平成24年(ワ)第328号、平成25年(ワ)第59号 志賀原子力発電所運転差止請求事件

原 告 北野進 外124名

被 告 北陸電力株式会社

第14準備書面

(原発の耐震設計 ~総論~)

平成25年9月日

金沢地方裁判所民事部合議 В 1 係 御中

原告ら訴訟代理人弁護士 岩 淵 正 明

外

目 次

- 第1章 はじめに
- 第2章 現行の耐震設計審査指針
- 第3章 地震動評価の手法 (総論)
 - 第1 地震現象の基礎
 - 1 地震とはどのような現象か
 - 2 大地震がもたらす諸現象
 - 3 地震はなぜ起こるか
 - 4 地震の種類
 - 第2 活断層とは何か
 - 第3 耐震設計の基礎
 - 1 地震の大きさ

- 2 地震動の大きさ
- 3 小括
- 第4 地震動の性質
 - 1 振動の基本的な性質
 - 2 地震動の諸性質
 - 3 周期特性とスペクトル
- 第5 地震動の破壊力
 - 1 地震動と建築物
 - 2 固有周期
 - 3 共振現象
 - 4 実際の地震動と建物の共振
 - 5 応答スペクトル
 - 6 地震動と応答スペクトル
 - 7 耐震設計
 - 8 より詳細な耐震設計
 - 9 物の破壊による固有周期の変化

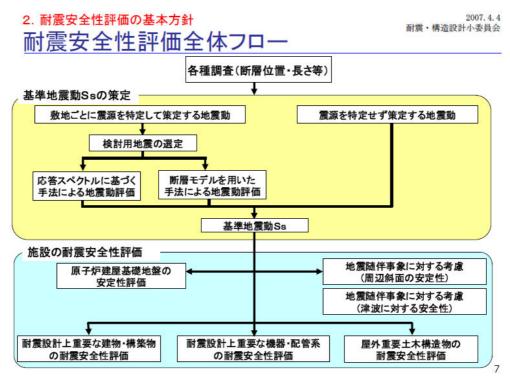
第4章 おわりに

第1章 はじめに

平成25年7月8日、原子力規制員会が新たに策定した新規制基準が施行された。 本準備書面では、新規制基準の地震に関する規定を理解するための基本的知識について述べる

第2章 新規制基準の内容

これまで、原発の耐震設計は以下のような流れで行われていた。



「浜岡原子力発電所3、4号機『発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針』の改定に伴う耐震安全性評価結果の報告について」H19.4.4

原発の耐震設計について、これを大きく分けると次のように分けることができる。

- ① 断層位置や長さ等の各種調査
- ② 基準地震動 S s を策定(上図の上段黄色部分)
- ③ (基準地震動 S s に基づく) 施設の耐震安全性評価(上図の下段水色部分)

原発の安全性を確保するためには、将来起こる可能性のある最大の地震(ないし地震動・強震動)を予測し、それに対して構造物が破壊されないように設計しなければならない。ここにいう「将来起こる可能性のある最大の地震(ないし地震動・強震動)」が基準地震動Ssにあたる。基準地震動Ssの策定にあたっては、断層位置や長さ等の各種調査を行う必要があるが、それだけでは不十分である。また、構造物を建設する地点で将来起こる地震の記録は得られておらず、将来起こると予想される地震の記録と同様の性質を有する地震の記録が得られている場合もほとんどない。そこで、将来起こる地震の当該地点での強震動をシミュレーションによって予測することが必要となる(甲B164「地震の揺れを科学する」133頁)。

構造物が破壊されないように設計するためには、構造物を数値的なモデルで表し、 構造物と地盤が接している部分に入力する地震動(入力地震動)を用意し、その地 震動を受けた構造物がどのような挙動を示すかシミュレーションする必要がある。

平成25年7月8日に新規制基準が施行されたが、基本的な部分に変更はない。 新規制基準(実用発電用原子炉及びその付属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則、甲B165)の地震に関する規定は以下のとおりである。

(地震による損傷の防止)

第四条

設計基準対象施設は、地震力に十分に耐えることができるものでなければならない。

- 2 前項の地震力は、地震の発生によって生ずるおそれがある設計基準対象施設の 安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度に応じて算定しなけ ればならない。
- 3 耐震重要施設は、その供用中に当該耐震重要施設に大きな影響を及ぼすおそれ がある地震による加速度によって作用する地震力(以下「基準地震動による地震 力」という。)に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければなら

ない。

4 耐震重要施設は、前項の地震の発生によって生ずるおそれがある斜面の崩壊に 対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。

そして、上記規定の解釈は以下のとおりである(甲B165)。なお、下線部分は引用者による。

- 5 第4条第3項に規定する「基準地震動」は、最新の科学的・技術的知見を踏ま え、敷地及び敷地周辺の地質・地質構造、地盤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想定することが適切なものとし、次の方針により策定す ること。
 - 一 <u>基準地震動は、「敷地ごとに震源を特定せず策定する地震動」及び「震源を</u> <u>特定せず策定する地震動」について、解放基盤表面における水平方向及び鉛直</u> 方向の地震動としてそれぞれ策定すること。

上記の「解放基盤表面」とは、基準地震動を策定するために、基盤面上の表層及び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、ほぼ水平で相当な拡がりを持って想定される基盤の表面をいう。ここでいう上記の「基盤」とは、おおむねせん断波速度Vs=700m/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。

二 上記の「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」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について、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。)を複数選定し、選定した検 討用地震ごとに、不確かさを考慮して応答スペクトルに基づく地震動評価及び 断層モデルを用いた手法によって地震動評価を、解放基盤表面までの地震波の 伝播特性を反映して策定すること。

上記の「内陸地殼内地震」とは、陸のプレートの上部地殼地震発生層に生じ

る地震をいい、海岸のやや沖合で起こるものを含む。

上記の「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。

上記の「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、海溝軸付近又は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」または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。

