

投稿

推進工法による世界記録への挑戦

佐々木 理務

中日本建設コンサルタント(株)
水工技術本部第3部



1. はじめに

最近の下水道管渠は、特に大都市においては大口径管や長距離施工が当然のように計画されている。

その理由としては、大雨による浸水被害の軽減策として大口径（ ϕ 3.0～10.0m程）の雨水貯留管が計画されることや、過密する都市部では道路部に立坑を建設することが困難なため、必然的に長距離工法が選択されるなどが挙げられる。

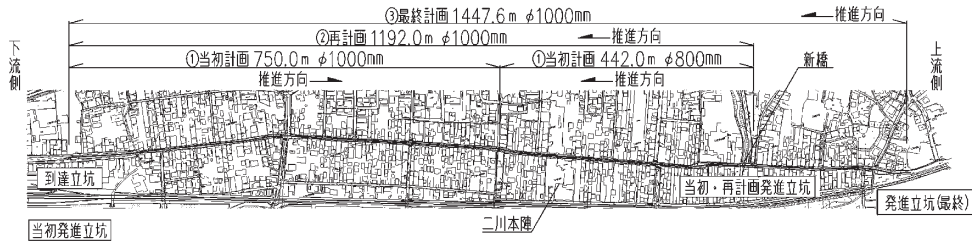
今回の設計路線は、豊橋市の中島処理場に至る汚水幹線（梅田第1汚水幹線）の上流区間の、市街地の東端に位置し、宿場町の面影を残す旧東海道沿いに計画された。その街道には現在でも二川本陣資料館や旅籠が立ち並び、歴史と文化の香りを感じさせる地域となっている。設計に際しては、古い町並みや文化施設、地域住民の日常生活に与える影響を最小限に抑えるとともに、経済的な施工法を選択することが絶対条件であった。このような条件下で様々な検討を行った結果、表題に示す「推進工法による世界記録への挑戦」が誕生した。以下に、その記録への挑戦に至る経緯及び検討内容を記す。



写真-1 一般全景



写真-2 新橋



図一 計画平面図 (①当初計画、②再計画、③最終計画)

2. 計画の概要

2.1 基本諸元

必要管径：φ 250～600mm

(下水道設計の流下能力)

路線条件：道路幅員 (4.5～5.0m)、

古い町並みで空地は少ない

(旧東海道) (写真一1)

支障物件：新橋 (橋長9.0m) 基礎杭 (写真一2)

土質条件：切羽部はN値50以上の砂礫層

(最大礫径φ 150～200mm)

：管上部はN値20～30前後の砂礫層
とやや緩くなる。

2.2 計画の経緯

本設計は、平成15年度に基本設計を行い、小口径管～大口径管推進までを組み合わせた何ケースかの検討を実施した。その時点では、経済性を優先するならば必要口径による小口径推進工法にて施工することが最善であるとの結論を得た。しかし、旧東海道の古い町並みを有する当該路線では、道路上に何箇所もの立坑を設置することは、地域住民の同意を得ることが難しい状況にあった。

そこで、実施設計に着手するに際し基本設計の見直しを行い、シールド工法も含めた長距離工法の検討を行った。

当初の計画では、2スパン施工で、750m (φ 1000mm) を上流に、442m (φ 800mm) を下流に推進し、中間に両到達を計画した。しかし、下流側の発進基地の借地ができなくなり、1スパンで1192m (φ 1000mm) の推進計画の変更となる。再発進立坑基地である駐車場からの施

工は、市街地のため、1日8時間という制約を受けた。1スパンで1000mを越す施工は、周辺環境から施工に際して、時間的な制約を受けると、不利となることから、1日16時間の施工が可能な用地の確保を検討した。再度の調査により、上流部の空き地が使用できることを確認するが、推進延長は大幅に増加し、1450mの超長距離となった。

一般的には、1450mの施工延長であればシールド工法の採用となるが、ここでは様々な検討の結果、最終的には超長距離推進工法 (CMT工法) を採用することとなった。

しかし、採用に際しては計算上で求められる結論だけでは不安な要素も多く、発注に至るまでに解決すべき諸課題も残された。

3. トンネル工法の検討

3.1 工法の比較

①確実性、②安全性、③施工性、④リスクの最小、⑤経済性を考え、都市トンネル工法より、長距離推進・シールド・ミニシールド工法の3工法にて再検討を行った。その結果を表一に示す。

