

地震災害軽減ツールとしての数値シミュレータの可能性

目黒 公郎¹

Kimiro MEGURO¹

¹東京大学生産技術研究所

1. はじめに

防災対策の基本は「災害発生時に、そしてその後の時間経過の中で、自分の周辺で何が起こるかを具体的にイメージできる人間をいかに増やしていくか」であると私は考えている。イメージできない災害に対して、適切な心構えや準備ができるはずがない。我々防災の専門家の使命は、災害の実像を認識できないことで準備せず、結果的に被害を被ってしまう人を減らすことであると私は認識している。このためには物理的根拠に基づいて災害時の環境を具体的に示すツールが必要であり、ここに数値シミュレータの存在意義がある。

兵庫県南部地震では、多数の建築・土木構造物が崩壊し、多くの尊い生命が奪われた。崩壊に至るまでの破壊挙動の解明がいかに重要であるかが再認識されたわけである。しかし、あれだけ無残な被害を経験したにもかかわらず、今、我々のまわり、すなわち構造物の設計や施工に携わるコミュニティーを見渡すと、依然として破壊現象(特に原型を留めないほどの崩壊)に対する注意が不十分ではないかと思われてしかたがない。

現在の設計においても、崩壊などの破壊挙動は設計思想の範疇外である。「壊れてはいけない。壊れないものを作ることが設計である」という人もいる。しかし、「壊れないもの」をつくるためには「壊れるという現象」を十分理解しなくてはならない。安全性の照査はもちろん重要である。しかしこれにしても想定地震外力に対しての確認が足りない。

「この構造物は、想定を越えるこれだけの地震外力を受ければ、 \dots のように挙動し、最後には \dots のような形で崩壊する。それに要する時間は \dots 秒である。」「その際、建物の動的挙動を受けて、家具などの屋内収容物や設備は、 \dots のように挙動して出口を塞いだり、人を傷つけたりする。」「そのような条件下での避難行動は \dots のようにあるべきだし、避難安全性を考慮した構造物設計や最適誘導は \dots のようにすべきである。」などの検討は一切なされていない。

これらの検討を行って初めて、有事に際しての具体的な対策の立案が可能になるし、そもそも災害とは、想定を越える状況が起こったことによるアクシデントなのであるから、想定を越えた状況下での検討をしなくては意味がない。またこのような検討と評価こそが、「性能設計法」移

行への不可欠なステップでなくてはならない。

しかし現実とはそうではない。このように重要な検討がこれまで行われてこなかったのはなぜだろう？

制度的にやる必要がないものを敢えてやらないというのは、経営的には理解できる。しかし、エンジニアのモラルとしてはどうか？また、実施するための物理的な環境はどうだったのか？

ここにも大きな問題があったと考えられる。すなわち、我々エンジニアがつくった構造物が犠牲者を生んでいるという事実認識の欠如と、このような検討を具体化するための技術や施設が完備していなかったことである。前者の事実認識の欠如については文献1)を参照していただくとして、後者の技術や施設に関して言えば、幸いにして実験環境としては、実物大構造物の崩壊現象が再現できる(であろう)「実大三次元震動破壊実験施設」が、科学技術庁によって2005年の完成を目標に具体化してきた。残るは数値解析法/数値シミュレータである。風洞実験設備とコンピュータによる数値風洞技術が相互に補完し合って現象の解明が進んだように、破壊現象を高精度に、しかもシンプルなモデルで再現できる数値解析法が提案されれば、上で述べたような課題も今後は随分改善されるであろう。

2. 地震環境シミュレータ構想

一般に数値シミュレーションを行う背景には、次のような目的や理由が存在する。専門家による現象分析や検証と一般の人々の現象理解を補助するための「現象の再現手段」、実験に当たって、現象が種々の危険性を伴ったり、規模が大き過ぎたり小さ過ぎたり、あるいは材料パラメータや境界条件の自由度の制約等から実験の実施が困難な場合の「代替仮想実験手段」、実時間では再現に長時間を要する場合の「時間の短縮化ツール」などである。

ここでは兵庫県南部地震の教訓を踏まえ、地震防災上最も重要性の高い地震時の構造物の破壊挙動とその建物に付随する設備や家具などの地震時の挙動、さらに災害時の人の避難行動などを総合的にシミュレーションするシステムについて考える。なおこのモデルは、最終目標として社会・経済的な活動や復興過程までのシミュレーションを目指す「地震環境シミュレータ」の最も基本的な一部分となる要素と位置づけている。

