

線路上空建築物の中高層化に対応した設計法

武居 泰* 山田 聖治* 清水 克将*

The Structural Design Method for Over-Track Middle-Rise Buildings

Yasushi TAKEI Seiji YAMADA Katsuyuki SHIMIZU

This report introduces a revision of a structural design method for over-track middle-rise buildings equal to or less than 31m in height. This intended for meeting the requirements for high use of the over-track spaces. We examined technically mainly on influences with the middle-rise buildings without footing beams by analytical studies, and devised the design method to secure seismic responses at huge-scale seismicity. In addition, we complied with laws and ordinances revision. These results reflected upon the revision of “Standard for Structural Design of Over-Track Low-Rise Buildings”.

キーワード：線路上空建築物，設計標準，構造設計法，中高層化， $P-\Delta$ 効果

1. はじめに

線路上空を利用した建物の構造設計に関しては、高さ20m以下の建物を対象とした「線路上空建築物(低層)構造設計標準」が1987年に制定された。その後、この設計標準は2002年に改定され¹⁾、橋上駅などの低層建物の標準的な構造設計法として数多く適用されてきた。しかし、線路上空空間の高度利用に対するニーズ(図1)が高まる中、高さ20mを超える場合の設計手法が確立されていなかったことから、設計標準の適用範囲の拡大が求められるようになった。

線路上空建築物は、施工上の制約から一般建物とは異なり基礎杭どうしを繋ぐ地中梁が省略される特殊な構造形式となる一方で、大地震時においても多数の旅客の安全や列車の運行を確保できるように十分な耐震性を持たせる必要がある。

そこで、中高層化に伴う影響等について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²⁾を策定した。また、併せて2002年度版¹⁾発行以降の関係規準の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 $P-\Delta$ 効果

地震時に建物が水平変形が生じると上階の鉛直荷重の影響により柱や杭には付加応力が発生する($P-\Delta$ 効果)。この時、建物が高くなるほど柱や杭の軸力が増加するた

め、下層階における $P-\Delta$ 効果の影響は顕著になる可能性がある。線路上空建築物に多い地中梁が無い架構形状では、 $P-\Delta$ 効果による線路階での付加応力を地中梁で負担できないこともあり、荷重-変形関係(復元力特性)や線路階の保有水平耐力への影響が懸念された。そこで、 $P-\Delta$ 効果の影響を把握するため、図2に示す6層3スパンモデル(モデルA)を対象として静的増分解析による検討を行った。

$P-\Delta$ 効果による層せん断力の低減量($\Delta Q_{P-\Delta}$)を下式より求めた。

$$\Delta Q_{P-\Delta} = M_{P-\Delta} / H = \sum N \times \delta / H$$

$M_{P-\Delta}$: $P-\Delta$ 効果による付加曲げモーメント

H : 階高 δ : 層間変位

ΣN : 当該階を支える柱の軸力和

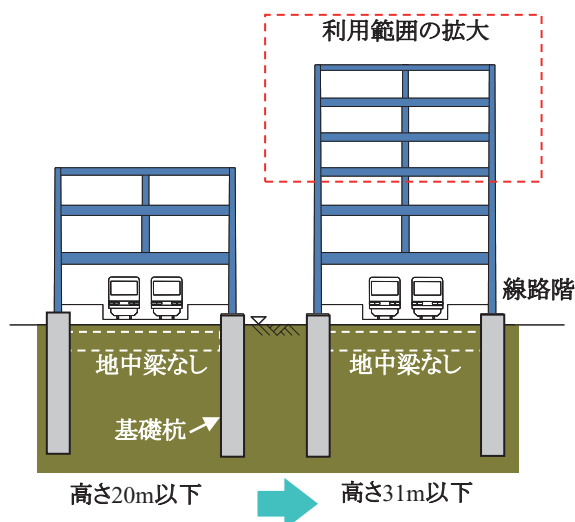


図1 線路上空利用建築物の中高層化

* 構造物技術研究部(建築)

