

の前イベント震源モデルによる長周期地震動予測地図を作成するとともに、構築した地下構造モデルと地震動計算手法の妥当性を検証しました。

また、内閣府は 2015 年 12 月に「南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告」を公表しています。この報告書では、南海トラフ沿いの巨大地震が発生した際に想定される長周期地震動の地表の揺れの推計を、三大都市圏を含む関東から九州にかけての領域（日本海側を除く）で実施し、その全体像を明らかにしました。さらに、長周期地震動が卓越すると想定される三大都市圏において、地表の揺れを入力波として超高層建築物の揺れを推計し、構造躯体への影響や室内における家具の移動・転倒、人の行動難度を評価し、必要となる長周期地震動対策を取りまとめています。さらに、国土交通省では 2016 年 6 月に「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について」をとりまとめ、長周期地震動の対策の強化を地方公共団体等の関係団体あてに通知しています。

本検討では、多数の高層建物が集中する首都圏を対象に相模トラフ巨大地震の長周期地震動を評価しました。2011 年東北地方太平洋沖地震を踏まえて公表された相模トラフ沿いの地震活動の長期評価（第二版）（地震調査委員会，2014）では、これまで考えられてきた固有地震モデルに固執することなく、想定し得る最大クラスも含めた地震の多様性を考慮した評価を試みるという方針が示されています。本検討では、これまでのような単一のシナリオ地震の評価ではなく、シナリオの多様性を考慮した評価を試みました。

今後、新総合基本施策に沿って新たな知見を反映させつつ、長周期帯域を含む広帯域地震動の調査研究を推進していく予定です。

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、 M 8.0）の際に、震央から約 250 km 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、 M 6.8）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（例えば大阪府，2011；科学技術振興機構，2011）。例として、K-NET 新宿で記録された地震動を図 2.2 に示します。

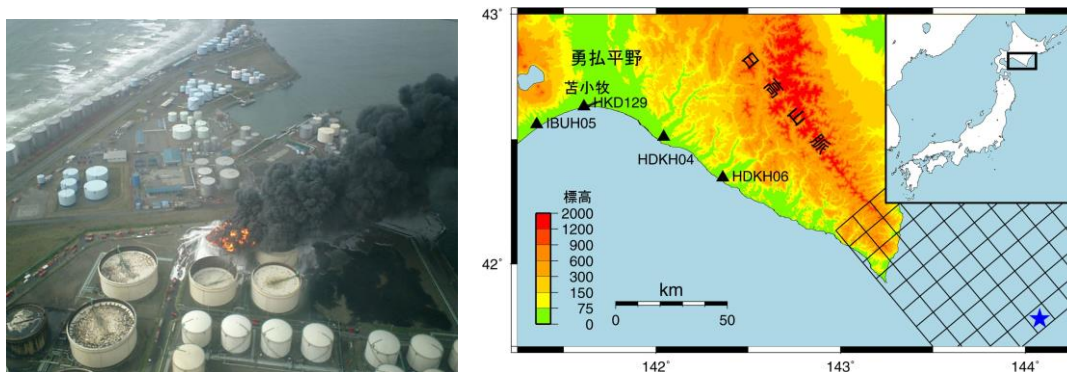


図 2.1 2003 年十勝沖地震で発生した長周期地震動による苦小牧の石油タンク火災。左は総務省消防研究センター提供のタンク被災状況の航空写真。右は 2003 年十勝沖地震の震央（星印）や震源域（黒格子）と苦小牧の位置関係を示した地図（Koketsu *et al.*, 2005）。

