

(論文内容の要旨)

近年の建築構造への要求性能の多様化を受けて、本論文ではそれらに応えるための新しい指標として、地震後の建物の残留変形に着目し、その低減を研究目的としている。まず残留変形に関して、その許容値を文献調査と実測調査から明らかにしている。次いで、一部で研究が進んでいる、建物の残留変形を低減するためにセルフセンタリング機構 (SC) に着目し、これを柱脚に適用 (SC 柱脚の開発) することを詳細に検討している。さらに、SC 柱脚の関連課題として柱脚のせん断抵抗機構を検討するとともに、この検討に基づいて、SC 柱脚と基礎に緊結しない柱脚との併用構造システムの可能性を考察している。本論文は以上の結果を全 9 章でまとめたものである。各章の要旨は以下の通りである。

第 1 章は序論であり、現在の耐震工学における要求性能の多様化や省エネルギー化の必要性と、それらの解決法の一つとしての残留変形の位置づけを明らかにしている。要求性能としては、地震直後の避難性、地震後の損傷制御性や継続使用性が挙げられることを指摘するとともに、残留変形問題に対処するための構法として SC 柱梁接合部を紹介し、SC を柱脚に導入する効果と利点を述べた。

第 2 章では、建物の残留変形の許容値を検討している。建築構造分野や心理学分野等さまざまな側面からの既往研究や、建築実務で使用されている設計指針等を参照して残留変形の許容値を探索した。また文献調査結果を裏付けるために、実建物の使用者を対象としたアンケート調査と当該建物の床と柱の傾きを実測調査した。これらの分析の結果に基づいて、許容残留変形として 0.005rad が妥当であることを検証した。

第 3 章では、本研究で検討する SC 柱脚の建物全体に及ぼす残留変形低減効果を確認するために、中低層 (3 層、6 層) の鋼構造建物を対象とした時刻歴応答解析を実施している。SC 柱脚の挙動には、SC 特有のフラッグ型履歴挙動を想定した。検討した建物は、柱脚を SC として上部構造は通常の剛接合鋼構造骨組とした骨組、またその比較対象としての通常の剛接合鋼構造骨組、さらに上部構造に SC 柱梁接合部を導入した骨組の 3 種類である。SC 柱脚の耐力を変数とした一連の解析から、SC 柱脚の性能と骨組全体の残留変形低減効果の関係とその有効性を検討した。解析の結果から、3 層骨組に関して、適切な性能を有した SC 柱脚を用いることで、最大変形を剛接合鋼構造骨組と同程度に抑制しつつ、各層の残留変形を半分以下に低減できること、一方 6 層鋼構造建物に関しては、最大変形は 3 層と同様に抑制できるものの、残留変形の低減効果は小さく、SC 柱脚だけの利用は必ずしも有効ではないことを明らかにした。

第 4 章では、第 3 章の結果を受けて柱脚部にフラッグ型履歴を付与する SC 柱脚を開発している。この柱脚は鋼製基礎梁と H 形鋼柱の使用を前提とし、超弾性要素として導入した PC 鋼棒を用いて柱と基礎梁を緊結し、同時に柱脚部でのエネルギー消費のための鋼製ダンパーを付与したものである。曲げに対しては、柱の片側フランジ底面が中心となり柱が基礎梁上を回転することで PC 鋼棒とダンパーが伸び、第 3 章で想定したフラッグ型履歴挙動を実現させている。開発した SC 柱脚の性能を確認するため、 $2/3$ スケール試験体を用いた準静的漸増繰返し載荷実験を実施した。この実験の結果、部材回転角 0.03rad 後も本柱脚に生じる残留変形は 0.003rad 未満と、第 2 章で規定した許容残留変形以下に収まることを確認した。また本柱脚の剛性と耐力の評価式を提案し、おおよそ 10% 以内の誤差で実験結果を評価できることを明らかにした。

第5章では、第4章で開発したSC柱脚の改良を、曲げ耐力の増大と2軸曲げ載荷対応という視点にたつてめざしている。最大耐力については、第4章で開発したSC柱脚に対して柱底面幅を増やしPC鋼棒径を大きくすることによって、第3章の数値解析で求めたSC柱脚に付与すべき最適値の実現を可能にした。また2軸対応として二つの離間箇所を設け、柱強軸・柱弱軸方向載荷において異なる箇所が離間する柱脚形式を考案した。この改良SC柱脚の性能を、第4章と同様の載荷実験で検討した結果、各方向載荷に対してそれぞれ所定の耐力が得られること、剛性確保についてはなお改良の余地があること、を明らかにした。

