Интеракција конструкције и тла

у току земљотреса:

нумеричка анализа

Борис Јеремић

Ванредни Професор Универзитета у Калифорнији Дејвис, Калифорнија

Мотивација

- Направити прецизне моделе грађевинских објеката (мостова, зграда, лучких конструкција, брана...)
- Модели ће да "живе" заједно са објектом које представљају
- Модели ће да омогуће власницима у одржавању објеката и у процени будућег понашања при инцидентним оптерећењима
- Мерења понашања објеката ће се користити да се побољшају модели употребом нумеричких симулација

Преглед данашњег предавања

- Склапање еластично-пластичних модела за солиде
- Земљотресно оптерећење на системе тла и конструкције
- Утицал тла на конструкцију и утицал конструкције на тло при земљотресном оптерећењу
- Повољности и неповољности спреге међусобних утицаја тла и конструкије при земљотресима
- Кратак опис програмског система OpenSees, (Open System for Earthquake Engineeing Simulations)

Еласто-пластичност у калупу

- Већина еласто-пластичних модела и имплементација се састоји од:
 - 1. Површи пластичности F (и њених првих извода по напону n_{ij} и променљивима стања ξ_*)
 - 2. Правца пластичног течења m_{ij} (први $m_{ij} = \partial Q / \partial \sigma_{ij}$ и други изводи потенцијала пластичности $\partial m_{ij} / \partial \sigma_{mn}$, $\partial m_{ij} / \partial q_*$)
 - 3. Закона промене променљивих стања q_* (скаларне или тензорске величине)
- Већина еласто-пластичних модела се на овај начин може имплементирати у врло генералном облику
- Корисник може сам да дефинише нове моделе комбинујући горње функције

Имплицитна нумеричка интеграција у еласто-пластичности

$$d\sigma_{mn} = -\left({}^{old}r_{ij} + \frac{{}^{n+1}F^{old} - {}^{n+1}n_{mn} \, {}^{old}r_{ij}{}^{n+1}T^{-1}_{ijmn}}{{}^{n+1}n_{mn}E_{ijkl} \, {}^{n+1}H_{kl}{}^{n+1}T^{-1}_{ijmn} - {}^{n+1}\xi_* \, h_*} \, E_{ijkl} \, {}^{n+1}H_{kl} \right) \, {}^{n+1}T^{-1}_{ijmn}$$

$$dq_* = \left(\frac{{}^{n+1}\!F^{old} - {}^{n+1}\!n_{mn} \,{}^{old}\!r_{ij}{}^{n+1}\!T_{ijmn}^{-1}}{{}^{n+1}\!n_{mn}E_{ijkl} \,{}^{n+1}\!H_{kl}{}^{n+1}\!T_{ijmn}^{-1} - {}^{n+1}\!\xi_* \,h_*}\right) \,h_*$$

$${}^{n+1}T_{ijmn} = \delta_{im}\delta_{nj} + \lambda E_{ijkl} \left. \frac{\partial m_{kl}}{\partial \sigma_{mn}} \right|_{n+1} \quad ; \quad {}^{n+1}H_{kl} = {}^{n+1}m_{kl} + \lambda \frac{\partial m_{kl}}{\partial q_*} \left|_{n+1} h_* \right|_{n+1} h_*$$

$${}^{n+1}\!\epsilon^p_{ij} = {}^n\!\epsilon^p_{ij} + \lambda \; {}^{n+1}\!m_{ij}$$
 ; ${}^{n+1}\!q_* = {}^n\!q_* + \lambda \; {}^{n+1}\!h_*$

Примери: монотоно оптерећење



Примери: циклично оптерећење



Нехомогено понашање

• Нехомогена деформација при чистом смицању (виртуелни узорак, конститутивно понашање?)











