U.D.C. 681. 532. 57'273. 4:550. 344. 094]:620. 178. 53

加速度制御形地震シミュレータの開発

Development of Acceleration Control Type Earthquake Simulator

耐震設計の重要性が再認識され、振動試験機に要求される機能、性能とも高度な ものとなりつつある。なかでも、加速度波の再現は、地震波の多くが加速度波で記 録されるため、最大の課題となっている。

従来の振動試験機は,変位制御で構成され,変位波を入力としていたため,加速 度波形の再現は必ずしも良くなかった。

そこで,加速度波を直接入力とする制御方式を考案し,従来の振動試験機に比べて,操作性,応答性及び安定性ともに優れた加速度制御形の電気油圧式地震シミュレータを開発した。

今回試作した台重量1tの地震シミュレータでは,加速度のステップ応答で立上り 3ms(従来方式では,変位のステップ応答のみ),周波数応答で折点周波数50Hz(従 来は30~35Hz)を得た。また台重量3.1t及び25tの試験機にも適用し,良好な結 果を得ている。

松崎 浮*	Matsuzaki Atsushi	
浜野 新**	Hamano Shin	
平井洋武**	Hirai Hiromu	
熊谷弘巳***	⁶ Kumagai Hiromi	

日 緒 言

地震国である我が国では,以前より耐震設計に対する関心 は高かったが,原子力の発達や構築物の大形化に伴って,実 再現するためには,加速度信号を積分して変位信号を算出し, これを変位制御系への入力とするため,加速度波としては必

証試験の重要性はますます高まりつつある。特に,地震波の 多くが加速度で記録されていること,あるいは原子力機器な どの耐震試験の規準が加速度の大きさで規定されていること のために,耐振実験用の振動試験機では加速度波形の忠実な 再現が最大の課題とされていた。

従来,振動試験機としては,振動台の共振を利用したもの, あるいは電磁式のものが多かったが,振動台の大形化及び任 意波形の加振に対する要求の増大に伴って,昭和40年ごろよ り各社で電気油圧サーボを利用した振動試験機の開発が進め られてきた。日立製作所でも,昭和43年以後,製品として各 所へ納入し実用に供してきた。

これらの試験機は、変位サーボで構成されており、変位制 御系としては十分な性能を持っているが、任意の加速度波を



ずしも十分な精度は得られなかった。

すなわち,上記の方式では加速度波形を再現する場合,

(1) 加速度信号の積分過程で誤差を生ずること。

(2) 加速度波における高調波ひずみは変位波形には現われに くい(加速度波に含まれる高調波成分は,変位波では周波数 の2乗に反比例して小さくなる)ために,変位制御では,加速 度の誤差の高調波成分が修正されにくいこと。

(3) したがって、摩擦特性などの非線形性による影響、あるいは制御系内で発生するノイズがそのまま加速度波形のひずみとして現われやすいこと。

などの欠点を持っている。

このような欠点を除くために、今回、加速度信号を直接入 力とする制御方式を考案し、従来の試験機に比べて、操作性 が良く、応答性、安定性ともに優れた加速度制御形の地震シ ミュレータを開発したので、ここに報告する。

2 地震シミュレータの構成

今回試作した実験用地震シミュレータの外観を図1に、その構成を図2に、またその仕様を表1にそれぞれ示す。

この地震シミュレータの最大の特長は,加速度信号を直接 の入力としていることで,加速度のステップ応答,三波試験な ど,加速度を入力とした試験が簡単に実施できる点にある。 また,制御回路の定数の設定値を変更するだけで,通常の変 位制御としての利用も簡単に行なえる。

まず,図2について,基本構成とその動作原理を簡単に説 明する。同図で,振動台で再現すべき加速度波は,地震波の 再生装置,あるいは試験波の発生装置により,電圧信号とし て直接入力回路に加えられる。入力回路では,この加速度信

図 | 実験用地震シミュレータ 今回試作した実験用地震シミュレー タの外観を示す。

号を積分して,速度及び変位に対応した信号を算出して,加速度,速度及び変位に対するそれぞれの目標値を制御回路へ 伝える。

51

* 日立製作所研究開発推進センター 工学博士 ** 日立製作所機械研究所 *** 日立製作所土浦工場

302 日立評論 VOL. 59 No. 4 (1977-4)

