NUMERICKÉ MODELOVANIE SEIZMICKÉHO POHYBU

Peter Moczo, Jozef Kristek, Katedra fyziky Zeme a planét Fakulty matematiky, fyziky a informatiky UK, Mlynská dolina F1, 842 48 Bratislava

ZEMETRASENIE A SEIZMICKÝ POHYB

Tektonické zemetrasenie. Väčšina tektonických (zlomových) zemetrasení vzniká na seizmoaktívnych zlomoch – relatívne slabých a tenkých zónach oddeľujúcich dva bloky zemskej kôry alebo litosféry. Vzhľadom na vlnové dĺžky seizmických vĺn, ktoré zaznamenávajú seizmometre, možno hovoriť o zlomovej ploche. Kým sa každý z blokov ako celok pohybuje voči druhému bloku v dôsledku regionálnych alebo globálnych tektonických procesov, určitá časť zlomovej plochy je v pokoji v dôsledku trenia. V dôsledku toho sa na zlome hromadí napätie. Ak v určitom mieste (hypocentre) dosiahne tangenciálne napätie medzu pevnosti kontaktu blokov určenú statickým trením, prekročeniu tejto medze zabráni vznik trhliny – diskontinuity v posunutí a teda sklzu medzi pôvodne susediacimi bodmi blokov. Počas vývoja sklzu v danom bode zlomovej plochy poklesne napätie zo statickej úrovne na dynamickú. Zároveň sa trhlina šíri po zlomovej ploche, v dôsledku čoho porušená časť zlomu vyžaruje seizmické vlny, ktoré sa potom šíria vnútrom zemského telesa a spôsobujú seizmický pohyb zemského povrchu.

Seizmický pohyb počas zemetrasenia. Seizmický pohyb (vibračný mechanický pohyb) na zemskom povrchu je určený šírením trhliny na zlome, lokálnou geologickou štruktúrou a prostredím medzi zlomovou plochou a lokálnou štruktúrou.

Numerické modelovanie seizmického pohybu. Keďže k vzniku a šíreniu trhliny na zlome dochádza typicky v hĺbkach kilometrov až desiatok kilometrov pod povrchom Zeme a porušená časť zlomu môže byť rádovo $10^0 – 10^4$ km^2 (výnimočne i viac), priamy riadený fyzikálny experiment nie je možný. Priame merania seizmického pohybu sú prakticky obmedzené na povrch Zeme a temer celá informácia o šírení trhliny a šírení seizmických vĺn je zakódovaná v záznamoch seizmometrov (seizmogramoch). Zložitosť procesu na zlome a vnútornej štruktúry Zeme neumožňuje použiť na výpočet seizmického pohybu presné (analytické) metódy. Je preto zrejmé, že kľúčovým a nenahraditeľným nástrojom výskumu zemetrasení je numerické modelovanie zlomového procesu a následného vibračného pohybu zemského vnútra.

Fyzikálny model a základné rovnice. Na kvantitatívny popis procesu šírenia trhliny na zlome, šírenia seizmických vĺn v Zemi a seizmického pohybu zemského povrchu seizmológovia zvyčajne používajú relatívne jednoduchý avšak akceptovateľný fyzikálny model. Predpokladajú lineárne elastické kontinuum charakterizované tenzorom elastických koeficientov (modulov) a hustotou. Ak je potrebné zahrnúť útlm v dôsledku anelastickej disipácie a rozptylu na malých nehomogenitách, uvažujú komplexné, frekvenčne závislé moduly a vhodný reologický model (najčastejšie viskoelastický). Aj (visko)elastické moduly aj hustota sa môžu skokom meniť na rozhraniach vrstiev alebo blokov rôznych horninových materiálov (t.j. na materiálových diskontinuitách) vnútri Zeme. Kmitavý pohyb kontinua a šírenie elastických vĺn (ktorými aproximujeme reálne seizmické vlny v Zemi) sa riadi pohybovou rovnicou kontinua (tiež elastodynamickou rovnicou) pre vektor posunutia a Hookovým zákonom, ktorý špecifikuje vzťah medzi tenzorom napätia, tenzorom (visko)elastických koeficientov a tenzorom deformácií. Na materiálových diskontinuitách sa predpokladá spojitosť vektoru posunutia a vektoru napätia. Na voľnom zemskom povrchu sa predpokladá nulový vektor napätia.

