

橋梁点検のためのセンサ内蔵支承の開発

Development of Sensored Rubber Bearing and its Application for Bridge Health Monitoring

全 邦 釘*

Pang-jo Chun*

Structural bearings are designed to transfer loads and simultaneously facilitate movements. They require careful design and precise fabrication; therefore they are excellent candidates for instrumentation to construct smart structures. This paper presents a research and development effort to that end. A sensored structural bearing prototype was developed, fabricated, and tested in this research. Numerical modeling of the prototype was performed using finite element method. Its application to bridge engineering was explored for sensing and monitoring. One bridge in Michigan is selected to receive these bearings to monitor it. Numerical simulation results show that the bearing reactions are sensitive to the interested behavior and performance. They are considered suitable for monitoring damage in the bridge.

Key words: Rubber bearing, Damage diagnosis, Health monitoring, Bridge engineering

1. 緒 言

近年、免震やその変形性能の利用を目的として、橋梁の支承にゴム支承を用いるケースが増えていく。ゴム支承は、加硫ゴムと鋼板などからなる単純な支承構造であり、その機能は支承の平面積と厚さで発現され、動作不良が鋼製支承と比較して生じにくいことが知られている^[1]。また、兵庫県南部地震による損傷についても、鋼製支承と比較して圧倒的に少なかったことが報告されている。本研究では、ゴム支承内部に複数の光ファイバセンサを埋め込むことで、その計測値から支承に作用する荷重などを計測することのできる、ロードセルとしての機能を持つセンサ内蔵ゴム支承を開発した。

橋梁の支承に作用する荷重を計測しようとした初期の研究として文献[2],[3]がある。これらの研究ではセンサは支承の外周部に設置されており、それゆえに外部環境の影響によるセンサの劣化が無視出来ず、長期的計測には向いていないという問題があった。Caussignacらはセンサを鋼板に設置し、それを支承と構造物の間に挟み込むことでセンサの劣化に伴う問題を解決しようとした^[4]。しかし、支承の外部にこの鋼板を付属させることで支承寸法が変化し、それゆえに支承の力学的挙動が変わってしまう。さらに、部品数が増えることで現場での作業が複雑化するという問題がある。本研究では、光ファイバセンサをゴム支承内部の鋼板に貼り付けているので、ゴム支承の寸法も変わらない。よって力学的挙動も変化せず、更に現場での追加の労力もかからない。また、光ファイバセンサは温度、振動などの影響を受けず、高精度の計測が期待でき、しかも内部に埋め込んであるので、メンテナンスフリーであるという利点も備えている。

*愛媛大学工学部 環境建設工学科 助教 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

Dept. of Civil and Environmental Engineering, Ehime Univ. (3 Bunkyo-cho, Matsuyama, Ehime)

原稿受理 平成 23 年 10 月 31 日

本研究で開発するセンサ内蔵ゴム支承は、例えば以下のような短期的および長期的モニタリングに活用できると考えられる。

- 1) 従来計測するのが容易ではなかった、梁やダイヤフラムなどによる死荷重の計測
- 2) 死荷重および活荷重作用時のそれぞれの梁への荷重分配係数
- 3) 車両重量の計測 (Bridge Weigh-in-Motion)
- 4) 橋梁仮設時の施工管理
- 5) 例えばオゾンの影響などによる、支承の劣化の把握
- 6) 温度応力の影響
- 7) 床版や梁など、橋梁上部構造の劣化診断

本研究では特に 7)を視野に入れて研究を進めており、現在米国ミシガン州フランケンムース市において建設中の橋梁にこのゴム支承は用いられる予定である。床版や梁などが劣化し弾性率が低下すると、橋梁が外力を受けた際に支承に作用する荷重・モーメントが変化する。その変化を検知することで、それら橋梁上部構造の劣化をモニタリングすることが出来ると考えられる。

また、本研究の手法の適用範囲は橋梁で用いられているゴム支承に限らない。例えば、タンクやビルなどでは免震を目的として多数の積層ゴムが用いられており、それらにセンサを埋め込むことで構造物の重心の偏りや変形の計測が可能となると考えている。

