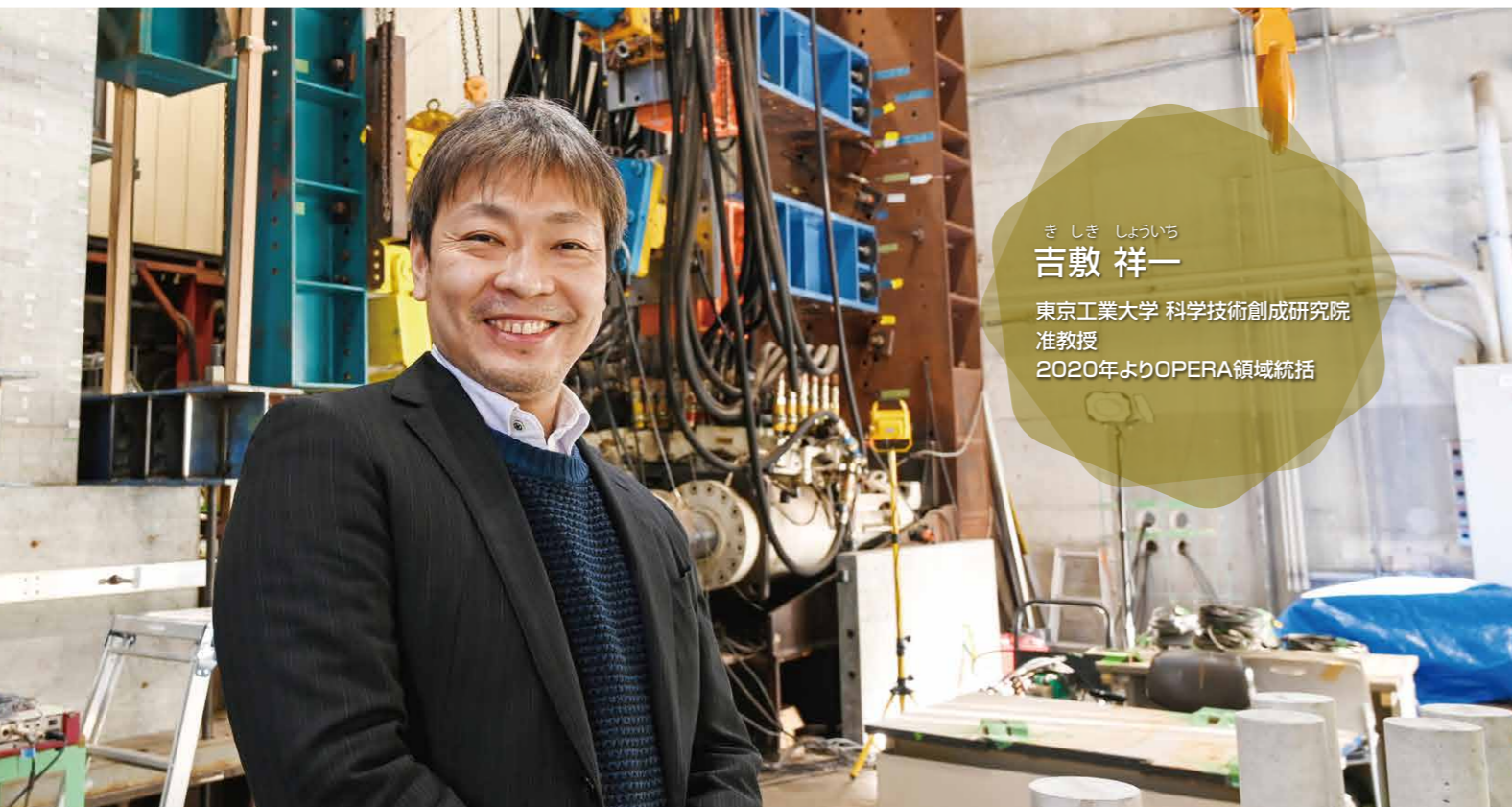


# 大都市の超高層ビルを安全に 社会・経済活動の維持目指す

地震大国といわれる日本において、巨大地震後も速やかに社会・経済活動を継続させるためには建物の安全性が重要だ。東京工業大学科学技術創成研究院の吉敷祥一准教授は、中枢機能が集約された大都市における超高層ビルの安全性に着目し、そこに集う人々が日常から災害時まで安心を感じられるシステムの構築に挑む。



きしき しょういち  
**吉敷 祥一**  
東京工業大学 科学技術創成研究院  
准教授  
2020年よりOPERA領域統括

## 構造材の「スケール効果」 実大実験による性能分析

東日本大震災から10年。安心安全な社会を実現するために、地震のメカニズム解明から自治体の避難計画見直しに至るまで、さまざまな分野で震災の経験を生かす取り組みが行われている。建築業界でも地震の揺れから建物を守る耐震技術が開発され、徐々に普及が進んでいる(図1)。

