

地下鉄駅部改築工事における安全性向上・工期短縮事例

佐藤工業株式会社 正会員 ○ 岩橋公男
佐藤工業株式会社 西本浩二
佐藤工業株式会社 齋藤 諭
佐藤工業株式会社 正会員 齋藤達也

1. はじめに

本工事は、東京メトロ有楽町線の小竹向原駅から千川駅間に、和光市方面と新木場方面（有楽町線）を結ぶ連絡線を新たに設置し、練馬方面と渋谷方面（副都心線）、和光市方面と新木場方面（有楽町線）を結ぶ列車の運行経路の平面交差を解消する工事である。

当初設計は、軌道間に仮支柱（H-150×150mm）を設置し、既設構造物外壁を撤去する計画であった。仮支柱の設置は、バラスト撤去に伴う軌道変動リスク、建築限界支障のリスク、さらに、き電停止中の限られた時間内での作業であるため、工程のリスクが高くなることから、工程促進・列車運行阻害事故防止の対策が求められた。そこで、軌道階での作業を減らすことが可能な PC 鋼棒による「中床版の吊り補強」による受け替え工を採用した¹⁾。

また、本工事は既設構造物の側壁を撤去し、新設構造物を接続し拡幅を行うが、既設の配筋は折り曲げ筋を使用し圧縮側の鉄筋を少なくしていた為、拡幅時の発生応力が許容値を超え、鉄筋量が不足する箇所が生じる。このため、長尺のアンカー鉄筋を設置し補強することとした。しかし、従来のコアボーリングによる削孔では既設鉄筋の切断の可能性がある、さらに、補強区間は約 70m と長いことから極力鉄筋の損傷を避ける必要が生じた。そこで「ウォータージェット（以下 WJ）削孔による鉄筋の挿入」を採用することとした²⁾。

本報告は、「中床版の吊り補強」による受け替え工および「ウォータージェット（以下 WJ）削孔による鉄筋の挿入」によるアンカー鉄筋設置工について紹介する。

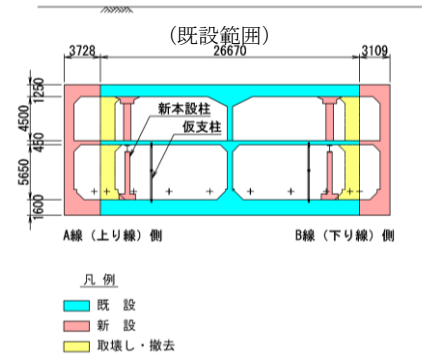


図-1 当初計画の工事概要

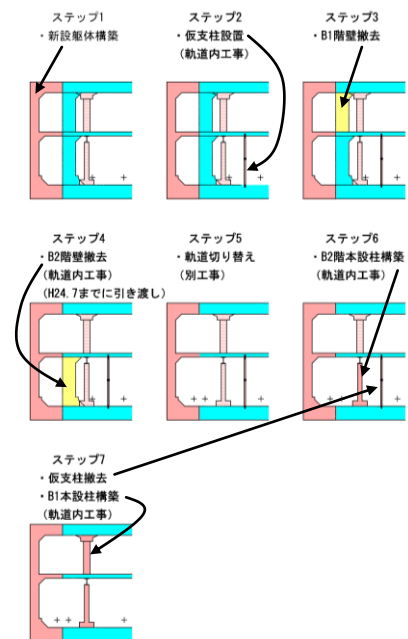


図-2 当初計画（仮支柱）のフロー図

2. 工事概要

工事件名：有楽町線小竹向原・千川間連絡線設置、向原工区工事

施工場所：板橋区向原二丁目4番地先～一丁目4番地先

発注者：東京地下鉄株式会社

工期：2010年5月14日～2016年1月13日

工事は、1期工事としてA線側（都心方面）の施工を行い、副都心線と東急東横線との相互乗り入れのために2012年7月末までに軌道階の土木工事を終わらせる必要があった。

ここでは、主にA線側の施工について報告する。

既設構造物改築工、軌道内工事、吊り補強、アンカー定着、ウォータージェット削孔、長尺補強鉄筋

連絡先 〒103-0023 東京都中央区日本橋本町4-12-19 佐藤工業株式会社東京支店 TEL03-3661-1298

3. 中床版の吊り補強

3.1 当初計画

3.1.1 当初計画の工事概要

仮支柱による当初計画の工事概要を図-1 に、フローを図-2 に示す。

3.1.2 当初計画（仮支柱）の検討事項

当初計画は、仮支柱を軌道階（B2）に設置する（図-1、図-2 参照）ため、発注当初から以下の問題が挙げられ、発注者より「列車運行阻害事故防止策」と「工程促進策」が求められた。

