

第4話 免震層を設計しよう

ここでは上部構造のフレームの設定ができた段階とします。免震部材の支持荷重は、長期荷重時と地震時荷重時に分けて明らかにします。特に、地震時荷重時は、フレームの非対称性によって加力方向で大きく異なってきます。X,Y 共に正負の2方向加力時の確認を行います。更に、平面形状が非対称な建物や超高層建物では45度、135度方向の確認も重要です。立体フレームモデルでは、45度、135度方向に設計地震力を作用させます。平面フレームモデルでは、X,Y 方向加力による支持荷重を2乗和平均で評価することもあります。

免震層の設計の目標は、「振動理論による原理」で説明しましたように、

- ・低い水平剛性と高い減衰特性の確保

と高重量の建物荷重を支持する

- ・高い鉛直剛性の確保

及び、長期間(60年相当以上)の耐久性の保持にあります。これらを目標として以下の手順で設計を進めます。

4-1. 免震部材の選定と配置を設計する

ここで、免震部材の選定には参考文献 17. 「免震部材標準品リスト 2005 JSSI」を参照すると便利です。

①まず、柱位置に鉛直剛性の高い積層ゴム支承を配置します。積層ゴムの選択は、長期荷重 W を積層ゴムの基準面圧 σ_s 程度で支持できる径 D とします。

$$\sigma_s = W/A_s \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad , \quad D \text{ (mm)} = \sqrt{4W / (\sigma_s \times \pi)}$$

現在使用されている基準面圧 $\sigma_s = 10, 12, 15$ が多く、支持荷重が大きい場合は高い値を用い、径 D を小さくすることができます。

径 D の選定では、以下のポイントを考慮します。

A. 建物全体の免震部材の径を比較して、できるだけ径 D の変化を少なくします。多少面圧が低くなっても著しく小さくなることは避けます。次節で説明する限界変形性能は、変形が同じであれば径 D が小さい積層ゴムが不利になり、この積層ゴム支承で建物の限界性能が決まってしまうからです。

B. 積層ゴムの安定変形性能を確保する理由で、想定水平変形が積層ゴム径の3分の2程度に抑えます。例えば、想定水平変形が500mmとすると積層ゴム径は最低750mm以上を選択します。

②低い水平剛性として積層ゴムを用いるが、ゴム素材のせん断弾性係数 G (N/mm²)は4とし、ゴム1層厚 t_r (mm)とゴム層の総厚 $n \times t_r$ (n:層数)が積層ゴム支承の安定性に影響するため、ここでは、

$$\text{せん断弾性係数 } G = 4.0 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\text{1次形状係数: } S1 = D / (4 \times t_r) > 30 \text{ , 2次形状係数: } S2 = D / (n \times t_r) > 4.0$$

とします。

せん断弾性係数 G は、断面 A 、厚さ T のゴムブロックを水平力 Q で静的に押した時の水平変形を δ としたとき、 $Q/A = G(\delta/T)$ の関係を構成する係数でせん断力に対して変形のし易さの程度を意味します。実用の積層ゴムでは、 $G = 3.0 \sim 8.0$ があります。

③選定した免震部材の長期面圧 σ_L 、短期面圧 σ_s を算定します。

$$\text{長期面圧 } \sigma_L = W / A_r,$$

$$W: \text{長期支持荷重、} A_r = \pi (D/2)^2 : \text{ゴム部面積}$$

$$\text{短期面圧 } \sigma_s = (W + \Delta N) / A_r,$$

$$\Delta N: \text{地震時の変動荷重(正、負加力時を考慮する)}$$

この時点 $W+\angle N < 0$ となった場合は、3-4節に戻り $W+\angle N > 0$ となる計画変更をします。積層ゴムの
変更、設計せん断力の変更などの対策もありますが、未確定の設計条件が多いこの時点では、構造計
画から見直すことが、全設計工程では効果的です。

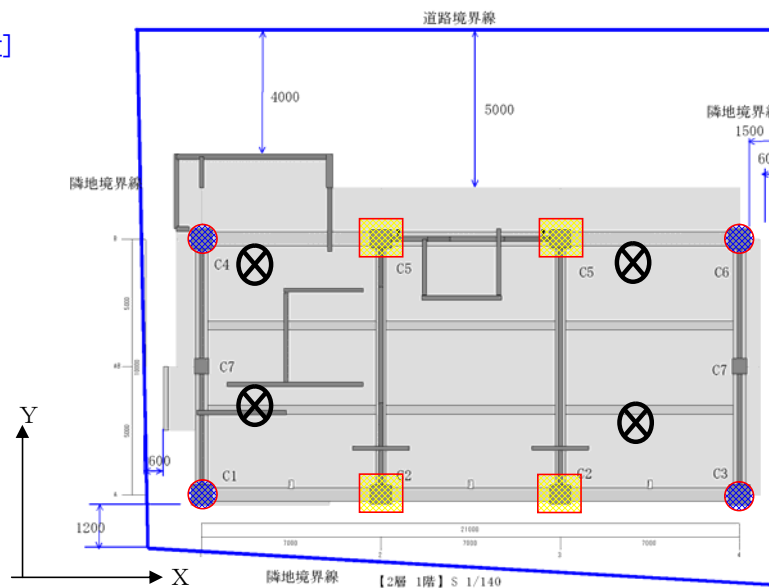
- ④ 想定変形量を設定します。応答解析ができていない時点では、3-1 節の変形量を用います。そのほか日
本建築センターのビルディングレター、JSSI MENSHEINにある類似物件から推定することも有効な資料
となります。
- ⑤ 減衰材料を選定します。免震層の必要性能として高い減衰性能が必要ですが、応答解析前に設定するた
めの以下の仮定条件を用いる。ただしB案で設定する場合は、変形を上記想定変形量とする。

A. 経験的に建物荷重の3~4%程度の減衰抵抗を与える。

$$\text{ダンパーの降伏耐力 } Q_y = 0.035 \times W \text{、 } W: \text{地震時建物荷重}$$

B. 告示2009号第6八の減衰材の負担せん断力係数 $\mu = 0.035$

[計算モデルの配置]



| | | | | | | | | |
|----------|-------------------|------------|-----------|-------------|-------------|------------|-------------|--|
| 支持荷重 | kN | RB80 | SD | SC70 | SC70 | SD | RB80S | |
| 引抜荷重 X,Y | kN | 5 | 11 | 6 | 7 | 12 | 8 | |
| 面圧、基準面圧 | N/mm ² | 8.70 10.00 | | 13.80 15.00 | 12.00 15.00 | | 8.00 10.00 | |
| 積層ゴム径 | mm | 799 | | 898 | 703 | | 795 | |
| 設計径φ | mm | 800 | | 700 | 700 | | 800 | |
| 鉛直剛性 | kN/mm | 2730 | | 14400 | 14400 | | 2480 | |
| 日 | 座席 | 0 10000 | 2500 3000 | 7000 10000 | 14000 10000 | 17000 3000 | 21000 10000 | |
| 支持荷重 | kN | | | | | | | |
| 引抜荷重 X,Y | kN | | | | | | | |
| 面圧、基準面圧 | N/mm ² | | | | | | | |
| 積層ゴム径 | mm | | | | | | | |
| 設計径φ | mm | | | | | | | |
| 鉛直剛性 | kN/mm | | | | | | | |
| A/B | | | | | | | | |
| 支持荷重 | kN | RB80S | SD | SC60 | SC60 | SD | RB80S | |
| 引抜荷重 X,Y | kN | 1 | 9 | 2 | 3 | 10 | 4 | |
| 面圧、基準面圧 | N/mm ² | 8.00 10.00 | | 13.00 15.00 | 13.00 15.00 | | 8.00 10.00 | |
| 積層ゴム径 | mm | 804 | | 807 | 804 | | 799 | |
| 設計径φ | mm | 800 | | 800 | 800 | | 800 | |
| 鉛直剛性 | kN/mm | 2480 | | 10800 | 10800 | | 2480 | |
| A | 座席 | 0 0 | 2000 3000 | 7000 0 | 14000 0 | 17000 3000 | 21000 0 | |
| 柱芯寄り | | 0 0 | | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | |
| | X1 | | | X2 | X3 | | X4 | |

$$\text{必要支承径 } \phi > 2\sqrt{(W/(\pi \cdot \sigma_o))}, \quad \sigma_o = 10, 15: \text{基準面圧 (N/mm}^2\text{)}$$

