日本建築学会・電子計算機利用委員会
第6回電子計算機利用シンポジウム 1984

建物の応答解析への3次元グラフイックの応用

正会員　和田　章※　同　○木下雅彦※※

1．　序文

建築分野への電子計算機の応用として最も成功したものの一つに地震応答解析がある。　初期には高層ビルの設計、中期には低層建物への適用によって、耐震設計をみなおし、最近では、原子力発電所の設計への応用というように、応答解析は、最も電子計算機の得意とする分野であるといえる。　しかし、今ではよほど特殊な建物ではない限り、地震応答解析そのものは、最大塑性率、最大層間変位等を自動的にグラフ化するように、ルーチンワークになってしまい、その動的挙動を総合的に把握しようとはしていない現状がある。

本研究では、最近めざましく発展したグラフイックディスプレイを用いて、電子計算機の中で計算されている、動的応答計算の途中過程を視覚的に表現しようとするものである。　その内容は、時々刻々の建物の振動の様子、各々の構造部材の分担している力の変化、歪エネルギーの分布が動的にどう変化していく等も示す。

2．　解析方法

2－1　解析モデル

建物を剛床仮定のもとで、各柱をX方向とY方向の独立なせん断型バネに置換し、このバネと床を結んだ擬似立体モデルを作る。各階の自由度として水平2方向および鉛直まわりの回転の3自由度（u,v,θ）を考える。各階の重量は、床位置に集中させる。（図1）

2－2　バネの復元力特性

バネの復元力特性を弾性せん断型および、弾塑性せん断型とし、弾塑性せん断型の復元力特性をBi-Linear型とする。

2－3　弾塑性応答解析

2－3－1　振動方程式

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + r = -M\ddot{u}_0 \qquad (1)$$

M：質量マトリックス　　C：減衰マトリックス

u：重心の変位ベクトル　　$\ddot{u}_0$：地動加速度ベクトル

r：バネの復元力のベクトル，t時刻において，

$$r_t = S \cdot \Delta u_t + r_{t-1}$$

S：時刻tにおける瞬間剛性マトリックス

Δu_t：時刻tにおける増分変位ベクトル

r_{t-1}：時刻t-1における復元力の総和ベクトル

この振動方程式により、線形加速度法を用いて、応答解析を行なう。　入力地震動は、X方向，Y方向ともに入力する。　（図4）

2－3－2　剛性マトリックス

i階の床の重心$G_i=(x_{gi}, y_{gi})$，j階の床の重心$G_j=(x_{gj}, y_{gj})$，バネの位置$S=(x_s, y_s)$，バネの力の作用する方向dとし、ある時刻における i階，j階の床の重心の増分変位を$\Delta u_i=(\Delta u_i, \Delta v_i, \Delta\theta_i)$，$\Delta u_j=(\Delta u_j, \Delta v_j, \Delta\theta_j)$とする。　その時のバネの増分変位をi階では$\Delta\bar{u}_i$，j階では$\Delta\bar{u}_j$とすると、バネの復元力$\bar{r}_i$，$\bar{r}_j$は，

$$k=\begin{bmatrix} k_{ii} & -k_{ij} \\ -k_{ji} & k_{jj} \end{bmatrix} \text{とおくと} \quad \begin{Bmatrix} \bar{r}_i \\ \bar{r}_j \end{Bmatrix} = k \begin{Bmatrix} \Delta\bar{u}_i \\ \Delta\bar{u}_j \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \bar{r}_{i\,t-1} \\ \bar{r}_{j\,t-1} \end{Bmatrix} \qquad (2)$$