なお、上記の「敷地ごとにしんげんを特定して策定する地震動」については、 次に示す方針により策定すること。

- ① 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について、活断 層の性質や地震発生状況を精査し、中・小・微笑地震の分布、応力場、及び 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し、検討用地震を複数選定すること。
- ② 内陸地殻内地震に関しては、次に示す事項を考慮すること
 - i) 震源として考慮する活断層の評価に当たっては、調査地域の地形・地質条件に応じ、既存文献の調査、変動地形学的調査、地質調査、地球物理学的調査等の特性を活かし、これらを適切に組み合わせた調査を実施した上で、その結果を総合的に評価し活断層の位置・形状・活動性等を明らかにすること
 - ii) 震源モデルの形状及び震源特性パラメータ等の評価に当たっては、孤立した短い活断層の扱いに留意するとともに、複数の活断層の連動を考慮すること。
- ③ プレート間地震及び海洋プレート内地震に関しては、国内のみならず世界で起きた大規模な地震を踏まえ、地震の発生機構及びテクトニクス的背景の類似性を考慮した上で震源領域の設定を行うこと。
- ④ 上記①で選定した検討用地震ごとに、下記 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を実施して 策定すること。なお、地震動評価に当たっては、敷地における地震観測記録 を踏まえて、地震発生様式及び地震波の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。

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、これに対して、地震の規模及び震源距離等に基づき地震動の継続時間及び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震源特性パラメータを設定し、 地震動評価を行うこと。
- ⑤ 上記④の基準地震動の策定過程に伴う各種の不確かさ(震源断層の長さ、 地震発生層の上端深さ・下端深さ、断層傾斜角、アスペリティの一・大きさ、 応力降下量、破壊開始点等の不確かさ、並びにそれらに係る考え方及び解釈 の違いによる不確かさ)については、敷地における地震動評価に大きな影響 を与えると考えられる支配的なパラメータについて分析した上で、必要に応 じて不確かさを組み合わせるなどの適切な手法を用いて考慮すること。
- ⑥ 内陸地殼内地震について選定した検討用地震のうち、震源が敷地に極めて近い場合、地表に変位を伴う断層全体を考慮した上で、震源モデルの形状及び位置の妥当性、敷地及びそこに設置する施設との位置関係、並びに震源特性パラメータの設定の妥当性について詳細に検討するとともに、これらの検討結果を踏まえた評価手法の適用性に留意の上、上記⑤の各種の不確かさが地震動評価に与える影響をより詳細に評価し、震源の極近傍での地震動の特徴に係る最新の科学的・技術的知見を踏まえた上で、さらに十分な余裕を考慮して基準地震動を策定すること。

- ⑦ 検討用地震の選定や基準地震動の策定に当たって行う調査や評価は、最新 の科学的・技術的知見を踏まえること。また、既往の資料等について、それ らの充足度及び精度に対する十分な考慮を行い、参照すること。なお、既往 の資料と異なる見解を採用した場合及び既往の評価と異なる結果を得た場合 には、その根拠を明示すること。
- ⑧ 施設の構造に免震構造を採用する等、やや長周期の地震応答が卓越する施設等がある場合は、その周波数特性に着目して地震動評価を実施し、必要に応じてほかの施設とは別に基準地震動を策定すること。
- 三 上記の「震源を特定せず策定する地震動」については、次に示す方針により 策定すること。
 - ① 解放基盤表面までの地震波の伝播特性を必要に応じて応答スペクトルの設 定に反映するとともに、設定された応答スペクトルに対して、地震動の継続 時間及び振幅包絡線の経時的変化等の地震動特性を適切に考慮すること。
 - ② 上記の「震源を特定せず策定する地震動」として策定された基準地震動の 妥当性については、申請時における最新の科学的・技術的知見を踏まえて個 別に確認すること。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、<u>各種の不確かさを考</u> 慮した評価を参考とすること。

以上をまとめると、基準地震動の策定過程では敷地付近の各種調査を基礎として

- ① 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」について、地震動評価の手法である「応答スペクトルに基づく手法」による地震動評価
- ② 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」について、地震動評価の手法である「断層モデルを用いた手法」による地震動評価
- ③ 「震源を特定せず策定する地震動」
- の3つに分けて検討されている。そして、それぞれに対して「不確かさ(ばらつ

き)」を考慮することが求められている。

原発の耐震設計における最終的な争点は、これらの手法によって策定された基準 地震動が過小であり、原発の耐震安全性が確保されていないということにある。

ただし、この結論を理解していただくためには、その前提として基準地震動が策定される過程、すなわち上記①~③の各手法を理解することが必要となる。そして、これを理解するためには、地震と地震動、地震動が建物に与える影響(応答スペクトル)についての基本的な理解が不可欠である。

そこで、第2章では、これらの耐震設計の基本的な考えについて述べる。

第3章 地震動評価の手法の総論

本章では、地震及び耐震設計の基本的な考え方について述べる。本章における記述は、神戸大学名誉教授の石橋克彦氏の陳述書(甲B23)、山中浩明編著「地震の揺れを科学するーみえてきた強震動の姿」(甲B165)及び大崎順彦著「地震と建築」(甲B166)に基づいている。

第1 地震現象の基礎

- 1 地震とはどのような現象か(甲B23・4~6頁)
 - (1) 地震とは地下の岩盤が面状にズレ破壊して地震波を放出する現象

日常生活において「地震」とは、地面の揺れを意味することが多いが、地震学では、揺れの原因となる地下の岩石破壊のことを「地震」という。

つまり、地下の岩石が破壊されて地震波(岩石の振動が猛スピードで地球 内部を伝わっていく波)を放出する現象を「地震」と呼び、地震波が地表に 達して地面が揺れるのを「地震動」と呼び、二つの現象を区別して捉える。

地震はある特定の地点(震源域)で発生するものであり、その大きさは1 つの決まった値である。これに対して地震動は、同一の地震であっても、それを観測する地点によってその大きさは全く異なる。遠くで地震が起きた場 合は、揺れ(地震動)は小さいが、近くで地震が起きた場合は、揺れ(地震動)は大きい。地下の岩石破壊(すなわち地震)の規模を表わす尺度が「マグニチュード(M)」で、地表の各地点の地震動の強さを示す目安が「震度」である(なお、マグニチュードについては、本準備書面15頁で後述する)。地震については、地下のどのようなタイプの岩石破壊であるのかかが重要となり、ほぼすべての地震は、面状のズレ破壊というタイプの破壊をする。つまり、破壊面が急激に拡大しながら、その両側の岩盤が互いに逆向きに激しくズレ動くという形の破壊をする。それに伴って、破壊の衝撃が地震波として四方八方に放出される。ズレ破壊はどこか一カ所から始まって拡大するが、その出発点を「震源」という。

