

最下層柱脚の降伏を防ぐ 層中間ピン柱脚の設計・施工

－実構造物の施工における利点と問題点－

木村 祥裕(東北大学大学院/教授)／金田 勝徳(構造計画プラス・ワン/会長)

1. はじめに

筆者らは、鉄骨骨組において大地震時にも柱の降伏を防ぐことができる構法として層中間ピン柱脚を提案している。これまでにこの柱脚を有する鉄骨骨組が全層で梁のみが降伏するための必要条件を提示すると共に、柱脚がピン挙動を示すための接合部ディテールに関する研究を進めてきた^{1)～5)}。

本構法は、これまで10棟の建物に採用された実績を有するが、施工においても様々な点で従来の柱脚と異なる⁶⁾。ここでは、これらの施工実績に基づき、施工の観点から従来の柱脚と層中間ピン柱脚による構法を比較し、本構法の特徴を論じる。

2. 従来の柱脚を有する鉄骨造建築物の問題点

鉄骨造建築物は、高強度及び高韌性をもつ鋼材の特性から、優れた耐震性能を有する構造として評価されてきた。しかし、鉄骨造建築物の増加に伴い、大地震のたびに、他の構造と同様に大きな被害を受けるケースが増え、現在に至るまで多くの教訓を得てきた。鉄骨ラーメン構造における地震被害は、主に溶接部の破断や一階柱脚部の損傷であり、そのうち溶接部については近年の溶接技術の進歩と品質管理の改善によって、その信頼性が大きく向上している。

一方、一階柱脚部の問題は、柱脚部が骨組の中で最大応力となる個所でありながら、接合される柱と基礎梁が異種構造材であることに加えて、大地震時にその部位の曲げ降伏が避け難いことがある。一階柱では、柱・梁の曲げ剛性に比べて、基礎梁の曲げ剛性が圧倒的に大きく、埋込み柱脚や固定（半固定）の露出柱脚の場合は実質的に柱脚固定ないしは半固定支持となる（図1(a)）。そのため、地震時に発生する柱脚部の曲げモーメントが大

きくなり、曲げ降伏を防ぐことが難しい（図1(c)）。固定度が低い露出柱脚の場合（図2(a)）、一階の水平剛性が低いことから層間変形角と柱頭曲げモーメントの増大は避けられない（図2(c)）。

このように、従来の柱脚は、多くの場合、柱脚部の塑性化を許容せざるを得ない。ある程度の高層建築物では、1～3層程度の下層階の柱などを強く設計することにより、全体的には上層階の梁の曲げ降伏が先行して、終局時まで下層階の柱を降伏させない設計が可能となる。

しかし、中低層建築物では、全体崩壊形を目指してウイークビーム・ストロングカラムの設計がなされた骨組でも、図1(c)、図2(c) 左のような曲げモーメント分布となり、最下層柱の降伏は避けられないことから、過去の大地震では、構造物の自重を支持する最下層の柱脚・柱頭で、図1(c) 右、図2(c) 右に示すよう

に柱材には大きな塑性ヒンジを生じ、倒壊に至るケースが確認されてきた。

現行の建築基準法では人命を守ることができれば、建物の被害は許容されているが、図1、2のような損傷を生じれば、建て替えを余儀なくされることから、解体・改築により元の建設費用の1.5倍以上になる場合もある。このように一階柱脚が中低層鉄骨造における耐震上の最大の弱点と言える。

3. 層中間ピン柱脚の骨組の特徴

筆者等は従来の柱脚の問題点を解消すべく、図3に示すようにRC基礎梁からRC柱を立ち上げ、1階中間部で上部の鉄骨柱と近似的にピン接合する新たな柱脚（以降、層中間ピン柱脚と呼ぶ）を提案している。