3.2 工法の選定

各工法の比較の結果、施工距離ではミニシールド工法が最適であるが、橋梁の基礎杭の処理ができなく確実性に欠ける。確実性ではシールド工法となるが、経済性・施工日数等を総合的に判断して、推進工法での超長距離化を最優先工法として検討を行う事になった。ただし、施工延長や杭処理については主な施工法である各推進工法の何れにも長短があり、以下に超長距離化に向けて検討を行った。

表一 各工法の比較

項目	シールド工法	ミニシールド工法	長距離推進工法
施工の最小径 (ϕ ・mm)	1200	1000(機械式)	1000(中押し)
掘進機外径 (ϕ ・mm)	1930	1334	1240
問題点	施工延長	○	△
	杭処理	○	×
日進量 (m/日)	4.5	5.6	8.0
掘進日数 (日・箇月)	322・11	256・9	180・6
掘削排土量 (m^3)	4233	2022	1747
掘進費・経費抜き (億円)	約9.3	約5.9	約3.8
総合判断	△	×	○

4. 超長距離推進工法の検討

4.1 課題の抽出

これまで前例がない程の超長距離でも設計上は可能と判断できたが、1000m以上の推進距離は、国内でも過去の実績は少なく、本計画を進めるに当り、発注者と協議の結果、各推進協会やメーカ、超長距離推進に経験のある自治体へのヒアリングの実施も行い、検討すべき課題の抽出を行った。

検討課題は以下に示すとおりである。

①管と地山の摩擦抵抗

推進工法は、発進部より管を押し出すため、管と地山の周辺摩擦抵抗が管の軸強度を上回る位置が施工限界点となる

②推進力

1450mの超長距離推進が可能か

③排泥の可能距離

掘削土の排泥可能な距離も施工延長の対象となる。

④地盤沈下と切羽の安定

⑤支障物の対応とビット交換

⑥滑材の劣化と裏込め注入の確実性

4.2 施工法の検討

推進工法は、次の3工法、泥水工法・泥土圧工法・泥濃工法より選定を行った。主な検討項目を次に示す。

(1) 管と地山の摩擦力の低減と滑材効果

管と地山の摩擦力は、一般に、地山の内部摩擦角 μ' と粘着力 C' が、全推進長の周辺摩擦抵抗として作用する。管と地山の摩擦力の低減には滑材の働きがある。

【滑材の効果】

滑材は1液型、混合型、固結型がある。滑材の有効性としては、実推進力の40～60%程度の低減が可能である。(本誌1992年11月号Vol.6 No.11「特集/推進工法に用いる滑材の効果とデータ」参照)現在の公的な長距離推進式もそれを活用したと考えられる。

【縁切り層の構築】

オーバカッタを行い、余掘り分のテールボイドに滑材を強制充填させ、上載荷重の影響の減少と、地山の摩擦および側土圧を遮断する縁切り層の構築が必要である。

超長距離推進には、縁切り層と推進管との間に泥水、または二次滑材が入り込み、推進管が浮く状態にする浮き管推進が重要であり、周辺摩擦抵抗力が著しく低下する。

滑材の中で確実に、縁切り層を構築できる滑材は固結型である。ただし、固結型滑材の欠点は、施工中の補充が困難であり、施工完了後の裏込め注入もでき難い事と、永年の保持は不可能で、やがて消失し、その結果、空洞化が生ずる。その固結型滑材の発展したものに、アルティクレイ、管周混合型、土圧緩み抑制材があるが、アルティクレイと管周混合型は永年の保持と裏込め注入は不明確と考えられた。自然粘土を使用した土圧緩み抑制材は、永年の保持と裏込め注入も可能であり、通常、滑材は推進管の移動摩擦と地中拡散で減少するが、この土圧緩み抑制材は、その補充も可能であった。

