

建築構造（鋼構造）分野の実験・実習の今と昔

Past and Present of Experimentation and Laboratory Training in the Field of Building Engineering (Steel Structure)

吹田 啓一郎^{*1}
Keiichiro SUITA

Some examples of experimentation in the field of building engineering are introduced. Progress of experimental techniques, change of topics following the lessons learned from seismic disaster are presented through comparison with my student days.

Keywords : Education, Experimentation, Structural Engineering, Engineer Education

キーワード：教育，実験，構造工学，技術者教育

1. はじめに

現実に起こる現象の解明が科学の出発点であり，明らかにしたい現象を人工的に再現するために実験を行い，そこから学んだ理屈を役に立つ形に利用するのが工学の目的である．あるいは実験から未知の現象や新たな理論が見えてくることもある．

建築構造の分野では，構造物の力学挙動を理解し，理論や設計法の妥当性を検証する手段として重要な位置を占め，教育と研究のいずれにおいても構造実験が行われる．京都大学名誉教授の井上一朗博士は，「実現象に学ぶ」と題した最終講義において「実験と整合する破壊機構と耐力の関係に理屈が見いだせれば，破壊させないための筋書きが見えてくる」という言葉で構造実験の役割を端的に説明されている．

実験対象となるのは，構造材料のレベルから，柱，梁，壁，筋交いなどの構造部材や部材同士の接合部のレベル，さらにこれらで構成される構造物全体のレベルがある．それぞれのレベルで，構造性能や力学挙動を知るために実際に行われる実験の規模や方法は，対象によってかなり異なってくる．素材レベルの実験では手で持ち運べる程度の供試体であるが，部材レベルになると小は住宅に使われる木材から，大は超高層ビルの部材まで様々なものが対象となる．大学などの教育機関が持つ実験設備で扱えるのは，実物大であれば中小規模の建物までに限られることが多く，大規模構造物になると部材レベルでもかなり縮小したモデルでないと扱えない．さらには建物全体を扱う実験となると，ごく限られた設備を除いて一般には対応できない．

多くの場合，構造実験は構造物全体ではなく，そこから着目する部分だけを取り出したものを対象に，構

造物の中におけるその部分の挙動を再現するように力学的条件を設定した装置に据え付けて行われる．また，再現したい挙動に適した加力装置によって載荷し，それには静的加力装置，動的加力装置，振動台などが挙げられる．ただし，これも大掛りな設備を持たずに，静的な加力装置を使用するのが一般的である．

一口に構造実験といっても実に多様である．材料実験では定型の試験体と試験装置で行われることが多いのに対して，構造実験では対象が多岐に亘ることから試験体や実験装置もそれぞれに適した形で構成される．いずれの研究分野でも共通すると思われるが，現象の解明に最も適した実験装置を開発・設計することも重要な研究成果となる．構造工学の分野でも長年の蓄積により様々な構造要素に適した実験方法が考案され，そこから新たな理論や有益な知見が生み出されてきた．建築構造用の材料には鋼，コンクリート，木，煉瓦，石などが使われるが，ここでは主に鋼構造を例にしながら，私が関わってきた構造実験の実例も交えて，工学教育における実験の方法について考えてみたい．

わが国では建築構造物に要求される性能の多くが耐震性と関係しており，構造実験も耐震性能評価を目的とすることが多い．様々な機関で実施される構造実験による性能評価の基準を統一して標準化するため，1994年に標準試験法（建設省建築研究所，(社)鋼材倶楽部）が発行され，さらに1995年の兵庫県南部地震における鋼構造建物の被害に対応した実験方法を加えて2002年に改定版¹⁾が発行された．これは前述の多様な実験方法を紹介した解説と原著論文のリストが付けられており，教育者や研究者が実験方法を検討する上で有益な情報が得られる貴重な資料である．

構造教育の現場では学生に興味を持たせるために実験が活用されることが多い．基礎となる構造力学の理

平成 22 年 11 月 10 日 受付

*1 京都大学

論は数式の展開による説明が多いため、工学系の学生にとっても抽象的で実現象の本質を理解できず、興味を失って構造離れしてしまうことがある。このような学生に自分の手で実験を行う機会を与えて自然に原理を理解させることを意図したものが文献2)である。これは日本建築学会中国支部構造委員会の努力で作成された教材を(社)鋼材倶楽部が全国に販売しているもので、学生が自分で製作できるように紙模型で様々な鋼構造を作り、様々な荷重をかけたときの変形の様子を試すことができるように工夫されている。定量的な扱いはできないが、定性的な現象の把握には効果的である。

