

地盤－構造連成を考慮した 大規模構造物の地震応答解析

平成24年2月28日 HPCI戦略分野3 地震津波課題ワークショップ

日本大学工学部情報工学科
宮村倫司

当面の研究目的

京コンピュータで数億～数十億自由度規模の非線形構造解析を実現し、地盤-構造連成を考慮した大規模構造物の地震応答シミュレーションを行う

目次

- ADVENTURE_Solid for Kの開発とその概要
- 京コンピュータでのパフォーマンス
- コンクリートの解析
- MPC(多点拘束条件)
- 地盤と超高層ビルの連成解析に向けたモデル作成
- 地盤とRC橋脚の連成解析に向けたモデル作成
- まとめ

ADVENTUREシステム



- オープンソースの並列CAEシステム(学振未来開拓, 1997~)
- モジュールベースの設計
 - 各種ソルバー
 - プリプロセッサ群
 - ポストプロセッサ群
 - 専用のI/OフォーマットおよびAPI
- ADVENTURE 2(JST-CREST プロジェクト「原子力発電プラントの地震耐力予測シミュレーション」(2007-2012)において機能拡張
- HPCI分野3および4において京向けのチューニングと機能拡張(共同開発)

- 商用版: ADVENTURECluster(アライドエンジニアリング)
 - 2006 Gordon Bell Prizesのファイナリスト(300M DOFs problem, 1.27 Tflops using 8192 nodes of Blue Gene/L)
- E-Simulator(数値震動台)(防災科学技術研究所)
 - ADVENTUREClusterをベースとして開発
 - 建築, 土木構造物の仮想震動実験を行う

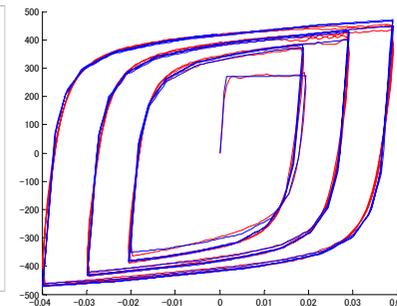
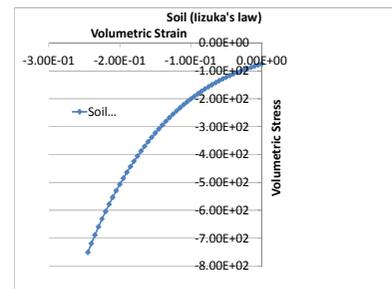
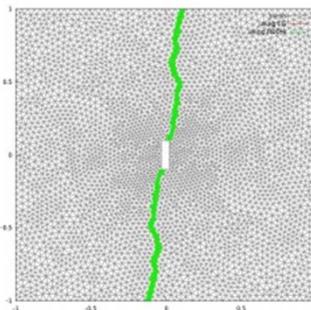
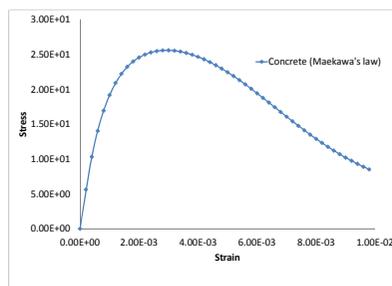
ADVENTURE_Solidの京向けチューニングと機能拡張

戦略分野4(次世代ものづくり)と連携して開発

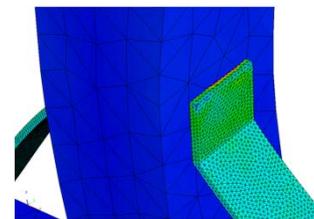
- 開発担当: 高谷(アライド), 荻野(名大), 田中(東大地震研), 宮村
- 京向けチューニング

MPI-OpenMPハイブリッド並列化, ピーク性能比13.6%を達成

- コンクリート構成則(前川則), PDS-FEM, 地盤構成則(飯塚則), 鋼材の複合硬化則の実装



- 大規模なMPC付問題への対応



- コードの汎用化(京で動く汎用有限要素解析コードの開発)

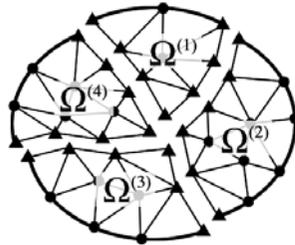
線形ソルバBDD法と京向け最適化

BDD(Balancing Domain Decomposition)法

最終的に解くべき
線形連立一次方程式

$$Ku = f$$

メッシュを空間的に分割



部分領域間境界上に
縮約された連立一次方程式

$$Su_B = g$$

反復法で解く

BDD法の前処理行列

$$M^{-1} = \left(I - R_0 \left(R_0^T S R_0 \right)^{-1} R_0^T S \right) T_{N-N}$$

BDD法の主な演算と京向け最適化

(1) 係数行列ベクトル積

$$q^n = Sp^n$$

```
#pragma omp parallel for schedule(dynamic,1)
for (i = 0; i < N; i++) {
  y_i = K_i p_i;
  x_i = K_i^{-1} y_i;
  q_i = K_i x_i;
}
```

- 一部分領域毎の疎行列ベクトル積と連立方程式求解に帰着
- 各MPIプロセスは担当領域ループをOpenMPでスレッド並列化
- 各線形代数演算は節点自由度分のループ展開などで最適化

(2) coarse問題求解

$$\left(R_0^T S R_0 \right) d_0 = R_0^T r^n$$

- 疎行列向けMPI並列直接法ライブラリMUMPSを適用
- MUMPS+SSLIIでハイブリッド並列化

担当: 荻野先生
(名古屋大学)

