

重要埋設管直下でのパイプーフ工法による地下鉄構造物の築造

The Construction of Box. C. for Subway by the Pipe-Roof Method under Significant Underground Installations

村上 進* 坂本 亮*
Susumu Murakami Akira Sakamoto
草野 孝三** 小宮 喜一**
Kozo Kusano Yoshikazu Komiya

要 約

重要埋設管が密集する箇所での地下鉄（ボックスカルバート）の築造にあたり、土留め杭が打設できないため非開削工法により施工することとなった。工法の比較検討を行った結果、パイプーフ工法を採用した。本埋設管の一部は京都市の幹線水道管であり、その重要性から施工時の許容沈下量は10mmと非常に厳しい管理値であった。施工環境の制約からパイプ推進方法、支保工支持杭等実績の少ない工法を採用せざるを得なかったが、水道管に影響を与えることなく施工を完了することができた。

本報は、当該工法の設計・施工および施工時の埋設管の計測管理について述べるものである。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 概要
- § 3. 施工順序
- § 4. パイプーフ工の設計
- § 5. パイプ推進工
- § 6. 坑内掘削工および支持杭打設工
- § 7. 地盤および埋設管計測管理
- § 8. あとがき

§ 1. はじめに

京都市地下鉄烏丸線延伸工事は、現在営業中の北山駅より京都国際会館等へのアクセス機能を強化するため建

設が計画されたものであり、北山駅から国際会館を4工区に分けて施工されている。

当工区は北山駅より約627mを開削工法により施工するものであるが、工区内の一部、宝ヶ池交差点付近には上下水道の重要埋設管が集中しており、土留め杭打設のスペースもなく、開削工法の採用が極めて困難であった。

そこで、開削工法に替わる工法として、①パイプーフ工法、②フロンテジャッキング工法、③URT工法、④PCR工法について比較検討を行った。工法選定のポイントは、施工中における重要埋設管への影響を小さくすることであり、これに、工期、経済性等を勘案して①の工法を採用することにした。

一般に、パイプーフ工法は、線路直下等の比較的土被りが小さい箇所での採用が多い。当該工事では、土被りが約7mと大きく、また地下水位が高い。このような悪条件下での施工実績は非常に少ない。厳しい条件の中、

*関西(支)北山(出)

**土木設計部設計課

慎重に設計・施工を行い、重要埋設管へ影響を与えずに躯体構築を完了することができた。本文では、主に、パイプ推進工、導坑掘削、支保工支持形式および埋設管計測管理に関して報告する。

§ 2. 概要

2-1 工事概要

| | |
|------|-----------------------------|
| 工事件名 | 高速鉄道烏丸線国際会館・北山間建設工事（北山通工区） |
| 企業先 | 京都市交通局 |
| 施工 | 西松・五洋・三井・日本国土・岡野特定建設工事共同企業体 |
| 工期 | 平成5年7月8日～平成9年3月7日 |
| 工事内容 | 施工延長 L=627m |
| 掘削幅 | 9.9m～14.5m |
| 掘削深さ | 13.0m～16.6m |

当工区は、土留め壁をSMWとした開削工法によって地下鉄構造物（一般線路部）を築造するものである。重要埋設管が存在する交差点部の約44m区間についてはパイプーフ工法による非開削工法で施工を行った。

非開削区間の平面図を図-1に、横断面図を図-2に示す。また、工事全体の主要数量を表-1に示す。

2-2 土質概要

京都市街地は一般に均一な砂礫地盤であるが、当工区の地盤はこれと異なり、加茂川と高野川に挟まれた場所であることから、砂礫を主体とした扇状地性堆積物が分布している。

これらの地層は洪積層～沖積初期層で、上部に砂礫を主体とした沖積層が存在し、φ150mm程度の玉石を多く含むものである。地下水位はGL-3.5mと高く、透水係数も大きい。