図 4-1.1 計算モデルの免震部材配置と面圧

4-2. 免震部材の基本性能・限界性能を確認する

選定した積層ゴムの限界性能を認定資料または「免震部材標準品リスト 2005 JSSI」から確認します。

認定資料には、図 4-2.1 に示すように使用ゴムの G 値、水平変形性能の特性グラフ、鉛直変形性能の特性グラフ、変形と支持荷重グラフの説明図が明示されています。

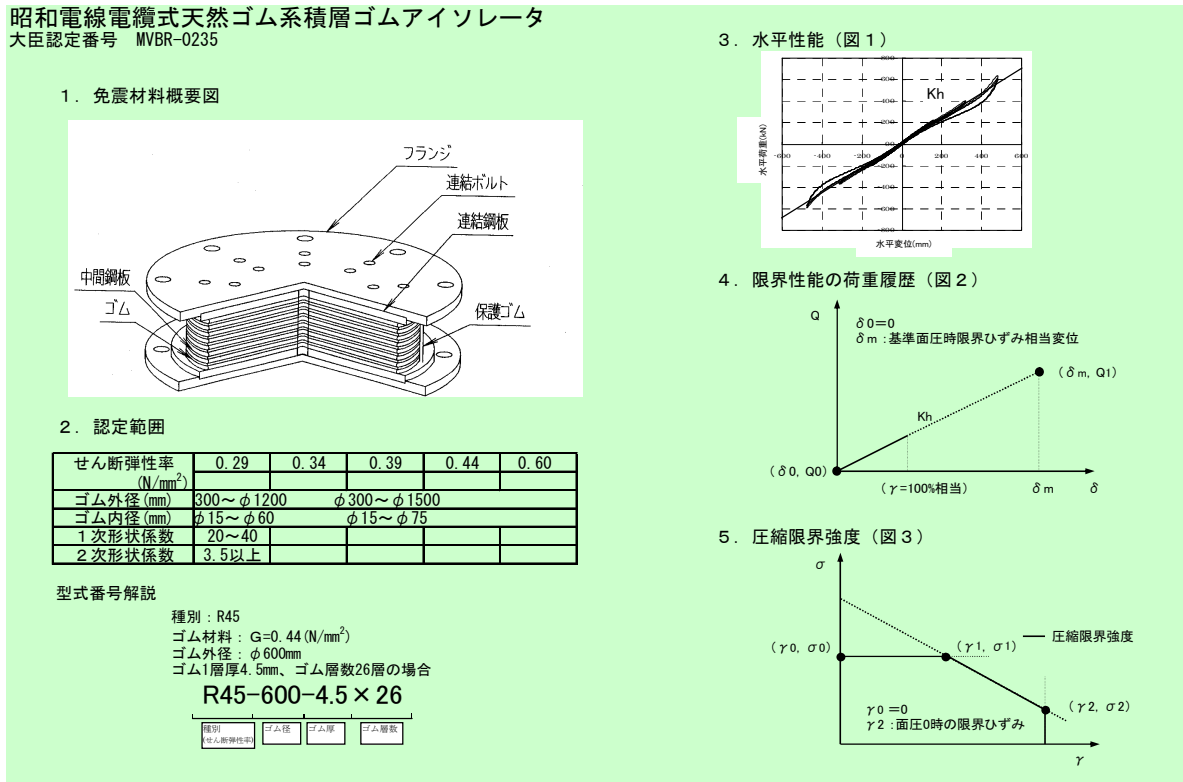


図 4-2.1 認定性能の説明図(出典:「免震部材標準品リスト 2005 JSSI」昭和電線電纜)

①基本性能とは、水平剛性と鉛直剛性を指します。免震性能を支配する性能です。これらの性能値は、図 4-2.2 のような荷重試験で求められます。図 4-2.3(a)に鉛直剛性、水平剛性の基本性能曲線を示します。限界性能値はこの試験で変形を漸増させることで確認されます。図 4-2.3(b)にはその歪み・面圧別の過程を示します。その結果は、限界状態は図 4-2.4 に示すような破壊モードと座屈モードに分かれます。一般に前掲の1次形状係数が同じであれば、2次形状が小さいほど座屈モードで限界性能となります。グラフから推定できるように座屈モードでは変形性能が少なくなります。詳しくは参考文献5、13、14を参照ください。

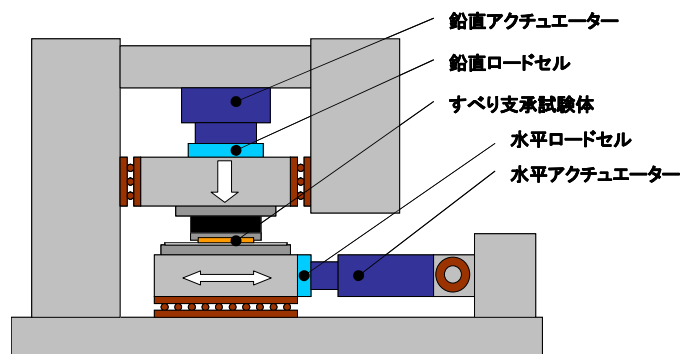


図 4-2.2 水平剛性と鉛直剛性を求める荷重試験模式図

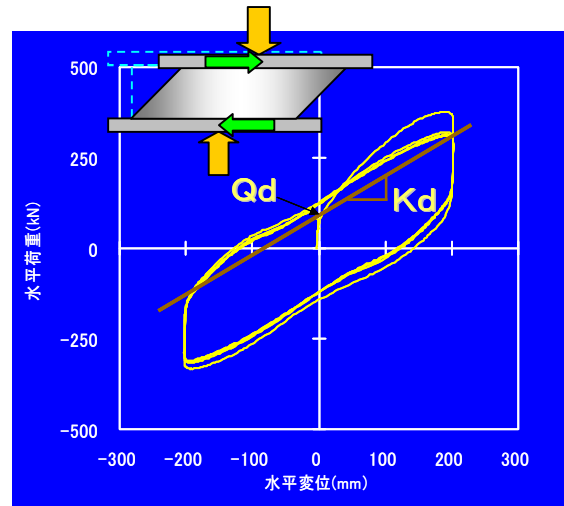
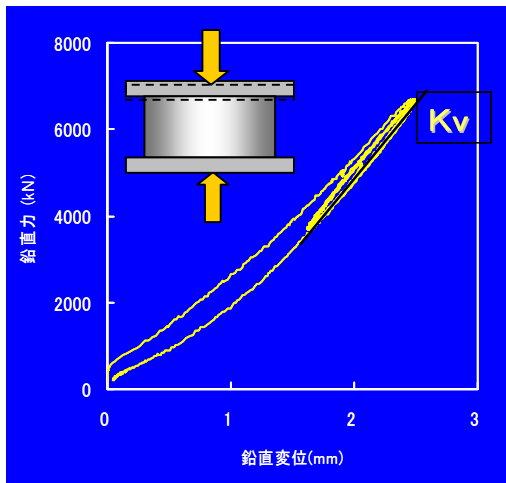


