

2方向オンライン応答実験システムの開発 Development of Bi-Directional On-Line Computer Control System

高橋 孝二*
Koji Takahasi

要 約

構造物の動的応答性状を直接調べる振動実験法として、近年は振動台による振動実験やオンライン応答実験が行われている。その両者とも動的現象を十分な精度で再現できるようになったが、オンライン応答実験においては、これまでほとんど1方向入力の実験に限られ、立体架構への2方向入力やねじれ振動などの実験は振動台による実験に限られていた。そのため、振動実験では得ることのできない数々の特徴を持ったオンライン応答実験を、2方向入力へと応用することが期待されてきた。本報は、2方向オンライン応答実験システムの開発を試み、そのシステムの地震応答再現性の検証に行った1層立体架構について述べた。その結果システムの精度は、数値解析との比較において十分な整合性を得た。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. オンライン応答実験の基本的概念
- § 3. 2方向オンライン応答実験システム
- § 4. 1層立体鉄骨架構の実験結果
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

オンライン地震応答載荷実験（以下オンライン応答実験）は、コンピュータとアクチュエータをオンラインで結合し構造物の地震時応答をシミュレーションする手法

として、研究に幅広く利用されている。また振動台実験との比較において、動的現象を十分な精度で再現できると報告されている。しかし立体架構に対して2方向入力（ねじれも含めた1質点3自由度）のオンライン応答実験の適用例は、1990年加藤、山崎等の電気油圧式アクチュエータの使用による1層鉄骨架構の1軸偏心モデルに対する弾塑性実験¹⁾、また1991年西澤、内田等の立体架構に対するデジタル制御型機械式加力装置によるオンライン応答実験システムの開発などが試みられ²⁾その成果が報告されているが、既発表の研究はこれら数例だけにとどまり依然研究の余地を残している。

これまでのオンライン応答実験は平面架構を対象とした適用例が多く、また1方向入力にほとんど限られてきた。その理由として、1) 2方向入力を包含する実験へ

*技術研究所構造研究課

拡張すると、アクチュエータの位置変化や試験体の変位計測誤差が応答値に悪い影響を及ぼす。特に試験体の剛性が高い場合や非線形領域での大変形時には、それらの誤差を無視することができない。2) 1方向入力と違いアクチュエータの制御方向と試験体の移動方向が一致しないので、制御が複雑になる。3) 平面架構の多質点系同様、複数のアクチュエータを必要とするため精度良く実験を行うのは技術的に難しい。など、立体架構への適用が困難とされていた。しかし振動台実験では得ることのできない数々の特徴を持ったオンライン応答実験を2方向へと応用できれば任意方向の地動に対する構造物の応答挙動が再現でき、立体架構の耐震性(ねじれ振動)や柱部材の2方向入力など実験的な研究に大いに利用価値のあるものとなる。

本研究の目的は上述した種々の課題の解決を可能とした2方向オンライン応答実験システムの開発と、システムの地震応答再現性の検証として実施した、2方向地震力を受ける1層立体鉄骨架構の実験結果について述べる。

§ 2. オンライン応答実験の基本的概念

オンライン応答実験は以下の手順に従う。

一般に行われている質点系の地震応答解析と同様に、まず実験対象の構造物のモデル化を行う。建物質量を床部分に、集中させるとした質量 M と、柱の水平剛性に相当するバネ剛性 K からなる質点系モデルに置換し、このモデルに対する振動方程式(動的力の釣合式)を解くことによって、応答値を求める。以後、1質点系モデルについて述べる。1質点系モデルの振動方程式は(1)式のようになる。

$$M \cdot \ddot{x} + C \cdot \dot{x} + K \cdot x = M \cdot \ddot{x}_0 \dots (1)$$

ここに M , C , K はそれぞれ質量, 減衰係数, バネ剛性を表す。 \ddot{x} , \dot{x} , x はそれぞれ質点の応答加速度, 速度, 変位, そして, \ddot{x}_0 は地動加速度を表す。オンライン応答実験では(1)式の減衰を適切に仮定して直接積分法によって解く。この時通常の数値解析とは異なり, モデルの復元力特性を仮定しないで代わりに直接積分の各ステップにおいてアクチュエータから得た試験体復元力を(1)式の復元力項($K \cdot x$)に代入して次ステップの計算を進める。オンライン応答実験の概念を図-1に示す。すなわち, 対象とする地震波を非常に微小な時間間隔 Δt 毎にデジタル化し, 1) コンピュータでモデルの応答変位を計算する。2) 計算された応答変位をアクチュエータによって試験体に与え, 同時に復元力をコンピュータ内に

