

特殊な有ヒンジPCラーメン橋桁端部の 詳細調査と補強対策 — 国道228号松城橋(ダブルバンド形式)の 浮き上がり防止対策 —

函館開発建設部 道路設計管理官付 ○中田 賢太朗
函館開発建設部 道路設計管理官付 高田 正広
株式会社ドーコン 交通事業本部 構造部 小林 竜太

国道228号の松前町に位置する松城橋は、北海道内の直轄国道で唯一のダブルバンド形式(桁端と橋台をPC鋼棒で連結した特殊構造)のコンクリート橋である。本構造は、鉛直PC鋼棒が腐食等により破断すると桁端部が大きく浮き上がり、現道交通に甚大な被害を及ぼす可能性がある(令和2年11月に山口県に架橋されている同一構造形式の橋梁で損傷事案が発生した)。

本稿では、松城橋の不測の事態を想定した予防保全対策を講じることを目的として実施した①現状把握のための詳細調査、②構造解析的アプローチ、③補強対策の内容について報告する。

キーワード：ダブルバンド構造、引張材、非破壊検査、バックアップ構造

1. 松城橋の橋梁概要

松城橋は北海道最南端の松前町に位置し、松前海岸を跨ぐ昭和54年に架設された橋梁である(図-1、写真-1)。

橋梁形式：3径間有ヒンジPCラーメン箱桁橋
(ダブルバンド形式)

橋長：120.000m

支間長：24.500m + 70.000m + 24.500m

全幅員：14.300m

活荷重：TL-20

竣工年次：1979年(昭和54年：供用後44年経過)

設計基準：昭和43年 PC道路橋示方書

ダブルバンド形式の橋梁は、国内に約30橋(平成30年10月：プレストレストコンクリート建設業協会調べ)しかなく、北海道内では3橋、北海道開発局が管理する橋梁では国道228号松城橋のみと希少な橋梁形式である。



写真-1 松城橋の現況写真(海側より撮影)

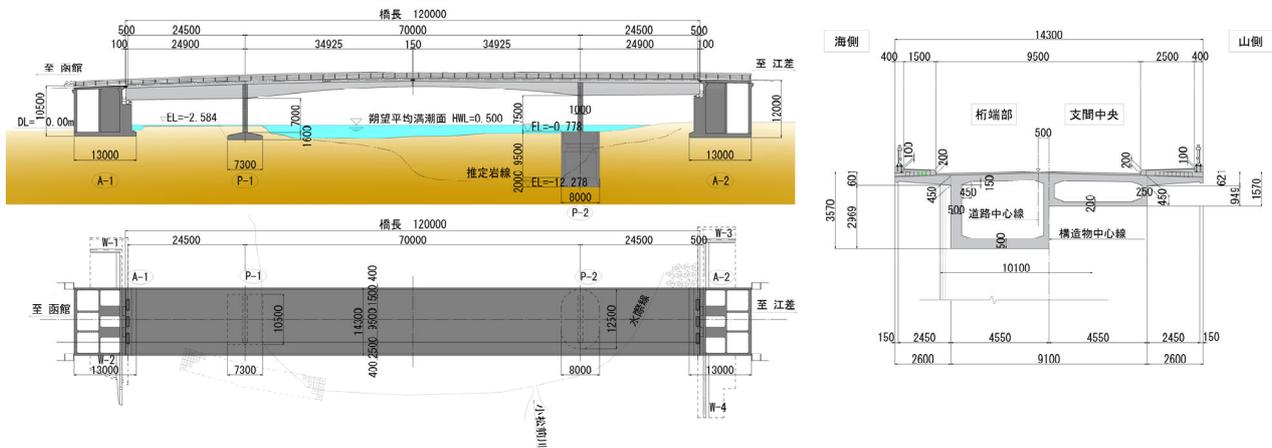


図-1 松城橋の全体一般図

2. 詳細調査および補強対策の実施背景

(1) ドゥルックバンド構造の概要

ドゥルックバンド構造は、桁端部と橋台を鉛直・水平方向に配置したPC鋼棒で連結し、死・活荷重や地震力を橋台に伝達させて抵抗する構造である。側径間が中央径間と比較して短いアンバランスな構造のため、桁端部には負反力（浮き上がり）が発生し、特に鉛直PC鋼棒には常時大きな引張力が作用しているため、PC鋼棒が破断すると橋全体が極めて不安定な状態となる（図-2）。

