

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 Observational Construction System for Installation of Pipe Roof

大谷 達彦* 塚田 昌基**
Tatsuhiko Otani Masaki Tsukada

要 約

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、パイプルーフが必要な未固結地山では、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、安全かつ合理的に設置するために、設置開始後の早い段階での計測結果から地山特性を評価することによって、変形挙動を予測する方法を提案した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. パイプルーフ設置時に計測された地山挙動
- § 3. パイプルーフ設置時の地山挙動の定量的評価
- § 4. パイプルーフ設置時の変形予測方法
- § 5. まとめ

§ 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るため、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えず、本来の目的である地山の变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变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ついて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、計測結果から地山特性を評価することにより、最終の变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

2-1 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。

* 中国（支）吉川トンネル（出）

** 関西（支）湊川（出）

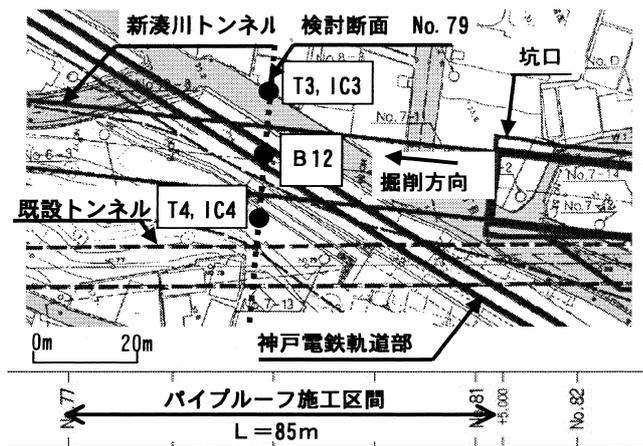


図-1 検討断面図

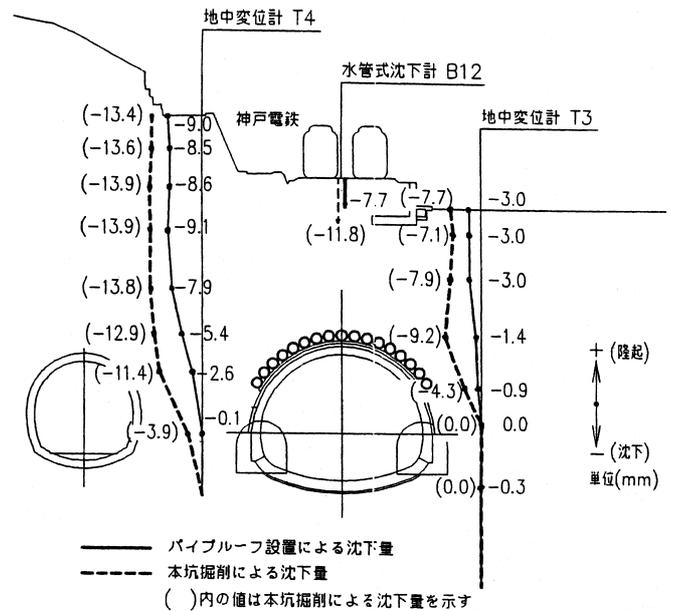


図-3 パイプルーフ設置による沈下挙動