ズレ破壊が終わると地下に破壊面が出来ているが、これが地震の本体であり、「震源断層面」と呼ぶ。「地震の本体、あるいは本源は、地下の震源断層面だ」ということは、最も本質的で非常に重要なことである。

なお、震源断層面が広がっている地下の領域、あるいはそれに対応する地 表の範囲を大まかにさすときは「震源域」という言葉を使う。また、震源断 層面に沿う急激なズレを、「くい違い」とか「すべり」ということもある。

(2) 強い固着域(アスペリティ)が激しい地震波を形成する(甲B23・7頁) 大地震はほとんどすべてにおいて、いわば地下の古傷がまた破壊されるの だが、地震前に特に強く固着していた部分が何カ所かあり、震源から始まっ たズレ破壊はその部分で跳び跳びに激しく進行する。当該部分を「アスペリ ティ」と呼ぶ。いくつかの強い固着域であるアスペリティが次々に大きくズ レ破壊して、そのときに特に激しく地震波を放出する。

2 大地震がもたらす諸現象

(1) 岩盤のズレの直撃 (甲B23・9頁)

地下で大規模な岩石破壊(つまり大地震)が起こると、第一に、その岩盤のズレ(破断)が直撃するという現象をもたらす。つまり、地下の震源断層

面が地表近くまで達すると、人間の造った構造物を破断してしまうことが起 こりうる。

震源断層面が地表にまではっきり顔を出せば、道路や川筋が横にずれたり 段差が出来たりといったことが、何km(ときには何十km)にもわたって 線状に生じる。これを、その地震に伴って現われた「地表地震断層」と呼ぶ。

(2) 地震波と地震動 (甲B23・9~10頁)

地震がもたらす現象の二つ目としては、「地震波」が挙げられる。これは、 地下の岩盤のズレ破壊の衝撃が岩石の振動となって、地球内部を猛スピード で四方八方に伝わっていくものである。地震が大きいと地震波のエネルギー も強大なので、地球全体に届いて地震計に記録され、近くの地面に達すれば 非常に強い地震動(強震動)をもたらす。

(3) 広範囲の岩盤の変形と応力変化(甲B23・10頁)

地震がもたらす現象の三つ目としては、広範囲の岩盤が変形して、岩盤中の至る所にかかっている力(応力という)が変化するという現象がある。これは、ズレ破壊が完了し、地震波の放出が終わり、地面の揺れが収まったあとも、震源断層面に沿って岩盤がくい違ってしまった結果として、永久に残る。この現象は、逆に言えば、地震前に広範囲の岩盤が無理な変形と高い応力の状態に置かれていたが、大地震によって解消されたということである。

変形は震源断層面に近いところほど大きく、震源域に近い地表では、地表地震断層が現れなくても、隆起・沈降や水平移動が生じる。これを、「地震時の地殻変動」という。海岸付近で大地震が起こると、海岸が1m以上も隆起したり沈降したりすることが稀ではない。そういう隆起・沈降が海底の広い範囲で生ずると、海水を持ち上げたり引き込んだりするため、津波が発生する。

3 地震はなぜ起こるか

(1) 岩石圏内の弱面が造構力によって破壊する(甲B23・11~12頁)

地球表面は、厚さが平均して100km程度の岩石の層、すなわち固いけれども脆くて、無理な変形が限界に達するとズレ破壊するような岩石の層で覆われている(岩石層という)。岩石圏は、何百万年も昔からあちこちで破壊を繰り返しており、古傷だらけである。特に日本列島は、その程度が甚だしい場所である。何度も破壊を繰り返してきた古傷を弱面という。

日本付近の岩石圏には、絶えず「造構力」という力が働いている。これは、 地球表層の大規模な構造(大山脈や深い海といった大地形や大きな地質構造 など)を造る力のことである。

弱面といっても、ふだんは固着している。そこに造構力が働き続けると、 弱面の周りの岩石圏が徐々に変形していく。変形に伴って、弱面沿いに「剪 断(せんだん)応力」という力が生じる。これは、弱面に沿ってズレ破壊を 生じさせて変形を解消させようとするような、ずらそうとする力である。

岩石圏の場所によって違うが、何百年か何千年か経つと、変形は一層大きくなり、それに応じて剪断応力も増大する。そして、剪断応力が弱面の固着力に打ち勝つと、弱面がズレ破壊して大地震が起こり、弱面周辺の変形が解消されるとともに地震波が放出される。より正確には、弱面上の主要なアスペリティに働く剪断応力がそこでの固着力に達したとき、地震が発生することになる。縮めたバネが物を跳ね飛ばすエネルギーを蓄えるように、変形した岩盤は、ズレ破壊を生じて変形を元に戻す莫大なエネルギーをもっている。

(2) 造構力の原因(甲B23・12頁)

地球全体の岩石圏が十何枚かの区画に分かれていて、互いに力を及ぼし合っているために、岩石圏に造構力が働いている。それぞれの区画のことを一般的に「プレート」と呼び、個々のプレートには固有の名前が付けられている。各プレートは、年間1~10cm程度の非常にゆっくりした速さだが、それぞれ決まった向きに着実に動いており、プレート同士がぶつかったり、すれ違ったりしている。その結果、造構力がプレート同士の境界付近では特に

大きく、またプレートの内部にもある程度、絶え間なく働くことになる。

(3) 日本列島周辺のプレート (甲B23・13~14頁)

日本列島は、4枚のプレートが互いに近づき合っているところで、地球上において造構力が強くて造構運動が活発なところの一つである。

日本列島は陸のプレートに載っているが、東から太平洋の海底を構成する太平洋プレートという大岩板が、年間8cm位の速さで西北西の向きに押し寄せている。陸のプレートと海洋底のプレートが近づき合うと、密度が多少違うために、一般に海洋プレートが陸のプレートの下に無理矢理入っていく「海洋プレートの沈み込み」という現象が起こるのだが、それが千島海溝、日本海溝、伊豆・小笠原海溝という、深さ1万m近い海底の細長い溝のところで起こっている。プレートの下には、やや流動的な岩石の層が厚く存在しているので、沈み込んだ海洋プレートはその中に斜めに入っていく。

