

I-448 制御力拘束を考慮した地震応答の最適制御

三田工業 正員 西野 博文
鳥取大学工学部 正員 野田 茂

1. まえがき

強震時に制御装置を用いて、構造物の制震化を図ることは合理的である。しかしながら、種々の条件から、ハード・ソフトの両面で、制御力量には限界が存在する。従って、制震を実施する際には、制御力に関する不等式拘束条件を考慮しておくことが必要である。そこで、本研究では、観測量不足とノイズを考慮するためにカルマンフィルターを併用して、制御力拘束時の逐次型最適制震法を提案し、拘束条件の有無が制震に及ぼす影響について検討する。

2. 分析方法

本研究では、バイリニア非線形系の制震問題を扱うために、非線形多自由度構造物のモデル化を行う。

制御力の不等式拘束を定式化するには、変分法を適用して、拘束条件の複雑な「場合分け」を考えることが必要である。この考え方は、一般に、2点境界値問題として多用されている。しかしながら、この方法は、本研究のように、リアルタイムに制御力を決める場合には適さない。そこで、本研究では、不等式拘束を等式拘束に変換して、変分法のもとで、最適制御力を求めることを考える。この場合、ダミー変数や付帯条件に関する随伴変数は増えるが、定式化が比較的簡単になる。

最適化の評価関数としては、振動応答のエネルギーと制御力のエネルギーを考え、時間依存型に設定する。このようにすれば、制御力の不等式拘束条件を等式拘束条件に変換して、変分法の適用のもとで、逐次的に最適制御力を求めることができる。

本研究で提案するアルゴリズムは、次のように、2つのステップからなる。まず、センサーによって地震動と地震応答を観測すると、カルマンフィルターによって状態(変位、速度と履歴変位)推定を行う。次に、制御力の不等式拘束を考慮して、瞬時に制御力を定め、アクチュエーターを作動させることにより、構造物の振動応答を抑制する。

本研究では、制御力の不等式拘束条件の有無やその拘束値の大小関係が制震効果に及ぼす影響を、数値シミュレーションによって検討する。

3. 数値解析結果および考察

検討の対象とした構造物は5質点系である。最上階の非線形性は特に強い。構造の制約上、アクチュエーターは最上階に設けた。制震の目標としては、最上層の強震時の応答を50%程度低減させ、図1 構造物全体をより安定な状態にすることとした。地震入力加速度はEl Centro波を用いた。

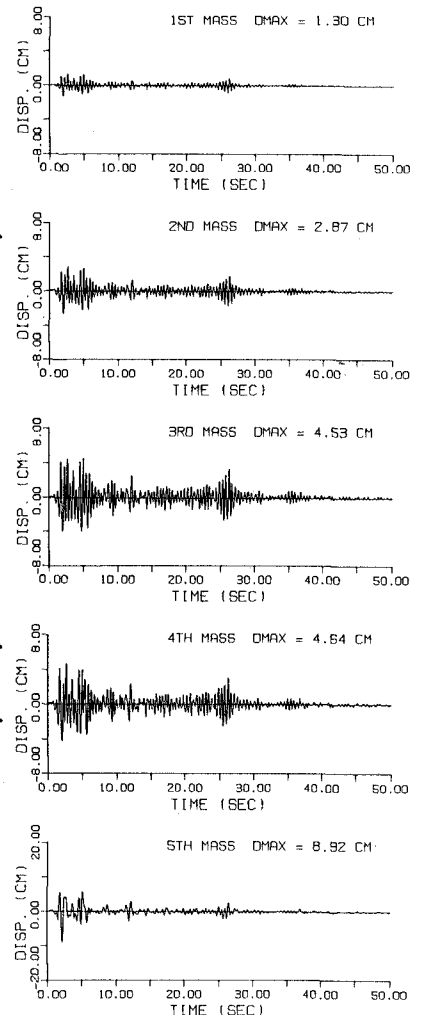


図1 制御力拘束(300ton)に対する変位応答

最上階の変位応答のみが観測されるとし、カルマンフィルタによる状態推定を行った。その結果、全質点の応答（状態量）が全て観測されるという理想的な条件下とほぼ同一の結果が得られ、本アルゴリズムの有用性が確認された。

