

博士學位論文

内容の要旨
および
審査結果の要旨
第12号

平成28年度
広島工業大学

は し が き

本編は、学位規則(昭和28年4月1日文部省令第9号)第8条による公表を目的として、
本学において博士の学位を授与した者の『論文内容の要旨および論文審査結果の要旨』
を収録したものである。

目 次

課程博士

【工学系研究科】

(学位記番号)	(学位の種類)	(氏名)	(論文題目)	(頁)
甲第14号	博士(工学)	久保直也	建物内に敷設する電力線周辺での磁気遮蔽対策に関する研究 ...	1
甲第15号	博士(工学)	小松真吾	ノンコンプレッションブレース鋼構造架構の耐震性能に関する研究 ...	5

氏名	久保 直也
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 14 号
学位授与年月日	平成 29 年 3 月 18 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	建物内に敷設する電力線周辺での磁気遮蔽対策に関する研究
論文審査委員	【主査】教授 清田 誠良 教授 永田 武 教授 田中 武

内容の要旨

建物内の電気設備からは低周波磁界が発生する。磁界は、コンピュータ機器、電子顕微鏡、電子線描画装置、MRI などに対し、画像の乱れや機器の機能低下などの磁気障害を起こすことがある。建物内では、機器を安全かつ正常に動作させることが重要であり、磁気環境面での検討が必要不可欠となっている。

建物の電気室およびその周辺には、建物内へ電力を供給するために多くの電力線が敷設されている。特に、変圧器の低圧側から各階の分電盤へ向けて敷設される電力線では、比較的大きな電流が流れ、多数の電力線を集中して敷設するため、周辺への漏洩磁界が大きくなり、磁気遮蔽対策の検討が必要である。

著者は、建物内の電力線周辺のみを角筒形状の磁性材料により囲む磁気遮蔽方法について研究した。この磁気遮蔽方法では、電力線の周辺を完全に磁性材料で取り囲むことで高い遮蔽効果を得られる。しかし、電力線からは通電による発熱があり、電力線に通電できる許容電流を低下させないために、放熱を考慮した方法が要求される。そこで、磁性材料に穴を開けて放熱を考慮できる手法を考案した。本研究は、基礎的な検証により、電力線周辺での角筒形状の磁気遮蔽方法が磁界を効率よく低減でき、放熱を考慮した開孔タイプの磁気遮蔽においても有効な技術であることを示すとともに、本手法における考え方や条件による違いについて、将来の設計用指針に向けての資料として提供することを目的としている。

本論文の構成を以下に示す。

第 1 章は序論であり、本研究の目的について述べ、既往の研究内容を踏まえたうえで本論文の位置付けを示す。また、本論文での必要な基礎的事項の概要を説明する。

第 2 章では、研究計画を示したうえで、本研究での実験方法や解析方法について説明する。

第 3 章では、電力線周辺での磁気遮蔽対策において、実験および解析により、角筒形状の磁気遮蔽方法の有効性を明らかにする。さらに、各種条件による遮蔽効果の違いを示すことで、遮蔽効果が大きくなるより有効な条件を検証する。

第 4 章では、電力線周辺での放熱を考慮した開孔タイプの磁気遮蔽方法について、開孔条件と放熱効果の関係を実験および解析により検証する。

第 5 章では、第 4 章で示した開孔タイプの磁気遮蔽方法の遮蔽効果について、実験および解析により検証する。さらに、各種開孔条件による違いを示すことで、開孔タイプの磁気遮蔽方法における設計用指針への提案内容について検討する。

第 6 章では、第 4 章および第 5 章で示した開孔タイプの磁気遮蔽方法について、放熱効果および遮蔽効果の関係を整理する。

第 7 章では、第 3 章から第 6 章の結果をもとに、本論文での総括を示し結論とする。

本研究では、実規模モデルによる実験および解析の両面から各検証作業を実施することで、解析による各種条件での磁気遮蔽の設計に活用できることも視野に入れて進めた。

実験装置において、交流安定化電源、三相変圧器および 3 本のケーブルにより、最大 800A の三相電流を通電できる回路を構成した。3 本の直線ケーブルは、木製および樹脂製の支持台上に中心間距離 50mm で水平に並べ、そのケーブル周辺に、1 辺 150mm の正方形管形状による磁性材料 (PB パーマロイ) を遮蔽材として設置した。計測においては、各ケーブルの通電条件をクランプ型電流センサおよびオシロスコープにより確認している。磁気遮蔽実験では、磁気センサを非磁性材料による支持台に固定し、3 軸型の磁界計測器により磁束密度を計測した。また、放熱効果実験では、複数の温度測定点に T 型熱電対を設け、記録計により温度変化を記録した。

