

被災した鋼箱桁橋の亀裂進展監視のための遠隔モニタリング

Remote monitoring to observe crack growth of stricken steel box-girder bridge

田代大樹*, 吉岡勉**, 佐々木達生***, 小橋朋和***, 岡本晃****

Daiki Tashiro, Yoshioka Tutomu, Sasaki Tatuo, Kobashi Tomokazu, Okamoto Akira

*工修, 大日本コンサルタント(株)保全エンジニアリング研究所 (〒170-0003 東京都豊島区駒込 3-23-1)

** 工博, 大日本コンサルタント(株)保全エンジニアリング研究所 (〒170-0003 東京都豊島区駒込 3-23-1)

***大日本コンサルタント(株)東北支社 (〒980-0021 仙台市青葉区中央 1-6-35)

****工修, 大日本コンサルタント(株)東北支社 (〒980-0021 仙台市青葉区中央 1-6-35)

The Pacific Ocean side of the Tohoku region in Japan entered the state of annihilation by “The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake” and the tsunami that had occurred on March 11, 2011. In this thesis, the monitor of the bridge damaged due to the earthquake to observe the progress of damage was executed. Moreover, data acquisition from the remote place is possible by the use of the communication module in this monitoring system. In addition, the power supply in the locale is secured by the solar photovoltaic system. As a result of the measurement, the progress of the crack was confirmed by the temperature change. Consideration to the measurement result is shown below though this monitoring is continuing now.

Key Words: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake,

steel box-girder bridge, remote monitoring, crack growth, solar panel

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 鋼箱桁橋, 遠隔モニタリング, 亀裂進展, 太陽光パネル

1. はじめに

2011年3月11日14時46分、宮城県牡鹿半島東南東約130km付近の深さ約24kmを震源として発生した東北地方太平洋沖地震は、日本の観測史上最大のマグニチュードMw=9.0を記録し、震源域は岩手県沖から茨城県沖までの南北約500km、東西約200kmの広範囲に及んだ¹⁾²⁾。この地震により、最大で波高10m以上、遡上高40.5mにも上る大津波が発生し、東北地方の太平洋沿岸部に壊滅的な被害をもたらした。また地震の揺れや液状化現象、地盤沈下等によって、北海道から関東に至る広大な範囲で被害が発生し、各種ライフラインも寸断された。道路橋の被害に着目すれば、一般国道45号の橋梁郡に代表されるように、震災被害としては津波による流失被害が顕著であるが、一方で強震動による地震被害も数件報告されている。