非開削工法施工場所の柱状図を図-2に示す。

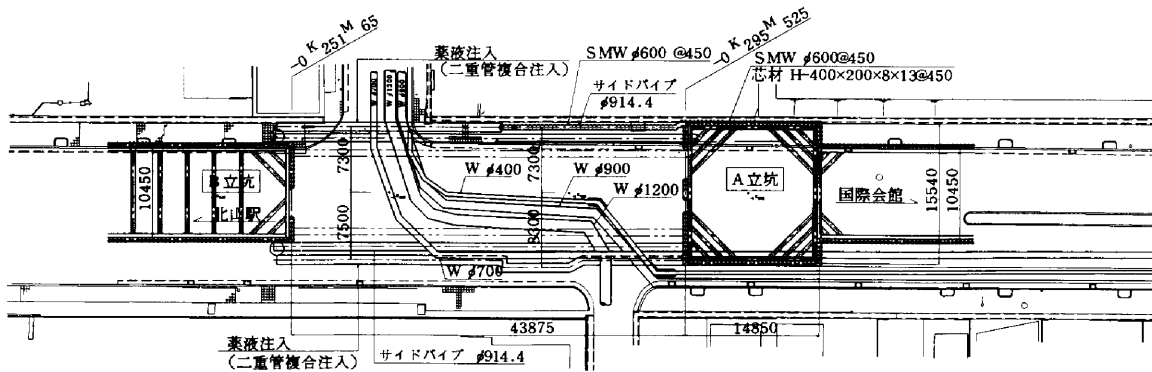


図-1 平面図

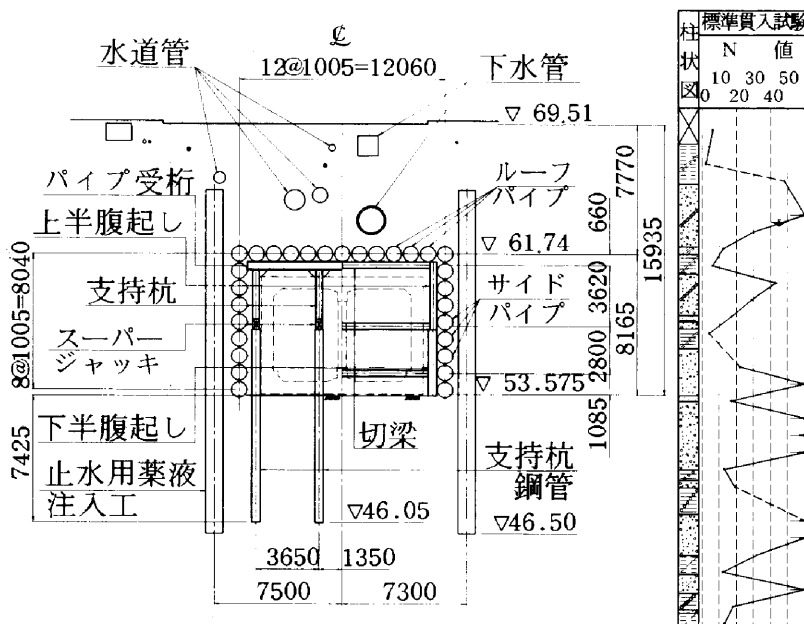


図-2 横断面図

表-1 主要数量

| 工種 | 単位 | 数量 |
|----------------|-----------------|--------|
| 鋼杭・鋼支柱工 | 本 | 285 |
| 土留杭工 (SMW) | 延m ² | 23,659 |
| 路面覆工 | m ² | 6,861 |
| 支保工 | 延m ² | 29,293 |
| 土工 | m ³ | 93,752 |
| 躯体コンクリート工 | m ³ | 15,549 |
| 鉄筋工 | t | 1,268 |
| 防水工 | m ² | 21,320 |
| 道路仮復旧工 | m ² | 6,861 |
| 重要埋設物アンダーピニング工 | 式 | 1 |

§ 3. 施工順序

施工順序図を図-3に示す。

§ 4. パイプルーフ工の設計

4-1 使用部材

表-2にパイプルーフ工法の使用部材を示す。

表-2 使用部材

| 名称 | 部材 |
|------------------|---|
| パイプ | ルーフパイプ $\phi 914.4 \quad t=12\text{mm}$ |
| | サイドパイプ $\phi 914.4 \quad t=12\text{mm}$ |
| 上半支保工 間隔1.25m | パイプ受桁 H-350, H-400 (交互) |
| | 下部水平材 H-350, H-400 (交互) |
| | 鉛直材 H-300 |
| 下半支保工 間隔 2.5m | パイプ受桁 H-418×407×20×30 |
| | 切ばり H-400 |
| | 鉛直材 H-400 |
| | 支柱 H-400 |
| 杭 | $\phi 508 \quad t=12.7\text{mm}$ |