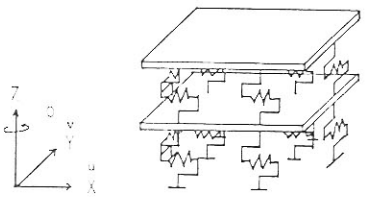


図1　擬似立体モデル

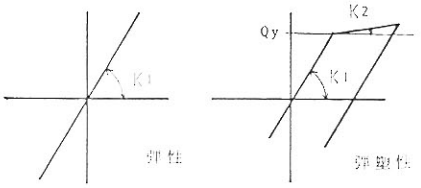


図2　バネの復元力特性

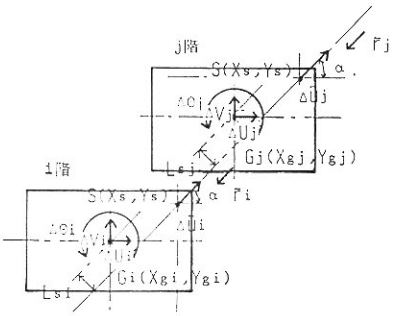


図3　I階とJ階のある時刻における変形

となる。 i階および j階の変位によって生じるバネの変位は、$l_{si}=(x_s-x_{gi})\cdot\sin\alpha-(y_s-y_{gi})\cdot\cos\alpha$, $l_{sj}=(x_s-x_{gj})\cdot\sin\alpha-(y_s-y_{gj})\cdot\cos\alpha$ として

$$\mathbf{T}=\begin{bmatrix}\cos\alpha & \sin\alpha & l_{si} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \cos\alpha & \sin\alpha & l_{sj}\end{bmatrix}$$ とおくと

$$\{\Delta\bar{u}_i,\Delta\bar{u}_j\}^T=\mathbf{T}\cdot\{\Delta u_i,\Delta v_i,\Delta\theta_i,\Delta u_j,\Delta v_j,\Delta\theta_j\}^T \quad (3)$$

となる。 バネの復元力と各床に作用する力、i階では X_i, Y_i, M_i、j階では X_j, Y_j, M_j との関係は、

$$\{X_i,Y_i,M_i,X_j,Y_j,M_j\}^T=\mathbf{T}^T\cdot\{\bar{r}_i,\bar{r}_j\}^T \quad (4)$$

となる。 したがって (2), (3), (4) 式をまとめると、

$$\{X_i,Y_i,M_i,X_j,Y_j,M_j\}^T=\mathbf{T}^T\cdot\mathbf{K}\cdot\mathbf{T}\cdot\{\Delta u_i,\Delta v_i,\Delta\theta_i,\Delta u_j,\Delta v_j,\Delta\theta_j\}^T+\mathbf{T}^T\cdot\{\bar{r}_{it-1},\bar{r}_{jt-1}\}$$ となり、

すべてのバネについて合成すると下式が求められる。

$$\mathbf{S}=\sum_{n=1}\mathbf{T}^T\cdot\mathbf{K}\cdot\mathbf{T},\quad \mathbf{r}_{t-1}=\sum_{n=1}\mathbf{T}^T\cdot\{\bar{r}_{it-1}\}$$

3. 応答解析経過のグラフィック化

2節で示した解析方法によって応答計算を行ない、その途中経過を次の3方式で表現する。 (図5)

3—1 変形図 (写真1)

この図は、各床の重心の (u, v, θ) 成分の変位応答時刻歴を基に、各床のバネの位置 (ここでは柱の位置) を計算し、地盤の動きを無視して、表現したものである。 このグラフィックスによって、地震動継続時間における建物の変形をリアルタイムで視覚することが出来る。 なおこの図では、一本一本の柱を直線で表現している。

3—2 剪断力ベクトル図 (写真2)

この図は、各時刻におけるバネのせん断力を $\bar{r}_i=(Q_{ix}, Q_{iy})$ とするベクトルに置き、階高の中間点を始点として描いたものである。

時々刻々における各バネ (柱) に作用するせん断力の大きさおよび方向を、他のバネと比較することが出来る。

3—3 エネルギー図 (写真3)

この図は、各バネ (柱) にたくわえられる歪エネルギー量 $E_t=E_{t-1}+(Q_{xt-1}+Q_{xt})\times\Delta\delta_x/2+(Q_{yt-1}+Q_{yt})\times\Delta\delta_y/2$ を計算し、この値の平方根を1辺の長さとする立方体として、そのバネの位置の階高の中間点に、その立方体の重心を置いて表現したものである。 この図により、各時刻におけるバネにたくわえられている歪エネルギー量を、他のバネと比較が出来、また弾塑性応答において、バネが塑性領域に入っていると歪エネルギーが柱の中に残留してゆくことが良くわかる。 一辺の長さとエネルギー量の平方根としたのは、視覚的にその量を面積によって表現するためである。