本構法による設計法及び実設計例は、鉄構技術2014年3月号に掲載されている

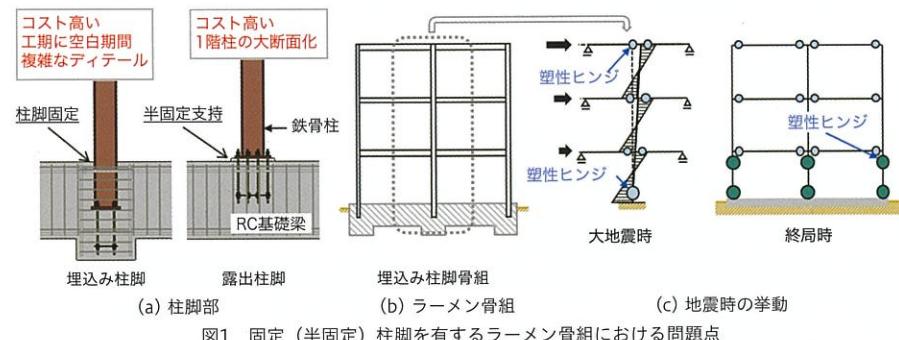


図1 固定（半固定）柱脚を有するラーメン骨組における問題点

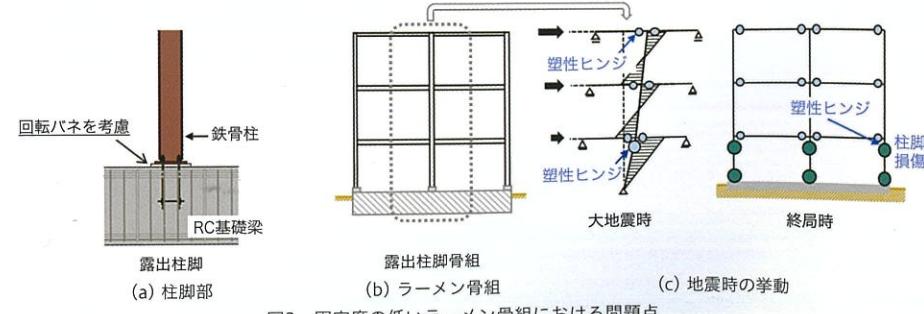


図2 固定度の低いラーメン骨組における問題点

ので参考されたい。

ピン接合部が柱の曲げモーメントの反曲点になるため、図3(c)左に示すように最下層柱頭・柱脚における曲げモーメント分布を接合部の位置を変えることによって、自由に制御できることから、最下層柱脚の曲げ降伏を防ぎ、全層梁降伏型メカニズムを実現できる(図3(c)右)。そのため、大地震後も従来型の柱脚を適用した建物に比べて、部分的な補修により建物の継続的使用が可能となることから、使用期間におけるライフサイクルコストを抑えることができる。

層中間ピン柱脚の場合(図3)、露出柱脚と同様にRC部材と鉄骨部材を完全に分離することから、埋込み柱脚のような複雑な施工手順を踏む必要がない。

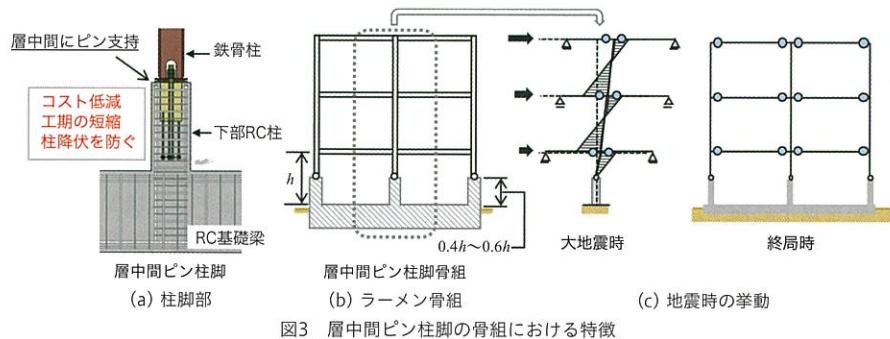
4. 層中間ピン柱脚と他構法との比較

表1に(a)層中間ピン柱脚、(b)埋込み柱脚、(c)露出柱脚を採用した場合の最下層の施工に要する工期の比較を示す。

埋込み柱脚の場合、鉄骨柱を基礎梁に埋め込むことで、鋼材使用量が増えると共に基礎梁の配筋が複雑になる。そのため、鉄筋の納まり上、基礎梁の断面を大きくして対応するか、基礎梁にハンチを設けなければならない。さらに、鉄骨建方を基礎梁の工事の前に行わなければならぬため、鉄骨部材の製作時間が十分でなく、その間の工事工程が遅れることも少なくない。

