



Praha, 5. září, 2024

Posudek dizertační práce:

Broadband kinematic ground motion modeling of tectonic earthquakes

předloženou Františkem Čejkou ve studijním programu P4f-7 Fyzika Země a planet na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy v Praze.

Předložená práce se zabývá modelováním silných pohybů půdy při mělkých tektonických zemětřeseních. Konkrétně zkoumá vliv seismického zdroje na silné pohyby, které způsobují škody v relativně malých epicentrálních vzdálenostech. Téma práce je aktuální a výsledky práce lze uplatnit při odhadu a minimalizaci potencionálních škod způsobených budoucími zemětřeseními. Pravděpodobností odhad seismického ohrožení je v současnosti vyjádřen ve stavebních normách zjednodušeně pomocí tzv. spekter odezvy. V komunitě stavebního inženýrství jsou ovšem též běžné nelineární simulace poškození kritické infrastruktury (jaderné elektrárny, přehrady, mosty atp.), které vyžadují kompletní záznam pohybu pro danou lokalitu. Ve většině případů pro danou lokalitu takový záznam neexistuje, a tak se nahrazuje záznamem z lokality obdobné, či numerickou simulací. Simulace a testy prezentované v předložené práci mohou sloužit právě takovým účelům.

Práci tvoří pět kapitol, z nichž tři (kapitoly 2–4) byly publikovány formou článku v kvalitních mezinárodních časopisech. První kapitola představuje velmi stručný úvod do problematiky odhadu seismického ohrožení. Druhá a třetí kapitola se věnují modelování silných pohybů pro katastrofické zemětřesení ve východním Turecku, resp. ve střední Itálii. Čtvrtá kapitola je metodologickou studií rozptylu intenzity simulovaných otřesů. Pátou kapitolou je závěr obsahující stručné shrnutí.

Autor práce aplikoval hybridní model seismického zdroje pro realistickou širokopásmovou simulaci otřesů. Hybridní model představuje alternativu k výpočetně náročným dynamickým modelům zdroje, při kterých se trhání zlomu simuluje z rozložení napětí a třecích sil podél zlomu. V hybridním modelu se naopak časový průběh posunutí podél zlomu předepisuje přímo za použití řady zjednodušujících předpokladů. Tím se snižuje výpočetní náročnost a počet volných parametrů. Dvě případové studie nedávných zemětřeseních (2016 Mw6,2 – Amatrice, Itálie; 2023 Mw7,8 - Kahramanmaraş, Turecko) testují schopnost hybridního modelu vystihnout pozorované pohyby. S využitím naměřených pohybů se podařilo zafixovat volné parametry a nalézt modely, které dobře vystihují pozorování v širokém pásmu frekvencí. V následující studii pak autor vygeneroval přes 12tis. scénářů otřesů pro zemětřesení ve střední Itálii a větší část jich vyloučil na základě pozorovaného rozptylu simulovaných intenzit, který neodpovídá pozorováním. Identifikoval též klíčový parametr (tzv. „stress parameter“), který ovlivňuje vysokofrekvenční pásmo generovaných silných pohybů.

Práce je dobře napsaná, čtivá a poměrně srozumitelná. Také stručnost práce hodnotím pozitivně, nicméně použitá metoda by zasloužila detailnější popis. Jazyková a grafická úroveň je na dobré úrovni. Ostatně, práci tvoří téměř výhradně materiál opublikovaných v respektovaných časopisech. Jistým nedostatkem práce je tak hlavně úvod, který je velmi stručný a obecný. Motivace práce jako celku není jasně formulovaná a je nutné si ji domýšlet. Empirické modely (GMM) se používají na jednu stranu ke kalibraci modelu (kap. 4), ale v jiných pasážích se naznačuje nahrazování GMM modelem hybridním v odhadu seismického ohrožení, či dokonce



v souvislosti s pohotovostní odezvou na silné zemětřesení. Závěr práce je též velmi stručný a představuje shrnutí dílčích výsledků bez hlubší syntézy.

Podněty pro obhajobu – diskuzi či prezentaci:

