

## 速度ベース载荷を用いた高速ハイブリッド地震応答実験アルゴリズムの提案

京都大学大学院 学生員 ○ 相澤 幸広  
 京都大学大学院工学研究科 正員 五十嵐 晃  
 京都大学大学院工学研究科 フェロー 家村 浩和

### 1. 概要

速度依存性の大きい構造部材や要素を対象としてその地震時応答および動的復元力特性を得るために行う実時間ハイブリッド実験や高速ハイブリッド実験を行う手法として、速度ベース载荷の概念を用いた実験制御アルゴリズムを開発した。ハイブリッド地震応答実験アルゴリズムに速度ベース载荷を組み込んだ場合の供試体変位の制御誤差に関して検討するとともに、提案する実験アルゴリズムを免震ゴム支承の実験に適用した。

### 2. 速度ベース载荷

従来の準静的载荷を用いたハイブリッド実験においては、各時刻ステップにおいて算出される目標変位に基づいてアクチュエータを制御する。これに対し、目標変位に加え、さらに前時刻ステップにおける速度を基にアクチュエータの载荷制御を行う考え方を速度ベース载荷と呼ぶことにする。概念図を図-1に示す。まず次ステップ目標変位  $\tilde{x}_{i+1}$ 、および現ステップ载荷速度  $v_i$  を数値積分により算出する。次に目標変位  $\tilde{x}_{i+1}$  に向かって速度  $v_i$  でアクチュエータ変位  $x$  を直線的に変化させる。  $\Delta t$  の時間が経過した時点でそのステップにおける载荷の完了とみなし、その間に算出される次の目標変位と载荷速度のデータを用いて速度载荷を開始する。

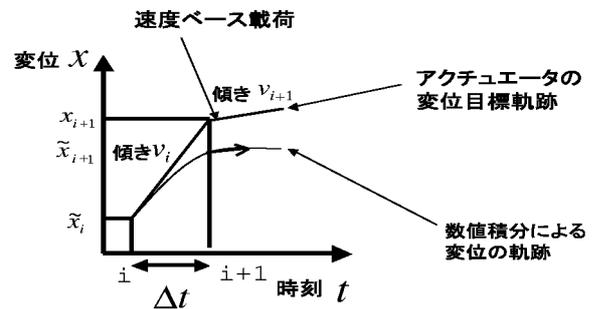


図-1 速度ベース载荷概念図

従来のアクチュエータ制御では目標変位に到達後次の目標変位が算出されるまで停止する必要があったが、速度ベース载荷では目標変位に到達後も供試体の運動を停止させないような载荷を比較的容易に制御することができる。

### 3. 実験概要

本研究で開発したアルゴリズムは、速度ベース载荷を用いてハイブリッド実験を高速で実施するために、次の要素を考慮して構成されている。

1. Operator Splitting 法：安定性条件に関する時間刻み幅の自由度の高い数値積分法として用いた。安定条件に拘束されずに時間刻み幅の大きさを決められることができるため、実験の高速化に有利である。
2. 計測復元力補正：変位誤差と推定剛性の積で定義される補正項を荷重計測値に加算して用いる方法<sup>1)</sup>である。実時間のハイブリッド実験では供試体を停止させずに計測を行うため、復元力計測値の信頼性の確保が一段難しくなるが、計測復元力補正を行うことで計測精度を改善し、数値積分における誤差伝播の影響を抑制する。

### 4. ハイブリッド実験アルゴリズムにおける誤差特性の検討

状況を単純化するため、目標変位を  $\tilde{x} = A \sin \omega t$  と仮定した場合において、速度ベース载荷を用いることで発生する誤差について検討する。ここに、 $A, \omega$  はそれぞれ振幅・振動数を表す定数である。各時刻  $t = i\Delta t$  における速度  $v(i)$  ( $i = 0, 1, 2, \dots$ ) として各ステップ  $t = i\Delta t$  における変位  $x$  の微係数  $\frac{dx}{dt}(i\Delta t)$  が与えられるものとする。速度ベース载荷に基づくアクチュエータの変位値  $x(i)$  と、目標変位  $\tilde{x}(t)$  の差の最大値で定義される変位誤差  $\Delta x$  は、近似的に次式で表される。

$$\Delta x = \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2\omega}} (A\omega \cos \omega(t - \Delta t) - A\omega \cos \omega t) dt = \frac{A}{2} (1 - \cos \omega \Delta t + \sin \omega \Delta t)$$

テーラー展開を行い  $\omega \Delta t$  を微小として二次以上の項を無視すれば、 $\frac{\Delta x}{A} = \pi \frac{\Delta t}{T}$  となる。時間刻みと振動周期の比である  $\frac{\Delta t}{T}$  が大きくなるにつれ、変位誤差は比例係数  $\pi$  で比例的に増加することがわかる。図-2の破線は変位誤差を数値計算で求めたものであるが、同一の結果を示している。

