

竹脇出教授 インタビュー

聞き手 = 小宅裕斗、上田昂平

2022.8.2 京都大学竹脇出教授室にて



インタビュー時の写真

—先生はなぜ建築を選ばれたのですか

高校時代は化学部に入っていて建築なんて全く眼中になかったんです。私は高校から大学を選ぶときに、京都大学の工学部ならどこでもいいくらいの気持ちでおり、親父に就職の面で建築がいいのではないかとされた程度でした。

—なぜ構造系に進み、教授になろうと思われたのですか

一回生の時に、建築意匠や環境も含む今の建築工学概論よりももう少し一般的な建築概論という土曜日の昼からの授業があったんです。その授業で横尾先生の構造の話聞いて、建築には物理に近いような構造力学という分野があるんだということを知ったんです。その後、二回生の後期から、横尾先生に代わって構造力学の講義にいられた中村先生という方の授業が、非常に綺麗に書かれた授業資料のもとで、ものすごく視覚的かつ論理的で分かりやすい授業だったんです。構造力学というのはこういうものから構成されているんだということに惹かれ、それで建築の構造に進みたいと思うようになったんです。またその後、さら

に研究に興味湧き、英語で書かれた論文などにも惹かれて研究の道に進もうと思ったのです。

—教えることではなくて研究することに興味があって教授になられたということですか

そうですね。最初は教えるというよりも自分の研究を進めたいということでした。

—研究テーマはどのように決めているのですか

もともと学生時代は留学がしたかったんです。構造力学等の先生が英語の資料を配っておられたので、英語による研究に興味湧き、大学院に行ったらどこかに留学したいなと思っていました。奨学金をもらわないと留学できないのですが、それより先に24歳の時に修士を出てすぐに助手になってしまいました。その後、奨学金の応募をしたりしてチャレンジしていたんですけどもなかなかうまくいわずに、結局32歳の時に鹿島財団に採用してもらって留学できたんです。デンマークやオーストラリアなどの論文で知っていたいろいろな人に声をかけたりして、来てもいい

よということになったんですが、構造力学や耐震設計などに興味があったのでアメリカに行くことにしました。カリフォルニア大学のバークレー校は有名で、1980年代頃は有限要素法や耐震設計のメッカということもあって、論文でしか知らなかったような先生がいっぱいおられたので、そこに行きたいと思ったんです。

—そこから現在の研究に繋がったんですか

そうですね。昔は中村先生が進められていた最適設計や逆問題などを中心に研究していたんですが、いまひとつ自分の中では納得していないところがあったんです。それはそれなりに、数理的には面白いのだけれど、実際の耐震設計とどのように深く関係するのだろうかという思いがあったんです。応用的な面というよりも、もうちょっと基礎的なところが中心的だったんでね。また、研究の世界は独創性というものが要求されるので、論文を出してもなかなか通らないという側面があるんです。最適設計や逆問題などに関する論文では、なかなかその独創性を示すことが難しかった部分があります。でも、そのような成功ばかりではない体験が今の研究に繋がっていると思います。

—独創性という話が出ましたが、竹脇・藤田研究室といえば極限的ダブルインパルスの研究が特徴としてありますよね

大学院生の時の講義に南井先生の耐震特論というのがあったんです。そこでは昔の世界地震工学会議の論文集から有名な論文を持ってきて、順番に学生を指名して発表させるという方式がとられていました。その中の一つに、正弦波でゆすったバイリニア型の1質点系か2質点系の定常振動というものがありました。当時はコンピュータが今ほど自由に使える訳ではなかったので、正弦波のバイリニアの解析ですら簡単にできなかったんです。その論文では解析的に数式で定常状態を求めていくことに主眼が置かれており、非線形すなわち弾塑性の定常状態を求めることが主たるテーマでした。また、中村先生の研究室ゼミでは最悪地震動という別のテーマをもらい、これらの2つのテーマをうまく解決できないかというのが私の頭の中にあっただんです。それが30年ほど経過した2015年の時に

正弦波の1サイクルを見ていて2つのインパルスを思いついたのです。バークレーのChopraさんの『Dynamics of structures』という本にも2つのインパルスという問題がありました。それは弾性の問題だったので2つのインパルスの線形応答を重ね合わせたら簡単に求まるものなんですが、弾塑性になると簡単に重ね合わせができないのです。それで、弾塑性の時のダブルインパルスに対する解、しかも共振というものがうまく求まるということが分かったので2015年ごろに研究し始めたんです。その後、1自由度系から今は明橋君がやっている多自由度系というところまで拡張して研究を進めたんです。

