

## ICTを活用した新しい橋梁維持管理手法の提案

三井住友建設(株) 正会員 工修 ○玉置 一清  
 富山市役所 工修 杉谷 真司  
 (株)TTES 博(工) 菅沼 久忠  
 神戸大学大学院 正会員 博(工) 森川 英典

Abstract : This paper proposed the new bridge maintenance technique which aims for the reduction of maintenance cost and the rationalization of diagnosis evaluation. The ICT tool which supported the visual inspection by distant view effectively, was developed by the authors. As a high durability sensor, the optical fiber is attached to a structure to enable a higher check diagnosis when deterioration progresses. The systems started an inspection of a deteriorated bridge due to ASR. Under the present conditions, it was confirmed that the target bridge behaves normally without extraordinary events.

Key words : Maintenance technique, Inspection support system, Monitoring

### 1. はじめに

平成26年の道路法施行規則の改正に伴い、橋長2m以上のすべての道路橋に5年に1度の近接目視による点検が義務づけられるなど、橋梁の老朽化対策が本格始動した。こうした中、地方自治体では、予算や人員、技術力の不足といった共通の課題を有しており、今後は、いかにして効率的、効果的に橋梁の状態を把握し、適正な維持管理、更新に取り組むかが喫緊の課題となっている。

現行の点検ルールである近接目視点検(すべての部材を対象)は、橋梁点検車や総足場が必要であり、比較的規模の小さい橋梁で一般的に行われてきた遠望目視点検に比べ、費用が大幅に増大している。また、前回点検との連続性が不明確であったり、点検評価は主観を排除して機械的に行われるが、その診断には工学的判断を要するなど、不明瞭となる課題も多いと考える。

そこで、本論文では、維持管理コストの縮減および診断の明解化を目的とした新しい橋梁維持管理手法について提案する。本手法の全体概要を図-1に示す。点検システムは、遠望目視点検を有効に機能させるためのICTツールの活用と、遠望目視点検困難箇所や、劣化が顕在化し、さらに高度な診断を要する場合には、固定センサーを併用する構造物モニタリングの2段階から構成する。これらのデータを集中管理し、類似橋梁との比較分析などによる診断システムは、現在、現場検証中の点検データ蓄積後、別の機会に報告を行う。本論文は、点検データの客観性、連続性に主眼をおいた新しい点検システムの報告を行うものである。

