

氏名	おがた よし ひろ 尾形 芳博		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成24年3月27日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 都市・建築学専攻		
学位論文題目	原子力発電所建屋を対象とした長期地震観測に基づく振動性状の検討と層間変位モニタリングの地震後健全性評価への応用		
指導教員	東北大学教授 井上 範夫		
論文審査委員	主査 東北大学教授 井上 範夫	東北大学教授 源栄 正人	
	東北大学教授 植松 康		

論文内容要旨

1. はじめに

日本の原子力発電所は、近年、設計用の基準地震動を一部周期帯で上回るような比較的大きな地震に見舞われている。そのような地震発生後には発電所の健全性評価を迅速に行い、その安全性について対外的な説明を尽くした上で運転を再開する必要がある。したがって、従来の地震観測記録に基づくシミュレーション解析結果や点検結果のみならず、より説明性、迅速性のある健全性評価の目安となるものが必要とされてきている。

本論文は、原子力発電所建屋を対象とし地震後の健全性評価の信頼性や迅速性の向上を目的として、長期の地震観測に基づく建屋の水平及び鉛直方向の振動性状と層間変位のモニタリングについて健全性評価への応用を研究したものであり、全5章より構成される。各章の項目は次の通りである。

第1章 序論

第2章 観測記録の分析による原子炉建屋1次振動数(建屋剛性)の検討

第3章 層間変位計測システムの開発と実建物における検証

第4章 観測記録に基づく鉛直方向振動特性の検討

第5章 結論

以下に、第1章～第5章の要旨を示す。

2. 「第1章 序論」の要旨

本研究の目的および背景を述べ、建物の振動特性の経年依存性や振幅依存性、建物の変位を直接計測するためのシステムおよび原子力発電所建物の鉛直振動特性のそれぞれに関する既往の研究について概観を示した。

3. 「第2章 観測記録の分析による原子炉建屋1次振動数(建屋剛性)の検討」の要旨

女川原子力発電所の原子炉建屋を対象として約30年にわたる長期の地震観測記録による建屋の1次ピーク振動数から建屋剛性を検討した。原子炉建屋を等価な1質点系の振動モデルとみなし、建屋基礎の観測記録に対する等価1質点系の上部応答に相当する観測記録からの伝達関数を求め、それに対するモデル伝達関数をフィッティングさせることにより1次振動数を評価し、相対的な建屋剛性を検討した。伝達関数の評価にはカーブフィットおよびARXモデルの2つの手法を適用した。建屋剛性としては、初期の固有振動数に対するそれぞれの固有振動数の低下の比率を2乗することにより、初期の建屋剛性を1としたときの建屋剛性を検討した。

図1に2号機原子炉建屋のARXモデルによる評価結果を時系列で表した例を、図2に建屋剛性と建屋基礎版の最大加速度振幅の関係の例を示す。これらの図から、建屋剛性は経年的に低下し、経年的な建屋の剛性の低下は、基礎版の最大加速度振幅を更新する際、つまり建屋が経験する揺れの最大値を更新する際に剛性が顕著に低下することが主な原因であり、振幅に依存した剛性低下が顕著に表れたものと理解できることを確認した。最大

