

電食技術による杭芯材劣化工法

向谷常松¹・岡利博²・荒川康広³

¹ 飛島建設株式会社 機電統轄部 (〒102-8332 東京都千代田区三番町二番地)

² 飛島建設株式会社 機電統轄部 (〒102-8332 東京都千代田区三番町二番地)

³ 飛島建設株式会社 機電統轄部 (〒102-8332 東京都千代田区三番町二番地)

本論文では、シールド工法の発進到達に伴う鏡切工について新しい手法を提案する。シールド機の発進到達は、土留壁背面の地盤改良を行い、障害となる立坑土留め壁を人力により取壊し、シールド機を進める方法が一般的である。本工法では、電気防蝕技術を逆利用した電食技術により、シールド機通過部の柱列式地下連続壁(SMW)の杭芯材を電氣的に強制腐食を起し、内部から鋼材を薄肉劣化させ、シールド機により直接切削を行い、地山を露出せずに安全で確実な施工を実施した。本報告では、実用化に向けた要素実験結果、実証施工における電食および切削結果を示し、本工法の実用性を報告する。

キーワード：シールド, 直接発進, 直接到達, 仮壁切削, 電食

1. はじめに

都市部における鉄道, 共同溝, 上下水道等の地下構造物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, シールド機の発進到達部や急曲線部, ビット交換箇所等では地上作業を伴う補助工法が必要となるが, 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。

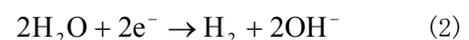
通常, シールド機の発進到達方法は, 立坑土留め壁を人力などにより取壊し, 地山を開放してシールド機を進める。その際, 地山の自立性と止水性を確保するため, 地盤改良等の補助工法が必要となる。また鏡切工は, 開放した地山での作業となるため危険が伴う。そのため, 補助工法の省略もしくは低減によりコスト縮減や周辺環境への影響を抑制し, 安全性も確保できる発進到達工法の開発が望まれている。

本論文に示す電食技術は, 電気防蝕技術の逆転発想を応用したもので, 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。劣化させた土留め壁の杭芯材は, シールド機で直接切削することが可能であり, 発進到達時の鏡切工や補助工法の省略もしくは低減, 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。

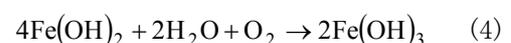
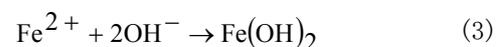
2. 電食理論

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, 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 Fe^{2+} は, 電解液中で水酸化鉄 $Fe(OH)_2$ 「錆」となって沈殿する。

式(1)に示す陽極反応は, 金属の溶解反応で, 鋼, 銅, 真鍮, アルミニウム, 亜鉛, マグネシウムなど活性溶解する金属で発生し, 金属が電子 e^- を失い電解液中にイオンとして溶け出す。陰極では式(2)に示すように, 水 (H_2O) の電気分解が発生し陰極表面に水素が発生し, 同時にアルカリ成分である水酸基 OH^- を生成する。



電解液中に溶解した鉄イオンは, 式(3)に示すように陰極にて生成された水酸基と速やかに反応し二価の水酸化鉄が生じる。電解液中に酸素(溶存酸素)が存在した場合, 式(4)に示すように, 鉄イオンは二価から三価に酸化され赤錆となり沈殿する。



電解液中の酸素は空気中より溶解したもので, 室温における塩水中の飽和溶存酸素濃度は約 9ppm で

あるが、十分に空気を吹き込まないと飽和に達しない。電解に伴う鉄の腐食量、電解液量、溶存酸素の兼ね合いにより、酸素量が不足した場合、二価と三価の混在した水酸化鉄となり、緑色から黒色を呈す¹⁾。

