

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22246073

研究課題名(和文) 動的耐震実験の汎用化をめざしたセグメント化振動台実験手法の開発

研究課題名(英文) Development of Shaking Table Techniques Using Segmentation Concept toward More Generalized Dynamic Loading Test

研究代表者

中島 正愛 (NAKASHIMA, Masayoshi)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：00207771

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,900,000円、(間接経費) 9,270,000円

研究成果の概要(和文)：構造工学における動的載荷実験の拡張をめざし、既存の振動台を基本セグメントとし、それに変位や速度を増幅させるセグメント、振動数を増幅させるセグメントを付加することによって、より大きな変位、速度、加速度応答を可能とする実験システムを開発した。またセグメント上で所定の振動を達成するために必要な振動台入力を、IDCS法や無規範モデルによるMCS法によって同定する方法を提案した。ここで開発した実験システムを用いて、免震化された医療施設における診療機器の応答を再現する実験を実施し、キャスターが取り付けられた診療機器は、長周期地震動下において極めて顕著な動きを示すことを実証した。

研究成果の概要(英文)：Dynamic loading test is useful for the advancement of earthquake engineering. Due to high cost among others, dynamic loading systems are commonly limited in size. Needs for dynamic loading test, however, increases in conjunction with the development of various damping devices used for mitigation of earthquake disasters. This study develops methods that increase the power, i.e., the displacement, velocity, and frequency capacities, of shaking tables, by the addition of extra segments that are connected to the shaking table. A displacement enhancing segment is developed by a combination of linear roller sliders and ballast, while a frequency enhancing segment is developed by the production of continuous collision between two spring-mass systems. To ensure accurate response on the segment, various control algorithms are developed. Effectiveness of the proposed system is examined for the behavior of medical appliances installed in a base-isolated medical facility.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：動的載荷実験 振動台 変位増幅 振動数増幅 免震

1. 研究開始当初の背景

耐震構造工学において構造実験は、理論や予測の検証手段として大きな役割を果たしている。従来の耐震構造実験の多くは、ゆっくりとした载荷（準静的载荷）に頼ってきたが、その背景の一つには準静的载荷装置は動的载荷に必要なアチエータに比べて、格段に安価でしかも取り扱いやすいという方便があった。近年、より高い耐震安全性や機能性の確保めざして、免震機構やダンパーに代表されるパッシブ制振機構の導入が進み、またアクティブやセミアクティブ制振の開発にも余念がない。さらに機能性維持の観点から、非構造体や家具什器の性能評価も求められるようになってきた。このような新しい要求に対しては、装置や部材が有する「速度依存性」によって、「準静的载荷実験」は多くの場合その用を足さなくなる。

上記の要求に応えるためには、試験体を動的に揺する「動的载荷実験」が当然必要となる。わが国はこの種の実験においても世界の先鞭をつけてきたが、初期投資や維持管理費用は多額にのぼり、また運転のための専門職員も必要となる等の事情から、特に中規模以上の動的载荷実験装置は、(旧)国立研究機関や民間研究機関がほぼ独占的に保有してきた。全国の大学にも動的载荷実験装置は多数配備されたものの、いずれも小規模に留まり、その結果、現実的な寸法をもつ実験対象(試験体)への動的载荷実験への道がほぼ閉ざされている状況にある。

一方昨今の世界の動勢を見ると、動的载荷実験に関するわが国の優位性は著しく揺らいでいる。例えば米国では、全米 14 大学に大中型耐震実験装置を配備し、その相互利用と共同研究を奨励しつつ耐震実験研究を促進するプロジェクト(俗称:NEES)が 2005 年以来展開され、これを通じて動的载荷実験研究に精通する多くの大学院生や若手研究者が輩出されるどころにある。耐震工学の先端を走るべきわが国、とりわけ人材育成の場としてのわが国の大学が、時代の要請であるところの動的载荷実験に積極的に関わりにくいというゆゆしい事態は座視しえない。

