

振動台用試験体の同定及び制震実験

裏 起煥*・鈴木 祥之・李 恵**・山本 雅史***

*京都大学大学院工学研究科

**ハルピン建築大学

*** (株) 竹中工務店

要旨

大地震を対象としたアクティブ制震システムの開発のため、本研究では振動台用試験体を利用して、同定実験および制震実験を行った。試験体モデルの同定においては、入出力データに基づいて状態空間を直接推定する部分空間法を採用している。また、制震実験においては、内部平衡実現に基づいた低次元化手法により、振動台試験体のモデル化を行った。LQ 制御則および H^∞ 混合感度制御則を採用し、低次元化による高次モードの安定性と 1 次モードを含む低次モードへの制御効果を実験的に確認した。

キーワード：同定実験、制震実験、アクティブマスダンパー、部分空間法、低次元化、内部平衡実現、LQ 制御則、 H^∞ 混合感度制御則

1. はじめに

地震時における建物の応答を抑制（制震）し、建物の構造安全性のみならず居住者の安全確保、心理的不安の緩和、更には財産の保全にもつながる制震構造が最近注目を浴びており、特に大地震にも有効な制震システムの開発は重要かつ緊急の課題になった。このため、筆者らは鋼構造実大試験架構の同定実験および各種の制御則による制震実験に関する研究を行って来た。これらの実大試験架構を利用した制震実験に加えて、地動入力の影響を考慮するために、振動台を用いて、各種制御則による建物モデル試験体の制震実験を行っている。

本研究では振動台用試験体の同定ならびに LQ 制御則および H^∞ 制御則による制震実験に関して主に述べる。同定においては、入出力データに基づいて簡単にシステムの動特性を推定する部分空間法を採用し、構造物系にも有効に適用し得ることを示す。また、制震

実験においては、構造物の 2 次モード応答も積極的に制御することを目標として、内部平衡実現に基づいた低次元化方法により、試験体を 2 自由度系にモデル化して、最適フィードバック制御アルゴリズムによる制震実験を行った。また、制御対象のモデル化に従う不確実さおよび外乱による影響を低減化し、安定的な制御を行うため、 H^∞ 制御則による制震実験を行った。

2. 実験装置

本実験は、京都大学防災研究所の電気・油圧サーボ方式の振動台を用いて行った。テーブルのサイズは 5.0m×3.0m であり、載積可能重量は 15tonf である。

振動台上に設置する制震実験用の試験体は、H 型鋼梁フレームと鋼製ウェートからなる総重量約 12tonf の 5 層構造物である。柱部は、高層ビルの様に長周期振動特性を持たせ、また各層の変位応答を大きくするために、各層に 4 個の積層ゴム（水平剛性 68kg/cm）

を配置している。Fig.1 に制震実験用試験体の形状を示す。

制震装置としては、操作性・信頼性の面で優れている AMD (アクティブ・マスダンパー) を利用している。AC サーボモータによりボールネジを介して重りを直進駆動させる方式の AMD を長辺方向と短辺方向に各々 1 基を最上部 (以下 6 階) に取り付け、試験体の振動応答を制御する。Fig.2 に AMD の構成を、Table1 にその諸元を示す。また、AMD の重錘、振動台床および試験体の各階にサーボ型加速度計を設置し、制御用または計測用に利用している。制御アルゴリズムの開発においては MATLAB/SIMULINK を用いている。

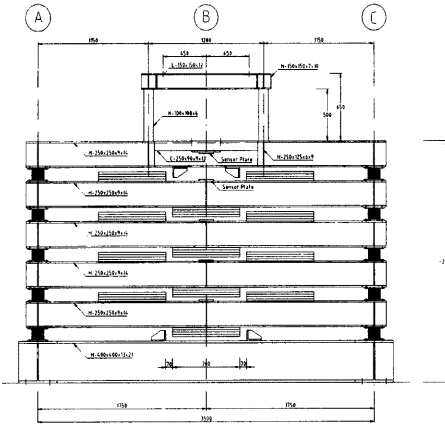


Fig.1 Specimen Structure

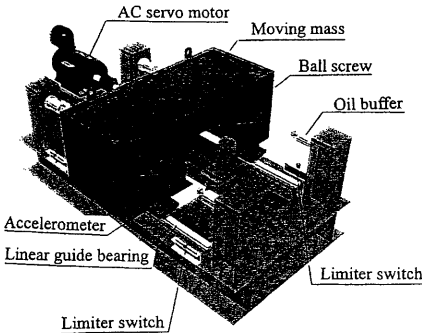


Fig.2 Configuration of AMD

Table 1 Specification of AMD

Electric power	3.7kW
Auxiliary mass weight	200kgf
Maximum control force	300kgf
Maximum stroke	±300mm

