

2.4. 段差発生後の緊急外観調査（令和2年11月実施）

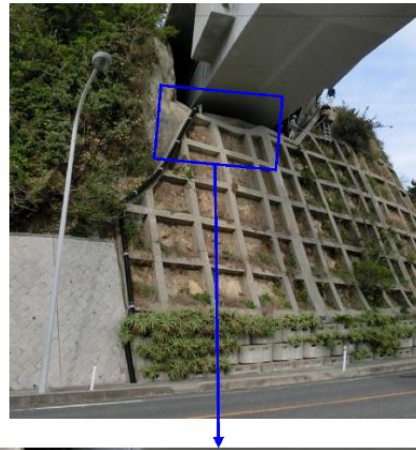
段差発生後、橋の外観調査及び試験等が実施されており、以下に示す状態であった。

- ① A2 橋台前面ののり面保護施設や周辺地山等との間に特段の変状が確認されず、橋台が沈下した痕跡がみられなかった（図 2.57）。
- ② A2 橋台部の上部工突起部に破壊が生じていた（図 2.58）が、調査時には鉛直 PC 鋼棒の状態を直接確認することはできなかった。
- ③ 過去の耐震補強工事で設置された主桁と A2 橋台を連結する PC 外ケーブルについては、目視の範囲では A2 橋台での浮き上がりに伴う変状は確認されなかった（図 2.59）。
- ④ 径間中央のヒンジ部において、A1 橋台主桁側と比較して A2 橋台主桁側が下がっており、橋面で約 20mm の段差、及び主桁下面でも段差を確認した（図 2.60）。平成 15 年度の調査でも、A1 橋台主桁側橋面が A2 橋台主桁側橋面に比較して高い段差が確認されていた（図 2.22）が、その時の段差は 10mm であった。
- ⑤ 径間中央では、A1 主桁側のヒンジ構造付け根部で塗膜割れが確認された（図 2.61）。
- ⑥ A1 橋台の橋座面では PC ケーブル定着部の腐食等が生じていた（図 2.62）。
- ⑦ 上部工箱桁内については、図 2.63 に示す損傷が確認された。
- ⑧ A1 橋台端横桁において、最大幅 1.1mm のひびわれを確認した（図 2.64）。平成 15 年度の調査時にも同じ最大幅のひびわれが確認されているが、PC ケーブルの定着ブロック間や端横桁上部などで、ひびわれの本数が増えている。なお、平成 29 年度の定期点検では、ひびわれがみられた写真はあるものの、端横桁の正面を展開した損傷図が記録されていない。
- ⑨ P2 橋脚柱頭部の北（室津側）面において最大幅 2mm（長さ 5m）の水平方向ひびわれを確認した（図 2.65）。
- ⑩ ゲレンク沓については、下爪部材への接触がみられた。下爪部材には塗膜の剥がれが認められたため、超音波探傷（UT）試験により傷を確認し、磁粉探傷（MT）試験により亀裂の有無を確認した。その結果、西側ヒンジ部の表面の形状不良による線状磁粉模様が検出されたが、亀裂はみられなかった（図 2.66）。

A2 橋台上の段差



A2 橋台前面ののり面保護施設



A2 橋台周辺地山の状態



図 2.57 緊急外観調査で確認された状態 (その1)

A2 橋台前面の状態

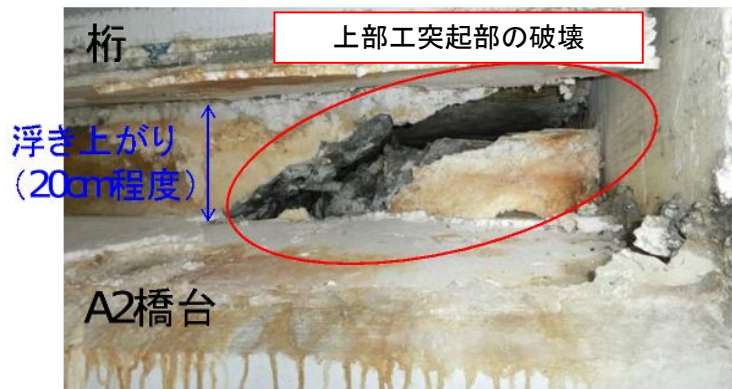


図 2.58 緊急外観調査で確認された状態 (その2)

