

実構造物におけるモニタリングシステムの活用事例

Application examples of the monitoring system of the actual structure

藤原啓隆*, 岡田裕行*, 濱博和**, 杵本正信***

Hiroataka Fujiwara, Hiroyuki Okada, Hirokazu Hama, Masanobu Sugimoto

*株式会社フジエンジニアリング 調査設計部調査2課 (〒532-0002 大阪市淀川区東三国 5-5-28)

**株式会社フジエンジニアリング 調査設計部 (〒532-0002 大阪市淀川区東三国 5-5-28)

***工博 株式会社フジエンジニアリング (〒532-0002 大阪市淀川区東三国 5-5-28)

Recently, most of social capitals have been up for renewal, so that it is growing necessity for maintenance and renewal. On the other hand, in the structure made newly, we are required to the safe and secure construction and conservation of surrounding environment, because of increasing effective use of land in urban area.

Under such circumstances, by network and sensor technology development, monitoring according to the purpose has been introduced in some constructions. This paper introduces examples of the maintenance construction of bridge and tunnel construction.

Key Words: monitoring, maintenance, safety management

キーワード: モニタリング, 維持管理, 安全管理

1. はじめに

高度経済成長期に建設された多くの社会資本は、更新時期を迎えている。これに伴い、維持管理に係わる様々な技術やシステムが開発導入されている。一般に、道路構造物の保全是、現場での点検作業が主となっており、構造物に接近して目視や機器による測定などにより変状を確認することが基本である。このため、構造物へ接近するための足場架設や高所作業が常に必要とされ、多大な労力とコストがかかるとともに危険を伴う。構造物を適切に保全するためには、このような点検は欠かすことができないものであるが、構造物の変状を捉えることのできる項目に着目したモニタリングを併用することで、費用の低減や効率化を図ることができる^{1), 2)}。高度なモニタリングの例として、地震計による常時微動観測やGPSを用いた法面の変状観測などが挙げられるが、このような技術が必ずしも普及している状況ではない。

一方、新設される構造物においては、住宅密集地などの都市部や市街地における土地の有効利用が多くなりつつあり、周辺環境保全や安全・安心に配慮した施工が重要視されている。特に、住民生活に近接した施工とな

る場合、住民との協議や対応は密に行い信頼を得ることが出来る計画・施工を実施する必要がある。このため、住民の意見を反映させた工事計画、施工管理や安全・安心な施工が求められている。

このような中で、ネットワーク技術やセンサー技術の進展と普及により、目的に応じたモニタリングの導入がなされている。本稿では、橋梁の維持・更新工事ならびに周辺環境に配慮したトンネル施工を安全・安心に進めることを目的とした遠隔モニタリングの事例について紹介する。

2. 鋼橋の座屈した主構造部材の取替えと健全構造部分の再利用に伴うモニタリング事例^{3), 4)}

2.1 モニタリング対象橋梁の概要

(1) 橋梁概要

モニタリング対象橋梁は、4連からなる鋼I桁製単純合成桁橋である。当該橋梁は、路下の国道と斜めに交差する関係上、3本の鋼製横梁で主桁を支持するという特殊な構造形式となっている。横梁は鋼床版形式となっており、単純鋼I桁を横梁から張り出したブラケットで支

持する構造である。また、当該橋梁では供用開始当時、1日9千台であった交通量は約11万台に増加し、車両の大型化も進んだことにより、重交通の荷重履歴を長期にわたり受けている。構造一般図を図-1に示す。

