

## 講義内容

### 未知の地震と住まいの安全 一究極の耐震設計とは一

竹 脇 出

住まいは私たち一人ひとりの生活の基盤をなすものであり、同時に、多くの人にとって一生の間に投資する最も大きな対象です。日本においては自然災害、とりわけ地震災害が大きな脅威であることはいうまでもありません。台風は毎年やって来て予報が出ますが、地震には出ません。たとえ‘地震予報’が出たとしても、私たちは避難することはできますが、家は地球上に存在する以上、地震の揺れから逃れることはできません。また、私たちが生きている間に住まいを脅かす地震に遭遇するかどうか、さらには遭遇するとすればどのような地震に遭遇するかも不確実な状況です。このような大きな脅威である地震に対して、私たちは住まいを守るどのような術を持っているのでしょうか。この講義では、未知の地震に対して安全・安心な建物を実現するための新しいアプローチ（免震・制震・最悪シナリオ想定など）について解説します。

## 講師紹介

たけ わき いずる  
竹 脇 出 教授（京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻）

専門分野：建築耐震設計、免震・制震、ロバスト設計、応用力学、都市環境

現在の研究テーマと内容：建物の耐震・免震・制震について、応用力学的な観

点から、その基本的な原理やしくみを明らかにすることに興味を持

つ。特性や発生時期の特定が困難な地震動を未知の現象として捉え、最悪ケースを明らかにすることにより安全な耐震設計を実現する新しいアプローチを提唱している。

また、建物の安全性に関わる構造設計のプロセスを論理的に捉えるテーマに関心を持ち、トライアルアンドエラー的な従来の考え方を根本から問い直す研究を進めている。

さらに、制震構造を用いて学校建築を耐震補強する研究についても興味を持ち、産学連携を進めている。国際的には、構造力学・構造工学に関する国際専門誌の編集委員などを通じて貢献を行っており、カリフォルニア大学サンディエゴ校などとの共同研究も進めている。



## 未知の地震と住まいの安全 —究極の耐震設計とは—

京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 竹 脇 出

## 1. はじめに

住まいは私たち一人ひとりの生活の基盤をなすものであり、同時に、多くの人にとって一生の間に投資する最も大きな対象です。この財産が守られることは私たちの願いですが、日本においては自然災害、とりわけ地震災害が大きな脅威であることはいうまでもありません。台風は毎年やって来て予報が出ますが、地震には出ません。たとえ‘地震予報’が出たとしても、私たちは避難することはできますが、家は地球上に存在する以上、地震の揺れから逃れることはできません。また、私たちが生きている間に住まいを脅かす地震に遭遇するかどうかは不確実な状況です[1, 2]。それでは、このような大きな脅威である地震に対して、私たちは住まいを守るどのような術を持っているのでしょうか。今日はこのような点についてお話させていただきます。

私たちの生活する家や職場である建物を地震に対する揺れから守るために、「耐震構造」という学問領域があります。この耐震構造が学問として認識されたのは、1891年の濃尾地震以後と言われていています（図1）。以来、大きな地震を経験するたびに私たちは多くの教訓を得、耐震設計に反映させてきました。ところが、歴史をひもといて見ますと大きな問題点が存在することがわかります。それは、地震のたびに耐震設計にとって新しい問題が露見し（図2）、多数の地震を経験した現在でも、尚収束する気配がみられないことです。このような事後処理的な対応のみを続けていたのでは、到底納得のいく設計法の構築など期待できないことは明らかです[3]。このような問題点に的確に対応するには、直面している問題と対峙し、新しい研究領域を開拓するほどの画期的な理論や方法を構築することが重要です。その代表例として、棚橋諒博士（昭和4年京大建築学科卒）による「速度ポテンシャルエネルギー説（1935）」があります[4]。地震の破壊力は地動最大速度の2乗に比例し、建物の耐震力は倒壊までに建物に蓄えられるエネルギーによるというもので、現在の建物の耐震設計の理論的な基礎を構築したものといえます。1935年（昭和10年）というコンピュータやその他の研究のための道具がなかった時代に、その後の世界の研究界・建築界

