

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：92702

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420604

研究課題名(和文)長周期地震動に対する建物のフィードフォワード振動制御システムの開発

研究課題名(英文)Development of feed-forward control system for buildings against long-period ground motions

研究代表者

長島 一郎(Nagashima, Ichiro)

大成建設株式会社技術センター・その他部局等・所長

研究者番号：10374042

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：巨大地震発生時に生成される長周期地震動を主たる対象として、超高層ビルや免震構造物の共振応答を効率的に低減するため、地震動情報を用いた制御(フィードフォワード制御)に焦点を当てた研究を行った。

超高層ビルの共振応答を制御する目的で、フィードフォワード制御型マスダンパーを提案した。建物固有周期の3倍程度の予測地震動があれば、従来のマスダンパーに比べて格段に高い共振応答の低減効果が得られることを明らかにした。免震層を油圧アクチュエータ等で動かすアクティブ免震では、絶対座標系による定式化によりフィードフォワード制御により絶対加速度が効果的に低減される効果を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To counteract the resonant response of super high-rise buildings or base-isolated buildings to long-period ground motions, a new active tuned mass damper (ATMD) and an active base-isolation system (ABS) with optimal feedback and feed-forward control (FBFFC) are studied.

It is made clear that a proposed ATMD effectively reduces the resonant response; performance is far better than an ordinary TMD. Feed-forward control forces are calculated using predictions of ground motions over a limited-duration. Two approaches of the feed-forward control are studied for an ABS. The one is FBFFC derived as the optimal control problem formulated using absolute coordinate system. The other is 'input cancellation control' (ICC) that cancels the absolute displacement of a base-isolated building at every moment. It was found that the ICC is obtained as the limit of the FBFFC. Based on these findings, a new control algorithm that combines the Feedback control and the ICC are presented.

研究分野：地震工学

キーワード：アクティブ制御 フィードフォワード制御 マスダンパー 免震 長周期地震動 共振

1. 研究開始当初の背景

建築構造物へアクティブ振動制御技術が世界で初めて適用されたのは、1989年東京・京橋においてである。その後、建物のアクティブ・セミアクティブ振動制御は地震工学の新しい研究分野の1つとして国内外で高い関心を集めてきた。日本国内では実際の建物への適用を目指した研究開発が大きく進展し、世界をリードして来た。アクティブ振動制御は、建築構造物の強風や中小地震に対する居住性向上技術として普及が進み、セミアクティブ振動制御は、制御に必要なエネルギーが少ないため、大地震に対しても適用可能な技術として、最近では可変減衰オイルダンパを利用したセミアクティブ制振・免震技術の実用化が進んだ。2011年東北地方太平洋沖地震では、セミアクティブ免震システムを適用した都内の超高層ビルで効果が実証され、地震対応技術としての有効性と信頼性の実証が進んできた。

一方で、従来実用化している構造制御システムは基本的にはフィードバック制御に基づいている。アクティブ・セミアクティブ振動制御の制御効果を格段に向上させる上で、残された重要な研究課題の一つは、地震動の事前推定波形を利用したフィードフォワード制御と考えられる。最適制御理論に基づくフィードフォワード制御に関する研究への取組みは少なく、実用化と言う観点からのフィードフォワード制御の制御アルゴリズムは未解明の課題であった。

2. 研究の目的

超高層ビルや免震構造物の既往のアクティブ・セミアクティブ制御システムを対象に、従来の制御性能を格段に向上させるため、フィードフォワード制御法を開発すると共に、制御性能が向上するメカニズムを明らかにする。

超高層ビルに対しては、強風や中小地震に対する居住性向上技術として普及しているアクティブマスダンパを利用して、建物1次モードの共振応答を励起する長周期地震動に対するフィードフォワード制御法を開発する。

免震構造物に対しては、免震層にサーボモータや油圧アクチュエータを付加するアクティブ免震システムを想定する。本研究では、アクティブ免震により絶対応答値(建物加速度と速度)を効率よく低減する制御法を開発を行う。