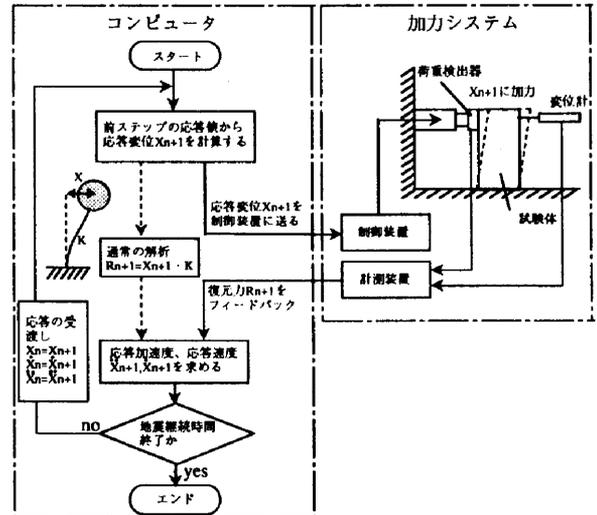


図-1 オンライン応答実験の概念

表-1 ハードウェアの仕様

・制御計測コンピュータ (日本電気製)	
CPU	i386 (20MHz)
	メモリ1.6MB
・アクチュエータ (鷺宮製作所)	
最大荷重	押135tf, 引100tf
最大変位	±300mm
最大速度	1cm/sec
変位検出器	±300mm, ±1.0%F.S.
荷重検出器	±100tonf, ±0.2%F.S.以内
・制御用変位計 (ソニマ*ネスケル社製)	
有効長	100mm
最小分解能	1ミクロン
・変換器	
A/D	12bit, 16ch
D/A	16bit, 2ch
・データロガー (東京測器)	
最大測定点数	1000点
サンプリング速度	500点/sec

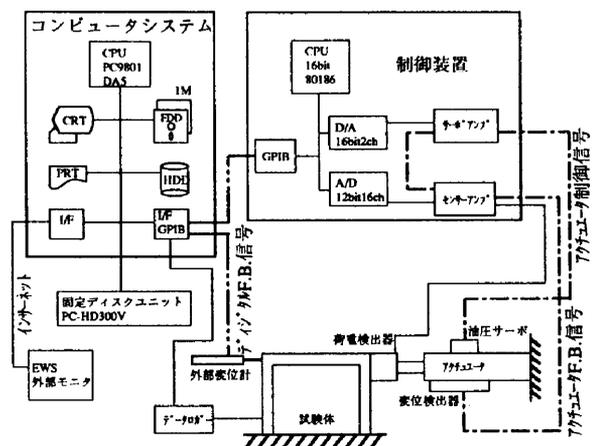


図-2 システムの概念図

フィードバックする。3) その復元力を用いて再び応答計算を実行する。この手順を繰り返すことによってモデルの地震応答が得られ、あたかも試験体が地震を受けた時のように挙動する。

§ 3. 2方向オンライン応答実験システム

3-1 実験装置の概要

オンライン応答実験システムの概要を図-2に、また各ハードウェアの仕様を表-1に示す。システムはコンピュータ、電気油圧式アクチュエータ、アクチュエータ制御装置、計測装置から構成される。コンピュータは地震応答計算、アクチュエータ制御、計測データの取込み及びデータディスプレイの各プログラムを実行する。アクチュエータへの信号及びデータの取込みはA/D、D/A各変換器を通じて行われる。

試験体に変位を与えるためのアクチュエータの制御方法としては、試験体変位監視制御法を用いている。試験体の変位計測は、できるだけ精度を上げるためにデジタル型変位計で計測し、デジタル量をそのままコンピュータに取込んでいる。一方アクチュエータの変位はサーボ機構がアナログ制御なので、システム全体ではデジタル・アナログ併用制御となっている。これをハイブリッド方式と呼ぶ。(図-2参照)

3-2 振動方程式

ここで2方向オンライン応答実験システムに組み込んだ振動方程式を示す。立体架構に適用可能とするため藤、志賀等によって示された剛床仮定を導入した立体振動の振動方程式を採用した³⁾⁴⁾。想定構造物をバネ質点系に置換し、水平2方向及び回転を含む1質点3自由度のモデルにする。モデル図を図-3に示す。立体振動(ねじれ振動)の自由振動方程式は重心座標系で以下の(2)式のように示される。

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{x} + K_x \cdot x - K_x \cdot e_y \cdot \theta &= 0 \\ M\ddot{y} + K_y \cdot y - K_y \cdot e_x \cdot \theta &= 0 \\ I \cdot \ddot{\theta} - K_x \cdot e_y \cdot x + K_y \cdot e_x \cdot y + K_\theta \cdot \theta &= 0 \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} Z &= i \cdot \theta \\ i &= \sqrt{I/M} \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

ここに x, y, θ は重心点を原点とするX, Y方向の変位、回転角、 I は回転慣性、 e は偏心距離を表す。(2)式は重心位置でのモーメントの釣合式も含まれているが、オンライン応答実験においては力を元に変位を変数とする式に揃えたほうが実験誤差に対する影響を把握しやすく、また桁落ち、丸め誤差に対する影響も小さくできる。そ