(1) 建築限界、車両限界の支障

仮支柱は、図-3 に示すように、建築限界間隔 290mm の間に H-150×150 を設置する計画であり、鋼材の接続部では、建築限界との離れが 35mm しか確保出来ないものであった。このため、工事の影響によるわずかな軌道の変位や仮支柱の設置精度次第では、建築限界、車両限界の支障、さらには列車運行阻害事故の可能性が考えられた。特に、軌道階の壁撤去後に仮支柱と列車が接触した場合には、仮支柱の倒壊、中床版の大幅な沈下といった重大事故に繋がる懸念された。

(2) 軌道への影響

仮支柱の設置位置は図-4 に示すように、軌道間のバラスト道床であることから、仮支柱の確実な固定をする為には、バラストと排水コンクリートの撤去が必要になる。仮支柱の計画設置間隔は 50cm であり、全面的なバラスト・排水コンクリート撤去となるため、軌道への影響が懸念された。

(3) 工程への影響

上記の作業は、き電停止中の実作業 3 時間での作業であり、安全・工程面から厳しい施工条件となった。

3.2 中床版吊り補強（代替策）

3.2.1 中床版吊り補強の概要

軌道階での作業を減らすことが「列車運行阻害事故防止」と「工程促進」という目標につながることから、本工事では、中床階での作業のみで仮支柱設置と同等の効果（中床版の変位・発生断面力抑制）がある「中床版の吊り補強」を行うものとした。

