2. 長周期地震動について

2.1 長周期地震動とは

長周期地震動は、2003年十勝沖地震(平成15年9月26日, M8.0)の際に、震央から約250km離れた苫小牧市内で発生した石油タンク火災(図2.1)や、翌年の2004年新潟県中越地震(平成16年10月23日, M6.8)の際に、東京都心の高層建物で発生したエレベーターの故障(日本建築学会,2007)などの原因の一つとして注目され、地震動による被害を考える上で極めて重要な課題の一つとなっています。2011年東北地方太平洋沖地震では、首都圏で高層建物が揺れているのが肉眼で確認され、震源域から遠く離れた大阪市内のいくつかの高層建物でも、長周期地震動の揺れによりエレベーターが停止したなどの影響が報告されています(例えばAsahi.com,2011;大阪府,2011;科学技術振興機構、2011)。

長周期地震動が構造物に影響を与えるなど工学面でも注目されるようになったのは、歴史的には 1968 年十勝沖地震 (M7.9) が初めてとされており、遡って 1964 年新潟地震 (M7.5) での石油タンク火災なども長周期地震動によるものと考えられています。世界的には、1985 年にメキシコで発生したミチョアカン地震 (M8.1) で、震源から約 400 km 離れたメキシコシティにおいて、長周期地震動により高層建物が倒壊するなどの甚大な被害がもたらされたことは広く知られています(工藤, 2008; Koketsu and Miyake, 2008)。更に、2008 年 5 月 12 日に中国の四川省で発生した地震 $(M_w$ 7.9) の際にも、長周期地震動により、震源から 1500 km 以上も離れた北京・上海・台北などでも高層建物が大きく揺れたとの報告があります(古村、2008)。

長周期地震動とは、文字通り解釈すれば、長い周期の地震動(地震による地面や地中の揺れ)です。海における波と同じように、地震波は地面や地中を伝わる波ということができます。海を波が伝わっているときには、海面のある一点(船やブイなど)が揺れるように見えるのと同じように、地震波が伝わっているときにも、地面や地中のある一点が揺れます。この揺れを地震動と呼んでいます。ここで周期とは、ある地点が波の山となってから再び山になるまでの時間のことです(図 2.2)。地震動には、



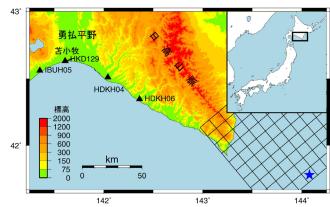


図 2.1 2003 年十勝沖地震で発生した長周期地震動による苫小牧の石油タンク火災 左は総務省消防研究センター提供のタンク被災状況の航空写真。右は 2003 年十勝沖地震の震央 (星印) や震源域(黒格子) と苫小牧の位置関係を示した地図(Koketsu *et al.*, 2005)。

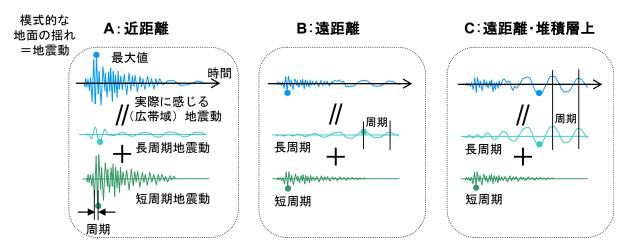


図 2.2 実際に感じる地震動と短周期および長周期地震動との関係

短い周期の波によるガタガタとした揺れと、長い周期の波が伝わって生じるゆっくり繰り返す揺れとが、同時に混ざっています。長周期地震動は後者の揺れを指します。長い周期の波は短い周期の波に比べて減衰しにくく、海の波のうねりのように、震源から遠くてもあまり弱くならずに伝わってきます(図 2.2 の B)。また、長い周期の波は、深い地下構造の影響を受けやすい性質があります。特に、深い地下構造が凹状で軟らかい地層がたまっているところ(堆積盆地)では、軟らかい地層により揺れが増幅したり、表面波と呼ばれる地表に沿って伝わる波が発達したりして、揺れの継続時間が長くなる傾向があります(図 2.2 の C)。また、高層建物、長大橋や石油タンクなどの長周期構造物に影響を与える周期の長い揺れは、低層の建物に影響を与える周期の短い揺れとは様相が異なります。このような長周期地震動の特徴を踏まえ、長周期地震動予測地図では、「全国地震動予測地図」に示されたような揺れの強さ(振幅)の特性だけでなく、周期や継続時間の特性も表現して提示しています(図 2.3)。ところで、周期が何秒より長い地震動を長周期地震動と呼ぶかについては、現在の

