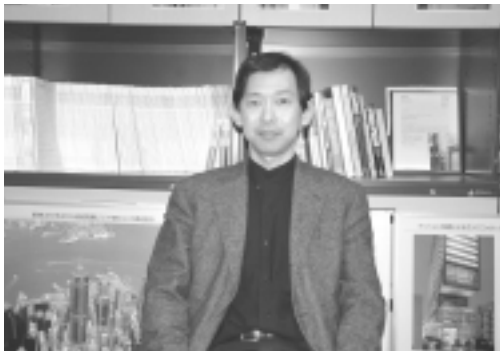




次世代の建築鋼構造に向けて

竹内 徹 研究室～建築学専攻



竹内 徹 助教授

竹内先生は東工大を卒業した後、新日鉄やイギリスの設計事務所では建築設計の実務に携わり、香港の超高層ビルなどを設計してきた。大学に戻って来たのは三年前で比較的新しい研究室だ。先生の専門は、建築学が意匠・構造・環境の三分野に分けられる中で構造（特に鋼構造）を中心に研究しており実際の構造設計も手がける。エネルギー吸収型の耐震設計など鋼の特徴を活かした構造研究をテーマとし、そのための部材・構法研究に力を入れる。構造の枠を超えたテーマを掲げ、新たな可能性を求め挑戦し続ける先生の話を知った。

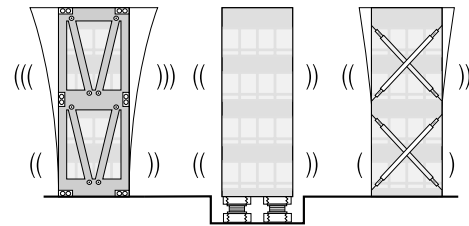


鉄のブレースで建物を守る

日本は地震の多い国であり、その被害を減らすこと、特に人々の命や生活を守ることは重要な課題である。最近マンションの購入や、家を新築する際に耐震性能を気にする人は増えている。しかし現在使用している建物の耐震性能を把握している人は少数だろう。新築の耐震設計と同時に、既存建築物への耐震補強も進めることが、地震による被害を軽減する重要な鍵となるだろう。

我が国の建築における耐震設計は、従来の強度型耐震構造、免震構造、制振構造の三種類に分けられる(図1)。従来の強度型耐震構造は地震の揺れに対して踏ん張る構法、免震構造はクッションのような働きをする免震装置で地震の揺れを軽減する構法だ。制振構造では建物にダンパーという部材を入れて補強する。ダンパーが地震のエネルギーを吸収して、建物の揺れが軽減される。

竹内研究室では、様々な鋼構造に制振構造や免震構造の技術を適用する方法について研究している。制振構造と免震構造は従来の強度型耐震構造に比べて耐震性能が高く、数百年に一度起こると言われている震度6強レベルの大地震でも建て直さず使い続けられる設計ができるからだ。今回は



強度型	免震構造	制振構造
踏ん張る	クッション(免震装置)	ダンパー
上階ほど揺れる	各階均等な揺れ	揺れが軽減

図1 耐震構造の三種類

主に先生が大学卒業後一貫して携わってきた鋼材ダンパーを使った制振構造について伺った。

制振構造に欠かすこのできないダンパーには鋼材ダンパー・摩擦ダンパー・オイルダンパー・粘性体ダンパーなど様々な材質や形が存在する。先生が特に鋼材ダンパーについての研究を行っているのは、他のダンパーに比べてエネルギー吸収力に対しての値段が安いからだ。鋼材ダンパーの一種である座屈拘束ブレースは鋼芯材、コンクリート、外側に鋼管という構造をもち、外側の鋼管が保護する役目を担って内側の芯材が伸縮しながら

