

Увод
оооооо
ооо

Програм
ооо
ооооо

Анализе
оооооооооо
оооооооо
оооооооооооооо

Закључак
оо

Моделовање еласто-пластичних система применом теорије вероватноћа

Борис Јеремић

University of California, Davis, CA, USA
Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA

Институт за водопривреду "Јарослав Черни"
Јун 2017

Увод
ооооо
ооо

Програм
ооо
ооооо

Анализе
оооооооооо
оооооооо
оооооооооооооо

Закључак
оо

Садржај

Увод

Мотивација

Modeling and Parametric Uncertainty

Програм

Real ESSI Simulator System

Real ESSI Simulator Components

Анализе

Брана

Нуклеарна Електрана

Механика и Теорија Вероватноћа

Закључак

Закључак

Јеремић

Еласто-Пластичност и вероватноће

Увод
●○○○○○
○○○

Мотивација

Програм
○○○
○○○○○

Анализе
○○○○○○○○○○
○○○○○○○
○○○○○○○○○○○○

Закључак
○○

Увод

Мотивација

Modeling and Parametric Uncertainty

Програм

Real ESSI Simulator System

Real ESSI Simulator Components

Анализе

Брана

Нуклеарна Електрана

Механика и Теорија Вероватноћа

Закључак

Закључак

Јеремић

Еласто-Пластичност и вероватноће

Мотивација

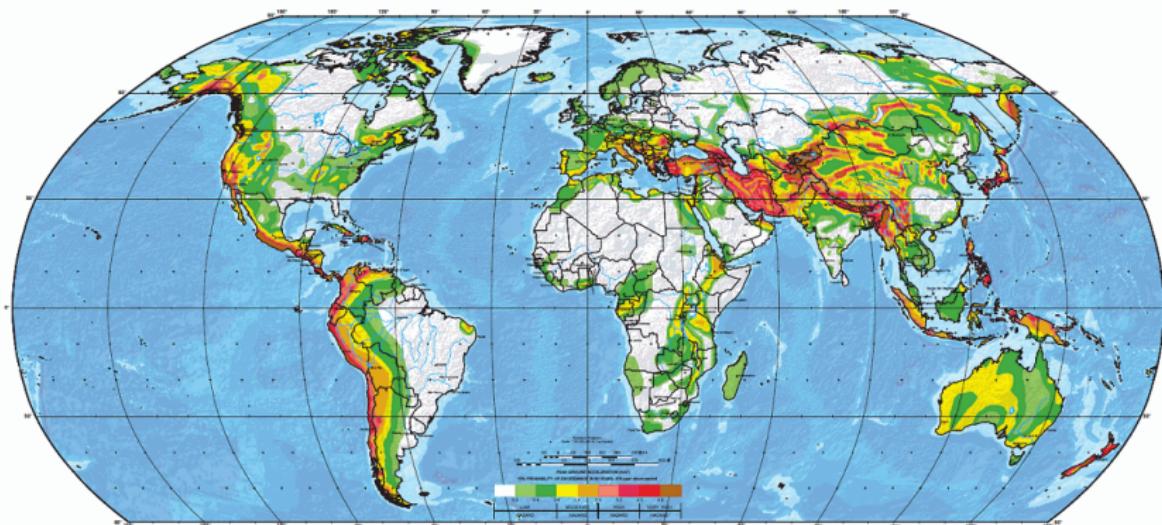
- ▶ Побољшање моделовања и симулација за системе тла и конструкције
- ▶ Развој експертног система за нумеричке анализе
- ▶ Употреба прецизних модела за анализе статике и динамике система тла и конструкције
- ▶ Циљ је развој методологије за нумеричка предвиђања и информисање корисника, стручњака, а не резултати који прате неку задату линију, на силу

Мотивација

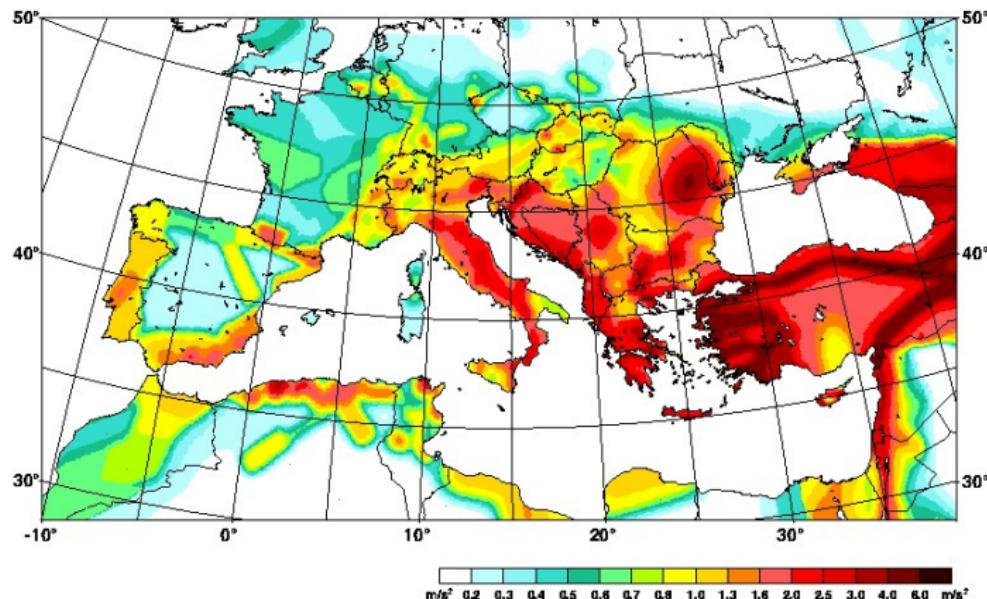
Seismic Hazard, World

GLOBAL SEISMIC HAZARD MAP

Produced by the Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP),
a demonstration project of the UN International Decade of Natural Disaster Reduction, conducted by the International Lithosphere Program.
Global map assembled by D. Giardini, O. Gutschow, R. Sheldock, and P. Zhang
1999

