

ロングゲージ FBG センサによる RC 構造物の損傷指標に関する研究

茨城大学 学生会員 ○和田拓也
 茨城大学 正会員 呉 智深
 株式会社 KSK 正会員 石沢 孝

1. はじめに

日本の社会基盤施設は鉄筋コンクリートで作られた RC 構造物が大部分を占めている。RC 構造物は適切な施工，維持管理を施すと優れた耐久性を示すが，長期の利用による劣化は避けられない。劣化により耐力が低下した場合期待される安全性，使用性を維持することはできないため，早期に劣化を検知することが求められている。そこで，センサを用いて構造物全体をモニタリングする構造ヘルスマニタリングが注目を集めている。

現在，構造ヘルスマニタリングに用いるセンサとしてロングゲージ FBG センサが研究されている。既往の研究ではひび割れや変形の計測が報告されているが，荷重の載荷状況によりひび割れが開閉する構造物の内部の損傷を検知する研究はあまり報告されていない。こういった内部の損傷も，コンクリート表面のひび割れと同様に劣化を進行させるため，内部の損傷を検知することは非常に重要である。この内部の損傷を検知する手法として MMSV が提案されているが，実橋梁に適用された例は少ない。

そこで本研究では，RC 構造物にセンサを敷設して構造物内部の損傷を評価し，MMSV が実橋梁への適用の可否を検討することを目的とする。

2. 計測センサ

2.1 FBG センサ

FBG センサは光ファイバセンサの一種である。計測誤差±数μmの高精度かつ1 kHz を超える高速計測が可能なセンサであり，動的計測に適している。千々内の回折格子間隔の変化により生じる波長の変化量を計測し，ひずみを算出する。

2.2 ロングゲージ化

FBG センサは5~20 mm のセンサ部区間で計測を行うポイントセンサであるため，構造物を分布的に計測するセンサとしては適さない。しかし，構造物全体の挙動を把握するためには分布的，連続的な計測が求められる。分布的に計測を行う手法の一つとして，本研究室においてセンサのロングゲージ化が提案された。張力を加えて定点接着を行うことにより，定点接着区間内のひずみの計測が可能となる。また，本研究に用いるセンサは実橋梁への長期間の適用を目指すため連続バサルト繊維材料でセンサを保護し，耐久性や耐侯性を向上した。

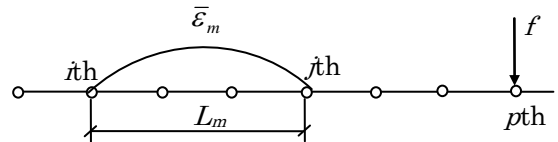


図-1 梁要素

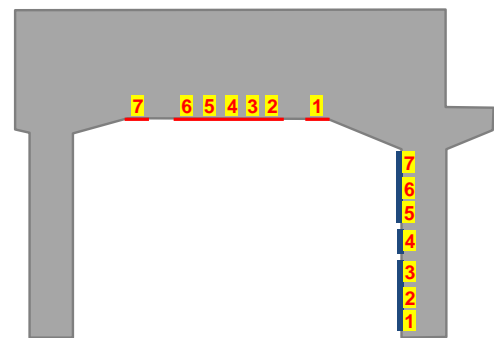


図-2 センサの敷設図 (橋軸方向)

3. 損傷評価方法

3.1 MMSV

構造物の損傷を評価する手法として固有振動数の変化を求める方法が利用されてきたが，変化が小さく損傷を検知することは難しい。そこで，参考点におけるひずみの固有値と計測点におけるひずみの固有値を相対評価することで，構造物の損傷を評価することを目的とした MMSV が提案されている¹⁾。

3.2 MMSV の理論

図-1 に示すように梁要素の1節点に2つの自由度を持つように分割する。このとき，*i* 次の卓越周波数と *j* 次の卓越周波数をそれぞれ $H_{ip}^d(\omega)$ ， $H_{jp}^d(\omega)$ とすると，式1，式2のように表せ，これらの比が式3である。式3において φ_{pr} は *r* 次モードの係数， η_m はセンサのゲージ長と試験体下縁から中立軸までの距離の比であるので，任意の2点におけるひずみモードの比は一定である。

$$H_{ip}^d(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{\varphi_{ir} \varphi_{pr}}{M_r (\omega_r^2 - \omega^2 + 2j\xi_r \omega_r \omega)} \quad \text{式1}$$

$$H_{mp}^{\bar{\varepsilon}}(\omega) = \sum_{r=1}^{ND} \frac{\eta_m (\varphi_{ir} - \varphi_{jr}) \varphi_{pr}}{M_r (\omega_r^2 - \omega^2 + 2j\xi_r \omega_r \omega)} \quad \text{式2}$$

$$\frac{{}_r H_{ip}^d(\omega)}{{}_r H_{mp}^{\bar{\varepsilon}}(\omega)} = \frac{\varphi_{ir}}{\eta_m (\varphi_{ir} - \varphi_{jr})} \quad \text{式3}$$

キーワード 光ファイバセンサ，維持管理，ロングゲージ FBG センサ，MMSV

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1 茨城大学工学部 TEL 0294-38-5004 FAX 0294-38-5268

3.3 手順

第 1 に、参考点と評価点の選定を行う。参考点は損傷が起きる可能性の低い点、評価点は損傷を評価したい任意の点を選定する。第 2 に、計測した振動データからひずみモードの算出を行う。算出には式 4 を用いた。この式を用いて変換した際に算出された卓越周波数のときのひずみモードを使用する。

$$F(k) = \int f(t) \exp(2\pi ikt) dt \quad \text{式 4}$$

第 3 に、初期データの蓄積を行う。MMSV では健全時と比較して損傷を評価するため、比較に用いるデータを蓄積する必要がある。最後に損傷評価を行う。式 3 より、健全時構造物の任意の 2 点のひずみモードの比は一定である。これより、ひずみモードの比が大きく変化したときに構造物の損傷が発生したと考えられる。

