

SOFOによる橋梁のヘルスマニタリング

河野 豊*

Yutaka Kawano

わが国で高度経済成長期を中心として整備された道路・橋梁、ダム、水道、鉄道、建築物等の社会資本は年々高齢化が進んでおり、経年設備の劣化への対応が必要な時代を迎えている。設備の特性に応じて適切な維持管理を実施することにより延命化を図ることも求められている。維持管理には設備を診断し、実態を的確に把握することが必要であり、その手法としてヘルスマニタリングが注目されている。当社と芝浦工業大学は共同で橋梁診断手法としての光ファイバセンサ（SOFO）の有用性を確認するため、基礎的試験を実施したので紹介する。

キーワード：橋梁、ヘルスマニタリング、光ファイバ、コンクリート、PC、RC

1. はじめに

高度経済成長時（1955年～1973年）に整備された社会基盤、住宅などは膨大であり、これらの設備は経年劣化が進んでいる。特に、橋梁の劣化については最近になりその劣化および損傷がメディアでも取り上げられている。

図 1.1 に示すように、高度経済成長期に建設さ

れた膨大な量の構造物は、今後、10年の内に更新時期を迎えることが予想され、更新対象物の数は想像を絶する。

さらに、劣化が進行する維持管理対象物の増加に対し、わが国の年齢別人口分布は図 1.2 に示す様に、高齢化が進み若者が年々減少傾向にあり、将来若い働き手、技術者が少なくなることが予想される。こういった状況下で現存する構造物の延

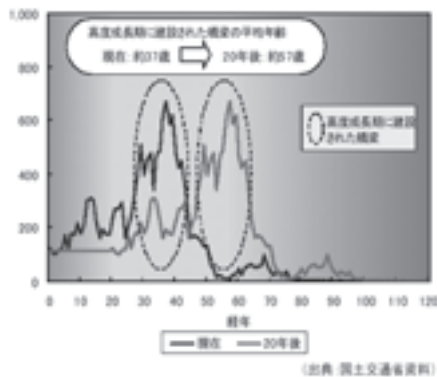


図 1.1 我が国の経年別橋梁分布

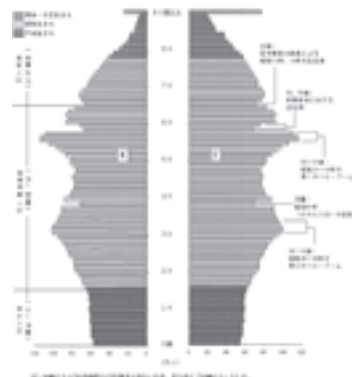


図 1.2 我が国の年齢別人員分布

* 計測事業部 計測技術部 構造物グループ 次長 コンクリート診断士

命化を図り、有効に活用するためには、劣化部分をモニタリングする技術が不可欠である。

橋梁の劣化検知に光ファイバー変位センサ(SOFO)を適用したヘルスマニタリングに関し、芝浦工業大学と共同研究を実施した。本稿では共同研究初年度として基礎試験を実施した結果を紹介する。

2. 橋梁ヘルスマニタリングセンサーについて

平成19年度共同研究においては、橋梁のヘルスマニタリングを行うためのセンサとしてSOFOセンサが有効であることを以下の要素実験により検証した。

(1) ひび割れ幅計測用センサとしての性能評価

橋梁劣化要因の大きな事象のなかの一つであるひび割れについて、ひび割れ幅計測センサとしての評価を行った。

ひび割れ幅センサとしては、 π 型ゲージがあるが測定範囲が数cmであり、設置箇所にひび割れが発生せず計測できない場合や、長期耐久性および安定性が適用の課題となっている。

その点光ファイバー変位センサ(SOFO)は計測箇所が25cm～20mと広範囲で、約20年の長期安定性が確認されている。

(2) RC (Reinforced - Concrete) 梁試験体の構造性能モニタリングセンサとしての性能評価

構造物の性能変化をSOFOで適切に評価できることを確認した。

3. センサ評価内容

3.1 ひび割れ幅測定精度確認試験

3.1.1 ひび割れ幅測定精度確認試験体の概要

試験体は、断面100mm×100mm、長さ400mmと、中央にはひび割れを誘発させるために幅20mm×深さ30mmの切り欠きを設け、内部には引張力を生じさせるためのPC (Prestressed