解析においても実験時と同様、3 本の直線ケーブル周辺に PB パーマロイの正方形管 (1 辺 150mm) を設けたモデルを構成した。磁場解析では、電磁場解析ソフトウェア (フォトン製 PHOTO-EDDY) を用い、材料特性を考慮した解析モデルにより漏洩磁界や遮蔽効果の計算を実施した。また、熱流体解析では、熱流体解析ソフトウェア (ソフトウェアクレイドル製 STREAM) を用い、材料開孔にともなう電力線周辺での放熱効果を確認した。

電力線周辺での磁気遮蔽対策において、角筒形状の磁気遮蔽方法の有効性を明らかにすることを目的とし、実験および解析により研究を進めた。

距離減衰特性としては広い範囲で高い磁気遮蔽効果を得られたが、電流特性としては使用する材料の磁気飽和などの磁気特性により、高い磁気遮蔽効果を得られる有効な電流範囲が限定されることを確認した。

材料の厚さおよび層数を変えたときの磁気遮蔽効果の違いについて検証し、厚さおよび層数のいずれが大きい材料でも大電流時に高い磁気遮蔽効果を確保できるが、多層時のほうが有効であることを確認できた。なお、角筒形の磁気遮蔽においても、円筒モデルによ

る基本理論式と同様の傾向が得られることを示せた。

電力線周辺で磁気遮蔽対策を施す際には放熱対策を検討することが重要であると考え、磁性材料への開孔を想定したときの放熱効果について、実験および解析により検証した。

実験および解析では同様に、正方形管が無い場合に比べ、開孔無しの正方形管では温度上昇が大きくなるが、材料への開孔率の増大により正方形管無しでの温度に近づくことを確認した。また、開孔にともなう放熱効果の式を定義し、開孔率による放熱効果の特性を整理した。

電力線周辺での放熱を考慮した開孔タイプの磁気遮蔽方法において、開孔時の遮蔽効果を実験および解析により検証した。

開孔率が異なる条件での磁気遮蔽効果の違いについて検証し、開孔率が大きい条件ほど磁気遮蔽効果が低下するが、例えば開孔率 20%の条件においても、高い磁気遮蔽効果を確保できることを示した。このとき、材料の開孔による漏洩磁界の影響に加え、特に大電流時には開孔率の増加にともない磁気遮蔽効果が低下することを示した。

並列形と千鳥形での開孔配列による遮蔽効果の差は小さいが、大電流時では千鳥形を選択したほうが有利になることを示した。また、開孔数を増やすのではなく各開孔径を大きくした場合、電力線の近傍では磁気遮蔽効果が低下しやすいが、十分に遠方を対象とした磁気遮蔽の場合には、開孔径の影響を考慮せずに設計できることが明らかになった。

磁性材料への開孔時において、放熱効果および磁気遮蔽効果の関連性を確認するため、開孔にともなう両者のデータ比較を実施した。

開孔率にともなう磁気遮蔽効果の保持比を定義することで、開孔による磁気遮蔽効果の低下度合いを分かりやすく示した。開孔にともなう放熱効果および磁気遮蔽効果の保持比を同図内に整理することで両者の関係を分かりやすく示し、開孔材料を用いた磁気遮蔽の設計時における開孔条件の選定につながる結果を得ることができた。

審査結果の要旨

建物内の電気設備からは低周波磁界が発生する。磁界は、コンピュータ機器、電子顕微鏡、電子線描画装置、MRI などに対し、画像の乱れや機器の機能低下などの磁気障害を起こすことがある。建物内では、機器を安全かつ正常に動作させることが重要であり、磁気環境面での検討が必要不可欠となっている。

建物の電気室およびその周辺には、建物内へ電力を供給するために多くの電力線が敷設されている。特に、変圧器の低圧側から各階の分電盤へ向けて敷設される電力線では、比較的大きな電流が流れ、多数の電力線を集中して敷設するため、周辺への漏洩磁界が大きくなり、磁気遮蔽対策の検討が必要である。

