

---

鉄骨建家の実大模型振動実験

Vibration Test of Steel Structure Model

荻野 英也(Hideya Ogino) 高田 千一郎(Senichiro Takada)

---

要旨：

床および壁に ALC 板を使用した 4 層 1 スパンの鉄骨建家に大型起振機により，強制振動を与え，各部の破壊状況を観察するとともに，周期，モード・減衰定数の変化を調べた。強制力を大きくするに従い，建家の周期，減衰定数は大きくなるが，鉄骨骨組は大きな変形に対しても十分な靱性を持ち，急激な剛性の低下は，みとめられない。ALC 板などの 2 次部材は 6.0～7.0c/s で破壊現象が発生する。6.0～7.0c/s の 1 次共振振動数を持つ鉄骨建家については十分な注意を必要とする。

---

Synopsis：

A test was made to study the vibration properties of a four-storied bay-framed steel structure, floored and walled with autocranted lightweight concrete. In this test the model structure was vibrated by means of an oscillator of big capacity, to make it possible to observe the development of destruction of each part of the structure and investigate the natural frequency, vibration mode, damping coefficient and their relation to the unbalanced moment of the oscillator. As an increased force was added, the natural frequency and damping coefficient of the model structure also increased, but no great decrease in stiffness was noted in the steel frames themselves, proving that they possessed sufficient toughness against major deformations. In contrast, the secondary structural materials, including the autocranted lightweight concrete panels, were observed to suffer destruction under the resonance oscillation frequency of 6.0 to 7.0c/s. Therefore, a considerable precaution should be taken as to the steel-framed buildings with primary resonance oscillation frequency ranging from 6.0 to 7.0c/s.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

|                   |
|-------------------|
| 本文は次のページから閲覧できます。 |
|-------------------|

## 鉄骨建家の実大模型振動実験

## Vibration Test of Steel Structure Model

荻野 英也\*

Hideya Ogino

高田 千一郎\*\*

Senichiro Takada

## Synopsis :

A test was made to study the vibration properties of a four-storied bay-framed steel structure, floored and walled with autocranted lightweight concrete.

In this test the model structure was vibrated by means of an oscillator of big capacity, to make it possible to observe the development of destruction of each part of the structure and investigate the natural frequency, vibration mode, damping coefficient and their relation to the unbalanced moment of the oscillator.

As an increased force was added, the natural frequency and damping coefficient of the model structure also increased, but no great decrease in stiffness was noted in the steel frames themselves, proving that they possessed sufficient toughness against major deformations. In contrast, the secondary structural materials, including the autocranted lightweight concrete panels, were observed to suffer destruction under the resonance oscillation frequency of 6.0 to 7.0 c/s. Therefore, a considerable precaution should be taken as to the steel-framed buildings with primary resonance oscillation frequency ranging from 6.0 to 7.0 c/s.

## 1. 緒 言

鉄骨建家で一方向をラーメン構造、他方向をブレース構造とするものは最近各地で建てられており、比較的大規模な建家も多い。この種の建物には建家全体の重量や鉄骨重量の軽減、工期の短縮および工事費の節約のため、床・壁に ALC 板がつかわれているが、比較的歴史が浅く地震時の被害または破壊状況は十分に把握されていない。この実験では床および壁に ALC 板を使用した 4 層 1 スパン、2 層 1 スパンの鉄骨建家に、大型起振機で強制振動を与え、建家各部の破壊状況を明らかにするために、次の 4 項目について調査した。

(1) 建家の振動にともなう ALC 板一主として壁板一の主地、梁との取付け部の逃げなどに注目し、面内方向だけでなく、面と直交方向の振動

に対する挙動

(2) 建家各部の振動に伴う、耐火被覆の変形追従性および振動性状

(3) ALC 板・耐火被覆が建家全体の振動特性(固有周期、減衰定数など)に及ぼす影響

(4) 骨組の大変形後の振動性状の変化

起振機の容量の関係で、柱の部材角にして 1/75 ~ 1/100 程度の予想される最大の振幅を与えることは不可能であったが、烈・激震時でも上記の最大振幅は数回の繰返しにとどまり、その他はその半分以下の振幅が多数繰返されることに着目した。したがって振動実験の途中に部材角最大 1/75 程度の静加力による大振幅実験をはさみ、その前後に部材角最大 1/200 程度の強制振動実験を行ない、大変形後の振動特性の変化を調べようとした。また減衰定数を調べるために、マンパワーによる自由振動実験を行なった。実験の一覧表を表 1 に示す。

\* 本社建材開発部建築開発室課長

\*\* 本社建材開発部建築開発室

表 1 実験一覧

| 試験体                   | 偏心モーメント<br>(kg・cm) | 振動数<br>(c/s) | 備 考                             |
|-----------------------|--------------------|--------------|---------------------------------|
| 2<br>層<br>試<br>験<br>体 | 200                | 2.98~10.75   | $f_1=5.4$ c/s                   |
|                       | 600                | 2.0 ~ 4.93   | 1次共振点通過せず                       |
|                       | 400                | 2.17~10.88   | へーベル板目地にキレツ                     |
|                       | 1,000              | 1.97~4.75    | 壁板コーナーにワレ                       |
|                       | 2,000              | 2.00~4.37    | 床板梁取付部ワレ                        |
|                       | 3,000              | 2.00~4.11    | 壁板目地モルタル剝離                      |
|                       | 自由振動               |              | $h_e=0.06\sim0.07$              |
|                       | 1,000              | 2.00~5.48    |                                 |
|                       | 200                | 2.95~7.96    | $f_1=6.00$ c/s                  |
|                       | 200                | 3.00~6.10    | $f_1=6.00$ c/s                  |
| 4<br>層<br>試<br>験<br>体 | 1,000              | 3.95~5.50    |                                 |
|                       | 2,000              | 3.00~4.75    |                                 |
|                       | 4,000              | 3.08~4.00    |                                 |
|                       | 800                | 1.00~10.18   | $f_1=2.47$ c/s<br>$f_2=6.5$ c/s |
|                       | 1,000              | 0.0 ~ 4.28   | $f_1=2.41$                      |
|                       | 2,000              | 0.5 ~ 4.23   | $f_1=2.27$                      |
|                       | 3,000              | 0.5 ~ 4.22   | $f_1=2.14$                      |
|                       | 4,000              | 0.5 ~ 4.44   | $f_1=2.10$                      |
|                       | 6,000              | 0.5 ~ 3.07   | $f_1=1.95$                      |
|                       | 静加力実験              |              | 3階床位置に水平力                       |
| 4<br>層<br>試<br>験<br>体 | 4,000              | 1.00~4.37    | $f_1=2.00$ c/s                  |
|                       | 6,000              | 0.5 ~ 3.00   | $f_1=1.95$<br>$f_1=1.98$        |
|                       | 800                | 0.5 ~ 9.60   | $f_2=5.4$ c/s                   |
|                       | 自由振動               |              | $h_e=0.04\sim0.05$              |

