計測と解析に基づく既設橋梁の許容荷重の評価および異常の検知

鹿島建設(株)　正会員　○五十嵐　乃愛，　東河　春奈
大窪　一正，曽我部　直樹
横田　泰宏

１．はじめに

我が国では，高度経済成長期に整備された橋梁が多く，2032 年には建設から 50 年以上経過した橋梁が約 6 割に達することが見込まれている[1)]．一方，多くの橋梁を補修，補強，更新するための人員や予算は限られており，国内にある橋梁約 73 万橋のうち，地方公共団体が管理する橋梁は全体の 9 割以上[1)]である一方，土木部門の技術職員が 5 人以下である自治体は全体の約 5 割を占め，予算についても 2019 年度には 1993 年度の約 6 割まで減少している[2)]．このような状況から，今後，老朽化した橋梁を補修，補強，更新するだけではなく，適切な管理の下でできるだけ長く，安全に供用していくことの重要性も高まっていくと思われる．例えば，経年劣化が進んだ橋梁の構造性能，特に走行を許容できる車両の重量を適切に評価して通行制限などの対策を講じつつ，供用を継続していくことが考えられる．また，こうした対策を講じた場合でも，損傷や異常が生じるリスクは，時間と共に高まっていくことから，その発生を即時に検知できるようにしておくことも必要である．

このような背景から，筆者らは，計測と解析を組み合わせることで，既設橋梁の許容荷重の評価と異常の検知を行うための手法について検討を行っている．本報文では，分布型光ファイバセンサを用いた車両載荷時のひずみ分布計測と解析に基づいて既設橋梁の許容荷重を評価する手法，ならびに動的ひずみセンサで異常を検知する手法について概説するとともに，供用中のランガーアーチ橋を対象として実施したこれらの手法の実証試験について述べる．

２．計測と解析による既設橋梁の評価手法

(1) 許容荷重の評価手法

既設橋梁において走行可能な許容荷重を推定するためには，建設当時の設計情報や経年劣化の進行の程度を評価したうえで，現状の構造性能を評価する必要がある．しかしながら，建設から長期が経過した橋梁では，当時の設計情報が失われていることが多く，経年劣化の程度も定量的に把握することができないケースが多い．そこで，本検討では，現状の既設橋梁における活荷重が作用した際のひずみの変化を再現できる解析モデルを構築して，同モデルを用いた解析によって許容荷重を推定することを考えた．本手法による許容荷重の評価のフローを**図-1** に示す．最初に重量が既知である車両を活荷重として橋梁に作用させる車両載荷実験を行い，その際に各部材に生じるひずみ分布の変化を分布型光ファイバセンサによって計測する．次に，橋梁の寸法情報等に基づく解析

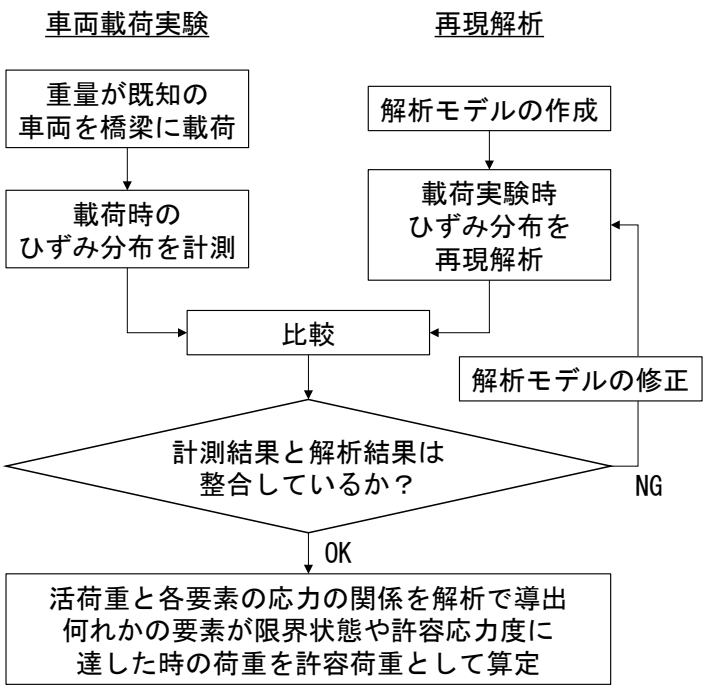


図-1　許容荷重の評価のフロー

キーワード　橋梁，維持管理，許容荷重，分布型光ファイバ計測，CFBG，モニタリング
連絡先　〒182-0036　東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所　TEL 042-485-1111

