

シールド掘進時に支障となる高速道路橋脚基礎杭のアンダーピニング及びシールド機による直接切削に関する施工報告

Underpinning and tunnelling through traffic viaduct pile foundation

Chiew Lerk Qing* 星光二郎*
 Kojiro Hoshi
 草野 孝三** 井上 正史***
 Kozo Kusano Masafumi Inoue

要 約

シンガポール地下鉄サークルライン6期工事のうち、ケッペル駅とカントンメント駅を結ぶシールドトンネル区間において、近接する高速道路橋脚2か所で、橋脚基礎杭がトンネル通過断面と支障していた。このため、シールドトンネル工事に先立って橋脚を受替えるアンダーピニング工事を施工した。また、トンネル線形上に位置する既設基礎杭は、シールドトンネル施工の際に、特殊カッタービットをカッターヘッドに装着し、切削撤去を行った。本稿では本プロジェクトにおける橋脚のアンダーピニング施工、シールド機による既設基礎杭の直接切削による撤去、及び施工中の橋脚計測結果について述べる。

目 次

- § 1. 概要
- § 2. アンダーピニング施工
- § 3. シールド機による既設基礎杭切削撤去
- § 4. まとめ

§ 1. 概要

本工事では、その基礎杭がシールドトンネルに支障する2か所の高速道路橋脚、FP9とP51でアンダーピニング施工及びシールド機（掘削外径：φ6,710 mm）による既設基礎杭切削撤去を行った。供用中の高速道路の交通に影響を与えないよう、構造物の挙動を計測しながら、変位を最小限に抑えるよう施工を行った（図-1）。

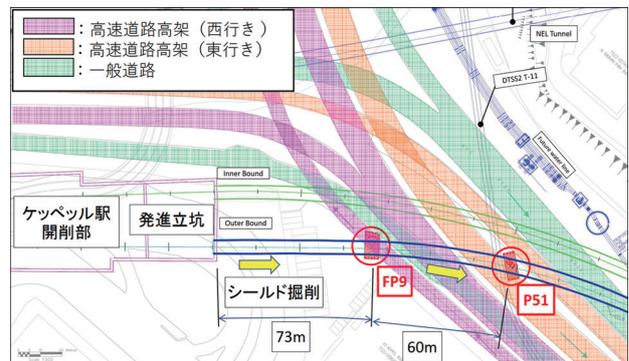


図-1 位置図

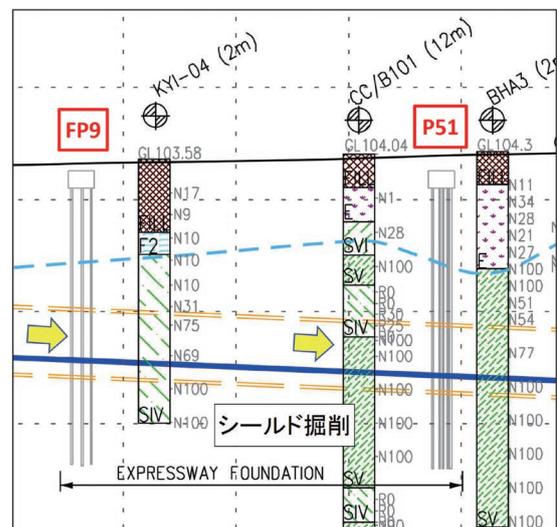


図-2 土質図

* シンガポール営業所 地下鉄ケッペル（出）

** 国際事業本部 技術部

*** シンガポール営業所 地下鉄ケッペル（出）

（現：西日本（支）美濃中山（出））

1-1 土質条件

土質はシンガポール島南部に広がるジュロン層と呼ばれる堆積岩及びその風化土から構成される。ジュロン層はその風化の度合いによって、S(I)~S(VI)に分類され、S(IV)~S(VI)は土砂に区分される。断層、亀裂を有し、大陸プレートの移動により地層が褶曲しているという特徴がある。本工事でシールド機が通過するGL-15mの土質はS(IV)、S(V)で、N値はFP9で31~100、P51で54~100であった(図-2)。