ところで、周期が何秒より長い地震動を長周期地震動と呼ぶかについては、現在のところ余り明確な定義がありません。大きな地震の近くで発生する、継続時間は短いものの振幅の大きな揺れを含めるとすると、周期1秒程度を下限とすることが考えられます(Koketsu and Miyake, 2008)。一方で、固有周期の長い大型構造物などに被害を及ぼす地震動という観点から定義することも可能です。すなわち、前述の2003年十勝沖地震の時に、苫小牧において周期約4秒以上の成分を多く含む地震動が発生し、長周期地震動による特徴的な被害をもたらしたことに基づけば、周期4秒以上を長周期地震動と呼ぶ(纐纈, 2006)という考え方も可能でしょう。また、一般的な高層建物が揺れやすい周期(固有周期)は2~3秒前後と言われていますので、それを下限とすることも考えられます。これらの考え方に対して、主要な都市圏の立地する堆積盆地が揺れやすい周期を必ず含むように長周期地震動を定義するという考え方もあります。中央防災会議(2008)によれば、想定東海地震や東南海地震、宮城県沖地震の影響が及ぶ範囲にある大都市圏のうち、揺れやすい周期が最も短いのは、中京圏を含む濃尾平野と仙台圏を含む仙台平野で、その周期はおよそ3~4秒前後に分布しています。

以上のように、長周期地震動の対象とする周期には様々な考え方があります。長周期地震動予測地図 2009 年試作版では、計算上の制約などから周期 3.5 秒以上の地震動

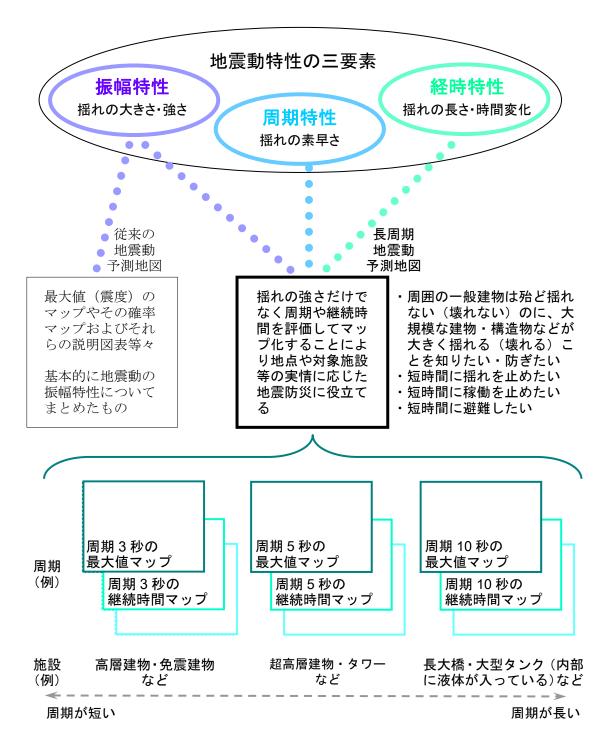


図 2.3 長周期地震動予測地図と従来の地震動予測地図の違い

を工学的基盤上で計算し、周期5秒、7秒および10秒を中心に長周期地震動予測地図を作成しました。しかし、前述の高層建物の固有周期などを考えると、より短周期側も対象に含めることが予測地図の工学的利用の促進につながると期待されます。そこで、南海地震(昭和型)を対象とした今回の2012年試作版では、計算手法の高度化と計算モデルの詳細化により、計算対象とする地震動の下限周期を約2秒まで拡張し、周期3秒、5秒、7秒、10秒の長周期地震動予測地図を作成しました。将来的には、震源モデルの更なる高度化により、周期2秒以下の帯域も含めて地図が作成できるように検討していきます。

