

信頼性工学に関する最新動向調査

2012年3月

信頼性工学利用小委員会

信頼性工学に関する最新動向調査WG

目次

序	… 3
本書作成関連委員	… 4
シミュレーション（確率有限要素法・モンテカルロ法）	… 5
ベイズ理論	…10
システム信頼性	…16
不規則振動・不確定性モデリング	…23
応用シミュレーション（避難・火災等）	…29
ハザード／フラジリティ／リスク評価・信頼性設計	…36
リスクマネジメント（リスクコミュニケーション・リスクファイナンス・意思決定）	…53
構造ヘルスマonitoring（システム同定・劣化診断・メンテナンス）	…61

序

不確定性やリスクの考え方がますます重要性を増す社会状況に鑑み、信頼性工学に関する最新の研究動向を把握し、研究者・技術者へその情報を伝えることを目的として、「信頼性工学に関する最新動向調査WG」が直上委員会である「確率・統計手法の工学利用小委員会」(2011年4月より「信頼性工学利用小委員会」)の下に2009年8月に設置され、2012年3月までの期間で活動を行っている。本刊行物はその活動の中で蓄積された、信頼性工学に関する最新の研究成果が発表された諸文献のレビューを抄録シートの形で取り纏めたものである。

信頼性工学が対象とする研究分野は基礎理論から応用技術まで非常に幅広いため、下記に示す8つの代表的分野を設定し、各分野毎に調査を行った結果を纏めている。

1. シミュレーション (確率有限要素法・モンテカルロ法)
2. ベイズ理論
3. システム信頼性
4. 不規則振動・不確定性モデリング
5. 応用シミュレーション (避難・火災等)
6. ハザード/フラジリティ/リスク評価・信頼性設計
7. リスクマネジメント (リスクコミュニケーション・リスクファイナンス・意思決定)
8. 構造ヘルスマモニタリング (システム同定・劣化診断・メンテナンス)

各分野の冒頭には、その分野の研究の流れや掲載された論文の位置付けなどを記載した。また、対象とする文献は2000年以降に出版されたものとし、代表的な学術誌・国際会議論文集を中心に調査した。

本刊行物が信頼性工学に携わる研究者・技術者にとって有益な情報として活用されれば幸いである。

本書作成関連委員
(50音順、敬称略)

信頼性工学利用小委員会

主査 森 保宏
幹事 今塚 善勝 高田 毅士
委員 石川 孝重 井戸田 秀樹 日下 彰宏 小檜山 雅之 斎藤 知生
高橋 徹 趙 衍剛 平田 京子 村地 由子

信頼性工学に関する最新動向調査WG

主査 斎藤 知生
幹事 小檜山 雅之
委員 足立 高雄 五十嵐 さやか 糸井 達哉 神田 誠一 佐藤 一郎
諏訪 仁 副島 紀代 田中 浩平 趙 衍剛 林 孝幸
平田 京子 蒲 武川 山崎 賢二 廬 朝輝

執筆者

足立 高雄 五十嵐 さやか 糸井 達哉 神田 誠一 小檜山 雅之
斎藤 知生 副島 紀代 田中 浩平 趙 衍剛 林 孝幸
平田 京子 山崎 賢二 廬 朝輝

シミュレーション(確率有限要素法・モンテカルロ法)

構造物の材料や波動伝播の媒質のばらつきを考慮し解析を行う手法として、Ghanem & Spanos (1991)はスペクトル確率有限要素法 (spectral stochastic finite element method) を提案した。この手法は、まずカルフーネン・ロエーブ分解 (Karhunen-Loève decomposition) を用いて物性値の確率分布 (空間的な分布なので、確率過程となる) をモデル化し、応答の確率分布を多項式カオス展開 (polynomial chaos expansion) を用いて表す特徴がある。Doostan et al. (2007) はこの手法を発展させたものを提案しており、例題として、ヤング率がランダムに分布する L 字形の平板の静的載荷問題を扱っている。また、本田 (2001) は不均質地盤中の波動伝播問題に適用しており、収束計算を伴わない時間積分法により計算時間が大幅に短縮できることを示している。

一方、モンテカルロシミュレーションは、確率分布から多数のサンプルを生成し、確定論的に解析を行うため、複雑な問題に対しても容易に適用できるが、確率が小さいものに対しては、しばしば膨大なサンプル数が必要となり、計算時間が長くなる問題がある。この問題を克服するため、様々な手法が提案されている。

代表的なものに Au & Beck (2001)が提案した部分集合シミュレーション法 (subset simulation method) があり、小さな確率を有する事象を部分集合の列の終点としてとらえ、その対応する条件付き確率の積によって確率を求めるものである。Au et al. (2007)は条件付き確率を計算するサンプルの生成にマルコフ連鎖モンテカルロ法 (Markov chain Monte Carlo method) を用いる方法と応答閾値超過時に分岐を発生させサンプルを生成する方法 (splitting method)、そしてそれらを組み合わせたハイブリッド法を提案し、ランダムな土質特性を持つダム、ダフィング系の多自由度振動子、バイリニア型多自由度せん断系建物の信頼性評価に適用し、高い計算効率を持つことを示している。

また、サンプル点の代わりにサンプル線を用いるラインサンプリング法 (line sampling method) も提案されている (Schuëller et al. 2004)。Koutsourelakis et al. (2004)は、この手法を発展させ、破壊領域をいくつかの領域で分割し効率よくサンプルを発生させることで計算効率を高める方法を提案し、ホワイトノイズ外乱を受ける 1 質点系の閾値超過確率を求める問題と 5 質点系の非線形応答解析に適用し、少ない試行回数で従来法と同等の精度を持つことを示している。

抄録外の参考文献

- Ghanem and Spanos (1991) *Stochastic finite elements: a spectral approach*, Springer.
- Au, S. K. and Beck, J. L. (2001) Estimation of small failure probabilities in high dimensions by Subset Simulation. *Probab. Eng. Mech.*, 16(4): 263–77.
- Schuëller, G. I., Pradlwarter, H. J., and Koutsourelakis, P. S. (2004) A critical appraisal of reliability estimation procedures for high dimensions. *Probab. Eng. Mech.*, 19(4): 463-74.

(担当：小檜山雅之)

テーマ分類	シミュレーション（確率有限要素法・モンテカルロ法）				
論文題名	Stochastic model reduction for chaos representations				
著者名	Alireza Doostan, Roger G. Ghanem, and John Red-Horse				
雑誌名	Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering				
巻号	196	ページ	3951-3966	年号	2007
発行所	Elsevier				
キーワード	不確実性の定量化、確率有限要素法、確率モデルの縮小、カルフーネン・ロエーブ分解、多項式カオス展開				
<p>要旨：</p> <p>確率有限要素法には、高次の応答統計量を正確に得るには確率ベクトルのサイズが大きくなるに従い基底関数の数が指数的に増大する「次元の呪い」と呼ばれる問題がある。そこで、確率的に表現されたモデルを縮小し、確率的な係数を持った偏微分方程式の解をスペクトル確率有限要素法（spectral stochastic finite element method, SSFEM）（具体的にはその一種である確率的ガラーキン法）により効率的に計算する方法を提示している。特に、ウィナーカオス（homogeneous chaos）で張られたヒルベルト空間における確率偏微分方程式の解で満たされた低い次元の多様体の特徴を効率的に見出すアルゴリズムを開発している。</p> <p>提案手法では、カルフーネン・ロエーブ分解（Karhunen-Loève decomposition）をソボレフ空間の部分集合で表されるようなある種の規則性と滑らかさを持った確率関数に対して定式化したヒルベルト・カルフーネン・ロエーブ分解を用いる。まず応答をよく近似できる低次元の部分空間を粗いメッシュの解析で求める。この低次元の集合を応答の確率分布を求める細かいメッシュの解析で用いることにより、確率変動を表す基底の数をかなり減らすことができる。そして、応答の確率分布を表す多項式カオス展開（polynomial chaos expansion）で用いる基底について、不要なものを削除することでさらなる計算コストの削減を図ることが可能である。また、確率的ガラーキン法の誤差を適応的に制御することも行っている。</p> <p>提案手法の特徴を示すため、例題としてヤング率がランダムに分布する L 字形の平板の静的載荷問題を扱っている。提案手法が細かなメッシュを用いた結果と比較しておおむね同等の精度を有しており、良好な収束性を持っていることを示している。</p>					

（担当：小檜山雅之）

テーマ分類	シミュレーション（確率有限要素法・モンテカルロ法）				
論文題名	スペクトル確率有限要素法によるランダム場の波動伝播解析				
著者名	本田利器				
雑誌名	土木学会論文集				
巻号	No. 689 I-57	ページ	321-331	年号	2001
発行所	土木学会				
キーワード	スペクトル確率有限要素法 (spectral stochastic finite element method), 確率場 (random field), 波動伝播 (wave propagation)				
<p>要旨：</p> <p>地震動の予測は重要な課題であり，これまでに様々な研究がなされている。一方で地震動は不均質な地盤中を伝播することから，地盤情報の不確定性の影響を定量的に考慮する必要がある。本論文では，この問題に対して地盤物性の分布を確率場として扱い，スペクトル確率有限要素法 (spectral stochastic finite element method, 以下 SSFEM) を適用することを提案している。</p> <p>従来よく用いられてきた手法 (モンテカルロシミュレーション) では大量の計算を必要とするのに対し，確率有限要素法では解析が効率的に行える利点がある。しかし，従来の確率有限要素法では展開が収束する範囲が狭く，解析が発散しやすいなどの問題があった。そこで実際の波動伝播解析への適用を目的として，発散しにくく高い安定性を有する手法として SSFEM が提案されている。</p> <p>また，動的な問題を SSFEM で効率的に解析するための数値計算手法として，収束計算を伴わない時間積分法 (non-iterative time integration scheme, 以下 NITI 法) の適用を試み，地盤のせん断剛性 G をランダム場と想定した小規模モデルによる数値計算で検証を行っている。その結果，SSFEM により通常よく用いられるモンテカルロシミュレーションで得られる解と同等の結果を得られることと，NITI 法の導入により計算時間が大幅に短縮できることが示され，このような問題に対する SSFEM 法適用の有効性を示している。</p>					

(担当：副島紀代)

テーマ分類	シミュレーション (確率有限要素法・モンテカルロ法)				
論文題名	Application of subset simulation methods to reliability benchmark problems				
著者名	S. K. Au, J. Ching, and J. L. Beck				
雑誌名	Structural Safety				
巻号	29	ページ	183-193	年号	2007
発行所	Elsevier				
キーワード	モンテカルロ法、信頼性、分岐、確率シミュレーション、部分集合シミュレーション				
<p>要旨：</p> <p>破壊確率（確率変数ベクトルが破壊領域に入っている確率）を求めるためにモンテカルロシミュレーションが行われるが、非常に小さな破壊確率を評価する場合には効率が悪い。そこで著者らは、小さな確率を有する事象を部分集合の列の終点として捉え、その対応する条件付確率の積によって求めたい確率を表現することを考えた。一般にこれら条件付確率は求めたい確率に比べ遙かに大きく設定できるからである。そしてこの条件付確率を計算するサンプルの生成に、メトロポリス・ヘイスティングス (Metropolis-Hastings) のアルゴリズムによるマルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法を用いた。これが部分集合シミュレーションの基本形、MCMC 型部分集合シミュレーション (SubSim/MCMC) である。</p> <p>これに対して、動的システムの時刻歴応答がある値を越える点でランダムに分岐を発生させてサンプルを生成する方法が分岐型部分集合シミュレーション (SubSim/Splitting) である。マルコフ連鎖モンテカルロ法では、サンプルの棄却条件によって同じサンプルが生成される場合があるが、分岐型の場合には常に異なるサンプルが生成されるという利点がある。そして、この 2 つを組み合わせ、応答がある値を越えるまではマルコフ連鎖モンテカルロ法を用い、その後は分岐型に移行する方法がハイブリッド部分集合シミュレーション (SubSim/Hybrid) である。</p> <p>これら 3 つの部分集合シミュレーション手法を以下の 3 つの対象、1) ランダムな土質特性を持つダム、2) ダフィング系の多自由度振動子、3) バイリニア型多自由度剪断系建物の、信頼性ベンチマーク問題に適用した。いずれの手法も、単純なモンテカルロシミュレーションに比べ、破壊確率の変動係数を対数的に減少させることができた。また、分岐型とハイブリッドは適用対象が動的システムに制限されるものの、基本形に比べ更に高い計算効率を持つことが示された。</p>					

(担当：斎藤知生)

テーマ分類	シミュレーション（確率有限要素法・モンテカルロ法）				
論文題名	Reliability of structures in high dimensions, part I: algorithms and applications				
著者名	P. S. Koutsourelakis, H. J. Pradlwarter, and G. I. Schuëller				
雑誌名	Probabilistic Engineering Mechanics				
巻号	19	ページ	409-417	年号	2004
発行所	Elsevier				
キーワード	信頼性、シミュレーション、線抽出法、マルコフチェーンモンテカルロ法				
<p>要旨：</p> <p>Direct Monte Carlo 法は非常に汎用性の高い手法であるが、高次元システムにおける低破壊確率の信頼性推定の際には試行回数が膨大な数となることが指摘されている。この問題を解決するために Line sampling 法 (LS) が提案された。破壊領域の情報を集めるために、従来のサンプル点の代わりに、サンプル線を用いることが特徴で、これによりガウス空間における N 次元問題を、$N - 1$ 個のパラメータの条件付き 1 次元問題に置き換えることが可能となる。具体的には、$N - 1$ 個のパラメータ $[\theta_2, \theta_3, \dots, \theta_N]$ を正規乱数によって発生させ、その条件下での破壊曲面上の θ_1 の値から破壊確率を算出する。この作業を複数回繰り返し、算出された条件付き破壊確率を平均したものが、求める破壊確率となる。</p> <p>LS の効率性は特に線形システムを用いたベンチマーク問題においてすでに数多く確かめられている。しかし一方で、その効率は抽出方向に強く依存し、破壊面が超平面とならない強非線形問題では良い精度が得られない。本論文では、破壊面が抽出方向と直交する場合と、平行する場合の両極端な 2 つの例が提示されている。前者では条件付き破壊確率の分散は 0 となり最も効率がよく、後者の場合は Direct Monte Carlo 法と変わらない。実際にはこの中間の値となるが、効率的な抽出方向を探索する手法はあまり提案されていない。</p> <p>本論文は抽出方向の違いによる計算効率の差を低減すべく、シミュレーションの収束率を向上する手法を提案する。具体的には破壊領域をいくつかの領域で分割し、領域内で効率よくサンプルを発生させることによって可能にする。またこの手法により、シミュレーションされた破壊確率の上限を試行回数に応じて管理することが可能となる。</p> <p>後半部では本手法の応用として、2 つの計算例を実施している。1 つ目は一質点系のホワイトノイズ入力による応答の、閾値 b の超過確率を算出した。提案した手法は、Direct Monte Carlo 法や従来の LS と比較しても高い精度を持ち、Subset simulation と同程度の精度を持つことが確認された。また同様の精度を Direct Monte Carlo 法で確保するためには、およそ 96 倍の試行回数が必要とされることが確認された。2 つ目に 5 質点系の非線形応答解析を実施し、1 つ目の解析と同様の精度を持つことが確認された。</p>					

(担当：田中浩平)

ベイズ理論

ベイズ統計学は、客観確率のみに基づく伝統的統計学と同様の結果を得ることができるが、客観確率に主観確率を加えた広義の確率に基づく統計学である。ベイズ統計学の特徴を実利用の観点から整理すると次の2点が挙げられる。ベイズの定理により、経験や情報の獲得による事前評価の更新を考慮できる構造（ベイズ推定）をもつ点と、頻度によって観測できない確率変数であっても経験や知識から主観的に事前分布を設定できるという柔軟性をもつ点である。ここでは各レビュー論文とベイズ理論のトピックとの関連性を整理し、理解の助けとしていただくことを目的とする。

能島ら(2003)では、地震直後の情報錯綜期に緊急対応の意思決定を支援することを目的とした、リアルタイム地震防災システムを構築した。ここでは被害情報の蓄積に応じて逐次評価を更新できるベイズ推定を用いている。地震直後、地震動観測点において得られた地震動情報は迅速性に優れているが実被害を表現する正確性は低い。よって巡回や目視による正確性の高い一次情報が得られるたびに、ベイズ推定により評価結果を逐次更新する。

Mahadevan et al.(2001)では、ベイジアンネットワークを用いて部材からシステムまでの信頼性を評価する手法を提案している。ベイジアンネットワークとは各確率変数をノードとし、その変数間の因果関係を矢印（リンク）で結びつけることによって構成されるグラフィカルモデルである。上端にある入力変数の確率分布が観測データや経験により与えられることで、その下流にある確率変数の確率分布を簡単に求めることができる。従来のフォールトツリー解析やイベントツリー解析においてはシステム全体の信頼性評価のみが可能であったが、ベイジアンネットワークでは部材レベルの信頼性の再評価が可能となる。

Beck & Yuen(2004)では、システム同定における最適なモデルクラスの選定手法を構築した。ベイズの定理から各モデルの説明力を算出し、比較する2つのモデルについて説明力の比をとったベイズファクター（ベイズ因子）をみることで、最適なモデルを探索できる。各モデルの説明力は、ベイズの定理で評価された事後確率を母数について総和をとったものであり、この値が1に近いほどデータの出現確率を説明する良いモデルとなる。

山川ら(2009)や Haukaas et al.(2007)では、多数のパラメータをそのハイパーパラメータで制御する階層ベイズ法を用いて設計問題を構成する方法を提案している。階層ベイズ法とは、事前に有する知識や信頼性の情報を、事前分布においてハイパーパラメータを介して導入することで、より精度の高い事後分布を求めようとする手法である。基本的な考え方は、データの獲得に応じて事後分布を更新していくベイズ推定の考え方と変わらない。

レビューでは取り上げていないが、事後分布の導出には事前分布と尤度関数の積の多重積分を解く必要があるため、工学的応用における障害となる可能性がある。通常は事後分布と事前分布を同形とするために、尤度関数に応じて自然な共役分布を事前分布として採用するが、利用可能な確率分布が限定される。よって任意の確率分布を用いるためには、マルコフ連鎖モンテカルロシミュレーション(MCMC法)によって事後分布を計算する。

(担当：田中浩平)

テーマ分類	ベイズ理論				
論文題名	地震動情報と実被害情報の統合処理による緊急対応支援の数理モデル				
著者名	能島暢呂、杉戸真太、金澤伸治				
雑誌名	土木学会論文集				
巻号	724/I-62	ページ	187-200	年号	2003
発行所	土木学会				
キーワード	post-earthquake emergency, real-time damage estimation, synthetic data, Bayes' theorem, sequential decision process				
<p>要旨：</p> <p>地震直後の情報錯綜期に緊急対応や復旧を支援することを目的とした、種々のリアルタイム地震防災システムが構築されている。これらシステムにおいて、「迅速性」と「正確性」はトレードオフの関係にあり、その比重は各情報源の特性に応じて変化する。例えば、巡回や目視による実被害情報は、「迅速性」には欠くが、直接情報であるために「正確性」は高い。一方、リアルタイム観測網において観測された地震動情報や気象庁の震源情報は、「迅速性」が高く、被害の全体像をつかむための即時推定を可能とするが、被害とは直接関係のない間接情報であるために、「正確性」は低い。他にも情報源としては、ライフライン系のフロー監視に基づく実時間システム制御、リモートセンシング情報などがある。著者は、これらの情報源の弱点を、相互に補完することにより、「迅速性」と「正確性」のバランスがとれた被害想定を可能とする枠組みを提案してきた。例えばその組み合わせは、異種情報源からの地震動情報、地震動情報と人工衛星画像情報などである。本論文では、地震発生直後、即時に得られる地震動情報から推定される被害推定を、「迅速性」に欠くが「正確性」の高い実被害データを用いることで逐次更新し、被害の全体像を概略推定するとともに、意思決定に用いる枠組みを提案している。</p> <p>前論文から新しくなったところは、建物被害や人的被害のように、可付番的な対象物を扱えるように拡張されているところと、二項被害に加えて、多項被害を扱えるように理論を拡張している点である。</p> <p>後半では、兵庫県南部地震で被害を受けた芦屋市を対象として逐次決定過程のシミュレーション事例を示した。計測震度を事前情報として、目視・巡回による建物被害の情報を用いて逐次更新される各地域の被害率をもとに、意思決定が迅速に行われるかをシミュレーションした。その結果、概ね全壊率の大小に応じた適切な判断がなされることが確認された。今後の課題として、可能な限り綿密で正確な地震動強度情報の利用と、被害発生率の閾値や許容誤り誤差といったパラメータの設定法を詳細に検討することがあげられている。</p>					

