

氏名	にしだ てつや 西田 哲也		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成17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	鉄筋コンクリート柱梁で拘束されたコンクリートブロック組積造の地震応答性状に関する研究		
指導教員	東北大学教授 井上 範夫		
論文審査委員	主査 東北大学教授 井上 範夫	東北大学教授 杉村 義広	
	東北大学教授 山田 大彦	教授 小林 淳	(秋田県立大学)

論文内容要旨

1999年に発生した台湾の集集地震、トルコのコジャエリ地震、2004年に発生したイランのバム地震などによる地震被害で代表されるように、東南アジアや中南米をはじめとする諸外国では、過去の地震被害でその耐震安全性の低さが示されたにも関わらず、主に経済上の理由から未だに組積造建物が多く建設されているのが現状であり、大地震のたびに甚大な物的・人的被害が発生し、その被害もさることながらそれに続く復旧・復興が大きな社会問題となっている。このような背景から、環太平洋地震多発地帯に位置するアジア・太平洋地域の地震・津波環境や社会経済環境を念頭におき、ハードおよびソフトの両面の科学技術を体系化し、実効性のある地震・津波災害軽減のためのマスタープランの構築を目的とした多国間型国際共同研究「アジア・太平洋地域に適した地震・津波災害軽減技術の開発とその体系化に関する研究」(研究代表者: 亀田弘行、(独)防災科学技術研究所)が1999年度~2003年度の5年プロジェクトとして実施された。本研究は、このプロジェクトのセクション2:「アジア・太平洋地域における地震ハザード評価と構造物による災害抑止技術の開発」のうちの「地域特性を反映した建築物の耐震化技術の開発」の一環として行われた実験的研究を基にしている。このプロジェクトでは、「真に地域特性に基づく、実効性のある防災研究」が求められたため、日本の構造技術をそのまま移しただけでは、地域特性に対する配慮や実効性に欠ける可能性があるため、当該地域の中では特に耐震化が進んでいると考えられた中国の鉄筋コンクリート柱梁で拘束されたコンクリートブロック組積造を研究対象とし、その構造性能の把握、他国へ展開する場合の問題点などについて検討することとした。

中国では、1976年の唐山地震の被害を教訓に組積造の耐震化に関する研究・開発が盛んに行われており、本研究で対象としている鉄筋コンクリート柱梁で拘束されたコンクリートブロック組積造は、唐山地震で被害を免れた組積造建物の構造法を参考にして、大連理工大学で研究・開発された複合構造であ

る。大連理工大学における実験的研究は、静的加力実験を主体としたものであり、地震時挙動に関する実験的な検討は、他大学において縮小模型による振動実験が行われている他は、本格的に実験的な検討がなされていないのが現状である。この理由として、振動実験では縮小模型を用いるにしてもパラメータを設定した実験シリーズを実施するには莫大な費用がかかること、一方でひび割れの発生とともに建物特性が変化する RC 系構造では、例えば入力波の設定等の実験技術面から、地震時挙動を検討するために必要なデータを取るのがむずかしいことなどが考えられる。このように実験的研究で地震時挙動が十分に把握されていない結果として、現状の本構造の耐震設計法では、中小地震に対応する強度設計が行われているのみで、事実上、大地震時の構造安全性の検討は行われていない。

以上のような状況を鑑み、本研究では、鉄筋コンクリート柱梁で拘束されたコンクリートブロック組積造に関して、静的構造実験装置と計算機による地震応答解析を組み合わせたオンライン地震応答実験を実施して地震時挙動、応答性状を実験的に把握し、そこで得られた実験結果と地震応答解析を基に検討を行い、本構造の大地震時の安全性の確保と、より合理的な耐震設計のために必要と考えられる設計手法、応答推定法に関する提案を行うことを目的としている。

上記の目的の下、本研究は、中国で提案された鉄筋コンクリート柱梁で拘束されたコンクリートブロック組積造（本論文内での略称：複合組積造）の大地震時挙動に着目し、1 層 1 スパンの縮尺 1/2 試験体を用いたオンライン地震応答実験により大地震時の応答性状、復元力特性を実験的に把握し、得られた実験結果を既往の強度・剛性算定式や本研究で提案した解析用モデルを用いて、本構造の大地震時における構造特性、応答推定に関する検討を行ったものである。本論文は全 6 章から構成されており、以下に各章の概要と結論を総括して述べる。

第 1 章では、主に経済上の理由から未だに組積造建物が多く用いられている東南アジアや中南米において、地震災害を軽減するために有望な構造と考えられる、中国で提案された複合組積造を研究対象とした背景、および本構造を想定地震入力レベルの異なる他国で適用するにあたっては、より合理的な耐震設計法を確立するため、本構造の大地震時の挙動、応答性状の把握が必要であることを述べた。

