

E-Defenseと連動させた 数値震動台の開発計画

堀宗朗¹・野口裕久²・井根達比古³

¹東京大学教授 地震研究所 (〒113-0032 文京区弥生1-1-1)
E-mail: hori@eri.u-tokyo.ac.jp

²慶応義塾大学教授 システムデザイン工学科 (〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)
E-mail: noguchi@sd.keio.ac.jp

³独立行政法人防災科学研究所 兵庫耐震工学研究センター (〒673-0515 三木市志染町三津田)
E-mail: ine@bosai.go.jp

本報告は、E-Defenseとともに開発が計画された数値震動台に関するものである。最初に数値震動台開発計画の目標を説明する。目標は、構造物の動的破壊過程を詳細にシミュレートする高度な汎用有限要素法の開発であり、次世代の耐震設計の高度化に寄与することが考えられている。ついで、この目標を実現するための二つの技術的課題を説明する。第一の課題は、さまざまな構造物・材料に対して大規模数値計算を実現するための並列計算環境の整備である。我が国が開発した汎用有限要素法ADVENTUREが数値震動台の基となる。第二の課題は、構造物の破壊過程をシミュレートする解析手法の開発である。有限要素法の利用を前提とした破壊過程の合理的なモデル化と、破壊過程のシミュレーションに必要な計算効率性の飛躍的向上を目指す。最後に、1)超高層ビルのシミュレーション、2)RC構成則の取り込み、3)都市の統合地震シミュレーション、の三点に関して数値震動台の開発の進捗状況を紹介する。

Key Words : E-Defense, E-Simulator, large-scale numerical computation, fracture of structure,, ADVENTURE project

1. はじめに

E-Defense¹⁾は、平成9年9月3日航空・電子等技術審議会の「地震防災研究基盤の効果的な整備のあり方について」答申に基づいて開発された実大3次元震動台である(図-1参照)。この建議には、E-Defenseと合わせて「数値震動台」²⁾の開発も謳われている。数値震動台とは、世界最大の震動台となるE-Defenseをもつてしても揺らすことができない巨大な構造物に対し、高度な数値解析手法と大型計算機を使って所定の地震動に対する応答を計算する計算機上の震動台である。個々の構造物はもとより、都市全体の実存構造物の地震応答を計算し、現状より高いレベルで都市の地震被害を推定することが考えられている。

平成18年度より、E-Defenseの供用開始に合わせて、新たな数値震動台開発計画が着手された。これは防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センターが主導する計画で

あり、E-Defenseの実験結果と直結させた数値震動台の開発を目標としている。実大3次元実験との直結が数値震動台の大きな目標であり、数値震動台は世界最高性能のE-Defenseに見合う高度な性能を具備する必要がある。

一方、我が国の計算科学を発展させるために、大型計算機の開発は必須の項目となっている。開発当初に世界最高性能を誇った地球シミュレータはその具体例である。また、次世代機であるペタマシンの開発も進められている。数値震動台はペタマシンを利用することを前提とし、現状を超えた大規模数値計算を実現することが計画されている。

本報告は、上記を背景として検討されている数値震動台の開発計画を紹介する。数値震動台の目標と特徴を整理し、進捗状況を説明する。なお、数値震動台は地震工学の分野での応用が期待されているが、計算工学の最先端の技術を結集すると同時に新しい計算技術を開発しなければならない。このため、現時点では計算工学の研究