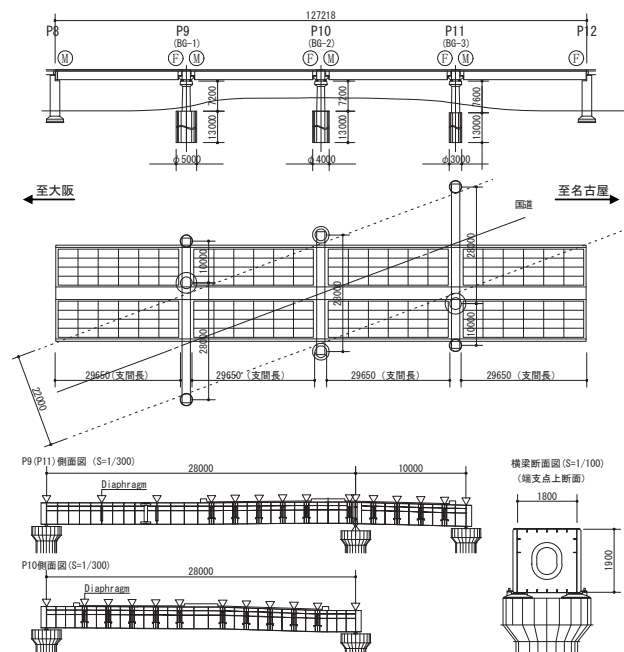


図-1 橋梁構造一般図

(2) モニタリングの経緯

当該橋梁は、特殊な構造を有していることに加え、重交通の荷重履歴を長期にわたって受けたことにより、損傷が確認されるようになった。損傷は、主として鋼製横梁に集中しており、各種調査により以下のような損傷が確認された。

- ① 横梁溶接部の疲労亀裂損傷
- ② 横梁端部の局部座屈
- ③ 横梁のたわみ変位
- ④ 端部支承の負反力 (P9, P11)

これらの損傷を受けて、応急的な対策として箱桁の形状保持を目的としたダイヤフラム補強や対傾構増設などが実施された。補強・補修により発生応力度の緩和が確認されたが、その後抜本的な対策に取り組む必要性があると考えられ、橋梁の改築工事が検討された。

しかし、国道を跨ぐ特殊な立地条件、かつ、重交通路線での工事であることから、国道ならびに本線の車線規制を最小限に抑えることが要求された。当該橋梁の改築工事は、厳しい制約条件の中で横梁の交換を行う難度の高い工事であり、安全には十分配慮する必要があった。また、改築内容や方法の検討には時間を要するため、工事開始までの安全管理についても十分な体制を整えておく必要があった。このことから、安全管理は支保工による荷重支持のようなハード面での準備とともに、事前に異常を察知するためのモニタリングも必要であると考えられた。

2.2 モニタリングの内容

(1) モニタリング項目

当該橋梁で実施したモニタリング項目は以下の通りである。

- ① 横梁支間中央断面の曲げ応力度とたわみ変位
- ② 横梁端部の局部応力と変形量
- ③ 橋梁天端における傾斜
- ④ 合成鋼桁の曲げ応力
- ⑤ 橋梁の映像

モニタリングの履歴を表-2に示す。当該橋梁のモニタリングは応急的対策前の変状調査を含めると平成10年頃から開始している。モニタリング項目については、必要に応じて順次追加した。

表-2 モニタリング履歴

年次	対象橋梁	内容	備考
平成10年	-	応力測定および変状調査	現地調査
平成11年	-	横梁端部の緊急補強(応急対策)	-
平成12年12月	P10	端部ウェブ応力 部材表面温度	データロガーによる計測 ⇒データ採取間隔は1時間 ⇒月1回のデータ回収
平成13年2月	P10	橋脚の傾斜	
平成13年9月	P10	支間中央のたわみ変位、フランジ応力	LabVIEWによる監視計測を開始 ⇒データ採取間隔は5分 ⇒PHS回線を活用した通信
	P11	支間中央のたわみ変位、フランジ応力	
	-	監視カメラ	
平成14年5月	P9	北側橋脚の傾斜 中側橋脚の傾斜	
平成14年10月	P10-P11	主桁応力(3断面)	
平成16年	-	-	⇒ADSL回線を活用した通信

(2) モニタリングシステム

モニタリング開始当初はデータロガーによる自動計測(静的計測)のみで、毎月の部材や塗膜の変状点検の際にデータを回収して、それを持ち帰ってデータ整理を行っていた(表-2)。その後、平成13年頃からPHSを活用したダイヤルアップ接続により計測結果をモニターできるシステムを採用した。工事開始前(平成16年頃)には、インターネットの急速な普及を背景に、ADSL回線を導入したシステムに変更した。システム構成を図-2に示す。

