実時間ハイブリッド加振による弾塑性ダンパ支持配管の振動実験*

井上 雅彦^{*1}, 堀内 敏彦^{*1}, 浪田 芳郎^{*1}

Vibration Experiment of a Piping System Supported by Elastoplastic damper Using Real-Time Hybrid Excitation

Masahiko INOUE, Toshihiko HORIUCHI and Yoshio NAMITA

Hybrid experimental method, in which a vibration experiment using an actuator and a vibration analysis using a computer are simultaneously conducted by exchanging information with each other, is being developed as a new seismic experimental method. We developed a real-time hybrid experimental system using a hydraulic actuator with large excitation capacity and used it in a seismic experiment of an energy absorber. This absorber is a new type of pipe-support absorbing vibration energy by elastoplastic deformation. By comparing the results of the hybrid experiment with those of the shaking-table experiment, we showed that the results obtained by the two experimental methods were close to each other. Therefore reliability of the developed hybrid experimental system was verified.

Key Words: Transient Response, Seismic Motion, Hydraulic Actuator, Hybrid Experimental Method, Elastoplastic Damper

1. 緒 言

地震による構造物の振動応答を調べるために、振動台を用いた加振実験が従来より行われている。しかし、加振対象物が大型である場合には振動台の大きさや性能によって、構造物全体を加振することが困難になる。そこで、構造物の一部分を用いた加振実験と計算機を用いた振動応答計算とをオンラインで結合して行うハイブリッド実験が提案され、さまざまな研究が行われている^{(1)~(3)}。この実験手法では、数値計算を併用することによって、構造物のうち注目する部分だけを取り出して加振を行うことができる。その際、加振部分の振動挙動が速度や加速度に依存する場合には、加振の時間軸を実際よりも伸ばして行う準動的な実験方法では、精度のよい評価が行えない。そのため、加振の時間軸と計算の時間軸とを合わせて、実時間で実験を行うことが必要となる。著者らはこの実時間ハイブリッド実験システムの開発を行っており、油圧加振機を一台使用した実験システムの開発を行ってきた^{(4)~(6)}。

本報告では、本実験システムの一適用例として、弾塑性ダンパで支持された配管を対象とした実時間ハイブリッド実験について述べる。この弾塑性ダンパについては、その振動特性を調べるため、配管を支持した状態で振動台による加振実験⁽⁷⁾(以下、振動台実験と呼ぶ)を既に実施しており、種々のデータを取得している。ここでは、非線形特性を持つ弾塑性ダンパの油圧加振機による加振実験と、配管系の線形の数値モデルによる振動計算とをオンラインで結合するという実時間ハイブリッド実験を、試験条件を振動台実験に合わせて実施した。そして、得られた実験結果を振動台実験結果と比較することにより、本実験システムの実用性について示した。

2. 実時間ハイブリッド実験の概要

実時間ハイブリッド実験(以下、ハイブリッド実験と呼ぶ)では、対象とする構造物のうち、注目する部分のみを実際に加振し、その他の部分の振動応答は数値モデル化して計算機で振動解析を行う。これらの部分構造モデルの加振実験と数値モデルの振動解析とをオンラインで結合し、応答を互いにやりとりしながら構造物全体の振動応答を評価する。ハイブリッド実験の手法については文献(4)に詳しく述べているが、以下、

* 原稿受付 1997年3月7日。

^{*1} 正員, (株)日立製作所機械研究所(〒300 土浦市神立町502)。

図1, 2を用いてハイブリッド実験の原理を簡単に述べる。

まず、モデル化について、図1に示す多層構造物を例に述べる。質量 m_i 、減衰 c_i 、剛性 k_i ($i=1, 2, \dots, n$) を持つ多自由度系を実験対象として考え、そのうち、耐震性を実証する必要がある部分や、非線形性が強く数値モデル化が困難である部分などは実構造物の供試体を作成し、加振機に設置する(以下、この部分をハイブリッド要素と呼ぶ)。その他の部分は質量・減衰・剛性マトリックス、 M 、 C 、 K として数値モデル化し、計算機に入力しておく。

