様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　７ 年　 ６ 月　 ５ 日現在

機関番号：１７４０１
研究種目：研究活動スタート支援
研究期間：2023～2024
課題番号：２３Ｋ１９１４８

研究課題名（和文）免震ゴム支承に生じた内部損傷・劣化の非破壊的検出手法

研究課題名（英文）Non-Destructive Detection Method for Internal Damage and Degradation in Seismic Isolation Rubber Bearings

研究代表者

渡部　慎也（Watanabe, Shinya）

熊本大学・くまもと水循環・減災研究教育センター・助教

研究者番号：６０９８０４７２

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では，数値解析により内部損傷を有する免震ゴム支承の変形性能評価を行うとともに，表面のひずみ分布を計測することにより，免震ゴム支承被覆ゴム上から内部損傷の評価の可否について検討を行った．
具体的には，実橋梁において使用されている免震ゴム支承をモデル化し，鋼板とゴムの層間剥離を損傷パラメータとして数値解析モデルに導入し，ケーススタディを実施した．
その結果，層間剥離損傷がいかなる場所に生じた場合であっても，免震ゴム支承表面における平均ひずみ分布を計測することで，内部に生じた層間剥離損傷を検出可能であることが確認された．

研究成果の学術的意義や社会的意義
本研究では，橋梁に広く用いられている免震ゴム支承に着目し，その健全性評価手法の確立を目的とした．免震ゴム支承は，橋梁において極めて重要な免震機構であるが，現在の維持管理においては，内部の劣化や損傷を把握するための実効的な手法は確立されていない．
本研究で提案する手法は，免震支承の内部状態を可視化・定量化するものであり，これまで困難とされてきた供用下での支承内部の劣化検出を可能とする点で，新規性と独自性を有し，健全性評価の高度化を期待しうるものである．また，社会基盤施設の予防保全型維持管理を実現し，インフラの長寿命化や災害に強い社会の構築に直結するものであり，社会的意義も極めて大きいといえる．

研究成果の概要（英文）：In this study, the deformation performance of seismic isolation rubber bearings with internal damage was evaluated through numerical analysis. In addition, the feasibility of detecting internal damage from the surface of the rubber cover was investigated by measuring the surface strain distribution.
Specifically, a numerical model was developed to represent seismic isolation rubber bearings used in actual bridges. Interfacial debonding between the steel plates and rubber layers was introduced into the model as a damage parameter, and a series of case studies were conducted.
The results demonstrated that, regardless of the location where the interfacial debonding occurred, it is possible to detect such internal damage by measuring the average strain distribution on the surface of the rubber cover of the seismic isolation bearing.

研究分野：維持管理

キーワード：構造力学　非破壊検査　維持管理　免震ゴム支承　デジタル画像相関法　鋼構造

１．研究開始当初の背景

免震ゴム支承は，橋梁の上部構造を支持する役割を持つと共に，橋梁全体の固有周期を長周期化させることにより，地震発生時には共振を避け，減衰性能により震動エネルギーを散逸させるといった，免震の役割を併せ持つ機構であり，兵庫県南部地震(1995 年)以降，その有用性が広く認知され，日本全国の橋梁に普及している．現在，初期の免震ゴム支承については，設置から 20 年以上が経過し，経年劣化が顕在化し始めている．免震ゴム支承の多くは，個別の橋梁の条件に合わせて設計，製作される受注生産品であり，同一品の製作には時間を要するため，万一，地震時に免震支承が破断すると，落橋にも進展し得る甚大な被害であるだけでなく，迅速な復旧も困難になる．東北地方太平洋沖地震(2011 年)や熊本地震(2016 年)の際には，免震ゴム支承に破断が生じ，速やかな供用再開に支障が生じた[1]．しかし，現在においても，供用下における免震ゴム支承の健全性評価は，外観的な評価に留まり，内部の劣化や損傷に関する評価法は確立されていない．このことから，免震ゴム支承内部の劣化や損傷の適切な評価は，社会基盤を適切に維持管理していく上で重要な課題であると考えられる．

２．研究の目的

本研究では，供用中の免震ゴム支承内部の劣化や損傷状態を非破壊的かつ視覚的に検出可能な手法の開発を目的としている．免震ゴム支承の性能低下は，ゴム材料が熱やオゾン，紫外線等，種々の環境因子によって材料特性が変化し，等価剛性が大きくなり，等価減衰が小さくなることに起因すると考えられてきたが，地震や交通振動，使用環境などの影響により，内部鋼板とゴムの境界面に負荷が発生し，その層間の接着が劣化することも分かってきた[2]．このように，免震ゴム支承内部のゴム層と内部鋼板の接着層の劣化メカニズムの解明はなされているが，接着層の劣化検出については，免震ゴム支承を橋梁から取り外し，X 線分析装置やガスクロマトグラフなどの機器を用いて，接着層の成分分析を行う手法が一般的であり，費用や技術的な面から，現場においての適用が可能な，簡便な手法であるとはいえない．