2. 研究の目的

研究の背景で示した切実な問題への有効な処方箋として「セグメント化振動台実験法」と称する新しい動的载荷実験法の開発を本研究の目的とし、以下を本研究の特徴と位置づける。

元々の振動台を基本セグメントと位置づけ、別のセグメントを次々と連結させることから、振動台の性能の向上と機能の増強をはかる、自己増殖が可能な仕組みを開発の基本コンセプトとして提案する。具体的には、基本セグメントがもつ容量(変位、速度、振動数)を増幅させる機構(増幅セグメント)を

開発する。さらに、構造体の一部分を実際の試験体として実験し、その他の部分を増幅セグメントや数値解析で代用するサブストラクチャ振動台実験法を実現することによって、振動台実験の汎用化を図る。これら一連の開発の帰結として、小規模な動的载荷実験装置であっても、現実的な寸法を有する構造物要素、部分、部品に対する動的载荷実験が可能な実験環境の整備を実現する。

3. 研究の方法

多くの大学が保有する小規模動的载荷装置は、その変位、速度容量が 50mm、200mm/s 程度、また可能な入力振動数で 10Hz 程度である。一方建物応答を現実的に再現するためには、100mm、1m/s 以上の変位、速度が、また機械系機器類の動特性を把握するためには数 10Hz 程度の振動数が、それぞれ必要となる。つまり、変位、速度、振動数いずれにおいても数倍の能力増強が必要となる。

変位と速度を増幅するセグメントとして、振動台上に、比較的大きな固有周期(例えば 3 秒)を有する機構を構築し、この機構上での変位応答が上記の要求仕様を満たす仕組みを考案する。このとき、機構上で再現したい変位時刻歴応答に最も近い応答を出現するために、振動台に入力すべき加速度時刻歴を同定する必要がある。これを実現するために、IDCS(Inverse Dynamics Compensation via Simulation)法を用いることとし、また制御すべき対象が非線形性を有する場合への対処として、無規範モデル化した Minimal Control Synthesis (MCS)法を新たに提案する。

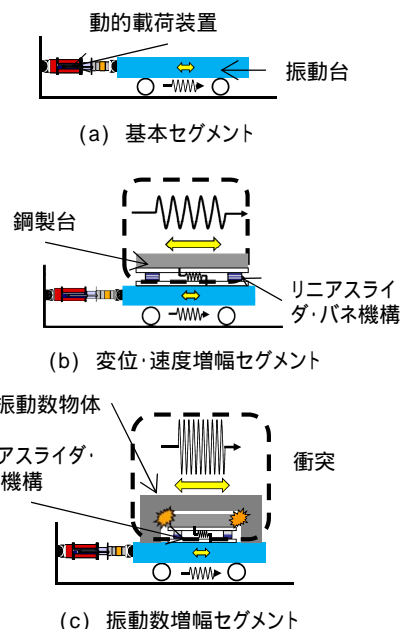


図 1 増幅セグメントによる振動台加振能力の拡張

一方振動数増幅セグメントとしては、振動

台上に設置された，その固有振動数が 30Hz 程度になる「剛なバネとすべり支承に支持された錘」を考え，この錘を，同じく振動台上に設置された試験対象の基盤に定期的衝突させるという仕組みを構築する．これによって，試験対象はその基部で 30Hz 程度の定常振動を得ることが可能になる．

さらに，特に変位増幅セグメントを用いた実験においては，サブストラクチャ法の考え方を導入し，対象とする構造体の一部を増幅セグメントで代用させることによって，相対的に大きな試験対象を対象とした動的载荷実験を実現する方法，またセグメント上で計測される応答（変位，加速度）特性をフィードバックとして使い，入力加速度特性とも合わせて，セグメントに取り付けたダンパーを用いてセグメント上の応答を制御する方法を考案する．

