

地山変位計測結果の逆解析に基づく パイプルーフ工法施工時の情報化施工

大谷達彦¹・佐々木良作²・前田昌彦³・進士正人⁴・櫻井春輔⁵

¹正会員 工修 西松建設㈱ 土木設計部設計課 (〒105-8401 東京都港区虎ノ門 1-20-10)

²兵庫県神戸土木事務所 災害復旧室 (〒652-0803 兵庫県神戸市兵庫区大開通 1-1-1)

³工修 神戸電鉄㈱ 鉄道事業本部技術部技術課 (〒651-1113 兵庫県神戸市北区鈴蘭台南町 6-1-15)

⁴正会員 学博 山口大学工学部 社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

⁵正会員 工博 Ph.D 広島工業大学 (〒731-5193 広島県広島市佐伯区三宅 2-1-1)

近年、構造物に近接してトンネルを建設することが多くなってきており、近接構造物に与える影響を抑制するために、パイプルーフ工法がしばしば採用されている。しかしながら、パイプルーフを採用したときの地山挙動は十分に把握されていないのが現状である。

本研究では、都市トンネル施工時の変位データを用いて逆解析を行い、パイプルーフ設置時の地山挙動について整理した。そして、パイプルーフを必要とするような未固結地山では、設置時にも、近接構造物の許容値を越える変形が生じる可能性があることを示した。また、パイプルーフ設置開始後の早い段階での計測結果から等価弾性係数を評価し、設置最終段階の変形挙動を予測する方法を提案した。

Key Words : *observational construction system, back analysis, pipe-roofing method, urban tunneling*

1. はじめに

構造物に近接してトンネルを建設する場合、切羽の自立性に加えて、近接構造物に対する影響の問題がある。このような問題をかかえたトンネルでは、パイプの剛性によりトンネル周辺地山を事前に補強し、変形を抑制するパイプルーフ工法がしばしば採用される。

パイプルーフ工法は、補助工法として多くの採用事例があり、その支保効果や地山挙動を把握する試みがなされている¹⁾。しかしながら、現状では十分に明確になったとはいいきれず、本来の目的である地山の変形抑制効果を十分に評価できた設計手法はないといわれている^{2),3)}。

そこで、著者らは、地表面に重要構造物(電鉄軌道部)が存在する都市トンネルでパイプルーフ工法(φ812.8mm)を採用したときの地山変位データを用いて地山挙動を把握することを試みた。

本研究では、まず、パイプルーフ設置時の地山挙動について整理し、本来の目的が地山の変形抑制効果であるにもかかわらず、パイプルーフが必要となるような未固結地山では、設置時に、近接構造物の許容値を越える変形が生じる可能性があることを示

す。したがって、パイプルーフ設置時においても、近接構造物に与える影響にも十分に配慮した施工をすることが重要であることを示す。

最後に、パイプルーフ設置を安全かつ合理的に行うために、設置開始後の早い段階で、計測結果から等価弾性係数を評価することにより、設置最終段階の変形挙動を予測する情報化施工法を提案する。

2. パイプルーフ設置時に計測された地山挙動

(1) トンネル概要

新湊川トンネル工事の特徴の一つは、電鉄軌道部の直下を小土被り(13m)で交差することである。そこで、トンネル施工時の軌道部の挙動を監視するために、地山変位計測を実施した(図-1 および図-2 参照)。

新湊川トンネルの地質は、新生代第四紀更新世の大阪層群(粘土・砂・砂礫の互層)および沖積層が複雑に分布し、トンネルと斜交して断層(会下山断層)が存在している。また、図-1のように、自然地下水位は高く(GL-6m)、一部に被圧地下水が存在している。そのため、パイプルーフ施工前にディープウェル工を実施し、地下水位が十分低下することを確認した。

