

温度変動下の橋梁支承に発生する応力による健全性評価

西土 隆幸^{*1} 福本伸太郎^{*2} 今川 峻^{*3}
Nishido Takayuki *Fukumoto Shintaro* *Imagawa Shun*

橋梁の可動支承の機能低下は、錆の発生や土砂の堆積により起こる。その結果、桁の変形に従った移動や回転ができなくなる。これらの拘束により、支承付近のコンクリート床版にひび割れが生じるような引張応力が発生することを解析により確認した。一般に、支承機能の健全性は、変位計による支承の移動量や回転量を測定することにより評価できる。しかし、この方法では、長期間継続した計測は困難となる。支承の移動が拘束された場合に、支承の斜材に大きな応力（ひずみ）が発生することを解析により明らかにした。FBG（Fiber Bragg Grating）センサを使用すれば、支承の斜材に発生するひずみを長期間測定できる。さらに、FBG センサによる計測を無線で行えるシステムを開発した。また、安価なシステムとするためにひずみと温度の測定に特化した。本無線システムを使えば、支承の挙動をリアルタイムに測定でき、対象橋梁が事務所から離れている場合、移動時間やコストを軽減できる。

キーワード：コンクリート床版、橋梁支承、FBG センサ、健全性評価

1. はじめに

現在では、橋梁にはゴム支承が使われるのが一般的であるが、それまでは代表的なものとしてピン支承などの金属製のものが使われてきた。これらの支承の機能は、死荷重や活荷重を橋台や橋脚などの下部工に伝えることや、温度変化による橋梁の伸縮や、活荷重によるたわみなどに対応することである。

ピン支承は、錆の発生や土砂などの堆積物により機能低下が起こることが考えられる。著者らは、単純合成桁を対象にして、解析により支承機能の低下がコンクリート床版に与える影響を検討した。移動可能な支承が拘束されると、温度変動等

によりコンクリート床版に引張応力が発生することがわかった。それらの引張応力が引張強度を超えると、コンクリート表面にひび割れが発生する可能性がある。

複数の変位計をピン支承にセットし、それらの移動量や回転量を測定することにより、支承の健全性を評価できる。しかし、磁石付きの治具で変位計を固定する方法では、変位計を長期間動かないようにセットすることは難しく、盗難の可能性もある。そこで支承の機能低下が起これば、温度変動等により支承自体のひずみも変化することに着目し、支承部材の発生ひずみを測定する方法を考えた。

さらに、発生ひずみを、FBG センサにより無

*1：研究開発センター センター長 工学博士 技術士（建設部門） P. E.（Civil Eng.） 芝浦工業大学大学院非常勤講師

*2：研究開発センター 研究開発グループ

*3：検査事業部 技術部

線で計測するシステムを開発した。このシステムを使えば、事務所内でリアルタイムに支承の挙動を計測できる。対象橋梁が遠隔地の場合には、移動時間や費用の削減が可能となる。

2. 支承の機能低下

図1に示すように、ピン支承を持つ単純形式の橋梁では、両端に曲げモーメントは発生しない。また、温度変化により、桁が伸縮できるように、片側(右側)の支承では、移動が可能となっている。

ピン支承の機能低下により、右側支承の移動が拘束されれば、図2のように水平反力と桁高に

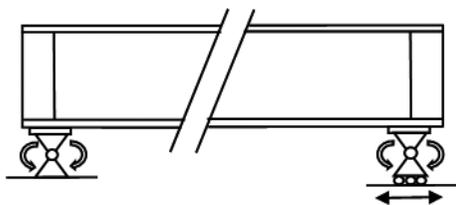


図1 ピン支承の構造

よる曲げモーメントがコンクリート床版に作用し、床版上側に引張応力が発生する。また、活荷重(自動車荷重)が载荷された時、支承が回転できなければ固定モーメントにより床版上面に引張応力が発生する。

このような応力は設計段階では考慮されておらず、床版に発生する引張応力が引張強度より大きくなると、ひび割れが発生する可能性がある。

3. 対象橋梁

著者らは、支承機能が低下した場合のコンクリート床版に与える影響を解析により検討した。対象とした橋梁は、図3、図4に示す鋼単純合成桁橋である⁽¹⁾。本橋梁は、橋長33.7m、4本の主桁で構成され、中央から5.5m間隔に横桁が配置されている。設計時の支承条件として、右側の回転と移動は自由、左側の回転は自由、移動は拘束とした。