2 センサ埋め込みゴム支承の材料定数の同定

2.1 光ファイバセンサ

本節でははじめに本研究で用いる光ファイバセンサについて述べる。本研究では Table 1 に示す性能を持つ、ファブリー・ペロー干渉計型光ファイバセンサ (Extrinsic Fabry-Perot Interferomet, FISO 社) を用いた。このセンサは、半透鏡で反射された光と、端面から出た残りの光の光路差により生じる干渉縞の縞の数あるいは位相からひずみを測定することができる。ファブリー・ペロー干渉計型光ファイバひずみセンサは、センサに垂直な方向の変形の影響を受けにくく、センサ軸方向のひずみを正確に評価することが期待できる。またセンサの出力は、センサ軸方向とせん断ひずみを同時に受けても、せん断ひずみの影響を受けにくいことが知られている。

Table 1 ファブリー・ペロー干渉計型光ファイバセンサ

製品名	FOS-N
レンジ	$\pm 1000\mu\epsilon$
分解能	$0.2\mu\epsilon$
動作温度範囲	$-40^{\circ}\text{C}\sim 250^{\circ}\text{C}$

2.2 試験による材料定数の同定

本節では、加硫ゴムの材料定数を把握するために、Fig.1 に示すセンサ埋め込みゴム支承を用いて、Fig.2 のように圧縮試験およびせん断試験を行った。ゴム支承の寸法は Fig.3 に示すように $20.3\text{cm}\times 20.3\text{cm}\times 3.8\text{cm}$ であり、中央に厚さ 0.5cm の光ファイバセンサが貼り付けられた鋼板を挟んでいる。これらの光ファイバセンサは Fig.1 から確認できるように支承側面からケーブルで繋がれている。

実験と並行して、商用有限要素パッケージ ABAQUS/Standard 3D による解析によりこれらの試験を

再現し、実験結果と比較することで材料定数の同定を目指した。Fig. 1 (右) に有限要素モデルが圧縮力を受ける場合の変形の様子を示す。ゴムについてはハイブリッド型三次元八節点要素(C3D8H)、鋼板については三次元八節点要素(C3D8)を用いた。それぞれの要素数は、C3D8Hについては 104976、C3D8については 19683、そして総節点数は 161376 である。