3. 研究の方法

(1) 地震入力に対する最適レギュレータ問題を考える。2次形式評価関数の最小化を目的とする最適制御理論に基づいて、地震動の全時刻歴波形を用いて最適フィードバック+フィードフォワード制御力を計算する基礎式を誘導・整理すると共に、地震動の全時刻歴波形を、事前予測可能な一定時間長の N

ブロックの部分的時刻歴波形に分割し、各ブロックの時刻歴波形に対して、図1に示す通りフィードフォワード制御力を計算する方MIFFC(Feed-forward Control by Individual optimization)を適用する。

(2) 超高層ビル最上階に設置した TMD (Tuned Mass Damper)にサーボモータ等で制御力を加える ATMD(Active Tuned Mass Damper)を想定し、装置設置位置における1次モードの一般化質量を有する建物の1質点振動系モデルを対象に、長周期地震動に対するフィードフォワード制御の効果を確認する。長周期地震動としては、建物の1次固有周期に合わせた正弦波の他、2011年東北地方太平洋沖地震の際に、超高層ビルに大振幅の共振応答を生じさせた地震観測記録を用いる。

(3) 免震層にサーボモータや油圧アクチュエータで制御力を加えるアクティブ免震システムを想定し、絶対加速度応答を低減するため、絶対座標系で最適フィードバック+フィードフォワード制御力を計算する基礎式を誘導・整理する。

(4) アクティブ免震システムでは、免震層で地震動の動きをキャンセルする制御法(以下、ICC(Input Cancellation Control)と呼ぶ)が既に提案されている。このような直感的に導かれた制御法と、(3)で誘導した絶対座標系での最適フィードバック+フィードフォワード制御の関係を、1質点振動系に対して誘導した理論解に基づいて検討する。

(5) フィードフォワード制御力を決定する予測地震動は、K-NET等の地震観測網をリアルタイムに利用して、建物建設地点よりも震源に近い地点の観測記録から、地震動予測フィルターで推定することを前提としている。建物建設地点における現時点までの地震観測記録だけを用いて、一定時間長の地震動の共振成分を予測してフィードフォワード制御を行う可能性についても検討する。

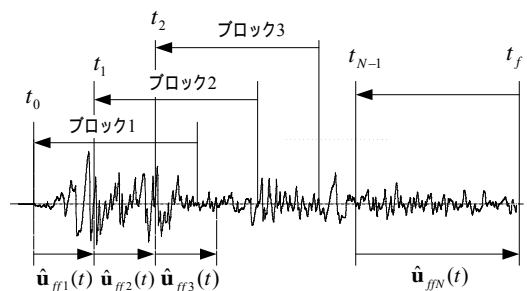
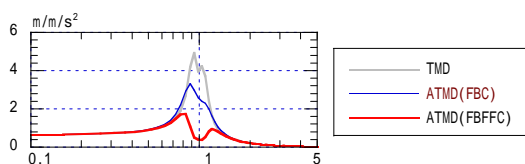


図1 MIFFCに基づくフィードフォワード制御力の計算

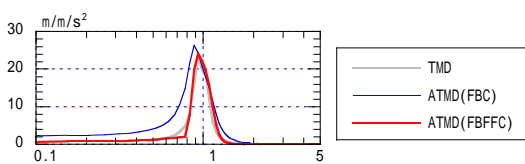
4. 研究成果

(1) ATMDによる超高層ビルの共振応答制御では、建物の1次一般化質量に対して3%に設定した。図2にTMD、フィードバック制御：ATMD(FBC)、フィードバック+フィードフォワード制御：ATMD(FBFFC)、の建物応答変

位と装置振幅の周波数応答の解析結果を例示する。制御力を加えない TMD や従来のフィードバック制御による ATMD に比べて、同程度の装置振幅で建物の共振応答を格段に低減できることが明らかとなった。1 次固有周期 5 秒の 3 倍の時間長を用いたフィードフォワード制御により、時刻歴での実際のフィードフォワード制御が可能であることを確認した。



(a) 建物応答変位



(b) 装置振幅

図 2 周波数応答の比較

(2) アクティブ免震においても、フィードバック+フィードフォワード制御により共振応答を効果的に低減できることがわかった。絶対座標系での定式化により、図 3 に示す通り、共振周波数 ($\omega/\omega_s=1$) で顕著な応答低減が得られるのに加えて、全周波数帯で応答低減が実現できることを確認した。