一方、伊豆・小笠原海溝から西の太平洋の海底は、フィリピン海プレートと呼ばれる別のプレートで、それがほぼ北西向きに年間3~4cmの速さで押し寄せている。関東地方から西の列島の沖には、海溝ほど深くはないが、相模トラフ、駿河トラフ、南海トラフと呼ばれる海底の溝が走っていて、フィリピン海プレートはそこで沈み込んでいる。

これら太平洋プレートの東北日本の下への沈み込みと、フィリピン海プレートの関東地方と西南日本の下への沈み込みが、日本列島の地震の起こり方を支配している基本的な条件である。

このようなプレートの運動の結果、日本列島では大地震が頻発する。また、 地震だけではなく、火山の噴火や大山脈の成長なども、プレートの境目に集 中して生じている。プレートの運動を知って地球表層面の変動を理解する地 球科学の理論のことを「プレートテクトニクス」という。

4 地震の種類

(1) プレートテクトニクスの枠組で見ると、地震は四つの類型に分けられる。

まず、プレート同士の境目で起こる「プレート間地震」とプレート内部で発生する「プレート内地震」に二大別される。ところがプレートには、岩石圏の性質が少し違う陸のプレートと海洋プレートがあるから、プレート内地震は「陸のプレート内の地震」と「海洋プレート内の地震」の二種類に分けられる。さらに、海洋プレート内の地震は後述のように二つのタイプに分けられるので、合計4種類になる。

(2) プレート間地震(甲B23・14~15頁)

沈み込む海洋プレートと陸のプレートの接触面(境界面)は、普段は固着しているので、それに沿って主として陸のプレートの中に変形が蓄積する。 100年から200年くらい経つとそれが限界に達して、プレート境界面を 震源断層面とする大地震が起こる。

千島から東北地方にかけての東の沖合の大地震、相模トラフ沿いの関東地震、南海トラフ沿いの東海・南海地震などがこのタイプになる。特に南海トラフ沿いの東海・南海地震は規則的にくり返していて、いつもマグニチュード8クラスの巨大地震で大きな被害をもたらす。

(3) 陸のプレート内地震(最新の耐震設計審査指針では「内陸地殻内地震」と されている。甲B23・15~17頁)

陸のプレート内部の弱面に沿っても、プレート運動に起因する変形が蓄積 する。プレート間に比べれば変形する速さが一桁以上小さくて、限界に達す るまでに千年単位か万年単位の時間がかかるが、いずれはそこで大地震が起 こる。

日本列島の陸のプレートは大部分の場所で非常に薄く、特に内陸や日本海沿岸では、固くて壊れやすいのは地表の少し下から深さ15~20kmくらいまでである(この部分を「上部地殻」という)。したがって、日本列島の場合、陸のプレート内地震の震源断層面は兵庫県南部地震のように浅くて、しばしば「直下型地震」と呼ばれる。ときには1891年濃尾地震のように

マグニチュード8クラスのものも起こる。

(4) 海のプレート内の浅い地震(甲B23・17頁)

海洋プレートの中で起こる地震のうちの一つは、海洋プレートのまだ沈み込んでいない部分、つまり上面が海底面か、多少陸のプレート先端部の下になった程度――地図上では海溝やトラフの外側から少し内側くらい――の部分で起こる地震で、震源域が浅いものである。三陸沿岸に死者・行方不明3千人以上という大津波災害をもたらしたマグニチュード8.1の1933年三陸地震が典型例だが、あまり頻繁に起こるものではなく、陸からかなり離れた海底下で起こるため、陸上での地震動はそれほど激しくはない。津波による被害の方が重大である。

(5) スラブ内地震(甲B23・17~19頁)

沈み込んだ海洋プレートは、陸のプレートの下へ斜めに入って行って、地球内部の流動的な岩石層の中に斜めに垂れ下がっていくが、海洋プレートのその部分を「スラブ」と呼ぶ。

四つ目の地震のタイプは、海洋プレート内の地震のうち、このスラブの中で起こる地震のことである。大きな特徴は、震源域がある程度深いこと、しかし海岸線や内陸の直下であること、深い割に地震波を強く放出して強震動をもたらすこと、現段階では実態がつかみにくいことである。

1993年釧路沖地震(M7.8)や1994年北海道東方沖地震(M8.1)、2001年芸予地震(M6.7)、2001年米国のシアトル近郊で起こった地震(M6.8)がスラブ内地震であった。

第2 活断層とは何か

1 活断層研究会(活断層を研究している地形学・地質学・地震学研究者有志の集まり)編集の『[新編]日本の活断層』(東京大学出版会、1991年)という本は、「活断層の定義」という項で、「一般に、最近の地質時代にくりかえし

活動し、将来も活動することが推定される断層を、活断層という」と述べている(4頁)。

また、石橋克彦氏は、活断層を「地形学、地質学、地球物理学的観察によって地表付近の形態が確認される断層で、最近の地質時代に繰り返しずれ動いていて、将来もずれ動くことが推定されるものを、活断層という」と定義している(甲B24・22頁)。

2 現実の活断層研究で対象とされている活断層とは、過去50万年間や200万年間に何度も出現した地表地震断層が累積したものである。つまり、一定の造構力によって地下の同じ弱面で繰り返し同じような大地震が起こり、ほぼ毎回震源断層面が地表に顔を出して同じような地表地震断層が現われた結果、地形や地層のズレが累積して線状の構造ができる。

実際には、昔の地震のことは知らずに、おもに地表付近の地形や地質の調査からそのような線状構造が見出され、ズレの累積が最近の地質時代に生じたと分かれば、それは近い過去に繰り返し大地震が起こった証拠だと判断し、将来もまた大地震が起こる可能性があると考えて、活断層と呼ぶ。

なお、暗黙のうちに、地表の線状のズレは地下に面的に拡がっていると前提 されているが、地下にどのように延びているか、確かな実態はほとんどの場合 わからない。

震源断層面は、地震学の理論によって地下の地震の源として考え出された。 しかし、震源断層面を見てきた人は誰もおらず、個々の震源断層面は地震波・ 地震動の記録や地殻変動のデータから間接的に推定される。これに対して活断 層は、地表付近で目に見える証拠を捕まえて過去の地震のズレや将来予測を議 論する。もっとも、活断層から地下の震源断層面を知ることはできない(甲B 23・23~24頁)。

