HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	塑性率を考慮した原子力発電所の耐震設計に関する研究［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	長澤, 和幸
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12822号
Issue Date	2017-06-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/66496
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Kazuyuki_Nagasawa_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学　位　論　文　内　容　の　要　旨

博士の専攻分野の名称　　博士（工学）　　氏名　長澤 和幸

学　位　論　文　題　名

塑性率を考慮した原子力発電所の耐震設計に関する研究
(Study on seismic design of nuclear power plants considering ductility factor)

近年では、2007 年新潟県中越沖地震等、国内の原子力発電所において設計用の基準地震動を超える地震動が観測されている。耐震設計体系の有する裕度は大きく、これまで、このような地震動を受けた原子力発電所において、安全上の問題を生じた例は確認されていないが、地震は自然現象であり、また、地震の発生、伝搬のメカニズムを完全に想定することは容易ではないことを考えれば、今後も基準地震動を超える地震動が発生する可能性を想定しておかなければならないと考える。

福島第一原子力発電所の事故後、深層防護に関する種々の検討が行われているが、基準地震動を超える状態を深層防護の中でどう取り扱うかについても議論が必要である。IAEA は、設計の想定を超える状態を設計拡張状態と定義し、これを施設の設計に反映するよう安全ガイドに記載した。ここには耐震設計に関する記載は無いが、基準地震動を超える地震を受ける状態ついても同様に設計拡張状態と捉え、これを考慮した耐震設計の導入が必要ではないかと考えられる。

そこで、本研究では実際に基準地震動を超える地震動を受けた原子力発電所における地震応答を分析するとともに、その結果を踏まえて耐震設計拡張状態を想定した新たな設計手法について検討した。本研究においては、機器の弾塑性挙動に基づく塑性率 (地震継続時間中の最大変形と弾性変形との比) に着目した地震応答解析を実施した。

2011 年東北地方太平洋沖地震により事故に至った東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の設備を耐震設計の観点から検証した結果、事故により地震による設備への影響が直接的に把握困難な 1、2 及び 3 号炉について、地震後、津波来襲までの運転制御状況、類似号機の点検結果及び設計手法に準ずる本震シミュレーション結果を通じて、地震による安全上重要な設備への影響は無かった可能性が高いことを示した。さらに、地震動の特徴を踏まえ、塑性率を用いた機器の初通過破壊 (パルス波等による塑性崩壊) に対する分析、エネルギーを用いた累積疲労に対する分析を実施し、いずれも地震による安全上重要な設備への影響は無いものと結論づけた。

極めて長い継続時間であった東北地方太平洋沖地震では、他の地震に見られるような大加速度のパルス波は見られず初通過破壊は生じにくいこと、また、長い継続時間であっても累積疲労破壊を生ずるレベルには至らないことを確認した。

次に、2007 年新潟県中越沖地震を受けた同柏崎刈羽原子力発電所の設備のうち、地震により損傷を受けた低耐震クラスの機器について、基礎ボルトのせん断破壊に着目し塑性率の観点から分析を行った。また、当該地震を踏まえて実施された国立研究開発法人防災科学技術研究所における基礎ボルトの振動試験結果についても同様に分析した。

分析においては機器を 1 自由度質点系で模擬した上で、その地震動の下での弾塑性挙動を単純化したバイリニアの荷重―変形特性を用い、実際に観測された地震動を入力として時刻歴応答解析を実施することで応答塑性率を求めた。また、実際の機器の損傷状態と比較し、機器に損傷を与える塑性率レベルを導出した。なお、2007 年新潟県中越沖地震ではパルス状の大加速度の波が観測さ

れており、これが低耐震クラス設備の初通過破壊に影響を与えたと考えられ、塑性率による分析を行う上で特徴的な地震動であることが確認された。

機器の耐震設計に用いる設計用静的震度を決めるとバイリニアの荷重―変形特性が定義できるので、設計においても入力地震動を用いて時刻歴応答解析を行えば、上記と同じように応答塑性率が求められる。機器の損傷防止ないしは機能維持を担保する許容塑性率を両発電所における機器の分析結果から定めた上で、応答塑性率が許容塑性率を満足するよう設計用静的震度を定める手法を本研究において提案した。現行の原子力発電所設備の耐震設計体系においては、基準地震動を用いた応答解析結果に基づく動的手法と、建築基準法に基づく地震層せん断力係数に施設の重要度分類に応じた係数を乗じて得られる震度を用いた静的手法の両者を実施する必要があるが、本研究における提案は、静的手法に用いる設計用静的震度を高度化するものである。すなわち、入力地震動として基準地震動を相当に上回る地震動を想定するとともに、許容値の設定に機器の損傷防止ないしは機能維持の限界を考慮することで、耐震設計拡張状態を考慮した設計手法となることを意図している。

本研究ではこの手法に則り、原子力発電所の実際の設備を対象として、塑性率を考慮した設計用静的震度を導出した。対象としたのは柏崎刈羽原子力発電所の「特定重大事故等対処施設」であり、航空機落下やテロからの防護のため、耐震設計においても通常の重要な施設に比して一層の頑健性が求められる設備である。入力地震動は、現行の同発電所の基準地震動の 2 倍に相当する地震動、ならびに防災科学技術研究所が公開している強震観測網 (K-NET、KiK-net) のデータのうち上位の 60 波形とした。また、許容塑性率としては、本研究における地震応答分析結果から相当の保守性を考慮して 10 とし、許容塑性率を満足する設計用静的震度は 1.5 程度となるものと結論付けた。これは現行の静的手法による震度を上回る震度となるが、実際の原子力発電所の機器設計では、地震以外の荷重を考慮し、かつ安全率を見込んでいるため、機器の構造を大きく変更する必要はないものと考えられる。また、許容塑性率の設定と入力地震動の想定に相当の保守性を考慮したので、実際の設計においてはさらに合理的な設計用静的震度の導出が可能と考えられる。

本研究では、設計手法の簡便化のため、塑性率の導出には 1 自由度質点系を用いたバイリニアモデルによる解析を行ったが、原子力発電所に採用される機器の型式は多様であり、機器ごとの損傷モードを考慮して、損傷と塑性率を合理的に関連付けるため、さらなる検討が必要である。

また、許容塑性率の設定には、さらなるデータの蓄積が必要と考える。本論においては福島第一原子力発電所ならびに柏崎刈羽原子力発電所における設備の状況の分析を行ったが、他の発電所や一般産業界における調査分析も待たれるところである。

これらの課題を継続的に検討していくことで、本研究で提案する耐震設計手法の信頼性をさらに高めていくことができるものと考える。