1-2 橋脚、及び基礎杭の構造

FP9橋脚は一般道から高速道路への合流する高架を支持し、その基礎杭はφ900mm場所打ち杭3本、主鉄筋径25mm(上部12mは18本、下部12m以深は9本)、配力筋径13mm@200からなる(図-3)。

P51橋脚は、高速道路西行き本線高架拡幅部を支持し、基礎杭はφ350mmマイクロパイル6本、主鉄筋径32mm(5本)、配力筋径10mm@250からなる(図-4)。

1-3 施工手順

アンダーピニング施工から既設基礎杭切削撤去までの施工手順を以下と図-5に示す。

- ① 地盤改良：
 - シールド機特殊ビット交換のための止水を目的とした地盤改良体の施工
- ② 新設マイクロパイル打設
- ③ 土留め設置、立坑掘削、既設パイルキャップ露出
- ④ 受替え梁構築(既設パイルキャップ下)
- ⑤ ジャッキアップ(荷重受替え)：
 - 油圧ジャッキシステムを用いて既設パイルキャップをジャッキアップし、既設杭の荷重を受替え梁に荷重移動
- ⑥ 既設杭切り離し(ワイヤーソウ切断、荷重移動完了)
- ⑦ 二次巻きコンクリート打設、既設パイルキャップと受替え梁の一体化
- ⑧ 立坑の埋戻し(アンダーピニング施工の完了)
- ⑨ シールド掘削、既設基礎杭手前でシールド機を停止、地盤改良体内で通常掘削用ディスクローラーカッターから特殊ビットへ交換
- ⑩ 特殊ビットを装着したシールド機カッターヘッドによる既設基礎杭の直接切削による撤去
- ⑪ 特殊ビットから通常のディスクローラーカッターへの再交換、通常シールド掘削再開