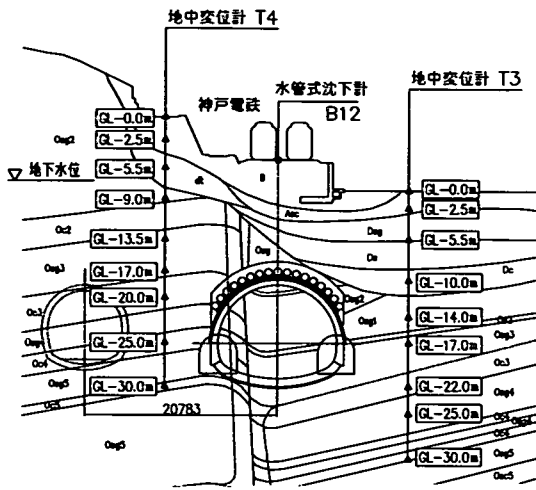


図-1 検討断面図

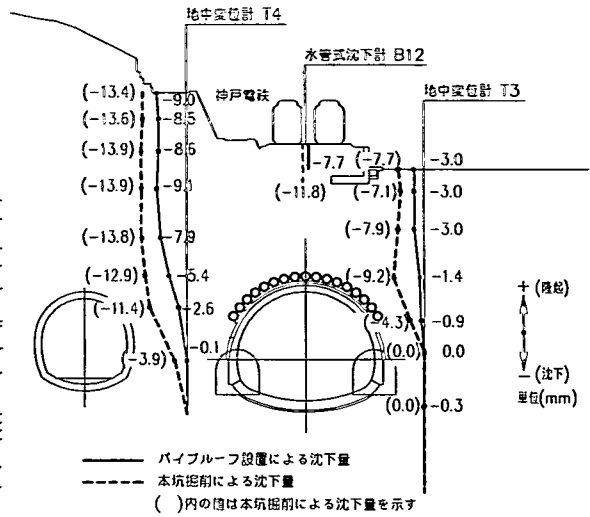


図-3 パイプルーフ設置による沈下挙動

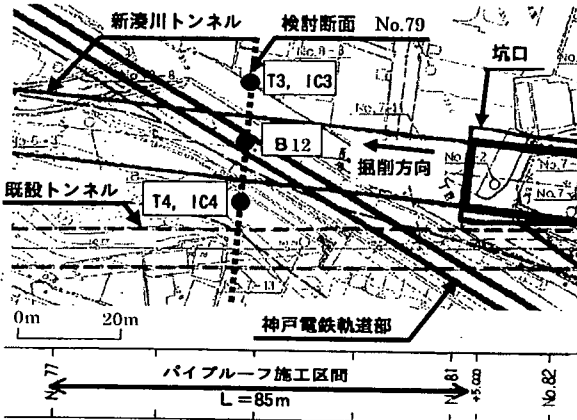


図-2 計測配置図

(2) パイプルーフの施工

新湊川トンネルで用いられたパイプルーフ工法は推進長が長い(L=85m)、高い施工精度が要求された。その上、周辺地山は巨礫を含む複雑な地層であるため、地盤の変化に対応する必要があった。これらの条件を考慮し、オーガー掘削鋼管推進工法を採用した。

この工法は、鋼管内にセットしたオーガービットにより地山を掘削しながら、鋼管(φ812.8×17本@1000, t=12.7~16.0mm)を非回転式圧入方式で圧入するものである。

(3) 計測結果の概要

17本のパイプルーフ設置完了時に生じた沈下挙動を図-3示す。パイプルーフ設置によって生じた沈下量(実線)は、大きいところで、本坑掘削によって生じた沈下量(破線)の2/3程度となっている。パイプルーフ設置によって、このような大きな変形が生じることは、事前に予測していなかった。変形に対する許容値が小さい重要構造物が存在する場合には、パイプルーフ設置によって、許容値を超える変形が生じる可能性があることを示している。

今回の計測結果を用いて、このような変形が生じた理由を把握し、今後のパイプルーフ工事での定量的評価に役立てることを考えた。

3. パイプルーフ設置時の地山挙動の定量的評価

(1) 地山挙動の解析

パイプルーフ設置時の地山の变形挙動を把握するため、設置順序毎に、弾性 FEM に基づいた逆解析(DBAP)⁹⁾を実施した。逆解析とは、計測で得られた変位量を入力値として、最適手法によって地山の等価弾性係数、初期応力状態を推定する解析方法である。

逆解析を実施するにあたっては、パイプルーフの設置モデルをいかに逆解析で表現するかが重要な課題となる。今回の解析では、オーガービット掘削による応力解放によって、地山の变形が生じたと考え、安全側にすべてのパイプルーフ部を素掘り掘削(解放