露出柱脚の場合、埋込み柱脚を用いた場合のようなRC部材と鉄骨部材の取り合い部ではなく、両者が完全に分離されているため、埋込み柱脚を用いた場合より施工手順が単純となる。しかし、埋込み柱脚に比べて最下層柱脚の回転剛性が低いため、最下層柱頭の曲げモーメント負担が大きくなり、かつ最下層の層間変形角も大きくなる。

従って、最下層の柱断面を大きくするか、柱脚の固定度を上げる必要がある。柱脚の固定度を上げるために、多くのアンカーボルトを用いる必要がある。そのため、接合部形状、基礎梁鉄筋との納まりともに複雑なものとなり、精度の確保も施工上の難点となる。そして、1.でも述べた通り、一般的に大地震における最下層柱の曲げ降伏は避けられない。



一方、提案する層中間ピン柱脚の場合、露出柱脚と同様にRC部材と鉄骨部材を完全に分離することから、埋込み柱脚のような複雑な施工手順を踏む必要がない。また、ピン接合部が柱の曲げモーメントの反曲点になるため、最下層柱頭・柱脚における曲げモーメント分布を自由に制御できることから、最下層柱脚の曲げ降伏を防ぎ、全層梁降伏型メカニズムを実現することができる。

層中間ピン柱脚を用いた場合、工期は露出柱脚と同様、埋込み柱脚よりも短くなり、施工コストは他の工法に比べて鉄骨量が少ない、柱脚金物が簡易であるなどの理由で安価となりうる。

5. 層中間ピン柱脚構法の施工手順

事例対象建物の梁伏図、軸組図を図4に示す。この建物は、後述の表1のNo.6であり、27m×17m、最高高さ11.97m、地上3階(塔状比0.43、0.69)であり、構造形式はラーメン構造一部プレース付きである。ルート3で設計されている。

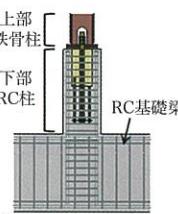
設計上の工夫点としては、

- ①一般部の1階柱については、1FL+1,200mmの高さに接合部を設けた層中間ピン柱脚を採用している。
- ②また、1階に食堂を計画しており、意匠上の要望より食堂で見え掛かりとなる3箇所の鉄骨柱に円形鋼管を採用した。円形鋼管柱は1階床レベルから鉄

表1 各種柱脚を採用した場合の工期の比較

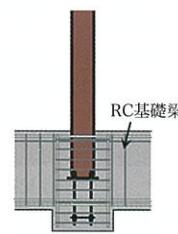
(a) 層中間ピン柱脚の場合

工期(カ月)	1	2	3	4	5	6	7
鉄骨工事	●			鉄骨製作		鉄骨建方 本締め	
RC工事					1階RC柱 養生		各階スラブ
基礎工事			耐圧版 1階スラブ	基礎梁 養生			



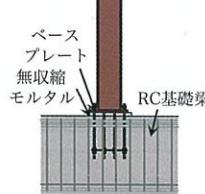
(b) 埋込み柱脚の場合

工期(カ月)	1	2	3	4	5	6	7
鉄骨工事	●			鉄骨製作		鉄骨建方 本締め	
RC工事							各階スラブ
基礎工事			耐圧版 1階スラブ	基礎梁 養生		基礎梁 1階スラブ	



(c) 露出柱脚の場合

工期(カ月)	1	2	3	4	5	6	7
鉄骨工事	●			鉄骨製作		鉄骨建方 本締め	
RC工事							各階スラブ
基礎工事			架台設置 耐圧版 1階スラブ	基礎梁 養生			