非構造格子による大規模構造解析の演算性能評価

2億自由度(原子炉-建屋モデル)
静弾性解析の演算性能

# nodes	512
BDD Iter.	885
Time [s]	827
Mem [TB]	2.95
FLOPS/PEAK [%]	13.6

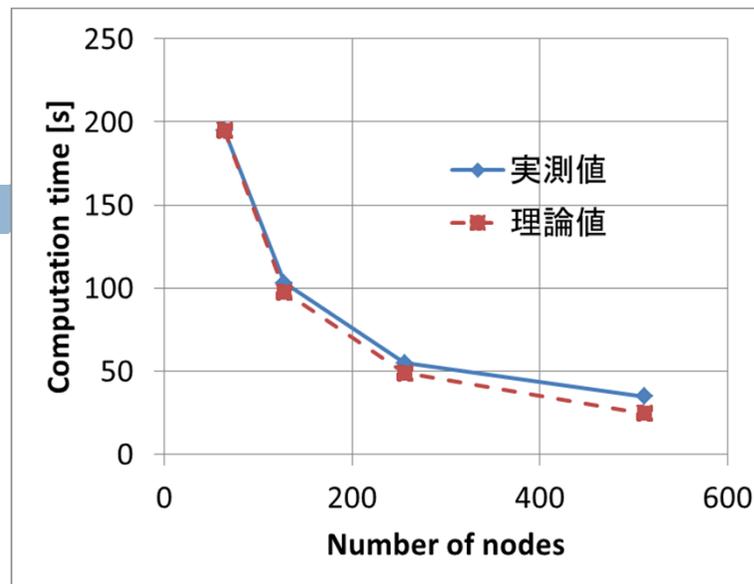
→ 非構造格子FEMで13.6%を達成

14億自由度(古代建築)静弾性解析の
演算性能

# nodes	2,048
BDD Iter.	146
Time [s]	376
FLOPS/PEAK [%]	11.6

→ 10億自由度規模解析を実時間内で実現

- この結果は、理化学研究所が実施している京速コンピュータ「京」の試験利用によるものである
- 京は開発中であり、性能値について暫定的なものである



1億自由度静弾性解析のストロング
スケーリングの並列効率 α_{strong}

→ 約80%を達成

分野4における線形弾性解析, マイルドな
非線形解析に特化したチューニングでは,
ピーク性能比が**最大42%**.
(2.1億自由度問題を4096ノードで計算.
1時間ステップの計算時間:約4秒)
(東大, 河合研究員)

今後のノード数制限解除に向けて

目標1(数億自由度規模:例えば, 超高層ビル1棟)

- 1,024ノードで2億自由度構造解析を64秒で解けている
- 2億自由度動弾塑性解析の1,000時間ステップ
 - 4K nodes: 2 min/step ($\alpha_{\text{strong}}=0.75$), 33 hr/whole → 1日強
 - 12K nodes: 40 sec/step ($\alpha_{\text{strong}}=0.75$), 12 hr/whole → 半日
→ パラメトリックスタディも可能

目標2(数十億規模:例えば, 地盤+超高層ビル10棟)

- 2,048ノードで14億自由度静弾性解析を約6分で解けている
- 地盤+超高層10億自由度規模の動弾塑性解析1,000時間ステップ
 - 12K nodes: 8 min/step ($\alpha_{\text{strong}}=0.75$), 133 hr/whole → 約2週間
 - 72K nodes: 1.5 min/step (12K node に対して $\alpha_{\text{strong}}=0.9$), 25 hr/whole
→ 3-4日程度

NR.iter / step = 6とした

PDS-FEMと再定式化された前川則

PDS-FEM:有限要素法の枠組みの中でコンクリートのひび割れを直接的に表現

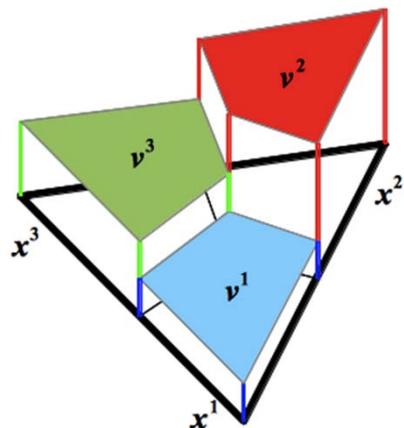
基礎方程式

$$\nabla \cdot \sigma(\mathbf{v}) = \mathbf{f}$$

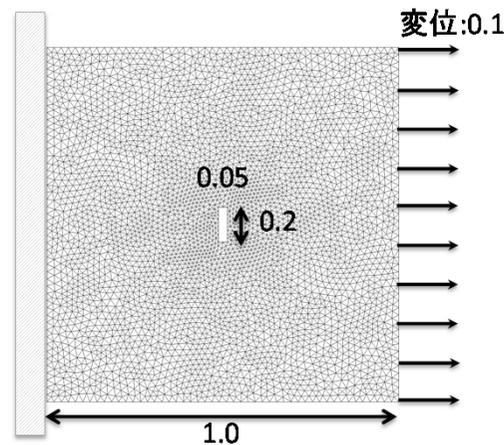
粒子離散化手法

(PDS: Particle Discretization Scheme)

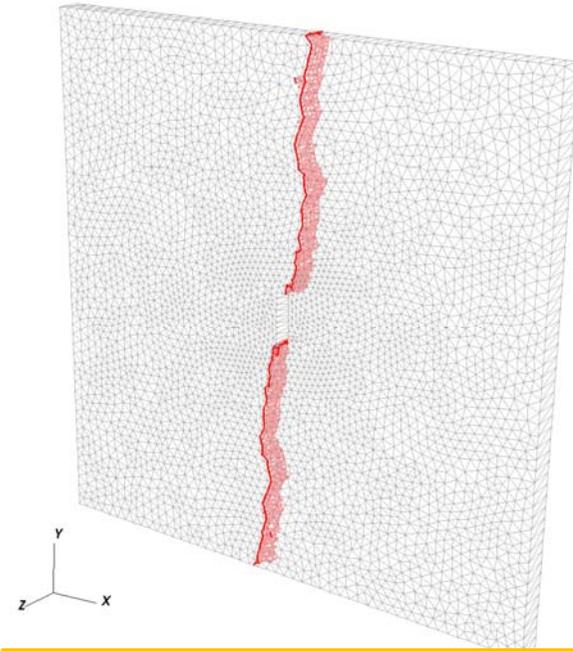
$$\mathbf{v}(\mathbf{x}) = \sum_{\alpha=1}^{N_{en}} v^{\alpha} N^{\alpha}(\mathbf{x})$$