主桁と橋台を連結する
PC ケーブル

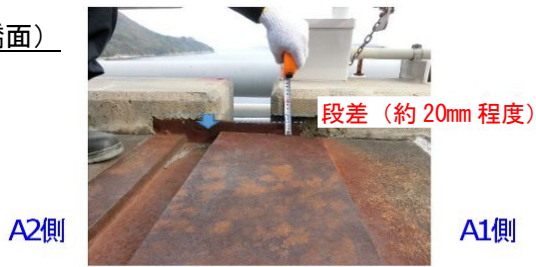


主桁と橋台を連結する
PC ケーブルの橋台側定着部



図 2.59 緊急外観調査で確認された状態 (その 3)

径間中央 (橋面)



径間中央 (主桁下面)

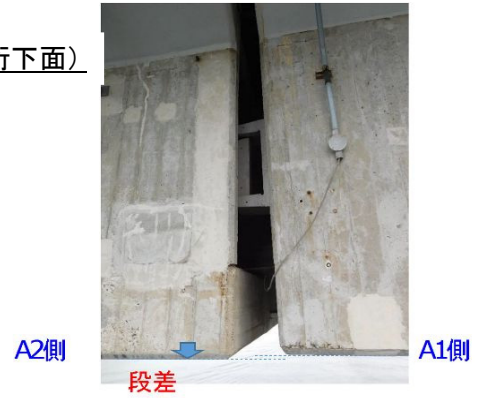


図 2.60 緊急外観調査で確認された状態 (その 4)

径間中央のヒンジ部の状態



図 2.61 緊急外観調査で確認された事項 (その 5)

P2 橋脚柱頭部



A1 橋台上の路面



A1 橋台前面の PC ケーブル



P2 橋脚付け根部



図 2.62 緊急外観調査で確認された事項 (その6)

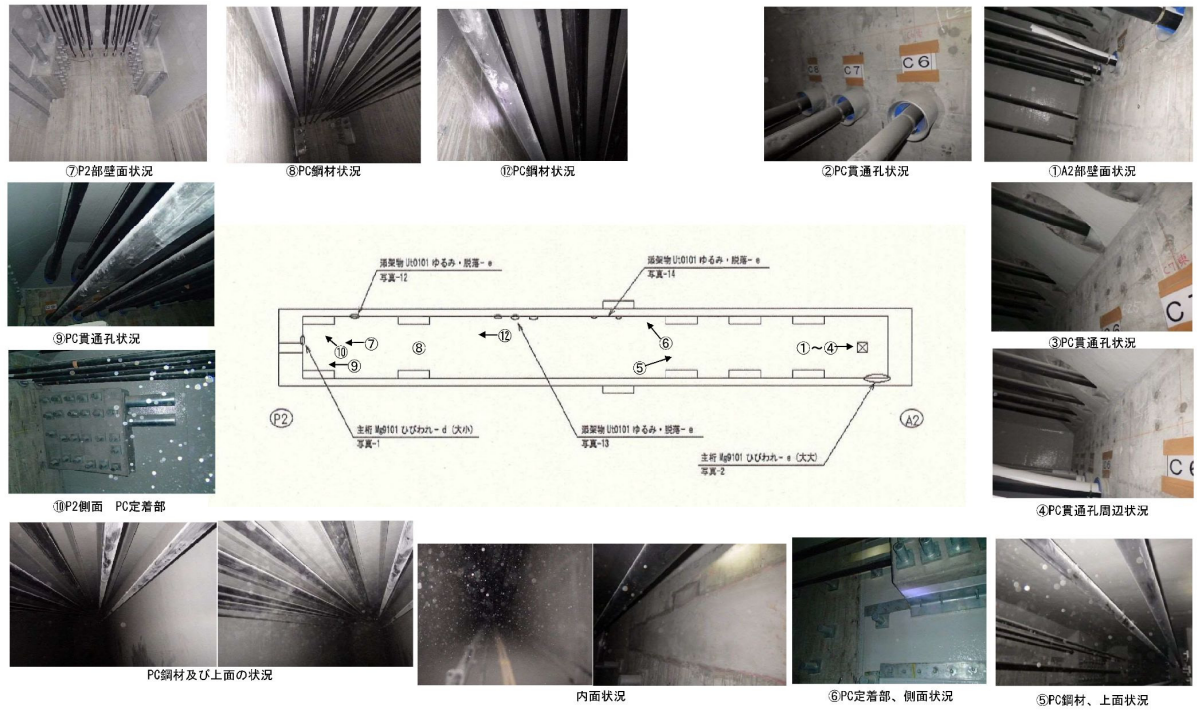


図 2.63 箱桁内部の外観目視結果 (P2-A2 間の箱桁内部)

