

地震・地盤・建屋解析モデリングの計画と現状

堀宗朗

東京大学地震研究所

〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

hori@eri.u-tokyo.ac.jp

地震・地盤・建屋解析モデリングは、想定された断層から原子力発電所のサイトまでの地震動伝播解析と、地盤と建屋を同時に扱う地盤・構造物連成解析に二分される。地震動伝播解析は、地質構造を持つ地殻とサイト周辺の表層地盤の中を伝播する地震波動を線形計算する。線形計算ではあるが、地質構造と地盤構造という異なるスケールの領域で波動伝播を計算するマルチスケール解析となっている。地盤・構造物連成解析は、強い地震動を受ける構造物の応答を非線形計算する。地震動の大きさによっては構造物が局所的に損傷を受けることもあり、材料・部材レベルでの破壊過程の解析も地盤・構造物連成解析に含まれている。

担当研究グループでは、地震動伝播解析と地盤・構造物連成解析に関して数値計算手法を開発してきた。この数値計算手法を改良させ、地震・地盤・建屋解析モデリングを構築することが目的である。具体的な研究実施項目は、地殻・表層地盤、建屋・部材をマルチスケールに扱える解析モデリングの構築と、それを使った数値シミュレーションである。年次計画の概要は以下のようになっている。

- 2007年 既存構成式・モデルおよび現在有している技術やソフトウェアの調査を実施。
- 2008年 既存技術の融合による地震解析のためのマルチスケール構造モデリングに着手。
- 2009年 マルチスケール構造モデリングの試作。ADVENTURE と連携した実装に着手。
- 2010年 高性能・大規模数値計算手法の開発。実データとの比較によるモデリングの検証。
- 2011年 マルチスケール構造モデリングをADVENTURE を耐力シミュレーションシステムと連携させ、評価。

現在、地震動伝播解析では、数値計算手法の改良と解析モデルの構築手法の開発を進めている。地震波動の高周波数成分を計算するためには、時間と空間の両方での密な離散化が必要であり、この大規模計算を効率的に行う数値計算手法の改良が必要である。また、大規模数値計算を前提しているとはいえ、断層からサイトまでの広大な領域全体で計算できる地震動の高周波数成分には限界がある。計算地震学で標準的に用いられる周波数成分の外挿を検討する必要がある。なお、線形計算であるため、数値計算手法そのものの妥当性は、解析解がある問題との比較によって検証できる。大胆な改良が可能である。地震・地盤・建屋解析モデリングでは、単純な成層構造を仮定しない。このため、地殻・表層地盤の解析モデルの構築には工夫が必要である。モデル構築に必要なデータが限られており、また、高周波数成分を計算するための分解能の高いモデル化も必要である。この二点を考慮した工夫を検討している。

地盤・構造物連成解析では、地震動による損傷・破壊の過程を解析する数値計算手法の改良を行っている。鉄筋コンクリート造の建屋では、地震による損傷・破壊は材料・部材レベルでの亀裂の発生・進展に起因する。このような亀裂問題の計算は計算力学の分野でも難問である。担当研究グループでは、亀裂問題を効率的に扱える新しい離散化手法を考案し、離散化手法のプロトタイプをADVENTURE に組み込んでいる。大規模数値計算ができるよう、離散化手法のプロトタイプの改良を行っている。なお、この離散化手法は特性関数を基底関数として使うものである。連続・微分可能な関数が不連続な既定関数で離散化されることになるが、不連続性・特異性のある亀裂問題には、基底関数の不連続性を使うことで効率的な数値計算が可能となる。

地震・地盤・建屋解析モデリングの計画と現状

堀宗朗(東京大学)

地震・地盤・建屋解析モデリング

◆地震動伝播解析

- 想定された断層から原子力発電所のサイトまで
- 線形であるが大規模数値計算が必要
- マルチスケール解析(地質構造を持つ地殻での波動伝播とサイト周辺の表層地盤での増幅過程)

◆地盤 構造物連成解析

- 地盤と建屋を同時に扱う
- 非線形計算
- 材料・部材レベルでの破壊過程の解析(鉄筋コンクリート造構造物の亀裂発生と進展)

地震波動伝播解析の課題

◆ 計算環境

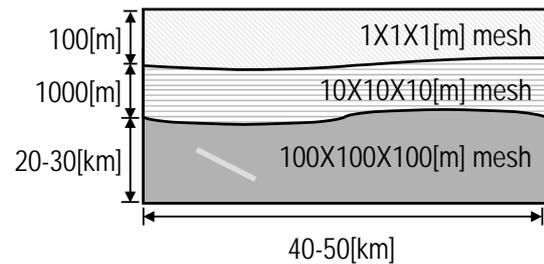
- frequency 5[Hz]
- non-linear analysis for soil

◆ 地下構造の不確定性

- ground 50[m] resolution
- crust 2-3[km] resolution

	Memory[GB]	computation
FEM	10,000	n
FDM	10,000	n
BEM	250	n ²

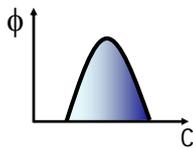
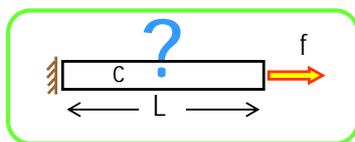
n:DOF



