

在来線直下における大口径長大パイプルーフ工法による 地下鉄トンネルの建設〈仙石線地下化工事仙台駅線路下工区〉

Construction of a Subway Tunnel Just Beneath a Conventional Railway by
Means of the Large-Long Pipe Roof Method

松 本 岸 雄 (まつもと きしお)

東日本旅客鉄道(株)東北工事事務所

古 山 章 一 (ふるやま しょういち)

東日本旅客鉄道(株)建設工事事務部構造技術センター

佐 藤 清 志 (さとう せいし)

東日本旅客鉄道(株)東北工事事務所

遠 藤 哲 朗 (えんどう てつろう)

鹿島建設(株)東北支店仙台駅工事事務所

1. はじめに

現在、JR 仙石線（仙台～石巻）の仙台駅～苦竹駅間（約3.9km）の連続立体交差事業（地下化）が、踏切（14箇所）による交通渋滞、交通事故の解消および都市圏骨格交通網の整備を目的として実施されている。このうち、仙台駅構内のおよそ130mの区間では、東北本線をはじめ15本（分岐器3組を含む）の営業線と4箇所のホームを横断する。この営業線の仮受け方法として、15線のうち12線はパイプルーフ工法を、残りの3線は工事桁工法を採用している。特にパイプルーフ工法においては、直径1.0m、長さ72mの大口径・長大鋼管を用いている。本稿では、この施工法の選定、パイプルーフ工の設計および施工結果について報告する（図-1参照）。

2. 地形・地質

当該現場は、仙台市に広く発達する五つの河岸段丘の一つ中町段丘にあたり、標高は30m前後である。層序および地質は以下のとおりである。現表土下に湿地性の堆積物である有機質の粘土、シルトを主体とした旧表土層が1m分布し、その下位に層厚約6mの段丘礫層（ N 値=30～50以上）が堆積している。この段丘礫層の下部には、厚さ約13mで一軸圧縮強度が20～85kgf/cm²の第三紀鮮新世の凝灰岩が分布している。地下水位は、地表面から5～6mの高さにある。

cm²の第三紀鮮新世の凝灰岩が分布している。地下水位は、地表面から5～6mの高さにある。

3. 施工法の選定・パイプルーフ工の設計

3.1 本体構造物（函体）

本体構造物は幅18m、高さ12.3mの2層3径間の鉄筋コンクリート造ボックスラーメンである。設計上の特徴としては、床付け面が一軸圧縮強度80kgf/cm²の軟岩地盤であること、函体が多層多径間であることから、ボックスラーメン部材および地盤を弾性体と考え、弾性理論に基づいた応力計算を行っていることがあげられる。この結果、地盤反力が側壁下部、中柱下部に集中し、下床版の曲げモーメントは、函体を剛体と仮定する剛体設計法より小さくなることから、部材厚は60cmと薄く経済的な断面となっている。

3.2 施工法の選定

線路下に横断構造物を構築する施工法¹⁾には、種々のものがあるが、本現場で採用可能な工法として次のものがあげられる¹⁾。

- (1) 工事桁工法
- (2) パイプルーフ工法（大口径パイプルーフによるトンネル工法）
- (3) ESA工法（Endless Self Advancing Method、パイプルーフ併用）
- (4) SC工法（Sliding Culvert Method）

当該現場の施工上、環境上の制約条件として以下のことがあげられる。

- (1) 駅構内であり横断線数が15本（うち分岐器3組）、横断ホームが4箇所と多い。残存埋設物が多い。
- (2) 信号機、電車線柱等が密集しているため信号ケーブルが多く、また給排水管等の埋設物も多い。
- (3) 函体断面が大きく、延長が長い。加えて、平面線形が曲線であり、函体構築幅も変化する。
- (4) 土被りが3.8mと大きい。
- (5) 工事では線路閉鎖、き電停止を伴う作業を極力少なくし、夜間作業を減らしたい。

