

長周期地震動を受ける二段階免震構造物の地震応答特性について

中川 肇* 前田 智香**

Seismic Response Characteristics of Two Stage Base Isolated Buildings Under Long Period Ground Motion

Hajime NAKAGAWA, Tomoka MAEDA

ABSTRACT

This paper presents the seismic response characteristics of two stage base isolated buildings under long period ground motion. Two stage base isolation systems are base isolated systems installed at the first and mid stories. The long period ground motions based on the K-NET earthquake observation systems are the 2003 Tokachi offshore earthquake in the K-NET Tomakomai, and the 2011 off pacific coast of Tohoku earthquake in K-NET Osaka. The simulated earthquake wave is the building center wave of Japan at level II.

As an earthquake response analysis result, the maximum displacement and acceleration responses of first and mid stories in two stage base isolated buildings can be reduced by 50~60% from these responses of base isolated buildings.

KEY WORDS: two stage base isolation systems, long period ground motion

1. はじめに

2003年の十勝沖地震以後、2004年の紀伊半島南東沖地震、2011年の東北地方太平洋沖地震では、長周期地震動が観測されている¹⁾。基礎免震構造物に長周期地震動が入力された場合、免震層を構成する積層ゴムが過大に変形する恐れが懸念されている。

実務設計では、この過大変形を抑制するために、オイルダンパーなどの制震ダンパーを併用される場合が多い。

本論では、制震ダンパーを用いた基礎免震構造ではなく、基礎免震と中間層免震を混合した二段階免震構造を提案したい。

多段免震構造に関する既往の研究²⁾において、一つの建物内に2つの免震層を有し、建物が3つの部分に分割された「多段免震構造」において、中間層免震の位置や免震層の剛性と減衰をパラメータとして、固有振動特性や地震時応答の特徴を明らかにし、多段免震構造の有効性を示している。

この二段階免震構造を採用することにより、基礎

免震構造物の1次固有周期以上に長周期化が図られ、免震層における積層ゴムの過大な変形を2層の免震層で分散できることが可能であると考えている。

本論では、十勝沖地震などの長周期地震動を受ける二段階免震構造物の応答特性を地震応答解析に基づき検討することを目的にしている。

2. 二段階免震構造物の地震応答解析法

2.1 解析モデルと入力地震動モデル

図1には、基礎部と中間層に夫々積層ゴムと鋼棒ダンパーを配置した免震装置(LRB)、基礎部以上の上部構造、中間層免震以上の上部構造を耐震構造とする二段階免震系構造物モデルが描かれている。

ここで、LRB (rubber bearing with lead damper)は鉛入り積層ゴムを意味し、 $m_i, r_1 k_1, r_i k_i, k_{i-1}, c_{i-1}$ は夫々、各層の質量、基礎免震層・中間免震層の初期剛性、上部構造物の剛性、粘性減衰係数である。

本論では、基礎免震層、中間層免震層、上部構造を29質点の合計31質点系モデルとする。

*建築学科 **建築・都市システム工学専攻

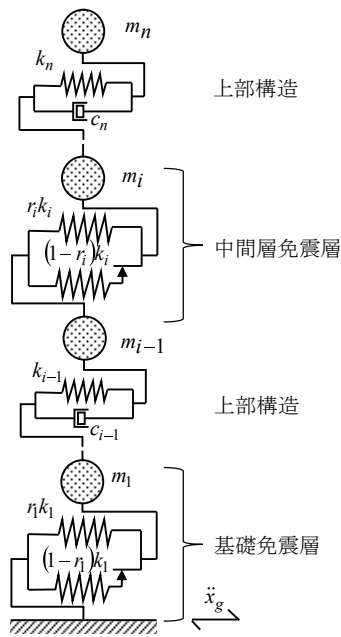


図1 二段階免震系モデル

入力地震動モデルは、2003年の十勝沖地震 (K-NET¹⁾ 苫小牧 NS 成分)、2011年の東北地方太平洋沖地震 (K-NET 大阪波 NS 成分)、模擬地震動の一例として、日本建築センター波 Level II (以下、模擬波 BCJWL2) である。夫々の最大速度を 100cm/s に基準化し、解析で用いる。

入力地震動の最大速度 100cm/s としている理由は、国土交通省告示 1461 号の入力地震動に示されている「極めて稀に発生する地震動」の 1.25 倍と考え、解析に用いるためである。

