

大和北道路橋梁工事における 国道24号 既設橋脚に対する近接施工影響検討について

影澤 拓知¹・簗内 慎司²

¹近畿地方整備局 奈良国道事務所 工務課 (〒630-8115奈良県奈良市大宮町3-5-11)

²近畿地方整備局 奈良国道事務所 工務課 (〒630-8115奈良県奈良市大宮町3-5-11)

大和北道路の本線が一般国道24号をアンダーパスする箇所において、本線に支障となる一般国道24号八条高架橋の既設P7橋脚を撤去し、新設門型橋脚へと再構築する。新設P7橋脚はアーバンリング工法により施工されるが、供用中の既設P7橋脚に対して約1.0mのきわめて近接した条件となる。このため、施工に伴う既設構造物への影響を把握するために、FEM影響解析を含む近接施工における影響検討手法ならびに計測管理手法の立案を行った。本論文では、この内容を報告するとともに、実計測で確認された温度に対する変位量の相関関係を計測管理へ反映した事例を示し、今後の近接施工時における計測計画への展開を報告する。

キーワード 近接施工（影響検討）、自動計測、アーバンリング工法

1. 概要

(1) 工事概要

a) 京奈和自動車道 大和北道路

京奈和自動車道は近畿圏の環状道路ネットワークを構成する高規格道路であり、このうち、奈良県内の未開通区間である大和北道路の一部が2008年度に事業化された。交通容量を超過し多数の主要渋滞箇所や速度低下による交通混雑が発生する一般国道24号から、新たに整備される大和北道路へ交通が転換することにより、奈良市周辺地域の交通円滑化が期待されることに加え、沿線自治体から和歌山・大阪・中京圏へのアクセス向上により、企業進出や観光行動へも大きく寄与する（図-1）。



図-1 京奈和自動車道の概要図

b) 離隔約1.0mの近接施工

大和北道路は奈良市八条地先において一般国道24号と交差し、一般国道24号の八条高架橋をアンダーパスする構造であるが、大和北道路の本線が八条高架橋の既設P7橋脚と干渉するため、この既設P7橋脚を撤去し、新設P7橋脚（鋼製門型橋脚）へと再構築を行う。八条高架橋は、迂回路が確保できない重交通路線であり通行止めができないため、ECI契約方式（技術提案・交渉方式「技術協力・施工タイプ」）により、設計段階より高度な工法等の活用を行った。狭隘な施工ヤードや隣接河川の条件より、新設P7橋脚基礎は、場所打ち杭から深礎杭へ変更された。この深礎杭を構築するオープンケーソンが既設P7橋脚へ約1.0mと近接する（図-2）ことから、施工時の地盤変位が既設橋脚へと影響する可能性があり、供用中の八条高架橋の安全性確保が重要な課題だった。

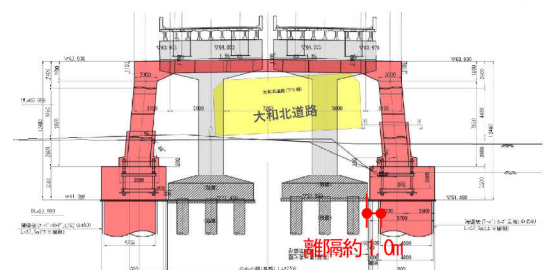
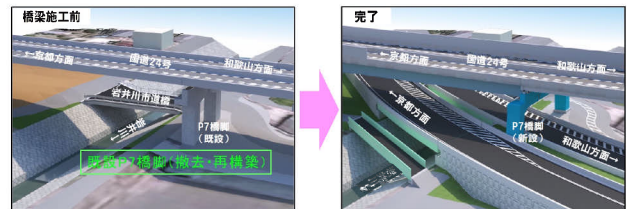


図-2 近接施工概要図

(2) 近畿地方整備局管内の近接施工実績

近畿地方整備局管内における近接施工の実績は、いずれも一般国道の既設橋脚に対する離隔約1.0m程度と近接したオープンケーソンの施工条件とはなっていない（表-1）。このため、本工事の施工条件に合致した近接施工の影響検討手法ならびに潜在リスクに対する管理手法を構築し、関係部門と事前調整を行う必要があった。