4. 橋梁への適用

本研究では対象構造物を鉄道橋とした。梁、柱のセンサの敷設状況を図-2 に示す。本研究で使用したセンサは常設されているセンサであり常時計測を行っている。毎日複数のデータを計測しているが、その中から特定の条件を満たしたデータを一日に一つ選定してひずみの推移を計測した結果計測値が安定していることを確認した。よって、交通荷重載荷時ではなく、地震時に着目して MMSV を行った。なかでも柱において最大ひずみ 150μ以上が計測され、震度 4 と規模の大きい 11 月 24 日の地震に着目した。図-3、図-4 は梁に関する MMSV の結果である。参考点を柱に最も近い 1 番センサ、評価点を梁の中央である 4 番センサとして地震発生の前後に損傷の評価を行った。これより、近似直線の傾きはほとんど変化せず、損傷が生じていないことが分かる。次に、柱に関して MMSV を行った。図-5、図-6 は柱に関する MMSV の結果である。参考点を 2 番センサ、評価点を 5 番センサとして地震発生の前後に損傷の評価を行った。これより、地震の前後に近似曲線の傾きが変化したことが分かった。この結果から、橋梁に損傷が生じている可能性がある。地震発生後、目視点検により柱にひび割れが生じていることが報告され、これより実橋梁への適用の可能を示した。

5. おわりに

本研究では MMSV を用いて実橋梁の損傷の評価を行った。MMSV は開閉するひび割れを検知することのできる損傷評価法であるが、既往の研究では室内実験の試験体レベルに留まっていた。しかし、実橋梁に適用できる可能性を示した。今後の課題としては、損傷の評価に用いる前後のデータはどの程度の期間必要であるか検討することがあげられる。

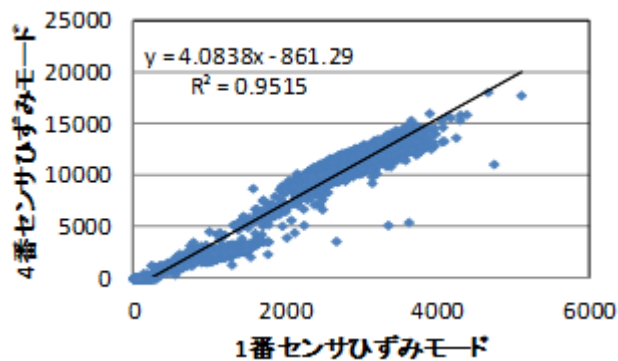


図-3 MMSV 解析の結果(梁, 地震前 1 ヶ月間)

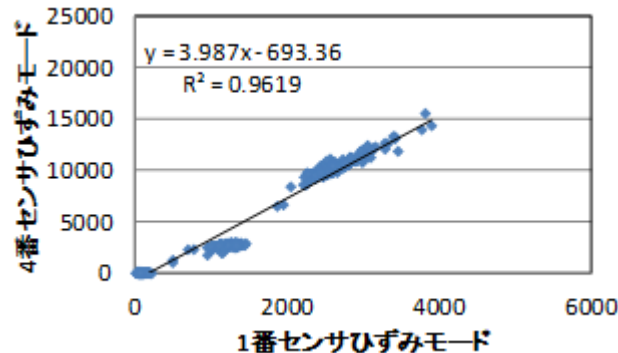


図-4 MMSV 解析の結果(梁, 地震後 2 日間)

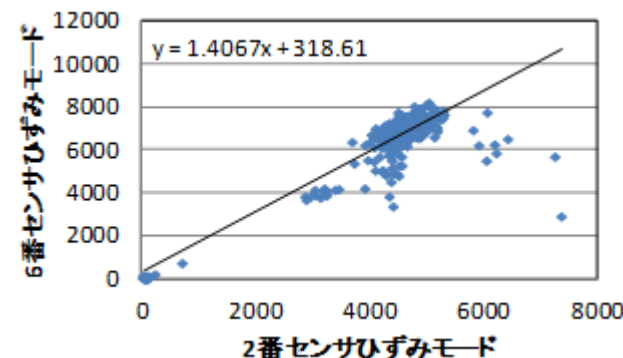


図-5 MMSV 解析の結果(柱, 地震前 1 ヶ月間)

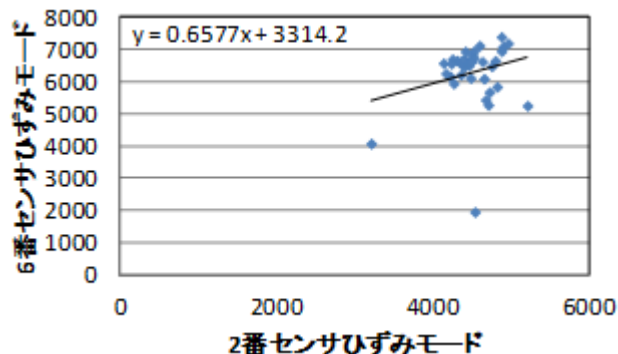


図-6 MMSV 解析の結果(柱, 地震後 2 日間)

参考文献

1) Suzhen Li(2005)「Non-baseline damage location based on dynamic macro-strain measurements」, 日本機械工学会第 9 回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, pp449-454