表 | 実験用地震シミュレータの仕様 実験用地震シミュレータの主な仕様を示す。

項	目	仕様
振動台寸	法(mm)	800×1,200
振 動 台 重	量(t)	1.0
最 大 振	幅(mm)	± 50
最大加速	度(G)	土3(無負荷時)
最 大 加 振	力(t)	3.0
加振方	定	電気油圧サーボ式
油 圧 源 容	量	210kg/cm ² , 601/min

一方,実際の振動台の加速度,速度及び変位は、それぞれ の検出器によって電圧信号に変換されて、制御回路へフィー ドバックされる。そして制御回路では、加速度、速度及び変 位の目標値と実際の振動台の値とを後で述べる比率で加算し て、それぞれの誤差、すなわち制御偏差が小さくなる方向に 振動台を動かす。すなわち、制御回路で電流増幅された信号 はサーボ弁に印加され、サーボ弁によってピストン シリンダ に供給される圧油の流量と方向とを制御して、振動台を目標 どおりに駆動する。このときのパワーは主油圧源より供給さ れる。

(2) 制御回路

加速度,速度及び変位の目標値とそれぞれのフィードバック値とを適当な比率で加算する演算部分及びその出力信号を 増幅する電流増幅部分より構成されている。特に,後者では サーボ弁コイルのインダクタンスによる応答遅れを補償する 意味で電流帰還形を採用している。

(3) サーボ弁

微弱な電気信号によってパワー レベルの高い油圧動力を制 御する一種の電気油圧変換器で,流れの方向を切り換える際 に生ずるショックを軽減するための工夫が施されている。

(4) 加速度,速度及び変位の検出器

今回の試作機では、加速度検出器にはひずみゲージ式を、 速度検出器には可動コイル形を、また変位検出器には差動ト ランスを利用したが、現在では速度と変位の検出器を一体と してピストン内部に内蔵したものを実用化している。これは、 差動トランスの一次側に搬送波と直流波とを印加し、二次側 の出力の搬送波成分より変位を、搬送波を除いた成分より速 度を同時に検出するように構成されている。

(5) 振動台浮上装置

本機では, 摺動面の摩擦を低減するために全面的に静圧案 内による油圧支持方式を採用している。

(6) 油圧クランプ装置

上記静圧案内により振動台を支持した場合,振動台が浮上

このように、この地震シミュレータでは、信号の処理には 応答の速い電気系を、パワーの必要な駆動部には油圧を利用 した構成となっている。

次に, 各部の構成要素について簡単に説明する。 (1) 入力回路

加速度波形より,速度,変位を算出するための回路であり, 後で述べるように,変位のドリフトを軽減するとともに,変 位の最大がストローク限界を超えないように極低周波の成分 をしゃ断するように構成されている。 した分をピストンと振動台の結合部で吸収可能な機構にする 必要がある。そこで、本機では特殊な油圧式クランプ装置を 採用し、振動台を浮上させた後に、ピストンと振動台を油圧 により結合している。

3 加速度制御方式

本方式の特徴は、図2に示すように、加速度入力を積分し て加速度のほかに速度及び変位に対応する信号を算出し、こ れら3個の入力信号と制御回路へフィードバックされる振動



変位計 速度計 ピストン 油圧クランプ 浮上用油圧源 (差動トランス) (可動コイル) シリンダ

図2 加速度制御形地震シミュレータの構成 加速度制御形地震シミュレータの装置の構成を示す。

52



図3 加速度制御形地震シミュレータのブロック図 加速度制御形 地震シミュレータの入出力間の伝達関数を示すブロック図である。



図5 積分回路 今回の試作で採用した積分回路の構成を示す。



台の加速度,速度及び変位の3個の状態量によって,振動台 を制御するもので,ドリフトが少なく安定で応答の良い制御 系を実現している点にある。

図2に示す加速度制御形地震シミュレータの制御系全体の ブロック図は図3で示される。ただし、摩擦特性の非線形 性は無視し、サーボ弁の特性も線形で近似し、更に変位、速 度及び加速度に対する入力ゲインを1、F、Eとし、振動台 の変位、速度及び加速度に対するフィードバックゲインを1、 D、Cとしてある。

