

地下空間

中野 須尾

既設高架構造物に非常に接近した地下横断歩道の施工 — 国道1号東野地下横断歩道設置工事(京都市山科東野) —

井上正司・福本聖史・大谷治彦

国道1号東野交差点は、一日の交通量が約8万台と多く、地下鉄の駅や地下駐車場があるため歩行者も増大している。この工事が完成すれば、交差点の横断や地下鉄駅への出入りがスムーズになるばかりか、交通弱者にも配慮した地下横断歩道となる。

しかし、掘削部分のすぐ横を、東海道新幹線が超近接して走っており、工事によって橋脚や地盤等に影響がないかどうか、日々の水平・鉛直変位が2.25mm以内を基準に最新機器を設置して常時計測しながら工事を行っている。施工時間が工種によっては深夜1時から3時までに限られていたり、非常に厳しい変位基準下で行われ、平成7年から施工開始したこの事業は今年で9年目となり、完成の年となる。

キーワード：地下道、新幹線近接施工、変位量計測、高さ制限、圧抜き孔、流動安定化処理土

1. はじめに

— 新幹線近接施工とは —

一般に、市街地等で建物や構造物が近接する開削工事等を行うときに工事影響が予想される場合、

- ・土留壁の変形を抑える工法
- ・遮水性を高めて地下水位の変動を押さえる工法
- ・FEM変位予測や計測管理

等を採用するのは衆知の通りである。

しかし東野地下横断歩道設置工事のごとく、近接施工の対象が昭和30年代後半築造の高速鉄道高架構造物であり、その橋脚が工事範囲約100mにわたり超近接し連続的に掘削影響範囲に入る工事であると、上記に加えてさらに、

- ・構造物調査（フレーム解析、基礎杭長、ひびわれ）
- ・変位量を3mm以内に抑える対策工のグレードアップ
- ・異状判明時に工事を即時中断する警報システム
- ・温度誤差の小さな計測機器の導入と計測員常駐
- ・日々対面打ち合せ、月1回程度の近接施工協議会
- ・施工機械の高さ制限（低空頭工法の採用）
- ・2万V高圧送電線（以下「き電線」と称す）の防護
- ・施工時間の制約（列車営業時間外での作業など）
- ・軌道狂いの測定

等を始めとして、列車走行上の安全性と構造物安全性

の両面から様々な対応が必要になる。これは一般の都市土木と異なる点である。

以下に、平成7年に着手した地下道開削工事に関し、施工者の立場からみた大量高速旅客輸送に係る近接施工の経過と特殊性について述べる。

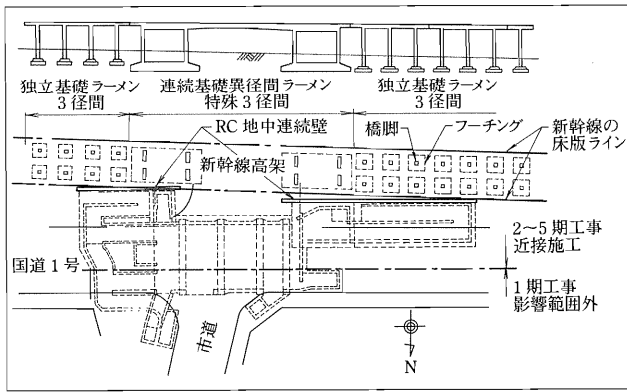
2. 東野地下横断歩道設置工事の概要

東野地下横断歩道（写真—1）は、国道1号京都市山科東野交差点における通行者の利便向上を目的として、既存の横断歩道橋を撤去し、エレベータと斜路を交差点四方に備えた地下広場を、開削工法で建設する工事である。