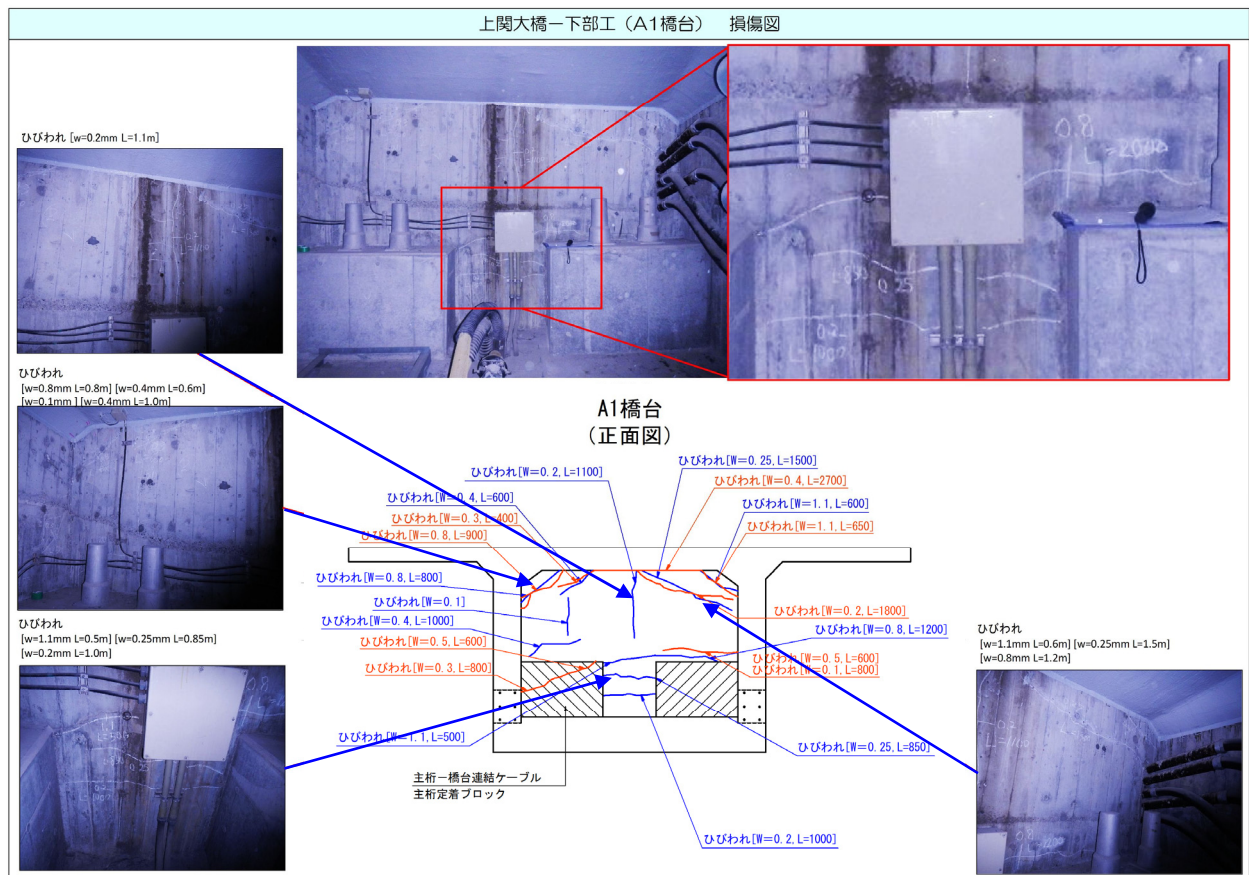


図 2.64 A1 橋台端横桁のひびわれ状態 (青線：緊急外観調査、赤線：平成 15 年度調査)

