

京都大学	博士（工学）	氏名	TAN YUQING
論文題目	Investigation of seismic performance of elastomeric isolation bearings using low-temperature hybrid simulation technique		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>橋梁の耐震性能を確保するための方策として、免震ゴム支承を用いた免震構造が幅広く採用されている。しかしながら、低温環境においてはゴム材料の剛性率の増加などで復元力特性が変化するため、寒冷地における高減衰ゴムを用いた免震ゴム支承の免震性能や適用橋梁の地震時性能の低下が懸念される。本論文は、免震ゴム支承の環境温度を制御しながら載荷試験を行う手法を用いた繰り返し載荷やハイブリッドシミュレーションによる実験により、低温時を含む温度の相違による免震ゴム支承の挙動の変化を検討するとともに、その知見を基に橋梁の動的解析に有効に適用できる復元力モデルを開発した成果について述べたものである。</p> <p>第1章では、まず橋梁の耐震性能の確保を目的としたゴム支承の利用の目的と、その中で用いられているタイプとして高減衰ゴム支承や拘束型鉛プラグ入り高減衰ゴム支承が利用されている現状を述べた上で、本研究の背景となる、高減衰ゴム系支承の低温時の復元力特性の変化による地震時性能の低下の可能性、および復元力特性が複雑であることに起因する地震応答評価のためのモデル化の困難さを本研究の課題として着目していることを説明している。こうした課題を解決するための手段として、ハイブリッドシミュレーションによる実験を低温環境下で実施する手法による高減衰ゴム支承と適用橋梁の地震応答の実験的な検証、およびその結果に基づき高減衰ゴム支承に生じる熱-力学連成挙動を考慮した復元力モデルの開発を目標として整理している。これらの技術検討に関連する既往研究を概観した上で、本論文における検討の方針をまとめて述べ、本論文の構成を説明している。</p> <p>第2章においては、高減衰ゴム支承（HDR-S）を対象とした低温ハイブリッドシミュレーションを中心とした実験と得られた知見について述べている。まず、HDR-Sの雰囲気温度を制御しながら載荷試験を行うシステムの構築について説明している。さらに、当該載荷システムを用いた正負繰り返しせん断載荷試験を行い、低温時のHDR-Sの等価剛性・等価減衰定数のひずみ振幅依存性および繰り返し回数依存性を確認するとともに、HDR-Sの復元力の内部温度への依存性がおおよそ指数関数で近似できるような特性を有することを検証している。雰囲気温度を変化させたハイブリッドシミュレーションによる実験では、HDR-Sの復元力の挙動の変化に加えて、設置を想定した橋梁の橋脚への地震作用がHDR-Sの特性変化により増加する傾向があることが定量的に示された結果について述べている。</p> <p>第3章では、スプリング拘束型鉛プラグ入り高減衰積層ゴム支承（SPR-S）を対象として実施した前章と同様の実験的検討とそこで得られた結果について述べている。低温環境におけるSPR-Sの特性は前章のHDR-Sと同様の変化を示すが、影響の割合はSPR-Sの方がやや小さく、また減衰性能はいずれも雰囲気温度においてもHDR-Sよりも高い結果となった事を示している。</p>			

第4章では、高減衰ゴム支承（HDR-S）を対象とした低温を含めた様々な雰囲気温度での実時間ハイブリッドシミュレーション手法による実験および得られた結果について述べている。前章までで実施した疑似静的な载荷に比べ、载荷速度を現実の地震応答時のものと同じとするような载荷制御を行った実験であり、両者のハイブリッドシミュレーションを比較して得られる相違に着目した検討を行っている。事前の予想に反し、低温時の実時間载荷による HDR-S の荷重は疑似静的な载荷によるものよりも小さく、低温による HDR-S の地震時応答の変化は疑似静的な载荷による結果に比べれば若干減少していることが見出されている。これは、熱の放射や内部での熱伝導の過程の時間スケールの差が HDR-S の内部温度の分布に影響している事によると考察している。

