耐震設計審査指針とバックチェック

原子力安全委員会が2006年9月に改訂した耐震設計審査指針に基づく基準地震動の評価方法と、柏崎刈羽原子力発電所を例とした耐震安全性のためのバックチェックについて紹介する。新潟県中越沖地震のときの柏崎刈羽発電所における強震動は、これまで経験的関係式として用いられている断層最短距離と最大加速度の関係に比べて顕著に大きかった。その原因を明らかにする。また、今後の基準地震動の評価のために、敷地周辺における地震動観測および震源域から敷地に至る伝播経路の地下構造の調査に基づいて、地震動伝播特性の把握、震源となる断層の形状の設定および断層パラメータのばらつきの検討の重要性について述べる。

愛知工業大学 入倉孝次郎

I. はじめに

2007年7月16日の新潟県中越沖地震(気象庁マグニチュード6.8, モーメント・マグニチュード6.6)は原子力発電所の極近傍に発生し、それにより発電所の建物・施設が極めて大きな強震動の直撃を受けた。この地震の強震動は設計時に想定された地震動レベルを2.5倍も上回った¹⁾。「なぜ想定外の地震動が生じたのか」「今後、別の地震が起こったときに原子力施設の耐震安全性は確保されるのか」といった問題が突きつけられた。この地震の約10ヶ月前の2006年9月に改訂された耐震設計審査指針²⁾は中越沖地震のような地震の発生に対して有効なのか、また、新指針に従って原子力発電所の十分な耐震性が確保できるかどうかについて、検証が必要とされている。

II. 耐震設計のための基準地震動

原子力施設の耐震設計のための基準地震動は、新指針で、「地震学および地震工学的見地から施設の供用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性があり、施設に大きな影響を与えるおそれがあると想定することが適切な地震動」と定められている³⁾。この基準地震動による地震力に対して、「施設はその安全機能が損なわれることがないように設計されなければならない」と規定されている。

上記の新指針の基準地震動の考えは、旧指針で「発電用原子炉施設は想定されるいかなる地震力に対してもこれが大きな事故の誘因とならないよう十分な耐震性を有していなければならない」との規定と同等な考え方に立ったものである。しかしながら、新指針では、解説において、「地震学的見地からは、上記のように策定された地震動を上回る強さの地震動が生起する可能性は否定できない」と記し、耐震設計用の地震動の策定において、

「残余のリスク」が存在することを明記している点が旧指針の規定と異なっている。さらに、新指針では、「施設の設計に当たっては、策定された地震動を上回る地震動が生起する可能性に対して適切な考慮を払い、基本設計の段階のみならず、それ以降の段階も含めて、この『残余のリスク』の存在を十分認識しつつ、それを合理的に実行可能な限り小さくするための努力が払われるべきである」と述べ、耐震設計のための基準地震動評価の意味をより明確にしている。

1. 基準地震動の評価

基準地震動は、旧指針では設計用最強地震力S1と設計用限界地震動S2の2種類が用いられたが、新指針では、「最近の地震学および地震工学の知見に基づき、科学的見地から限界地震動としてSsを評価する」と規定された。ただし、耐震設計上の必要性から弾性設計用地震動Sdを $Sd = \alpha \times Ss (\alpha \geq 0.5)$ として算出し、S1と同等のものとして設計に用いることとした。また、基準地震動は、これまで水平方向のみ決め、鉛直方向は静的地震力として水平方向の1/2と仮定していたものを用いてきたが、新指針では、水平方向だけでなく鉛直方向についても、検討対象とする地震とその伝播経路・サイトの性質を考慮して評価することが規定されている。

基準地震動のSsを決めるために、敷地周辺における地震活動・震源の性質、および伝播経路・サイト特性を十分調査し、施設に最も大きな影響を与える可能性のある地震として検討用地震(複数)が選定される。それらの地震に対して「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」が評価される。さらに、調査を行っても特定できない地震の存在も知られており、これらの地震に対して「震源を特定せず策定する地震動」が評価される。

2. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」は以下のような手順で策定される。はじめに、敷地に影響を及ぼす地震について、「内陸地殻内地震」、「プレート間地震」、「海洋プレート内地震」という地震発生様式等に注目した

New Regulatory Guide for reviewing Seismic Design of Nuclear Power Reactor Facilities and reevaluation of Seismic Safety of existing Nuclear Power Plants: Kojiro IRIKURA.