2.2 長周期地震動の影響

長周期地震動予測地図について紹介・解説する前に、ここでは、一般的な生活空間 を念頭に置いて、長周期地震動の影響について説明します。

まず、建築物への影響について示します。戸建住宅をはじめ低層のオフィスビル・マンション等の建物の構造体には、今回の計算対象である周期 2 秒以上の長周期地震動は、一般にほとんど影響しません。これに対し高層の建物には、その固有周期が長周期地震動の周期に一致すると、非常に大きな影響を与えると考えられています。これまでの実験や解析によれば、図 2.4 に示すように、一般的な高層建物の場合、その固有周期 T (秒) は、階数を N とすれば概ね T = $(0.049 \sim 0.082) N$ (日本建築学会, 2000)、高さを H (m)とすると概ね T = $(0.015 \sim 0.02) H$ (日本建築学会, 2000) となっています。また、大きく揺れる際には、固有周期は更に長めになる場合もあるといわれています。例えば、50 階建てで高さが 200m 程度の高層建物では T = $3 \sim 4$ 秒程度と見積もられ、実際に東京の臨海部に建つ 50 階建てのある高層建物では、振幅が小さい常時微動では 3 秒程度ですが、東京で震度 5 強を観測した地震時には約 3 5 7 秒で、2 割ほど長めになっています(平田・他, 2006)。なお、長周期地震動の強さに関しては、高層建物の構造安全性を確かめるための構造計算に用いられる、加速度応答スペクトルで定義

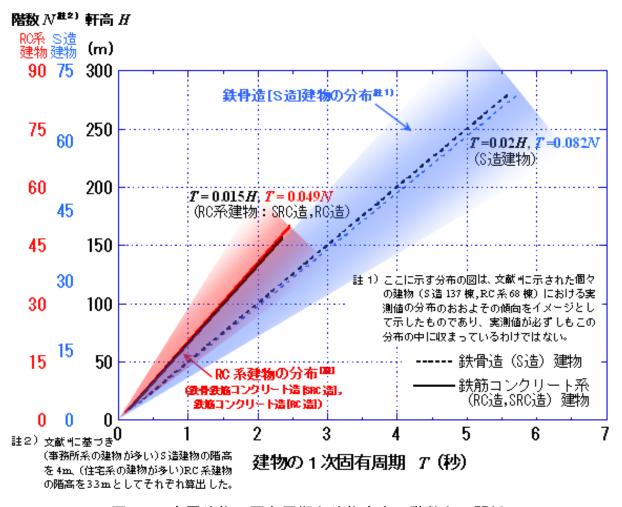


図 2.4 高層建物の固有周期と建物高さ・階数との関係 (日本建築学会, 2000*をもとに作成)

された極めて稀に発生する地震動 (平成 12 年建設省告示第 1461 号) の値を速度応答 スペクトル (14 頁のコラムを参照) に換算すると、長周期の範囲においては 80 cm/s 強であることなども参考になるでしょう (建設省, 2000; 中野, 2006)。

本のです。高層建物とともに長い固有周期をもつとされる免震建物(図 2.5)への影響についても触れておきましょう。免震建物とは、例えば建物の基礎部と上部構造との間に免震装置を入れることによって、地震時に建物へ伝わる揺れを低減する仕組みの建物です。一般に免震装置とは、地震時の(主に水平方向に対する)建物の揺れの周期を長くすることによって地盤の卓越周期からはずす働きをするアイソレータと、揺れによるエネルギーを吸収して揺れを抑える働きをするダンパーとを組み合わせたものです。免震構造は、地震から建物を守る技術として近年脚光を浴びていますが、注意しなければいけない点があります。免震構造はもともと周期の短い低層建物用に開発された技術であるため、その機構上、通常の地震による短い周期の揺れを低減しやすい反面、長い周期の揺れは低減しにくい性質があります。結果として、長周期地震動に対しては免震装置の効果が小さくなる可能性があることに留意する必要があります。

一方、建築物以外の構造物への影響についてみますと、たとえば首都圏の代表的な長大道路橋は、揺れ方によって固有周期が $4\sim9$ 秒程度に変わることが示されています(小森・他, 2005)。また、大型の石油タンクでは、長周期地震動により内部の液体が揺さぶられるスロッシングと呼ばれる現象が起こることが、2003 年十勝沖地震の時に再認識されました。この現象により液体があふれ、それが火災の原因の一つになったと考えられています。各種の評価式など(Housner, 1957; 座間, 1985)を参考にすると、満液状態にある直径 30 m と 60 m の石油タンクのスロッシング固有周期は、それぞれ約7秒、約10秒となります。これらの長い固有周期を持つ長大橋や石油タンクなどと、前述した高層建物や免震建物などの建築物を合わせて、長周期構造物と呼ぶ