4-2 上半掘削時

上半掘削は、掘削～支保工設置の繰返し施工となる。

ルーフパイプの検討は、ルーフパイプを上半支保工および地盤で支持された梁として逐次解析を行った。

逐次解析は、掘削～支保工設置の繰返しを考慮し、断面力・変位の重ね合わせを自動的に行う当社開発のプログラムにより行い、支保工および地盤はバネ支承として考えた。

図-4に上半掘削時のルーフパイプの解析モデルを示す。

サイドパイプについても同様に、上半支保工および地盤で支持された梁として逐次解析を行った。

図-4からもわかるように上半掘削時の切羽の勾配が

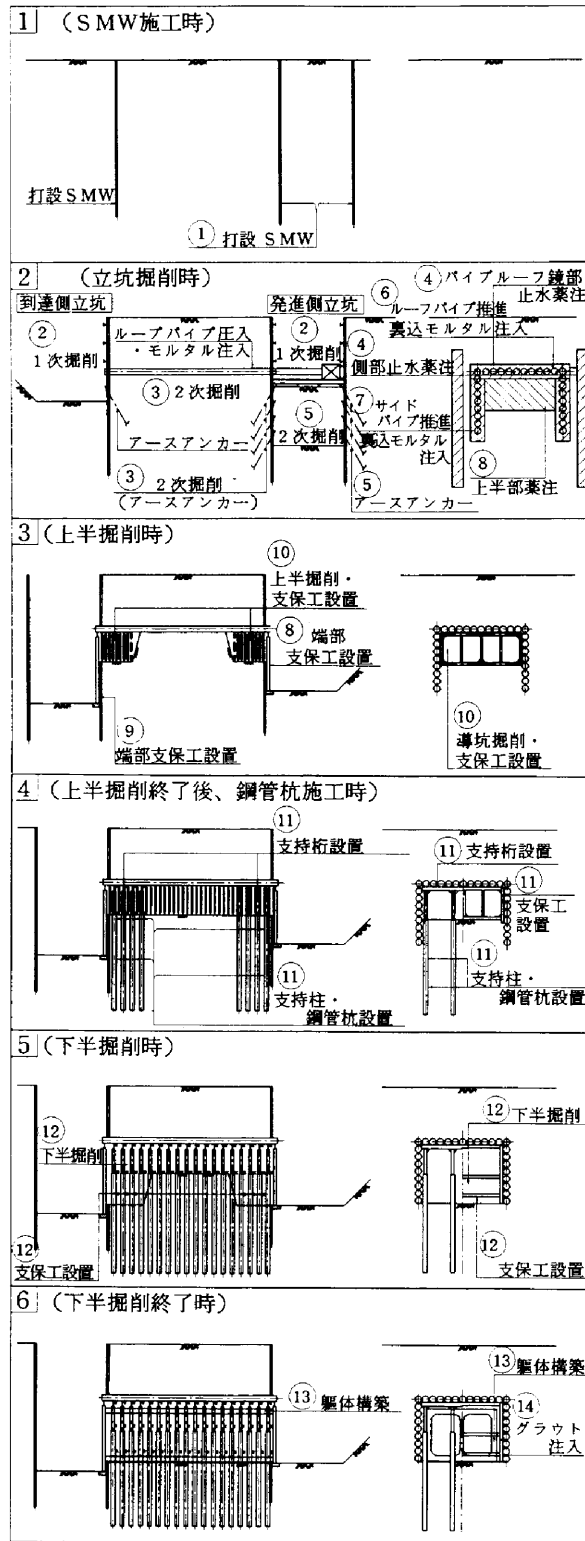


図-3 施工順序図

緩くなるとルーフパイプのスパンが長くなり、応力・変位ともに不利になる。

土質試験結果から上半掘削対象層は、礫分が主体であり、細粒分含有率が小さい。したがって、切羽の法勾配をたてるため、薬液注入による地盤強化を図り切羽の安

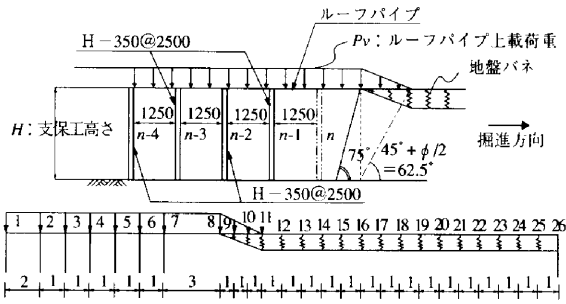


図-4 パイプルーフの解析モデル

定を保持した。

4-3 受替え時

上半掘削完了後、ルーフパイプ上部荷重をすべて支持杭により受け替えた。この時のルーフパイプの検討は、支持杭をバネ支承とした連続梁として検討した。

4-4 下半掘削時

受替え後の下半掘削時は、上半掘削時に設置した支保工の内、H-350@2500の支保工を撤去しながら、もう1組のH-400@2500の支保工をそのまま利用し、下方に継ぎ足した。