図 4-2.3(a) 限界性能試験結果説明図

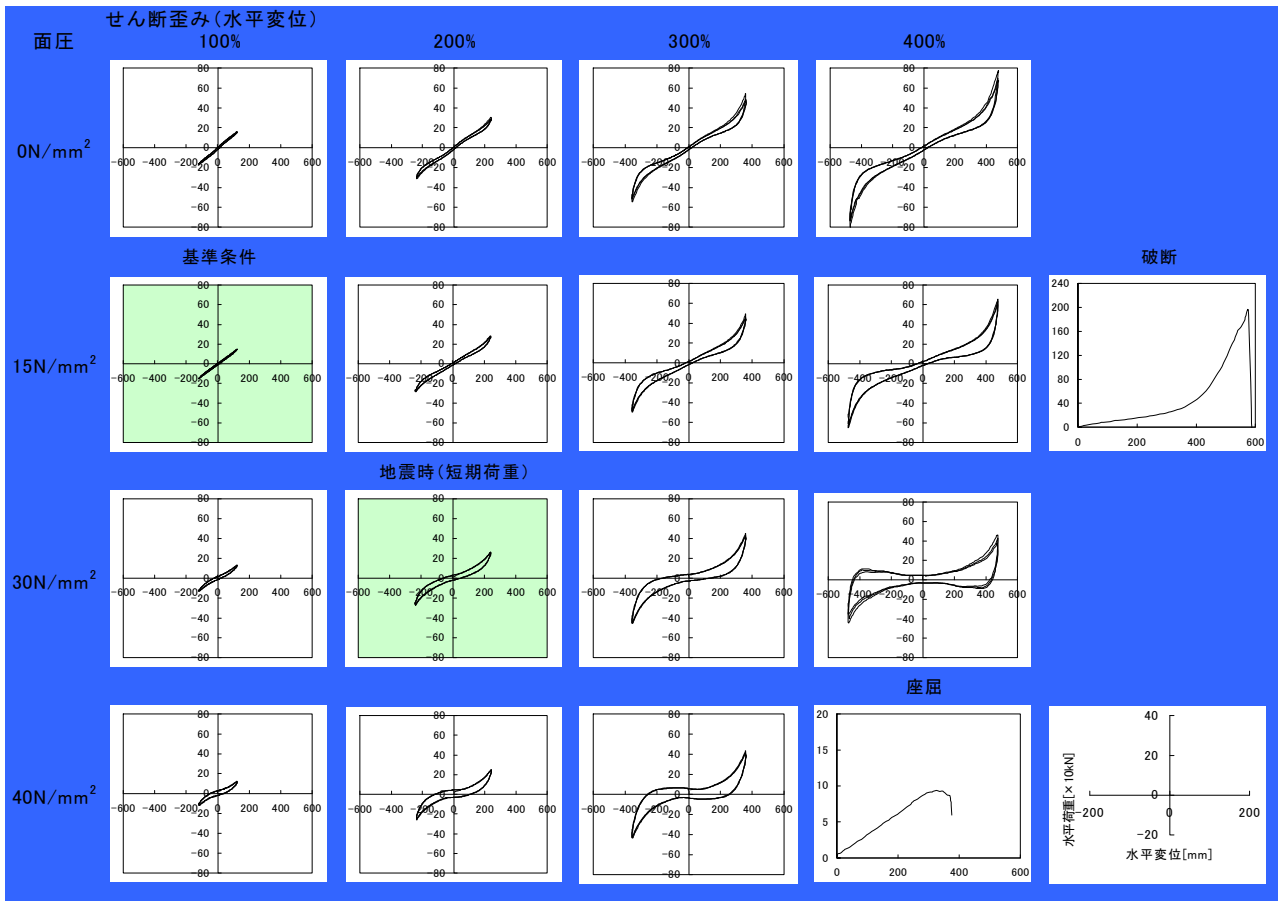


図 4-2.3(b) 歪み・面圧別の限界性能試験結果図

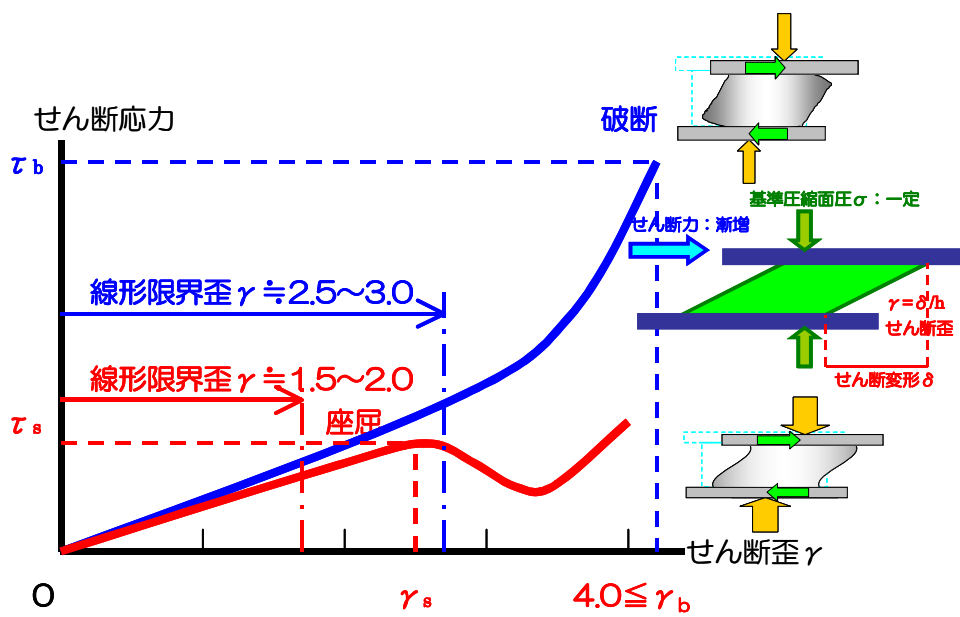


図 4-2.4 限界性能試験結果説明図

この関係をすべての積層ゴムで定義し、図 4-2.5 に示す限界性能曲線で表しています。横軸に変形量と縦軸に支持面圧をとり、設計変形に対し支持可能な荷重を確認することができます。ここで支持面圧は長期面圧では変形は無く、Y軸上になります。一般に長期時に変形が生じることの無いように免震部材は水平に設置されます。水平剛性が小さいため斜めに設置することは危険な設計になります。一方、短期時の面圧では変形が伴い、最も面圧が高いときが限界性能ラインに近づきます。この時点では、限界ラインの7割程度に収まっていることがスムーズな設計になります。逆に面圧が小さい場合もゼロ以上になるようにします。