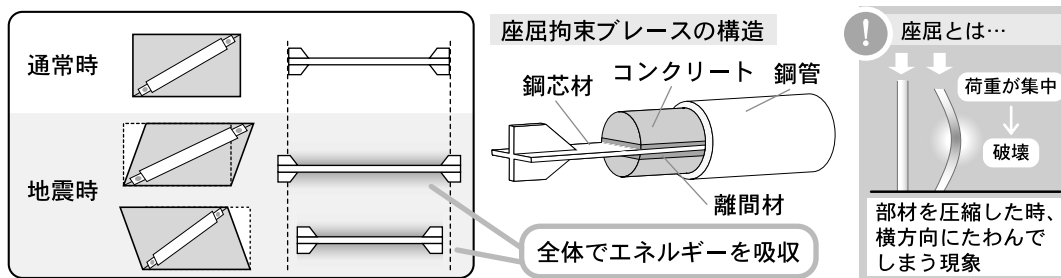


図2 鋼材ダンパー（座屈拘束ブレース）のしくみ

地震のエネルギーを吸収する(図2)。芯材だけでは座屈してすぐに折れてしまうが、鋼管とコンクリートで包むことで座屈せず、より多くのエネルギーを吸収できるようになっている。また芯材に使用されている鋼材はある強さで伸び始め(降伏点という)、地震のエネルギーを吸収し始めるが、その強さが小さすぎると十分なエネルギーを吸収することができず、逆に大きすぎるとブレースがエネルギーを吸収し始める前に本体の建物が壊れてしまう。建物に伝わったエネルギーをうまくブレースが吸収するためには、ブレースが設計した強さのエネルギーで降伏しなければならぬのだ。ところが製鉄プロセスでは、どうしても製造される鉄の強さにばらつきが出てしまう。通常の鋼材では±25%くらいのばらつきがあるが、竹内研究室では、特殊な製造プロセスでばらつきを±5%以下に抑えた鋼材を使用している。この鋼材は伸び性能も通常の鋼材より高いので、吸収できる地震のエネルギーも高い鋼材となっている。これらの技術は、竹内先生が新日鉄時代に建築物物理研センターの和田章先生らと開発したもので、六本木ヒルズや渋谷のQフロントなど身近な建物に

も多く使われ、米国でも使用され始めている。

構造設計では、まずパソコン上で計算して設計することが多い。部材が実際に計算通りに挙動するかを確かめるために実験が重要になり、竹内研究室でもダンパーの性能を試すなど、様々な実験が行われている。例えば、写真1に示すようなコンクリートの柱に一般的な補強で 사용되는炭素繊維を巻き、鋼材ダンパーのブレースを入れて、地震と同じ揺れをかける。ダンパーを入れた柱は補強のない柱に比べて、ひびが明らかに少ない。実験では、ダンパーの補強により柱本体に大きな損傷を与えず震度6強の地震にも耐えられることが確かめられた。これは鋼材がエネルギー吸収能力を発揮し、損傷がダンパーに集中しているからである。このように鋼材ダンパーが地震のエネルギーを吸収するので本体は壊れない程度の揺れで済む。何度も地震が来るとダンパーは地震のエネルギーを吸収しなくなるが、ボルトで留められているだけなので簡単に新しいものに取り替えられ本体の建物は使い続けることができる。人の命も建物も守る耐震補強を広められれば、大地震が来ても被害を大幅に減らすことができるだろう。

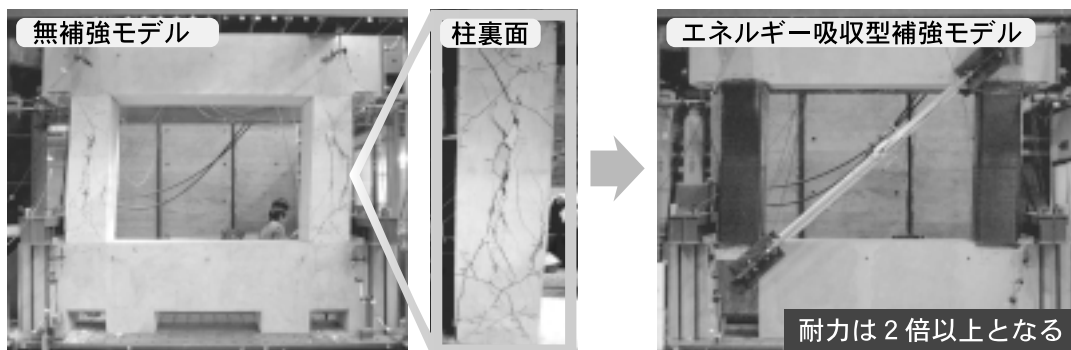


写真1 縮小架構実験(緑が丘一号館モデル)