上半掘削時と同様にサイドパイプの検討は、下半断面部分の支保工および地盤で支持された梁として逐次解析を行った。

4-5 検討結果

4-2~4-4の検討結果のうち、埋設管の沈下に影響のあるルーフパイプおよびサイドパイプの変位を表-3に示す。

表-3 パイプの変位

| | 掘削時変位 δ_1 (mm) | 受替時変位 δ_2 (mm) | 最終変位 $\Sigma \delta$ (mm) |
|--------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|
| ルーフパイプ | 8.7 | 0.9 | 9.6 |
| サイドパイプ | 23.0 | — | 23.0 |

§ 5. パイプ推進工

5-1 パイプ推進工法の選定

パイプルーフの上部には重要埋設管が位置しているため、パイプ推進時にこれらの埋設管に影響を与えないことが工法選定のポイントである。特に、京都市の幹線水道管に対しては10mmという厳しい許容沈下量を求められた。また、パイプを推進する地盤は、推進工事において種々の問題を生じやすい帯水層であり、しかも、大径の玉石を含む砂礫層が中心となっている。さらに、推進延

表-4 パイプ推進工法比較表

| 工 法 | 埋設管 影響対策 | 地下水対策 | 玉石対策 | 工期 | 工費 | 評価 |
|--------------------------------|-------------|-------|------|----|----|----|
| 全土質対応型泥水加压工法 (アングルモルソーバー工法) | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 刃口推進工法+薬液注入防護 | △ | △ | △ | × | △ | × |
| オーガ推進工法+薬液注入防護 | △ | △ | × | × | ○ | × |

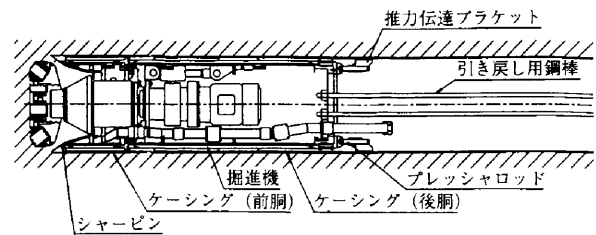
長も約44mと長く、極めて厳しい施工条件下にある。これらの施工条件を考慮し、工法の比較検討(表-4参照)を行った結果、全土質対応型泥水加压推進工法を採用した。

5-2 パイプルーフ推進工

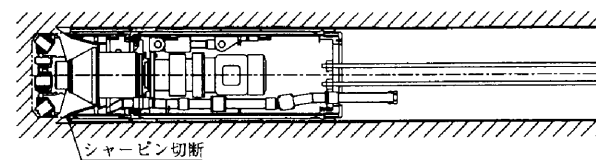
(1) パイプ推進制約の対策工

図-1に示す立坑の平面形状の制約から、サイドパイプおよび一部のルーフパイプの推進はA立坑からとした。また、残りのルーフパイプはB立坑からの施工とした。

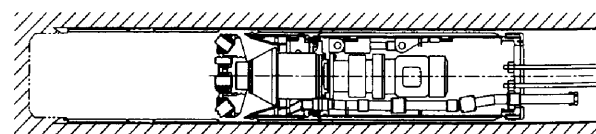
A立坑からの推進は、掘削機がB立坑に到達できず、土中内で推進完了となる。したがって、掘削機を推進完了したパイプ内から回収する必要がある。このため、種々の実掘削機を使用した引き戻し実験を行い、掘削機を引き戻す施工法を確立した。施工要領を図-5に示す。



- 掘削機の姿勢を水平な状態にする。
- プレッシャロッドを緩める。
- 推力伝達ブラケットを切り落とす。
(溶接部で切断しグラインダで突起部が無くなるように仕上げる。)
- 引き戻し用鋼棒を取り付ける。



- 掘削機を元押し装置によって坑口側へ引き戻すとケーシング(前胴)の後端が、ケーシング(後胴)の前端に当りシャーピンが切断され掘削機とケーシング(前胴)が分離される。