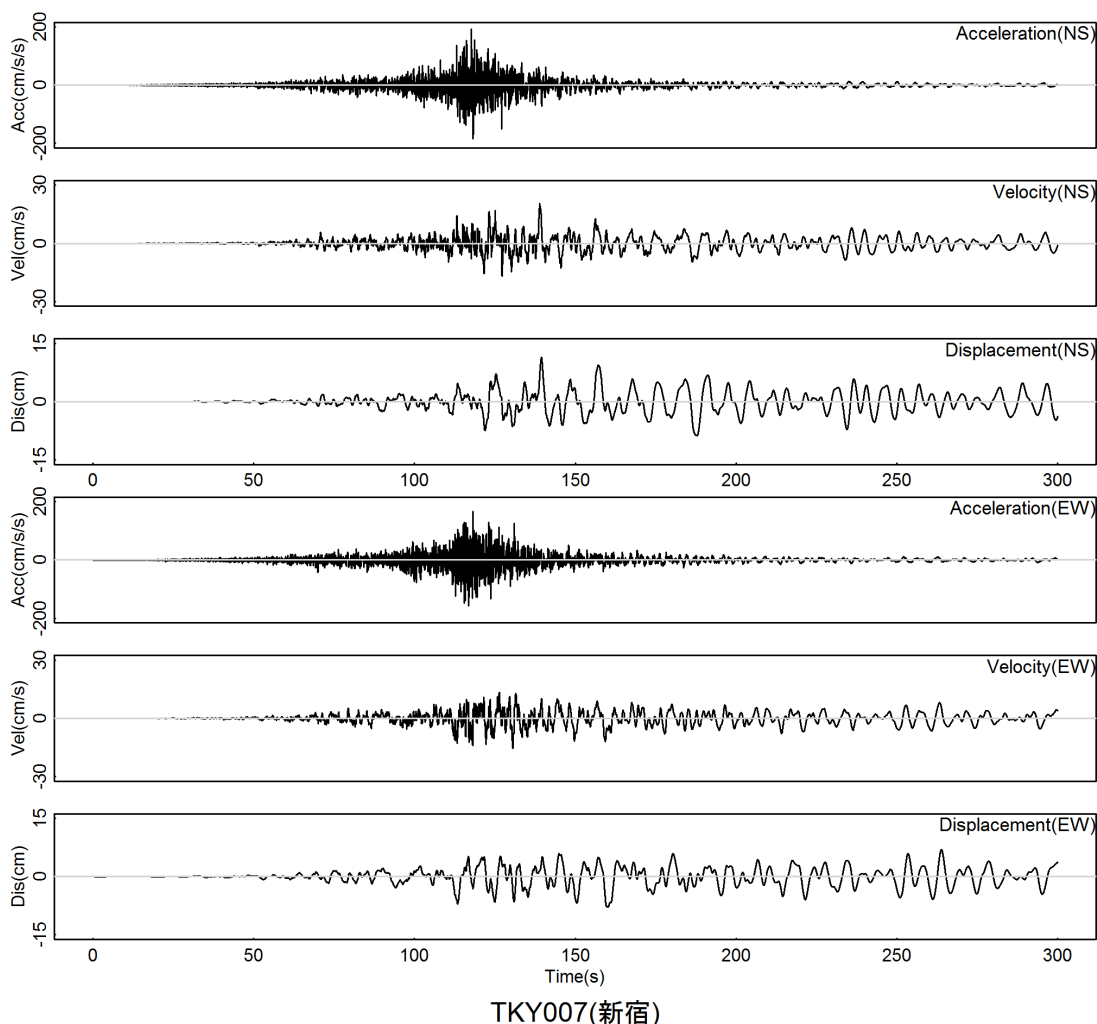


図 2.2 2011 年東北地方太平洋沖地震の水平地震動観測加速度波形とそれを積分して得られた速度・変位波形の例（上から順に、水平動南北成分の加速度・速度・変位波形、水平動東西成分の加速度・速度・変位波形）。

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 ($M7.5$) による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400km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も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出来ます。波が海を伝わっているときには、海面のある一点 (船やブイなど) が揺れて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。そして周期とは、ある地点が波の山となってから、一旦谷を経て再び山になるまでの時間のことです (図 2.3)。地震動には、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ゆったり繰り返す揺れが、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伝わっていきます (図 2.3 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 2.3 の C)。高層建物、長大橋や石油タンクなど大型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 2.4)。

