

ここまできた推進工法 “最新技術と施工管理”

2600mmRCM型泥水加圧式(超分割型)掘進機

工事名 南住吉～加賀屋幹線下水管渠築造工事(その7)

発注者 大阪市 建設局

施工者  株式会社 福田組 大阪支店

製造 ライフ工業株式会社

長距離推進 “適正な設計・施工への提案”

ECO SPEED SHIELD(ESS)工法協会 技術・積算統括主任 檜皮 安弘

§ 1. はじめに

近年、推進技術はめざましい発展を遂げ、様々な場面でシールド工法と比較され、コスト、工期、ヤード面積等で有利な推進工法が設計採用されている。その背景に、シールド工法は、発進立坑から到達立坑まで任意に結ばれた線形で、施工が可能である。それに対して、推進工法では、掘進機の性能、ヒューム管の性能等を加味し、推進延長、曲線半径を設定し、スパン割りが行われている。シールド工法と推進工法を比較する場合、シールド工法案を基に、推進工法案が作成されるケースが多く、厳しい条件での検討となる。しかし、各推進工法協会では、検討を行い施工不可であっても、施工可能な代替え案の提案を行っている。発進位置の変更、スパン分割数の変更、線形の変更、立坑数の変更を伴うが、社会の情勢からコスト縮減が可能な推進工法が設計採用されるケースも少なくない。

また、推進工法では困難と考えられる施工であっても、特殊管や中押し管による創意工夫で、推進工法が設計採用されているケースがある。このように、推進技術の進歩と工法協会の提案力により、推進工法の設計採用が増加し続けている。その反面、このような案件は、施工難易度が非常に高く、施工業者が綿密な計画を立てて、施工を行わなければ、トラブルという範囲に收まらずに、莫大な損失と社会的な信用を失うことになる。

工法協会では、それぞれ長距離、急曲線、難地盤、低土被り、高土被り、小立坑発進、既設構造物へ直接到達、障害物撤去等の特殊な技術を有しているが、各工法協会がこれらの全ての技術について、精通しているわけではない。長年の施工実績の積み重ねにより、ノ

ウハウを構築し、難題を克服していくことで、独自の技術を習得するため、推進工法が万能であっても、工法協会が万能であると考え難い。発注者および設計者の立場では、各工法協会が優れた技術を有していることよりも、平均的で最もコストが安価な工法協会を評価してしまう。また、難易度の非常に高い工事では、2～3社の工法協会が施工可能であれば、最も安価な工法協会を評価してしまう。この場合、施工性や安全性に配慮し、独自の技術を採用した工法協会が高価となり、評価されない。施工についても同様で、推進工法で設計された案件であれば、どの施工業者でも施工可能であると思われている。

このような背景でも、当協会では施工のトラブルを未然に回避するために、設計段階で呼び径、土質条件、長距離、急曲線等の条件を十分に確認し、これまでの施工実績と照査して、適切な設計を行うことに努めている。

本稿では、設計における留意点を挙げ、適切な設計について提案するものである。合わせて、今までほとんど発表されたことがない長距離施工の失敗要因、不測の事態での対策を解説する。最後に、今後の課題として、当協会が現在、取り組んでいる新しいテールボイドの保持方法、超長距離に対応する排泥の吸引方法について紹介する。

§ 2. ESS 工法の概要

ECO SPEED SHIELD(ESS)工法は発足以来、推進・シールド併用タイプ（特殊推進工法）とシールドタイプ（小口径シールド工法）を開拓してきたが、2年前からK-1推進工法の巨礫破碎型泥濃式推進工法および既設構造物到達型泥濃式推進工法を当協会で引き継ぐ運び

となり、新たに推進タイプが追加された。

2.1 巨礫破碎型泥濃式推進工法

従来の泥濃式の特長である礫を丸ごと排出する機能を生かし、前面ヘッドで取り込みができる巨礫を大割することで、巨礫地盤の推進を可能とした工法である。必要以上の破碎を行わないことで、掘削ビットの負担を軽減するとともに推進力低減システム（ESシステム）の採用により、巨礫地盤での超長距離推進施工を可能にした。特長は以下の通りである。写真-1に、カッタヘッドを示す。

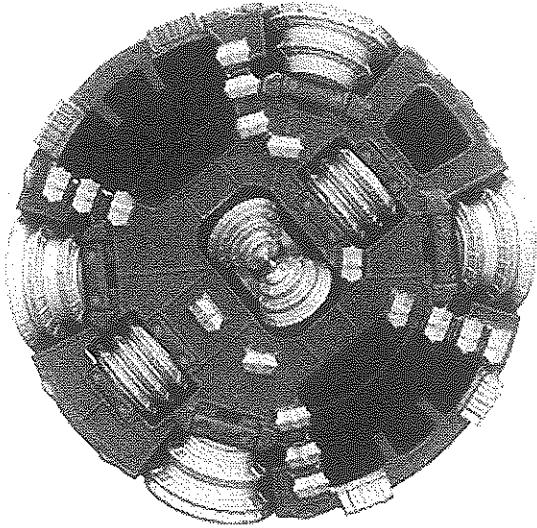


写真-1 巨礫破碎型

- ①大型ローラービットの適正配置により、巨礫・玉石層から軟岩層まで対応できる。
- ②土質に見合った面盤の選択が可能である。
- ③巨礫を大割して、大開口部から取込み、二次破碎なしで排土することにより、日進量の確保し、ビットの磨耗を軽減して、コストダウンを実現した。
- ④積極的なオーバーカットにより、急曲線施工が可能である。
- ⑤ESシステムの併用により、推進力の低減が図れるために、長距離推進（500m以上）が可能である。

2.2 既設構造物到達型泥濃式推進工法

既設構造物到達型は、掘進機を直接既設構造物に到達させ、掘進機内の機器を取り外し、スキンプレートを既設構造物内で切断撤去す

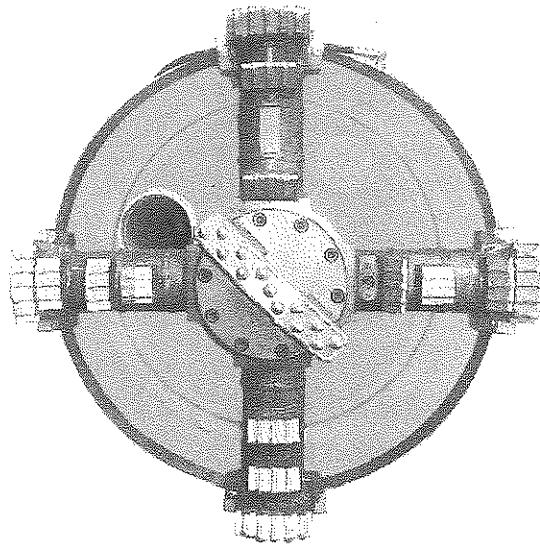


写真-2 標準タイプ

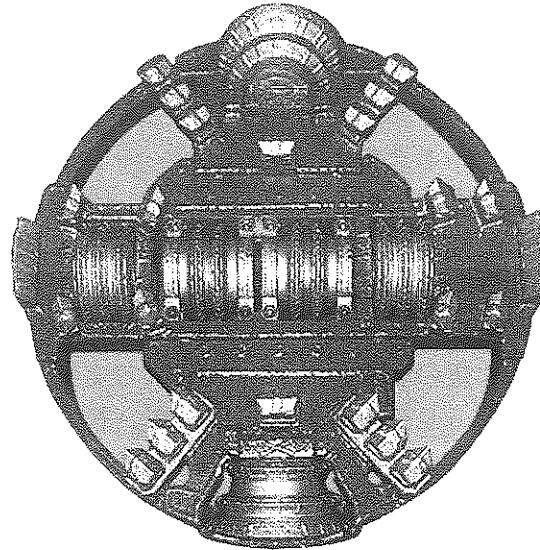


写真-3 破碎タイプ

- る。写真-2、3に、カッタヘッドを示す。
- ①既設人孔到達、小型立坑等、到達立坑を選ばずに施工可能である。
 - ②掘進機本体内径を充分に確保することにより、機能・作業性の充実。
 - ③機器撤去を容易にし、低コスト化を実現。
 - ④土質に応じて、標準タイプと破碎タイプの選択が可能である（写真-2、3）。
 - ⑤ESシステムの併用により、推進力の低減が図れるために、長距離推進（500m以上）が可能である。

