

# 大型工場建築建家の立体振動解析 (その3)

中 川 恭 次      寺 村      彰  
渡 辺 清 治      金 子 正 孝

## Study on the Dynamic Behavior of Large Factory Structure (Part 3)

Kyoji Nakagawa   Akira Teramura  
Seiji Watanabe   Masataka Kaneko

### Abstract

This report presents the basic methods of linear and non-linear earthquake response analyses for large factory structures. Firstly, five typical vibration modes collected through numerous vibration tests are indicated. The assumption of four degrees of freedom of displacement at joints is then introduced. The model of the earthquake response is a three-dimensional lumped-mass system. The non-linear force-displacement character is bi-linear for steel members and tri-linear for concrete members (walls). As an example, the response calculation of "Building K" subjected to actual earthquake records is simulated. As a result, the authors have confirmed that this method is reliable at least for linear response.

### 概 要

本論は同一建物内にラーメン架構部ブレース構造部R. C. 耐震壁が混在し一方また水平剛性が小さく質量分布が不均一である大型工場建築の弾性・弾塑性応答の基礎的な解析法を述べたものである。最初に多くの建物の常時微動測定と強制外力振動実験から整理した5つの基本振動形を示し、次に応答解析を実行するために、4つに仮定した節点変形自由度を示し、節点一質量系立体モデルを用いた応答解析法を示した。最後にこの解析法に基づいてスパン50mケタ行150m高さ30mの概略寸法を有するK建物の地震観測波入力によるシミュレーション解析例を示した。この結果、弾性範囲の応答の信頼性は十分有る事が判り、かつ今までのいくつかの具体的な解析例を考察すると、さらに簡便な解析法へ発展することが可能である。

## 1. まえがき

大型工場建築の耐震設計は現在静的震度法に基づいている。今後大型化、高層化に進む工場建築の動的設計法が経済設計を考える上でも必要である。一方現在においても大型クレーンによる原因の明確でない局部損傷等が数多く見られる。以上の諸問題を解決するための第1歩として、約7つの建物に関する実測資料をもとに弾性、弾塑性地震応答解析の方法を研究した。

## 2. 振動試験

### 2.1. 振動試験方法

試験資料は常時微動測定と大型起振機による強制外力試験および数例の地震観測波形である。常時微動測定では工場建物内のさまざまな場所で種々の周波数成分を検出した。強制外力試験では測点を建物全体に分散し各種の固有振動数、立体固有振動形、減衰定数を求めた。

### 2.2. 測定結果<sup>1~5)</sup>

固有振動数：常時微動波形を周波数解析して求められた卓越周波数成分と、強制外力試験の固有振動数とを対比した結果、建物の有する各種の固有振動数はほぼ強制外力試験で明らかになることが判った。その3例を図一1～図一3に周波数解析(点線)と共振曲線(実線)とで示す。

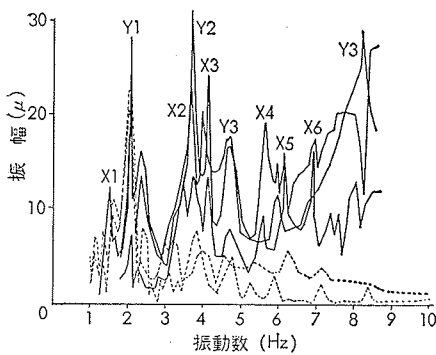
固有振動形：強制外力試験の多測点X, Y同時測定から求めた立体固有振動形は、勿論柱に関する振動形だけで整理できず後記するタイプA, B<sub>1</sub>, ..., Dの5つの基本振動形で整理できた。そしてこの事実はビル建築のねじれ振動が卓越しにくいことを表わしている。(0.5~10Hz 範囲) 数例を表一1に示した。