4. 解析例

4—1 対象モデルと解析条件

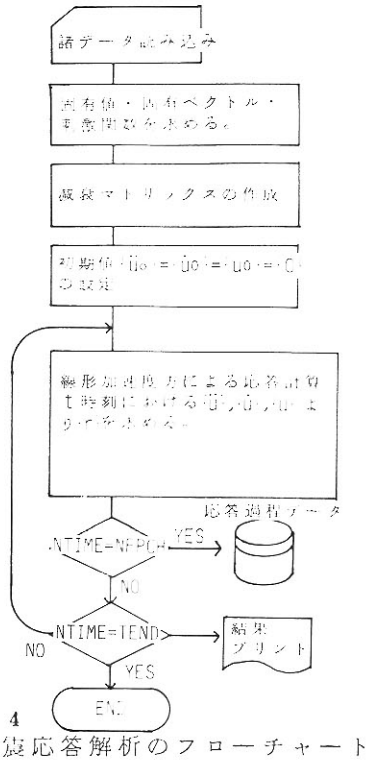


図 4 地震応答解析のフローチャート

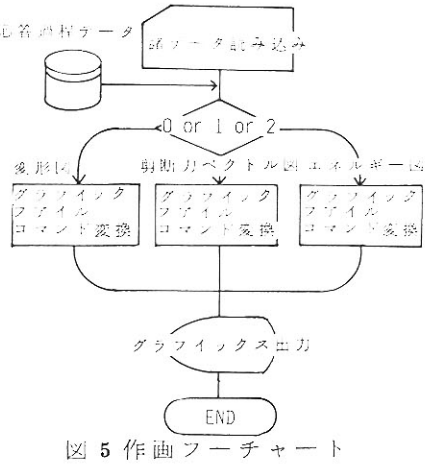
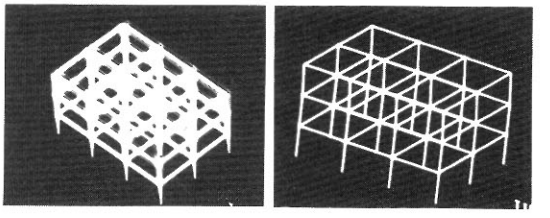


図 5 作画フーチャート



1枚前画面　　コマ撮り

写真 1 変　形　図

図6に示す様な、3階建、階高350cm、梁間方向2スパン、桁行方向3スパン、どちらもスパン長600cmの建物を対象とし、弾性および、弾塑性解析を行なう。剛性は、各階、同じ位置にある柱の剛性を等しくし、ねじれ振動が生じる様に、Y方向は、X1通りの柱の剛性を高め、他の柱は、すべて同じ剛性とし、X方向の柱の剛性は、すべて同じ値とする。減衰定数は振動数によらず一定の値5%とする。入力地震動は、X方向EL-CENTRO 1940 EW成分 最大加速度215.9gal，Y方向 EL-CENTRO 1940 NS成分 最大加速度319.19gal を使用し、積分間隔は、0.005秒とする。なお建物の諸データーは表1に示す。

4－2 解析結果

図7と8は地震動加速度記録と弾性及び弾塑性応答計算結果の中の、R階の重心のX方向及びY方向の変位応答時刻歴を示す。その中の四角でかこんだ時刻間の変形，歪エネルギー等の様子を3次元グラフィックで示す。

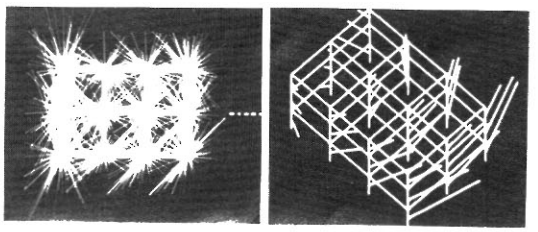


写真2 剪 断 力 ベ ク ト ル 図

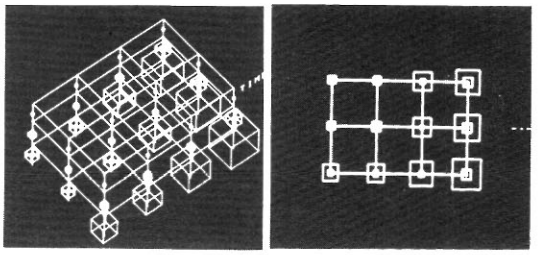


写真3 エ ネ ル ギ ー 図

表1 建 物 の 諸 デ ー タ

質 点 の デ ー タ

	重量 ton	慣性モーメント ton.cm²	重心位置 cm X座標	Y座標	Z座標
2F	216.	8.424×10^7	900.	600.	350.
3F	216.	8.424×10^7	900.	600.	350.
RF	216.	8.424×10^7	900.	600.	350.