こで(2)式に以下の(3)式を導入する。

i は回転半径、すなわち図-3に示すように重心位置から回転半径 i 離れた位置での荷重と変形の関係になる。従って地動加速度を受ける振動方程式を減衰項を考慮にいれてマトリックスで表現すると(4)式となる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = [M]\{\ddot{x}_0\} \dots (4)$$

$[M], [C], [K]$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリックス、 $\{ \}$ は加速度、速度、変位のベクトルを表す。

3-3 実験制御方法

オンライン応答実験を1方向入力から2方向入力に拡張した時のアクチュエータ制御法、制御目標点変位の測定及び復元力項の算定方法を示す。

(1) アクチュエータ制御法

アクチュエータの動きと、加力スラブの移動の関係を図-4に示す。アクチュエータの両端は通常ピン支持のため、剛床仮定下では図のように3台のアクチュエータをそれぞれ制御すれば水平2方向成分と回転1成分の変形状態は再現できる。通常1方向入力ではアクチュエータの制御方向と試験体の移動方向は一致しているが、2方向入力においてはアクチュエータは反力壁側のピン位置を中心にして水平面上を回転する。試験体が線形領域ではこの回転は微小なもので無視できるが、非線形領域での大変形時には無視できなくなる。したがってオンライン応答実験の性格上、弾性域から塑性域までの応答挙動を一貫して精度良く再現するには、アクチュエータの動きを幾何学的に考慮した制御手法が必要になる。そこで3台のアクチュエータの両端のピンPと重心位置G(x, y, θ)の関係を直交デカルト座標系で表す。反力壁側のピン位置は常に固定、加力スラブ側のピン位置(u, v)は(5)式の座標変換式により求める。

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{Bmatrix} \dots (5)$$

u_0, v_0 は初期状態の加力スラブ側のピン位置を示す。従って、GがG'に移動したときの各アクチュエータのピン接合間の長さが計算でき、現在位置から計算したピン接合間の長さとの差を制御量としてアクチュエータに指令を送る。この手順を三台のアクチュエータについて同時に行えば重心位置を制御したことになる。

(2) 制御点変位の測定方法

制御対象である重心点のX, Y方向の変位および回転角 θ の測定方法を図-5に示す。オンライン応答実験では試験体の変位を精度良く計測できなければ、応答値に与える影響は大きなものとなる。そして2方向入力の場合

