

平成23年(ヨ)第67号 原発再稼働禁止仮処分申立事件

債権者 辻義則外162名

債務者 関西電力株式会社

主張書面

平成26年9月19日

大津地方裁判所民事部保全係御中

債権者ら代理人弁護士

井戸謙一



同 吉川

実



同 石川賢治



同 向川さゆり



同 石田達也



同 永芳

明



同 高橋陽一

一



弁護士井戸謙一復代理人同

高橋典明



【序論】	3
第1 耐震問題の重要性.....	3
1 はじめに.....	3
2 基準地震動とは何か	3
3 福井地裁判決の認識	5
4 本主張書面の目的.....	5
第2 新規制基準への適合は、安全を意味しない。	6
1 あるべき規制基準.....	6
2 現実の規制基準.....	6
【本論】	6
第1章 現行の耐震設計審査指針.....	6
1 原発の耐震設計の流れ.....	6
2 原発の耐震設計の概略.....	7
3 基準地震動の策定方法.....	7
4 問題の所在.....	9
第2章 地震動評価の手法の総論.....	9
第1 地震とは何か.....	9
第2 地震動の性質.....	14
第3 地震動の破壊力.....	18
第4 さらに、不確かさの考慮が要求されていることについて.....	25
第3章 地震動評価手法の各論.....	26
第1 応答スペクトルに基づく手法による地震動評価について.....	26
第2 断層モデルを用いた手法について.....	32
第3 「震源を特定せず策定する地震動」について.....	49
第4章 総論の結論－原発の耐震設計上の2つの原則の確立を.....	65
第5章 各論.....	66
第1 高浜原発の基準地震動策定の問題点.....	66
第2 大飯原発の基準地震動策定の問題点.....	68
第3 まとめ.....	70

【序論】

第1 耐震問題の重要性

1 はじめに

地震の多発地帯に多数の原発が建設されているのは、世界広しといえど、我が国と中華民国しかない。我が国で原発を運転することの最も深刻な問題の一つは、地震によって過酷事故に至るリスクがあることである。東北地方太平洋沖地震を予想した地震学者が皆無であったように、我々は、深い地中で発生する地震の規模、発生の時期、それによって生じる地震動の程度を予知する能力を未だ獲得していない。したがって、この地震国日本で原発をどうしても運転したいのであれば、その耐震設計は、慎重の上にも慎重を重ね、原発の運転期間中にその原発を襲う可能性のある最大限度の地震動を想定して、それに襲われても過酷事故が起こることがないようになされなければならない。

2 基準地震動とは何か

(1) 耐震設計審査指針における基準地震動

「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（平成18年9月19日原子力安全委員会決定、以下「平成18年耐震設計審査指針」という。）は、「基準地震動 S_s 」を「施設の供用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性があり、施設に大きな影響を与えるおそれがあると想定することが適切な地震動」と定義づけ、「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」と述べている（解説1.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）。すなわち、「基準地震動 S_s 」は、原発の耐震設計の基準となる地震動であり、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和32年法律第166号、以下「原子炉等規制法」という。）による安全審査が行われる趣旨は、原発による災害が「万が一にも起こらないようにするため」である（最高裁第1小法廷平成4年10月29日判決・民集46巻7号1174頁参照）から、「基準地震動 S_s 」は、その原発を襲う可能性のある最大の地震動であって、それ以上の地震動が当該原発を襲うことはないと言いうるものでなければならない。

「基準地震動 S_s 」は、「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日原子力委員会決定、以下「昭和56年耐震設計審査指針」という。）における「設計用限界地震 S_2 」を引き継いだものと理解されているが、「設計用限界地震 S_2 」については、「およそ現実的ではないと考えられる限界的な地震」と説明されていたことが想起される

べきである。

(2) 新規制基準における「基準地震動」

新規制基準においては、「基準地震動による地震力」は、「(原子炉施設の) 供用中に当該施設に大きな影響を及ぼす恐れがある地震による加速度によって作用する地震力」と定義づけられており【実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成25年6月28日原子力規制委員会規則第5号，以下「設置基準規則」という。）第4条第3項】，その趣旨は必ずしも明確でない。しかし，基準地震動による地震力に対しては，耐震重要施設【設計基準対象施設[発電用原子炉施設のうち，運転時の異常な過度変化又は設計基準事故の発生を防止し，又はこれらの拡大を防止するために必要となるもの（設置基準規則第2条第2項7号)のうち，地震の発生によって生じるおそれがあるそ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が特に大きいもの（設置基準規則第3条第1項)】は，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ず（設置基準規則第4条第3項），重大事故等対処施設【重大事故に至るおそれがある事故に対処するための機能を有する施設（設置基準規則第2条第2項11号)】のうち，常設耐震重要重大事故防止設備が設置される重大事故等対処施設は，重大事故に至るおそれがある事故に対処するために必要な機能が損なわれるおそれがないものでなければならず【設置基準規則第39条第1項1号，実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則（平成25年6月28日原子力規制委員会規則第6号，以下「技術基準規則」という。）第50条第1項1号】，常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設は，重大事故に対処するために必要な機能が損なわれるおそれがないものでなければならず（設置基準規則第39条第1項3号，技術基準規則第50条第1項3号），特定重大事故等対処施設は，重大事故等に対処するために必要な機能が損なわれるおそれがないものでなければならず（設置基準規則第39条第1項4号，技術基準規則第50条第1項4号）とされている。

このように，原発の安全確保の要である耐震設計は，基準地震動を策定した上，これによっても，耐震重要施設の安全機能が損なわれるおそれがないように，常設耐震重要重大事故防止設備が設置される重大事故等対処施設の必要な機能が損なわれるおそれがないように，常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設の必要な機能が損なわれるおそれがないように，特定重大事故等対処施設の機能が損なわれるおそ

