パイプルーフ工法の地表面沈下抑制効果 に関する数値解析的解釈

千々和 辰訓^{1*}・大谷 達彦²・進士 正人¹

¹山口大学大学院 理工学研究科(〒755-8611山口県宇部市常盤台2-16-1) ²西松建設株式会社 土木設計部(〒105-8401東京都港区虎ノ門1-20-10) ^{*}E-mail: chijiwa@rock.civil.yamaguchi-u.ac.jp

近年,都市部において,構造物に近接してトンネルを建設する事例が増加している.その際,近接構造 物に生じる沈下量を抑制する工法として,パイプルーフ工法がしばしば採用されている.しかし,パイプ ルーフ工法の沈下抑制効果のメカニズムは十分に解明されておらず,設計段階においてパイプルーフ工法 により許容値内に沈下量を抑制できるか否かを厳密に把握できないのが現状である. 本研究では,三次元数値解析を用いて,パイプルーフの打設仕様と地表面沈下抑制効果の関係を「効果 率」の考え方を用いて整理し,パイプルーフ工法が有する沈下抑制効果を確実に発揮するためには,パイ プルーフの支点沈下の抑制が重要な役割を果たすことを明らかにする.

Key Words : design method, pipe roofing ,surface settlement, urbun tunneling, numerical analysis

1. はじめに

近年,都市建造物及び鉄道・道路直下にトンネルが計 画されるなど,既設構造物に近接してトンネルを建設す る事例が増加している.その際,地表面沈下を抑制する 必要性から,パイプルーフやAGF等の先受け工法を補助 工法として併用することが一般的になっている.また, このような先受け工法の中でもパイプルーフ工法は特に 地表面沈下の抑制効果が高く,より確実な工法といわれ ている^{1)~3)}.

しかしながら,地表面沈下の抑制を目的としたパイプ ルーフの変位抑制効果のメカニズムならびにパイプルー フを採用した場合の地山挙動は十分に明らかになってお らず,このままでは,設計段階でパイプルーフの仕様を 選定しにくいのが現状である.このような状況において, パイプルーフの設計及び施工を安全かつ経済的に行うた めには,パイプルーフによる地表面沈下抑制効果を事前 に評価する必要がある.

そこで,本研究では三次元数値解析を行い,パイプル -フ工法の打設仕様と地表面沈下抑制効果の関係を「効 果率」の考え方を用いて整理し,更にパイプル-フ工法 が有する地表面沈下抑制効果を十分に発揮するためには そのパイプル-フ径,間隔などの打設仕様でけでなくパ イプル-フの支点部沈下の制御が重要な設計ファクタ- であることを数値解析の観点から明らかにする.

2. 解析の概要

パイプルーフ工法は,トンネル軸方向の剛性効果とト ンネル周方向のシェル効果が合成された三次元的な支保 挙動をすると考えられる.そのため,パイプルーフ工法 の効果を正確に把握するためには,三次元数値解析を実 施する必要がある.加えて,パイプルーフ工法を用いる ような都市部における土被りが小さい土砂地山では,ト ンネル掘削により,地表面まで塑性領域が拡がり,大変 形が生じる可能性がある.従って,大変形が表現できる 有限差分法を用いることとした.

地山モデルを図-1に示す.パイプルーフが採用される 地山は,坑口付近の脆弱な地山を想定し,D 等級相当 の弾塑性地山を仮定し,表-1に示す地山条件とした.

トンネルの掘削形状は,トンネル直径 10m(=1D:Dは トンネル直径)の馬てい型とした.解析領域は,トンネ ル掘削方向に 80m(=8D),トンネル上方に 5m(=0.5D),ト ンネル側方 25m(=2.5D),トンネル下方 10m(=1D)とした.

パイプルーフの打設仕様は図-2に示すように, 鋼管と 中詰め注入剤を一体化し円柱状のソリッド要素の改良体 として表現した.図には解析ケースを合わせて示した. 以下,ケース名で解析ケースを呼ぶことにする.なお, 解析ケース毎に,パイプルーフ鋼管径,鋼管中心間隔が 異なるため,それぞれ異なる解析モデルを準備した.ま た,パイプルーフ部の剛性は,鋼管と中詰めモルタルを 合成した値とした.すなわち,鋼管径 1016mmのケー スでは,下式のように合成した弾性係数は33,655MPaと なる.なお,これらの解析において,打設範囲は既往の 実績で用いられている範囲(上半約120度)とした.

```
E'=(Es \times As+Ec \times Ac) / (As+Ac)
```

