

# 電食技術によるシールド直接発進到達工法の開発 — 安全性の向上, 周辺環境への影響低減, コスト縮減を目指して —

中 里 卓 治 ・ 田 中 孝 ・ 向 谷 常 松

従来のシールドの発進到達方法は、補助工法として地上作業を伴う地盤改良を行い、人力等で土留め壁を取壊して行っていた。そのため、安全性、周辺環境への影響、コストが問題となっていた。筆者らは、これらの問題に対応するために、電食技術を利用して土留め壁を劣化させ、シールド機で直接切削して発進到達する工法の開発を行った。今回、実用化に向けた実験によって電食性能および土留め壁の切削性等を評価し、本工法の実用性を確認した。

キーワード：電食、直接切削、シールド、発進到達

## 1. はじめに

都市部における下水道整備は周辺環境等への影響を配慮して、シールド工法が多く用いられてきた。しかし、シールドの発進到達や急曲線部、ビット交換箇所等では地上作業を伴う補助工法を併用することから、過密化した市街地においては、振動・騒音、交通渋滞の誘発等により住民の理解が得られ難くなっている。一方、都市部の道路下は地下埋設物が輻輳しているため、新設管路の設置場所は深層化傾向にあり、シールドトンネルの建設に伴う補助工法のコストや工期の増大を招いている。

通常、シールドの発進到達方法は、立坑土留め壁を人力などにより取壊し、地山を開放してシールド機を進める。その際、地山の自立性と止水性を確保するため、地盤改良等の補助工法が必要となる。また鏡切り工は、開放した地山での作業となるため危険を伴う。そのため、補助工法の省略もしくは低減によりコスト縮減や周辺環境への影響を抑制し、安全性も確保できる発進到達工法の開発が望まれている。

今回着目した電食技術は、電気鉄道等からの迷走電流によって地中埋設管が溶出し腐食する電食現象を応用したもので、電食作用により土留め壁（柱列式地下連続壁等）の杭芯材を溶解するものである。

本技術で劣化させた土留め壁をシールド機で直接切削することで、発進到達時の鏡切り工や補助工法の省略もしくは低減ができ、安全性の向上、コスト縮減、さらに周辺環境への影響低減が期待できる。

本報文では本工法の概要および実用化に向けて実施した実験で確認された事項について報告する。

## 2. 工法の概要

食塩水のような電解液中に金属を入れ、プラス方向の電流を流すと、金属中の電子が放出されイオン化した金属が溶液中に溶け出す。これを電食（アノード溶解反応）と呼ぶ。溶解した鉄イオン  $Fe^{2+}$  は、電解液中で水酸化鉄  $Fe(OH)_2$ （錆）となって沈殿し、回収可能となる（図—1 参照）。

電食技術によるシールド直接発進到達工法は、この原理を利用して、図—2 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、薄肉化し、鏡切り工を行わず直接発進到達する工法である。