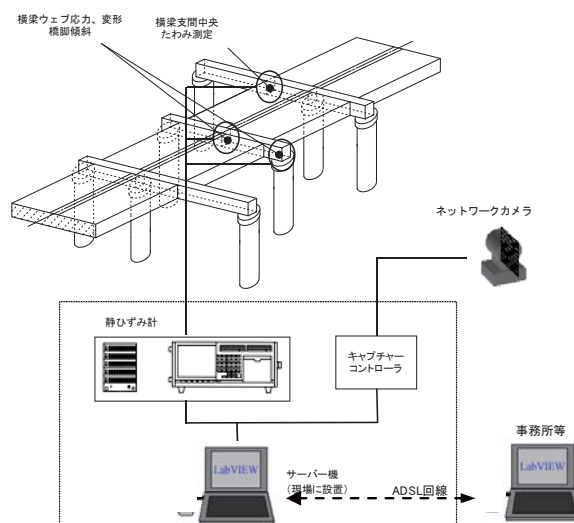


図-2 モニタリングシステムの構成 (ADSL 回線)

ひずみやたわみ等のセンサーからの出力信号はデータロガーにより静的測定（データ採取間隔は5分）を行い、測定データは現地に設置したパソコンのハードディスクに磁気記録した。また、橋梁全体をモニターできる位置にネットワークカメラを設置し、橋梁の画像も同時にモニターできるシステムとした。これらの測定結果は、クライアントマシンから PHS 携帯電話を介してサーバマシンにアクセスすることができ、PHS 通信が可能な場所であればどこからでもモニターが可能なシステムを構築した。しかしながら、PHS 通信では複数の同時アクセスができないことや速度が遅いなど制約が多かったため、通信回線を ADSL に変更したことでより効果的なモニタリングが可能となった。モニター画面の一例を図-3 に示す。

図-3 に示したように、モニター画面は応力や変位の測定結果と同時に橋梁の映像をモニターできるよう構成した。ネットワークカメラによる映像は、画面上からズームやパンなどのコントロールが可能なものとした。

計測プログラムは日本ナショナルインスツルメンツ製の LabVIEW を用いて作成している。LabVIEW はブロック化された処理ルーチンをワイヤーで結ぶことによりプログラムを完成させるもので、複雑なプログラムを比較的容易に作成することが可能である。このため、要望や必要性に応じて機能の追加などが容易であり拡張性に富んでいるといえる。

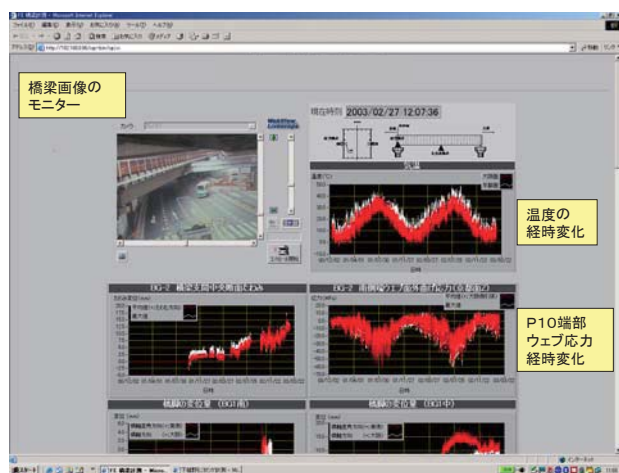


図-3 モニター画面の一例

2.3 モニタリングに対する評価

損傷が発見されてから座屈部分の状態、発生応力の観察を続け、平成 11 年に危険と予知した時点で補強・補修による応急対策を実施した。応急対策実施時点で発生応力は改善され、本工事が始まるまでの期間を安全に維持することができたといえる。また、ほぼリアルタイムに各種測定値を確認できたことで、異常値や変動があった場合にどのような作業が行われていたか確認でき、安全管理を適切に行うことができた。