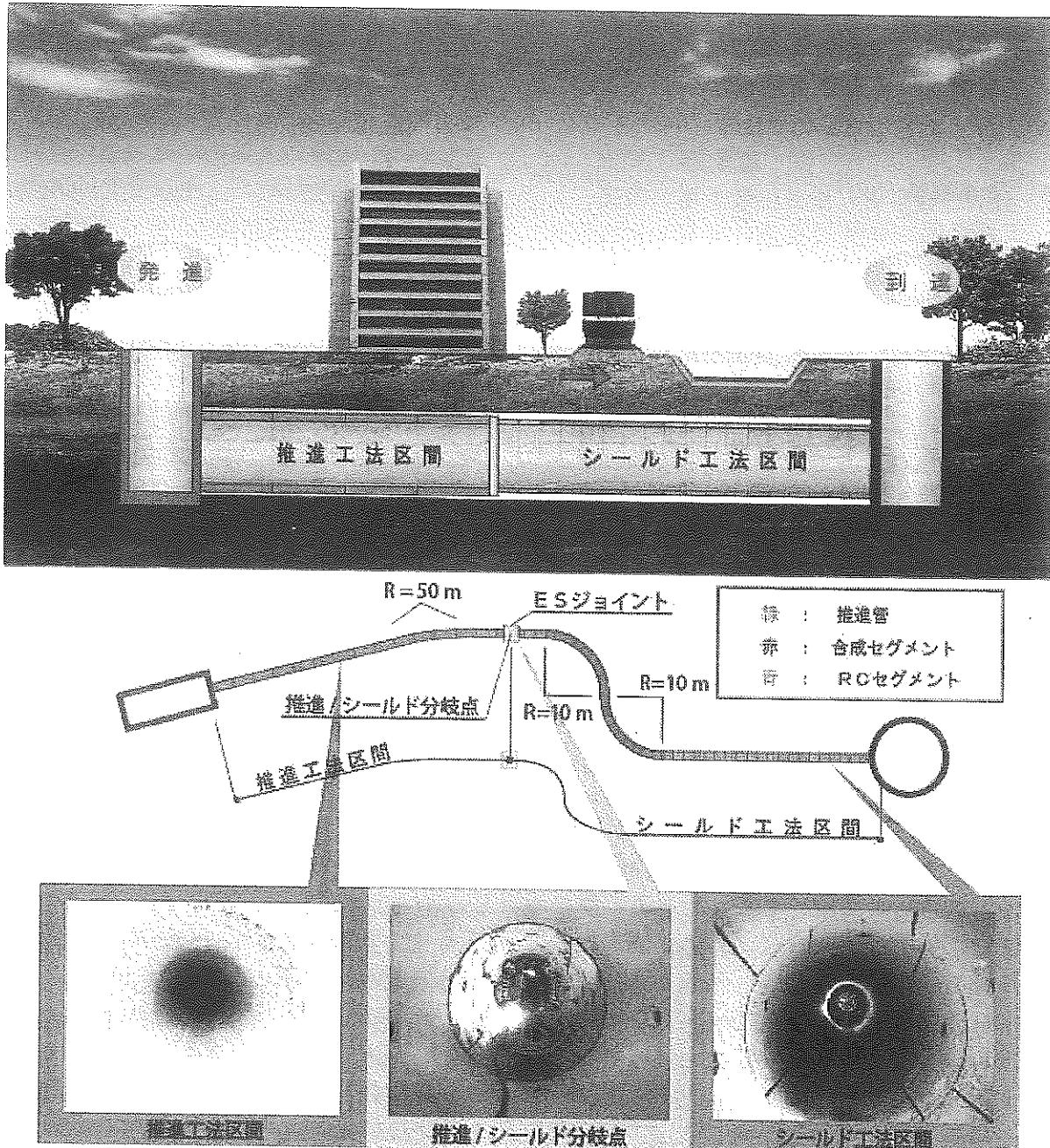


図-1 推進・シールド併用タイプ概要図



写真-4 切り替え位置状況

2.3 推進・シールド併用タイプとシールドタイプ

仕上り内径 ϕ 1,000mm ~ 2,400mm を対象とした工法である。推進工法によって、管耐荷力の限界もしくは急曲線手前の任意の地点まで施工を行って、立坑を築造することなくシールド工法に切替え可能な『推進・シールド併用タイプ（特殊推進工法）』（図-1）と全区間をシールド工法によって施工する『シールドタイプ（小口径シールド工法）』の2種類から、施工条件に応じて選択することが可能である。切り替え位置では、推進管とセグメントを直接接続する。写真-4に示す。

§ 3. 長距離施工の設計

本稿の冒頭で述べたように、小口径シールド工法から推進工法に、変更された事例を紹介する。

3.1 工事概要

- ・工事場所：某市
- ・管　　径： $\phi 1800\text{mm}$
- ・推進延長：約 1130 m (1 スパン)
- ・曲線半径： $R=500\text{m} \times 4$ 箇所、 $R=100\text{m}$
- ・土　　質：粘性土
- ・N　　値：2 ~ 5
- ・礫　　率：0%
- ・最大礫径：15mm
- ・土被り：平均 6.97 m
- ・地下水位：均 GL - 1.50 m

3.2 設計の経過

実施設計では、小口径シールド工法が採用されていた。再度、実施設計の見直しが発注され、当協会では長距離および昼間施工であることから、推進・シールド併用タイプを提案した。推進区間の延長設定については、過去に呼び径 $\phi 2000\text{mm}$ 、推進延長 700 m 以上の経験があり、昼間施工であったため、施工の終盤では推進力との戦いとなつた。当時は、現在ほどの施工技術もなかったが、施工性や安全性を考慮した場合、昼間施工での許容延長は 800 m 程度と考える。推進・シールド併用タイプでは、推進区間延長が長ければ長いほど大幅なコストダウンが図れる。

本件では、推進力や曲線による制約を受けることがなく、推進区間延長を任意に設定できることから、当初に比べて大幅なコスト縮減が可能であることを評価された。しかし、他の推進工法協会から、1 スパンでの施工が可能であると提案があり、推進工法での検討が行われた。推進工法の課題である連続施工には、昼夜間施工が不可欠であるが、実施設計が昼間施工の小口径シールド工法であったため、昼夜間施工への変更には抵抗が感じられた。

最終的には、推進工法が採用され、防音壁を設置し、昼夜間施工で発注された。残念ながら、他工法での施工となつたが、今後も注

目していきたい。

3.3 まとめ

本件では、実施設計の段階で、1 km を超える施工延長および中間位置での既設シールドとの接合のために、小口径シールドが採用されていた。中間位置での接合については、基本的にセグメントを考えていた。推進・シールド併用タイプでは、推進区間を長くすることで、コスト縮減が図れるため、中間位置では推進管を使用する。推進管については、推進管への直接取り付けや削孔の実績が多く存在し、開口部分の強度計算が行えることから、問題がないことが立証された。さらに、1 km を超える施工延長であっても、推進工法の適用が可能であると裏付けされたため、推進工法で発注されたと推察される。

今回のポイントは、1 km を超える施工延長をどのように判断するかである。1 km を超えた施工は、国内外でも貴重な実績だと考えられる。本件も、現在の技術を駆使すれば施工は可能であるが、施工性・安全性を考慮した場合、適正な設計であったのかを自問自答してしまう。

§ 4. 設計における留意点

4.1 土質の適用範囲

当工法では、土質の適用範囲を標準仕様の礫破碎型で施工が可能な範囲としている。これ以外の土質については、別途検討している。これは、カタログ・積算資料のみを参考に工法の選定が行われた場合、不利となることが多い。しかし、カタログ・積算資料に記載された数値が一人歩きし、拡大解釈から施工トラブルに陥ることを懸念する。そこで、当

表-1 挖削・推進力検討に必要な資料

- ・ボーリング柱状図
- ・ボーリングコアの写真
- ・粒度分布
- ・粒径加積曲線
- ・礫破碎対象の遭遇頻度
- ・最大礫径
- ・礫の圧縮強度
- ・液性及び塑性限界
- ・透水係数

協会では発注者ならび設計者から問い合わせをいただいた際に、直接対話を行い、適切な設計を実施してもらえるよう提案している。

当工法で適用範囲外の土質については、施工難易度が高いことを認知していただき、十分な検討を行うために、資料提示が必要であることをご理解願いたい。

4.2 許容推進延長

許容推進延長は、推進方向の推進管の耐荷力（許容応力）、元押ジャッキ最大設備の有効推進力、支圧壁反力より求まる元押推進力およびピット磨耗により算出する。しかし、礫破碎型ではこれらの計算式に様々な要素が作用し、必ずしも算出値通りとはならない場合が存在する。また、計算で求められない要素についても、十分な検討を行い施工の安全性を確保する必要がある。