—教授をしていて大変だったことはなんですか

今でこそ電子メールが非常に盛んになっていますが、1980年代とかはね、郵便で論文を投稿したりするんですよ。するとその編集長の人にまず送って、そこから査読者の所にまた郵便で送られるんです。1ヶ月くらいは平気でかかったりして、そこで査読が3ヶ月とか半年とかかかるんですよ。それで一回だめになったら返ってきて、何回もやりとりするというようになって、普通に1年くらいはかかってしまうんです。論文が一発で通ることはなかなかなくて、論文が認められるまでの忍耐力というところが大変でした。また、雑誌の数も今はいっぱいあるんですが、昔は少なかったからね。論文が採用されるまでに時間がかかったり苦勞したりして、なかなか向こうに独創的なアイデアを理解してもらえないというところがありましたね。

—研究の環境は昔と比べて今は良くなってきているということですか

それは分かりませんよ。昔は時間がかかったからじっくり考えられたけど、今はすぐに電子メールが来るから忙しくてゆっくり考える時間がないですね。ダブルインパルスなどの考えやアイデアなんかを思いつこうとしてもすぐに連絡が来るので、ずっと自分の頭の中に置いておいて訳にいかないのです。昔と今のどっちがいいかは分かりません。連絡を取る分には良くなっていますが。

あとは、海外の人と知り合いになったりすると査読とかもすんなり行ったりするんですよ。全く研究内容を知らない

人が書いた論文を査読してくれって頼んでも、実績がないと本当にいい論文なのか分からないけれども、有名な先生が書いた論文が送られてきたら、この先生の論文だから大した論文だろうなってことで、実績というかネームバリューというのがあるんですよ。また、私たちの研究室の先生方は海外との行き来があまりなかったんで、留学とかも苦労しました。もう少し指導していただいた先生方に海外との交流があれば楽だったかもしれません。でも自分がそういう境遇に置かれて苦勞して調べたりしたことは自分にとって良かったと思います。

——教授としてやり残したことや後悔はありますか

研究は色々やったんですが、海外との交流をもっとできたら良かったなというのはありますね。海外との交流もだいぶやったんですが、もう少し行き来して向こうの学生をこっちに受け入れたりと、こちらの学生を向こうに送ったりとかいうような国際的な交流があっても良かったかとは思いますが。でも良い面と悪い面があって、自分が向こうに行ったり、国際会議にしょっちゅう行かないといけなくなって、そちらに時間を取られて良い研究ができなくなるんですよ。交流が盛んになればなるほど時間が取られてしまって独創的な研究ができなくなってしまいます。でもそればかりやってしまうと海外交流が無くなってしまおうという……。両方はなかなか難しく大変だなということですよ。

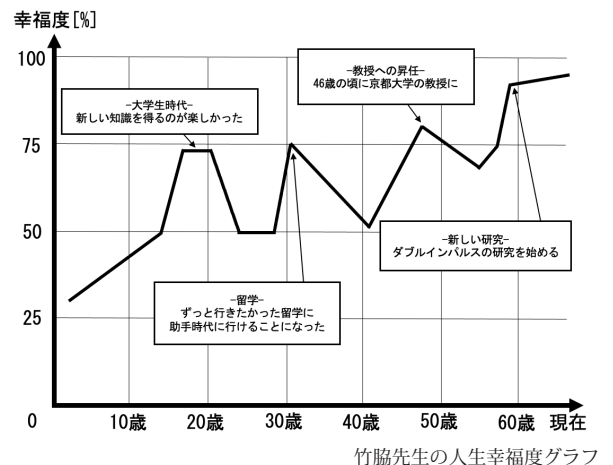
——退官されてからは何をされるんですか

京都市内のどこかの小さい大学に行って構造力学を教えたりとか、私立大学のマネジメントをしたりとか、民間の人とタイアップして色々新しいことができたかなというふうに思っています。京都大学に来て四十数年なので、京都大学からは少し離れたいと考えています。私立大学で全く新しい、違うタイプの学生に会ってみたりしたいなど。それから、海外の人と色々やりとりをしているのでそれは続けるつもりです。『ジャーナルのエディター』とかね。スイスに毎年一回行ったりとか、海外の人とやりとりするのは楽しいですね。全然違う考えを持っている人がいたりして、海外の都市を訪れたりするのが非常に面白いです。