本稿では、地震後に実施された緊急点検時において、地震動による橋梁被害が確認されたものの、被災地への物資輸送や救助支援のための緊急輸送路として交通開

放された仙台松島道路内の高城川新橋(図-1 参照)について、交通開放後から本復旧工事までの期間実施した亀裂進展モニタリングについて報告する。



図-1 対象橋梁の位置図

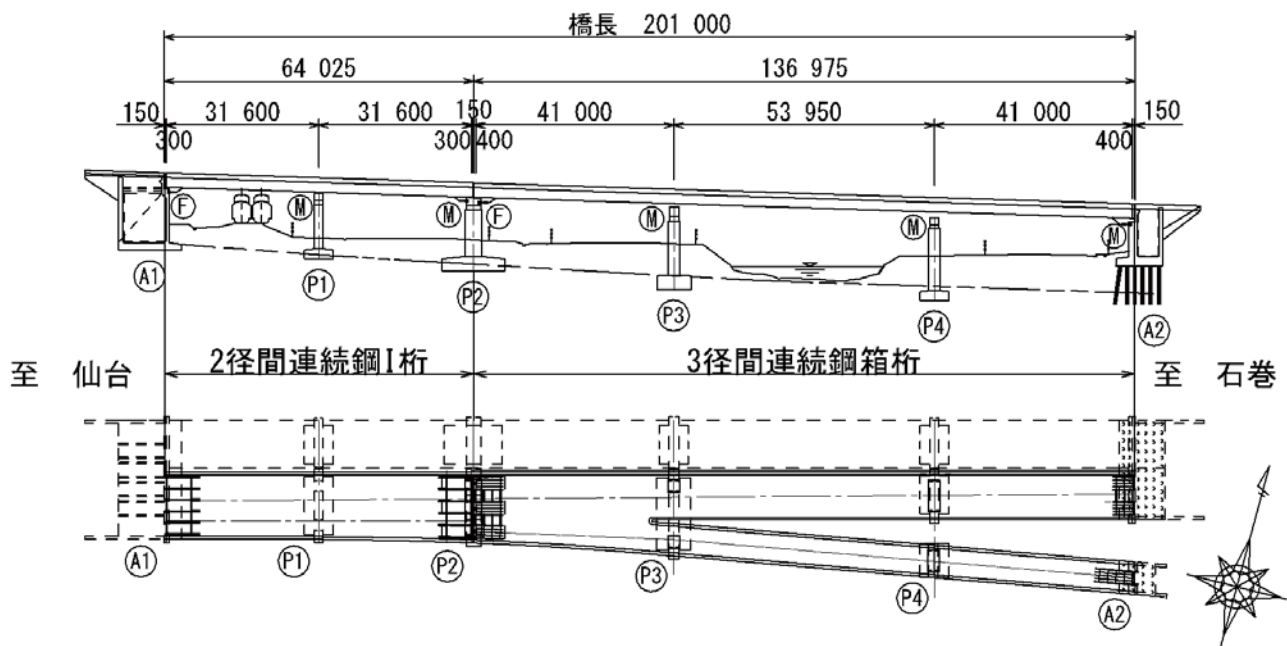


図-2 対象橋梁の一般図

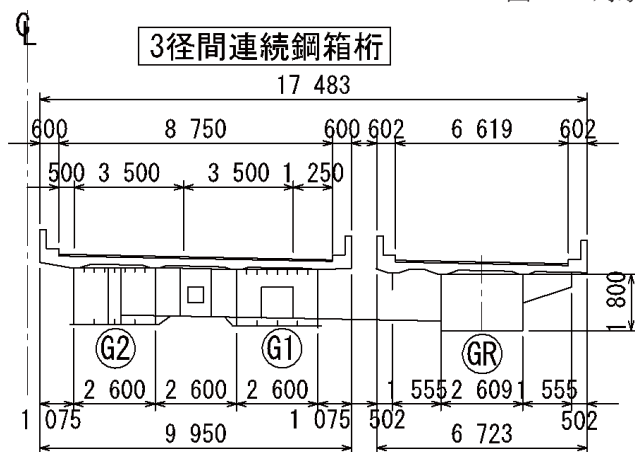


図-3 対象橋梁の標準断面図



写真-1 対象橋梁の外観

2. 対象橋梁の概要

本報告で対象としている高城川新橋の外観を写真-1に示す。本橋は、1982（S57）年竣工の橋梁で、図-2、3に示すとおり橋長 201m のうち 2 径間連続鋼 I 桁（6 主桁）と 3 径間連続鋼箱桁（3 主桁）で構成されている。今回の地震で被災し、モニタリング対象としたのは箱桁橋側であり、近接する松島北 IC のオンランプとして GR 桁が P3 橋脚上でセパレートする構造的特徴を有する。鋼箱桁側の支承条件としては、鋼製ピン支承・ピンローラー支承が採用されており、起点側支点部（P2 橋脚上）を固定とした 1 点固定構造である。また、地盤条件は I 種地盤と II 種地盤が混在しており、A2 橋台のみが杭基礎（杭径 600mm の鋼管杭）、その他は直接基礎である。

なお、2007（H17）年には耐震補強工事が施されており、仕様はフルスペックで耐震性能 2 を満足する仕様として、橋脚柱への RC 巻立てに加えて、変位制限構造と落橋防止構造が完備されている。

3. 本震（2011. 3. 11）による対象橋梁の被害状況

本橋では、本震直後の 3 月 15 日～17 日の 3 日間で緊急点検を実施した。その際、かけ違い部である P2 橋脚上の鋼箱桁側において、固定支承直上の下フランジおよび内部の補剛材に破断等の損傷を発見した（写真-2 参照）。



写真-2 固定支承部の損傷状況（GR 桁）

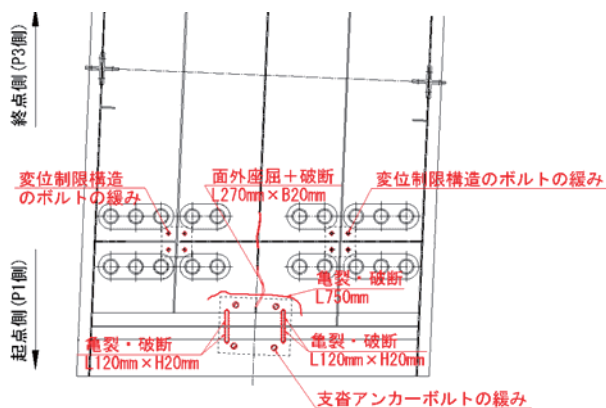


図-4 損傷スケッチ平面図(GR桁)



写真-3 固定支承部の損傷状況(GR桁)



写真-4 橋脚の周辺地盤状況(P4)

損傷は、各主桁で程度の差は有るものの、3主桁全てに確認されている。GR桁の損傷スケッチを図-4に示す。

損傷は大きく4つに区分され、(1)下フランジの面外変形を伴った破断、(2)鋼製ピン支承・ピンローラー支承の回転阻害と上沓セットボルトの緩み、(3)変位制限構造のセットボルト破断である。(1)については、後日、箱桁内部を確認したところ、写真-3に示すように支承直上の下フランジに溶接された縦リブやダイヤフラムの支点上補剛材の面外変形を伴っており、一部破断に至っている。最も損傷程度が大きい桁はGR桁であり、終点側に向かってセパレートする桁であることや、斜角を有していることが原因と考えられる。また、RC巻立てを施した橋脚柱には損傷は確認されなかったが、写真-4に示すように柱周辺には柱が大きく揺さぶられた痕跡が残っている。なお、本震による架橋位置の震度は6弱であった。

