

巨大構造物の実大部材における破壊・力学性状を解明するための世界最大の6自由度動的加力装置

① 計画の概要

増え続ける超高層建築などの巨大建設物の自重を支える構造部材は、激烈な地震で膨大な鉛直力と水平力を受ける。高耐力で大型の構造部材ほど、設計時の想定と異なる応力集中や脆性破壊を生じ、巨大建設物の機能喪失、最悪の場合は崩壊・大惨事を招く恐れがある。革新的な構造部材と材料が日本で開発・適用されているが、それらを実大規模で実証する加力装置は日本に無く、米国・台湾・イタリアなどで日本の試験体を実験している。地震多発国日本の社会の安全、産業の事業継続、耐震技術の進展と国際競争の面で極めて不利である。

これを覆すため、実大構造部材の破壊・力学挙動を検証できる世界最高の載荷能力と計測精度をもつ加力装置(図1)を建設して実験・解析研究を行う。前回からの進展は、本計画の推進体制の強化、加力装置の性能向上、装置活用に関する展望の拡張、当分は海外施設を使用する実験研究の開始に大別され、適宜後述するように本計画の説得性を著しく高めたと思われる。様々な用途の巨大建設物は、材料の特性や組み合わせも多様だが、力学的には共通の構造部材つまり大断面の柱、梁、壁、杭、基礎、免震・制振装置などからなる。それらを実験する本施設が、国内外の建築・土木の実験研究ハブとなることができる。

本計画の「加力装置」は、防災科研のE-ディフェンス「加振台」と機能は重複しない。前者は後者の30倍の膨大な鉛直力を再現できるが、比較的単純な機構のため施設建設費用は15%程である。前者の試験対象は、例えば70階までの超高層建物の実大構造部材の加力、後者は5～6階までの建物全体の加振であり全く異なる。

東工大教員が、長年の共同利用研究拠点の活動の延長として、国内外研究者と様々な共同実験研究を企画遂行し、強力な産学連携により、得られた知見を社会に還元する。

② 学術的な意義

地震被害の軽減、社会のレジリエンシーに直接関わる建築・土木の学問は実務と繋がり、研究対象も実際に使用されるものが多い。本申請でも実際の構造部材を対象とするが、大型の部材ほど応力集中・脆性破壊し易いという寸法効果があり、Beremin理論、破壊の最弱リンク説などの適用例はあるが、地震のようなランダムな外乱での破壊予測は困難である。

一方、建設物の破綻を防ぐため、ある箇所を犠牲にしてもある機能は死守する「損傷許容設計」、地震レベルごとに許容できる損傷を決めて維持すべき機能を選ぶ「性能設計」など、耐震設計の方法論の変革が世界で起こりつつある。これらに損傷予測は必須だが、寸法効果のある多くの大型構造部材からなる巨大建設物ほど予測は難しく、重要度の高い建設物のリスク評価の面で大きな問題である。

以上に対し実験的アプローチが採られるが、日本では加力能力の制約から、寸法効果が曖昧なまま、かなり縮小した試験体の実験から解析・予測法や構造規定を築いている。阪神大震災で多数発生した鋼柱の脆性破壊や杭・基礎の破壊、今後起き得る大地震での様々な大型構造部材の破壊など、多くが未解決であり、自重と地震力を鉛直方向にかけて水平方向に加力する実大実験は、自国で行う必要がある。

本提案装置の性能向上により、様々な破壊現象を更に広く検証できる。他国の装置は共通に試験体抵抗力のデータに計測不可能な装置摩擦力が混入する。本装置はその問題がないため最も精度が良く、世界初の6自由度の大きな加力・変形を、6 x 6 x 7.5m程までの大型試験体にかかけられ、他国のレベルを遥かに超え、世界の実験工学上の意義は大きい。地震工学、破壊力学、構造工学に加え、原子力工学、機械工学、船舶工学の分野にも有用であり、海外からの実験委託や共同研究も期待できる。

③ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

鉛直・水平方向の動的加力装置は他国で整備され、一般も料金支払いにより使用でき、研究、検証、製品認証などに用いられる。鉛直1軸・水平2軸方向の動的加力装置として18年間世界一のものが、カリフォルニア大サンディエゴ校(UCSD)にある。鉛直力容量は圧縮5,340トンと大きいですが、引張実験や支承以上の高さの試験体の実験はできない。同様な装置がイタリアに2台、台湾に2台、中国に1台ある。また、圧縮10,600トンの装置など2019年完成予定のものが中国に2台ある。

一方、日本では一部の企業が装置をもつが、性能は上記をかなり下回り、使用は自社のみに限られる。一般が使用できる動的加力装置の鉛直力は圧縮僅か400トンと、著しく後れている。他国に実験を依存する場合、実施まで1年以上待つことや、日本の卓抜した知識や展望での共同研究も難しいことが、学問・産業の両面で問題である。世界最高の加力能力と計測精度の本提案施設を極力早く実現すれば、日本の耐震工学と実務を更なる発展の方向に導ける。

④ 実施機関と実施体制

南海・東南海トラフ地震の被害が懸念される地域の8大学、大手建設会社研究所、政府系研究所、免震・制振メーカーを実施機関とし、学協会や海外研究機関を含め産官学共同の実施体制とする。中心機関は東工大であり、建築工学、土木工学、機

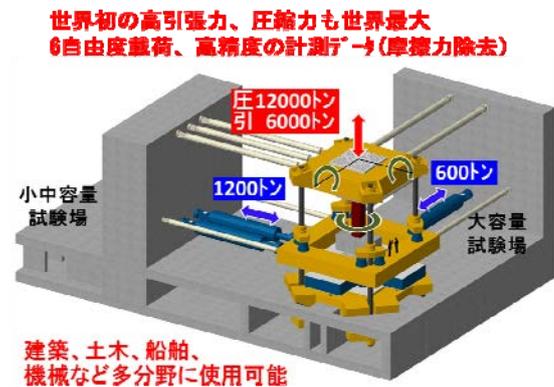


図1 世界最大容量の6自由度動的加力装置

械・精密工学、原子力工学における構造工学を専門とする40名を超える教員の参加を予定している。日本最大と思われるこの構造工学研究グループが、広範な構造実験研究、共同利用研究の企画と実施を行う。また、中核は未来産業技術研究所の実大加力実験工学共同研究講座(ALREM)と都市防災研究コア(UDPRC)の教員10名である。進展として、前者が企業・協会の支援で設立され、その資金で提案装置の技術、学術・社会・産業面での有用性、施設実現とその後の運営を検討している。

ALREMとUDPRCは、日本で最も大型実験の実績をもつ大学教員のグループである。また、共同利用・共同研究拠点での活動により国内外の多くの構造工学研究者と繋がり、実験データの活用、共同研究を促す役目も担う。建築構造分野の各種の設計指針の作成を主導的立場で行ってきた経験から、研究成果の社会実装の仕組みも築く。

東工大は免震・制振デバイスの検討、東大・首都大・建研は首都圏のコンクリート系建物の構造部材、京大・名大・土研では東海圏における産業保護・事業継続・早期復旧の観点からの検討、阪大・横国大・北大・大手ゼネコンでは、超高層建築の柱の鉛直・水平力による実験を分担する。学協会、評価機関、海外研究機関も含めた体制とする。

なお、大手建設会社、設計事務所、免震・制振メーカー、製鉄会社、各協会などによりコンソーシアムを形成し、東工大と共に運営委員会を設置し、上記研究機関による非競争領域の実験研究と、企業による競争領域の実験(認証試験を含む)による施設使用のバランスを保っていく。

⑤ 所要経費

前回申請からの変更・進展は、提案装置の性能を上げたこと、企業の検証・認定実験から得る収入は施設拡充と研究費の充填に用いること、したがって加力装置の運営維持費を新たに計上したことである。

