

Physic-based classification, quantification, and simulation of ground motion for earthquake engineering applications

Doctoral Thesis

Author(s):

Cabrera, Banu Mena

Publication date:

2010

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006244527>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Diss. ETH No. 19077

PHYSICS-BASED CLASSIFICATION, QUANTIFICATION,
AND SIMULATION OF GROUND MOTION
FOR EARTHQUAKE ENGINEERING APPLICATIONS

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

BANU MENA CABRERA

Master of Science in Earthquake Engineering

Bogazici University, Istanbul, Turkey

born July 3, 1979

citizen of Turkey

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Domenico Giardini, examiner

Assoc. Prof. Dr. P. Martin Mai, co-examiner

Dr. Luis Dalguer, co-examiner

Prof. Dr. Fabrice Cotton, co-examiner

2010

Zusammenfassung

Das primäre Augenmerk dieser Arbeit ist die Auswahl und Vorhersage von Bodenbewegungen zur seismischen Risikoanalyse anhand der zugrunde liegenden Physik. Die Auswahl und Quantifizierung erfolgt hierbei anhand von empirischen Datenbank. Das Ziel ist die Charakterisierung erwarteter Bodenbewegungswerte für zukünftige Erdbeben, sowie die Bereitstellung einer direkten Schnittstelle für Bauingenieure für die strukturelle und geotechnische Analyse.

Im ersten Teil konzentriere ich mich auf die Auswahl und Quantifizierung von starken Bodenbewegungen im Nahfeld anhand von empirischen Datenbank unter Berücksichtigung der Richtwirkung des Erdbebenherdes. In diesem Zusammenhang schlage ich einen automatischen Algorithmus vor, welcher mithilfe einer Spektrogrammanalyse starke Schwinggeschwindigkeitspulse aufgrund von Richtwirkungseffekten aufspüren und deren Eigenschaften quantifizieren kann. Zu diesen Eigenschaften gehören die Anzahl der Starkschwingungen sowie die dominante Periode des Pulses. Der Einfluss der Herdkomplexität auf die Generierung von starken Schwinggeschwindigkeitspulsen durch Richtwirkungseffekte in Bruchrichtung wurden ausführlich mit Hilfe von kinematischen Slipinversionen mehrerer Erdbeben untersucht. Wir bestimmen die Vorhersagbarkeit von Richtwirkungseffekten mit Hilfe des Satzes von Bayes anhand des Ortes, der Bruchrichtung, der Verwerfungsgeometrie, und der Slipheterogenität. Aus einer Regressionsanalyse werden Grössenbeziehungen für Richtwirkungseigenschaften abgeleitet.

Eines der Hauptanliegen dieser Arbeit ist die Entwicklung einer verbesserten hybriden Breitbandbodenbewegungssimulationsmethode im Frequenzbereich von 0,1 – 10 Hz, der für Ingenieur Anwendungen von Interesse ist. Besonderes Augenmerk liegt bei der Einbeziehung der Herdphysik durch die Benutzung von volldynamischen oder dynamisch-kompatiblen kinematischen Bruchmodellen, sowie der Einbeziehung von hochfrequenten Streueffekten aufgrund der Wellenausbreitung. In diesem Zusammenhang werden stärkste Bodenbewegungen anhand von Szenarioerdbeben in seismisch hochaktiven Regionen produziert. Diese zielen darauf ab, physikalische Simulationsalgorithmen zu entwickeln die gleichzeitig von praktischer Anwendbarkeit im Ingenieurwesen sind. Standardverfahren zur Simulation der Bodenbewegung basieren auf der Theorie der willkürlichen Schwingungen und benutzen üblicherweise stark vereinfachte Herdcharakterisierungen in Verbindung mit inkohärenter Stapelung von Teilherdelementen. Die vorgeschlagene Simulationsmethode liefert realistische Seismogramme nahe des Herdes durch Kombination der Effekte von dynamischer Bruchausbreitung und Streuung im Nahbereich um den Herd. Es wird somit eine innovative Methode zur Vorhersage von Bodenbewegungen für Anwendungen im Ingenieurwesen entwickelt. Ich berechne Breitbandseismogramme im Nahfeld indem niederfrequente synthetische Berechnungen mit finiten Differenzen in einem dreidimensionalen Geschwindigkeitsmodell mit ortsspezifischen

Greenschen Funktionen für zufallsverteilte, isotrope Medien kombiniert werden. Dieser neue Simulationsalgorithmus verbessert Hochfrequenzseismogramme indem Streueffekte in der Erdkruste berücksichtigt werden. Letztere sind der Hauptgrund für den Verlust der Kohärenz bei hohen Frequenzen und für die Entstehung seismischer Koda. Der neue Hochfrequenzalgorithmus bedarf eines geringen Rechenaufwandes und erlaubt die effiziente Berechnung von Bodenbewegungseigenschaften von Interesse für Ingenieuranwendungen.