図-5 に吊り補強の概要、図-6 にフローを示す。

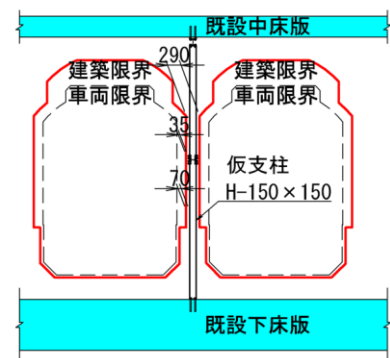


図-3 仮支柱の（当初）計画

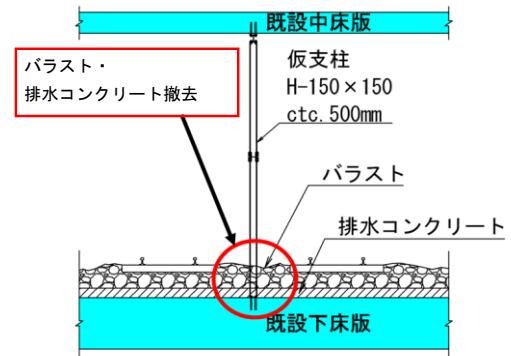


図-4 バラスト道床

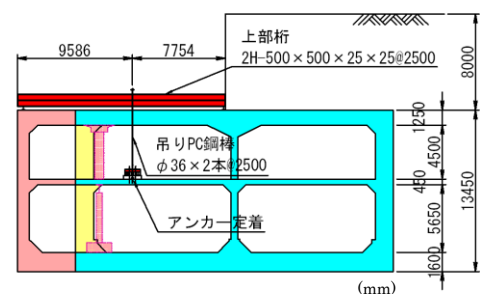


図-5 中床版吊り補強の工事概要

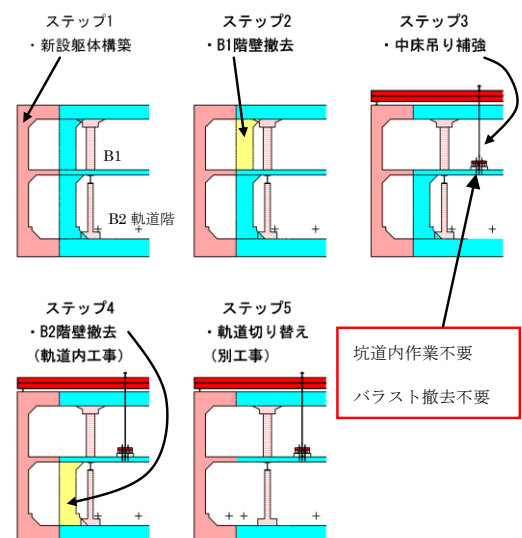


図-6 中床版吊り補強のフロー図

3.2.2 中床版吊り補強の施工

図-7 に吊り上げ部（上床版）詳細、図-8 に中床版の定着部断面、写真-1 に中床部の吊り補強状況を示す。中床版吊り補強の施工方法を以下に示す。

- ① 上床上に配置する上部桁（2×H-500×500mm）より、吊り PC 鋼棒（φ36mm）を使用して吊り上げる。
- ② 吊り PC 鋼棒は新設の補強コンクリートに定着し、定着部にはアンカープレートを設置する。PC 鋼棒の定着は本来であれば、PC 鋼棒が中床版を貫通し、溝形鋼などにより支持する形状が一般的だが、中床版の下は軌道階であり、中床版下 10 数 cm のところに剛体架線があるため、新設の補強コンクリート内に定着する形状とした。
- ③ 吊り PC 鋼棒の定着部が押し抜きせん断破壊を起こしても急激な変形が生じないように、溝形鋼で定着部を挟む。
- ④ 補強コンクリートと既設中床版は、定着 PC 鋼棒（φ23）により一体化する。
- ⑤ 吊り PC 鋼棒は、既設中床版に対してもあと施工アンカーとして定着する（設計計算上は、その効果を考慮していない安全対策）。
- ⑥ 吊り PC 鋼棒（φ36mm）の初期緊張力（設計値 125kN/本）は、中床版の変位が±5mm 以内に収まるように設定する。

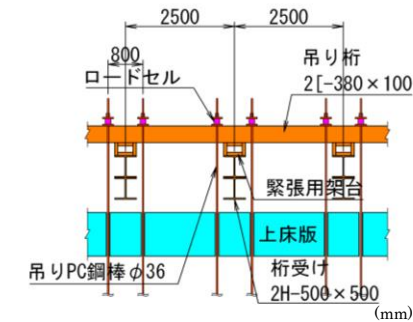


図-7 吊り上げ部（上床版）詳細

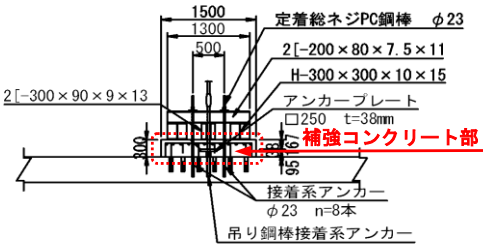


図-8 中床版の定着部断面

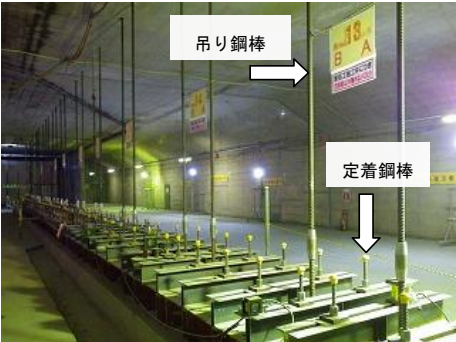


写真-1 吊り補強（中床部）状況図

3.2.3 計測管理

中床版の吊り補強における計測管理項目を表-1 に示す。
中床版の変位は画像変位計測システム、吊り鋼棒と定着鋼棒の緊張力はセンターホール荷重計、上床・中床の温度はセンターホール荷重計に付属する温度計をそれぞれ用い、5 分毎に計測した。各計測方法を以下に示す。

(1) 画像変位計測システム

画像変位計測システムは、影響範囲外に設置されたカメラによって、測定範囲に設置されたターゲットを撮影し、カメラの映像を基に、基準部と測定部の相対変位により変位を計測する。画像よりターゲットがどこにあるか検出し、画像上の座標を求め、検出した座標情報から鉛直・垂直変位量を計測精度±0.5mm（50m 地点）で計算する。警報値（±4.0mm）超過の場合、設定した関係者の携帯電話に警報の e-mail が発信される。

(2) センターホール荷重計

吊り鋼棒（φ36mm）の引張力および中床版の定着鋼棒の緊張力の計測は、山留めアンカーや地滑り防止におけるアースアンカーなどの引張荷重測定などに用いられる防水型差動トランス式のセンターホール型の荷重計を採用した（写真-2）。

