

トピックス

実大加力装置の実現に向けて

— 建築物の構造安全性と部材の寸法効果

笠井 和彦 東京工業大学

1 はじめに

建設物の巨大化が進み、海外ではそれに対応して構造部材の実証施設が建てられている。特に地震時の破壊の検証のため大型の動的加力施設が増えているが、一方で、地震大国・技術立国の日本にはないという状態が続いている。本来であれば、先進国のうち地震のリスクが最も高い日本で、建設物の大型化における寸法効果の検証、安全・安心の確保のため、かつ世界の地震工学の主導的立場の維持のためにも、世界最高の加力施設があつてしかるべきである。

海外に大きくリードされた現状を逆転すべく、企業・団体の支援により東京工業大学に設立された「実大加力実験工学共同研究講座 (ALREM)」の活動として筆者らは、世界最高の加力能力と計測精度をもつ大型加力装置 (G-Force3D) を設計し、その検証を行ってきた (<http://alrem.jp/>)。G-Force3D の提案は、日本学術会議マスタープランにおいて16倍の競争率から選ばれた「重点大型研究計画」として、2017年から今まで認められており、3年に一度の文科省ロードマップ・予算化のための審査が、今年度予定されている。文科省のルートの本筋と考えるが、そのみに期待することなく、同時に他の幾つかのルートで政府に予算化を訴える活動を行っている。

本稿では、まずG-Force3Dを既存の海外試験機と比較しながら説明し、予算獲得のため現在進行している様々な活動を紹介します。また、最後に国内外の施設を用いた寸法効果に関する実験検討プロジェクトの内容を述べる。

2 装置概要

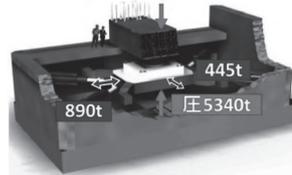
地震時の再現に必要な鉛直・水平方向の動的加力装置は他国の大学・研究所で整備され、一般も料金支払いにより使用でき、実験研究、守秘義務を伴う検証・製品認証などに用いられる。鉛直1軸・水平2軸方向の動的試験機として現在まで20年間世界一

のものが、カリフォルニア大サンディエゴ校 (UCSD) にある (図1)。鉛直力の容量は圧縮5,340tと大きいのが、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2台ある。また、圧縮10,800tの装置など2019年完成予定のものが中国に2台ある (図1、図2)。

2019年 中国建築有限公司



2000年 カリフォルニア大サンディエゴ校 (UCSD)



現在まで世界最大。使用者の1/3は日本企業。試験予約1年以上、フル稼働 (図提供: 竹中工務店)

提案: 世界初の高引張力、圧縮力も世界最大
6自由度載荷、高精度の計測データ(摩擦力除去)

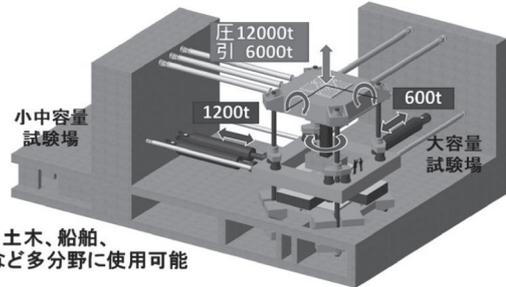
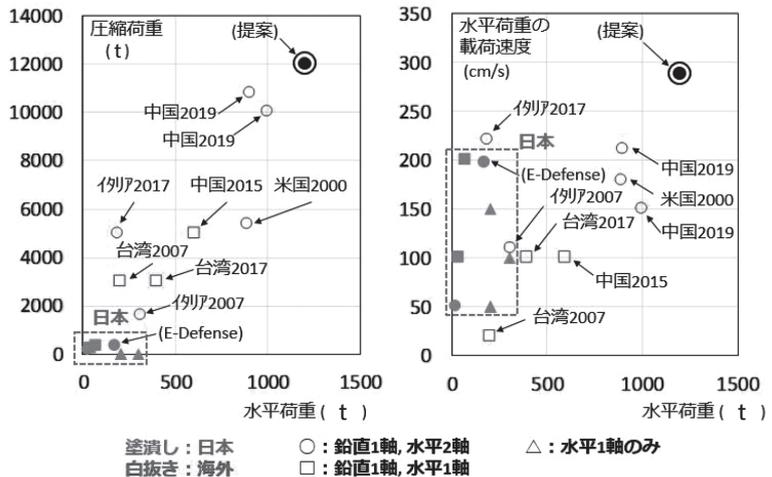