研究は論文を書いたりとかは今までほどはしないけれども、教え子と議論したりして、共著になって欲しいと言われていたら手伝ったりとかはしていくつもりです。

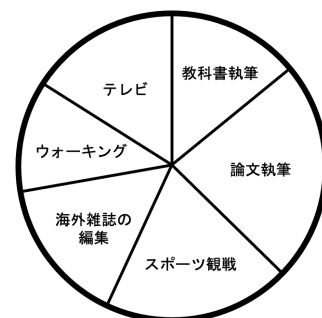
——幸福度グラフを書いてもらってもいいですか

難しいなあ。何を評価軸とするかによって違うからね。その時その時に一生懸命に生きてきたので難しいな。高校を卒業してからの大学生時代は新しいことを学ぶのが楽しかったな。20代中盤の助手時代とかは大変やったから50くらいかな。上がったのは、教授に昇任した時や、新しい研究を始めたりした時かな。



——脳内グラフを書いてもらってもいいですか

この1年とそれまでとは違うからとりあえず今でいいですか。今は構造力学の本を書いているから、教科書執筆と、あとは論文の執筆かな。趣味というのは特にないな、スポーツ観戦とテレビかな。



現在の竹脇先生の脳内グラフ

誰もが使える理論を構築

教授 竹脇 出

誰もが使える理論を構築

建物には固有の揺れやすい周期（固有周期）があり、これと地震波の周期が一致すると”共振”が起こり、建物が大きく揺れることで被害が生まれる。2011年の東北地震では、震源地から遠く離れた都市部の高層ビルが長周期地震動によって被害を受けた。たとえば大阪湾岸の超高層ビルでは激しい共振が発生したことで有名だ。そもそも高層ビルの固有周期は、地震の被害を防ぐためにあえて長周期になるように設計されている。このような長周期の地震動というものは起こらないとかつては考えられていたからだ。その他、かつては建設が想定されていなかったような地盤の緩い場所で、高層建築が建てられるようになってきたことが要因の一つだろうと考えられる。

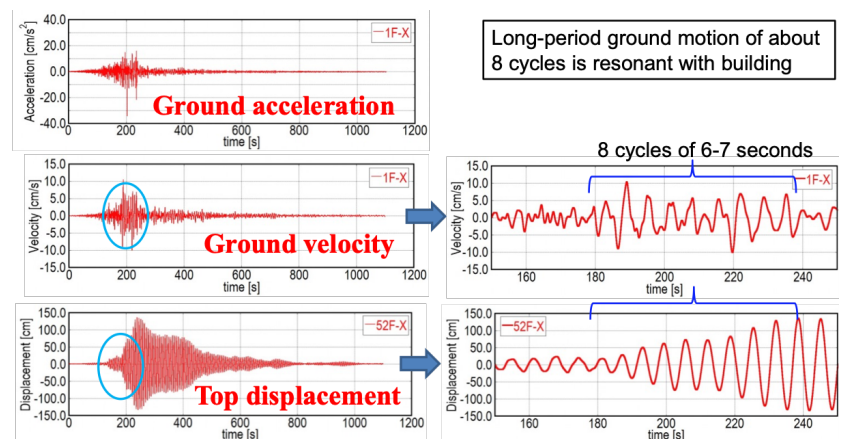


図 1

また、建物は揺れを受けるとある程度までは元に戻る性質（弾性）を持っているが、大きな変形を受けると元に戻らなくなる性質（塑性）も持っている。この変化は「塑性変形」または「残留変形」と呼ばれる現象を引き起こし、その後の建物の共振の周期を変化させる。通常は建物の強度が弱くなるので周期が伸びるが、この共振点を調べる方法として1960年頃に米国・カリフォルニア工科大学のグループが提案した「等価線形化法」が存在する。

しかし、この方法ではコンピューターを用いて数千・数万回の計算を繰り返す必要があり、満足のいくものではなかった。そこでこの共振点を見出す新たな理論を発明し、2015年に発表した。具体的にはランダムな地震動をインパルス（衝撃）に置き換えることで、複雑な事象を単純な計算式で精度よく表すことに成功した。結果として、これまでのような計算の繰り返しが必要なくなり、簡易な計算式で答えを導き出せるようになり、世界中から注目を集めている。熊本地震のような震度7の地震が2度起こった時に、通常の1.5倍の耐震強度が必要になるという試算もこの方式でいち早く突き止めることができた。

その後、数年に渡ってこの分野における種々の論文を発表し、大きな流れを形成することができたのではないかと考えている。この成果は、20世紀の後半に提唱された耐震設計の二大法則である「エネルギー一定則」と「変位一定則」の中間に位置するものであり、国内外で極めて高く評価されている。特に、等価線形化で有名な柴田明徳東北大学名誉教授から2016年に頂戴した「耐震設計の第三の法則である」という極めて高い評価は、その後の研究発展の動機付けには最高のものとなった。