次にハイブリッド実験の方法について図2に模式的に示す。まず、計算機で数値モデルの振動応答、すなわち、微小時間後の相対変位ベクトル x を、波形発振器から入力される地動加速度ベクトル $\ddot{q}$ と、計測されたハイブリッド要素からの反力ベクトル f を用いて次式の運動方程式に基づいて算出する。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\ddot{q} + f \quad \dots\dots\dots (1)$$

次に、計算機は計算結果をもとにハイブリッド要素に生ずる変位を加振機へ指令信号として出力し、加振機によってハイブリッド要素に変形を与える。それに

Fig. 1 Numerical model of multiple-degree-of-freedom system

Fig. 2 Schematic of hybrid experiment

より生じるハイブリッド要素からの反力 f をロードセルにより計測し、次ステップの地震入力 $\ddot{q}$ と合わせて、再び数値モデルの応答計算を行い、微小時間後の状態を求める。以上の過程を繰返し実施することにより、ハイブリッド要素と数値モデルの応答を組み合わせることで構造物全体の振動応答を評価する。この際、加振実験の時間軸と振動計算の時間軸を一致させて実時間で実験を実施することにより、ハイブリッド要素に含まれる減衰力や慣性力など時間依存性のある特性まで高精度に評価することが可能になる。

3. 実験方法

3.1 振動台実験の概要⁽⁷⁾ 使用した弾塑性ダンパ(Energy Absorber, 以下、EAB と呼ぶ)は原子力発電所や化学プラントなどの配管系を対象とした高減衰配管支持装置の一つである。これは、部材の弾塑性変形による履歴特性を利用して、支持した配管の振動エネルギーを吸収し制振効果を得るものである。

図3は比較の対象とした振動台実験の概略を示した平面図であり、以下、その条件および仕様について述べる。配管は片端が固定支持、もう片端は自由という片持ばりの境界条件下にあり、固有振動数を調整するために自由端側におもり(200 kg)が取り付けられている。配管の形状は外径 89.1 mm、内径 78.1 mm(呼び径 3 B、呼び厚さ Sch 40)、全長 4 m であり、固定端側から 3 m の位置が EAB によって管軸と直角方向に支持されている。供試体の加振方向は水平面内で管軸に対して直角方向である。

図4に EAB の構造の概略を示す。EAB はその両端の相対変位により内部の X 形の金属プレートが曲げ変形を生じる構造になっており、金属プレートの塑

Fig. 3 Shaking-table experiment of a piping system supported by EAB (Plane view)

Fig. 4 Schematic of EAB

Fig. 5 Set-up of real-time hybrid experiment for the piping system

性変形を利用することで、支持した配管系の振動エネルギーを吸収する仕組みになっている。金属プレートをX形にしているのは、曲げに対する平板表面ひずみを均一にして塑性変形を一部に集中させないためである。本実験に使用したEABが塑性変形を生ずる荷重は4.9 kN、最大許容変位は ± 15 mmである。

このような振動台実験の試験条件に合わせて、以下に示す手順によって、EABで支持された配管系のハイブリッド実験を行った。

3・2 ハイブリッド実験の構成 前述のようにハイブリッド実験では対象とする構造物のモデル化において、実際に加振を行う部分構造モデルと、計算機で振動解析を行う数値モデルとを併用する。本実験においては、図5に示すように、実験対象のうち弾塑性変形による非線形性を有するEABを部分構造モデルとして、油圧加振機(最大加振力 100 kN)と反力壁の間に、荷重を計測するためのロードセルとともに取り付ける。また、配管系を表1に示す定数を用いて有限要素法によりモデル化し、固有値解析を行い図6に示すような固有モードを求め、あらかじめ数値モデルとして計算機に入力しておく。ハイブリッド実験での数値モデルの振動計算はモード空間において行った。なお、表1にあるEABの剛性はEABを静的に微小変形させ計測した値である。また、数値モデルの振動解析に用いる減衰の値は振動台実験において得られた配管のみの減衰比0.4%を用いた。