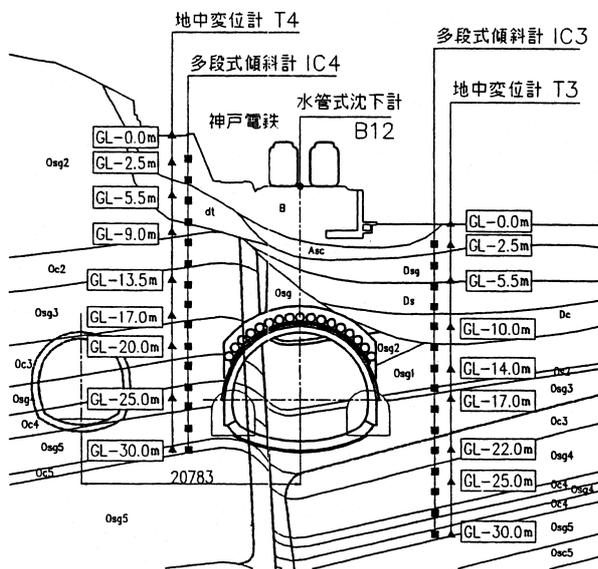


図-2 計測配置図

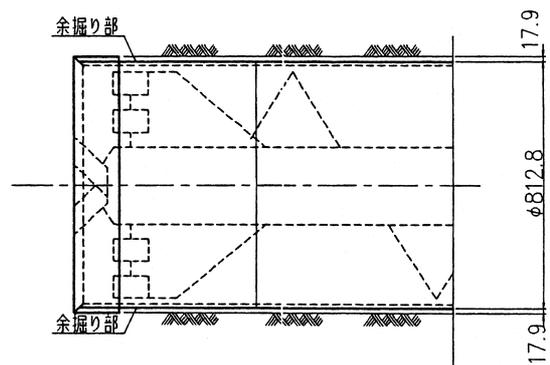


図-4 オーガービット先端の構造図

また、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。

2-2 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ため (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。

2-3 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に示す。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^{4), 5)}。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。

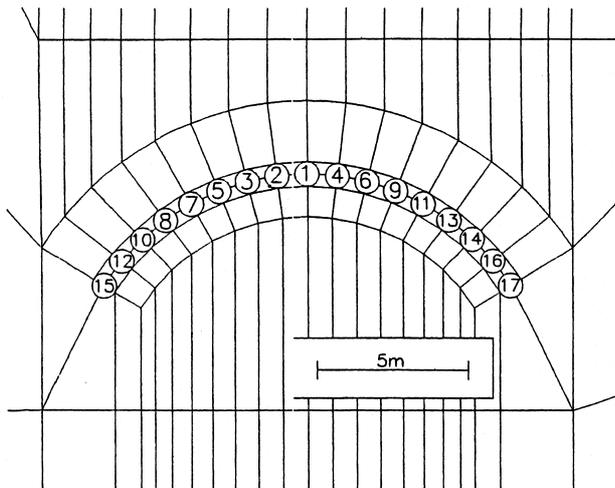


図-5 パイプルーフの設置順序図

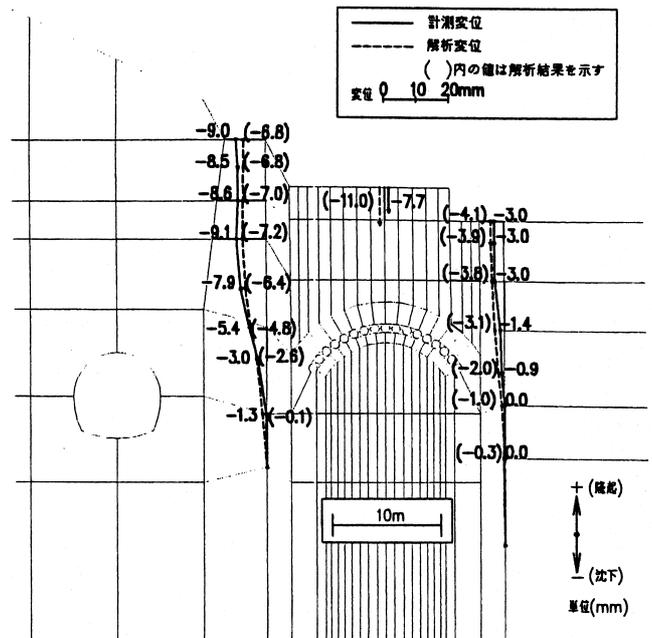


図-6 沈下量の逆解析結果

§ 3. パイプルーフ設置時の地山挙動の定量的評価

3-1 地山挙動の解析

パイプルーフ設置時の地山の変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)⁶⁾を実施した。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、オーガビット掘削による応力解放によって、地山の変形が生じたと考え、パイプルーフ部を素掘り掘削(解放率100%)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って生じた可能性もある。しかしながら、トンネル周辺の地下水位は、ディープウェル工により、事前に十分低下したことが確認されており、地下水位低下による影響は少なく、主として、オーガビット掘削による応力解放によって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。計算上、オーガ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ているため、素掘り掘削と同様の挙動をしていることがわかる。

