

電食技術による直接発進到達 工法に関する研究

1. 研究目的

シールド工事における発進・到達は、補助工法として地盤改良を用い、立坑土留め壁の背面の地盤を自立させた後、取り壊すのが一般的である。近年、都市部におけるシールド工事は輻輳する既設埋設物を回避するため年々深層化の傾向にあり、補助工法である地盤改良も大深度の施工となりコストが増大する傾向にある。また、地上からの地盤改良の施工は交通渋滞など周辺環境へ与える影響も大きい。

電食技術による直接発進到達工法は、立坑土留め壁のシールド機の通過部分に電食用杭芯材（矩形管の内部に陰極と絶縁材を取付けたもの）を配置して電食作用により劣化させることで、補助工法を用いることなくシールド機で直接切削し、発進・到達を行うものである。本工法に関しては、すでに要素実験および実験立坑による実証実験を通して実用化にいたっている。

しかしながら、鋼材を溶解させるために必要な電気量が理論値に対して約1.7倍必要であり、電食に要する時間も長く、工程上支障となる場合も予想された。したがって本研究では、電食効率（理論電気量に対する通電電気量の割合）を向上させるべく要素実験を行い、さらに実証施工により施工性等の検証を行った。

2. 工法の概要

食塩水などの電解液中に金属を入れプラス方向の電流を流すと、陽極側の金属中の電子が放出されイオン化した金属が電解液中に溶け出す。これを電食（アノード溶解反応）と呼び、溶解した鉄イオンは、電解液中で水酸化鉄（錆）となって沈殿する。

本工法はこの原理を利用して、図-1に示すように柱列式地下連続壁工法（SMW工法）等の土留め壁の杭芯材をシールド機で直接切削できる状態まで溶解、劣化させ、鏡切り工を行わず直接発進到達する工法である。シールド機通過部の杭芯材は矩形断面とし、その内側に陰極内管（銅板）を配置し、矩形管と陰極管の間に電解液を充填・循環させながら

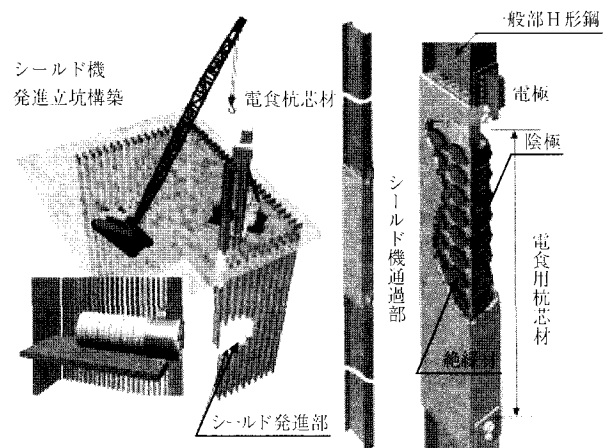


図-1 本工法の概要

電食により矩形管を内部より溶解させる。溶出した鉄は、循環電解液を処理して回収する。

本工法には、以下のような特徴があり安全性の向上、周辺環境への影響低減、コスト縮減が可能となる。

- 【特徴】**
- ① 鏡切り工が不要
 - ② 補助工法の省略・低減が可能
 - ③ 通常のシールド機で切削可能

3. 研究の経緯

電食により鉄1gを溶解させるためには、電気化学当量から、1Aの電流を1時間通電する必要がある。シールド通過部分の杭芯材（以下、電食用杭芯材という。）をすべて溶解するには電食期間が長期に及び、工程上支障をきたす。したがって、本工法では電食用杭芯材に絶縁材を貼り付け、溝状に電食を進行させることで鋼材を不連続な破片状にし、直接切削を可能とした。これにより、電食対象鋼材の重量を軽減し、電食量を低減させることで電食期間の短縮を図った。

これまで、絶縁材材質および絶縁材間隔、切削性について行ってきた要素実験の結果から表-1のことが明らかとなっている。本研究はこれらの課題に

表-1 これまでの成果と課題

項目	結果	課題
絶縁材の材質	木材、ゴムが有効	絶縁材貼付コストの低減
絶縁材の間隔	10mm以上	水酸化物の滞留排除 電解液循環阻害要因の排除
電食効率*1	約63% (理論値の約1.7倍)	電食効率の向上 電食完了時期の把握方法の確立
切削性	非電食片:10cm程度 (隅角部は一部連結片)	均一な電食方法の確立

