

『Super Build® / SS7 Op. 免震部材』速度の評価方法

1. 概要

『Super Build® / SS7 Op. 免震部材』(以下、『Op. 免震部材』)は免震建物の静的な検証を行うソフトウェアです。免震部材は支承材や履歴系減衰材だけでなく流体系減衰材も対象としています。流体系減衰材は速度に依存する部材であるため、その部材応力の算定には静的なパラメータから速度を評価する必要があります。また、支承材においても速度に依存する特性を持つものがあります。

『Op. 免震部材』では、それら評価に必要となる速度(免震層の速度)を、以下のように計算しています(解説書「Op. 免震部材」抜粋)。本資料では、この式の導出と、プログラムの計算結果に対して検算を行います。

なお、『Super Build® / SS7』 Ver.1.1.21.1 を対象に記載内容を示しています。

免震層の速度として、応答速度、等価速度、平均速度をそれぞれ次式により計算します。

$$\text{応答速度: } V_r = C_v \cdot V_{eq} \quad (3.3.2)$$

$$\text{等価速度: } V_{eq} = \sqrt{(Q_e + Q_h) \cdot \delta / M} \quad (3.3.3)$$

$$\text{平均速度: } V_{ave} = (2 / \pi) \cdot V_{eq} \quad (3.3.4)$$

C_v : 応答速度算出用の割増率で入力指定⁶⁾によります

Q_e : 弾性部のせん断力

Q_h : 減衰部のせん断力

M : 上部構造の質量

図1 『Op. 免震部材』の免震層の速度(解説書「Op. 免震部材」抜粋)

2. 導出

図1に示した免震層の速度は、主に告示免震を参考に導出しています。まず、免震層の等価速度 V_{eq} は変位 δ 、周期 T で単振動したときの最大速度として評価します。

$$\begin{aligned} V_{eq} &= \omega \cdot \delta \\ &= 2 \cdot \pi \cdot \delta / T \end{aligned} \quad (1)$$

式変形を行えば次のような表現も可能となります。

$$\begin{aligned} V_{eq} &= \omega \cdot \delta = \delta \sqrt{\frac{K}{M}} \\ &= \delta \sqrt{\frac{Q_h + Q_e}{\delta} \frac{1}{M}} = \sqrt{\frac{(Q_h + Q_e) \delta}{M}} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 Q_e : 弾性部のせん断力、 Q_h : 減衰部のせん断力、 M : 上部構造の質量。

この式は、図1の式(3.3.3)に該当します。

次に、応答速度 V_r についてです。告示免震においては、応答速度は次式で定義されています。

$$V_r = 2.0 \sqrt{\frac{(Q_h + Q_e) \delta}{M}} \quad (3)$$

式(2)を用いれば、次式のような表現もできます。

$$V_r = 2.0 \cdot V_{eq} \quad (4)$$

ここで、係数「2.0」については、告示免震の解説に記載のとおり、免震層の応答速度 V_r には短周期成分が含まれているため、 $\omega \cdot \delta$ で表される速度 (= 等価速度 V_{eq}) よりも大きくなることを踏まえた係数としています。また、すべり・転がり系などにより短周期成分の影響がさらに大きい場合、2.0 以上の値を用いることが望ましいとしており、厳密には 2.0 の固定値ではありません。この係数 2.0 を係数 C_v として置き換え、『Op. 免震部材』では次式のように計算します。

$$V_r = C_v \cdot V_{eq} \quad (5)$$

これが、図 1 の式 (3.3.2) に該当します。

最後に、平均速度 V_{ave} についてです。平均速度は、等価速度と同様に、免震層が単振動したときの状態を考えます。変位 δ 、周期 T で単振動したときの平均速度を考えると、周期 T 秒で総移動距離は 4δ と考えられ、次式のように評価できます。

$$V_{ave} = 4 \cdot \delta / T \quad (6)$$

これに対し、式 (1) を用いれば次式となります。

$$V_{ave} = 4 \frac{\delta}{T} = \frac{2}{\pi} \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{\delta}{T} \right) = \frac{2}{\pi} V_{eq} \quad (7)$$