= $(2.1 \times 10^5 \times 50,265.5+2.2 \times 10^4 \times 760,466.5)$

- / 810,732
- = 33,655MPa

ここに,

- E': パイプの合成弾性係数 (MPa)
- Es : 鋼管の弾性係数 (MPa)
- As : 鋼管の面積 (mm²)
- Ec : 中詰めモルタルの弾性係数 (MPa)
- Ac : 中詰めモルタルの面積 (mm²)

解析ステップは、パイプルーフ設置後、坑口より 40m を一括掘削すると同時に、切羽から 1m離れた 39mまで 支保工を設置した.このとき、支保工は表-1 に示すよ うに吹き付けコンクリートの時間依存性を考慮し、ソリ ッド要素として表現した.

3. 効果率の算出

(1) 効果率の概要

効果率とは,櫻井ら⁴が提案している補助工法の変形 抑制効果を評価する一つの指標であり,施工時の計測デ ータを用いた逆解析から求めた等価弾性係数(E)と事前 調査における孔内水平載荷試験によって得られた地山の 弾性係数(Es)との比(E/Es)として定義される.すなわち, 補助工法の支保効果により,地山の見かけの弾性係数が 向上すると考えるものである.図-3 に示すように,こ れまでに多くのトンネルの施工実績から各種補助工法の 効果率が整理されており,パイプルーフ工法の効果率は ばらつきはあるものの,おおむね 2~4 のところに分布 するといわれている.いいかえると,パイプルーフ工法 を用いた場合,全体の支保効果として,トンネル掘削に より生じる地山変位を 1/2~1/4 に抑制することができる ことを意味する.

(2) 効果率の算出

先にも述べたように,効果率は,計測データから逆解



図-1 地山モデル

表-1 解析諸条件

	弾性係数	単位体積 重量	ポアソン 比	粘着力	内部 摩擦角
	E (MPa)	(kN/m ³)		C (Mpa)	(°)
地山	150	210	0.35	0.05	30
支保工	3400	2509	0.2		

析により求めた地山の等価弾性係数(E)と事前調査に り得られた弾性係数(E)との比(EEs)で定義されているた め,下式のように変位量の比として考えられる.

- 効果率=E/Es (1/U')/(1/Us)=Us/U' (1)
- ここに , Us : 無支保掘削による地表面沈下量 U': パイプルーフおよび一次支保工を考 慮した地表面沈下量

次に,図-2 に示すパイプルーフの鋼管径と地表面沈 下から(1)式により求められる効果率との関係を整理し た.図-4 に無支保掘削時におけるトンネル中心線上の 地表面沈下量と,それぞれのパイプルーフ打設仕様にお ける同様の位置の地表面沈下量の比較を示す.この図か らからわかるようにパイプルーフの仕様を変化させても 地表面沈下はほとんど変化しないことがわかる.

図-5 に図-4 及び(1)式より求めたパイプルーフ打設仕様と効果率との関係を示す.この図に示すように, case4の打設仕様で効果率は最大値 4.2, case1の打設仕様で効果率は最小値 4.0 を示し,パイプルーフの管径が異なっても効果率そのものには大きな差異が生じないことがわかる.

この検討結果から,既往の施工実績から評価されるパ イプルーフ工法は,数値解析結果からも上限値である 4.0相当の効果率を有することがわかった.しかし,先 にも述べたように実際の現場において「効果率」の値が 2~4の範囲でばらつくという報告がある.その原因とし て支保工の剛性の違いに着目した.

解析ケース	case1-a	case2-a	case3-a	case4-a	case5-a
鋼管径 (mm)	216.3	406.4	609.6	812.6	1016
打設間隔 (mm)	500	500	1000	1000	1500
パイプの合成弾性係数(Mpa)	49,428	39,168	37,340	33,569	33,655
支保工の弾性係数(Mpa)	3400	3400	3400	3400	3400

