

論文の内容の要旨

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

仮橋脚は、仮設構造物であり、本設構造物施工中の代替設備として設置される。例えば、鉄道構造物の建設工事では、線路を工事桁で仮受し、工事桁を支持する仮設構造物として仮橋脚が設置される。道路橋などの工事では、道路の切り回しなどで用いられる仮橋梁で桁を受ける橋脚として仮橋脚が用いられる例がある。

仮橋脚は、本設構造物の施工期間のみに使用されるため、使用期間は本設構造物に比べて短期間となる。このため、仮橋脚の耐震設計は、使用期間が短いことが反映されている例がある。例えば、1973年に公表された既往研究では、使用期間を10年とした再現期間による地表面加速度の期待値を示している。道路橋の仮設構造物工指針では、本設構造物に設定される設計水平震度の1/2を考慮するという規定もある。鉄道事業者では、仮設構造物の耐震設計を中規模地震（L1地震動）に対しては設計水平震度0.25、大規模地震（L2地震動）に対しては本設構造物の耐震性能の1/2を保有すると規定している場合もある。

以上のように仮橋脚では、一般に使用期間が短いことを前提に低震度設計を行うが、近年の地震発生状況を考えると大きな地震が続けて起きる場合もあり、2016年の熊本地震がその典型的な事例と考えられる。仮橋脚構造は、多くが大規模地震に対応した耐震設計となっていないと考えられ、仮に大規模地震対応の耐震設計を実施した場合、部材断面や基礎構造が大きくなり、仮橋脚構造を含む仮設構造物のコストアップが必要となると考えられる。

そこで申請者は、仮橋脚に対してヒューズ機構を採用することを提案している。提案するヒューズ機構は、板状のモルタルヒューズとコイルバネから構成することを想定している。L2地震動が発生した場合、ヒューズ材が脆性的に破壊し、バネ材の復元力が作用することでヒューズ機構が機能し、構造系の固有周期が長周期化し、地震時の応答加速度を抑制することで、破壊に関する安全性（破壊安全性）と損傷に関する復旧性（損傷復旧性）の確保を図るものである。また、L1地震動発生時、L2地震動発生時共に上部構造反力は脚部材で支持する構造としている。付録資料では、上部工を受けている横梁がスライド可能な構造とすることで、免震の効果が期待でき、列車走行性に関わる応答変位が大きくなってしまふことに対して、モルタルヒューズを設置することが有効であることを解析的に示している。本研究においてヒューズ構造はL2地震動に対しての破壊安全性と損傷復旧性の観点から、仮橋脚構造の耐震性の向上を図るものである。

このヒューズ機構を有した仮橋脚構造の実用化に向けた課題を以下にまとめる。

- (1) 本研究で提案している仮橋脚構造においては中空鋼管の中を芯材（鋼管）が貫通しており、中空鋼管と芯材（鋼管）の間にモルタルヒューズを配置している。モルタルヒューズは扇形の形状となるが、この形状のモルタルヒューズについては力学特性や破壊挙動を明らかにする必要がある。
- (2) 本研究において、ヒューズ機構はL2地震動発生時にはヒューズ材が破壊し、設定固有周期（長周期）に移行することで破壊安全性・損傷復旧性を確保するものであるが、実仮橋脚構造において本ヒューズ機構がこの要求性能を満たす構造であるか明らかにする必要がある。

本研究では上記の課題解決のため、試験・解析的検討を実施している。ヒューズ機構を任意の荷重で発動させるため、扇形のモルタルヒューズの要素試験、3次元の非線形FEM解析を実施し、破壊メカニズムを確認することで、簡易的な耐力評価法の提案を行った。また、ヒューズ機構を有した供試体を用いて変形挙動および動的応答の検証を行った。そのうえで、実構造レベルの仮橋脚構造に対し

て L2 地震動を作用させる非線形骨組みモデルによる動的解析を実施し、破壊安全性・損傷復旧性の検証を行った。

本論文は全 5 章で構成され各章の内容についての要約を以下に示す。

「第 1 章 序論」では、前述のような研究の背景と従来の仮橋脚構造や耐震設計法に関する既往文献を整理するとともに、本研究の位置づけを明らかにしている。また、本研究で提案しているヒューズ機構を有する仮橋脚構造の要求性能について述べている。

「第 2 章 モルタル材料を用いたヒューズ部材の耐荷力の検証」では、ヒューズ機構に用いるモルタルヒューズについて、要素試験と 3 次元の非線形 FEM 解析による再現解析を実施し、耐力評価法の提案を行った。モルタルヒューズの要素試験の結果から、圧縮強度・形状ごとに計 6 パターンのモルタルヒューズの破壊荷重と荷重-変位関係を明らかにした。モルタルヒューズの破壊性状は供試体上部の圧縮破壊や割裂破壊が発生する結果となり、各供試体で概ね同様の破壊性状となった。