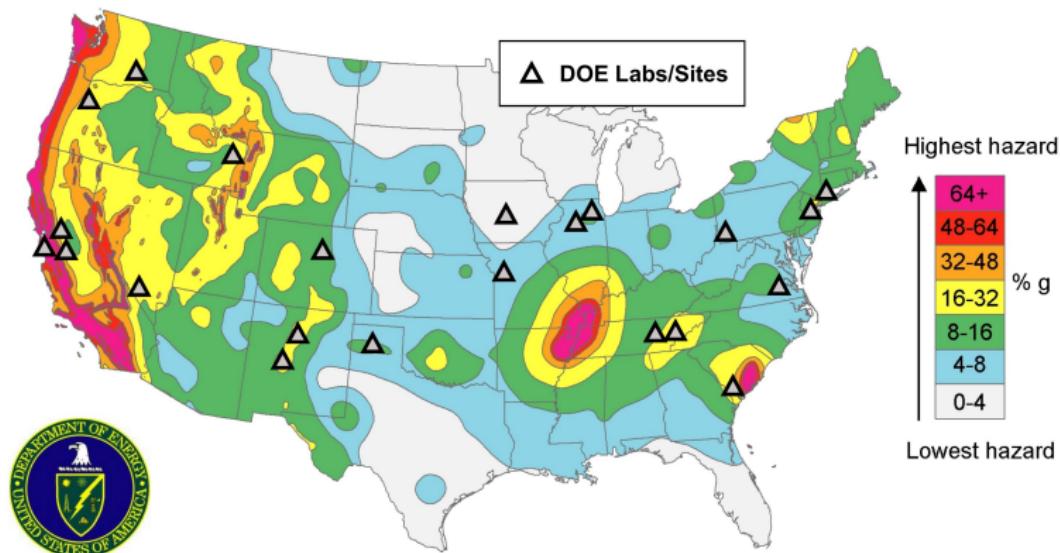


Seismic Hazard, Europe



Мотивација

Seismic Hazard, DOE Facilities



ПРЕТПОСТАВКА

- ▶ Интеракција динамичких карактеристика земљотреса, тла и конструкције контролише ниво оштећења конструкције
- ▶ Место и време дисипације земљотресне енергије одређује локацију и ниво оштећења конструкције
- ▶ Контролисањем проток земљотресне енергије кроз тло и конструкцију, можемо да побољшамо
 - ▶ Сигурност
 - ▶ Економичност

Тачност Моделовања и Симулација

- ▶ Верификација: доказ да је модел тачно решен, математички проблем
- ▶ Валидације: доказ да је решен прави модел, механички проблем
- ▶ Нумеричко анализа: коришћење нумеричког модела за предвиђање стања система за оптерећења која нису коришћена при тестирању (валидацији)
- ▶ Предвиђање/анализа уз теорију вероватноћа:
 - ▶ Несигурност модела
 - ▶ Несигурност параметара

Modeling and Parametric Uncertainty

Увод

Мотивација

Modeling and Parametric Uncertainty

Програм

Real ESSI Simulator System

Real ESSI Simulator Components

Анализе

Брана

Нуклеарна Електрана

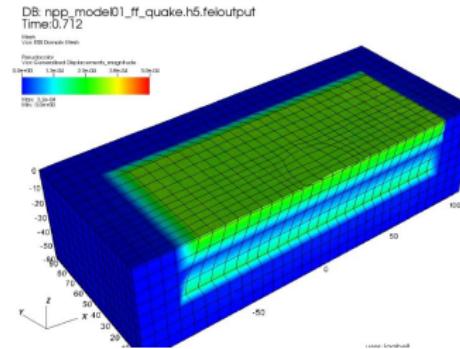
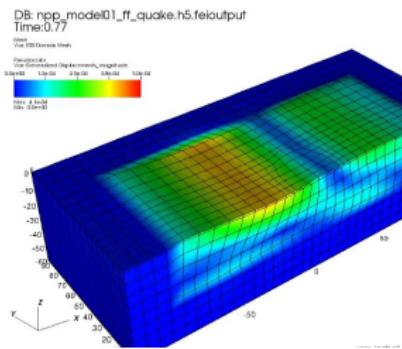
Механика и Теорија Вероватноћа

Закључак

Закључак

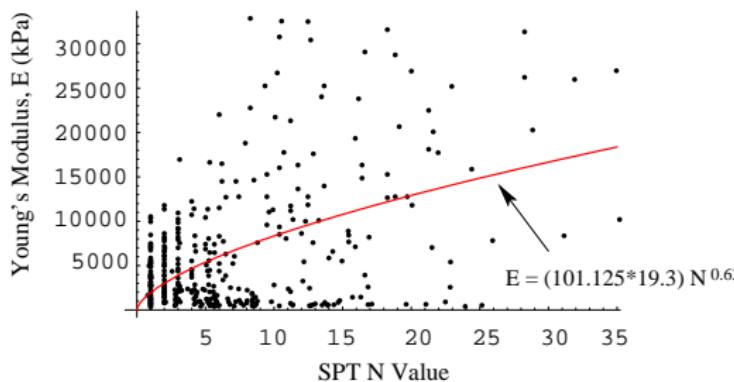
Modeling Uncertainty: Simplified Models

- ▶ Simplified modeling: Features (important ?) are neglected (6D ground motions, inelasticity)
- ▶ Modeling Uncertainty: unrealistic and unnecessary modeling simplifications
- ▶ Modeling simplifications: justifiable iff higher level sophistication model shows features not important

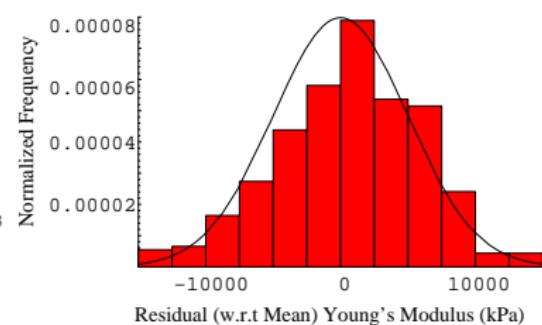


Parametric Uncertainty: Material and Loads

- ▶ Significant uncertainty in material and loads
 - ▶ Need to propagate uncertainty through simulation, to give regulators and engineers information for design, licensing...



Transformation of SPT N -value: 1-D Young's modulus, E (cf. Phoon and Kulhawy (1999B))



Увод
оооооо
ооо

Real ESSI Simulator System

Програм
●оо
ооооо

Анализе
оооооооооо
оооооооо
ооооооооооооо

Закључак
оо

Увод

Мотивација

Modeling and Parametric Uncertainty

Програм

Real ESSI Simulator System

Real ESSI Simulator Components

Анализе

Брана

Нуклеарна Електрана

Механика и Теорија Вероватноћа

Закључак

Закључак

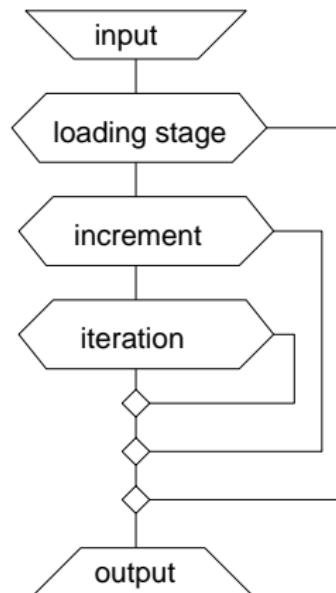
Јеремић

Еласто-Пластичност и вероватноће

Real ESSI Simulator System

- ▶ **The Real ESSI-Program** is a 3D, nonlinear, time domain, parallel finite element program specifically developed for Hi-Fi modeling and simulation of Earthquake Soil/Rock Structure Interaction problems for NPPs (infrastructure objects) on ESSI-Computers.
 - ▶ **The Real ESSI-Computer** is a distributed memory parallel computer, a cluster of clusters with multiple performance processors and multiple performance networks.
 - ▶ **The Real ESSI-Notes** represent a hypertext documentation system (Theory and Formulation, Software and Hardware, Verification and Validation, and Case Studies and Practical Examples) detailing modeling and simulation of ESSI problems.

