

第I編 鋼構造物の点検・調査

社会資本としての鋼構造物は、そこにある限りその機能が将来にわたって維持され続けるという「永久性への暗黙の期待」に応える必要がある。その実現のためには、既設・新設構造物を長寿命化させることが最も効果的な対策である。加えて、ライフサイクルコストの低減や機能向上のための更新、社会資本の集約による廃止も含めた対応が必要となるであろう。いずれの場合においても対象となる鋼構造物の状態を客観的に把握・評価することは、その第一歩であり、適正に点検・調査することが重要であることは言うまでもない。

鋼構造物の状態を客観的に把握・評価するためには、建造時の設計思想、製造過程、現場施工の状況はもちろん、供用中の周辺環境、外力の作用状況等について熟知している技術者がこれにあたるのが理想的である。加えて、数多くの劣化や損傷状況を診る経験を有し、そのメカニズムを体験的かつ工学的にも分析できるような資質を有する必要もある。

しかしながら、現状では建設と維持管理に従事し、両方の技術に熟知した技術者は限られること、点検・調査が必要な鋼構造物が多数あることなどから、点検・調査の量と質を確保するために要領やマニュアルの策定がなされている。このような現状のもと、点検・調査を実施している場合、要領やマニュアルの策定は、ある面マニュアル教条主義（実践による検証を怠り、マニュアルを無批判に盲信するような知的怠惰）に陥る可能性を常に秘めている。これに注意し、要領やマニュアルの技術的背景や知見を踏まえた活用が望まれる。

構造物の管理状況を見ると、連綿と維持管理がなされ点検技術者の資質を確保している場合や点検すらおぼつかない場合など、鋼構造物の置かれている管理状況はさまざまである。各管理者が策定する要領やマニュアルでは、管理者の態勢や鋼構造物の管理状況が暗黙のうちに反映されていることに注意が必要である。すなわち、対象とする構造物の種類、設置環境、荷重などが類似した場合は、要領やマニュアルも参考になるが、異なる環境下では求められる事項は必然的に異なることに注意すべきである。

上記のことを踏まえた上で、鋼構造物の長寿命化に欠かすことができない点検・調査の現状と課題、今後開発・実用化が望まれる点検・調査技術について報告する。

1. 鋼構造物の点検

社会基盤施設の点検は管理構造物や管理者により多様な形態がある。それらは、日常点検、定期点検、詳細点検、異常時点検に大まかに分類することができる。日常点検は比較的短いサイクルで実施される第三者被害の発生防止や使用性の確保に主眼を置いた点検である。そのため、構造物そのものの現状把握の側面よりも安全・安心に資する情報取得を目的としている。定期点検は数年に一度の頻度で実施される構造物の現状を把握するための点検であり、主に目視による点検と打音検査等によって実施されている。この定期点検結果をもとに鋼構造物の長寿命化修繕計画が策定・実施される必要がある。目視点検は、遠望目視と接近目視に分類され、構造物の状況を概略的に把握するために遠望目視を行い、その情報に基づき、損傷の有無を接近目視されている。詳細点検は、定期点検で発見された損傷や異常についてより客観的で詳細な情報を得るために実施される点検であり、非破壊検査や微破壊検査、応力・変位・振動の計測、長期モニタリング等が実施されることがある。損傷程度をより詳細に把握したり、表面からの目視によるだけで

は検出できない損傷（例えば、き裂など）を調査したりする上で、非破壊検査が有効であることも多い。異常時点検は、地震や豪雨・洪水等の異常が発生した後に実施される点検で危機管理対応として実施される。そのため安全性と復旧・供用再開に必要な情報収集が主な目的となる。

一般に行われる定期点検・詳細調査は、以下の3つの情報収集に着眼される。

①劣化及び損傷の状態の把握

鋼構造物の耐荷性能への影響、第三者被害発生の有無を確認すること。目視及び簡易測定のみでは、損傷状態の把握が困難な場合もあるため、構造物の安全性の担保に必要な詳細調査が併用される。

②劣化及び損傷の進行状況

鋼構造物に発生した経年的な劣化や突発的な事象による損傷に対して、進行の状況が明確になる。一般には、目視点検を一定期間ごとに実施することで、前回点検結果との比較等により、劣化及び損傷の進行状況が明らかになる。

③劣化及び損傷原因の推定

鋼構造物に発生した劣化及び損傷の原因を推定し、その後の診断、対策実施へと情報を引き継がれる。目視点検により原因の推定が困難な場合には、原因究明のために必要な計測や非破壊試験が併用される。

本節では、詳細点検等と並び鋼構造物の長寿命化のための基礎情報を取得する場となることが期待される定期点検について詳述する。

1.1 鋼構造物の点検（定期点検）

社会基盤施設の、道路、鉄道、上下水道、港湾、空港、河川、砂防、海岸施設等における鋼構造物の定期点検について概観する。

(1) 鋼構造物の種類

社会基盤施設として供用されている鋼構造物を以下に示す。

道路施設：鋼道路橋，鋼歩道橋，鋼製シェッド，鋼製の標識・照明柱，その他付属物

鉄道施設：鋼鉄道橋

上下水道施設：管路橋

港湾施設：栈橋

空港施設：連絡橋，空港進入灯橋梁

河川施設：水門，樋門

砂防施設：鋼製砂防えん堤

海岸施設：鋼矢板，鋼管矢板

鉄道施設：鋼鉄道橋

通信施設：通信鉄塔

エネルギー施設：送電用鉄塔，風力発電鉄塔，煙突支持鉄塔，タンク

等

(2) 対象とする損傷

鋼構造物の長寿命化に係わる点検項目として、防食機能の低下による損傷、疲労による損傷、連結部のボルトのゆるみ・脱落の3項目に大別できる。鋼構造物における防食機能の維持は、酸素、水、塩分を環境中から排除することが困難であることから、必要不可欠な問題である。疲労による損傷は、活荷重や風荷重等の繰り返し作用を受ける構造物に発生するため、ある程度対象とする鋼構造物を限定することができる。また、疲労損傷の点検は、既知の疲労損傷発生箇所を基本として実施するため、最新の知見を共有することが必要とされる。高力ボルトの遅れ破壊については、建造年代や材料を特定できれば損傷の発生を予測できる。そのため、遅れ破壊によるボルトの脱落については第三者被害への影響が大きいことから、定期点検の前段階である事前調査での対応が望まれる。

上記の3項目の他に、車両・船舶の衝突や地震、津波などの過大な外力による変形・欠損、異常なたわみ、振動、騒音なども定期点検の対象となることがある。

(3) 点検方法

鋼構造物の定期点検は、近接目視を主とし、触診、テストハンマーによる打音点検、ノギスや巻尺、下げ振り等を用いた簡易な計測を行う場合がある。

鋼構造物はそれぞれ使用環境や構造特性に適合した防食性能を付与されているため、それに応じた着目点検箇所や部位が例示されている場合が多い。また、防食の方法、水分及び塩分の供給状況に応じた点検項目の設定がなされている。疲労損傷に対しては、管理する鋼構造物の特性と過去の疲労損傷に関する知見に基づいた点検部位の例示がなされていることもある。

定期点検は近接目視を基本とするとされていることが多いものの、目視を行い難い部位については、ミラーやファイバースコープ、点検カメラ等の簡易機器の使用を認めている場合もある。しかし、それらの機器によっても見ることが困難な部位もある。さらに、支承機能の水平可動の確認や水平反力分散機能、免震機能の確認は、目視や触診だけでは困難な場合もあり、これらの点検・調査については今後の研究・開発が望まれる分野である。

個々の損傷を点検するための近接目視の他に、鋼構造物の全体構造や周辺環境を観察するには遠望からの目視も必要であることは言うまでもない。設計図に基づく全体形状の確認、境界条件の確認など、舗装から下部構造まで橋梁全体を見渡す視点も必要である。これを担保するために全景写真の撮影を求めている場合もある。

近接目視とは、点検員が構造物に手の届く範囲にまで接近し目視により行う点検である。このため、構造物の高さ条件や構造物の立地条件などにより、足場、高所作業車や橋梁点検車などの仮設備が必要となる。また、構造物に接近するという特質上、コンベックスなどを用いた簡易な計測や触手点検・打音点検などが可能である。近接目視に加えてこれらの作業を行うことで、損傷の規模や要因など診断や補修設計および補修計画の立案に必要な情報の取得が可能となる。近接目視を行う上で留意すべき点は、構造物に接近するという特質を最大限に活かすことである。橋梁を例に具体化すると、「支承や伸縮継手などの腐食・破損」や「遠望目視では確認し難い疲労き裂」などを確認するために実施する。

遠望目視とは、点検員が構造物に対し遠望からの目視により行う点検である。遠望目視

は、近接目視と異なり構造物に接近しないため得られる情報が限定される。遠望目視の場合は、構造物の規模や形状により不可視部分が生じるため、ある種の限界点があることを念頭に置く必要がある。一方で、遠望目視は、その方法より点検速度が速くなる傾向にある。したがって、構造物の状態について早期に橋梁全体の概略を知る必要がある場合などは有効である。

打音点検とは、近接目視を行う際に損傷状態をより正確に把握するため、点検箇所をテストハンマーなどにより適度に打撃する点検である。一般には、打撃に伴う発生音により、損傷の有無を確認できる。コンクリート構造物では、コンクリートの剥離や浮きを確認するために行われるが、鋼構造物の場合では、腐食損傷度の把握やボルトの折損を確認するために行われる。打音点検は、近接目視を補完する有用な点検となるため、近接目視時にたとえ変状が見られない場合でも、抜取的に実施することなどが重要である。

一般に鋼構造物の定期点検は近接目視を主体に行われているが、目視のみでは損傷を正確に把握できない場合や定量化できない場合がある。例えば、塗装を施した鋼部材や溶接部などに生じるき裂は、当該割れが「塗膜割れ」か「母材や溶接金属にも生じている割れ」なのかが目視のみでは正確に把握できない場合がある。また、ボルトでは触手や打音点検のみで把握できないボルト軸力、塗膜では目視のみで定量化できない塗膜厚や塗膜の劣化、付着性能などがある。定期点検においてこれらの損傷が疑われる場合は、詳細点検や特別点検として各種の非破壊検査が行われる。各種鋼構造物の点検では、損傷有無の把握や損傷度の定量化などを目的に非破壊検査を実施する。

1.2 橋梁点検要領（鋼道路橋）

鋼構造物の代表例として国道及び地方自治体、高速道路会社が管理する鋼道路橋に関する点検要領について概観する。

(1) 橋梁定期点検要領（案）²⁾平成 16 年 3 月

国土交通省、内閣府沖縄総合事務局が管理する一般国道の橋梁の定期点検を対象とした定期点検要領（案）である。定期点検の頻度は、供用後 2 年以内に初回を行うものとし、2 回目以降は、原則として 5 年以内に行うよう規定されている。初回点検は、橋梁の初期欠陥を含む初期状態を把握してその後の損傷の進展経過を明らかにすることを目的としている。

なお、本要領においては、点検の品質を確保するために「定期点検は、これを適正に行うために必要な橋梁に関する知識及び技能を有する者が行なければならない」規定されている。

橋梁点検における点検対象となる 26 種類の損傷のうち、鋼構造物に関連する損傷と点検の標準的な点検方法、点検技術及び点検の現状を次に示す。いずれも近接目視を主に、必要に応じて簡易な点検器具を用いることを基本としている。

1) 腐食

腐食は、断面欠損による応力超過、応力集中によるき裂への進展、主桁と床版接合部の腐食は、橋梁の剛性及び耐荷力の低下につながる。特にケーブル構造物のケーブル材

に著しい腐食が生じ、その腐食が構造安全性を著しく損なう状況や、鉸桁形式の桁端の腹板が著しい断面欠損を生じており、対象部材の耐荷力の喪失によって構造安全性を著しく損なう状況などにおいて、緊急対応が必要となる場合がある。

代表的な損傷原因は、床版ひびわれからの漏水、防水層の未設置、排水装置設置部からの漏水、伸縮装置の破損部からの漏水及び付着塩分等の自然環境によるものがある。

点検は、目視により腐食部位とその範囲、進行状況及び鋼材表面の膨張具合を確認し、板厚減少が疑われる場合には、ノギス、マイクロメータ、キャリパーゲージ、超音波板厚計等により板厚測定を行う。表面の凹凸の計測には、型取り工具等を用いる。

2) き裂

き裂は、断面減少に伴う応力超過及びき裂の急激な進行による部材断裂につながる。特に、き裂が鉸桁形式の主桁腹板や鋼製橋脚の横梁の腹板に達しており、き裂の急激な進展によって構造安定性を損なう状況や、鋼床版構造で縦リブとデッキプレートの溶接部からデッキプレート方向に進展するき裂が輪荷重載荷位置直下で生じて、路面陥没によって交通に障害が発生する状況などにおいては、緊急対応が必要となる場合がある。

代表的な損傷原因は、支承の機能障害による構造系の変化、路面の不陸による衝撃力の作用、腐食の進行、主桁間のたわみ差の拘束（荷重分配機能）、溶接部の施工品質や継手部の応力集中、荷重偏載による構造全体のねじれ及び活荷重直下の部材の局部的な変形がある。

点検は、目視による外観調査によって塗膜表面の割れの検出を行う。

き裂が生じた原因の推定や当該部材の健全性の判断を行うためには、表面的な長さや開口幅などの性状だけでなく、き裂の深さや深さ方向のき裂幅の変化、当該部位の構造的特徴や鋼材の状態(内部きずの有無、溶接の種類、板組や開先)、発生応力などを総合的に評価することが必要である。このことから、原因や生じた範囲などが容易に判断できる場合を除いて、基本的には詳細調査を行う。

詳細調査では、テストハンマーやワイヤブラシ等の工具を用いて塗膜やさび、塵埃などの付着物を除去し、渦流探傷試験、磁粉探傷試験、超音波探傷試験及び浸透探傷試験により表面きず及び内部きずの長さや大きさを確認する。

3) ゆるみ・脱落

ゆるみ・脱落は、直ちに耐荷力には影響はないが、進行性のある場合には危険な状態となる。主桁のうき上がりによる伸縮装置の段差の発生や、ボルト等の脱落による二次的災害につながる。特に、接合部で多数のボルトが脱落しており、接合強度不足で構造安定性を損なう状況や、常に上揚力が作用するペンデル支承においてアンカーボルトにゆるみを生じ、路面に段差が生じるなど、供用性に直ちに影響する事態に至るケースや、F11T ボルトにおいて脱落が生じており、遅れ破壊が他の部位において連鎖的に生じ、第三者被害が懸念される状況などは、緊急対応が必要となる場合がある。

代表的な損傷原因は、連結部の腐食、走行車両による振動、ボルトの腐食による断面欠損、F11T ボルトの遅れ破壊、車両の衝突、除雪車による損傷がある。

点検は、目視による確認のほか、ボルトヘッドマークの確認、たたき試験、超音波

探傷（F11T等）、軸力測定を用いる。

4) 破断

破断は、鋼部材が完全に破断しているか、破断しているとみなせる程度に断裂している状態で、床組部材や対傾構・横構などの2次部材、あるいは高欄、ガードレール、添架物やその取り付け部材などに多く見られる。特に、アーチ橋の支材や吊り材、トラス橋の斜材、ペンデル支承のアンカーボルトなどが破断し、構造安全性を著しく損なう状況や、高欄が破断しており、歩行者あるいは通行車両等が橋から落下するなど、第三者等への被害の恐れがある状況などにおいては、緊急対応が必要となる場合がある。

代表的な損傷原因は、風や交通荷重による疲労、振動、腐食、応力集中である。点検は、目視による確認が基本となる。

5) 防食機能の劣化

防食機能の劣化は、鋼材の腐食への進展が懸念される損傷である。塗膜の大規模なうきや剥離が生じており、施工不良や塗装系の不適合などによって急激にはがれ落ちることが懸念される状況や、異常な変色があり、環境に対する塗装系の不適合、材料の不良、火災などによる影響などが懸念される状況などにおいては、詳細調査の実施が必要となる場合がある。

代表的な損傷原因は、鋼板・ボルトのシャープエッジ部の表面張力による塗膜厚不足、床版ひびわれからの漏水、防水層の未設置、排水装置設置部からの漏水、伸縮装置の破損部からの漏水、自然環境（付着塩分）である。

点検は、目視による確認を基本とし、その他に、写真撮影（画像解析による調査）、インピーダンス測定、膜厚測定、付着性試験等がある。

13) 遊間の異常

遊間の異常は、上部構造への拘束力の作用が懸念される損傷である。遊間が異常に広がり、自転車やオートバイが転倒するなど第三者等への障害を及ぼす懸念があるなどにおいては、緊急対応が必要となる場合がある。

代表的な損傷原因は、下部工の変状である。点検は、目視及びコンベックスを用いた確認が基本となる。

16) 支承の機能障害

支承の機能障害は、移動、回転機能の損失による拘束力の発生、地震、風等の水平荷重に対する抵抗力の低下、主桁のうき上がりにより伸縮装置等への段差の発生、荷重伝達機能の損失及びき裂の主部材への進行が懸念される損傷である。特に、支承ローラーの脱落により支承が沈下し、路面に段差が生じて自転車やオートバイなど第三者等への障害を及ぼす懸念がある状況などにおいては、緊急対応が必要となる場合がある。

代表的な損傷原因は、床版、伸縮装置の損傷による雨水と土砂の堆積、防水層の未設置、腐食による断面欠損、斜橋・曲線橋における上揚力作用、支承付近の荷重集中、支承の沈下、回転機能損失による拘束力の作用がある。

点検は、目視による確認を基本とし、その他に、移動量の測定などが考えられる。

18) 定着部の異常

定着部の異常は、耐荷力の低下が懸念される損傷であり、特にケーブルを鋼制定着

部やコンクリートに定着している構造において、当該部の腐食やひびわれによる構造安全性の低下が懸念される。

点検は、目視による確認を基本とし、その他に、たたき試験、赤外線調査などが考えられる。

20) 漏水・滞水

漏水・滞水は、支承機能の低下、合成桁では主桁の剛性低下、非合成桁では合成作用の損失、耐荷力の低下、主構造の腐食等が懸念される損傷である。

代表的な損傷原因は、ひびわれの進行、防水層未施工、打設方法の不良、目地材の不良、橋面排水処理の不良、止水ゴムの損傷、シール材劣化、脱落、排水管の土砂詰まり、腐食、凍結によるわれ、床版と排水ますの境界部からの雨水の侵入がある。点検は、目視による確認を基本とする。

21) 異常な音・振動

異常な音・振動は、き裂の主部材への進行や応力集中によるき裂への進展が懸念される損傷で、橋梁の構造的欠陥または損傷が原因となり発生する。特に、車両の通過時に大きな異常音が発生し、近接住民に被害を及ぼしている状況においては、緊急対応が必要となる場合がある。

代表的な損傷原因は走行車両による振動であり、点検は、聴覚及び目視により確認することが基本となる。

22) 異常なたわみ

異常なたわみは、き裂の主部材への進行、応力集中によるき裂への進展が懸念される損傷であり、橋梁の構造的欠陥または損傷が原因となり発生する。

代表的な損傷原因は走行車両による振動であり、点検は、目視により確認することが基本となる。

23) 変形・欠損

変形・欠損は、二次的災害、耐荷力の低下、鋼材の腐食が懸念される損傷である。特に、高欄が大きく変形しており、歩行者あるいは通行車両など、第三者への障害が懸念される状況などにおいて、緊急対応が必要となる場合がある。

代表的な損傷原因は、局部応力の集中、衝突または接触がある。点検は、目視、水系、コンベックスを用いた確認が基本となる。

24) 土砂詰り

土砂詰まりは、主構造の腐食、床版の劣化、支承の移動、回転機能の損失による拘束力の発生が懸念される損傷である。

代表的な損傷原因は、排水配管の不具合、床版と排水ますの境界部からの雨水の侵入、床版、伸縮装置の損傷による雨水と土砂の堆積などがあり、点検は、目視により確認することが基本となる。

点検体制は、必要な要件の標準を示し、橋梁検査員、橋梁点検員、点検補助員の作業内容を定めている。

対策区分の判定は下に示す 7 種類に分類する。

A：損傷が認められないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない。

B：状況に応じて補修を行う必要がある。

C：速やかに補修等を行う必要がある。

E1：橋梁構造の安全性の観点から、緊急対応の必要がある。

E2：その他、緊急対応の必要がある。

M：維持工事で対応する必要がある。

S：詳細調査の必要がある。

なお、主要部材について C 又は E1 の判定を行った場合は、対策として補修もしくは更新が必要かを併せて判定することになっている。

(2) 道路橋に関する基礎データ収集要領（案）³⁾平成 19 年 5 月

道路橋に関する基礎データ収集要領（案）は適用の範囲として、「本要領（案）は、できるだけ簡易に道路橋の健全度に関して概略が把握できることを意図し、一般的な構造形式の道路橋において、主要な部材のみに着目し、かつ損傷発生頻度が高い箇所や同じ部材の中でも劣化が先行的に進行する箇所のみに着目するなどにより省力化を図ったものである。」とある。