加速度振幅を更新しない状況であれば、経年的な剛性の低下はなく、加速度振幅に依存して建屋の剛性が変化している。

また、伝達関数へのカーブフィットによる方法と ARX モデルの手法による結果の違いはなく、どちらも精度よく1次振動数を推定可能であることを確認した。

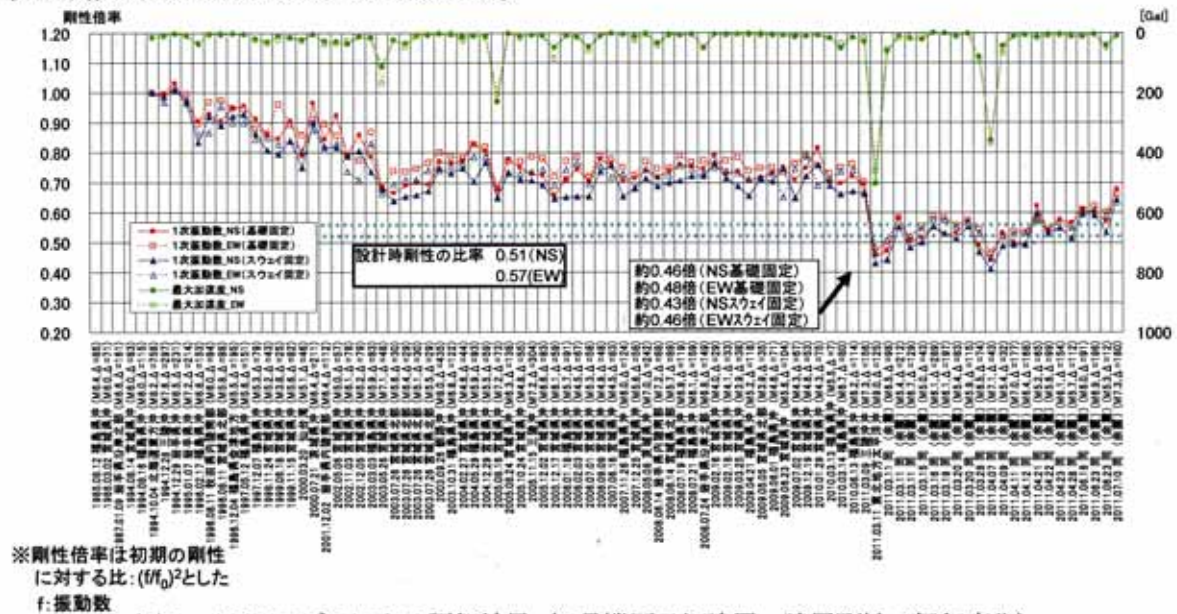


図1 ARXモデルによる評価結果(2号機原子炉建屋 建屋剛性の経年変化)

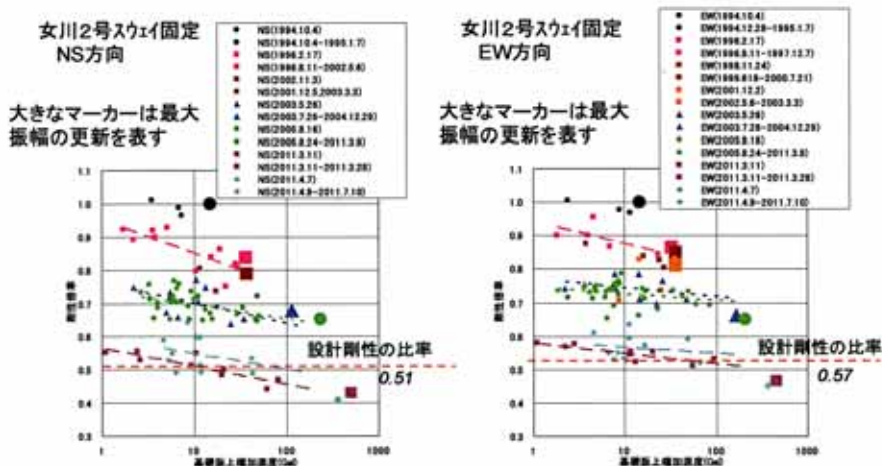


図2 建屋剛性と最大加速度との関係(2号機原子炉建屋)

このような建屋剛性の経年依存性と振幅依存性は一般建物における既往の研究でも報告されているが、最大振幅の更新との関係を観測記録から明確に論じたものではなく、有益な結果が得られた。建屋剛性の振幅依存性の傾向を過去の地震の観測記録から予め計算しておき、比較的大きな地震の際の概略的な健全性の目安として利用することが可能であることを時系列的に建屋剛性と建屋基礎版の最大加速度振幅との関係から明らかにした。