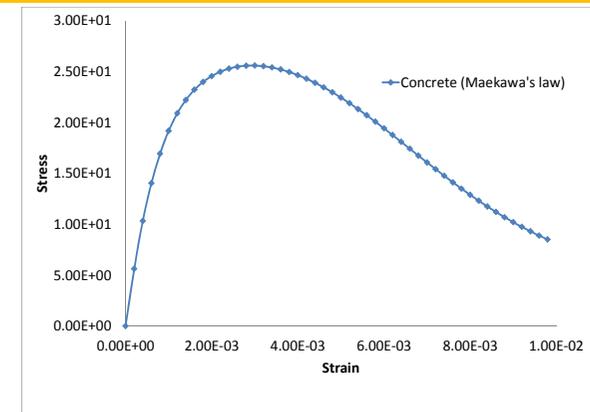
特性関数



$E = 1.0 \quad \nu = 0.25$



前川則:圧縮強度の低下を表現

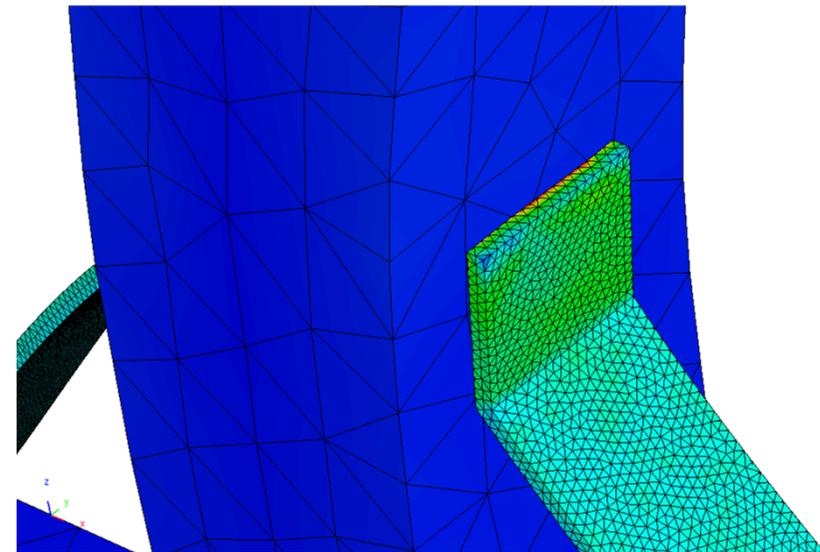
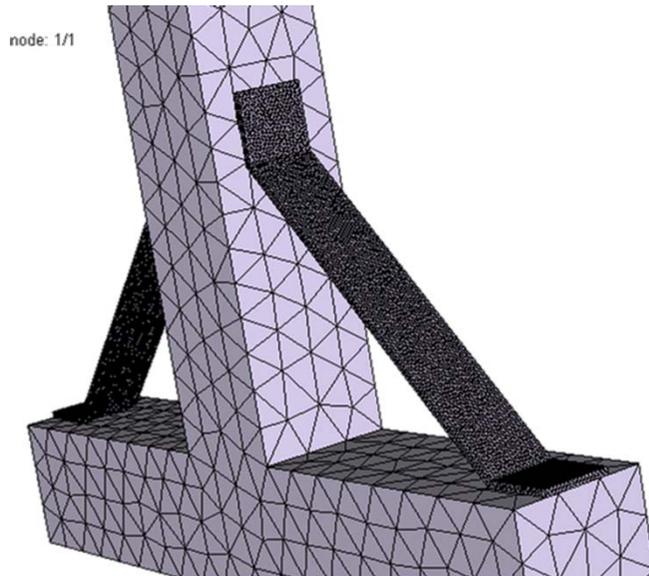
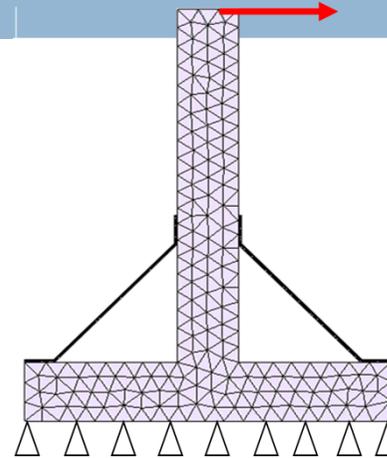


担当:田中先生(東大地震研)

