エネルギー入力に着目した実大震動破壊実験施設性能確認試験の評価

EVALUATION OF PERFORMANCE CHECK ON E-DEFENSE BASED
ON THE ENERGY INPUT山田 哲*¹, 前澤将男*², 森 利弘*³島田侑子*⁴, 佐藤栄児*⁵, 秋山 宏*⁶

Satoshi YAMADA, Masao MAEZAWA, Toshihiro MORI,

Yuko SHIMADA, Eiji SATO and Hiroshi AKIYAMA

In the shaking table test, if force that acts on the specimen and energy input to the specimen can be measured from control information, it becomes powerful information to verify the measurement result. In this study, whether force and energy input by control information were able to be measured at E-defense was examined. The maximum value of force was able to be measured by control information. However, in time history, unbalance caused by the incompleteness of modeling of the actuators was contained. Therefore, energy input was not able to be measured from control information. Moreover, the influence of the rotation of the table on the experimental result was significant. It is necessary to develop the control method of making the rotation of the table minimum.

Keywords: E-Defense, Energy Input, Performance Check, Shaking Table

E-ディフェンス, エネルギー入力, 性能確認試験, 振動台

1. はじめに

1995年1月17日未明に発生した兵庫県南部地震での甚大な被害を受け、地震下における構造物の動的挙動ならびに破壊過程を解明し、構造物の耐震性向上と耐震補強技術を確立するため、(独)防災科学技術研究所により世界最大級の実大三次元震動破壊実験施設(E-ディフェンス)が建設された。(振動台一般を表す場合には振動台、E-ディフェンスの大型振動台のみを表す場合には震動台と表記する。)この震動台は、実大規模の構造物の破壊実験を可能にする世界最大級の実験装置であり、各種構造物の動的破壊実験を通じて耐震工学の進歩に寄与することが期待されている。

大型構造物の振動台実験を行う場合、計測項目が膨大になり、実験結果の全体像を如何に総合的に捉えるかが問題となる。本研究では、試験体へのエネルギー入力に着目する。試験体へのエネルギー入力は、エネルギーの授受に着目した耐震設計¹⁾における総合的な評価指標であるだけでなく、試験体に作用した力とそれにより生じた変形の積分値として、実験結果を評価する上でも有効な指標である。試験体へのエネルギー入力を、試験体の計測ではなく振動台の制御情報から計測することができれば、加振情報として実験結果を捉えることができるだけでなく、エネルギー入力を計測する過程で試験体に作用する力を試験機側から計測することになるので、計測

結果を検証する上で非常に有力な情報となる。

試験体へのエネルギー入力を制御情報から計測する研究は、既に多度津の振動台について行われており²⁾、摩擦力による消費エネルギーを適切に評価することでエネルギー入力が求まることが報告されている。実大三次元震動破壊実験施設(E-ディフェンス)においても震動台制御情報による試験体へのエネルギー入力を計測することを主目的とし、実験での運用に先立ち行われた性能確認試験結果を用いて検討を行う。

本論文では、最初に制御情報に含まれる加振機の圧力情報から加振力を求め、これを用いて試験体に作用した力とモーメントを求め、試験体側での計測結果と比較検討する。これは、E-ディフェンスにおける制御情報には震動台の変位・回転角に関する情報が含まれているものの、試験体に作用した力・モーメントに関する情報は含まれていないことによる。ついで、制御情報と試験体側での計測結果の双方に基づき求めた試験体へのエネルギー入力を比較し、制御情報からエネルギー入力を計測することができるかを検討する。また、本研究では試験体へのエネルギー入力に着目していることから、震動台制御手法の違いにより実験にどのような影響が出たかについても、試験体へのエネルギー入力の観点から検討を行う。

*1 東京工業大学統合研究院 助教授・博士(工学)

*2 元東京工業大学 大学院生・修士(工学)

*3 熊谷組技術研究所, 元防災科学技術研究所

*4 東京工業大学 大学院生

*5 防災科学技術研究所

*6 日本大学総合研究所 教授・工博

Assoc. Prof., Integrated Research Institute, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Former Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.
KUMAGAI GUMI CO., LTD., Former NIED
Graduate Student, Tokyo Institute of Technology
NIED
Prof., Nihon Univ., Dr. Eng.