電食概念図を**図-1**に示し、**写真-1**に鋼管を内部から電食により薄肉化した状況を示す。

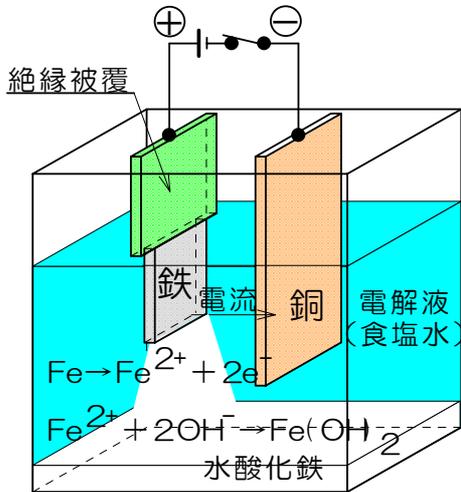


図-1 電食概念図

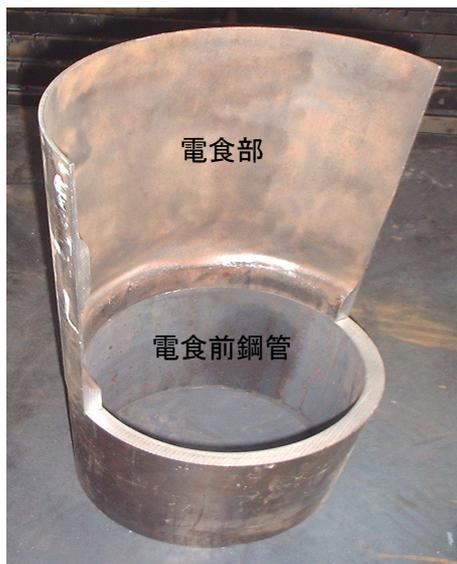


写真-1 鋼管の電食例 (鋼管の内部から電食)

3. 工法の概要

本工法は、電食原理を利用して、柱列式地下連続壁工法 (SMW 工法) の土留壁杭芯材内のシールド通過部に電食用杭芯材を配置し、シールド機で直接切削できる状態まで内部から溶解、薄肉化し、人力による鏡切工を行わずにシールド機の Cutterビットで直接切削し、発進到達する工法である。**図-3**に電食技術による杭芯材劣化工法による施工概要図、**図-4**には例として、発進時における電食工の施工フロー図を示す。

電食杭芯材は、応力部材としての矩形管 (陽極管) と電食用の内管 (陰極管) から構成され、矩形管と内管の間に電解液を循環させながら、矩形管にプラス、内管にマイナスの直流電流を通電することにより、矩形管が電解液中に鉄イオンとして溶解し劣化する。電解液中の鉄イオンは、陰極管表面にて発生する水酸基と反応し水酸化鉄となり、循環液により地上部に設置された電解液貯留槽まで輸送され、回収される。

電食反応に伴う鋼材の溶解量は、ファラデーの法則により、次式 (5)、(6) で表せる。

$$W = A \times q \quad (5)$$

$$A = I \times T \quad (6)$$

W: 溶解量 (g)

q: 電気量 (Ah)

A: 電気化学当量 (g/Ah)²⁾

鉄の電気化学等量: 1.0419 (g/Ah)

I: 通電電流 (A)

T: 通電時間 (h)

従って、溶解させる鋼材重量 (矩形管重量) が決まれば、通電電流の大きさを変えることにより通電時間を任意に調整することが可能である。

電食に使用する電解液については、無害で導電性の高いもの、入手、取り扱いおよびコスト面などから塩水を利用する。電食時の通電抵抗、使用電力量を試算する上で、電解液の抵抗率は重要な要因である。塩水の場合、**図-2**に示すように、塩分濃度が高いほど抵抗率は減少する。また、電解液の抵抗率は温度の影響も受け、温度が高いほど減少する。

