eine plastische Verformung des Materials ausserhalb der Verwerfung, welche durch hohe Spannungskonzentrationen an Bruchsfronten ausgelöst wird. Durch eine detaillierte Analyse der Energiebilanz und der Bewegungsgleichung von selbst-ähnlichen pulsförmigen Brüchen sind wir in der Lage, quantitative Beziehungen zwischen plastischer Energiedissipation und makroskopischen Eigenschaften der Erdbebenquelle zu definieren. Diese Erkenntnisse tragen zu einem in sich schlüssigen theoretischen Rahmen für die Untersuchung der Erdbebenenergiebilanz bei, welcher auf beobachtbaren Eigenschaften des Erdbebenherdes basiert. Die ausgestrahlten seismischen Wellenfelder weisen Signaturen der Bruchstile und der Plastizität auf, welche sich in Nahfeld-Seismogrammen und Quell-Spektren manifestieren. Die asymmetrisch induzierten plastischen Dehnungsfelder resultieren in charakteristischen Schadenmustern in der Nähe der Bruchlinie und tragen zum gesamten seismischen Moment bei. Die Ermittlung der Vielfalt der Bruchmuster in realen Erdbeben stellt eine interessante Herausforderung für Beobachtungsstudien dar. Die langfristige Perspektive dieser Arbeit ist es, physikalische Grenzwerte in Bezug auf Quelleigenschaften von Erdbeben zu ermitteln, welche dann für Bodenbewegungsvorhersagen, seismische Gefährdungsanalysen und Quellinversionsmethoden anwendbar sind.