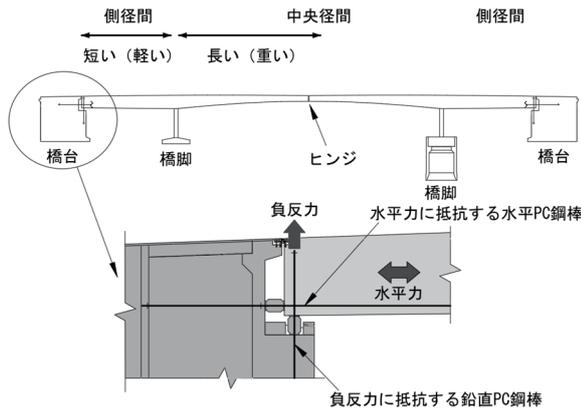


図-2 ドゥルックバンド構造の概要

(2) 山口県にある上関大橋で損傷事案が発生

令和2年11月、山口県の県道光上関線のうち上関海峡を跨ぐドゥルックバンド形式橋梁【上関大橋：昭和44年竣工、橋長220m、3径間有ヒンジPCラーメン箱桁橋】で供用状態下において鉛直PC鋼棒が破断した。その結果、桁端部が浮き上がって路面に20cm程度の段差が生じ、その段差に乗用車が衝突して2名が負傷する事故が発生した（写真-2）。破断原因は、PC鋼棒が塩害環境や雨水浸入の腐食環境下において、常に高い引張力が作用していたことによる「応力腐食割れ」と推定されている¹⁾。



写真-2 山口県の上関大橋における損傷状況¹⁾
【左：路面に生じた段差、右：乗用車の破損状況】

(3) 松城橋に対する現状把握および対策工の実施が急務

損傷が生じた上関大橋と同様に、松城橋もドゥルックバンド形式かつ塩害劣化が懸念される海上橋梁である。上述の背景より、現状のPC鋼棒の健全性を確認する詳細調査を実施し、不測の事態を想定した予防保全対策を講じることにしたため、本稿ではその概要を報告する。

3. 鉛直PC鋼棒の健全性を評価するための詳細調査

(1) 松城橋における桁端部の構造と現況

松城橋の桁端部は、PC鋼棒の車両や風等による振動や腐食等の不慮の事態に備え、当初からメナーゼ鉄筋により補強されていた（図-3）。PC鋼棒やメナーゼ鉄筋はコンクリートロッカー脊に埋設されているが、現状では外観上目立った劣化や損傷は確認されなかった（写真-3）。

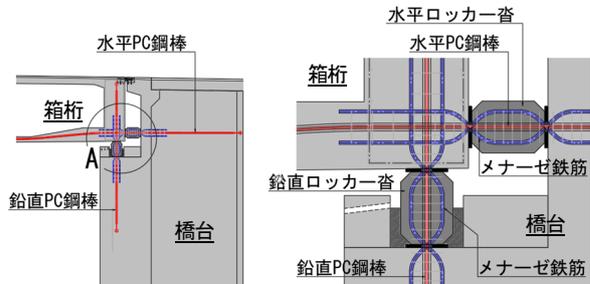


図-3 桁端部の構造詳細（右図はA部詳細）



写真-3 コンクリートロッカー脊の状況

(2) 詳細調査の方法および調査結果（非破壊検査）

既設構造に与えるダメージを最小限とするため、雨水が滞水し易い横断勾配の低い端部に配置されている鉛直PC鋼棒を対象として超音波探傷試験（図-4）を実施した。調査の結果、設計上のPC鋼棒長位置での反射を確認し、現状では破断が生じていないことが確認された（写真-4）。



