

日本地震工学会誌

Japan Association for Earthquake Engineering

No.5

Jan.2007

特集：原子力発電所の耐震設計



JAEE

<http://www.jaee.gr.jp/>

日本地震工学会

〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館

Tel:03-5730-2831 Fax:03-5730-2830

INDEX

巻頭言：

原子力発電所の耐震設計／青山 博之	1
-------------------	---

特集：原子力発電所の耐震設計

「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂について／前田 洋介	4
原子力発電所の耐震設計－1958年の出発・発展とその経過／柴田 碧	10
原子力発電所の耐震設計のための基準地震動／入倉孝次郎	23
新耐震設計審査指針におけるSdの役割について／秋山 宏	29
建屋耐震設計／土方勝一郎	33
機器・配管系の耐震設計／遠藤 六郎	37
確率論的耐震安全評価（地震PSA）／平野 光将、蛭沢 勝三	40
発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針	45

記事：

鉄筋コンクリート造実大3層建物の振動実験概要	
／壁谷澤寿海、松森 泰造、壁谷澤寿一、壁谷澤寿成、金 裕錫	54
緊急地震速報を活用した早期地震警報システム／芦谷 公稔	62
NEESWood メディアイベント参加報告／荒木 康弘、五十田 博	67
ESG2006報告／岩田 知孝	69
第12回日本地震工学シンポジウム開催報告／大町 達夫、風間 基樹、山崎 文雄、山中 浩明	71
事業企画委員会報告－E-ディフェンスRC建物実験見学会・セミナー／中澤 博志、張 至鎬	76

追悼文：

世界の地震工学者 ヤキム・ペトロフスキー教授に捧げる追悼文／和泉 正哲	79
-------------------------------------	----

学会ニュース：

学会ニュース	81
--------	----

論文集目次：

学会論文集－第6巻・第4号	84
---------------	----

年間カレンダー：

年間カレンダー	85
法人会員一覧	
日本地震工学会のご案内・入会案内	

編集後記

巻頭言

原子力発電所の耐震設計

青山 博之

●東京大学名誉教授

このたび地震工学会誌で、原子力発電所の耐震設計に関する特集号が編集されることになった。これは昨年9月に「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（以下「指針」という）が改訂されたので、この機会にわが国の原子力発電所施設の耐震設計技術の全貌を分かりやすく解説しようという趣旨の特集である。私は「指針」の改訂作業のために原子力安全委員会の原子力安全基準・指針専門部会に設けられた耐震指針検討分科会（以下「分科会」という）の主査を務めたので、「指針」の改訂作業の全体について、簡単にまとめて述べたいと思う。

「指針」が最初に策定されたのは1978（昭和53）年9月のことである。この「指針」とは原子炉等の許認可に際し、当時の通商産業省資源エネルギー庁（現在の経済産業省原子力安全・保安院）と原子力安全委員会が行う安全審査（いわゆるダブルチェック）において、審査の指針として用いられるもので、実際の耐震設計においても基本方針として採用されてきたものである。「指針」はその後、1981（昭和56）年の建築基準法の改正（保有耐力算定など、当時新耐震設計法と呼ばれていた耐震設計法の採用）を踏まえて、同年9月に改訂されたが、それ以来今回の改訂までそのまま置かれてきた。その間の地震学及び地震工学に関する新しい知見の蓄積と、原子炉施設の耐震設計技術の改良進歩には、著しいものがあつた。特に、1995（平成7）年1月の兵庫県南部地震に際して、地震学及び地震工学上の多くの貴重な知見が得られた。実際の原子炉等の許認可は、その時その時の最新知見を参考にして行われてはきたが、これら最新知見を「指針」の上に明示する必要性は年毎に強くなっていた。

原子力安全委員会では2001（平成13）年6月に当時の原子力安全基準専門部会（現在の原子力安全基準・指針専門部会）に「分科会」を設けて「指針」の検討を正式に開始することとした。勿論その前にも、各種の準備作業は行われてきた。原子力安全委員会に於いては1996（平成8）年度から5年間にわたり、国内外の耐震設計基準類の動向や耐震安全性に関する最新知見等の情報収集・整理が行われてきたし、又民間でも原子力発電技術機構が勉強会を設けて指針改訂の検討

を開始していた。それらを受けて第1回の「分科会」が2001（平成13）年7月10日に開催された。それ以来2006（平成18）年8月28日の第48回「分科会」までの約5年間の検討の成果が今回の「指針」である。

「分科会」の下には基本、地震・地震動、施設に関する三つのワーキンググループが設けられ、それぞれ7回、16回、8回の会合を開いて論点の整理が行われ、「分科会」に報告された。又、2006（平成18）年5月には原子力安全委員会が「指針」（案）に関して一般からの意見公募を行い、700件を超える数の意見が寄せられた。「分科会」ではこれ等の意見の検討を行い、回答を作成して意見ともども公開するとともに、「指針」（案）に取り込むべきと結論された意見に関しては「指針」（案）を改訂して最終案を作成し、上記の第48回「分科会」において結審して、2006年9月11日に原子力安全基準・指針専門部会に報告した。原子力安全委員会は2006（平成18）年9月19日付で新「指針」を決定し、ここに原子力発電所施設の耐震設計の基本方針が、25年ぶりに大改訂されることとなったのである。

改訂された「指針」の内容はこの特集で各執筆者から詳しく説明されると思うので、ここには述べないことにする。ただ、あとの説明を十分理解していただくために、「指針」に関わる各種文書の構成について、簡単に説明しておく。

一番元になる文書は、平成18年9月19日付の原子力安全委員会決定（18安委第59号）で、「「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」等の耐震安全性に係る安全審査指針類の改訂等について」と題する。この中で原子力安全委員会は「指針」の改訂作業の経緯について述べるとともに、特に「残余のリスク」について言及している。「残余のリスク」とは、「策定された地震動を上回る地震動の影響が施設に及ぶことにより、施設に重大な損傷事象が発生すること、施設から大量の放射性物質が放散される事象が発生すること、あるいはそれらの結果として周辺公衆に対して放射線被ばくによる災害を及ぼすこととのリスク」と定義される。今回の「指針」では「残余のリスク」の定量的評価の結果を設置許可申請の段階で提示することを求めている。しかし、原子力安全委員会は将来確率論的安全

評価を安全規制へ本格的に導入することを考えており、その検討に活用するために、「残余のリスク」の定量的評価は意義のあることと考えている。そこで、安全審査とは別に、「残余のリスク」の評価結果を原子炉設置者が行政庁に報告することを要望している。

「指針」は、発電用原子炉施設を対象とし、その設置許可申請に係る安全審査の段階で、耐震安全性の確保の観点から耐震設計方針の妥当性についての判断の基礎を示すものである。全体は本文8章からなり、そのうち3、5、6、7章に、解説I、II、III、IVが付けられている。今回の特集は、大部分がこの「指針」本文及び解説に関するものとなろう。

3章「基本方針」における主要な改訂点は次の三点である。

- (1) 従来の指針にあった剛構造の原則を削除した。
- (2) 従来の指針にあった岩盤支持の規定を変更した。
- (3) 「残余のリスク」について解説で記述した。

4章「耐震設計上の重要度分類」における主要な改訂点は、従来A、B、Cの3クラスのうちAクラスに於いて、特に重要な施設がA_sクラスとされていたのを改め、Aクラス全体を実質的にA_sクラスに格上げして、Sクラスと呼ぶことにした点である。

5章「基準地震動の策定」は旧指針の5章「耐震設計評価法」の「(3) 基準地震動の評価法」を独立した章としたもので、旧指針からの主要な改訂点は下記の各点である。

- (1) 従来、基準地震動としてS₁、S₂の2種類を策定していたのを改め、基準地震動としてS_sを1種類策定することになった。
- (2) 水平方向に加え、鉛直方向の基準地震動を策定することになった。
- (3) 基準地震動は「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」と「震源を特定せずに策定する地震動」に分けて策定することになった。
- (4) 活断層調査に関して、従来は指針には詳細な記述はなく、原子力安全委員会が別に策定した「原子力発電所の地質、地盤に関する安全審査の手引き」に、敷地周辺と敷地についての調査範囲、調査内容等が記載されていたが、改定「指針」には活断層調査に関する事項が明記された。手引きについては、引き続き必要に応じて調査審議を行うべきであり、その改廃も含めた結論は今後の議論にゆだねることが適当であるとの判断に至った。
- (5) 基準地震動S_sの策定に当たって考慮すべき活断層の評価基準を、後期更新世以降の活動が否定できないものとし、その認定基準も規定された。

(6) 従来は基準地震動は応答スペクトルを基にして評価するのを基本としていたが、改定「指針」では応答スペクトルと並んで断層モデルを用いた地震動評価を用いることになった。

(7) 基準地震動の策定の過程における不確かさについて、適切な手法を用いて考慮することが要求された。

(8) 策定された基準地震動の超過確率を安全審査において参照することになった。

6章「耐震設計方針」は旧指針の5章「耐震設計評価法」の「(1) 方針」、「(2) 地震力の算定法」に対応するもので、旧指針からの主要な改訂点は次の2点である。

- (1) 基準地震動が従来のS₁、S₂の2種類からS_sの1種類に変わったことに伴い、工学的観点から弾性設計用地震動S_dを基準地震動S_sを係数倍することによって設定することになった。
- (2) 水平方向の基準地震動、弾性設計用地震動に加え、鉛直方向の基準地震動、弾性設計用地震動も策定することになった。

7章「荷重の組合せと許容限界」は旧指針の6章「荷重の組合せと許容限界」に対応するもので、耐震重要度分類が改まったことによる変更以外には基本的に旧指針の方針が継承されている。

8章「地震随伴事象」は今回の改訂で新たに追加された章で、斜面の安定と津波について記述されている。

「指針」には「見解」という文書が付属している。これはもともと「耐震指針検討分科会の見解」という名称でまとめられたもので、「指針」が原子力委員会決定として正式決定される段階で、「原子力安全基準・指針専門部会の見解」という上書きが付けられたものである。その内容は、次の2点である。

まず第一に、今回の指針改訂の趣旨や審議経過を述べている。これ等は指針改訂直後の端境期に指針を使用する者への便宜のための解説と言えるもので、指針が十分定着したあとでは重要性が薄れるので、本文の解説とするのは不適當と判断されたものである。内容としては基準地震動をS_sに一本化し、他に弾性設計用地震動S_dを策定することにしたこと、剛構造の原則と岩盤支持の規定を削除したこと、それと、「残余のリスク」に関する今回の「指針」の立場や考え方が含まれている。

第二に、今後の課題、特に「残余のリスク」の存在を認識する立場からの耐震安全性向上へ向けての、今後の課題について述べている。

「分科会」は上記の「指針」改訂の審議経過などを記述した報告書を二回、原子力安全基準・指針専門部会

に提出している。第一回は平成18年5月19日付で、「指針」(案)が策定された段階、第二回は同年9月11日付で、意見公募(パブリックコメント)を踏まえて最終案が策定された段階のものである。これ等の中に「分科会」およびワーキンググループにおける審議経緯が少数意見なども含めて詳細に記述されている。又これ等の会合における提出資料や議事録は全て原子力安全委員会のホームページに公開されている。

原子力安全委員会は「指針」が改訂された平成18年9月19日と同日付で、二つの文書を決定している。第一は「各種指針類における耐震関係の規定の改訂等について」と題し、「指針」以外の各種指針類の「指針」改訂に伴う改訂、「地質、地盤に関する安全審査の手引き」を継続審議としたこと、その他記述の整合を図るための改訂に関するものである。第二は「耐震設計審査指針」の改訂を機に実施を要望する既設の発電用原子炉施設等に関する耐震安全性の確認について」と題し、いわゆるバックチェックに関する要望を述べたものである。

最後に、「分科会」だけでも実質5年に及ぶ今回の「指針」改訂作業に関係された歴大な人数の方々の、献身的なご努力に心から謝意を表して、巻頭言の結びとする。

「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂について

前田 洋介

●内閣府 原子力安全委員会事務局審査指針課

1. 「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂の経緯等について

これまでの「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（昭和56年7月20日原子力安全委員会決定、平成13年3月29日一部改訂。以下、「旧指針」という。）」は、昭和53年9月に当時の原子力委員会が定めたものに基づき、昭和56年7月に、原子力安全委員会が、当時における新たな知見に基づき静的地震力の算定法等について見直して改訂を行い、さらに平成13年3月には、国際放射線防護委員会 Publication 60（1990年勧告）の原子力安全委員会安全審査指針類への取入れに伴う一部改訂がなされたものである。

昭和56年の旧指針策定以降現在までにおいて、地震学及び地震工学に関する新たな知見の蓄積並びに原子炉施設の耐震設計技術の改良及び進歩には著しいものがあった。特に、平成7年1月に発生した兵庫県南部地震は、原子力施設に特段の影響を及ぼしたものではなかったが、関連する調査研究の成果等を通じて、断層の活動様式、地震動特性、構造物の耐震性等に係る貴重な知見が得られ、原子力施設の耐震安全性に対する信頼性を一層向上させるためのたゆまぬ努力の必要性を改めて強く認識させるものであった。

このような状況を踏まえ、原子力安全委員会は、平成8年度から平成12年度の5年間にわたり、原子力施設の耐震安全性に関する海外の基準類や文献の収集整理等を行い、平成13年6月には、これらの情報の収集整理等がとりまとめられたことに伴い、原子力安全基準専門部会（当時）に対し、耐震安全性に係る安全審査指針類について、最新知見等を反映し、より適切な指針類とするために必要な調査審議を行い、その結果を報告するよう指示した。これを受け、同専門部会は、同年7月に「耐震指針検討分科会（以下、「分科会」という。）」を設置し、調査審議を開始した。

分科会では、新知見・新技術の指針への反映の必要性について調査審議するに当たって、基本ワーキンググループ、施設ワーキンググループ、地震・地震動ワーキンググループを設置し、確率論的安全評価（地震PSA）の導入や第四紀層地盤立地及び免震・制振構造の

導入、地震動評価法及び設計用地震の想定に関する最近の知見の反映等の調査審議に必要な各種知見等の整理作業を行った。そして、これら各ワーキンググループの調査審議の結果を踏まえつつ、4年10月にわたり、改訂指針案の検討を行った。この検討においては、関連する各分野の最新知見を十分踏まえ、必要に応じ分科会外部の専門家の協力も得ながら、鋭意検討を進め、分科会としての合意の形成に努め、その結論として、平成18年4月に改訂指針案のとりまとめに至った。

原子力安全委員会は、行政手続法第39条の規定に基づき、改訂指針案についての意見公募を、平成18年5月から6月にかけて実施した。その結果、合計約700件にも上る意見が提出され、本件に対する国民の関心の高さが改めて認識された。

提出された意見に対する対応方針については、平成18年7月から8月にかけて計5回の分科会において調査審議が行われ、耐震重要度分類の呼称の変更や活断層調査に関する解説の一部修正などを含めた対応方針がとりまとめられた。

なお、意見公募に寄せられた提出意見及びそれらに対する対応方針については、インターネット上のサイト「電子政府の総合窓口（<http://www.e-gov.go.jp/>）」において、意見募集の結果一覧のページより閲覧することができる。

以上の分科会での調査審議の結果を受け、原子力安全委員会は平成18年9月19日に「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（以下、「改訂指針」という。）」の全面的な改訂を決定した。決定した改訂指針は、本誌の45ページより添付されている。

また、原子力安全委員会及び分科会の配付資料並びに各会合の速記録はインターネット上の原子力安全委員会ホームページ（<http://www.nsc.go.jp/>）において、委員会等の資料のページより閲覧することができる。

2. 「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂のポイントについて

改訂した「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」に規定される耐震設計に関する各種の要求事項について、各章ごとに概要及び改訂のポイントについ

て以下に示す。

(1) はしがき

「はしがき」には、耐震設計審査指針の策定目的、策定経緯等が記載されている。策定経緯については「1. 耐震指針検討分科会の調査審議の経緯等について」において述べたとおりなのでここでは省略する。策定目的については、旧指針と同様に、発電用軽水型原子炉施設の設置許可申請（変更許可申請を含む。以下同じ。）に係る安全審査のうち、耐震安全性の確保の観点から耐震設計方針の妥当性について判断する際の基礎を示すことと定めている。

(2) 適用範囲

「適用範囲」には、耐震設計審査指針の適用範囲、技術進歩等への対応等が記載されている。改訂指針は、旧指針と同様に、PWR、BWRといった発電用軽水型原子炉施設の設置許可申請に係る安全審査を行う場合に適用される旨定めている。

また、発電用軽水型原子炉施設以外の試験研究用原子炉施設や核燃料の再処理を行う施設などの核燃料サイクル施設にもこの指針の基本的な考え方は参考となるものであるとしている。これは、発電用軽水型原子炉施設とは構造や内蔵する放射性物質等の諸特性が異なるものの、地震という外力への対策の基本的な考え方は共通していることから、参考となる旨を記したものである。

さらに、他の安全審査に用いる指針類と同様に、設置許可申請の内容の一部が耐震設計審査指針に適合しない場合であっても、それが技術的な改良、進歩等を反映したものであって、耐震設計審査指針を満足した場合と同様又はそれを上回る耐震安全性が確保し得ると判断される場合は、これを排除するものではないと記載している。これは、指針の各規定があることによって、健全な技術改良や新技術の導入を阻害するようなことがあってはならないという趣旨に加え、安全審査は申請案件毎に行い、耐震設計審査指針はその判断の基礎をなすものの、耐震設計審査指針以外の最新の技術知見や経験等をも十分踏まえてその都度厳正に行うものであるとの趣旨も踏まえて記載されたものである。いずれも旧指針における考え方と同様となっている。

(3) 基本方針

この章では、耐震設計に関する基本方針について述べている。まず、耐震設計上重要な施設は、原子炉施設

の敷地周辺の地質・地質構造並びに地震活動性等の地震学及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を策定し、これによる地震力に対して、その安全機能が損なわれることがないように設計することを求めている。

旧指針からの変更点としては、旧指針では「想定されるいかなる地震力」であったところを、改訂指針では「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」と改め、また、現行指針の「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」のところは、改訂指針では「耐震設計上重要な施設は、・・・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」というように、表現振りは異なっているが、いずれも想定される地震動による地震力（地震に起因する外乱）によっても「周辺の公衆に対し、著しい放射線被ばくのリスクを与えないようにする（すなわち大きな事故の誘因とならないようにする）」ことに関しては、新旧指針とも同等の考え方となっている。

構造の規定に関しては、旧指針では、建物・構築物は原則として剛構造にすることを規定していたが、改訂指針では、この規定は削除された。これは、近年の免震構造等に関する設計・建設技術の進歩は著しく、適用が一般化し、その有効性が広く認められるものとなっており、一部の原子力施設では、すでに適用実績があることから、剛構造以外の設計であっても、剛構造と同様又はそれを上回る耐震安全性の確保が可能である場合も想定しようという判断から、規定の見直しが行われたものである。

地盤に関する規定については、旧指針では、重要な建物・構築物は岩盤支持させなければならないこととしていたが、改訂後の指針では、重要な建物・構築物だけではなく全ての建物・構築物は、十分な支持性能をもつ地盤に設置されなければならないという規定になった。これは、設計荷重に応じた十分な支持性能をもつ地盤に設置することにより、「岩盤」に支持させなくとも十分な耐震安全性を確保することが可能である、また、重要な機器だけではなく、施設を構成する全ての建物・構築物が、それぞれの設計荷重に応じて十分な支持性能をもつ地盤に設置されるべきとの判断から、規定の見直しが行われたものである。

また、基本方針の解説において、適切な地震動を策定しても地震学的見地からは、策定した基準地震動を上回る強さの地震動が生起する可能性は極めて低いものの否定できないことから、「残余のリスク」という考え方を明記した。この「残余のリスク」については、分科会において多くの時間をかけて議論が行われたため、その概要について説明する。

まず、基本ワーキンググループでは、指針の基本目標として、基準地震動という想定事象の範囲内の設計目標を示しつつ、さらに、施設の設計裕度により、この基準地震動を超える地震動を考慮してもそれによる公衆の放射線災害のリスクが小さいことを求める規定についての提案がなされた。これに関連して、様々な観点からの見解や地震PSAに関する産業界における取組みの紹介などを踏まえつつ、現時点で、どこまでどのように指針高度化の検討に盛り込むことができるのかについて、度重なる議論が展開された。

その結果、原子炉施設の設計には「残余のリスク」が存在することについては、分科会における共通の理解であるとの整理がなされ、その定量的評価については、詳細設計実施後・運転開始前の適切な時期に実施することが適当であるとの議論がなされた。

しかしながら、「残余のリスク」の評価方法として、確率論的手法を導入することについては、手法の成熟度に関する認識において専門家間でもかなりのばらつきや不一致があること、原子力安全規制上のリスクに対する明確な定量的目標値が未設定であるという現状等を踏まえ、なお今後の検討に委ねるべき事項があるとの理由により、全面的採用には至らなかった。このため、例えば、改訂指針案に基づき策定される基準地震動についてはその超過確率を参照することとした等、将来の確率論的評価の安全規制への本格的導入の検討に役立つ情報については、可能な限り活用していくことを求めている。

以上の議論を踏まえ、「残余のリスク」の指針上の取扱いとしては、地震学的見地からは、想定する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ことから、想定を上回る地震動の影響が施設に及ぶことにより重大な損傷事象や大量の放射性物質が放散される事象などが発生することのリスクについて、その存在を十分認識し、施設の設計に当たっては、基本設計の段階のみならず、それ以降の段階も含めて、適切な考慮を払い、この「残余のリスク」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との趣旨を改訂指針の「基本方針」に関する解説に明記し、分科会の議論での共通理解部分を表すこととした。

(4) 耐震設計上の重要度分類

改訂前の耐震設計審査指針では、原子炉施設の設備・機器を耐震設計上の重要度に応じA、B、Cの3クラスに分類し、それぞれのクラスごとに設定される地震力に「耐える」よう設計することに加え、Aクラスの中から安全上特に重要な施設をAsクラスとして抽出し、Aクラスに対して要求される動的地震力を上回る地震力に対しても当該Asクラスの「安全機能が保持」されるよう設計することを求めるというものであった。

改訂後の耐震設計審査指針では、先に述べたように「残余のリスク」を合理的に実行可能な限り小さくする努力の必要性を踏まえ、耐震設計の信頼性をより高いものとするため、旧耐震指針におけるAクラス全体をAsクラスと同等の扱いとすることとし、これらをまとめてSクラスと呼ぶこととした。

(5) 基準地震動の策定

改訂指針では、基準地震動の策定方針について、旧指針で規定されていた基準地震動を2種類（地震動 S_1 及び地震動 S_2 ）策定するという考え方を改め、これまでの S_1 及び S_2 の策定方針を統合し高度化した基準地震動 S_s の1種類のみを策定することとした他、多くの改訂が行われた。このため、基準地震動の策定方針について、まず旧指針における規定の説明を行い、その後、変更された改訂指針の規定について説明を行う。

旧指針においては、基準地震動について、施設の建物・構築物及び機器・配管系の重要度に相応し、地震動 S_1 及び地震動 S_2 の2種類に区分して策定することとしていた。ここで、地震動 S_1 をもたらす地震（設計用最強地震）は、工学的見地から起こることを予期することが適切と考えられる地震として、敷地及び敷地近傍に影響を与えた過去地震及び活動度の高い活断層による地震を考慮し、これらのうち敷地に最も大きな影響を与えるものとして規定されていた。また、地震動 S_2 をもたらす地震（設計用限界地震）は、地震学的見地に立てば設計用最強地震を超える地震の発生を否定できない場合があるので工学的見地からの検討を加え将来発生する可能性を否定できない地震として、敷地周辺の活断層及び地震地体構造に基づく地震並びに近距離地震として $M=6.5$ の直下地震を考慮し、これらのうち敷地に最も大きな影響を与えるものとして想定されていた。

さらに旧指針では、活断層によって発生すると考える地震は活断層の活動度によって、基準地震動 S_1 又は基準地震動 S_2 を敷地基盤に与える地震に分類されると

し、それぞれ活断層を評価するに際しての判断の基準のめやすが規定されていた。すなわち、基準地震動 S_1 の発生源としては、i) 歴史資料により、過去に地震を発生したと推定されるもの、ii) A級活断層に属し、10,000年前以降活動したもの、又は地震の再来期間が10,000年未満のもの、及びiii) 微小地震の観測により、断層の現在の活動性が顕著に認められるものを評価上考慮すること、さらに基準地震動 S_2 の発生源としては、i) 上記のii)を除きA級活断層に属するもの、及びii) B及びC級活断層に属し、50,000年前以降活動したもの、又は地震の再来期間が50,000年未満のものを評価上考慮することとしていた。

以上については、旧指針策定時における工学的見地及び地震学的見地を総合して適切と考えられる規定がなされたものである。

これに関して、分科会の調査審議では、旧指針策定以降の地震学及び地震工学における知見の蓄積等を踏まえ、従来の基準地震動 S_1 及び S_2 の策定方針を統合し高度化した地震動である基準地震動 S_s の策定方針等について、検討が行われ、改訂指針では以下のとおり策定方針が定められた。

①基準地震動 S_s の性格等について

基準地震動 S_s は、旧指針の基準地震動 S_1 及び S_2 の策定方針を統合し、敷地に大きな影響を与えると予想される地震（以下「検討用地震」という。）の選定、地震動評価等について高度化を図ったものである。この基準地震動 S_s は、施設の耐震安全性を確保するための耐震設計の前提となる地震動であり、その策定に当たっては、個別の安全審査時における最新の知見に照らして、その妥当性が十分確認されなければならないと規定した。

また、基準地震動 S_s の策定方針は、敷地周辺の地質・地質構造並びに地震活動性等の地震学及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ものとして策定しなければならないと規定し、その策定方法については、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」について、敷地における解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向の地震動としてそれぞれ策定することとした。

②「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」について

「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」について、検討用地震を複数選定し、それぞれに対し地震動の評価を行うこととした。地震動評価法については、従来の「応答スペクトル」に基づく評価手法に加え、近年技術的進歩が著しい強震動予測手法としての「断層モデル」を用いた手法の双方の評価法の長所を活かすべきとの方向性が示され、同時並列的に双方の地震動評価の実施を規定するに至ったものである。この際、震源が敷地に近く、その破壊過程が地震動評価に大きな影響を与えられ地震については、断層モデルを用いた手法による地震動評価を重視すべきであるとの整理がなされた。

検討用地震の選定に当たっては、「内陸地殻内地震」、「プレート間地震」及び「海洋プレート内地震」という地震発生様式等に着目した分類によることとし、特に「内陸地殻内地震」に分類される検討用地震の選定の際に考慮すべき活断層としては、後期更新世以降の活動性が否定できないものとする、及びその認定には最終間氷期の活動の有無によることができる、とすることでコンセンサスが得られた。

また、改訂指針についての意見公募においては、変動地形学の重要性についての意見が提出され、本件については、分科会においても議論がなされ、指針解説への取入れが行われた。これにより、活断層調査について、従来の考え方を踏まえつつ、地形学、地質学等における最新の知見を反映した高度化を図ることとなる。

さらに、地震という自然現象に対する検討に当たっては、地震規模の想定や基準地震動 S_s の策定に伴う不確かさ（ばらつき）については、適切な手法を用いて考慮すべきであるとのコンセンサスが得られ、この考慮に当たっては、基準地震動 S_s の策定に及ぼす影響が大きいと考えられる不確かさ（ばらつき）の要因及びその大きさの程度を十分踏まえつつ、適切な手法を用いることとする旨指針に規定した。

③「震源を特定せず策定する地震動」について

「震源を特定せず策定する地震動」は、敷地周辺の状況等を十分考慮した詳細な調査を実施しても、なお敷地近傍において発生する可能性のある内陸地殻内の地震の全てを事前に評価しようとは言い切れないことから、敷地近傍における詳細な調査の結果にかかわらず、全ての申請において共通的に考慮すべき地震動と意味付けたものである。

その策定方針については、震源と活断層を関連付けることが困難な過去の内陸地殻内の地震について得られた震源近傍における観測記録を収集し、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、振幅包絡線の経時的变化等の地震動特性を適切に考慮して策定する旨指針に規定した。

また、この考え方を具現化した基準地震動 S_s の策定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合わせて個別に確認すべきであり、なお、その際には、地表に明瞭な痕跡を示さない震源断層に起因する震源近傍の地震動について、確率論的な評価等を必要に応じて参考とすることが望ましいとする旨指針及び解説に規定した。これに伴い、旧指針における「直下地震 $M=6.5$ 」という地震規模による設定は廃止することとした。

(6) 耐震設計方針

前項で述べたとおり、改訂指針では、基準地震動は、旧指針における S_1 及び S_2 の策定方針を統合し高度化した基準地震動 S_s の1種類のみを策定するとの改訂が行われた。これに伴ってこの基準地震動 S_s に基づいて工学的判断により弾性設計用地震動 S_d を設定することとした。

耐震設計方針に関する具体的な審議においては、この基準地震動 S_s による地震力に対して耐震安全上重要な施設の安全機能が保持されることが、耐震安全上の要求事項として基本となる考え方であるとのコンセンサスが得られた。また、基準地震動 S_s に対する施設の安全機能保持をより高い精度で確認するために工学的な観点から弾性設計用地震動 S_d を設定すべきとの考え方が提案され、改訂指針に取り入れられることとなった。この考え方は、施設、もしくはその構成単位ごとに安全機能限界と弾性限界に対する入力荷重の比率を求め、これにより基準地震動 S_s を係数倍することにより弾性設計用地震動 S_d を設定し、この弾性設計用地震動 S_d に対して施設全体として概ね弾性範囲に留まっていることを確認することが適切であるというものである。

弾性設計用地震動 S_d の設定については、指針の解説において『弾性設計用地震動 S_d と基準地震動 S_s の応答スペクトルの比率 (S_d/S_s) の値は、弾性設計用地震動 S_d に求められる性格上、ある程度以上の大きさであるべきであり、めやすとして、0.5を下回らないような値で求められることが望ましい。』と規定され、具体的には個別の安全審査において、その設定値及び設定根拠の妥当性の確認が行われることとなる。

(7) 荷重の組み合わせと許容限界

当該事項においては、耐震安全性に関する設計方針の妥当性の評価に当たって考慮すべき荷重の組合せと許容限界に関する基本的考え方を述べている。

まず、Sクラスの建物・構築物については、運転時などに作用する荷重と基準地震動 S_s による地震力との組合せに対して、建物・構築物の終局耐力に対し十分な安全余裕を有していることなどを求めている。なお、ここでの『終局耐力』とは、構造物に対する荷重を漸次増大した際、構造物の変形又は歪みが著しく増加する状態を構造物の終局状態と考え、この状態に至る限界の最大荷重負荷を意味する。Sクラスの建物・構築物の弾性設計用地震動 S_d 等との組合せに対する許容限界については、『安全上適切と認められる規格及び基準による許容応力度』とされているが、具体的には建築基準法等がこれに相当する。

また、Sクラスの機器・配管系については、運転時の異常な過渡変化時及び事故時に生じるそれぞれの荷重と基準地震動 S_s による地震力との組合せに対して、その機能に影響を及ぼすことがないことなどを求めている。ここでの「運転時の異常な過渡変化時及び事故時に生じるそれぞれの荷重」については、地震によって引き起こされるおそれのある事象によって作用する荷重、及び地震によって引き起こされるおそれのない事象であっても、一たん事故が発生した場合は長時間継続する事象による荷重は、地震力と組み合わせて考慮しなければならないとした。

ただし、「事故時に生じる荷重」であっても、その事故事象の発生確率と継続時間及び地震動の超過確率の関係を踏まえ、両者が同時に発生する可能性が極めて小さい場合には、そのような事象によって発生する荷重を地震力と組み合わせて考慮する必要はないとされた。

機器・配管系の弾性設計用地震動 S_d 等との組合せと許容限界については、「発生する応力に対して降伏応力又はこれと同等な安全性」を有することを基本的な考え方としたが、具体的には、電気事業法に定める「発電用原子力設備に関する技術基準」等がこれに相当する。

以上のとおり、「荷重の組み合わせと許容限界」については基本的には旧指針と同様の考えに基づくものとなっている。

(8) 地震随件事象に対する考慮

旧指針では、地震随件事象について特化した規定は存在していなかったが、分科会では、原子力施設の周辺斜面の地震時における崩壊等への考慮、津波に対す

る考慮、地盤変動等についての考慮の取込みの要否等に関する幅広い調査審議が行われた。調査審議においては、地震随伴事象として考慮すべき事項について、原子炉施設の「基本設計ないし基本的設計方針」の妥当性に係る「安全審査」において、設置許可申請対象となる固有の原子炉施設の耐震設計についての妥当性を審査すべき事項として適切かつ不可欠であるかどうかという視点、及び現行の他の関連する指針類で対応されているかどうかとの視点から議論を重ね、最終的には、地震随伴事象として、背後斜面の崩壊、地震に伴う津波に対する考慮について明記することとした。

3. 今後の対応について

改訂指針は、今後の原子力安全委員会が行う発電用原子炉施設の安全審査に用いられることとなるが、これに関連して原子力安全委員会は、平成18年9月19日、改訂指針の決定と同時に、指針の改訂に伴う移行時期における運用に資するための事項及び将来の課題についてとりまとめた「原子力安全基準・指針専門部会の見解」について決定した。

また、発電用原子炉施設以外の核燃料サイクル関係の施設などの安全審査指針類においては、耐震設計審査指針を引用または参考としているが、それらの指針類における耐震安全性に関する規定についてもそれぞれ改訂等を決定した。これにより、核燃料サイクル関係の施設などに対しても、改訂指針の考え方を引用または参考して安全審査が行われることとなる。

さらに、原子力安全委員会は、「耐震設計審査指針の改訂を機に実施を要望する既設の発電用原子炉施設等に関する耐震安全性の確認について」を決定した。この決定の趣旨は、原子炉施設をはじめとする原子力施設の安全性については、常に最新の科学技術的知見に照らし合わせて、更なる安全性の向上に努めていくことが重要であり、今般の耐震指針の改訂等を契機に、既設の原子力施設について、これらの改訂等がなされた指針類の規定内容を踏まえた耐震安全性の確認を実施することが、我が国の原子力施設の耐震安全性の一層の向上に資するものであり、国民への説明責任の観点から意義深いと考えることから、行政庁に対し、①既設の原子力施設の耐震安全性の原子力事業者による評価の実施に関する要請、②行政庁が同評価の妥当性に関する確認を行ったうえで、その結果を報告するよう要望したものである。

この既設の原子力施設に関する耐震安全性の確認は、あくまでも法令に基づく規制行為の外側で、原子炉設

置者等の原子力事業者が自主的に実施すべき活動として位置づけられるべきであるものの、当委員会としては、既設の原子力施設の耐震安全性の一層の向上に資する観点から、行政庁による対応について、その着実な実施を特に求めるものである。

この決定を受け、原子力安全・保安院は、改訂指針等が決定された翌20日、関係原子力事業者等に対し、「既設発電用原子炉施設等の耐震安全性評価」として、①新耐震指針に照らして既設発電用原子炉施設等の耐震安全性の評価を行い報告すること、②評価の実施に先立ち評価に係る実施計画書を作成し遅滞なく報告すること、などを求めた。このほか、「残余のリスクの評価」として、発電用原子炉施設の残余のリスクの定量的な評価を行い、耐震安全性評価の報告以降、速やかに報告することを求めた。

この要請を受けて、平成18年10月18日、既設の原子炉施設等の耐震安全性の評価等の実施計画が原子力事業者等から提出された。実施計画では、原子力事業者は、①地質調査、②耐震設計で用いる地震動の策定、③建物・構築物の評価、機器・配管の評価等を行い、必要な場合には、④耐震性向上対策を実施することとされている。

今後、耐震安全性評価報告書の提出があったものから順次内容の妥当性について行政庁より確認されていくこととなっている。

なお、以上の原子力安全委員会が決定した「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂等の内容については、インターネット上の原子力安全委員会ホームページの中の

http://www.nsc.go.jp/anzen/sonota/kettei/kettei_f.htmのページで閲覧することができる。

原子力発電所の耐震設計

1958年の出発・発展とその経過

柴田 碧

●東京大学名誉教授

1. はじめに

本稿は、原子力発電所の耐震設計の方法が前耐震設計審査指針(1981)とそれを受けた日本電気協会の技術指針JEAG4601、いわゆる1987年版、で形が出来上がるまでを小生個人の経験、記憶、見方で記したものである。従来、1958年を起点に大体10年に1回は纏めるようにしていたが、不規則であり、英文が大部分である。1993年のASMEのPVP25周年記念の論文は、当時における内容の要約であり、小生としての一つの“まとめ”である。また、JPVT、2006年掲載の論文〔1〕は、審査指針の改訂作業中の小生の意見と問題点を纏めたものである。最後に、若干、地震学の進化について原子力安全の立場から纏めて加えた。

2. 最初の数年

原子力を始めたのは、1953年、大学院博士課程に進学し、西脇 仁一、渡辺 茂、藤井 澄二(以下いずれも当時、東大教授)らがグループを組織し、原研、JRR3、いわゆる国一炉の学術会議主催のコンペに東大として応募したのに大学院学生であった元日立社長の金井 務や、現在、東大名誉教授である平田 賢などと参加したのが切掛けである。その後、国一炉の細部設計の委員会に、藤井教授の代理で出席し、いろいろなことを原研、メーカーの方々と経験した。このときは、小型実験炉であるため耐震設計は話題とならなかった。

その後、1958年春に大学院を修了して、東京大学生産技術研究所に助教授として採用され、西千葉に勤めるようになった。化学機械の講座(部門)で前任者は既に亡くなっていて、その専門の粉体工学を継ぐかどうか迷っていた。

そのとき、6月になって東海村にガス炉を作る話が正力 松太郎(読売新聞社主、原子力委員長)の提案で具体化し、東大機械工学科で支援することになった。それに参加することとし、初めて機械工学の立場から耐震問題を扱うこととなった。爾来、今日までこの仕事を続けており、その過程を記録するものと

して、1969年に、当初、原子力産業会議の資料として、その後、生産研究に10年史〔4〕として記して、それ以来、節目毎にまとめている。至近のものは、ASMEのPVPグループの25年記念誌となっている。また、その後、当初、約2年の計画で原子力耐震設計指針が発足し、その改訂作業に2006年9月までの約5年従事した。その間の小生としての考え方を2005年末近くまでに纏めたものが、上述のASMEのJPVTの2006年11月号に、論文として掲載された。これらを辿ることにより、わが国の機械の分野を通じた原子力分野の耐震設計の考え方の変遷を知る事が出来る。以上が、本稿の導入部である。

1957年に、さまざまな国策的論議の末、英国型天然ウラン黒鉛炉の導入が決まり、原子力研究所は、耐震研究委員会を組織した。これには、当時の地震工学の著名な先生方が、一部の理学系の方を除いてほとんど全て加わっていたものと思われる。秋に日本原子力発電株式会社が発足して、1958年4月には、新卒者を迎えて新会社は動き出した。6月に、原研の委員会が改組されるかたちで、より実務的に内藤 多仲(早大名誉教授、建築、東京タワー設計)を委員長に、武藤 清(東大名誉教授、建築)を中心として発足した。この際、機械の分野から何人か参加した。その一方、土木関係者が離脱した。これは、電力会社の火力発電所の構造設計が、建築の分野であり、土木はダム・水力を担当していたことと、土木学会内の主導的・基本的考え方によるものと推察される。

原研の耐震委員会で既に基本思想は出来上がっていたように思われる。6月に日本原子力発電(以下、原電)の耐震検討委員会が発足したときには、炉心などの重要構造物の震度の割り増し、また、ガス・ダクト(径約1500mm、長さ約30m)の設計震度は2Gと言う修正震度法の導入のことは、おおそ決まっていたと思われる。これは、内藤とともに武藤、また、幹事役の久田 俊彦(後に建築研究所所長)の動的感覺による成果であろう。

東海サイトは、鹿島灘の海岸で、原研北側の松の低

木の林が広がる砂丘地帯であり、当時は、岩着の思想も無かった為と、基本的に支持地盤がしっかりしていたので、耐震設計の観点からは、原研の3研究炉、また、後続のJPDRとともに岩着とせずケーソン構造となった。

黒鉛・ガス炉の考え方として、格納容器はなく、炭酸ガス(2酸化炭素)の圧力容器がその役割を兼ねていると考えられていた。構造的耐震問題のうち、巨大な熱交換器とガス・ダクト、4回路があったが、前述のように、動的応答を念頭に置いて静的2Gで設計された。これは、完成後、数年して、応答計算が可能になったとき概ね妥当と判断された。

