

実時間数値シミュレーション を組合せた耐震実験

梶井紳一郎¹・安田千秋²・広江隆治³・山下敏夫⁴

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)

In the Seismic test, a shaking table is generally applied as a test facility. However, in case of that test model is a big size structure with non-linear characteristics, seismic tests have many problems in costs and keeping accuracy in making a reduced size model under a similarity law.

Therefore, we have just developed the seismic test method combined with real time numerical simulators as a countermeasure of the above mentioned problems.

In this paper, we show the new control designs and verified the effect on some simulation and experiment with multiple axis system.

Key Words : Real Time Numerical Simulator, Seismic Test, Stewart Platform

1. 緒言

構造物の耐震実験では、対象となる構造物全体を振動台に搭載して実験することが一般的である。しかし振動台の能力には限界があり、大型構造物の耐震実験には高縮尺比のハードウェアモデルの利用が不可避である。ところが、縮尺モデルにより実験規模に対する制約は解決できるが、現実には縮尺比が大きくなるとモデルの相似性を確保することが困難となる。また、一般にハードウェアモデルは高価であるという問題もある。このように大規模構造物の耐震実験は精度と費用の面で課題があり、簡便な実験技術の開発が望まれている。

最近、この課題を解決する手法として実時間数値シミュレーションと組合せた耐震実験手法が目ま

れている。従来の実験手法では、図-1に示すとおりの構造物全体を振動台に搭載していたのに対し、この手法では構造物の大部分を数値モデルに置きかえるので、ハードウェアモデルの製作コストを大幅に節約することができる。さらに、供試体为非線形支持されている場合や塑性領域に入る場合には縮尺モデルにする必要がないため、一様な実験精度が確保できるメリットがある。このように、数値モデルを利用した耐震実験手法によると、ハードウェアモデルのみに頼る従来法を補完することができ、今後の計算機能力の向上およびシミュレーションソフトウェアの進歩と共に発展すると考えられる。

本稿では、本手法の概要、多軸システム化とその検証結果について述べ本手法の有効性を示す。

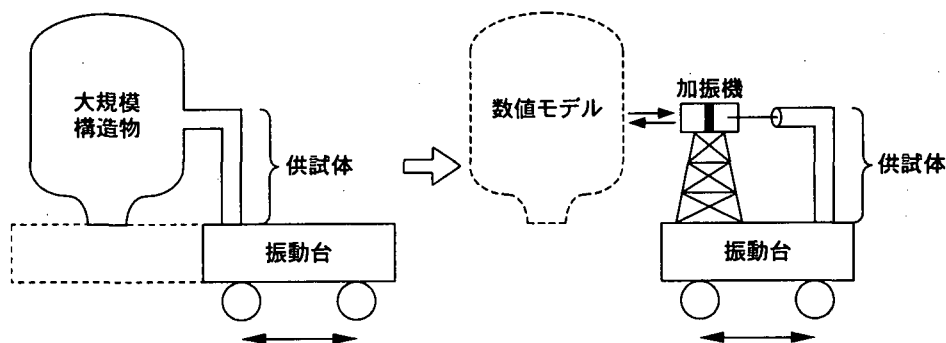


図-1 耐震実験手法の比較

2. 本手法の概要

(1) 制御システムとオリジナル構造物の等価性

数値モデルを用いた実験構成(疑似システム)とオリジナル構造物(オリジナルシステム)の等価性を確認することは重要であり、まずその条件を導出する。ハードウェアモデルと数値モデルの間に、図-2に示すように境界点上に微小質量 ε を持つ境界質量を考える。

そして、境界質量で数値モデルとハードウェアモデルが分割されていると考える。

境界質量の運動方程式は次式で表される。

$$\frac{1}{2}\varepsilon\ddot{z}_r + 2c(\dot{z}_r - \dot{y}_r) + 2k(z_r - y_r) = \phi_f \quad (1)$$

$$\frac{1}{2}\varepsilon\ddot{z}_p + 2c(\dot{z}_p - \dot{y}_p) + 2k(z_p - y_p) = \phi_p \quad (2)$$