デザイン・環境との融合

竹内先生は、建物は構造だけでなくデザインや環境性能も重要だと考えている。専門分野の構造だけを中心に考えた研究ではなく、意匠や環境の専門家と協力してバランスの良い研究を目指しているのだ。本来、建築はチームプレイであり、自分の価値観を主張するだけでは理想的な建築はできない。例えば、意匠の専門家が「柱を出るだけ細くしたい」と言ったとき、構造の専門家が安全面を考えて取り合わなければ、意匠の専門家の作りたい空間は生まれえない。構造の専門家は、柱を細くできないとき、意匠の専門家に作りたい空間のイメージを聞きできるだけそれに近い代わりのものを提案する。こうすることで更に新しいアイデアが出てくる可能性もあり、意匠・構造・環境のバランスが取れた優れた建築が期待できるのだ。全ての分野で優れた建築の方が需要も高くなるだろう。

そのチームプレイで改修された建物が東工大の敷地のなかにある。緑が丘一号館だ。木々に囲まれた真新しい感じのするこの建物は、実は一昨年まで耐震強度の足りない危険な建物だった。特に製図室のある二階は壁が少なく、他の階の半分程度の強度しかなかった。それが一昨年竹内先生を含む設計チームで耐震補強工事が施され、去年の春に新しく生まれ変わったのだ。見た目はまるで新築のように綺麗だが、実際はもともとあった建物に耐震補強を施したものだ(写真2)。

緑が丘一号館の耐震改修設計は、構造を竹内先生、意匠を同専攻の安田幸一先生、環境を湯浅和博先生が担当し、大学の施設運営部と協力して行

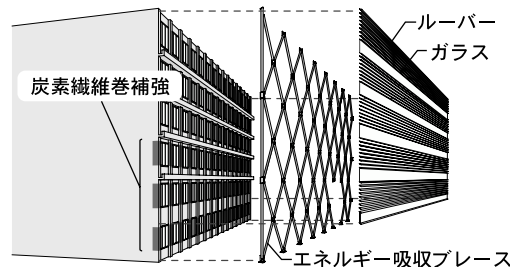


図3 緑が丘一号館のファサード

われた。構造はもちろん、デザイン的にも環境的にも配慮した理想的な建築を創るために先生方が集結し、完成したのが緑が丘一号館の正面を覆っているファサードだ。ファサードは多種多様だが、緑が丘一号館のファサードは、鋼材ダンパーと光を遮って光の量を調節するルーバー、そしてガラスからできている(図3)。

竹内先生は、意匠の安田先生とディスカッションをしながら緑が丘一号館のために鋼材ダンパーを用いた耐震補強を提案した。制振ブレースを使用することで地震のエネルギーを吸収し、建物への負担そのものを軽減できるため、より細い部材を使用することが可能となる。その結果ダンパーは震度6強程度の地震から建物を守りながら、なお且つ綺麗に見えるように、仰々しくなりがちな接合部分も含めてスマートなデザインになった。特に建物の両脇の柱は、縦方向の力に抵抗するので重要であり、その柱とダンパーとの接合部は普通多くのボルトで留めるが、デザインに配慮してピン接合されている。構造上必要なものをデザイ



写真2 緑が丘一号館 改修前(左) 改修後(右)