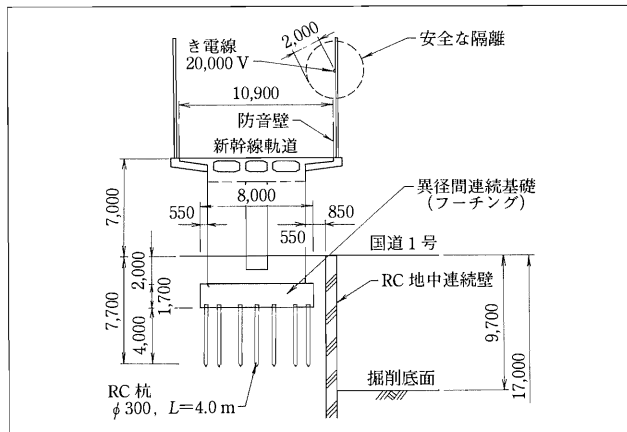
近接施工の対象は、杭支持された新幹線高架であり、異径間連続基礎の区間と、2~4径間独立基礎の区間から成る。



写真—1 工事場所全景



図一 全体平面図と高架縦断面図



図二 近接断面図

土留壁（連壁）と高架の最小離隔は約 85 cm であった（図一、図二）。当地区の新幹線走行速度は時速約 200 km/h であり、JR 東海によれば、新幹線の地下や上空を横切る近接工事は最近珍しくないが、このように新幹線に全面接して大規模掘削を行うのは大変まれな工事らしい。

3. 事前調査及び対策工法の検討

(1) 構造物と許容変位量の調査

調査はまず、昭和 30 年代後半築造の高架構造物の耐力照査が必要であると考え、橋脚間相対変位（隣り合う橋脚間の不同沈下等）についてフレーム解析を実施し、許容変位量は線路方向 3 mm、横断方向 17 mm であった。一方、軌道整備基準ではレール面変位の限界値を 3.0 mm とする規定があり、工事影響を僅か 3.0 mm 以内に抑える対策が必要であった。

次に、その基礎杭（RC 杭 $\phi 300$ ）の有効根入れ長（設計杭長に対し実際に打設された杭長、高止まりによる杭頭切断、長期供用による杭先端や杭中間部の損傷の有無）などを、念のために調べておくことが必要であると考えた。

調査方法は、簡易な設備でありながら従来の弾性波探査に比べて測定精度の高い、株式会社青木建設が開発した探査技術「オーリス」を用いた。

(2) コンクリートひび割れの変状追跡調査

高架構造物のコンクリート表面のひび割れに関して、近接施工の着手前と完了後との比較調査を実施するとともに、工事期間中は、構造物の応力の弱点部分など着目すべきと思われる既設ひび割れの伸展を定期的に観察するために、クラックゲージを貼付け、月 1 回の頻度で高所作業車を用いた目視測定を実施した。

(3) 地中連続壁の機種選定と溝壁の安定

新幹線側の土留壁は、剛性の高い RC 地中連続壁として、新幹線に関する以下の施工条件、

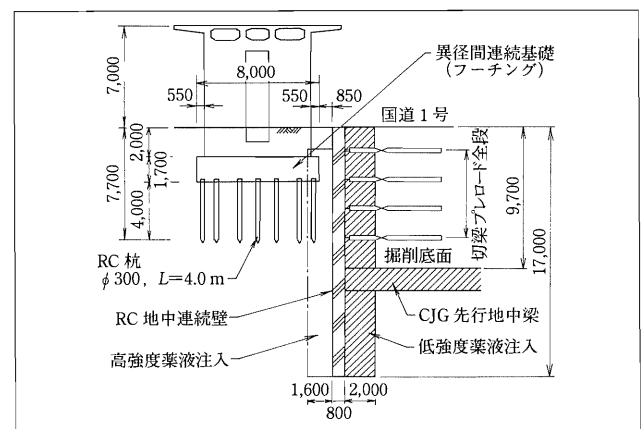
- ・高さ制限（列車運転手から機械が見えないこと及び新幹線高架の桁下最小寸法から機械高 5.6 m 以下であること）
- ・1 エLEMENT の掘削幅が高架フーチングの一辺の長さ 3.3 m よりも小さいこと（溝壁崩壊リスクを考慮に入れた）。
- ・バケット等の自由落下による振動を与えないこと。