本論文は建物内の電力線周辺のみを角筒形状の磁性材料により囲む磁気遮蔽方法について明らかにした論文である。まず、この磁気遮蔽方法では、電力線の周辺を完全に磁性材料で取り囲むことで高い遮蔽効果を得られる。しかし、電力線からは通電による発熱があり、電力線に通電できる許容電流を低下させないために、放熱を考慮した方法が要求される。そこで、磁性材料に穴を開けて放熱を考慮できる手法を考案した。

本論文は、基礎的な検証により、電力線周辺での角筒形状の磁気遮蔽方法が磁界を効率よく低減でき、放熱を考慮した開孔タイプの磁気遮蔽が有効な技術であることを示すとともに、本手法における考え方や条件による違いについて、将来の設計用指針に向けての資料として学術及び実用の面から優れた独創性を有する学位論文であることを審査員全員一致により高く評価された。

本論文の公聴会は、平成 29 年 2 月 14 日に、Nexus21-601 号教室において開催され、本論文に関する質問があったが、何れについても明快な回答がなされた。その結果、審査委員全員が一致して学位の資格を有するものと判断した。

氏名	小松 真吾
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 15 号
学位授与年月日	平成 29 年 3 月 18 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	ノンコンプレッションブレース鋼構造架構の耐震性能に関する研究
論文審査委員	【主査】教授 高松 隆夫 教授 荒木 秀夫 教授 中村 省三

内容の要旨

鋼構造建築物においては、容易に耐力および剛性を上昇させることのできる耐震要素としてブレースが多く用いられる。地震時に作用する水平力をブレースに大きく負担させる設計とすることで、柱や梁等の部材断面を小さくすることができ経済的な耐震構造を実現することが可能となる。しかしながら、従来から用いられているブレース（以降、従来型ブレースと表記する）は圧縮力による座屈に基因して、繰返し荷重作用下において耐震性能が劣化することが過去多数の研究によって明らかにされている。

従来型ブレースの問題点を解決するために、芯材の座屈を拘束することで圧縮力作用下においても安定した挙動を示す座屈拘束ブレースが開発され、現在は構造物の設計において最も広く用いられている。一方で、著者等も楔デバイスと呼ぶ装置を端部に設置することで圧縮力が作用しないノンコンプレッションブレースを開発している。架構に X 型に配置するとともにブレース初期張力を導入することで座屈拘束ブレースと同様な完全弾塑性型復元力特性を示すことが明らかにされている。

しかしながら、こうした降伏後に地震入力エネルギー消費を図るシステム（以降、鋼材ダンパー架構と表記する）は、弾性範囲では地震入力エネルギーを消費できず、また構造物が高剛性を維持するため地震時の絶対加速度が高くなりやすい。絶対加速度が高いと、構造部材が弾性に留まる程度の地震動レベルにおいても、室内什器の転倒や滑り、内外装材の損傷が発生することが指摘されており、弾性時から積極的に地震入力エネルギー消費できるシステムが求められている。

このような背景の中で、著者等は上述の問題を解決しうる新しい構造システムとして、Z 型 NC ブレース架構、非対称 Z 型 NC ブレース架構を提案してきた。これらのブレース架構は、NC ブレースの特性によりブレース弾性範囲にあっても弾性ひずみエネルギー蓄積により地震入力エネルギー消費し地震応答を低減するという大きな特徴を有している。しかしながら、一方向漸増変形の機構や地震応答性状を十分に検討できていないため、その耐震性能は明らかではないのが現状である。

そこで、本論文では Z 型、非対称 Z 型に比較対象である X 型を加えた NC ブレース架構の耐震性能を明らかにする。振動台実験によりその基本的性能を明らかにし、数値解析により通常の鋼材ダンパー架構と比較を行うことで、各 NC ブレース配置架構の耐震性能について検討する。最後に、NC ブレース架構の地震応答予測手法を提案し、耐震設計法の基礎理論を構築する。