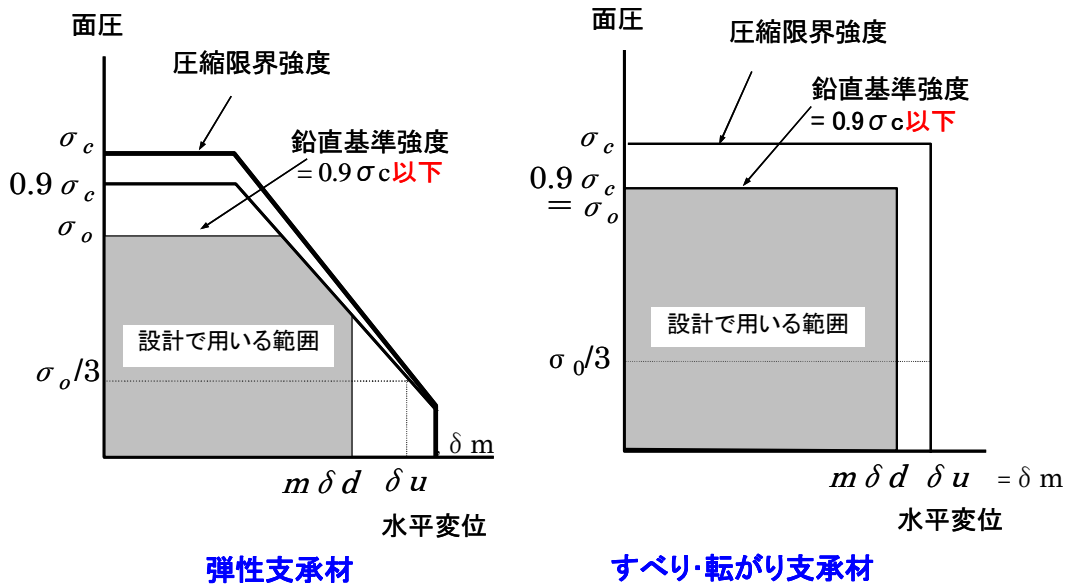


図 4-2.5 限界性能曲線(左: 積層ゴム系支承、右: すべり系支承・転がり系支承の例)

なお、この図 4-2.5 の中の符号は告示 2009 号で規定された性能値で、告示により設計を選択した場合は、限界性能ラインは、10%安全側のライン(0.9σc)となります。また、各性能値は、下記の意味です。

- ・ σ_c : **圧縮限界強度** : ゼロ変形の状態で荷重をかけて破壊モードを確認した面圧
しかし実大モデルの試験は試験機の性能上難しく、理論式から算定し
各免震部材で安全係数をかけて設定している。また、基準面圧の 4 倍程度で設定しているが、理論値以下としている。
変形が伴う場合に値は、いくつかの限界試験データと理論式から各免震部材で安全側に設定している。

$$\sigma_c = \zeta \cdot G \cdot S_1 \cdot S_2, \quad \text{補正係数 } \zeta = \pi \sqrt{\kappa / (8(1+2\kappa \cdot S_1^2 \cdot G/E_b))}$$

$$(G_4: \text{ゴム硬度補正係数 } \kappa = 0.8 \sim 0.9, \quad \text{体積弾性係数 } E_b = 1020(\text{N}/\text{mm}^2))$$

- ・ $F_c (=0.9 \times \sigma_c)$: (試験値のばらつき・誤差を考慮した安全係数) × (圧縮限界強度) で告示による設計では、このラインが限界となります。
- ・ σ_o : **鉛直基準強度** : 0.9 × σc 以下であれば良いとした設計者判断値です。
一般に大きな支持荷重で変形が少ない場合、この値は大きく設定する方が、設計可能領域が増えます。逆の場合は、この値を 0.9 × σc よりかなり低くすると有利です。しかし、振動理論では荷重が大きいと変形も大きくなり勝ちで都合よくは行きません。
そこで、長期面圧 $\sigma_L < \sigma_o/3$ になるようにします。即ち $\sigma_o > 3 \times (\text{長期面圧 } \sigma_L)$ とします。
- ・ $\sigma_o/3$: **長期許容面圧**、短期時はこの 2 倍です。告示計算では
長期面圧 $\sigma_L < \sigma_o/3$ 、短期面圧 $\sigma_s < 2\sigma_o/3$ が設計条件となります。
- ・ δ_u : **水平基準変形** : 長期許容面圧 $\sigma_o/3$ 時の限界変形、
- ・ $m\delta d$: **設計限界変形** : 安全率 $\beta \times \delta_u$ で算定します。
安全率 β は、免震部材の種類で異なります。
積層ゴム支承 : 0.8, 弾性すべり支承 : 0.9、ダンパー : 1.0 復元材 : 1.0
- ・ δ_m : **各免震材料の限界変形(ひずみ)**

[計算モデルの基本性能] (図 4-1.1 配置図参照)

表 4-2.1 a 配置部材の基本諸元

| 部材記号 認定記号 | ゴム直径 D(mm) | ゴム剛性 G (N/mm ²) | ゴム厚 t (mm) | ゴム層数 n | ゴム総厚 nxt(mm) | 1次形状 S1=D/4t | 2次形状 S2=D/nt | 摩擦係数 μ |
|-----------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| 部材1:RB80S R40-800-6.0x33 | φ 800 | 0.39 | 6.0 | 33 | 198 | ① 33.3 | ② 4.0 | ---- |
| 部材2:RB80 R40-800-6.0x30 | φ 800 | 0.39 | 6.0 | 30 | ③ 180 | ④ 33.3 | ⑤ 4.4 | ---- |
| 部材3:SC60 SC80-600S-5x4 | φ 600 | 0.78 | 5.0 | 4 | 20 | 29 | 30.0 | 0.011 |
| 部材4:SC70 SC80-700S-5x4 | φ 700 | 0.78 | 5.0 | 4 | 20 | 33.5 | 35.0 | 0.011 |
| 部材5:SD SSUD45x4 | □45x4 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | ---- |

表 4-2.1 b 配置部材の基本性能

| 部材記号 | 基数 n | 水平1次剛性 | | 水平2次剛性 | | 切片荷重 | | |
|-----------|---------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------|-------------|
| | | K1 (kN/mm) | n・K1 (kN/mm) | K2 (kN/mm) | n・K2 (kN/mm) | 平均荷重 N(kN) | Q (kN) | n・Q (kN) |
| 部材1:RB80S | 3 | 0.99 | ① 2.97 | 0.99 | ② 2.97 | --- | --- | --- |
| 部材2:RB80 | 1 | 1.09 | 1.09 | 1.09 | 1.09 | --- | --- | --- |
| 部材3:SC60 | 2 | 11.0 | 22.0 | 0 | 0 | 3748 | 41.2 | 82.4 |
| 部材4:SC70 | 2 | 15.0 | 30.0 | 0 | 0 | 4910 | 54.0 | 108.0 |
| 部材5:SD | 4 | 7.60 | ③ 30.4 | 0.128 | ④ 0.51 | --- | 184 | 736 |
| 合計 | 12 | --- | ⑤ 86.5 | --- | ⑥ 4.57 | --- | --- | ⑦ 926.4 |

注)積層ゴム:K1=A・G/nt = K2, Q=0, 鉛・錫プラグ入り: K1=αk2, K2= A・G/nt, Q=β Ap

すべり支承:K1= A・G/nt, K2=0, Q=μ N

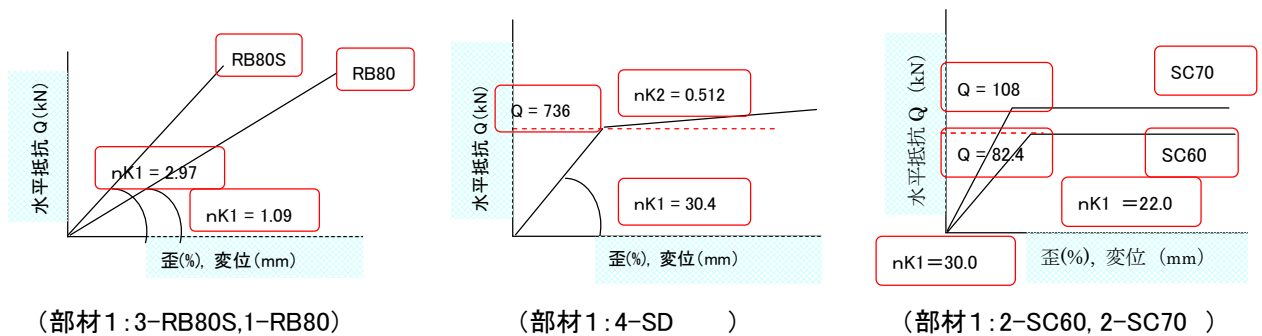


図 4-2.6 基本性能曲線(左: 積層ゴムの例、右:すべり支承の例)

