

## 線路上空建築物の中高層化に対応した設計法

構造物技術研究部 建築  
副主任研究員 山田聖治

### 1. はじめに

橋上駅などの高さ 20m 以下の線路上空建築物の構造設計法として数多くの適用事例がある「線路上空建築物（低層）構造設計標準」を、高さ 31m までに適用範囲を拡張した構造設計法として改定した<sup>1)</sup>。これは、近年の線路上空空間の高度利用に対するニーズ（図 1）への対応を目的としており、中高層化に伴う影響を中心に構造解析等による技術的な検討を行い、大地震時においても耐震性能を十分確保するための設計法を策定したものである。また、合わせて前標準<sup>2)</sup>発行以降の法令改正等に対応した変更を行った。

### 2. 高層化に伴う影響の検討

#### 2.1 P- 効果

地震時の水平変形によって柱や杭に発生する付加応力（P- 効果）は、建物の高さが増加することで特に地中梁のない線路階における影響が顕著になる可能性がある。そこで、静的増分解析による荷重－変形関係の検討を行った。P- 効果の有無による線路階の荷重－変形関係の比較を図 2 に示す。変形が大きくなるほど P- 効果は影響するものの保有水平耐力（層間変形角 1/75）時で 3.0% 程度であった。しかし、さらに大きな応答変位が生じる可能性がある最大級地震動（鉄道土木波 L2 地震動）では P- 効果の影響が大きくなり、考慮した方が望ましい。

#### 2.2 必要保有水平耐力の割増

線路上空建築物では線路階を軌道のシェルターと想定し、重要度を考慮した設計が必要である。そこで、要求性能に応じた線路階の必要耐力を検討するために質点系モデルを用いた動的解析を行った。なお、この解析においては、地中梁が無いことを想定して線路階の剛性には杭の水平変形を考慮している。解析より決定した必要保有水平耐力の係数は表 1 に示す値となり、2002 年度版からの変更はない。

表 1 降伏性状の違いによる必要保有水平耐力の係数

層降伏順序	対象階	地中梁の無い方向	地中梁の有る方向
上層階先行降伏	上層階	$D_s+0.10$	$D_s+0.10$
	線路階	$1.25 (D_s+0.05)$	$1.25 \cdot D_s$
線路階先行降伏	上層階	$D_s$	$D_s$
	線路階	$1.5 (D_s+0.05)$	$1.5 \cdot D_s$

$D_s$ ：各層を構成する鉄骨部材より決まる値とする（昭和 55 年建告第 1792 号）

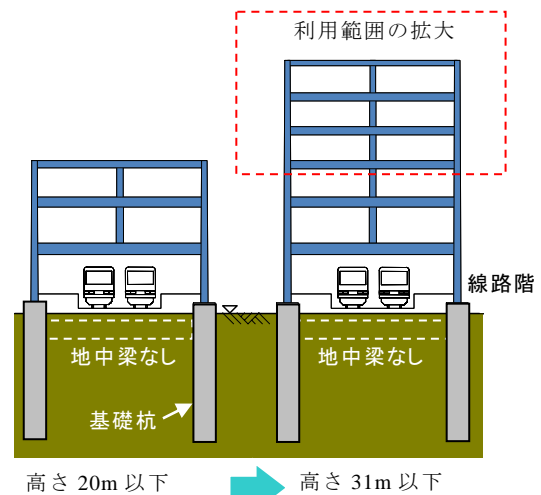


図 1 線路上空利用建物の中高層化

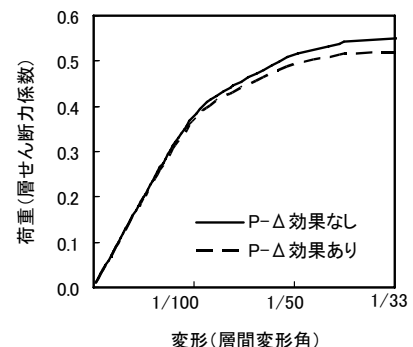


図 2 線路階の荷重-変形関係

### 2.3 動的解析モデル

中高層建物では高次モードの影響を受けやすく、既往の設計標準<sup>2)</sup>で用いていた応答スペクトル法の適用は容易ではない。そのため、高次モードの影響を考慮できる動的解析によって、応答量を推定することとし、その動的解析モデルを提案した。動的解析モデルは地中梁が無いことを考慮しており、地盤-基礎系と上部構造を連成させつつ、設計実務に供するための簡便な質点系モデルとした。また、地盤-建物連成系モデルと比較し、線路階の減衰定数の設定方法について検討した。検討対象モデルを図3に、最大応答層間変位の比較を図4に示す。質点系モデルの線路階の減衰定数(h)を10%にした場合、連成系モデルより一部を除き上回った。大地震時には地盤の非線形化により地盤の材料減衰がさらに大きくなることが予想されるため、質点系モデルの線路階の減衰定数は10%程度見込めると考えられる。

