In Laboratory Now

研究室訪問5

安全な建築物を設計するために

和田 章 研究室～建築物理研究センター

和田 章 教授

建築物はその目的の機能を満たしつつ、地震や風などの外力条件に耐えられる安全性を確保しなければならない。それらの条件のもとで合理的な建築構造及び設計を追求することを和田研究室では目的としている。その為には構造材料の力学的性質を詳しく調べて、それに基づいた理論により構造物の力学的挙動を解明できる方法を確立する必要がある。

本稿では、コンピュータによる構造物の力学的挙動解析の精度向上と免震構造や制振構造の改善を紹介する。

数値解析による構造物の挙動の把握

建物が地震や強風に対してどのように振る舞うかを理論付けるためには、まず建造物全体や、各部材の特性を知る必要がある。例えば、大きさの異なる模型を複数造ってそれらの挙動を比較することで、本来の大きさにおける挙動を類推する方法がある。いくつもの実験から建築物一般に成り立つ理論を導き出すことで、実験をしなくてもコンピュータを用いた計算などにより、建物の挙動を推測することができるのだ。建築学では、このような理論を基にして、より頑丈で壊れにくく建てられる構造を考えている。

建築学における理論の多くは、地震や強風に対する建物の挙動を力学的に計算する方法を示すものだ。しかし、実際の建築物の挙動は複雑で、忠実に計算することは不可能である。そのため、現実の建物を計算しやすく単純化する。この操作をモデル化といい、このモデルに対して数式を立てて解を求め、建物の挙動を推定する方法が、建築学における理論である。このモデル化は、単純さと精確さという二つの相反する要素を、できる限り満たさなければならない。単純なモデルを用いれば計算は簡単だが、解と実際の挙動が大きく異なる。一方、複雑なモデルを用いれば挙動を精確に推定できるが、数式を立てて解くことが難しくなる。実際には、簡単なモデルから始め、解がずれた要因を考え、モデルを修正するという作業の繰り返しによってよりよいモデルを作っていく。

モデルを作る際に問題となるものの一つに、変形の種類がある。鋼材に力を加えると、程度はさまざまだが鋼材は変形する。変形の程度が小さい場合、力を取り去ると鋼材はバネのように元に戻る。これを弾性変形という。一方、変形がある程度大きくなると、力を取り去っても完全に元の状態には戻らず、ある程度の変形が残るようになる。この、曲げてしまった針金のように力を取り除いても元に戻らない変形を塑性変形という。

物体に力を加えると変形するが、その割合をひずみという。弾性変形のひずみが外力の大きさにほぼ比例するのに対し、塑性変形のひずみは外力の大きさに対して比例しない（**図1**）。そのため、塑性変形を考慮して立てた数式は非線形である。また、弾性変形であっても変形の仕方によっては数式が非線形であった。非線形な数式は、解析的に解を求めるのが一般に困難であるため、従来は

微小変形かつ弾性変形であると仮定をして線形な数式にしていた。しかし、実際の構造物には塑性変形が生じたり、ひずみが微少ではないことがあるため、変形が微小変形かつ弾性変形であると仮定した解析によって推定された挙動は、実際の挙動と異なる部分が多かった。

和田先生の業績の一つが、塑性変形や微小でない変形を考慮に入れたモデルでも解析できる非線形解析法を組み立てたことである。和田先生は、当時大きな発展を遂げていたコンピュータによる計算を試みた。解析的に解けない数式について、コンピュータによる繰り返し計算を用いて近似的に解く非線形解析で、可能な限り本物に近い解を得る方法だ。非線形解析法で得られた結果は線形解析よりも現実の挙動に非常に近いことが多く、和田先生はこの手法を用いてさまざまな建築構造物の挙動を精確に解明した。