(2) 推進力の計算

長距離推進には、元押しジャッキだけでは限界があるため、中押しジャッキの検討が必要となる。

【中押しジャッキ使用による計算】

中押しジャッキの装着は、管内径φ1000mm以上が必要で、4段まで使用可能である。採用できる工法は、泥水式と泥土圧式で泥濃式は一般に採用されていない。長距離推進式より、管周辺摩擦抵抗は、 $\tau_a = 2.0 \sim 3.0$ と記載される中から、一般的には中間値の $\tau_a = 2.5$ を使用する事が多いが、礫率が60%と高いため、安全を考慮し、 $\tau_a = 2.69$ を用い（CMT工法技術資料より）。中押し4段（1段当たり30t×10本=300t×4段）を使用、元押し600t、総推進力1800tで計算を行った。その結果でも、約1480m迄の施工が可能となった。

(3) 排泥方式と中継ポンプの使用

機構的に泥水式と泥土圧式に排泥用の中継ポンプが可能であるが、泥濃式は真空排土のため、中継ポンプが一般に使用できず、排泥距離は500～600mが限度であり、特殊な中継ポンプを採用しても1000m以上の推進は難しい。

【中継ポンプの計算】

通常は、吸引式で計算を行う。従って、キャビテーションで中継ポンプの配置が決まり、設計延長より必要台数は8台以上になった。ポンプの押し出す揚程能力として配置を考え、計算を行うと15kwが5台で可能になる。

また、1450mで管路勾配は1.8%の下りにあるため、2.6mの水位負荷が作用するが、それも中継ポンプの設置で対応可能となった。

(4) 地盤沈下と切羽の安定

切羽のカッタ構造はスポーク型と面板型が一般である。最も懸念されたのが、地盤沈下による

近接家屋への影響であった。

【砂礫土に対する切羽の対応】

切羽の崩壊を泥水や高濃度泥水だけで抑え切ることが困難であり、当然、掘進機の面板による切羽の安定を加味する必要性もあり、また砂礫土では切羽の攪乱による崩落も想定された。土質柱状図によると、切羽部分のN値は高いが、その上部は緩くなる傾向にある。N値が低い土質は緩みやすく、一端緩めば過剰取り込みの原因となり、地盤沈下につながる。従って、切羽の安定性を重視し、攪乱しにくい平滑な面板構造を採用した。

(5) 支障物の対応とビット交換

路線上に立坑が築造できないことから、支障物は機内からの処理が可能で、かつビット交換時期の確認・交換も機内からできる機種が必要であった。

(6) 滑材の劣化と裏込注入

滑材の劣化による不等沈下の防止には、裏込注入が確実にできる工法の選択が必要となった。使用した土圧緩み抑制材は、裏込め注入の確実性も高く、置換できなかった材料は裏込め注入で加圧密粘土となり永久に残存する。それが、当推進区間には最良の滑材と判断した理由である。

4.3 施工法の決定

泥水工法、泥土圧工法、泥濃工法の3工法を表一2にまとめる。

以上の検討結果、泥水工法が、最適と判断された。泥水工法の中でアルテミット、スーパーエル、ユニコーンロング工法等があるが、障害物の撤去と切削ビットの交換が可能で、摩耗の著しい、ローラビットも機内より交換が可能な、CMT工法を採用した。

表一2 施工可能工法の比較

項目	泥水工法	泥土圧工法	泥濃工法
支持方式	周辺・センタ	センタ	センタ
長距離推進式	○	△	○
滑材	○	△	△
切羽機構	面板型○	スポーク型△	スポーク型△
排泥方式	圧送ポンプ○	圧送ポンプ○	真空ポンプ△
ビット交換 ※	○	×	×
杭処理 ※	一部に可○	×	×
総合判断	○	×	×

※は機内処理を条件とする

5. 設計の検討と対策

(1) 2管押しと作業効率

発進基地に余裕があったので、立坑を通常の7.2mから10.8mに変更し、推進管を2本連結させる施工を、ある事例を参考に、設計に取り入れた。その結果、推進効率が向上し、経済性も高くなった。用地に余裕があれば、今後、この方法の適用性を考慮すべきであろう。また、16時間施工により、2倍の施工効率となり、コストの低減にもつながった（表-3、4）。

表-3 1管押しと2管押しの比較

項目	1管押し	2管押し
日進量（16時間施工）（m/日）	11.3	12.5
1m当たり、施工費（万円/m）	9.6	8.6

表-4 8時間と16時間の比較

項目	8時間施工	16時間施工
日進量（m/日）	6.3	12.5
1m当たり施工費（万円/m）	14.0	8.6

※日進量は推進工のみ、関連工種や不稼働率も除外

(2) 曲線推進の管の配置計画と管種の使用計画

曲線に対する、推進管の許容耐荷力：R=500mの管の目開きS1は6mmであり、曲線クッションが無ければ局所の点加圧となり管が座屈する。カーブ推進によるクッション材は図-2のよ