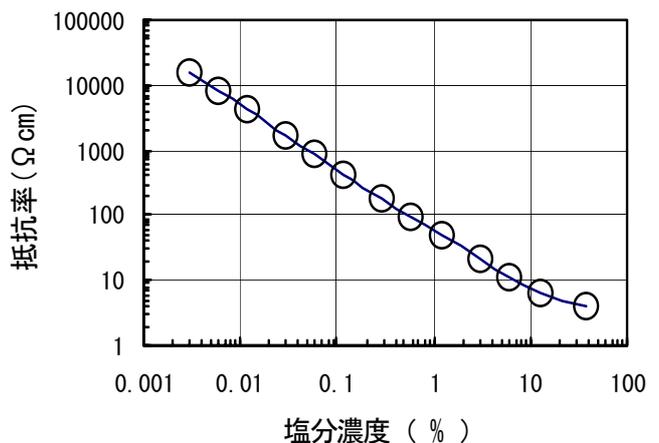


図-2 抵抗率と塩分濃度³⁾

単純な構造の場合、陰極陽極間の抵抗は抵抗率、間隔、面積を用いて次式 (7) のように表すことが出来る。

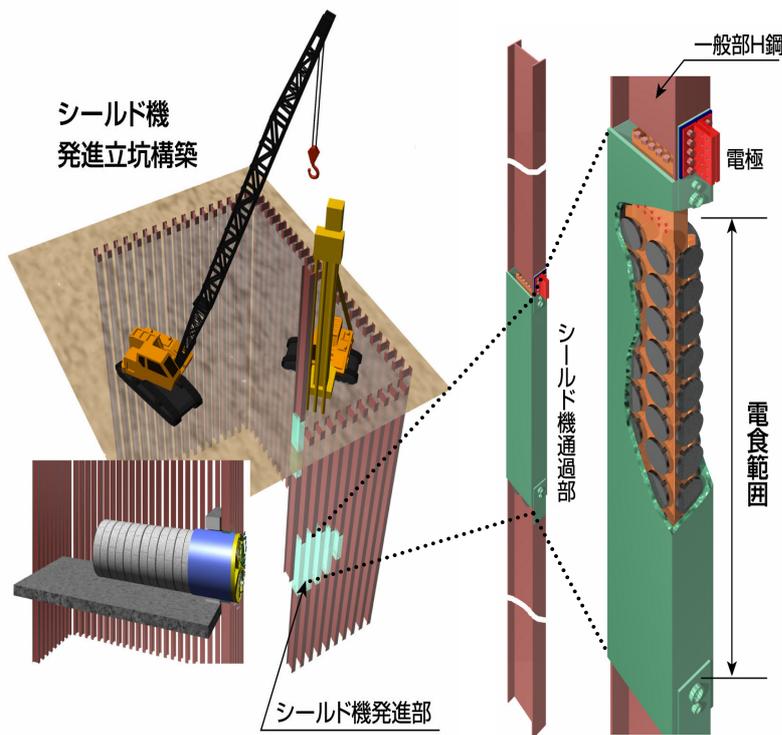


図-3 施工概要図

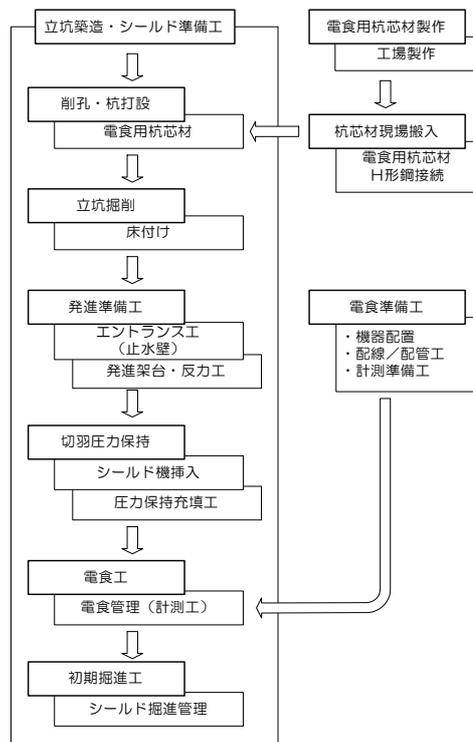


図-4 施工フロー図

$$R = \rho \frac{d}{S} \quad (7)$$

R: 抵抗, d: 間隔, S: 面積, ρ : 抵抗率

この抵抗と通電電流から、通電電圧および目的の抵抗値を得るために塩分濃度を調整する。電解液の抵抗率は通電電流、陰極面積、両極間距離により異なるため、個別のケースに併せて塩分濃度を調整するが、通常1~3%程度で電食を行う。