2. 近接施工影響検討とリスクに対する管理手法

(1) 近接施工の概要

近接施工となるオープンケーソンは、圧入ケーソン工法に分類されるアーバンリング工法により構築する。直径約4.8mの円形に組み立てたアーバンリング鋼殻を、四隅に設置した沈設用グラウンドアンカーの反力を用いた圧入装置により圧入しながら内部を水中掘削することで、地表から40m超の深い地中まで順次アーバンリング鋼殻を沈設する（図-3）。数メートルに1か所設けたフリクションカットにより28mm程度地山を余掘りするため、1.0m程度のわずかな離隔しかない既設P7橋脚の変位が発生する可能性があった。

(2) 近接程度の判定

a) 規準類における近接程度の判定手法

設計便覧（案）第3編道路編ならびに近接基礎設計施工要領（案）²⁾に基づき、近接程度を判定すると、アーバンリング圧入掘削時の主働崩壊角 $45^\circ + \phi/2$ の内側に八条高架橋既設P7橋脚が位置することになるため、「影

響範囲Ⅲ」と分類される（図-4）。これは最も近接程度が高い状況であり、対策工法の検討、既設構造物の許容変位量の設定ならびに現場計測管理を行う必要がある（表-2）。

b) 既設P7橋脚の許容変位量の設定

許容変位量の設定では、近接基礎設計施工要領（案）を参照すると、「伸縮継手や支承の移動可能量、自動車の走行性」「上部構造及び下部躯体の応力度」などから定まる変位量とされているが、これらは構造物毎の固有の値であり、管理対象構造物が幅広いことから一律の設定はなされていない。一方、近接工事に関する設計施工指導要領書³⁾では、橋梁を主眼とした構造安全性ならびに自動車走行安全性を確保する観点から定められた許容変位量が具体的に記載されている（図-5）ため、本工事における八条高架橋既設P7橋脚において許容変位量（沈下量、傾斜量、移動量）の準用を検討した。基準類の比較表を表-3に示す。

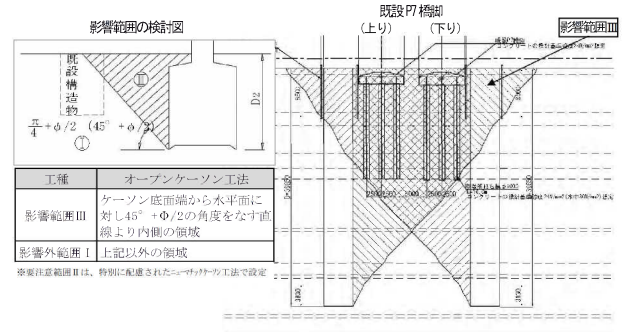


図-4 影響範囲図

表-1 近接施工実績

工事名	工法	近接状況
大和御所道路曽我高架橋（P 9 L 他）下部工事	オープンケーソン工法	-
国道9号京都西共同溝発進立坑他工事	オープンケーソン工法	-
西舞鶴道路上安久高架橋P 9 橋脚他工事	ニューマチック工法	線路近接
奥瀬道路（3期）1号橋P 2 下部工事	ニューマチック工法	河川近接

※近畿地方整備局調べ

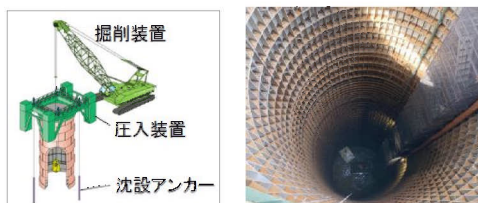
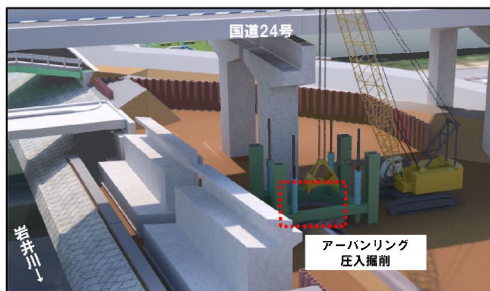