第5章では、実験結果を基に、熱-力学連成メカニズムを考慮した高減衰ゴム支承（HDR-S）の新たな履歴復元力モデルである、TMC MPW モデル（Thermo-Mechanical Coupled Modified Park-Wen モデル）を提案している。一連の実験的検証により、履歴復元力によるエネルギー吸収による内部温度の上昇と、雰囲気温度と内部温度の差に起因する熱放射・熱伝導の過程によるゴム支承の内部温度の変化のモデル化、その結果生じる内部温度の履歴復元力の弾性および履歴成分の大きさに対する影響に関する内部温度の指数関数によるモデル化を組み合わせたものとなっている。正負繰り返し载荷実験の結果によりモデルパラメータを決定した上で、前章までの HDR-S の载荷実験やハイブリッドシミュレーションの結果と提案モデルによる復元力の計算結果との比較を行い、提案モデルは HDR-S の復元力の良好な表現が可能である上、精度の高い時刻歴応答解析結果が得られることを示している。

第6章では、上述の TMC MPW モデルでは表現が十分でなかった HDR-S の復元力の最大経験ひずみ依存性である Mullins 効果を陽に表現する手法を考案し、それを含めた HDR-S の熱-力学連成履歴復元力モデルである Mullins TMC MPW モデルの開発について述べている。これは、HDR-S に生じるひずみ値の範囲を多数のランダムな長さのひずみ小区間に分割し、それぞれの小区間が発揮する摩擦力の和を TMC MPW モデルによる復元力に加えたモデルである。各々の小区間の摩擦力は累積ひずみの増加に従って低減する仮定をおくと、これまでモデル化が課題であった Mullins 効果が表現できることを説明している。この Mullins TMC MPW モデルを用いると、いずれの雰囲気温度のケースにおいても正負繰り返し载荷実験による復元力やハイブリッドシミュレーションに基づく実験による応答結果の良好な再現が得られたことを確認している。

第7章では、本研究で得られた成果および結論を要約して述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、橋梁に用いられる高減衰ゴムを用いた2つのタイプの免震ゴム支承(HDR-S および SPR-S) の低温時の復元力特性の変化と地震時性能への影響の評価、およびその複雑な復元力特性を反映した妥当性の高い地震応答評価のための復元力モデルの構築を目的として、環境温度を制御しながら試験を行う載荷システムを用いた繰り返し載荷およびハイブリッドシミュレーションによる実験により、低温時を含む温度の相違による免震ゴム支承や橋梁構造物の応答への影響を検討するとともに、熱-力学連成の効果に着目して新たな復元力モデルを開発した成果について述べたものである。実験により雰囲気温度の免震ゴム支承の復元力特性や橋梁の動的応答への影響に関する定量的な評価を得るとともに、雰囲気温度や内部温度の復元力への影響を表現できる復元力モデルを提案し、橋梁に適用した解析により精度を検証しており、一連の研究により得られた主な成果は次のとおりである。

1. 雰囲気温度の低下による免震ゴム支承の復元力特性の変化の実験的なデータの実証に加え、ハイブリッドシミュレーションにより、これらの免震ゴム支承を設置した橋梁の橋脚への地震作用が、免震ゴム支承の特性変化により増加する傾向があることを定量的に示している。これは、橋梁設計における環境温度への考慮の方法の検討にあたっての重要な情報である。
2. 疑似静的な低速載荷を用いたハイブリッドシミュレーションと、実時間ハイブリッドシミュレーションの両者を実施してその載荷速度の影響を検証している。予想に反し、低温時の実時間載荷による免震ゴム支承の荷重は疑似静的な載荷によるものよりも小さくなることを見出している。熱の放射や熱伝導の時間スケールの差が免震ゴム支承の内部温度の分布ひいては地震時性能に影響によるものと考えられ、今後の免震ゴム支承の性能評価手法の開発への寄与が期待できる成果である。
3. 熱-力学連成メカニズムを考慮した HDR-S の新たな履歴復元力モデルである、TMC MPW モデル (Thermo-Mechanical Coupled Modified Park-Wen モデル) およびさらに経験最大ひずみ依存性を表現できる Mullins TMC MPW モデルを新たに提案している。将来的に、高減衰ゴム支承を適用した橋梁のより妥当性の高い耐震性能評価が期待できるモデルの提案であり、今後の橋梁設計法の合理化に貢献する可能性がある成果である。

本論文は、地震活動度の高い地域、とりわけ寒冷地における免震ゴム支承を用いた橋梁の整備と地震時安全性の向上に貢献する可能性につながる技術を提供するとともに、高減衰ゴム支承の復元力特性の温度依存性とそのモデル化に関する新たな方法論を提示しており、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年8月8日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

要旨公開可能日： [令和 4年12月26日以降](#)