3 構造物の高精度破壊シミュレーションモデル

ここでは、「崩壊に至るまでの破壊現象を、高い精度で、しかも簡単なモデルで解析すること」を目的として開発を進めている応用要素法(Applied Element Method, AEM²⁾)を紹介する(図-1)。AEMは歴史が浅いために、有限要素法(FEM)などと比較すれば実績は全く不十分である。しかし

その潜在能力は非常に高く(開発者の発言なので、割り引いて考えていただいた方がいいとは思いますが...)皆さんのお役に立てる道具になると確信している。これまで私は、個別要素法(Distinct Element Method, DEM)やこれに改良を加えた拡張個別要素法(Extended DEM, EDEM)³⁾を用いて連続体から非連続体に至るまでの破壊現象のシミュレーションを行ってきた。これらの手法は、取り扱える変

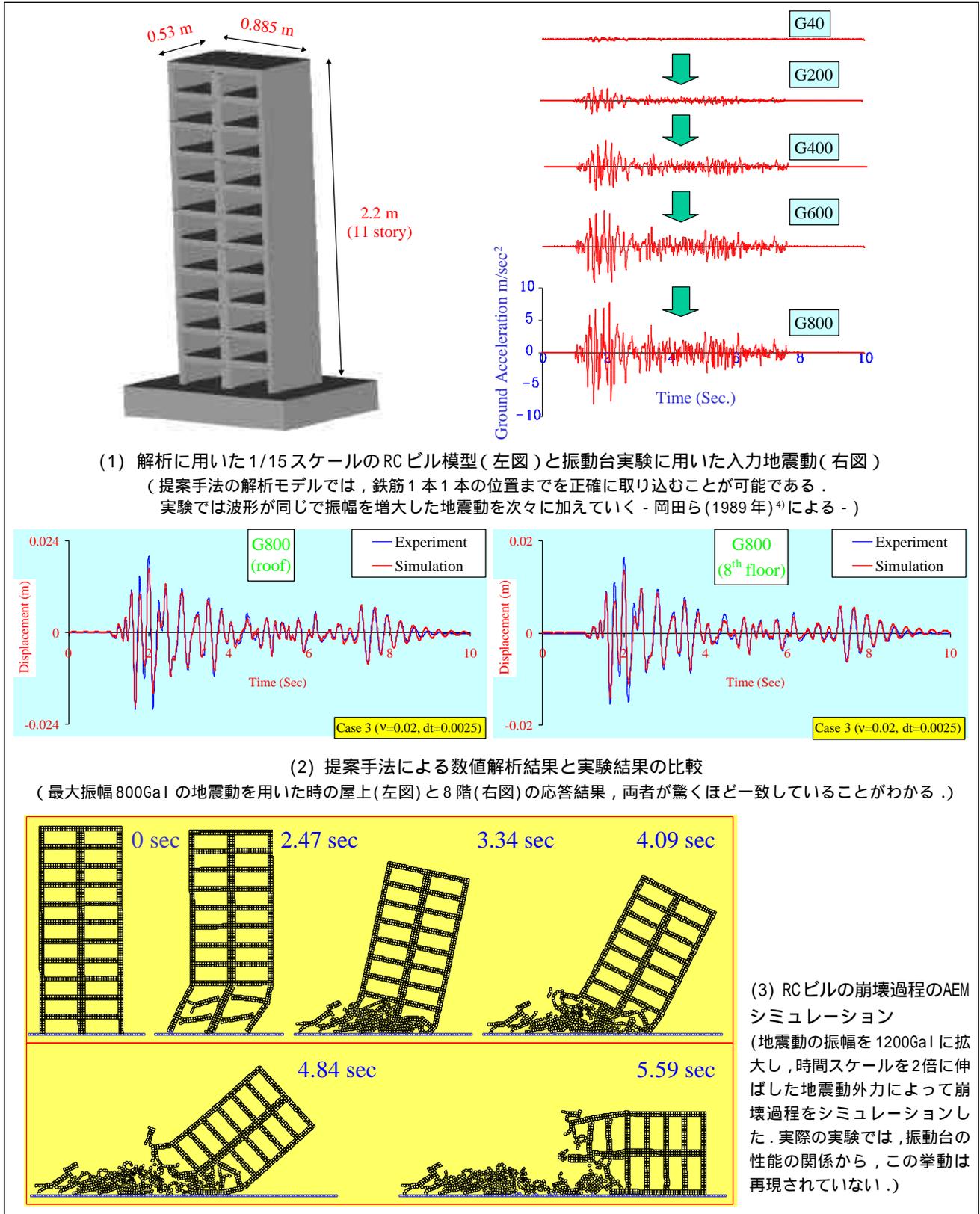


図-1 RC構造物の振動台破壊実験と応用要素法解析によるシミュレーション結果の比較

形や破壊の程度に特に制限がなく、要素同士の剥離、滑り、初期と違う要素との新たな接触による応力場の形成などの現象が容易に取り扱えることから、破壊現象を取り扱う手法としては、高いポテンシャルを持つ手法と言える。ただし現在の問題点は、高い精度で定量的な議論をできるまでに至っていない点である。これはFEMが適用可能な変形領域で、両者の解析結果を実験や実現象と比較した場合に、明らかにFEMの解析精度が高いことから伺われる。

AEMは、FEMの解析精度とEDEMの適用性を合わせ持つだけでなく、それぞれの欠点を補う特長も有する手法と位置付けている。このモデルを用いると、座屈などの大変形問題や完全崩壊に至るまでの破壊過程が、リーズナブルなCPUタイムで、しかも驚くほど高い精度で追跡できる。FEMにおけるジョイント要素のように、クラックの発生位置や進展方向を予め仮定するなどの必要性は一切なく、

破壊は任意の位置に発生し、応力条件に応じて自由な方向に進展していく。クラックの発生による応力状態の変化や境界条件の変化によって進展する進行性破壊現象を高い精度で解析できる手法となっている。またDEMやEDEMが苦手とする静的な問題への適用性、用いる要素の形状や配置の影響による解の不安定性の問題もない。解析に要するCPUタイムも圧倒的に短いなどの特長を有している。

4 家具の地震時挙動シミュレーションモデル

新建材や新工法による建物の耐震化の進展や地震の規模別発生頻度を考えると、家具の落下や転倒による死傷者の問題は、今後の地震防災を考える上でますます重要になってくる。図-2は、構造物の地震応答(入力地震動は神戸海洋気象台記録)を受けて挙動する家具の3次元動的挙動を、