問題はグラファイト・パイルであった。当初、中性子照射で膨張すると言うデータが提示され、箍で締める方式が提案された。しかし、英国での照射実績が進むにつれ、収縮することが判明した。約4000 tonのコア、炉心を寿命末期まで地震による慣性力を支持構造に伝えるにはどうしたらよいか最大の問題点になり、六角形コアにスライド可能なキーを入れる方式が案出され、はじめ、ボール紙のモデルで動作を確認し、その後、建築研究所(当時、新宿区大久保)の自由振動型の振動台で三層モデル(10分の1)を用いて実験し、力を外側の支持構造物に伝えられることを確認した。炉が閉鎖された実際の収縮が計算通りであったかは、確認していない。

もう一つの問題点は、約30mのガス・ダクトの固有振動数であった。英国側、三社は入札計算書で、上下・水平方向に制約してRayleigh-Ritz法で計算していた。これは、誤りである事に気づき、方向を弾性主軸(このダクトの様に、空間的形狀では、一般に上下・水平でない)に基づいて採ることが正しいとした。また、東大・藤井研で、小型模型による実験を行い、この計算が正しいことが推測された。これらは、参考値で、設計は前述のように静的2Gで行われた。計算値の確認試験が行われた記憶はない。なお、この構造は、不静定であって、安定点が2箇所あり、小型モデルの大振幅加振実験では、飛び移りがみられた。

原電では、秋野 金次、加藤 宗明(原電担当)が中心となって、実務的なことは行われた。完成後、加藤と小生の2人で3日間にわたり、いわゆるWalk-downを行った。また、東大・藤井研、総出で振動試験を行ったが、加振容量・測定器などの点で必ずしも良い結果が得られなかったように記憶する。しかし、その後の軽水炉プラントで一般化されたことは、大体試みたように思う。

この他、減衰を与えるためのダンパーが取り付けられたが、解析的なことの問題は記憶していない。茨城という立地のため、とくに顕著な地震にあうことも無く運転を終了した。

原子力発電所の耐震と安全性は、立地審査指針に基本がある。原研のJPDR炉(BWR-GE製, 12MW)の設計のころ、アメリカで耐震設計のハンド・ブックが、G.W.Housner (Caltech 教授)によって企画され、その目次が、久田によりもたらされた。基本的に、Siting Criteriaをうけ、重要度分類、重大事故、仮想事故などの現行の考え方が目次ながら示されていた。

3. 指針の卵、原案から、支持プログラム

東京電力、福島1号、原電、敦賀1号の両BWRの仕様書の議論が進み、JPDRでの経験から、発展して、重要度分類、A, B, Cの考え方が明確になってきた。耐震設計のため告示などで制約を設けるべきか否かについては、関係会社により意見が異なり、結果として、電気事業法の原子力発電所についての告示に1条が入れられただけになった。しかし、この考え方は整理されて、通産省、原子力発電所安全技術指針案の19章に詳しく書かれることになった。当初の案は、3C₀による静的設計のみであったが、改稿をくりかえした結果として建築構造の動的解析、機器・配管系の動的設計となった。許容応力は弾性限とし、機器・配管系も、後にASME Sec.IIIの系統のANSI B31.7の成立後、採り入れられまで弾性限とされた。重要度分類は、A,B,Cが基本であるが、今の安全分類のPS、BS、サービス確保の思想で分けられていた。そして、日本電気協会の原子力発電所耐震設計技術指針、JEAG4601の1970年版として纏められた。しかし、重要度分類、許容応力編がでるまでには14年を要した。

福島、敦賀の時代に戻って、設計用地震動の決定は、個別のプラントごとに社内委員会の形で議論された。福島については、河角マップが主な根拠になり、東北電力で金華山沖地震-1936に際しての金華山神社の記録の調査などが行われ、その内容が詳しく検討された。金華山近くの内側の地震発生機構について討議された。これは、東電、福島の決定に際して、その南への延長が討議されたように記憶する。

敦賀は、濃尾地震-1891の震源断層の延長断層の存在について、考慮すべきか否かの議論があったが、濃尾地震は近年の地震であるから、特に考慮することはないと考えられたと記憶する。この問題は、現地調査

も含め敦賀2号で再び検討の対象となった。

安全設計指針案は、案止まりであったが実際の設計の指針として効果を発揮し、配管の減衰定数（これは、工学的用語で力学的には、臨界減衰比、記号としては、 ζ 、 h 、 n が使われるが、後の二つは、 ζ の誤植の結果が一般化された）の値が問題となった。一方、固有値は、まだ、直接計算が出来ず、1960年頃の当時としては、新鋭火力であった旧品川火力発電所や横須賀火力発電所において、科技庁の原子力平和利用費によって、東京電力の協力のもと、機械学会の研究分科会で実施された。まだ、電力不足の時代のため深夜に発電所を止めて、配管の振動実験が実施された。実験内容は、ワイヤーを介しての強制変位実験と共振状態とした後、ワイヤーを切断して、解放状態での減衰定数計測実験であった。

この頃、わが国への初輸入として、IBM704型計算機が、三菱原子力 (MAPI) に導入された。1時間のCPUコストが、32万円/時 (大学出、初任給が2~3万円) で、2箇所にも曲がりのある立体配管の固有値計算が1個3000円ぐらいだったように記憶する。

当時はプログラムの開発から始まった。奥村 敦史 (早大教授 機械) の学位論文の遷移行列法を取る事に決め、佐藤 壽芳 (1963年、大学院修了、東大助教授、その後、教授) が、手計算を試みたら、マトリクスの各数値の値の桁が大きく異なることがわかり、無次元化を試みて成功した。両端固定梁の固有値が、8桁、既存のものと同じし、さらに、16桁まで出た時は嬉しかった。そのころ、偶然、文部省在外研究員にあたり、UC.Berkeleyに派遣されることになった。世界で、数台のIBM7094の1台があり、機械工学科では、ほとんど使っていなかったので、割り当ての全時間近く使って上記プログラムのための数値実験を行った。上述の佐藤、それに井口 雅一 (当時、東大助教授) と、日本IBM社のプログラマー (当時約50名しか居なかった) で、UCでの結果に基づき、日本での改造作業を行なった。出張旅費が200万円 (\$1.00=360円、月給3万円台) のとき、日本で払えば280万円ぐらいの計算機使用料分であった。帰国頃までに2世代のプログラムを経て、100区分の配管まで中間支持を入れて計算できる汎用プログラムとして完成し、DYNAPSと名づけた [2]。その後、イタリア、IspraのECの計算センターや東大のセンターで20年ぐらいは使われた。当初、30分ぐらいの計算が、東大の最後では30秒以下であったように記憶するが、何年たってもとんでもない所にバグがあったりして驚かされる。

それについて格納容器の固有振動数の計算が必要となり、奥村らにより同じく伝達関数法のプログラム、Shelvia、が開発され、U字形の固有値分布など殆どそれまで知られていなかったことが計算可能になったが、殻体の振動、特に、BWRのMark-1タイプについては、多くの理論的な難しさがあり、実用のプログラムにはならなかった。

一方、PWRの初号機である美浜1号については、前述のBWR系のプラントと異なる形状、立地条件などに加えて、関西電力が中心であったので耐震工学者などの委員会は、京大名誉教授 棚橋 諒を先頭に組織された。幾つかの基本的な点で、当初の設計思想に差が見られる。その第一は、硬岩上の構造物であり、機器 (压力容器、炉心) に至る建屋の応答増幅が、1質点系として取り扱われたことや、伝達関数法の使用が検討されたようであった、ことなど、安全設計指針との調整を必要とした面が多々あったようである。完成近くに、ダイナマイトによる振動応答計測が行われたが、小薬量の試験発破でボーリング孔が崩れて、なかなかデータが得られなかったことなどBWR系と異なった問題を残した。

4. サイトと地震等々

紀伊長島の近くの芦浜サイトは、長年、計画が持続され、耐震問題の検討もされたが、中止になっている。これが出来ていれば、現在、東海・東南海地震の問題に絡んで、耐震補強のことが大いに問題となったであろうと思われる。この他、1970年頃までに地震関する調査が行われ、なかには、試掘坑掘削まで行って中止になったサイト候補もある。

現在、完成したプラントを含め新指針で問題となったこと、裁判などで問題となったことの多くは検討されている。ただ、断層については、震源断層より、ダム建設の影響をうけ、地質、地盤問題の観点の処理が多かったように記憶する。

島根1号については書いたことがあるが、880年の出雲の地震の震源の候補が3点あり、古文書だけでは同定出来なかった。サイトに近い宇陀神社の境内に断層崖があり、实地調査に参加した記憶がある。後年、トレンチ調査が行われた線とは別の位置であった。また、微小地震観測により、震源断層の同定が数年にわたって行われた例もある。広域の地形判読で活断層と考えたが、活動性の判断基準に差があったように思われる。

浜岡1,2号の地震動レベルが、300Galと決まった当初、一般には地震入力、200Galが平均的な値であるという見方が強かった。釧路、東京1号（大丸、東京駅ビル6F-当時、最上階）などの記録や、いわゆる、エルセントロ地震の記録の値で議論していた時代である。

浜岡の問題点は、その他、津波、1、2号の地盤を介しての相互干渉などがある。また、後になって、建屋周辺区域の液化化が問題になった。

先に述べたように女川サイトは、比較的地震が多く、1936年の金華山沖地震について、金華山神社をはじめ、地域の歴史的文書の調査が事業者により克明に行われた。この後、地震資料の調査の重要性が認識され、宇佐美 竜夫の仕事や、更に、地震予知総合研究振興会の発足に繋がっている。

当時（1960年代）、既にわが国における原子力発電所で、ある程度の強震を最初に受けるのは浜岡ではないかと考えられていたが、発生周期の短い（宮城県沖地震など、約35年か?）、そんなに強い地震ではないが、サイスミック・トリップでの停止の先例は、一昨年（2005年）の女川が先になった。

その他、玄海サイトは、当時の平均的評価手法では150Galと考えられたが、福島にならって180Galに修正された。伊方サイトは、中央構造線からの距離が僅かで、その活動性が議論されたが、5000年間の平均のずれと地震記録の存在と調和がとれず議論が続かなかったように記憶する。似た問題としては、志賀サイトについての七尾湾北縁の断層についてもあった。泊サイトは、積丹半島に長周期の常時微動があり、計測など行われたが、結論は出なかった。また、比較的、近くの地域に活火山があるが、とくに話題にはならなかった。以上が、小生の記憶に残っているサイトに関する地震論議である。

地震のことから小生の専門である機器・配管系の耐震設計へ話を戻す。これらを中心とした動的設計については、既に述べたように固有値、減衰定数が問題点で品川火力発電所での実験を初めとした現場でのデータ収集で平均像は掴めていったが、機械の分野での制振の常識である減衰付与に意外な盲点があることがわかった。それは、自動車など、車両用では、常時、機構が動いているが、構造物、配管などでは、熱変形など極めて低速な動きであり、その結果、グランド・シールの設計・製作（油もれ防止）が難しいことである。火力用の配管の防振に使われている海外G社からの輸入品が、1年ぐらいの間にほとんど、全品、完全に油抜けを起こした例が見付かった。

5. さまざまの問題点、技術的發展

大型計算機の發展、普及は著しいものがあり、それに伴い、有限要素法は、学問から使用者レベルで作成する実用ソフト、まもなく市販ソフトへ發展して、耐震技術の向上に寄与したが、いくつかのものを除いて名称が特記されることも減り、やがて、非線形の領域の問題となった。計算機も栄枯盛衰があったが、IBMが中心となり間もなく国産機でそれを凌駕するものが現れ、これも、耐震技術の圏外のこととなった。それをつかの間、パソコンの時代になった。大型ソフト、EWSでの既製のソフトによる計算は行われているが、一般にPCで自己作成のソフトによる設計の時代は去った。しかし、許容応力基準の告示501号や、高圧ガスの耐震告示515号など、基準類は比較的簡単な数式で仕様を与えたまま残り、それを継ぐ民間指針もその状態が続いている。後者の高圧ガスの保安行政では、SEISMITという通産大臣の認定プログラム制度を設けられ、現在も運用されているが、企業内の計算機の進展の形態と齟齬をきたしているのが現状である。

より重要な問題は、荷重下の金属、特に配管系とその材料の地震下の挙動に関することである。建築関連の研究は、一般建築のための研究の必要性が多々あるので、特に原子力安全に関わるものとしての格納容器以外は、構造・形状と結びついたものが多く、それも、工費の低減、工期の短縮など企業努力に結びつくことが大部分であった。ただ、地盤との動的連成の問題で、特に地盤の固い地域については、原子力固有の課題に近いため、NUPECなどでの研究努力があり今日まで続いている。

日本機械学会－原子力平和利用の線の研究は、日本電気協会での研究へと繋がり、当時は実験が主体であった。特に機械系では、配管強度の問題が主体で、1960年代後半に活発に行われた。当初は、平和利用の一環として行われた。やがて、電力料金と原子力安全研究の経費がリンクする形で結びつき、電源特別会計として、大きく支出されるようになった。また、安全研究は自主的にも行われ、電力共同研究の形になった。

配管の耐震強度については、17年の間、原研で行われたものもあるが、加圧下での静的加力で始まったこの実験は、NUPEC、電力共同研究から、JNESでの研究へ繋がり、各種の成果が得られている。当初のSUS管の単純1回振り試験後の配管に触れて、腹部が僅かに膨らんでいるのを小生が見出し、後の大学の加わっ

た電力共研での実験となった。このラチェティング (ratcheting) 現象は、燃料被覆管などで知られていたが、加圧配管については全く知られてなかった。ただ、通常の地震荷重では発生に至らないが、支持構造の損傷などで過大な曲げ、捩じりなどの応力が加わった場合に問題になる。その後、朝田 泰英 (東大教授 機械) により、累積損傷則に組みこまれた。これは、現在も、プラントの高経年化に伴う配管の減肉などと結びつくとき問題があるが技術指針にはとくに含まれていない。

その後、電力共同研究への大学の研究者が参画する方式が取られることが多くなり、多額の経費を使った電力共同研究が学会などの場を通して公開の場に出されるようになった。研究成果を電気協会の耐震専門部会で検討するだけでなく、その内容の妥当性を評価する場が公開の場へ広がった。

また、これと同様、宇佐美 龍夫 (東大、名誉教授) が、1974年より、文部省科研費により歴史地震資料の収集と出版 (日本被害地震総覧、東大出版会、1975年初版) を企画、実施したのを、電力関係が電気協会を通して拡大、継続して来ている。一番最近の版は、2001年の出版であり、また、収集した原資料の最終巻は、2005年であり、この努力は現在も続いている。

“応答の揺らぎ”については、1960年代後半になって小生のアナログ計算機を使つての擬似地震波 (ランダム地震波) についての応答計算により、その特性が明確になり、ランダム地震波による理論解析が可能であることが確認され進展をみた。1973年の5WCEEで発表され、この問題の重要性が認識された。軽減減衰系の実地震応答の確認のため、東大生産研の千葉実験所にプラント・モデルが設置され、それから20年の間、応答観測が続けられた。このような結果により、揺らぎについての多くの知識が得られ、現在では常識として認識されるに至っている。

この間、プラントの地震被害の重要性が言われ出したが、1964年になって、アラスカ地震と新潟地震があった。新潟では、タンク火災があり、世間の関心がこの方面に向くようになった。また、工場などの産業施設の被害、液状化によるビルを含む各種施設の広範囲な被害など、新しく認識された被害の様式 (モード) が多かった。それにより、アラスカ地震の際の同様な被害モードがあったことが改めて確認され、更に津波へも注意が向くようになり、研究課題として現在に続い

ている。そして、チリ地震-1960での被害についても、1969年に3WCEEが開催されたこともあり、遡って注意が払われるようになった。また、日向灘地震-1961による、宮崎県日南市の製紙工場の被害も改めて、思い起こされた。そして、十勝沖地震-1968では、産業施設の被害とともに一般RC建物の被害が大きかった。これは、比較的新しい設計のRC構造物の被害が目立ち、壁の役割など、当時の計算機による設計解析に対応した構造のモデル化や許容限界への問題を齎すこととなった。これらは、後になって、問題となる短柱破壊 (大分県中部地震-1975年) など、構造物設計のモデル化の進歩と被害についての経験のシーソー・ゲームであったことが、現在になると改めて痛感する。

その後、ロサンジェルス郊外の住宅密集地 (アメリカの当時の感覚で) San Fernandoを襲ったM6.5の地震は、地元だけでなく、わが国にも大きな衝撃を与えた。すなわち、新築の病院の大損傷で注目をあびたこの地震は電力施設、都市ガス・水道施設、高架高速道路などに大きな被害を与えた。これらの医療機関などを始めてとする公共施設の被害は、わが国では、危険物施設の耐震点から取り上げられ、行政面の態勢に反映される結果となった。

地元アメリカでは、その後、数年で土木 (ASCE) が中心となって、ライフ・ラインという新たな概念が確立した。

6. 国際的展開の2段目

世界地震工学会議は、1960年 (第2回、2WCEE) の日本から、各分野合同の本格的な国際会議になり、“Housnerの応答スペクトルの概念をつかった高層ビル設計”なども、発表、討議された。その後、1965年のニュージーランド、1969年のチリへと進むうちに、理学的色彩はうすれ、工学の会合と成るとともに、ランダム地震波などの工学的モデル (理論) が、地震の理学的研究と独立して発表されるようになった。1973年のイタリアでの会議の前にSan Fernando地震-1971があり、新築の病院の崩壊・棟の転倒などが生じたことから、基準や、それに従って被害のあった場合の設計者の責任なども前年のアメリカの第1回国内シンポジウムに引き続いて討議された。また、1975年のトルコの6WCEEでは、5日目の金曜日の早朝に軍のクーデターがあり、この会議で初めての話題であった免震についてのセッションが開けなかったことなど、現在の原子力分野にも影響のある話題が次々と展開されて行つたが、突然に邪魔が入った。しかし、最終日の

閉会式は無事終わった。このとき、日本から、免震に関する論文は1件もなかった。

ベルリンのBAMのT.Jeagerは、原子炉構造力学会議、SMiRTを、1970年に開催する企画をECの援助のもとUSNRCなどと計画した。耐震は計画に入っていたが、日本については、全く視野に入ってなかった。小生が、原子力関係の海外誌の広告で気付いて連絡を取ったところ、日本の窓口となり、Division K/Seismic Responseを担当するように依頼された。これが、小生とSMiRTとの繋がり始まりである。この夏は、国連の原子力平和利用会議の第4回が、ジュネーブであり、わが国からJEAG4601について発表することになっていた。1週間をおいて、ベルリンでSMiRTが開かれ、このJEAGの要約と配管解析のDYNAPSの紹介を行った。その後、イタリアのIspraのECの計算センター（現在、ECのJRCに発展している）により、DYNAPSの紹介をして、後に、ライブラリーにのりつけになった。

原子力耐震設計審査指針の制定(1978年版)の経緯については、殆ど記憶が無い。原子力委員会であって、現行指針にも、はしがきの中で述べられているだけで、原子炉立地審査指針のように決定日は示されていない。内容は今まで述べてきた、それまでの状況を踏まえて、その後の1981年版と類似の構成であったようである。この1981年は、San Fernando地震から10年が経ち、建築基準法、同施行令の改訂、高圧ガスの関係のいわゆる耐震告示515号の制定など、地震工学、耐震関係の進歩が一斉に指針などに反映された年である。この新審査指針の改訂(制定)は、“はしがき”に“静的地震力の算定法等について見直しを行ったものである”と記されているが、それだけでなく、原子力安全委員長の内田 秀雄の主導により、地震工学者が地震学的立場で、根本的に見直したものである。ある部分、応答スペクトルによるなどアメリカ(USNRC)の基本的方法を取り入れた面と、地震発生の機構や海洋型地震の取扱いなどわが国独自の知見の融合を図った観がある。この間、高圧ガスの耐震設計告示も約6年の調査・民間ベースの策定が難波 桂芳(東大教授、反応)、鵜戸口 英善(東大教授、機械)の指導で行われ、機器の動的設計の実施について揉めたが、最終的に現行の形で制定され、その内容は原子力の一部に取り込まれている。

1970年版が余りに教科書的であるとの批判のあつ

た電気協会の耐震設計技術指針(JEAG4601)は、また、重要度分類、許容応力について欠けていた。重要度分類は、基本的思想、特に、原子力安全設計指針の立場と電気事業法の立場のいずれによるかが論点であったが、前者で割り切ることとなり解決した。許容応力は、告示501号が、ASMEのSec.VIIIに立脚した当初から、1968年に試行版(約100ページ)が出来たASMEのSec. III(配管は当時、ANSI B31.7)系へ切り替える機会に、それに思想をあわせて、機器・配管系の耐震設計用許容応力体系を作ることになり、鵜戸口 英善の主査で開始した。Sec.IIIの改定が逐年に行われることもあり、最終案を得るまでに、14年の日時を要した。その後、通産省のいわゆる顧問会で最終的な結論を出すまでに4年を要した。金属の降伏の概念、降伏後も弾性であるというshake downの概念など、コンクリートと異なった概念の表現、統一理解の難問があったことによる。

実際の設計に関与する地震のマグニチュードの与える推定誤差を、加速度に直すと0.3で倍、半分になる。一般には、加速度減衰式の不確定性が問題となっているが、震源と地震の大きさを決めて設計する方式を採用すると、その値、震源位置などを使う数式の精度などを加速度や力に直すと意外に大きな値の差になる。当たり前のことながら、この不確定性の設計に与える影響は大きい。千葉実験所におけるプラント・モデルの応答観測の結果は、いわゆる応答倍率に大きな揺らぎがあることを示しているが、両者を合わせると、配管系などで平均的状态をとるか、 1σ 、つまり標準偏差分を大きい方に加えるかなどで設計結果は大変に変化する。また、床応答スペクトルの拡張という概念として、設計手法で標準化された。4WCEEで地震による機器・配管系の損傷モードを、SMiRT 3で設計用地震力決定の不確定さを問題にした。1980年ごろから、LLNLのSSMRPのような計画がアメリカで始まり、それへの問題点について、1982年にベルリンのBAMで耐震設計の不確定さと確率的評価の意義などについて、D.Okrent(UCLA,ACNRC,原子力安全)や、G.W.Housnerらと共に非公開の会議が開かれた。これらは、形式的な点もあるが、WASH1400で地震も扱われたこと、また、当時のOkrentの立場などもあり、さらにDiablo Canyon発電所に近く活断層が同定されたことへの対策としての評価の1過程でもあった。

国内で大学の研究者も加わった電力共同研究としてEDRが発足し、その中で、6in管のラチェティングの実

験も行われ、CDF（炉心損傷率）に関連ある損傷モードとしてSMIRT 5の発表で注目された。また、民（産）・学共同研究の意義が認められ、配管減衰、動機機器の許容耐力－加速度（ACT）などが大掛かりに行われ、そのデータなどは現在まで使用されている。ただ、試験方法の確立などに役立った反面、すっきりした理論的解決にはならなかった感がある。配管減衰など、当時の議論を思い起こすと、原子力の規定、基準で、一律、安全側に例えば減衰定数（臨界減衰比）を決めなければならないことと、その振幅依存性などの力学的性格とが実務で相容れない面があることを感ずるが、この問題は現状でも続いている。

7. 1981年

1981年の大きな出来事は、既に述べたように、耐震設計審査指針の制定、建築基準法関連の改訂、高压ガスの耐震告示515号の制定などであるが、原子力（特に耐震）の分野に大きな影響を残しているのは、改良標準化の仕事である。地震の標準的な入力波で“昭56改良標準化波”と呼ばれるものなどや、現在、既に何基か活動しているABWRなどの原型の耐震設計は、これから生まれた。高地震地帯用（300～350Gal）、低地震地帯用（180～200Gal）に別れ、また、1300MWeと850MWeとあり、全部で8種類について簡略な耐震設計が行われ、将来の立地選定などの参考にするとともに、設計経費の削減に役立てようというものである。現に、浜岡5号以後、ABWRの建設は進んでおり、APWRについては、敦賀3,4号機の建設が期待されている。

この年に運用が始められた多度津工学試験所の1000ton、2軸振動台は、多くのデータを残し、2005年6月で運用を停止しスクラップとなった。いわゆる電源特別会計により、当初、年50億円程度、末期で25億円程度の経費の試験の他、各種試験も行われた。初めは、設計レベルを超えた試験に反対の雰囲気が強かったが、次第に、確証、限界、損傷、破壊と入力レベルがあがり、最後にきて、増加速度装置を搭載して6Gレベルまでの損傷率曲線を求めるところまで進んだ。現在、電源特別会計で実施された原子力の14のプロジェクトについての、成果、データについて、再分析をJNESで進めている。

個々の地震波の形状は応答の揺らぎに密接な関係があり、重要であることは既に述べた。わが国は、従来、海溝型の地震の被害が広域である事により、原子

力分野でも重視してきた。ところが、兵庫県南部地震は、比較的浅い至近の断層と深部地形とが一緒になり、いわゆるキラー・パルスといわれる“破壊力のある地震波形”の問題となった。1980年にSSMRPで触れたLLNLで、2基の核融合施設が至近の地震でかなりの被害を受けた。地震は同規模のものが、2回継続して発生（1月24日と26日）したが、両方で被害に大きな差があり、断層の亀裂の走行方向の問題であると認識された。

このような波形の問題は、わが国では、前述のように、継続時間へと関心が向き、材料損傷の点でも繰り返しによる破壊、金属疲労へと関心が集まっている。上述のような波形による破壊性状の差、すなわち、神戸での鋼材の脆性破壊には、関心が薄いのが現状である。しかし、鋼材の脆性破壊は造船では、古くから知られ、原子力の压力容器のように温度だけでなく、損傷限界のJ値が歪速度による他、材料の加工程度などに関連にしていることに設計時の材料選択や溶接の問題として配慮されて来ている。

多度津での加振地震波も、当初、いわゆる、El Centro波、Taft波から始まり、やがて、八戸波に長周期成分が含まれているとして使われるようになった。その後、昭56改良標準化波が主流となった。その後、神戸での地震波のデモとして、神戸海洋気象台波が振幅の大きさなどから、キラー・パルス波の代表として、はじめ、60～80%で用いられた。また、加速度体験として、人を振動台に載せて加振することも一般的になってきた。人体の応答の面からみると、この程度が限界で、それ以上のレベルでの加振は危険のように思われる。その後、三木のE-ディフェンス（防災科学技術研究所）が出来て、その能力はから、神戸の地震での、

鷹取波が一般にいった破壊能力（波のエネルギー？）は高いようであり、専ら、最近の試験には、この波が使われている。このことについて、原子力の耐震（試験）の立場からは、まだ十分に検討されていない。

8. Seismic PSAの始まり

Seismic PSAについては、LLNLによるSSMRPなど、1980年代から始まり、解析方法も簡易なもの出来る反面、安全系の挙動の解析が複雑になって、CDFの計算だけでも、大変、複雑になっている。これに加えて、“安全目標”という、概念の形成とともに、耐震安全についての目標を“可能な限り低く”と表現し、その値を求めているが、これについては、今後の議論が必要

である。今回の審査指針の改訂では、原子力学会の、Seismic PSAについての標準が出来上がることが前提となっている。しかし、これには、実務上の困難を伴う要求が含まれている。安全目標を設計の過程に近づけることは、設計作業と本質的に異なる作業を要求することになるからである。上述のように、死亡リスクの計算では、地震時のシステムの挙動をはじめ、外部電力その他、いわゆる用役（ユーティリティー、原子力では余り使われない用語？）の地震時損傷の問題などから、死亡リスクに関係のある原子力防災の問題まで計算することが必要になる。レベル3（死亡リスク）までの計算には、気象条件の設定だけが不可欠であるが、これだけでも、設計に対応する精度での基本的条件の設定が、現時点では明確になっていない。また、シビア・アクシデントについての扱いかたも、考え方が一般的に確定していない。設計用地震Ssの決定に当たって、これらのことを付記することは、文言としては簡単であるが、実務としては極めて複雑であり、また、実施者によって判断が異なり均質な数値データを得ることは極めて困難である。当面、設計作業に対応したレベルで出来ることは、“ハザード曲線”作成手順の明確化だけであると思える。本項は歴史と言うより、現実の問題点に見えるが、2006年9月に終わった、審査指針のSeismic PSAについての論議であるので、発端の歴史であると考えて記した。

昔に戻って、1963年の夏、ANLの原子力安全部のBritain氏を訪ねて、原子炉安全と地震の問題についての考え方について、尋ねた。“必要だと思うが”、との回答であった。その後、前述のように、1970年後半にMITのRasmussenによる、WASH-1400を経て、PSAの一部からSeismic PSAが生まれ、わが国で原子力学会の標準が生まれようとしている。この間、44年の歳月が経っているが、地震学、地質学の専門家と、原子力との間の隙間は依然、続いている感がある、“日本の活断層”、地震研究推進本部の“地震動予測地図（<http://www.jishin.go.jp>）”と、原子力実務を公的に繋げる機関が、何処であるか明確でないし、中央防災会議の大規模地震対策特別措置法（1978）による地震情報と、原子力発電所の運用との関係も、公的には明確になっていないと思われる。また、地震予知連絡会での諸情報の活用も議論されていない。しかし、確率論的評価を適切に行うためには、地震についてのデータが的確なものでなくてはならない。（財）地震予知総合研究振興会（ADEP）は、地震予知の問題の業務を中核に据えて1981年に発足した。当初から、原子力

関係を踏まえて、古地震学などの分野を、東大、資料編纂所とともに、創設して、それについての調査なども行っている。

神戸の地震の際、当時の原子力安全委員であった住田 健二が、地震直後、豊中の自宅から東京へ伊丹空港発で来られ、10時の会議の前にご自分の執務室で地震の激しさを知り、愕然とされたと言うことがある。その後、安全委員会内の議論を経て、2001年から審査指針の改訂が行われた。改訂着手までの間、改訂前の審査指針の妥当性の検討が行われ、一応、問題ないとされた。しかし、直下の活（震源）断層によることから、いわゆるGreen関数法による強震動予測の手法で波形を求めることが行われ応答スペクトルの一部で設計用応答スペクトルを超過することが判明した。このときの被害は、いわゆるキラー・パルスによる脆性的破壊など地殻内地震の特徴と怖さを改めて認識する事になった。波形の問題性についての認識は未だ十分とはいえないが、強震動予測の手法は今回取り入れられた。

“既存炉の取扱い”については、“見直し”と言う形で行われることになり、既にはじまっている。世界的にみて、見直し問題は、1980年代からの東欧圏のプラントについての問題からはじまり、今に至っているが、今回のものは、そのポイント・手法からみて全く異なっている。現在、IAEAでも、新しいS-Gを作成中であるが、わが国の実施法はこれとも異なったものとなるだろう。

今後の新たな問題点としては、地震動の問題は別として、設計へ損傷をどの程度考慮するか、また、それに伴い、神戸の地震などで知った新しい“破壊のメカニズム”など、いわゆる“新知見”をどのように取り入れるかにある。また、火山、津波（洪水）などについて、IAEAで新S-Gの作成が進められているが、防災については、確率的考えが世界の主流である。気象現象については、近年、母集団が変わったのではないかとと言われる状況が発生することがある。日本海側でみられるようになった竜巻は、冬季雷と共に大きな影響を与える可能性がある。残余のリスク問題より、外的事象としてのリスクは高いものと、推定されるが、進展をみていない。

耐震設計の“おち”は、劣化の“発見おち”とともに、強い地震が来て複数の箇所に被害があつて、始めてその“おち”と判明することが大部分である。耐震設計

時の過誤は、見付からないで寿命を終える可能性もある。この点、設計計算書の適正さの確保と、そのバックアップの問題は高圧ガス関係で告示の運用に際して、論議、対策が検討され、新手法が開発されている。

9. その他の歴史と参考文献の内容

本稿の参考文献の数は非常に多くなる。ここでは、小生が書いた10年史をはじめ、幾つかの時間的経過を要約した文献を中心に引用する。その他について、改訂に関連した主要な議論を、小生の観点から行ったのが、昨年11月のASME、JPVT誌の論文〔1〕であり、そこには、今回の審査指針の改訂に際しての、問題点とそれに関連した資料、文献、その他を引用した。これを付録的にその後に添付した。また、原子力安全委員会、事務局で、1981年版審査指針、1987年版技術指針（JEAG4601）の内容に関係のある原資料、文献を発掘して、電子化したように聞いている。以下、引用文献と事態の移り変わりにについて簡単に説明する。

文献〔1〕については、既に述べた。文献〔4〕も先に述べたように、最初の10年の経緯を原子力産業会議の原動研の活動報告として纏めたものを生産研究に掲載した。これは、後に原研の翻訳事業の一環として英訳された。この10年の間に、配管の固有値解析プログラムの開発などを行った。これについては、文献〔2〕で印刷物となっているが、渡航経費がなく発表出来なかった。機器・配管系の損傷の一般的状況は、東海地震－1944であったことが知られているが、戦時中で記録は殆ど残っていない。その後、日向灘地震－1961で、日南市の日本パルプ社の工場被害が唯一の情報であった。1964年の新潟地震の調査で、初めて書いたものを残す事ができた〔3〕。その後、1968年の十勝沖地震の被害の速報も含め、1969年の4WCEEで発表し〔5〕、初の海外資料とすることが出来た。その後、San Fernando－1971の報告〔6〕もあわせて、一応の被害調査を済ませた。その後、電気協会の耐震設計技術指針、JEAG4601の1970年版が出来、これを、第1回のSMiRT（1970）と、その2週間前の、国連主導の第4回原子力平和利用会議で発表したのをNED誌に投稿し、1972年になって出版された〔7〕。また、それを、補う意味で、原子力発電所の機器・配管などでの地震被害の予測をNED誌〔10〕に纏めた。

度々記したように、いわゆる、エルセントロ波による応答解析が一般的であったが、その後、その信頼性に疑問を感じ、小生自身の個人研究も交え、日本機械学会への科技厅による平和利用関連の補助金で、ランダム

波による地震波のシミュレーションと、その理論的裏付けを纏めて5WCEEで発表した（1973）〔8〕。これは、応答解析の不確定さとともに、地震規模Mの決定の不確定さと合わせて、地震時応力レベルの推定精度に大きな影響を与えることに繋がり、SMiRT 3（1975）〔9〕で発表したが、その効果の大きさを考え論文に纏めなかった。

話題は次第に実務的になり、最大の問題点は、減衰定数（力学的には、臨界減衰比）へ移った。現在のいわゆる電力共研方式のものも混えて、配管減衰だけで5編がSMiRT 6で発表され、その際、昼休みにまで討議が持ち越され、1時間以上続いた記憶がある〔11ほか〕。

以上で、1981年版審査指針ができるまで、小生に与えられた歴史の範囲の主要文献は終わるが、今回の改訂作業で論点となったことに関する文献は、〔1〕の論文の文献の再録として付記した。

最後に、いわゆる、Rathmussen報告（USNRC,1975）の影響に、小生の文献〔9〕などが影響して、LLNLにおける、SSMRPが1980年初頭より開始され、Diablo Canyon発電所の評価、補強問題の非公開会合が、Jeagerの主導で、Housner、Okrentらの出席のもと1982年にBerlinで開かれた。それに関連して、小生により、Seismic PSAで何を考えなければならないか、について書かれた論文と、人間の問題（いわゆる、ヒューマン・エラー）が地震時にも重要であるとして発表がされたのが〔12〕、〔13〕である。なお、1981年に開かれたシンポジウムの目次に小生のこれに関連した論文の題目があるが内容はない。TMI事故のあとで、シビアー・アクシデントに関連しての話題が多い会議であった。

機器・配管系以外に1980年前後で問題になった点を列記すると、

- ①設計用応答スペクトルからの波形の作成。位相の与え方。なお、当時は、グリーン関数を使った強震動予測手法は、未開発であった。
- ②SSIに関する、計算モデル、手法の開発。
- ③せん断壁の強度実験。

などが記憶に残っているが、この他にも、地震動、建築関係は細部にわたることが多い。これについては省略する。

10. 終わりに

本稿は、全て、現時点での、小生の記憶で書いた。従って、数字などを含めて、間違いも少なくないと思

うが、お許し頂きたい。また、過去の図表や写真は入れてない。

そのため、容量としては、約0.7MBで与えられた5MBより、はるかに少ないが、原稿の量としてはかなりのものとなっている。

ここで殆ど触れなかったのは、NUPECの多度津の振動台の建設、実験（試験）経過である。これは、審査指針に直接関係ないこともあり、他の試験や、また、使用前検査の一環として行われた試験などと合わせると、莫大なことになるので、今回は省略した。また、続けて、今回の審査指針の改訂が何故時間を要したか、1981年以前の論議の過程の影響を付録として纏めてみた。

なお、お名前を引用した方々の職名、身分は当時のもので、敬称は省略させていただいた。原子力に多い略号は説明を付していない。

最後に、編集委員長、森下先生、委員で、文章の検討など、多大の時間を費やしてくださった、古屋先生に、感謝の言葉をお送りしたい。そのようなことで、締め切りに、第1稿が出来たが、今日は、神戸の地震の12周年の1月17日である。

付録と付記 耐震指針改訂審議への従来の耐震設計法の影響（討議の抜け、いわゆる“つけ”の足跡）

[A1] 耐震審査指針の改訂の遅れ

審査指針の改訂は当初3年と予定された。実際は5年を必要とした。その主な原因は設計用地震動を決める活断層の同定についての議論にある。活断層と震源（地震）断層の区別についての、分野別の考え方の違い、地形学的判断の重視の度合い、その生成時期と、近未来の活動の可能性などの議論が繰り返された。その間に、分野間の見解の相違が出てきて議論が繰り返された。その中には、地球物理の分野における、下記のような特有な見方もある。また、地震・変動計測などの急激な進歩への、信頼感、追従性もある。また、1958年~1970年ごろまで間の計測技術の発展の立ち上がりに支えられた地震学の進歩はその後も続いており、それへの理解の差が、上記のようなことを招いたと思われる。

[A2] 地球物理学者のある見解として示された世界観

“地震は妖怪”、島村 英紀（北大教授、地球物理）著、講談社+α新書、2000年初版、がある。「まえがき」の“終

わりなき戦い”から始まって、地球の正体がわかり難く、学者がどのように騙され続けたかが述べられている。「あってもわからない」活断層、地震予知は「難病指定」など、地球物理学者などの世界観が書かれている。元毎日新聞記者であった横山 裕道（淑徳大、教授）は地震ジャーナル誌（ADEP機関誌）42（2006.12）、p.47に、地震予知の前兆重視の姿勢についての批判があるが、この考えはユニークであると、上記、島村の考えとして紹介している。

一方、1997年のhi-netシステムは地殻の3次元構造を明確にし、和達・上田の業績であるプレート・テクトニクスに裏付けられる理論を現実の姿で描き上げてくれるようになった。このわが国の観測網の充実にGPSなどの加わった現段階で、（構造）地質学と地震学の結合は密になり、今までにない高精度の地殻構造、さらにそれらのダイナミックスが判ろうとしている。学者が騙されていた自然の難しさは、今も変わらない点もあるが、地震学への不信、あるいは、過度の“安全側仮定の強調”の時期は去ったと考えてよいのではと思われる。

[A3] 耐震設計審査指針の改訂に5年の日時を費やした理由

上記のことの繰り返しになるが、次の諸点についての過去の考え方にその原因があると思われる。

[A3-1] 地震の発生源としての地震

松田 時彦（地質学）の“動く大地を読む”自然景観の読み方 岩波書店 1992初版のp.3で、活断層で地震が起きるということが、一般の考え方になったのは、“比較的新しい”と書かれていることに、小生も同感である。原子力の耐震が始まった1960年ごろは、地震発生は断層によると言う事は、必ずしも定着していなかった。上記に要約されているが、松田の著作の内容の引用を続けると、Reidの“弾性反発説”が、1906年のSan Francisco地震の後に発表されたが、わが国では、石本 巳四雄が、1934年にこれを支持する意見を述べただけである。これを、断層であると、その運動について地震動記録から決定付けたのは新潟地震-1964であるとしている。

しかし、小生の知るところでは、著名な地震学者である、坪井 忠二の“新地震の話” 岩波新書 青7 1967年初版には、弾性反発説は、紹介されているものの、否定的であり、“地震の発生原因は、マグマ変態などの物性的なものであり、その結果に、断層が地表に現れる”としている。1960年の“2WCEE”で座長

をされて、その議論をしておられた記憶がある。1961年に出たTID7024, “Reactors and Earthquake” G.W.Housner編、アメリカ政府刊行で初めて、断層モデルの説明を見たのが最初であった。

[A3-2] 海溝型地震と地殻内地震

わが国の地震被害で記録に残る大地震は海溝型地震であることが多い。恐らく地震規模Mの大きさと被害地域の広域性によるものであろう。さらに、これらの発生の周期性が、記録に残る程度の歴史性を有するものであるからと考えられる。したがって、関東地震後から昭和初期ごろ頻発した内陸の地震は、それぞれの被害は激しいにも拘らず、原子力の耐震基準の一般論では、直ぐには起きないものとして注目されなかった。それが、兵庫県南部地震－1995で、防災の対象としての地震は、地殻内（いわゆる直下）となり、その考え方が、一般防災の世界で海溝型より優位に立って議論されるようになった。