→ 解析モデルの構築難

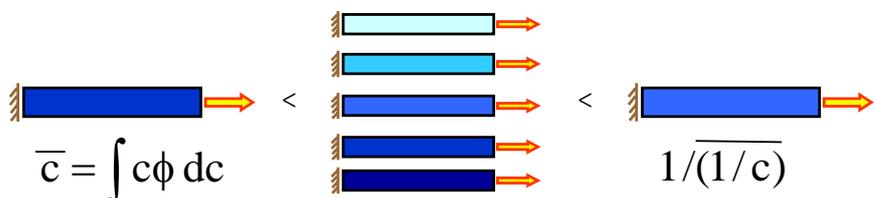
確率モデル

STOCHASTIC MODEL



PDF of Young modulus

BOUNDING MEDIA



bound *expected* behavior

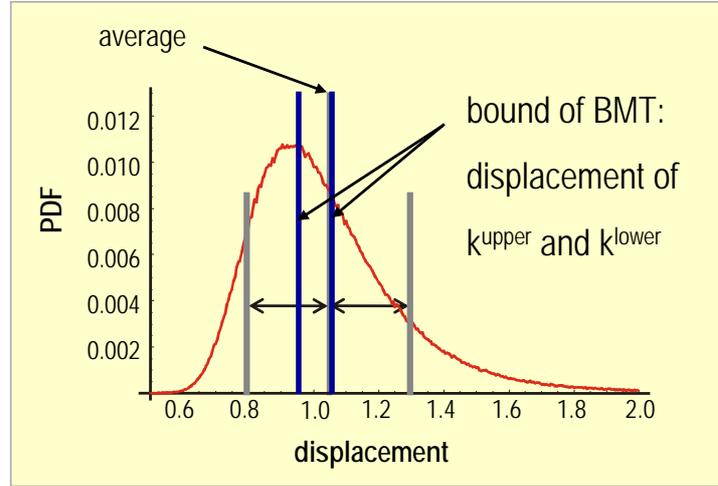
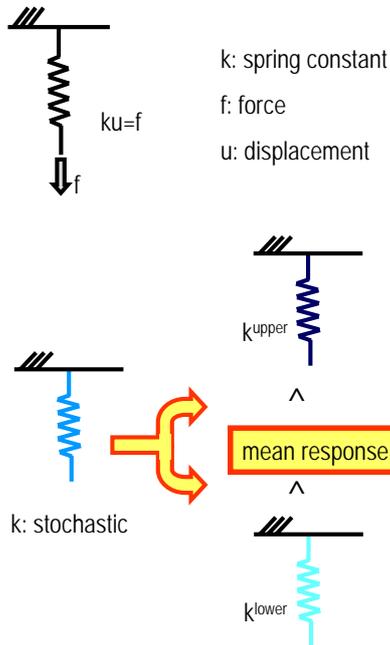
BOUNDING MEDIUM THOERY

$$\text{strain energy: } \Pi(u, c) = \int_0^L \frac{1}{2} c (u')^2 dx - u(L)f \Rightarrow E(c) \geq -\Pi(u, c)$$

$$\text{bound: } \bar{E} = \int E(c) \phi(c) dc \geq -\int \Pi(u, c) \phi(c) dc = -\Pi(u, \bar{c})$$

バウンディングメディア理論

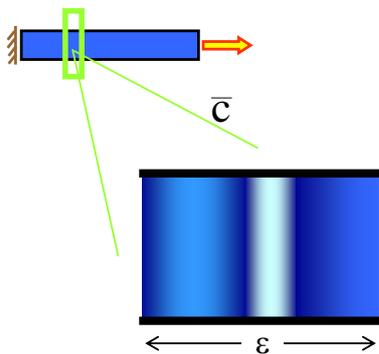
Spring Problem



k^{upper} & k^{lower} :
 computed by using Hashin-Shtrikman variational principle
 (which leads to kinematic/geometric mean of k)

マルチスケール解析

HIGH HETEROGENEITY



multi-scale: x & y

overall modulus

REGULAR PERTURBATION

$$\begin{aligned}
 (cu')' &= ((c_o + \delta c)(u_o + \delta u))' \\
 &\approx c_o u_o'' + (c_o \delta u'' + (\delta c u_o'))'
 \end{aligned}$$

good for $\delta c \ll c_o$

SINGULAR PERTURBATION

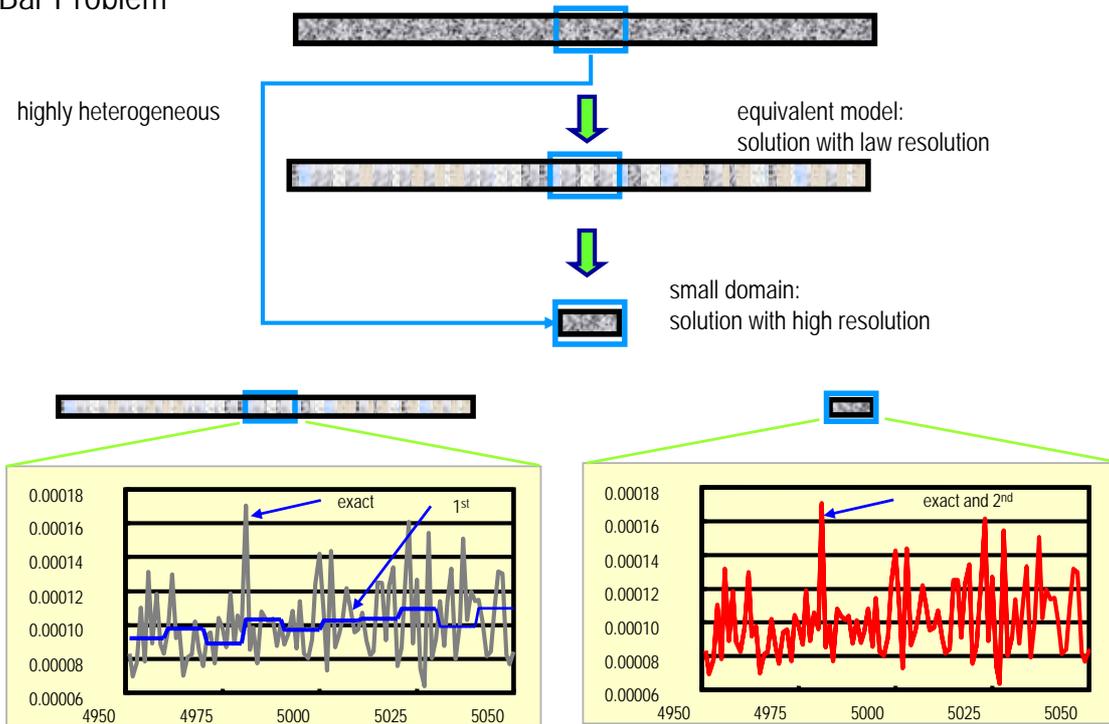
fast variable $y = \frac{1}{\epsilon} x$