実験を通じて理論を学ぶには実際の鋼材を対象とした実験から定量的な現象の理解が必要であるが、様々な力学挙動をすべて実験で見せることは難しく、多くの建築学科の学生は実験により鋼材の素材そのもの、部材や接合部の実挙動を確認する機会を与えられていないのが現実である。教育現場に立つ教員からの多くの要望に応じて、構造教科の副教材として利用できるよう、実験の模様を簡潔に紹介したビデオが編集されている³⁾。これも(社)鋼材倶楽部が発行したもので、現在はDVD化されているので、座学で紹介するのに適している。主な内容は、ボルト孔のあいた鋼板の引張試験、高力ボルト摩擦接合部の引張試験、溶接継手の引張試験、中心圧縮柱の座屈、梁の横座屈、鋼管の局部座屈などで、様々な実験が用意されていて便利である。

建築学科では教育研究の内容は構造、計画、環境の3分野に大別される。構造以外の分野の専門家を目指す学生にはなかなか実験を経験する機会が得られないことが多い。しかし、模型や映像で様子を見ると、実際の構造部材を対象とする実験とでは、学生に与えるインパクトは大きく違い、実物のリアリティに勝るものはない。構造以外の分野の学生であるほど、学生の内に構造実験を体験させて構造の原理と破壊の様子を理解させることは重要である。また、構造設計のエンジニアを目指す学生にも重要な体験となる。多くの大学などでは何らかの形で構造実験を経験する機会が得られるよう、努力されている。

2. 実験方法の進歩

私が学生時代に構造実験を始めてから現在までの30年間、実験方法の基本的な手法はほとんど変わっていない。当時から既に荷重、変位、歪などの基本となる物理量を電氣的に出力するセンサーと計測装置が普及しており、また加力装置は油圧式の静的な加力を行うジャッキやサーボ制御による動的アクチュエータなどが使用されていた。大きく変化したのはこれらの装置の制御系、データ収録とその処理がデジタル化されて大容量、高速化した点、また映像による様々な記録も

デジタル処理で容易に扱える点である。以前は、多くの計測器が機械式、アナログ式の装置であり、計器が示す目盛りを読んで筆記するのがデータ収録の主な方法であったと古い先輩から聞いたことがある。私自身はこのような苦労を経験したことはほとんどないが、構造物の力学挙動の軌跡を描いた履歴曲線は、ノートに書き留めた数値から手書きで描いていた。

1970年代後半から小型コンピュータが普及し、実験装置もこれと接続してデジタル化したデータの収集が手軽にできるようになり、処理能力が飛躍的に向上した。実験結果の計算処理や図化が自動化されると共に精度も上がり、短時間で多くのデータの処理が可能となったことから、結果を分析するために多くの時間を割くことができるようになった。これに呼応して計測装置も多点収録高速化が進み、ひとつの実験から得られる情報量が飛躍的に多くなった。また、加力装置の制御もデジタル化が進み、複雑な多軸の制御、動的載荷の制御精度が向上し、多自由度の構造要素の挙動を再現する実験が普及するようになった。これらの実験技術の進歩は主に研究の進展を促すのに貢献しているが、教育の実習の場で基本的な力学挙動を示す実験にはそれほど高度な機能は必要としないことが多い。

3. 構造材料・実験の実習

大学教育の場で行われる構造実験について京都大学の例を紹介する。記録によると1920年に建築学科が創設された当時から「材料検定法実験」と称する科目が設けられていて、初期から実験が構造科目の一環に名を連ねていて、その重要性が伺われる。1941年には「構造材料及実験」に変わり、現在の「構造・材料実験」へと続いている。私が学部生であった1980年の内容は、半年の日程の前半は材料学や実験装置の説明に関する座学で、後半に(1)鉄筋とコンクリートの材料試験、(2)H形鋼梁の曲げ試験、(3)RC単筋梁の曲げ試験、の3つの実験が行われている。構造実験としては、鉄骨造とRC造の基本的な部材実験が行われており、載荷過程における荷重、変位はすべて手書きで写し取り、これを元に荷重-撓み関係、曲げモーメント曲率関係を求めて理論値と比較するなどしている。

その後、この科目は何度も内容が見直され、座学の回数を減らしてできるだけ多くの実験を経験できるように変わってきた。2010年では、2回の材料試験と5回の構造実験の計7回の実験が行われている。構造実験の内訳は(1)コンクリート部材の横拘束実験、(2)木材の圧縮、曲げ試験、(3)鋼材と高力ボルト摩擦接合および引張接合の引張試験、(4)H形鋼曲げ試験、(5)RC梁曲げせん断試験である。