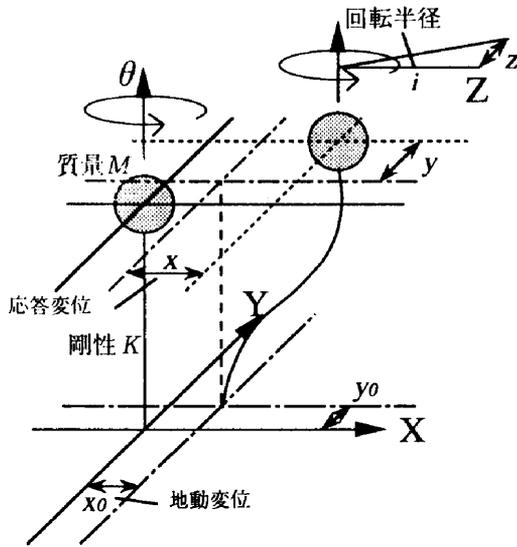


図-3 質点モデル

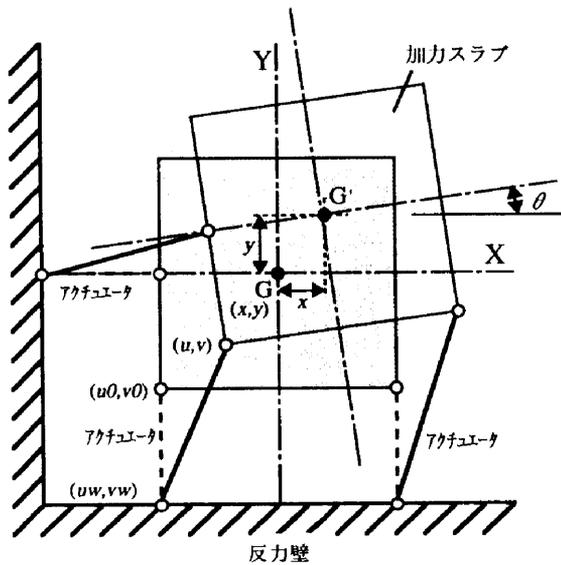


図-4 アクチュエーター制御法

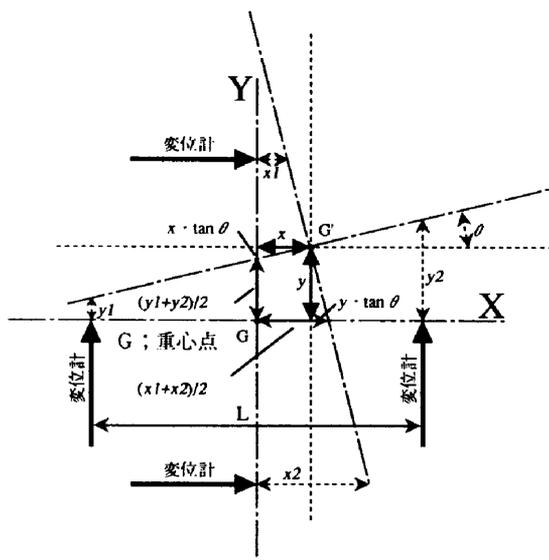


図-5 制御点変位測定法

には、制御目標点が平面的に動くことになり、重心位置を直接測定することが難しい。そこで4つの変位計で重心点から離れた位置より代数演算を介して、算定する方法を考案した。今、重心点Gが変形後G' (x,y) に移動しθ回転した時、(6)式による演算で重心点を算出する。x₁, x₂, y₁, y₂はそれぞれセンサー出力、Lはセンサー間距離を表す。

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{A-B \cdot \tan \theta}{1 + \tan^2 \theta}, \quad y = \frac{B-A \cdot \tan \theta}{1 + \tan^2 \theta} \\ \left(A = \frac{x_1+x_2}{2}, \quad B = \frac{y_1+y_2}{2} \right) & \quad \dots (6) \\ \theta &= \frac{x_2-x_1}{L} \end{aligned} \right\}$$

$$\therefore \begin{cases} x = \frac{x_1+x_2}{2} - y \cdot \tan \theta \\ y = \frac{y_1+y_2}{2} - x \cdot \tan \theta \end{cases}$$

(3) 復元力項の算定

3台のアクチュエータの荷重検出器からX, Y方向の層せん断力及びねじれモーメントを求める方法を示す。アクチュエータの荷重検出器はピンとピンを結ぶ線上の力しか測定できないので、試験体の大変形時、特にねじれ角が大きい時にはアクチュエータ自身の動きを考慮にいれなければ、その幾何学的誤差が復元力項に含まれ真の応答挙動が再現できなくなる。そこで各荷重検出器からの荷重値を3-3(1)で示したピン位置の座標を用いてX, Y方向成分にそれぞれ分解する。荷重の分解の概念図を図-6に示す。図に示すように各アクチュエータの回転量α₁, α₂, α₃,を考慮して(7)式により各方向の荷重に分解する。

$$\left. \begin{aligned} F_{ix} &= \cos \alpha_i = \frac{u_i - uw_i}{\sqrt{(u_i - uw_i)^2 + (v_i - vw_i)^2}} \cdot f_i \\ F_{iy} &= \sin \alpha_i \cdot f_i = \frac{v_i - vw_i}{\sqrt{(u_i - uw_i)^2 + (v_i - vw_i)^2}} \cdot f_i \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

$$M = \sum_{i=1}^3 \{-F_{ix}(v_i - y) + -F_{iy}(u_i - x)\} \dots (8)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_x &= F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} \\ Q_y &= F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} \\ Q_z &= M/i \end{aligned} \right\} \dots (9)$$

(7)式についてはアクチュエータ1についてのみ示した。ねじれモーメントは重心回りで考え、反時計方向を正と

して(8)式で求める。従って層せん断力 Q_x, Q_y, Q_z は(9)式で求める。オンライン応答実験の手順により(4)式の復元力項に各方向の復元力を代入して応答計算を進める。

(4) 制御アルゴリズム

本実験システムは、3台のアクチュエータをできるだけ同時に目標変位に到達させ、しかも実験全体に要する時間を考慮すると制御時間の短い制御方法が要求される。採用した制御アルゴリズムを図-7に示す。すなわち現在の変位 d_i から目標変位 d_c までの増分変位 Δd_c に、ある係数 $A (< 1$; フィードバックループゲイン)を掛けて、 $A \cdot \Delta d_c$ をアクチュエータに変位増分指令として与える。この手順を繰り返せば、試験体の重心位置は目標位置に到達するはずだが、ジョイント部でのガタなどで必ずしも到達しない。そこで1回の制御の後に試験体がさらに動くべき変位が計算されその残りの変位の A 倍の変位が指令として与えられる。この手順は最終的に試験体が指定された変位に許容誤差を持って到達するまで繰り返される。係数 A はフィードバック制御の安定性と速応性を考慮して予め適性値に調整しておく。本報の実験に先立ち行った予備実験から比較的小さな範囲から大きな範囲の制御変位に対して、3台のアクチュエータの同時到達性が満足いくものであることを確認した。