れないように設計される。逆に、設計基準対象施設は、耐震重要施設を除き、設置基準規則第4条2項の地震力に耐えることは求められているものの、基準地震動に耐えることまでは求められていない（設置基準規則第4条1項）し、重大事故等対処施設のうちでも、常設耐震重要重大事故防止設備が設置されないものは、基準地震動に耐えることまでは求められていない（設置基準規則第39条第1項2号）。

したがって、基準地震動が当該原発を襲えば、その原発は、各種の設備が損傷し、その機能を失い、一部の重要施設で残された機能によってかろうじて重大事故の発生を防止するという仕組みになっているのであるから、新規制基準下における基準地震動も、当該原子炉の供用期間中に、当該原子炉施設を襲う可能性のある最大の地震動であって、それ以上の地震動が当該原子炉を襲うことはないと言いうるものでなければならず、平成18年耐震設計審査指針における「基準地震動 Ss」と性格は変わっていないと解することができる。

3 福井地裁判決の認識

ところで、大飯原発3、4号機運転差止め訴訟福井地裁判決（平成26年5月21日）は、大飯原発の敷地に1260ガルを超える地震動が到来する危険があると認めた（同判決45頁）。従来、大飯原発3、4号機の基準地震動は700ガルであったが、最近、債務者は、これを759ガルへ引上げ、現在、原子力規制委員会では、更に856ガルへ引上げることに議論がなされている。しかし、福井地裁判決の上記認定によれば、原子力規制委員会でなされている上記議論は、全く意味をなさないことになる。このことは、福井地裁判決が、基準地震動を策定する手法【これは、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」（以下「設置基準解釈」という。）に定められているが、その内容は、平成18年耐震設計審査指針に定められていた内容を基本的に踏襲している。】に根本的な誤りがあるとの認識を前提としていることを示している。

4 本主張書面の目的

そこで、本主張書面において、新規制基準における基準地震動の策定方法がまことに不合理であり、そのような不合理な方法で策定された基準地震動を前提に耐震設計をしても、原発の安全性を担保することには到底ならないことを述べる。

第2 新規制基準への適合は、安全を意味しない。

1 あるべき規制基準

新規制基準は、発電用原子炉の設置許可基準としての「発電用原子炉施設の位置、構造及び設備が核燃料物質若しくは核燃料物質によって汚染された物又は発電用原子炉による災害の防止上支障がないと判断できる基準」を定めたものである（原子炉等規制法第43条の3の6第1項第4号）。したがって、新規制基準に適合した発電用原子炉は、「災害の防止上支障がない」はずであり、新規制基準は、そのようなものとして策定されなければならなかった。

2 現実の規制基準

ところが、原子力規制委員会は、自らが策定する基準を当初は「安全基準」と称していたものの、平成25年4月以降、「規制基準」と言い換えるようになった。田中俊一原子力規制委員会委員長は、平成25年4月3日に開催された平成25年度原子力規制委員会第1回会議で、「規制基準」と言い換える理由について、『『安全基準』という、基準さえ満たせば安全であるという誤解を呼ぶ』からであると説明した。原子力規制委員会は、平成26年7月16日九州電力川内原発1、2号機について、新規制基準に適合しているという内容の「審査書案」を了承したが、これについても、田中俊一委員長は、「基準への適合を審査しただけである。私は安全とは言わない。」と明言している（甲第228号証）。すなわち、本件各原発は、新規制基準に適合しているだけでは安全であるとは言えず、債務者は、本件各原発が安全であるというのなら、更に安全性を高める努力をしなければならないのである。

新規制基準は杜撰であって、仮にこれに適合していても、その原発が安全であるなどと言えるものではない。この点については、債権者らと田中俊一委員長の認識は一致している。新規制基準は、そのようなものであるから、これは、原子炉等規制法43条の3の6第1項4号が定める発電用原子炉等による「災害の防止上支障がないものとして原子力規制委員会規則で定める基準」には該当しないというべきである。そのことを冒頭、指摘しておく。

【本論】

第1章 現行の耐震設計審査指針

1 原発の耐震設計の流れ

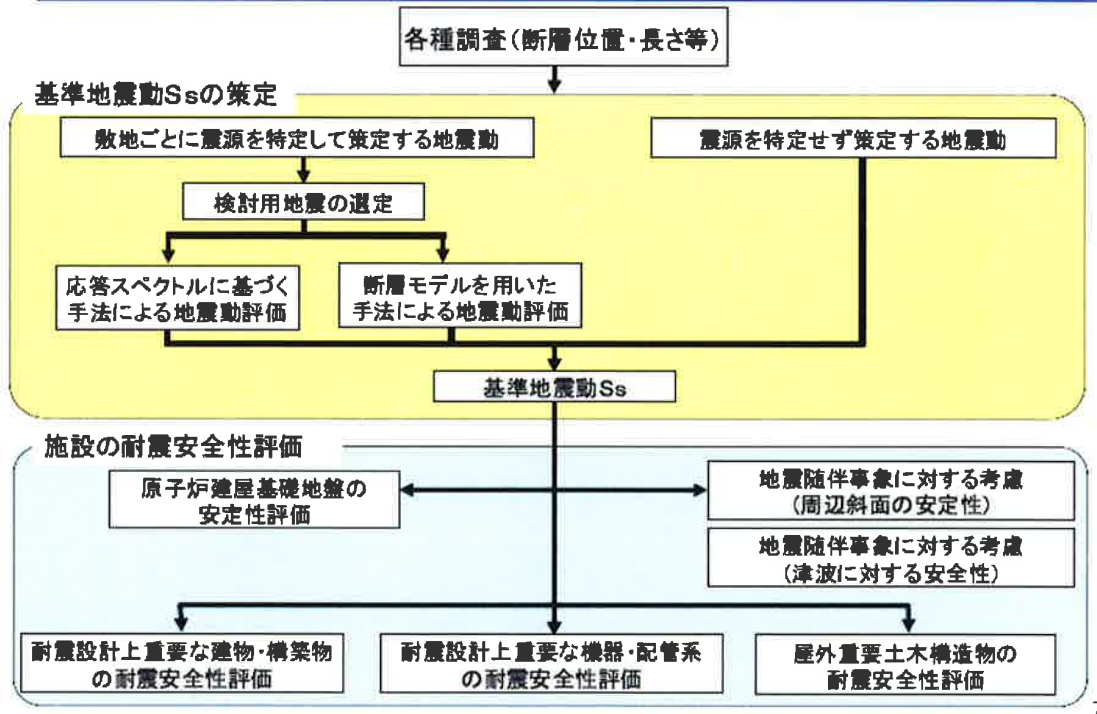
原発の耐震設計は、次のような流れでなされている。なお、下図は、平成18年耐震設計審査指針の下でのフローであるが、新規制基準下でも基