表-1 計測項目

着目点	仕様	箇所数	計測頻度
中床変位	画像変位計測システム	25	5分毎
吊り鋼棒緊張力	センターホール荷重計（100t用）	49	5分毎
定着鋼棒緊張力	センターホール荷重計（100t用）	13	5分毎
上床気温	センターホール荷重計に付属	3	5分毎
中床気温	センターホール荷重計に付属	1	5分毎
補強コンクリートひび割れ	目視による点検	49	毎日点検 週2回ひび割れ幅計測

管理基準
・中床板変位：1 次管理±4.0mm、制限値±5.00mm
・最大緊張力：吊鋼棒 228KN、定着鋼棒 144KN
急激な変化は異常と判断
・補強コンクリートひび割れ：幅、数の急激な変化は異常と判断



写真-2 センターホール荷重計（吊り鋼棒）

3.3 計測結果概要

変電所部の中床の鉛直変位・吊り鋼棒緊張力の計測結果を図-9 に示す.

図中の A 部は、軌道階の既設壁撤去に伴う変形で、設計で 3.0mm、実測で 2.1mm となった。変位が段階的に進行しているのは、軌道階壁最上部の切断だけでは切断部がせり、吊り鋼棒への荷重の受け替えが十分ではなかったため、最上段のコンクリートブロック撤去により、最終的に荷重が作用し受け替えが起きたためである。

B 部は，不動点が移動したことによる変形である．

C 部は、温度変化に伴う変位と考えられ、中床の気温よりも上床の気温が低くなると中床の変位が大きくなる傾向が認められる（図-10 参照）。

D 部は、上床の開口部コンクリート打設に伴う変形で、コンクリート打設時に沈下し、型枠支保工解体時に隆起した。変位は、設計 1.3mm、実測 0.4mm と実績値のほうが小さな値を示した。これは、荷重が作用している範囲が縦断方向に対して限られた範囲となっており、中床版の面としての挙動によって変位が小さな値となったと考えられる。

中床版の定着部の補強コンクリート（前述図-8）のひび割れ状況を図-11に示す。9月中旬の時点で、ひび割れの総数は、93箇所と数が多いものの、0.20mm以下のひび割れが98%を占めており、また、アンカー定着プレートから発生する押し抜きせん断破壊によるひび割れは見られないことから、定着部に異常はないものと判断された。

以上の「中床版の吊り補強」により、A線側工事の工期を2ヶ月短縮し、引き渡し時期を守ることができた。

4. ウォータージェット削孔による鉄筋の挿入

4.1 既設壁一新設壁接合部の補強概要

既設の配筋は折り曲げ筋を使用し、圧縮側の鉄筋を少なくしているため、拡幅時の応力状態の変化に伴い、図-12 のように、発生応力度が許容値を超える箇所が発生することが明らかとなった。

既設構造物内に営業線が通っていること、工程厳守の施工条件を考慮し、補強対策を検討した結果、既設構造物内に不足する鉄筋量をアンカー鉄筋で補うこととした。

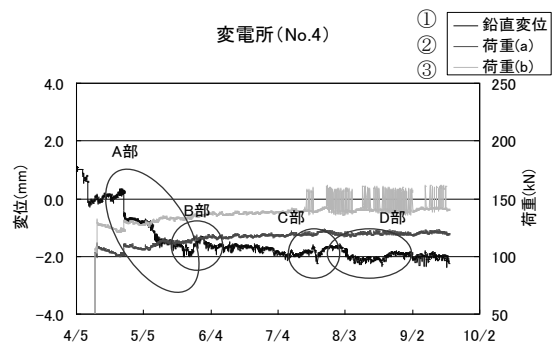


図-9 変位・吊り材緊張力図（変電所）

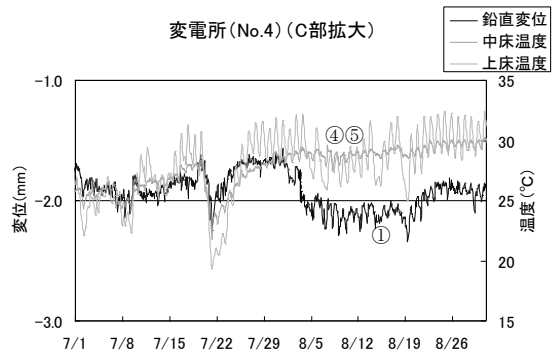


図-10 変位・温度図 (C 部拡大)