- Podstatná část závěrů práce je založená na empirickém modelu Sgobba a kol. (2021). V publikacích, ze kterých je dizertace sestavena, není na podrobnější představení prostor. V dizertaci by si ovšem tento model podrobnější popis zasloužil. Prosim o podrobnější prezentaci modelu včetně jednotlivých chybových členů při obhajobě (buď ve formální prezentaci, či při diskuzi).
 - Jaká data (oblast, časové rozmezí) byla použita?
 - Je tento neergodický model dostatečně robustní z hlediska počtu zahrnutých magnitud a vzdáleností?
- V kapitole 2-4 se pracuje se spektry odezvy, konkrétně pak se spektrální zrychlením (zkráceně SA). SA je praktický nástroj v inženýrské praxi, ovšem pro seismologické interpretace není vždy vhodný. Perioda (frekvence) v SA představuje vlastní periodu (frekvenci) tlumeného lineárního oscilátoru, ne samotného pohybu půdy. Transformace pohybů do SA je nelineární a neumožňuje jednoznačnou zpětnou transformaci.
 - Pro kalibraci modelu lze SA využít (tj. testovat shodu ve smyslu SA) včetně aplikace korekcí SA na lokální odezvu. Doporučovat však takovou korekci pro praktické případy je problematické, a ne zcela logické (poslední odstavec na str. 59). Korigované SA je stále pouze spektrum odezvy, které lze přímo a jednodušeji odvodit z empirického modelu. Hlavní výhoda hybridního modelu (třísloužkové záznamy v časové oblasti) se tím ztrácí.
 - Přírozanější a naprosto logické je naopak použití Fourierových spekter (buť jen amplitudových, zkráceně FAS), které umožňují transparentní aplikaci lokálních efektů, či transformaci do časové oblasti.
 - Na str. 78 je diskutována doba trvání trhliny vzhledem k periodě SA. Takové srovnání ovšem nemá smysl, perioda SA neodpovídá periodě pohybu půdy (viz výše).
- Volba přechodového frekvenčního pásma („cross-over band“) mezi integrálním a kompozitním modelem má jistý vliv na výsledky. V práci se optimální hodnoty získávají metodou pokus-omyl, srovnáním pro reálné naměřené zemětřesení (kap. 2 a 3). Toto ovšem není možné při predikci pohybů pro zemětřesení budoucí.
 - Rozptyl použitých hodnot f_1 - f_2 je značný (mezi studovanými jevy i ve srovnání s citovanou literaturou). Co je příčinou tohoto rozptylu? Je možné diskutovat použité hodnoty ve vlnových délkách vzhledem k charakteristickým rozměrům zdrojového procesu?
 - V práci se naznačuje, že přechodové frekvenční pásmo souvisí s procesy ve zdroji. Zmiňuje se též vzdálenost zdroj-přijímač. Nehraje tedy důležitou roli i použitý rychlostní model?
 - Obr. S3.3 ukazuje vliv volby přechodového frekvenčního pásma na spektrální zrychlení. Bylo by názorné ukázat stejné srovnání v časové oblasti (jako v obr. 3.3b).
- Na obr. 2.4a, 2.7b a 3.4b jsou interpolované mapy PGV (resp. SA na různých periodách). Bylo by zajímavé provést srovnání s výsledky ShakeMap (jsou-li k dispozici).
- Jak jsou definovány azimuty stanic? Jde o azimut stanice vzhledem k epicentru?
- Bylo by možné uvažovat tzv. „stress parameter“ (kap. 4) při konstrukci útlumových křivek (GMM)?
- V úvodu práce se píše o odhadech seismického ohrožení. Na str 10 se uvádí: „To categorize this study, we mimic deaggregation of PSHA (in the sense of choosing one specific earthquake setting) to use a deterministic approach to assess the seismic hazard of a specific earthquake in Central Italy and



Eastern Türkiye.“ O odhadu ohrožení však nelze hovořit, jelikož se využívají naměřené záznamy jevů a použité zdrojové parametry jsou výsledkem obrácených úloh. V kap.4 lze již odhadu mluvit, ovšem s tím, že část parametrů byla optimalizována na konkrétní jev, a i tak bylo výsledkem 4000 scénářů, což není úplně praktické. Je možné načrtnout jednoduchou strategii (recept, klíčové body) pro odhad tříložkových záznamů pro konkrétní jev a lokalitu?

Ostatní komentáře:

- Str. 24: „In seismic hazard assessment, none of the rupture parameters, such as slip distribution, rupture velocity, and location of the nucleation point, can be anticipated for a future event. Therefore, they must be treated as epistemic uncertainty through scenario simulations in physics-based seismic hazard assessment.“ – Nejasné, pokud nelze tyto parametry předem určovat, mělo by se jednat spíše o aleatorní neurčitost.
- Str. 11: „However, the far-field areas are relatively intact by slip distribution on the fault if we assume the same rupture speed, direction, and dimensions (see further Paper 1), which can be used by engineers and hazard seismologists to better evaluate risks connected to earthquake ground motions.“ - Nesrozumitelné tvrzení.
- Str. 9: Ve vztahu $x=(\pi/2)((f-f_1)(f_2-f_1)/(f_2-f_1))$ je zřejmě chyba.

Závěr: František Čejka prokázal schopnost samostatně tvořivě vědecky pracovat. Dizertační práce obsahuje řadu relevantních výsledků, které lze přímo, či nepřímo uplatnit v praxi při odhadu seismického ohrožení. Po úspěšné obhajobě navrhuji udělit Františkovi Čejkovi titul PhD.

.....
RNDr. Jan Burjáněk, Ph.D.
Geofyzikální ústav AV ČR, v.v.i.