ここで,

 $AT = E\lambda$, $BT + C = E + F\lambda$, $T + D = F + \lambda \cdots (1)$ となるように, C, D, E, Fを選べば, 加速度入力から振

動台の出力加速度までの伝達関数は,

 $1/(\lambda S + 1)$ (2) となる。

したがって、 λをできるだけ小さく選ぶことによって、安定 で応答の良い制御系を得ることができる。また、 図2の系で は変位のフィードバック ループがあるため、サーボ系として 定位性をも持っている。

以上のように、本制御方式では、周波数の低い範囲で変位 制御のループが優勢となり、周波数の高い範囲で加速度制御 の効果が大きくなり、応答性と安定性とを共に改善している。

次に,入力回路について,いま少し説明する。

アナログ,あるいはディジタルのいずれによらず,地震波やランダム波などの加速度波を直接積分すると,加速度波自



304 日立評論 VOL. 59 No. 4 (1977-4)

体に含まれるドリフト分,あるいは積分器自体のドリフトな どによって,積分結果はドリフトしてしまう。図4は,アナ ログ計算機で加速度波を直接積分した例であるが,ドリフト してゆく様子がよく分かる。

そこで、今回の試作では**図5**に示す回路を採用した。厳密 には信号 α と \ddot{r} との間に位相遅れを生ずるが、信号 α 中のドリ フト成分は取り除くことができる。しかも、信号 \ddot{r} 、 \dot{r} 及びrの間には位相遅れを伴わない積分関係が存在する。すなわち、 信号 α と \ddot{r} との間における波形のひずみが無視できる程度に 小さければ問題はない。信号 α と \ddot{r} との間のひずみを小さく するためには、積分回路の折点周波数を小さくすることが望 ましいが、あまり小さくするとドリフト分が取り除けなくな る。一般の地震波では、この折点周波数として0.1~0.5Hz が適当である。

折点周波数を0.1Hzとしたときの積分例を図6に示す。同 図中、上より加速度波の原信号 α 、積分回路の加速度波 \ddot{r} 、 その1回積分値(速度波に相当) \dot{r} 及び2回積分値(変位波に 相当)rである。これより、積分値のドリフトも、 α と \ddot{r} との 間の波形ひずみも小さいことが分かる。なお、制御回路へは、 \ddot{r} 、 \dot{r} 及びrの信号が送られる。

4 制御性能

54

本稿の加速度制御系では,前に述べたように(1)式に示した λの値が小さいほど応答は良くなる。すなわち, λの値が最 小になるように,パラメータの値を設定するのが最良である。 このような条件を満たすパラメータの値を理論的に算出する ことは可能ではあっても,各係数値の測定誤差,理論式の近 似誤差などを考慮すると,最終的には実際の応答をみながら 再調整する必要がある。そのためには,実際の応答において λの値が最小となる点を判断する手段が必要となる。



図7 加速度ステップ応答 加速度制御形地震シミュレータの加速度ス テップ入力に対する応答を示す。



(2)式によれば、 λ の値が小さいほど、ステップ応答の立上 り時間は短くなる。したがって、ステップ応答の立上り時間 によって応答性の良否を知ることができる。従来の変位制御 系でもステップ応答に着目して制御系の良否を判断する場合 もあったが、変位のステップ応答では速度及び加速度が飽和 してしまうために、加速度に対する応答を評価するには無理 がある。

そこで、本稿では、加速度のステップ入力に対する応答を もって、制御系の良否を判断するための一応の目安とした。 すなわち、この場合の入力と出力加速度との誤差面積をもっ て制御系の評価基準とし、それが最小となる点をもって最適 状態とした。

