

超大型三次元地震震動台の 動的シミュレータの開発

梶井紳一郎¹・安田千秋²・前川明寛²・奥田幸人³
原田孝幸⁴・小川信行⁵・柴田碧⁶

¹非会員 三菱重工業株式会社 高砂研究所 (〒676-8686 高砂市荒井町新浜 2-1-1)

²非会員 工博 三菱重工業株式会社 高砂研究所 (〒676-8686 高砂市荒井町新浜 2-1-1)

³非会員 工修 三菱重工業株式会社 高砂研究所 (〒676-8686 高砂市荒井町新浜 2-1-1)

⁴非会員 三菱重工業株式会社 下関造船所 (〒750-8505 下関市大和町 2丁目 16番 1号)

⁵非会員 工博 科技厅防災科学技術研究所 (〒305-8505 つくば市天王台 3丁目 1番地)

⁶非会員 工博 日本大学教授 (〒275-8575 習志野市泉 1-2-1)

The largest 3-dimensional vibration test facility are planning to build in Hyogo pref. The objectives of this facility are to investigate the process of the collapsing phenomena of the full-scale structure under the earthquake.

At the design stage, it's impossible to make sure the performance without the numerical simulation. Therefore, the mathematical simulation model was accurately construct, and the simulation was performed. This paper is described the modeling method, the verified results of the simulation, and the results based on the condition of a collapsing phenomena of the full-scale building.

Key Words : Numerical Dynamic Simulator, Shaking Table, Hydraulic Actuator

1. 緒言

平成7年1月の兵庫県南部地震において、建物が倒壊するなどの大被害が生じた。これを契機に、構造物が破壊へ至る過程を解明するには従来の小規模モデル試験では耐震性の把握に限界があり、実規模モデル試験の重要性が高まってきた。

このような背景から、科学技術庁防災科学技術研究所では、構造物の破壊過程の解明・実証可能な大型三次元震動実験施設の建設を兵庫県三木市に計画しており、平成7年度より検討している。

本施設の主要部となる大型三次元震動破壊実験装

置の概念図を図-1に、また主な仕様を表-1に示す。本設備は従来の震動台設備の域を越えており未知な部分が多く、本設備の設計には、高精度な動的シミュレーションによる加振性能などの仕様確認や、入力地震波の再現性を検証することが不可欠である。

したがって、実大三次元震動破壊実験装置全体を対象とした、大規模な動的シミュレーションモデルの構築と各種性能の事前検証を行った。

本論文では、本装置の動的シミュレーションモデルのモデル化手法、モデルの妥当性、さらに破壊実験の対象とされる構造物を搭載した場合の加振能力を検証した結果について述べる。

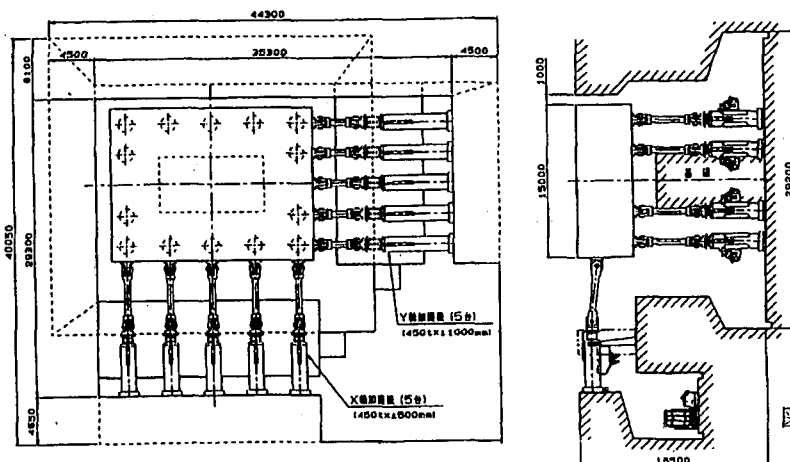


表-1 震動実験施設の仕様

	水平		上下
	X	Y	Z
最大加振力	12000kN		
テーブル寸法	20m×15m		
最大ストローク	±0.5m	±1m	±0.5m
最大速度	1.3m/s	2m/s	0.7m/s
最大加速度	0.9G	0.9G	1.5G