$f_1, f_2$ : 1次, 2次共振振動数  
 $h_e$ : 減衰定数

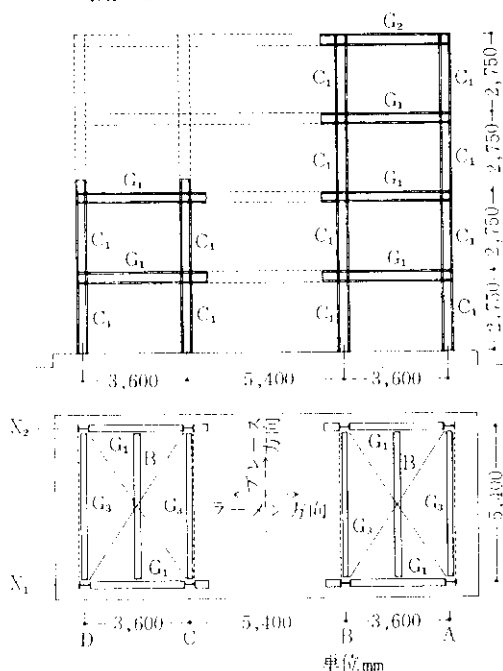


図 1 試験体骨組 (軸組および伏図)

## 2. 試験体および実験方法

### 2.1 試験体

図 1 に示すような桁行方向 3 スパン、梁間方向 1 スパン、4 階建の純鉄骨建家から、基礎部で連結された 4 層および 2 層 1 スパンの試験体を作製した。両試験体ともスパン 3.6 m のラーメン構造とスパン 5.4 m のブレース構造であり、床面には ALC 板をならべ、床の水平剛性を高めるために、水平ブレースを入れた。4 層試験体では床の ALC 板上に厚さ 20 mm のモルタル仕上げを行ない、壁についても図 2 に示すように 1 部分、床と同様にモルタル仕上げをした。2 層試験体には鉄骨の耐火被覆材を貼りつけなかったが 4 層試験体には各種の被覆材を貼りつけた。

次に各部の詳細について述べる。

柱、梁材はフランジ (厚さ 6 mm) とウェブ (厚さ 4.5 mm) をユニオンメルトで片面すみ肉溶接した H 形鋼である。使用鋼材の機械的性質、部材の断面性能は表 2 に示すとおりである。ラーメン構造部の柱梁の継手は工場溶接による持ち出し継手で、継手部はリベットによった。

壁・床板は厚さ 100 mm、幅 600 mm の ALC 板を使用した。図 2 に ALC 板の割付けおよび取付詳細を示す。

表 2-1 機械的性質

|         | 降伏点 (t/cm <sup>2</sup> ) | 最大強度 (t/cm <sup>2</sup> ) |
|---------|--------------------------|---------------------------|
| フ ラ ン ジ | 2.97                     | 4.23                      |
| ウ ェ ブ   | 2.77                     | 4.10                      |

表 2-2 主部材の断面性能

| 部材名            | 寸 法 mm                            | 断面積 (cm <sup>2</sup> ) | 断面 2 次モーメント (cm <sup>4</sup> ) | 断面係数 (cm <sup>3</sup> ) |
|----------------|-----------------------------------|------------------------|--------------------------------|-------------------------|
|                | H B t <sub>1</sub> t <sub>2</sub> |                        |                                |                         |
| C <sub>1</sub> | 350 180 4.5 6.0                   | 36.8                   | 7838.8                         | 447.9                   |
| G <sub>1</sub> | 350 135 4.5 6.0                   | 31.4                   | 6241.1                         | 356.9                   |
| G <sub>2</sub> | 250 180 4.5 6.0                   | 32.3                   | 3721.1                         | 297.6                   |
| G <sub>3</sub> | 350 135 4.5 6.0                   | 31.4                   | 624.1                          | 356.9                   |

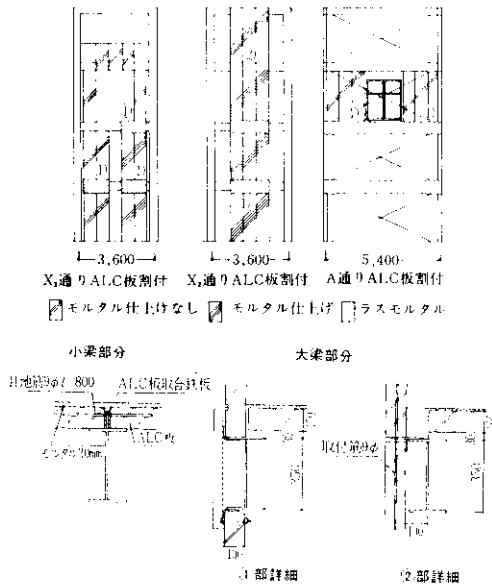


図 2 ALC 壁板の割付けおよび取付詳細

耐火被覆材はH, L, T-被覆材およびラスモルタルの4種類でH-被覆材は接着材およびボルトにより, またL, T-被覆材は接着材により梁にはりつけ, ラスモルタルは柱および梁に貼りつけた。各耐火被覆材の割付を図3に, 取付詳細を図4に, 各耐火被覆材の性質を表3に示した。

表 3 耐火被覆材の性質

|                               | H-被覆材                | L-被覆材 | T-被覆材 |
|-------------------------------|----------------------|-------|-------|
| 気 乾 比 重                       | 0.6                  | 0.65  | 0.2   |
| 設 計 用 比 重                     | 0.55                 | —     | 0.25  |
| 圧縮強さ (kg/cm <sup>2</sup> )    | 40                   | —     | 7.0   |
| 引張強さ (kg/cm <sup>2</sup> )    | 5                    | 0.694 | —     |
| 曲げ強さ (kg/cm <sup>2</sup> )    | 1.0                  | 6.53  | 5.0   |
| せん断強さ (kg/cm <sup>2</sup> )   | 5                    | 9.42  | —     |
| 弾 性 係 数 (kg/cm <sup>2</sup> ) | 1.75×10 <sup>4</sup> | —     | —     |