(2011年 1月6日 受理)

分類により、それぞれについて地質・地形学および地球物理学的調査を行い、敷地に影響の大きい地震がどれかを検討する。「内陸地殻内地震」のため評価すべき活断層は後期更新世以降に活動が否定できないものとする。「プレート間地震」や「海洋プレート内地震」は、過去の地震の発生状況を精査し、敷地周辺の中・小・微小地震の活動、応力場、地震発生様式等に関する既往の研究成果を総合的に検討して選定される。このような調査に基づき、検討用地震を設定し、それぞれの検討用地震ごとに、「応答スペクトルに基づいた地震動評価」および「断層モデルに基づいた地震動評価」の双方を実施する³⁾。

応答スペクトルに基づく地震動評価に関しては、旧指針では、活断層の長さから想定される地震規模と経験的な距離減衰式から応答スペクトルの形状、いわゆる大崎スペクトルを決めて、経験的な包絡関数を考慮して時刻歴波形を決めるという方法で基準地震動の策定がなされてきた。改訂指針でも、これまでの基準地震動策定の経験を生かして、同様の手法で基準地震動を策定する。設計用の応答スペクトルの形状はこれまで日本国内で蓄積された強震動データを用いて新たに求め直したものを用いる。最近の各地で得られた強震動データから、応答スペクトルの経験的な関係式は内陸地殻内地震やプレート間地震など地震発生様式の違い、震源域や伝播経路などの地域特性により異なることがわかってきた。敷地ごとに応答スペクトルの適用に当たって、上記の地震発生様式、地域性などを考慮することが必要とされる。

断層モデルを用いた手法による地震動評価に関して、最近、地震調査委員会は標準的な評価法として「強震動予測レシピ」を推奨している。この方法は、断層面積や地震規模のような震源の全体像を表す「巨視的断層パラメータ」と、震源断層の中の不均質性を表すアスペリティの面積やそこでの応力降下量などの「微視的断層パラメータ」の両方を考慮して、強震動を算出する。これらの「巨視的断層パラメータ」と「微視的断層パラメータ」は地震モーメントを関数として経験的に得られた2つの異なるスケールング則により推定される(第1, 2図)。

内陸地殻内地震でもプレート境界や海洋プレート内に起こる海溝型地震でも、種々の調査データから震源域の大きさやアスペリティの情報が得られると、レシピに基づいて震源断層がモデル化され、強震動の時刻歴波形が評価される(第3図)。また、波形が得られれば、応答スペクトル、最大加速度、最大速度などの情報も同時に求めることもできる。とくに、敷地が震源断層に近い場合には断層モデルを用いた方法を重視することが決められている。これは、震源近傍域では震源断層とサイトの幾何学的位置関係により強震動の波形が大きく影響を受けるからである。強震動の破壊力を評価する上で、断層破壊の前方方向に生じる指向性パルスなど波形の位相特性が非常に重要になる。

第1図 巨視的断層パラメータのスケールング—地震モーメントと断層面積の関係(室谷, 他, 2010)
赤マークと●■▲は最近起こった横ずれおよび逆断層巨大地震で、地震記録のインバージョン解析から決められたもので、信頼性が高い。●と●は Stirling *et al.* (2006) のカタログからの横ずれ/正断層地震と逆断層地震で、信頼性は相対的に低い。

第2図 微視的断層パラメータのスケールング—断層面積とアスペリティの全面積の関係(Irikura and Miyake, 2010)
●は横ずれおよび逆断層(高角)地震。○は低角逆断層地震。

第3図 地震動評価のための特性化震源モデル
(原子力安全委員会地震動解析技術等作業会合(平成20年7月24日)資料第7号)

原子力施設の耐震安全性を確保するために、敷地周辺について地形学・地質学・地球物理学的方法で活断層や

海溝型地震の震源域の詳細な調査を実施し、震源断層の3次元的形状をモデル化し、波形シミュレーション法を用いて基準地震動を策定する方法は世界に先駆けた最新の考え方である。これが今回の改訂の重要点の1つで、国際的にも日本がはじめて導入したものである。

