

5. まとめ

5.1. 段差発生の原因

鉛直 PC 鋼棒全 18 本の内、13 本については目視で破断を確認した。また、破断が確認できていない 5 本についても、桁全体が一様に浮き上がっていることから破断している可能性が高く、全 18 本破断したことにより、段差が発生したと推定する。

5.1.1. 段差発生のメカニズム

全 18 本のうち、破断面が確認できていない 5 本については、破断箇所や破断面の形状、破断箇所付近の腐食の状況などが不明であるため、破断形態の推定は困難であるが、他の鋼棒と同様の原因で破断に至ったと考えることもできる。一方で、鉛直 PC 鋼棒ごとに錆の付着量が異なり腐食の進行度合いが異なる可能性があること、破断位置にばらつきがあることから、全 18 本が同時に破断した可能性は低いと推定する。

破断面が確認された 13 本も破断面が確認できていない 5 本も、いつどのように破断したのかは不明であるが、ある程度の本数で脆性的な破断が生じたのち、残りの鋼棒だけでは約 5590kN (570t) の上揚力に抵抗するための強度が不足した可能性が考えられる。このとき、残りの鋼棒については、脆性破断が生じる可能性も延性破断が生じた可能性のいずれも残る。また、ある程度の本数で脆性的な破断が生じたのちには、残りの鋼棒では、活荷重や温度変化の影響などによる応力変動も大きくなるので、残りの鋼棒が破壊に至るまでの速度が速まった可能性も残る。

5.1.2. 鉛直 PC 鋼棒の破断原因

破断した鉛直 PC 鋼棒の破断面や外観の観察、室内試験の結果等から、常時高い引張応力が加わった状態で腐食環境に置かれているとき、全面的に腐食している中の孔食を起点として急速に割れが広がるという、「応力腐食割れ」と呼ばれる現象が生じた可能性が疑われる。

すなわち、図 5.1 に示すように、主な要因として、桁と橋台の界面（橋座部）や PC 鋼棒を通じた水の浸入、鋼棒の長さ方向で腐食環境が一様でない状況、これに加えて桁を固定し続けるために鉛直 PC 鋼棒が常時負担する大きな引張力が考えられ、その他影響を及ぼしたと考えられる要因として、日々生じる応力の変動や他の鋼棒の破断による残存鋼棒への負担の増加があり、ある時点で急速に破面が広がる脆性的な破壊に至ったというものと推定される。