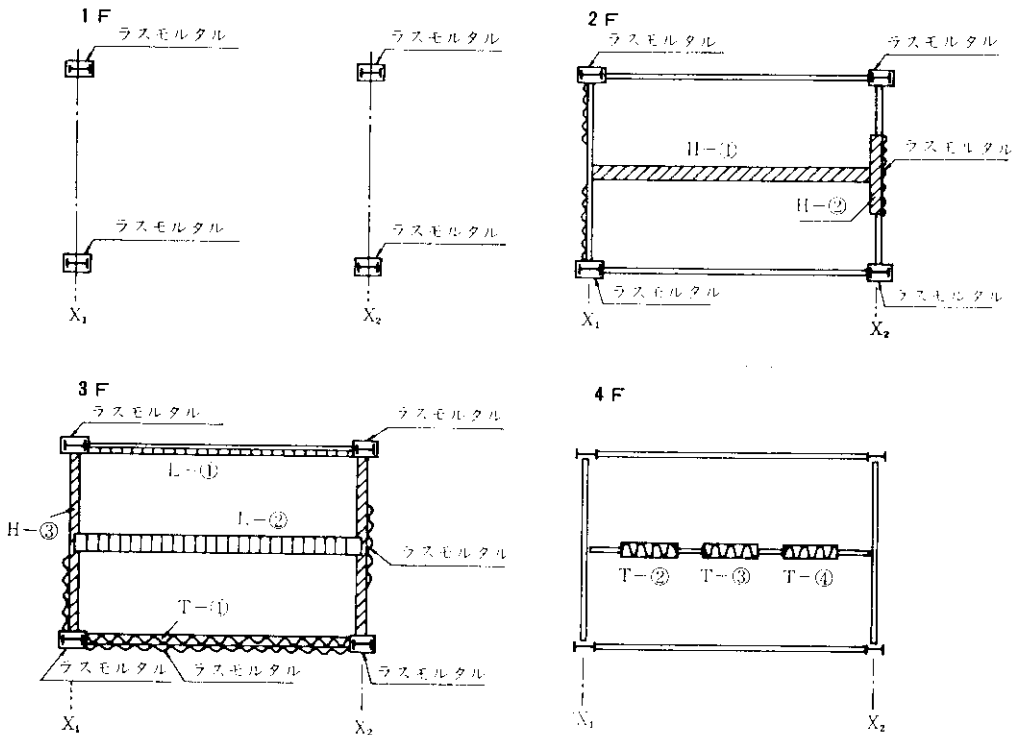


図 3 耐火被覆材の割付

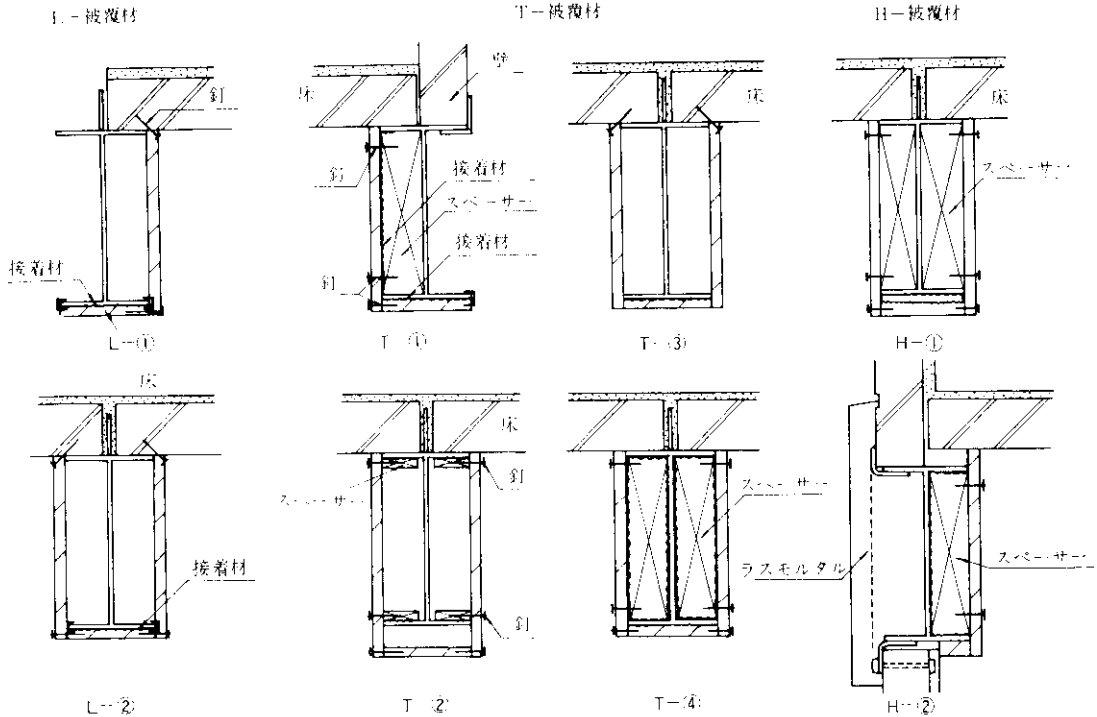


図4 耐火被覆取付詳細

## 2.2 実験方法

### (1) 加振方法・加力方法

使用した起振機の性能は表4に示すようなもので、2層試験体にはBCS-A-200型3t起振機を、4層試験体には早坂電機製の10t起振機を使用した。その配置は図5に示すとおりで、いずれも最上階に鉄骨を組んで設置し、ラーメン方向に加振した。表1に示すように、2層試験体では偏心モーメントを200から4,000 kg・cmまで、4層試験

体では800から6,000 kg・cmまで変化させ、それぞれ7, 6段階に分けた。

静加力実験は4層試験体のX<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>フレームの3階床梁の位置で、2台の50tオイルジャッキにより、柱の部材角が1/75を超えないように加力した。

### (2) 計器および測定法

振動実験の各部の絶対変位は、加速度計、微動計(速度計)を主にして測定し、2階および3階

表4 起振機の性能

|               | BCS-A-200                                | 早坂電機製                          |
|---------------|------------------------------------------|--------------------------------|
| 起振力(t)        | 3                                        | 10                             |
| 偏心モーメント(kg・m) | 第1, 第2段 10~200<br>第3段 2~101              | 0.8~375                        |
| 振動数(c/s)      | 第1段 0.2~2.0<br>第2段 0.8~8.0<br>第3段 2.0~20 | 0.3~3.0<br>0.6~6.0<br>1.0~10.0 |
| 起振方向          | 水平・2方向                                   | 水平・1方向                         |
| 起振力波形         | 正弦波                                      | 正弦波                            |
| 電源            | 200V 20A                                 | 200V 100A                      |
| 出力            | 3.75kW                                   | 15kW                           |

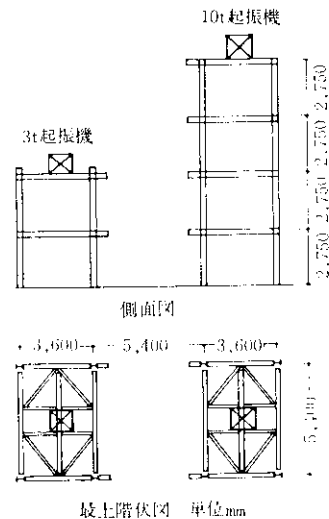


図5 起振機据付図

床位置の基礎に対するラーメン方向の相対水平変位は、土間コンクリート部より不動点ポストを立て、板バネ型の変位計で測定した。骨組の歪度は1階柱脚、2階鉛直ブレース、および4階床水平ブレースにストレン・ゲージをはりつけて測定した。記録は各偏心モーメントについて、振動数を徐々に変化させ、各振動数ごとにオシログラフ4台で同時記録を行なった。

静加力実験の水平変位は、2階床および3階床の変位だけを不動点よりダイヤル・ゲージで測定した。

### 3. 実験結果

2層試験体では、起振機の容量の関係で偏心モーメント  $200 \text{ kg}\cdot\text{cm}$ 、 $400 \text{ kg}\cdot\text{cm}$  の場合以外は、1次共振点を通過することができず、最大振幅も柱の部材角にして  $1/500$  程度であった。したがって鉄骨骨組、基礎部に破壊現象も現われず、破壊現象と個有周期の関係を調べられなかった。2層試験体の ALC 壁板の破壊状況は4層試験体のモルタル仕上げがない壁板と同じであり、ALC 床板の破壊状況は、モルタル仕上げがないために、4層試験体と異なった。したがって、4層試験体の実験を中心に述べ、床板の破壊状況の違いについては4・3で簡単に述べることにする。

#### 3.1 破壊状況

破壊の様式は次の3つに大別される。

- (i) ブレース方向の梁とスラブの共振による壁板・耐火被覆の破壊
  - (ii) ラーメン方向の主としてロッキング振動による壁板および耐火被覆の破壊
  - (iii) 骨組の大変形にともなうラスモルタルその他の破壊
- 以下この順に破壊状況を述べる。

##### 3.1.1 ブレース方向の梁とスラブの共振による壁板・耐火被覆の破壊

これは振動方向と直交する方向の面に生じた破壊であり、最初に行なった偏心モーメント  $800 \text{ kg}\cdot\text{cm}$  の実験で著しく破壊が進展した。すなわち1