- さらに掘削機を引き戻し坑口にて掘削機を回収する。

図-5 引き戻し可能な掘削機によるパイプ推進の施工手順図

(2) 発進・到達防護工

発進・到達防護工として、パイプ外側より1.0m、厚さ1.5mを対象とした薬液注入を行うとともに、推進完了が土中となるサイドパイプについては、到達側にCJG柱φ1,600を2本施工した。

(3) 発進架台および推進機の据付け

A立坑側については、サイドパイプ施工が主体であるため、鉛直に移動可能な昇降式架台を設置した。

B立坑側については、ルーフパイプのみであるため、水平移動可能なトラバースを設置した。

架台の上にレール(H-300×300)を推進勾配に合わせて敷き、元押し油圧ジャッキの固定、推進機の据付けを行った。

(4) 鏡切りおよび発進坑口工

坑口はSMWで施工してあるため、人力でモルタル壁を研り取り、芯材(H鋼)を鋼管の大きさに合わせて切断した。

鏡切り完了後、すみやかに掘進機を地山に押し当て鉄板型枠を取り付けモルタルを打設した。

(5) 鋼管の推進

鋼管の推進は、掘進機の掘削と合わせ順次押し進め、測定の結果を確認しながら遠隔操作で方向修正を行った。推進精度を高めるため、掘進機の方角制御機構として、新開発の反射型方向誘導装置(RSG)を採用した。測量は、元押しジャッキの間から掘進機の中心部に向けレーザー光線を飛ばし、そのポイントのズレを確認し方向を制御した。

鋼管は、A立坑側からの推進については6m管6本と4m管2本の構成とし、開先溶接部が弱点とならないように接続位置が隣の管と千鳥位置となるようにした。B立坑側からの推進については、道路占用の関係で長尺管の投入ができないため2.5m管と2.0m管の組合せとした。

掘進機は4機製作し、引抜き完了後工場に戻し、整備点検、ケーシングの取付けという繰返しで行い、同時2台稼働とした。

(6) 推進施工実績

パイプ推進工において、推進力過大による掘進機の故障、反力壁の補強などが発生したが、平均すると44mを5日で推進した(昼夜2交替体制)。

推力については40tf~300tf(392kN~2940kN)(設計推力100tf(980kN))を要した。

施工精度は、概ね30mm以内で施工できた。ただし、ルーフパイプは汚水管の人孔基礎が障害となり最大で100mm偏心した。

5-3 掘進中の沈下対策

B立坑よりルーフパイプの3本目施工中、路面に異状が発見されたため、施工を中断し路面のレーザー探査、試掘、観測孔の追加、掘進機の改造、逸泥対策を行った後にパイプ推進を再開した。

掘進機の改造については、土砂の取込みの過剰を防ぐ目的で、土砂取込み口の縮小、ケーシング刃口部上部フード取付けなどを施した(写真-1参照)。

逸泥対策としては以下に示す泥水管理を強化した。

- ・推進鋼管1本毎にAPIろ過試験を実施した。API試験より安定液が劣化していれば補給作業を行った。
 - ・推進鋼管1本毎に泥水の比重、粘性を判定した。
 - ・泥水の量はプラントのタンクの液面で管理した。
- また、標準配合と逸泥時の配合を表-5に示す。

表-5 泥水配合

| 1バッチ500ℓ当り | | 単位kg | |
|------------|--------|--------|------|
| 標準 | 粘土 | ベントナイト | CMC |
| | 150 | 25 | 0.5 |
| 逸泥時 | ベントナイト | 特粉珪砂 | 珪砂8号 |
| | 16 | 124 | 36.4 |

坑口のジャンクション部からの泥水の流出については、止水ゴムパッキンにより対処した。



写真-1 掘進機の改造

§ 6. 坑内掘削工および支持杭打設工

6-1 留意点

地盤沈下を極力小さくし、埋設管への影響を少なくするため、以下の点に留意する必要がある。

- ①一度に大断面の掘削を行わない。
- ②土被りの荷重を確実に支持する。
- ③掘削時の地盤の緩みを極力小さくする。

- ④切羽の角度をできるだけ大きくする。
- ⑤ルーフパイプのたわみを小さくする。

これらの条件の内、①については掘削断面を上半、下半の2分割にすることで対応した。②については導坑支保工および支持杭（鋼管）により、土被り荷重を確実に支持力の確保できる地盤に伝達させることにより対応した。②～⑤については上半部の砂礫層に対し薬液注入を行い、地盤強化することで対応した。

