

論文の内容の要旨

論文題目 断層モデル地震波群を用いた建物の確率論的機能損傷評価に関する研究

- 地震リスク寄与度による震源選定に基づく評価手法の効率化 -

Study on probabilistic evaluation of building functional loss using ground motions simulated with fault rupture models

: Proposal of efficient evaluation method based on seismic-sources selection in terms of the seismic risk contribution

氏名 鈴木（五十嵐） さやか

本論文は、近年急速に発展を遂げてきた断層モデルに基づく地震動シミュレーション技術を生かした新しい確率論的地震リスク評価手法について、評価地点の地震ハザードを表す時刻歴地震波群の作成から機器・配管システムを有する建物の機能損傷評価までの、地震リスク評価の一連の流れを実施することにより、従来手法に対する優位性を確認するとともに、実適用に向けた効率化手法を提案することを主題とする。

従来から一般的に用いられてきた地震リスク評価手法は、時刻歴応答解析を必要としない確率・統計論的手法と、発生頻度に関連付いた地震波群を入力とした時刻歴応答解析に基づく手法の大きく 2 つの種類に分類できる。

前者は、地震ハザード曲線とフラジリティ曲線に基づく地震リスク評価手法に代表される。地震ハザード曲線は、Cornell (1968) の手法に基づき地震動強さとその年超過頻度の関係として表される。通常、地震動強さは震源のマグニチュード M と震源距離 X の関数として表される距離減衰式によって算定される。また、フラジリティ曲線は、建物や機器類の地震被害調査や振動台実験あるいは地震応答解析等で解析的に評価した結果に基づき、地震動強さの条件付き損傷確率分布として表される。ハザード曲線とフラジリティ曲線に基づく地震リスク評価手法は、建物の時刻歴応答解析など高度な解析技術を必要とせず、地震動強さを共通指標としたハザード曲線とフラジリティ曲線のコンボリューションにより容易に地震リスクを評価することができる。また、地震危険度や建物の損傷しやすさをひとつの地震動強さ指標によって表現するため、地震動や建物応答に関する専門知識を持たない相手とのリスクコミュニケーションがしやすく、現在においても最もよく用いられている手法である。一方で、地震動の本来の姿とも言える時刻歴波形の一部分の情報のみを用いて地震リスク評価を行うことにより、時刻歴波形に含まれる様々な地震動情報（周期特性や経時特性）によるリスクへの影響を無視してしまう恐れがある。また、地震ハザード曲線とフラジリティ曲線による地震リスク評価では、建物や地盤などの非線形性を陽には考慮することができず、地震リスク評価の不確かさを増やす原因にもなっている。

後者は、主に原子力施設の確率論的地震リスク評価に用いられている手法に代表される。前者の課題点を克服するために、評価地点に起こり得る地震波群を時刻歴波形として評価し、それらを入力地震動とした時刻歴応答解析に基づき地震リスクを評価する手法である。入力地震動には、評価地点に

おける広帯域の地震動強さを評価することが可能な応答スペクトル距離減衰式に基づく一様ハザードスペクトル (Uniform Hazard Spectra ; UHS) に適合するように作成された模擬地震波群が用いられることが多い。UHS は応答スペクトル距離減衰式に基づく各周期の地震ハザード曲線の等確率値を結んだスペクトルであるため、UHS に適用するように作成した地震波には起こり得る全ての震源による地震動特性が包括的に反映されてはいるものの、具体的な震源断層による地震動特性を表す地震波とはなっていない。また、スペクトル適合模擬波であるため互いに関係のある3方向(水平2方向, 上下方向)の地震波セットとしては評価することが困難であるという課題もある。

地震動予測の研究分野では、近年、断層モデルに基づく地震動評価手法が発展してきた。この手法は、震源断層の破壊性状や地震動の伝播特性を物理的モデルとして地震動評価に反映することができるため、実地震動の特性を比較的精度良く表現できる手法として時刻歴応答解析を必要とする高層建物の設計用地震動としても用いられている。断層モデルに基づく地震動評価は、1つの断層モデルに基づく3方向成分の時刻歴波形を評価することができるため、3次元有限要素モデルのような詳細な建物モデルの解析への適用性も高いと考えられる。

このような背景より、本論文では、地震動評価技術の最新知見である断層モデルに基づく地震動評価技術を活用した次世代に向けた新しい確率論的地震リスク評価手法を対象として種々の検討を行った。