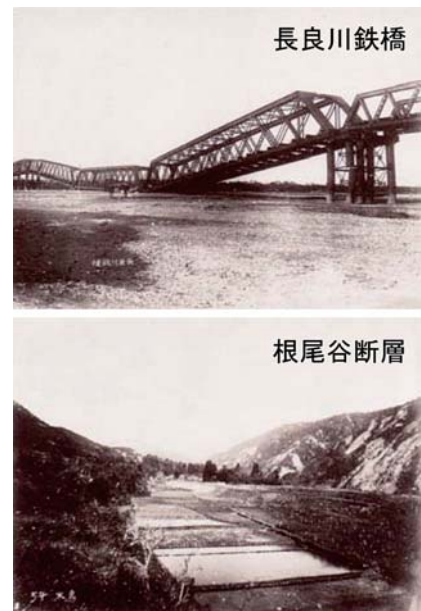


図1 濃尾地震（1891）

を何十年にも渡ってリードする研究がなされたことに驚きを感じます。

それでは、最近ではどのような工夫がなされているのでしょうか。上記の問題点に対応する新しい方法として、1980年代から耐震構造に代わるものとして免震構造や制震構造[3, 5]が発展してきました(図3)。最近では、免震構造は戸建住宅、高層マンション、病院、精密機器工場などをはじめとする多くの建物に導入され(図4)、制震構造は高層・超高層建物には欠くことのできない技術となりつつあります。



図2 大地震のたびに新たな災害形態(一部出典:EERI)

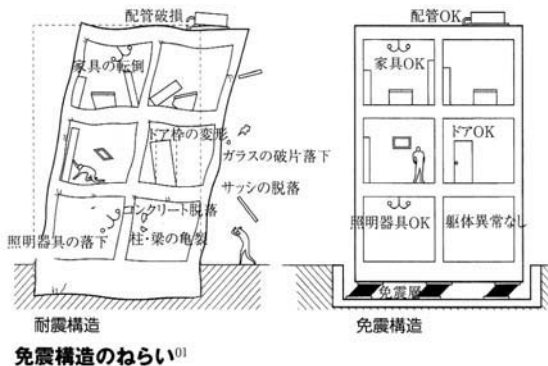


図3 耐震・免震

(出典:建築設計資料集成, 日本建築学会)

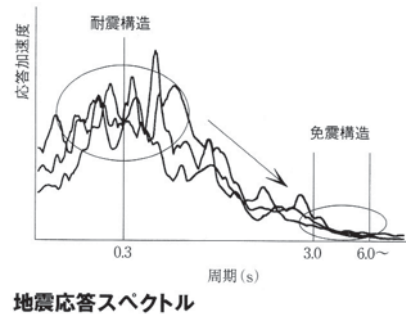


図4 免震原理(出典:図3と同一)



図5 京都大学ベンチャービジネスラボラトリー棟(国立大学第1号免震)

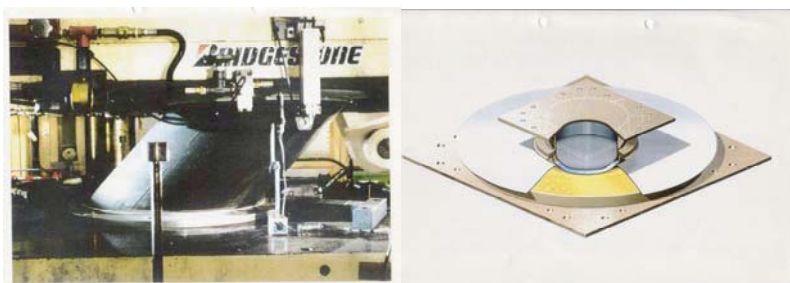


図6 積層ゴムの変形(実験時)と多機能直列型粘性ダンパー(提供:大林組技研)

## 2. 免震構造

最初に免震構造についてお話ししましょう。私たちが働き、学ぶ京都大学にも本格的な免震建物が2棟あります。一つは、兵庫県南部地震を契機として1997年に新規竣工したベンチャービジネスラボラトリー棟（以下VBLと略）であり、ナノテクノロジーなどをはじめとする研究・開発が行われています。もう一つは、京都大学のシンボルである時計台の建物（時計台とホール）です。こちらは創立100周年事業の一環として2003年に免震技術を用いて改修されたものです。従って、両者には新築と改修という大きな違いがあります。

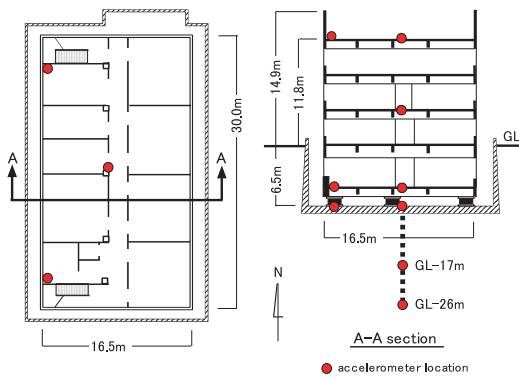


図7 高密度地震観測システム (VBL)