本的に変わっていない。もっとも、「基準地震動」については、「基準地震動 S_s 」と表記されている。

2. 耐震安全性評価の基本方針

2007.4.4
耐震・構造設計小委員会

耐震安全性評価全体フロー



「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」の改訂に伴う耐震安全性評価結果の報告について」平成19年4月4日

2 原発の耐震設計の概略

- (1) 原発の耐震設計の過程は、大きく分けると、①活断層の位置や長さ等の調査、②基準地震動の策定（上図の上段黄色部分）、③（基準地震動に基づく）施設の耐震安全性評価（上図の下段水色部分）となる。
- (2) 原発の安全性を確保するためには、基準地震動に対して、構造物が破壊されないように設計する必要がある。そのためには、構造物を数値的なモデルで表して、それ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をシミュレーションする。

3 基準地震動の策定方法

- (1) 基準地震動の策定方法について、設置基準解釈は、おおむね、次の

ように規定している（別記2第4条第5項）。

「5. 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 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」及び「震源を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方向の地震動としてそれぞれ策定すること

「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、ほぼ水平で相当な広がりを持って想定される基盤の表面をいう。「基盤」とは、おおむねせん断波速度 $V_s = 700/S$ 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 「震源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（検討用地震）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る地震動評価を、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

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地震特性パラメータを設定し、地震動評価を行うこと

iii 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、アスペリティの位置・大きさ・応力降下量・破壊開始点等の不確かさ）を適切な手法を用いて考慮すること

三 「震源を特定せず策定する地震動」は、震源と活断層を関連づ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、各種の不確かさを考慮

して敷地の地盤特性に応じた応答スペクトルを設定して策定すること

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、各種の不確かさを考慮した評価を参考とすること」

(2) まとめ

以上をまとめれば、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「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「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。

4 問題の所在

原発の耐震設計の妥当性をめぐる重要な争点の一つは、上記の手法によって策定される基準地震動が過小であり、これを前提として耐震設計をしても原発の耐震安全性が確保されないのではないか、という点にある。

この結論を理解するためには、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①②③の各手法を理解する必要がある。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、すなわち、応答スペクトル等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方について述べることとする。その上で、第3章において、それぞれの地震動評価手法の問題点について述べる。

第2章 地震動評価の手法の総論

本章では、耐震設計の基本的な考え方について述べるが、これは、大崎順彦著「地震と建築」（岩波新書）と山中浩明編著「地震の揺れを科学するーみえてきた強震動の姿」（東京大学出版会）に基づいている。

第1 地震とは何か

1 地震と地震動

「地震」は、地下の岩盤が急速に破壊されることによって地震波が発生し、それが地殻内をあらゆる方向に伝わる自然現象である。「地震動」は、その地震がもたらす揺れである。地下の岩盤が大きく破壊されればされるほど、それだけ発生する地震波は大きなものになる。

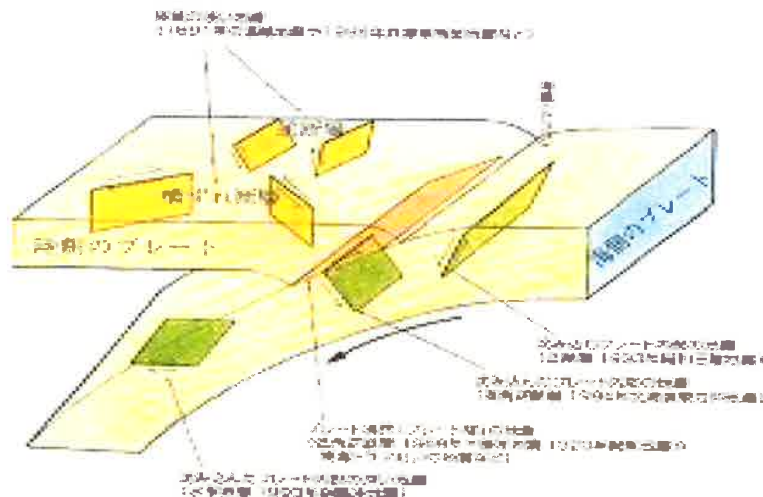
地震は、ある特定の地点（震源域）で発生するものであり、その大きさは1つの決まった値（推定値）である。これに対して、地震動は、同一の地震であっても、それを観測する地点によって、その大きさは全く異なる。遠くで地震が起きた場合は、揺れ（地震動）は小さいが、近くで地震が起きた場合は、揺れ（地震動）は大きい。このことは、私たちが日常に体験することである。

2 地震の種類



日本列島は、上記のとおり、4つのプレートの境界付近に位置し、東から太平洋プレートに、南からフィリピン海プレートに、西からユーラシアプレートに押され、圧力が集中している。

