

◆特集：橋梁の維持管理・補修補強◆

部材応力のモニタリングによる鋼橋の状態監視に関する基礎検討

村越 潤* 麓 興一郎** 高木伸也*** 次村英毅****

1. はじめに

道路橋ストックの高齢化が進展していく中で、これらの橋梁を健全な状態で適切に維持管理していくために、構造物の状態を定量的、かつ効率的に把握、評価するための点検・診断技術が求められている。

モニタリング技術とは、対象物にセンサを設置し、ひずみ、振動等の物理量を長期間測定し、分析することによって、対象物の状態変化を捉えようとするものであり、これまでに多くの調査研究が行われており^{1)~3)}、既に長大橋の動態観測⁴⁾等様々な形で活用されている。しかしながら、大半を占める中小規模の橋梁を対象とした場合、現行の橋梁点検等の維持管理業務を支援する観点から、モニタリング技術の適用性や活用方法については必ずしも十分整理されているわけではない。これらの技術を維持管理のどの場面で、どのように適用するのかといった点について十分検討した上で、維持管理全体の中での位置付けを整理しておくことが必要と考えられる。

本文では、鋼橋の維持管理支援へのモニタリング技術の適用性について整理するとともに、橋梁各部の応力、変位のモニタリングを対象として、経時的な変状や供用状態の変化の把握への適用性について、実橋での長期計測データを基に検討した結果について報告する。

2. モニタリング技術の適用対象の検討

モニタリングという表現は、一般に長期・連続的な監視（例えば、長大橋の動態観測や車両重量計測等）の意味合いで使われているが、ここでは、構造物の状態を把握し、健全度を評価するための点検・診断技術全般を対象として、これらの技術の維持管理における適用対象の整理を行った。

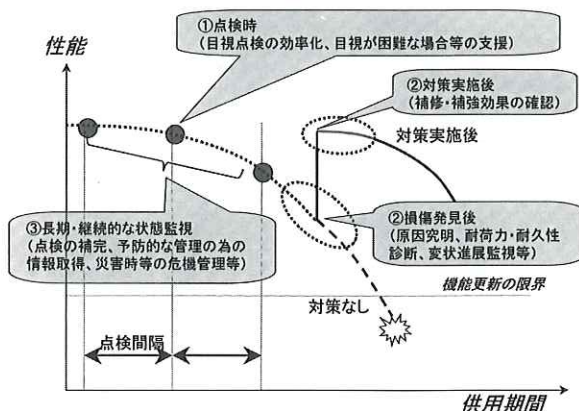


図-1 モニタリング技術による維持管理支援イメージ

表-1 モニタリングの適用対象と計測方法

計測方法 適用対象	連続的 (橋梁に機器を設置)	不連続的
事前対応 (変状発生前)	・地震時等の変状監視等	・点検の効率化 ・目視点検が困難な部位の状況把握等
事後対応 (損傷発見後、 対策実施後)	・損傷に対する原因究明、対策検討が必要な場合 ・耐荷力、耐久性の診断が必要な場合 ・対策後の変状の進展性の監視 ・補修補強対策後の効果確認等	

図-1に構造物の健全度の概念図と、維持管理の各場面でのモニタリング技術による支援イメージを示し、表-1にモニタリング技術の適用対象を適用場面と計測方法により分類して示す。以下に、図-1に示す各場面における適用対象についてまとめる。

①点検時における目視点検等の支援

目視主体の点検時において、客観的・定量的なデータを必要とする場合や、目視では把握できない部材内部や点検しにくい（近接しにくい）部位の状態を把握する必要がある場合が適用対象と考えられる。この場合、多数の橋梁に対して適用可能な技術であることが重要な条件と考えられ、そのためには低コストの、点検の効率化を図ること

が可能な技術であることが必要である。あるいは、構造物としての重大損傷の予防に資する技術の場合には、多少のコスト増であっても、損傷の想定される橋梁・構造部位を絞り込んだ上での適用が考えられる。

