

## 厚肉積層ゴム免震部材 を利用した低層線路 上空建物の開発



山高 円\*



岩崎 和明\*\*



星川 努\*



清水 満\*

線路上空建物に免震技術を適用することで、地震応答の低減に伴う下部構造の縮減が実現でき、設計施工上の制約が厳しい線路上空建物における建設時の工期短縮および工事費削減が見込める。また、免震化による損傷部位の制御により、災害時の早期復旧性を高める効果も期待できる。

線路上空建物の免震化を実現するためにはいくつかの技術的課題があり、それらを解決するために、新たな免震架構形式を考案した。ある低層線路上空建物を想定としたモデルについて、考案した架構形式による免震化の試設計と解析検討を行い、地震時における建物の安全性を検証した。さらに、免震部材として振動低減性能を有する厚肉積層ゴムを用いることで、線路上空空間の居住性を高めることができることを解析により確認した。

●キーワード：線路上空建物、免震、厚肉積層ゴム、地震応答解析

### 1. はじめに

線路上空建物には一般建物と異なる設計施工上の厳しい制約条件があり、建設時の工期の長大化や工事費の増大につながる事が多く、線路近接作業の大幅な縮小化が求められている。また、首都圏の線路上空開発では、オフィスやホテルといったさまざまな建物用途での利用を実現するため、列車振動の低減による居住性の向上も望まれている。こういったニーズを実現するものとして免震技術があげられる。

これまでの研究では、免震技術を低層線路上空建物に適用することによる、地震応答の低減と基礎杭の縮小化の可能性が示されると共に、技術的課題が明らかとなっている。本報では、線路上空建物の免震化を実現するうえでの技術的課題を解決するための新たな架構形式を提示し、線路上空モデル建物の試設計と解析検討を通じてその妥当性を検証する。また、免震効果と共に振動低減効果も期待できる免震部材として厚肉積層ゴム（免震防振積層ゴム）に着目し、列車振動防振による居住性向上についても評価する。

### 2. 線路上空建物の免震化

#### 2.1 免震化の課題と基本検討

免震化による構造合理化のためには、一般の免震建物と同様に、最下層に免震層を設けるのが最も効果的であるが、これには以下の課題がある。

第一に、免震クリアランス（免震層の変形に対応できるように設ける、建物周囲の隙間）が確保しにくいといった空間上の制約がある。図1に免震クリアランスの考え方を示す。線路階では列車運行を阻害しないよう建築限界を確保すること、およびホーム上の旅客導線を確保することが計画上の前

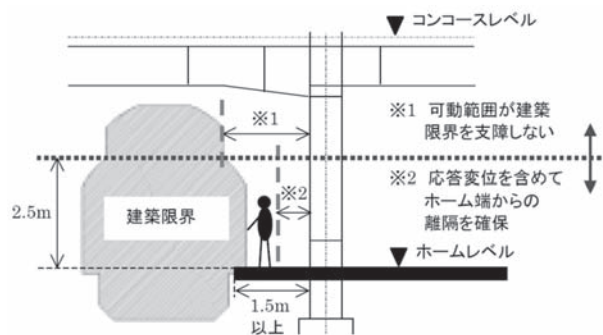


図1 免震クリアランスの考え方

提となる。最下層に免震層を設ける場合、それらのスペースを確保するために、クリアランスの大きさが制限される。

第二に、免震下部構造の剛性の問題がある。線路上空建物では地中梁のない1柱1杭基礎形式が採用されることが多いため、一般の免震建物と比べて免震下部構造の剛性が小さくなる。そのため、免震層に大きな回転変形が生じることが想定され、免震積層ゴムの力学的特性の低下が懸念される。

第三は減衰部材であるダンパーの設置スペースの問題である。通常、線路上空建物の1階（線路階）は建築限界確保のため、一般階よりも階高が大きくなる。線路上空空間を効率的に使用するためにはこれを極力小さくすることが重要である。さらに、既存建物への増築あるいは周辺建物との計画上の整合が必要な場合は、床レベルを変えることなく免震層を設けることが必要である。省スペースを考慮すると支承材と一体化したダンパーの適合性が高いが、地震時の建物の変形を抑制するために要するダンパー量に満たない場合は、新たに設置スペースを確保しなければならない。このような制約の多い空間の中で免震化による合理的な計画を実現するためには、新たな架構形式を考案する必要がある。