本実験系の構成を図7に示すが、この構成に即して実験手順を説明すると次のとおりである。(1)地震入

Table 1 Parameters of numerical model of the piping system

Young's modulus		192 (GPa)
Poisson's ratio		0.3
Density		7850 (kg/m ³)
Diameters	out side	89.1 (mm)
	inside	78.1 (mm)
Sectional area		14.45 (cm ²)
Moment of inertia of area		126.7 (cm ⁴)
Section modulus		28.44 (cm ³)
Linear stiffness of EAB		2.78 (MN/m)

Fig. 6 First eigen mode of the pipe supported by EAB

Fig. 7 Schematic of the hybrid experiment

力が加わった際の配管系の応答のうちEAB部分の応答変位を加振機により実現し、(2)それによって生じるEABからの反力をロードセルにより計測し、(3)計測したEAB反力と波形発振器から逐次入力される地震加速度とから数値モデルの振動応答計算を計算機で行い、(4)この結果をもとに計算機から加振機制御盤に変位信号を出力し、(5)加振機制御盤により加振機を変位制御によって動作させる。以上の過程を高速に繰り返すことによって振動実験を行う。本実験では反力の取り込みと加振機動作の繰返しを0.5 msごとに行った。

4. 実験結果の比較

4・1 実験項目 振動台実験で用いられた正弦波掃引および地震波を使用して同様の加振実験を実施し、振動台実験結果との比較、検討を行う。

まず、正弦波掃引により配管系の共振点の確認および入力増加に伴う配管系の振動伝達特性の変化について調べた。次に、周波数特性の異なる2種類の地震波を用いて、それらの入力振幅を段階的に増加させながら加振を繰返し実施し、応答波形や最大振幅の変化について調べた。使用した地震波は人工波(卓越振動数を配管系の線形固有振動数付近に設定した人工地震波)、および El Centro 波(1940 年の Imperial Valley 地震の南北方向観測波)の2種類である。それぞれの地震波の特性を表す応答スペクトルを図8に示す。図8(a)は人工波の加速度応答スペクトルを3とりの減衰比について示したものであり、5 Hz 付近にピークを持っており、配管系の微小振動時の固有振動数に合致したものとなっている。同様に、図8(b)に示したものは El Centro 波の加速度応答スペクトルであり、人工波に比べると主要な周波数成分がより広い範囲に広がっている。

測定を行う項目は入力加速度と、EAB の変位および反力(圧縮方向を正とした)である。EAB の変位は加振機に内蔵された変位計により検出し、反力は EAB と剛壁の間に設置したロードセルによって測定した。また、数値モデルにより配管各部の応答が算出されるので、配管先端の加速度応答についても振動台実験との比較のためデータの収録を行った。

4・2 正弦波掃引 EAB は前述のように金属の弾塑性変形を利用しており非線形応答特性をもつ。そこで、応答の振幅依存性を確認するために、数段階の入

(a) Artificial wave

(b) El Centro wave

Fig. 8 Response spectrum of earthquake

力振幅において正弦波掃引実験を行った。以下、その結果について述べる。

図9(a)はハイブリッド実験で得られた配管先端の振動伝達特性である。これは、入力加速度に対する配管先端の絶対加速度の応答倍率を表しており、入力の加速度振幅が 0.5 m/s^2 から 5.0 m/s^2 までの4段階について示した。なお、ハイブリッド実験における配管先端の加速度値は加振実験と同時に進行される振動計算から得られるものである。小振幅の入力では EAB が弾性剛性での配管系の共振点近傍で振動伝達特性に顕著なピークが現れている。入力振幅が大きくなるに従って、応答倍率の最大値が小さくなると同時にはっきりとしたピークが見られなくなる。また、塑性変形による剛性の低下によって共振点が低振動数側へ移行している。比較のため、図9(b)に振動台実験において得られた結果を示す。入力振幅が小さい場合には微小なガタなどの影響により応答倍率の大きさに差が見られるものの、入力振幅の増加に伴う応答倍率の低下、共振点の変化などは同様な傾向を示しており、振動台実験で得られた EAB 支持配管系の振動特性を再現していることがわかる。