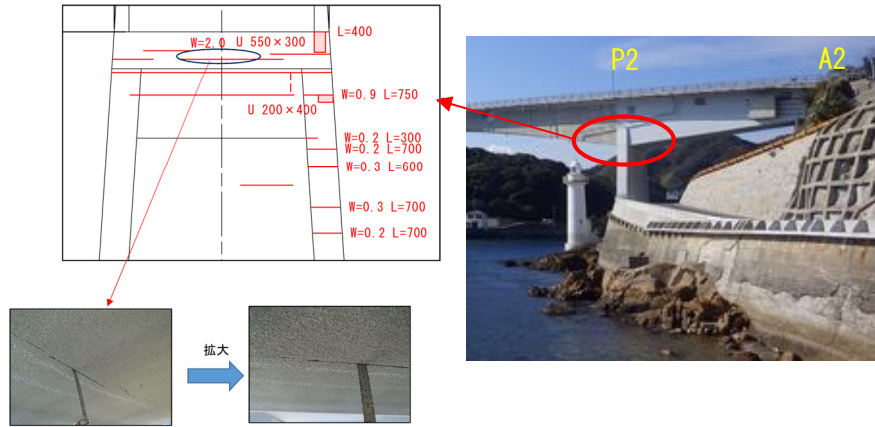


図 2.65 P2 橋脚柱頭部のひびわれ状態

			PHOTO No. 2
<p>東側ヒンジ部</p> <p>西側ヒンジ部</p> <p>単位: mm</p>			<p>西側ヒンジ部</p> <p>MT状況</p> <p>表面の形状不良による φ5の線状磁粉模様を認める</p>
試験場所 ESAM PLACE	上階大橋	顧客担当課 CUSTOMER'S ATTENDANT	
試験目的 AIM OF EXAM	定検点検		
試験内容 EXAM. STAGE	目視検査		
検査履歴	EVALUATION	試験技術者 EXAMINER	
<p>超音波探傷試験において、きずによるひびわれは検出しなかった。</p> <p>磁粉探傷試験において、西側ヒンジ部に表面の形状不良による磁粉探傷の模様を認めた。西側ヒンジ部およびその周辺の磁粉探傷模様を抽出しなかった。</p>		<p>氏名 NAME</p> <p>資格 LICENSE</p> <p>JISQ1014 2005010401</p> <p>JISQ1014 2005010402</p> <p>JISQ1014 2005010403</p> <p>JISQ1014 2005010404</p> <p>JISQ1014 2005010405</p>	
		部門 DEPARTMENT	
		承認者 APPROVED	
		確認者 CHECKED	
		施行責任者 EXECUTED	

図 2.66 試験箇所・MT 試験結果

2.5. 橋の状態と調査事項に関する助言

事故の発生、及び本章における既存資料の調査、緊急外観調査の結果に基づき、検討会議では、損傷の拡大を防止することが重要であること、そのうえで、さらなる現地調査や計算等による検討が必要であることを指摘した。そして、以下の助言を行った。

2.5.1. 橋の状態の見立てについて

- ① 平成15年に実施された調査やその後の定期点検においてみられた橋台前面でのひびわれ、漏水からは、下部工突起部の高さ程度までの滞水と排水が長期に渡って繰り返されたことが推定された。また、過去にA1橋台側で、橋台と桁を連結する鉛直PC鋼棒に腐食がみられている。これらの状況からA2橋台側の鉛直PC鋼棒または水平PC鋼棒、あるいは両者が破断した可能性がある。鉛直・水平の両者が破断しているのであれば、地震や暴風に対して桁全体が回転、水平移動し、突発的に落橋に至るような、極めて危険な状態であることも想定すべきである。
- ② PC鋼棒が健全である場合には、橋台コンクリートにも、外ケーブルやグラウンドアンカーが定着され、また、その定着位置の関係からは、コンクリートに引張応力が生じ、大きなひびわれ等が生じることも否定できない。この場合も、地震や暴風に対して橋台と桁全体が回転、水平移動し、突発的に落橋に至るような、極めて危険な状態であることも想定すべきである。
- ③ 中央の伸縮装置ではA2橋台側スパンがA1橋台側スパンの下に入り込んだまま、A2橋台側の桁がA1橋台側の桁にもたれかかった状態であるが、A1橋台側の端横桁のひびわれは、表面に段差等もみられた。設計方針や実際の構造を確認することが必要であるが、現時点においても、引張力がこれ以上生じたときに局所的な引張破壊が生じることや、せん断破壊に移行することも懸念しておくべきである。
- ④ A2橋台側の桁がA1橋台側に単純にもたれたのか、A2橋台側とA1橋台側の桁の衝突等の結果として現状になっているのかが不明である。中央ヒンジ部が損傷した場合、A2橋台側の下部構造の回転が進み、落橋に繋がったり、下がっている桁が突発的に跳ね上がるなどの事態が懸念される。
- ⑤ 耐震補強のための外ケーブルも追加されているが、その結果、上床版の応力状態が建設当初よりも厳しくなっている可能性がある。加えて、支間中央部でA2橋台側の桁がA1橋台側の桁にもたれかかり、中央径間では桁断面の上床版が圧縮側、下床版が引張側に变化している可能性も想定される。
- ⑥ 現状の中央径間部の断面力分布や応力分布の推定を単純な計算では行うことが難しい上、P2橋脚柱頭部付近の桁断面の応力状態は、計算よりも厳しくなっている可能性がある。
- ⑦ 持続荷重や日々の温度変化によって、事故直後から応力状態も変わっており、今後もまた、変わっていくことも想定しておく必要がある。
- ⑧ 側径間に鋼板により重量を載荷していることは、必ずしも桁の応力状態として有利とは言えない。柱頭部の負曲げを厳しくし、圧縮側、引張側のコンクリートの安全率に関して、不利な影響を与えている可能性もある。