なお、調査従事者に関する要件の明示はない。

全調査項目は 12 項目あり、そのうち鋼道路橋に関する 5 項目を次に示す。

1) 腐食：a～e の 5 段階区分

2) き裂：有無

3) ボルトの脱落：有無

4) 破断：有無

11) 支承の機能障害：有無

調査方法は目視を基本とするが、桁端部や支承部は近接目視するものの、近接目視が著しく困難な場合は遠望目視と周辺部材の状況から推定することとなっている。

定期点検要領（案）では全 26 項目のうち鋼道路橋に関する点検項目は 13 項目（いずれも 5 段階区分）であるのと比較して簡略化されている。

(3) 総点検実施要領（案）【橋梁編】⁴⁾平成 25 年 2 月

道路法（昭和 27 年法律第 180 号）第 3 条に規定する道路の道路橋において、道路利用者及び第三者被害を防止する観点から実施する道路ストック総点検の道路橋編である。橋梁本体及び付属施設の損傷状態を把握するための点検を実施し、損傷等による落下及び倒壊・変形による道路利用者及び第三者被害の危険性の有無を判定する。

対象橋梁とその箇所は第三者被害を想定すると、桁下を道路・鉄道が交差する場合、公園又は駐車場として利用している場合、道路が並行する場合がある。道路利用者被害としては、路面より上に橋梁部材が存在する場合、照明柱、防護柵等の付属物が路面より上に設置されている場合が対象となる。

なお、点検従事者に関する要件の明示はない。

全調査項目は 8 項目あり、鋼構造物に関する 4 項目を次に示す。点検の方法は、近接目

視を基本とし、点検項目に応じて、触診、打音検査等を併用する。ただし、コンクリートの「うき」に対しては、打音検査の実施を原則とする。

- 1) 著しい腐食：近接目視
- 2) き裂・破断：近接目視，打音
- 3) ゆるみ・脱落：近接目視，打音，触診
- 4) ボルト類：近接目視，打音，触診

判定区分は次のとおりである。

無：将来の被害リスクが拡大する危険性が無い場合

B：応急措置にて当面のリスクが忌避できた場合

C：応急措置を試みたもののその目的が達成できなかった場合⇒措置計画策定

D：異常は無いものの将来の被害リスクが予測される場合

未：点検が実施できなかった場合⇒点検計画策定

(4) 橋梁定期点検要領（国管理）⁵⁾ 平成 26 年 6 月

国土交通省，内閣府沖縄総合事務局が管理する一般国道の橋梁の定期点検を対象とした定期点検要領（案）である。道路法の道路における橋梁を対象とした定期点検要領である。本要領の適用範囲は「支間 2.0m以上の道路橋」と明示された（横断歩道橋定期点検要領とシェッド，大型カルバート等定期点検要領が同時に通知された）。定期点検の目的として，損傷状況の把握，対策区分の判定に加えて，健全性の診断を行うこととされている。

定期点検は，供用開始後 2 年以内に初回を行い，2 回目以降は，5 年に 1 回の頻度で行うことを基本としている。また，定期点検は，近接目視により行うことを基本とし，必要に応じて触診や打音等の非破壊検査などを併用して行うこととされている。

対策区分は 7 段階から 9 段階区分になり，予防保全の観念が明示された。

A：損傷が認められないか，損傷が軽微で補修を行う必要がない。

B：状況に応じて補修を行う必要がある。

C1：予防保全の観点から，速やかに補修等を行う必要がある。

C2：橋梁構造の安全性の観点から，速やかに補修等を行う必要がある。

E1：橋梁構造の安全性の観点から，緊急対応の必要がある。

E2：その他，緊急対応の必要がある。

M：維持工事に対応する必要がある。

S1：詳細調査の必要がある。

S2：追跡調査の必要がある。

なお，主要部材について C2 又は E1 の判定を行った場合は，対策として補修もしくは更新が必要かを併せて判定することになっている。

健全性の診断では，部材単位の診断を行い，その主要な部材に着目してもっとも厳しい評価を橋単位の診断とすることができる。健全性の判定区分は下記の 4 段階区分とする。

I 健全：道路橋の機能に支障が生じていない状態⇒A，B

II 予防保全段階：道路橋の機能に支障が生じていないが，予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態。⇒C1，M

Ⅲ 早期措置段階：道路橋の機能に支障が生じる可能性があり，早期に措置を講ずべき状態．⇒C2

Ⅳ 緊急措置段階：道路橋の機能に支障が生じている，又は生じる可能性が著しく高く，緊急に措置を講ずべき状態．⇒E1, E2

(5) 道路橋定期点検要領（技術的助言）⁶⁾ 平成 26 年 6 月

本要領は，道路法（昭和 27 年法律第 180 号）第 2 条第 1 項に規定する道路における橋長 2.0m 以上の橋，高架の道路等(以下「道路橋」という)の定期点検に適用する。道路法施行規則第 4 条の 5 の 2 の規定に基づいて行う点検について，最小限の方法，記録項目を具体的に記したものである。国交省版との相違点として，適用範囲が「橋長 2.0m 以上の道路橋」となっている。また，定期点検の頻度についても 5 年に 1 回の頻度とあるだけで，直轄橋梁における初回点検は省かれている。

定期点検は，近接目視により行うことを基本としており，必要に応じて触診や打音等の非破壊検査等を併用して行うことと規定されている。

点検体制は，橋梁検査員，橋梁点検員，点検補助員等の名称は無いものの定期点検を行う者の要件を「道路橋の定期点検を適正に行うために必要な知識及び技能を有する者がこれを行うとし，道路橋に関する相応の資格または相当の実務経験を有すること，道路橋の設計，施工，管理に関する相当の専門知識を有すること，道路橋の点検に関する相当の技術と実務経験を有すること」と明示している。損傷状況の把握，対策区分の判定，健全性の診断は国交省版と同じ内容である。

本要領では，健全性の診断に加えて「道路の効率的な維持及び修繕が図られるよう，必要な措置を講ずる。」とある。具体的には，対策（補修・補強，撤去），定期的あるいは常時の監視，通行規制・通行止め等の措置を講ずることになる。さらに記録では，定期点検後に，補修・補強等の措置を行った場合には，健全性診断を改めて行い，記録に反映させる必要がある。

本要領では，自治体管理の橋梁の諸元と部材単位の診断結果，道路橋毎の診断結果，全景写真，損傷状況の写真を記載した点検記録の作成・保存が求められている。これにより，国道，都道府県道，市町村道に架かる橋梁に対し同一の基準による 4 段階評価でその健全性を評価できるようになった。

一方，自治体を実施する必要がある管理橋梁の長寿命化修繕計画の策定や計画の見直し及び精度向上のために必要な点検情報の記録方法については明記されていない。そのため，管理者である自治体がこれまで実施してきた橋梁点検と平成 26 年版橋梁定期点検要領を参照しながら独自に点検項目や損傷程度の評価，対策区分等を策定していく必要がある。

(6) 道路構造物の点検要領（阪神高速道路）⁷⁾ 平成 23 年 12 月

高速道路会社の事例として阪神高速道路株式会社の点検要領について概観する。高速道路会社は従前から点検・維持管理を組織的に実施しており，点検結果のデータの蓄積もあるため管理構造物の特徴に応じた点検項目・判定基準が策定されている。

本要領では，阪神高速道路を構成する本体構造物，付属構造物および施設を対象に初期

点検、日常点検、定期点検、臨時点検を規定している。

1) 点検の目的

定期点検は、長期点検計画に基づき、一定の期間ごとに構造物に接近して行う点検であり、機能低下の原因となる損傷を早期に発見し、構造物の損傷度やその影響度を把握するとともに、対策の要否やその内容を判断するための資料を得ることと、補修あるいは補修工事の計画策定を行うことを目的としている。

2) 点検の方法

点検の方法は、すべての構造物に接近して行うことを原則とし、必要に応じてたたきおよび簡易な計測を実施することとしている。また、本要領には、構造物に接近することを最大限に活かすため、点検において発見された損傷のうち、点検時にその応急措置が可能なものについては、点検と同時に実施することを規定している。具体的に実施している作業内容は、鋼材腐食片の除去、簡易塗装、ボルトの緩みに対する増締めなどである。

3) 点検項目

鋼構造物の点検項目は、鋼桁および鋼製橋脚、耐候性橋梁（防食）、その他の構造物に分けて規定している。例として、鋼桁および鋼製橋脚の点検項目を示すと以下の9項目である。

- ① 部材の損傷（われ、曲がり、ひずみ）
- ② 溶接部のわれ
- ③ 高力ボルトの欠損、折損およびゆるみ
- ④ 異常音
- ⑤ 滞水および漏水
- ⑥ さびおよび腐食
- ⑦ 塗膜の状態
- ⑧ 桁の遊間の良否
- ⑨ その他の損傷

4) 点検結果の判定

点検結果の判定には、損傷の程度およびその影響度を総合的に評価し判定する1次判定（表1.1）と設備数量が多く主要な構造物である桁、橋脚、はり上構造物、床版、高欄・水切り（以下、点検5工種）に限り実施する2次判定がある。

表 1.1 1次判定

判定区分		損傷状況
S	S1	機能低下が著しく、道路構造物の安全性から緊急に対応の必要がある場合
	S2	第三者への影響があると考えられ、緊急に対策の必要がある場合
A		機能低下があり、対策の必要がある場合
B		損傷の状態を観察する必要がある場合
C		損傷が軽微である場合
OK		上記以外の場合

本要領の1次判定は、損傷を単体で捉えた場合の対策の要否を判定している。したがって、損傷の原因や損傷している部材や部位の重要度の如何によっては、構造物への影響度を必ずしも合理的に評価できていない場合もあると考え、点検5工種については2次判定を行うこととしている。2次判定では、1次判定でAランクと判断した損傷について、下記に示す進行性と冗長性の定義に従い、それぞれ大・中・小の3段階に評価し、その評価結果の組み合わせによる健全度判定を基本としている（図1.1、表1.2）。

進行性：部材が破断等によって何時機能を失う状態になるか、また、それが通常の点検周期で発見でき、適切な措置をとっていく余裕のある早さで進行するか否かを評価する。

冗長性：発見された損傷が進行し、部材が破断（機能喪失）状態に達したとき、構造物全体が崩壊等、構造物としての機能を失う状態になるか否かを評価する。

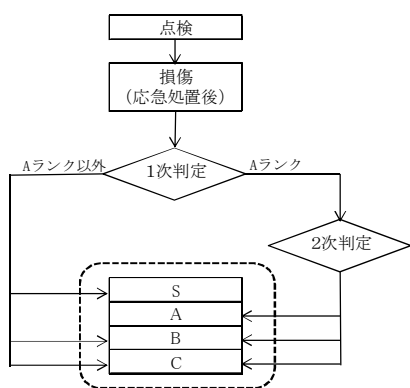


図 1.1 点検判定の考え方（点検5工種）

表 1.2 点検2次判定要領

点検1次判定	点検2次判定				
S	S				
A	冗長性の評価	小	中	大	
	進行性の評価	大	A	A	B
	中	A	B	B	
	小	B	B	C	
B	B				
C	C				

5) 対策判定

点検判定の結果「対策の要あり」と判定した損傷については、損傷の集中性や予防保全の必要性、中長期的な対策計画などを判断し講ずるべき対策として、表1.3に示す「個別補修」、「計画補修」、「点検強化」、「経過観察」の4つに区分している。

表 1.3 対策の区分

対策区分	対策の名称	対策の内容
T 1	個別補修	耐久性、使用性、機能性の回復や向上、第三者影響度の軽減ならびに部材や構造物の剛性などの力学的性能の回復および向上のためにとられる対策。損傷の状況から速やかな対策が望まれるもの、また速やかな補修を行うことが経済的であるものを対象。なお、損傷の状況に応じて、永久補修、応急補修の対応を選択する。
T 2	計画補修	耐久性、使用性、機能性の回復や向上、第三者影響度の軽減ならびに部材や構造物の剛性などの力学的性能の回復および向上のためにとられる対策。他の中長期的な対策計画と併せた対策により、効率的に性能の回復が図れるものを対象。
T 3	点検強化	点検項目などの追加により、損傷の進行状況を慎重に観察する対策。
T 4	経過観察	軽微な損傷など補修や点検強化を実施しない場合にとられる対策であり、通常の点検体制の中で損傷の進行状況を観察していくもの。

1.3 その他の点検要領

その他の鋼構造物として鉄道橋、港湾構造物及び河川構造物に関する点検要領について概観する。

(1) 鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）鋼・合成構造物⁸⁾ 平成 19 年 1 月

鉄道土木構造物の維持管理の方法が初めて体系化された指針は、昭和 49 年に国鉄により作成された「土木建造物の取換標準」とされている。以降、国鉄末期の昭和 62 年 3 月に取換標準の改定板として発刊された「建造物保守管理の標準・同解説」を経て、国鉄の民営分割後においても、JR 各社等ではこれら標準で示された考え方にに基づき維持管理業務が行われてきた。

一方、平成 11 年に相次いで生じた鉄道トンネルのコンクリート剥落問題を契機に、構造物の維持管理の重要性が再認識され、より適切な維持管理が可能となる検査周期やその方法などを取りまとめた結果、平成 19 年 1 月に国交省鉄道局長から「鉄道構造物等維持管理標準」が通達され、現在、国内のすべての鉄道事業者が本標準を参考（解釈基準）として実施基準を届け出た上で維持管理を行っている。

本標準には、

- 1) 構造物に対する要求性能を考慮し、維持管理計画を策定することを原則とする。
- 2) 構造物の供用中は、定期的に検査を行うほか、必要に応じて詳細な検査を行う。
- 3) 検査の結果、健全度を考慮して、必要な措置を講じる。
- 4) 構造物の維持管理において必要となる事項について、適切な方法で記録する。

ことがうたわれている。構造物の要求性能としては安全性が必須である他、必要に応じて使用性や復旧性を設定するものとされている。道路橋の点検に相当する検査は「構造物の変状やその可能性を早期に発見し、構造物の性能を的確に把握するために行うもの」とされ、初回検査（供用開始前、改築・取換え後に実施）、全般検査（通常・特別）、個別検査および随時検査に区分される。

全般検査の調査方法は目視を基本としており、初回検査から 2 年ごとにおこなわれる。調査項目は、構造物の特性と周辺の状況に応じて設定するものとされ、例として以下の 13 項目が挙げられるとともに、構造種別毎に主な目視個所が例示されている。

- 1) 塗膜の劣化および腐食の状態
- 2) 耐候性鋼材の保護性錆の生成状態
- 3) 建築限界支障の有無
- 4) 列車通過時の橋桁の振動状態
- 5) 支承部の変状
- 6) リベットおよびボルトの変状
- 7) 溶接部および母材の変状
- 8) 補修・補強箇所の再変状
- 9) 衝撃によって疲労き裂が生じやすい個所
- 10) 排水設備の状態

- 11) 歩道および防音工等付帯物の変状
- 12) 周辺環境に与える影響
- 13) 下部構造の変状

性能の確認は健全度の判定により行うものとされ、健全度の判定区分は次の6種類がある。

- AA：安全性を脅かす変状等があり緊急に措置を必要とするもの
- A1：進行している変状等があり構造物の性能が低下しつつあるもの等
- A2：変状等があり、将来それが構造物の性能を低下させるおそれのあるもの
- B：将来、健全度Aになるおそれがある変状等があるもの
- C：軽微な変状等があるもの
- S：健全なもの

なお、全般検査における健全度の判定は、変状の種類・程度および進行性等に関する調査の結果に基づき総合的に行うものとされ、特に早急な措置が必要な健全度AAについてののみ、限界き裂長等を根拠に数値で判断基準が示される一方、健全度Aと判定された構造物は、個別検査を実施するものとして、A1,A2等の分類は全般検査では行わない。

個別検査は、全般検査等で健全度Aと判定した変状に対して、状態を的確に把握し、変状原因の推定と変状の予測を行い、構造物の性能項目を照査するとともに、これらの結果に基づき総合的により精度の高い健全度の判定を行うことを目的としておこなわれることが多いが、腐食した構造物の耐荷性能等、健全度B～Sであっても事前に変状を予測し措置する予防保全を目的とした個別検査が行われることもある。

(2) 港湾の施設の維持管理技術マニュアル⁹⁾ 平成19年10月

港湾の施設の技術上の基準に基づいて実施する港湾の施設（水域施設、外郭施設、係留施設及び臨港交通施設）の維持管理に適用される。

点検診断の種類としては、初回点検、日常点検、定期点検診断及び臨時点検診断がある。定期点検診断は、日常点検で把握し難い構造物あるいは部材の細部を含めて、変状の有無や程度の点検を部材の性能把握を目的に行う。

定期点検診断には、海面より上の部位・部材を対象として主として目視調査による簡易的な一般定期点検診断と、目視が困難な部位・部材の点検診断および変状の原因や進行速度などを把握するための詳細定期点検診断があり、その頻度は、一般定期点検診断は1～2年に1回、詳細定期点検診断は、対象施設によって多少異なるが、新規供用して5年以内に1回、その10年後に2回目、供用20年後に3回目を実施する。

一般定期点検診断の対象施設は、護岸・堤防、重力式係船岸、矢板式係船岸、栈橋、浮栈橋、道路、橋梁と多く、これらの各施設における鋼構造物に関する主な点検方法と点検項目は、表1.4に示すとおりである。

表 1.4 点検方法と点検項目

点検方法	点検箇所	点検項目
目 視	排水設備	排水設備の破損, グレーチングの変形, 腐食
	鋼矢板・鋼管杭	鋼矢板の腐食, き裂, 損傷
		被覆防食工
	係船岸	本体の損傷, 塗装
	防舷材	本体の損傷, 破損, 取付金具の状態
	はしご	本体の損傷, 塗装, 腐食
	車止め・安全柵	本体の損傷, 塗装, 腐食
	渡版	本体の損傷, 塗装
	ポンツーン外部 (鋼製)	鋼材の腐食, き裂, 損傷
		被覆防食工
	係留杭・係留チェーン	摩耗, 塗装, 腐食
	連絡橋・渡橋	安定性, 損傷, 腐食
	伸縮装置	ジョイント部材の状態・損傷, 排水状態
		シール材の状態・損傷, 後打ち材の剥離, 陥没, 角欠け
	高欄	高欄の損傷
	支承	支承本体の損傷, 取付状況
	鋼床版	鋼材の腐食
塗装		
鋼構造部材	部材の変形, ひび割れ	
	橋脚隅角部のき裂	
	鋼材の腐食	
電位測定	鋼矢板・鋼管杭	電気防食工
	ポンツーン外部 (鋼製)	電気防食工

一般定期点検診断の結果は、対象施設の各部位に対して(a,b,c,d)の 4 段階で劣化度評価を行い、詳細定期点検診断結果(同じく 4 段階)と併せて、施設全体の性能を (A,B,C,D) の 4 段階に総合的評価する。この時、点検項目を施設の性能、特に安全性に及ぼす影響の観点から 3 種類の評価スキーム (【1】、【2】、【3】) に分類し総合評価を行う (表 1.5 参照)。

表 1.5 評価結果の導出方法

スキーム	点検項目	評価結果			
		A	B	C	D
【1】	I類	「a が 1 個から数個の項目」があり、既に施設の性能が低下している。	「a または b が 1 個から数個の項目」があり、そのまま放置すると施設の性能が低下する恐れがある。	A,B,D 以外	すべて d のもの
【2】	II類	「a が多数を占めている項目」, 「a+b がほとんどを占めている項目」があり、既に施設の性能が低下している。	「a が数個ある項目」, 「a+b が多数を占めている項目」があり、そのまま放置すると施設の性能が低下する恐れがある。	A,B,D 以外	すべて d のもの
【3】	III類	—		D 以外	すべて d のもの

(3) 河川用ゲート設備点検・整備・更新検討マニュアル（案）^{10）} 平成 20 年 3 月

河川管理施設として設置されている河川用ゲート施設・設備の点検・整備・更新に適用され、対象構造物として、本線を横断する構造物として堰及び分派水門、堤防の一部を構成する構造物として水門、樋門がある。

点検の種類は、定期点検、運転時点検及び臨時点検があり、定期点検は、管理運転点検（原則として定期的に毎月 1 回）、月点検（管理運転点検が困難な設備において、原則として月 1 回）、年点検（毎年 1 回出水期の前に実施）に分け、専門技術者により実施される。