等を満足する MBC-30（回転水平多軸やぐら式低空頭型ミニトレンチカッタ⇒掘削幅 2.8 m）を掘削機種に選定し、継手方式はカッティング方式とした。

次に断面計算の結果、 $q_u = 3 \text{ N/mm}^2$ という CJG 並みの堅固な背面地盤改良が必要であったが、基礎杭周辺の原位置土を乱さない工法とするのが望ましく、高強度薬液注入工法を採用した。

(4) 底版改良、掘削及び土留支保工について

複数の補助工法併用ケースについて実施した FEM 変位予測解析結果などを基に、防護対策工は、CJG 先行地中梁+切梁プレロード全段に決定した（図三）。



図三 高架橋防護断面図

(5) 計測管理と異状判明時の工事中断システム

全工期を通して3 mm という僅かな許容変位量に対応するには、信頼できる0.1 mm 単位の精度で日々管理を行うことが必要であり、従来型の連通水管式に比べて誤差の小さな、当時としては最新型の水路式沈下計及び傾斜計を、工事影響範囲の全橋脚に設置した。また、高架だけでなく、高架の基礎地盤内と連壁内部と切梁にも計器を設置し、土留架構の異常が高架へ及ぶ前にトラブルを早期発見できる計測体系とした。

許容変位量3 mm に対する管理値（ステップ）は、

- ① 1次管理値1.5 mm（超過すると要注意レベル）
- ② 2次管理値2.25 mm（超過すると工事中断）
- ③ 管理限界値3.0 mm（超過すると工事中止）

と設定された。

このような厳しい制約の中で、長期近接施工を安全サイドに進めるには累積変位量を増やさないことが何よりも重要であった。そこで、日常計測管理の当現場ルールとして、1日あたりの管理目標値（前日の同時刻に比べて0.3 mm）を別途設け、計測管理室に詰める計測員と工事担当職員が、作業当日の計測データ推移とここ数日間の経時変化から工事予測や計測推定を行い、異状の兆候の早期発見に努めた。

計測室には工事中断ボタンを設置し現地のプラントを緊急停止できる警報システムを構築し、特に薬液注入時には1日管理目標値に近づくとボタンを押して注入をいったん中断し、変位の回復を待って注入再開するという管理を行った。

4. 地盤改良（薬液注入）の施工

溝壁を堅固にして連壁掘削の影響から高架を防護する地盤改良工事は、改良強度 $q_u=3\text{ N/mm}^2$ 、注入率30%、注入量1,280 kLの高強度薬液注入で設計され、対象地盤は地表より約20 mまで層厚1~3 mの粘性土層と砂礫層の互層で構成されていた。

注入工法としては近接構造物への影響が最も小さなダブルパッカを採用し、 $q_u=3\text{ N/mm}^2$ を得る注入材としては特殊スラグ系のシラクソル（懸濁型）の採用が必要であった。

(1) 技術的課題

薬液注入による近接構造物挙動は一般に予測困難であり、しかも異径間高架のフーチングは底面が広く隆起する圧力を受けやすい。1,280 kLの高強度の薬液を、懸濁型という浸透性の劣る液体で高架近傍に注入する際の高架変状を如何にして3 mm 以下に抑える

かが、施工計画上の最重要課題であった。

(2) 注入圧力を遮断する

次に、地盤条件を整理し、注入可能限界に関する研究報告をもとに検討した結果、高架変状の主要因は、粘性土層における注入材の逸走（以下、リークと略す）と、高架基礎地盤への注入圧力伝播であるという結論に達した。注入圧を遮断する対策として、

- ① 鋼矢板の遮断カーテン（可変超高周波バイブロ）
- ② 変位吸収孔（ $\phi 300$ オーガ削孔、泥状粘土充填）
- ③ 圧抜き孔（ $\phi 135$ ボーリング、高濃度安定液充填）

