

想定南海トラフ地震を受けるサンドイッチ免震構造物の耐震安全性の検討について

中川 肇*

Seismic Safety of Sandwich Base Isolated Buildings Under Simulated Nankai Trough Earthquake

Hajime NAKAGAWA

ABSTRACT

The severe earthquakes such as the 2003 Tokachi offshore and the 2011 off Pacific coast of Tohoku earthquakes are happened after the 1995 southern of Hyogo prefecture earthquake. The probability of Nankai Trough earthquake which is occurred from 2030 to 2035 is about 70 %. It's said to be in resonance with the natural period of base isolated buildings and the predominant period of this earthquake.

As a way of avoiding the resonance phenomenon, we discuss the seismic response reduction effect of sandwich base isolated building under the simulated Nankai Trough earthquake. The simulated earthquake waves assume the Hoei or Ansei-Tokai earthquake fault models. Two base isolated buildings are sandwich models which have installed in base isolation and mid-story base isolation floors.

According to an analytical result, the maximum displacement of base and mid-story isolated floor can be reduced by 50% of the base isolated building models. In general, the acceleration response of sandwich base isolated building tends to increase under the mid-story floor, but by properly selecting the rubber bearing's stiffness of base and mid-story floor, the response of sandwich base isolated buildings can be reduced less than the response of base isolated buildings.

KEY WORDS: Sandwich base isolated buildings, Simulated Nankai trough earthquake, 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。

既往の研究として、大川等が、南海トラフ連動地震に対する「超高層建築物への長周期地震動の影響に対する検討」²⁾を実施している。

また実務設計では、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。

多段免震構造に関する既往の研究³⁾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。

前報⁴⁾では、十勝沖地震 K-NET 苫小牧 NS 波を受けるサンドイッチ免震構造を有する 31 質点構造物モデルに対して、その応答低減効果について論じた。

本論では、前報の続報とし、十勝沖地震 K-NET 苫小牧 NS 波及び南海トラフ地震を想定した模擬地震動を受けるサンドイッチ免震構造物の耐震安全性及び応答低減効果について論じる。

*建築学科

2. サンドイッチ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

鉄骨造 38 階建ての事務所ビル（床面積 2,268m²）の基礎部と中間層（10 階床下に設置）に夫々鉛入り積層ゴム（LRB）を配置するサンドイッチ免震構造を考える。

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、中間層免震層の初期剛性、上部構造物の耐震構造とするサンドイッチ免震系構造物モデルが描かれている。LRB の荷重変形関係は、Bi-linear 型履歴特性である。

ここで、 $m_i, r_1 k_1, r_i k_i, k_{i-1}, c_{i-1}$ は夫々、各層の質量、基礎免震層・中間層免震層の初期剛性、上部構造物の剛性、粘性減衰係数である。

本論では、基礎免震構造物、サンドイッチ免震構造物を 39 質点系、40 質点系でモデル化する。

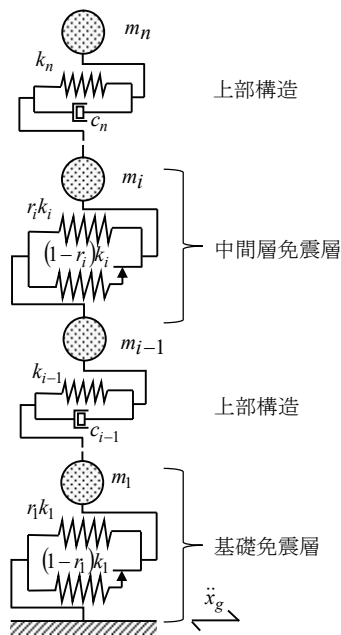


図 1 サンドイッチ免震系モデル

入力地震動モデルは、長周期地震動の観測波として、十勝沖地震 K-NET 苫小牧波 NS 成分、模擬地震動として、参考文献 2)、5)により作成した南海トラフ型模擬地震動（以下、宝永南海トラフ地震）とする。宝永南海トラフ地震は、大阪市此花区で作成された模擬波である。此花区を選択した理由は、文献 5) において引用されている観測地であり、本論で同様として選択した。

また、夫々の最大速度を 1m/s に基準化し、解析

で用いる。入力地震動の最大速度 1m/s としている理由は、国土交通省告示 1461 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)	1m/s 入力 (cm/s ²)
十勝沖(苫小牧)	86.74	32.55	266.48
宝永南海(此花)	63.75	38.99	163.50