図-3 アーバンリング工法概要

表-2 近接程度による検討の必要性

検討対象	近接程度の判定	既設構造物に影響を与える工種
八条高架橋P7	影響範囲Ⅲ	新設P7橋脚基礎
近接程度の判定	対策工法の検討	既設構造物の許容変位量の設定
影響範囲Ⅲ	○（要検討）	○（要検討、計測が必要）

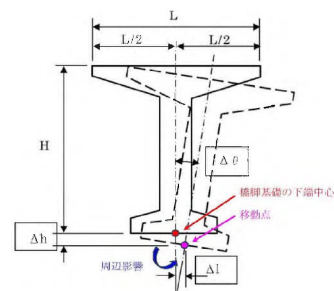


図-5 変位量算定図

表-3 近接施工の基準類の比較表

比較項目	設計便覧（案）、近接基礎設計施工要領（案）	近接工事に関する設計施工指導要領書
管理対象	管理対象構造物が多岐にわたる	主に橋梁を対象
近接判定	掘削時の主働崩壊角により判定	掘削時の主働崩壊角により判定
許容変位量	「伸縮継手や支承の移動可能量、自動車の走行性」「上部構造及び下部躯体の応力度」「確保すべき桁下空間や建築限界」	橋脚高さ・橋脚幅員に応じた許容変位量を具体的に記載

c) FEM影響解析モデル

近接施工時における八条高架橋既設P7橋脚の変位について、施工に伴う変位が許容変位量を超過する可能性を事前に確認して対策工の必要性を判断するために、有限要素法（FEM）による影響解析を実施した。実施フローに従い、新設P7橋脚の2つの基礎を順次掘削した場合に、各段階で既設P7橋脚に生じる変位量を算定した。断面モデルにおける新設P7橋脚の掘削は、フリクションカットによる余掘り分の地盤変位として表現される一方で、実際の掘削形状は円形であるため、周辺地盤にアーチ効果が生じて地盤変位が抑制される傾向がある。このため、平面モデル解析により、円形掘削時の変位抑制効果を算定し、この効果を断面モデルへ導入した（図-6）。これにより、アーバンリング工法における円形掘削形状に起因する地山のアーチ効果を断面解析モデルへ反映し、施工時における既設P7橋脚の変位量を適正に算出した。

d) 変位量評価による対策工の必要性検討

FEM影響解析結果より、アーバンリング工法を用いた40m超と深い近接掘削時における八条高架橋既設P7橋脚の変位量は許容変位量以内であることが確認された。このため、施工着工前段階での対策工は不要と判断し、既設P7橋脚の施工時変位量が許容変位量以内に収まっていることを現場計測により確認することとした。一方、施工時の配慮としては、掘削時の滑剤を周辺地盤影響低減型へ変更するなど、掘削影響が周辺地盤を介して既設P7橋脚へ伝達することを防ぐため万全を期した。

(3) 自動計測計画

a) 計測機器

ターゲットプリズムを既設P7橋脚（上り・下り）に取付け、別途設置したトータルステーションから変位量を読み取り水平・鉛直変位を算出するとともに、傾斜計を取付けて橋脚の傾きを計測する。また、熱電対により橋脚表面の温度を測定する手法とした（図-7）。

b) 計測器の設置位置

解析変位量の算定位置であるフーチング下端は、実現場では土中にあり計測機器の取付けができないため、地表面の柱下端に計測機器を設置した。この設置位置の乖離による変位量への影響は、FEM解析により最大0.4mmと微小であることをあらかじめ確認している。

c) 計測方法及び頻度

近接施工時の計測では、水平器や光波測距儀を用いた人力による計測も用いられるが、この手法では、1日に数回程度の計測が限度となり、夜間や現場閉鎖時の計測異常値が把握できない。このため、供用中の重要路線である一般国道24号八条高架橋に対する近接施工時の安全性確保の観点から、トータルステーション等による計測結果を即時記録可能な自動計測システムを導入した。これにより、計測頻度を1時間に1回まで高め、アーバンリング施工時における連続的な変位監視を可能とした。

