

## 建築構造力学（6）

### 第10回 限界耐力計算法による免震構造の設計

#### 10.1 限界耐力計算法の意味

保有水平耐力による設計法が施行された1981年以降、構造特性係数  $D_s$  値の解釈について、累積塑性変形倍率による定義と塑性率による定義が混在していた。ところが、日本各地で大きな地震が頻発するようになり、その都度、計測される地震加速度記録は300ガルではなく、1Gを超えるような直下型地震が数多く記録されるようになった。一方、2011年3月11日の東北地震では、長周期の地震動が5分を超える長時間に渡って大地を揺らすことも明らかとなってきた。

想定した地震動の大きさが一定であれば、塑性率  $\mu$  による  $D_s$  値の定義も累積塑性変形倍率  $\eta$  による定義も、一致させることは可能である。しかし、対象とする地震動が大きくなれば、両者の定義に従って、矛盾することなく保有耐力設計法を物理的に解釈することは不可能なことになってきた。最初に、加速度応答スペクトルによる地盤の影響を含めた耐震構造計算の修正が行われた。これが、限界耐力計算法である。2000年になると法改正の機運が高まり、仕様設計から性能設計へというスローガンとともに法改正が行われたのである。

ところが、社会現象としては「姉齒建築士事件」という「耐震偽装」問題が発生し、限界耐力計算法と保有耐力設計法の2つの法律があることは、矛盾ではないかという報道が行われ、限界耐力計算法に使用する地盤増幅係数（大きな地震動に対して設計する方法）が2倍に引き上げられることになった。このため、現在では限界耐力計算法によって通常の耐震構造計算を行うことは稀であるが、免震構造のような減衰性能の高い構造形式の場合は、応答スペクトルを低減することが可能で、しかも長時間に渡る総入力エネルギーに対しても減衰装置があるため耐震余裕度が確保されている。以上の2つの理由で、免震構造を設計する際には、告示式（限界耐力計算法）を用いた免震構造の設計には、構造安全性という観点からは合理性が存在するのである。

今回の講義では、限界耐力計算法（建築基準法の告示式）の概略を解説し、かつ、戸建て免震構造を対象として、高減衰積層ゴム支承を用いた告示免震の計算方法について解説する。

## 10.2 告示式の解説

（免震建築物の構造方法に関する安全上必要な技術的基準を定める等の件）

（平成十二年十月十七日）（建設省告示第二千九号）

- 上記の国土交通省告示による免震構造の法律用語の定義を以下にまとめる。

黒字は、法律の文言通りを記載した。青字は解説で、記載はない。

### （1）積層ゴムの性能

- ・「免震材料の水平基準変形」： $\delta u$  (m)：支承材にあつては、支承材の鉛直基準強度（変形を生じていない場合の合計値）の三分の1に相当する荷重における水平方向の限界変形（実験によって求まり、免震材料の大臣認定を受けた数値）
- ・「支承材の鉛直基準強度」： $F_c$  (N/mm<sup>2</sup>)： 圧縮限界強度に0.9乗した数値以下の数値（実験によって求まり、免震材料の大臣認定を受けた数値）
- ・免震材料の設計限界変形 (m)： $m \delta d = \beta \delta u$

$\beta$ ：免震材料に作用する荷重に関する変形の特性を適切に考察し、安全上支障のないことが確認された場合に説いては、この限りでない。（支承に作用する軸力による剛性の変動などは、この値によって考量されていると考えることができる。）