- ⑨ A2 橋台側の桁が A1 橋台側にもたれかかった結果、A1 橋台側における橋台と桁の連結部の負荷が増えている可能性がある。A1 橋台部では、過去に、既存の鉛直 PC 鋼棒の全てが破断しても問題が生じないようにバックアップケーブルが追加されているが、既設の鉛直 PC 鋼棒とバックアップケーブルの荷重分担が不明である。また、バックアップケーブルの桁定着部は、下床版、桁ウェブ、及び端横桁に荷重伝達されるが、設計における応力伝達メカニズムや限界状態の想定が不明であること、現在もすでにケーブル定着部のコンクリートにひびわれが生じていることから、バックアップケーブルに設計で想定するとおりの強度が期待できるか、ただちには明らかではない。
- ⑩ いずれの橋脚も、桁の移動に伴い倒れ込みが生じている可能性がある。段落とし部での曲げ、せん断破壊が生じることで、不安定化するおそれがある。
- ⑪ 耐震補強のために設置された落橋防止構造であるケーブルは、桁との位置関係からは、ある程度桁に大きな変位が生じないと効果的な抵抗力を発揮しない可能性がある。
- ⑫ 地震や暴風等の影響については脆弱であることは既に指摘したとおりであるが、本橋の上部構造や上下部構造の連結部の応力状態については、死荷重や日々の温度の影響が非常に大きいと考えられる。活荷重については、死荷重や温度の影響に比べれば相当小さいと考えられる。しかし、動的成分については、車両直下で局所的に大きな影響を与える。たとえば、桁端付近、桁上床版、中央ヒンジ部付近などで局所的な損傷があると、影響を受けることが懸念される。

2.5.2. 当面の安全性の確保について

- ① 変形や損傷などが進行的である場合には、監視を行うことでその進行が捉えられる可能性がある。一方、本橋の現状では、必ずしも進行的な損傷や破壊ではなく、突発的に落橋等に至る危険性を想定せざるを得ない。したがって、監視を行うとともに、地震や暴風、また、活荷重の衝撃の影響による突発的な落橋等ができるだけ避けられるような対策を講じるべきである。
- ② 突発的な落橋その他致命的な状態をできるだけ避けるための対策として、A1 橋台と桁の接合部、橋脚や桁断面の損傷に伴う桁の変位に対して支間中央部で桁どうしがもたれ合うように変位形態を誘導することや、A2 橋台位置での上方、水平の変位をできるだけ拘束することが考えられる。そこで、A2 桁端及び中央ヒンジ部の変位を拘束することが考えられる。
- ③ また、桁端と橋台の連結部、中央ヒンジ部、桁断面引張側コンクリートの応力状態の推定が困難であることも考えると、軸重の衝撃分による局所的な応力変化の影響を小さくできるように、車両の通行は、徐行とすべきである。車両の連行・並走も考慮した車両総重量は、死荷重の影響に比べると小さいと考えられるので、監視等の結果もみながら、規制の方法を検討することも可能と考えられる。
- ④ まずは、徐行等の規制、監視体制などの管理体制の構築と併せて、中央ヒンジ部の対応を優先し、直ちに以下の観点で対策を取るべきである。
 - ・中央ヒンジ部に異常が生じて、左右の桁は、せん断力を伝達でき、出来るだけ分離が生じないようにする。
 - ・A2 橋台や A1 橋台における橋台と桁の連結部、A1 橋台、A2 橋台、P1 橋脚、P2 橋脚で更なる損傷が生じたときにも、桁どうしが互いにもたれ合うような変形状態にできるだけ誘導し、かつ、左右の桁で圧縮軸力が一定程度伝達可能であるようにする。
 - ・たとえば、中央ヒンジを跨いで、桁断面下面に PC 鋼線を軸方向に通すことで、目開きを抑えつつ、せん断変形にも抵抗させるなどしたうえで、断面上側では一定の圧縮に耐えられるように、必要に応じてコンクリートを補強することが考えられる。