## 2.2 架構形式の提示

線路上空建物の免震化に際してその最適な架構形式を選定するため、表1に示すような、免震層の位置が異なる4案それぞれについて、免震層に30cm程度の水平変位を生じさせる静的解析による検討を行った。なお、免震層の剛性は支承材（免震防振積層ゴム）と相応の履歴型ダンパーによる等価剛性を用いた。

表1に解析結果を示す。杭頭免震案は、杭頭変位が最小で杭の設計応力を最も低減しているが、免震層に生じる回転角は1/50を超えている。一方、2階柱脚免震防振案（2階床荷重を含まない）は、免震対象範囲を限定するため、免震効果が小さくなり、杭頭変位は最も大きく、線路階の層間変形角も1/30と過大になる。2階柱脚免震防振案（2階床荷重を含む）は、杭頭変位、回転変形ともに抑制されており、また、免震層が線路階よりも上に位置するので免震クリアランスを確保しやすく、前述の第一、第二の課題を解決するもの

である。そこで、以降は、本架構形式を検討対象とする。

第三の課題を解消するために図2に示す新たな架構形式案した。免震層高さを極力抑えるために特に梁せいの制約の厳しい線路直交方向については免震層下梁を折り曲げて、免震層上梁を2本梁としてそれぞれ平面的に干渉しない位置に設けることで、高さの縮減を図りつつダンパー設置スペースを確保する。線路平行方向についても、梁せいの縮減および取替時のジャッキ設置などを考慮して上梁は2本梁とする。

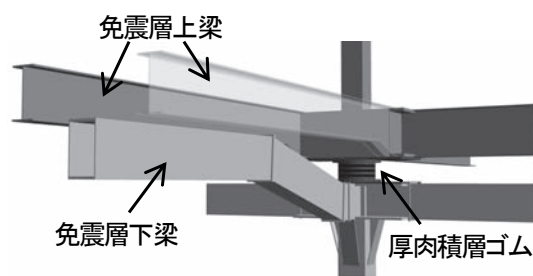


図2 免震層周りの架構形式

表1 免震層30cm変位時水平力による静的解析結果

|                          | 杭頭免震防振案 |      | 1階柱脚免震防振案            |       | 2階柱脚免震防振案<br>(2階床荷重含む) |       | 2階柱脚免震防振案<br>(2階床荷重含まない) |       |
|--------------------------|---------|------|----------------------|-------|------------------------|-------|--------------------------|-------|
|                          |         |      |                      |       |                        |       |                          |       |
| 免震層最大変位<br>$\delta$ (cm) | 33.4    |      | 32.3                 |       | 31.3                   |       | 32.7                     |       |
| 杭頭最大変位<br>$\delta$ (cm)  | 3.8     |      | 8.5                  |       | 8.2                    |       | 21                       |       |
| 線路階最大変形角<br>(rad)        | 1/63    |      | 1/43<br>(1FL~免震層下まで) |       | 1/83                   |       | 1/30                     |       |
| 3階より上階の最大<br>層間変形角(rad)  | 1/159   |      | 1/298                |       | 1/286                  |       | 1/203                    |       |
| 免震層上下部材の回転角<br>(rad)     | 杭頭      | 1階柱脚 | 1階柱頭                 | 3階柱脚  | 1階柱頭                   | 3階柱脚  | 1階柱頭                     | 3階柱脚  |
|                          | 1/225   | 1/36 | 1/46                 | 1/232 | 1/225                  | 1/144 | 1/66                     | 1/104 |
| 免震層に生じる<br>最大傾斜角(rad)    | 1/36    |      | 1/46                 |       | 1/144                  |       | 1/66                     |       |
| 免震層に生じる回転角<br>(rad)      | 1/43    |      | 1/57                 |       | 1/400                  |       | 1/181                    |       |