上記の工法で、工事桁工法では分岐器があることから、配線変更が必要となる。加えて、仮橋台、仮橋脚の杭を

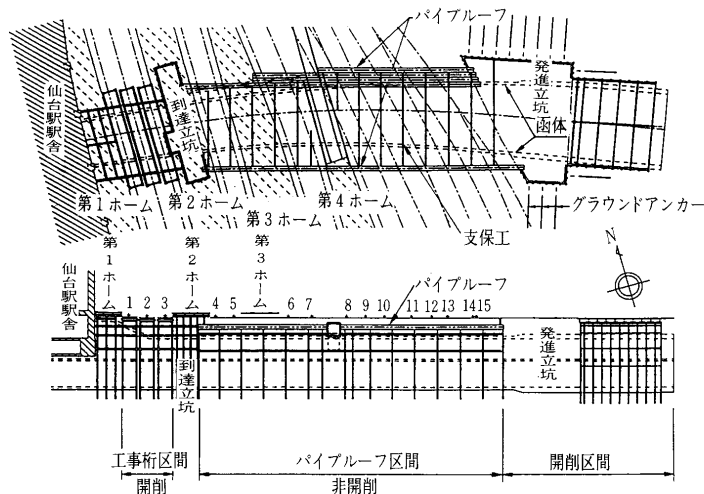


図-1 線路下工区全体図（上：平面，下：縦断）

線路下や線間に施工する作業は線路閉鎖、き電停止を伴うことが多くなる。ESA 工法、SC 工法は直線で施工するのでデッドスペースが生じる、この規模での施工実績が少ない、工費が高い等の短所を有する。

パイプルーフ工法でも、立坑構築位置の制約条件から、全長にわたっての採用は困難である。検討の結果、工事桁工法とパイプルーフ工法の併用²⁾で施工することにした。西側の3線は、夜間の迂回ルートによる列車運行が可能であることから工事桁工法を採用し、分岐器を含む東側の12線については、パイプルーフ工法を用いることにした。この工法は、パイプルーフと支保工により、線路を仮受けした後、その下を掘削し函体を構築するものであり、列車の走行安全性が確保できるとともに、線路閉鎖やき電停止を伴う夜間作業が少なく、昼間作業で施工できるという長所を有する。

3.3 パイプルーフ工の設計

(1) パイプルーフ配置

パイプルーフは、図-2に示すように門型で計画した。立坑は立地条件、施工条件等を勘案し、東側駅前広場を発進立坑、西側第2ホームを到達立坑とした。推進高さは埋設物、土被り、函体上面とパイプルーフ受け桁の間隔、パイプルーフの推進精度等を考慮し、地表面より2.0m下、函体天端より1.5m上とした。

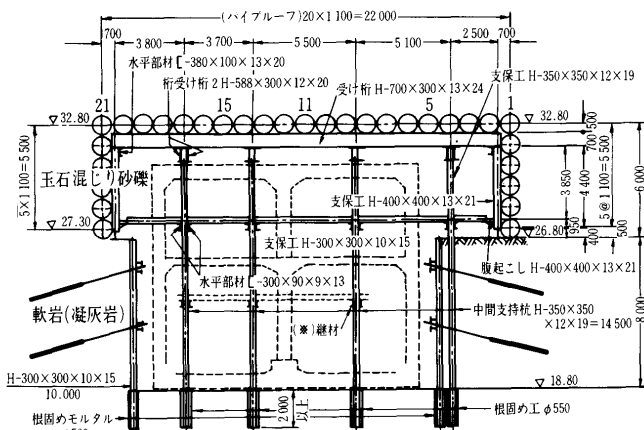


図-2 パイプルーフ配置

(2) 管径・肉厚

管径・肉厚は基本的に、応力計算から決定されるが、以下の事項にも配慮した。

- ① 列車の走行安全性から定まる、列車載荷時のパイプルーフのたわみ ($l/600$ 以下、 l は線路方向のスパン) を満足する。
- ② 旧駅舎で利用した石垣等の残存埋設物、転石等の出現が予想されることから、これらをパイプルーフ内から人力で撤去可能な大きさとする。
- ③ 延長が最大で72mと長大であることから、高度の推進精度を確保する。
- ④ 経済性から、パイプルーフ本数を少なくする(同一条件であれば、材料費は管径にかかわらず、ほぼ一定である。したがって、全体の工事費は施工費が少ない、つまりパイプルーフ本数が少ない方が安く