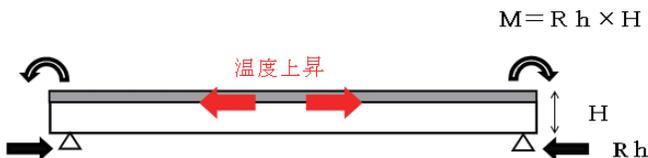


図2 支承機能の低下による曲げモーメント

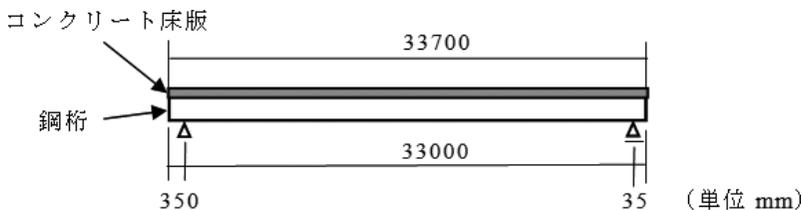


図3 解析モデル(側面)

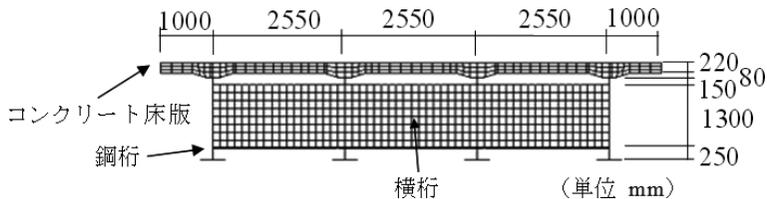


図4 解析モデル(横断面)

図4に示すように、コンクリート床版の厚さと幅は、220mm、9650mmで、高さ80mmのハンチを持つ。コンクリートの圧縮強度は30N/mm²、引張応力強度はその1/10として3N/mm²と仮定した。床版内の鉄筋は、径19mmの主筋を150mm間隔、径16mmの配力筋を140mm間隔にそれぞれ配置した。

高さ1700mmの4本の主桁は、2550mm間隔とした。上フランジの幅は300mm、厚さは10mmから21mmまで変化させた。また、下フランジの幅は480mm、厚さは9mmから36mmまで変化させた。フランジ幅は実際には橋軸方向に従って変化させるが、本解析では同じ剛性となるようにフランジの板厚のみ変化させた。横桁は、その位置に関係なく高さ1300mm、幅240mm、板厚10mmとした。

4. 解析方法

4.1 モデル化

コンクリートはソリッド要素、鉄筋はバー要素でモデル化した。主桁と横桁はシェル要素とした。支承はモデル化せず、その位置で拘束条件を与えた。

図5にFEMモデルを示す。床版と上フランジの接合は、合成効果を考慮して同一節点とした。要素数、節点数は、約101500、約98000である。解析に使用した材料定数を表1に示す。解析は、ABAQUS⁽²⁾による弾性解析である。

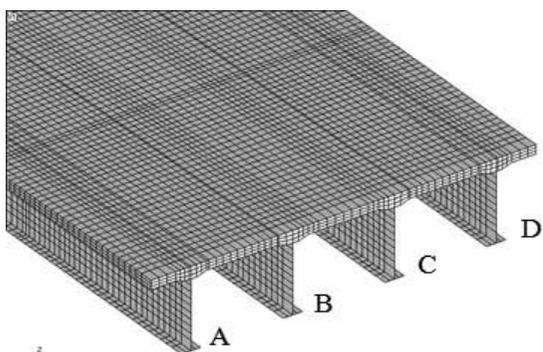


図5 鋼合成桁全体のFEMモデル

表1 解析に使用した材料定数

項目	単位	鋼	コンクリート
ヤング率 E	N/mm ²	2.0 × 10 ⁵	2.8 × 10 ⁴
せん断弾性係数 G	N/mm ²	7.7 × 10 ⁴	1.2 × 10 ⁴
単位重量 ρ	kN/m ³	77	23
ポアソン比 ν		0.3	0.2
線膨張係数 α	1/°C	1.2 × 10 ⁻⁵	1.2 × 10 ⁻⁵