3. 震源を特定せず策定する地震動

改訂指針では、旧指針のようにM6.5の「直下地震」というような一定規模の「地震」を規定するのではなく、活断層との関係が特定できなかった過去の地震の地震動の応答スペクトルを参考に、「震源を特定せず策定する地震動」を基準地震動の1つとして別途に算定することとした。具体的には、震源と活断層を関連付けることが困難な内陸地殻内地震について、震源近傍で得られた観測記録を収集し、これらを基に敷地の地盤物性を加味した応答スペクトルを設定し、これに地震動の継続時間、振幅包絡線の経時の変化等の地震動特性を適切に考慮して地震動評価を行うこととした。ただし、この考え方を具現化して策定された基準地震動の妥当性については、申請時点における最新の知見に照らして個別に確認する必要があることも規定されている。例えば、地震本部による「震源断層をあらかじめ特定しにくい地震」の最大規模等を参考に、対象地域毎に適切な規模・地震発生様式をもつ地震を設定し、それらの震源断層を想定し、震源近傍の面的な地震動評価を行い、その地震動レベルから妥当性を確認すること等が参考例として挙げられる。

Ⅲ. 2007年新潟県中越沖地震の強震動

この地震の強震動は防災科学技術研究所のK-NETおよびKik-net強震観測網に加えて、柏崎刈羽原子力発電所の地表および地中観測網など震源近傍域を含む多くの観測点で記録された。強震動の最大値と距離の関係から、この地震の強震動は全般的には既存の距離減衰式にはほぼ一致しているが、最も震源断層に近いと考えられる柏崎刈羽原発サイトでの強震動記録は、地表、地中岩盤とも既存の距離減衰式よりも顕著に大きいことがわかっ

た(第4図)。同発電所にある7機の原子炉の基礎版上で、設計時の地震動レベルを上回る観測記録が得られた。そのうち、地震動が最も大きかった1号機では、設計レベル273ガルの約2.5倍にあたる最大加速度680ガル(EW成分)、比較的小さかった5号機でも設計レベル254ガルの約1.7倍の最大加速度442ガルが記録された。柏崎刈羽原発の強震動が大きい理由として以下があげられる。

(1) 震源特性については、強震動生成に寄与するアスペリティの応力降下はやや大きい程度(1.5倍程度)。これは観測された強震動と既存の距離減衰式の関係にはほぼ対応している。(2) 伝播経路については、震源域からサイトに至る地下構造(地殻浅部構造)が褶曲構造になっていて、サイト付近で背斜構造となっていることおよび厚い堆積層(西山層、 $V_s=0.7$ km/s)のため、震源から出た波がサイト付近でフォーカシング効果により振幅が増大した可能性が高い。標準的な地下構造の地域に比べて、地震動は5号機側(北側)で約1.5倍、1号機側(南側)で約3倍大きい。このことは本震のみならず、余震の観測データおよびシミュレーションでも確かめられている^{4,5)}。

この地震について、余震分布に基づき震源断層面(南東傾斜の逆断層)を設定し、震源近傍域の強震動記録を用いて断層破壊過程の推定が多くの研究者により行われている。それによると、この地震の震源モデルは強い揺れを生成するアスペリティが3つあったことがわかってきた。経験的グリーン関数法を用いると、3つのアスペリティからなる断層モデルで広帯域の強震動の再現が可能である(第5, 6図)。

原子力発電所のような重要構造物の耐震安全性を確保するためには、活断層調査に基づいて敷地に影響のある地震を想定し、適切な断層パラメータを設定し、精度の高い強震動予測を行い、それに耐え得る構造物の設計を行う必要がある。中越沖地震を引き起こした震源断層は余震分布の延長上にあるF-B断層に対応することがほぼ明らかになった(第7図)。このF-B断層は、建設時

第4図 左：2007年中越沖地震の破壊開始点(星印)、震源断層(長方形で囲われた部分、実線：地表、破線：地中)、および柏崎刈羽原発の位置関係。右：強震動(PGA：最大加速度)の距離減衰。

第5図 2007年新潟県中越沖地震の特性化震源モデル

第6図 柏崎刈羽原子力発電所の1号機基礎版上での観測記録(黒)と経験的グリーン関数を用いて合成された地震動(赤)との比較
震源モデルは第5図に示される。

点で海域に断層として存在することは東京電力により確認されていたが、5万年以降の活動がないということで評価対象となる活断層ではないと判断されていた。その後、褶曲の形態に関する新知見が得られ、活断層として認定すべきとの見解が出され、その考えに基づいて東京電力は基準地震動の再評価を行ったが、この活断層に対する地震動は旧指針のS2を上回らないとの結論を出した。これは、地表で活断層情報が得られたとしても、震源断層に関するモデル化が適切に設定できなければ、地震動が評価できないことを如実に示している。