(a) Hybrid

(b) Shaking table

Fig. 9 Acceleration transfer function of response of the top of the pipe

(a) Input amplitude 0.5 m/s^2 (b) Input amplitude 1.0 m/s^2 (c) Input amplitude 3.0 m/s^2 (d) Input amplitude 5.0 m/s^2

Fig.10 Variation of relation between force and displacement obtained from sweep excitation in hybrid experiment

また、図10はハイブリッド実験の正弦波掃引において、EABの変位-反力の履歴特性が入力振幅の大きさに応じて、どのように変化したかについて表したものである。図10(a)に示す加速度振幅 0.5 m/s^2 の小振幅入力では、EABの応答は弾性域にあるため、変位と反力の間にほぼ線形の関係が見られる。しかし、図10(b)～(d)に示すように入力振幅が大きくなるに従ってEABの応答も大きくなり、その変形が塑性域に入るため、変位振幅の大きな部分で変位の増加に対する反力の増分が減少し、応答全体としてヒステリシスループを描くようになる。このループで囲まれる面積がEABで消散されるエネルギーに相当するが、振幅の増加とともにループの面積が大きくなり、EABの塑性変形による減衰効果が増加していることがわか

Fig.11 Input acceleration of artificial wave

(a) Time history of displacement

(b) Time history of force

(c) Relation between displacement and force

Fig.12 Response of EAB to artificial wave (Hybrid)

る。この効果は、配管先端の応答倍率が入力の増加とともに減少することに現れており、加振によってEABに生じるこのような荷重-変位特性が、ハイブリッド実験において適切に数値モデルの計算に反映されることによって、図9(a)のような配管系の伝達特性が得られた。

4.3 地震波加振

4.3.1 人工波加振 人工波は図8(a)に示したようにその卓越振動数が、EABが弾性を示す線形応答範囲での固有振動数付近にある波であり、その加速度波形を図11に示す。この波形について加振レベルを段階的に増加させながら繰返し加振を行った。このうち、図11に示した最大振幅を 10 m/s^2 とした場合の入力に対するEABの変位、反力の時刻歴波形と、それらを変位-反力の関係で表したものを図12(a)

～(c)に示す。図12(a)に示す応答波形の振幅の変化の様子は概ね入力波形と同様であるが、図12(b)に示す反力では変位に比べると振幅の変動が緩やかである。これは変位が大きな部分ではEABのプレートの変形が塑性域に達しているため、変位の増加に対して反力がそれほど増えないためである。このことは図12(c)に示すようにEABの応答がヒステリシスループを描いていることからわかる。

比較のため、振動台実験において、同じく人工波の最大振幅が 10 m/s^2 で入力を行った際のEABの変位および反力の時刻歴波形と同時間内の変位-反力の関係を図13(a)～(c)に示す。振動台実験では供試体に加わる加速度入力に振動台特性の影響を受けたものであるため、ハイブリッド実験で数値モデルに加えた入力と厳密には一致していないが、図12と図13を対比してみると、ハイブリッド実験による応答は振動台実験のものと同様で波形が近似していることが確認できる。さらに、両実験結果について、入力した人工波の加速度振幅とEABの最大応答の関係を比較したものを図14(a), (b)に示す。図14(a)は変位、図14(b)は反力について、いずれも入力の最大加速度に対する最大応答値を示したものである。図中の○印が振動台実験

結果、△印がハイブリッド実験結果を示しており、変位、反力ともその最大値は振動台実験とハイブリッド実験とではほぼ等しい値が得られている。

4.3.2 El Centro 波加振 次に、El Centro 波を入力として、人工波加振と同様に加振レベルを段階的に増加させながら加振を行った。そのうち、最大振幅を 10 m/s^2 に設定した際の El Centro 波の加速度波形を図15に示す。この入力に対してハイブリッド実験で得られたEABの変位および反力の応答波形と、同時間内でのEABの変位-反力の履歴を図16(a)～(c)に示す。