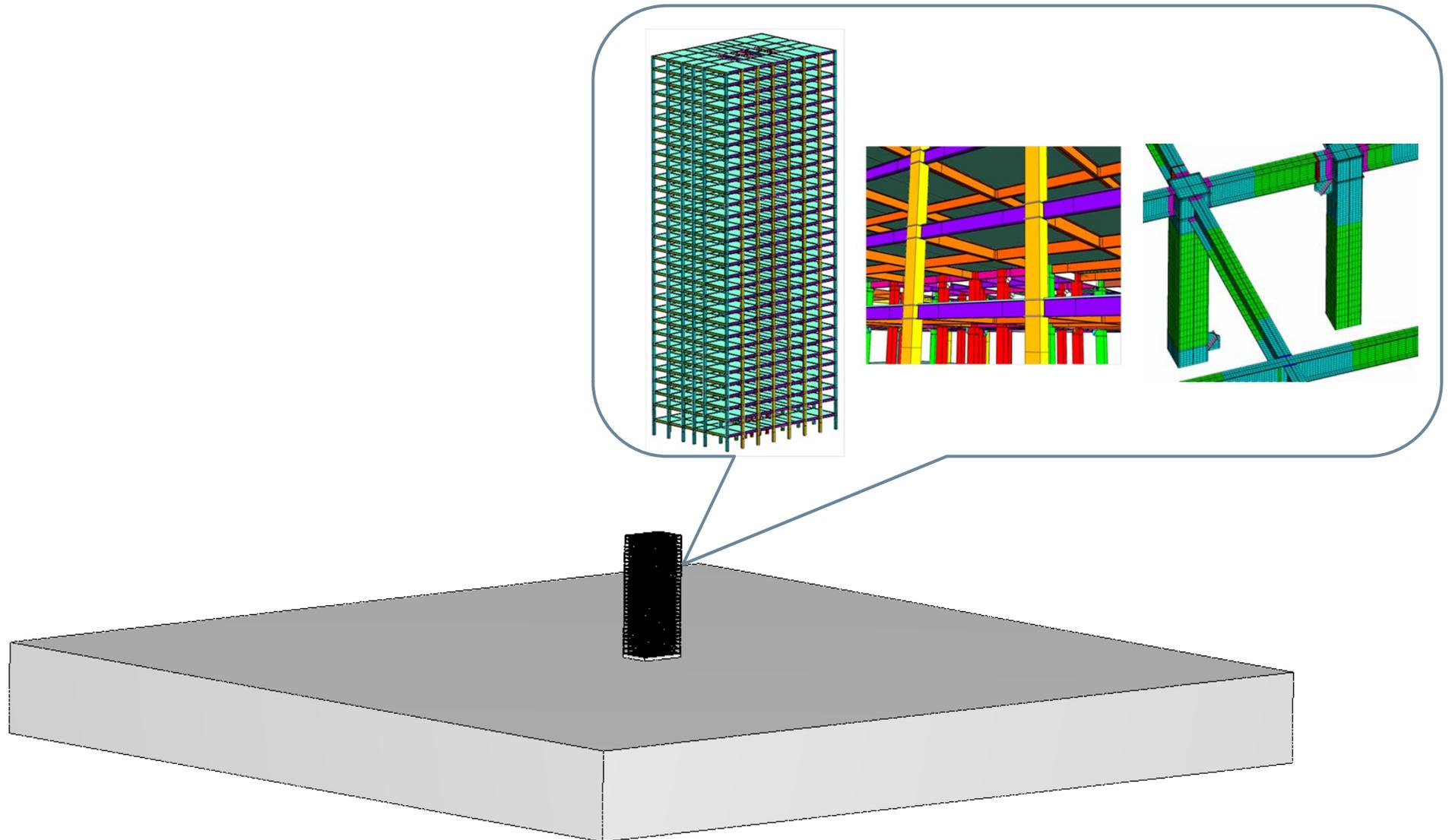
MPC(多点拘束条件)付問題

- 共役射影勾配法
- コースグリッドではペナルティ法でMPCを考慮

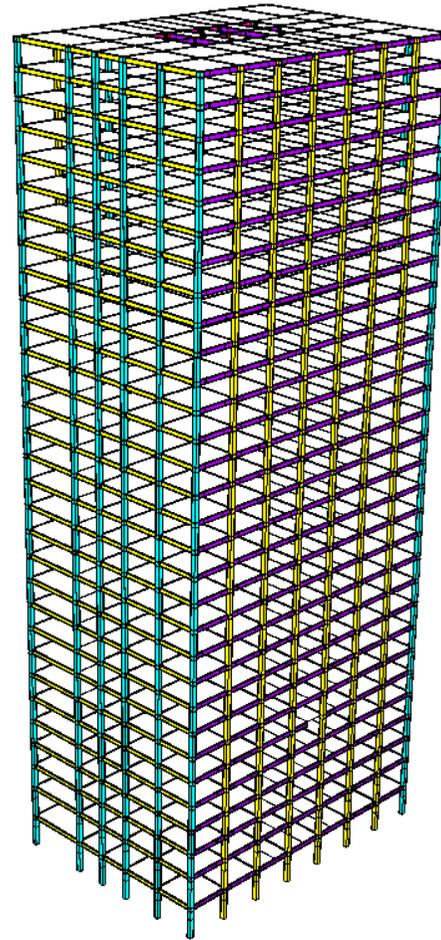
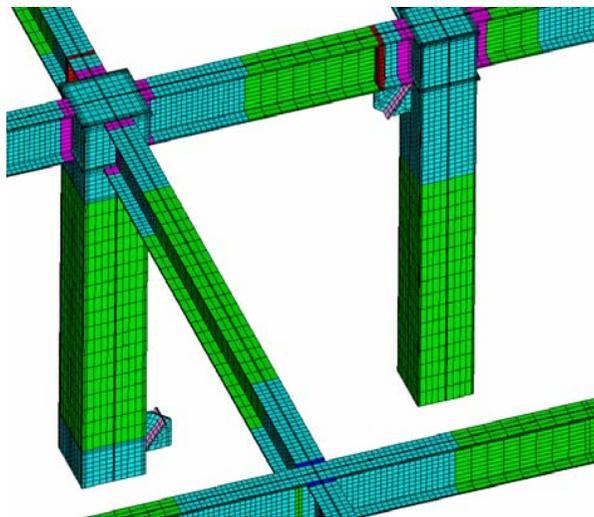
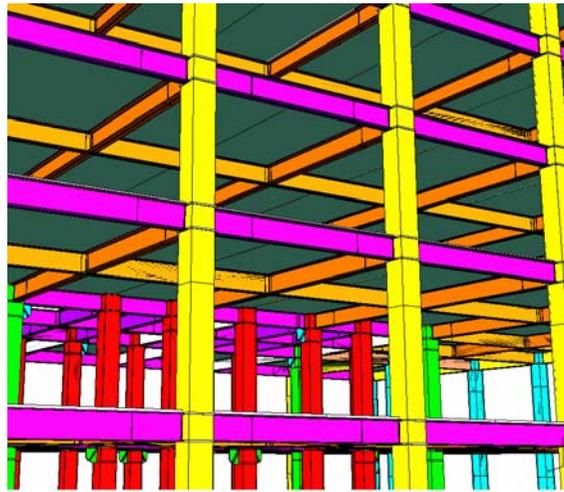
MUMPSで解く
MPCをグループ分け



地盤-構造連成を考慮した超高層ビル の地震応答シミュレーション



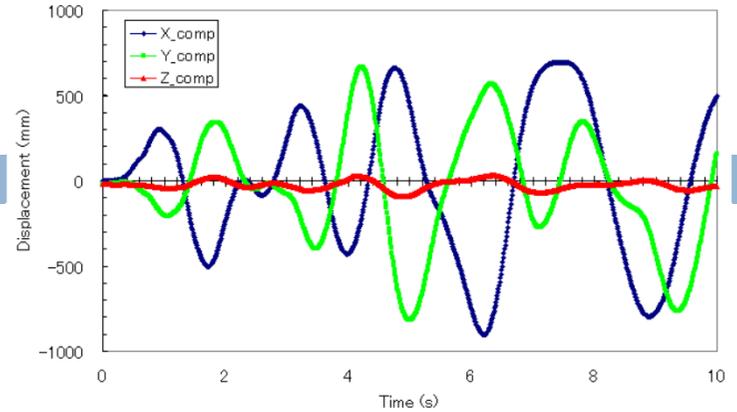
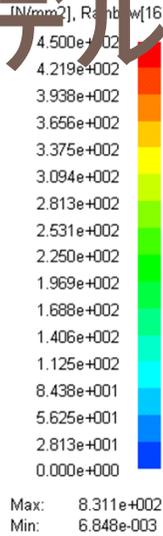
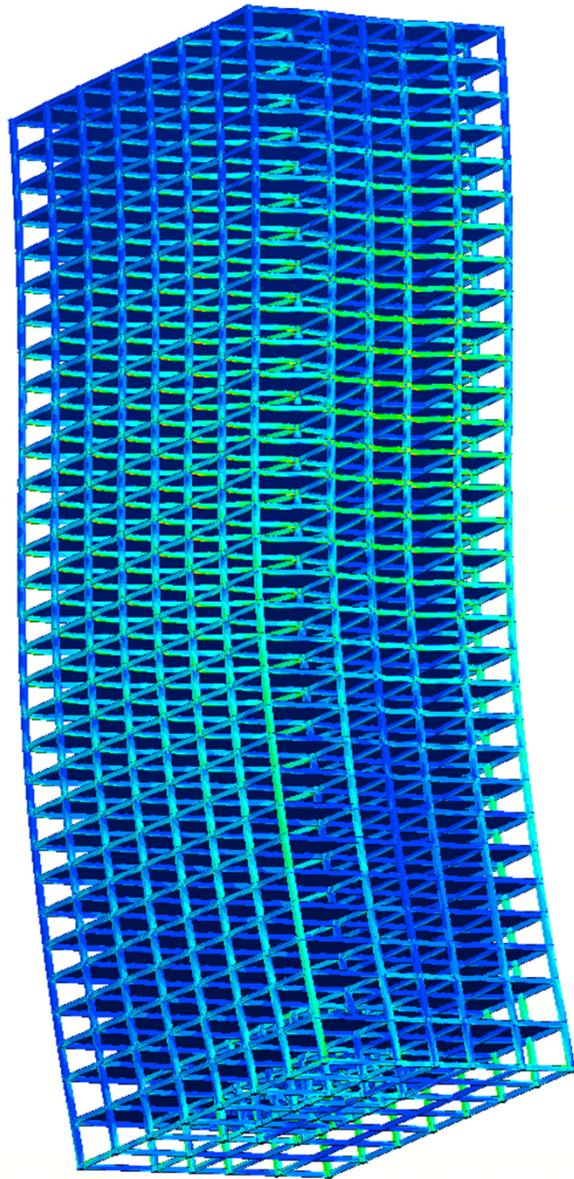
超高層ビル単体の地震応答解析 (防災科学技術研究所E-Simulator)