4.2 解析ケース

コンクリート床版の発生応力によるひび割れ可能性を確認するため、支承の拘束条件を変えて温度変動量とT荷重（自動車荷重）を与えた。

(1) 温度荷重

表2に右側支承の拘束条件を示す。支承の数は、図5のように片側4、計8個である。温度荷重を与えた時に、コンクリート床版に最大の引張応力が発生する支承の拘束条件を考えた。ケース1は健全時、ケース2は右側すべての支承の移動を拘束、また、ケース3は支承AとBの移動を拘束した。本解析では、橋全体が同じ温度になる時間帯があると仮定した⁽³⁾。健全な支承状態では、同一温度で桁と床版の伸縮は同じ量となる。支承の拘束により発生する引張応力は、桁と床版が同一温度の時のほうが両者に温度差がある時よりも大きくなるので、橋全体に20°Cの温度荷重を与えた。この温度荷重は、支承機能が低下した後に発生したと仮定したものである。

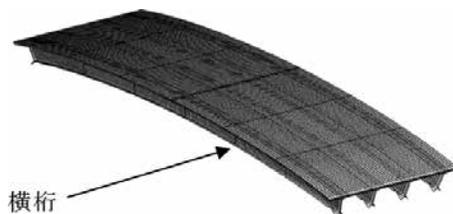
(2) 活荷重

活荷重が橋梁に載荷された時、床版に最大の引張応力が発生する支承の拘束条件を考えた。支承の回転が拘束された時に固定モーメントが発生するが、片側のみ回転が拘束された方が固定モーメントは大きくなるので、右側支承の回転のみ拘束した。ケース4は健全時、ケース5は右側すべての支承の移動と回転を拘束、ケース6は支承AとBの移動と回転を拘束した。道路橋示方書では床版の応力を検討する場合には、T荷重を載荷することが規定されている⁽⁴⁾。ここでは、図6に示すように与えた。

表 2 右側支承の拘束条件

荷重	解析 ケース	移動(支承名)				回転(支承名)			
		A	B	C	D	A	B	C	D
	1	○	○	○	○	○	○	○	○
温度荷重	2	×	×	×	×	○	○	○	○
	3	×	×	○	○	○	○	○	○
	4	○	○	○	○	○	○	○	○
T荷重	5	×	×	×	×	×	×	×	×
	6	×	×	○	○	×	×	○	○
温度 + T荷重	7	×	×	○	○	○	○	○	○

○:可能 ×:拘束



最大鉛直方向変位 15mm

(a) 変形状態

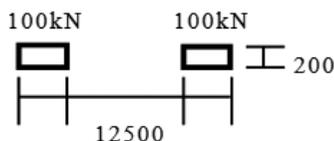
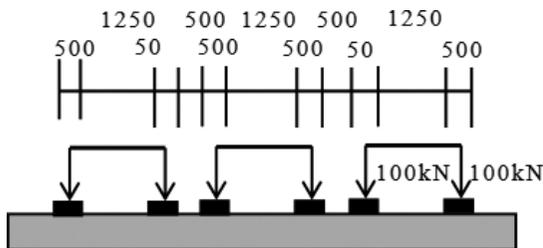


図 6 T 荷重の載荷方法



(b) 床版上面の最大主応力

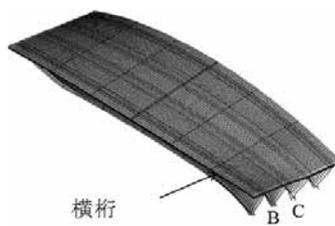
図 7 ケース 2 の解析結果

5. 解析結果

5.1 温度荷重

図 7 にケース 2 の橋全体の変形状態 (a) と、床版に発生する最大主応力のコンター図 (b) を示す。図 2 のように、この温度荷重により橋全体が伸びようとするが、右側支承により移動が拘束される。その結果、橋全体が凸状に変形する。床版は支承による拘束がないために、橋軸方向に移動可能となる。両側支承の回転は拘束されていないので、梁理論によれば曲げモーメントは発生しない。しかし、実際の橋梁と同じようにモデル化すると、下フランジのみピン支持となり、水平反力と桁高により曲げモーメントが床版に作用する。その結果、横桁と支承間に約 1.5N/mm² の引張応力が発生する。

図 8 にケース 3 の橋梁全体の変形 (a) と床版下面の最大主応力のコンター図 (b) を示す。右側支承付近の床版はサイン波形のような変形状態となっている。移動が拘束されている支保 B 付