3. 試験体の同定実験

建築構造物の地震応答制御を行うには、構造物の振動特性を把握する必要がある、その精度によって一般に地震応答制御の効率や安定性が左右されるので、まず、精度良い構造物パラメータの同定が要求される。本研究では、入出力データから簡単にシステムを同定することが可能な部分空間法を採用し、ランダム波加振および地震波加振実験によるデータに基づいて試験体を同定する。その結果を Sweep 波加振実験および自由振動実験に基づく従来の古典的な方法による同定結果と比較する。

3.1 部分空間法による試験体同定

0.2Hz から 5Hz までの成分を持つランダム波を作成して振動台によるランダム波加振実験を行い、また、4 つの地震波形 (El-Centro NS 70gal, Taft NS 50gal, Hachinohe NS 70gal, JMA Kobe NS 50gal) を入力とする加振実験を行い、その入出力データに基づいて、部分空間法による試験体同定を行った。

まず、入力データ $u_k \in R^m$ 、出力データ $y_k \in R^l$ を用いて、以下のような離散時間状態空間モデルを考える。

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \quad (1)$$

$$y_k = Cx_k + Du_k + v_k \quad (2)$$

ここで、 $x_k \in R^n$ は状態ベクトルを表す。また、 $v_k \in R^l$ は観測雑音、 $w_k \in R^n$ はシステム雑音である。 v_k および w_k を平均値 0 のガウシアン白色雑音と仮定する。 x_k の線形最小分散推定値を \hat{x}_k とすれば、イノベーション過程の定義から次式を得る。

$$\hat{x}_{k+1} = A\hat{x}_k + Bu_k + \Gamma e_k \quad (3)$$

$$y_k = C\hat{x}_k + Du_k + e_k \quad (4)$$

ここで、カルマンゲインを K として $\Gamma = KA$ であり、 e_k はイノベーション過程と呼ばれる平均値 0 の白色雑音である。

部分空間法は式(1)と式(2)によって表されたモデルに対する同定、すなわち、入出力データからシステム行列 A 、 B 、 C 、 D およびカルマンフィルタゲイン K

を推定することである。計算は、MATLAB の System Identification Toolbox を使用した。

ランダム波および地震波加振実験から観測された振動台の加速度を入力として、試験体各階の加速度を出力として同定解析を行った。ランダム波加振実験の観測データから同定された試験体モデルの各階伝達関数を Fig.3 に、El-Centro 地震波加振による伝達関数は Fig.4 に示す。また、各加振実験によって推定された各々のシステム行列 A の固有値解析を行い、各次固有振動数および減衰定数を求めた。その結果を Table2 に示す。これらの結果は入力波の違いに影響されておらず、良く一致しており、それぞれ信頼性が高いことが分かる。ただし、ランダム波加振実験結果から推定された5次の減衰定数が他の実験結果と差があるけど、いずれの結果を用いて試験体をモデル化しても、制震実験および地震応答解析上において大きな差はないと思われる。

次に、各加振実験によって推定された試験体状態空間の妥当性を調べるため、モデルのクロス評価を行った。ランダム波加振実験により得られたモデルを用いて、JMA Kobe 波加振実験のシミュレーションを行い実験結果と比較した。クロス評価による比較結果を6階の加速度応答に対して Fig.5 に示す。また、El-Centro 波加振実験によって得られたモデルに対する JMA Kobe 波加振実験のシミュレーションと実験結果の比較は Fig.6 に示す。