Ⅳ. 新指針に基づく既存原子炉施設のバックチェック

耐震設計審査指針の改訂(2006年9月)を受けて、原子力安全委員会は、行政庁に原子力事業者に対して既設も含めて原子力施設の耐震安全性の評価の実施と、その結果の速やかな報告を指示した。原子力安全・保安院は、

	断層名	断層長さ	考慮すべき断層長さ
陸域	①角田・弥彦断層	54km	3つの断層の連動を想定した、長岡平野西縁断層帯 91km
	②気比ノ宮断層	22km	
	③片貝断層	16km	
海域	④F-B断層	36km	36km

第7図 柏崎刈羽原子力発電所周辺陸域および海域における活断層調査結果
敷地への影響の大きい検討用地震として、陸域で長岡平野西縁地震、海域でF-B断層地震がそれぞれ選定された。

原子力施設について新耐震指針に照らした耐震安全性の評価(バックチェック)を原子力事業者等に要請した。それを受けて原子力事業者は、耐震安全性の評価の実施計画書を行政庁に提出し、既設原発の耐震安全性の評価のために地形・地質調査を実施するとともに、基準地震動の

評価を準備している最中に、新潟県中越沖地震は起こった。

柏崎刈羽原子力発電所では、中越沖地震による影響評価とともに、新指針に基づき、基準地震動の評価がなされ、それに対する7機の原子炉の耐震安全性の評価が順番に行われている。最初に7号機、次いで6号機、1号機、5号機について、原子力安全・保安院および原子力安全委員会による耐震安全性の確認が終了し(2010年12月現在)、順次、運転が再開されている。

耐震安全性評価のための基準地震動の設定は以下の手順でなされる。耐震設計上考慮すべき断層については、旧指針では5万年前以降に活動したものとされていたが、新指針では後期更新世以降の活動が否定できないものを対象とする。活断層の調査は、新たに作成された「活断層等に関する安全審査の手引き(2008年6月)」に基づいて、事業者により変動地形学、地質学、および地球物理学的な詳細調査が行われるとともに、原子力安全・保安院による海上音波探査や専門家を交えた現地調査などの補足調査が実施された。これらの調査結果に基づき、原子力安全・保安院は、柏崎刈羽原子力発電所に影響の大きい活断層は、海域ではF-B断層(長さ約36km)、陸域では長岡平野西縁断層帯(長さ約91km)と評価した(第7図)。

それらの活断層が震源となって発生する地震を検討用地震として、発電所敷地における基準地震動が、経験式を用いた応答スペクトル手法、および断層モデルを用いた波形合成の手法で評価される。断層モデルによる評価では、新潟県中越沖地震の観測データの分析に基づき、

その特徴を踏まえた震源のモデル化と地震波の伝播経路特性を考慮した地震動の計算がなされた。

東京電力による基準地震動の評価結果について、原子力安全・保安院の審議で、活断層の諸元の妥当性および中越沖地震の分析結果の反映などの評価の見直しが行われた。見直しの結果、最終的に設定されたF-B断層地震の震源モデル(基本モデル)は3つのアスペリティからなる特性化震源モデルである(第8図)。長岡西縁断層地震については3つのセグメントからなり、その中で51kmの長さの角田・弥彦セグメントに2つのアスペリティ、気

第9図 種々の検討用地震に対して評価された基準地震動の加速度応答スペクトルの例

Ss-1とSs-2はFB断層地震に対する応答スペクトル法と断層モデル法による評価、Ss-3とSs-4は長岡平野西縁断層地震に対する応答スペクトル法と断層モデル法による評価。評価地点は荒浜側(1～4号機)の解放基盤表面。

第8図 F-B断層地震に対する震源モデル(基本モデル)。

比ノ宮および片貝セグメントにそれぞれ1つ、計4つのアスペリティからなる震源モデルを設定して地震動が計算された。これらの地震に対して計算された基準地震動の加速度応答スペクトル例が第9図に示される。基準地震動は、基本モデルに対する評価だけでなく、断層パラメータのばらつきを考慮して策定される。最終的には求められた基準地震動は1～4号機側で2,300ガル、5～7号機側1,209ガルとして策定された(第10図)。なお、柏崎刈羽原子力発電所の設置時の基準地震動(S2)は450ガルだったので、今回の評価はその2.7～5.1倍となった。