表2 目標性能（クライテリア）

| 外力種別     |                      | レベル2(極めて発生する地震動)                                                   | 鉄道L2                                              |                                         |
|----------|----------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 上部       | 層間変形角<br>(串団子モデル・重心) | 1/200 以下                                                           | —                                                 |                                         |
|          | 柱・梁・耐震壁<br>部材応力度     | 1)曲げ・軸応力度が短期許容応力度以下<br>2)QL+1.0QE2 が短期許容応力度以下<br>※上下動地震による付加断面力を考慮 |                                                   |                                         |
|          | 免震層より上階床加速度(RF 除く)   | 200cm/s <sup>2</sup> 程度以下                                          |                                                   |                                         |
| 免震層      | 積層<br>ゴム             | 水平変位                                                               | 300mm (250% 歪) 以下                                 | 550mm (400% 歪) 以下                       |
|          |                      | 引張面圧                                                               | 引張ひずみ0.5% 以下<br>0.5N/mm <sup>2</sup> 以下           | 引張ひずみ0.5% 以下<br>0.5N/mm <sup>2</sup> 以下 |
|          |                      | 圧縮面圧                                                               | 積層ゴムひずみに対応する圧縮限界強度<br>$\sigma_{cr} \times 0.9$ 以下 | 積層ゴムひずみに対応する圧縮限界強度<br>$\sigma_{cr}$ 以下  |
|          |                      | 回転変形                                                               | —                                                 | 1/50                                    |
|          | オイルダンパー<br>(変位・反力)   | 限界変位(500(mm))以下<br>最大耐力(313(kN))以下                                 | 限界変位(500(mm))以下<br>最大耐力(313(kN))以下                |                                         |
| 下部<br>構造 | 層間変形角<br>(串団子モデル・重心) | 1/150以下(杭変形による回転成分は除く)                                             | 応答変形量が保有変形量以下                                     |                                         |
|          | 柱・梁・耐震壁<br>部材応力度     | 1)曲げ・軸応力度が短期許容応力度以下<br>2)QL+1.0QE2 が短期許容応力度以下<br>※上下動地震による付加断面力を考慮 |                                                   |                                         |

### 3. 免震化の試設計と解析検討

#### 3.1 設計基準

表2に免震設計の目標性能を示す。検討に用いる設計用入力地震動は、「建築における極めて稀に発生する地震動（以下、建築L2）」として建設省告示1461号<sup>1)</sup>に規定されたスペクトルに適合する地震動および「鉄道構造物設計標準耐震設計<sup>2)</sup>におけるL2地震動スペクトルII（以下、鉄道L2）」としてスペクトルに適合する地震動をそれぞれ設定する。これは低層線路上空建築物（低層）構造設計標準<sup>3)</sup>における保有水平耐力時および最大級地震時に相当する。鉄道L2時には、免震積層ゴムの目標性能として、面圧制限のほか、回転変形に関する制限値を設けている。あわせて、免震防振積層ゴムの振動低減効果により鉄道振動に対するコンコース階床の振動性能評価、および固体伝搬音の適用等級の1ランクアップを目標性能とする。

#### 3.2 免震化の試設計

提案した免震架構形式を実建物に導入した際のディテールを検討するために、地中梁をすべて省略した低層線路上空建物を対象とした試設計を行った。検討建物の上部構造は鉄骨純ラーメン架構であるが、剛性確保のために線路階柱にはコンクリートを充填している。柱築造位置の制約条件から線路直交方向の最大スパン長が約23mとなっている。線路階では建築限界およびホーム端からの離隔距離により柱径が制限され、線路階直上の梁については特に線路と直交する方向で建築限界などの考慮が必要となり、梁せいの制約条件となる。基礎は場所打ちコンクリート杭で計画している。鉛直支持とともに地震時の水平変形抑制、耐力確保が必要となり大口径となる。