[付記1] 審査指針による地震動決定と諸機関

小生が籍を置く（財）地震予知総合研究振興会（略称ADEP）の業務は、審査指針による地震動決定のための諸調査をはじめ、本来の地震予知のための研究とその進展となる地震調査研究推進本部（内閣府、事務担当は文部科学省）の具体的業務を行っている。この業務を通じて、地震・地震動の決定の手順を踏んでいる。実務はまた、多くの建設関連の企業で、独自性を持ちつつ行っている。なお、中央防災会議とは、原則的には無関係である。

[付記2] 震源を特定しない地震とスラブ内地震

この問題は、審査指針の改訂中に議論され無かった問題と思われる。新審査指針で“震源を特定せず策定する地震動”を惹き起こす地震を、ここでは、表記のように呼ぶ。これは、従来の審査指針で、直下地震と呼んでいたものから派出したものである。一方、スラブ内地震が考慮されるようになった。震源を特定するためには、活断層（地形学的）か、すくなくとも、震源断層が同定される必要がある。ところが、スラブ内断層は、地形学的には同定出来ない。過去の地震記録によるには、この地震についての知識が最近のものであるため、該当する地震を、近い将来、また、起きる地震とすることは、一般に困難である。そのように考えると至近のスラブ内に、過去の記録と無関係に震源を想定することになり、“震源を特定せず策定する地震”と紛らわしくなる。別の言い方をすれば、“特定で

きる地震”は、なんらかの方法で、確定できる震源（活断層である筈と考えられる。

以上、改訂が手間どった経緯と思われる点などについて、私見を記した。

文 献

- [1] Heki SHIBATA: Modeling of Earthquake Motions for Seismic Design of Critical Facilities: Revision of Licensing Criteria of NPP, ASME, J. of Pressure Vessel Technology, Vol. 128, 2006, p.486-501
- [2] SHIBATA, Hisayoshi SATO, Tatsuya SHIGETA: Aseismic Design of Machine Structure, Proc. of 3WCEE, Vol. II, 1965. 02, p.552-562
プロシーディングス掲載のみで口頭発表なし。
- [3] 柴田 碧, 藤井澄二, ほかと共著, 機械配管関係の被害, 原因とその対策, 生産研究, Vol.16, No.10, 1964. 10, p.293-
- [4] 柴田 碧: 原子力発電所-10年のあゆみ、生産研究、Vol.20, No.8, 1968, p.388-
英訳あり、原研、1970。
- [5] Heki SHIBATA, Sumiji FUJIIほかと共著, Observation of Damages of Industrial Firms in Niigata Earthquake, Proc. of 4WCEE, Vol. III, J-2, 1969. 01, 15pp.
- [6A] 柴田碧, 産業施設の被害, 生産研究, Vol.23, No.8, 1971. 08, p.335-
- [6B] 柴田碧, 久保慶三郎, サンフェルナンド地震・概要, 生産研究, Vol.23, 8, 1971. 08, p.314-
- [7] Toshiaki HISADA, Heki SHIBATAほかと共著: Philosophy and Practice of the Seismic Design of Nuclear Power Plants-Summary of the Guidelines in Japan, Nucl.Eng' g. & Design, Vol.20, No.2, 1972. 07, p.339-370
- [8] Heki SHIBATA, Nobuyuki SHIMIZU, Makoto YAMAMURO, Tatsuya SHIGETA: On Fluctuation of Responses of a Structure, Proc. of 5WCEE, Vol. II, 1973. 06, p.2886 -2898
- [9] Heki SHIBATA: On Response Analysis for Structural Design and its Reliability, Trans.for SMiRT-3, K, 1975.09, 12pp
- [10] Heki SHIBATA, Kinji AKINO, Muneaki KATO: On Estimated Modes of Failure of Nuclear Power Plants by Potential Earthquakes, Nucl.Eng' g. & Design, Vol.28, No.2, 1974.09, p.257-277
- [11] Morio MAKIGUCHI, Heki SHIBATA, and

- Others: Test and Evaluation about Damping Characteristics of Hanger Supports for NPP Piping Systems, Trans. for SMiRT-6, K (a), 1981.08, 8pp.
- [12] Heki SHIBATA, Takafumi FUJITA, Masanori SHINTANI: On Damage Rate Evaluation of Nuclear Facilities under Destructive Earthquake Conditions and Some Comments on Their Current Antiearthquake Design Practice, Proc. of 3rd Inter Symp. on Struct. Safety and Reliability (ICOSSAR' 81), 1981. 06, p.441-450
- [13] Heki SHIBATA: The Role of Human Error in Seismic Risk Analysis, Proc. on 2nd CSNI Specialist Meeting on Probabilistic Methods in Seismic Assessment for Nuclear Power Plants. (Livermore), 1983.05, p.465-480
- [14] Research and Application of Seismic PSA in Japan--Problem which should be Solved, VII/1*, Proc. of 3rd Symp. on Current Issues related to Nuclear Power Plant Structures, Equipment and Piping, Orland Florida, 1990.12
- 以下、上記論文[1]に引用分を纏めて載せる〔論文の記載方式に従い、和文については、原記載を記した〕。
- Au-Yang, ed., Shibata, H., 1993, Recent Development of Aseismic Design of Equipment and Piping Systems in Japan, Technology for the '90s. ASME, Title IV, Chapt. 2, 1995, 1011-1014
- BSSA, 1994, Special Issue on Landers earthquake-1992, BSSA Vol.84., No.3., June 1994, 497-962.
- BSSA, 2004, Special Issue on Denali Fault earthquake-2004, BSSA Vol.94, No.6B, Dec. 2004, S1-S450
- Bolotin, V.V., 1962; Trans. Friedman, M.D., 1964, Statistical Methods in Structural Mechanics, Chapt. III, 28. Statistical Theory of Brittle Failure, and 29 Scale Factor of Brittle Failure, English Translation, Lockheed Missile & Space /Holden-Day, Inc., 1962, 51-54 (English Version)
- Fukushima, Y. et al, 2005, Attenuation Relations of Strong Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period, Tans. of SMiRT-18, K02-1 Aug.2005, 2978-2989
- Ghosh, A.K. and Kushwaha, H.S., 2005, Determination of the Peak Ground Acceleration for Operating Basis Earthquake and its Influence in Design of Structures, Trans. of SMiRT-18, K03-3, Aug.2005, 3029-3040
- Hauessler, P.J. et al, 2004, Surface Rupture and Slip Distribution of the Denali and Totschunda Faults in the 3 November 2002 M 7.9 Earthquake, Alaska, BSSA, Vol.94, No.6B, S23-S52
- Hisada, T. et al, 1972, Philosophy and Practice of the Aseismic Design of Nuclear Power Plants, Nuclear Engineering and Design, Vol.20, No.2, Apr.1972, 339
- Housner, G. ed, 1963, Nuclear Reactors and Earthquakes, USAEC, Div. of Tech. Inf., TID 4500, Aug. 1963, 415pp.
- 入倉 幸次郎、私信、Irikura, K, 1995, Private Conversation
- Irikura, K. et al, 2004, Recipe for Predicting Strong Ground Motions from Future Large Earthquakes, Proc. of the 13th World Conf. on Earthq. Eng' g., 13WCEE, Aug. 2004, Paper #1371
- Irikura, K., 2004, Asperity Study, Recent Research Development and Future Study, Proc. of OECD/NEA Workshop in Tsukuba, Japan, NEA/CSNI/R(2004)22, Keynote 5, Nov. 2004
- JEA/NRC-BNL: Park, Y.J. and Hofmayer, C.H., 1994, English Translation of JEAG 4601-1987, NUREG, CR6421/BNL-NUREG-52422, 1994
- JNES/AIST, 2004, Classified
- Japan Electric Assoc. (JEA), 1984,' 87,' 91, Technical Guideline for Aseismic Design Guideline of Nuclear Power Plants, in Japanese, JEAG 4601
- 垣見 俊弘、審査指針旧版、Kakimi, T., See NSC 1981
- 金井 清、審査指針旧版、Kanai, K., See NSC 1981
- 金井 清、大槻 志夫：耐震設計、Kanai, K. & Ootsuki, Y., 1961, Taishinsekkei, (Anti-Seismic Design), Corona Pub.Co., p.35, in Japanese
- Kato, N. and Sato, H. et al, 2004, Seismic Reflection Profiling across the Source Fault of the 2003 Northern Miyagi earthquake (Mj 6.4), NE Japan: Basin Inversion of Miocene Back-arc Rift, Earth, Planets and Space, Vol. 56, No.12, Dec. 2004, 1369-1374
- Katona, L., 2001, Private, For IAEA document.
- Kelson, K.I. et al., 2001, Representative Styles of Deformation along the Chelungpu Fault from the 1999 Chi-Chi (Taiwan) Earthquake: Geomorphic Characteristics and Responses of Man-Made

- Structures, BSSA, Vol.91, No.5, Oct. 2001,p.930-952.
- 工藤 一嘉：長周期地震動について、配管技術、
Kudo, K., 2005, On Long Period Ground Motion,
Haikangijutsu (The Piping Engineering) in
Japanese, Vol.47, No.11, Nov.2005, 4-11
- Litehiser, J and Carrato, P., 2005, Characterization
of Design Ground Motion for the Central and
Eastern United States:, Licensing Implications,
Trans of.SMiRT-18, K02-4, Aug.2005, 3004-3015
- 原子力安全・保安院、ホーム・ページ、METI,
2005, Technical Instruction of the Ministry of
Economy and Industry, Regarding to Data and its
Evaluation of Earthquake-, Aug. 16 on Operation
of Onagawa NPP, NISA-152d-05-5, Aug. 2005, 2pp.;
HP of Tohoku E.P. Co., Sept 2, 2005, in Japanese
(行政法人) 防災科学技術研究所 ウェブ・サイ
ト、NIED, 2005, <http://www.bosai.go.jp/k-net>,
Website
- 原子力安全委員会、耐震設計審査指針、1981年版
NSC, 1981, Licensing Criteria for Seismic Design
of Nuclear Power Plants
- Nakamura, I. et al, 2005, A Research Program on
Thinned Wall Piping Systems under Seismic
Events, Trans. of SMiRT-18, K01-04, Aug.2005,
2935-2963
- 旧建設省 Previous Ministry of Construction, 1982,
Law of Building, 1982, in Japanese
- 佐藤比呂志、地質時代の断層の再活動によって引
き起こされた2003年の宮城県北部の地震、サイ
スモ、地震調査研究推進本部、Sato, H., 2004,
Reactivation of Tertiary fault, Miyagi-pref.earthq.-
July 2003, Seismo, Sept. 2004, 10-11, in Japanese;
see "Kato, N. 2004"
- Shibata, H. et al, 1969, Observation of Damages of
Industrial Firms in Niigata Earthquake , Proc. of
the 4th World Conference on Earthq. Eng' g., III,
J-2, Jan.1969, 15pp.
- Shibata, H. et al, 1980, Study on Failure Mechanism
of Equipment by Using High Velocity Shaking
Table, Report of ERS.IIS., Univ. of Tokyo, in
Japanese, No.III-3, Jun.1980, 47pp.
- Shibata, H. et al, 2005, An Approach to Seismic PSA,
Evaluation of a Nuclear Power Plant with Aged
Pipings, Proc. of PCS-1, SMiRT-18, Aug.2005,
15pp..
- Shibata, H., 1999, Seismic Hazard and Damages,
Avoiding Disaster Through Simulation,
Experiment, and Experience, JPVT, Vol. 121, Feb.
1999, 30-36
- Shibata, H., 2004, Significant Concept of Scenarios in
Relation to Revising Process of Licensing Criteria
for Seismic Safety of Nuclear Power Plants in
Japan, Proc. of 13 WCEE, Aug.2004, Paper #2058
- Shibata, H., Amano, A.& Takada, H., 1993, A New
Semi-Numerical Approach on Response of Beam
with Multi-gaps and Chaotic Response, Proc. of
PVP Conf., PVP-Vol.376, 185-190
- Shibata, H. and et al, 2004, Development of Seismic
Design code for High Pressure Gas Facilities in
Japan, JPVT, Vol.126, Feb. 2004, 2-8
- Somerville, P., 2004, Differences in Earthquake Source
and Strong Ground Motion Characteristics
between Shallow and Buried Faulting, Proc.
of OECD/NEA Workshop in Tsukuba, Japan,
NEA/CSNI/R(2004)22 Key Note 3, Nov.2004, 5pp.,
Keynote 3
- 東北電力 ホーム・ページ、Tohoku E.P.Co. 2003,
Tohoku Electric Power Website, Seismic Trip of
Onagwa No.3 Unit by the Earthquake May 26,
2003, HP in Japanese, May 26.2003.
- 東北電力 ホーム・ページ、Tohoku E.P.Co., 2005,
Letter from METI to Tohoku Electric Power Co.,
Website, HP in Japanese, Sept. 2 2005
- Toyosada,M. and Gotoh.K., 1998, Strength Evaluation
for Brittle Fracture at Arbitrary Strain Rates,
Proc. of PVP Conf., Fitness-for-Service Evaluation
in Petroleum and Fossil Power Plants, PVP-380,
July 1998, 111-118
- Toyosada,M. et al, 2001, Evaluation of a Brittle
Fracture Accident tat Occurred at the Hyogo-
ken Nanbu Earthquake, Proc. of 10th Int. Conf. on
Fracture, Advances in Fracture Research,
USNRC, 1982, Design Response Spectra for Seismic
Design of Nuclear Power Plants, RG 1.60

平成19年1月8日作成

原子力発電所の耐震設計のための基準地震動

入倉孝次郎

●愛知工業大学

1. はじめに

「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」は4年に及ぶ議論を経て昨年9月19日に改訂された。今回の原子力発電所の耐震設計審査指針改訂における重要ポイントの1つは、耐震設計の前提となる基準地震動をどのように決めるかにあった。改訂が必要となった背景には、地震学などにおける新知見の蓄積や原子力発電所の耐震設計技術の進歩があるが、やはり、1995年に発生した兵庫県南部地震の経験が契機となっている。この地震で得られた強震動を含む種々の記録に基づいて、断層の活動様式、震源破壊過程と地震動特性、構造物の耐震性等にかかる貴重な知見が得られた。改訂理由の1つは、これらの最新の重要な知見を耐震安全性に対する信頼性向上に反映させることにある。もう1つは、国際的に原子力安全耐震設計に対し確率論的安全評価を取り入れるという動きがあり、この考え方を日本でも入れるべきとの意見が原子力のリスク研究者から出されていた。

原子力発電所の耐震設計審査指針の基準地震動の基本的な考え方は「地震学および地震工学的見地から見て、施設の寿命中に極めてまれではあるが発生する可能性のある限界的地震動を基準地震動として最新の知見により策定し、そのような地震動に対して、発電用原子炉施設を、安全防護施設を含めて必要な安全機能が損なわれず周辺の公衆に過度の放射線災害を与えないように設計する」ことにある。これは原子力発電所のように万一事故が起こったら広域に極めて重大な被害の発生が予想される施設に対しては当然のことで、旧指針においても同様の考えに基づいて耐震設計の方針が規定されていた。今回の指針の改訂でこれまでに比べて基準地震動の策定方法が大幅に高度化されるだけでなく、「この基準地震動は、個別の安全審査時における最新の知見に照らして、その妥当性が十分確認されなければならない」ことが明記された。これに加えて、「このような限界的地震動に対する安全性を達成しても、なおかつ地震によるリスクは残存する可能性があることを踏まえ、この『残余のリスク(注1)』を考慮して、公衆放射線災害のリスクを評価し、それを合理的に実行可能な限

り小さくすることに努力が払われるべきこと」も記されている。

2. 基準地震動にかかわる主な改訂点

旧指針では、「基本方針」として「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、大きな事故とならない、誘因とならないような十分な耐震性を有していなければならない」と定められていた。ここでの「いかなる地震力」とは、耐震設計のための基準地震動は想定しうる最大限の地震動として与えることを前提としている、と考えられる。

新指針の「基本方針」では、地震動および地震力に関する定義を厳密化し、「施設の供用期間中にごくまれではあるが発生する地震動、基準地震動による地震力に対して、その安全性能が損なわれない設計をする」と規定された。これが基準地震動 S_s を決める根拠となる。また、解説において以下のように記述されている。地震動の策定については、「『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に地震動』を適切に策定し、この地震動を前提とした耐震設計を行うことにより、地震に起因する外乱によって周辺公衆に対し、著しい放射線被爆のリスクを与えないようにすることを基本とするべきである」としている。さらに、「残余のリスク」の存在について、「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。このことは、耐震設計用の地震動策定において、『残余のリスク』が存在することを意味する」と記されている。

上のように「残余のリスク」が存在することは明記されたが、その評価方法および適用については、「安全目標が決められていない段階で、残余のリスクについて具体的数値は決められないため、合理的に可能な限り小さくするための努力を払うべきである」と規定されている。なお、この問題については、分科会の見解という形で、安全審査とは別に、運転開始までに確率論的安全評価を試行的に実施、確認することとし、学問の進歩や国民的コンセンサスの状況を踏まえて改訂ができるよう、実際に残余のリスクを必ず評価して

データの蓄積を図ることとしている。

基準地震動の策定について、旧指針では工学的判断から決められた設計用最強地震S1と理学的観点から設計用限界地震S2の2種類が定義されていた。今回の改訂の審議で、基準地震動は最近の地震学および地震工学における蓄積を踏まえ、旧指針におけるS1およびS2の策定方針を統合し高度化して、科学的見地から限界地震動を決めるべきということで、Ssに統一した。設計用に必要なものとして地震工学的に定義されるSdが規定されることになった。また、これまで水平方向のみ決め、鉛直方向は水平方向の2分の1と仮定していたものを、検討対象とする地震とそのサイトの性質に応じて、水平方向に加え、鉛直方向についても策定するとした。これまでの応答スペクトルに加えて、断層モデルを用いた手法も採用するとともに、地震動のある種の不確実さについてもばらつきを考慮することが明記された。

検討対象とする活断層について、耐震設計の安全性を高めるため調査期間を5万年から後期更新世以降に拡大した。また活断層の調査方法について、敷地からの距離に応じて、地形学・地質学・地球物理学的手法等を総合した十分な調査を義務付けている。旧指針では、敷地又はその近傍で活断層が認められない場合においてもM6.5の直下地震による地震動を考慮すると規定されていたが、改訂指針では、詳細な調査をもとに敷地ごとに震源を特定するように最大限の努力をするが、なお見逃される可能性もあるので、「震源を特定せず策定する地震動」として、一定レベルの地震動を別途設定することになった。

3. 基準地震動の策定

改訂指針において、基準地震動は、地震学および地震工学の最新の知見を踏まえ、かつ従来の指針と継続性がある形で、策定することが規定された。基準地震動Ssは、施設の耐震安全性を確保するための耐震設計の前提となる地震動で、その策定に当たっては、個別の安全審査時における最新の知見に照らして、その妥当性が十分確認されねばならないことも定められた。改訂の重要点の1つは、基準地震動のSsを決めるために、必ず敷地ごとに、最も大きな影響を与える可能性のある地震について、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することにある。これらの調査に基づき、基準地震動Ssは「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」について策定する。

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の調査を行い、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、地震発生様式当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。

応答スペクトルに基づく地震動評価に関しては、従来から活断層のマグニチュードと距離減衰式から大崎スペクトルを決めて、経験的な包絡関数からスペクトル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大崎スペクトル策定以後蓄積された強震動データを用いて求めなおした用いることが前提となる⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。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關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⁽⁴⁾⁽⁵⁾。敷地ごとに応答スペクトルの適用に当たって上記のことを考慮することが必要となる。

断層モデルを用いた手法による地震動評価に関し、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⁽⁶⁾。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ー」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「微視的なパラメーター」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ー」と「微視的なパラメーター」は地震モーメントを関数として経験的に得られた2つの異なるスケーリング則により推定される(図1参照)。

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、強震動波形の

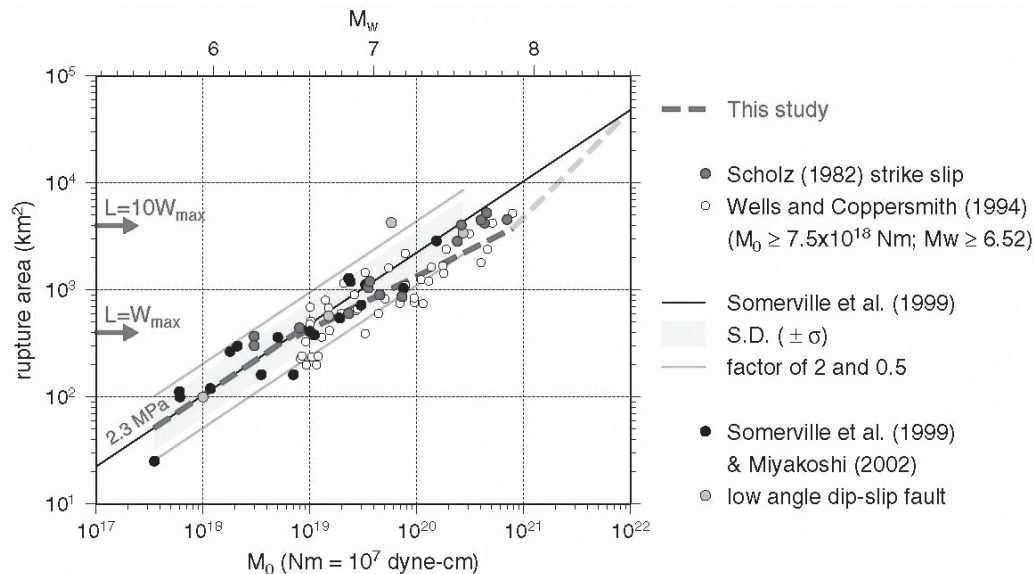


図1. 地震モーメントと断層面積のスケールング則。太破線は3段階のスケールングを示す。最初の折れ曲がり、 M_0 が 7.5×10^{18} Nm、 M_w が6.52。(入倉, 2004)⁽⁶⁾より引用。

計算ができる。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得ることもできる。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、波形の位相特性が非常に重要になる⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

原子力施設の耐震安全性を確保するために、敷地ごとに十分な調査をし、震源を特定して地震の震源断層のモデル化を行って基準地震動を決めるということは世界に誇る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のものである。

震源を特定せず策定する地震動

今回の改訂では、基準地震動 S_s は、詳細な活断層や海溝域の調査により敷地ごとに検討用地震を選定し、「震源を特定して策定する地震動」として与えられることを基本としているが、調査を行っても特定できない地震の存在も知られている。旧指針では、規模の小さい地震は見逃す可能性があるとして、すべての敷地でマグニチュード6.5の「直下地震」が震源距離10 kmに起こることを想定して、設計用限界地震の1つとして地震動の評価を行っていた。今回の耐震指針検討分科会の審議では、近年起こった地震と活断層の関係の調査研究により、マグニチュード6.5以上の活断層地震は震源が特定できるとは言い切れないことが指摘された。

活断層のないところに地震が発生した場合、①調査が十分に行われてなかったために活断層の存在がわからなかっただけで、詳細な調査を実施すれば活断層の評価は可能であった、あるいは②事前に詳細な調査を行っても活断層の存在は特定できなかった、という2つのケースが考えられる。これまでの研究成果から、一般的には、一定規模以上の地震が発生したとき、地震に伴い地表断層が出現し、地震の痕跡が変動地形や地下構造に累積されるが、規模の小さい地震では地表断層が出現しないので、明瞭な断層地形は形成されない、ことはわかってきた。このような関係は「地震規模と地震断層の面積の関係」や「地震規模と震源断層の長さの関係」など断層パラメータに関するスケールリングに顕著な折れ曲がりが見られることから明らかにってきた(図1および図2上図参照)。しかしながら、最近の地震の兵庫県南部地震の震源過程の研究などから、アスペリティが浅い時には、地表断層が出現するが、アスペリティが深いと地表断層が出現しない、こともわかってきた⁽⁹⁾。このようなアスペリティ・モデルの考えから、活断層を事前に特定できるかどうかを地震規模のみで規定するのは問題があることも分科会で指摘された。地震動の観点からは、震源が直下にあるとき、アスペリティが浅いと敷地へ影響の大きい揺れが生じるが、アスペリティが深いと敷地への影響は相対的に小さくなる。

そこで、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、地震動のレベルから「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、国内外の幅広い知見の収集、検討を行い、そのような地震の過去の観測記録を収集し、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、これに地震動特性を適切に考慮して地震動評価を行うこととした⁽¹⁰⁾。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。

その他考慮すべき問題点—その1：孤立した長さが短い活断層—

先に述べた巨視的断層パラメータのスケーリング則から、一定規模以上の内陸地殻内地震は、多くの場合地表断層・地中断層が出現し⁽¹¹⁾、地表断層の長さ⁽¹²⁾と震源断層の長さがほぼ一致する⁽¹²⁾。したがって、地表に現

れている活断層の長さから将来起こる地震の規模が推定できると考えられている。

ところが、地形・地質調査などから孤立した長さの短い活断層の存在も知られている。たとえ短くてもそのような活断層は過去の地震活動の痕跡を示すもので、将来地震の源となる可能性が高いと考えられ、当然「震源を特定して策定する地震動」として評価対象とするべきである。ただし、地表に現れている活断層の長さから「断層長さと地震規模」のスケーリング則などにより地震規模を推定するのは問題がある。

これまでの内陸で活断層に関して発生した地震に関して、地表地震断層の長さ⁽¹³⁾と地震規模や震源断層の長さの関係について、Stirling et al. (2002)⁽¹³⁾によりコンパイルされている。それらのデータの中には、信頼性に欠けるものや明らかな誤りなどが含まれているので、慎重にデータの選別を行い、信頼性のあるデータのみを用いて地震モーメント (M_w) と地表断層長さ (L)

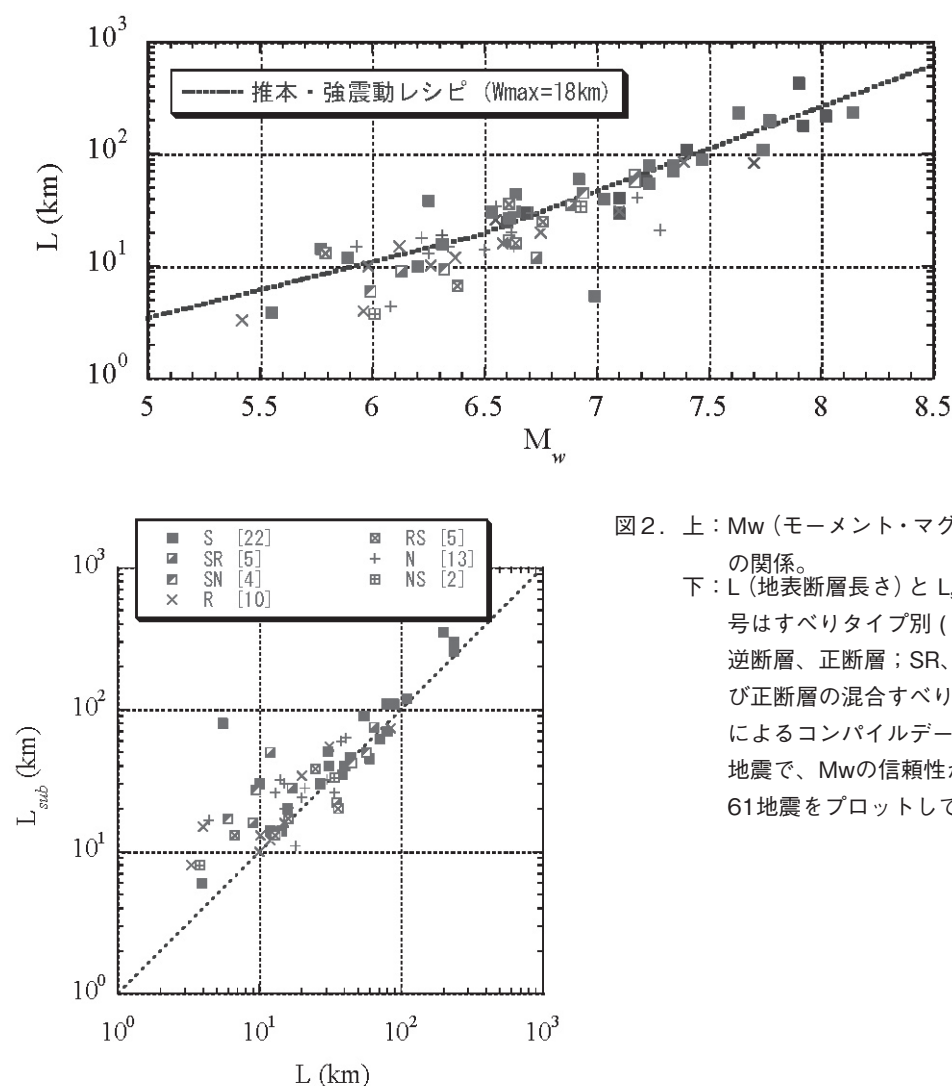


図2. 上： M_w (モーメント・マグニチュード) と L (地表断層長さ) の関係。

下： L (地表断層長さ) と L_{sub} (震源断層長さ) の関係。記号はすべりタイプ別 (S、R、Nはそれぞれ横ずれ断層、逆断層、正断層；SR、SN、RSは横ずれ、縦ずれ、および正断層の混合すべり)を示す。Stirling et al.(2002)⁽¹³⁾ によるコンパイルデータのうち、 L と L_{sub} が記載された地震で、 M_w の信頼性が低いと考えられるものを除いた61地震をプロットしている。野澤(2006)⁽¹⁴⁾より引用。

の関係 (図2上参照)、および地表断層長さ (L) と震源断層 (L_{sub}) の関係が野澤等により作成された (図2下図参照) ⁽¹⁴⁾。

図2の上図は観測データから得られるM_wとLの関係は、断層幅W_{max}が18 kmで飽和すると考えると、よく説明できることを示している。そのとき、Lが約20 kmでM_wがほぼ6.5を境としてM_wとLのスケーリング則が変化していることがわかる。また、図2の下図から、Lが20 kmよりも大きい地震ではLとL_{sub}は比較的よく対応するが、Lが20 kmよりも小さくなると、両者は顕著にずれている。Lが小さくなってもL_{sub}は約20 km付近に漸近し、それ以上小さくならない。これらの関係から、地表に数km程度の長さの孤立した活断層がある場合、地震学的に考えると地下には最低20kmくらいの断層が存在する可能性が否定できない。ただし、ここでの震源断層の長さ (L_{sub}) は必ずしも精度良いものではなく目安値として考えるべきものである。

孤立した短い活断層の震源断層を想定するために、図1に示されるような震源断層の面積と地震モーメントに関するスケーリング則にしたがって、地表断層が現れる可能性が高い一定規模以上の地震 (たとえば、M₀ > 7.5 10¹⁸ Nm、M_w ~ 6.5) とするなど最新の知見の整理が必要と考える。

その他考慮すべき問題点—その2：ばらつきの評価—

検討用地震を選定して、地震規模、震源断層、アスペリティなど震源断層パラメーターを推定し、基準地震動S_sを策定するときに、種々の不確かさ (ばらつき) が存在する。この不確かさは基準地震動を過小あるいは過大な評価をもたらす可能性がある。

改訂指針では、本文で「基準地震動S_sの策定過程に伴う不確かさ (ばらつき) については、適切な手法を用いて考慮することとする」と明記し、解説においても「基準地震動S_sの策定過程に伴う不確かさ (ばらつき)」の考慮に当たっては、基準地震動S_sの策定に及ぼす影響が大きいと考えられる不確かさ (ばらつき) の要因及びその大きさの程度を十分踏まえつつ、適切な手法を用いることとする、と記されている。これは、断層パラメーターの不確かさにより、基準地震動が過小評価にならないように歯止めとして規定された。

地形・地質調査などにより、震源断層が推定されたとき、算定される地震動が過小評価にならないような検討が必要である。活断層や地震活動の調査等で標準的な震源断層モデルが設定できたとき、ここの断層パラメーターの不確かさを考慮して敷地に影響の大きい震源断層モデルの想定して地震動の範囲を評価する必

要がある。

4. おわりに

耐震指針検討分科会は、4年10ヶ月にわたる審議の結果、改訂指針 (案) を平成18年4月28日に全会一致でとりまとめた。それを受けて原子力安全基準・指針専門部会で審議を行い、一部修正の上了承された。原子力安全委員会は、指針 (案) の内容を妥当と認め、行政手続法第39条の規定に基づき意見公募を行った。意見提出期間は30日間で短いものだったが、世論の関心の高さを反映して、680件のコメントが出された。特に、基準地震動については、4年間にわたる議論の中で意見相違の大きかったところであり、賛否を含む多様な意見が出された。

提出意見の中に、2006年6月に島根原子力発電所のサイト近傍のトレンチ調査で活断層の存在が明らかになったのは、指針で規定されている活断層の調査法に問題があるのではないかの指摘があった。この問題は分科会における指針案のとりまとめの後に明らかになったもので、「安全審査」は信頼性があることを前提とした指針作りそのものに問題があるのではないかと、また原子力発電所にかかわるこれまでの活断層調査が、変動地形学を中核とする現在の活断層研究が十分に反映されたものになっていない、などの意見が出されました。

これらの提出意見について審議の結果、指針に規定されている活断層調査に関する項目について、変動地形学的な研究者の指摘する変動地形学的調査を明示的に入れるよう修正された。安全審査の信頼性に関しては、今回の改訂指針は敷地からの距離に応じて詳細な活断層調査を規定しており、これまで以上に信頼性ある調査が行われることになる、との意見が多数を占めた。個人的意見としては、この問題に関して、今後安全審査において活断層の見落としなどがおこることのないように適切な専門家を委員とするなど適切な対応を関係機関に強く要望したい。

震源を特定せず策定する地震動の策定方針については、分科会においても意見が分かれたこともあり意見公募でも多くの意見が出された。この問題については、これまでの分科会での議論のまとめとして、指針の解説で敷地周辺の状況等を十分考慮した詳細な調査を実施しても、なお敷地近傍において発生する可能性のある内陸地殻内の地震の全てを事前に評価しうるとは言い切れないことから、敷地近傍における詳細な調査の結果にかかわらず、全ての申請において共通的に考慮すべき地震動」と規定されている。すなわち、「震

源を特定せず策定する地震動」は詳細な地形・地質調査の結果、敷地周辺に活断層が確認されない場合でも、基準地震動として想定すべきminimum requirementを意味している。孤立した短い活断層が確認されたとき、断層の一部しか地表にあらわれない可能性も考慮し一定の長さ(約20 km程度)あるいは一定規模(Mw ~ 6.5)を想定するとともに、基準地震動が過小評価とならないように不確かさも考慮することなど、震源を特定せず策定する地震動と、震源を特定する地震動の境界がないように規定されている。このようないくつかの歯止めを掛けることにより、改訂指針で安全性の高い基準地震動の策定が可能となる、と考える。

今回の耐震指針の改訂は、現時点における地震学及び地震工学に関する新たな知見の蓄積等を反映してなされた。最重要の変更点である基準地震動の策定方法は現状の技術レベルから見て最先端の知識に基づいた高度化が図られている。

指針の改訂において、もう1つの重要点である残余のリスクについても、そ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を払うべきであると規定されている。残余のリスクの評価に不可欠な確率論的な地震動予測は、個々の活断層や海溝域における地震発生の確率をどのように評価するか、また地震動の評価に直接的に影響する距離減衰式のばらつきをどのようにしたら少なくすることが可能かなどいまだ多くの問題が残されている。

基準地震動について、新たな評価方法を示すだけでなく、その限界を盛り込んでおり、世界に誇れることができるものであると私は考えている。残念ながら、議論の一部について全員の合意には至らず、最終段階で辞任された委員もいたが、はじめの段階で委員の間にあった大きな意見の隔たりが多くの議論により最終的には大変小さくすることができた。

注1：策定された地震動を上回る地震動の影響が施設に及ぶことにより、施設に重大な損傷事象が発生すること、施設から大量の放射性物質が放散される事象が発生すること、それらの結果として周辺公衆に対して放射線被曝による災害を及ぼすリスク。

参考文献

1) Nishimura, I., S. Noda, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M. Tohdo, and T. Watanabe: Response spectra for design purpose of stiff structures on rock sites, Transactions, SMiRT 16, Paper#1133, 2001.

