

V-8 鋼構造物の劣化状況のモニタリング手法に関する調査

研究予算：運営費交付金（道路勘定）

研究期間：平 12～平 15

担当チーム：構造物研究グループ（橋梁構造）

研究担当者：村越潤、麓興一郎、高木伸也

【要旨】

道路橋ストックの効率的な維持管理を進めていく上で、構造物に生じている安全性の低下に繋がる現象を正確かつ効率的に把握するための手段の一つとしてモニタリングが挙げられる。本調査では、道路橋を対象として、鋼部材の劣化・損傷等の状態を把握するための各種センサを用いたモニタリング技術の活用方法について検討するものである。平成 15 年度は、モニタリング技術の適用対象と課題の整理、試験橋を対象とした 3 次元立体 FEM 解析によるひずみ及び変位計測によるモニタリングの限界と適用性の評価、実橋長期モニタリング結果による応力変動（活荷重、温度変化の影響）の分析を行った。

キーワード：橋梁、モニタリング、劣化損傷、維持管理、ひずみ、変位、3 次元 FEM 解析

1. はじめに

過去に建設された膨大な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、これまでも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、現状の目視主体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可能性や活用方法については必ずしも十分に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

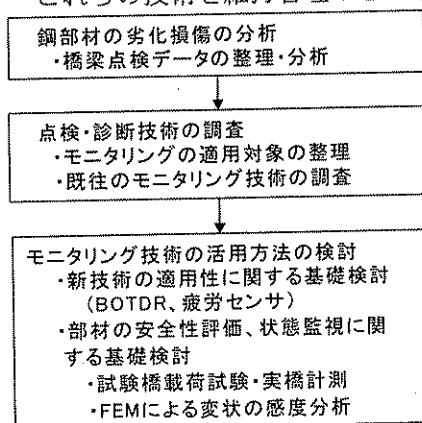


図-1 研究項目及び研究の流れ

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。

鋼橋の応力

（ひずみ）、変位等のモニタリングについては、数多くの調査研究が行われており、荷重車による挙動・振動測定や交通供用下での応力頻度測定等による橋梁の状態診断は既に一般的に行われている。ただし、長期連続モニタリングで取得されたデータの維持管理支援への活用といった点に関しては、橋梁の変状、供用状態等の監視可能性等実橋レベルにおいて検討しておくべき点は多い。

本調査では、鋼道路橋を対象として、既往の各種点検・診断技術の適用性について、整理・とりまとめを行うとともに、各種センサ（ひずみゲージ、変位計等）を用いて鋼部材の劣化・損傷等の状態を把握するためのモニタリング技術の活用方法を提案することを目標とする。平成 15 年度は、モニタリング技術の適用対象と課題の整理、実橋長期モニタリング結果による応力変動（活荷重、温度変化の影響）の分析、試験橋を対象とした 3 次元立体 FEM 解析によるひずみ及び変位計測によるモニタリングの限界と適用性の評価を行った。

図-1 に研究項目及び研究の流れを示す。なお、研究を進めるに当たっては、現場との連携を図り、実橋（関東地方整備局大宮国道工事事務所管内一般国道 17 号）において、各種センサによる長期モニタリングを行い基礎データの収集・分析を行った。

2. モニタリング技術の適用対象と課題の整理

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と課題の整理を行った。

図-2 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-2 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、第三者被害や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。以上の場面では、例えば、以下の技術が挙げられる。

- ・定量的な記録を残し健全度を評価することを支援する技術(デジタルカメラ+画像解析等)
- ・目視困難な構造内部等の情報を得ることが可能な技術(赤外線カメラ等)

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。危機管理の一手段として、監視の目的・期間が特定された後の危機管理の一環として実施した事例はこれまでにもある。

③橋梁の状態の長期・連続的な監視

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。橋梁状態を連続的に監視し、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