の3案について検討を行った。

その結果、①案及び②案では対策工自体が3 mm を超える高架沈下を招くと予測され、工程、経済性、確実性の比較でも優る③案の圧抜き孔について詳細検討を進めた。

この過程で特に留意した点は、圧抜き孔の構造である。地盤を削孔して安定泥水を充填する従来方法の圧抜き孔では、標準注入材に比べて6~8倍のゲル強度を発現するシラクソルがいったんリークすると、圧抜き孔を固結閉塞させ、圧抜き効果が失われると考えた。そこで我々は、試験注入~露天掘りを実施してそれを実証し、試験注入の結果をもとに次の3点を技術的解決策の結論とした（図-4）。

- ① 従来型の圧抜き孔に改良を加えて、孔内からの加圧洗浄によって圧抜き効果を回復させるストレーナ型圧抜き孔を考案した。
- ② 被圧注入材が高架底面へリークする場合に備え、フーチングを穿孔し、中の状況の判る透明な圧抜

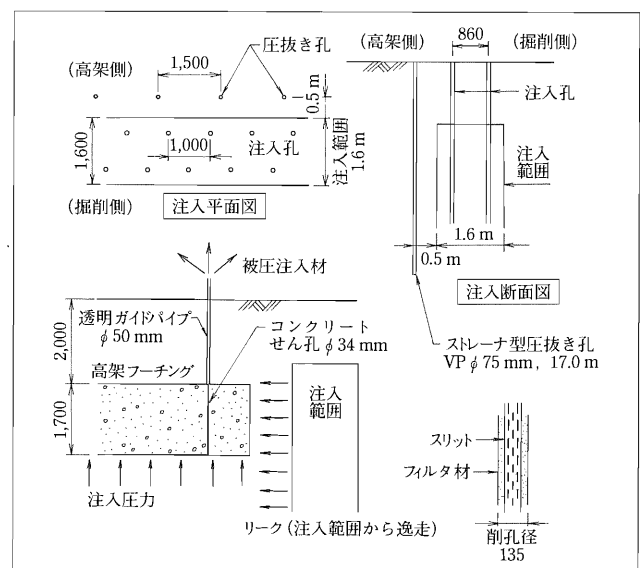


図-4 薬液注入断面図

きガイドパイプを設置した。

- ③ 毎分4.5~6Lまでの低吐出量で注入し、注入圧力を軽減した。

注入圧力遮断の効果として、薬液注入完了時の高架変位量は2次管理値以下（隆起）に抑えられた。また注入後の地盤改良強度は $q_u=3.4\text{ N/mm}^2$ に達し、設計基準強度を満足した。圧抜き孔の設置と維持管理には約400万円程度を要したが、緊急軌道整備費の調達が不必要になり、総合的には工事費を節減できた。

簡易な設備であるストレナ型圧抜き孔が重要構造物に及ぼす影響を経済的、効果的に軽減しえたことは評価でき、薬液注入工法に留まらず、都市域の液状化対策などに活用する余地があろう。特に、再開発や用地難や既存施設の耐震補強等の必要性から、今後同様のケースが増加するものと予想される。

5. RC 地中連続壁の施工

新幹線側の土留壁として採用したRC地中連続壁は、壁長69m、掘削深さ17m、コンクリート860 m^3 、鉄筋籠5段で設計された工事であった。

上空には、き電線（2万5千V）が存在し、ジブを伸ばして防音壁を超えるクレーン作業は、列車営業が終了し高圧送電の停止する深夜0時から早朝5時までの作業を余儀なくされた。

（1）夜間クレーン作業の安全性を高める

夜間に架空線の位置を地上から目測するのは容易ではなく、しかも離隔がほとんどなく、クレーン運転手と監視員の誤判断や意識の途切れが原因で送電線や高架を損傷し、翌朝の列車運行に甚大な被害を与える恐れがあり、クレーン作業の安全性を高めて高架を防御することもまた、本工事の重要課題の一つであった。