2) 佐藤智美・片岡正次郎・奥村俊彦：K-Net強震記録に基づく工学的基盤における加速度応答スペクトルと経時特性と推定式の検討、第11回日本地震工学シンポジウム論文集、2002年、pp.615-620。
3) Kanno, T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara, and Y. Fukushima: A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 96, No. 3, 2006, pp.879-897.
4) 佐藤智美：宮城県沖のスラブ内地震とプレート境界地震の短周期レベルの推定、日本地震工学会論文集、第4巻、第1号、2004年、pp.1-4。
5) 原子力安全基盤機構：海溝型固有地震の地震動特性に関する検討【概要版】、JNES/SAE06-098. 06 解部報-0098、2006年。
6) 入倉孝次郎：強震動予測レシピ——大地震による強震動の予測手法一、京都大学防災研究所年報、第47号A、2004年、pp. 25-45。
7) 境有紀、瀬戸一、神野達夫：建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案、日本建築学会構造系論文集、第555号、2002年、85-91。
8) 川瀬 博：建物の地震被害の予測とその軽減への展望、地学雑誌、110巻6号、2001、pp. 885—899。
9) 香川敬生・壇一男・大塚康弘・本橋章平：確率論的地震危険度評価のための潜在断層地震の発生確率設定法、土木学会地震工学論文集、047(CD-ROM)、2005年。
10) 加藤研一・宮腰勝義・武村雅之・井上大榮・上田圭一・壇一男：震源を事前に特定できない内陸地殻内地震による地震動レベル—地質学的調査による地震の分類と強震観測記録に基づく上限レベルの検討—、日本地震工学会論文集 第4巻、第4号、2004年、pp.46-86。
11) Shimazaki, K.: Small and large earthquakes: The effect of the thickness of seismogenic layer and the free surface, Earthquake Source Mechanics, AGU Geophysical Monograph 37, 1986, pp.209-216.
12) 松田時彦：活断層から発生する地震の規模と周期について、地震、第2輯、28号、1975年、pp.269-283。
13) Stirling, M. W., Rhoades, D. and Berryman, K.: Comparison of earthquake scaling relations derived from data of the instrumental and preinstrumental era, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 92, 2002, pp.812-830.
14) 野澤 貴：断層長さともーメントマグニチュードの関係についての検討資料、論文準備中、

新耐震設計審査指針におけるSdの役割について

秋山 宏

●日本大学総合科学研究所 教授

1. はじめに

「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」は1981年に制定された。この度の改訂作業は2001年6月に始まり、5年の歳月を経て、2006年9月に成案を得た。改定の目的は四半世紀の耐震設計技術の進歩を指針に反映させることであった。地震動評価の分野では、地震観測網の整備、震源モデル、波動伝播モデルの精緻化を背景とした設計用地震動策定法の見直しが課題となった。地震動の下での施設の安全機能評価(狭義の耐震設計)の分野では、メキシコ地震(1985)、ノースリッジ地震(1994)、兵庫県南部地震(1994)、スマトラ沖地震(2004)等の被害経験、解析・実験技術の進歩、損傷軽減に向けた免震構造、制震構造の発達を背景に、より信頼性が高く自由度の高い設計法の追求が課題となった。結果として改定の要点は次のようなものとなった。

- 1) 旧指針の S_1 (最強地震動)、 S_2 (限界地震動)から基準地震動 S_s への移行
- 2) 弾性設計用地震動 S_d の導入
- 3) 「建築物、構築物は原則として剛構造とする」との規定の削除
- 4) 「残余のリスク」の存在の認識の必要性の導入
一方、旧来の内容に留められたのは次の項目である
- 5) 施設の耐震重要度分類
- 6) 静的地震力

改定内容は基本的には耐震設計技術の進歩を取り入れつつ旧来の安全評価手法を踏襲したものであると云える。評価手法は設定された地震動の下での施設の状態を予測し、その状態が施設の健全性を損なわないものであることを確認するものであり、力学原理に基づく決定論的手法と呼べるものである。

地震学的見地から見れば地震動 S_s を上回る地震動が起こる可能性は否定できない。それに対処する為には「残余のリスク」を認識することの必要性が解説レベルで導入された。残余のリスク評価に有効な手法の一つは残余のリスクの確率レベルを設定して、確率評価を行なう確率論的手法である。この度の改定の議論において決定論的手法と並んで確率論的手法を導入する

ことの是非についてはかなりの時間がさかれたが、確率論的手法それ自体の信頼性、完成度、決定論的手法との調和と言った観点から未だ検討の余地があるとの判断からその本格的導入は見送られた。

本稿は新耐震設計審査指針における S_d の役割を述べることに主眼を置くが、これと深く関わり、決定論的手法において中核的役割を果たす静的地震動の意義についても再確認する。また、決定論的手法における「残余のリスク」への対処の仕方についても言及する。

2. 基準地震動 S_s と弾性設計用地震動の位置づけ

旧指針では放射性物質を内蔵する構造物はA、Asクラスの2段階に分類されていた。Aクラスに対しては設計用地震動 S_1 が設定されAsクラスに対して設計地震動 S_1 、 S_2 が設定された。 S_1 地震動に対して施設は弾性状態に留まることが必要条件であり、特に重要度の高い施設には設計上考え得る限界の地震動の下でも施設が有害な損傷状態に到らないことの確認がなされた。今回の改定では放射性物質の多寡に関わりなく A_1 、Asクラスは対等に扱うことになり、Aクラスの格上げが行われた。これに伴い設計用地震動は基準地震動 S_s に統一された。地震動、地震工学の立場からすれば、放射線被曝防護と云う単一目標は設定すべき地震動のレベルを一つにすることの明確な論拠であり、 S_1 地震動を存続させる論拠は失われる。それでは S_1 地震動の必要性は何であったのか。 S_1 地震動下で弾性状態に留まっている施設は S_1 を越える地震動に対しても余力を持っており、重大な損傷を免れる可能性を有している。特に重要なAsクラスに対しては直接 S_2 地震動に対する施設の健全性が評価される。このようにして、 S_1 地震動下で弾性設計された施設の S_2 地震動下の健全性は高い確度で保証されることになる。結局、旧来の S_1 地震動の設定は施設の耐震設計上の要請であったと言える。この度の改定は地震動の評価と施設の耐震設計(安全性評価)を明確に分離したものであり、これにより設計体系の明快化が大幅に進んだ。

3. Sdと弾性限界

構造物が弾性範囲に留まることは構造物が無損傷であることの必要条件である。これに変形制限の条件を加えれば構造物の無損傷状態をほぼ完全に記述できる。弾性を保証するものは材料の応力と歪の間の線形性である。線形性により構造物に加わる力と変形の関係は1対1に対応する。従って、弾性状態は明確に記述することができる。構造物はその一部が弾性限界を越えると弾塑性状態に突入する。塑性状態に入ると力と変形の関係は1対1に対応しなくなり、構造状態を記述することは困難となる。しかし、設計荷重下の構造物の安全性、健全性を証明する為には構造状態を明確に記述することが必要である。それには先ず、明確に記述できる唯一の状態である弾性限界状態を記述の根拠とすることは欠かすことができない。弾性限界に対応する荷重状態をもたらし地震動がSdである。地震動Sdから荷重レベルを漸増させて地震動Ssに到る迄の構造物の挙動を記述することにより地震動Ssの下における構造安全性の評価が客観的なものになる。構造種別毎に、SdからSsに到る挙動の記述は蓄積される。震害経験や震動台実験による検証を通して挙動の記述の客観性は高められる。Sd地震動からSs地震動に到る記述の過程で、荷重は比例的に増大させることが望ましい。このことからSs地震動の振幅に構造種別に従って定まる定数(本稿では f と記述)を乗じたものをSdとすることが原則となる。

施設は建築物・構築物等の大規模で支持・格納機能を専らとするものから運転・制御機能が重視される機器類に至る迄多種多様である。建屋・構築物系では弾性限界を越えて非線形領域に到っても直ちに支持機能が失われることはない。経済合理性を考慮すれば、 f の値をどこ迄低減できるかが一つの技術課題である。しかし、 f を小さくし過ぎるとSdからSsに到る迄の

挙動記述の信頼性が保証されなくなる。旧指針の下では、 S_1 地震動の S_2 地震度に対する強度比率は概ね2/3以上であった。また、弾性限界状態の2倍程度の荷重に到る迄の建屋・構築物の非弾性挙動の評価技術はほぼ確立されている。これ等を背景として、 f の下限值として1/2が定められた。運転・制御機能が重視される機器類ではSs地震動下でも弾性挙動することが求められるものが多い。このような場合は $f \geq 1.0$ であり、Sd地震動を導入することの直接的意義は薄い。

4. Sd、Ssと安全限界との対応

図1には構造物の荷重(F) - 変形(δ)関係上に安全限界、Sd地震動下の状態、Ss地震動下の状態を示す。Sd地震動は構造物の弾性限界に対応する地震動であると仮定する。(a)図は動的機能や制御機能が重視される機器類の場合で、機能保持の観点から弾性的性質が強く要求されている。この場合は弾性限界よりも安全限界が早く訪れることもある。従って、 f は1.0以上になり得る。地震動のレベルは横軸ないし縦軸に平行な線分で示してある。横軸に平行な線分は強度(荷重)で地震動のレベルを示したもので、縦軸に平行な線分は変形(エネルギー)で地震動のレベルを表現したものである。(a)図に示す弾性構造物では両者の尺度は一致するので構造物の挙動の把握は容易である。(b)、(c)図は構造物が塑性化する場合で、もはや強度で地震動レベルを表現し得なくなり、エネルギーのみが地震動レベルを表現し得るものとなる。(b)図は安全限界と弾性限界が接近している場合である。構造物が座屈や脆性破壊に支配され安定的に塑性化が進行しない場合であり、薄肉円筒タンク等がこれにあたる。(c)図は建築物・構築物の場合で質量が大きく支持機能、格納機能が重視される場合である。この場合は塑性化を阻む要因を排除することにより安

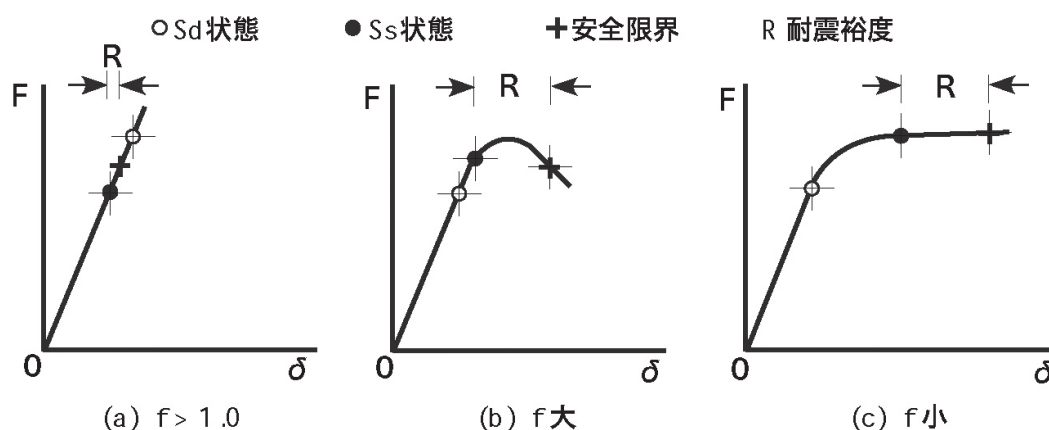


図1 Sd状態、Ss状態、安全限界の対応

定的に塑性変形を生じさせエネルギー吸収能力を高めることにより耐震安全性を高めることができる。一般の建築物では約半世紀の設計技術の蓄積により f の値は1/10から1/2程度の範囲に分布している。原子炉施設の安全性確保の重要性に鑑みて、 f の下限値として一般建築物に採用されている上限約的な値に対応する1/2の値を採ることは妥当な措置であろう。

5. 静的震度法

日本の耐震設計は1923年の関東大地震の震災復興の一環として市街地建築物法に初めて導入された¹⁾。これは建物の自重に水平震度を乗じて設計用地震力として、自重と地震力の組合せの下で建物を弾性範囲に留める方法であり震度法と呼ばれ世界の耐震規定の模範となった。当初の震度値は0.1であったが、1950年の建築基準法の制定に際して0.2と改められ、その後の我が国の耐震設計における骨格をなしている。戦後の復興に伴って都市の高密度化は進み耐震技術は進歩した。その原動力をなしたものは震度法導入以来連綿として続けられた柔剛論争である¹⁾。当時既に弾性振動学は確立していた。振動学的観点から見れば、建物を強く剛く造ることは一つの選択肢に過ぎず、これを法律として強制することの不合理性がこの論争の根幹に存在した。しかし震度法はその単純明快さの故に実行可能な優れた選択肢であり、法律の強制力の下に存在し続けた。1960年代以降の度重なる震害経験、電子計算機の発達による解析技術の進歩により、耐震的な構造物に要求されるものは単に強度（水平力に対する抵抗力）のみではなく、変形能力、特に塑性変形能力が不可欠であることがわかった。強度と変形の積はエネルギーであり、地震の構造物にもたらす荷重効果の本質はエネルギーであることが明らかとなった²⁾。こうした事実の解明に基づいて、1981年には建築基準法は改定され従来の震度法は踏襲されると共に、変形能力の大小により所要強度レベルを変化させ得る終局強度設計法（保有耐力設計法）が導入された。この方法は構造種別毎に評価される弾性限状態に対応する地震動のレベルの安全限界に対応する地震動のレベルに対する比率である構造特性係数（ D_s 値）に基づくものであって、上述の f 値と D_s 値はほぼ対応する。保有耐力設計法の適用は旧指針と同様に改定指針にも引き継がれた。但し旧指針同様に一般建築物に相当するCクラスに対してのみである。これは、指針が一般建築物の震害経験に根ざした技術進歩を積極的に取り入れると共にそれにとらわれずに更に高い安全目標レベルを追求する姿勢を示したものである。震度法はエネルギーの

一方の指標である強度確保の合理的かつ実行可能な手段としてその必要性が再確認されることになった。震度法が適用され続けたことは日本の建物の耐震強度が統一されたことにより、耐震性の確保のみならず震害経験の一般化にも大きな役割を果たした。

一般建築物の耐震安全性のレベルと原子炉施設のそれとの比較の為に、原子炉施設の水平震度のレベルを明示することは有意義である。旧指針同様にSクラス施設に対する静的震度は0.6であり、建築物のその3倍が採られた（3Ciの規定）。この震度がSd地震動に対応するものとすれば、 $f = 0.5 \sim 1.0$ に対応するSs地震動がもたらす応答加速度レベルは0.6 g ~ 1.2 g 程度となる。これは全国一律の地震動のレベルを表し、静的震度法は震源を特定しない地震動が構造物にもたらす荷重のレベルを与えている。兵庫県南部地震の発生は改めて地震の脅威を知らしめたが、3Ci規定の威力をも認識することになった。

倒壊、崩壊を免れても損傷が大きければ建物は修復不能となり建替えを余儀なくされる。1980年代以降、損傷軽減に向けた耐震技術の追求も本格化した。結果として実現した耐震構造として免震構造と制震構造が挙げられる。免震構造は地震入力エネルギーを建物下部に設けられた免震層で全て吸収し、上部建物を地震入力エネルギーから解放するものである。制震構造は建物骨組を弾性範囲に留め、骨組全体に配置されたエネルギー吸収装置（ダンパー）により地震入力エネルギーを分散的に吸収する構造である。エネルギーを最大変形を抑えながら効率的に吸収させる為には骨組を弾性に留まる要素（柔要素）と弾塑性挙動する要素（剛要素）との混合構造（柔剛混合構造）とすることが最も効果的である。免震構造は損傷集中型の柔剛混合構造であり、制震構造は損傷分散型の柔剛混合構造と言える²⁾。兵庫県南部地震以降免震構造、制震構造の導入は本格化した。柔剛混合構造の本格的導入により長年に亘る柔剛論争は終に決着した。旧指針における「剛構造」の規定の撤廃はこうした背景に支えられている。

6. 残余のリスク

決定論的手法によって残余のリスクに対処することは、図1に示すように、Ss地震動下の構造物の状態から安全限界状態に到る迄の耐震裕度Rを確保することである。耐震設計におけるバラツキの要因は圧倒的に地震動評価側に多く存在し、耐震性能評価側には少ない。従って、Ss地震動の超過確率に見合ったSs地震動の割増率が推定できれば、余裕度は容易に確保できるものと考えられる。

決定論的手法は震害経験、力学的因果関係に基づき安全性阻害要因を具体的に排除することの実現(reality)を尊重する。一方、確率論的手法は安全性のレベルを確率を通して明確に掲げ、そのレベルの確保を論理的に証明することを重視する。こうすることにより、社会に存在する一般の事故事象との比較において原子力施設の安全性が客観的に保障されたものになると考えられる。しかし、確率評価を精度よく行なえるだけの十分な統計資料が未だ得られているとは云えない。確率論的論理展開そのものの直接的実証は不可能に近い。また、全ての手法は手法としての一貫性を要求する。現時点で確率論を導入することは決定論的手法の排除につながりかねない。確率論的手法を導入するにあたっては、先ず、決定論的手法と独立に完結した手法として導入し十分な試行期間を経て、両者融合の道を探るべきであろう。

7. 結び

新耐震設計審査指針におけるSd地震動の役割について述べ、これと深く関わり決定論的手法の中核的役割を担う静的震度法の意義についても再確認した。また、残余のリスクに対する決定論的手法の対処の仕方、これに関連した確率論的手法の導入への展望について言及した。

旧指針のS₁地震動は地震動評価の目的で導入されたと云うよりも施設の耐震安全性確保の為の耐震設計上の要請で設定された面が強い。改定指針では、このS₁地震動の役割をSd地震動として位置づけることにより地震動評価と安全性評価が明確に分離されたとと言える。

静的震度法は現在に至る迄、我が国における建築物・構築物の耐震設計の根幹をなしている。耐震設計は力の設計からエネルギーの設計に移行しつつあるが、静的震度法はこうした技術進歩に追随し得る手法であり、これとの脈絡を保つことは原子炉施設の耐震安全性評価においても欠かすことができない。

残余のリスクに対処することは決定論的手法においても可能である。Ss地震動の超過確率に見合ったSs地震動振幅の割増率が推定できれば、施設の耐震裕度は容易に確保できるものと考えられる。確率論的手法を導入するとすれば、先ず決定論的手法と競合しない形で独立に完結した手法として導入し、十分な試行期間を経て両者の融合の道を探るべきである。

参考文献

- 1) 大橋雄二：日本建築構造基準変遷史、日本建築センター、1993
- 2) 秋山 宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計、技報堂出版、1999

建屋耐震設計

土方勝一郎

●東京電力(株) 技術開発研究所

1. はじめに

本稿は発電用原子炉施設の内、建屋の耐震設計について解説するものである。

2006年9月19日、原子力安全委員会(内閣府)により「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」が改訂された(以後これを「新指針」と呼ぶ)。本稿ではこの改訂を踏まえた、発電用原子炉施設の建屋耐震設計について、特に原子炉建屋を中心に解説することとする。できるだけ平易な解説を心がけたため、記述が厳密さに欠ける部分や、他の原稿との重複がある点をご容赦いただきたい。また、必要に応じ改訂前の審査指針(以後これを「旧指針」と呼ぶ)との比較についても論じることとする。

2. 原子炉建屋の概要

図1にBWRプラントの例として、改良型BWRの原子炉建屋及びタービン建屋の断面図を示す。ここでBWRとはBoiling Water Reactor(沸騰水型原子力発電所)のことをいう。図1の①に示すのが原子炉建屋である。原子炉建屋の中心には、鉄筋コンクリート製原子炉格納容器に内蔵された原子炉圧力容器が位置している。②に示すのがタービン建屋であり、原子炉建屋で発生する高圧の蒸気によりタービンを回して発電を行うための建屋である。

原子炉建屋の主要な構造体は、鉄筋コンクリート造の壁と床スラブ及び基礎版から構成される。耐震壁の厚さは地下部で2m程度、基礎版の厚さは5～6m程度である。オペレーションフロアより上部は大きな空間となっており、天井走行クレーンが設置されている。この部分も基本的には鉄筋コンクリート造の壁式構造であるが、クレーンと屋根を支えるため、鉄骨鉄筋コンクリート造の柱がある。また、屋根はこの大空間を支えるために大きな鉄骨トラス構造となっている。

図1に示す例では、原子炉建屋は半分程度地盤に埋め込まれている。これは建屋を十分な支持性能を有する地盤で支持する必要があることによる。また、原子炉建屋とタービン建屋の間は構造的に縁が切られており、両者は独立している。

3. 耐震設計の基本方針

3.1 耐震重要度と耐震クラス

表1に示す「新指針」の耐震重要度分類では、発電用原子炉施設はその重要度に応じてSクラス、BクラスおよびCクラスに分類される。発電用原子炉施設において、主体は原子炉圧力容器をはじめとする機器であり、建物は機器を内蔵し、その機器が安全に運転するための支持機能、遮蔽機能等を有しなければならない。したがって、厳密には建屋の耐震重要度分類は、

建屋内の各部位ごとに機器との関係に応じて個別に定められることとなる。なお、一般的なプラクティスとしては、建屋単位に耐震重要度を付与し、建屋全体モデルに対して耐震安全性を一括して評価する方法を用いる場合が多い。

原子力発電所の各建屋の中で最も重要な建物は原子炉建屋であり、耐震クラスはSクラスである。また、BWRのタービン建屋はBクラスである。

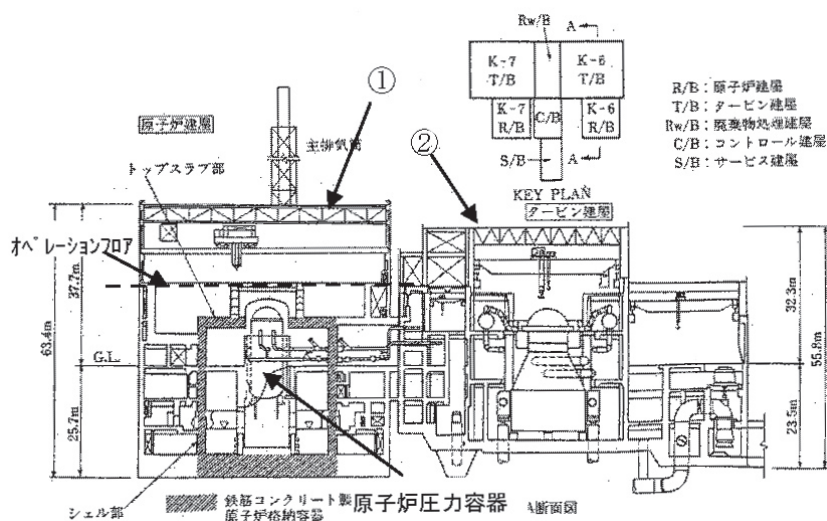


図1 建屋断面図(参考文献の図に加筆)

表1 耐震重要度分類

Sクラス	自ら放射性物質を内蔵しているか又は内蔵している施設に直接関係しており、その機能喪失により放射性物質を外部に放散する可能性のあるもの、及びこれらの事態を防止するために必要なもの、並びにこれらの事故発生の際に外部に放散される放射性物質による影響を低減させるために必要なものであって、その影響の大きいもの
Bクラス	上記において、影響が比較的小さいもの
Cクラス	Sクラス、Bクラス以外であって、一般産業施設と同等の安全性を保持すればよいもの

3.2 耐震設計に用いる地震力

表2には「新指針」における耐震クラスと設計用地震力を示す。ここに示すようにSクラスの原子炉建屋は動的地震力と静的地震力の両者で設計される。

「新指針」では原子炉建屋は基準地震動 S_s と弾性設計用地震動 S_d の両者に対し地震応答解析を実施することとなった。この際、 S_s に対しては弾塑性応答解析を実施し、安全機能の保持を確認する。また、 S_d に対しては建築基準法の短期許容応力度に収まることを確認する。なお、「旧指針」では、 S_2 と S_1 の二つの基準地震動が定められていた。今回地震学の最新の知見を反映するよう S_s の評価法が定められ、これに伴い S_s と関連付けて S_d が設定されることとなった。

また、「旧指針」では鉛直方向の地震力は基準地震動の最大振幅の1/2の値を鉛直震度とし、高さ方向に一定の値とし水平地震力と同時に不利な方向で組み合わせで評価していた。「新指針」では鉛直方向の地震動が与えられたことから、地震応答解析を行って鉛直方向の増幅特性を評価することになった。なお、地震応答解析では水平地震動と鉛直地震動を同時に入力することを基本とするが、両者の解析を別々に行って適宜応答を組み合わせる方法を用いることもできる。

以上の動的地震力に加え、原子炉建屋では建築基準法の定める地震力の3倍の静的地震力(3Ci)に対して短期許容応力度に収まることを確認することが求められている。したがって、動的解析の結果がどうであれ、わが国の原子炉建屋は全国一律に最低限3Ciの地震力に耐えるよう設計されていることになる。このような明快な下限値が定められていることは、原子力発電施設の耐震安全性を保証する上で非常に意義深いものと考ええる。なお、この規定に関しては「新指針」「旧指針」で変更はない。

表2 耐震クラスと設計用地震力(建屋関係)

耐震クラス	動的地震力		静的地震力	
	水平	鉛直	水平	鉛直
S	S_s -H	S_s -V	-	-
	S_d -H	S_d -V	3Ci	Cv
B	-	-	1.5Ci	-
C	-	-	Ci	-

(Ciは建築基準法による層せん断力係数、Cvは震度0.3を基準として算定する)

4. 地震応答解析

4.1 地震応答解析法の概要

図2には建屋の地震応答解析の概念を示す。基準地震動(または弾性設計用地震動)は解放基盤表面(原子力ではせん断波速度で700m/s以上を目安とする)で定義されている。この地震動に基づき解放基盤表面以浅の地盤増幅を計算し、建屋-地盤連成系モデルへの入力地震動を求める方法がとられている。

地震応答解析においては、建屋-地盤の動的相互作用を考慮すると共に、必要に応じて地盤の材料非線形性、建屋の材料非線形性(復元力特性)、および基礎浮き上がりに伴う幾何学的非線形性を考慮する。

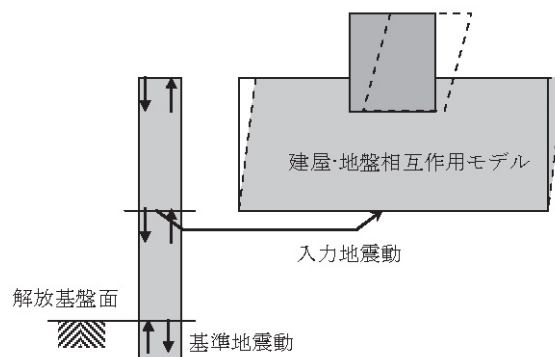


図2 地震応答解析の概要

4.2 地盤の地震応答解析

地盤の地震応答解析では、地盤を水平成層と仮定し、解放基盤表面で定義された基準地震動(または弾性設計用地震動)に基づき、1次元波動解析を用いて原子炉建屋の地震応答解析モデルへの入力地震動を評価することが一般的である。この時、水平方向の地震動に対してはS波の鉛直入射を仮定し、鉛直方向の地震動に対してはP波の鉛直入射を仮定して地盤の地震応答解析が行われる。

地盤の応答解析に用いる弾性定数は弾性波試験の平均値を用いて設定する。表層の比較的柔らかい地盤に

関しては、室内試験により ($G-\gamma$ 曲線、 $h-\gamma$ 曲線) を評価し、これに基づき等価線形解析を用いて地盤の非線形性を考慮する。

4.3 建屋-地盤動的相互作用の評価法

原子炉建屋は重量が大きく剛な構造のため、地盤との動的相互作用の影響が大きい構造物である。この影響をどのように評価するかが、長い間、建屋耐震設計の重要な課題となってきた。わが国における動的相互作用研究の進展は、原子力が推進役となってきたとも言える。

現在、原子炉建屋の地震応答解析には、「スウェイロッキング (SR) モデル」と「離散系モデル」が主に用いられている。SRモデルでは建屋の基礎底面位置で水平地盤ばねと回転地盤ばねが評価されるが、更に埋め込みのある場合には、側面地盤ばねを考慮した「埋め込みSRモデル」が用いられる (図3参照)。SRモデルの地盤ばねは、地盤を半無限の均質または成層地盤と仮定して弾性波動論に基づき誘導される。また、時刻歴応答解析を実施することを踏まえ、本来周波数依存性を有する地盤ばねを一定の剛性とダッシュポットで

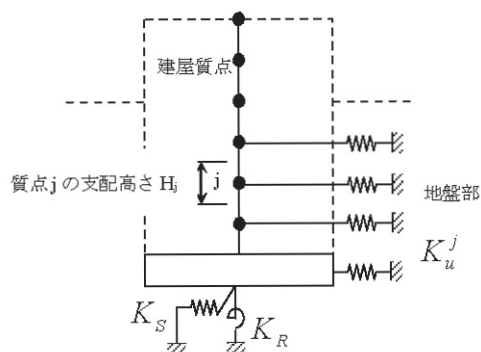


図3 埋め込みSRモデル

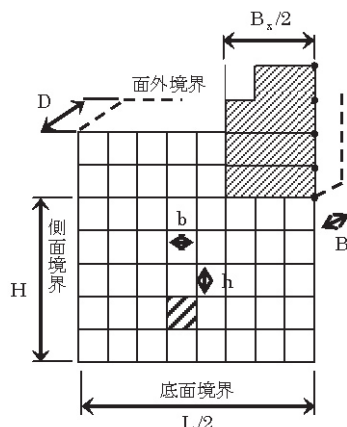


図4 離散系モデル (疑似3次元FEMモデル例)

モデル化することが一般的に用いられている。

離散系モデルでは、地盤は「ばね-マス系」や2次元FEMでモデル化される。図4にFEMモデルの例を示す。地盤モデルの端部には粘性境界や伝達境界等の波動の逸散を評価できる境界が設けられる。地盤モデルの面外方向に粘性境界を付与し擬似3次元とする場合もある。離散系モデルでは、地盤の不規則性や不整形性を直接考慮することが可能である。

4.4 基礎の浮き上がり評価法

入力が大きくなり建屋の基礎に大きな転倒モーメントが作用すると、解析上は基礎スラブの一部が地盤から離れる現象、いわゆる「基礎の浮き上がり」が生じる場合がある。SRモデルや埋め込みSRモデルを用いた地震応答解析では、地盤の回転ばねにこの浮き上がりによる幾何学的な非線形性を考慮する。離散系モデルを用いる場合には、基礎と地盤との剥離が評価できるJOINT要素を用いる。

原子炉建屋の場合、基礎が浮き上がっても水平方向の応答に関してはほとんどその影響は生じないが、基礎浮き上がりに伴い鉛直動 (誘発上下動と呼ばれている) が誘発される。接地率が65%を下回ると、この誘発上下動の影響が大きくなるといわれており、このような接地率では誘発上下動を考慮可能なより詳細な方法で評価する必要がある。

4.5 建屋のモデル化と復元力特性

図5には、水平地震応答解析モデルの例を示す。ここに示すように、建屋の剛性は曲げとせん断を考慮した梁要素を用いて評価される。建屋の非線形特性を表す復元力特性に関しては、曲げとせん断変形にトリリニア (3折れ点) のスケルトンカーブ (骨格曲線) が用いられ、履歴則はエネルギー吸収の少ない最大点指向型が用いられることが一般的である。図6にはその概要を示す。また、鉛直地震応答解析モデルでは建屋の

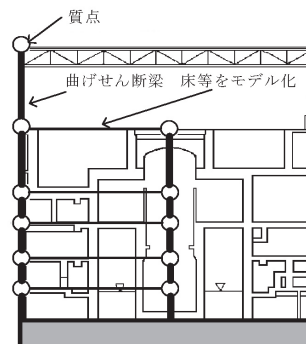
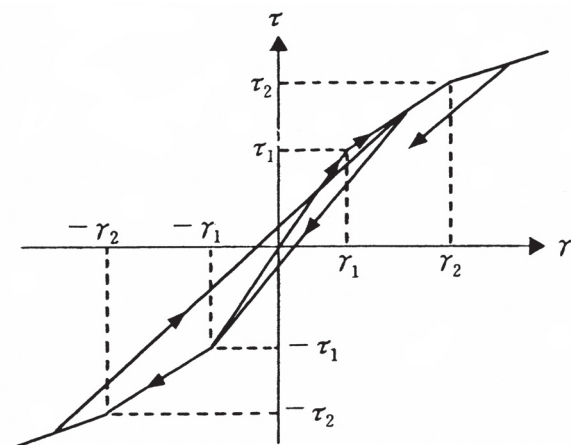


図5 水平地震応答解析モデルの例 (参考文献から引用)



τ : せん断力 γ : せん断ひずみ

図6 最大点指向型モデル(参考文献から引用)

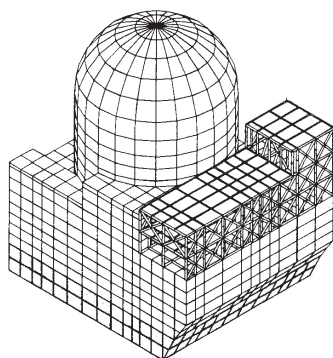


図7 3次元FEMモデルの例(建築学会 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説から引用)

壁を軸剛性で、屋根トラスを曲げせん断変形を考慮した梁要素でモデル化することが多い。

図7には、建屋形状を忠実にモデル化できる3次元FEMモデルの例を示す。実務設計への適用はこれからであるが、計算機の発達により本図に示すようなモデルによって非線形を考慮した詳細な解析も行えるようになってきている。

5. 耐震安全余裕の確認

「新指針」では、Sクラスの原子炉建屋に対し、基準地震動Ssの作用下で、「構造物全体として変形能力(終局耐力時の変形)について十分な余裕を有し、かつ終局耐力に対して妥当な安全余裕を有していること」を要求している。以下では、この耐震安全余裕の確認方法と機能維持、波及的影響の防止について述べる。

5.1 基準地震動Ssに対する評価

鉄筋コンクリート造耐震壁に関しては現在まで数多

くの実験が行われてきた。これらの実験結果を整理し各実験値のばらつき等を考慮し、耐震壁の終局せん断ひずみ γ_u は $4.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ に定められている。基準地震動Ssに対する耐震壁の許容限界ひずみ γ_a は、この終局せん断ひずみ γ_u に対して2倍の安全率を有するように設定されている。

$$\gamma_a = \gamma_u / 2$$

5.2 必要保有水平耐力に対する評価

一般建築では保有水平耐力が必要保有水平耐力($C_0=1.0$)を上回ることが求められる。原子炉建屋では必要保有水平耐力に対して保有水平耐力が1.5倍の余裕を確保することが求められる。

5.3 機能維持、波及的影響の防止に関する検討

建屋には負圧維持機能、漏えい防止機能、遮蔽機能および支持機能が要求されている部位がある。また建屋を構成する部位の破損により、上位の耐震クラスに分類される施設に対する波及的影響の防止が要求される部位がある。地震時においては、これらの各機能が維持されることを確認する必要がある。

6. まとめ

本稿では発電用原子炉施設の建屋耐震設計の概要について解説した。紙面の関係から充分には説明できなかったが、建屋耐震設計は長年にわたる膨大な調査研究や試行に基づき確立されてきた。発電用原子炉施設の重要性を鑑みると、今後とも常に最新の知見を取り入れ、また継続的に技術開発を推進し、安全性のより向上を目指した不斷の努力を継続する必要がある。

(参考文献)：原子力発電所耐震設計技術指針(案)第6章：(社)日本電気協会 耐震設計分科会 建物・構築物検討会、2006.12.15第20回耐震設計分科会資料

機器・配管系の耐震設計

遠藤 六郎

●日本原子力発電(株) 発電管理部

はじめに

ここでの機器・配管系の範囲は、容器・機械類、配管系に加えて電気計装設備を含んでいる。ちなみに、配管には弁などの機器類とサポートが設置されるので、これらを総称して配管系と呼んでいる。一方、電気計装設備は、原子炉の安全に関与する安全系に関連するものに限定しても、発電所によって多少異なるが電圧の尺度でみると、非常用ディーゼル発電機が発電する6.9 キロボルトから電子機器が作動する数ミリボルトと範囲が広い。したがって、扱う設備、機器類も多種多様である。更に、安全系だけでなく発電所全体で見ると送電端で数十万ボルト（ある例では50万ボルト）まで扱う設備まで含まれる。

本稿は、原子力安全委員会の耐震設計審査指針改訂内容のうち、機器・配管系の耐震設計に関連する事項を主に話を進める。また、紙面の制約もあり概要を述べることにするので、分かり易さを優先させた。正確な内容は専門的な資料などに譲ることとしたい。

1. 耐震重要度分類

耐震重要度分類において旧指針と新指針では表1に示すような変更があった。

表1 旧指針と新指針の耐震重要度分類の対比

旧指針		新指針
As クラス	→	S クラス (旧指針の As クラスに相当)
A クラス	→	
B クラス	→	B クラス
C クラス	→	C クラス

耐震重要度分類の数は旧指針では、原則的にA、B及びCクラスの3分類で、Aクラスのうち特に重要な施設をAsクラスとしており、地震時の安全性の観点から実質的には4分類としていた。新指針では、この旧指針のAsクラスを含むAクラス全体を新たにSクラ

スとし、Bクラス及びCクラスについては変更なく、S、B及びCクラスの3分類とした。このSクラスは旧指針のAsクラスに相当する耐震設計上の要求がなされているので、旧指針のAsクラス以外のAクラスは実質上Asクラスに格上げとなっている。

旧指針では、原子炉炉心の中に存在する大量の放射性物質を環境に放出するのを防止するため、原子炉を止める、冷やす、放射性物質を封じ込める機能をAクラスとした。このAクラスのうちからAsクラスの設備を設け、この3つの機能を地震に起因して喪失しないように、発電所が遭遇すると想定した限界的な基準地震動S2に対する設計を要求していた。したがって、この基準地震動S2によって炉心から大量の放射性物質を環境に放出する事故（以下限定して「事故」¹⁾）は起こらないことになる。一方、万が一、地震とは別の要因で「事故」が起こっている時に、極めて発生確率の低い基準地震動S2に遭遇することは考慮しなくてよいが、より発生確率が高い基準地震動S1に遭遇する可能性がある。その場合でも、止める、冷やす、封じ込める機能は当然要求される。「事故」時にこの3つの機能を要求されるものが、Asクラス以外のAクラスの設備となっていた。

したがって旧指針では、Asクラス以外のAクラス設備に対して基準地震動S2の設計要求はなく、「事故」と基準地震動S1の組合せに対し設計することを要求されていた。

このように、お互いに異なる要因に基づく事象による荷重を組合せるか否かは、確率的な考えを現在も導入している。この荷重の組合せの考え方は、3. 荷重の組合せと許容限界 (2) 荷重の組合せの項を参照のこと。

また、上位の分類に属するものは、下位の分類に属するものの破損によって波及的破損が生じないことの要求も新指針に引き継がれている。

2. 設計用地震力

(1) 動的地震力

基準地震動Ss及び弾性設計用地震動Sd各々の地震動の定義及び考え方は他の章に述べられているので、

ここでは、機器・配管系に関連する事柄を述べる。

旧指針の基準地震動S2及び基準地震動S1は、水平方向には、原則として、敷地地盤の応答スペクトル、またはこのスペクトルから算出される時刻歴波形で与えられおり、この与えられ方は新指針でも変更がない。ただし、新指針では基準地震動Ss及び弾性設計用地震動Sdによる鉛直動も水平動と同様に応答スペクトル、または時刻歴波形で与えられることになった。旧指針では、鉛直方向に関しては、水平方向の最大加速度振幅の $1/2$ の値を震度として与えていた。基本的には、設備の重量×震度＝施設に作用する力(地震力)となる。

このように新指針では、鉛直方向にも応答スペクトル及び時刻歴波形が与えられることになったので、機器・配管系に対しても、鉛直方向の地震動を入力とした応答解析を行うことになる。

新指針において、各耐震クラスの耐震設計に用いる地震動を表2に示す。

表2 耐震クラスと耐震設計に用いられる地震動

耐震クラス	耐震設計に用いる地震動
Sクラス	・基準地震動Ss ・弾性設計用地震動Sd
Bクラス	・共振のおそれのある場合は、 ($1/2$)×弾性設計用地震動Sdに対し 検討を行う。

(2) 静的地震力

静的地震力とは、機器・配管系が設置される建屋の位置の震度を基に計算されるもので、Sクラス、Bクラス及びSクラスに適用される震度は旧指針からの変更はない。

各耐震クラスに用いる静的震度を表3に示す。

表3 耐震クラスと耐震設計に用いる震度

耐震クラス	耐震設計に用いられる震度
Sクラス	3.6 Ch (水平方向) 1.2 Cv (鉛直方向)
Bクラス	1.8 Ch (水平方向)
Cクラス	1.2 Ch (水平方向)

Ch、Cv：建築基準法を基にして計算される水平震度及び鉛直震度

水平震度Chは建屋の水平方向の応答を反映して高さ方向に増加する。一方、鉛直震度Cvは、建屋の鉛

直方向における震動の増幅を無いものと考え、高さ方向に一定である。建屋の基礎部分の鉛直方向と水平方向の震度の比 $1.2Cv / 3.6Ch$ は0.5となる。

なお、地震力と震度の関係は前項(1) 動的地震力に述べた通りである。

3. 荷重の組合せと許容限界

(1) 耐震設計で考慮する地震以外の荷重

発電所の運転状態を、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時、事故時に分け、各々の状態において発生する荷重を考慮する。機器・配管系に作用する様々な荷重で、代表的な具体例を挙げると、自重、圧力、及び熱による荷重、及び弁が作動して流体が噴出するときの反力などの機械的荷重がある。

各々の運転状態とは概略以下の通りである。

- ・通常運転：起動、停止及び出力運転などの計画的な範囲での運転
- ・運転時の異常な過渡変化：発電所の寿命期間中に予想される機器の誤動作などによる状態及び同様な頻度で発生すると予想される状態
- ・事故：運転時の異常な過渡変化を超える異常な状態で予想される発生頻度は稀で安全設計の観点から想定されるもので、代表的なものには、炉心を冷却する冷却材を失う冷却材喪失事故がある。

(2) 荷重の組合せ

耐震設計における荷重の組合せの基本的な考え方は、地震によって引き起こされると想定される事象(従属事象)による荷重は、その地震荷重と組合せる。また、地震に起因しないと想定される事象(独立事象)による荷重とは、その事象の発生確率と発生した場合の継続時間と、地震の発生確率と継続時間を考慮して双方の荷重の同時性、非同時性から組合せるか否かを判断する。この考え方は、旧指針から一貫した考え方である。

(3) 荷重の組合せと許容限界

地震による荷重と各運転状態における地震以外の事象による荷重の組合せと許容限界を表4に示す。

地震動が変更になっているが、基本的な組合せの考え方に変更はない。

設計では通常、対象設備のモデルを作成し、応答解析、応力解析を行い、解析結果の算定応力と許容限界を比較評価し安全性を判定している。

表4 荷重の組合せと許容限界

耐震クラス	地震動等	地震動等と組合すべき状態
Sクラス	・基準地震動Ss	・通常運転 ・運転時の異常な過渡変化 ・事故（基準地震動Ssと組合せる事故）
		上記組合せに対する許容限界 ⇒ A
	・弾性設計用地震動Sd ・静的地震力	・通常運転 ・運転時の異常な過渡変化 ・事故（弾性設計用地震動Sdと組合せる事故）
		上記組合せに対する許容限界 ⇒ B
Bクラス	・静的地震力	・通常運転 ・運転時の異常な過渡変化
Cクラス		上記組合せに対する許容限界 ⇒ B

注：

- ①静的地震力は各々の耐震クラスに応じたもの。2. 設計用地震力（1）静的地震力の項参照のこと。
- ②A：構造物の相当部分が降伏し、塑性変形する場合でも、過大な変形、亀裂、破損等が生じその設備の機能に影響を及ぼさないこと。
- B：降伏応力又は同等な安全性を有する応力

（4）動的機器の地震時機能維持

動的機器とは、安全に関与する設備の機能を果たすために動作、運転などが必要な機器であり、代表例として、

- ・原子炉の反応度を制御・停止させるために制御棒を炉心に挿入する装置
- ・非常用の電源を供給するディーゼル機関及び発電機
- ・弁、ポンプ及びそれらを駆動するモータなどがある。

動的機器は、地震時にも動作又は運転継続し安全機能を保持させることが要求される。

JEAG²⁾では、12種類の動的機器に対し、振動台による動作等の確認試験の結果に基づく評価方法を示している。通常動的機器に対する機能維持の確認の指標としては、加速度が用いられ、所定の加速度を受けても作動又は運転継続されるか否かで判断される。

新指針では、この地震時の動的機能維持の確認を行うことが明記された。

この動的機器の地震時の機能維持に関しては、旧原子力発電技術機構の多度津工学試験センターの大型震動台を用いて制御棒の挿入性、ディーゼル機関と発電機、ポンプ等の実証試験が行われてきた。現在で

は、様々な動的機器に対し（独）原子力安全基盤機構が、原則として試験体が破損するか機能を失うまでの振動試験を行っている。

註

- 1) 原子力発電所の安全に係わり、様々な影響度のレベルの事故を想定するが、ここでは話を平易にするため、文章中にあるような大きな事故に限定した。
- 2) 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版 （社）日本電気協会