(担当：田中浩平)

テーマ分類	ベイズ理論				
論文題名	Bayesian Networks for System Reliability Reassessment				
著者名	Sankaran Mahadevan, Ruoxue Zhang and Natasha Smith				
雑誌名	Structural Safety				
巻号	23 (3)	ページ	231-251	年号	2001
発行所	Elsevier				
キーワード	ベイジアンネットワーク, 信頼性再評価, システム信頼性, 破壊シーケンス				
<p>要旨：</p> <p>解析的な信頼性評価手法は簡便で安価な方法であることから、実験を行うことができない場合の信頼性評価手法として利用されている。しかし、モデル化における様々な近似や入力データの情報不足が原因で、評価結果に不確実性や誤差が生じる恐れがある。そのため、試験結果が入手可能な場合には、試験結果を解析的手法に組み込むことでより正確な信頼性再評価を行うことが望まれる。試験結果と解析手法の併用にはベイズ理論を利用することができるが、これまでの研究では、部材レベルの信頼性評価、もしくはシステム全体のみを対象とした信頼性評価にとどまっている。本論文では、ベイジアンネットワークを用いて部材からシステムまでの信頼性を評価する手法を提案している。</p> <p>論文ではまず、ベイジアンネットワークの概要を説明する。従来のフォールトツリーやイベントツリーによるシステム信頼性解析において、ベイズ理論を用いる場合には、部材レベルの信頼性の再評価は不可能であり、システム全体の信頼性評価のみが可能であることを指摘している。一方、ベイジアンネットワークでは、システム全体の信頼性だけでなく部材レベルの信頼性の再評価が可能であることを利点として挙げている。具体的には、システムの性能に関する新たな情報を加えることで全部材の信頼性を再評価することなどが挙げられている。</p> <p>次に、特に構造物の信頼性評価にベイジアンネットワークを適用する際の問題点を整理している。部材レベルの限界状態の相関の考慮、およびシステムの段階的な破壊シーケンスの考慮が必要なことを指摘し、簡単な例題により対処方法を示している。</p> <p>最後に、大規模な構造物として門型フレームを取り上げ、そのシステム信頼性を評価する手法を示している。門型フレームには 2 つの集中荷重が作用し、複数個所での塑性ヒンジ発生による様々な破壊シーケンスが考慮されている。しかし、全ての破壊シーケンスを考慮することは現実的でないことから、分枝限定法(branch-and-bound 法)により支配的な 5 つの破壊シーケンスを抽出している。提案手法によるシステム信頼性の評価結果をモンテカルロシミュレーションの結果と比較することで、手法の有効性を示している。また、システムの性能に関する新たな情報から部材の信頼性を再評価する例を示している。</p>					

(担当：糸井達哉)

テーマ分類	ベイズ理論				
論文題名	Model Selection Using Response Measurements: Bayesian Probabilistic Approach				
著者名	James L. Beck, Ka-Veng Yuen				
雑誌名	Journal of Engineering Mechanics				
巻号	130	ページ	192-203	年号	2004
発行所	ASCE				
キーワード	システム同定、モデルクラス選択、ベイズの定理、エビデンス、オッカムファクター				
<p>要旨：</p> <p>システム同定における通常のアプローチは、あるモデルクラス(剪断系建物モデルやバイリニア型履歴モデル等)の中の最適なモデルを見つけることであるが、どのモデルクラスを選択すべきかという点に関しては未だ議論が不十分である。複雑なモデルはデータによく適合させることができるが、逆に過適合に陥りやすく、将来の予測には使えないことが多い。そこで本論文では、ベイズ理論によるモデルパラメタの更新手法を拡張し、構造物の応答データを用いた最適なモデルクラスの選択手法に展開する。</p> <p>ある応答データを条件とするあるモデルクラスの確率(尤もらしさ)は、ベイズの定理によって、事前確率と「エビデンス」と呼ばれる周辺化尤度との積に比例する形で与えられる。更にエビデンスは全確率の定理によって、あるパラメタで規定されるモデルの尤度とそのモデルの事前分布との積を全パラメタ空間で積分した値として与えられる。ラプラスの漸近近似を用いると、上記の積分は、事後確率を最大化するモデルの尤度とそれ以外の項との積で表すことができる。後者は「オッカムファクター」と呼ばれ、パラメタ数とデータ数が増えること(主に前者)に対するペナルティとなる。このようにして評価されるモデルクラスの確率(尤もらしさ)が最大となるものを、最適なモデルクラスとして選択することができる。</p> <p>この手法の効果を3つの例で説明する。</p> <p>1つ目は、地震入力を受けるバイリニア型1自由度の振動系で、モデルクラスの候補として弾性・完全弾塑性・バイリニアの3種類を考える。入力としてエルセントロ波を10%・15%・20%の3つのレベルで与えたところ、10%レベルでは弾性モデルクラスの確率が1となったのに対し、15%・20%レベルではバイリニアモデルクラスの確率が1となった。</p> <p>2つ目は、6自由度の2層弾性フレームモデルで、モデルクラスの候補は2層剪断系・梁の剛性を柱の半分に制限した2層フレームモデル・制限のない2層フレームモデルの3種である。この場合、第3のモデルクラスの確率が1となった。</p> <p>3つ目は、地震入力を受ける10層の剪断系モデルで、モデルクラスの候補はモーダルパラメタで規定されるモード解析型モデルで、考慮する次数がそれぞれ1~8次のものである。モデルクラスの確率は6次が1となった。比較したAICでは尤度の項に比べペナルティ項が小さすぎるため、8次が選択されてしまう。</p>					

(担当：斎藤知生)

テーマ分類	ベイズ理論				
論文題名	ベイズ情報量規準によりパラメータの事前分布を考慮した鋼構造骨組最適設計法				
著者名	山川誠、荒木慶一、中川佳久、上谷宏二				
雑誌名	日本建築学会構造系論文集				
巻号	645	ページ	2021-2028	年号	2009
発行所	日本建築学会				
キーワード	最適設計、鋼構造骨組、情報量基準、ベイズ推定、平滑化				
<p>要旨：</p> <p>鋼構造骨組の部材断面積を設計変数とした鋼材量最小化問題では、解の一意性を満たさない ill-posed な問題に近いと見られるため、大きな断面と小さな断面が交互に分布するチェッカーボード状の設計解が最適解として得られることがある。このような設計解は、接合部設計や施工性の観点から好ましくない。本論文では、多数のパラメータを少数の超パラメータにより制御することができるベイズ法を用いて設計問題を構成する方法を提案している。</p> <p>提案手法は、ある通りあるいはある層の部材断面の分布に対して変化が大きいものを誤差が含むものとみなし、誤差を取り除いた滑らかな部材断面を推定し、鋼材量、応力・変位等の評価を行う。すなわち、部材断面の分布に対して平滑化を行う方法といえる。滑らかさはデータの差分の事前分布で表現し、線形ガウス型のベイズモデルを採用している。</p> <p>超パラメータの推定はベイズ情報量基準 ABIC (Akaike's Bayesian information criterion) を用いて選定している。ABIC と鋼材量は相反する性能量であるため、鋼材量を目的関数ではなく制約条件の一つとして扱い、ABIC を目的関数として最小化する問題構成としている。超パラメータとしては、部材分布の標準偏差、部材分布の差分の標準偏差、差分を評価するための境界ベクトルを用いている。境界ベクトルは ABIC 最小の条件式から陽に与えられる。設計変数としては部材分布の標準偏差、部材分布の差分の標準偏差と部材断面に関する量としている。また、最小化問題の制約条件は、設計変数の上下制限制約、応力度比制約、層間変形角制約、鋼材量制約からなる。</p> <p>数値解析例として、10層4スパン鋼構造平面骨組の事例を示している。設計用長期鉛直荷重と $C_0 = 0.2$ とし A_i 分布より算定した設計用地震荷重を組み合わせる載荷し、1次設計時の長期許容応力度・短期許容応力度・層間変形角の確認を行っている。柱部材の断面の平滑化のため、通りごとの鉛直方向の3階差分、層ごとの水平方向の1階差分の事前分布を与えている。最適解は内点法を用いて求めている。制約条件を単純に満足する平滑化を行わない解の鋼材量の下限值から1%の鋼材量の増加を許容して情報量基準が最小となる解を求めたところ、チェッカーボード状の断面配置が解消できていることを確認している。</p>					

(担当：小檜山雅之)

テーマ分類	ベイズ理論				
論文題名	Bayesian finite elements				
著者名	T. Haukaas, P. Gardoni, A. Bebamzadeh				
雑誌名	Application of Statistics and Probability in Civil Engineering, ICASP10				
巻号	-	ページ	121-122	年号	2007
発行所	Taylor & Francis, London				
キーワード	確率有限要素法、ベイジアンアプローチ、ベイズ更新、モデル誤差、センサ				
<p>要旨：</p> <p>本論文は構造信頼性予測に含まれるモデルと解析の誤差を説明する技術を示し、その必要性を記述している。継続中の本研究は、有限要素方程式を構成する包括的なセットとして、確率分布と更新された構造信頼性評価法を作成することを目的とする。</p> <p>この論文の主目的は、ユーザにとって未知であるモデル誤差や解析誤差を表現することでユーザによって指定された応答閾値の超過確率を求める「有限要素信頼性解析」(FERA)を拡張することである。それらの誤差は不明確なものであり適切な確率分布は入手可能な情報に基づくベイズ更新によって評価される。不確定性を示す項には「センサ」を用いて有限要素方程式を修正する手法をここに提案している。センサには方程式に誤差が影響する部材たわみ、シアスパン比、要素のゆがみ、非線形性の度合いなどが挙げられる。ベイジアンアプローチはそれぞれのセンサの適合性を判断し、解析モデルに潜在する不確定量の確率分布を評価する。</p> <p>本論は FERA 法の簡易なレビューから始め、モデルと解析誤差の原因について概説され、不確定性を評価するために利用可能な情報について説明している。次に異なるセンサが議論され、最後に提案された手法により拡張した有限要素方程式を簡易モデルによる数値例を提示している。</p> <p>数値例では、逆対称曲げを受ける梁部材を対象として、要素分割数の異なる二種類のファイバーモデルを使用して端部モーメントと回転角の関係を比較している。非線形性の度合いと断面のファイバー数を含む 4 つのパラメータをモデル不確定性を表すためのセンサとして仮定したところ、モデル誤差を説明するために非線形性の度合いが重要なセンサであることを示した。</p> <p>提案する手法により得られた結果は有限要素法コードでモデル誤差項に実装され、確率変数のリストを修正することによって FERA を拡張する。本論文で提示した評価法は、トラス、ビームコラム、連続体要素を含む有限要素方程式に対して確率分布を作成し、構造信頼性評価を更新するものである</p>					

(担当：山崎賢二)

システム信頼性

システム信頼性に関する最近の研究動向としては、Song & Kiureghian (2003) や Li & Chen (2007) らによる純粋なシステム信頼性の数値的な解法に関するものはもちろんのこと、構造システムの地震時損傷確率や被災後の補修に関する意思決定、耐久性の予測など、実際の問題にアプローチするための手段として検討がなされていることが特徴的である。これは、近年多発している地震災害や、それに伴う企業の事業継続の問題、さらに社会基盤の老朽化に伴う維持管理の問題が顕在化し始めていることなどの社会情勢が影響しているものと考えられる。また、部材レベルのシステムからライフラインシステムまで、ミクロからマクロに至る様々なシステムが対象とされている。

ミクロなところでは、Darmawan & Stewart (2007) がプレストレストコンクリート橋の桁に導入されたプレストレス用撻り線ケーブルの最大孔食深さの空間分布を確率モデルにより予測し、経年後の破壊確率や耐用年数の評価への適用を試みている。ケーブルという1つの部材を、それを構成するワイヤの集合体とみなし、外ワイヤがそれぞれ独立に腐食するという仮定で完全脆性並列システムとしてモデル化した例である。

さらに少し大きな構造系を対象として、Song & Kang (2009) は橋梁システムの地震時脆弱性カーブの作成や、静的な不静定トラス構造物における限られた予算条件下での構造システム最適化を目的とした感度分析による意思決定の枠組みについて提案している。またこの研究では計算手法として、線形計画法 (LP) の代わりに Matrix-Based システム信頼性手法 (MSR) が提案されている。

マクロなところでは、中村・遠藤 (2009) が事業継続計画 (BCP) の策定支援を目的として、給排水システムの機能停止期間の評価にシステム信頼性理論が用いた場合の研究を行っている。ここではシステム構成要素間の相関も考慮しており、オフィスの復旧への影響を検討している。

また、最近ではこれらシステムの健全性にロバスト性 (頑強性, 堅牢性) が大きく影響すると言われている。Baker et al. (2008) は、このロバスト性を新たなシステム信頼性の指標として着目し、被災後の補修計画の必要性判断などの意思決定への活用や、設計への適用などを提案している。この研究では、システムの冗長性の大小が提案するロバスト性指標に表現できることや、警報・避難システムなどの導入による間接被害のリスク低減がロバスト性指標を増大させることも示されている。

今回掲載された抄録をはじめとして、より実用的な分野でのシステム信頼性理論の適用が今後活発となることと予測される。

(担当 : 副島紀代)

テーマ分類	システム信頼性				
論文題名	Bounds on System Reliability by Linear Programming				
著者名	Junho Song and Armen Der Kiureghian				
雑誌名	Journal of Engineering Mechanics				
巻号	129(6)	ページ	627-636	年号	2003
発行所	ASCE				
キーワード	線形計画法、構造信頼性、システム信頼性、システム解析、確率論的手法				
<p>要旨：</p> <p>システム信頼性の上下界を線形計画法（LP）で求める手法について有効性を論じた。全事象を漏れ・重複なく基本事象に分けたとき、各基本事象の発生確率を変数で表すとすると、1要素の損傷の周辺確率 $P_i=P(E_i)$、2要素の損傷の同時確率 $P_{ij}=P(E_i E_j)$、3要素の損傷の同時確率 $P_{ijk}=P(E_i E_j E_k)$、システム全体の損傷確率などが基本事象の確率の線形和で表すことができる。基本事象の確率を決定変数とし、求めたい事象の確率を目的関数で与え、さまざまな事象の確率の情報を線形の等式や不等式の制約条件で与えれば、その上下界を求める問題は線形計画問題として定式化できる。したがって、単体法などで容易に解くことができる。このようにして得られた最適解は、与えられた情報から得られる真の最も幅の狭い上下界となる。</p> <p>直列システムについて P_{ij} まで考慮し上下界を求めた Kounias, Hunter, Ditlevsen の式（以下、KHD 式）や、P_{ijk} まで考慮した Zhang の式は、構成要素に付ける番号の順番によって計算結果が変わる問題があり、また、最適な上下界が得られる保証がない。一方、LP で解く場合、①最も狭い幅の上下界を与える、②構成要素の番号順に依存しない、③事象発生確率の情報を一般的な形で扱える、④どのようなシステムでも同じように適用できる、⑤広く汎用ソフトが利用できるといった利点がある。欠点として、変数の数が増えると計算量が指数関数的に増大することが挙げられるが、コンピュータ科学の進歩により将来克服しうるといえる。</p> <p>適用事例として、直列システムである 7 部材静定トラス、並列システムである剛体棒を脆性破壊する 6 本のワイヤで吊ったダニエルズシステム、より一般的なシステムである完全弾塑性片持梁の端部を剛塑性棒で吊ったシステムの 3 つを示した。トラスの例では、P_{ij} まで考慮した場合と P_{ijk} まで考慮した場合は KHD 式や Zhang 式で最良の上下界が得られなかったが、LP では得られた。ダニエルズシステムの例では、P_{ij} まで考慮した場合、KHD 式と LP はほぼ同じ上下界が得られた。一般的なシステムの例では、与えた条件から有効数字 8 桁まで一致する上下界が得られ、試行数 10,000,000 回のモンテカルロ法で求めた確率の平均±標準偏差の範囲に収まっていることが確認でき、ほぼ厳密解と同じ確率が得られた。</p> <p>備考： 2005 年 131 巻 4 号 pp. 458-460 に討論と論文訂正あり。</p>					

(担当：小檜山雅之)

テーマ分類	システム信頼性				
論文題名	The equivalent extreme-value event and evaluation of the structural system reliability				
著者名	Li J. and Chen J.B.				
雑誌名	Structural Safety				
巻号	29	ページ	112-131	年号	2007
発行所	Elsevier				
キーワード	システム信頼性、限界状態関数、確率分布関数				
<p>要旨：</p> <p>システム信頼性手法は多く開発されているが、ほとんど要素の信頼性解析結果を利用して、システムの破壊確率を求めている。そのため、要素の間の相関性問題が生じており、要素の破壊確率からシステム破壊確率を求めることは未だに困難である。ここではまずシステムの限界状態関数を各要素の限界状態関数の極値として厳密的に誘導している。</p> <p>$E_i = (g_i < 0)$ は第 i 要素の破壊事象を表し、$g_i = g_i(\mathbf{X})$ は第 i 要素の限界状態関数とすると、直列システムの限界状態関数は各要素の限界状態関数の最小値として数学的に証明している。</p> $G(\mathbf{X}) = \min[g_1, g_2, \dots, g_k] \quad (1)$ <p>同様に、並列システムの限界状態関数は各要素の限界状態関数の最大値として数学的に証明している。</p> $G(\mathbf{X}) = \max[g_1, g_2, \dots, g_k] \quad (2)$ <p>上述のシステムの限界状態関数に対して、破壊確率 P_f は次式のように定義することができる。</p> $P_f = P[Z = G(\mathbf{X}) \leq 0] = \int_{-\infty}^0 f_Z(z) dz = F_Z(0) \quad (3)$ <p>ここでは $f_Z(z)$ と $F_Z(z)$ はそれぞれ $Z=G(\mathbf{X})$ の確率密度関数(PDF)及び累積分布関数(CDF)である。</p> <p>限界状態関数 $G(\mathbf{X})$ は複数の確率変数の関数であり、その関数値 Z の確率密度関数を求めることは一般に困難であるので、本論文では著者が提案している確率密度関数の演化方法(Probability Density Evolution Method—PDEM)を用いて、システムの破壊確率を求めている。</p>					

(担当：趙衍剛)

テーマ分類	システム信頼性				
論文題名	Spatial time-dependent reliability analysis of corroding pretensioned prestressed concrete bridge girders				
著者名	M. Sigit Darmawan, Mark G. Stewart				
雑誌名	Structural Safety				
巻号	29	ページ	16-31	年号	2007
発行所	Elsevier				
キーワード	孔食、プレストレストコンクリート、構造信頼性、劣化、確率有限要素法				
<p>要旨：</p> <p>本論文では、孔食を受けるプレストレス用撻り線ケーブルの最大孔食深さの空間分布を予測する確率モデルの構築について議論する。</p> <p>孔食現象に関するデータを集めるため、腐食促進試験を行った。その結果、撻り線ケーブルを構成する単一ワイヤの最大孔食深さはグンベル分布でよく表現できることがわかった。孔食によるワイヤの断面欠損は幾何学モデルによって予測する。</p> <p>撻り線ケーブルにおいては芯となる内ワイヤの周りに 6 本の外ワイヤが配置されており、外ワイヤはそれぞれ独立に腐食するものとする。撻り線ケーブルは 7 本全てのワイヤが切れた時に破壊するため、完全脆性並列システムでモデル化できる。この結果、撻り線ケーブルが破壊に到るまでの時間は、単一ワイヤのそれよりも平均的に短くなることがわかる。</p> <p>確率有限要素法を用いて、単スパンのプレストレストコンクリート桁橋の信頼性解析を行った。検討した限界状態は桁の曲げ耐力と使用性である。</p> <p>解析の結果、桁は早ければ 18 年で崩壊する場合もあることがわかった。時間に伴って変化する破壊確率を見ると、100 年後の耐力の破壊確率は約 10 %となり、これは既往の研究結果に較べかなり大きい。これは既往の研究が、応力の一番大きい桁の中央のみで評価していることが原因である。実際、中央のみで評価した結果と空間的な効果を考慮した結果を比較してみると、耐力の破壊確率では、空間的な効果を考慮することによって約 10 %の増加となる一方、使用性の破壊確率では数倍も大きくなり、更に影響が大きくなることが明らかになった。</p> <p>また、本研究で構築した確率的アプローチは、耐用年数予測のより現実的な表現を可能とするものでもある。</p>					