電食部の杭芯材は矩形断面とし、その内側に設置した陰極内管（銅板）との間に電解液を充填し、通電して電食を進行させる。溶出した鉄は、電解液を循環させて回収する。

本工法には、以下のような特徴がある。

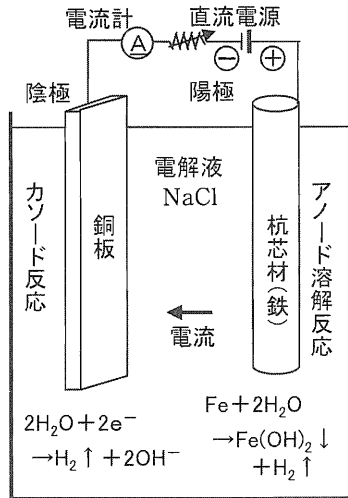


図-1 電食の概要

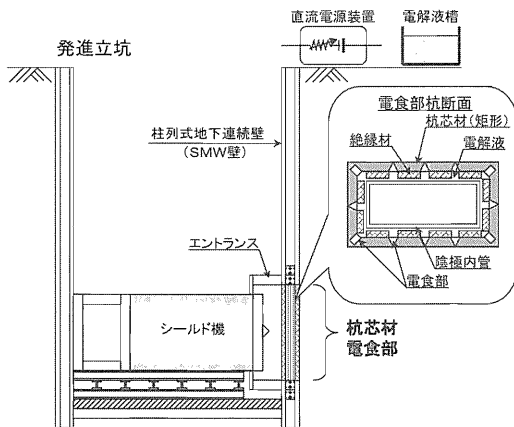


図-2 工法概要図

- ① 鏡切り工が不要
- ② 補助工法の省略もしくは低減が可能
- ③ 通常シールド設備で切削が可能

また、上記特徴から、以下の効果が期待できる。

- ① 安全性が向上
- ② 周辺環境への影響が低減
- ③ コスト縮減が可能

### 3. 実用化に向けた課題

電食によって鉄を溶解する場合は、1 A の電流を1 h 流すと、1 g の鉄が溶け出す。シールド通過部分の杭芯材をすべて溶解するには、直径  $\phi$  3.0 m クラスの場合、計算上では長期間を要し、工程に支障をきたす恐れがあるため、期間短縮を図る

必要がある。

さらに電食電流の安全性、周辺への影響、施工性等を含め、実用化に向けて検討および確認すべき技術的課題を整理すると以下ようになる。

- ① 電食の制御
- ② 必要劣化度の把握
- ③ 切削性の評価
- ④ 柱列式地下連続壁工法への適用性
- ⑤ 地中埋設物への影響

これらの課題に対し、対策を検討し実験を実施して、本工法の実用化を目指した。

## 4. 課題への対応

### (1) 電食の制御

本工法では、矩形芯材の内側に絶縁材を貼付して電食を格子溝状に進行させ、鋼材を不連続な破片にすることで、電食量を低減し、短時間でシールド機が切削可能な状態にする。そのイメージを図-3 に示す。

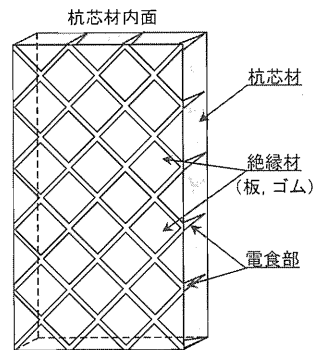


図-3 電食制御概要

#### (a) 絶縁材の選定

絶縁材には芯材内面の電食範囲を限定し、電食の効率化を図る役目がある。絶縁材に求められる条件は、絶縁性、耐久性、施工性に優れ、さらにコスト的に有利なことである。

絶縁材の材料として塗料、接着剤、磁器、ゴム、木を選定し、平鋼板を絶縁加工して電食実験を行い、適性を比較検討した。材質によっては、電食の進行と共に絶縁材端部が欠落あるいははく離が生じ、電食部分が限りなく拡大することが判明した。これらの実験の結果、「木」は絶縁効果、施工

性およびコスト等において良好であり、最適と判断した。ただし、杭の建込みから電食実施まで期間が長期化する場合は、耐久性が要求されることから「ゴム」が有効であると考えられる。

(b) 絶縁材の間隔

少ない溶解量で切削を可能とするためには、適切な絶縁材の間隔（電食溝幅）を決定する必要がある。電食溝幅が狭いと溶解量は少なくなるが、電食溝に腐食生成物が堆積し、電食進行深さ、電食の均一性が損なわれる。また電食効率が低下するため、通電電気が多くなる。一方、電食溝幅が広いと溶解量が増え、電食期間が長くなる。

電食の最適溝幅を決定するため、平鋼板を使い、電食溝幅を5mm、10mm、15mmに設定し、電食の進行状況を観察した（図-4参照）。

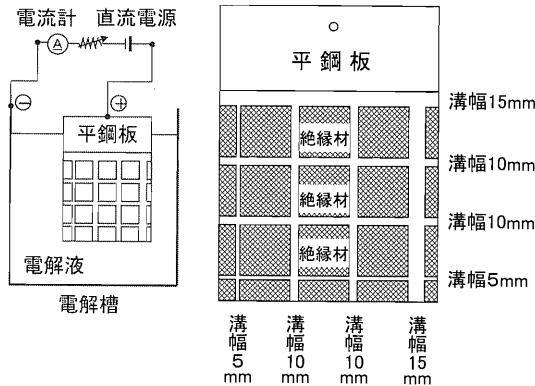


図-4 絶縁材の間隔選定実験

電食部の溝幅の違いによる電食実験の結果は、溝幅が10mm以上で電食進行深さおよび均一性で良好な結果を得た。溝幅が15mm以上では、電食部の体積が大きくなり、電食期間が長くなる。よって、電食溝幅は10mmを最適と判断した。

