

大型振動台を用いた動的ハイブリッド実験システムの構築と検証実験

鉄道総合技術研究所 正会員 ○豊岡 亮洋

1. 目的

免震支承や制震装置などの装置を実際の構造物に適用する場合、これらの非線形特性を載荷試験により数値モデル化して応答解析や設計を行うことが一般的である。しかし、モデルを構築する際に設定する試験条件は、実際の地震時において構造物と装置の間に生じる動的相互作用下での装置の応答とは必ずしも一致しないという問題がある。このため、この相互作用を直接実験で再現するハイブリッド実験手法が提案されているが、大型の載荷設備を用い、実時間（動的）に載荷を行うシステムの開発事例は少ないのが現状である。

そこで本研究では、動的ハイブリッド実験システムを大型振動台に実装し、その特性を検証実験により確認したので報告する。

2. 構築した実験システムの概要

振動台ハイブリッド実験においては、構造全体系を計算部と実験部に分離し、両者を相互作用力によって結合する必要がある。ここでは、図 1(a)に示す 2 自由度系、すなわち実験部 1 自由度と計算部 1 自由度が水平力（ベースシア）を介して連成する構造を対象に、動的ハイブリッド実験システムの実装方法について述べる。図 1(a)を解くべき全体構造系とし、この運動方程式を図 1(b)の計算モデルと図 1(c)の実験部に分離すると、それぞれ式(1)、式(2)のように表される。

$$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s - f_{bs} = -m_s \ddot{z} \quad \cdots (1)$$

$$m_e \ddot{x}_e + c_e \dot{x}_e + k_e x_e = -m_e (\ddot{x}_s + \ddot{z}) \quad \cdots (2)$$

$$f_{bs} = c_e \dot{x}_e + k_e x_e = -m_e (\ddot{z} + \ddot{x}_e + \ddot{x}_s) \quad \cdots (3)$$

ここで、 x_s は計算部の変位、 x_e は計算部と実験部の相対変位、 m_s 、 c_s 、 k_s は計算部の質量、減衰、剛性を表

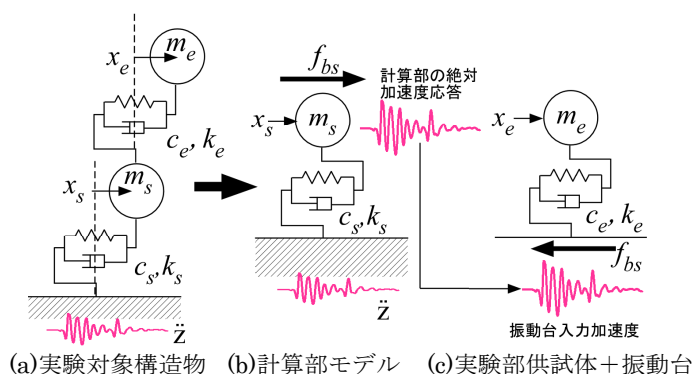


図 1 ハイブリッド実験の概念図

す。また、 m_e 、 c_e 、 k_e は実験部の質量、減衰、剛性、 $\ddot{z}$ は入力地震動加速度、 f_{bs} は実験部のベースシアである。

ここで、式 (2) の左辺を供試体の加振実験に置換すればハイブリッド実験システムが実現される。すなわち、計算部の応答計算により得られた絶対加速度を実験部に入力し、ベースシア f_{bs} を測定して計算部にフィードバックすれば図 1(a)の状態を再現できる。 f_{bs} を直接載荷実験で得るため、供試体特性 (k_e 、 c_e) は非線形でもよい。図 2 には、上記をもとに構築した実験システムのフローを示す。実験中に図 1(b)の応答計算を行うハードウェアは高速信号処理装置 (DSP) を用い、数値解析法としては Operator Splitting 法を用いている。

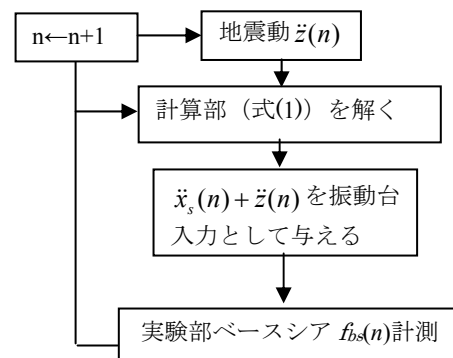


図 2 ハイブリッド実験の手順

3. システムの検証実験

次に、構築した実験システムを大型振動台に実装し、供試体を用いた動的ハイブリッド実験を行い、実験システムの性能試験を実施した。ハイブリッド実験においては、実験結果は加振時間遅れなど実験システム自体に起因する要素と、実験供試体の非線形特性に起因する要素の 2 つの影響を受けるが、ここでは図 1(c)の実験部を固定 ($k_e = \infty$ 、 $c_e = 0$) とすることで、前者の要因のみを抽出した実験を行うこととした。

そこで、図 3 のように質量 m_e が 11.1t の鋼製桁模型 (3.60m×3.30m) を用意し、3 分力計および固定治具を介して振動台に 4 点で固定した。実験では 3 分力計で測定した桁のベースシアをサンプリング周波数 1kHz で DSP に取り込み、これをもとに運動方程式をリアルタイムに解くことで振動台の加振加速度を決定する。

振動台は、鉄道総研が所有する大型振動台を用いた。本振動台は、供試体 50t を上際し、X 方向 7m×Y 方向 5m のテーブルを 2 方向加振することが可能であり、加振最大加速度は X 軸方向 1G、Y 軸方向 2G である。本