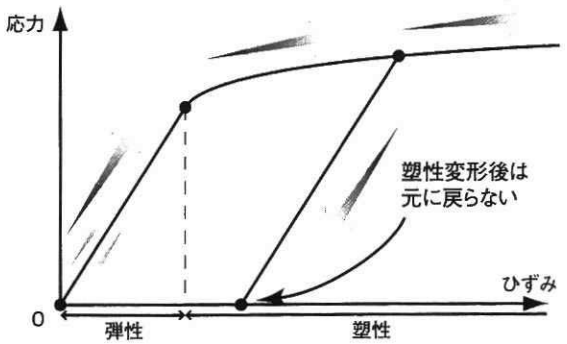

図1　鋼材の応力－ひずみ特性

新型耐震構造

近年、耐震設計は大きく変遷をたどってきた。現在の建物に用いられている耐震設計構造は大きく三つに分類できる。長い間用いられ現在も大多数の建物に利用されている耐震構造、90年代に使われるようになった免震構造、2000年代によく使われるようになった制振（制震）構造だ。耐震構造に比べ免震構造と制振構造は、耐震性に優れているほか、経済的で環境面にも配慮されている。これら三つの構造について簡単に紹介する。

耐震構造は、強度抵抗型と履歴減衰利用型の二つに分けられる。塑性変形をしないものとして考慮しないのが強度抵抗型、塑性変形を考慮しているのが履歴減衰利用型である。強度抵抗型は、どんな外力に対しても弾性変形しかしないように、柱や梁を頑丈に設計するものだ。そのため設計が簡単である。しかし、建物が高くなるほど柱が太くなったりするため高い建物には使うことができない。一方、履歴減衰利用型は柱や梁がある程度塑性変形することを許し、かつ塑性変形しても崩壊しないように適度な強度とねばりを持たせるように設計する。しかし、複雑な塑性変形を考慮するために非線形解析が必要であり、設計が難しい。また、どちらの耐震構造でも、地震による揺れのエネルギーが骨組みの各所にどのようにかかるか正確に予測できない。そのため設計では各部品にかかるエネルギーを、実際の地震のエネルギーより大きく設定しなければならない。さらに、大地震の際は建物こそ倒れないまでも揺れにより家具が倒れ、負傷者が出る可能性が高い。加えて、柱や壁が塑性変形したままの建造物は設計上の安全が保てず危険なため、大地震後は建物全体の改築、または改修工事が必要となる。

これらの耐震構造に代わる構造として考えられたのが免震構造である。免震構造は、建物に伝わる揺れを軽減する構造である。耐震構造の固有周期は地震の周期に近かったため揺れが伝わりやすかった。免震構造では建物の下に免震層と呼ばれる水平方向に自由度のある構造を組み込むことで建物の固有周期を大幅に長くし、揺れを伝わりにくくし建物の崩壊を起こりにくくしている。

免震構造は、耐震構造に比べて三つの利点がある。環境に優しいこと、大地震時の人への被害が少ないこと、構造設計が明快なことである。耐震性が耐震構造より優れている免震構造は、大地震がきても建物本体に生じる変形が小さく、塑性変形も生じないため、改築または改修工事の必要性がない。よって、改築用の資源が無駄にならず、環境に優しい。また、揺れによる加速度が小さいことから家具が倒れにくく、人の重軽傷に繋がりにくい。三つ目のメリットとして構造設計の明快さを挙げた。免震構造では、建物本体には塑性変形が起こらないと考えてよい。これにより、ほとんど線形解析のみの簡単な設計と、高い耐震性を両立できた。

しかし、免震構造には欠点も存在する。地下に免震層を組み込む必要があるため、普通の建築よりも大規模な工事が必要になるのだ。また、免震層自体の費用が高いという欠点もある。そのため、大規模な建築物においては耐震構造を取るより安価で済むが、一般的な住宅程度の規模であれば耐震構造で建築した方が安価で済むのだ。

その後、免震構造とは異なる発想を持った構造として、新たに制振構造が考案された。これは建物にダンパーと呼ばれる装置を適切に配置する構造である。ダンパーは、他の建材が塑性変形するよりも弱い力で塑性変形する構造をしており、地震時にはダンパーが大きく塑性変形して地震エネルギーの多くを吸収する（**注**）。塑性変形によりエネルギーを吸収する耐震設計として履歴減衰利用型耐震構造があったが、これは建物全体を何度も塑性変形させることでエネルギーを吸収させていたのに対し、制振構造ではダンパーのみがエネルギーを吸収するように計算した設計、建築を行うのだ。