本研究は，ゴム材料の劣化に伴う免震ゴム支承全体の機械的特性の変化に着目し，供用下の橋梁において，ゴム支承を取り外すことなく適用可能であるという点，また，X 線分析装置といった特殊な機器を必要とせず，デジタル画像相関法という既存の手法を合わせて用いることで，視覚的に免震ゴム支承内部の劣化・損傷の検知が可能となる手法の検討を行う．

３．研究の方法

本研究では，数値解析により内部損傷を有する免震ゴム支承の変形性能評価を行うとともに，表面のひずみ分布を計測することにより，免震ゴム支承被覆ゴム上から内部損傷の評価の可否について検討を行った．

数値解析モデルは，従来型の支承と同等な寸法かつ，弊学実験室環境において実験が実施可能な寸法を採用し，数値解析モデルを作成した．対象としている支承は，ゴム層と平鋼板からなる 420 mm×420 mm の正方形断面の積層構造である．ゴム層 1 層の厚さは 19 mm であり，ゴム層は 5 層からなり，内部の補強鋼板は，4.0 mm の板厚であり，各ゴム層間に挿入されている．また，表面には 10 mm 厚の被覆ゴムが設けられている(図-1)．いずれの要素も，8 節

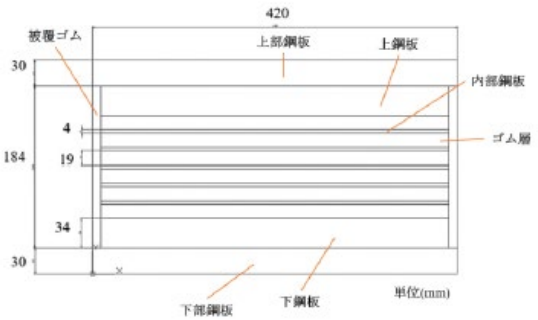
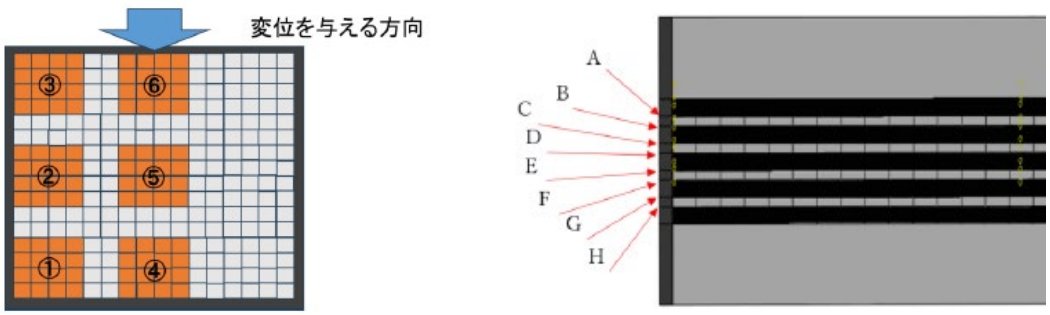


図-1　数値解析モデルおよび実験供試体寸法



(a) 同一平面内での剥離位置　　(b) 異なる層における剥離

図-2　剥離損傷のパラメータ設定

点 6 面体ソリッド要素を用いた．ゴム層及び鋼板の厚さ方向は 4 分割とし，その他のメッシュサイズは 5.0 mm とした．ゴムの物性値には，道路橋支承便覧に示されている天然ゴムのせん断弾性係数を用いた．また，数値解析モデルの材料構成則は，大きな変形下でのゴムの挙動を精度良く再現できるモデルであることから，Ogden モデルを採用した．ゴム層と鋼板層の剥離損傷は，①剥離面積の大きさ，②同一平面内での剥離位置（図-2(a)），③異なる層における剥離（図-2(b)）をパラメータとして再現した．

数値解析は，設計死荷重反力相当として 6.0 MPa となる鉛直荷重を載荷した状態で正負交番繰り返し変位を 8 mm/sec 程度の比較的緩やかな速度で与え，せん断ひずみ 50%時点での表面の平均ひずみを算出した．