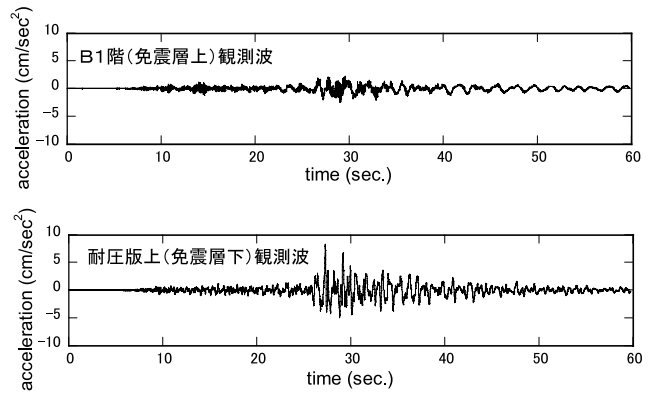


図8 京都大学 VBL 棟における地震観測例  
(1999年2月12日京都府南部地震)

まず、VBLについて見てみましょう。VBLは地上3階・地下1階の鉄筋コンクリート建物で、地下1階の下に免震装置が設置されています（図5）。形は整形で低層建物であり、免震建物の教科書のようなものです。この免震装置は、建物を地面から切り離すための積層ゴムと、建物に減衰を与えるための粘性ダンパーから構成されています（図6）。積層ゴムは、鉄板と天然ゴムが何重にも重ねて構成されており、水平方向の剛性は小さく抑えて同時に鉛直方向の剛性や強度を確保するための工夫がなされています。一方、免震装置として採用される粘性ダンパーは日本でも希少価値のあるもので、2種類のダンパーが直列配置されており、微振動から大きな振動まで有効に効くことが特徴です。従って、VBLのような微振動を嫌う精密機器を扱う研究施設には最適の装置といえます。このVBLの建物の1次の固有周期は小さな振動時において約2秒程度で、大きな振動時には3秒近くになります。免震装置がない場合には、このような大きさの鉄筋コンクリート建物の1次の固有周期は約0.5秒以下ですので、周期が大幅に伸びていることがわかります。免震建物では、通常地震動が持っている周期（約1秒以下）と免震建物の周期をずらすことで、地震の影響から建物を守っているといえます。VBLの存在する地盤は地盤の中でも堅固な地盤に属し、免震建物と共振を起こすような長い周期の地震動が発生しにくい状況となっています。このこともVBLの免震建物が免震建物の教科書的な存在であることの一因となっています。このVBLでは、竣工以来、私たちが中心となって地震動観測を行っています。観測は、建物内と地盤

の中の計27成分で行われており、日本の中でも高密度に観測が行われているものといえます（図7）。竣工以来、最大の震度は4であり、設計で想定しているような大きな変形は経験していませんが、中小規模の地震に対して大きな免震効果が得られていることが観測されています（図8）。

一方、時計台の建物は、地下1階、地上2階、塔屋3階の鉄筋コンクリート建物で（図9）、高減衰積層ゴムと呼ばれる水平剛性の小さい装置と弾性すべり支承と呼ばれる減衰装置が設置されています。時計台の建物は、大正時代の建築ですので、基礎構造が十分ではなく、免震による改修の際には、この基礎構造の補強もなされています。免震装置の中の高減衰積層ゴムは名前の通り、天然ゴムとは異なりそれ自身に減衰特性を有しています。また、弾性すべり支承という装置は、上部建物の重量を支持すると同時に、地震時には摩擦抵抗の極めて低い面がすべることによりエネルギーを消費して減衰効果を得る装置です。時計台の建物には、高減衰積層ゴムが80個、弾性すべり支承が10個設置されています。この建物の1次の固有周期は、小さな振動時において約1.5秒程度で、大きな振動時には3.5秒近くになります。VBLの建物と同様に、通常地震動が持っている周期（約1秒以下）と共振させない計画がなされています。これまでに大きな地震を経験したことはありませんが、設計段階では、農学部グラウンドから学術情報メディアセンターの横の周辺に存在する花折断層で想定される地震に対する安全性も検討されています。また、この時計台の建物でもVBLほどの高密度ではありませんが地震観測が行われています。

