

長周期地震動の加速度波形再現性能向上を目指した油圧加振機制御技術の開発

関 健 太*

Development of Control Technology for Hydraulic Actuators Considering Improvement of Reproducibility of Acceleration Waveforms in Long-period Earthquake Ground Motion

Kenta Seki*

Shaking table systems are applied to earthquake-proof evaluations for constructive structures or observations of destructive mechanisms, where seismic tests are performed for a variety of structures, such as tall buildings, large bridges, power facilities, etc. In recent years, the research activities concerning long-period earthquake ground motion are actively promoted in Japan. In order to reproduce the acceleration waveforms in the long-period earthquake, the hydraulic actuators are required to generate the long stroke displacement. As a results, vibration mode caused by compressibility of hydraulic oil becomes low. In addition, nonlinearity of oil clearly appears, resulting in the difficulties to provide the exact acceleration to the specimen by using the hydraulic actuators. In this research, therefore, the controllers are designed to compensate for the vibration mode and nonlinearity of hydraulic actuator system. The effectiveness of proposed approach has been verified by experiments using laboratory experimental setup.

1. はじめに

東日本大震災では、震源地付近での甚大な被害だけでなく、遠く離れた都心部あるいは大阪市内においても様々な被害をもたらした。これらは、通常の短周期地震動（直下型）とは異なり、数秒～数十秒の長い周期で揺れる長周期地震動によって引き起こされる被害であり、近年それに対する耐震技術の確立や被害予測に関する研究が進められている。

構造物の耐震性能を実験的に評価する装置として振動台がある。振動台は、加振テーブル上に試験対象物を設置し、油圧加振機により実際の地震加速度を発生させて加振する装置である。上記の長周期地震動では、加速度の周期が長い、すなわち周波数が低いため、地動の変位が長くなる。既存の振動台では変位の限界があるため、長周期地震動を再現することが困難となっている。そのため、長周期地震動を再現するための新たな油圧加振機構の開発が行われている。一方で、機構の開発と共に、目標加速度を正確に再現するための電子機械制御技術の開発が急務となっている。

長周期地震では、振動台で用いられる油圧加振機の発生変位が長くなる。それに伴い、加振機が長尺化することにより、油の非線形性及び剛性低下に伴う共振周波数低下が加振性能を劣化させる要因となる。本研究では、特に長周期地震動に対応した長ストローク油圧加振機で問題となる油の非線形特性と共振周波数低下を補償するための制御系設計を行う。設計した制御系の有効性は、油圧加振機を用いた実験により検証される。

2. 油圧加振機システムの概要

図1は、本研究で対象とした油圧加振機システムの外観である。油圧加振機は所望の電気信号に基づき、サーボ弁によって油の流量を制御することで、ピストン及びそれに連結したテーブルを駆動させる。テーブル上には任意の負荷（構造物）を搭載可能である。テーブルの加速度は加速度センサにより検出可能であり、その他に、加振機内の油の圧力、ピストンの発生変位、発生力を

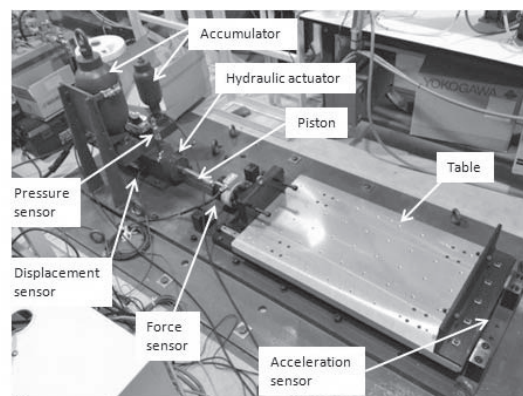


図 1. 対象とした油圧加振機の外観

2013年3月31日 受理

*豊田理研スカラー

(名古屋工業大学若手研究イノベータ養成センター)