プログラムの作成に LabVIEW を用いたことで、応力

成分の分離や時間平均処理などが比較的容易にでき、効率的かつ効果的に測定結果を整理することができた。また、パッケージとして完成されたソフトウェアを用いた場合は測点の追加やその他要望に対しては専門技術者によるプログラムの更新などが必要となるが、測点の追加や更新に対して簡易な変更で対応することができ、拡張性が生かされた。しかし、当時使用していた PHS 通信では転送速度が有線に比べて遅いため、転送するデータ量に応じてレスポンスが低下することがあった。当該モニタリングでは、データロガーによる静的測定データであったため、大きな支障は生じなかったが、数年間におよぶ測定結果を一括送信することは困難である。測定対象が振動などの動的な現象が対象となった場合には、測定データが多くなるため、データの転送方法を工夫する必要があると考えられた。工事開始時期には、PHS を利用したダイヤルアップ接続から ADSL 回線に変更したことで複数のクライアントによる同時接続が可能となった。しかしながら、動的計測結果についても効率的にモニターできるシステムを構築することが課題とされた。

当該モニタリングで構築した遠隔モニタリングシステムは、計測結果に異常がない限り現地に行く必要がない。このため、定期的にデータ回収や現地調査を行った場合よりランニングコストを低減することができた。また、多数の人がモニタリング結果を観察することで、多くの意見を得ることができモニタリングの重要性と利点を十分活用できたものと考えられる。そして、モニタリングにより、車両走行や工事の安全確保、効率的な橋梁の取替えおよび橋梁の健全性の回復が適切になされ、無事故で改築工事を終えたことが大きな成果である。

3. 変状・劣化を受けた鋼橋 RC 床版の安全管理と健全度評価に関するモニタリング事例⁵⁾

3.1 モニタリング対象橋梁の概要

(1) 橋梁概要

モニタリング対象橋梁は、4 主桁からなる鋼 3 径間連続非合成鈑桁橋である。路下には、2 車線の県道および河川を有している。また、当該地域は降雪の多い地域となっており、冬季には凍結防止剤が多く散布される箇所となっている。構造一般図を図-4 に示す。

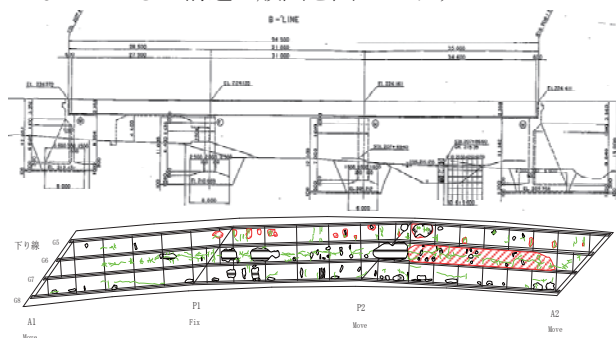


図-4 橋梁構造一般図

(2) モニタリングの経緯

当該橋梁は、平成6年から平成7年にかけてSFRCによる床版上面増厚施工が実施された橋梁である。それ以降に、床版下面のかぶりコンクリートの浮きが急激に進行したことを受け、平成11年および13年に詳細調査が実施された。平成12年には抜本的対策を実施するまでの間、緊急性を要する県道上に限って床版下面の剥落防止シートの設置やネット防護による対策を実施している。その後、活荷重載荷、凍結防止剤の散布による塩害等の影響により激しい変状・劣化が発生し、鉄筋の腐食、床版下面のかぶりコンクリートの浮き、はく離等の状況が進行していた(図-5)。このため、輪荷重による押抜きせん断破壊による床版の抜け落ちが発生することが懸念され、RC床版の取替えが検討された。平成17年以降、試験車による載荷試験や床版調査などを実施し、現状床版の耐荷性能の評価が行われ、対策工事開始までの期間に対する車両の走行安全性を確保することを目的としてモニタリングを実施した。



図-5 床版下面の状況

3.2 モニタリングの内容

(1) モニタリング項目

当該橋梁におけるリアルタイムモニタリングの実施項目は以下の通りである。

- ① 床版たわみ変位
- ② ひび割れ開閉量
- ③ 温度

当該橋梁のモニタリングは約3年間にわたって実施した。また、外観目視点検についても、月1回のペースで実施した。

(2) モニタリングシステム

リアルタイムモニタリング開始当初は、床版たわみ変位、ひび割れ開閉量、温度の項目について静的計測によるモニタリングを実施していた。しかし、静的計測では過積載車の走行による影響のような急激な活荷重たわみ変位を把握することができないため、動的測定を追加してモニタリングを行った。モニタリングシステムの構成を図-6に示す。