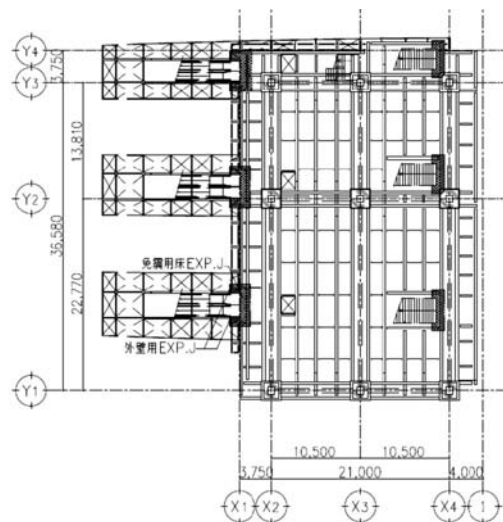
線路上空建物の免震化における諸課題を解決するために、図3に示すように線路階直上に免震層を配置する2階柱脚免震とし、線路直交方向の下段梁を折り曲げた架構形式を採用する。使用する積層ゴムは建物中央で1500φ、端部で1100φとなる。あわせてU型ダンパー（NSUD45）を配置し、減衰の付加および風荷重時の変形を抑制する。また、ダンパー量を確保するためにオイルダンパーを合計7基設ける。

#### 3.3 立体フレームモデルによる地震応答解析

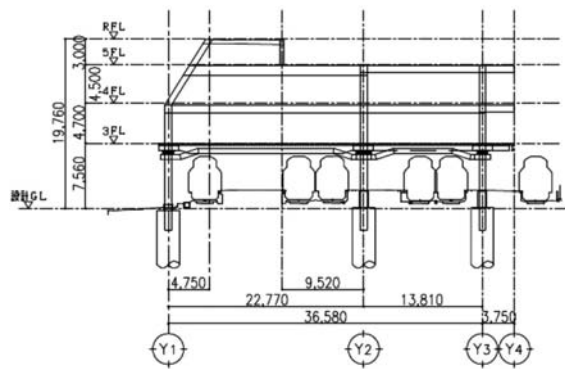
解析モデルは、免震層の下梁の折れ曲がり考慮した立体フレームモデルとし、免震層より上部は剛床、下部は非剛床とする。地盤および杭基礎は、基礎梁を省略した構造形式であるためSRモデルのような支持ばねとして評価することが困難なことから、地盤、基礎および上部構造を一体とした質点系モデルとし、入力地震動は、複数の地盤ばねに単一

入力する方式<sup>2)</sup>とした（図4）。

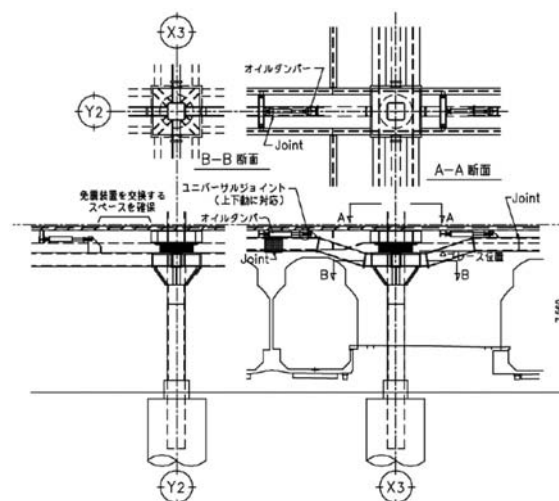
設計入力地震動は、建築L2の3波（八戸NS位相、神戸NS位相、一様乱数位相）および、鉄道L2の1波をそれぞれ設定して、計4波を工学的基盤波として用いた（表層地盤の増幅特性は実施設計で精査する）。構造減衰は歪エネルギー比例型で与え、地上躯体は2%、杭は3%、地盤ばねについては、建築L2時5%、鉄道L2時10%とする。また、免震材料については0%とする。