図1 米国・中国の動的試験機および提案する試験機 G-Force3D



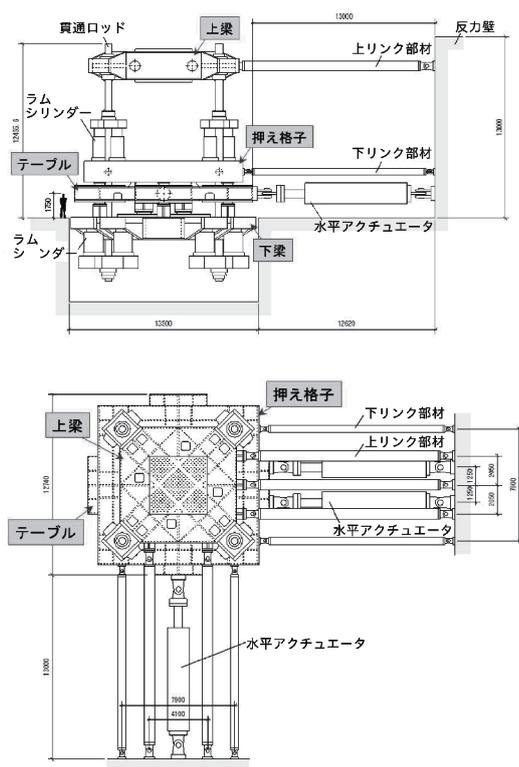


図3 G-Force3Dの立面・平面図

一方、日本では一部の企業が動的試験機を持つが、性能は上記をかなり下回り、使用は自社のみに限られる。一般が使用できる試験機の鉛直力は圧縮わずか400tと、著しく後れている(図2)。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試験機を極力早く実現すれば、日本の耐震工学と実務をさらなる発展の方向に導ける。

提案する試験機 G-Force3Dは、他国の試験機に対し(図1) 水平・鉛直方向の载荷荷重が大きく上回るだけでなく、初めて水平力と同時に大きな引っ張り鉛直力もかけられ、後述するように6自由度の载荷が可能である。また、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他国の試験機と対比して、G-Force3Dでは試験体の反力を頂部の水平リンクで直接計測するため最も精度が良く、開

放型の形状により6×6×7.5mほどの試験空間が確保される。

建設後に性能増強を繰り返し、20~30年間は世界一の加力能力を維持できるように計画している。施設の初期段階の建設は政府資金、増強は民間資金とし、また、運営もほとんど民間資金で行うという案である。民間資金の確保のために、試験機の使用料金を積み立てるという計画である。

図3に示すように、G-Force3Dの構造部品は、反力床に固定された下梁、その上を滑動する

とともに中央に試験体の下端を固定する可動テーブル、可動テーブルを上部から押える押え格子とそれを固定する下リンク4本、試験体の上端を固定する上反力梁とそれを固定する上リンク5本、下梁と押え格子を貫通し、上梁に固定する貫通ロッド4本からなる。

また、試験体は可動テーブル上面と上梁下面の間に固定し、押え格子上面と貫通ロッドに固定した上ブロックの間に設置する上ラムシリンダー8基、反力梁下面と貫通ロッドに固定した下ブロックの間に設置する下ラムシリンダー8基が、油圧で伸びることで、試験体に対しそれぞれ鉛直方向の引っ張り、圧縮载荷を行う。さらに、可動テーブルに接続した水平X、Y方向それぞれ2本、1本の水平アクチュエータが高速载荷を行う。

G-Force3Dの動作の特徴を述べる。可動テーブルは貫通ロッドを介して下梁と押え格子に挟み込まれるため、転倒モーメントなどにより可動テーブルが下梁から離間して試験が不安定になることがない。つまり、上