$c \rightarrow c(y), \quad u \rightarrow u_o(x) + \epsilon u_1(x, y)$

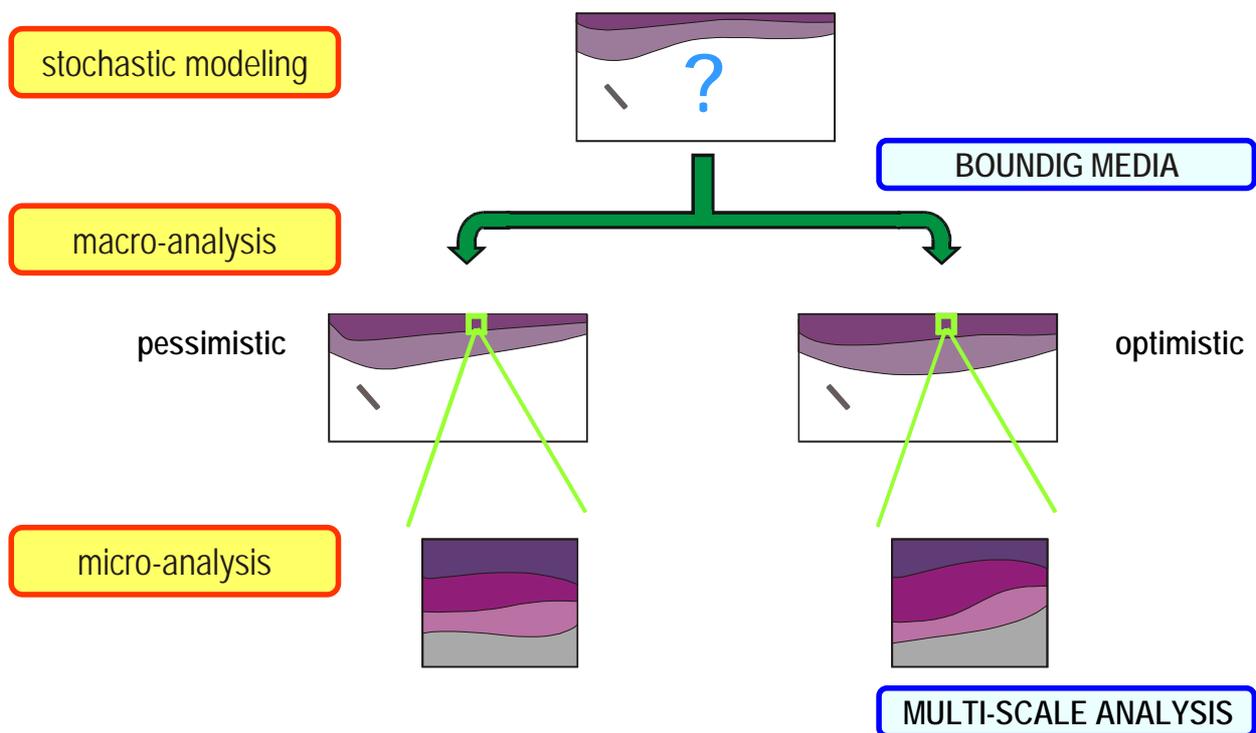
$$Cu_o'' = 0, \quad u_1(x, y) = \chi(y)u_o'(x)$$

マルチスケール解析の例

Bar Problem

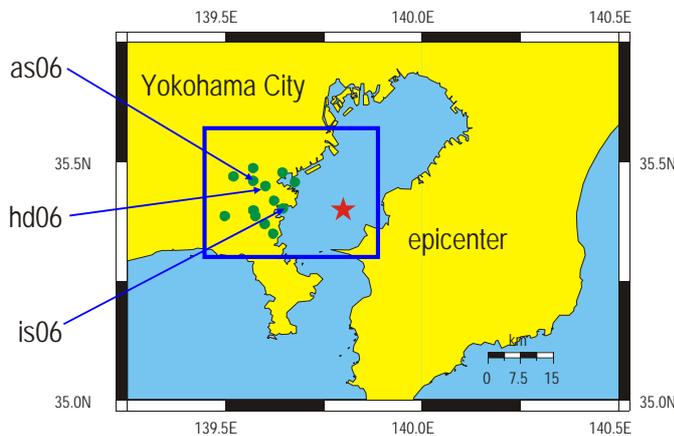


マクロ-ミクロ解析手法



横浜市地震シミュレーション

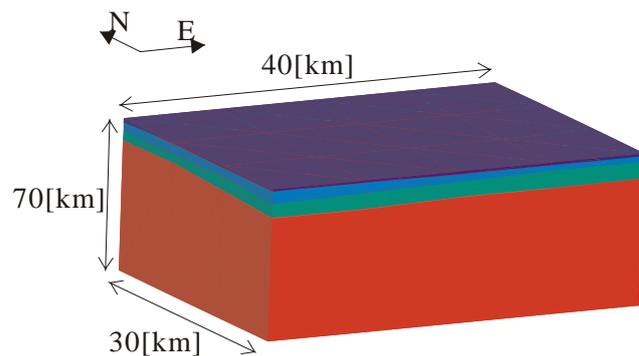
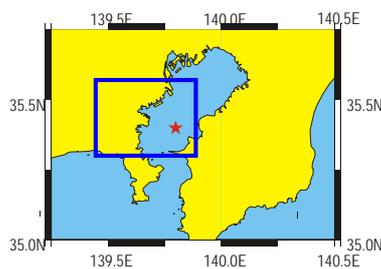
- ◆ Comparison of synthesized strong ground motion with data observed at 13 seismograph sites



August 11, 1999

Lat.	Long.	Depth	Strike	Dip	Rake	Mag.
35.4N	139.8E	53km	62	85	73	4.0Mw

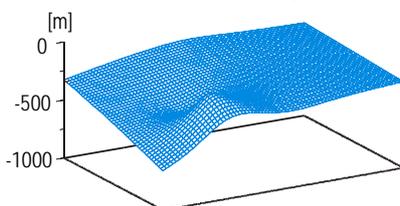
マクロ解析: 解析モデル



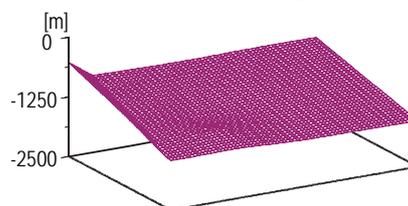
	mate.1	mate.2	mate.3	mate.4
p wave veloc.[m/sec]	1040	1730	2950	5200
s wave veloc.[m/sec]	600	1000	1700	3000
density[kg/m ³]	1800	2000	2300	2500