- ・冬場は気温が下がるため、軸方向の固定の剛性が高いほど、桁に導入される引張軸力が大きくなるため、連結方法を検討するにあたっては注意すること。
- ⑤ P2 橋脚柱頭部のひびわれについては、進展を監視しておく必要がある。一方、橋の形状をできるだけ元に戻そうとしたときに障害とならないような方法を考える必要があること、上部構造の設計計算上は、柱頭部はピン可動支承と同じに扱われていることから、上部構造と橋脚の接合部の曲げ剛性が低下していても、直ちに上部構造の不安定化にはつながらないことから、現時点で補修等を急ぐものではない。
- ⑥ この他、桁や橋台についても、今後の比較の基準となる正確な損傷図を作っておくべきである。監視は、以下の観点で行うのがよい。
- ・ 監視は、主として突発的な事象が生じたことを間断なく把握するためのものと、主として進行的な変化を把握するためのものとを組み合わせるのがよい。突発的な事象が生じたことを間断なく把握するためには桁の位置、形状の大きな変化を捉えることが考えられ、例えば、桁内部にターゲットを複数断面に設置し、A1 橋台から A2 橋台までを通した桁形状や桁形状の変化が捉えられるようにするのがよい。進行的な挙動を捉えるためのモニタリングも行うが、その対象断面が選択的であることを補う面からも、桁全体のおりを把握できるような計測を行っておくことは有効と考えられる。
 - ・ 進行的な変化については、応力が厳しい桁断面で応力・ひずみを計測し、日々の応力・ひずみの振幅に、傾向の変化などが生じないか把握することが考えられる。最大値だけでなく、断面では応力・ひずみの分布特性や日々の振幅も整理するとよい。たとえば、温度と応力・ひずみの履歴曲線の形状に変化がみられないかどうか、日平均気温の変化に応じて履歴曲線の中心点が移動していくときに移動の傾向に変化がみられないかどうかなどを追跡することが考えられる。
 - ・ 応力・ひずみを監視する断面を選ぶにあたっては、当初設計や補強設計の結果から応力が厳しくなりそうな断面、たとえば、A1 橋台と桁端を接合する鋼材や定着部、柱頭部付近の桁断面、桁断面力の向きが変化する点付近、落橋防止ケーブルの桁定着部付近などを選ぶだけでなく、橋の変形形状の測量等を行い、当初設計でさほど大きな断面力が生じないものの事故により断面力の向きが変わるような断面など、事故の影響が表れやすいと考えられる断面も選んでおくのがよい。
 - ・ 応力・ひずみの振幅は、計測開始時点からの変化を測るものであり、実際の応力状態を反映したものではないことに注意する。
 - ・ 橋脚については、早急にひびわれ等を正確に把握する。また、すでに見られたひびわれは監視する。加えて、段落とし部については、ひびわれが無い場合でも、ひびわれの発生について把握できるように監視する。
 - ・ A1 橋台側の鉛直 PC 鋼棒の桁定着部のひびわれについては、起終点、分岐なども正確に記録したうえで、進展がないか監視を行う必要がある。
- ⑦ 桁端部において、変位を固定する方法も同時並行で準備を進めるのがよい。アンカー等を取ることが考えられる。復旧工事においても、同様の行為が必要になると考えられるため、アンカー等の配置や量については、復旧工事を阻害しないような方法を検討するのがよい。そのほかの注意点は以下のとおりである。
- ・ アンカーの桁側定着位置は、ウェブに下向きの圧縮力が入るような形や、下床版が抜けたり、下床版とウェブが分離するような応力状態にならないような形にすることを検討するのがよい。たとえば、桁全断面を押さえ付けられるような、できるだけ高い位置とすることが考えられる。