特集：構造物技術

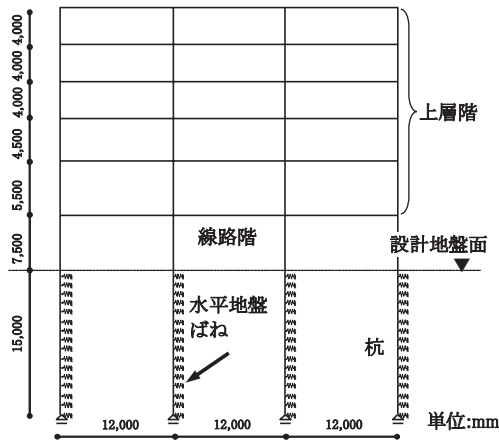
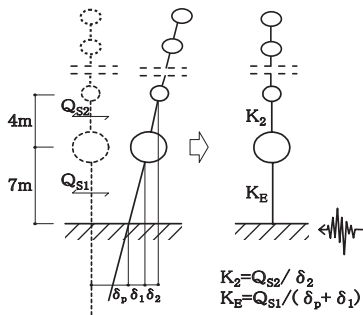


図2 モデルA



- ・建物規模：7層
- ・階高：上層階4.0m, 線路階7.0m
- ・各階質量：線路階は上層階の1.2倍
- ・降伏，終局耐力：図5に示す基準タイプに割増率Iを考慮
- ・復元力特性：トリリニア標準型（線路階の剛性には，杭頭変位 δ_p を考慮する。）
- ・減衰：線路階5%，上層階2%（運動エネルギー比例型）

図4 解析モデル

P-Δ効果の有無による線路階の荷重-変形関係の比較を図3に示す。二つの線の差分がP-Δ効果であり、変形が大きくなるほどP-Δ効果の影響は顕著となる（この差分に自重を乗じたものが $\Delta Q_{P-\Delta}$ となる）。線路階の保有水平耐力時（層間変形角1/75時）では大きな差はなかったが、P-Δ効果を考慮した方がより安全側の評価になる。また、保有水平耐力時より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時（鉄道土木波L2地震動）³⁾の検討では、応答推定時の動的解析モデルにP-Δ効果の影響を考慮して復元力特性を設定する方が望ましい。

2.2 必要保有水平耐力の割増

線路上空建築物では、線路階は軌道のシェルターとしての役割があるため重要度を考慮した設計が必要である。そこで、要求性能に応じて線路階の必要耐力をどの程度に設定するかを検討するため、質点系モデルの動的解析を行った。

解析モデルは、図4に示すように7層建物を想定し7質点せん断型モデルとし、各階の復元力特性はトリリニア標準型とした。上層階先行降伏型の場合として採用した線路階および上層階の復元力特性を図5に示す。ただし、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も考慮し、一次設計時（線路階の層せん断力係数

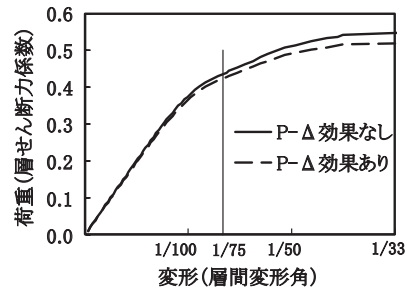
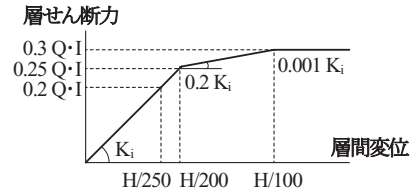
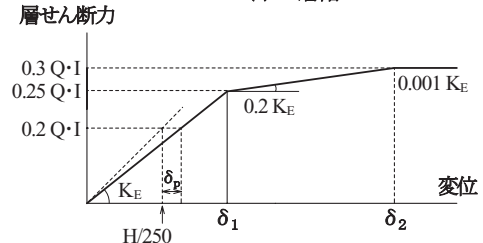


図3 線路階の荷重-変形関係



(a) 上層階



(b) 線路階

図5 解析モデルの復元力特性

(上層階先行降伏型の場合)