図-4 超音波探傷試験の概要

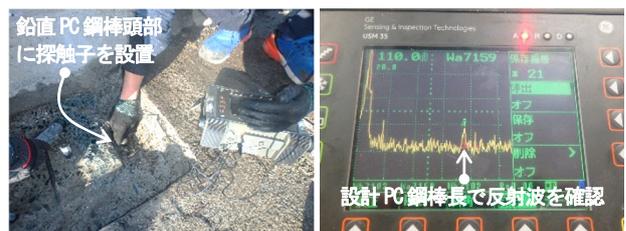


写真-4 超音波探傷試験の実施状況および結果

4. 構造解析的検討

(1) 構造解析の目的

構造解析は下記の目的に対して、現行の道路橋示方書で定める構造安全性を満足するかどうかを照査した。

- 現状の構造安全性評価（常時：永続＋変動作用）
- 鉛直PC鋼棒が破断した場合の橋全体の影響評価

(2) 構造解析モデルの概要

松城橋全体の変形や応力状態を把握するために、上部構造と下部構造（橋台・橋脚）には梁要素を、基礎構造や中央ヒンジ及びロッカー支承にはバネ要素を適用して橋梁全体をモデル化した（図-5）。また、ラーメン橋では架設時の施工ステップに応じて応力状態が変化するため、現状を精度良く推定するためには、これを無視できない。よって、竣工時の設計計算書をもとに施工ステップ毎の断面力を足し合わせる形で初期状態を再現した（図-6）。

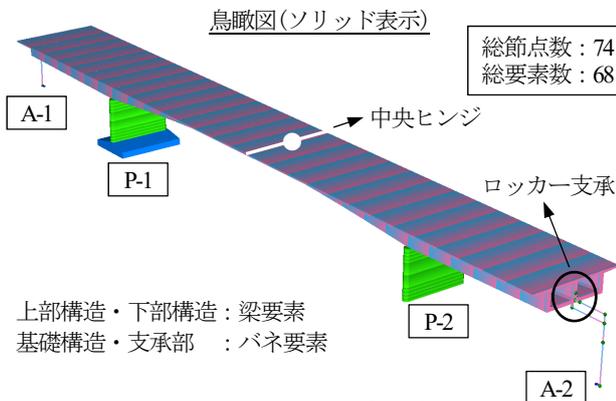


図-5 構造解析モデルの概要

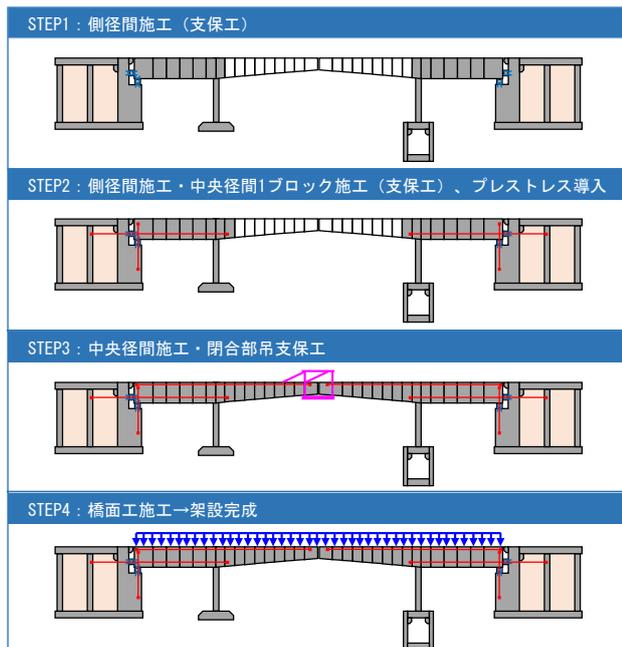


図-6 構造解析で考慮した架設時の施工ステップ

(3) 現状の構造安全性評価（常時：永続＋変動作用）

現状の構造安全性を評価するため、常時状態（死荷重および活荷重）における検討を行った。ここで、活荷重は構造的に最も不利となる支間中央部にB活荷重を載荷した（図-7）。その結果、全ての部材において発生応力が許容値未満であり、鉛直PC鋼棒が健全な状態であれば構造安全性は満足できることを確認した。また、桁端部鉛直反力は、死荷重載荷時では約1,700kN、B活荷重載荷時では約3,100kNの負反力が生じることが確認された。