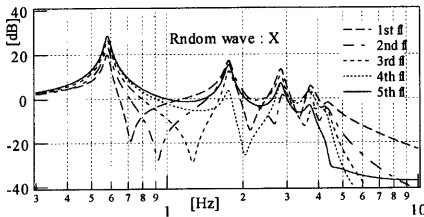


Fig.3 Transfer function obtained from random wave excitation

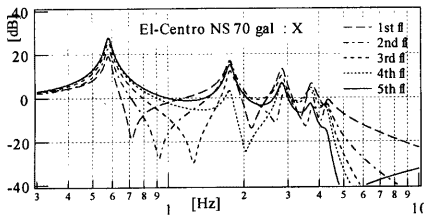


Fig.4 Transfer function obtained from El-Centro wave excitation

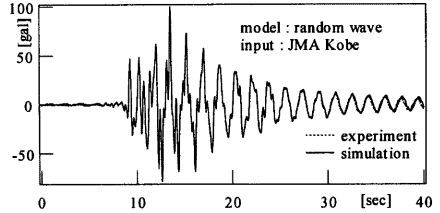


Fig.5 Cross verification for 6th floor

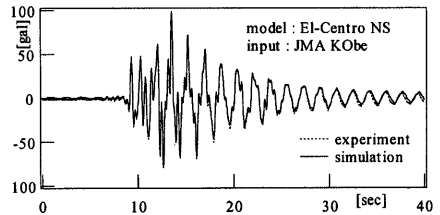


Fig.6 Cross verification for 6th floor

Table 2 Comparison of natural frequency and damping ratio

Mode		1st	2nd	3rd	4th	5th
Frequency (Hz)	Random	0.58	1.76	2.84	3.71	4.31
	El-Centro	0.58	1.76	2.84	3.71	4.29
	JMA Kobe	0.58	1.76	2.84	3.69	4.31
	Hachinohe	0.58	1.76	2.84	3.70	4.28
	Taft	0.58	1.76	2.84	3.70	4.27
Damp ratio (%)	Random	2.30	2.74	2.94	3.67	4.33
	El-Centro	2.51	2.85	2.97	3.21	3.11
	JMA Kobe	2.53	2.76	2.97	3.25	3.43
	Hachinohe	2.40	2.78	3.00	3.20	3.26
	Taft	2.44	2.82	3.00	3.22	3.32

3.2 古典的な方法による試験体同定結果の比較

以上の部分空間法に基づいた同定結果を、従来行われている古典的同定方法による結果と比較し、その有効性を示す。本研究では、Sweep 波加振実験および自由振動実験による同定結果を利用した。

Sweep 波加振実験においては、予想される試験体の各次固有振動数を含む正弦波を低い振動数から高い振動数まで徐々に増加させながら振動台による加振を行った。また、反対のケースも行って、フーリエ解析により試験体の各次固有振動数を推定した。ここでは、0.3Hz から 5.0Hz までの、また、5Hz から 0.3Hz までの Sweep 波加振を行った。各階の加速度を観測してそのフーリエ解析結果を行い、入力波に対する各階の

伝達関数を求めた。Fig. 7 に長辺方向に対する伝達関数を示す。

Sweep 波加振実験から推定した各次の固有振動数で 60gal-100gal 程度に定常加振した後、振動台を急停止させることによって、試験体の自由振動実験を行った。観測された自由振動曲線から各次の固有振動数および減衰定数を推定した。1次モードに対する自由振動曲線を Fig. 8 に、4次モードに対する自由振動曲線を Fig. 9 に示す。Sweep 波加振実験および自由振動実験によって推定した各次の固有振動数と減衰定数を Table 3 に示す。

古典的同定方法による試験体の同定結果も部分空間法による同定結果と良く一致している。しかし、Sweep 波加振実験によって求めた伝達関数からは高次の固有振動数を区別することが、また応答スペクトル曲線から減衰定数を推定することが困難であった。自由振動実験においては、4次および5次モードの自由振動観測波形に1次と2次モードの成分が含まれているので、推定された減衰定数が小さくなっており、また、ある程度正確な推定値を得ることが困難であった。