*1: (理論電食量/通電電食量) × 100

対して対策を講じ、要素実験および実証施工を通して検討を行ったものである。

4. 電食効率の向上

電食効率を改善するには電解液性状の劣化を防止し、電解液循環阻害要因を排除する必要がある。電食により、鉄は電解液中に溶け出し二価の水酸化鉄となる。二価の水酸化鉄はさらに溶存酸素と結合し三価に酸化され赤錆となり沈殿する。これら沈殿物が路内の閉塞を引き起こしたり、矩形管内の表面に付着し電食を妨げることとなる。また、陰極表面ではアルカリ成分である水酸基が発生し、電解液のpHが上昇し電食の効率低下を引き起こす。

したがって、電食効率の向上を目指すために、電食用杭芯材（矩形管）の各種形状の見直しと水酸化物除去装置を導入して電解液の性状を管理し、循環液の流動をスムーズにして、要素実験を行った。図-2に実験装置の概要を示す。表-2に対策と効果を示すが、電食用杭芯材および電食設備に電解液循環の阻害要因を除去する対策を講じた結果、電食効率を約63%から約99%まで引き上げられた。

表-2 課題に対する対策と効果

対 策	効 果
電極間隔（陽極と陰極）の拡大 絶縁材間隔の拡大 (10mm→30mm)	管内の電解液流速の確保 (0.3~0.5m/s)
絶縁材形状の変更(矩形→円形) 陰極角部に突起形状を設置	陰極と陽極の距離の均一化
エアレーションによる堆積物の攪拌	水酸化物の沈殿凝固の防止
水酸化物除去装置の設置	電解液中の水酸化物除去 電解液の濁度、pH調整

$$\begin{aligned} \text{電食効率} &= \text{理論電食量} / \text{通電電食量} \times 100 \\ &= 164 \text{ kWh} / 165 \text{ kWh} \times 100 \\ &= 99\% \end{aligned}$$

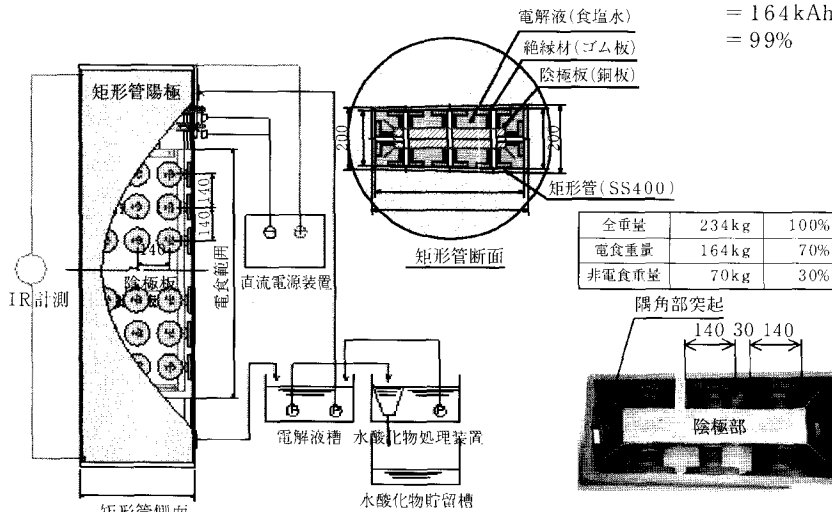
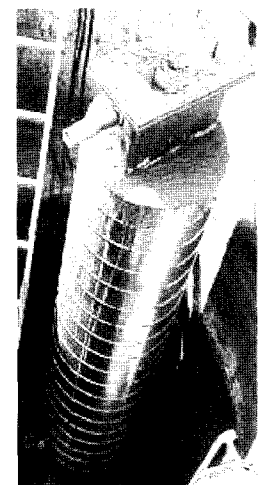


図-2 要素実験設備の概要



5. 完了時期の把握手法の確立

電食における最大の課題は、電食完了時期の判断であった。当初は理論電気量に対する電食効率を係数として捉えて判断基準としていたが、電食部および陰極部の形状、絶縁材の占める面積等により電食完了時期が異なる。