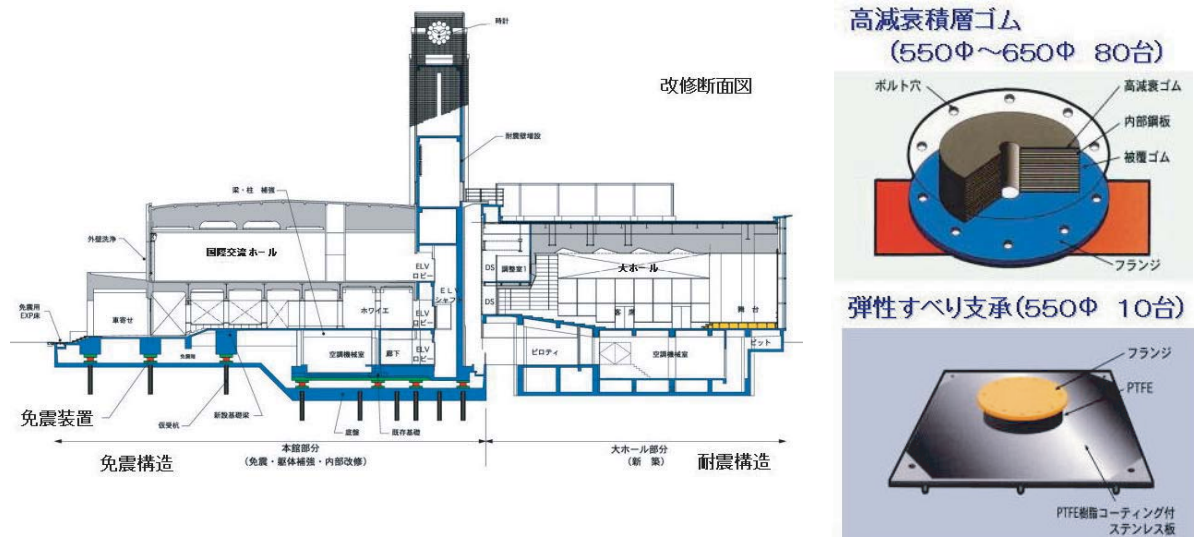


図9 免震改修後の京都大学時計台と使用されている高減衰積層ゴムと弾性すべり支承

### 3. 制震構造

これまでは、免震構造について見てきましたが、免震構造はどのような建物にも適用できるわけではありません。例えば、軟弱な地盤では周期の長い地震動が卓越する可能性がありますので、あまり適しているとはいえません。また、超高層の建物はそれ自身が長い固有周期を有しており、

免震装置を設置しても固有周期は大きくは伸びませんので免震効果は低層建物ほどには期待できません。このような場合には、制震構造がよく利用されます（図10）。制震構造では、建物内部にエネルギーを吸収する部材や装置を設置することにより、建物に入ってくる地震のエネルギーを小さくすることを目指しています。最近の高層・超高層建物のほとんどにおいて使用されていると言っても過言ではないと思います。この制震構造は、京都大学名誉教授の小堀鐸二先生が故南井良一郎防災研教授と1960年代に提唱されたものであり、現在でも、世界の制震構造研究において先導的な役割を果たしておられます。制震構造には、電気的なエネルギーを利用するアクティブ型と、それを利用しないパッシブ型のものがあり、比較的容易に設置できる後者的の方が数多く存在します。超高層建物では地震以外に強風の影響も無視できませんので、このような制震構造は大きな役割を果たしています。

### 制震構造の架構形態

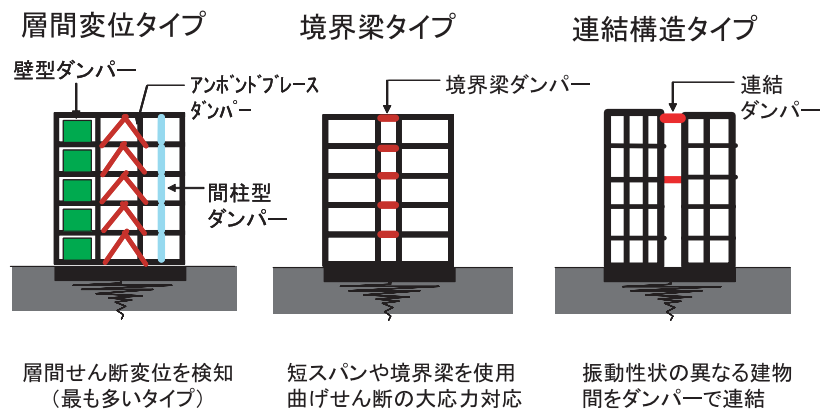


図10 制振構造（提供：清水建設技研）

では、何故、この制震構造は有効なのでしょう。端的に言って、建物に入ってくるエネルギーは、制震構造の有無に関係なくほぼ一定であることが最近の私たちの研究からも明らかとなっ