(担当：斎藤知生)

テーマ分類	システム信頼性				
論文題名	System reliability and sensitivity under statistical dependence by matrix-based system reliability method				
著者名	Junho Song, Woo-Hee Kang				
雑誌名	Structural Safety				
巻号	31	ページ	148-156	年号	2009
発行所	Elsevier				
キーワード	Complex system, Importance measure, Matrix-based computations, progressive failure, Sensitivity, System reliability				
<p>要旨：</p> <p>システムの破壊確率の上下限を計算する手法として、線形プログラミング法(LP)が提案されている。著者らは、LPを解く代わりに簡単な行列計算によって同様の成果が得られる手法として、Matrix-based システム信頼性手法(MSR)を提案している。</p> <p>MSRの利点はつぎの5つである。1つ目は大規模なシステムにおいても簡単な内積によって計算できるため、複雑でなく計算コストもかからない。2つ目にシステムイベントを簡単に、破壊確率ベクトルを効率よく作成できる。3つ目にシステムの構成要素の破壊確率やシステム同士の統計的従属性の情報が欠けている場合にも、システムイベントの生起確率を最も狭い上下限で求めることができる。これはLPと同様の成果が得られる。4つ目にMSRを用いることで、重要な指標や条件付確率を簡単に計算できる。5つ目に、MSRは行列計算を用いているため、市販のソフトの恩恵にあずかることができる。また欠点としては、システムの複雑化に伴い行列やベクトルのサイズが指数的に増大することであるが、これは1つのシステムを複数のシステムに分割することで回避できる。</p> <p>本論文ではMSRを用いた、システム間に統計的従属性が見られる状況での信頼性解析手法や構成要素の感度解析手法を提案している。他のシステム信頼性問題と同様に、統計的従属性をもつイベントにおいても、共通ソースをもつランダム変数(CSRV)を考慮することで、イベント間の条件付独立を与えることができる。本論ではCSRVが自明でない場合にも、Dunnet-Sobelクラスの相関行列を持つランダム変数に変換することによって、CSRVを同定することが可能になることを示している。</p> <p>後半部分では提案手法を用いて、2つの数値解析例をのせている。1つ目には橋梁システムの地震時のフラジリティーカーブを作成し、従来のモンテカルロシミュレーションによる手法と比較を行っている。また、複数部材のフラジリティーカーブや破壊イベントの感度解析も行っている。2つ目には、静的な不静定トラス構造物の破壊確率を算出している。この例では限られた予算の中で行われる、感度解析に基づいたシステム性能向上のための意思決定の枠組みを提案している。</p>					

(担当：田中浩平)

テーマ分類	システム信頼性				
論文題名	BCP への貢献を目的とした建物の機能確保に関する研究				
著者名	中村孝明、遠藤透				
雑誌名	日本建築学会 総合論文誌				
巻号	7	ページ	87 ~ 92	年号	2009
発行所	日本建築学会				
キーワード	事業継続計画、建築設備、復旧曲線、ボトルネック指標、被害関数、システム信頼性				
<p>要旨：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・この論文では、事業継続計画（BCP）の策定支援を目的として、システム信頼性理論を用いた地震による建物の機能停止期間の評価手法を提案し、仮想の建物の給排水システムの機能停止期間を試算している。提案する評価手法では、機能停止期間に影響するシステムの構成要素の被害事象の相関（損傷相関）を考慮している。なお、損傷相関の定義は、システムを構成する要素の損傷事象の統計的相関であり、ある要素が損傷すれば必ず別の様相が損傷するといった物理的な従属関係とは異なる。 ・損傷相関として、システムを構成する任意の2要素の応答のみが相関を有すると仮定している。さらに、応答を完全相関と仮定することで、損傷相関を考慮したシステムの機能停止期間の確率関数を評価している。なお、構成要素間の相関係数の違いは、耐力と応答の対数標準偏差により考慮できる。 ・オフィスビルを例に復旧曲線とボトルネック指標（B.I.）を算出している。オフィスビルを複数のエリアに分け、建屋全体の機能に対する個々のエリアの機能の影響度を考慮し復旧曲線を作成することを提案している。また、エリアの機能を構成する要素が、他のエリアの機能にも関与している場合、関与していない要素よりも全体機能への影響が大きい。この割合に当該構成要素の復旧日数を掛けた値をB.I.と定義している。例えば、エリアの機能を構成する要素である「建屋」は、他の全てのエリアの機能にも関与しているため、影響の割合は100%となる。これに「建屋」の復旧日数を乗じた値がB.I.である。 ・BCPに即した耐震対策マネジメントとしてオフィスビルを取り上げ、B.I.を考慮した耐震対策を提案し、これらの対策による復旧曲線の改善効果を確認している。 ・今後の課題として、工程、資材調達などの要因を考慮した検討の必要性を挙げている。 					

(担当：足立高雄)

テーマ分類	システム信頼性				
論文題名	On the assessment of robustness				
著者名	Jack W. Baker, Matthias Schubert, Michael H. Faber				
雑誌名	Structural Safety				
巻号	30 (3)	ページ	253-267	年号	2008
発行所	Elsevier				
キーワード	ロバスト性、損傷許容性、リスク評価、信頼性、脆弱性、冗長性				
<p>要旨：</p> <p>過去の建物崩壊事例の分析から、構造物や構造システムの特長としてロバスト性（頑強性、堅牢性）を考慮することの重要性が広く認識されている。本論文では、確率論的リスク評価の枠組みの中で、システムのロバスト性を評価する新たな枠組みの提案を目的としている。</p> <p>著者らは、被害リスク全体における間接被害リスクの割合が小さい（直接被害リスクの割合が大きい）システムをロバストなシステムと考え、被害リスク全体（直接被害のリスク R_{Dir} と間接被害のリスク R_{Ind} の合計）に占める直接被害のリスク R_{Dir} の割合をロバスト性指標 I_{Rob} と定義する。ただし、この指標では、直接被害のリスク R_{Dir} の許容値については議論できないため、直接被害のリスク R_{Dir} を許容できるかどうかを従来の信頼性評価の枠組みで議論した上で用いることを前提としている。</p> <p>次に、本論文で定義されるロバスト性指標の考え方が、被災後の補修計画の必要性判断などの意思決定にも利用可能であることが示され、条件付きロバスト性指標やロバスト性に基づく設計（robustness-based design）の考え方が示されている。また、複数の被害事象を考慮する場合や、被災後の対策（補強）実施の有無などを考慮する場合にも容易にロバスト性指標の計算が可能なことなどが示されている。</p> <p>最後に、並列システムを対象とした数値計算例が示され、ロバスト性指標の有効性が示される。例えば、冗長性（redundancy）が小さい部材からなるシステムではロバスト性指標が小さく評価されることや警報・避難システムの導入により間接被害のリスクを減少されることがロバスト性指標を増加させることなどが示される。また、ロバスト性の研究と併せて、部材の冗長性係数（Wen & Song, 2003）についても検討し、設計基準への導入をすすめることが必要であるとの指摘もされている。</p>					

(担当：糸井達哉)

不規則振動・不確定性モデリング

不規則振動の初通過問題（確率過程の最大値等）に関連する論文が 2 編，不確定性モデリング（不確定性の分類）を取り扱った論文が 3 編取り上げられた。

初通過問題では，従来研究では定常確率過程が対象となる場合が多かった。しかし，最近の研究では，非定常確率過程の最大値を扱うことで手法の適用範囲を広げるとともに，より現実的かつ実用的な問題を取り扱う方向に向かっていると言える。

Barbato & Conte (2011)は，外乱を受ける系の初通過確率を評価する際に，Vanmarcke の近似解に基づく評価手法が精度良いことを，弾性一質点系と 3 層鉄骨造建物の非定常応答評価の例題を通して示した。

Takewaki (2006)は，エネルギー入力率を最大化する地動入力を求める critical 外乱問題を定式化した。定式化の際に初通過問題の考え方を利用している。

初通過問題は古典的なテーマで数多くの研究の蓄積があるが，Takewaki (2006)に見られるような応用利用はそれほど行われておらず，今後の研究余地があるかもしれない。

不確定性モデリングに関する 3 編の論文には，社会的／工学的意思決定という観点から不確定性の情報を有効に利用するという大きな流れが感じられ，今後リスク情報を意思決定の際に有効活用する観点からの研究が求められていると考えられる。

Faber & Stewart (2003)は，リスク解析の根底を流れる普遍的な原理の必要性を指摘し，リスク解析とリスク評価に関する最新状況（ハザード特定，ロジックツリー，不確定性モデリング，リスク受容基準）をとりまとめた。

Reinert & Apostolakis (2006)は，不確定性を偶然的な不確定性と認識論的な不確定性（パラメータ不確定性，モデル不確定性，完全性の不確定性）に分類した上で，原子力発電所の許可基準変更の妥当性判断を意思決定する上で，決定に影響を与えるモデル不確定性の要因を抽出する方法を提案した。

竹村ら (2004) は，リスク社会学的な観点から不確実性を分類した上で数理モデルの枠組みを検討し，科学的知見が十分でない社会問題に対する意思決定を支援する処方的アプローチの必要性を指摘した。

不確定性モデリングに関しては人文社会系や他の工学分野の研究の蓄積にも目を向ける必要がある。従来のリスク概念にとらわれることなく，これらの蓄積を反映した包括的なリスク概念に再構成する必要があると言えるかもしれない。

(担当：糸井達哉)

テーマ分類	不規則振動・不確定性モデリング				
論文題名	Structural Reliability Applications of Nonstationary Spectral Characteristics				
著者名	Michele Barbato, Joel P. Conte				
雑誌名	Journal of Engineering Mechanics				
巻号	137(5)	ページ	371-382	年号	2011
発行所	ASCE				
キーワード	確率過程、時変破壊確率、スペクトラル・モーメント、非古典的減衰多自由度系、モンテカルロシミュレーション、基本事象重点サンプリング				
<p>要旨：</p> <p>多くの構造物では破壊状態を、あるスカラー応答の線形和がある確定的な閾値を超過する事象としてモデル化することができる。このモデルを用いてある一定の時間に破壊が起こる確率を求める問題を初通過問題 (first passage problem) と呼ぶ。初通過問題はこれまでもっとも単純な、定常ガウス白色雑音の荷重を受ける線形弾性一自由度系のモデルに対しても厳密解が得られていない。ある時刻 t までに閾値 ζ を超過する回数の期待値は、時刻 t までに閾値を超過する確率の上界として与えられる。これは Rice の式から得られる平均閾値超過率 $\nu(\zeta, t)$ を、$0 \sim t$ の時間区間で積分して計算できる。</p> <p>非定常な外乱を受ける系の初通過確率は、閾値 ζ と時間 t の関数であるハザード関数 $h(\zeta, t)$ を用いて計算される。ここで、$h(\zeta, t) dt$ は、$t \sim t+dt$ の時間区間において初めて閾値を超過する確率を表す。このハザード関数について、Vanmarcke は確率過程のモーメント $\sigma_X(t)$ とバンド幅パラメータ $q(t)$ を用いた 2 種類の近似式 (古典的方法と経験的に修正した方法) を提案した。著者らは別の論文で、非定常確率過程に対し $q(t)$ の閉形解を導いた。</p> <p>この論文では、まず線形弾性一質点系に対し、静止状態から白色雑音地動が作用したときの破壊確率について、ポワソン過程を仮定したときの確率 (閾値超過をポワソン過程と考え、$h(\zeta, t)$ を $\nu(\zeta, t)$ として計算)、Vanmarcke の 2 種類の近似式による確率、Au と Beck が提案した基本事象重点サンプリング法 (ISEE) のシミュレーション結果に基づく確率を比較し、Vanmarcke の 2 種類の近似式が ISEE の結果とよく一致することを示している。</p> <p>続いて、1 層目と 2, 3 層目の面積が異なる線形弾性非対称 3 層鉄骨造建物モデル (比例減衰系のとくとダンパーを付加し非古典的減衰としたときの 2 ケース) を対象に、45° 方向に白色雑音地動が作用したときと、非定常地動が作用したときの破壊確率 (屋根の変位と最上層の層間変位の 2 通り) を示している。非定常地動は金井・田治見のパワースペクトルと篠塚・佐藤の時間変調関数 (包絡関数) でモデル化しており、いずれのケースも著者らが提案する $q(t)$ を用いた Vanmarcke の 2 種類の近似式が ISEE の結果とよく一致し、ポワソン過程を仮定したときの確率よりも精度が高いことを確認している。近似式による方法の計算コストのオーダーは ISEE よりも数桁小さい。</p>					

(担当：小檜山雅之)

テーマ分類	不規則振動・不確定性モデリング				
論文題名	Probabilistic Critical Excitation Method for Earthquake Energy Input Rate				
著者名	Izuru Takewaki				
雑誌名	Journal of Engineering Mechanics				
巻号	132	ページ	990-1000	年号	2006
発行所	ASCE				
キーワード	Dynamic response, Excitation, Ground motion, Frequency analysis, Earthquakes, Probabilistic methods				
<p>要旨：</p> <p>地震動の評価や地震動入力による構造物の応答評価には、大きな不確定性が伴うため、これらを考慮に入れたロバストな構造設計法が導入される必要がある。critical 外乱法は、そのような設計法の確立に見込みのあるアプローチであり、著者はこれまでに、層間変位や床加速度応答を最大化する外乱を探索する方法を提案してきた。ここではその一連の論文の中で最新のものとして、地震動のエネルギー入力率が最大となる外乱の探索法を提案したものをとりあげる。エネルギー入力率を指標としたのは、建物の変位との関連性が高く、変位応答が問題となるような構造物で重要な応答指標だからである。</p> <p>本論文では以下のことが明らかにされている。まず、一様・非一様に調整された地震動モデルにおける地震エネルギー入力とその入力率についての新たな表現が導かれる。そして、エネルギー入力率を指標とした critical 外乱問題が定式化される。最後に上述の問題を解く際に発生する 2 重の最適化問題を簡易化する方法が提案される。</p> <p>設定された問題は以下のとおりである。1 質点系せん断モデルの構造物パラメータ（質量、剛性、減衰）と地震動の包絡関数、外乱パワーの上限に関する制約条件、強度に関する制約条件が与えられた状況で、ある時刻 t における平均エネルギー入力率を最大化するパワースペクトル密度(PSD)関数 $S_w(t)$ を求める。この問題は、$S_w(t)$ ごとにエネルギー入力率を最大化する時刻 t^* を求め、さらにその中から時刻 t^* でのエネルギー入力率を最大化する PSD 関数 $S_w(t)$ を求めることになる。この作業は 2 重の最大化を伴うため、大きな労力を必要とする。そこで、本論では最大化の順序を逆とすることで計算を簡易化している。すなわちはじめに時刻 t を固定することで、平均エネルギー入力率を求めるための伝達関数を周波数のみの関数とし、定常ランダム振動の critical 外乱を求める手法が適用できるようにする。強度に関する制約条件 s が有限である場合には、有限区間で一定値 s をとる矩形のものが critical 外乱の PSD 関数となるため、解の探索が容易となる。</p>					

(担当：田中浩平)

テーマ分類	不規則振動・不確定性モデリング				
論文題名	Risk assessment for civil engineering facilities: critical overview and discussion				
著者名	M. H. Faber, M. G. Stewart				
雑誌名	Reliability Engineering and System Safety				
巻号	80	ページ	173-184	年号	2003
発行所	Elsevier				
キーワード	リスク分析、決定理論、不確定性、確率、被害規模、リスク回避、リスク受容、最適性				
要旨：	<p>本論文は、リスク解析とリスク評価の重要な側面を議論する土台となると共に、最新の研究成果に従ってリスク評価技術を説明することを目指したものである。</p> <p>はじめに、リスクを事象が起こる確率とその事象が起こった時の被害規模の積として定義した後、実際のリスク解析の実施方法が説明される。全体のフローチャートとしてオーストラリア/ニュージーランドのリスクマネジメントに関する規準が例示され、その各ステップ毎の内容が詳細に示される。</p> <p>まず、ハザード、即ちリスクの源の認識が行われる。認識されたハザードのみがリスク解析で考慮されるのでこの過程は極めて重要な役割を担う。</p> <p>次にロジックツリーによる分岐の確率評価が行われる。フォールトツリーやイベントツリーでは、基本事象が独立でない場合を扱うことは不可能或いは非常に困難であるが、ベイジアンネットワークにはそのような制限がなく、リスク分析に対する有力な手法として期待される。</p> <p>最も単純なリスク解析の形は事前解析である。そこでは、何らかの決定や対策が行われる前の統計的情報や確率的モデルによってリスクが評価される。これに対して事後解析では同じディシジョンツリーを使いながら、リスク低減対策や新しい情報による、枝の確率や被害規模の変更が反映される。事前事後解析では、対策の結果に基づいて将来の行動をどう決定するかのルールを構成することにより、最適な決定を選択することができる。</p> <p>被害規模は通常、人々やその環境に直接関わる指標、即ち死傷者数や経済損失などによって測られる。被害規模の評価で最も困難なのは、直接損失、間接損失、そして、金額に換算できない損失をどのように比較するかということである。人命の経済的評価については多くの試みがある。また、時間の影響を考慮することも重要である。通常は将来起こる被害については、割引率を用いた正味現在価値で評価される。</p> <p>要求性能と保有性能を比較する構造物などの信頼性解析では、極めて大きな荷重による非常に稀な破壊事象を扱うことに加え、殆どの対象がユニークであるため、耐力と荷重の両方の確率的モデリングが必須となる。</p> <p>リスク受容の基準をどのように設定するかは難しい問題であり、リスク評価のみでは解決できない。多くの基準ではリスクとハザードは「合理的に実行可能な限り出来るだけ低く」すべきとされる。また、個人と社会のリスクは区別されることが多く、前者が年間死者数などで表現されるのに対し、後者は一般的に F-N 曲線によって、累積頻度と死者数などとの関係で表現される。死者数が大きい方が、より死者数が少なく頻度が多い等価な場合よりも回避される傾向がある。</p> <p>これまで論じたように、リスク解析の根底を流れる原理・哲学は普遍的なものであり、個別の問題のタイプからは独立である。この考え方が、リスク分析者・工学者・意思決定者により深く理解され、それぞれの立場に合わせて活用されることが求められている。</p>				

(担当：斎藤知生)

テーマ分類	不規則振動・不確定性モデリング				
論文題名	Including model uncertainty in risk-informed decision making				
著者名	Joshua M. Reinert, George E. Apostolakis				
雑誌名	Annals of Nuclear Energy				
巻号	33	ページ	354-369	年号	2006
発行所	Elsevier				
キーワード					
<p>要旨：</p> <p>不確定性は偶然的な不確定性と認識論的な不確定性に分類される。認識論的な不確定性はパラメータ不確定性、モデル不確定性、完全性の不確定性に分類され、意思決定に大きな影響を与える。本論文では、その中でモデル不確定性に着目しその影響を検討する手法を提案している。</p> <p>内的事象のレベル1 確率論的リスク評価を対象とする。許可基準 (Licensing basis) 変更の意思決定が合理的かどうかを判断することを目的とし、意思決定を変更させる可能性があるような大きなモデル不確定性を有する基本事象を特定し、評価する方法が提案されている。</p> <p>評価は RG1.174 (USNRC) の受け入れ基準に基づき行うことを前提としている。まず、炉心損傷頻度 (CDF) と炉心損傷頻度増分 (ΔCDF) を求める。次に、フォールトツリーの各基本事象を対象とし、炉心損傷頻度 (CDF) と炉心損傷頻度増分 (ΔCDF) に関するリスク増加価値 (RAW) を算出し、重要な基本事象を抽出する。抽出した基本事象に対し、最後に意思決定に影響を与えるには基本事象の生起確率がどの程度増加する必要があるかを計算する。以上の結果に基づき許可基準の変更が合理的かどうか判断できると主張している。</p>					

(担当：糸井達哉)

