
3. 調査および解析の評価

観察の結果、「2.1.2 損傷位置と状態」に示した支承の損傷は、P4 橋脚の右側支承を除くすべてピボットローラー支承で生じており、その損傷は、ピニオンギアの脱落、ピニオンギアとローラー胴部を結ぶまたはローラー胴部の中間の軸部の付け根部の破断、ローラーに沿った向きの支圧板の割れに大別された。ピニオン、ローラー、支圧板ともに、顕著な腐食は見られなかった。

また、カバープレートも含めた外観と、カバープレートを外して内部を観察した結果の比較からは、「2.1.2 損傷位置と状態」にまとめたように、カバープレートが外側に膨らんでいたり、カバープレートを固定するボルトが脱落していたりする場合、カバープレート内部で支承に損傷が生じているという関係性が見られた。この関係性を前提に過去の定期点検結果を調べると、過去の定期点検では支承の損傷は記録されていないものの、2015年（H27）の定期点検にて撮影された、P5 橋脚、P6 橋脚上の支承の写真からは、カバープレートの異常が疑われることから、これらの支承では、2015年（H27）にはすでに損傷が生じていた可能性が高い。

「2.4 支承の損傷状態調査」に示したように、ローラー胴部には変形などは生じていなかったものの、支承によっては、胴部の端部がガイドと接触している様子も見られた。また、支圧板についても、表面の錆の状態等の色調の違い等から判断すると、支圧板に割れが生じているローラーの可動幅も限定的であった。

破面観察では、ローラー軸部では、表面付近に起点を有するリバーパターンが見られた。このことから、繰り返し作用する力により脆性的な破壊が生じたと考えられる。支圧板は、ローラーと接触する表面側で材料が剥離し、さらに深さ方向にはビーチマークが確認された。このことから、支圧板では、表面側から深さ方向に徐々に損傷が進行していき、最終的に破断したと考えられる。これに併せて、断面観察および超音波探傷試験では、ローラーや支圧板の断面内部での割れや傷が見られなかったことから、製作時からの内部の割れや傷が支承部損傷の直接の原因であった可能性は除外できると考えられる。

以上からは、可動支承が用いられているものの実態としてローラーはほぼ移動しておらず、支承は軸方向にも固定支点として挙動していたものと考えられる。そして、支承は大型の箱桁の支点であり、常に大きな鉛直力が作用していること、ローラー胴部とガイドが接触したことや支圧板の表面で損傷が進行したことにより、ローラーが軸方向に均等に鉛直反力を受けられず、ローラー軸部の付け根では、負荷が大きくなるなどで、脆性的な破断が生じた可能性がある。また、支圧板は、橋の死荷重状態でも支承ローラーから大きな鉛直力を受けているだけでなく、ローラーが実質的に移動できなかったことで、可動域が限定的となり反力の変動が繰り返し生じたことで、徐々に断面方向に損傷が進行し、破壊に至ったと考えられる。

このように、桁からの大きな作用力や、鉛直または偏心反力の繰り返しが破壊に影響を与えたと考えられるが、過去の荷重の履歴を調べると、「2.2 建設時の設計・施工出来形・維持管理履歴」に示したように、突発的な地震、暴風、顕著な高温などによる上部構造からの大きな偏心、傾斜荷重の作用が原因になったとは考え難い。また、大型車の通行量からは車両通行の繰り返しによる疲労損傷とも考え難い。記録の範囲では、ダンパーの損傷は確認できたものの、風による振動の継続が問題になったことはなく、風の振動の継続による破壊も考え難いことが分かった。

これらのほか、日々変動し、繰り返し作用する影響として温度の影響が考えられた。本橋は曲線橋であることから、温度変化や桁断面の温度勾配により橋は軸線方向に伸び縮みするだけの挙動にとどまらないこと、また、支承の設置方向（主桁接線方向）と桁の伸縮方向（各可動支承から固定支承である P3 橋脚を結ぶ方向）が一致しておらず、幾何学上、支承の可動方向のみに可動となり難いことは、支承に大きな反力の変動を繰り返し生じさせるだけでなく、可動支承が軸方向にも固定支点のように挙動していたこととも符合する。

温度影響による橋の全体挙動の推定を行うために、本橋では全体挙動の調査を行った。ただし、損傷前または応急対策前とは、応急対策後の支承条件は異なっていることから、今回計測した挙動と数値解析結果を直接比較できない点は注意を要する。