最大鉛直方向変位 17mm

(a) 変形状態



(b) 床版下面の最大主応力

図 8 ケース 3 の解析結果

近の床版上下面の引張応力は、約 2.6N/mm²である。この引張応力は右側支承と横桁間に斜め 45 度方向に発生している。

5.2 床版のひび割れ可能性

表 3 に全ケースのコンクリート床版に発生する最大引張応力を示す。ここで U は上側、L は下側を示している。ケース 1 では支承が正常に機能しており、応力は発生しない。半分の支承 (A と B) の機能が低下しているケース 3 は、すべての支承の機能が低下しているケース 2 に比べ、床版の発生引張応力は大きくなっている。また、温度荷重は、T 荷重に比べ発生応力が大きくなっており、回転より移動を拘束した方の影響が大きいといえる。

参考文献 (3) では、橋全体が 32℃ になる時間帯がある。この条件をケース 3 に当てはめてみると、温度荷重 20℃ の 1.6 倍となるので発生引張応力は $2.6 \times 1.6 = 4.2 \text{N/mm}^2$ となる。この場合には、支承付近の床版の広い範囲でひび割れが発生する可能性があるといえる。

実際の橋梁では、温度変動と T 荷重を同時に受ける。そのような場合も想定して、ケース 3 の拘束条件で、20℃ の温度荷重と T 荷重を同時に受ける場合 (ケース 7) の解析も実施した。図 9 にケース 7 の床版下面の最大主応力のコンター図を示す。また表 3 には、ケース 7 の最大引張応力を示す。このような条件では、さらに低い温度変動でも床版にひび割れが発生する可能性があることがわかった。

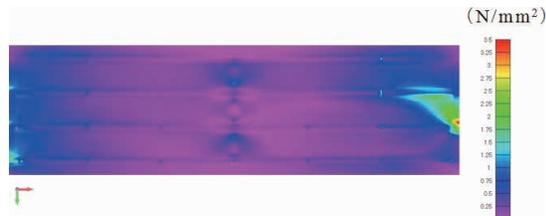


図 9 ケース 7 の床版下面の最大主応力

6. 支承の健全度評価

6.1 従来法

コンクリート床版の損傷が進めば、床版の打ち替えが必要となる。しかし、支承の機能を回復させなければ、同様な床版では再度ひび割れが発生する可能性がある。支承の機能低下は目視検査で発見するのが難しい。そのため、それらの移動量や回転量を連続的に測定する必要がある。一般には、図 10 (a) に示すように、変位計①を橋軸方向に設置して支承の移動量を、また、変位計②、③を支承の前後に設置し、それらの変位計間の距離と変位量の差から回転角を測定する。健全性を評価するためには、同時に支承付近の温度を知る必要があるので、支承付近の上下フランジの表面を接触温度計や熱電対で測定する。健全な支承であれば、夏には桁の伸び、冬には桁の縮みにより、支承が移動や回転する。このような測定は容易に行える。しかし、長期の計測では、変位計を磁石付きの治具で同じ位置に固定することは困難であり、それらの盗難のおそれもある。

表 3 全解析ケースのコンクリート床版の最大引張応力

荷重	①温度				②T荷重				① + ②	
	1	2	3	4	5	6	7(3)			
ケース	U	U	U	L	U	U	U	L	U	L
位置	U	U	U	L	U	U	U	L	U	L
応力 N/mm ²	0	1.5	2.6	2.6	0	0.3	0.9	1.0	3.8	3.8
					U: 床版上面				L: 床版下面	

6.2 提案法

支承機能の低下により拘束を受ける支承では、健全な支承に比べ支承自体の部材に発生するひずみが大きくなることが予想できる。そこで、**図 10 (b)** に示すように、支承の①や②などの温度変動に伴う発生ひずみを連続的に測定すれば、支承の機能低下を検出できる可能性がある。

