

## 論文審査の結果の要旨

氏名：関 口 穂

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：ヒューズ機構を有する鉄道用仮橋脚構造の提案と大規模地震に対する耐震性評価に関する研究

審査委員：（主査） 教授 谷 口 望

（副査） 教授 峯 岸 邦 夫 教授 関 文 夫

近年、国内で生じる大規模地震の新たな特徴としては、2016年の熊本地震に代表されるように、短い再現周期で連続的に大きな地震が生じることである。社会基盤インフラの一部である鉄道構造物では、この事象に早急に対応することが迫られており、破壊安全性や損傷復旧性の確保が急務となっている。特に、都市圏内の鉄道改良工事に頻繁に使用される工事桁工法では鋼製の仮橋脚が使用されるが、本設の構造物に比べて供用期間が短く設定され、設計水平震度も小さめに設定されるケースがある。しかし、様々な地域で大規模地震が頻発している現状では、仮設構造物であっても十分な破壊安全性の確保は必要であり、仮橋脚の設計にも本設橋脚並みの設計を行うケースが増加している。このような中で、仮橋脚であっても、本設構造物と同等な性能を有する構造物を製作、架設することは、鋼重の増加や構造部材の複雑化につながり、工事期間の長期化や工事コストの増加という課題が生じている。

また、先述の通り、高頻度で連続的に大きな地震が生じることを想定した場合、構造物の損傷復旧性に対する設計も再検討する必要がある。鉄道構造物の設計においては、大規模地震後に早期に復旧できるよう損傷を制御する必要があるが、短い周期で連続的に大規模地震が発生することを想定した場合、より高度な損傷復旧性を有する構造物を提案する必要がある。これはつまり、従来の検討で行われている構造部材の損傷を伴う塑性ヒンジ化による構造形式の変化では、部材交換や大規模な補修補強が必要となるため、早期の復旧が困難であり、連続的に発生する地震への対応が不可能となることが課題となっている。

そこで、申請者は、これらの重大で喫緊な課題に対応するため、今までにない新しい耐震構造を考案し、これの効果実証や評価手法の提案、設計手法の提案を行っている。具体的には、鉄道荷重を支持する構造物では検討されたことがないヒューズ機構を有する鋼製の仮橋脚構造を提案している。本構造は、常時や中規模地震（L1地震）時には従来構造と同様、損傷を生じさせず、かつ、列車走行性を満足する構造形式とする。一方で、大規模地震（L2地震）時にはヒューズが発動し、構造系の固有周期を長周期化させて応答加速度を低減するとともに、鉄道荷重を支持する鋼製部材の損傷を最小限に抑える構造形式に変化させるという特徴がある。また、ヒューズが発動には、モルタルを用いることを提案しているが、このモルタル製ヒューズを交換する際には、安価、かつ、容易であることにより、高頻度で発生する大規模地震に対応するとともに、コスト増加への課題にも対応していることになる。

これらの内容を、本論文では5つの章と1つの付録資料で構成して記載しており、各々の内容と評価は次のとおりである。

「1章 序論」では、本論文の背景や関連する既存研究を的確に整理し、本研究の社会的意義を明確に示している。さらに、研究の目的や提案構造の詳細を明示するとともに、論文の全体構成について述べられている。また、鉄道構造物に対する耐震設計としては、L1地震時には列車走行性、L2地震時には破壊安全性と損傷復旧性の確保が必要となる現状を踏まえ、本研究では破壊安全性と損傷復旧性を併せて要求性能としての耐震性と定義している。

「2章 モルタル材料を用いたヒューズ部材の耐力の検証」では、提案したヒューズが発動条件に関わる耐力の検証を行っている。ヒューズ部材を模擬した実物大のモルタルと鋼管の供試体を6ケース

作成し、静的載荷試験により耐荷性能を確認した。ここでは、このモルタルが破壊することにより、ヒューズが発動していることを意味している。また、この載荷試験結果は、構成則等の条件を明確に示したうえで三次元弾塑性ソリッド要素静的解析を用いて精緻に再現し、破壊メカニズムを明らかにした。さらには、この破壊メカニズムを基に、実務設計に適用可能な容易なヒューズ機構の設計手法を提案し、精緻な有限要素解析を用いずにヒューズの発動条件を算定できることを証明した。なお、本章の提案設計手法により、様々な構造形式に対応するため、任意のヒューズ発動条件をモルタルの強度と形状により簡易的に設定できることを明確にした点が、高く評価される点である。