3-4 制御誤差対策方法

本実験システムは試験体の重心変位を4本のデジタル式変位計で監視しながらアクチュエータ内部変位計により変位制御で行っている。この場合、予め設定した許容誤差範囲 $\pm \epsilon$ が実験誤差となる。また予め行った試行実験より本システムの実験誤差はアンダーシュート誤差(目標変位に対し制御変位が常に下回る誤差)が支配的であることがわかった。既往の研究によれば制御変位の一貫したアンダーシュートは、変位履歴に対しエネルギー付加効果があり応答値を発散させる。そして弾性系の場合には、その影響は極めて顕著である。しかし制御変位が目標変位に対し不規則に到達する場合は応答値に対し影響が小さいと報告されている。⁵⁾そこでアクチュエータの位置決めの際に許容誤差範囲内をランダムに到達するように制御系をソフト的に改良した。通常のオンライン応答実験では、1ステップの終了判定を許容誤差範囲に到達と同時にしているが、ここではある設定した回数だけ、ほぼ最小ビットに相当する制御変位を継続して加力するようにした。この時の留意点は、アクチュエータが試験体に塑性変形を与える際、許容誤差範囲を超過させてしまい引き戻しを始めないように、適切な制御回数とフィードバックループゲインを調整することにある。こ

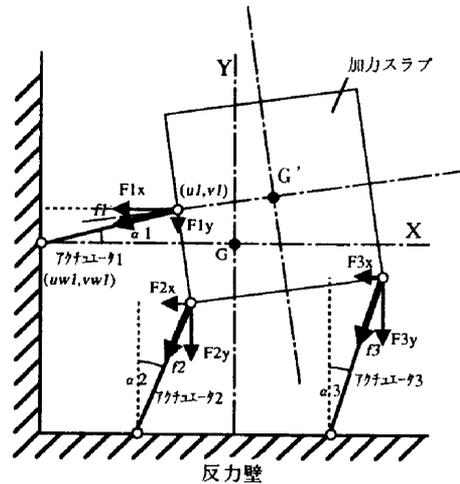


図-6 復元力項の計算法

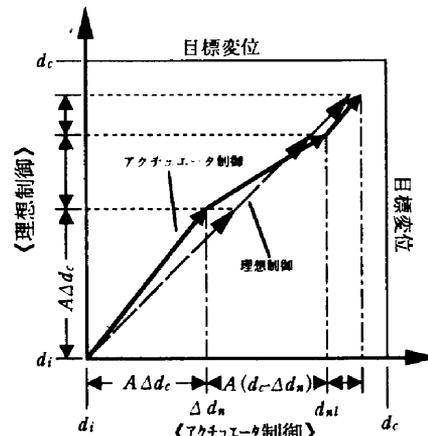


図-7 制御アルゴリズム

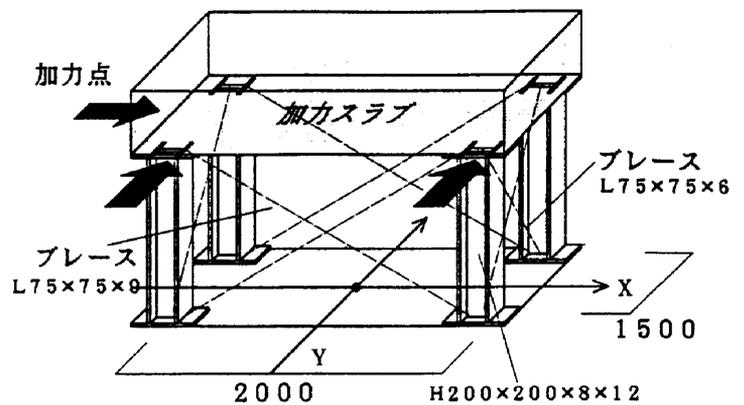


図-8 試験体

表-2 試験体諸元

	剛性(tonf/cm)				偏心距離 (cm)	捩れ剛性 (重心回り) (tf/cm)
	X 1	X 2	Y 1	Y 2		
type1	86.0	86.0	61.0	61.0	0	2.19×10^6
type2	199.1	199.1	100.1	149.7	20.0	4.75×10^6

の改良により、許容誤差範囲 $\pm \epsilon$ を極端に小さく設定することなく、ランダムに制御変位が到達するようになり、応答値への影響の縮小や制御時間の短縮に効果が期待できる。

§ 5. 1層立体鉄骨架構の実験結果

5-1 実験の概要

(1) 試験体

試験体は層の高さ1m、スパンはX方向2m、Y方向1.5mの4本柱試験体である。その形状を図-8に示す。剛性の偏心はブレース材の有無によってもたせた。オンライン応答実験に先だて静的に載荷実験を行い、その荷重と変形関係から各フレームの実剛性を算定した。X方向に関しては、アクチュエータが1機なので各フレーム剛性が同定できないため、所定の構造特性より同一の剛性と仮定した。試験体の構造諸元を表-2に示す。ブレース材を取り付けず構造得性上無偏心な試験体をタイプ1とし、応答挙動を把握しやすくするために、Y方向だけ、偏心させている1軸偏心試験体をタイプ2とした。タイプ2は構造特性上X方向とY方向の振動は独立となりX方向の振動は純並進、Y方向の振動はねじれ振動となる。

(2) 実験変数

実験変数の一覧を表-3に示す。実験は全部で4ケース行った。ブレース材を有せず無偏心な試験体の実験をCase1とし、ブレース材によってY軸方向にだけ偏心をもたせ、各フレーム共剛性を高くした試験体の実験をCase2とした。またシステムの制御誤差に対する影響を調べるために、Case2と同一の構造特性で、質量を小さくした系に対し通常の制御と§3-4(5)で改良を施した制御の実験をそれぞれCase3、Case4とした。