図-1 大型三次元震動破壊実験装置の構成概念図

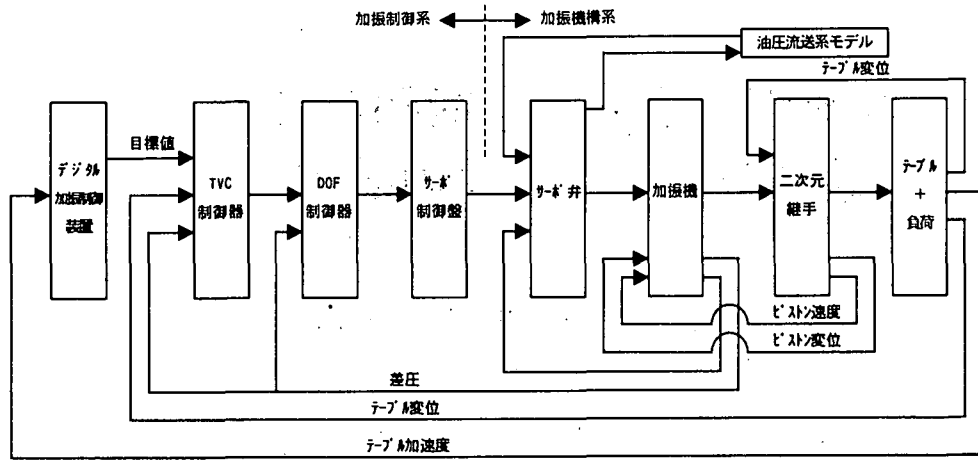


図-2 動的シミュレータの構成概念図

2. 動的シミュレータのモデル化

シミュレータの構成概念を図-2に示す。本シミュレータは加振制御系、加振機構系および油圧流送系で構成される。

(1) 加振制御系モデル

a) デジタル加振制御装置

ここでは、本装置を最前段にモデル化しており、入力補償制御およびリアルタイム制御からなる。

b) TVC制御器

テーブル姿勢の目標値と各々のフィードバック値、および各加振機の差圧を入力とし、フィードフォワード、フィードバック制御を行う。

c) 自由度変換器

TVC制御器が出力したテーブル姿勢に関する指令を、各加振機への指令値に変換する。

d) サーボ制御盤

作動油の圧力/流量非線形の影響を改善するために、流量非線形化補償を行った。

(2) 加振機構系モデル

a) サーボ弁

サーボ弁動特性、零点ドリフト、オーバーラップおよび制御限界によるスレッシュホールド特性を考慮したモデル化を行った。(図-3)

b) マニホールド

マニホールド部の流量係数などを考慮した。(図-3)

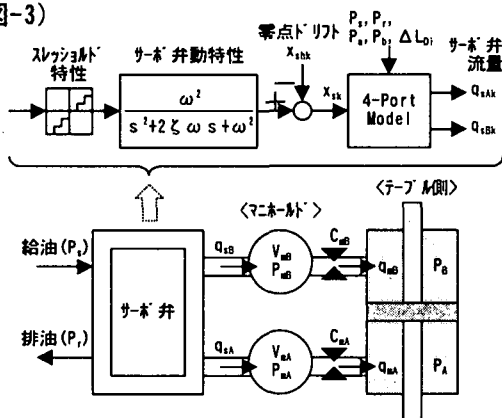


図-3 加振機の構成概念図

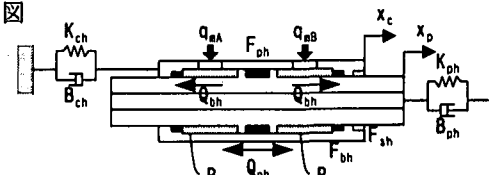


図-4 水平油圧加振機モデル

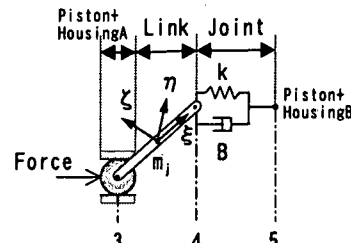


図-5 三次元継手の数学的モデル(簡略版)

c) 加振機シリンダ

シリンダ部は、シリンダ容積室の圧縮性、ケーシングに作用する摩擦特性を考慮した。(図-4)

d) 三次元継手

三次元継手は、ピストン、ハウジング、球面軸受、リンク継手で構成されており、ラグランジュ運動方程式に基づき定式化し、モデル化した。(図-5)

e) テーブル

モデルの低次元化をはかるために部分構成合成法(不拘束モード法)を適用したモデル化を行った。

(3) 油圧流送系モデル

油圧ポンプ、アキュムレータなどの要素モデルを1100個組合せ、管路を30000点に分割した脈動解析モデルを構築した。加振機構系との結合は、図-2に示すようにサーボ弁への供給圧力と消費流量とした。