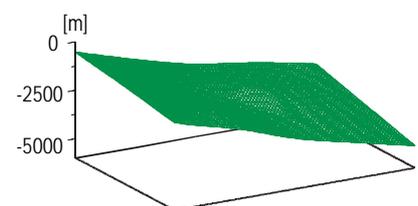
between 1st and 2nd layers



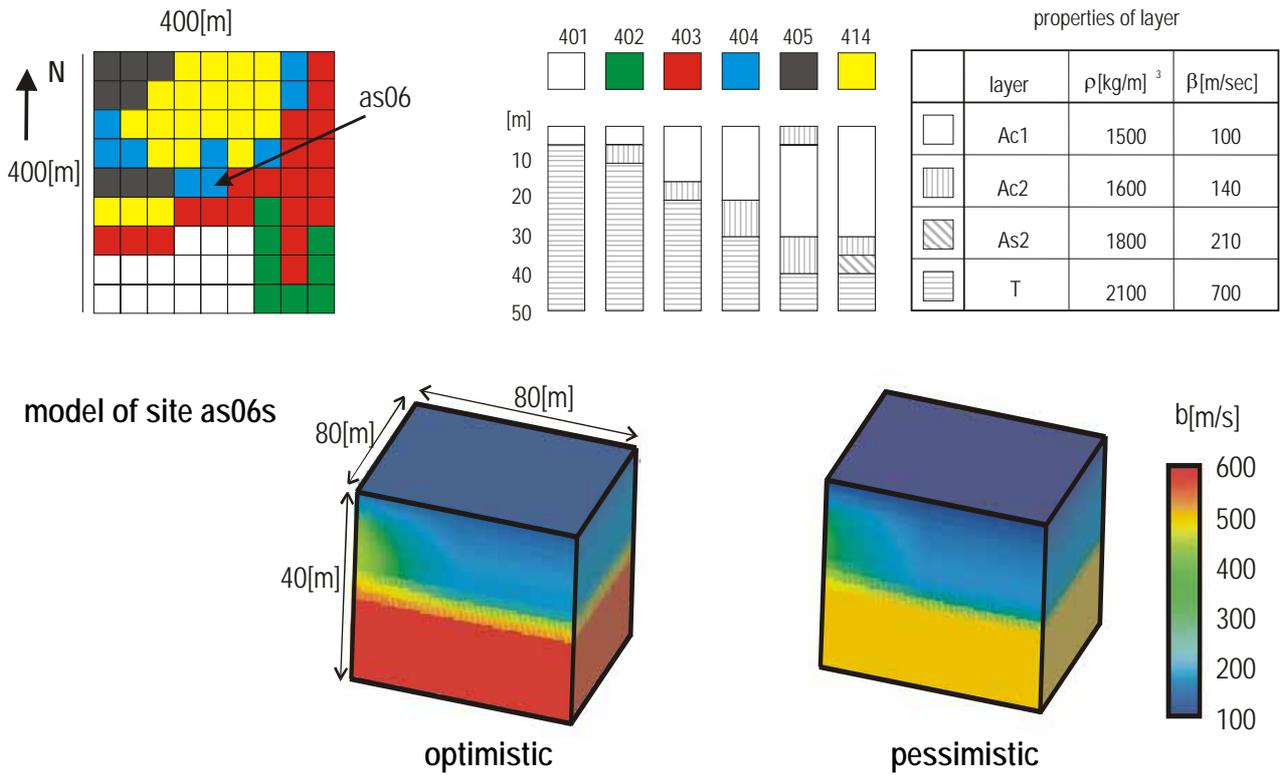
between 2nd and 3rd layers



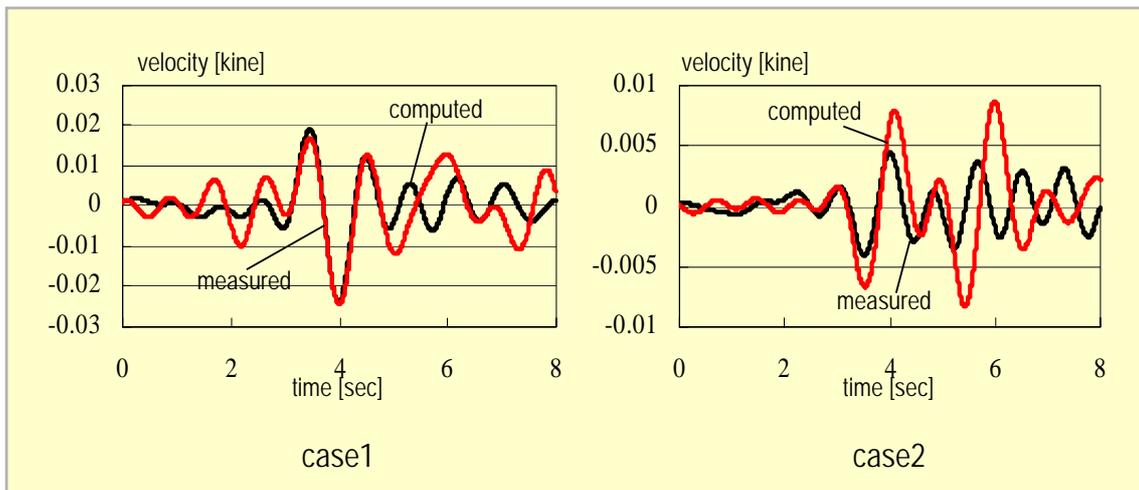
between 3rd and 4th layers



マイクロ解析: 解析モデル



解析結果

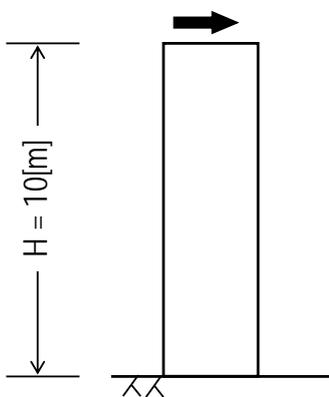


Two cases of earthquakes are simulated.

地盤－構造物連成解析の課題

- ◆ 構造物解析: 耐震設計に準拠したモデリング
 - 非線形多自由度系
 - 有限要素法系 ファイバー要素, シェル要素
- ◆ 構造物解析: 構造物の崩壊過程は対象外
- ◆ 地盤－構造物連成問題
 - 地盤と構造物の境界の取扱い
 - 土の非線形性と周波数依存性
 - 土－水の連成

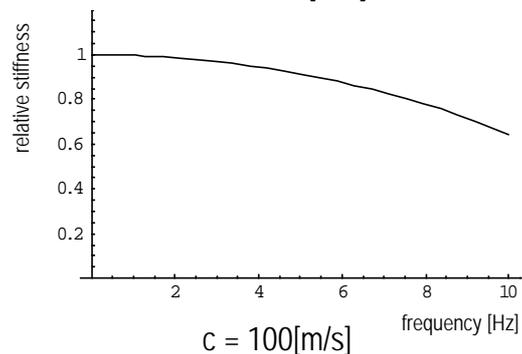
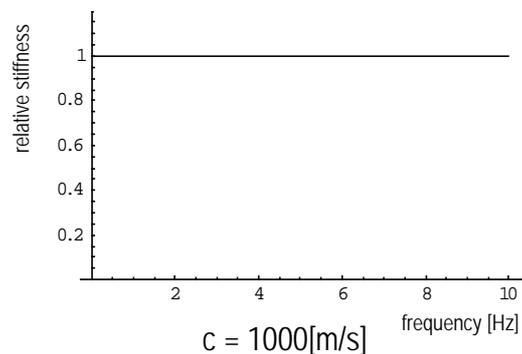
塑性化による部材剛性の変化