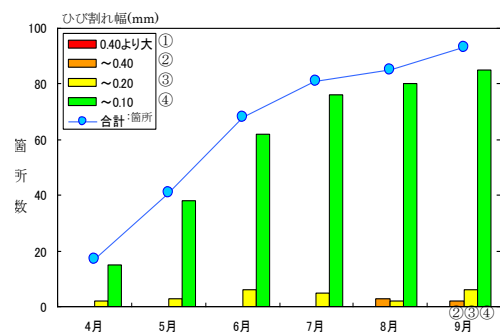


図-11 ひび割れ幅毎の状況図

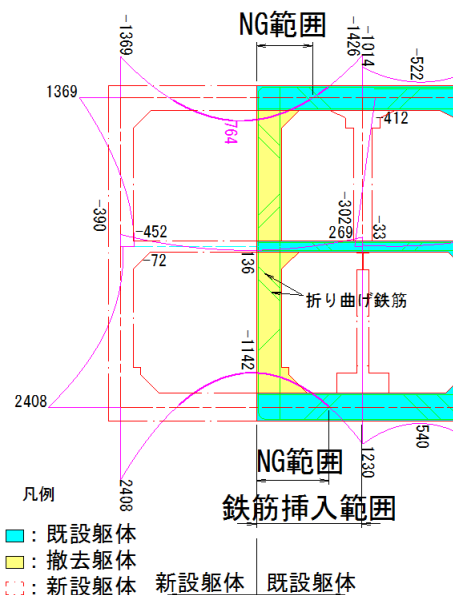


図-12 既設配筋と断面力合成図（A線側）

補強アンカー鉄筋は、概要を図-13 に示すように既設構造物内への削孔可能な位置を確保することから、かぶりを 200mm 程度と大きくとり、削孔本数を抑えるため鉄筋径を D51 とした。

4.2 ウォータージェット工法による削孔

4.2.1 ウォータージェット工法の採用

補強アンカーの必要鉄筋径は D51、長さは 4.2m、4.7m とされた。従来、この程度の鉄筋径・長さの削孔はコアボーリング工法が考えられたが、既設の鉄筋を切断してしまう可能性があった。

今回の補強範囲は、延長で 70m 区間が対象であり、これだけの区間の鉄筋を損傷することは避けなければならない。そこで、WJ（ウォータージェット）工法による削孔を検討するため試験施工を実施した。

4.2.2 WJ 削孔試験施工

(1) 削孔確認

従来、WJ の削孔長の実績は 2m 程度までであったため、新たに開発された超高圧水削孔ノズル、WJ 削孔装置、鉄筋固定方法を用いた試験施工を行った。試験は、既設配筋を再現した構造物（試験体）を作成し、削孔精度、削孔速度、既設構造物への影響等を検討した。

その結果、削孔長最大 5m（約 60 分）、削孔径 $\phi 65 \sim \phi 120\text{mm}$ 、挿入鉄筋径最大 D51 の適用範囲が確認でき、また、コアボーリングと異なり、孔内面が凹凸で、削孔排出物がヘドロ状にならないことから鉄筋の付着強さが期待できることが確認された。

(2) モルタルの充填性確認

モルタル充填は削孔穴内にエアーを残さないよう流動性が高く、耐震補強でも実績が多い高流動無収縮モルタルを使用し、図-14 に示すように、削孔後の鉄筋を挿入する前に孔内を充填させて鉄筋を挿入する方式とした。