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)。なお、水管式沈下計、地中変位計は鉛直方向変位、多段式傾斜計は水平方向変位を計測するものである。

3-2 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。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。

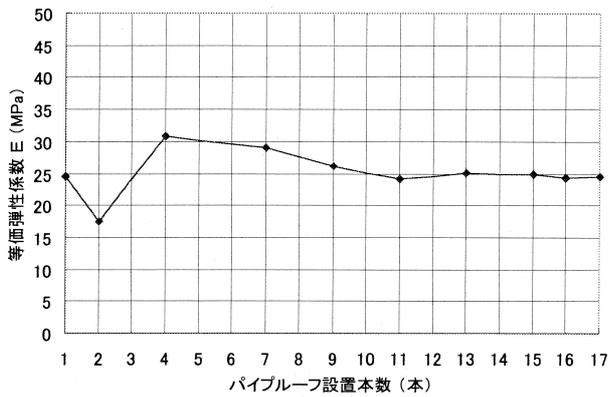
また、逆解析により推定される等価弾性係数、および初期応力のパイプルーフ設置毎の変化を図-7に示す。

この結果から、以下のことがわかる。

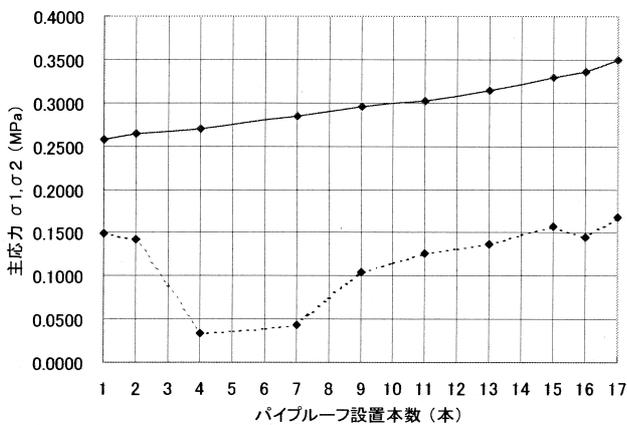
①図-7(a)からわかるように、パイプルーフ1本目設置時の逆解析で得られた等価弾性係数と、2本目以降～17本全ての設置を完了したときの逆解析で得られたものはほぼ同じ値を示す。すなわち、パイプルーフ施工の早い段階において最終状態を予測できることを示している。

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、設置範囲が広がると、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。

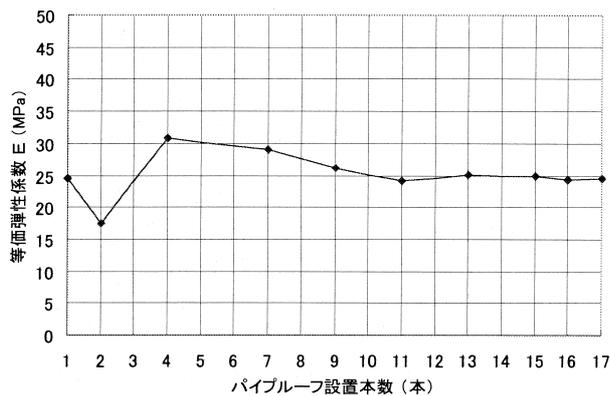
③最終的に、17本全てを設置完了したときの逆解析では、地表面形状が考慮されている自重解析での初期応力と、ほぼ一致する(図-8)。