Real ESSI Simulator Modeling and Simulation Process



Увод
оооооо
ооо

Real ESSI Simulator Components

Програм
ооо
●оооо

Анализе
оооооооооо
оооооооо
ооооооооооооо

Закључак
оо

Увод

Мотивација

Modeling and Parametric Uncertainty

Програм

Real ESSI Simulator System

Real ESSI Simulator Components

Анализе

Брана

Нуклеарна Електрана

Механика и Теорија Вероватноћа

Закључак

Закључак

Јеремић

Еласто-Пластичност и вероватноће

Real ESSI Simulator: DSL

[fragile]

- ▶ Domain Specific Language (DSL), Yacc & Lex
- ▶ English like modeling and simulation language
- ▶ Parser and compiler, can define functions, models, etc.
- ▶ Can extend models and methods
- ▶ Requires units!

Real ESSI Simulator Program: Finite Elements

- ▶ Dry/single phase solids (8, 20, 27, 8-27 node bricks),
- ▶ Saturated/two phase solids (8 and 27 node bricks, liquefaction modeling),
- ▶ Truss, Beams, linear and nonlinear
- ▶ Nonlinear concrete shell and linear shell (ANDES)
- ▶ Contacts (dry and/or saturated soil/rock - concrete, gap opening-closing, frictional slip),
- ▶ Base isolators (elastomeric, frictional pendulum)
- ▶ Stochastic Elastic-Plastic FEM (1D and 3D solid)

Real ESSI Simulator Program: Material Models

- ▶ Elastic (solids): Linear, nonlinear, isotropic and anisotropic
- ▶ Elastic-Plastic (solids): von Mises, Drucker Prager, Rounded Mohr-Coulomb, Leon Parabolic, Cam-Clay, SaniSand, SaniClay, Pisanò. All elastic-plastic models can be used as perfectly plastic, isotropic hardening/softening and kinematic hardening models.
- ▶ Elastic-Plastic (structures, 1D fibers): concrete and steel
- ▶ Probabilistic Elasto-Plasticity

Real ESSI Simulator Program: Seismic Input

Analytic input of seismic motions using Domain Reduction Method (Bielak et al.)

- ▶ Body (P, S) seismic waves
- ▶ Surface (Rayleigh, Love, etc.) seismic waves,
- ▶ Analytic radiation damping.

Real ESSI Simulator Program: V&V

- ▶ Verification: mathematics issue,
 - ▶ Each element, model, algorithm and procedure has been extensively verified (math issue),
- ▶ Validation: physics issue,
 - ▶ Limited, current DOE project will provide a wealth of data for soil, SSI, &c.

Examples

- ▶ Earth and Concrete Dam: level of sophistication and the influence of human factor (expert opinion)
- ▶ Nuclear Power Plant: 3D (6D) vs 1D seismic motions
- ▶ Stochastic Elastic Plastic Finite Element Method: risk of undesirable performance