鋼構造の実験は(3)、(4)の2つが用意されており、その内容は30年前と比較すると、その後の建築構造の進歩に合わせた変化が見られる。(3)の高力ボルト接

合部の試験では、1981年の建築基準法改定により採用された新しい終局強度型の耐震設計法で保有耐力接合と呼ばれる接合部の設計法が採用されたこと、さらに1995年の兵庫県南部地震の鋼構造建物の被害で接合部の破断を伴う被害が多く見られたことを反映している。鋼構造建物の耐震要素としてよく使用されるブレース（筋交い）の端部は高力ボルトで接合されるが、この接合部の最大耐力はブレースの軸降伏耐力を十分に上回るように設計することでブレースの耐震性能を発揮することができる。しかし、ボルト接合部のディテールの設計が不十分であるところのような性能の確保ができず、実地震で大きな被害を受けた建物がかかり見られた。この実験では、直接的には摩擦接合のすべり耐力、支圧に移行後の母材破断で決まる最大耐力の2つのレベルのボルト接合部耐力の理論値と実験値を比較して耐力評価法の理屈を学ぶものである。それに加えて、接合詳細の違いにより耐力の異なる2つの接合部の引張実験を実施することにより、耐震ブレースの接合部として性能を評価した場合に何が必要とされるかを理解するよう、誘導しながら実験結果を分析するようにレポート課題を課している。このように、実験対象に耐震上適切なものと不適切なものを並べて比較し、建物の安全性を確保するために必要な性能が何であるかを、実際の破壊挙動を見せて理解させるように仕向けている。また、併せて行う鋼材の引張試験では、鋼材の鋼種を伝え、鋼材の応力歪関係や、その規格が規定する機械的性質を確認する課題を課すが、もうひとつ、鋼種を明かさずに様々な鋼材の引張実験から鋼種を推測させる課題も課している。その鋼材には極低降伏点鋼、高強度鋼、ステンレス鋼などの普通の構造用鋼材とは特性がかなり異なる鋼種を用意し、毎年異なる鋼材を使っている。学生は鋼種による応力歪関係の違いに驚きながら、鋼種を当てようと様々な文献やインターネットを使って調べてくる。

もうひとつのH形鋼梁の曲げ試験では、単純支持された梁の4点曲げ試験を行うが、弱軸曲げ方向の断面2次半径が異なる2種類の断面の梁を用意して一方は早期に横座屈が発生し、他方は起こりにくい設定にしている。このような設計で扱う部材のパラメータの相違が、構造性能に与える影響と、建物の安全性に結びつくことを理解させるような課題設定となっている。

これも最近の耐震設計法に合わせて変形能力の高い構造を実現するための条件を理解することを付け加えたものである。

4. おわりに

ここでは主に学部生を対象とする教育における実験の変遷を見ながら、実験を通じて学ばせる内容を考えた例を紹介した。構造系の学生の多くは大学院に進学してさらに自らの研究テーマとして構造実験に取り組むものも多くいる。このような構造実験は研究の先端的なテーマを扱うことになるが、最近の地震被害の経験を踏まえて、実験はより実物に近いものを対象とする必要性から大型化し、また動的な現象を扱うことも増えている。大学院教育の中心が学部よりも研究主体となることから、大学院生にこのような実験を課題とすることが多くなっている。このような形で実現象をよく知り、その体験を構造エンジニアとして将来の仕事に生かせる人材をできるだけ多く育てることがこの分野において重要である。

参 考 文 献

- 1) (独)建築研究所, (社)日本鉄鋼連盟：鋼構造建築物の構造性能評価試験法に関する研究委員会報告書, 2002年4月
- 2) 鋼材倶楽部鋼構造教材作成小委員会編：紙模型で分かる鋼構造の基礎, 技報堂出版, 2001
- 3) (社)日本鉄鋼連盟：鉄骨建築ビデオ教材シリーズ, 接合編, 座屈編, 1992

.....

著 者 紹 介



吹田 啓一郎

1988年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。京都大学工学部助手、防災研究所助教授、工学研究科准教授を経て、2009年より建築学専攻教授。博士（工学）。専門分野は建築鋼構造学、耐震工学。2000年米国土木学会Moiseiff Award, 2010年日本建築学会賞（論文）受賞。所属学会：日本建築学会、溶接学会、日本地震工学会、日本鋼構造協会
連絡先：suita@archi.kyoto-u.ac.jp