§2. アンダーピニング施工

アンダーピニング施工の各作業の詳細を以下に示す。

2-1 地盤改良

アンダーピニング施工及びシールドトンネル施工に先

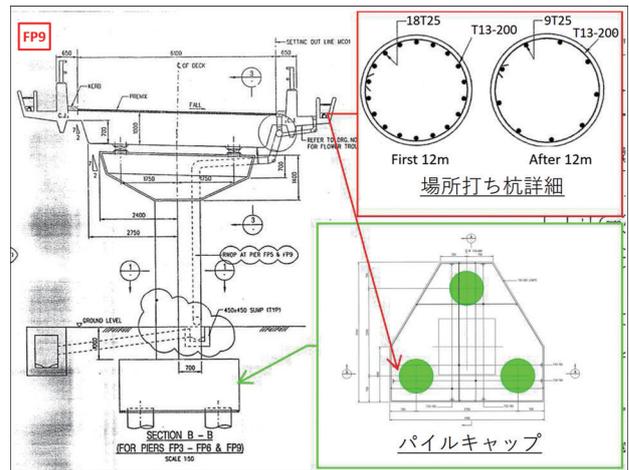


図-3 FP9橋脚 構造

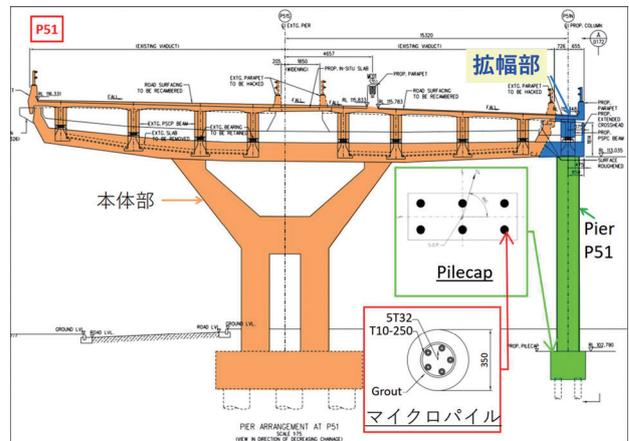


図-4 P51橋脚 構造

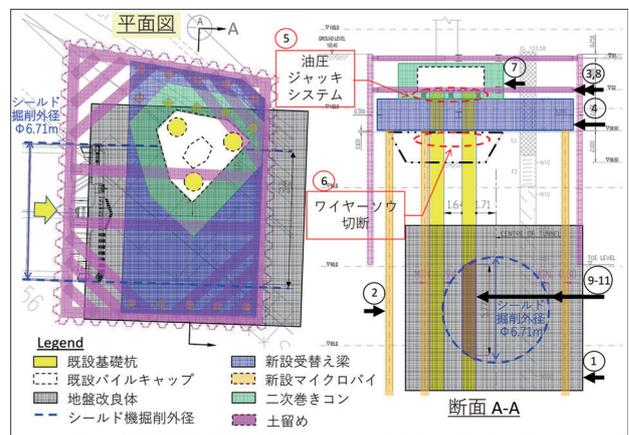


図-5 施工手順 (FP-9)

行してダブルバッカー工法による地盤改良を行った。改良体の大きさは11.71m(W)×11.71m(H)×10.5m(L)とし、シールド機が既設基礎杭前で停止し特殊ビット交換作業が行えるよう、止水を目的とし透水係数kは10⁻⁷m/s以下とした。1次注入材にセメントベントナイト、2次注入材に水ガラス系注入材を使用し、注入率はFP9(7.8%)、P51(7.2%)で所定の透水係数を得ることができた。

2-2 マイクロパイル打設（新設基礎杭）

受替え梁を支保する新設杭として、以下のマイクロパイルを打設した（図-6）。

FP-9：φ406 mm（主筋 D40，5 本）15 本

P51：φ508 mm（主筋 D32，6 本）6 本

マイクロパイルに掛かる荷重が地山を介して将来的にシールドトンネルに影響しないよう、シールドトンネル下3mまでは鋼製ケーシングに瀝青シートを巻き、地山との縁切りを行った。

施工場所の一部は高架下で空頭制限 2.5 m の条件であった。施工機材高さ 4.0 m で施工ができるよう、施工基面を 1.5 m 掘削し下げて杭の打設を行った。

シールドトンネルとの離隔が 800 mm 程度であるため、マイクロパイルが干渉しないよう、施工の際は鉛直精度に細心の注意を払いながら施工を行った。

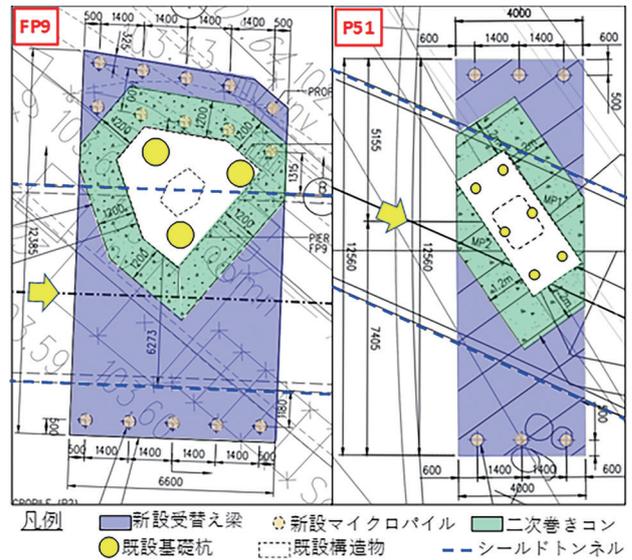


図-6 マイクロパイル FP9（左）、P51（右）

2-3 土留め、及び掘削切梁

土留め施工はサイレントパイラーを用いて鋼矢板Ⅳ型を打設した。根入れ部はN値31~100、また既設高架空頭制限下での施工であったため、打設部地山はあらかじめ機材高の低い土質調査用削孔機を用いた先行削孔により地山を緩め、ウォータージェットを併用して矢板を圧入した。