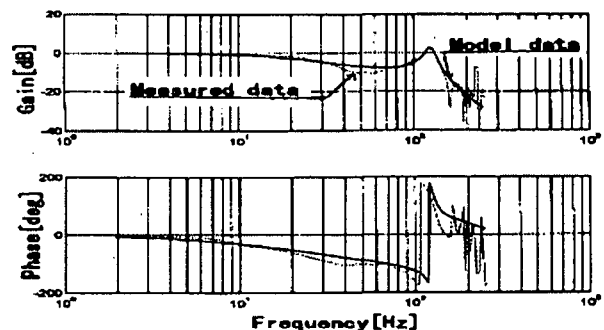


図-6 サーボ弁スプールの周波数応答

3. 動的シミュレータの検証

動的シミュレータの検証は、加振機構の機能・性能の検証を目的とした確認試験の装置を対象に、モデルを構築し行った。

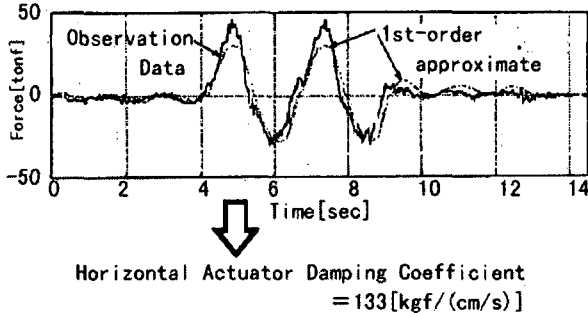
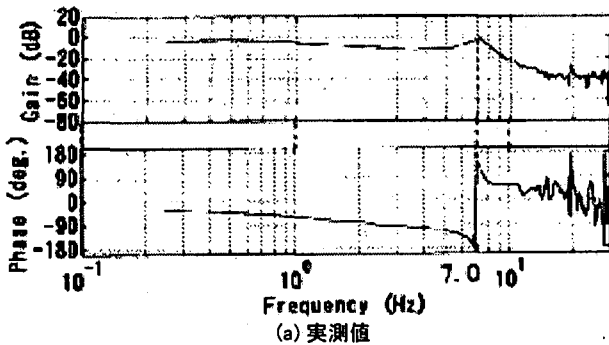
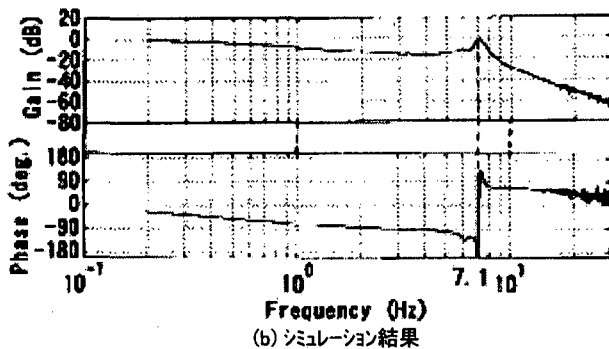


図-7 シリンダの減衰力



(a) 実測値



(b) シミュレーション結果

図-8 周波数特性

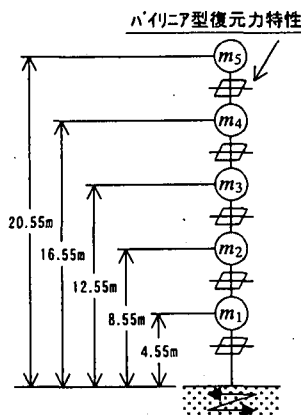


図-10 試験体モデル概念図

(1) 要素モデルの検証

a) サーボ弁

スプールの動特性は、図-6に示すサーボ弁単体試験結果に基づき、3次遅れ特性とした近似を行った。

b) 加振機

シリンダに発生する摩擦特性や粘性減衰特性は実測試験の結果に基づいた。これより、摩擦特性は差圧の関数とし、また加振機の粘性減衰特性(図-7)は、速度に比例する1次項のみとしたモデル化を行った。

c) テーブル

FEMモデルによる固有値解析結果と実測結果を比較することにより、モデル化の妥当性を確認した。

(2) 確認試験装置モデルにおける検証

実大三次元震動実験施設の確認試験装置を対象に得られた実測データとシミュレータの結果を比較したところ、両者の周波数特性はほぼ一致することを確認した。(図-8)