4. 研究成果

4.1 IDCS 法の適用による高精度変位・速度応答の実現

変位・速度増幅セグメントとして図 2 に示す，湾曲面をもつすべり支承と錘から構成される機構を開発した．この機構は錘の大きさ，また本セグメント上に設置する試験体の重さに関わらず，3.0 秒の固有周期を有している．このセグメント上で所定の応答（注：この応答がセグメント上に配される試験体への入力となる）を得るために必要な振動台入力を，IDCS 法を用いて正確に得るためのアルゴリズムを構築した．

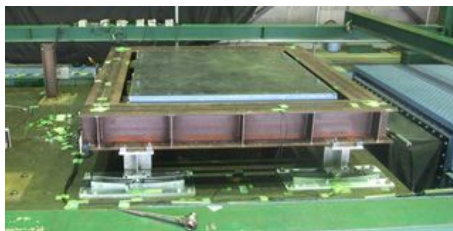


図 2 変位・速度増幅セグメント

IDCS 手法は，数値解析におけるフィードバックループでコントローラが計算した信号を外に取り出し，リアルタイムに実システムの制御に用いるという特徴を有している．その概要は図 3 に示す通りで，実験システムモデルの加振入力波 u から応答 y_n までの伝達関数を P ，加振入力波 u を計算するコントローラを W として，このコントローラ W と実験システムの動特性により構成されるフィードバックループにおいて，目標応答 r を再現応答 y_n に追従させることによって加振入力波 u を同定する．この加振入力波 u を用いて振動台上の実験システムを加振する．

ここで開発したシステムを用いた一連の検証実験から，振動台入力としての最大変位，

最大速度に対して数倍以上の変位，速度増幅が可能であることを実証した．この他にも，長周期地震動のように継続時間が長い入力時に問題となるアキュムレーター内の油量制限を克服するために，増幅セグメント上での応答特性を勘案し，振動台入力の短周期成分を除去する手順も導いた．

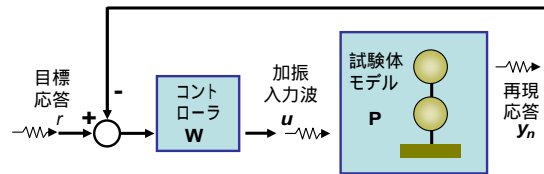


図 3 IDCS 法のアルゴリズム

4.2 無規範モデル化した MCS の適用による非線形システムに対する制御

前節における増幅セグメントは線形を仮定していたが，この増幅セグメントをサブストラクチャ振動台実験に用いる場合，セグメント自身に非線形性を持たせたい場合が出てくる．現在の制御理論では，構造物の非線形性を外乱としてとらえ，それに対してロバスト性を確保する手法がある．しかしながら，これらの手法は制御対象の伝達関数や規範モデルに基づいて設計されることから，非線形性の様相が大きくなるにつれて制御精度が低下する．そこで，強非線形性の制御対象を制御する手法として無規範モデル化した Minimal Control Synthesis (MCS) を構築した．

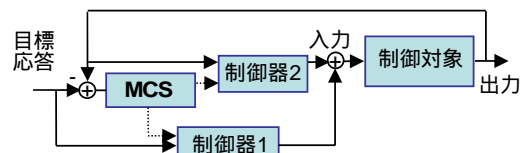


図 4 無規範化された MCS

この制御手法では，これまで制御対象の線形性に強く拘束されていたリアルタイム制御用の MCS を，強非線形性にも追従できるように図 4 のように無規範モデル化した．このコントローラは 2 つのパラメータだけで構成され， H 法などに要するリカッチ方程式の解法や重み関数などの設定などが不要である点に特徴がある．この無規範モデル化した MCS を IDCS の close-open loop に従って適用することから，非線形システムに対しても所定の応答を精度良く再現できることを確認した．

