

特殊な有ヒンジPCラーメン橋桁端部の 補強対策工事報告 — 国道228号松城橋(ドウルックバンド形式)の 浮き上がり防止対策 —

函館開発建設部 江差道路事務所 ○山田 和輝
函館開発建設部 江差道路事務所 佐竹 永光
函館開発建設部 函館道路事務所 泉澤 大樹

国道228号松城橋は、道内直轄国道で唯一のドウルックバンド形式（桁端部と橋台をPC鋼材で鉛直方向に連結した特殊構造）の橋梁である。本構造は、PC鋼材が腐食破断すると桁端部が浮き上がり、現道交通に支障を及ぼした事例もあることから、予防保全対策を講じるために詳細調査、構造解析的アプローチ、対策工の設計・施工を行った。本稿では、昨年度発表の設計概要に引き続き、対策工事の施工内容と今後の維持管理について報告する。

キーワード：ドウルックバンド形式、引張材、バックアップ構造、橋梁維持管理

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-1.2、写真-1)。

ドウルック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。



図-1 位置図



写真-1 松城橋の現況写真（海側より撮影）

橋梁形式：3径間有ヒンジPCラーメン箱桁橋
（ドウルックバンド形式）

橋 長：120.000m (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46年経過）

設計基準：昭和43年 PC道路橋示方書

塩害区分：B-S地域（塩害特定対策区分判定B）

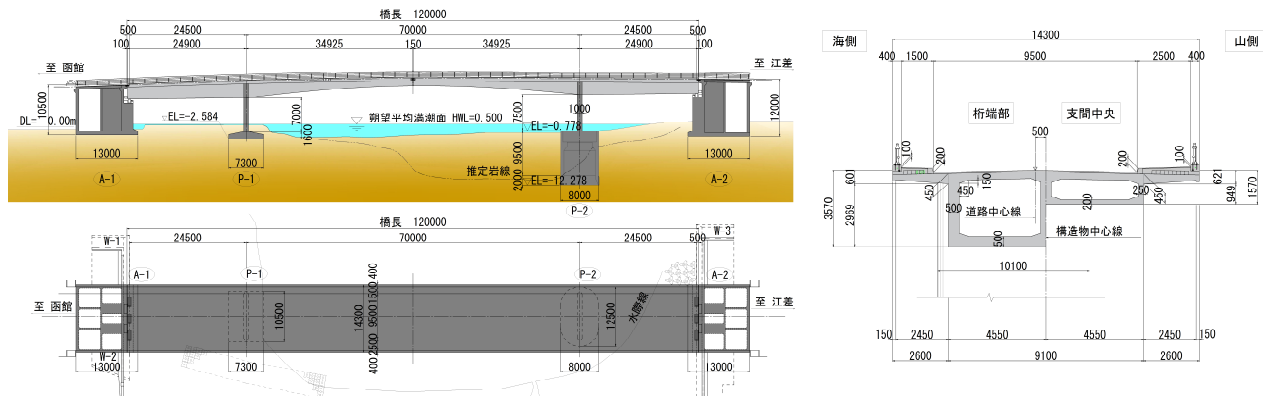


図-2 松城橋の全体一般図

2. 詳細調査および補強対策の実施背景

ドゥルックバンド形式は、構造計算のための電子計算機が普及していない昭和40年代に考案された有ヒンジラーメン橋の一種で、電子計算機を使用しなくても長支間の多径間橋梁の設計計算を可能としている構造である。

有ヒンジラーメン橋は橋脚から両方向に張り出した片持ち梁同士の先端をヒンジで結合することで構造計算を単純化し長支間化を可能としているが、ドゥルックバンド形式は、種々の理由で橋台・橋脚位置に制約があり、側径間と中央径間にアンバランスが生じる場合、橋台と桁を2点固定、橋脚全体を1点固定のヒンジとして中央径間長をかせぐ構造である。