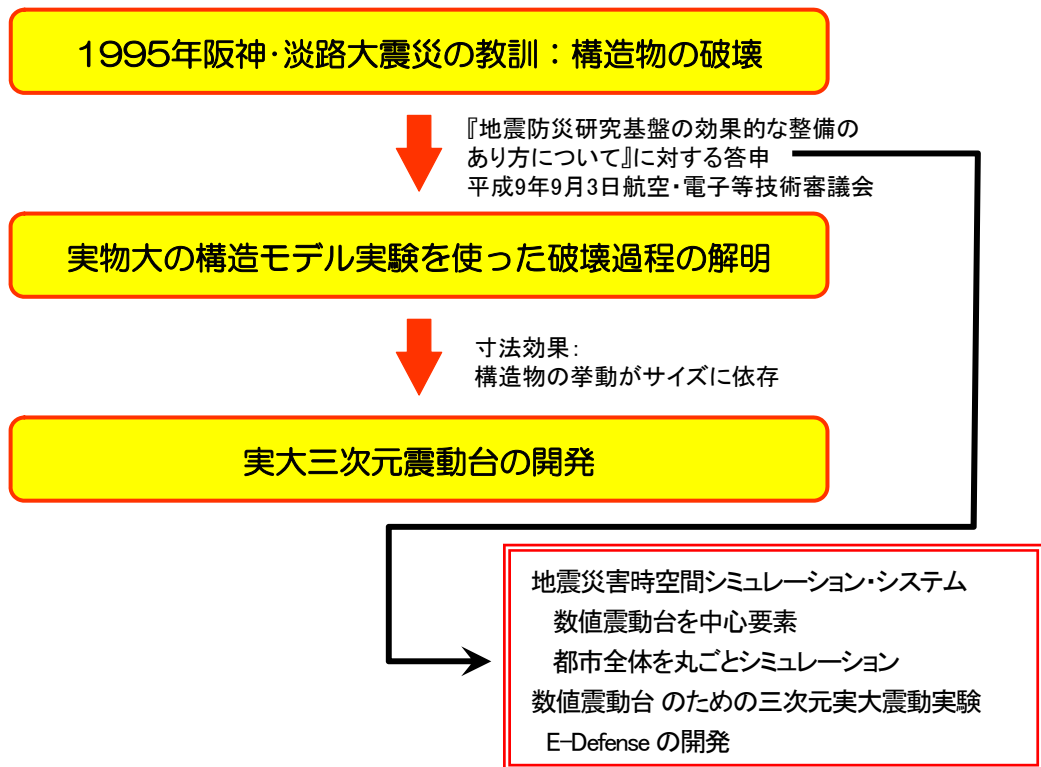


図-1 E-Defense の開発経緯と数値震動台の位置付け

者を中心に開発が進められている。プロトタイプの開発の目処が立った時点で、E-Defenseの実験結果を活かすべく、構造工学・耐震工学との専門家との共同研究が開始される予定である。

2. 数値震動台の目標

数値震動台の目標は、地震動による構造物の破壊過程を詳細にシミュレートする高度な汎用有限要素法の開発である。対象とする構造物は、超高層ビルや中低層のRC・SRC造ビル、木造家屋のような建築構造物や、橋脚・橋梁・ダムのような巨大構造物を含む全ての社会基盤構造である。コンクリート、鋼、地盤・岩盤といった建設材料の構成則が組み込まれ、また、動的状態の有限変形も対応できるものとなる。対象とする破壊過程は、座屈や亀裂・せん断帯の進展による構造物の崩壊を含み、構造物が壊れる様子を材料・部材レベルから正しく計算することが目標となる(図-2参照)。

対象構造物が多岐多様であるため、汎用性を確保することが重要な課題となっている。このため、別途開発された有限要素法の汎用コードを利用することが予定されている。この汎用コードを使うことで、非線形数値解析や時間積分に関して高度な数値解析手法が利用できる。これは、各種構造物に対し、長大規模数値計算による地

震応答解析を実現する唯一の方法である。なお、有限要素法の汎用コードは各種市販されているが、少なくとも動的状態の破壊過程をシミュレートするという点において、数値震動台はこれらを凌駕する機能を持つことが必須となっている。

繰り返してであるが、数値震動台の目標は高度な汎用有限要素法の開発である。対象が地震動による構造物の破壊過程のシミュレーションであるため、開発された数値震動台は地震工学の分野で利用されることが期待される。しかし、現在、耐震設計の実務で利用される数値解析手法に比べ、必要となる計算機が大型となり、時間・空間分解能は過度に細かい。したがって、数値震動台が直ちに実務に利用されることは難しい。長期的視野に立った数値震動台の利用が検討されている。

