

学位論文審査報告

松下, 直幹
九州大学大学院人間環境学府

本田, 誠
九州大学大学院人間環境学府

御手洗, 泰文
九州大学大学院人間環境学府

Nasruddin
Graduate school of Human-Environment Studies, Kyushu University

他

<https://hdl.handle.net/2324/26784>

出版情報 : 都市・建築学研究. 22, pp.205-217, 2012-07-15. Faculty of Human-Environment Studies, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

学位論文審査報告

氏名(本籍) 松下 直幹(京都府)
学位記番号 博士(工学)人環博甲第254号
学位授与の日附 平成23年9月30日
学位論文題名 省エネルギーを目的とした既築業務用建物の空調用熱源システム制御法に関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 赤 司 泰 義
(副査) " " 藤 本 一 壽
" " " 林 徹 夫

論文内容の要旨

我が国の温室効果ガス排出量は2005年には1990年比で13%増加しており、京都議定書の目標値6%削減の達成が非常に厳しい状況となっている。特に、全排出量の約32%を占める民生業務・家庭部門においては約41%も増加し、火急の対策が強く求められている。

運用段階における民生業務用建物のエネルギー消費は、熱源、空調、換気といった空調設備に消費される割合が非常に大きく、一般に建物全体のエネルギー消費の約半分を占めると言われる。今なお増加し続けている民生業務部門のエネルギー消費量を削減するためには、空調設備の省エネルギー運用が不可欠となる。特に、既築建物の運用段階におけるエネルギー消費は、その膨大なストック数のために全体に占める割合が大きく、その削減対策の実施は極めて重要である。

建物設備の課題を明らかにし、改善する仕組みの一つにコミッショニングがある。コミッショニングとは、「ビルシステムの実性能の持つべき要求性能を規定し、新築ビル導入や既築ビル運用においてその実性能が要求性能や基準に合致しているかを検証して記録し、合致していなければ改善するといった品質志向のプロセス」である。最近では、コミッショニングに関連した実務的な動向が急速に展開しつつあり、今後の省エネルギー化やCO₂排出量削減の実現において、重要な手法と位置付けられている。しかしながら、既築建物の省エネルギー対策は、新築時に設置した機器から進歩した機器への更新が主流であり、その他の具体的な対策メニューに乏しいのが実情である。このような状況のもと、本研究では、既築業務用建物の空調設備、その中でも最もエネルギー消費割合が大きい空調用熱源システムを対象とした省エネルギーへの具体的な制御法について提案したものである。

本論文は以下の6章より構成される。

第1章は序論であり、まず、研究対象を民生業務部門における既築建物の空調用熱源システムとした背景を述

べ、これに対する現状の問題点と課題についてまとめた。そして、本研究の概要と意義について示した。

第2章では、既築業務用建物の空調用熱源システムの実態把握を行うための運転分析手法について整理した。この分析手法に基づいて、多くの熱源システムが抱える問題点を明らかにするとともに、省エネルギー性能向上のための具体的な制御法の開発方針を提示した。

第3章から第5章では、第2章で明らかとなった熱源システムの省エネルギー性能上の問題点を解消するための具体的な3つの制御法、すなわち、熱源低負荷運転回避制御法、熱源一次ポンプ余剰圧力活用制御法、最適化運転制御法を提案・開発し、実際の既存熱源システムを対象にそれぞれの導入効果を調査し、その有効性を検証した。

第3章では、熱源低負荷運転回避制御法について述べた。一般的に行われる熱源台数制御は、空調時間帯において必要負荷に応じて熱源機の運転台数を制御するが、ベース機として必ず1台が運転される。設計最大負荷が実負荷に対して大きくなると、その1台での運転時間が大勢を占める。さらに、1台運転時にその熱源機能力に対して低負荷で運転している時間も長くなり、非効率な運転となる。この問題を解決するために、低負荷時に運転中の残りの1台も停止し、冷温水のみを循環させることで熱源機の低負荷運転を回避する独自の熱源低負荷運転回避制御法を考案し、その効果検証を行った。その結果、この制御法によって、導入前と比べて冷房低負荷期(中間期)には44%が熱源機0台運転となり、その間の電力消費量が42%、ガス消費量が24%と大幅に削減され、熱源COPが16~22%向上した。また、暖房期においても負荷熱量GIあたりのガス消費量を6%削減できた。

第4章では、熱源一次ポンプ余剰圧力活用制御法について述べた。本制御法は、ツーポンプ方式の熱源システムを対象とするものである。ツーポンプ方式熱源システムの冷温水搬送は、往還水ヘッダから二次側(負荷側)を担う二次ポンプと一次側(熱源側)を担う一次ポンプに分割されている。この役割を切り分けているのが、往水ヘッダと還水ヘッダを接続する連通管である。従来は、一次ポンプ能力は二次側搬送に用いないが、二次側要求流量が少ない場合には一次ポンプ能力を二次側に積極的に活用する新しい熱源一次ポンプ余剰圧力活用制御法を提案し、その効果検証を行った。その結果、本制御導入前に比べて冷房期間全体で冷温水搬送ポンプの電力消費量を67%削減することができた。

第5章では、最適化運転制御法について述べた。最適化運転制御とは、通常の熱源システムにおいて固定的に扱われている制御上の設定値を、時々刻々と変化する外界や負荷の状況に合わせて最適な値に設定することによって省エネルギー化を図ろうとする制御法である。本制

御法を実際の熱源システムに導入し、その効果検証を行った。その結果、本制御法を導入しない場合と比較して、運転効率が20~50%の低負荷時において、熱源COPが10%、熱源システムCOPが6~10%向上した。本制御法は、熱源システム全体のシミュレーションモデルを活用する手法であるが、個々の熱源システムの仕様に合わせてシミュレーションの入力設定やモデルパラメータのチューニングを行うことになり、多大な労力と時間が必要になる。このことから、本制御法の省エネルギー効果は従来から広く認識されてはいるものの、熱源システムへの実装レベルではあまり普及していない。そこで、本制御法をより多くの熱源システムで活用できるようにするための汎用ツールを開発した。

第6章では、本研究で得られた成果を各章別に要約し、熱源システムに対するコミッシングプロセスにおいて、本研究の成果をどのような場面で活用すべきかについて示したフローの提示を行って、総括とした。

論文調査の要旨

日本全体の約32%を占める民生部門の温室効果ガス排出量は、近年、著しく増加しており、地球温暖化防止の観点から早急な対策が必要とされている。業務用建築物のライフサイクルを通じたエネルギー消費量においては建物運用時が約80%を占めており、エネルギー消費の面で建物を効率的に運用することが不可欠である。既築の業務用建築物では、その省エネ対策として、新築時に設置した機器類を比較的効率の良い新しい機器類に更新することが主流であるが、スパンの長い更新時期と高額な更新コストによって、省エネ性能が高い良質の建築ストックの形成という観点からは必ずしも十分な省エネ対策になっていない。

本論文は、既築の業務用建築物の空調設備において最もエネルギー消費割合が大きい熱源システムを対象に、その効率的運用を比較的安価で容易に実現することのできる新たな3つの制御法（熱源低負荷運転回避制御法、熱源一次ポンプ余剰圧力活用制御法、最適化運転制御法）を考案し、実際の教育施設の中央式熱源システム（吸収冷温水機）に導入することによって、それらの制御法による省エネ効果を実測調査やシミュレーションにより定量的に明らかにしている。これらの成果は以下の通りまとめられる。

- (1) 熱源システムの省エネ性能に関する分析手法を取得可能な計測データの種類に応じて体系的に整理するとともに、その分析手法を活用した性能検証事例を通じて、熱源システムの省エネ性能を低下させる具体的な事象を抽出し、その対処策としての新たな制御法の開発方針を明らかにした。
- (2) 従来の熱源台数制御において、低負荷時に熱源機の