我が国でよく起こる地震には、大別すると、①プレート境界地震、②スラブ内地震、③内陸地殻内地震がある。



プレートの運動によって蓄積された歪みのエネルギーがある限界を超えたときに、プレート境界部で陸側プレートが跳ね上がる形で起こるのが「プレート境界型地震」であり、プレート内の弱面がずれてエネルギーを解放するのが「プレート内型地震」である。プレート内型地震のうち、海洋プレートが日本列島の下部に沈み込んだ部分で起きる地震を「スラブ内地震」という。プレート境界型地震は、一般に規模が大きく、大津波を発生させることがあるが、震源域が日本列島から離れているため、日本列島での揺れは、地震の規模ほどには強くないことが多い(ただし、関東大震災をもたらした大正関東地震のように、陸地近くで発生すると、陸地に大きな揺れをもたらす)。スラブ内地震は、日本列島の直下で大きな規模の地震を起こすことがあり、震源域は深いものの、地表の揺れは大きいとされる。プレート内型地震のうち、陸のプレート(上部地殻、地表3km~20km程度)の弱い部分がずれるのが「内陸地殻内地震」であり、多くの場合、人が居住している場所の直下が震源域になるので、「直下型地震」ともいわれる。一般に震源域が浅いため、地表に激しい揺れを生じさせる。上部地殻のずれが地表にまで達すると、「活断層」として認識される。多くは、以前にずれた部分と同じ部分がずれるので、「活断層」が地震を起こすような表現がされることがあるが、活断層は、あくまで地震が発生した結果にすぎない。

3 地震(動)の観測

地震の大きさを直接測定する方法はない。地震は、地中奥深くで発生するため、直接測定ができないのである。私たちが、観測できるのは地震動であり、地震動は地震計で測定することができる。地震計は、今日

では全国中に設置されており、一つの地震に対して、瞬時に各地の地震計が揺れを観測する。

このようにして観測された地震動の記録から、地下のどのあたりでどのような規模の地震が発生したのか、を推定している。これが、地震の震源（域）や深さ、大きさとして発表される。その後、地表での変位のデータや余震分布なども加えて、震源域がより詳細に特定されていくのである。

4 地震の大きさ

地震の大きさ（地震の持つエネルギーの大きさ）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（ M_0 ）から導かれるモーメントマグニチュード（ M_w ）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（ M_j ）¹は、これとは異なる概念である）。

地震モーメント（ M_0 ）とは、震源断層面の面積（ S ）と、断層面におけるずれ量（平均すべり量 D ）と、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（ M_0 ）は、後に述べる「断層モデルを用いた手法」において、重要な要素となる。

なお、地震モーメント（ M_0 ）と、モーメントマグニチュード（ M_w ）の関係は、以下の式となる。

$$M_w = (\log M_0 - 9.1) / 1.5$$

マグニチュード（M）は対数であるので、Mでは0.2の差でも、エネルギーは2倍の差がある。M6とM7では約32倍の差、M6とM8では約1000倍の差となる。

5 地震動の大きさ

これに対して、地震動の大きさは、日常的には、震度として示されている。ただし、震度は、人の揺れの体感であるので、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。

たとえば、A点からB点まで100m進むのに5秒間かかったとすれば、この時の速度は毎秒20mとなる。これに対して、A点を通過する

¹ 周期5秒までの強震計の最大振幅を用いて計算するもの。大きな値になると飽和して、それ以上大きな値とならない。東北地方太平洋沖地震のような巨大地震では、モーメントマグニチュードが用いられる。速報性はあるが、物理的意味合いは薄い。

時の速度が毎秒 15 m で、B 点を通過する時の速度は毎秒 25 m だったとすれば、5 秒間に毎秒 10 m 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 2 m となる。このような毎秒ごとに速度の変化する割合が加速度である。

地震動の場合は、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。

6 重力加速度

高いところから物体を落とした場合、落下速度は一定ではなく、刻々と速度が加わっていく。つまり物体は加速されている。この時の加速度は、おおよそ 980 ガル（すなわち毎秒・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、1 G ともあらわす。この重力加速度は、物体が鉄であっても木でもあっても羽毛であっても変わらない。空気抵抗が無ければ、皆同じ速度で落ちる。

7 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事は、その物体に力が作用した、ということの意味している。「物体に力が働くとき、物体には力の同じ向きの加速度が生じる。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。」というのがニュートンの運動の第二法則であり、このように加速度と力は比例する。

8 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・マイナスの加速度が繰り返し作用する状態である。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作用する。加速度が大きければ、作用する力もそれだけ大きくなり、建築物を壊したりする。

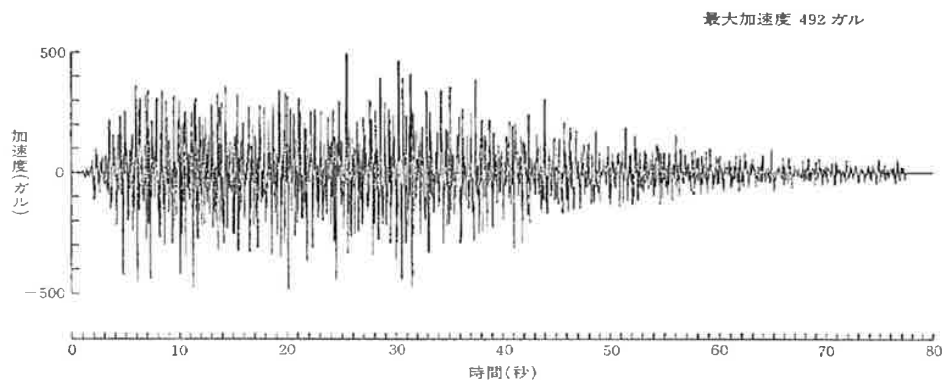


図1-1 東京大学構内における加速度記録(「東京大地震」)

図 I - 1 (大崎 9 頁) は、小説「日本沈没」が映画化された際に、大崎順彦が作成した「東京大地震」の推定地震動の加速度記録である(実測記録ではない)。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 秒付近に表れていて、その値は 492 ガルである。