(a) コンコース階伏図



(b) 軸組図



(c) 免震層取り合い詳細

図3 建物概要

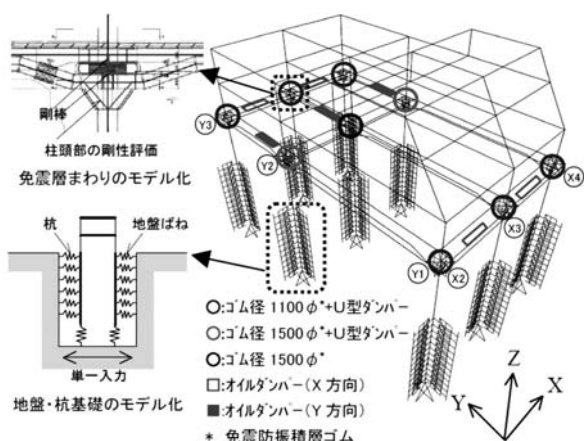


図4 解析モデルの概要

図5に加速度、層せん断力、変位の最大応答値を示す。加速度に関して、下部構造では、上下部構造で概ね振動が分離しているため大きな値を示している。上部構造では、鉄道L2時においても免震層に過大な変形が生じないようにするための免震層の計画をしたため（鉄道L2時で30cm程度）、建築L2時のRFを除く最大応答は259galと目標の200galを若干上回っている。層せん断力に関して、全ケースとも全層にわたり弾性限強度を下回っており、建築L2時については短期設計用層せん断力（ $C_i=0.2$ 、 $A_i$ 分布）以下である。また、免震層の変位も全ケースで目標性能を満たしており、免震化による地震力低減の効果が確認できた。

免震防振積層ゴムに関して、上下動応答結果に基づき±0.5Gを加味した面圧とせん断ひずみの関係を図6に示す。最大最小値ともに許容面圧内に収まっている。また、基礎梁がないために懸念された免震防振積層ゴムに作用する最大回転角は、建築L2時で1/297、鉄道L2時で1/197であり、影響のないことを確認した。以上から、検討モデルにおいて免震防振積層ゴムは十分な免震性能を確保できるものと判断する。

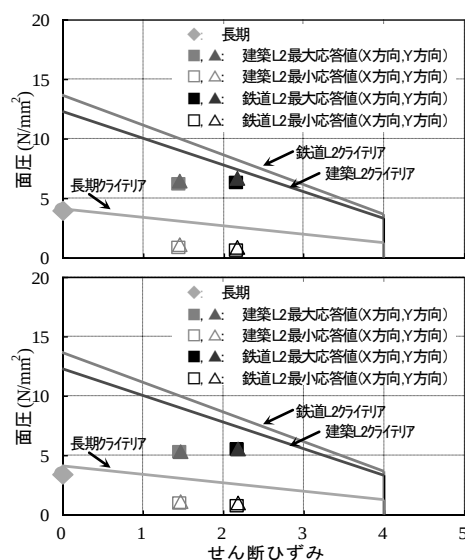


図6 面圧とせん断ひずみの関係  
(上: 1100φ、下: 1500φ)