試験施工においては、削孔面から 1.5・3.0・4.5m の位置でコアを採取し、充填状況を確認するとともに、引張り試験を実施し、アンカー性能を確認した。

充填確認のサンプリング位置および採取コア状況写真を図-15、写真-3 に示す。

4.3 実施工における WJ 削孔による長尺鉄挿入

4.3.1 施工条件

(1) 使用機材

使用資機材一覧を表-2 に、WJ 削孔装置を写真-4 に示す。

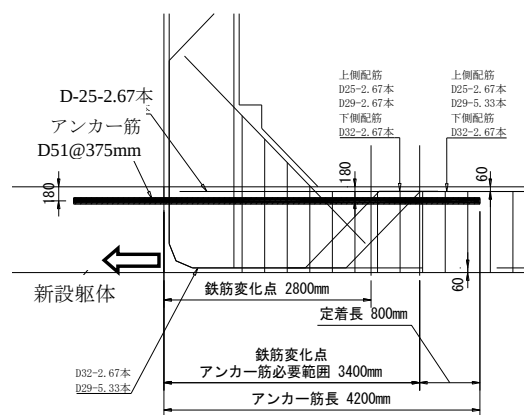


図-13 下床版補強アンカー概要図（変電所型）

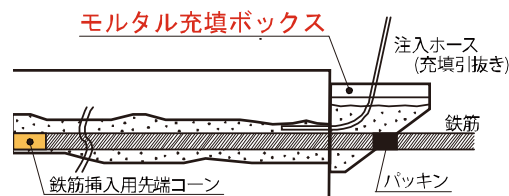


図-14 充填・鉄筋挿入方法

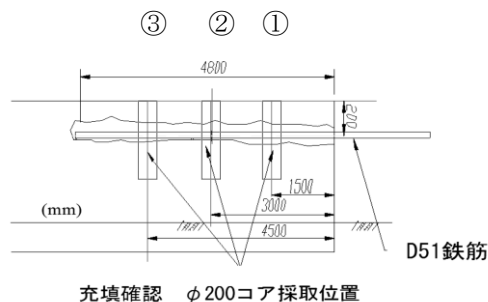


図-15 充填確認サンプリング位置図（写真-3 対応）

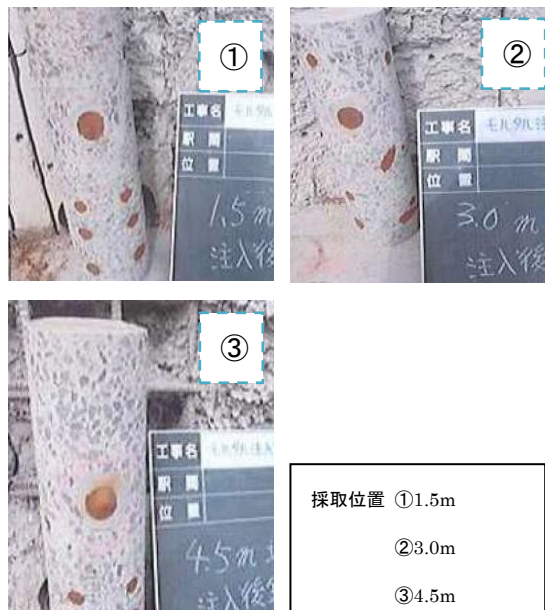


写真-3 各採取位置におけるコア状況

(2) 削孔仕様

施工試験の結果から、本施工における削孔の仕様を以下のように決定した。

- ① 噴射圧力・・・140MPa
- ② 噴射吐出量・・・83 ㍈/min
- ③ ノズル回転数・・・200rpm～300rpm
- ④ 計画穿孔径・・・φ65mm～75mm
- ⑤ ノズルボデー径・・・50mm
- ⑥ 穿孔深度・・・4.3m, 4.8m

(3) 施工数量

- ① 削孔深さ 4.3m（変電所型） … 52 本
- ② 削孔深さ 4.8m（換気室型） … 54 本

4.3.2 施工フロー

施工フローを図-16 に、施工状況および既設鉄筋の支障状況を写真-5、写真-6 に示す。

削孔位置は既設側の配筋図をもとに決めたが、組み立て精度にばらつきがあり、鉄筋が挿入できず何度も再削孔を行う箇所が多くあった。再削孔は、別の箇所で削孔し直す（既設主鉄筋位置をずらす）方法と、同じ孔を使用して若干の角度（水平）をつけて行うという方法をとった。

4.3.3 施工結果

(1) WJ 削孔について

WJ 削孔の場合、鉄筋を損傷しないため、削孔中に鉄筋に支障した場合は、削孔位置を変えるなど再削孔を行った。今回の施工では、支障の可能性がある既設部の鉄筋として、配力筋、ハンチ筋、壁筋、ベンダー筋、せん断補強筋、組立筋が想定され、既設鉄筋組立の精度も支障率に大きく影響することとなり、全体の 67% で何らかの鉄筋に支障し、再削孔を行っている。