この制振構造には、他の構造にはないいくつかのメリットがある。前述のように、大地震が起きても塑性変形したダンパーのみの交換で、建物の再利用が可能となる。また、ダンパーは建築済みの建物の外側に取り付けることもできるので、履歴減衰利用型よりも改修しやすいほか、免震構造に比べても非常に安価である。そのため、すでに建築されていたり、また比較的小規模であったりする一般住宅でも導入しやすいのだ。

しかし、制振構造はダンパーのみにエネルギーを吸収させて塑性変形させる構造のため、非線形解析が必要であり設計が難しい。

以上に説明してきた三種類の構造のうち、履歴減衰利用型耐震構造と制振構造では非線形解析が必要である。和田先生は、長きに渡り耐震構造や免震構造、制振構造での非線形解析を行ってきた。いずれも設計用のプログラムに組み込んで、広く使えるようになっている。また、制振構造をさらに発展させた構造として、大きく弾性変形できる高強度材料を用いて、柱や梁を使用することで、より高い制振効果を発揮させる構造を設計し、実際に建築することでその性能を証明した。

すずかけ台キャンパスの免震・制振構造

すずかけ台 J2 棟の免震構造

前述のように免震構造や制振構造は優れた技術であるが、免震構造が考案された当時は、この構造は建築の常識に反していた。水平方向への低弾性を確保するために土台に建物本体を完全には固定していないという構造は、土台に柱を固定するこれまでの構造からあまりにもかけ離れていた。また、実際に用いられた事例が少なかったため、十数年ほど前までは免震構造を採用した建物は少なかった。

しかし、1994 年にアメリカで起きたノースリッジ地震の際に、免震構造の病院と耐震構造の病院では対照的な結果となった。耐震構造の病院では水平最大加速度が、地盤では 0.91G、1 階では 0.82G、屋上では 2.31G に達した。建物自体は耐震性の高い壁に亀裂が発生する程度にとどまったが、設備機器類は故障し医療機器や家具が転倒した上、カルテなどの書類が落下し飛び散った。さらにスプリンクラーが破断して建物内部が水浸しになり、結果的に建物が使用不能になった。従来の耐震構造の重大な欠陥がわかる事例である。これに対し免震構造の病院では水平最大加速度が、地盤では 0.49G、内部は 0.10G ～ 0.15G、屋上では 0.21G であり耐震構造と比較して振動が減衰している。また、棚から物が全く落下せず、設備や医療機器に何の被害もなく病院機能は完全に維持され、災害拠点としての役割を十分に果たすことができた。

また、阪神淡路大震災が発生した頃、和田先生

注：このダンパーに関して和田先生と研究を行った竹内先生の記事は、LANDFALL59 号に掲載されています。
また、過去の記事は LANDFALL のウェブサイトからご覧頂くことができます。
http://www.titech-coop.or.jp/landfall/

が技術委員長を務める日本免震構造協会は、ちょうど免震構造を普及させる取り組みを行っていた頃だった。規格や法律を整備することで一般の構造設計者でも扱えるようにしたのだ。ノースリッジ地震、阪神大震災のような大地震対策の需要は増加し、病院への免震構造の採用が増加した。

これに対し免震構造の採用例がほとんどない建物がある。例えば超高層ビルである。超高層ビルで免震構造が十分な効果を発揮するためには、免震機構の上にある建物の曲がりにくさを通常の建物以上に高める必要がある。建物が高さ方向に長くなっており、そのままでは建物全体が曲がりやすくなってしまうからだ。