第3 耐震設計の基礎

1 地震の大きさ

地震の大きさ(規模)は「マグニチュード(M)」で表わす。マグニチュードにはいくつかの種類があるが、ここでは、地震モーメント(Mo)から導かれるモーメントマグニチュードについて説明する。なお、気象庁が用いているマグニチュード(Mi)は、これと異なる概念である。

地震モーメント(Mo)とは、震源断層面の面積(S)、断層面におけるずれの量(平均すべり量D)、剛性率(変形のしやすさ=ずれ面の接着の強さ)から得られる物理量である。地震モーメント(Mo)は「断層モデルを用いた手法」において重要な要素となる。

地震モーメント (Mo) =震源断層面の面積×ずれの量×剛性率

地震モーメント (Mo) とモーメントマグニチュード (Mw) の関係は以下 のとおりである。

モーメントマグニチュード (Mw) = (Log 地震モーメント (Mo) -9.1/1.5) マグニチュードは、地震計で観測された地震波の記録から推算されるもので、マグニチュードで表わされる地震の大きさの本質はズレ破壊の規模であって、それは、震源断層面の大きさである。つまり、地震が大きい、マグニチュードが大きいということは、震源断層面が広大だということを意味する。具体的には、震源断層面の長さ(横方向)と幅(深さ方向)が、マグニチュードとともに長くなる。それに伴って、面の両側の岩盤がくい違う分量も増える。また、ズレ破壊が拡大する速さは地震の大きさにはよらないので、地震が大きくなると(破壊面が広くなると)ズレ破壊の時間も長くなる。

地震の本体であるところの震源断層面の大きさやズレの量は、マグニチュードと非常によく相関している。マグニチュードが1大きくなると、断層面の長さ、幅、ズレの量、破壊時間が、およそ3倍になる。

震源の位置はあくまでも破壊の出発点であって、地震の本体は地下の非常に

広い範囲に拡がっている。破壊時間の間じゅう破壊の衝撃が地震波として放出されるため、大きな地震ほど地表が揺れる時間も長くなる。なお、マグニチュードは対数であるため、マグニチュードが1大きくなると、放出される地震波のエネルギーは約30倍増え、マグニチュードが2大きくなるとエネルギーは約1000倍に増える。

2 地震動の大きさ

(1) これに対し、地震動の大きさは震度として示されている。もっとも震度は 人の揺れの体感であるため、科学的厳密さに欠ける。

そこで、より科学的な尺度として用いられているのは、地震動の速度と加速度である。速度と加速度は極めて重要な基本的な概念であるので、以下この点について説明する。

(2) 速度と加速度

A点からB点まで100m進むのに5秒かかった場合、その速度は毎秒20mとなる。これに対し、A点を通過するときの速度が毎秒15mで、B点を通過するときの速度が毎秒25mであった場合、5秒間で毎秒10mの速度の変化があったことになる。これを1秒間あたりの速度の変化にすると、毎秒・毎秒2mとなる。つまり、1秒間に毎秒2mずつ速度が上がっていることになる。このような毎秒ごとに速度が変化する割合のことを加速度という。

地震動の場合、単位はセンチメートルで表す。速度は毎秒何センチメートル、加速度は毎秒・毎秒何センチメートルとなる。この時の毎秒・毎秒何センチメートルを「ガル」という単位であらわす。

(3) 重力加速度

ここで、重力加速度について触れておく。高いところから物を落とすと、 物は地球の引力に引かれて落ちる。この時の落下速度は一定ではなく、刻々 と速度が上がっていく。つまり物体は加速されている。この時の加速度はお よそ980ガル(毎秒・毎秒980センチメートル)という一定の値である。 これを重力加速度といい1Gとあらわす。この加速度は物体が鉄であっても 羽毛であっても変わらない。空気抵抗がなければ、全ての物体が同じ時間で 落ちるのは重力加速度のためである。

(4) 加速度と力の関係

加速度は速度の変化であり、速度が変化するということは、その物体に力が作用したことを意味している。これは、車を急発進した場合(1秒ごとに増加する速度の割合が大きい場合)に体がシートに押さえつけられること、逆に車を急停車した場合(1秒ごとに減少する速度の割合が大きい)に体が前のめりになることで体感できる。

ニュートンの運動の第二法則によれば「物体に力が働くとき、物体には力の同じ向きに加速度が生じる。その加速度 a の大きさは、働いている力の大きさ F に比例し、物体の質量mに反比例する」のであり、加速度と力は比例する。

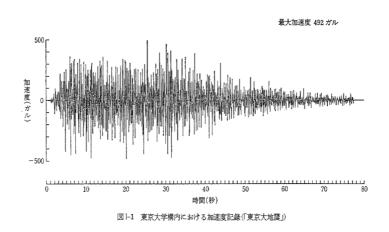
物には重さがある。「重さ」をもたらすのは重力であり、重力によって生み出される加速度が重力加速度 9 8 0 ガルである。人間やビルは地面に支えられているが、地面がなくなれば 9 8 0 ガルの加速度で落下する。このように地球上のすべての物体は、支えがあるから落ちていかないだけであり、いつも下方に向かって 9 8 0 ガルの加速度をもたらす重力を受けているのである。

(5) 地震動の加速度

地震動は地面の振動である。振動とは、ある量のプラスとマイナスが繰り返される状態である。地面の振動は、プラスとマイナスの加速度が繰り返し作用する状態である。これは、車が急発進→急停車→急発進を何度も繰り返している状態と同じである。

加速度は力であり、このような地震動の加速度によって地上の物体には力

が加わる。加速度が大きいほど物体に加えられる日からもそれだけ大きくなり、建築物を破壊したりする。



上の図I-1 (甲B166・9頁) は、小説「日本沈没」が映画化された際に大崎順彦氏が作成した「東京大地震」の推定地震動の加速度記録である(注:実測値ではない)。この図では、約80秒間、大小様々な加速度を繰り返しながら地面は振動を続けている。最も大きい加速度は25秒付近に表れており、その値は492ガルである。

3 小括

以上のとおり、最大加速度が大きければ地震動は大きくなる。したがって、 最大加速度が大きい地震は破壊力が大きく、甚大な被害を引き起こす。破壊力 は力であり、加速度も力であることから、加速度=破壊力という関係が成り立 つ。

しかし、最大加速度の大小だけが破壊力を決めるわけではない。地震動の破壊力は、最大加速度以外の特性の総合効果である。次に最大加速度以外の地震動の性質を述べたうえで、地震動の破壊力について述べる。