静的計測では、各センサーからの出力信号はデータロガーにより測定し、パソコンに集録した。集録したデータはADSL回線を用いてデータ通信することで、クライアント側から遠隔操作でき、データのコピーやプログラム操作が可能なものとした。また、測定結果はADSL回線を通してインターネット上のデータベースへアップロードし、Web上でデータを確認できるシステムを構築した。モニター画面の一例を図-7に示す。

動的測定では、変位センサーからの出力信号を動ひずみ計測器により計測し、パソコンに集録した。データ通信等の設定は静的測定と同様とし、同じWebページから閲覧できるようにした。

これらの測定結果に対して、試験車による載荷試験や床版調査など幾つかの構造検討により得た床版たわみ変位の管理値(1次管理値、2次管理値)を設定した。計測値が管理値を超過した場合、道路管理者、点検者等の携帯電話やパソコンに緊急メールが送信されるように設定し、早急な対応が取れるようにした。

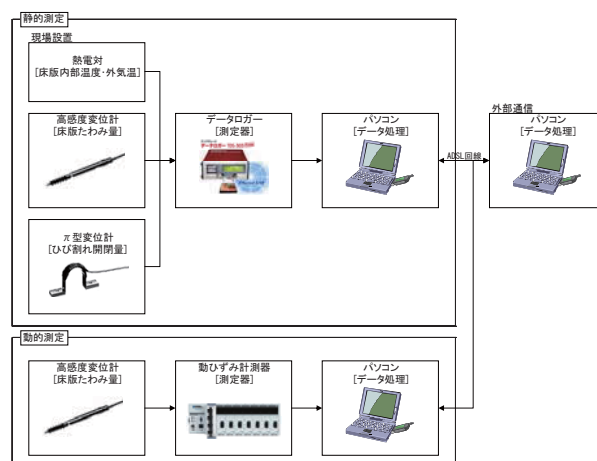


図-6 モニタリングシステムの構成

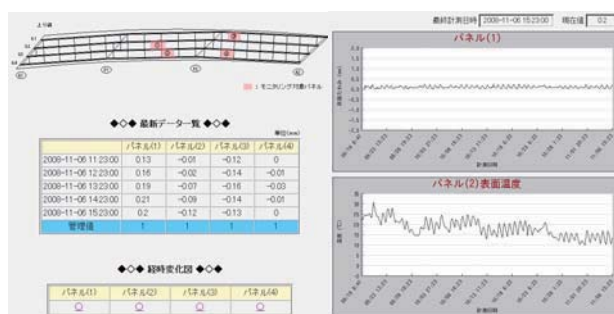


図-7 モニタリング画面の一例(静的測定)

3.3 モニタリングに対する評価

静的モニタリング計測結果より、路面や増厚床版のたわみ変位が累積的に増加する現象(床版が塑性変形する)はなく耐荷性能が低下する傾向は確認されなかったため供用を続けた。一方、床版下面のはく離コンクリート部分では、全体的にひび割れ開閉量が増加する傾向が認められた。平成18年には、当初1mm程度のひび割れ

幅が約 3mm 程度まで広がり、床版下面コンクリートの剥落を予知し、事前に撤去することができた。また、活荷重たわみを測定することで、床版の弾性復元特性を把握した。床版たわみの弾性復元特性は、走行する車両の活荷重によるたわみの発生傾向を経時的に観察し、発生たわみ量に大幅な差異が認められなければ弾性復元特性に変化はないものとして健全性は保たれていると考えた。モニタリング結果より、発生たわみ量に大きな変化はなく、床版の耐荷性能が低下しているような傾向は認められなかった。ただし、気温による変動が確認され、気温が上昇する時期にたわみ量が増加する傾向が見られた。これは、気温上昇に伴いアスファルト舗装の剛性が低下し、この影響が現れたものと考えられる。