9 小括

以上のとおり、最大加速度が大きければ地震動は強い、と言えることは間違いはない。最大加速度が大きい地震は破壊力が強く、大きい被害を引き起こす。破壊力は力であり、加速度も力であるから、加速度＝破壊力ということが成り立つ。しかし、最大加速度の大小だけが、破壊力を決定する要因ではない。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上で、地震動の破壊力について述べる。

第2 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(後述するように倒立振り子でも)イメージできる。

メトロノームの振り子は、同一線上を、左右に規則正しく、行きつ戻りつしている。振り子が 1 秒間に 1 回往復する間に経過する時間を「振動の周期」という。1 回往復するのに 1 秒かかるとすれば周期は 1 秒、0.5 秒かかるとすれば周期は 0.5 秒、2 秒かかるとすれば周期は 2

秒である。速く繰り返すもの（たとえば0.5秒）を短周期、ゆっくり繰り返すもの（たとえば2秒）を長周期という。

これに対して、1秒間に何回振動するかという回数を「振動数」という。その単位はヘルツである。1ヘルツは1秒に1回の振動、2ヘルツは1秒間に2回の振動、0.5ヘルツは1秒間に0.5回の振動となる。周期と振動数は逆数の関係になる。

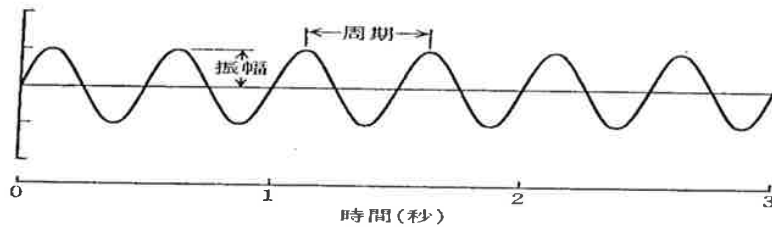


図 V-1 単振動

図 V-1（大崎 74 頁）は、周期 0.5 秒の振動を表している。

横軸が周期，縦軸が振れ幅を表す。振れ幅は「振幅」ともいう。このような同じ状態を単純に繰り返している振動を単振動という。

振幅がいくら大きくなっても、周期が同じであれば、戻ってくる時間は同じである。それは、すなわち、揺れの速度が速いということであり、すなわち、速度の変化量＝加速度も大きくなるということを意味している。

2 地震動の諸性質

実際の地震は、このような単純な振動ではなく、同じ状態が規則正しく繰り返されているわけではない。たとえば、下記図 V-2（大崎 75 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。

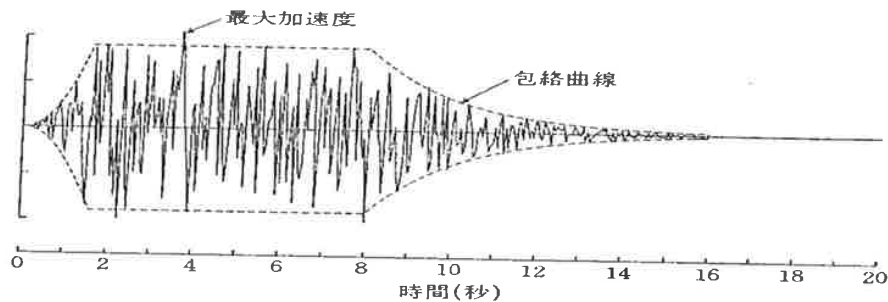


図 V-2 地震動

ところで、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（このことは、後述する）。

たとえば、下記図V-3（大崎77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。ただし、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しているが、徐々に振動が収束している。