入力波は地震動を模擬した不規則波とし最大入力加速度はX方向で218gal、Y方向で241galの波とした。またZ方向の入力は一貫して0とした。振動方程式の数値解法は、陽なニューマーク法($\beta=0$)を採用した。粘性減衰項は不確定要素を無くす意味で、どのケースについても0とした。各方向に対する許容誤差変位は、本実験システムの位置決め精度が $\pm 2 \mu\text{m}$ の精度で可能であるが、実験の継続時間を考慮すると実用的ではないため許容誤差範囲はX、Y方向に対して $\pm 5 \mu\text{m}$ 、Z方向に対しては $\pm 3 \mu\text{m}$ とした。制御誤差の影響を見るCase3、Case4についてはX、Y方向に対して $\pm 10 \mu\text{m}$ 、Z方向に対しては $\pm 2 \mu\text{m}$ とした。

(3) 数値解析

表-3 実験変数

	架構タイプ*	質量(t)	回転半径(cm)	振動数(Hz)*		
				X	Y	Z
case1	type1	20	100	14.6	12.3	—
case2	type2	10		22.3	17.3	24.6
case3				31.5	24.4	34.7
case4						

*振動数は一般化ヤコビ法で求めた。

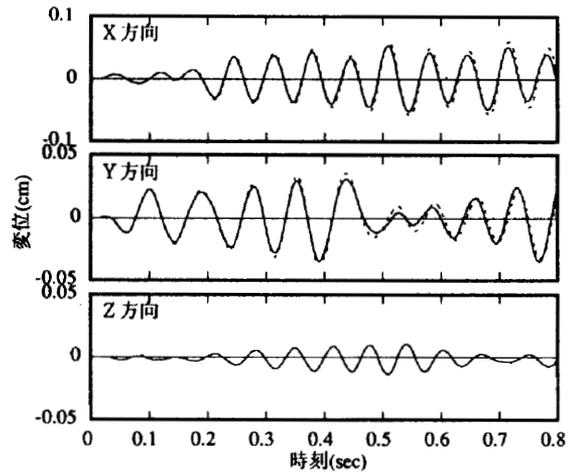


図-9 応答変位時刻歴 (Case1)

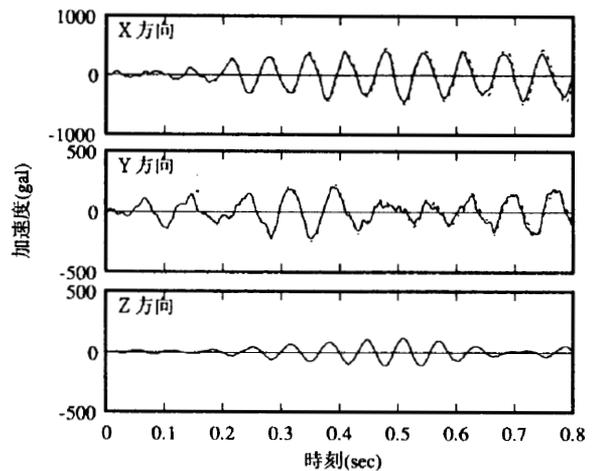


図-10 応答速度時刻歴 (Case1)

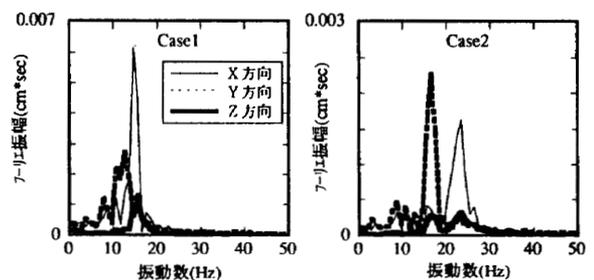


図-11 応答変位のフーリエスペクトル (Case1, Case2)

オンライン応答実験システムの精度の検証として一般的に、弾性領域における数値解析との比較が行われている。そこで数値解析に際し、使用する積分法及び変数はできるだけオンライン応答実験システムと同一になるようにプログラムの開発をした。振動方程式の数値解法はシステムと同様、陽なニューマーク法を使用した。復元力項の算定は立体架構を各方向（X、Y方向）のフレームに分解し、各フレームの荷重と変形の関係から求めた、各フレームの剛性は予め行った静加力試験により得られた値を入力した。

5-2 実験結果及び考察

(1) Case1について

X、Y、Z方向の応答変位時刻歴、応答加速度時刻歴をそれぞれ数値解析と比較して、図-9、図-10に示す。実線がオンライン応答実験結果で破線が数値解析結果を表す。X、Y方向の実験値と解析値の整合性は応答変位、応答加速度とも極めて良好である。しかし回転方向成分であるZ方向は、構造特性上は無偏心試験体なので数値解析には存在しないが、実験では振動が励起している。このことから試験体は実際には、材料特性のバラつきや施工性の問題などでわずかながら偏心していると考えられる。またCase 1、Case 2について応答変位のフーリエスペクトルの結果を図-11に示す。スペクトル解析よりZ方向の振動成分はX方向の振動数に近いことからX方向に偏心があることがわかる。

