

線路上空建物のコストダウンのための 免震化による新たな構造形式に 関する基礎的検討



岩崎 和明*



林 篤*



増田 達*

線路上空建物は列車を運行させながら建設するため、設計施工上の制約が多い。さらに、線路上空建物は駅をはじめとする公共性の高い建物であるため、災害時における高い安全性能、早期復旧性能が求められる。その上、建物構造に関する主要な工事が線路に近接し夜間作業が多くなることから、工事の長期化および工事費の増大につながっている。そこで、線路上空建物建設の合理化が期待できる免震化による新たな構造形式を提案し、解析により構造性能の検証を行った。解析結果から、新たな構造形式の導入により建築基礎の杭径など構造部材を縮小できる可能性を確認し、今後の実現に向けた課題を整理した。

●キーワード：線路上空建物、免震、地震応答解析、建物—地盤連成モデル

1. はじめに

線路およびホームの上空に建築される線路上空建物は一般の建物と異なり、柱スパンが大きく、基礎梁が設置できないなどの特殊な構造形式を有する(図1)。また、列車の運行、旅客など利用者の安全確保や、大地震時の早期復旧性能などを考慮して設計することから、一般の建物と比較して建物部材を大きくして、耐震性能を高めている。その上、構造躯体の主要な工事は線路に近接しており、夜間の線路近接作業が多くなることが多い。これらのことから、線路上空建物の建設では工期が長期化し、工事費が増大することが多いため、線路近接作業の大幅な縮小化が望まれている。

線路上空建物の工期短縮やコストダウン、地震に対する早期復旧性を実現する方法の1つとして、免震技術を利用した線路上空建物の地震力低減を図る方法が考えられる。そこで、免震化による新たな構造形式を提案し、地震応答解析により構造性能の検証を行った。解析による構造性能の検証結果に基づき、今後の線路上空建物への免震技術の導入に向けた課題について整理した。

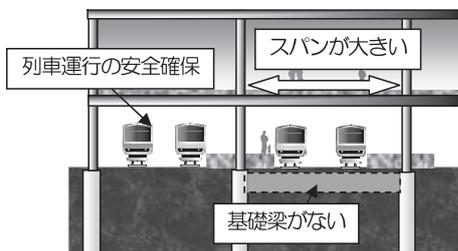


図1 線路上空建物の特徴

2. 線路上空建物の地震応答解析

2.1 線路上空建物の構造性能の検討方法

2.1.1 低層線路上空建物の構造性能の比較

現在、多くの線路上空建物は、「線路上空建築物(低層)構造設計標準2002年版」¹⁾に基づき、建物高さ20m以下、建物階数4階以下で設計されている。低層線路上空建物では、基礎杭などの線路近接部分の工事の効率化が求められている。そこで、低層線路上空建物の免震化による基礎杭縮小化の可能性について、検討を行った。

建築基準法では、極めて稀に発生する(数百年に一度程度)地震に対して建物の安全性を検証し、建物の構造設計を行う。線路上空建物の免震化による効果を検討するため、従来の耐震構造と免震構造について、建築基準法で定める極めて稀に発生する地震動を対象に地震応答解析を行い、構造性能を比較した。

2.1.2 検討対象モデル

表1、図2に示す低層線路上空建物のうち、線路により柱スパンの制約の大きい線路直交方向二次元モデル(図3)について、従来構造と免震構造の地震時建物挙動を比較する。線路上空建物では基礎梁がないことにより基礎杭の変形が大きくなるため、建物地上部分だけでなく、基礎杭や地盤といった建物地下部分を連成してモデル化を行った。