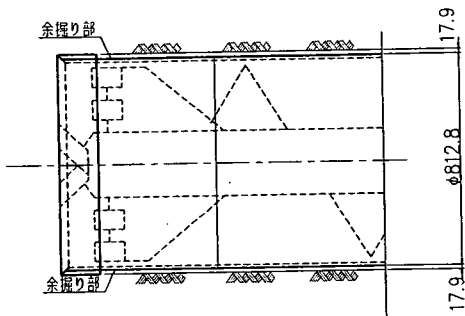


図-4 オーガービット先端の構造図

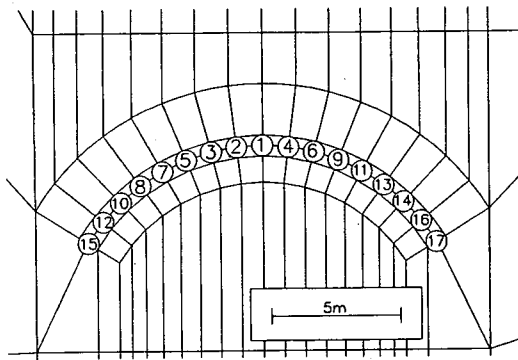


図-5 パイプルーフの設置順序図

率 100%)と仮定し、地山挙動をモデル化した。このようにモデル化した理由を以下に示す。

①地山の変形は、オーガービット掘削による応力解放のほかに、パイプルーフ設置時の地下水位低下による圧密沈下、弾性沈下によっても生じた可能性がある。しかし、前述したように、パイプルーフ施工前に実施したディープウェル工により、図-1に示すトンネル周辺の地下水位は十分低下したことが確認された。したがって、地下水位低下による影響は少なく、主として、オーガービット掘削による応力解放により地山の変形が生じたと考えられる。

②鋼管径に対して、鋼管先端シューは大きくなっていて、施工上、鋼管周辺に 17.9mm の余掘りが生じる(図-4 参照)。この余掘りは、推進する管の周面摩擦抵抗を軽減するために必要不可欠であり、パイプルーフ設置時に、いずれの推進工法を用いても生じるものである。逆解析で予測されたオーガービット掘削による孔壁の変位は、この余掘り量以下であることがわかった。このことから、解析上、パイプと地山の間には空隙が残るため、パイプルーフの土留め効果は比較的小さく、素掘り掘削と考えた。

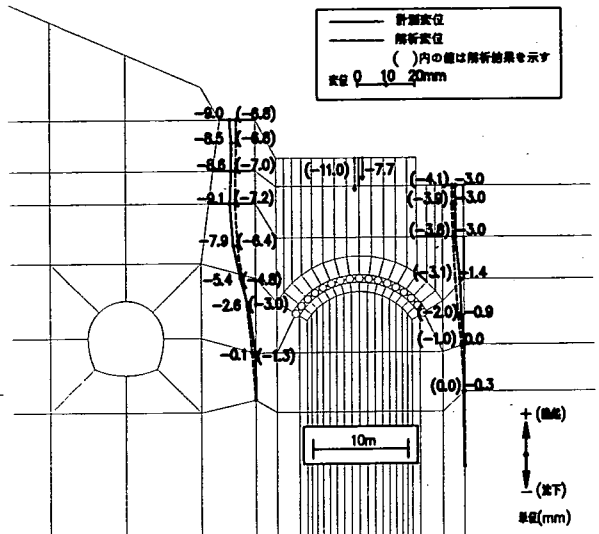


図-6 沈下量の逆解析結果

逆解析では、実際のパイプルーフ設置と同じ順序で掘削解析をした(図-5 参照：図中の数字はパイプルーフの掘削順序である)。このとき、トンネルが電鉄軌道部の直下に位置する断面を検討断面とし、水管式沈下計(B12)、地中変位計(T3, T4)、多段式傾斜計(IC3, IC4)の計測値を入力値とした(図-1 参照)。

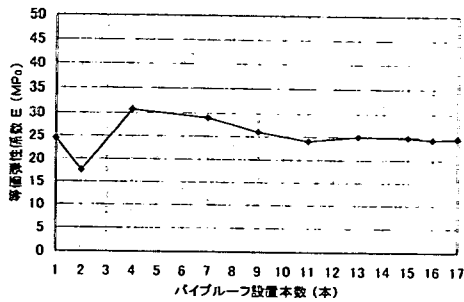
(2) 逆解析の結果

パイプルーフ設置最終段階の逆解析結果と計測変位の比較図を図-6 に示す。これは、鉛直方向の計測変位(B12, T3, T4)について示したものである。これらはよく一致し、逆解析での掘削のモデル化が、工学的にはほぼ妥当であることがうかがえる。

