

(論文内容の要旨)

わが国の鋼構造建物の耐震設計では、極大地震時に鋼材の塑性化を許容し、安定した履歴挙動を持つ部材のエネルギー吸収に期待した崩壊メカニズムが形成されることをもって、耐震安全性を確保している。一方で、現実の鋼構造建物が有する耐震性能を論じるときには、これら建物に必然的に取り付く外壁や間仕切り壁の非構造部材の損傷が見逃せない。さらに、建物が設計で期待したとおりの耐震性能を示すかどうかは、非構造部材が構造性能に及ぼす影響にも依存する。しかしながら、非構造部材の損傷や構造体との相関に関わる研究成果は極めて乏しい。このような背景のもと、非構造部材を有する実大 4 層鋼構造骨組の震動台実験を通じて、鋼構造建物全体の耐震性能を総合的に評価した結果をまとめた本論文は、全 8 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、本研究の背景とそれを解決する実験手法、論文全体の構成を記述している。

第 2 章では、震動台実験に用いた試験体の設計とその特徴、計測方法、入力地震動について述べている。試験体は実大 4 層純ラーメン構造の鋼構造建物で、床スラブや ALC パネル外壁、間仕切り壁を取り付けることから、実際の建物を忠実に再現している他、現行の耐震基準に即して終局状態で梁パネル複合型の全体崩壊メカニズムが形成されるように設計されている。入力地震波には現行の設計基準における入力レベルに加えて、それを遙かに上回る JR 鷹取駅記録波を採用し、柱梁の耐力比が柱に対して最も不利となる 45° 方向が主軸となるように入力方向を選定している。

第 3 章では、震動台実験の結果から構造体の応答を分析している。試験体の剛性計測の結果から、事前解析の仮定や計測方法が概ね妥当であることを確認したうえで、入力レベルごとの試験体応答の特徴を論じている。設計地震動レベルでは、梁パネル複合型の全体崩壊メカニズムの形成が進行し、耐震設計上の十分な水平耐力を有していることを確認したが、同時に柱梁耐力比の検討における安全率が必ずしも十分でないことも明らかにした。また、試験体が崩壊に至った加振結果より、幅厚比の大きな角形鋼管柱は全塑性耐力到達後の局部座屈による耐力劣化が早期に生じるため層崩壊を誘引しやすく、建物の耐震余裕度を低下させる主因となりうると結論づけている。

第 4 章では、試験体内の ALC パネル外装材に焦点を当て、その地震時挙動と損傷過程について述べている。ALC パネル単体の要素実験から、 0.015rad 以下の変形角では ALC パネルは水平力を負担することなく損傷もほとんど生じないこと、開口補強材がフレームモデルの剛性に応じた水平力を負担すること、 0.15rad まで ALC パネル全体の脱落に至らないことなどを示したうえで、震動台実験結果について論じている。まず、最大層間変形角 0.02rad 近くまで ALC パネルは軽微な損傷にとどまり、面外・面内回転ともに層間変形によく追従するなど、縦壁ロッキング構法がもつ変形追従性能の高さを実証している。次いで、その追従性の限界が 0.05rad 付近にあり、ALC パネル外装材の脱落を防止するには建物の層間変形角を 0.05rad 以下に抑えることが重要であると論じている。

第5章では、間仕切り壁、鋼製扉、内壁、天井といった内装材に焦点を当て、その地震時挙動や建物応答と損傷の関係について述べている。内装材の納まりには、耐震性に配慮した耐震仕様と在来工法による標準仕様の二種類を用意し、その損傷状況を比較した結果、耐震仕様の損傷が相対的に少なく耐震性能に優れていることを確認している。また、加振中の間仕切り壁の変形を計測した結果から、層間変形に対する追従機構が壁の形状や部位・納まりにより異なることを明らかにし、目標性能に応じて適切なクリアランスをとる必要があることを示している。天井については加振中に大きな変形・加速度が生じることはなく、損傷も観察されなかったことから、その耐震性に問題がないことを確認している。