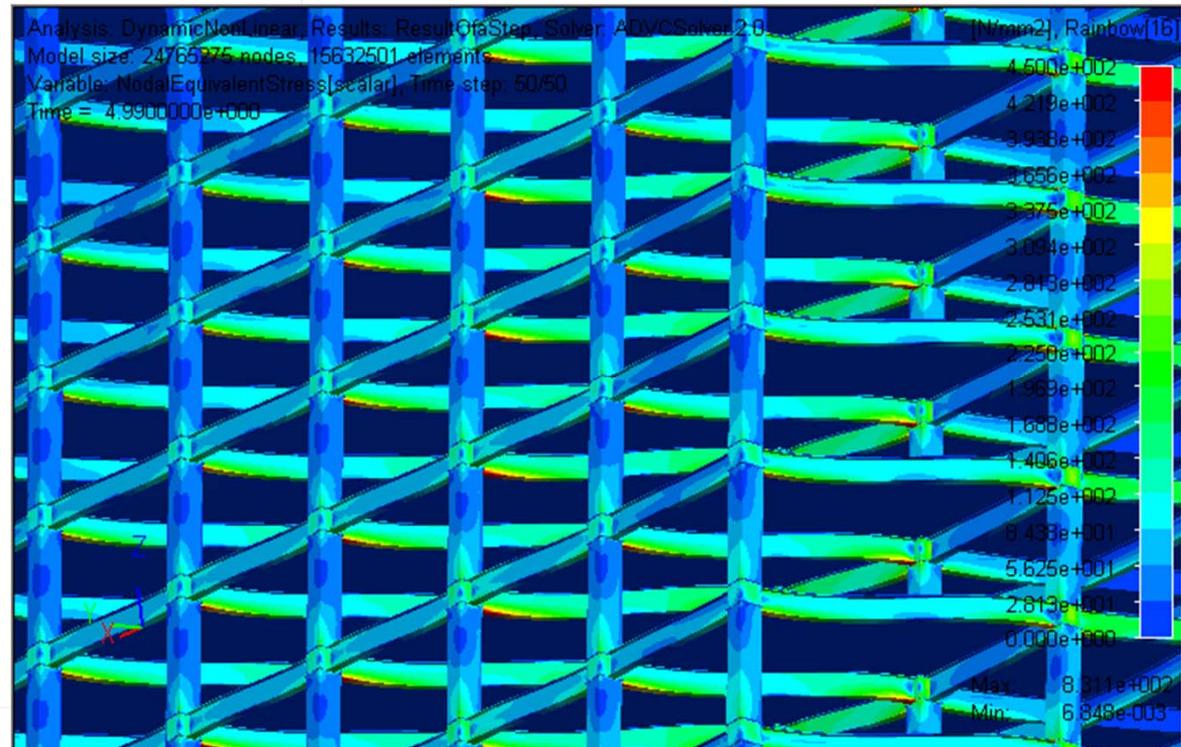
- 六面体ソリッド要素
- 15,592,786要素
- 24,765,275節点
- E-Simulator
(ADVENTURECluster
ベースで開発)

Step, Solver: ADVCSolver 2.0
nts
step: 50/50

31層モデルの弾塑性地震応答解析

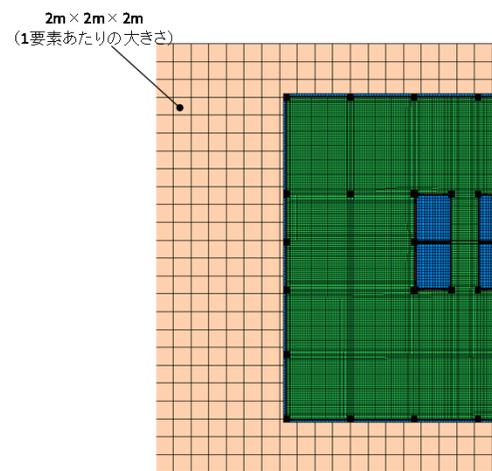
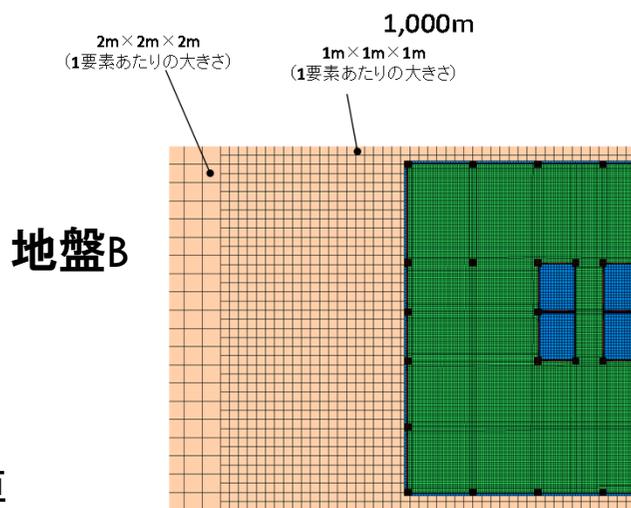
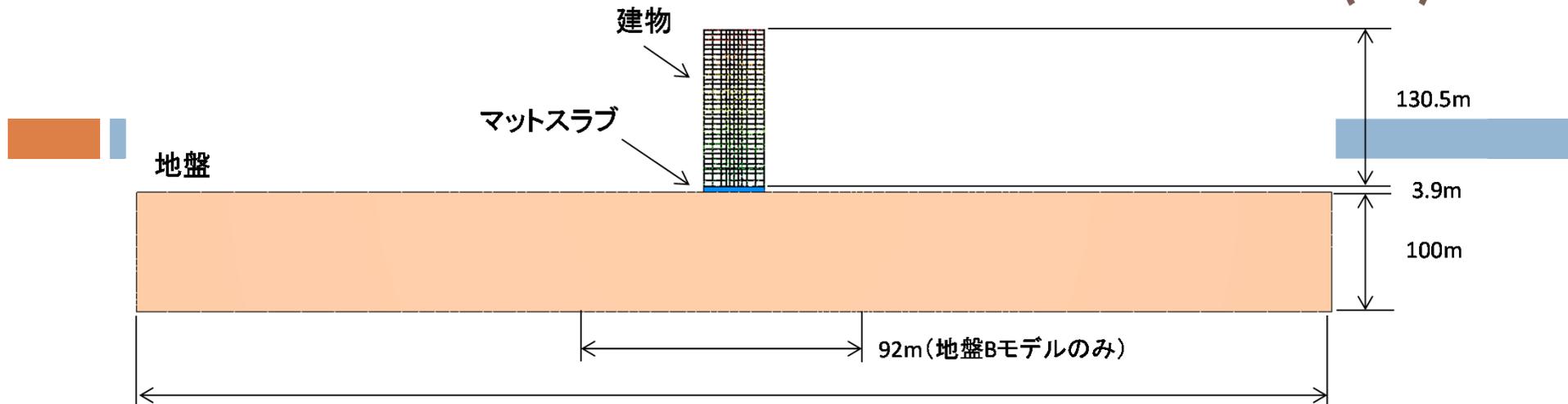