②損傷発見後、対策実施後の調査支援

耐荷力の診断が必要な場合（例えば、損傷に伴う耐荷力の減少や橋の使用条件の変化が想定される場合）、損傷に対する原因究明や対策検討のために応力状態等を把握する必要がある場合、何らかの応急的な対策を講じた後に恒久対策実施までの安全性に係る状態を監視する必要がある場合、対策実施後の効果確認のために状態を把握する必要がある場合等が適用対象と考えられる。

③橋梁の状態の長期・継続的な監視

これについては、①と適用対象が重なる部分があるが、データ取得方法が連続的か不連続的かという点で異なることから別項目として整理した。橋梁状態を継続的に監視し、目視点検の補間、効率化や安全性の向上を目的とした適用が考えられるが、費用対効果、センサの長期耐久性・信頼性等の技術的課題、維持管理における位置付け等十分な検討が必要である。一つの位置付けとして、予防的な維持管理への活用といった観点から、例えば、特定の橋梁を対象として、それらを当該路線・地域の活荷重や腐食環境等の供用状態を長期モニタリングするセンサとして、また地震時の被災情報検知のセンサとして活用することが考えられる。

以上のように、道路橋へのモニタリング技術の適用に当たっては、適用対象、必要性及びその効果を検討した上で、それに見合った技術を抽出することが重要と考えられる。

3. 応力、変位計測データに基づく鋼橋の状態監視に関する検討

前章2. ②のケースを対象としたモニタリング（損傷が発見され損傷部位が特定された後の変状の進展性の監視や、供用状態の変化の監視）の限界や適用性を見極めるために、現在、(i) 変状が発生した場合の橋梁各部の応力変化や、(ii) 実橋の交通供用下における応力変動の把握のための基礎検討を行っている。

前者 (i) については、応力等により把握可能な

変状の程度を判断するために、土研構内の試験橋をモデル橋として、擬似的変状前後の応力計測及び3次元FEMによる変状に対する応力解析を検討中である。後者 (ii) については、実橋において20ton荷重車の動的載荷試験を実施するとともに、現在、約1年間を目途に、応力及び桁端変位の長期計測を実施中である。

以下、後者の実橋計測について、動的載荷試験及びこれまでに得られた約3ヶ月間の計測データについて、整理、分析した結果をまとめる。

3.1 対象橋梁

対象とした橋梁は、一般国道17号の鋼単純非合成I桁橋（関東地方整備局大宮国道工事事務所管内）である。写真-1に橋梁の状況を、図-2に一般図を示す。架設年次は平成3年（平成2年道示適用）で、日大型車交通量は5288台/車線（平成11年センサス調査）である。なお、橋下からの目視調査では、鋼部材、支承、床版に特に損傷、変状は確認されていない。