東北地方太平洋沖地震では、長期地震観測による建屋剛性の低下傾向を把握することにより、設計時の建屋剛性を下回る顕著な剛性低下であったもののこれまでの傾向の延長でとらえることができたこと、その後の余震では概ね建屋剛性は設計時の剛性以上に回復していることが確認できた。これらの情報は、今後の詳細な評価のため実施していくシミュレーション解析における建屋剛性の評価に際しても非常に有益である。

4. 「第3章 層間変位計測システムの開発と実建物における検証」の要旨

既往の層間変位計測システムを概観し、設置を想定している原子力発電所建屋の階高 17m 程度に対して数mm

の層間変位に適用可能なシステムを検討した。既存のシステムでは画像センサによる変位測定システムが有効と考えられたが、設置した床の局所的な回転に対して階高の 17m 先の精度を保つことは容易ではないことから新たに「鋼線+変位計」による変位計測システムを提案した。(図 3, 図 4 参照)

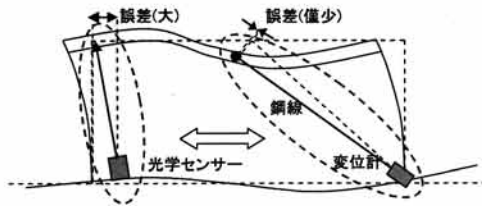


図 3 床の局所的回転変形の影響

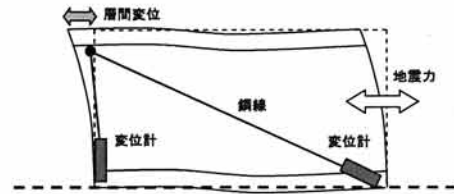


図 4 「鋼線+変位計」による変位計測システム

提案した「鋼線+変位計」による変位計測システムの有効性を検証するため、実建物への設置の際の加速度レベル、変位レベルを想定した振動台実験を実施し、目標とする測定精度が確保できることを確認した。

開発した変位計測システムを女川原子力発電所 2 号機原子炉建屋のオペフロ階～屋上階の層間に設置し、設置後得られた計測変位について精度を検討した。

2011 年東北地方太平洋沖地震時には、トリリニア型のせん断スケルトン上で第一折点を上回る変位波形を計測しており、地震後の迅速な健全性評価に際して有効なデータとなっている。今後、建屋のシミュレーション解析や点検・評価結果と合わせ、詳細な健全性評価にも活用していく予定である。

5. 「第 4 章 観測記録に基づく鉛直方向振動特性の検討」の要旨

原子力発電所建屋の健全性評価に際しては鉛直方向の建屋応答解析モデルは屋根トラスなどを除けば特に重要なものではないが、機械設備の評価に必要な床の応答スペクトルを算定するためにはその精度向上が重要であることから、女川原子力発電所の床の回転応答が評価可能な鉛直方向の複数の観測記録を用いて、鉛直方向地震観測記録に含まれる水平応答による床の回転の影響について図 5 に示す振動モデルにより詳細に検討した。

その結果、観測記録から得られる床の回転角応答と水平方向のシミュレーション解析から得られる質点の回転角応答は概ね整合することを確認した。さらに、図 6 に示すように、水平方向の応答による床の回転により生じる鉛直応答を考慮した鉛直方向振動モデルによる床応答スペクトルのシミュレーション結果は、従来の単純な 1 軸の鉛直方向解析モデルによる結果よりも、観測記録に近い応答となることを確認した。本手法には課題はあるものの観測記録とシミュレーション解析の両面から鉛直方向解析モデルの精度向上に有効であることが分かった。