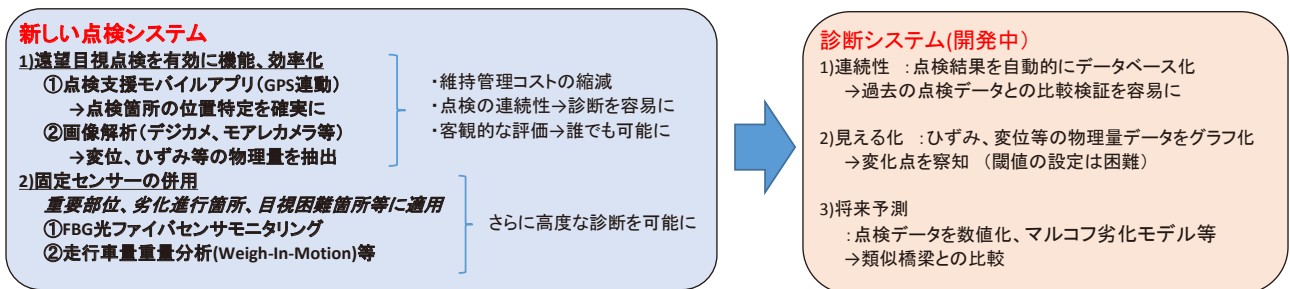


図-1 提案する橋梁維持管理手法

## 2. 遠望目視点検を有効かつ効率的に機能させるためのICTツール

遠望目視点検を有効に機能させるためには、点検箇所を選定および過去の点検データとの対比が重要であり、本来、点検者に高度な経験、知識が要求される。これらをICTツールを活用することで、専門技術者でなくても、一定水準以上の点検データの集積を可能にする点検支援モバイルアプリ(写真-1)を開発した。点検者は、GPS連動機能により一般図上で点検者の自位置を確認することができ、一般図上に点検箇所を登録し、点検データおよびUSB接続されたデジタルカメラの画像を紐付けていく。事前に、過去の点検データを取り込んでおくことで、それと比較しながら、同じ箇所の点検データを追加登録することができる。構造物に、あらかじめ写真-2に示すようなマーカ(100×100mm)を設置し、複数マーカを遠望撮影することで、画像解析により、マーカ同士の相対変位を自動算出する機能を有する(解像度3000万画素のカメラを使用すれば、距離30mで1mm程度の精度)。たとえば、不動点を含めた全景写真を撮影すれば、桁のたわみや遊間変位を、レベルやスケールを使わずに容易に測定することができ、自動的にデータベース化する。

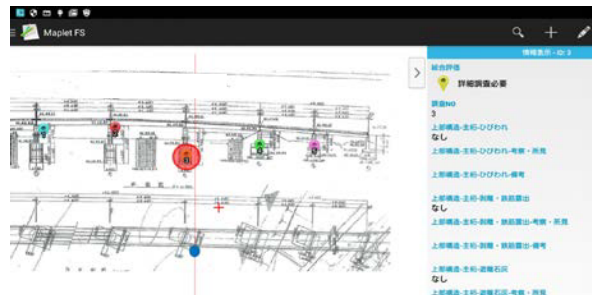


写真-1 点検支援モバイルアプリ



写真-2 画像解析用マーカ

## 3. センサーモニタリング

### 3.1 センサーモニタリングの課題と本システムにおける解決策

センサーモニタリングが構造物の点検、診断に有用であることは従来から提唱されているが、補修補強後の効果確認など比較的短期間での採用実績はあるものの、下記の課題により、劣化の進行が初期段階の構造物から長期監視するシステムは、まだ実用化されているとはいいがたい。以下に、課題と本システムにおける解決策を述べる。(なお、本システムの採用は、現行の仕様規定型の点検基準から、性能照査型の維持管理に移行されるであろうことを前提としている。)

- ①数十年に及ぶ長期信頼性のあるセンサーがない。→FBG光ファイバーセンサーの採用 3.2(2)参照
- ②土木構造物の場合、電源の確保が容易でない。→発電機を使用した定期モニタリングでの運用
- ③長期間に及ぶデータ管理者の体制構築が必要である。→CM方式など、民間企業などへの代行

### 3.2 FBG光ファイバーセンサー

#### (1) 基本原理

本モニタリングシステムで採用したFBG(Fiber Bragg Grating)方式は、光ファイバー内部に加工した回折格子から反射する光波長により、回折格子部のひずみおよび温度を測定するものである(図-2)。

写真-3に、今回使用したFBG光ファイバーひずみセンサーを示す。構造物に固定した間での平均ひずみを測定し、任意のセンサー長を構築することができる。数mで固定すれば、ひび割れが多い構造物であっても、測定ひずみが局所的に集中、開放されることなく、平均的なひずみが測定可能である。なお、圧縮側のひずみ測定には、プレテンション(今回は2500μ)を与えて固定する必要がある。

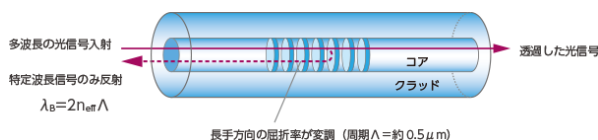


図-2 FBG光ファイバーの概要(伸興電線HPより)

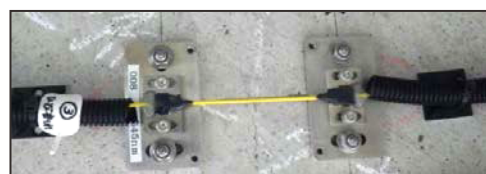


写真-3 FBB光ファイバーひずみセンサー

(2) 特徴

本システムが、橋梁の維持管理システムに適していると考えられる特徴を以下に述べる。

①センサーには劣化する材料(鉄, 接着剤など)を使用していないため、長期測定の可能性が高い。

SUS板をSUSアンカーでコンクリートに固定, SUS板と光ファイバはガラス溶着(写真-3参照)