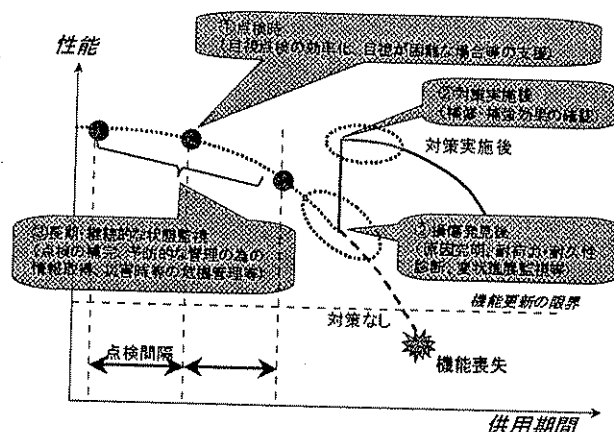


図-2 モニタリング技術による維持管理支援イメージ

表-1 モニタリングの適用対象と計測方法

適用場面	計測方法	
	連続的 (橋梁に機器を設置)	不連続的 (時系列に計測)
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態把握
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	

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、また地震時等災害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。前者の場合、橋梁を秤に見立てた車両重量計測(Weigh-in-motion)や応力頻度計測による疲労耐久性の概略評価、一定期間内の最大応力度の計測による供用下における部材の実安全率の評価は既に実用化されている。しかしながら、長期計測により劣化損傷を捉えるという道路管理者ニーズ(どのような変状をどの段階でどのような精度で捉え、どのように維持管理のアクションに結びつけるのか?)、B/C(待ち時間と計測コスト、目視点検に対する優位性、センサの寿命等)といった課題への明確な答えはない状況である。後者の場合、早期に被災状況を把握し、初動体制に反映させることが目的であることから、必然的にリアルタイム検知のための連続計測とする必要がある。ただし、この場合、データ転送の確実性が要求され、大規模地震時のデータ転送の信頼性を十分検討しておく必要がある。

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

が重要である。

3. 実橋の応力、変位計測データに基づく状態監視に関する基礎検討

3.1 検討内容

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)の限界や適用性を検討するために、実橋(鋼I桁橋)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た。実橋において20tonf荷重車の動的载荷試験を実施するとともに、約1年間(2003年2月より)を目途に、応力及び桁端変位の長期計測を実施した。

以下、実橋計測について、動的载荷試験及び得られた約9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。なお、供用中の橋梁を1~数年程度モニタリングしても、構造安全性に影響を与えるような変状を捉えモニタリングの適用性を評価することは困難に近い。ここでは、連続計測により得られる情報の利用可能性を探ることが重要と考え、そのような観点から種々のデータ整理、分析を試みている。

3.2 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桁橋である。写真-1に橋梁の状況を、図-3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。

3.3 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-4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。

長期計測については、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0.005秒毎に応力を計数)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。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