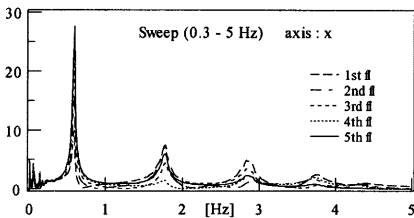


Fig. 7 Transfer func. obtained from sweep wave excitation

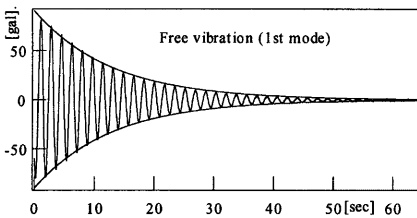


Fig. 8 Free vibration of 1st mode

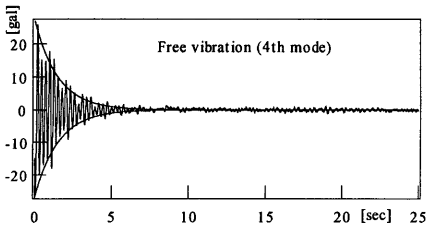


Fig. 9 Free vibration of 4th mode

Table 3 Frequency and damp. ratio estimated by classical identification method

	Sweep wave	Free vibration	
	Frequency (Hz)	Frequency (Hz)	Damping (%)
1st	0.59	0.59	2.1
2nd	1.77	1.77	2.6
3rd	2.83	2.88	2.8
4th	3.73	3.75	2.8
5th	4.38	4.33	2.8

4. 試験体のモデル化および検証

以上で述べた同定方法によって、各次の固有振動数および減衰定数が得られた。しかし、実際、地震応答解析を行うためには試験体を数式でモデル化する必要がある。通常、建築構造物では質量マトリクス、減衰マトリクスおよび剛性マトリクスを用いて運動方程式が表現されるため、これらを求める。その際に用いる固有振動数および減衰定数は El-Centro 波加振実験の観測データに基づいた部分空間法の推定結果を用いる。

モデルとして各スラブに質量を集中させた 5 質点系のモデルを考える。まず、試験体を部材レベルで積算し質量マトリクス M_0 および剛性マトリクス K_0 を作成し、固有値解析によりモードマトリクス Ψ を求める。 M_0 の精度は高いと考え、質量マトリクスの真値 M として用いる。

$$M = M_0 \quad (5)$$

剛性マトリクス K および減衰マトリクス C は測定した各次の固有振動数および減衰定数に基づき、

$$K = M \Psi \text{diag}(\omega)^2 \Psi^{-1} \quad (6)$$

$$C = 2M \Psi \text{diag}(h) \text{diag}(\omega) \Psi^{-1} \quad (7)$$

として求める。ここで、 ω, h はそれぞれ Ψ に対応する順に固有円振動数、減衰定数を要素にもつベクトルである。また、 $\text{diag}(\cdot)$ はベクトルを対角マトリクスに変換する関数、 $(\cdot)^{-1}$ は逆行列を表す。

上述の手法によって求めた振動台用試験体モデルの妥当性を検証するため、地震波加振実験による観測データとモデルの地震応答解析によるシミュレーション結果を比較した。Fig. 10 に El-Centro 70gal 加振実験による観測値と試験体モデルの応答解析結果を 6 階加速度に対して比較している。また、Fig. 11 には Taft 50gal を入力した場合の実験観測値と数値解析結果を同じく 6 階加速度に対して比較している。実験結果と数値解

析結果が良く一致していることから、精度良いモデル化が行われたと判断される。

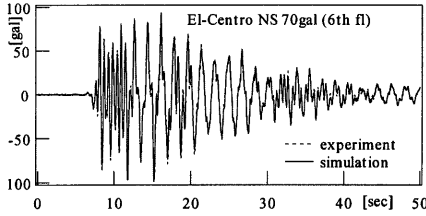


Fig.10 Acceleration comparison of 5th floor under El-Centro

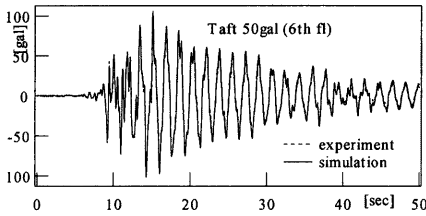


Fig.11 Acceleration comparison of 5th floor under Taft

5. 制震実験

5.1 LQ 制御則による試験体制震実験

現実に、構造物の地震応答を制御する場合、全層の状態量を観測することは、一般に困難である。また、建物の地震時挙動は、一般に低次のモードに支配されることが多い。このような理由から、構造物系を1自由度にモデル化してコントローラの設計が通常行われている。しかしながら、高層ビルにおいては、2次あるいは3次などの低いモードで地震動と共振する可能性があり、十分な制震効果が得られない場合がある。本研究では、内部平衡実現に基づき、試験体モデルを2自由度系に低次化し、最適フィードバック制御による制震実験を行った。