4. 要素実験

(1) 実験目的

電食によって鉄を強制腐食する場合、1gの鉄を溶解させるのに約1Aの電流を1時間通電する必要がある(電気量1Ah)。従って、シールド機通過部分の杭芯材をすべて溶解するためには、長期の電食期間を必要とし、工程に支障をきたす恐れがある。そのため、期間短縮を図る電食制御方法として、陽極表面に絶縁材を配置して非電食部を作成し、電食量を低減する方法が有効であることを要素実験で確認している。

今後の実施工に向けて、実際の応力部材を使用した場合の、電食の効率化の可否確認、電食の進行状況確認、電食完了時期の把握を目的として実験を行った。

(2) 実験概要及び装置

図-5の実験装置概要図に示す模擬杭芯材内部に電食量低減のための絶縁材を設置して、電解液(塩水)を循環させながら直流電流の通電を行った。また、電食により発生する水酸化鉄の除去および、電食の進行に伴い上昇するpH調整用として水酸化物処理装置を設置した。写真-2に模擬杭芯材断面写真(電食部矩形管)を示す。

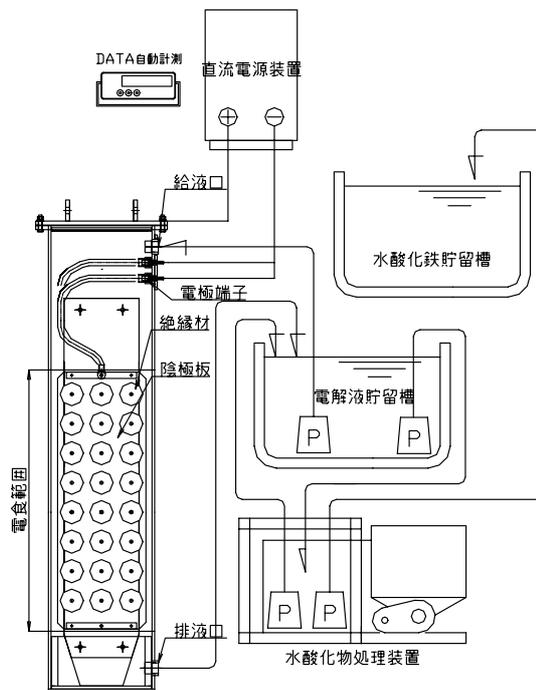


図-5 要素実験装置概要図



写真-2 模擬杭芯材断面写真

(3) 実験結果

表-1 に模擬杭芯材の重量及び電食量を示す。

表-1 模擬杭芯材の重量および電食重量

	重量 (kg)	重量比 (%)	備考
電食対象重量	234	100	
電食重量	164	70	
非電食部重量	70	30	絶縁材による低減分

図-5 に示す模擬杭芯材の電食対象矩形管部に、平均 759A の直流電流を通電した。図-6 に通電中の電圧及び電流の変位グラフを示す。図中の電食率とは、電食部の全鋼材重量に対する通電電気量（通電電流と通電時間の積を累計した値）の割合である。電食率 45% 付近までは、通電電圧は 20V 以下で比較的安定した数値を示し、45% 以上になると徐々に上昇傾向となった。実験に使用した直流電源装置は、最大出力 1000A-30V 定電流方式であるため、鋼材の溶解に従い、通電抵抗値が増加すると共に、出力電圧も上昇する。

電食率 60%（約 217 時間）通電した時点で電圧が 30V で飽和状態となり、更に電食率 65% 付近にて、電流値の減少が見られた。これは、電食の進行により、陽極矩形管断面積が著しく減少し、部分的に破断された結果、通電抵抗が急激に上昇したためと考えられる。