(a) 等価弾性係数

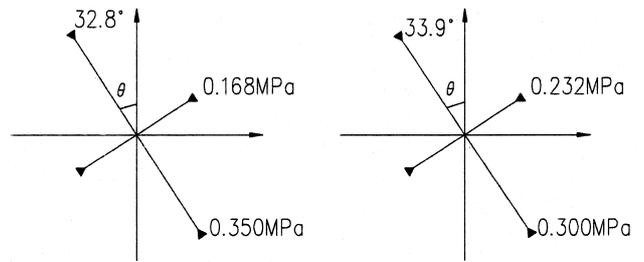


(b) 主応力



(c) 主応力の傾斜

図-7 逆解析による初期応力結果



(a) 逆解析結果

(b) 自重解析結果

図-8 初期応力

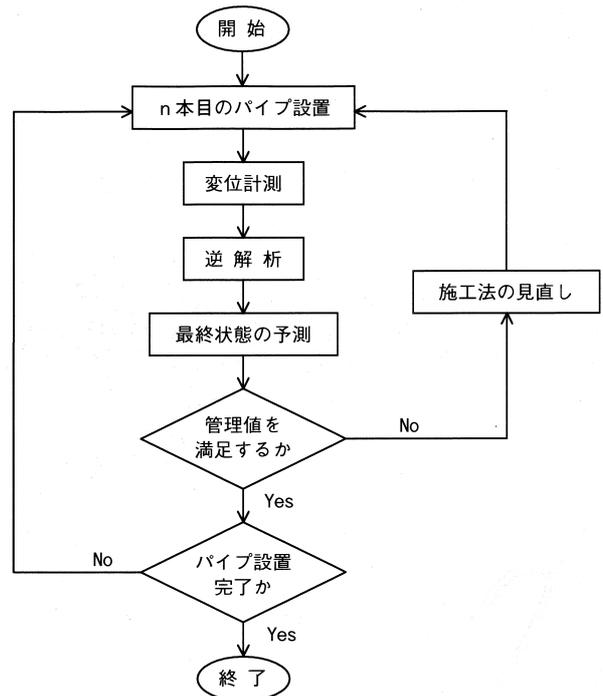
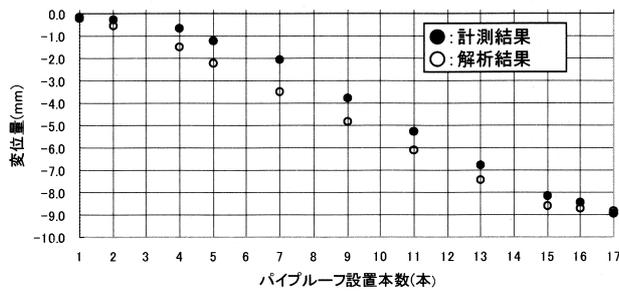


図-9 提案するパイプルーフ工法施工時の情報化施工

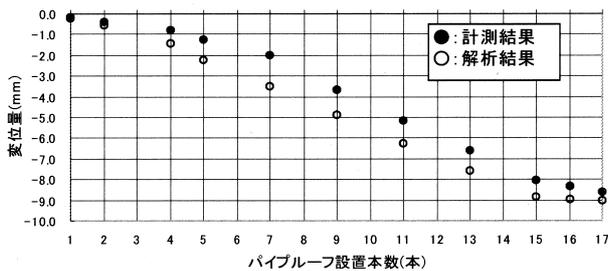
§ 4. パイプルーフ設置時の変形予測方法

§ 3. に示した逆解析の結果をもとに、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。

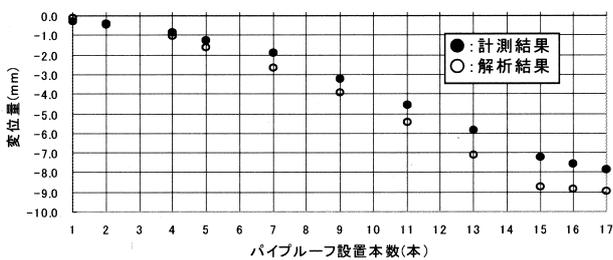
すなわち、実施工において、パイプルーフ設置開始の早い段階で地山を評価し、その後の変形挙動を予測できれば、非常に安全かつ合理的に施工管理が行える。そこで、n 本目のパイプルーフ設置時の逆解析結果から求められた地山特性を考慮して、たえず最終段階のパイプルーフ設置時の変形挙動を予測し、問題があれば直ちに施工法を検討する。