Fig. 1 センサ埋め込みゴム支承（左）と、圧縮力を受け変形するゴム支承の有限要素モデル（右）

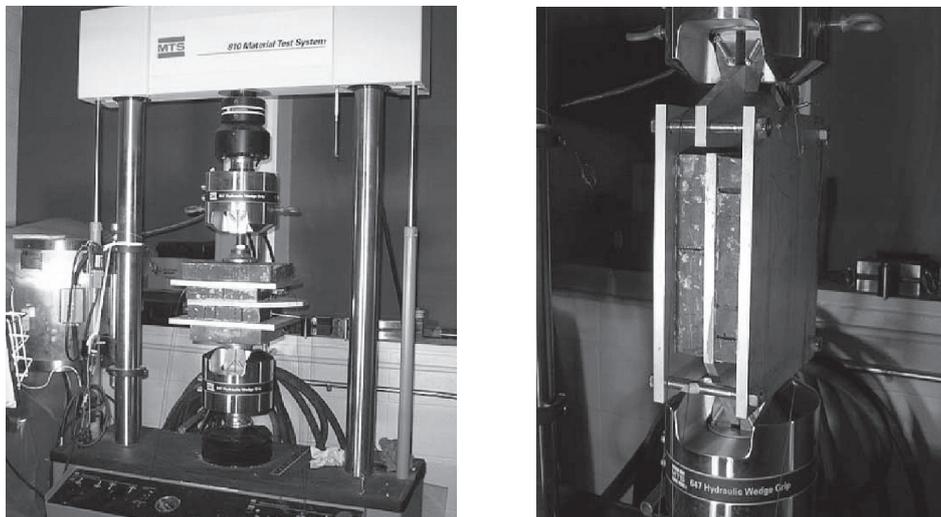


Fig. 2 センサ埋め込みゴム支承の圧縮試験（左写真）およびせん断試験（右写真）の様子

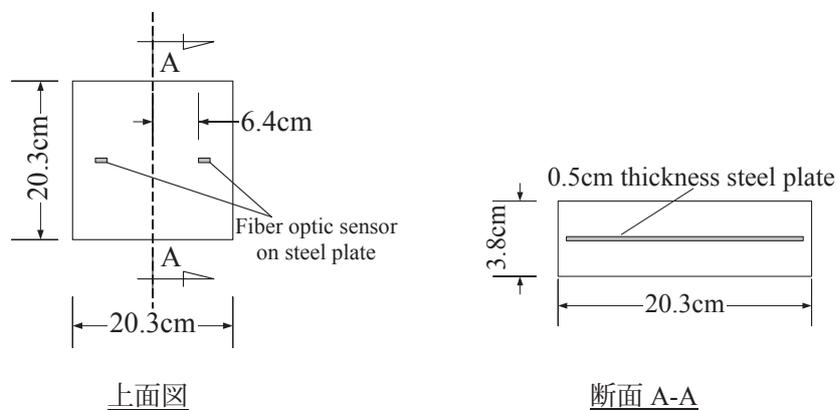


Fig.3 センサ埋め込みゴム支承の寸法および 光ファイバセンサ貼り付け位置

有限要素解析において、鋼板についてはヤング率 200GPa, ポアソン比 0.3 の等方弾性体を仮定した。ゴムについては、よく高分子材料の解析において用いられる Mooney-Rivlin モデル^[5]を採用した。Mooney-Rivlin モデルの構成式を以下の式(1)に示す。

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (1)$$

U はひずみエネルギー関数, C_{10} , C_{01} は Mooney-Rivlin 定数, I_1 および I_2 は Cauchy-Green のひずみテンソルの不変量であり, I_1 は軸ひずみによるエネルギーを, I_2 はせん断ひずみによるエネルギーを表している。解析においては Mooney-Rivlin 定数 C_{10} , C_{01} を決定する必要があるが, 本研究では ABAQUS/Standard 3D を用いて実験結果から $C_{10}=0.208\text{MPa}$, $C_{01}=0.057\text{MPa}$ のように同定した。Fig.4 および Fig.5 に圧縮試験およびせん断試験におけるセンサ 1 (Fig.3 上面図中の右側のセンサ) の計測結果および対応する有限要素解析結果を示す。この図より両者がよく一致していることがわかる。以後の解析ではこの係数を用いて行う。

また, この Mooney-Rivlin 定数を用いた有限要素解析により, 計測されたひずみからゴム支承に作用する荷重を逆に求めることが出来る。例えば, 圧縮応力のみが作用するようなケースを考えると, Fig.4 からわかるように, ひずみの計測値から圧縮荷重を求めることが出来る。せん断力や曲げモーメントが作用するような場合でも, 計測点の数を増やすことで求めることが出来る^[6]。計測点の数をどの程度にするのかについては, 要求性能と費用の観点から決定される。