約 3 年間にわたるモニタリングの結果、損傷床版の健全度を評価・管理しながら適切に安全管理を行ったことで床版取替え工事を無事完了させることができたと考えられる。

4. 住宅密集地におけるトンネル施工に伴う周辺環境モニタリング⁶⁾

4.1 工事概要とモニタリングの経緯

環境モニタリングを実施した箇所は、住宅が密集する丘陵部に位置しており、最大土被り約 10m の浅層部を全面的に地盤改良した後、NATM 工法によるトンネル施工が計画された区間である。周辺が閑静な住宅密集地という環境にあることから、騒音・振動など様々な問題が指摘された。また、当該地域の地盤状況は比較的軟弱な地盤であることから振動問題が懸念された。実際に、当該地域においては、盛土ヤードの造成、迂回道路の造成時に重機稼動によって振動・騒音苦情が寄せられていた。これらを受け、各作業において振動・騒音低減対策が実施された。しかし、工事期間中は現状を常に把握し、状況に応じた対応を行うこと体制を整えることが必要であると考えられた。このため、トンネル工事に伴って発生する振動および騒音をリアルタイムに監視し、計測結果を即時工事へ反映させるためのシステムを構築した。

4.2 モニタリングの内容

(1) モニタリング項目

モニタリング項目は、振動レベルおよび騒音レベルとし、代表的な測点を対象に実施した。測定位置図を図-8 に示す。振動レベル測定は、工事敷地境界とし、振動が大きい坑口付近およびトンネル全長にわたって測点を配置した。騒音レベル測定は、周辺環境への影響が最も大きいと考えられる防音ハウス開口部付近を対象に測点を配置した。

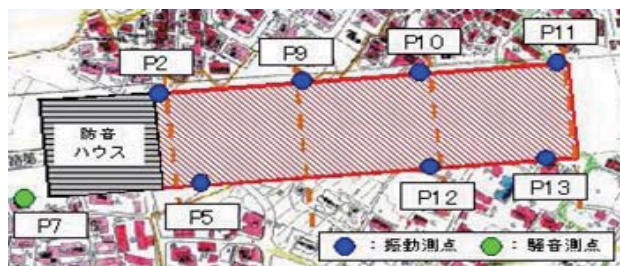


図-8 測点位置の概要

(2) モニタリングシステム

モニタリングシステムは図-9 に示したとおりで、主に各測点の計測システムとそれらの計測結果を集約する計測ホストの 2 つで構成されている。

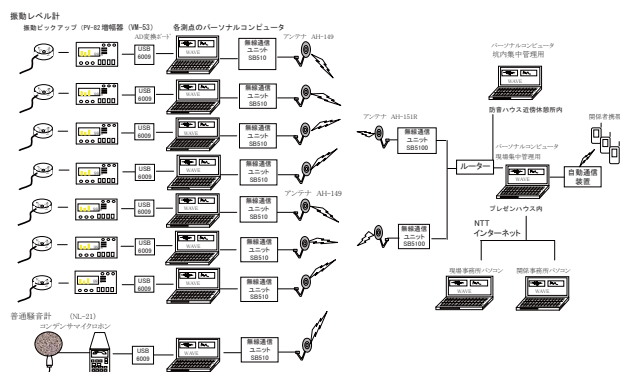


図-9 モニタリングシステムの構成

各測点における計測システムは、それぞれ、振動計ならびに騒音計、集録デバイスおよび計測用パソコンを設置しており、それぞれが独立して計測を行っている。計測データは、10 秒ごとに統計処理を実施し、そのうちの最大レベルを代表値として計測ホストへ転送している。各測点の状況例を図-10 に示す。

計測ホストは、各測点から転送されたデータを一括集中管理するためのサーバーパソコンである。計測ホストは常時起動した状態で、次のような役割を担っている。

- ① 転送された統計処理データを一括で管理するデータベースサーバー。
- ② 計測結果をインターネット上にアップするためのウェブサーバー
- ③ 異常値発生時の警告を行うためのパトライトおよび警告メールの制御