ベース機1台の非効率な長時間運転が余儀なくされていることを改善するために、ベース機1台も停止し、冷温水のみを循環させることで熱源機の低負荷運転を回避する「熱源低負荷運転回避制御法」を開発した。この制御法を大学施設の熱源システム制御に適用したところ、冷房低負荷時における熱源システムの電力消費量42%、ガス消費量24%を削減し、熱源COPも16~22%向上できたことを示した。

- (3) ツーポンプ方式の熱源システムにおいて、一次ポンプ余剰流量が連通管を經由して熱源機に還流することによる搬送エネルギーの無駄を解消するために、二次ポンプ流量が少ない場合に一次ポンプ能力を二次側送水に積極的に活用する「熱源一次ポンプ余剰圧力活用制御法」を開発した。この制御法を中学・高等学校施設の熱源システム制御に適用したところ、冷房期間全体で搬送ポンプの電力消費量を67%削減できたことを示した。
- (4) 熱源システム制御上の固定的な設定値を時々刻々変化する外界気象や負荷の状況にあわせて最適な値に設定する「最適化運転制御法」を熱源システムに導入し、低負荷時の熱源システムCOPが6~10%向上することを明らかにした。また、本制御法の導入に際しては、シミュレーションの入力設定やモデルパラメータのチューニングに多くの労力と時間が必要になるという課題点に着目し、本制御法の広範な活用を目的としたオンライン実装向けの汎用最適化制御ツールを開発して、本制御法の導入・維持管理の簡便化を実現した。

以上、要するに、本論文は、既築の業務用建築物における空調用熱源システムの効率的な運用を低コストで容易に実現することのできる新たな制御法や汎用ツールを独自に考案・開発し、その省エネ効果を実際の熱源システム制御への適用によって定量的に明らかにし、省エネ性能が高い良質の建築ストック形成のための業務用建築物のエネルギー消費量削減に向けた有用な技術的知見を示したものであり、建築設備工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認める。

氏名(本籍) 本田 誠(宮崎県)
学位記番号 博士(工学)人環博甲第255号
学位授与の日附 平成23年11月30日
学位論文題名 強風下における鉄塔-送電線連成系の部材振動の実態とその制振対策の開発

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 前田 潤 滋
(副査) " 准教授 清 家 規
" " 教授 蜷 川 利 彦

論文内容の要旨

送電鉄塔は電力輸送を支える社会インフラとして、社会・経済へ多大なる影響を与えることから高い信頼性が求められている。とくに送電鉄塔の耐風性能を向上するため、設計荷重として支配的な風圧荷重や風速変動などに伴う動的風応答量などの推定精度の向上が求められてきた。送電線を含む鉄塔全体としての構造安全性や振動特性については数多くの研究が行われ、その大部分が解明されている。しかしながら、強風下での種々要因が絡む構成部材単体の振動や構造形態に起因して水平材フレームが構面外に振動するオバリング振動などのような局部的な振動に対しては、未だ不明な点が残されており、部材や接合部の強度低下による鉄塔全体の安全性の低下が懸念されている。

本論文は、強風下でのオバリング振動や部材振動の現状を、強風観測データと振動試験結果の両面から明らかにし、その対策として高減衰ゴムシートを利用した「部材振動の制振対策法」をとりまとめたもので、以下の7章で構成した。

第1章では、近年の鉄塔被害と我が国での送電鉄塔の耐風設計法の経緯とその概要および耐風性能向上対策の事例について紹介し、部材振動制振対策の必要性およびその位置づけを示した。

第2章では、諸元の異なる2つの実機耐張型鉄塔で取得した強風応答観測データを用いて、15m/s程度の強風下における吊架ジャンパ装置の振動特性とオバリング振動および部材振動の発生状況を明らかにして、その振動特性を分析した。吊架ジャンパ装置の振動は塔体や腕金の振動に起因した複雑な振動を示すことがわかったが、逆に、理論上考えられる振動の塔体振動への吊架ジャンパ装置の影響を検証したところ、それほどの高風速ではない今回の応答観測データでは、吊架ジャンパ装置の振動レベルが小さく塔体振動への影響を特定できなかった。一方、オバリング振動や部材振動はその振幅が風速増加に伴って増大する傾向を示し、塔体振動や個材の渦励振などの伝播などが振動発生要因となることがわかった。さらなる高風速で継続時間が長大化した場合、ボルト接

合部のボルト緩みや溶接部の疲労損傷を誘発することを明らかにした。

第3章では、吊架ジャンパ装置の自由振動試験と強制加振試験および塔体強制加振試験を無風時に実施して、吊架ジャンパ装置の基本的な振動特性と吊架ジャンパ装置振動と塔体振動との相互作用を明らかにした。吊架ジャンパ装置の強制加振時では、吊架ジャンパ装置の振動が腕金を介して塔体に伝達し、吊架ジャンパ装置の固有振動数の倍長成分に対応する塔体振動が励起されることが明らかになった。また塔体の強制加振時では、強風観測データと同様に吊架ジャンパ装置は塔体振動に従属して振動することが分かり、加振箇所によって相互作用の様相が大きく異なることが分かった。すなわち、強風時の風況特性によっては、吊架ジャンパ装置の強制加振時のような塔体振動の増大や、本振動試験では確認できなかった部材振動も同様の振動伝播によって励起される可能性を示した。

第4章では、吊架ジャンパ装置の強制加振試験のシミュレーションを実施し、吊架ジャンパ装置の固有振動数の倍長成分に対応する塔体振動の発生を再現して、吊架ジャンパ装置の振動が腕金を介して塔体へ伝播することを追跡した。本章での鉄塔振動シミュレーションでは、吊架ジャンパ装置の振動によるオバリング振動や部材振動の励起は再現できなかったが、鉄塔の結構様式や吊架ジャンパ装置の諸元の組み合わせによっては、塔体あるいは個材と吊架ジャンパ装置の振動干渉が誘発されることを明らかにした。

第5章では、振動伝播などで誘発される部材振動に有効と考えられる「高減衰ゴムを部材に貼付して部材自体の減衰を増加させる制振対策」を提案し、高減衰ゴムの素材試験、鋼板と鋼管の片持ち梁モデルを用いた振動試験およびそのシミュレーション解析から、基本的な制振特性についての検討を行った。その結果、高減衰ゴムに加えて、高減衰ゴムの変形を進めて効率的にエネルギー散逸量を増加させる拘束板の併用によって、高い制振効果を発揮できることを明らかにした。また、高減衰ゴムの素材試験を実施し、得られた高減衰ゴムの材料特性を用いて構築したモデルの振動シミュレーションの結果が、鋼板片持ち梁の振動試験結果によく対応できることを示した。

6章では、5章の実験結果に対して、フィッシャーの実験計画法を利用した感度解析を行って、個々の部材上での高減衰ゴムと拘束板の取付位置が制振効果と固有振動数に最も大きな影響を与えることを明らかにした。また、強風下においてオバリング振動を観測した鉄塔パネルを模擬した塔体モデルの過渡応答解析を行って本制振対策の制振効果を確認し、実機での有効性を示した。また、オバリング振動対策でも高減衰ゴムと拘束板の取付位置

が制振効果に与える影響が大きいことを明らかにし、実機への適用には、取付位置に対する施工上の注意が必要であることを示した。

第7章では、本研究を総括し、高減衰ゴムの実機適用へ向けて残された課題についてまとめた。

論文調査の要旨

強風下での送電鉄塔には、直接作用する風圧力の他に、鉄塔本体や送電線の振動伝播など種々要因が絡んだ部材単体の振動や骨組の結構形態に起因して水平材フレームが構面外に変形する“オバリング振動”などの局所的な振動の発生が知られている。このような現象は力学的に未解明な点が多く、部材接合部の強度低下による鉄塔全体の安全性の低下につながるものが懸念されているが、電力輸送設備の長寿命化の観点からも部材振動の抑制対策が優先課題として指摘されている。