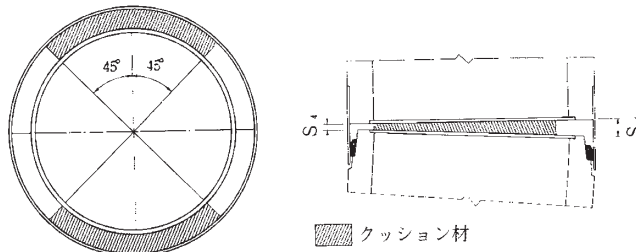


図-2 曲線用クッション材

表-5 管種と管耐荷力について

管種	管耐荷力KN	管耐荷力（半断面）と布設本数
50N/mm ² （500kg/cm ² ） 最先端スパンに可能	全断面3766.1 半断面1883.1	(1883.1 - 499) / 11.216 = 123.40m区間まで使用可能。 それ以降は70N/mm ² 管、以上が必要となる
70N/mm ² （700kg/cm ² ） 2スパン目以降に使用	全断面5069.7 半断面2534.9	70N/mm ² の管耐荷力（2534.9 - 499） ÷ 11.216 = 181.5m区間までが必要となる
90N/mm ² （900kg/cm ² ） 上記から元押し区間迄	全断面6518.2 半断面3259.1	残り延長、1447.6m - 181.5m = 1266.1m 残りの延長の管種は、90N/mm ² を使用する事になる

うに上下に配置され、内側の局所接点をなくし、座屈破壊を防ぐ。但し、支圧面は1/2断面となり、管体に作用する全推進力は2倍になり、その負荷推進力に可能な推進管が必要となる。

曲線部の管耐荷力による推進延長は表-5に示すとおりである。

$$\text{推進延長} = (\text{管耐荷力 } \delta ca - \text{初期抵抗 } F_0)$$

$$\div \text{周辺抵抗 } \tau a \cdot Bc \cdot \pi$$

$$\text{※ } F_0 = 499 \text{ KN}$$

曲線施工による施工は、半断面に推進力が作用し、全断面と半断面の関係は次のようになった。

中押しジャッキ間の推進延長は、中押しジャッキの最大推進力で延長を決定する。3000KNを上回る管耐力は90N/mm²だけになり、1266mの区間に90N/mm²管（JSWAS A-8下水道推進工法用ガラス繊維鉄筋コンクリート管、以下、SSP管）の採用を計画する。

(3) マニユキアの使用

管体に滑材や泥水の水分が吸水されることで、泥水が固体化し管体に張り付くと言われる。推進延長が500～600mを越すと推進力が急激に増加する場合はその付着作用が原因と考える。その対応はマニユキアで行った。500m以上には耐久性に富むシリコン系を、500m以下にはエポキシ系を使用した。

(4) 始動掘進時の滑材の影響

16時間施工は、昼夜連続作業となり、実動作業8時間＋休憩1時間＋交代3時間の2交替の繰り返しとなる。推進停止が長くなるほど、滑材の有効性も低下し、停止からの稼動を始動掘進（初期掘進）と言ひ、推進力負荷も大きくなり、昼夜管（16時間）施工が望ましいと判断した。

表－6 始動掘進（初期掘進）による推力の負荷

推進停止時間	抵抗値
3日以上	60%以上の推力の割増
24時間（1日）以上	30%～50%以上の推力の割増
8時間程度	10～20%程度の推力の割増
4時間以下	0～0.5%程度の推力の割増

【環境への配慮】

排泥産廃とCO₂の抑制に留意した。排泥の再循環と再利用で、低資源化とバキューム車の走行台数を減少させ、渋滞の緩和による、CO₂の抑制を考慮した。確実にリサイクル機構を持つ工法も泥水方式であった。

6. 今回の経験から感じたこと

(1) 施工への対応

CMT工法の予想以上の切削能力と切羽の安定性、土圧緩み抑制材による、浮き管推進の確実性。それに加えてSSP管の信頼性が無ければ、この施工は不可能であったと考える。

