

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 20 日現在

機関番号：92702
 研究種目：挑戦的萌芽研究
 研究期間：2010 ～ 2012
 課題番号：22651067
 研究課題名（和文）
 地震動の事前推定波形を用いた次世代構造制御システムの開発
 研究課題名（英文）
 Development of advanced response control system using predicted propagation of seismic waves
 研究代表者
 長島 一郎 (NAGSAHIMA ICHIRO)
 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・室長
 研究者番号：10374042

研究成果の概要（和文）：

1990年代から日本国内では、モーター等の動力を使って強風時や地震時の建物の揺れを制御するアクティブ振動制御装置の実用化が進んできたが、制御に要するエネルギーが多くなるため大地震時の揺れの制御には適用することができない問題があった。本研究では、大地震時にも適用可能な格段に制御効率の高いアクティブ振動制御システムを実現するため、建物に到達する地震の揺れを予測して制御を行う新しい制御法を開発した。

研究成果の概要（英文）：

Since 1990s, there has been a steady increase in the number of buildings enhanced with active response control systems in Japan. Active response control systems are very effective. However, they use a feedback control law and are not suitable for controlling the seismic response of buildings due to limitations of control force and power. In other words, they are limited in application to the range from small to medium earthquakes.

To improve the control performance and efficiency of active response control systems, a new feed-forward control method is presented to make use of predicted earthquake ground motion before its arrival.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	0	1,100,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	2,900,000	540,000	3,440,000

研究分野：地震工学，構造制御

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学A

キーワード：フィードフォワード制御，アクティブ制御，インパルス応答関数，地震動伝播解析，部分空間法，地震動予測フィルター，次世代構造制御

1. 研究開始当初の背景

(1) 建築構造物のアクティブ振動制御は、1990年代から徐々に実用化が進んできたが、殆どのシステムはフィードバック制御を採用している。アクティブ振動制御は高い制御

効果を発揮するが、制御に多大なエネルギーを要するため、地震応答制御への適用は困難と考えられていた。

(2) アクティブ振動制御の制御効率を格段に向上させるには、フィードフォワード制御

の適用が有望と考えられるが、最適制御理論に基づいてフィードフォワード制御力を決定するには、予め地震動の全時刻歴が必要と考えられていた。

(3) 地震動の全時刻歴を事前に予測することは殆ど不可能と考えられるが、地震発生時に震源近傍の地震観測記録を、地震動伝播経路の伝達特性を有するフィルター（地震動予測フィルターと呼ぶ）に通すことで、地震動が到達するまでの一定時間長の地震動波形をリアルタイムで予測する方法は提案されてきている[1]。

(4) しかしながら、一定時間長の地震動予測波形を利用してフィードフォワード制御力を決定する方法は、未だ十分には研究されておらず、実用的な方法が提案されていない状況であった。

参考文献

[1] I. Nagashima *et.al* : Real-time prediction of earthquake ground motion using empirical transfer function, Proc. of 14th WCEE, S02-023, 2008.

2. 研究の目的

本研究では、従来のフィードバック制御に基づくアクティブ振動制御システムの制御効率を格段に向上させる、フィードフォワード制御に基づくアクティブ型の次世代構造制御システムの開発を目的とする。

そのための最も重要な課題は、地震発生時に震源近傍で観測された地震動波形を入力として、地震動予測フィルターを通して推定した地震動が制御対象構造物に到達するまでの一定時間長の地震動予測波形に対して、フィードフォワード制御力を算定する方法を開発することである。

本研究では、上記フィードフォワード制御力の実用的な計算方法のアルゴリズムを開発して、その制御効率を明らかにすることを目的とする。

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・整理した。フィードバック制御力の計算には定常フィードバックゲインを採用した。本基礎式に基づいた全時刻歴波形を用いる理想的な制御を GFFC (Feed-forward Control by Global optimization) と呼ぶ。

(2) 地震動の全時刻歴波形を、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 (1) のフィードフォワード