電食用杭芯材には直流電源装置より設定した一定電流で通電する。電食開始時には通電に伴う電圧は数ボルトしか発生しないが、電食の進行につれ通電部となる矩形管（陽極管）断面が減少するため、抵抗が増大する。図-3に示すように所定の電流となるように電圧が徐々に上昇し、設定電圧（30 Vmax）に達すると電流値が急激に低下する。また、矩形管の上・下間の微小電圧値（以下、IR値という。）を測定すると、電食開始時期には電位差が無いが、電食進行に伴い電位差が生じて、電食矩形管の上下間に微小電位差が発生し、図-4に示すように電食終了時に急激に上昇する。また、IR計測端子の電圧を個別に計測すると、電食初期は電圧は発生しないが、電食終了時期が近づくと端子部自身が溶解するため電圧が発生する。

これらの現象が確認された時点で通電を停止し杭芯材を解体した結果、写真-1、2のように杭芯材全体に電食が均一に進行していた。

したがって、電食完了時期の把握手法は電流、電圧、IR値を計測し、これらの変化を総合的に判断して電食完了時期とした。

また、絶縁材部分の電食の進行は、電食溝幅の範囲を鉛直に進行していくのではなく、図-5に示すように、およそ鋼材の板厚分は食い込むように電食が進行していた。

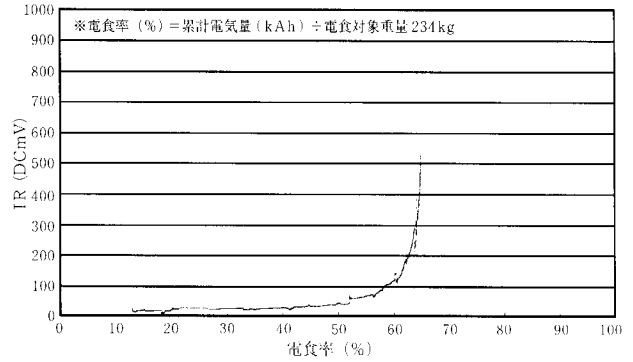


図-4 IR値の変化

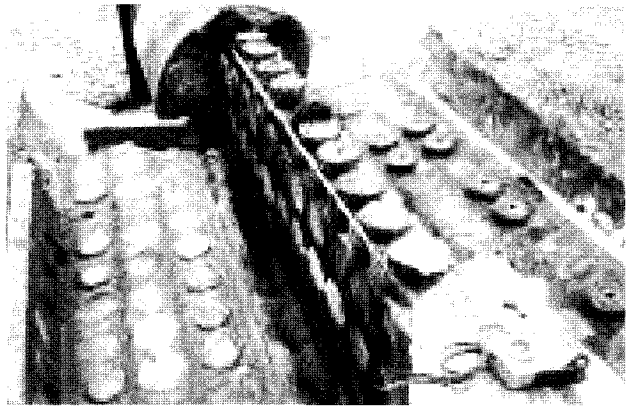


写真-1 電食後の杭芯材の解体状況

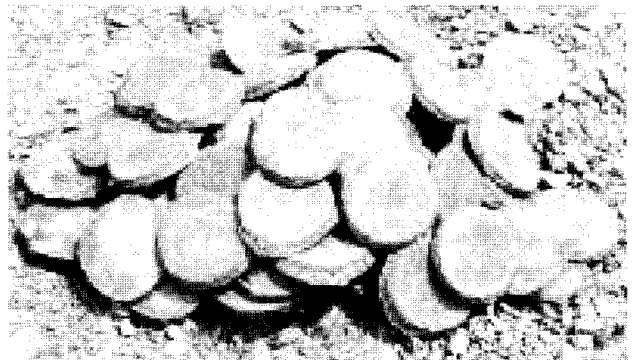


写真-2 電食後の鋼材残存鉄片

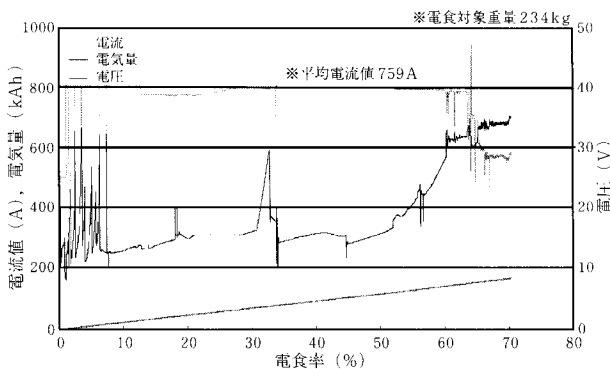


図-3 電流、電圧の変化

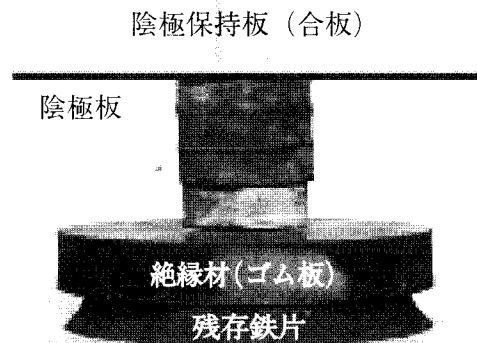


図-5 絶縁材部分の電食進行状況

6. 現場実証施工

上記の要素実験の結果を反映し、実証施工により施工性、切削性について評価を行いつつ、施工歩掛の収集を行った。実証施工は2カ所の現場にて行った。工事名称を以下に示す。

工事名：高速鉄道東西線建設工事（石田北工区）
 企業者：京都市交通局

