

	かねだ かつのり	
氏名	金田 勝徳	
授与学位	博士(工学)	
学位授与年月日	平成24年4月11日	
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項	
最終学歴	昭和43年3月	
	日本大学理工学部建築学科 卒業	
学位論文題目	最下層柱脚の損傷防止を目的とする新しい柱脚機構を用いた 中低層鉄骨ラーメン構造の耐震性能	
論文審査委員	主査 東北大学教授 木村祥裕	東北大学教授 源栄正人
	東北大学教授 植松康	東北大学准教授 五十子幸樹

論文内容要旨

1995年1月に起こった兵庫県南部地震では、ラーメン（剛接）構造の中低層建築物がその構造種別に関わらず、特定層の層崩壊によって大被害を受けた例が多く見られた。層崩壊は、柱の曲げ降伏や局部座屈による当該階の水平剛性低下によるものや、柱のせん断破壊によるものなど、損傷が柱に集中することに起因する。

それ以来これまで、中低層鉄骨造建築物の層崩壊防止のための研究や、柱脚の損傷後の骨組の耐震性に関する研究が数多くなされている。これらの研究は、いずれもある程度の柱降伏や柱脚の損傷を前提としたうえで、骨組の終局的な耐震性能に関するものである。このことは現在の構法では、骨組を完全梁降伏型骨組として設計をすることが困難なことによっている。とりわけ最下層柱脚と最上層柱頭において柱降伏を防ぐことは、一般的には不可能といえる。

このうち最上層柱頭の曲げ降伏は、骨組全体の安全性に大きな影響を及ぼすものではないと考えられる。しかし最下層柱脚の損傷は、それを契機として骨組の全体崩壊に至る危険性をはらんでいる。このことから、最下層柱脚の設計法に関しては、各種の基・規準により詳細な技術基準が定められており、施工精度にも十分な注意が払われている。しかしそうした複雑な規準類に準拠して設計され、慎重な精度管理の下に施工されても、現状では柱脚の降伏や損傷そのものを防ぐことになっていない。2011年3月の東北地方太平洋沖地震においても、地震動によって被災した鉄骨造建築物の損傷部位のほとんどが、ブレースないしは最下層の柱脚部であることが報告されている。

本論文は一般に用いられている構法では、不可避とされている最下層柱脚の損傷防止を目的とした新しい柱脚機構を提案し、その柱脚機構を用いた骨組が、従来からの柱脚機構を用いたラーメン架構より優れた耐震性能を有していることを検証している。併せて望ましい降伏機構とされながら、実際には実現が困難とされている全層梁降伏型骨組を、比較的容易に実現するための研究をまとめたものである。

第 1 章「序論」では戦後の日本国内において目覚ましく発展し、あらゆる用途、規模の建築物に用いられている鉄骨造が、兵庫県南部地震によって受けた被害状況を考察している。その上で特定層の層崩壊を防ぐことが、中低層鉄骨造建築物の耐震性向上を図る上で重要な事柄であることを論証している。

第 2 章「軸力支持柱による鉄骨ラーメン骨組の損傷集中抑止効果」では米国のラーメン構造に多く用いられている Gravity Column を例として、軸力支持柱の架構の層崩壊抑止効果について考察している。

米国では風、地震荷重などの水平荷重に抵抗するラーメン架構の他に、鉛直荷重のみを負担する Gravity Column ないしは Lean Column と呼ばれる鉛直材（以下「軸力支持柱」という）を組み込んだ架構を併設する構造が多く用いられている。この軸力支持柱が組み込まれている構造と、日本で多く設計されている純ラーメン構造における耐震性能の違いについて比較検討を行い、軸力支持柱が耐震性能に与える影響を検証している。検証の対象には、1990 年代後半に日米共同研究として行われた「日米の鉄骨造建物の耐震性比較」の際に、日米で試設計された架構を用いている。検証方法はそれぞれの架構に対して静的増分解析と地震応答解析を行い、部材が最大耐力に達した時（部材崩壊時）の架構の保有性能を把握することによっている。

その結果、軸力支持柱（Gravity column）が層間変形の集中を抑制し、そのことによって特定層への損傷集中を抑止する効果を持つことを確認できた。また検討対象とした日米の架構は、いずれも梁の履歴吸収エネルギーが大きいタイプであるが、軸力支持柱を用いた米国型の架構の方が、より多くの地震エネルギーを梁で吸収できることが確認された。以上より柱が骨組の終局時まで弾性内に留まることで骨組の冗長性を高め、地震エネルギー吸収能の高い骨組の設計が可能であることを明示している。

このように米国式構造システムは優れた耐震上の特性を持っているものの、そのまま日本における建築物に適用される例は少ない。その理由は柱を軸力のみを支持する柱と水平力も負担する柱に分けることが、水平耐力を確保しながら鉄骨重量を削減する上では必ずしも有利ではないことや、日本の厳しい技術規準を満足することが難しいなどの理由が考えられる。

第 3 章「新しい柱脚機構を用いた中低層鉄骨ラーメン架構の耐震性能」では、架構に軸力支持柱を組み込まなくても、架構の層崩壊抑止効果を発揮することのできる新しい柱脚機構を提案し、その有効性についての研究結果を示している。