キーワード 大型振動台、動的ハイブリッド実験

連絡先

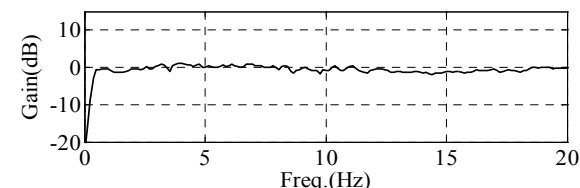
〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 TEL:042-573-7394

実験では、応答加速度の追従性がより良好な Y 軸方向に対して 1 方向加振を行った。Y 軸の指令加速度—応答加速度の伝達特性を図 4 に示す。

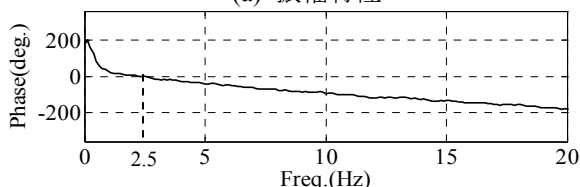
実験は、計算部を線形とし、その質量 m_s および減衰定数をそれぞれ 30t、5% で固定し、図 1(b) の計算部単独の固有振動数を表 1 のように設定して载荷を行った。すなわち、構築した実験システムが有効に機能した場合、構造全体系の固有振動数が低振動数側に移行する結果が得られることになる。入力加速度は、帯域制限ホワイトノイズ(0.1~20Hz)、神戸海洋気象台記録 NS 成分、鉄道耐震設計標準の L2 地震動スペクトル II (G3 地盤用) を、それぞれ最大加速度 300gal に設定して用いた。表 1 の W、K、L はそれぞれの地震動を表す。



図 3 検証実験用試験体の概要



(a) 振幅特性



(b) 位相特性

図 4 振動台の伝達特性 (Y 軸)

表 1 計算部固有振動数の条件

Case	計算部 (図 1(b))	計算+実験部 (図 1(a))
W-1,K-1,L-1	2.4 Hz	2.0 Hz
W-2,K-2,L-2	3.5 Hz	3.0 Hz
W-3,K-3,L-3	4.7 Hz	4.0 Hz

4. 载荷実験結果と考察

ここでは代表的な実験結果として、神戸海洋気象台記録 NS 成分を入力とした場合 (ケース K-2) の結果を示す。図 5 には、実験により得た変位応答を、再現すべき図 1(a) の数値解析結果と比較して示す。また、図 6 にはこれらの応答のフーリエスペクトルの比較を示す。

図 5 および図 6 から、ハイブリッド実験の結果およ

び図 1(a) の 1 自由度系の応答は、いずれも卓越振動数が 3Hz 付近で生じており、時刻歴、周波数特性ともに良好に一致しており、構築したシステムが有効に機能していることがわかる。

図 7 には実験を行った全ケースについて、実験および図 1(a) の解析における最大変位応答を比較して示す。ここで、ケース W-1、K-1、L-1 については、実験の方が解析よりも大きな応答を示しているが、これは図 4(b) に示した位相特性から、振動台の加速度指令値と実際の応答の間に時間遅れ δt が生じているためと考えられる。この時間遅れの影響は付加減衰 c_a として発現し、計算部のみかけの減衰が c_s から $c_s + c_a$ に変化することが知られている。自由振動状態を考えた場合、この付加減衰 c_a は式(4)のようになる。

$$c_a = \omega^2 m_e \delta t, \quad \omega = \sqrt{\frac{k_s}{m_s + m_e}} \quad \dots \dots (4)$$

ここで、図 1(a) の全体系固有振動数が 2.5Hz より低い場合、図 4(b) から位相進み特性が生じて $\delta t < 0$ 、すなわち $c_a < 0$ となり、構造全体系の減衰が減少することから、これが上記の最大応答の差として生じていると考えられる。この遅れ時間の補償方法については今後の課題と考えているが、他のケースについては、ハイブリッド実験により概ね想定される最大応答が再現されており、実験中にハンチング等の不安定現象も生じなかった。これにより、構築した動的ハイブリッド実験システムの有効性を確認できたと考えられる。

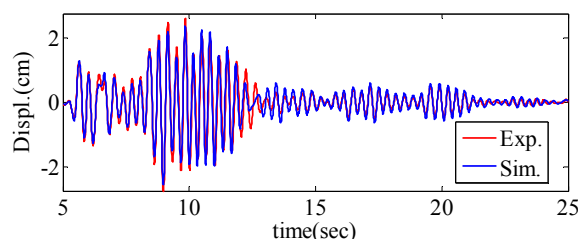


図 5 応答変位時刻歴比較 (K-2)

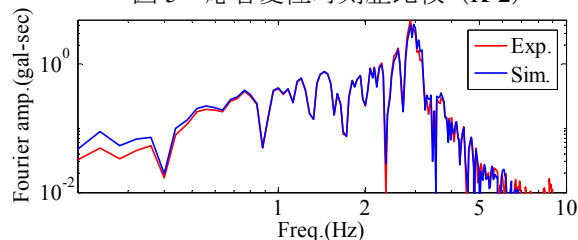


図 6 応答変位フーリエスペクトル比較 (K-2)

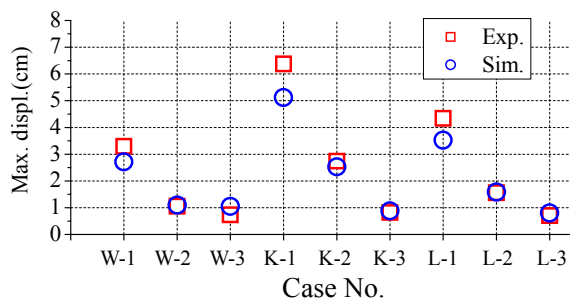


図 7 全実験ケースの最大変位応答比較