

# 大地震対応のインテリジェント制震構造の開発

## Development of Dynamic Intelligent Structures for Large Earthquakes

(研究プロジェクト番号 : JSPS-RFTF 96R15701)

プロジェクトリーダー

西谷 章 早稲田大学理工学部・教授

コアメンバー

家村 浩和 京都大学大学院工学研究科・教授

井上 豊 大阪大学大学院工学研究科・教授



### 1. 研究目的

本研究プロジェクトは、大地震時の構造安全性の確保さらには機能維持をも可能とする次世代耐震構造の確立を目指すものである。技術的にはセンシングと自動制御を融合したインテリジェントなアクティブ制震構造のあり方の確立を、また学術的には構造工学と制御工学を結びつけた新たな学問領域としての「構造制御学」の確立を目指している。このような目標を掲げて、平成8年度～12年度に行った。

建築構造物のアクティブ振動制御は平成元年に初の実用化がなされ、その後日本を中心に数十の構造物に適用されてきているが、究極の目標とも言える大地震への対応を意識したものはわずかであり、この目標に向けての明確な方向性が示されてはいない。このような状況から、以下のサブテーマにより研究を行った：

- (1) 計算機シミュレーションと小型模型実験によるインテリジェント制震システム設計のための基礎研究(早稲田大学拠点・西谷章)
- (2) インテリジェント制震機構の実大構造物実験(京都大学拠点・家村浩和)、
- (3) インテリジェント制震構造を目指す制御アルゴリズムの検討(大阪大学拠点・井上豊)。

### 2. 研究成果概要

#### 2.1 インテリジェント制震システム設計のための基礎研究(早稲田大学拠点)

本研究では、非線形性を有効利用したエネルギー吸収、セミアクティブ制御の2つをキーワードとして捉えている。本研究は大きく3つに分かれる。非線形性をもつ制震構造物の評価手法、人工的非線形性を利用した簡易な制御則をもつセミアクティブ制御ダンパ、最大許容初期状態集合理論に基づく可変フィードバックゲイン制御である。

大地震時の応答低減にあたって非線形性の考慮は重要なポイントとなる。非線形履歴を含む制震構造物の評価手法として、Bouc-Wenモデルを実用的に拡張・発展させた。この手法によって、非線形性を簡易的に評価し、非線形性を有効利用した振動制御の実設計に結びつけることができる。

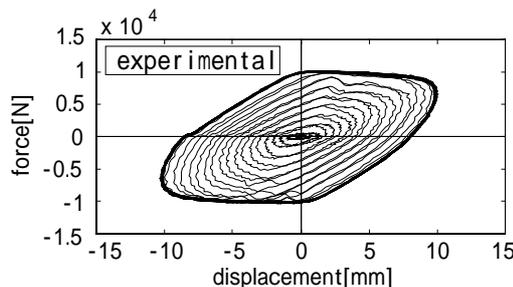


図1 可変スリップレベルダンパ履歴

建築物の、特に大地震時の制御においては、多数の層の応答情報を集めてひとつの中央コントローラが制御を行う方式は、現実的ではない。省エネルギーとなるセミアクティブ制御による、建築物に相応しい制御のあり方を提案したものが、可変スリップレベルダンパである。ダンパ・スリップレベルを設置層の応答情報のみによって制御し、図1のような非線形履歴を発生させて応答低減を実現するこの制御は、各層ごとに完結した、いわゆる自律分散制御システムとなる。数値解析・模型実験による制震効果の検証を経て、オイルダンパ機構による実用化に向けての検討も行った。「自律分散セミアクティブ制御」の基本理念は今後の方向であろう。

付加質量型の制御装置 AMD では可動限界等の問題から、幅広い地震動への対応には、フィードバックゲインの切替えが必要となる。最大許容初期状態集合理論は、ゲインの切替えに理論的根拠を与えるもので、この理論を適用した可変フィードバックゲインをもつ AMD とパッシブ型非線形履歴ダンパの組合せによって、大きな地震動に対しても対応可能な制御システムが可能となることを提示した。

#### 2.2 インテリジェント制震機構の実大構造物実験(京都大学拠点)

本研究では、実大鋼構造試験架構による試験システムを中心として、さまざまな制震装置を用いた試験法の開発、実大スケールにおける検証試験、および制震機構の実証的な検討を行った。具体的には以下ようになる。