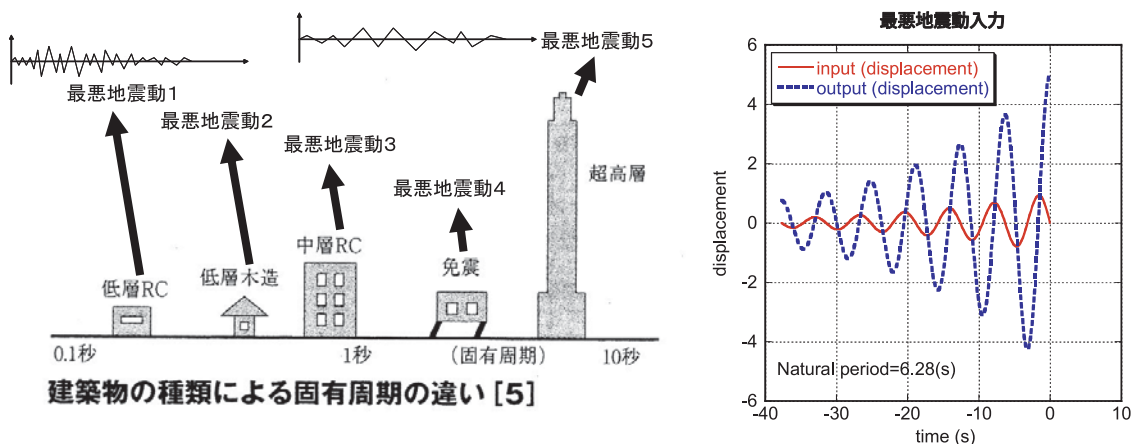


図11 建物ごとの最悪地震動（一部出典：建築設計資料集成，日本建築学会）

ています。制震構造が組み込まれた建物では、制震要素（装置）が地震によるエネルギーの一部を消費しますので、建物に入ってくるエネルギーを小さくすることができます。建物に入ってくるエネルギーが小さくなるということは、建物の安全性が向上することになります。このような比較的単純な原理により、制震構造の有効性を説明することができるのです。

#### 4. 未知の地震にどう対応すべきか（1）

現在、日本全国を対象として活断層の調査が進められ、それに基づく地震発生に関する詳細な情報が公開されています。これは大変重要なことであり、私たちはこのような情報から多くの知見を得ることができます。しかし、一方で、兵庫県南部地震をはじめとして、新潟県中越地震、スマトラ沖地震、福岡県西方沖地震などからも明らかなように、世界の最先端研究を用いても予測できない「地震の特性や時期の問題」を如何に克服するかが大きな問題であることも確かです [1, 2]。

このような困難点に立ち向かう一つの方法として、私たちは最近「最悪地震動」（図11）に関する研究を進めています [6, 7]。これは、「上記の通り、活断層の発見には時間的・物理的問題が存在し、たとえ活断層の存在がすべて明らかになったとしても、地震の発生メカニズムやそれを取り巻く地盤・地質特性の不確実性は到底完全に理解できるものではないため、当該サイトで考えられ得る地震動の中で建物にとって最も危険な地震動に対して

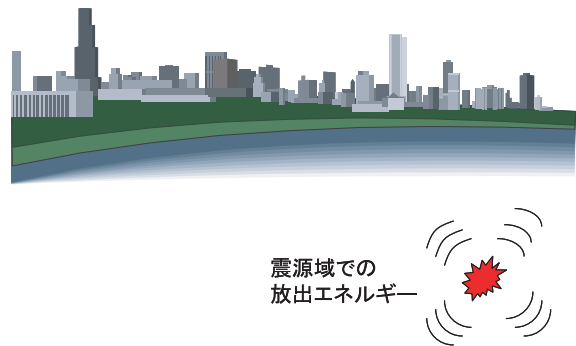


図12 科学的根拠に基づく想定の一例

安全に設計しておけば、現在よりも合理的な対応が可能ではないか」という発想に基づいています。もちろん、「当該サイトで考えられ得る地震動の中で」ということにも限界や制約はありますが、震源から放出されるエネルギーなど、科学的根拠に基づき想定されたものであれば、ある程度納得のいく結果が得られるのではないかと考えています（図12）。このアプローチにおいて重要な点は、最悪地震動は建物ごとに異なる点です。低層の建物、超高層建物、免震建物ごとに最悪となる地震動の「顔」は異なるということに留意しなければなりません。

建物の耐震設計においては、2つの重要なキーワードがあります。一つは共振現象で、もう一つは減衰効果です（図13）。これまでの地震による建物の被害は、多くの場合、地震動が持っている固有の周期と建物が持っている固有の周期が一致し、大きな揺れを引き起こしたことに起因します。また、そのような場合にも、建物に十分大きな減衰特性が賦与されていたならば被害を防ぐことができた場合も少なくないと考えられています。従って、上記の最悪地震動の研究では、建物にとって最も危険な地震動、すなわち共振に近い状況を引き起こす地震動を想定して、それに対して十分な減衰特性を賦与することが要求されます。この十分な減衰特性を賦与するためには、前述の制震構造が重要な役割を果たすことになります。