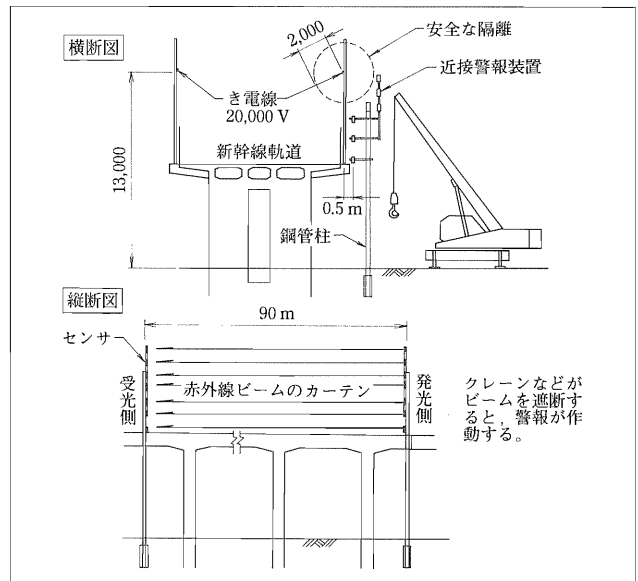
（2）近接警報装置

作業手順や過去のクレーン災害事例を十分整理すると、安全対策は次の3案に絞られた。

- ① 堅固なフェンスを設置（ $H=11\text{ m}$ ）
 - ② やぐら足場を組み監視員を高所へ配置（ $H=9\text{ m}$ ）
 - ③ 近接限界を超えると自動的に警報を発する装置
- ①案で衝撃時の耐力を考慮した構造に設計すると工期や経済性が著しく悪化し、②案は第三者が軌道内へ不法侵入しやすくなるなど、列車運行に及ぼす影響が問題となり、総合的に優る③案を採用し、離隔の限界値を0.5mと規定した。

次に、危険状態を検出する方法として、防犯や計量

の分野で既に普及し低廉化した屋外仕様の赤外線センサに着目し、建設現場の安全設備への応用を試みた。7本の赤外線ビームを高架上に沿ってカーテン状に放射し、クレーンのジブやフックや吊荷がビームを遮断するとセンサが検知し、ブザーと回転灯を作動させる近接警報装置を応用・設置した（図—5）。

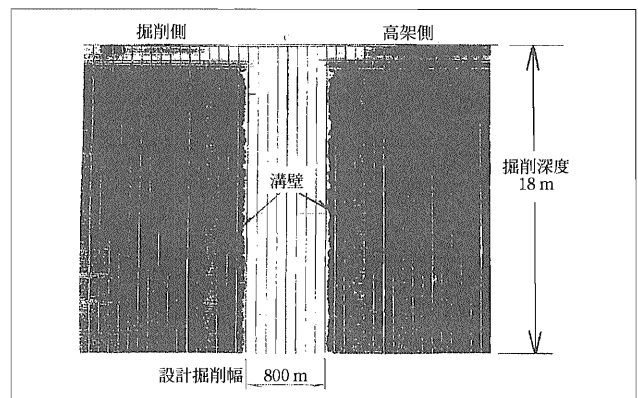


図—5 近接警報装置 横断面・縦断面

赤外線ビームの周波数には、相互干渉が生じないように異なる4種類の周波数を割り当てた。

対策の効果として、自動警報による精度の高い離隔判断でのクレーン作業が可能となり、き電線や高架の安全確保にこれまでのところ成功している。装置の設置には約900万円を要したが、当該路線における人的事故や、1日の営業補償が40億円にも及ぶ事を考えると、十分な損失防止効果を発揮したと言えよう。

また、工事の安全を追求する立場から言えば、クレーン作業対策に限らず、建設現場における熟練工不足や労働者高齢化対策の一環としても、今回のような安全



図—6 連壁溝壁の掘削形状（超音波測定結果）

施工技術の情報化、高度化によって現場の作業環境を改善し、ヒューマンエラー型災害の防止に取り組むことが重要であると考える。

(3) 掘削溝壁の防護の成果について

なお、連壁掘削時に心配された互層地盤における緩い砂礫層の崩壊に関しては、高強度薬液注入や入念な安定液管理が功を奏し、超音波測定結果から有意な溝壁崩壊は認められなかった(図-6)。