それぞれのセンサで検出可能としている。これらの計測信号を基にして、マイコン内に実装された補償器によって制御演算が行われ、補償信号が生成される。

3. 油の非線形特性に対する補償とその有効性検証

油圧加振機では、油の非線形特性により加速度波形再現性能が劣化することが課題となる。特に、長周期地震動を正確に再現するためには、非線形特性に起因した加速度ひずみを十分に抑制する必要がある。図2の破線は、図1の油圧加振機を目標加速度信号を点線として単一正弦波で加振した際の加速度波形測定結果である。この結果より、正弦波のピーク値がひずんでいることがわかる。この加速度ひずみを低減するために、非線形特性の数学モデルを構築し、そのモデルを用いたフィードフォワード補償器を設計した。フィードフォワード補償器は、一般的に補償器と実際の機械の間でモデル化誤差やパラメータ変動が発生した場合、その補償効果が十分得られない。そこで、本研究では、観測可能な信号（制御入力信号と加速度信号）からパラメータ変動を実時間で推定する適応アルゴリズムを補償器に実装した。補償結果を図2の実線で示す。この図から、設計した補償器を適用することで、加速度ひずみが低減できている。

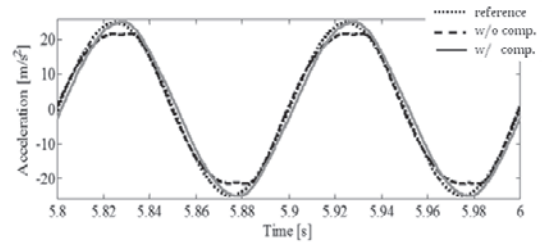


図2. 非線形特性による加速度ひずみの補償結果

4. 共振モードに対する補償とその有効性検証

加振機の発生変位を大きくした場合、加振機内の油の体積が大きくなる。それに伴い、剛性が低下して共振周波数が低くなり、十分な制御帯域を確保できなくなる。図3は、図1の振動台テーブル上に負荷を搭載することで、共振周波数低下を模擬した加振機閉ループ制御系の周波数特性測定結果である。油圧加振機制御システムの安定性や加速度再現性能向上を実現するためには、共振周波数におけるゲインピークを抑制することが求められる。

本研究では、加速度信号と等価な加振機内圧力信号をフィードバックすることで、共振周波数の極を任意に配置でき、減衰を加えることが可能であることを数式的に導出した。圧力信号を適切なゲインでフィードバックすることで、図4の実線に示す通り、ゲインピークを減衰可能であることを実験により示した。

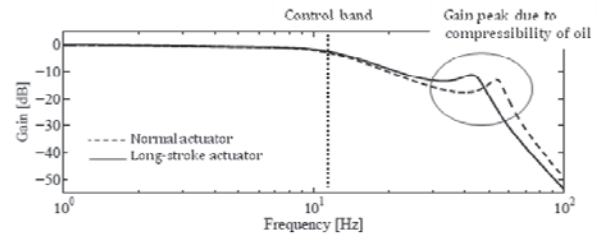


図3. 油圧加振機閉ループ制御系の周波数特性測定結果

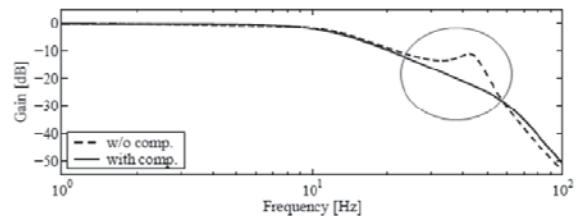


図4. 圧力フィードバックを施した場合の周波数特性測定結果

5. まとめ

本研究では、油圧加振機を制御対象として、長周期地震動を再現する際に問題となる油の非線形性と共振モードに対する補償方式を提案した。非線形特性に対する補償では、非線形特性の数学モデルに基づくフィードフォワード補償器を設計し、さらにパラメータ変動に対するロバスト性能を具備する適応アルゴリズムを実装することで、加速度再現性能が向上することを実験により検証した。一方で、共振モードに対する補償では、圧力センサ情報を活用したフィードバック補償器を設計し、共振ピークを抑制可能となることを実験により検証した。

REFERENCES

- (1) 関, 他5名: 振動台における外乱抑圧特性を考慮した供試体反力補償器設計, 日本機械学会論文集(C編), 74巻, 745号, pp. 2206-2213, 2008
- (2) 宇佐美, 関, 岩崎: 2次元振動台におけるモーメント外乱の抑制を考慮した適応フィードフォワード補償, 電気学会産業計測制御/メカトロニクス制御研究会, IIC-13-31, MEC-13-31, pp. 77-82, 2013
- (3) 杉田, 関, 岩崎: 機構解析ソフトウェアを活用した反復学習制御による振動台の外乱抑制, 電気学会産業計測制御/メカトロニクス制御研究会, IIC-13-31, MEC-13-31, pp. 83-88, 2013