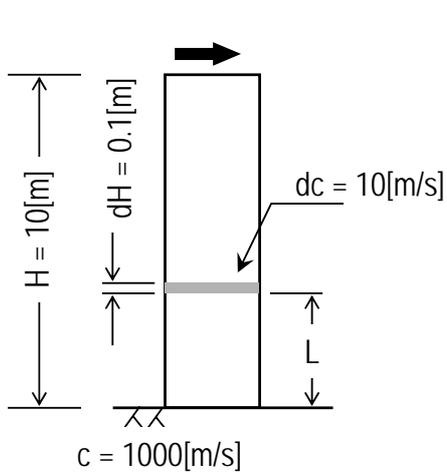
部材のせん断剛性の周波数依存性

周波数依存性は小

見かけの剛性: 上端のせん断力と変位の比

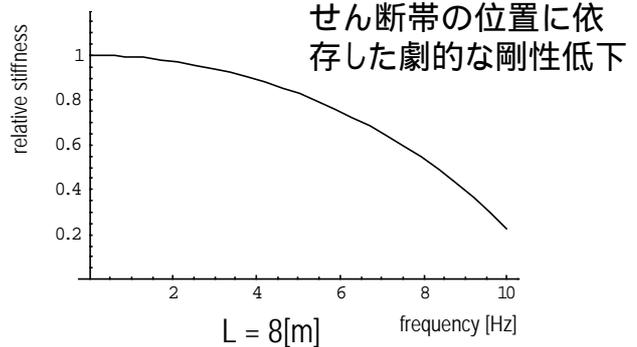
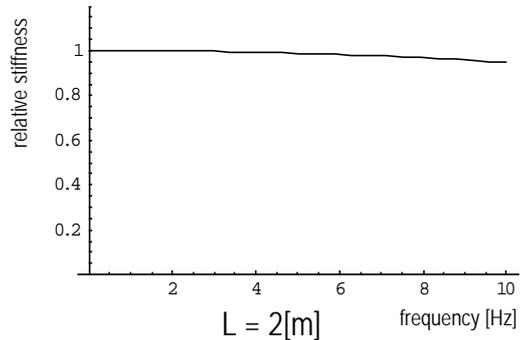


塑性化による部材剛性の変化

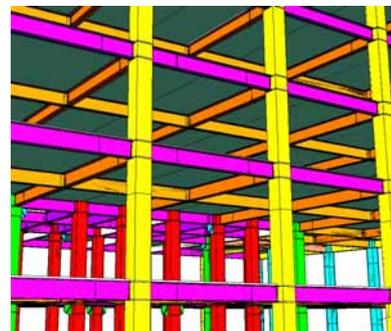
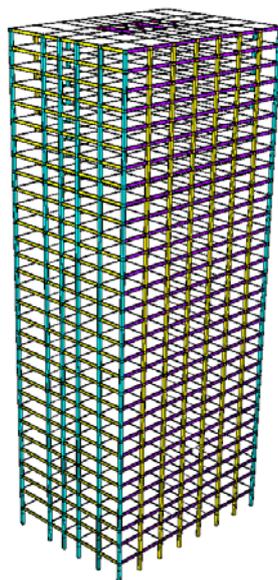
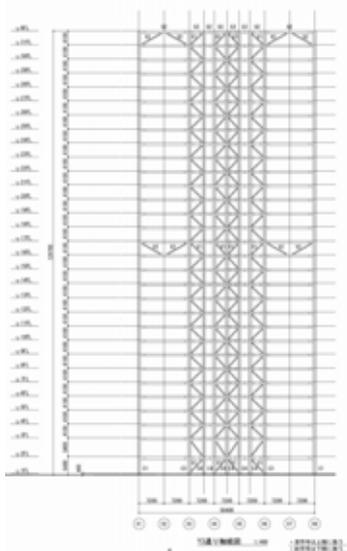


局所的塑性化により薄いせん断帯が発生

塑性化の影響は大



超高層ビル



3次元CADデータ

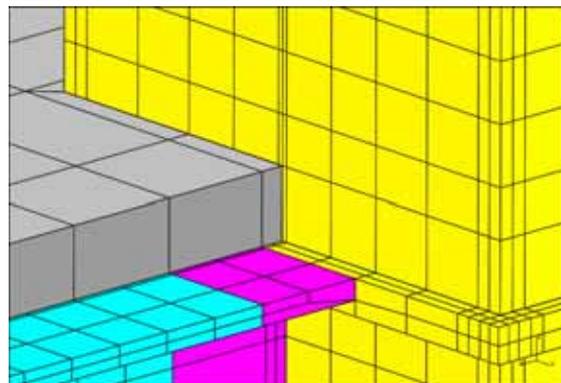
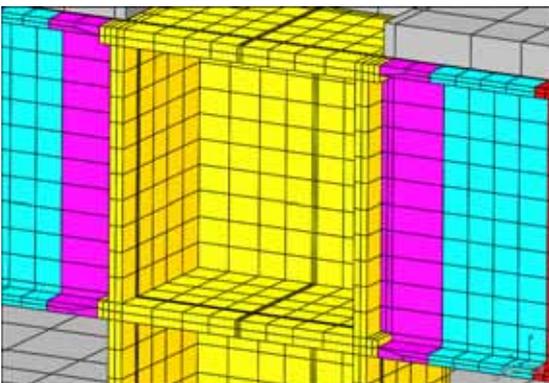
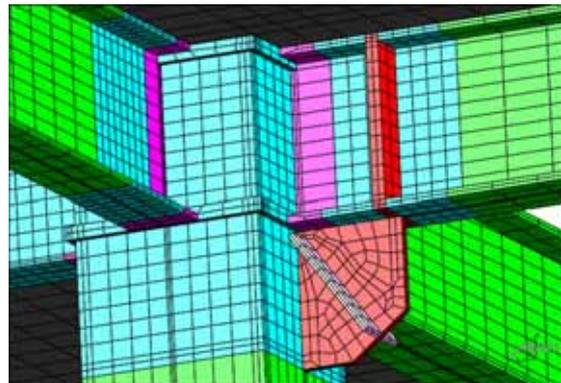
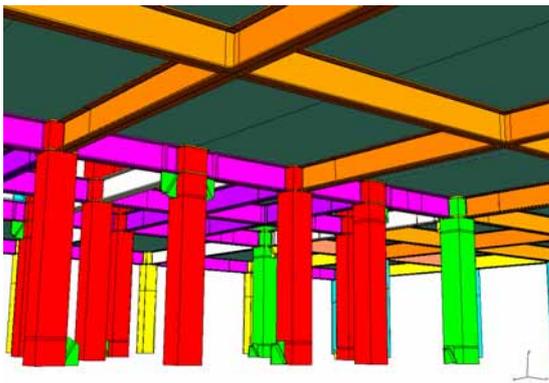
ソリッド要素を用いたモデル