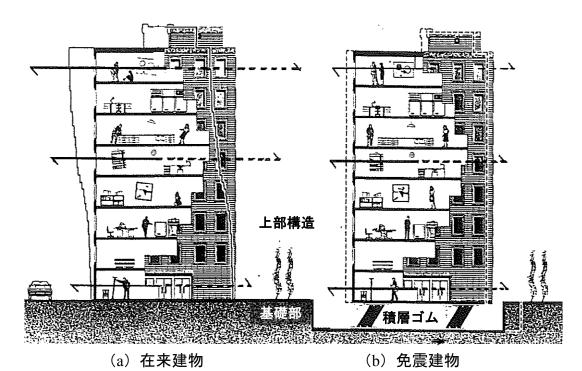


図 2.5 在来建物と免震建物 (清水建設免制震研究会, 1999 に加筆)

こともあります。

次に、長周期地震動による人体感覚に目を向けてみましょう。長周期地震動による人体感覚については、風による振動を概ね何%の居住者が感じるかという居住性の観点での調査から評価することができます。それをグラフにしたのが図2.6です。これを見ると、周期10秒付近で揺れの速度が20cm/sの場合、90%の人が揺れを感じることがわかります(日本建築学会、2004)。また周期5~10秒のゾーンでは、速度が70~90cm/sになるとやや不安を感じるようになります。更に周期5秒付近では速度が約150cm/s以上、周期7秒付近では速度が200cm/s以上になると、避難行動が困難になります(図2.6で「滞りなく行動できない」の線を参照)(Takahashi et al., 2007)。なお同図には、後述する高層建物の室内状況の説明に関連して、住宅内の家具の転倒に関する調査結果を併記しています。これによると、周期5秒付近では、書棚は速度が約140 cm/sになると転倒することが示されています(日本建築学会、2003)。

それでは、大きな長周期地震動に見舞われると、高層建物の室内はどうなるでしょうか。最近、図 2.7 の Eーディフェンスと呼ばれる実大三次元震動破壊実験施設(兵庫県三木市、独立行政法人防災科学技術研究所所管)の 20 m×15 m の大きな震動台上に、30 階建物の上層部 5 階を模した図 2.8 に示すような試験体(固有周期約 3 秒)を載せて実物大の室内の状況を再現し、長周期地震動によりどうなるのかを検証した実験が行われました(榎田・他, 2009)。この実験では、別途実施したシミュレーション解析をもとに、この試験体が想定南海地震の長周期地震動(藤谷・他, 2007)による高層建物の上層階の揺れの状況を再現するように、震動台を加振しました。今回の実験では、試験体の床は周期約 3 秒で約 200 秒間揺れ、その間の揺れの速度の最大値は約 230 cm/s、変位の最大値は約 1.3 m でした。なお、想定東海地震の際に名古屋市内に建つ周期 3 秒の高層建物内での揺れを模擬した別の実験では、速度と変位の最大値がそれぞれ約 500 cm/s、約 2 m にも及び、かつその揺れが 2 分余りにわたり継続することが確認されました(福和・他, 2007)。これらの結果は、片道数メートルの距離を僅か数秒間で往復する運動を数十回繰り返すことに相当します。このことからも、長周期地震動による高層建物の揺れが、いかに恐ろしいものであるかが容易に想像で

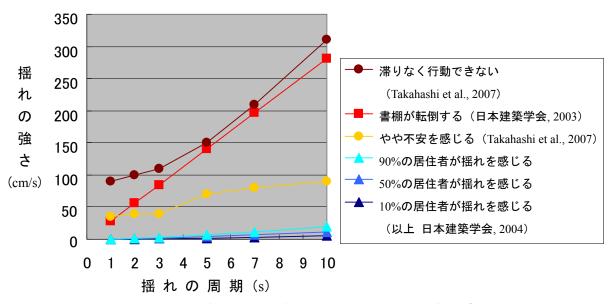


図 2.6 人体感覚・家具転倒に長周期地震動が及ぼす影響



図 2.7 Eーディフェンスの概観図 (防災科学技術研究所, 2008b)