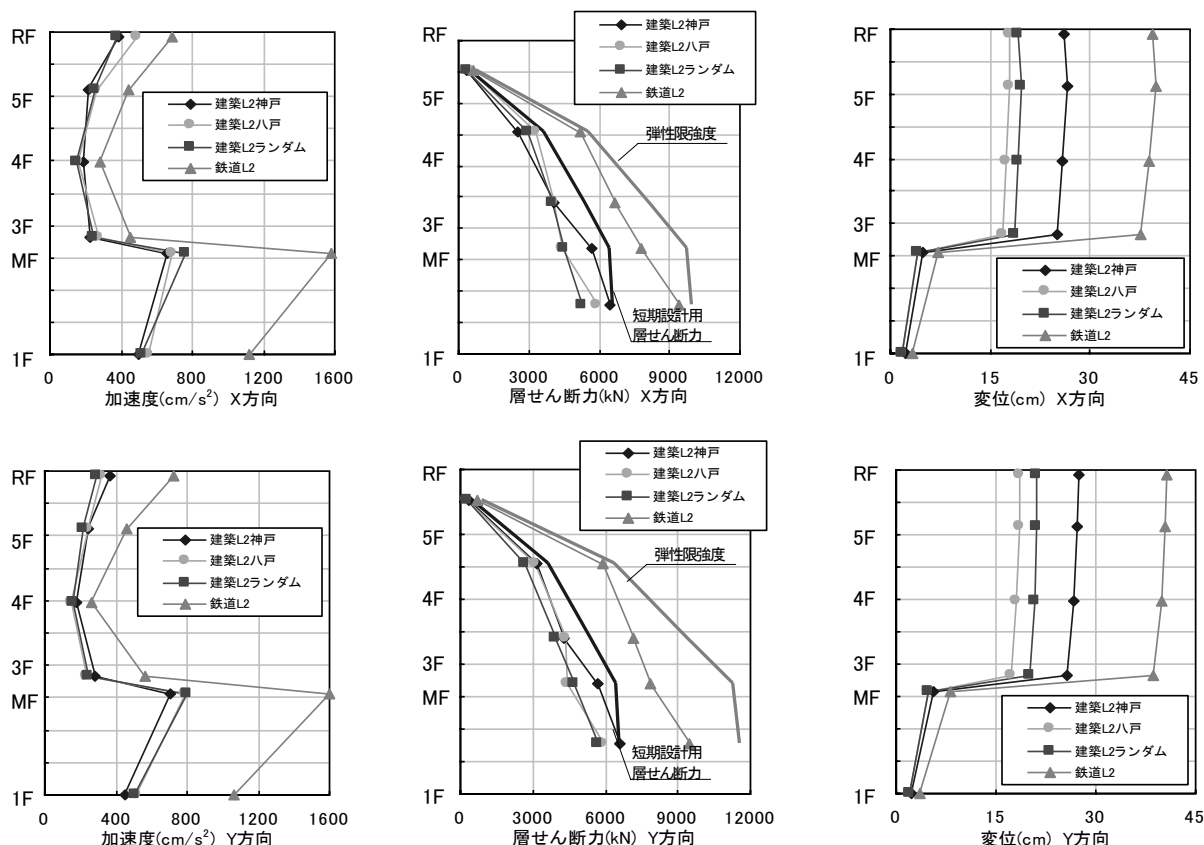


図5 最大応答値

## 4. 防振性能に関する検討

### 4.1 防振性能の検討概要

免震防振積層ゴムを用いた線路上空建物の防振性能および建物内に想定した事務室の固体伝搬音に関する検証を行う。

免震化の試設計を行った線路上空建物について、図7に示す、耐震モデル、免震モデル（免震部材に免震積層ゴムを使用）、免震防振モデル（免震部材に免震防振積層ゴムを使用）の3モデルを用いた解析を行い、それぞれの結果を比較する。

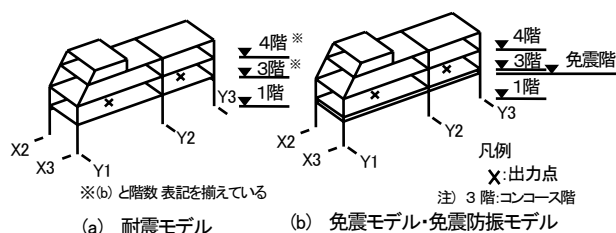


図7 解析モデル

ある線路上空建物の1階柱脚において、列車が通過する際の振動を実測し、解析における鉄道振動の入力値とする。測定は列車が通過するたびに行い、同じ形式の車両9本のデータを平均化した。図8に、測定結果の振動加速度レベルを示す。この実測結果を耐震、免震、免震防振の3モデルそれぞれの1階柱脚6本すべてに同時入力し、周波数応答解析により、鉄道振動に対する各モデルの振動予測値を算出する。その結果から免震防振架構を採用した場合の防振性能、固体伝搬音の評価を試みて2、3で示した目標性能を満足しているかの確認を行う。