[計算モデルの限界変形性能]

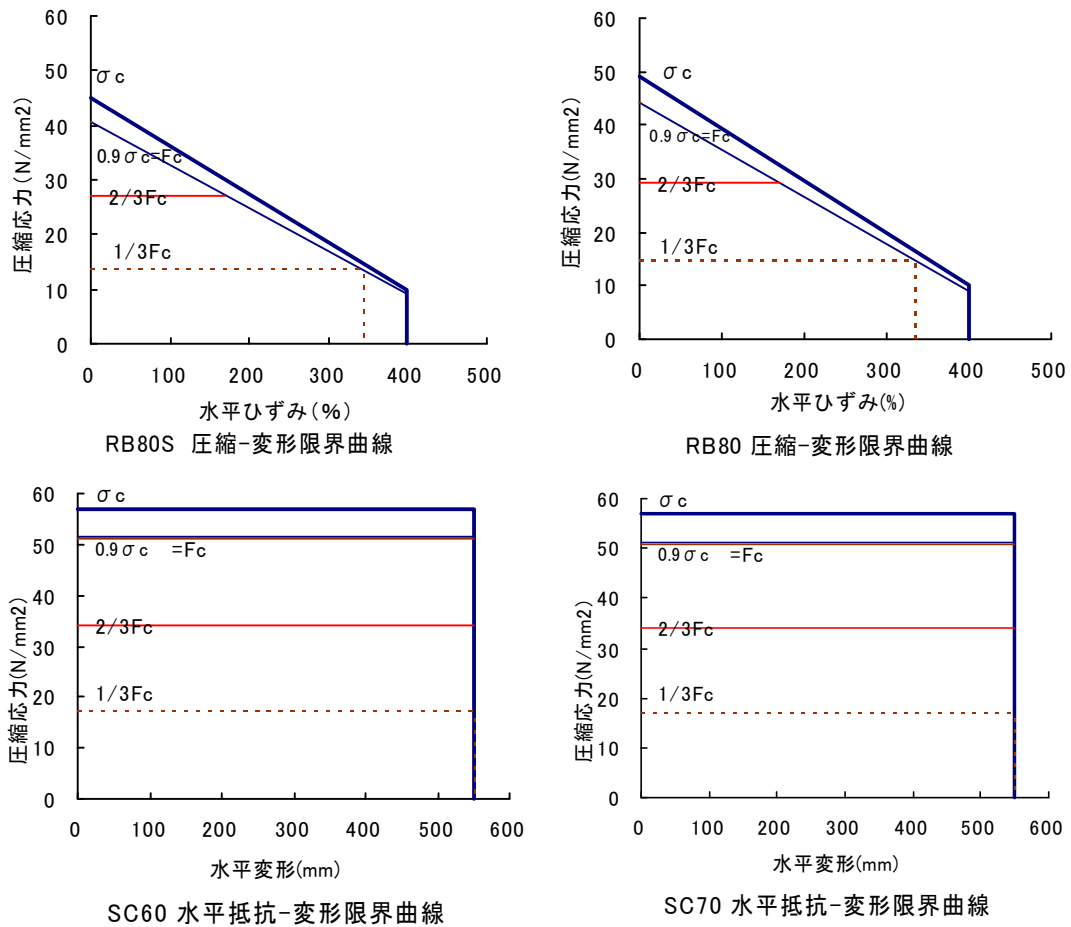


図 4-2.7 限界性能曲線(左: 積層ゴムの例、右: すべり支承の例)

表 4-2.2 配置部材の限界性能値

| 部材記号 | 圧縮限界強度 σ_c (N/mm ²) | 鉛直基準強度 F_c < $0.9\sigma_c$ (N/mm ²) | 限界変形 δ_m (mm) | 水平基準変形 δ_u (mm) | 設計限界変形 $m\delta_d$ (%),(mm) |
|-----------|---|--|-------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 部材1:RB80S | 45 | 41 | 400 (%) ①792 (mm) | 343(%): $F_c/3$ 679 (mm) | 274(%) 543 (mm) |
| 部材2:RB80 | 49 | ② 44 | 400 (%) ⑤720 (mm) | 335(%): $F_c/3$ 603 (mm) | 268(%) ⑥482 (mm) |
| 部材3:SC60 | 57 | ③ 51 | 550 (mm) | 550 (mm) | 495(mm) |
| 部材4:SC70 | 57 | ④ 51 | 550 (mm) | 550 (mm) | 495(mm) |
| 部材5:SD | --- | --- | 650 (mm) | ⑦650 (mm) | ⑧650 (mm) |

最小値: ⑨ 550 ⑩ 550 $\delta_s =$ ⑪ 482 (mm)

注) 水平基準変形 δ_u : 面圧 $F_c/3$ 時の限界変形、 (最小値)
 設計限界変形 $m\delta_d < 0.8\delta_u$ (積層ゴム支承), $0.9\delta_u$ (すべり支承), $1.0\delta_u$ (ダンパー, 復元材)
 設計限界変位 $\delta_s = \text{Min}(m\delta_d)$ (変形: 免震材料で使用、変位: 免震層で使用する)

4-3. 免震層の復元力特性を確認する

ここまでで設計した免震部材の復元力特性を総計し、免震層の復元力特性を求めます。そのためには、この特性を変形と復元力のグラフにし、それぞれの特性値を重ね合わせます。図 4-3.1 は積層ゴムの復元力と鉛ダンパーの復元力を重ね合わせた模式図です。一般に重ね合わせたグラフは複数の折れ点を持つトリ・リニア型、多点折線の復元力曲線となります。

[告示計算モデル]