31F変位応答



1ステップあたりの計算時間: 東大T2K, 1024コアで1時間ステップあたり2408 s

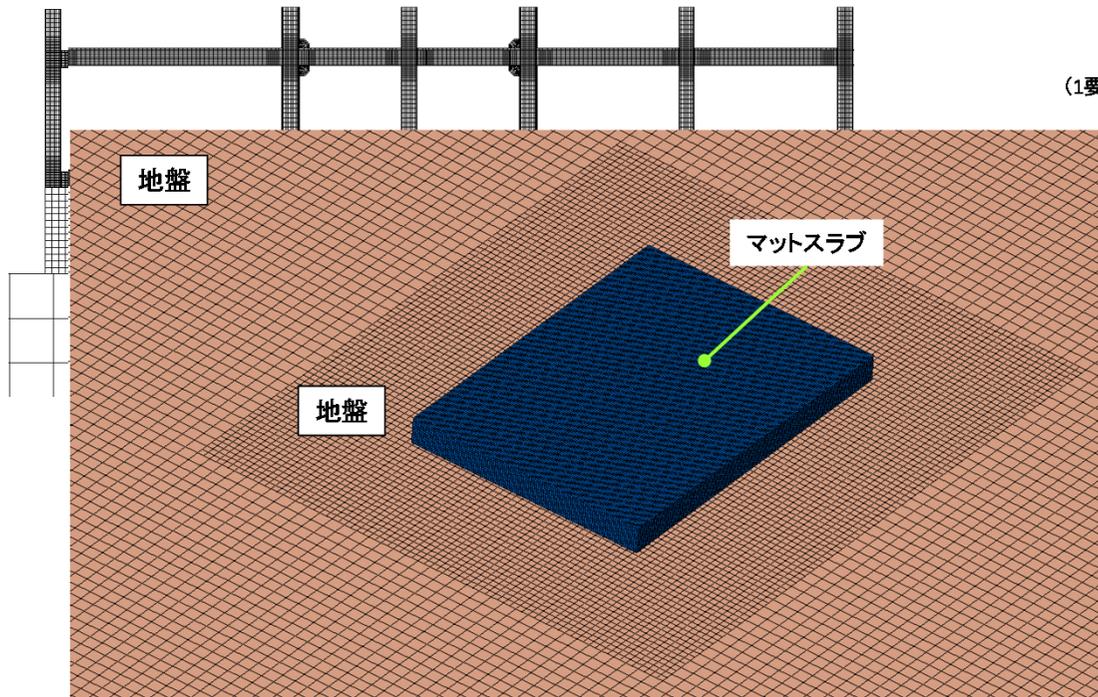
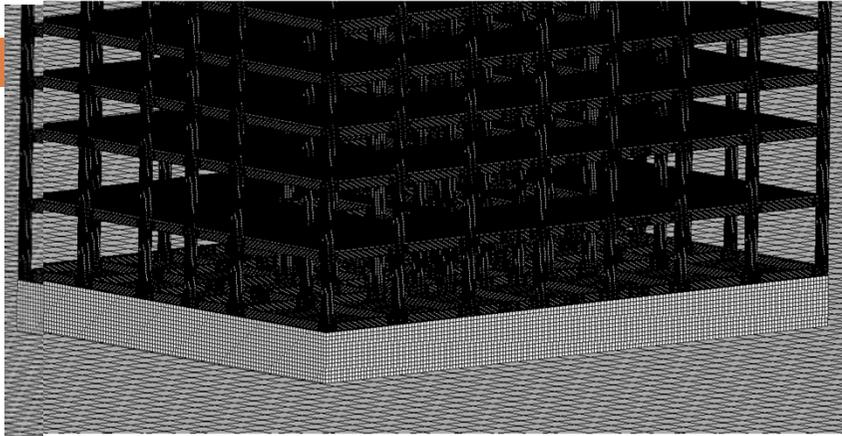
地盤と超高層ビルとの連成解析(1)



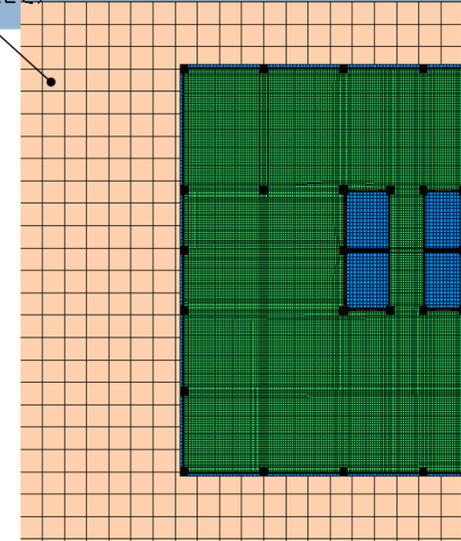
解析モデルの規模

項目	地盤A	地盤B
要素数	28,357,986	28,969,786
節点数※	37,852,931	38,491,277
自由度数	113,558,793	115,473,831