ンとして利用する構造デザインが活かされているのだ。

また、このファサードに使われているルーバーとガラスは環境への配慮がなされている。最近の都心のビルでは窓が全面ガラスになっているのをよく見かける。このようなビルでは二重にガラスがはめ込まれていて、その間にルーバーが付いている。ルーバーに光が当たると熱が発生し、二枚のガラスの間に溜まった熱は機械の力で屋上へと排出されるようになっている。しかし、ガラスを二重にしてしまったら窓が開けられず、自然の換気ができなくなり、機械の力で全て入れ換えなければならなくなる。ルーバーやガラスは室内環境を良くするためにあるのだが、外の空気を遮断して室内環境を良くしようという発想が、実は新たな装置を必要とさせ、地球の環境には悪影響を与えている。

一方、緑が丘一号館は、ルーバーによって日光を遮り、ある程度自然の風によって換気を行うというコンセプトを掲げている。実物大のファサードを作っての日光の入り方や室温変化を測定やパソコン上でのシミュレーションなど様々な検討を繰り返した結果、各階の上の方にはルーバー、下の方にはガラスを入れる現在の形にたどり着いた。季節で変化する日の高さを利用して、夏は室内に直接光が入らず、冬は効率よく入るよう工夫されている(図4)。冬が厳しいヨーロッパの気候に合わせたガラスだけの一般的なファサードは熱が屋外に逃げるのを防ぐことに重点を置いてい

る。それとは違い、夏の暑さが厳しい日本の気候に合わせ、夏にはなるべく涼しく冬には暖かくなる計算である。

緑が丘一号館のファサードは建築の三分野である意匠・構造・環境性能を全て兼ね備え、写真2を見ても分かるとおり、耐震補強によりまるで新築のようになった。一方コストはルーバーとガラスをつけたにもかかわらず従来型の耐震補強と同程度となっている。制振ブレースは踏ん張らずに地震のエネルギーを吸収するために杭が必要なく、その分安い。安くなった分を意匠や環境に充てたのだ。

また、緑が丘一号館では居つきのまま工事が行われた。一般の耐震補強では、内部に壁やブレースを増設するため、住人は工事の期間中は別の場所で生活する必要がある。しかし緑が丘一号館の耐震補強は、ファサードも外から取り付けるだけでよく、屋内での作業がほとんど無かったため、居つきのままでの工事が可能となったのだ。騒音や振動のために途中で避難した研究室もあったが、最終的には約60%が耐震工事中も建物にとどまった。

耐震補強というと見た目が悪く光も入りづらいものになりがちだが、緑が丘一号館はそのような暗いイメージの無い、構造面のみでなく意匠・環境面にも配慮した建物である。コスト面と併せて、エネルギー吸収型の耐震補強の普及に一役買うのではないだろうか。