モデルを作成し，実験によって得た計測データと同解析モデルによる再現解析の結果を比較して，両者が整合するように解析モデルの各種パラメータを修正する．修正したモデルを現状における橋梁の構造性能を反映した解析モデルと位置づけ，活荷重の大きさと各要素に発生する応力度の関係を同モデルによる解析で求め，何れかの要素が設計で想定される限界状態や許容応力度に達するときの荷重を許容荷重として算定する．本手法では，橋梁に荷重が作用した際の実際の応答を再現できる解析モデルを構築するため，対象橋梁の設計情報が失われている場合や劣化の進行に伴って構造性能が変化している場合でも，現状の性能を踏まえた許容荷重を評価できる．構造性能の低下が疑われる老朽化した橋梁であっても，本手法によって現有性能に即した許容荷重を設定して適切に車両の通行制限等を行うことで，安全性を確保しながら供用を継続することが期待できる．また，車両載荷時の応答をひずみ分布として計測できるため，点計測と比較して多くの位置で解析結果との整合性を確認できることが本手法の特長である．

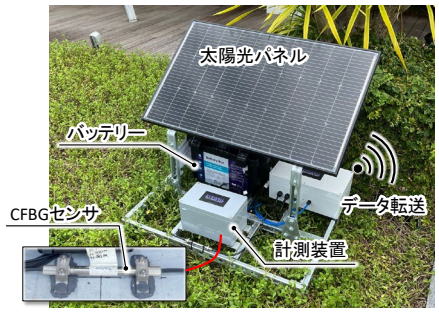
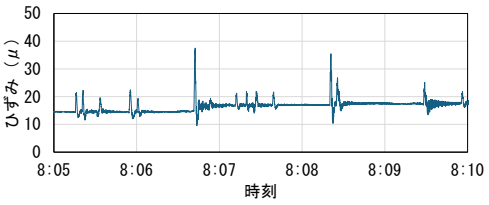


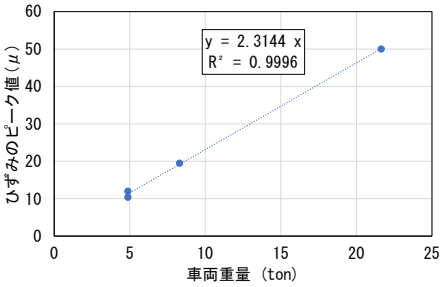
図-2　動的ひずみ計測システム

(2) 動的ひずみ計測による異常検知手法

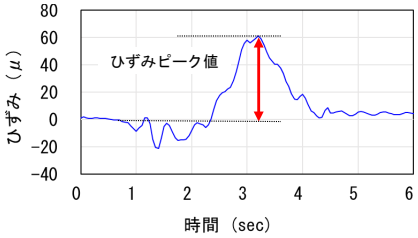
老朽化した橋梁では，通行制限などの対策を行った場合でも，時間の経過によって異常や損傷が生じるリスクが高まっていくことが想定される．そのため，このような橋梁の維持管理では，異常や損傷が発生した際に，即時に通行止めや応急復旧などの対策を行えるように，その発生を検知することが重要である．これに対して，筆者らは Chirped-FBG 技術 [3,4]（以下，CFBG，**図-2**）を活用した動的ひずみ計測システムによる異常検知手法について検討している．本システムは，ひずみを計測する素子に光ファイバを活用しておりセンサ自体が高い耐久性を有すること，低電力で動的にひずみを計測できること，さらに計測データを無線で伝送できることが特長である．そのため，太陽光パネル等，現地での発電機構を併用することで，ワイヤレスで長期間にわたるひずみ変化を計測することができる．この動的ひずみ計測システムを用いることで，橋梁の異常を検知する手法を**図-3** に示す．本手法では CFBG センサを橋梁の上部工に設置して，常時における交通荷重による応答ひずみを計測する．**図-3 (a)** のグラフは，後述する供用中のランガーアーチ橋の桁下面に CFBG センサを設置してひずみの変化を経時的に計測した例であるが，車両の走行に伴うスパイク状のひずみ変化を捉えていることや，**図-3 (b)** に示すようにピーク値が通行する車両の重量と相関していることが確認できる．常時走行する車両の種類，割合や構造性能が大きく変わらない条件であれば，応答ひずみのピーク値の日毎，月毎の傾向も変わらないことが想定される．一方，橋梁の劣化の進行もしくは突発的な異常や損傷が生じた場合には，ピーク値の傾向が経時的もしくは不連続に変化すると考えられる．そこで，橋梁の構造特性の変化や異常を検知するための指標として，同センサで得られる車両走行毎の応答ひずみのピーク値における日毎の最頻値と，90 パーセンタイル値（**図-3 (c)，(d)**）に着目した．最