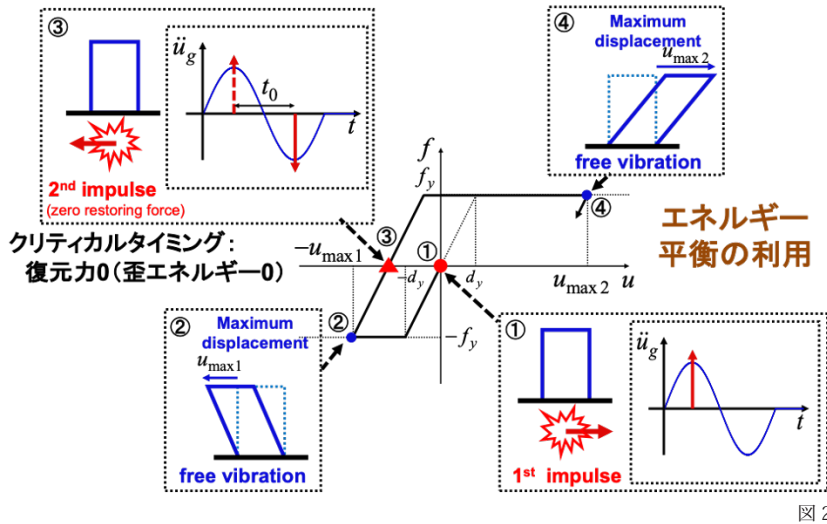


図2

免震・制震のハイブリッドで世界一安全な高層ビルをつくる

想定以上の強い地震が何度も発生するということになると、梁や柱の強度を高める耐震性能の向上を図るだけでは限界があり、近年では免震構造と制震構造が普及している。免震構造は建物の基礎部分と建物間にゴム材料を用いた免震装置を入れることで、揺れを建物に伝えないようにする構造だ。一方、制震構造はダンパーを用いて地震エネルギーを吸収することで耐震性を上げる。現在ほとんどの超高層ビルの屋上に設置されているTMD (Tuned Mass Damper) は、地震の揺れに対して反対側におもりを動かすことで揺れを軽減させる制震装置の一例である。住友ゴムと共同研究を行い、ビルや木造住宅に簡単に設置可能な制震ダンパーを開発し、既に多くのビルや住宅で用いられ、熊本の地震でも効果が実証されている。

また、現在力を入れているのが、この免震と制震をハイブリッドで用いることで究極的に安全性を高めた建物の実現だ。これまでは、両方の仕組みを設置するのはコスト面からも必要ないと言われてきたが、実際にはそれぞれ得手不得手があり、適切に組み合わせることで対応できる地震の幅が広がる。実際、長周期の地震に対して免震構造はあまり効果を発揮しないものの、直下型地震のような短い揺れはよく吸収する。逆に制震ダンパーは、直下型ではあまり効果がないが長周期の地震には高い効果を発揮する。東京湾岸に建設された高層マンションでは、このハイブリッドのシステムを採用し、短い急激な地面の揺れは免震で、長周期地震動には制震で対応するという設計が取り入れられている。

最悪地震動を知り想定外をなくす

想定外の被害を発生させないため、限られた既知情報から発生が予想される地震動群を考え、最悪地震動（その建物に最も甚大な被害を及ぼすであろう地震動）を特定する研究をおこなっている。構成部材の性質やばらつき、地盤の揺れ方などを考慮した上で、その建物の固有周期をあらかじめ想定することで、それに耐えるような設計を可能にしようという考えだ。合わせて建物の状態を調べる構造ヘルスマモニタリングの開発にも力を入れている。これは建物を人間のような生き物に喩え、その性能が保持されているかを、主にデータ分析により明らかにするというもので、建物の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）がおこなわれる。来るべき大地震に対して、老朽化した建物をそのままにしておくのではなく、適切な構造ヘルスマモニタリング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になるからだ。

また近年注目されているレジリエンス（復元力・回復力）という考え方にに基づき、被害が起こってもすぐに復旧できる、回復力の高さに注目したレジリエントな構造物やシステムについて考えることも重要だ。制震や免震によって性能の低下をいかに最小限に抑えるかということだけでなく、補修に必要な部材がどれだけ素早く入手できるかといったことが重要となる。すなわち、建物単体を越えた社会全体の仕組みと関係した取り組みが求められている。