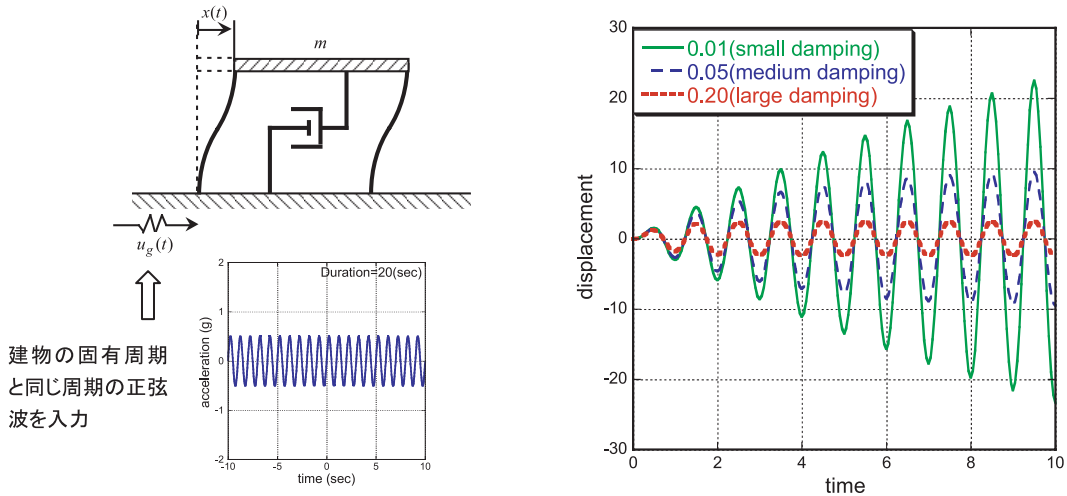


図13 共振現象と減衰の役割

建物にも大きく分けて、私有のものと公共的なものがあります。私たちの家や住まいの多くは前者に分類され、学校、市庁舎、警察署、消防署やその他の公共施設は後者に分類されます。大地震の際には、多くの場合、後者の公共施設は災害復旧の中心的な役割を担う必要がありますので、どのような地震に対しても建物機能が維持されることが必要です。このような要求に対しては、上記の最悪地震動の考え方は有効な手段を提供すると思われます（図14）。それに対して、前者は、建築行為が経済活動の一環として存在する以上、どのような地震に対しても被害を受けないように設計することは非現実的です。しかしながら、少ない予算でできるだけ安全性の高い建物が設計できればそれに越したことはありません。このような要求に対しても最悪地震動の考え方は一つの道筋を与えると期待しています。

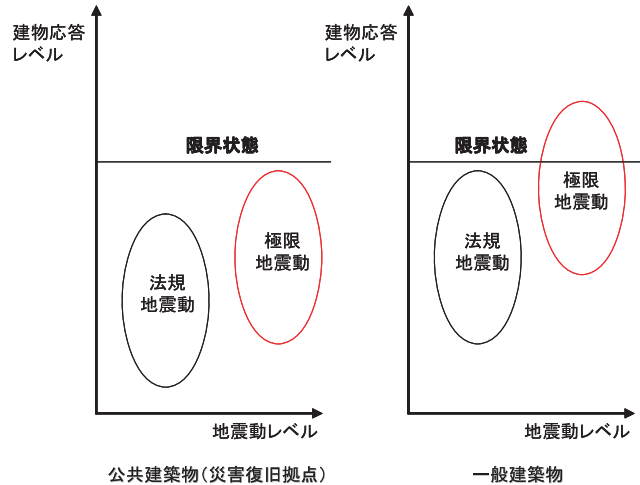


図14 公共建築物と一般建物の地震動レベルと応答レベル（一例）

## 5. 未知の地震にどう対応すべきか (2)

最近、建物の維持・管理の分野で、「構造ヘルスマモニタリング」(図15) という新しい研究分野が脚光を浴びています。建物を人間のような生き物に喩えて、その性能が保持されることを健康が保持されることに喩えているといえます。先ほど述べました、VBLで地震観測を行っていることも広い意味での構造ヘルスマモニタリングといえるかもしれません。そこで得られたデータを分析することにより、建物の「健康状態」が明らかになるのです。もし、健康が損なわれているこ



とが判明した場合には、何らかの処置（耐震補強など）が行われるかもしれません。この構造ヘルスマonitoringには費用がかかりますので、費用対効果の関係で、十分な説明ができない場合は実現することは困難となります。しかしながら、来るべき大地震に対して、老朽化した建物をそのまましておくのではなく、適切な構造ヘルスマonitoringや耐震診断技術により性能を評価し、最悪地震動にも対応できるようにグレードアップを図ることは減災上も極めて重要です。