表 1 に、解析に用いる入力地震動の諸元を示す。

表 1 入力地震動の諸元

地震名	最大加速度 (cm/s ²)	最大速度 (cm/s)	100cm/s 入力 (cm/s ²)
十勝沖(苫小牧)	86.74	32.55	266.48
東北地方太平洋沖(大阪)	6.89	6.16	111.85
模擬波(BCJWL2)	355.66	73.44	484.29

図 2 には、十勝沖地震、東北地方太平洋沖地震、模擬波の速度応答スペクトル (減衰定数 5%) を示している。図 2 より、十勝沖地震の卓越周期は、3.5 秒、5.2 秒、7.1 秒に現れ、東北地方太平洋沖地震 K-NET 大阪波の卓越周期は 3.2 秒、模擬波では、0.5 秒付近が速度応答スペクトルがほぼ一定となっていることが分かる。十勝沖地震、東北地方太平洋沖地震 K-NET 大阪波は長周期地震動である。

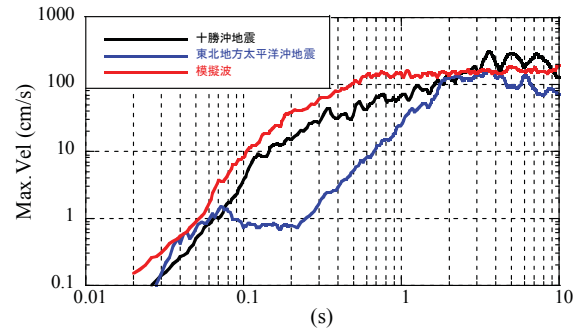


図2 速度応答スペクトル

2・2 運動方程式と状態方程式の誘導

二段階免震系モデルにおいて、図 1 を参考にし、最上層、中間層免震層、2 層、基礎免震層の層間座標系の運動方程式は、次式のように表現できる。

最上層：

$$m_n(\ddot{u}_1 + \dots + \ddot{u}_n + \ddot{x}_g) + c_n \dot{u}_n + k_n u_n = 0 \quad (1)$$

中間層免震層：

$$m_i(\ddot{u}_1 + \dots + \ddot{u}_i + \ddot{x}_g) - c_{i+1} \dot{u}_{i+1} + r_i k_i u_i - k_{i+1} u_{i+1} + (1-r_i) k_i y_i = 0 \quad (2)$$

2 層：

$$m_2(\ddot{u}_1 + \ddot{u}_2 + \ddot{x}_g) + c_2 \dot{u}_2 - c_3 \dot{u}_3 + k_2 u_2 - k_3 u_3 = 0 \quad (3)$$

基礎免震層：

$$m_1(\ddot{u}_1 + \ddot{x}_g) - c_2 \dot{u}_2 + r_1 k_1 u_1 - k_2 u_2 + (1-r_1) k_1 y_1 = 0 \quad (4)$$

ここで、 $m_i, u_i, y_i, \ddot{x}_g$ は夫々*i*層の質量、上部構造、免震層の層間変位、免震層を構成するクーロン素子の層間変位、系の基盤に入力される加速度である。また、クーロン素子の層間速度 \dot{y}_i は、次式のように表現できる。

$$\dot{y}_i = \frac{\dot{u}_i}{4} [2 + \text{sgn}(y_i + \delta_i) - \text{sgn}(y_i - \delta_i) - \text{sgn}(\dot{u}_i) \cdot \{\text{sgn}(y_i + \delta_i) + \text{sgn}(y_i - \delta_i)\}] \quad (5)$$

(1)~(4)式をマトリクス形式で表現すると次式となる。

$$\{\ddot{u}\} + [\tilde{c}]\{\dot{u}\} + [\tilde{k}]\{u\} + [\tilde{k}']\{y\} = -\{l'\}\ddot{x}_g \quad (6)$$

ここで、 $\{u\}$ は層間変位応答ベクトル、 $[\tilde{c}][\tilde{k}][\tilde{k}']$ は夫々上部構造の粘性減衰、剛性に関するマトリクス、中間層・基礎免震層の剛性マトリクス、 $\{l'\}$ は最下段エレメントのみが 1、その他は 0 のベクトルである。

(5)、(6)式より、状態ベクトルとして、 $\{U\} = \{\{u\}, \{\dot{u}\}, \{y\}\}^T$ とおくと、二段階免震系モデルの状態方程式は、次式のように表現できる。

$$\frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{\dot{u}\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & [E] & [0] \\ -[\tilde{k}] & -[\tilde{c}] & -[\tilde{k}'] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{\dot{u}\} \\ \{y\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ -\{\dot{y}\} \end{Bmatrix} \ddot{x}_g \quad (7)$$

$$\dot{y}_i = \frac{\dot{u}_i}{4} [2 + \text{sgn}(y_i + \delta_i) - \text{sgn}(y_i - \delta_i) - \text{sgn}(\dot{u}_i) \cdot \{\text{sgn}(y_i + \delta_i) + \text{sgn}(y_i - \delta_i)\}] \quad (8)$$