支承材で弾性系（ゴム材料）の場合は、0.8

以上は、免震材料（積層ゴム支承）の性能（変形）と強度について、法律で定義したものである。複数の積層ゴム支承を用いる場合は、それぞれの支承ごとに異なる値となる。 $\beta$ の値は、支承の作用する軸力変動による水平剛性の変動を考慮した数字である。このため、免震構造に使用する支承には標準的な軸力を設定して、等価剛性を設定する必要がある。これが、標準面圧である。技術開発では、1基の支承当たりの軸力  $N_0$  を設定する。この値は、長期軸力よりも小さくなければならない。また、平均軸力（上部構造総質量  $M$  / 総基数）に近い値である必要がある。平均軸力が大きい場合は、水平剛性が実験値よりも小さくなるので、地震時の応答変位が大きくなる。そこで、 $\delta u$  の値を小さくすることで、応答変位の増加に対する安全性を確保したものである。

(2) 限界耐力計算の用語

・設計限界固有周期  $T_s$  (秒) : =  $2\pi \sqrt{\frac{M}{K}}$

$M$  上部構造の総質量 (上部構造の固定荷重と積載荷重との和 (令第八十六条 第二項 ただし書の規定によって特定行政庁が指定する多雪区域においては、更に積載荷重を加えたものとする。)) を重力加速度で除した数値をいう。以下 同じ。) (単位 トン)

$K$  免震層の等価剛性 (免震層の設計限界変位  $\delta_s$  時に各免震材料に生ずる水平力の合計を免震層の設計限界変位  $\delta_s$  で除した数値をいう。以下同じ。) (単位 一メートルにつきキロニュートン)

・免震層の等価剛性  $K$  (KN/m) : 設計限界変位  $\delta_s$  のとき各免震材料に生じている水平力の合計を免震層の設計限界変位  $\delta_s$  で除した数値 である。従って、実験で求め大臣認定を受けた免震材料 (積層ゴム支承) の水平力  $Q$  (設計上は地震力) を、設計者が決めた値  $\delta_s$  で割った数値である。このように、 $K$  の値は設計者が決めることになる。

・設計限界変位 :  $\delta_s$  (m) : この値は、法律用語ではあるが、設計者が個別の免震構造建物に応じて、任意に設定してよい。ただし、 $m \delta d$  以下でなければならない。

・免震層の地震応答変位 :  $\delta_r$  (m) :  $\delta_r = 1.1 \delta_r'$

・免震層の地震応答変位 :  $\delta_r'$  (m) :  $\delta_r' = \alpha \delta$

この式において、 $\alpha$  及び  $\delta$  は、それぞれ次の数値を表すものとする。

$\alpha$  免震材料のばらつき、環境及び経年変化に関する係数 (一・二を下 回る場合は、一・二とする。)  $\delta$  口 (4) に定めるところにより計算した地震によって免震層に作用する地震力を免震層の等価剛性で除して得た数値 (以下「免震層の基準 変位」という。) (単位 メートル)

・免震層の基準 変位 :  $\delta$  (m) :  $\delta = Q/K$

・地震力 :  $Q$  (KN) :  $0.64 \text{ sec} < T_s \quad Q = \frac{5.12 M F_h Z G_s}{T_s}$

$T_s$  設計限界固有周期 (単位 秒)  $Q$  地震によって免震層に作用する地震力 (単位 キロニュートン)  $M$  上部構造の総質量 (単位 トン)  $F_h$  (3) に規定する加速度の低減率  $Z$  令第八十八条第一項に規定する  $Z$  の数値  $G_s$  令第八十二条の五第五号の表に規定する  $G_s$  の数値

例題

高減衰積層ゴム支承の実験結果より、下図の復元力特性曲線を得たとする。このとき、鉛直荷重  $N_0 = 5.0 \text{ ton}$  一定の状態、荷重変形曲線が得られたとする。この軸力を標準面圧と呼ぶ。実験で得られた水平基準変形  $\delta_u$  が  $450 \text{ mm}$  だとすると、設計限界変形  $m \delta_d = 360 \text{ mm}$  となる。また荷重変形曲線の囲むループから、等価減衰率を算定すると  $22\%$  を得る。この結果、 $F_h = 0.5$  の値を得る。さらに、バイリニア一特性を仮定すれば、接線剛性  $K_t = 22 \text{ N/mm}$  である。積層ゴム支承の基数で、建物の地震力算定時の鉛直荷重の平均値  $M$  を算定し、接線周期  $T_t$  が  $2$  秒以上であることを確認する必要がある。従って、平均質量  $M > 2.2 \text{ ton}$  である。