Увод
ooooooo
ooo

Брана

Програм
ooo
ooooo

Анализе
●oooooooooooo
oooooooooooo
oooooooooooooooooooo

Закључак
oo

Увод

Мотивација

Modeling and Parametric Uncertainty

Програм

Real ESSI Simulator System

Real ESSI Simulator Components

Анализе

Брана

Нуклеарна Електрана

Механика и Теорија Вероватноћа

Закључак

Закључак

Јеремић

Еласто-Пластичност и вероватноће

Увод
оооооо
ооо

Програм
ооо
ооооо

Анализе
о●оооооооо
оооооооо
оооооооооооо

Закључак
оо

Брана

Dam, Satellite Photo



Јеремић

Еласто-Пластичност и вероватноће

Увод
оооооо
ооо

Програм
ооо
ооооо

Анализе
оо●oooooooo
oooooooo
oooooooooooo

Закључак
оо

Брана

Dam, 3D Slope, Satellite Photo



Јеремић

Еласто-Пластичност и вероватноће

Увод
оооооо
ооо

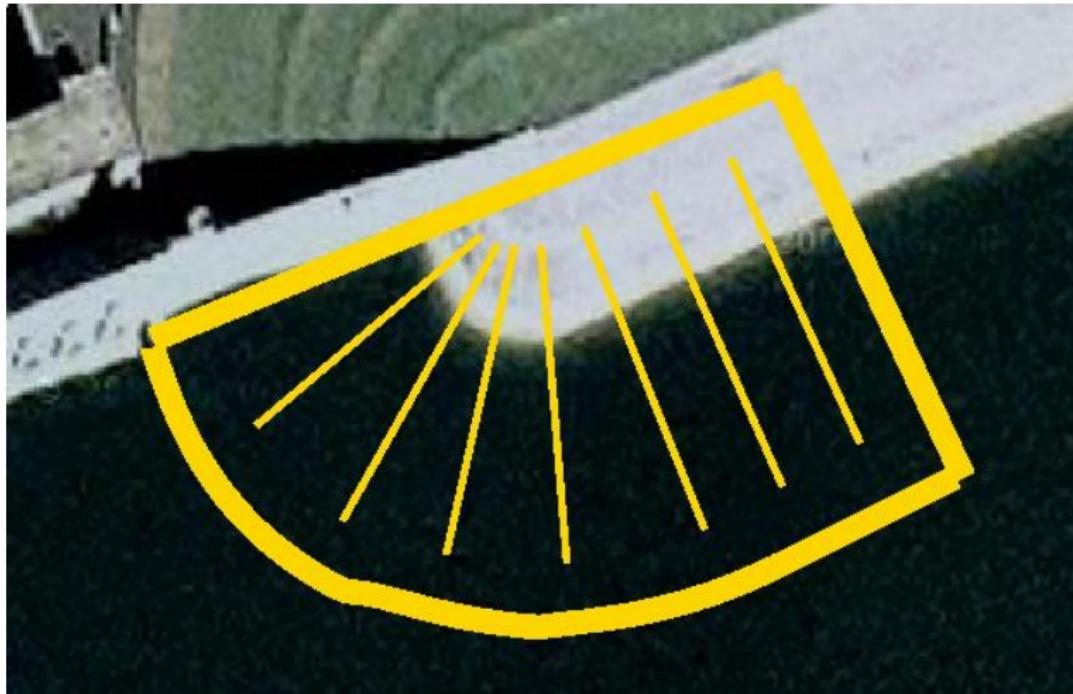
Програм
ооо
ооооо

Анализе
ооо●ооооо
ооооооо
оооооооооооо

Закључак
оо

Брана

3D Slope



Јеремић

Еласто-Пластичност и вероватноће

UCDAVIS



Увод
оооооо
ооо

Брана

Програм
ооо
ооооо

Анализе
оооо●оооо
оооооооо
оооооооооооо

Закључак
оо

3D Slope, Ground Photo



Јеремић

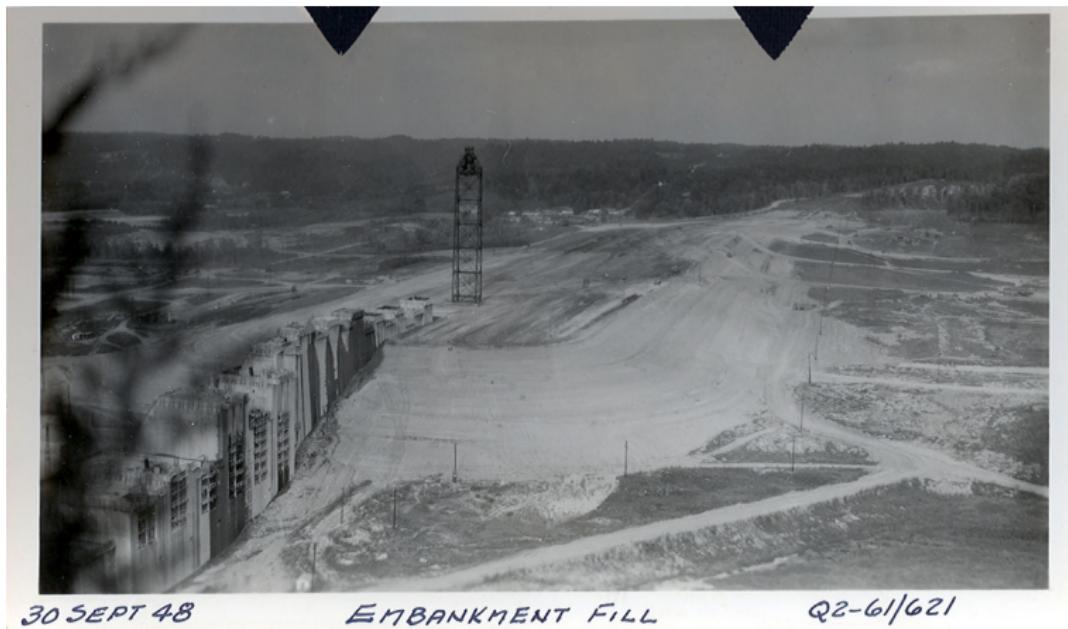
Еласто-Пластичност и вероватноће

UCDAVIS



Брана

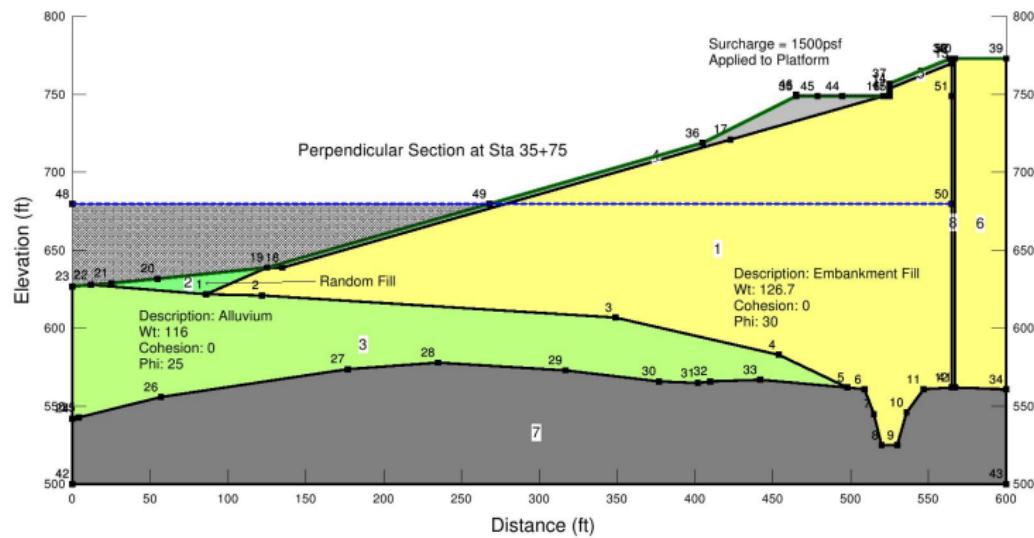
Dam, Construction Photo



3D Dam – Slope Stability

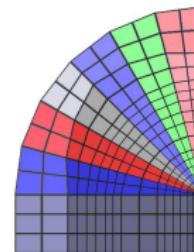
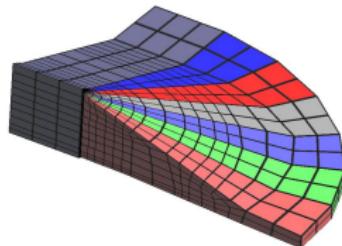
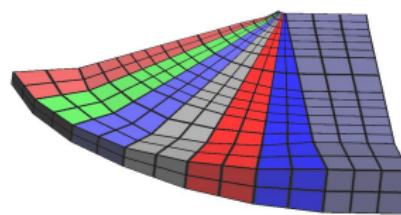
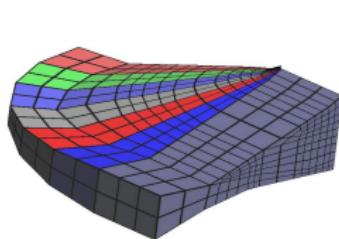
- ▶ 3D earth slope part of a concrete, earth dam
- ▶ Movements recorded during lowering of reservoir (and significant rain!)
- ▶ 3D slope unstable (?), no one could tell, all commercial software does 2D slope stability
- ▶ 2D vs 3D slope stability
- ▶ Shear strength (?) as the only material parameter
- ▶ ("")Expert(") increased value of (a single) measured shear strength
- ▶ Load cases: lowering and raising reservoir, slow and fast
- ▶ Dam build using untreated alluvium

Dam, Section



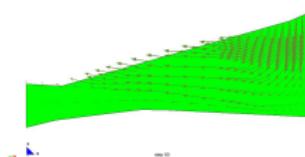
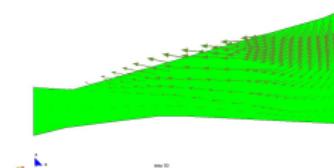
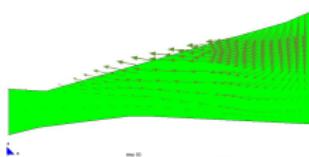
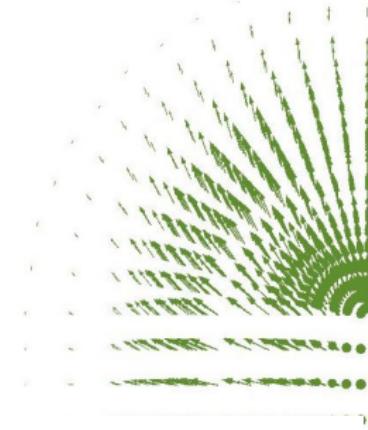
Брана