京都大学防災研究所構内の実大5層鋼構造試験架構に、付加質量型制御装置 AMD を設置した試験システムを構築した。このシステム

によって、大地震における AMD の能力制約を考慮したアルゴリズムを開発し、実大レベルにおける良好な制震機能を確認した。

通常の振動台加振が不可能な実物大構造物架構においても、試験架構に任意の地震動が作用したときの構造物の応答を、構造物上の加振装置によって高い精度で再現するための手法を開発した。

既設の5層試験架構に隣接して新たに3層の試験架構を設置し、実大連結制震実験を行うことのできる試験架構系を整備して(図2)、油圧式アクチュエータおよびバリアブルダンパの、2種類のジョイントダンパを用いた実験を行った。ジョイントダンパの応答低減効果および装置の実際的な制御性能を実証的に確認した。

実大ダンパに対する従来の動的載荷試験の問題点を解決するため、補助質量駆動機構と弾性支持された床構造より構成される「慣性力駆動型ダンパ載荷試験装置」を開発し、特許を取得した。実際に試験装置を製作してダンパ供試体を用いたダンパ動特性の検出試験を行い、本試験手法の有効性を実証している。

本研究で構築した実物大架構・制御装置・ダンパを用いた試験システムは、多様な制御システムの確認実験に有用であり、今後の有効利用が期待できる。

### 2.3 インテリジェント制震構造を目指す制御アルゴリズムの検討(大阪大学拠点)

本研究では、大地震対応の非線形制御アルゴリズムの開発を行い、インテリジェント制震システム設計法の構築を目的としている。開発する制御アルゴリズムは、制御系の非線形性や外乱の非予測性に対する感度特性の改善ならびに安全余裕度の確保を目指すものである。

フィードフォワード回路を併設した可変フィードバック制御システムを簡便に設計可能な制御アルゴリズムを提案した。具体的には、離散制御力集合に基づく有限チャンネルのデジタル応答予測型準最適制御則を用いた大地震対応の非線形制御アルゴリズムである。

計算機数値シミュレーションによって、開発した非線形制御アルゴリズムを導入したシステムの制御効果を検証した。検証にあたっては、制御対象の各種条件に相違があっても制御効果を一元的に評価できる指標の導入を行っている。この検証から、非予測性の高い地震外乱に対して、安定性の保証された当初の開発目的にかなう非線形制御アルゴリズムによる制御システムの設計が可能となることが示された。



図2 実大鋼構造試験架構

### 3. 結論

以上、本研究では、大地震対応のインテリジェント制震構造のあり方と制御アルゴリズムの提示等、今後の具体的な方向性を明示し、あわせて実大構造物試験システムを確立した。本研究により得られた成果は、建築構造物、都市社会基盤構造物単体にとどまらず、計測・情報処理・制御技術を融合した都市全体の安全デザインに発展しうるものであり、21世紀の、IT技術との融合による高度防災システムへの発展・展開が期待できる。

#### 主な発表論文

- (1) 西谷章、仁田佳宏：「AMDの可動限界を考慮した可変フィードバック制御による制震」、日本建築学会構造系論文集、503(1998)、61-68
- (2) 仁田佳宏、西谷章：「AMDと履歴ダンパの複合による制震システムの設計」、第10回日本地震工学シンポジウム論文集、(1998)、269-274
- (3) Y.Inoue, Y.Mukai, E.Tachibana: "Application of quasi-optimizing control method to structural response control system for seismic excitations," Computational Method for Smart Structures and Materials, (1998), 233-242
- (4) 家村浩和、五十嵐晃、豊岡亮洋：「加振装置による構造物の地震時挙動の再現に関する検討」、構造工学論文集、45A(1999)、719-726
- (5) A.Nishitani: "Semiactive structural control strategy for buildings against severe earthquakes," Proceedings of Third International Workshop on Structural Control, (2000) 407-416
- (6) A.Nishitani, Y.Nitta, A.Itoh, Y.Ikeda: "Semiactive variable-friction damper control with simple algorithm," Proceedings of American Control Conference, (2000) 503-507
- (7) 家村浩和、五十嵐晃、中田成智：「連結構造物のバリアブルダンパによる最適震動制御に関する研究」、構造工学論文集、46A(2000)、575-582
- (8) A.Kubo, Y.Mukai, S.Kawasaki, E.Tachibana, Y.Inoue: "Application of quasi-optimizing control method for seismic structural response control system," Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, (2000), Paper No.1061