$C_1=0.2$ 時)の杭頭変位 (δ_p) を普通地盤の場合、2cmと仮定した。ここで設定した上層階先行降伏型は上層階の耐力が線路階より小さいモデル、線路階先行降伏型は上層階の耐力が線路階より大きいモデルである。入力地震は告示（平12建告第1461号）に示されている極めて稀に発生する地震動（建築告示波（極稀）4波）とし、表層地盤の増幅を考慮するとともに現行の二次設計レベルに対応するように0.8倍して用いた。耐力の割増し係数(I)をパラメータとし、動的解析により各層の最大応答塑性率で損傷の程度を評価した。

各層の最大応答塑性率を図6に示す。上層階先行降伏型の場合、線路階の割増し係数Iを1.3にすると線路階（第1層）の塑性率は2程度以下になり大地震でも大きな損傷が発生しないことがわかった。Iを1.4に上げると線路階の塑性率は下がるが、上層階（特に第2層）の塑性率が上昇した。これは上層階の耐力を既往設計法¹⁾に倣い線路階の耐力に関わらず一定にしているためであり、各層の耐力バランスを適切に設定する必要があることを示唆している。線路階先行降伏型の場合、線路階のIを1.5にすると塑性率は2～3程度に抑えられるが、1.7にしても塑性率の低下は見られなかったことから、I=1.5程度が線路階の必要耐力として適切であるといえる。