バ ネ の デ ー タ（各階同じ）

通り		X1 X方向	X1 Y方向	X2 X方向	X2 Y方向	X3 X方向	X3 Y方向	X4 X方向	X4 Y方向
Y3	K1	97.52	246.3	97.52	49.26	97.52	49.26	97.52	49.26
	K2	1.97	4.926	1.97	0.9852	1.97	0.9852	1.97	0.9852
	Qy	32.4	81.0	32.4	16.2	32.4	16.2	32.4	18.4
Y2	K1	97.52	246.3	97.52	49.26	97.52	49.26	97.52	49.26
	K2	1.97	4.926	1.97	0.9852	1.97	0.9852	1.97	0.9852
	Qy	32.4	81.0	32.4	16.2	32.4	16.2	32.4	18.4
Y1	K1	97.52	246.3	97.52	49.26	97.52	49.26	97.52	49.26
	K2	1.97	4.926	1.97	0.9852	1.97	0.9852	1.97	0.9852
	Qy	32.4	81.0	32.4	16.2	32.4	16.2	32.4	18.4

（単位 K:t ton/cm，Qy:t ton）

建 物 の 固 有 周 期（秒）

	1 次 周 期	2 次 周 期
X 方 向	0.21	0.09
Y 方 向	0.24	0.10

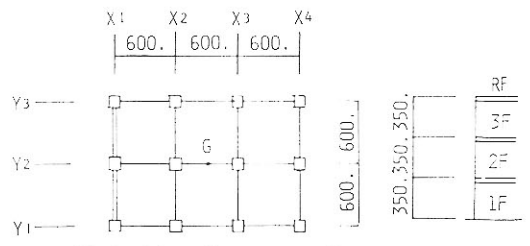


図6 対 象 モ デ ル

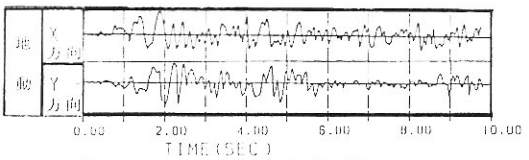


図7 地震加速度記録

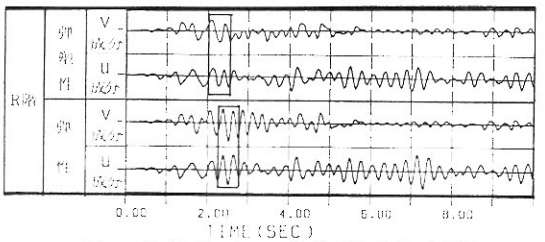