次世代手法では、評価地点の地震ハザードを、断層モデルに基づく時刻歴地震波群の集合として評価し、それらを入力地震動とした建物・機器の時刻歴応答解析に基づく建物・機器の応答と耐力との比較により直接的に地震リスクを評価する。評価地点に起こり得る全ての地震波群を評価するために、断層モデルの震源特性の認識論的不確定性および偶然的な不確定性を考慮した多数の断層モデルのサンプルを生成し、その1つ1つの断層モデルに対して波形合成法を用いて断層モデル地震波群を作成する。このように時刻歴波形として作成された断層モデル地震波群は、地盤や建物の非線形解析にも適用可能であり、地盤や建物の非線形化を考慮したリスク評価も可能となる。また、個々の断層モデルの震源の違いや震源特性の違いが、断層モデル地震波群としての周波数特性や経時特性のばらつきに反映されることから、応答特性が異なる様々な機器で構成される機器システムを有する建物の地震リスク評価を行う場合にも、よりきめ細やかな地震リスク評価が期待できる。

また、震源～地震動～建物の応答～建物の損傷可能性の地震リスク評価の連の流れを一貫通貫的に評価するため、各評価段階における情報を失うことなく地震リスクを評価することができる。また、得られた評価結果を震源まで遡ってトレースすることができることから、地震リスクが大きくなる場合の要因が特定しやすく、効果的な地震安全対策の策定にも有益であると考えられる。本論文では、短周期～長周期まで様々な周波数応答特性の機器類から構成された機器・配管システムを有する建物の機能損傷評価を対象として、断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価手法の優位性を確認することを目的の一つとする。

一方で、評価地点の地震ハザードを断層モデル地震波群を用いて評価するという事は、地震波群作成の解析負荷が大きいだけでなく、その後の時刻歴応答解析や損傷可能性評価の解析負荷も増大するため、次世代手法の実適用に向けては効率化手法を確立することが重要となる。本論文では、断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価手法の実適用に向けた解析負荷低減を目的として、最終的な

地震リスクを最も良く表す地震動強さ指標に基づき地震リスクに影響を及ぼす震源を選定することによって、断層モデルの作成サンプル数を低減させる手法を提案する。

これまで、原子力施設向けの確率論的地震リスク手法の高精度化および信頼性向上を目的として、西田ら（2013，2015）によって最大加速度を地震動強さ指標とする地震ハザードに寄与する震源を対象として断層モデル地震波群が作成されている。本論文ではそれらの地震波群を用いて検討を行った。

本論文は、全6章の構成とする。以下に、各章の検討内容と結果の概要を示す。

第1章では、地震リスク評価手法の変遷や関連研究について調査し、従来の地震リスク評価手法の内容と課題点について整理した。また、断層モデル地震波群に基づく新しい地震リスク評価手法の特長と課題点について概説した。最後に、本論文の目的である断層モデル地震波群の地震リスク評価の有効性の検証および実適用に向けた効率化手法の提案に関してその概要を述べた。

第2章では、本論文の検討に用いる断層モデル地震波群の作成手法について、西田ら（2013，2015）の論文を引用して概説した。また、断層モデル地震波群の作成結果に関して考察を行った。

第3章では、震源特性の不確定性を考慮して、ひとつの震源から作成した約3000波の断層モデル地震波群を対象として、断層モデルの震源特性の不確定性が、地震動強さや建物応答に及ぼす影響を感度解析した。重回帰分析の結果、地震モーメント、平均応力降下量、媒質のQ値の影響が大きく、断層モデル地震波群を作成する上で重要なパラメータであることを確認した。また、震源特性が震源スペクトルに及ぼす影響は、震源特性の種類毎に影響する振動数領域の範囲が異なることを確認した。

第4章では、実適用可能な地震波数として抽出された250波の断層モデル地震波群を対象として、地震波群の応答スペクトルのばらつきと周期間相関に着目し、地震リスク評価用地震波群の応答スペクトルのばらつきや周期間相関が、最終的な地震リスク評価結果にどのような影響を及ぼすのかを定量評価することによって、応答スペクトルのばらつきと周期間相関を実地震動に近い形で考慮できる断層モデル地震波群に基づく地震リスク評価手法の有効性を確認した。

第5章では、断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価手法の課題点である解析負荷の低減を目的とした効率化手法を提案した。提案手法は、時刻歴波形から算定することが可能な様々な地震動強さ指標の中から最終的な地震リスクを最も良く表すことができる地震動強さ指標を選定することにより、地震リスクに寄与する震源に照準を当てた地震波作成サンプル数の低減を図る手法である。この提案手法について、地震動評価位置、建物モデル、機器・配管システムの条件を変えた複数の解析ケースを対象として妥当な地震動強さ指標が選定されるか確認し、提案手法の妥当性を確認した。また、断層モデル地震波群を用いた地震リスク手法の効率化手法の適用フローを示し、効率化手法によって実適用可能な負荷で地震リスク評価できることを確認した。

第6章では、本論文の結論について述べた。また、本論文で得られた知見の一般性と今後の課題について言及した。

(要旨：3917字)