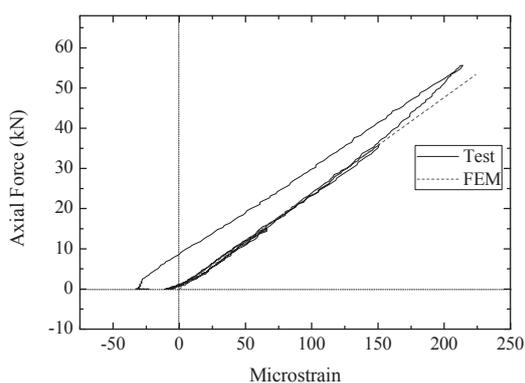


Fig. 4 ゴム支承が圧縮力を受けた場合の, 鋼板上の光ファイバセンサのひずみ計測値と有限要素解の比較

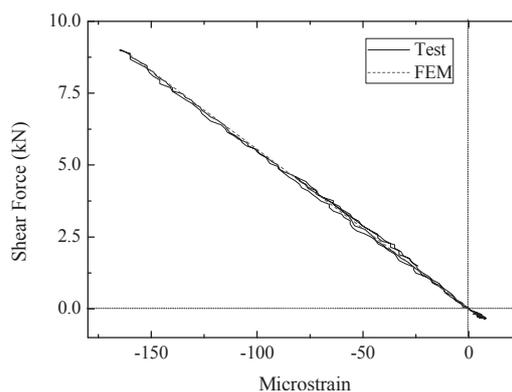


Fig. 5 ゴム支承がせん断力を受けた場合の, 鋼板上の光ファイバセンサのひずみ計測値と有限要素解の比較

3 橋梁上部構造の劣化シナリオ

本章では, ミシガン州フランケンムース市において改修予定の橋梁(橋梁名: B01 of 73131)を例に本研究の有効性を示す。改修にあたって, 本研究で開発したセンサ内蔵ゴム支承を供用する計画となっており, そしてキャリブレーションについては軸重がわかっているトラックを用いて行う予定である。対象とした橋梁は橋長 20.1m, 幅員 14.4m, 斜角 30 度, 桁間距離 1.3m, 桁数 11, 床版厚 0.23m の I 型 PC 橋であり, 見取り図を Fig.6 に, 断面図を Fig.7 に示す。また, Fig.6 右下部に座標系を示しており, 以下の議論ではこの座標系を用いることとする。さらに, 以降の解析で HS-20 仕様のトラック^[7]を橋梁に載荷するが, 中央に載荷する場合の位置および鈍角部に載荷する場合の位置についても Fig.6 に示してある。数値解析にあたっては, コンクリート床版および PC 桁の弾性率はそれぞれ 24.9GPa および 27.8GPa, ポアソン比は 0.2 とした。また, ゴム支承の材料および寸法は 2.2 において作成したプロト

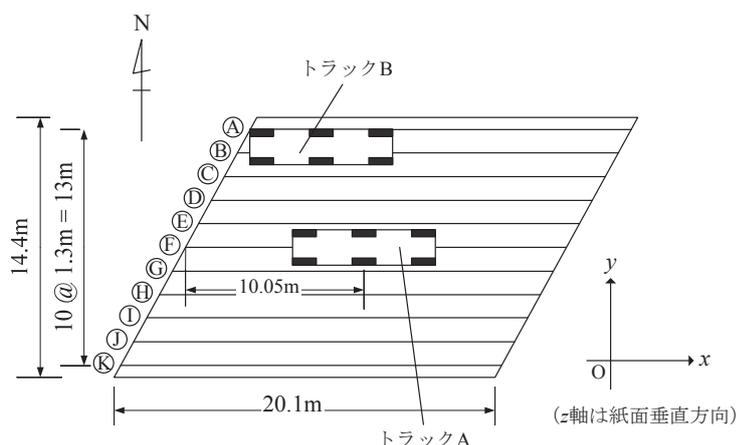


Fig. 6 支間長 20.1m, 桁幅 1.3m, 斜角 30° の斜橋の見取り図。トラック A は中央にトラックを載荷する場合の位置を, トラック B は鈍角部にトラックを載荷する場合の位置を示している。

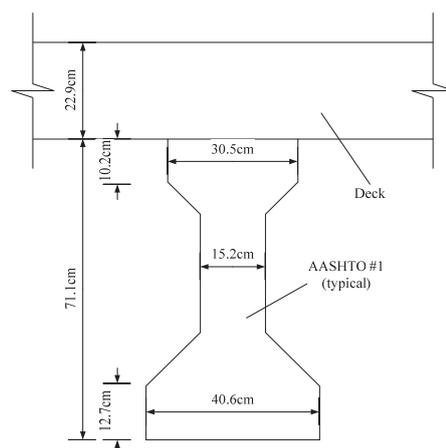


Fig. 7 Fig.6 に示す斜橋の断面図

タイプと同様である。ゴム支承の寸法はセンサを埋め込まない通常のもので変わらないので、施工手順や橋梁の力学的挙動に影響を及ぼさず、それゆえ追加の設計計算や現場作業が不要である。

本研究では様々な劣化パターンについて検討しているが、本稿では、特に①コンクリート床版の損傷、②鈍角部支承近くにおける外桁の損傷の二通りの、橋梁によく見られる劣化シナリオについて考慮し、その際にどのように支承に作用する荷重が変化するかを追跡する。なお本研究では、最大 50% まで弾性率を減少させることで、想定外の外力によるひび割れやアルカリ骨材反応に代表される損傷を表現するという簡易なモデルを採用してある。なお、例えば文献[8]によればアルカリ骨材反応により膨張量 2500 μ で約 50%, 10000 μ で約 35%程度低下するとされている。また、文献[9]においては、アルカリ骨材反応によって約 70%, 凍結融解による劣化進行によって約 50%の弾性率の低下が確認されている。