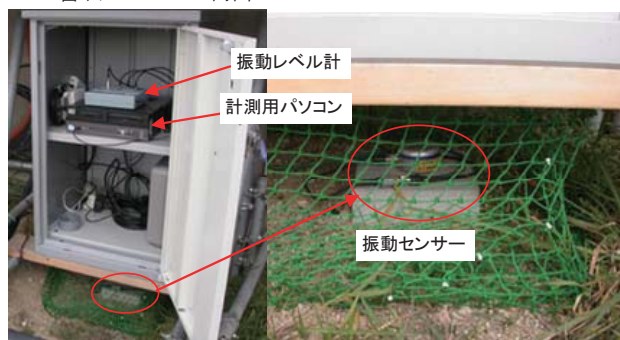


図-10 各測点の機器設置状況

(3) データ通信

各測点の計測システムと計測ホストは、場所によっては 200m 以上離れており、作業場内は重機作業、道路や設備の盛り替えなど、作業の進捗に応じて作業場内の状況は変化していた。従って、有線回線による通信は困難であり、採用できたとしても度重なる盛り替え作業が必要となることが予想された。このことから、本システムでは、無線 LAN 通信システムを採用した。

無線 LAN 通信のシステムおよび機器設置状況を図-11 および図-12 に示す。なお、無線 LAN の採用にあたっては、外部からの不正アクセス等が発生しないよう、通信データの暗号化、MAC アドレスによる制限などセキュリティ対策を徹底した。

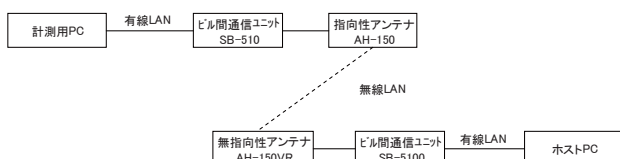


図-11 無線通信システムの概要



図-12 無線通信機器の設置状況

(4) 管理値超過時の警告

管理値は各作業による振動および騒音の影響について事前に調査を実施し、家屋での増幅や減衰を考慮して設定した。作業場内には、作業中に発生してしている振動および騒音レベルの電光掲示板を設置し、現況レベルを作業員に周知できるようにした。また、管理値を超過した場合、掲示板に設置したパトライトが点灯し、即座に作業の一時停止や作業内容や振動、騒音の低減対策がなされているかなどを確認できるよう警告するようにした。

担当者は、常に現状を把握しておく必要があるため、異常値の発生を知らせる警告メールを携帯電話へ送信するものとした。警告メールは、いつ、どこで、どの程度の振動・騒音が発生したかを把握できる内容とした。また、通信が途絶えた場合や、電源に異常がある場合な

ども、警告メールにて周知できるようにした。

(5) 計測画面の概要

異常値の発生とともに、即座に警告が発せられるが、作業員や担当者（現場従事者）以外については、現場状況や他測点との関係性が把握できない場合がある。このため、警告メールなど以外に、計測専用の WEB サイト（以下、管理サイト）を構築し、データの確認が容易にできるようにした。

管理サイトは、インターネットがつながる環境で管理サイトのアドレス、ID およびパスワードがあれば、どこからでも確認が可能なものとした。また、計測結果のリアルタイム表示、過去のデータ検索、必要な項目のみのデータ検索機能などを付加し、必要なデータをエクセル形式でダウンロード可能なシステムとした。モニタリング画面の一例を図-13 に示す。管理値に近い値や管理値を超過した値は、網掛け（赤、黄）されるように設定した。

	P2			P5		
	X	Y	Z	X	Y	Z
2007/03/28 13:12:50	27.8	20.3	28.6	31.7	26.9	46.3
2007/03/28 13:13:00	28.2	21.0	29.9	33.0	29.5	44.2
2007/03/28 13:13:10	30.6	22.3	29.2	40.4	35.8	49.7
2007/03/28 13:13:20	29.9	24.2	29.5	40.8	31.8	48.8
2007/03/28 13:13:30	29.3	20.3	30.9	30.8	26.6	40.3
2007/03/28 13:13:40	29.6	23.9	29.6	30.5	28.2	45.1
2007/03/28 13:13:50	29.3	22.9	29.2	42.0	36.4	50.7
最新データ 2007/03/28 13:14:00	31.8	22.4	30.8	41.4	34.6	53.1
2007/03/28 13:14:10	29.4	23.2	31.7	31.1	26.3	45.7
2007/03/28 13:14:20	26.8	21.9	28.6	29.1	30.3	45.2
2007/03/28 13:14:30	26.6	21.4	28.1	31.4	30.7	46.3
2007/03/28 13:14:40	29.2	24.4	30.2	31.9	30.3	50.9
2007/03/28 13:14:50	29.2	23.7	32.9	30.5	22.4	41.6
2007/03/28 13:15:00	27.4	22.1	27.7	31.8	32.9	50.3
2007/03/28 13:15:10	29.0	24.6	31.8	39.7	35.8	51.7
管理値	昼間	50	50	50	50	50
	夜間	50	50	50	50	50