- ・ A1 橋台側のバックアップケーブルの桁定着部においてはコンクリートにひびわれが生じている。これについては、発生時期や原因の詳細は不明であるが、バックアップケーブルからの力によりコンクリートに引張が生じたことによるひびわれ発生の可能性もあることから、現時点では、同様の定着方法を避けることが望ましい。
 - ・ アンカーにより橋台躯体・基礎コンクリートに引張が生じないようにするためには、橋台ではなく、地盤にアンカーを取ることも検討すべきである。
- ⑧ 側径間に積載した重量は、柱頭部での桁の応力状態を必ずしも改善していないと考えられること、復旧までの期間が短期とは考えにくく、重量物自体の安定の管理が課題になると考えられることから、桁端の変位を固定すると同時に撤去を検討するのがよい。

2.5.3. 損傷箇所や損傷メカニズムに関する調査

- ① 事故時の挙動を推定するためには、PC 鋼棒がコンクリートから抜けだした痕跡や上下のコンクリートどうしの擦過痕、連結部の鉄筋の抜け出し、腐食、破断なども記録しておくことよい。
- ② 中央径間側が下がり、桁端部が上方に移動していることからすれば、桁と橋台を連結する鉛直 PC 鋼棒が破断している可能性から調査を始めるとよい。
- ③ 中央径間側が下がり、桁端部が上方に移動していることからすれば、少なくとも鉛直 PC 鋼棒についてはすべて破断していることや、加えて、水平 PC 鋼棒が破断していることまで想定せざるを得ないが、一方で、切れていない鋼材もあれば、調査中にも破断が生じ、橋に変位が生じることも想定した調査計画が必要である。
- ④ 鉛直 PC 鋼棒については、上部工突起部と橋座の間の隙間部分やその近傍で、腐食環境も応力環境も厳しいことが考えられる。下部工突起部は、機能上重要な役割を果たしていないと考えられる。また、上部工突起部も、圧縮力を伝える以外には特に重要な役割や機能を果たしていない。そこで、下部工突起部を部分的に前面側からはつり、鋼棒の状態を直接確認することから始めるのが安全で、かつ、損傷部位を把握できる可能性が高いと考えられる（以下、はつり調査という）。
- ⑤ なお、これらの突起部の役割からは鉄筋等を切断しても問題がない可能性が高いが、作業にあたっては、図面や設計図書等で、これらの突起部の構造上の役割を確認したうえで行うこと。また、PC 鋼棒が機能している場合、これを傷つけることは、橋の安全性に重大な影響を与える恐れがあることから、注意して作業を行うこと。
- ⑥ ④のはつり調査では、鉛直、水平の PC 鋼棒の防食や定着の方法も把握すること。例えば、過去に行われた A1 側の調査では、腐食のない鋼材の写真が残っているが、PC 鋼棒でなく、鋼棒を保護し、グラウトを充填するなどの目的のさや管であったなど、設計図書や平成 17 年当時調査の整合性を改めて確認すること。
- ⑦ A1 側で行われた過去の調査では橋台部分のコンクリートを大規模にはつり、鉛直 PC 鋼棒を目視することが行われている。設計図書では、鉛直 PC 鋼棒は付着により定着されていないものの、実際には付着も取られている場合には、コンクリートをはつることにより鉛直 PC 鋼棒の定着に関する実質の安全率が低下すること、実際の定着構造がよくわからないことから、避けるのがよい。

- ⑧ 設計図書によれば、鉛直 PC 鋼棒は付着では定着されていないこと、また、仮にグラウト等で定着されていたとしてもグラウト未充填箇所があることから考えれば、調査中に何らかの衝撃を与えることで鉛直 PC 鋼棒が突出することも懸念される。過去には、桁上床版コンクリートをはつり、鉛直 PC 鋼棒に打撃を与えることにより、非破壊検査が行われているものの、鋼棒の腐食が激しい場合には、コンクリートをはつることや鋼棒に打撃を与えることで突出事故等につながる恐れが懸念される。現在のところ、鉛直 PC 鋼棒が突出していると疑われる変状は橋面には見られないものの、調査は慎重に進めるのがよく、④のはつり調査を優先するのがよい。
- ⑨ 非破壊検査を行っても、平成 17 年調査でもその精度等は明らかでなかった。そこで、都度キャリブレーションが必要と考えられ、はつり調査が省略できるわけではない。
- ⑩ 鉛直 PC 鋼棒を確認したのち、その奥にある水平 PC 鋼棒についても、直接状態を確認するのがよい。
- ⑪ 鉛直 PC 鋼材に沿った上面側からの水の侵入・滞水、伸縮装置から桁背後を回ってくる水の侵入・滞水、コンクリート中の塩分量などの腐食環境についても把握するのがよい。
- ⑫ 橋台、橋脚やその支持地盤に移動がないことも確認しておくべきである。