管理運転点検及び月点検では、目視による外観の異常の有無等の確認が行われるが、年点検では、目視、触診、聴診等のみならず各種計測による傾向管理を実施し、かつ事後保全対応項目における不具合を確実に検知し、さらに点検記録を分析することにより、数年先の対応（整備予測）を可能としている。

河川用ゲート設備の点検項目は多岐にわたる。以下に鋼構造に関する点検項目・内容の一例を表 1.6 に示す。

表 1.6 ゲートの点検項目・点検内容

装置区分	点検項目	点検内容
扉体全般	塗膜	損傷, 劣化
扉体	構造全体	振動, 異常音, 片吊り
	スンプレート	変形, 損傷, 板厚の減少, 腐食(孔食), 溶接部の割れ
	主桁, 補助桁	ゆるみ, 脱落, 損傷, 腐食(孔食)
	ボルト, ナット	
	リベット	
支承部	主ローラー, 軸, 軸受	摩耗, 損傷, 腐食(孔食), 給油状態, 回転状況
	補助ローラー, 軸, 軸受	

上記の点検項目と内容における損傷の有無を点検記録票(チェックシート)にまとめ、点検結果を総合的に判断して、点検結果総括表を作成し、不良・不具合に対する処置として、以下の処理ランク(緊急度)に区分する。

A：早急な処置を実施する。

B：なるべく早い処置（2，3年以内）の実施を検討する。

C：状況の推移を観察し処置の実施を検討する。

また、これら「A・B・C」の判断を、「○・△・×」の健全度評価に置換え、点検結果を効率的に取り込み、維持更新の判断基準への適用を図る。

1.4 長寿命化に向けて

約 100 年前の大正三年（1914 年）に関場茂樹¹¹⁾により発刊された「標準橋梁仕様書」¹²⁾には「第六章 既設橋梁の検査」として 18 頁にわたり記述がある。この仕様書は鉄道橋、公道橋、電気鉄道橋を対象としており、そこには、管理責任者が実施する検査には毎年 1 回の小検査、5 年目の大検査と耐荷検査の 3 種類あることが記述されている。さらに橋梁台帳に記載すべき項目が事細かに記載されており、橋梁台帳と検査報告書の結果から加工修理あるいは新橋架設をなすべし、とある。小検査の検査項目は橋床、主桁、塗料、橋台・橋脚、支承面の高さ（下部工の沈下の有無）の 5 項目に大別されており、主桁ではき裂変形あるいは腐食の有無、支承部は土砂塵埃なく自由に正しく働き得ること、とある。5 年に一度の大検査では、塗装塗替、海岸部や工業地帯での検査間隔の短縮について記述があり、検査項目は小検査で実施する検査項目に加え連結部のリベットの全量打音検査を実施する、とある。

このように、既に 100 年前から維持管理のための点検の必要性が説かれていたが、技術者の不足、予算などの種々の制約や問題等によって、維持管理が十分に実施されていないものがあるのが現状である。近年は、「鋼構造物を安全に利用できる」という情報を得ることに対して高い社会的価値を見出しつつあることから、種々の点検要領を概観し鋼構造物の長寿命化に向けての課題を整理する。

(1) 点検技術者の資質の確保

点検要領やマニュアルを使いこなせることはもとより、基本的な設計・施工・維持管理に関する技術や経験を有し、マニュアル化の弊害を乗り越え得る人材を育成していく必要がある。一方

で、点検対象となる橋梁の構造形式による分別ごとに対応した点検技術者のあり方についても考える必要がある。たとえば鉄道橋、都市高速道路橋、長大橋など特徴的な橋梁群、ケーブル系橋梁群、アーチ系橋梁群、橋長の短い鋼桁橋の橋梁群など専門性の階層に分別することなどが考えられる。

(2) 点検の高度化・効率化

鋼道路橋の定期点検では腐食、き裂、ゆるみ・脱落、破断、防食機能の劣化等に対し、近接目視点検することを基本としている。現状では、肉眼による近接目視で点検を実施しているが、見えない箇所や非常に見づらい箇所に対する検査技術の高度化が必要である。また、各種カメラを用いた画像処理技術によって、肉眼による目視点検と同等の性能を持つ点検技術の開発などによる点検の信頼性の向上、省力化・効率化についても求められている。

(3) 建造時資料の確保

定期点検によって構造物の現状を把握することにより、健全性を評価・診断して将来予測を行い、補強・補修などの措置を予防的に講ずることで対象となる構造物の長寿命化が図られる。そのためには、建造時の資料の調査が非常に重要である。橋梁諸元、建造年、設計図、設計計算書、施工計画書等を把握することにより、鋼構造物の設計思想や製造方法、架設工法、架設時の精度管理方針を知ることは、予防保全によるメンテナンスサイクルを回す際の有力な情報元となる。さらに、初回点検結果、点検履歴、補修履歴の情報も蓄積することで将来予測の精度向上が図られるであろう。

(4) 未知の損傷に対する対応

現在の我々が知る事の無い未知の疲労損傷が日々進行している可能性があり得る。また、補修用の防食工法が種々開発され実用化されているが、その成否が実際の現場で判明するまでの期間は未定である。これらのことから、例示されている点検項目に対して近接目視するだけでなく、常に新たな知見を求める姿勢で鋼構造物に対峙し、近接と俯瞰、両方の目を持って定期点検を実施する必要がある。そして、知りえた新たな知見をすばやく反映できる設計や維持管理基準、点検要領の運用が求められる。

(5) 自治体管理の橋梁への対応

高速道路会社が管理する橋梁、鉄道橋など、収益を生み出すことができる鋼構造物は、リスク管理の観点から合理的に長寿命化に必要な人的、経済的、技術的投資を受けることができる。また、直轄国道の道路橋はその重要性が非常に高いため、必要十分な投資を行う合理性がある。一方、地方自治体が管理する道路橋では、橋梁規模や交通量、社会的重要性が大きく異なる。そして、官・民とも経験と技術力の不足、人材の不足、定期点検の発注形態、膨大なストック数などの問題がある中での長寿命化に必要な定期点検を考える必要がある。

具体的には、鋼構造物の長寿命化における素地整備として、一般市民への啓蒙と参加型プロジェクトの推進、地域に根差す官・民技術者の技術力向上のための再教育を実施し自治体管理の一般的な橋梁の定期点検を地域で実施する態勢を整える。使用状況や橋梁形式、維持管理レベルに対応した点検従事者の要件の階層化等の実情に合わせた工夫が考えられる。また、定期点検の実施にあたり、その一括発注や点検結果のキャリブレーションなどの技術水準の保証を担う組織の設立による広域的なサポートも考えられる。

【参考文献】

- 1) 西川和廣：社会資本ストックの戦略的維持管理とは何か，国土技術政策総合研究所資料 No.482,pp.7-22,2008.12.
- 2)国土交通省：橋梁定期点検要領（案），2004.3.
- 3)国土交通省，国土技術政策総合研究所：道路橋に関する基礎データ収集要領（案），2007.5.
- 4)国土交通省道路局：総点検実施要領（案）【橋梁編】，2013.2.
- 5)国土交通省道路局国道・防災課：橋梁定期点検要領（国管理），2014.6.
- 6)国土交通省道路局：道路橋定期点検要領（技術的助言），2014.6.
- 7)阪神高速道路株式会社：道路構造物の点検要領,2005.10.
- 8)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）鋼・合成構造物,2007.1.
- 9) 沿岸技術研究センター：港湾の施設の維持管理技術マニュアル,2007.10.
- 10)国土交通省総合政策局建設施工企画課，河川局治水課：河川用ゲート設備点検・整備・更新検討マニュアル（案），2008.3.
- 11)土木学会鋼構造委員会 100周年記念出版特別委員会：100年橋梁，土木学会,pp.54-61,2014.11.
- 12)関場茂樹：標準橋梁仕様書，丸善株式会社，pp.105-121,1914.9.

2. 自治体の点検精度確認調査

橋梁の定期点検における近接目視を主体とした調査については、現状においては数多くある対象構造物に対して、複数の点検技術者が個別に点検を実施した場合に、ある程度のばらつきを有しているものと想定される。

点検者の点検結果の精度等については、アメリカ合衆国 FHWA において 2001 年 6 月に「Reliability of Visual Inspection for Highway Bridges : FHWA-RD-01-020」が公表されており、その中で目視外観調査の精度や信頼性について、多方面からの分析が行われている。当該資料は、アメリカ政府の公認点検員が行っている目視外観調査についての報告であり、我が国のように必ずしも公的機関で認証された点検員が調査を行っていない現状から、多くの課題があるものと推察される。そこで、学術的見地から、現状行われている目視点検の精度と信頼性について調査を行い、点検の精度を明らかにし、点検を担う人材の育成や資格制度の必要性を検討することが、構造物の長寿命化を図る上で、重要であると考え点検実態の調査・分析を行った。

2.1 富山市の事例

2.1.1 富山市の橋梁点検の当時（2013 年）の状況

富山市では、約 2200 橋の橋梁を管理し、このうち、橋長 15m 以上のものは 224 橋、2m 以上 15m 未満のものは 1980 橋となっており、大多数は橋長 2m 以下の橋梁である。

橋長 15m 以上の橋梁に対して、平成 19 年から平成 23 年度の 5 ヶ年をかけて、富山県土木部が国の「橋梁定期点検要領（案）平成 16 年 3 月」に準じて作成した「富山県橋梁点検マニュアル（案）平成 18 年 6 月」¹⁾を使用して詳細点検を実施した。一方、橋長が 2m 以上 15m 未満のものは、日常のパトロールで路面管理を行なう程度であり、詳細点検は未実施の状況であった。

なお、損傷等級の判定区分は、径間ごとの部材単位で実施し、以下の 5 段階の評価が行われた。

A：損傷が特に認められない

B：損傷が小さい

C：損傷がある

D：損傷が大きい

E：損傷が非常に大きい

2.1.2 対象橋梁

詳細点検が実施された橋梁のうち 40 橋を抽出し、当小委員会の委員が手分けして精度確認調査を行った。対象とした橋梁の竣工年のヒストグラムと橋梁種別の割合を図 2.1、図 2.2 に示す。竣工年の平均は 1975 年となり、構造形式としては、鋼単純 I 桁、RCT 桁、PCT 桁が多く、RC ゲルバー橋、アーチ橋も含まれている。精度確認調査は、2013 年 6 月 6 日から 6 月 8 日にかけて実施した。

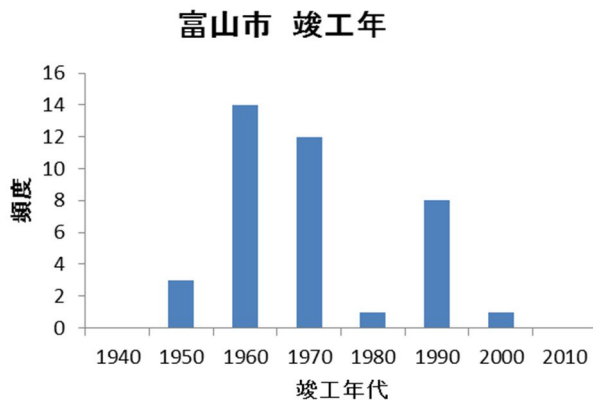


図 2.1 竣工年代（富山市）

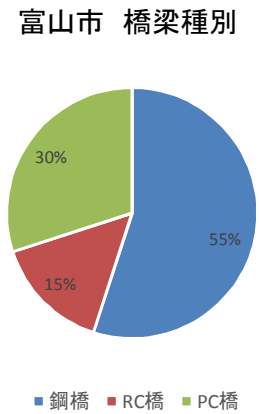


図 2.2 橋梁種別（富山市）

2.1.3 再点検結果

富山市が実施した点検において損傷等級 B～E と損傷判定された箇所に対し、当小委員会の委員による精度確認調査を行なった結果、損傷等級 B～E の判定結果が当初と同じように評価された箇所と、当初と異なる評価となった箇所があり、その結果を図 2.3 に示す。精度確認調査により損傷を評価された箇所数は 405 箇所であった。そのうち、富山市の定期点検で適正に評価されていたのは 321 箇所であり、全体の約 2 割にあたる残り 84 箇所については損傷の判定が異なることとなった。これは、橋梁点検時に損傷を見落とししたことや、損傷の評価時に、損傷等級の評価に間違いがあったものと推測された。

橋梁毎に精度確認調査による評価が当初と異なる箇所数を分子、精度確認調査結果による損傷箇所数を分母とする数値を計算し、それを富山市の定期点検の誤差と定義した。誤差の分布を図 2.4 に示す。誤差の平均値は 23.5% であるが、全体の 35% にあたる 14 橋の橋梁が 50% 以上の誤差を有する定期点検結果であったことを示している。

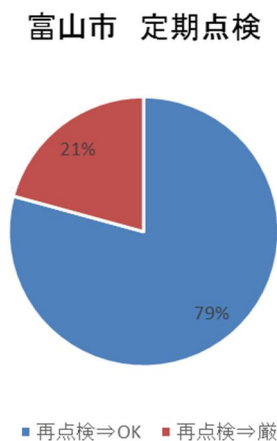


図 2.3 定期点検の点検誤差

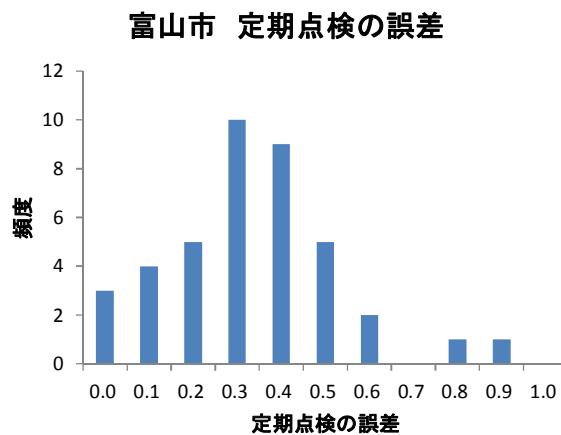


図 2.4 定期点検の誤差分布

定期点検の誤差に関して、床版、主構造、横桁等、支承、支承部モルタル、下部工躯体、下部工基礎、高欄、地覆、舗装、伸縮に細分したグラフを図 2.5 に示す。これによると橋梁の上部構造に誤差が集中していることがわかる。床版、主構造、横桁等、支承、支承部モルタルの 5 項目で集計すると、36% の箇所で見落とし、もしくは損傷評価の間違いがあったことになる。

富山市 定期点検の誤差件数

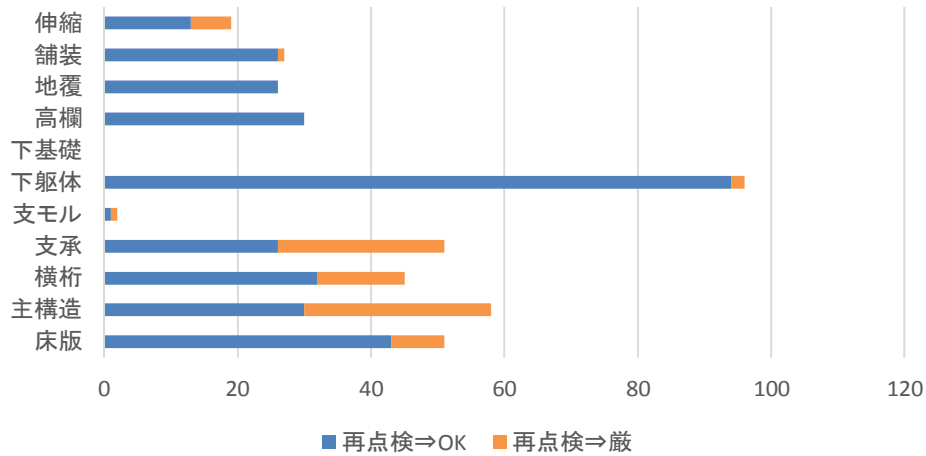


図 2.5 定期点検における部位別の点検誤差（富山市）

2.1.4 分析結果

富山市では、橋梁台帳、橋梁一般図が完備されており既存資料の保管状態は比較的良好であると考えられる。一方、定期点検の精度は低く、長寿命化にとって危険側に 20～35%の誤差が存在することが明らかになった。部位別の誤差件数として主構造や横桁などの上部工における結果について、当初と異なる評価結果が多いことから、十分な近接目視が実施できていなかった可能性と点検技術者の知識・経験不足が考えられる。

橋の長寿命化に係わるメンテナンスサイクルに必要な重要なデータを取得するための定期点検において、誤差を多分に含んだ点検結果が報告されている実態が分かった。本来であれば点検成果の受領時に適正なチェックが入るべきであったが、発注者・受注者ともに維持管理に関する取組態勢が十分できていなかったのではないかと推察する。維持管理では、現場で実際に橋梁を診る経験がなにより重要である。技術力の向上はもちろんであるが、発注者も現場に通い詰め、提出される点検成果を適正に評価できる観察眼を習得するなどの対策が今後は必要であろう。

(1) 事例 八田橋

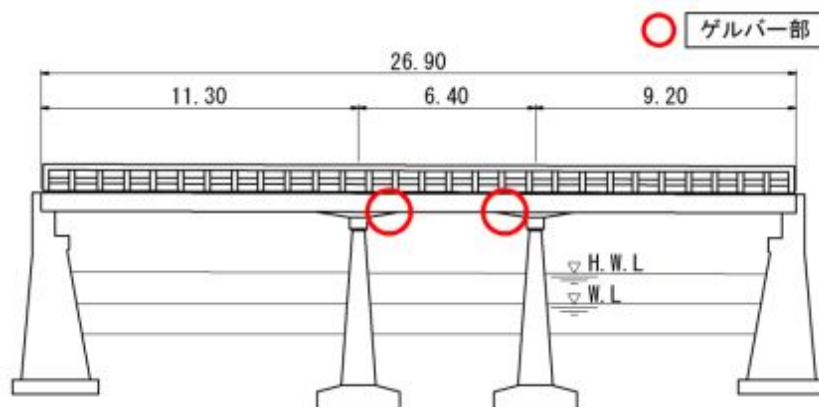


図 2.6 橋梁一般図

- ①前回点検時期 : 2008 年
- ②適用点検基準 : 富山県橋梁点検マニュアル(案) 平成 18 年 6 月
- ③前回点検種別 : 詳細点検
- ④委員会点検方法 : 橋梁点検車を使用した点検
- ⑤委員会点検結果

点検前に小委員会に貸与された 2008 年実施の点検調書に記載された橋梁台帳の構造図によると図 2.6 に示すとおり 3 径間連続桁に見えるが、小委員会が点検を行った結果、中央径間部はゲルバー桁の吊り桁構造であることが明らかになった。ライトレール用の橋梁の橋梁台帳に記載されている構造図では、中央径間が 10m となっているため、図 2.6 の側面図(支間長 6.4m と記載)は橋脚位置ではなく路面の伸縮装置の位置を元に作図された可能性が高い。小委員会では、損傷が生じやすく、かつ構造的な弱点となるゲルバー桁のヒンジ部に着目した点検を実施した結果、ヒンジ部付近には写真 2.1 に示すとおり、コンクリートの剥離・鉄筋露出などの多くの損傷が見られた。2008 年実施の点検調書にはゲルバーヒンジ部の点検結果の記録が無く、構造の見落とし、もしくは点検結果の記録漏れが考えられる。八田橋の事例では、点検精度が低い原因として対象橋梁の構造形式に起因する誤差と点検技術者の知識・経験不足による誤差が考えられる。橋梁の橋面と桁下からの観察と橋梁台帳の図面を突き合わせ、橋梁の全体像を見極めた上で点検に従事する事の重要性を示す事例である。



(a)ゲルバー部側面



(b)ゲルバー部下面

写真 2.1 損傷状況(八田橋)

2.2 浜松市の事例

2.2.1 浜松市の橋梁維持管理における当時の状況

浜松市は、市町村合併の経過を経て、平成 19 年 4 月に政令指定都市となるに伴い、これまで静岡県が管理していた、国・県道及び合併した市町村道が移譲されることとなった。このとき、膨大な量の土木施設を管理する必要が生じ、財政状況や市民ニーズの多様化を踏まえながら、より効率的・効果的かつ透明性の高い土木施設の維持管理が求められることとなった。こうした背景の中、約 6 千橋という膨大な数の道路橋について、当時、既に静岡県が策定した「土木施設長寿命化計画 橋梁ガイドライン 平成 18 年 3 月」、 「土木施設長寿命化計画 橋梁点検マニュアル 平成 18 年 3 月」を基本に浜松市の実状を加味して策定した「(仮称) 浜松市土木施設長寿命