なる)。

管径は以上を考慮して外径を1.0mとした。肉厚は、運搬時における変形防止(真円の保持)、推進時の座屈防止等も考慮して14mmとした。過去の実績では、大口径の場合には外径の1/100以上の肉厚を採用している例が多い。パイプルーフのたわみ計算モデルを図-3に示す。計算では、支保工で逐次仮受けして掘削する施工を忠実に表現するため、地盤を分布ばね、支保工を支点ばね、パイプルーフを梁でモデル化し、発生断面力、たわみを算出している。ばね値はJRの「建造物設計標準(基礎構造物)」に基づいて計算している。たわみの算出は、各ステップの残留たわみを累積させる方法を用いている。たわみの計算結果を図-4に示すが、最大13mmで1/600の許容値を十分満足する結果となっている。

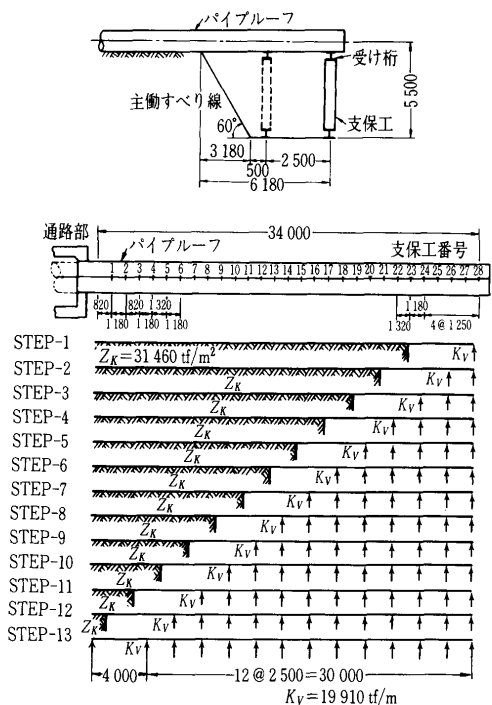


図-3 パイプルーフのたわみ計算モデル

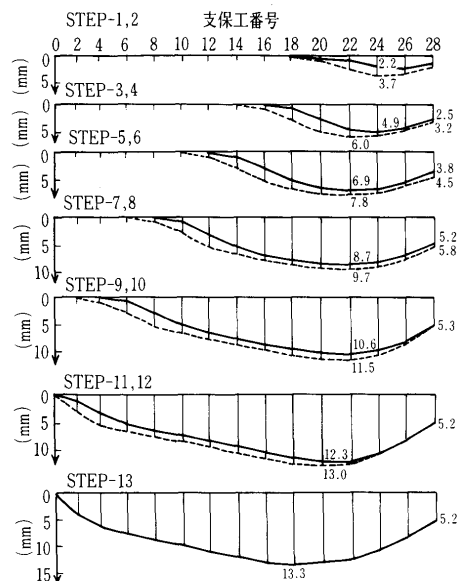


図-4 たわみの計算結果

工事報告

4. 施 工

4.1 基準管の推進

パイプルーフ施工の1本目(No. 20)を基準管として、機械により推進することにした。対象地質が玉石混じり砂礫であり、残存埋設物も予想され、オーガー回転に大きなトルクを要することが想定されたため、推進機械には最大トルク値4 000 kgf・m、最大推力400tfの能力を有する推進機を使用した。

基準管の推進精度は、後続施工する一般管の推進精度(1/300)を左右するため、一般管よりも高精度の1/500に設定した。この推進精度を確保するため、方向制御装置を先端部に設けた。

推進精度の実績を図-5に示すが、推進抵抗を低減させる目的で刃口部先端に設けたリッパーが災いし、加えて方向制御装置の重量も悪影響し、推進直後から下向きの傾向となった。対策として途中でリッパーを切断したが、下向きの傾向は直らず、刃口先端に上向きの反力板を取り付けて、ようやく修正できた。最終的には、到達立坑において、鉛直方向上向きに50 mmという値に抑えることはできたが、中間部では下向きに130 mmという値となった。この基準管をガイドとして、後続の一般管を推進すると、一番端部のパイプルーフでは、所定の精度が確保できなくなると判断し、もう1本基準管を施工することにした。

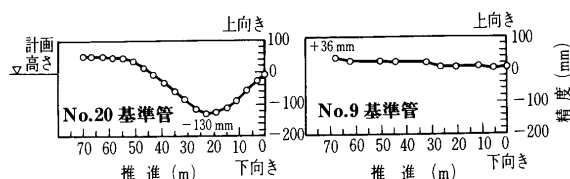


図-5 推進精度の実績 (No. 20, No. 9)