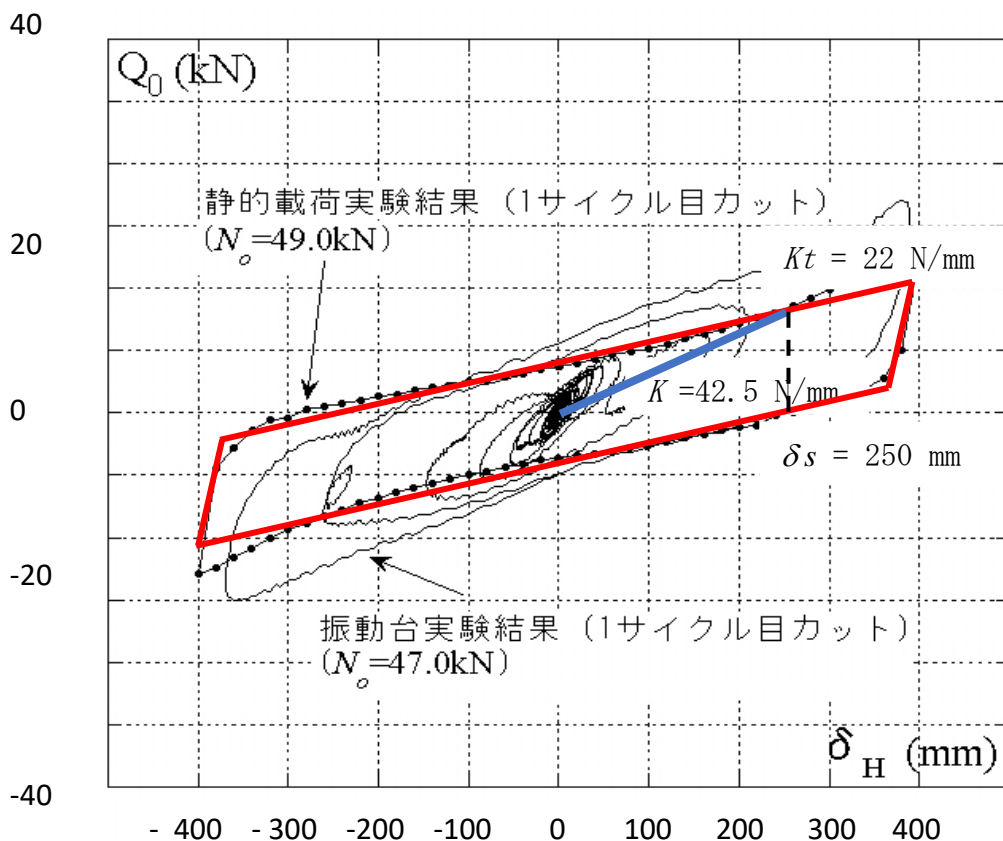


図 1 実験結果を忠実にモデル化した荷重—変形曲線

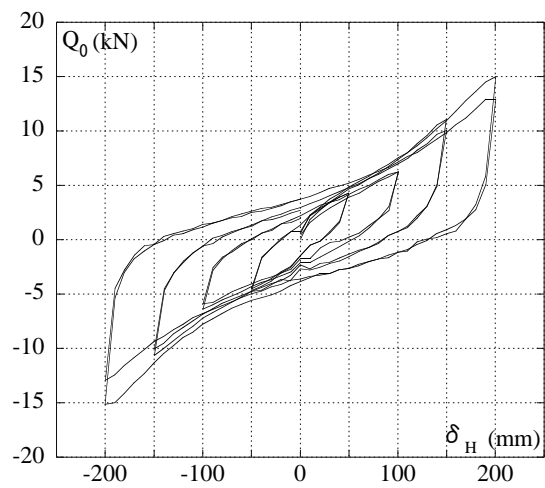


図6 Z1 試験体 軸力下の水平剛性実験結果 (軸力  $N_o$  = 49.0kN)