(2) Case 2について

各方向の応答変位時刻歴を図-12に示す。各方向とも実験値と解析値の整合性は良好であるが、Y方向は0.3秒付近から減衰傾向が見られる。ここでX、Y各方向の重心位置での荷重-変形関係を解析値と併記して図-13に示す。実験は粘性減衰を0と仮定しているにもかかわらず、X、Y方向についてわずかながらループの膨らみがあることがわかる。原点付近の変位で20 μmの幅があり許容誤差範囲の10 μmの倍の膨らみとなっている。これは弾性範囲内で認められるわずかな履歴減衰（±250 kgf [2.45kN] 程度の摩擦減衰）の影響と考えられる。スペクトル解析からZ方向成分にX、Y両方向の成分が含まれていることからY方向だけの1軸偏心ではなく、2軸偏心していることがわかる。

(3) Case 3について

応答変位時刻歴の結果を図-14に示す。Case 3、Case 4について各方向の制御誤差頻度分布を図-15に示す。図中の横軸の0は目標重心変位を表し、制御変位が実際には目標点に収束していないことを示す。縦軸の頻度は最大値を1に基準化した。誤差の平均値及び標準偏差を図

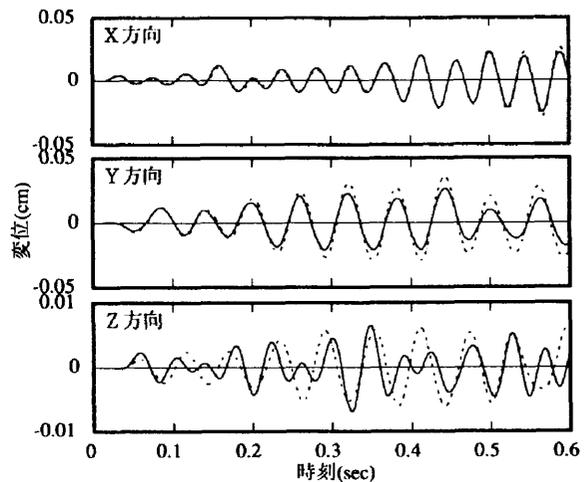


図-12 応答変位時刻歴 (Case2)

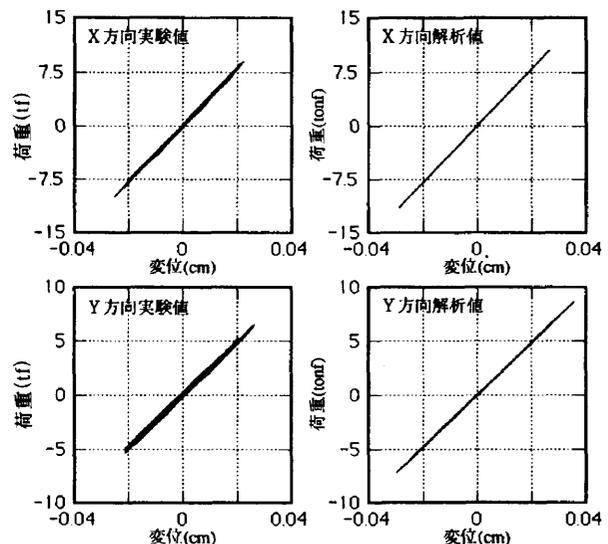


図-13 荷重-変形関係

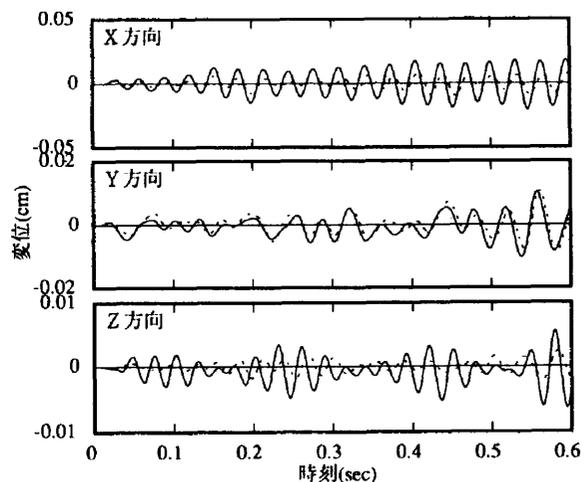


図-14 応答変位時刻歴 (Case3)