3. 解析結果

3-1 基礎免震系と二段階免震系の固有値解析

本論では、二段階免震系として 29 質点の上部構造と中間層・基礎免震層の 31 質点を想定している。

29 質点の上部構造の 1 次固有周期を 2.9 秒として、30 質点の基礎免震系モデルの 1 次固有周期を 6.0 秒とする積層ゴムの剛性 k_I を計算により求める。基礎免震層と 6 層目に基礎免震系と同じ積層ゴムの剛性 k_I を与え、二段階免震系モデルの固有値解析を行い、1 次～3 次固有周期を求める。表 2 に、その結果を示す。ただし、各層の重量 W_i は一定で、12500 kN とする。

表 2 固有値解析結果

	基礎免震系	二段階免震系
1 次	6.00 秒	7.76 秒
2 次	1.53 秒	1.70 秒
3 次	0.87 秒	1.32 秒

表 1 より、基礎免震系の固有周期を 6.0 秒になるように積層ゴムの剛性 k_I を事前に求め、二段階免震構造の基礎部と 6 層目に同じ積層ゴムの剛性を与えることで、1～3 次固有周期とも基礎免震系の固有周期に比べ、長周期化することが分かる。

3-2 基礎免震系の応答特性

入力地震動を十勝沖地震とし、基礎免震系の LRB 内の鋼棒ダンパーの降伏強度 Q_{dy} を 30 質点全重量の 3～6% ($\alpha = Q_{dy} / \sum W$) となるように与え、地震応答解析を実施する。ここで、 α は鋼棒ダンパーの降伏強度レベルである。

図 3 には、基礎免震系の最大層間変位応答を示している。図 3 より、6 秒基礎免震に十勝沖地震を入力した場合、基礎免震層の最大層間変位応答は、鋼棒ダンパーの降伏強度レベル α が 0.03～0.06 まで増加するにつれて、117.76cm から 73.62cm まで低減することは可能であるが、鉛入り積層ゴム (LRB) のみで積層ゴムのせん断歪 300% (60cm) 以内にすることは不可能である。これは、序論で記述したように、基礎免震構造に長周期地震動が入力された場合、免震層が過大に変形するために、実務設計では、

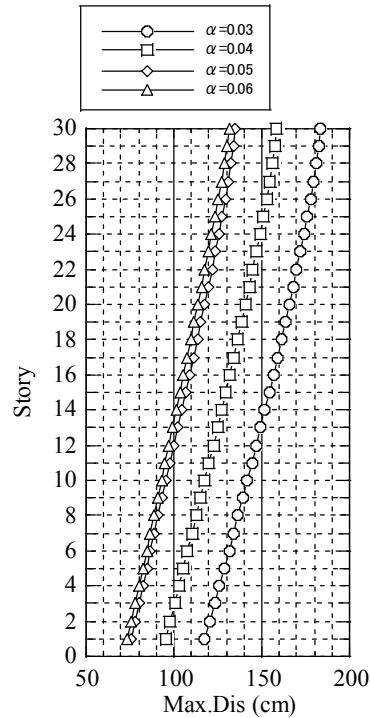


図 3 基礎免震系の応答特性

オイルダンパー (制震ダンパー) を併用する構造設計がなされ、免震層の過大変形を抑制している。

本論において、基礎免震系の鋼棒ダンパーの降伏強度レベルを $\alpha = 0.05$ として、今後の解析に用いることにする。

3-3 基礎免震系と二段階免震系の応答特性

図 4～6 には、十勝沖地震、東北地方太平洋沖地震、模擬波を入力地震動として、基礎免震系、二段階免震系モデルの最大層間変位応答、絶対加速度応答を示している。

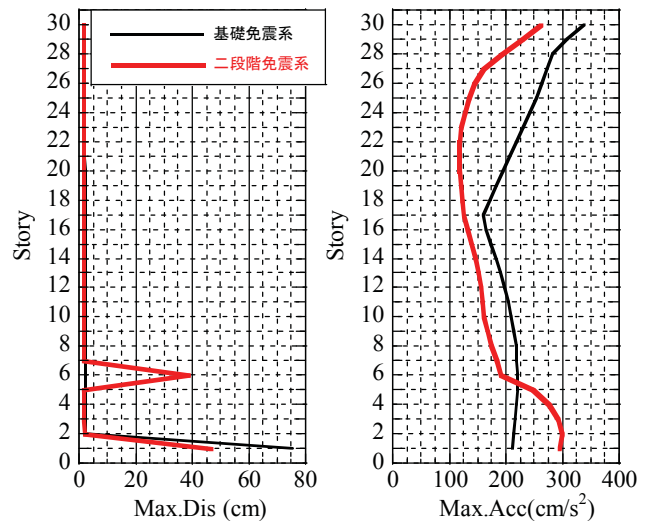


図 4 基礎免震系と二段階免震系の応答特性 (十勝沖地震)