免震構造では免震装置を建物の下層に設けるほど免震効果が高い。しかし、線路上空建物では、線路下に免震層を設けることは施工上、困難である。また、建物中間

層免震では建物高さが高くなり、階段など縦動線のスペースが増え、建物平面計画に制約が生じる可能性がある。そこで今回は、免震層を設けずに線路階へ免震装置を設置する免震構造を検討対象とした。利用する免震装置として、1種類の部材を線路階の柱に設置することで、免震の機能を実現することのできる、表2の性能の鉛プラグ入り積層ゴムを選定した。設置位置は、杭基礎と柱の接合部に免震装置を設置した杭頭免震と、線路階の柱頭部に免震装置を設置した柱頭免震の2通りとした。

表1 低層線路上空建物概要

規模	延床面積	8,852㎡
	階数	地上3階
	高さ	17.4m
構造種別	鉄骨造	
骨組形式	線路平行方向	純ラーメン構造
	線路直交方向	純ラーメン構造
	地中梁の無い構造形式	
基礎種別	場所打ち鉄筋コンクリート杭基礎	
	杭径φ2200~1800、杭長24m	

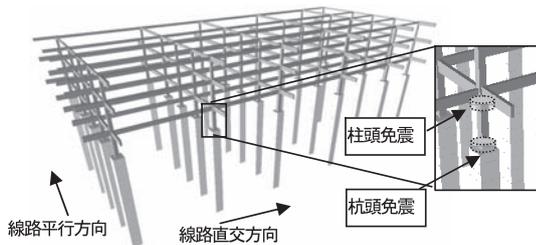


図2 低層線路上空建物モデル

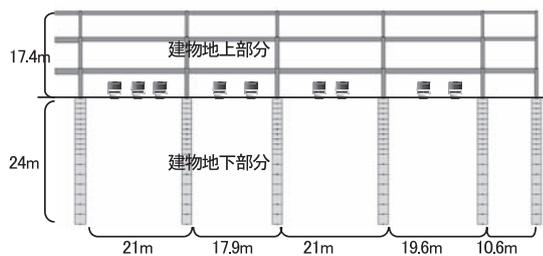


図3 線路直交方向建物モデル

表2 免震部材性能

ゴム外径 (mm)	鉛径 (mm)	ゴム層厚 (mm)	鉛直剛性 (kN/m)	水平性能 (γ=1.0, 温度=20℃)		
				1次剛性 (kN/m)	2次剛性 (kN/m)	切片荷重 (kN)
650	140	202	2.10 × 10 ⁶	8463	651	123

2.1.3 入力地震動

解析には入力地震動として、模擬地震動と観測地震動を利用する。模擬地震動は、建築基準法で定める極めて稀に発生する地震動の加速度応答スペクトル²⁾を用いて、表層地盤の増幅特性を考慮して作成した図4に示す3波である。観測地震動はEl Centro 1940 NS成分波、Taft 1952 EW成分波、Hachinohe 1968NS成分波を利用して、極めて稀に発生する地震動に相当する最大速度50cm/secに基準