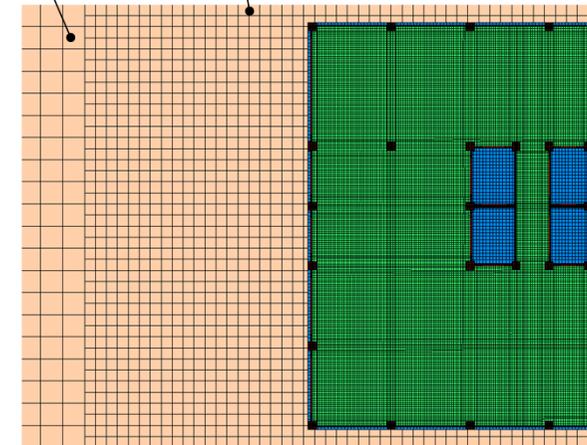
地盤と超高層ビルの連成解析(2)



2m × 2m × 2m
(1要素あたりの大きさ)

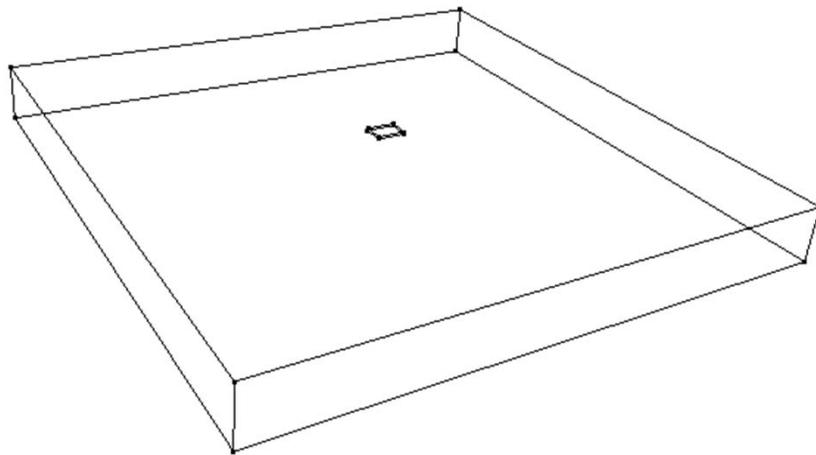


2m × 2m × 2m
(1要素あたりの大きさ)



大規模MPC付問題のテスト (マットスラブ+地盤モデルの静解析)

- 自由度数: 39,272,175, MPC数: 301,488
- 東大T2K, 16ノード256コア
- 自重解析の計算時間: 847 sec



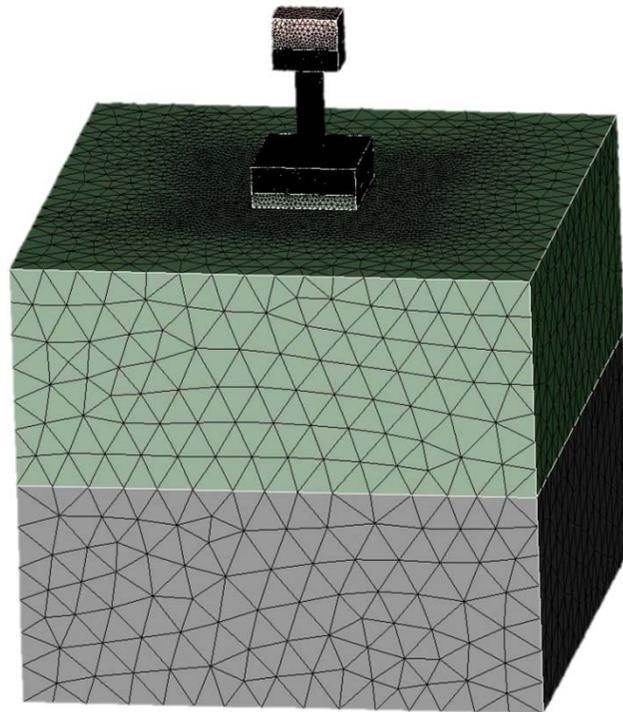
地盤は側面及び底面を法線方向に固定

マットスラブと地盤を固着接触

質量密度: 1000kg/m^3

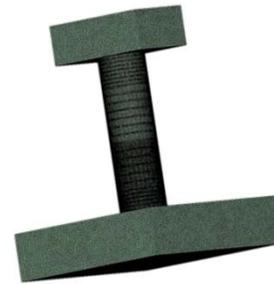
重力加速度: 9.8m/s^2

地盤-構造連成を考慮したRC橋脚の 地震応答シミュレーション(メッシュ生成)