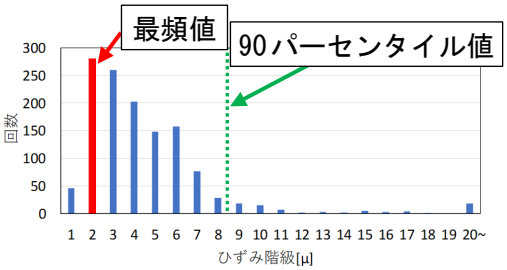
(a) 計測された応答ひずみの時刻歴



(b) 車両重量と応答ひずみのピーク値



(c) 車両走行によるピーク値の抽出



(d) 評価指標の算出

頻値は，橋梁上を通過する車両の大部分を占める普通車両が走行した際のひずみ応答，90 パーセンタイル値は，計測値のうち，上位 10%の割合を占めるひずみの大きさであり，過積載車両を含む大型車両の走行による比較的大きなひずみ応答に相当する．そのため，走行車両の種類や台数等の傾向が大きく変化していないにも関わらず，最頻値が長期的に増加するような場合には，経年劣化や疲労などで橋梁としての剛性が低下していることが疑われる．また，不連続な変化が認められた場合には，何れかの部材に損傷が発生している可能性がある．さらに，90 パーセンタイル値のみが増加する傾向が確認された場合は，過積載車両など重量の大きな車両の走行頻度の増加が示唆され，疲労による劣化が想定よりも早期に進行するリスクが高まっていると判断できる．以上のように，長期間にわたって連続的に応答ひずみを取得し，橋梁の異常と関連する傾向の変化を評価することで，橋梁の構造特性に影響する異常や損傷を早期に検知できると考えている．本手法によって異常が検知された場合には，即時に通行止めや応急復旧を行うことで，重大な損傷や事故への進展を防ぐことができる．また，異常が生じた橋梁，もしくは補修，復旧を行った橋梁において，前述した許容荷重の評価を行うことにより，橋梁の状態に応じた車両の通行制限を設定することもできる．



写真-1　対象橋梁

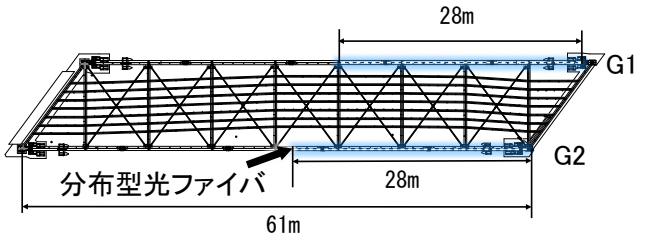
３．実橋梁を対象とした実証試験

提案した手法の有効性を検証するため，静岡県熱海市で供用されている自動車専用有料道路「熱海ビーチライン」内の伊豆山橋（鋼ランガーアーチ橋，**写真-1**）を対象とした実証試験を行った．