写真-1 計測対象橋梁

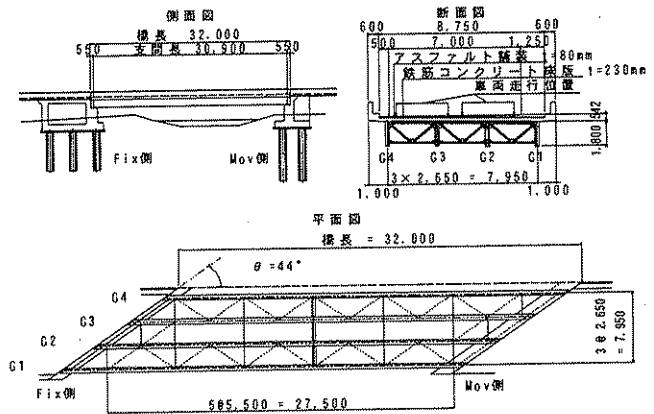


図-3 対象橋梁一般図

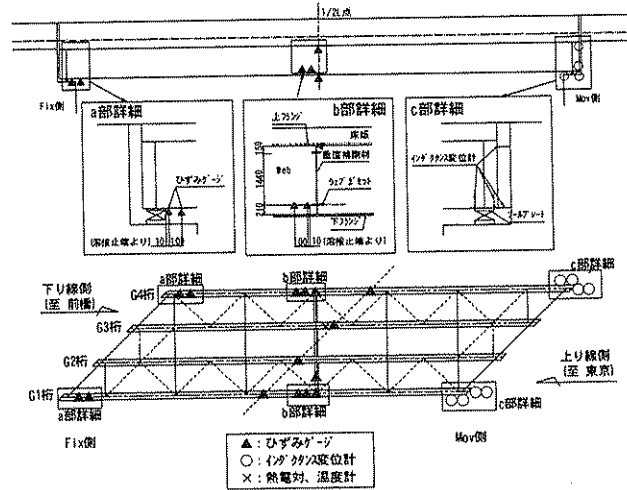


図-4 センサ設置位置

度を算出した。

3.4 計測結果の分析

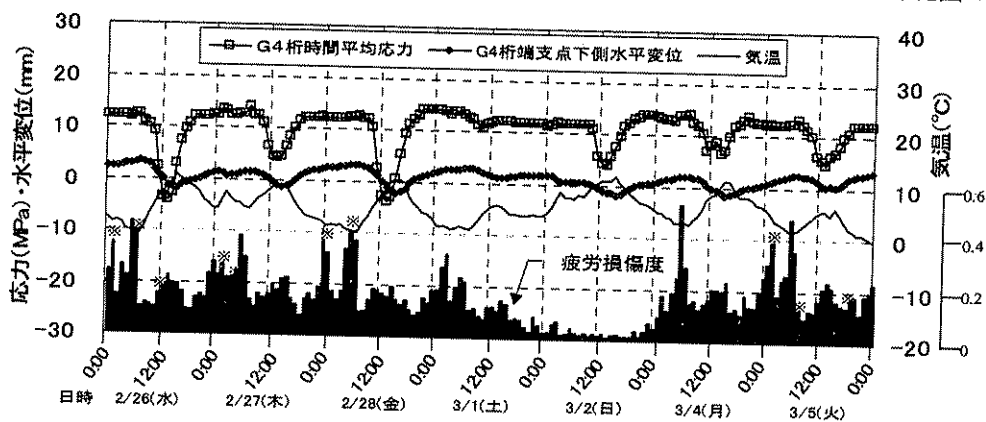
(1) 応力、変位、気温の時間・日変動

図-5にG4桁支間中央下フランジについて時間平均応力、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

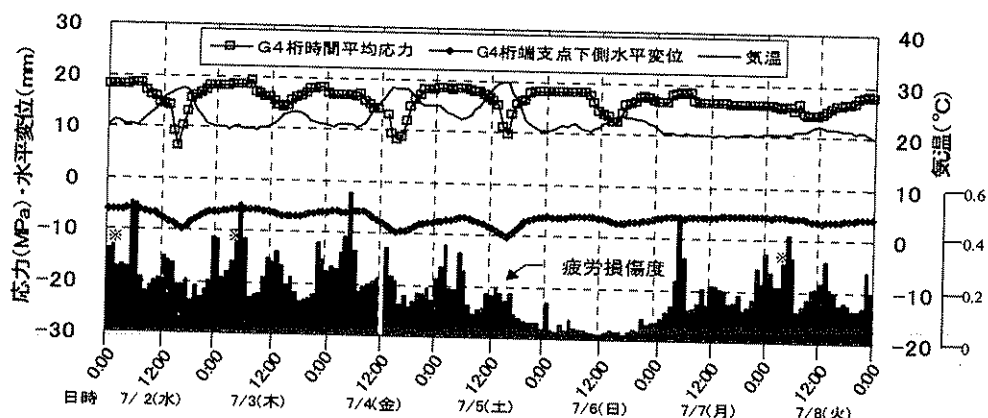
32MPa (20tonf 車載荷時応力の 4 倍) 以上の応力範囲が計測された時間帯を示している。なお、疲労損傷度は応力範囲の 3 乗と頻度に比例するため、両者がピークとなる時間帯は必ずしも一致していない。水平変位及び応力ともに気温との相関が見られる。