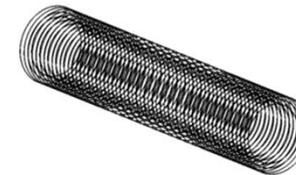


Nodes 5,414,081
Elements 32,743,228

コンクリート部



フープ筋



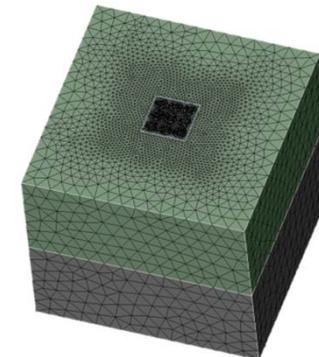
主鉄筋



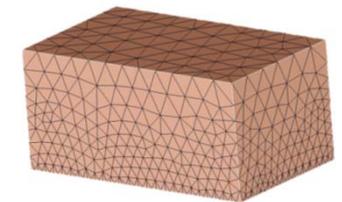
橋脚延長部



地盤・基礎

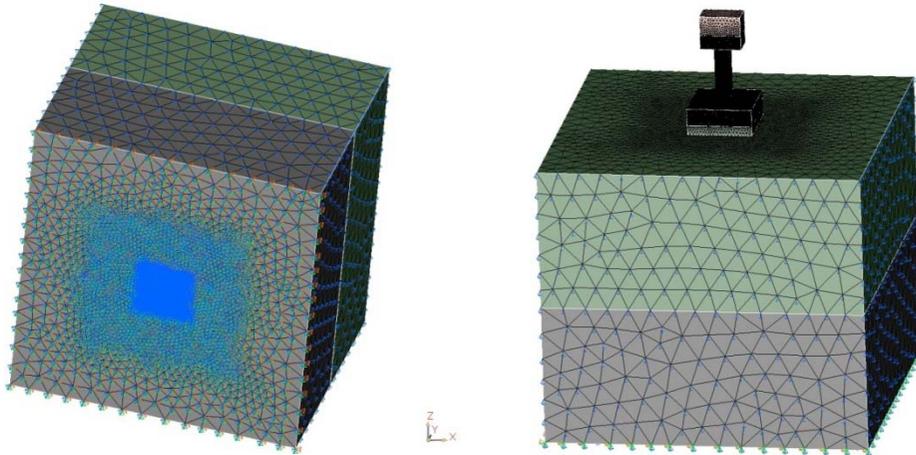


上部載荷



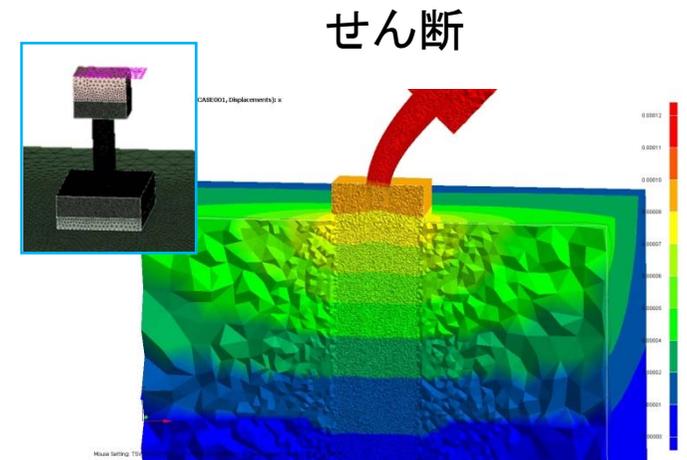
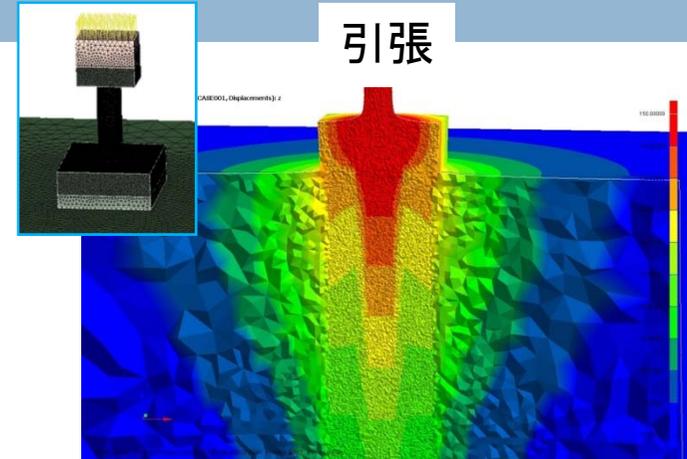
担当:岡澤先生(広島大学)

線形解析



地盤底面：全方向変位=0
 地盤側面：鉛直方向変位=0

モデル名	ヤング率(MPa)	ポアソン比	質量密度(t/mm ³)
コンクリート	25.2×10^3	0.2	2.3×10^{-9}
フープ筋	197.1×10^3	0.3	7.93×10^{-9}
主鉄筋, 基礎	193.0×10^3	0.3	7.93×10^{-9}
地盤上部	100	0.47	1.8×10^{-9}
地盤下部	400	0.45	1.8×10^{-9}



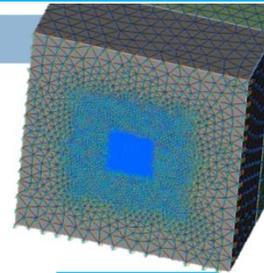
地震応答解析

地盤境界条件

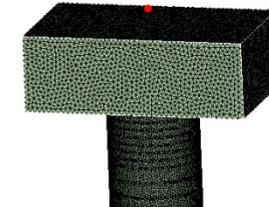
底面: 変位入力(自重解析時のみ固定)

側面: 鉛直方向変位=0

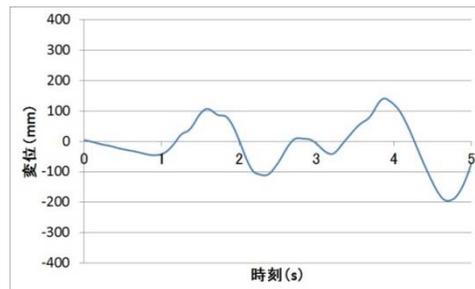
変位入力位置



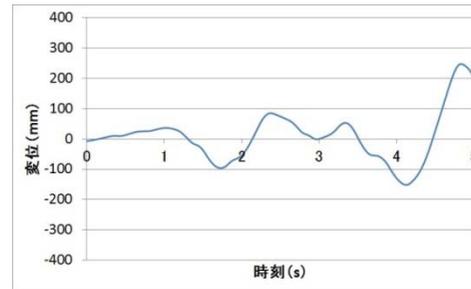
応答変位抽出位置



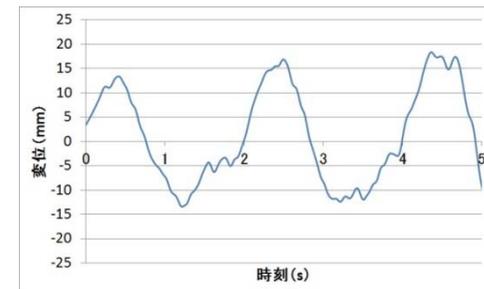
x方向



y方向

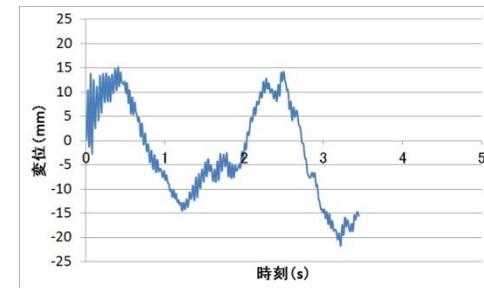
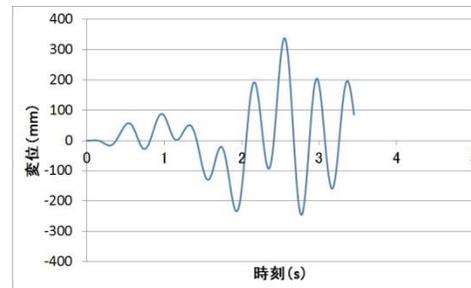
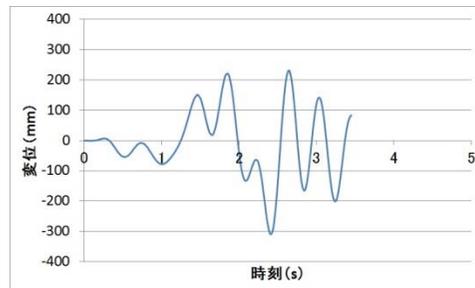


z方向



入力

応答



今後の目標

- 上部構造を連結させた複数橋脚(5本程度)に基礎+地盤を加えたモデル
- モンテカルロシミュレーション

まとめ



- AdvSolid for K(仮称)の概要と開発状況
- 京におけるAdvSolid for Kのパフォーマンスと今後の見通し
- AdvSolid for Kの機能紹介
- 地盤－超高層ビルの解析(モデル作成)
- 地盤－RC橋脚の解析(モデル作成)