しかしながら、結果としては、全ての本数（52 本+54 本=106 本）を削孔・鉄筋の挿入を完了することができ、この工法の有効性を確認できた。

削孔結果のまとめを以下に示す。

- ① $F_c=24\text{N/mm}^2$ 強度のコンクリートに対して、WJ 穿孔は、噴射吐出量 $Q=83\text{ ㍈/min}$ 、噴射圧力 $P=140\text{Mpa}$ 、ノズル回転数 200～300rpm の仕様で、D51 の鉄筋挿入に必要な穿孔径；φ65mm～φ75mm が確保される。
- ② この場合の穿孔速度は、 $V=8\text{cm/分} \sim 10\text{cm/分}$ である。
- ③ 穿孔精度は、水平 $\pm 1/480$ 、鉛直 $-1/480$ （前下がり）が確保される。
- ④ 1 本当たりの平均的施工時間は以下の通りであった。（再削孔を考慮しない）

表-2 使用資機材一覧

機械名称	仕様・用途
超高圧水発生装置	155MPa、300HP、max83L/min
WJ削孔装置	φ75～φ95mm、L=4.8m
超高圧ホース	250MPa対応、送水長100m
水タンク	10m ³ 給水用
コンプレッサー	ノズル回転用
水中ポンプ（給排水） 集水ポンプ（排水）	



写真-4 WJ 削孔装置

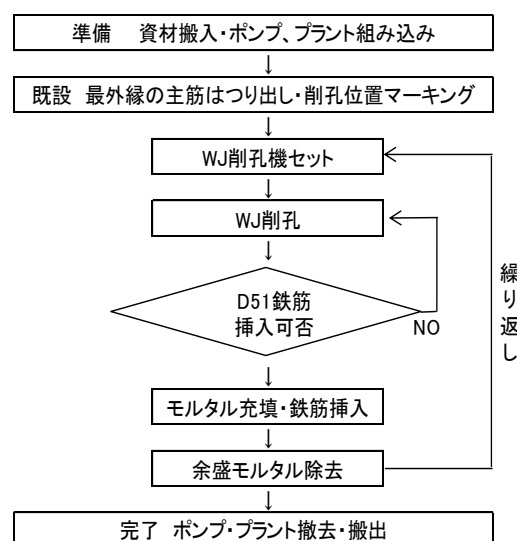


図-16 施工フロー



写真-5 削孔状況

穿孔時間・・・・・・60分（4.8m/本）

付帯工事時間・・・・30分（4.8m/本）

計 90分（4.8m/本）

なお、付帯工事は、孔内ガラ出し洗浄、口元箱設置、モルタル充填、鉄筋挿入、機械移動等である。

(2) モルタル充填，鉄筋挿入について

モルタルの充填は，試験施工と同様（前述図-14）に，先に孔内にモルタルを充填し，後から鉄筋を挿入することとした．そのため，孔内からモルタルがこぼれないように，また，充填高さ以上にモルタルを保つために充填ボックスを作成し，取り付けを行った（写真-7）。

モルタルについては耐震補強工事での実績が多い，高流動無収縮モルタルであるプレミックスタイプを使用した．

孔内上部にエア溜まりが残ることが懸念されが，試験施工の結果より，先端まで硬質ホースを挿入し，充填ボックスの孔天端＋10cm までモルタルをチューブポンプで圧送し，この時点でホースをジェットイングしながら引き抜く方法を採用した．



写真-6 既設鉄筋の支障状況



写真-7 モルタル充填ボックスの取付け状況

4.3.4 「WJ 削孔による長尺鉄挿入実施工」のまとめ

(1) 削孔結果の分類

今回の施工では，既設側の鉄筋の組立精度により，施工歩係りが大きく影響されることがわかった．

鉄筋支障の有無は次の3ケースに分類できる．

a) CASE1

鉄筋に支障されることなく穿孔が完了し，鉄筋が所定の深さまで設置される．

（施工本数；39本，全本数に対する割合；37％）

b) CASE2

鉄筋に支障されることなく穿孔が完了したが，鉄筋が挿入困難となり拡幅穿孔あるいは，鉄筋の挿入軸をずらして設置した．

（施工本数；9本，全本数に対する割合；8％）

c) CASE3

組み立て鉄筋・配力鉄筋等に支障され所定の穿孔が困難となり，位置を替え再穿孔で施工が完了した．

（施工本数；58本，全本数に対する割合；55％）ただし，CASE1の39本のうち，33本（33/39→85％）は，変電所型での結果で，換気室型では殆どがCASE3となった．