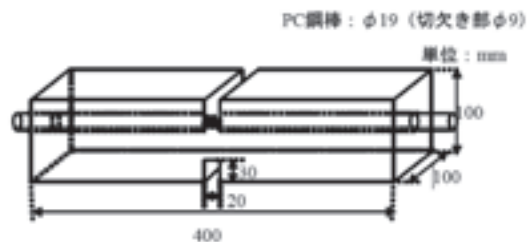


図 3.1.1 試験体概要

試験体A

単位：mm



試験体B

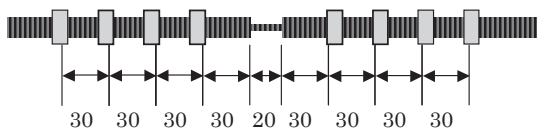


図 3.1.2 PC 鋼棒の概要

Concrete) 鋼棒 (直径 19mm) を配置した。試験体のサイズと形状は図 3.1.1 に示す。

図 3.1.2 は PC 鋼棒の概要を示す。試験体は 2 種類作製した。試験体 A には全ネジでナットなしの PC 鋼棒を、試験体 B には中央に全ネジの PC 鋼棒にナットを取り付けたものを配置した。なお、PC 鋼棒にはひずみゲージを取り付ける。また切り欠き部に引張応力を集中させるために、さらに切り欠き部の PC 鋼棒の直径を 9.445mm に加工した。なお加工した PC 鋼棒の直径は、芝浦工大実施による解析により 70kN まで引張荷重を載荷させることができることが分かっているため、約 70kN で降伏するように決定した。

型枠は 100mm×100mm の面の中央に PC 鋼棒が通るように、直径 20mm の穴をあけたものを使用した。型枠の詳細は写真 3.1.1 に示す。

図 3.1.3、写真 3.1.2 に光ファイバセンサ (SOFO)、パイ型ゲージ (ひずみゲージを使用した変位計) およびひずみゲージの配置を示す。SOFO は試験体中央の両側面に 2 本、固定金具を

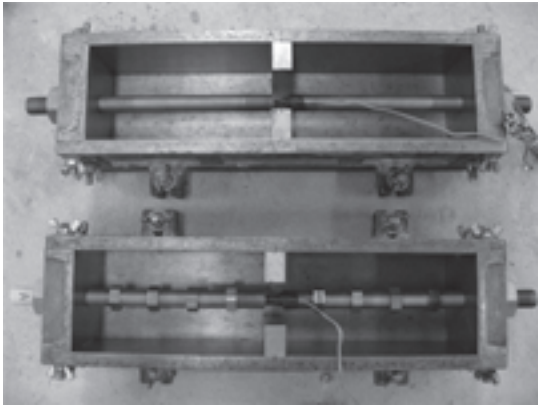


写真 3.1.1 PC 鋼棒と型枠



写真 3.1.2 センサ取り付け位置



写真 3.1.3 引張試験機と試験体

用いて設置した。パイ型ゲージは SOFO に隣接して両側面に取り付けるが、試験体中央に取り付けられないため千鳥に設置することにした。また、ひずみゲージを PC 鋼棒位置のコンクリート表面に貼り付けて、コンクリート表面の引張応力を計測した。