6. 掘 削

(1) 不静定構造物の柱間相対変位量の抑制について

当工区の高架はバラスト軌道であり、仮にレール面に有意な変位が発生した場合、列車の走行しない深夜に軌道整備による補修が可能であるが、橋脚間相対変位は、いったん生じた変位量を元に戻すのは不可能に近い。

もし、隣り合う橋脚が一様に隆起(沈下または水平移動)すれば、相対変位量はゼロである。或いは、全ての橋脚の変位量分布が緩やかなコサイン曲線状になるならば、相対変位量はほとんど増進しない。

したがって、市道を跨ぐ高架の両橋脚根元の掘削速度を等しくし、工程の許す限り根切り高を揃えるようにして掘下げた。このような掘削管理法は、鉄道高架が近接した本工事に限らず、対象構造物が橋脚支持や杭支持のラーメン構造等であるときには常に励行することが望ましいと思う。

(2) 構造物の水平変位量をリアルタイムに測る

鉛直変位は、温度差による日変動をほとんど生じない水路式沈下計が、高架挙動を精度良く捉えた。水平変位は、傾斜計が捉えた東西南北方向の橋脚の傾きを2次元ベクトルに換算して表示し、また3次元トランシットで1日2回橋脚の絶対変位を測り、計器が捉えた相対変位及び水平移動に関するチェックを日々行った。

しかし掘削を開始(鉄道構造物の真横を約100mにわたり空洞化)するにあたり、背面地盤の緩みやリバウンドに伴う側方変位が少なからず予想され、水平移動量をさらにリアルに測ることの重要性が高まり、「水」ではなく「糸」を用いて水平・鉛直両変位を同時に測る新型計測器「ラインゲージ」を導入した。

FEM変位予測では2種類の変形モード(掘削側への側方変位、掘削底面のリバウンドによる押戻し)が当初考えられたが、結果的に、押戻し現象と思われる

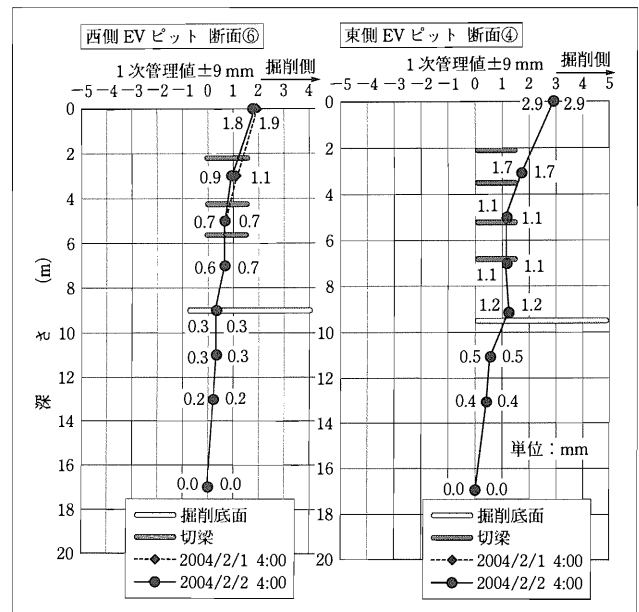


図-7 多段式傾斜データ(掘削による連壁水平変位量)

挙動は一時的には観察されたが、最終掘削時には連壁が概ね直線形状を保持したまま掘削側へ数mmシフトするという変形モードに収束した(図-7)。

7. 躯体築造～切梁腹起し撤去～埋戻し

躯体築造工事において、近接施工上特に配慮したのは次の2点である。

- ① 躯体のリフトアップに伴う切梁・腹起し撤去後の土留壁のクリープ変形を防ぐ。
- ② 狭隘な躯体側部埋戻しを確実にやり、切梁撤去時の即時変位や完成後の残留変位を極力与えない。