Dam, Model



Dam Slope, Failure Modes

- ▶ 3D failure pattern
- ▶ 3D has lower FS than 2D (!)
- ▶ Original S_u : FS barely enough
- ▶ With "increased" S_u , FS a bit higher
- ▶ Seismic: immediate slope failure



Увод
oooooo
ooo

Програм
ooo
ooooo

Анализе
oooooooooooo
●oooooooo
oooooooooooo

Закључак
oo

Нуклеарна Електрана

Увод

Мотивација

Modeling and Parametric Uncertainty

Програм

Real ESSI Simulator System

Real ESSI Simulator Components

Анализе

Брана

Нуклеарна Електрана

Механика и Теорија Вероватноћа

Закључак

Закључак

Јеремић

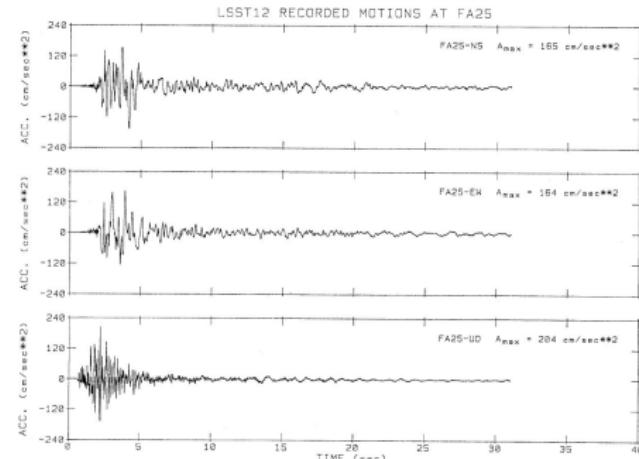
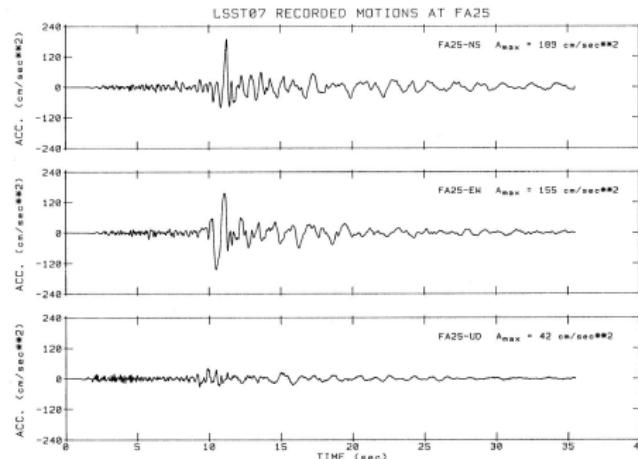
Еласто-Пластичност и вероватноће

Nuclear Power Plants, Modelling Issues

- ▶ Nuclear Power Plants (NPPs), early use of SSI analysis (SASSI, CLASSI, &c.)
- ▶ State of practice for ESSI analysis of NPPs:
 - ▶ Linear elastic material
 - ▶ 1D seismic motions
 - ▶ Incoherent seismic motions
- ▶ Current state of art for ESSI analysis of NPPs:
 - ▶ Nonlinear soil, rock, contact, structure
 - ▶ 3D (6D) seismic motions
- ▶ Seismic motions issue/problem

Нуклеарна Електрана

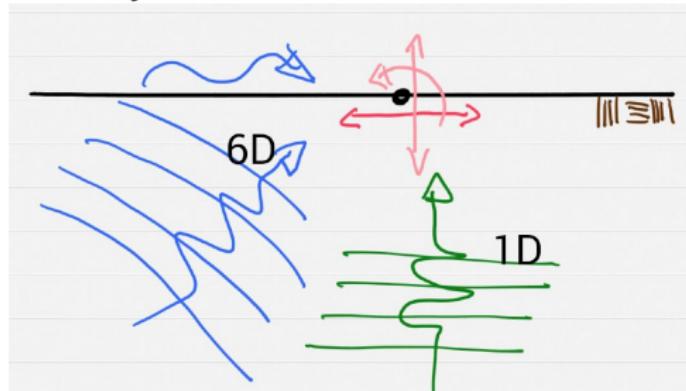
1D, 2D, 3D Earthquakes?



- ▶ SMART-1 array, Lotung, Taiwan,
 - ▶ LSST07: almost 2D (the only one!)
 - ▶ LSST12: full 3D

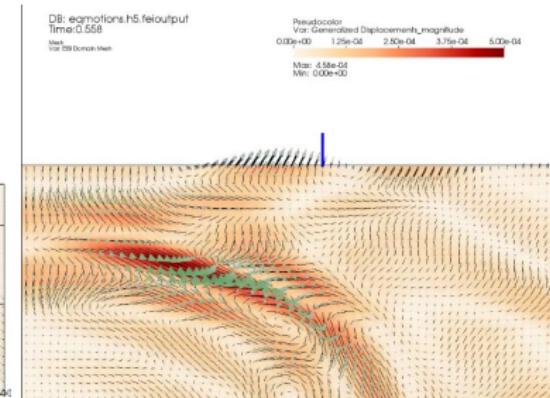
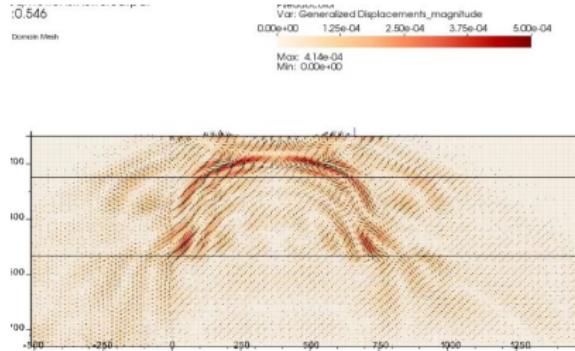
3D (6D) or 1D Seismic Motions for NPPs

- ▶ Assume that a full 6D (3D) motions at the surface are only recorded in one horizontal direction
- ▶ From such recorded motions one can develop a vertically propagating shear wave in 1D
- ▶ Apply such vertically propagating shear wave to the same soil-structure system



Нуклеарна Електрана

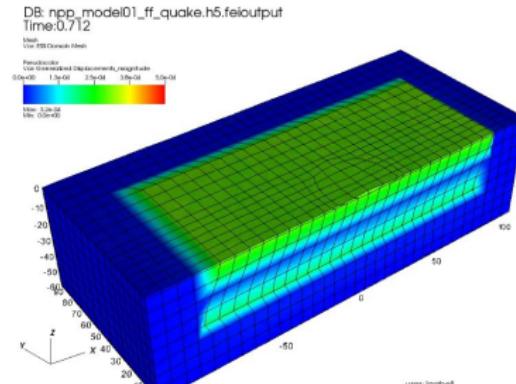
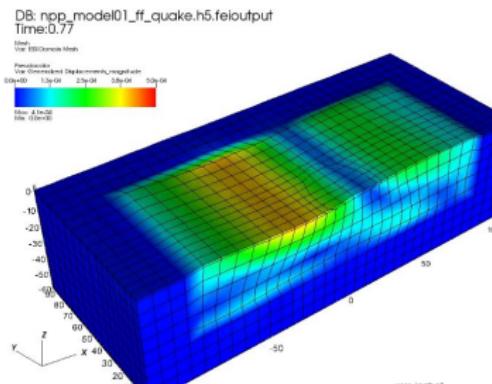
Synthetic (Realistic) Test Motions