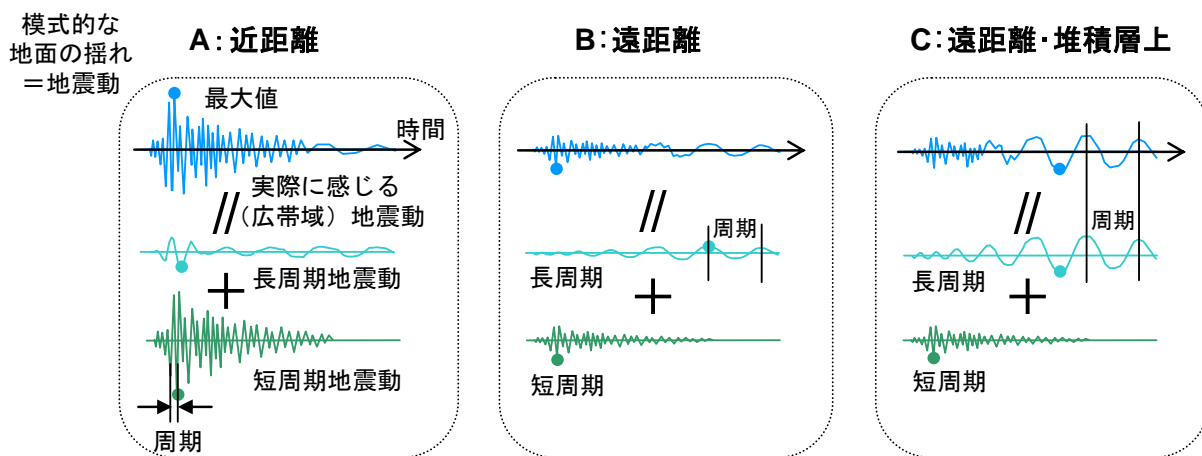


図 2.3 実際に感じる地震動と短周期および長周期地震動との関係。

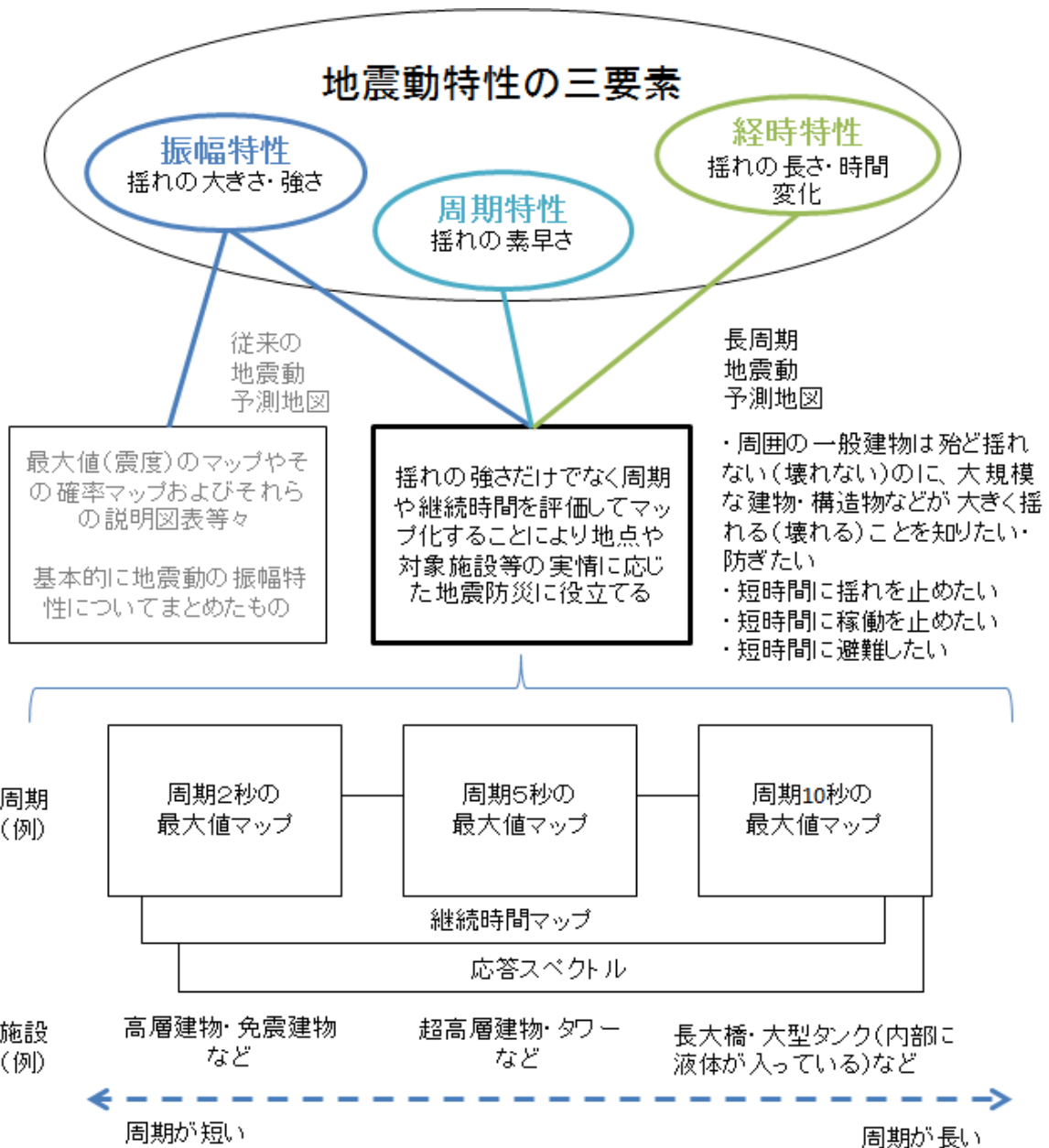


図 2.4 長周期地震動評価と従来の地震動予測地図の違い。

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、建物が揺れやすい周期 (固有周期) に着目し、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、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 (瀨瀬, 2006) という考え方も可能でしょう。また、一般的な高層建物の固有周期は 2~3 秒前後とされていますので、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。「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長周期地震動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、「2012年試作版」では、計算対象とする地震動の下限周期を試験的に約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。今回の長周期地震動評価では、特性化震源モデルの高度化により、周期2秒までの帯域を更に高精度に評価しました。

2. 2 長周期地震動の影響

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、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2.5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 $T=(0.049\sim 0.082)N$ 、高さを H （m）とすると概ね $T=(0.015\sim 0.02)H$ となっています（日本建築学会, 2000）。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固有周期が3～4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3.7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に換算すると、長周期帯域で80 cm/s強（告示スペクトル）であることも参考になります（建設省, 2000; 中野, 2006）。