2. 性能確認試験の概要

2.1 性能確認試験の目的

本題であるエネルギー入力計測の前に、本研究での検討対象とする震動台の性能確認試験について概説する。一般に構造物の振動破壊実験では、その破壊過程を解明するために振動台上で再現される波形は高精度に実現されることが望まれ、また適切に構造物を振動させる必要がある。E-ディフェンスはテーブルの質量 775ton に対し、搭載できる試験体の質量は最大 1200ton と、テーブルの約 1.5 倍の質量が搭載可能である。しかし、大規模な試験体を搭載した場合には、試験体を搭載しない場合と比べ加振機にかかる負荷が大きく異なるため、台上で再現される波形の精度に影響がでることが懸念される。そこで E-ディフェンスでの本格的な振動破壊実験に備え、試験体を適切に加振することができるかどうかの確認と台上での波形再現性能等を確認するため、質量約 600ton の負荷試験体を搭載し、性能確認試験を行った。

2.2 試験体

試験体は図1に示す 5 階建の鋼構造骨組であり、柱は円形鋼管、梁は両端部を拡張した H 形断面部材で、梁通しの接合となっている。また、X 方向(短手方向)には座屈拘束ブレースが組み込まれているが、Y 方向(長手方向)は純ラーメンである。ランダム加振結果から求めた試験体の固有周期を表1に示す。

2.3 パラメーター

性能確認試験におけるパラメーターは制御方法、入力波、入力レベルである。まず最も重要なパラメーターである制御方法であるが、E-ディフェンスの制御方法は加速度、速度、変位信号によるフィードバックおよびフィードフォワード制御(Three Variable Control)を基本とした基本制御と、加振精度を高めるためのこれに付加的に追加する複数の応用制御からなる。代表的な応用制御として繰り返し入力補償(以下、入力補償)があるが、これは試験体と震動台の特性をあらかじめ同定しておき、その特性から震動台上で目標とされる波形が再現できるように入力波を補正する手法である。入力補償は以下の手順で実施される。

- ① 試験体が搭載された震動台の伝達関数を同定し、その結果から逆伝達関数を求める。→ ② 求めた逆伝達関数に目標とする波形を入力し、補償波形を作成する。→ ③ 作成した補償波形を震動台に入力し、震動台上の再現波形と目標波を比較し補償波を調整する。→ ④ ③を繰り返し、目標とする波形に震動台上の波形を近づける。

今回の試験では、基本制御のみの場合と入力補償を付加した場合を実施した。

次に、入力波であるが、正弦波の他兵庫県南部地震震取記録³⁾(3 次元)・同神戸海洋気象台記録⁴⁾(3 次元)、1993 年釧路沖地震釧路気象台記録強震観測記録⁵⁾(NS 成分のみの 1 次元を使用)の強震加速度記録について、入力レベルを変化させて加振を行った。これらの波の中で釧路気象台記録を除くものは試験体を弾性に留める弾性加振の入力波として用い、釧路気象台記録は試験体 1 階について座屈拘束ブレースを強度を低くかつ両側の 2 構面のみに装着して塑性化させ、剛性変化の影響を調べる弾塑性加振の入力波として用いた。この理由は、図2に示す入力波(NS 成分)のエネルギースペクトル⁶⁾からわかるように、兵庫県南部地震の強震観測記録は試験体の 1 次固