本論文は、強風時観測データと無風時振動試験結果の両面から部材振動やオバリング振動の発生状況を整理して振動発生の要因を精査している。また、大がかりな補強工事を必要としない振動抑制対策として、高減衰ゴムシートを利用した制振対策法を新たに考案し、その効果と実用化に向けた論点を、以下のようにとりまとめている。

まず著者は、近年の強風による鉄塔被害に照らし合わせて、我が国での送電鉄塔の耐風設計法の経緯とその概要および耐風性能向上対策の論点を整理している。その中で、これまでの耐風補強法が、主として台風時などの異常風圧力に耐えるための鉄塔本体の強度確保に主眼が置かれたこと、また、長期的な保守保全に基づく鉄塔自体の長寿命化に部材振動抑制が不可欠であることを指摘して、その対策に関するいくつかの課題を挙げている。

次いで、諸元の異なる2つの実機耐張型鉄塔で取得した15m/s程度の強風時での応答観測データを整理して、高圧送電線に多用される吊架ジャンパ装置の振動特性と塔体構面のオバリング振動および部材振動の発生状況を分析し、その振動特性を明らかにしている。すなわち、吊架ジャンパ装置の振動は塔体や腕金の振動に起因した複雑な振動伝播の影響を受けるが、逆に、塔体の曲げ振動への吊架ジャンパ装置の影響を検証したところ、それほど高風速ではない応答観測データでは、吊架ジャンパ装置の振動レベルが小さく塔体曲げ振動への影響を特定できなかったことを報告している。一方、オバリング振動や部材振動では、その振幅が風速増加に伴って増大する傾向を示し、塔体曲げ振動や部材の渦励振などがオバリング振動や部材振動を助長する要因になることを明らかにして、さらなる高風速で強風の継続時間が長大した場合には、部材接合部のボルト緩みや溶接部の疲労損傷を誘発する可能性を指摘している。

また、上記鉄塔の自由振動試験と強制加振試験を無風時に実施して、吊架ジャンパ装置の基本的な振動特性や吊架ジャンパ装置と塔体曲げ振動との相互作用を明らかにしている。すなわち、吊架ジャンパ装置の振動が腕金を介して塔体に伝達し、吊架ジャンパ装置の固有振動数の倍長成分に対応する塔体振動が励起されること、一方で強風時応答観測データと同様に吊架ジャンパ装置は塔体振動に従属して振動することが分かり、加振箇所によって相互作用の様相が大きく異なること、などを明らかにしている。以上の結果は、吊架ジャンパ装置の強制加振試験のシミュレーションによって再現されており、腕金を介した塔体への吊架ジャンパ装置の振動伝播の追跡に成功している。

最後に、振動伝播などで誘発される部材振動に有効と考えられる“高減衰ゴムを部材に貼付して部材自体の減衰を増加させる制振対策”を提案し、高減衰ゴムの素材試験、鋼板と鋼管の片持ち梁モデルを用いた振動試験およびそのシミュレーション解析から、同対策法の基本的な制振特性を明らかにしている。すなわち、高減衰ゴムの変形によるエネルギー散逸量を増加させる拘束板の併用によって、より高い制振効果が発揮されること、また高減衰ゴムの材料特性から構築したモデルの振動シミュレーションの結果が鋼板片持ち梁の振動試験結果によく対応すること、などを明らかにしている。さらに上記実験結果に対して、フィッシャーの実験計画法を利用した感度解析を行って、高減衰ゴムと拘束板の取付位置が制振効果と固有振動数に最も大きな影響を与えることを示し、オバリング振動対策でも高減衰ゴムと拘束板の取付位置が制振効果に与える影響が大きいことを明らかにして、制振対策上重要な設置法を提供している。

以上要するに本論文は、強風時応答観測と無風時での振動試験によって送電鉄塔の構成部材の振動発生状況を検証し、塔体全体と部材の振動との相互作用を明らかにするとともに、部材の振動抑制対策への高減衰ゴムシートの応用に関する新たな知見をとりまとめたもので、風工学および都市災害管理学に寄与するところが多い。よって本論文は博士(工学)の学位に値するものと認める。

氏名(本籍) 御手洗 泰文(熊本県)
学位記番号 博士(工学)人環博甲第260号
学位授与の日附 平成24年3月27日
学位論文題名 原子力発電所建屋コンクリートの施工管理と耐久性モニタリングに関する研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 准教授 小山 智 幸
(副査) " 教授 蛭 川 利 彦
" " " 前 田 潤 滋

論文内容の要旨

原子力発電所施設の建屋には一般のコンクリート構造物よりも高度な耐震性ならびに放射線遮蔽性等が要求されるため、その構造体は高強度コンクリートを用いた大断面の部材で構成されることになる。しかし高強度コンクリートは単位セメント量が多いため水和発熱量が大きくなり、マッシブな断面による断熱効果とその影響を助長して、部材温度が上昇する傾向にある。コンクリート温度が高くなると長期材齢における強度増進が鈍化し、また温度ひび割れ発生の危険性が増大する結果、構造体強度の不足、遮蔽性の低下、そして耐久性の低下までもが懸念されることになる。施設の重要性を考慮すると、設計で要求される性能は、建設時のみならず供用期間中の長期にわたって確実に実現、維持される必要がある。しかし本研究で対象とした発電所建屋の建設時には、施工事例が少ないこともあり、上記の強度管理やひび割れ抑制を含む施工管理の手法が必ずしも確立されていない状況にあった。また、供用中の施設の健全性を確認し対策の要否を判断する方法が体系化されていなかった。

このような背景のもと本研究は、原子力発電所プレストレストコンクリート製格納容器(PCCV)を構成する高強度マスコンクリートの施工時における品質管理、また、供用時における耐久性モニタリング手法を新たに提案し、その妥当性を実プラントで20年以上にわたって実証したものである。

本論文は以下の5章より構成される。

第1章では、序論として本研究の背景と目的、経緯を述べ本論文の構成を記した。

第2章では、初期強度発現の不足が懸念される冬期施工時における高強度マスコンクリートの強度管理手法を明らかにすることを目的として、実大模擬試験体を用いた実験ならびに解析を行った。その結果、標準水中養生される小型の管理用供試体と実際の構造体コンクリートの強度差を補うため、使用するコンクリートの強度を高く設定する際の、いわゆる強度補正值は、強度試験を行う材齢すなわち管理材齢を管理用供試体と構造体とで同じ時期とする従来の方法では過大な値となり、セメント

量の増加による温度ひび割れ発生のリスクが高くなることを示した。これに対し新たな方法として両者の管理材齢を異なる時期とする方法を提案した。そして構造体コンクリートの強度管理材齢を、冬期には初期強度は低いものの材齢13週以降の強度増進が大きいことやプレストレスを材齢6ヶ月で導入することを考慮して6ヶ月に設定し、管理用供試体強度の管理材齢は13週とすれば強度補正值を低く設定できることを明らかにした。この方法により、温度ひび割れ発生のリスクを低減しながら、プレストレス導入時に必要な構造体コンクリート強度を確保することが可能となった。なお、供試体と構造体の管理材齢を異なる時期とする考え方は現在の日本建築学会建築工事標準仕様書JASS5などにおける構造体管理強度の補正值、いわゆるS値に踏襲されている。