Tektonické zemetrasenie je modelované ako spontánne šírenie trhliny na zlomovej ploche. Na zlomovej ploche je vektor napätia spojitý, avšak vektor posunutia a vektor rýchlosti posunutia môže byť nespojitý. Diskontinuita v posunutí, sklz, v danom bode zlomovej plochy súvisí s vektorom napätia v danom bode prostredníctvom zákona trenia. Vznik a šírenie trhliny je určené počiatočným napätím na zlomovej ploche, lokálnou pevnosťou kontaktu (určenou statickým trením) a zákonom trenia.

VÝPOČTOVÉ METÓDY

Aplikovateľné metódy možno približne rozdeliť do troch zásadných skupín: 1. hraničné metódy, 2. doménové metódy, 3. hybridné metódy. Do prvej skupiny patria napr. metóda integrálnych hraničných rovníc, metóda hraničných elementov a metóda diskrétnych vlnových čísiel. Do druhej skupiny patria napr. metóda konečných prvkov (**MKP**) a metóda spektrálnych prvkov, metóda konečných diferencií (**MKD**) a pseudospektrálna metóda. Do tretej skupiny patria rôzne kombinácie dvoch až troch z uvedených metód a kombinácie uvedených metód napr. s metódou separácie premenných, Fourierovou metódou a metódou sumácie módov. Čiastkové prehľady možno nájsť v prácach [1], [2] a [3]. Hraničné metódy sú presnejšie ako doménové, avšak ich praktická aplikácia je z dôvodu výpočtových nárokov obmedzená na relatívne jednoduché modely pozostávajúce z dvoch-troch homogénnych vrstiev/blokov. V prípade štrukturálne zložitých (napr. dostatočne realistických) modelov nemôžu konkurovať robustným doménovým metódam. Keďže žiadna známa metóda nie je výhodne aplikovateľná na všetky dôležité konfigurácie vlnového poľa a heterogenity prostredia, snažia sa rôzne hybridné prístupy využiť výhody a redukovať alebo eliminovať nevýhody jednotlivých metód. V modelovaní šírenia trhliny a seizmického pohybu počas zemetrasení sa však zatiaľ doterajšie hybridné algoritmy zásadne neustálili a nepresadili. V súčasnosti je dominantnou metódou metóda konečných diferencií.

MKD

Súčasné postavenie MKD je dôsledkom jej aplikovateľnosti na zložité modely a zároveň relatívnej presnosti a výpočtovej efektívnosti. Naviac je MKD relatívne jednoduchá, ľahko programovateľná a výpočtový algoritmus paralelizovateľný. 'Relatívnosť' je namieste jednak vo vzťahu k ostatným metódam, jednak preto, že aj samotná MKD má inherentné problémy a jej aplikácia na štrukturálne zložité modely nie je stále dostatočne prepracovaná. Zvláštnu pozornosť si vyžaduje implementácia okrajových podmienok na materiálových diskontinuitách a voľnom povrchu. Keďže priama aplikácia MKD algoritmu v prípade veľkých a zložitých štrukturálnych modelov (napr. sedimentárnych bazénov pod aglomeráciami Los Angeles a Osaka) vyžaduje príliš veľkú počítačovú pamäť a čas, aj keď je pohyb simulovaný len pre frekvenčný interval do 1 Hz, je nutné aplikovať optimalizáciu výpočtového času a pamäti (napr. [4], [5]).

Pohybová rovnica kontinua umožňuje použitie explicitných konečno-diferenčných schém (KDS), v ktorých je vektor posunutia alebo rýchlosti posunutia v danom sieťovom bode a danej časovej hladine vypočítaný len z pohybu v predchádzajúcich časových hladinách a materiálových parametrov. Z hľadiska zahrnutia okrajových podmienok, dominantným je algoritmicky oveľa výhodnejší heterogénny prístup, v ktorom sa rovnaká KDS používa pre všetky vnútorné sieťové body bez ohľadu na ich polohu voči materiálovej diskontinuite. Pohybovú rovnicu a Hookov zákon možno formulovať napr. v 1. posunutí (D), 2. posunutí a napätí (DS), 3. posunutí, rýchlosti posunutia a napätí (DVS), alebo 4. rýchlosti posunutia a napätí (VS). D-formuláciu je prirodzené aproximovať na konvenčnej sieti, v ktorej sú všetky veličiny v každom sieťovom bode. DS, DVS a VS formulácie je prirodzené aproximovať na striedavo usporiadaných sieťach, v ktorých majú rôzne veličiny rôzne polohy v sieti a posunutie sa počíta v iných časových hladinách ako rýchlosť alebo napätie – podľa konkrétnej formulácie. Keďže KDS aproximujúce D formuláciu na konvenčných sieťach nie sú dostatočne presné v prípade pomeru rýchlostí pozdĺžnych a priečnych vĺn väčšieho ako 2, používajú sa dominantne KDS 4-ho rádu na striedavo usporiadaných sieťach, ktoré majú aj ďalšie dôležité výhody.