しかし、建物内部を広く使うために柱や梁を減らす必要が生じることがある。これによって下がった剛性を補うためには、建物の外周部にブレースと呼ばれる補強材を取り付けることで対処した。しかしこの方法では、力の大きくかかる位置が建物の重心から離れてしまうため、建物外周の一辺を浮き上がらせる力、すなわち鉛直方向に引っ張る力が大きくなる。免震構造部材の一つである積層ゴムアイソレータは、鉛直方向への耐荷重能力と、水平方向への自由度を両立しているが、鉛直方向への引っ張りに弱い。超高層ビルでは建物の剛性と力のモーメントという二つの条件を満足させながら免震構造の設計を行わなければならないのだ。

東工大すずかけ台キャンパスのJ2棟は、超高層ビルでの免震構造の有効性を実証するために、和田先生を始めとする東工大の研究グループにより設計され、建造された（**写真1**）。対照研究として耐震構造のJ1棟も観測されている。まず剛性を確保するためにメガブレースと呼ばれる補強材を、ブラケットと呼ばれる建物との接合部品を介してつないだ。ブラケットにある程度の弾性変形を許すことで、外周に伝わる力を抑えつつ十分な曲がりにくさを持たせた。

また、計算した結果四隅の積層ゴムアイソレータの浮き上がり量が許容範囲外であったため、土台に固定する部分に、皿ばね内蔵ワッシャーと呼ばれる部品を設置した（**図2**）。この部品は、アイソレータが引っ張られるとアイソレータが破損する前に縮み始め、結果として通常よりアイソレータ本体に力がかかりにくくなり、破損しにくくなる。その際、かからなかった分の力は梁で四隅のアイソレータと連結された他のアイソレータにかかり、他のアイソレータは上向きに引っ張られるが、シミュレーションの結果、他のアイソレー

写真1　すずかけ台J2棟

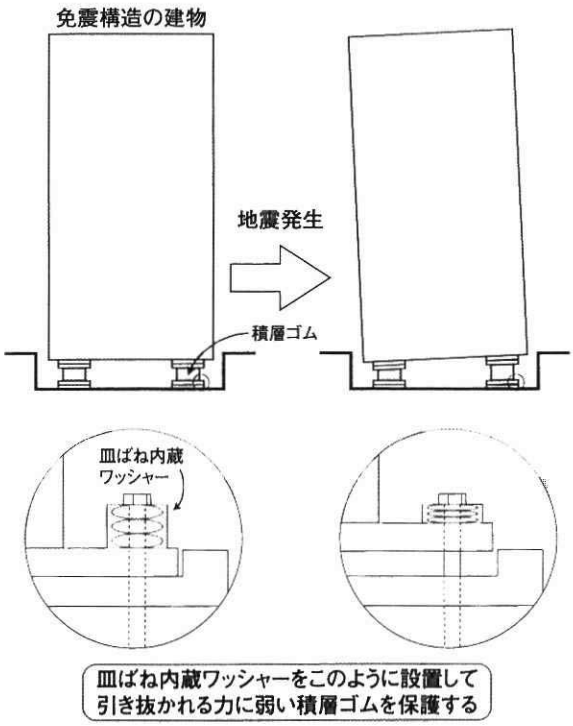

図2　積層ゴムアイソレータ下部の接合法の改善

タには許容範囲内の力しかかからず、モーメントの分散に有効であることが分かった。2005年8月16日の宮城県沖地震の際、免震構造であるすずかけ台J2棟7階は、免震構造でないすずかけ台J1棟9階に比べると、最大変位は2倍であったが最大加速度は半分以下であった。これにより、宮城県沖地震の際に免震装置は適切に作動していたことが確かめられたが、 中小地震から大地震まで、地震を受けたときの高層免震ビルの挙動を調べるため、現在でも建物の変位や加速度のデータを取り続けている。この実験結果は免震構造が超高層ビルにも普及する足がかりになるだろう。

すずかけ台G3棟の制振構造

すずかけ台G3棟は古い建造物であり、現在の建築基準を満たしていない。そのため、東工大の施設部の方々と和田先生の所属するグループは、G3棟に制振構造を適用する方法を考えることになった。

