

現場計測データに基づくめがねトンネルへの 作用荷重と周辺地山挙動の評価

GROUND BEHAVIOR AND PERFORMANCE OF EYE-GLASS-FRAME TUNNELS BASED ON MEASUREMENTS

青木宏一¹⁾・若狭紘也²⁾・上村正人³⁾・進士正人⁴⁾・中川浩二⁵⁾

Koichi AOKI, Hiroya WAKASA, Masato KAMIMURA, Masato SHINJI and Koji NAKAGAWA

Construction of the eye-glass-frame tunnels with a center pillar, which stand very close to each other, tends to increase because of the limitation of the land utilization in Japan. Compare to the total number of the tunnels, there are not many constructions of the eye-glass-frame tunnels with a central pillar. In design and construction stage of this tunnel type; it is needed to understand sufficiently the characteristic such as displacement action of the peripheral natural ground. This paper used measurement data for statistical analysis to study the ground movements and load generation during the construction stages.

Key Words : eye-glass-frame tunnel, measurement data, overburden, ground behavior

1. はじめに

めがねトンネルは、1974年に伊祖トンネル¹⁾にて我が国で初めて施工されて以来、その施工事例は40件程度とあまり多くない。しかし近年、市街地でのトンネル工事の増加や文化財保護など理由に、めがねトンネルを採用せざるを得ない事例が多くなってきており、今後もその採用数は増加していくものと考えられる。

しかし、施工実績はあまり多くないため、設計・施工面における技術的な考え方や基準は確立されておらず、めがねトンネル特有の問題に対しても個々のトンネルごとに対応しているのが現状である。

めがねトンネルは、図-1に示すように2本以上のトンネルが互いに接し、センターピラーを共有した特殊な断面形状²⁾であるため、通常の相互影響のないように離隔距離を確保する双設トンネルとは違い、先進坑と後進坑には、それぞれの掘削による影響が相互に及ぼし合うことが考えられる。そのため、設計・施工にあたっては、その影響度合いの特徴を十分理解し、事前に対策の検討しておく必要がある。

そこで本研究では、最近施工が行われためがねトンネルの現場計測データを分析し、めがねトンネル特有の地山挙動および支保工やセンターピラーへの作用荷重の把握を行う。このことにより、今後のめがねトンネルの支保設計に対する新たな考え方の提言を行うものである。

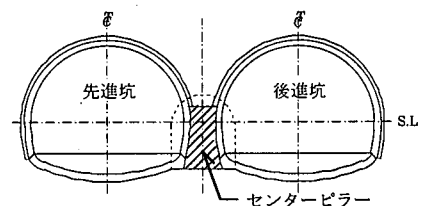


図-1 代表的なめがねトンネルの構造

- | | | |
|-----------|------|--------------------|
| 1) 学生会員 | 修(工) | 山口大学大学院 理工学研究科 |
| 2) 学生会員 | 学(工) | 山口大学大学院 理工学研究科 |
| 3) 正会員 | | 山口大学大学院 理工学研究科 |
| 4) 正会員 | 学博 | 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 |
| 5) フェロ-会員 | 工博 | 山口大学教授 臨床トンネル工学研究所 |

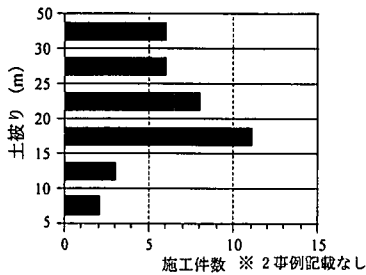


図-2 最大土被り

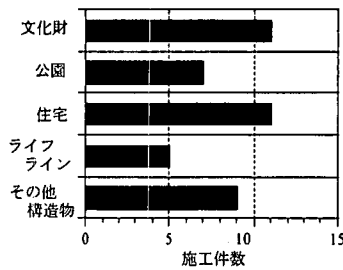


図-3 トンネル直上地表面の構造物

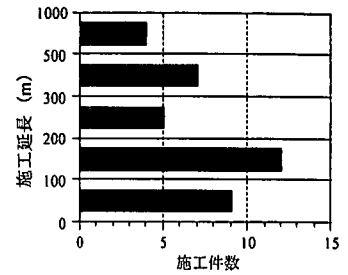


図-4 施工延長

2. めがねトンネルの設計・施工の現状

(1) 施工環境³⁾

過去に施工が行われた事例（37トンネル）より、各事例の最大土被りを図-2に、トンネル直上の地表部の土地利用状況を図-3に示す。最大土被り25m未満の事例が約70%を占め、地表周辺には文化財や住宅などが多く存在していることがわかる。これらの図より、めがねトンネルは、土被りが小さく、地表付近には構造物が多く存在する都市部で採用され、地表沈下の抑制が必要条件となっていることがわかる。