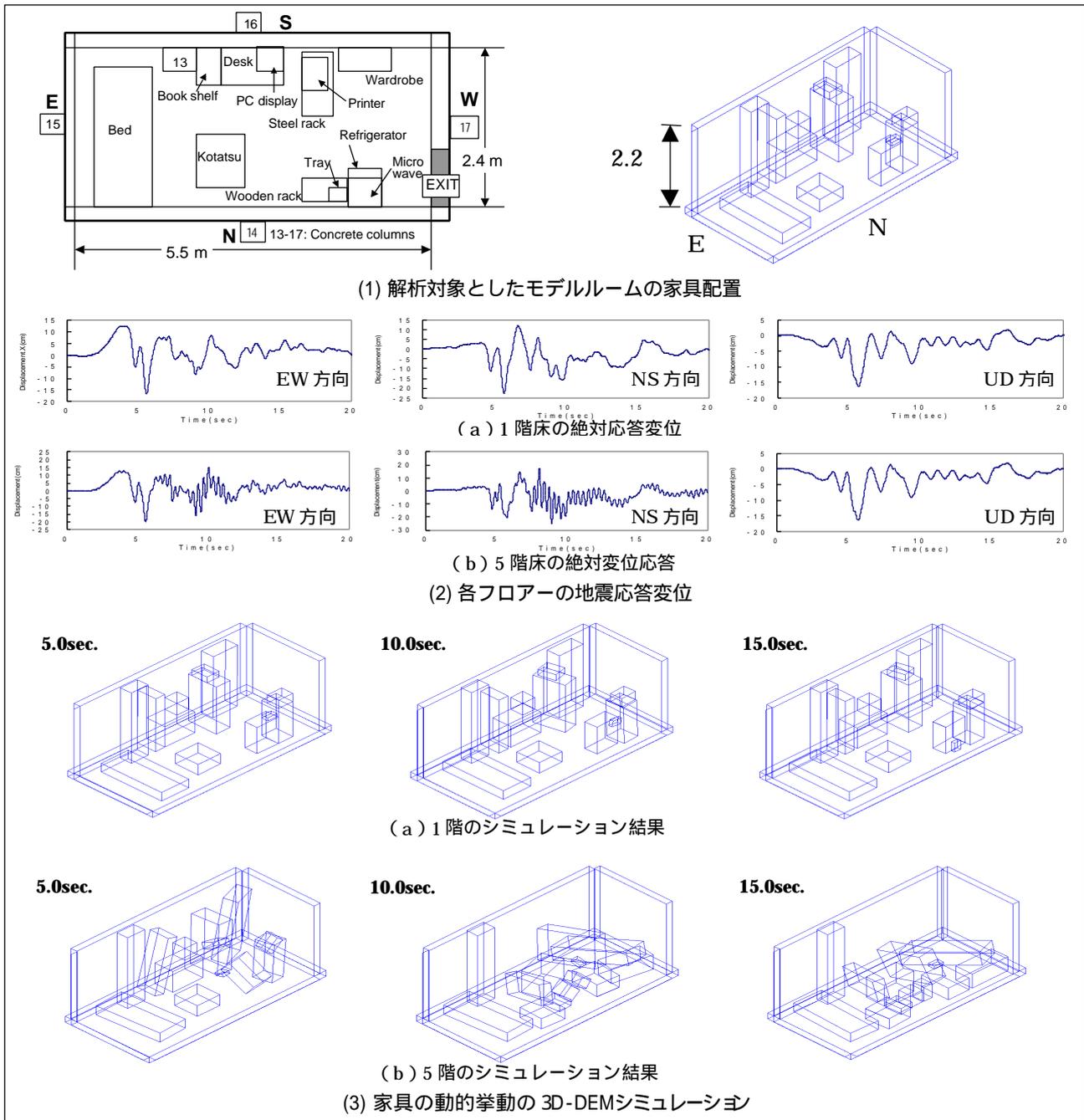


図-2 RC 5階建ビル内の異なるフロアにあるモデルルーム内の家具の挙動

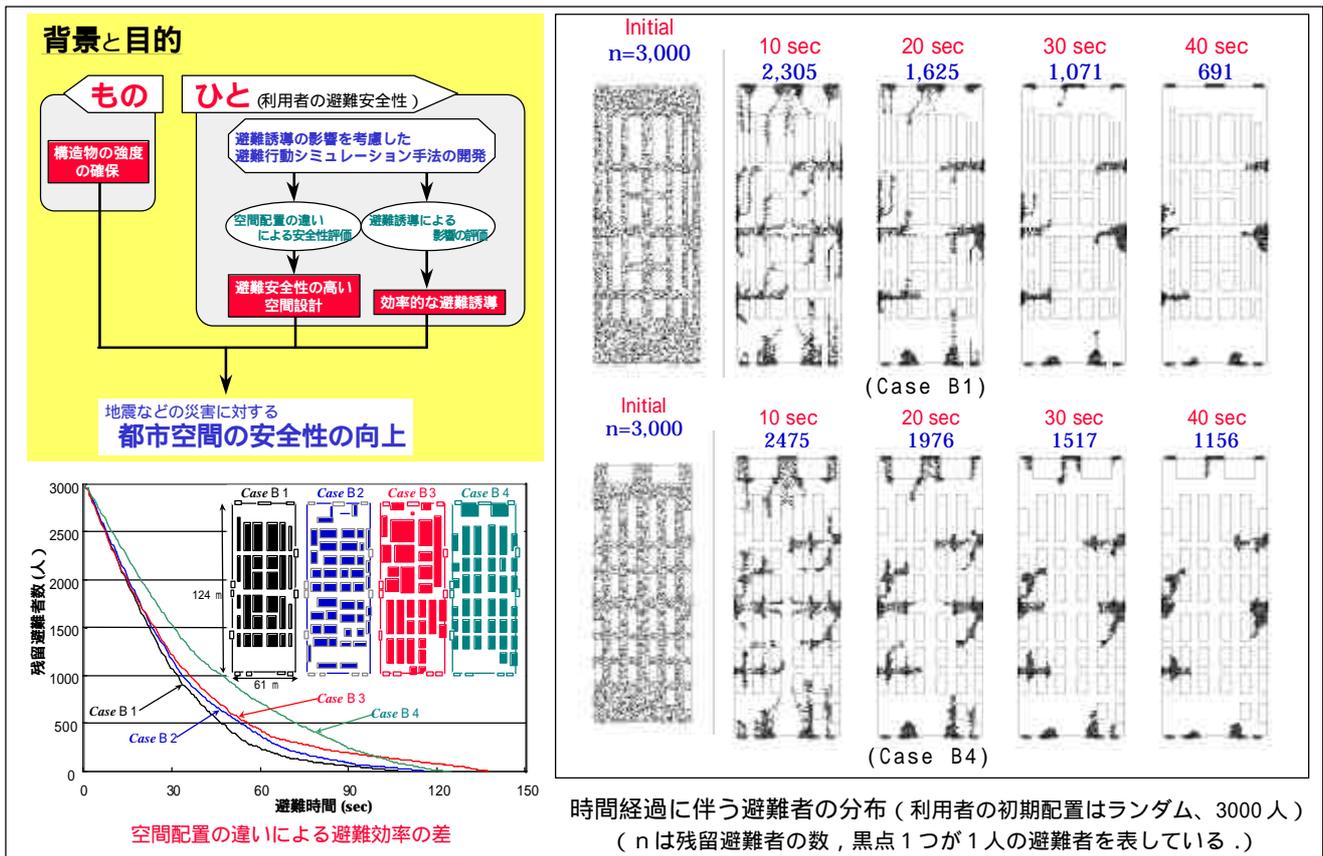


図-3 ポテンシャルモデルを用いた避難行動シミュレーションの例

(この例は実在の大規模展示場で過去に実際に利用されたブース配置を対象として解析したもの)

直方体要素 ただし接触判定の簡便化のために各頂点には適当な半径の1/8球,各辺には1/4円柱を想定)を用いた3次元個別要素法によってシミュレーションした例である。

5. 避難行動シミュレーションモデル

前の2つの章では、地震時の建物の動的破壊挙動とその地震応答を入力とする家具の挙動解析モデルの説明を行った。これらの挙動が精度高く評価できるようになると、次はそのような環境下における人間の避難行動が問題となってくる。すなわち、建物が崩壊する過程や家具が移動したり転倒/落下するなどの環境下での避難行動の分析や、安全な避難行動を可能にするための適切な事前対策や発災時の効果的な避難誘導の検討である。

図-3は、ポテンシャルの概念を用いることによって利用者1人1人の個人特性や時々刻々変化する災害状況、更には避難誘導の効果などを効率よく評価できるモデル⁵⁾を用いたシミュレーション例である。