なお、損傷箇所の前面には、耐震補強工事の際に変位制限構造を兼ねた段差防止構造が設置されている。そのため、損傷進展により鉛直反力支持機構に不具合が生じた場合でも、仮支点として利用可能な構造であった。そこで、急激な路面段差の発生防止を目的として、下フランジ下面と段差防止構造との間に厚さ25mmの鋼板を3枚挿し込み、間に緩衝材を挟むことで隙間をクリアゼロとする応急措置(図-5参照)が施された。

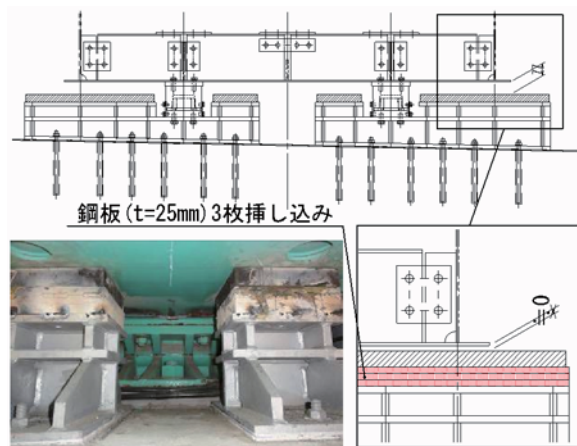


図-5 応急復旧図

4. 亀裂進展モニタリング

本橋は、地震による損傷後に緊急輸送路として早期に交通開放した上に、震度4クラス以上の余震が多発していた。そのため、損傷の進展状況によっては通行可否の判断を早急に行う必要があったため、亀裂進展の状況を定量的に判断するための指標とする必要があった。そこで、地震の発生から現在に至るまでの亀裂の進展モニタリングを行った。地震発生から現在までのモニタリングに関する経緯を表-1に示す。

表-1 モニタリングの経緯

日時	事項
2011.3.11	東日本太平洋沖地震の発生(宮城県沖, M9.0) →通行止め
2011.3.15 ~2011.3.17	緊急点検の実施 →高城川新橋の亀裂損傷発見
2011.3.19 ~2011.3.21	応急復旧 →段差防止構造を利用した仮支点の設置
2011.3.22	緊急車両・事業車両の通行開始
2011.3.24	一般車両を含む全面通行開始
2011.3.25	亀裂進展モニタリングの開始 ・計測項目:クラックゲージ4点, 変位計1点 ・計測システム:電池駆動, 計測データの現地回収
2011.4.7	大規模な余震の発生(宮城県沖, M7.4) →交通規制, 計測センサーの破損
2011.4.8	通行規制解除
2011.4.12	亀裂進展モニタリングの再開 ・計測項目:クラックゲージ3点, 変位計2点 ・計測システム:前回と同じ
2011.4.19	モニタリングシステムの改修 ・遠隔データ転送機能の導入 ・太陽光発電システムの導入
2011.4.25	太陽光パネルの増設
2011.5.23	DC/DCコンバーターの導入
~	
遠隔モニタリング継続中(2011.7.14時点)	

4.1 モニタリング概要

(1) 計測位置

震災後に物流機能が麻痺したことで物資不足となり、新たに計測機器を揃えることが非常に困難であった。そのため、当社で所有している計測機器で可能な測定規模として、5ch の計測を行った。本モニタリングの主目的は、活荷重および地震による亀裂の進展監視であるため、

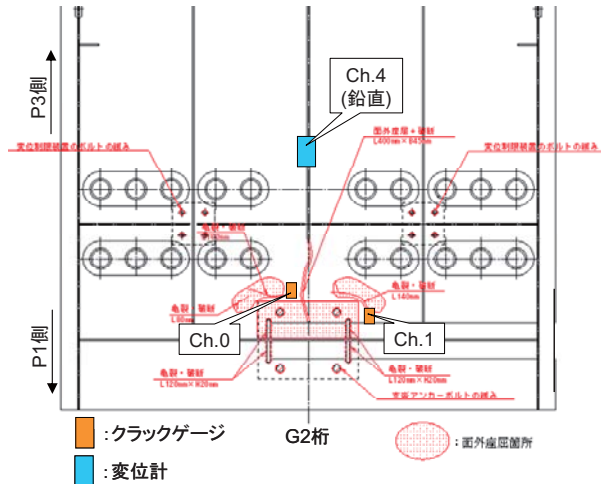


図-6 計測位置(G2桁)

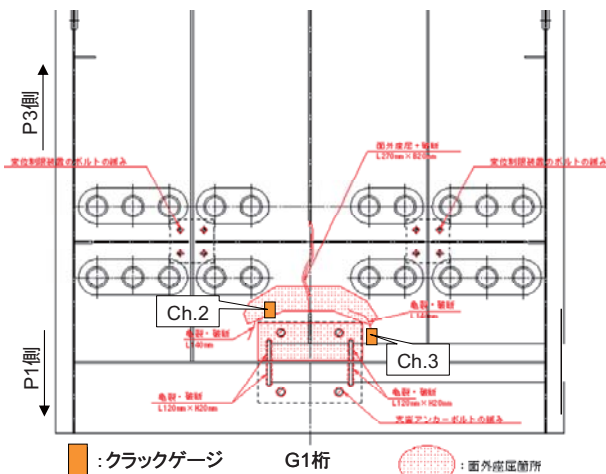


図-7 計測位置(G1桁)