4.3 振動数増幅セグメントを用いた高振動定常応答の実現

強震動が多数記録できるようになった昨今，20Hz 近傍の高振動数成分が多く含まれる強震動の存在が明らかになっている．このような高振動によって，剛性の高い構造物（例え

ば発電施設)の高次モードが刺激され,その中に設置された(固有振動数が20Hz以上の)重要機器は大きく揺さぶられる.このような振動は機器の損傷を招きかねず,重要機器の安全や機能を評価するためにも,20Hz近傍の振動数領域を対象とした振動台実験が必要となる.本研究では,振動台の再現可能振動数以上の振動数成分を含む応答を実現するために,振動数増幅セグメントを構築した.

図1(c)のように再現可能振動数以上の固有振動数を有する高振動数システムを振動台上に載せ,衝突システムによって十分な力積を与えることで,高振動数システムに自由振動を励起させるものである.図5の例では,振動台入力としては3Hz程度の低振動数を入力したが,高振動数システム上では20Hzの高い振動数が衝突によって継続的に実現できた.衝突時には瞬間的に非常に大きなパルス(数gレベル)が生じるが,それは衝突面に薄いゴムを介するなどの措置によって回避できることを確認するとともに,振動台入力の大きさと高振動台システム上で得られる応答振幅の関係を定式化した.

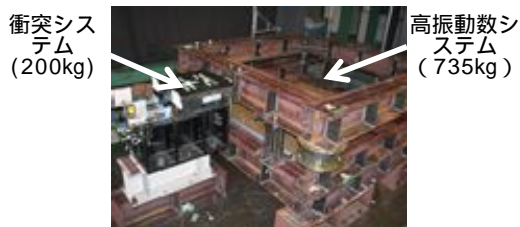


図5 衝突振動台実験手法

4.4 LQRSG法の適用による変位・速度増幅セグメントの高性能化

前節に示した変位・速度増幅セグメントにおいては,セグメント自身が有する固有振動数は不変であって,その意味においてパッシブ型の装置の一種と位置づく.より高度で一般性をもつ制御をめざすという観点から,セグメントの振動特性を可変とし,セグメント上で再現したい振動が最も適切に産み出せるように,セグメントの振動特性を制御する方法を考案した.図2に示すセグメントにMR(Magnetic-Rheological)ダンパーを併設し,振動台の振動と増幅セグメントの振動を逐一参照しながら,MRダンパー制御のゲインを調節する仕組みとした.このゲイン調節は,増幅セグメントの変位応答と加速度応答を参照するもので,基本的にはできるだけ変位を増幅させるが,変位の限界を超えそうな局面においては,逆向きの力を意図的に与えることによって変位の増幅を抑制するもので,増幅セグメントとその上に設置される試験体への損傷を回避する効果を有している.またこのゲイン調節については,ゲイン値を不変とせず,振動台への入力の周波数特性を逐次参照しながら更新してゆく手順(LQRSG

法)を新たに考案した.