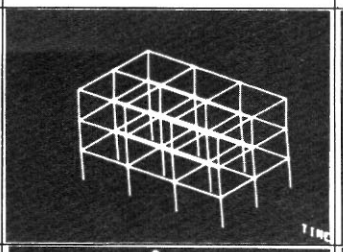
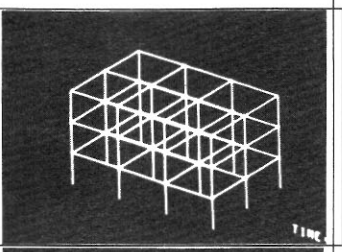
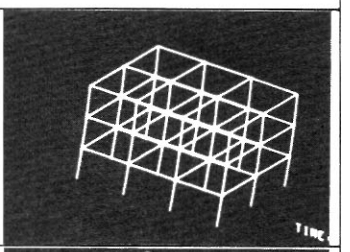
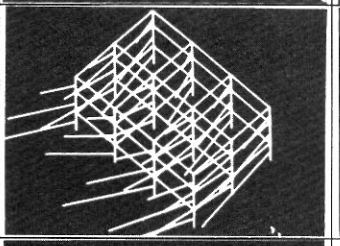
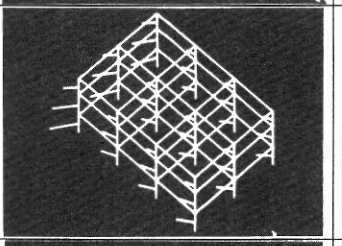
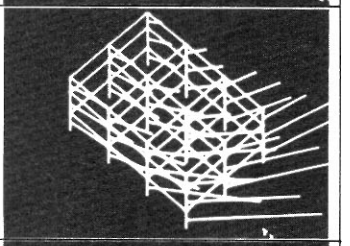
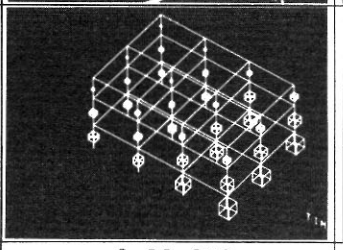
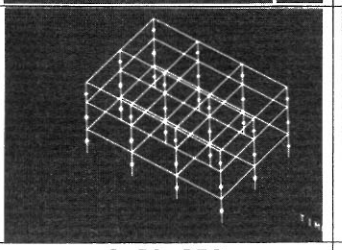
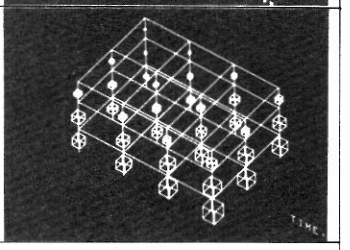
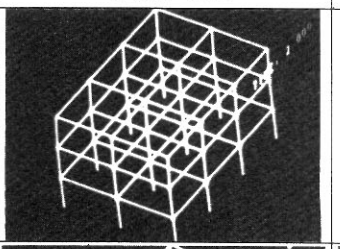
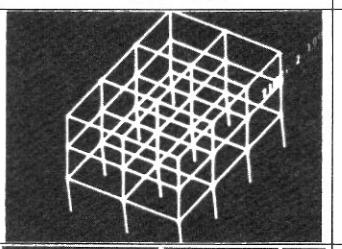
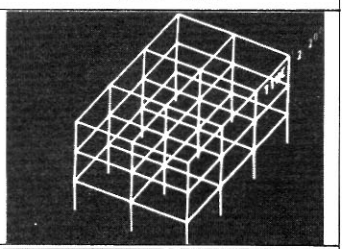
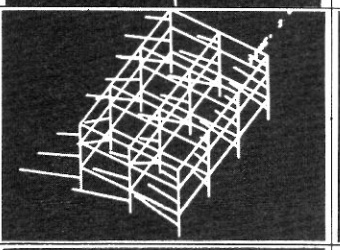
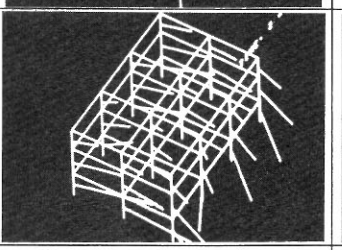
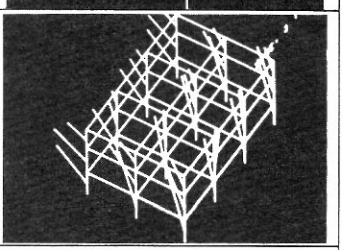
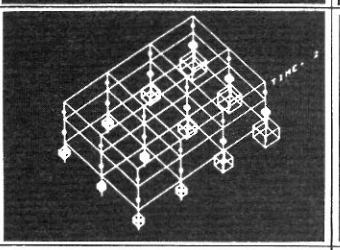
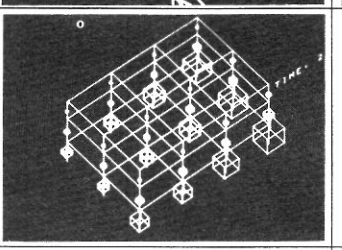
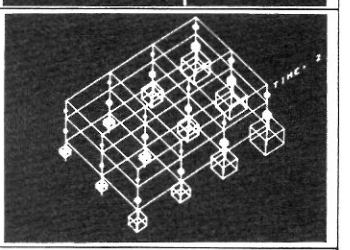
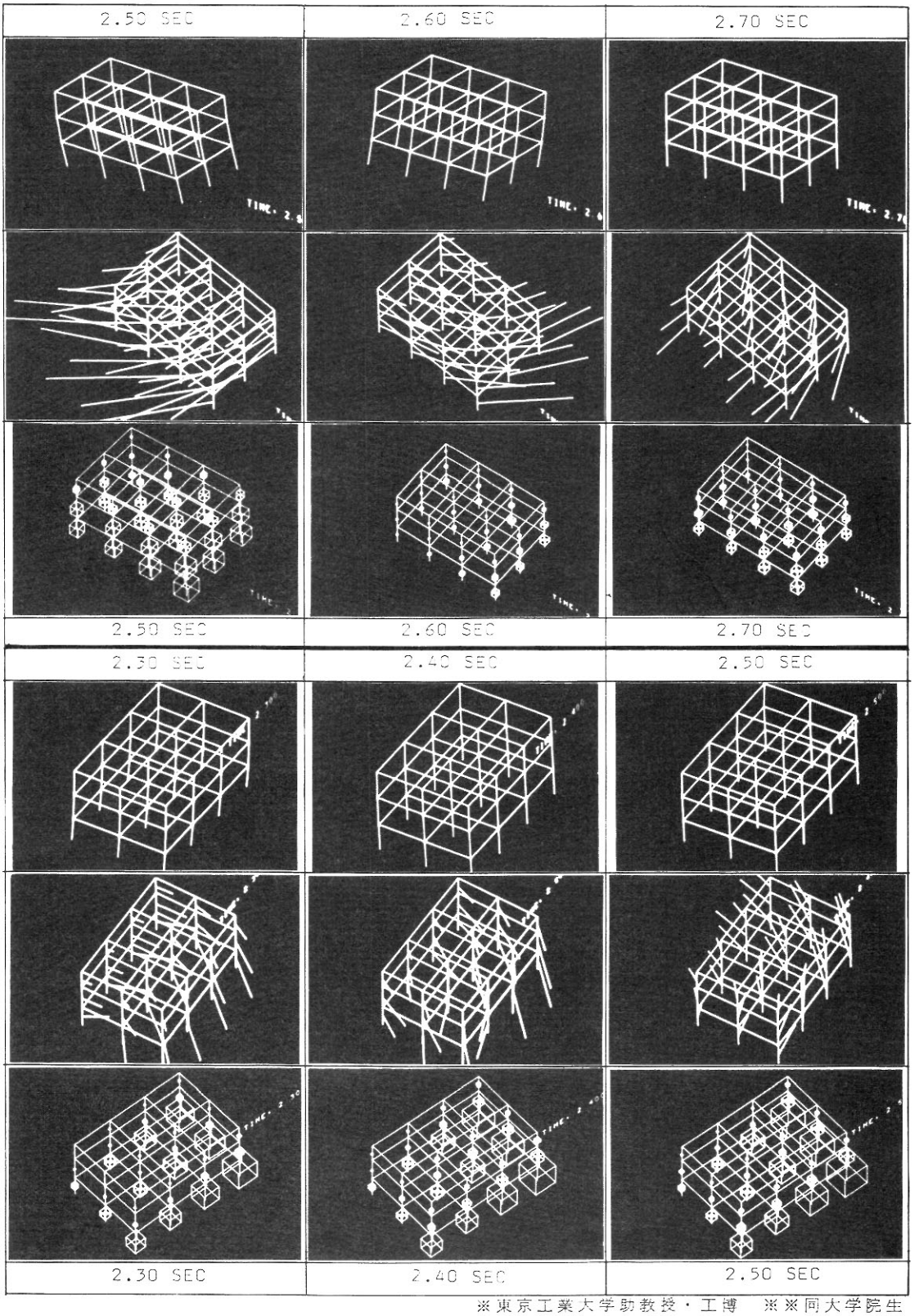


