

外92-54

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

鉄筋コンクリート造柱の曲げ降伏後の
限界変形に関する研究

申請者

稻井 栄一

Eiichi Inai

平成 4 年 1 月

理 1653 (1923)

近年、経済性および居住性の良さから、鉄筋コンクリート造による高層あるいは超高層の集合住宅、オフィス等の建築物が建てられている。このような建築物では、部材の塑性変形に立脚した設計がなされ、特に1階の柱には、高層あるいは超高層化に伴う高軸力下での塑性変形能力が要求される。この要求を満たすため、高強度コンクリートの使用および各種の横補強筋〔拘束筋〕の使用が広く行われているが、現状では、コンクリートの種別、軸力の大小、横補強筋の材料強度や配筋量さらに配筋方法の差異を理論的に考慮できるような柱の変形性能の評価法は確立されておらず、実施設計では構造実験により変形性能の確認が必要である。より安全な建築物を合理的かつ経済的に設計するためには、柱の変形性能に関する理論的評価手法の確立が必要となっている。

柱は通常、曲げ降伏がせん断破壊に先行するように設計がなされ、曲げ降伏後の変形の限界を決定する物理的要因としては、①コンクリートの圧縮応力負担性能の劣化〔圧壊等〕、②圧縮側主筋の座屈、③引張側主筋の破断、④ヒンジ領域の拘束筋の破断、⑤ヒンジ領域のせん断破壊〔曲げ降伏後のせん断破壊〕、⑥付着割裂破壊が挙げられる。これらの要因のうち、②～⑥に示した要因に対しては、それらの破壊を防止するための設計手法の提案や使用鉄筋の制限等がなされており、①に示したコンクリートの圧縮応力負担性能の劣化により柱の曲げ降伏後の限界変形が決定される可能性は高いと言える。

コンクリートの圧縮応力負担性能の劣化に起因する限界変形に関して、コンクリートの材料特性や部材断面の曲げ挙動に着目した既往の研究から、柱あるいは梁の曲げ降伏後の限界変形を表す指標として、コンクリートの限界圧縮縁ひずみや限界曲率等の提案が数多くなされている。しかしながら、これら提案された限界ひずみや限界曲率と部材の限界変形との関係は必ずしも明確にはなっていない。

本論文は、曲げ降伏が先行し、かつ、コンクリートの圧縮応力負担性能の劣化によりその変形性能が決定される柱を対象に、物理的意味を明確に持つ柱部材の曲げ降伏後の限界変形点の定義を行い、柱の軸力およびコンクリートの拘束性状がこの限界変形点に及ぼす影響をコンクリートと鉄筋の材料特性に基づいた理論的解析により明らかにするとともに、限界変形時における柱の部材角の算定法を示したものである。

本論文は、5章により構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章は序論であり、本論文の研究背景と目的、既往の研究、および、本論文の構成と概要を述べている。

第2章では、まず、柱の曲げ降伏後の限界変形を定義している。柱の実験結果によれば、曲げ降伏後破壊に至る変形領域において、引張ヒンジ領域の伸び〔ヒンジ領域における引張側主筋の伸びに相当する〕には限界があり、この限界点を

境に柱のエネルギー吸収性状は急変する。このことから、引張ヒンジ領域の伸びの限界を“安定限界”と名付け、曲げ降伏後の限界変形として定義した。

次に、柱のヒンジ領域の挙動は、曲げ降伏後破壊に至るまで、本論文に示したトラスモデルにより表し得ることを示した。このトラスモデルの変形機構によれば、大変形領域における柱の部材角は、ヒンジ領域における曲げ変形成分とせん断変形成分を併せてヒンジ領域の回転角で近似できる。さらに、ヒンジ領域全体を一つの危険断面として捉えれば、大変形領域の柱の部材角は危険断面の曲率、すなわちヒンジ領域の平均曲率と一定な降伏ヒンジ長さの積で近似し得る。このことより、危険断面の曲率から柱の部材角を推定する算定式を得た。なお、危険断面では“安定限界”は引張鉄筋のひずみの限界に対応することになる。