第 2 章では、本研究で対象である、我が国には存在しない複合組積造に関して、構造特性、中国における耐震設計法の概要を示し、現状での耐震設計上の課題と本研究との関連を明確にして、第 3 章以降で行うオンライン地震応答実験、応答解析および検討の目的をより具体的に示した。

第 3 章では、複合組積造の大地震時の応答性状を把握することを目的として、縮尺 1/2 の試験体 7 体を用いて実施したオンライン地震応答実験、およびその結果について示した。オンライン地震応答実験

により、大地震時挙動（荷重－変形関係、破壊性状）および応答性状（最大応答値）を実験的に確認するとともに、結果の考察から下記の知見を得た。

- 複合組積造の等価粘性減衰定数は、ほぼ弾性の状態から 5%程度以上あり、階段状ひび割れが発生する層間変形角 1/1000 程度以上の変形領域で増加する傾向がある。ただし、柱主筋降伏先行型試験体では、大振幅時における等価粘性減衰定数の増加量は比較的小さく、せん断すべり破壊型試験体と異なる傾向を示す。
- 柱主筋降伏先行型（全体曲げ降伏型）の破壊モードでは、柱主筋降伏以降、履歴ループは逆 S 字形状となり、せん断すべり破壊型モードの場合よりエネルギー吸収の小さな性状を示し、耐震設計上、好ましくない破壊モードである。
- 鉛直地震動の影響を考慮した場合、水平方向の応答変位が 1 割程度増加する可能性がある。

第 4 章では、複合組積造の大地震時の応答性状を解析的に検討することを目的として、時刻歴応答解析と等価線形化法による 2 種類の解析手法を取り上げ、これらの解析で用いる復元力特性モデルおよび等価減衰について検討した。その結果、時刻歴応答解析に用いる履歴モデルとして、Takeda モデルが適切であることを示した。また、等価線形化法については、複合組積造用の等価減衰設定法を示した。

第 5 章では、第 3 章に示したオンライン地震応答実験結果を基に、第 2 章に示した既往の強度・剛性算定式による結果の検討、第 4 章で示した解析手法による応答値の検討を行い、複合組積造の構造特性、地震応答性状を総合的に検討した。以下に、本章で得られた主な知見を示す。

- 終局強度と階段状ひび割れ強度を検討した結果、既往の強度算定式による計算値はシアースパン比が 0.55 の場合には両強度を多少安全側に評価するが、シアースパン比 1.0 と 1.5 に関してはほぼ妥当な結果を与える。また、階段状ひび割れ強度と終局強度に比較的明確な線形関係がある。
- RC 壁の曲げ終局強度式を準用することで、柱主筋が降伏する場合の終局強度を精度よく推定できる。
- 実験から得られた荷重－変形関係の包絡線と、既往の強度・剛性算定式に本論で提案した最大耐力点以降の勾配を含めた復元力特性算定値を比較した結果、シアースパン比 0.55 の場合に強度を多少過小評価する傾向にある他は、両者は比較的良好に対応する。
- 中国で行われている耐震設計法と、試験体の終局強度と各入力レベルでの応答値の関係を考慮すると、現在中国で行われている中小地震を対象とした強度設計だけでは、大地震時の耐震

安全性が確保されるとは言えず、大地震時の耐震安全性を確保するためには応答変形量の確認が必要である。

- 最大応答値の推定に関しては、実用性を考慮した3折線スケルトンカーブを用いた時刻歴応答解析ではほぼ十分な精度を有している。
- より実用性を重視した等価線形化法による応答推定では、時刻歴応答解析に比較してばらつきが大きいため、耐震設計で用いるためには安全側の推定値を与える3折線スケルトンカーブとRC造略算式を用いた等価減衰の下限値を使用するのが適切である。

第6章では、本研究のまとめを総括的に述べ、本論文の結論として、以下に示す複合組積造の大地震時に対する耐震設計法に関する提案を行い、さらに今後の課題についても言及した。

第3章から第5章の結果を踏まえ、第6章で本論文の結論として示した複合組積造の大地震時の耐震設計法に関する提案の概要を以下に示す。

1) 破壊モードの確認

履歴エネルギー吸収の小さな柱主筋降伏先行型（全体曲げ降伏型）の破壊モードを避け、より履歴吸収能の大きなせん断すべり破壊型の壁とするため、各破壊モード時の終局強度を算定し、個々の壁について全体曲げ降伏時の強度がせん断すべり破壊時の強度を上回るように設計する。

2) 大地震時における塑性変形量の推定法

大地震時の塑性変形量を推定する方法として、時刻歴応答解析による方法または等価線形化法による方法を使用する。時刻歴応答解析による最大応答値の推定では、より精度の高い結果が得られると考えられるが、実用的な推定法としては等価線形化法を使用し、規定化された応答スペクトルを用いることにより、より一般的性をもった推定値を得ることが可能となる。