これが、図 1 の式 (3.3.4) に該当します。

なお、式 (5)、(7) より、 V_r と V_{ave} には次式の関係が成り立ちます。

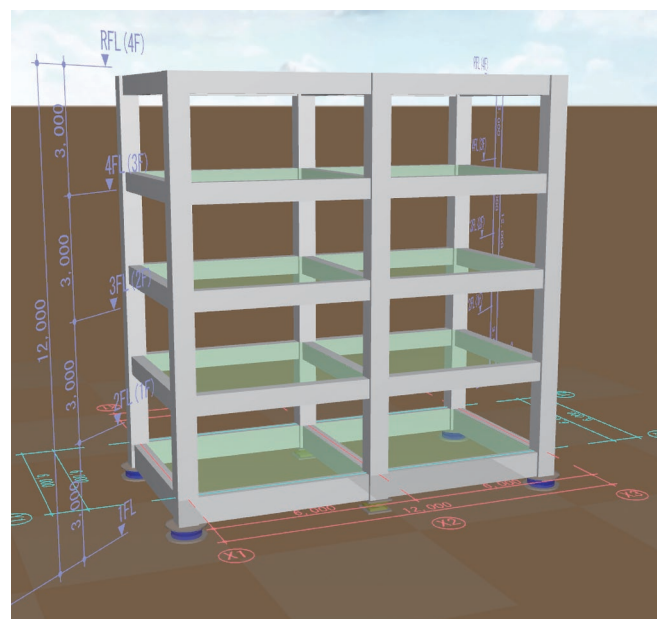
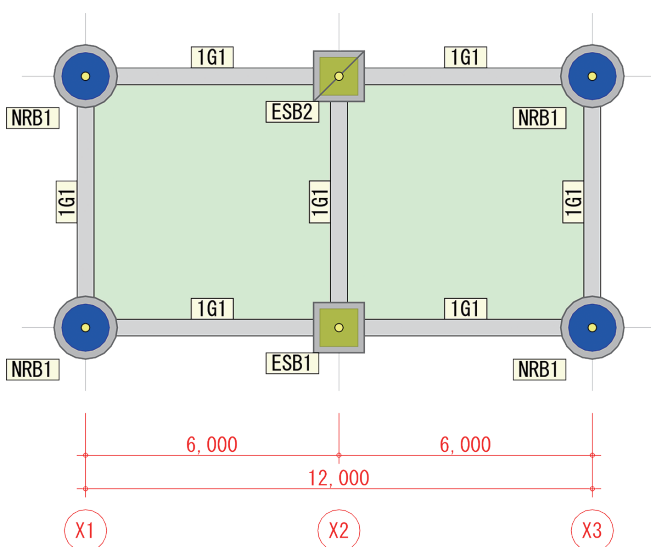
$$V_{ave} = \frac{2}{\pi} V_{eq} = \frac{2}{\pi} \frac{V_r}{C_v} \quad (8)$$