Ausserdem arbeitete ich an der Verbesserung des pseudo-dynamischen Ansatzes als Alternative zu volldynamischen Bruchmodellen. Ich erstellte einen dynamischen Datensatz bei Benutzung von bestehenden dynamischen Bruchmodellen sowie von neuen dynamischen Simulationen. Ich analysierte die statistischen Eigenschaften dieser dynamischen Modelle und entwickelte neue pseudo-dynamische Beziehungen zur Vorhersage von kinematischen Herdparametern und zur Erstellung von dynamisch konsistenten kinematischen Bruchmodellen. Die Beziehungen zwischen kinematischen und dynamischen Herdparametern sind Vereinfachungen der wahren Komplexität der Bruchphysik, beinhalten jedoch wichtige physikalische Kenndaten. Mit Hilfe der neuen pseudo-dynamischen Beziehungen führte ich Plausibilitätstests für eine Reihe von aufgezeichneten Erdbeben durch. Die Implementierung dieser neuen und verbesserten pseudo-dynamischen Herdcharakterisierung in bestehende Simulationsprogramme erlaubt die verbesserte Berechnung von realistischeren Bodenbewegungen anhand der zugrunde liegenden Physik mit geringem Rechenaufwand.

Abstract

The primary focus of this thesis is physics based ground motion selection and prediction for use in seismic hazard analysis in terms of selecting and quantifying ground motions from empirical databases; characterizing expected ground motion levels in future earthquakes, as well as directly interfacing with earthquake engineers for structural and geotechnical analysis.

I first focused on selection and quantification of near field strong ground motions from empirical databases according to source directivity. In this context, automated algorithms which detect records containing strong velocity pulses due to source directivity effects are proposed using a spectrogram analysis. The properties of velocity pulses such as number of cycles, the period of the pulses and their frequency content are quantified. The effects of source complexities on generation of strong velocity pulses due to forward directivity effects have been extensively investigated using kinematic slip inversions of several earthquakes. We determined the predictability of forward or backward directivity effects using a Bayes theorem, based on the site location, the direction of propagation, fault geometry, and slip heterogeneity. Scaling relations are proposed for the directivity properties as a result of regression analysis.

One of the main concerns of this thesis work has been developing an improved hybrid broadband ground motion simulation methodology over a frequency range of engineering interest (0.1-10 Hz), with particular emphasis on including source physics either by using full dynamic or dynamically compatible kinematic rupture models and including high frequency scattering due to wave propagation. In this perspective, most severe ground motions are produced due to scenario earthquakes in highly seismic regions, aiming at developing physical yet practical simulation algorithms allowing the methodologies to be used for engineering applications. Standard ground motion simulation approaches used in earthquake engineering are based on random vibration theory and usually apply strongly simplified earthquake source characterizations coupled with incoherent summation of elementary sub-sources. In the proposed simulation method, realistic simulations of near source seismograms are obtained, combining the effects of dynamic rupture propagation and near source scattering to develop an innovative method for ground motion prediction in favor of earthquake engineering applications. I calculated near-source broadband seismograms by combining low-frequency finite difference synthetics computed in a 3D velocity model and site-specific scattering Green's functions for random, isotropic scattering media. In this new simulation algorithm, the high-frequency seismograms are improved by incorporating the physics of seismic wave scattering in the stochastic nature due to small scale heterogeneities in the Earth crust, which is the main cause of loss of coherency in the high-frequency band, and for seismic coda generation. The new high frequency simulation algorithm is computationally inexpensive and efficiently produces ground motion properties of engineering interest.

Furthermore, I worked on the improvements of the pseudo-dynamic approach as an alternative to fully dynamic rupture models. Using a set of existing dynamic rupture models as well as producing new dynamic simulations, I generated a dynamic dataset. I analyzed the statistical properties of these dynamic models, and derived new pseudo-dynamic relations for predicting kinematic source parameters and generating dynamically consistent kinematic rupture models. While the relationships between kinematic and dynamic source parameters are simplifications of the true complexity of rupture physics, they hold important physical features. I performed validation tests for a number of recorded earthquakes using the new pseudo-dynamic relations. The implementation of this new/improved pseudo-dynamic source characterization into the simulation codes will improve our ability to produce computationally inexpensive, more realistic, physics-based ground motions.