なお、脆性的に破断した時期は鋼棒により異なると推定される。

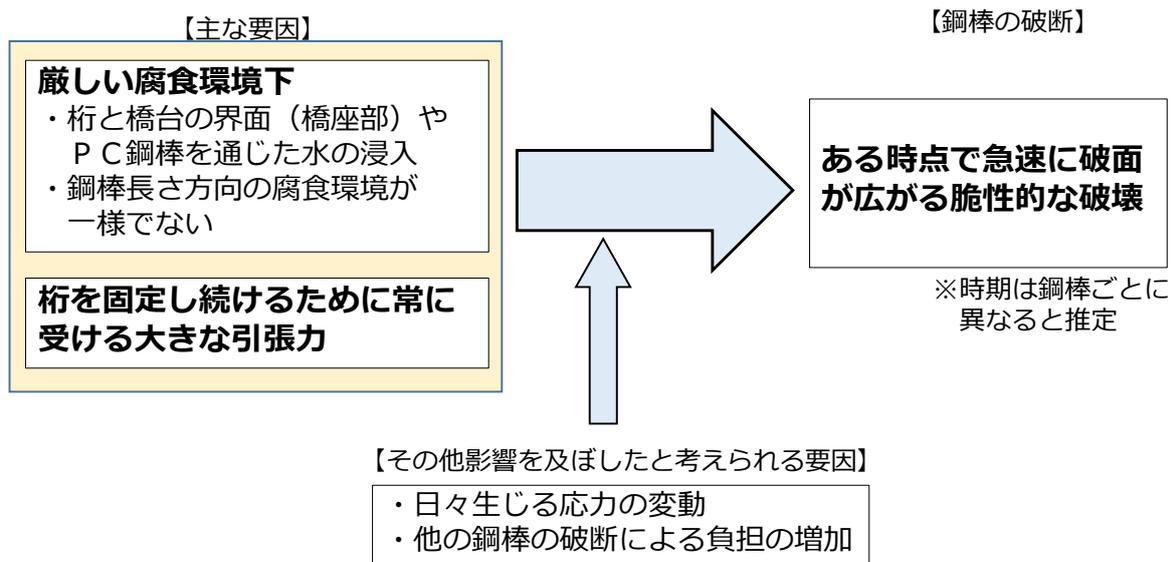


図 5.1 鉛直 PC 鋼棒の破断要因と破壊メカニズム

5.1.3. 再発防止に向けて考慮すべき事項

(1) 構造に係わる事項

- ドゥルックバンド橋は、主桁と橋台を鋼材で連結することで荷重の作用を橋台に伝達して抵抗する構造であり、鉛直・水平 PC 鋼棒が破断した場合、荷重の作用に対して不安定な状態となるという、維持管理の確実性という観点からはデメリットを有する。
- デメリットを知った上で採用する場合でも、構造上の弱点となる部位に対して、突発的に浮き上がりを生じることなく、その前に変状を気づくことができるように、破壊形態を制御したり、バックアップ部材を設置するなど構造に工夫することも考えられる。
- 上記のように橋の安全性に重大な影響を与える鉛直・水平 PC 鋼棒は、外観から直接的に状態を確認することができない構造であった。
- 耐久性の観点からは、以下の点で防水・排水の工夫の余地があった。ただし、劣化の速度は遅くなるが、確実な状態の把握、突発的な事象の防止のためには、これだけに対応すればよかったということではないことに注意するのがよい。
 - 建設当時は橋面からの排水が主桁に浸透するのを防止するための橋面防水工が施工されていなかったこと、及び、鉛直 PC 鋼棒に施されていた瀝青材料とテープが、経年劣化によりその機能を喪失していたこと。
 - 伸縮装置から橋面の水が浸入できたこと。
 - さらに、上部工突起部については、止水・排水施設が設けられておらず、浸入した水が滞水しやすい構造であったこと。

(2) 維持管理に係わる事項

過去の定期点検では、A2 橋台前面での漏水跡等が記録されていた。A1 橋台側にすでに鉛直 PC 鋼棒に対するバックアップ材が設置されている一方で、A2 橋台側では設置されていなかった。

今回の事故が起きた後からの仮説にはなるが、維持管理の過程の中で、このドゥルックバンド構造というこの橋の構造上の特徴や A1 側ではすでに鉛直 PC 鋼棒の腐食が疑われ、対策も取られていたという事実が関係者で常に認識されるような体制の充実が求められたと考えられる。たとえば、定期点検や長寿命化のための維持管理計画の策定時などに、上記のような点検で見られた変状と併せて考えることができ、A2 橋台での補強の実施や詳細な調査に結び付く可能性も高められたと考えることもできる。

5.2. 現在の状態

上関大橋は、段差発生による影響により、以下に示す状態であると推定され、将来的な安全が保証されないため、構造安全性の余裕の回復が必要である。

- ① 事故前とは異なる応力状態が続いている。
- ② 桁が浮き上がったことにより、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ことや、そのまま時間も経過していることで、橋全体の応力状態の推定の不確実性が大きい。
- ③ A2 橋台の水平ロッカー支承にせん断破壊が生じ、桁を固定している水平 PC 鋼棒が塑性変形している可能性があり、状態が把握できない状況にある。

5.3. 本復旧対策の方針と留意点

また県からは、事故後の監視と通行規制による管理の状態から、安全性を向上させ、他の橋と同様に定期点検やパトロール等により管理ができる状態に戻すことを目的とした本復旧対策を計画・実施していくことが示されたことから、検討会議では、以下の提言を行った。