既設橋脚パイルキャップ及びその下の既設基礎杭を掘削露出した際の構造物の水平安定性を考慮し、土留め切梁とは別に、パイルキャップに水平ブレーシングを設置した（写真-1）。

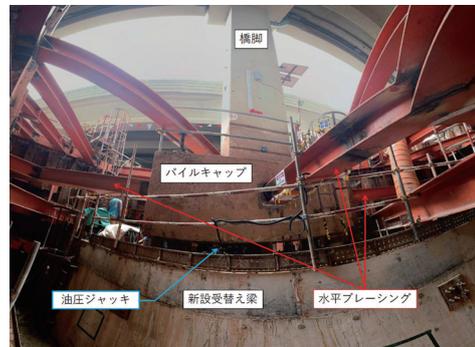


写真-1 パイルキャップ水平ブレーシング

2-4 受替え梁構築（新設構造物）

既設パイルキャップ下を掘削後、厚さ 2.0 m の新設受替え梁をパイルキャップ下に構築した。ジャッキアップによる荷重移行時に、既設基礎杭とそれを巻き込む受替え梁接合面の荷重ロスを防止するために、境界には 50 mm 厚さの発泡スチロールを設け縁切りを行った（写真-2）。

既設基礎杭の不良

P51 では受替え梁施工のために掘削を行ったところ、既設基礎杭（マイクロパイルφ350 mm，6 本）の施工不良（鉛直精度不良，杭径の縮小，凹凸）が確認された。特に 4 本はひび割れ（最大 1.8 mm）があり、直ちにひび割れ観測，構造物の変位計測を開始した。企業先設計者と協議し、既設基礎杭を 100 mm 厚の無収縮モルタルと鉄筋で補強を行った（写真-3）。



写真-2 発泡スチロールによる既設基礎杭縁切り

2-5 ジャッキアップ（荷重受替え）

受替え梁に設置した油圧ジャッキシステムを用いて既設パイルキャップをジャッキアップし、既設基礎杭が負担している荷重を新設受替え梁及び新設基礎杭に盛替えた。

油圧ジャッキシステムは各ジャッキがマニュアルホールド



写真-3 既設基礎杭の施工不良

を介して油圧ポンプと接続され、各ジャッキに均等に油圧が作用し同調するようにした。また、ジャッキはそれぞれネジ構造の機械式ロックを備え、ストローク毎にロックできるものとした。油圧システムは、橋脚総荷重の3倍の能力を有するものとした(表一)。

ジャッキアップ時の荷重段階は、橋脚の自重の90%(FP9は5,000 kN, P51は3,550 kN)を9ステップとし、その際の構造物の許容変位は、橋脚の浮き上がり最大2 mm, 受替え梁の沈下最大5 mmとし、ステップ毎に計測を行い構造物の挙動を確認した。結果、両橋脚とも許容変位内で、予定した自重90%のジャッキ荷重に達し、荷重の受替えを行うことができた。

2-6 既設杭切り離し(ワイヤーソウ切断)

ジャッキアップ完了後、受替え梁下部の人力掘削を行い、既設基礎杭を露出、ワイヤーソウを用いて既設基礎杭の切断を行い、基礎杭の切り離しを行った。これにより、全荷重が新設受替え梁及び基礎杭に伝達され、荷重の受替えを完了した。

各杭の切断毎に、ジャッキアップ時と同様に構造物の変位を計測し挙動を確認した。基礎杭切断は各杭2回に分けて行い、既設基礎杭が完全に切り離され、将来的にも干渉しないよう100 mm厚さ分を撤去した(写真-4, 5)。切断の際は、切断部への鋼製くさびの挿入、散水を行い、ワイヤーソウの噛み込みを防止した。