### 2.3. 建物の固有値解析

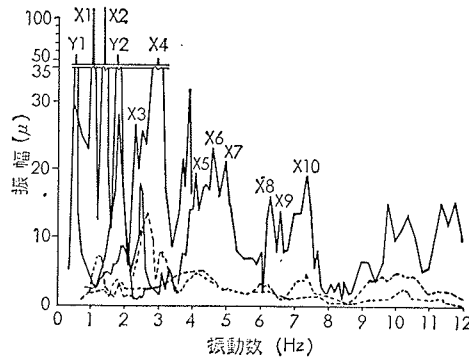
固有振動数、固有振動形の測定値は固有値解析で確認された。この結果を表一1「計算値」に示した。

### 2.4. 測定値のまとめ

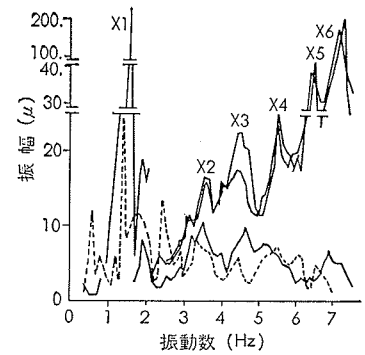
大型工場建築の振動性状を次の如く整理した。



図一 1 H建物の振動数特性



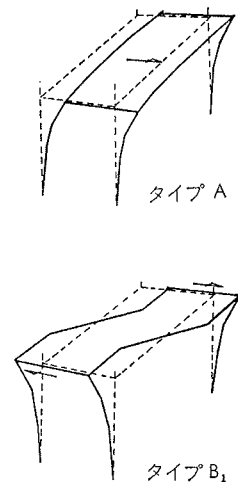
図一 2 R建物の振動数特性



図一 3 B建物の振動数特性

建物名称	振動測定値				計算値		刺激係数 (β) 応答 参考値	
	寸法概算値 (メートル)	共振 曲線	固有振動数 (Hz)	固有振動形 A~Dタイプ別	減衰定数 (%)	固有振動数 (Hz)		固有振動形 A~Dタイプ別
Hx	スパン: 67. ケタ行: 72. 高さ: 39.	×1	1.6	A (1次)	3.20	1.62	A (1次)	1.409
		×2	3.5	AとB1	2.40	3.53	AとB1	.814
		×3	4.1	B1 (1次)	—	3.96	B1 (1次)	-.614
		×4	5.2~5.5	B1	4.45	5.80	B1 (高次)	.215
		×5	6.0~6.25	B2	—	6.25	B2	-.416
		×6	6.9~7.0	B1とC	≒1.6	7.22	B1とC	.041
Rx	スパン: 18. 高層部 136. 低層部 150. ケタ行: 65. 高さ: 65.	×1	1.0	A (1次)	2.24	0.73	A (1次)	1.805
		×2	1.3	B1 (1次)	2.30	1.05	B1 (1次)	-.507
		×3	2.2~2.4	B1 (1次)	4.00	1.57	B1	-.474
		×4	2.8~3.0	B1 (高次)	5.00	1.86	B2 (1次)	-.018
		×5	4.0~4.1	B2とC	—	2.08	B1 (高次)	.096
		×6	4.5~4.6	A (2次)	—	2.17	—	-.037
Bx	スパン: 21. 高層部 78. 低層部 175. ケタ行: 60. 高さ: 60.	×1	1.6	A (1次)	4.3	1.41	A (1次)	1.48
		×2	1.8	B1 (1次)	≒6.2	3.03	C (逆相)	-.24
		×3	3.5	B1とC	8.5	3.57	C (同相)	-.62
		×4	4.2	(B2)	6.6	5.00	A (2次)	.44
		×5	5.5	CとB1 or B2	5.4	8.32	C	-.05
		×6	6.7	CとB1 or B2	2.7	(※主要1架橋解析)	—	—
Dx	スパン 66. ケタ行: 105. 高さ: 26.	×1	1.78	A (1次)	2.62	2.24	A (1次)	1.436
		×2	2.37	B1 (1次)	4.11	3.56	B1 (1次)	.783
		×3	4.8~5.0	B2 (1次)	—	5.08	B2 (1次)	.313
		×4	5.9~6.0	B1 (高次)	—	6.21	B2 (高次)	-.234