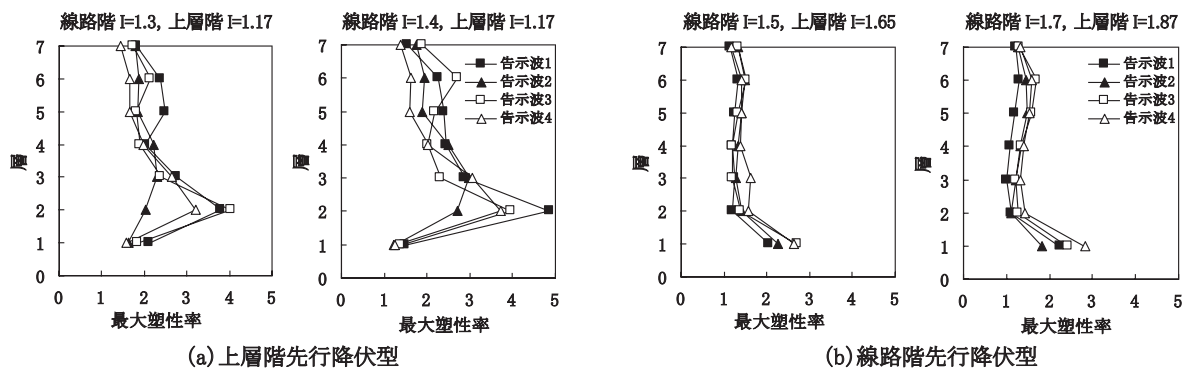


図6 最大応答塑性率分布

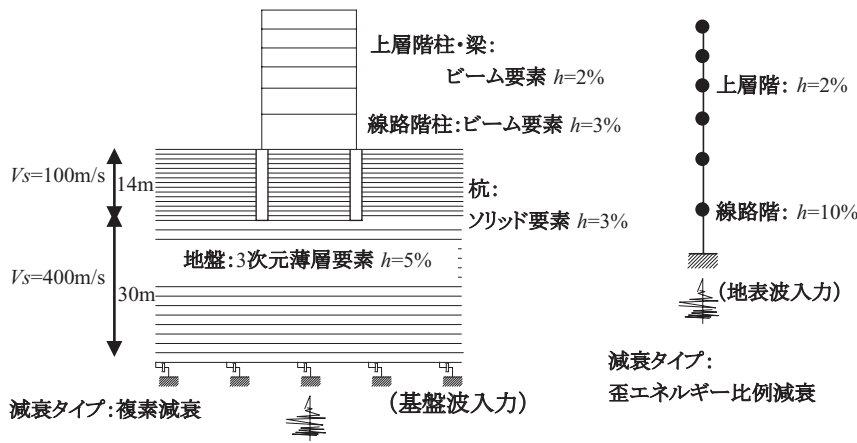


図7 解析モデル

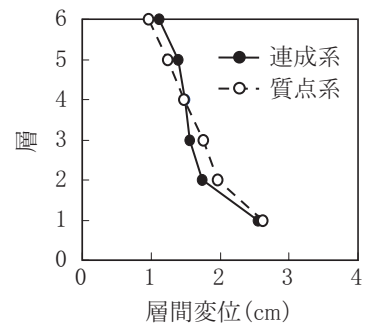


図8 応答層間変位の比較

2.3 動的解析モデル

既往の設計標準¹⁾では、最大級地震動(鉄道土木L2地震動)に対して線路階の変形性能を検証している。低層建物では、杭を含めた線路階の剛性が上層階と比較して小さく、1次の振動モードが支配的であり、建物を1質点系とみなして応答スペクトルから地震時の応答量を推定することは妥当であると言えた。しかし、中高層建物では高次モードの影響を受けやすく応答スペクトルの適用は容易ではない。このような建物の応答推定には動的解析が有効であるが、地中梁が無い建築物では一般建築物とは異なり上部構造を基礎から分離してモデル化することはできないため、地盤-基礎系と上部構造を連成させた煩雑なモデル化が必要となる。そこで、設計実務に供するための簡便な質点系モデルについて、地盤-建物連成系モデルとの比較を行ない、モデル化に際し明確ではなかった線路階の減衰定数の設定方法について検討した。なお、ここでの解析は全て弾性範囲で実施している。

検討対象モデルを図7に示す。質点系モデルの各層の剛性は、連成系モデルの応答結果(層間変位と層せん断力)から算定した。なお、線路階は地盤-杭系の影響を含む剛性とした。入力地震動は建築告示波(稀)と鉄道土木波(L1地震動)³⁾を用いた。

建築告示波入力時の最大応答層間変位の比較を図8に

示す。質点系モデルの線路階の減衰定数(h)を10%にした本検討では、一部を除き連成系モデルの応答を上回った。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のが予想されるため、質点系モデルの線路階の減衰定数は10%程度見込めるものとする。

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

線路上空建築物は地中梁が無いため、骨組の応力解析モデルにおいて上部構造と基礎杭を一体としているが、簡略化のため基礎杭に取り付く鉛直地盤ばね(杭周面摩擦ばね、杭先端ばね)を省略している。そこで、鉛直地盤ばねが保有水平耐力等に与える影響について検討した。対象モデルは転倒モーメントが大きくなる図9の6層1スパン建物(モデルB)とし、杭周辺地盤を図10のモデルとした。杭周には深さ1mごとに水平地盤ばねと杭周面摩擦ばね、杭先端に杭先端ばねを配置した。鉛直地盤ばねのばね定数の設定は鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物・杭土圧構造物)⁴⁾に依った。

鉛直地盤ばねの有無による線路階の荷重-変形関係を図11に示す。一次設計時($C_1=0.2$ 時)の層間変形角は、鉛直ばねを考慮した方が変形は多少大きくなったが(1/272→1/261)、保有水平耐力時はほぼ同程度であった。な