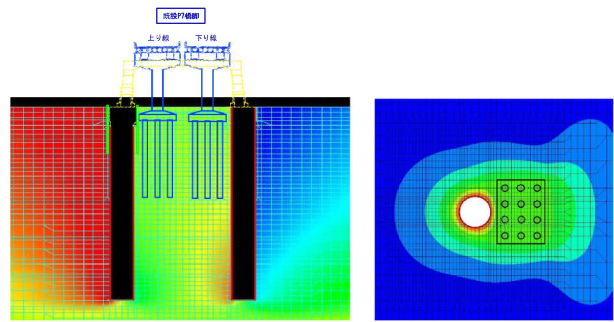


図-6 FEM解析モデル（左：断面モデル、右：平面モデル）

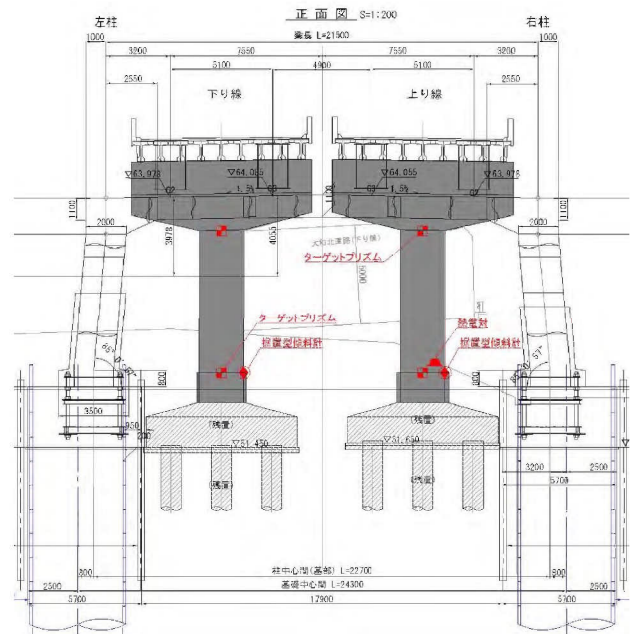


図-7 自動計測概念図

d) ユーザーインターフェースならびに通知

計測結果は、現場事務所に設置したモニターや携帯電話・タブレット等へ反映するとともに、管理値を超過した計測結果が発生した場合には、メール配信等により、現場担当者へ即座に通知を行う体制を構築した。

(4) 管理体制

a) 管理値毎の管理体制

自動計測の計測値が管理値を超過した場合は、原因究明や施工手法の修正、変位抑止対策、走行車両の安全確認、既設構造物の調査、補強対策の検討、通行止め対応など、素早い措置が求められる。実現場での施工進捗に応じて、これらの即時対応を可能とするために、あらかじめ管理フローを策定して、管理値超過時に適切な報告

がなされる体制を構築した（図-8）。

b) 重大インシデントに対する交通迂回計画

特に、限界管理値超過時は、橋梁の安全性を確認して緊急対応を迅速に実施することが求められる。この方針を維持管理部門と定め、既設八条高架橋に損傷がないかを確認し、緊急措置を講ずる必要がある場合に通行止めを行う方策を調整した（図-9）。一般国道24号八条高架橋は奈良県内の重要路線であることから、万が一の通行止め時の交通迂回検討もあわせて実施することが望ましい。このため、通行止め時の交通量推計を行い、通行止めで交通量の増大が生じても混雑度が一定程度以内に収まる路線を迂回誘導先候補とし、交通誘導や看板の検討を行った。