工事名：南住吉～加賀屋幹線下水道管渠築造工事
 企業者：大阪府都市環境局

6.1 柱列式連続壁（SMW壁）の施工

柱列式地下連続壁工法により立坑土留め壁を築造する場合、通常杭芯材はH形鋼が使用される。

本工法では、シールド機の通過部分に図-6のような電食用杭芯材（矩形管）を用い、その上下にはH形鋼を継いだ杭芯材（以下、電食杭芯材という。）を使用する。この電食杭芯材を用いた場合、H形鋼材に比べて芯材挿入時の抵抗が大きくなると予測された。したがって、実証施工では反復混練を通常施工に対して3割程度多く行い、ソイルセメントの混練率を高めて施工した。

結果としては、H形鋼より挿入抵抗は大きく感じられたが、通常H形鋼の芯材挿入時間とほぼ同等の時間で挿入することができたため、反復混練を通常の3割程度多く行うことが必要であると思われた。

また、セメント系懸濁液についても、土質条件によっては遅延剤等の配合によりソイルセメントの硬化時間の調整が必要となる場合も考えられる。

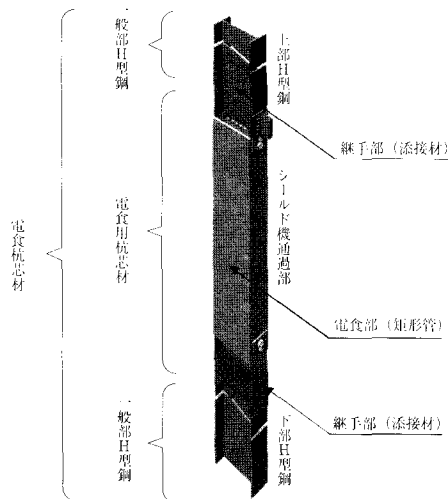


図-6 電食杭芯材の概要

6.2 切羽圧力保持

電食用杭芯材は電食することにより杭剛性を失い、山留め壁の応力部材としての機能を果たさなくなる。したがって、電食を行う前にシールド機をエントランスコンクリート内に挿入し切羽内を充填して切羽圧に抵抗させる必要がある。本工法では、長期にわたりシールド機をエントランス内に留めておく必要があることから、止水性の高い構造（二重エントランスパッキン）を採用した。

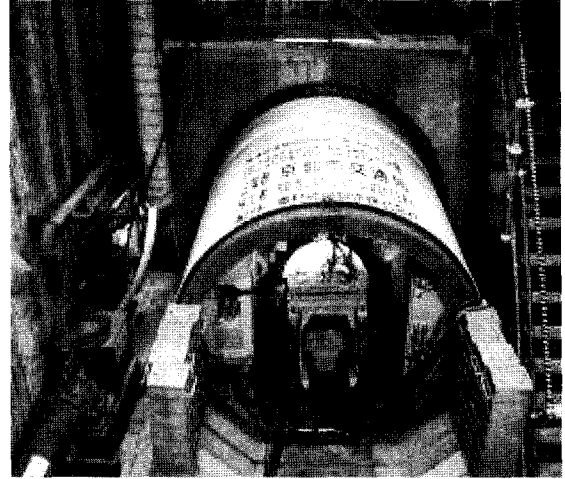


写真-3 シールド機による切羽圧力保持状況

6.3 電食工

電食工は要素実験と同様に水酸化物処理装置（写真-4）を設置し、送液と排液のバランス保持、矩形管内の流体圧力の管理、電解液の性状管理等の電解液の移送管理を行った。

電解液の移送管理のシステムは、各ポンプの起動停止や水酸化物処理後の電解液pH、濁度、電解液濃度等の各設備の情報を現場通信盤経由で管理用コンピューターへ集約し、設備稼働状況、処理状況、計測データ等を一元管理し、現場での作業人員の削減を図った。