(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。

以上によれば、地震動の特性として、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。

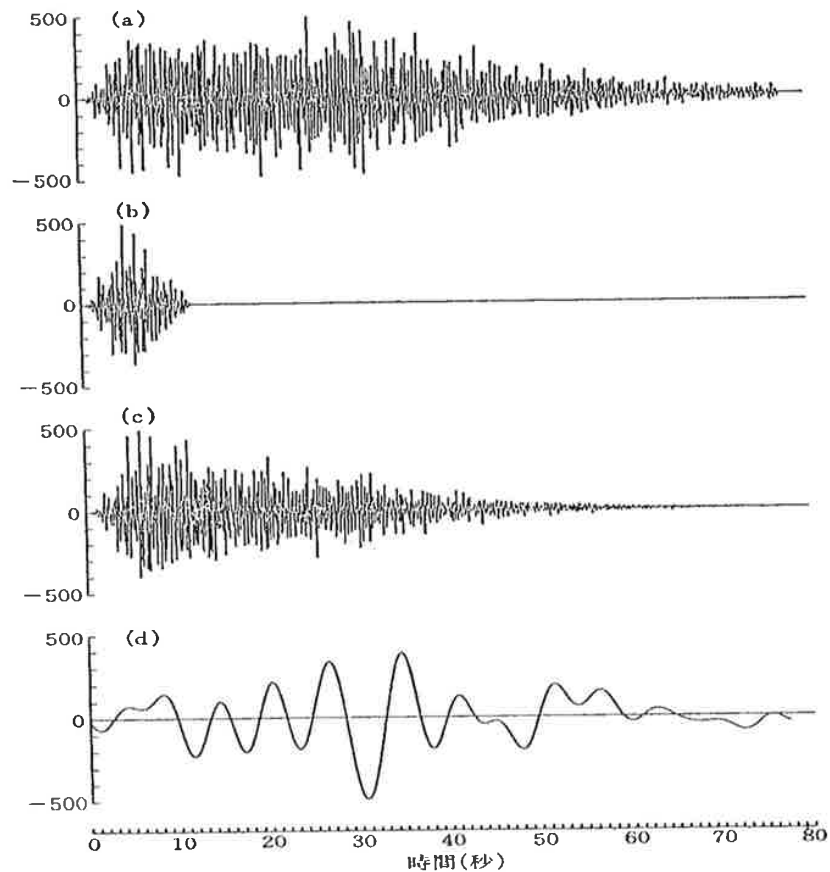


図 V-3 地震動のいろいろ

3 周期特性とスペクトル

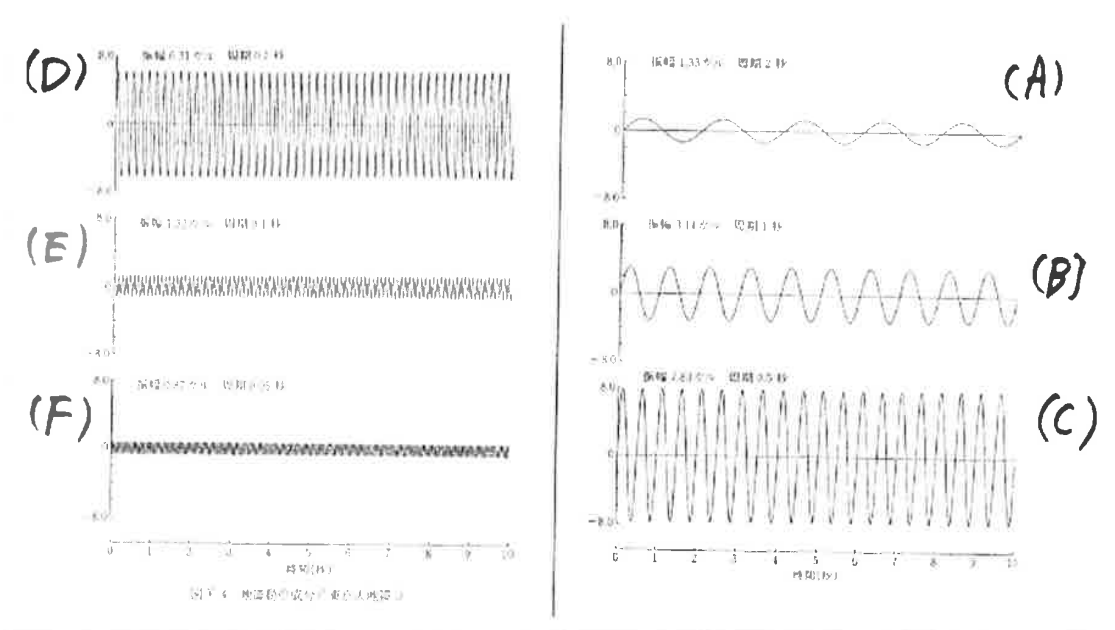
ここで「スペクトル」という概念を説明しておく。「スペクトル」とは、複雑な組成を持つものを、単純な成分に分解し、その成分を、それを特徴づけるある量の大小の順に従って並べたもの、である。

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ことは既に述べた。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。

図 I - 1 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、代表的なもののいくつかを並べたものが、図 V - 4 である。

ここに並べた成分は、全部単振動であるが、振幅と周期が違う。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 (A) ~ (F) ようになる。

図 V - 4



- (A) 右上 振幅 1.33 ガル 周期 2 秒
- (B) 右中 振幅 3.14 ガル 周期 1 秒
- (C) 右下 振幅 7.83 ガル 周期 0.5 秒

- (D) 左上 振幅6.31ガル 周期0.2秒
- (E) 左中 振幅1.32ガル 周期0.1秒
- (F) 左下 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記の図V-5である。この曲線は、フーリエの名をとって、「フーリエ・スペクトル」と呼ばれている。

これを、さらにより細かく固有周期ごとに計算して一覧にしたものが、図V-6の曲線である。図V-6には、周期0.5秒付近に高い山がある。これは、つまり、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による。このような性質は、元の地震動記録を見ただけでは分からないものであり、これをはっきりさせてくれるのが、フーリエ解

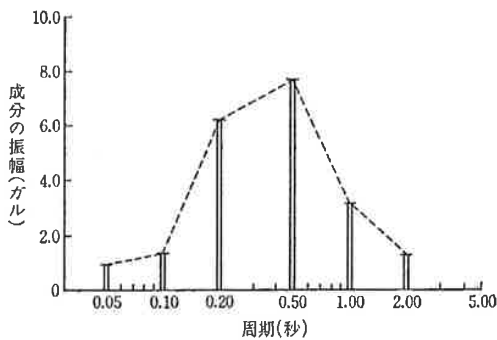


図 V-5 フーリエ・スペクトルの原理

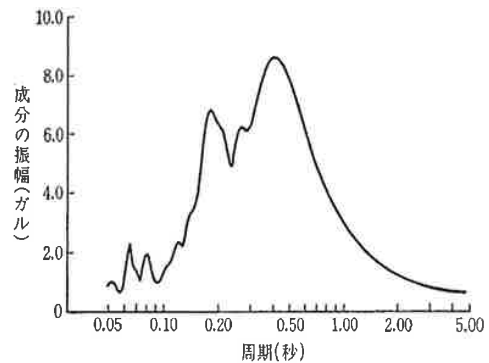


図 V-6 フーリエ・スペクトル(「東京大地震」)

析であり、フーリエ・スペクトルなのである。

第3 地震動の破壊力

1 地震動と建築

ここから、地震動が、建築物にどのような影響を及ぼすかということを見ていく。

2 固有周期

小さな地震動では、建築物にはダメージはない。反対に、大きな地震動は、建築物を破壊する。建築物が破壊されるのは、建築物が揺れ動くからである。すなわち、建築物は、力を加えればそれ自体が揺れ動く振動体である。

では、建築物は、どのように揺れるのか。揺れによる破壊を考える場

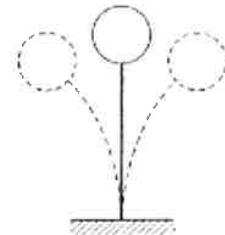
合は、振動体としての揺れ方の性質、すなわち、早く揺れるのか、ゆっくり揺れるのか、という振動の周期が重要となる。