前述のように、数値震動台はペタマシンのような次世代の最高性能を持つ計算機の使用を前提としている。したがって、E-Defenseをもってしても揺らすことができない大型構造物の地震動による破壊過程をシミュレーションする他、都市内の全構造物に対し地震応答シミュレーションを行うことが考えられている(図-3参照)。地震シナリオを変えた場合の構造物被害を詳細にシミュレートし、地震被害想定的高度化に寄与する。また、通常は無視される非構造部材をもモデル化して応答解析に取り込んだシミュレーションや、構造物内にいる人が地震動による建物の揺れをどう感じるかシミュレートする研究も

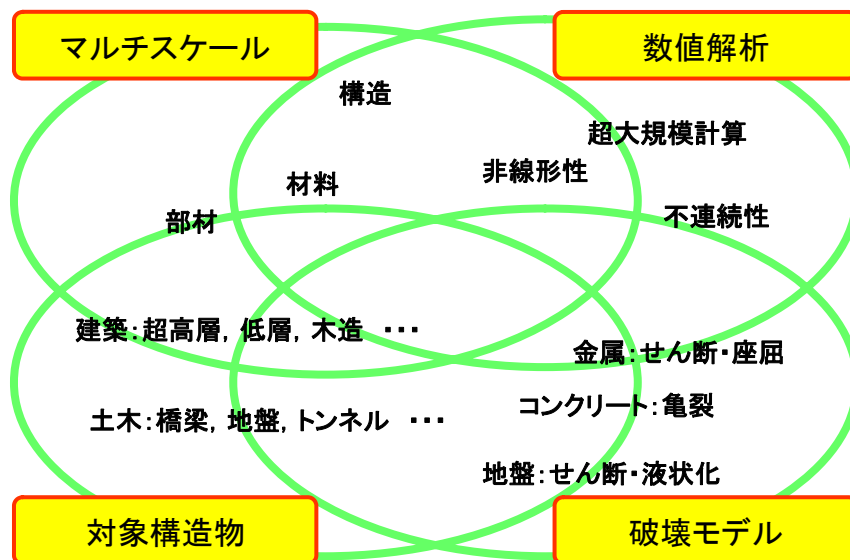


図-2 汎用有限要素法としての数値震動台の対象と構成要素

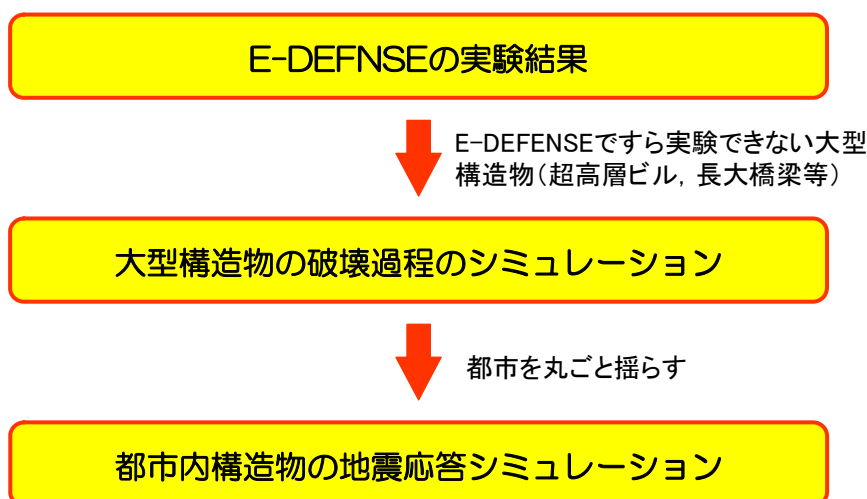


図-3 数値震動台の利用方法

検討されている。

3. 大規模数値計算

汎用有限要素法として開発される数値震動台の特徴の一つは大規模数値計算である。これは計算科学の高度化を意識したものである。汎用と称しつつも、数値震動台はソリッド要素のみを利用する。動的状態での破壊過程を材料・部材レベルでシミュレートするためにはソリッド要素の利用は必須となる。以下、開発されるソリッド

要素と汎用有限要素法コードを説明する。

(1) ソリッド要素

数値震動台はソリッド要素のみを開発する。これは、梁要素やシェル要素に代わって、ソリッド要素で相応に細かく構造物を要素分割することが、構造物数値解析の姿であることが考えられているためである。梁・板やシェルのような構造部材の解析に、敢えてソリッド要素を利用しなくとも、相当の精度で構造計算ができることは周知の事実である。しかし、動的状態での破壊現象を材料・部材レベルでシミュレートするためには、連続体と

