

1. はじめに

免震構造とは、地震が伝わる地盤面と構造物の間に積層ゴムなどを挟んで地盤と切り離すことで、構造物に入る地震動を減らし内部の安全性を高めるもので、阪神大震災を契機に、耐震安全性が注目されている。ここでは免震構造物と非免震構造物を取り上げ、兵庫県南部地震時に観測された地震波などを用いて、地震下で構造物の被害を低減できる免震技術、特に地盤を考慮した場合について地震応答解析を行い、考察を加えたので報告する。

2. 対象地盤と構造物の概要

対象地盤は、十分に地盤が良いため表土を取り去り直接基礎を採用する場合と地盤の硬さを変化させた sway パネ定数 (K_s) を $1.0 \times 10^4 \text{tf/cm}$ 、rocking パネ定数 (K_r) を $1.0 \times 10^4 \text{tf} \cdot \text{cm/rad}$ とした地盤を基準とし、それら二つの定数 (K_s, K_r) を 0.7 倍して地盤を軟らかくした場合、10 倍して地盤を硬くした場合の三つの条件を与えた地盤について考えた。対象構造物は、5 階建て (高さ約 17 m) を想定したので対象モデルは図-1に示す 4 種類とし、免震構造物は図-2に示すようにダンパーを鋼棒製ダンパーの他に鉛ダンパーを付加した場合も考えた。

3. 解析方法

RC 構造物の場合、変形が始まるとまずひび割れがはいる、次いで降伏し破壊に至るため、これらの非線形応答を考慮できる復元力特性としてトリリニアモデル (武田モデル) を用いた。各層の荷重変形曲線を図-3に示し、線形の場合と比較した。

構造物に、 x 方向の地震動が作用する場合の振動方程式は式 (1) による。

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = -[M]\{\ddot{y}(t)\} \quad \cdots \text{式 (1)}$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{1h} & m_{2h} & m_{3h} & m_{4h} & m_{5h} & m_{6h} & m_{7h} \end{bmatrix} \quad \{x\} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \end{bmatrix} \quad [K] = \begin{bmatrix} K_1+K_{10} & K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} & K_{16} & 0 \\ K_{11} & K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} & K_{16} & 0 \\ K_{12} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} & K_{16} & 0 & 0 \\ K_{13} & K_{13} & K_{14} & K_{15} & K_{16} & 0 & 0 & 0 \\ K_{14} & K_{14} & K_{15} & K_{16} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{15} & K_{15} & K_{16} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{16} & K_{16} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{10} & K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} & K_{16} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_r \end{bmatrix} \quad [C] = \begin{bmatrix} c_1+c_2 & -c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_1 & c_1+c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_2 & c_2+c_3 & -c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_3 & c_3+c_4 & -c_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c_4 & c_4+c_5 & -c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_5 & c_5+c_6 & -c_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_6 & c_6+c_7 & -c_7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_7 & c_7 \end{bmatrix}$$

用いた入力地震波は、兵庫県南部地震で観測された J R 西日本の鷹取地震波を 100gal 時に基準化した時刻歴波形を用いて、構造物や地盤の線形、非線形を考慮した①地盤考慮しない免震、非免震②地盤考慮した免震、非免震の場合について比較、検討した。ここでは主に②の地盤を考慮した場合について述べる。

4. 解析結果と考察

地盤が硬いときは免震装置をいれると、図-4 (1) に示すように、非免震時に比べて直立不動の形で最大加速度応答値が 1 階から 5 階までほぼ一定の値をとる。最上階 5 階の応答値を比較すると、非免震時に比べて免震装置をいれた場合、約 265gal から約 193gal まで値が減少している。地盤が軟らかいときは、図-4 (2) に示すように変化は見られず、最上階の応答値は、約 300gal から約 325gal まで値が増加している。最大変位応答値は、地盤が硬いときは図-4 (1) に示すように、非免震の場合、免震装置をいれた場合どちらも地盤が軟らかいとき (図-4 (2)) に比べて直立不動の形で 1 階から 5 階までほぼ一定の値をとる。

鷹取波は、8 ~ 10 秒間のとき約 2.5 秒の長周期成分があり、図-5 に示すように、地盤が軟らかいと影響されて、応答加速度、応答変位が大きくなる。構造物に免震工法を用いると、長周期化となる。構造物と地盤の相互作用の影響が大きい場合、地盤が軟弱であると、表層地盤による地盤内の長周期成分の増幅が免震構造物と共振現象をおこし、大きな問題となる。よって地盤が軟らかい場合には免震工法は適用するべきで