図4より、十勝沖地震の場合、基礎免震系モデルでは、免震層が75.2cmと過大に変形していることが判る。しかし、二段階免震系モデルでは、基礎部と6層目における免震層の最大層間変位は46.6cmと38.6cmとなり、基礎免震系の0.51~0.62倍まで低減していることが判る。これは、二段階免震構造を適用することで、免震層で吸収する地震エネルギーが2層の免震層に分散されたこと、及び免震系全体としての固有周期がさらに長周期化したためと考えている。一方、絶対加速度応答においては、基礎免震系と二段階免震系を比較すると、1層~5層における絶対加速度応答は二段階免震系の場合が大きくなるが、中間層免震以上では、基礎免震以上に加速度応答を低減することが可能である。5層以下の絶対加速度応答が増加した理由としては、基礎部の免震層の最大変形量が基礎免震の0.62倍まで低減されたためと考えている。

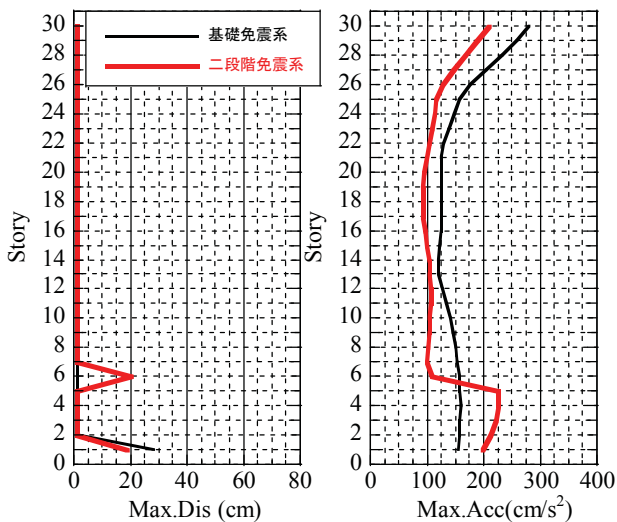


図5 基礎免震系と二段階免震系の応答特性 (東北地方太平洋沖地震)

図5より、K-NET大阪波を入力した場合の基礎免震系の免震層の最大層間変位は、28.2cmであり、十勝沖地震に比べ、免震層に過大な変形が生じていないことが判る。本論で提案している二段階免震構造を適用すると、基礎部、6層目の免震層の最大層間変位は、夫々18.7cm、20.4cmで図4と同様に免震効果が得られている。一方、絶対加速度応答分布においては、中間層免震以下の下部層の絶対加速度応答は基礎免震のそれより大きくなることが判る。これは、図4の結果と同様である。

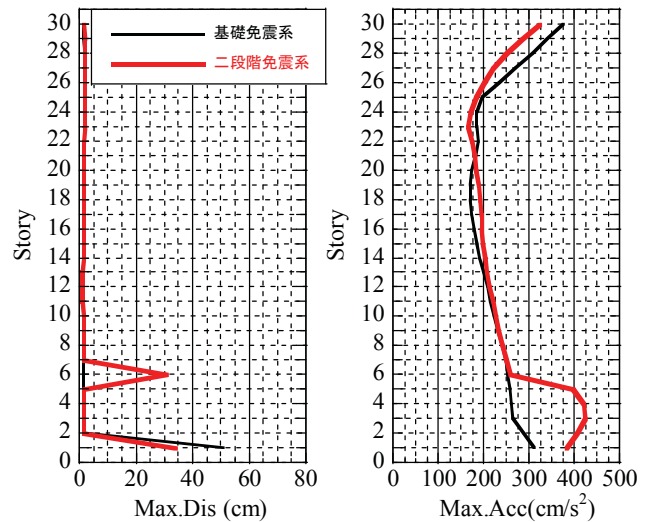


図6 基礎免震系と二段階免震系の応答特性 (模擬波)