先に述べたダンパーによる制振構造は、建物が高くなればなるほど大きいダンパーが必要になるため、コストが高くなりやすい。また、建築物に大きなダンパーを外から付けるという構造上、景観が悪くなり窓からの景色にも影響が出るという欠点もあった。緑ヶ丘一号館に使われている制振構造は、デザインにダンパーを取り入れるという形でこの問題をクリアーしているが、和田先生のグループでは、既に建築されている建物の形状を活かすという、別の方向からのアプローチで設計を行った。

地震の力が特定の階に集中すると、他のほぼ全ての階層が無傷であるにもかかわらず、ある一つのフロアだけが上のフロアに丸ごと押し潰され、倒壊するという現象が起こりうる。この現象は、阪神大震災において20近い建物に起きた。もし全てのフロアが均等に揺れ、建物全体に地震の力が分散されていたならば、建物は倒壊せずに済んだのだ。

一方、法隆寺などの五重塔は千年以上前に建築され、地震の多い国である日本にありながら一度も地震で倒壊したことがなく、現在まで残されている。五重塔には心柱と呼ばれる一本の長い木製の柱があり、地面から塔の先端まで通っている。しかし、この心柱は地面には固定されていない。この心柱は直接的に建物を支えているわけではないのだ。

地震が起き五重塔が揺れると、心柱は五重塔のどこかのフロアの床に押される。その動きに合わせて心柱が揺れる際、心柱は地面と接する点を軸として揺れる。心柱の揺れは他のフロアの床を押すことで、結果的に五重塔全体の各階の床が連動してほぼ同じ方向に揺れる。この構造と、組まれた木材同士が摩擦でエネルギーを吸収することにより、五重塔は地震のエネルギーを建物全体で効果的に分散させていたと考えられる。

すずかけ台G3棟にも、この構造を応用した制振構造が使われることになった。すずかけ台G3棟の構造は、**図3**の通りになっている。建物の長辺に部屋が並びその間を廊下が通るというこの棟のような構造は、校舎やマンションなどにも多く見られる。この構造は、短辺方向には部屋の壁が多く地震の力に比較的強い。しかし、長辺方向に

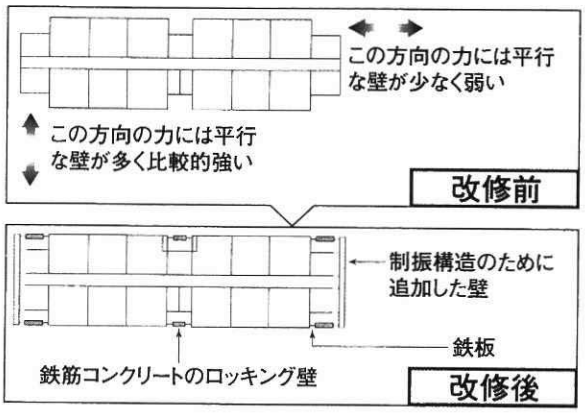

図3　G3棟改修前後の平面図

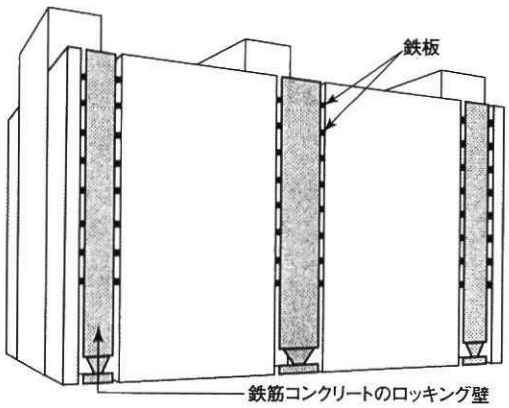

図4　改修後のG3棟

は壁が少なく、さらに廊下と教室の間の壁には出入り口として穴が空けられているため、強度が低くなり地震の力に弱い。そのため、特に長辺方向の地震の力に対する新しい構造を組み込む必要があった。