図-2 パイプルーフ打設仕様

4. 支保工の支保剛性の違いによる沈下挙動の比較

(1) 支保工の弾性係数の違いによるパイプルーフの沈下 挙動の比較

図-5の結果を基に,効果率が最も大きい42を示した case4 の打設仕様と,効果率が最も小さい 4.0 を示した case1の打設仕様の2パターンの解析モデルを用いて, それぞれのケースにおける支保工の弾性係数 E=3400Mpa(case4a, case1-a)を基準とし,その2倍の E=6800Mpa(case4b, case1-b), 1/2 倍の E=1700Mpa(case4c, case1-c),の6ケースにおいて,支保工の弾性係数の違い による支保工そのものの沈下挙動の比較を行った.その 結果を図-6の支保工沈下コンター図に示す.図より, まず case4 の場合,3 ケース共,脚部における沈下量は 2mm となりほぼ同程度となる.次に天端部付近におけ る沈下挙動を比較する.まず case4a ではトンネル中心 線から側方部にかけて約 5.8mm の沈下が広がっている ことがわかる.次に case4b では約 3mmの沈下となり支 保工全体がほぼ同程度の沈下といえる.一方 case4-c で はトンネル中心線から側方部にかけて約 7.8mm の沈下 が広がっていることがわかる.同様に case1の場合,3 ケース共,脚部における沈下量は 2mm となりほぼ同程 度である.次に天端部付近における沈下挙動を比較する. まず case1-a ではトンネル中心線から側方部にかけて約 6.2mmの沈下が広がっていることがわかる.次に case1-b では,約 3mmの沈下となり支保工全体がほぼ同程度の 沈下といえる.一方 case1-c ではトンネル中心線から側 方部にかけて約8.5mmの沈下となるこがわかる.

以上のことからの case4の打設仕様と case1の打設仕様 の両者において,支保工の弾性係数が小さくなっても脚 部における沈下量はほぼ同程度であるものの,トンネル 天端における沈下量は次第に増加しトンネル中心線か側 方に向かって沈下分布が拡大することがわかる.





管径812.6 (@1000) 管径1016 (@1500)

管径609. (@1000)

管径406.4 (@500)

36 35

> 管径216. (@500)

図-5 パイプルーフ仕様と効果率の関係



図-6 支保工の沈下挙動の比較

しかし,この両者の打設仕様を比較すると,効果率が 低い数値を示す casel のケースの方がそれぞれの弾性係 数における天端沈下の値そのものは大きな値を示し,沈 下範囲はやや広い範囲を示している.つまりパイプルー フ工法の有する地表面沈下抑制効果の低い打設仕様ほど 支保工が負担する荷重が大きくなるため,支保工の沈下 量が大きくなり沈下分布も拡大すると考えられる.

(2) パイプルーフの変形挙動の比較

case4 と case1 の打設仕様の解析モデルを用いて,先ほ どと同様に支保工の弾性係数を E=3400Mpa(case4a, case1-a), E=6800Mpa(case4b, case1b), E=1700Mpa(case4c, case1-c)とした計 6 ケースについて,支保工の弾性係数の 違いによるパイプルーフ自体の沈下挙動を比較した.こ こでは,パイプの変形が最も大きいと推測されるトンネ ル中心線直上に位置するパイプに着目し計測点はパイプ の中心とした.その結果を図-7(a),(b)に示す.case4 と case1 の打設仕様の2パターン共に支保工の弾性係数が 通常の E=3400MPa よりも大きくなるとパイプ自体の変 形は小さくなり,反対に支保工の弾性係数が小さくなる とパイプ自体の変形も大きくなることが確認できた.

次に,図-7(a),(b)において端部における最終沈下と 切羽断面における沈下量(以下,「先行沈下」と呼ぶ) を用いて最終沈下に対する先行沈下の比率を求めた.そ の結果を図-8に示す.case4の打設仕様において,case4 aでは最終沈下は先行沈下の2.27倍,case4bでは2.12倍, case4cでは2.4倍であることがわかった.同様にcase1の





打設仕様において, case1-a では最終沈下は先行沈下の 2..34倍, case1-b では 2.15倍, case1-c では 2.52倍であるこ とがわかった.

このことから,先行沈下を抑制するほど,最終沈下が 小さくなることがわかる.また,この両者を比較すると, case1の打設仕様における最終沈下に対する先行沈下の 比率は case4 のそれに比べ,支保工の弾性係数 E=3400Mpaでは, case1-a は case4-a の 1.03倍,その 2倍の E=6800Mpa では case1-b は case4-b の 1.01倍,1/2倍の 1700Mpa では case1-c は case4-c の 1.05倍であることがわ かった.

以上をまとめると,地表面沈下抑制効果の低いパイプ ルーフ打設仕様ほど,支保工の沈下による影響を受けや すく変形しやすい.また,最終沈下は、先行沈下の大き さに影響を受け,先行沈下が小さいほど,最終沈下に対 する先行沈下の比率における増加率が小さくなる.つ まり,最終沈下を抑制するためには,パイプルーフの 支点を確保し,支点の沈下量を抑制することにより, 先行沈下そのものを抑制することが重要であることが わかった.