Нуклеарна Електрана

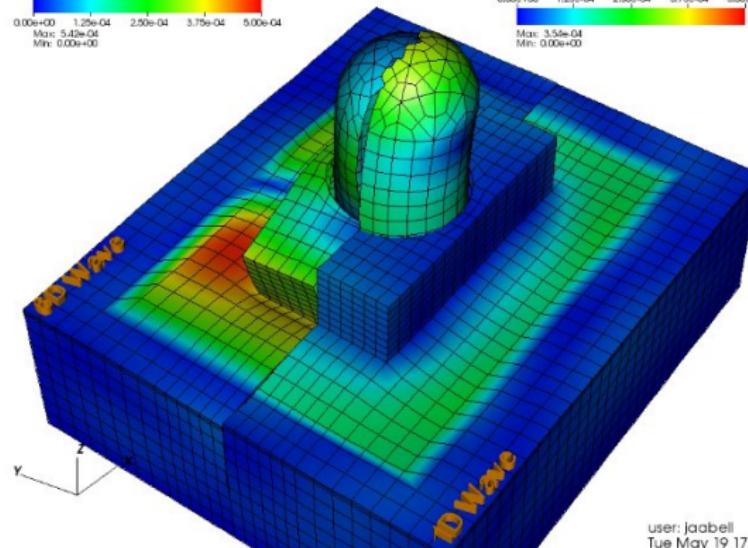
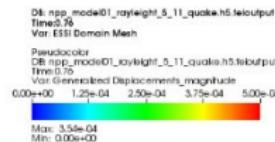
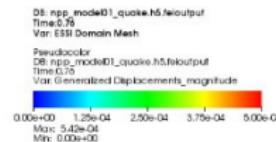
Synthetic Test Motions, 6D vs 1D

- ▶ Danger of picking one component (1D) of motions
- ▶ Excellent (forced) fit, but it is not a prediction



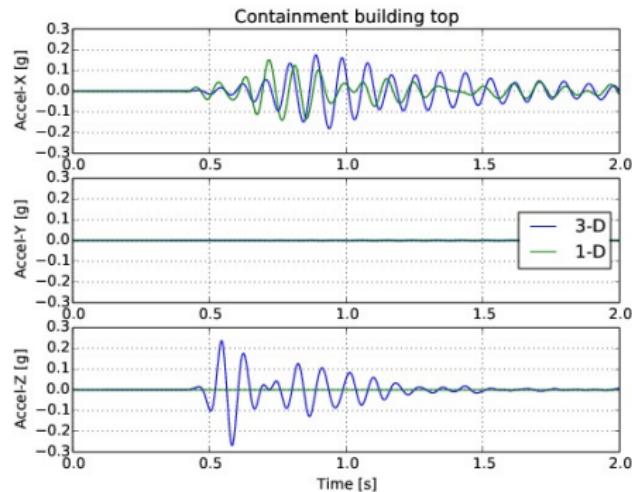
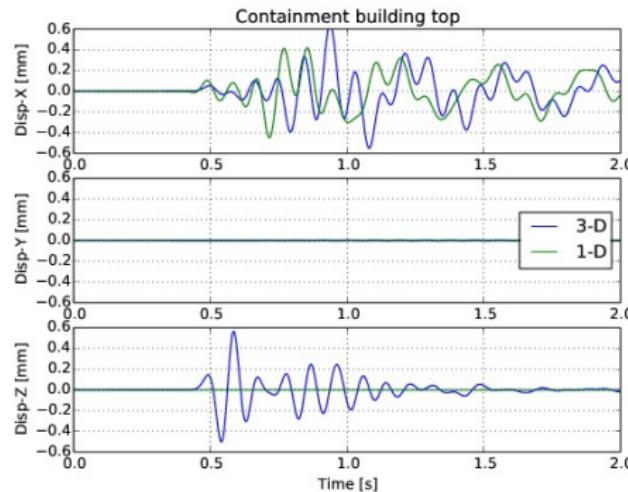
Нуклеарна Електрана

6D vs 1D NPP ESSI Response Comparison

user: jaabell
Tue May 19 17:19:21 2015

Нуклеарна Електрана

6D vs 1D NPP ESSI, Top of Containment, Differences



Увод
oooooo
ooo

Програм
ooo
ooooo

Анализе
oooooooooooo
oooooooo
●oooooooooooo

Закључак
oo

Механика и Теорија Вероватноћа

Увод

Мотивација

Modeling and Parametric Uncertainty

Програм

Real ESSI Simulator System

Real ESSI Simulator Components

Анализе

Брана

Нуклеарна Електрана

Механика и Теорија Вероватноћа

Закључак

Закључак

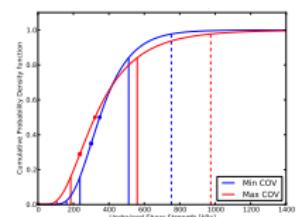
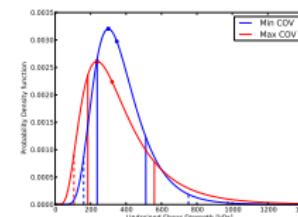
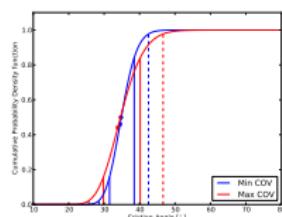
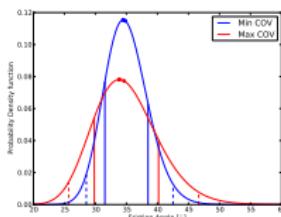
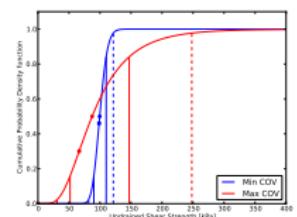
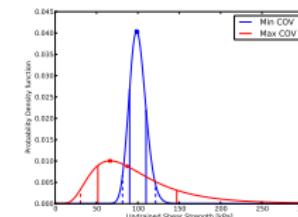
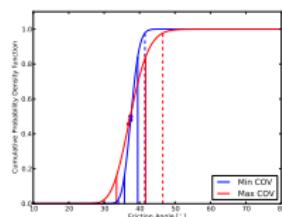
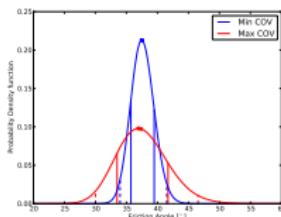
Јеремић