(a) 橋梁全景



(b) 桁下の状況

写真-1 計測対象橋梁

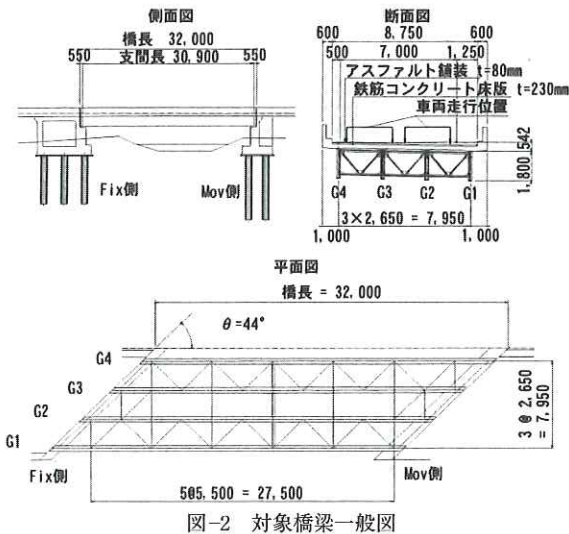


図-2 対象橋梁一般図

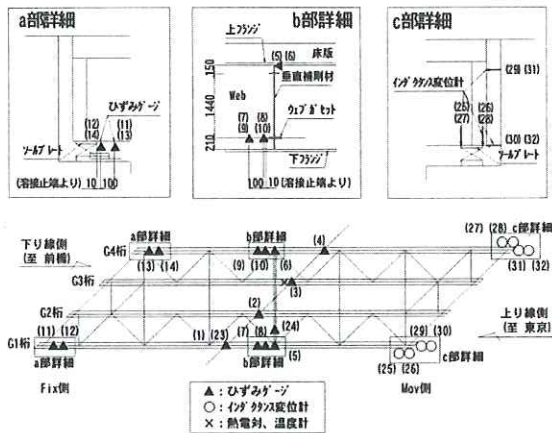


図-3 センサ設置位置

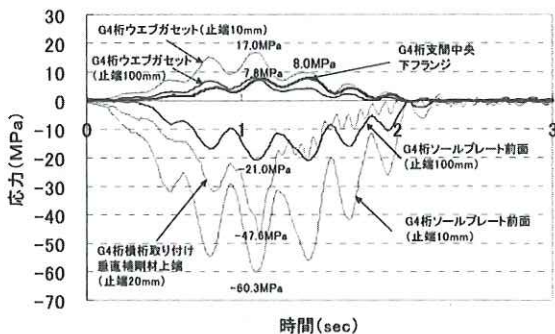


図-4 20t荷重車走行時の応力波形

3.2 計測方法

モニタリング対象としては、構造物の安全性や疲労耐久性の評価に直接的につなげられる物理量であるひずみ、変位を対象とした。また、温度変化に伴う応力変動を把握するために桁温度、気温

も計測した。図-3に主要なひずみゲージ、変位計、鋼材（主桁）表面温度計測のための熱電対、温度計の設置位置を示す。ひずみゲージについては、主桁の挙動を把握するために主桁支間中央下フランジに貼付したほか、局部的に高い応力が想定され疲労の影響が考えられる部位に貼付した。また、G3桁支間中央下フランジ上面において桁温度、気温を計測するとともに、G1、G4桁の移動側支承周りににおいて桁変位を計測した。以下に、計測内容を示す。

(1) 荷重車走行時の応力変動計測

20tonf荷重車（ダンプトラック：前軸5.9tonf、後タンデム軸14.1tonf）を上下各車線に速度60km/hで単独走行させ、その際の各部の応力を計測した。

(2) 応力、変位及び温度の時間変動計測

交通供用下における、各部の応力、桁端変位、温度の計測を実施中である。応力については、レインフロー法（時刻歴波形より応力範囲を計数）及びタイム法（時刻歴波形より一定時間間隔毎に応力を計数）により1時間単位の応力頻度分布として計測し、これより時間または日単位の平均応力（以下、それぞれ時間平均応力、日平均応力と言う。）と等価応力範囲（3乗平均値の3乗根）を算出した。桁変位及び温度については、20分間毎に計測を行っている。また、得られた応力頻度分布より、各部位における疲労の影響を概略把握するための参考値として、修正マイナー則を用いて疲労損傷度を算出した。

3.3 計測結果

(1) 荷重車走行時の応力波形及び応力頻度分布

図-4に20tonf荷重車を下り車線（G4桁側）に走行させた場合のG4桁側の主要部位の応力波形を、図-5に平日3日間の応力頻度分布例を示す。これまでに損傷事例が報告されている部位において、溶接止端から10mmの位置を基本に計測したが、ソールプレート前面部と横桁取り付け垂直補剛材上端部において比較的高い応力が生じている。計測値をホットスポット応力⁵⁾と仮定して、平日3日間の応力頻度を用いて支承ソールプレート溶接部、垂直補剛材上端部（それぞれE等級、F等級^{5) 6)}と仮定）の50年間疲労損傷度（3日間の応力が50年間作用すると仮定）を計算すると、それぞれ18、14であり、今回計測し