表一 1 振動試験結果および固有値解析結果



イ) 固有振動形は次の5種の基本振動形に仮定した。

タイプA: 水平架構面が同一方向にほぼ同一量水平変位する。タイプB1: 水平架構面の両端が逆位相になる。タイプB2: 水平架構面の両端は同位相で中央部が逆位相になる。タイプC: 開口部の効果が含まれて、その両側が同相あるいは逆相になる。タイプD: けた行方向の長さが長い場合にその水平架構面内で伸び縮み振動形が生ずる。

図一4は各タイプの基本振動形を示し、実際にはこれらの高次形までが複雑にまざり合うものである。

ロ) 最も低い振動数を有する固有振動形はタイプAの1次である。タイプAの2次以上の高次固有振動形が明確に表われた例は少なかった。

ハ) 一般にタイプAの固有振動形の次にタイプB1の固有振動形が生じ、その後タイプB2の振動形が生ずる。

ニ) タイプB1・タイプB2の高次振動形は明確に生じた。

ホ) タイプCは1階から屋根面直下まで吹抜けの建物の場合に卓越した。

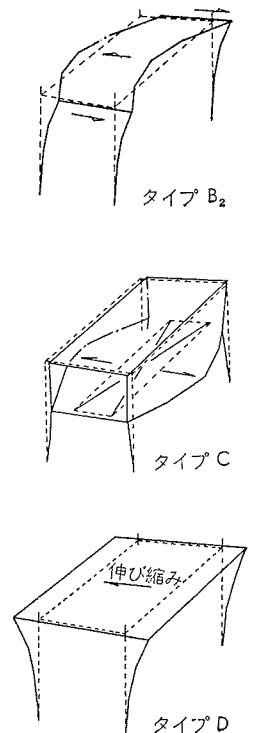
### 3. 弾性・弾塑性地震応答解析

#### 3.1. 節点変形自由度

剛板スラブの仮定<sup>6,7)</sup>が成り立たない立体振動解析を行なう場合、部材端の節点変形自由度は6つである。しかし、ここで取扱う大型工場建築の場合、上記の固有振動形が卓越すると考えて部材応力を計算するために重要な節点変形を仮定した。この節点変形が、図一5に示す如くX方向入力に対しX軸方向とZ軸方向との変位およびY軸とZ軸回りの回転、計4つの自由度変形である。

#### 3.2. 基本式

4つの節点変形から既定される柱・梁の材端変形を同図(図一5)に示した。部材端  $i, j$  の応力  $(f)$  と変形  $(d)$  との関係はマトリッ



図一4 大型工場建築の5つのタイプの基本振動形

クス変位法を用いて、

$$\begin{Bmatrix} d_i \\ d_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K & L \\ M & N \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} f_i \\ f_j \end{Bmatrix} \quad (1)$$

### 3.3. 部材剛性マトリックス

(1)式の剛性マトリックスK, L, M, Nはそれぞれ4×4のマトリックスである。その他の部材は引張ブレース、圧縮ブレース、R

C耐震壁等がある。これらは上記に順じて求められる。

### 3.4. 内力と外力との釣合式

全体座標系の変形ベクトル{D}と

応力ベクトル{F}とは変換マトリ

クス[T]により(2)式である。{F}, {D}は4×1である。

$$\{D\} = [T] \{f\} \quad \{F\} = [T] \{d\} \quad (2)$$

全体座標系の変形ベクトルは(3)式である。

$$\begin{Bmatrix} D_i \\ D_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} TKT^T & TLT^T \\ TMT^T & TNT^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} F_i \\ F_j \end{Bmatrix} \quad (3)$$

節点iの内力の和は他端jとして(4)式である。

$$\sum_j F_j^i = (\sum_j K_j^i) \cdot D_i + \sum_j L_j^i D_j \quad (4)$$

外力の和を P<sub>i</sub> として釣合式は(5)式である。

$$P_i + \sum_j F_j^i = 0 \quad (5)$$

### 3.5. 分割構造物の連立一次方程式の解法

大型工場建築の構成部材は非常に多いので静的計算の解法は全体架構をいくつかのブロックに分割して分割接面上の節点の釣合条件を考慮して解いたり、あるいは全体架構を平面架構に分割して接線上の節点の釣合条件を考慮して解いたりするが多かった。これらの方法は基本振動形をいくつ考えるかによって、できるだけ簡単な方法を見つけた。しかし解法は次に記す大次元連立一次方程式の分割法を基本にして応用した解法である。