Heterogénna KDS. KDS musí aproximovať relevantné diferenciálne rovnice. Heterogénna KDS musí byť aproximáciou heterogénnej formulácie rovníc. Heterogénna formulácia znamená rovnaký tvar pre daný bod prostredia bez ohľadu na jeho polohu voči materiálovej diskontinuite, pričom pre bod na diskontinuite sú splnené okrajové podmienky bez akýchkoľvek aditívnych rovníc. Prekvapujúcim je fakt, že viac ako dve desaťročia boli používané heterogénne KDS bez toho, aby sa autori schém zaujímali o heterogénnu formuláciu pohybovej rovnice. Schoenberg a Muir [6] v roku 1989 publikovali algoritmus, ktorý nahrádzal súbor tenkých anizotrópnych vrstiev ekvivalentnou (pre dlhé vlny) homogénnou anizotrópnou vrstvou a ktorý sa mohol stať východiskom pre hľadanie heterogénnej formulácie. Algoritmus však do komunity seizmológov simulujúcich ‚zemetrasný' pohyb neprenikol a v tomto zmysle Zahradník v roku 1995 [7] oprávnene na absenciu heterogénnej formulácie upozornil. Moczo et al. [8] problém podrobne analyzovali. Pre 1D prípad našli jednak fyzikálny model, jednak presnú heterogénnu formuláciu a príslušnú KDS. Zároveň ukázali značnú komplikovanosť problému v 3D. Aj pri lokálnej aproximácii nerovinného rozhrania rovinným vedie rigorózne zahrnutie okrajovej podmienky k tomu, že vlastne nemožno použiť striedavo usporiadanú sieť a nároky na počítačovú pamäť alebo čas sú príliš vysoké. Moczo et al. preto, vychádzajúc z rigoróznej analýzy, navrhli približné riešenie. Ich heterogénna KDS má rovnakú štruktúru ako štandardné KDS na striedavo usporiadaných sieťach a teda rovnaké pamäťové nároky a počet operácií. Zásadný rozdiel je v určení efektívnych modulov a hustoty. Efektívne moduly stlačiteľnosti a torzie sa v sieťovom bode so zložkou tenzoru napätia počítajú ako objemové harmonické priemery v sieťovej bunke so stredom v danom bode. Efektívne hustoty sa v sieťovom bode so zložkou vektoru posunutia počítajú ako objemové aritmetické priemery v sieťovej bunke so stredom v danom bode. Numerické testy ukázali, že schéma je značne presnejšia ako ostatné KDS na striedavo usporiadaných sieťach a je schopná vnímať polohu materiálovej diskontinuity aj medzi dvomi sieťovými bodmi.

Simulácia rovinného voľného povrchu. Simulácia nulového napätia na nerovinnom voľnom povrchu stále nie je uspokojivo vyriešená, keďže ide o zásadný a inherentný problém metódy. Možným riešením je problému sa vyhnúť a to hybridnou kombináciou napr. s MKP [9]. Netriviálnym problémom je však aj rovinný voľný povrch. Levander [10] navrhol použiť pre body na a pri voľnom povrchu vnútornú schému s tým, že nad povrchom uvažoval virtuálne zložky tenzoru napätia antisymetrické zložkám pod povrchom. Levanderov 'stress-imaging' sa stal dominantnou metódou simulácie voľného povrchu v KDS na striedavo usporiadaných sieťach. Kristek et al. [11] však ukázali, že pri priestorovom vzorkovaní šesť sieťových krokov na vlnovú dĺžku používanom v KDS 4-ho rádu [12] dochádza k nezanedbateľnej sieťovej disperzii v prípade dôležitých Rayleighových povrchových vĺn. Kristek et al. preto navrhli metódu adjustovaných konečno-diferenčných aproximácií pre priestorové derivácie v sieťových bodoch na a pri voľnom povrchu. Aj so štandardným priestorovým vzorkovaním je metóda značne presnejšia ako 'stress-imaging' a to aj v prípade laterálnych materiálových diskontinuít dosahujúcich povrch, ako ukázali porovnaním s MKP Moczo et al. [13].