このようにして求めた最適状態における応答の幾つかを図

7~10に示す。

(1) ステップ応答

図7は、加速度のステップ入力に対する応答を示したもので、 上から入力加速度、振動台の加速度、速度及び変位を示している。この応答の立上り時間は約3msであり、出力加速度に 多少のノイズが認められるが、非常に良い応答を示している。 (2) 周波数特性

図8は、周波数応答を示したもので、横軸に加振周波数、 縦軸に入力加速度と出力加速度との振幅比をとってある。折 点周波数(振幅-3dBの点)は50Hzで、通常の電気油圧式振 動台の30~35Hzに比べて良い応答を示している。

(3) ランダム波応答

図9はランダム波入力に対する応答を示したもので、ラン

-81





(a)入力周波数成分 0 ~15Hz (b)入力周波数成分 0 ~30Hz (c)入力周波数成分 0 ~50Hz 図 9 ランダム波に対する応答 加速度制御形地震シミュレータのランダム波入力に対する応答を示す。



図10 地震波に対する応答 加速度制御形地震シミュレータの地震波入力に対する応答を示す。

ダム波信号は、ホワイト ノイズ発振器の出力を折点周波数可 変の低域通過フィルタを通して得たものである。同図で上が ランダム波入力、下が振動台の加速度であり、(a)は低域通過 フィルタの折点周波数を15Hz、(b)は30Hz、(c)は50Hzとし たときの結果である。これらより、周波数成分50Hzまでのラ ンダム波に対しては非常に良く応答できることが分かる。

(4) 地震波応答

図10は過去に記録された地震波を再現したもので、上の波 形が地震波入力、下が振動台の加速度を示している。(a)は、 過去に記録された地震のうち最大級のものとして有名なエル セントロ地震の再現で、その周波数成分は約5Hz以下であ る。また、(b)は信州大学で昭和42年に記録されたもので、比 較的高い周波数成分(10Hz近くの成分)まで含まれている。い ずれの場合も非常に良く加速度波形が再現されている。 以上,最適状態での応答の実測例を幾つか示したが,これ らのほか種々の地震波に対して試験した結果,いずれの場合 においても加速度波は十分な精度で再現されることを確かめ た。

回 実機への適用

ここでは、本研究の成果を東京大学生産技術研究所納め及 び電力中央研究所納めの振動試験機に適用した例について述 べる。それぞれの概略仕様は表2,3に示すとおりである。 図11は前者のエルセントロ地震波に対する応答で、図12は後 者のタフト地震波に対する応答である。両図とも、上の波形 が加速度の入力信号で、下が振動台の加速度である。

いずれの振動試験機においても,加速度は高い精度で再現されており,本稿の制御系は,実機でも効果を発揮している。

表 2	振動試験機の仕様	東京大学生産技術研究所納めの振動試験機の
主な仕	様を示す。	

表3 大形振動台の仕様 電力中央研究所納めの振動試験機の主な仕様 を示す。

項目	仕 様	項目	仕様
振 動 台 寸 法(mm)	2,000×1,500	振 動 台 寸 法(mm)	6,000×6,500
振 動 台 重 量(t)	3.1	振 動 台 重 量(t)	25
最大積載重量(t)	5	最大積載重量(t)	120
最 大 振 幅(mm)	±75	最 大 振 幅(mm)	±50
最大加振力(t)	4.7	最大加振力(t)	120
最 大 加 速 度(G)	±1.5(無負荷時)	最大加速度(G)	800(120 t 負荷時)
油 圧 源 容 量	210kg/cm², 180 <i>l</i> /min	油 圧 源 容 量	210kg/cm ² , 800 <i>l</i> /min

1s

図II 振動試験機の
 地震波に対する応答
 東京大学生産技術研究所
 納めの振動試験機の地震
 波入力に対する応答を示す。

55



図12 大形振動台の地震波 に対する応答 電力中央研究 所納めの振動試験機の地震波入力 に対する応答を示す。

結 言 6

電気油圧式地震シミュレータで、従来最大の課題とされて いた加速度波の再現に関して,理論及び実験の両面から検討 を加え、その実現が可能であることを確認した。

すなわち、加速度波を直接入力とする制御方式を考案し、 従来の振動試験機に比べて、使いやすく、応答性、安定性と もに優れた加速度制御形電気油圧式地震シミュレータを実現 ランダム波入力に対しては50Hzまで高精度で追従可能である こと,及び過去の地震の加速度波も十分な精度で再現できる ことを実験的に確認した。