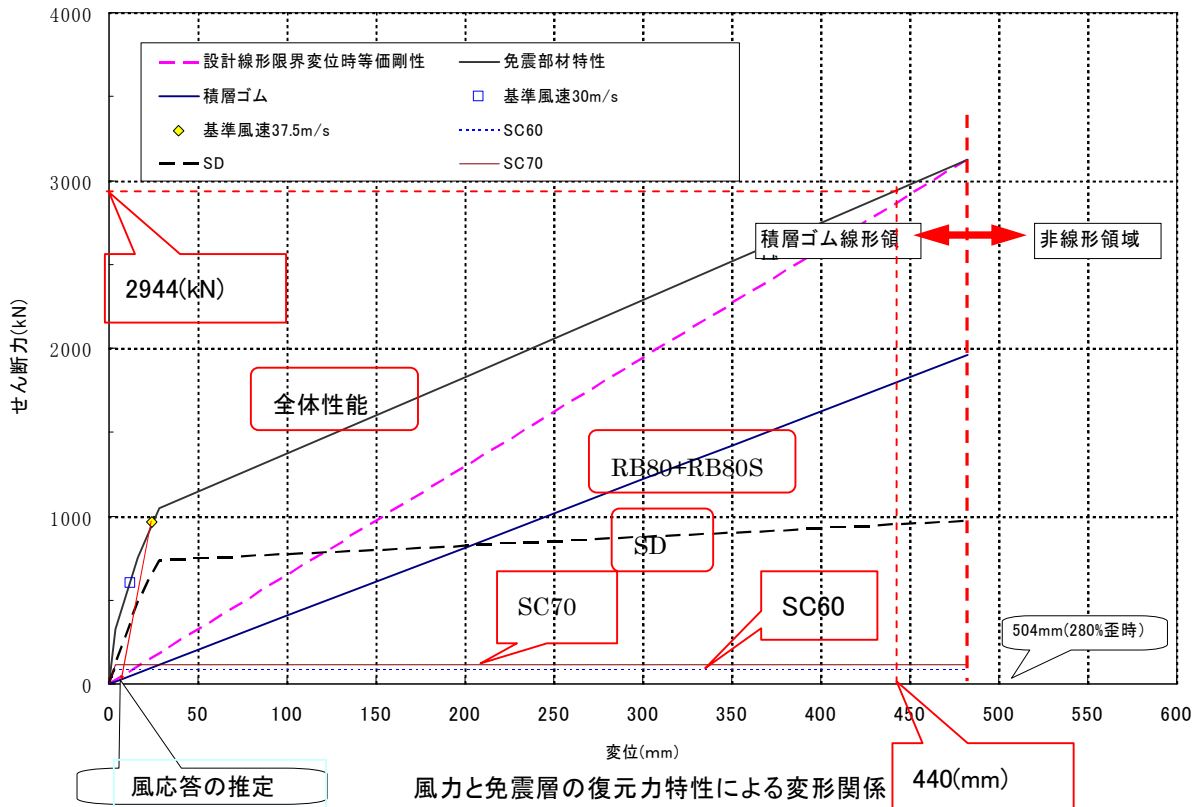


図 4-3.1 積層ゴムの復元力と鉛ダンパーの復元力を重ね合わせた模式図

4-4. 免震周期を確認する

次に免震周期を確認します。免震層の復元力特性から塑性剛性 K_p (: 第3剛性 K_3) と建物の地震時荷重重量 W から固有周期 T_f を算定します。

$$T_f = 2\pi\sqrt{(M/K_p)} \quad , \quad M=W/g, g: \text{重力加速度}(980\text{cm/s}^2)$$

この固有周期は、建物を1質点とし、免震層の復元力 K_p で振動する周期を意味し、免震周期と呼びます。

この周期が長いほど応答スペクトルで説明したように免震性能が高くなります。ここでの確認条件は、

$$\text{算定値 } T_f > 5 \text{ 秒}$$

とします。この条件を満たすと経験的に許容応力度設計の耐震目標を設定することが可能となります。

一般に積層ゴム支承だけでは、この条件を満たすことはやや難しいため、対策として、積層ゴム支承の一部を低摩擦すべり支承や転がり支承に置き換えることが有効です。

なお、地震時の実周期は、この免震周期に対して減衰力によって修正された等価周期に近くなります。

[告示計算モデル]

設計限界固有周期 $T_s = 2\pi\sqrt{(M/Ke)} = \textcircled{1} 4.15 \text{ (sec)}$

上部構造の総質量: $M=W/g=(23796+4461+400)/980$
 $\doteq 28660/980 = 29.24 \text{ (kN/(cm/s}^2\text{))}$

設計限界変位時の免震層等価水平剛性 $Ke = Q(\delta_s)/\delta_s = \textcircled{2} 66.91 \text{ (kN/cm)}$ 注
 $\delta_s = 482\text{mm} \longrightarrow 0.90 \times 482 = 434 \rightarrow 440\text{mm}$ とする (*告示設計で説明します)

$Q(\delta_s) = 440 \times (3 \times 0.99 + 1.09) + 82.4 + 108 + (736 + (440 - 16) \times 0.51) = 2944 \text{ (kN)}$
 { RB80S + RB80 } + SC60 + SC70 + SD

4-5. 免震層の変動性能を確認する

前節で選定した免震部材の変動特性を確認しておきます。告示による設計計算、時刻歴解析による設計計算においてもこの性能変動率を考慮した設計が必要です。むしろ、耐震目標の確認のためには、変動性能を用いた解析が必要です。

即ち、上部構造、下部構造の応力・変形の確認では、免震効果が最も低くなる免震部材のプラス誤差が最大となる“上限性能”で設計を行います。また、免震層の変形の確認では、免震効果が最も高くなる免震部材のマイナス誤差が最大となる“下限性能”で設計を行います。

免震部材の誤差やばらつきは、各部材で異なり認定リストから計画地の環境温度、使用年数も考慮して設定します。天然ゴム系積層ゴム、低摩擦弾性すべり支承、鋼材ダンパー、オイルダンパーの例を表 4-5.1a 表 4-5.1b に示します。

解析上では、これらの変動率を基準性能値に掛けて扱います。しかし、下記の変化率は設計者の地震動の特性も考慮した総合判断が必要です。

- a. 繰り返し変化率：地震動の非定常性と繰り返し回数の推定を考慮して設定する。
- b. 変形依存性：大地震時の想定変形時を当てはめる。面圧依存は他の変化率と同様に扱う。

表 4-5.1a 免震部材の性能変動率例 1

| 変動・依存性能 | 天然ゴム系積層ゴム | | 低摩擦弾性すべり | | | | オイルダンパー | |
|---|-----------|------|----------|------|-------|------|---------|------|
| | 上限 | 下限 | 水平剛性 | | 摩擦係数 | | 上限 | 下限 |
| ・製造誤差 | +15% | -15% | +20% | -20% | +20% | -20% | +15% | -15% |
| ・経年変化率(60年相当) | +10% | 0 | +10% | 0 | 僅か | 僅か | +3% | -3% |
| ・繰り返し変化率(40回/3回) | 僅か | 僅か | 僅か | 僅か | 僅か | 僅か | 僅か | 僅か |
| ・温度変化率(0°C~30°C) | +6% | -5% | +15% | -5% | +5% | -5% | +3% 僅か | -3% |
| ・変形依存性(200%時) | 0 | -10% | 僅か | 僅か | 僅か | 僅か | か | 僅か |
| ・面圧依存性(0.5σ _o ~2.0σ _o) | +5% | -5% | +5% | -5% | +50% | -45% | なし | なし |
| ・速度依存性 | 僅か | 僅か | 僅か | 僅か | 高速域一定 | | 性能式で設定 | |

表 4-5.1b 免震部材の性能変動率例2

| 変動・依存性能 | 鋼材ダンパー | | | | 鉛ダンパー | | | |
|------------------|--------|------|--------|------|-------|------|--------|------|
| | 水平剛性 | | 降伏せん断力 | | 水平剛性 | | 降伏せん断力 | |
| | 上限 | 下限 | 上限 | 下限 | 上限 | 下限 | 上限 | 下限 |
| ・製造誤差 | +10% | -10% | +10% | -10% | +20% | -20% | +10% | -10% |
| ・経年変化率(60年相当) | 僅か | 僅か | 僅か | 僅か | 僅か | 僅か | 僅か | 僅か |
| ・繰り返し変化率(40回/3回) | 僅か | 僅か | 僅か | 僅か | 未定 | 未定 | 0 | -45% |
| ・温度変化率(0°C~30°C) | +2% | -2% | +2% | -2% | 僅か | 僅か | +7% | -7% |
| ・変形依存性(限界変形内) | 僅か | 僅か | 僅か | 僅か | 僅か | 僅か | 0 | -25% |
| ・面圧依存性 | なし | なし | なし | なし | なし | なし | なし | なし |
| ・速度依存性 | 僅か | 僅か | 僅か | 僅か | 僅か | 僅か | 僅か | 僅か |

[告示計算モデル]