### 3. その他の検討

#### 3.1 杭の鉛直地盤ばねのモデル化に与える影響

転倒モーメントが大きくなる形状の建物を対象として、鉛直地盤ばね（杭先端ばね及び杭周面摩擦ばね）が保有水平耐力等に与える影響について検討した。鉛直地盤ばねの有無による線路階の荷重-変形関係を図5に示す。一次設計（荷重(層せん断力係数)=0.2）時の層間変形角は、鉛直ばねを考慮した方がやや大きくなったが、保有水平耐力（層間変形角1/75）時はほぼ同程度であり、線路上空建築物で一般的な1柱-1杭構造では、鉛直地盤ばねの影響は小さいことがわかった。

#### 3.2 大スパンに対する上下動の影響

構造形状が大スパンになった際に上下動を受けることによる影響について検討した。スパン13m、20mのモデルにおけるR階梁の最大曲げモーメントの比較を図6に示す。スパン20mのモデルでは端部で2割程度、中央部で2倍以上増加しており、スパンが20mを超えるような大スパン架構の場合には、梁の共振による応答増幅を踏まえて上下動の影響を設計上考慮すべきである。

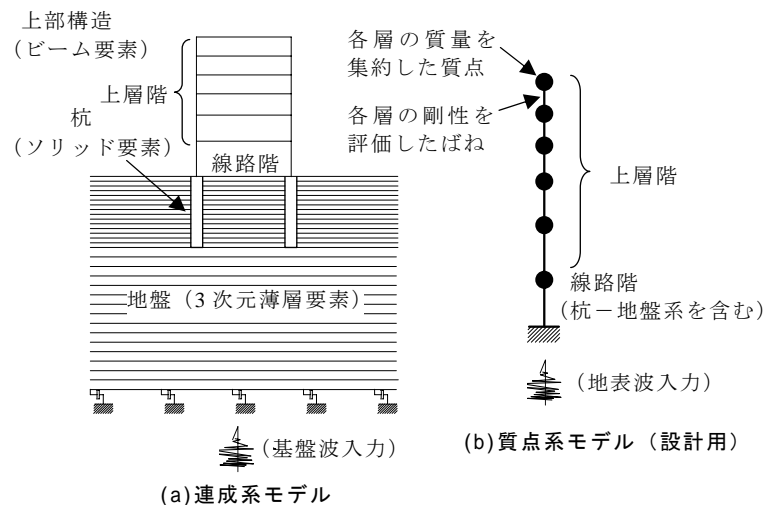


図3 連成系モデルと質点系モデル

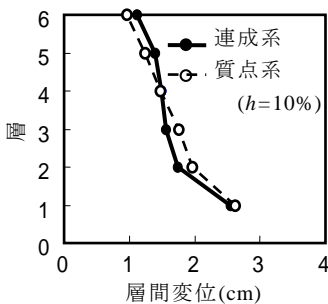


図4 応答層間変位の比較

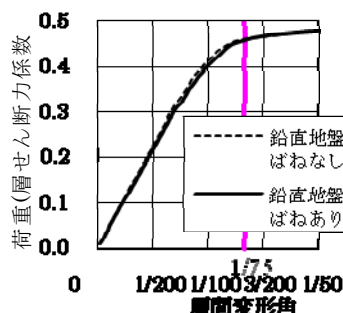


図5 荷重-変形関係

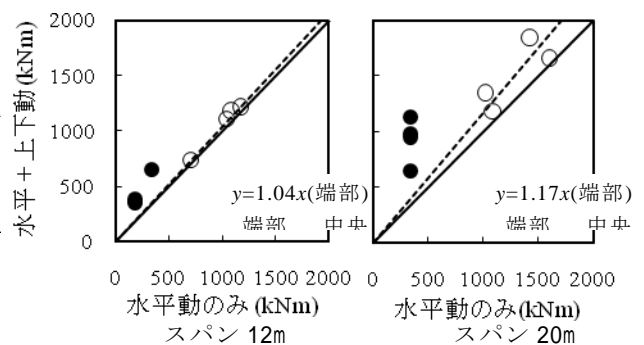


図6 大スパンに対する上下動の影響

## 4. 改定版設計標準の概要

### 4.1 設計法の概要

今回の主な改定趣旨は、①法令改正や学会指針の改訂等に伴う変更、②建物高さの適用範囲の20m以下から31m以下への拡張、である。以下に本設計法の特徴を示す。

#### ①適用範囲

- ・線路上空建築物のうち高さが設計地盤面から31m以下で、一部または全部に地中梁が無く、柱と杭が一体となって地盤に支持されるもの。

#### ②線路階の目標耐震性能

- ・中小地震時に弾性範囲内の挙動であり、大地震時に列車の運行に支障しない軽微な被害にとどめ、最大級地震時に層崩壊が生じないことを目標とする。

#### ③構造種別

- ・上部構造は原則として鉄骨構造、杭基礎は場所打ち鉄筋コンクリート杭または鋼管杭とする。柱－杭接合部は、根巻き形式、埋込み形式、露出形式および鋼管巻き補強形式を対象とする。

#### ④設計手法

- ・設計の手順は、耐震性能の目標に合わせて一次設計（中小地震に対する設計）、二次設計（大地震に対する設計）、最大級地震時の線路階の変形性能確認の3段階とする。
- ・応力変形解析は、上部・下部構造を一体としたモデルを用いる。