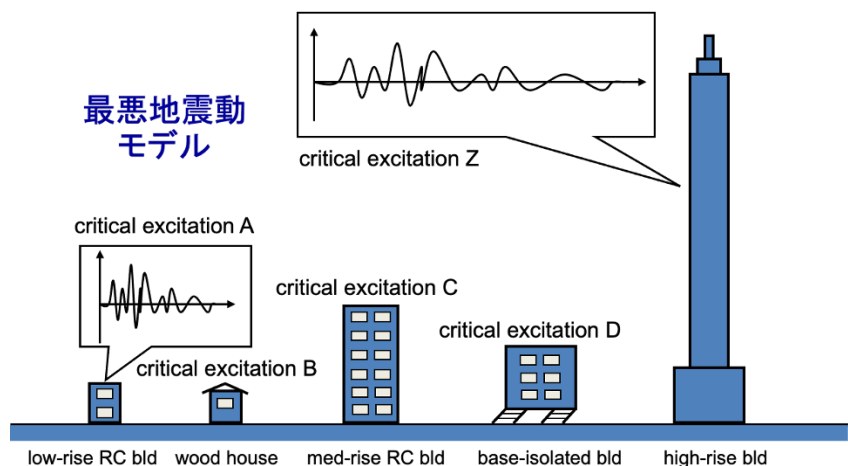


図 3

災害に強い構造システム

准教授 藤田 皓平

はじめに

我々はこれまでに様々な災害を経験することで、災害に対して都市や建物をいかに安全にするかという課題に向き合ってきた。近年の地震被害として、東日本太平洋沖地震（2011年）や熊本地震（2016年）などが挙げられ、災害時の建築・都市の防災力や復旧性を高める必要性をあらためて認識させられた。今後発生が懸念される南海トラフ地震や上町断層帯地震（大阪平野）などの都市部における内陸型直下型地震に対しても構造安全性を高めることが重要となる。さらに、地球温暖化に伴うグローバルな気候変動などにより、暴風雨を伴った台風や線状降水帯による突発的な大雨による浸水被害も懸念されている。建築は、人が社会的・文化的な活動を営む基盤の一つであり、このような災害から身を守る境界としての役目を課せられている。当研究室では、減衰性能を高めるためのイノベティブな制振システムの開発・解析や、災害時の建築物の状態をモニタリングする手法の構築などを行っている¹。本ページでは、災害に強い構造システムの構築に向けた研究テーマをいくつか紹介する。

1 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 環境構成学講座地盤環境工学分野ウェブサイト：http://takewaki-lab.archi.kyoto-u.ac.jp/takewaki_tsuji_lab/home.php

揺れを制御する制振構造

制振構造とは、建物内に制振装置（ダンパー）を配置することで、地震や風といった外乱に対して建物の揺れを抑える構造システムである。柱や梁を頑強にすることで揺れに耐えるという耐震構造ではなく、ダンパーが振動エネルギーを吸収・発散することで建物の構造的な損傷を軽減するというシステムである。制振構造は、建物を高性能化する技術の一つとして確立され、高層建物などでは標準的な構造システムとなりつつある。ダンパーには様々な種類があり、それぞれのダンパーの特性を十分に把握したうえで、建物内の配置の違いが建物の揺れに及ぼす影響をふまえた上で設計する必要がある。このような問題をダンパー最適配置問題(図1)という。



図1 ダンパー配置問題：さまざまなダンパーを架構内にどのように配置すべきかを数理的に導く²

2 Uemura R, Akehashi H, Fujita K and Takewaki I (2021), Global Simultaneous Optimization of Oil, Hysteretic and Inertial Dampers Using Real-Valued Genetic Algorithm and Local Search. Front. Built Environ. 7:795577.

工学分野では種々の要因によるばらつきや不確定性を考慮する必要があり、建築構造においても入力外乱や構造特性の変動に対する構造性能の変化を考慮した設計をすることが望ましい。このような様々な不確定性に対して余裕をもった設計とするために安全率を見込むことが一般的であるが、安全率の設定方法が妥当であるかは定かではない。そこで、不確定要因に対して構造性能の変動のしにくさを定量的に評価するロバスト性指標の提案や、ロバスト性指標に基づいた最適化問題を展開している（図2）。限られたコスト・資源から建物を合理的に設計する構造最適化問題は、地球環境への負荷を低減させ持続可能な社会に向けて、今後も継続的な研究テーマであると考えている。

