

論文の内容の要旨

論文題目 中低層鉄骨ラーメン構造の耐震性評価に
おける構造モデルと入力地震動の研究

氏 名 張 惠 雲

中低層鉄骨ラーメン構造は日本の住宅建築と小規模商業建築として多く使用されているが、1995年兵庫県南部地震のような大地震に対して要求される耐震性の評価方法は現在でも不明な点が多い。それは、通常の設計業務では中低層鉄骨ラーメン構造に対する応答解析を行わないためである。また、応答解析を行うとしても、その耐震性評価の結果が構造モデルと入力地震動によって大きく変わる可能性も否定できない。中低層鉄骨ラーメン構造の広汎な普及を考えると、その耐震性評価に及ぼす構造モデルと入力地震動の影響をすみやかに究明すべきである。本論は上述の観点に立ち、中低層鉄骨ラーメン構造の耐震性評価に対し一連の検討を展開した。

中低層鉄骨ラーメン構造の損傷形態は、それに使用される冷間成形角形鋼管柱の局部座屈劣化に深く関わる。また、床スラブの合成効果によって梁の強度が高まり、柱が先に降伏して破壊する可能性が出てくる。これらの実情を考え、本論は弱柱型骨組を検討対象とし、冷間成形角形鋼管柱の局部座屈劣化を応答解析に反映することにした。そして、検討対象とする単層骨組と五層骨組それぞれをフレームモデルと質点系モデルにモデル化して、構造物への総入力エネルギーを固定して時間軸上の波形分布が異なる模擬地震動の限界加速度倍率を応答解析により求めた。解析結果の比較により、中低層鉄骨ラーメン構造のフレームモデルと質点系モデルによる耐震性評価の相違、弾性限界、劣化限界および倒壊限界に至らせる地震動の強さや波形などの入力特性をさらに究明した。上述の検討から得られた結果を学位論文として以下のようにまとめた。

本論文は全六章および付録 A、付録 B より構成されている。

第一章「序章」では、研究の背景と目的、既往の研究および本論の構成について記述している。

第二章「構造モデルの設定と応答解析の方法」では、構造モデルの設計条件をはじめ、冷間成形角形鋼管柱の局部座屈劣化挙動を追跡できる解析プログラムの作成まで説明している。

具体的に、現行の建築設計法を満たすような一般的な設計条件をまず述べ、これらの設計条件を用いて対象構造物を設定した。続いて、材端に塑性回転バネを有する部材モデルを採用し、冷間成形角形鋼管柱の曲げ降伏や局部座屈劣化の弾塑性挙動を追跡できる部材モデルを作成した。そして、中低層鉄骨ラーメン構造の弾性限界、劣化限界および倒壊限界を定義し、それぞれの判定基準を記述した。最後に、研究の目的に応じて作成した平面骨組の解析プログラムのフローチャートを参考として提示した。

第三章「入力地震動の設定」では、入力地震動の考えをはじめ、模擬地震動の作成法、作成した模擬地震動の特性を記述している。

時間関数である地震動の波形記録はフーリエ変換により、周波数領域での振幅スペクトルおよび位相スペクトルに展開できる。地震動のフーリエ特性を利用して研究に必要な模擬地震動の作成がしばしば行われている。地震動のフーリエ振幅に関しては従来から多く研究され、地震動のフーリエ振幅スペクトルと構造物への総入力エネルギー換算速度との対応関係は既に示されている。それとは対照的に、地震動の位相特性とその非定常性との関連性が注目されたのは比較的最近のことであり、それが構造物の応答性状に与える影響はまだ十分研究されていない。本論はこの点について追究した。ここではフーリエ振幅スペクトルを固定して位相差分を五段階に変化させ、直下型から海洋型までの複数の模擬地震動を作成した。これらの模擬地震動を第四章と第五章の応答解析に用いられ、入力地震動が中低層鉄骨ラーメン構造の耐震性評価に及ぼす影響を探究した。

第四章「単層多スパン骨組の地震応答性状」では、層せん断力と層間変形の関係を同じに設定した単層フレームモデルと一質点系モデルの応答解析を行い、模擬地震動の限界加速度倍率とそれに対応する総入力エネルギー換算速度を求めた。この検討から得られた研究結果を以下に整理する。

簡単な一質点系モデルを用いて構造物の耐震性を評価する例は少なくない。

しかし、その耐震性評価の結果は、精密な単層フレームモデルと異なる可能性がある。本章ではこの点について検討した。応答解析の結果から、適切に置換されれば、簡単な一質点系モデルを用いて単層骨組の耐震性を弾性限界、劣化限界、倒壊限界のいずれにおいても精度よく評価できることが分かった。無減衰弾性構造物の地震最大応答と地震終了後の自由振動の振幅とは高い相関があるため、地震動のフーリエ振幅スペクトルを固定すれば、弾性限界加速度倍率は地震動の波形によらずほぼ同じになる。