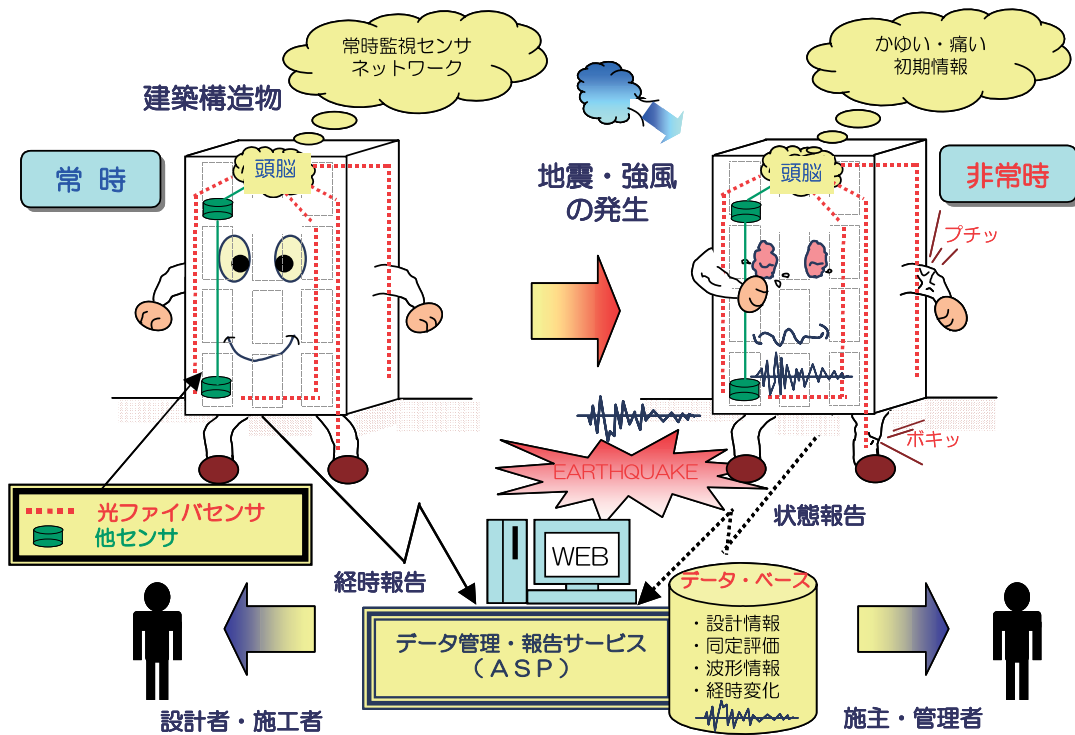


図15 構造ヘルスマonitoring (提供：清水建設技研)

## 6. 未知の地震にどう対応すべきか (3)

最後の話は、未来における話かもしれませんが、遠方から到来する地震動を前もってキャッチし、建物の性能をその地震動の特性に対応して変化させることが考えられます(図16)。この発想は、制震技術の開発において提示されたものであり(前出の小堀名誉教授によるダイナミックインテリジェントビルディング[3, 5])、新幹線などを大地震時に安全に停止させる方法(ユレダス)とも関連する技術です。地震防災の分野では、時々刻々集まる観測データをリアルタイムに分析し、地震災害の軽減に役立てることを目指すものとして、リアルタイム地震学という分野が最近脚光を浴びています。もちろん、都市直下型地震に対しては極めて困難であり、遠方から到来する地震動に対してのみ有効であります。また、信号伝達のスピードの問題やシステムの維持管理に要する費用の問題など解決しなければならない問題はたくさん存在しています。しかしながら、IT技術などの目覚ましい発展を考えれば、このようなアプローチが現実的なものとなる日もそう遠くないかもしれません。