4. 試験体の破壊現象に着目したシミュレーション

試験体が搭載されると、震動台テーブルには試験体の転倒モーメントによってピッチングが発生し、目標波と完全に同じ波が観測されにくい。ここでは、転倒モーメントが本施設の仕様に対し、最大となる試験体を選定しシミュレーションを実施した。

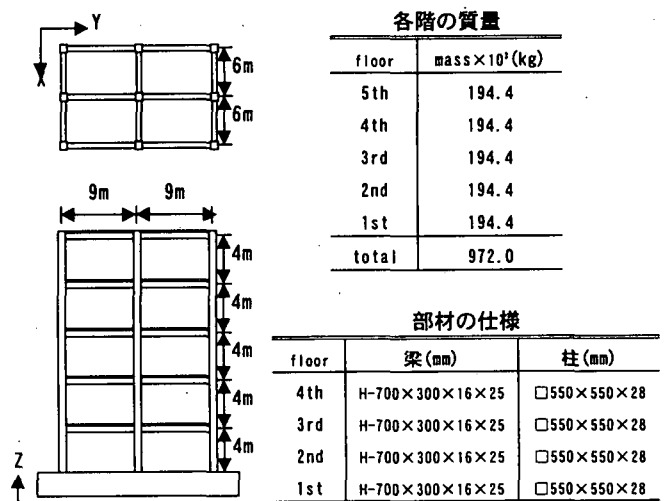
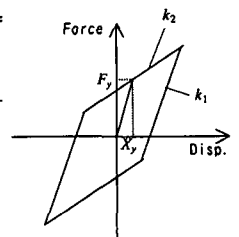


図-9 5階建て鉄筋構造物の試験体概念図

表-2 5自由度系モデルの諸元

Floor	Mass × 10 ² (kg)	k ₁ × 10 ⁸ (N/m)	k ₂ × 10 ⁶ (N/m)	F _y × 10 ⁶ (N)	X _y × 10 ⁻² (m)
5th	1.944	2.732	2.116	6.080	1.406
4th	1.944	2.981	3.084	6.080	2.040
3rd	1.944	2.994	2.740	6.080	2.084
2nd	1.944	3.053	2.236	6.080	2.044
1st	1.944	4.819	3.840	7.040	1.461



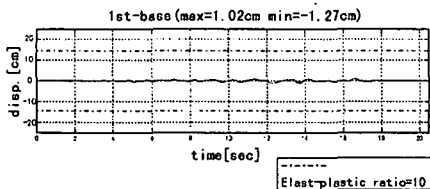


図-11 1階と基礎との相対変位 (制御無し)

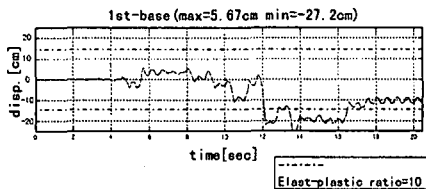


図-13 1階と基礎との相対変位 (入力補償制御)

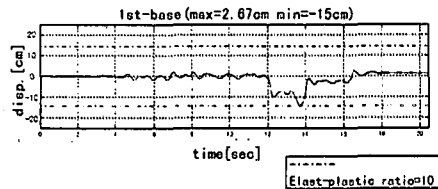


図-15 1階と基礎との相対変位 (リアルタイム制御)

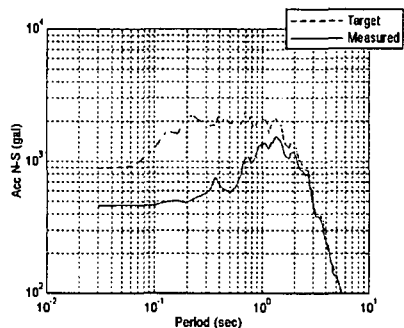


図-12 応答スペクトル (制御無し)