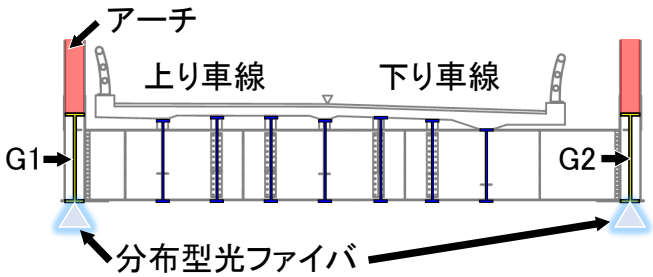
(1) 許容荷重の評価手法の検証

a) 車両載荷実験および解析の概要

車両載荷実験では，分布型光ファイバセンサをアーチ材と連結している外側の G1，G2 桁の下面に敷設し（**図-4**），上り車線の支間中央付近に 19.9ton の車両を載荷させた時のひずみ分布の変化を計測した．なお，光ファイバには 0.9mm 心線を使用し，2 液混合型エポキシ系接着剤で設置した．ひずみ分布は，高精度かつ高分解能でひずみを計測できる PNC-OFDR 方式 [5]を用いて，計測点の間隔を 5cm，空間分解能を 10cm として計測した．



(a) 平面図



(b) 側面図

図-4　計測位置

図-5 に，本検証で用いた解析モデルの概要を示す．本橋梁は設計図書が残っていなかったため，実測および 3D スキャンによる計測結果に基づき，各部材の寸法や諸元を設定して，梁要素を基本とする二次元骨組みモデルを作成した．また，本橋梁は 9 本の主桁と RC 床版から成る非合成桁の橋梁であるが，既往の事例 [6]を参考として 9 本の主桁を 1 つの梁要素としてモデル化した上で，軸剛性および曲げ剛性が十分に大きい梁要素（オフセット部材）で**図-5** に示すように主桁

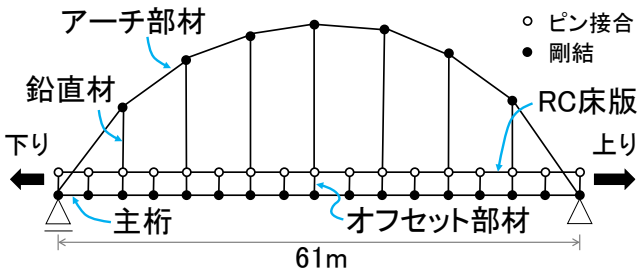


図-5　解析モデル

と RC 床版を接続した．なお，RC 床版の要素では，地覆および鉄筋は考慮していない．境界条件は，支承が健全に機能していると仮定し，単純支持とした．各要素の応力－ひずみ関係は線形弾性として，ヤング係数については，鋼材を 200kN/mm^2，コンクリートを 25kN/mm^2 とした [7]．

b) 車両載荷実験結果と解析結果の比較

図-6 に車両載荷実験で得られたひずみ分布の計測結果と解析結果を示す．なお，解析で用いたモデルが二次元骨組みモデルであることから，解析結果との比較，考察においては，上り車線に車両を載荷した際に G1 桁と G2 桁で計測されたひずみ分布の平均値を用いた．**図-6** より，分布形状を含めて計測値と解析値が近似していることが確認できる．また，**表-1** に示す通り，載荷位置におけるひずみ値で比較すると，解析値と計測値の誤差は約 10%であった．

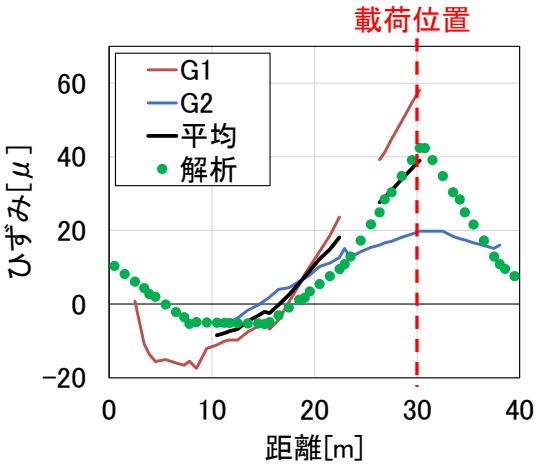


図-6　計測結果と解析結果の比較

表-1　載荷位置のひずみの値

		載荷位置のひずみ［μ］	G1・G2 の平均に対する比率
計測	G1	58.1	1.5
	G2	19.8	0.5
	平均	39.0	―
解析		42.4	1.1

c) 許容荷重の評価

前述のとおり，車両載荷実験時のひずみ分布の変化を，概ね再現解析で評価できたことから，同解析モデルを用いて対象橋梁の許容荷重の評価を行った．同解析結果と式(1)によって，各部材の応力度が設計当時の許容応力度に達する際の荷重を算出し，その中で最も小さい値を許容荷重とした．なお，式(1)は，死荷重時の発生応力度から許容応力度までの差分を単位荷重当たりの発生応力度で除すことで，死荷重分を含めた発生応力度が許容応力度に達する時点の荷重を算出するものである．