水酸化物処理プラント

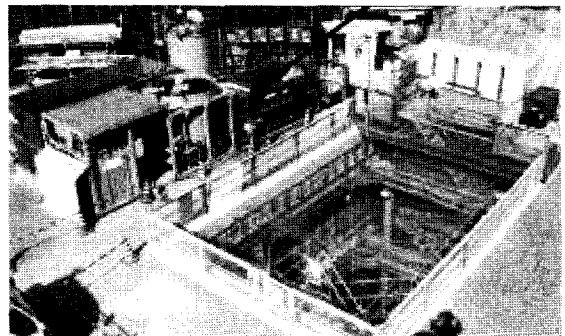


写真-4 水酸化物処理装置の設置状況

また、電食完了の判断を行うため、計測は電流、電圧、IR値を測定し、電食進行状況も要素実験と同様な状況が確認されたため、電流、電圧、IR値の変化時点で電食を停止した。表-3に施工結果を示し、図-7に京都の施工例のグラフを示す。

京都の施工例では、鋼材重量1,900kgに対して、電食重量は1,300kgであり、電食率（鋼材重量に対する電食重量の割合）は約68%であり、図-7のグラフのように電食率が約70%の段階で電流、電圧、IR値の変化が確認された。通電電気量も理論電気量（=電食重量）とほぼ同様であったため、電食効率も約100%という結果が得られた。

また、今回電食期間の短縮を図るため、1,000Aの直流電源装置を導入し、端子部分もそれに耐え得るものとした。

表-3 実証施工による電食工の施工結果

	鋼材重量 kg	電食重量 kg	電通電気量 kAh	平均電流値 A	電食日数
京 都	1,900	1,300	約1,300	780	14
大 阪	4,240	3,402	約3,400	838	23

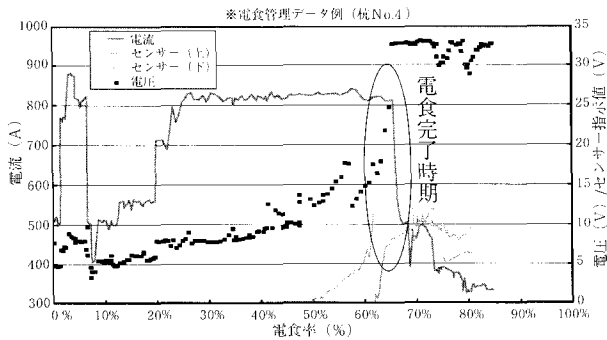


図-7 実証施工時の電流、電圧、IR値（京都）

6.4 切削性

電食完了後、シールド機により直接切削を行い、切削トルク、切削片の搬出状況等について検証を行った。大阪市の施工例を示すが、平均掘進速度3mm/minで切削したが、平均切削トルクは360kN-mと通常の切削トルクの約30%で切削することができ、切削性は良好であった。

また、切削片についても絶縁材の大きさ（φ110mm）よりも2mmほど小さく、掘削土に混入され、スクリーコンベアによる搬出にも問題は無かった。写真-5は、切削の様子と残土に混入して搬出された切削片であり、陰極管である銅板も問題なく搬出された。



写真-5 実証施工時の切削の様子と切削片

6.5 地中埋設物への影響

電食には平均して約800Aの直流電流を流すことから、迷走電流が発生する可能性があり、周辺埋設物に影響を及ぼす場合がある。したがって、実証施工では模擬配管を布設し、電位変化を測定した。図-8に模擬配管の電位測定の概要を示す。

図-9に示すように、模擬配管のアノード的電位変化は最大で+4mVで、この値は判断基準（「電食防止対策の手引き」：関西電食防止対策委員会編）+50mVを大きく下回る数字であり、他構造物への影響は少ないと判断された。

なお、上記の判断基準は他構造物が長期的な迷走電流の影響下にあることを前提にしているのに対して、電食工法の場合は仮設で、迷走電流の影響が顕著に表れる期間は短いことから他構造物への影響はないものと判断された。