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、活荷重の载荷条件が疲労上厳しくなる傾向が伺える。

図-6 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約 9 ヶ月にわた



(a) 2月26日(水)～3月4日(火)の変動



(b) 7月2日(水)～8日(火)の変動

図-5 G4桁支間中央下フランジ時間平均応力、水平変位の変動

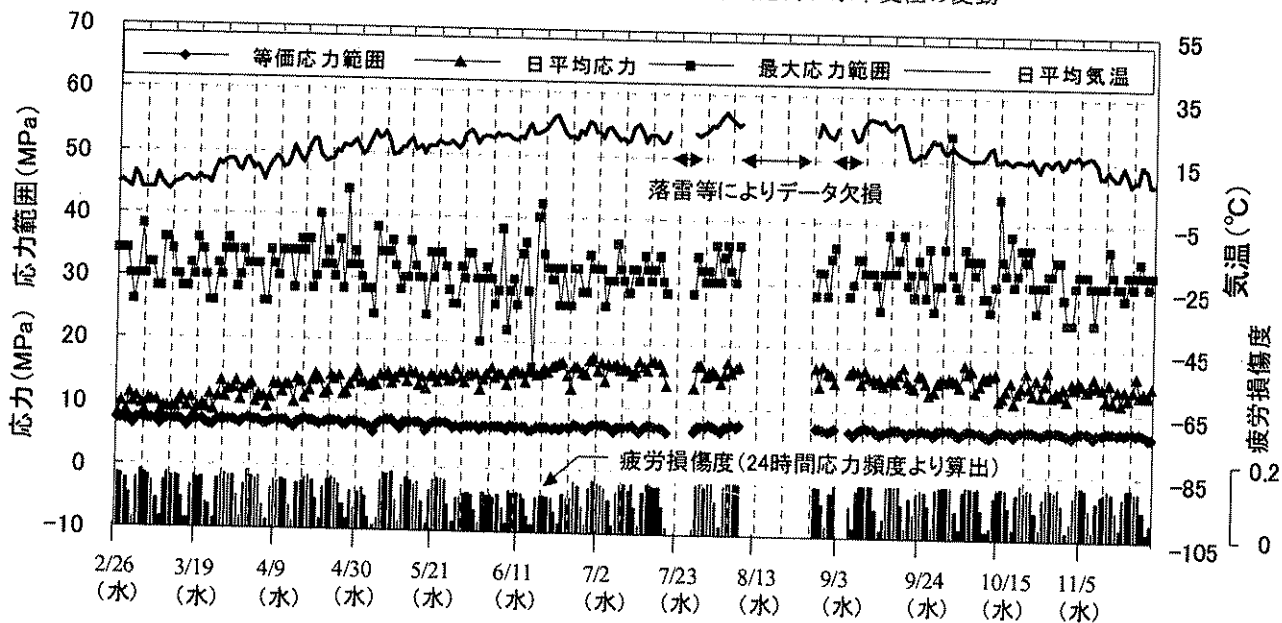


図-6 G4桁支間中央下フランジ日平均応力、日応力範囲、疲労損傷度の変動

たる日変動を示す。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漸減を示しているが、日平均応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。疲労損傷度は火～木曜日にかけて相対的に大きく、月、金曜日では若干小さくなっている。

(2) 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の傾向を踏まえ $n=7$ とした。

図-7 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及び日最大応力範囲の 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）、G4 桁端水平変位（移動側の下側）の 7 日間平均値の変動を示す。前述のとおり応力、変位と気温の相関は高く、両者は気温の変化に対応していることがわかる。図中には実線により、温度補正した結果を示しているが、ほぼ水平であり、9ヶ

月間を通して多少のばらつきはあるものの特異な変化は見られない。なお、約 9 ヶ月間の計測期間中に地震（橋梁付近で震度 1 の地震を 8 回、震度 2 の地震を 7 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、かつ、計測期間中の最大応力範囲は 54MPa であり、同一部の設計活荷重応力度（L-20 荷重に対して 72MPa）と比較して小さいことが確認された。

4. 3次元立体 FEM 解析による変状感度分析

4.1 検討内容

ここでは、モニタリングの限界と適用性を見極めるための基礎検討として、供用中に想定される損傷に対して、損傷前後の橋梁各部における応力、変位の変化量について FEM 解析により検討した。具体的には、まず土研構内の試験橋を対象として解析モデルを作成し、荷重車静的載荷試験の結果との比較を通して、モデルの妥当性を確認した。次に、解析モデルに擬似的変状を与え、損傷に伴う橋梁各部の応力、変位の変化量について分析した。

図-8 に試験橋（単純合成 I 桁橋）の一般図を示す。ここで、mov 側は元々鋼製支承を用いていたが、現在、ゴム支承に取り替えられている。図-9 に幅員方向載荷位置を、図-10 に載荷試験に用いた荷重車諸元を示す。