#### ⑤一次設計

- ・線路階の偏心率、剛性率を法令の規定より厳しく制限する。
- ・地盤－杭系を弾性的挙動の範囲にするため、杭の水平変位を制限する。

#### ⑥二次設計

- ・線路階の必要保有水平耐力を層の降伏順序に応じて一般建築物より割り増す（線路階先行降伏型：1.5倍、上層階先行降伏型：1.25倍）。
- ・柱－杭接合部が柱や杭などより先行して破壊しないように、安全率を考慮して接合部の耐力を十分確保する。

#### ⑦最大級地震に対する検討

- ・最大級地震動は、鉄道土木構造物の設計で用いるL2地震動とする<sup>3)</sup>。
- ・線路階の保有変形量は、鉄骨部材の保有累積変形倍率より算定する。また、コンクリートを充填した鋼管柱の場合は、部材の保有部材角より算定する。
- ・線路階の応答変形量は、質点系モデルによる動的解析（31m以下の場合）または簡便な応答スペクトル法（20m以下の場合）により推定する。
- ・応答変形量が保有変形量を上回らないことを確認する。
- ・高さ20m以下で「上層階先行降伏型」または「線路階先行降伏型で梁降伏」の場合は最大級地震時にも層崩壊が生じないことが明らかであるため、最大級地震動に対する検討は省略できる。
- ・本検討は、土木構造物との耐震性能の整合を取ることが目的であり、建築基準法で求められる検証の範疇外である。

### 4.2 設計フローおよび中高層化に伴う付加項目、法令改正等に対応した変更点

設計フローを図7に示す。一次設計までは大スパン架構への奨励項目の追加のみであるが、二次設計ならびに最大級地震動の検討については、検討項目や検討フローに大きな変更もある。ま

た、構造高さが 20m を超える場合の付加項目、法令等の改正、学会指針の変更および工学的見地からの変更点について主な内容を表 2 に示す。

### 5. まとめ

線路上空建築物の中高層化に伴う影響について構造解析等による技術的な検討を行い、耐震性能を十分確保するための規定や照査方法を新たに定めた。検討結果に基づき、今まで 20m 以下に制限していた建築物の高さ制限を 31m まで拡張し、中高層化に対応した構造設計法として既往の設計標準を改定した。

この設計法の適用により低層の橋上駅のほか中高層の駅ビル等についても設計法が明確になった。今後の幅広い活用が期待される。

### 【文献】

- 1) 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, (社)鉄道建築協会, 2009
- 2) 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 2002, (社)鉄道建築協会, 2002
- 3) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 1999