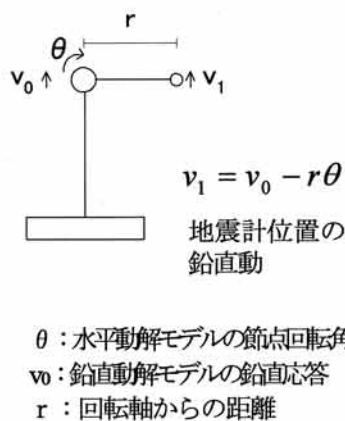


図 5 床の回転応答により生じる鉛直動成分を考慮した鉛直方向振動モデル

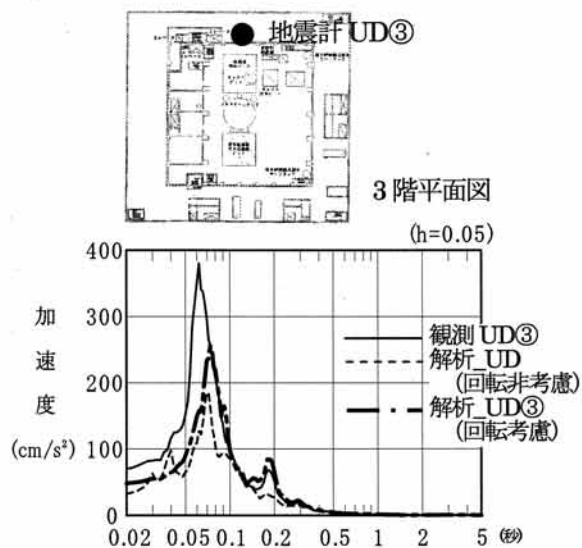


図 6 鉛直動加速度応答スペクトルの比較例 (3 号機原子炉建屋)

6. 「第5章 結論」の要旨

第2章から第5章の検討結果から、地震観測と1次振動数による建屋剛性の継続的評価、変位計測等が地震後の健全性評価における迅速性や応答解析における精度向上などに有効であることを女川原子力発電所の観測記録に基づき明らかにした。また、原子力発電所建屋の概略健全性評価のためのフローを取りまとめた(図7参照)。

本論文では原子力発電所建屋の観測記録をもとに建屋の剛性について検討したが、RC建物としての建屋剛性は一般の建物においても同様の傾向(最大振幅の更新とその後の剛性低下の関係)があるものと考えられることから、一般のRC造建物への応用も可能と考える。