構造物系の状態空間表現は次の状態方程式と観測方程式によって表す。

$$\dot{X} = AX + Bu + Ew \quad (8)$$

$$Y = CX \quad (9)$$

ここで、 X , u , w , Y は、それぞれ状態ベクトル、制御力、外乱、観測量であり、 A , B , E , C はシステム行列である。2つのリアプノフ方程式(10)と(11)を考え、可制御グラミアン W_c と可観測グラミアン W_o を座標変換し、(12)式の内部平衡型にする座標変換マト

リクス T を求める。

$$AW_c + W_c A^T + BB^T = 0 \quad (10)$$

$$W_o A + A^T W_o + C^T C = 0 \quad (11)$$

$$\bar{W}_c = \bar{W}_o = \Sigma \quad (12)$$

$$\bar{W}_c = T^{-1} W_c T^{-T}, \quad \bar{W}_o = T^T W_o T$$

ここで、 Σ^2 は積 $W_c W_o$ の特異値で(10)式のように定義される。

$$\Sigma^2 \equiv \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_n^2), \quad \sigma_1^2 \geq \dots \geq \sigma_n^2 > 0 \quad (13)$$

座標変換マトリクス T により状態ベクトル及びシステム行列を変換し、内部平衡システムの状態方程式と観測方程式を求める。

$$\dot{Z} = \bar{A}Z + \bar{B}u + \bar{E}w \quad (14)$$

$$Y = \bar{C}Z \quad (15)$$

$$X = TZ, \quad \bar{A} = T^{-1}AT$$

$$\bar{B} = T^{-1}B, \quad \bar{C} = CT, \quad \bar{E} = T^{-1}G$$

$\sigma_r \gg \sigma_{r+1}$ なる条件の下で、内部平衡システムを分割し、構造物系を r 次に低次化する。

$$\dot{Z}_1 = \bar{A}_r Z_1 + \bar{B}_r u + \bar{E}_r w \quad (16)$$

$$Y = \bar{C}_r Z_1 \quad (17)$$

観測された状態変数 X_o と低次元化モデルの状態変数 Z_1 の数が等しい場合には X_o によって直接 Z_1 を求めることが可能である。しかし、観測された状態変数の数が少ない場合には、カルマンフィルタにより低次元化モデルの状態変数 Z_1 を推定する。座標変換された状態変数 Z において、 $r+1$ 次以下の状態変数は対応する特異値 σ の値が小さいため、次の式が近似的に成立する。

$$\begin{bmatrix} Z_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} IT_{11} & IT_{12} \\ IT_{21} & IT_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_o \\ X_{no} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} Z_1 &= (IT_{11} - IT_{12} \cdot IT_{22}^{-1} \cdot IT_{21}) X_o \\ &= IT_r \cdot X_o \end{aligned} \quad (19)$$

ここで、 IT は座標変換マトリクス T の逆行列である。

低次元化モデルを対象とした制御において、最適な制御力は次のように求められる。ここで、 P_r は低次元化モデルの Riccati 方程式の解である。

$$u = -R \cdot \bar{B}_r \cdot P_r \cdot IT_r \cdot X_o \quad (20)$$

本制震実験においては、AMDのストロークと速度、また6階および3階の相対加速度を積分した変位と速度を制御に必要な状態量として採用した。Taft 30galを入力した場合の制震効果を6階加速度応答に対してFig.12に、変位応答に対してはFig.13に示す。Fig.14には3階加速度応答の周波数領域における制震効果を示す。同じく、JMA Kobe 50galで加振した場合の制震効果を図Fig.15、Fig.16、Fig.17に示す。制御時と非制御時の比較から分かるように、加速度と変位において、Taft地震波加振の場合には約50%、JMA Kobe地震波加振の場合には約30%の制震効果が得られた。