図 2.8 試験体 (榎田・他, 2009 に追記)

きます。

図2.9 は、先の試験体において、オフィスを模した部屋の地震前と地震後の様子を示しています。一般に、オフィスには収納能力の高い、背の高い書棚などがあります。この実験から、背の高い書棚は、治具などで床や壁に固定されていなければ転倒は免れないことが実証されました。また、仮に書棚を固定していても、収納物の飛散を完全に防ぐことは容易ではありません。更に、ストッパーが効いていないキャスター付きの家具や100 kg にもおよぶコピー機などの機器は、一度に最大3mほども大きく移動しました。長周期地震動は継続時間が長くなることから、キャスター付きのコピー機などは、机や壁に何度も衝突しながらふらふらと長い時間にわたり動き続け、壁に穴を開ける状況も観察されました(榎田・他、2009)。

図 2.10 は、先の試験体において、集合住宅のキッチン内を模した部屋が、長周期 地震動で揺らされた後の様子を示しています。家具を固定した場合と固定していない 場合とを再現して実験しています。集合住宅でも、家具や収納物の振る舞いは、基本 的にはオフィスの場合と同じです。キッチンでは、背の高い冷蔵庫や食器棚が転倒す る可能性が非常に高く、またリビングでも、重いテレビが大きく移動してしまうこと も実験で確認されました。

では、このような被害を軽減するためには、どのような対策を事前に講じておけば良いのでしょうか。図 2.10 の比較から、こうした背の高い家具や大きく重い物については、種々の固定器具などを用いて適切に固定するのが有効であることが分かります。また、食器棚などでは、たとえ棚を固定していても、中に入っている食器類や調理器具が落下・飛散する可能性が十分にあります。このため、扉開放防止器具などを取り付けることも大切です。たとえ震源から遠く離れていても大きな地震により長周期地震動が発生すると家具や収納物などが突然に凶器と化してしまうことをオフィスや各家庭でしっかり認識し、対策する必要があります。しかしながら、日常生活の中では、万全な状態を維持し続けるのはなかなか難しいことも事実です。そのため、物をできるだけ置かない比較的安全な部屋を予め決めておき、地震が来たらそこに逃げ込むこと、最低限寝室は安全にしておくことなど、日常からオフィスや家庭で地震時の対応を確認しておくことも対策の一つと考えられます。遠方の大きな地震による長周期地震動の場合、通常の(短周期の)地震動に比べて、揺れ始めてから揺れが大





図 2.9 オフィスの状況 (左:加振前,右:加振後)(榎田・他,2009)





図 2.10 集合住宅のキッチンの状況 (左:家具転倒対策なし, 右:対策あり) (榎田・他, 2009)

きくなるまでに多少時間がかかります。今後は、緊急地震速報の有効活用など、長周期地震動が生じる前の退避行動などの対策についても検討を進めることが必要です。なお、図 2.9 や図 2.10 に示した状況は、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のホームページ (http://www.bosai.go.jp/hyogo/research/movie/movie.html) から動画を入手できますので、ぜひ一度ご覧下さい。ご覧になると、長周期地震動への対策を施す必要性がより一層ご理解いただけるでしょう。また、長周期地震動に限った話ではありませんが、大地震時の室内の被害の実態については、1995年兵庫県南部地震の時のNHK神戸放送局内の映像や神戸市内のコンビニエンスストアの防犯カメラ映像なども、インターネット上に公開されています(例えば http://library.skr.jp/hansindaisinsai.htm など)。

2.3 長周期地震動予測地図の見方

長周期地震動予測地図の見方について、今回の 2012 年試作版で対象とした南海地震(昭和型)の検討結果(詳細は3章を参照)を例に挙げて示します。長周期地震動予測地図は、地震本部が公表している「全国地震動予測地図」の中の「震源断層を特定した地震動予測地図」の一種に相当します。

図 2.11 は、「全国地震動予測地図」に収められた、簡便法を用いて求められた海溝型地震の予測震度分布図(地震調査委員会, 2009c)の手法に基づき作成した、南海地震(昭和型)の簡便法による地表面の予測震度分布を示しています。「震度」は、比較的短周期(約 0.1~1 秒程度)を中心とした揺れや被害に対応しています。しかし、震度と対応していない長周期地震動は、図 2.11 と同様には表現できません。

