

	てらもと なおふみ
氏名	寺本 尚史
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成11年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)都市・建築学専攻
学位論文題目	鉄筋コンクリート造耐震壁の擬似動的実験と非線形有限要素解析
指導教官	東北大学教授 小川 淳二
論文審査委員	主査 東北大学教授 小川 淳二 東北大学教授 柴田 明德 東北大学教授 山口 育雄 東北大学助教授 井上 範夫

論文内容要旨

地震動は、発生状況、震源距離、地盤特性等によって特徴が大きく異なる。地震動が構造物に与える特性を表す指標としてよく用いられるものに応答スペクトルがあるが、震源に近い場合に見られる継続時間の短いパルス的な波と、震源から遠く建物が何度も繰り返し地震荷重を受ける継続時間の長い波とでは、同一の応答スペクトルを仮定してもその応答パスの違いから、構造物への損傷状況や応答変形等に様々な違いが表れる可能性がある。

地震時における構造物の弾塑性挙動を明らかにする方法として、振動台を用いた動的加力実験や、応答計算の結果を基に静的加力を行う擬似動的実験(オンライン実験)による手法が用いられる。このうち構造物の動的効果をみるには振動台実験が最も効果的であるが、振動台の大きさや加振の能力に制約があること、試験体が壁である場合の面外方向の応答など実験目的と異なる振動の制御が静的実験と比べ格段に難しいことから試験体の規模、形状に著しい制約がかかってしまうという問題がある。これに対して擬似動的実験は、静的加力装置を用いて実験を行うことができるため、振動台実験に比べると試験体の大きさや耐力等の制約が少なく済む。また、ひずみ速度等の動的パラメータを再現することは非常に困難であることから、動的応答状況を厳格に再現することはできないものの、入力波が数十秒程度の実験を数時間かけて行うため、瞬時に実験が終わってしまう動的実験と比べて実験中のひび割れ状況等を観察することが可能であるなど、静的実験ならではの利点を持つ。

一方、載荷パスを事前に設定する通常の静的実験と比べた場合、同一の変形まで載荷を行った場合でも、擬似動的実験の方がより地震時の応答に近い載荷パターンとなるため、実際の損傷により近い状況を再現することができる。近年、構造物の地震時の最大応答変形量を予め想定した上で建物を設計する性能規定型の設計手法が新たに検討されているが、この手法は地震時の応答状況をより詳細に分析、検討する上で非常に適した手法であるといえる。

本研究では、曲げせん断破壊型耐震壁を対象とし、継続時間の異なる地震波を入力した場合の応答性状の違いを検討することを目的として、復動型オイルジャッキを用いた擬似動的実験を行った。鉄筋コンクリート(RC)造耐震壁を対象とした擬似動的実験はいくつか行われているが、これらは主に原子力建屋を想定したせん断破壊型のものである。これに対し本研究では、せん断スパン比が比較的大きい曲げ破壊型のもを対象とした実験を行った。

また、地震動が建物に与える破壊力を表す指標の一つとして、エネルギー入力による検討があり、エネルギー入力の激しさと建物の損傷の関係についての研究が行われている。本研究では、単位時間におけるエネルギー増分を比較することにより、応答性状についてさらに詳細に検討を行い、最大応

答変形値など、継続時間の異なる入力波を用いた場合の応答状況の違いについてエネルギー的観点から考察を行った。

そして最後に、コンピュータの数値解析により実験時の応答状況を詳細に比較・検討することを目的として、2次元の非線形有限要素手法 (Finite Element Method) を用いた弾塑性応答解析を行った。