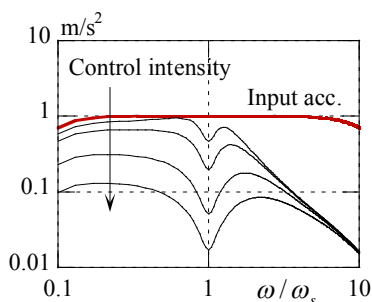


図 3 建物絶対応答加速度の周波数応答

(3) アクティブ免震において、絶対座標系で 1 質点振動系に対してフィードフォワード制御力を計算する状態推移行列の数式表現を導いた。フィードフォワード制御力はこの状態推移行列と予測地震動の畳み込み積分により得られる。この数式に基づいた考察により、制御が強くなるにつれて状態推移行列が直ちに 0 行列に収束するため、必要な予測地震動の時間長が短くなり、極限として時々刻々の地震動をキャンセルする ICC に収束するメカニズムを明らかにした。

(4) アクティブ免震において、ICC は予測地震動が不要な点は大きなメリットであり、理想的な制御効果を得る事ができるが、必要制

御力が增大する。そこで、入力地震動の一部を ICC でキャンセルし、フィードバック制御と組み合わせる制御法 FBICC(Feedback and Input Cancellation Control)を考案した。FBICC はフィードバック制御に比べると必要制御力は大きくなるが、ICC よりは制御力が小さく制御効果は向上する。予測地震動が不要な点も利点である。

(5) 超高層ビルの長周期地震動に対する揺れを ATMD で制御する場合において、建物建設地点における現時点までの地震観測記録だけを用いて、一定時間長の地震動の共振成分を予測してフィードフォワード制御を行う可能性を検討した。2011 年東北地方太平洋沖地震の際に、超高層ビルに大振幅の共振応答を生じさせた地震観測記録を用いた。先ず、入力地震動の共振周波数近傍の成分のみ抽出できれば、フィードフォワード制御で良好な共振応答低減効果が得られることを確認した。次いで、観測記録の現時点までの共振成分をフィルターで抽出して正弦波近似し、3 周期先まで共振正弦波が継続すると予測して、フィードフォワード制御力を決定する方法を検討した。観測記録の正弦波近似の精度が高ければ優れた制御効果が得られることがわかった。共振成分を精度良くリアルタイムに抽出するフィルターの工夫が今後の課題である。

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 0 件)

〔学会発表〕(計 6 件)

Ichiro Nagashima, Ryota Maseki, Feed-forward control of active mass damper in super high-rise building against long period ground motion, 6th World Conference on Structural Control and Monitoring, Sprain, Barcelona, 2014.6.

長島一郎, 欄木龍大, 長周期地震動に対する超高層ビルの共振応答制御, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2014.9.

長島一郎, 欄木龍大, 外乱情報を用いた免震建物のアクティブ制御, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2015.9.

長島一郎, 欄木龍大, 石川義幸, 長周期地震動に対する超高層ビルの共振応答制御 その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016.8.

石川義幸, 長島一郎, 欄木龍大, 長周期地震動に対する超高層ビルの共振応答制御 その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016.8.

Ichiro Nagashima, Ryota Maseki, Study on Feed-forward Control of Base-isolated Building Using Seismic Input Motions, 16th World Conference on Earthquake

Engineering, Santiago, Chili, 2017.1.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計1件)

名称：フィードフォワード制御力の算定方法
発明者：長島一郎、欄木龍大
権利者：大成建設株式会社
種類：特許
番号：特許第6057691号
取得年月日：2016年12月16日
国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等
<http://www.taisei.co.jp/giken/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長島 一郎 (NAGASHIMA ICHIRO)
大成建設株式会社・技術センター・建築技術研究所・所長
研究者番号：10374042

(2) 連携研究者

欄木 龍大 (RYOTA MASEKI)
大成建設株式会社・技術センター・建築技術研究所・防災研究室課長
研究者番号：40374055

(3) 連携研究者

石川 義幸 (YOSHIYUKI ISHIKAWA)
大成建設株式会社・技術センター・建築技術研究所・防災研究室
研究者番号：70810729