そこで長周期地震動予測地図では、別の方法で揺れの強さや揺れの継続時間を表現します。図 2.12 や図 2.13 がその例です。図 2.12 は、工学的基盤上で計算された速度波形を用いて長周期地震動の揺れ幅(振幅)の最大値(最大速度)の面的な分布を示したもので、水平 2 方向(NS 方向と EW 方向)の速度のうち大きい方を表示しています(単位:cm/s)。ここでは、地中の工学的基盤上での揺れを示していますが、表層地盤の卓越周期よりも十分に長周期を対象とする場合には、近似的にこれを地表の揺れと同程度と見なせます。また図 2.13 は、速度 1 cm/s を超える揺れが継続する時間の分布を示しています(単位:s)。これらは、図 2.3 に挙げた地震動の特性を示す要素のうち、振幅特性(最大値)と経時特性(継続時間)を示しています。

また、周期特性を示す図として、周期3秒、減衰定数5%の最大速度応答値分布を図2.14に示します。この速度応答値は、地盤に対する構造物の相対速度応答値です。こちらも水平2方向の値のうち大きい方を表示しています(単位:cm/s)。前節で述べたように、高層建物などの構造物は、その固有周期が長周期地震動の卓越周期に一致すると、非常に大きな影響を受けて揺れます。この時の建築物や構造物の揺れ方を応答と呼びますが、ある固有周期の構造物の応答の大きさを見積もる目安として、応答スペクトル(14頁のコラムを参照)という指標がしばしば用いられます。この図は、地表の揺れに対して、固有周期が3秒の構造物(図2.4より概ね高さ150m程度,40~45階の高層建物が該当)がどのように揺れるのかを、地盤に対する構造物の相対速度応答の最大値分布で表したものです。この他にも、本報告書では周期5秒、周期7秒、周期10秒の図を作成しています(4章を参照)。図に示す応答速度は長周期構造物の代表的な揺れの速度であり、例えば最上階など、構造物上の部位によってはそれ以上の揺れになる可能性があります。

図 2.11 と図 2.12 は揺れの強さを別の指標で示したものであることには注意が必要です。すなわち、短周期の地震動と長周期の地震動とでは、影響を及ぼす構造物が異なります。例えば、固有周期が短い建物は、図 2.12 のような長周期地震動の影響をほとんど受けずに図 2.11 の震度分布に応じて揺れる一方、固有周期が長い長周期構造物は、例えば固有周期が 3 秒付近の建物の場合、図 2.14 の応答スペクトル分布に応じて揺れることになります。一方、地域分布については、定性的には次のように見ることもできるでしょう。図 2.11 の震度分布からは、震源に近い紀伊半島南部や高知県・徳島県の一部などで最大震度 6 弱の揺れとなっており、その他の四国全域や大阪平野などで震度 5 強となっているのに対し、濃尾平野では最大でも震度 4~5 弱程度しか予測されていません。一方、長周期地震動の観点から見た場合は、震源に近い場所と同等程度の長周期の揺れ(図 2.12)が大阪平野や濃尾平野、徳島県の吉野川沿いなどで長く続きます(図 2.13)。更に、固有周期が短い建物などが震度 4 以下程度で揺れているのに対し、例えば周期 3 秒の長周期構造物では、震源に近い場所と同等か、場所によってはそれ以上の揺れが予測されます(図 2.14)。長周期構造物が揺れ続ける時間は、地表の揺れの継続時間(図 2.13)よりも長くなる場合があります。

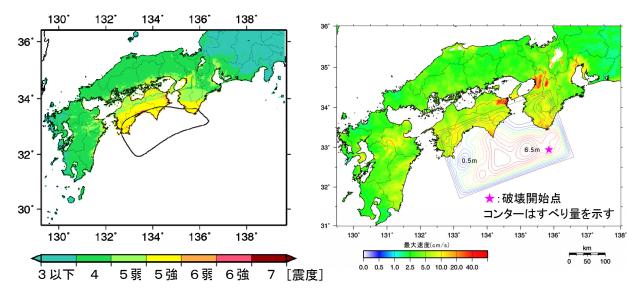


図 2.11 南海地震(昭和型)の簡便法に よる予測震度分布図(M 8.0)