また、めがねトンネルは、施工直前にトンネル地表部に遺跡などの重要文化財が確認され、その保護のため、当初設計では切土区間であったところをトンネル構造へ設計変更した際に、道路線形の問題などもあり、同工法を採用せざるを得なかった事例も多数みられる。そのため図-4に示すように、トンネル施工延長は100～200mのものが最も多く、300m未満の事例が70%を占めていることより、一般的にめがねトンネルは短いトンネルであるといえる。

(2) 設計・施工時に生じる問題点

めがねトンネルは、前述に示すような施工環境であること、また2本のトンネルが近接している構造形式であることから、その設計・施工時には下記に示すような力学的な問題とそれに対する対策工が実施されている。

① 地表沈下抑制の必要性

都市部での採用が多いことから、土被りが小さく、地表部には沈下抑制を必要とする構造物が多く存在する。そのため、本坑施工時にはパイプルーフやAGFなどの先受け工法を採用している事例が多い。

② センターピラーへの作用荷重

めがねトンネル特有の構造物であるセンターピラーは、両本坑施工時には、種々の方向から繰り返し荷重を受けるとともに、支保工を介してアーチ部に作用している荷重を支持し、構造形式によってはトンネル完成後も両本坑の支保工より伝達される地山荷重を負担する。そのため施工時には、センターピラーの沈下や傾斜などの計測が行われ、その挙動の把握を行っている。しかし、事前設計段階でのセンターピラーへ作用する荷重の考え方は、まだ確立されていない。

③ 後進坑施工による先進坑への影響

めがねトンネルは、相互影響を及ぼさないように離隔距離を十分確保する双設トンネルとは異なり、2本のトンネルがほぼ接した状態で施工を行わなければならない。そのため、複雑な相互影響の度合いを事前に予測し、最小限に相互影響を抑える対策の検討を行っておく必要がある。特に、後進坑の掘削により地山には応力再配分が生じ、その応力が先進坑の支保工や覆工に作用し、クラックなどの不具合を先進坑に生じさせ、その安定性を損なう可能性が考えられる。

3. 地表への影響の検討

先進坑と後進坑の直上地表面の最終沈下量の比較を図-5に示す。なお、ここで取り扱う沈下量は、導坑掘削

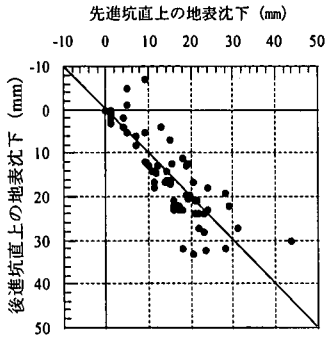


図-5 先進坑と後進坑直上の最終地表面沈下量

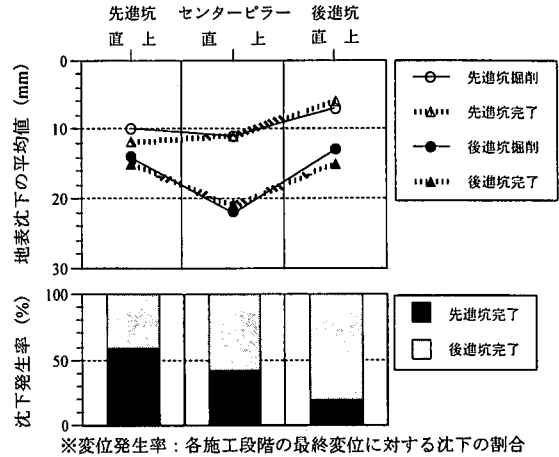


図-6 各施工段階における地表面沈下量の平均値と沈下発生率

$$\text{荷重比} = \frac{\text{ピラー作用荷重}}{\text{土被り荷重}} \quad \text{土被り比} = \frac{\text{土被り}}{\text{トンネル掘削幅}}$$