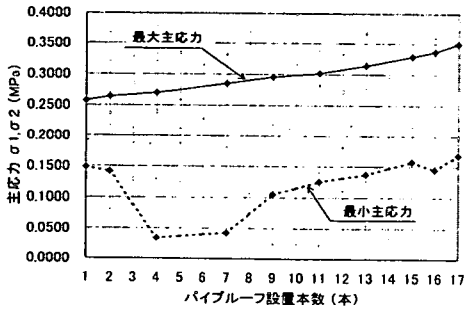
また、各施工段階での計測変位を用いて、逆解析により推定される等価弾性係数および初期応力のパイプルーフ設置段階毎の変化を図-7 に示す。

この結果から、以下のことがわかる。

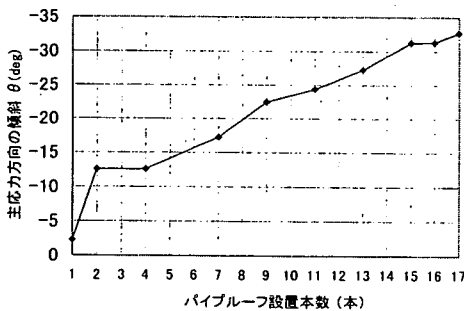
①図-7(a)からわかるように、パイプルーフ1本目設置時の逆解析で得られた等価弾性係数と、2本目以降～17本全ての設置を完了したときの逆解析で得られたそれはほぼ同じ値を示す。すなわち、パイプルーフ施工の早い段階において最終状態を予測できることを示唆している。なお、2本目のパイプルーフを設置したとき、等価弾性係数は若干小さくなる。これは、2本目の段階ではまだ十分に応力の再配分がなされておらず、局所的な変



(a) 等価弾性係数



(b) 主応力



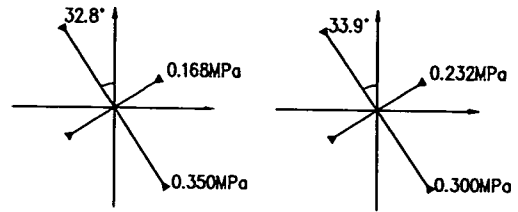
(c) 主応力の傾斜

図-7 パイプルーフ設置段階毎の逆解析による初期応力推定結果の変化

位増加により、等価弾性係数が低下したためと考えられる。

②パイプルーフ1本目設置時の逆解析では主応力の傾斜角は小さいが、設置本数が増加するに従って大きくなり、地表面傾斜とほぼ等しくなる。これは、設置範囲が広くなると、地山挙動が地表面形状の影響を受けるようになるためと考えられる。

③17本全て設置時の逆解析結果から得られた、全パイプルーフ要素の平均土被りの初期応力は、地表面形状が考慮されている自重解析の値とほぼ一



(a) 逆解析結果 (全パイプルーフ要素の平均) (b) 自重解析結果 (1本目パイプ要素)