次共振点(約  $2.5 \text{ c/s}$ )で建物全体の振幅は最も大きくなるが、ブレース方向の部材にはまったく破壊現象は現われなかった。振動数が共振点を越えて  $5.0 \text{ c/s}$  あたりから最上階および4階床のブレース方向の妻面梁は加振方向(梁についていえば面外方向)に梁自体の振れを伴ってゆれだし、振動数の増加とともに、しだいにゆれが大きくなり、 $6.3 \text{ c/s}$  で最大となったが3階床の梁の振動はあまり大きくならなかった。したがって3階梁と4階梁との間に大きな相対変位を生じ、これがブレース方向の壁板、耐火被覆の破壊をひきおこしたと思われる。 $6.3 \text{ c/s}$  における3階および4階床梁の振動性状は図6に示すとおりである。偏心モーメント  $1,000 \text{ kg}\cdot\text{cm}$  ~  $6,000 \text{ kg}\cdot\text{cm}$  の実験では  $5.0 \text{ c/s}$  以上に振動数をあげていないため、ブレース方向の各部材には、まったく破壊現象は現われなかった。したがって最初の偏心モーメント  $800 \text{ kg}\cdot\text{cm}$  の場合の実験を中心に各部位別に破壊現象を次に述べる。

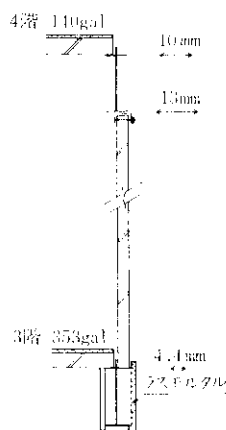


図6 振動数  $6.3 \text{ c/s}$  における妻面梁振動状態

ALC 壁板は最初の偏心モーメント  $800 \text{ kg}\cdot\text{cm}$  の  $5.4 \text{ c/s}$  で壁板の縦目地モルタルが剝離し、 $6.1 \text{ c/s}$  で目地モルタルは一部脱落し、 $6.93 \text{ c/s}$  では壁板上部の止め金具周囲の ALC 板にひびわれが発生し、金具がゆるむ。さらに振動数を増すと、止め金具周囲の摩耗が激しくなり、目地周辺の ALC 板が、かけた。

耐火被覆の破壊は ALC 壁板と同様、最初の偏心モーメント  $800 \text{ kg}\cdot\text{cm}$  の場合に集中した。特に妻面梁は、フランジ下面に鉛直ブレースが溶接されているために、ブレース自身の振動によって、梁フランジ下面の耐火被覆材に早期に破壊が現われ、梁自身の振れ振動により、さらに破壊が進展する。これに対して試験体中央の小梁の耐火被覆材には破壊は少なかった。各被覆材の破壊現象を列挙する。

(i) 3階床妻面梁のL-被覆材は、最初の偏心モーメント  $800 \text{ kg}\cdot\text{cm}$  の  $6.39 \text{ c/s}$  で、鉛直ブレースが溶接されているフランジ下面と、梁中央のフランジ下面で、落下しはじめ、それと同時に梁全体の被覆材が落下した。

(ii) 3階床妻面梁のT-被覆材は、最初の偏心モーメント  $800 \text{ kg}\cdot\text{cm}$ 、 $9.18 \text{ c/s}$  で鉛直ブレースが溶接されている梁下端フランジ下面の被覆材が落下した。しかしL-被覆材のように梁全体の被覆材は落下しなかった。同時点で図4のT-被覆材②が落下した。その順序は、床板と被覆材の接着面が剝離し、つぎにスパーサーと梁、さらに側板とスパーサーの接着面が離れた。

(iii) ラスモルタルは特に顕著な破壊現象はないが、最後の偏心モーメント  $800 \text{ kg}\cdot\text{cm}$  で振動数が  $6.0 \text{ c/s}$  を超えると、3階床妻面梁のラスモルタルは梁と剝離をはじめた。

(iv) 2階および3階床小梁のHおよびL-被覆材は実験終了まで破壊は生じなかった。

### 3.1.2 ラーメン方向の主としてロッキング振動による壁板および耐火被覆の破壊

これはラーメン方向、すなわち加振方向面内の破壊で、主として ALC 壁板のロッキング振動にともなって生じた。これもブレース方向と同様、最初の偏心モーメント  $800 \text{ kg}\cdot\text{cm}$  の場合に破壊が集中し、以後の実験では顕著な進展は見られなかった。壁の破壊はモルタル仕上げのないものが著しく、 $6.3 \text{ c/s}$  付近ではロッキングの共振現象をおこし、個々の板に分離して振動した。一方モルタル仕上げのある壁板は全体としてゆれ、部分的な破壊が生じたが顕著ではない。表5に各階床の加速度と変位を示した。3階床の変位が大きく、その上下の層の層間変位が大きいことがわかる。

表5 各階床の加速度および変位 (偏心モーメント  $800 \text{ kg}\cdot\text{cm}$   $6.3 \text{ c/s}$ )

| 位 置 | 加速度 (gal) | 変 位 (mm) |
|-----|-----------|----------|
| 5 F | 86.0      | 0.55     |
| 4 F | 139.9     | 0.9      |
| 3 F | 352.5     | 2.3      |
| 2 F | 87.7      | 0.6      |

耐火被覆材は壁の振動にともない、破壊が進展した。以下、各部材の破壊状況を述べる。

#### (i) 仕上げのない ALC 壁板

最初の偏心モーメント  $800 \text{ kg}\cdot\text{cm}$ 、 $4.0 \text{ c/s}$  で2階壁板上部の止め金具のボルトがゆるみ、壁板のボルト穴がしだいに大きくなり、 $6.3 \text{ c/s}$  では目地モルタルにひびわれが発生し、次第にひびわれが大きくなる。それと同時に壁板は個々の ALC 板 (幅  $600 \text{ mm}$ ) に分離し、壁として一体性がなくなった。

#### (ii) 仕上げのある ALC 壁板

最初の偏心モーメント  $800 \text{ kg}\cdot\text{cm}$ 、 $2.0 \text{ c/s}$  (共振点付近) で試験体全体の変形が大きくなると、壁板と梁が接する部分で仕上げのモルタルがわずかに剝離した。同時点で床板と接する部分は床板と分離し、壁板と床板の一体性がなくなった。モルタル仕上げ面には実験前に収縮亀裂が見られたが、実験による新しいひびわれは認められなかった。

#### (iii) 耐火被覆

H-被覆材は最初の偏心モーメント  $800 \text{ kg}\cdot\text{cm}$   $2.5 \text{ c/s}$  付近で梁側面の目地部および、壁と接着されている面に亀裂が発生し、梁側面の被覆材は  $5.5 \text{ c/s}$  で一部落下し、梁下フランジ面の被覆材は  $6.0 \text{ c/s}$  付近で大部分落下した。ボルト締によるH-被覆材は、各偏心モーメントの共振点付近で建家全体の変形が大きくなると、梁の変形に追従できず、ボルト穴が大きくなるが、ひびわれ、落下などの破壊は発生しなかった。

梁・柱のラスモルタルは最初と最後の偏心モーメント  $800 \text{ kg}\cdot\text{cm}$  で振動数が  $6.0 \text{ c/s}$  を超えると、梁・柱とわずかに分離するが、顕著な破壊にはならなかった。

### 3.1.3 骨組の大変形にともなうラスモルタルその他の破壊

静加力による大変形実験およびその前後の偏心モーメント  $2,000 \sim 6,000 \text{ kg}\cdot\text{cm}$  の振動実験では、耐火被覆材、ALC 壁板・床板ともに顕著な破壊は現われなかった。しかし柱のラスモルタルは静加力実験前の偏心モーメント  $4,000, 6,000 \text{ kg}\cdot\text{cm}$  の共振点 ( $2.10, 1.95 \text{ c/s}$ ) 付近で、柱フランジ面