有周期近傍でのエネルギー入力小さく、1 階の座屈拘束ブレースを塑性化させることができないと判断したことによる。

2.4 計測

実験時に設置した加速度計、変位計、歪ゲージ等のセンサー類による計測(以下、試験体情報)と、震動台変位、回転角、加振機差圧等の震動台制御情報(以下震動台情報)の 2 系統の合計約 1000 チャンネルの計測を、サンプリング周波数 2000Hz で行った。これらの計測項目の中で本研究で用いたのは、

①試験体情報について

試験体各階に設置した加速度計による加速度記録
震動台上面に設置した加速度計による加速度記録
加振機バランスシリンダー差圧

②震動台情報について

震動台上面中央の変位・回転角
震動台上面中央の加速度・角加速度
加振機差圧

の各項目である。なお、両系統のデーターがアンプに収録されるまでに震動台情報は A/D,D/A 変換とフィルター処理が施されるため、位相のずれが生じていた。この位相差は、A/D,D/A 変換による 1msec の時間ずれのほか、フィルター処理によって生じたものであるが、フィルターの特性が明らかにされていないことから、両系統で共通の計測を行った震動台上面中央における加速度記録の比較結果に基づき、図3に示す 8 次の Butterworth フィルター(カットオフ周波数は $f_c=100\text{Hz}$)であると推定した。1msec の時間ずれと Butterworth フィルターによる位相ずれについて、補正前後の加速度の比較結果の例を図4に示す。エネルギー入力の算定において試験体情報と震動台情報を混用する必要がある際は、上述の処理を計測値に施して震動台情報と等しい位相特性を持つデーターとした。

2.5 加振結果の概要

弾性加振において神戸海洋気象台記録を原波の 50% の強さで入力した際の、震動台上面中心位置に設置した加速度計の計測記録から速度応答スペクトル(減衰 2%)を描き、制御目標波の速度応答スペクトル(減衰 2%)と併せて図5に示す。基本制御の場合、水平動については全体的に制御目標波に比べやや大きめの値となっているが、試験体 1 次固有周期付近では制御目標波をやや下回る結果となっている。一方、入力補償制御の場合では、試験体 1 次固有周期付近で制御目標波を上回る傾向が見られる。これは、転倒モーメントによる影響と考えられる。試験体 1 次固有周期付近で目標通りの入力となっているかどうかは、振動台実験において重要な点であることから、今後制御方法の改善が望まれる。

震動台上面中心位置における 3 成分の加速度だけでは、転倒モーメントによって生じる回転の影響は捉えられないことから、弾性加振において神戸海洋気象台記録を 50% の強さで入力した際の x 軸周りの転倒モーメントの時刻歴を図6に、同じく震動台の x 軸周りの回転角の時刻歴を図7に、それぞれ基本制御で加振したときの結果と入力補償制御で加振したときの結果を比較して示す。試験体が弾性であり、同じ波を入力しているにも拘わらず、試験体の応答である転倒モーメントの時刻歴は制御方法で全く異なったものとなっている。同時刻の転倒モーメントと震動台の回転角を見ると、基本

制御では転倒モーメントに合わせて回転角が生じているのに対し、入力補償制御では基本制御の場合に生じる回転角と逆向きの回転が生じており、制御が効き過ぎていることがわかる。転倒モーメントにより生じる台の回転が実験に及ぼす影響については、論文後半において試験体へのエネルギー入力の観点から論ずることとし、ここでは観察された現象を示すに留める。

3. 震動台制御情報に基づく力の計測

試験体に作用した力は、試験体へのエネルギー入力を評価するために必要な情報であるだけでなく、一般に振動台実験結果を評価する上で重要な情報である。タンク内における液体のように実験中における試験体の質量分布が大きく変動し、かつ基礎部での力の計測が困難な場合には、震動台情報から試験体に作用した力がわかれば望ましいことは言うまでもないが、計測結果をキャリブレーションする場合や、加振時にセンサーに問題が発生した場合のバックアップとして、震動台情報から試験体に作用した力がわかることは重要であり、実験装置として求められる機能である。ここでは、震動台情報から求めた試験体に作用した力と試験体情報から求めた試験体に作用した力を比較し、震動台情報に基づく力の計測結果について検討を行う。