図-8 初期応力

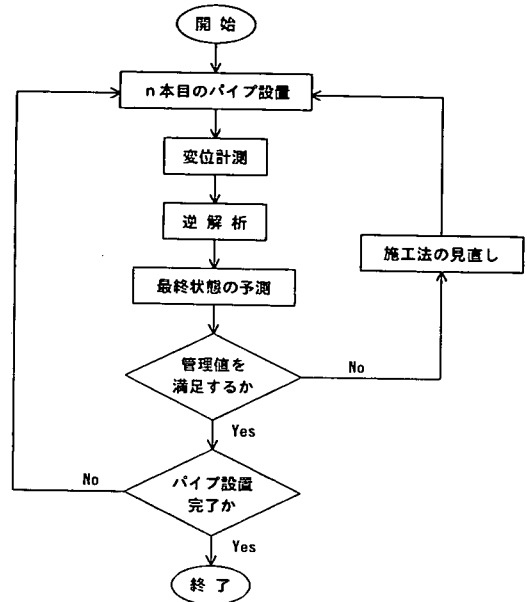


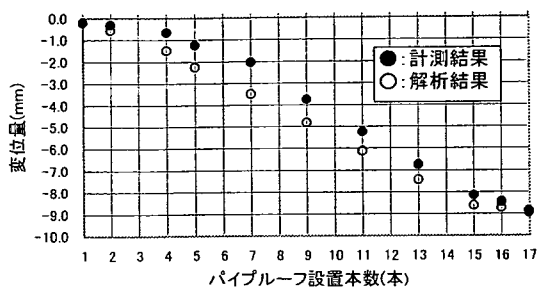
図-9 提案するパイプルーフ工法施工時の情報化施工

致する(図-8)。したがって、土被りが小さい都市部における解析では、初期応力の設定を自重解析で行ってよいことが、この結果から検証できた。

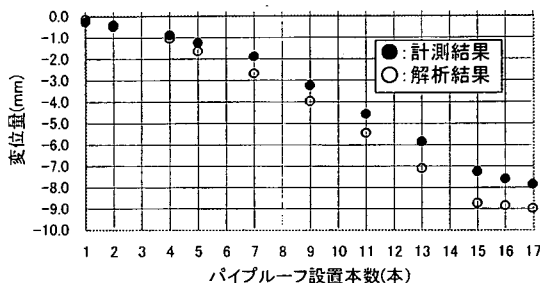
4. パイプルーフ設置時の変形予測方法

3. に示した逆解析の結果を参考にして、パイプルーフの設置に伴う変形を予測するために、情報化施工を積極的に実施していく方法を提案する(図-9参照)。この方法は、パイプルーフ1本目の逆解析で得られた等価弾性係数が、最終段階の逆解析結果とほぼ一致するということが、前述した逆解析からわかったため、これを積極的に利用するものである。

すなわち、実施工において、パイプルーフ設置開始の早い段階で地山を評価し、その後の変形挙動を



(a) GL-0.0



(b) GL-13.5

図-10 1本目の逆解析結果による
地中変位計 T4 の沈下予測

予測できれば、非常に安全かつ合理的に施工管理が行える。そこで、 n 本目のパイプルーフ設置時の逆解析結果から求められた地山特性を考慮して、たえず最終段階のパイプルーフ設置時の変形挙動を予測し、問題があれば直ちに施工法を検討する。

図-10 に実際の施工順序ごとにパイプルーフを設置する解析結果の例を示す。この解析は、1本目のパイプルーフを設置したときの逆解析で求められた等価弾性係数(25MPa)を用いて、2本目以降の変形予測をシミュレートしたものである。このとき、初期応力については自重解析で算出した。図のように、1本目のパイプルーフ設置の計測変位があれば、2本目以降のパイプルーフ設置の地山挙動がほぼ予測できていることがわかる。

同様に2本目の計測結果から地山の等価弾性係数が把握できれば、3本目以降のパイプルーフ設置時の変形を順解析から予測できる。前述したように、設置範囲が狭い時、すなわち施工の早い段階では、地山の変形挙動は地表面形状の影響を強く受けにくいことがわかっているので、打設初期の段階では、簡便な理論解、たとえばJefferyの式などを用いた簡便な逆解析で等価弾性係数を求めることも可能である。