②配線が直列配置であり, センサー設置作業および測定作業が容易(図-3)

(次項の運用方法に示す定期モニタリングは, 地元企業による実施を想定)

③電磁の影響を受けないため, ノイズが極めて小さく, 微小ひずみを検出可能(図-8参照)

④距離減衰が小さく, 長距離(広範囲)の測定が可能→複数橋梁を同時測定できる可能性など

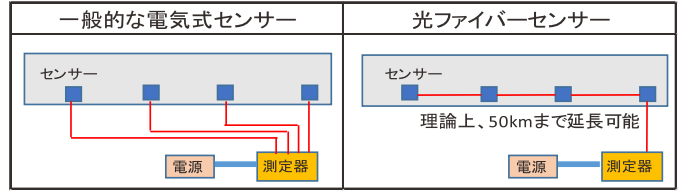


図-3 ひずみセンサーの配置比較

(3) 維持管理のためのモニタリング運用方法

完全無人化を目指し, 電源確保, 無線通信などの設備を構築した場合, これらの維持管理が問題となり, 本末転倒なシステムとなる可能性がある。本システムは, 当面の運用として, 年1回程度, 測定器, 発電機を持ち込んでの定期モニタリングと, その際に数日間連続で高周波サンプリングを行う連続モニタリングを基本として検証を開始した。この運用方法により得られる主な成果を表-1に示す。

表-1 定期モニタリングおよび連続モニタリングにより得られる効果

測定項目	効果
定期モニタリング ※測定器, 発電機を準備し 年1回程度で, 2~3日間連続測定	<ul style="list-style-type: none"> <li>ひび割れの進展, 幅の変化</li> <li>桁曲率(≒たわみ)の変化</li> <li>収縮, ASR等の膨張, 収縮挙動</li> <li>プレストレス応力等の喪失</li> </ul> ・長期的な挙動をグラフ化→基本的に, 変化ないことを確認→変化点を早期に検知 ※センサ設置時を初期値とするため, 絶対量の把握は困難であり, 閾値の設定は困難 ・日気温変化による変動を検証 →ASR等, 温度変化に敏感な事象等を検出
連続モニタリング(100Hz) (2~3日間程度)	<ul style="list-style-type: none"> <li>車両走行時の挙動(走行荷重試験等)</li> <li>走行車両重量分析(Weigh-In-Motion) ※測定期間中に走行した全車両の台数, 重量, 速度を把握</li> </ul> 例えば, 荷重既知車(20t程度)を走行させ, その挙動の経時変化をグラフ化→マクロな診断 → 異常が検知されれば, 近接目視点検等を実施 ・重車両による疲労回数の推定 ・過積載車両の把握, 取締り等

4. 現場検証

4.1 対象橋梁

河川上に架設された築38年(1978年竣工)の単純T桁(図-4, 支間28.9m, 桁高1.5m, 幅員10m)を対象に, 2016年8月より本点検システムの現場検証を開始した。対象橋梁は, 築20年頃にASRと推定される軸方向ひび割れや, 床版間詰の剥落などが確認され, ひび割れ注入および劣化が激しかった桁端部の断面修復が実施されているが, 現時点において, 注入したひび割れの再開口や, 桁端部の断面修復部のひび割れなど, 新たなひび割れの発生が確認されており, ASRの進行継続が強く疑われる橋梁である。



図-4 橋梁側面図およびマーカ設置位置

4.2 デジタルカメラによる画像解析

表-2に, スケール, レベル測量とデジタルカメラ画像による変位解析の比較を示す。約20℃の気温変化に対し, 正常な桁遊間移動量であり, 手動測量と画像解析は概ね一致することが確認できた。本システムにより, 測量技術者に委託することなく, 高頻度に変位データを蓄積することが期待でき, 診断の大きな判断材料とすることができると考える。

表-2 変位測定値の比較

			単位	8/26	12/20	4/11
気温			℃	30	10	12
桁遊間	起点側	スケール測量	mm	0 (初期値)	7	6
	終点側				10	10
	起点側	画像解析			8	7
	終点側				9	9
たわみ	支間中央	レベル測量			2	1
		画像解析			2	1