第6章では、内装材単体を試験体とする振動台実験を実施し、その結果から、間仕切り壁や天井の損傷過程と力学特性について述べている。間仕切り壁は、直交壁や扉の影響によってロッキング回転を主体として層間変形に追従し、直交二方向同時加振による影響が見られないこと、計測された間仕切り壁耐力の履歴曲線が、その不可逆的な損傷によってスリップ型の挙動となることを明らかにしている。さらにこの結果を一般の建物に適用すると、間仕切り壁に損傷が生じる際の剛性と耐力は、建物全体の10%以上に及び、精緻な構造解析を行ううえでは無視できないオーダーであることを明らかにしている。また、天井については、矩形の在来工法を用いた天井の耐震性能は極めて高く、耐震性に配慮した天井では目標性能に応じたクリアランス確保が性能発揮の必要条件となることを示している。

第7章では、震動台実験結果から得られた非構造部材の負担せん断力を分析し、その力学特性や建物の応答に及ぼす影響について述べている。非構造部材の耐力履歴については、弾性剛性はその層が経験した最大変形角に依存し、かつ一定の降伏耐力を持つ弾塑性要素、等価減衰定数が振幅に比例して増加する粘性要素、間仕切り壁による摩擦要素とスリップ要素を組み合わせることで表現できることを示している。さらに、この力学モデルを床面積に対する壁長さを使って一般化する手順を示し、非構造部材の影響を設計において簡便に評価する方法を提示している。また、非構造部材の建物全体の応答に対する影響は、等価粘性減衰定数にして1~5%に相当するという実用的情報を提供することをもって、非構造部材は耐震性能余力として考慮に値する要素であると結論づけている。

第8章は結論であり、本論文で得られた成果を要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、非構造部材を有する実大 4 層の鋼構造骨組に対する震動台実験を実施し、構造設計で想定する地震動入力から建物が崩壊に至る過大入力までの各種入力レベルに対する、構造骨組がもつ応答性状、非構造部材の損傷特性、非構造部材の力学挙動、構造体と非構造部材の相関に関する研究成果をまとめたものである。本論文から得られた主な成果は次のとおりである。

1. 現行の耐震基準のもとに設計された、4 層純ラーメン構造で内外装材を有する実大鋼構造骨組を震動台上で加振し、小地震から極大地震に至るまでの建物の地震時応答を詳細に計測した。その結果に基づいて、設計地震動レベルでは期待通りの全体崩壊メカニズムが形成されるものの、それを上回る過大入力時には、個々の部材の耐力上昇あるいは耐力劣化が設計での想定範囲を超え、崩壊メカニズムが全体崩壊型から層崩壊型へと変化し、建物の鉛直荷重支持能力が失われる完全崩壊に至ることを明らかにした。
2. 震動台実験での内外装材の損傷観察と変形挙動の計測から、実際の建物における非構造部材の地震時挙動をとらえた。その結果、ALC パネル外装材は変形追従性に優れるものの、建物の過大変形時には脱落の危険性が高いこと、乾式内装材は比較的小さい変形から損傷が生じるが、取り付け詳細の違いにより損傷に顕著な差が生じること等の実証的な知見を得た。
3. 震動台実験での計測結果より非構造部材が負担するせん断力を導き出し、その力学特性を明らかにするとともに、非構造部材の履歴モデルを構築したうえで、それが建物の全体挙動に与える影響の定量化をはかった。

以上、非構造部材を有する実大鋼構造骨組の震動台実験を行うことから、極大地震に至るまでの鋼構造建物の耐震性能を実大建物レベルで検証するとともに、非構造部材の損傷と建物の地震時挙動の関係やその力学特性と構造体への影響を明らかにした本論文は、建築物の耐震性能向上をめざす構造設計や今後の耐震工学の研究に対して、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 21 年 10 月 26 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。