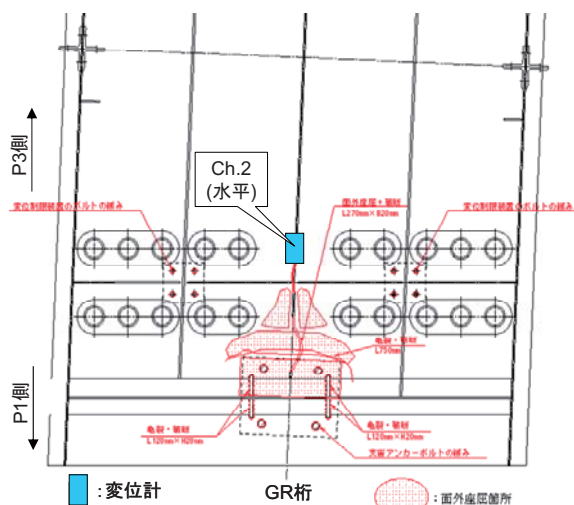


図-8 計測位置(GR桁)

5ch 中 4ch にクラックゲージを用いて、G1 と G2 を対象とした。計測スタート時の計測位置を図-6, 7 に示す。残りの 1ch は、亀裂進展への影響が大きいと考えられる下フランジのたわみに着目し、G2 桁の鉛直変位を計測した。また、余震後の再計測にあたっては、G1 桁の支承前面に設置したクラックゲージ Ch2 を取り外し、GR 桁の下フランジの橋軸方向水平変位として新たに設置した。余震後の計測位置を図-8 に示す。

(2) 計測システム

計測システムの概要を図-9に示す。使用したクラックゲージは、0.5mmピッチでグリッド線が配置されたもので、順に断線する毎に50μmのひずみが出力され、20mmまでの亀裂進展が測定可能である。また、変位計は最大25mm(±12.5mm)のたわみを測定できる。なお、使用した測定器はデータメモリ機能付きで、乾電池駆動であるため、現地で電源を確保する必要はない。使用した計測機器の仕様を表-2に示す。クラックゲージは設置箇所をグラインダーでケレンし、亀裂先端の進展方向を確認後、亀裂先端と直角にゲージを貼り付ける。変位計については、沓座面に鋼板を接着剤で固定し、その上に変位計をマグネットで固定した。各計測センサーを設置後、配線・養生して測定器類を雨風から防ぐために、収納ボックスに格納して検査路下に設置した。現地の計測機器の設置状況を写真-5～9に示す。

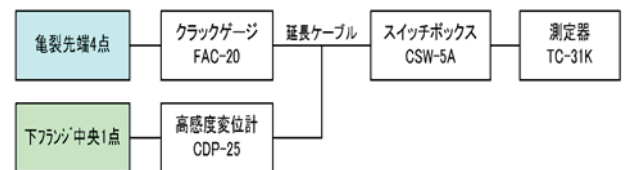


図-9 計測システム

表-2 計測機器の仕様

機器	型式	メーカー	仕様
クラックゲージ	FAC-20	東京測器研究所	測定範囲: 20mm 1ゲージ3線式結線法
高感度変位計	CDP-25	"	感度: 500×10^{-6} ひずみ/mm 応答周波数 8Hz
スイッチボックス	CSW-5A	"	測定5点 測定範囲はTC-31Kに準ずる
データロガー	TC-31K	"	5ch/台、電池駆動可 データメモリ機能付



写真-5 クラックゲージ(FAC-20)



写真-6 変位計(CDP-25, 鉛直方向)

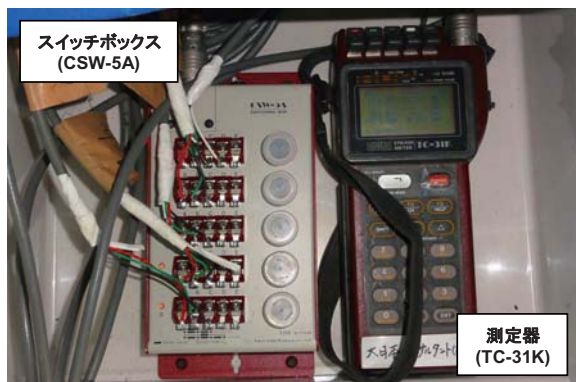


写真-7 計測システム



写真-8 収納ボックス



写真-9 変位計(CDP-25, 橋軸方向)

(3) 計測方法

計測は、10 分間隔のスリープインターバル計測として、10 分毎の計測値と計測時刻をメモリーカードに保存した。測定器は 10 分毎に計測すると自動で電源 OFF となるため、単 3 乾電池 4 本で約 2 週間使用できる。ただし、計測データを参照するには、現場にてメモリーカードを回収しなければならない。そのため、中規模の地震が多発している状況と、救助支援等の大型車通行による影響を鑑みて、2 日に 1 度メモリーカードを回収して、亀裂・たわみの進展を評価することにした。また、緊急時および震度 4 以上の余震発生時にもデータの回収・評価を行い、交通可否の判断を迅速に行うこととした。