### 4.3 FBG光ファイバーによるモニタリング

#### (1)FBG光ファイバーセンサの配置

図-5、写真-4に、FBG光ファイバーの配置概要を示す。モニタリングを実施した桁は、遠望目視では、点検が困難かつ走行車両の影響が最も大きい、外桁から2番目の桁である。表-3に、各配置センサの測定目的およびセンサー長、サンプリングの一覧を示す。ひび割れが多い箇所では、複数本のひび割れを跨ぐように500mm～1000mmのロングゲージを使用し、平均ひずみを計測する。ひび割れ幅や床版間詰め部など、微細な挙動を把握したい箇所には100mmのショートゲージを使用している。

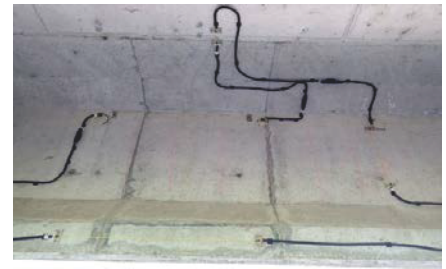


写真-4 FBG ひずみセンサ設置状況

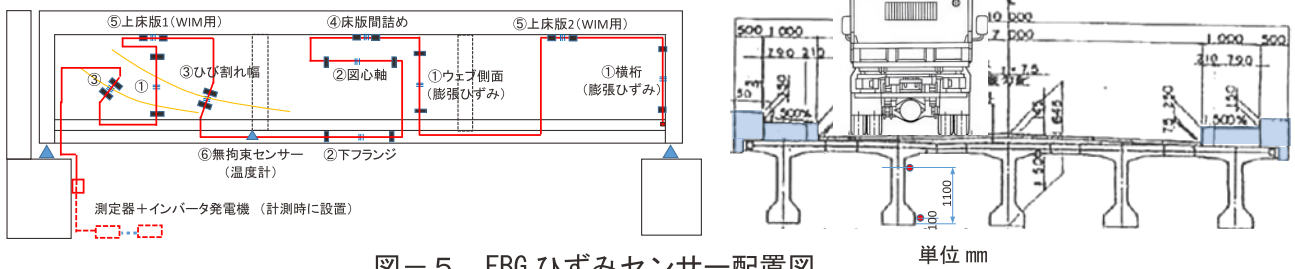


図-5 FBG ひずみセンサー配置図

表-3 各センサーの測定目的とセンサ長, サンプリングレート

番号	測定目的	測定項目	FBG センサー長	測定箇所	箇所数	サン プリ ング	
①	ASR進行度合いの把握	鉛直方向ひずみ	500mm	端支点横桁	1箇所	1時間毎	
				桁端 (ひび割れ顕著)	1箇所		
				支間中央(ひび割れ少)	1箇所		
②	桁曲率変化の把握	橋軸方向ひずみ	1000mm	図心軸	1箇所	1時間毎	
				下フランジ	1箇所		
③	ASR もしくは PC鋼材腐食膨張の可能性を検証	ひび割れ幅	100mm	PC鋼線に沿ったひび割れ	0.2mm以上のひび割れを選定	2箇所	100Hz
④	輪荷重の影響	床版ひずみ (橋軸直角方向)		床版間詰め部	支間中央付近	1箇所	
⑤	走行車両重量分析 (Weight-in-motion)	速度検知	1000mm	床版中央(車輪直下)	支間中央から±9.4m	2箇所	
		重量検知		橋軸方向ひずみ	支間中央部	下フランジ →桁曲率と兼用	1箇所
⑥	温度補正用	無拘束	-			1箇所	

#### (2) 定期モニタリング

図-6に、上表①～③のひずみ測定値を示す。測定値はセンサー設置時の2016年8月を初期値とし、2017年4月までの8ヶ月間に計3回の測定を行った。モニタリング前に行われた近接目視点検では、ひび割れ密度が高く、劣化進展期であることが疑われたが、モニタリングでは、季節による気温変化に伴う線膨張ひずみが生じているだけで、ひび割れ幅の変動もなく(逆に、冬季で閉じる方向)、とくに異変は確認できない結果となった。これから夏季を経過し、それでも異変が確認できない場合、ASRは収束段階にあると判断できると考える。