2本目の基準管は中央部のNo. 9とし、方向修正および精度確認のための測量が頻繁にできるよう、最初から人力掘削による刃口推進とした。施工実績では目標精度1/1 000に対し、これを大幅に上回る到達立坑で、上向きに36 mm、精度的には1/2 000という値に収めることができた。

4.2 一般管の推進

施工中に予想以上の残存埋設物、大きな転石等の出現により、しばしば推進不能となり、その都度オーガーを引き抜き、人力によりそれらを除去した。実績のオーガートルク値は、1 900~4 000 kgf・m、推力は90~180tfであった。機械推進と人力刃口推進の割合は、5:5と半分が人力施工となってしまった。

4.3 陥没対策

今回のパイプルーフは大口径であること、残存埋設物、大きな転石等が存在することから、推進に伴う地山陥没の発生は避けられないと考え、軌道を常時トランシットで監視するとともに、分岐器以外のパイプルーフ通過区間の軌道には、簡易工事桁を架設し軌道防護を行った。

分岐器のない東京方で最初に推進した2本においては、列車運転に支障はなかったものの、大小33回の陥没が発

生した。これらの陥没に対しては、その都度、軌道整備により対処した。3本目からは、大径の玉石、旧機関区跡の石垣などを人力により撤去した場合には、入念にその除去した跡を粘土等で充填し、地山の急激な陥没を防止した。また、推進完了後、試験的にパイプルーフの中から地山に向けて裏込め注入を実施した。注入材はゲルタイムの調整が容易で、所定範囲への注入が可能、かつ耐久性にも優れるセメント系のものを用いた。施工では、注入圧による軌道隆起を懸念し、注入圧1.0 kgf/cm²、ゲルタイム1分で実施した。この対策により、注入材が次のパイプルーフ推進対象地山(砂礫)にも浸透し、事前対策としての地盤改良の効果も果たすことが判明した。そこで、以降の推進では、パイプルーフが到達したらただちに裏込め注入を実施することにした。その結果、当初はパイプルーフ推進1本当たり16.5回あった陥没が1.5回に激減した。

4.4 掘削時のパイプルーフたわみ

No. 11のパイプルーフのたわみを図-6に示す。掘削が進行するにつれて、たわみが大きくなっていく模様、各掘削段階のたわみが残留し、累積していく様子がわかる。支保工を設置した後は、支点沈下として現れるが、その量は一般に小さい。しかし、支保工番号が小さい方たとえば2~10番で、支保工を設置した後も支点沈下が進行している。この原因としては、パイプルーフの到達端である地下通路自体が、沈下していることによるものと考えられる。最大たわみ発生位置が支保工番号20付近であること、最大たわみは17 mmであるが、両端の支点沈下が予測値より大きいことを差し引くと、ほぼ計算値(図-4参照)に近い値を示していることがわかる。

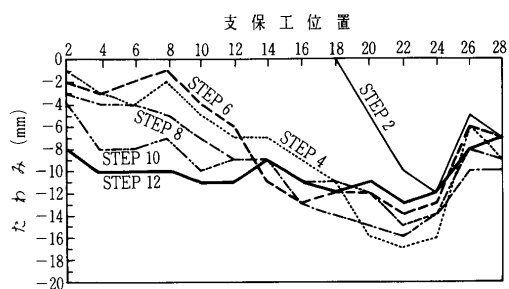


図-6 パイプルーフのたわみ (No. 11)

5. おわりに

現在はパイプルーフの推進も終了し、パイプルーフ下の掘削作業も終盤である。本事例が、同様な施工条件での施工法の選定、設計、施工の参考になれば幸いである。最後に、仙石線地下化工事に対し、ご指導をいただいているJR東北技術研究会の委員の方々に、深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) JR 東日本:「線路下横断構造物の計画及び施工法の選定の手引」, 1994. 2.
- 2) 松本岸雄・佐藤春雄:分岐器下を通るパイプルーフ工法による施工例, 基礎工, Vol. 22, No. 4, pp. 58~66, 1994. (原稿受理 1996.2.27)