これは，変電所型と換気室型では，既設の鉄筋の組み方が変わっていたためか，組立の精度に大きな差があると推定された．

(2) 従来工法との比較

表-3 従来工法との比較

	本工法 ウォータージェット削孔	従来工法 コアボーリング削孔
既設鉄筋	損傷しない	当れば切断
削孔速度	60分／4.8m（鉄筋支障なし） 136分／4.8m（今回の平均） （従来WJの削孔長は2m程度）	300分／4.8m （通常の場合）
鉄筋との付着	削孔内面が凸凹なため、 付着強度が発揮しやすい	削孔内面は平滑、孔内洗浄の程度 により、WJより劣る可能性が高い
削孔排出物	ヘドロ状とならない	排水水の処理が問題
削孔精度	問題なし	問題なし
施工ヤード	WJポンプの施工ヤードが必要	主要機械はコアボーリング 機械だけ、特に必要としない
削孔水量	大量の削孔水が必要 （今回 10m ³ タンクを設置）	通常の水道水程度
騒音	WJポンプが騒音源となる	特に問題なし

従来工法のコアボーリング削孔との比較を表-3に示す。同表より、施工ヤード、削孔水量、騒音といった設備面からは、コアボーリング工法が有利であり、既設鉄筋の損傷、削孔速度、鉄筋との付着、削孔排出物などの施工面では、WJ削孔が有利であるといえる。

既設鉄筋の支障のため再削孔したケース（前述 CASE3）を、従来のコアボーリングで施工したと仮定すると、全施工箇所の半分以上で何らかの鉄筋を損傷させていたことになり、構造物への影響を考えると既設鉄筋の損傷に対する有効性は大きかったといえる。また、削孔速度はコアボーリング工法の半分以下であり、鉄筋の支障がなければ、さらに早く、WJ工法による長尺鉄筋の挿入は、既設構造物への影響を最小限にとどめる最適な方法であったといえる。

なお、WJ削孔で問題となる騒音防止対策として、本来車上プラントである設備を覆工下に設置して、全体を遮音シートで覆った。また、WJポンプは機械自体の振動が故障要因（車上の場合は、車体のスプリングで吸収）となるため、故障対策および振動による騒音低減のための振動吸収マットを機械下面に敷設した。

5. まとめ

(1) 中床版の吊り補強

PC鋼棒による「中床版の吊り補強」による受け替え工は、過去に例を見ない施工方法であるが、中床版の変位・PC鋼棒の緊張力・定着部のひび割れは、それぞれ、予想された範囲内での現象であった。本工法を用いることで、軌道階での作業を減らすことができ、き電停止中の限られた時間内での作業条件であったが、A線側工事の工期を2ヶ月短縮し、引き渡し時期を守ることができた。

(2) WJ削孔による長尺アンカー鉄筋挿入工

今後、耐震基準の見直し等、既設構造物の改築は増加していくことが予想され、アンカー筋挿入による補強は重要な施工法である。今回の施工では、既設鉄筋を損傷させることなく、5mの長尺鉄筋にも対応でき、従来のコアボーリング工法と比較して倍以上の施工速度が実証された。

6. おわりに

本報告ではA線工事について紹介した。本施工成果をもとに、施工性、精度向上をはかるべく工夫を加えて、B線を施工した。平成27年7月現在、B線においてもWJ削孔による長尺鉄挿入はすべて完了、B線中床吊り補強を施工中であるが、中床の変位は、現在、ほぼ0mmとなっている。引き続き工程促進・列車運行阻害事故防止に努めているところである。

ここで紹介した「ウォータージェット削孔による長尺アンカー鉄筋挿入工」は、東京地下鉄株式会社、メトロ開発株式会社、コンクリートコーリング株式会社と共同開発した技術である。

謝辞

本工事に際し、ご指導ご協力頂きました東京地下鉄株式会社をはじめコンクリートコーリング株式会社の関係者の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 斎藤，岩橋：有楽町線小竹向原・千川間連絡線設置工事（向原工区）における中床版の受け替えについて，土木学会第69回年次学術講演会，pp1157-1158，2014.9
- 2) 岩橋，斎藤：ウォータージェット削孔による長尺アンカー鉄筋の挿入工法について，土木学会第69回年次学術講演会，pp1159-1160，2014.9
- 3) 岩橋，西本，斎藤（諭），斎藤（達）：地下鉄駅部改築工事における創意工夫事例，佐藤工業技術研究所報 No.39 2014，PP31-38，