建築物には、大小様々なものがあるが、板バネ（倒立振り子）と錘（おもり）の簡単なモデルで示すことができる（図VI-6）。

錘は建築全体の重量を表し、板バネは建築の堅さ・柔らかさを表す。コンクリートの低層の建物は堅いので厚くて短い板バネで、超高層のビルは柔らかいので薄くて長い板バネにする。

図VI-6の倒立振り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って、それ以外の周期をもって自由振動することはない。メトロノームが、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なものであり、これを固有周期という。

物には、すべて固有周期がある。低層建築の固有周期はガタガタ速く揺れる短周期、柔らかい高層建築はユラユラとゆっくり揺れる長周期である。



図VI-6 倒立振り子

3 共振現象

固有周期が重要なのは、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するに至るからである。

たとえば、固有周期が0.5秒の振子を想定して、この足下の地面を揺らしてみる。この時、地面の揺れの周期が、振子の固有周期と一致しない短周期（たとえば0.2秒）、あるいはずっと長周期（たとえば3秒とか5秒とか）だったとすると、振子はそれなりに揺れるけれども、揺れは成長しない。そして、この場合、揺れが少ないので、建物を破壊することはない。

これに対して、地面の揺れの周期が、振子の固有周期と一致する0.5秒だとすると、振子の振動はしだいに成長し、とめどもなく大きい揺れに成長してしまうのである。揺れが大きくなるということは、それだけ大きな力が振子に加わるということであり、そして、その力は、ついには、建物を破壊するに至るのである。

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。

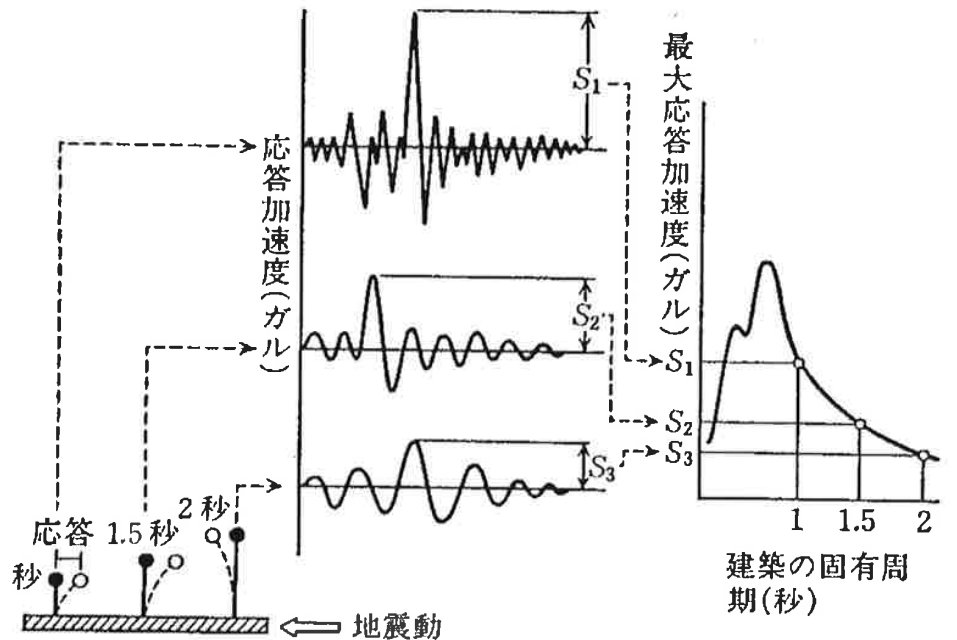
4 実際の地震動と建物の共振

実際の地震動は、0.5秒の単周期ではなく、様々な周期の波の集合だということは前述した。これに対して、物の固有周期は一定（たとえば周期0.5秒）であるので、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、建築物や振子が、地震動を受け、地震動とその物（建築物や振子）自体の特性（固有周期）に応じて揺り動かされる、その反応のことをいう。「応答スペクトル」は、応答のスペクトル、すなわち、建築や振子の反応を、周期の大小の順に従って並べたものである。

図IV-8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。



(a) 固有周期の異なる建築群

(b) 応答加速度記録

(c) 応答スペクトル

図 M-8 応答スペクトルの説明図

図VI-8の左側の(a)には、固有周期の異なるモデルが3つ（ここでは1秒，1.5秒，2秒）並べてある。これに対して、ある地震動の加速度で揺らしてみよう。すると、モデルは一斉に揺れ出す、つまり応答を始めるが、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となる。

この時、振子の錘に加速度計が取り付けられていたとすると、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)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S1である。これが、(a)の左端のモデル、つまり固有周期が1秒の建築物が、この地震動によって揺さぶられている間に、その建築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秒の建築物の最大応答加速度である。同じように、固有周期1.5秒（(b)の中段）や2秒の建築物（(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（ここでは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が縦軸に取られている。その結果が、(c)の白丸点である。

今みてきた固有周期は3つだけであるが、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。すなわち、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て、これを隙間無くつなげると、(c)の波線が得られる。これが、すなわち応答スペクトルである。

この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、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。

応答スペクトルには、縦軸に速度をとった「速度応答スペクトル」、縦軸に加速度をとった「加速度応答スペクトル」がある。現実には、加速度を斜め軸にとり、縦軸に「疑似速度」（加速度から計算で出した速度。厳密には、「速度」と一致しないが、おおむね一致するので「疑似速度」という。）をとった「疑似速度応答スペクトル」が作られることが多い。