下のラムシリンダーを同時に用いて試験体への力と、挟み込む力の両方を生じさせることができる。伸びにより圧縮力を支圧面にかけるだけのラムシリンダーの適用により、接合部は支圧を受けるだけの単純なディティールにでき、これにより低コスト・大容量の3軸動的試験機が可能になった。さらに、貫通ロッドと上梁の接合部は球座を介しており、上梁を傾かせることも可能であるため、並進3方向、回転3方向の加力ができる。上梁を下げることや試験体と上梁の間に治具を接続することで、免震支承のように背の低い試験体も効率的に実験でき、さらにダンパーなどの横に長い試験体は、可動テーブル上面と外にある反力壁に固定して実験できる。

3 予算獲得を目指した活動

破壊力学や地震工学の学問だけでなく建設産業の技術展開や認証にもG-Force3Dは大きな役割を果たすことは言うまでもない。文科省の審査では産業界の支持も問われるため、以下の活動を行っている。

3.1 産業競争力懇談会(COCN) 推進テーマ採択

2019年度に「大型構造部材の次世代評価法」と題した検討課題を申請し採択された。リーダーが東京工業大学、コ・リーダーが日本製鉄であり、サブリーダーとして竹中工務店とブリヂストンが参加している。WG参加企業として18社、オブザーバーとして6社・機関が参加している。大学からも多数の教員がアドバイザーとして参加いただいている。

課題は構造部材や制振・免震部材から建物全体の解析による評価法の現状を調査し、評価法、特に時刻歴応答シミュレーションの改善のため、極力大型の実験と解析法、大型建設物の高密度モニタリング、シミュレーション専門家育成などの検討を提案

するものである。中間報告を昨年10月に終え、現在最終報告書を作成しており、それを大臣クラスの方々に報告する機会が与えられる。国内外の実験施設を利用した大型実験などが継続的に行われれば、施設の必要性の説得力が増すと考えられる。

3.2 大型加力施設コンソーシアム

G-Force3Dの実現に関し、49の企業・機関から賛同をいただいた。これらの各企業・機関との協力体制を築き、装置建設に必要な予算の獲得に向けた新たな活動内容や、建設後の運営方法を検討するコンソーシアムを昨年10月に設立した。装置実現後、コンソーシアムは日本の技術の発展のため、実験施設を活用した認証試験と実験研究および基準策定を運営委員会に委託する。運営委員会はデータ開示と共同研究の程度に基づく試験料金体系により、試験受注の収入による施設拡充と研究費の充填、社会に有益なビッグデータの構築を行う。東京工業大学および国内の大学・研究機関がコンソーシアムへの専門的協力や共同研究を行うことを想定している。

3.3 委員会・社会啓発活動

近年の免制振製品の検査偽証問題に対し、業界の信頼回復と免制振製品の健全な普及へと導く自主検査基準を、免震構造協会(JSSI)が認証機関として提案・実施していくことを検討している。この一環として、大型加力装置の実現に関する検討も行われており、筆者らも参加している。

また、日本学術会議土木工学・建築学委員会は、「免震・制振データ改ざんの背景と信頼回復への道筋」と題したシンポジウムを2019年1月15日に開催し、筆者も基調講演を行った。シンポジウムは第三者機関として公平に免震・制振デバイスを検査できる機関の必要性が訴えられた一方、大型試験装置が日本にないことも示した。

約390人の参加者のほとんどから施設実現に対する賛同が得られた。

また、一般市民対象に2018年8月に開催されたイノベーションジャパン2018に「世界一の大型動的加力装置による建設物の安全・安心の実現」と題して、VR動画も含んで展示を行った。当ブースには2日間で400名ほどの方に来場いただき、アンケートには179名からの回答をいただいた。来場者の多くは地震大国日本に大型加力装置がない現状に驚きを示し、装置の実現に対し賛同が得られた。

4 実大・縮小実験による寸法効果の検討

鉄筋コンクリート構造、鉄骨構造接合部、免震ゴム支承の分野の第一人者を招き研究会を設立し、寸法効果の検討、海外施設を用いた実大・縮小実験を行っている。「なぜ、実大部材の加力実験が必要なのか」を示すことが目的である。