表3 Zタイプ 水平剛性の実験値 (軸力  $N_o$  = 49.0kN)

試験体	水平剛性 (N/mm)			
	$\delta_H=50\text{mm}$	$\delta_H=100\text{mm}$	$\delta_H=150\text{mm}$	$\delta_H=200\text{mm}$
Z1	75.06	46.48	45.00	39.91
Z2	73.84	52.88	44.18	40.24

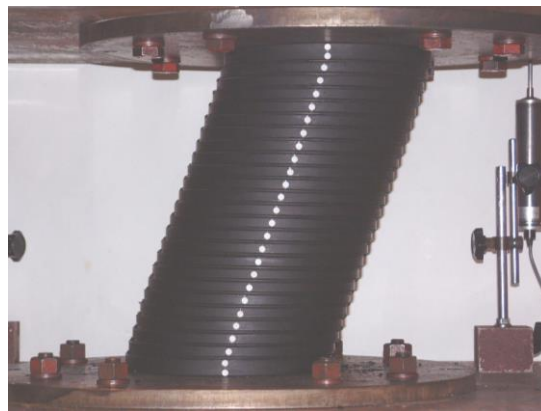


写真2 Z1 試験体 (軸力  $N_o$  = 49.0kN 水平変位  $\delta_H=100\text{mm}$ )

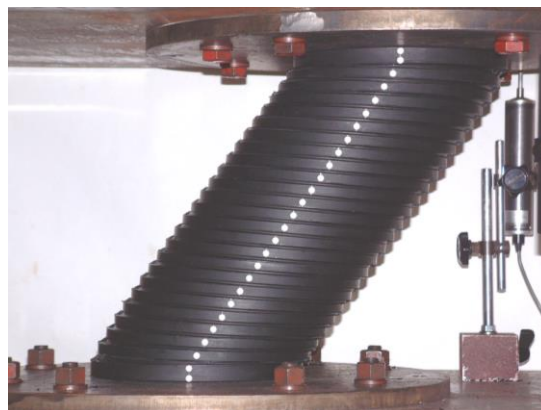


写真3 Z1 試験体 (軸力  $N_o$  = 49.0kN 水平変位  $\delta_H=200\text{mm}$ )