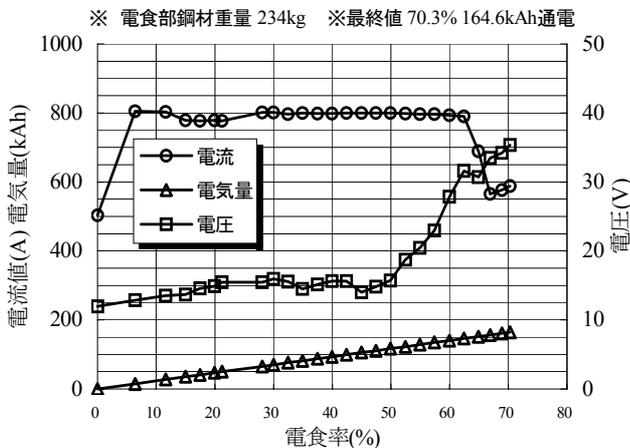


図-6 電食進行に伴う電流電圧推移

また実験では、陽極矩形管上下端にセンサーを設

置し、芯材自体の通電抵抗値 (IR 値) の変化を計測した。通電抵抗値は、通電開始直後は電食矩形管の電気抵抗が極端に低いため、微弱な電圧値として計測されるが、電食の進行に伴い、矩形管上下間に微小電位差が発生、上昇傾向を示し、約 60~65% 付近で急激に上昇した。図-7 に IR の電位グラフを示す。

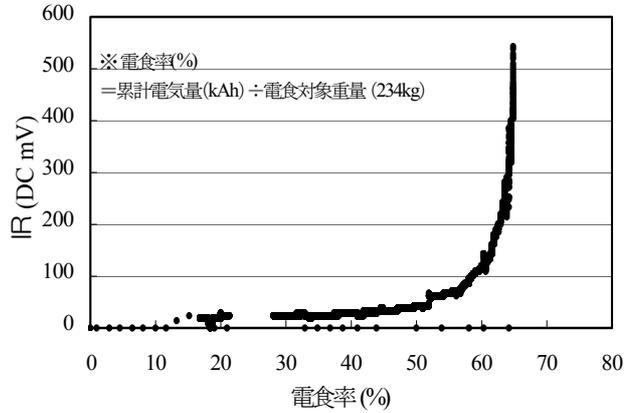


図-7 電食進行に伴う IR 電位変化

電食率 70%にて、通電を停止し、芯材内部の点検および解体を行い、詳細な電食状況を確認した。最終電気量は、約 164 kAh であった。写真-3、写真-4 に模擬杭芯材の解体状況を示す。



写真-3 模擬杭芯材解体状況



写真-4 非電食部の残存鉄片

模擬杭芯材解体後の目視結果は、非電食部の電食残存鉄片が不連続に独立した形状（円形）で確認された。残存鉄片の形状および重量には大差は認められず、矩形管内部の電食が全体的に均一に進行し、完全に剛性を失ったものと考えられる。この結果を踏まえ、この時点を通電完了の時期と決定し、判断基準を以下のように決定した。

(4) 電食完了判断基準

通常電食は、密閉された空間にて行われるため、内視鏡等を利用する以外実施工では目視による内部確認は不可能である。従って、電圧、電流、通電抵抗、IR電圧値、電解液抵抗率、電解液液温および濃度を複合評価し、間接的に電食の進行と終了時期を判断する。以下に電食完了判断基準を示す。

- ①電圧上昇および、電流が顕著な減少傾向を示した時。
 - ②陽極側矩形管上下 IR 端子部の計測による電圧上昇が顕著な変化を示した時。
 - ③上下 IR 部の溶解による電位が発生した時。
- 上記現象が複合確認された時点をも、電食完了時期として実証施工へ反映させる。

5. 現場実証施工

本事例は、シールド外径φ3980mmの発進工法に電食劣化技術を適用した例である。

(1) 工事内容

- シールド延長：803m
 シールド機：φ3980mm土圧式シールド機
 土被り：8.0～10.0m
 発進到達防護工：三重管高圧噴射攪拌工法(CJG)
 薬液注入工

(2) 電食矩形管の検討

要素実験を基に、実証施工における電食矩形管の検討を実施した。当該工事において電食方法に関しては要素実験と同様であるが、柱列式地下連続壁(SMW)構築において削孔径φ650mm、削孔間隔450mmを適応するため、電食用杭芯材に矩形管を使用した場合、隣接孔を削孔中にオーガーが既設矩形管と干渉する可能性がある。このため図-8に示すような、矩形管と同等な断面性能を有し、干渉しない特殊中空H形管の電食用杭芯材を検討した。表-2に杭芯材の性能表を示す。