次に Operator Splitting 法を数値積分に適用したハイブリッド地震応答実験アルゴリズムに速度ベース載荷と計測復元力補正を組み込んだ場合に関して変位誤差を調べた。対象構造モデルは周期 1sec、減衰比 5% の線形 1 自由度系、地震地動加速度は周期 1.0sec の正弦波としてハイブリッド実験の数値シミュレーションを行った。種々の  $\Delta t$  の場合について変位誤差  $\Delta x$  を求め、正解値の振幅との比を図示すると図-2 の実線のようになる。図に示されるように速度ベース載荷により発生する誤差と比較すると、現れる誤差は著しく小さいことがわかる。

また地震地動加速度を El Centro 記録とした場合に関しても同様のシミュレーションを行った。 $\Delta t$  を 0.010sec とした場合の結果とその拡大図を図-3 に示す。この図からも現れる誤差が小さいことがわかる。これはハイブリッド実験アルゴリズムには Operator Splitting 法と計測復元力補正が導入されているため、速度ベース載荷による変位誤差を緩和する特性があるためであると考えられる。以上から、速度ベース載荷を用いたこのハイブリッド実験アルゴリズムは実験誤差が増大しない良好な性質を示しており、実験の信頼性は十分確保できると予想される。

### 5. 免震ゴム支承の高速ハイブリッド実験への適用例

本研究で開発したアルゴリズムを適用して、橋梁用免震ゴム支承の模型を対象とした高速ハイブリッド実験を実施した。実験システムの概略を図-4 に、写真を図-5 に示す。載荷装置として最大変位 800mm, 最大荷重 100kN の能力を持つアクチュエータを使用した。質量を免震ゴム支承により支持した一自由度系を構造物モデルとした。免震支承供試体の寸法は 400mm × 400mm × 150mm である。質量の値は、等価固有振動周期が約 1.5sec となるように設定した。実験結果の一例として、入力地震動をレベル 1・3 種地盤標準波とした場合の変位時刻歴を図-6 に示す。実験の時間スケールは 2.0 倍である。この結果から、速度ベース載荷を用いたアルゴリズムによって実験の高速化が可能であることを確認した。

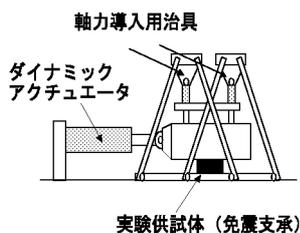


図-4 実験システムの概略図

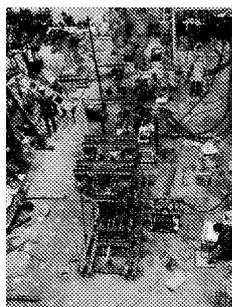


図-5 実験システム全景

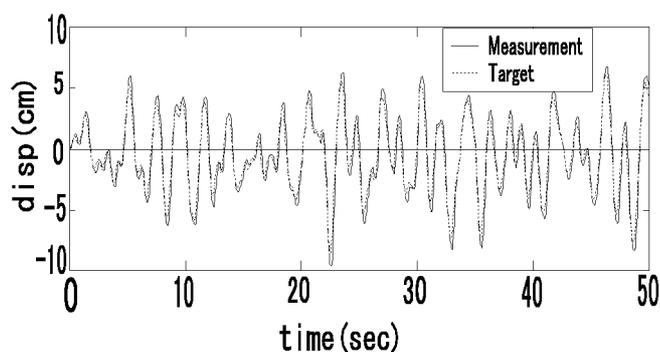


図-6 実験結果 (変位時刻歴)

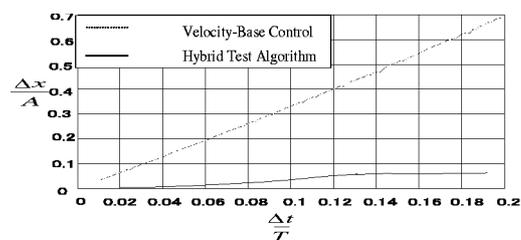


図-2 時間刻み幅と相対誤差との関係

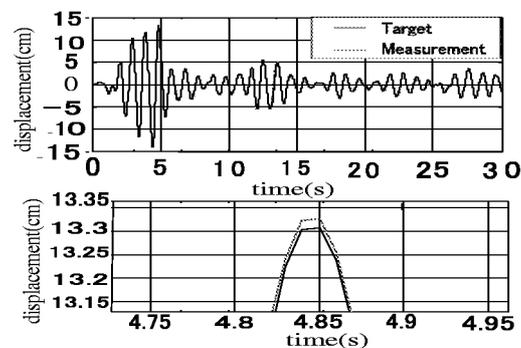


図-3 変位時刻歴

### 6. 結論

本研究では、速度ベース載荷を用いた高速ハイブリッド地震応答実験アルゴリズムの開発を行った。得られた知見は以下のようにまとめられる。

1. 速度ベース載荷を用いることに起因する変位誤差と比較して、ハイブリッド地震応答実験アルゴリズムを組み込んだ場合は誤差は大きく現れず良好な信頼性を持つことがわかった。
2. 免震ゴム支承に対してハイブリッド実験を実施し、速度ベース載荷を用いた高速ハイブリッド実験が実現できることを確認した。

### 参考文献

- 1) M.Nakashima, and H.Kato : "Explanatory Error Growth Behavior and Error Growth Control in On-Line Computer Test Control Method", Research Paper, Building Research Institute, Ministry of Construction, Japan.