(2) 必要劣化度の把握

シールド機が土留め壁を直接切削して発進・到達するためには、芯材の電食溝部板厚を3mm以下までに溶解し、土留め壁を劣化させる必要がある。しかし、電食の進行状況を確認する方法が確立されていないことから、土留め壁がシールド機で直接切削可能な状態（必要劣化度）になっているかどうかを把握できない。ここでは、芯材が必

要劣化度に至るまでに通電した電気量に着目し、必要劣化度を電気量で判定することとした。なお、電食電気量は溶解させる金属の重量に比例することから、要素実験によりその関係を確認し、電食溝部の溶解に必要な電気量をその重量から設定した。

電食により溶解させたい範囲は、図-5に示すように電食溝幅×板厚（仮想電食範囲）である。しかし、実際の電食は半円形状で進行していく。

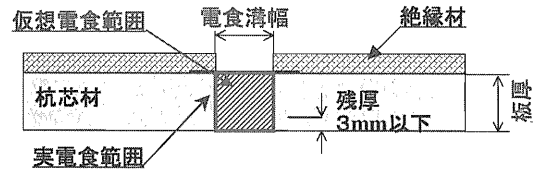


図-5 電食進行概念図

電食電気量と溶解させる金属の重量との関係は(1)式で表せる。

$$Q[A \cdot h] = k[A \cdot h/g] \times M[g] \quad (1)$$

ここで、Q：電食電気量

k：係数

M：金属重量

通常、平鋼板等を電解液中で電食させると、係数kは1.0となる。しかし、仮想電食範囲の重量を基準に考えると、電食溝部の腐食生成物による電食効率の低下、電食範囲の拡大により係数kは1.0より大きくなる。

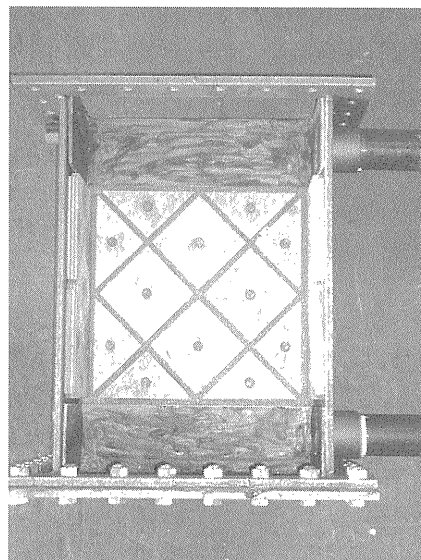


写真-1 矩形模型芯材

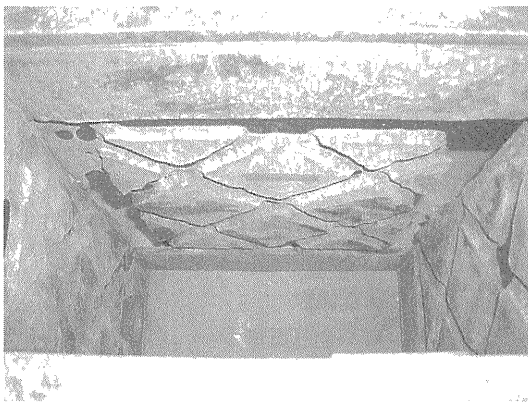
係数  $k$  を設定するため、写真—1 に示す矩形芯材を使用した模型実験を行った。矩形芯材は□-400×200、板厚 10 mm、高さ 1.0 m であり、絶縁材は木板を使用し、電食溝幅は 10 mm とした。

実験結果を表—1、電食後の芯材の状況を写真—2 に示す。

表—1 模型実験結果

①仮想電食範囲体積 (cm <sup>3</sup> )	②仮想電食範囲重量 (g)	③必要電食電気量 (A·h)	④係数 $k$ (A·h/g)
1,364	10,708	17,412	1.62

(注) ②=①×7.85 (g/cm<sup>3</sup>) [鉄の単位体積重量]  
④=(③/②)×100



写真—2 電食後の矩形模型芯材

実験より、矩形芯材に絶縁材を貼付し、電食溝部の板厚が 3 mm 以下になるまで電食を行う場合、仮想電食範囲の鉄を 1 g 溶解するのに 1.62 A·h の電気量が必要であり、仮想電食範囲の重量に対し、約 1.7 倍の電気量を通電することで必要劣化度が得られることが明らかとなった。この関係は (2) 式のように表すことができる。

$$Q[A \cdot h] = 1.7[A \cdot h/g] \times M[g] \quad (2)$$

ここで、 $M$ ：仮想電食範囲の重量 (g)