化計画橋梁点検マニュアル（案）「平成 20 年 3 月」²⁾をもとに橋梁長寿命化計画を目的とした橋梁点検を推し進めることとなった。

上述の政令指定都市になる際に、国・県道及び合併した市町村道を管轄する各管理者より引き継がれた橋梁の中には、著しく損傷が進行した橋なども含まれており、原田橋のケーブル破断（平成 24 年 3 月）のように、その後、長期にわたる交通止めを余儀なくされるほどの大規模な補修工事が必要となるような橋梁も存在した。

なお、浜松市の点検マニュアルでは、定期点検を詳細レベル 1（近接目視）、詳細レベル 2（近接もしくは遠望目視）、概略レベル（遠望目視）に分類している。詳細レベルの損傷等級の判定区分は、径間ごとの部材単位で実施し、以下の 5 段階の評価が行われた。

- A：損傷が特に認められない
- B：損傷が小さい
- C：損傷がある
- D：損傷が大きい
- E：損傷が非常に大きい

一方、概略レベルでは、代表径間に対して点検を行い「良好・軽度・重度」の 3 段階で評価する。健全度の評価では、良好を A、軽度を C、重度を E に換算し、中間をそれぞれ B、D に分類している。

2.2.2 対象橋梁

浜松市の管理する橋梁は、平成 16 年版橋梁定期点検要領に準じて定期点検（詳細レベル）が実施された橋梁と、概略点検（概略レベル）を実施した橋梁が混在している。その中から、定期点検を実施した 13 橋と概略点検を実施した 56 橋を抽出し、当小委員会の委員が手分けして全 69 橋を対象に精度確認調査を行った。対象とした橋梁の竣工年のヒストグラムと橋梁種別の割合を図 2.7、図 2.8 に示す。竣工年の平均は 1969 年となり、構造形式としては、鋼単純 I 桁、RCT 桁、PCT 桁が多く、トラス橋、RC ゲルバー橋、アーチ橋、吊橋も含まれている。精度確認調査は、2013 年 7 月 4 日～7 月 6 日にかけて実施した。

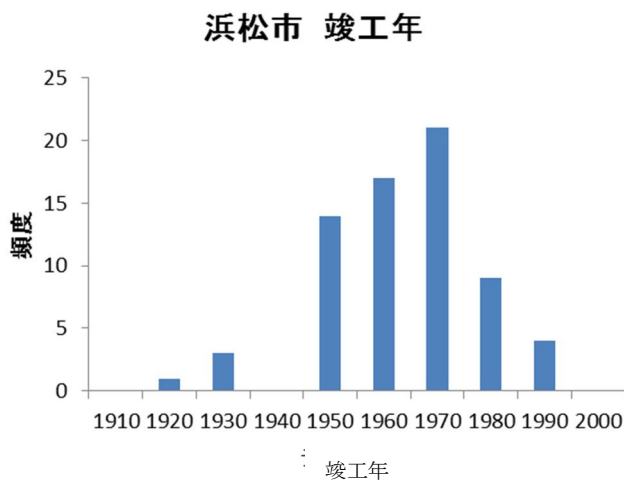


図 2.7 竣工年代（浜松市）

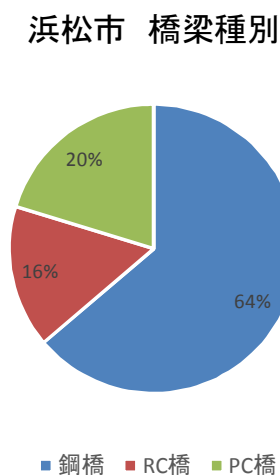


図 2.8 橋梁種別（浜松市）

(1) 精度確認調査結果（定期点検実施橋梁 13 橋）

浜松市が実施した橋梁点検において損傷等級 B～E と損傷判定された箇所に対し、当小委員会の委員による精度確認調査を行なった結果損傷等級 B～E の判定結果が当初と同じように評価された箇所と、当初と異なる評価となった箇所があり、その結果を図 2.9 に示す。精度確認調査により損傷を評価された箇所数 369 箇所であった。そのうち、浜松市の定期点検で適正に評価されていたのは 249 箇所であり、全体の約 3 割にあたる 120 箇所については損傷の判定が異なることとなった。これは、橋梁点検時に損傷を見落としたことや、損傷の評価時に、損傷等級の評価に間違いがあったものと推測された。

橋梁毎に精度確認調査による評価が当初と異なる箇所数を分子、精度確認調査結果による損傷箇所数を分母とする数値を計算し、それを浜松市の定期点検の誤差と定義した。誤差の分布を図 2.10 に示す。誤差の平均値は 34.1% であり、全体の 30% にあたる 4 橋の橋梁が 50% 以上の誤差を有する定期点検結果であったことを示している。

富山市に比べて対象橋梁数が少ないため、正確な比較は出来ないものの、富山市に比べ浜松市の定期点検は、平均的な精度が悪いと言える。

浜松市 定期点検

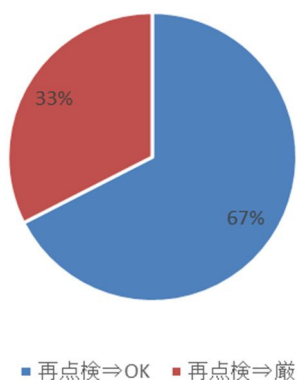


図 2.9 定期点検の点検誤差（浜松市）

浜松市 定期点検の誤差

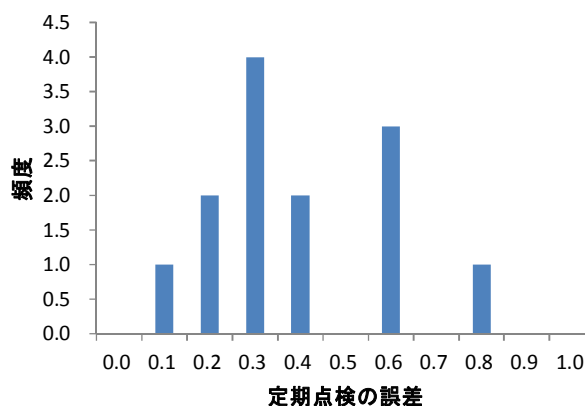


図 2.10 定期点検の誤差分布（浜松市）

定期点検の誤差に関して、床版、主構造、横桁等、支承、支承部モルタル、下部工躯体、下部工基礎、高欄、地覆、舗装、伸縮に細分したグラフを図 2.11 に示す。これによると橋梁の上部構造に誤差が集中していることがわかる。床版、主構造、横桁等、支承、支承部モルタルの 5 項目で集計すると、43% の箇所が橋梁点検時における損傷の見落とし、もしくは損傷評価の間違いがあったことになる。

浜松市 定期点検の誤差件数

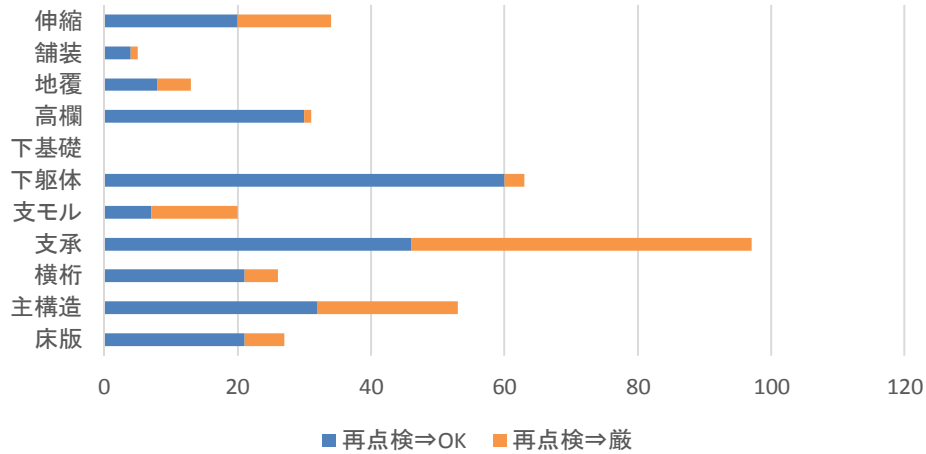


図 2.11 定期点検における部位別の点検誤差（浜松市）

2.2.3 精度確認調査結果（概略点検実施橋梁 56 橋）

浜松市が実施した橋梁点検において損傷等級 B～E と損傷判定された箇所に対し，当小委員会の委員による精度確認調査を行なった結果，損傷等級 B～E の判定結果が当初と同じように評価された箇所と，当初と異なる評価となった箇所があり，その結果を図 2.12 に示す．精度確認調査により損傷を評価された箇所数 436 箇所であった．そのうち，浜松市の概略点検で適正に評価されていたのは 190 箇所であり，全体の約 6 割にあたる残り 249 箇所については橋梁点検時における損傷の見落とし，もしくは損傷評価の間違いがあったことになる．

橋梁毎に精度確認調査による評価が当初と異なる箇所数を分子，精度確認調査結果による損傷箇所数を分母とする数値を計算し，それを浜松市の定期点検の誤差と定義した．誤差の分布を図 2.13 に示す．誤差の平均値は 61.7% であり，全体の 77% にあたる 43 橋の橋梁が 50% 以上の誤差を有する点検結果であったことを示している．

浜松市 概略点検

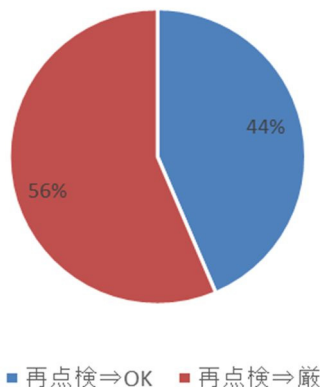


図 2.12 概略点検の点検誤差（浜松市）

浜松市 概略点検の誤差

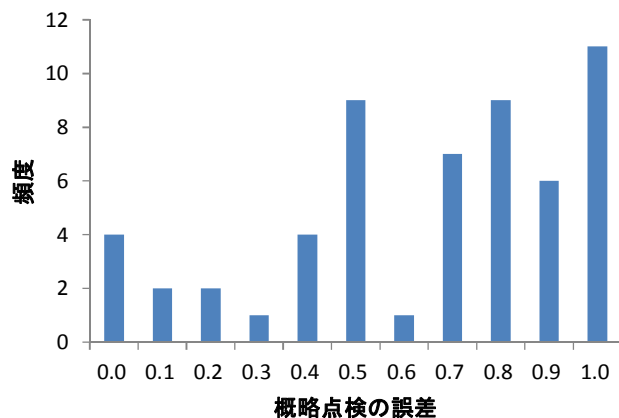


図 2.13 概略点検の誤差分布（浜松市）

概略点検の誤差に関して、床版、主構造、支承、支承部モルタル、下部工躯体、高欄、舗装、伸縮に細分したグラフを図 2.14 に示す。これによると橋梁の上部構造に誤差が集中していることがわかる。床版、主構造、支承、支承モルタルの 4 項目で集計すると、61%の箇所では橋梁点検時における損傷の見落とし、もしくは損傷評価の間違いがあったことになる。

概略点検では、遠望目視を主体としていることから、橋梁の主要部材である床版と主構造の点検誤差が大きく、定期点検に比べ非常に簡易な概略点検は、橋梁定期点検としては、不適切であると判断される。

浜松市 概略点検の誤差件数

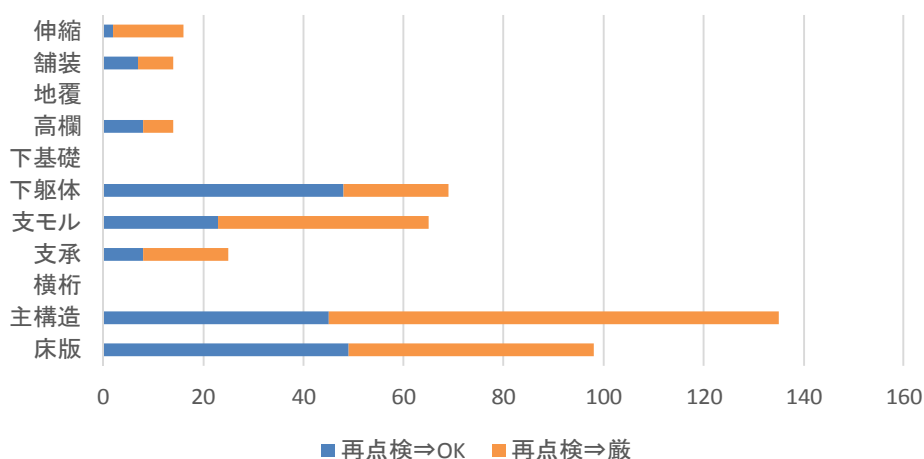


図 2.14 概略点検における部位別の点検誤差（浜松市）

2.2.4 分析結果

浜松市では、橋梁台帳、橋梁一般図が完備されており橋歴板の情報も記載されており既存資料の保管状態は比較的良好であると考えられる。一方、定期点検を実施しているものの、その精度は低く、長寿命化にとっては危険側に 34～43%の誤差が存在することが明らかになった。部位別の誤差件数として主構造と支承の点検ミスが多いことから点検技術者の知識・経験不足と遠望目視による視認性の不足が考えられる。

概略点検では危険側に 60%の誤差があり、点検結果として利用できない状況にあると言える。また、吊橋、ランガー橋、π形ラーメン橋、トラス橋の点検を概略点検（遠望目視点検）で実施しているケースがあった。橋種にかかわらず点検を画一的に実施したため、特殊な橋梁の点検に必要な着目点に対する点検がなされていなかった。少なくとも、自由記述欄に点検で把握された情報を記述すべきであるが、吊橋などのケーブル系橋梁の場合でも特に記載が無く、主索のアンカレイジ定着部の写真・記述が一切無かった。これらより、橋梁形式や構造的特徴に関する基礎的な知識に対する技術者再教育の重要性が再認識される。

定期点検、概略点検ともに、支承の機能障害に係わる捕らえ方に問題があると考えられる。橋梁設計時の境界条件を具現化する支承は非常に重要であり、鉛直反力の伝達機能の他に水平方向の境界条件と桁の回転を保障する機能がある。また、水平反力分散支承や免震支承においては耐震性能を保障するものであることを認識した上で支承の点検に取り組む必要がある。この認識の有無により浜松市の点検結果と委員会による精度確認調査結果がかけ離れることになったと考えら

れる。

また、概略レベルの点検では支承を含めすべての点検項目に対し、代表径間に対する遠望目視による点検，としていることが点検精度を低下させた要因になっている。橋の長寿命化を実施するには、すべての部材を診ることが必要不可欠であり、桁端部における近接目視は必須である。

以上のことより、長寿命化に資する情報を取得するための定期点検では、橋梁形式や構造の特徴を反映した点検内容、記録が必要であることに加え、遠望目視と近接目視の適正な適用を点検マニュアルに明記する必要がある。

(1) 事例その1 大輪橋（定期点検）

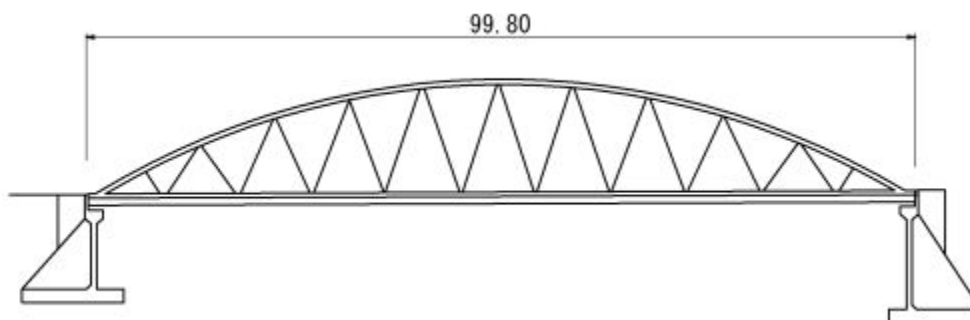


図 2.15 橋梁一般図

- ①前回点検時期 : 2008 年
- ②適用点検基準 : (仮称) 浜松市土木施設長寿命化計画 橋梁点検マニュアル (案)
平成 20 年 3 月
- ③前回点検種別 : 定期点検 (詳細レベル)
- ④委員会点検方法 : 地上目視点検
- ⑤ 委員会点検結果

大輪橋の橋梁一般図を図 2.15 に示す。大輪橋の橋梁形式は、鋼単純下路式ローゼ桁であり、2008 年に定期点検が行われており、健全な状態であると報告されていた。

小委員会が精度確認調査を行った際、写真 2.2 に示すように可動支承を有する橋台のパラペットと桁端部が衝突しており、詳細な調査も含めた対策検討が必要な橋梁であることが確認された。桁端部の衝突は、橋面から目視が行える範囲である。また、伸縮装置の櫛部分の遊間量がなくなっている状況からも、異常の予見が可能である。ここでは、点検技術者の知識、経験不足が損傷の見落としにつながったと考えられる。



(a)桁端部



(b)伸縮装置

写真 2.2 損傷状況（大輪橋）

(2) 事例その2 瀬戸橋（概略点検）

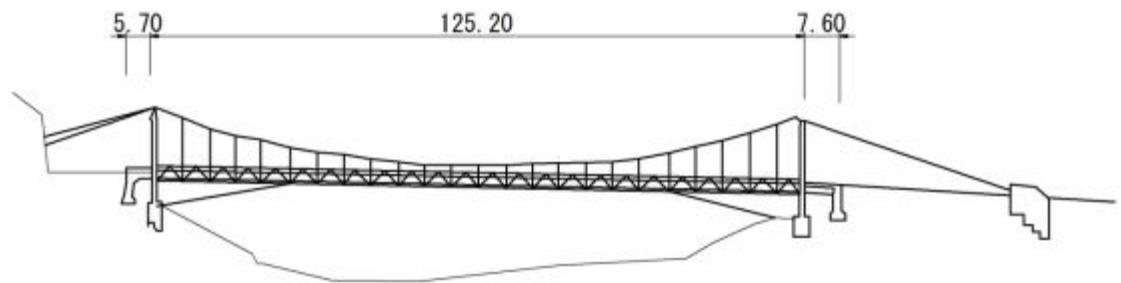


図 2.16 橋梁一般図

- ①前回点検時期 : 2008 年
- ②適用点検基準 : (仮称) 浜松市土木施設長寿命化計画 橋梁点検マニュアル (案)
平成 20 年 3 月
- ③前回点検種別 : 概略点検
- ④委員会点検方法 : 地上目視点検 (梯子使用)
- ⑥ 委員会点検結果

瀬戸橋の橋梁一般図を図 2.16 に示す。瀬戸橋の橋梁形式は吊橋であり、2008 年の点検では健全と報告されていた。小委員会の精度確認調査では概略点検レベルを想定し、双眼鏡を用いた遠望目視を行った。その結果、主径間の補剛桁を支持する支承のアンカーボルトのナットの浮きが存在することを確認した。この異常に対して、次に梯子を用いて支承部に近接した点検を行ったところ、アンカーボルトはハンマで叩くと折れ曲がるほど腐食が進行しており、点検結果に大きな差異が生じる結果となった。その時の様子を写真 2.3 に示す。

ここでは、吊橋に対し概略点検を適用することに対し問題意識を持たなかったところに根本的な問題があると考えられるが、点検結果の提出に際して点検技術者としての知識不足を指摘することができる。また、アンカーボルトに関しては点検環境に起因する視認性の不足による損傷の見落としと考えられる。



(a) 支承部



(b) 支承部拡大

写真 2.3 損傷状況（瀬戸橋）

2.3 点検精度に係わる誤差要因

浜松市の概略点検の事例では、橋の長寿命化に係わる定期点検に資する情報を取得することが困難であることが精度確認調査の結果からも確認できた。実施した時期から考えて、定期点検に対する必要性の認識、技術的知見、予算措置、点検技術者の熟練度、報告内容に対する検証体制いずれもが未成熟であり、今回の結果は不可避的なものであると考えることも出来る。このことを教訓とすべく今回実施した定期点検と精度確認調査結果の比較内容を踏まえ、誤差要因を表 2.1 に示すように分類した。

表 2.1 誤差の分類と要因

分類	要因例
1 点検技術者の知識、経験不足、倫理観の不足に起因する誤差	損傷の見落とし
	損傷判定が不適切
2 対象橋梁の構造形式に起因する誤差	特殊な着目点の欠如、イレギュラー対応の不足
3 点検環境に起因する誤差	遠望・近接のミスマッチ、視認性の不足、天候変化による変動
4 点検中の判断ミス、作業ミス、単純ミス	周辺・付加情報の不記載、転載ミス、転記ミス。