3.1 コンクリート床版が損傷する場合

コンクリート床版が劣化した場合に、死荷重および活荷重下において支承に作用する荷重がどのように変化するかについて有限要素解析により検討を行った。その結果、特に①死荷重下における鈍角部支承 (Fig.7 に示す梁 A 西側および梁 K 東側)、②橋梁中央に HS-20 仕様のトラックを載荷した場合 (トラック A) における梁 C 東側および梁 I 西側部支承において顕著な変化が見られた。それぞれの結果を Fig.8 および Fig.9 に示す。図の F_x, F_y, F_z はそれぞれ x, y, z 軸方向の反力を、 M_x, M_y, M_z は反モーメントをあらわしている。縦軸(Bearing Force Ratio)は、コンクリート床版が劣化していった場合の反力の値を、健全な時の反力の値で割った値を意味している。

Fig.8 よりわかるように、死荷重下では鈍角部支承において M_y が大きく増加している。これは、床版が劣化しその剛性が低下することで、端部での y 軸周りの回転角が大きくなるのが原因である。また、 M_x については大きく減少している様子が見てとれる。これは、床版の弾性率が下がることで梁 A についての荷重分配係数が低下し、それゆえに死荷重による x 軸周り正方向への回転角が小さくなったことが原因と考えられる。

また、Fig.9 に示すように、トラックを中央に載荷した場合には x 軸周りのモーメントが大きく変化

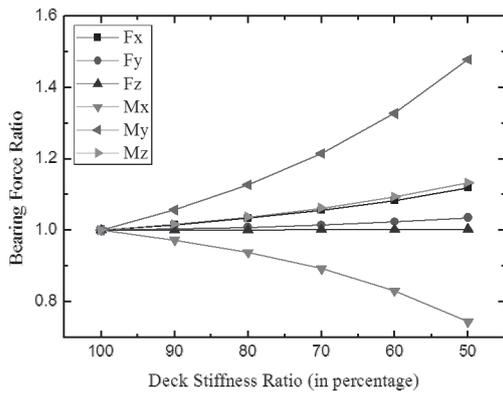


Fig. 8 コンクリート床版が劣化していった場合における死荷重下での鈍角部支承の反力変化率

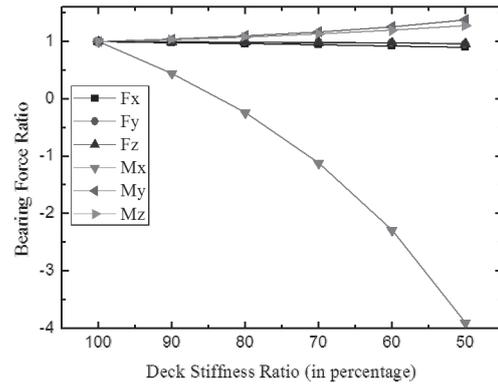


Fig. 9 コンクリート床版が劣化していった場合における活荷重下（トラック A）での梁 C 東側部支承の反力変化率。なお，対称性より，梁 I 西側部支承においても極めて似通った結果が得られている。

している。特に，床版の弾性率が 80%以下では回転の方向が変化している。すなわち，非常に敏感に床版の劣化に応答する値であり，劣化診断に大きく役立つことを意味している。

3.2 鈍角部支承近くにおける外桁が損傷する場合

ここでは，温度差や塩化物の影響をもっとも受けやすい外桁（梁 A）が，支承近くにおいて損傷した場合にどのように挙動が変化するかを調べる。本研究では，梁の端部から支間長の 1/10 の長さまでを支承近くとし，その部分の弾性率を変化させることで劣化を表現した。有限要素解析の結果，Fig.6 中のトラック B の位置に HS-20 トラックを載荷した際に，劣化部分の近くの梁 A 西側の鈍角部支承において顕著な変化が見られた。その結果を Fig.10 に示す。図よりわかるように，x 軸周りのモーメントが上昇している。斜橋においてはねじれが卓越することがよく知られているが[10]，鈍角部支承近くの部材が劣化することでねじれに対しての剛性が低下したことが原因であると考えられる。また，Fz についても低下しており，これらの値を追跡することで外桁端部の劣化を検知出来るようになると考えている。