骨柱とし、柱脚形式には露出柱脚を採用した。
である。

これまでの施工例を元に本構法の施工手順を以下に記す。写真1はアンカーボルト設置から建方まで施工手順である。

①基礎・基礎梁の施工

基礎梁からアンカーボルトセットを設置する下部RC柱の主筋のみ立ち上げる。

②アンカーボルトセットの設置（写真1(a)(b)）

アンカーボルトとアンカーボルトに十字型に溶接したプレート（支圧プレート）、支圧プレート上端に溶接した円盤状の鋼板（保護プレート）を一体化したピン接合用金具であるアンカーボルトセットを、RC柱の軸芯を通るように設置する。上部鉄骨柱のベースプレートと面で接触する保護プレート上面は、その高さや傾きの精度が上部鉄骨骨組の施工精度を左右する。そのため、アンカーボルトセットの設置精度を上げるために、あらかじめアンカーボルト下部に設置用架台を取り付けておく（写真1(b)）。設置用架台はアングルを組み合わせ、ボルトで用いて上下方向及び傾きを制御できるものにした。

③下部RC柱の配筋（写真1(c)）

アンカーボルトセット設置後、下部RC柱の帶筋を配する。

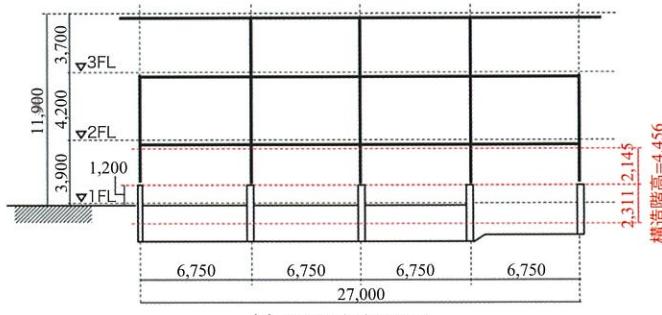
④下部RC柱の型枠設置とコンクリートの打設（写真1(d)～(f)）

本柱脚の柱型枠は一般的な柱型枠と違い、梁・スラブが取り付かず自立させる必要があるため、1階スラブから単管を用いて支持している。さらに各作業工程において、通り芯と型枠の距離をレーザー距離計で測定し鉛直精度を確保している。また、アンカーボルト下部ではコンクリートが十分に充填されない可能性があることから、型枠の下部にコンクリート充填状況が目視

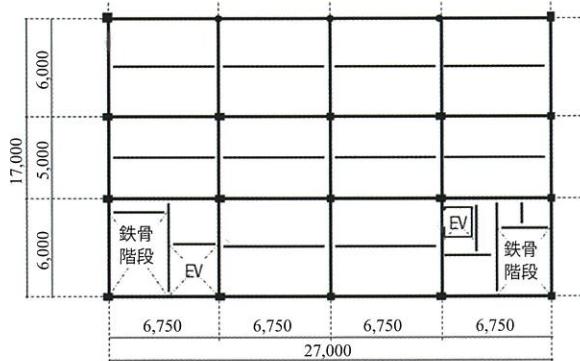
できる確認窓を設置してジャンカが発生しないように対処している。

⑤鉄骨骨組の建方（写真1(g)(h)）

下部RC柱の施工後、鉄骨骨組の建方を行う。1節目の鉄骨柱はラーメン架構が形成されるまで柱脚のアンカーボルト1本のみで自立するため、不安定になる。そこで、安定性を確保し施工精度を保つため3方向にワイヤロープを張り、回転や傾きが大きくならないように対処している。また、材軸に通した1本のアンカーボルトによって



(a) 長辺方向略軸組図



(b) 2階略伏図

図4 層中間ピン柱脚を適用した3階鉄骨建物



(a) アンカーボルト設置



(b) 位置取り



(c) 配筋完了



(d) 型枠立て後



(e) アンカーボルトの納まり



(f) 脱型後



(g) 上部鉄骨柱



(h) 鉄骨組立て後

写真1 施工手順



下部RC柱と接合するため、上部鉄骨柱に角形鋼管を使用した場合、その最下部にはナットを締めるための孔が必要となる（写真1（g））。この孔はアンカーボルトのナットを締めた後、母材と同材料同厚の鋼板を用いて塞ぎ柱耐力の低下を防いでいる。このように実施工において一般的な方法を用いて精度を確保しながら、従来の埋込み型柱脚に比べてコスト縮減と約3週間の工期短縮を実現している。