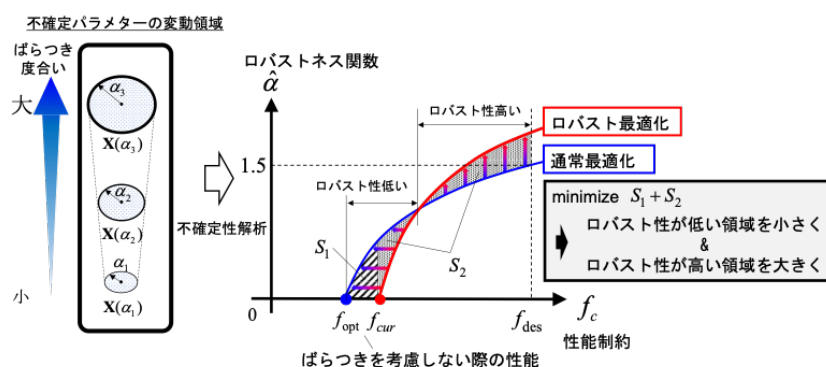


図2 ロバスト最適化問題

ロバスト性を定量的に評価する指標とそれに基づく最適化問題を定式化^{3,4}

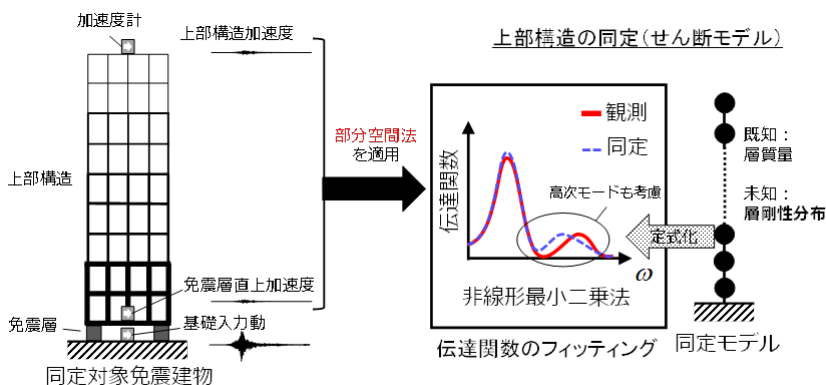
3 日本建築学会, 構造最適化の最近の発展と設計への応用事例 (応用力学シリーズ 14), 6 章.

4 Fujita K, Wataya R and Takewaki I (2021), Robust Optimal Damper Placement of Nonlinear Oil Dampers With Uncertainty Using Critical Double Impulse. Front. Built Environ. 7:744973.

システム同定・モニタリング

建物内に種々のセンサーを設けて、地震などによる建物の揺れを計測することを、建物の健全状態を診断することになぞらえて構造ヘルスマニタリングという。建物内に設置できるセンサーには限りがあるため、建物全体や室内什器等の挙動をモニタリングデータから直接計測することはできない。少ないモニタリングデータを有効に活用し、建物内の被災状況や構造的な損傷を評価するためには、対象物に応じた適切なモデル化を行うことが重要であり、それらのモデルのパラメータを同定する必要がある。このような構造ヘルスマニタリング技術を採用することで、地震時に建物に生じた被害を速やかに評価することが可能となり、災害からの復旧時に有益な情報を提供することが可能となると考えている（図3）。

近年では、災害に強い構造システムの一環として、地震のみならず風水害などの様々な災害に対応することも必要であり、間仕切り壁や建物内設備などの非構造部材を対象としたモニタリングシステムの構築などにも注力している（図4）。



5 榎原 由理江, 河又 洋介, 藤田 皓平, 倉田 真宏 (2022), 目視点検が困難な吊り配管等を対象とした画像モニタリングシステム, 日本建築学会構造系論文集, 87 巻, 798 号, p. 725-736.