4.1 鉄筋コンクリート杭頭

鉄筋コンクリート杭頭の大試験体は日本国内の実験設備では載荷できないため台湾の実験装置(BATS)を使

用した(図4)。大試験体は寸法が小試験体の4倍、面積が16倍であるため、その横軸の値は小試験体の4倍、縦軸は16倍としている。小試験体では、最大荷重後の耐力低下が緩やかであるが、大試験体でより激しい。小・中・大試験体(有効せい=250、500、1000mm)の最大荷重を加力板の面積で基準化した結果を図4(d)に示す。小・中試験体は材料強度 $f_c = 46.7$ MPaの共通のコンクリートからなり、2種の大試験体は $f_c = 37.3$ MPa、 47.7 MPaと異なるコンクリートからなるため、それらの最大耐力を補間して $f_c = 46.7$ MPaの場合を推測した。中・大試験体の強度は小試験体の0.9、0.8倍であり、寸法が大きくなると強度が低下することが分かる。

このような現象は、既に鉄筋コンクリート梁(一方向せん断)について報告されたが、杭頭試験体(二方向せん断)で確認されたのはおそらく世界で初めてである。

4.2 鉄骨柱梁接合部

鉄骨構造は超高層建築物に使用されるものと同様な大きさの試験体を製作し、国内で加力実験を行った。

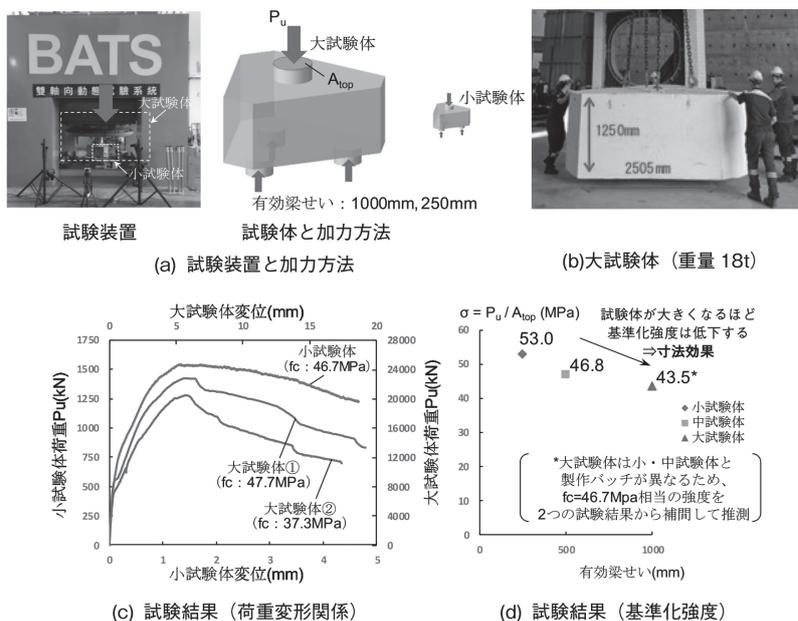


図4 鉄筋コンクリート杭頭の実大・縮小実験

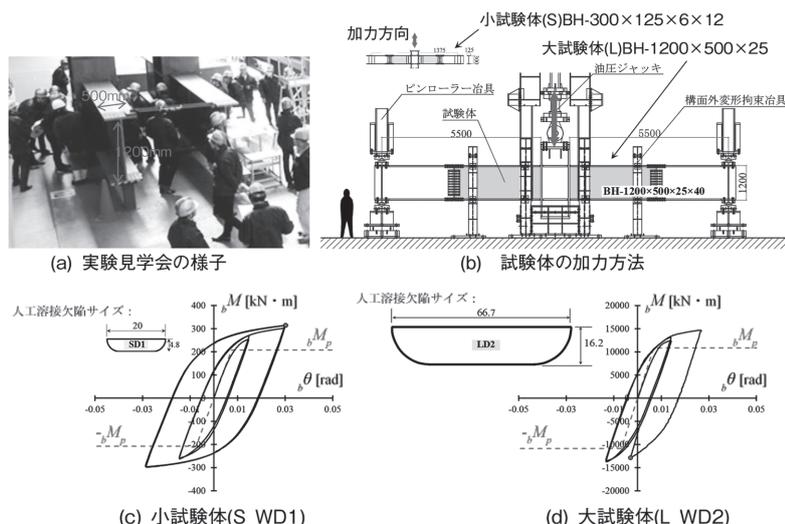


図5 鉄骨柱梁接合部の実大・縮小実験

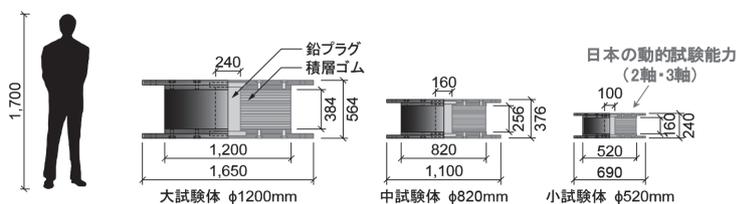


図6 鉛プラグ入り免震ゴム支承の実大・縮小実験計画 (2020年BATSにて実施予定)

実験時には、各大学や企業から21機関を招待して見学会を実施し、実大実験の必要性を訴えた(図5)。

試験体S、Lの荷重-変形関係を図5(c)、(d)に示す。試験体Lは、試験体Sの試験体寸法および溶接欠陥寸法を4倍にスケールしたものである、試験体Sは回転角 $\pm 4\theta_p$ の荷重2サイクル目の正側で、試験体Lは $\pm 4\theta_p$ の荷重1サイクル目の負側で破断した。エネルギー吸収から求めた累積塑性変形倍率で比較した場合、試験体Sは試験体Lの2.8倍の変形性能を有することが分かった。大試験体の母材シャルピー値の方が格段に高い一方で、大試験体が小試験体に比べ小さな塑性変形で破断すると分かり、寸法効果が表れている。