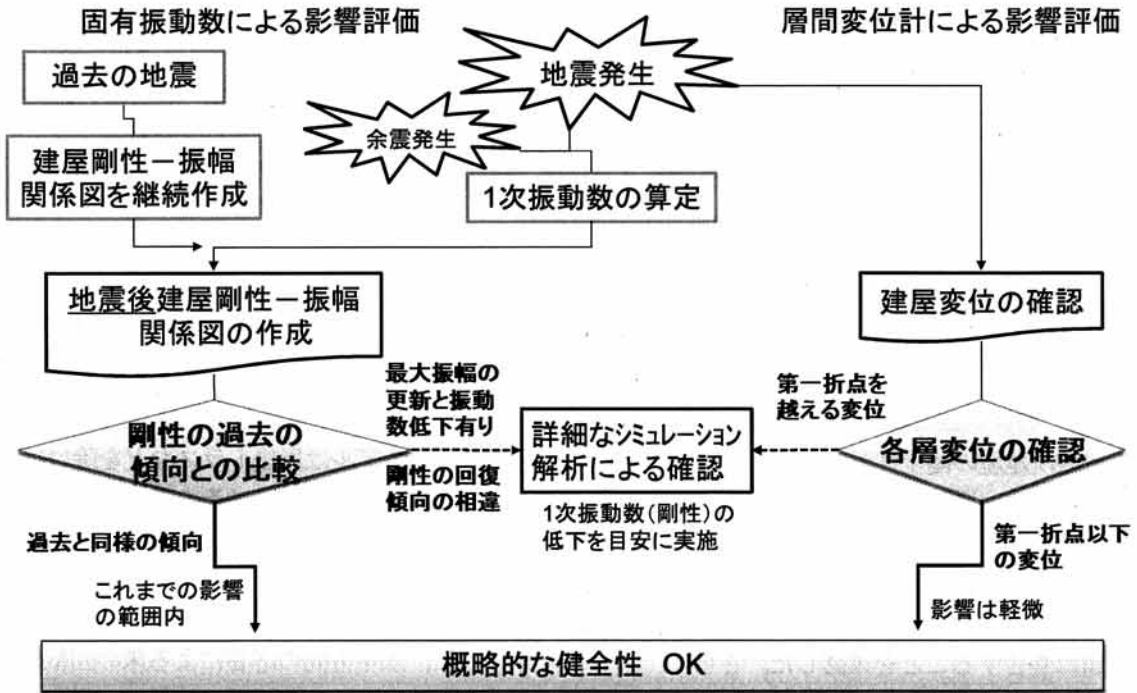


図7 概略の健全性評価フロー

論文審査結果の要旨

我が国の電力発電において原子力発電は重要な役割を果たしてきたので、大地震に対する安全性の確保のため、地震観測や多くの研究が行われてきた。本論文は、女川原子力発電所において行われてきた長期間の地震観測結果とそれをもとにした応答解析により建屋の振動性状を明らかにし、さらに、鉄筋コンクリート耐震壁よりなる建屋の地震時微小層間変形を計測することが可能なモニタリングシステムを開発し、それを実建屋に設置することにより、地震後の建屋の健全性を評価できることを示したもので、全5章よりなっている。

第1章は序論である。

第2章では、女川原子力発電所の原子炉建屋を対象として約30年にわたる長期の地震観測に基づき、建屋の振動特性としての建屋剛性に着目した検討を行い、経験的な過去の地震歴が建屋剛性に及ぼす影響を明らかにすることで、地震後の健全評価に有効な知見を与えることができることを示している。手法としては、建屋を等価な1質点振動系にモデル化して建屋基礎に対する上部応答の伝達関数をカーブフィットにより求める方法とARXモデルで求める方法を検討し、得られた両者の結果は同様なものとなることを示すとともに、長年の建屋剛性の変化を明らかにしている。さらに、その結果を評価して、地震による影響については地震後の建屋剛性の低下の程度が加速度振幅に依存すること、また、経年による影響については、過去の最大加速度振幅を更新しない状況であれば経年的な建屋剛性の低下はなく、加速度振幅に依存した建屋剛性の変化が見られると結論づけている。

第3章では、鉄筋コンクリート耐震壁よりなる原子炉建屋において、層間変形を直接計測するためには、既存のシステムでは設置した床の局部的回転により精度よい値は得られないことを解析的に明らかにし、鋼線とひずみ計よりなる新たなシステムを提案している。その有効性については、建屋を模擬した縮小試験体で振動台実験を実施し、実建屋の応答レベルにおいて精度よい計測ができることを明らかにしている。さらに、このシステムを実原子炉建屋に設置して地震観測を行い、得られた結果を評価して地震後の建屋健全性の評価に有効なものであることを明らかにしている。

第4章では、建屋の鉛直方向振動特性に着目し、鉛直方向の複数の地震観測記録を基に応答解析を行い、地震動の初期に見られる鉛直動主体の場合には既往のモデルで評価できること、また、そのあとに続く水平動が卓越する場合には、建屋の水平方向応答による床の回転変位で生じる鉛直応答を考慮した鉛直方向シミュレーション解析を行えば、既往のモデルよりも観測記録をよく模擬できることを示している。このモデルを用いれば、原子炉建屋内に設置されている重要な機器の床応答スペクトルをより精度よく評価できることになり、機器の設計に有効であることを明らかにしている。

第5章は結論である。

以上を要するに、本論文は、長期地震観測に基づく振動性状の検討と層間変位モニタリングを用いることにより、原子炉建屋の地震後の健全性評価を行うことができることを示しており、原子炉建屋の耐震安全性向上に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。