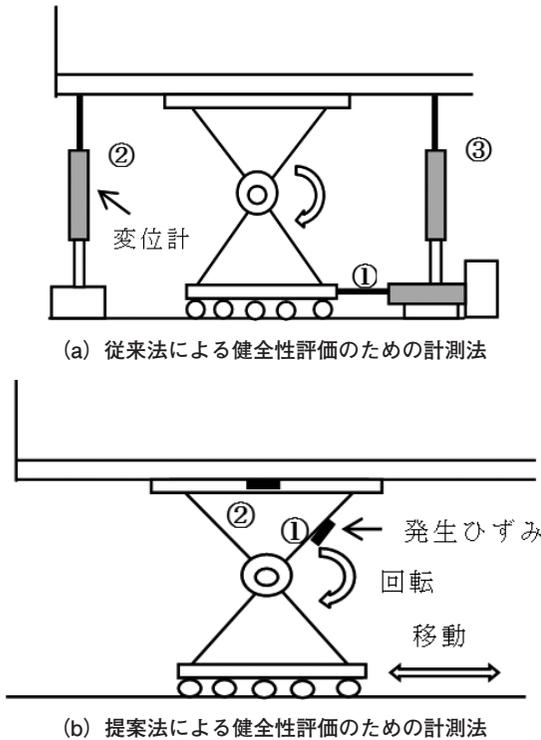


図 10 支承の計測法

6.3 解析による確認

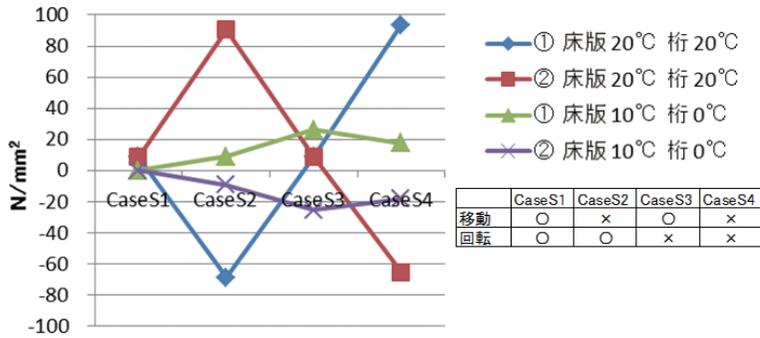
本提案法の有効性を確かめるために、以下の解析を実施した。支承をモデル化し、支承の支持条件を変化させる。そして、温度荷重を与えた場合の支承に発生する応力（ひずみ）の大きさを比較する。全体の解析モデルは、**図 4**、**図 5** と同じである。4つの支承はソリッド要素とし、支承のヤング率は**表 1**の鋼と同じ値とした。ここでは**表 3**の結果に従い、温度荷重のみを考慮した。支承機

能が低下した後に橋全体が 20℃ 上昇した場合、コンクリート床版のみ 10℃ 上昇した場合の 2 ケースを考えた。右側支承の移動と回転の拘束条件は、ケース S1 から S4 までの 4 ケースであり、4 つの全支承で同じ条件とした。

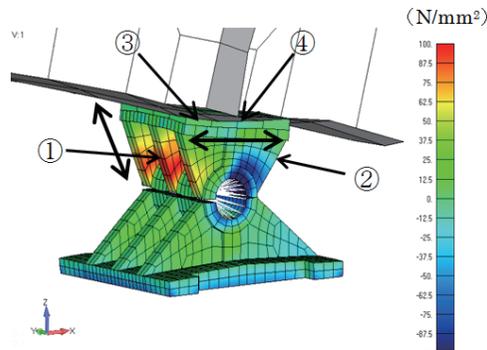
図 11 (a) は、支承の斜材①と②の矢印方向の発生応力を示す。**図 11 (b)** は、ケース S4 の最大主応力のコンター図を示す。支承が正常に機能しているケース S1 では、温度変動にかかわらず応力は発生しない。橋全体の温度が 20℃ の場合、支承の移動が拘束されているケース S2 と S4 では、コンクリート床版のみ温度が 10℃ の時に比べ、大きな応力が発生している。また、回転のみ拘束されているケース S3 では、温度の大きさにかかわらず約 20N/mm² 以下の発生応力となっている。

図 12 は、支承の上側プレートの橋軸（矢印）方向の発生応力を示す。**図 11 (b)** には、ケース S4 での上側プレートの最大主応力コンター図も示している。この位置の発生応力は、温度が 20℃ の場合の支承斜材の発生応力の約 1/4 となる。さらに、圧縮応力のみ発生している。プレート中央④の応力は端③の応力よりも大きい。また、コンクリート床版のみ温度が 10℃ の時には、いずれの場合にも応力はほとんど発生していない。