図6より、模擬波を入力した場合、基礎免震系の免震層の最大変位応答は、50.6cmであり、二段階免震系の場合、夫々33.7cm、30.7cmと基礎免震系の0.62~0.67倍まで低減されている。一方、絶対加速度応答において、図2に示した模擬波の速度応答スペクトルより、0.5秒以降、最大速度はほぼ一定になるために、二段階免震構造を用いて長周期化を行っても加速度応答を低減することはできず、基礎免震系と同等の効果しか得られないことが判る。

図7には、図4、6で示した基礎免震系、二段階免震系における上部構造の最大変位応答を示している。

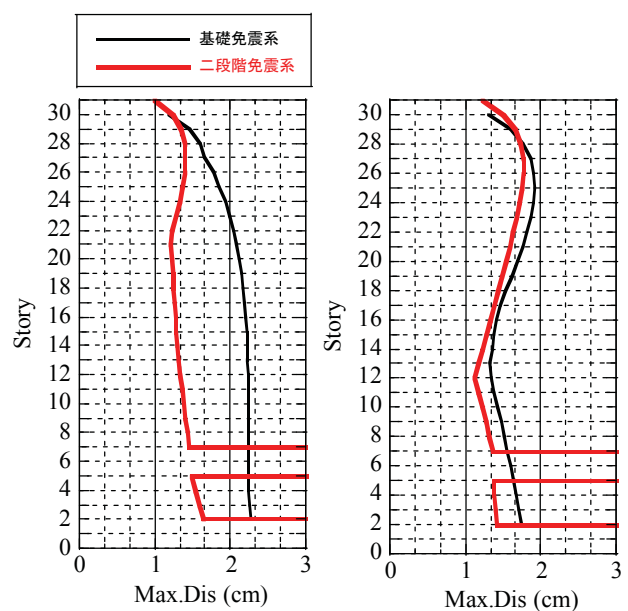


図7 基礎免震系と二段階免震系における上部構造物の応答特性 (左:十勝沖地震、右:模擬波)

図7より、十勝沖地震を入力した場合の基礎免震系、二段階免震系の上部構造の最大層間変位応答は、夫々2.23cm、1.44cmとなり、基礎免震系の0.65倍まで低減できることが判る。また、模擬波を入力した場合は、十勝沖地震の場合ほど上部構造の応答低減効果は得られなかったが、基礎免震系の応答以下となっていることが判る。

本論では、中間層免震層を6層目に設置した場合の解析結果を示したが、中間層免震層を6層目以外の中間層、例えば10層目に設置した場合も考えられる。二段階免震構造を採用する場合、中間層免震の位置が、免震層の最大層間変位応答の低減効果に及ぼす影響は少なく、基礎免震構造の場合に比べ、半分程度に低減することは可能である。しかし、中間層免震層を上層階に設置すれば、中低層部以下の絶対加速度応答がやや増加することが推察される。

4. まとめ

1995年の兵庫県南部地震以後、日本は地震活動期に入り、2003年の十勝沖地震以後、日本各地で長周期地震動が観測されている。

超高層基礎免震構造物に長周期地震動が入力された場合、免震層が過大に変形し、基礎部周辺の擁壁に衝突する可能性がある。

本論では、長周期地震動対策として実務の構造設計でなされている基礎免震及び制震ダンパー併用した構造ではなく、基礎免震、中間層免震を混合した二段階免震構造を提案し、地震観測システム

K-NETで観測された記録波形及び日本建築センター波の3波に対し二段階免震構造の地震応答特性について論じた。解析結果から得られた工学的な知見は以下の通りである。

- (1) 二段階免震構造物の1次固有周期は、基礎免震構造物の1次固有周期より長周期化することができる。
- (2) 免震層を2層に配置することで、免震層の過大変形を抑制することができ、基礎免震構造の0.5～0.6倍程度の最大層間変位応答となる。
- (3) 二段階免震系における上部構造の最大変位応答は、基礎免震系の最大変位応答以下となる。
- (4) 二段階免震構造を適用することで、1次固有周期は伸びるが、基礎免震層の層間変位応答が小さくなるため、中間層免震層以下の絶対加速度応答が基礎免震構造より、やや増加する。中間層免震層以上の上部構造においては、絶対加速度応答は、日本建築センター波（模擬波）を除き、小さくなる。

参考文献

- 1) (独) 防災科学研究所：地震観測システム K-NET、<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin>
- 2) 辻聖晃、辻千佳、片岡奈々美：複数の免震層を有する多段免震構造の地震応答特性、日本建築学会構造系論文集 Vol.79、No.705、1613～1623頁、(2014)