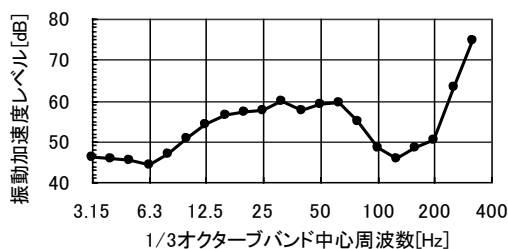


図8 入力値（1階柱脚）

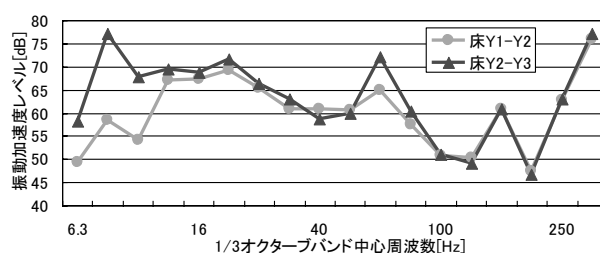
### 4.2 鉄道振動による応答予測方法と結果

各モデルについての応答予測は、以下の手順で行った。

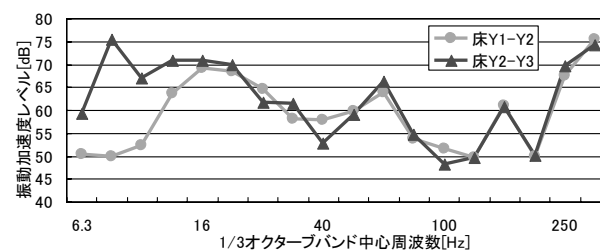
- ①1階柱脚に周波数領域一定の単位加速度を与える周波数応答解析を行い、基準位置（1階柱脚）に対する各出力点（図7中×印部分）の増幅量を求める
- ②その増幅量に図8に示す入力値を乗じて暗振動未考慮の応答予測値を求める。
- ③列車が通過していない時に測定した暗振動で、列車振動以外の成分を補正した応答予測値を求める。

床の応答予測結果を図9に示す。

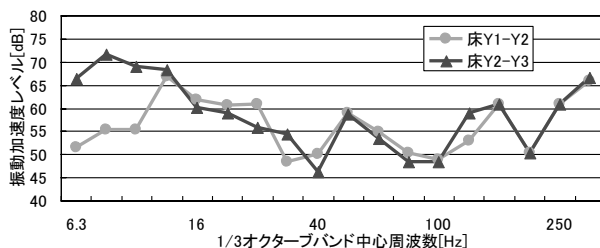
周波数全域に着目すると、耐震モデルに対して免震モデルは若干低減されているものの大きな差異が見られなかった。これは、通常の免震積層ゴムの鉛直剛性が耐震モデルと変わらないことから予測できる。免震防振モデルについては、両者と比べて振動加速度レベルが低減されている。また、鉄道振動特有の63Hzから125Hzの周波数領域についても同様に低減効果が確認できた。



(a) 耐震防振形式



(b) 免震形式



(c) 免震防振形式

図9 応答予測結果

### 4.3 鉄道振動に対する床の振動環境評価

本検討では上部構造の支持条件の違いが振動性状に与える影響をみることに主眼を置いているので、免震層の上梁のダブルガーダーによる見かけのスパン縮減効果などをあえてモデル化していない。したがって、各架構形式とも固有値解析結果からY1-Y2床とY2-Y3床の1次固有振動数はそれぞれ約4Hz、約8Hz程度となっている。このうち鉄道振動に対してはY2-Y3床の方が比較的大きな影響を受ける。特に免震防振モデルは上下の固有振動数が10Hz程度以下となっており、床への影響が懸念される。Y1-Y2床の場合は鉄道振動の入力は小さい一方で、群集による歩行振動の影響などに留意する必要がある。これらの総合的な床の性能評価は、より具体化した段階での詳細検討で行うこととして、こ

では応答予測から得られた6.3Hz以上の値を用いて鉄道振動に対する床の性能評価を行う。

各モデルの検討結果の一例として、免震防振モデルの3、4階床の性能評価曲線を図10に示す。また、表3にY1-Y3床とY2-Y3床の性能評価<sup>4)</sup>を各モデルでまとめた。

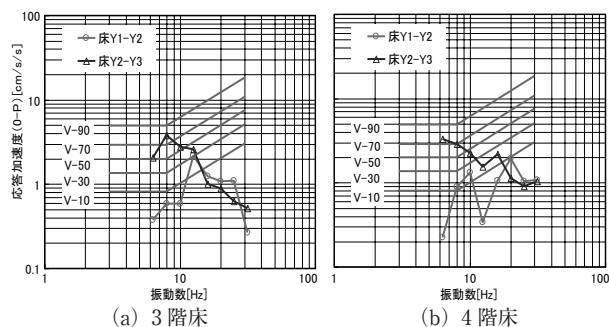


図10 免震防振モデル 床の性能評価曲線

表3 鉄道振動に対する床の性能評価

| 床位置   |    | 耐震モデル | 免震モデル | 免震防振モデル |
|-------|----|-------|-------|---------|
| Y1-Y2 | 4階 | V-50  | V-50  | V-10    |
|       | 3階 | V-30  | V-30  | V-30    |
| Y2-Y3 | 4階 | V-70  | V-70  | V-70    |
|       | 3階 | V-90  | V-90  | V-70    |