制御力を計算する方法を適用した。本方法を IFFC (Feed-Forward Control by Individual optimization) と呼ぶ。

(3) IFFC では各ブロックの終端の境界条件としてフィードフォワード制御力が 0 に設定されるため、終端に近づくにつれて制御効率が低下することが判明した。そのため、一定時間ごとのフィードフォワード制御力を計算する際に、図 2 に示す通り、各ブロックをオーバーラップさせて計算して、制御効率の低下が小さい前半部分のフィードフォワード制御力を作用させる方法を考案した。本方法を、MIFFC (Feed-Forward Control by Modified Individual optimization) と呼ぶ。

(4) フィードフォワード制御の制御効率の高さをフィードバック制御と比較するため、制御対象の動特性と地震動予測フィルターの特性を併合した拡大系のシステムに対して、最適制御理論に基づいてフィードバック制御力を決定することにより、間接的に入力地震動の特性を考慮する制御法についても検討を行った。

(5) 最適フィードバック+フィードフォワード制御と、(4) の拡大系のフィードバック制御の周波数応答を評価して制御性能を比較した。最適フィードバック+フィードフォワード制御については、提案した MIFFC の有効性を、GFFC 及び IFFC と時刻歴応答解析で比較して明らかにした。

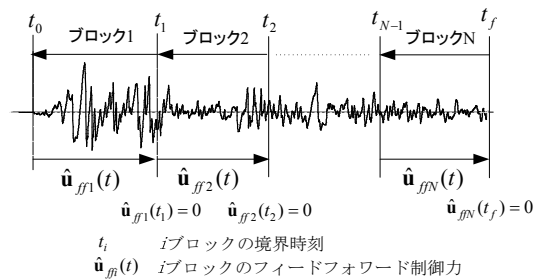


図 1 IFFC に基づくフィードフォワード制御力の計算

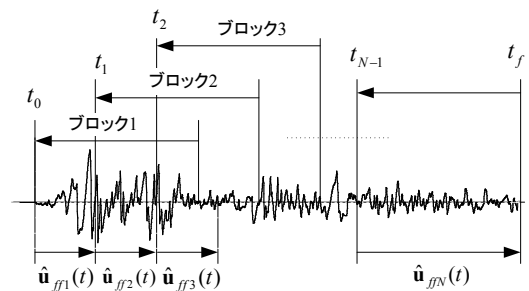


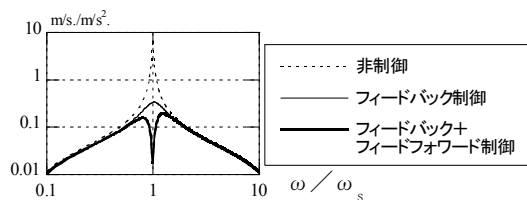
図 2 MIFFC に基づくフィードフォワード制御力の計算

4. 研究成果

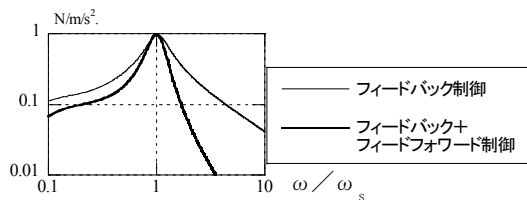
(1) 地震発生時に震源近傍で観測された地震動波形を入力として、地震動予測フィルターを通して推定した一定時間長の地震動予測波形に対して、フィードフォワード制御力を算定する方法を考案した。本方法は、上記地震動予測波形に対して最適制御理論に基づいてフィードフォワード制御力を計算し、制御効率が低下しない前半部分のみを作用させる方法であり、実用性も高い。

(2) 1 質点振動系（質量 1kg, 固有円振動数 $\omega_s = 2\pi \text{ rad./s}$ ）を例題として、制御性能を比較した。1 質点振動系と地震動予測フィルターの特性を併合した拡大系に対して設計した最適フィードバック制御と、最適フィードバック+フィードフォワード制御 (GFFC) の速度応答と制御力の周波数応答を比較した結果を図 3 に例示する。GFFC では特に共振周波数における制御効率が格段に高くなることが明らかとなった。