表-2 断面性能比較表

項目	母材杭芯材	電食用杭芯材
杭芯材形状	H-500×200×10/16	516×200×9/9
断面係数 Zx (cm ³)	1870	1876
断面2次モーメント Ix (cm ⁴)	46800	48410
単位重量 W (kg/m)	88.2	121.0

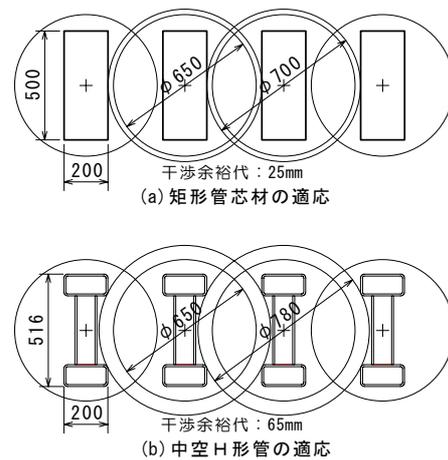


図-8 削孔時の干渉比較

(3) 電食工

a) 電食用杭芯材の構造

電食用杭芯材の構造は、削孔時の干渉を防止するため特殊中空H形状とし、中空内部に円形状の絶縁材を配列し非電食部を作成して電食時間の短縮を図った。計画電食重量は、電食対象重量と非電食部(絶縁部の鉄重量)の差で示され、約80%の電食が必要である。使用した杭芯材本数は10本で、全電食重量4240kgに対して、計画電食量は3392kgである。電食用杭芯材は工場で作成した後、現地で上下部に母材H形鋼を添接板、高力ボルトにて接続を行った。表-3に使用した電食用杭芯材重量表、図-9に電食用杭芯材の詳細図、写真-5に電食用杭芯材の内部構造、写真-6に電食用杭芯材とH形鋼のボルト接続状況を示す。

表-3 電食杭芯材重量表および計画電食量

杭芯材番号	電食杭芯長 (mm)	電食長 (mm)	対象重量 (Kg)	電食重量 (Kg)
NO.1	3000	1920	240	192
NO.2	4310	3110	380	304
NO.3	4980	3880	470	376
NO.4	5400	4210	510	408
NO.5	5590	4280	520	416
NO.6	5590	4280	520	416
NO.7	5400	4210	510	408
NO.8	4980	3880	470	376
NO.9	4310	3110	380	304
NO.10	3000	1920	240	192
合計	46560	34800	4240	3392

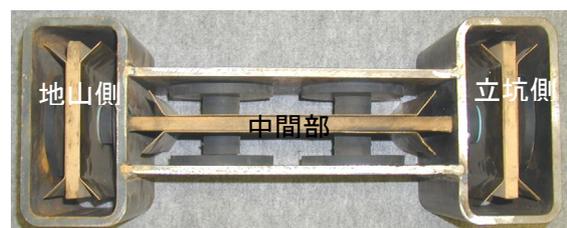


写真-5 杭芯材内部構造

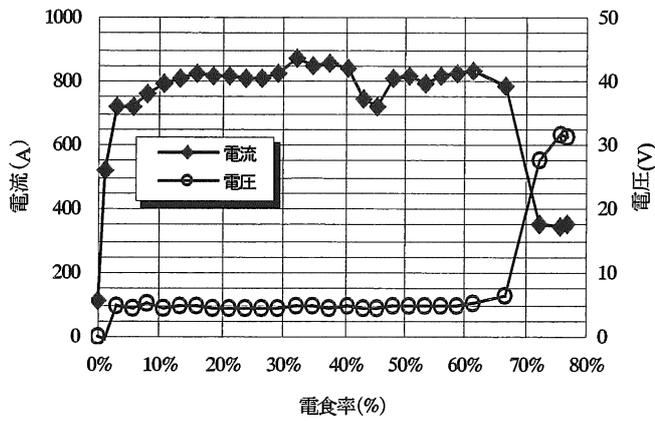
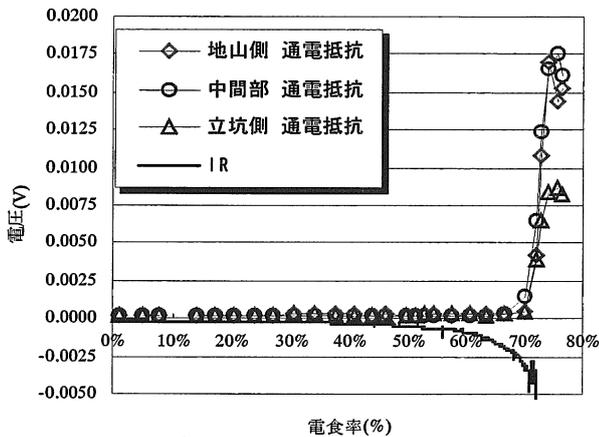