第3章では、長期強度増進の鈍化や温度ひび割れ発生が懸念される夏期施工時における高強度マスコンクリートの強度管理ならびにひび割れ抑制手法を明らかにすることを目的として、実大模擬試験体を用いた実験ならびに解析を行った。その結果、暑中期においては構造体コンクリートがマッシブとなる場合に長期強度増進の鈍化が顕著となること、したがって冬期とは異なり管理材齢を長期化するだけでは対処が難しいことを明らかにした。またこのときの強度には、平均養生温度ではなく、コンクリートの最高温度が大きく影響することを明らかにし、使用した材料ならびに調合の場合、最高温度を約50℃以下とすれば構造体の強度低下を抑制できることを明らかにした。これらの結果から、要求強度を確実に実現する方法として、フレークアイスを用いたコンクリートのプレクーリングを新たに導入し、これによる最高温度の抑制が、強度のみならず温度ひび割れ抑制にも効果があることを実験および解析により実証した。これらの成果は、日本建築学会建築工事標準仕様書JASS5Nのほか暑中コンクリート施工指針などに取り入れられている。

第4章では、実機建屋の体系的なモニタリング手法を確立することを目的として20年以上にわたる暴露実験および分析を行い、結果を整理した。まず基本的な考え方として、当該建物が供用開始後はその性質上、非破壊試験を含むあらゆる品質管理試験が十分には実施できないことを考慮して、実構造物を模擬し先行して暴露を開始した長期モニタリング供試体を用いて管理する方法を提案した。これによりコンクリートの長期強度ならびに耐久性の確認を行うと同時に、実機建屋に採用した仕上げ材等のモニタリング調査を長期にわたり実施した。さらに鉄筋に劣化が生じた場合の補修方法を提案し、模擬的に補修を行った部位の健全性を追跡調査した。これらの結果、冬期および夏期施工における施工管理、ならびに提案したモニタリング手法が妥当であることを実証した。また、保護仕上げ塗装による躯体の保護効果およ

び塗膜の耐久性、塗膜補修のサイクルを定量的に明らかにした。

第5章では、本論の結論を総括し、原子力発電所建屋コンクリートの施工管理ならびに維持管理に関する今後の展望と課題について述べた。

論文調査の要旨

原子力発電所施設の建屋には一般のコンクリート構造物よりも高度な耐震性ならびに放射線遮蔽性等が要求されるため、その構造体は高強度のマスコンクリートで構成されることになる。しかし高強度コンクリートは単位セメント量が多いため水和発熱量が大きくなり、マシン断面による断熱作用がその影響を助長して、硬化過程における温度が高くなる傾向にある。この時期の温度が高いと長期材齢における構造体コンクリート強度の増進は鈍化し、また温度ひび割れ発生の危険性が增大する。その結果、構造体強度の不足、遮蔽性の低下、そして耐久性の低下までもが懸念されることになる。施設の重要性を考慮すると、設計で要求される性能は、建設時のみならず供用期間中の長期にわたって、より確実に実現、維持される必要がある。しかし、研究対象とした発電所建屋の建設時には、施工事例が少ないこともあり、上記の強度管理やひび割れ抑制を含む施工管理の手法が必ずしも確立されていない状況にあった。また、供用中の施設の健全性を確認し対策の要否を判断する方法が体系化されていなかった。

本研究は、原子力発電所プレストレストコンクリート製格納容器(PCCV)を構成する高強度マスコンクリートの施工時における品質管理手法、および供用時における耐久性モニタリング手法を新たに提案し、その妥当性を実プラントで20年以上にわたって実証したものであり、その所見は以下のように取り纏められる。

著者はまず、初期強度発現の不足が懸念される冬期施工時における高強度マスコンクリートの強度管理手法を明らかにすることを目的として、実大模擬試験体を用いた実験ならびに解析を行っている。その結果、標準水中養生される小型の管理用供試体と実際の構造体コンクリートの強度差を補うために、使用するコンクリートの強度を高く設定するいわゆる強度補正值は、管理用供試体と構造体とで同じ材齢に強度試験を行う従来の方法では過大な値となり、セメント量の増加による温度ひび割れ発生のリスクが高くなることを示している。これに対し著者は、両者の試験時期、すなわち管理材齢を異なる時期とする方法を新たに提案している。つまり、管理用供試体強度の管理材齢は13週とし、冬期には初期強度は低いものの材齢13週以降の強度増進が大きいことやプレストレスを材齢6ヶ月で導入することを考慮して構造体コンクリート強度の管理材齢を6ヶ月に設定すれば、強

度補正值を小さい値としても要求性能を実現できることを明らかにしている。この方法により、温度ひび割れ発生のリスクを低減しながら、プレストレス導入時に必要な構造体コンクリート強度を確保することを可能としている。なお、管理用供試体強度と構造体コンクリート強度の管理材齢を異なる時期とする考え方は現在の「日本建築学会建築工事標準仕様書 JASS5 鉄筋コンクリート工事」などにおける構造体管理強度の補正值、いわゆる S 値に踏襲されている。

次いで、長期強度増進の鈍化や温度ひび割れ発生が懸念される夏期施工時における高強度マスコンクリートの強度管理ならびにひび割れ抑制手法を明らかにすることを目的として、実大模擬試験体を用いた実験ならびに解析を行い、その結果、冬期とは異なり管理材齢を長期化するだけでは対処が難しいことを明らかにしている。また標準期や冬期においては平均養生温度が構造体コンクリート強度に影響するのに対し、暑中期においてはコンクリートの最高温度が大きく影響することを明らかにし、使用した材料ならびに調合の場合、最高温度を約50℃以下とすれば構造体の強度低下を抑制できることを示している。これらの結果から、要求強度を確実に実現する方法として、フレークアイスを用いたコンクリートのプレクーリングを新たに導入し、これによる最高温度の抑制が、強度のみならず温度ひび割れ抑制にも効果があることを実験および解析により実証している。これらの成果は、「日本建築学会建築工事標準仕様書 JASS5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事」のほか「暑中コンクリート施工指針」などに取り入れられている。

最後に、実機建屋の体系的なモニタリング手法を確立することを目的として20年以上にわたる暴露実験および分析を行い、結果を整理している。まず、当該建物が供用開始後はその性質上、非破壊試験を含むあらゆる品質管理試験が十分には実施できないことを考慮して、実構造物を模擬し先行して暴露を開始した長期モニタリング供試体を用いて管理する方法を提案している。これによりコンクリートの長期強度ならびに耐久性の確認を行うと同時に、実機建屋に採用した仕上げ材等のモニタリング調査を長期にわたり実施している。さらに鉄筋に劣化が生じた場合の補修方法を提案し、模擬的に補修を行った部位の健全性を追跡調査している。これらの検討により、提案したモニタリング手法による管理が妥当であることを実証するとともに、保護仕上げ塗装による躯体の保護効果および塗膜の耐久性、塗膜補修実施時期の適切な間隔を定量的に明らかにしている。

以上要するに本論文は、原子力発電所プレストレストコンクリート製格納容器を構成する高強度マスコンクリートの施工時における品質管理手法、および供用時における耐久性モニタリング手法を新たに提案し、これらを実

プラントに適用したものであり、建築材料学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認める。

氏名（本籍） NASRUDDIN（インドネシア）
学位記番号 博士（工学）工博甲第265号
学位授与の日付 平成24年3月27日
学位論文題名 SEISMIC RESISTING PERFORMANCE OF A
NEW DOUBLE TUBE HYBRID SYSTEM FOR
MULTI-STORY BUILDINGS
多層建物に対する新ダブルチューブ
構造システムの耐震性能