分割数をmとして分割された1つの架構内の節点数をnとした場合の基本式は(6)式である。

$$\{\{D\}_n\}_m = [\{K\}_n]_m^{-1} \cdot \{\{F\}_n\}_m \quad (6)$$

分割架構内の節点数nを他の分割架構に共通な節点(B) (外周節点と以下呼ぶ) とそうでない節点(I)

(内部節点と以下呼ぶ) に分けた結果、1つの分割架構の基本式は(7)である。

$$\begin{Bmatrix} \{D_I\} \\ \{D_B\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [K_{II}] & [K_{IB}] \\ [K_{BI}] & [K_{BB}] \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} \{F_I\} \\ \{F_B\} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

ここに {D<sub>I</sub>} : 内部節点変形ベクトル, {D<sub>B</sub>} : 外周節点の変形ベクトル, {F<sub>I</sub>} : 内部節点に作用する外力ベクトル, {F<sub>B</sub>} : 外周節点に作用する外力ベクトル。そして外周節点の変形をゼロに固定した解と、この固定を解除した解(修正値)とを加え合わせる。すなわち変形ベクトルは(8)式である。

$$\begin{Bmatrix} \{D_I\} \\ \{D_B\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{D_I\}_\alpha \\ \{D_B\}_\alpha \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{D_I\}_\beta \\ \{D_B\}_\beta \end{Bmatrix} \quad (8)$$

ここに { }<sub>α</sub> は外力 {F<sub>I</sub>} が作用し外周節点変形を固定 ({D<sub>B</sub>}<sub>α</sub> = {0}, {D<sub>B</sub>} = {0}) したときの変形ベクトル, { }<sub>β</sub> は外力 {F<sub>I</sub>} = {0} にもとづき外周節点変形を解除 ({D<sub>B</sub>} = {0}) したときの内部節点と外部節点の変形ベクトル。

一方外力ベクトルも同様に表わされる。

$$\begin{Bmatrix} \{F_I\} \\ \{F_B\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_I\}_\alpha \\ \{F_B\}_\alpha \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{F_I\}_\beta \\ \{F_B\}_\beta \end{Bmatrix} \quad (9)$$

ここに {F<sub>I</sub>}<sub>α</sub> = {F<sub>I</sub>}, {F<sub>I</sub>}<sub>β</sub> = {0}

i) 境界を集合した固定構造: 外周節点変形ベクトル {D<sub>B</sub>} を {0} とした固定構造の外周節点反力ベクトルは(7)式(8)式から {D<sub>I</sub>}<sub>α</sub> を消却して(10)式である。

$$\{F_B\}_\alpha = [K_{BI}] \cdot [K_{II}]^{-1} \cdot \{F_I\} \quad (10)$$

ii) 境界の固定を解除した構造<sup>3)</sup>: 外周節点変形ベクトルを解除 ({D<sub>B</sub>}<sub>β</sub> = 0, {D<sub>I</sub>}<sub>β</sub> = 0) し, {F<sub>I</sub>} = 0 と仮定して, (7)式から {D<sub>I</sub>} を消去すると, 外周節点変形ベクトル {D<sub>B</sub>}<sub>β</sub> が得られる。

$$\{D_B\}_\beta = [[K_{BB}] - [K_{BI}][K_{II}]^{-1}[K_{IB}]]^{-1} \{F_B\}_\beta \quad (11)$$