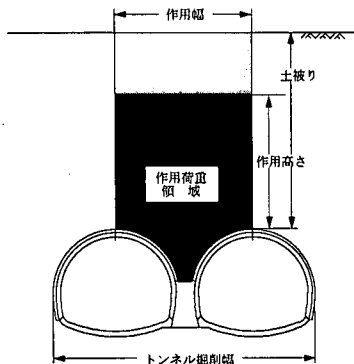


図-7 センターピラーに作用する荷重領域

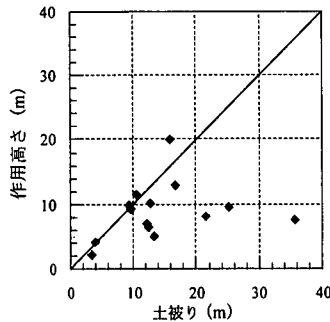


図-8 土被りと作用高さの関係

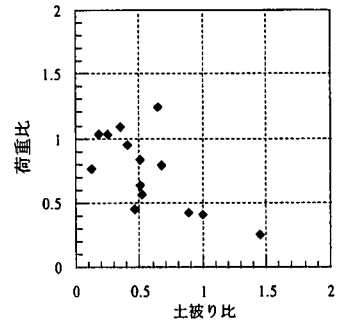


図-9 土被り比と荷重比の関係

時に生じた変位は含まず、本坑掘削のみにより生じた沈下量である。図-5より、地表面沈下は40mm以下の事例が大半を占めていることがわかる。また、先進坑と後進坑の直上地表面には、最終的に同程度の沈下が生じていることがわかる。

次に、各測点における各施工段階の地表面沈下量と沈下発生率の平均値を図-6に示す。なお、沈下発生率とは、後進坑掘削完了時での沈下量を100%とした場合の各施工段階における沈下量の割合である。図-6より、先進坑掘削完了時においては、先進坑とセンターピラー直上の地表面沈下は同程度である。しかし、センターピラー直上の最終地表面沈下量は、先進坑と後進坑直上に比べ10mm程度大きくなっている。また、各施工段階におけるセンターピラー直上の地表面の沈下発生率をみると、先進坑掘削完了時には約40%、後進坑の掘削により残りの60%が変位する結果が得られている。これは両本坑掘削による地表面への影響は、先進坑掘削よりも後進坑掘削による影響が大きいことを意味している。

4. センターピラーへの作用荷重

センターピラーに作用する荷重（以下、ピラー作用荷重という）は、地山条件や施工法などにより異なってくると考えられるため、その荷重について明確な指針が示されていないのが現状である。

センターピラーへ作用する荷重領域（以下、ピラー作用荷重領域という）を単純に表現することは困難である。しかし、ここでは既往の研究⁴⁾を参考にし、図-7に示すような単純な矩形領域を仮定する。ピラー作用荷重の推定には、作用幅を両本坑のトンネル中心までの長さとし、作用高さをパラメータとすることとした。な

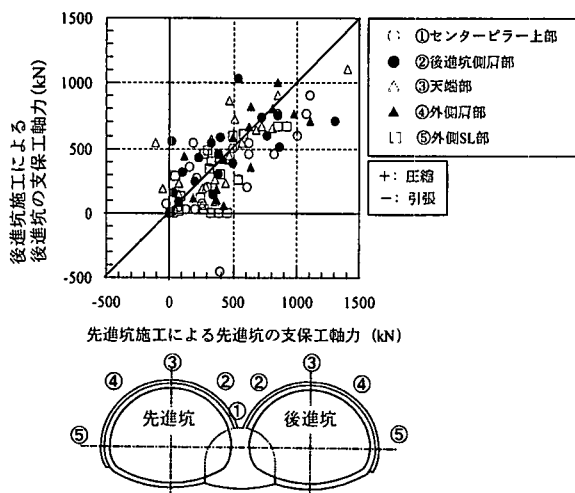


図-10 先進坑と後進坑のそれぞれの掘削により発生した支保工軸力の比較

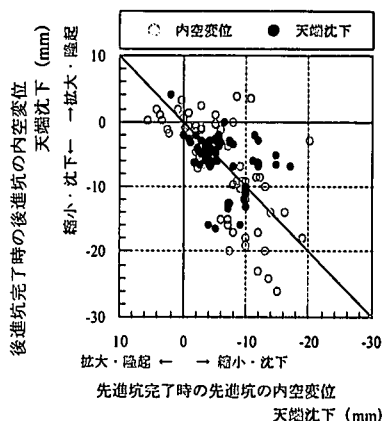


図-11 先進坑と後進坑のそれぞれの掘削により発生した内空変位・天端沈下の比較

お、荷重の推定には、後進坑施工完了時における両本坑の支保工軸力と吹付け応力の最終値を用いた。

作用高さと土被りの関係を図-8に示す。これより、ピラー作用荷重領域は、作用高さが土被りとほぼ等しくなる事例と、土被りに関わらず作用高さが10m前後となる事例の2種類の傾向があることがわかった。前者は、めがねトンネルの施工環境が低土被りの都市部での施工が多いことから、地質的にアーチ効果が十分に得られない地山条件、後者は比較的良好な地山条件（地山の弾性係数で表現すると高い値であるなど）ため、地山のアーチ効果が得られたものであると推測される。また、土被り比と荷重比の関係を図-9に示す。