特集：構造物技術

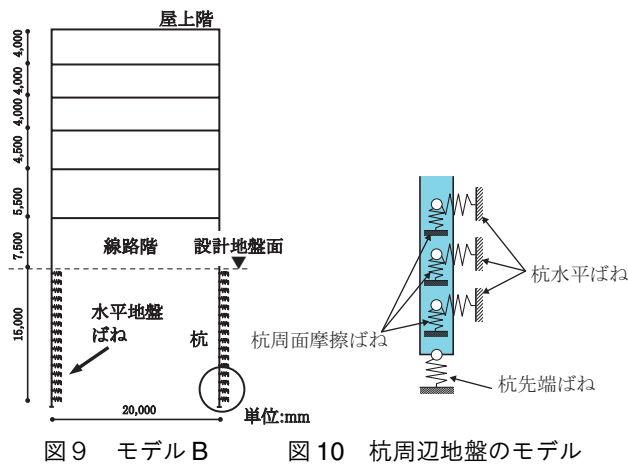


図9 モデルB 図10 杭周辺地盤のモデル

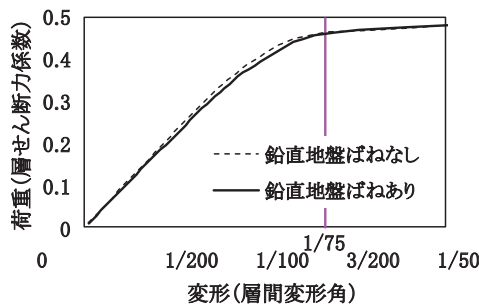


図11 荷重—変形関係

お、杭周面および杭先端ばねは保有水平耐力時においても降伏耐力の1/2以下であった。

以上より、線路上空建築物で一般的な1柱—1杭構造では、支持力が十分なこともあり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

線路上空建築物は、線路を跨ぎ大スパンになることが多いため、上下方向の地震動の影響が懸念される。そこで、骨組モデルによる弾性応答解析により、上下動が柱や梁の応力に与える影響を検討した。解析モデルは図2に示すスパン12mのモデルAおよび図9に示すスパン20mのモデルBである。ここでは上下動を対象とするため、杭には水平地盤ばねのほか、鉛直地盤ばねを考慮した。減衰条件はレーリー型とし、水平および上下それぞれ1次モードの減衰定数(1.5, 4.0%)を設定した⁵⁾。地震動入力方向は、水平動のみと水平動+上下動とし、入力地震動はEL CENTRO (NS, UD), TAFT (EW, UD), HACHINOHE (NS, UD), KOBE (NS, UD)の記録波を用い、水平動の最大速度を25kineに基準化し、同位相で地盤ばね支点位置に入力した。

梁に生じる最大曲げモーメントについて、水平動入力時と水平+上下動入力時の比較を図12に示す。モデルA, Bともに線路階梁の曲げモーメントの増加は小さいが、スパンが20mのモデルBの屋上階梁は端部で2割程度、中央部で2倍以上増加した。これは、屋上階の上下

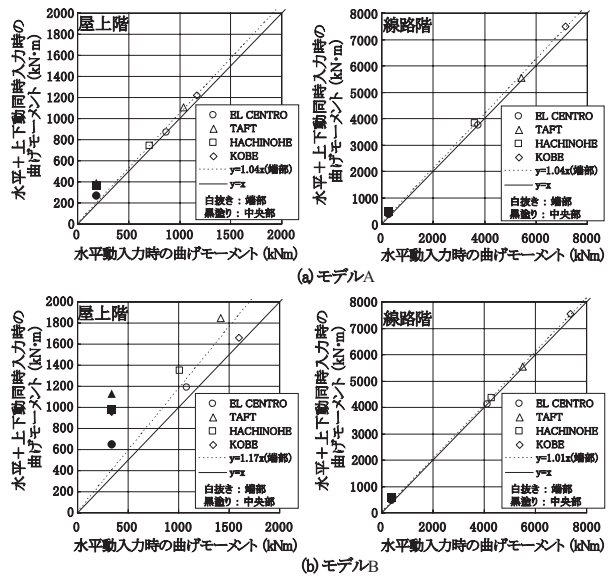


図12 梁の曲げモーメントの最大値(絶対値)の比較

振動が卓越するモードの周期が上下入力動の卓越周期に近いためと考えられる。

以上の検討より、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と言える。

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建物高さの適用範囲の20m以下から31m以下への拡張、②法令改正や学会指針の改訂等に伴う変更、である。改定に際し、学識経験者、建築行政関係者、JR(建築、土木)、鉄道総研で構成する「線路上空建築物の中高層化に関する構造検討委員会 委員長：森田耕次 千葉大学名誉教授 事務局：鉄道総研」において審議を経ている。以下に本設計法の特徴を示す。また、設計フローを図13に示す。