第6章では、第4章、第5章で開発したSC柱脚のせん断抵抗機構に着目し、柱脚部のベースプレート鋼板と鋼製基礎梁鋼板の間の静止摩擦係数を検討している。またSC柱脚基礎にコンクリート基礎を用いた場合も想定して、鋼と基礎モルタの間の静止摩擦係数にも検討の対象を拡げている。それぞれの柱脚を模擬した材料から構成される板を製作し、それらに所定の圧縮力を作用させた状態で正負漸増の水平力を加えて静止摩擦係数を測定した。この実験の結果、最初のすべりにおいて鋼と鋼では静止摩擦係数は約0.25、鋼とモルタルでは静止摩擦係数は約0.5であるが、その後繰返しすべりを経験すると静止摩擦係数は増大し、最終的に鋼と鋼では約0.4、鋼とモルタルでは約0.8に収束するという結果を得た。それぞれの摩擦面に関する静止摩擦係数に対して、「凝着理論」と「掘り起こし理論」を援用した評価式を導くとともに、この評価式が誤差10%以下の精度で実験値を再現できることを明らかにした。

第7章では、第6章に引き続き鋼とモルタルの摩擦を対象に、その動摩擦挙動を振動台実験から検討している。振動台にコンクリート基礎を模擬した土台を4台設置し、その上に柱脚を模擬した鋼製部材を配した鋼製フレームとコンクリート錘を載せることから、より実建物の柱脚に近い条件で動摩擦挙動を検証した。入力には正弦波を用い、最大振幅、振動数、入力方向（水平1方向と鉛直方向）の3種類を変数として、鋼とモルタルの動摩擦特性、摩擦係数の繰返しすべり依存性や鉛直軸力依存性を検討した。その結果、本論で検討した条件下では、鋼とモルタルの静止摩擦係数と動摩擦係数は等しく、その値は約0.8であることを実証した。

第8章では、第6章、第7章の結果を踏まえて、柱脚を基礎に緊結しない、「置くだけの柱脚」の実現可能性を検討している。この柱脚は、摩擦力によってせん断力に抵抗し、建物自重に起因する離間以前は固定柱脚、離間後はピン柱脚として挙動する。外周柱をSC柱脚とし、中柱を「置くだけの柱脚」とした併用構造を考え、この構造形式の性能を3層と2層の鋼構造骨組に対する時刻歴応答解析によって検討した。その結果、3層骨組では残留変形低減効果は限られているが、2層骨組に対しては最大変形と残留変形双方に関して、本併用構造の有効性が確認された。

第9章は結論であり、各章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、地震後の建物の残留変形に着目し、許容残留変形の定量化と、残留変形の低減をめざした新しい機構の開発をめざした内容である。本論文から得られた主たる知見は下記のとおりである。

1. 許容残留変形の定量化：地震後無補修で継続利用できる残留変形の許容値に関連して、建築構造や施工という視点から施工時精度と避難時安全性を、人間心理という視点から傾きに対する居住者心理と居住性を、それぞれ取り上げた調査分析を実施するとともに、現存する建物に対する実測調査とその建物への居住者への聞き取り調査から、地震後の建物の許容残留変形は、安全性、修復性、人間心理いずれの観点からも約 0.005rad であることを突き止めた。
2. 残留変形低減のための構造システムの開発：建物全体の残留変形を低減する構造形式として、柱脚部にセルフセンタリングと称する機構を組み込んだ新しい構造形式の開発をめざした。この機構は、PC 鋼棒を利用した弾性要素と履歴ダンパーを用いたエネルギー消費要素を併用して、最大変形を抑制しつつ大変形後も弾性要素がもつ原点復帰力によって残留変形を最小化するものである。この機構を組み込むことによって達成できる残留変形低減度を、機構に付与する剛性、耐力、エネルギー消費能力を関数とした詳細な時刻歴応答解析によって明らかにした。またこの解析結果を参照しつつ、セルフセンタリング機構をもつ柱脚の具体化に取り組み、一連の準静的繰り返し実験を通じて、 0.03rad の繰り返し回転に対しても安定した履歴を保持しつつ、荷重の除去によって原点に復帰できる柱脚システムの開発に成功した。
3. 鋼板とモルタル基礎の摩擦抵抗：上記の柱脚システム開発の一環として、柱脚部の摩擦によるせん断抵抗を詳細に検討するために、鋼（ベースプレート）とモルタル（基礎）の摩擦特性を、油圧ジャッキを用いた準静的実験と、振動台を用いた動の実験によって詳細に検討した。これらの実験から、静止摩擦係数と動摩擦係数はほぼ等しく約 0.8 であること、多数回の繰り返しすべりに対しても摩擦係数は一定値を保ち続けることを明らかにした。

以上、耐震設計における新たな指標として残留変形に着目した本論文は、この指標に対する許容値を定量化するとともに、残留変形を最小に留めるための新しい構造システムの開発しそれを詳細な実験から検証するなど、耐震工学の高度化に寄与するところは大きい。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 1 月 28 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。