「3章 ヒューズ機構を用いた供試体の耐荷性能の検証」では、提案したヒューズ機構の耐荷性能と、ヒューズ発動後の構造系の固有周期の変化について検証を行っている。ヒューズ機構を模擬した実物大のモルタル、鋼管、コイルバネの供試体を作成し、死荷重を再現したカウンターウェイトの下で Sin 波による動的載荷試験により挙動を確認している。載荷試験の結果、想定通りのヒューズ発動が可能であるとともに、コイルバネの効果による構造系の固有周期の変化が可能であることを実証している。また、本試験結果は、三次元非線形骨組み要素動的解析により再現を試み、おおむね試験結果と解析結果が一致することが示された。本検証により、提案したヒューズ機構は期待した動的応答を示すことを証明し、様々な構造に対応した任意のヒューズ機構を設計、かつ、制御が可能であることを示した点は、大変意義がある。

「4章 ヒューズ機構を用いた仮橋脚構造の耐震性の検討」では、前章で用いた動的解析手法を用い、実際の仮橋脚構造に対する解析的検討を行っている。この解析的検討では、実際の工事術工法で用いられている仮橋脚構造を参照して実物大で3ケースをモデル化し、これに対して、G0～G5 地盤における入力地震動 (L2 地震・スペクトルⅡ) 時の応答を検証した。また、この従来構造に、提案するヒューズ機構を付加した場合についても、提案機構の効果を確認するために同様な解析的検討を実施している。この結果、従来構造ではL2 地震時には破壊安全性を満足できない構造に対しても、ヒューズ機構を付加することにより、応答加速度を大幅に低下させることが可能であるとともに、鋼製の仮橋脚部材を無損傷のまま保つことも可能であることが示された。本章の試設計検討により、提案するヒューズ機構が実構造物上でも有効性を発揮し、様々な地盤、地震動、構造物の各条件に適応可能であること具体的に示したことは、実務上高く評価できる。

「5章 結論」では、本論文の成果と今後の展望について整理を行い、論文としての結論を述べている。本論文は、L2 地震動を想定したモルタルヒューズ発動後は構造系が長周期化し、応答加速度を低減させることで、破壊安全性・損傷復旧性を満足させることができ、この効果は実構造物レベルにおいても有効であることを解析的に証明している。本研究は、各章に示した各種試験と解析的検討により、提案したヒューズ機構の有効性を実証しただけでなく、そのメカニズムの明確化が図られ、その結果今後の研究の発展的展開も十分期待できるため、社会的意義が高い結論となっていることを示している。

「付録資料」では、本論文で示したヒューズ機構を提案に至るまでの前提条件について参考として示している。ここでは、4章に示したヒューズ機構を付加した構造から、モルタルヒューズ部材を取り除き、鋼管とコイルバネのみの機構として解析的検討を行った事例を示している。鉄道構造物に対する耐震設計基準では、前述の通り L1 地震時には列車走行性、L2 地震時には破壊安全性と損傷復旧性を満足する必要があるが、本結果からはモルタルヒューズを用いない場合は、L1 地震時の列車走行性、L2 地震時の破壊安全性を同時に満足させることができない結果となった。これはつまり、耐震設計上有効な構造とするためには、ヒューズ機構が必要不可欠であることを示すとともに、ヒューズにモルタルを用いることで地震災害後に安価で容易に交換できる本構造は、損傷復旧性も十分に満足することが容易に想像できる。よって、本付録資料により、モルタルを用いたヒューズ機構の部材構成の妥当性をより確実に示すことができたと言える。

本研究で提案したヒューズ機構は、これまでにない新規性を有する構造であり、その有効性について本論文で明らかにしている。また、本研究の構成では、実物大モデルによる載荷試験や、条件を明確にした再現性の高い解析手法も示されており、それらが一致することで信頼性も十分に有していると言え

る.さらには,検討ケース数も十分に確保されており,様々な実構造物に対応可能な高い汎用性を有する提案であることが示されている.併せて示されている設計手法は,我が国の鉄道構造物に対する耐震設計基準に問題なく適合しており,非常に高い実現性を有していることを証明している.

このことは,本論文の提出者が自立して研究活動を行い,又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである.

よって本論文は,博士(工学)の学位を授与されるに値するものと認められる.

以 上

令和6年2月15日