図-13 モニタリング画面の一例

4.3 モニタリングの評価

本工事では、環境モニタリングにより、工事による周辺住宅地への振動および騒音の影響を把握し、低減対策を適宜実施することができた。また、パトライトや警告メールによる管理値調査の際の周知徹底は、作業員や担当者の意識向上を促し、適切な作業実施体制の構築に繋がったといえる。管理サイトでは、ニーズにあった表示が可能な機能を備えたシステムとし、日報などのデータ整理機能も付加することで作業効率の向上も得ることができた。

一方で、作業外の影響として、特に騒音測定において犬やセミの鳴き声、近傍を通過する救急車の音などが異常値として計測され、警告メールやパトライト点灯が発せられるケースも多くあった。このような、外乱の影響を即時に判断して除外することは困難であるが、管理サイトで異常値発生時のデータを検索して作業内容等の

現場状況を比較することで、これらを判断することは十分可能であることが確認された。

周辺住民との協議にあたって、環境モニタリングによる施工管理手法や測定結果の開示をすることで、周辺住民の安心・安全にもつながり、信頼を得ることができ円滑な工事を行うことができた。このようなハード的な部分だけでなく、ソフト的な面においても、モニタリングの重要性が示されたことは、今後、モニタリングの必要性を考えるための大きな成果であるといえる。

5. 総括

実構造物におけるモニタリングにあたって、構造物の変位、ひずみ、振動などについてインターネットを介して遠隔地からリアルタイムで確認・操作できる環境を構築した。これにより、モニタリングへの労力、コスト削減、作業効率化など大幅に実現することができた。また、管理値を適切に設定することで、危険度に応じて作業員や管理者へ情報を伝達できるシステムも付加した。このような、よりユビキタスな計測環境を整えることで安全で低コストのモニタリングが期待できる。

近年では、センサー技術やネットワーク技術がこれまでに以上に急速に発展・普及しており、今後はより高度なユビキタス環境が構築されるものと考えられる。また、計測技術も同様にコンパクト化、省電力化が進み日々進化を遂げている。

今後、急速に発展するセンサー技術、ネットワーク技術を的確に活用し、より効率的で拡張性のあるモニタリング技術の開発を積極的に進めていきたい。

謝辞

本稿で紹介した橋梁の維持・更新工事ならびにトンネル工事は全て無事完了した。モニタリングの導入・運用にあたっては、関係者の方々から多くの助言をいただくことができた。

最後に、多大なるご指導、ご協力をいただいた関係者の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 松田哲夫, 神野真一郎, 宮里心一, 石崎茂, 岸上弘宣, 杵本正信: 塩害により損傷したコンクリート橋のリニューアル, 橋梁と基礎, 建設図書, 2007.5
- 2) 仲田慶正, 石崎嘉明, 村山康雄: 超音波伝播速度測定におけるコンクリート橋脚の追跡調査結果による一考察, 弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集, 土木学会, 2004.8
- 3) 濱博和, 岡田裕行, 佐藤勝彦, 山本泰造: 再利用鉄桁の連続化に伴う応力変動, 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp.325-326, 2005.9
- 4) 杵本正信, 濱博和, 松田哲夫, 衛藤繁美: 老朽化した鋼製横梁の損傷状況, 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp.315-316, 2005.9
- 5) 松田哲夫, 西山晶造, 松井繁之, 元井邦彦, 村山康雄, 薄井王尚: 鋼橋 RC 床版のモニタリングによる安全管理と健全度評価, 土木学会第 64 回年次学術講演会, pp.1245-1246, 2009.9
- 6) 田口敬介, 水野希典, 足立康軌, 平岡慎司: 自動計測システムを活用した住宅密集地でのトンネル施工, 基礎工, 総合土木研究所, 2009.1