2-7 変位計測

ジャッキアップ(荷重受替え)の際、橋脚(パイルキャップ)及び受替え梁の変位計測を行った。変位計測は各所にダイヤルゲージを設置し(写真-6)、荷重を掛けるステップ毎に実施した。また、既設杭切り離し(ワイヤーソウ切断)の際も、同様の計測方法で既設基礎杭を1本切断するごとに計測を実施し、構造物の挙動を観測した。それぞれの計測結果を表-2に示す。

2-8 二次巻きコンクリート

既設基礎杭切り離し後、立坑埋戻しを受替え梁上端まで行い、水平ブレーシングを撤去、既設パイルキャップを巻き込んで、二次巻きコンクリートを打設し、既設パイルキャップと受替え梁を最終的な構造物として一体化させた。

なお、ジャッキアップ後パイルキャップを支えていた油圧ジャッキは、ロックした状態で油圧オイルとモルタルの入替を行い、二次巻きコンクリート内に存置した。

二次巻きコンクリート打設後、立坑埋戻しを完了し、アンダーピニング施工を完了した。

表一 油圧ジャッキシステムの能力

橋脚	設計能力		油圧ジャッキシステム能力		
	橋脚総作用荷重(kN)	橋脚総作用荷重の3倍(kN)	油圧ジャッキ数	ジャッキ容量(kN)	総荷重(kN)
FP9	7,000	21,000	6	3,500	21,000
P51	4,650	13,950	8	1,750	14,000



写真-4 既設基礎杭の切断 (FP9)



写真-5 既設基礎杭の切断 (P51)



写真-6 ダイヤルゲージによる変位計測

表二 構造物計測結果

橋脚	ジャッキアップ時		既設杭切り離し時	
	橋脚	受替え梁	橋脚	受替え梁
規定値	+2mm 以下	-5mm 以下	-5mm 以下	-5mm 以下
FP9	+0.60mm	-0.84mm	-0.55mm	-0.36mm
P51	+1.43mm	-0.37mm	-0.52mm	-0.28mm

§3. シールド機による既設基礎杭切削撤去

アンダーピニング施工後、トンネル線形上に存置された既設基礎杭を、シールドトンネル施工の際に、シールド機カッターヘッドに装備した特殊カッタービットを用いて直接切削し撤去を行った。

既設基礎杭手前の地盤改良体内でシールド機を停止、通常掘削用ディスクローラーカッターを特殊ビットに交換、超低速掘削速度で基礎杭を切削しながら掘進を行い、基礎杭撤去を完了。その後再度通常掘削用ディスクローラーカッターに変更して掘削通過させた。

切削撤去を行った基礎杭は、以下のとおりである。

FP9 橋脚：φ900mm 場所打ち杭 1本，主鉄筋径 25mm (9本)，配力筋径 13mm @200 (図-7)

P51 橋脚：φ350mm マイクロパイル 6本，主鉄筋径 32mm (5本)，配力筋径 10mm @250 (図-8)

3-1 シールド機基礎杭切削の技術的課題

シールド機による基礎杭切削にあたって、技術的課題は以下の3つであった。

- (1) 特殊ビット交換時の作業安全性、効率性の確保
 特殊ビットへの交換には数日を要し、チャンバー内の狭いスペースでの交換作業の安全性、効率性の確保が課題であった。
- (2) 切削した鉄筋によるシールド機の閉塞防止
 既設基礎杭を切削し、切削したコンクリート及び鉄筋を掘削残土と共に排出する。その際鉄筋がカッターヘッド面板、チャンバー及びスクリーコンベアで引っ掛かり、シールド機が閉塞する懸念があった。
- (3) 切削時の掘削土取込み過多による沈下防止
 基礎杭切削撤去は通常掘削よりも非常に低速の掘削スピードで行うため長時間を要するため、掘削土取込み過多による地盤沈下増が懸念された。