ここで提案する新しい柱脚機構は、最下層柱脚の損傷を防止して、柱が架構の終局時まで弾性内に留まることで、水平力を負担しつつ軸力支持柱と同様に特定層の層崩壊を防止することを目指している。新しい柱脚機構の形状は、最下層柱の中間部に回転剛性の低い接合部を設け、接合部より上部は鉄骨造、下部は RC 造としている。以下本論では新しい柱脚機構を「層中間型柱脚機構」、鉄骨柱と RC 柱の接合部を「鉄骨柱支点部」と呼ぶ。

層中間型柱脚機構では鉄骨柱支点部の回転剛性を低くすることにより、実質的に支点部位置近傍が柱に生ずる曲げモーメントの反曲点となる。従って層中間型柱脚機構では、鉄骨柱支点部を鉛直力と水平せん断力のみを伝達するピン支承とし、柱の曲げモーメントが最大となる柱脚部は柱、基礎梁共に RC 造として構造の連続性を保つことができる。

このような層中間型柱脚機構の有効性を検証するため、層数と鉄骨柱支点部の基礎梁からの高さ、及び柱梁耐力比をパラメータとした骨組に対して、静的増分解析と地震応答解析を行って耐震性能と振動性状を把握している。検討対象は冷間成形角形鋼管を柱とした純ラーメン構造として、柱脚機構

は層中間型柱脚と併せて、比較のため従来型である露出型柱脚と埋め込み型柱脚についても検討を行っている。

検討結果から層中間型柱脚機構を用いたラーメン構造が、鉄骨柱支点部の高さを適切に調節することで、柱脚部の損傷を回避しながら層間変形角を制御できること、柱梁耐力比がある程度大きな場合は、層間変形角 0.03 程度の大変形に達するまで全層完全梁降伏型メカニズムが形成されること、柱梁耐力比が小さい場合は上層階において部分的に柱降伏となるものの、履歴吸収エネルギーのほとんどが梁で負担され、柱の損傷が抑制されることなどを明らかにした。これらより層中間型柱脚機構が、骨組の安全性を高めるために高い実用性を有する構法であることを明示している。

第 4 章「層中間型柱脚機構を有する中低層鉄骨ラーメン架構の終局耐震性能」では、層中間型柱脚機構を用いたラーメン架構において、前章より層間変形が増大して、構成部材のいずれかの部材が崩壊に達する大変形時（層間変形角 0.07～0.1 程度）までの挙動を検証している。検証には水平剛性と部材降伏耐力がほぼ等しく、柱梁耐力比と板材の幅厚比をパラメータとした 3、6、9 層の骨組を用いた。検証方法はこれまでの第 2 章および第 3 章と同様に、静的増分解析と地震応答解析を行い、各骨組の部材崩壊時に至るまでの挙動を明らかにすることによっている。

その結果、層中間型柱脚機構を用いると最下層柱脚の曲げ降伏が発生しないことから、従来の埋め込み型柱脚に比べてより大きな層間変形角(0.07～0.1)に達するまで部材崩壊に至らず、大きな地震エネルギー吸収能力があることを示した。

同時に柱梁耐力比が小さい場合や幅厚比が大きな柱材を用いた場合は、上層階において部分的に柱崩壊に至ることがあり得ることも確認された。しかしこの場合でも上層階の部分的な柱崩壊は支持すべき柱の鉛直荷重が大きくないことから、建築物の倒壊などの大被害に直接結びつく可能性は少ないと考えられる。

さらにここでは全層完全梁降伏型メカニズムが形成されるために、必要な柱梁耐力比と幅厚比についても明示している。また新しい柱脚機構を用いた架構が、最大速度 75kine 程度の地震動を受けても部材崩壊をきたさないために必要な、柱と梁の累積塑性変形性能を示している。

第 5 章「部分架構モデルによる層中間型柱脚に関する基礎実験」では、前章までに有効性が検証された層中間型柱脚機構における、鉄骨柱支点部の性能を検証するために行った基礎実験について考察をする。

実験に用いた試験体は、層中間型柱脚機構の概念に基づいて考案された 3 種類の柱脚ディテールに加えて、従来の柱脚機構である埋め込み型柱脚としている。試験体の大きさは標準的な 3 階建鉄骨造建築物に想定される柱梁部材のサイズを 2/3 程度に縮小し、柱梁接合部を取り出した十字型部分架構モデルとしている。荷重の載荷方法は静的漸増繰り返し載荷として、試験体の柱頂部に加力している。

実験結果から従来の埋め込み型柱脚では層間変形角が 0.013 (1/77) 程度で柱脚が曲げ降伏したのに対して、層中間型柱脚機構は 0.05 (1/20) の層間変形角でも柱および、鉄骨柱接合部材の塑性化は見られず、安定した履歴挙動となることが確認できた。ただし、アンカーボルトの径が細いタイプでは、低い加力段階でボルト周囲のコンクリートが、ボルトからの支圧力により圧壊して、架構の水平変位が大きくなった。このことからアンカーボルトには適切な太さが必要であることが分かった。また部位別の履歴吸収エネルギーの比較では、埋め込み型柱脚の場合は柱が 40%、梁が 60%程度のエネルギー吸収比率であるのに対して、層中間型柱脚では梁の吸収エネルギーが 90%に達することが分かった。