【参考文献】

発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針
（昭和56年7月20日原子力安全委員会決定）
及び（平成18年9月9日 原子力安全委員会決定）

確率論的耐震安全評価 (地震P S A)

平野 光将／蛭沢 勝三

●独立行政法人 原子力安全基盤機構

1. はじめに

新耐震設計審査指針(新指針)は、5年数ヶ月の検討・審議を経て平成18年9月19日に策定された¹⁾が、

- a)信頼性の高い地質・地盤調査を前提とした不確実さを適切に考慮した基準地震動Ssの策定方法の高度化
- b)Ssを超える地震動による「残余のリスク」の認識とそれを可能な限り小さくすることの明記が新指針の大きな特徴といえる²⁾。

原子力施設の安全性は一般的に深層防護の原則に基づく確定論的な対策・評価によって達成されているが、

- a)地震・地震動は自然現象で人間が制御できないこと
- b)兵庫県南部地震以降著しい進歩を遂げた最新技術でも地震・地震動の規模、頻度、特性を精度良く推定することは難しいこと
- c)大きな地震動に対しては、重要な系統・機器・構造物が同時多発的に損傷し、多重防護が有効に機能しない可能性があること

等が機器故障等に基づく内的事象と異なる特徴である。

新指針は、(i)適切なSsを想定し、Ssに対して重要な系統・機器・構造物が安全機能を維持するよう設計することにより「残余のリスク」を小さくすることを求めている。しかしながら「残余のリスク」が小さいことを確実なものとするために、(ii)「残余のリスク」を確率論的耐震安全評価(地震PSA: Probabilistic Safety Assessment)により把握することが推奨されている。そのために、(iii)様々な不確実さを考慮して策定するSsの策定方法と地震PSAとは整合することが求められる。実際、(iv)地震PSAを構成する要素技術は全て決定論的耐震設計法及び耐震安全評価法と同一である。

この基本的認識²⁾に基づき、本報ではまず、新指針中の確率論的方法の要点を論ずる。次いで、日本原子力学会にて策定中の地震PSA実施基準³⁾の策定方針及び概要を紹介し、これに基づき、確率論的取り扱いへの具体的な方法について述べる。

2. 新指針における確率論的方法の位置づけ

新指針中の確率論的方法の取り扱いの内容は、「残余のリスク」と基準地震動策定に係るものに大別される。

(1) 残余のリスクの取り扱い

新指針では、「基準地震動Ss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。Ssを上回る地震動によるリスクを「残余のリスク」とし、「残余のリスク」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」ことが記述されている。

一方、耐震指針検討分科会(耐震分科会)の見解¹⁾には、「客観性・信頼性を備えたリスクの定量的評価手法の確立、リスクに対する明確な定量的目標値(安全目標又は安全目標から導出される定量的性能目標等)の設定が不可欠であり、関連する技術開発、総合的な検討の促進、決定論的手法と確率論的手法の融合等について、一層の精力的な取組みが必要と考えられる。残余のリスクに対する定量的な評価の試行的実施を進め、設計段階以降における活用を図ることが有効である。今後共、評価手法の精度向上、リスク情報活用のための一層の取組みが積極的に実施されることを期待するものである」ことが明記されている。

(2) 基準地震動策定における確率論的取り扱い

基準地震動Ssは、震源を特定して策定する地震動と、震源を特定せず策定する地震動から構成され、共に水平及び鉛直地震動成分からなる。前者の評価では、対象とする検討用地震は地殻内地震、プレート境界地震、スラブ内地震に分けられる。特に、考慮すべき活断層は後期更新世の最終間氷期までとなった。審議の過程では凡そ8万年前以降から最長13万年前以降に活動した断層の調査が必要との議論がなされた。これらを対象とした地震動の評価手法としては、応答スペクトル距離減衰式を用いた手法と断層モデルを用いた手法が併記されている。

Ss策定での確率論的取り扱いについて、次の4つの事項が求められている。

2-1)震源を特定して策定する地震動の評価において、不確かさの要因及びその大きさの程度を十分踏まえること

2-2)震源を特定せず策定する地震動の評価において、決定論的方法とともに、確率論的手法も言及されていること

2-3)策定されたSsの応答スペクトルの超過確率を申

請書に明記し、安全審査時に参考情報として活用すべきこと

2.4)事故時荷重と地震荷重を組み合わせる場合、超過確率を用いてスクリーニングすること

これらの要求を整合的に満足するためには、地震PSA手法の活用が考えられ、耐震分科会においても、何度か地震PSA手法の紹介がなされると共に、原子力学会の地震PSA実施基準策定状況の報告が求められた。

3. 地震PSA実施基準の策定方針及び概要⁴⁾

3.1 実施基準の策定方針

主な策定方針は次の通りである。

- ①活用先として、原子力施設の耐震安全評価の観点から、安全目標/性能目標への適合性評価、地震時アクシデントマネジメント対策の選定と対策効果確認、耐震設計手法の高度化と効果確認等を念頭に、活用目的に見合った詳細度の評価手法を選択可能なように実績ある手法を広く検討する。
- ②具体的実施手順を明確にするために、仕様規定で策定するが、高位の要求項目の漏れがないか、我が国特有に規定すべき要求項目は何か等を確認する。
- ③対象範囲は、軽水炉運転時の炉心損傷頻度（格納容器先行破損を含む）と地震時格納容器機能喪失のシナリオの同定とする。このシナリオの同定により、以降は内的事象に対するレベル2及びレベル3PSA実施基準を用いて、地震起因の格納容器機能喪失頻度、ソースターム、個人リスク等が評価可能となる。
- ④地震動下での事故シナリオを可能な限り広範に挙げた上で実効的にスクリーニングし、定量評価するシナリオを選択する。

⑤審議の経緯から導入されそうな重要項目を判断し、先取りして実施基準へ導入する。主なものは鉛直地震動の策定、鉛直地震動に対する動的応答解析法、余震の考慮、周辺斜面の安定性評価、免震技術、断層モデルにおけるパラメータの詳細設定法、地震・地震動の不確かさの取り扱い等がある。

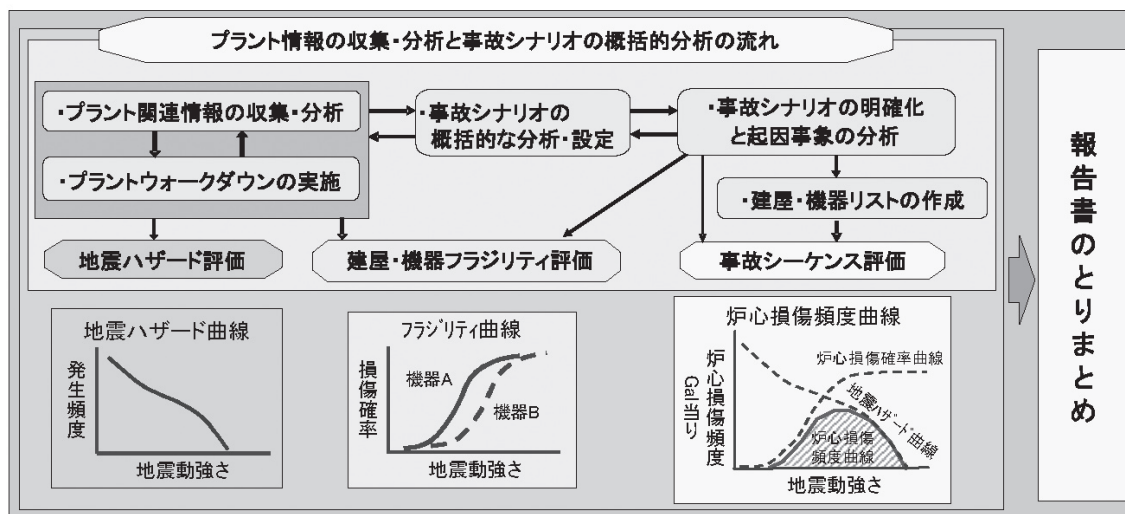
⑥新指針や日本電気協会の耐震設計技術指針（JEAG）⁵⁾等と関連情報やデータは共通との認識のもと、これらの専門用語と統一を図る。

3.2 実施基準の概要

実施基準は次の8章から構成される。1. 適用範囲 2. 専門用語の定義 3. 評価の流れ 4. プラント情報の収集・分析と事故シナリオの概括的分析の流れ 5. 地震ハザード評価 6. 建屋・機器フラジリティ評価 7. 事故シーケンス評価 8. 報告書のとりまとめ

実施基準の詳細は関連文献⁶⁾を参照されたい。ここでは4章以降の実施基準の概要について述べる。まず、第1図に示すように、地震PSAに必要な関連情報の収集・分析、プラントワークダウンを実施すると共に、原子力プラントで最も過酷な事故の炉心損傷（燃料被覆管最高温度が1200度に達する状態で定義）に関する定量的評価の準備として、地震時特有の広範な事故シナリオの設定、炉心損傷事故の引き金となる起因事象の分析、機器リストの作成を行う（4章プラント情報の収集・分析と事故シナリオの概括的分析）。

次いで、対象原子力サイトに将来襲来する可能性のある地震動の強さとその発生頻度の関係を示す地震ハザード曲線を求める（5章地震ハザード評価）。



第1図 地震PSA実施基準における評価手順

また、地震動によって、原子力プラント内の個々の建屋・機器がどのように揺れるか、この揺れとそれらの機能限界との関係で、どのように機能喪失するかを評価し、地震動の強さと機能喪失の確率の関係を示すフラジリティ曲線を求める（6章建屋・機器フラジリティ評価）。

そして、これらの機器から構成される事故進展緩和のための各種緩和系がどのように機能喪失するか、これらの機能喪失に伴い多重防護の観点で設置されている各種安全系の機能がどのように破られ、炉心損傷に至るかの可能性を分析し、地震動の強さと炉心損傷の確率の関係を炉心損傷確率曲線として求める。この曲線と上記地震ハザード曲線から求まる図中上に凸の炉心損傷頻度曲線内の面積、即ち、炉心損傷頻度を求める（7章事故シナシス評価）。

地震PSAも含めたPSAでは、ややもすると、最終評価結果の炉心損傷頻度に着目しがちである。しかしながら、PSAからの最も重要なメッセージは、評価の過程におけるモデルやデータをどのような根拠・判断で用いたか、その結果として、炉心損傷に大きく寄与する不確かさの要因、事故シナリオ、緩和系、機器等を同定し、明示することであり、説明性、透明性の確保の観点から、これらを報告書に取りまとめる（8章報告書の取りまとめ）。

3.3 地震ハザード評価

次章4.において基準地震動策定における確率論的取り扱いを論ずるので、ここで実施基準における地震ハザード評価の関連事項を述べる。

地震ハザード評価ではサイト周辺で将来発生する地震の位置・規模・発生頻度を活断層や歴史地震データを用いてモデル化し、これらの地震による地震動伝播を距離減衰式や断層モデルで評価し、地震動強さとその超過頻度/確率の関係を求める。モデル化の不確かさはロジックツリーを用いて取り扱う。主な特徴を示す。

- ①震源モデルを特定震源と領域震源モデルに分ける。
- ②地震動伝播モデルとして、距離減衰式又は断層モデルによる方法のいずれを用いてもよい。水平及び鉛直地震動の両方を設定する。
- ③地震動のばらつきを表す対数標準偏差と地震動の上限値を設定する。
- ④震源モデル、地震動伝播モデルに係る不確かさの要因を自然現象に係わる偶然的要因と知識・データ不足に係わる認識論的要因に大別し、後者の要因を対象としたロジックツリーを用いた不確かさ評価手法

を導入する。

- ⑤建屋・機器のフラジリティ評価における応答解析用地震動を地震ハザード一様スペクトルから評価する手法等を用いる。

4. 新指針における確率論的取り扱いへの活用

4.1 残余のリスクの取り扱い

(1) 残余のリスクの定義及び判断指標

新指針において残余のリスクは、基準地震動を上回る地震動の影響が施設に及ぼすことにより施設の重大損傷事象が発生すること、大量の放射性物質が放散する事象が発生すること、あるいはそれらの結果として周辺公衆に対して放射線被ばくによる災害を及ぼすことと定義されている。

残余のリスクの判断指標としては、原子力安全委員会が公開の安全目標（施設敷地境界付近の公衆の個人の平均急性死亡確率及びがん死亡確率が 10^{-6} /年・サイト以下）や性能目標（炉心損傷頻度が 10^{-4} /炉・年以下で、且つ格納容器機能喪失頻度が 10^{-5} /炉・年以下）が挙げられる^{7,8)}。

(2) 残余のリスクの評価手法

残余のリスクの定量的評価手法としては、PSA手法だけが公開文献として提案されており、最も現実的手法と考える。上記残余のリスクにおける施設の重大損傷事象、炉心損傷頻度はレベル1PSA手法で、格納容器機能喪失頻度、大量の放射性物質の放散事象はレベル2PSA手法で、周辺公衆の放射線被ばく及び死亡確率はレベル3PSA手法で評価される。

ここで論じている地震PSA手法はレベル1PSAを指し、その結果と内的事象PSAの手法を準用することで地震に対するレベル2,3PSAへと進むことができる。これらの実施基準のいずれも日本原子力学会において策定中で、現在公衆審査中であり、近々に策定予定である。

(3) 残余のリスクの低減策と低減効果の評価手法

新指針で求められている「残余のリスク」を合理的に実行可能な限り小さくする具体的方法として、残余のリスクの1つである炉心損傷頻度が上記性能目標に十分対応していない場合には、重要な事故シナシス、緩和系、機器に着目し、各種の改良・改善を行い、どの程度低減できたかの効果を、再度地震PSAによって確認する。具体例として、構造強化の観点では、安全上重要な機器がタンクや配管のような静的機器の場合、それらの支持構造物（基礎アンカーボルトや配管サポート等）の強化等が挙げられる。一方、ポンプや電気盤のような動的機器の場合免震構造化等が挙げら

れる。

4.2 基準地震動策定における確率論的取り扱い

(1) 震源を特定して策定する地震動評価における不確実さの考慮

不確実さの考慮に関しては、新指針に震源を特定して策定する地震動評価を、距離減衰式又は断層モデルによる手法を用いて、不確実さを考慮し決定論的に行うと記載されているものの、定量的評価手法が明示されていない。耐震分科会においても、不確実さを考慮すべき要因、因子の提案、議論はなされたが、それらの定量的取り扱いについては具体的な議論はなされていない。そこで、地震ハザード評価における特定震源を対象としたロジックツリー (LT: LogicTree) を用いた不確実さ評価手法の活用⁹⁾が挙げられる。

LTを用いた確率論的取扱いは、不確実さを考慮して決定論的に行うことと、一見相容れないもののように見えるが、基本的考え方は同一であり、より透明性、説明性を確保できると考える。決定論では、震源や地震動伝播モデルに係るパラメータを設定する場合、何度かの試行を行った上で、最終パラメータを決定していると想定されるので、全パラメータは一見確定値に見える。しかしながら、決定論的な何度かの試行のプロセスを、LTとして陽に明示することによって、認識論的不確実さと現象論的不確実さ¹⁰⁾を確率論の共通の土俵で扱うことができる。

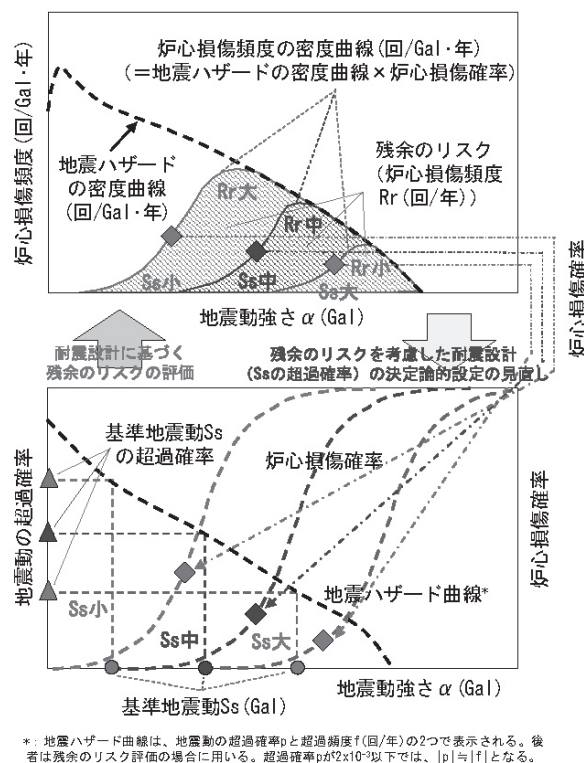
(2) 震源を特定せず策定する地震動の確率論的取り扱い

震源を特定せず策定する地震動の評価における不確実さの考慮について、確率論的手法の活用が言及されているものの、具体的評価手法が示されていない。そこで、地震ハザード評価における領域震源を対象としたLTを用いた不確実さ評価手法の活用が挙げられる。あるいは、この手法をより詳細化した(独)原子力安全基盤機構における断層モデルを用いた確率論的評価手法が分科会で審議され認知されると共に、論文が公開されているので^{11), 12)}、これの活用も挙げられる。

(3) 超過確率の参照

超過確率の明記に関しては、新指針に超過確率の評価手法やその大きさが示されていない。そこで、地震ハザード評価結果の超過確率の活用が挙げられる。

どの程度の値にするかについては、耐震指針分科会の審議において、前述の我が国の性能目標の検討状況、国際的にも認知度の高いIAEA/INSAG5の性能目標を念頭に、少なくとも超過確率 10^{-4} 以下とすることが例示されているので¹³⁾、参考値としての活用が挙げられる。



第2図 炉心損傷確率による残余のリスクと基準地震動の超過確率との関係

(4) 運転荷重と地震荷重の組み合わせ

事故時荷重と地震荷重の組み合わせに関しては、新指針に両荷重を組み合わせる場合に、超過確率の使用が明示されているものの、超過確率の評価手法や具体的値が示されていない。そこで、地震荷重の超過確率に地震ハザード評価結果を活用することが挙げられる。両荷重の組み合わせにおける超過確率の取扱いは、旧指針においても導入されており、旧指針に対応しているJAEGに 10^{-7} を参照することが明示されている¹⁴⁾ので、この値を参照できる。

4.3 残余のリスクと基準地震動の超過確率との関係

残余のリスクの内の炉心損傷頻度は、第2図に示すように地震ハザード曲線と炉心の損傷確率曲線とで囲まれた面積として求められる。そこで、基準地震動の超過確率が小さい程、それに対応した地震動 α が大きくなり、大きな地震動で設計された建屋・機器の耐力は大きくなるので、 α に対する炉心損傷確率が小さくなり、炉心損傷頻度も小さくなる。即ち、残余のリスクと地震動の超過確率とは、関数関係にあり、基準地震動の超過確率を低く設定する程、残余のリスクが小さくなる。

5. あとがき

耐震指針検討分科会の見解として、「残余のリスク」の評価手法の精度向上が挙げられている。一方、著者は我が国の地震PSA技術が実用段階にあると考えている。原子力学会では、地震PSAが有すべき要件とそれを満たす具体的方法を実施基準としてまとめており、公衆審査を終え今年度中にも発刊予定である。この状況を踏まえ、より一層の評価手法の高度化のために取り組むべき事項は以下の通りである。

- ・地震動のばらつきを表す対数標準偏差の低減と上限値の設定モデルの詳細化を図る。
- ・経年化を考慮したフラジリティ評価手法の詳細化やローカルな機器・配管耐力データの拡充を図る。
- ・複数の機器間での相関性評価モデル及び多数基立地地域における炉心損傷頻度の評価手法を高度化する。

地震PSAに関する国際的動向としては、平成18年11月に、国際経済協力開発機構原子力機関主催の地震PSAの専門家会議が韓国済州島で開催され、会議のまとめとして、地震PSA技術は成熟しており、一層規制へ活用されるべきとしてまとめられている¹⁵⁾。

評価手法を高度化するためには、決定論と確率論の融和が必須である。そのためには理学の知見を工学の観点で連携する立場が重要であり、また工学的意思検定の枠組の課題として取り組む必要がある。

参考文献

- 1)原子力安全委員会(原安委):発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針の改定,平成18年9月19日.
- 2)平野光将:新しい耐震指針の考え方、エネルギーレビュー、12月号、2006.
- 3)日本原子力学会:原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準(案)、2007年1月.
- 4)M.Hirano,et al: Outline of Seismic PSA Implementation standards on the AESJ, OECD/NEA, Specialist Meeting on Seismic PSA of Nuclear Facilities,2006.
- 5)日本電気協会:原子力発電所耐震設計技術指針,JEAG4601-1987.
- 6)蛭沢勝三:軽水炉確率論的安全評価(PSA)入門(6)地震PSA、日本原子力学会誌Vol.48、2006.
- 7)原安委:安全目標に関する調査審議状況の中間とりまとめ、平成15年12月.
- 8)原安委:発電用軽水型原子炉施設の性能目標について、平成18年3月28日.
- 9)H. Nanba, et al: A Probabilistic Seismic Hazard Assessment based on Logic Tree Utilizing Expert Judgment, the same as 4).
- 10)Ang, AHS・Tang WH(著)、伊藤・亀田・能島・阿部(訳):改訂確率・統計の基礎、丸善、平成19年1月.
- 11)原安委:震源を特定しにくい地震による地震動の確率論的評価、震分第17-5号、成17年4月22日.
- 12)S.Motohashi, et al.: Probabilistic evaluation of nearfield ground motion due to buried-rupture earthquakes caused by undefined faults, SMiRT18,KM01-3,2005.
- 13)原安委:地震動評価における不確定性要因の取り扱い、震分第21-6号、平成17年6月30日.
- 14)日本電気協会:原子力発電所耐震設計技術指針重要度分類・許容応力編、JEAG4601・補-1984.
- 15)R. Budnitz: Summary of what was learned during the meeting, the same as 4).

発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針

原子力安全委員会

平成18年9月19日

1. はしがき

本指針は、発電用軽水型原子炉の設置許可申請（変更許可申請を含む。以下同じ。）に係る安全審査のうち、耐震安全性の確保の観点から耐震設計方針の妥当性について判断する際の基礎を示すことを目的として定めたものである。

従前の「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（昭和56年7月20日原子力安全委員会決定、平成13年3月29日一部改訂。以下、「旧指針」という。）」は、昭和53年9月に当時の原子力委員会が定めたものに基づき、昭和56年7月に、原子力安全委員会が、当時の知見に基づいて静的地震力の算定法等について見直して改訂を行い、さらに平成13年3月に一部改訂したものであった。

このたびは、昭和56年の旧指針策定以降現在までにおける地震学及び地震工学に関する新たな知見の蓄積並びに発電用軽水型原子炉施設の耐震設計技術の著しい改良及び進歩を反映し、旧指針を全面的に見直したものである。

なお、本指針は、今後の新たな知見と経験の蓄積に応じて、それらを適切に反映するように見直される必要がある。

2. 適用範囲

本指針は、発電用軽水型原子炉施設（以下、「施設」という）に適用される。

しかし、これ以外の原子炉施設及びその他の原子力関係施設にも本指針の基本的な考え方は参考となるものである。

なお、許可申請の内容の一部が本指針に適合しない場合であっても、それが技術的な改良、進歩等を反映したものであって、本指針を満足した場合と同様又はそれを上回る耐震安全性が確保し得ると判断される場合は、これを排除するものではない。

3. 基本方針

耐震設計上重要な施設は、敷地周辺の地質・地質構造並びに地震活動性等の地震学及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による地震力に対して、その安全機能が損なわれないことがないように設計されなければならない。さらに、施設は、地震により発生する可能性のある環境への放射線による影響の観点からなされる耐震設計上の区分ごとに、適切と考えられる設計用地震力に十分耐えられるように設計されなければならない。

また、建物・構築物は、十分な支持性能をもつ地盤に設置されなければならない。

（解説）

I. 基本方針について

（1）耐震設計における地震動の策定について

耐震設計においては、「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」を適切に策定し、この地震動を前提とした耐震設計を行うことにより、地震に起因する外乱によって周辺の公衆に対し、著しい放射線被ばくのリスクを与えないようにすることを基本とすべきである。

これは、旧指針の「基本方針」における「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」との規定が耐震設計に求めていたものと同等の考え方である。

(2) 「残余のリスク」の存在について

地震学的見地からは、上記(1)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。このことは、耐震設計用の地震動の策定において、「残余のリスク」(策定された地震動を上回る地震動の影響が施設に及ぶことにより、施設に重大な損傷事象が発生すること、施設から大量の放射性物質が放散される事象が発生すること、あるいはそれらの結果として周辺公衆に対して放射線被ばくによる災害を及ぼすことのリスク)が存在することを意味する。したがって、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。

4. 耐震設計上の重要度分類

施設の耐震設計上の重要度を、地震により発生する可能性のある環境への放射線による影響の観点から、施設の種別に応じて次のように分類する。

(1) 機能上の分類

- Sクラス…自ら放射性物質を内蔵しているか又は内蔵している施設に直接関係しており、その機能喪失により放射性物質を外部に放散する可能性のあるもの、及びこれらの事態を防止するために必要なもの、並びにこれらの事故発生の際に外部に放散される放射性物質による影響を低減させるために必要なものであって、その影響の大きいもの
- Bクラス…上記において、影響が比較的小さいもの
- Cクラス…Sクラス、Bクラス以外であって、一般産業施設と同等の安全性を保持すればよいもの

(2) クラス別施設

上記耐震設計上の重要度分類によるクラス別施設を以下に示す。

① Sクラスの施設

- i) 「原子炉冷却材圧力バウンダリ」(軽水炉についての安全設計に関する審査指針において記載されている定義に同じ。)を構成する機器・配管系
- ii) 使用済燃料を貯蔵するための施設
- iii) 原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための施設、及び原子炉の停止状態を維持するための施設
- iv) 原子炉停止後、炉心から崩壊熱を除去するための施設
- v) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後、炉心から崩壊熱を除去するための施設
- vi) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に、圧力障壁となり放射性物質の放散を直接防ぐための施設
- vii) 放射性物質の放出を伴うような事故の際に、その外部放散を抑制するための施設で上記vi)以外の施設

② Bクラスの施設

- i) 原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていて、一次冷却材を内蔵しているか又は内蔵しうる施設
- ii) 放射性廃棄物を内蔵している施設。ただし、内蔵量が少ないか又は貯蔵方式により、その破損による公衆に与える放射線の影響が周辺監視区域外における年間の線量限度に比べ十分小さいものは除く。
- iii) 放射性廃棄物以外の放射性物質に関連した施設で、その破損により、公衆及び従事者に過大な放射線被ばくを与える可能性のある施設
- iv) 使用済燃料を冷却するための施設
- v) 放射性物質の放出を伴うような場合に、その外部放散を抑制するための施設で、Sクラスに属さない施設

③ Cクラスの施設

上記Sクラス、Bクラスに属さない施設

5. 基準地震動の策定

施設の耐震設計において基準とする地震動は、敷地周辺の地質・地質構造並びに地震活動性等の地震学及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ものとして策定しなければならない。(以下、この地震動を「基準地震動Ss」という) 基準地震動Ssは、以下の方針により策定することとする。

(1) 基準地震動Ssは、下記(2)の「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び(3)の「震源を特定せず策定する地震動」について、敷地における解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向の地震動としてそれぞれ策定することとする。

(2) 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」は、以下の方針により策定することとする。

①敷地周辺の活断層の性質、過去及び現在の地震発生状況等を考慮し、さらに地震発生様式等による地震の分類を行ったうえで、敷地に大きな影響を与えると予想される地震(以下、「検討用地震」という。)を、複数選定すること。

②上記①の「敷地周辺の活断層の性質」に関しては、次に示す事項を考慮すること。

i) 耐震設計上考慮する活断層としては、後期更新世以降の活動が否定できないものとする。なお、その認定に際しては最終間氷期の地層又は地形面に断層による変位・変形が認められるか否かによることができる。

ii) 活断層の位置・形状・活動性等を明らかにするため、敷地からの距離に応じて、地形学・地質学・地球物理学的手法等を総合した十分な活断層調査を行うこと。

③上記①で選定した検討用地震ごとに、次に示すi)の応答スペクトルに基づく地震動評価及びii)の断層モデルを用いた手法による地震動評価の双方を実施し、それぞれによる基準地震動Ssを策定する。なお、地震動評価に当たっては、地震発生様式、地震波伝播経路等に応じた諸特性(その地域における特性を含む。)を十分に考慮することとする。

i) 応答スペクトルに基づく地震動評価

検討用地震ごとに、適切な手法を用いて応答スペクトルを評価のうえ、それらを基に設計用応答スペクトルを設定し、これに地震動の継続時間、振幅包絡線の経時的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。

ii) 断層モデルを用いた手法による地震動評価

検討用地震ごとに、適切な手法を用いて震源特性パラメータを設定し、地震動評価を行うこと。

④上記③の基準地震動Ssの策定過程に伴う不確かさ(ばらつき)については、適切な手法を用いて考慮することとする。

(3) 「震源を特定せず策定する地震動」は、震源と活断層を関連付けることが困難な過去の内陸地殻内の地震について得られた震源近傍における観測記録を収集し、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、振幅包絡線の経時的変化等の地震動特性を適切に考慮して基準地震動Ssを策定することとする。

(解説)

Ⅱ. 基準地震動Ssの策定について

(1) 基準地震動Ssの性格について

旧指針においては、基準地震動に関して、地震動 S_1 及び地震動 S_2 の2種類を策定することとしていたが、今次改訂においてはこの双方の策定方針を統合し、基準地震動Ssとして、検討用地震の選定、地震動評価等について高度化を図ったものである。

この基準地震動Ssは、施設の耐震安全性を確保するための耐震設計の前提となる地震動であり、その策定に当たっては、個別の安全審査時における最新の知見に照らして、その妥当性が十分確認されなければならない。

(2) 基準地震動Ssの策定に関して使用する用語の意味解釈は次による。

- ①「解放基盤表面」とは、基準地震動を策定するために、基盤面上の表層や構造物が無いものとして仮想的に設定する自由表面であって、著しい高低差がなく、ほぼ水平で相当な広がりを持って想定される基盤の表面をいう。ここでいう「基盤」とは、概ねせん断波速度 $V_s=700\text{m/s}$ 以上の硬質地盤であって、著しい風化を受けていないものとする。
- ②「活断層」とは、最近の地質時代に繰り返し活動し、将来も活動する可能性のある断層をいう。

(3) 基準地震動Ssの策定方針について

- ①検討用地震の選定に当たっては、敷地周辺の活断層の性質や過去の地震の発生状況を精査し、さらに、敷地周辺の中・小・微小地震の分布、応力場、地震発生様式(プレートの形状・運動・相互作用を含む。)に関する既往の研究成果等を総合的に検討することとする。
- ②検討用地震は、次に示す地震発生様式等に着眼した分類により選定することとする。
 - i) 内陸地殻内地震
「内陸地殻内地震」とは、陸のプレートの上部地殻地震発生層に生じる地震をいい、海岸のやや沖合で起こるものを含む。
 - ii) プレート間地震
「プレート間地震」とは、相接する二つのプレートの境界面で発生する地震をいう。
 - iii) 海洋プレート内地震
「海洋プレート内地震」とは、沈み込む(沈み込んだ)海洋プレート内部で発生する地震をいい、海溝軸付近ないしそのやや沖合で発生する「沈み込む海洋プレート内の地震」と、海溝軸付近から陸側で発生する「沈み込んだ海洋プレート内の地震(スラブ内地震)」の2種類に分けられる。
- ③震源が敷地に近く、その破壊過程が地震動評価に大きな影響を与えると考えられる地震については、断層モデルを用いた手法を重視すべきである。
- ④「基準地震動Ssの策定過程に伴う不確かさ(ばらつき)」の考慮に当たっては、基準地震動Ssの策定に及ぼす影響が大きいと考えられる不確かさ(ばらつき)の要因及びその大きさの程度を十分踏まえつつ、適切な手法を用いることとする。
- ⑤「震源を特定せず策定する地震動」の策定方針については、敷地周辺の状況等を十分考慮した詳細な調査を実施しても、なお敷地近傍において発生する可能性のある内陸地殻内の地震の全てを事前に評価しうるとは言い切れないことから、敷地近傍における詳細な調査の結果にかかわらず、全ての申請において共通的に考慮すべき地震動であると意味付けたものである。

この考え方を具現化して策定された基準地震動Ss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べきである。なお、その際には、地表に明瞭な痕跡を示さない震源断層に起因する震源近傍の地震動について、確率論的な評価等を必要に応じて参考とすることが望ましい。
- ⑥「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」については、それぞれ策定された地震動の応答スペクトルがどの程度の超過確率に相当するかを把握しておくことが望ましいとの観点から、それぞれが対応する超過確率を安全審査において参照することとする。
- ⑦検討用地震の選定や基準地震動Ssの策定に当たって必要な調査や評価を行う際は、既往の資料等について、それらの精度に対する十分な考慮を行い、参照することとする。なお、既往の評価と異なる結果を得た場合には、その根拠を明示しなければならない。
- ⑧施設の構造又は施設を支持する地盤において、地震応答に特徴的な周波数特性が認められる場合は、必要に応じて基準地震動Ssの策定に反映させることとする。

(4) 震源として想定する断層の評価について

- ①活断層調査は、震源として想定する断層に関する評価を行うための基本となるものであるもので、敷地からの距離に応じ、既存文献の調査、変動地形学的調査、地表地質調査、地球物理学的調査等を適切に組み合わせて十分な調査を実施することとする。特に、敷地近傍においては、精度の高い詳細な調査を行

う必要がある。なお、敷地近傍の範囲は、「震源を特定せず策定する地震動」として策定される基準地震動 S_s との関係等を十分考慮して、適切に設定することとする。

- ②地震活動に関連した活褶曲、活撓曲等については、活断層と同様に上記①の調査の対象とし、その性状に応じて震源として想定する断層の評価に考慮する。
- ③断層の性状については、それぞれの地域に応じ、地下構造等を把握して適切に評価すべきである。なお、断層が不明瞭な地域において断層の性状から地震を想定する場合には、特段の留意が必要である。
- ④経験式を用いて断層の長さ等から地震規模を想定する際には、その経験式の特徴等を踏まえ、地震規模を適切に評価することとする。
- ⑤活断層調査によっても、震源として想定する断層の形状評価を含めた震源特性パラメータの設定に必要な情報が十分得られなかった場合には、その震源特性の設定に当たって不確かさの考慮を適切に行うこととする。

6. 耐震設計方針

(1) 基本的な方針

施設は、耐震設計上のクラス別に、次に示す耐震設計に関する基本的な方針を満足していなければならない。

- ①Sクラスの各施設は、基準地震動 S_s による地震力に対してその安全機能が保持できること。また、以下に示す弾性設計用地震動 S_d による地震力又は以下に示す静的地震力のいずれか大きい方の地震力に耐えること。
- ②Bクラスの各施設は、以下に示す静的地震力に耐えること。また、共振のおそれのある施設については、その影響についての検討を行うこと。
- ③Cクラスの各施設は、以下に示す静的地震力に耐えること。
- ④上記各号において、上位の分類に属するものは、下位の分類に属するものの破損によって波及的破損が生じないこと。

(2) 地震力の算定法

施設の耐震設計に用いる地震力の算定は以下に示す方法によらなければならない。

①基準地震動 S_s による地震力

基準地震動 S_s による地震力は、基準地震動 S_s を用いて、水平方向及び鉛直方向について適切に組み合わせたものとして算定されなければならない。

②弾性設計用地震動 S_d による地震力

弾性設計用地震動 S_d は、基準地震動 S_s に基づき、工学的判断により設定する。また、弾性設計用地震動 S_d による地震力は、水平方向及び鉛直方向について適切に組み合わせたものとして算定されなければならない。

③静的地震力

静的地震力の算定は以下に示す方法によらなければならない。

i) 建物・構築物

水平地震力は、地震層せん断力係数 C_i に、次に示す施設の重要度分類に応じた係数を乗じ、さらに当該層以上の重量を乗じて算定するものとする。

Sクラス	3.0
Bクラス	1.5
Cクラス	1.0

ここで、地震層せん断力係数 C_i は、標準せん断力係数 C_0 を0.2とし、建物・構築物の振動特性、地盤の種類等を考慮して求められる値とする。

Sクラスの施設については、水平地震力と鉛直地震力が同時に不利な方向の組合せで作用するものとする。鉛直地震力は、震度0.3を基準とし、建物・構築物の振動特性、地盤の種類等を考慮して求めた鉛直震度より算定するものとする。ただし、鉛直震度は高さ方向に一定とする。

ii) 機器・配管系

各耐震クラスの地震力は、上記i) に示す地震層せん断力係数 C_i に施設の重要度分類に応じた係数を乗じたものを水平震度とし、当該水平震度及び上記ii) の鉛直震度をそれぞれ20%増しとした震度より求めるものとする。

なお、水平地震力と鉛直地震力は同時に不利な方向の組合せで作用するものとする。ただし、鉛直震度は高さ方向に一定とする。

(解説)

Ⅲ. 耐震設計方針について

(1) 弾性設計用地震動 S_d の設定の必要性について

旧指針においては、基準地震動について、施設の建物・構築物及び機器・配管系の重要度に相応し、地震動 S_1 及び地震動 S_2 の2種類に区分して策定することとしていたが、今次改訂においては基準地震動 S_s のみを策定することとした。

施設の耐震安全性を確保するための耐震設計の考え方においては、この基準地震動 S_s による地震力に対して、耐震安全上重要な施設の安全機能が保持されることが基本である。さらに、この基準地震動 S_s に対する施設の安全機能の保持をより高い精度で確認するために、工学的な観点から基準地震動 S_s と密接に関連付けられる弾性設計用地震動 S_d の設定についても合わせて規定することとしたものである。

(2) 弾性設計用地震動 S_d の設定について

本指針の6. の耐震設計方針で規定した「地震力に対して耐える」ということは、ある地震力に対して施設全体として概ね弾性範囲の設計がなされるということを意味する。この場合、弾性範囲の設計とは、施設を弾性体とみなして応力解析を行い、施設各部の応力を許容限界以下に留めることをいう。なお、ここでいう許容限界とは、必ずしも厳密な弾性限界ではなく、局部的に弾性限界を超える場合を容認しつつも施設全体として概ね弾性範囲に留まり得ることで十分である。

Sクラスの各施設は弾性設計用地震動 S_d による「地震力に耐える」ことを求めているが、この弾性設計用地震動 S_d は工学的判断に基づいて設定するものである。弾性限界状態は、地震動が施設に及ぼす影響及び施設の状態を明確に評価することが可能な状態であり、施設が全体的に弾性設計用地震動 S_d による地震力に対して概ね弾性限界状態に留まることを把握することによって、基準地震動 S_s による地震力に対する施設の安全機能保持の把握を確実なものとする。すなわち、弾性設計用地震動 S_d は、旧指針における基準地震動 S_1 が耐震設計上果たしてきた役割の一部を担うことになる。

弾性設計用地震動 S_d は、施設、もしくはその構成単位ごとに安全機能限界と弾性限界に対する入力荷重の比率を考慮して、工学的判断から求められる係数を基準地震動 S_s に乗じて設定することとする。ここで、当該係数の設定に当たっては、基準地震動 S_s の策定の際に参照した超過確率を参考とすることができる。この弾性設計用地震動 S_d の具体的な設定値及び設定根拠について、個別申請ごとに、十分に明らかにすることが必要である。

なお、弾性弾性設計用地震動 S_d と基準地震動 S_s の応答スペクトルの比率(S_d / S_s)の値は、弾性設計用地震動 S_d に求められる性格上、ある程度以上の大きさであるべきであり、めやすとして、0.5を下回らないような値で求められることが望ましい。

また、弾性設計用地震動 S_d は、施設を構成する要素ごとに、それらの耐震設計上考慮すべき特性の差異を踏まえて個別に設定することができる。

なお、Bクラスの施設について、「共振のおそれのある施設については、その影響についての検討を行うこと」としたが、この検討に用いる地震動に関しては、弾性設計用地震動 S_d に2分の1を乗じたものとするができる。

(3) 基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d による地震力の算定について

基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d による地震力を地震応答解析に基づいて算定する場合には、応答解析法の適用範囲、適用制限等を考慮のうえ、適切な解析法を選定するとともに、十分な調査に基づく適切な解析

条件を設定することとする。

なお、解放基盤表面が施設を設置する地盤に比して相当に深い場合は、解放基盤表面より上部の地盤における地震動の増幅特性を十分に調査し、必要に応じて地震応答評価等に反映させることとする。

(4) 静的地震力について

建物・構築物についての静的地震力の算定は以下に示す①及び②による。

また、建物・構築物については、当該建物・構築物の保有水平耐力が必要保有水平耐力に対して、施設の重要度に応じた妥当な安全余裕を有していることを確認するものとし、必要保有水平耐力の算定は、以下に示す③による。