現在の推進力の計算方法は、土質条件のみに依存している。しかし、実際には施工体制（施工時間、休日等）、施工期間等で推進力の推移が異なる。設計時にはこれらの条件をほとんど加味することができない。実際には、長距離施工の期間中は、長期の休暇であっても、推進管からの滑材注入や地切り作業のために、不安を抱えたまま休日の作業を行っている。さらに、施工の終盤では、施工時間の延長や休日出勤による連続的な作業により、推進力の上昇を抑制している。

土質条件について考えると、礫率・最大礫径により推進力の算出を行っているため、同条件（数値）であれば同じ結果となる。しかし、施工場所・地形などにより推進力は異なる。また、高透水性・無水層での施工は、留意しなければならない点が数多く存在する。設計者の立場として、土質調査結果を基に、慎重に検討する必要がある。

次に、計算で求められない要素について述べる。玉石が混在する砂礫層では、掘進機への負担が大きい。玉石による外殻の変形・磨耗、高負荷によるカッタモーターの故障、ギアの故障、ピッチバルブの損傷、泥水材吐出口の損傷、ピットの欠落等が挙げられる。当工法では、現場に応じたこれらの対策を講じているが限界はある。推進管も同様に掘進機

に追随しているため、推進管の表面に影響を及ぼす場合がある。これらの要素を含めて施工の安全性・作業性を考慮する必要がある。

4.3 曲線の適用範囲

一般的に掘進機の性能、推進管の性能・許容耐荷力により、曲線の適用範囲を決定している。しかし、礫破碎型ではこれらに安全性を持たせる必要がある。玉石が混在する砂礫層、岩盤層での曲線施工は、非常に難易度が高く、掘進機の性能が十分に引き出せない場合がある。また、玉石などにより推進管に偏圧がかかり破損する場合もある。これらの要素を十分に加味する必要があると考える。

当協会では、玉石が混在する砂礫層、岩盤層での曲線施工は、あまり推奨していない。曲線を含む場合は、できる限り到達側に設置し、曲線半径を大きく設定することを、提案している。

長距離施工では、推進力が大きくなり、高強度の管種が必要となる。当然ながら、緩曲線であっても、推進管に大きな力が作用するため、円滑に推進力を伝達させるクッション材の検討が必須となる。

4.4 ピット磨耗

当工法では、玉石を大割して取り込むことによりピットの磨耗を軽減し、日進量の確保を行っている。

当協会では、施工後にピットの磨耗状況を測定し、施工データの蓄積を行っている。これまでのデータでは400～500m程度が限界であると考えているが、詳細な土質条件に基づいて、許容延長は慎重に検討が必要であると考えている。

表-2 ピット検討に必要な資料

- ・礫破碎対象の遭遇頻度
- ・最大礫径
- ・礫の圧縮強度
- ・地質想定図
- ・岩質分類、岩分類
- ・岩のRQD
- ・岩の弾性波速度
- ・石英含有率

4.5 その他

設計では無視されているが、長距離施工において、泥水材および滑材の圧送方法、排泥の吸引方法、送電方法、管内配線および配管の仕様、管内測量方法等の留意点が挙げられる。詳細については、長距離施工の失敗要因で解説する。

4.6 まとめ

土質の適用範囲、許容推進延長、曲線の適用範囲、ビット磨耗についての留意点を述べたが、設計時にそれらを反映することは難しい。しかし、施工実績がある近隣地域では、それらを反映した適切な設計を行うべきである。N値・礫径・礫率だけの条件提供では、適切な設計は難しい。そこで、発注者が設計者に近隣施工の情報を提供することを提案する。土質条件だけではなく、施工地域・地形等を、考慮することも重要である。河川の周辺、山沿い、谷間は、それぞれ玉石の成分・形状・強度が異なっている。本来は、これらの要素も考慮しなければならないが、現状では、資料蓄積が不足しており、設計に反映させるには、もう少し時間が必要である。近隣施工の情報があれば、確実性の高い技術提案が行える。

§ 5. 長距離施工の失敗要因

5.1 推進力の上昇

推進工法では、不測の事態に陥る要因として、推進力の上昇が主に挙げられる。推進工法では、いかに推進力を管理し、コントロールできるかにかかっているといつても過言ではない。その推進力をコントロールする上で周面抵抗力と密接な関係にあるテールボイドの保持が重要となる。

当初、泥濃式ではテールボイドの圧密沈下の防止、推進管の浮力防止、滑材効果を目的として、2液性固結滑材（可塑剤）をテールボイドに充填し、残りは切羽からの高濃度泥水を伝播し、テールボイドが充満加圧されることで、テールボイドの保持を行っていた。その後、推進力低減システムの登場により、推進力のコントロールが可能となり、長距離施工の分野は、飛躍的な発展を遂げた。

しかし、現在では推進力低減システムが一

般化され、施工時に使用するだけで推進力が低減できると勘違いされている。設計推進力より低い推進の場合は、理論通りに周面抵抗力が軽減されたと認識しているが、反対に高い推進の場合は、推進力低減システムの効果が発揮できていないと間違った認識をしてしまう。推進力が高くなる要因を下記に示す。

- ①土圧管理が不十分である。
- ②泥水材料の配合が悪いため、泥膜が形成されていない。
- ③施工精度が悪いため、テールボイドが不均一である。
- ④透水係数が高い、または無水層のため、地山へ滑材が逸脱する。
- ⑤必要な箇所に滑材が注入されていない。
- ⑥設計時の土質条件と異なる。

このように様々な要因によって、推進力の上昇が生じるため、これらの要因を言及しなければ、推進力低減システムの能力は発揮されない。

5.2 泥水材および滑材の圧送

泥濃式では、長距離施工が行われているにもかかわらず、泥水材および滑材の圧送能力については、ほとんど検証されていない。当協会では、独自の計算により、検討を行っている。図-2に圧送可否の計算例を示す。

圧送延長は、下記の要素に依存する。

- ①必要流量
- ②圧送管の内径
- ③流体の比重
- ④流体の粘性
- ⑤ポンプ吐出圧力と掘進機必要注入圧

長距離施工では、高比重、高粘性の材料は不向きである。また、圧送管の内径を大きくすることで、大幅に圧送延長を延ばすことが可能である。

事前に、圧送ポンプの能力、使用するホースの内径、使用材料の性能を把握し、計画を立てることが必要である。計画が不十分な場合、圧送能力が不足し、使用材料の変更を余儀なくされ、トラブルの要因となる。

5.3 排泥の吸引能力

長距離施工では、排泥の吸引能力により、日

圧送可否の計算

(1) 計算条件

q : 流量 (m^3/s)
 d : 管の内径 (m)
 ρ : 流体の比重 (kg/m^3)
 μ : 流体の粘性 ($kg/m \cdot s$)
 L : 推進延長 (m)
 P_1 : ポンプ吐出圧力
 P_2 : 推進機必要注入圧

35.0	(流速 / min)	0.00058	(m^3/s)
1.50	(インチ)	0.03750	(m)
1.140	(g/cm^3)	1140	(kg/m^3)
1200	(c p s)	0.120	($kg/m \cdot s$)
1000.000	(m)		
2.00	(Mpa)	20.00	(kg/cm^2)
0.10	(Mpa)	1.00	(kg/cm^2)

(2) 圧力損失 (摩擦圧力損失) の算出

v : 流体の平均流速 (m/s)
 q : 流量 (m^3/s)
 A : 管の断面積 (m^2)
 d : 管の内径 (m)

0.52727	(m/s)
0.00058	(m^3/s)
0.00110	(m^2)
0.03750	(m)

$$v = \frac{q}{A} = 0.52727$$

$$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = 0.00110$$

Re : レイノルズ数
 ν : 流体の動粘性係数 (m^2/s)
 v : 流体の平均流速 (m/s)
 d : 管の内径 (m)
 ρ : 流体の比重 (kg/m^3)
 μ : 流体の粘性 ($kg/m \cdot s$)

179.75	(m^3/s)
0.00011	(m^3/s)
0.52727	(m/s)
0.03750	(m)
1140	(kg/m^3)
0.120	($kg/m \cdot s$)

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{v \cdot d}{\mu / \rho} = 179.75$$