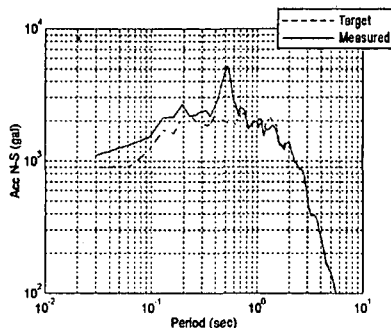


図-14 応答スペクトル (入力補償制御)

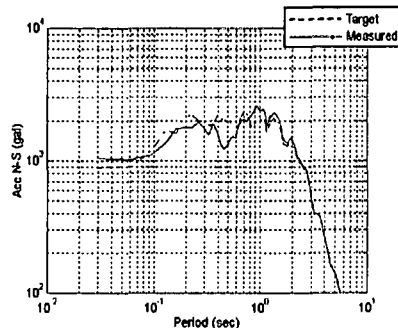


図-16 応答スペクトル (リアルタイム制御)

(1) 試験体

試験体モデルの概念図を図-10に示す。5階建て鉄骨造建物の各層の仕様は、18m×12m、高さは20mの諸元であり、各層間部材にはバイリニア型の復元力特性を有するものと仮定している。このような試験体モデルをせん断ばねのみを有する5質点のマスーばねモデルとして扱い、本シミュレータに適用した。図-10に試験体モデル概念図、また表-2に試験体モデル諸元を示す。FEMモデルとマスーばねモデルに対し、鷹取模擬波を入力した応答結果を表-3に示す。これより、両者の応答はほぼ同等であり試験体として妥当なモデルである。なお、試験体が破壊に至るか否かは、各層間の塑性率（最大層間変位/層間降伏変位）が10を超えたかどうかで判断する考え方を採用した。

(2) シミュレーション結果

シミュレーションに適用した地震波は、兵庫県南部地震時にJR鷹取駅で観測された水平成分をベクトル合成した波形を対象に、加速度応答スペクトルを包絡した波形（以下、鷹取模擬波と呼ぶ）である。

図-11に無補償時の試験体1階部分の時刻歴層間変位応答を示す。これより、1.27cm（層間降伏変位の0.87倍）の層間変位応答が得られたが、試験体は破壊まで至っていないと考えられる。

入力補償制御を行うために必要な震動台伝達特性

表-3 鷹取模擬波を入力した場合の応答比較

	FEM モデル	質点モデル
建屋最上階最大応答加速度 (gal)	1747	2001
最大転倒モーメント (N・m)	1.3×10^5	1.3×10^5
基礎-1階最大層せん断力 (kN)	9.32×10^3	7.44×10^3
基礎-1階最大層間変位 (m)	0.17	0.19
基礎-1階最大降伏変位 (m)	-	1.46×10^{-2}
最大塑性率	10.4	13.3

を把握した後、試験体が線形応答を示す範囲内で低レベル（1/4レベル）の入力補償制御シミュレーションを実施し、入力波を補償した。このように得られた補償波の4倍を最終波とした。図-13に入力補償制御を行った場合の試験体1階部分の時刻歴層間変位応答を示す。この結果から、27.2cm（層間降伏変位の18.6倍）の最大層間変位が得られており、試験体は破壊に至っていると考えられる。

図-15にリアルタイム補償制御を行った場合の試験体1階部分の時刻歴層間変位応答を示す。この結果から、15cm（層間降伏変位の10.3倍）の最大層間変位が得られており、試験体は破壊に至っていると考えられる。

5. 結言

世界最大の大型三次元震動実験施設の性能を事前検証することの可能な動的シミュレータモデルを構築するとともに、モデル化の妥当性が確認できた。また、試験体として5階建鉄骨造建物モデルを搭載したシミュレーションを行ったところ、入力補償、リアルタイム補償制御を行った場合に破壊現象が再現できることが確認できた。

参考文献

- 1) 梶井, 安田他: 超大型三次元地震震動台の動的シミュレータの開発 (その1: モデリング), JSME D&D'99講演論文集, Vol. A pp.165-168, 1999
- 2) 奥田, 安田他: 超大型三次元地震震動台の動的シミュレータの開発 (その2: 検証試験データを用いたシミュレータの検証), JSME D&D'99講演論文集, Vol. A pp.169-172, 1999
- 3) 梶井, 安田他: 超大型三次元地震震動台の動的シミュレータの開発 (その3: 試験体の破壊現象に着目した性能検証シミュレーション), JSME D&D'99講演論文集, Vol. B pp.475-478, 1999