側径間が中央径間と比較して短くアンバランスとなるため、側径間の桁の重量化及び桁と橋台を水平方向と鉛直方向のPC鋼棒で結合させることにより橋台に働く負反力（浮き上がり）に抵抗させており、橋台と桁を結合しているPC鋼棒のうち、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-3）。

松城橋は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り、現状のPC鋼棒の健全性を確認し、不測の事態を想定した予防保全対策を検討した。

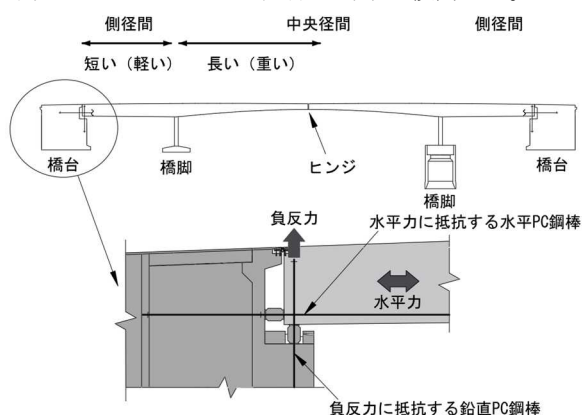


図-3 ドゥルックバンド形式の概要

3. 鉛直PC鋼棒の健全性を評価

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-4）。

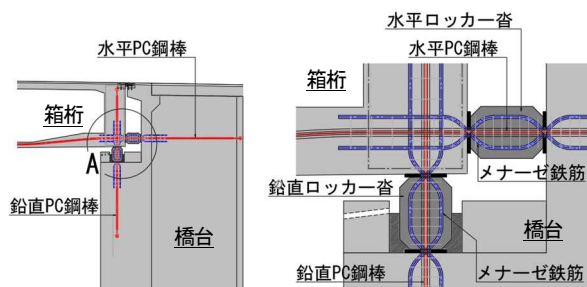


図-4 桁端部の構造詳細（右図はA部詳細）

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-2）。



写真-2 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-5）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。



図-5 超音波探傷試験の概要

4. 構造解析的検討

(1) 構造解析の目的

構造解析は『現状の構造安全性評価』、『鉛直PC鋼棒が破断した場合の橋全体の影響評価』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否かを照査した。

構造解析のモデルの概要については、参考文献1)を参照されたい。

(2) 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-6）。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出来ることを確認した。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。

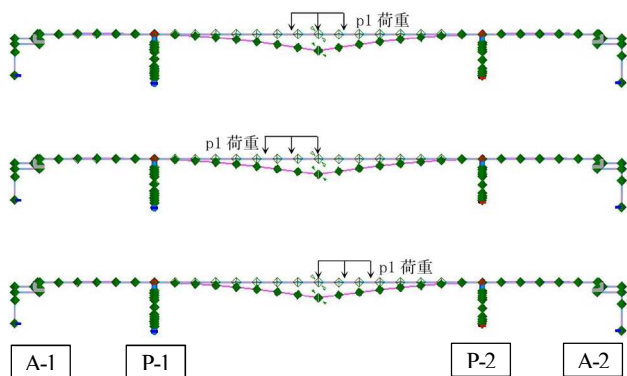


図-6 死荷重およびB活荷重載荷時の変形図（変形倍率50倍）

(3) 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1,700 kN）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68 mmの浮き上がりが発生し、中央ヒンジ部では約43 mmの垂れ下がりが生じる可能性があることが判明した（図-7）。

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。

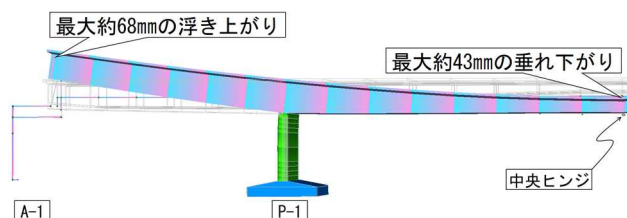


図-7 鉛直PC鋼棒が破断した場合の変形図（変形倍率100倍）

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、比較検討の結果、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実績があり、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」を採用した（図-8）。