①水平地震力

i) 水平地震力を算定するうえでの基準面は原則として地表面とする。ただし、建物・構築物の構造や外周の地盤との関係等の特徴を考慮する必要がある場合は、適切に基準面を設定し、算定に反映させること。

ii) 基準面より上の部分の水平地震力については、建物・構築物の各部分の高さに応じ、当該部分に作用する全体の地震力とし、次の式による。

$$Q_i = n \cdot C_i \cdot W_i$$

この式において、

Q_i ：基準面より上の部分に作用する水平地震力

n ：施設の重要度分類に応じた係数（Sクラス 3.0、Bクラス 1.5、Cクラス 1.0）

C_i ：地震層せん断力係数であり、次の式による。

$$C_i = Z \cdot R_t \cdot A_i \cdot C_o$$

C_i の算出式において、

Z ：地震地域係数（地域による違いを考慮せず、1.0とする。）

R_t ：振動特性係数であり、安全上適切と認められる規格及び基準その他適切な方法により算出するものとする。ここでいう「安全上適切と認められる規格及び基準」とは、建築基準法等がこれに相当する。ただし、建物・構築物の構造上の特徴や地震時における応答特性、地盤の状況等を考慮して算定された振動特性を表す数値が、建築基準法等に掲げる方法で算出した数値を下回ることが確かめられた場合においては、当該算定による値（0.7を下限とする。）まで減じたものとしてとることができる。

A_i ：地震層せん断力係数の高さ方向の分布係数であり、 R_t と同様に安全上適切と認められる規格及び基準その他適切な方法により算出するものとする。

C_o ：標準せん断力係数で0.2とする。

W_i ：当該部分が支える固定荷重と積載荷重の和

iii) 建物・構築物の基準面より下の部分に作用する水平地震力は、次の式による。

$$P_k = n \cdot k \cdot W_k$$

この式において、

P_k ：当該部分に作用する水平地震力

n ：施設の重要度分類に応じた係数（Sクラス 3.0、Bクラス 1.5、Cクラス 1.0）

k ：水平震度で次の式による。

$$k \geq 0.1 \cdot \left(1 - \frac{H}{40} \right) \cdot Z$$

k の算出式において、

H ：基準面より下の各部分の基準面からの深さ（20を超えるときは20とする）（単位 メートル）

Z ：地震地域係数（地域による違いを考慮せず、1.0とする）

Wk：当該部分の固定荷重と積載荷重の和

なお、建物・構築物の構造上の特徴、地震時における応答特性、地盤の状況等を考慮して振動の性状を適切に評価して算出できる場合は、当該算出によることができる。

②鉛直地震力

Sクラスの静的地震力算定における鉛直地震力は、次式による鉛直震度から算定する。

$$C_v = R_v \cdot 0.3$$

この式において、

Cv：鉛直震度

Rv：鉛直方向振動特性係数で1.0とする。ただし、特別の調査又は研究に基づき、1.0を下回ることが確かめられた場合においては、当該調査又は研究の結果に基づく数値(0.7を下限とする)まで減じたものとするることができる。

③必要保有水平耐力

必要保有水平耐力は、安全上適切と認められる規格及び基準に基づく方法により算定するものとする。ここでいう「安全上適切と認められる規格及び基準」とは、建築基準法等がこれに相当する。

なお、必要保有水平耐力の算定においては、地震層せん断力係数に乗じる施設の重要度分類に応じた係数は、Sクラス、Bクラス、Cクラスともに1.0とし、その際に用いる標準せん断力係数Coは1.0とする。

7. 荷重の組合せと許容限界

耐震安全性に関する設計方針の妥当性の評価に当たって考慮すべき荷重の組合せと許容限界についての基本的考え方は、以下に示すとおりである。

(1) 建物・構築物

① Sクラスの建物・構築物

i) 基準地震動Ssとの組合せと許容限界

常時作用している荷重及び運転時に作用する荷重と基準地震動Ssによる地震力との組合せに対して、当該建物・構築物が構造物全体としての変形能力(終局耐力時の変形)について十分な余裕を有し、建物・構築物の終局耐力に対し妥当な安全余裕を有していること。

ii) 弾性設計用地震動Sd等との組合せと許容限界

常時作用している荷重及び運転時に作用する荷重と、弾性設計用地震動Sdによる地震力又は静的地震力とを組み合わせ、その結果発生する応力に対して、安全上適切と認められる規格及び基準による許容応力度を許容限界とする。

② Bクラス、Cクラスの建物・構築物

常時作用している荷重及び運転時に作用する荷重と静的地震力を組み合わせ、その結果発生する応力に対して、上記①ii)の許容応力度を許容限界とする。

(2) 機器・配管系

① Sクラスの機器・配管系

i) 基準地震動Ssとの組合せと許容限界

通常運転時、運転時の異常な過渡変化時、及び事故時に生じるそれぞれの荷重と基準地震動Ssによる地震力とを組み合わせ、その結果発生する応力に対して、構造物の相当部分が降伏し、塑性変形する場合でも、過大な変形、亀裂、破損等が生じ、その施設の機能に影響を及ぼすことがないこと。なお、動的機器等については、基準地震動Ssによる応答に対して、実証試験等により確認されている機能維持加速度等を許容限界とする。

ii) 弾性設計用地震動Sd等との組合せと許容限界

通常運転時、運転時の異常な過渡変化時、及び事故時に生じるそれぞれの荷重と、弾性設計用地震動Sdによる地震力又は静的地震力とを組み合わせ、その結果発生する応力に対して、降伏応力又はこれと同等

な安全性を有する応力を許容限界とする。

②Bクラス、Cクラスの機器・配管系

通常運転時、運転時の異常な過渡変化時の荷重と静的地震力とを組み合わせ、その結果発生する応力に対して、降伏応力又はこれと同等な安全性を有する応力を許容限界とする。

(解説)

Ⅳ. 荷重の組合せと許容限界について

荷重の組合せと許容限界についての解釈は以下による。

(1) 「運転時の異常な過渡変化時及び事故時に生じるそれぞれの荷重」については、地震によって引き起こされるおそれのある事象によって作用する荷重、及び地震によって引き起こされるおそれのない事象であっても、一たん事故が発生した場合は長時間継続する事象による荷重は、地震力と組み合わせて考慮しなければならない。

ただし、「事故時に生じる荷重」であっても、その事故事象の発生確率と継続時間及び地震動の超過確率の関係を踏まえ、両者が同時に発生する可能性が極めて小さい場合には、そのような事象によって発生する荷重を地震力と組み合わせて考慮する必要はない。

(2) 建物・構築物の弾性設計用地震動 S_d 等との組合せに対する許容限界については、「安全上適切と認められる規格及び基準による許容応力度」としたが、具体的には建築基準法等がこれに相当する。

(3) 建物・構築物の基準地震動 S_s との組合せに対する項目中の「終局耐力」とは、構造物に対する荷重を漸次増大した際、構造物の変形又は歪みが著しく増加する状態を構造物の終局状態と考え、この状態に至る限界の最大荷重負荷を意味する。

(4) 機器・配管系の許容限界については、「発生する応力に対して降伏応力又はこれと同等な安全性」を有することを基本的な考え方としたが、具体的には、電気事業法に定める「発電用原子力設備に関する技術基準」等がこれに相当する。

8. 地震随件事象に対する考慮

施設は、地震随件事象について、次に示す事項を十分考慮したうえで設計されなければならない。

- (1) 施設の周辺斜面で地震時に想定しうる崩壊等によっても、施設の安全機能が重大な影響を受けるおそれがないこと。
- (2) 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るとして想定することが適切な津波によっても、施設の安全機能が重大な影響を受けるおそれがないこと。

鉄筋コンクリート造実大3層建物の振動実験概要

「大都市大震災軽減化特別プロジェクト(大大特)Ⅱ. 震動台活用による構造物の耐震性向上研究」

壁谷澤寿海

●東京大学地震研究所

／松森 泰造

●防災科学技術研究所

／壁谷澤寿一、壁谷澤寿成

●東京大学大学院博士課程

／金 裕 錫

●東京大学地震研究所

1. はじめに

兵庫県三木市に建設された防災科学技術研究所の実大三次元震動破壊実験施設(E-Defense)が2005年度より本格稼動している。E-Defenseは最大搭載質量1,200tの世界最大の三次元振動台で、中層の鉄筋コンクリート(RC)建物の実大振動破壊実験が可能である。本誌前号¹⁾でも紹介されたように、2005年度には文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト(大大特)Ⅱ. 震動台活用による耐震性向上研究」²⁾の一環として、木造建物、RC建物、杭地盤構造の振動実験が予定通りに実施された。このほか、試験加震や民官の個別プロジェクトによる実験もいくつか行われて、2005年度、2006年度ともに、維持調整期間を含めて1年間の運用スケジュールはほぼ完全に埋まっている。プロジェクト間で施設を重複使用するなどさらに効率的な運用も可能かもしれないが、独立したプロジェクトによる可能な最短期間による連続使用が続いており、運用開始期間として十分な利用実績を挙げつつあると思われる。

RC建物に関する最初の実験としては、大大特2005年度の実験として実大6層耐震壁フレーム構造の加振実験が2006年1月に実施され、実験計画や結果の一部に関しても本誌前号他^{1) 4)}で報告されつつある。大大特2006年度鉄筋コンクリート建物の実験は2006年9月から11月にかけて加振が実施された。2006年度の実験では、学校建築を模擬した3階建RC建物2棟の動的崩壊過程を実験的に再現しているが、基礎の固定度が上部構造の応答に与える影響、外付け耐震補強の効果の検証を主要なテーマにしている。本稿では2006年度の振動実験について概要を報告する。

2. 実験計画の背景

1995年の兵庫県南部地震以降、地震動の観測記録の充実あるいは震源モデルによる地震動のシミュレーションなどにより、地表地震動のレベルと性質は一定の精度で再現されるようになってきている。しかし、推定または観測された地震動と鉄筋コンクリート建物等で観察された被害、特に全数の被害率が非線形地震応答解析などによる解析モデルと対応しているかどうかについては、多くの場合定量的な整合性は十分でない。

い。一般には、被害があった建物の挙動の説明は大略可能であっても、被害が小さい建物も含めた被害率は、地震動から推定されるよりもほとんどの場合明らかに小さい傾向にある。この理由としては、(1) 実際の建物の強度がモデルよりもかなり高い(一般に評価式は設計用で安全側)、(2) 実際の応答変形が被害よりも大きい(最大応答は観察された被害の残留状態から推定されるが、被害は過小評価されやすい)、(3) 建物に実際に入力する地震動は自由地盤の地震動と異なる(入力逸散効果)、などが考えられる。いずれも耐震設計にとっては安全側の要因であり、特に被害がない(小さい)建物の挙動については定量的には厳密に検討されない傾向にある。

入力逸散効果については、実際の構造物に入力する加速度は建物-地盤相互作用および支持条件(近傍地盤)の非線形効果によって自由地盤で観測された加速度よりも大幅に低減する可能性が指摘されており、近年建物の実効入力を評価する手法について多くの研究が行われてきた。しかし、ほとんどの場合、解析的な研究であり、また、実構造物の起振機実験などでは振動レベルが低い場合に限られており、非線形域での実験的な検証は極めて少ない。したがって、個別の実構造物の観測あるいは実験によって、近傍地盤の非線形性の効果を含めた形で入力逸散効果は実証されておらず、このような効果を疑問視する向きもある。

筆者らは、大大特とは別の研究課題で、2004年10月に発生した新潟県中越地震の本震後に近傍自由地盤および建物における余震観測を実施し、比較的大きな余震レベルで鉄筋コンクリート建物基礎部への実効入力を評価した^{5) 6)}。また、被害調査に基づいた建物の被災度が本震の自由地盤観測データ(防災科学技術研究所K-NET観測データ)から推定される最大応答と対応しているかどうかを解析的に吟味するとともに、実効入力に着目して検討した結果を示した。

新潟中越地震では、川口町で震度7、小千谷市で震度6強の強震動が観測された。図1に防災科研K-net小千谷(以下、K-net 小千谷)、小千谷消防本部敷地内の気象庁JMA小千谷(以下、JMA 小千谷)、JMA川口町役場(震度7)の本震観測記録の加速度応答スペクト

ル(減衰5%)を示す。本震観測記録(K-net)は加速度応答が最大4G以上、1秒付近において2G相当となっている。

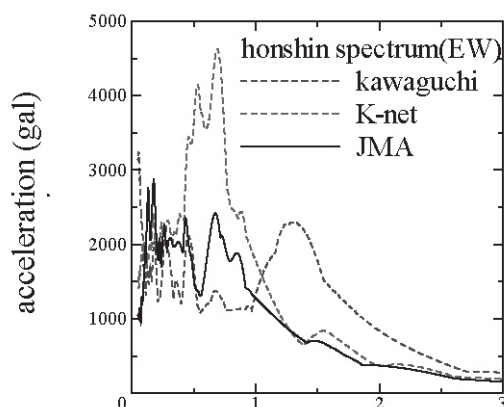


図1 本震の加速度応答スペクトル
(新潟中越2004/10/23、小千谷ー川口)

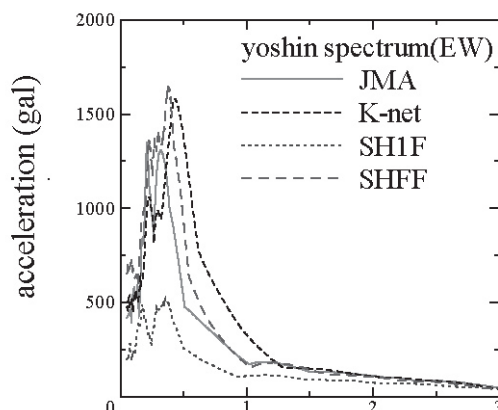


図2 余震の加速度応答スペクトル
(新潟中越2004/10/26、小千谷小)

K-net小千谷の観測データを兵庫県南部地震(神戸海洋気象台の記録)、特にEW方向に0.3~1秒の範囲で大幅に上回っており、これが建物に入力された地震動であるとする非常に大きな応答塑性変形が算定され、標準的な水平耐力を保有するRC構造物では概ね大破に近い甚大な被害が想定されうる。

検討結果の詳細は省略するが、以上の本震記録、余震観測記録、建物の推定耐力などにもとづいて、小千谷小学校および東小千谷中学校における地震応答解析を行い、被害調査と比較して、建物の実効入力およびK-net, JMA本震記録に関して以下の点を明らかにした。

- 1) 新潟県中越地震の余震観測を建物内外で行い、最大加速度および応答スペクトルが明らかに異なる観測データが得られた。すなわち、余震観測では自由地盤に比べて建物で明らかに入力が低減していた(図2)。

- 2) 本震の被害調査の結果、鉛直部材の損傷レベルから小千谷小学校では1/200、東小千谷中学校の本校舎では1/100、ピロティ校舎では1/40程度の最大応答変形があったと推定されたが、各校舎の推定された耐力および同定された固有周期、自由地盤の本震入力による非線形地震応答解析では、被害レベルと対応しない。K-net小千谷入力では5~7倍程度、JMA小千谷入力では3倍程度に応答変形を過大評価する。以上の解析結果は基礎レベルでの入力低減効果により、観測記録(K-net, JMA)より実際に建物に入力した加速度は小さかった可能性を指摘している。

以上の主要因が基礎近傍での入力逸散効果によるものかどうか、これらが一般性のある現象であるかどうか、などについては検討の余地はあるが、基礎近傍の挙動が上部構造の応答に大きな影響を及ぼす可能性を示唆している。また、以上とは別の建物であるが、実建物の基礎の非線形スウェイ抵抗に関しても、現地で水平載荷試験⁷⁾を行って、この場合は杭の水平抵抗と底面摩擦および側面土圧の抵抗の累加によって非線形性状が説明しうることを示した。

一方、1995年の兵庫県南部地震、1997年の耐震改修促進法以降、学校建物や公共建築を中心に既存建物の耐震診断と耐震補強は徐々に行われるようになってきたが、耐震補強の進み具合は必ずしも十分ではない。これにはいくつかの理由があるが、工事期間に建物の継続使用ができない補強工法による場合は、代替建物や引越しの費用のほか建物使用上の制限によって補強実施が見送られる理由になることも多い。そこで、技術的には建物の継続使用が可能な補強工法(居ながら補強)のひとつとして外付け補強工法が開発されつつあり、実用化もされつつある。一般化が可能な工法については設計マニュアル⁸⁾も出版されているが、設計用応力や接合部耐力の算定法に関する検証は必ずしも十分ではない。当然ながら、実大構造物での振動実験、大きな地震の被害経験による補強効果が検証された例などは皆無であり、構造物としての挙動や施工も含めた補強効果の信頼性についてはこれまた疑問視する向きも多い。

3. 2006年度実験の概要

3.1 実験計画と目的

2006年度の実験計画は、2005年度実験の計画実施に併行して、前提条件に応じて選択しうるようにいくつかの計画を検討していた。それらは、例えば、①2005年度6層建物とほぼ同様に十分なせん断設計をした場

合、②6層建物をあと施工耐震補強した試験体、③低層で既存／補強試験体2体の同時加振、④低層で既存／補強試験体2体の連続加振（③、④は基礎の固定度も考慮）、などである。このほかにも可能なテーマは無限にあったが、最終的には2006年1月以降に、2005年度の実験結果、予算、可能な実験期間を勘案して、最も実験条件は厳しいが、広範囲の成果が期待しうる④を選択した。

試験体はほぼ実大の3階建鉄筋コンクリート学校校舎2体である（写真1、2）。いずれも1970年代のやや古い設計規準⁹⁾による。平面計画はB型片廊下形式で校舎端に計画されることが多い特別教室部分2×3スパンを模擬している。この部分では平面的に柱が不規則に抜けることが多く、地震被害もよくみられる。この試験体でも一部で柱が抜けて大スパンになっている梁がある（図3）。



写真1 既存RC試験体



写真2 外付け補強試験体

2体の試験体は同一の設計であるが、1体目は既存の古い設計のままであり、もう1体目はまったく同様に設計施工した後に、あと施工により耐震補強を施した。いずれの試験体も基礎をボルト等で振動台に直接固定することはせず、直接基礎の底面摩擦および近傍側面土圧を模擬しうる容器のなかでスウェイ・ロック

ング現象を実現しようとしており（写真3）、実大規模の実験でこそ可能な試みとなっている。以上により、①既存RCの脆性的な崩壊過程、②外付けブレースの補強効果、③基礎レベルで入力逸散現象、を明らかにすることを主な目的としている。

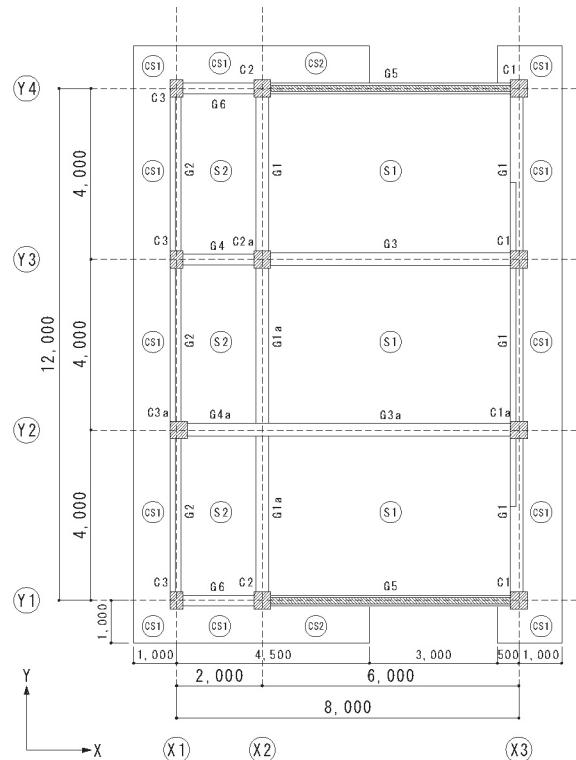


図3 基準階平面図

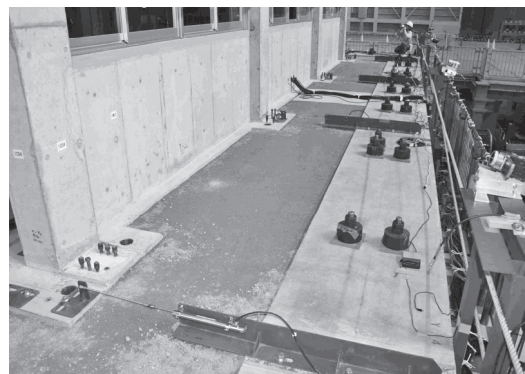


写真3 基礎まわりの埋め戻し土

既存RC試験体の桁行き方向の耐震指標は、基準をやや下回るIS=0.51（F=0.8, CTSD=0.63）であり、大地震では極短柱が曲げ降伏後のせん断破壊による進行性軸崩壊に至る過程を想定した。実験では、基礎を固定しない場合は、基礎の底面摩擦と短柱のせん断破壊が計算上同程度のレベルになるように設計した。すべりが先行しても大きな入力では側面土圧反力により短柱のせん断破壊が生じると予想したが、破壊しない場合

も想定して基礎固定の実験も可能なように計画した。

2体目は外付け鉄骨ブレースにより耐震補強を施した試験体であり、補強効果を確認するとともに、いずれでも基礎のスウェイ・ロッキングによる機構を模擬する。2体の比較により耐震補強の効果が確認されるが、補強試験体に特有の現象を把握する目的で、基礎固定方法は必ずしも対応させていない。接合部補強詳細が異なる外付け鉄骨ブレースを用いて、補強の有効性、接合部補強詳細の安定性も検証する。

3.2 試験体の製作と運搬

試験体は6月から8月中旬までに屋外ヤードで通常の現場打ち施工により、2体を交互に打設した。コンクリートの設計基準強度18MPaとしたが、実強度は31MPa（既存RC試験体）－28MPa（補強試験体）程度になった。基礎まわりの箱型（プール型）容器には高強度コンクリート、PS梁などが用いられている。箱型容器の底版は直接基礎捨てコンクリートを模擬しており、通常の均し施工の上で基礎コンクリートを続けて打継ぎ施工している。この不連続界面でのせん断伝達は摩擦および粘着のみとなる。側面土圧および底面摩擦の抵抗性状を明らかにする静的試験も実施する。

今回の実験実施上のポイントは、箱型容器による近傍地盤の模擬とともに2体連続の試験を短期間で実施しうるような移動および設置の方法であり、入念な計画と設計が必要とされた。上部建物に仮設の補強をするとともに、容器にはジャッキアップおよび揚重に耐える強度と剛性を確保した（写真4、5、6）。ジャッキアップ後トレーラーにより震動台ヤードに移動し、容器四隅を400tクレーン2台で吊り上げて震動台に設置しうるように設計した。試験体重量は、埋戻し土（まさ土）を含めてクレーン容量800t以下としたが、クレーンの稼働時荷重の安全をみて、埋戻しは振動台上で散水締め固めに変更した。また、振動台設置後に屋上に鋼製錘（40ton）を取付けてスケール則を若干補っている。



写真4 試験体のジャッキアップ



写真5 試験体の移動

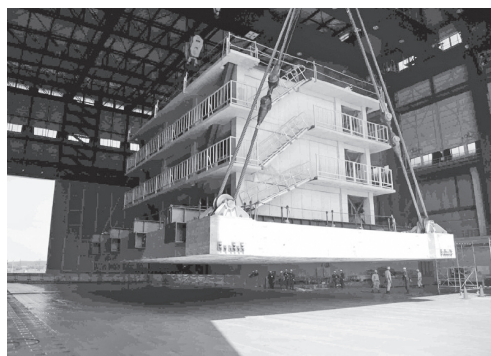


写真6 試験体の吊り上げ

3.3 あと施工耐震補強

耐震補強試験体では仕上げ工事後に、桁行方向の中央スパンに外付け鉄骨ブレースをあと施工で設置した。廊下側はあと施工アンカー主体の旧来型接合部（写真7）として、外付けマニュアル⁸⁾に基づいて設計した。教室側では柱内フレーム、梁面通しボルトによる新しい接合部詳細（写真8）を試みた。試験体では観察用にバルコニーを設けているが、補強用にはこれらのスラブはない場合を想定して、いずれの接合部もあえてスラブ面から切り離している。また、梁降伏型とするため腰壁には一面せん断型スリットを設けた。ブレース座屈耐力による1階層せん断力係数の増分は0.8相当であったが、スリットによる柱耐力の低減、梁降伏型の浮上りモードを考慮すると、計算上はこれほどの耐力増分は期待できず、予備解析では浮上り開始の合計のせん断力係数は0.9程度（せん断破壊を考慮しない漸増解析ではその後1.4程度に上昇）と計算された。

3.4 計測および室内什器

加速度は各節点および容器外周で、層間相対変形を各層ごとに4箇所（3方向）で、部材変形は柱の鉛直・水平変形、梁・腰壁開き変形、基礎フーチングの鉛直・水平変形などを計測した。

仕上げは、桁行きのみでサッシと窓ガラスを設置したほかは打ち放しコンクリートである。什器類は、1階は職員室、2階は教室、3階は音楽室を模擬して、内部には事務机、PC機器、生徒用机、椅子、吊天井型テレビ、ピアノ(2台)、ロッカー、本棚、時計などを配置して、移動、転倒、落下を観察、計測した(写真9、14、15)。



写真7 外付けブレース (既往詳細)



写真8 ソトルケブレース (新詳細)



写真9 3階室内 (加振前)

3.5 既存RC試験体の加震および破壊の経過

1体目の既存RC試験体の桁行き方向の耐震指標は、 $IS=0.51$ ($F=0.8$, $CTSD=0.63$) 程度であり、(極大の)地震動を受けて、(極)短柱が曲げ降伏後のせん断破壊を起こして、軸力の再配分を経て構造物が進行性軸崩壊に至る過程を模擬した。平成18年9月25日～10月2日に加振した。地震動はいずれもJMA-Kobe (1995年兵庫県南部地震) として、入力レベルを段階的に大きくした (Run1～6)。入力方向は6層の場合と同様にNS方向から45度回転させて、最大応答がY方向で生じる方向 (N45W) としている。なお、50%入力 は 現行基準法レベル2 (極稀地震動、最大50kine) に相当する。以下、下記の略記により入力および基礎の条件、損傷度を各加振について破壊経過を記した。

加振Run番号 (実施月日) : 地震動入力レベル (原波形に対する倍率)、基礎条件、被災度¹⁰⁾、Y方向1階の最大応答層間変形角 (以下同様)

Run1 (9/25) : 10%、基礎非固定、無被害、1/5000

Run2 (9/25) : 25%、基礎非固定、軽微、1/2000

Run3 (9/27) : 50%、基礎非固定、小破、1/700

以上の入力では、基礎のすべりは生じず、振動台 (容器) と建物基礎 (1階) ではほぼ同様の入力地震動であったが、応答変形角も最大1/700程度であり、被災度は小破にとどまった。

Run4 (9/29) : 100%、基礎非固定、小破、1/250

基礎底面ですべり (sway) 変形 (最大8cm) が生じて建物への入力が低減し、最大変形角1/250、被災度は小破にとどまった。

静的試験 (9/30～10/1) : 油圧ジャッキにより基礎レベルでの静的加力試験を行い、側面土圧を含む基礎レベルでの静的摩擦係数がほぼ想定通りであること (0.65～0.9) を確認した。基礎を定位置に戻して、高力ボルトで固定した。

Run5 (10/2) : 75%、基礎ボルト固定、中破、1/180

入力の目標は100%だったが、制御トラブルにより振動台で75%相当程度の入力になった。基礎は通しボルトにより容器底面のインサートに固定したが、若干のすべり変形が生じて1階での入力はやや低減した。上部構造の変形は1/180で、短柱でせん断ひびわれが確認されたが、被災度レベルは中破にとどまった。

Run6 (10/2) : 100%、基礎完全固定、倒壊、1/20

入力目標130%だったが、同様に100%相当程度の入力になった。基礎はボルトに加えて周辺容器梁に圧縮切梁で固定したためすべり変形も生じず、完全固定と

なって、台と1階はほぼ同じ入力となった。建物は廊下側短柱のせん断破壊、教室側柱の付着破壊、中央独立柱の曲げ圧縮破壊の順に、柱の脆性的な破壊が連続的に生じて、両側耐震壁と残存軸耐力で鉛直軸力を支持しうる状態に達して、構造物としてはほぼ崩壊状態に至った(写真10、11、12)。上部構造の最大層せん断力(ベースシア)係数は耐震診断による計算値を大きく上回り、変形角1/100付近で1.3に達した。



写真10 既存RC試験体の破壊状況(教室側)



写真11 既存RC試験体の破壊状況(廊下側)

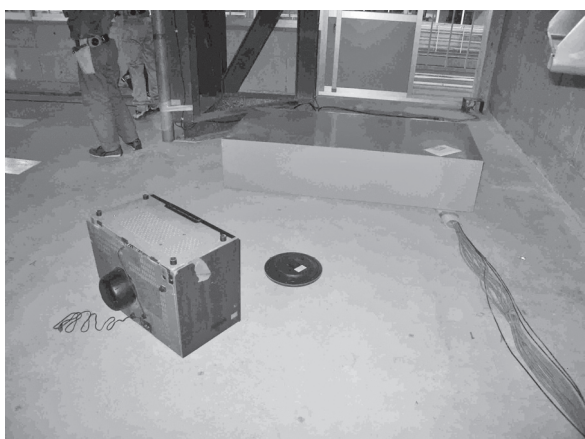


写真12 テレビの落下(既存RC 3F)

3.6 耐震補強試験体の加震および破壊の経過

2体目は1体目のRC試験体と同じ設計の試験体に仕上げ工事後に桁行方向の中央スパンに外付け鉄骨ブレースをあと施工で設置した耐震補強試験体である。廊下側はあと施工アンカー主体の旧来型接合部としたが、教室側は柱内フレームに鉄骨を設置して、梁面通しボルトを用いた新しい接合部詳細である。平成18年10月25日～11月6日に以下の入力および基礎の条件で加振した。地震動はJMA-Kobe (Run1～6)、JR-Takatori (1995年兵庫県南部地震)、BCJ-L2、さらに崩壊モード確認のため共振Sine波 (Run7～15)を入力した。
Run1 (10/23) : 10%、基礎非固定、無被害, 1/10000
Run2 (10/23) : 25%、基礎非固定、軽微, 1/5000
Run3 (10/23) : 50%、基礎非固定、軽微, 1/2000

以上では台と基礎の入力はほぼ同じであり、補強の効果により、応答変形も小さく(1/2000)、被災度も軽微にとどまった。

Run4 (10/27) : 100%、基礎非固定、小破, 1/666

RC試験体と同様に基礎すべりが生じて、入力低減効果があり、応答変形も小さく(1/666)、被災度は軽微に近い小破であった。

静的試験 (10/28-29) : 同様に基礎レベルでの静的試験を行い、同様の摩擦係数を確認した。

Run5 (10/30) : 100%、基礎部分固定、小破, 1/588

基礎は外スパン (Y1,Y4) はボルトおよび鉄骨梁でSWAYとRockingを固定し、中央スパンは固定せず、浮上り変形を許容した。補強の効果によりほぼ弾性的な挙動を示しつつ、コンクリート部材による減衰効果もあり、応答変形は十分小さく1/588程度に留まった。以下最終加振まで基礎はこの状態としたが、浮上り変形は極めて小さい瞬間的な変形(最大でも10mm程度以下)に留まり、明らかな浮上り崩壊形は形成されなかった。

Run6 (11/1) : 130%、基礎部分固定、小破, 1/344

以上では入力はJMA-Kobeであるが、補強の効果によりほぼ弾性的な挙動を示しつつ、コンクリートによる減衰効果もあり、応答変形は1/344程度に留まった。
Run8 (11/1) : JR-Takatori 120%相当 (Y方向NS)、基礎部分固定、中破, 1/250

Run13 (11/6) : BCJ-L2 210%相当 (目標210kine、Y方向のみの1方向入力)、基礎部分固定、中破, 1/125

JR-Takatori, BCJ-L2を振動台で可能な最大レベルまで入力したが、若干剛性低下して最大変形は漸増するもののほぼ弾性的な挙動に留まり、崩壊には至らなかった。最大層せん断力レベルは1.7に達した。

Run15 (11/6) : Sine波 (5Hz-1.0Hzのsweep、平面楕円入力)、基礎部分固定、倒壊, 1/30

振動数を共振振動数5.0Hz付近から徐々に低下させて1.0Hzまでに低下させるsine波により塑性応答変形が漸増するような入力を計算により作成し、最大耐力、変形能力を確認した。変形角1/50付近で最大応答せん断力係数は2.0に達して、ブレースの座屈が生じ、耐力低下した。既往の詳細の補強ブレースは座屈後に面外変形が生じて、基礎梁の接合部、1階柱の接合部が破壊したが、2階床以上では接合部は安定していた。一方、新詳細による接合部はブレースの座屈破壊以降もずれ変形や破壊は生じず、安定した挙動を示し、明らかに良好な挙動が確認された(写真13、14、15)。



写真13 補強試験体の破壊状況(新詳細)



写真14 補強試験体の破壊状況(既往詳細)



写真15 ピアノの移動

3.7 実大3層実験のまとめ

2006年度3層の振動実験により直接明らかになった点を以下にまとめるが、とくに基礎における入力逸散現象を中心に解析も含めて詳細な検討を行っている。

- (1) 既存RC試験体では、耐震診断の計算よりかなり高い強度と靱性が確認された。これらは、診断の計算の仮定がかなり安全側に設定されていることのほか、歪み硬化や歪み速度の影響があったと考えられる。
- (2) 基礎支持条件による上部構造の応答および損傷低減の効果は非常に大きく、非線形効果を含むスウェイの影響は従来考えられているよりもかなり大きい可能性がある。
- (3) 外付け耐震補強の有効性を検証した。新旧詳細とも有効であったが、新詳細は、より安定した挙動を示した。浮き上がりのモードはいくつかの理由で静的な計算で予測されるよりはかなり生じにくいものであることが確認された。

4. 実大振動実験のまとめと今後の課題

2005年度、2006年度のRC建物の実大震動実験により、三次元極大地震動による構造物の崩壊に至るまでの挙動、非構造材の損傷、什器の応答などが再現可能であることを示し、入力や計測など今後の実大実験手法の基礎技術を確立した。実大6層RC建物実験では、動的な効果による層崩壊現象を実現するとともに、高次モード、鉛直地震動、材料のひずみ速度・歪み硬化の影響などにより、終局時の層せん断力が計算値を大きく上回ることを示した。実大3層RC建物実験では、同様に計算値を大きく上回る強度を観測し、基礎の条件による応答低減効果、外付け鉄骨フレーム耐震補強の有効性を実証した。また、曲げ降伏後のせん断破壊などポストピーク耐力劣化挙動に関する動的解析手法を開発し、実験により検証した。今後、E-Defenseによる実験が有効な研究対象としては例えば以下のような課題が考えられ、地震工学の発展に大いに貢献することが期待される。

- (1) 新技術の検証(材料、構造形式、補強工法)
- (2) 3次元あるいは不整形構造物の応答
- (3) 地盤構造物系の応答
- (4) 未経験地震動(極大、周期帯)による応答
- (5) 海外の構造物の挙動(耐震設計されていない構造、HB,CB-infill, masonry, adobe, 経済的補強)、国際協力事業
- (6) 技術教育(崩壊過程の理解、被災度判定)

謝辞

2005年度実大6層実験とともにE-Defense最初の実大RC建物の振動実験シリーズである本実験の計画実施を担当させていただく機会に恵まれたことは身に余る僥倖であり、先人を含む関係各位のご尽力とご支援に対してこの場をお借りして深く感謝申し上げたいと思う。岡田恒男先生、小谷俊介先生、青山博之先生には、実験計画の段階から実施に至るまで暖かいご指導ご助言と励ましをいただいた。片山恒雄先生、早山徹氏、中島正愛先生、佐藤正義氏、小川信行氏、梶原浩一氏をはじめとする防災科研の(旧/現)首脳陣およびスタッフには運営面で強力な支援をしていただいた。実験の計画と実施にあたっては、大大鉄筋コンクリート建物実験委員会関係各位(倉本洋、勅使川原正臣、福山洋・斉藤大樹、田中仁史・河野進、勝俣英雄・白井和貴、五十嵐克哉・鈴木紀雄・田上淳、長嶋一郎、長谷川俊昭・熊谷仁志、真田靖士、陳少華・加藤敦の各氏)には貴重なご助言ご協力をいただいた。加震実験時の作業では、東京大学地震研究所、豊橋技術科学大学、京都大学、大林組の数多くの学生・研究者のみなさまにご助力ご協力いただいた。2006年度実大試験体の許容応力度設計および詳細計算は堀江建築工学研究所(太田勤、小杉雅男、田子茂、高橋愛の各氏)に共同実施していただいた。試験体製作は株式会社高階、計測および入力制御の作業は震動実験総合エンジニアリング株式会社に実施していただいた。以上のほか、ここには記しきれないほど多くのみなさまのご支援とご協力により、どうにか実験を遂行することができた。心より謝意を表するとともに、今後E-Defenseが益々広範に利用されて、海外も含む耐震工学の発展、地震防災に大きく貢献することを願っている。

参考文献

- 1) 壁谷澤寿海、松森泰造：RC建築構造物の振動破壊実験、日本地震工学会誌、NO.4、pp.37-41、2006
- 2) 文部科学省研究開発局、独立行政法人防災科学技術研究所：大都市大震災軽減化特別プロジェクトⅡ震動台活用による構造物の耐震性向上(平成17年度)研究成果報告書、2006.7
- 3) 壁谷澤寿海、松森泰造ほか、E-ディフェンスによる実大6層鉄筋コンクリート建物実験 その1-その7、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2構造Ⅳ、pp.685-690、2006.9
- 4) 壁谷澤寿海、松森泰造：振動台実験による鉄筋コンクリート造建物の地震時崩壊挙動の把握 大都市大震災軽減化特別プロジェクト-RC建物に関する

研究-の概要、建築防災11月号、NO.346、pp.2-16、2006

- 5) 壁谷澤寿海・壁谷澤寿一・瀬戸一起・工藤一嘉・真田靖士、2004年新潟県中越地震における余震観測と被害調査による入力地震動の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集、AIJ、pp.719-720、2005
- 6) 壁谷澤寿一・壁谷澤寿海・坂上実・田中康久・行谷佑一、新潟県中越地震における余震観測と被害調査による入力逸散効果の検証、構造工学論文集、Vol.52B、pp.305-312、2006.3
- 7) 壁谷澤寿一・壁谷澤寿海・真田靖士・金裕錫、既存RC学校構造物における基礎梁の静的水平載荷試験、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No.2、pp.955-960、2006.7
- 8) 国土交通省住宅局建築物指導課監修、既存鉄筋コンクリート造建築物の外側耐震改修マニュアル、日本建築防災協会、2002.10
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説1975
- 10) 財団法人日本建築防災協会：震災建物等の被災度判定基準および復旧技術指針(鉄筋コンクリート造編)、2005