#### (3) 連続モニタリング(100Hzサンプリング)

##### ① 走行載荷試験

重量を測定した車量(前輪6.7t, 後輪13.4t: 合計20.1t)を走行させ、100Hzでサンプリングする走行載荷試験を実施した(写真-5)。後導車を付け、近接車両の影響は排除している。走行速度は、時速30km/h, 50km/h, 超低速(3km/h)の3種類とした。表-4に試験結果一覧を、図-8にcase7(時速50km/h)の拡大図と3次元FEM解析値( $E_c=31\text{kN/mm}^2$ と仮定)との比較を示す。



写真-5 走行載荷試験状況

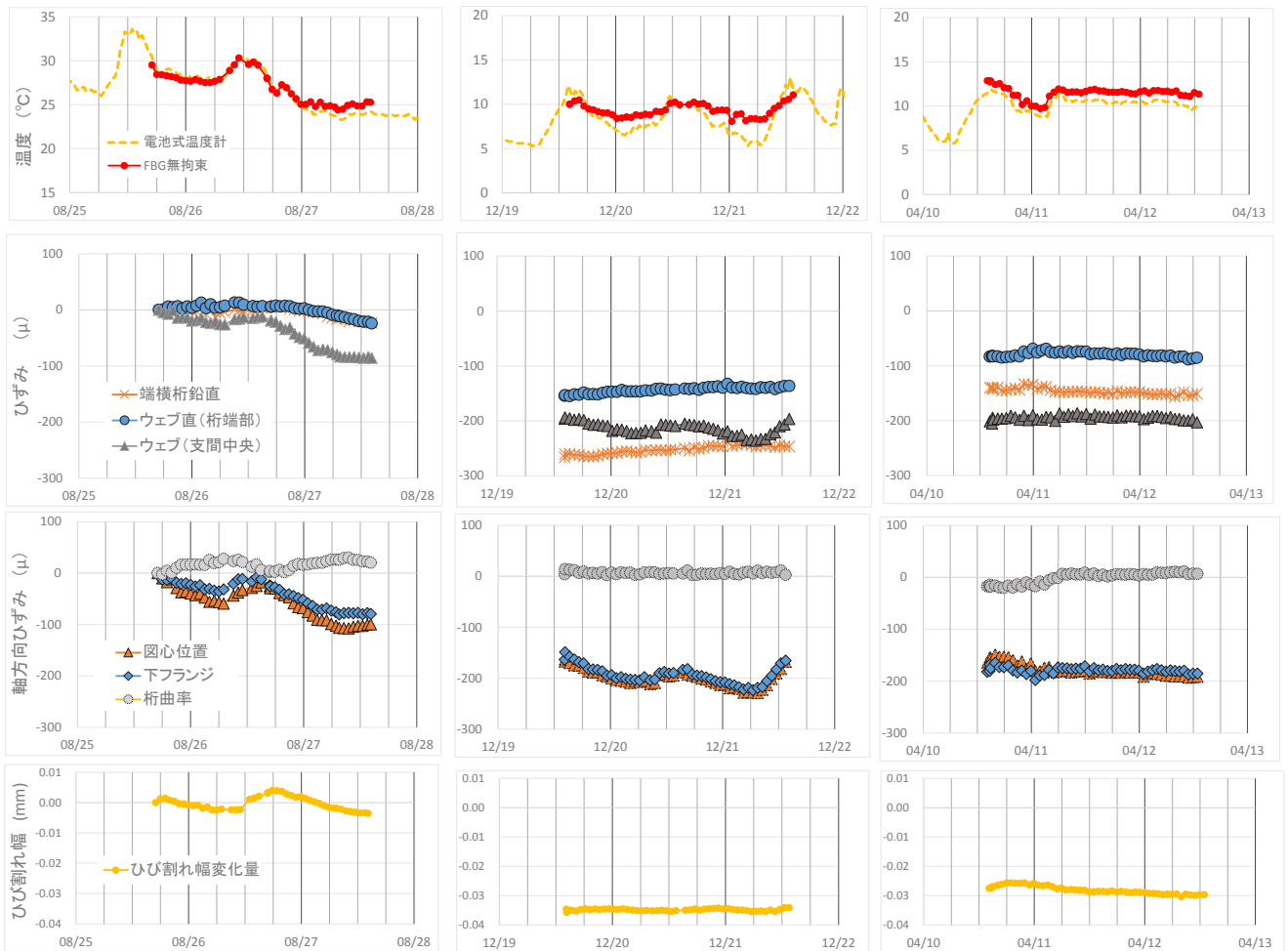


図-6 ひずみ測定データ (1回目: 2016/8, 2回目: 2016/12, 3回目: 2017/4) ※横軸は月/日

FEMモデルは、舗装および地覆を剛性に加味したModel1と、無視したModel2の2種類とした。実際のヤング係数が設計値より2割程度大きいと仮定すれば、実測値はModel1の解析値とよく整合していると考えられ、ASRの劣化が疑われる橋梁であるが、桁剛性は十分に維持しているものと考えてよい。図-7に走行速度と最大ひずみの関係を示す。走行速度が増加するとひずみは僅かに増大する傾向にある。