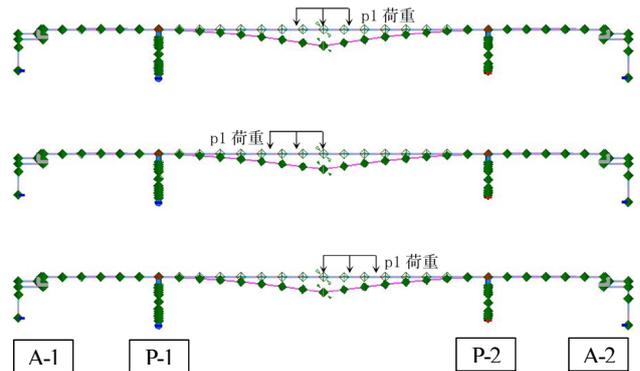


図-7 死荷重およびB活荷重載荷時の変形図（変形倍率50倍）

(4) 鉛直PC鋼棒が破断した場合の橋全体への影響評価

鉛直PC鋼棒が破断すると、死荷重時に負担している負反力が解放されることになる。よって、鉛直PC鋼棒が破断した場合の再現解析では、鉛直PC鋼棒をモデル化したバネ要素の鉛直方向成分を「自由」とし、桁端部に上向きの鉛直力（約1,700kN）を入力することとした。

解析の結果、死荷重状態においては桁端部で約68mmの浮き上がりが発生し、一方で中央ヒンジ部では約43mmの垂れ下がりが生じる可能性があることが判明した（図-8）。

この傾向は、実際に鉛直PC鋼棒が破断し、桁端部に段差が生じた上関大橋の実現象と合致している。なお、鉛直PC鋼棒が破断すると上・下部構造の応力レベルも変化することになるが、橋脚柱頭部の鉄筋の発生応力度が許容値を約11%超過するものの降伏には至らず、上部構造の発生応力も全部材で許容値を下回る結果となった。

よって、鉛直PC鋼棒が破断すると桁端で浮き上がりが生じるため一般車両の通行に支障をきたすが、直ちに落橋等の致命的な状態には至らないことが確認された。

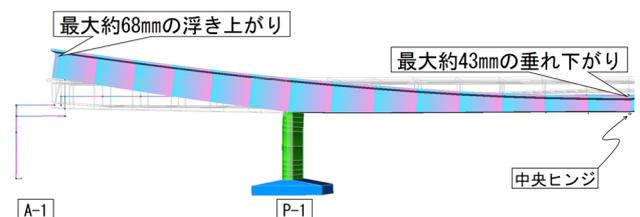


図-8 鉛直PC鋼棒が破断した場合の変形図（変形倍率100倍）

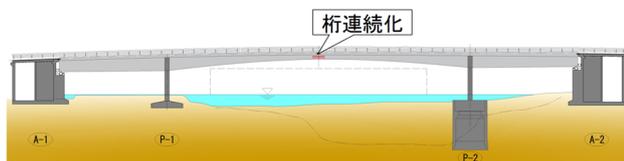
5. 桁端部の浮き上がり防止対策

(1) 浮き上がり防止対策の検討

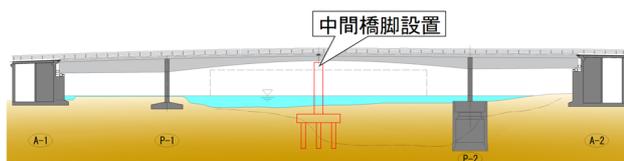
桁端部の浮き上がり防止対策として、国内の有ヒンジPCラーメン橋に対する既往の対策事例も参考に、以下に示す4つの対策案を抽出して比較検討を行った(図-9)。

比較検討の結果、鉛直PC鋼棒が破断した直後に機能を発揮可能な上・下部構造間を連結する「バックアップ構造の設置(対策案④)」を採用した。バックアップ構造の設置は、ダブルックバンド形式橋梁に対する浮き上がり防止対策としても実績がある。例えば、山口県の青海大橋【昭和41年竣工、橋長260m、3径間有ヒンジPCラーメン箱桁橋】では、鉛直PC鋼棒が腐食により破断していたものの、バックアップ構造(PCケーブル)が機能して、桁端部の損傷や段差の発生を防止した実績がある。