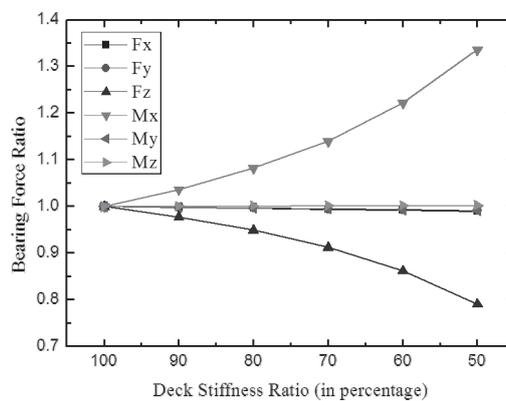


Fig. 10 外桁端部が劣化していった場合における活荷重下（トラック B）での梁 A 西側部支承（鈍角部支承）の反力変化率

4. まとめ

本研究では、ゴム支承内部に複数の光ファイバセンサを埋め込むことで、その計測値から支承に作用する荷重などを計測することのできるセンサ内蔵ゴム支承を開発した。この支承は、光ファイバセンサを内部の鋼板に貼り付けているために、ゴム支承の寸法が変わらず現場での追加の労力がかからないという利点を備えている。さらに、有限要素解析により、この支承を用いることで床版などの橋梁部材の劣化を検知することができることを示した。

また、1章において述べたように、劣化診断だけでなく様々な用途にこのゴム支承を適用することを計画している。具体的には、例えば文献[11],[12]などにおいて議論されている、斜橋の鈍角部支承における支点反力の荷重分配係数を実橋梁において実際に求めることが可能となると考えている。

5. 謝辞

本研究は US Federal Highway Administration の助成を受けて行われました。ここに記して謝意を表します。

6. 参考文献

- [1] (社)日本道路協会：道路橋支承便覧，丸善，2004.
- [2] Subramaniam, K. V.: Feasibility of Using Instrumented Elastomeric Bearings for Bridge Monitoring and Condition Assessment, M.S. Thesis, University of Toledo, 1995.
- [3] Nims, D. K.: Instrumented Elastomeric Bridge Bearings, ODOT Project No. 14647(0), Final Report, University of Toledo, 2000.
- [4] Caussignac, J. M., Barbachi, M., and Chabert, A.: Bridge Bearings Equipped with Optical Sensor for Monitoring Vertical Load through the Support, Proceedings of the SPIE, Vol.2719, pp. 220-228, 1996.
- [5] Ogden, R. W.: Non-Linear Elastic Deformations, Dover Publications, 1997.
- [6] Zhuang, Y., Fu, G., Chun, P., and Feng, J: Sensored Elastomeric Bridge Bearing and its Application, Advances in Structures, Vol.163, pp.2887-2890, 2011.
- [7] AASHTO: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 4th edition, 2007.
- [8] (社)土木学会：コンクリートライブラリー124 アルカリ骨材反応対策小委員会報告書－鉄筋破断と新たなる対応－, 2005.
- [9] 高柴保明, 堺孝司, 熊谷守晃：凍害およびアルカリ骨材反応を受けたコンクリートの力学特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 1, pp.221-226, 1998.
- [10] 全邦釘, Fu, G. : 厚肉補剛斜板の曲げ解析解の導出と斜橋解析への適用, 応用力学論文集, Vol.13, pp.9-18, 2010.
- [11] Ebeido, T. and Kennedy, J. B.: Shear and Reaction Distributions in Continuous Skew Composite Bridges, Journal of Bridge Engineering, Vol.1, No.4, pp.155-165, 1996.
- [12] Chun, P. and Fu, G.: Analytical Solution for Skewed Bridges, Advances in Civil Engineering and Architecture, Vol. 243, pp.1518-1523, 2011.