化した図5に示す地震波とする。それぞれの地震動の加速度応答スペクトルを図6に示す。これらの地震動を杭先端に入力して時刻歴応答解析を行った。

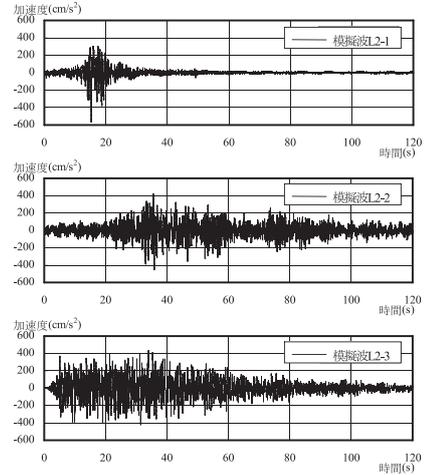


図4 模擬地震動

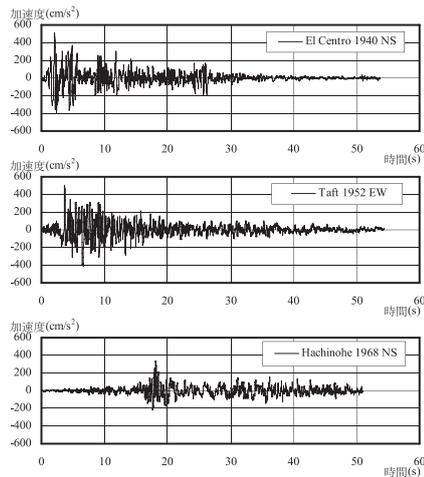


図5 観測地震動

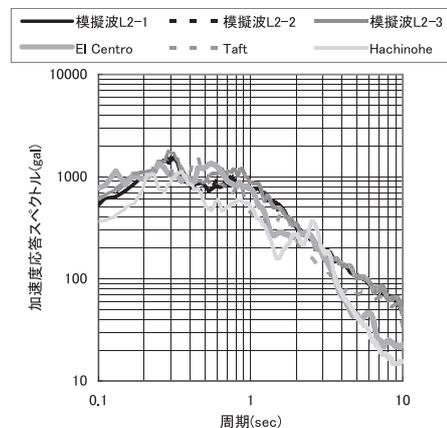


図6 入力地震動の加速度応答スペクトル

2.2 従来構造の地震応答解析結果

入力地震動に対する加速度、変位の建物最大応答値を図7に示す。入力地震動の違いによって応答値に若干の違

いが見られるが、地震動に対する建物の応答は概ね同様の傾向であった。最大加速度は建物柱脚に対して3階では3倍程度に増幅されることが分かった。また最大変位の分布より、1階柱脚の最大変位は5cm程度と大きくなっており、基礎梁がない構造形式のため、1階柱脚の変形が大きくなるなど、建物地上部の応答に対して杭や地盤の応答が影響することが分かった。

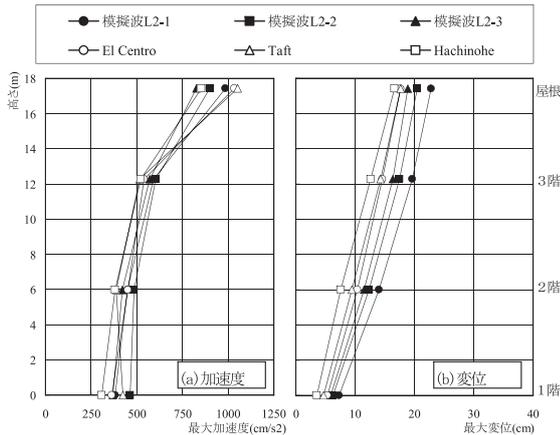


図7 従来構造の最大応答加速度、変位

図8に入力地震動に対する、基礎杭の最大変位と最大曲げモーメントを示す。基礎梁のない構造形式では、基礎梁によって杭頭の水平変形を抑えることができないため、基礎杭は深さ10m程度まで大きく変形している。基礎杭の変形は建物上部の地震時挙動に影響を与えるため、基礎梁のない構造形式では基礎杭や地盤の変形を適切に評価した地震時の挙動把握が必要である。また、基礎杭に発生する最大曲げモーメントは杭頭より地中部分で大きくなる。基礎杭は地震時に発生する最大曲げモーメントに対して、十分な耐力を保有する必要があることが分かった。