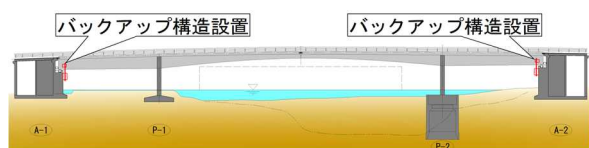


図-8 浮き上がり防止対策工

(2) バックアップ構造の詳細

バックアップ構造の形式は、既設橋梁の耐力補強や耐震補強での採用実績が豊富な「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-9、図-10）。

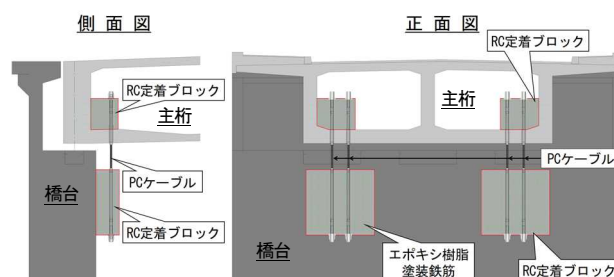


図-9 バックアップ構造の配置図

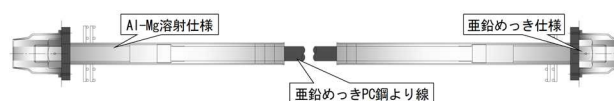


図-10 PCケーブルの詳細図

6. 負反力対策工（バックアップ構造）の施工

(1) 施工方法の検討

本対策工は、既設箱桁内部や橋台に定着ブラケットを設置し、箱桁底版部を削孔してPCケーブルを通す構造である。既設橋梁に多数のコンクリート削孔が必要だが、既設配筋が緻密であるため、配筋状況を正確に把握する必要があった。

また、箱桁内部の出入り口は検査口が800 mm四方と狭く、材料搬入や施工方法も検討する必要があった。

このことから、3Dモデル（図-11）を用いて、配筋の確認や施工計画立案を行うこととした。

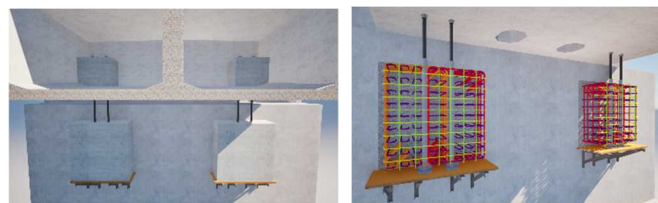


図-11 バックアップ構造の配置図

(2) 既設配筋の把握

まず、既設配筋位置の把握として、鉄筋探査を実施した。探索データをもとに作成した既設配筋図と新規ブラケット配筋図とを3Dモデルに反映させることで、完成時の配筋状況を立体視出来るようにした。そこに設計の削孔位置を重ね、アンカーボルトが干渉しないか確認した。また、精度を高めるため、橋台コンクリートを部分的に既設鉄筋が確認出来る深さまで掘削し、実際の配筋位置との差違を確認した(図-12)。

その結果、既設配筋とアンカーボルトの干渉を防ぐため、アンカーボルトの配置を最大で60 mm程度変更する必要が生じた。新たなアンカー配置図は、最小限の配置変更で、m2あたりの必要本数も満足することから、アンカーの寸法・数量変更を行わずに施工することが出来た。

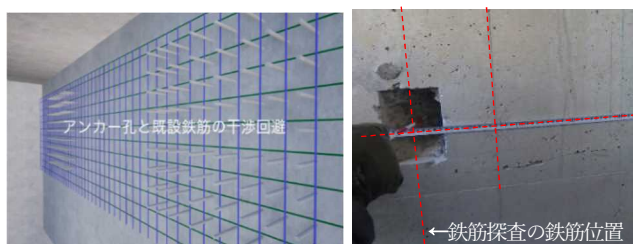


図-12 既設配筋の確認状況

(3) PCケーブル等の材料搬入・設置について

負反力対策工の施工について、作業環境が狭小で、クレーン等の機材は持ち込めない状況であった。そのため、3Dモデルで施工空間を再現し、施工方法を検討した。

その結果、箱桁内部の点検口から手動式チェーンジャッキを用いて、約95 kgのPCケーブルを人力で搬入すると共に、設置も人力で行う段取りが可能であることが分かった。鉄筋や型枠なども同様の方法で搬入し、箱桁内で組み立てを行った(写真-3)。