計画地 日最低気温の月別平年値 2.8(1月)
日最高気温の月別平年値 30.8(8月)

●天然ゴム系積層ゴム(弾性系)

| 入力 | 標準 | +変動 | | -変動 | |
|------------|----------|-----|------|------|------|
| ΣnK1(kN/m) | 4360 | 25% | 5450 | -13% | 3793 |
| 剛性K1変動 | 経年変化 (%) | 10% | | 0% | |
| | 温度変化 (%) | 5% | | -3% | |
| | 製造誤差 (%) | 10% | | -10% | |

●低摩擦弾性すべり支承(すべり系)

| 入力 | 標準 | +変動 | | -変動 | |
|------------|----------|-----|-------|------|-------|
| ΣnK1(kN/m) | 52000 | 47% | 76440 | -19% | 42120 |
| ΣQy(kN) | 190 | 40% | 266.7 | -20% | 152.4 |
| 剛性K1変動 | 経年変化 (%) | 10% | | 0% | |
| | 温度変化 (%) | 10% | | -4% | |
| | 製造誤差 (%) | 15% | | -15% | |
| | 面圧変化 (%) | 7% | | 0% | |
| 降伏変動 | 経年変化 (%) | 0% | | 0% | |
| | 温度変化 (%) | 5% | | -5% | |
| | 製造誤差 (%) | 15% | | -15% | |
| | 面圧変化 (%) | 20% | | 0% | |

●ダンパー(弾塑性系,鉛ダンパー、鋼棒ダンパー)

| 入力 | 標準 | +変動 | | -変動 | |
|------------|----------|-----|--------|------|--------|
| ΣnK1(kN/m) | 30400 | 15% | 34960 | -15% | 25840 |
| ΣnK2(kN/m) | 512 | 10% | 563.2 | -10% | 460.8 |
| ΣnQy(kN) | 736 | 12% | 824.32 | -12% | 647.68 |
| 剛性K1変動 | 経年変化 (%) | 0% | | 0% | |
| | 温度変化 (%) | 0% | | 0% | |
| | 製造誤差 (%) | 15% | | -15% | |
| 剛性K2変動 | 経年変化 (%) | 0% | | 0% | |
| | 温度変化 (%) | 0% | | 0% | |
| | 製造誤差 (%) | 10% | | -10% | |
| 降伏変動 | 経年変化 (%) | 0% | | 0% | |
| | 温度変化 (%) | 2% | | -2% | |
| | 製造誤差 (%) | 10% | | -10% | |

4-6. 免震層のねじれ特性を確認する

免震層のねじれ特性は、各免震部材の変形に応じた等価水平剛性 K_i と支持荷重 W_i を用いて算定します。偏心率は、微小変形から大変形まで計算し、できるだけ大変形で偏心率が小さくなるように調整します。調整方法は、以下の2つの方法が効果的です。この段階では、積層ゴム支承やすべり支承は、変更しない調整が合理的です。

- ①分散して設置したダンパーの取り付け位置を変更する。
- ②ダンパーの性能を変更する。基数を増減する。またはダンパーの種類や型式を変更する。

(免震層の偏心率の計算式)

重心位置 $g_x = \sum(N \cdot X) / W$, $g_y = \sum(N \cdot Y) / W$ (mm)
 $W = \sum N$: 長期支持荷重(kN)、 X, Y : 免震部材の座標(mm)

剛心位置 $L_x = \sum(K_y \cdot X) / \sum K_y$, $L_y = \sum(K_x \cdot Y) / \sum K_x$ (mm)
 K_x, K_y : 免震部材の等価剛性、積層ゴム, すべり支承の場合: $K_x = K_y$

偏心距離 $e_x = |L_x - g_x|$, $e_y = |L_y - g_y|$ (mm)

ねじり剛性 $K_r = \sum(K_y \cdot X'^2) + \sum(K_x \cdot Y'^2)$ (kN \cdot mm²/mm)
 剛心間距離: $X' = L_x - X$, $Y' = L_y - Y$

弾力半径 $r_{ex} = \sqrt{K_r / \sum K_x}$, $r_{ey} = \sqrt{K_r / \sum K_y}$ (mm)

偏心率 $R_{ex} = e_y / r_{ex}$, $R_{ey} = e_x / r_{ey}$ (mm)

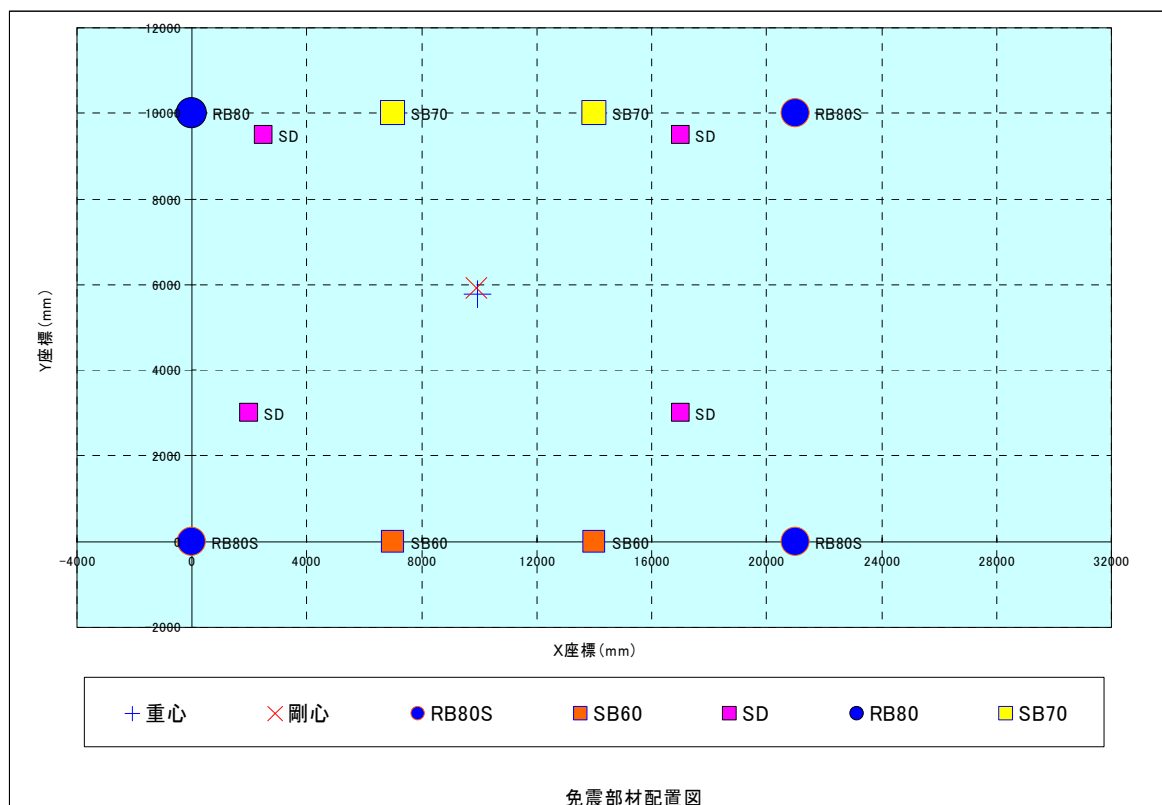
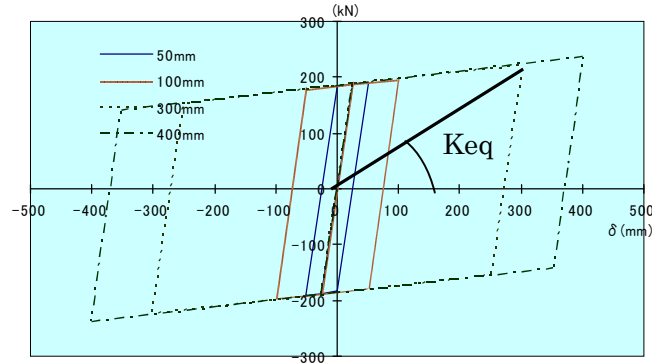