3) 時刻歴応答解析で用いる諸定数および復元力特性モデル

ここでは、解析時に使用する減衰定数、減衰タイプおよび復元力特性モデルの詳細を示す。

4) 等価線形化法で用いる復元力特性モデルおよび等価減衰

ここでは、解析時に使用する復元力特性モデルのスケルトンカーブおよび等価減衰の詳細を示す。

5) 鉛直地震動に対する配慮

軸応力度が終局強度に及ぼす影響が比較的大きな複合組積造においては、鉛直地震動による水平方向の応答変形量の影響が無視できないと考えられるので、鉛直地震動の影響を考慮して、2)～4)で算定される応答量推定値が目標値に対して1割程度余裕をもつように設計することを推奨する。

論文審査結果の要旨

中国、東南アジア、南米などでは、経済的理由から無筋のブロック造建物が主に住宅用として多数建設されているが、その脆弱性のために地震が発生すると多くの人命が失われている。本論文は、中国で提案された、鉄筋コンクリート柱梁で拘束されたコンクリートブロック組積造(複合組積造)を対象としてオンライン地震応答実験を実施するとともに、解析による検討を行ったもので、全6章よりなっている。

第1章は序論である。

第2章では、複合組積造の構造的特徴を調査し、無筋コンクリートブロック壁を先に施工した後で周囲の鉄筋コンクリート柱梁を打設することにより一体性を持たせること、目地部の強度をブロックより小さくすることにより脆性的な破壊性状を与えることが重要であることを示している。また、中国では、大地震時の応答性状を実験的に明らかにした研究が乏しく、耐震設計法においては大地震時を対象としたレベル3の検討がなされていないことを指摘し、この設計法を改良するために次章以降で行うオンライン地震応答実験、応答解析、および検討が有用であることを示している。

第3章では、複合組積造の大地震時の応答性状を把握することを目的としたオンライン地震応答実験を実施し、荷重-変形関係や破壊性状などの大地震時挙動および最大応答などの応答性状を実験的に明らかにしている。この実験では、試験体頂部に3台の鉛直ジャッキを設置し、軸力一定の場合のほか鉛直地震動に対する軸力変動を入力できること、さらに転倒モーメントを任意に入力できることに特徴があり、軸力値、シアスパン比、柱主筋量、鉛直地震動の有無をパラメータとしている。得られた実験結果より、水平変形に対応した等価粘性減衰定数を定量的に求め、また、目地部のせん断すべりが卓越するせん断型破壊モードと比べて柱主筋が降伏する曲げ降伏型モードはエネルギー吸収の小さな好ましくない傾向を示すこと、鉛直地震動が及ぼす水平応答変形への影響は無視できないことを明らかにしている。

第4章では、複合組積造の大地震時の応答性状を解析的に検討することを目的として、時刻歴応答と等価線形化法による二種類の解析手法を取り上げ、これらの解析で用いる復元力特性モデルおよび等価減衰について、得られた実験結果を基に検討している。その結果、復元力特性のスケルトンカーブとしては、実験結果を忠実に模擬した4折れ線カーブと実用算定式から作成した3折れ線カーブを提案し、時刻歴応答解析に用いる履歴モデルとしてはTakedaモデルが適切であることを示している。また、等価線形化法に用いる等価粘性減衰の算定式として、Takedaモデルの履歴則に基づいた算定式と鉄筋コンクリート造に用いる等価減衰略算式を準用した算定式を示している。

第5章では、オンライン地震応答実験結果を基に、強度・剛性算定式の精度の検証、および4章で示した解析手法による応答値の推定を行い、複合組積造の構造特性、地震応答性状を総合的に検討している。その結果、強度・剛性については、既往の算定式と新たに提案した算定式を併用することにより、概ね近似した値が得られること、最大応答値の推定に関しては、実用性を考慮した3折れ線スケルトンカーブを用いた時刻歴応答解析でほぼ十分な精度が得られること、より実用性を重視した等価線形化法では、3折れ線スケルトンカーブと鉄筋コンクリート造略算式を準用した等価減衰の下限値を使用すると安全側の値を得ることができることを示している。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は、オンライン地震応答実験を実施して、複合組積造耐震壁の大地震時における挙動および応答性状を明らかにするとともに、解析に用いるのに適切な強度・剛性・等価減衰や復元力特性などを提案し、さらに、時刻歴応答解析と等価線形化法により、大地震時の応答を精度よく推定できることを示しており、世界で多数建設されている無筋ブロック組積造建物の耐震技術の向上に資するとともに建築構造学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。