図 2 には、十勝沖地震、宝永南海トラフ地震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 K-NET 苫小牧波の卓越周期は、3.5 秒、5.2 秒、7.1 秒に現れ、宝永南海トラフ地震の卓越周期は 6~7 秒である。十勝沖地震、宝永南海トラフ地震は、長周期地震動であることが分かる。また宝永南海トラフ地震は、十勝沖地震より、速度応答スペクトルの最大値が大きいのが特徴である。

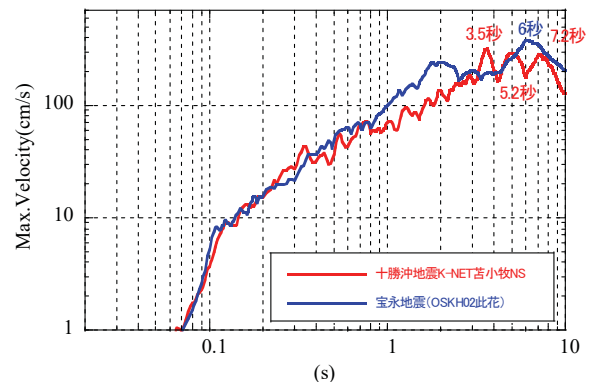


図 2 速度応答スペクトル

2.2 運動方程式と状態方程式の誘導

サンドイッチ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：

$$m_i(\ddot{u}_i + \ddot{x}_g) - c_2\dot{u}_2 + \eta_1 k_1 u_1 - k_2 u_2 + (1 - \eta_1) k_1 y_1 = 0 \quad (4)$$

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。

$$\{\ddot{u}\} + [\tilde{c}]\{\dot{u}\} + [\tilde{k}]\{u\} + [\tilde{k}']\{y\} = -\{1'\}\ddot{x}_g \quad (6)$$

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、 $\{1'\}$ 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、サンドイッチ免震系モデルの状態方程式は、次式のように表現できる。

$$\frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{\dot{u}\} \\ \{y\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & [E] & [0] \\ -[\tilde{k}] & -[\tilde{c}] & -[\tilde{k}'] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{\dot{u}\} \\ \{y\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ -\{1'\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \ddot{x}_g \quad (7)$$

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

3. 解析結果

本論では、38 質点の上部構造物の 1 次固有周期を 3.8 秒、39 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 $b_k k_I$ を収斂計算により求める。また、サンドイッチ免震系モデルにおける基礎免震系の積層ゴムは基礎免震系と同じとし、中間免震層の積層ゴムは、1 次固有周期が 4.5~6.0 秒となる剛性 $m_k k_I$ を収斂計算で求める。ただし、各階の重量 W_i は一定で、12,474kN とする。また、LRB を構成する鉛ダンパーの降伏せん断力係数 α_B は、基礎免震層は、全重量の 5%、中間層免震層のそれ α_m は 10 層以上の重量和の 5% とした。

3.1 十勝沖地震における基礎免震系、サンドイッチ免震系モデルの応答特性

図 3 には、基礎免震層の 1 次固有周期を 6 秒、中間免震層の 1 次固有周期を 4.5~6 秒まで変化させた場合の基礎免震層、中間免震層の最大変位応答を、

また固有値解析により得られたサンドイッチ免震系モデルの 1 次固有周期を描いている。

図 3 より、中間層免震層の固有周期が増加するにつれて基礎免震層の変位応答は 62.78cm から 31.65cm まで減少し、逆に中間層免震層のそれは 29.34cm から 45.06cm まで増加することが判る。本論で定義した積層ゴムの最大変形量の基準値 (最大せん断歪 200%) に一致する中間層免震層の 1 次固有周期は 5.4 秒である。

一方、中間層免震層の 1 次固有周期が増加するにつれて、サンドイッチ免震構造の 1 次固有周期は 6.85 秒から 7.89 秒となることが判る。基礎免震層 6 秒、中間層免震層 5.4 秒とした場合のサンドイッチ免震系モデルの 1 次固有周期は図 3 より 7.46 秒となる。