力とモーメントの釣り合いを、図8に示す。震動台情報に基づく震動台上面中央位置で試験体に作用する力とモーメントは、式(1)～(6)で求まる。

$$R_x^* = \text{act}F_x - \tau m_x \cdot \ddot{x} \quad (1)$$

$$R_y^* = \text{act}F_y - \tau m_y \cdot \ddot{y} \quad (2)$$

$$R_z^* = \text{act}F_z - \tau m_z \cdot \ddot{z} \quad (3)$$

$$M_{\theta x}^* = \text{act}M_{\theta x} - \tau l_{\theta x} \cdot \ddot{\theta}_x - \tau m_y \cdot \ddot{y} \cdot h_z \quad (4)$$

$$M_{\theta y}^* = \text{act}M_{\theta y} - \tau l_{\theta y} \cdot \ddot{\theta}_y + \tau m_x \cdot \ddot{x} \cdot h_z \quad (5)$$

$$M_{\theta z}^* = \text{act}M_{\theta z} - \tau l_{\theta z} \cdot \ddot{\theta}_z - \tau m_x \cdot \ddot{x} \cdot h_y + \tau m_y \cdot \ddot{y} \cdot h_x \quad (6)$$

ここで、 $\text{act}F_x, \text{act}F_y, \text{act}F_z$ はx方向,y方向,z方向の加振力であり、震動台情報である各加振機の差圧から求まる加振力、同じく震動台情報から求められるリンク材の回転角、そして上下方向加振機バランスシリンダーの保持力(震動台と試験体を試験位置に保持するために必要な力であり、加振力を与えるのとは別のシリンダーにより与えられる)から、各方向成分の合力として算出した。ここで、加振機の差圧から加振力を正確に求めるには加振機の剛性や内部減衰の影響を正しく反映する必要があるが、後述するようにこれらの影響は周波数毎に特性が異なりモデル化できなかったこと、さらには加振機にロードセルが装着されておらず加振力を求める方法が他に無かったことから、改善の策として差圧から加振力を直接求めることとし、誤差については不釣り合い力として評価することにした。また、 $\text{act}M_{\theta x}, \text{act}M_{\theta y}, \text{act}M_{\theta z}$ はx軸周り,y軸周り,z軸周りの加振モーメントであり、加振力同様に算定した。 $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ は震動台可動部重心位置のx方向,y方向,z方向の絶対加速度、 $\ddot{\theta}_x, \ddot{\theta}_y, \ddot{\theta}_z$ は震動台可動部のx軸周り,y軸周り,z軸周りの角加速度であり、いずれも震動台情報である。そして、 $\tau m_x, \tau m_y, \tau m_z$ は震動台可動部質量、 $\tau l_{\theta x}, \tau l_{\theta y}, \tau l_{\theta z}$ は震動台可動部の重心まわりの回転慣性、 h_x, h_y, h_z は震動台可動部重心のテーブ

ル上面中心からの距離であり、表2に示す値である。なお、式(1)～(6)を構成する各項の中で、上下方向加振機バランスシリンダーの保持力だけが震動台情報には含まれないことから、1msecの時間ずれとButterworthフィルタによる位相ずれの処理を行い震動台情報と併せて使用した。