### (3) 切削性の評価

実験で得られた必要劣化度に対する電食電気量の適正と芯材を電食し劣化した土留め壁の切削性を評価するために、実物大の模擬壁を製作し、電食およびシールド機による切削実験を行った。

実験に用いた模擬壁の諸元とシールド機の仕様は以下のとおりである。

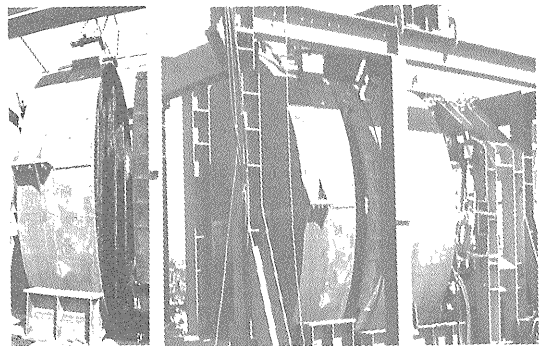
#### ① 模擬壁諸元

- ・形状：外径  $\phi$  3,000 mm、壁厚 1.0 m
- ・充填材：ソイルモルタル  
(強度  $\sigma=0.5\sim 3$  N/mm<sup>2</sup>)
- ・杭芯材：矩形管 3 本 @900 mm、材質 SS 400  
(□-400×200、板厚 10 mm)

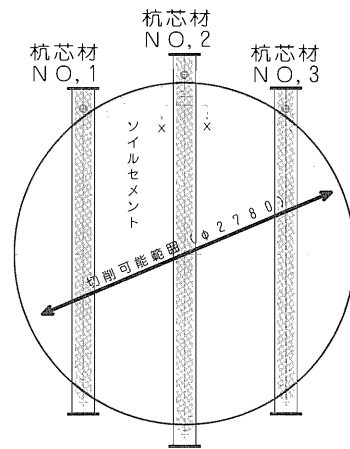
#### ② シールド機仕様

- ・シールド機外径： $\phi$  2,750 mm
- ・掘削形式：泥土圧式
- ・装備推力：600 kN ジャッキ×6 本
- ・装備トルク：336.6 kN·m

模擬壁の切削実験装置を写真—3 に、模擬壁形状を図—6 に示す。



写真—3 模擬壁切削実験装置



図—6 模擬壁形状

杭芯材は、10 mm の電食溝幅で、1 辺 10 cm の絶縁材を内面に貼付し、絶縁加工を施した。

電食は、実験で設定した必要劣化度に必要な電気量（仮想電食範囲の芯材重量に対して約 1.7 倍の電気量）を通電して行った。電食完了時に杭芯材上部をサンプリングして電食の進行状況を確認

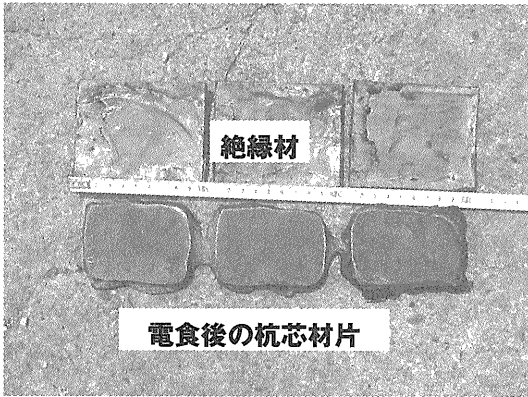


写真-4 模擬壁電食後杭芯材

したところ、写真-4に示すように絶縁材によって、非電食部と電食部が制御されており、電食溝部の板厚残量が3mm以下となっていることを確認した。

切削性については、掘進速度、切削トルクと総推力の計測および切削片の観察から評価した。

模擬壁切削時のシールド機掘進速度と切削トルクおよび総推力の関係を図-7に示す。

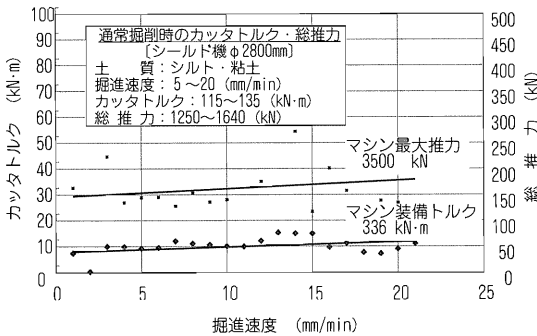


図-7 模擬壁切削特性

掘進速度が5~10 mm/minにおける切削トルクは9~10 kN・m、総推力は150~160 kNの範囲であり、シルト質粘土を対象とした地盤をほぼ同径のシールド機で掘進する場合よりも小さく、切削性は良好であった。これは、通常のシールド機の装備で十分切削が可能であることを示している。ただし、掘進速度が10 mm/minを超えると切削トルクにばらつきが生じることから、電食で劣化させた土留め壁を切削する時の掘進速度は、10 mm/min以下が望ましいと言える。