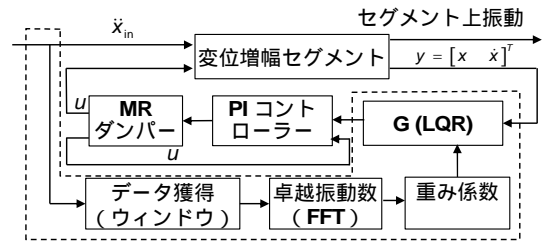


図6 ゲイン調節によるセグメントの制御

4.5 免震化された医療施設における診療機器の地震時応答

医療施設(病院)は地震直後において救急医療を担わなければならない重要な防災関連施設である.大地震直後においても診療機器類の健全が担保されなければならない.それを実現するために医療施設に免震が適用されることが激増している.免震の特徴は加速度低減にあり,これが診療機器類への過大な入力や変形を阻止している.ところが南海トラフの巨大地震等においては長周期成分が卓越する地震動が,高層建物や免震建物等,その固有周期が長い構造物の揺れを増幅する傾向にある.ここにおいて,加速度低減をめざして免震化した医療施設が,免震があだとなって,応答が増幅し診療機器に被害を及ぼすことにもなりかねない.本研究で開発した変位・速度増幅セグメントを用いて,免震化された医療施設内に設置されたさまざまな診療機器類が,長周期(3~5秒)成分が卓越する地震動下で示す応答を再現した.その結果,(1)「可動性」が強く要求される診療機器の多くの脚にはキャスターが設置されていること,(2)キャスターがロックされない状態においてこれら診療機器は長い等価固有周期を有していること,(3)それがゆえに免震によって長周期化された床応答と共振すること,(4)共振の結果,診療機器によっては2m以上も動き,また機器同士や機器と周囲の壁との衝突によって10g以上の衝突加速度が生じること,(5)一方キャスターをロックするだけでこれらの動きはほぼなくなること,を明かにした.またこれらの動きを”Motion Capture Technique”を用いて計測する手法を構築するとともに,その精度を評価する手順を提示した.

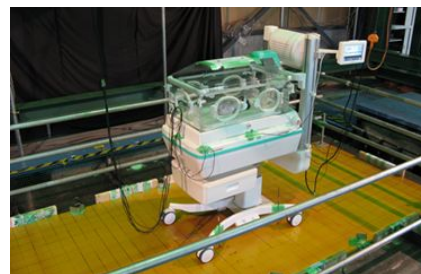


図7 免震病院における医療機器の振動

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計10件)

- (1) Shi, Y., Kurata, M., and Nakashima M., “Disorder and Damage of Base-Isolated Medical Facilities When Subjected to Near-Fault and Long-Period Ground Motions”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics (available online), 査読有, 2014. [DOI: 10.1002/eqe.2417]
- (2) Shi, Y., Becker, T. C., Furukawa, S., Sato, E., and Nakashima M., “LQR Control with Frequency-Dependent Scheduled Gain for a Semi-active Floor Isolation System”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics (available online), 査読有, 2014. [DOI: 10.1002/eqe.2352]
- (3) Furukawa, S., Becker, T. C., Shi, Y., Sato, E., and Nakashima M., “Full-scale Shaking Table Test of a Base-isolated Medical Facility Subjected to Vertical Motions”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 査読有, Vol. 42, No.13, 25 October 2013, pp.1931–1949. [DOI: 10.1002/eqe.2305]
- (4) Shi Y., Becker, T. C., Kurata, M., and Nakashima M., “H-infinity Control in the Frequency Domain for a Semi-Active Floor Isolation System”, Fronteer of Civil Engineering, Frontier of Civil Engineering, 査読有, Vol.7(3), September 2013, pp.264-275. [10.1007/s11709-013-0214-x]
- (5) 梶原浩一、榎田竜太、中島正愛：無規範モデル化した Minimal Control Synthesis による非線形1質点構造物の制御、日本建築学会構造系論文集、査読有、第682号、2012年12月、pp.1863-1870.

[学会発表](計15件)

- (1) Shi, Y., Enokida, R., Sato, E., and Nakashima M., “Development of hybrid floor isolation system with semi-active control”, Proceedings of the 15th WCEE 2012, Lisbon, Portugal, September 2012.

6. 研究組織

(1)研究代表者

中島 正愛 (NAKASHIMA, Masayoshi)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号：00207771

(2)研究分担者

金尾 伊織 (KANAOKI, Iori)
京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・准教授
研究者番号：80372564
(平成22年度～平成23年度)

松宮 智央 (MATSUMIYA, Tomohiro)
近畿大学・建築学部・講師
研究者番号：20454639
(平成23年度～平成24年度)

保木 和明 (HOKI, Kazuaki)
北九州市立大学・国際環境工学部・講師
研究者番号：70599026
(平成24年度)