- ・温度分布の計測結果は、1 日の中で全体の温度変化は 10～15℃程度、床版とウェブ、下フランジとの温度差は最大で 20℃であった。また、左側ウェブと下フランジ、右側ウェブとの温度差は最大 13℃であった。また、径間毎に各部材への日射の時刻が異なることを確認し、各径間や各部材への日射の時刻により、温度差が生じる。さらに、日射の影響が小さく部材の温度が低くなる冬期には温度差がさらに大きくなると考えられる。
- ・桁伸縮量調査では、温度変化に伴った曲線の外側への桁の変形が支点部で直角方向に拘束されることからひずみが発生し、さらに左右のウェブで差異が生じていた。また、床版および下フランジでは、上下の温度差による変形が連続桁中間支点で拘束されるため、ひずみが発生すると考えられる。
- ・支承反力を計測した結果から、温度変化に応じて支承鉛直反力が変動し、同一橋脚上の左右支承の反力比率も変化していた。
- ・下部構造天端の変位を計測した結果、可動支承を有する橋脚や支承の応急対策が行われた橋脚で、桁接線方向（橋軸方向）に下部構造は変位していた。下部構造の変位は支承部が拘束されることで下部構造に水平力が伝達していると考えられるため、支承は、可動状態というよりは固定に近い状態にあると考えられる。
- ・左右の支承の変位量にずれが生じており、応急対策を行っていない支承では、左右の支承の変位量に最大 1.7mm のずれが生じていた。応急対策を行った支承では、ローラーと支圧板を外し下咎と底板の間に PTFE 板を置くことで、PTFE 板位置では比較的自由に変位できる状態であったが、左右の支承の変位量にずれが生じていた。また、支承変位量は、固定支承である P3 橋脚から離れた支承ほど大きかった。

応急対策を実施したことで損傷前または応急対策前に比べて支点拘束条件は変わってしまっているが、応急対策後では支承は移動も生じているものの、半固定のような状態であり、下部構造にも支承可動方向の力が伝達されていた。

以上から、特に、上部構造に温度変化や温度勾配を与えたときの橋の挙動について、数値解析により把握することにした。数値解析は、上部構造をシェル要素でモデル化し、立体的な挙動を捉えるとともに、支点反力も各支承位置で算出できるようにモデル化した。また、可動支承が固定支点のように挙動するのであれば、橋の伸縮挙動は下部構造が変形し吸収することになるため、下部構造についても、その剛性が考慮できるようにモデル化した。ただし、支承を桁接線方向に可動できその他方向には固定である条件で数値解析を行うと、与えた条件どおりに、桁は支

承位置で桁接線方向に可動となる。一方で観察では、ローラー胴部端部がガイドに競るなどしてローラーが可動できる範囲は極めて限定的であったこと可能性が高い。具体的には、「2.7.4 直角方向にギャップを設定し橋軸方向固定とした全体解析」に示したように、ローラーとガイド間に直角方向の遊間（ギャップ）を設定し、桁の伸縮によりローラーとガイドが接触するようにした支承をモデル化した。しかし、直角方向のギャップを設けたモデルでは、下部構造に生じる変位が解析結果と現地計測結果で一致しなかった。そのため、支承部にはギャップを設けず、当初から橋軸方向に抵抗があるモデルを最終モデルとした。

以上のモデルに対して、死荷重、温度変化+10℃、床版と桁の温度差に+20℃、左右ウェブの温度差+15℃を与えて、橋の挙動を計算した。計算値を見ると、支承の動きは拘束される傾向がみられ、支承の拘束に伴い、橋梁全体も複雑な変形形状を示し、支承反力も設計計算値よりも明らかに大きくなった。支圧板に生じる局所的な反力の計算値は、鉛直反力のうち、死荷重の寄与分は40%、温度の影響は60%である。このように、数値解析では、本橋の支承は非常に高い応力下に繰り返しさらされた可能性を示した。

直角方向のギャップを設けたモデル：CASE-2で支承毎の挙動を見ると、温度を漸増させたときに、すべての橋脚上の支承で同時にローラーとガイドが接触し、支承の動きが拘束されるのではなく、基本的には固定支承を有するP3橋脚よりも離れた位置の下部構造上の支承から順番に、可動できない拘束状態へと移行する傾向があった。実際の損傷でも、固定支承を有するP3橋脚よりも遠い位置の下部構造上の支承で損傷が大きい傾向がみられたことと符合している可能性がある。