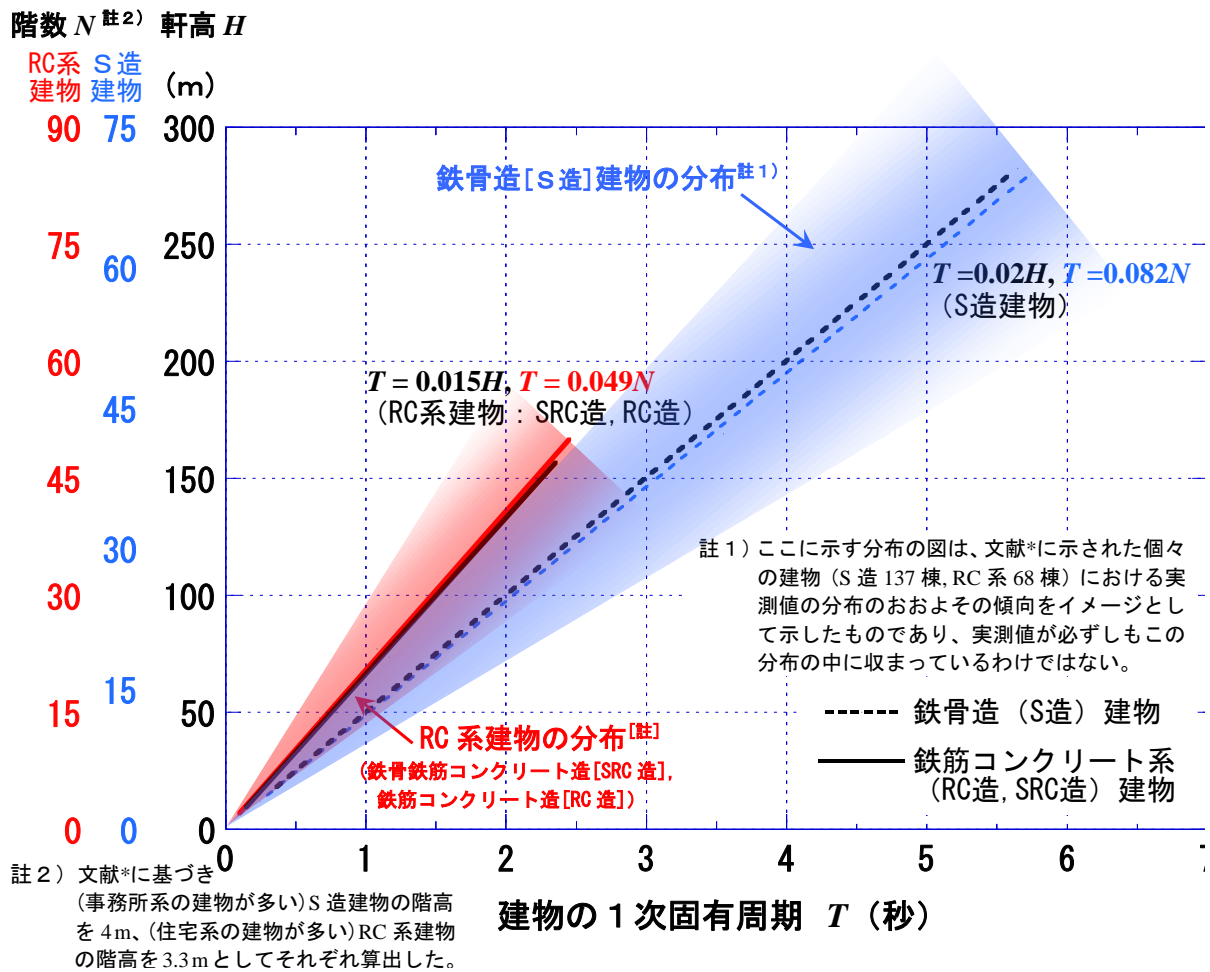


図 2.5 高層建物の固有周期と建物高さ・階数との関係
(日本建築学会, 2000*をもとに作成)。

ここで、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 2.6)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、地震時に建物に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外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。

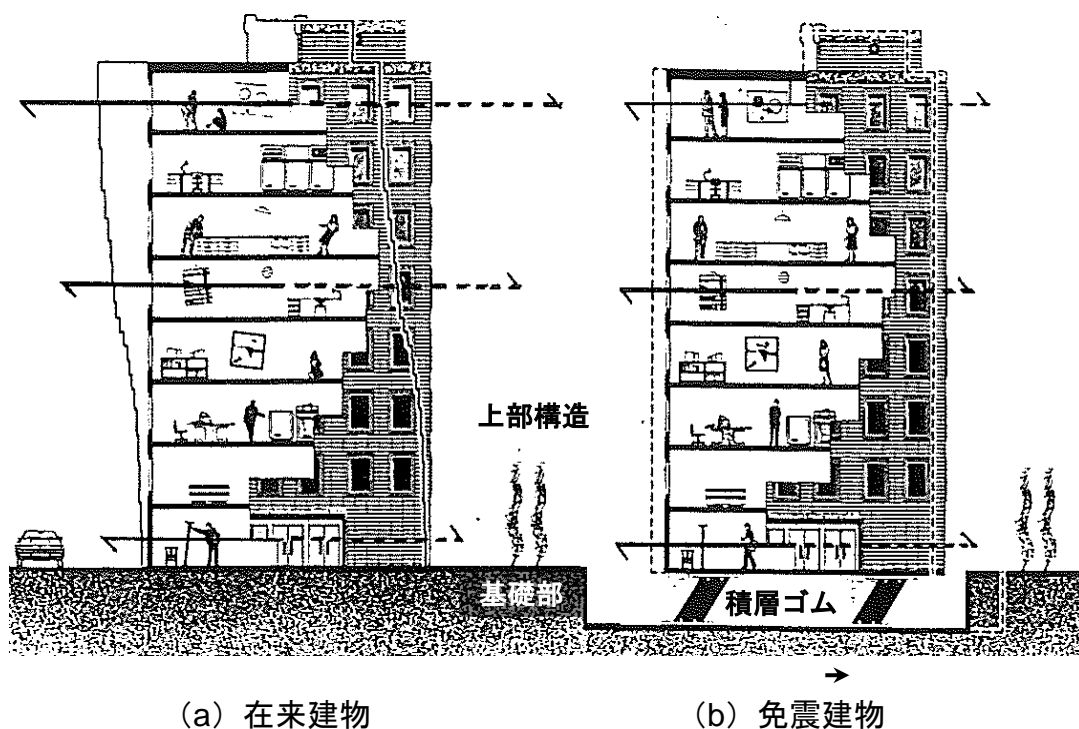


図 2.6 在来建物と免震建物（清水建設免制震研究会, 1999 に加筆）。

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、部位や揺れ方によっても変わりますが、1~9 秒程度の固有周期があることが示されています（山本・他, 2009）。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らされるスロッシングと呼ばれる現象が起きることが、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 2.7 です。これを見ると、周期 10 秒付近で揺れの速度が 20 cm/s の場合、90 %の人が揺れを感じるようになります（日本建築学会, 2004）。また周期 5~10 秒のゾーンでは、速度が 70~90 cm/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 150 cm/s 以上、周期 7 秒付近では速度が 200 cm/s 以上になると、避難行動が困難になります（図 2.7 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)。