(a) GL -0.0



(b) GL -5.5



(c) GL -13.5

図-10 1本目の逆解析結果によるT4の沈下予測

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、パイプルーフの設置本数が増加するに従って、地表面形状の影響を受けることがわかっているため、地表面形状を考慮できる自重解析で算出した。これらの図に示すように、1本目のパイプルーフ施工時の計測変位があれば、2本目以降のパイプルーフ設置時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を設置するときの変形を順解析から予測できる。前述したように、設置

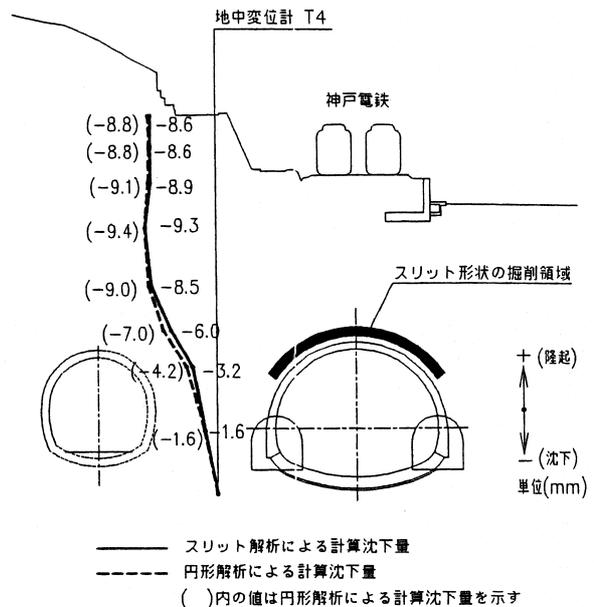


図-11 スリット解析の結果

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受けないことがわかっている。したがって、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。

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、スリット解析は、パイプルーフを円形で表現した解析と、よく一致した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)の割合と一致している。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地山を素掘り掘削（解放率100%）することで、ほぼシミュレーションできる。
- ②パイプルーフ1本目を設置したときと17本全てを設置完了したときの逆解析で得られる等価弾性係数はほぼ同じとなった。このことから、パイプルーフ施工の早期の段階で、最終状態の予想が可能である。
- 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地山特性を評価し、最終の変形挙動を予測する情報化施工法を提案した。なお、今回用いたのは、計測データの一例であるため、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、今後は、パイプルーフ設置前後の地山変形特性（等価弾性係数）の変化を把握し、パイプルーフの変状抑制効果を十分に評価した設計方法について考察を加える予定である。

謝辞. 貴重な計測データを提供して頂き、便宜を図って頂きました。兵庫県神戸工事事務所、神戸電鉄(株)に対し感謝いたします。また、研究を実施するにあたり、貴重な御助言および御指導を頂きました。広島工業大学 櫻井春輔学長、山口大学 進士正人助教授に感謝いたします。

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。
- 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) R. Sasaki, T. Takayama, M. Tsukada, M. Kimura, S. Torii and H. Nakagaki：Excavation monitoring of a large cross section tunnel underpassing an existing railway, IS-Kyoto 2001.
- 5) 佐々木良作，高山努，塚田昌基，木村正樹，鳥居敏：鉄道直下の大断面トンネル施工時の計測管理，トンネル工学研究論文・報告集，第10巻，2000，11。
- 6) 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。