一方、試験体情報に基づく試験体に作用する力とモーメントは、式(7)～(12)で求まる。

$$R_x = \sum_{i=1}^6 s m_i \cdot (\ddot{x}_0 + \ddot{\theta}_{y0} \cdot h_i + \ddot{x}_i) \quad (7)$$

$$R_y = \sum_{i=1}^6 s m_i \cdot (\ddot{y}_0 - \ddot{\theta}_{x0} \cdot h_i + \ddot{y}_i) \quad (8)$$

$$R_z = \sum_{i=1}^6 s m_i \cdot (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_i) \quad (9)$$

$$M_{\theta x} = \sum_{i=1}^6 s I_{\theta xi} \cdot (\ddot{\theta}_{x0} + \ddot{\theta}_{xi}) - \sum_{i=1}^6 s m_i \cdot (\ddot{y}_0 - \ddot{\theta}_{x0} + \ddot{y}_i) \cdot h_i \quad (10)$$

$$M_{\theta y} = \sum_{i=1}^6 s I_{\theta yi} \cdot (\ddot{\theta}_{y0} + \ddot{\theta}_{yi}) + \sum_{i=1}^6 s m_i \cdot (\ddot{x}_0 + \ddot{\theta}_{y0} + \ddot{x}_i) \cdot h_i \quad (11)$$

$$M_{\theta z} = \sum_{i=1}^6 s I_{\theta zi} \cdot (\ddot{\theta}_{z0} + \ddot{\theta}_{zi}) \quad (12)$$

ここで、 $s m_i$ はRFを6階として構成部材を階高中央で上下階に分割して求めた試験体各階の質量、 h_i は各階床スラブ重心位置の震動台上面からの高さ、 $s I_{\theta xi}, s I_{\theta yi}, s I_{\theta zi}$ は梁と床スラブの見かけの面積から算出した各階床スラブ重心周りの回転慣性であり、それぞれ表3に示す値である。また、 $\ddot{x}_0, \ddot{y}_0, \ddot{z}_0$ は震動台上面中心位置の各方向絶対加速度、 $\ddot{\theta}_{x0}, \ddot{\theta}_{y0}, \ddot{\theta}_{z0}$ は震動台上面中心位置におけるx軸周り,y軸周り,z軸周りの角加速度、 $\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i$ は試験体各階床スラブ重心位置の各方向相対加速度、 $\ddot{\theta}_{xi}, \ddot{\theta}_{yi}, \ddot{\theta}_{zi}$ は試験体各階床スラブのx軸周り,y軸周り,z軸周りの角加速度である。

図1 試験体概要

表1 試験体の固有周期

	x (sec)	y (sec)	z (sec)	θx (sec)	θy (sec)	θz (sec)
1次	0.185	0.333	0.058	0.051	0.196	0.161
2次	0.065	0.118	-	-	-	0.058
3次	0.037	0.067	-	-	-	0.036

図2 入力波(NS成分)のエネルギースペクトル

図3 8 次の Butterworth フィルター

(1)補正前

(2)補正後

図4 補正前後の加速度記録の比較

(1)x 方向(NS成分) 全体

試験体 1 次固有周期付近拡大

(2)y 方向(EW成分) 全体

試験体 1 次固有周期付近拡大

(3)z 方向(UD成分) 全体

試験体 1 次固有周期付近拡大

図5 速度応答スペクトルの比較(減衰 2%)

図6 転倒モーメントの時刻歴

図7 震動台に生じた回転角の時刻歴

図8 力とモーメントの釣り合い

(1) 弾性加振 基本制御で神戸海洋気象台記録を90%で入力した場合

(2) 弾性加振 入力補償制御で神戸海洋気象台記録を65%で入力した場合

(3) 弾塑性加振 基本制御で釧路気象台記録(NS)成分を最大速度 65cm/s で入力した場合

(4) 弾塑性加振 入力補償制御で釧路気象台記録(NS)成分を最大速度 60cm/s で入力した場合

図9 震動台情報と試験体情報から求めた力とモーメントの比較

ここで、 $\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0$ は震動台上面中心位置の各方向絶対速度、 $\dot{\theta}_x, \dot{\theta}_y, \dot{\theta}_z$ は震動台上面中心位置における x 軸周り、 y 軸周り、 z 軸周りの角速度であり、台上両端部に設置した加速度計による上下方向の計測値をセンサー間距離で除して角加速度を求め、これを積分した値である。