論文調査委員

（主査） 九州大学 教授 河野 昭彦
（副査） " " 蜷川 利彦
 " " 前田 潤滋
 " " 名誉教授 崎野 健治

論文内容の要旨

本論文は、鉄筋コンクリート（RC）構造系中高層事務所建築を対象とした新たなダブルチューブ構造システムの開発に関する研究である。RC系のダブルチューブ構造システムは、一般に、建物中央に配置したRC耐震壁等の構面で囲った区画を内部チューブとし、比較的短スパンの純ラーメン構造とした建物外周構面を外部チューブとするものである。内部チューブは、耐震コアとして十分な剛性と耐力を付与し、脚部を中心として剛体回転を卓越させる。これにより、危険性の高い層崩壊を回避し、さらに建物の層間変形角の高さ方向分布を一様化して、各層毎に水平耐力を調整するのではなく、建物全体の転倒モーメント耐力について要求値を満たせばよいので、設計が容易になると同時に、外部チューブおよび付帯ラーメン部分についても各層水平耐力の高さ方向分布の調整が不要となるメリットがある。

しかし、従来のRC系ダブルチューブ構造システムは構造上の困難さも残している。例えば、内部チューブについては、耐震壁脚部は曲げを受けると曲げ引張側ではコンクリートのひび割れが発生して、コンクリートの有効断面積が小さくなるため、せん断耐力が低下して脆性的な破壊を生じやすくなる。そのため、大きな曲げとせん断力が作用する耐震壁脚部には過大とも思える余力を付与するなどの対応が求められている。また、RC耐震壁周囲の柱には強大な引抜き力が発生するが、これに耐えるためには強固な基礎や杭が必要となる。本論文は、ダブルチューブ構造システムにとって不可避と考えられていたこれらの構造上の困難さの解消を図ると共に、従来見

過ごされていた鋼管横補強RC柱（Tube-jacketing Reinforced Concrete column（TRC柱））やコンクリート充填鋼管（CFT）柱の高い靱性およびエネルギー吸収能力を積極的に利用して、新たな構法を内部チューブと外部チューブのそれぞれに導入し、耐震性能を飛躍的に向上させた新ダブルチューブ構造システムを提案するものである。新ダブルチューブ構造システムの研究の最終目的はその一般的な骨組の耐震設計法を確立することであるが、本論文では、内部チューブの制振壁に残された課題を解決し、外部チューブに新たなスパンドレル壁梁骨組を提案し、さらにダブルチューブ構造システムの典型的骨組に対する設計法を提案して、その耐震挙動が従来の場合に比較して飛躍的に優れたものであることを示した。

第一章では、研究の背景や目的、および新ダブルチューブ構造システム（Double Tube Hybrid System（DTHS））の概念を述べている。内部チューブの構面は、並列する二つの耐震壁を境界梁で連結したカップルドシアウォールとしている。独創的な点は、それぞれの耐震壁の脚部および頂部を短軸のTRC柱またはCFT柱を介して基礎あるいは屋上梁に取りつけた点、並びに境界梁を短スパンのH形鋼梁としてウェブせん断降伏型履歴ダンパーとした点である。これによって、耐震壁脚部の靱性が確保され、境界梁のウェブせん断降伏耐力を調整することによって耐震壁周囲の柱の引抜き力の低減が可能となり、従来の構造上の困難さが解決されると同時に、優れた制振効果が期待できる。これは、崎野健治博士が2008年に制振壁（Energy Dissipation Structural Walls（EDSW））として発表したもので、筆者も2008年10月から一部共同研究した。外部チューブについては、新たな構法としてスパンドレル壁梁骨組（Spandrel Wall Frame（SWF））を提案している。SWFはせいの高いスパンドレル壁梁とTRC柱またはCFT柱で構成し、柱降伏機構で設計して、TRC柱またはCFT柱の高い変形性能とエネルギー吸収能力を活用するものとしている。

第二章では、崎野健治博士による制振壁の力学挙動や構造詳細に関する基本的知見は、本論文の論旨を展開する上で不可欠であり、詳細に紹介している。本章では新たな研究成果として残された課題である柱のパンチングシア耐力について研究している。つまり、内部チューブの制振壁で危険な破壊形式は、耐震壁を支持するTRC柱のパンチングシア破壊である。そこで、TRC柱に強制的にパンチングシア破壊させる実験を行い、パンチングシア耐力は主として軸力比、主筋比、コンクリート強度、およびせん断スパン比に依存することを明らかにした。これらの実験結果を基に、日本建築防災協会の既存鉄筋コンクリート造建築物に関する耐震診断・改修指針のRC柱に対する耐力式を修正して、TRC柱のパンチングシア耐力式を提案した。これによるTRC柱のパン

チングシアア耐力と終局曲げ耐力を比較した結果、通常の骨組内での TRC 柱のプロポーシオンではパンチングシアア破壊の心配はないことを明らかにした。

第三章では、外部チューブであるスパンドレル壁梁骨組 (SWF) に関する実験的、解析的研究について述べている。スパンドレル壁梁は腰壁とたれ壁を一体とした梁部材であり、柱部材に対して自ずと高い耐力を持つ。その結果、柱降伏機構となるが、内部チューブの存在により層崩壊せずに全体降伏機構を形成する。柱は、TRC あるいは CFT であり、これらは優れたエネルギー吸収能力を持っているので、これを積極的に利用することで骨組全体の耐震性の飛躍的な向上を期待した。そこで、SWF の部分骨組試験体に繰り返し水平力を作用する実験を行い、柱降伏機構が予定通り形成されること、スパンドレル壁梁は弾性域に留まること、柱梁接合部の損傷はわずかであること、荷重変形関係は安定しており、エネルギー吸収性能が高いこと等を明らかにし、外部チューブとして SWF の有効性が高いことを示した。また、SWF の骨組解析モデルを提案し、部分骨組試験体の実験をシミュレーションし、実験の荷重変形挙動と極めてよく一致することを示した。

第四章では、新ダブルチューブ構造システム (DTHS) に関する解析的研究について述べている。同システムの典型的中高層骨組に対する設計法を提案し、3層、6層、および12層の骨組モデルを設計して、地震応答解析によってその優れた耐震性能を明らかにした。また、設計上の注意点として、極稀に生じる地震に対しては、現行法規で要求される必要転倒モーメント耐力では低層(3層)骨組の層間変形角応答がやや過大になるので骨組耐力に余裕のある設計が望ましいこと、さらに高層(12層)骨組では隅柱の軸力変動が大きいため TRC 柱の断面を大きくするか、あるいは断面寸法を変えない場合は CFT 柱にすることが望ましいことなどを明らかにした。

第五章は、各章で得られた知見をまとめて総括した。

論文調査の要旨

本論文は、鉄筋コンクリート系中高層事務所建築への利用を前提として、鋼管横補強鉄筋コンクリート柱の優れた耐震性能を明らかにし、同柱またはコンクリート充填鋼管柱を適所に併用し、これらの高い靱性とエネルギー吸収能力を有効に利用する新たなダブルチューブ構造システムをさらに発展させ、従来の同システムの課題を解決すると同時に、耐震性能を明らかにし、設計法を確立して、同システムの実用化を大幅に推進させたもので、建築構造学について重要な知見を得たものとして価値ある業績と認める。

氏名(本籍) 喬 崎雲(中国)
学位記番号 博士(工学) 人環博甲第267号
学位授与の日附 平成24年3月27日
学位論文題名 EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANICAL BEHAVIOR OF EXPOSED-TYPE COLUMN BASES OF CONCRETE FILLED STEEL TUBES BY USING BUILT-IN REINFORCING BARS
内蔵鉄筋を使用したコンクリート充填鋼管露出柱脚の力学的性状に関する実験的研究

論文調査委員

(主査) 九州大学 教授 河野 昭彦
(副査) " " 蜷川 利彦
" 北九州市立大学 " 津田 惠吾

論文内容の要旨

本研究は、円形および正方形のコンクリート充填鋼管(CFT)柱の露出柱脚を対象として、鉄筋を内蔵させることにより、CFT柱と基礎コンクリートとの接合耐力の向上、ベースプレートとアンカーボルトの簡素化、あるいはベースプレートとアンカーボルトの省略を可能にする新たなCFT露出柱脚構法を開発するものである。