図 4-6.1 免震部材の配置と免震層の重心、剛心位置

(1) [計算モデル]

SDの等価剛性例



| 公称名 | RB80S | RB80 | SC60 | SB70 | SD |
|-------------|-------|-------|------|------|------|
| ゴム総厚mm | 198.0 | 180.0 | 20 | 20 | - |
| ゴム歪% | 25% | 28% | - | - | - |
| すべり出変位 | | | 3.74 | 3.60 | |
| Keq (kN/mm) | 1.20 | 1.30 | 0.82 | 1.08 | 3.81 |

| δ (mm) | | 免震材料の水平変形量と偏心率 (%) | | | | | | | 注) 赤字は、直接記入する |
|-------------|------|--------------------|------|------|------|------|------|-------|---------------|
| δ (mm) | 50 | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 最小ゴム厚 | |
| 最小径装置歪% | 25 | 25 | 51 | 101 | 152 | 202 | 253 | 198.0 | |
| 偏心距離 X (mm) | -35 | -35 | 14 | 71 | 104 | 126 | 141 | | |
| Y (mm) | 146 | 146 | 37 | -91 | -166 | -216 | -252 | | |
| 偏心率 X (%) | 1.68 | 1.68 | 0.40 | 0.94 | 1.67 | 2.13 | 2.45 | < 3% | |
| Y (%) | 0.40 | 0.40 | 0.15 | 0.73 | 1.04 | 1.24 | 1.38 | < 3% | |

δ = 50 (mm) 変形等価剛性による偏心率

| | | |
|-----------------------------------|---|-----------------------------|
| 建物総重量 (kN) | 29696.0 | |
| | X | Y |
| | $\sum (N \cdot X) / \sum N$ | $\sum (N \cdot Y) / \sum N$ |
| 重心位置 g (mm) | 9933 | 5778 |
| | $\sum (K \cdot X) / \sum K$ | $\sum (K \cdot Y) / \sum K$ |
| 剛心位置 L (mm) | 9898 | 5924 |
| | $ L_x - g_x $ | $ L_y - g_y $ |
| 偏心距離 e (mm) | -34.8 | 145.9 |
| | $K_r = \sum (K \cdot X'^2) + \sum (K \cdot Y'^2)$ | |
| ねじり剛性 kr (kN・mm ² /mm) | 1.80E+09 | |
| | $\sqrt{(K_r / \sum K)}$ | |
| 弾力半径 re (mm) | 8672 | 8672 |
| | ey/re | ex/re |
| 偏心率 Re | 1.6823 | 0.4018 |

(2) 偏心率の目標値とその背景

一般に偏心率は3%以下に設計します。この値は、免震構造の評定審査が開始された建築センターの審査物件の統計的値やねじれを考慮した免震建築物の地震応答解析の論文等から決定されてきました。告示2009号の規定値はその値を継承したものです。

計算モデルで、免震部材の変形歪み250%で固定して、偏心率を変動させて免震部材のせん断力の変動を補正係数 α を計算すると図4-6.2の結果を得た。この例では、偏心率3%程度では免震部材のせん断応力3%以上の誤差が含まれることになる。この変動が上部構造の応答をどの程度増幅させるかが、懸念されるが、これまでの研究では、3%以下ではその増幅はわずかであるとされています。

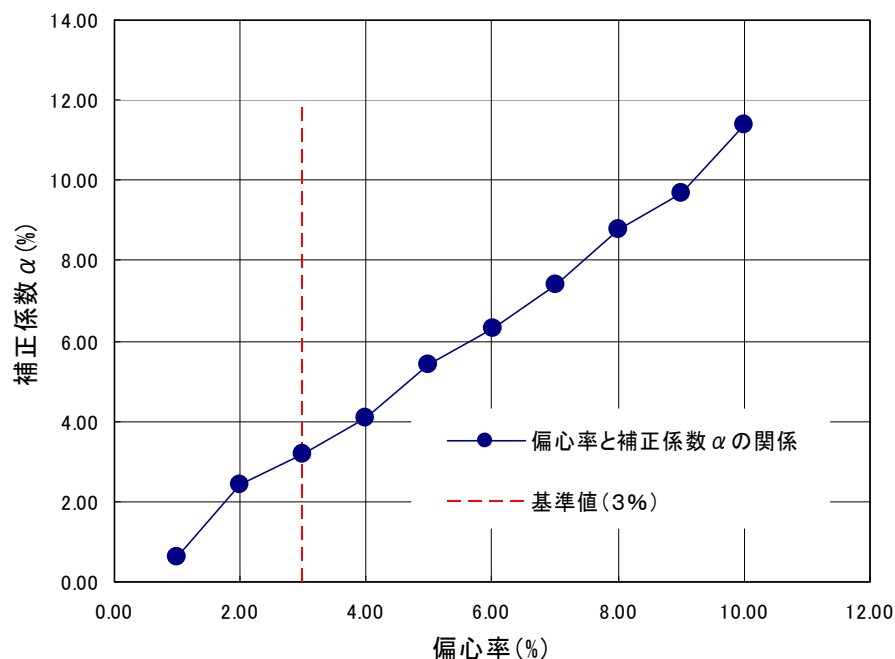


図 4-6.2 計算モデルによる250%歪み時の
免震層の偏心率と免震部材の負担せん断力補正係数(%)の関係

表 4-6.1 負担せん断力補正係数 α の計算式と計算結果

| 分担せん断力に対する補正係数 α ($Q_i' = \alpha \cdot Q_i$) | | | |
|---|---------------|------------------------------|------------------------------|
| $K \cdot X^2$ | $K \cdot Y^2$ | $\alpha_{x=1+Dejx} \cdot Y'$ | $\alpha_{y=1+Dejy} \cdot X'$ |
| 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.951 | 1.114 |
| 4.04E+06 | 0.00E+00 | 0.951 | 1.041 |
| 1.62E+07 | 0.00E+00 | 0.951 | 0.968 |
| 3.83E+08 | 0.00E+00 | 0.951 | 0.896 |
| 0.00E+00 | 9.42E+07 | 1.054 | 1.114 |
| 5.29E+06 | 1.08E+07 | 1.054 | 1.041 |
| 2.12E+07 | 1.08E+07 | 1.054 | 0.968 |
| 3.83E+08 | 8.67E+07 | 1.054 | 0.896 |
| 2.79E+07 | 1.98E+06 | 0.972 | 1.036 |
| 1.79E+08 | 1.98E+06 | 0.972 | 0.916 |
| 1.24E+07 | 1.79E+07 | 1.013 | 1.062 |
| 1.52E+08 | 1.79E+07 | 1.013 | 0.932 |

4-7. 免震層の履歴特性も確認する

前節“4-3. 免震層の復元力特性を確認する”では設定した免震部材の復元力を重ね合わせることで免震層の復元力特性を算定したが、第1象限の上り抵抗部分だけでした。ここでは、全象限の履歴ループを推定します。

- ・告示計算では、履歴ループはその面積から算定する減衰係数の算定に用います。
- ・地震応答解析では、各免震部材または免震層の履歴ループをバイ・リニア型やトリ・リニア型の履歴曲線モデルによって近似化します。