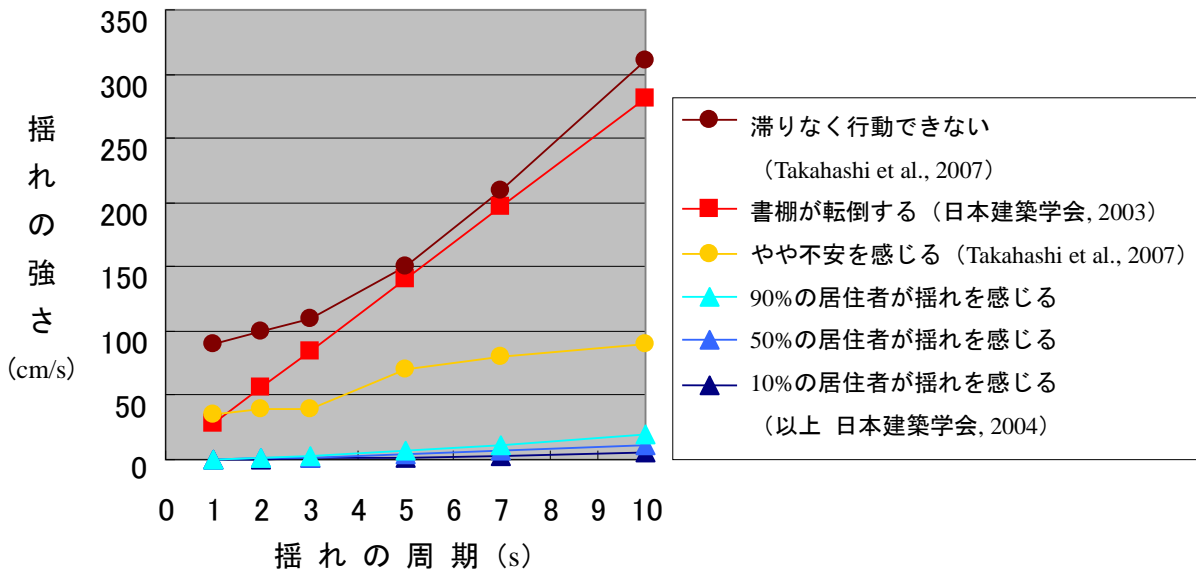


図 2.7 人体感覚・家具転倒に長周期地震動が及ぼす影響。

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。図 2.8 に示した E-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、国立研究開発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 2.9 に示す試験体（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、室内でどのような現象が起こるのかを検証する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。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、想定東海地震による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 と約 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 m 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、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を容易に想像できます。



図 2.8 Eーディフェンスの概観図
(防災科学技術研究所, 2008b)。

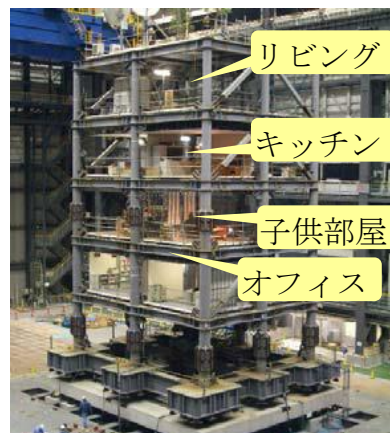


図 2.9 試験体
(榎田・他, 2009 に追記)。

図 2.10 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があり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いろいろな方向へ移動し続け、壁に穴を開ける状況も観察されました (榎田・他, 2009)。

図 2.11 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などが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 2.11 の比較から、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こと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 2.10 や図 2.11 に示した状況は、国立研究開発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から動画を入手できますので、ぜひ一度ご覧下さい (<http://www.bosai.go.jp/hyogo/research/movie/movie.html>、2016 年 9 月現在)。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。



図 2.10 オフィスの状況（左：加振前，右：加振後）（榎田・他，2009）。



図 2.11 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）。