$$P_a = \frac{\sigma_a - \sigma_{dl}}{\sigma_{uni}} \qquad (1)$$

ここで，P_a：許容荷重(ton)，σ_a：各部材の許容応力度(N/mm^2)，σ_{dl}：死荷重によって各部材に発生する応力度の解析結果(N/mm^2)，σ_{uni}：単位荷重あたりの各部材で発生する応力度の解析結果(N/mm^2/ton)である．

表-2　各部材の許容応力度と発生応力度および許容荷重

部材	許容応力度 σ_a (N/mm^2)	発生応力度 (N/mm^2)		許容荷重 P_a (ton)
		死荷重時 σ_{dl}	単位荷重載荷時 σ_{uni}	
アーチ材	-118	-103	-0.44	35
主桁	140	50.2	0.70	128
鉛直材	140	39.7	0.18	555

表-2 に対象橋梁を構成するアーチ材，主桁，鉛直材の許容応力度と，死荷重時，単位荷重載荷時の発生応力度の解析結果および許容荷重の評価結果を示す．なお，各部材の許容応力度は，本橋が竣工した年代を考慮して昭和 39 年版の道路橋示方書 [8]に基づいて設定した．また，**表-1** に示した通り，車両を載荷した上り車線側の G1 桁に発生したひずみは，下り線側の G2 桁との平均に対して 1.5 倍程度であった．そこで，活荷重によって主桁以外の各部材に発生する応力度も，走行車線に近い方が同様の割合で大きくなると仮定し，各部材のσ_{uni}については解析結果を 1.5 倍することとした．加えて，前述のように解析結果には，10%の誤差が含まれることから安全側の評価とするため，さらに 1.1 倍した値を用いた．以上の条件に基づき，各部材が許容応力度に達する荷重を算定した結果，アーチ材では 35ton，主桁では 128ton，鉛直材では 555ton となった（**表-2**）．そして，活荷重に対して最も裕度が低いアーチ材の応力が，許容応力度に達する荷重である 35ton を対象橋梁の許容荷重として評価した．なお，過去に本橋を通行したことがある最重量の車両は，30ton クラスであることから，その範囲においては十分な耐荷性能を有していると判断できる．

(2) 異常検知手法の検証

a) 長期計測試験の概要

本検討では，2 章(2)節で述べたように，常時の車両走行時の応答ひずみを長期間計測して，その傾向の変化を捉えることで異常を検知することを想定している．そこで，本計測システムによって，長期間の車両走行時の応答ひずみが取得できることを検証するため，伊豆山橋を対象とした長期計測試験を実施した．CFBG センサの設置位置を**図-7** に示す．CFBG センサは，比較的，センサを設置しやすい下り車線側のスパン中央の地覆上面と，車両走行時のひずみ変化が大きいと思われる橋台から約 8m 地点の G2 主桁下面に設置した．計測は，2025 年 2 月 1 日から 2025 年 9 月 30 日で行い，20Hz で連続計測したひずみの時系列データから，個々の車両走行に伴う応答ひずみのピーク値を抽出した．具体的には，1 秒間のひずみ変動が閾値（地覆の場合は-1.3 μ 以下，主桁下面の場合は 2.0 μ 以上）を超えた場合を，車両走行に伴うひずみ応答として判定し，その直前の計測値から 4 秒以内の変化量のピーク値を機械的に抽出した．なお，これらの閾値や秒数は，車両載荷実験時に併せて同計測システムで計測した応答ひずみの波形に基づいて設定した．