4.2 大規模余震(2011.4.7)の発生

3月25日よりモニタリングを開始してから14日目の4月7日の23時32分、宮城県沖を震源とするM7.1の余震が発生し、本橋梁のある松島町周辺の震度は6弱に及んだ。震度の大きさとしては本震と同程度であったと考えられるため、地震の直後に現地にて損傷状況を確認した。

計測データを回収したところ、クラックゲージは全て破断しており、変位計は固定していた架台から外れていた。そのため、目視による点検を行った結果、先の本震で確認された損傷箇所以外で新たな損傷はなかった。しかし、確認済みの損傷箇所のうち、(1)下フランジの面外変形を伴った破断、(2)鋼製ピン支承の回転阻害と上沓セットボルトの緩み、この2箇所については損傷進展が確認された。写真-10に示すとおり、下フランジの亀裂では、最大3cmの亀裂進展が確認され、亀裂先端がダイヤフラムに向かって延伸している。また、支承前面側の亀裂も、相互に近づくように延伸している。一方、鋼製ピン支承では、支承ヒンジ部のエンドキャップの脱落と、ヒンジ部が浮き上がったことで、内部ピンの破断が確認された。併せて、鋼箱桁の他支点部の上沓セットボルトの緩みも確認された。しかし、本震時と同様の判断で翌日には通行規制を解除している。

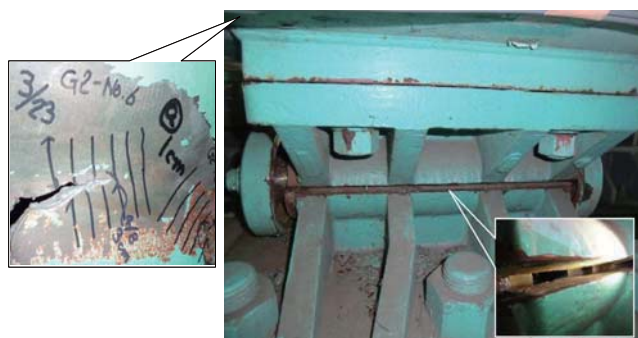


写真-10 余震による損傷状況

4.3 遠隔モニタリングシステムの導入

余震後のモニタリング再開にあたり、4.1に示す計測システムでは、亀裂の進展と主桁のたわみを定量的に評価できるが、長期監視のためには以下の問題があった。

- (1) 定期的に現地にてデータ回収するため、データ回収まで評価ができず通行可否の判断が遅れる。
- (2) 乾電池駆動のため電池交換の手間がかかることや、中規模な余震が多発している現状を考えると、省力化を図る必要がある。

上記の問題を解決する方法として、(1)に対しては通信機器を用いた遠隔モニタリングの導入が有効と考えた。これまで、橋梁の遠隔モニタリングに関する研究³⁾は多くあるが、現地にPCが必要になるため電源の確保に問題がある。そこで、本モニタリングでは測定器に直接接続できる通信モジュールを用いて、現地での電源をバッテリー程度で駆動できるシステムを開発し、現地に赴くことなく迅速に対応できるようにした。また、(2)の問題に関しては、近年注目されている太陽光発電システムを導入することで半永久的な電源を確保することとした。遠隔モニタリングシステムおよび、太陽光発電システムを導入した計測システムの概要を図-10に示す。また、新たに追加したシステムの仕様を表-3に示す。

なお、遠隔モニタリングシステムの導入にあたり、計測値が閾値を超えたときのアラーム機能を設定した。今回の場合、亀裂進展が10mm、変位量が±5mmと設定して計測を行った。

表-3 追加したシステムの仕様

機器	型式	メーカー	仕様
通信モジュール	D2-K's2 EL	安川情報システム株式会社	通信速度：最大(上り)64Kbps(下り)144Kbps 電源：DC+5V、通信プロトコル：PPP、TCP/IP 外部端子：RS-232C
ソーラーパネル	SPS1-20W-12V	sinasolar	最大出力：20W、最大動作電圧：17.6V、 最大動作電流：1.14A、開放電圧：21.6V
バッテリー	SY12120	SUNBRIGHT POWER	公称電圧：12V、20時間率容量：12 Ah
インバーター	WM-10	WillCOM	入力電圧／DC12V、出力電圧／AC100A 定格出力／135W、出力周波数／55Hz
太陽光発電用コントローラー	CMP02-24A	sinasolar	システム電圧：12V・24V・36V／48V自動切換

4.4 DC/DC コンバータの導入

太陽光発電は天候に大きく左右されるため、システム自体の消費電力を極力抑えることが重要な課題であった。本システムでは、バッテリーのDC電源からインバーターを介してAC電源に変換して機器を使用したため、AC変換時に余分な電力を消費している可能性があった。