水平管における圧力損失 (摩擦圧力損失) はファンningの式で求められる。

$$\Delta P_f = -4f \frac{\rho \cdot v^2}{2g} \cdot \frac{L}{d}$$

ΔP_f : 圧力損失 (摩擦圧力損失)
 f : 摩擦係数
 g : 重力加速度 = 10.0 (m/s^2)
 L : 推進延長 (m)

$$150455.65$$

15.05	(kg/cm^2)
0.00901	(層流)
10.0	(m/s^2)
1000.000	(m)

$$0.00901$$

層流範囲 ($Re < 3 \times 10^4$) では、理論的速度分布より、カルマンの式により、

$1/f = 4 + 10g (R_e f^2) - 0.4$

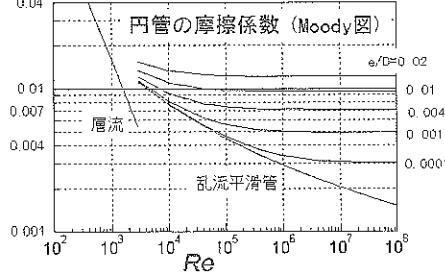
この式の形式は、円管内乱流速度分布式から導かれ、係数は実験値に合うように修正したものである。fについて説明があるので試行法が必要である。

ここでは、これに近似して粗度の影響を含めた式を用いる

$$f = 0.0526 / [10g ((s/3.7d) + (s/7.4/R_e^{0.5}))^{1/2}]$$

0.04015	
0.00028	(m)

s : 管壁の粗さ (m)
 s/d : 管壁の粗度 (0.01とする)



(3) 圧送の可否

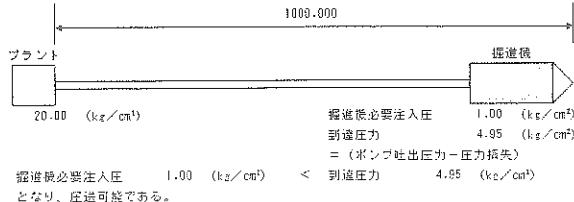


図-2 圧送可否の計算例

進量が大きく左右される。円滑に吸引する主要な対策を下記に示す。

- ①出力の高い吸泥排土設備を使用する。
- ②吸泥排土設備の台数を増やす。
- ③横引きと縦引きに分ける。
- ④泥水材料の調整により、排泥を吸引しやすい状態にする。

出力の高い吸泥排土設備を使用することで、風量が大きくなり、吸引力が向上する。当工法では、37 kW、55 kW、75 kW、100 kW の4種類から選定している。しかし、吸引力の向上に伴って、排泥パイプを鋼管に変更する必要がある。

吸泥排土設備の台数を増やす場合、直列に接続し、風量を大きくする方法や系統を増やすことにより、負担を軽減する方法がある。しかし、配管材の変更や追加が必要となる。また、吸泥排土設備を増設することにより、騒音および振動の問題が発生する。

長距離施工や高土被り施工では、横引きと縦引きを分ける方法を用いることが多い。横引きで推進延長を分担し、縦引きで土被りを分担する。ただし、立坑内に小型の排土貯留槽の設置が必要となる。また、吸泥排土設備を増設することから、同様の問題が発生する。増設が無理な場合は、縦引きを行わずに、立坑内で丸タンクに貯留し、クレーン等で丸タ

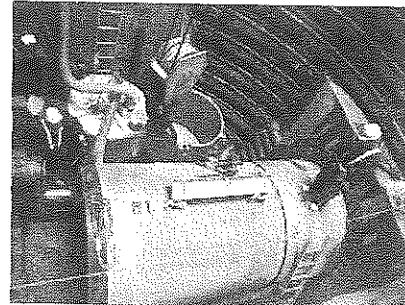


写真-5 立坑内の丸タンク

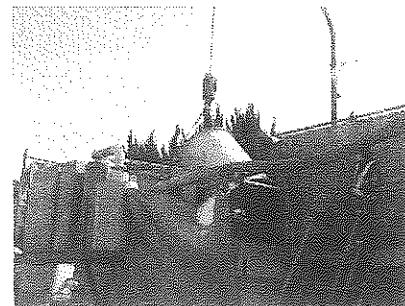


写真-6 立坑上の排土貯留槽

ンクを立坑上の排土貯留槽に移動し、転倒させる。写真-5、6に状況を示す。

泥水材料の調整については、標準配合を使用せずに、ペントナイト系または高分子系の泥水材料を使用し、高比重ではなく、高粘性とすることで、排泥の分離を防止している。

その他には、配管内にエアーを送り込む方法等が使用されている。これらの方針を組み合わせて、現場に即した方法を選定しなければならない。

5.4 管内測量

当協会への依頼案件で、トランシット盛替数が10箇所を超える場合が多く、中には20箇所を超える場合もある。技術的に施工が可能であっても、現場での精度管理は非常に厳しい。また、設計段階で自動測量が採用されれば、施工性・経済性の問題はある程度解消できる。当協会では、盛替数の上限を15箇所に設定し、それを超える場合は、施工不可としている。施工においては、盛替数により、日進量が大きく左右され、日進量の低下を防ぐために、測量回数が減らされている。そのため、精度不良を起こす可能性も高く、当協会では盛替数の上限を設けている。

設計および施工において、盛替数は重要な項目である。盛替数を踏まえて、適切な計画を立てなければならない。

5.5 まとめ

推進力の上昇、泥水材および滑材の圧送、排泥の吸引能力、管内測量で述べたことを参考にして綿密な計画を立て、トラブルを未然に回避していただければ幸いである。

§ 6. 不測の事態での対策

今までほとんど発表されたことがない不測の事態に陥った場合の対策を紹介する。これらの対策を講じても、改善されないケースは多く、設計および施工の重要性とリスクを再認識して欲しい。

6.1 推進力上昇による施工不能の対策

推進力上昇により、推進管の破損、支圧壁の破損、元押し設備の能力不足で、施工不能

となる。推進管および支圧壁は補修を行い、元押し設備は入れ替えを行えば、再施工は可能となるが、推進力を低下させない限り、問題の解決とはならない。そこで、推進力を低下するために、推進管のグラウト孔を利用し、オイル系滑材を推進管ごとに注入する。これは、テールボイドが劣化し、さらに施工中と異なり推進管が移動しないため、より確実に滑材を充填するためである。全線において充填が完了すれば、元押し設備によって、クッション材の縮みと推進管の動向を確認しながら、ゆっくりと推進力を作用させる。慎重に押し引きを繰り返し、地切りを行う。地切りが行えない場合や再度、推進管および支圧壁の破損が生じた場合は、作業を中止する。

このような場合は、最終手段として、下記の方法から選択される。

- ①立坑を築造し、再発進する。
- ②到達立坑から迎え掘りを行う。
- ③推進管を改造し、中押し設備を取り付け、中押し管として使用する。
- ④シールド工法に切り替える。

立坑が築造できない場合、②～④の方法を選択することになる。いずれの方法についてもリスクが高いと考えられる。

6.2 推進管破損時の対策

推進管破損の状況に応じて、軽いものは補修を行い、酷いものは写真-7のように補強リングを使用する。また、破損の恐れがある箇所については、補強リングを事前に取り付けることがある。

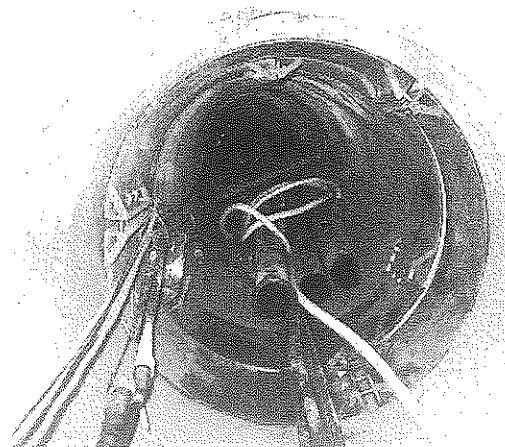


写真-7 補強リング

6.3 排泥取り込み過多の対策

破碎タイプでは、巨礫・玉石を破碎するため、取り込み過多を起こす場合がある。現在の施工技術では、取り込み過多が発生しないと思われているが、掘進機の構造やオペレーターの操作に依存している。取り込み過多を起こした場合、速やかに地表面を調査し、適切な処置を行わなければならない。

ここでは、取り込み過多を防止する対策ではなく、取り込み過多を起こした場合に、速やかに報告することが、適切な対策であると考える。

6.4 まとめ

不測の事態に陥る原因として、設計ミス、施工ミス、想定外の出来事が挙げられる。設計ミスおよび施工ミスは、未然に回避できる要因であるため、発注者、設計者、施工者がそれぞれの立場で、施工の難易度を十分に把握し、経済性のみではなく、施工性・安全性に配慮した最良の選択を行って欲しい。選択ミスにより、不測の事態を招くことを忘れないで欲しい。