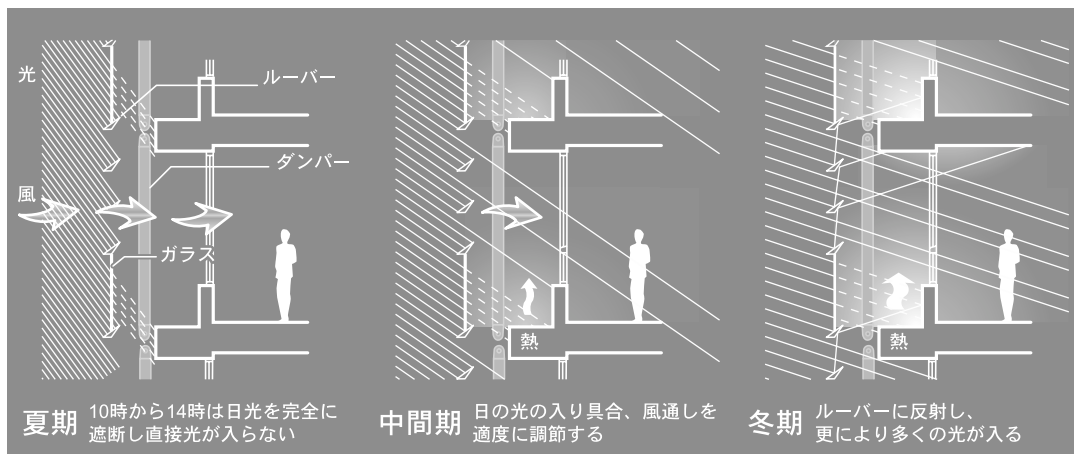


図4 緑が丘一号館のファサードの効果



新たな夢の実現に向けて

最近では免震構造や制振構造などのエネルギー吸収型の構造は、新築の超高層ビルなど新しい建物にはよく使われるようになってきている。しかし古い建物やドーム・ケーブル構造など複雑な構造の建物などの場合応用の仕方が分からない、というのが現状だ。建物を構造設計する際、役所で基準に照らして審査するためにモデル化が必要があるが、古い建物では使われている材料や構造の情報が不足していたり、複雑な構造などでは簡単な形にモデル化ができなかったりする。そのためエネルギー吸収型の構造を採用したときに、どの位効果があるのかの説明が難しいのだ。しかし、学校や体育館などの公共建物は、大地震後の避難施設になる可能性が高いので地震後も継続使用できる耐震補強は非常に大事だ。先生は現在、古い形式の構造で実験を行っている。また同専攻の小河利行教授と共同で、ドームや貝殻のように薄い曲面でできたラチスシェル、三角形を組み合わせてできたトラスなど複雑な形の構造を精密にモデル化して、エネルギー吸収型の構造を採用したときの効果を確認し、精密にモデル化できない場合でも十分な耐震構造を簡単に設計できるような評価方法を提案しようとしている(図5)。このことによって一般の構造設計者が気軽にエネルギー吸収型の構造を採用できるようにすることが目標だ。

また、このようなコンセプトを日本から他国に広めることも重要だ。近年、世界中で地震が頻発していて、東南アジアやトルコなど今まで地震の

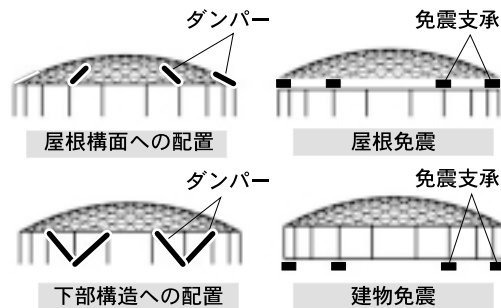


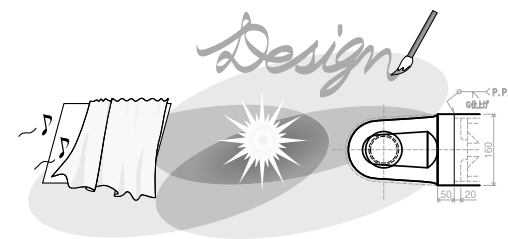
図5 空間構造への免震・制振技術の応用

めったに起こらなかった地域でも、地震が起こるようになってきている。エネルギー吸収型の耐震補強が世界中に広まれば、多くの人の命が救われることになる。そのような意味で、日本の技術を耐震技術の研究が進んでいない国に輸出していくということも、これからは重要になっていくだろう。

日本には、耐震補強が必要であることは知りつつも実際に工事がされていない建物がたくさんある。研究室での構造研究や補強部材の開発などは既存建築物の補強率の増加に大きく貢献することだろう。日本だけでなくアジア各国においても地震対策は急務となっているはずだ。構造分野の枠を超えたマクロな視点から、斬新なお話を熱く語って下さった竹内先生の研究のこれからの発展が非常に楽しみである。分野の枠にこだわらない先生の積極的な姿勢はこれからも先進的な構想を生み出すことだろう。

竹内先生は他にも、風のエネルギーを吸収する制振技術や、やじろべえ免震など独創的な技術についても話して下さいました。また「古い建物を壊して新しい建物を建てると二酸化炭素やゴミが排出され、環境に悪影響を与える。それをうまく使いながら改修していくことで、耐震面でもデザイン面でも向上させ、環境面でも負荷を少なくしていこう」という先生の考えは、まさに今必要とされているものだと感じました。

本稿を執筆するにあたり、竹内先生には貴重な時間を割いていただきました。心からお礼申し上げます。



げます。竹内先生及び研究室の方々の、今後の研究の更なる発展をお祈りいたします。

(田上 優)