各加振での震動台情報に基づき求めた試験体への総エネルギー入力 inE_{total}^* と、試験体情報に基づき求めた試験体への総エネルギー入力 inE_{total} を比較し、図11(1)に示す。 inE_{total}^* については、キャリブレーションのため、試験体各層に作用した力と各層に生じた層間変形の増分を積分して求めた試験体の吸収エネルギー dE_{total} と比較し、図11(2)に示す。 inE_{total} と dE_{total} は良い対応を示しており、試験体情報に基づき試験体への総エネルギー入力が正しく計測できていることがわかる。一方、震動台情報に基づき総エネルギー入力の計測結果は試験体情報に基づく結果を大きく上回っており、加振力を求める際の誤差の影響が大きいことがわかる。また、入力が大きくなると制御方法による違いも見られ、試験体の影響も受けていると考えられる。震動台情報に基づき求めた総エネルギー入力における誤差の評価は、これから蓄積されていく実験結果や加振力の計測方法と併せて、今後総合的に検討を進める必要がある。

5. エネルギー入力の観点による制御方法の評価

前章で述べたように、現段階では震動台情報から試験体へのエネルギー入力を正しく計測することはできなかった。しかしながら、

試験体情報からはエネルギー入力は計測できていたことから、試験体情報に基づく試験体へのエネルギー入力の計測結果を用いて、制御手法の違いにより実験にどのような影響が出たかを検討する。弾性加振および弾塑性加振における試験体への各方向成分のエネルギー入力の時刻歴を、図12に示す。基本制御で加振した場合、水平成分により入力したエネルギーの大部分が台の回転により逸散している。一方入力補償制御で加振した場合には、水平成分によるエネルギー入力だけでなく、台の回転でも大量のエネルギーが試験体に投入されている。基本制御・入力補償制御のいずれの場合においても、一般的な地震入力としては存在しない回転成分により、試験体に対する外乱の効果が目標とは大きく異なるものとなっていることが端的にわかる。波形や応答スペクトルからは捉えにくい現象が、エネルギー入力の観点で明確に捉えることができた。

(1) inE_{total}^* と inE_{total} の比較 (2) dE_{total} と inE_{total} の比較

図11 総エネルギー入力の計算値の比較

(1) 弾性加振 基本制御で神戸海洋気象台記録を90%で入力した場合

(3) 弾塑性加振 基本制御で釧路気象台記録(NS)成分を最大速度 65cm/s で入力した場合

(2) 弾性加振 入力補償制御で神戸海洋気象台記録を65%で入力した場合

(4) 弾塑性加振 入力補償制御で釧路気象台記録(NS)成分を最大速度 60cm/s で入力した場合

図12 エネルギー入力の時刻歴の比較

図13 エネルギースペクトルとエネルギー入力速度換算値

試験体に入力されたエネルギーを、エネルギースペクトル上で検討する。図13に弾性加振についてはy方向、弾塑性加振についてはx方向について、入力目標波のエネルギースペクトル(減衰10%)と台上記録のエネルギースペクトル(減衰10%と減衰0%)を描き、これに並進成分による試験体へのエネルギー入力速度換算値(弾性加振の場合 $\sqrt{2mE_y/M}$ 、弾塑性加振の場合 $\sqrt{2mE_y/M}$ 、 M は試験体総質量)を●で、並進成分と回転成分による試験体へのエネルギー入力速度換算値(弾性加振の場合 $\sqrt{2(mE_y+mE_{\theta_x})/M}$ 、弾塑性加振の場合 $\sqrt{2(mE_y+mE_{\theta_x})/M}$)を○でプロットした。減衰10%でのエネルギースペクトルにおける目標波と台上記録の差は、制御による並進成分の入力の誤差である。また、台上記録について減衰0%のエネルギースペクトルを描いたのは、弾性加振はもちろんのこと、弾塑性加振においても試験体の塑性化の程度は極わずかであり、エネルギー入力量は減衰0%の弾性系に近いと考えたことによる。並進成分によるエネルギー入力は、台上記録減衰0%のエネルギースペクトル上にほぼプロットされており、回転による影響はプロットのずれとして見て取れる。これらの結果からも、基本制御の場合、水平成分のエネルギーが回転方向に逸散していることがわかる。なお、弾塑性加振入力補償制御の場合、並進成分の入力が小さいように見えるが、これは一部の座屈拘束ブレースが塑性化したため長周期化したものの、1次固有周期より長周期側の入力が小さかったことにより、並進成分によるエネルギー入力も小さくなったと考えられる。