しての取り扱いが必要であり、このためには、ソリッド要素を使用せざるを得ないのである。

CADの汎用化やIFCの実用化等、計算科学が構造計算に与える影響は大きい。計算機そのものの進歩の速さをみると、少なくともある程度の大きさの構造物には、大規模数値計算が普遍的に設計に用いられることが予想されている。この傾向を考えると、構造応答の数値計算の手法自体に高度化を図ることは必要であり、計算手法の研究は必要とされている。ソリッド要素を使用する点の是非はさておき、数値震動台の開発は、計算手法の高度化を目指す研究として位置付けることもできる。

(2) ADVENTUREとADVC (ADVENTURE Cluster)

自動車・船舶・航空産業を始め、電子機器の製造においても、構造物応答の数値計算を設計に利用することは普遍的に行われている。このため、汎用の有限要素法コードは広く産業界に利用されている。高度なフリーウェアの汎用有限要素法としてADVENTUREが開発されている³。このADVENTUREを基に商用コードとして並列計算に対応できるADVC (ADVENTURE Cluster)が開発されている。計算機のハードウェアにも依存するが、ADVCは大規模計算の性能では他の汎用有限要素法コードより遥かに優れている。

数値震動台はADVENTUREないしADVCを基に開発される。前処理・後処理と線形・非線形のソルバーは既に先端的な機能を持つものが準備されており、また、別途、高度化を図ることも可能である。したがって、具体的な開発項目は、簡単に言えば、各種構造材料の材料構成則の組み込みと、破壊過程の組み込みに尽きる。

構造物破壊過程のシミュレーションに大規模数値計算がどのような貢献をするかは十分な検討が必要である。大規模数値計算では、設計で必要とされる分解能を遥かに超えた分解能で構造応答を計算するためである。未知の点が残されている構造物の破壊過程に対し、構造工学的知見を加えずに、連続体レベルの構造応答の支配方程式を精密に解くというアプローチがどの程度有効であるかは必ずしも明確ではない。E-Defenseの実大実験はもとより、材料・部材レベルの破壊過程の実験と比較することで、大規模数値計算の有効性が実証されると考えられている。

4. 破壊過程

数値震動台の特徴の一つは破壊過程のシミュレーションである。固体計算力学の分野で、変位や歪の不連続性や応力の特異性を含む脆性・延性破壊のシミュレーション

は古典的課題であり、ジョイント要素から不連続ガラーキン法、メッシュレス有限要素法、さらにはXFEM等、さまざまな解析手法が提案されている。しかし、有効な方法がないことも否定しがたい。

数理的な視点からみれば、破壊に伴う不連続性や特異性を持つ関数を計算することは、元来、滑らかな関数を想定した数値解析が最も不得意とするものである。滑らかな関数を前提とする以上、いろいろな工夫をしても、やはり不連続な関数や特異性を持つ関数の取り扱いにはどこかで無理がある。実際、提案されている多くの解析手法は、必要となる計算量は大きい。特に脆性破壊の3次元解析の場合、亀裂が進展するにつれてその面の傾きや曲率が変化するが、この変化を正しく計算するために必要な計算量は膨大となる。

物理的な視点からみれば、局所的な材料のばらつきが破壊に及ぼす影響を無視できないことが挙げられる。例えば、脆性破壊の場合、亀裂経路は供試体によって異なることが多く、その結果、構造応答にも相応のばらつきが生じる。数値計算では理想的な材料均一性を仮定するため、ばらつきを計算することは難しい。勿論、材料不均一性を有限要素法の解析モデルに取り込むことは可能である。要素単位で材料パラメータを変えれば良い。しかし、局所的な不均一性の程度や分布を計測することは難しく、材料パラメータの分布を具体的に決めることは容易ではない。

数値震動台では、新しい関数離散化である粒子離散化手法⁴を有限要素法に取り込むことで、上記の二つの課題の解決を図っている。粒子離散化手法とは、要素で一樣な関数を基底関数とする離散化であり、離散化された関数は要素の境界で不連続となるため、不連続な関数を扱うことが容易である(図4参照)。不連続に離散化された関数の微係数を厳密に計算することができるため、特異性の計算も可能であり、実際、粒子離散化手法に基づく線形要素を使った有限要素法は、通常の線形要素法の有限要素法と同じ精度を持つことが示されている。