はないと考える。免震工法は地盤が硬い場合に適用する工法である。

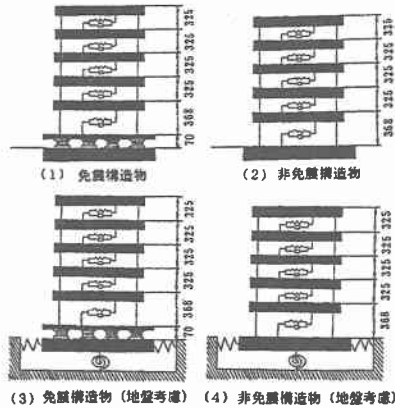


図-1 対象モデル

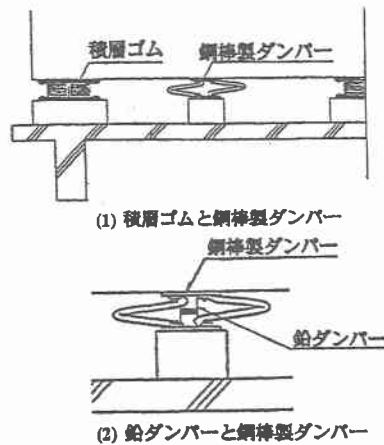


図-2 免震装置

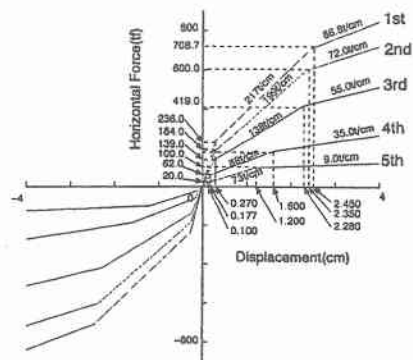
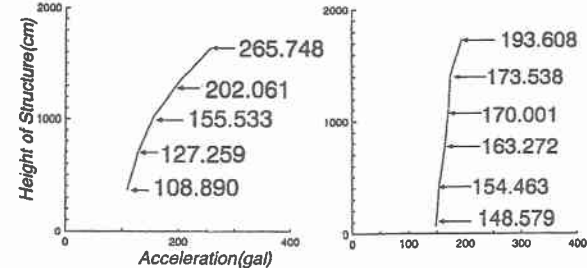
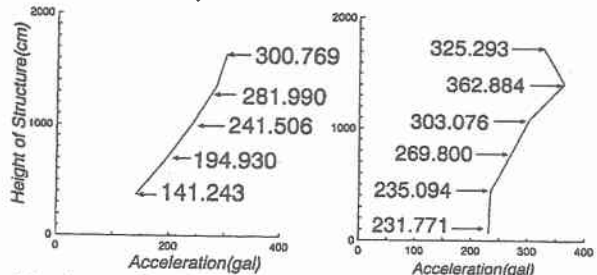


図-3 構造物の非線形復元力特性

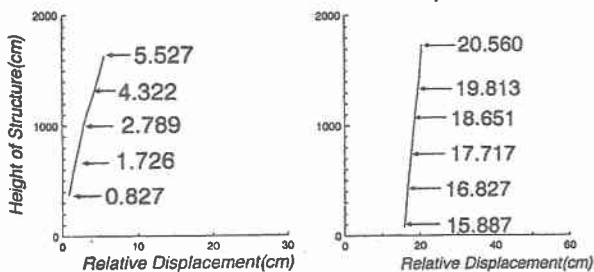
Maximum Response of Acceleration



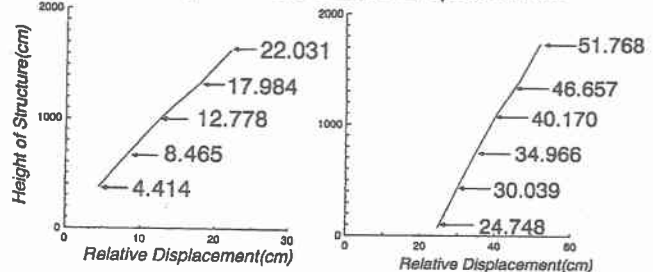
Maximum Response of Acceleration



Maximum Response of Relative Displacement



Maximum Response of Relative Displacement



非免震

免震

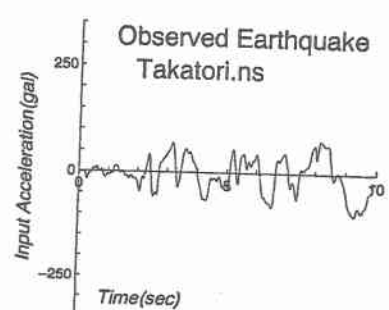
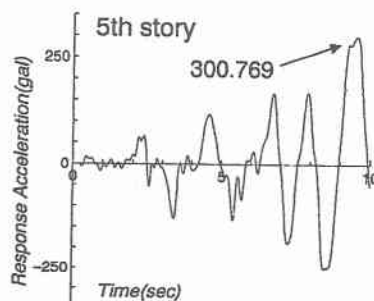
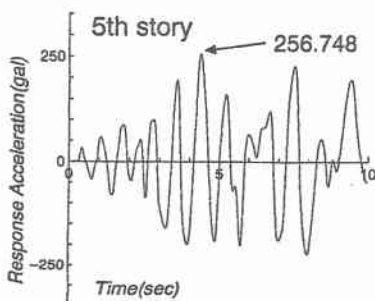
非免震

免震

(1) 硬質地盤

(2) 軟弱地盤

図-4 鷹取 NS の応答値最大包絡線分布



(1) 硬質地盤

(2) 軟弱地盤

入力地震波

図-5 鷹取 NS の非免震時の 5 階の加速度応答値時刻歴波形

参考文献

- 1) Masaaki YOSHIKAWA et al.: Active Control of Seismic Response of Structure by Mass Diver System, 1st World Conference on Structural Control, PP.FP1-33 ~ FP1-44, 1994.8.
- 2) 武田寿一: 構造物の免震・防震・制震, 技報堂出版株式会社, pp.4243, 1998.