一方で近年では都市部を中心に超高層ビルの建設が相次いでいる。1つの街と同じ規模の人員を収容でき、高さ100メートルを超える超高層ビルは商業施設、住居、オフィス、大学などさまざまな用途で利用されており、社会・経済の中枢ともいえる存在だ。

このような超高層ビルの林立する都市部が巨大地震に見舞われ、ひとたび被害が発生すれば、影響は計り知れない。東京工業大学科学技術創成研究院の吉敷祥一准教授は、巨大地震後も日常生活を維持できる超高層ビルを目指し、OPERA「社会活動継続技術共創コンソーシアム(SOFTech)」で技術開発に挑んでいる。

耐震性能は通常、柱や梁などの構造材に地震を模した揺れを加えて評価する。超高層ビルや橋梁などの大きな構造物の場合、実物大の大型構造材の耐震性能を分析で



図1 東京工業大学すずかけ台キャンパスJ2棟の基礎部分に設置された免震ゴム装置。この他にも免震ダンパーやセンサー、地震計などあらゆる装置が導入され、都市地震工学の粋を集めた建築となっている。

きる設備が日本にないため、現在は実験装置に載せられる縮小試験体を使い、安全性検証実験が行われている。この実験方法は実物大の構造材と縮小試験体の大きさに応じた差が物理的な性質にも確認されていれば、効率的

な良い評価法だといえる。

しかし現時点ではさまざまなスケール効果を想定し、計算上で安全な構造か否かを推測することしかできていない。結果として何重にも安全策を講じざるを得ず、建設コストはかさむ一方だ。「実物大の試験体に対して耐震性能を評価できる巨大実験装置を作れば適切な評価は可能になりますが、建設には資金が必要です。巨大実験装置の必要性を多くの方に理解してもらわなければいけません」と吉敷さんは語る。

そこで構造材のスケール効果がどの程度あるのかを確認するために、鉄骨のサイズや溶接の際に生じる欠陥の大きさを変えた実物大の構造材に力を加え、どのくらいの力・変形で破断するかを調べた(図2)。構造材の接合部が破断するまでの変形量には明らかなスケール効果が確認され、実験に立ち会った多くの技術者たちも実物大で実験する重要性を再認識したという。「免震装置の1つである積層ゴムは鉄板とゴムを層状に重ね合わせて作るのですが、大きくなればなるほど両者を均一に欠陥なく接合したものを大量に作ることは難しいです」と吉敷さんは巨大構造物の建材が抱える課題を指摘する。加えて通常1回に溶接できる幅は3ミリメートルから4ミリ

メートルなので、厳密に4分の1のミニチュアを作ろうとすると、溶接幅を1ミリメートル未満にしなければならず、そのような微細な溶接は不可能なのだ。

また鉄筋コンクリートの縮小試験体を作ろうとすれば、セメントに混ぜる砂利や砂のサイズまで厳密な比率で小さくしなければならず、これも現実には不可能だ。この

ように縮小試験体を用いた実験で耐震性能を推定するには限界があることから、吉敷さんは構造材の耐震性能を正確に評価するための大型実験装置の設置に向けて、今後も関係機関に働きかけていきたいという。

## 非構造材の評価手法も必要 センサー付けた実験を実施

超高層ビルは内部に損傷が生じると、継続して利用することが難しくなる。実際に構造材に大きな損傷がないにもかかわらず、壁や天井などの非構造材の損傷により建物が使用できなくなる事例も多い。

一般的に建物は、柱や梁などの構造



図3 実物大の壁にセンサーを取り付けた実験の様子

材と天井や部屋を仕切る壁などの非構造材に分けて考えられている。東日本大震災後も耐震性能の評価は、構造材を中心に研究が進められてきた。「非構造材の耐震性能も適切に評価し向上させていかなければ、被災後も安全に使い続けられる建物は作れません」と吉敷さん。

これまで非構造材の耐震性能は構造材ほどには検討されてこなかったため、何をどのように計測すれば、安全性を評価したといえるのかがわかっていない。そこでSOFTechでは実際の建物を模した鉄骨柱と壁を用意し、地震時を想定した変形を加えて損傷させる実験を行っている(図3)。壁には建材のゆがみや揺れを計測するセンサーが多く取り付けられている。地震の揺れがどのように壁に伝わって、破損につながるのかを明らかにするのが狙いだ。

こうした実験を繰り返すことで、非構造材の耐震性能を評価する手法を確立できれば、より安全な設計が可能になる。さらに建物全体を常時モニタリングできるようになれば、有事の際に建物から避難すべきかとどまってよいのかを、建物の使用者がその場で判断できるようになるという。いつ起きかわからない自然災害への備えは後回しになりがちなことから、設備の不具合やメンテナンスのタイミングを通知するといった平時にも使えるシステムを模索している。



図2 SOFTechに参加する多くの企業や構造技術者が見守る中で行われた実大破壊実験。大きさを3段階に変えた相似形の鉄骨梁を用意してどのくらいの力・変形で破断するかを調べた結果、溶接の際に生じる欠陥を相似形で変化させると、鉄骨梁の変形できる量は実物大ほど小さくなり、溶接部に許容できる欠陥の大きさにはスケール効果があることがわかった。