従来のCFT露出柱脚は、CFT柱脚部分の応力をベースプレートとアンカーボルトによって基礎コンクリートへ伝達するもので、純鉄骨柱の露出柱脚構法を踏襲したものであるが、CFT柱は同一外径の純鉄骨柱と比較して曲げ耐力が高く、固定柱脚とすることは困難である。ところで、CFTに鉄筋を内蔵することは、比較的薄肉の鋼管を使用する欧米では一般的であり、日本でも近年研究が進められている。これをCFTR(Concrete Filled Tube with Reinforcing bars)と呼ぶことにして、CFTRの特性を活かした新たな露出柱脚の構法の一つとして、柱脚をCFTRとし、CFTRの内蔵鉄筋を基礎コンクリートまで延長して定着させる構法を提案した。CFTRでは、鋼管内面に機械的ずれ止めを設ければ鋼管と充填コンクリートを一体化できるので、CFTRは柱脚部分だけとし、それ以外は通常のCFTとして内蔵鉄筋を配置する必要はない。この新たな応力伝達機構を追加することにより、固定支持が実現できる。

また、一方では、CFTR露出柱脚での応力伝達を内蔵鉄筋のみとし、ベースプレートやアンカーボルトを省略することも可能である。このベースプレート省略型CFTR露出柱脚は、CFT柱の幅厚比や径厚比が大きければ、内蔵鉄筋の強度や配筋量を増大させることで固定柱脚とすることも可能であるが、柱脚が降伏する場合の検討も必要である。ベースプレート省略型CFTR露出柱脚は、ベースプレートやアンカーボルトが躯体費としては比較的大

きな割合を占め、施工精度も要求されるので、実用上有効であると考えられる。また、近年開発されたH-SA700材のような超高強度鋼は、それに見合う強度を持つ溶材が未開発で鋼管とベースプレートの溶接接合が困難である。また、溶剤が開発されたとしても超高強度鋼の溶接は高度な技術と品質管理を要するため、溶接接合が不要なベースプレート省略型CFTR露出柱脚は超高強度鋼CFT柱に対して合理性を持つと考えられる。

本論文は、角形CFT柱あるいは円形CFT柱について、ベースプレートがある場合のCFTR露出柱脚あるいはベースプレート省略型CFTR露出柱脚の耐力および弾塑性挙動を実験的に調べるもので、6章から構成されている。

第一章では、本論文の研究の背景、および論文全体の構成について述べている。

第二章では、CFTR接合部の内蔵鉄筋の引き抜き試験を行い、CFTR露出柱脚の設計に不可欠であるCFT側の内蔵鉄筋の引き抜き耐力を調べた。実験では、考えられ得るすべての破壊モードを再現することができた。つまり、内蔵鉄筋の降伏と破断、鋼管の降伏と破断、CFTR内の機械的ずれ止めでのコンクリートの支圧破壊、内蔵鉄筋の付着破壊、内蔵鉄筋の端部に設けたアンカープレートでのコンクリートの支圧破壊やパンチングシア破壊である。その結果に基づいて、すべての破壊モードを考慮したCFTR接合部の最大強度評価式、および短期許容耐力評価式を提案した。

第三章では、角形CFT柱に対するCFTR露出柱脚の繰返し水平荷重実験を行った。試験体はCFT柱、CFTR柱脚、ベースプレート、アンカーボルト、RC基礎およびRC基礎梁で構成される片持ち柱形式のもので、柱に一定鉛直荷重を作用して、水平荷重を正負交番で繰返し載荷する。実験変数は、鋼管の幅厚比、軸力比、内蔵鉄筋の有無、ベースプレート形状、およびアンカーボルト量である。ベースプレートはほぼ弾性に留まるようにし、原則としてCFT柱の曲げ耐力とCFTR露出柱脚の曲げ耐力がほぼ等しくなるようにしている。水平荷重変形挙動はスリップ型を呈するが、大変形域まで安定しており、十分な変形性能があることを明らかにした。また、耐力評価式は、ベースプレート下面のコンクリートに対して支圧強度を期待する範囲を有効断面と定義し、これと内蔵鉄筋とアンカーボルトで構成される断面の一般化累加強度として導出した。これによってCFTR露出柱脚の終局曲げ耐力の実験値が精度よく評価できた。

第四章では、角形CFT柱に対するベースプレート省略型CFTR露出柱脚の弾塑性挙動を実験的に調べた。実験変数は軸力比であり、0、0.25、0.5としている。それぞれの軸力比に対応する3体の試験体について、第三章と同様な荷重条件で実験を行った。荷重変形挙動は、スリップ型を呈するが、大変形域まで極めて安定しており、十

分な変形性能があることを確認した。また、実験で得られた柱脚の終局曲げ耐力は、充填コンクリートと内蔵鉄筋からなるRC断面に対してコンクリート部分をシリンダー圧縮強度、内蔵鉄筋をそれぞれ引張または圧縮の降伏耐力を仮定して求めた一般化累加強度によって概ね評価できることを明らかにし、この考えに基づく耐力評価式を導出した。

第五章では、円形CFT柱についてベースプレート省略型CFTR露出柱脚の弾塑性挙動を実験的に調べた。円形鋼管の径厚比は100として主として固定柱脚を想定した試験体を実験した。径厚比が大きいので念のためフープ筋も配した。荷重条件は、第三章、第四章と同様である。実験変数は、軸力比、コンクリート強度、内蔵鉄筋の強度および配筋量、そしてフープ筋量である。実験結果から、いずれの試験体もスリップ型を示すが大変形域まで安定した荷重変形関係を示し、変形性能は十分であることを確認した。また、柱脚の実験耐力は、充填コンクリートと内蔵鉄筋から構成されるRC断面に対して、日本建築学会のCFT構造設計施工指針による拘束効果を考慮したコンクリート強度を用いた一般化累加強度によって、精度よく評価できることを明らかにした。

第六章は以上の結果の総括であり、新たに提案したCFTR露出柱脚およびベースプレート省略型CFTR露出柱脚が、CFT構造の耐震性向上、高強度化への対応、並びに施工性向上に大きく貢献することを述べて結びとした。

論文調査の要旨

本論文は、円形および正方形のコンクリート充填鋼管(CFT)柱の露出柱脚を対象として、柱脚部分に鉄筋を内蔵させることにより、CFT柱と基礎コンクリートとの接合耐力の向上、ベースプレートとアンカーボルトの簡素化、あるいはベースプレートとアンカーボルトの省略を可能にする新たなCFTR(Concrete Filled Tube with Reinforcing Bars)露出柱脚構法を開発したもので、建築構造学について重要な知見を得たものとして価値ある業績と認める。

氏名(本籍) 張 櫻子(中国)
学位記番号 博士(工学)人環博甲第269号
学位授与の日附 平成24年3月27日
学位論文題名 Transformation of Urban Structure and Composition of Living Spaces in Growing Cities of Tibet (チベット成長都市における都市構造の変容と生活空間の構成に関する研究)

論文調査委員

(主査) 九州大学 准教授 趙 世 晨
(副査) " 教授 南 博 文
" 東京大学 " 出口 敦

論文内容の要旨

標高3,000メートルを越えるチベットの高原都市では、独特の気候・風土やチベット仏教を中心とする宗教・文化と密接に関係した都市構造や生活空間が形成されてきた。その一方で、近年、チベット自治区の首都であるラサ市への長距離鉄道の開通やポタラ宮等の世界遺産登録を契機に観光需要が急増し、主要都市では人口増加と市街地拡張を伴う急速な都市成長が進行している。そのような中、歴史的環境や都市文化の保全を図りながら、今後急速に進むことが予測される都市開発を計画的に誘導していくことが、主要都市における都市計画上の重要課題となっている。