ここに、 c は数値モデルとハードウェアモデルの境界が本来持つべき減衰行列、 k は同剛性行列、 z は境界点の変位ベクトル、 f は境界入力行列である。ハードウェアモデルと数値モデルは本来一体であるので、オリジナルの構造物と等価であるための必要条件として、境界での内力と変位の境界条件を満たさねばならない。

$$f_r + f_p = 0 \quad (3)$$

$$z_r = z_p \quad (4)$$

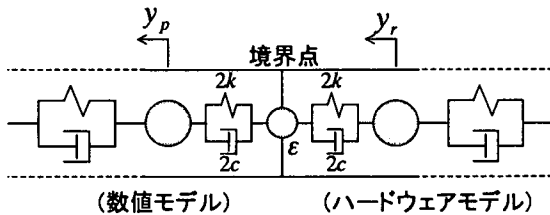


図-2 境界部のモデル

(2) 制御方式

本稿では、従来の制御方式の課題であるロバスト性の改善する制御方式を提案する。提案の制御方式では等価条件として満たすべき変位の境界条件(4)の残差

$$\delta := z_p - y_p \quad (5)$$

を制御量、油圧サーボ弁の開度司令 Q を制御入力とみなすところに特徴がある。そして、図-2に示すような δ についてのフィードバック制御系を設計する。図-3において z_p は補助的なフィードバックであり、従来法のように相殺型のフィードフォワード補償は行わない。

残差 δ が小さければ等価条件(4)が成立するのでより広い周波数領域にわたって δ を抑制する制御器がより良い制御器となる。フィードバック制御系に関する一般的な性質にしたがって、一巡伝達関数の交差周波数以下では $\delta \approx 0$ となるので、交差周波数が制御設計の指標であり、これが大きくなるように制御器を設計すればよい。従来の制御方式では相殺型の補償のみに頼っていたが、提案法では図-3に示す

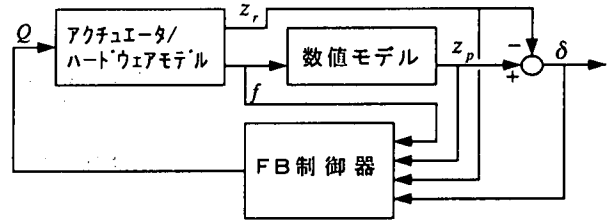


図-3 フィードバック制御系

ように数値モデルの速度や境界応力などの補助的なフィードバックにより位相補償による安定余裕の改善等が可能である。

本稿ではフィードバック制御に基づく制御手法を提案した。数値例では、次式のような簡単な制御則で提案法の効果を示す。

$$Q = K_\delta(s)\delta + K_v\dot{z}_p + K_f f \quad (6)$$

ここに、 $K_\delta(s)$ は一次の進相遅相補償器、 K_v と K_f は定数である。

3. 多軸システム化とその検証

(1) 制御装置

実時間シミュレーションと組合わせた多軸化対応耐震実験システムの構成概念図を図-4に示す。本システムでは、多軸化を実現するためにパラレルリンク機構の一つであるStewart Platformを油圧加振機6基で構成し、多軸境界模擬装置として適用した。油圧加振機への指令信号は、以下に示す2つのサブシステムを経て演算される。

a) 地震応答計算サブシステム

スードシステムは、基礎側からの地震加速度入力と試験体との取り付け点からの作用力の2つの入力を同時に受ける。したがって、スードシステムの応答は下式の運動方程式を解くことにより求める。

$$m_p\ddot{x} + c_p\dot{x} + k_p x = -m_p\ddot{z} + F \quad (7)$$

ここで、 m_p はスード構造物の質量、 c_p はスード構造物の減衰定数、 k_p はスード構造物のばね定数、 x はスード構造物の応答変位、 \ddot{z} は基礎側からの入力加速度、 F は試験体取り付け点からの作用力である。

b) 制御系演算サブシステム

ここでの運動演算は試験体側へ作用する所定の荷重/モーメントを実現するためにパラレルリンクを構成する加振機の荷重目標値を算出するいわゆる逆キネマティクスに加え、パラレルリンクを構成する各加振機の加振力から試験体側で実現される荷重の6軸成分を算出するいわゆる順キネマティクスの2種類である。演算式を以下に示す。