図1は、制御力拘束値（300ton）を与えたときの変位応答である。無拘束の場合と比べると、制御力には上限が設けられたため、最大応答値は大きくなる。しかし、変位応答は無制御時の約 $1/2$ に低減されており、制震目標を考慮すれば、制御力拘束によって、十分実用に供されることが考えられる。

図2（a）は無拘束時の、図2（b）は制御力拘束（300ton）を与えたときの、最上階質点における制御力の時系列変化を示したものである。制御力拘束の導入により、制御力の波形は飽和し、その挙動も変化している。特に、強震部の制御力の符号は、同一時刻であっても、拘束条件によって異なる場合がある。拘束値以下の制御力に対しては、拘束の有無が制御力の時系列変化に及ぼす影響は小さい。

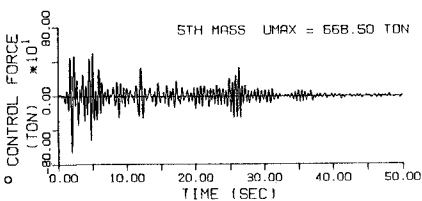
図3は、制御力拘束（300ton）を課したときの、制御力の等式拘束に対する随伴変数の時系列変化を示したものである。これは、図1と図2（b）に対応する。図2と図3を対比させれば、随伴変数が零の場合、制御力拘束は課されていないことがわかる。随伴変数は、制御力拘束の時間区間とその大きさを反映する。制御力拘束値が小さくなるほど、拘束の支配回数は増加する。随伴変数の時系列変化は、制御力だけでなく、振動応答の抑制効果を示す。

制御力拘束値が振動応答に及ぼす影響について検討した。図4に示すように、制御力拘束値が小さいほど、応答は増大し、非線形性の影響が顕著になる。この影響は、制御装置の設置質点である最上階応答において、特に顕著である。

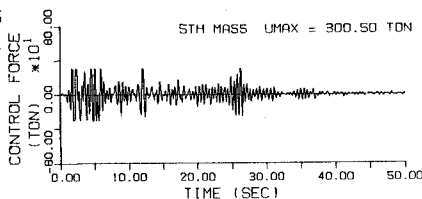
無制御時の地震応答は降伏変位を越え、塑性変形が起こり、強い非線形性を有していた。制御力拘束を考慮しないときに制御を施す（図4において、668.5tonの最大制御力を与えた場合に相当する）と、無制御時に比べて、最上階変位は約 $1/3$ に低減され、塑性変形も抑制された。

4. あとがき

制御力の不等式拘束の有無や程度が制震効果に及ぼす影響を検討した結果、本制震システムは有効に機能していることが明らかになった。本アルゴリズムは、観測量の情報量不足やノイズも取り扱うことができ、実用的であると考えられる。



(a) 無拘束



(b) 拘束 (300ton)

図2 拘束条件が制御力に及ぼす影響

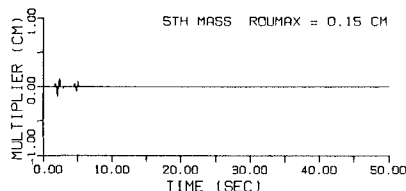
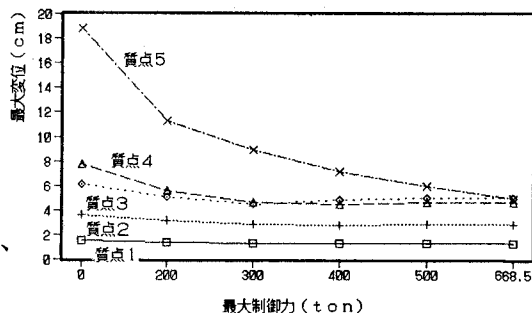
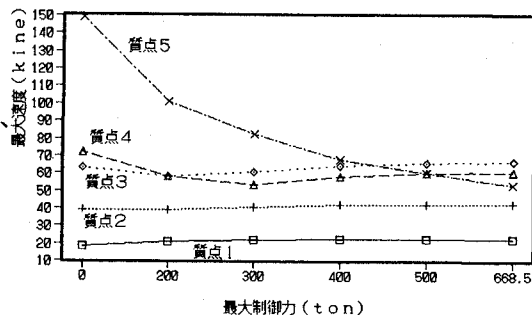


図3 随伴変数の時系列変化



(a) 変位



(b) 速度

図4 制御力の拘束条件と最大応答の関係