第 6 章「層中間型柱脚機構を用いた鉄骨ラーメン構造実施例の評価」では、実建築物に層中間型柱脚機構を適用した純ラーメン構造の実施例について、耐震設計上の耐震性を評価するとともに、施工性、工期、工事費などについて評価を行なう。対象とした建築物は 2011 年 7 月に着工し、2012 年 3 月竣工予定の 7 階建ての小規模事務所建築と、2011 年 3 月に竣工した 4 階建ての中規模工場である。いずれも設計は関連する諸基・規準に準拠して、一般的に広く用いられている保有水平耐力計算法（計算ルート 3）によっている。

その結果より、層中間型柱脚機構を用いた骨組が終局時まで最下層柱脚の損傷を回避して、大変形時まで崩壊しないことを確認している。また一般に極稀地震と言われる地震動の最大速度 50kine を超える 75kine の地震動まで安定した振動性状を示すことを検証した。施工においては層中間型柱脚が、施工の難易度を改善し、工期短縮やコスト削減に寄与することを実証することができた。

第 7 章「結論」では各章で得られた研究成果を要約し、本論文の結論を述べている。

以上より層中間型柱脚機構を用いたラーメン構造が、従来型の露出柱脚に用いられる定着金物より簡便なディティールとしながら、埋め込み型柱脚と同等以上の耐震性能を有することを検証した。また層中間型柱脚機構を用いることで、部材の幅厚比を小さく抑えて、ある程度大きな柱梁耐力比を確保すれば、全層梁降伏型骨組の設計が比較的容易に可能であることを明示している。

論文審査結果の要旨

本論文は一般に用いられている構法では、不可避とされている最下層柱脚の損傷防止を目的とした新しい柱脚機構を提案し、その柱脚機構を用いた骨組が従来からの柱脚機構を用いたラーメン架構より優れた耐震性能を有することを明らかにしている。併せて望ましい降伏機構とされながら、実際には実現が困難とされている全層梁降伏型骨組を比較的容易に実現するための研究をまとめたものである。

論文は全6章で構成されている。

第1章は総論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第2章「軸力支持柱による鉄骨ラーメン骨組の損傷集中抑止効果」では、米国のラーメン構造に多く用いられている Gravity Column を例として、軸力支持柱の架構の層崩壊抑止効果を明らかにしている。

第3章「新しい柱脚機構を用いた中低層鉄骨ラーメン架構の耐震性能」では、架構に軸力支持柱を組み込まなくても架構の層崩壊抑止効果を発揮することのできる新しい柱脚機構を提案し、その有効性を示している。層中間型柱脚機構を用いたラーメン構造は、鉄骨柱支点部の高さを適切に調節することで、柱脚部の損傷を回避しながら層間変形角を制御できること、層間変形角 0.03 程度の大変形に達するまで全層完全梁降伏型メカニズムが形成されることなどを明らかにした。これらより層中間型柱脚機構が、骨組の安全性を高めるために高い実用性を有する構法であることを明示している。

第4章「層中間型柱脚機構を有する中低層鉄骨ラーメン架構の終局耐震性能」では、層中間型柱脚機構を用いたラーメン架構において前章より層間変形が増大して、構成部材のいずれかの部材が崩壊に達する大変形時（層間変形角 0.07~0.1 程度）までの挙動を明らかにし、設計地震力以上の想定外巨大地震が架構に作用した場合の崩壊時性能を明らかにしている。従来型の埋め込み柱脚では、柱脚で損傷が大きくなり、部材崩壊を生じるため、架構が倒壊に至る危険性があるが、層中間型柱脚機構では、梁のみで損傷が生じ、部材崩壊するため、安定した挙動を示すことを明らかにした。

第5章「部分架構モデルによる層中間型柱脚に関する基礎実験」では層中間型柱脚機構における鉄骨柱支点部の要求性能を検証した基礎実験について考察している。様々な鉄骨柱支点部を試作し、大変形領域まで鉄骨柱支点部が弾性挙動となり、かつピン接合となるための要求性能を明らかにした。

第6章「層中間型柱脚機構を用いた鉄骨ラーメン構造実施例の評価」では、実建築物に層中間型柱脚機構を適用した純ラーメン構造の実施例として、7階建ての小規模事務所建築と4階建ての中規模工場について耐震設計上の耐震性を評価するとともに、施工性、工期、工事費などを比較し、層中間型柱脚機構を適用した場合、耐震性、施工性、工期、工事費ともに優れていることを実証した。

第7章「結論」では各章で得られた研究成果を要約し、本論文の結論を述べている。

以上より層中間型柱脚機構を用いたラーメン構造が、従来型の露出柱脚に用いられる定着金物より簡便なディテールとしながら、埋め込み型柱脚よりも優れた耐震性能を有することを明らかにした。建築構造の耐震性能向上に新たな知見を与えたものであり、建築構造の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。