6. おわりに

昨今 我々建設系や構造系エンジニアのaccountabilityがよく議論されるが、他業種のエンジニアが自分の作り上げた製品の性能を高い精度で把握し、それをきちんと説明できるのに対し、建設系エンジニアが自分の製品である構造物や施設の性能に対する理解力と説明力は甚だお粗末である。この背景には、これまでは他業種のように製品を実際に壊して性能を調べるのが困難な状況があった。しか

し今後は、科学技術庁の「実大三次元震動破壊実験施設」と本報で紹介したような「地震環境シミュレータ」によって、状況は随分と改善されていくと思われる。

最近の電子計算機の発展状況を考えると、「数値シミュレータ」の可能性が今後益々高まっていくことは確実であるし、高性能「地震環境シミュレータ」の存在が、「実大三次元震動破壊実験施設」を代表とする実験施設の効果的な運用と実験結果の解釈や有効活用のためには不可欠である。物理的挙動のみならず、社会・経済的な活動、そして復旧・復興活動までを表現する「数値シミュレータ」が、災害軽減ツールとして果たす役割は計り知れない。

参考文献

- 1) 目黒公郎：ライフライン地震防災論，防災総合講座 - 都市災害論 - ，静岡県，pp.33-55,1999.
- 2) 目黒公郎：崩壊過程までを考えた構造物の設計について，橋梁構造等の耐震設計法に関する講習会 - 耐震設計の現状と今後の展望 - ，pp.335-351,1999.
- 3) K. Meguro and M. Hakuno: Application of the Extended Distinct Element Method for Collapse Simulation of A Double-Deck Bridge, Structural Eng./Earthquake Eng. Vol.10, No.4, pp.175s-185s, JSCE, 1994.
- 4) Okada, T., Kumazawa, F., Horiuchi, S., Yamamoto, M., Fujioka, A., Shinozaki, K. and Nakano, Y.: Shaking Table Tests of Reinforced Concrete Small Scale Model Structure, Bulletin of ERS, IIS, The University of Tokyo, No. 22, pp. 13-40, 1989.
- 5) 目黒公郎：利用者の安全性から見た都市空間・施設の安全設計と管理システム，第1回生活環境設計シンポジウム講演論文集，pp.17-22，1998.