6-2 上半掘削

(1) 薬液注入工

切羽の安定を図るため上半掘削部に水平薬注を行った。薬液注入の施工は、2重管複合注入工法で行い、注入率は35%とした。施工延長が約44mと長いので両坑口より水平注入を行った。また、パイプで密閉されたエリアでの注入であり土中の水の逃げ場所がなく、注入圧が上がり埋設管に影響を及ぼす可能性が高かったため、注入の進捗に合わせて水抜き孔を設置した。注入時には図-7に示すように若干の隆起があった。

(2) 掘削工および支保工架設

掘削はバックホウ（0.1m³クラス）および人力にて行った。支持力確保を目的とし、支保工基礎として鉄板を敷くため、敷付け面を乱さないように慎重に掘削した。掘削土はベルコンにより坑口のピットまで排出した。

支保工架設は鉄板上に支保工の位置出しを行い、下桁、横桁、上桁、支柱の順にチェーンブロックにて組立てを行った（写真-2参照）。ルーフパイプと支保工の隙間には特殊金物を挿入した。また、沈下防止のために支柱に設置した油圧ジャッキによりジャッキアップを行った。掘削は工程の関係上、両立坑から行った。

6-3 支持杭の検討

(1) 工法の選定および問題点

支持杭は上半掘削後に施工する。施工盤からルーフパイプまでの高さは3.8mである。このように空頭制限のあ



写真-2 支保工組立て

る場所での施工は一般にBH杭が考えられる。当工事にBH杭を使用する場合、①施工盤以深の砂層が被圧されている、②玉石が存在する、③坑内に泥水処理施設が必要である、等の問題があった。このため、衝撃式推進工法（グルンドラム工法）により支持杭を打設することにした。グルンドラム工法の概念図を図-6に示す。

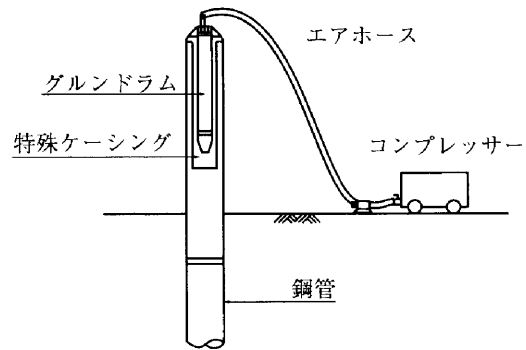


図-6 グルンドラム工法概念図

グルンドラム工法は通常のコンプレッサによる衝撃力により杭を打設するものであり、一般には水平方向の杭の推進に使用され、下水道工事等で広く利用されてきた。同工法は、周辺地山を緩めながら周面摩擦力を小さくすることにより杭を打設するという特性上、大きな支持力を期待できないという問題があった。また、鉛直支持杭としての実績もなかった。

(2) 杭打設

グルンドラム工法による杭打撃は非常に大きな音を伴う。しかし、施工場所が導坑の中であったため、地上では打撃音をほとんど感じなかった。

打撃回数はエア量により異なるが、一般には毎分400回程度である。打撃速度は毎分約10cmであった。杭打設時の状況を写真-3に示す。

(3) 支持力確認試験

実施工に先立ち、グルンドラム工法で打設した鋼管杭の支持力確認試験を実施し、支持力・沈下特性を把握した。支持力は、①支持層の深さおよび地盤強度、②杭先端閉塞効果、③杭周面摩擦力により、その大きさが変化する。具体的には表-6に示す要因を組み合わせた7本の試験杭を設定した。杭打設位置は上半掘削盤と同レベルの近接立坑内とした。

試験杭の仕様を表-7に示す。

杭の設計反力は $R=121\text{tf}$ (1186kN) であるが載荷重の反力受けの構造から載荷最大荷重は170tf (1666kN) であった。試験結果を表-8に示す。また、表-9には要因別の効果を示す。