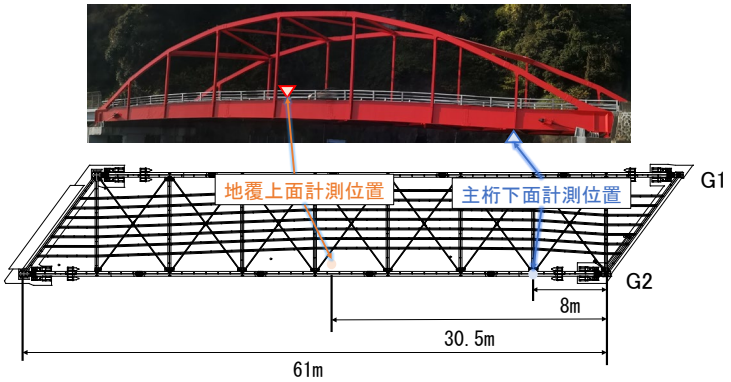
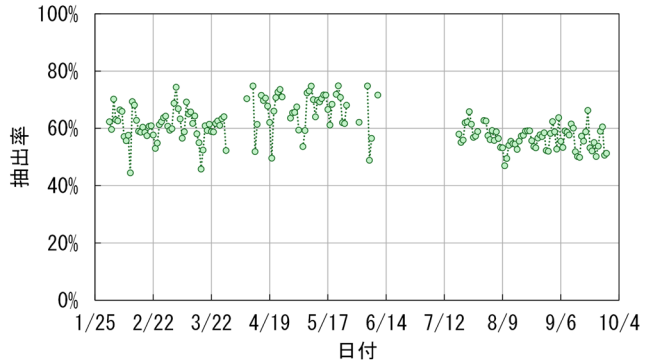


図-7　長期計測試験における計測位置

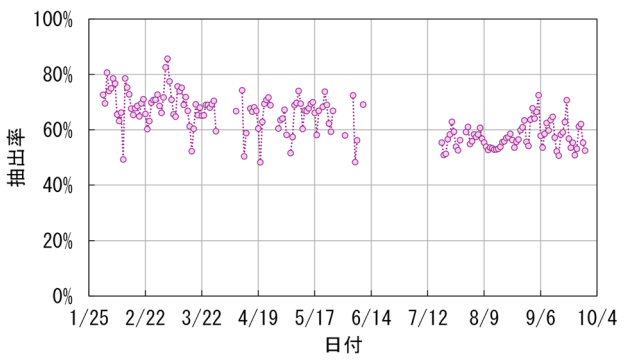
b) 長期計測試験の結果

同計測システムによって車両走行時の応答ひずみが計測できていることを検証するため，対象橋梁を通過した台数と，応答ひずみのピーク値の抽出個数の割合（以下，抽出率）を比較した（**図-8**）．その結果，抽出率は，地覆のデータでは 60±10%，主桁下面のデータでは 65±15%の範囲で推移していることが確認された．抽出率が 100%に達しない要因としては，センサ付近を複数の車両が短時間に連続して通過した，あるいはセンサ付近で上下線の車両がすれ違った等により，応答ひずみが重複したこと等が要因と考えられる．ただし，計測期間中における抽出率の値が安定していることから，同期間中における車両走行に伴う応答ひずみの頻度や大きさの傾向の変化を捉えるという目的に対しては，十分な精度であると思われる．

取得できたデータに基づいて算出した応答ひずみの最頻値，ならびに 90 パーセンタイル値の推移を**図-9** に示す．地覆上面の応答ひずみは，最頻値が-2 μ，90 パーセンタイル値が約-4 μ であり，計測期間を通じて安定して推移していることが確認できる．一方，主桁下面の応答ひずみは，2025 年 2 月～3 月では，最頻値が 3～4 μ であったのに対し，4 月から 9 月では，2～3 μ に減少する傾向が確認された．計測期間中，大型，普通車両の割合を含む交通状況の変化や主桁の剛性に影響するような異常は無かったことから，気温の変化を含む季節的な要因が主桁の応答ひずみの計測結果に影響している可能性がある．このことから，異常による変化と季節変動を区別するため，年間を通じた応答ひずみの変動特性を把握することの必要性が示唆された．今回の長