切削した破片は、写真-5に示すように破片状になっており、シールド機内の搬送には支障がな

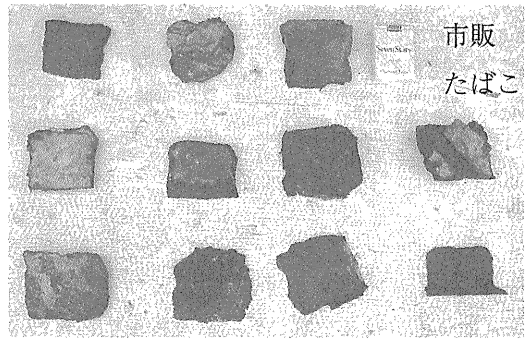


写真-5 杭芯材切削片

いと判断できる。しかし、矩形芯材のコーナー部においては一部電食不足による切削片の連結が確認された。

(4) 柱列式地下連続壁工法への適用性

本工法は、応力部材として杭芯材を使用する柱列式地下連続壁等を対象としている。柱列式地下連続壁の杭芯材は、通常H形鋼を使用するが、本工法では、シールド機切削部分に矩形芯材を、その上下部にH形鋼を使用した継ぎ杭を芯材として使用する。この継ぎ杭は中間部がボックス構造をしているため、浮力と矩形芯材底部の抵抗により芯材建込み時が困難になり、高止まりになる懸念がある。

実際の立坑を柱列式地下連続壁工法 (SMW工法) で築造し、電食用杭芯材建込み時の施工性を確認した。また、杭芯材を電食させ劣化した土留め壁をシールド機で切削し、その切削性と切削片を含んだ残土の搬送状況を確認した。

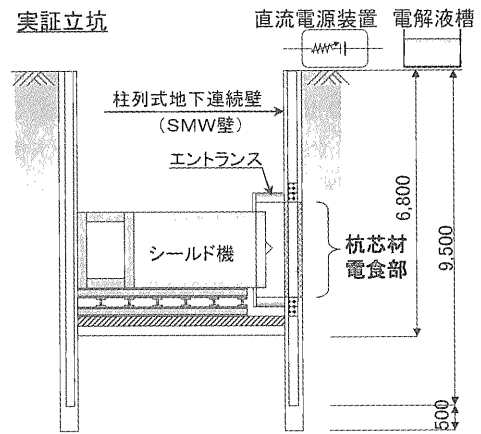


図-8 実証立坑概要図

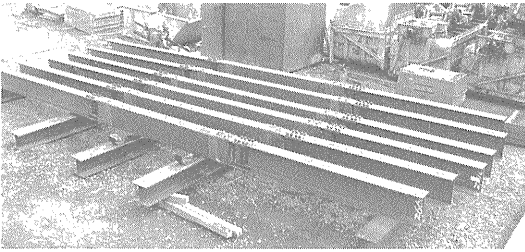


写真-6 実証立坑杭芯材

実証立坑の概要を図-8に、電食用杭芯材および使用機械の概要を以下に示す。

① 電食用杭芯材 (写真-6 参照)

電食部形状：□-400×200，板厚 10 mm  
材質 SS 400

本数：6本@450 mm

杭長：9.5 m (電食部 2.8~3.7 m)

② 使用機械

SMW 杭打ち機：100 t 級

③ シールド機仕様

模擬壁切削実験時と同一

杭芯材は現地で電食部と H 形鋼を接続し、SMW 杭打ち機械で削孔・混練り後建込みを行った。実験では、事前対策として最下部の削孔攪乱を十分行くと共にソイルモルタルの粘性の影響を確認するために水/セメント比を 200%と 250%に変えて行った。

結果として、6本とも自重による建込みが可能であったことから、電食部杭芯材がボックス構造である影響は少なく、柱列式地下連続壁への適用は問題ないと考えられる。

電食および切削については、模擬壁による実験と同様に仮想電食範囲芯材重量の約 1.7 倍の電流を流して電食させ、シールド機で直接切削した。

切削に伴うカットトルクの値は、模擬壁切削時に比べ 4~5 倍の 40~50 kN・m、総推力は約 2 倍の 360~380 kN であったが、通常のシールド機の装備で切削が可能な範囲であった。