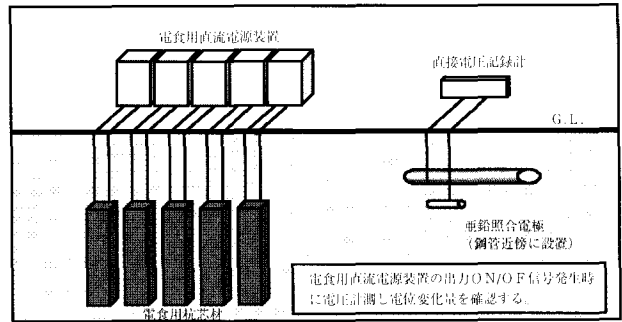


図-8 模擬管による電位測定の概要

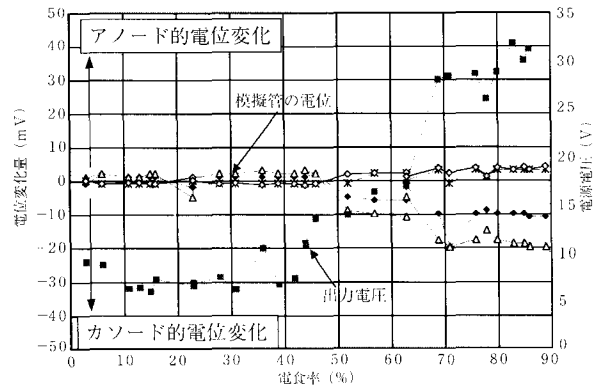


図-9 迷走電流の計測結果

6.6 水酸化物の処分

実証施工の結果から、鋼材1gを電食すると水酸化物処理装置から発生する水酸化物のスラッジが0.022m³であった。発生スラッジは含水率80～90%であるが、フィルタープレスを使用して脱水処理することで含水率60%以下にすることが可能であり、その重量比は75%以上とすることができる。

また、発生したスラッジは産業廃棄物として適正に処理する必要がある。

7. コスト面の評価

本工法を採用することによって、鏡切り工に伴う地盤改良を削除、あるいは低減できる。条件によって異なるが、補助工法である地盤改良費が低減されることから、発進に係わる施工費の約20～30%の縮減が可能となる。

ただし、本工法はシールド機をエントランス内に挿入した後、電食工を行うため全体工程を踏まえて総合的に検討する必要がある。

8. 本工法の展開技術

本技術の展開技術として図-10のような既設構造物の下をシールド機が通過することが計画されている場合、事前にシールド機と干渉する部分に電食用杭心材を設置し、シールド機の掘進工程に合わせて電食を実施することで容易にシールド機は通過で

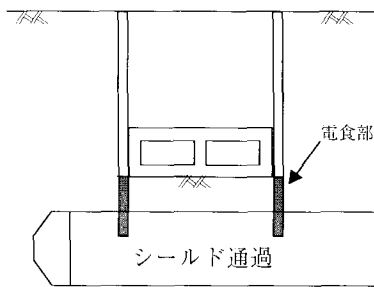


図-10 展開技術の概要

きる。このようにシールドの発進到達以外の建設分野にも展開が可能である。

9. 技術マニュアルの構成

これまでの研究成果をとりまとめ技術マニュアルを発刊した。技術マニュアルには電食技術による直接発進到達工法を地下トンネル工事に適用する場合の計画、設計、積算に係わる基本事項を示した。以下にマニュアルの構成を示す。

第1章 総論

第2章 設計

第1節 工法の適用範囲

第2節 設計上の留意点

第3節 調査計画

第4節 電食用杭心材の設計

第5節 立坑築造計画

第6節 切羽圧力保持計画

第7節 電食計画

第8節 発進到達計画

第3章 電食用杭心材の製作

第4章 施工および施工管理

第1節 施工手順

第2節 電食工

第3節 発進・到達工

積算資料

参考資料

設計資料

10. まとめ

シールド工法は都市部において欠かせない技術であるが、近年その施工条件は厳しく、安全性の向上や周辺環境への負荷削減、コスト縮減に係わる技術開発が求められている。

電食技術を用いたシールド機による直接発進到達工法は、これらの要望に応えるものであり、技術マニュアルの発刊により今後の普及が期待される。

●この研究を行ったのは

研究第二部長

研究第二部長

研究第三部総括主任研究員

研究第二部研究員

研究第二部研究員

研究第二部研究員

研究第二部研究員

中里 卓治

高相 恒人

本重 信宏

田中 孝

中西 康博

舩岡 秀一

岸田 裕

●この研究に関するお問い合わせは

研究第二部長

研究第三部総括主任研究員

研究第二部研究員

研究第二部研究員

高相 恒人

本重 信宏

舩岡 秀一

岸田 裕