(1) 適用範囲(第1章)

- 線路上空建築物のうち構造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(第1章)

- 地震動のレベル(中小地震, 大地震, 最大級地震)に応じて3段階の性能を目標とする。

(3) 構造種別(第2章)

- 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(第1, 4章)

- 設計の手順は、耐震性能の目標に合わせて3段階と

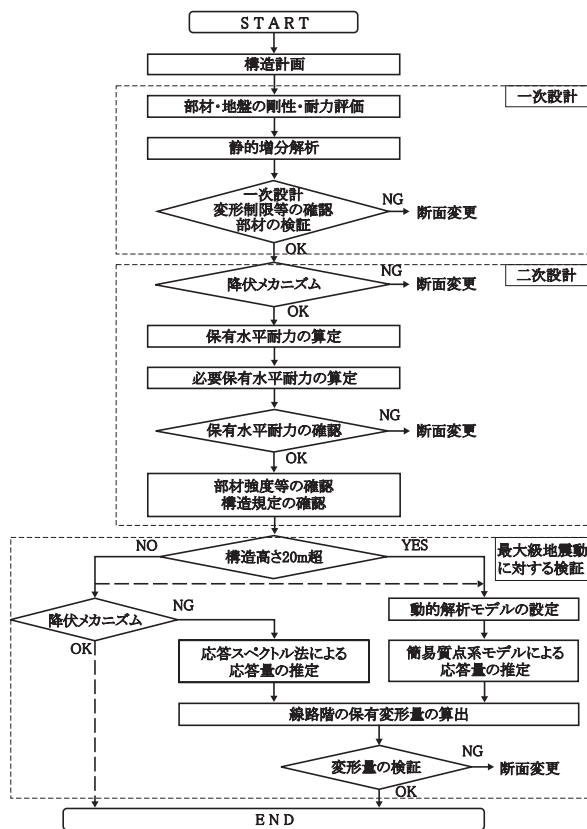


図 13 設計フロー

する。

- ・応力変形解析は、上部・下部構造を一体としたモデルの静的増分解析による。

(5) 一次設計（第5章）

- ・線路階の偏心率，剛性率を法令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，杭の設計地表面変位を制限する。

(6) 二次設計（第6章）

- ・大地震時の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：1.5倍，上層階先行降伏：1.25倍）。
- ・線路階層降伏時に柱－杭接合部が破壊しないよう，接合部係数（接合部の設計における安全率）を考慮して耐力を確認する。

(7) 最大級地震に対する検討（第8章）

- ・鉄道土木波L2地震動を最大級地震動として，線路階が層崩壊しないことを目標とした照査を行う。
- ・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，コンクリート充填柱の場合は，CFT柱の保有部材角より算定する。
- ・線路階の応答変形量は，動的解析（31m以下）または応答スペクトル法（20m以下）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以下では，層の降伏順序などによって，最大級地震動に対する検討は省略できる場合がある。
- ・最大級地震動に対する検討は建築基準法にいう保有水平耐力計算で求められる検証の範疇外である。

4.2 中高層化に伴う付加項目および既往設計法からの変更点

構造高さが20mを超える場合の規定を追加するだけでなく，その他関係規準の改正・変更および工学的見地に対応した既往設計法からの変更を実施した。変更概要の一覧を表1に示す。

4.2.1 中高層化に伴う付加項目（20m超の場合の規定）

(1) 構造種別

- ・線路階柱（鋼管）には2階梁上端から500mm程度までコンクリートを充填し，局部座屈を防ぎ変形性能を高める。

(2) 二次設計

- ・P-Δ効果を考慮して保有水平耐力を低減する。
- ・保有水平耐力時に圧縮側杭に塑性ヒンジを発生させない。

(3) 最大級地震時の検討

- ・動的解析により線路階の応答変形量を推定する。解析モデルの復元力特性にはP-Δ効果を考慮する。
- ・場所打ち鉄筋コンクリート杭に塑性ヒンジが発生する場合は，コンクリートが圧壊しないことを確認するため，塑性率またはコンクリートの圧縮縁ひずみを制限する。