図3 免震構造を対象としたモニタリング手法の開発：実際の建物の挙動を物理モデルで推定する⁵

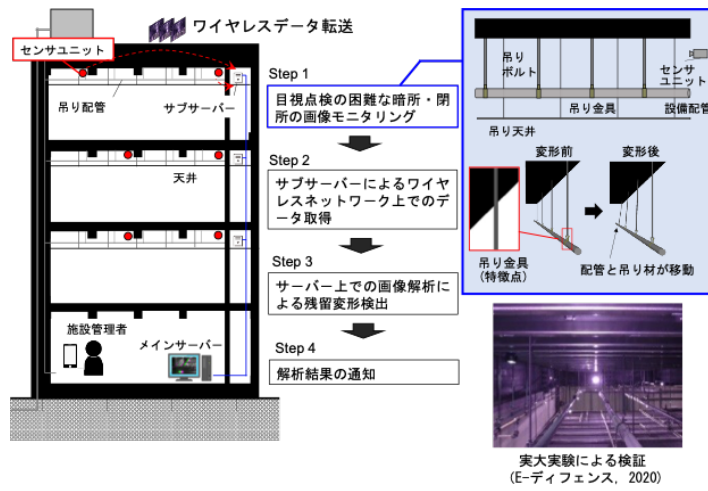


図4 非構造部材を対象としたモニタリングシステム：画像解析に基づく損傷診断⁵

断層近傍および長時間地震動に対する弾塑性多層建物の インパルスを用いた極限応答解析

博士後期課程三年生 明橋 弘樹

研究背景

近年、日本の都市部における高層建物が断層近傍及び長周期長時間地震動により甚大な被害を受けることが危惧されている。一方で、断層破壊・伝播特性・地盤特性を考慮してもなお建物を経験し得る地震動を正確に予測することは現在の知見を以ってしても困難であり、また建築構造物は材料本来のばらつき・経年劣化・施工の精度等に起因する不確実性を有する。このような不確実性を高層建物の設計に反映させるため、特徴的な地震動に着目して弾塑性多層建物に対する最悪な地震動入力と対応する極限応答を解明する必要がある。

インパルスを用いた極限応答解析（1）

構造物の塑性化を考慮した解析および設計は、従来、等価線形化（構造モデル変換）により行われていた。等価線形化には、1）地震レベルの増大に伴って応答評価精度が低下する、2）最悪な極限応答を見出すためには構造パラメータ・入力振動数を変更して多数の繰り返し解析を行う必要があるといった問題が存在する。これに対して、構造モデルではなく入力モデルをインパルス列に変換するという全く新しい考え（ゲームチェンジ）を導入する（図1）。

断層近傍地震動を模擬したダブルインパルスを用いた解析では振幅（入力速度 V ）と周期（インパルス時間間隔 t_0 ）を解析上切り分けて扱うことが可能であり、弾塑性1自由度系の極限応答を見出すことは比較的容易である。しかし、超高層建物モデルとして用いられる弾塑性多自由度系を扱う場合、インパルス入力により全てのモードは同時にかつ同程度に励起され、また弾塑性応答及び高次モード応答に起因して各質点の応答には位相差が生じる。従って、1）エネルギー平衡則の適用は困難であり、2）最悪な入力周期を見出すことも困難、さらに、3）建物応答（層間変形・床加速度）を過大に評価する恐れがある。

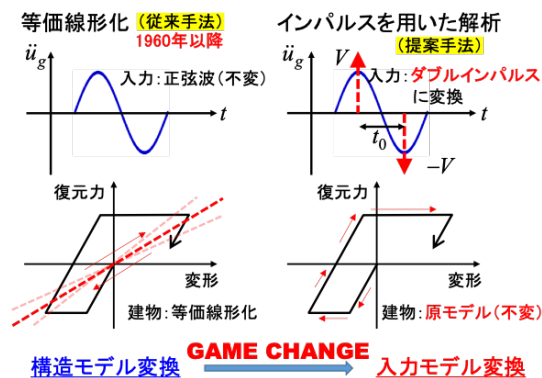


図1 構造物の塑性化を考慮した非線形共振解析

インパルスを用いた極限応答解析（2）

以上の困難点を一挙に解決する方法として、影響ベクトルを操作してインパルス入力を等価な水平衝撃力として扱う方法（動力学の原理に基づく独自のハイカットフィルター）を提案し、擬似ダブルインパルスと命名した（図2）。擬似ダブルインパルスの最悪な入力周期の条件は、「慣性力の弾性1次モード成分が0に等しい場合に第2インパルスが入力されることである」という事実を数式的に解明しており、最悪入力周期は繰り返しなしで特定可能となる。また、擬似ダブルインパルスは断層近傍地震動に対する弾塑性極限応答（層間変形・床加速度）を高精度かつ効率的に評価可能である（図2）。