試験体を2自由度系に低次元化することによる効果を調べるため、1自由度系に低次元化した場合と周波数領域において比較した。Taft 30galを入力して応答制御を行った場合に対して、3階加速度の周波数応答を用い、その比較をFig.18に、6階加速度周波数応答の比較はFig.19に示す。

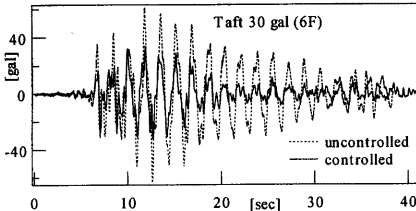


Fig.12 Comparison of acceleration responses of 6th floor

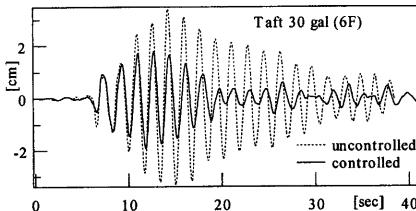


Fig.13 Comparison of displacement responses of 6th floor

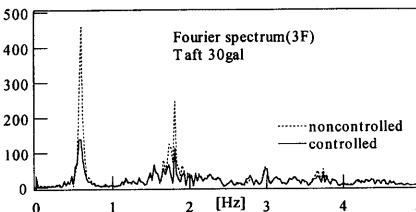


Fig.14 Comparison of acceleration responses of 6th floor in frequency domain

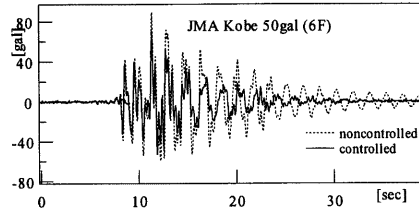


Fig.15 Comparison of acceleration responses of 6th floor

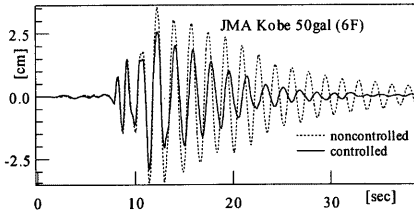


Fig.16 Comparison of displacement responses of 6th floor

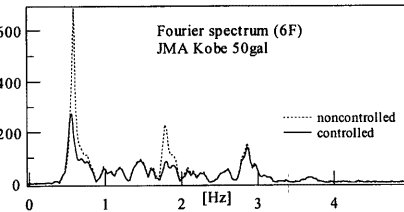


Fig.17 Comparison of acceleration responses of 6th floor in frequency domain

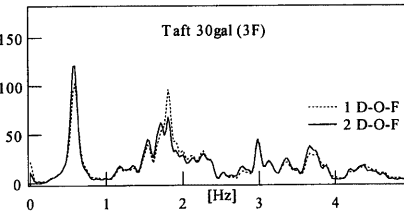


Fig.18 Comparison of reduced models in frequency domain

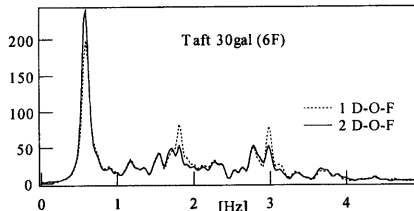


Fig.19 Comparison of reduced models in frequency domain

5.2 H[∞]制御則による試験体制震実験

構造物の地震応答を制御する際、モデルの誤差によって、または、低次元化により無視された高次モードによって、システムが不安定になる恐れがある。このようなスピルオーバー現象を回避し、安定的な制御を行うため、本研究では LQ 制御則に続いて、H[∞]混合感度制御則による制震実験を行った。本実験においても、試験体の低次元化を行い、全状態量を考慮する非低次元化モデルによる制震結果と比較して、その効果を示す。