(4) 構造規定

- ・場所打ち鉄筋コンクリート杭の軸方向筋の座屈補剛効果を期待して，設計地盤面から杭径の6倍の範囲のせん断補強筋の間隔は100mm以下とする。

4.2.2 既往設計法からの変更点

(1) 一次設計

- ・スパンが20mを超える大梁については，短期荷重として鉛直震度 $1.0 \cdot Z$ （Z：地震地域係数）を考慮することを推奨する。ただし，地震時水平力との組み合わせは要しない。

(2) 二次設計

- ・上層階先行降伏の場合は，上層階は梁降伏形にするとともに梁端フランジ幅の拡幅等により梁端部の溶接部が破断しないように配慮する。
- ・冷間成形角形鋼管柱を用いる場合で柱降伏（部分崩壊）と判定される層がある場合は，通常の保有水平耐力計算のほか，柱耐力の確保を目的に当該層の冷間成形角形鋼管柱の耐力を低減した場合の保有水平耐力の検討を追加する。
- ・柱－杭接合部を設計する際の接合部係数（外力の割増し係数）を接合部指針⁶⁾の改定に伴い変更する。

表1 変更概要一覧

項目	既往設計法 ¹⁾	改定設計法 ²⁾
適用範囲	構造高さ 20m 以下かつ 4 層以下	構造高さ 31m 以下
構造種別	上部構造：鉄骨造	線路階柱にはコンクリートを充填
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	・保有水平耐力時の圧縮側杭の塑性ヒンジ制限 ・上層階先行降伏の場合、上層階は梁降伏形
保有水平耐力の算定方法	・冷間成形柱が降伏する場合は保有水平耐力を低減	・冷間成形柱降伏の場合、柱耐力を低減して再解析 ・ P-Δ 効果を考慮して保有水平耐力を低減
柱-杭接合部	—	・接合部係数変更 ・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 ・CFT 柱の変形性能は新都市ハウジング協会式に準拠	・動的解析 (P-Δ 効果考慮) により応答変形量を推定 ・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 ・CFT 柱の変形性能は長柱を考慮した建築学会指針に準拠
構造規定	・線路階鉄骨部材は FA ランク ・杭頭から 6D 範囲の帯筋間隔は 150mm 以下	・塑性化しないことが明らかな梁は FB ランクまで許容 ・ 杭頭から 6D 範囲の帯筋間隔は 100mm 以下

太字：構造高さ 20m を超える場合に適用

- ・線路階保有水平耐力時の柱-杭接合部に作用する引張力を接合部の最大耐力以下かつ杭自重を含む杭の短期引き抜き耐力以下に制限する。
- ・線路階の階高が一般の建物に比べて高いことや上下動地震による軸力変動を考慮し、線路階保有水平耐力時の線路階柱の軸力比を 0.35 以下に制限する。なお、充填コンクリートがある場合はコンクリートの耐力を考慮してよい。

(3) 最大級地震時の検討

- ・CFT 柱の保有部材角の算定は、長柱を考慮した CFT 指針⁷⁾ に準拠する。

(4) 鋼管巻き補強柱脚

- ・ベースプレートの板厚の設計は、せん断耐力により検討する。

(5) 構造規定

- ・線路階を構成する鉄骨部材の幅厚比は原則 FA ランクとするが、降伏メカニズム時に塑性ヒンジの生じない梁については FB ランクも許容する。

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、大地震時においても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

た建物高さ制限を 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。

今回の改定にあたっては、設置した検討委員会において委員長、委員、幹事の諸氏に精力的なご審議をいただいた。ここに記して謝意を表します。

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 2002, (社) 鉄道建築協会, 2002
- 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 2009, (社) 鉄道建築協会, 2009
- 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
- 4) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・杭土圧構造物, 2000
- 5) 日本建築学会編：多次元入力地震動と構造物の応答, p.76, 1998
- 6) 日本建築学会編：鋼構造接合部設計指針, 2006
- 7) 日本建築学会編：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 2008