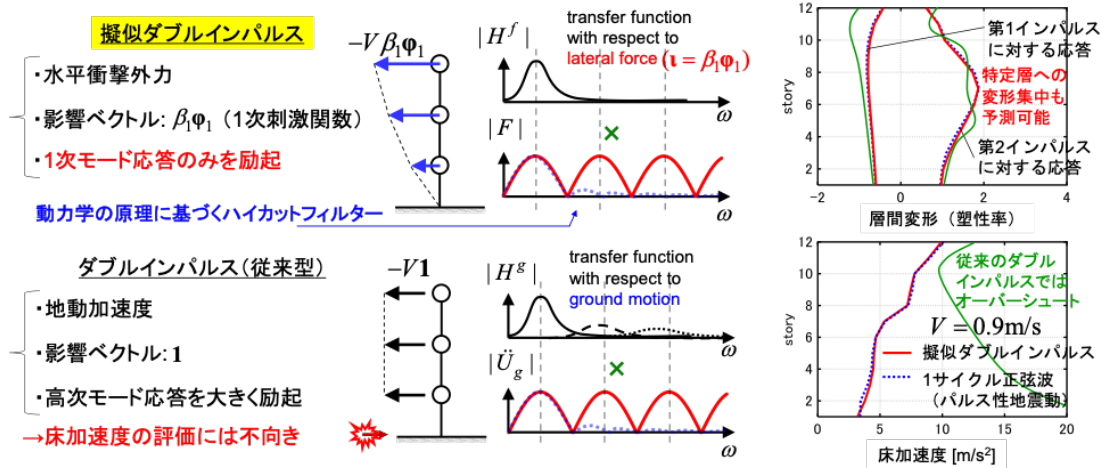


図2 擬似ダブルインパルスの概要及び最大応答の比較

さらに、最悪な入力を受けた場合の変形特性とモーダルカップリングを考慮した変位制御解析法 Updated mode-controlled energy-based approach (UMEA) を開発し、UMEA とエネルギー平衡則に基づき層間変形極限応答を数式的に陽に表現して1960 年来の難問を解決した（図3）。尚、step by step の時刻歴応答解析と比べて数百倍の計算速度（共振周期探索の繰り返しを考慮すれば数万倍）を達成している。

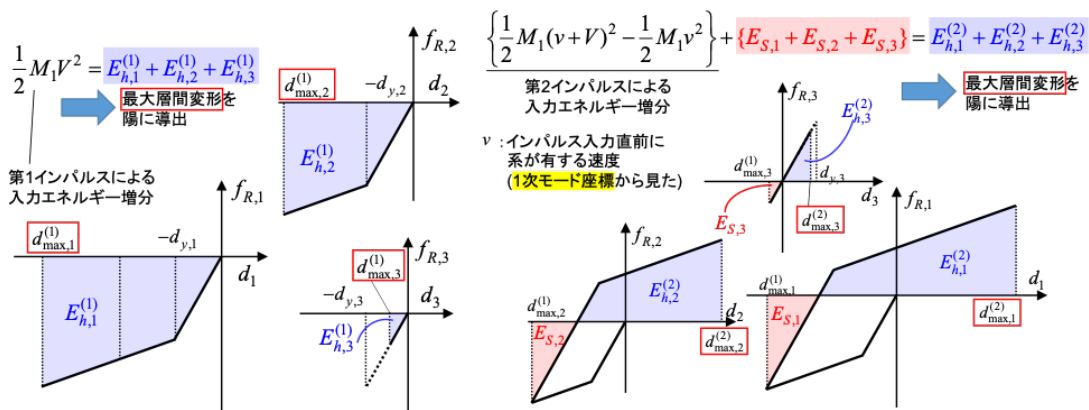


図3 UMEA とエネルギー平衡則による層間変形極限応答の簡易高精度導出（3層建物の例）

提案手法は、詳細な骨組モデルに対して高精度な評価が可能であることを確認している。また、最悪な地震動を使用することで、制振建物の応答の上限値を低減する信頼性の高いダンパー設計を得ることができる（図4）。

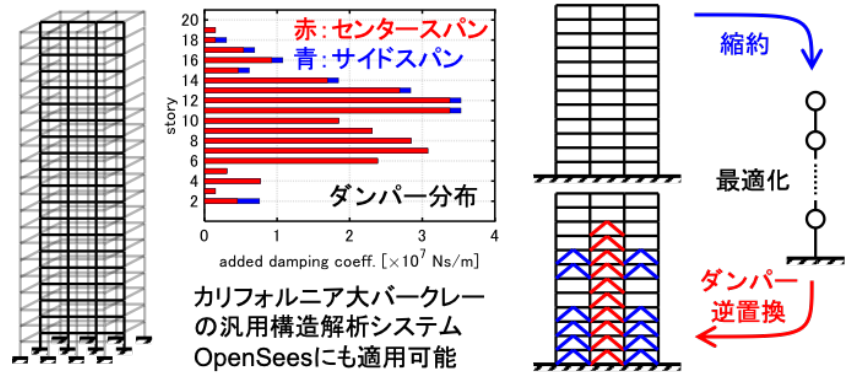


図4 骨組モデルに対するダンパー最適設計法

尚、長時間地震動を扱う場合、入力モデルを擬似マルチインパルスに変換することで、擬似ダブルインパルスの場合と同様に極限応答を繰り返しなしで特定可能となる。

【参考文献】

- 1) H.Akehashi and I.Takewaki (2021). Soil Dyn. Earthq. Eng., 150, 106887.
- 2) H.Akehashi and I.Takewaki (2022). Soil Dyn. Earthq. Eng., 157, 107254.
- 3) H.Akehashi and I.Takewaki (2022). Eng. Struct., 250, 113457.