Zahrnutie realistického útlmu. Napätie vo viskoelastickom prostredí je v časovej oblasti konvolúciou inverznej Fourierovej transformácie komplexného viskoelastického modulu a tenzoru deformácie. Priama aplikácia vzťahu je kvôli nárokom na počítačovú pamäť a čas vylúčená. Emmerich a Korn [14] a Carcione et al. [15] ukázali, ako možno za predpokladu reológie generalizovaného Maxwellovho a Zenerovho telesa nahradiť konvolučný integrál systémom obyčajných diferenciálnych rovníc pre tzv. anelastické funkcie. V 3D prípade stále ešte značné nároky na pamäť redukoval Day [16] riedkou distribúciou anelastických funkcií v sieti. Dayova distribúcia je dobre aplikovateľná na spojite nehomogénne prostredie, avšak môže mať zásadný problém na rozhraniach, kde sa faktory kvality menia skokom. Preto Kristek a Moczo [17] predefinovali anelastické funkcie tak, aby tieto boli nezávislé od materiálových parametrov (anelastických koeficientov). Ukázali, že za určitého predpokladu možno určiť anelastické koeficienty a elastické moduly spriemerovaného média (reprezentujúceho materiálovú diskontinuitu) na základe priemerovania viskoelastických modulov vo frekvenčnej oblasti. Navrhli aj alternatívnu riedku distribúciu anelastických funkcií, ktorá má rovnaké nároky na počítačovú pamäť ako Dayova distribúcia. Numerické testy ukázali, že metóda Kristeka a Mocza je v prípade prítomnosti materiálovej diskontinuity zreteľne presnejšia ako Dayova metóda.

MKD-MKP HYBRID

V súčasnosti je sľubnou hybridná kombinácia KDS 4-ho rádu a MKP schémy 2-rádu s rovnakým časovým krokom a možnosťou využitia výhod obidvoch metód. V oblasti pokrytej MKP možno simulovať šírenie trhliny metódou napätia v rozdelených uzloch a šírenie vyžiarených seizmických vĺn vo väčšej časti modelu možno simulovať výpočtovo efektívnejšou MKD.

Reference

[1] H. Takenaka, T. Furumura, H. Fujiwara, In: *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Irikura, K. et al. (eds.), Balkema, Rotterdam, 91 (1998).
[2] H. Mizutami, R.J. Geller, N. Takeuchi, Phys. Earth Planet. Int. **119**, 75 (2000).
[3] J.M. Carcione, G.C. Herman, A.P.E. ten Kroode, Geophysics **67**, 1304 (2002).
[4] P. Moczo, M. Lucká, J. Kristek, M. Kristeková, Bull. Seism. Soc. Am. **89**, 69 (1999).
[5] P. Moczo, J. Kristek, E. Bystrický, J. Comp. Acoustics **9**, 593 (2001).
[6] M. Schoenberg, F. Muir, Geophysics **54**, 581 (1989).
[7] J. Zahradník, E. Priolo, Geophys. J. Int. **120**, 663 (1995).
[8] P. Moczo, J. Kristek, V. Vavryčuk, R.J. Archuleta, L.Halada, Bull. Seism. Soc. Am. **92**, 3042 (2002).
[9] P. Moczo, E. Bystrický, J. Kristek, J.M. Carcione, M. Bouchon, Bull. Seism. Soc. Am. **87**, 1305 (1997).
[10] A. Levander, Geophysics **53**, 1425 (1988).
[11] J. Kristek, P. Moczo, R.J. Archuleta, Stud. Geophys. Geod. **46**, 355 (2002).
[12] P. Moczo, J. Kristek, L. Halada, Bull. Seism. Soc. Am. **90**, 587 (2000).
[13] P. Moczo, M. Gális, J. Kristek, Bull. Seism. Soc. Am. (in press).
[14] H. Emmerich, M. Korn, Geophysics **52**, 1252 (1987).
[15] J.M. Carcione, D. Kosloff, R. Kosloff, Geophys. J. R. Astr. Soc. **95**, 597 (1988).
[16] S.M. Day, Bull. Seism. Soc. Am. **88**, 1051 (1998).
[17] J. Kristek, P. Moczo, Bull. Seism.Soc. Am. **93**, 2273 (2003).