3-2 技術的課題に対する対応

以上の技術的課題に対し、以下に示す対策、対応を行った。

- (1) 特殊ビット交換時の作業安全性、効率性の確保
 ビットのハウジング（台座）を回転式にすることで、交換作業をカッターヘッド前の地山側ではなく、チャンバー内から実施できるようにした。またチャンバー内には専用の足場ステップを容易に設置できる構造とし、作業の安全性と効率性を確保した。
- (2) 切削した鉄筋によるシールド機の閉塞防止
 鉄筋が長尺で切断されると、スクリーコンベア等で引っ掛かり易くなり、閉塞の原因となる。このため特殊ビット同士の間隔を 84~100mm とし、鉄筋を短く切断できるようにした (図-9)。

カッターヘッド中心から外周方向へ切削面にテーパ角度を付け、特殊ビットの台座高さを変化させるこ



図-7 基礎杭切削撤去 (FP9)

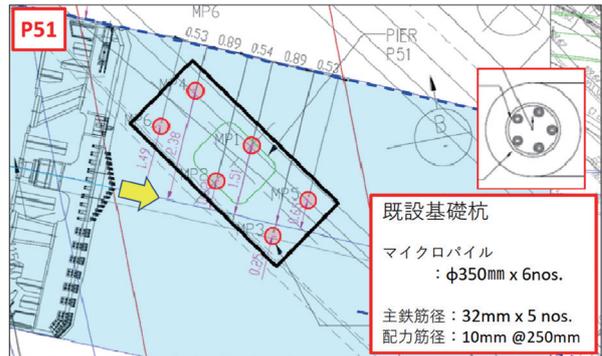


図-8 基礎杭切削撤去 (P51)

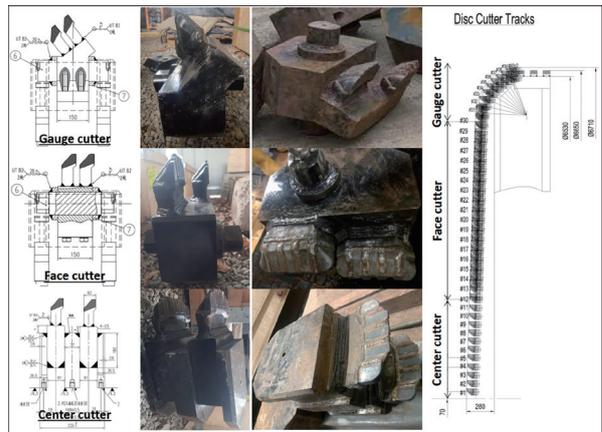


図-9 特殊ビット配置

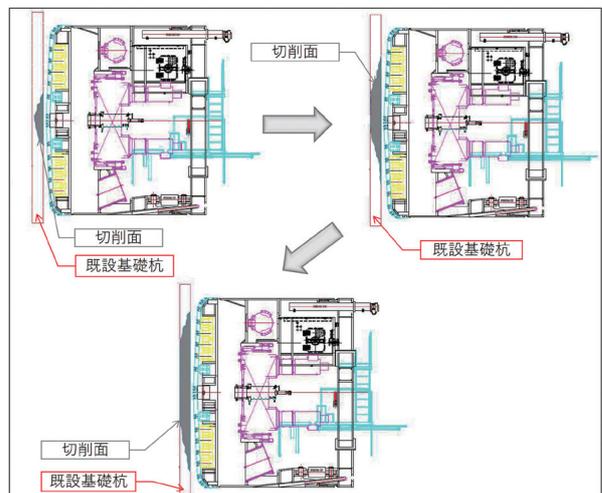


図-10 円錐形切削面

とで、中心部が尖った円錐形の切削面にした。これにより、鉄筋切断がカッター中心から徐々に外周方向へ進行し、鉄筋が長尺で剥離、脱落することを防止した(図-10)。

切削時に鉄筋の剥離、脱落を防ぎながら、鉄筋を特殊ビットで所定長さに確実に切断するために、シールド機掘削スピードを超低速とし安定した状態で切削を行う必要があった。このため、掘削推力の油圧システムに通常掘削時とは別の超低速用の小型油圧ポンプを追加し、掘削スピードを安定制御した。