外周節点のみに関する剛性マトリックス [K] は(11)式に示される。また外周節点の外力ベクトル {F<sub>B</sub>}<sub>β</sub> は(9)式, (10)式から

$$\{F_B\}_\beta = \{F_B\} - [K_{BI}][K_{II}]^{-1} \{F_I\} \quad (12)$$

故に 全体架構の外周節点に関する変形ベクトル {D<sub>B</sub>}<sub>β</sub> は剛性マトリックス [K] および(12)式から(13)式で

$$\{D_B\}_\beta = [K]^{-1} \cdot \{F_B\}_\beta \quad (13)$$

ある。(13)式は全体架構の変形問題を分割架構の接面上の節点(外周節点)に関する変形問題に短縮された。以上の解法の基本概念はプログラムが容量的に不足する場合にも応用した。

### 3.6. 動的解析モデル

工場建築は各種重量機械、クレーン走行空間等があり平面、立面形状にさまざまな凸凹が存在する。したがって動的解析モデルは建物の架構特性・質量分布・剛性分布を含めた二次元ないし三次元立体系モデルである。影響係数マトリックスはこのモデルに関して計算した。また、部材応力はこのモデルの応答値から計算されるので、応力計算の簡便なモデル化が必要な場合もある。以上の如く解析モデルは建物個々について

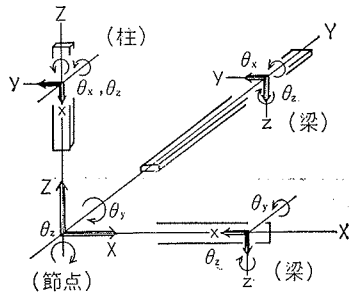


図-5 節点変形の4自由度と部材端変形の成分

決めた。

### 3.7. 固有値計算

全体架構の剛性マトリックス  $[K]$  は3.5. で求めた影響係数マトリックスの逆マトリックスである。固有値は質量マトリックス  $[M]$  を求めて計算した。

### 3.8. 弾性応答計算

弾性地震応答計算は(14)式の直接法で計算した。

$$[M]\{\ddot{X}\} + \{[C] \cdot \alpha + [K] \cdot \beta\}\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = -[M]\{\ddot{X}_0\} \quad (14)$$

減衰定数は  $[M]$  に比例する減衰と  $[K]$  に比例する減衰との合成減衰で、建物の種類、実測値、高次減衰等を係数  $\alpha, \beta$  で調節した。

### 3.9. 弾塑性復元力特性

動的モデルを構成する部材の復元力特性は次のようにして決めた。

#### i) モデル化部材が実際の部材に等しい場合

部材数の少ない主要ラーメン1架構を取り出し各部材の応力度を破壊まで含めて検討する場合、モデル化節点を床レベルおよび柱材断面の変わる所等に設定した。このとき通常行なわれる如く曲げ降伏および剛性低下率が直接復元力特性になる。

#### ii) モデル化部材が実際は複数の部材である場合

基本的には単材の降伏特性を集合して決めようとした。例えば図-6で、3つの部材①, ②, ③の各々の降伏特性(点線)は集合され OABC DE の復元力曲線である。しかし実際はモデル化部材に相当する架構部分を取り出し、外力  $Q$  を与えて部材応力度を静的に計算し部材が降伏する外力  $Q_{y1}, Q_{y2}, \dots$  をみつけ出した。降伏後の部材はピン接合、部材を無くす、剛性を減らす等である。モデル化部材は最終的に bi-linear に置換した。屋根水平架構面の場合は水平ブレースの降伏により図-6の  $Q_y$  が明確になり近似的に置きかえられる。一方ラーメン