6 地震動と応答スペクトル

ここで、図 I - 1 に示した地震動を、もう一度みる。

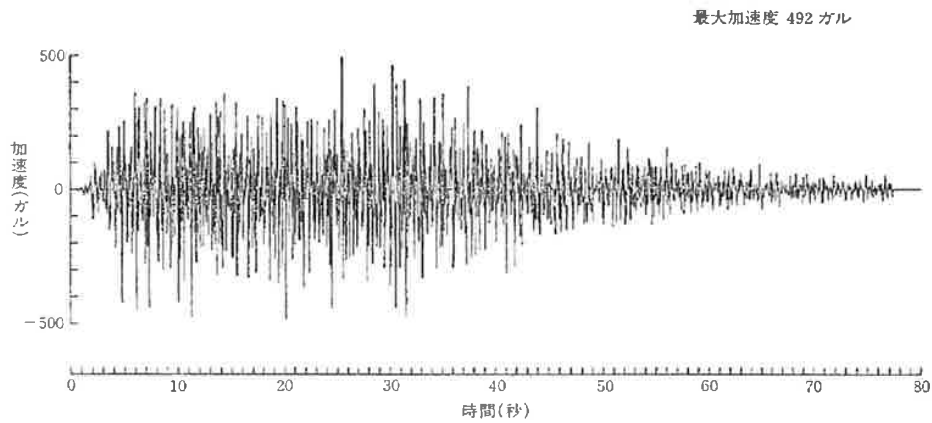


図 I-1 東京大学構内における加速度記録(「東京大地震」)

この地震動(図 I - 1)の応答スペクトルが、図 VI - 9 (大崎 110 頁)である。

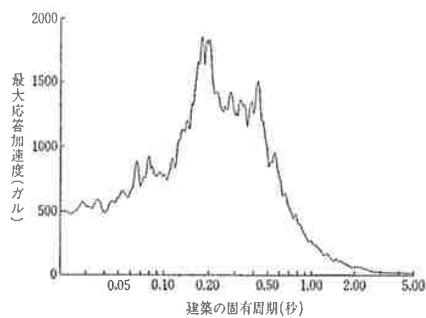


図 VI-9 応答スペクトル(「東京大地震」)

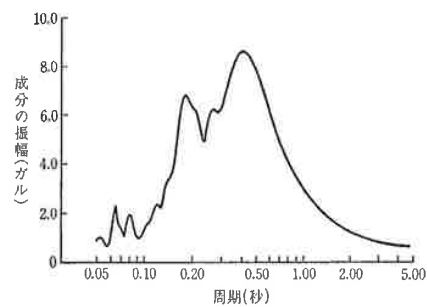


図 V-6 フーリエ・スペクトル(「東京大地震」)

この地震動をフーリエ解析した図 V - 6 と並べてみよう。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。これに対して、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 秒のところには山があるが、山の高さが逆転して、0.2 秒付近の方が高い。

ということは、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、建築物に与える影響という点からみると、固有周期が0.5秒ではなくて、0.2秒の建築物に対してもっとも強く作用する、ということを示している。

このような結果になるのは、地震動の破壊力には、最大加速度だけではなく、継続時間やその他の特性も影響するからである。単純化して言えば、地震動の中で最大の加速度は固有周期0.5秒付近の成分だったが、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、共振により建築物の揺れは成長したものだといえることができる（実際には、さらに複雑であるが、ここまでにとどめる）。

このようにして得られた応答スペクトルは、地震動が建築物に与える影響を集約したものである。（なお、「基準地震動」は、岩盤自体の加速度であるから、建物の最も短周期（通常は0.02秒である）の応答加速度をもって、岩盤の加速度と扱う。下記の図の場合、地盤自体の加速度は、200ガルになる。）。

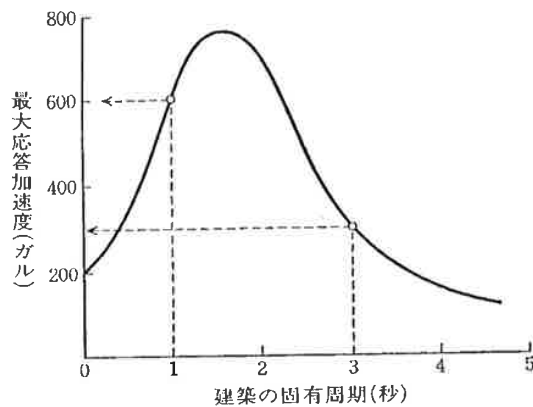


図 VI-10 応答スペクトルの意味

7 耐震設計

同じ地盤の上に立ち、同じ地震動を受けても、作用する力（すなわち地震動入力）は、建築物自体の特性によって違う。建築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を示すのが応答スペクトルである。

たとえば、建築物の固有周期が1秒だと決まると、図VI-10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

ば良いということになる。もし、この時、建築の固有周期が3秒だとすれば、最大応答加速度は300ガルに耐えられるようにすれば良いということになる。このような考え方が採用されたのは、1981年の建築基準法の改訂時であった。

8 より詳細な耐震設計

ここまでみ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。この錘は建築の全重量をひと塊にしたものと考えているので、これから求められるものは、建築に働く総体の力である。

総体に働く力はこれでいいが、数階建ての建物の場合の各床に、どのような力が働くかは、これだけでは分からない。原発では、原子炉やポンプ等無数の機器・配管等が設置されており、これらの機器・配管等は、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、この階数分だけ、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・配管等の設計においては、機器・配管等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、設計するということになる。

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・施設についても同様である。

9 物が壊れれば、固有周期が変化する

更にやっかいなのは、物が壊れれば、その固有周期は変化するということである。すなわち、物には、すべて固有周期があり、低層建築の固有周期はガタガタ速く揺れる短周期、柔らかい高層建築はユラユラとゆっくり揺れる長周期であると前述した。今、これが、何らかの理由で壊れかけているとしよう。そうすると、固有周期は、短周期側から長周期側にずれることがある。そうすると、元の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（もともとそうして設計された）、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ってしまい、設計時点での期待とは別の挙動を示すことがあり得る。建築物にかかる力（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、いつもそうだとは限らない。したがって、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。