図-11 電食進行に伴う電流電圧推移



IR 値はプラス電圧で計測。
図中のマイナス表記は、計測値が微小な為、乗率×10の演算処理を行っているため。

図-12 電食進行に伴う IR 電位変化

(4) 電食杭芯材切削結果

図-13 に切削特性グラフを示す。横軸はシールド機ストロークを表し、185~701mm 間が、電食杭芯材切削中のデータである。切削は無負荷に近い状況であり、電食杭を切削した後の地山切削において、多少のカッタートルク上昇が見られる。このことから、電食により鋼材が完全に剛性を失っていることが認められる。掘進速度は、初期掘進および電食杭の切削状況にあるため、3mm/min とした。切削された電食残存鉄片も、問題なく掘削残土と一緒に搬出された。

写真-8 にシールド機スクリーコンベヤより搬出された電食残存鉄片を示す。表-5 に電食用杭芯材の切削データを示す。

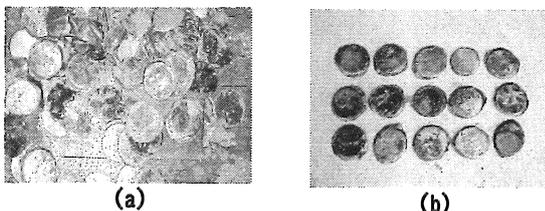


写真-8 電食残存鉄片

表-5 電食杭芯材切削データ

計測項目	計測値	備考
掘進ストローク	185~701(mm)	電食杭切削範囲
平均切削トルク	360 (KN-m)	通常は1200 (KN-m)程度
平均推力	1415(kN)	
平均掘進速度	3(mm/min)	

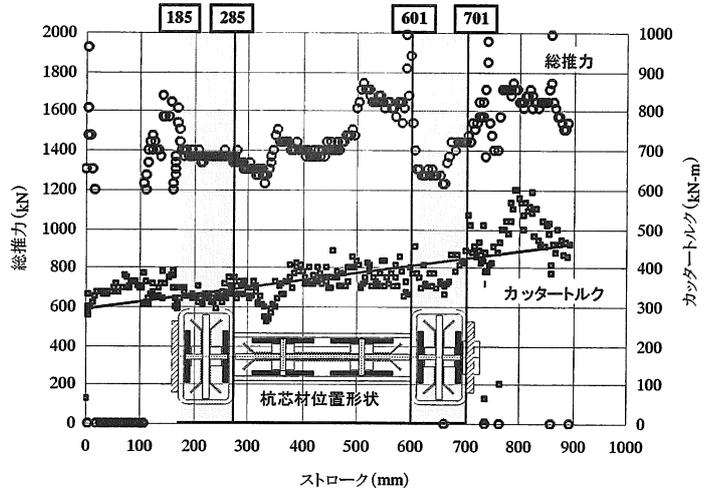


図-13 杭芯材切削時の推力およびカッタートルク

6. 干渉影響調査

(1) 測定方法

電食工法は、直流電流を切羽に通電し鋼材を強制腐食させる工法であるため、実証施工に際し、立坑に近接して模擬埋設物を設置し、通電電流の周囲に対する影響調査を行った。図-14 に示す位置に模擬埋設管 (P1 裸鋼管, P2 被覆鋼管) を設置した。各配管両端には、亜鉛照合電極 (Zn1, Zn2, Zn3, Zn4) を埋設し、電食用直流電源装置の出力 ON/OFF 時における埋設管と照合電極間の電圧計測を行い、電位変化量を確認した。