これは、衝撃の影響であると推定されるが、道示で規定される衝撃係数は大きく下回るものである。図-9に、文献<sup>1)</sup>に示される鋼橋(支間35.6m, 単純桁)におけるひずみ波形式例を示す。車1台の波形であるが、2~5Hz程度の卓越した波形が見られる。PC橋である本橋では、このような波形は検出されず、交通による橋梁振動は極めて小さいものと推察される。これら挙動については、さらにデータを採取し、検討を継続する。

表-4 走行載荷試験一覧表

	試験条件	走行速度 実測値 (km/hr)	最大ひずみ (後輪通過時) ( $\mu$ )	対向車線
case1	30km/hr	32	27	2tトラック
case2		33	24	大型トラック
case3		28	25	普通乗用車
case4		30	25	
case5		34	24	普通乗用車2台連行
case6	50km/hr	47	26	普通乗用車
case7		46	25	
case8		48	26	
case9		48	28	軽トラ3台連行
case10		49	24	
case11		超低速	2.5	23

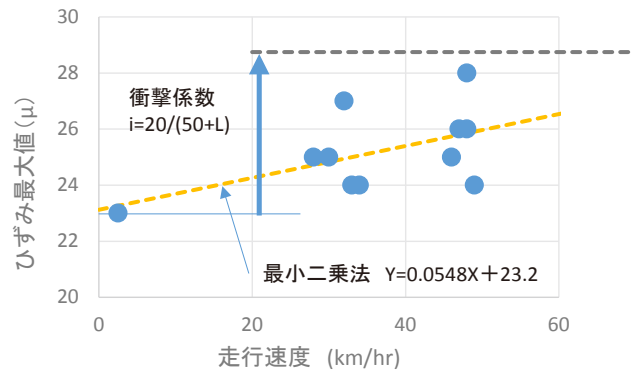


図-7 走行速度と桁ひずみの関係

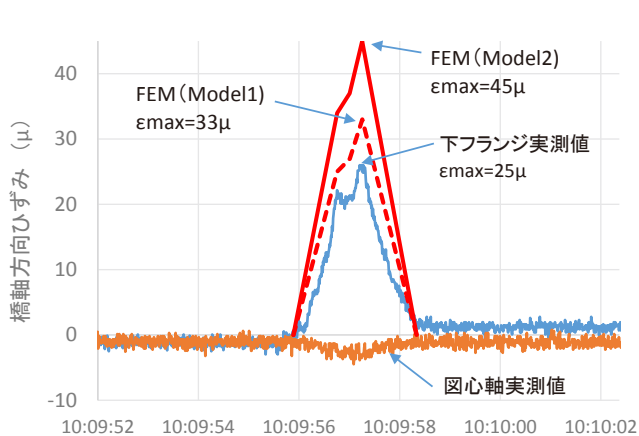


図-8 橋軸方向ひずみ拡大図 (case7)