に縦にひびわれが発生し、また柱・梁の仕口部分にもひびわれが集中して発生した。静加力実験で柱の部材角が1/75に到達する付近では、振動実験によるひびわれが大きくなった。

上間コンクリートは静加力実験前の偏心モーメント2,000~4,000kg・cmの共振点(2.27~1.95c/s)付近で、試験体中央・ブレース方向にひびわれが発生し、X<sub>1</sub>からX<sub>2</sub>フレームまで横断し、基礎継ぎ梁にもひびわれが発生した。さらに静加力実験後の偏心モーメント6,000kg・cmの共振点(1.95c/s)では、ひびわれは1~2mmに広がる。同時点で上間コンクリート端部が約2~3mm浮き上り1階柱脚部周囲のコンクリートがわずかに剝離した。

鉄骨各部の歪度は振動実験中弾性範囲内であったが静加力実験で1階柱脚圧縮別フランジで局部座屈を生じたが、その後の振動実験でも弾性範囲内であり、その応力度は最大1.6t/cm<sup>2</sup>程度であった。

### 3.2 周期振動モード・減衰定数

周期および減衰定数は、最上階および3階床の加速度および変位計より、起振力一定に換算した共振曲線から求めた。振動モードは共振点の各部の変位から求めた。

#### 3.2.1 周 期

静加力実験前後の1次周期と偏心モーメントの関係を図7に示した。

図7からわかるように静加力実験以前では偏心モーメントが増大するにつれ1次周期はのび、偏心モーメント800kg・cmで0.4sec(2.5c/s)の

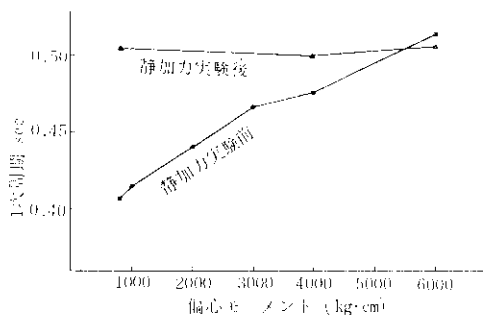


図7 1次周期と偏心モーメント

ものが最大偏心モーメント6,000kg・cmでは25%あまりのびて0.5sec(2.0c/s)になっている。静加力実験後は偏心モーメントに関係なく、1次周期はほぼ一定で、その値は静加力実験前の最大偏心モーメント6,000kg・cmのときの周期と同じである。

2次周期は梁の振れ振動、床板の振動、ブレース方向壁板の面外振動、ラーメン方向壁板のロッキング振動などが重なり、判別はむずかしいが、各部の破壊状況の観察結果および共振曲線から推定すると表6のようになった。

表6 2次周期および各部の周期

|              |           |
|--------------|-----------|
| 静加力実験前の2次周期  | 0.158 sec |
| 静加力実験後の2次周期  | 0.189 sec |
| ブレース方向梁の振れ周期 | 0.178 sec |
| 床板の上り振動周期    | 0.117 sec |

#### 3.2.2 振動モード

表7に偏心モーメント、周期、減衰定数、スウェイ率、ロッキング率および最上階変位の値を示す。

表7 実験結果一覧表

| 偏心モーメント<br>(kg・cm) | 1次周期<br>(sec) | 減衰定数<br>(%) | スウェイ<br>率<br>(%) | ロッキング<br>率<br>(%) | 最上階変<br>位<br>(mm) |
|--------------------|---------------|-------------|------------------|-------------------|-------------------|
| 800                | .407          | .020        | .3               | 1.3               | 11.7              |
| 1000               | .415          | .030        | 3.3              | 3.1               | 15.0              |
| 2000               | .440          | .037        | 4.6              | 7.7               | 24.6              |
| 3000               | .467          | .038        | 5.3              | 9.0               | 23.6              |
| 4000               | .476          | .032        | 2.7              | 8.1               | 41.1              |
| 6000               | .514          | .041        | 3.1              | 6.7               | 49.9              |
| 4000*              | .500          | .034        | 2.5              | 10.6              | 31.0              |
| 6000*              | .507          | .041        | 2.27             | 8.6               | 39.8              |
| 800*               | .505          | .049        | 1.4              | 6.8               | 10.6              |

\* 静加力実験後

静加力実験前のスウェイ率は偏心モーメント800kg・cmから3,000kg・cmまで、偏心モーメントを増大すると0.3%から5.3%まで大きくなるが、4,000kg・cm、6,000kg・cmでは2.7%、3.1%に低下する。静加力実験後では大きな変化はなく1.4%~2.5%である。

ロッキング率はスウェイ率と同じく静加力実験前は偏心モーメント3,000 kg・cmまで増大し、その後は減少する。静加力実験後は偏心モーメント4,000 kg・cmで最大となる。

スウェイ率、ロッキング率ともに最小であった時（最初の偏心モーメント800 kg・cm）とほぼ

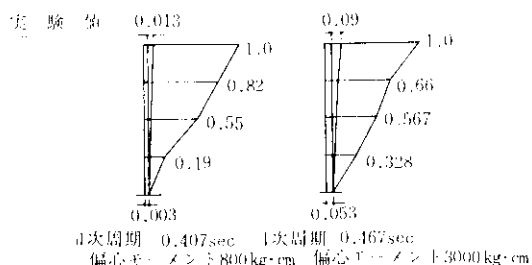
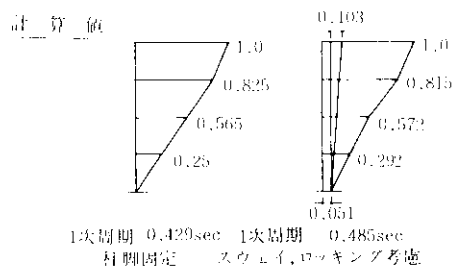


図8 振動モード（計算値，実験値）

最大になった時（偏心モーメント3,000 kg・cm）の振動モードの実験値および計算値を図8に示した。

### 3.2.3 減衰定数

減衰定数も偏心モーメントを増大すると3000 kg・cmまでは大きくなるが、偏心モーメント800 kg・cmの場合を除いて、静加力実験前後に大差なく3.2%~4.1%の間にある。偏心モーメント800 kg・cmの場合は、静加力実験で2.0%のものが、実験後は4.9%で、ほぼ2.5倍となる。強制振動実験後の自由振動では4~5%であった。

### 3.3 静加力実験の荷重変位曲線

3階床変位と荷重の関係を図9に示す。計算値と実験値は比較的良好に一致している。荷重は3階床の変位がほぼ一定になるように制御したため、各サイクルごとの最大荷重は徐々に低下している。降伏点を超え、柱の部材角で1/85付近で1階柱脚で局部座屈が発生し、変形は急速に進むが、耐力の低下はみられず、また各サイクルごとの立上り勾配にも大きな変化はない。