ここで、小東山トンネル³⁾でのFEM解析と計測結果によると、ピラー作用荷重は土被り比が0.5～0.75では荷重比=1となる線上に分布し、土被り比が1以上の場合にはそれより下位に分布するとの知見を得ている。これに対し図-9は、土被り比が0.5未満では、荷重比が1前後に分布しており、全土被り荷重がセンターピラーへ作用していることがわかる。また、データ数が少ないが、土被り比が0.8以上では荷重比は0.5程度となり、センターピラーには全土被り荷重は作用しないことがわかる。

5. 後進坑施工の先進坑への影響

(1) 先進坑と後進坑の各々の掘削によるトンネルの挙動

先進坑と後進坑のそれぞれを単一トンネルとして考えた場合、各施工段階における先進坑と後進坑の変位・応力の発生状況の比較、すなわち先進坑施工開始から完了までの先進坑の計測結果と後進坑施工開始から完了までの後進坑の計測結果の比較を行った。

先進坑・後進坑それぞれの掘削完了時の支保工軸力の比較を図-10に示す。この図より、先進坑と後進坑それぞれの掘削により発生するそれぞれの支保工軸力は、概ね同程度となることがわかる。

また、先進坑・後進坑それぞれの掘削完了時の内空変位・天端沈下の比較を図-11に示す。この図からも支保工軸力同様、先進坑と後進坑とも掘削により発生する変位量は、多少ばらつきがみられるものの、概ね同程度であるといえる。

以上より、先進坑と後進坑の同一施工過程における変位・応力の発生過程に違いはみられないことから、万が一、先進坑施工時に問題となる応力や変位が発生した場合は、後進坑にも同じ問題が発生する可能性が考えられ、その場合には既設の先進坑への影響も大きくなると考えられる。したがって、この結果より先進坑で大きな変位・応力が発生した場合は、後進坑施工前に後進坑の支保設計の見直しを行うなど、先進坑の計測データを活用した後進坑の対策工の事前検討が可能となると考える。

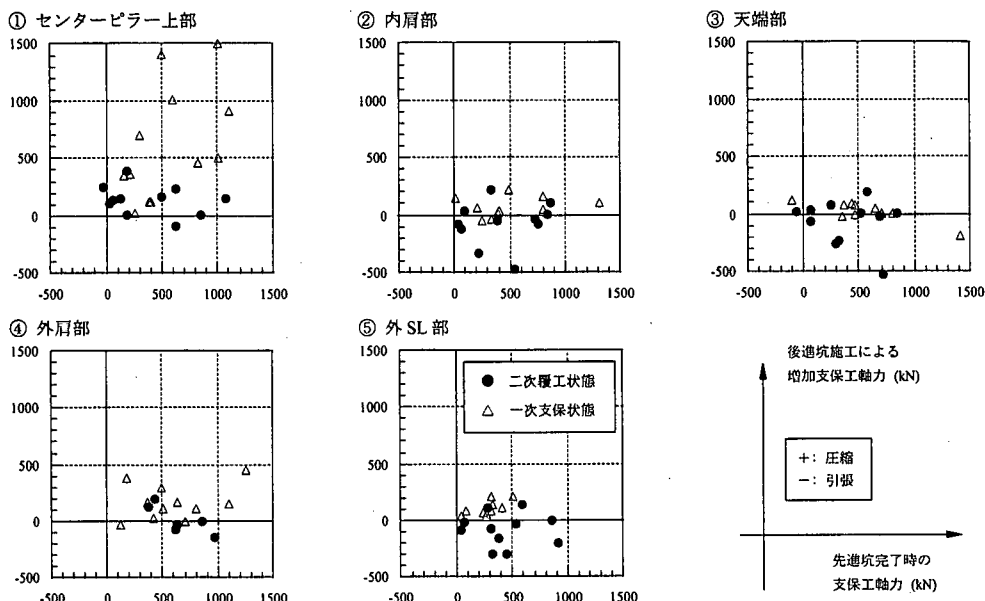


図-12 後進坑施工による先進坑の増加支保工軸力の分布

(2) 後進坑掘削による先進坑への影響の検討

近接して2本のトンネルを施工するめがねトンネルでは、後進坑施工に際して二次覆工あるいは一次支保状態で存在している先進坑への影響について把握しておく必要がある。そこで、計測結果より後進坑施工による先進坑の支保応力や内空変位の増減に着目し、先進坑への影響について検討を行う。

a) 支保工応力

後進坑施工による先進坑の支保工軸力の増減の分布を図-12に示す。この図は、横軸に先進坑掘削完了時の支保工軸力を、縦軸に後進坑施工により増減した先進坑の支保工軸力をプロットしたものである。図-12より、まず他の4測点と比べ、センターピラー上部の測点のみ、後進坑施工により圧縮応力が増加する傾向となっている。他の4測点では、先進坑掘削完了時の応力状態に関わらず、後進坑施工による影響は小さいといえる。