第 1 章「序論」では、従来の鋼材ダンパー架構における問題点を示し、ノンコンプレッションブレース架構を研究する必要性について述べた。

第 2 章「1 層 Z 型 NC ブレース架構の振動台実験および実大 1 層架構の数値解析」では、1 層 Z 型、非対称 Z 型、X 型 NC ブレース架構の耐震性能を明らかにすることを目的としている。まず、振動台による 1 層 Z 型、非対称 Z 型試験体の正弦波加振実験を行い、漸増変形機構、基本的応答性状、弾塑性復元力特性を明らかにし、数値解析で実験を追跡できることを明らかにした。続いて、実大 1 層解析モデルを用いた Z 型、非対称 Z 型、X 型 NC ブレース架構の数値解析により、弾性ひずみエネルギー蓄積に基づき弾性地震応答を低減可能であること、弾塑性地震応答は NC ブレースの塑性ひずみエネルギー消費により鋼材ダンパー架構と同等となることを示した。

第 3 章「2 層 Z 型 NC ブレース架構の振動台実験および実大多層架構の数値解析」では、多層 Z 型、非対称 Z 型、X 型 NC ブレース架構の耐震性能を明らかにすることを目的としている。まず、2 層 Z 型、非対称 Z 型試験体で振動台による正弦波加振実験を行い、多層架構の漸増変形機構、基本的応答性状、弾塑性復元力特性を明らかにし、数値解析により実験結果を追跡した。続いて、実大 8 層解析モデルを用いた Z 型、非対称 Z 型、X 型 NC ブレース架構の数値解析により、弾性ひずみエネルギー蓄積に基づき各層の弾性地震応答を低減できること、NC ブレース降伏後における各層の弾塑性地震応答は鋼材ダンパー架構と同等となることを明らかにした。更に、層毎のブレース配置方向を交互とすることで架構の相対変位、各層の最大層間変形・残留層間変形を全層同一方向配置する場合と比較して抑制できることを明らかにしている。併せて、Z 型配置した場合の各層残留層間変形を簡便に計算する手法を構築し、評価値が解析結果と良好に対応することを示している。

第 4 章「エネルギーの釣合に基づく 1 層 NC ブレース架構の地震応答予測」では、Z 型、非対称 Z 型、X 型の各 1 層 NC ブレース架構の地震応答予測手法を構築し、その予測精度を検証することを目的としている。まず、一方向漸増変形および弾性ひずみエネルギー蓄積を考慮したエネルギーの釣合に基づく 1 層 NC ブレース架構の弾性地震応答予測手法を構築するとともに、構造物への地震入力エネルギー量を、NC ブレース架構の弾性ひずみエネルギー蓄積時における周期変動を考慮して求める手法を提案している。これらの提案手法における地震応答予測精度は、数値解析結果と比較して概ね $\pm 10\%$ 以内、あるいは $+10\%$ 以上であり安全側に応答予測できることを示した。また、既往手法に基づいて NC ブレース降伏後の累積塑性変形倍率を解析結果と比較して概ね安全側に予測できることを示した。

第 5 章「結論」では、第 2 章から第 4 章までに得られた研究知見をまとめた。その結果、

中小地震時には弾性ひずみエネルギー蓄積に基づく地震応答低減効果を，大地震時には NC ブレースの塑性ひずみエネルギー消費に基づく地震応答低減効果を期待した，中低層 NC ブレース架構の耐震設計が実現可能であることを記した。

審査結果の要旨

現行の耐震設計では、構造物各部にバランスよく地震入力エネルギーを消費させることで大地震に対する倒壊防止を目指しており、このような目標を達成するためには構造物各層に適切な耐力および剛性を設定することが重要となる。耐力および剛性を容易に上昇できる耐震要素として、鋼構造建築物では一般にブレースが多く用いられるが、従来型ブレースは圧縮力に対して座屈を生じることで地震力に対して抵抗特性が劣化し、上記耐震設計の目標が達成できない可能性がある。この問題を解決するブレースとして座屈拘束ブレースが開発され、現在では建築構造分野において広く普及している。一方で、従来型ブレースの問題点を解決しうる新しい構造部材として、申請者等も端部に楔デバイスを設けることで圧縮力が作用しないノンコンプレッション(NC)ブレースを開発している。

座屈拘束ブレース等の履歴ダンパーは降伏後における鋼材の塑性変形を利用した地震入力エネルギー消費により大地震の応答を低減可能だが、ダンパーが弾性範囲に留まる中小地震時には地震入力エネルギーを消費できず構造物が高剛性を維持するため、絶対加速度等が増大することが指摘されている。絶対加速度が増大すると、室内では什器の転倒や滑り、および仕上げ材の剥落等が生じて人的被害に繋がる恐れがあるため、極稀に発生する大地震に対してだけでなく発生頻度が比較的高い中小地震動に対しても地震入力エネルギーを消費して積極的に地震応答低減を図ることが重要である。