以下に各章における概要を示す。

第1章は序論であり、目的・背景および本論文で行った研究に関してこれまでに行われている既往の研究について述べた。

第2章では試験体および擬似動の実験についての概要について述べた。実験の対象とした試験体は、中間梁を有する2層の曲げ破壊型連層耐震壁で、試験体部分の寸法は横幅 84cm×高さ 132cm、壁厚 6cm であり、試験体の実験時における加力高さからのせん断スパン比は 2.15 である。試験体部分の寸法は継続時間の異なる波の応答性状を比較するため、同一形状で同一材料を使用したものを2体製作した。擬似動の実験システムは復動型油圧ジャッキ、ロードセルの他に、油圧ユニット、ジャッキ制御用コントローラ、デジタル多点測定装置、制御・応答計算・変位記録用コンピュータで構成される。油圧ジャッキは面内、面外方向の水平2方向に設置し、面外方向については変位を零に保つことにより、面外方向への倒れ込みを防いだ。また軸方向加力は行わずに実験を行った。実験を行う際に用いた数値積分法は、Newmark β 法の $\beta=0$ (衝撃加速度法) で、載荷点位置に質量を設置した水平 (面内方向) 1 自由度とした。実験中は次ステップの変位を計算し、ジャッキでその目標変位まで試験体を変形させ、その時計測された荷重を用いて次のステップの目標変位を計算するという方法をとる。動的パラメータについては、試験体の初期周期は 0.3 秒とおくため重量は 200ton とし、減衰定数は復元力特性の影響のみを検討するため 0% とした。実験に用いた入力波は、ターゲットスペクトルを目標周期範囲で 50gal となるよう設定し、継続時間の長い波は海洋型地震である東北大 NS (1978 年宮城県沖地震)、継続時間の短い波は直下型の Sylmar NS (1994 年 Northridge) の特徴を持つ実際の地震波の位相を修正することにより作成した。実験は弾性域から大変形域まで 4~5 段階に分けて実験を行い、良好な実験結果を得た。

第3章では擬似動の実験の実験結果を示し、最大応答値や載荷パスを中心に比較・検討を行った。その結果、継続時間の長い波の場合、2段階目の実験で試験体が曲げ降伏したのに対し、継続時間の短い方は3段階目の実験まで降伏しないなど、継続時間の長い波の方が最大応答変位が大きくなる傾向が見られた。また応答性状にも大きな特徴が見られ、継続時間が短い場合、入力レベルが大きくなり試験体の周期が長くなるにつれ応答が両振幅型から片振幅型に近くなっていくなど、特徴ある結果を得た。また、継続時間の違いによる試験体のひび割れ状況の差については、試験体降伏前については同一変位で比較した場合、継続時間の違いによるひび割れ量の差はほとんど見られなかったが、最終レベル (塑性時) では交番載荷回数の多い継続時間の長い入力の方がひび割れ量は大きくなった。

第4章では、擬似動の実験の応答結果についてさらに詳細な検討を行うため、エネルギー応答の手法を用いてエネルギー入力の時刻歴分布と応答変位の対応性について、各実験の結果をもとに比較・検討を行った。エネルギーの時刻歴分布は、継続時間の長い方がほぼ全ての時刻にわたって連続してエネルギー入力があるのに対し、短い方は試験体の周期が長くなるほどパルス的に入力されており、実際の応答結果をよく表したものとなった。また、これまでの研究においてエネルギー増分量が最も大きい地点で、最大応答変位が生じる可能性が高いことが指摘されている。本研究では、単位時間を試験体の振動周期の 1/2 サイクルとおき、1/2 サイクル当たりのエネルギー増分量のうち、最も大きなエネルギー量 (=最大瞬間入力エネルギー) が入力された時点と最大応答変位の発生地点の一致状

況を見たところ、継続時間の違いによらず、両者には相関性が見られることを確認した。また発生時点がずれた場合についてその原因を詳細に検討したところ、発生時点がずれた場合はいずれも最大応答変位は最大瞬間入力エネルギー入力よりも後に生じており、

1. 両振幅型、片振幅型などの振幅のタイプの違いに起因するもの
 2. 試験体が塑性域に達した後は、ある変位を経験後に再びその点を目指す場合、剛性が低下しているため履歴消費エネルギーも小さくて済み、最大変位を更新しやすくなることに起因するもの
- の、大きく分けて2種類の原因が考えられることが判った。また交番回数が多いほど、2. で示した状況が表れやすくなることから、継続時間が長いほど両者の発生時点がずれ、応答変位が増大する可能性が高いことを示した。また、各実験時における最大瞬間入力エネルギーとその入力により生じる応答変位の関係を見ると、弾性域ではほぼ直線上に並び、弾塑性域の場合は瞬間入力エネルギー量に比べ応答変位が小さくなる傾向があることを示した。