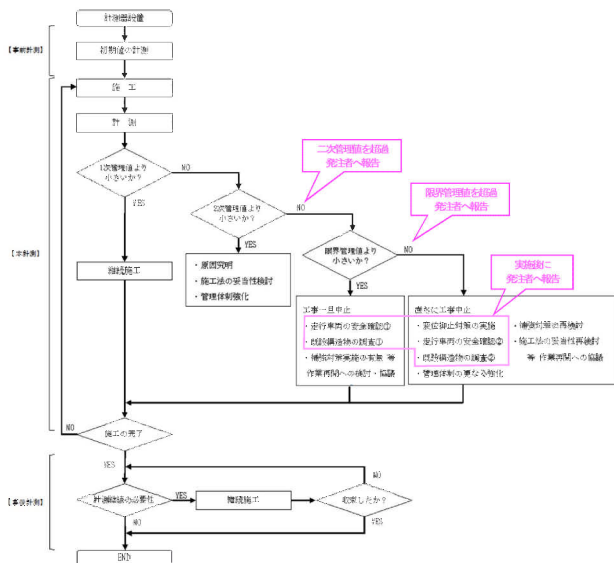


図-8 管理値に応じた連絡体制

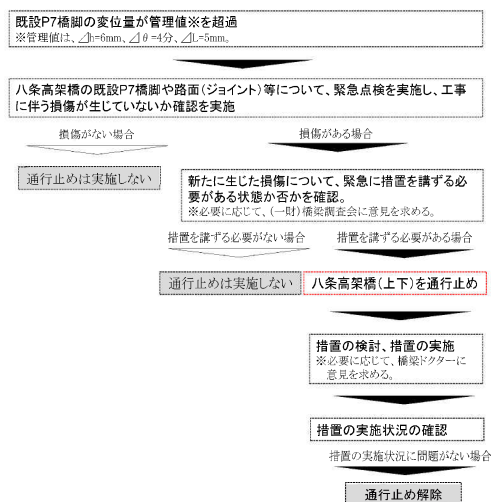


図-9 限界管理値超過時の対応方針

表4 計測管理値

計測項目	管理値	一次管理値	二次管理値	限界管理値
沈下・隆起		3.0mm + α	4.8mm + α	6.0mm + α
傾斜		2.0分 + α	3.2分 + α	4.0分 + α
水平移動		2.5mm + α	4.0mm + α	5.0mm + α

3. 実計測における知見

(1) 事前計測

既設橋脚の計測管理にあたっては、施工に伴う変位のみならず、橋梁固有の季節変動や車両通過時の振動、計測誤差等の自然変動を考慮する必要がある。八条高架橋の既設P7橋脚は、鋼単純合成箱桁と、PC単純プレテン箱桁または6径間連結プレテンT桁の掛け違い部である（図-10）。構造の特殊性ならびに築年数の経過より、温度応力等による橋脚の自然変動量を解析で事前に定量評価することが困難である。このため、あらかじめ自動計測期間を2週間設けて、既設P7橋脚固有の自然変動量が織り込まれた計測値のばらつきを考慮し、段階的な計測管理値（一次管理値、二次管理値、限界管理値）を設定した（表-4）。

(2) アーバンリング1基目の影響

アーバンリング工法の制御圧入掘削は、2基のうち上り（右柱）を先行する。事前計測から上り（右柱）掘削時の本計測までの計測結果を確認すると、土圧バランスに偏りが生じて最も既設P7橋脚の変位が大きくなると想定された施工段階においても、既設P7橋脚の変位量が一次管理値を下回った。さらに、既設P7橋脚上りと下りの変位量の重ね合わせ図（図-11）では、掘削箇所に近接した上り側の変位量に特異な点が見られないことから、アーバンリング工法の施工による既設P7橋脚への影響が微小であることが確認された。

(3) 温度による影響

a) 鉛直変位上昇の発生

一方で、本計測の半ばで、橋脚温度が約20℃を下回った時期より、事前計測による温度相関で説明可能な範囲を逸脱して、既設P7橋脚の鉛直方向変位が上昇し始めた。FEM影響解析結果によると、アーバンリング掘削時における既設P7橋脚の主な変位現象は、周辺地盤の水平変位や引き込まれに伴う既設橋脚の沈下であるため、鉛直変位上昇はアーバンリング工事による影響とは考えにくい。