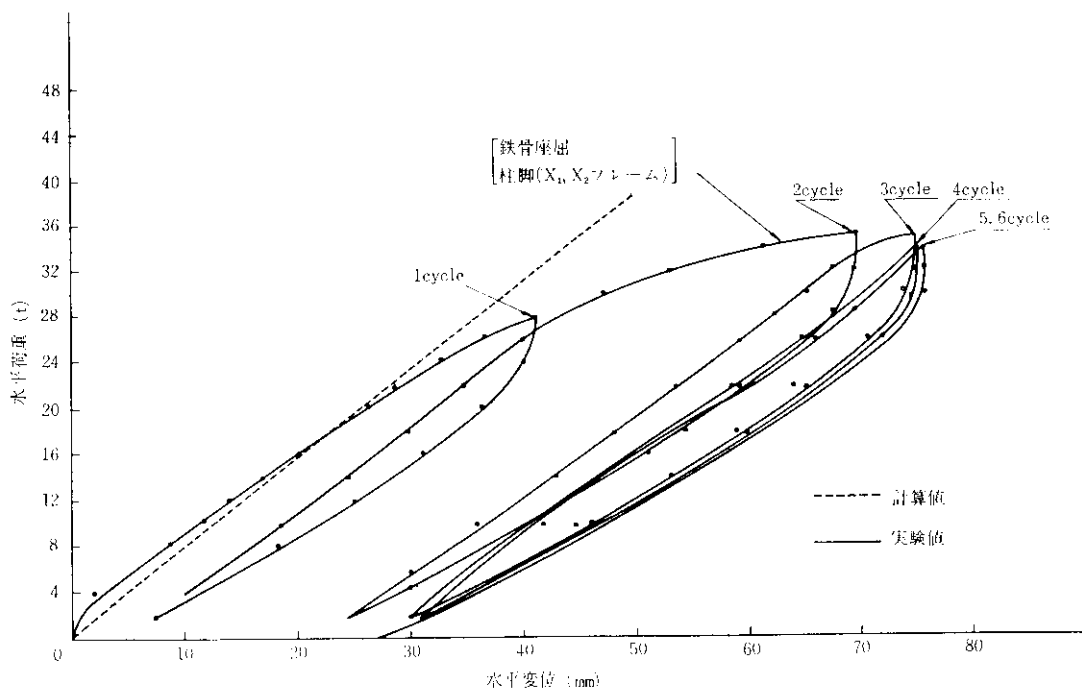


図9 3階床変位—荷重曲線（X<sub>1</sub> フレーム）

## 4. 考 察

破壊状況について、各部位別に検討し、周期・振動モードについては計算値と対応させ、さらにこの試験体を5質点の振動モデルに置換し、2種の地震記録をインプットし、その応答結果から、破壊現象を検討する。

### 4.1 ALC 壁板の破壊について

ALC 壁板の破壊状況は 3.1 で述べたようにラーメン方向（加振方向）とブレース方向とで著しく異なっているため、両者に分けて検討する。

#### (1) ブレース方向

壁の破壊の原因は梁自身の振れをとまなう面外方向（加振方向）のゆれ、および壁板にモルタル仕上げがないことである。ラスモルタル、被覆がない妻面梁の振れおよびゆれが著しかったのは床板が梁の両側になく、また床板と梁が十分に結合されていないため、梁の振れ、ゆれに対する拘束が不十分であったためと考えられる。ラスモルタル被覆のある妻面梁は、梁とラスモルタルとで、箱型の断面となり、梁の面外方向の剛性および振れ剛性が増大したため、振れおよびゆれが小さくなったと考えられる。

図6に示したように、4階梁の下端フランジでは13mm（両振幅）の変位で、3階梁はほぼ柱位置の変位（4.4mm）に等しいとすれば、壁板の層間変位は最大8.4mm（両振幅）となる。これは壁板の部材角にして1/290程度であるが、壁板の弾性変形は小さいと考えられるので、止め金具周辺で大きな変形を必要とする。またモルタル仕上げがないために、容易に金具周辺のひびわれおよび目地モルタルのきれつが発生しやすく、短時間で壁と梁の一体性を失ったと考えられる。

#### (2) ラーメン方向

ラーメン方向の壁板の破壊はモルタル仕上げの有無によっても左右されるが、壁板のロッキング振動により生じているので、この点についても数

値的に検討する。

モルタル仕上げのない壁板の破壊の原因は、ALC板と目地モルタルのなじみが悪いこと壁板としての一体性がなく、ALC板が取付金具に比較して柔いため、金具周辺の板が振動により削られ、壁板と梁の一体性を失い、壁板は幅600mmの単体に分離し、ロッキング振動をおこすためと考えられる。

モルタル仕上げのある壁板は梁、床との一体性は認められなかったが、モルタル仕上げにより壁板としての一体性を保ち、取付金具周辺のALC板のひびわれを少なくしたために、顕著な破壊が生じなかった。偏心モーメント4,000, 6,000kg・cmの共振点および静加力実験で鉄骨骨組の層間変位が大きくなると、壁と梁が接触する部分でモルタルがわずかに剝離するが、大きな破壊には到らな

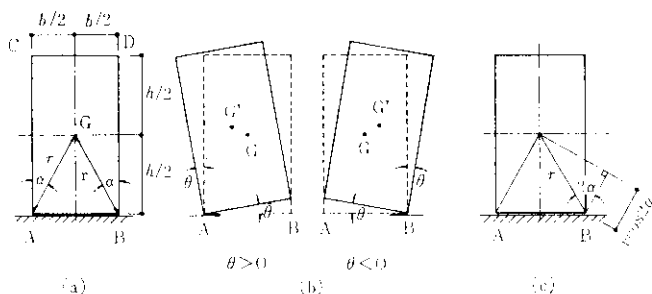


図10 剛体上の長方形板（剛体）のロッキング振動モデル

いことにより、実際の激震時でも安全であると推察される。

つぎに壁板のロッキングを剛体上の剛体の運動と仮定し、壁板を図10に示すような長方形にモデル化し、ロッキングによる変位量を調べた。

$I_{A(B)}$ ,  $I_G$  をそれぞれA(B)点、重心(G)周りの慣性モーメントすると、

$$I_{A(B)} = mr^2 + m \cdot h^2/12 + mb^2/12 \\ = 4mr^2/3$$

$$I_G = mr^2/3 \dots \dots \dots (1)$$

ただし  $m$  : 質量

$h$  : 高さ

$b$  : 幅

$r = \overline{AG}$  あるいは  $\overline{BG}$

ここで  $x_0$ ,  $y_0$  をそれぞれ水平、鉛直方向の地

動,  $g$  を重力の加速度とすると, A (B) 点に関する振動方程式は (2) 式となる。

$$I_{A(B)} d^2\theta/dt^2 \pm m(g+\ddot{y})r \sin(\alpha \mp \theta) - m\ddot{x}_0 V \cos(\alpha \mp \theta) = 0 \quad (2)$$

ただし  $\theta$  : 回転角

$\alpha$  :  $\angle GAC$  or  $\angle GBD$

B (A) 点まわりの角運動量は保存されるから, 図10の(c)状態での重心(G)の速度を  $V$  とすると

$$V = r(d\theta/dt)_{\theta=+0} \quad (3)$$

角運動量は

$$m \cdot r(d\theta/dt)_{\theta=+0} \cdot r \cos 2\alpha + I_G(d\theta/dt)_{\theta=+0} = I_B(d\theta/dt)_{\theta=-0} \quad (4)$$

$$\therefore (d\theta/dt)_{\theta=-0} = (1+3 \cos 2\alpha)/4 \cdot (d\theta/dt)_{\theta=+0}$$