た部位の中では疲労上厳しい値となっている。また、応力頻度分布によると、20tonfの載荷時の応力範囲に対して概ね最大3～4倍程度の応力範囲が生じている。

(2) 応力、変位、気温の時間・日変動

図-6にG4桁における支間中央下フランジの時間平均応力、可動支承側の桁下端水平変位（橋台

側への変位が負）及び気温の時間変動を示す。

図中の疲労損傷度はG4桁ウェブガセット位置（止端より100mm位置、G等級と仮定）での時間単位の応力頻度分布より求めた50年間疲労損傷度を示し、※印は32MPa（20tonf車載荷時応力の4倍）以上の応力範囲が計測された時間帯を示している。なお、疲労損傷度は応力範囲の3乗と頻度に比例するため、両者がピークとなる時間帯は必ずしも一致していない。

水平変位及び応力ともに気温との相関が見られる。また、疲労損傷度の平日の変動を見ると、深夜から明け方頃と、正午過ぎ頃の時間帯において、活荷重の載荷条件が疲労上厳しくなる傾向が伺える。

図-7にG4桁支間中央下フランジの日平均応力、日最大応力範囲及び日等価応力範囲の日変動を示す。図中の疲労損傷度はG4桁ウェブガセット位置での日単位の応力頻度分布より求めた50年間疲労損傷度を示している。日平均気温は季節変化とともに漸増しているが、日平均応

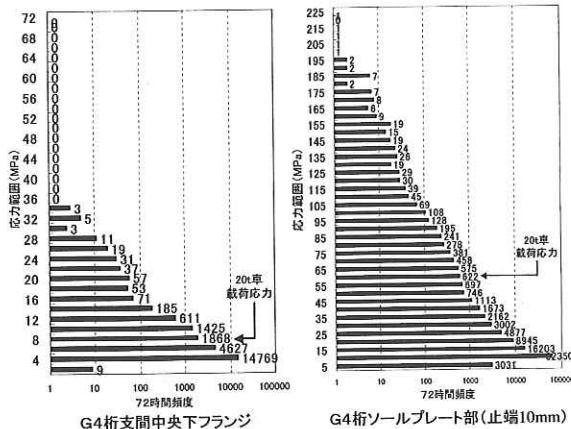


図-5 平日3日間の応力頻度分布の例

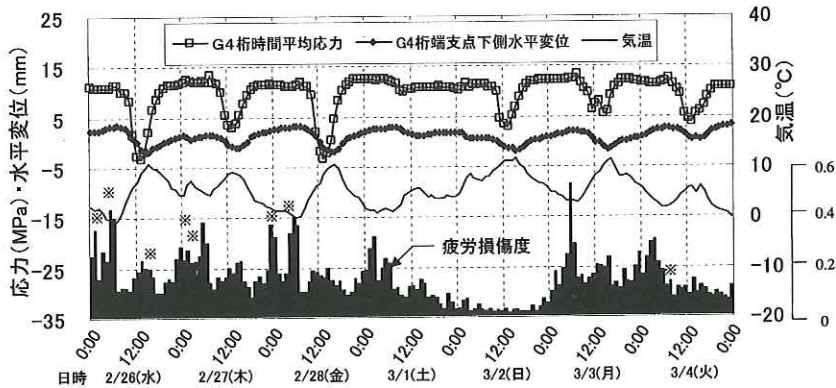


図-6 G4桁支間中央下フランジ時間平均応力、水平変位の変動

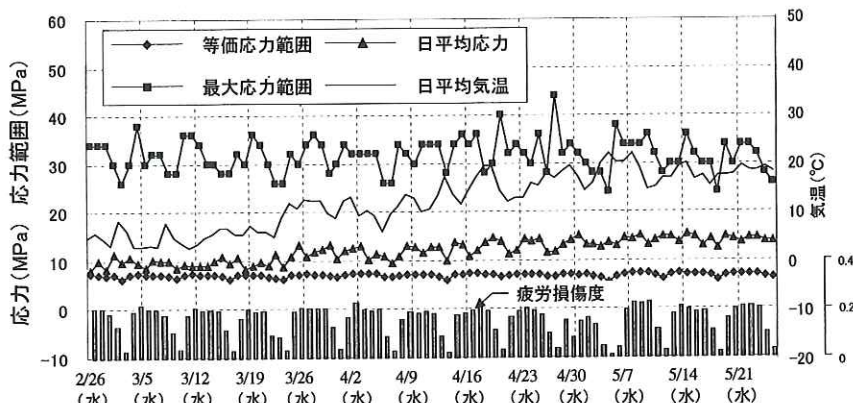


図-7 G4桁支間中央下フランジ日平均応力、日応力範囲、疲労損傷度の変動

表-2 曜日別50年換算疲労損傷度

曜 日	50年換算疲労損傷度	
	平均値	標準偏差
月	0.17	0.039
火	0.20	0.036
水	0.21	0.018
木	0.21	0.014
金	0.19	0.035
土	0.11	0.023
日	0.03	0.007