写真-3 負反力対策工の材料搬入状況

(4) コンクリート打設について

コンクリート打設は、開口部や箱桁内部が狭い上に入り組んだ構造となっていたため、当初はバケツを使用した人力施工を計画した。しかし、型枠高からの落差が4.9 mと高く、打設量も7.5 m³と多いため、打設ホースのルートを再検討することとした。コンクリート圧送を担当する技術者と直接現地確認を行い、3Dモデルを活用して、施工の段取りを以下のように決定した。

- ① ホースを極端に曲げることで、圧送力が強くなり材料分離の恐れがあるため、R3以下になるようにホースを固定した。
- ② コンクリートポンプ車を橋面上に設置し、ブームを橋梁側面から下部へ引き込み打設を行った。
- ③ 作業箇所が狭く、十分な締め固めが出来ない可能性があったため、高周波バイブレーターに加えて、壁打ちバイブレーターを併用して施工した(写真-4)。



写真-4 コンクリート打設状況

(5) PCケーブル組み立てについて

PCケーブルは、既設の負反力防止構造に不具合が生じたときのフェイルセーフの役割であり、緊張力、軸力などの応力を予め導入する必要がない。そのため、管理対応となる応力など設計値がないことから、設置に際しては、ナットの締付がアンカープレートに密着していることを目視確認することとした。

最後にPCケーブルの隙間から雨水等が侵入しないように、保護キャップ内にポリサルファイド系のシーリング材を充填し、負反力対策工が完成した(写真-5)。



写真-5 負反力対策工の完成状況

(6) CIMの活用について

施工箇所が狭小な上に、配筋も複雑な施工箇所のため、施工の段取りを施工を行う作業員と共有するのは困難であった。そこで、施工手順を3D動画で作成し、施工計画の検討や作業員との施工方法の打ち合わせ、安全管理に使用することとした。

3D動画は、3Dモデルを施工順序に合わせレンダリングする方法で作成し、施工する作業員にリアルな映像表現により視覚的に確認することを目的として行った。

作業員からは『作業空間が狭く、施工順序を検討するのにイメージしやすい。今回、ブラケット施工する前にPCケーブルを吊り下げとしたが、動画を作成しなければ思いつかなかったかもしれない。』、『コンクリート

④ 地震時の変状確認

水平ロッカー査は、地震時の対策が行われていないため、震度4以上の地震発生時に実施する通常の地震時点検で、路面や橋体の外観に異常が確認された場合は、水平ロッカー査に、ひび割れ等の変状がないか確認する。また、中央ヒンジ部周辺の主桁ウェブのひび割れ進行状況や、新たなひび割れの発生を確認する。

8. おわりに

国道228号松城橋は、ドゥ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年度に補強対策が完了した。これにより、破断による重大な損傷を予防することが出来、通行に対する障害も最小限にとどめられると考えられる。

今後は、日常的な道路パトロールで外観を点検すると共に、発見が難しい引張材の劣化や損傷は、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。

有ヒンジラーメン橋やドゥルックバンド形式は、現在では採用されない構造であるが、インフラのメンテナンスにあたっては、これらの技術以外にも過去の技術について見識を深めることが必要である。本論文が今後のメンテナンスをする際の一助となれば幸いである。

謝辞：本論文の作成にあたり、ご協力いただきました(株)松本組の皆様、中央コンサルタンツ(株)の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1)国土交通省 北海道開発局 函館開発建設部：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 令和6年2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