§ 7. 適切な設計とは

当協会では、トラブルの発生を未然に回避するために、設計段階において呼び径、土質条件、長距離、急曲線等の施工条件を十分に確認し、これまでの施工実績と照査して適切な設計を行うことに努めている。本来、設計では、既存の一般的な技術で施工可能でなければならぬ。しかし、現状はそのような平易な工事は既に完了し、難易度の高い工事が残っている。そこで、適切な設計が重要となり、特殊工法の選定も必要となる。しかし、これらの工法を比較すると、考え方の違いから日進量・推進力・使用管種などがそれぞれ異なる。その中で、技術的に最も妥当な工法の選定が必要にも関わらず、現状ではコスト面が重視されている。少なくとも複数の工法が同条件下で施工可能であることが、適切な設計において重要である。当協会では、コスト増であっても、あえて施工の確実性が高い方法を提案する場合がある。トラブルを引き起こす無理な設計は行わない方針である。

当協会が考える現在の技術レベルでの適切な設計を以下に示す。

7.1 呼び径について

呼び径は下水道の場合、流量から必要径が求まる。また、以下の要素も関係する。

①推進延長

許容推進延長は呼び径の800倍程度としており、それ以上の場合は管径をアップさせる。

②土質条件

最大礫径により呼び径を決定する。許容礫径は、呼び径の80%を標準としている。

7.2 土質条件について

特に下水道協会積算基準の適用範囲外土質については、十分な検討が必要である。

①巨礫・玉石層

ボーリング柱状図、ボーリングコアの写真、粒度分布、粒径加積曲線、礫破碎対象の遭遇頻度、最大礫径、礫の圧縮試験等のデータを基に、施工の可否を決定する。

②岩盤層

ボーリング柱状図、ボーリングコアの写真、岩質分類、岩分類、岩のR Q D、岩の弾性波速度、石英含有率等のデータを基に、施工の可否を決定する。

③無水層

ボーリング柱状図、ボーリングコアの写真、地下水位、透水試験等のデータを基に施工の可否を決定する。

④透水係数

無水層と同様である。

⑤ピット磨耗

巨礫・玉石層・岩盤層で必要なデータを基に、許容延長を算出する。必要に応じてピット交換を提案する。

⑥その他

施工地域・地形を十分に考慮する。

7.3 長距離施工について

確実な施工を行うためには、十分な検討が必要である。

①呼び径

許容推進延長は呼び径の800倍程度としており、それ以上の場合は管径をアップさせる。

②推進力の計算

推進力に見合う管種の選定を行う。

③推進力の低減（ESシステム）

土質に応じてES管のピッチ幅を狭める。

④ビット磨耗

土質条件から許容延長を算出する。必要に応じてビット交換を提案する。

⑤排泥の搬出方法

吸泥排土装置の使用台数と設置方法を提案する。

⑥玉石の搬出

開口部に制限を設け坑内搬出作業を軽減する。 $\phi 1000\text{mm}$ 以上ではバッテリーカーを使用する。

⑦施工体制

長距離施工では、できる限り連続して作業が行えるようにする。

⑧その他

施工地域・地形を十分に考慮する。

7.4 急曲線施工について

管の破損が起こらないように十分な検討が必要である。

①推進管長

曲線の位置により、同じ曲線半径であっても管長を変更する。また、クッション材を考慮し、管長を選定する。

②継手性能

クッション材を考慮し、管長を選定する。

③曲線部における側方荷重

当協会では、標準タイプは新式を採用し、破碎タイプは安全を考慮し旧式を採用する。

④管端部における推進力伝達方法

当協会では、独自の考え方に基づきクッション材の種類と枚数を選定する。必要に応じて、バルリング（パーティクルボード）とFJリングを使用する。表-3、4に単曲線でクッション材を考慮した推進管の許容耐荷力を示す。

⑤使用管種

③と④の結果に基づき使用管種を決定する。

⑥掘進機の性能

最小曲線半径に応じて掘進機の選定を行う。

⑦拡幅余掘り

余掘り量は推進中に増減できないため、曲線形と掘進機の寸法・形状を検討し、適正な余掘り量を設定する。

表-3 パルリングを考慮した推進管の許容耐荷力

	800	900	1000	1100	1200	1350	1500	1650	1800	2000	2200	2400
直線	2,296	2,986	3,767	4,374	5,309	6,239	7,939	9,451	11,092	13,642	16,455	18,966
100	412	531	659	789	1,010	1,291	1,821	1,863	2,082	2,524	3,082	3,833
	0.18	0.18	0.17	0.18	0.19	0.21	0.23	0.20	0.19	0.19	0.19	0.19
200	890	856	1,036	1,113	1,301	1,398	1,877	1,862	2,072	2,504	3,080	3,863
	0.30	0.29	0.28	0.25	0.25	0.22	0.21	0.20	0.19	0.18	0.18	0.19
300	863	1,098	1,321	1,481	1,718	1,890	2,269	2,544	2,845	3,246	3,614	3,919
	0.38	0.37	0.35	0.34	0.32	0.30	0.29	0.27	0.26	0.24	0.22	0.21
400	985	1,265	1,547	1,735	2,059	2,259	2,753	3,117	3,484	3,996	4,551	4,927
	0.43	0.42	0.41	0.40	0.39	0.36	0.35	0.33	0.31	0.29	0.28	0.28

※上段は許容耐荷力、下段は曲線の許容耐荷力／直線の許容耐荷力を示す。

表-4 FJリングを考慮した推進管の許容耐荷力

	800	900	1000	1100	1200	1350	1500	1650	1800	2000	2200	2400
直線	2,296	2,986	3,767	4,374	5,309	6,239	7,939	9,451	11,092	13,642	16,455	18,966
100	1,340	1,737	2,233	2,808	3,223	3,703	4,692	6,202	7,227	8,800	10,782	12,287
	0.53	0.58	0.59	0.60	0.61	0.58	0.66	0.65	0.65	0.66	0.65	0.65
200	1,714	2,154	2,717	3,082	3,656	4,165	5,179	6,206	7,246	8,897	10,753	12,351
	0.75	0.72	0.72	0.70	0.68	0.67	0.65	0.66	0.65	0.65	0.65	0.65
300	2,217	2,727	3,350	3,668	4,388	4,922	6,001	6,977	7,994	9,619	11,264	12,904
	0.97	0.91	0.89	0.84	0.83	0.79	0.76	0.74	0.72	0.71	0.68	0.68
400	2,296	2,986	3,767	4,374	5,123	5,753	7,045	7,958	9,069	10,752	12,571	14,003
	1.00	1.00	1.00	1.00	0.96	0.92	0.89	0.84	0.82	0.79	0.76	0.74

※上段は許容耐荷力、下段は曲線の許容耐荷力／直線の許容耐荷力を示す。

⑧地盤補強の検討

軟弱地盤や曲線部で推進力が高い場合、管列が外側に張り出そうとする力に対して地盤反力が不足し、精度の維持ができなくなる。その場合は、地盤改良を行う。

以上のことを見越して、工事ごとに検討を行う。また、特殊な条件が存在する場合は、詳細に検討し、確実な設計を行う。

§ 8. 推進・シールド併用の施工事例

京都市の施工事例について、設計から施工までを紹介する。

8.1 工事の特長

本工事を行う伏見地区は古くから城下町として栄えており、全般に道路幅員が狭く、屈曲も多い。そのため、道路を掘削する場合には、作業の実施や占用帯の確保が難しい箇所が多く存在する。

今回の施工箇所である竹田街道は、道路幅員が歩道を含め11~15mで、交通量が多く、路線バスも通行する幹線道路であり、加えて、地下埋設物が輻輳しているという難しい条件であった。

本工事の最大の特長として、大手筋幹線との接続点である到達部分については、幹線道路（竹田街道大手筋交差点）であり、地下埋設物が輻輳しており、到達立坑の設置が困難であるため、既設管である大手筋幹線（シールド工法、Φ3000mm）の施工時に到達部分のセグメントをFFU（硬質ウレタン樹脂をガラス長纖維で強化したもの）で製作し、掘進機で直接切削できる構造となっていた。

本工事は、半径R=80mの曲線施工の直後に既設管への到達となることから、標準的な元押しジャッキのみによる推進方法では、推進機まで推進力が到達するまでのタイムラグによって、過剰な推進力が掛かり、到達部分のFFUを押し抜き破壊することが懸念されるため、到達部分における微動掘進が可能である当工法の推進・シールド併用タイプが採用された。

8.2 工事概要

工事名：大手筋北幹線（その1）公共下水道工事

工事場所：京都市伏見区聚楽町地内

発注者：京都市上下水道局

呼び径：Φ1800mm

掘削延長：L=348.092m

推進区間 339.092m

シールド区間 9.000m

線形：R=140m+80m

土質条件：砂礫土 N=22~78

礫率34~41%

最大礫径200mm

土被り：14.51~15.06m

地下水位：GL-4.22m

特記事項：既設シールド到達

(FFUセグメント切削)