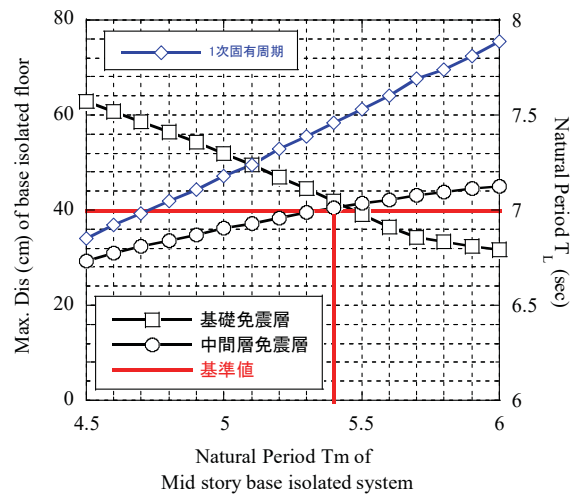


図 3 基礎免震層と中間層免震層との相関性

図 4 には、図 3 に示したサンドイッチ免震系モデルにおいて、基礎免震層と中間免震層の最大変位応答がほぼ一致する中間免震層上部の 1 次固有周期を 5.4 秒とした場合の基礎免震系及びサンドイッチ免震系モデルの最大変位応答分布と絶対加速度応答分布を描いている。図 4 より、基礎免震系の基礎免震層の最大変位応答は 91.73cm に対し、サンドイッチ免震系モデルのそれらは、夫々 41.89cm、40.57cm となり、基礎免震系モデルの約 44% まで低減できる。一方、絶対加速度応答について、サンドイッチ免震系は基礎免震層を含め 4 層まで基礎免震系とほぼ同じ値となっているが、それ以上の層では大幅に低減していることが判る。

ここで、サンドイッチ免震系モデルの基礎免震層、中間免震層の相対変位で考えると 82.46cm となる。

本論では、図 1 に示す等価せん断型モデルを用い

て地震応答解析を実施しているため、2層に分散された免震層の層間変位応答は、水平方向に運動すると考えているため、超高層建築物がよく示す曲げ変形やそれにとまなう P- δ 効果は考慮していない。基礎免震層及び中間免震層の層間変位が例えば、50cm を超える場合、免震構造物の安全性を考慮し、基礎・中間免震層の積層ゴム内外にストッパーを設ける機構^{6)~10)}が最近、実務設計で用いられている。

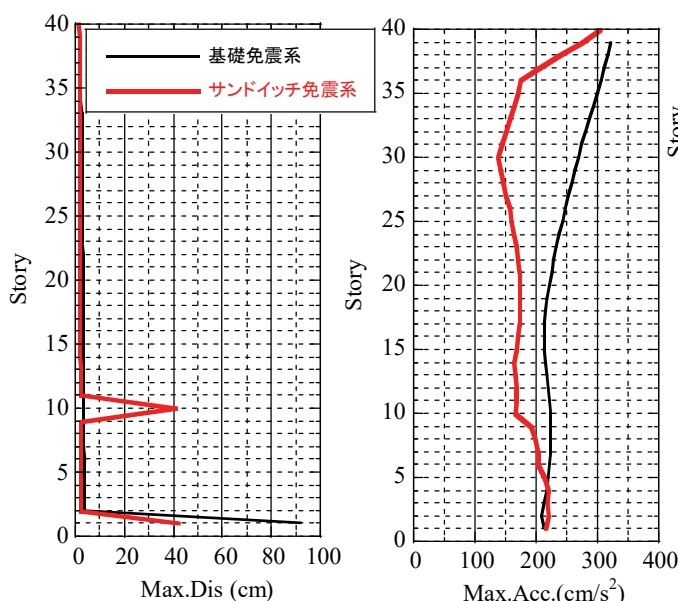


図4 基礎免震系とサンドイッチ免震系モデルの応答特性

3・2 宝永南海地震における基礎免震系、サンドイッチ免震系モデルの応答特性

表1及び図2に示した宝永南海地震の震源モデルを模擬した此花波 (OSKH02)を図4と同様のパラメータで解析を行うと基礎免震系モデルの免震層の最大変位応答が1mを超えるため、本節は、基礎免震層、中間免震層に粘性ダンパー ($C' = 400\text{kNs/cm}$) を付加する。