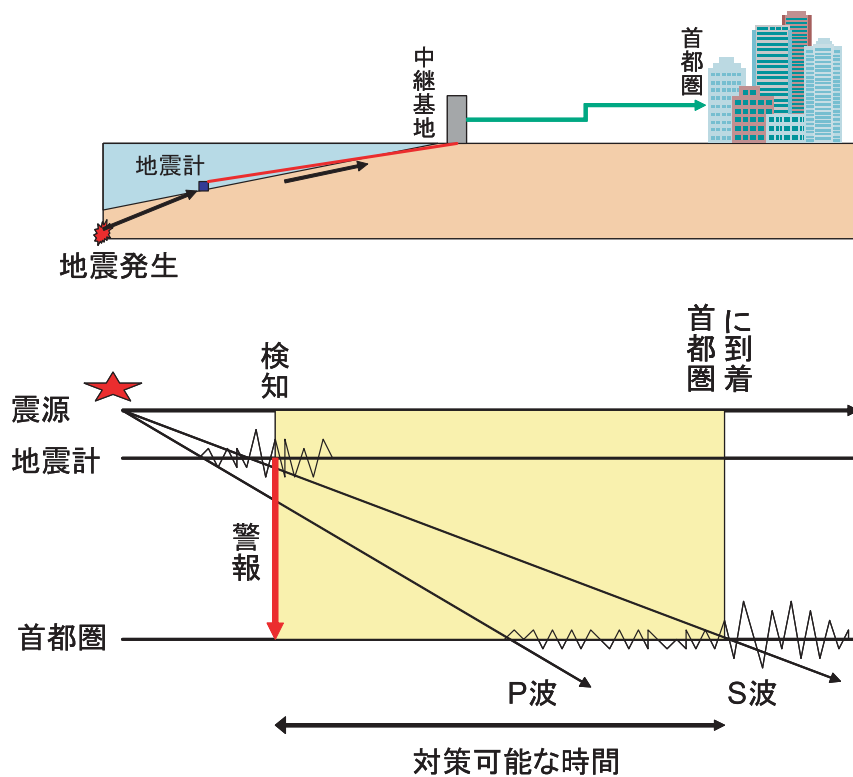


図16 リアルタイム地震学と未来における可能性

## 7. おわりに

これまでお話しましたように、地震という自然現象は捉えどころの無い（過去の分析ではなく、将来発生するものについて）、わたしたちの住まいにとって極めて厄介な相手なのです。しかも、最悪の場合には、人命や財産をすべて奪ってしまう可能性があり、何とかしてうまく処理したいあるいは付き合いたい相手なのです。工学（あるいは理学も含めて）の分野では、理論や方法を新たに構成した場合には、実験や観測によりその妥当性を証明することが要求されます。特定の地点で発生する大規模地震は、数十年あるいは数百年というタイムスパンでの話ですので、このような証明を行うことが難しいことがこの困難さの大きな原因であると思われます。また、特性を詳細に知ることが難しい地球内部を伝わってくる地震動（従って地震動自体の性質も不確定）を相手にしなければならないことも困難さの大きな原因の一つかもしれません。工学の分野でも、このような捉えどころの無いものを研究の対象とする分野はそれほど多くないと思われます。

東京や大阪、名古屋をはじめとする大都市圏では、超高層建物や免震建物は種々のタイプの大地震の洗礼を受けていません。また、このような地域では、現代的な地震計が設置されて以後大きな地震をほとんど経験していません。従って、関東平野や大阪平野、あるいは濃尾平野がどのような揺れに襲われるか、さらには超高層建物や免震建物がこのような揺れに対してどのような挙動を呈するかについては、コンピュータによるシミュレーションでしか確認されていません。2003年に北海道で発生した十勝沖地震の石油コンビナート事故において大きくクローズアップさ

れた長周期地震動[8]が、超高層建物や免震建物にどのような影響を及ぼすかという問題はその一例かもしれません。

建物の耐震設計では、少し前までは、「極稀に発生する大地震に対しては、建物が崩壊せず人命が失われなければよい」ということが構造設計のコミュニティーの中で認められていましたが、最近では、建物自身も大きな損傷を受けて継続使用できなくなることを避けることが要請されることが多くなっています。これを実現するためには、建物の所有者と設計者が十分な協議を行い、大きな地震を受けたときの状況について共通の理解を深めておくことが重要と思われま

す。人類がこれまでに得た英知を結集して、どのような地震にも対応できる住まいを創り出すことが私達に課された大きな課題であることは疑う余地がありません。この分野に関わる一人の研究者として、少しでもその実現に向けて役立ちたいと考えています。

#### 参考文献

1. 島村英紀，公認「地震予知」を疑う，柏書房，2004.
2. Geller, R.J., Jackson, D.D., Kagan, Y.Y., and Mulargia, F., Earthquakes cannot be predicted. *Science*, 275: p1616, 1997.
3. 小堀鐸二，揺れを制する，鹿島出版会，1998.
4. 棚橋諒，地震の破壊力と建築物の耐震力に関する私見，建築雑誌（日本建築学会），1935年5月号.
5. 小堀鐸二，制震構造 - 理論と実際 - ，鹿島出版会，1993, 2004.
6. I.Takewaki, Bound of earthquake input energy, *J. Struct. Eng.*, American Society of Civil Engineers, 130(9): pp.1289-1297, 2004.
7. 竹脇 出，建築構造物の混合逆問題型設計法 - システムの合理化とロバスト性 - ，建築雑誌（日本建築学会），2005年8月号.
8. “想定外”の大震災，雑誌ニュートン，pp26-55, 2005年3月.