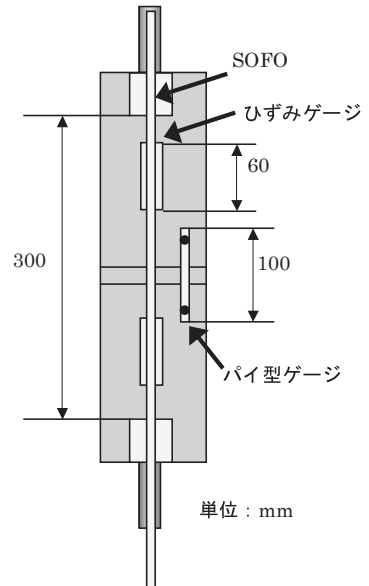


図 3.1.3 センサ取り付け位置

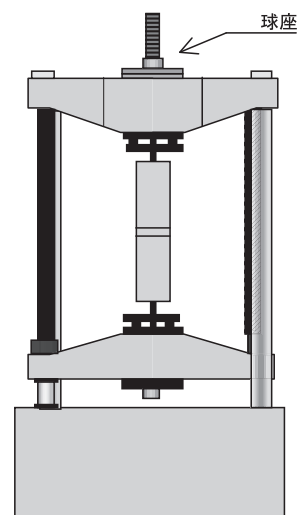


図 3.1.4 引張試験機と試験体

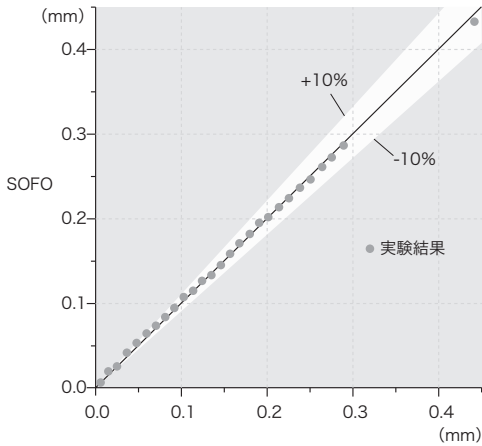


図 3.1.5 パイ型ゲージと SOFO で評価したひび割れ幅履歴

3.1.2 ひび割れ幅測定精度確認試験内容

図 3.1.4 に今回使用した荷重制御引張試験機を示すが、引張軸の偏心を排除するため PC 鋼棒の上部は球座の治具を用いて固定した。実際に使用した球座は写真 3.1.3 に示す。

試験手順は、試験体を引張試験機に取り付け荷重を加え、切り欠き部のひび割れ発生を確認した後一旦徐荷し、その後に計測器の計測準備を行な

う。準備が整った地点で荷重を 2.5kN ずつ加え、その都度計測器でひび割れ幅、ひずみ量を計測する。計測は PC 鋼棒が降伏するまで行った。

PC 鋼棒が降伏した時点で 1 回目の試験を終了し、徐荷し、計測器を最初の状態に戻す。その後次は 5kN ずつ荷重を加えながらも 1 度試験を行った。

3.1.3 ひび割れ幅測定精度確認試験結果

実験結果より、パイ型ゲージと SOFO の計測精度がほぼ一致することがわかった。なお、図 3.1.5 にパイ型ゲージと SOFO で評価したひび割れ幅履歴を示すが、パイ型ゲージで計測されたひび割れ幅が正しいとすると、SOFO センサで計測されたひび割れ幅の精度は ± 10% 以内に十分入るものであり、SOFO センサはコンクリート構造物のひび割れ幅計測センサとして十分な性能を有しているものと考えられる。