図8 R階重心の変位応答時刻歴

時刻		2.20 SEC	2.30 SEC	2.40 SEC
弾性	変形図			
	ベクトル図			
	エネルギー図			
時刻		2.20 SEC	2.30 SEC	2.40 SEC

時刻		2.00 SEC	2.10 SEC	2.20 SEC
弾塑性	変形図			
	ベクトル図			
	エネルギー図			
時刻		2.00 SEC	2.10 SEC	2.20 SEC



※東京工業大学助教授・工博　※※同大学院生

APPLICATION OF THREE-DIMENSIONAL GRAPHICS TO RESPONSE ANALYSIS ON BUILDING STRUCTURES

Akira Wada *1
Masahiko Kinoshita *2

One of the most successful applications of computers in the structural engineering field is the analysis of dynamic response of building structures hit by an earthquake. This was initially applied to the structural design of high-rize buildings, subsequently, to low-rize buildings for aseismic structural design and more recently, to the structural design of nuclear power plants.

The aim of this research is to visually express progress in dynamic response calculations done by computer using the remarkable new development of graphic displays.

This meens that how the occasional momentary vibration of buildings, the shear force vector of each column and strain energy distribution change dynamically, is shown.

*1 : Associate Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.
*2 : Graduate Student, Tokyo Institute of Technology