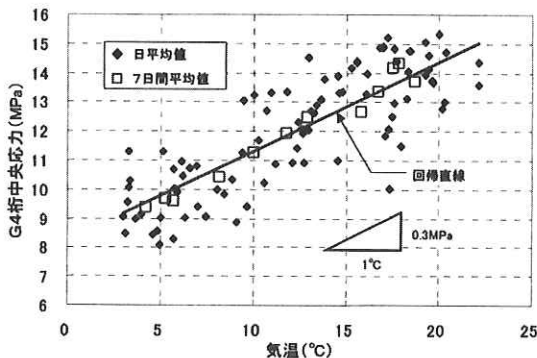


図-8 G4桁支間中央下フランジ日平均応力と日平均気温の関係

表-3 各計測部位における応力と気温（7日間平均値）の関係

計測部位	応力変化量 (MPa/°C)	相関係数
支間中央下フランジ下面	0.31	0.99
横桁取付垂直補剛材上端 (溶接止端20mm)	0.60	0.96
ウェブガセット近傍 (溶接止端10mm)	0.47	0.98
ソールプレート前面 (溶接止端10mm)	0.31	0.87

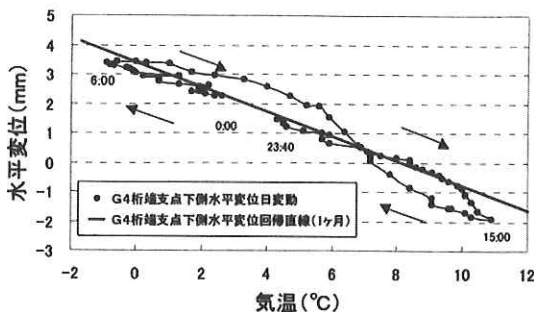


図-9 桁温度と桁端水平変位の関係

力も同様に変化しているのが確認できる。

週間変動を見ると、土、日曜日において各諸量ともに相対的に応力が小さく、大型車交通量の影響と推測される。表-2に曜日別の疲労損傷度の平均値と標準偏差を示すが、火～木曜日にかけて相対的に大きく、土、日曜日前後の月、金曜日では若干小さくなっている。

なお、20tonf荷重車載荷時に、止端10mm位置での応力は止端100mm位置に対して2倍程度生じており（図-4参照）、横構等からの作用力による局所的な面外曲げ応力の影響を受けているものと推測される。同位置の疲労損傷度の評価を行う際には面外曲げ等の影響も別途考慮する必要がある。

(3) 応力、変位と気温の関係

図-8にG4桁支間中央下フランジにおける日平均応力と日平均気温の関係を示す。図中には7日間平均値とした場合の結果と一次回帰式を併せて示す。また、表-3に同様に求めて求めた各部位の一次回帰式の勾配（気温変化に対する応力変化量）と相関係数を示す。日平均値のばらつきは大きいですが、7日間平均値で見ると応力と気温の相関が高いことがわかる。

図-9にG4桁端支点下側における1日間の水平変位（橋台側への変位が負）と気温との関係を示す。図中には34日間（2月末～3月末）の計測結果より求めた一次回帰式を示している。桁端の水平変位と気温との間には高い相関が見られる。ここで、鋼材の線膨張係数 12×10^{-6} から求まる主桁の伸び量は単純計算すれば 10°C に対し3.7mmとなるが、実測値は概ね同程度の移動量となっている。