そこで、バッテリーのDC電源を電圧調整し、ACに変換することなく直接機器に接続できる「DC/DCコンバータ」(写真-11参照)を自作した。これにより、導入前の消費電流が0.7～0.8Ahだったのに対して、導入後は0.2～0.3Ahとなり、消費電流を約半分に抑えることができた。

また、DC/DCコンバータ導入の際に、なるべく長期間計測可能なシステムとするために、大容量バッテリーに変更した。新たに導入したバッテリーは、広く一般的に市販されている乗用車用のもので、バッテリーサイズが40B19のものを用いた。バッテリーの5時間率容量が64Ah程度であることから、太陽光発電システムと組み合わせることで、約100日間の稼動が可能である。しかし、稼動可能日数はあくまで計算上の仮定値であるが、現在も継続中であるモニタリングの実績は55日間である。

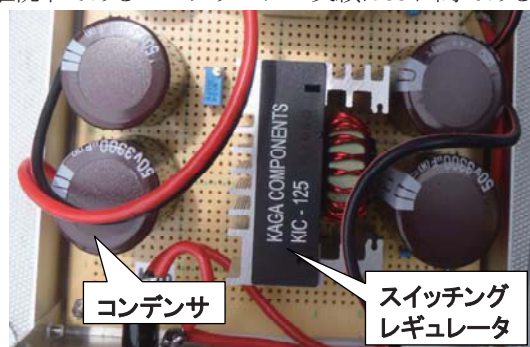


写真-11 DC/DC コンバータ

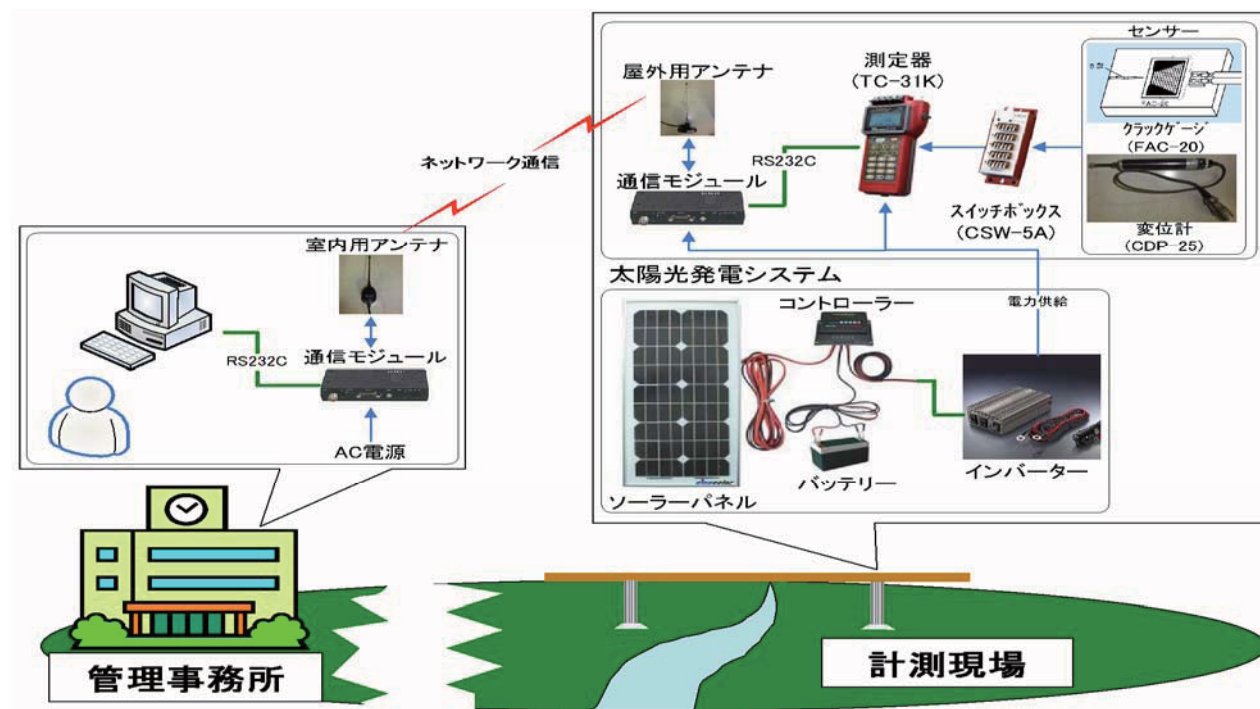


図-10 遠隔モニタリングシステムの概要

5. モニタリング結果

モニタリングの結果を図-11, 12 に示す。4 月 7 日の余震以前の計測結果である図-11 を参照すると、余震後にクラックゲージのひずみ量が 2,000 $\mu\epsilon$ 程度上昇していることがわかる。これは、使用しているクラックゲージが 0.5mm ごとに 50 $\mu\epsilon$ 出力し 20mm まで測定可能なことから、すでに測定限界を超えており、ゲージが破断したことを示している。