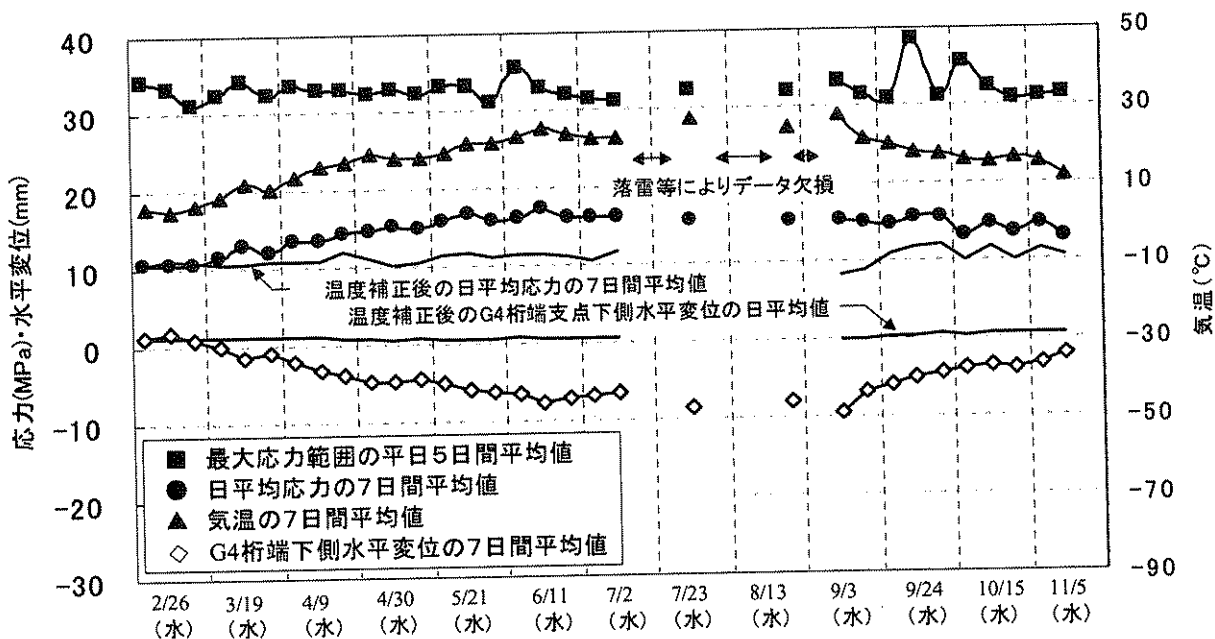


図-7 G4 桁支間中央下フランジ応力の 7 日間平均値

4.2 解析モデルの検討

図-11 にモデル概要を示す。各部材の剛性を表-2 に示す。床版と主桁上フランジは剛結合（節点共有）とし、コンクリート床版と鋼桁の弾性係数比は7としている。鋼桁に関して、シェル要素のサイズは最大3.8cm×2.0cm、最小1.7cm×1.45cm(ソールプレート前面)としている。

以上の橋梁モデルに対して、mov、fix 側ともに鋼製支承と仮定し、荷重車載荷時（G1 桁直上載荷）に対して解析を行ったところ、過去の載荷実験結果（G1 支間中央下フランジ応力、変位）と良く一致する結果が得られた。次に、mov 側について、道路橋支承便覧に従い、表-2 に示すバネに置き換えて解析したところ、同部位の応力、変位に関して、それぞ