切削片の大きさは約 80×80 mm で、シールド機内の残土搬送には支障はなかった。また、模擬壁切削に確認された連続した切削片は確認されなかった。

(5) 地中埋設物への影響

シールド工事は都市部における施工が多く、立

坑周辺に埋設物が近接している場合が多い。本工法では電食時に杭芯材に電流を流すことから、迷走電流が発生する可能性がある。迷走電流は近傍の地下埋設物に悪影響を及ぼす場合があるため、立坑と埋設管をモデル化したフィールド実験を行い、迷走電流の影響度を判定した。

実験モデルを図-9に、実験条件を以下に示す。

- 電食管と埋設管の離隔：約 1 m
- 電食管の電流：200 A と 300 A
- 測定項目：SGP 管 (埋設物) の電位変化量

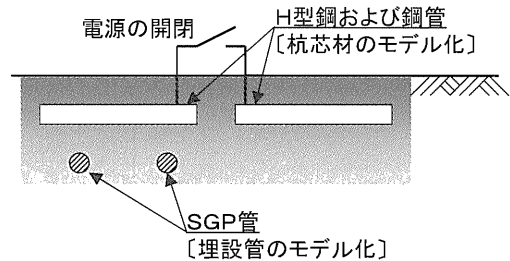


図-9 迷走電流実験モデル

電位変化量の測定結果は、+1 mV~-3 mV で、電気学会が定める安全基準値 50 mV を大きく下回る値であり、金属性の近接埋設物に与える影響は無いと判断される。

また、電食電圧の安全性については、電食時の使用電圧が 10~30 V で、日本電気協会が電気設備の技術基準として定める使用電圧 60V 以下を満足しており、危険性が低いと言える。

5. 実用性の評価

実用化に向けた課題に対し、個々の技術に係わる要素実験および実施規模の実証実験を行い、以下のような結果を得た。

- ① 絶縁材の貼付による電食範囲の制御で、電食量の低減と電食期間の短縮が可能である。
- ② 杭芯材の必要劣化度は、仮想電食範囲の重量から設定した電気量で把握できる。
- ③ 電食により劣化した土留め壁の切削は、通常のシールド機で可能である。
- ④ ボックス構造をした電食部杭芯材の建込みに支障はない。
- ⑤ 迷走電流の電位変化量は小さく、地中埋設

部への影響はない。

以上の結果から、本工法は実用性が高い技術であると判断できる。

## 6. おわりに

シールド工法は、都市部の下水道整備には欠かせない技術であるが、その施工条件は厳しく、要望は高くなってきている。特に近年、安全性の向上や周辺環境への負荷低減、コスト縮減に係わる技術開発が求められている。今回筆者らはシールドの発進・到達に着目し、これらの要望に応えるべく電食技術によるシールド直接発進到達工法を開発した。

各種実験を行い、実用化が可能であることが確認できたが、電食の効率化、実測による必要劣化度の把握、電食用芯材の製作性の向上等、改善すべき点も残されている。今後、実験や実施工を通じて技術の確立を目指す予定である。

なお、本工法の開発にご協力、ご助言いただきました方々に感謝の意を表します。 J C M A

## 《参考文献》

- 1) (財)下水道新技術推進機構：スライド式ピット交換システムとその利(併)用技術に関する共同研究報告書（平成13年3月）

### 〔筆者紹介〕



中里 卓治（なかざと たくじ）  
財団法人下水道新技術推進機構  
研究第二部  
部長



田中 孝（たなか たかし）  
財団法人下水道新技術推進機構  
研究第二部  
研究員



向谷 常松（むかいだに つねまつ）  
飛島建設株式会社  
土木事業本部  
技術部  
担当部長

# 大深度地下空間を拓く建設機械と施工技術

最近の大深度空間施工技術について取りまとめました。主な内容は鉛直掘削工、単円水平掘削工、複心円水平掘削工、曲線掘削工等実施例を解説、分類、整理したものです。工事の調査、計画、施工管理にご利用ください。

頒 価 2,310円(本体価格2,200円) 送料500円

申込先 本部：FAX.03-3432-0289

## 社団法人 日本建設機械化協会

東京都港区芝公園3-5-8(機械振興会館) TEL03-3433-1501 FAX03-3432-0289