(2) 施工管径への配慮と施工延長

施工管径は中押し可能なφ1000mmで設計を行ったが、机上設計の予測以上に、現場施工は厳しいと感じられた。推進工法の形式は、各施工法で異なるが、測量・掘進機の点検・巨礫の取り出し等から、管内作業を人間が行う事が多く、長距離施工は厳しい面が多い。500mを越える場合はあらゆる条件予測を設計時に考察する必要性を感じた。

(3) 距離が示す不安

以前は、400mを越えると、マシンの熱で光波が曲がり、換気設備として冷却装置を加えた。今回は、電力の低下に合わせて、どの様なトラブル

が生ずるかは予測もできなかった。未知数に達した1200m前後に、予想外であった排泥ポンプの故障が、次々に生じた。主に砂礫土の長時間稼動による、ポンプケーシングと排泥管の摩耗によって泥水を管内に吹き飛ばした。1420mを越え、残り20mの距離で、機内ポンプ筒の排泥ポンプが同様に停止した。設計時点で切削ビットの交換は見込んであったが、同時にポンプの摩耗損傷に対策を考慮すべきであった。

7. 施工延長と今後の課題

地域の影響や市民の安全性を含め、工事支障を優先させたことが、1447.6mの記録的な延長になった。従って、あくまでも結果として長距離の記録が付随したに過ぎないと考えている。

到達するまでは、不安も有ったが、到達するとやはり推進工法は施工性が良く、経済性に優れる事が実感できた。今後は、以下のような事を期待する。

(1) 縁切り層を形成する滑材

注入後に即座に裏込め材に変わり、永久に劣化せずに硬化し、その層と推進管の僅かな間に、さらに二次滑材の注入が可能なシステムなら、推進力は大きく低減できると考える。

(2) カーブ推進による半断面推進

曲線用のパッキンを用いた、半断面推進は、推進管に厳しい軸方向推進力が作用する。ある管材メーカーによる圧縮試験結果でも管の許容耐力は半減していたことを認識している。したがって、パッキンの開発もさることながら、推進管の両端部を強力な鉄筋で補強するか、金属プレートを埋め込んで、軸力を分散させる対策等も望まれる。提案はされているが製品への動向は現在のところ見られない。但し、約2倍の軸強度を持つSSP管を使用する事は、安全で望ましいと実感している。この管がもっと多用され、安価になる事を望みたい。

(3) レジン管に対し

点加圧が生じた場合には、コンクリート管は局

部座屈ですむが、高強度のレジン管はガラスのように、亀裂が走り、その部位だけのクラックでは収まらない可能性が高い。その点を今後の課題と考える。

(4) 掘進機の切羽構造

地山を攪乱しない事が地盤沈下に最適である。今回は面板形を採用したが、切削効率の良いスポーク形式に、泥土圧式のようにリングカッタの使用を試みる等、地山を乱さずに切削可能な、切羽構造の開発研究を望みたい。

(5) 管内測量

曲線を含めた推進施工の測量は狭い管内では非常に困難を極める。トランシットが30台以上も連続測距する困難を考えれば、ジャイロの検討をどのように設計に反映させるかも課題である。

(6) 増径した管路の有効利用

小口径管を増径した管渠の余裕率を管内貯留の利用や中継ポンプの運転効率に反映させる等、有効活用を勘案した下水管渠計画を期待する。

(7) 設計基準

設計者が参考にする設計指針や歩掛り等においても、割愛が多くなった。以前のように多段中押しの公的積算資料も復活して欲しいと考える。また実情に見合った有効滑材や余掘り量の適正化の定義等も含め、実施工に見合った積算基準が示されれば、よりの確な設計が可能であり、施工に反映されると思われる。以上は、(社)日本下水道協会に要望を切にお願いしたいと考える。

最後に、豊橋市の下水道担当職員の方々に至りまして、設計をよく理解して頂き、良き判断を頂いた事が、この施工に結びついたと固く信じている。また、施工担当の鉄建建設(株)、推進担当の(株)姫野組、掘進機と設備を製作した(株)推研の高度な技術力と技能に加え、栗本コンクリート工業(株)と日本ゼニスパイプ(株)の高強度・高精度のSSP管が有ってこそ、ここに超ロングスパンの推進が無事に完了したことに深く感謝し、敬意を表す次第である。