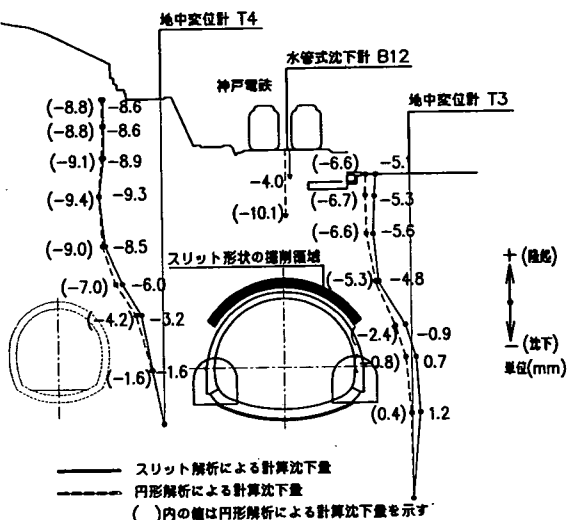


図-11 スリット形状の解析結果

また、逆解析により地山の等価弾性係数を推定した後、その弾性係数を用いて最終状態を予測する場合、より手軽に最終値が予測できることが望ましい。そこで、FEMのメッシュ作成をより簡便にするための一方法として、パイプルーフ施工範囲をスリット形の形状で一括掘削するモデル(以下スリット解析と呼ぶ)を試行し、同様の予測計算を実施した。その結果を図-11に示す。この図から、スリット解析でも、パイプルーフを円形で表現した解析と、工学的に十分な精度で沈下予測ができていることがわかる。解析では、スリット内の弾性係数は、地山の弾性係数(25MPa)の20%(5MPa)としている。これは、パイプルーフの打設ピッチ(1.0m)に対する、パイプルーフ間に残る地山の幅(0.2m)の割合である。したがって、スリット解析をするときには、スリット内に残っている地山の面積に比例して、弾性係数を低減させればよいと考えられる。

5. まとめ

本論文では、構造物に近接したトンネルのパイプルーフ設置時の地山挙動について、計測・解析成果を報告した。

まず、パイプルーフを設置するときの地山挙動について考察するために、現場計測結果に基づいて、逆解析による地山挙動の定量的把握を試みた。その結果、以下のことがわかった。

①パイプルーフ設置時の地山挙動は、オーガーピッチ

トとパイプルーフ間の余堀が発生するため、素掘り掘削(解放率 100%)で、ほぼシミュレーションできる。

②パイプルーフ 1 本目設置時と、17 本全て設置完了時の逆解析で得られる等価弾性係数はほぼ同じとなる。このことから、パイプルーフ施工の早期段階で、最終状態の予想が可能であり、必要であれば対応策が実施できる。

③パイプルーフの設置範囲が大きくなるに従って、逆解析で求められる主応力方向が、地表面の傾斜方向とほぼ等しくなる。このことから、パイプルーフの設置範囲が大きくなると、設置時の変形挙動は地表面の影響を受けるようになる。

この逆解析結果を有効に活用し、パイプルーフ設置を安全かつ合理的に行うために、設置開始後の早い段階で計測結果から等価弾性係数を評価し、設置最終段階の変形挙動を予測する情報化施工法を提案した。

なお、今回得られた成果は一例にすぎないが、パイプルーフ自体の施工による沈下が比較的大きいケースはしばしば見受けられるため、今回提案する方法の適用性は高いと思われる。しかし、他の計測事例からも、設置時の地山挙動について確認していきたいと考える。

また、実際のパイプルーフ工においては、沈下を抑えるために、オーガービット掘削時の余堀や掘削土の取込み過剰を極力避けることや、パイプルーフの裏込め注入を早期に行うなどの施工上の留意が必要である。

参考文献

- 1) 斎藤重治：トンネルにおけるパイプルーフ工法・地盤、理工図書,1982.
- 2) 櫻井春輔編著：都市トンネルの実際 合理的な設計・施工法をめざして、鹿島出版会、1998.
- 3) 大川孝、横山治郎、石原久、小島亘：トンネル補助工法としてのパイプルーフ効果の計測と考察、土木学会論文集、No.355/VI-2、1985.
- 4) Sasaki, R., Takayama, T., Tsukada, M., Kimura, M., Torii, S., and Nakagaki, H., : Excavation monitoring of a large cross section tunnel underpassing an existing railway, IS-Kyoto 2001.
- 5) 櫻井春輔、武内邦文：トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法、土木学会論文報告集、No.337、pp.137~145、1983.

(2001. 10. 17 受付)

OBSERVATIONAL PROCEDURE OF PIPE ROOFING METHOD BASED ON BACK ANALYSIS OF FIELD MEASUREMENT

Tatsuhiko OTANI, Ryosaku SASAKI, Masahiko MAEDA,
Masato SHINJI and Shunsuke SAKURAI

The pipe roofing method has been used to minimize the deformation of ground, in case of constructing a tunnel close to existing structures. However, the settlement of the ground when the pipe roofing method is applied has not been clearly understood.

In this paper, the comparison between the field displacement and the numerical forecast by using back analysis has done to understand the ground behavior during the work on the pipe roofing method. The authors propose an observational procedure of pipe roofing method to estimate the impact of environments such a settlement of the ground at the early stage of pipe roofing excavation.