各支承の反力を詳しく見ると、死荷重により大きな鉛直反力が生じ、温度変化に対しては、橋軸直角方向のみならず橋軸方向にも水平力が発生する。そして、拘束状態へ移行する。また、床版と桁の温度差により、計算上、桁は上下にたわみ、その結果、支承には鉛直反力の変動が生じる。実際には、全体の温度変化や水平方向からの日射の影響を受けることも考えて、死荷重、桁断面の上下方向の温度差だけでなく、全体温度変化および左右のウェブで温度差を与えると、桁に上下方向の変位分布が生じるだけでなく、桁曲線の内側ウェブの温度が高いときは桁の支間中央部が水平方向へ変位し、ねじれるような挙動を見せた。このとき、全体温度変化、桁断面上下の温度差、桁断面左右の温度差を考慮したときに生じる支承の鉛直反力は死荷重反力の36%程度であり、結果として、ローラーや支圧板に生じる反力の計算値は死荷重反力の237%であった。

以上の損傷の観察結果、破面観察結果、全体挙動調査、数値解析結果からは、損傷の主な要因の1つとして、少なくとも、桁形状と支承の設置方向の不適合や箱桁断面の上下左右面の温度勾配の影響の組合せが挙げられる。本橋は規模の大きな曲線橋であり、支点毎にローラーの可動方向を桁接線方向と一致するように支承を設置しているものの、各支点での挙動は接線方向と一致せず、温度変化や温度勾配を受けて伸縮しようとする桁の動きに対して支承の可動方向が互いに干渉し合い、結果的にすべての支承が固定支点のような状態であったと考えられる。また、上部構造の規模が大きく、ローラーも支圧板も桁の死荷重だけでも常に大きな鉛直反力下にあること、支承位置で桁の動きが拘束された状態で桁断面の上下左右の温度勾配により曲線橋にねじりが生じ、支承には鉛直反力の変動が生じること、これが長年にわたり繰り返されてきたことが、

支圧板の損傷の原因である可能性が疑われる。計算モデルでは考慮できていないが、一旦支圧板が損傷すると、ローラーが受ける反力のローラー軸方向の分布も偏ることや、支承は水平方向の移動に対してさらに固定条件のように挙動することで、他の支承にも悪影響を与えやすくなると考えられる。また、この見立てが成立しているとすれば、まだ損傷が生じていない支承でもいずれは同様の損傷が生じることも想定されることも、復旧にあたって考慮すべきと考えられる。

なお、支承の材質を調べた結果からは、受け入れ時の材料検査結果に問題はないものの、支圧板では、内部と表面の硬さに差がなかった。道路橋支承便覧では、支圧強度を高めるためにローラーや支圧板の表面に焼き入れし、鋼材の内部に比べて表層を硬くすることとなっているが、超音波計測結果からは支圧板内部の割れや傷が検出されなかったこと、また、上述のように破面観察結果でも表面からの進行的な損傷の累積の結果として破断に至ったと考えられることから、内部と表面の硬さに差がなかったことは、今回の損傷の主たる要因ではなかったと考えられる。ただし、圧縮残留応力が十分ではないため、支圧板はローラーと比べ損傷が発生しやすい状態であった可能性はある。以上の結果において、他の大型橋のローラー支承の維持管理にも反映すべき知見として以下のことが挙げられる。

- ・比較的大型の橋や1支承線上に2点で支えているローラー支承のローラーや支圧板は、比較的大きな死荷重反力の下で、反力の変動を受ける。また、曲線橋でローラー支承が用いられていると、橋によっては、本橋と同様に、設計では可動と想定している支承が結果的に幾何学的に拘束されてしまうことがある。以上のような状態で、日々の温度変化の影響で支承反力に大きな変動が生じると、死荷重反力との組合せによっては、ローラーや支圧板に累積損傷または進行性の破壊が生じることが生じる可能性がある一方で、ローラーや支圧板のSN線に実験結果などに基づいて提案されたものがあるわけではない。したがって、定期点検においては、そのような損傷が生じる可能性も念頭に入れながら、支承部の点検を行う必要がある。
- ・今回の損傷例からは、上記の特徴がある橋などでは、ローラーをカバーするカバープレートを外すなどし、内部の損傷の有無を確認することが、早期に損傷を発見し、橋の安全性の確保のための対策を行う上で重要であると考えられる。その他の橋でも、外観にて、カバープレートに膨らみ、ボルトの破断などの異常がみられる場合やピニオンギアの損傷がみられる場合には、カバープレートを外すなどし、内部のローラーや支圧板の状態を把握するのがよいと考えられる。
- ・今回のように、応急対策などで、対策前と後で支点条件が異なっている場合には、モニタリングを行っても、応急対策前の橋の挙動を直接的に知ることができないので、計測結果の解釈に注意を要するとともに、モニタリング結果に基づいて数値解析を行うという考えに固執せず、むしろ同時並行的に支点条件をパラメータにした数値解析による検討を行うことが損傷の原因につながる橋の挙動を推定するうえで合理的な手順となる場合がある。