第4 地震動の性質

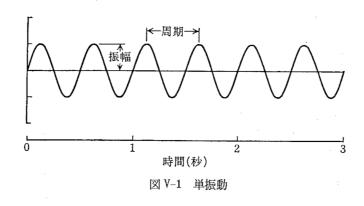
1 振動の基本的な性質

振動の基本的な性質はメトロノームの動きでイメージすることができる。

メトロノームの振子は、同一線上を左右に規則正しく、行きつ戻りつしている。振子が1回往復するのにかかる時間を「振動の周期」という。1回往復するのに1秒かかれば周期は1秒、0.5秒かかれば周期は0.5秒、2秒かかれば周期は2秒となる。速く繰り返すものを短周期、ゆっくりと繰り返すものを長周期という。

これに対し、1秒間に振動する回数を「振動数」という。単位はヘルツである。1ヘルツは1秒間に1回振動し(周期1秒)、2ヘルツであれば1秒間に2回振動(周期0.5秒)、0.5ヘルツであれば1秒間に0.5回の振動(周期2秒)となる。

下の図V-1は周期0.5秒の振動を表している。



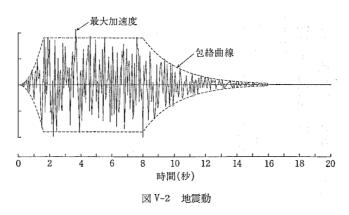
横軸は周期、縦軸が振れ幅を表している。振れ幅は「振幅」ともいう。上の図のように同じ状態を単純に繰り返している振動を単振動という。

振幅が大きくなっても周期が同じであれば、1往復する時間は同じである。 それは、揺れの速度が速いということであり、速度の変化量=加速度も大き くなることを意味している。

2 地震動の諸性質

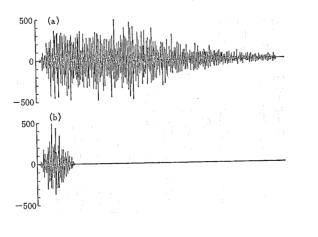
もっとも、実際の振動はこのような単純な振動ではない。下の図V-2 (甲 $B166\cdot75$ 頁) の地震動は16秒間続いているが、最大のものは3.

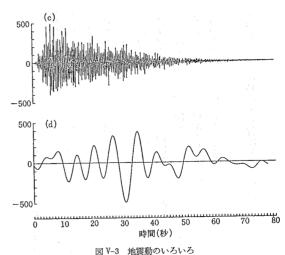
7秒付近であり、これがこの地震動の最大加速度である。破線は地震動の振幅を包み込んでいるという意味で「包絡曲線」という。



この図の地震動は、一見複雑な振動に見える。しかし、一見複雑に見える 振動も実はいろいろな振幅と周期をもった振動の寄せ集めであり、単純な振動に分解することができる(この点については後述する)。

下の図V-3 (甲 $B166\cdot77$ 頁) では、4つの地震動の加速度記録が並べてある。これらの最大加速度はすべて490 ガルである。しかし、その性質は全く異なる。





(a) は激しい地震動が 80 秒近く続いている。 (b) は継続時間が短く 12 秒ほどである。 (c) は立ち上がり直後にいったん強い加速度が作用するが、徐々に振動が収束する。 (d) は (a) (b) (c) と異なり、長周

期のゆっくりとした揺れである。

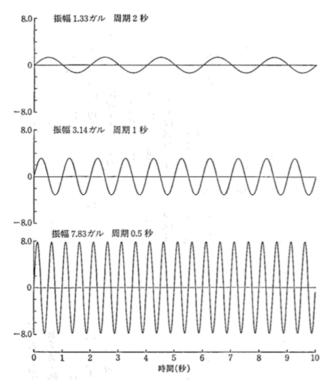
以上をまとめると、地震動の特性としては、①最大加速度、②継続時間、 ③包絡曲線、④周期特性の4つをあげることができる。

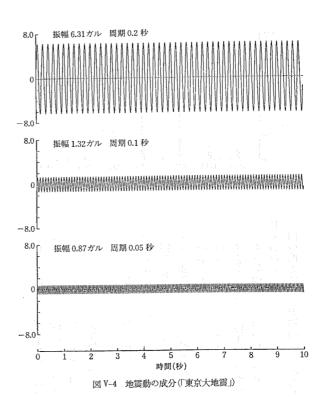
3 周期特性とスペクトル

ここでスペクトルという概念について説明する。スペクトルとは、複雑な 組成を持つものを単純な成分に分解し、その成分を、それを特徴づけるある 量の大小の順に従って並べたものである。

地震動の加速度記録は一見複雑に見えるが、実はいろいろな振幅と周期を もった振動の寄せ集めであり、単純な振動に分解することができる。分解す る方法は、創始者である数学者フーリエの名前にちなんでフーリエ解析と呼 ばれている。

下の図V-4 (甲 $B166\cdot86\sim87$ 頁) は、図I-1 (甲 $B166\cdot9$ 頁) の地震動を分解(フーリエ解析)して得られたもとの地震動の成分の うち、代表的なものをいくつか並べたものである。





ここに並べた成分はすべて単振動であるが、振幅と周期が異なる。これを スペクトルの趣旨に従って周期の大きい順番に並べると以下のようになる。

(A) 左上:振幅1. 33ガル、周期2秒

(B) 左中:振幅3.14ガル、周期1秒

(C) 左下:振幅7.83ガル、周期0.5秒

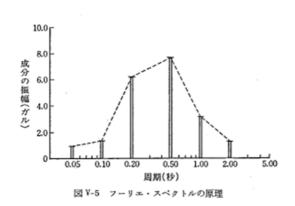
(D) 右上:振幅6.31ガル、周期0.2秒

(E) 右中:振幅1.32ガル、周期0.1秒

(F) 右下:振幅0.87ガル、周期0.05秒

この結果を一覧できるようにしたものが、下の図V-5 (甲B166・8 8頁)である。この曲線は、フーリエの名前をとってフーリエ・スペクトル と呼ばれている。

さらに、図V-5をより細かく固有周期ごとに計算して一覧できるようにしたものが、下の図V-6(甲 $B166\cdot89$ 頁)の曲線である。図V-6では、周期0.5秒付近に高い山がある。これは、元の地震動の中に周期が0.5秒程度の大きな振動が含まれていることを示している。このような性質は元の地震動記録を見ただけではわからない。これをはっきりさせてくれるのがフーリエ解析であり、フーリエ・スペクトルである。