粒子離散化手法では、亀裂やせん断帯のような不連続性が生じる場所を要素の境界に限定することができる。そこで変位が不連続に離散化されているからである。この結果、破壊の発生や進展の取り扱いは簡便である。図5に一例として、沖中近畿大学講師と共同実験で得られた破壊に伴う弾性波のシミュレーションと十毛結果の比較を示す。

さらに、要素分割を変えたモンテカルロシミュレーションを行うことで、局所的不均一性に対応したばらつきの評価を行うことができる。この場合、要素サイズが局所的不均一性に対応する唯一のパラメータとなる。未解決の問題が残されていることは確かであるが、粒子離散

化手法をADVENTUREに組み込み、通常の有限要素法と格段に効率的な破壊過程のシミュレーションを行うことを計画している。

5. 数値震動台の現状

(1) 超高層ビル

現時点の数値震動台の目標として超高層ビルの地震応答の数値計算が挙げられている。超高層ビルは約30階のSRC造であり、1億自由度の要素で分割し、非線形数値解析を実施する。この自由度では、部材も相当細かく離散化することができる。材料の局部座屈を起因とする破壊過程のシミュレーションを目標としている。

(2) RC構造

土木構造物としてRC橋脚の非線形地震応答解析が予定されている。この準備として、前川東大教授によって開発されたRC構造の構成則をadventureに組み込む作業が行われている。組み込みには接線剛性を計算するモジュールが必要であるが、RC構造の構成則では接線剛性は使われていない。このため、数式処理を利用して接線剛性を計算し、それを基にモジュールを開発する、という試みを行っている。

(3) 都市統合地震シミュレーション

地理情報システムを利用した都市の統合地震シミュレーションの開発を行っている。このシミュレーションで

は、地震動計算・構造物応答計算・対応行動計算の三つから構成される。将来、構造物応答計算に数値震動台が利用される予定である。

6. おわりに

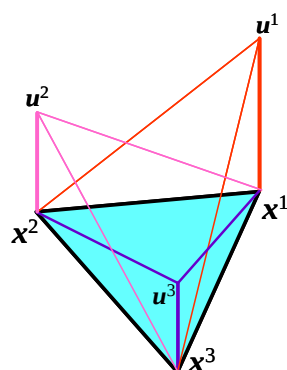
現在、数値震動台開発計画は大規模数値計算を実現する汎用有限要素法を建築・土木構造の解析に利用する最初の段階である。崩壊過程という複雑な非線形現象を正しくシミュレートするために、当面、計算力学の最先端の技術の移植が実施されている。この完成を持って、既存の構造解析手法との崩壊過程前までのシミュレーションの比較、そして、E-Defenseの崩壊実験との比較が予定されている。

実務で要求される規模を超えていることは確かであるが、少なくとも研究開発の点において、数値震動台は、建設産業の数値計算にインパクトを与える研究となる可能性がある。完成時はもとより開発時にも、共同研究者やユーザを広く呼びかけることを予定している。

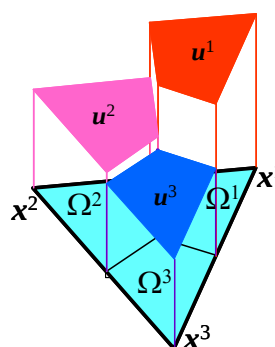
参考文献

- 1) 独立行政法人防災科学研究所，兵庫耐震工学研究センターホームページ，<http://www.bosai.go.jp/hyogo/index.html> (2007)
- 2) 平成18年度数値震動台プロジェクト報告書，兵庫耐震工学研究センター(2007)。
- 3) 設計用大規模計算力学システム開発プロジェクトホームページ