図5には、宝永南海地震における基礎免震系及びサンドイッチ免震系モデルの最大変位応答分布と絶対加速度応答分布を描いている。図5より、基礎免震系の基礎免震層の最大変位応答は93.28cmに対し、サンドイッチ免震構造のそれらは、夫々51.02cm、47.69cmとなり、基礎免震系の約51%まで低減できる。また絶対加速度応答は、12層目まで基礎免震系とほぼ同じ結果であるが、それ以降、十勝沖地震と同様に加速度応答の低減が見られる。

図4と比較し、宝永南海地震による2つの免震層の最大変形量が40cm以上となっているが、一般に

実務設計では、極めて稀に発生する地震動に対し、最大せん断歪300%を超えないように設計しているので、本論の解析結果では、それ以内であり、特に問題とはならないと考える。

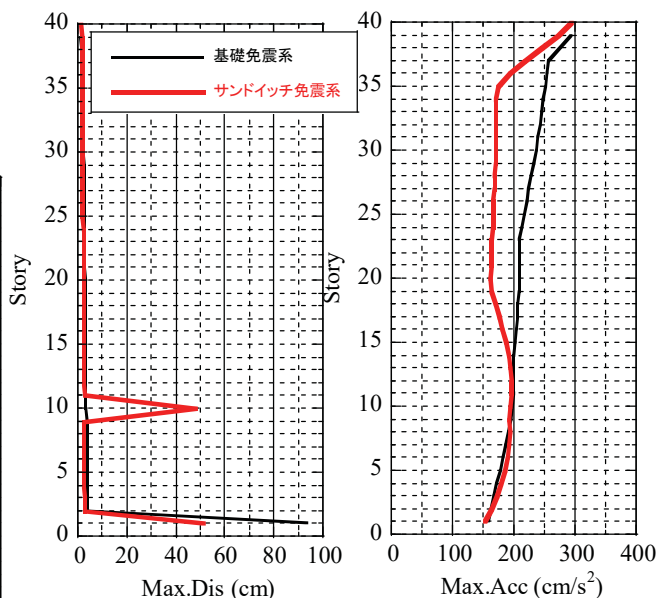


図5 基礎免震系とサンドイッチ免震系モデルの応答特性

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、前報4)に引き続き、長周期地震動対策として基礎免震構造、中間層免震構造を混合したサンドイッチ免震構造を提案し、2003年の十勝沖地震 K-NET 苫小牧波、南海トラフ地震を想定して長周期模擬地震動波に対しサンドイッチ免震構造物の耐震安全性について論じた。

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) サンドイッチ免震構造物の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0.45~0.5倍程度の最大層間変位応答となる。
- (3) サンドイッチ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) サンドイッチ免震構造物の絶対加速度応答は、十勝沖地震に対し、基礎免震構造物の応答以下となる。一方、宝永南海地震において、中間層免震層（10層目）以下では、基礎免震構造とほぼ一致しているが、上階以上でそれ以下となる。

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) 大川出ほか：超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討、建築研究所-研究資料 No.144、147、(2013)
- 3) 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)
- 4) 中川肇、前田智香：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、明石工業高等専門学校研究紀要、第 58 号、15～19 頁 (2016)
- 5) 楸構造計画研究所：模擬・長周期地震波作成プログラム ARTEQ for Windows Ver. 6.1、ARTEQ-LP for Windows Ver.2.1
- 6) 濱口弘樹ほか：想定を上回る地震に対する安全性の高い免震構造の提案、その 1、日本建築学会学術講演梗概集 (北陸)、B-2、437～438 頁、(2010)
- 7) 濱口弘樹ほか：想定を上回る地震に対する安全性の高い免震構造の提案、その 2～4、日本建築学会学術講演梗概集 (関東)、B-2、599～604 頁、(2011)
- 8) 大住和正、熊谷祥吾ほか：緩衝装置を含めた免震建物衝突設計手法の検討 (その 1、2)、日本建築学会学術講演梗概集 (関東)、B-2、493～496 頁、(2015)
- 9) 大住和正、熊谷祥吾ほか：緩衝装置を含めた免震建物衝突設計手法の検討 (その 3、4)、日本建築学会学術講演梗概集 (九州)、B-2、547～550 頁、(2016)
- 10) 大林組：免震建物へのフェイルセーフ機構「免震フェンダー」を開発し実物件へ適用、https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news2017126_1.html (2017)