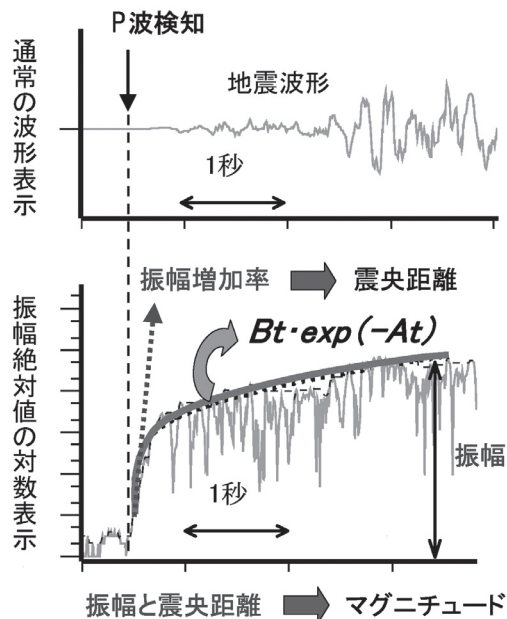


図2 単独観測点での地震諸元推定方法の模式図

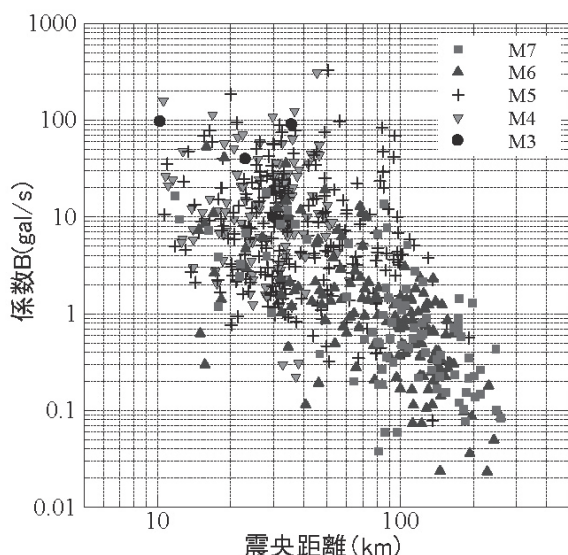


図3 係数Bと震央距離の関係

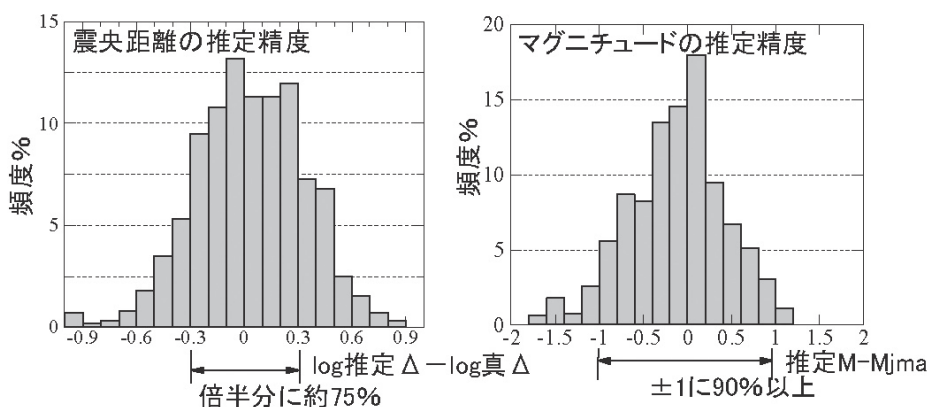


図4 震央距離とマグニチュードの推定誤差分布

図3に気象庁で過去に観測された地震記録約1000記録に本方法を適用して得られた係数Bと実際の震央距離の関係を示す。また、図4は同記録に本法を適用して推定した震央距離とマグニチュードの推定誤差分布を示したものである。図4によると、震央距離については、全体の約75%が真の値の半分～倍の範囲に推定されている。ここで、図4の左図の横軸は震央距離(Δ)の対数の差を示しており、 $-0.3 \sim 0.3$ の範囲が真の値の $1/2 \sim 2$ 倍の範囲に相当する。また、マグニチュードについては、全体の約90%が気象庁マグニチュードの ± 1 の範囲に推定されている⁵⁾。

鉄道総研では、新たに考案した地震諸元推定方法を採用した早期警報用の新地震計を開発し、実用化した。この新地震計は、九州新幹線(新八代・鹿児島中央)に導入され、2004年3月の開業とともに実運用されているほか(図5参照)、東北・上越・長野新幹線および東海道・山陽新幹線の既存の早期地震検知・警報システムの後継機として採用され、2005年度～2006年度に全てのシステムが新地震計に更新される予定である。また、気象庁は、緊急地震速報の処理のために、同様の新地震計を全国約200個所の観測点に配置した。

3.2 複数観測点による推定方法

上記の新地震計を用いると1観測点だけでも地震の諸元を推定できるが、前述したように緊急地震速報では地震波が複数の観測点に到達するにしがって、さらに情報の精度を上げる工夫をしている⁶⁾。たとえば、ある瞬間に観測点Aでは地震の揺れを観測していたが、観測点Bではまだ揺れが到達していなかった場合、地震の発生した場所はBよりAに近いということになる。このことを利用すると、最初に地震動を検知した観測点がどこかによって、震央位置をある範囲に絞り込むことができる。この範囲は観測点ごとの受け持ち

エリア(テリトリー)として予め算出しておくことができる。よって、ある観測点で最初に地震の揺れが観測されたら、地震はその受け持ちエリア内のどこかで発生したことになる。2番目に揺れを観測した点がどこかによって、さらに震央の存在エリアを絞り込むことができる。以下同様に繰り返すことにより震央位置の推定精度は逐次向上する。こ



図5 早期警報地震計の実用機の例

の手法はテリトリ法と名付けられている。

このほか、複数の観測点で地震波を検知した時刻を観測データとして、このデータに最もよく合う震源の位置を最小二乗法的に求める方法（グリッドサーチ法と名付けられている）も用いられている。

さらに気象庁は（独）防災科学技術研究所が開発した着未着法⁷⁾とよばれる震源決定の方法も採用している。このように様々な手法を組み合わせ、緊急地震速報は逐次精度を高めながら、1つの地震に対して複数回配信される。

4. 列車制御範囲の考え方

地震が発生した時、その影響がどこまで及ぶかは、震源の規模（マグニチュード）だけではなく、地震波が伝播する地盤の特性や対象とする施設の耐震性能などによって異なるので一概には言えない。しかし、地震時の列車制御の要・不要の判断は即座に行う必要がある。そこで、鉄道では、影響範囲の一つの判断方法として、過去の被害地震のデータを基に、地震のマグニチュード（M）に応じて、これ以上は被害がないだろうという限界の距離（ Δ ）に対する経験式が用いられることが多い。この方法はM- Δ 法と呼ばれ、新幹線の早期地震警報の判断にも用いられている。図6は、最近の被害地震データを用いて作成した、マグニチュード（M）と被害発生個所までの震央距離（ Δ ）の関係図（M- Δ 図）である。図中の直線が被害発生の上限距離に相当する。

5. 緊急地震速報の事例

図7は2003年十勝沖地震において実際に観測されたデータに基づいて緊急地震速報を算出し、M- Δ 法によって影響範囲を試算した例である。この例では、震

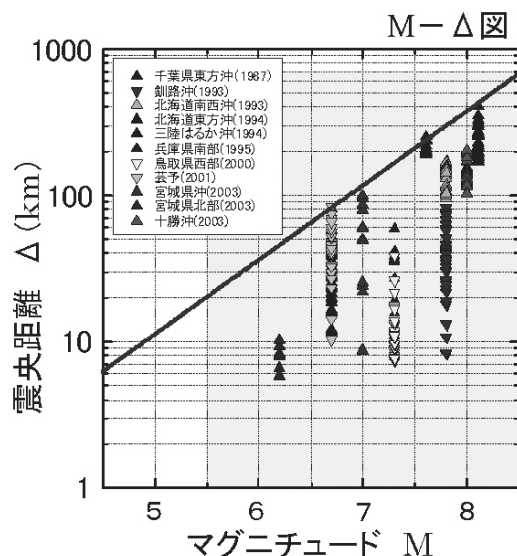


図6 マグニチュードMと被害発生箇所までの震央距離 Δ の関係（M- Δ 図）

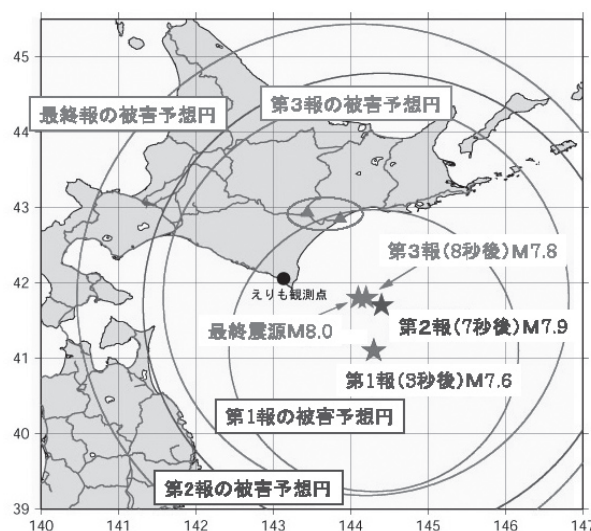


図7 2003年十勝沖地震の緊急地震速報と被害推定範囲の試算例

源に一番近いえりもの観測点に地震波が到達してから3秒後に緊急地震速報の第1報が発表され、その4秒後に第2報、さらに1秒後に第3報が発表され、次第に実際の震央に近いところに推定されていることがわかる。マグニチュードの指定は第1報が7.6、第2報が7.9、第3報が7.8である。緊急地震速報の精度が上がるにつれ、影響が及ぶ可能性のある範囲を示す円も変化する。このように影響予測範囲は次々と変動するが、鉄道の列車制御システムにおいては、安全を考えて全部の緊急地震速報にかかる影響予測円の領域すべてを列車制御の対象にする、すなわち制御エリアが徐々に拡大していくように制御するべきである。

図中の▲はこの地震で鉄道が実際に被害を受けた地点を示しているが、それぞれ第1報と第2報で制御範囲内に入っている。計算上、緊急地震速報を受信してから当該個所に主要動（S波）が到着するまでの余裕時間は15秒程度と試算されている。

図8は2005年8月16日に発生した宮城県沖地震の際に試験的であるが実際に配信された緊急地震速報の例である。この例では、緊急地震速報は第1報でも概ね良好な推定精度であった。なお、この地震の際に、仙台市のある小学校で緊急地震速報の試験配信を受けていて、大きな揺れがくる約15秒前にその情報を得ることができたといわれている。このことはテレビや新聞・雑誌等でも報道され、緊急地震速報が一躍有名になるきっかけとなった。

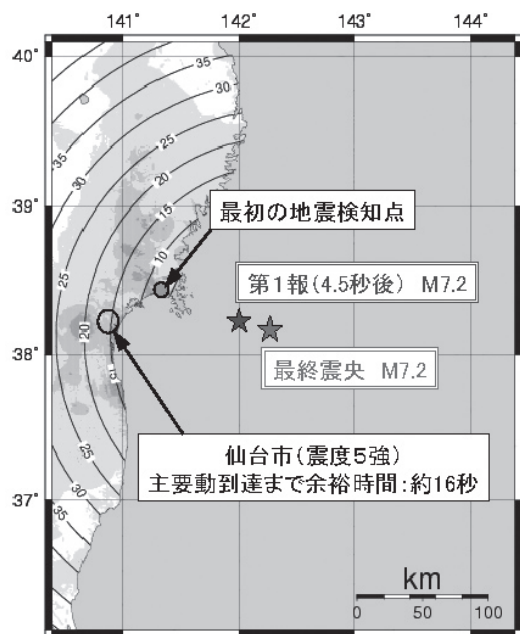


図8 2005年宮城県沖地震の緊急地震速報

6. 鉄道における緊急地震速報の活用例

鉄道総研では、緊急地震速報を利用した早期地震警報システムの開発を進めてきた。最初に小田急線をテストフィールドとしたプロトタイプシステムを作成し、気象庁が2004年2月に開始した緊急地震速報の配信試験に参画してシステムの検証を行ってきた。この検証試験結果を踏まえ、小田急線を対象とした実用システムの開発を行った(図9参照)。このシステムは、NTT専用回線で緊急地震速報を受信し、前述のM-Δ法によって小田急線に影響があるかどうかを判断し、影響があると判断した場合は列車無線装置に信号を発して、自動的に列車無線を発報する。図10に本システムの構成図を示す。



図9 緊急地震速報を活用した実用システムの全景

本システムは2006年度初から試験運用を開始し、気象庁が緊急地震速報の先行配信を開始した2006年8月1日からは実運用に入っている。

鉄道における緊急地震速報の導入事例は順次増加しており、2006年12月時点で9事業者が先行的な配信を受けている(気象庁ホームページより)。

7. おわりに

新幹線においては自ら高機能な地震計を沿線に設置して早期地震警報システムを構築しており、今後ともそのシステムを維持・管理していくとともに、さらなる機能の高度化を追求していくものと思われる。一方、従来主にS波警報のみで地震時の運転規制をおこなってきたJR在来線や民鉄線においては、気象庁が配信する緊急地震速報を活用したシステムの導入が期待される。さらに、将来的には、鉄道各社が運用する自社の地震警報システムと緊急地震速報を併用して、より早く、よりの確な早期地震警報システムを構築することが可能になるものと思われる。

鉄道総研では、地震警報システムのさらなる高度化を目指して引き続き研究開発を進めていくつもりである。関係各位から忌憚のないご意見・ご要望がいただけたら幸いである。

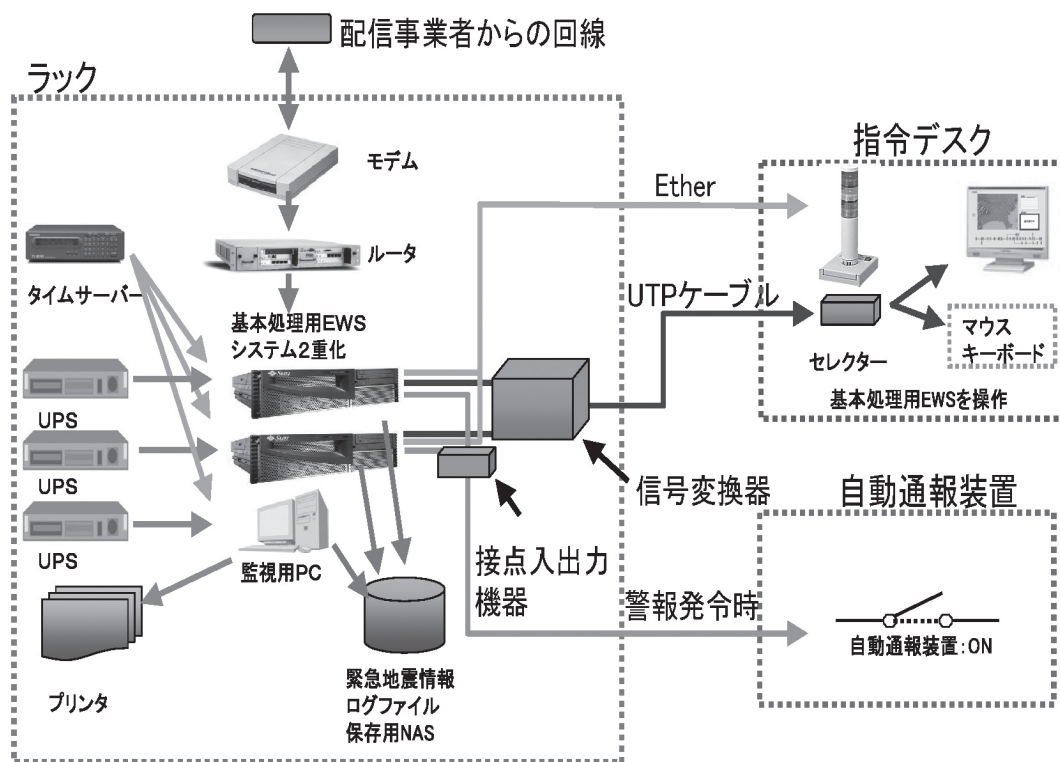


図10 実用システムの構成例

参考文献

- 1) 中村豊：研究展望：総合地震防災システムの研究、土木学会論文集、No.531/I-34、1-33、1996。
- 2) 芦谷公稔、中村洋光：鉄道における早期地震警報の現状、月刊地球、号外46号、82-88、2004。
- 3) T. Odaka, K. Ashiya, S. Tsukada, S. Sato, K. Otake and D. Nozaka: A new method of quickly estimating epicenter distance and magnitude from a single seismic record, BSSA, 93, 526-532, 2003.
- 4) 東田進也、小高俊一、芦谷公稔、大竹和生、野坂大輔：P波エンベロープ形状を用いた早期地震諸元推定法、地震Ⅱ、56(4)、351-361、2004。
- 5) 中村洋光・大竹和生・芦谷公稔・東田進也：早期地震諸元推定手法における推定精度について、日本地震学会講演予稿集2003年度秋季大会、P115、2003。
- 6) 芦谷公稔、小高俊一、東田進也、横田崇、加藤孝志、上垣内修：ナウキャスト地震情報との早期地震警報への活用、物理探査、55(6)、485-494、2002。
- 7) S. Horiuchi, H. Negishi, K. Abe, A. Kamimura and Y. Fujinawa: An Automatic Processing System for Broadcasting Earthquake Alarms, BSSA, 95, 708-718, 2005.

NEESWood メディアイベント参加報告

荒木 康弘 / 五十田 博

●防災科学技術研究所 ●信州大学

1. はじめに NEESWood/メディアイベントとは

NEESWoodはNEES (George E. Brown, Jr. Network for Earthquake Engineering Simulation) のResearch programの1つとして2005年9月より開始された“NEESWood: Development of a Performance-Based Seismic Design Philosophy for Mid-Rise Woodframe Construction”である。本プロジェクトの対象は研究タイトルのとおり中層階建て木造住宅であり、これまで研究蓄積の乏しい木造建築物の耐震データを集約し、最終的には性能規定型設計法の構築を目指している。研究1年目の主要課題は、実物大の建物に対する地震時データを得ることである。そこで、2階建て木造住宅を振動台に載せ実験を実施した。加振は6月から始まり11月までの長丁場で、構造要素を増減させながら構造要素の耐震性能に関する寄与を検討しつつ、最終的には仕上げ状態の建物に対して実験を実施した。また、途中にはオイルダンパーなどの制震装置を用いた実験も実施した。

ここでは、一連の実験のうち、仕上げを施し、室内装飾などまで再現した“immediate occupancy”の状態の試験体に対して1994年ノースリッジ地震で観測された地震波を入力した公開実験(メディアイベント)の様子を報告する。なお当日のビデオやプロジェクトの計画は<http://www.engr.colostate.edu/NEESWood/>に詳しいのでそちらを参照願いたい。

2. メディアイベント

メディアイベントは2006年11月14日(火)、New York State University at Buffalo (SUNY) のKetter Hallで行われた。来場者はプレスをはじめ、研究者、一般の人々をあわせ約200名程度であった(図1)。

実験の開始前にはSUNYを代表してProf. G. Stenger Jr., Prof. A.Scott Weberらが、NSF (National Science Foundation) を代表してProf. Adnan Akayが挨拶をし、次いで本プロジェクトの主担当であるProf. John van de Lindt (Colorado State University) によりNEESWoodプロジェクトの概要、本実験の担当者であるProf. Andre Filiatrault (SUNY) より当日の実験概要についての説明が行われた。

また実験後には講評会見が行われ、Prof. Andre Filiatraultが、これまでの米国では得たことのない貴重な荷重変形のデータを収集できたという点で本実験が非常に重要なものであったこと、またこれらのデータが、木造建物の耐震性能の予測精度を向上させ、さらに耐震規定の改定を促し、その結果、多くの人命を救うことであろうとコメントしていた。途中、ノースリッジ地震が契機となり木造の耐震研究が開始されたこと(原文: "Northridge was a wake-up call. Suddenly, the engineering community is more interested in the performance of wood-frame buildings.")を1年後の兵庫県南部地震での日本の状況を引きあいにだしながらコメントしていた点は非常に興味深い。

最後にProf. John van de Lindtが、今回の実験結果が木造建物の耐震設計のためのモデル化の方法を向上させ、より経済的な耐震設計法を提案することが可能になるとコメントし、結んだ。



図1 メディアイベントの様子

3. 実験の概要

試験体概要 試験体は、ノースリッジ地震を契機に実施された米国での初の本格的な木造建物の研究“CUREE-Caltech Woodframe Project”で対象にされた3戸連棟タウンハウスの1戸分を取り出したものである。仕様としては、カリフォルニアの1980年代から90年代に見られたいわゆる建売住宅(production-house)を模している(図2)。耐震設計は現行法規に従っているものの、木造建物に関しては鉄筋コンクリート造や鉄骨造などのように明確な水平震度と耐力要素との関係

によって設計されているわけではない（米国ではNon-Engineered Structureと呼ばれている）ため、地震の挙動は不明とされている。耐震要素としては、外壁にOSB、内壁に石膏ボードが用いられ、仕上げ材としては、外壁にスタッコを用いている。試験体の大きさは約150㎡、1階床から屋根の軒までの高さは5.49m、地震用重量は約320kNであり、実際の住宅の室内の被害をも再現するために寝室やリビングルームには家具、調度品を置き、ガレージには車が設置されている。（図3）。



図2 実大試験体 全景



居間 ガレージ（2台用）

図3 実大試験体 内部

加振概要 入力波には1994年のNorthridge地震の際にSan Fernando ValleyのRinaldiで観測された地震記録が用いられた。図4に入力波の加速度応答スペクトル（5%減衰）をJMA 神戸、JR鷹取と比較して示す。実験は、7m×7mの振動台（最大搭載質量50t）2基を同時に駆動させることで実現している（図5）。2基の途中は鉄骨で接合されており、見かけ上、約20m×7mの振動台である。

実験結果概要 開口部隅角部に大小の亀裂が生じ、室内の家具等には落下や転倒がみられた（図6、図7）。日本の振動台実験でここまでリアルに室内の様子を再現することは希であり、ビデオを一見するとCGと錯覚するほどである。

また、実験後速報では1階層間変位は約10cm (1/30rad) 程度であった。これは研究チームの予想よりも小さな損傷であり、特に窓が一枚も損傷しなかったことは研究チームの予想に大きく反する結果とのことであった。

4. おわりに

本研究プロジェクトは米国における木造建物の性能規定を目指した耐震研究の第一歩であり、本実験の様子や一連の研究はニューヨークタイムスやロサンジェルスタイムスに取り上げられ、TVなどでも報道された。NEESWoodの最終段階では、E-ディフェンス（兵庫県三木市）において15×20mの6階建て木造建物の実験を日米共同研究の一環として予定（現在2009年で調整中）している。なお、メディアイベントについては荒木が参加し、メディアイベント直前までの実験には五十田が参加し、本報告ではそれらをまとめた。

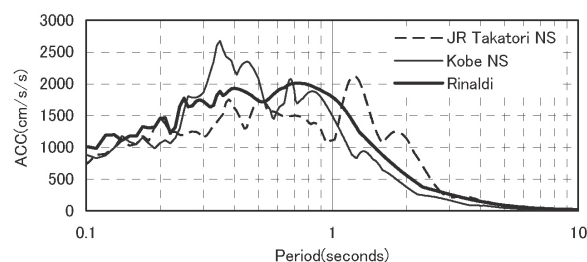


図4 加速度応答スペクトル（主要成分、5%減衰）

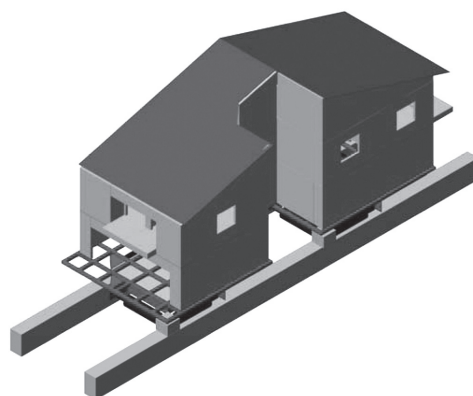


図5 2基の振動台との試験体の関係

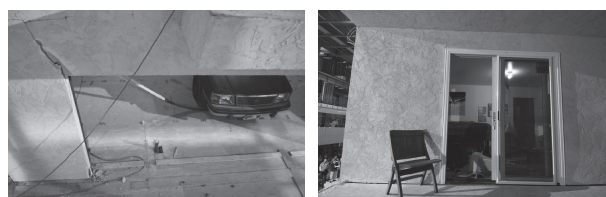


図6 加振後の損傷状況



図7 加振前後の損傷状況

ESG2006報告

岩田 知孝

●京都大学防災研究所

2006年8月30日から9月1日にかけて、第3回表層地質が地震動へ及ぼす影響に関する国際シンポジウム (Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion) がフランス・イゼール県庁所在地であるグルノーブルにある、ユーロポール国際会議場で開かれた。ここではこのESG国際シンポジウムのこれまでの経緯と、今回の会議の紹介を行う。

タイトルにもなっているESG研究とは、1986年にIASPEI (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior) とIAEE (International Association for Earthquake Engineering) において合同で結成されたジョイントワーキンググループ (JWG) が中心となって行っている国際的な研究課題である。そのきっかけは1985年メキシコ・ミチョアカン地震時に震源域から300kmも離れたメキシコ市において甚大な地震動災害が起き、いわゆるサイト特性の地震動への影響評価とそれに基づく地震災害軽減のための地震動の予測に関する研究課題が国際的にクローズアップされたためである。日本ではそれ以前にも被害地震を通してサイト特性の重要性は指摘され、本研究課題に関して主導的な立場を常にとってきた。実際この国際シンポジウムはこれまで第1回が1992年に小田原で、第2回が1998年に横浜で開催され、8年の期間をあけて今年第3回が開催された。それぞれの国際会議では、ESG研究に関する最新の研究成果を発表して議論するとともに、各回の時代におけるESG研究の背景に対応する参加型の特別セッションが行われた。もともとJWG-ESG研究の興味の主たるもののひとつは、ESG評価によるBlind prediction (目隠し予測) である。具体的には岩盤の観測点記録と地盤・地下構造情報を与えて堆積層上観測点の記録を参加チームが予測し、観測波形と比較するというものだ。当初は表層地質の影響を対象とした「地震動予測」であったが、現在想定地震などで考えられている強震動予測の隆盛から鑑みると、時代を先取りした内容であったといえる。第1回は国際テストサイトとして小田原サイトの目隠し予測を特別セッションとして、堆積盆地構造の影響を考察することが行われた。第2回は1995年兵庫県南部地震後と

いう時代背景から、震源域の強震動の同時シミュレーションを課題とした特別セッションが行われた。

第3回の今回は特別セッションとして、グルノーブル盆地における地震動シミュレーションと、近年都市域における地下速度構造モデル推定に威力を発揮している微動アレイ観測の有効性を検証するための微動ブラインドテストが行われた。微動ブラインドテストでは、水平成層の地下構造モデルを使って模擬微動を生成し、その模擬微動データを参加者に与えて通常の微動アレイ解析等を行って地下構造の推定結果を比較するものである。微動アレイの解析によって得られる分散曲線から地下のS波速度構造を推定する際には、現実には層境界情報など地球物理学的、地質学的情報を調査し、それらを先験的情報として与える場合が多いが、このテストにおいてはそのような情報を与えずに模擬微動情報だけで地下構造速度モデルの推定を行ったため、参加チーム間の差が予想したより大きかった印象をうけたが、各国から計19チームが参加したこの特別セッションは、アレイ微動を利用した地下速度構造モデルの推定の国際的な浸透と成熟を示しているといえる。

地震動シミュレーションセッションの課題はグルノーブル盆地の詳細な3次元堆積盆地構造を与えて、小地震の同時シミュレーションとM6クラスの地震動予測が課題であった。この課題の計算負担が大きく、参加チームが限られてしまった (日本からの参加チームは結果的にゼロ) ことは残念であった。

これらの特別セッションの他、最新のESG研究成果が一般セッションとして集約され、最近の研究トピックスに関するキーノート講義が行われた。

会議期間中に行われたJWG-ESGミーティング (JWG座長は川瀬博教授 (九大)、J. Bielak教授 (米国・カーネギーメロン大学)) では、第4回は米国で行われる予定であることがコンセンサスとして得られた。

なお本会議の詳細な報告は、工藤ほか (震災予防、No.211, 2006) を参照していただきたい。また本シンポジウムのプロシーディングスはLaboratoire Central des Ponts et Chausséesのホームページ<http://www.lcpc.fr>において注文できる (現在、新刊予定に入っている)。



写真1 ユーロポール国際会議場前景 (松島信一氏提供)



写真2 オープニングセレモニー (松島信一氏提供)

第12回日本地震工学シンポジウム開催報告

大町 達夫／風間 基樹／山崎 文雄／山中 浩明

●東京工業大学

●東北大学

●千葉大学

●東京工業大学

1. シンポジウムの趣旨

日本地震工学シンポジウム (JEES) は1962年に第1回が開催され、おおむね4年ごとに、世界地震工学会議 (WCEE) の開催の中間年に開かれてきました。最近数回の本シンポジウムは、700-1,100人の参加者を数え、この種の会議の代表的なものと評価されています。また、このシンポジウムは第1回以来、関係学協会が共催し、土木学会、日本建築学会、地盤工学会が順次、幹事学会をつとめるという形で開催されてきましたが、今回初めて日本地震工学会が幹事学会となり、企画・運営を担当しました。

運営委員会は、有意義で円滑なシンポジウムとなるよう今回は「ひと・技術・減災」をテーマに掲げ、それに因んだ特別企画を組み込みました。

2. 概要

シンポジウムは、2006年11月3日 (金) ～5日 (日) の三日間の日程で、東京工業大学大岡山キャンパスにおいて行われました。発表された論文数は表1の通り、合計385編でした。一般論文の内16編 (スペインからの投稿1編を含む) が英文論文でありました。また、三日間の登録参加者数は、表2に示すように合計696名でありました。このほか、次回の第13回世界地震工学会議の開催国である中国北京から4名の来客があり、二日目の特別講演の前に、世界会議の概要が紹介されました。

シンポジウムは初日10時から、大町委員長の挨拶で始まりました。

表 2 登録参加者数

項 目	参加者数	参加費
一般論文 第一著者 (一般)	270	20,000円
同 (学生)	96	16,000円
一般参加 (事前登録)	155	10,000円
(当日現地登録)	120	12,000円
学生参加 (事前登録)	30	6,000円
(当日現地登録)	25	7,000円



写真1 開会式で挨拶する大町運営委員長と会場風景

表 1 発表論文数

一般査読論文セッション 内 オーラル ポスター	366編 (273編) (93編)
スペシャルテーマセッション1 わが国における地震工学の最新動向	9 編
スペシャルテーマセッション2 2006年ジャワ島中部地震の被害と教訓	6 編
パネル討論 スマトラ地震津波災害の教訓	4 編

3. 内容

3.1 一般セッション

今回のシンポジウムでは、表3に示されているように、前回までのシンポジウムでの分野に加えて、耐震設計論、人間行動、防災教育などの分野を論文応募分野に新しく付け加えました。さらに、最近のトピックスとして中越地震、やや長周期地震動と地震被害、スマトラ沖地震津波の3つのセッションでの論文応募を行いました。

表 3 発表論文数

テーマ分野	総発表 件数	口頭 発表	ポスター 発表
震害	5	3	23
地震ハザード およびゾーネーション	16	11	
震源特性	12	9	
地盤震動	32	24	
強震動予測および入力地震動	16	11	
津波	2	2	0
土および地盤の動的特性	15	11	19
地盤の非線形応答	3	3	
地盤の液化化	14	11	
側方流動および地盤変状	5	4	
地すべりと斜面崩壊	6	6	
土構造物・ダム	12	8	
基礎	8	5	
地中構造物	4	2	
相互作用	13	11	
構造物と構造物材、 構造要素の実験	34	27	20
構造物と産業施設の地震応答	19	15	
免震・制震	31	26	
知的構造 およびヘルスマニタリング	5	2	
耐震診断・改修	12	12	
非構造物材および設備	5	5	
構造物の耐震設計論 および耐震設計基準	10	9	
ライフラインシステム	8	5	16
防災計画および防災システム	14	9	
リスクアセスメント	6	4	
地震時の人間行動、 防災教育	5	3	
リアルタイム地震防災 および災害情報	8	5	
社会・経済問題	1	1	16
やや長周期地震動と地震被害	20	12	
中越地震	15	7	
スマトラ沖地震・津波	6	6	-

今回のシンポジウムでは、投稿申し込みから査読までの全プロセスを電子化した形式で行いました。投稿締め切り間際にも大きな混乱がなく、順調に行うことができました。投稿論文の査読に関しては、論文委員会を組織し、査読者の割付、査読状況の管理、修正原稿のチェックなどを行っていただきました。厳正な査読の結果、一般論文367編が採択されました。採択さ

れた論文は、論文集(CD)に掲載され、さらに、それぞれの論文の要旨をまとめたアブストラクト集も発行されました。

一般論文の発表は、ポスター会場を含めて7会場で行われました。それぞれの分野での発表数は、表3に示すとおりです。発表形式は、基本的に著者の希望を優先しましたが、7割以上の著者が口頭発表を希望していました。そのために、ポスターセッションでは、幅広い分野の発表が行われることになりました。一方、口頭発表では6会場が使用可能であったために、類似分野の口頭発表を同じ時間に行わざるを得ませんでした。また、会場の広さがまちまちであり、あるセッションでは会場に入れない状況もあり、ご迷惑をお掛けしました。しかし、口頭およびポスター発表では熱心な議論が多く行われており、地震工学関連学会の横断的にシンポジウムの良さを実感された方も多かったと思います。



写真2 ポスターセッションの様子



写真3 一般発表セッションの様子

3.2 スペシャルテーマセッション 1

「わが国における地震工学の動向」では、地盤と基礎に関しては①液状化に伴う地盤の流動、②橋梁と液状化、③地盤データベースの構築と被災分布について、それぞれ最近10年余りの研究開発の動向と今後の話題が提供されました。討議では「地盤の非線形領域における変形解析手法の精度と実用性を早急に高めてほしい」との意見が他分野の方から出されました。耐震基準の最新動向では、2006年に改訂された原子力施設耐震設計審査指針と、ISOや欧州規格における構造物の耐震規定の最新動向について報告がありました。建築構造物の耐震補強と免震・制震技術では、学校施設の耐震化対策の現状、木造住宅の耐震補強、戸建住宅における免震技術、日本における建築構造物のアクティブ、セミアクティブ制御技術の4編の発表が行われました。いずれも活発な質疑応答が時間を超過して行われました。

3.3 スペシャルテーマセッション 2

「2006年ジャワ島中部地震の被害と教訓」として、①震源モデルの推定、②強震動レベルの評価、③リモートセンシングによる被害観測、④地盤災害調査、⑤建物被害調査結果、⑥復興支援の調査報告があり、被災地域の地震動レベル、地盤の影響、調査手法、被害の状況などに関して活発な質疑がありました。

3.4 特別講演

11月4日の午後、一般にも公開され、ほぼ満員の聴衆を集めて特別講演会がデジタル多目的ホールで開かれました。講演者の工学院大学教授（東大名誉教授）、畑村洋太郎先生（機械工学専攻）は、“地震工学者と議論が出来ることを楽しみにしてきた”とおっしゃる通り、その熱弁は聴衆の気持ちを自ずと熱くしました。予定時間の一時間半、フルに熱弁をふるわれ、その後の懇親会に議論は持ち越されました。先生の周りに次々と参加者が訪れたため、ほとんど食事を取る暇がない程でしたが、帰り際に“こんなに楽しい機会を頂いてありがとうございます。”と反対にお礼の言葉までいただきました。“現場、現物、現人”現場に行き、現物をさわって、現地の人に聞く、失敗学の極意は、地震工学を志すものにとっても掛け替えのない要件です。個々の現象に対する先生の解釈に異論のある方もおられたと思いますが、問題提起とともに、必ず実現性のある解決法を提示される先生の姿勢に共感しない聴衆はいない様子でした。



写真4 特別講演を熱心に聴講する参加者

3.5 懇親会

二日目の特別講演会に引き続いて、講師の畑村先生、13WCEEの中国事務局長を務めるWang氏らを交えて東京工業大学百年記念館フェライト会議室において、懇親会が催された。日本地震工学会大町会長の挨拶の後、小谷前会長の乾杯の音頭で、乾いたのどを潤しました。地震工学を核とした様々な理工学分野に所属する研究者約100名の参加をいただき、互いの近況や情報を交換する場となりました。会は、北川次期会長の挨拶で締めくくられました。



写真5 懇親会の様子1



写真6 懇親会の様子2

3.6 地震工学の早分かり講義

「大学院生から初級技術者のための地震工学早わかり講義」と銘打って、これから技術者をめざす若手が、多岐にわたる地震工学の主要・最新分野の知識を得る機会として、第一線の研究者によるシリーズ講義を企画しました。当初、どれくらい参加者があるか心配しましたが、7つの早わかり講義にそれぞれ40～50名の聴講者を得て大いに好評でした。学生から若手技術者の参加者に加えて、中堅の技術者とおぼしき聴講者も多数見られ、質疑応答には、講師の先生も困惑する場面も見られました。地震工学に関わるこのような横断的な知識を習得する機会の重要性を、改めて感じさせられた企画であり、今後のシンポジウムにおいても存続を期待する声が多く聞かれました。

表4 早分かり講義の内容と講師

第1回「強震動のなりたちとその予測」 地域地盤環境研究所	香川敬生
第2回「耐震診断」 武蔵工業大学工学部建築学科	大橋好光
第3回「建物の免震・制震(振)」 鹿島小堀研究室	池田芳樹
第4回「地盤と構造物の相互作用」 鹿島小堀研究室	古山田耕司
第5回「液状化・地盤災害」 電力中央研究所	金谷 守
第6回「災害情報・防災システム」 防災科学技術研究所	松岡昌志
第7回「津波」 東北大学災害制御研究センター	越村俊一



写真7 盛況の地震工学の早わかり講義

3.6 パネル討論「2004年スマトラ地震津波の教訓」

2004年12月26日に発生した巨大津波災害に関係したアジア諸国と日本の津波研究者や防災関係者に集まっていたいただき、津波災害を軽減するための津波現象の解明、津波の観測と早期警報、減災対策、復旧・復興活動などについて討論する場として企画しました。すべて英語による国際セッションで、目黒公郎氏(東京大学)に司会・コーディネータを務めていただきました。まず、今村文彦氏(東北大学)より「インド洋津波の特徴と将来の課題」、TeddyBoen氏(インドネシア津波災害復旧復興アドバイザー)より「インドネシア・バンダアチェの津波災害からの復旧・復興活動と課題」、SahabanduKLS氏(スリランカ災害マネージメントセンター委員)より「スリランカの津波災害からの復旧・復興活動の現状と課題」、目黒氏より「インド洋沿岸の特性を考えた津波災害軽減策システムの提案」、家村浩和氏(京都大学)より「将来の津波災害に備えて行われたアチェの活動」に関する話題が提供されました。

次に、パネル討論では、

- ・災害の専門家としての我々の役割は何か?
 - ・災害軽減の実際の問題とは何か?
 - ・持続的な災害軽減システムはどうあるべきか?
- などの問題提起が行われました。結論として、
- ・将来の津波や災害の潜在的死傷者数は相当に上る。
 - ・津波を含む災害の復旧政策には問題がある。
 - ・地域性に応じて適用可能な解決策を提案すべきである。
 - ・技術の欠如はそれほど問題ではなさそうである。
 - ・ハザードが災害にならないようにする責任がある。
 - ・災害の専門家は政策決定者・マスメディア・一般市民と会話する努力が必要である。

などの共通認識を得て、討論を終えました。なお、この討論には、政策大学院大学から20名近い外国人学生の参加があり、文字通り国際的な討論となりました。



写真8 討論するパネラー



写真9 パネル討論の会場風景

3.8 技術展示

エントランスホールの20ブースのスペースを使って技術展示が催されました。地震工学に関連する技術として、様々な耐震工法や地震計測システムの紹介、図書の即売などが行われました。比較的来場者が多く、出展者からも好意的な評価を頂きました。

4. おわりに

1995年の阪神淡路大震災から既に11年が経過し、必要な耐震補強工事も着々と進められてきました。しかし現在、宮城県沖地震をはじめ、東南海・南海地震や東海地震、首都圏直下地震などの発生の逼迫性や、それらによる膨大な被害想定も発表されています。また2004年の新潟県中越地震やスマトラ島沖地震津波、2005年パキスタン北部地震など、国内外でさまざまな被害地震が頻発する一方で、最近では技術者倫理や構造物の耐震安全性の評価、効率的な点検・補修方法などにも社会的に強い関心が向けられています。今後もますます、地震工学に携わる研究者の社会的な使命は大きいものと考えます。

今回のシンポジウムでテーマに掲げた「ひと・技術・減災」のテーマについては、各人さまざまな思いをお持ちのことと思いますが、「地震に強い社会づくり」のための具体的課題を多様な切り口から横断的に議論していただく機会として、関連分野の多くの専門家や学生諸君に活用して頂けたものと思います。

謝辞

シンポジウム運営委員会は、日本地震工学会を中心として各関係学協会から参加いただいた運営委員約20名で構成されました。約2年前から準備に取り掛かり、運営システムの電子化に取り組みました。また、シンポジウムの収支を均衡させることを大前提として、会場を大学としたことなど、初めてのことも多かったため、何かと至らない点もあったと思います。しかし、多くの参加をいただいて、失敗学のレッスンにならないで終えることが出来ましたことに、運営委員一同、ほっとしているところです。最後になりますが、ご協力いただいた各学協会、合計286名の査読者の方々、論文委員会の方々、裏方で献身的な奉仕をしていただいた事務局、東京工業大学のスタッフの方々に、お礼を申し上げます。



写真10 技術展示の様子

事業企画委員会報告

○E-ディフェンスRC建物実験見学会*

○セミナー**

中澤 博志*

／張 至鎬**

●独立行政法人 防災科学技術研究所 ●清水建設(株) 技術研究所

○E-ディフェンスRC建物実験見学会

10/30(月)に兵庫県三木市の独立行政法人防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センターにおいて、「E-ディフェンス見学会」を実施した(表1)。当見学会は地震・耐震工学に関連する国内実験施設についての知識を深めることを目的に、昨年度に引き続き実施された催しであり、耐震関係の研究者を中心とした40名の方々に御参加いただいた。見学会は、若松事業企画委員会副委員長(防災科学技術研究所)の開会挨拶(写真1)に始まり、防災科学技術研究所が実施している「大都市大震災軽減化特別プロジェクト(大大特)Ⅱ.震動台活用による構造物の耐震性向上研究」のRC建物実験およびE-ディフェンス施設を見学することが出来た。