『Op. 免震部材』では、これらの速度を用いて免震部材の応力を計算しています。

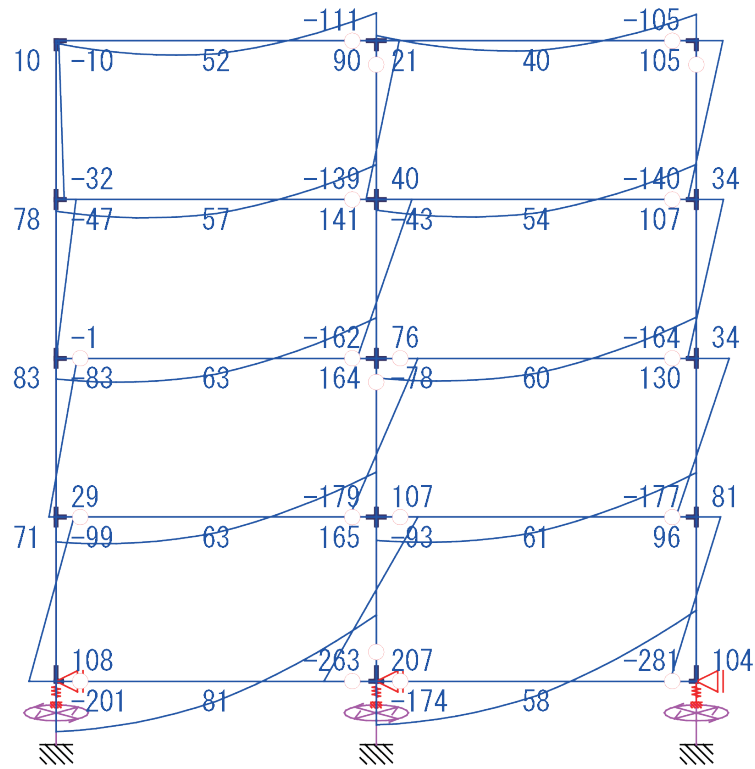
3. 計算結果の確認

ここでは、『Op. 免震部材』で計算される免震層の応答速度を検算してみます。

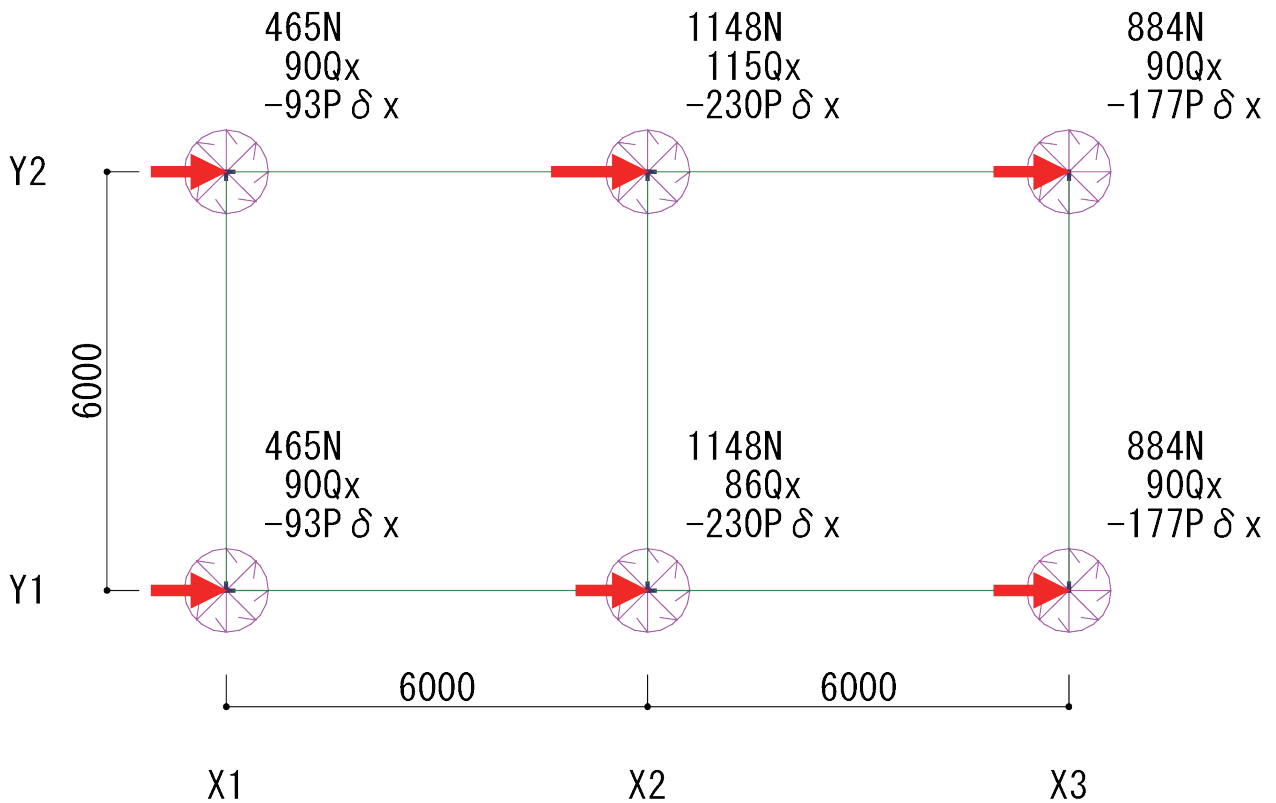
以下のように、天然ゴムとすべり支承の免震部材を配置した免震建物について確認を行います。



解析を行う設計変位は 400mm (天然ゴムのひずみ = 250% 相当) を入力しました。
 一次の応力解析ではひび割れを考慮して行い、X 方向正加力の結果は以下のような応力結果となりました。
 支点位置ではモーメントが釣り合っていないが、免震部材の付加曲げが考慮されているためです。



免震部材の応力図は以下になりました。



免震層の変位、応答速度、せん断力は下図になりました。
 この応答速度 $V_r=1360\text{mm/s}$ を検算します。
 等価速度 V_{eq} は、式 (2) より次式になります。なお、 $M=484\text{ton}$ です。

$$V_{eq} = \sqrt{\frac{(Q_h + Q_e)\delta}{M}} = \sqrt{\frac{(200.3 + 358.4)0.4}{484}} = 0.6795\text{m/s} \approx 680\text{mm/s} \quad (9)$$

等価速度を式 (5) に適用し、応答速度 V_r は次式になります。なお、入力指定より $C_v=2.0$ としています。

$$V_r = C_v \cdot V_{eq} = 2.0 \cdot 680 = 1360\text{mm/s} \quad (10)$$

上記のように、検算結果はプログラムの結果と一致しました。
 なお、免震層の平均速度 V_{ave} を計算すると、式 (7) より次式になります。

$$V_{ave} = \frac{2}{\pi} V_{eq} = \frac{2}{\pi} 680 = 433\text{m/s} \quad (11)$$

ケース	δ mm	V_r mm/s	Q_h kN	Q_e kN	γ	Q_{iso} kN	Q_o kN	μ	λ
EX+	400	1360	200.3	358.4	1.00	558.7	558.7	0.0423	0.117859

4. まとめ

『Op. 免震部材』の流体系減衰材や一部の支承材で部材応力の計算に用いる速度（応答速度 V_r ・等価速度 V_{eq} ・平均速度 V_{ave} ）について、その導出方法を示しました。また、プログラムの計算結果を検算しました。

本資料で示したように、『Op. 免震部材』では静的な結果から速度を求めています。そのため、応答解析で得られる速度とは異なることに注意してください。なお、応答速度算出用の割増率 C_v は入力値であるため、 C_v を調整することで、『Op. 免震部材』の応答速度を、応答解析で得られる速度に近づけることが可能となっています。