(1) 切梁を部分的に残置する

プレロードを緩めずに、切梁を躯体壁に巻き込み、コンクリート養生及び切梁高さまで躯体側部埋戻しを終えてから、躯体に干渉しない切梁腹起し部材だけを撤去した。

(2) 躯体側部埋戻し材に流動安定化処理土を用いる
狭隘部の充填が完全に行え、確実な強度が得られ、しかも配合を変えて強度を指定できる非圧縮性の埋戻し材(仮称「流動安定化処理土」)を本工事において開発し、躯体側部の埋戻しに用いた。これは、建設現場などから発生した汚濁泥土を原料に、

脱水ケーキ

→固化材を添加して再生骨材を製造

→生コンプラントにストック

→再生骨材にセメントや水や混和剤を加えて生コン

状にしトラックミキサで出荷する、というリサイクル製品であり、現場荷降し後は普通コンクリート打設と同様に、コンクリートポンプ車で圧送し、棒形振動機で締固めた。

強度（配合）は、切梁撤去後も切梁と同等の変形係数が早期に得られることを前提とした構造計算結果から、深度別に以下の3種類を設定した。

- ① 底版以下 1.47 N/mm²
- ② 底版から切梁下までの側壁部分 2.1 N/mm²
- ③ 切梁下から頂版まで 0.5 N/mm²

当製品の実用化ははまだ始まったばかりであり、強度的恒久性や耐久性など未解明の部分があるものの、少なくとも、長期耐久性や高強度などの品質を問わない仮設構造物については、コスト縮減と資源循環の両面から、今後応用する価値が十分にあると考えている。

また当現場では以前、RC地中連続壁工、薬液注入工、高圧噴射攪拌工、柱列式土留壁工など本工事施工に伴う大量の汚泥を排出しており、建設リサイクルの取組みとして排出汚泥に見合う量の汚泥を買戻し、現地で再使用することが好ましく、その点では、時代のニーズにマッチした事例であったと考える。

8. おわりに

工程的には、本高架構造物超近接での高強度薬液注入は当時前例がなく、対策立案から管理手法まで全て列車走行をはじめとする安全確保を最重視したために、安易な注入速度低減が工期短縮を困難にした点など、改善すべき点が幾つかある。

また、各主要工種（薬注、連壁、掘削）着手時の試験施工や、一部の工種で万一の軌道整備に要する時間を列車始発時刻と終電時刻から逆算して施工時間帯を設定（深夜2時間！）したことなどが、少なからず工期や工事費の増大を招いた事も否定できない。

しかし、高速大量旅客輸送の安全確保と工期短縮、工事費縮減とを秤にかけるとき、施工者の立場からは次のように考える。「ひとつ誤れば東京-博多間が不通になり、その営業補償費は膨大な額、会社は間違いなく〇〇、況や大事故が発生したら…」

5年前に、施工協議関係者は批判を恐れずに「当該構造物の安全確保のためにはできることは全てやる」ことを決断した。その後近接施工5年間の成果として、各対策工法による防護が功を奏し、躯体築造と埋戻しを95%終えた現在、最大変位量は1.5mm（隆起）、構造物にも軌道にも有意な変状ははまだ認められていない。

一方、我々施工者サイドとしては、近接施工着手当初にはその責任の重さと予算との板挟みから実に胃の痛くなる思いをした反面、多種多様の対策工法や補助工法や計測を経験させていただいた事や、様々な角度から技術的検討を行うために、社内・社外の優れた頭脳集団と協働する機会を得た事は、建設現場に携わる技術者として本望を達したところである。

そして本報文の最後に、施工者から独立した立場で工事に参画し、昼夜を問わず長期的に現場常駐していただいた計測員の皆様と、重要構造物の近接という状況を十分理解し、常に精鋭部隊を本工事に振り向けてくれた各専門工事業者の熱意と頑張り、現在までのところ「許容変位微小」な本工事を成功させていることを申し述べたい。

JICMA

【筆者紹介】

井上 正司（いのうえ ただし）
株式会社青木建設大阪本店
東野地下道作業所
現場代理人



福本 聖史（ふくもと きよふみ）
株式会社青木建設大阪本店
東野地下道作業所
次長



大谷 治彦（おおたに はるひこ）
株式会社青木建設大阪本店
東野地下道作業所
工事主任