テーマ分類	不規則振動・不確実性モデリング				
論文題名	不確実性の分類とリスク評価				
著者名	竹村和久、吉川肇子、藤井聡				
雑誌名	社会技術研究論文集				
巻号	Vol.2	ページ	12 - 20	年号	2004
発行所	社会技術研究会				
キーワード	リスク評価、不確実性、無知、意思決定、予防原則、決定フレーム				
<p>要旨：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本論文では、立場によって異なるリスク評価に対する認識の不一致を解消することを目的として、社会的リスク評価を実施するための理論枠組みを提供することを試みている。 ・リスク解析の定義として、技術者は確率論や期待効用理論の概念でとらえるが、欧州やカナダで提案されている予防原則というリスク解析は確率で表現できない不確実性を想定している。また、リスク査定には不可知の部分が含まれるため、技術者によるリスク評価を批判する人々もいる。これが、リスク評価に対する認識の不一致である。 ・リスク評価に関わる不確実性は過去に Wynne が7種に分類分けしているが、この分類では社会問題を解決するための意思決定問題としてどのような理論枠組みを作れるのかが明確ではないため、著者らは集合論を用いて意思決定現象を表現することを試みている。 ・意思決定を、一群の選択肢からある選択肢を採択することと定義すれば、有限な選択肢の集合 A、生起する結果の集合 X、A を採択することによって生起する X が依存する社会情勢などの状態 Θ、採択した選択肢と状態から結果への写像 $f(A \times \Theta \rightarrow X)$、結果の集合 X と X の要素に対する意思決定者の選好関係 R の選好構造 (X, R) で表現できる。意思決定問題は、この集合 $D=(A, \Theta, X, f, (X, R))$ として表現できる。この集合を用いることで、Wynne による7種の不確実性を解釈できるとしている。 ・著者は、意思決定環境に応じた不確実性が4種類に分類できるとしている。「確実性下の意思決定」は選択肢を選んだことによる結果が確実に決まっている状況を指すが、写像 $g: A \rightarrow X$ が存在する状態と示される。「リスク下の意思決定」は選択肢を選んだことによる結果が既知の確率で生じる状況を指すが、X 上の確率の集合 P の上に選好関係 R を入れた選好構造 (P, R) と表される。「曖昧性下の意思決定」は出現する状態や結果は分かっているが出現確率が分からない状況を指すが、状態 Θ の構成要素は判っているが Θ 上の確率分布が既知でない状況や X 上の確率分布が既知でない状態と表される。「無知下の意思決定」は選択肢 A、状態 Θ、結果 X の集合の要素が既知でない状態と表される。 ・意思決定の理論として、合理的な意思決定を志向し望ましい意思決定を説く理論である規範理論、実際に行われている意思決定を説明する記述理論があるが、現実問題の意思決定支援を目的とする処方的アプローチは、従来型のリスク解析では捉えきれない曖昧下の意思決定や無知下の意思決定の問題への対処として有効である、としている。 ・著者らは、構築した理論的枠組みをもとに、社会問題の状況を不確実性の観点から分類し、状況に応じたリスク評価の理論を構築することによって、リスク研究者間のコミュニケーションが進展し、より安全で安心できる社会の構築が期待できるとしている。 					

(担当：足立高雄)

応用シミュレーション（避難・火災等）

最近の応用シミュレーションに関する研究では、地震系の分野のみならず火災系の分野でも実現象を忠実に再現するためのシミュレーション技術が開発されており、火災時における火炎の燃え広がりや群集避難や防火設備や消火活動などの影響を加味した確率論的な火災安全性評価に関する研究が進められている。また、近年の新潟県中越沖地震や東日本大震災における原子力施設の被災状況を受け、重要施設の設計、運営に関しても不確実性を考慮した確率論的安全性評価の重要性が問われている。以上のようなシミュレーションを行う際には、一般的なサンプリング手法であるモンテカルロ法では計算量が膨大になる傾向があるため、計算負荷を低減させるサンプリング手法が積極的に検討されている。以下、3つのトピックスについてまとめる。

（1）群集避難に関するシミュレーション

交通工学や都市計画学など様々な分野で避難シミュレーションが研究されているが、最近では堀ら(2008)のように、避難者個々の行動を予測可能なエージェントシミュレーションが良く用いられるようになり、地震時火災をはじめとする複合災害に対しても検討がなされている。避難シミュレーションの避難者行動を決定づけるロジックには Kirchner & Schadschneider (2002)で議論されているセルラオートマトンモデルやソーシャル・フォーモデルなど多様な手法が提案されている。

（2）火災リスク評価・火災シミュレーション

Jukka Hietaniemi (2007)の木質系部材の木材炭化率を確率モデルとした部材レベルの耐火性能評価や Phillips & Beller (2008)の火災性状と人間行動の相互関係を考慮した総合的な火災安全性評価でも、不確実性を考慮したシミュレーションが積極的に検討されている。火災系シミュレーションについては、アメリカの NIST やフィンランドの VTT が積極的に開発しており WebPage の関連資料は非常に参考になる。

（3）確率論的シミュレーションにおけるサンプリング手法

流体計算や大群集を取り扱う火災系シミュレーションやパラメータの分布を考慮した確率論的シミュレーションは計算負荷が非常に高くなるため、効果的なサンプリング手法が検討されている。Au et al. (2007)は、少ないサンプル数でモンテカルロ法と同等の火災リスク評価が可能であるサブセットシミュレーション法の有用性を示している。また、Okutani & Hino (2009)は、原子炉格納容器の確率論的耐力評価において、二点推定法により大幅に解析数を抑えられることを示している。

近年は地震に起因して火災や津波が発生する事例があり、複合災害に対する安全性の検討もますます重要になってくることが考えられる。実験や実測だけでは把握するのが難しい火災・津波時の建物内の状況や安全性評価に係る様々な因子の不確実性の影響について包括的に把握するためには、応用シミュレーションが果たす役割は大きいと思われる。

（担当：五十嵐さやか）

テーマ分類	応用シミュレーション（避難・火災等）				
論文題名	地震時避難行動予測のためのエージェントシミュレーション				
著者名	堀宗朗、宮嶋宙、犬飼洋平、小国健二				
雑誌名	土木学会論文集 A				
巻号	64	ページ	1017-1036	年号	2008
発行所	土木学会				
キーワード	エージェントシミュレーション、群衆避難、避難経路モデル自動構築、並列計算				
<p>要旨：</p> <p>避難行動のシミュレーションに用いられる主な手法としては、物理モデル手法、セルオートマトン法、エージェントシミュレーションが挙げられるが、本論文ではエージェントシミュレーションを用いて群衆避難を定量的に再現・予測する試みが行われている。</p> <p>避難する個々の人間を表すエージェントは、最大移動速度・視野・追越確率からなる「能力」と、移動の方向と速度を決める能力・過去の移動経路の記憶からなる「知力」を属性とし、見る・考える・動くという「機能」を有している。エージェントの設計パラメタは、単純な避難経路でのシミュレーションや、混雑時における群衆の歩行・災害時の避難行動・高齢者の歩行などを実際に撮影したビデオ画像の分析などによって設定された。避難経路に関しては、GIS と CAD のデジタルデータを自動的に変換してモデルを構築するアルゴリズムを開発し、モデル作成プロセスを大幅に効率化した。</p> <p>開発したエージェントシミュレーションの適用性を検討するため、街区・地下鉄駅・大規模地下街の3つのケースを対象としてシミュレーション解析を行った。</p> <p>街区の避難経路モデルは GIS データから自動構築された。エージェントの中に移動速度の遅いエージェントがいる場合には避難時間が増加するが、エージェントが狭隘な路地に入った場合に迷走することによる避難時間の増加に比べると無視できる程度であった。エージェント数と計算時間との関係はほぼ直線であるが、エージェント数が増えるにつれて追越の頻度が増えることにより更に計算時間が増加する傾向が確認された。</p> <p>地下鉄駅は大きさの異なる2つの駅を対象とした。避難経路は共に CAD データから自動構築された。大型駅と小型駅で、エージェントの密度を等しくしてシミュレーションを行ったところ、10%のエージェントが避難する時間は両者でほぼ同じだが、80%のエージェントが避難する時間は大型駅の方が約2.2倍長く、これは面積比と同じであった。</p> <p>大規模地下街のシミュレーションでは、緊急地震速報の効果についても検討された。地震発生10秒前に30%のエージェントが緊急地震速報を受信した場合、80%のエージェントが避難する時間を早める効果は認められるものの、その差は数秒以下であった。また、緊急地震速報を受けた方が避難時間が遅くなっている場合もあり、パニックによる負の影響についても表現されていた。</p>					

(担当：斎藤知生)

テーマ分類	応用シミュレーション（避難・火災等）				
論文題名	Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics				
著者名	Ansgar Kirchner、 Andreas Schadschneider				
雑誌名	Physic A: Statistical Mechanics and its Applications				
巻号	312	ページ	260-276	年号	2002
発行所	Elsevier				
キーワード	セルラオートマトン、非平衡物理、歩行者ダイナミクス				
<p>要旨：</p> <p>セルラオートマトン（複数形：セルラオートマタ）は、格子状に配置されたセルを使用し、近傍のセルの状態から次の時間ステップの計算を行うもので、人工生命、流体などの物理現象、交通、群集行動、避難行動などのシミュレーションで用いられている。本研究では避難行動シミュレーションに関し、歩行者間の相互作用を記述するため「走化性」（細菌などの生物が誘引物質や忌避物質の化学的な刺激に反応して方向性のある運動をする性質）のアイデアを用いたモデルを提案している。</p> <p>一人の歩行者は一つのセルで表され、隣接する 4 つのセルと原位置に対し遷移確率が与えられる。これより、次のステップの位置は確率的に計算される。遷移確率は最短距離を表す場 S と歩行者の足跡を表す場 D の 2 つのデータから与えられる。場 S は出口に近いほど大きな値が設定される、時間変化しない静的なデータである。一方、場 D はセルが移動すると元の位置のセルの値が 1 加算されるもので、速度ポテンシャル密度に対応している。場 D の値は確率的に減衰したり周辺に拡散したりするよう 2 つのパラメータが用いられている。また、場 S と場 D それぞれに感度パラメータが設定されている。場 S の感度を小さく設定すると、部屋が暗い、煙が充満しているといった出口が分かりにくい状況に対応することになる。場 S の感度が高いと決定論的な秩序だった様態となり、場 D の感度が高いとパニック状況のような無秩序な群集行動の様態となる。</p> <p>様々なパラメータ値でシミュレーションを行い、避難時間を比較した結果、場 S の感度がやや低い状況では、避難時間が最小となる場 D の感度の最適値が存在することが明らかとなった。これは、群集行動と周辺環境の知識の適切な組み合わせにより避難時間を最適化できる、すなわち、協力的行動により避難時間を最小化できることを意味している。</p> <p>よく用いられる避難行動のシミュレーション手法にソーシャル・フォースモデルがある。これは、歩行者を質点で表し、歩行者間や歩行者と障害物間の距離に応じて減衰する反発力を導入して質点系のダイナミクスを解く手法である。本研究のモデルはこれとは全く異なる相互作用のモデルであるが非常によく似た結果を与えている点が興味深い。</p>					

（担当：小檜山雅之）

テーマ分類	応用シミュレーション（避難・火災等）				
論文題名	Probabilistic simulation of fire endurance of a wooden beam				
著者名	Jukka Hietaniemi				
雑誌名	Structural Safety				
巻号	-	ページ	322-336	年号	2007
発行所	ELSEVIER				
キーワード	木材炭化率、耐火、火災シミュレーション、火災リスク				
<p>要旨：</p> <p>フィンランドの研究機関 VTT の火災研究グループは現在、確率的火災シミュレーターを開発しソフトウェアパッケージとして整えており、近い将来に標準的な火災安全性設計のツールとなることが期待されている。</p> <p>本論文では、木材炭化率χを確率モデルにより表し、木質部材の燃焼時間と破壊確率の関係をシミュレーションしている。χは熱流動、木材密度、含水率、周辺酸素濃度などで構成される。燃焼時間に応じてχは累積され、部材の炭化深さが進行することより部材断面特性は徐々に低減してゆき、最終的に荷重を支持できなくなり崩壊に至る。モンテカルロシミュレーションを用いてχをサンプリングし、燃焼時間毎に破壊確率を求めて破壊時間分布を導いている。ただし、ここで求められる破壊時間分布は、ある火災が発生した場合の条件付き確率分布としている。2章において、シミュレーションに使用する確率的変動を有する熱流動率を導いている。まず、フィンランド北西部に位置する商業施設を解析モデルとし、その建物に生じる火災シナリオを確定的に定めて HRR (Heat Release Rate) を求めている。次に、設計火災の確率的特性をもとに HRR カーブを確率モデルに変換し、変換された HRR カーブから熱流動率を導いている。導かれた熱流動率をもとに炭化深さを求めると、30 分後で平均が 6.8mm、標準偏差が 2.2mm である。3章において、設計火災による木造集成材梁の破壊確率をシミュレーションにより求めている。シミュレーションでは固定+積載荷重を正規分布、積雪荷重をディラックデルタ分布とワイブル分布の合成分布とし、また梁耐力を対数正規分布とし、炭化深さにより断面の減少を考慮した限界状態関数から破壊の判定を行っている。シミュレーションの結果によると、破壊確率は 90 分後で約 3%、120 分後で約 13%である。</p> <p>4章において、時間依存型イベントツリー(TDET)を使用した解析によって、供用期間中の建物の火災による破壊確率を求めている。設計火災頻度は年間 1×10^{-4} 回と仮定し、建物内の人の存在、火災安全装置の作動方式を考慮して破壊確率を求めている。求められた破壊確率は、Eurocode に明記されている限界値 70×10^{-6} を下回る結果となった。</p> <p>5章において、本論文のまとめを行っている。また、シミュレーターの開発によって確率的火災耐久性評価を包括的で具体的に説明可能であり、安全装置の効果を建物の破壊リスクに基づいて示すことが可能であると述べている。</p>					

(担当：山崎賢二)

テーマ分類	応用シミュレーション（避難・火災等）				
論文題名	Computer Simulation for Fire Risk Analysis				
著者名	William G.B. Phillips and Douglas K. Beller (Revised by Rita F. Fahy)				
雑誌名	SFPE Handbook of Fire Protection Eng.				
巻号	4 th Edition	ページ	5-155 – 5-167	年号	2008
発行所	Society of Fire Protection Engineering				
キーワード					
<p>要旨：</p> <p>火災安全工学では物理的・化学的な火災性状だけでなく人間の反応や挙動を含んだ複雑な火災シナリオを取り扱う必要性が高まっている。火災安全性に関するシステムは人間が関係するため実験実施が困難であり、過去の実験においても十分な知見は得られていない。一方で、近年はオペレーションズ・リサーチ（OR）の進歩により科学的手法を用いたシミュレーションモデルで火災安全性が検討されている。本報では火災リスク評価へのコンピュータシミュレーションモデルの適用について体系的に示している。</p> <p>シミュレーションモデルは「連続的なモデル」と「離散的なモデル」の2種類に大別することができ、前者のモデルには、火災時の化学反応や熱流及び熱気流の物理過程などが該当し、後者のモデルには、消火活動や建物からの避難などが該当する。火災安全工学に係るシミュレーションモデルではこれらの相互作用の影響を適切にコンピュータに処理させる必要がある。また、火災進展や火災成長や火災警報に対する避難者の反応など確率的な過程が含まれている現象を扱う場合や初期条件自体にランダムなばらつきがある場合には、モンテカルロ法をモデルに適用することが有効である。</p> <p>火災安全工学に適用可能なシミュレーションの発展は未だ開発途中ではあるが、その中でも完成度の高いモデルとして、煙流動及び避難者挙動の相互作用を考慮し、避難者の煙ばく露量から火災による死者を想定するシミュレーションや、死者や建物損傷及び事業費が最小となる消防署の配置を想定するシミュレーション、消防活動やスプリンクラー等の消火設備の作動を考慮したシミュレーションが開発されている。</p> <p>火災安全工学を発展させていくにあたり、近年は在館者特性や人間行動データの蓄積が進んできているものの、火災安全システムのデータ収集の限界や人間の挙動を含む実験を実施する難しさが課題として挙げられる。今後、シミュレーションモデルを利用した検討により有用なデータが蓄積され、データの不確実性を考慮したシミュレーション、火災安全指標となる犠牲者割合の感度の算出及び火災リスクの推定が可能になると考えられる。</p>					

(担当：五十嵐さやか)

テーマ分類	応用シミュレーション(避難・火災等)				
論文題名	Analytical Study for Failure Probability of PCCV under Pressure Load after Seismic Experience				
著者名	Tetsuya Okutani and Yoshihiko Hino				
雑誌名	20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-20)				
巻号	Division 6 (1826)	ページ	1 ~ 10	年号	2009
発行所	International Association for Structural Mechanics in Reactor Technology				
キーワード	確率論的安全性評価 (PSA)、シビアアクシデント、損傷確率、フラジリティ評価、有限要素法、加圧水型原子炉 (PWR)、プレストレストコンクリート製原子炉格納容器 (PCCV)				
<p>要旨：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・この論文では、PWR を有する原子力発電所の重要構築物である PCCV を対象とし、その圧力荷重に対する終局耐力が、地震による損傷の有無に依存しないことを示している。これは、地震によって原子炉の配管などが損傷し、大量の水蒸気が漏れだすことで、PCCV 内の圧力が上昇するという事故を想定している。 ・PCCV を構成する材料として、コンクリート、鉄筋、テンドン (PC 鋼線)、ライナの 4 種類がある。過去の知見から、この 4 種の材料強度の現実的な値 (中央値) とそのばらつきを設定している。例えば、コンクリートの現実的な強度は設計基準強度の 1.4 倍としている。 ・PCCV の圧力荷重による終局耐力として、テンドンの降伏耐力を用いている。これは、テンドンの降伏に合わせて PCCV の変形が大きく進むことが、静的漸増載荷解析の結果から確認されたことによる。 ・FEM の動的非線形解析を実施しているため、MC 法や LHS 法では解析数が膨大となり、総解析時間などの観点から非現実的である。そこで、二点推定法を用いて解析数 (2⁴=16 ケース) を減らしている。これらの解析結果を統計処理することで PCCV の耐力 (テンドンの降伏耐力) の中央値とばらつきを評価している。 ・フラジリティ曲線の評価は、「圧力荷重のみ」と入力地震動の最大加速度を 1000gal、2000gal、3000gal、4000gal とした「地震力を受けた後の圧力荷重」の合計 5 ケースを実施し、5 つのフラジリティ曲線がほとんど一致していることを示すことで、PCCV の圧力荷重による終局状態が地震力に依存しないことを説明している。 					

(担当：足立高雄)

テーマ分類	応用シミュレーション(避難・火災等)				
論文題名	Compartment fire risk analysis by advanced Monte Carlo simulation				
著者名	Siu Kui Au、 Zhi-Hua Wang and Siu-Ming Lo				
雑誌名	Engineering Structures				
巻号	Volume 29、 Issue 9	ページ	2381-2390	年号	2007
発行所	Elsevier				
キーワード	火災リスク、モンテカルロ法、サブセットシミュレーション、不確実性				
<p>要旨：</p> <p>構造物の火災リスク評価は仕様規定的な基準に依ってきたが、近年では、確率論的アプローチが合理的な枠組みと認識され、FEG、BS、ISOなどの性能規定型の設計ガイドラインに採用され始めている。一方、原子力発電所の火災リスク評価や製品出火リスク、火災避難などを対象に確率論的の火災リスク評価が行われてきている。評価手法としては、モンテカルロシミュレーションやFOSM(1次近似2次モーメント法)、ラテンハイパーキューブサンプリング法などが用いられてきた。</p> <p>著者らは従来から、モンテカルロシミュレーションよりも効率的に確率分布を計算することができるサブセットシミュレーション法を提案している(Au & Beck、2001; 2003)。本論文では、その手法を火災リスク評価に適用し、鉄骨の強度低下の指標である火災時の室内温度の最大値の確率分布を予測している。</p> <p>ゾーンモデルによる火災計算を行う汎用ソフトCFASTにより、室内での火災成長と温度変化をサンプルごとに計算している。その際、計算条件として入力する室内火災荷重はOZoneで求め、全サンプルの計算結果を統計処理することで室内最大温度の分布を評価している。発熱速度はNFSC曲線に従い、成長段階では時刻の2乗に比例し全体の70%の火災荷重が消費された後に漸減すると仮定する。シミュレーションではこの曲線を規定するパラメータに不確実性を与えることで、室内最大温度の確率分布を評価している。</p> <p>著者らによるとサブセットシミュレーションで280個のサンプル数から評価した確率分布の評価精度は、モンテカルロシミュレーションで10000個のサンプルから評価したものと同等であり、提案手法は効率的な計算が可能となる。また、スプリンクラーや火災報知機などの被害低減策の故障率を考慮したシミュレーションを行い、サンプル数の低減による効率性の観点から有用性を主張している。</p> <p>ただし、論文の中では各パラメータの変動係数を10%や25%などほぼ一律に設定しており、パラメータ特性が十分把握されていないことが想像される。また、空気混入や煙、熱伝達モデルなどの不確実性の考慮についても今後の課題とされている。</p>					

(担当：糸井達哉)

ハザード／フラジリティ／リスク評価・信頼性設計

この分野は、Cornell (1968) や McGuire (2004) などによって理論や評価法が体系化されてきた。今日では、地震ハザード評価は政府や地方公共団体の自然災害予測や防災計画に、フラジリティやリスク評価は建造物の自然災害に対する強度を示す客観的指標 (例: PML) として実用化されてきている。

最近では、実用化を目的とした研究が活発に報告されている。例えば、Ellingwood et al.