これらの基準地震動から逆算される原子炉基礎版での入力地震動は、1号機で829ガル(観測は680ガル)、5号機で652ガル(観測は442ガル)など、いずれの号機においても、中越沖地震で観測された強震動の1.2～2.0倍の強さに相当している。

原子力安全委員会は、柏崎刈羽原子力発電所の基準地震動の評価等に関する原子力安全・保安院の見解に関して、原子力安全性評価特別委員会で独自の検討を行い、いくつかの留意点を指摘した。F-B断層に対する震源断層のモデル化に関して地震調査委員会における検討を参考に、地震モーメント(1.7倍)およびアスペリティ個数(4個)を想定した確認用地震動の評価を行い、基準地震動のレベルが適切であることを確認している¹⁾。

V. ま と め

2006年9月の新耐震安全審査指針の改訂を受けて、関連する原子力施設では、敷地に影響する海溝型地震や活断層の調査、それに基づく震源断層モデルの構築および断層パラメータの不確かさの検討により、基準地震動が評価され、その基準地震動に対する施設の耐震安全性に関するバックチェックが行われている。2009年新潟県中越沖地震の強震動の直撃を受けた柏崎刈羽原子力発電所の耐震安全性の評価は、これからの原子力発電所の耐震性を検討する上でキーとなるものである。今回の地震から得られる強震動の評価や施設の健全性の確認に関わる知見を整理し、他の原子力発電所に反映すべき事項を明確にする必要がある。

基準地震動の評価に関して、今後解決すべき多くの課題が残されている。特に緊急の課題としては、地表に短い活断層のみが分布する場合に地下の断層形状の推定、複数の断層の連動性、さらに、震源を特定しにくい地震や震源を特定せず策定する地震動の評価についてより詳細な検討が必要とされている。また、別の観点として、現在

(単位: Gal)

基準地震動	荒浜側 (1～4号機)	大湊側 (5～7号機)
Ss-1 (F-B断層・応答スペクトル)	水平: 2300 鉛直: 1050	水平: 1050 鉛直: 650
Ss-2 (F-B断層・断層モデル)	NS: 847 EW: 1703 UD: 510	NS: 848 EW: 1209 UD: 466
Ss-3 (長岡平野西縁断層帯・応答スペクトル)	水平: 600 鉛直: 400	
Ss-4 (長岡平野西縁断層帯・断層モデル)	NS: 589 EW: 574 UD: 314	NS: 428 EW: 826 UD: 332
Ss-5 (長岡平野西縁断層帯・断層モデル)	NS: 553 EW: 554 UD: 266	NS: 426 EW: 664 UD: 346
S2 (旧耐震指針の基準地震動)	水平: 450 鉛直: 150 (S2では600)	

第10図 採用された基準地震動の最大加速度の一覧

Ss-1～Ss-5の応答スペクトルは第9図に示される。

の決定論的手法で評価される基準地震動は震源パラメータの不確かさを考慮して保守的に見積もられているが、施設がそれより大きな地震動を受ける可能性は否定できない。現在の決定論的评价法と確率論的评价法を融合することにより、残余のリスクを定量的に評価する方法論の確立が必要とされている。これらの課題は、地震学的検討だけでなく、地形学・地質学、建築工学、機械工学、原子力工学の研究者と共同で検討が必要とされている。

一 参 考 文 献

- 1) 原子力安全委員会, 第1章新潟県中越沖地震による影響, 平成19・20年版原子力安全白書, (2010).
- 2) 原子力安全委員会, 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針, <http://www.nsc.go.jp/shinsashishin/pdf/1/si004.pdf>, 2006.
- 3) 入倉孝次郎, “原子力発電所の耐震設計のための基準地震動”, 日本地震工学会会誌, 第5号, p.23-28(2007).
- 4) 入倉孝次郎, 他, 2007年新潟県中越沖地震の強震動—なぜ柏崎刈羽原子力発電所は想定以上の破壊的強震動に襲われたのか?, http://www.kojiro-irikura.jp/pdf/cyuetsu_080319.pdf
- 5) 原子力安全基盤機構, 2007年新潟県中越沖地震により柏崎刈羽原子力発電所で発生した地震動の分析, <http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g80522a21j.pdf>

著 者 紹 介

入倉孝次郎(いりくら・こうじろう)

京都大学 名誉教授
(専門分野)地震学, 地震ハザード研究, 経験的グリーン関数法・ハイブリッド法による強震動評価, 強震動予測のためのレシピの研究