表1 プログラム

13:45-	実験概要説明会(副委員長挨拶および実験概要の説明, 写真2)
14:00-	実験棟へ移動
14:20-14:40	実験見学 (JMA 神戸波 100kine 3方向)
14:40-15:00	実験後の試験体の観察
15:00-15:45	施設見学 (実験後無補強RC試験体, 実験準備棟, 油圧源棟)
15:45-16:00	質疑, 担当者挨拶
16:00-	解散

見学会のメインであった大大特のRC建物の震動実験は、ほぼ実大の3階建て学校校舎を想定した試験体2体を用いている。2試験体はいずれも1970年代のやや古い設計により作製されたものであり、校舎端に計画されることが多い特別教室部分2×3スパンを模擬している。これらの試験体は同一の設計であるが、1体目は既存の古い設計のままであり、もう1体目はまったく同様に設計施工した後に、あと施工により耐震補強を施したものである(表2)。1体目の試験体の実験に関しては1ヶ月前に既に終了していたが、本見学会では2体目の耐震補強を施した試験体(写真2)の実験の見学をすることができた。

表2 試験体仕様

1970年代RC造学校校舎(補強)
3階建て 階高2.5m
重量: 上部320t 基礎部410t
加振条件: JMA神戸波 100kine

加振実験後は、震動台周りまで移動し実験直後の試験体の様子を観察し(写真3)、次にE-ディフェンス施設内を案内した。ここでは既に実施されたRC試験体の損傷状況の観察、実験準備棟において次に行われる地盤の側方流動実験で用いる大型土層および震動台の動力源となる設備がある油圧源棟(ガスエンジン・アキュムレータ)を見てまわるなど、実験以外にも震動台の付帯設備の見学をすることで、E-ディフェンス施設についての更なる理解を深めていただけたように思う。



写真1 実験概要説明会の様子(事業企画委員会若松副委員長挨拶)



写真2 RC建物試験体



写真3 実験後の試験体観察の様子

なお、E-ディフェンス関係の行事としては、第6回通常総会での講演会が平成18年年5月22日（月）に建築会館ホールにおいて、約60名の参加者を集め開催された。講演は、E-ディフェンスのプロジェクトを中心とした内容で行われた。「大都市大震災軽減化特別プロジェクトⅡ：震動台活用による構造物の耐震性向上研究」において昨年度実施した実大実験のうち、地盤基礎実験、木造住宅実験およびRC建物実験についての報告がなされ、今後の実験へ向け非常に興味深い講演会であった。また、「実大三次元震動破壊実験施設（E-ディフェンス）を用いた橋梁耐震実験研究 平成17年度研究成果発表会 橋梁はどこまで巨大地震に耐えられるか？」が平成18年9月12日（火）に世界貿易センタービル3階にて独立行政法人防災科学技術研究所主催のもと開催され、日本地震工学会も共催させていただいた。このシンポジウムでは、大型橋梁耐震実験研究の概要、大型耐震実験研究実施に向けた事前実験研究およびE-ディフェンスにおける公募研究成果についての報告やディスカッションがなされ、平成19年度の橋梁耐震実験実施に向け、大きな期待が高まるところである。



写真4 施設見学の様子（ガスエンジン）

最後になるが、E-ディフェンスRC建物実験見学会を実施するにあたり、加震実験見学の許可を戴いた大大特RC建物実験関係者に深く感謝する次第である。

○セミナー

日本地震工学会事業企画委員会（委員長：田蔵隆、委員数：11名）では、地震工学および地震防災に関する学術・技術の進歩発展を図り、地震災害の軽減に貢献することを目的とした事業を企画し、実行している。また、講演会や見学会などの事業を通して、日本地震工学会が社会的に果たすべき役割を推進している。ここでは、2006年12月までに開催された講演会の概要を報告する。

1. 第1回のセミナー

平成18年8月29日（火）建築会館において、「セミナー：分かりやすい地盤の液状化・流動化と構造物の応答～そのメカニズムと解析法・対策法～」が、吉見吉昭先生（東京工業大名誉教授）、福武毅芳氏（清水建設（株）技術研究所主任研究員）を講師に迎え開催された。本セミナーは、地震・地盤・構造物の多種多様な組み合わせにおいて、液状化に関する耐震設計ができる技術者を目指す「若手技術者」、また耐震技術の基礎知識を習得したいと考えている「若手・中堅技術者」を対象に実施された。参加者は42名であり、建設コンサルタントと建設会社からの参加者が31名で最も多かった。以下にプログラムの概要とセミナーならびに会場風景を示す。

セミナープログラム

- ・開会の挨拶：田蔵委員長
- ・液状化のメカニズムと液状化発生の要因：吉見先生
- ・土の非線形特性と地盤応答：福武氏
- ・土の動的非線形特性のモデル化：福武氏
- ・地盤の種々の動的解析法と解析事例：福武氏
- ・液状化流動化地盤における構造物の挙動：吉見先生
- ・液状化流動化対策と液状化地盤の耐震設計：吉見先生（福武氏）



写真1 吉見先生の講演



写真2 福武氏

2. 第2回のセミナー

平成18年11月14日(火) 建築会館において、「Prof. Nogamiによる地盤と基礎構造物の動的相互作用解析の基礎から応用まで」が開催された。Nogami-Novak法の考案者で世界的に著名な元カリフォルニア大学の野上仁昭先生を講師として迎え、地盤と基礎構造物の動的相互作用解析について、詳細で平易に解説された。本セミナーは平成18年度事業企画委員会が主催する第2回目のセミナーであり、参加者は40名であった。セミナーのプログラム会場ならびに風景は以下のとおりである。

セミナープログラム

- ・ 開会の挨拶：田蔵委員長
- ・ Approximate and Rigorous Treatments of Soil and Models Based on These Treatments
- ・ Pile Groups Subjected to Static Loads
- ・ Pile Foundations Subjected to Dynamic Loading
- ・ Dynamic Pile Responses in Special Environments
- ・ Shallow Foundations and Geosynthetic-Reinforced Earth



写真3 野上先生の講演と会場風景

世界の地震工学者 ヤキム・ペトロフスキー教授に捧げる追悼文

和泉 正哲

●東北大・東北芸工大名誉教授 清水建設技術顧問

2006年暮れに日本地震工学会を通して伝えられたヤキム・ペトロフスキー教授12月18日に死亡の報に私は愕然とした。彼は、世界的に著名な耐震工学の権威であったが、私個人にとっても数少ない最良の学生、最高の友人そして最も信頼の出来る研究仲間の一人であり、余りにも大きなものを失ってしまった。

人生に「もし」は無いと言われてはいるが、もし、1963年7月26日早朝の地震が当時ユーゴスラヴィア連邦を構成したマケドニヤ共和国の首都スコピエに起こらなかったら、ヤキム・ペトロフスキー教授はバルカンの、欧州の、そして世界の『耐震工学』を背負う偉大な学者とはならなかったであろう。そして、親日家、知日家の学者としてしばしば来日されることもなかったであろう。私も彼と出会う機会も無く、全く違う世界で生きたに違いない。人生はこうも偶発的なものに支配されているものなのか。(勿論、彼は他の分野で名をなしていたであろうが。)

私が初めてヤキムと会ったのは、1965年も終わりに近い日の早朝、未だ真っ暗で電灯の光も覚束ない壊れたスコピエ駅に於いてであった。元マケドニヤ建設大臣で新地震・地震工学研究所(IZIIS)所長のキリヤス氏、通訳、秘書嬢の他に2、3人の大学院生兼研究所職員が、パリのユネスコからの我々家族を迎えてくれた。ヤキムはその学生職員の一人であった。

10月に創設された研究所とその付置の大学院コースは、建研から臨時にユネスコ専門官に出向した私の到着を待ちわびており、授業もすぐ翌日から始められた。内容は動力学、耐震建築物設計、コンピューター等々実に多岐にわたっていた。学生は、建設関係の国営企業の大学卒の技術者から精選された三十数名で、基礎数・物理学に強く、何よりも2年まえにスコピエを壊滅させて多数の縁者・知人を奪った地震に対して今後は災害を防止するぞという執念を持っていた。私は教え甲斐を強く感じ、それがその後断続的に数年間もスコピエに滞在した原動力となった。

学生達は、授業外の時間は所属企業で働き給料を得ていた。教える側も教わる側も大変であった。而も授業は、科学とは縁遠い通訳を通して行われ、日本語、英語、マケドニヤ語と変わる間に私の意図するものが

本当に伝わっているか否かは、常に心配であった。

ヤキムは文化の中心のザグレフ大学卒のエリートとして以前はスコピエの製鉄工場の設計を行いその建設現場長を務め、地震後は復興局の顧問となり、国連の援助でスコピエ大学(注1)に地震・地震工学研究所が創設されることとなって、その職員となった。(国連はスコピエ復興について都市計画の指名コンペも行い丹下健三案が当選し実行された)

当時ヤキムと通訳以外に英語を話せる人は研究所に居らず、彼とは授業後は同僚として研究所設立と維持のための事務と、研究を通してのレベル向上の具体案作成のため、共に夜遅くまで働いた。年齢は彼(1934年ユーゴのクリバ・パランカ生まれ)が4歳若かったが、体格はロシアのヒグマの如く逞しく、小柄の私の保護者のようにさえ見えた。彼の英語の口癖は

“Oh! Dr.Izumi. It is actually impossible.” であり、今思えば、私は無理な提案ばかりをしたのであろう。

我々家族のために準備されたフィンランド型の応急住宅は彼の応急住宅からも近く、家族ぐるみの付き合いもすぐ始まった。彼の美しい奥様はザグレフ出身でお子様は人形のようなお嬢様が二人、年齢も丁度我々の二人の娘と近く、彼女等はすぐ友達になった。私の娘二人は現地の幼稚園に通ったため、易々とマケドニヤ語をマスターし、子供達の間では言語の障害は無かった。

研究所は、初め蒲鉾型の小さなバラックから始まった。国連の御蔭で、日本、米国、ソ連、インドその他の国々から一流で著名な教授や研究者をユネスコ専門官として次々に招くことが出来、学生のレベルは上がった。問題は、国連は教官を派遣した機材も幾らか提供するが、建物や運営費は現地側で用意しなければならぬ点にあった。当時ユーゴスラヴィアはチトー大統領の下、修正社会主義を唱えてソ連と一線を画し各国営企業の経済自立を実行しつつあり、新設の研究所の維持・拡大は容易ではなかった。

ヤキムも私も貴重な研究時間を割いて、耐震設計のコンサルタントもした。さらに、ユネスコの機材費の殆どを当時小型ながら最高性能のコンピューター購入

につき込み当時普遍化していなかった応答計算などを研究所が一手に行い、復興事業として建設される建物の耐震安全性を検討する体制を整えて、研究所の財政面を確実なものとした。またユネスコ専門官に超多忙の服部博士（構造計画研究所社長）を三顧の礼でお迎えし、学生の中から何人かの構造のわかるソフトの専門家を育成した。

更にヤキム等は、バルカンでの地震観測網の設置と継続観測のプロジェクトも国連の事業として呼び込み、その上当時東欧での核実験検知に興味を持っていた米国の援助も引き出した。（ヤキム自身は、此の大学院で修士を得た後、学位は首都のペオグラード大学で取得したが、彼の後輩達はこのプロジェクトの御蔭で米国に留学し学位を得た。）

研究所もバラックを出て大学の一部を使用し、ヤキムをはじめとする職員の一部は大学の教授、助教授に昇進し、さらにキリヤス所長引退後、ヤキム・ペトロフスキー教授が所長となり、海外の研究者育成機関を併設し、スコピエ市の南に聳えるボドノー山の中腹に大規模な研究棟群と実験棟を建てて大研究所に成長した。規模だけでなく、内容も世界有数のレベルを誇れるようになった。

ヤキム自身も発展を遂げ続けた。研究を深め生涯で270に及ぶ論文を発表し国連や諸国政府へ約80の提案や報告書を提出し、震災低減に関する8巻の本を国連から、そして4冊の書を研究所から発刊した。また、国連関連のプロジェクトに参加し、23の事業に専門家として派遣されて世界中をとび回り、16の震災リスク低減事業の主幹を務めた。研究所長を後輩に譲り、1988～1990年にはスコピエ大学の総長となり、同時に国連事務総長の顧問として「国際災害低減10年」の計画・立案を担当した。

処で、地震帯にあっても、この地域の地震の頻度は日本などとは比較にならぬほど少ない。スコピエの復興事業が一段落した後にはこの大きくなった研究所を維持するのは大変と思われたので、特別講義の依頼を受けて研究所を訪問した折に、震災リスク低減の話題に添えて研究所の一部のインフォメーション・センターへの変身を示唆した。当時、東西冷戦の最中にあり、学術文献の橋渡しだけでも十分の需要はあった。聴衆の納得は得られたが、すぐには実行されなかった。その後チトー大統領が亡くなりユーゴは分裂し（冷戦も解消）、完全独立した小国マケドニアも大きな研究所IZIISも深刻な財政難に陥った。ヤキムは、数年前日本を訪れた際、インフォメーション・センター案に大賛成だったが、所長を辞した後であり敢えて実

行を強要しなかったことを大変後悔している、と述懐していた。

ヤキムは心臓病を病んではいたが、活動は止めなかった。（タバコは止めた。）彼は、ヨーロッパ・アカデミーの会員に選ばれ、また、国際地震学会の名誉会員となった。

私が彼と最後に会ったのは、2003年スコピエ地震40周年記念のヨーロッパ地震工学会議（於マケドニア）に出席した折りであった。昔よく訪ねたヤキムの家は、少しずつ増改築が重ねられ、平屋の応急住宅の影は全く消えて、落ちついた二階屋に変身していた。

2組の老夫婦は、昔を懐かしみ、互いの家族の現況を語り、そして将来の不安を話しあった。両家庭とも其の後長男が生まれそれぞれ3人の子持ちとなり、孫もいた。彼は昔から家族思いで子煩悩であり、御家族の話となると、厳しい研究者の顔は消え、好々爺となる。我々の将来の問題となると、先ず年金である。研究所の旧職員の年金については、ヤキムの提案で苦しい創業時代から将来に備えていたため、盛時を経てそして苦境の時代迄、十分の支払いがなされて来ていると彼は胸をはった。チトーによる企業の独立採算制の考えは、ユーゴ分裂後も年金に生きていた。当時マケドニアには内戦に備えて外国の軍隊が駐留しており、日本では経済が未だ安定していなかった。我々の会話は、『将来は厳しいが御互い健康に留意して頑張ろう』との結論で終わり、次はヤキム夫妻が日本を訪問する事を約束して別れたが、ついに実現出来なくなってしまった。

追悼文では本人の輝かしい功績を述べるが常であるが、ヤキム・ペトロフスキー教授の偉大で膨大な業績については、研究所（IZIIS）の機関誌の特集等で述べられると思われる。私は彼との思い出を語り、過ぎし日を懐かしむことで、彼の霊を慰めたい。

（注1、スコピエ大学は外国人の使う通称であり、英名は、University of Ss.Cyril and Methodius, Skopjeである。）

日本地震工学会ニュース No.135

(2007年1月15日配信)

《日本地震工学会関連のニュース》

○セミナー「分かりやすい強震動予測レシピ」

日時：平成19年2月7日(火) 10:00~17:00

会場：建設交流館 702会議室(大阪市西区立売堀2-1-2)

主催：日本地震工学会

受講料：

(1)日本地震工学会会員及び協賛各団体所属会員：
6,000円(テキスト込み)

(2)学生会員：3,000円(テキスト込み)

(3)その他一般(協賛学会に所属しない方)：8,000
円(テキスト込み)

定員：50名(先着順)

詳細・申込：<http://www.jaee.gr.jp/event.html>

○第5回日本地震工学会・大会-2007

主催：日本地震工学会

日時：2007年11月13日-15日

場所：東京大学地震研究所

投稿方法等の詳細は決まり次第またお知らせ致します。

《行事案内行事予定・論文募集(関連学協会を含む)》

○地震防災フォーラム'06

ー来るべき南海、東南海地震に備えて(4)ー

(大阪平野における長周期地震動と長周期構造物
の応答について)

主催：関西地震観測研究協議会

協賛：日本地震工学会、他

日時：2007年1月19日(金) 13:30~16:45

場所：建設交流館グリーンホール
(大阪市西区立売堀2-1-2)

参加費：5000円(学生2000円)

連絡先：関西地震観測研究協議会 事務局 溝上

E-mail:mizokami@geor.or.jp, FAX:06-6578-6254

○文部科学省21世紀COEプログラム「第10回都市地震 防災セミナー」

日時：平成19年1月26日(金) 午後2時~4時

場所：東京工業大学キャンパス・イノベーションセ
ンター 1階国際会議室(東京都港区芝浦3
-3-6)

プログラム：

1)コンクリート構造物の地震被害-新潟県中越地
震の事例から-

二羽淳一郎教授

2)災害と人間行動-ジャワ島中部地震被災者のイ
ンタビュー調査から-

大野隆造教授

参加費：無料(参加者には資料配布)

定員：100名

申し込み・問合せ先：東京工業大学都市地震工学セ
ンター

TEL:045-924-5576 FAX:045-924-5199

メール：office@cuee.titech.ac.jp

○震災対策セミナー IN神戸

主催：(財)神戸国際観光コンベンション協会、(財)
神戸市防災安全公社

後援：日本地震工学会、他

日時：2007年1月18日(木)~19日(金)

場所：神戸国際会議場(神戸市中央区港島)

詳細：<http://www.kcva.or.jp/shinsai/index.html>

○震災対策技術展

横浜会場：2007年2月1日(木)~2日(金)

パシフィコ横浜

大阪会場：2007年5月23日(水)~24日(木)

インテックス大阪

詳細：<http://www.exhibitiontech.com/etec/>

○第26回震災予防協会講演会

身近な地震・火山の学び方

ーエンターテイメントから探る防災へのヒントー

主催：(財)震災予防協会

後援：日本地震工学会、他

日時：2007年2月2日(金) 13:00~16:30

場所：パシフィコ横浜・アネックスホール

(2階203会場)(横浜市西区みなとみらい)

講師：

石黒 耀(医師・小説家)人類を造った火山：小説
「死都日本」の背景

山岡耕春(東京大学地震研究所教授)映画「日本沈没」を支える最新地球科学

小山真人(静岡大学教育学部教授)映画・文学・テーマパークで学ぶ地震と火山噴火

参加費：1000円(資料代含む)

定員：200名

(参加申し込みは、FAX、またはメールで、(財)震災予防協会事務局まで。氏名、連絡先住所、電話番号明記のこと。折り返し参加券を送付します。)

問い合わせ先：(財)震災予防協会事務局

Tel：03-3457-7453、Fax：03-3457-7076、

メール：office@aedp-jp.com

詳細：http://www.aedp-jp.com/

○文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」

震災総合シミュレーションシンポジウムin大阪

日程：2007年2月6日(火)13:00~17:00

場所：大阪大学中之島センター10Fホール

(大阪市北区中之島4-3-53)

主催：文部科学省、(独)防災科学技術研究所、大阪大学大学院

定員：100名(先着順)

参加申込締切：1月31日(水)

参加費：無料

詳細：http://www.mapse.eng.osaka-u.ac.jp/w8/sinsai/

○第56回理論応用力学講演会

主催：日本学術会議「機械工学委員会・土木工学・建築学委員会合同IUTAM分科会」

共催：日本機械学会、日本地震工学会、など

日時：2007年3月7日(水)~9日(金)

場所：日本学術会議(東京都港区六本木7-22-34)

講演申込締切：2006年10月17日(火)

詳細：http://www.jsme.or.jp/nctam/

○震度計の設置促進と震度データの利用高度化に関するシンポジウム

主催：土木学会(担当：地震工学委員会震度計の設置促進と震度データの利用高度化に関する研究小委員会)

共催：日本地震工学会

場所：土木学会講堂(東京都新宿区四谷1丁目)

日時：2007年3月16日(金)

詳細：http://www.jsce.or.jp/committee/eec2/index.html

○第1回ヨーロッパ地震工学・地震学会議の資料がダウンロードできます

昨年9月にスイス・ジュネーブで開催された第1回ヨーロッパ地震工学・地震学会議の梗概集、基調講演の資料がインターネットでダウンロードできるようになりました。

・アブストラクト

http://www.ecees.org/abstracts_book.pdf

・keynotelecturesの発表資料

http://www.ecees.org/index2.html

○6thInternationalConferenceonEarthquakeResistantEngineeringStructures

日程：2007年6月11日~13日

場所：Bologna,Italy

詳細：http://www.wessex.ac.uk/conference/2007/eres07

Abstract：現在募集中(300words以内)

FinalPaper：アブストラクトによる審査の後に全論文提出

○ニュージーランド地震工学会大会

性能設計をテーマに行われます。

日程：2007年3月30日~4月1日

全論文提出期限：2007年2月5日

URL:http://www.nzsee.org.nz/

○InternationalSymposiumonSeismicRiskReduction

日程：2007年4月26日~27日

場所：ルーマニア

概要：主催のルーマニア地震災害軽減センターは、JICAの国際協力プロジェクトの一環として建築研究所が主体的に取り組んでいるものです。来年は1977年ルーマニア地震から30周年に当たり、またこの5ヵ年プロジェクトの最終年度となることから、このシンポジウムが企画されております。是非たくさんの方々の参加を賜り、シンポジウムがより有意義なものなるように、ご協力頂ければ幸いです。

アブストラクト締切：2007年1月15日

論文提出期限：2007年3月20日

詳細：<http://cnrrs.utcb.ro/issrr2007/issrr2007.html>

○ASME（米国機械学会）Pressurevesselsandpipingdivi
sionconference2007

日程：2007年7月22日－26日

場所：SanAntonio,Texas,US

詳細：<http://www.asmeconferences.org/pvp07/>

アブストラクト締切：2006年12月4日

論文提出期限：2007年4月16日

○環太平洋地震工学会議（The8thPacificConferenceon
EarthquakeEngineering）

主催：ニュージーランド地震工学会

日程：2007年12月5日－7日

場所：シンガポール

詳細：<http://www.ntu.edu.sg/cee/8PCEE/>

アブストラクト締切：2007年2月1日

論文提出期限：2007年6月中旬

○その他の行事等は下記のページをご覧ください。

<http://www.jaee.gr.jp/event.html>

JAEENEWSのバックナンバーは

http://www.jaee.gr.jp/old/back_number/index.html

で御覧いただけます。

JAEENEWSへのお問い合わせ・ご意見はadmin-
n@news.jaee.gr.jpにお寄せください。

入会・資料等の問い合わせは

事務局 (office@general.jaee.gr.jp, 電話：03-5730-2831,

FAX：03-5730-2830) にお寄せください。

日本地震工学会論文集 第6巻・第4号

Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol.6, No.4

[<http://www.jaee.gr.jp/old/submit-j/v06n04/mokuji.html>]

目 次 Index of the Journal

- | 1 論文集編集委員会から | 本会論文編集委員会 | |
|---|---|---------|
| (論文) | | |
| 2 磁気異方性センサを用いた曲管の発災後残留応力の非破壊診断
Non-destructive Diagnosis of Residual Stress in Bent Pipe
After an Earthquake Using the Magnetic Anisotropy Sensor | 飯村正一
IIMURA Shoichi | 1-18 |
| 3 2004年新潟県中越地震における免震建築物の対地震性能に関する建築物利用者へのアンケート調査
QUESTIONNAIRE SURVEY TO INHABITANTS' IMPRESSION ON PERFORMANCE OF SEISMICALLY ISOLATED BUILDINGS IN THE 2004 MID NIIGATA EARTHQUAKE | 小豆畑達哉、飯場正紀、井上波彦、
緑川光正
T. Azuhata1, M. Iiba, N. Inoue
And M. Midorikawa | 19-37 |
| 4 ファイバー要素を用いた数値解析による場所打ち杭基礎の変形性能評価
Numerical Estimation on Ductility Capacity of Drilled Shaft Foundations Using Fiber Elements | 白戸真大、福井次郎、中谷昌一
SHIRATO Masahiro, FUKUI Jiro,
and NAKATANI Shoichi | 38-54 |
| 5 減衰が地盤の地震応答解析にあたえる影響と精度
Effect of damping on earthquake response of ground and its accuracy | 吉田望、澤田純男、中村晋
YOSHIDA Nozomu, SAWADA
Sumio, NAKAMURA | 55-73 |
| 6 地質構造形成史を考慮した3次元地質構造の簡便なモデル化
—新潟県中越地方南部の地震空白域を例として—
Modeling of a Three-Dimensional Geological Structure with Constraints of Geotectonic History: Application to a Seismic Gap Region South of the 2004 Mid Niigata Earthquake | 長郁夫、西開地一志、柳沢幸夫、
長谷川功、桑原保人
CHO Ikuo, NISHIKAICHI
Kazushi, YANAGISAWA
Yukio, HASEGAWA Isao and
KUWAHARA suto | 74-93 |
| 7 強震動予測のための高域遮断フィルターに関する研究 —
1995年兵庫県南部地震の観測記録に基づく検討—
Study on a high-cut filter for strong ground motion prediction - Based on the observed records during the 1995 Hyogo-ken Nambu Earthquake - | 鶴来雅人、香川敬生、岡崎敦、羽
田浩二、入倉孝次郎
TSURUGI Masato, KAGAWA
Takao, OKAZAKI Atsushi,
HADA Koji, and IRIKURA Kojiro | 94-112 |
| 8 広帯域強震動評価のための堆積層深部地盤速度構造のモデル化
—大阪堆積盆地のサイト増幅スペクトルに着目して—
Modeling of Deep sedimentary Velocity Structure for Evaluation of Broadband Strong Ground Motions: Site-Amplification Spectra in Osaka Sedimentary Basin | 長郁夫、鶴来雅人、香川敬生、岩
田知孝
CHO Ikuo, TSURUGI Masato,
KAGAWA Takeo and IWATA
Tomotaka | 113-132 |

年間カレンダー

日本地震工学会 主催・共催・関連団体行事予定一覧

2007年1月現在

<主催行事>

日 程	行 事 名	開催場所
2007年2月7日	セミナー 分かりやすい「強震動予測レシピ」	大阪：建設交流館
11月13日～15日	第5回日本地震工学会・大会—2007	東京：東京大学 地震研究所

<共催／後援の行事>

2007年 2月1日～2日	第11回「震災対策技術展／自然災害対策技術展」横浜	横浜：パシフィコ横浜
2月2日	身近な地震・火山の学び方 —エンターテイメントから探る防災へのヒント—	横浜：パシフィコ横浜
2月9日	第10回地震防災技術懇話会	東京：土木会館
2月14日	地震に強い道路橋設計講習会	仙台
3月1日	地震に強い道路橋設計講習会	札幌
3月7～9日	第56回理論応用力学講演会	東京：日本学術会議
3月16日	震度計の設置促進と震度データの利用高度化に関するシンポジウム	東京：土木会館

<関連団体行事>

2007年 3月5日～6日	第4回都市地震工学国際会議	東京：東工大 大岡山キャンパス
3月30日～4月1日	ニュージーランド地震工学会大会	ニュージーランド
5月14～16日	Fifth International Conference on Seismology and Earthquake Engineering	イラン
6月13～15日	Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering	ギリシャ
6月27～29日	9th Canadian Conference on Earthquake Engineering	カナダ：オタワ
7月22～26日	ASME（米国機械学会）Pressure vessels and piping division conference 2007	アメリカ：テキサス
7月31日～8月3日	10th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering	東京：東大 柏キャンパス
9月25～26日	The First International Conference on Risk Analysis and Crisis Response(RACR07)	中国：上海
2008年 10月12～17日	The 14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE)	中国：北京

「<http://research.jaee.gr.jp/event.html>」

下記の企業・団体は日本地震工学会の法人会員として、地震工学の発展に貢献されています

日本地震工学会 会長 大町 達夫

【特級】

(建設)

鹿島建設株式会社
清水建設株式会社
大成建設株式会社
(電気・ガス・鉄道・道路)
関西電力株式会社
東京電力株式会社
(各種団体)
社団法人プレハブ建築協会

【A級】

(建設)

株式会社大林組
株式会社奥村組
小田急建設株式会社
株式会社熊谷組
株式会社竹中工務店
戸田建設株式会社
(設計・コンサルタント)
株式会社阪神コンサルタンツ
(電気・ガス・鉄道・道路)
四国電力株式会社
中部電力株式会社
電源開発株式会社
東北電力株式会社
東日本高速道路株式会社
(各種団体)
社団法人静岡県建築設計事務所協会
社団法人土木学会
社団法人日本建築学会
財団法人日本建築センター
社団法人文教施設協会

【B級】

(建設)

株式会社浅沼組
安藤建設株式会社
東亜建設工業株式会社
東急建設株式会社

飛鳥建設株式会社
株式会社間組
(設計・コンサルタント)

株式会社建設技術研究所大阪本社
ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社
中央復建コンサルタンツ株式会社
株式会社社長大
株式会社東京建築研究所
東電設計株式会社
株式会社ニュージェック
ビューローベリタスジャパン株式会社
(電気・ガス・鉄道・道路)

九州電力株式会社
中国電力株式会社
日本原子力発電株式会社
東日本旅客鉄道株式会社
北陸電力株式会社
北海道電力株式会社
(官公庁・公団・公社)

国土交通省国土技術政策総合研究所
独立行政法人防災科学技術研究所
(各種団体)

危険物保安技術協会
社団法人建築業協会
社団法人日本水道協会
全国建設労働組合総連合
社団法人全国地質調査業協会連合会
損害保険料率算出機構
財団法人電力中央研究所
財団法人日本建築防災協会
(建材・システムなど)

株式会社エヌ・ティー・エス
ジャパンシステムサービス株式会社
東京鉄鋼株式会社
白山工業株式会社

【C級】

(建設)

五洋建設株式会社
東洋建設株式会社

株式会社福田組
株式会社本間組
真柄建設株式会社
(設計・コンサルタント)

株式会社N T Tファシリティーズ
株式会社大崎総合研究所
基礎地盤コンサルタンツ株式会社
株式会社構造計画研究所
ジェイアール西日本コンサルタンツ株式会社
株式会社システムアンドデータリサーチ
株式会社篠塚研究所
株式会社スリーエーコンサルタンツ
株式会社ダイヤコンサルタント
財団法人地域地盤環境研究所
株式会社日建設計
株式会社三菱地所設計
株式会社安井建築設計事務所
(電気・ガス・鉄道・道路)

東邦ガス株式会社
(官公庁・公団・公社)
独立行政法人港湾空港技術研究所
(各種団体)

財団法人愛知県建築住宅センター
財団法人大阪建築防災センター
社団法人高層住宅管理業協会
構造調査コンサルティング協会
財団法人国土技術研究センター
財団法人ダム技術センター
千葉県耐震判定協議会
社団法人日本クレーン協会
社団法人日本ガス協会
社団法人日本建築構造技術者協会
財団法人日本建築設備・昇降機センター
財団法人日本建築総合試験所
社団法人日本ボイラ協会
社団法人日本免震構造協会
日本木造住宅耐震補強事業者協同組合
(建材・システムなど)

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社
エイム株式会社



日本地震工学会のご案内

1. 日本地震工学会の目的

我が国は、世界でも有数の地震国であり、古くから世界をリードする地震学ならび耐震技術に関する学問や技術開発が行われてきました。ところが、これらの活動は、これまで、建築、土木、地盤、地震、機械等の分野に分かれて行われてきており、地震工学としてまとまった活動を行う学会がありませんでした。しかし、たとえば1995年兵庫県南部地震による被害を見ても明らかなように、大都市の耐震性を向上させるためには、関連した各分野の研究者や実務者が協力して、問題解決に当たる必要があります。

このようなことから、2001年1月1日に日本地震工学会が発足しました。日本地震工学会の目的は、地震工学の進歩および地震防災事業の発展を支援し、もって学術文化と技術の進歩と地震災害の防止と軽減に寄与することにあります。

2. 日本地震工学会はどのような分野を対象としているか

日本地震工学会は、これまでの地震工学関係の研究者や技術者のみならず、地震そのものや地震による災害に関わるあらゆる分野の人々にとって有益な交流の場となるものであります。したがって、これまでに耐震工学に関わってきた人々は勿論のこと、行政や公益事業に関わる人々、あるいは地域計画や心理学などの人文・社会科学に関する研究者、さらには医療関係者など、地震による災害に関わりのある分野を対象としています。

日本地震工学会が対象とする分野はこのように大変幅広いものですが、これをもう少し具体的に示すと、地震動や活断層の工学的評価、建築物、道路・鉄道施設、電力・上下水道・ガス・通信等のライフライン施設、地盤・土構造物、河川施設、港湾施設、機械施設等多岐にわたる施設・構造物の地震前の耐震化、地震時の機能維持、地震後の復旧などのほか、国や自治体の地震防災対策、地域防災計画、地震危険度評価、発災後の対応、医療対策、震災時の救援救急システム、震後復興、地震災害調査と分析、さらには国際的な震災軽減の技術的支援、地震防災教育などの分野となります。

3. 日本地震工学会はどのような活動を行うか

日本地震工学会は、電子メディアを活用して充実した論文集を効率的に会員の皆さんにお届けするほか、会員の皆様にインタラクティブな情報交換の場を提供します。また、年次学術講演会などの定期的な研究発表会の開催、地震工学・地震防災関連の講習会や研修会の開催、調査・研究プロジェクトの指導・推進、新技術の評価、耐震基準の開発・普及、技術者の生涯教育支援、地震防災施策の提言、地震工学・地震防災分野における国際交流ならびに国際貢献を担う活動、地震工学の広い分野が連携した地震災害調査とその成果の公表、などを行っています。

4. 日本地震工学会はどのような組織か

日本地震工学会は、会員の会費に支えられた任意団体として活動を行っています。活動の充実とともに、将来は法人格をもった団体に発展させます。

会則、学会組織、役員、最近の活動状況などの詳しい情報は下記の日本地震工学会のホームページをご覧ください。

<http://www.jaee.gr.jp/>

事務局 〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館 日本地震工学会

E-mail : office@general.jaee.gr.jp、Tel : 03-5730-2831、Fax : 03-5730-2830

5. 歴代会長

- | | | | | | |
|--------|------|--------|-------|--------|------|
| ・初代会長 | 青山博之 | ・第二代会長 | 岡田恒男 | ・第三代会長 | 土岐憲三 |
| ・第四代会長 | 石原研而 | ・第五代会長 | 入倉孝次郎 | ・第六代会長 | 小谷俊介 |
| ・現会長 | 大町達夫 | | | | |



日本地震工学会 入会案内

日本地震工学会は、これまでの地震工学関係の研究者や技術者のみならず、地震そのものや地震による災害に関わるあらゆる分野の人々にとって有益な交流の場となるものであります。したがって、これまでに耐震工学に関わってきた人々は勿論のこと、行政や公益事業に関わる人々、あるいは地域計画や心理学などの人文・社会科学に関する研究者、さらには医療関係者など、地震による災害に関わりのある分野の方々を対象としています。

▼ 申込方法

個人会員（正会員・学生会員）用及び法人会員用の申込書（PDF ファイル）は、ホームページ（<http://www.jaee.gr.jp/>）からダウンロードすることができます。必要事項を直接記入して、事務局に郵送もしくはファックスするか、Adobe Acrobat で必要項目を記入して保存し、そのファイルを電子メールに添付して事務局にお送りください。

事務局 〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館 日本地震工学会
E-mail : office@general.jaee.gr.jp、Tel : 03-5730-2831、Fax : 03-5730-2830

▼ 年会費

◇会費種別と年会費				◇年度途中入会の年会費		
会員種別	会費	入会金		入会の申込日	正会員	学生会員
正会員	10,000円	1,000円		3～5月	10,000円	3,000円
学生会員	3,000円	なし		6～8月	7,500円	2,250円
法人会員	特級	200,000円以上	なし	9～11月	5,000円	1,500円
	A級	100,000円	なし	12～2月	2,500円	750円
	B級	50,000円	なし	*法人会員は年度途中入会でも通年の会費を納めて頂きます。		
	C級	20,000円	なし			

▼ 一般規則で定める会員資格

【正会員の資格】

地震工学・地震防災の分野に関する学歴・経験をもつ個人で次の各号の一つに該当する者。

- (1) 大学を卒業した者
- (2) 高等専門学校または同程度以上の学校を卒業し、実務経験を持つ者
- (3) 高等学校を卒業し、実務経験を持つ者
- (4) 上記の分野以外を専門とする者または外国の学校を卒業した者の正会員としての資格は前各号に準じ、かつ、この会の目的に寄与するに必要な学識経験を持つ者
- (5) その他理事会で、前各号と同等以上の資格ありと認められた者

【学生会員の資格】

地震工学あるいは地震防災に関連する学術・技術を学ぶため、大学院、大学、専門学校、高等学校およびこれに準ずる学校に在学中の個人

【法人会員の資格】

地震工学あるいは地震防災およびこれらに関連する次の事業を営む法人等とする。

- (1) 建設業、建設設計業、建設コンサルタント、建材業、その他これらに準ずるもの
- (2) 製造業、公益事業、報道・情報事業、保険業、その他これらに準ずるもの

▼ 入会の承認と資格の発効

入会申込書受理後、理事会の審査を経て入会が承認されます。理事会の審査は入会申込書受理月の翌月に行われます。なお、理事会での入会承認後に、会員証と会費請求書が送付されます。

会員としての効力は、正会員にあっては入会金および会費を、学生会員および法人会員にあっては会費を納めたときに生じます。

▼ 会員の特典

【正会員・学生会員】

1. 役員の選挙権と被選挙権を持ちます。(正会員のみ)
2. 総会における議決権をもち、総会に出席して意見を述べるができます。(正会員のみ)
3. 日本地震工学会「JAEE NEWS」のメール配信を受けられます。
4. 日本地震工学会のホームページから「地震工学論文集」を閲覧・入手できます。
5. 日本地震工学会「JAEE NEWS」や「コラム」への投稿ができます。(ただし、掲載の可否および掲載号については当会に一任させていただきます。)
6. 日本地震工学論文集に論文発表ができます。(ただし、審査があります。)
7. 日本地震工学研究発表・討論会で論文発表ができます。
8. 研究発表会、講習会、講演会、見学会等に会員割引で優先的に参加できます。
9. 委員会に委員として参加する資格が得られます。

【法人会員】

1. 正会員・学生会員の上記特典のうち「5.」、「6.」、「7.」を除く特典。ただし、法人会員には被選挙権はありません。
2. その他に次の特典があります。

特 典 内 容	法人会員種別			
	特級	A級	B級	C級
講習会等の行事に会員会費で参加できる人数	12人	6人	3人	1人
地震工学会誌への広告の割引掲載	掲載箇所等については当会に一任させていただきます。			
研究発表会等の催し物会場でのパンフレット配布	制限のある場合もあります。			
学会ホームページと法人会員ホームページとのリンク	法人会員リンク集を掲載します。			
法人会員のイベント情報等の学会ホームページへの掲載	掲載の時期、掲載箇所等については当会に一任させていただきます。			

編集後記：

今号の地震工学会誌では、原子力発電所の耐震設計に関する特集を企画しました。これは、昨年9月に「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」が改訂されたので、この機会にわが国の原子力発電所施設の耐震設計技術の全貌を分かりやすく纏めておこう、という趣旨によるものです。原子力安全委員会・耐震指針検討分科会の主査として今回の指針改訂を取りまとめられた東京大学名誉教授青山博之先生をはじめとして、指針の改訂に携わられた諸先生や耐震設計の実務に明るい方々に原稿執筆を頂き、読み応えのある特集になりました。年末の多忙な時期にもかかわらず原稿執筆をご快諾頂いた著者の皆様に、誌上をお借りしてお礼申し上げます。

会誌編集委員会では、分野横断的なトピックスを取り上げるなど、日本地震工学会らしさを活かした特集のありかたを検討しております。また、学会の諸活動に関する情報提供の面でも記事の充実を図りたいと考えております。会誌への要望や記事、特集のアイデアなどがございましたら、是非お寄せください。

日本地震工学会会誌編集委員会委員長 森下 正樹（日本原子力研究開発機構）
同幹事 古屋 治（東京都立産業技術高等専門学校）

編集委員

委員長	森下 正樹	日本原子力研究開発機構	幹事	古屋 治	東京都立産業技術高等専門学校
委員	大保 直人	鹿島建設	委員	五十田 博	信州大学
委員	三宅 弘恵	東京大学地震研究所	委員	中瀬 仁	東電設計

日本地震工学会誌

2007年 1月31日発行

編集・発行 日本地震工学会
〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館
TEL 03-5730-2831 FAX 03-5730-2830