10年間の予算総額は95.8億円である。内訳は施設89.6億円(反力床と壁を有する建物22億円、防音防振対策2億円、載荷ジャッキと油圧機器54.6億円、加力・支持鉄骨フレーム11億円)、10年間の人件費4.6億円(特任教授・准教授・助教各1名、技術職員1名)とする。大容量・小中容量試験場の運営経費は、建設後8年間で1.6億円(機器維持管理費1.0億円、旅費0.08億円、消耗品0.52億円)とする。

提案装置の膨大な鉛直力は自己釣合式としてフレーム内部で処理し、水平力の影響のみ周辺で処理するという効率的な設計ができた。水平2方向に高価な動的アクチュエーターを用い、鉛直方向に安価で高耐力のラムシリンダーを用いてコンパクトな装置とした。前述のようにこれらにより6自由度の加力や、世界最高の鉛直圧縮・引張りができる。上背のある試験体も実験でき、高性能装置として非常に経済的であると言える。

⑥ 年次計画

これまでは推測の域を出なかった実大構造部材の耐震性能を検討する。結果に基づきモデル化とシミュレーションも行う。

1～2年目：効率的・実践的な施設となるよう詳細計画を策定し、施設と載荷装置を建設する。

3～4年目：実験設備の校正を兼ね、施設の最大載荷能力を使う実験を行う。阪神大震災において69箇所破断した高層建築の鋼柱、および首都圏に存在する高層建築物鉄筋コンクリート(RC)造柱の高軸力2軸曲げせん断実験を行う。国内研究機関との共同研究課題を具体化させる。

5～6年目：免震建物を支える積層ゴム支承とコンクリート充填鋼管柱の高軸力2軸曲げ実験、2010年チリ地震や2011年ニュージーランド地震でおきたRC造耐力壁の曲げ圧縮破壊を実大で再現する。海外研究施設との共同研究課題を具体化させる。

7～8年目：高引張鉛直力での安全性検証がされていない免震スライダース承と引張軸力および2軸曲げを受ける鉄骨造柱・梁接合部の実大実験を行う。杭の実大曲げせん断実験を行い、太径鉄筋の付着の影響を解明する。この問題は建設物の種類によって多様であることから、本実験施設で比較的長期で取り組む。

9～10年目：高圧縮力下での安全性の検証ができていない免震構造用すべり支承と高圧縮力および2軸曲げを受ける鉄骨接合部の実大実験を行う。RC造の壁や柱については高強度材料からなるものの実験を行う。

雇用は、特任教員3名を上記1～10年(技術職員は2年目から)とする。試験収入を多くの大学院生のRA雇用を用い、各課題に従事させて人材育成をはかる。10年後は、他国の施設のように試験収入のみで自立して雇用・維持管理するよう運営委員会が計画する。UCSDの施設は約20年継続使用中であり、本申請施設も30年ほどの使用期間を考慮する。

⑦ 社会的価値

本申請は、SDGs目標9「産業と技術革新の基盤をつくろう」、目標11「住み続けられるまちづくりを」に貢献する。

東日本大震災の後、首都圏直下地震や東海・東南海地震などの可能性が頻りに指摘され、国民全体が地震への備えの必要性を強く認識している。一方、都市を構成する高層建築など巨大建設物は、実大規模での部材実験なしに、縮小実験による知見の演繹により設計されている。

提案施設は巨大建設物がかつてない大地震に曝された場合の安全性を世界で初めて検証するものである。学術的価値が極めて高い実験データが得られ、既往の解析技術や評価基準を見直すことで、学術の進展に大きく寄与すると共に、安全・安心でレジリエントな都市・建物を実現するという、国民の期待に応える施設でもあり、イノベーションジャパン2018展示会では多数の市民の支持が得られた。

また、ここで行われる研究は、我が国の建設に関わる産業分野での技術革新に繋がるものである。大地震に対しレジリエントな都市・建築の実現は、我が国の経済・産業の災害耐性の向上に寄与し、日本の国力向上に貢献する。このことは、我が国の建設業の世界的な競争力をも向上させる。

⑧ 本計画に関する連絡先

笠井 和彦(東京工業大学科学技術創成研究院)