3 次元の非線形 FEM 解析により要素試験の再現解析を実施した結果、モルタルヒューズ供試体上部の圧縮領域で局所破壊が最初に発生し、圧縮破壊領域がひとつの塊となりさらに変形が進み、モルタルヒューズ供試体中心で左右方向の変形の進展で割裂する破壊メカニズムであることを明らかにした。この破壊メカニズムをもとに実用的で簡易な耐力評価式を構築した。算定値の試験値に対する比率の平均値は 1.08、変動係数は 0.15 となり、要素試験の最大荷重を妥当に評価しており、提案した耐力評価式でモルタルヒューズの耐力評価が可能であることを示した。

「第 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、ヒューズ機構を用いた供試体を製作し、静的荷重試験および動的荷重試験（以下、ヒューズ機構確認試験）を実施することで、変形挙動および動的応答の確認を行った。また、非線形骨組み解析モデルによる再現解析を実施し、解析モデルの妥当性の検証を行った。

静的荷重試験の結果からは、モルタルヒューズ破壊前は柱部材の剛性に応じた変位となることが示された。また、動的荷重試験の結果から、モルタルヒューズ破壊後はコイルバネと慣性質量による振動系の固有周期に移行することを確認した。

非線形骨組みモデルによる再現解析においては、モルタルヒューズに対応した非線形ばね要素は最大荷重到達後、脆性的に荷重低下する非線形特性を用いてモデル化を行った。

静的荷重試験の再現解析では、解析結果の最大荷重が試験結果を若干大きく評価していたが、試験結果を概ねシミュレートしていた。動的荷重試験の再現解析では、モルタルヒューズの破壊後の固有周期はコイルバネのバネ定数と慣性質量から算出される設定固有周期に移行する結果となり、試験結果を概ねシミュレートしていた。

この結果から、解析モデルは試験結果を概ねシミュレート可能であり、解析モデルは妥当性であると考えられる。

「第 4 章 ヒューズ機構を有した仮橋脚構造の耐震性の検討」では、ヒューズ機構を有した実仮橋脚構造を設計し、L2 地震動に対する破壊安全性と損傷復旧性に関する検討を実施した。検討仮橋脚の柱部材には、JR 東日本の基準にある既設計事例を参考に標準的に用いられる断面諸元の H 形鋼を柱部材に選定した。ここでは、一般的なヒューズ機構を有しない仮橋脚とヒューズ機構を有した仮橋脚構造に対して、L2 地震動を作用させ、柱部材の損傷（降伏）の有無を比較している。まず、仮橋脚の設計における前提条件を定めた。具体的には、上部工として想定する鉄道用仮設工事桁の鋼材重量と列車重量を設定した。ヒューズ機構の発動条件は、ヒューズ破壊時の応答震度を JR 東日本の規準を参考に 0.25 とした。ヒューズ破壊後の設定固有周期は、鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計（鉄道耐震標準）に設定されている L2 地震動の表層地盤面の地震波形の応答スペクトルから、最大加速度応答値が約 40%となる 1.5 秒とした。これらの前提条件をもとに一般的なヒューズ機構を有しない仮橋脚とヒューズ機構を有する仮橋脚構造を計 3 パターンずつ設計し、非線形骨組みモデルによる動的解析を実施した。この解析モデルに鉄道耐震標準における L2 地震動（スペクトル II）の表層地震波形を計 6 パターンずつ入力した。その結果、一般的なヒューズ機構を有しない仮橋脚の場合は全 18 パター

ンのうち 13 パターンで柱は降伏曲率 (ϕ_y) を超える応答となり部材降伏となった。一方、ヒューズ機構を有する仮橋脚構造に関しては、全 18 パターンで弾性領域に収まる結果となった。また、同時に、L2 地震動の挙動では構造物の固有周期が 0.23~0.31 秒から 1.5 秒付近に変化し、長周期化することが確認され、応答加速度が最大 44%低減できることが確認できた。この結果から、L2 地震動が作用した場合、一般的なヒューズ機構を有しない仮橋脚はその多くが崩壊に近い損傷となり、ヒューズ機構を有する仮橋脚構造の柱部材は、弾性領域で無損傷となり、L2 地震動に対する破壊安全性・損傷復旧性が確保されたことを確認した。

「第 5 章 結論」では、本研究から得られた成果をまとめている。モルタルヒューズは圧縮強度・形状変更に対応した簡易的な耐力算定式から破壊荷重が算定できることを明らかにしたことで、破壊荷重を任意で設定する構造設計が可能となる。また、ヒューズ機構は、L1 地震動を想定したヒューズ破壊前では弾性域での挙動を示し、L2 地震動を想定したヒューズ破壊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・損傷復旧性を満足する。この結果は実構造物レベルにおいても有効であることが解析的に示され、仮橋脚の耐震性が向上するため、本ヒューズ機構の実現性が高いことが確認できた。