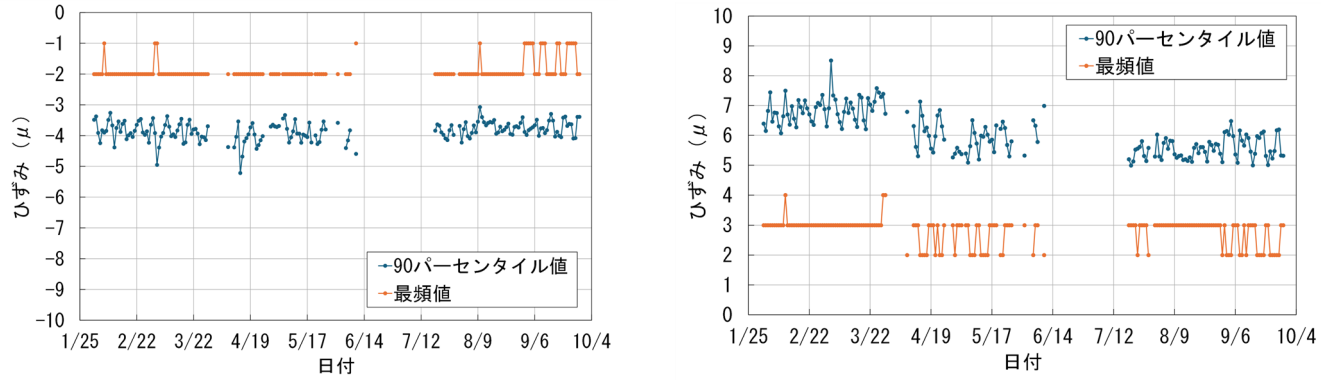


（a）地覆上面



（b）主桁下面

図-8　応答ひずみによる通行車両の抽出率



（a）地覆上面　　（b）主桁下面

図-9　最頻値，90 パーセンタイル値の日毎の推移

期計測試験では，期間中に応答ひずみが変化するほどの異常，損傷は発生していないため，本手法によって異常が検知できることは実証できていないものの，その検知で必要となる長期間にわたる応答ひずみの計測とその傾向の評価が可能であることを確認した．

４．まとめ

分布型光ファイバセンサを用いた車両載荷時のひずみ分布計測と解析に基づいて既設橋梁の許容荷重を評価する手法，ならびに動的ひずみセンサで異常を検知する手法を提案し，これらの手法の有効性を供用中のランガーアーチ橋を対象とした実証試験で確認した．その結果，車両載荷実験を再現できる解析モデルを作成したうえで，同モデルを用いた解析によって既設橋梁の許容荷重を評価することができた．また，動的ひずみ計測システムによって，既設橋梁の上部工における車両走行時の応答ひずみを計測することができ，異常の検知において有効と考えられる日毎の最頻値や 90 パーセンタイル値を評価できることを確認した．本手法による許容荷重の評価結果や異常の検知の妥当性については，今後におけるデータの蓄積と検証が必要であるが，本報文で報告した計測および解析を活用した評価手法が既設橋梁の維持管理の一助となれば幸いである．

参考文献

1) 国土交通省道路局：老朽化の現状・老朽化対策の課題，https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/torikumi.pdf
2) 国土交通省総合政策局：インフラメンテナンスにおける包括的民間委託導入の手引きについて，https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/_pdf/houkatsu_tebiki_kaisetsu.pdf
3) M. Maheshwari, et al. : Wavelength-shifted chirped FBGs for temperature compensated strain measurement, Sensors and Actuators, A 265, pp.231–235, 2017
4) M. Maheshwari, et al. : Chirped fiber Bragg grating coupled with a light emitting diode as FBG interrogator, Optics and Lasers in Engineering, 122, pp.59-64, 2019
5) 吉村ら：PNC-OFDR 方式を用いた分布型光ファイバセンサによる静・動ひずみ計測，土木学会第 77 回年次学術講演会講演概要集，CS9-41，2022.
6) 佐野：ファイバーモデルを用いた橋梁の耐震設計－鋼上路式アーチ橋についてー，第 15 回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，pp.15-28，2012
7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋編，pp.86-87，2012
8) 日本道路協会：鋼道路橋設計示方書・鋼道路橋製作示方書解説，日本道路協会，pp.49-54，1964