Еласто-Пластичност и вероватноће

Uncertain Material Parameters and Loads

- ▶ Decide on modeling complexity
- ▶ Determine loads and model/material parameters
- ▶ Loads are uncertain!
- ▶ Model/material parameters are uncertain!
 - ▶ Measurements
 - ▶ Transformation
 - ▶ Spatial variability

Parametric Uncertainty: Material Properties

Field ϕ Field c_u Lab ϕ Lab c_u

Uncertainty Propagation through Inelastic System

- ▶ Incremental el-pl constitutive equation

$$\Delta\sigma_{ij} = E_{ijkl}^{EP} \Delta\epsilon_{kl} = \left[E_{ijkl}^{el} - \frac{E_{ijmn}^{el} m_{mn} n_{pq} E_{pqkl}^{el}}{n_{rs} E_{rstu}^{el} m_{tu} - \xi_* h_*} \right] \Delta\epsilon_{kl}$$

- ▶ Dynamic Finite Elements

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}^{ep}\mathbf{u} = \mathbf{F}$$

- ▶ What if all (any) material and load parameters are uncertain

Stochastic Elastoplastic Finite Element Method (SEPFEM)

- ▶ Material uncertainty expanded along stochastic shape functions:

$$E(x, t, \theta) = \sum_{i=0}^{P_d} r_i(x, t) * \Phi_i[\{\xi_1, \dots, \xi_m\}]$$

- ▶ Loading uncertainty expanded along stochastic shape functions:

$$f(x, t, \theta) = \sum_{i=0}^{P_f} f_i(x, t) * \zeta_i[\{\xi_{m+1}, \dots, \xi_f\}]$$

- ▶ Resulting displacement expanded along stochastic shape functions:

$$u(x, t, \theta) = \sum_{i=0}^{P_u} u_i(x, t) * \Psi_i[\{\xi_1, \dots, \xi_m, \xi_{m+1}, \dots, \xi_f\}]$$

SEPFEM : Formulation

Stochastic system of equation resulting from Galerkin approach

$$\left[\begin{array}{ll} \sum_{k=0}^{P_d} < \Phi_k \Psi_0 \Psi_0 > K^{(k)} & \dots \\ \sum_{k=0}^{P_d} < \Phi_k \Psi_0 \Psi_1 > K^{(k)} & \dots \\ \vdots & \vdots \\ \sum_{k=0}^{P_d} < \Phi_k \Psi_0 \Psi_P > K^{(k)} & \dots \end{array} \right] = \begin{bmatrix} u_{10} \\ \vdots \\ u_{N0} \\ \vdots \\ u_{1P_U} \\ \vdots \\ u_{NP_U} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{l} \sum_{i=0}^{P_f} f_i < \Psi_0 \zeta_i > \\ \sum_{i=0}^{P_f} f_i < \Psi_1 \zeta_i > \\ \sum_{i=0}^{P_f} f_i < \Psi_2 \zeta_i > \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{P_f} f_i < \Psi_{P_U} \zeta_i > \end{array} \right]$$

# KL terms material	# KL terms load	PC order displacement	Total # terms per DoF
4	4	10	43758
4	4	20	3 108 105
4	4	30	48 903 492
6	6	10	646 646
6	6	20	225 792 840
6	6	30	$1.1058 \cdot 10^{10}$
...



SEPFEM : Probabilistic Constitutive Modeling

- ▶ Probabilistic constitutive modeling :
 - ▶ Evolution of stress and stiffness via stochastic Armstrong-Frederick kinematic hardening rule
$$\Delta\sigma = Ha\Delta\epsilon - c_r\sigma|\Delta\epsilon|$$
 - ▶ Initial stiffness Ha and shear strength Ha/c_r are now uncertain :
$$Ha = \sum h_i \Phi_i \quad Cr = \sum c_i \Phi_i$$
 - ▶ Resulting stress and stiffness are also uncertain :
$$\sum_{i=1}^{P_\sigma} \Delta\sigma_i \Phi_i = \sum_{i=1}^{P_h} \sum_{k=1}^{P_e} h_i \Delta\epsilon_k \Phi_i \Phi_k - \sum_{j=1}^{P_g} \sum_{k=1}^{P_e} \sum_{l=1}^{P_\sigma} c_i \Delta\epsilon_k \sigma_l \Phi_j \Phi_k \Phi_l$$
- ▶ Polynomial Chaos decomposition of stress and stiffness is updated incrementally at each Gauss Point via stochastic Galerkin projection
- ▶ Time integration is done via Newmark algorithm

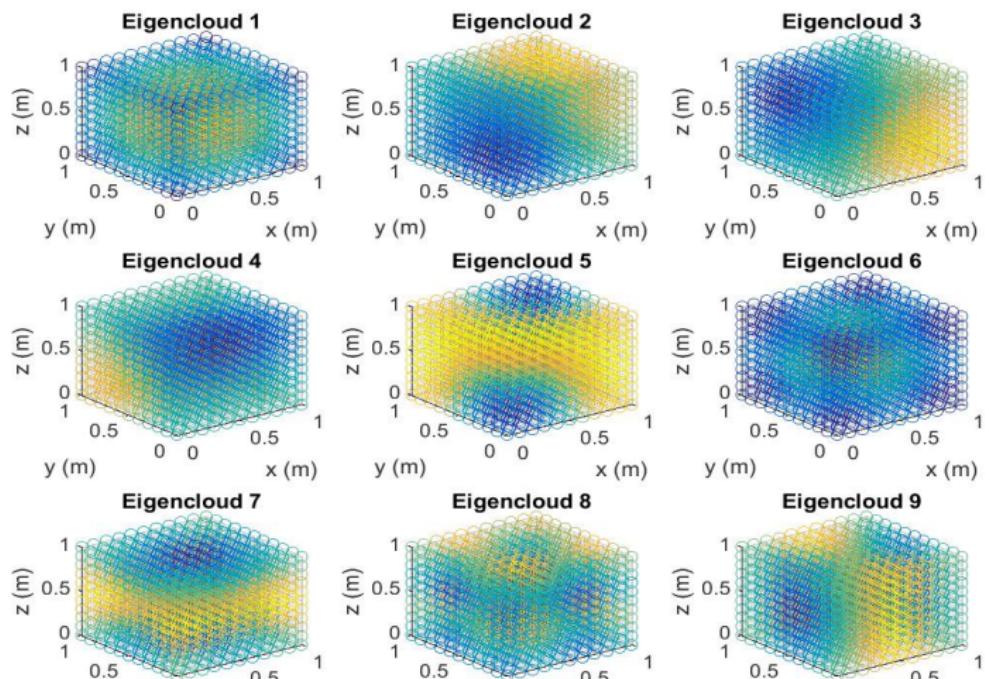
SEPFEM: Solution

- ▶ Solution is probability density function (PDF) of :
 - ▶ displacement
 - ▶ velocity
 - ▶ acceleration
 - ▶ stress
 - ▶ strain
- ▶ These PDFs evolve in space and time
- ▶ PDFs include dynamic uncertainty from materials and loads