3.2 RC 試験体による劣化評価

3.2.1 RC 試験体の概要

RC 梁試験体の概略を図 3.2.1 に示す。試験体

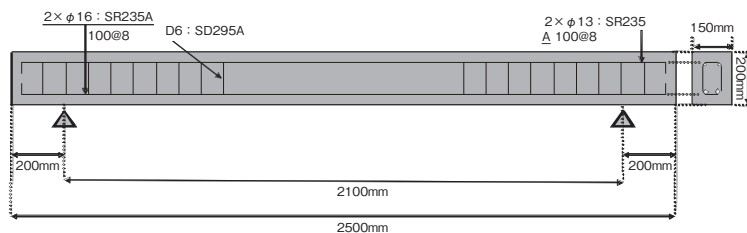


図 3.2.1 試験体概要



写真 3.2.1 試験体写真

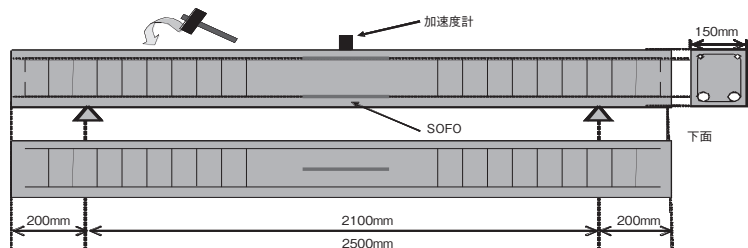


図 3.2.2 RC 試験体概要

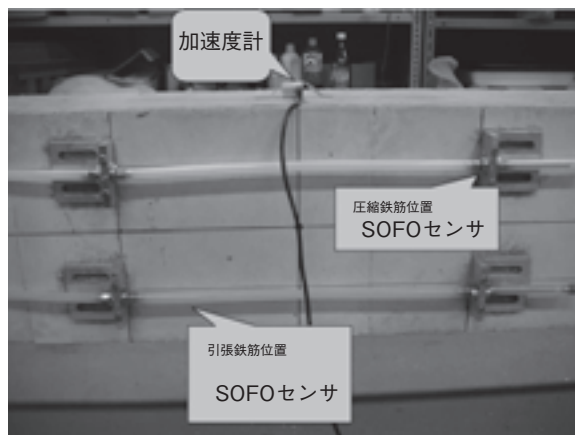


写真 3.2.2 センサ設置状況

は全長 2.5m × 幅 15cm × 高さ 20cm で、試験体のかぶり（鉄筋からコンクリート表面までの最短距離）はすべて 4cm の RC 単純梁である。

断面には張側鉄筋 2 本、圧縮側鉄筋 2 本、およびせん断スパンとなる区間内にはせん断補強筋（あばら筋）を 10cm 間隔に計 16 本を配筋した。なお、引張鉄筋（D16）の降伏点は約 327N/mm²、引張強さは約 466 N/mm²、伸びは 29% 程度である。また、圧縮側鉄筋（D13）の降伏点は約 345 N/mm²、引張強さは約 472 N/mm²、伸びが 26% である。写真 3.2.1 に試験体完成写真を示す。

3.2.2 試験内容

1) 健全時における RC 梁試験体の固有振動数計測

橋梁においては劣化が進行し曲げひび割れが発生すると固有振動数が変化することが知られている。そこで光ファイバー変位センサ（SOFO）に

より梁の固有振動数を計測および評価するために試験を実施した。

試験体概要を図 3.2.2 に示すが、圧縮・引張鉄筋位置のコンクリート表面、および梁試験体下面のコンクリート表面にそれぞれ固定金具を用いて計 3 本の SOFO センサを設置し、中央には加速度計を設置し、固有振動数の比較を行った。加速度計および SOFO センサの設置状況を写真 3.2.2 に示す。

試験体への打撃振動はハンマーを用いて行い、この打撃振動によって生じるコンクリート表面のひずみの挙動を SOFO で、加速度を加速度計によって計測した。計測は健全時と曲げ試験によってひび割れを発生させた後にそれぞれ 3 回行った。なおサンプリング速度は、1000 回/sec とした。固有振動数は、それぞれのセンサで得られる自由振動部分だけの時刻歴応答データを FFT（高速

フーリエ) 変換して求めた。また実験で得られた固有振動数の精度検証のために FEM 解析 (有限要素法解析) を行い、健全時の固有振動数を求めた (健全時の理論値 = 69.9Hz)。

2) 曲げ試験後 (ひび割れ損傷後) の RC 梁試験体の固有振動数計測

同じ試験体を用いて、図 3.2.3 の様に静的荷重をおこない中央部分にひび割れを発生させた。ひび割れ後の固有振動数の精度検証のために本試験体についても同様に固有振動数を計測した。本試験体のひび割れ性状は、初期ひび割れが 9kN で、A 面 B 面ともに左荷点付近に 1 本ずつ、計 2 本発生した。初期ひび割れ発生以降、荷重を増していくと A 面 B 面ともに新たな曲げひび割れが 3 本ずつ発生し、徐々にひび割れが上方に進展し、最終的に最大荷重 46kN に達したとき計 8 本ひび割れが発生し、図に示すひび割れ分布となった。また、最大荷重 46kN 時の最大ひび割れ幅は A 面の左荷点付近 (点線で囲まれた部分) に発生し、1.2mm であった。