実験に用いる H[∞]混合感度法のブロック線図を Fig.20 に示す。図の中の z_1 と z_2 は制御量、 $W_1(s)$ と $W_2(s)$ は重み関数、 $G(s)$ は一般化制御対象である。H[∞]混合感度問題の評価関数は(21)式のように、状態空間は(22)式のように定義される。

$$\left\| \begin{matrix} W_1(s)N(s) \\ W_2(s)M(s) \end{matrix} \right\| < 1 \quad (21)$$

$$\dot{X}_F = A_F X_F + B_F y \quad (22)$$

$$u = F(s)y \quad (23)$$

$$F(s) = C_F(sI - A_F)B_F \quad (24)$$

ここで、 $N(s)$ と $M(s)$ は感度関数であり、 $F(s)$ はコントローラーである。

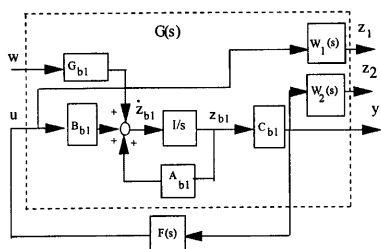


Fig. 20 Block diagram of H[∞] mixed sensitivity problem

実験に用いる重み関数は次のように定義した。

$$W_1(s) = \frac{0.005s + 0.005}{s^2 + 2.1s + 1000}$$

$$W_2(s) = \begin{bmatrix} \frac{3000s^2 + 188400s + 11831520}{12000s^2 + 495000s + 15550000} & 0 \\ 0 & \frac{5s^2 + 314s + 19700}{12000s^2 + 495000s + 15550000} \end{bmatrix}$$

H[∞]混合感度法による制震実験においては、重み関数により、低次モードの振動応答を低減することが可能であるので、振動台用試験体を 1 自由度系にモデル化した。制御に必要な状態量としては、AMD のストロークと速度および 6 階の変位と速度を利用した。

El-Centro 50gal を入力した場合の制震効果も 6 階変位応答に対して Fig.21 に、また、そのフーリエスペクトルに対しては Fig.22 に示す。Taft 30gal を入力した場合の制震実験結果は Fig.23 と Fig.24 に示す。次に、低次元化による影響を検討するため、試験体を 5 自由度系にモデル化して行った H[∞]制震実験結果と低次元化による実験結果を比較した。El-Centro 50gal 入力に対する 6 階の変位応答の時間領域における比較を Fig.25 に、周波数領域における比較は Fig.26 に示す。比較結果から分かるように、モデルを低次元化した場合の制震実験において、時間領域でも、また、周波数領域でも良い結果が得られた。その理由は、少ない状態変数により、むだ時間要素による影響が減少したからであると考えられる。