(2004) は軽量骨組木造住宅のハリケーンと地震に対する使用性や人命保護に対応したフラジリティを作成した。壇ら (2006) は、断層モデルによる予測地震動を建物の性能設計に適用することを目的とした地震ハザード評価法のフローを示した。中島ら (2008) は、地震ハザード曲線と建造物の地震フラジリティ曲線を必要としない建造物の年損傷確率評価手法を提案した。また、森・井戸田 (2009) は、耐震診断評点 $I_g=0.7$ 程度を目標とすれば都市の地震リスク低減には十分な効果があることを名古屋市の木造住宅を用いて例示した。Yin et al. (2009) は、Catastrophe Model (CAT モデル) を用いて東アジア地域を対象とした広域台風リスク評価手法を提案した。Miyazawa & Mori (2009) は、日本の過去 500 年の地震記録を用いた最大震度マップを作成し、地震調査研究推進本部 (進本) による地震ハザードマップとの相関性を確認した。Dolsek (2009) は、増分動的応答解析手法で得られる地震動指標と建造物の応答指標の関係 (IDA カーブ) に建造物モデルの不確実性が影響を与えることを例示した。松崎ら (2010) は、塩害を受ける RC 土木建造物の耐久信頼性評価とその際の部分係数の設定を試みた。Mahsuli & Haukaas (2011) は、地域のマルチハザード評価ツールを開発し、バンクーバー都市圏を対象とした地震リスク評価を実施した。

このように、実用化を目的とした研究が進む一方で、評価手法の高度化を目的とした研究も数多く進められている。Zhao & Ono (2001) は、確率モーメントを適用した信頼性解析手法を提案した。Youngs et al. (2003) は、断層破壊による地震被害が避けられない大規模施設を対象とした活断層変位量に着目した地震ハザード評価法を提案した。Wang & Takada (2005) は、広域の建物群やインフラ施設の地震リスク評価を目的として、観測記録から推定した地震動強さの空間相関モデルを提案した。Baker & Cornell (2006) は、ターゲットスペクトルそのものが所与の再現期間を持つ Conditional Mean Spectra を提案した。さらに、Baker & Cornell (2006) は、ばらつきが異なる 2 種類の地震応答スペクトル加速度が存在するが、違いが認識されずに混用されていることを指摘した。Power et al. (2008) は、PEER、USGS、SCEC の共同研究として逆断層の上盤効果や深部地盤構造の影響といった地殻内地震に関する最新理論と米国内外の最新の地震観測記録を取込んだ距離減衰式を提案した。Goda (2010) は、確率変数に非線形の従属関係がある場合に同時確率分布が線形の相関行列では十分にモデル化できない問題点について、接合分布関数 (Copula) を用いる解決法を提案した。

このように、確率論を用いた『地震ハザード／フラジリティ／リスク評価・信頼性設計』の分野は、実用化と高度化の両面から進化を続けている。

1. Cornell, C.A., 1968. Engineering seismic risk analysis, Bull. Seis. Soc. Am. 58(5): 1583-1606
2. Robin K. M., 2004. Seismic hazard and risk analysis, EERI MNO-10

(担当: 足立高雄)

テーマ分類	ハザード／フラジリティ／リスク評価・信頼性設計				
論文題名	Fragility Assessment of Light-Frame Wood Construction Subjected to Wind and Earthquake Hazards				
著者名	Bruce R. Ellingwood, David V. Rosowsky, Yue Li, Jun Hee Kim				
雑誌名	Journal of Structural Engineering				
巻号	130	ページ	1921-1930	年号	2004
発行所	ASCE				
キーワード	建築基準、地震、ハリケーン、確率、木造建築物、骨組構造				
<p>要旨：</p> <p>米国における住宅用軽量骨組木造建築物は、近年ハリケーンと地震によって多大な被害を被っている。過去 15 年間の保険金支払額だけでも 450 億ドルを超え、実際の被害総額はこれより遙かに大きい。建築構造の基準は稀な外力に対して人命の損失に繋がる建物の崩壊を防ぐことを主目的として設定されており、米国ではそれに関しては基本的に達成されているものの、付随する経済的損失の大きさは許容範囲を超えてきており、人命保護のみを目的とした基準で設計された建物はもはや所有者や居住者の期待に応えられなくなっている。</p> <p>上記の期待に応えるため、性能設計の大きな潮流が生まれた。性能設計は、その前身である LRFD（荷重耐力係数設計法）等の第一世代の手法に比べ、より総合的で定量的な確率論的手法を必要とする。本論文では住宅用軽量骨組木造建築物のハリケーンと地震に対するフラジリティ解析を行い、確率論に基づいた応答評価の方法論を提示する。</p> <p>フラジリティはある荷重強さにおける限界状態の条件付確率として与えられる。構造システムのフラジリティは一般に対数正規分布の累積分布関数でモデル化されることが多い。軽量骨組木造建築物のハリケーンに対する主な性能限界状態には、局所的風力による屋根板の浮き上がり、及び、小屋組と壁との接合部の破壊がある。地震に対しては木製パネル耐震壁の破壊を考える。</p> <p>屋根材の浮き上がりについては、張り出しの有無、釘の間隔の違いによって、小屋組と壁の接合部については、固定方法の違い、粗度区分の違いによって、それぞれ複数のフラジリティを作成した。これらのある割合を仮定して統合すると、風速に対する屋根材及び小屋組・壁接合部それぞれの被害予測が可能となる。</p> <p>耐震壁に関しては、最大変形に対して使用継続及び人命保護の各クライテリアに対応するフラジリティを作成した。また耐震壁の構成条件を変えた場合についても検討を行った。</p> <p>性能設計の流れに沿って進めば、住宅建築の性能を社会の要請に合うものとしていくことが可能となるはずである。建築基準が人命保護のみを目的として使用性について顧みなければ、それによってもたらされる大きな経済的損失を社会は受け入れようとしなない。</p> <p>フラジリティモデルの方法論を用いて建物の性能を記述することにより、木材や木質複合材料が利用しやすくなり、自然災害に対する建物被害の不確定性を減らし、ハリケーンや地震による経済的損失や社会的混乱を緩和することになるだろう。</p>					

(担当：斎藤知生)

テーマ分類	ハザード/フラジリティ/リスク評価・信頼性設計				
論文題名	断層破壊のシナリオとその生起確率を考慮した地震ハザード解析に関する研究				
著者名	壇一男・神原浩・藤川智・菊地優				
雑誌名	日本建築学会構造系論文集				
巻号	602	ページ	119-128	年号	2006
発行所	日本建築学会				
キーワード	断層の破壊シナリオ, 生起確率, 断層モデル, 強震動, 地震ハザード, 性能設計				
<p>要旨：</p> <p>本研究では断層モデルによる予測地震動を建物の性能設計に実装することを目標として、断層破壊のシナリオとその生起確率を考慮した地震ハザード解析の方法について一連の流れを提案し、事例を示している。従来、地震ハザード解析における地震動の予測は距離減衰式で行われていたが、それを断層モデルによる計算に置き換える点が本研究の提案である。提案手法は(1)解析地点周辺の地震環境の調査、(2)予備的な地震ハザード解析、(3)断層モデルで地震動を評価する想定地震の選定、(4)強震動シミュレーション、(5)地震ハザード曲線の算定、(6)設計用入力地震動の選定の6つのステップからなる。強震動シミュレーションではひとつの断層に対して複数の破壊シナリオや要素地震を考慮することで予測地震動にばらつきを与えている。また、設計用入力地震動の選定では再現期間に応じた地震動が各想定地震から選ばれるため、想定される地震の特徴を持った設計用地震動により多様な部位の耐震性能を評価することが可能となる。</p>					

(担当：糸井達哉)

テーマ分類	ハザード／フラジリティ／リスク評価・信頼性設計				
論文題名	起こり得る全ての地震の発生確率を考慮した構造物の脆弱性情報を内在化する地震リスク評価方法				
著者名	中島正人、平田和太、森川仁				
雑誌名	土木学会論文集				
巻号	64	ページ	421-433	年号	2008
発行所	土木学会				
キーワード	不確定要因、内在的、脆弱性情報、地震リスク、フラジリティ曲線				

要旨：

本論文では、地震ハザードを考慮した構造物の地震リスク評価方法のうち地震 PSA における構造物の年損傷確率を合理的に評価する方法について新しい提案を行っている。本論文では、入力側では想定され得る一つ一つの地震による地震動群を考慮し、応答側では構造物の動的応答特性を考慮することにより構造物の任意の破壊規範に対する損傷確率を評価している。年損傷確率は一般に、地震ハザード曲線と構造物フラジリティ曲線をもとに計算されるが、本評価方法では地震ハザード曲線とフラジリティ曲線を必要とせず、構造物の任意の破壊規範に対して年損傷確率が求められる。2章では、まず提案される評価方法を構成する各要素技術の理論的背景とモデル化方法について紹介し、次に提案方法の枠組みについて説明している。要素技術のうち、入力地震動には、地震発生源にランダム地震域、海溝型地震、内陸活断層を考慮し、強震記録を統計解析して得られる距離減衰式を用いている。また、損傷確率評価の対象構造モデルとして、線形・非線形一自由度系システムである **Spring-mass** モデルと剛体ブロックの滑動を表現した **Sliding-block** モデルを採用している。そしてこれらのモデルを用いて、地震規模と震源のモデル化、地震毎に三種類の応答スペクトルを規定、各スペクトルに適合する地震動の作成、そして応答の確率分布の統計量を点推定法で求めることで構造モデルの年損傷確率を算定している。3章では、提案方法を用いて仮想地震発生源モデルを対象とした損傷確率評価例を示し、従来方法と比較している。解析結果では、**spring-mass** モデルと **sliding-mass** モデルの年損傷確率を示している。破壊規範に最大応答変位と累積塑性ひずみエネルギーの2種類を扱ったが、解析結果より年損傷確率は破壊規範により異なることが確認され、適切な破壊規範を選択することが重要であると述べている。また、提案法と従来法の比較では地震発生の条件として同一の **G-R** 式の基で地震ハザードを規定し、一方、フラジリティ曲線は提案法と同じ構造物で同じ破壊規範の下で作成されたフラジリティ曲線を従来法に適用し、それぞれの年損傷確率を計算して比較をしている。それぞれの年損傷確率はほぼ同じ値となり、提案法が従来法に対して調和的な評価結果を与え得ることが確認されている。

4章では、評価結果をもとに本提案方法の有効性についてまとめ、今後の課題についてまとめている。

(担当：山崎賢二)

テーマ分類	ハザード／フラジリティ／リスク評価・信頼性設計				
論文題名	避難リスクを考慮した木造住宅と学校建物の耐震化戦略—名古屋を対象に—耐震改修促進のための意思決定支援ツールに関する研究（その3）				
著者名	森保宏，井戸田秀樹				
雑誌名	日本建築学会構造計論文集				
巻号	74 (646)	ページ	1737-1759	年号	2009.12
発行所	日本建築学会				
キーワード	耐震化戦略、木造住宅、学校建物、避難リスク、リスク情報、地震ハザード				
<p>要旨：</p> <p>既存不適格木造住宅の耐震改修が大地震発生時の被害低減で重要な課題である。耐震診断評点の極めて低い住宅を改修するよりも、目標評点が0.7以上であれば1.0に評点を上げるよりも耐震改修戸数を増やすことの方が極めて重要であることを前報で示した。論文では名古屋を対象として小中学校の校舎・体育館を避難所として考え、学校建物の耐震改修による避難所の確保と木造住宅の耐震化による避難者数の低減効果を評価し、避難リスク（避難者が避難所からあふれるリスク）を考慮した都市の耐震化戦略を検討する。</p> <p>地震ハザードは、1kmメッシュごとの地動速度の30年最大値の確率分布関数がそれぞれ対数正規分布に従うと仮定、地震調査推進本部公開の30年超過確率30%および6%の地動速度を元に設定。メッシュ間のハザードは完全相関と仮定。耐震性能指標には建築防災協会による旧精密診断法のI_gを用いる。木造住宅損傷度はワイブル分布で評価、学校建物はI_s値の分布で評価、3階建て以上の校舎を対象にしてフラジリティカーブを用いて損傷度を評価している。一方、学校建物の避難所としての利用可否は損傷度、避難行動を用いた正規確率分布関数を用いて評価している。</p> <p>名古屋市内の全ての学校建物を耐震改修することで、既存不適格木造住宅と学校建物のいずれも改修しない場合に比べ、あふれ人数期待値が100人を越える学区が全260学区中159学区から80学区へと半減するほか、300人以上を越える学区が約1/3、1000人以上となる学区は1/9以下へ減少する。しかし多くの学区での避難リスクは大きく、これを大幅に低減させるため、周辺の木造住宅の耐震改修が欠かせない。避難リスクについて、診断評点0.7を下回る木造住宅の50%を目標評点0.7まで改修することによる低減効果は、半分程度の費用で実現可能であり、費用対効果は高い。また学区ごとの避難リスクを示すマップを作成したが、そうした情報は行政にとって有用な情報となる。</p>					

(担当：平田京子)

テーマ分類	ハザード／フラジリティ／リスク評価・信頼性設計				
論文題名	Basinwide typhoon risk modeling and simulation for Western north pacific basin				
著者名	Jianming Yin, Michael B. Welch, Harumi Yashiro, Mizuki Shinohara				
雑誌名	The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering				
巻号		ページ		年号	2009
発行所	The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering				
キーワード	台風、ハザード評価、モンテカルロシミュレーション				

要旨：

保険業界では自然災害リスクを担保する契約の引き受け判断やそのポートフォリオリスク管理等において Catastrophe Model (CAT モデル) などモデリング技術を用いた意志決定が行われることが多い。このモデルは世界主要国・地域を対象として作成されているが、リスクの存在状況や建物脆弱性、法律その他において大きな違いが存在するため、通常国や地域ごとに作成されている。しかしこの場合、国や地域によっては十分なデータが整備されておらず適切にリスクが評価できないケースや、特に東アジア地域のように一つの巨大台風によって複数の地域が危険にさらされる可能性があってもそのリスクを評価できないなど不都合な点もあった。しかし中国をはじめ、アジア地域では急激な経済成長に伴う保険リスクの増加が見込まれるなどの背景から、近年、CAT モデルにおいて東アジア地域全体の台風リスクを統一的に評価しようとする動きがあり、本研究もその一つである。著者らは気象庁の台風経路データをベースに中国気象局、香港天文台が収集したデータに基づき、北大西洋北部における台風の発生から消滅までを統一的にシミュレートしようと試みている。シミュレーションの対象地域は北緯 0 度～60 度ならびに東経 90 度～180 度のエリアとし、それを 5 度のグリッドに区切って台風経路や強度の変化のモデリングを行っている。

モデリング項目は台風の発生、強度、動き、大きさならびにその消滅としている。台風の発生～消滅モデルは気象庁の台風の発生点から消滅点を平滑化することによって構築し、台風の後戻り運動については先に設定した各 5 度グリッドに対する気象庁の 6 時間ごと経路データに基づいて設定している。台風の強度は周辺部の気圧（標準大気圧）と中心部の最小海面気圧との差異に基づき、大きさ（最大旋衡風速半径）は Vickery and Wadhwa (2009) による北大西洋ハリケーンへの研究に基づき設定されている。また気象庁データに基づいて年間台風発生件数や発生時期等を設定し、モンテカルロシミュレーション手法を用いて台風を発生させることにより損失推定に活用する。

筆者らは検証として気象庁のデータ収集期間と同じ 56 年間台風を発生させ台風の経路を比較すると共に、一万年間シミュレーションを試行し日本における年間平均上陸回数を比較している。また上陸時の強度等については Fujii (1998) による統計結果とも比較を行い、おおむね対応が取れていることを確認している。

(担当：神田誠一)

テーマ分類	ハザード／フラジリティ／リスク評価・信頼性設計				
論文題名	Test of Seismic Hazard Map from 500 Years of Recorded Intensity Data in Japan				
著者名	Masatoshi Miyazawa and Jim Mori				
雑誌名	Bulletin of the Seismological Society of America				
巻号	99	ページ	3140-3149	年号	2009
発行所	Seismological Society of America				
キーワード					

要旨：

1498年から2007年までに観測された地震動強さのデータを用いて、日本における最大震度マップを作成し、地震調査研究推進本部で公開されている地震ハザードマップを検証するための比較対象として用いる。過去500年間の最大震度マップは、475年再現期間、すなわちポアソン過程で50年10%超過確率の地震ハザードマップと比較される。まず最大震度マップを作成する際に、観測記録は表層地盤の増幅率を除することで、工学的基盤における値に変換される。そして観測データが存在しないメッシュのデータは、工学的基盤における観測記録を空間補完することで得られる。最終的には、各メッシュで計算された工学的基盤における震度に、増幅率を掛け、表層における震度に変換している。また最大震度マップは地震のタイプごとに3種類作成され、1つ目に全ての地震、2つ目に沈み込み帯で発生した地震、3つ目に陸域の地殻内地震である。

2つのマップを比較したところ、すべての地震と沈み込み帯で発生した地震により作成された最大震度マップが、推本のハザードマップと高い相関を持つことがわかった。これは、沈み込み帯で発生する地震の再起期間が50~400年なのに対し、記録の観測期間が500年であるため、地震発生の繰り返しを観測するに十分な期間であることが指摘されている。それに対し、陸域の地殻内地震により作成された最大震度マップは、推本のハザードマップとの相関が低くなる。これは、陸域の地殻内地震の再起期間に匹敵するような、長期間の観測記録が存在しないことと、確率論的地震ハザードマップ(PSHM)で、これらの地震の発生サイクルの適切なモデリングや震源のメカニズム、地震発生位置を予測することが非常に困難であることが指摘されている。

その他の特徴として、震度が小さいレベルにおいて、推本のハザードマップは最大震度マップに比べ過大評価となり、震度が大きいレベルでは、過小評価となった。また推本のハザードマップは、震源パラメータの違い(最大ケースと平均ケース)による2ケースで比較されたが、陸域の地殻内地震の最大震度マップをよく説明するのは、最大ケースであった。ここから、最大ケースの震源パラメータが平均ケースに比べ優れている、もしくは推本のハザードマップで考慮されていない、認識されていない活断層がこれ以上に多く存在することが指摘されている。

(担当：田中浩平)

テーマ分類	ハザード／フラジリティ／リスク評価・信頼性設計				
論文題名	Incremental dynamics analysis with consideration of modeling uncertainties				
著者名	Matjaz Dolsek				
雑誌名	Earthquake Engineering and Structural Dynamics				
巻号	38	ページ	805-825	年号	2009
発行所	Wiley				
キーワード	extended incremental dynamics analysis, performance-based earthquake engineering, uncertainty, epistemic, aleatory, latin hypercube sampling				

要旨：

Vamvatsikosa and Cornell(2002)により、増分動的応答解析手法 (IDA) が提案されている。これは、任意の地震動指標でスケールされた地震動群による構造物の動的応答解析を行うことにより、地震動指標値と構造物応答指標値の関係性 (IDA カーブ)を推定するものである。本論では、従来手法に構造物モデルの不確定性を導入し IDA カーブを作成する手法を提案している。具体的には、各構造物パラメータに確率分布を与え、分布を満たすパラメータを持つ構造物サンプル群を複数作成し、サンプル一つ一つに対し、従来の IDA カーブを作成する。用意された地震動群は偶然的な不確定性(aleatory uncertainty)を反映しており、構造物サンプル群は認識論的不確定性(epistemic uncertainty)を反映している。