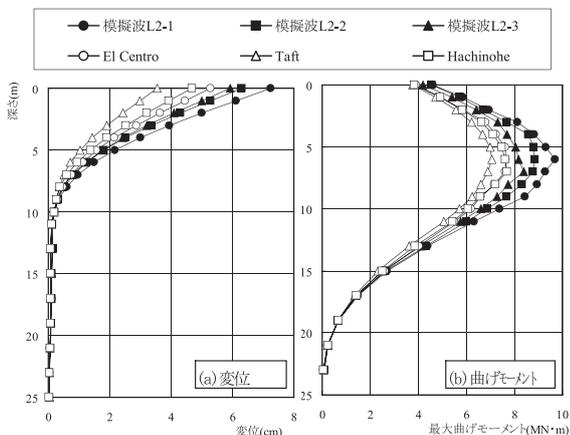


図8 従来構造の最大応答加速度、変位

2.3 免震構造の地震応答解析結果

入力地震動に対する杭頭免震の加速度、変位の建物最大応答値を図9に、柱頭免震の加速度、変位の最大応答値を図10に、それぞれ従来構造の模擬波L2-1の結果とあわせて示す。杭頭免震、柱頭免震とも免震装置設置位置より上部である2階以上で、最大加速度が従来構造より低減されており、地震による水平力が低減されている。建物の最大変位は、免震構造ではいずれも従来構造より大きくなっている。しかし、免震装置のみが大きく変形しており、線路上空部分では上層階でもほぼ最大変位は一定である。このことは免震構造では従来構造に比べて、大地震時に建物にゆがみや変形が発生せず、建物部材に生じる応力を低減できることを表している。線路上空部分の建物挙動に関して、杭頭免震と柱頭免震で大きな違いは見られなかった。しかし、杭頭免震では線路階の柱脚より上部の最大変位が30cm以上となり、建築限界を支障する可能性が高いのに対し、柱頭免震では線路階の柱の変形は抑制されるため、建築限界への影響は小さいと考えられる。