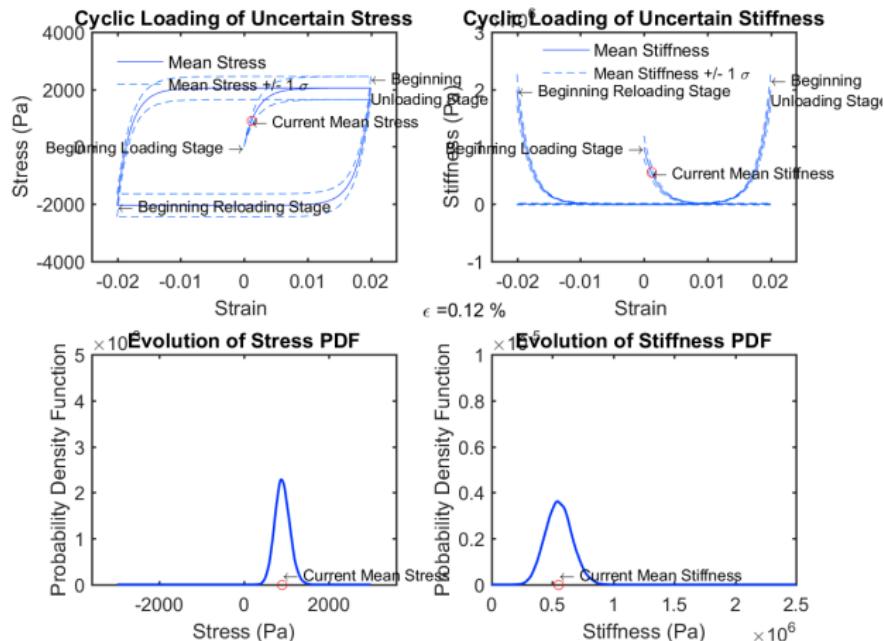
SEPFEM : Correlation Structure Representation

- ▶ Material properties $E(x, y, z; \theta)$ are spatially correlated, with correlation structure $C(x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2)$ between two point locations
- ▶ Eigenvalue analysis of 3D correlation structure (KL Expansion)
$$\int_{\mathbb{R}^3} C(x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2) f_k(x_1, y_1, z_1) dx_1 dy_1 dz_1 = \lambda f_k(x_2, y_2, z_2)$$
- ▶ 3D eigenfunctions can be included in stochastic shape functions Ψ to propagate correlation structure of materials
$$E(x, y, z; \theta) = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{\lambda_k} f_k(x, y, z) \Psi\{\xi_k(\theta)\}$$

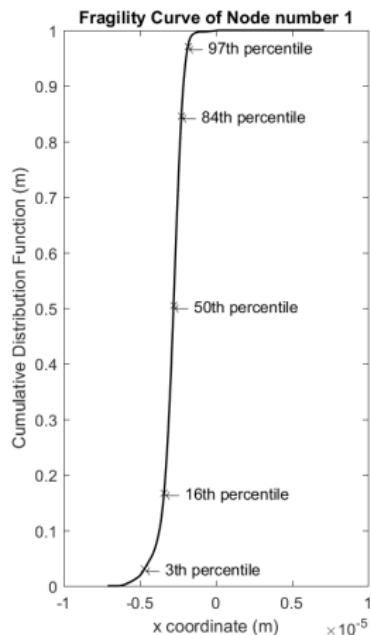
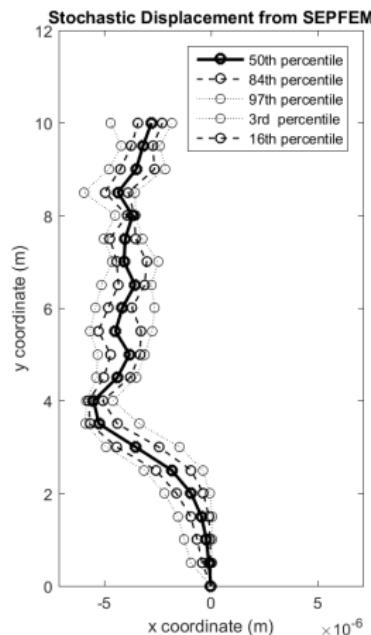
SEPFEM : Correlation Structure Representation



SEPFEM : Probabilistic Elastic-Plastic Modeling

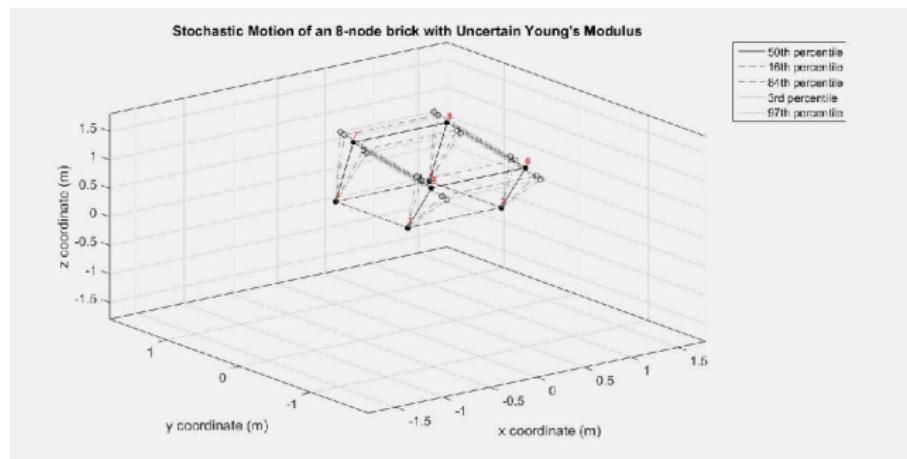


SEPFEM : Example in 1D



Механика и Теорија Вероватноћа

SEPFEM : Example in 3D



Увод
оооооо
ооо

Закључак

Програм
ооо
ооооо

Анализе
оооооооооо
оооооооо
ооооооооооооо

Закључак
●○

Увод

Мотивација

Modeling and Parametric Uncertainty

Програм

Real ESSI Simulator System

Real ESSI Simulator Components

Анализе

Брана

Нуклеарна Електрана

Механика и Теорија Вероватноћа

Закључак

Закључак

Јеремић

Еласто-Пластичност и вероватноће



Summary

- ▶ High fidelity modeling and simulation allows reduction of modeling uncertainty and direct propagation of parametric uncertainties through the dynamic ESSI system
- ▶ Development and expert use of high fidelity modeling and simulation numerical tools: Real ESSI Simulator System
- ▶ Education and training of users (researchers, designers, regulators, owners) will prove essential
- ▶ Collaborators: Yang, Cheng, Jie, Sett, Taiebat, Tafazzoli, Karapiperis, Abell, Pisanò, Feng, Sinha, Lacour, Yang, Behbehani, Wang, Petrone, Wong, McKenna, McCallen
- ▶ Funding from and collaboration with the US-NRC, US-NSF, US-DOE, CNSC, LBNL, LLNL, INL, ILEE, AREVA NP GmbH, and Shimizu Corp. is greatly appreciated,