(3) 切削時の掘削土取込み過多による沈下防止

超低速掘削スピード、長時間切削による掘削土取込み過多対策として、シールド機胴体上部に充填剤(クレショック)注入孔を設け、切削時に切羽上部へ充填剤を注入し、掘削土取込み過多による沈下を防止した。

3-3 既設基礎杭切削状況

シールド機による既設基礎杭切削撤去状況を示す。

(1) シールド機掘削パラメータ

通常掘削時と既設基礎杭切削時の各シールド掘削パラメータを表-3に示す。

(2) 鉄筋切削状況

FP9、P51ともに大きな問題無く切削撤去を完了した。P51では数回スクリーコンベアの鉄筋噛み込みによる内部からの金属異音、トルクの上昇が発生したが、スクリーコンベア正転逆転点操作を行うことで解消された。掘削残土及び切削撤去完了後のビット再交換の際、チャンバー内で確認された鉄筋で最も長いものはFP9で0.34m、P51では1.2mで、P51の方が長い鉄筋が多い傾向にあった(写真-7)。P51はFP9よりも切削鉄筋量が多く、主鉄筋径も32mmと大きいためFP9との違いがあったと考える。

(3) 基礎杭切削撤去による橋脚への影響

基礎杭切削撤去による橋脚への影響は、FP9では変位は無く、P51では4mmの沈下が観測されたが、設計許容値以内であった。P51での沈下は同時期に他工事のシールド掘削が近接して行われたことによる地山の乱れが影響して発生したと考えられる。

§4. まとめ

以下にまとめを示す。

表-3 シールド機掘削パラメータ

	通常掘削時	基礎杭切削時
掘削スピード (mm/min)	<35	1~2
掘削推力 (kN)	<18,000	<15,000
カッター回転速度 (rpm)	1.5~2.0	2.0
カッタートルク (kNm)	<3,200	<3,200

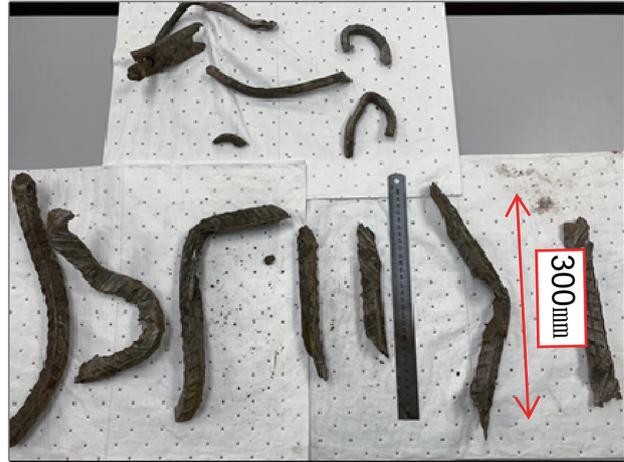


写真-7 切削された鉄筋

- (1) 基礎杭がトンネル線形に支障する橋脚で、シールドトンネル工事に先立ってアンダーピニングを行い、規定値以内の変位で施工し、供用中の高速道路の交通に影響を与えずに完了することができた。
- (2) アンダーピニング施工後、トンネル線形上に存置された既設基礎杭を、シールドトンネル施工の際にシールド機カッターヘッドに装備した特殊カッタービットを用いて直接切削し撤去を行い無事に完了した。

謝辞. 本施工では、一般土木委員会ならびにシールド委員会より多大なご協力をご指導を頂きました。深く感謝し、お礼申し上げます。

参考文献

- 1) 草野 孝三, 古園 豊繁: シンガポール地下鉄サークルライン新駅建設に伴う鉄道高架橋のアンダーピニング, 基礎工 2007年5月号
- 2) Lim Tuck Fang, Tan Bee Suan Cynthia, Chang Wee Ann, Kozo Kusano, R. Chakravarthy. Underpinning of live MRT piers for Singapore's new Circle Line Interchange Station, WTC 2007