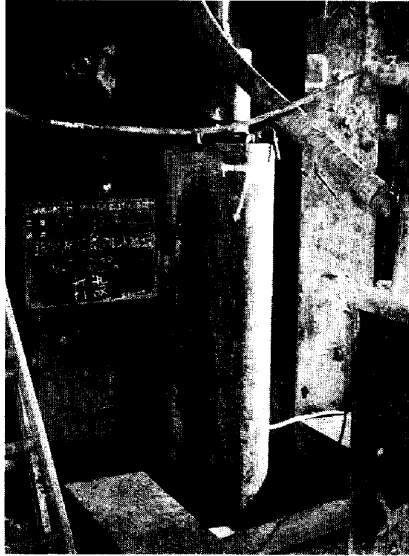


写真-3 杭打設状況

道路橋示方書の支持力算定式より求まる極限支持力は $R_u=20\sim 240\text{tf}$ (196~2352kN) であるが、試験値はこれを下回っている。

設計荷重が第1限界荷重より大きいと長期的な沈下が継続する。長期荷重時における杭の沈下量を把握するた

表-6 試験要因

| 要 因 | 目 的 |
|-----------|--|
| 支 持 層 | 支持層の違いによる支持力の差の確認 |
| 閉 塞 板 | 杭頭付近に閉塞板を設け、管内に入り込む上の締めによる支持力増大効果の確認 |
| 十 字 補 強 板 | 杭先端付近に十字補強板を設け、管内に入り込む上と鋼管との摩擦力増加による支持力増大効果の確認 |
| グラウト注入 | 杭先端をグラウト注入し、地盤強化による支持力増大効果の確認 |

表-7 試験杭仕様一覧

| 仕 様 | 試験番号 | A | B | C | D | E | F | G |
|----------|--------|-----|------|------|-----|------|------|------|
| 杭番号*1 | | ① | ① | ① | ② | ③ | ③ | ① |
| 根入れ長 (m) | | 6.5 | 12.0 | 13.0 | 4.3 | 10.5 | 10.5 | 13.0 |
| 想定支持層*2 | | ア | イ | イ | ア | イ | イ | ウ |
| 杭頭、杭端補強 | グラウト注入 | 無 | 無 | 無 | 無 | 無 | 有 | 有 |
| | 十字補強 | 無 | 無 | 無 | 有*3 | 有*4 | 有*4 | 無 |
| | 閉塞板 | 無 | 無 | 有 | 有 | 有 | 有 | 有 |

*1: 杭番号は、以下のとおりとする。①杭では、A→B→Cと順次試験を行い、それに伴って、杭の継ぎ足し、杭頭補強を行った。G試験は、C試験を行った後、杭先端部にグラウト注入し、3日養生の後に実施した。③杭においても同様に、E試験を行った後、グラウト注入しF試験を実施した。

*2: ア・・・ OP+53.2m~OP+49.2m付近の砂礫層を支持層とする。
 イ・・・ OP+46.6m~OP+44.2m付近の砂礫層を支持層とする。
 ウ・・・ OP+44.2m~OP+43.1m付近の砂混りシルト層を支持層とする。

*3: 十字補強高・・・ 30cm

*4: 十字補強高・・・ 100cm

表-8 支持力確認試験結果一覧表

| 試 験 番 号 | | A | B | C | D | E | F | G |
|------------|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 第1 限界荷重 | log P-log S 曲線 (tf) | 20 | 50 | 41 | 50 | 44 | 77 | 75 |
| | S-log t 曲線 (tf) | 20 | 60 | 50 | 50 | 40 | 80 | 80 |
| | $\Delta S / \log t - P$ 曲線 (tf) | 20 | 55 | 44 | 55 | 35 | 80 | 76 |
| | 判定値 P_1 (tf) | 20 | 50 | 41 | 50 | 35 | 77 | 75 |
| | 判定値に対する沈下量 S_y (mm) | 1.1 | 2.2 | 2.3 | 5.9 | 4.0 | 4.8 | 3.4 |
| 第2 限界荷重 | P-S 曲線におけるS軸にほぼ平行とみなされる荷重 (tf) | 33 | 90 | 86 | 100 | 80 | 170 | 110 |
| | 杭径の10%相当の沈下量が生じたときの荷重 (tf) | 29 | 90 | 86 | - | - | 150 | 100 |
| | 判定値 P_2 (tf) | 29 | 90 | 86 | 100 | 80 | 150 | 100 |
| | 道路橋示方書による R_u | 240 | 192 | 20 | 240 | 56 | 56 | 20 |