以上の解析結果より温度変動時に発生する支承斜材の応力（ひずみ）は十分大きく、支承機能の低下を計測により検知することが可能と考えられる。また、発生応力が 20N/mm² 以上であれば、支承機能が低下している可能性がある。このような場合には、支承の移動量や回転量を従来法で測定すれば、さらに詳しい支承状態を検出できる。しかし、本提案法では、以下のような検討項目もある。発生ひずみを測定するので、変位量や回転量のような直接評価できる指標がない。明確な機能低下の判断が困難であり、今後、測定回数を増やし評価法を確立する必要がある。



(a) 支承斜材①、②の発生応力



(b) 支承の最大主応力 ケース S4

図 11 ケース S4 の解析結果

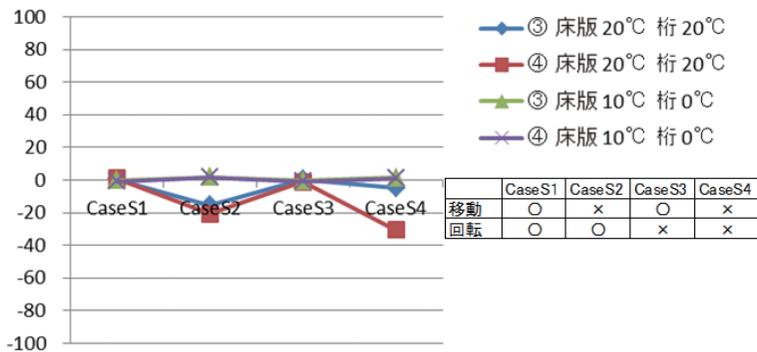


図 12 支承上側プレート③、④の発生応力

支承機能の低下はいつ起こるか予想できないので、発生ひずみの測定を長期間継続して行う必要がある。ひずみ測定は、ひずみゲージで行うのが一般的である。しかし、この方法による測定は、養生対策を採っても1年以上継続して行うことは困難である。そこで、FBG センサによる支承斜材の長期間のひずみ測定法を提案する。

FBG センサは、電気的な影響を受けない、錆びない、高いひずみ感度を持つ、温度測定が可能である、などの特徴を持っている。また、後述する無線システムを利用すれば、長期間、測定の都度、現場に行く必要がない。新設橋梁に取り付けられれば、支承の機能低下がどれくらいの時間で発生するか明らかとなる。

7. FBG センサによる長期測定システム

7.1 FBG センサの測定原理

図 13 に FBG センサの構成図を示す。FBG センサは光ファイバの一種で、光ファイバのコア内にブラッグ格子と呼ばれる回折格子が形成されている。また、本センサは、特定波長（ブラッグ波長）のみ反射する機能を持っている⁽⁵⁾。FBG セン

サは、1本のファイバで複数点の測定が可能で、センサ内で反射した波長 λ_B は、ひずみや温度によって変化する。

図 14、図 15 は、FBG センサのひずみと温度をそれぞれ独立に変化させた時のブラッグ波長の変化を示している。これらは線形性があり、ひずみと温度の計測が可能となる。