直下型地震動を受けると構造物は単調的挙動をし、小さなエネルギー入力で劣化限界に至る。それとは対照的に、海洋型地震動を受けると、構造物が小さな振幅の塑性変形を繰り返すので、劣化限界に至らせるには大きなエネルギー入力が必要となる。このため、地震動の波形が海洋型に近づくと、劣化限界加速度倍率は著しく上昇する。

構造物への総入力エネルギー換算速度は、構造物の一次固有周期に対応する地震動のフーリエ振幅で近似できる。この理論値と比較した結果、劣化度合いが緩やかである構造物に対する直下型地震動のエネルギー入力は低減することのに対し、海洋型地震動のエネルギー入力はやや増加する。

地震動の波形が直下型に近づくと、構造物は倒壊限界に対するエネルギー吸収が減少する。また、で述べたように劣化度合いが緩やかである構造物に対する直下型地震動の総入力エネルギーが低減する。この二つが相殺することにより、地震動の波形が直下型から海洋型まで変化しても、倒壊限界加速度倍率はあまり変わらない。

第五章「多層多スパン骨組の地震応答性状」では、構造系の弾性一次固有変形で比例載荷したときの各層の層せん断力-層間変形がほぼ同じである五層フレームモデルと五質点系モデルを用いて応答解析を行い、模擬地震動の限界加速度倍率とそれに対応する総入力エネルギー換算速度を求めた。この検討から得られた結果を以下に整理する。

これまでの研究では、簡単な多質点系モデルを用いて多層骨組の耐震性を評価する例は少なくない。しかし、その耐震性評価の結果は、精密な多層フレームモデルと異なる可能性がある。本章ではこの点について検討した。応答解析の結果から、適切に置換されれば、簡単な多質点系モデルを用いて多層骨組の耐震性を弾性限界、劣化限界、倒壊限界のいずれにおいても精度よく評価できることが分かった。

研究対象とする五層骨組は通常の構造設計と同じに設定し、その部材断面を二、三層ごとに变化させている。部材断面の不連続的な変化によって五層骨組の第一層と第三層が比較的弱くなる。応答解析では、これらの弱層に損傷が集中し、しかも、構造系全体の限界性能はこれらの弱層の弾塑性挙動によってほぼ決まる。結果的に、五層骨組の地震応答性状は単層骨組と大差がないことが分かった。

無減衰弾性構造物の地震最大応答値と地震終了後の自由振動の振幅とは高い相関があるため、地震動のフーリエ振幅スペクトルを固定すれば、五層骨組の弾性限界加速度倍率に及ぼす地震動の位相特性の影響が小さい。

五層骨組は直下型地震動を受けると単調荷重的挙動をし、小さなエネルギー入力で劣化限界に至る。それとは対照的に、海洋型地震動を受けると、各層が小さな振幅の塑性変形を繰り返すので、倒壊限界に至らせるには多くのエネルギー入力が必要となる。このために、地震動の波形が海洋型に近づくにつれ、五層骨組の劣化限界加速度倍率が著しく上昇する。

地震動の波形が直下型から海洋型まで変化すると、五層骨組の倒壊限界加速度倍率はあまり変わらないのに対し、それに対応する総入力エネルギー換算速度は増加する。この結果は、第四章で述べた劣化度合いが緩やかな構造物に対する直下型地震動の総入力エネルギーの低減によるものと考えられる。直下型地震動の一撃入力によって複数の層がほぼ同時に降伏や耐力劣化をするため、構造系全体の損傷が単一の層に集中しにくい。一方、海洋型地震動は繰り返し荷重と同様に、先に降伏した層への損傷集中を促進する。多層構造物において弱層への損傷集中は、直下型地震動よりも海洋型地震動のほうが上述の荷重効果によってより激しくなる。

第六章「結論」では、各章において得られた結果をまとめて記している。

付録 A 「冷間成形角形鋼管柱の局部座屈性状に関する文献調査結果」では、これまでの参考文献にある冷間成形角形鋼管柱の曲げ圧縮による局部座屈の実験を整理した。これらの実験結果を参考にして、柱の座屈劣化モデルを第二章で作成した。

付録 B 「劣化構造物に対する直下型地震動のエネルギー入力の低減について」では、弾性剛性の塑性化によって構造物が長周期化し、直下型地震動がそのフーリエ振幅スペクトルの設定どおりにエネルギー入力しないことを数値解析により検証した。これにより、第四章と第五章の倒壊限界に対する地震応答がもっとも解明された。