耐震モデルと比べて、免震モデルは僅かながら振動低減傾向があるものの性能ランクの向上には至っていない。一方、免震防振モデルは総じて振動低減効果が確認された。4階Y2-Y3床において、振動低減傾向はあったが免震防振層の設計振動数の帯域での増幅がみられ同ランクで留まる結果となった。コンコース階の3階Y2-Y3床で1ランク、4階Y1-Y2床で2ランク性能の向上がみられた。

#### 4.4 鉄道振動に対する固体伝搬音の解析検討

固体伝搬音の解析を以下の条件を設定して行った。

- ・3階X2X3-Y1Y2間にL22m×W5m×H2.7mの事務室があるものと想定する。
- ・事務室の内装仕様は

床：GRC製フリーアクセスフロア+タイルカーペット

天井：PB捨貼り岩綿吸音板

壁：(X2側) 全面窓、(その他) PB

振動加速度レベルの高い床中央の床上Y1-Y2の振動加速度レベル予測結果を採用し、既往の研究<sup>5)</sup>で得られた躯体振動データから500Hzの振動加速度レベルとして250Hzの予測値-7dBを設定した。3階の床、壁、窓へは一樣に3階床上Y1-Y2の振動が伝搬し、天井へは4階床上Y1-Y2の振動が伝搬するものとした。

固体伝搬予測式は幾何学音響理論による内装材の振動増幅と音響放射効率を考慮した次式で行う。

$$SPLs = La + \Delta la + 10 \log(S/A) - 20 \log 10 f + 10 \log 10 \sigma + 36$$

$SPLs$ ：内装各部位からの

固体音放射による室内音圧レベル[dB]

$\sigma$ ：放射係数

$La$ ：床躯体中央の振動加速度レベル予測結果[dB]

$\Delta la$ ：内装各部位の振動増幅量[dB]

$f$ ：周波数[Hz]

$S$ ：内装各部位の面積[m<sup>2</sup>]

$A$ ：室内吸音力[m<sup>2</sup>]

想定した事務室における固体伝搬音の予測結果を図11に示す。免震防振モデルは耐震モデル、免震モデルに比べ125Hz以外の周波数帯域で大きく固体伝搬音が低減することが確認された。適用等級<sup>3)</sup>についてはオープン事務室とした場合、免震防振モデルは2級程度の評価となる。

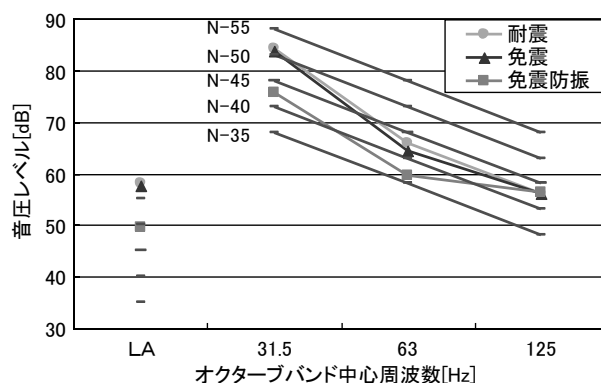


図11 固体伝搬音の予測結果

## 5. まとめ

線路上空建物の免震化に適した新たな架構形式を考案し、モデルとなる低層線路上空建物を対象とした試設計を行った。

検討モデルの地震応答解析を実施し、その結果、地震時の建物の安全性を担保する目標性能を概ね満足することを確認した。

免震部材として厚肉積層ゴムを用いることで、鉄道振動に対して防振と防音効果が得られ、線路上空建物における居住性の向上につながることを解析検討により確認した。

#### 参考文献

- 1) 建設省：建設省告示第1461号、官報（号外第106号）、2000.5.30
- 2) 財鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計、1999.10
- 3) 財鉄道総合技術研究所編：線路上空建築物（低層）構造設計標準、2009.06
- 4) 建築物の振動に関する居住性能評価指針同解説、日本建築学会
- 5) 建築物の遮音性能基準と設計指針、日本建築学会