結論

1. 震動台制御情報に含まれる加振機の圧力情報から加振力を求め、これを用いて試験体に作用した力とモーメントを求めたところ、試験体側での計測結果と最大値は概ね対応した。
2. 震動台制御情報に基づく試験体に作用した力とモーメントと、試験体側での計測結果を時刻歴で比べると、全体的な挙動は概ね捉えられたものの、不釣り合いが生じていた。不釣り合いの原因は、加振力を求める際に加振機の内部減衰や剛性を無視したことや継ぎ手部での摩擦の影響によるものであるが、正弦波加振の結果からは簡単にモデル化できるような規則性は見られなかった。
3. 積分結果としての大局的な指標であるエネルギー入力の中で、震動台情報に基づく試験体に作用する力とモーメントに含まれる不釣り合いの影響がどの程度を占めるものであるかを検討したところ、不釣り合いの影響が支配的であり、震動台情報に基づく試験体へのエネルギー入力の計測が現状ではできないことがわかった。
4. 試験体情報に基づく試験体へのエネルギー入力の計測結果を用いて制御手法の違いによりどのような影響が出たかを検討したところ、基本制御で加振した場合には、水平成分により入力されたエネルギーの大部分が台の回転により逸散し、入力補償制御で加振した場合には、水平成分によるエネルギー入力だけでなく、台の回転でも大量のエネルギーが試験体に投入されていることがわかった。
5. 試験体に作用した力を試験機側から計測することは、実験を行う上で重要であり、加振機内部の減衰や剛性などを正確に評価したモデルの構築により加振力を正確に計測できるようにすること、そして、試験体へのエネルギー入力を制御情報より計測できるようにすることは今後解決すべき課題である。
6. 大きな転倒モーメントが作用した際に、台に回転が生じると実験結果への影響が大きいことから、回転を成るだけ発生させないように制御手法を向上させる必要がある。

謝辞

本論文は、「振動台エネルギー入力に関する検討会:秋山 宏(日大), 阿部健一(防災科研), 小川信行(元防災科研), 甲斐芳郎(清水建設), 加藤 敦(防災科研), 坂下克之(元防災科研), 森 利弘(元防災科研), 山田 哲(東工大), 山野祐司(日建設計)」による成果の一部を取り纏めたものである。性能確認試験においては、中島正愛センター長をはじめとする E-Defense 関係者、東京農工大田川研究室ほか、多くの方のご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 秋山 宏: 建築物の耐震極限設計, 東京大学出版会, 1980.
- 2) 高圧ガス保安協会振動実験専門委員会: 鋼製閉底円筒形貯槽の耐震実験報告(第1回)(第2回), 高圧ガス, Vol.21, No.7/No.8, pp.363-373/440-452, 1984, 高圧ガス, Vol.21, No.7, pp.363-373, 1984
- 3) 中村 豊, 上半文昭, 井上英司: 1995年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析(II), JR 地震情報 No.23d, 財団法人鉄道総合技術研究所ユレダス開発推進部, 1996.3
- 4) 気象庁 87型電磁式強震計波形データによる
- 5) 鹿島俊英, 北川良和: 平成5年(1993年)釧路沖地震強震観測記録速報, 建設省建築研究所, 1993.2

(2006年7月10日原稿受理, 2006年10月30日採用決定)