図 2.12 南海地震(昭和型)の長周期 地震動の最大速度の分布

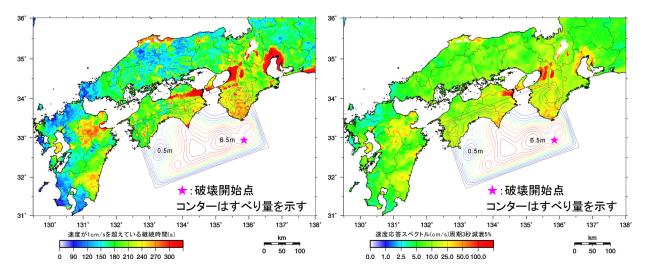


図 2.13 南海地震(昭和型)の長周期 地震動の継続時間の分布

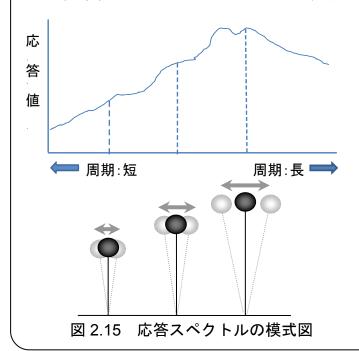
図 2.14 南海地震(昭和型)の地震動 の相対速度応答スペクトル (周期 3 秒)の分布

このように、従来の震度で説明される比較的短周期の地震動と長周期地震動とでは、主な影響を与える建物などが異なるほか、震源から遠く離れた場所への影響の与え方などにも違いがあります。特に、図 2.13 に示した継続時間は、長周期地震動にさらされる構造物の耐震性を考慮する上で非常に重要な指標であり、波形の最大値や応答スペクトルなどと同様に注意して見る必要があります。

3章に示す長周期地震動予測地図と、**図 2.11** に参考として掲載した「全国地震動 予測地図」から抜粋した簡便法による南海地震(昭和型)の予測震度分布図とを比較 しながら、各地域の揺れ方の特徴を読み取ってみると、長周期地震動の意味をより深 く理解できるでしょう。

コラム:速度応答スペクトルとは?

応答スペクトルとは、いろいろな固有周期(建築物や構造物が揺れやすい周期)を持つさまざまな建築物や構造物に対して、地震動がどの程度の揺れの強さ(応答)を生じさせるかをわかりやすく示したものです(図 2.15 参照)。



建築物や構造物の揺れは、その 固有周期や減衰定数(揺れが時を とともに弱まっていく程度をいいて 定数のことで、減衰比ともとします。本予測地図では5%として 数をもしてを 数をもしての最大値が採用される 算され、その最大値が採用される 事され、その最大値がなく、速 地位時間における変化(= 速も を もの変化率(= 加速度)で りその変化を りその変化率(= 加速度)で ります。速度応答スペクト と は、地盤に対する一質点系の 対応答速度の最大値のことです。

コラム:東北地方太平洋沖地震の地震動の速度応答スペクトル

2011年東北地方太平洋沖地震(M_w 9.0)と2004年新潟県中越地震(M6.8)の際に、東京都文京区の東京大学地震研究所で観測された地震動の速度応答スペ

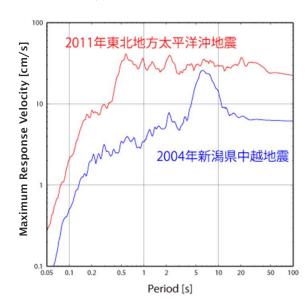


図 2.16 速度応答スペクトルの例 (東京大学地震研究所, 2011 を一部修正)

クトル (減衰定数 5 %) の例を比較 しました (**図 2.16** 参照)。

新潟県中越地震(図の青線)では、 主に高層建物に影響を与える周期 7秒前後の周期帯域の地震動が卓越したのに対し、東北地方太平洋沖地震(図の赤線)では、それと同程度の最大速度応答が0.5~20秒の広い周期帯域で発生し、高層建物のみならず周期の短い低層建物にも影響を与えた可能性があります。ただし、長周期地震動予測地図2009年試作版で対象とした想定東海地震による東京都庁での計算結果と比較すると、そのスペクトルは全体的に小さくなっています。