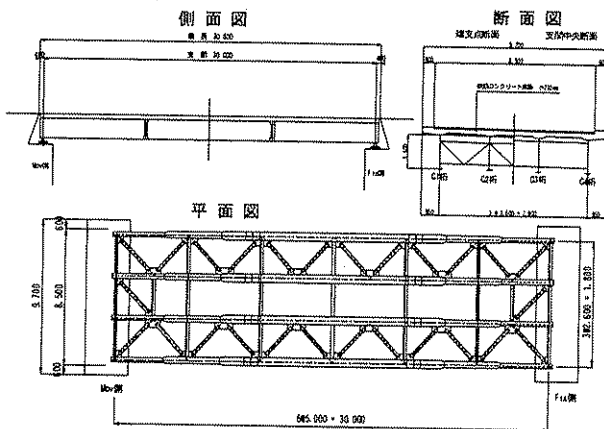


図-8 試験橋の一般図

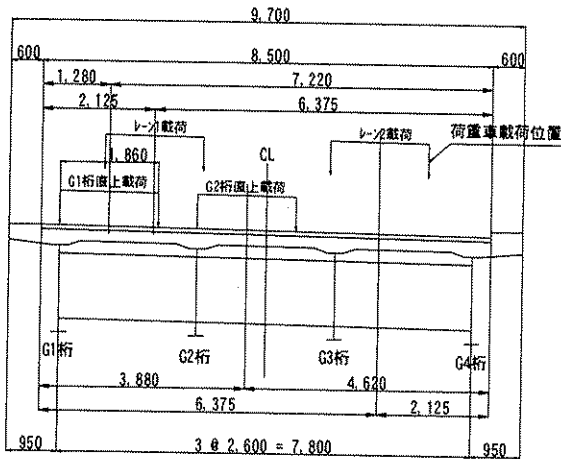


図-9 荷重車載荷位置

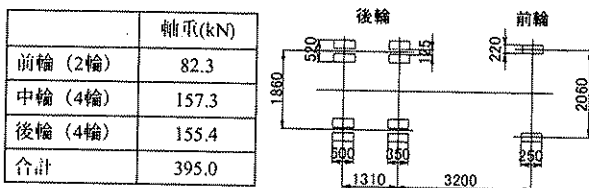


図-10 荷重車車輪設置面積、各車輪間距離、軸重

れ応力 21.1%、変位 13.0%の誤差が見られた。この主要因として、計測結果より、fix 側の鋼製支承下の鋼製台座の水平方向の弾性変形の影響が確認されたことから、これを水平バネとして見込むこととした。具体的には、荷重車載荷時に G1 桁の水平変位を計測し、その水平変位が生じるように fix 側の各桁にバネ定数を与えるようにした。図-12 に、G1 桁直上載係数（水平方向固定とした場合の fix 側支承の反力に対する、バネ支持とした場合の反力の比率）と誤差（実験値/解析値）の関係を示す。G1 桁 fix 側

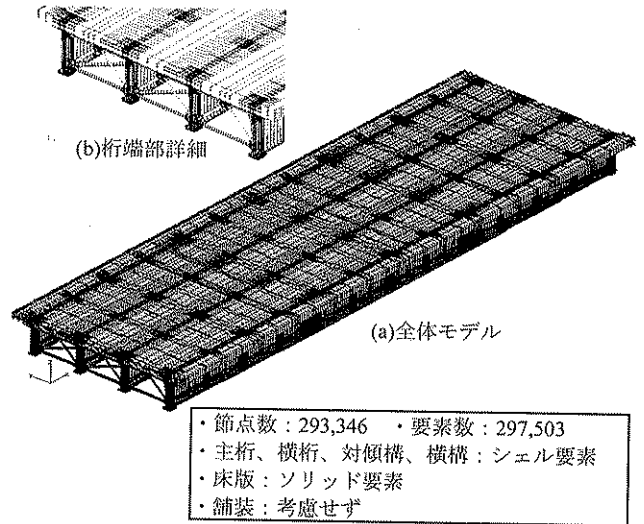
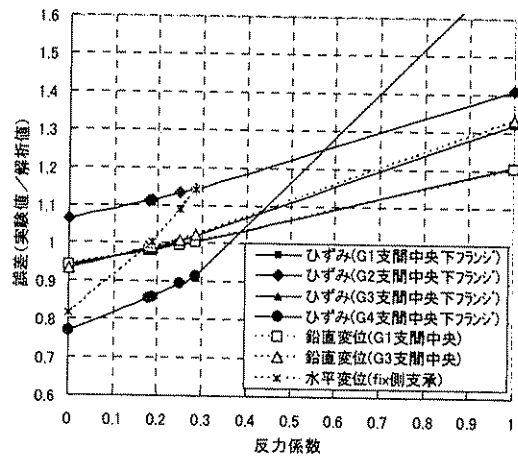


図-11 FEMモデル概要

表-2 各部材の剛性

部材	弾性係数/バネ定数	ポアソン比
床版コンクリート	$2.8 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ ($\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$)	0.167
主桁等鋼部材	$2.0 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$	0.300
ゴム支承（水平バネ）	1800 kN/m	-
ゴム支承（鉛直バネ）	30086 kN/m	-
ゴム支承（橋軸・橋直回り回転バネ）	$2181.5 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$	-
ゴム支承（鉛直軸回り回転バネ）	剛	-