したがってロッキングをする条件は

$$(1+3 \cos 2\alpha) > 0 \quad (5)$$

ゆえに,  $0 < \alpha < 50^\circ 44'$  であれば長方形の板は, ロッキングを生ずる。

またロッキングを始めるには, 次式を満足する必要がある。

$$|m\ddot{x}_0| \cdot h/2 \geq |(g-\ddot{y}_0)| \cdot m \cdot b/2 \quad (6)$$

また,  $g \gg \ddot{y}_0$  であるから, (6)式は

$$|\ddot{x}_0| \geq g \tan \alpha \quad (7)$$

となる。 $x_0 = A_0 \sin pt$  とすると (6)式は

$$A_0^2 P^2 / g \geq \tan \alpha \quad (8)$$

となる。一方 ALC 壁板は図 11 に示すように I, II, III の 3 タイプで使用されている。各タイプに

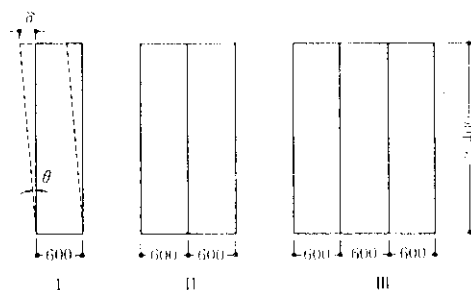


図 11 ALC 壁板のタイプ

表 8 各タイプの  $\alpha$ ,  $g \tan \alpha$  の値

| タイプ | $\tan \alpha$ | $\alpha$        | $g \tan \alpha$ | 実験で得られた加速度         |
|-----|---------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| I   | 0.25          | $14^\circ, 10'$ | 245gal          | $f=6.3$ c/s 353gal |
| II  | 0.5           | $26^\circ, 35'$ | 490gal          | $f=6.1$ 220gal     |
| III | 0.75          | $36^\circ, 50'$ | 735gal          |                    |

ついて上述の角度  $\alpha$ ,  $g \tan \alpha$  を求めると表 8 のようになる。各タイプともに角度  $\alpha$  は  $0^\circ \sim 50^\circ 44'$  の間にあるが, 実験ではタイプ I を除いてロッキングをおこさせるのに必要な加速度にならないことがわかる。タイプ II の板についてロッキングによる板頂部の変位を計算すると表 9 のようになる。ただし入力としては 3 階床位置の加速度を用いた。

表 9 ロッキングによる壁板頂部の変位

| 振動数 (c/s) | 回転角 (radi)             | 変位 (mm) |
|-----------|------------------------|---------|
| 6.1       | $0.289 \times 10^{-2}$ | 7.15    |
| 6.3       | $0.34 \times 10^{-2}$  | 8.15    |
| 7.5       | $0.21 \times 10^{-2}$  | 5.04    |
| 7.8       | $0.239 \times 10^{-2}$ | 5.68    |

以上の結果から, ALC 板単体 (タイプ I の板) は, 最大 8 mm 程度変位することがわかる。実際には梁の上は剛体とは考えられず, 鉛直方向の加速度, 梁のラーメン内での回転もあるために, もっと小さい加速度でロッキングをおこすと考えられる。

壁のロッキングを防ぐためには, モルタル仕上げなどを行ない, 壁板として一体性のあるものにするとともに, 取付金具周辺の保護をすることが必要である。

## 4.2 耐火被覆の破壊について

### (1) ブレース方向梁の耐火被覆

すでに述べたようにブレース方向妻面梁の耐火被覆は梁の捩れおよび面外方向へのゆれとブレースの振動により破壊された。一方試験体中央の小

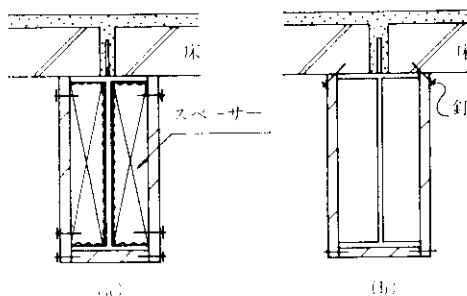


図 12 被覆材の取付方法

梁の耐火被覆は、小梁の両側の ALC 床板と日地の鉄筋、プレートなどで、小梁と床がある程度剛に結合され、小梁の振れを拘束しているために、破壊が少なかった。他に破壊に影響する要素としては、被覆材のとりつけ方法がある。すなわち、図 12(a) のように上下フランジ間に、被覆材の取付けと補強をかねたスペーサーのあるものは破壊が小さい。特にスペーサーの大きいものは効果的である。図 12(b) のように被覆材と床板を釘で結合した場合は、床板と梁の動きが異なるために有効ではない。これは接着材についても同様である。このような取付け方をする場合には、床板と梁が剛に結合されていることが必要である。

#### (2) ラーメン方向梁の耐火被覆について

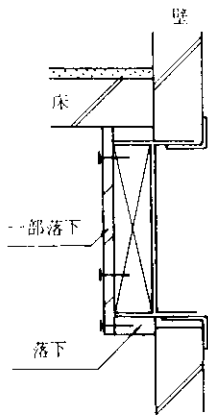


図 13 II 被覆材の破壊状況

破壊は図 13 に示すように梁下フランジ面の被覆材が多い。これは梁と壁板の動きが異なり、被覆材と壁面の接着剤に大きいせん断力が働くためと考えられる。フランジ下面の被覆材が破壊・落下すると梁側面の被覆材も接着面積が小さくなり落下する傾向がある。

### 4.3 床板の破壊について

2 層試験体では床板に使用した ALC 板にモルタル仕上げをしなかったため、容易に日地に亀裂が発生する。ブレース方向、妻面梁の振れ振動が最大になると、日地のモルタルはすべて板から剝離し、床板としての一体性を失う。一方モルタル仕上げをした 4 層試験体では、ほぼ板としての一体性を保ち、試験体中央の小梁の振れを拘束する効果があった。この点でも、ALC 板に 20mm 程度のモルタル仕上げを行なうことは効果的である。

### 4.4 周期・振動モード・減衰定数について

#### (1) 周期について

試験体を柱脚固定とした 4 質点系およびスウェ

イとロッキングを考慮した 5 質点系に置換した振動モデルについて 1 次周期および振動モードを求めた (図 8 参照)。上部構造のバネ定数は、壁板などの 2 次部材の付加剛性を無視し、鉄骨骨組に逆三角形分布の水平荷重を与えたときの層せん断力と層間変位の関係から求めた。下部構造のスウェイとロッキングのバネ定数は、杭のバネ定数より求めた。最初の偏心モーメントが小さい場合の 1 次周期は柱脚固定の計算値に近く、特に偏心モーメント 800 kg・cm の場合 (0.407 sec) は計算値より短く、スウェイ率、ロッキング率も小さい。これは上部構造に比較して下部構造の剛性が高く、柱脚固定の仮定に近いこと、ラーメン内の壁板の剛性が全体の剛性に影響することによると考えられる。

1 次周期がのびる原因としては、2 次部材の破壊、鉄骨骨組の破壊および基礎部の破壊があげられる。2 次部材は、最初の偏心モーメント 800 kg・cm の実験で破壊されたが、次の偏心モーメント 1,000 kg・cm の実験では周期はわずかに 0.008 sec のびて、0.415 sec であった。したがって 2 次部材の破壊が周期に及ぼす影響は小さいと考えられ、その剛性は全体の剛性に対して数パーセントにすぎない。鉄骨骨組は静加力実験でかなり破壊されたが図 9 の荷重変位曲線からわかるように、柱脚座屈後の立ち上り勾配にほとんど変化がないため、鉄骨骨組の剛性は静加力実験後もほとんど変わらないと推察される。また振動実験中铁骨の歪度は弾性範囲内にあり、静加力実験直前と直後の振動実験 (偏心モーメント 6,000 kg・cm と 4,000 kg・cm) の周期にあまり差がないことから、鉄骨骨組の破壊が周期に及ぼす影響は少ないと推察される。上間コンクリート、基礎梁にひびわれが発生すると、ロッキング率が大きくなり、周期ものびることが表 7 よりわかる。すなわち、周期がのびる主な原因は基礎梁、上間コンクリートの破壊である。