また、余震後の再計測結果である図-12 より、クラ

ックゲージならびに変位計ともに、温度の上昇・下降と追従して計測値が変動していることから、両者に相関性も確認が見られる。活荷重および震度 4 程度の地震による損傷進展は確認されなかったが、6 月 6 日以降から気温が 25℃以上に達すると、鋼桁の温度変化による伸縮の影響が顕著に見られるようになった。GR 桁の水平方向変位(Ch02)は 4 月 12 日の計測再開時点から +5mm 程度増加していることから、計測位置では下フランジが桁端方向(P2 橋脚方向)に移動していることがわかる。

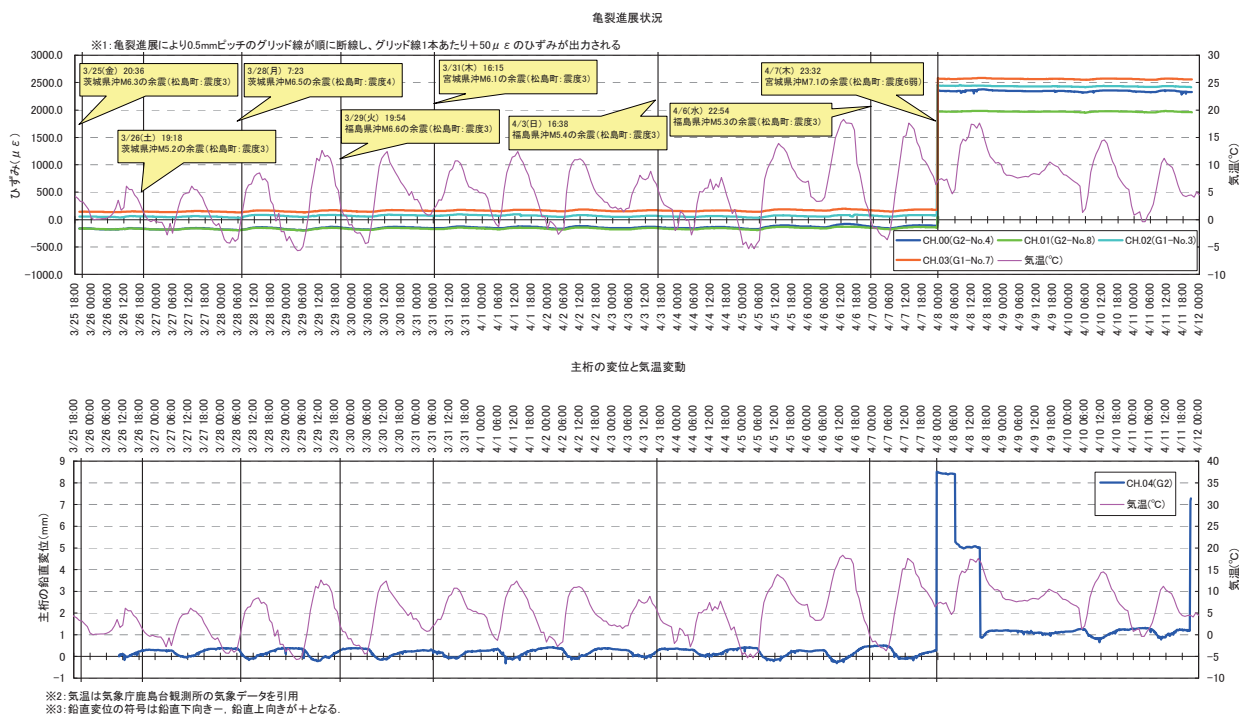


図-11 モニタリング結果(2011.3.25-2011.4.12)