8.3 設計時の考え方

本工事の設計では、工法選定条件として、以下のことが挙げられた。

①砂礫層を長距離推進後にガラス長纖維の切削が可能であること

②急曲線施工に対応が可能な工法

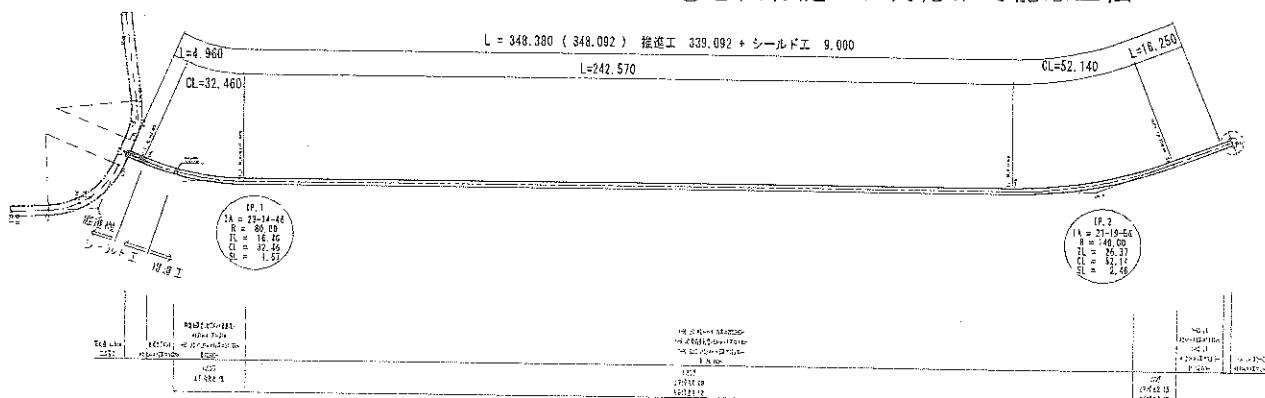


図-3 施工概略図



写真-8 到達部の状況

- ③機内（外）薬液注入孔設置
- ④FFUセグメント切削時の押し付け力管理が容易にできること
- ⑤FFUセグメント切削時の掘進速度管理が容易にできること
- ⑥曲線推進直後の到達坑口への到達誤差のない工法

推進機が既設シールド管への到達時に、元押しジャッキからの推進力では、掘進機までの推進力伝達のタイムラグや微動掘進が困難であった。さらに、既設管へ垂直に到達させるために、到達直前の曲線区間内から、掘進機本体に装備されたシールドジャッキでの到達が不可欠であった。

そこで、既設Φ3000mmシールド管に接続する時のみシールド掘進機の性能を持った工法が要求され、それ以外では一般的な推進工法で満足できたため、推進・シールド併用工法が採用された。

8.4 課題とその対策

本工事では、以下のような課題が挙げられた。

- ①硬質土
- ②高水圧
- ③テールボイドの保持
- ④曲線施工
- ⑤到達部の地盤改良
- ⑥既設シールド管渠の損傷防止
- ⑦FFUセグメント切削

1) 硬質土への対応

硬質地盤に有効な切削能力の高いピットを選定し、さらにFFUセグメントを確実に切削

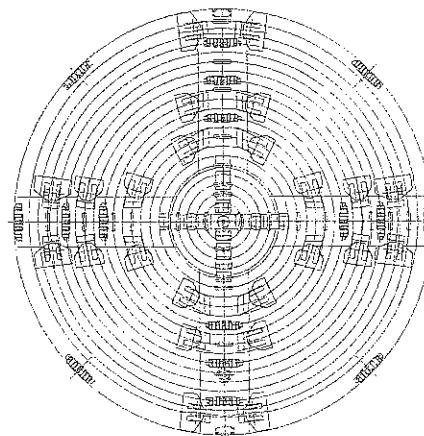


図-4 ピット軌跡

できるピットを選定して、適正な配置を行った。図-4にピット軌跡を示す。

2) 高水圧への対応

高水圧対策として、ピンチバルブと油圧ゲートを併用した。作業終了時に油圧ゲートを閉めることにより、機内への流入水を防止した。写真-9に示す。

また、発進直後のバックリング対策を行った。写真-10に示す。

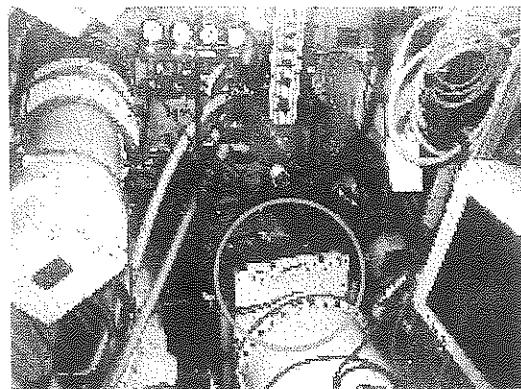


写真-9 油圧ゲート

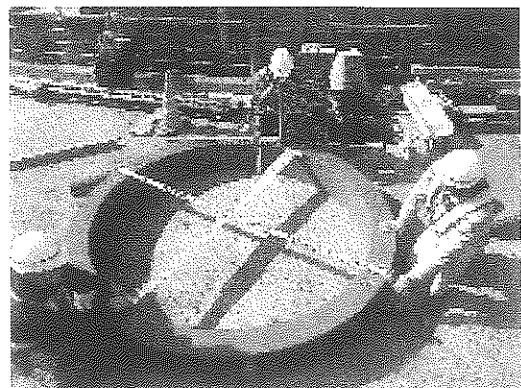


写真-10 バックリング対策

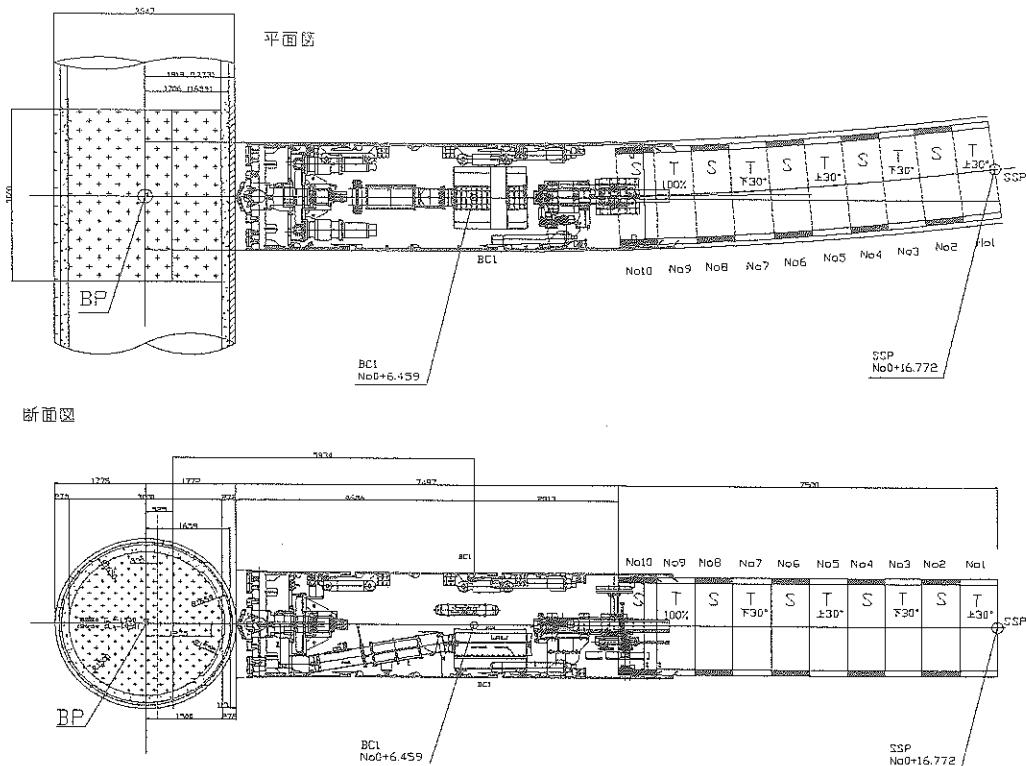


図-5 既設シールド到達図

3) テールボイドの保持への対応

通常の推進工法に比べてテールボイドが大きいことから、推進区間では、テールボイドの保持が重要な課題である。推進力低減(ES)システムにより、テールボイドに加圧注入を行った。また、地盤沈下を防止するために、路線の沈下測量を毎日実施した。