2.5.4. 本復旧方針策定のための応力状態や橋の挙動に関する調査

- ① 最終的に応力状態や桁の位置を是正するために、中央ヒンジ部に水平ジャッキを設置したり、桁端部に鉛直ジャッキを設置したりすることも想定される。是正作業中の構造の安全性の監視のため、応力状態が厳しい箇所をできるだけ幅広く抽出しておく必要がある。
- ② 完成系だけでの計算では架設や補強工事上、応力が厳しい箇所を見落とす可能性もあることから、当初施工ステップ、A1 側鉛直 PC 鋼棒の状態の調査やバックアップケーブルの設置施工ステップ、耐震補強工事等の施工ステップをできるだけ反映させた応力計算を行う必要がある。たとえば、耐震補強と事故の結果として、上床版コンクリートの応力状態が厳しい状態になっている可能性もあることや、様々な PC 鋼材、ケーブルの定着部の応力状態が厳しくなっている可能性もある。
- ③ 事故直後の桁の挙動や、すでに事故から時間が経っていることも考えると、計算結果には通常的设计計算と比べても無視できない不確実性があると解釈する必要がある。
- ④ 計算では、中央ヒンジ部や桁端部での固定条件は、複数のパターンを想定しつつ、測量結果やひび割れ等の観察結果と比較しておくことが必要である。比較を通じて、計算結果を解釈するうえで、安全側の解釈となるように、解釈の方法を考察しておくのがよい。
- ⑤ 上部構造の設計計算では、桁端部はピン支承に置き換えて行われているが、実際の鉛直 PC 鋼棒と水平 PC 鋼棒の配置からは、桁端部に偶力が生じている可能性もあるので、鉛直 PC 鋼棒の配置に依存する幾何学的な桁端の拘束効果が計算結果に与える影響なども、再評価しておくのがよい。
- ⑥ 鉛直、水平 PC 鋼棒の破断の有無は明らかではないが、復旧方法を検討する観点からは、両鋼棒とも強度は期待できないことを想定し検討しておくことが安全側で、かつ、手戻りのない検討になると考えられる。

- ⑦ A1 側の追加部材の構造については、A2 側でも類似の対策を行う可能性はあるので、構造の改善ができる点を整理しておくのがよい。例えば、前述のとおり、バックアップケーブルの桁への定着構造については、再評価が必要である。また、既設が PC 鋼棒であるのに対して、バックアップのために追加されたものがケーブルであり、材料のヤング率（断面の軸剛性）が異なる。既設 PC 鋼棒が破断し、荷重が盛り変わるときに伸びが生じたりするなど、荷重分担を不明確になるなどが懸念されることから、既設部材と追加ケーブルの荷重分担が明確になるような構造に改善する余地も考えられる。
- ⑧ 当面の安全確保のために A2 橋台部でアンカーを取るときには、アンカーにはある程度の張力を入れる必要がある。張力を導入するときには、監視のために設置したセンサーも活用し、橋の各部の挙動を計測しておく必要がある。復旧工事のためにジャッキダウンするとき、支間中央部や A1 側橋台にどのような変化が現れるのかや、桁の各部の応力の変化の分布を把握することで、ジャッキダウンの有効度や、ジャッキダウン作業中に応力等を監視すべき箇所を抽出することに役立つと考えられるためである。また、A2 橋台部に積載している重量を除去するときにも同様の計測を行うのがよい。
- ⑨ 車両が連行することの影響は応答としては顕著に表れない可能性もあるが、復旧時の応力や形状の是正方法やモニタリング箇所や項目の検討に有用な情報が得られる可能性があるため、鉛直荷重の載荷位置に応じた、上部構造の各断面の応答を整理しておくのがよい。
- ⑩ 損傷箇所や損傷メカニズムの把握と併せて、本橋の維持管理、及び当初の設計施工の観点からも、今となってはどのようにしておけば事故の可能性を減らせたのかも整理しておくべきである。なぜならば、本橋の復旧や同形式の橋の維持管理方法の検討だけでなく、既設、新設の他の橋でも供用中の突発的な事故を未然に防ぐために役立つと考えられるためである。