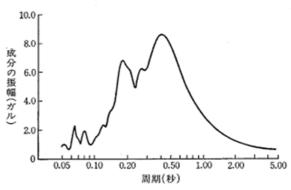


図 V-6 フーリエ・スペクトル(「東京大地震」)

第5 地震動の破壊力

1 地震動と建物

ここまで述べてきたことは地震と地震動のことばかりであり、建物は不在であった。ここからは、地震動が建物にどのような影響を及ぼすのかという点について述べていく。

2 固有周期

小さな地震(地震動)では建物にダメージはない。反対に大きな地震(地震動)は建物を破壊する。建物が破壊されるのは、建物が揺れ動くからである。 すなわち、建物は力を加えるとそれ自体揺れ動く振動体である。

では、建物はどのように揺れるのか。揺れによる破壊を考える場合、振動体 としての揺れ方の性質、すなわち速く揺れるのか、ゆっくりと揺れるのか、と いう振動の周期が重要となる。

建物は大小様々なものがあるが、板バネ(倒立振子)と錘(おもり)の簡単なモデルで示すことができる(図VI-6、甲B166・103頁)。

錘は建物全体の重量を表し、板バネは建物のかたさ・ やわらかさを表す。コンクリートの低層の建物はかたい ので暑くて短いバネにし、超高層のビルはやわらかいの でうすくて長い板バネにする。

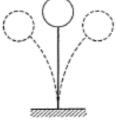


図 W-6 倒立振子

図VI-6の倒立振子を指でつついて揺らすと振動を始める。ひとりでに揺れ動く振動を自由振動という。この場合の振動の周期は、錘の重さと板バネの強さ(厚さと長さ)で決まる一定の値であり、それ以外の周期をもって自由振動することはない。再びメトロノームに戻れば、錘の位置をずらさないかぎり、一定の周期で揺れるのと同じことである。この自由振動の周期はそれぞれの振子に固有のものであり、これを「固有周期」という。物にはすべて固有周期がある。低層建物の固有周期はガタガタと速く揺れる短周期、やわらかい高層建

物はユラユラとゆっくり揺れる長周期である。

3 共振現象

では、なぜ固有周期が問題となるのか。それは建物の固有周期と一致する地 震動の成分によって揺れ始めた振動が成長していき、ついには建物を破壊して しまうからである。

たとえば、固有周期が 0.5秒の振子を想定し、その足下の地面を揺らして みる。このとき、地面の揺れの周期が振子の固有周期と一致しない場合、振子 はそれなりに揺れるが、揺れは成長しない。この場合、揺れが少ないため建物 を破壊することはない。

これに対し、地面の揺れの周期が振子の固有周期と一致する 0.5 秒の場合、振子の振動は次第に成長し、とめどもなく大きな揺れに成長してしまう。揺れが大きくなることはそれだけ大きな力が振子に加わるということであり、ついには建物を破壊する。

このように、外部から与えられる振動の周期と物の固有周期が一致したために大きな振動が出現する現象を「共振」という。要するに、共振している場合というのは、振子の固有周期に合わせて外から力を作用させることになる。日常的な例としては、ブランコに乗った子供の背中を押す場合、ブランコの周期に合わせると効率的に揺れを大きくすることができることがあげられる。

4 実際の地震動と建物の共振

実際の地震動は単周期ではなく、様々な周期の波の集合であることは前述した。これに対し、物の固有周期は一定(たとえば周期 0.5秒)であるため、物の側からすれば、いろいろな周期の地震動がやってくるうちの自分の固有周期に近いものに特に反応して共振し、その都度大きく揺れるということになる。

5 応答スペクトル

「応答」とは、建物や振子が地震動を受け、地震動とその物(建物や振子) 事態の特性(固有周期)に応じて揺り動かされる反応のことをいう。「応答ス

ペクトル」は、「応答」の「スペクトル」、つまり、建物や振子の反応を周期の大小の順に従って並べたものである。一見すると「応答スペクトル」は難解な用語に聞こえるが、地震動がいろんな建物に対してどのような力を及ぼすかということをわかりやすいように図に描いたもののことである。

下の図VI-8 (甲B 1 6 6 ・ 1 0 9 頁) は応答スペクトルの概念を模式的に 説明したものである。

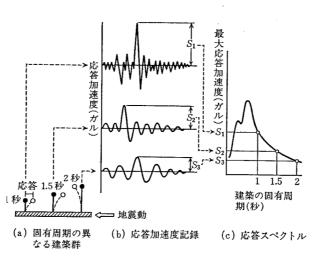


図 W-8 応答スペクトルの説明図

図VI-8の左側の(a)には固有周期の異なる3つのモデル(1秒、1.5秒、2秒)が並んでいる。これらをある地震動の加速度で揺らしてみる。すると、モデルは一斉に揺れ出し「応答」を始めるが、その揺れ方は地震動の特性(揺れの特性、すなわち最大加速度、継続時間、周期特性など)とモデルの特性(固有周期)との関係でそれぞれ違ったものになる。

このとき、振子の錘に加速度計が取り付けてあったとすると、加速度計はそれぞれのモデルが与えられた地震動に対して応答することによって生じる加速度、すなわち応答加速度をそれぞれ記録する。この記録が図VI-8の真ん中の(b)と応答加速度記録である。

(b) の上段は固有周期が 1 秒のモデルの応答加速度を示している。その最大値が S 1 である。これが(a)の左端のモデル、つまり固有周期 1 秒の建物

がこの地震動によって揺さぶられている間にその建物に対して作用した最大の加速度、つまりこの地震動に対する固有周期1秒の建物の最大加速度である。同じように、固有周期1. 5秒((b)の中断)や2秒の建物((b)の下段)には、それぞれ最大応答加速度S2、S3が作用する。

図VI-8右側の(c)は横軸に固有周期、縦軸に最大応答加速度を表したものである。(a)の3つのモデルの固有周期(1秒、1.5秒、2秒)を横軸にとり、それに対応する最大応答加速度S1、S2、S3が縦軸にとられている。その結果が(c)の白丸点である。