比較のため、振動台実験において同じく最大振幅 10 m/s^2 の El Centro 波で加振を行った際の、EABの変位及び反力の応答波形とそれらを変位-反力の関係で表したものを図17(a)～(c)に示す。両実験結果において、最大応答は加振直後の大きな入力加速度が加

(a) Time history of displacement

(b) Time history of force

(c) Relation between displacement and force

Fig. 13 Response of EAB to artificial wave (Shaking table)

(a) Relation between input acceleration and displacement of EAB

(b) Relation between input acceleration and reaction force of EAB

Fig. 14 Comparison of EAB responses obtained from two experimental methods (Artificial wave)

Fig. 15 Input acceleration of El Centro wave

Fig. 16 Response of EAB to El Centro wave (Hybrid)

Fig. 17 Response of EAB to El Centro wave (Shaking table)

Fig. 18 Comparison of EAB responses obtained from two experimental methods (El Centro)

わったときに生じている。その後、全体的に応答は漸減するが、ハイブリッド実験では5秒付近で振動台実験に比べ応答が大きくなる部分が見られる。この差の原因としては、先に行った人工波加振において大振幅入力によりEABを繰返し塑性変形させており、疲労によりEABの剛性が下がり系の固有振動数が低下したことや、繰返し加振により実験供試体であるEABの塑性変形の履歴が異なっていることが考えられる。また、前述のように振動台実験では配管系に加わる入力加速度が振動台特性の影響を受けたものであるのに対し、ハイブリッド実験では数値モデルに直接、波形データ入力しているため、厳密には入力が一致していないことも一因と考えられる。

入力したEl Centro波の最大振幅に対するEABの最大応答変位と最大反力について、ハイブリッド実験結果と振動台実験結果を比較したものを図18に示す。図中の○印が振動台実験結果を、△印がハイブリッド実験結果を表しているが、耐震設計上重要である最大値の評価においてほぼ等しい値を示すことが確認できた。

5. 結 言

開発した実時間ハイブリッド実験システムを, EAB で支持された配管系の振動実験に適用した. EAB の加振実験と配管系の数値計算とを結合した実時間ハイブリッド実験の結果を振動台実験の結果と比較することにより, 以下に示すような結果を得て, 本システムの実用性を確認することができた.

(1) 正弦波掃引により得られた配管系の共振点および振動伝達特性と, 入力の増加に伴うそれらの変化は, 振動台実験での結果を再現している.

(2) 周波数特性の異なる 2 種類の地震波入力に対する EAB の応答波形・履歴, および, 入力振幅と最大応答の関係は, 振動台実験にほぼ等しい結果を示した.

文 献

- (1) 伯野元彦・ほか 2 名, 計算機により制御されたはりの動的破壊実験, 土木学会論文報告集, **171**(1969-11), 1-9.
- (2) 家村浩和・ハイブリッド実験の発展と将来, 土木学会論文集, 356(1985), 1-10.
- (3) Takanashi, K. and Nakashima, M., Japaness Activities on On-Line Testing, *ASCE, J. Eng. Mech.*, **113**-7(1987), 1014-1032.
- (4) 堀内敏彦・ほか 3 名, 加振機の応答遅れを補償した実時間ハイブリッド実験システムの開発(第 1 報), 機論, **61**-584, C(1995), 1328-1336.
- (5) 堀内敏彦・ほか 3 名, 加振機の応答遅れを補償した実時間ハイブリッド実験システムの開発(第 2 報), 機論, **62**-599, C(1996), 2563-2570.
- (6) 堀内敏彦・ほか 1 名, 加振機の応答遅れを補償した実時間ハイブリッド実験システムの開発(第 3 報), 機論, **64**-617, C(1998), 掲載予定.
- (7) 浪田芳郎・ほか 3 名, 弾塑性ダンパ支持配管系の耐震設計手法の開発(第 2 報), 機論, **61**-590, C(1995), 3874-3880.