そこで、本研究では、チベットの高原都市を対象に、歴史文化的な成り立ちを整理した上で、主要都市に共通した都市の骨格である環状巡礼路に着目した都市構造の形成・変容過程と生活の場としての巡礼路や住宅の空間構成と利用実態の分析を通じ、今後も成長が見込まれるチベット高原都市の都市計画上の課題及び対応について論じることを目的にしている。

本論文は、序論、本論、及び結論の6章で構成されている。

第1章では序論として、研究の背景、研究目的と方法について述べ、関連既往研究のレビューと本研究により期待される効果を提示し、本研究の枠組みを明確にした。また、チベットの都市独特の成り立ちに影響を及ぼしてきた主要な要因を地理と気候等の自然要因、宗教、文化、統治制度等の社会的要因、寺院等の都市核と旧市街地形成等の歴史的要因に大別して整理した。

第2章では、チベットの主要都市全般を対象に、クラスター分析を通じた都市構造上の特徴を踏まえた上で、土地利用やインフラ整備に関する課題を整理した。まず、チベット自治区内72県それぞれの最大規模の都市にラ

サ市を加えた主要都市群から47都市を抽出し、文献調査と地図データの分析に基づき、都市形成上の主要因として都市核の数と機能、旧市街地の配置、新旧市街地の位置関係の4つの歴史的要因を説明変数とするクラスター分析を行った。その結果、対象都市群が5つのクラスターに分類でき、それぞれのクラスターごとに異なる形態的特徴が特定できることを示した。更に、各クラスターの形態的特徴に基づく都市計画上の課題を整理した。

第3章では、チベット自治区の中心都市ラサ市を対象に、文献調査及び1956、1970、1985、2007年の4時点の地図の比較分析に基づき、2つの都市核と3つの環状巡礼路を骨格とする都市構造の原型が近代化の過程の中で変容し、市街地が拡張していく過程を整理した。即ち、その変容過程は、2つの都市核と旧市街地が形成される第一段階から、4つの都市核形成と旧市街地の西方への拡張の第二段階を経て、4つの都市核を包含する市街地拡張の第三段階に至る段階的変化として説明できることを示した。

更に、同市における過去15年間の人口と観光客数等の変化の分析に基づき、観光産業を中心とした経済成長がラサ市の社会動態と生活様式の変化に及ぼす影響を考察すると共に、流入人口の急増に起因する過密化と市街地の無秩序な拡張がもたらす都市計画上の課題を明らかにした。

第4章では、チベット都市の伝統的な生活空間の典型として、ラサ市の旧市街地内における伝統的な住宅街区を対象に取り上げて、現地調査に基づき、各街区内に立地する寺院と住宅群の配置構成から見た住宅街区の類型とその特徴を明らかにした。更に、2つの異なるタイプの伝統的住宅を対象にした実測調査と冬季の温熱環境の計測調査に基づき、住宅内部の配置構成の特徴と室内環境の実態と課題を明らかにしたと共に、居住者へのアンケート調査に基づき、夏季と冬季における台所と南向き居室の利用法の違いや居室内の宗教空間の利用法の特徴を明らかにし、チベット都市独特の生活様式に適応した住環境の改善方策を提示した。

第5章では、チベット仏教徒の日常的な宗教行為の場としての巡礼路に着目し、ラサ市中心部を対象に、3つの代表的な巡礼路の配置や形成過程を整理した上で、現地調査に基づき、代表的巡礼路の形態的特徴を明らかにした。即ち、幅員や構成要素等から空間構成を4タイプに類型化し、巡礼者の夏季と冬季それぞれの路上の行為を記録、分析し、夏季と冬季それぞれにおける時間帯別の路上の人口密度変化、沿道建物用途や道路内の樹木や

ファニーチャ等の構成要素と路上行為と関係、路上の人の分布状態の特徴と季節間の相違を明らかにした。また、以上の調査結果に基づき、歴史環境保全と利用者の利便性や快適性の観点から見た巡礼路環境のタイプ別の課題とその課題解決のためのガイドラインを整理した。

最後に、第6章では上述までの章を通じて得られた知見を総括し、本論文の結論とした。

論文調査の要旨

昼夜の気温差が大きく、日照時間が長いなど独特の気候風土を持つチベット高原の都市では、これまで伝統的な都市空間や建築様式が形成され、自立的な都市活動が行われてきたが、近年の鉄道開通や世界遺産の指定などから観光化が進行し、ラサ市等の主要都市では人口増加と市街地の拡張が進行している。しかしながら、研究蓄積の少ないチベット都市において、近年の動向を踏まえた持続的な成長に向けた都市計画を検討するためには、都市の構造と成り立ちの整理や、チベット仏教と密接に関わる住宅や街路空間等の生活空間の使われ方や居住環境の実態を把握する必要がある。

本研究では、調査が困難とされてきたチベット高原都市に関する現地調査や文献調査を通じ、2つのアプローチを行っている。まずは、チベットの主要都市の都市構造と成り立ちから見た類型と環状の巡礼路を骨格とする都市構造の形成とその変容過程について論じ、更に、ラサ市を対象にした住宅や巡礼路等の生活空間の空間構成と温熱環境を明らかにし、住宅内部と巡礼路の利用実態の調査に基づく整備ガイドラインの提示を通じ、チベット高原都市が抱える課題とその解決の方策について論じている。その所見は以下の通り取りまとめられる。

(1) チベット高原の気候風土や宗教の影響から、チベットの都市は極めてユニークな成り立ちの歴史を持つが、文献調査に基づき、都市の成り立ちに影響を及ぼしてきた主要因を地理と気候等の自然要因、宗教、文化、統治制度等の社会的要因、寺院等の都市核と旧市街地形成等の歴史的要因に大別して整理した。

(2) チベット自治区内の72県内に分布する主要都市の内、47都市を対象にした地図データ分析に基づき、都市形成上の主要因として歴史的要因に着目し、都市核の数、都市核の機能、旧市街地の配置、新旧市街地の位置関係の4つの要因を説明変数とするクラスター分析を行い、対象都市群が5つのクラスターに分類でき、クラスターごとに異なる形態的特徴が特定できることを示した。また、各クラスターの形態的特徴に基づく類型化を行い、

チベット主要都市の類型別の都市計画上の課題を整理した。

(3) チベット自治区の中心都市ラサ市を対象にした1956年以降の4時点の地図データの比較分析に基づき、2つの都市核と3つの環状巡礼路を骨格とする現在の都市構造の原型が近代化の中で変容する過程を市街地拡張の過程と共に整理することで、ラサ市の都市構造の変容過程が、2つの都市核と旧市街地が形成される第一段階、4つの都市核形成と旧市街地の西方への拡張の第二段階、4つの都市核を包含する市街地拡張の第三段階の大きく3つの段階的变化として説明できることを示した。

(4) ラサ市における過去15年間の人口や観光客等の社会動態の分析に基づき、観光産業を中心とした経済成長と流入人口の急増がもたらす過密化と市街地の無秩序に起因する都市計画上の課題を整理した。

(5) ラサ市旧市街地内における伝統的な住宅街区を対象にした現地調査に基づき、街区内に立地する寺院と住宅群の配置構成に着目した住宅街区の類型化を行い、各類型の特徴を明らかにした。

(6) 伝統的住宅を対象にした実測調査と冬季温熱環境の計測調査に基づき、住宅内部の配置構成の特徴と室内環境の実態と課題を明らかにすると共に、居住者アンケート調査に基づき、夏季と冬季における居室の利用法の違いや宗教空間の利用法の特徴を整理し、チベット独特の生活様式に適応した住環境の改善方を提示した。

(7) ラサ市中心部における3つの代表的な環状巡礼路の配置や形成過程と街路空間の形態的特徴を整理した上で、構成要素等から街路空間の構成を4タイプに類型化した。更に夏季と冬季それぞれにおける巡礼者の路上での行為分析を通じ、街路の物的環境と路上行為の特徴や分布との関係及び季節間の相違を明らかにした。