モデル

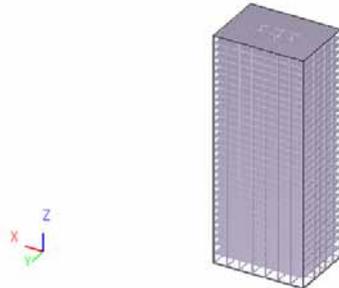
アライドエンジニアリング協力

モデルの詳細

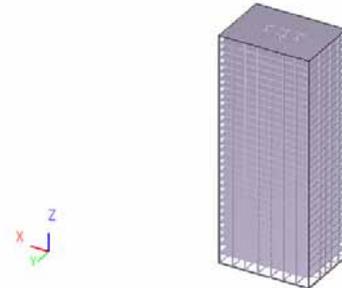


計算結果

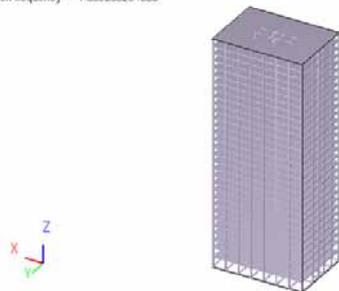
Analysis: EigenValue, Results: ResultOfanEigenState, Solver: ADVC Solver 3.3.2
 Model size: 24783633 nodes, 15635158 elements
 Variable: Displacement[norm], Eigen mode: 1/6, Motion: 1/27, phase: 0.00 deg
 Eigen frequency = 3.7042095e-001



Analysis: EigenValue, Results: ResultOfanEigenState, Solver: ADVC Solver 3.3.2
 Model size: 24783633 nodes, 15635158 elements
 Variable: Displacement[norm], Eigen mode: 2/6, Motion: 1/23, phase: 0.00 deg
 Eigen frequency = 4.2352504e-001



Analysis: EigenValue, Results: ResultOfanEigenState, Solver: ADVC Solver 3.3.2
 Model size: 24783633 nodes, 15635158 elements
 Variable: Displacement[norm], Eigen mode: 6/6, Motion: 1/7, phase: 0.00 deg
 Eigen frequency = 1.3392382e+000



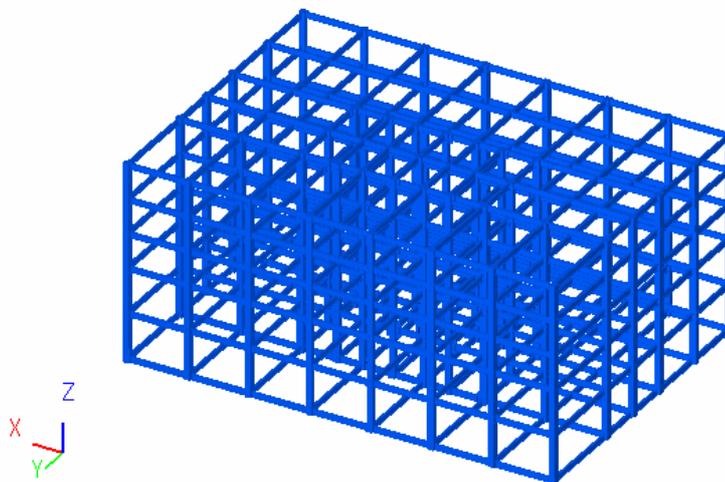
固有振動モードの比較

- ◆ ゆっくりした前後の揺れ
- ◆ ねじれを伴う左右の揺れ
- ◆ 早いクネクネした揺れ

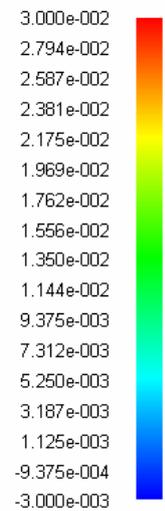
アライドエンジニアリング協力

計算結果

Analysis: StaticNonLinear, Results: ResultOfaStep, Solver: ADVC Solver 2.0
 Model size: 4471144 nodes, 2849802 elements
 Variable: NodalEquivalentPlasticStrain[scalar], Time step: 1/512
 Time = 1.0000000e+000



[-], Rainbow[16]