2.4 長寿命化のための点検における課題

鋼構造物の長寿命化を図るためには、現状の点検の実態を把握するために、2013年6月及び8月に富山市および浜松市において、点検精度確認調査を実施した。我が国では、橋梁定期点検の点検精度に関する調査はほとんどなく、本調査の結果から、遠望目視を用いた橋梁点検の精度に関する課題、知識・経験不足等の課題が明らかになった。その後、道路法施行規則（平成26年3月31日公布、7月1日施行）をもって、橋梁（約70万橋）・トンネル（約1万本）等は、国が定める統一的な基準により、5年に1度、近接目視による全数監視を実施することとなった。本調査に際して、富山市と浜松市は橋梁点検データ等を提供いただくとともに、フィールドの提供というかたちで、多大な協力を頂いた。その結果、道路橋の安全性に、一石を投じ、点検要領等の改定につながったことは、非常に有益であった。今回は富山市と浜松市を対象に精度確認調査を

実施したが、両市の状況は特異ではなく平均的な地方自治体の実情ではないかと考える。一般的に地方自治体の管理する橋の定期点検を考えた場合、人員不足、技術力不足、財政不足ということは周知の事実である。近接目視による定期点検要領が策定され、財政的には補助制度が整備されたが、そのため、それを実施する発注者および受注者の人員と技術力の向上が課題となる。それに加え、全国で実施された橋の長寿命化修繕計画策定時に得られた知見として、目視点検の品質確保のための対策や点検業務の発注形態、使用実態の維持管理への反映などが共通の課題として挙げられている。

以上より、自治体の点検における課題と対策案を下記に示す。

(1) 橋梁の点検・維持管理に関する要件を満たす橋梁点検技術者の養成と確保

橋梁点検技術者とともに発注者の技術力の向上も必要であり、架橋環境や交通量を勘案するなどの地域の実情に合わせた点検項目の工夫や交通規制に関する技術的判断を行うことのできる技術者の養成と確保が必要となる。

(2) 管理橋梁の分類とそれに応じた定期点検の実施（近接目視の徹底と支援）

PC床版橋など点検が容易な橋梁群、単純鋼I桁橋、RCT桁橋などの標準的な単純桁形式の橋梁群、アーチ・トラスなどの骨組構造形式の橋梁群、ケーブル系橋梁群など、管理する橋梁を橋長ではなく、構造形式ごとに分類し点検を実施する。そして、点検要領の内容や配置技術者の要件も対象橋梁群に応じたものとするなどが考えられる。橋梁点検の近接目視を徹底するために、IoTの活用による点検の支援（補助）技術の開発が望まれる。ロボット等を用いた作業については、すべてを自動化するというよりも、点検技術者を支援するもの、また、狭隘部などの点検困難箇所について、点検補助を行なうような機器の開発が必要である。

(3) 支承機能の再認識（構造的境界条件、耐震性能の保障）

支承機能については、定量的な健全度診断基準が示されていない場合が多く、状態が良好でない支承ばかりを見慣れていると判定が危険側になる恐れがある。鉛直反力の伝達はもちろんのこと、桁の回転や水平移動を可能とする性能、水平反力の分散や免震性能などについて設計時の前提条件を具現化できていることを点検する必要がある。

(4) 定期点検時の未見情報記載の義務化と解消案の策定

定期点検において近接目視が困難であった場合、その情報を点検結果に記載するとともに、近接目視を可能とする点検計画の策定もしくは代替方法による確認手段の提案を義務化することで、経験不足や倫理観の不足に起因する見落としを排除する必要がある。

(5) 点検評価を客観的に数値化できる画像処理もしくは計測システムの構築

自治体が管理する橋梁については、橋長は短いものが多いが、橋梁の数は多い。自体体では橋梁に精通した技術者を十分確保することも困難である。そのため、点検結果の精査に困難が予想される。目視点検による評価をセカンドオピニオンのように利用できるAI等を活用した評価システムの構築が望まれる。具体的には画像処理による腐食程度の評価であるとか振動計測による全体剛性の評価、支承移動量の計測による支承機能の確認などが考えられる。

(6) 定期点検と清掃、小規模補修の一括発注

定期点検により点検部位に近接する機会を捉えて、桁端部や排水装置の土砂清掃、防錆機

能低下部分へのタッチアップ塗装等の小規模補修を実施することは、予算制約の厳しい自治体が管理する橋梁にとって有効である。補助金の予算執行上の問題や登録業種の問題があるものの、点検により土砂堆積や防錆機能の低下が判明しても、その対策が実施されるまでの期間が長引くことが予測される場合の次善策として検討することも考えられる。

(7) 点検結果に基づく対策区分の判定に作用外力の実情を反映する仕組みの構築

自治体が管理する橋梁の多くは、大型車交通量がほとんどなく、乗用車や農作業車の交通が大部分を締めていると考えられる。点検結果の判定は全国的に統一された点検要領に従うものの、対策区分の判定は作用外力の実情を反映することが現実的であると考えられる。その場合においても予算的制約を要因とすることなく、あくまでも道路管理者として実情に整合した安全性を保障する技術力が必要である。

(8) データの蓄積と活用

橋梁点検結果については、多くの場合、帳票で結果の整理が行なわれている。

維持管理のデータについては、継続的に蓄積し、経年の状況がわかることが重要である。点検結果や維持管理に関するデータを効果的に蓄積する方法を決定することが必要である。CIM や i-construction 等においても省力化、効率化とした目的を含めて、3D モデルの活用などが示されている。維持管理のためのデータ保存要領などの基準の整備も必要である。

【参考文献】

- 1) 富山県土木部：富山県橋梁点検マニュアル（案）,2006.6.
- 2) 浜松市役所道路保全課：(仮称) 浜松市土木施設長寿命化計画橋梁点検マニュアル（案）,2008.3.

3. 鋼構造物の調査（詳細調査）

鋼構造物の定期点検は目視によって行われているが、点検部位、損傷の種類や状態によっては目視では損傷の検出が困難な場合や、損傷要因の究明や健全度の評価に必要な情報が得られない場合がある。このとき、非破壊検査や計測技術等を用いた詳細調査が実施され、損傷の検出精度を向上させるとともに、損傷要因の究明と損傷度の評価、および対策の立案に必要な情報を得ている。これらの非破壊検査や計測によって対象橋梁の状態把握、将来予測、対策工法が明らかになるため、より正確な長寿命化修繕計画の策定が可能となり、適切な時期に適切な対処が実施されることになる。

鋼構造物のモニタリングを考える場合、①既に損傷が発覚し経過観察状態にある構造物を一定期間モニタリングする場合、②長大橋梁等の挙動を長期的にモニタリングし定常状態を把握した上で損傷による異常を検知するための長期モニタリング、③地震や台風などの自然災害に際し、リアルタイムで鋼構造物の安全性や使用性を把握し、通行規制とその解除に係わる情報を得るためのモニタリングなどがある。

鋼構造物の長寿命化に資するモニタリングである②では、目視点検よりも客観的かつ定量的に損傷程度を知ることができる。一方、モニタリングで検出した異常の要因を解明するためには目視による調査が必要となる。そのため、モニタリングと目視点検の両者は補完しながら、長大橋梁などの社会的影響が大きい鋼構造物の損傷を正確かつ効率的に検出する使命を担うことになる。

目視による定期点検やモニタリング等によって損傷を把握した場合、損傷を反映した設計計算上の検討はもちろんであるが、実構造物による性能検証が必要もしくは有効になる場合がある。事前の性能検証を実施することで補修・補強工事の必要性やその内容についての精度が高まり、工事後の性能検証によって補修・補強工事による性能回復の効果が実証される。このため、補修・補強工事以降のより正確な長寿命化修繕計画の策定が可能となる。

本章では、損傷の定量的な把握や要因分析が必要となる場合に実施する非破壊検査、設計計算上の仮定や構造物の挙動の変状調査のためのモニタリング技術、補修・補強工事による性能回復を確認する性能検証について紹介する。

3.1 鋼構造物の非破壊検査

3.1.1 疲労き裂に対する非破壊検査技術

1950年代後半より多くの溶接鋼構造物が建設され、放射線透過試験などの非破壊検査は溶接継手の品質管理に適用されてきた。放射線透過試験などの各試験方法は日本工業規格(JIS規格)で規格化されており、表3.1に鋼構造物の溶接継手の非破壊検査に関わるJIS規格を示す。1980年代になると既設鋼構造物で疲労などの損傷が報告され、超音波探傷試験、磁粉探傷試験、および浸透探傷試験などの非破壊検査が既設鋼構造物の維持管理に適用されるようになった。既設鋼構造物の非破壊検査に関わる規格基準が未整備であるため、非破壊検査の実施にあたっては鋼構造物の品質管理で利用されているJIS規格が引用されている。

(1) 従来の非破壊検査方法と疲労き裂の検出精度

表3.1に示される各種非破壊検査における疲労き裂の検出の限界寸法およびその精度について、すみ肉溶接継手の回し溶接止端に発生する表面き裂を対象に検討された結果を表3.2に示す²⁾³⁾。

疲労き裂が面状であること、現場での安全管理および作業性から放射線透過試験は検討対象から外されることが多い。塗膜除去後の結果をみると、磁粉探傷試験による表面き裂の検出が優れており、2mm以上の長さのき裂を±1mmの精度で測定が可能である。浸透探傷試験によるき裂の検出は磁粉探傷試験に比べると劣っている。特にき裂深さが浅く開口していない場合には、浸透液の浸み込みが十分になされず、寸法推定精度も過小評価となっている。塗膜上からの試験においては、磁粉探傷試験および浸透探傷試験とも試験方法自体の信頼性が低い。渦流探傷試験は正確な寸法推定が不可能であるが、塗膜上からの粗探傷としての適用が可能である。

非破壊検査方法については表 3.1 以外の原理によるものが各方面で研究開発されつつある。非破壊検査方法の選定および採用にあたっては最新の技術動向に注意をはらうとともに、その検査方法における疲労き裂の検出精度を十分確認する必要がある。

表 3.1 鋼構造物の非破壊検査に関わる JIS 規格(日本工業規格)

試験方法	規格番号	規格の表題
外観試験	JIS Z 3090:2005	溶融溶接継手の外観試験方法
放射線透過試験	JIS Z 3104:1995	鋼溶接継手の放射線透過試験方法
超音波探傷試験	JIS Z 2344:1993	金属材料のパルス反射法による超音波探傷試験方法通則
	JIS Z 3060:2002	鋼溶接部の超音波探傷試験方法
	JIS Z 3070:1998	鋼溶接部の超音波自動探傷方法
磁粉探傷試験	JIS Z 2320-1:2007	非破壊試験－磁粉探傷試験－第 1 部：一般通則
	JIS Z 2320-2:2007	非破壊試験－磁粉探傷試験－第 2 部：検出媒体
	JIS Z 2320-3:2007	非破壊試験－磁粉探傷試験－第 3 部：装置
浸透探傷試験	JIS Z 2343-1:2001	非破壊試験－浸透探傷試験－第 1 部：一般通則：浸透探傷試験方法及び浸透探傷指示模様分類
	JIS Z 2343-2:2009	非破壊試験－浸透探傷試験－第 2 部：浸透探傷試験剤の試験
	JIS Z 2343-3:2001	非破壊試験－浸透探傷試験－第 3 部：対比試験片
	JIS Z 2343-4:2001	非破壊試験－浸透探傷試験－第 4 部：装置
渦電流探傷試験	JIS Z 2315:1991	渦流探傷装置の総合性能の測定方法
	JIS Z 2316-1:2014	非破壊試験－渦電流試験－第 1 部：一般通則
	JIS Z 2316-2:2014	非破壊試験－渦電流試験－第 2 部：渦電流試験器の特性及び検証
	JIS Z 2316-3:2014	非破壊試験－渦電流試験－第 3 部：プローブの特性及び検証
	JIS Z 2316-4:2014	非破壊試験－渦電流試験－第 4 部：システムの特性及び検証

表 3.2 各種非破壊試験のき裂検出限界寸法および精度³⁾

	き裂検出限界寸法(mm)		寸法推定精度
	塗膜上	塗膜除去後	
目視検査	4.0	8.0	ばらつき大
磁粉探傷試験	(4.0)	2.0	適正(±1mm)
浸透探傷試験	(4.0)	8.0	過小評価
超音波探傷試験	5.0	5.0	過大評価
渦流探傷試験	5.0	5.0	不可

(2) フェイズドアレイ探傷法による超音波探傷試験

構造工学委員会非破壊評価小委員会で実施されたアンケート調査⁴⁾によれば、表面き裂の検出に対して、その深さを精度良く測定することが難しいこと、また、溶接欠陥に起因する疲労き裂については検査位置の特定が難しいことが報告されている。

この問題に対して、フェイズドアレイ探傷法を用いた超音波探傷試験の適用が期待される。フェイズドアレイ探傷子は複数個の振動子からなり、超音波の送信時に各振動子の送信タイミングを電子的に制御して超音波を任意の位置に集束することができる。

鋼構造物の溶接継手における内部きずの検出精度の向上を目的に、フェイズドアレイ探傷法の適用に関わる検討が行われている^{5),6),7),8)}。図 3.1 に鋼製橋脚隅角部の溶接線交差部を対象とした検討結果を示す^{7),8)}。鋼製橋脚隅角部は、部材を構成する板組の構造から複数の溶接線が交差し溶接施工上の難易度が高く、せん断遅れによる応力集中の生じる箇所である。

従来の超音波探傷試験で用いられる探傷子は、超音波の入射角度および集束深さが固定されているため探傷子の条件と合致しなければきずの検出は困難である。これに対してフェイズドアレイ探傷法では、超音波の入射角度および集束深さが電子制御されるため従来の探傷方法と比較してきずの検出精度が向上すると考えられる。また、探傷速度も速く、探傷結果を二次元画像で表示が可能であるため、きずの位置や大きさを把握するのに有効な手法と考えられる。

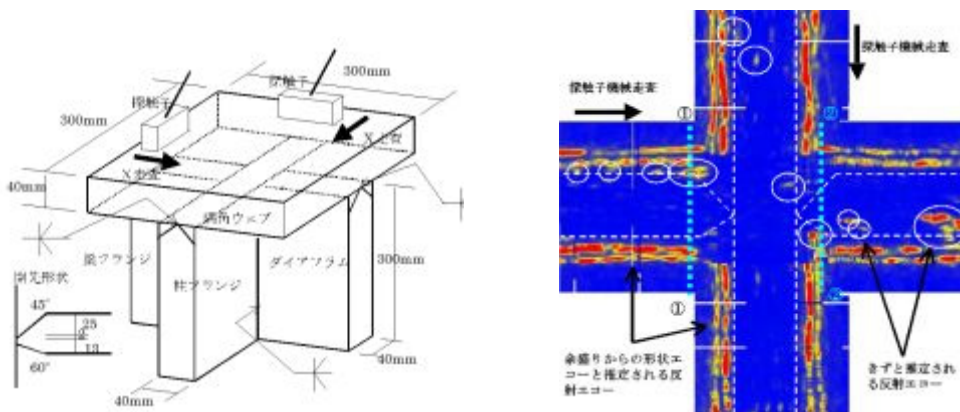


図 3.1 鋼製橋脚隅角部を対象とした検討事例^{7),8)}

(3) 鋼床版における非破壊検査

閉断面リブで補剛された鋼床版では、デッキプレートと閉断面リブの溶接継手のルート部からデッキプレートを貫通する疲労き裂が重交通路線の道路橋で報告されている。このタイプの疲労き裂は目視による検出が不可能なこと、さらに鋼床版においてはその検査範囲が広いことから、鋼床版の効率的な点検および調査手法の検討⁹⁾が行われている。

この検討では超音波探傷試験について、クリーピング探触子（90度縦波斜角探触子）と70度斜角探触子の適用性の確認試験が実施され、2つの探触子を用いた超音波探傷試験の手順ときずの評価方法が要領化されている。その超音波探傷試験による疲労き裂深さの評価手順を図3.2に示す。90度縦波斜角探触子による探傷で疲労き裂の有無を確認し、70度斜角探触子による探傷で疲労き裂の深さを推定する手順が示されている。

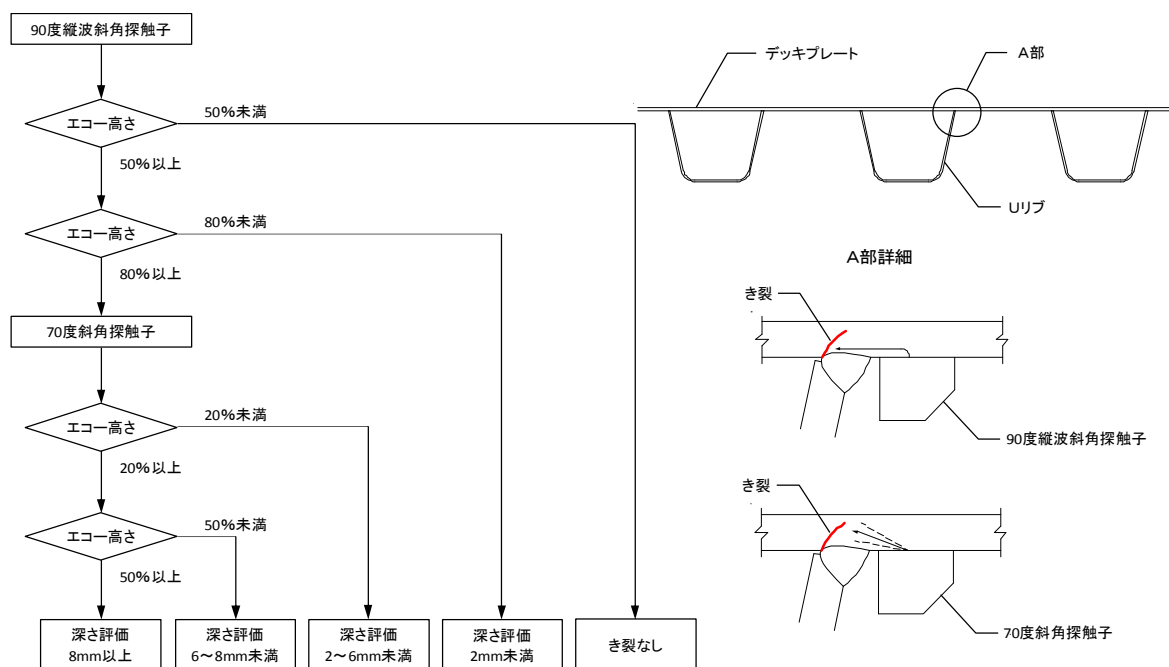


図 3.2 超音波探傷試験による疲労き裂深さの評価手順⁹⁾

また、多くの鋼床版を管理する都市高速道路では、鋼床版の舗装面の熱赤外線画像による検査、鋼床版の舗装上面からの渦流探傷試験による検査、および鋼床版の下面からフェイズドアレイ探傷法による検査の3種類の検査を組合せた複合的検査手法の開発が行われている¹⁰⁾。検査範囲の広い鋼床版に対して、3種類の検査手法を実施して疲労き裂の発生箇所を徐々に絞り込む。まず、鋼床版のデッキプレートを貫通する疲労き裂と舗装の損傷に相関があることから、赤外線により舗装面の異常箇所を抽出し、疲労き裂の発生の恐れのある箇所を絞り込む。次に、非接触で疲労き裂の検出が可能な渦流探傷を舗装上面から実施し、疲労き裂の発生位置を特定する。そして、鋼床版の下面からフェイズドアレイ探傷法を行って、疲労き裂の詳細を検査する手法である。

(4) 赤外線技術を利用した非破壊検査手法¹¹⁾

き裂などの面上のきずを有する構造物に応力が作用すると、応力集中によって、き裂先端付近の熱弾性温度変化は周辺部に比べて局部的に大きくなる。この温度変動分布を赤外線サーモグラフィにより計測し、き裂による特異な応力場を可視化することにより、き裂の検出および寸法の計測を行う。しかしながら、温度変動は赤外線計測時のノイズと同程度の微小なものであるため、ノイズを含む時系列の赤外線計測データから変動する成分のみを抽出するデータの処理技術が検討されている。図 3.3 は実橋梁における検査結果である。デッキプレートと垂直補剛材の回し溶接部に発生している疲労き裂に対して検査を実施した結果で、疲労き裂の先端部で応力集中によるコントラストが得られている。