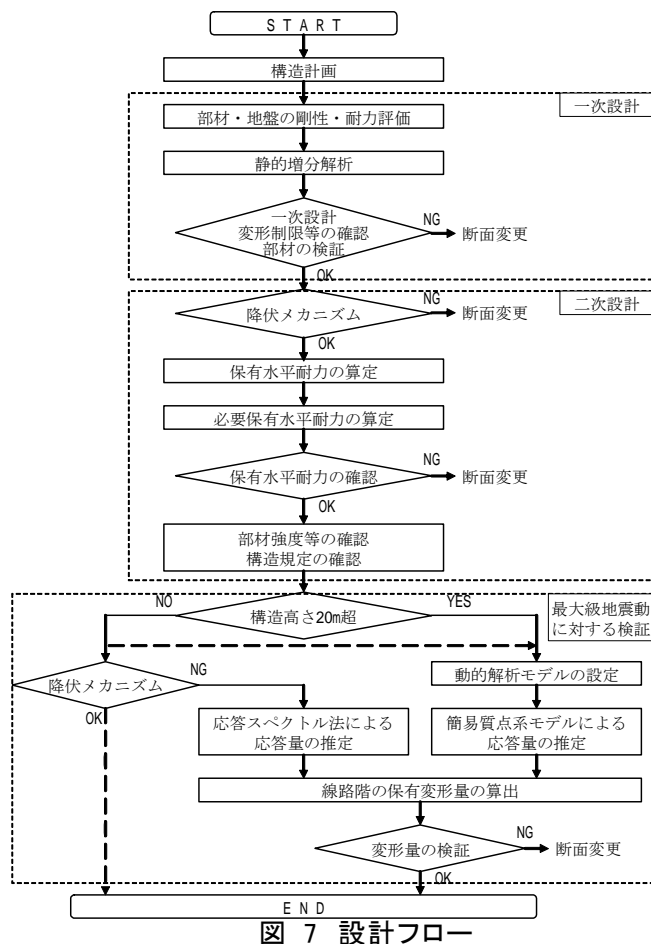


表 2 設計標準の変更概要一覧

項目	既往設計法 <sup>2)</sup>	改定設計法 <sup>1)</sup>
適用範囲	高さ 20m 以下かつ 4 層以下	高さ 31m 以下
構造種別	上部構造：鉄骨造	<b>線路階柱にはコンクリートを充填</b>
上下動の考慮	—	スパン 20m 超の大梁の応力割増 [推奨]
降伏メカニズム	・ 保有水平耐力時に杭の塑性ヒンジの発生を許容	・ <b>保有水平耐力時の圧縮側杭の塑性ヒンジ制限</b> ・ 上層階先行降伏型の上層階は梁降伏
保有水平耐力の算定方法	・ 冷間成形角形鋼管の柱が降伏する場合は保有水平耐力を低減	・ 冷間成形角形鋼管の柱が降伏する場合は柱耐力を低減して再解析 ・ <b>P-Δ 効果を考慮して保有水平耐力を低減</b>
柱－杭接合部	—	・ 接合部耐力の安全率の変更 ・ 接合部の引張り耐力明示 ・ 鋼管補強形式の評価式変更
降伏メカニズム時の軸力制限	・ 線路階の軸力比は 0.5 以下 ・ 接合部に作用する引張力：接合部アンカーボルト耐力以下かつ杭自重以下	・ 線路階の軸力比は 0.35 以下 ・ 接合部に作用する引張力は、接合部の最大引張耐力以下かつ杭自重を含む杭の短期引き抜き耐力以下
最大級地震時の検討	・ 応答スペクトル法により応答変形量を推定	・ <b>動的解析 (P-Δ 効果考慮) により応答変形量を推定</b> ・ <b>杭部材に塑性ヒンジが発生する場合は塑性率を制限または圧壊しないことを確認</b> ・ コンクリート充填柱の変形性能の評価式を変更
構造規定	・ 線路階の鉄骨部材の幅厚比制限 (FA ランク) ・ 杭の帯筋間隔は 150mm 以下 (一部範囲)	・ 塑性化しないことが明らかな梁は FB ランクまで緩和 ・ <b>杭の帯筋間隔は 100mm 以下 (一部範囲)</b>

太字：高さ 20m を超える場合に適用