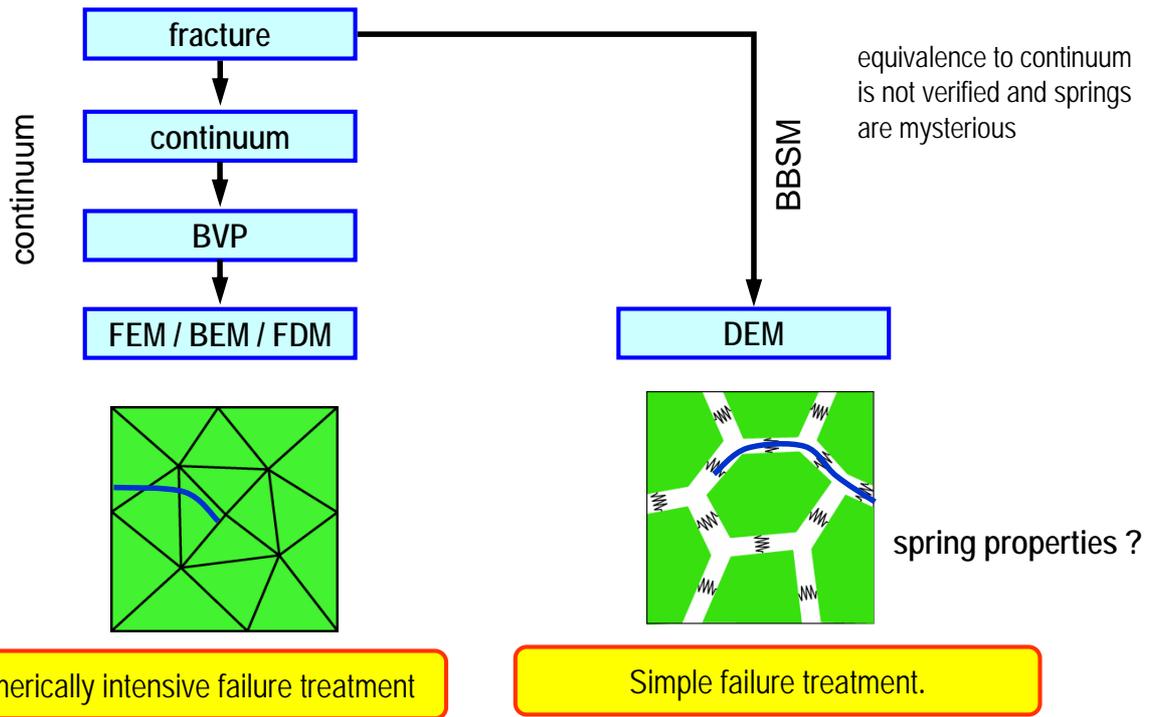
損傷の度合い
 青: 無
 緑: 有
 赤: 損傷大

Max: 0.000e+000
 Min: 0.000e+000

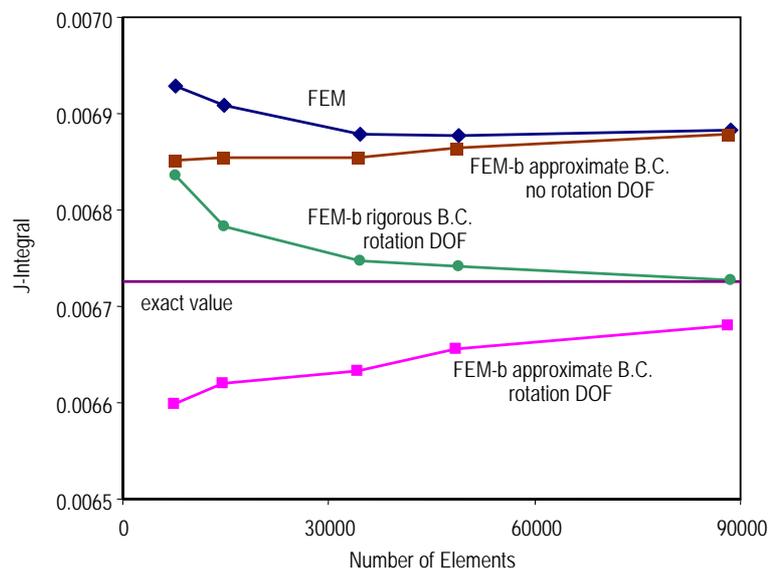
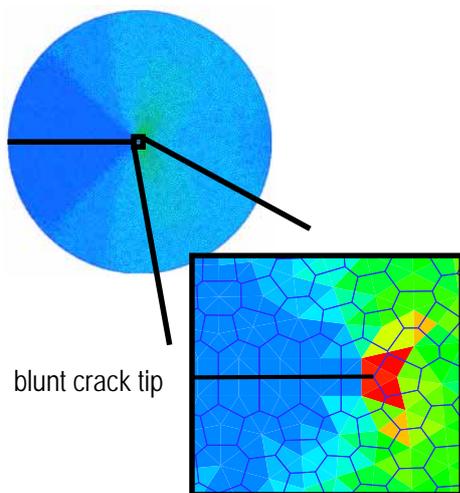


アライドエンジニアリング協力

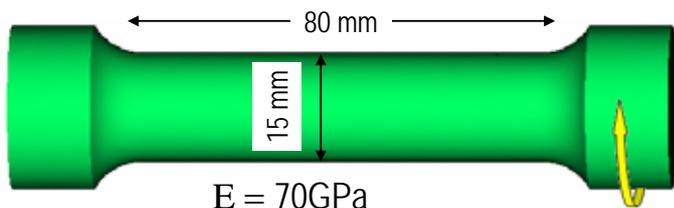
RBSM



J-INTEGRALの比較

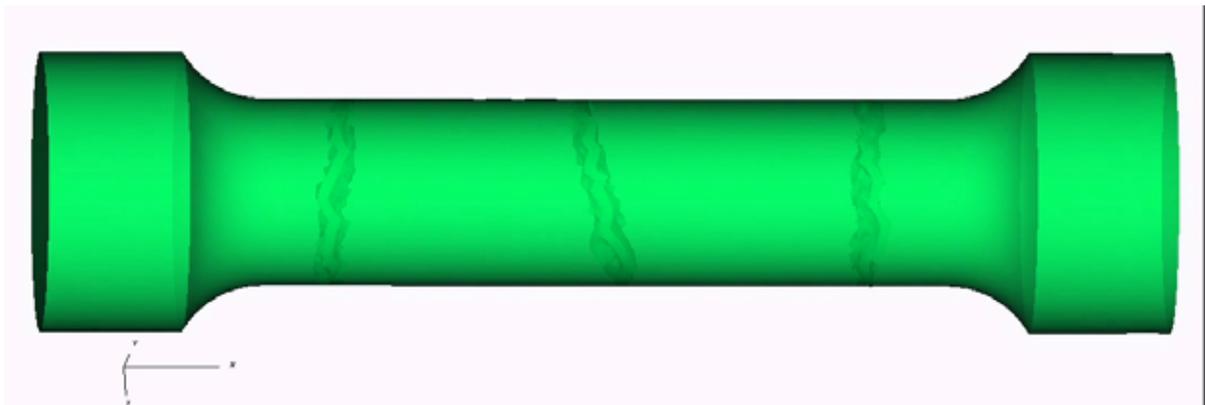
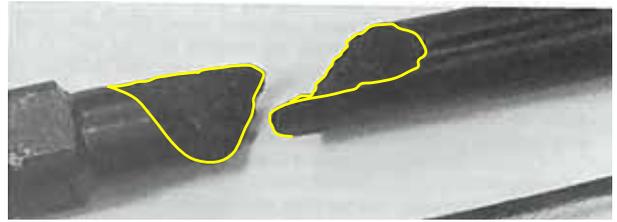