- ① 応力状態の不確実性を解消し、橋の各部の安全性や信頼性を向上させるため、中央ヒンジ部で応力を開放するとともに、可能な範囲で桁や橋脚の位置を是正する。
- ② 桁位置の鉛直、水平方向の調整にあたっては、桁端部や中央ヒンジ部でできるような方法を検討すること。桁端部では、損傷している水平ロッカー支承（水平 PC 鋼棒）が負担している応力を開放させる方法について検討すること。
- ③ 桁端部を固定する部位の応力状態や固定する部材の荷重分担などについて精緻な検討を行い、安全側に評価すること。
- ④ 可能な範囲で桁や橋脚の位置を是正する際は、局所的な力の作用で桁や橋脚を傷めない方法を検討すること。
- ⑤ 両橋台において、橋台のグラウンドアンカー定着部、外ケーブル定着部、また、これらの間の橋台コンクリートの引張応力域の状態については、変状がないことを確認すること。
- ⑥ 上下部を接続する A2 橋台の鉛直 PC 鋼棒が腐食により破断した可能性があることから、その機能を代替する引張材等に対する適切な止水・防水対策や、引張力を確認できる対策を講じること。
- ⑦ 工事中の橋の各部の安全性の把握や、補強設計で用いた仮定、あるいは設計結果の妥当性を把握するために、工事中も引き続きモニタリング等の計測を行うこと。
- ⑧ 必要に応じて、バックアップ部材の設置を検討すること。
- ⑨ 今回の事案と同様の事態を防ぐため、新たに設置する部材は維持管理の確実性と容易さについても配慮すること。
- ⑩ 中央ヒンジ部の開放等による桁の応力の開放を行ったのち、必要に応じて応力状態が厳しいと目される箇所や損傷した箇所等を補修・補強すること。
- ⑪ A1 橋台部では、過去に PC ケーブルにより主桁と橋台を連結する工事を行っているが、ひび割れの監視を続けつつ、設計思想を再度確認した方がよい。
- ⑫ 定期点検を実施する際には、今回の事象に関する検討結果も含め、設計図書、工事記録、過去の点検・調査結果、補修履歴等の記録を点検に携わる者で確実に共有すること。
- ⑬ 測量やモニタリング等により平常時から橋梁の状態を把握・監視するとともに、上関大橋の点検・監視計画を立案し、それに基づき適切に管理すること。
- ⑭ なお、調査の結果からは桁端の鉛直 PC 鋼棒に沿って水が浸入していたことも疑われたことからすると、桁ウェブの縦締め PC 鋼棒の調査や腐食対策の必要性についても検討するのがよい。

5.4. 同じ構造を持つ橋梁について

同じ構造を持つ橋梁に関しては、以下のことを参考にしながら、今後の調査や維持管理に活用することを提言した。

5.4.1. 上下部接続部の補強対策

- ① 上下部接続部の鋼棒の腐食が進まないよう、止水・防水対策の実施を検討すること。
- ② 上部工の落下等に対する致命的な事象を回避できるようにバックアップ（フェールセーフ）構造・部材の設置を検討すること。

5.4.2. 点検の留意事項

- ① 橋の安全性において重要な引張材については、点検が確実にできる構造とするなど、設計段階から致命的な事態を回避するための配慮を検討すること。
- ② 架橋位置や設計条件等の特性を踏まえた適切な診断が行えるよう、橋ごとに、橋の各部の把握すべき情報や把握方法を検討し点検すること。例えば、上関大橋の鉛直 PC 鋼棒については、防食材料の内側にも水みちがあったことが疑われた。また、橋座上の漏水やそれに起因する橋台のひびわれ、漏水が確認された。したがって、破断や腐食について、周辺部材の状態、被覆の外観に異常などがあれば、被覆を外して状態を確認することも検討すべきである。また、上関大橋の鉛直 PC 鋼棒の破断は、上下部構造の接合面だけでなく、コンクリート中でも生じていた。一般に、地際部も腐食が生じやすいとされており、地際部についても状態を把握することが必要である。さらに、把握方法の選定にあたっては、鋼材の定着方法、調査中の鋼棒の突出の可能性を吟味する方がよい。構造を把握することで、一部削孔調査などを選ぶ方が確実に安全性が高い場合もある。
- ③ 鋼材については、断面積の減少にともなう破断だけでなく、応力腐食割れなどの破壊形態も想定すべきである。
- ④ 上関大橋の鉛直 PC 鋼棒の調査の経験からは、橋に与える影響に対して慎重に箇所を選んだうえで部分的に削孔するなど、直接目視できる方法を検討することを優先するのがよい。上関大橋での鉛直 PC 鋼棒の非破壊検査の経験からすれば、非破壊検査によって鉛直 PC 鋼棒の破断の有無や破断面の位置を必ずしも正確に推定することはできなかった。このため、非破壊試験する場合は、計測結果にはばらつきがあり精度高く損傷位置を計測出来ない可能性があることを理解した上で、計測結果について慎重に取り扱うこと。
- ⑤ 定期点検等の維持管理にあたっては、工事記録、点検結果、補修履歴等の記録を関係者で確実に共有すること。

5.4.3. 記録の保管

- ① 適切な点検を実施するためには、過去の設計図書や工事記録を確認することが重要であるため、設計図書をはじめ、工事記録、点検結果、補修補強履歴等の記録を確実に保管すること。
- ② 重要な引張材等に関する工事記録については、図面等に表記されない施工手順、使用材料等の情報も記録し保管すること。