逆キネマティクス演算

$$f = (J^T)^{-1} F \quad (8)$$

順キネマティクス演算

$$F = J^T f \quad (9)$$

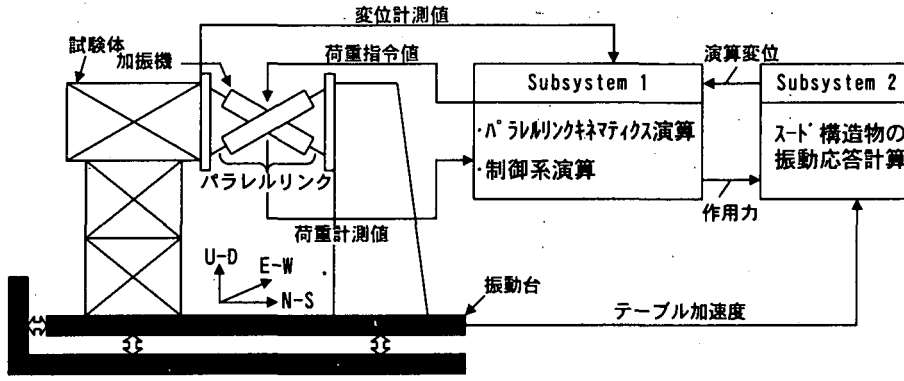


図-4 実時間数値シミュレーションと組合せた耐震実験システム概念図

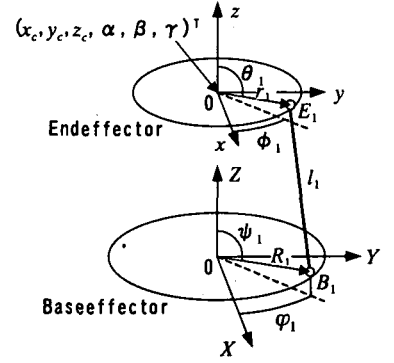


図-5 パラレルリンク機構の座標系

ここで、 f_i は各加振機荷重ベクトル、 F は試験体側に作用する6軸荷重ベクトル、 J は運動学で定義されるヤコビ行列である。ヤコビ行列の要素は図-5に示す座標系に従い以下で定義される。但し $\sin \alpha = s \alpha$, $\sin \beta = s \beta$, $\cos \alpha = c \alpha$, $\cos \beta = c \beta$ とした。

$$J_{i1} = l_{xi} \frac{1}{l_i}, J_{i2} = l_{yi} \frac{1}{l_i}, J_{i3} = l_{zi} \frac{1}{l_i} \quad (10)$$

$$J_{i4} = (l_{xi}((-sac\beta)e_{xi} + (-sas\beta\gamma - cac\gamma)e_{yi} + (-sas\beta\gamma + cas\gamma)e_{zi}) + l_{yi}((cac\beta)e_{xi} + (cas\beta\gamma - sac\gamma)e_{yi} + (cas\beta\gamma + sas\gamma)e_{zi})) \frac{1}{l_i} \quad (11)$$

$$J_{i5} = (l_{xi}((-cas\beta)e_{xi} + (cac\beta\gamma)e_{yi} + (cac\beta\gamma)e_{zi}) + l_{yi}((-sas\beta)e_{xi} + (sac\beta\gamma)e_{yi} + (sac\beta\gamma)e_{zi}) + l_{zi}(-c\beta)e_{xi} + (-s\beta\gamma)e_{yi} + (-s\beta\gamma)e_{zi})) \frac{1}{l_i} \quad (12)$$

$$J_{i6} = (l_{xi}((cas\beta\gamma + sas\beta\gamma)e_{yi} + (-cas\beta\gamma + sac\gamma)e_{zi}) + l_{yi}((sas\beta\gamma - cas\gamma)e_{yi} + (-sas\beta\gamma - cac\gamma)e_{zi}) + l_{zi}((c\beta\gamma)e_{yi} - (c\beta\gamma)e_{zi})) \frac{1}{l_i} \quad (13)$$