第5章では、擬似動的実験の解析的検討を行うため、試験体を有限要素(FEM)の面材でモデル化して非線形応答解析を行った。コンクリートには分布ひび割れ、テンションスティフニング、圧縮-引張領域間の相互作用を考慮したモデルとした。鉄筋についてはバイリニアを仮定し、分布ひび割れモデルとして表した。なお動的解析を行う前に予め正負両方向に静的加力し実験開始時の初期剛性と一致させた後解析を行い、数値積分法については実験時と同じNewmark β 法の $\beta=0$ を用いた。また解析結果についても実験と同様エネルギー応答の概念を用いて比較を行い、さらに始めから大きな入力レベルの波が試験体に入力された場合の継続時間の違いによる応答状況の違いについても解析的検討を行った。実験結果と解析結果の一致状況は、試験体の曲げ降伏点近傍までの第3段階までの実験については比較的良い一致状況を示し、また同時に行ったエネルギー応答による検討においてもエネルギー入力量の分布状況や最大瞬間入力エネルギー量等において実験結果に近い値となった。一方、試験体の曲げ降伏後の大変形域については、試験体の曲げ降伏以降の実験時に顕著となった、柱主筋端部の抜け出しによるスリップ変形を完全に表現するには至らなかったものの、安定した解を得ることができた。また実験時の場合と同様に、最大瞬間入力エネルギー量は解析の場合でも継続時間の長い方が大きくなった。

また、はじめから大きな入力レベルの波を入力した場合の応答形状については、連続して行った実験の場合と比べ、同じ入力レベルにおける最大変位は小さくなり、継続時間による比較では、継続時間の長い波の方が変位量は大きくなるという結果を得た。

第6章は本研究のまとめ及び今後検討すべき課題について述べた。

審査結果の要旨

地震動が構造物の応答を左右する特性を表す指標として応答スペクトルがあるが、継続時間の短いパルス的な波(近い震源)と、継続時間の長い波(遠い震源)とでは、同一の応答スペクトルを仮定しても、構造物の損傷状況や応答変形等に違いがある。継続時間の異なる地震波を用いた擬似動的載荷実験を連層耐震壁2体について行い、エネルギー応答の概念を含め多角的に実験結果を検討し、継続時間の違い等に起因する応答性状について特徴ある結論を得た。同時に試験体を面材でモデル化して動的 FEM 解析を行い、エネルギー的検討を行っている。

本論文はこの研究成果についてまとめたもので、全文6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の目的及び既往の研究について述べている。

第2章では、本研究で行った擬似動的載荷実験の概要について述べている。継続時間の異なる人工地震波を作成し、入力弾性時から大変形時までを4段階に分けて行った。

第3章では、擬似動的載荷実験の実験結果について述べ、入力波の継続時間の違いにより応答状況に大きな特徴が出ること、最大応答変位は継続時間の長い方が大きくなる傾向を示した。

第4章では、擬似動的載荷実験の実験結果について、エネルギー応答の手法を用いて詳細な検討を行った。継続時間の違いによらず最大瞬間入力エネルギーと最大応答変形の発生時点には相関性が見られ、発生時点がずれる場合は大きく分けて2種類の原因が考えられることを示した。瞬間入力エネルギーとその入力により生じる応答変位は、弾性域ではほぼ直線上に並ぶこと、弾塑性域では瞬間入力エネルギー量に比べ応答変位が小さくなることを示した。瞬間入力エネルギーと最大応答変位の関連性に着目した研究が近年数多く行われていることもあり、こうした対応状況に関する検討を行うことは非常に重要な知見が得られ可能性がある。

第5章では、非線形有限要素法(FEM)を用いた実験のシミュレーション解析及びエネルギー応答による検討を行った。試験体の曲げ降伏点近傍までの実験結果と良い一致を示した。筆者の行った非線形 FEM 解析法では、一般的に解が不安定となりがちな試験体降伏以後の大変形域においても安定して解が得られる事を示した。実地震のように始めから大きな入力レベルの波を入力した場合についても解析を行い、応答状況に差異のあることを示した。

第6章は結論である。

本論文は「地震動の継続時間が RC 構造の応答に与える影響を擬似動的載荷実験および動的 FEM 解析により検討した」もので、応答結果についてエネルギー応答の観点からの特徴ある考察をするなど既往の研究では不十分であった当該分野で、本研究の有用性は非常に高いと思われる。

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。