通常の FEM

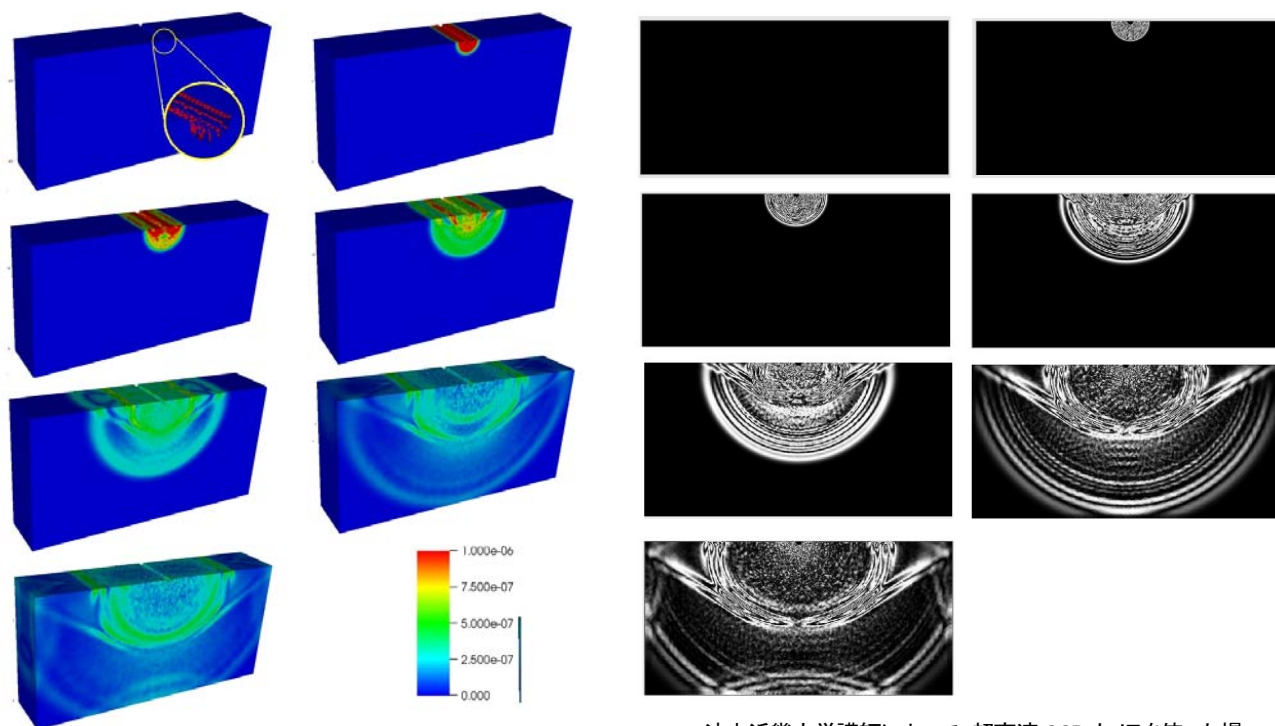


FEM- β



滑らかではあるが、互いに重なり合う形状関数で変位場を離散化

図-4 通常の有限要素法の線形要素法での離散化と粒子離散化手法



沖中近畿大学講師によって、超高速 CCD カメラを使った撮影された弾性波の進展状況。応力のコンターが表示。超高速 CCD カメラは江藤近畿大学教授が開発した世界最高性能の CCD 素子を利用。

図-5 破壊に伴って発生する弾性波のシミュレーションと実験の比較

ージ(ADVENTURE PROJECT), <http://adventure.q.tu-tokyo.ac.jp/jp/> 2004.
(2007).

4) 小国健二, 堀宗朗, 阪口秀: 破壊現象の解析に適した有限要素法の提案, 土木学会論文集, No. 766/I-68, pp. 203-217,

(2007.06.29 受付)

RESEARCH PLAN OF DEVELOPING E-SIMULATOR AS PART OF E-DEFENSE PROJECT

Muneo HORI, Hirohisa NOGUNI and Tatsuhiko INE

This report presents a research plan of developing E-Simulator, a simulation program based on a finite element method to analyze non-linear seismic response of structures, as a part of E-Defense project. The key features of E-Simulator are 1) large-scale numerical computation that realizes finest temporal and spatial resolution of the structure response and 2) simulation of collapsing processes of structures that is comparable with the real-scale E-Defense experiments. The report explains the objective of the E-Simulator and its two features. It also introduces the current state of E-Simulator.