4) 曲線施工への対応

設計推進力を基に、クッション材の貼り方、使用枚数、発泡倍率を、当協会独自の考え方で選定し、施工を行った。

5) 到達部の地盤改良への対応

写真-8のように、到達部(シールド接合

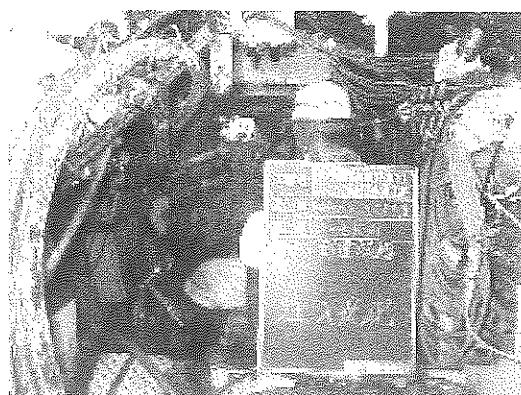


写真-11 機内注入状況

箇所)では、竹田街道と大手筋が交差するため、交通量が多く、道路上からの地盤改良は、困難であった。そのため、掘進機製作時に機内注入が可能な仕様に変更した。写真-11に注入状況を示す。

6) 既設シールド管渠の損傷防止への対応

既設シールド坑内到達部に、予め歪センサを取り付けておき、掘進圧力等によるFFUセグメントの変形や歪を常時監視する体制および連絡体制を整えた。既設シールド坑内到達部と掘進機オペレーターとの連絡については、既設シールド坑内到達部から既設シールド坑内入口までは有線通話、既設シールド坑内入口から発進立坑までは簡易無線通話、発進立坑から掘進機オペレーターまでは坑内用電話を使用し、綿密に連絡を取り合った。

既設シールド管渠手前の掘進方法として、掘進機をミリ単位で微速度制御ができるシールドジャッキを用いて、常時監視しながら速度調整の管理を行った。

既設シールド管渠に損傷を与えないために、掘進機の位置を正確に測量する必要があり、トランバース測量とジャイロコンパスを併用した。

7) FFUセグメント切削への対応

ビットの形状が有効であることと適切な切削（押し付け）速度を確認するために検証実験を行った。FFUのサンプルを使用し、最も回転速度が小さく、FFUセグメントに最初に接触するフィッシュテール部で実験を行った。押し付け速度が早くなるに連れて、切削したFFUがさざくれ状態となることから、速度は1～2 mm/min程度が妥当であった。

写真-12に切削実験状況を示す。

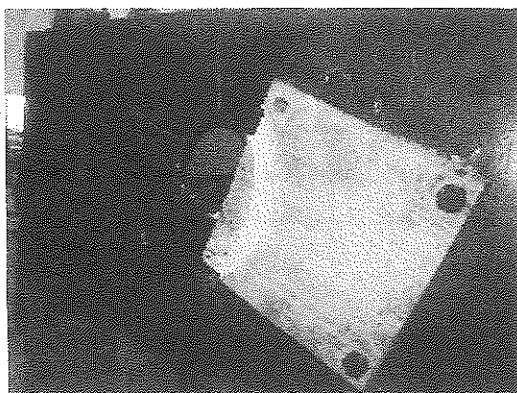


写真-12 FFU切削実験状況

既設シールド到達時、FFUセグメントを掘進機ビットで切削するため、破損を起こしたり、変位を起こさないように、予め既設シールド内に鋼製型枠で仕切を入れ、裏込材を充填し、隔壁を設け、セグメントの保護を行った。

到達後は、FFUセグメントと掘進機外殻との隙間から流入水および土砂流出を防止するために、事前に掘進機の全周に設けたグラウト孔から注入を行った。

8.5 経過と結果

想定以上に地盤が固く、日進量は低下したが、ビットの選定については、十分であったと考えられる。テールボイドの保持については、図-6の推進力変移グラフの通り、ESシステムが効果を発揮したと考えられる。設計推進力に対して、実施推進力は約90%程度となり、クッション材の潰れが良好であったため、曲線施工の課題も克服できた。

シールド区間では、曲線内でセグメントの組み立てを開始したため、セグメントが競ってしまい、組み立てに苦労した。最大の課題であるFFUセグメントの切削は、全く問題なく施工が行えた。写真-13に切削したFFUを示す。

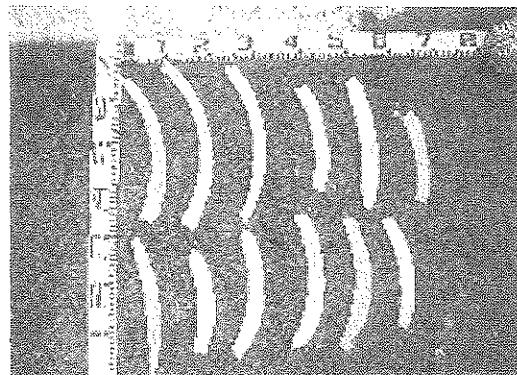


写真-13 切削したFFU

施工精度は、推進区間において、レベル-15mm～+15mm、センター右28mm～左27mmであり、シールド区間（既設シールド接合到達時）において、レベル-4mm、センター左4mmを記録した。

写真-14に掘進機搬入状況を示す。

写真-15に既設シールドへの到達状況を示す。

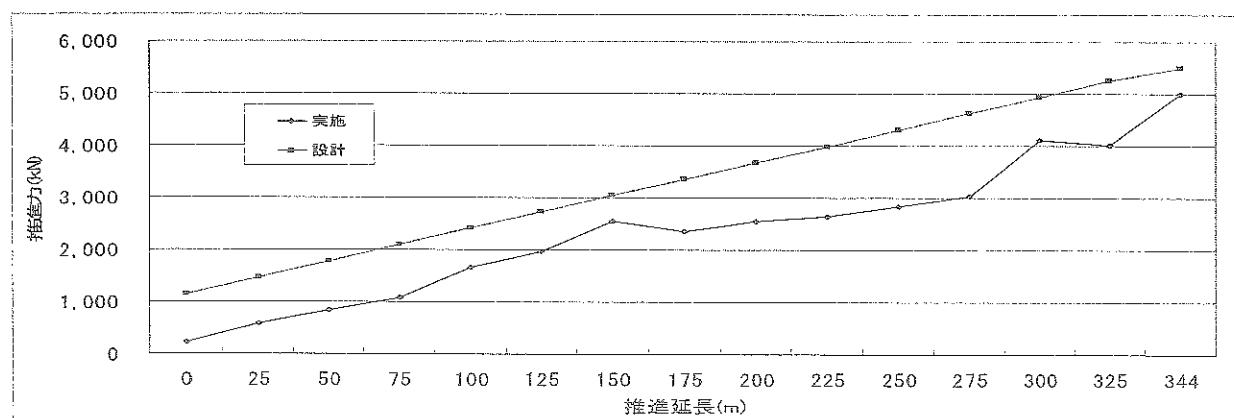


図-6 推進力変移グラフ

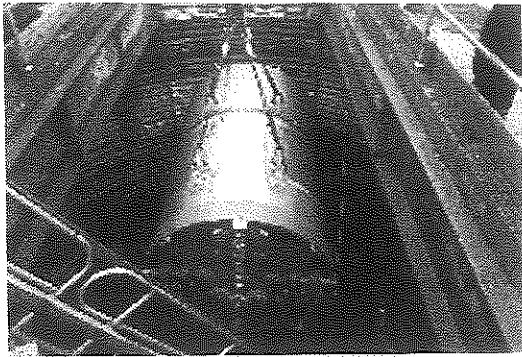


写真-14 挖進機搬入状況

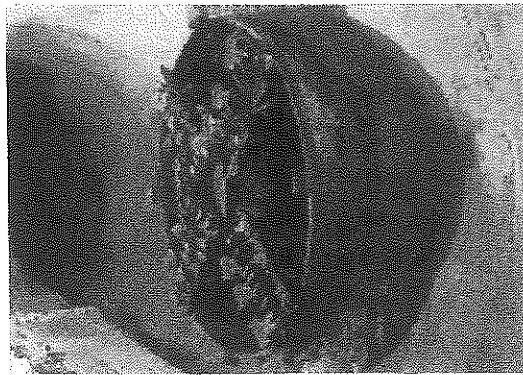


写真-15 到達状況

8.6 まとめ

既設シールド管渠への到達時に、元押しジャッキからの推進力では、掘進機までの推進力伝達のタイムラグや微動掘進が困難なために、当工法が設計採用された。シールド工法に切り替えることで、FFUセグメントへの押し付け力の管理とミリ単位での切削速度の調整が可能となり、破損することなく、無事に到達できた。