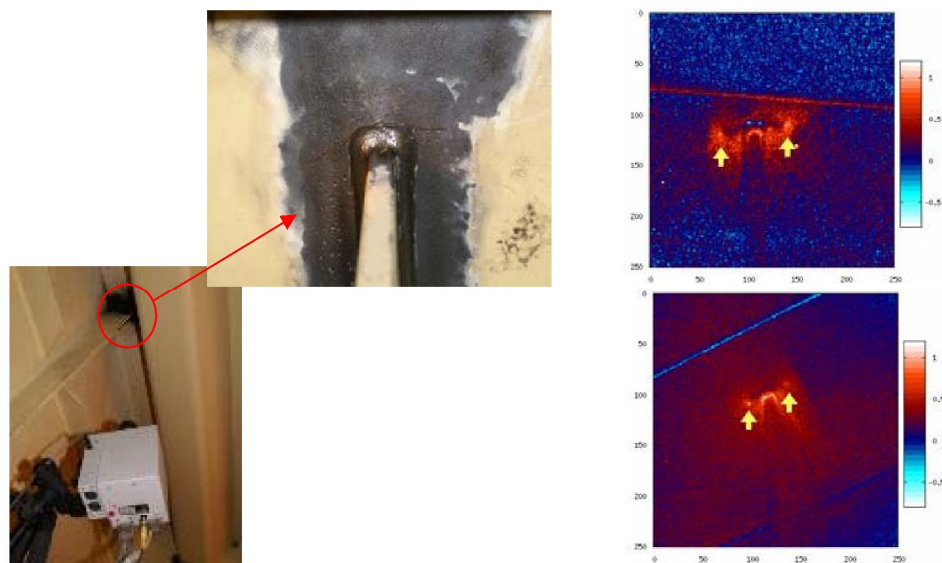


図 3.3 実橋梁における検査結果

3.1.2 高力ボルトに対する非破壊検査技術

(1) 高力ボルトの遅れ破壊の非破壊検査

部材の連結部では、高力ボルトまたはリベットのゆるみ、脱落の損傷が報告されている。特に、ボルトの強度等級 F11T 以上の高力ボルトの遅れ破壊は、部材の連結部における損傷の代表例で、1965 年ごろから問題となり種々の調査および高力ボルトの交換工事などが行われている。高力ボルトの遅れ破壊の検出にあたっては、検鋸ハンマによるたたき検査および超音波探傷試験による非破壊検査が実施されている。

検鋸ハンマによるたたき検査は、高力ボルトのナットを検鋸ハンマで 3~4 回たたき、指に伝わる振動、ナットの挙動、および音によってボルトの異常を判定する(図 3.4)。このたたき検査は、検鋸ハンマで実施できる簡易な方法であるが、検査精度については良好とは言い難い。都市高速道路における高力ボルトの交換工事に先立って実施された打音検査の結果¹²⁾では、進行中の遅れ破壊の検出率は約 3%、軸力不足の異常ボルト(ゆるみ)の検出率は約 34%と報告されている。また、高力ボルトのゆるみは確認できるものの、そのゆるみが遅れ破壊に起因するものかの判定は困難である。

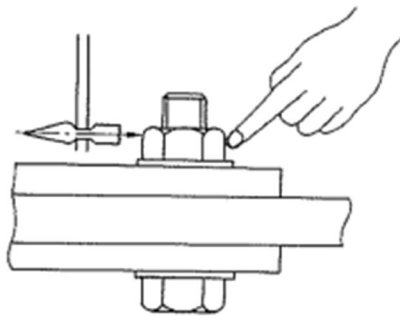


図 3.4 たたき検査の概要図¹²⁾

一方、超音波探傷試験による検査は、高力ボルトの頭部より垂直法で探傷し、きずからの反射エコーの有無で遅れ破壊の判定を行う。検査にあたって探傷感度の調整は、人工きずをつけた高力ボルトの対比試験片を用いて行われる。図 3.5 に深さ 2mm の人工きずを有する高力ボルトの探傷例を示す。B1 はボルト頭部の底面エコー、B2 はボルト軸部からの底面エコー、そして F が人工きずからの反射エコーである。前述と同様の都市高速道路における高力ボルトの交換工事で実施された超音波探傷試験の結果¹²⁾では、遅れ破壊の生じている損傷ボルトの検出率は約 86%と報告されている。超音波探傷試験による遅れ破壊の検査は、作業性については打音検査に劣るが、検査精度、信頼性、および実績から損傷ボルトの検出に適していると考えられる。

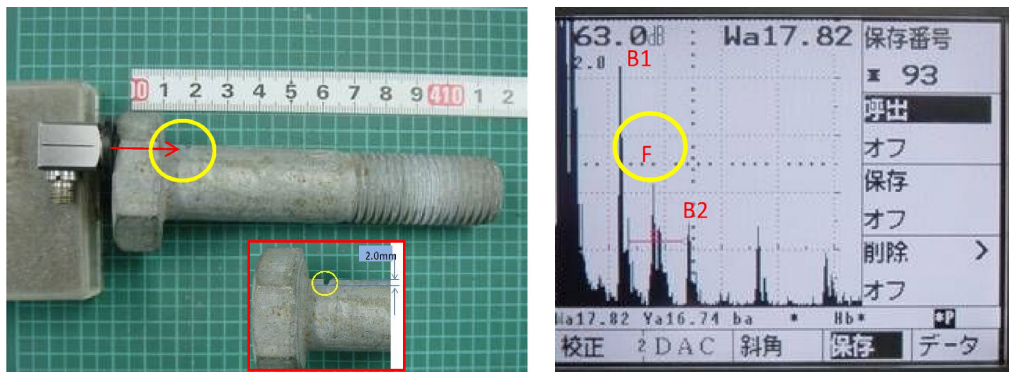


図 3.5 人工きずを有する高力ボルトの探傷例

(2) 超音波による高力ボルトの軸力推定

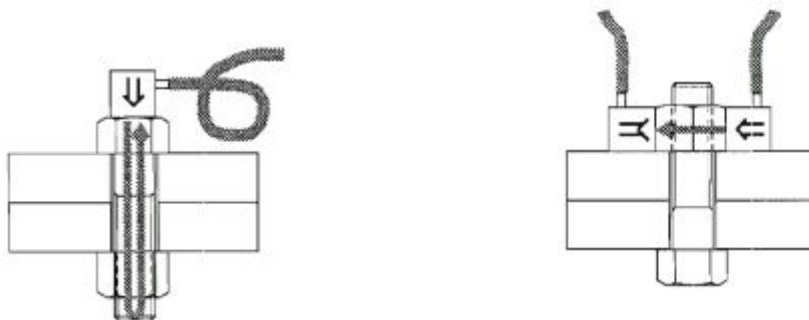
超音波による高力ボルトの軸力推定方法として、ボルトの頭部より軸方向に超音波を伝播させる方法図 3.6(a)^{12),13)}と、ナットの側面の対向面に超音波を伝播させる方法図 3.6(b)¹⁴⁾がある。

図 3.6(a)は、高力ボルト軸部の伸びによる超音波の伝播速度の変化を利用した方法である。高力ボルトの頭部に探触子を接触させるため、検査にあたってはボルト頭部の刻印などを平坦に仕上げる必要があること、測定時の温度が結果に影響するなどの短所がある。

図 3.6(b)は、ナット側面の対向面の一方で超音波を送信し、他方で受信を行ってボルトの締付け軸力と超音波の透過量の関係から高力ボルトの軸力を推定する方法である。この測定方法では、ボルト軸力が十分な場合の超音波の経路は、ナットとボルトのネジの接触部を通る最短距離で超音波が伝播するが、ボルト軸力が低下すると最短距離での超音波の透過量が減少する原理を利用している(図 3.7)。特殊に開発された探触子を使用することで接触媒質が不要であり、ナット側で

の測定のため仕上げ作業が不要となる長所がある。

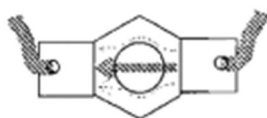
超音波による高力ボルトの軸力推定は、火災による損傷を受けた鋼橋の調査で使用されている¹⁵⁾。前述のいずれの方法ともボルトの軸力推定にあつては、同一ロットで製造された高力ボルトを用いた締付け試験の情報が必要となる。このため、被災部のボルト軸力と健全部と比較することで評価を行っている。



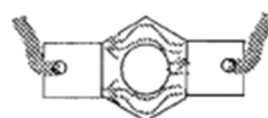
(a) 頭部から軸方向へ超音波を伝播

(b) ナットの対向面に超音波を伝播

図 3.6 超音波による高力ボルトの軸力推定方法¹³⁾



ボルト軸力が十分な場合



ボルト軸力が0の場合

図 3.7 超音波の伝播経路¹³⁾

(3) 高力ボルトの自動緩み検知機¹⁶⁾

高力ボルトの自動緩み検知機は、自動ハンマで高力ボルトを打撃することによりゆるみの判定を行う非破壊検査機器である。自動ハンマとコンピューターで構成されている。自動で高力ボルトを打撃するハンマには、打撃力と加速度を計測するセンサーが内蔵されており、一定の力でナットを打撃することができる。ナットを打撃した際の振動を内蔵されたセンサーが記録し、波形を分析することで高力ボルトのゆるみの有無を判定する。高精度化には十分な学習データを必要とするため、高力ボルトの軸力推定の方法として確立されるには至っていない。

3.1.3 ケーブル張力の計測

(1) 振動法

斜張橋やニールセンローゼ橋等のケーブル構造物においては、橋梁の架設の際にケーブルに所定の設計張力が導入されているかの確認を行っている。ケーブル張力の計測方法として、ケーブルの固有振動数を測定し張力を算定する振動法が多く用いられており、ケーブル構造の橋梁の張力計測システムあるいは形状管理システムとして各所で検討されている^{18),19),20)}。計測方法の基本構成は、ケーブルに設置した加速度計から得られる振動波形をFFTによりスペクトル解析を行っ

てケーブルの固有振動数を求める。その後、提案されている算定式^{21),22)}を用いてケーブル張力を推定する。ケーブルの曲げ剛性およびサグの影響が課題となっているため、橋梁の架設時には複数の振動モードを用いてキャリブレーションが行われる。

最近では、ケーブルの振動を非接触のレーザードップラー速度計により計測する方法も報告されている²³⁾。

(2) 磁歪法

磁歪法は、応力を受ける磁性体の磁気特性の変化を利用し、EM センサー(Elasto-Magnetic Sensor)等を用いて応力の計測を行う方法である。EM センサーは、棒状の鋼材やケーブルの外周に設置してその磁気特性を計測する。計測対象物の無応力時の透磁率をあらかじめ測定し、磁気特性と応力の関係から現時点の応力を計測する。

斜張橋の架設時におけるケーブル張力の計測事例では、振動法と同等の計測結果が報告されている²⁴⁾。

(3) ケーブルサグの3D計測法

斜張橋のケーブル形状を3次元で計測し、そのサグ量から張力を算出する方法が提案されて実際の橋梁に適用されている。非接触で一度に数多くのケーブルの位置情報を計測できるため、効率的な計測方法である。

3.1.4 課題と今後の展望

道路、鉄道、港湾等の社会基盤施設ごとに鋼構造物の定期点検要領が作成されているが、非破壊検査や計測技術を用いた詳細調査に関わる要領が作成されているものは少ない。鋼構造物の健全度の評価および余寿命の予測に必要な情報を得るために、維持管理で使用する非破壊検査の要領の作成が望まれる。

既設構造物の点検および調査は、狭隘箇所で行われることが多い。検査および計測機器の軽量化、さらには外部電源を使用せずに機器の内蔵電源のみで調査が行える検査機器の開発も望まれる。

鋼構造物の腐食に関する非破壊検査技術について現状実用化されている技術は無いが、腐食の程度・面積等を画像処理により定量的に検出する方法や、鋼板の減厚量を面的に計測できる3次元計測システム、塗装の下で進展している錆の検出方法などの開発が望まれる。

【参考文献】

- 1) 横野泰和：溶接構造物の非破壊試験技術，溶接学会誌，第79巻，第8号，pp.9～24，2010年。
- 2) 三木千寿，深沢誠，加藤昌彦，大睦久雄：表面疲労き裂検出に対する各種非破壊試験の適用性，土木学会論文集，No.386/I-8，pp.329～337，1987年10月。
- 3) 深沢誠，大睦久雄，加藤昌彦，三木千寿：非破壊試験による表面疲労き裂検出に及ぼす塗膜の影響，土木学会論文集，No.398/I-10，pp.395～404，1988年10月。
- 4) 構造工学委員会非破壊評価小委員会：土木工学における非破壊評価の現状と将来，土木学会論文集，No.459/I-22，pp.1～18，1993年1月。

- 5) 平林雅也, 三木千壽, 田辺篤史, 白旗博美: マルチフェイズドアレイ探触子を用いた高精度超音波探傷試験, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.1, pp.71~81, 2008年1月.
- 6) 上林正和, 勝浦啓, 服部圭二, 近藤祐史, 池上克則: 溶接継手部へのフェイズドアレイを用いた自動超音波探傷に関する研究 (第一報実用探傷条件の検討), 非破壊検査, 第58巻12号, 2009年12月.
- 7) 藤木修, 村越潤, 高橋実: 鋼製橋脚隅角部を対象としたフェイズドアレイ探傷法の基礎検討, 土木学会第59回年次学術講演会, I-603, 2004年9月.
- 8) 藤木修, 高橋実, 村越潤, 三木千壽: 鋼製橋脚隅角部を対象としたフェイズドアレイ法による超音波探傷試験のきず検出性能について, 土木学会第60回年次学術講演会, I-167, 2005年9月.
- 9) 国土技術政策総合研究所: 鋼部材の耐久性向上策に関する共同研究, 国土技術政策総合研究所資料, 第471号, 2008年8月.
- 10) 塚本成昭, 山上哲示, 林田充弘, 田畑晶子: 鋼床版デッキ貫通き裂発見を目的とする複合的検査手法の開発, 土木学会第64回年次学術講演会, VI-346, 2009年9月.
- 11) 坂上隆英, 久保司郎, 西村隆, 松井繁之, 高田佳彦: 自己相関ロックインサーモグラフィによる鋼床版の疲労き裂遠隔検出技術, 土木学会第61回年次学術講演会, I-587, 2008年9月.
- 12) 西村昭, 山崎信之, 加藤修吾, 米谷真二, 神田正孝: 既設高力ボルトの各種非破壊検査の特質, 橋梁と基礎, pp.26~33, 1983年1月.
- 13) 上野幹二, 山口隆司, 小林昭一: 超音波縦波および横波を用いた高力ボルト軸力測定に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1147~1152, 2000年3月.
- 14) 池ヶ谷靖: 超音波によるボルト軸力計, 検査技術, pp.14~19, 1998年1月.
- 15) 是松晃男, 池田武志, 山口栄輝, 牧角龍憲, 亀尾順一郎, 林裕也: 火災を受けた鋼桁橋の損傷調査と強度評価, 橋梁と基礎, pp.50~55, 2011年10月.
- 16) 三上市蔵, 田中成則, 樋渡達也, 山浦忠彰: 鋼橋の高力ボルトの軸力推定システム, 土木学会論文集, No.549/I-37, pp.77~90, 1996年10月.
- 17) 小林剛, 石原靖弘, 谷平勉, 中津留幸紀, 亀井正博: 実橋における残存ボルト軸力推定と推定方法の比較, 土木学会第55回年次学術講演会, I-A63, 2000年9月.
- 18) 市川衡, 中込秀樹: 横浜ベイブリッジのケーブル張力測定, 土木学会第50回年次学術講演会, I-330, 1995年9月.
- 19) 新銀武, 田中正明, 海老原竜司: ニールセンローゼ桁橋のケーブル張力測定について, 土木学会第50回年次学術講演会, I-496, 1995年9月.
- 20) 山上哲示, 大坂憲司, 岸明信, 森直樹: 常時微動計測によるケーブル張力自動同定システム, 土木学会第50回年次学術講演会, I-497, 1995年9月.
- 21) 新家徹, 広中邦汎, 頭井洋, 西村晴久: 振動法によるケーブル張力の实用算定式について, 土木学会論文報告集, 第294号, pp.25~32, 1980年2月.
- 22) 頭井洋, 新家徹, 濱崎義弘: 振動法によるケーブル張力实用算定式の補正, 土木学会論文集, No.525/I-33, pp.351~354, 1995年10月.
- 23) 宮下剛, 稲葉将吾, 吉岡勉, 田代大樹, 長山智則: 不可視レーザー光を用いた新しいLDVによる斜張橋ケーブルの振動計測, 土木学会第66回年次学術講演会, I-324, 2010年9月.

- 24) 木口基, 松原薫, 羅黄順, 井出本錦也, 土居和子, 山本晴成 : EM センサーによる張力管理計測事例(その 1), 土木学会第 58 回年次学術講演会, CS1-016, 2003 年 11 月.

3.2 鋼構造物のモニタリング

3.2.1 モニタリング技術と長寿命化

モニタリングは、一定の期間連続して計測データを取得することであり、災害対策として斜面のモニタリングや河川水位のモニタリングについては実用化・実装化されている。一方、構造物のモニタリングとしては、変状が発見され対策工事が実施されるまでの期間もしくは現状観察の期間、変状の進展等を監視する場合に実施されることがある。また、社会的に影響が大きく挙動が複雑な構造物に対して、長期的にその挙動をモニタリングして設計上の仮定の確認や定常状態であることの確認を長期的に行っている事例もある。これらいずれのモニタリングにおいても、得られたデータをどのように判断し、有益な情報を抽出するのかという部分が未成熟であるものの、構造物の長寿命化という観点からは今後飛躍的な進展を望む分野であると考えられる。

構造物のモニタリングとして広く知られるようになった事例としては、本州四国連絡橋での橋梁モニタリングが挙げられる。かつてない長大橋梁の設計において、種々の設計上の前提条件を仮定して解析や設計が行われている。そのため、しゅん功後のモニタリングは地震時や暴風雨時の構造物の挙動を把握することを目的としたモニタリングだけではなく、当初の設計で想定した挙動が実際の構造物の現象として現れているかを検証するためのものでもあった¹⁾。

その後、モニタリングを支える技術として、センシング技術の発展は、1990年代よりレーザーなどの計測装置や高度な非破壊検査法が継続的に発展し、今世紀に入りMEMS（Micro Electro Mechanical Systems）センサー、ワイヤレスセンサの研究・開発が盛んに行なわれている。一方で、システム同定技術などそれを処理する技術の発展として、ビッグデータと呼ばれる大量のデータから異常等が検出できる状況が整えられるようになり、両者を合わせることで、対象構造物を遠隔でリアルタイムにモニタリングするシステムの実用化の目処が立ってきている。

鋼構造物の長寿命化を図るために、モニタリング技術を活用した実構造物の状況の把握、診断結果に基づく適時な対策及びその後の効果測定の実施は、非常に有効であると考えられること、また、点検の熟練者不足を視野に点検作業の効率化に向けて、ICTを活用することが望まれる。本節では、モニタリングのいくつかの事例について長寿命化の観点から概説する。

3.2.2 鋼構造物のモニタリング

鋼構造物に対しモニタリングを行なう動機としては、構造物の規模や重要性、第三者被害発生のリスク、維持管理の難易度等の要因が挙げられる。最近では、鉄道橋で破断検知線を用いた疲労損傷モニタリング²⁾、道路橋で支承反力測定モニタリング³⁾の事例があり、モニタリング技術の適用性を図るための計測が継続中である。

(1)明石海峡大橋

明石海峡大橋では、設計法の検証を目的に動態観測を継続して実施している。設置しているセンサー類は、プロペラ型風速計、桁端変位計、TMD変位計、GPS、地震計、速度計、加速度計を各部位に設置している。これまでに明石海峡大橋で観測されたデータによれば、橋の挙動は設計時の解析結果とほぼ一致していることが確認されている。明石海峡大橋のモニタリングの目的には、設計検証、橋体の維持管理、交通管理がある。設計検証と交通管理の面ではモニタリングの成果を活用できているものの、橋体の維持管理に対してモニタリングの蓄積を積極的に活用する

までには至っていない。これは、動態観測という観点で設置するセンサーも選定されており、維持管理のためのモニタリングを第一義としたものではないためであろうと考えられる。一方、建造以来の継続的なモニタリングにより、明石海峡大橋の定常状態の把握は深化しているため、なんらかの異常の検出精度は向上していると考えられる。

(2)横浜ベイブリッジ

建設時に耐震設計の検証を目的として設置した加速度計が設置され、モニタリングが行なわれている。このモニタリングにより実際に記録された地震時応答の分析結果から、桁端部において、エンドリンクが桁と固着してヒンジとして作動しないことが明らかとなったため、耐震補強の際、桁端部にフェールセーフ構造を設置したことが報告されている⁴⁾。モニタリングにより、設計の「想定外」の動きを見つけて、補強等の維持管理に結びつけることで構造物の長寿命化を図ることができる考える。

(3)東京ゲートブリッジ

東京ゲートブリッジのモニタリングシステムは、現地から離れた場所から、リアルタイムで橋梁の現況を定量的に評価し、適切なメンテナンス及び地震等の自然災害発生時に安全性や使用性の判断を支援する目的で実装されている。常時のメンテナンスに係わるモニタリングでは、①車両等の活荷重、温度等の変化とその応答に対する動的なデータ測定を行い、②対象部材等の健全性評価を行う、③周期的かつ連続的に変化する温度変形や床版・桁の挙動等の静的なデータ測定から橋梁の保有する機能の評価を行う、ことを目的としている。