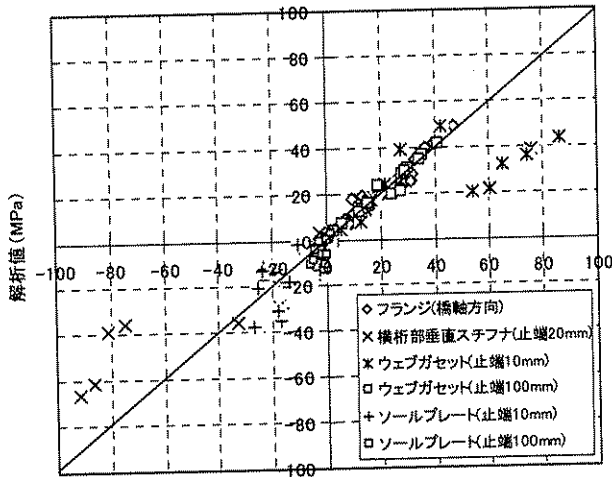


(a) G1直上

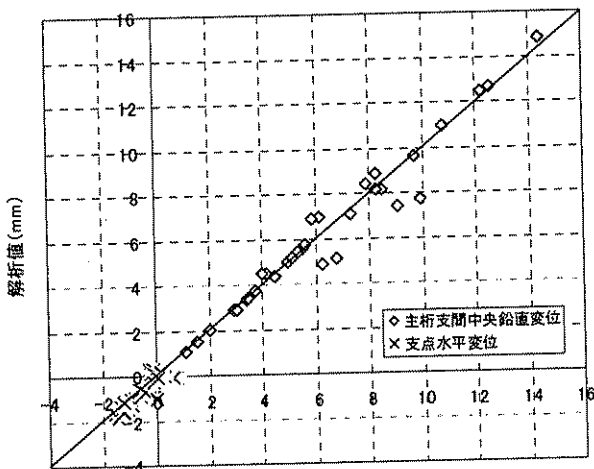
図-12 ひずみ、鉛直変位、水平変位

表-3 変状ケース

変状ケース	内容
変状なし	橋梁に何も手を加えないそのままの状態
支承拘束	支承に対して、腐食等による機能損失を想定し、全支承(8箇所)の回転及び移動の動きを妨げた状態
全横構開放	地震及び腐食により桁端支点における劣化損傷を想定し、全横構のボルトを除いた状態
支点開放	地震及び腐食により桁端支点における劣化損傷を想定し、G1桁Fix側の支点の支持を取り除いた状態
ウェブ亀裂	G1桁の横桁取付部ガセット付近から亀裂が発生し、ウェブの上下フランジ間及び下フランジも貫通した状態



(a) 応力



(b) 変位

図-13 応力・変位比較図

支承の桁端変位の解析値が実測値とほぼ一致するのは反力係数が約 0.2 付近であり、他の部位の誤差も 2%~10%程度と概ねよい対応を示している。

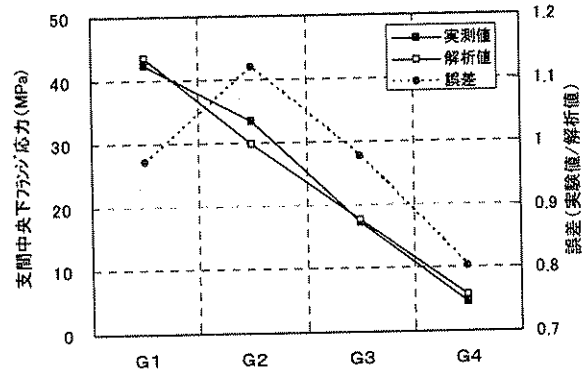
4.3 解析モデルの妥当性の評価

(1) ひずみと変位の比較

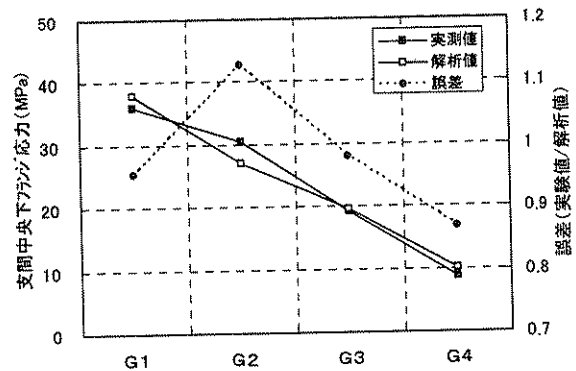
図-13 に各载荷ケースに対して、各部の応力・変位の実測値と解析値の関係を示す。図中には横構を全て取外した場合の、実測値と解析値も含めてプロットしている。応力・変位ともに比較的良く一致しているが、局部応力(垂直補剛材上端部やウェブガセット溶接止端近傍等)については実験値の方が大きく、本モデルでは表現できていないことが確認された。