(3) 制御対象の固有振動数と同じ振動数の正弦波に対する制御応答を比較した結果を図 4 に例示する。4 秒間を 1 ブロックとする地震動予測波形を用いて制御を行っている。全時刻歴を用いる理想的なフィードフォワード制御 (GFFC) と比較すると、IFFC は各ブロックの境界 (4 秒と 8 秒) で制御効率が低下しているが、MIFFC では GFFC とほぼ同等の制御性能が発揮できることが明らかとなった。尚、本事例では 4 秒間の地震動予測波形に対して計算した MIFFC のフィードフォワード制御力の内、最初の 1 秒間の制御力を作用させている。

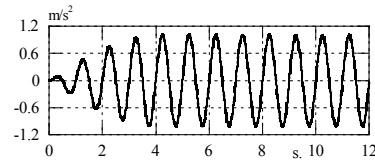


(a)速度応答

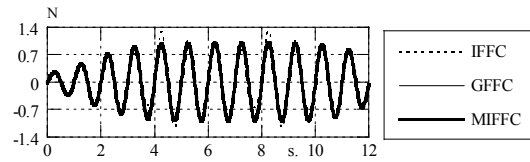


(b)制御力

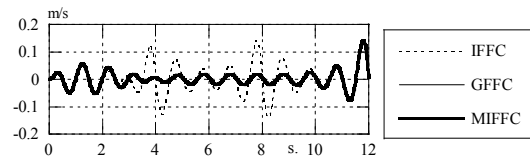
図 3 周波数応答の比較



(a) 入力地震動加速度

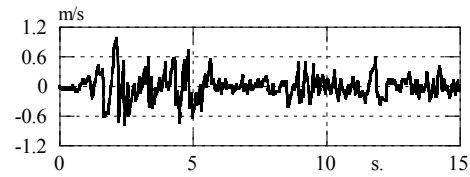


(b) 制御力

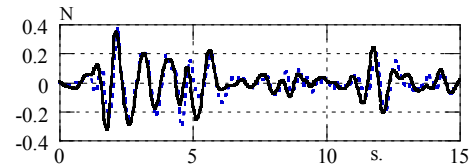


(c) 速度応答

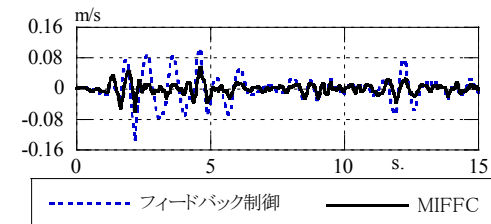
図 4 時刻歴応答 (正弦波入力)



(a)入力地震動加速度



(b)制御力



(c) 速度応答

図 5 時刻歴応答 (地震波入力)

(4) (3) の正弦波に対するフィードフォワード制御と同じ 1 質点系振動モデルを想定して、El-Centro1940NS 成分波に対する制御応答を比較した結果を図 5 に例示する。フィードバック制御とフィードバック制御+フ

ードフォワード制御 (MIFFC) で、最大制御力がほぼ同等になるように制御強さを調整している。本事例から、同等の最大制御力で、MIFFCの方がフィードバック制御に比べて最大応答値を40%程度に低減できており、制御効率が低いことがわかる。

(5) 提案したフィードフォワード制御力の計算方法は汎用性があり、多自由度系にも適用できるため、免震構造物に限らず、超高層ビルをアクティブマスダンパーで制御するような多質点振動系の制御についても、本方法を展開することが可能である。

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2件)

- ① 山本優, 吉村智昭, 七井慎一, 26.3次元大規模 FEM による東海・東南海・南海連動地震の長周期地震動シミュレーション, 第13回日本地震工学シンポジウム, OS6-Sat-PM(OS6)-3, pp.2116-2123.
- ② Ichiro Nagashima, Ryota Maseki, Study on feed-forward control of base-isolated buildings using predicted propagation of seismic waves, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.1671, Lisboa 2012.

[学会発表] (計1件)

- ① 長島一郎, 欄木龍大, 地震動予測フィルターを用いた免震構造物のフィードフォワード制御, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2013. 8.

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 地震動情報を用いた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: 2012 年第 270577 号

出願年月日: 平成 24 年 12 月 11 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.aisei.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・防災研究室室長

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

山本 優 (YAMAMOTO YU)

大成建設株式会社・技術センター・建築技術研究所・防災研究室主任

研究者番号: 90532565