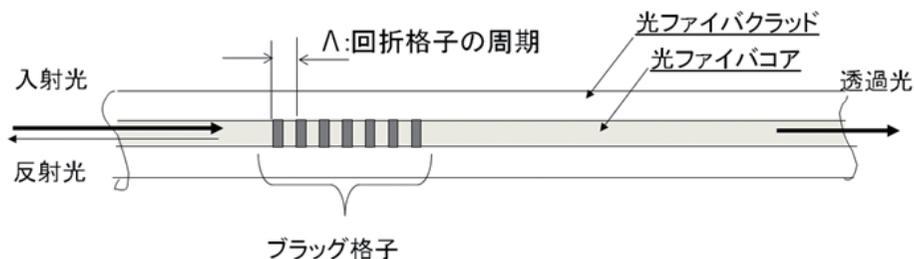


図 13 FBG センサの構成図

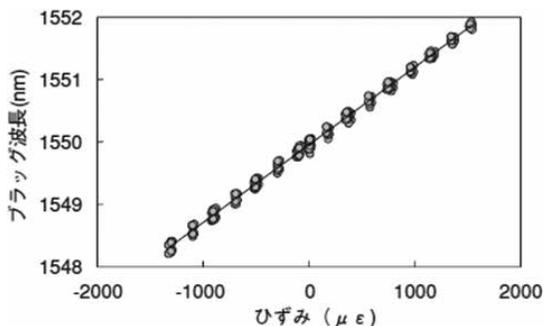


図 14 ひずみに対するブラッグ波長変化

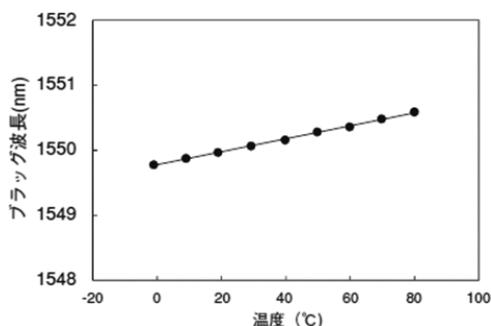


図 15 温度に対するブラッグ波長変化

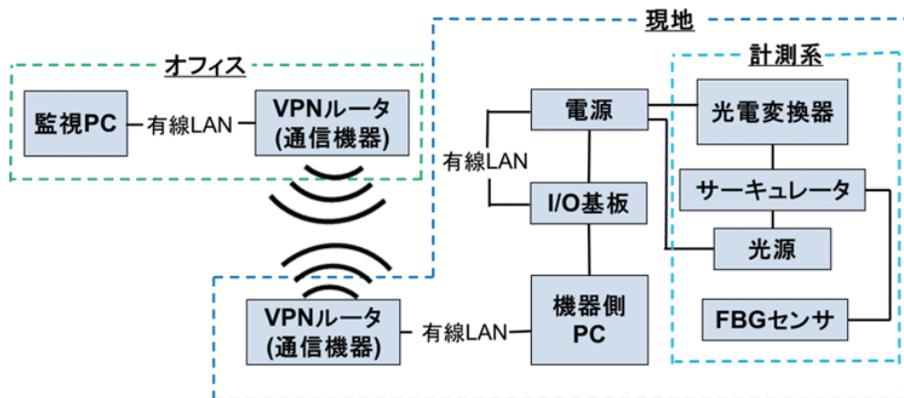


図 16 FBG センサ用無線システム

7.2 無線測定方法

FBG センサ用に開発した無線システムのブロック図を図 16 に示す。光源と光電変換器は、支承などのインフラのモニタリングを想定し、ひずみと温度を計測するための機能に限定した。

これらの装置を組み合わせ、安価で小型の測定システムを開発した。また、本システムは、橋台や橋脚に設置することを想定し、防水性も考慮した。

本システムを使用すれば、事務所でリアルタイムに支承の挙動がモニタリングできる。対象橋梁が事務所から遠距離にある場合には、移動時間やコストを削減できることから特に有用となる。

8. おわりに

以下に本研究で得られた結果を示す。

- (1) ピン支承機能の低下により、コンクリート床版に引張応力が発生し、コンクリート表面のひび割れが発生する可能性がある。
- (2) 温度変動に伴うピン支承斜材の発生ひずみを測定すれば、支承の機能低下を検出できる。

(3) FBG センサを使用すれば、支承斜材の発生ひずみを長期間測定できる。

(4) 開発した無線システムにより、事務所でリアルタイムに支承の挙動がモニタリングでき、移動時間やコストの削減が期待できる。

参考文献

- (1) 一般社団法人日本橋梁建設協会：合成桁の設計例と解説、1995
- (2) ABAQUS：ユーザーズマニュアル、Ver.6.10-1、2010
- (3) 山村浩一、日下徹、櫻田和志ら：温度日変動に伴う既設鋼合成 I 桁橋の変形挙動の実態と検討、公益社団法人土木学会、東北支部研究発表会、I-26、2010
- (4) 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説（I 共通編・II 鋼橋編）、2012
- (5) 福本伸太郎、中島富男：FBG センサ、ひずみゲージ、および加速度ピックアップによる片持ち梁の振動計測性能の比較、IIC REVIEW、No.55、2016/04、pp.46-51



研究開発センター センター長
工学博士 技術士（建設部門）
P. E. (Civil Eng.)
芝浦工業大学大学院非常勤講師

西土 隆幸

TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547



研究開発センター
研究開発グループ
福本伸太郎

TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547



検査事業部
技術部

今川 峻

TEL. 045-791-3523
FAX. 045-791-3547