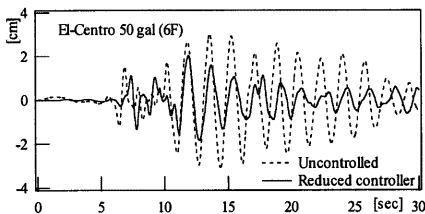


Fig.21 Comparison of displacement responses of 6th floor

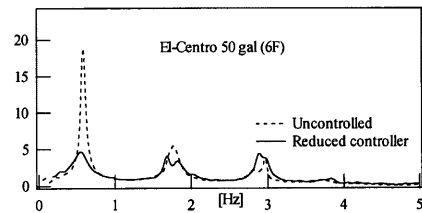


Fig.23 Comparison of acceleration responses of 6th floor in frequency domain

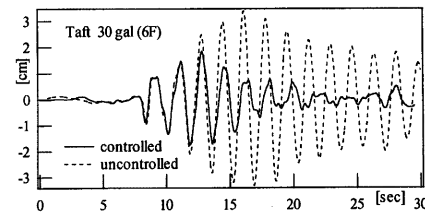


Fig.23 Comparison of displacement responses of 6th floor

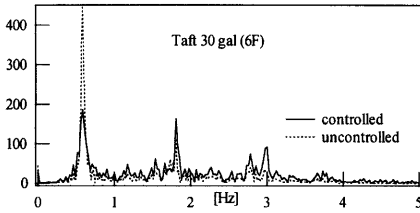


Fig.24 Comparison of acceleration responses of 6th floor in frequency domain

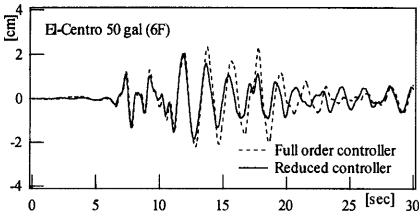


Fig.25 Comparison of reduced order model and full-order-model in time domain

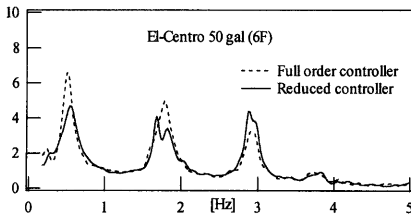


Fig.26 Comparison of reduced order model and full-order-model in frequency domain

6. おわりに

大地震にも有効に適用し得るアクティブ制震システムの開発のため、本研究では振動台用試験体を利用して、同定実験および制震実験を行った。試験体の同定においては、入出力データから簡単にシステムの状態空間を同定する部分空間法を適用しており、sweep 波加振実験および自由振動実験による同定結果と比較してその有効性を示した。また、部分空間法により推定された固有振動数と減衰定数を用いて試験体のモデル化を行った。推定されたモデルによる地震応答シミュレーション結果と地震波加振実験結果がよく一致していることから、モデルの妥当性が確認された。

制震実験は、LQ 制御則および H^∞ 制御則を採用して行った。LQ 制御則による実験においては、2次モードも積極的に制御するため、内部平衡実現に基づい

て試験体を2自由度系に低次元化した。その制震実験結果と1自由度系に低次元化した場合の結果を周波数領域で比較し、2次モードに対する制震効果を確認した。 H^∞ 制御則による制震実験においては、試験体を1自由度系に低次元化し、また、 H^∞ 混合感度法を採用して、高次モードでも安定的でロバストな制御を行った。

参考文献

- 鈴木祥之、玉木 利裕、山本 雅史、加賀谷 博昭、裴 起煥、荒木 時彦 (1997) : 鋼構造実大試験架構を用いたアクティブ制震実験システム、平成9年度日本建築学会近畿支部研究報告集、構造系、pp.133-136.
- 鈴木祥之、裴 起煥、山本 雅史、玉木 利裕、加賀谷 博昭、荒木 時彦 (1997) : 鋼構造実大試験架構の同定とLQ・LQG 制震実験、平成9年度日本建築学会近畿支部研究報告集、構造系、pp.137-140.
- 山本雅史、鈴木祥之 (1997) : 極配置に基づく鋼構造実大試験架構のアクティブ制震実験、平成9年度日本建築学会近畿支部研究報告集、構造系、pp.141-144.
- L. Ljung (1996) : System Identification Toolbox – For Use with MATLAB, The Math-Works Inc., chap.4, pp.66-68.
- H. A. Smith et al. (1996) : Modeling issues associated with vibration control of cable-stayed bridges subjected to multiple support excitation, 2nd international workshop on structural control, pp.509-520.
- F. Jabbari, W.E. Schmitendorf and J. N. Yang (1995) : H^∞ control for seismic-excited buildings with acceleration feedback, Engineering Mechanics, pp.994-1002.
- K. Nomami and H. Nishimura (1993) : Control performance for active structural control and benchmark problem, Proceedings of international workshop on structural control, pp.367-384.

Experimental Study on Identification and Seismic Response Control of Building Structure

Gi-Hwan BAE*, Yoshiyuki SUZUKI, Hui LI** and Masashi YAMAMOTO***

*Graduate School of Engineering, Kyoto University

**Harbin University of Civil and Architecture

***Takenaka Corporation

Synopsis

For the purpose of developing an active control system to be effective under large or severe earthquakes, identification and control experiments of specimen structure were conducted by using shaking table. Subspace identification method to estimate the state space of system directly from input-output data was used for identification of the specimen. In the control experiments, the specimen structure was modeled to one or two degree-of-freedom system using internal balanced realization theory. Particularly, LQ controller and H^∞ controller were adopted as control algorithms to control seismic responses.

Keywords : identification; seismic response control; active mass damper; subspace identification method; model reduction; internal balanced realization; LQ controller; H^∞ control mixed sensitivity theory