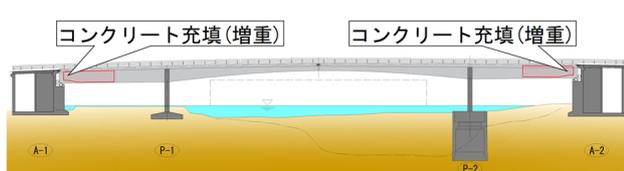
■対策案①：上部構造の連続化【構造性：×，交差条件：○】



■対策案②：中間橋脚の設置【構造性：○，交差条件：×】



■対策案③：側径間部の増重化【構造性：×，交差条件：○】



■対策案④：バックアップ構造の設置【構造性：○，交差条件：○】

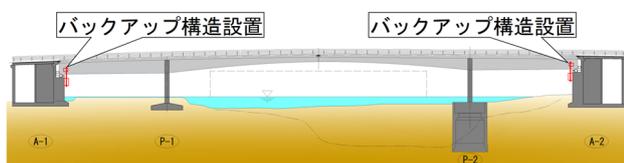


図-9 浮き上がり防止対策工の比較検討

(2) バックアップ構造の詳細設計

バックアップ構造の形式は、既設橋梁の耐荷力補強や耐震補強での採用実績が豊富で、上述の青海大橋の浮き上がり防止対策でも適用された「PCケーブルによる上・下部連結構造」を採用した。PCケーブルは箱桁内部と橋台の堅壁前面に設置した鉄筋コンクリート(RC)製のブロックに定着して既設構造物との一体化を図った。

また、松城橋架橋位置は海上飛沫帯の厳しい塩害環境下に置かれているため、RC定着ブロックの鉄筋にはエポキシ樹脂塗装鉄筋を適用し、PCケーブルの部品はAl-Mg溶射仕様や亜鉛めっき仕様を採用する等、塩害に対する耐久性確保に最大限配慮することとした(図-10、図-11)。

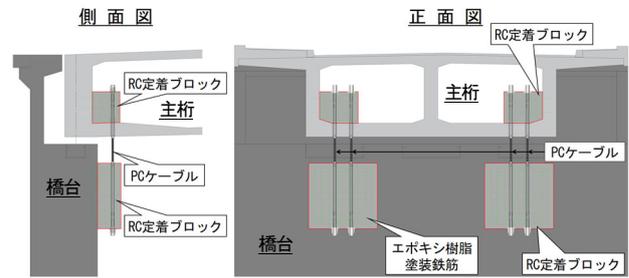


図-10 バックアップ構造の配置図

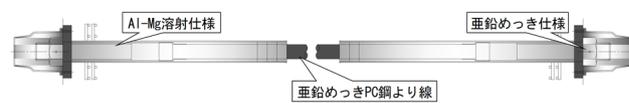


図-11 PCケーブルの詳細図

6. おわりに

国道228号松城橋は、ダブルックバンド形式の橋梁における「構造の要」となる鉛直PC鋼棒の破断に備えてバックアップ構造の設置を採用し、令和5年度中に補強対策が完了する見込みである。

道路橋には、ダブルックバンド形式の橋梁以外にも、斜張橋や吊橋、アーチ橋等のように引張材の破断等による損傷によって、橋全体が落橋等の致命的な状態に至るものや橋全体の力学挙動に大きな影響を与える橋梁形式がある。この種の橋梁は「引張材を有する道路橋の損傷例と定期点検に関する参考資料(平成31年2月：国土交通省道路局_国道・技術課)²⁾」でも取り上げられており、構造上の注意喚起がなされている。

引張材の劣化や損傷は、日常的な道路パトロールでは発見が難しいため、5年に1度の定期点検において前兆を的確に捉えることが重要であると考えられる。

なお、今回実施した対策は鉛直PC鋼棒の破断を想定した場合の浮き上がり防止対策を目的としており、水平PC鋼棒の破断は対象としていない。水平PC鋼棒は地震力等の水平力に抵抗する部材であるため、今後計画されている耐震補強の中で対策方法を検討する予定である。

参考文献

- 1) 山口県：上関大橋復旧検討会議報告書、令和3年10月
- 2) 国土交通省 道路局 国道・技術課：引張材を有する道路橋の損傷例と定期点検に関する参考資料、平成31年2月