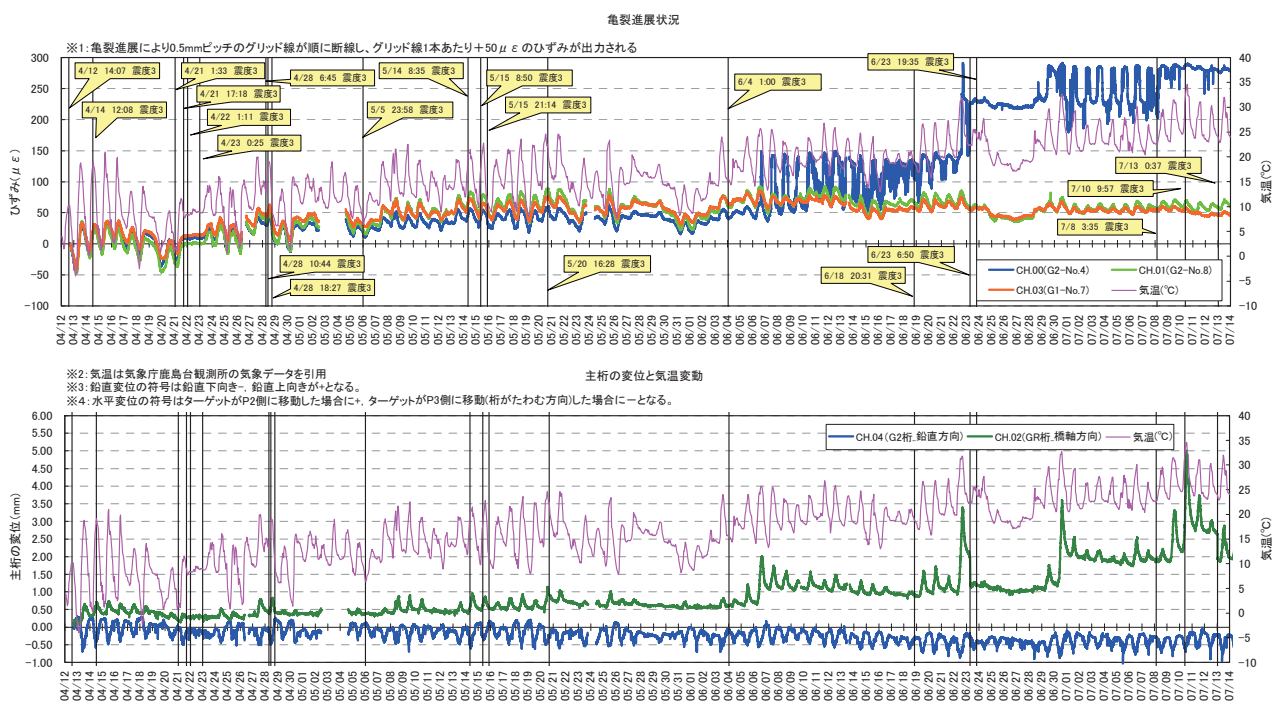


図-12 モニタリング結果(2011.4.12-2011.7.14)

また、クラックゲージ Ch00 については、約 $280\mu\epsilon$ のひずみ増加となり、計測再開時点よりも 2.5mm 程度の亀裂進展が確認できる。考えられる原因としては、温度の急激な上昇に伴って桁が延伸し、桁端側へ水平移動したものと推察される。また、Ch00 の亀裂進展については、計測位置の断面内において、RC 床版と鋼桁との合成作用により内部温度差が生じたことで曲げモーメントが発生し、下フランジの亀裂箇所に引張応力が作用して亀裂が進展したものと推察される。しかしながら、他の 3 測点に関しては温度変化による日変動はみられるものの、変位量の増大や亀裂進展には至っていない。これは、桁の温度上昇による延伸は橋軸方向に卓越し、鉛直方向変位の影響は小さいと考えられること、亀裂進展に関しては、亀裂の発生した支承部の下フランジ周辺は、近接する補剛材やその損傷により、非常に複雑な応力場となっており、Ch00 の亀裂先端に特に大きな応力集中が生じたものと考えられる。

6. まとめ

本稿は、2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震により主桁に重大亀裂が発生した鋼道路橋において、交通開放後から現在(2011.7.14)に至るまで、亀裂進展監視を目的として遠隔モニタリングを行ったものである。モニタリングは現在も継続中であるが、得られた成果をまとめると以下のようになる。

- (1) 地震により鋼部材が損傷した橋梁に対して、重車両による活荷重と余震の多発する最中、損傷進展モニタリングシステムを構築し、損傷状況を定量的に評価した。
- (2) 車両通行可否の迅速な判断および、現地作業の省力化のために、交通開放後直ちに遠隔モニタリングシステムを構築し、亀裂進展を常時監視した。
- (3) 現地での電源確保のために、太陽光発電システムを導入し、省エネ且つ省力化したシステムを構築した。また、天候の影響により不安定となる太陽光発電を補うため、DC/DC コンバータを用いて消費電力を極力抑えたシステムを構築した。

(4) モニタリングの結果、支点上の主桁に重大な亀裂が生じているものの、重交通や震度 4 程度の余震では亀裂は進展していないことが定量的に確認された。

(5) 夏場の気温上昇による桁の延伸および断面内部の温度差に起因して、2.5mm 程度の亀裂進展と約 5mm の桁の水平移動が確認された。

以上を踏まえ、今後益々の気温上昇により亀裂が進展する危険性がある。また、亀裂進展後の重車両走行と余震の影響に対しては余談を許さない状況であり、本復旧工事開始までは注意深くモニタリングを実施することになっている。

東日本太平洋沖地震では、震災により物流および各種ライフラインが麻痺したことから、モニタリングの資材調達や現地までの移動等、様々な面において大変困難な状況であった。保全分野に関しては、災害に限らず突発的な対応を求められることが多く、迅速に対応できるシステムや資材の備えが重要であると強く感じた。今後益々の高齢化橋梁の増加を踏まえると、地震被害に限らず、経年劣化等による橋梁被害を少しでも減らすための予防保全として、一刻も早い既存不適合橋梁の補修・補強や損傷診断技術の確立が急務と考えられる。

謝辞

本論文を作成するにあたり、道路管理者である宮城県道路公社の方々にはご高配頂きました。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 防災科学研究所：東北地方太平洋沖地震について(速報)，2011.3
- 2) 気象庁：<http://www.seisvol.kishou.go.jp>
- 3) 奥松俊博，岡林隆敏，田代大樹，要谷貴則，Jawaid Bashir AHMAD：橋梁遠隔モニタリングシステムによる鋼ランガートラス橋の固有振動数の推移観測，構造工学論文集，Vol.53A，pp.844-852，2007.3