今みてきた固有周期は3つだけだが、実際にはさらに細かく固有周期を分け、 応答加速度を得ることができる。さらに多くの固有周期におけるそれぞれの最 大応答加速度を調べ、これを隙間なくつなげると(c)の波線が得られる。こ れが応答スペクトルである。

以上述べてきたことから明らかなように、ある地震動に対してはそれに対応 した応答スペクトルが得られ、別の地震動に対してはその別の地震動に対応し た応答スペクトルが得られるのである。

6 地震動と応答スペクトル

ここで図I-1 (甲 $B166\cdot 9$ 頁) に示した地震動をもう一度みる。

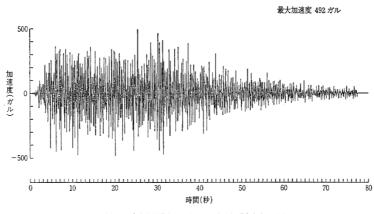
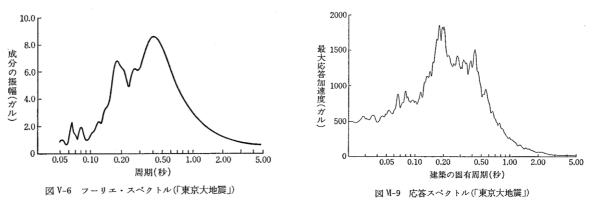


図 1-1 東京大学構内における加速度記録(「東京大地震」)

この地震動の応答スペクトルが下の図VI-9(甲 $B166\cdot110$ 頁)である。 この地震動をフーリエ解析した図V-6(甲 $B166\cdot89$ 頁)と並べてみる。



図V-6のフーリエ・スペクトルでは周期0.5秒付近に高い山(大きな加速度)があり、この地震動では周期0.5秒の成分が優勢であった。そして、周期0.2秒付近にもやや低い山がある。

これに対し、同じ地震動に対応する応答スペクトル図VI-9でも、0.5秒 と0.2秒のところに山があるが、山の高さが逆転し0.2秒付近のほうが高 くなっている。

これは、地震動の成分としては 0.5秒のものがより優勢であるが、建物に与える影響という点からみると、固有周期が 0.5秒ではなく 0.2秒の建物に対してもっとも強く作用することを示している。

なぜこのような結果になるのか。それは、地震動の破壊力は最大加速度だけでは説明することができず、継続時間(さらにその他の特性)も大きく影響するからである。極めて単純化していえば、地震動の中で最大の加速度は固有周期 0.5 秒付近の成分であったが、その継続時間は短く、一方で固有周期 0.2 秒付近の加速度は地震動の中では最大の成分ではなかったが、継続時間が長く、共振により建物の揺れは成長したものだということができる(実際にはさらに複雑である)。

このようにして得られた応答スペクトルは地震動が建物に与える影響を集約 したものであり、ここに耐震設計の全体があらわれるのである。

耐震設計

同じ土地の同じ地盤の上に立ち、同じ地震動を受けても、作用する地下(す なわち地震動入力)は建物自体の特性によって異なる。建物の特性を端的に表

現し、直接地震動入力に反映させるのに もっともふさわしい特性値が応答スペク トルである。

たとえば、建物の固有周期が1秒と決 まると、右の図VI-10 (甲B166・ 111頁)の応答スペクトルから、最大 応答加速度は600ガルに耐えられるよ うにすればよいことになる。もしこのと

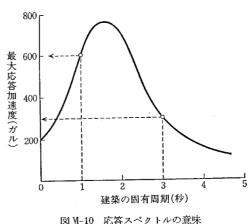


図 W-10 応答スペクトルの意味

き、建物の固有周期が3秒であれば、最大応答加速度は300ガルに耐えられ るようにすればよいということになる。

600ガルというのは重力加速度980ガルのほぼ0.6倍であり、建物に はその重量の0.6倍の力がかかることになる。この力に対して建物が壊れな いように部材や寸法など、具体的な設計に取り掛かればよい。このような考え 方が採用されたのは1981年の建築基準法改定時であった。

8 より詳細な耐震設計

ここまで見てきた応答スペクトルは錘が一つだけの倒立振子のモデルであっ た。この錘は建物の全重量をひと塊にしたものと考えており、これから求めら れるのは建物に働く総体力である。

総体に働く力はこれでいいが、数階建ての建物の場合、各床にどのような力 が働くかはこれだけではわからない。原発では原子炉やポンプなど、無数の危 機・配管が設置されており、これらの機器・配管は建物とは別の固有周期を有 している。そして、その応答はそれが各階のどこに設置されているかによって も異なる。そこで、各階の床にどのような力が働くかは、その階数分だけ錘を

縦につなげて串団子のようなモデルを考える必要がある。このようにして得られた応答スペクトルは床の数だけ得られる。これを「床応答スペクトル」という。

各階の床に設置された機器・配管の設計においては、機器・配管の固有周期を把握し、それを設置する床応答スペクトルから最大応答加速度に耐えられるように設計することになる。これは、数千本とも数万本とも言われている配管や、その他の機器、設備、施設についてもあてはまる。

9 物の破壊による固有周期の変化

よりやっかいなのは、物が壊れるとその固有周期が変化することである。

物にはすべて固有周期があり、低層建物の固有周期はガタガタと速く揺れる 短周期、やわらかい高層建物はユラユラとゆっくり揺れる長周期であることは 前述した。これらの建物が何らかの理由で壊れかけようとしている場合、固有 周期が短周期側から長周期側にずれることがある。そうすると、設計時の固有 周期では最大応答加速度以下の応答だったものが(もともとそのように設計さ れた)、固有周期が変化することによって別の周期で共振することになり、設 計時点での期待とは別の挙動を示すことがあり得る。建物にかかる力(すなわ ち加速度)が小さくなる方向であれば問題はないが、いつもそうなるとは限ら ない。物を設計する場合は、これらについても考慮する必要がある。

第4章 おわりに

これまで述べてきたことが、耐震設計を理解するために必要な基本的な知識である。原発の耐震設計も基本的にはこれと変わるところはない。

原発の基準地震動の策定は耐震安全性の基礎となる要であり、これが適切に策定されていなければ、その後の建物、機器、配管などの構造物の設計(安全評価)は全く意味のないものとなってしまう。

原発の耐震設計に関する各論については追って主張する。

以上