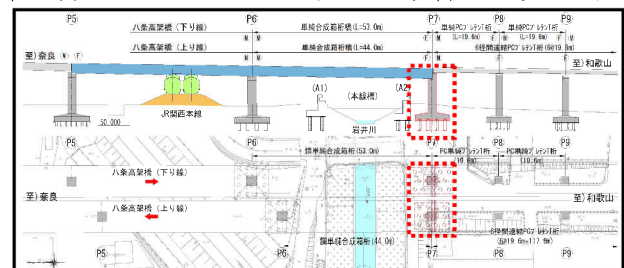


図-10 既設八条高架橋

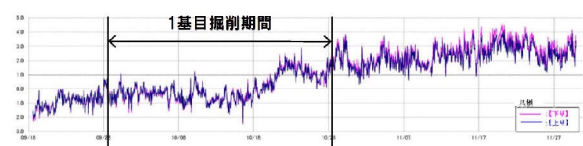


図-11 上り・下り変位量重ね合わせ図

温度に対する鉛直変位量の変動図を図-12に示す。

b) 橋脚特有の要因の推測

既設P7橋脚の支承は、築造年代から旧仕様であると考えられ、経年劣化の影響も想定される。このため、気温低下に伴う鋼桁の収縮変位が支承の固着点に達し、固定支承を介して桁の応力が直接橋脚へ伝達されたことで橋脚が上昇した可能性がある(図-13)。いずれにしても、本現象はこの橋脚固有の挙動であると考えられるため、管理値の設定ではこれらの影響を反映する必要があった。

c) 相関関係の再分析

事前計測での鉛直変位と温度の相関係数を確認すると0.4程度と弱い相関であるが、約2週間の事前計測で取得できたデータは橋脚温度がおおむね20℃以上の範囲に限られる。一方、事前計測から約2か月間の本計測までを含めると、橋脚温度が5℃以上まで幅広いデータが取得できており、0.9程度の強い温度相関が示された(図-14)。これにより、既設P7橋脚固有の自然変動量には、橋脚の温度変化が大きく影響していることが確認された。

d) 幅広い温度帯を考慮した計測管理値

以上より、幅広い温度帯での既設P7橋脚固有の挙動を表すデータを用いて、温度変化の鉛直変位に対する回帰式を再設定して計測管理値を設定し直した。

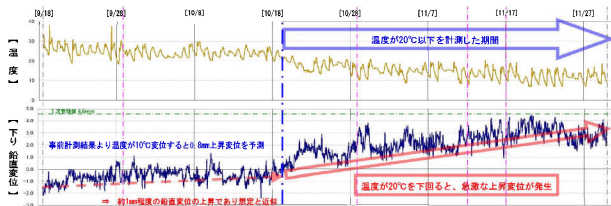


図-12 鉛直変位量 変動図

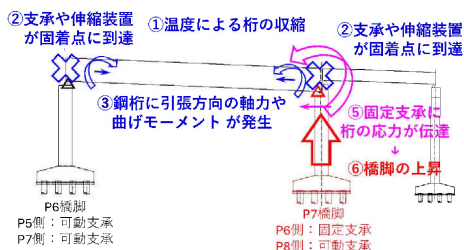


図-13 橋脚上昇の説明概念図

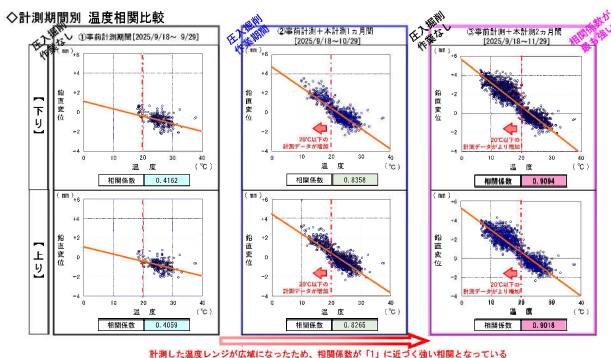


図-14 温度相関の変化

(4) アーバンリング2基目の影響

温度相関を再検証して設定した計測管理値を用い、自動計測により変位量を確認しながらアーバンリング2基目の下り(左柱)掘削を進めたところ、既設P7橋脚の変位量はいずれも一次管理値以内に収まり、顕著な変位増加等は確認されなかった。また、上り(右柱)施工時と比較しても、施工に起因する新たな変位傾向はみられず、既設P7橋脚への影響は軽微であることが確認された。