(8) 巡礼路環境の調査結果に基づき、歴史環境保全と巡礼者を主とする利用者の快適性や利便性の双方の観点から見た巡礼路環境の課題を整理すると共に、ガイドラインの提案を通じ、課題解決の方策を提示した。

以上、要するに、本論文は、チベット高原都市の成立要因の整理と主要都市の都市構造形成の観点から見た類型化を行い、類型別の都市計画上の課題を明らかにすると共に、ラサ市における環状の巡礼路を骨格とする都市構造の変容と市街地拡張の双方の過程の把握を通じ、同市の成長が3段階の過程で説明できることを示した。また、ラサ市内の伝統的な住宅街区の類型とそれぞれの特徴、及び住宅内部の室内環境の実態と課題を明らかにした上で、居住環境の改善策を提示すると共に、同市の3

つの主要な巡礼路における夏季・冬季の巡礼者の行為分析により物的環境と行為との関係を明らかにし、巡礼路環境の課題整理に基づく歴史的環境保全と利用者の利便性や快適性の双方の観点から見たガイドラインの提案を通じ、チベット成長都市における生活空間の課題と改善方策について論じており、都市計画学に寄与するところが大きい。
よって、本論文は博士（工学）の学位に値するものと認める。

氏名（本籍） 武田 裕之（岡山県）
学位記番号 博士（工学）人環博甲第270号
学位授与の日附 平成24年3月27日
学位論文題名 日本型持続都市の実現に向けた都市評価手法の開発と応用

論文調査委員

（主査） 九州大学 准教授 有馬 隆文
（副査） 教授 坂井 猛
" " 赤司 泰義

論文内容の要旨

近年、多くの分野において「持続可能性」という概念が注目され、持続可能性に関する多くの問題・課題が指摘されている。また、持続性に関わる諸問題は人間の活動の中から発生したものであるが、その活動の場である都市においても多岐に亘る課題が顕在化している。これらの課題の解決には、社会や経済の改善のみならず、持続可能な新たな都市モデルの構築、その実現に向けた政策立案、さらには法制度の整備が必要であり、現在、コンパクトシティを始めとする持続可能な都市のモデルやその実現方策としての政策・制度が模索されている。

日本の地方都市においても、都市拡張を前提とした近代都市計画から都市の持続化に主眼を置いた計画への転換期にあり、コンパクトシティ政策や公共交通指向型開発（以下 TOD）などの取り組みがみられる。しかし、日本における都市構造や交通利用などと都市持続化の関係は未だ明確でないことから、都市持続化の観点に基づく都市の評価手法の確立や今日の社会・生活に適した持続都市の計画論の構築には至っていない。

そこで本研究では、これまでに提唱された持続都市を指向する都市モデルや都市計画・政策の概念整理を行った上で、都市を持続的観点から評価するための要件及びその具体的な評価指標を提案し、九州各都市をケーススタディとして、都市の形態、都市骨格とネットワーク、求心力ある中心市街地の評価を持

続可能性の観点から定量的に論じ、日本における持続都市の実現に向けた方策と課題を明らかにする。

第1章では序論として、研究の背景、目的、論文の構成と共に既往研究を整理し、本論文の意義について述べている。

第2章では、文献調査に基づき、これまでに提案された持続都市モデル及び国内外の都市計画や政策を収集し整理することで概念整理を行い、3章以降の着眼点を明確にした。文献調査の結果として、持続化に関する都市モデル11件及び都市計画・政策25件を抽出し、これらの言説から持続化に重要な6つの視点「中心市街地、交通・ネットワーク、居住、地域アイデンティティ、自然環境、成長管理」を導出し、さらに都市持続化のための12の要件を明確にした。

第3章では、前章で導出された結果とコンパクトシティの要件から都市の持続性を評価する指標を考案し、九州各地の都市と青森市・富山市を持続性の観点から評価した。また総合評価であるコンパクトシティ度を算出してランキング評価を行い、上位に位置づけられた都市の特徴から日本におけるコンパクトシティ像を明確にした。

第4章では、都市の交通・ネットワークに着目した。持続都市の1つの要件は公共交通の利用の高さである。本章では福岡市における交通手段別の利用実態を把握すると共に、公共交通利用を促進すると言われる TOD と交通手段選択との関係を明らかにすることを目的とし、福岡市を TOD の観点から都心、副都心、駅勢圏内、駅勢圏外の4種のエリアに分け、各エリア間の交通手段別トリップ数をパーソントリップ調査（以下 PT 調査）のデータをもとに、TOD が交通手段選択にもたらす影響を検証した。TOD のエリア別トリップでは、都心エリアが起終点に含まれる場合に、公共交通に対する依存度が高いこと、都心への商業・業務の集積は公共交通利用促進に大きく寄与することを定量的に実証した。また、福岡市における交通・ネットワークの課題として、鉄道とバスの役割分担によるサービスの向上を指摘した。

第5章では、PT 調査のトリップデータ 71,463 件を用いた決定木分析に基づく意志決定モデルを作成し、交通手段選択における意思決定の条件を明らかにした。次に、公共交通への転換が求められる自動車保有者の通勤 14,143 件に着目してその意志決定モデルを作成し、TOD を推進した場合における交通手段選択のシミュレーションから TOD 推進の効果を予測した。結果として交通手段選択における意思決定の条件として、移動距離、保有自動車の有無、出発地が都心か否かが交通手段選択に大きく影響していることを示した。一方、シミュレーションの結果から自動車保有者の公共交通利用転換を進めるには、勤務地を都心に誘導することが重要であることを指摘した。

第6章では、TOD圏内の住宅や業務の集積は公共交通利用の推進に寄与することが想定されるため、住宅面積、業務面積の増減と通勤における交通分担率の経年変化を分析し、福岡市におけるこれらの動向から両者の関係を見出した。住宅面積の増加量が大きいTOD圏内では公共交通利用が増加しているが、業務面積の増加量が大きい副都心では自動車利用が増加していること、すなわち、副都心ではその周辺から自動車によって通勤する割合が高く、副都心における業務面積の増加は公共交通利用促進に寄与しないことを定量的に明らかにした。

第7章では、中心市街地に着目した。持続都市において賑わいがあり、求心力の高い中心市街地の存在は極めて重要である。そこで本章では、中心市街地の賑わいや求心力に影響を及ぼすと考えられる項目を既往研究等から抽出し、中心市街地を「賑わい性能」の観点から評価する指標を提案すると共に、その結果を相対的に比較し「中心市街地カルテ」として表現する評価法を開発した。そのケーススタディとして5つの都市を分析し、賑わい性能からみた各都市の特徴と課題を明らかにした。

最後に第8章では、上述までの章を通じて得られた知

見を総括し、本論文の結論としている。

論文調査の要旨

本論文は、これまでに提唱された持続化を指向する都市モデルや都市計画・政策を概括し、都市の持続化に必要な要件とその具体的な評価指標を整理した上で、日本の39都市を対象に持続都市の1つのモデルであるコンパクトシティへの適合度を算出し、その結果を相対的に評価することで日本におけるコンパクトシティ像を明らかにした。更に、公共交通利用を促進するTOD都市構造と交通手段選択の関係を明らかにした上で、公共交通利用を推進するための方策を、交通手段選択の意思決定モデルを活用したシミュレーション及びTOD圏内の住宅・業務面積増減と公共交通利用の経年変化の関係から考察し、都心の求心力向上が公共交通利用の推進に寄与することを明らかにすると共に、求心力のある都心の実現に向けた新たな都心の評価法の提案を行い、5都市をケーススタディとした検証の結果について論じており、都市計画学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位に値するものと認める。