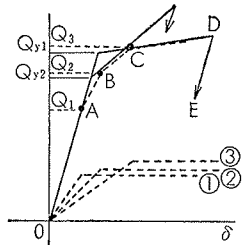


図-6 bi-linear 復元力曲線

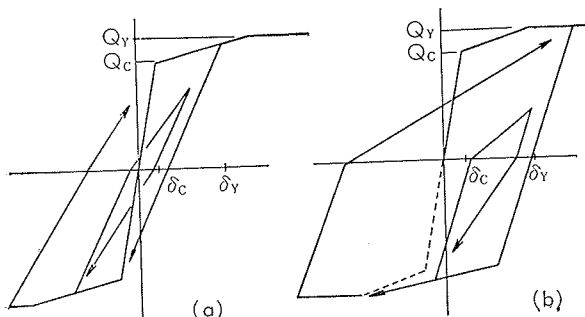
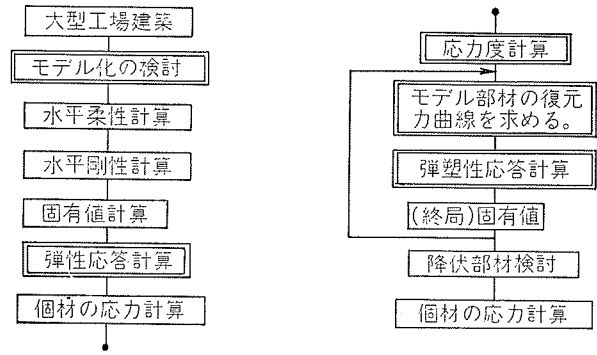


図-7 Tri-linear RC 復元力曲線



工場建築解析流れ図

架構に代表される  $Q_c$  が明確でない場合は弾塑性応答の目的(弾性から塑性に入る附近を問題にするのか、最終破壊を問題にするのか)に応じて  $Q_y$  の位置を決めた。

#### iii) 建物の1部にRC耐震壁が有る場合

RC耐震壁のせん断型復元特性は参考資料<sup>9)</sup>を仮定し、図-7(a)(b)である。モデル化に当ってRC壁単体は一つのモデル化部材に置換した。尚、RC壁を取りまく柱・梁は剛性を評価する復元力特性に対してのみ無視した。また、壁高さに比して壁有効長さが短い場合、壁の回転量を考慮して剛性を低下した。

### 3.10. 弾塑性応答計算

弾塑性計算の節点一質量系モデルは前もって規定されなければならない。その節点間を結ぶ材の初期剛性は全架構の弾性フル剛性マトリックスを分解して求めた。個々の材の復元力特性は先のようにして求めた。各材はプログラム上、個々に復元力特性を選択できる繁用性を持ちまた開口部、建物の形状の不規則性はゼロ剛性部材により表わした。応答計算式は(14)式であらわされ、剛性マトリックスは逐次再計算される。

### 3.11. 部材応力計算

i) 弾性応答計算の場合: 節点一質量系の応答量は、それぞれ建物の特定節点の変形量に対応する。しかし慣性力と回転慣性の作用しないZ軸方向変位とY軸回りの回転角  $(\theta_y)$  (図-5参照)に内する応答量はゼロである。そこで一般にはX方向変位とZ軸まわりの回転角から変形ベクトル  $\{D\}$  を決めてマトリックス応力解法により部材応力ベクトル  $\{f\}$  が求まる。

ii) 弾塑性応答計算の場合: 先に静的計算で復元力曲線を求めたために最大応答剪断力あるいは節点間相対変位から部材の降伏箇所を知ることが容易である。この降伏部材を考慮して再度静的応力計算を行ない近似解を得る。しかしこの計算の主目的は降伏部材の適出と建物の破壊過程を推定する事に注目した。

#### 4. 観測地震波のシミュレーション結果

1階平面の大きさが約150M×50Mの某建物の基礎上で採集された地震波を入力波として弾性応答計算した2例を以下に記す。

##### 4.1. K建物Y成分応答計算例

地震波最大加速度：13.20ガル

建物の減衰定数：タイプAの1次減衰定数 $h=0.025$ ，タイプAの2次 $h=0.11$ ，タイプ $B_1=0.089$

建物の固有振動数：タイプA 1次 $\approx 3.3\text{Hz}$ ，タイプ $B_1$  1次 $\approx 11.8\text{Hz}$ ，図-8にこの結果を示した。観測波は細線で示し，応答計算値は太線で示した。