4. その他の近接施工時の影響検討

(1) 止水目的薬液注入時の影響

新設P7橋脚基部の土留め掘削に先立ち、鋼矢板内において止水を目的とした薬液注入(二重管ストレーナ工法(複相タイプ))を実施したが、鋼矢板と既設P7橋脚との離隔が10cm以下と極めて近接した施工条件であった(図-15)。施工時に自動計測結果を確認すると、薬液注入の進行に伴い、既設P7橋脚に水平変位が発生していることが確認され、一次管理値超過の可能性が懸念された。このため、計測頻度を自由に設定可能な自動計測の利点を活用し、従前の1時間に1回の計測を改め、20分に1回の計測へ切り替えることに加え、施工現場に常備したタブレット端末によりリアルタイムで計測結果を監視しながら薬液注入を行う措置を講じた。

また、薬液注入を一時停止した場合には変位量が一定程度復元する傾向が確認されたものの、注入前の変位水準までは復元しない(図-16)ことから、注入に伴う地盤内圧力が既設P7橋脚へ影響している可能性が示唆された。そこで、注入圧力の局所集中を抑制するため、平面的に分散配置した複数台の注入機により順次注入する「サイクル注入」など、注入手法に関する試験施工を行い、既設P7橋脚への影響を計測結果により確認した。

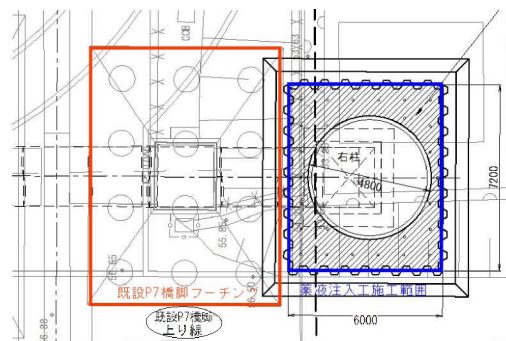


図-15 薬液注入概念図

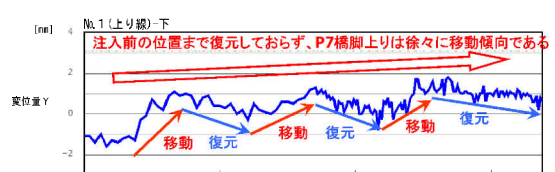


図-16 薬液注入時の変位図

(2) 土留め掘削時の影響

土留め掘削では、自立式鋼矢板の頭部変位に周辺地盤の変位が追従し、八条高架橋既設P7橋脚に変位が発生する可能性が想定された(図-17)ため、有限要素法

(FEM)による影響解析を行ったところ、既設P7橋脚に発生する水平変位が限界管理値を超過することが判明した。このため、上載荷重の一部を排除して作用土圧を軽減する対策工をあらかじめ検討して施工を進めることが可能となった。

5. まとめ

(1) 近接施工時の事前検討ならびに施工時の対応

供用中の一般国道24号八条高架橋既設P7橋脚に対し、約1.0m程度まで近接する前例のないアーバンリング工法の施工において、既設橋脚の自然変動量を考慮した計測管理値を設定し、事前の対策工の必要性を有限要素法(FEM)による影響解析で判断し、万が一の通行止め規制に至る判断フローをあらかじめ維持管理部門と調整したうえで安全に工事を進捗させることができた。

また、リアルタイムで計測結果を管理する自動計測システムを構築したことにより、アーバンリング施工時に既設P7橋脚への影響が生じていないことが確認でき、さらに自動収集されたデータの活用により、温度変化と橋脚変位量の相関関係分析に基づいて、計測管理値をタイムリーに設定して基礎工事を完了させることができた。