## 熊本地震でも損傷を判定 「改装でOK」が取り壊しに

吉敷さんがこのような非構造材の安全性にも目を向けるきっかけとなったのが、2011年の東日本大震災と16年の熊本地震だったという。吉敷さんは東日本大震災の1ヵ月後に被災地に向かい、建物の構造材がどのように壊れているかを調査して回った。宮城県内の学校の体育館では天井が落下し、床一面に散乱していた(図4)。体育館は使い続けられるかと学校の先生から問われた吉敷さん。「私は答える言葉を持っていませんでした。建築構造・防災の専門家として現場に入りながら、構造材の壊れ方ばかり見ている、その建物が安心安全に使い続けられるのかという視点で見たことがなかったのです」。この出来事をきっかけに、吉敷さんは外観から建物の損傷を推定する手法の開発に取り組み始める。

壁や天井が破損し鉄骨がむき出しになった場所に着目し、鉄骨に塗られているサビ止め塗料の剥がれ方の度合いから、鉄骨の損傷を推定する手法を開発した。また耐震性能を高める筋かいが地震の揺れを受け止めて湾曲することにも注目し、筋かいの曲がり具合からも構造

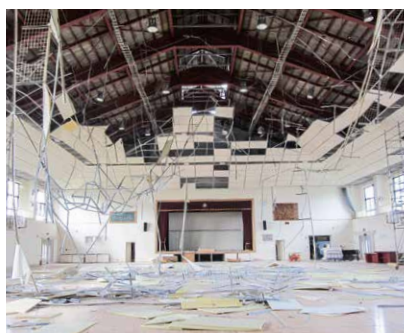


図4 吉敷さんが調査した宮城県の体育館。天井材が落下してフロアに散乱している。この経験は後に生かされ、天井材のない体育館が増えていたことで熊本地震の際には被害が抑えられた。



図5 熊本地震の揺れによって教室を仕切る壁が倒壊。吉敷さんの調査によって、この学校の構造は損傷していないことがわかったが、建て替えられることになった。

材の損傷を推定できるようにした。

こうして確立した評価法は熊本地震で生かされることになる。地震発生直後に調査に赴いた吉敷さんは、建物の構造材の損傷具合を評価していった。ある学校を訪れた際、教室を仕切る壁は倒れていたものの、幸い人的被害も出てお

らず、構造は一切損傷していなかったことから、吉敷さんは改装すれば使用できる建物と判定した。ところがその建物は数年のうちに取り壊されたという(図5)。

「どんなに壁を直しても、地震の被害を思い起こさせるような教室で授業をしたい人はいません」と学校関係者が語った言葉が今も胸に残る。以来、吉敷さんは建物を使う人が求める安心や安全性とは何かという問いに真摯に向き合い続けている。

## 被災者の心理状態つかみ 逃げ込める高層ビルに道

被災した建物に利用者が恐怖を感じると使い続けられないと痛感した経験を踏まえ、SOFTechには心理学から安心安全を考えるプロジェクトチームも参画している。東京工業大学リベラルアーツ研究教育院の永岑光恵准教授は、椅子に座った状態で地震の揺れを疑似体験できる「地震ザブトン」や実物大の部屋を揺らすことができる「実大振動台」を利用して、心拍数や発汗から地震を経験した人の心理・生理状態を測定する実験を行っている(図6)。今後の研究で不安を軽減するために必要な情報提供の在り方が明らかになれば、安全な建物を安心して使えるようになるだろう。

またSOFTechには大学の他に多くの企業も参画している。吉敷さんらが明らかにした基本的な知見や研究成果



図6 VRグラスで揺れる室内の映像を見ながら「地震ザブトン」に座って揺れを体験すると、被験者は強い恐怖を感じる。こうした実験を通じて、必要以上に恐怖を感じさせないようにする情報提供の方法を模索している。

は、早い段階でSOFTech内の建設会社や資材メーカーと共有されている。「大学の研究成果を基に各社が開発した製品を販売するようになれば、安全な建物が確実に増えていきます。巨大地震に見舞われた際に多くの人々を受け入れられる『逃げ込める高層ビル』が生まれるのです」とSOFTechの活動に期待を寄せる(図7)。

巨大地震の直後には免震・制振といった耐震技術の必要性が声高に論じられるものの、時間とともに論調は弱まりがちだ。実際に日本免震構造協会の調査によれば、阪神・淡路大震災や新潟県中越地震のような大きな地震が生じた直後は免震技術を採用した建物の建設棟数が増えるが、やがて減少していくという。吉敷さんは「産学が一体となって取り組むことで、世界をリードする災害に強い社会にしたい」と、節目の年に決意を新たにする。



図7 東日本大震災では首都圏でも強い揺れが感じられた。工学院大学の新宿キャンパスにある地上28階建ての高層ビルでは、安全を確認した上で地震発生当日に帰宅困難者の受け入れが行われた。(工学院大学 建築学部 久田嘉章教授 提供)