- ・ 水平変形と軸力変化に対する終局耐力

鉛直軸力を変化させて、水平剛性の変化を実験により確認した。実験結果から、図 2 に示す限界耐力領域図を作成した。標準面圧は長期軸力よりも小さくなければならない。

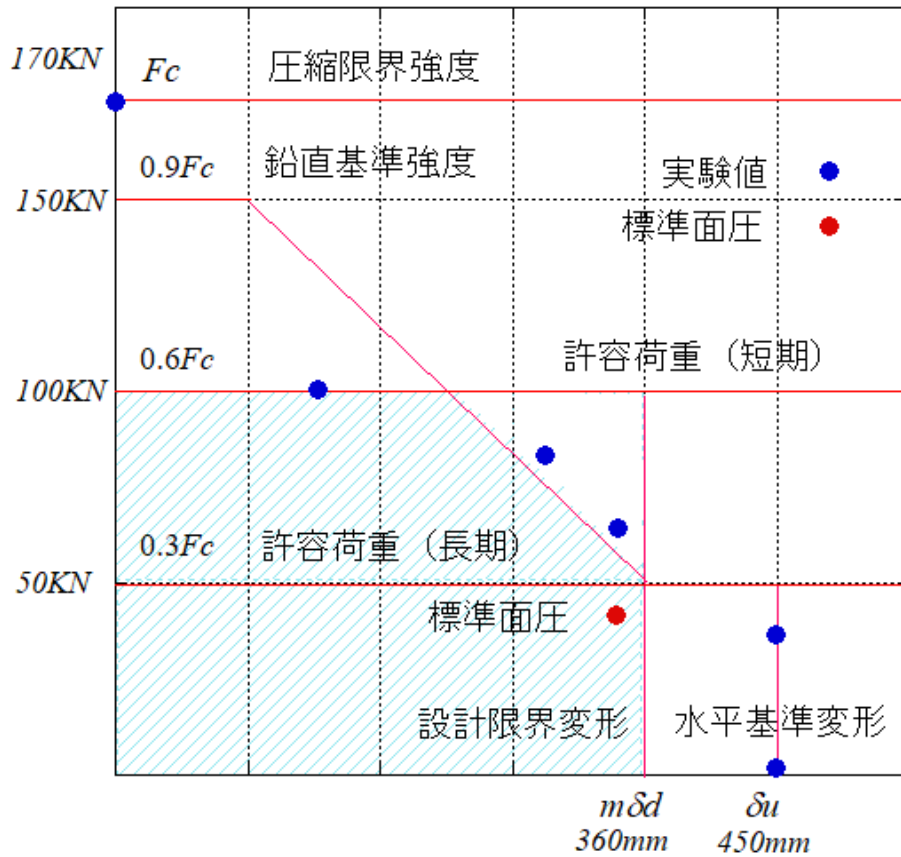


図 2 限界耐力領域

### 10.3 戸建て住宅の平面計画と鉛直軸力の算定

結局のところ、国土交通省の材料認定を取得した免震材料（積層ゴム）については、前節で定められた所定数が建築基準法の定めるところによって決まっている。この値を用いることで、告示式に基づく免震構造の設計を、限界耐力計算法（応答スペクトル法）に従って行うことができる。

図9を参照すると、この積層ゴム支承は  $N_0 = 5.0$  トンのとき、 $m \delta d = 360\text{mm}$  のとき、反力は  $16.5\text{KN}$  である。

設計限界変位  $\delta_s = 250\text{mm} < m \delta d = 360\text{mm}$  とすると、等価剛性  $42.5\text{ N/mm}$  だから、減衰率  $20\%$  の積層ゴム支承であれば、 $F_h = 0.5$ 、地盤増幅係数  $G_s = 1.5$  を仮定して、地域定数  $Z=1$ 、平均軸力  $M=3.35\text{ ton}$  なので、設計限界固有周期  $T_s = 1.76$  秒となる。よって、地震力は、 $Q_0 = 7.31\text{ KN}$ 、このとき免震層の基準変位は、 $\delta = 17.2\text{ cm}$  となる。

よって地震応答変位  $\delta_r = 1.1 \times 1.2 \times 17.2 = 22.2\text{ cm} < \delta_s = 25.0\text{ cm}$  となり、告示式を満足する。