ベースの継手の配置を図-5に示すようにパラメータ R_i , ψ_i , ϕ_i を用いて極座標で表すと、ベースの継手の位置はXYZ座標系で以下のように表せる。但し今後 $i=1 \sim 6$ とする。

$$B_i = \begin{pmatrix} B_{xi} \\ B_{yi} \\ B_{zi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_i \sin \psi_i \cos \phi_i \\ R_i \sin \psi_i \sin \phi_i \\ R_i \cos \psi_i \end{pmatrix} \quad (14)$$

同様に、エンドエフェクタの継手の位置はxyz座標系で以下のように表せる。

$$e_i = \begin{pmatrix} e_{xi} \\ e_{yi} \\ e_{zi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_i \sin \theta_i \cos \phi_i \\ r_i \sin \theta_i \sin \phi_i \\ r_i \cos \theta_i \end{pmatrix} \quad (15)$$

次にXYZ座標系を基準にxyz座標系の原点の位置を x_c , y_c , z_c とし、姿勢をX-Y-Z固定角で記述するエンドエフェクタの位置/姿勢を表すベクトルは $x = (x_c, y_c, z_c, \alpha, \beta, \gamma)^T$ となる。ここで、 γ , β , α はそれぞれxyz座標系をX軸、Y軸、Z軸回りの順での回転角を表す。いまベクトル X_c , 行列 T を以下のように定義する。

$$X_c = \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$T = \begin{pmatrix} cac\beta & cas\beta\gamma - sac\gamma & cas\beta\gamma + sas\gamma \\ sac\beta & sas\beta\gamma + cac\gamma & sas\beta\gamma - cac\gamma \\ -s\beta & c\beta\gamma & c\beta\gamma \end{pmatrix} \quad (17)$$

このベクトル X_c , 行列 T を用いると、エンドエフェクタの継手の位置 e_i はXYZ座標系では次式となる。

$$E_i = T e_i + X_c \quad (18)$$

6本のアクチュエータの長さをベクトルを用いて $l = (l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)^T$ と表すとすると、 i 番目のアクチュエータの長さ l_i はそれぞれ i 番目のエンドエフェクタの継手 E_i とベースの継手 B_i の距離であり、

$$l_i = \sqrt{l_{xi}^2 + l_{yi}^2 + l_{zi}^2} \quad (19)$$

と表せる。但し、 $l_{xi} = E_{xi} - B_{xi}$, $l_{yi} = E_{yi} - B_{yi}$, $l_{zi} = E_{zi} - B_{zi}$ である。

本システムでは、図-6に示すとおり以下の2種類のフィードバック制御系で構成される。

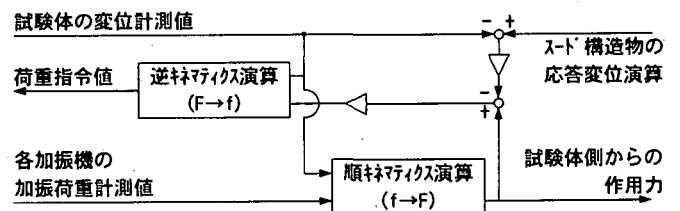


図-6 制御系構成図

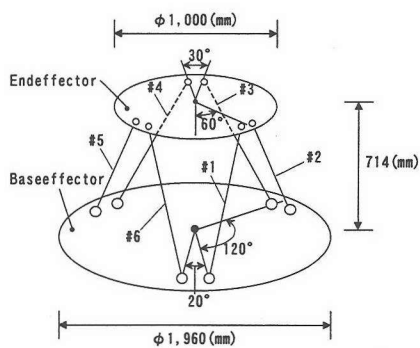


図-7 多軸境界模擬装置概念図

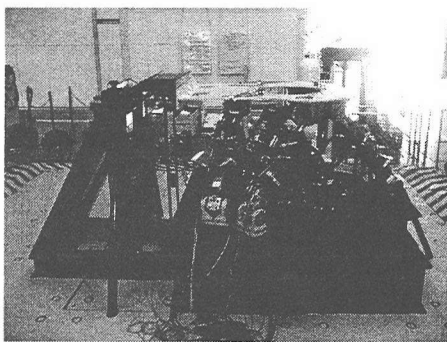


図-8 試験装置

荷重フィードバックループ

本フィードバックループでは、加振機への荷重指令信号を受けて、荷重目標値に加振機が正確に追従するようにサーボ演算を行う。この時、荷重フィードバックゲインは、試験体負荷特性によって生じる油柱共振振動数のピークを抑えるように設定することが可能である。