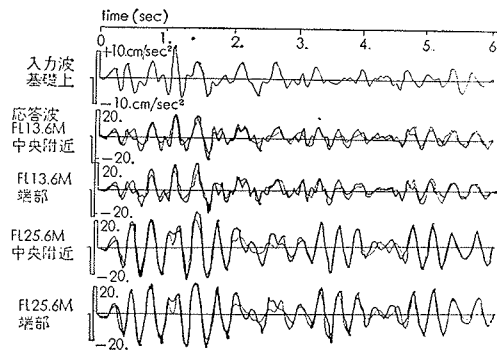


図-8 シミュレーション解析 例-1

##### 4.2. 建物のX成分応答計算例

地震波最大加速度：10.46ガル

建物の減衰定数：タイプAの1次減衰定数 $h=0.02$ ，タイプ $B_1$ の1次 $h=0.0314$ ，タイプ $B_2=0.0358$

建物の固有振動数：タイプAの1次 $\approx 2.04\text{Hz}$ ，タイプ $B_1$ の1次 $\approx 2.54\text{Hz}$ ，タイプ $B_2$ の1次 $\approx 3.60\text{Hz}$

図-9に観測地震波（点線）と応答計算値（実線）を示す。

#### 5. まとめ

イ) 大型工場建築の基本振動形はタイプA～タイプD

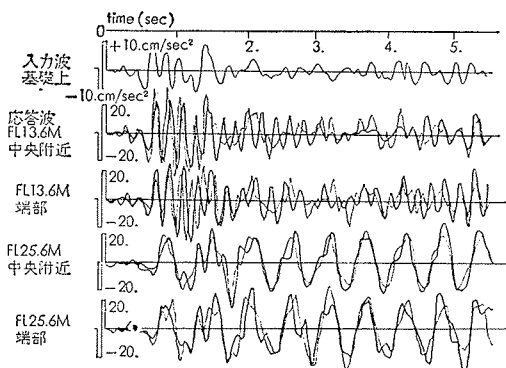


図-9 シミュレーション解析 例-2

の5種類に分けられる事。

ロ) 部材節点自由度を4自由度に仮定できる事。

ハ) 影響係数マトリックスを計算する場合大次元連立一次方程式（分割法）の解法を応用した。

ニ) 動的解析モデルは架構形式を表わす立体モデルである事。

ホ) 高次の減衰定数は外部減衰係数（ $\alpha$ ）と内部減衰係数（ $\beta$ ）とで調節し過大なることを防いだ事。

ヘ) 弾性範囲の計算固有値は実測値で確認した。

ト) 弾性範囲の応答計算値は数例であるが地震観測からほぼ妥当であると考えた。

チ) 弾塑性応答解析は降伏部材の適出と破壊過程の推定が可能である。

以上の如く大型工場建築に関するこの解析法は十分信頼性が有ると考える。また、今日までの数多くの解析を試みて来たが、顧みてさらに簡便な解析法へ発展させることが可能である事を最後に附記する。

謝辞 本研究を進めるに当たり、多大な御援助をいただきました構造研究室 武田室長 表職員 機械計算室 板橋様および振動研究室 角田主任 島口職員 西村君に深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 中川・渡辺・寺村「大型工場建築の振動解析」昭和46年建築学会大会
- 2) 渡辺・寺村他2名「A製鋼工場・転炉棟の振動実験」昭和46年第42回建・関東支部
- 3) 渡辺・寺村「大型工場建築の立体振動解析その1」1971, 大林組技術研究所報 No. 5
- 4) 渡辺・寺村「同題その2」1972, 大林組技術研究所報 No. 6
- 5) 川村・内田他1名「B製鋼工場・転炉棟の振動実験」昭和48年建, 大会
- 6) Weaver, W., and M. F. Nelson 「Three-dimensional analysis of Tier building」 Jour. of the struct Div. Proceedings of the A. S. C. E., Vol. 92, No. st6, December, 1966.
- 7) M. C. Stamato and B. Stafford Smith 「An approximate method for the three dimensional analysis of tall buildings」 October, 1969.
- 8) T. Furuie 「Computerized multiple level substructuring analysis」 Computers. & structures, Vol. 2 March, 1972.
- 9) T. Takeda 「Reinforced concrete response to simulated earthquake」 A. S. C. E. December, 1970