#### (2) 振動モードについて

図 8 に示したように最初偏心モーメント 800 kg・cm の場合の振動モードは柱脚固定の計算値に近く、偏心モーメント 3,000 kg・cm の場合はスウェイ、ロッキングを考慮した計算値に近い。偏心モ

ーメント3,000 kg・cmの場合には、すでに基礎梁などにひびわれが発生していたためにスウェイ、ロッキングの剛性は低下していると考えられる。したがって、計算に用いたスウェイ、ロッキングのバネ定数は小さすぎる。これは杭のバネ定数だけを考慮し、地盤によるバネ定数を考慮しなかったためである。

### (3) 減衰定数について

試験体各部が破壊されるのにもとない減衰定数は大きくなり、したがって偏心モーメントの増大に比して試験体の変位量は小さい。減衰定数に影響する破壊現象は、基礎、鉄骨骨組、2次部材などの破壊が掲げられる。2次部材の剛性が試験体の剛性および周期に与える影響は少なく、振動実験中の鉄骨の最大応力は弾性範囲内であったことを考えると、基礎の破壊による影響が最も大きいと考えられる。また他の実験報告<sup>1)</sup>でもP・C壁板、カーテンウォールなど2次部材の減衰定数に及ぼす影響は少ないと結論づけられている。一般

に地盤に比して建物の剛性が高いと建物の減衰定数は小さくても、地盤の影響により、減衰定数は大きくなり、一方地盤の剛性が十分高いと建物の減衰定数に近くなる。試験体の基礎は4層3スパンの建家として設計されているため、試験体の剛性に比して基礎の剛性が高く、基礎部が破壊されるまでは比較的減衰定数は小さいが、基礎梁などにひびわれが発生するとエネルギーが逸散し減衰定数が大きくなったと考えられる。

### 4.5 応答計算

本実験で ALC 板・耐火被覆・基礎などが破壊されたが、実際の地震で、このような破壊現象が発生するかどうか検討するために、4層試験体に、EL CENTRO NS '40 最大加速度 320 gal, TOKYŌ 101 NS 最大加速度 74 gal の加速度を3倍に拡大した地震波を入力として与え、最上階の変位を計算したものが図14である。減衰は3%, スウェイおよびロッキングは考慮した。

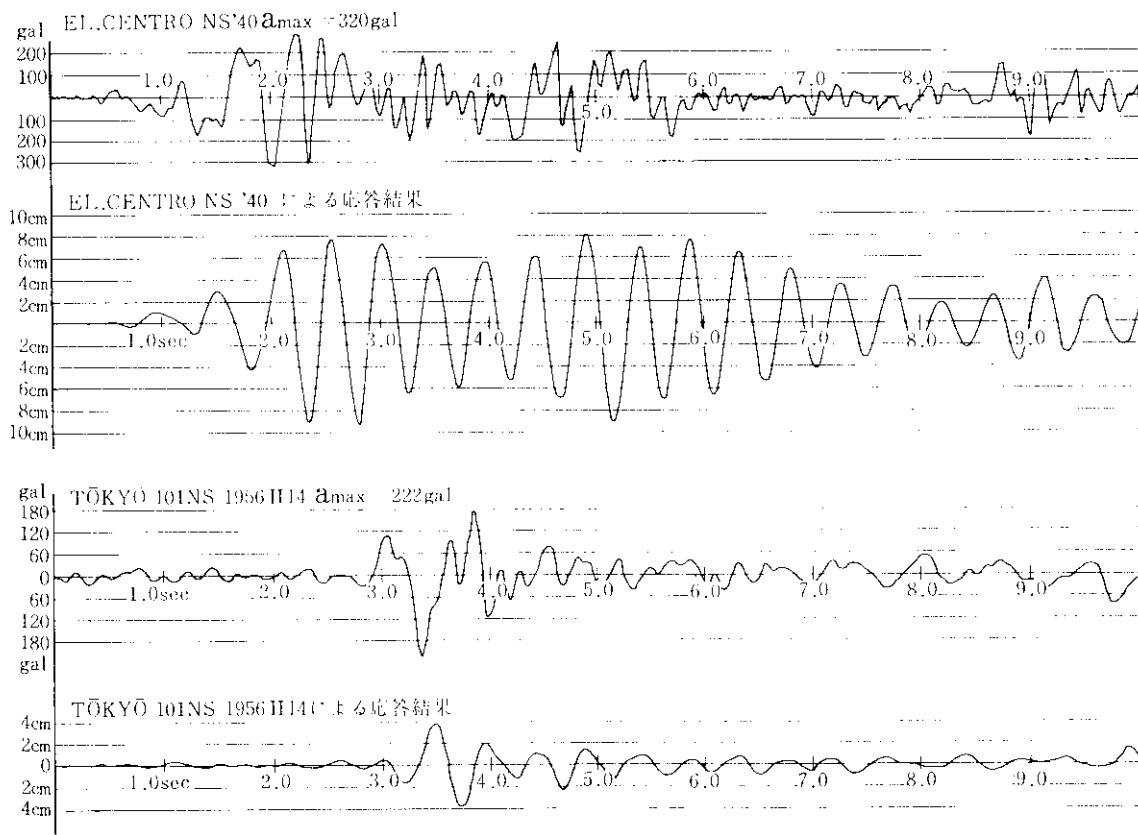


図 14 応答計算結果

入力原波形は各種の周波数成分を含んでいるが応答結果はモデルの一次周期で振動していることがわかる。振動形は図示してないが大体一次モードで、振動している。すなわち、この種の建物では、建物自身で入力波をフィルターし、一次周期で運動するものと推察される。したがって、2次部材の振動による破壊に関しては、2次部材の各種の周期（梁の振れ、壁のロッキング、床のすべりなど）が建物の1次周期と一致しないように計画することが必要であると考えられる。しかし実験で、最上階の変位で30mm～40mm程度になると、基礎梁にひびわれが発生することは、実際の地震時でもその可能性があると推察される。

また、振動実験中の鉄骨の応力度は弾性限度内であり、鉄骨自体の変形性能は十分あることから、基礎部はその剛性は高いが、鉄骨に比較して変形性能が低いと考えられる。

## 5. 結 び

この実験により、ALC板・耐火被覆の地震時の振動性状がある程度把握できたと考えられる。

特に留意すべき点としては

- 1) ALC板を床または壁板に使用する場合、振動時に個々の単体に分離しないよう、モルタル被覆などにより床としての一体性が保てるようにする。
- 2) 梁の振れ、（ブレース方向の梁）を拘束できるような床と梁の接合方法を考える。特に妻面の梁については注意しなければならない。
- 3) 床板のすべり、梁の振れ振動の周期と建物の周期を一致させない。
- 4) 架構全体に関しては、振動時の破壊は鉄骨ではなく、基礎部に集中する傾向がある。

最後にこの実験をご指導して下さった東京大学地震研究所大沢胖教授、明治大学狩野芳一教授、また終始ご協力して下さったニチモ・プレハブKK三宅徳昌氏、大倉英三氏、旭化成KK和田将秀氏、日本材料試験所岡井毅氏、および起振機を快くお貸し下さった清水建設KKの皆様に深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) 山本鎮男、他：日本建築学会大会学術講演梗概集、(1969)、707
- 2) 山原浩：日本建築学会大会学術講演梗概集、(1968)、379
- 3) 田治見宏：建築振動学〔コロナ社〕
- 4) 梅村魁、今井弘、滝沢春男：熱風炉の耐震性の検討
- 5) 強震応答解析委員会：SERACに使用した地震記録のデジタル量