(2) 荷重の横分配効果の比較

図-14(a)(b)に G1 桁直上载荷時、レーン 1 载荷時について、各主桁の支間中央下フランジ応力の実測値



(a) G1 桁直上载荷



(b) レーン 1 载荷

図-14 主桁支間中央下フランジ応力横分配の評価

と解析値を比較して示す。横分配の影響を概ね表現できていることがわかる。

4.4 FEMによる変状感度分析

上述の解析モデルに擬似的変状を与え、損傷に伴う橋梁各部の応力、変位の変化量について分析する。変状ケースを表-3 に示す。

図-15 に G1 桁载荷時に変状別に G1 桁下フランジ(橋軸方向)の応力分布を示す。図-16 に変状別の橋梁各部位の応力を示す。極端に大きい変状を想定したが、ウェブ亀裂を除き応力変動は高々 1~12MPa 程度であり、3章に示す供用下の応力変動(温度変化、活荷重変動)と比較してそれほど大きい値ではなく、急激な変化でない限り変状監視のためのモニタリングは難しいものと考えられる。

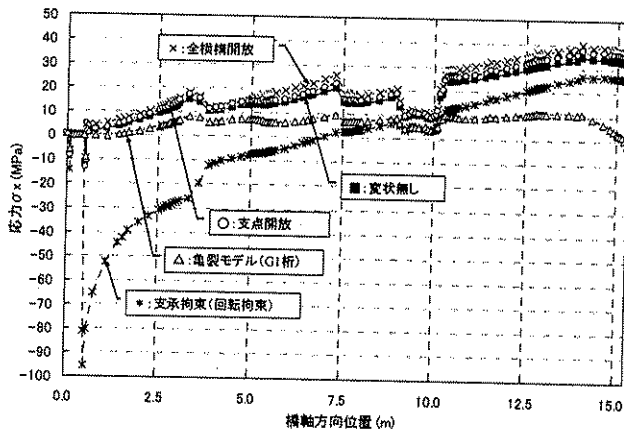


図-15 G1直上載荷時のG1桁下フランジ(橋軸方向)応力分布

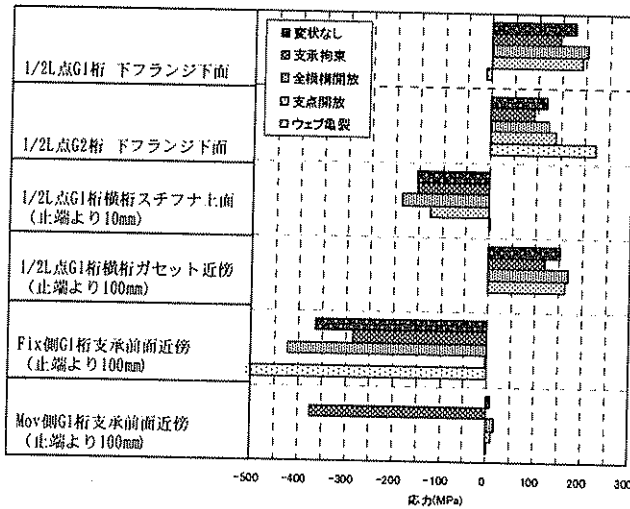


図-16 変状別応力変化

5. まとめ

既往の橋梁モニタリング技術の適用対象の整理、実橋における長期計測結果の分析、3次元立体FEMによる変状感度分析を通して、モニタリング技術の適用性、適用方法について検討を行った。以下に、主な結果をまとめる。

- ①維持管理業務支援の観点から、点検、健全性評価、補修補強等の各場面について、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、モニタリング技術の適用対象と課題を整理した。
- ②実橋の長期計測において、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活荷重応力の時間別、曜日別の変動傾向を確認した。また、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。

なお、計測期間中の主桁応力、主桁桁端変位の7日間平均値を用いることにより、両者の変動が温度応力に依存することにより温度応力以外に応力、変位について特異な変化が見られなかったことが確認された。

- ③3次元FEM解析における変状感度分析より、限られた変状ケースであるが、応力の変化量は概して小さく、変状を特定した上で局部的な応力集中箇所をねらった測定を行うか、橋梁全体に網羅的にセンサを設置しない限り、変状監視のためのモニタリングは実務的には難しいことが確認された。

【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) 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，平成3年3月
- 6) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.3.