3.2.3 試験結果

1) 健全時における RC 梁試験体の固有振動数

健全時の各センサでの FFT 変換の結果比較を図 3.2.4 に示し、各センサにおける計測①～③での固有振動数結果を表 3.2.1 に示す。

図 3.2.4 で 2 つの卓越振動数が観察され、表

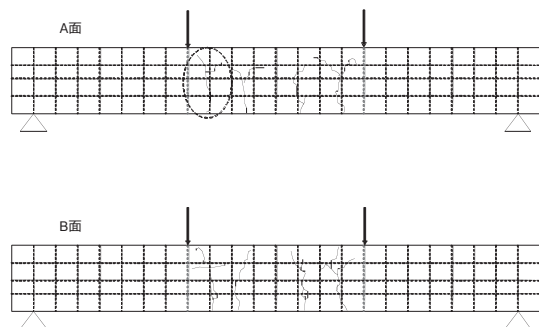


図 3.2.3 荷重方法とひび割れ発生状況

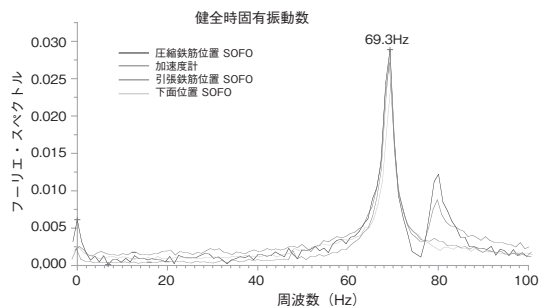


図 3.2.4 健全時における FFT 変換結果の比較

健全時	加速度計	下面位置 SOFO	圧縮鉄筋位置 SOFO	引張鉄筋位置 SOFO
計測 I	69.3Hz	69.3Hz	69.3Hz	69.3Hz
計測 II	68.4Hz	69.3Hz	80.1Hz	70.3Hz
計測 III	69.3Hz	69.3Hz	69.3Hz	69.3Hz

表 3.2.1 健全時における FFT 変換結果の比較 (卓越振動数)

3.2.4 の計測 II の圧縮鉄筋位置 SOFO の結果は 80.1Hz と、他とは異なっている。69.3Hz は 1 次の上下方向曲げの固有振動数であり、80Hz は自由端の前後方向振動数を SOFO は捕らえていると考えられる。試験体側面に取り付けた SOFO は前後方向の固有振動数も計測できている。

2) 曲げ試験後 (ひび割れ損傷後) の RC 梁試験体の固有振動数評価

ひび割れ損傷後における、各センサでの FFT 変換の結果比較を図 3.2.5 に示し、各センサにおける計測①～③での固有振動数結果を表 3.2.2 に示す。

この結果をより、どの計測結果も固有振動数が 56.6Hz となり、曲げ試験前の 69.3Hz からの低下した振動数を計測できた。

以上の結果より健全時および曲げ試験後のどちらも、SOFO センサから得られる RC 梁試験体に生じる動的なひずみから求めた固有振動数と、加

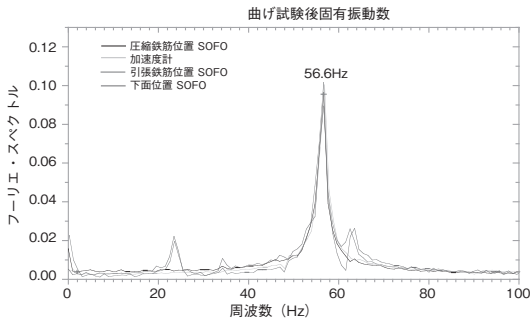


図 3.2.5 ひび割れ損傷後における FFT 変換結果の比較

曲げ後	加速度計	下面位置 SOFO	圧縮鉄筋位置 SOFO	引張鉄筋位置 SOFO
計測①	56.6Hz	56.6Hz	56.6Hz	56.6Hz
計測②	56.6Hz	56.6Hz	56.6Hz	56.6Hz
計測③	56.6Hz	56.6Hz	56.6Hz	56.6Hz

表 3.2.2 損傷後における FFT 変換結果の比較

速度計から得られた固有振動数がほぼ一致したことより、SOFO センサが固有振動数を加速度計と同等の精度で評価できることが分かった。このことより、曲げひび割れの影響を受けることなく動的計測を継続的に行うことができることが確認できた。

以上より RC 橋梁中央部に SOFO センサを配置すれば、精度よく固有振動数を計測することができ、ひび割れ発生後の劣化進展状態もモニタリングできることが明らかになった。

4. おわりに

2 種類の要素試験により、SOFO センサを用いてコンクリート構造物のひび割れ幅、固有振動数、劣化における固有振動数の変化を的確に捉えることが確認できた。今後は実橋梁でのデータを蓄積し、実橋梁劣化診断の有効なツールとしていきたい。

また本試験は芝浦工業大学との共同研究であり、FEM 解析、試験実施、評価に関してご指導いただいた勝木太教授、魚本健人教授、勝木研究室、魚本研究室の皆様深く感謝します。

参考文献

- (1) コンクリート診断技術 (日本コンクリート工学会)
- (2) コンクリート構造物のヘルスマニタリング技術 (土木学会)