(2) 近接施工と自動計測に関する知見

a) 近接施工における計測計画立案の一手法

今回、実現場に即した既設橋梁の許容変位量を設定し、FEM影響解析により変位量推定を行った一事例を示した。近接影響検討で用いる基準類は、管理する既設構造物の種類・規模により計測管理方法の具体化の程度に差がみられる。今回の事例も踏まえ、近接施工時の計測管理がさらに体系化され、改善されることが望ましい。

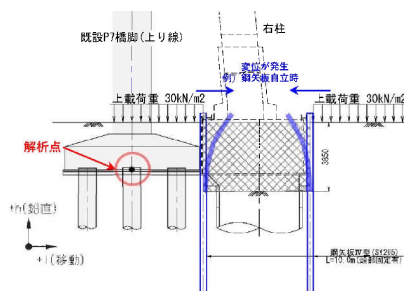


図-17 土留め掘削時の変位発生図

表-5 計測手法の比較表

比較項目	手動計測	自動計測
計測頻度	現場末稼働の休日・夜間等は測定不可能	任意に設定可能
後処理	計測データを表計算ソフト等へ入力して図化を行う必要がある	計測データは自動的に蓄積され、データの取り出しが可能
速報性	計測データの後処理を行い管理値と比較するまでにタイムロスが生じる	測定値を管理値と自動比較し、超過が生じた場合は、即座に通知を行うことが可能
費用面	計測回数増加に応じて人件費が増大	測定機器等の費用は計測頻度に関わらず一定

b) 自然変動量を踏まえた事前計測期間の示唆

既設橋脚は、旧基準で築造された築年数50年を超える構造物から、新基準による構造物まで幅広いため、温度変動を含めた各橋脚の挙動にも大きなばらつきがある。本工事で実施した相関分析の手法により、既設橋脚固有の自然変動量がいかなる要因で定まっているかを分析して、実現場に即した計測管理値を設定することが可能である。さらに、橋脚の変位に季節変動が生じることを踏まえると、1年程度以上の長期にわたる事前計測期間を設定することが、計測管理値の信頼性を高め、供用中の既設橋梁に対する安全性向上につながることを示唆された。

c) 自動計測の適用性

本工事で実施した自動計測は、手動計測と比較して、計測頻度の柔軟さ、計測データの後処理の容易さ、計測結果の速報性に優位性がある(表-5)。特に、本工事のように、供用中の重要路線の既設構造物に近接した工事、長期にわたり継続的な計測結果と維持管理上の管理値を比較して大量のデータを処理する必要がある工事、計測頻度を適時適切に調整して試行錯誤による対策工法の選定を行う工事等については、昨今の週休二日制も踏まえ、自動計測の優位性がより際立ち、適用性が増すと考えられる。

(3) 今後の展望

既設構造物への近接施工に先立ち、FEM影響解析を踏まえた各部門との事前調整により、計測異常時の判断フローを構築した一事例を示し、近接施工に伴う自動計測等における留意点の一端を考察したため、同様の近接工事への示唆となれば幸いである。一方で、今後も既設構造物に対する様々な近接施工ならびに、八条高架橋上部工の受替え工事等、より精度の高い計測が求められる高難度工事が継続するため、自動計測による計測結果を施工計画へ反映して、タイムリーな報告体制の構築を通して、安全な工事施工を推進するとともに、本工事における知見を、高規格道路の幹線道路ネットワークの形成などへと繋げていきたい。

謝辞： 本論文の執筆にあたり、本工事の受注者である大成建設株式会社および工事関係者の皆様、道路の維持管理の観点でご指導・ご調整いただいた近畿地方整備局道路管理課、奈良国道事務所管理第二課および奈良維持出張所の皆様、ならびに施工実績情報をご提供いただいた近畿地方整備局道路工事課の皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 近畿地方整備局：設計便覧（案）
- 2) 土木研究所：近接基礎設計施工要領（案），1983年6月
- 3) 阪神高速道路株式会社：近接工事に関する設計施工指導要領書，2009年6月