提案手法は、4層の RC 構造物に適用される。確率分布を与えられた構造物パラメータは、各層の重量、コンクリート強度、スチール強度、有効スラブ幅、減衰定数、柱・梁の初期剛性、柱・梁の Ultimate rotation の 12 個である。構造物サンプル群は、モンテカルロシミュレーションによっても作成可能であるが、本論では計算コスト削減のために、ラテンハイパーキューブサンプリング法(LHS)で作成する。また作成された構造物サンプルの各パラメータが、任意の相関行列を満たすように、焼きなまし法(Sampled annealing)を用いてパラメータの再構成が行われている。

作成された IDA カーブを、従来の構造物のモデル不確定性を考慮しない IDA カーブと比較し、以下の知見を得た。構造物モデルの不確定性は、構造物の崩壊領域から離れたところでは、応答指標に大して重要な影響はない。また、モデル不確定性が考慮されることにより、平均崩壊耐力は減少する。しかしこれは、一般的な結論ではない。またスピアマンの順位相関係数を用いて、応答指標に対する構造物パラメータの感度解析結果から、構造物の崩壊過程に影響を与えるパラメータを選定する手法を提案した。本論のモデルでは、影響度の高い構造パラメータは、減衰定数、柱の初期剛性、柱の ultimate rotation であることがわかった。また、作成する構造物サンプル数は、確率分布を与える構造物パラメータの数より大きくすることが良いこともわかった。

(担当：田中浩平)

テーマ分類	ハザード／フラジリティ／リスク評価・信頼性設計				
論文題名	部分係数を用いた海洋環境下にある RC 構造物の耐久信頼性設計				
著者名	松崎裕、秋山充良、鈴木基行				
雑誌名	構造工学論文集				
巻号	56A	ページ	733-741	年号	2010
発行所	土木学会				
キーワード	信頼性設計、塩害、RC 構造物、部分係数設計法				
<p>要旨：</p> <p>構造物の設計を行う際、確率論の概念を取り入れた設計法のひとつとして部分係数設計法がある。部分係数設計法はレベル1 信頼性設計法として荷重ならびに耐力に対して部分係数を設定して目標とする性能を確保するための概念であり、耐震設計や耐風設計等においてその概念を用いた設計法が提案されている。</p> <p>筆者らはその概念を土木構造物における塩害に対する設計用かぶり厚さを算定するための設計法に応用し、海洋環境下にある RC 構造物の耐久信頼性評価法ならびにその際の部分係数の設定について試みている。概念としては地震リスク等を考慮する際に用いられるハザードの定量化ならびにフラジリティ曲線の算定と同様、筆者らは塩害環境ハザード・塩害に対するフラジリティ曲線を用いて鉄筋腐食の発生率を算定する評価法を提案している。</p> <p>本論文で引用しているハザード曲線は海岸線からの距離に応じて飛来塩分量が減衰することに着目し、海風比率・平均風速・海岸線からの距離を説明変数としているが、筆者らはマクロ的な観点から、海岸線からの距離によって飛来塩分量が規定されると仮定して適用している。</p> <p>一方、フラジリティ曲線においては任意の飛来塩分量の下、塩化イオンの浸透予測や飛来塩分量から表面塩化イオン量を推定する際の不確定性等、鉄筋腐食量の評価に介在する不確定量を考慮して鉄筋腐食量を求め、それがあがる鉄筋腐食量を超過する確率を算定するものとして構築している。</p> <p>また、本論文では上記ハザード曲線とフラジリティ曲線の関係をもとに設計者が容易に設計用かぶり厚さを設定できるよう、部分係数の算出を行っている。耐久限界期間の設定については鉄筋腐食発生点・腐食ひび割れ発生点・質量減少率5%点・質量減少率20%点を設定し、各状態における設計耐用期間ならびに目標信頼性指標ごとに部分係数を算出した。</p>					

(担当：神田誠一)

テーマ分類	ハザード／フラジリティ／リスク評価・信頼性設計				
論文題名	Regional risk by reliability analysis				
著者名	M. Mahsuli , T. Haukaas				
雑誌名	Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering				
巻号		ページ	1991-1999	年号	2011
発行所	Taylor & Francis Group				
キーワード	リスク評価, 信頼性理論, バンクーバー, FORM, SORM				
<p>要旨：</p> <p>地震リスク低減のための重要な対策として、信頼性分析に基づく地震リスク評価をバンクーバー都市圏において行う。とりわけ地域の地震による損失評価は ATC-13(ATC 1985)に基づいていたが、HAZUS (FEMA-NIBS 2003)によっても行われ、それらが主であった。初期の頃の損失評価はシンプルな確率的アプローチに基づいており、それは未知のエラーと関連していた。本研究はこれに信頼性理論を取り入れ、この理論に基づく新しいソフトウェア Rt を開発した。モデルは地震発生率、マグニチュード、震源を考慮している。</p> <p>バンクーバー都市圏における評価対象とする各地域を定め、発生確率、その確率過程、マグニチュードモデル、位置モデル、震度階モデルを作成し、その説明を行っている。バンクーバー市街のビルディングを想定したインフラストラクチャーとその解析結果モデルの項において、先行研究からの発展を述べている。初期の第1・第2段階では各ビルディングの経済損失と修繕コストがセクターロスとして解析対象にされていた。あるいは建物応答が考慮され、構造損失と非構造損失を評価していたことを述べている。本論文の Rt のプラグ&プレイのモデリングフレームワークによってこれらが代用可能なモデルになっている。これらのモデルに基づき、モデルの平滑化技術として FORM,SORM を用いた。こうして Rt によって地域のマルチハザードを評価し、損失曲線を解析して明らかにしている。本研究は進行中の研究である。</p>					

(担当：平田京子)

テーマ分類	ハザード／フラジリティ／リスク評価・信頼性設計				
論文題名	Moment methods for structural reliability				
著者名	Yan-Gang Zhao and Tetsuro Ono				
雑誌名	Structural Safety				
巻号	23	ページ	47-75	年号	2001
発行所	Elsevier				
キーワード	一次信頼性解析法、破壊確率、限界状態関数、モーメント法				
<p>要旨：</p> <p>一次信頼性解析法は、構造信頼性解析の一般的な手法として認識されている。最近の数十年、多くの研究者は FORM の欠点を改善するために、二次信頼性近似法、重点サンプリング法、一次近似 3 次モーメント法、応答曲面法等の FORM に基づく構造信頼性解析が提案されてきた。FORM の欠点を改善するために前述の多くの手法が提案されたが、設計点に関する問題は線形計画法を用いる繰返し計算の固有な欠点であり、改善することは困難である。本研究ではこうした FORM 設計点問題を回避するために、限界状態関数の確率モーメントを利用して破壊確率を計算する。限界状態関数の分布形はそのモーメントと直接関係があり、その関係を簡単に表せば、信頼性指標または破壊確率も簡単に計算できる。論文では、まず、五つのモーメント法に基づく信頼性を導出した。次に、モーメント法に必要な限界状態関数の確率モーメントの求め方法としての標準化点推定法を提示した。最後に、モーメント手法の計算精度と効率は、多くの例を使って示された。FORM に基づく構造信頼性解析法に比べ、提示したモーメント手法は、設計点に関する欠点がなく、導関数の計算や繰返し計算を必要としないので、構造信頼性設計への適用されることが期待される。</p>					

(担当：盧朝輝)

テーマ分類	ハザード／フラジリティ／リスク評価・信頼性設計				
論文題名	A Methodology for Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA)				
著者名	Robert R. Youngs, Walter J. Arabasz et. al.				
雑誌名	Earthquake Spectra				
巻号	19 (1)	ページ	191-219	年号	2003
発行所	Earthquake Engineering Research Institute (EERI)				
キーワード	Earthquakes, Faulting, Hazardous areas, Probability, Tectonics				

要旨：

・この論文では、確率論に基づく断層変位量のハザード評価法（PFDHA）を提案し、過去の地震による記録の回帰式を提示している。また、米国内2サイトにおいてPFDHAを適用し、断層変位量のハザード曲線を示している。ただし、データ不足による不確実性が非常に大きく、データの拡充が今後の課題である。

・一般に、断層破壊による被害は断層上に施設を建設しなければ避けられるため、注目度は低かったが、大規模な施設（例：高レベル放射性廃棄物処理施設）のように被害を避けられない状況では、PFDHAの適用が重要となる。

・PFDHAには「①Earthquake Approach」と「②Displacement Approach」の二種類が提案されている。①はPSHAに準ずる方法であり、PSHAにおける「地震動強さの距離減衰式」が「断層変位の発生確率」と「断層変位量の距離減衰式」に置換された方法となっている。なお、断層変位量は、震源断層の変位量と震源断層以外の断層変位量を区別して統計処理されている。②では断層変位量のハザード評価を、断層変位が生じる要因を区別しない発生頻度と、断層変位が生じた場合の変位量分布の積という単純な数式で表現している。

・断層変位量は、最大断層変位量や平均断層変位量で基準化されている。前者で基準化する場合は上下限値を有するため、確率モデルにはベータ分布が適用されている。後者で基準化される場合には、分布形状の自由度の高さからガンマ分布が適用されている。

・評価法や回帰式が複数提案されているが、これに起因する認識論的不確実性はロジックツリーで処理されている。

・断層変位量のハザード曲線は、変位量が小さい領域での超過確率がほぼ一定になる。これは、小さい地震では断層変位が生じない場合があるからである。また、断層変位ハザード曲線から断層の有効すべり量を逆算できるため、これを観測値などと比較することで、断層変位ハザード曲線の妥当性を確認できる。

(担当：足立高雄)

テーマ分類	ハザード／フラジリティ／リスク評価・信頼性設計				
論文題名	Macrosatial Correlation Model of Seismic Ground Motions				
著者名	Ming Wang and Tsuyoshi Takada				
雑誌名	Earthquake Spectra				
巻号	21 (4)	ページ	1137-1156	年号	2005
発行所	Earthquake Engineering Research Institute				
キーワード					
<p>要旨：</p> <p>広域に分散する建物群やインフラ施設の地震リスク評価（いわゆるポートフォリオ評価）が広く行われるようになってきているが、その際、複数建物における被害の同時発生の評価が課題であり、特に地震動強さの評価におけるモデル化の影響が大きい。</p> <p>地震動強さの予測では、平均値を距離減衰式で予測する。しかし、距離減衰式による予測には大きなばらつき（不確実性）があり、従来のポートフォリオ解析では、地点間のばらつきを完全相関や独立と仮定することが多かった。しかし、現実には 2 地点間の距離が近いほど 2 地点間の地震動強さは似た傾向を示すという空間相関構造があり、その適切なモデル化が求められていた。</p> <p>そこで本研究では、観測記録の距離減衰式による予測値からの残差を、空間相関構造を有する 2 次元の均質な確率場としてモデル化することを提案している。観測最大速度を評価対象とし、国内外の近年の大地震（5 地震）を分析する。まず、観測記録のペアを 2 地点間の距離を基準にグループ化した後、2 種類の距離減衰式（安中，1997；翠川・大竹，2002）からの残差を計算し、距離のグループごとに自己共分散を評価する。その結果について、空間相関（自己共分散）が 2 地点間の距離の関数として指数関数的に減少していくと仮定し、その相関距離（相関係数が $1/e$ となる距離）の大きさを相関の指標とする。観測記録の分析から相関距離は 20～50km 程度と評価される。</p> <p>提案されたモデルは、多地点を対象とした確率論的地震リスク評価や地震動の空間分布の即時評価などに容易に利用できると主張されている。実際、近年では多くのポートフォリオ地震リスク解析で同様のモデル化が行われるようになりつつある。</p>					

(担当：糸井達哉)

テーマ分類	ハザード／フラジリティ／リスク評価・信頼性設計				
論文題名	Spectral shape, epsilon and record selection				
著者名	Jack W. Baker, and C. Allin Cornell				
雑誌名	Earthquake Engineering and Structural Dynamics				
巻号	35	ページ	1077-1095	年号	2006
発行所	Wiley				
キーワード	地震動選定, 記録選定, 地震動指標, Uniform Hazard Spectra(UHS)				

要旨：

観測波形から、構造物の設計用地震動を選びだしてくる際のターゲットスペクトルとして Uniform Hazard Spectra(UHS)が使われる。UHS は同じ再現期間に対応する応答スペクトル値を周期毎につないだスペクトルであり、スペクトルの算出の際には、各周期において地震ハザード解析を独立に行う。ここでは、UHS の各点は所与の再現期間を満たしているが、UHS 全体の再現期間については何も言及されていない。よって UHS をターゲットスペクトルとした地震動は、UHS の各点で考慮されている再現期間より長い再現期間をもつことになる。また、UHS は、高周波成分は近距離中規模地震、低周波数成分は長距離大規模地震の影響を強く受けており、複数の地震イベントを重ねあわせた結果であるため、1つの地震イベントのスペクトルとしてはふさわしくないことが指摘されている。

そこで本論で提案されたのが、Conditional mean spectra(CMS)という考え方である。筆者は、所与の再現期間と整合性のあるスペクトルを作成するために、ハザードの再分解結果であるマグニチュード M 、震源距離 X 、残差 ε に着目し、これらのパラメータを条件としたときの平均的なスペクトルとして CMS を提案した。まず、 ε とスペクトルの形状の関係に着目し、 ε が与えられた時のスペクトルの平均的な形状を、加速度応答スペクトルの周期間の相関係数を用いてモデル化した。この形状に、距離減衰法から算出された中央値、標準偏差を与えることで、CMS を作成することが可能となる。このように作成された CMS をターゲットスペクトルとして選定された地震動は、所与の再現期間をもつ。

この地震動選定手法を以下の3つの選定手法と比較した。1つ目に地震動データベースからランダムに選定してくる手法 (AR-method)、2つ目にマグニチュードと震源距離が想定地震と一致するように選定してくる手法 (MR-BR-method)、3つ目に ε が一致するように選定してくる手法 (ε -BR-method) である。各手法で選定された地震動を用いて、時刻歴解析を行った結果、 ε -BR-method と提案手法の有効性が検証された。中でも、提案手法は評価結果のばらつきが小さいことが分かった。また、観測波形を選定する際には、 M や X よりも、残差 ε を一致させることを重視すべきであることが分かった。

(担当：田中浩平)

テーマ分類	ハザード／フラジリティ／リスク評価・信頼性設計				
論文題名	Which Spectral Acceleration Are You Using?				
著者名	Jack W. Baker and C. Allin Cornell				
雑誌名	Earthquake Spectra				
巻号	22 (2)	ページ	293-312	年号	2006
発行所	Earthquake Engineering Research Institute (EERI)				
キーワード	earthquakes, seismology, structural engineering, risk analysis, hazards, probability				
<p>要旨：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・この論文では、地震ハザード評価における指標として一般的に用いられる地震応答加速度（S_a: Spectral Acceleration）は、その作成方法の違いから2種類に分類され、それぞれ異なるばらつきを有することが述べられている。また、このばらつきが構造物の応答評価結果に与える影響が調べられており、併せて、ばらつきの差を埋める方法が提案されている。 ・2種類の S_a とは、①地震動の平面上の方向性を無視した S_a と、②方向性を考慮した S_a である。より多くのデータを統計処理して得られる①が、②より小さなばらつきを有する。 ・②は S_a の方向性を考慮して構造物の応答評価を行う構造工学者によって必要とされる。一方で、ほとんどの場合、S_a の引用元となるハザードマップは、地震科学者によって①を用いて作成されている。 ・多くの構造工学者が、意図せずに①を②として応答評価を実施してきたため、既往の研究では、応答値のばらつきを小さく見積もってしまっている場合が多い。その一例として、著者は、50年超過確率2%の応答加速度値（減衰率5%）を12%程度小さく見積り、さらに、対応する最大層間変形角を10%程度小さく評価してしまうという試算例を示している。 ・このばらつきの違いによる影響を埋める最も有効な手段として、既往の応答評価法に、ばらつきの過小評価分を定量的に上乘せする手順を付け加えた新しい応答評価法が提案されている。著者は、この応答評価法は、既往の応答評価手順そのものを直接修正する必要がないため魅力的である、と述べている。 ・一方で、著者は、この問題の本質的な解決には、ハザード評価と、それを活用した応答評価の両者に、同一の S_a を使用できる環境を整えることが好ましいと述べている。 					

(担当：足立高雄)

テーマ分類	ハザード／フラジリティ／リスク評価・信頼性設計				
論文題名	An Overview of the NGA Project				
著者名	M. Power, B. Chiou, N. Abrahamson, Y. Bozorgnia, T. Shantz, C. Roblee				
雑誌名	Earthquake Spectra				
巻号	24 (1)	ページ	3-21	年号	2008
発行所	Earthquake Engineering Research Institute				
キーワード					
<p>要旨：</p> <p>本論文では、太平洋地震工学研究センター（PEER）がアメリカ地質調査所（USGS）と南カリフォルニア地震センター（SCEC）と共同で実施した分野横断的な研究プログラムである次世代距離減衰式（NGA）プロジェクトの概要を示している。</p> <p>NGA プロジェクトには、5つのチームが参加し、アメリカ西海岸の地殻内地震を対象としたPGA, PGV, 5%擬似加速度応答スペクトル（周期 0～10 秒）の距離減衰式を開発した。それぞれのチームは開発過程で互いに協力しながらも個別のモデルを提案した。</p> <p>提案された距離減衰式では、逆断層の上盤効果や断層タイプ、断層深さ、硬質地盤サイトからの非線形増幅特性、深部地盤構造（Vs1.0～2.5km/s 層までの深度）の影響などが考慮されている。</p> <p>また、PEER の観測記録データベースに米国内外の最新の記録を追加することで、NGA-PEER データベースを作成した。観測地点の地盤情報など補足的な情報も記載され、これらの情報はどのチームも共通に利用している。また、距離減衰式のモデル化に科学的なバックグラウンドを与えるためにいくつかの予備的な研究プロジェクトが行われた。科学者と利用者であるエンジニアによる分野横断的な議論やレビューも活発に行われた。</p> <p>NGA プロジェクトにより開発された距離減衰式のうち3式は USGS の地震ハザード評価に採用された。</p>					

(担当：糸井達哉)

テーマ分類	ハザード／フラジリティ／リスク評価・信頼性設計				
論文題名	Statistical modeling of joint probability distribution using copula: Application to peak and permanent displacement seismic demands				
著者名	K. Goda				
雑誌名	Structural Safety				
巻号	32 (2)	ページ	112-123	年号	2010
発行所	Elsevier				
キーワード	接合分布関数（コピュラ）、同時確率分布、耐震信頼性評価、最大応答変位、残留変位				

要旨：

同時確率分布のモデル化においては、非線形の従属関係がある場合に、線形の相関行列では十分なモデル化が行えないことがある。接合分布関数（コピュラ）は複数の確率変数間の従属関係を記述する関数で、これを用いることにより、各確率変数の周辺分布のモデリングと確率変数間の従属関係のモデリングを分離して行うことができる。確率変数間の相関係数は、確率変数を対数関数や指数関数によって変換すると値が変わってしまうが、コピュラは狭義単調増加関数による変換に対し不変で、ケンドールの τ やスピアマンの ρ といった順位相関係数が接合分布関数のモデリングにおける関連性の指標として用いられる。接合分布関数には正規コピュラやtコピュラが含まれる楕円コピュラ、クレイトン・コピュラ、グンベル・コピュラ、フランク・コピュラが含まれるアルキメディアン・コピュラといったクラスがある。これらのコピュラは確率分布の裾における従属関係などに特徴があり、赤池情報量基準AICを参照してよく適合するコピュラが選択される。

信頼性解析における有用性を示すため、地震応答の最大変位（最大塑性率）と残留変位（残留変位と降伏変位の比）の関係について、解析例を示した。構造物のモデルは Bouc-Wen 履歴特性（耐力低下とピンチングはなし）を持つ弾塑性 1 自由度系を使用した。入力地震動はカリフォルニア州の 381 波の地震観測記録（762 成分）を用いた。固有周期は 0.2 秒から 1.0 秒、降伏強度は 0.1 から 2.0 の間で変動させた。周辺分布のモデルについては、尤度を比較した結果、最大塑性率に関してはフレシェ分布、残留変位に関しては一般化パレート分布をモデルとして採用した。従属関係のモデルについては、tコピュラ、グンベルコピュラ、非対称グンベルコピュラの 3 つを比較したところ、非対称グンベルコピュラが最も AIC が小さく、時刻歴応答解析のサンプルに見られる高い確率（上位裾部）の従属性がよく再現され、また残留変位が最大変位よりも大きくなるような不自然さも生じにくく、より現実的なシミュレーションができていた。残留変位と降伏変位の比が 1~2 という条件付きの最大塑性率の累積分布関数について、独立コピュラ、正規コピュラ、非対称グンベルコピュラの 3 つを比較したところ、非対称グンベルコピュラが最もよく時刻歴応答解析の結果と対応していた。