G3棟の平面は**図３**に示すように長辺に一部窪みがあり、また階段やエレベータがある四つの角がへこんでいる。今回の工事では、この平面形をそのまま利用することになった。具体的には、長辺の窪みの間やへこんだ四隅に鉄筋コンクリートのロッキング壁を設置し、建物とこの壁の間に鉄板を挟み、柱と建物に固定したのだ（**図４**）。

鉄筋コンクリートのロッキング壁は、幅4.4メートル厚さ60センチメートルの寸法で、鉄筋が中を通るだけのシンプルな構造だ。しかし、地面に接する部分は五重塔の心柱と同じく完全には固定されていない。土台と接する部分は歯車の一部のような構造をしており、柱はこの点を中心として動くことが出来るのだ。

鉄板は菱形に変形するが、繰り返し変形に対して劣化しにくい鋼材で作られている。これが各階の柱と鉄筋コンクリートのロッキング壁の間に、数枚固定されている。

実際に地震が起きると、鉄板で床と固定されているコンクリートのロッキング壁は、ある床に押されることで歯車状の接点を中心にして揺れる。コンクリートのロッキング壁は全ての床と固定されているので、各フロアの床の動きにばらつきがあれば、五重塔の心柱と同じように他のフロアを連動させ、地震のエネルギーを分散させることができる。

さらに、鉄筋コンクリートのロッキング壁が動いたとき、鉄板は**図５**のような形に塑性変形させられる。このとき鉄板は変形のために大きなエネルギーを吸収することになり、建物本体が受ける地震のエネルギーを軽減する、すなわち制振構造としての働きを示すのだ。

建築物は短くても数十年から数百年の間、機能を損なわず安心して使えなければならない。そのため、その建築物の構造や制御に関する知識を持った人間がいなくなったとしても、その能力は失われてはならない。それゆえ、免震構造や制振構造も単純明快であることが望ましい。すずかけ台G3棟の制振構造の補強も、千年以上昔に使われていた単純な技術と、根本的な原理はほとんど同じである。和田先生の研究には、最先端の技術だけに傾倒することなく適切な技術を用いることの大切さが刻まれているのだ。

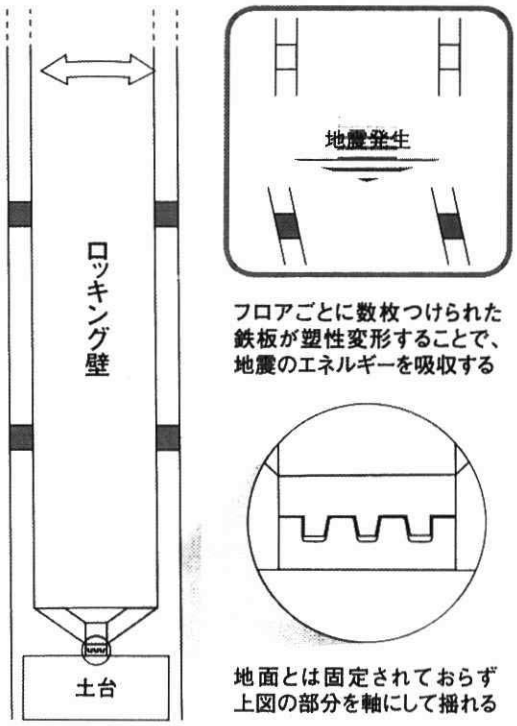

図５　制震装置

本稿の執筆にあたり、和田先生にはさまざまなお話を伺いました。記事で述べた建物の振る舞いの解析法や免震構造・制振構造の他にも、芸術性と機能性を兼ね備えた建物などについてお話していただきました。いずれも非常にわかりやすく、また興味深い内容でした。さらに、今まで常識と思っていたことが実は大きな間違いであったといういくつもの事実に出会い、どのお話も新鮮に感じられました。

最後になりましたが、和田先生が御協力くださりましたこと、深く感謝しております。貴重な時間を割いて取材に応じてくださっただけでなく、執筆にあたり何度も質問にお答えくださり、他分野を専攻している私にもわかりやすく説明くださった先生に、心より御礼申し上げます。

（村井　英淳）