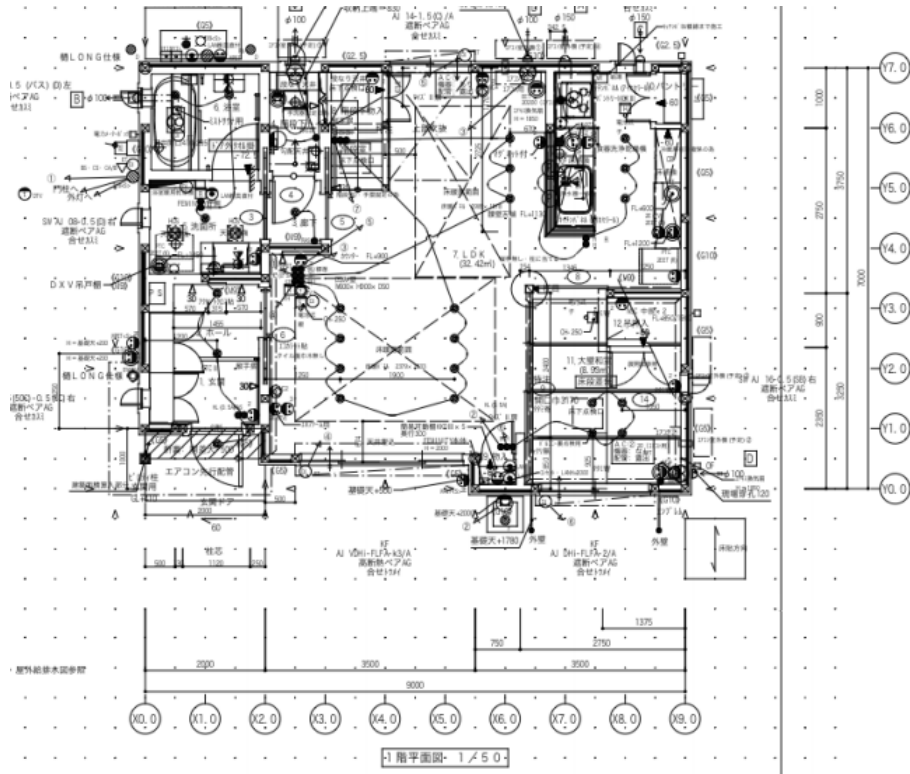


図 3 1階 平面図

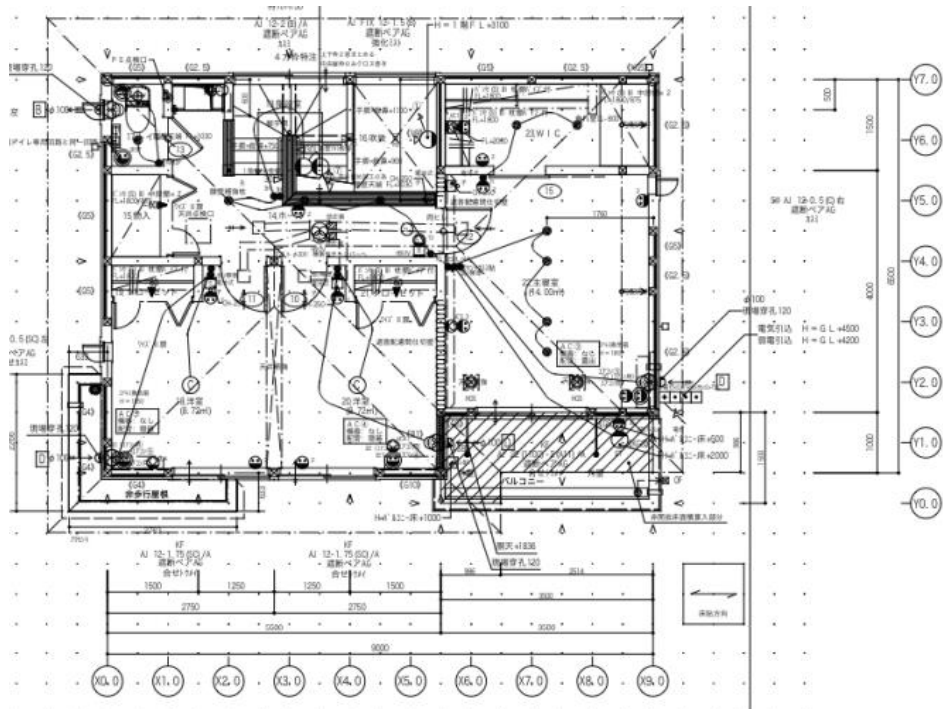


図 4 2階 平面図



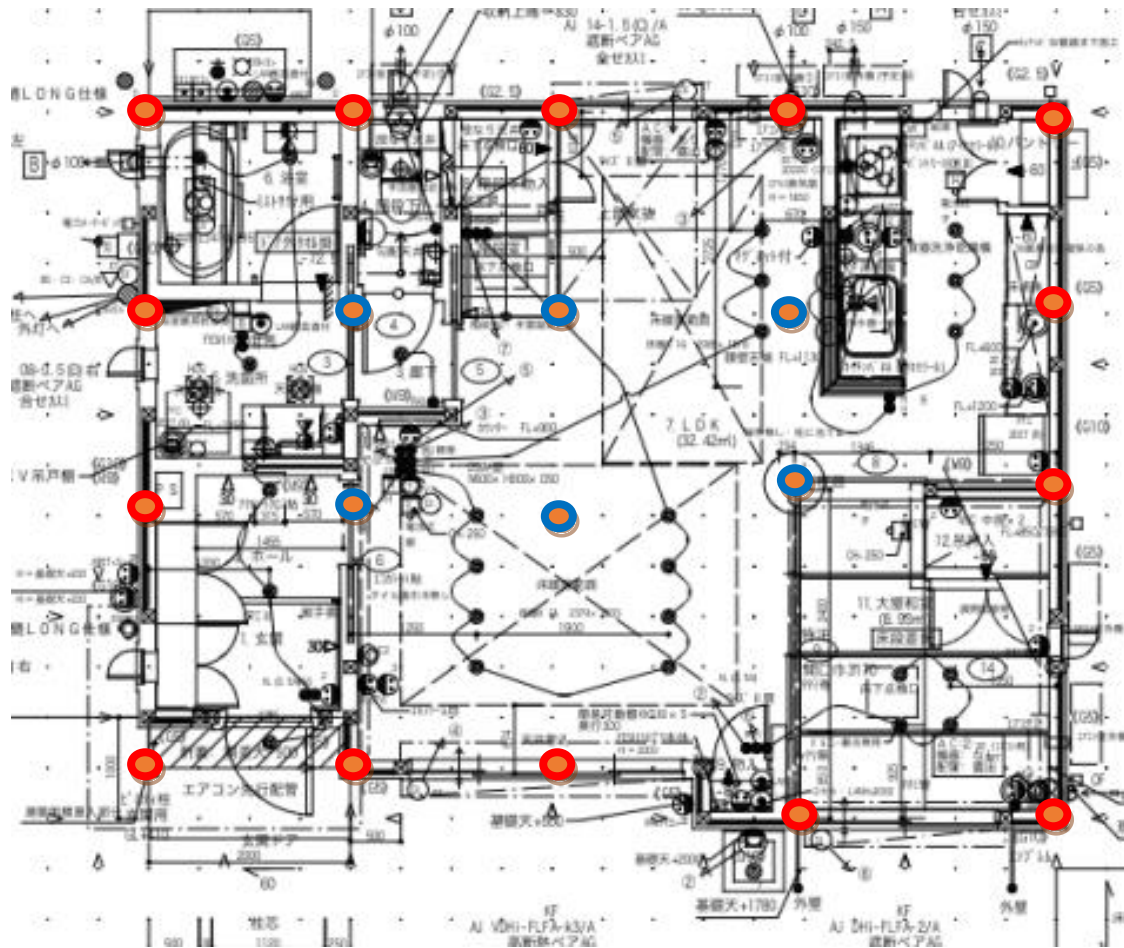


図 5 支承配置と軸力分布

- : No = 3.0 ton    × 6 = 18 ton
- : No = 3.5 ton    × 14 = 49 ton

地震時 合計 重量 : 67 トン

平均軸力  $M = 67/20 \text{ 基} = 3.35 \text{ ton} > 2.2 \text{ ton}$  なので、  
接線周期  $T_t = 2.0$  以上を満足する

全ての支承で軸力  $No < 5.0 \text{ ton}$  だから、長期軸力の許容値を満足する