ねじれ破壊

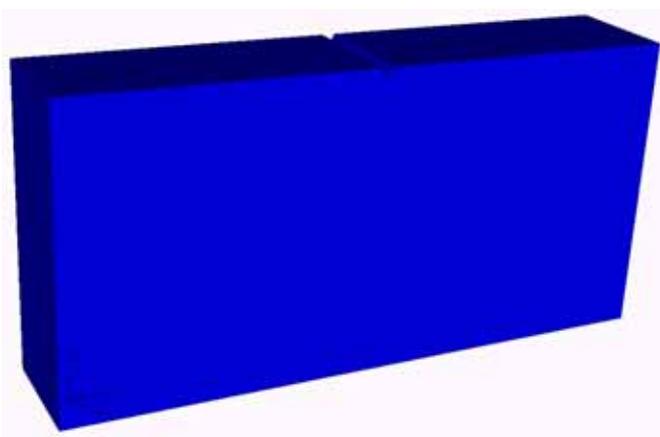


$E = 70\text{GPa}$

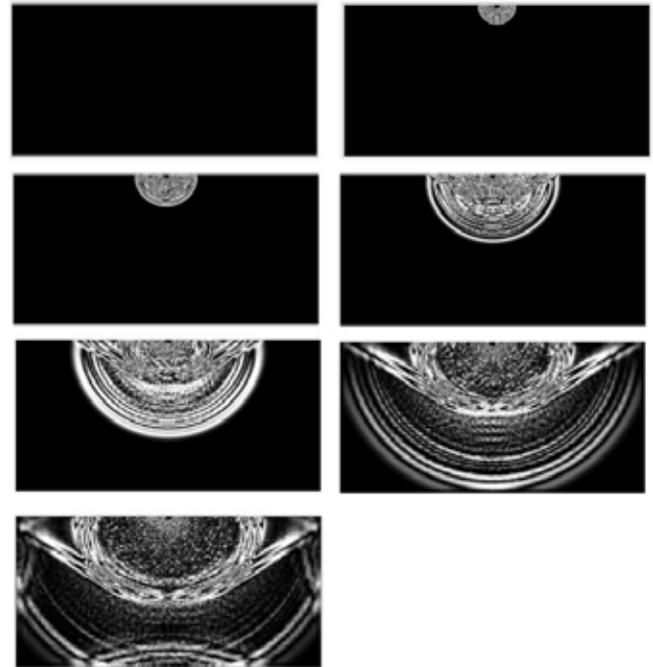
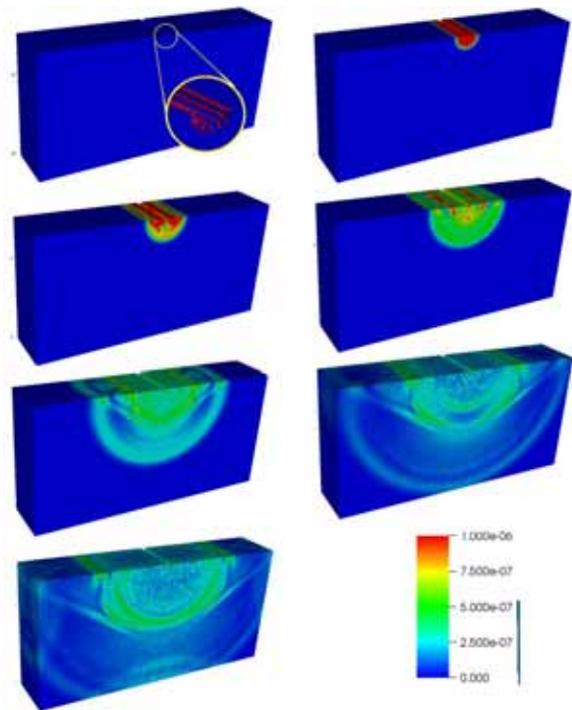
$\nu = 0.3$



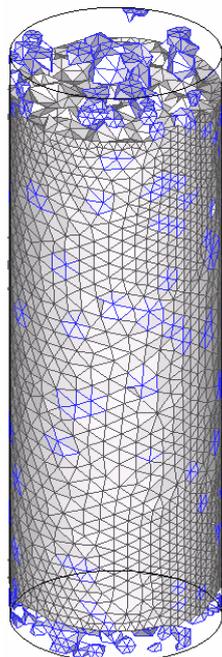
光弾性実験との比較



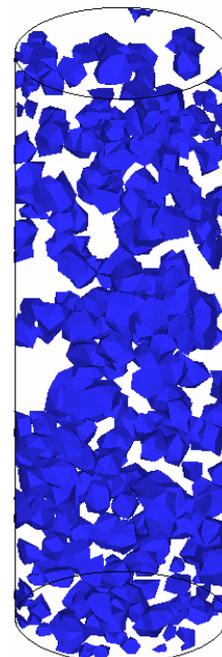
光弾性実験との比較



コンクリート供試体

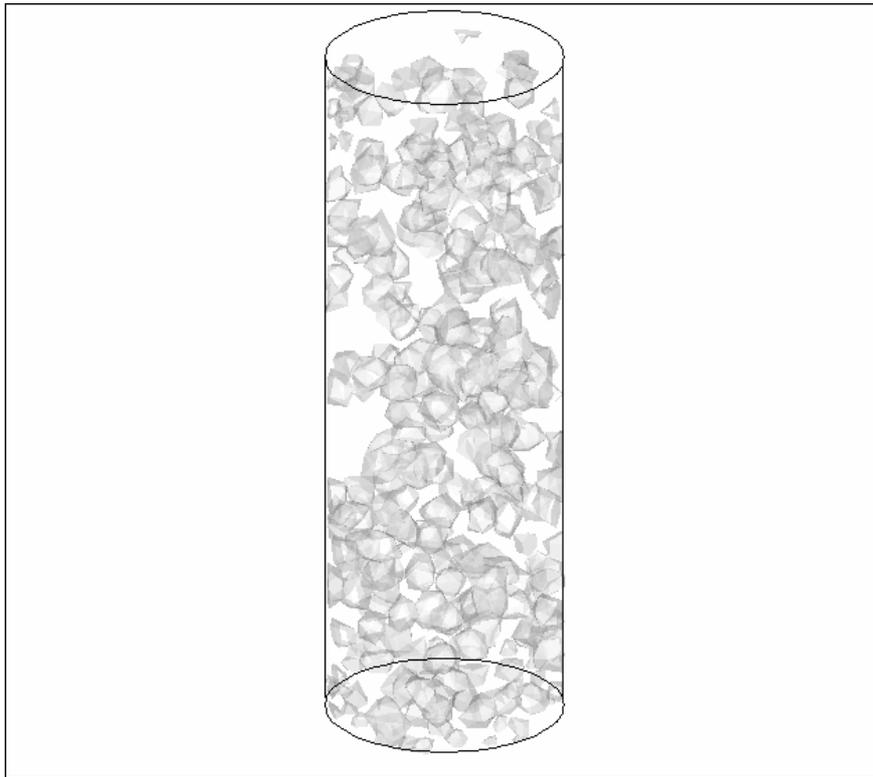


円柱供試体



骨材1つ1つをモデル化

破壊過程



円柱供試体
一様引張

白 モルタル
灰 骨材
赤 亀裂

ADVENTURE+PDS

おわりに：研究計画

- 2007年 既存構成式・モデルおよび現在有している技術やソフトウェアの調査を実施。
- 2008年 既存技術の融合による地震解析のためのマルチスケール構造モデリングに着手。
- 2009年 マルチスケール構造モデリングの試作。ADVENTUREと連携した実装に着手。
- 2010年 高性能・大規模数値計算手法の開発。実データとの比較によるモデリングの検証。
- 2011年 マルチスケール構造モデリングを耐力シミュレーションシステムと連携させ評価。