• Стварни узорак (томографија)

Утицаји опреме за тестирање





Еласто-пластичност и вероватноћа

- Утицај нехомогености узорка на механичко понашање (ојачање, идеална пластичност, омекшање...)
- Понашање материјала произилази из вероватноћа ојачања, идеалне пластичности или омекшања
- "Идеалан" узорак би требао да има хомогено поље напона и деформација и да се понаша у складу за микромехаником деформације
- Понашања свих осталих узорака (стварних материјала) су уско повезана са просторном расподелом материјалних особина (сттистиком) и могу бити представљена само помоћу вероватноћа

Земљотресно оптерећење

- Унос земљотресног оптерећења (или померања?)
- Утицај коначне величине модела (заробљавање земљотресне енергије)
- Тродимензионо простирање земљотресних таласа

Метода редукције домена

- Базирано на радовима групе сарадника (Проф. Биелак са КМУ)
- Двостепена процедура
- Основне непознате
 - Комплетно поље померања у локалном домену
 - Додатно поље померања у спољном домену
- Поље померања које се простире од хипоцентра се редукује на једну конкавну површ која обухвата локални модел

Позадинско поље померања

- Може се одредити мерењима или неком од постојећих аналитичких метода хафдгт хбгырф хбасдефдеащчсдща
- Потребно је поље померања и убрзања



Основна идеја

- Поједностављен оригинални модел
- Локални модел (који је реалан, не мора се упрошћавати)





Динамика система

 $\begin{bmatrix} M_{ii}^{\Omega} & M_{ib}^{\Omega} \\ M_{bi}^{\Omega} & M_{bb}^{\Omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_{i} \\ \ddot{u}_{b} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ii}^{\Omega} & K_{ib}^{\Omega} \\ K_{bi}^{\Omega} & K_{bb}^{\Omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{i} \\ u_{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ P_{b} \end{bmatrix}, \text{ y } \Omega$ $\begin{bmatrix} M_{bb}^{\Omega+} & M_{be}^{\Omega+} \\ M_{eb}^{\Omega+} & M_{ee}^{\Omega+} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_{b} \\ \ddot{u}_{e} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{bb}^{\Omega+} & K_{be}^{\Omega+} \\ K_{eb}^{\Omega+} & K_{ee}^{\Omega+} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{b} \\ u_{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P_{b} \\ P_{e} \end{bmatrix}, \text{ y } \Omega^{+}$





Замена променљивих

Једначине померања (равнотеже) у Ω^+ за промењени модел

$$\left[\begin{array}{cc} M_{bb}^{\Omega+} & M_{be}^{\Omega+} \\ M_{eb}^{\Omega+} & M_{ee}^{\Omega+} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \ddot{u}_b^0 \\ \ddot{u}_e^0 \end{array} \right\} + \left[\begin{array}{c} K_{bb}^{\Omega+} & K_{be}^{\Omega+} \\ K_{eb}^{\Omega+} & K_{ee}^{\Omega+} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} u_b^0 \\ u_e^0 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} -P_b^0 \\ P_e \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$P_{e} = M_{eb}^{\Omega +} \ddot{u}_{b}^{0} + M_{ee}^{\Omega +} \ddot{u}_{e}^{0} + K_{eb}^{\Omega +} u_{b}^{0} + K_{ee}^{\Omega +} u_{e}^{0}$$

Замена промењљивих $u_e = u_e^0 + w_e$

- Укупно поље померања u_e
- Позадинско поље померања u_e^0
- Резидуално поље померања (релативно у односу на референтно, позадинско поље померања) w_e

$$\begin{bmatrix} M_{ii}^{\Omega} & M_{ib}^{\Omega} & 0\\ M_{bi}^{\Omega} & M_{bb}^{\Omega} + M_{bb}^{\Omega+} & M_{be}^{\Omega+}\\ 0 & M_{eb}^{\Omega+} & M_{ee}^{\Omega+} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{u}_i\\ \ddot{u}_b\\ \ddot{w}_e \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ii}^{\Omega} & K_{ib}^{\Omega} & 0\\ K_{bi}^{\Omega} & K_{bb}^{\Omega+} + K_{bb}^{\Omega+} & K_{be}^{\Omega+}\\ 0 & K_{eb}^{\Omega+} & K_{ee}^{\Omega+} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_i\\ u_b\\ w_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_i^{eff}\\ P_b^{eff}\\ P_e^{eff}\\ P_e^{eff} \end{pmatrix}$$