(3) 地表面沈下挙動の比較

最後にcase4, case1の打設仕様の2パターンの解析モデ ルを用いて,先ほどと同様に支保工の弾性係数 E=3400Mpa(case4a, case1-a), E=6800Mpa(case4b, case1-b), E=1700Mpa(case4c, case1-c)の計6ケースにおいて,トン ネル中心線上の地表面沈下挙動を検討することにより, 支保工の弾性係数の違いとパイプルーフ工法の地表面 沈下抑制効果の関係を検討した.そこで,詳細に地表 面沈下抑制効果を照査するため,効果率を算出し検討 する.その結果を図-9に示す.case4の打設仕様の場合, case4-aでは,先にも述べたように効果率は4.2を示す.次 にcase4bでは効果率は30%アップの5.6となり, case4bで は効果率は24%ダウンの3.2となる.

同様に, case1の打設仕様の場合, case1-a では先にも 述べたように効果率は4.0程度となる.次に, case1-b で は効果率は37%アップの55となり, case1-c では効果率 は30%ダウンの3.0となる.

以上のことから両者のパイプルーフ打設仕様において パイプルーフ工法の地表面沈下抑制効果は,支保工の弾 性係数の違いが地表面沈下抑制効果に大きく影響する. つまり図-3に示すように,パイプルーフ工法の効果率 がおおむね 2~4 の範囲でばらつく理由の一つとして支 保工により生じた沈下量の大きさに応じてパイプルーフ 工法が発揮する地表面沈下抑制効果も異なることがわか った.



図-8 支保工の弾性係数の違いによる 最終沈下に対する先行沈下の比率



図-9支保工の弾性係数の違いと効果率の関係

5. まとめ

本論文では,まず三次元数値解析を実施して,パイプ ルーフ工法の沈下抑制効果について分析を加えた.その 結果,パイプルーフの打設仕様が異なっても,効果率そ のものには大きな差異が生じないことがわかった.

その原因としてパイプルーフの支点部に生じた支保工 沈下量の大きさにより,パイプルーフ工法が発揮する沈 下抑制効果が異なることが推測されたため,沈下抑制効 果に関する検討を行った.その結果,地表面沈下抑効果 の高いパイプルーフ打設仕様に比べ地表面沈下抑制効果 の低いそれは支保工そのものの沈下量の影響を受けやす くパイプルーフが変形しやすいということがわかった.

また,地表面沈下抑制効果の低いパイプルーフ打設仕 様ほど,支保工の弾性係数が大きくなるほど,地表面沈 下抑制効果が増加することがわかった.

以上のことから支保工の剛性の違いが地表面沈下抑制 効果に大きく影響することがわかった.すなわち,実測 でパイプルーフ工法の効果率がおおむね 2~4 の範囲で ばらつく理由の一つとして支保工の剛性の違いにより発 生した沈下量の大きさに応じてパイプルーフ工法が発揮 する地表面沈下抑制効果が異なるためであることがわか った.つまり,パイプルーフ工法が十分に沈下抑制効果 を発揮するためにはパイプルーフの支点となる切羽近傍 の支保工に沈下を生じさせないだけの十分な剛性を有す る支保工の採用や脚部沈下対策等をあわせて検討するこ とが必要であることがわかった.

謝辞:3次元数値解析に実施にあたり,計算の指導を頂 いた㈱熊谷組・田中信次氏(元山口大学大学院生),鉄建 建設㈱・平田亮氏(元山口大学大学院生),㈱ケー・エフ・ シー・森本真吾氏(元山口大学大学院生)に心より感謝いたします.

参考文献

- 1) 土木学会 トンネル工学委員会:トンネル標準示方書[山 岳工法偏] 伺解説,pp.231-234 2001.
- THパイプルーフ技術協会 パイプルーフ工事 施工実績 表
- 3) 東日本旅客鉄道株式会社,近接工事設計施工標準, 1999.9.
- 4) 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.

NUMERICAL EVALUATION OF THE CONTROLLING EFFECT OF GROUND SETTLEMENT BY PIPE ROOFING METHOD

Tatsunori CHIJIWA, Tatsuhiko OTANI and Masato SHINJI

Recently, the case of construction on tunneling which close to the established infrastructure increases in the urban area. The pipe roofing method is well adopted to control the ground settlement which arises in the approach structure. However, the controlling effect of the ground settlement by pipe roofing method is not so clear that the design of pipe roofing depends on the empirical approach.

In this paper, the authors deal with the parametric studies of 3D numerical simulation. The authors also show the rigidity of lining supported pipe roofing is very important by the analysis of numerical simulation.