更に、本研究の成果を、台重量3.1t及び25tの実機に適用 し,良好な結果を得た。

最後に、本研究の実機への適用に当たり、永年にわたり御 支援をいただいた東京大学生産技術研究所 工学博士 柴田教 授及び電力中央研究所土木技術研究所 工学博士 堤主任研究 員に対し、心からお礼を申しあげる次第である。

した。

具体的には、台重量1tの地震シミュレータを試作し、加 速度のステップ応答で立上り3ms(従来方式では変位のステ ップ応答だけしかできない), 周波数応答で折点周波数50Hz (従来は良くても30~35Hz,ただし-3dB点)を得るとともに

参考文献

1) 松崎, 平井:「電気油圧式振動試験機に関する研究(第2報, 加速度入力形地震シミュレータの開発)」,日本機械学会論文 集, 42, 353, p. 146 (昭46-1)



原子力プラント主要機器及び配管の 振動測定と解析 日立製作所 加賀万亀男・笠井洋昭 他3名 日本機械学会誌 79-689, 377(昭51-4)

原子力プラントの安全工学の一環として, 耐震問題が重要視されている。プラント各 部の耐震性を評価し, 合理的な耐震設計を 行なうための最も基本的な分野として、各 部構造の動力学的特性の把握ということが 挙げられる。

有限要素法をはじめとする最近の構造解 析の分野での進歩により,理想化された系 での構造解析はほぼ問題なしに行なえる域 に達した。残された重要な問題は、実機の 境界部や結合部の剛性,及び非線形特性を 持つ部分の非線形パターンの正確な把握で あると考える。このことは、特にプラント などの大形構造物で問題になる場合が多く, 実測値と計算値に大きな差が生ずる原因と なり得るものである。

ここでは、原子力プラントの主要機器, ある4本の組みについて、大気中及び水中 その要因を究明して、より正確な解析を行 配管を取り上げ、実機及び模型を用いた振 のそれぞれの場合の振動実験を行なうとと なう方法と, 誤差をある種の不確定さから 動実験の結果と解析結果を示すとともに, くるものとして偏差計算を付け加えて解析 上記の問題点に対する検討結果について述 もに、解析方法について検討した。 する方法とがあり、これらについて検討した。 原子力プラントには多数の機器、配管が べた。 56

原子力プラントの格納容器には幾つかの 種類があるが,最近は形状が単純化される とともに、大形化の傾向にある。この種の 格納容器では, 地震時に付加質量の影響に よる高次振動の発生の可能性があること, また、はりタイプの振動については理論値 と実験値とに大きな差があることなどが指 摘されている。格納容器模型の振動実験で は、これらの問題点を更に詳細に検討する 目的で行なったものである。

BWR (沸騰水型原子炉)に使用される燃 料は,燃料集合体と呼ばれる細長い角筒 (内部に燃料棒が49本正方配列されている) が基本要素になっていて、これが狭いすき まを保って数百本配置されており, 全体が 冷却水に没している。

ここでは、 燃料集合体の群の最小単位で 構造解析の誤差に対する考え方としては,

あるが,設計時にはそれぞれに対して耐震 上の検討がなされる。また,重要なものに ついては、これらの検討結果の妥当性を確 認する目的で,施工途上若しくは完成時に 何らかの形で振動測定が行なわれる。

ここでは、例として500MWクラスのBWR の炉内構造物及び再循環系配管の振動測定 結果について述べた。

次に構造物の振動解析で, 誤差を生ずる 要因として「材料のばらつき,製作誤差, 解析モデル化の悪さ,系の非線形性,計算 誤差」がある。これら要因のうち、材料の ばらつきや製作誤差による影響は比較的小 さいが、境界及び結合部に対する計算のモ デル化の悪さや,これらの部分の非線形性 による影響は大きい。