変位フィードバックループ

ここでは、スード構造物の応答変位と試験体応答変位の相対変位に仮想ばねに相当するゲインを掛けた荷重信号がフィードバックされる。つまり、制御量を相対変位とするフィードバック制御系であるため、仮想ばねに相当するゲインを適切に設定することによって、所定の制御帯域を確保することができる。

なお、各サブシステムは制御演算による遅れ時間をできるだけ小さくするようにDSP(Digital Signal Processor)を組合わせた並列演算処理を採用しており、サンプリング周波数は1.2KHzで実行した。

(2) 多軸境界模擬装置および試験体

図-7に多軸境界模擬装置の概念図を示す。また表-1には本装置の仕様を示す。本装置は、6軸境界(並進3成分、回転3成分)が模擬できるように油圧加振機6本で構成された平行リンク機構である。

試験装置概念を図-8に示す。試験体は、片持ち梁としたI型鋼およびその頂部にH型鋼を載せており、減衰比が調整可能なようにH型鋼には防振ゴムで支持する構成とした。なお、試験体として考慮した自由度はX、Yの水平並進2自由度である。また、多軸

表-1 多軸境界模擬装置の仕様

変位 及び 回転角	X(mm)	±81
	Y(mm)	±74
	Z(mm)	±65
	γ (deg)	-8.6/+9.2
	β (deg)	-8.0/+9.0
	α (deg)	-7.2/+7.6
荷重 及び モーメント	F_x (KN)	±18
	F_y (KN)	±18
	F_z (KN)	±44
	F_r (KN·cm)	±1.0e6
	F_θ (KN·cm)	±1.0e6
	F_ϕ (KN·cm)	±1.7e6

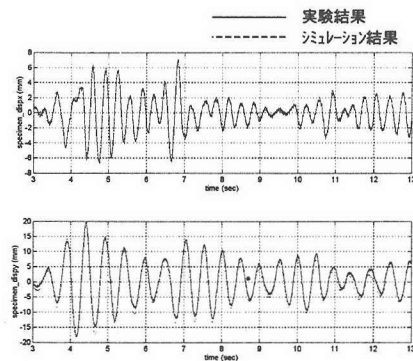


図-9 試験体の応答変位

表-2 スード構造物および試験体諸元

諸元	方向		スード構造物部分	
	X	Y	X	Y
質量(kg)	3.3×10^4	1.8×10^4	255	255
減衰定数(Ns/mm)	32	29	0.3	0.45
ばね定数(N/mm)	1.2×10^4	6.0×10^3	106	63
固有振動数(Hz)	3.0	2.0	3.25	2.5
減衰比(%)	2.6	2.8	2.9	5.6

境界模擬装置のエンドエフェクタは試験体頂部のH型鋼にボルト結合することによって装置全体を構成した。表-2にスード構造物および試験体の諸元を示す。

(3) 実験結果

試験装置全体を振動台に搭載し、振動台テーブルに地震波を入力した加振を行い、本システムの性能を検証した。入力にはEl-Centro波を用い、水平2軸同時加振を行った。

図-9に地震波入力時の試験体変位応答結果を示す。本図には、試験体およびスード構造物全体系の地震応答解析を行った結果を破線で示しているが、両者は良く一致していることがわかる。これより、本システムの性能を確認することができた。

4. 結言

本稿では、実時間数値シミュレーションと組合せた耐震実験システムについて、その多軸化装置を用いた実験により、ここで提案した制御手法の有効性を確認した。

参考文献

- 1) 広江, 梶井他: 実時間数値シミュレーションと組合せた耐震実験における制御設計の検討, JSME D&D'99講演論文集, Vol. A pp.471-474, 1999
- 2) 梶井, 広江他: 実時間数値シミュレーションと組合せた耐震実験における制御技術の検討(その2: 多軸システム), JSME D&D'99講演論文集, Vol. B pp.63-66, 1999