（担当：小檜山雅之）

リスクマネジメント(リスクコミュニケーション・リスクファイナンス・意思決定)

リスクマネジメントとは、リスクを組織的にマネジメントしてハザードやそれによる損失の回避または最小化を図るプロセスであり、企業経営の管理手法としてよく知られるが、その管理プロセスは様々な分野で活用されており、建築構造分野もその例外ではない。建築構造分野において昨今では主にリスクコミュニケーション・リスクファイナンス・意思決定に関する研究が活発に行われている。

リスクファイナンスに関する建築構造分野の研究で代表的なものに、地震による被災者のリスクを金融市場に転嫁する手法の研究がある。Guillermo Franco(2010)は、地震の物理的特性値をトリガーとした支払い判定(パラメトリックトリガー)による地震災害債権(CAT)を用いた仕組みを提案した。これは、保険産業が発達していない発展途上国でも災害リスクを世界の金融市場に転嫁することができるリスクマネジメント手法である。

また、ステークホルダー(行政・専門家・企業・市民)の関係主体間における合意形成から意思決定までを合理的かつ円滑に進める場合にリスクマネジメントが有効である。限られた予算を複数の橋梁の補修に分配する場合の意思決定に、Mark G. Stewart et al. (2001)は、リスクランキングによる優先順位付けを行う安全性評価指標が有用であることを示した。近年では市民の意思決定に重点を置く研究報告が数多く、市民と他のステークホルダー間との意識共有、協力関係の重要性が伺える。廣井ら(2006)は、耐震補強工事に対して市民(住民)の属性別に有効な政策を把握することを目的に、ランダム効用理論を用いて意思決定者の属性や補強方法の特性の違いによる意思決定構造に及ぼす影響を定量的に明らかにした。Solomon Tesramariam et al. (2010)は、不確実性を考慮した耐震補強方法の選定手法として、Yager (2004)が提案する複数の意思決定者がいるときのファジー効用関数を用いた手法を拡張した手法を提案した。井戸田ら(2007)は、既存不適格木造住宅の耐震性向上が地震時に住民を守る点で有効な政策であるが、耐震化が進んでいない現状に対し、住民が耐震改修工事を行う判断基準となる意思決定支援ツールを提案した。

さらにこうした意思決定をサポートするシステムやツールに着目した研究に対して、意思決定者の意識変化に着目したリスクコミュニケーションに関する研究が報告されている。有効なシステムやツールの活用には、意思決定者がそもそもリスク回避意識を備えていることが不可欠であり、そうでない場合には意識変化が必要である。山田ら(2008)は、水害リスクマネジメントを対象としてPDCAサイクルに沿ったワークショップの運営方式とその内容・意識変化に着目し、提案手法が住民の防災意識を高揚させる有効な手法であることを示した。本間ら(2008)は、住民の防災意識を5つの段階別のフェイズで表現し、洪水災害の講演会による防災教育効果の計測手法を提案した。提案手法を防災講演会に参加した洪水危険地域の住民に適用することで参加住民の防災意識の向上を確認できている。

リスクマネジメントが活用される分野は幅広いなか、建築構造分野では防災による社会的影響が大きいため、今後ますますこれらの研究が重要となっていくと考えられる。

(担当：山崎賢二)

テーマ分類	リスクマネジメント (リスクコミュニケーション・リスクファイナンス・意思決定)				
論文題名	Minimization of Trigger Error in Cat-in-a-Box Parametric Earthquake Catastrophe Bonds with an Application to Costa Rica				
著者名	Guillermo Franco				
雑誌名	Earthquake Spectra				
巻号	26 (4)	ページ	983-998	年号	2010
発行所	Earthquake Engineering Research Institute				
キーワード					
<p>要旨：</p> <p>地震リスクを金融市場に転嫁するために地震災害債権（CAT ボンド）という仕組みがしばしば利用される。そこでは、SPV（特定目的事業体）などの実体のある組織が債権を発行し、災害時にはこのような組織から迅速な被害補填が行われる。商品設計にあたり、モラルハザードがない透明性のある仕組みとするために、信頼に足る第三者機関が発表する地震の物理的特性値をトリガーとした支払い判定（パラメトリックトリガー）が採用されることが多い。このような金融手法を活用することにより、保険産業が発達していない発展途上国においても災害リスクを世界の金融市場に転嫁することが可能になる等の顕著な成果が見られる。</p> <p>まず、対象地域を地図上で正方形領域に離散化し、それぞれの領域でマグニチュードと震源深さの閾値を設定し、条件を満たす地震が発生すれば投資家の元本が没収され出資者に配布され、地震発生がない場合に投資家に利子を上乘せして返済する債権（Cat-in-a-box bond）を考える。債権の支払いと実被害が対応しないことに着目し、両者の差をトリガーエラーと定義する。</p> <p>その上で、地震発生記録（もしくはシミュレーション結果）と被害記録（もしくはシミュレーション結果）に基づき、トリガーエラーが小さい最適なトリガー設定法を自動設計する手法を提案し、単純化した例題とコスタリカへの適用例を通してその有効性を示している。</p>					

(担当：糸井達哉)

テーマ分類	リスクマネジメント (リスクコミュニケーション・リスクファイナンス・意思決定)				
論文題名	Reliability-based bridge assessment using risk-ranking decision analysis				
著者名	Mark G. Stewart, David V. Rosowsky, Dimitri V. Val				
雑誌名	Structural Safety				
巻号	23	ページ	397-405	年号	2001
発行所	Elsevier				
キーワード	信頼性、橋梁、構造物、アセットマネジメント、リスク、決定解析				
<p>要旨：</p> <p>橋梁の現在及び将来の信頼性に関する情報は、それに関わる合理的意思決定に必要不可欠である。本論文では、リスクランキング決定解析を考慮した、時間と共に更新される橋梁の信頼性評価の、意思決定問題への応用について検討する。</p> <p>まず、橋梁の信頼性評価について振り返る。設計コードに基づいた評価のアプローチは実務者に馴染み易いが、実は、新規設計用に開発されたコードは既存の橋梁の評価には適用することが難しい。それは第一に設計と評価には異なった種類の不確実性が存在すること、第二に橋梁が過去に満足な性能を発揮していれば設計・施工上の誤りに関する不確実性を減少させること、第三に過度に保守的な設計と評価がそれぞれ経済的には異なる結果をもたらすことによる。</p> <p>評価コードが現在の LRFD のような設計コードと互換性を持つことは望ましいが、両者のキャリブレーションの過程には大きな違いがある。即ち、評価コードの場合には既存橋梁の検査結果による確率分布のアップデートが必要なこと、目標信頼性指標が設計で使われるものとは異なってくる、コストの側面がより重要となってくること等である。評価に用いられる目標信頼性指標には破壊の結果引き起こされる事態、評価期間、残余供用期間等が影響する。</p> <p>限られた予算を複数の橋梁のメンテナンスに分配しなければならない時、リスクランキングによる優先順位付けが必要になる。その指標となるのは一定期間中の期待損失、即ち、各限界状態毎の破壊時刻の確率密度と損失の積を割引率を考慮して期間にわたって積分したものの総和である。</p> <p>事例として、劣化の進展度合が異なる複数の RC 橋梁のリスク評価を行う。まず建設後の年数に応じて変化する年破壊確率を、それまで破壊が起らなかったという条件で更新して評価したところ、劣化の進展がある程度遅い場合には、年数が経つほど年破壊確率が減少する傾向が見られた。次に、年齢・交通量・劣化速度が異なる 4 種類の橋梁について、今後 5 年間の破壊確率を評価して比較した結果、劣化が全くなくかつ新しい橋梁よりも、多少劣化があっても長い期間残存してきた古い橋梁の方が破壊確率は小さくなった。なお、評価される破壊確率はモデル化の仮定によって敏感に変わる可能性があるため注意が必要である。</p> <p>リスクに基づいた橋梁の安全性評価へのアプローチは橋梁性能に関する有用な指標を与え、それをメンテナンス・補修・架け替え等のリスクマネジメント手段の優先順位付けに用いることができる。また、リスクランキングの適用事例によって、安全性評価が与条件のみに基づいてなされるべきではないことが示された。</p>					

(担当：斎藤知生)

テーマ分類	リスクマネジメント (リスクコミュニケーション・リスクファイナンス・意思決定)				
論文題名	ランダム効用理論に基づく住宅の耐震補強に関する選択行動分析				
著者名	廣井悠, 小出治, 加藤孝明				
雑誌名	地域安全学会論文集				
巻号	8	ページ	1-9	年号	2006
発行所	地域安全学会				
キーワード	耐震補強, ロジットモデル, 政策評価, 地震調査委員会				
<p>要旨：</p> <p>本論文では、耐震補強工事の意思決定者の属性や補強工事の選択肢の特性の違いが、耐震補強工事の選択に関する住民の意思決定構造にどの程度影響しているのかを明らかにし、属性ごとにどの政策がどの程度有効であるか（政策のインパクト）を把握することを目的としている。</p> <p>本論文では、耐震補強工事の選択に関して以下の検討結果と考察が纏められている。</p> <p>① 耐震補強工事に関する意識調査アンケートの分析（集計分析） 静岡県を持ち家層世帯に対して、意思決定者の属性や耐震補強工事の選好特性についてアンケートを実施した。属性の項目には性別、年齢、年収、地震保険加入の有無、地震に対する不安感などが含まれ、選好特性には工事の自己負担額（20~200万円）、耐震補強の程度（頑強 or 簡易）が含まれる。集計分析の結果、属性の違いで耐震補強工事の選択の意思決定構造が異なるということを定性的に明らかにした。</p> <p>② 耐震補強工事の選択に影響を及ぼす要因から個人の選択が判別可能かの検討（判別分析） 判別分析は、属性や選好特性を変数とした判別関数を定義することで個人の属性や選好特性からその人の意思決定を判別する分析手法である。アンケート結果を用いて判別分析し、線形判別関数を得たところ、全体の63.5%を正しく分類することができた。しかしながら、この結果は選択行動の再現性としてはそれほど高くなく、また判別分析により政策の効果や組み合わせを議論することは難しい。</p> <p>③ ランダム効用理論を用いた耐震補強の選択確率の推定（非集計分析） ランダム効用理論は「意思決定者は与えられた選択肢集合の中から最も効用（満足度）の高い選択肢を選ぶ」ことを前提としている。個人がある選択肢 j を選ぶときの効用 U_j は確定項と確率項の和で表わされ、確率項にロジットモデルを適用した場合、個人がある選択肢 j を選ぶ選択確率を定量的に算定することができる。選択確率は属性や選好特性の関数で表されるので、多量のデータを用いなくとも耐震補強の総量の把握や政策のインパクトを定量的に評価することが可能である。</p>					

(担当：五十嵐さやか)

テーマ分類	リスクマネジメント (リスクコミュニケーション・リスクファイナンス・意思決定)				
論文題名	Decision Making Under Uncertainty-An Example for Seismic Risk Management				
著者名	Solomon Tesfamariam, Rehan Sadiq, Homayoun Najjaran				
雑誌名	Risk Analysis				
巻号	30(1)	ページ	78-94	年号	2010
発行所	John Wiley & Sons				
キーワード	証拠理論、ファジィ、多基準意思決定、OWA、地震リスクマネジメント、不確実性				
<p>要旨：</p> <p>不確実性を考慮した耐震補強方法の選定手法が提案されている。耐震補強では、導入費用、保守費用、工期、建物機能の適合性といった経済的・社会的基準や、熟練工の必要性、基礎構造への影響、被害リスクの大きさ、工事による建物使用の制限といった技術的基準などが考慮される。このような多基準の意思決定では、データが少ないこと、知識が不足していること、主観性といった因子が影響する。この不確実性下・知識不足下の意思決定に関して、Yager (2004)が提案する複数の意思決定者がいるときのファジー効用関数を用いた手法を拡張した新たな手法を提案している。</p> <p>具体的には、①Yager (1988)の順序付き加重平均 (ordered weighted average, OWA)による効用の統合方法、②Dempster (1967)と Shafer (1976)が構築した証拠理論 (evidence theory)による確信度情報の統合方法、ならびに Kiremidjian (1985)の提案を改良した意思決定者の経験と自信に基づく信頼度設定、③利得(payoff)に関するファジー効用モデルに基づいている。</p> <p>まず提案手法を説明するため、2つの対策方法から1つを選ぶ意思決定問題について、5つのケースを示している。ケース 1 は利得に対し互いに素な確率で重みが与えられたとき、ケース 2 は知識不足時のとき、ケース 3 はこれに加え信頼度が同じ 3 人の意思決定者がいるとき、ケース 4 は意思決定者の信頼度が異なるとき、ケース 5 はさらに利得の値があいまい (ファジー) であるときである。それぞれ、パラメータの値や情報統合のルールによって、好ましい対策方法が変わりうることを示している。</p> <p>例として、3 階建て鉄筋コンクリート造建物の耐震補強について、1) ガラス繊維補強プラスチックによる補強、2) 鉄骨ブレースの付加、3) コンクリートによる被覆、4) 免震構造の導入の 4 つの補強方法を比較している。提案手法による検討の結果、鉄骨ブレースの付加がもっとも好ましく、次いで免震が好ましいことが示されている。そして、順序付き加重平均における楽観性を表すパラメータ <i>orness</i> の値によっては、順位が 3 番と 4 番の補強方法が入れ替わることが観察された。</p>					

(担当：小檜山雅之)

テーマ分類	リスクマネジメント (リスクコミュニケーション・リスクファイナンス・意思決定)				
論文題名	在来軸組木造住宅における一般耐震診断の評点と損傷度の関係 耐震改修促進のための意思決定支援ツールに関する研究 (その1)				
著者名	井戸田秀樹、嶺岡慎悟、梅村恒、森保宏				
雑誌名	日本建築学会構造系論文集				
巻号	612	ページ	125-132	年号	2007
発行所	日本建築学会				
キーワード	木造住宅、耐震診断評点、損傷、耐震改修、費用対効果				
<p>要旨：</p> <p>阪神淡路大震災の被害調査報告に基づけば、地震時に人命を守るためには既存不適格木造住宅の耐震性を向上させておくことが効果的な対策だが、実際には住宅所有者の意思決定段階において経済的または技術的支援の欠如を理由に耐震化は進んでいない。本研究は既存不適格木造住宅の耐震化を促進するために、住宅所有者が耐震改修工事を行う判断基準となる意思決定支援ツールを提供することを目的とし、本論文では、支援ツールの技術的情報である一般耐震診断の評点と地震時損傷度の関係を明らかにした。</p> <p>2章、3章では、既往の調査結果から、構造技術的な側面から対応できる項目として耐震改修の費用とその効果に絞り込んで対応策を検討している。耐震改修の費用に関しては、仕上げ材も含めた工法全体で低価格な耐震改修工事の実現と、補強程度は軽微であるが低価格で済む改修の推奨が重要であり、実現には耐震改修のグレードと耐震性能を示す評点の上昇値の関係を明確にすることが必要である。耐震改修の効果に関しては、住宅所有者が耐震改修で向上する耐震性能を実感できる説明が重要であり、建物の損傷メカニズムを説明し理解を得ることが必要である。4章では、前章の検討結果に基づいて、耐震改修意思決定支援ツールを提案している。支援ツールは、地震の大きさの尺度に「震度階」、損傷程度の尺度に「倒壊、大破、中破、小破、無被害」の5段階、耐力特性の尺度に「評点」を用いてそれぞれの尺度を定量的関係から有機的に結び付けた性能マトリクスである。5章、6章では、既往の耐震診断手法に基づいて診断された木造住宅の時刻歴応答解析を行うことによって、前章で提案した支援ツールの構築に必要な評点と損傷程度の間関係を明らかにしている。解析により、震度の大きさと損傷度の関係、評点と損傷度の関係を定量的に示した。また、震度5強を超える場合には同じ評点でも損傷度の変動性が極めて大きいことが確認できる。解析結果と実被害の被害調査結果の比較を行ったところ、解析は実被害よりも損傷程度を上回るケースがあるが、全体の傾向としては良い対応を示した。7章では、前章での結果で見られた大きな変動性を認めた上で耐震改修効果を説明するために、性能マトリクスにおける評点と損傷程度の間関係を確率量で表現している。今後、支援ツールの実用性を高めるために、より実感が高まるような説明性の高いツールを構築することと詳細な解析手法から震度と損傷程度の間関係を精確にすることを重要な課題として位置づけている。</p>					

(担当：山崎賢二)

テーマ分類	リスクマネジメント (リスクコミュニケーション・リスクファイナンス・意思決定)				
論文題名	水害に対する地域防災力向上を目指したリスクコミュニケーションの実践的研究				
著者名	山田文彦、柿本竜治、山本幸、迫大介、岡裕二、大本照憲				
雑誌名	自然災害科学				
巻号	27(1)	ページ	25-43	年号	2008-05-31
発行所					
キーワード	水害、リスク、コミュニケーション、マネジメント、避難行動、ハザード				
<p>要旨：</p> <p>水害リスクマネジメントとは、企業経営などで用いられる組織防衛の概念を水害に応用したものである。本研究では水害リスクマネジメントを3つの点から定義する。</p> <p>①常時水害を監視し、発生を的確に予測すること ②予測される水害に対する対策を迅速にかつ効果的に実施すること ③水害時に個人が的確な行動をとれるように水害や対応行動に対する教育・訓練を計画・実施すること</p> <p>具体的には洪水ハザードマップ作成や避難行動計画、防災教育や防災リーダー育成などが該当する。近年その有効な対策として、ワークショップ形式の水害リスクコミュニケーションの活用が注目されている。特に住民、行政と専門家の双方向の情報共有と理解が重要である。本研究ではワークショップ形式を用いた水害リスクコミュニケーションとそれに基づく社会実験を提案する。他の研究がシステムやツールに注目しているのに対して、本研究はPDCAサイクルに沿ったワークショップの運営方式とその内容・意識変化に着目している。また熊本市壺川地区（小学校区）でのケーススタディを行っている点が新しい。</p> <p>壺川地区の住民によるハザードマップ作成、避難行動に関するワークショップ形式の社会実験を実施し、水害避難経路マップの作成、想定シナリオに基づく災害図上訓練などを行った結果をまとめた。その各段階における意識調査が行われ、その結果も示されている。</p> <p>以上により、提案するリスクコミュニケーション手法が住民の意識を高揚させる有効な手法であることを示した。しかし地域防災力の持続的な向上を図るためには、PDCAサイクルを循環させ、実施可能な計画への練り上げ、住民への浸透が要求される。</p>					

(担当：平田京子)

テーマ分類	リスクマネジメント (リスクコミュニケーション・リスクファイナンス・意思決定)				
論文題名	住民の防災意識水準に応じた教育プログラム策定手法に関する研究				
著者名	本間基寛、片田敏孝、桑沢敬行				
雑誌名	土木計画学研究・講演集				
巻号	Vol.37, No.257	ページ		年号	2008
発行所	土木学会				
キーワード	リスクコミュニケーション、防災意識、防災計画、意識調査分析				
<p>要旨：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・この論文では、住民の防災意識を高めることを目的とした防災教育効果とその計測手法についての概念整理を行い、洪水災害の講演会による防災教育効果の計測事例を報告している。 ・防災教育の効果の計測では、講演会等に参加することで直接防災教育を受けた住民はもとも防災に高い関心を持っており、この参加住民らによる防災に関心の低い不参加住民への波及教育効果を測定することが重要である。すなわち、防災意識の向上という質的效果と、防災意識を持つ住民数の増加という量的効果の双方を考えることが重要である。 ・一般住民に対する防災教育の目標を「災害に対する自主的な防災行動を促すこと」「防災対策の必要性を過不足なく与えること」とし、実施すべき教育の内容を適切なものとするため、住民の防災意識を5つの段階別のフェイズ（リスクの存在を考えたことがない、リスクの存在に気付く、リスクを深く理解する、対処方法を理解する、対処行動を実行する）で表現している。また、教育前後のフェイズの変化を計測することで、教育効果を客観的かつ定量的に計測することが可能となり、教育方法やツールの効果的な改良に役立てることが出来る。 ・提案手法を防災講演会に参加した洪水危険地域の住民に適用することで防災教育の効果を計測し、参加住民の防災意識の向上を確認している。ただし、この論文では、不参加住民への波及効果による地域全体への防災教育効果の計測は行っておらず、今後の課題としている。 					