本工事では、曲線途中で推進工法からシールド工法に切り替えたため、最初のセグメントの組立てに、非常に苦労した。本工事のシールド切り替えの目的が、FFUセグメントの切削であり、シールド区間を極力少なくするために、曲線区間での切り替えとなつた。今後は、これらの対応と対策について考える必要がある。

本工事で、様々な問題点が把握できたため、今後の設計および施工に生かしていきたい。

§ 9. 今後の課題

当協会では、テールボイドの保持と排泥の吸引をテーマに開発を行っている。

9.1 新しいテールボイドの保持方法

現在、特許出願準備中のテールボイド充填材を2種類紹介する。

①弹性可塑剤

泥濃式では、2液性固結滑材（可塑剤）が一般的に使用されている。近年では、泥水式にも応用され、テールボイドの充填に効果を発揮している。推進技術が進歩し、可塑剤の開発当初には想定できなかった長距離施工が可能となつたが、可塑剤の改良は行われていない。恐らく現状の性状に満足し、施工者からの要望がなかつたためである。

当協会では、推進・シールド併用タイプにおいて、通常の推進工法に比べオーバーカットが大きいため、テールボイドの保持が課題であった。そこで、安定したテールボイドを構築するために、より強力な可塑剤が必要となり、EC剤が開発された。

EC剤は、フルキープ（可塑剤）に添加するだけで、弾性力を持たせ、ゲル体を崩壊しにくくする。また、追加注入を行っても、通常の可塑剤と異なり、分離を起こさない。写真-16、17に性状を示す。写真は、左側が通常の可塑剤、右側が弾性可塑剤とする。



写真-16 上部からの圧縮状況

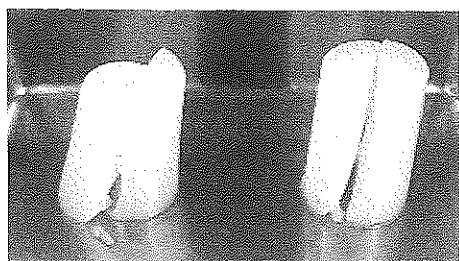


写真-17 切断状況

②テールボイド充填材

当協会では、可塑剤以外で充填効果の高い材料の開発を行っている。可塑剤は、注入時に地山と混合するために、充填状況が不明である。そこで、管内で2液を攪拌混合し、ゲ

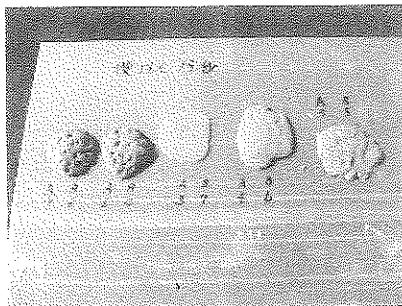


写真-18 配合比率ごとの性状

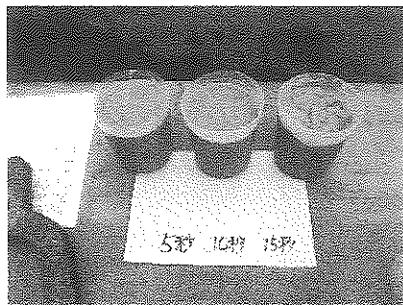


写真-19 搅拌時間ごとの性状

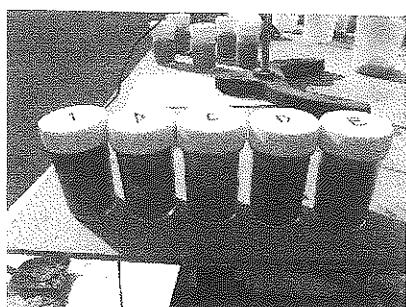


写真-20 土砂による圧密実験

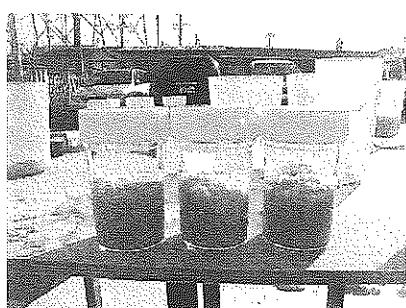


写真-21 水による希釈実験

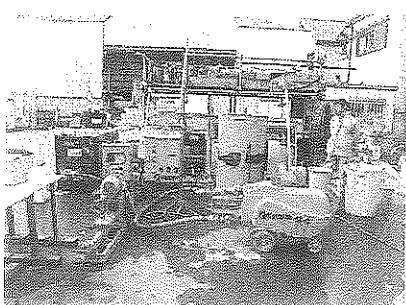


写真-22 搅拌および圧送実験

ル体のままで、直接テールボイドに注入する方式を採用した。テールボイド充填材の性状と実験状況を、写真-18～22に示す。現場の状況に応じて、配合比率や攪拌時間を設定し、確実にテールボイドを保持する。

9.2 超長距離に対応する排泥の吸引方法

排泥吸引実験および1.5kmの施工実績から、1.5km以上の排泥吸引が可能であることは立証されている。しかし、前項の排泥の吸引能力で述べたように、様々な方法の組み合わせによって、行われている。これらは、施工のノウハウのため、当協会では、確実に排泥吸引が行える方法の開発に取り組んでいる。当協会の取り組みを下記に示す。

- ①泥水材料の開発
- ②排泥パイプ内のコーティング剤
- ③排泥パイプ内の清掃用添加剤

泥水材については、標準配合、ペントナイト系、高分子系に分類される。長距離施工では、ペントナイト系または高分子系が使用されている。当協会では、これに類似した分離を起こしにくい材料を開発している。

排泥パイプは、長距離施工によって、内部の表面が劣化を起こし、排泥吸引の障害となる。内部にコーティング剤を塗布し、円滑に排泥吸引を行う。現在、塗布方法を検討中である。

排泥吸引の際に、排泥パイプには土砂が付着する。放置しておくと、土砂の水分が奪われ、排泥吸引の障害となる。一般的には、ボールを吸引し、清掃を行っている。当協会では、排泥に添加剤を加えて、ボールと同等の効果を期待している。現在、排泥との攪拌方法を検討中である。

9.3 まとめ

弾性可塑剤については、今後、積極的に現場で使用していきたい。また、テールボイド充填材については、狭隘な管内での作業となるため、攪拌および注入設備の小型化、システム化が急務である。

§ 10. おわりに

本稿では、発注者ならびに設計者に適切な設計の重要性を知っていただくために、設計における留意点やあまり公開されていない事項について紹介した。当協会では、発注者ならびに設計者に検討案件の難易度を理解・判断していただきたいと切望する。事務処理により設計条件を数値化することは可能であるが、数値化できない部分も存在する。設計における留意点で述べたように、施工地域・地形により、難易度の差が生じる。これが数値化できない部分である。発注者ならびに設計者に施工の難易度を理解していただければ、数値化できない部分を補うことも可能である。

当協会では、近隣施工の施工情報を提供していただくことが有効な方法であると考えており、ここで提案したい。一部の市町村では困難な施工を強いられており、施工の難易度を十分に把握。理解している場合もあるので、もう一步踏み込み施工情報としてまとめていただきたい。当協会は、検討に必要な書類ができるだけ多く提供していただくことを望んでいる。

また、発注者ならびに設計者には、経済性の観点だけではなく、施工性・安全性の向上、優れた技術の導入を積極的に行っていただきたい。今回、設計者の観点から、適切な設計について解説したが、現在の建設業界の冷え

込みの中で、生き残るために、技術力の向上および新たな技術の開発が必須である。当協会では、今後の課題で挙げた新しいテールボイドの保持方法、超長距離に対応する排泥の吸引方法について、早急に開発したい。

最後に、本稿の作成で資料の提供をいただきました関係各社に、心から感謝致します。

参考文献

1. 下水道推進工法の指針と解説（財）日本下水道協会
2. 推進工法用設計積算要領「泥濃式推進工法編」（公社）日本推進技術協会発行
3. 推進工法用設計積算要領「推進工法応用編（長距離・曲線推進）」（社）日本下水道管渠推進技術協会発行
4. 曲線推進時における推進管軸方向耐荷力の検証（社）日本下水道管渠推進技術協会発行
5. 第31回「最新の推進工法施工技術」講習会テキスト N.P.R（日本プロジェクト・リサーチ）
6. 第35回「最新の推進工法施工技術」講習会テキスト N.P.R（日本プロジェクト・リサーチ）
7. ECO SPEED SHIELD 工法 設計積算資料（推進タイプ）