なお、図中には示していないが、G4桁上端及びG1桁上下端における変位と気温の関係もほぼ同様の挙動を示している。

(4) 応力、変位、気温の7日間平均値

日平均値については日々の交通状況や温度変化の影響によるばらつきが大きいことから、長期的な傾向を捉えるために、上記結果や文献²⁾を踏まえ、日平均応力と日最大応力範囲のn日間平均値を用いて計測データを整理した。

前者は変状等の進展に伴う応力変化を捉えるための指標、後者は活荷重に対する部材の安全性の余裕を概略把握するための指標としての活用を想定したものである。ここで日平均応力の週間変動

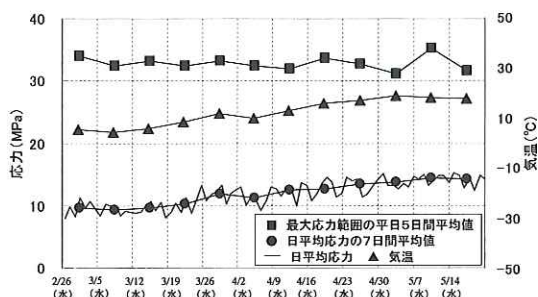


図-10 G4桁支間中央下フランジ応力の7日間平均値

の傾向を踏まえ $n=7$ とした。

図-10に一例として、G4桁支間中央下フランジにおける日平均応力、日最大応力範囲の7日間平均値（ただし、日最大については土、日曜日を除く5日間を考慮）の変動を示す。

前述のとおり平均応力と平均気温の相関は高く、応力は気温の変化に対応していることがわかる。なお、約3ヶ月間の計測期間中に地震（橋梁付近で震度2の地震を3回観測）等による大きな外力の作用や変状の発生はなく、応力的に特異な変化は計測データからは確認されなかった。

また、日最大応力範囲の5日間平均値については34～40MPaであり、同一部位のL-20荷重載荷時の設計活荷重応力度（72MPa）と比較して小さいことが確認された。

4. まとめ

鋼道路橋を対象として、モニタリング技術の適用対象について検討するとともに、状態監視に関する基礎検討としての実橋計測を実施し、約3ヶ月間の応力、変位計測データについて分析を行った。以下に主な結果をまとめる。

①モニタリング技術が必要と考えられる事例につ

いて検討を行い、維持管理の各場面における適用対象について整理を行った。

- ②主桁における時間単位、日単位の疲労損傷度の計測結果より、大型車交通の影響と考えられる時間別、曜日別の活荷重応力の傾向を把握した。
- ③橋梁各部の応力及び桁端変位と気温との間に高い相関が見られることを確認するとともに、温度変化に伴う各部の応力、変位の変化量を把握した。

現在、計測を継続中であり、今後、長期計測データを基に橋梁の状態監視への適用性や活用方法について検討する予定である。

最後に、今回の実橋計測に当たって、ご協力頂いた大宮国道工事事務所の皆様に紙面を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 構造工学委員会橋梁振動モニタリング研究小委員会：Intelligent Bridge/Structure and Smart Monitoring 研究の動向，土木学会論文集No.654/I-52，2000.7.
- 2) 例えば，建設省：既設構造物の点検・補修システムの開発〔橋梁の長期監視システムの開発〕報告書，官民連帯共同研究，1991.3.
- 3) 例えば，三木、水ノ上、小林：光通信網を使用した鋼橋梁の健全度評価モニタリングシステムの開発，土木学会論文集No.686/VI-52，2001.9.
- 4) 例えば，阿部、天野：明石海峡大橋動態観測システム，本四技報，No.86，1998.9.
- 5) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技報堂出版，1993.4.
- 6) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.3.

村越 潤*



独立行政法人土木研究所構造物研究グループ橋梁構造チーム首席研究員
Jun MURAKOSHI

麓 興一郎**



独立行政法人土木研究所構造物研究グループ橋梁構造チーム主任研究員
Koichiro FUMOTO

高木伸也***



独立行政法人土木研究所構造物研究グループ橋梁構造チーム研究員
Shinya TAKAGI

次村英毅****



独立行政法人土木研究所構造物研究グループ橋梁構造チーム交流研究員
Hideki TSUGIMURA