(担当：足立高雄)

構造ヘルスマニタリング(システム同定・劣化診断・メンテナンス)

構造ヘルスマニタリング (Structural Health Monitoring, SHM)はこの10年間で黎明期から実用化へ向けて大きく発展した技術である。内容的には、構造物にセンサを設置して加速度や歪等の物理量を計測し、様々な信号処理・システム同定・最適化手法等を用いて構造物の特性及びその変化を評価し、損傷や劣化の位置及び程度の推定や今後の進展予測を行う技術と言える。この分野の研究内容は、大きく分けて以下の3つのカテゴリに分類することができよう：

- (1) システム同定・最適化手法
- (2) 新しいセンサ及び計測システムの開発
- (3) 地震後の避難・復旧活動や維持管理の意思決定支援

特に最近実用化における課題と直結する(3)に関わる研究が増えてきている。本テーマには6編の論文が抄録されているが、その中ではMeo & Zumpano (2005)、佐藤・田中(2006)、Saito & Beck (2010)が(1)に、圓ら(2007)が(2)に、Mullard & Stewart (2009)とShoefs et al. (2009)が(3)に、それぞれ対応している。具体的には以下の通りである：

Meo & Zumpano (2005)は、センサの最適配置問題を扱っており、センサ情報から推定されるモード形状とモデルとの誤差、及び、フィッシャー情報行列の行列式をクライテリアとして、6つの最適配置手法の比較を行っている。佐藤・田中(2006)は、非線形システムに対して適用性の高いモンテカルロフィルタをシステム同定に利用し、更にその計算効率や追従能力を向上させた改良型を提案している。Saito & Beck (2010)は、ARXモデルを用いたシステム同定で常に問題となっていたモデル次数の決定を、ベイズの定理を応用したモデル選択手法により合理的に行う枠組みを提案し、実建物のモニタリング記録を用いて効果を検証している。圓ら(2007)は、それぞれローカル及びグローバルなモニタリングに供するセンサと無線計測システムを開発し、ひび割れの発生や振動特性の変化を捉えることによる損傷検知の実現を試みている。Mullard & Stewart (2009)は、鉄筋コンクリート造構造物の塩化物による腐食劣化を対象とした維持管理モデルを提案、橋梁の床版に適用し、点検期間や補修方法が供用期間中の補修の発生確率に及ぼす影響等について評価している。Shoefs et al. (2009)は、受信者動作特性(ROC)曲線により非破壊検査の検知性能を評価する枠組みを示すと共に、エルミート多項式カオスの最尤推定で確率分布を表現した、より検知性能の高い理論的ROC曲線のモデル化手法を提案している。

これら論文の掲載誌は、Journal of Engineering Structure / 土木学会論文集 / Earthquake Engineering and Structural Dynamics / 日本地震工学会論文集 / ASCE Journal of Structural Engineering / Structural Safety となっており、構造工学・地震工学・信頼性工学の幅広い分野に跨っていることが伺える。その中でも、地震防災やストックマネジメントが喫緊の課題となっている現在、確率統計・信頼性理論の視点からの研究はますます重要になっていくものと考えられる。

(担当：斎藤知生)

テーマ分類	構造ヘルスマモニタリング (システム同定・劣化診断・メンテナンス)				
論文題名	On the optimal sensor placement techniques for a bridge structure				
著者名	M. Meo, G. Zumpano				
雑誌名	Journal of Engineering Structures				
巻号	27	ページ	1488-1497	年号	2005
発行所	Elsevier				
キーワード	Optimal sensor placement, Fisher information matrix, Covariance matrix				
<p>要旨：</p> <p>本論文では、センサー数が限られている条件下でセンサーの最適配置問題(Optimal Sensor Placement, OSP)についての議論がされている。6つの異なる OSP 手法が比較される。設置されるのは全部で 10 個のセンサーであり、これらのセンサーによって推定される大径間吊り橋の固有振動モードの精度を競う。比較におけるクライテリアは 2 種類用意されている。1 つ目は、10 個のセンサーで推定される固有振動モードと有限要素法によって別途計算される 3 次までの固有振動モードの平均 2 乗誤差である。2 つ目は各センサーが観測した信号強度やノイズへの耐久力を表すフィッシャー情報行列(FIM)の行列式である。</p> <p>センサー設置位置の選定は次のように行われる。はじめに吊り橋にくまなく 2042 個のセンサーを配置し、各最適化の条件下で貢献度の低いセンサーを 1 つずつ除去する。この作業が残り 10 個になるまで繰り返す。比較される 6 つの OSP 手法は以下の通りである。1 つ目は FIM の行列式を最大化する EFI(Effective Independence Method)である。2 つ目は、全ての固有振動モードを同様の重みで最適化してしまう EFI を改良した EFI-DPR 法である。これを用いることでより低次の固有振動モードの影響を強く考慮できる。3 つ目は FIM を質量で重み付けをした運動エネルギー行列(Kinetic Energy Matrix, KEM)の行列式を最大化したものである。4 つ目は EVP(Eigenvalue Vector Product)で、これはセンサーが固有振動モードの接点に設置されるのを防ぐ最適化を行なう。5 つ目は NODP(Non-Optimal Driving Point)法である。この方法は、全固有振動モードの変位の中で最も小さい値を NODP としてセンサー位置ごとに算出し、これが最も小さいセンサーから除去する方法である。よってセンサーが吊り橋の中心に集まる傾向がある。6 つ目は著者らが提案する手法で、VM(Variance Method)である。</p> <p>これら 6 つの手法が上述の 2 つのクライテリアで比較された。優れていたのは FIM の最適化を行う EFI と EFI-DPR の 2 つの手法であり、低次モードの検出には EFI-DPR 法が優れている。著者等によって提案された VM 法はそれに継ぐ精度であったが、最適なセンサー数(Optimal Number of Sensors, ONS)を決定するための指標となり得る可能性を示唆した。</p>					

(担当：田中浩平)

テーマ分類	構造ヘルスマニタリング（システム同定・劣化診断・メンテナンス）				
論文題名	モンテカルロフィルタを用いた効率的構造同定法の開発とその適用				
著者名	佐藤忠信，田中庸平				
雑誌名	土木学会論文集 A				
巻号	Vol. 62, No. 3	ページ	693-701	年号	2006
発行所	土木学会				
キーワード	システム同定、モンテカルロフィルタ、振動台実験、 リラクゼーションスキーム				
<p>要旨：</p> <p>構造物の健全性を把握するヘルスマニタリングの概念において，構造物の系としての健全性を確認する手法の一つとしてシステム同定が挙げられる。システム同定は，構造物の応答の観測記録から構造システムの損傷箇所や損傷程度を把握する手法である。この代表的な手法としてはカルマンフィルタが挙げられるが，これは基本的に線形システムを対象とした理論であり，複雑な非線形システムへの適用が課題であった。</p> <p>本報告は，上記の課題解決のために，非線形システムに対して適用性の高いモンテカルロフィルタをシステム同定に利用したものである。また，従来用いられてきたモンテカルロフィルタの一部が改良され，自由度の大きな構造システムへ適用可能な効率的な構造同定法として Relaxation Monte Carlo Filter (RMCF)が提案されている。更に，遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm)を RMCF に組み込むことによって，より良い追従能力を有する同定手法 (Genetic Algorithm Relaxation Monte Carlo Filter: GA-RMCF)が提案されている。</p> <p>この手法の適用例として，10 自由度の線形構造システムによる数値実験により Relaxation 手法の検証が行われており，同定における解の収束効率が向上していることが報告されている。また，5 層構造モデルの振動台実験から得られた観測データを用いて，GA-RMCF の検証が行われている。実験は，線形モデルとなるような実験体と，非線形モデルとなるように鉛入り積層ゴム(LRB) を柱に配した実験体の 2 つを用いて行われているが，手法の適用性検証は線形モデルのみとなっている。結果，粘性減衰の推定は精度が劣るものの，剛性の推定は高い精度で同定されており，観測値の加速度応答の再現は良く一致している。また，手法を RMCF のみとした場合と比較すると，GA-RMCF では，構造パラメータの同定が安定すると報告されている。</p> <p>今後の課題として，GA-RMCF を非線形構造の同定に適用可能ではあるものの，その場合には同定する非線形構造パラメータが増加するため，モデル式によっては同定が困難である場合も発生する。また，系の自由度が大きくなる場合や複雑な非線形パラメータを含む系の同定には多量の工夫が必要であると結ばれている。</p>					

(担当：林孝幸)

テーマ分類	構造ヘルスマニタリング (システム同定・劣化診断・メンテナンス)				
論文題名	Bayesian model selection for ARX models and its application to structural health monitoring				
著者名	T. Saito and J. L. Beck				
雑誌名	Earthquake Engineering and Structural Dynamics				
巻号	39	ページ	1737-1759	年号	2010
発行所	Wiley				
キーワード	ベイズモデル選択、ARX モデル、構造ヘルスマニタリング、地震応答、システム同定、モーダルパラメタ				
<p>要旨：</p> <p>構造ヘルスマニタリングにおいてグローバルな健全性を評価する際には、ARX モデルを用いた同定手法が非常に有効である。その際に常に問題となるのがモデル次数の決定方法で、一般的に用いられる赤池の情報量基準(AIC)では実データに対して最適な次数を決定できないことも多い。そのため経験的手法によってこの問題に対処する試みも行われているが、確固たる理論的基盤を持つ手法は未だ提案されていない。そこで本論文ではベイズ理論に基づいたモデル選択とモデル更新の枠組みをARXモデルの次数選択とパラメタ推定に適用することを試みる。</p> <p>確率モデルはARXモデルの係数と予測誤差の分散とをモデルパラメタとして構成され、観測される入出力データに基づきベイズの定理によって更新される。モデル係数の事前分布は平均0の正規分布とし、その分散はハイパーパラメタとして、モデルパラメタの最大事後確率値から決定される。</p> <p>候補となる各モデルクラス(ある次数のARXモデルの集合)の事後確率は、データに基づくモデルクラスの周辺化尤度(エビデンス)によって決定される。エビデンスの計算に必要なパラメタ空間での積分は、ラプラスの漸近近似を用いて評価される。その際に使われる対数尤度のヘッセ行列を陽に導出したことにより計算時間が大きく短縮された。</p> <p>提案したモデル次数選択手法の有効性を検証するため、都内に建つ鉄骨造高層建物における地震応答入出力データを対象として、AICとも比較して解析を行った。その結果、AICは次数が増えると殆ど平坦となり最適な次数の判断が困難であるのに対し、エビデンスはある次数で明瞭かつ単一のピークを持っており、モデルクラスの事後確率もその次数で顕著に高く、最適な次数が明快に選択できることが示された。</p> <p>ところで、通常適切なARXモデルは構造物の主要モードの数よりかなり多くのモード数に対応する次数を有するため、同定されたモデルから評価対象モードを抽出する必要があり、その自動化は困難だった。本論文ではベイズ理論によるモーダルパラメタの同時確率分布の更新と尤度最大化によって自動的にモード抽出を行う方法についても提案されている。</p> <p>9年間にわたる43の地震応答モニタリングデータに対し、提案手法を用いて4次までのモーダルパラメタ(固有振動数・減衰定数・刺激関数)を評価したところ、全ての記録に対してモーダルパラメタは適切に評価され、かつ、4次モードまでのモーダルパラメタが齟齬なく自動的に抽出されており、モデル次数選択及び主要モード自動抽出手法の有効性が示された。</p>					

(担当：斎藤知生)

テーマ分類	構造ヘルスマモニタリング（システム同定・劣化診断・メンテナンス）				
論文題名	スマートセンサと無線ネットワークを用いた構造ヘルスマモニタリングシステムの開発				
著者名	圓幸史郎、池ヶ谷靖、中村充、柳瀬高仁				
雑誌名	日本地震工学会論文集				
巻号	第7巻 第6号	ページ	17-30	年号	2007
発行所	日本地震工学会				
キーワード	構造ヘルスマモニタリング、スマートセンサ、無線ネットワーク、損傷検知				
<p>要旨：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・この論文では、地震後の構造物の損傷状態を迅速に把握する目的で使用される構造ヘルスマモニタリングシステムのうち、Acoustic Emission (AE)センサと Vibration Analyzing (VA)センサ、および ZigBee 規格の無線を採用したシステムを紹介している。 ・構造ヘルスマモニタリングには、構造物の部材単位の損傷を検知することを目的とするローカルモニタリングと、建物全体としての損傷の検知を目的とするグローバルモニタリングに分別される。構造ヘルスマモニタリングの実用化に向けては、得られたデータを如何に迅速にコンピュータに送り、分析させるかがポイントとなる。 ・著者が提案している構造ヘルスマモニタリングシステムでは、AE センサと VA センサを採用している。AE センサは部材の破壊によって生じる波動を捉えることでひび割れなどを検知するローカルモニタリングを行う。VA センサは構造物の振動特性の変化を捉えることで構造物全体の損傷を検知するグローバルヘルスマモニタリングを実施する。迅速なデータ送信と省エネ化を目的として、センサ自体にデータ処理機能を持たせ、送信するデータ量を削減する工夫をしている。ただし、これにより、データ分析の自由度が小さくなっていると考えられる。また、データ送信手段に ZigBee 規格の無線を採用することで、省電力化している。しかし、センサに乾電池を組み込む必要があるため、電池交換などの維持管理の頻度の改善が今後の課題となる。 ・AE センサによる損傷検知の有効性検証として、振動台を用いた模型実験を実施している。結果、コンクリートの初期ひび割れを AE センサで検知できることを確認している。ただし、信号の発生頻度とひび割れとの関係は明確に示せておらず今後の課題である。VA センサによる損傷検知の有効性検証も同じ模型実験で実施している。応答加速度のゼロクロス点数、最大値、振幅絶対値和を利用することでデータ量を削減しているが、実験結果との比較から、これらの指標で建屋全体の振動性状の変化が計測できている。 ・今後の課題として、モニタリングデータとひび割れ発生や振動性状の変化との関係を効果的に示すため、データの蓄積が欠かせない。 					

(担当：足立高雄)

テーマ分類	構造ヘルスマonitoring (システム同定・劣化診断・メンテナンス)				
論文題名	Stochastic Assessment of Timing and Efficiency of Maintenance for Corroding RC Structures				
著者名	J. A. Mullard and M. G. Stewart				
雑誌名	Journal of Structural Engineering				
巻号	8-135	ページ	887-895	年号	2009
発行所	American Society of Civil Engineering				
キーワード	空間解析, コンクリート構造物, 鉄筋コンクリート, 塩化物, 腐食, 劣化, 補修管理, 確率的過程, 時間因子				
<p>要旨：</p> <p>海洋環境に建設された鉄筋コンクリート造構造物は、塩化物による厳しい腐食・劣化環境に曝されている。本論文では、塩化物による腐食劣化が問題となる鉄筋コンクリート造構造物を対象として、補修回数やタイミング、補修工法をはじめとする維持管理計画を構造物の供用期間を考慮して適切に選定するのに有効な、空間的・時間的従属関係のある維持管理モデルの提案を行い、RC橋梁の床版に適用した結果について述べている。</p> <p>提案されたモデルでは、構造物の定期点検の時期に判定される限界ひび割れ幅を超えるひび割れが生じるコンクリート表面の割合 $d_{\text{crack}}(t)$ が、補修までどの程度のひび割れ範囲を許容するかを示す補修クライテリア X_{repair} を超えた場合に補修が開始される。</p> <p>ここで、$d_{\text{crack}}(t)$ は2D空間の確率場から算出される。解析対象構造物のコンクリート表面は格子エレメントに分割されており、各エレメントには互いに相関関係がある。各エレメントには空間的なばらつきを持ったコンクリートのかぶり厚さや圧縮強度、塩化物濃度などが確率変数として設定されており、MCSを行うことで限界ひび割れ発生範囲 $d_{\text{crack}}(t)$ の頻度分布及びひび割れ発生範囲 $x\%$ の超過確率が算出される。</p> <p>補修クライテリア X_{repair} の判断、点検期間 Δt の設定の判断、補修工法の選定の判断（限界ひび割れ幅に達した箇所のみ補修 or 予防を兼ねた限界ひび割れ範囲を超えた補修）、補修後の劣化進展に影響する補修効果の違いは、維持管理計画に複雑に影響するため、提案されたモデルを用いることで、供用期間における構造物の維持管理計画について上記の判断の違いや補修効果の違いの比較検討を行うことができる。</p> <p>本論文では 400m^2 の鉄筋コンクリート造橋梁の床版に対してモデルを適用している。この信頼性解析により、点検期間の違いによる限界ひび割れ発生範囲の関係、補修工法の違いによる限界ひび割れ発生範囲の関係、供用期間における補修回数の発生確率の関係、共用期間80年の構造物における補修効果の影響による補修回数の発生確率の違いを定量的に示すことが可能になっている。</p>					

(担当：五十嵐さやか)

テーマ分類	構造ヘルスマモニタリング（システム同定・劣化診断・メンテナンス）				
論文題名	Assessment of ROC curves for inspection of random fields				
著者名	F. Schoefs, A. Clément, A. Nouy				
雑誌名	Structural Safety				
巻号	31(5)	ページ	409-419	年号	2009
発行所	Elsevier				
キーワード	ROC 曲線、検出率、検査、確率場、腐食、多項式カオス				
<p>要旨：</p> <p>既存構造物の非破壊検査法は完璧ではないため、検出確率（PoD）、誤検知確率（PFA）と受信者動作特性曲線（ROC カーブ）に関し、信頼性をモデル化することが一般的になってきている。これらの結果は構造物のオーナーが調査・維持・修繕計画を立てるのに必要な主要な情報となる。PoD と PFA の評価は非破壊検査法のツール間のキャリブレーションや雑音と信号のモデル化によっても行われる。雑音と信号が構造物の位置に依るとき、PoD と PFA は空間的に依存関係にある。</p> <p>本論文では、沿岸地域の港湾構造物の鋼管杭の腐食減厚を対象に、確率過程のモデル化を行った例を示している。まず腐食減厚の非破壊検査記録と実測記録から減厚量とノイズのモデルを構築する。正規分布、一般化極値分布、t 分布を比較したところ、t 分布の尤度が最大であった。次に、被害判定閾値を 0.05 mm ずつ変化させ PoD と PFA を求め、区分線形（折れ線）の実験的 ROC 曲線を求める。次に、ROC 曲線上の点(PFA, PoD)と理想的な検知性能の点(0, 1)との距離が最小になる点を求め、検知性能を評価する。この距離が小さいほど検知性能が高い。杭の腐食減厚の非破壊検査を行う場合、測定点が潮位や波のしぶきの影響を受ける高さの場合と常に海水中にある位置の場合とを比べると、前者のほうが海水の影響を受けにくいので検知性能は高い。</p> <p>先の3つの確率分布による理論的 ROC 曲線をフィッティングで求めた場合、検知性能は実験的 ROC 曲線よりも低下する。そこで、よりよい ROC 曲線のモデルを作成するため、最尤法を用いてエルミート多項式カオスで減厚量とノイズの確率密度関数をモデル化し、理論的 ROC 曲線を構築する方法を示している。最尤法の解の探索では、局所最適解に注意し、ランダム探索アルゴリズムとネルダー・ミード法による二段階の最適化手法で十分な繰り返し計算により行う。この例では3次の多項式カオスで良好なモデルが得られる。</p> <p>また、検査位置の高さによりノイズの分布が異なることから、高さごとに独立な確率場であると考え、ノイズの周辺分布を多項式カオスでモデル化する方法も行ったところ、同じく3次の多項式カオスで ROC 曲線の良好なモデル化が得られる。</p> <p>以上、多項式カオスを用い雑音と雑音が混ざった信号の確率分布を同定し、非破壊検査による損傷検知性能の評価に有用な ROC 曲線のモデルを作成する方法を提案した。</p>					

（担当：小檜山雅之）