中に示した。また、誤差の算出方法は文献⁵⁾を参照されたい。X、Z方向の応答値が発散傾向を示し解析値とかなりずれている。またX、Z方向の誤差頻度分布からアンダーシュート誤差の卓越が見られ、制御誤差の影響が応答値の歪みを引き起こしていると考えられる。Y方向の応答値に関しては、解析値と良好な一致を示している。これは誤差頻度分布の形状が正規分布形状に近く、目標重心位置に集まっていることから裏づけられる。2方向入力の場合の制御誤差は多次元的(X、Y、Z方向の誤差がそれぞれ相互的に)に応答計算に含まれるが、通常の1方向入力での制御誤差の影響を調べる手法で、2方向入力におけるの現象もうまく説明できる結果となった。Y方向については、2台のアクチュエータを同時に制御するような場合、それぞれが影響を及ぼしあって誤差がランダムに分布すると考えられる。

(4) Case4について

応答変位時刻歴の結果を図-16に示す。各応答値はCase3で見られた発散傾向も見られず、制御誤差に対する影響は低減できている。また誤差頻度分布からもアンダーシュートが抑制され、制御アルゴリズムの改良の効果がみられる。しかしX、Y方向とも0.2秒付近から周期のずれと減衰傾向が見られ、解析値との整合性は良好とは言い難い。このように非常に微小な変形領域においては制御誤差の影響を取り除いても、ジョイント部のガタなどの摩擦によって生じる誤差が影響して減衰傾向を示し、解析値との整合性が悪くなっている。

§ 5. おわりに

本研究では、立体架構に対し2方向入力を可能にするための種々の手法を示し2方向オンライン応答実験システムを開発した。またシステムの検証として実施した1層立体鉄骨架構の実験結果から以下の知見を得た。

システムの地震応答再現性は高剛性な試験体にもかかわらず良好な結果を得た。また応答値に対する制御誤差の影響は、1方向入力の場合と同様に各方向のアンダーシュート誤差により応答値を発散させる傾向が見られた。今後の課題としては、大変形時のシステム精度の検証と、システムの持つ誤差の影響を低減させる方法を検討する必要がある。

謝辞

本研究を進めるに際し、貴重なご助言を頂きました日本大学理工学部教授、安達洋先生にここに深く感謝の意を表します。

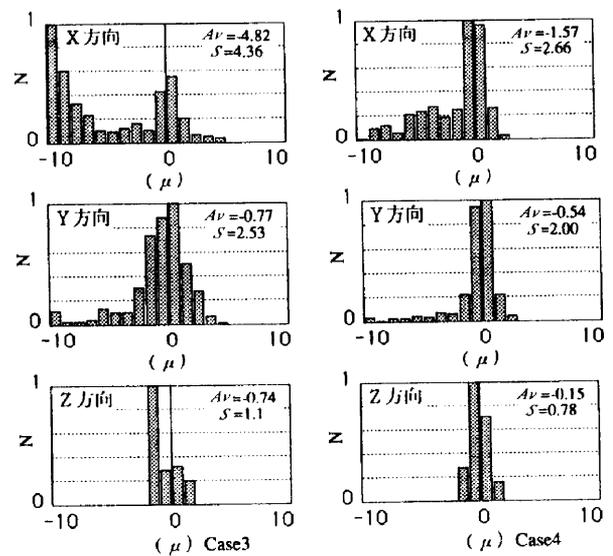


図-15 誤差頻度 (Case3, Case4)

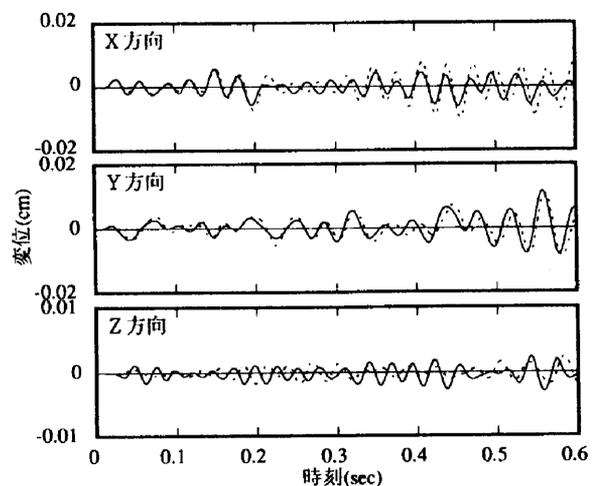


図-16 応答変位時刻歴 (Case4)

参考文献

- 1) 加藤博人,山崎裕他: 偏心を持つ1層鉄骨架構の仮動的地震応答実験,日本建築学会大会学術講演梗概集(中国),1990
- 2) 西澤英和,内田富久他: デジタル微分解析法とデジタル制御型機械式加力装置を用いた2方向地震力を受ける1層立体鉄骨架構のオンライン地震応答載荷実験,日本建築学会構造系論文報告集,第429号,1991
- 3) 武藤清: 耐震設計シリーズ4 構造物の動的解析,丸善1970
- 4) 志賀敏男: 構造物の振動,共立出版,1976
- 5) 石丸辰治,安達洋他: 擬似動的実験システムの開発と誤差評価に関する研究,日本大学理工学部学術講演会論文集,1985