これに対し、非常時は、地震等の自然災害発生時に当初設計で求めた重大損傷予測部位を特定し、損傷のモード等をリアルタイムで計測することによって効率的に健全度判定を支援することを目的としている。ここで得られたデータ及び健全性判定結果を基礎として、橋梁管理者は、交通規制の必要性を定量的なデータを基に容易に判断できるシステムとしての機能が必要となる。また、動態観測の点に着目すると、東京ゲートブリッジは鋼トラス構造の長大橋であり、風雨、地震などの大きな環境変化に対して顕著な応答を示すことが予想される。さらに本橋梁特有のタイダウンケーブル等の構造形状、トラスボックス一体化構造などの設計や、新たに導入される細目等に対し、種々な作用荷重や環境変化にどのように挙動するかを計測することによって今後の新たな橋梁構造の設計、維持管理に役立つように設置されている。

東京ゲートブリッジに設置したモニタリング装置によるメリットは常時、非常時において専門技術者が種々な判断を比較的簡易に判断することが可能な仕組みを目指して構成されている。

設置されたモニタリングシステムの構成は、構造物の状態を計測する計測装置及び伝送装置等（センサ、センサデータの伝送システム）、得られたデータに基づき橋梁の損傷状況を判定する分析評価システムに大別される。設置したセンサーとして、環境計測のための風向風速計、雨量計、桁内温度計、強震計、挙動把握のための変位計（ワイヤ式・ロッド式）、加速度計（1軸・3軸）、車輛重量計測システム（Weight-in-Motion (W. I. M.) システムセンサ）がある。

東京ゲートブリッジは、長大橋梁であることから近接目視点検を各部材に行なうことは長時間を要し、多額の費用が必要となる。このような課題に対し、設置したモニタリングシステムから得られたデータを有効活用することによって、日常点検及び定期点検の頻度や内容を定量的に変えることが可能となるばかりでなく、修繕計画策定時にも機能する重要なデータの収集が可能となるというメリットを見出すことができる。さらに、首都直下地震や東南海地震等の発生時に一

一般的に通過交通を規制し、安全性と使用性を短期に判断する必要となるが、その際にも本モニタリングシステムで得られたデータによって比較的短時間でその判定が可能となる。

(4) 鉄道橋における破断検知システム

主桁の疲労想定箇所に図 3.8 に示すように、一筆書きの要領で破断検知線が設置される。破断検知線が、破断により断線した場合、その情報を管理者に自動通報されるシステムである。本鉄道橋は、8 年に 1 回の頻度で塗装の塗替えを行なうこととしており、全面的な足場設置に合わせて詳細な詳細目視点検を実施するため、例えば、検知線を固定する接着剤等の耐久性は 8 年を目安として考えられており、その間に起こりえる最悪な事態を想定したモニタリングであることが特徴的である。このようにモニタリングシステムの寿命、詳細目視点検の頻度及び塗装の塗替え等の定期的な修繕を一連として考えることで合理的かつ効率的に構造物の長寿命化を図れるものとする。

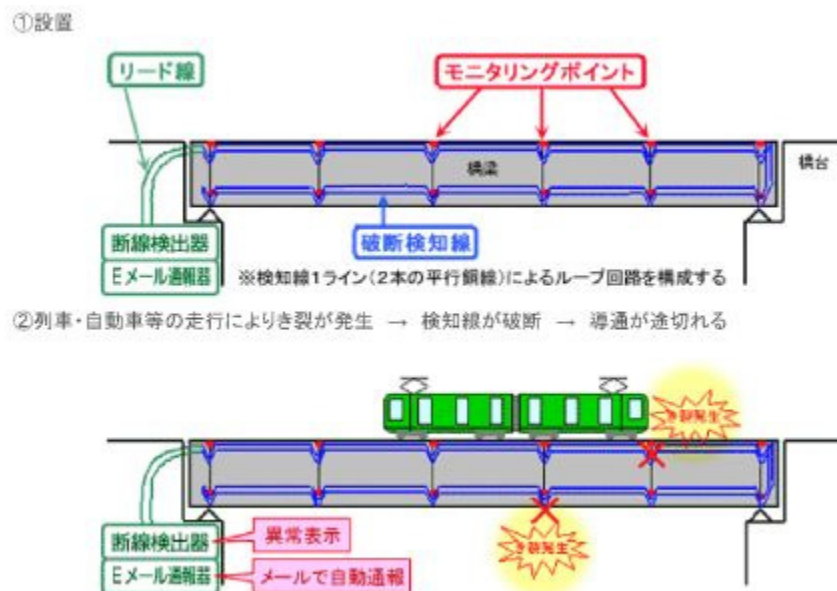


図 3.8 鉄道橋における破断検知システムの例

(5) 反力測定ゴム支承

反力測定ゴム支承を図 3.9 に示す。反力測定ゴム支承は、荷重を測定する圧力センサーを内蔵したゴム支承であり、支承反力をモニタリングする技術である。支承取替施工時の施工管理で活用できるほか、供用後は、反力値の変化をモニタリングすることにより、支承部の沈下や伸縮装置の段差の発生の有無等の情報を早期に発見することが可能である。支承の取替えに合わせて、反力を測定可能な支承を配置することで、別途に反力測定モニタリングシステムを構築するより安価な対応が可能でメリットを有する。一連の路線の橋梁で全て設置されることで、長寿命化対策の有無等を判断できると考える。

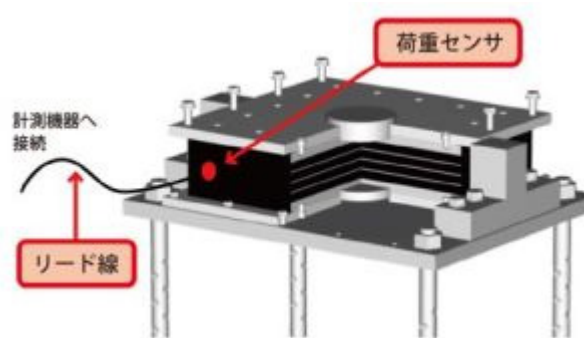


図 3.9 反力測定ゴム支承の構造

3.2.3 モニタリングの課題と今後の展望

いくつかの事例で示したように長寿命化技術の観点から既往のモニタリング実施例を整理したが、長大橋等の大規模な構造物については、設計検証，交通管理，維持管理の目的のうち，設計検証と交通管理については，既往の事例もあり，実用レベルの技術がある程度完成していると言える。一方で，維持管理を主目的としたモニタリングについては，その緒に就いたばかりの状況である。

近接目視点検による橋梁の状態把握は数年に一度の頻度であるのに対し，モニタリングは常時数値化された情報を取得し続ける。この両者の択一ではなく補完の方向でモニタリング技術の研究・開発が望まれる。

モニタリングで実施される計測項目は，架橋環境，作用外力，構造挙動の3項目に分けて考えることができる。まず，架橋環境として，基本的な気温，湿度，風向・風速，日射等のほかに飛来塩分，漏水・滞水など，防食機能に影響する要因の計測が考えられる。疲労損傷に大きく影響する作用外力については，W.I.M.のためのひずみ計測，軸重計とカメラの連動，加速度計等による計測が考えられる。構造挙動については，変位計，GPS，速度計，加速度計などによりその挙動をとらえることになる。

モニタリングによって把握しておきたい機能については，耐疲労性能や耐防食性能の他に，支承の性能（可動性能，回転性能，免震性能，水平反力分散性能），制振性能，路面走行性能などが考えられる。

課題としては，上に示したセンサーやモニタリングの要素技術の進展とともに，システムとしての耐久性・冗長性の構築，取得データの後処理，コスト，中小規模の橋梁への展開等が考えられる。これらの課題に対しては，モニタリングを継続しながら解決策を模索していくことになる。

最後に，長期モニタリングの実装化に際して活用が期待されるセンサーを紹介する。

(1) ACM 型腐食センサー

ACM (Atmospheric Corrosion Monitor) 型腐食センサ（以下 ACM センサ）を図 3.10 に示す。ACM センサは，環境因子により電気化学的に発生する金属の腐食電流を計測するセンサーであり，その計測結果より大気環境の腐食性を定量的に評価することができる⁶⁾。ACM センサーは多く用いられており，その結果から腐食速度を推定している例もある^{7)・10)}。

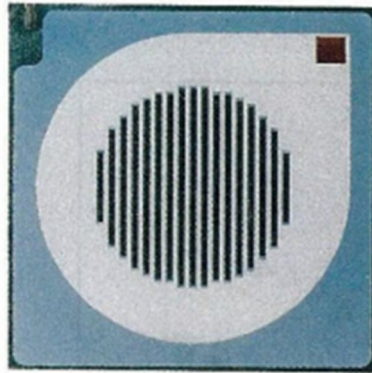


図 3.10 ACM腐食センサー⁶⁾

(2) 疲労センサー

疲労センサーを図 3.11 に示す。疲労センサーは、人工ノッチを有するセンサー箔とベース箔が接合された構造で、対象部材よりも短時間でセンサー箔上にき裂の進展が見られ、疲労損傷度の評価が容易に行える特徴を持つ¹⁾。このセンサーを実際の橋梁に貼り付けて寿命の評価を行った事例も幾つか見られるが、文献(12)の事例では疲労き裂が発生している鋼板桁橋について、主桁・横桁の補強が行われた際に疲労センサーによるき裂進展計測を行い、余寿命評価に基づく補強効果の判定を実施している。しかし、そのような適用例はあるものの、疲労センサーの精度の検証については今後の検討課題である。

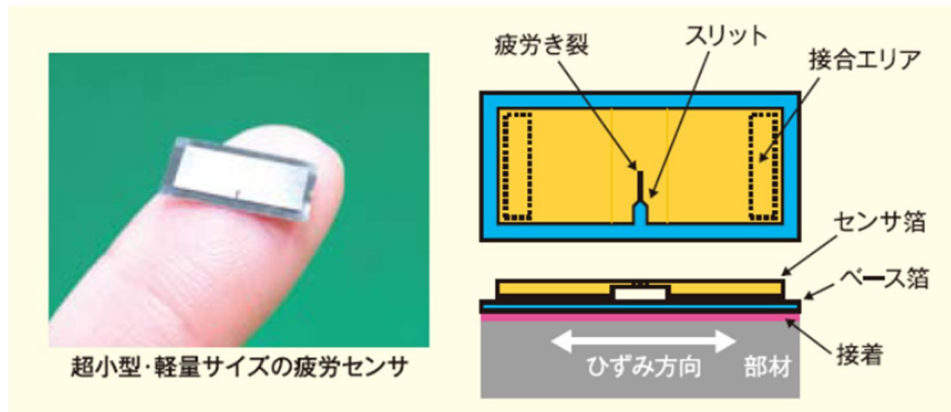


図 3.11 疲労センサーの概要

【参考文献】

- 1) 岩屋勝司, 松本毅: 長大橋の管理技術, 橋梁と基礎, pp155~161, 1998年8月特集号.
- 2) 伊藤裕一, 松岡昌武, 蔣立志: 破断検知線による鋼構造物疲労損傷モニタリング手法の開発, 土木学会第60回年次学術講演会, I-052, 2006年9月
- 3) 藤原博: センサー内臓型ゴム支承を用いた支点反力計測システム, 橋梁と基礎, pp43~46, 2012年10月
- 4) 小森和夫, 吉川博, 小田桐直幸, 木下琢雄, 溝口孝夫, 藤野陽三, 矢部正明: 首都高速道路における長大橋耐震補強の基本方針と入力地震動, 土木学会論文集, No.794/I-72, pp.1~19, 2005年7月

- 5) 岩屋勝司, 松本毅 : 長大橋の管理技術, 橋梁と基礎, pp155~161, 1998年8月特集号.
- 6) 元田 慎一, 鈴木 揚之助, 篠原 正, 兒島 洋一, 辻川 茂男, 押川 渡, 糸村 昌祐, 福島 敏郎, 出雲 茂人, : 海洋性大気環境の腐食性評価のための ACM 型腐食センサー, 材料と環境, Vol. 43, pp.550-556, 1994.
- 7) 古家和彦, 磯江浩, 大串弘幸 : 海峡部橋梁箱桁内の腐食環境調査, 土木学会第 57 回年次学術講演会, I -263, pp525-526, 2002.
- 8) 岩本政巳, 田中忍, 後藤芳顯, 小畑誠 : ACM センサーによる高架橋箱桁内の腐食環境調査, 土木学会第 60 回年次学術講演会, I -054, pp105-106, 2005.
- 9) 永田和寿, 田中忍, 牧耕司, 小畑誠, 後藤芳顯 : 鋼箱桁内における結露状態と腐食環境調査, 土木学会第 62 回年次学術講演会, I -387, pp769-770, 2007.
- 10) 大田隼也, 大屋誠, 安達良, 武邊勝道, 願永留美子, 麻生稔彦, 北川直樹, 松崎靖彦, 安食正太 : ACM センサーを利用した橋梁桁内の局部環境観測, 土木学会第 62 回年次学術講演会, I -390, pp775-776, 2007.
- 11) 小林朋平, 仁瓶寛太 : 疲労センサーによる溶接構造物の疲労寿命診断, 溶接学会誌, Vol.76, No.4, 2007.
- 12) 梅田聡, 松田博和, 山元博司, 山田久之, 山田雅義, 松田好生 : 横桁補強の耐久性向上効果の疲労センサーによる検討, 土木学会第 59 回年次講演会, I-008, 2008.

3.3 画像等を用いた調査技術

我が国では、橋梁やトンネル等の土木構造物の維持管理の一環として定期点検が実施されている。定期点検では、橋梁点検車や高所作業車等の仮設足場を使用したりする事などから、点検コストを削減するためには、ロボット化 (UAV 等) や画像を活用した技術の普及が求められている。そのような技術ニーズを踏まえて、計測技術としてレザースキャナー等を用いて計測されてきた点群データをデジタル画像から取得する技術が実用化するなど、3D モデル化への技術開発が盛んな状況にある¹⁾。

また、損傷の評価や診断については、膨大な点検データの活用として、データマイニングに関心が集まっている。これまで橋梁点検から取得される点検データ量は膨大であることから、橋梁点検結果において損傷に関連する要因は、供用年数、構造形式、部位、設置環境などであり、必要な要因を抽出し、分析の視点を見出すのは難しいとされてきた。近年では、仮説発見型のデータマイニングは、例えば、構造物の損傷が出やすい構造・部位、損傷を受けやすい条件などを捉えるのに有効ということが、わかってきたことから、その活用について研究が進んでおり、一部、実用化されている。既往の研究事例においては、インフラ維持管理における点検データについて、データマイニングを適用することで、点検方法の合理化や技術伝承等に関する有用な仮説を発見する可能性が示されている^{2)・3)}。例えば、点検方法の合理化については、データマイニングにより、ある条件での一番損傷が出やすい箇所や、重要損傷の予兆となる損傷を抽出することで、損傷の進行度合いに応じてメリハリをつけた点検を行うことが可能になると考えられる。また、技術の伝承については、点検結果とセンシング情報や外延要因をマイニングし、外延要因と損傷の関係性を明らかにすることで、構造形式や諸元や設置環境など、点検時や損傷判断時に経験豊富な熟達者が暗黙知として理解・活用しているノウハウを可視化し、その技術を伝承していくことができると思われる。

最近の画像処理を用いた技術の一例を以下に示す。

東日本高速道路株式会社においては、「橋梁点検支援システム」を開発しており、橋梁点検の際に撮影した構造物の変状画像などを開発したシステムに登録すると、過去の点検で撮影した画像をはじめとしたデータの中から類似する事例を自動的に抽出。技術者が橋の損傷内容を的確かつ円滑に評価できるようになっている⁴⁾。

また、画像処理を用いた非破壊検査では、現在、実施されている近接目視点検では難しい、疲労き裂等の損傷に、画像点検の技術を用いることによって、損傷を可視化できることが示されている⁵⁾。画像処理技術を活用することで、多くの目視点検の課題解決につながる可能性があり、今後の長寿命化技術として、大いに期待されている。

【参考文献】

- 1) 例えば、西村正三・木本啓介・松岡のどか・大谷仁志・緒方宇大・松田浩；橋梁維持管理における遠隔測定法の開発と評価，応用測量投稿論文，2014年 等
- 2) 市川，田中，二宮：データマイニング手法を用いた点検データの分析，土木学会第67回年次学術講演会，平成24年9月，pp.245-246
- 3) 東京大学大学院情報学環「社会連携講座の活動成果概要2009-2011」
- 4) 平成23年度次世代高信頼・省エネ型IT基盤技術開発・実証事業（データ利活用による社会

基盤の安全性向上)に関する委託業務 事業報告書,平成 24 年 3 月 30 日,東日本高速道路株式会社

- 5) 小西拓洋:「首都高速道路における点検・診断技術の高度化に関する共同研究」,橋梁と基礎,2014 年 9 月号

3.4 鋼構造物の性能検証

鋼構造物の長寿命化を推進する際、現状の損傷度や耐荷力、余寿命を的確に評価するための鋼構造物の性能検証が求められる場合がある。また、補修・補強を行った場合には、その対策効果を評価するため、対策後の性能向上を検証することが橋の長寿命化修繕計画の精度を高めることにつながる。

鋼構造物の性能検証において注意すべき点は、設計段階で設定している状況が、必ずしも現場で成立していない場合があることである。例えば、非合成桁の設計では終局状態を想定した設計になっているため、鉄筋コンクリート床版の主桁作用は見込んでいない。しかしながら、使用状態においては鋼桁と鉄筋コンクリート床版は一体化して挙動していることが知られている。そのため、非合成桁として設計した橋梁のたわみや応力、振動を計測しても、設計計算で用いた桁の曲げ剛性ではなく、床版と鋼桁の剛性断面と考えた場合の曲げ剛性を有する桁に近い挙動を示す。これにより、性能検証のためには「劣化の発現」や「修繕工事」のような性能が変化する出来事の前で比較することが理想的である。そのため、今後建造する長大橋梁や社会的影響の大きい鋼構造物の場合、初期の性能検証を実施することを希求する。

3.3.1 性能検証の分類

鋼構造物の性能を検証する場合、全体的な性能検証と部材単位もしくは損傷部位の性能検証に分類することができる。具体的には、軸重を計測した載荷トラック等を利用した静荷重載荷による桁のたわみや応力の計測、支承の変位量の計測によって対象構造物全体の曲げ剛性と境界条件を同定し、断面2次モーメントや材料の弾性係数を検証することができる。さらに加えて振動計測を実施すると全体の曲げ剛性と死荷重を評価することができる。振動計測単独であっても、全体曲げ剛性や死荷重、支承条件を検証することは可能である。

部材の性能検証として、支承の変位計測、ケーブル等の軸力部材の振動計測などがある。これにより部材の健全性や機能の回復状態を確認することができる。また、疲労き裂を対象とした応力計測、腐食による残存板厚の計測によって損傷の将来予測や残存性能を把握することができ、補修・補強工事の判断材料やその効果の検証が行える。

上述した計測項目に対する具体的な計測方法は次節に示すが、性能検証の目的設定、計測計画、計測結果から導く性能評価の方法などは、設計資料や施工資料による事前調査を十分にを行い性能検証に係るコストと効果を適正に判断することも必要である。

3.3.2 性能検証のための計測

(1) たわみ計測

鋼構造物のたわみ計測により、対象構造物全体の曲げ剛性すなわち断面2次モーメントと弾性係数を評価することができる。たわみについては、局所的な腐食や疲労き裂による部材の断面減少による影響は小さいため、腐食による広範囲の鋼板減肉、部材の破断等著しい変状の発生などを判別できる情報を得ることができる。以下にたわみの計測方法を示す。

1) 接触式変位計

橋梁などの構造物下に不動点を設けることが可能な場合には、**図 3.12** に示す接触式変位計を用いた測定が可能である。**図 3.12(a)** は、支保工などを用いることにより直接変位計を計測点に設置

できる場合の例を示したものであるが、そのような設置手法が困難な場合には、図 3.12 (b), (c) に示すように、構造物より離れた不動点に測定器を設置し、ピアノ線とスプリング及びリング型変位計を用いる方法、パイプ等を吊下げ、その移動量で測定するものが一般的である。ただし、このような場合には自然環境（風等）による影響を大きく受けることが予想されることから注意が必要である。