4.3 鉛プラグ入り免震ゴム支承

2020年度の実施を目標として、国家地震工程研究中心(台湾)のBATSを使用した鉛プラグ入り積層ゴムの実大・縮小実験を計画している(図

6)。本実験で計画している試験体寸法は大試験体でゴム層の直径が1200mm、中試験体が直径800mm、小試験体が直径500mmであり、各サイズを用いた体系的な動的な試験は今までに実施されていない。早い速度の加振では試験体に熱電対を挿入して鉛プラグの温度を計測することで鉛プラグで発生した熱の伝播特性と力学特性の温度依存性、免震支承が破断にいたるまで静的にせん断ひずみを与えた時の限界特性について試験体サイズの違いを検証することで、免震支承における寸法効果を解明する。

5 おわりに

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繁に指摘され、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。

提案する試験機 G-Force3Dからは、学術的価値が極めて高い実大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、学術および産業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る。試験機の実現に向けた様々な活動により、賛同していただける企業・機関が多くなり、予算獲得への機運の高まりを感じている。

謝辞: 記載した様々な活動は、共同研究講座の支援者であるKYB、昭和電線ケーブルシステム、日本鉄鋼連盟、ブリヂストン、オイレス工業により可能となりました。ご支援に深謝いたします。また、実大・縮小実験研究の代表者は、鉄筋コンクリート杭頭：市之瀬敏勝教授(名工大)、鉄骨柱梁接合部：中込忠男特任教授(信州大)、吉敷祥一准教授(東工大)、川畑友弥教授(東大)、鉛プラグ入り免震ゴム支承：高山峯夫教授(福岡大)、菊地優教授(北大)であり、検討研究会の委員長は和田章名誉教授(東工大)です。以上の先生方の積極的なご活動に感謝いたします。



東京工業大学
科学技術創成研究院
未来産業技術研究所
特任教授
笠井 和彦
(かさい かずひこ)

〈略歴〉

1985年 カリフォルニア大バークレイ校講師/ 研究員
1986年 イリノイ工科大学 助教授
1992年 イリノイ工科大学 准教授
1993年 リーハイ大学 准教授
1997年 東京工業大学 教授
2017年 現職