Динамичке (земљотресне) силе

$$\left\{ \begin{array}{c} P_{i}^{eff} \\ P_{b}^{eff} \\ P_{e}^{eff} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ -M_{be}^{\Omega+} \ddot{u}_{e}^{0} - K_{be}^{\Omega+} u_{e}^{0} \\ M_{eb}^{\Omega+} \ddot{u}_{b}^{0} + K_{eb}^{\Omega+} u_{b}^{0} \end{array} \right\}$$



- Стварне земљотресне силе P_e замењене са ефективним чворним оптерећењима P^{eff} ,
- P^{eff} се појављују само са под-матрицама $M_{be}, K_{be}, M_{eb}, K_{eb}$
- Постоје само у једном слоју коначних елемената у Ω^+ који се граниши са Г.
- Не постоје никакви специјални захтеви за материјал у Ω, може да буде и не-еластичан!

Примери

- Простирање земљотресних таласа
 - Ефекти пластификације тла на земљотресне таласе
- Интеракција конструкције и тла
 - Ефекти пластификације тла на динамички одговор конструкције (врло упрошћене)

Модел коначних елемената за простирање таласа





₽

Простирање земљотресних таласа крута тла



Простирање земљотресних таласа мека тла



Модел коначних елемената интеракција конструкције и тла



Модел без конструкције круто тло



Модел са конструкцијом круто тло



Модел без конструкције меко тло



Модел са конструкцијом меко тло



Понашање конструкције

конструкција је у овом случају упрошћена на шип, стуб и масу на врху



круто тло

меко тло

Појачање земљотресних таласа



Круто тло

Меко тло

Модел моста



Foundation Springs



Model Type III

Модел армирано бетонског рама















- Велико омекшање система конструкције и тла ако се узима у обзир интеракција
- Промена првог природног периода

Усмереност земљтресног удара



Интеракција повољна





Kobe–JMA

Интеракција неповољна





LP-Corralitos

Даља анализа понашања моста је у току

- Комплетан модел моста са тлом
 - Ефекти простирања земљотресних таласа (веза са регионалним симулацијама које раде геофизичари)
 - Локално појачање и умањење земљотресног удара
 - Брзина простирања земљотресних таласа кроз тло и мостовску конструкцију
 - Земљотресна изолација



Програмски систем OpenSees

- Резултат рада група истраживача са Берклија, Дејвиса, Станфорда и Сан Диега (за сада)
- Програмски оквир који омогућава развој и надградњу разних метода коначних елемената за статичку и динамичку анализу солида и конструкција направњених од грађевинских материјала
- Лабав конгломерат процедура, функција, метода, писаних у програмским језицима C, C++, Fortran, Tcl)
- Програмски систем OpenSees, (Open System for Earthquake Engineeing Simulations)
- У току је врло активан развој и надградња:

Избор елемената, материјала, метода...

- еластични и не-еластични материјали (за тло, бетон, челик, стенске масе...),
- мноштво елемената (солиди (4,8,20,27, *B*, u-p-U), штапови (метода крутости, сила), плоче (савијање, шајбне, љуске),...),
- методе праћења равнотежне линије (Newton, Quasi-Newton, BFGS,...),
- контрола инкременталног корака (контола оптерећења, померања, дужина лука,...),
- динамичке методе анализе (Newmark, Wilson, Hilber-Hughes-Taylor),
- солвери линеарних система (UMFPack, SkyLine, BandGeneral,...)
- секвенцијално и паралелно извршење (рачунари са расподељеном меморијом)
- базе података о моделима и резултатима (mySQL, BerkeleyDB, XML)
- графичко постпроцесирање (Fantom, Joey3D, VisSees, GID,...)
- OpenSees систем је доступан у изворном коду, уз велики број примера, упутство се стално надограђује...

Уместо закључака

- Потреба да се што боље моделује понашање конструкција и тла при нормалним и изванредним оптерећењима
- Омогућити пројектанту, инжињеру да има при руци што боља оруђа за предвиђање понашања конструкције
- Развој система OpenSees управо пролази кроз промене,
- Већа отвореност за сарадњу и надградњу
- Предвиђена намена система за опште друштвену корист