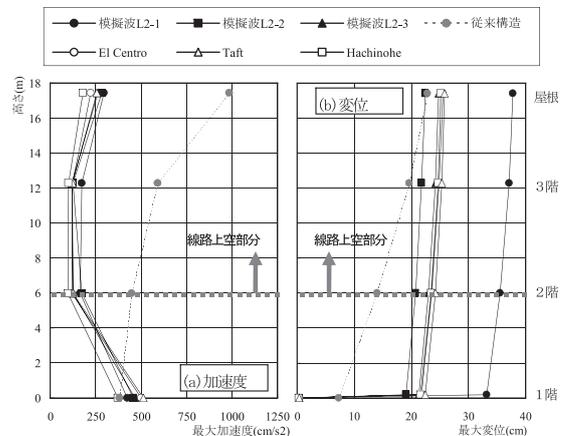


図9 杭頭免震の最大応答加速度、変位

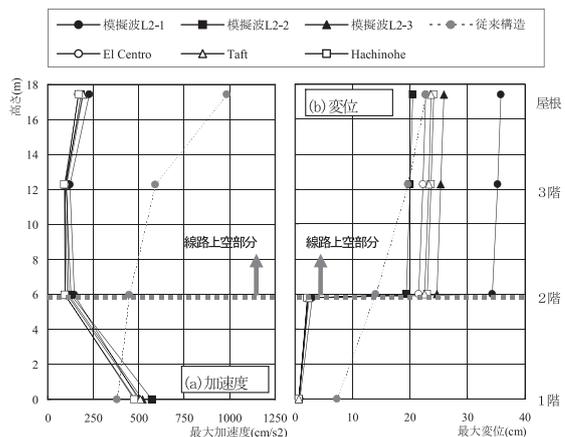


図10 柱頭免震の最大応答加速度、変位

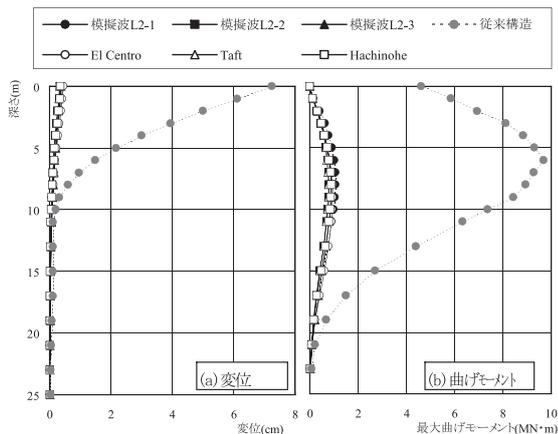


図11 杭頭免震の基礎杭最大変位、曲げモーメント

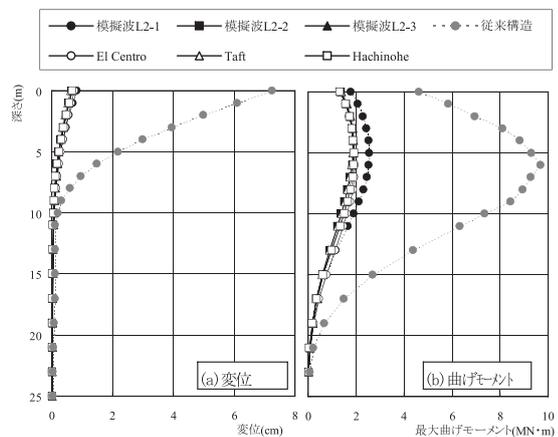


図12 柱頭免震の基礎杭最大変位、曲げモーメント

つぎに、杭頭免震における基礎杭の最大変位と最大曲げモーメントを図11に、柱頭免震における基礎杭の最大変位と最大曲げモーメントを図12に、それぞれ従来構造の模擬波L2-1の結果とあわせて示す。従来構造と同じ入力地震動でも、免震構造では杭頭の変位は1cm以下に低減されており、基礎杭の変形は深さ5m程度までとなっている。杭頭免震および柱頭免震とも杭の最大曲げモーメントは従来構造と同様、地中部6m付近で最大となる。しかし、その最大値は従来構造に比べて、杭頭免震で1割程度、柱頭免震で2割程度に低減されている。基礎杭に対しては杭頭免震のほうが柱頭免震に比べ、地震時の応力低減効果は高い。

最後に、免震構造における低減された地震力に対して、基礎杭径の縮小化の可能性を検討した。まず、従来構造と同程度の基礎杭の変形を許容した場合、基礎杭の径を試算した。簡略法として地盤を一様とみなし、弾性支承上の半無限長杭の理論解³⁾を用いると、柱頭免震の場合、基

礎杭径は6割程度に低減できる。つぎに、曲げモーメントに対して基礎杭に発生する応力を従来構造と同程度とすると、柱頭免震の場合でも基礎杭径は同様に6割程度に低減できる。

3. 線路上空建物への免震構造導入に向けた課題

今回の検証により免震構造による地震力の低減効果と基礎杭縮小化の可能性を確認した。しかし、実際の線路上空建物への導入に向けて次の課題が考えられる。

- ・大きな変形に対する安全性の検証

地震力低減のために、免震装置設置部分の変形が大きくなる。杭頭や柱頭に免震部材を設置した場合、免震部材はせん断変形に加え、曲げ変形を生じる可能性があり、免震部材の変形性能を把握する必要がある。さらに、このときの建物の安全性や、列車運行や鉄道施設への影響を把握し、またその対策の検討も必要となる。

- ・限られたスペースでの免震装置設置方法の検討

特殊な構造形式である線路上空建物では、建物中間に免震層を設けない場合、免震機能を持たせるための装置の設置箇所は柱の周辺のみである。限られた設置箇所、より効率的に免震性能を発揮するために、装置の開発や設置方法を検討する必要がある。

4. おわりに

線路上空建物の効率的な建設のために、免震という技術を利用した新しい構造形式の導入について、地震応答解析により検討を行った。その結果、免震構造では地震力低減により、基礎杭の縮小化の可能性を確認した。

今後、免震技術の導入に向けた課題について、実験やより詳細な解析を通して検討し、線路上空の効率的な利用を実現する研究開発に取り組んでいく予定である。

参考文献

- 1) 線路上空建築物(低層)構造設計標準2002, (社)鉄道建築協会, 2002.6.
- 2) 平成12年建設省告示第1461号, 第四号イ(1), 2000.5.
- 3) 建築基礎構造設計指針, (社)日本建築学会, 2001.10.