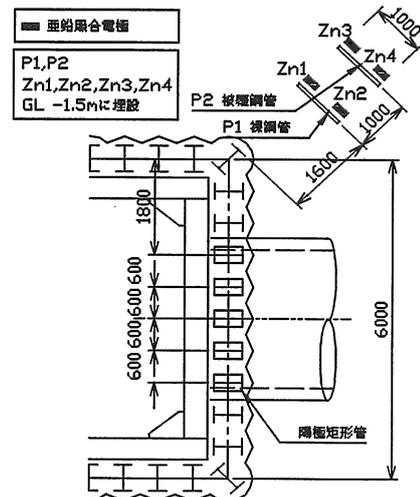


図-14 模擬配管と照合電極設置位置

(2) 計測結果

図-15 に電位変化の計測結果を示す。

電食進行に伴い、電食杭から迷走電流が流れ出すようになれば、模擬配管に影響が出るようになる。電食率が42%以降で電源電圧の上昇が発生し63%付近にて30Vに達しているが、それに伴い模擬配管の電位変化も増加し、マイナス方向への変化は-10～-20mV程度、プラス方向への変化は約+4mVである。

腐食が促進されるプラス方向への電位変化は+4mVで、この値は、判断基準を大きく下回る値であり、電食工法による他構造物への影響は少ないと判断される。しかも、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現れる期間は10日間程度であることから、他構造物への影響はないものと判断される。

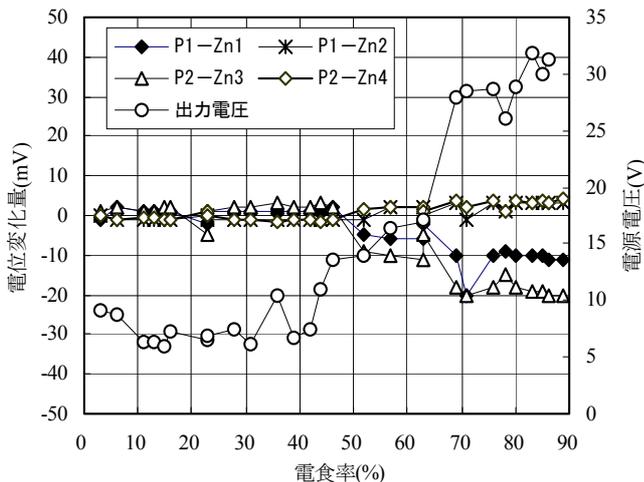


図-15 迷走電流計測結果

7. まとめ

今回、電食技術を利用した、シールド機の直接発進到達工法を開発し、要素実験および実証施工を行った結果から、本工法を以下のように整理する。

- ①陽極矩形管内部に絶縁材を貼付する事により、電食電量の低減と電食期間の短縮が可能である。
- ②電食用杭芯材は、電食後、完全に剛性が失われるため、シールド機への過度な負担が少ない。
- ③鏡切工に伴う、地盤改良等の補助工法が省略または低減可能。
- ④一般的なシールド機の発進到達工法に見られる立坑土留壁の人力による撤去とは異なり、地山の開放がないため、安全性が高い。

8. おわりに

シールド工法は、都市部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、コスト削減に係る技術開発が求められている。これらの要望に応えるべく電食技術を用いた、シールド機による杭芯材劣化工法を開発した。今後、更なる効率化や実施工を通じて技術の確実化、コスト低減を目指す予定である。

最後に、本工法の開発にご協力、ご指導いただきました方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 荒木ら 5 人編集:水酸化物の性状, 鉄鋼腐食科学, 朝倉書店発行, 1972
- 2) 岡本, 松田, 松島:腐食反応とその制御, 産業図書発行, 1989
- 3) 化学便覧, 日本化学会編, 丸善, 1993