４．研究成果

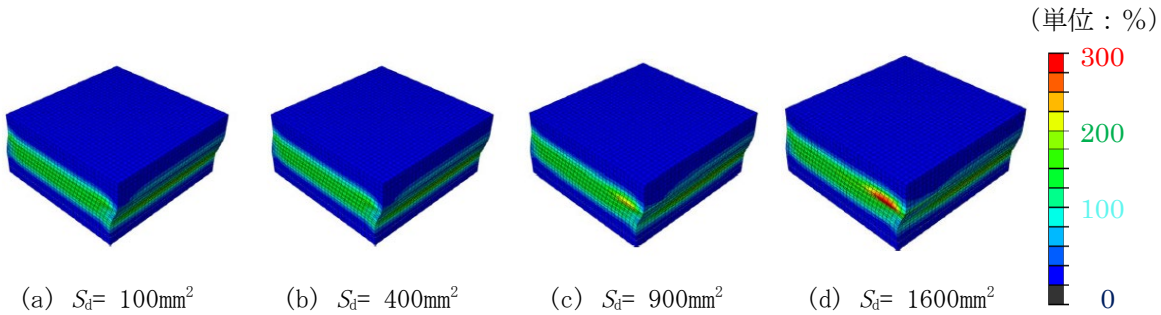
数値解析結果のうち，各パラメータ比較において代表的な解析結果を示す．

①剥離面積を異ならせたケースにおいては，図-3 に示すように，剥離面積の増加につれ，表面に生じる平均ひずみの値も大きくなることが確認された．特に被覆ゴムに近接した箇所においては，3.0 mm 四方の微小な剥離であっても検出が可能であることが確認された．

②同一平面内において，剥離の位置を異ならせた場合では，支承の角に近い位置のほうが表面に生じる平均ひずみ量は大きくなることが確認された（図-4）．なお，剥離位置は図-2(a)に対応する．

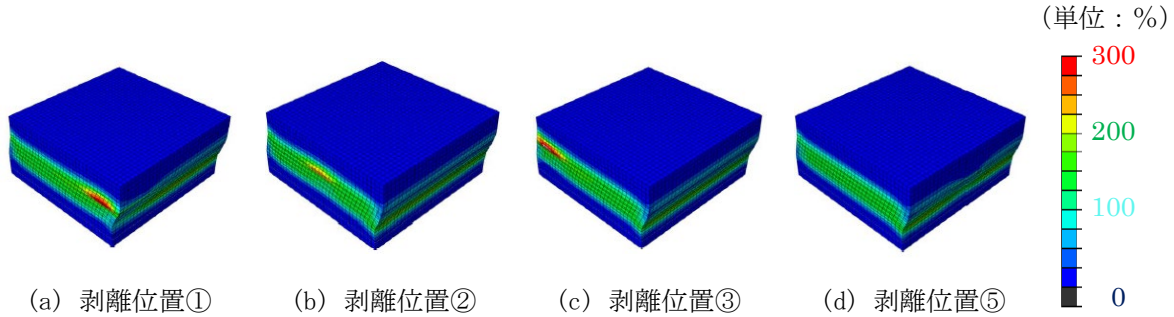
③剥離の生じる層が高さ方向に異なる場合には，剥離の生じた層の位置が低いほど，表面に生じる平均ひずみが増大することが確認された．

以上の解析結果から，免震ゴム支承表面における平均ひずみ分布を計測することで，内部に生じた層間剥離損傷を検出可能であることが確認された．しかしながら，本研究においては，模擬欠陥を導入した試験体の製作および試験システムの構築に困難を伴ったため，本手法に関する検討は解析的な検討に留まっている．したがって，実用化に向けた実験的検証，および実橋梁における適用の可否について，今後早急に取り組むべき重要な課題であると考えている．



（a） S_d= 100mm^2　（b） S_d= 400mm^2　（c） S_d= 900mm^2　（d） S_d= 1600mm^2

図-3　ゴム支承表面に生じた平均ひずみ分布（S_d：剥離面積）



（a） 剥離位置①　（b） 剥離位置②　（c） 剥離位置③　（d） 剥離位置⑤

図-4　ゴム支承表面に生じた平均ひずみ分布

＜引用文献＞

[1] 曽田信雄，山田金喜，木水隆夫，広瀬剛，鈴木基行:東北地方太平洋沖地震により破断した積層ゴム支承の性能試験，構造工学論文集，Vol.59A，pp. 516-526，2013.

[2] 伊藤義人，佐藤和也，顧浩声，山本吉久：橋梁用天然ゴム支承の性能劣化特性に関する研究，土木学会論文集，No.794/I-72，pp.253-266，2005.

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計0件

〔学会発表〕　計3件（うち招待講演　0件／うち国際学会　1件）

１．発表者名 渡部慎也
２．発表標題 免震ゴム支承の損傷検知技術の開発
３．学会等名 構造工学シンポジウム
４．発表年 2024年

１．発表者名 志水宏亘
２．発表標題 内部損傷を有する積層ゴム支承の変形性能評価に関する基礎的研究
３．学会等名 令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会
４．発表年 2024年

１．発表者名 Hironobu Shimizu
２．発表標題 Fundamental study on evaluation of deformation performance of laminated rubber bearings with internal damage
３．学会等名 The 16th Taiwan - Japan Workshop on Structural and Bridge Engineering（国際学会）
４．発表年 2024年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

―

６．研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考

７．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

８．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関