6. 層中間ピン柱脚を適用した設計・施工事例

表2に層中間ピン柱脚を適用した設計・施工事例の一覧を示す。施工中も含めて全部で10棟である。用途は工場、事務所、倉庫、診療所、厚生・研究施設、保育園など多岐にわたる。最も高い建物が27.9m、地上7階、最も広い建物が建築面積2,757m²、延床面積8,666m²である。構造形式は、多くがラーメン構造である

が、一部、プレース構造にも採用されている。

7.まとめ

以上から、層中間ピン柱脚を適用することで、骨組としての耐震性能だけでなく、施工性の観点からも優位性が示された。本柱脚機構は、表2に示すように概ね4階程度以下、塔状比2.0以下となる中低層鉄骨構造物への適用事例が多い。

鉄骨構造建築物全般に適用可能であるが、建物の転倒曲げモーメントに伴い柱に引張軸力が生じない塔状比の低い建築物などに適している。

2) 金田勝徳、木村祥裕、宮原直樹、和田章：新しい柱脚機構を有する中低層鉄骨ラーメン架構の終局耐震能力、日本建築学会構造系論文集、第76卷、第661号、pp.649-658、2011.3

3) 金田勝徳、木村祥裕、六倉賢太、角屋治克、渡辺亨、高橋邦広：全層梁降伏型中低層鉄骨ラーメン構造構築のための柱脚機構に関する部分架構モデルによる基礎実験、日本建築学会構造系論文集、第76卷、第665号、pp.1357-1366、2011.7

4) 木村祥裕、金田勝徳、和田章：新しい柱脚機構を有する鉄骨ラーメン骨組の終局耐震能力と鉄骨柱支点部の作用力の算定法、日本建築学会構造系論文集、第78卷、第688号、pp.1149-1158、2013.6

5) 木村祥裕、古川幸、金田勝徳、渡辺亨、和田章：層中間型柱脚機構を有する鉄骨ラーメン骨組における最下層柱の圧縮力伝達機構と鉄骨柱支点部の圧縮耐力、日本建築学会構造系論文集、第80卷712号、pp.905-915、2015.6

6) 高橋邦広、金田勝徳、古川幸、木村祥裕、和田章：層中間型ピン柱脚構法を有する鉄骨建物、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1055-1056、2015.9

参考文献

- 1) 金田勝徳、木村祥裕、濱崎慎一、和田章：全層梁降伏型を目指した中低層鉄骨ラーメン構造構築のための新しい柱脚機構の提案、日本建築学会構造系論文集、第75卷、第654号、pp.1537-1546、2010.8

表2 これまでの設計・施工事例

1	2	3	4	5
薬品工場 千葉県千葉市緑区 2,757.59 / 8,666.13 21.61 / 地上4階 ラーメン構造	貸事務所 東京都中央区 193.05 / 1,237.59 27.9 / 地上7階 ラーメン構造	貸倉庫 東京都品川区 228.39 / 576.87 6.35 / 地上2階 ラーメン構造(X方向) プレース構造(Y方向)	診療所 山形県天童市 133.66 / 133.66 5.25 / 地上1階 ラーメン構造	精米工場 埼玉県熊谷市 2,295.80 / 3,383.50 19.41 / 地上2階 ラーメン構造
				
6	7	8	9	10
工場内厚生施設 神奈川県相模原市 532.00 / 1,412.12 11.97 / 地上3階 ラーメン構造 一部プレース付き	保育園 東京都中野区 392.45 / 869.73 9.82 / 地上3階 ラーメン構造	食品工場 山梨県 2,298.05 / 2,898.48 14.3 / 地上2階 ラーメン構造	研修施設 埼玉県 651.16 / 1,499.11 19.76 / 地上4階 プレース付 ラーメン構造	食品工場 東京都日野市 1,312.68 / 3,625.04 15.9 / 地上3階 プレース付 ラーメン構造
				

各表上から (1) 物件No. (2) 建築用途 (3) 場所 (4) 建築面積 (m²) / 延床面積 (m²) (5) 最高高さ (m) / 階数 (6) 構造形式