このような背景の下、本論文では構造物への NC ブレース配置を工夫することにより、一方向漸増変形に基づく弾性ひずみエネルギー蓄積で弾性時から地震入力エネルギーを消費できる Z 型および非対称 Z 型 NC ブレース架構を提案している。これら架構の性能は十分に検討されていないため、1 層架構の振動台実験を行うとともに実大 1 層架構の数値解析で履歴ダンパー架構との比較において耐震性能を明らかにしている。更に、本システムを多層架構へ拡張することを目的に、2 層架構で振動台実験を行うとともに実大多層架構の数値解析を行っている。また、NC ブレース架構の耐震設計法における基礎理論として、一方向漸増変形や弾性ひずみエネルギー蓄積といった NC ブレース架構固有の現象を考慮したエネルギーの釣合に基づく 1 層架構の地震応答予測手法を新たに提案し、数値解析結果との比較によりその予測精度を検証している。

以下に、得られた主な研究成果をまとめる。

- 1) 振動時において、Z 型は層間変形が一方向に漸増する漸増変形を、非対称 Z 型は層間振り角が一方向に漸増する漸増振り変形を生じ、これらに基づく弾性ひずみエネルギーの蓄積で履歴ダンパー架構と比較して弾性時絶対加速度応答を低減することを示した。
- 2) ブレース弾塑性時には、Z 型、非対称 Z 型 NC ブレース架構ともに bi-linear 型復元力特性を示すことで、履歴ダンパー架構と同等の地震入力エネルギー消費性能を発揮し、その絶対加速度応答は同様となることを示した。

- 3) 多層架構において Z 型 NC ブレース配置を 2 層毎で交互とした場合、漸増変形に基づく変位を 2 層毎に相殺し、架構の変位領域を履歴ダンパー架構と同等とできることを示した。
- 4) 新たに提案したエネルギーの釣合に基づく 1 層 NC ブレース架構の地震応答予測手法によれば、各 NC ブレース架構の地震応答を数値解析結果と比較して概ね良好な精度あるいは安全側に予測できることを示した。

本研究では、弾性ひずみエネルギー蓄積で中小地震から地震入力エネルギー消費性能を付与させる新しい構造システムを実現するために、実験および解析の両面から検討した。Z 型および非対称 Z 型 NC ブレース架構においては、中地震時には弾性ひずみエネルギー蓄積に、大地震時には NC ブレースの塑性ひずみエネルギーに基づく地震入力エネルギーを消費性能による地震応答低減性能を有していることを明らかにした。

最後にノンコンプレッションブレース鋼構造架構の設計における今後の課題について次のようにまとめている。

- 1) 本研究では、NC ブレース架構の耐震設計法における基礎理論としてエネルギーの釣合に基づく 1 層架構の地震応答予測手法を構築している。しかしながら、中低層建築物への適用を考えた場合、多層架構の各層において一方向漸増変形や弾性ひずみエネルギー蓄積を考慮しながら地震応答を予測する手法が必要となる。本提案手法の多層架構への拡張は今後の課題である。
- 2) 実大架構の数値解析の研究知見は、①構造的な偏りがなく整形な解析モデル、②基本的なブレース配置、③数種類の観測地震動、を設定した上での解析結果に基づいている。今後、不整形な構造物に対して Z 型および非対称 Z 型が適用可能であるかを検討するとともに、更にブレース配置や入力地震動の変数を増加させて数値解析を行い、研究知見を蓄積する必要がある。

本研究成果は原著論文をはじめ口頭発表等により、その学術的意義、独創性、および工学的実用性について関連の学会や産業界から高い評価を得ている。

本論文の公聴会は、平成 29 年 2 月 6 日に、Nexus21-601 号教室において開催され、申請者による発表と質疑応答がなされた。更に引き続き開催された論文審査委員会において、本論文は学術的に高く評価され、全員一致して、博士（工学）の学位を授与するに相当であると判断した。

博士学位論文内容の要旨および審査結果の要旨第12号

平成29年 6月13日発行

発行 広島工業大学
大学院 工学系研究科

編集 広島工業大学 学務部
〒731-5193 広島市佐伯区三宅2丁目1-1
TEL 082-921-3121