引張鉄筋のひずみに限界が存在すること、および、この現象はコンクリートのひずみ軟化による圧縮応力負担性能の劣化に起因することは既往の研究により明らかにされている。しかしながら、本論文では、コンクリートおよび主筋の材料特性をより一般的に表し得る数式を用い、平面保持を仮定した断面の曲げ解析に基づき、この現象を理論的に明らかにした。また、安定限界時〔引張鉄筋のひずみの最大時〕における危険断面のコンクリートの圧縮縁ひずみ、引張鉄筋のひずみ、中立軸位置および曲率に関し、既往の算定式をより一般化した算定式を導くとともに、柱の軸力およびコンクリートの拘束性状が、それら各種ひずみ、曲率等に及ぼす影響を図と式を用いて示した。例えば、引張鉄筋量と圧縮鉄筋量の等しい柱では、安定限界時の危険断面の各種ひずみ、中立軸位置および曲率は、近似的に、危険断面のコンクリートの応力-ひずみ関係とコンクリートの最大圧縮強度に対する断面の軸応力の比〔軸力比〕だけを用いて表すことができる。軸力比が小さいほど、あるいは、コンクリートの拘束が良いほど、安定限界時の曲率は大きくなる。

なお、安定限界時の柱の部材角は、まず安定限界時の危険断面の曲率を求め、それを部材角の算定式に代入することにより求めることができる。

第3章では、まず、第2章において定義した“安定限界”的限界変形としての有意性およびその算定法の妥当性を検証するために行った柱の実験の詳細を示した。実験では、柱に軸力、曲げおよびせん断力を作用させた曲げせん断実験とともに、コアコンクリートの圧縮特性〔拘束性状〕を把握するために柱の中心圧縮実験、また、断面の純粋な曲げ挙動を把握するために柱の純曲げ実験を行った。

柱の限界変形に関する主要な実験結果は以下の通りである。①純曲げ実験における軸力比の低い柱試験体では、引張側主筋の伸びは破壊前のある変形点において最大になった。この現象は、安定限界時の現象に対応すると考えられる。②一方、純曲げ実験および曲げせん断実験における軸力比の高い柱試験体では、繰返し載荷の影響により耐力低下が顕著に進行した後、破壊前のある変形点において、

引張側主筋の伸びは最終履歴ループの中での上限に達した。ただし、この上限値は最大値ではない。なお、この現象は安定限界時の現象と極めて類似していることから、最終履歴ループの中での引張側主筋のひずみの上限を“擬似安定限界”と名付けた。③安定限界あるいは擬似安定限界以後、柱試験体の挙動は極めて不安定になり、その直後、軸力を保持できなくなり崩壊した。以上のことより、“安定限界”および“擬似安定限界”は、柱の限界変形として、極めて重要な意味を持つことを明らかにした。

次に、柱試験体に生じた降伏ヒンジ長さの評価を行うとともに、第2章に示した柱の部材角の算定式の検証を行った。

さらに、柱の中心圧縮実験より得られたコアコンクリートの応力-ひずみ関係を用い、平面保持を仮定したファイバーモデルにより柱断面のモーメント-曲率関係を求め、純曲げ実験で得られたモーメント-曲率関係および曲げせん断実験で得られたヒンジ領域のモーメント-平均曲率関係とそれぞれ比較を行った。曲げ降伏後の耐力低下の進行状況および安定限界時、擬似安定限界時の曲率に関し、解析結果は実験結果と良い対応を示した。このことより、コアコンクリートの圧縮特性を推定する上で柱の中心圧縮実験が持つ有効性、ならびに、危険断面の解析に平面保持の仮定を用いることの妥当性を検証した。

第4章では、まず、“擬似安定限界”に至った軸力比の高い柱試験体においては、繰返し載荷による顕著な耐力低下とともに軸方向ひずみの累積が進んでいたことを実験結果により指摘し、この現象は、危険断面における“圧縮ひずみの重複に基づくコンクリートの圧縮応力負担性能の劣化現象”により生じていたことを、繰返し載荷を受ける危険断面のひずみ履歴とコンクリートの履歴挙動の特性に関する検討から明らかにした。なお、このコンクリートの圧縮応力負担性能の劣化現象は、ひずみ軟化による劣化とは異なり、軸力比の高い柱が繰返し載荷をうける場合のみ生じるものである。

次に、擬似安定限界時に柱試験体に観察された現象を、圧縮応力負担性能の劣化を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係を用い、危険断面の解析から理論的に明らかにした。さらに、擬似安定限界時の危険断面の圧縮縁ひずみおよび曲率の算定法を導き、安定限界と擬似安定限界の関係を図と式を用いて示した。略算的には、擬似安定限界時の圧縮縁ひずみは安定限界時の圧縮縁ひずみにはば一致する。また、擬似安定限界時の曲率は、載荷履歴に大きく依存し、繰返し載荷によりコンクリートの圧縮応力負担性能が劣化した分だけ安定限界時の曲率より小さくなる。最後に、安定限界時および擬似安定限界時の危険断面の圧縮縁ひずみと曲率に関し、理論値と実験値の比較を行い、本論文に示した算定法の妥当性を検証した。

第5章は、前章までの結果を総括した本論文の結論である。