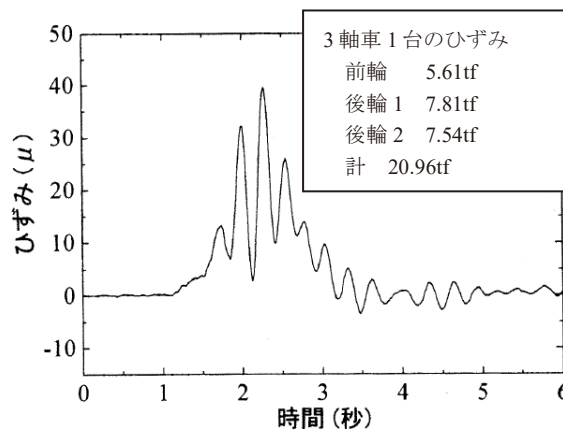


図-9 鋼橋におけるひずみ波形例<sup>1)</sup>

②走行車両解析(Bridge-Weigh-In-Motion)<sup>1)</sup>

図-10に、10月初旬の木曜日から金曜日にかけての24時間に、本橋を走行した総重量10tf以上の重量別走行台数を示す。この処理には、先の走行載荷試験をキャリブレーションとして利用した。24時間の総計は281台で朝の通勤時間帯が最も多い。設計荷重を超過すると思われる車両が数台/日確認され、最大は午前4時台に通過した50.5tであった。本橋ほか、地方自治体が管理する道路が過酷な環境下におかれていることが改めて認識された。

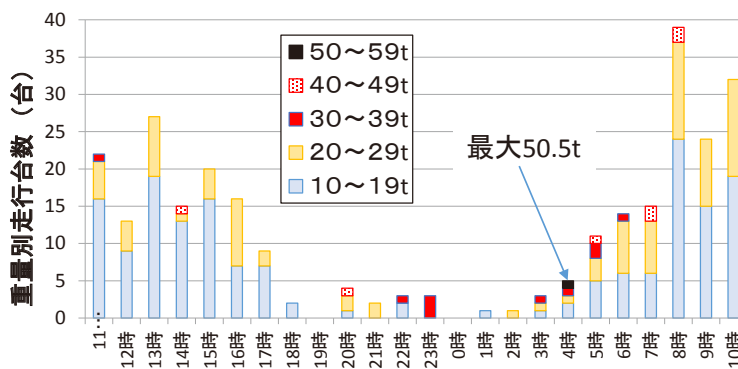


図-10 時間ごとの重量別走行台数

5. おわりに

本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) 遠望目視点検を支援するモバイルアプリの開発により、点検の連続性を確保すると同時に、全景写真の画像解析からレベルなどの従来測定と同などのデータを容易に蓄積することができ、測量技術者に寄ることなく高頻度に変位データを蓄積していくことが可能である。
- 2) FBG光ファイバーは、長期にわたるモニタリングが可能と考えられ、その設置作業および測定作業などの運用も、従来の電気式センサーと比較すると容易であり、維持管理に適していると考えられる。
- 3) 近接目視点検でASRの劣化進展が強く疑われる橋梁において、本点検システムの現場検証を行った結果、約半年間の経過ではあるが、とくに異変は確認されず、また、走行載荷試験においても、解析値よりも応答値は十分に小さく、マクロ的には十分に健全であることが確認できた。現行の近接目視点検では、変状を見逃さないことに主眼がおかれるが、モニタリングにおいては、コンセンサスのとれる数値データを基に異変がないことを確認することが重要な目的・成果と考える。
- 4) 維持管理用のモニタリングシステムを利用して、走行車量解析が可能である。24時間分の解析を行った結果、走行台数は少ないものの、設計荷重を超過する車両が数台/日、確認され、地方自治体が管理する道路が過酷な環境におかれていることが改めて認識された。

本報告が、これら新しい維持管理手法の可能性について、議論の一助となれば幸いである。

参考文献

1) 小林祐介, 三木千壽, 佐々木栄一: FBG 光ファイバーセンサによる Weigh-In-Motion システムの構築, 応用力学論文集, 2003