表-9 要因別第1限界荷重比較表

| 要 因 | 試験番号 | 第一限界荷重(tf) | 試験番号 | 第一限界荷重(tf) | 支持力比 | 効果 |
|--------|-----------|------------|--------|------------|------|----|
| 支持層 | C (砂質シルト) | 41 | B (砂礫) | 50 | 1.22 | ○ |
| | G (砂質シルト) | 75 | F (砂礫) | 77 | 1.03 | |
| 閉塞版 | B (無) | 50 | C (有) | 41 | 0.82 | × |
| 十字補強 | B (無) | 50 | E (有) | 35 | 0.70 | × |
| グラウト注入 | E (無) | 35 | F (有) | 77 | 2.20 | ◎ |
| | C (無) | 41 | G (有) | 75 | 1.83 | ◎ |

表-10 計測頻度

| 工種 | 埋設管沈下板レベル測量 | | ルーフパイプ内沈下計 (7点) | 支保工レベル測量 (全本数) |
|--------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------|
| | 水道管 (11点) | 沈下板 (41点) | | |
| 計測期間 | パイプ推進～埋戻し | | 上半薬注～埋戻し | 上半掘削～下半掘削 |
| パイプ推進 | 毎回1回 (直下施工時) 朝夕2回/日 | 毎回1回 (直下施工時) 朝夕2回/日 | | |
| 薬液注入 | 朝夕2回/日 | 朝夕2回/日 | 一定間隔で自動計測 (施工時監視人配置) | |
| 上半掘削 | 毎日1回 (直下施工時) 朝夕2回/日 | 毎日1回 | 一定間隔で自動計測 | (架設済支保工) 朝夕2回/日 |
| 支持杭・受替 | 朝夕2回/日 | 毎日1回 | 一定間隔で自動計測 | 毎日1回 |
| 下半掘削 | 朝夕2回/日 | 毎日1回 | 一定間隔で自動計測 | 毎日1回 |

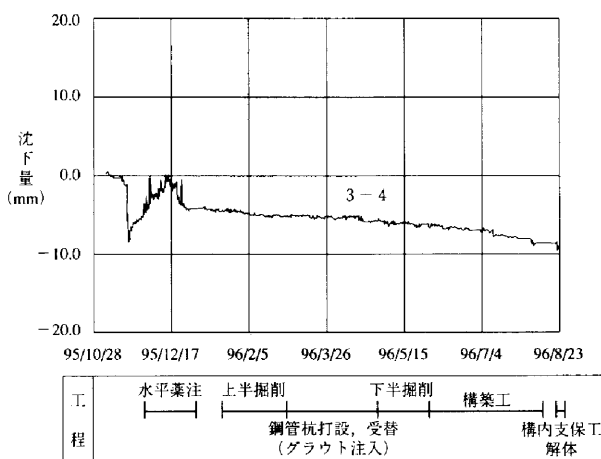


図-7 水道管の沈下曲線

め3日間の載荷を行い、 $S-\log t$ 曲線を直線的に外挿し、支持杭供用期間での沈下量を推定した。

この結果、予想沈下量は4.7mmであった。

上記の結果を踏まえ、F杭の仕様にて施工を行うことにした。実施工においては、支持力確認試験での数値以上の支持力を期待するため、鋼管内部および杭周囲にも薬液注入を行った。また、桁の受替時には、杭全本数について以下の管理を行った。

- ①支柱に設置した油圧ジャッキにより荷重載荷を行い、荷重～沈下関係を得る。

- ②第1限界荷重が設計荷重以上であればよい。
 - ③第1限界荷重が設計荷重より小さい場合には荷重を持续させ、長期沈下の推定を行う。支持杭供用期間での推定沈下量が許容値以下であればよい。
- 施工ではすべて②の状態であった。

§ 7. 地盤および埋設管計測管理

埋設水道管の許容沈下量が10mmと厳しい値であったため、施工期間中、表-10に示す計測管理を行った。

計測結果の一例として水道管の沈下曲線を図-7に示す。

§ 8. あとがき

重要埋設管に影響を与えることなくパイプーフ工法により躯体を構築し、非開削部分の施工を完了することができた。本工事においては、①土被りの大きい箇所でのパイプーフ工法、②推進機引き戻し工を用いたパイプ推進工、③グルンドラム工法による支持杭の打設等、今までに施工実績の少ない工種を採用した。今後、同様な施工を実施する時に本文が役立てば幸いである。

最後に本工事の施工にあたり、ご指導いただいた関係各位に深く感謝いたします。