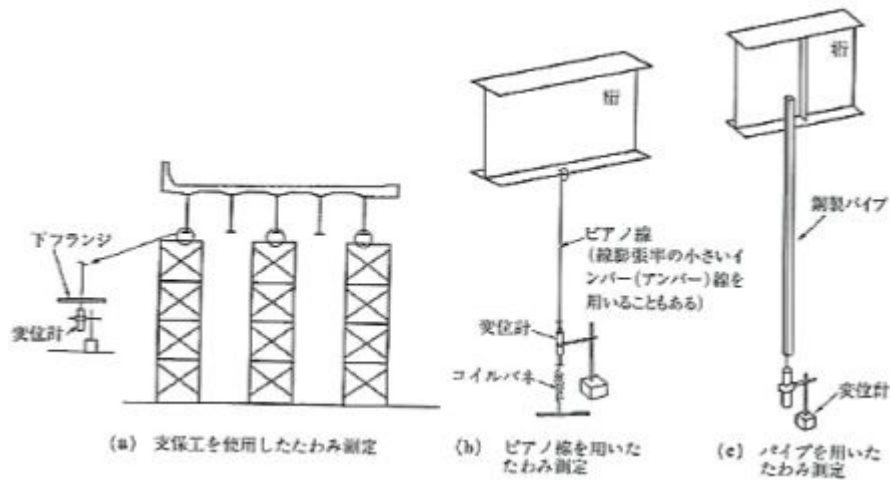


図 3.12 接触式変位計とたわみ測定の一例¹⁾

2) 非接触型変位計

構造物の周辺状況によっては、計測点の下に測定器を設置するための不動点を得られない場合がある。そのような状況では、非接触による測定として、光学式変位計やレーザー変位計等を利用できる。調査の際に光やレーザーを使用する場合、陽炎など大気中の粒子の乱れに光の直進度や周期が影響を受ける。そのため、不動点のあるたわみ測定結果に比べてその精度・使用性に注意した計測計画が必要である。

3) 加速度計を用いた測定²⁾

構造物の振動を加速度計により測定し、加速度を二重積分することにより対象部位の変位の推定が可能である。ただし、加速度成分をそのまま積分すると、わずかなゼロ点移動が大きな振動変位となって現れることから、測定された加速度に対する基線の調整が必要である。本方法は、加速度計による測定であることから、構造物が十分に振動している必要があり、たわみ計と異なり静的な変位の測定は困難であることから、適用の際に十分な検討が必要である。

(2) ひずみゲージによる応力計測

実橋梁における応力計測では、主要部材において設計計算上最大応力が生じている部位や、作用力による部材の変形状態を測定可能な位置にひずみゲージを設置するのが一般的である。さらに、ひずみゲージの設置位置を工夫することで設計計算時に明確となっていない局部応力や応力集中箇所への荷重伝達経路、変形状況を定量的に測定することができることから、補修・補強効果の検証に対しても有効である。

接着剤による貼付け型のひずみゲージを用いる他に、構造物の塗装の上からマグネットで吸着し受感部（ひずみゲージ）を押しあてることで、界面に発生する摩擦によってひずみを測定する

応力聴診器を利用する方法もある。ひずみを測定したい部分に簡単に取付けられ、塗装の除去が必要ないことからすぐに測定できる特徴がある。

(3) 支承変位量の計測

鋼橋では支承の機能（可動性）が損なわれると、橋梁全体の挙動が変化するとともに想定していない力が発生し疲労などの損傷を誘発する場合もあり、採用している支承の機能検証のために変位を測定する。支承の健全性に対し定量的な検証を行う場合は、支承と桁、支承と下部工間の相対的な動変位の測定により検証することが可能である。変位の測定は、ロッド式もしくはワイヤ式変位計によるものが一般的である。支承の変位測定位置の一例を図 3.13 に示す。

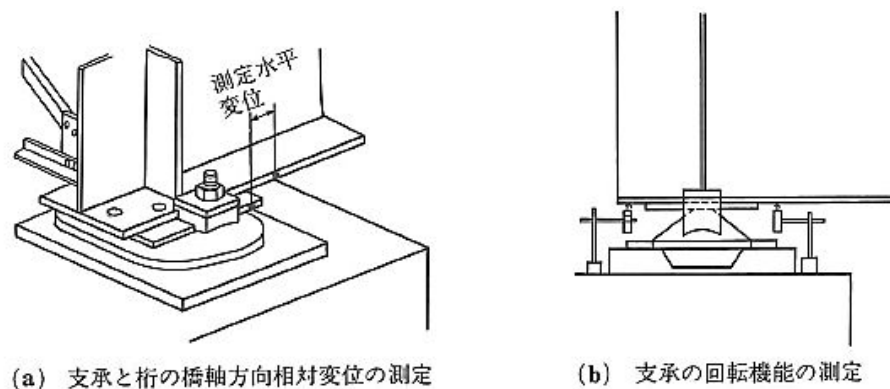


図 3.13 支承の変位測定の一例²⁾

(4) 振動計測

振動測定により振動特性を得ることは、静的載荷試験の測定により得ることができる曲げ剛性を比較的簡便に得ることが可能である。鋼構造物の場合、部材の破断や腐食による断面欠損、支承の損傷、伸縮装置の変状など構造系全体に影響を及ぼす損傷の場合、固有振動数や減衰に変化が生じる。

鋼構造物全体の振動計測から個々の損傷の部位や損傷度合いを知ることは困難であるが、構造物全体の変状の有無を客観的に評価することができる。そのため、遅れ破壊によるボルト脱落や疲労き裂の発生を検証することは困難である。一方、例えば10年前と現在、地震の前後の計測データを比較することで変化の有無を確認することができる。また、質量や曲げ剛性を変化させることになる補修・補強工事の前後を比較することで、その工事による性能検証となる。

吊橋や斜張橋、ニールセンローゼ橋などのケーブル系橋梁においては、ケーブルに所定の張力が作用していることが構造系成立の条件となる。そのため、振動法によりケーブルの張力を計測することは、構造物の性能検証として重要である。地震・強風による大きな構造物の振動によるケーブルの調整プレート（シムプレート）の脱落の有無、ケーブルの制振対策の効果、オーバーレイ、遮音壁等の設置、床版取替等の質量変化の検証などに振動法によるケーブル張力の計測を利用することができる。同様に、外ケーブル補強やテンションロッド等の張力部材の性能検証も振動計測により可能である。これらの張力部材の性能検証については、正確な張力を計測する目的ではなく、ケーブルバンドやケーブルスパーサ、固定具が取りついた状態（供用状態）におけ

る振動計測結果の変化を比較することが性能検証となる。

また、鉄道橋では列車の走行安全性や乗客の乗り心地の評価を行うために桁の横揺れを水平方向の加速度として測定する。その際に、横構、対傾構及びこれらを主桁に連結するガセットプレートなどの破断や連結部の変状により横振動が大きくなることに着目し、変状発見の目安として振動測定による検証が行われている。

振動計測に用いる加速度計には、サーボ型加速度計、静電容量型加速度計、レーザードップラー加速度計などがある。静電容量型加速度計は MEMS 技術の発達により、小型高性能化が進んでいる。レーザードップラー加速度計は非接触型であるため、ケーブル計測などセンサー設置の手間がかかる場面での適用が見込まれる。

振動計測は常時微動と強制加振による計測がある。加振法は、規則振動加振法と不規則振動加振法に大別できる。振動測定計画・実施に際し、各種センサーや構成機材、工程、経済性を考慮するとともに、常時微動と強制加振による結果を比較するなど計測結果の信頼性を確保することが望ましい。また加振法の選定にあたっては、振動させる構造物の重量と加振体との重量比、加振周波数範囲・加振力に対して考慮が必要である。

以下に構造物の振動計測における衝撃加振法と常時微動法について述べる。

1) 衝撃加振法³⁾

衝撃加振の測定では、まず構造物に衝撃的な力を作用させ、それによる橋梁各部の振動応答を計測する。その後、振動系に対する入力（衝撃力）と出力（振動）から求められる伝達関数より固有振動特性を検出する方法である。衝撃的なインパルス外力は多くの周波数成分を含んでいる。これは、正弦波加振が単一の周波数による加振であったのに対し、衝撃加振は多くの周波数に対する加振を同時に短時間に行っていることに相当する。したがって、入・出力の伝達関数を求めることは正弦波加振の共振曲線（振幅および位相）を求めることに相当している。

2) 常時微動法

常時微動法は橋梁周辺の風などの自然の力や地盤振動による微小振動をランダム振動として計測する。加振手段を必要とせず、供用中の橋梁のモニタリングに適している。振動振幅が小さいので測定結果の振幅既存性（非線形）や温度依存性を考慮する必要がある。減衰データの検出に際しては、空気力の影響（空力減衰）などに留意して測定する。

(5) 腐食状況の計測

鋼構造物の経年劣化は、腐食現象を起因としたものが多い。鋼構造物の性能を評価するうえで、腐食による影響を定量的に把握することが必要となってくる。

腐食状況を表す因子としては、残存板厚及びその分布性状、腐食面の凹凸が考えられる。測定による検証項目は、腐食減肉状況により強度への影響項目が異なる。たとえば、部材の引張耐力が問題となる場合は、抵抗断面の減少量把握が必要である。疲労強度が問題となる場合は、断面の平均的な現象の把握ではなく局所的な応力集中の状況把握についても必要となってくる。圧縮部材や曲げ部材では、部材構成範囲の減厚状況の把握が必要であり、中立軸の移動に伴う耐荷性能が変化するため、部材断面形状についての測定も必要である。

以下に、腐食状況による検証方法として基本となる残存板厚測定について述べる。

1) 直接測定

直接測定する方法は特殊技量を必要とせず，調査機具も小型で携帯性が優れ電源等を必要としないことから，最も簡易な方法である．主な用具として，ノギス，マイクロメータ，キャリパー（図 3.14）が使用されている．しかし，鋼構造物の部材は広がりを持ったパネルで構成されており，測定できる部位は限定的である．これらの状況より，計画の際には計測目的と腐食表面の状況（凹凸）を考慮したうえで決定することが望ましい．

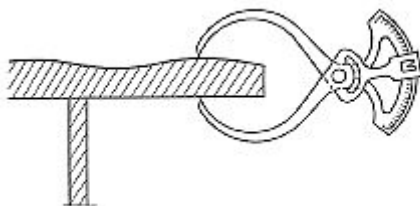


図 3.14 キャリパーによる板厚測定の場合⁴⁾

2) 超音波探傷による測定

測定法として一般的な方法は超音波厚さ計による方法である．超音波厚さ計は，パルス反射式垂直探傷法により非破壊測定するもので容易な測定が可能である．一般的な超音波厚さ計は，携帯性に優れており実構造物の測定に適している．使用される超音波周波数域は，1MHz～10MHz の範囲で，探触子は接触型のφ10mm 程度のものが使用されている．

3) その他の測定方法

その他の測定方法として，放射線透過による測定やレーザー光を用いた測定がある．

放射線透過試験による測定は，放射線が部材透過の際に部材の厚さにより吸収率が異なることを利用するものである．板厚の変化をフィルムの吸収率が異なることで生じる濃淡より定量化し，減厚状況を把握する方法である．しかし，放射線を用いることから環境的に有害であることから，実構造物への適用に多くの制限がある．

レーザーを用いた測定は，レーザーによる計測対象物とセンサー管をレーザーパルスが往復する時間を計測することで距離を測定することで2次元の状況（スキャン）を把握するもので，近年では，実構造物に適用可能な3次元レーザー計測機についても開発され実用化されつつある⁵⁾．

3次元レーザー計測機の計測風景と結果から得られた映像を図 3.15 に示す．

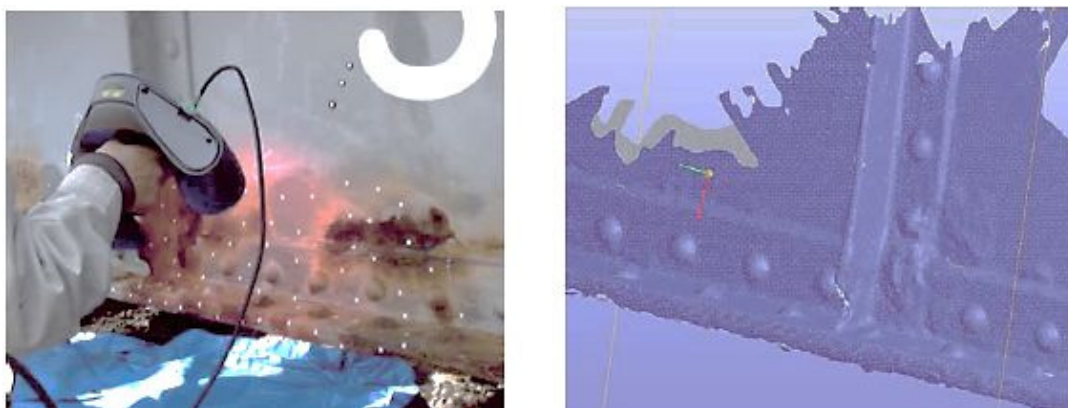


図 3.15 3次元レーザー計測と得られた表面形状⁵⁾

3.3.3 性能検証の問題点

(1)設計と実挙動の乖離

鋼構造物の性能検証をする場合、検証の比較は、設計計算上の性能が実際に現地で具現化できているかを比較することにある。構造物の設計計算では、終局状態を想定した設計が実施されている場合があり、使用状態で実施する性能検証との乖離がある場合がある。例えば、非合成桁の挙動、水平反力分散支承や免震支承を採用した橋梁系全体の挙動などは、使用状態での計測によって設計性能と比較することは困難である。FEAによる数値シミュレーションにおいても、伸縮装置や各種添架物の影響など実際の構造物の境界条件を完全に再現することは困難である。

そのため、性能検証するにあたり、健全時の状態をどのように設定するのかが問題となる。経年劣化を確認するためには、建造当初の状態が計測されている必要があるし、補修・補強工事による性能回復の検証であれば、工事の事前・事後の計測が必要となる。このように相対的な差を検証する方法は、設計と維持管理の現場との乖離を埋める一つの方法であると考えられる。

一方、鋼構造物の性能（耐荷性能・使用性能）を把握すること無しにその長寿命化を考えることはあり得ず、絶対的な性能評価法の開発が望まれる。

(2)作用を考慮した鋼構造物の評価

ここまで記述してきた性能検証は、限界状態設計法でいうところの抵抗側の評価であるが、作用側すなわち載荷される荷重の実態を鋼構造物の長寿命化に関する評価に反映することも考えられる。

設計モデルと同様に、作用すなわち設計荷重にもモデル化による実態との乖離があることは明確であり、設計段階での荷重のモデル化による誤差は安全側にあるため問題にならない。しかしながら、長寿命化を考える際に耐荷力や余寿命を予測するにあたり、設計荷重と実荷重の乖離が大きい場合、実荷重を反映した鋼構造物の評価を実施することも合理的判断の一つであると考えられる。ここで、経済的理由に起因する合理性についての議論はそれを完全に排除する必要があることは言うまでもない。

実際の作用を検出（重量、軸重、頻度）する方法としては、舗装に埋め込む軸重計、W.I.M システム、加速度計測などが開発および実装化されている。

3.4 今後開発・実装化が望まれる技術

鋼構造物の長寿命化に係わる劣化現象は、腐食等環境要因による劣化現象と疲労損傷等を要因とする構造要因による現象に大別できる。鋼構造物の劣化現象を含む各種状況把握に今後とされ開発・実装化が望まれる技術について列挙する。

(1)点検・調査技術

1) 走行車両による路面及び舗装下面、舗装下面より深部の変状検知技術

高速道路会社で既に開発が進められている道路版のドクターイエローの開発。路面性状はもちろん、舗装下面の状況（水や空洞の有無）、床版部分の状況なども同時に検知できるシステムの開発が望まれる。

2) マイクロロボットによる点検困難部位の可視化技術

ファイバ스코ープと異なり、より小型で自立的多機能なマイクロロボットによる点検困難部位の画像取得や3D スキャンが可能なロボットの開発が望まれる。

3) ロボットカメラによるケーブル表面の展開写真データの取得と分析技術

既に実用化されているロボットカメラによるケーブル表面の劣化状況の確認。斜張橋の平行線ケーブルだけではなく、より線ケーブルも対象とでき、小規模吊橋のハンガーケーブルの金具やニールセンローゼ橋のケーブル拘束金具、斜張橋ケーブルの制振装置などを乗り越えて自走できる性能を有するロボットカメラの開発が望まれる。

4) カメラによる鋼構造物表面の展開写真データの取得と分析技術

既に建築分野で一部取り入れられている 360° パノラマ写真、3D スキャン装置と写真の合成技術などを取り入れた、鋼構造物の全表面の展開写真を取得する技術と、それを分析して損傷を評価する技術の開発が望まれる。

5) 塗膜下の腐食状況を検知する技術

塗装を剥離させることなく、塗膜下の鋼材の腐食状況を把握する技術。塗膜下で進行している腐食は、目視点検や打音検査で検出することは可能であるが、ある程度の熟練が必要であり、客観的に非接触で検出する技術開発が望まれている。

6) 腐食ボルトの残存軸力の計測技術⁶⁾

腐食した高力ボルトの残存軸力を計測するためには、現状では破壊もしくは微破壊検査を実施する必要がある。より正確に破壊することなく軸力を確認できる技術の開発が望まれている。

7) 疲労クラックの非接触型検出技術

疲労クラックの検出に関して、各種センサーや検出システムの開発・実装化が進んでいる。さらに、足場を要することのない、非接触型検出技術の開発が望まれている。

(2) モニタリング技術

1) 各種センサー・機器の耐久性能・耐候性能の向上

モニタリングは長期間の稼働を前提としているため、使用するセンサーや機器は屋内での利用を前提として開発されてきたものと異なり、耐久性能や耐候性能について高い水準が求められる。

2) ワイヤレスデータ転送技術・データストレージ

各種センサーの実装において、ケーブル配線は施工性・モニタリングシステムの維持管理の面からも問題があるため、データ転送および電源供給のワイヤレス化が望まれている。モニタリングで得られるビッグデータの保存方法と管理方法の検討が必要である。

3) 省電力・自己発電・蓄電・無線等の電力供給技術

長期間のデータ収集を実現するためには、センサーおよびデータ収集に係わる電力供給の簡易化が望まれている。また、災害前後での稼働を前提としているため、自律的電源によって数日から数週間は稼働する電源供給技術の開発が望まれる。鉄道橋では既に構造物の振動をエネルギー源とする圧電素子を用いた振動発電によるモニタリングシステムが開発されている⁷⁾。

4) 腐食環境の総合的モニタリング技術

架橋環境による腐食状況の違いを明らかにすることは、鋼構造物の長寿命化にとって基礎的データになるばかりではなく、劣化予測の精度向上にもつながる。飛来塩分、風向、風速、温湿度、水漏れ検知等の総合的なモニタリングシステムの開発と全国的な計測ポイントの設置が望まれている。

(3) 性能検証技術

1) 走行車両による構造物の振動計測システム

計測機器を搭載した車両が鋼構造物への载荷と計測を同時に行い、固有振動数などの振動特性を得る計測システムの実装化が望まれている。

2) 3次元カメラによる変形量の計測システム

非接触による変形量の把握のための3D計測システムの開発と作用荷重の検出技術、路面の監視カメラによる走行車両の記録をリンクさせたたわみ性状の計測システムの構築が望まれている。

3) 水平反力分散支承、免震支承の地震時性能の検証方法

地震時（大変形時）の支承の水平剛性、橋脚の水平・回転剛性を入力した動的時刻歴解析による耐震性能の検証を行う手法の確立が望まれる。ゴム支承の初期剛性を製作時の管理値に加える、初期剛性と大変形時の剛性の相関性についてのデータ取得を進めるなど使用状態で検証が可能となる体系を整える。もしくは、部品単位ではなく、組み込んだ構造物全体を水平方向に大変形させ、構造系全体の水平剛性・減衰などの特性を検証する方法を構築するなどの方策が必要である。

4) 作用荷重の検出技術

先述したように、W.I.Mシステムや軸重計は既に実装化されているが、簡易でより長期間の試用に耐え得る検出技術の開発が望まれる。

【参考文献】

- 1) 土木学会鋼構造委員会：鋼構造シリーズ鋼構造シリーズ7 鋼橋における劣化現象と損傷の評価，1996.10.
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）鋼・合成構造物，2007.1.
- 3) 岡林隆敏，原忠彦：道路橋振動特性測定における衝撃加振法の適用，構造工学論文集 vol.34A,pp731-pp738，1988.3.
- 4) 日本鋼構造協会：土木鋼構造物の点検・診断・対策技術，2013.
- 5) 藤井堅：構造物の維持管理その難しさとおもしろさ，川田技報，vol.30,pp4-9,2011.
- 6) 下里哲弘，田井政行，有住康則，矢吹哲哉，長嶺由智：腐食劣化した高力ボルトの残存軸力評価に関する研究，構造工学論文集，Vol.59A,pp.725-735,2013.3.
- 7) 吉田善紀，小林裕介，内村太郎：鋼鉄道橋における部材の振動発電を利用したモニタリングシステムの構築，土木学会第65回年次学術講演会，I-515,pp.1029-1030,2010.9.