次に、後進坑施工により支保工軸力が圧縮側へ増加したセンターピラー上部の測点について、後進坑施工時の先進坑の支保状態に着目し分類した。その結果、先進坑を二次覆工まで施工したのち後進坑の施工を行った場合（以下、先進坑二次覆工状態）は、若干圧縮側に応力増加している傾向もみられるが、先進坑の一次支保工には影響が小さいものと考えられる。これは、先進坑を覆工とインバートにより閉合し、先進坑の剛性を高めることで、後進坑施工による影響を抑えているものと考えられる。したがって、先進坑二次覆工状態で後進坑の施工を行う場合、先進坑の二次覆工には、その影響が大きく生じる可能性がある。そのため、設計に際してはコンクリート強度や補強鉄筋量の検討を行う必要があり、また施工に際しては、覆工コンクリートの応力測定などから有害なクラックが生じる可能性を予測し、しかるべき対策を講じる必要があると考える。

一方、先進坑の支保工が一次支保状態で後進坑の施工を行った場合（以下、先進坑一次支保状態）、増加する応力にバラつきはみられるが、先進坑完了時の応力より約2倍増加している事例が多いものと推測される。これは、後進坑施工による地山荷重が再び先進坑一次支保工へ作用した結果、剛なセンターピラーが存在するセンターピラー上部の支保工軸力が圧縮側へ応力増加したのと考えられる。

以上より、先進坑一次支保状態で後進坑の施工を行う場合、合理的な支保設計という観点からいえば、めがねトンネルということで通常の単一トンネルよりも剛な支保構造で先進坑と後進坑を同支保ランクとするのではなく、後進坑は通常の単一トンネルと同じ基準で支保選定を行い、先進坑は後進坑施工による影響を考慮し、後進坑より剛な支保構造を採用する、すなわち後進坑側の支保工のみ剛性を高めることで対応することが基本方針として考えられる。

b) 内空変位・天端沈下

後進坑施工時に先進坑一次支保状態の事例を対象に、後進坑施工による先進坑の内空変位・天端沈下の増減の分布を図-13に示す。この図より、先進坑掘削完了時の変位に関わらず、内空変位は最大約5mm拡大し、天端沈下は5～10mm程度沈下する傾向があることがわかる。これは、近接して後進坑施工を行うことから、先進坑は後進坑側へ引っ張られるような挙動が生じ、先進坑の天端部は沈下し、内空は拡大したものと考える。但し、このような後進坑施工による先進坑および周辺地山の挙動については、計測結果と数値解析を用いて、より詳細にその挙動について把握しておく必要があると考えられる。

6. まとめ

複数のめがねトンネルの現場計測データを整理し、先進坑と後進坑の施工によるめがねトンネル特有の挙動について力学的に把握を行った結果、以下に示す知見を得た。

① 地表への影響

地表面沈下量は、センターピラー直上で最大値をとる傾向がある。変位発生率をみると、両本坑掘削による地表面への影響は、先進坑掘削よりも後進坑掘削による影響が大きいことがわかった。

② センターピラー作用荷重

センターピラー作用荷重は、土被り比が0.5未満では全土被り荷重が作用し、土被り比が0.8以上では土被り荷重の半分程度がセンターピラーへ作用していることがわかった。

③ 後進坑施工による先進坑への影響

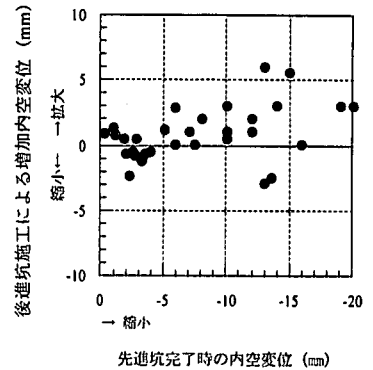
後進坑施工による先進坑の支保工軸力の増加は、多少バラつきあるものの先進坑施工完了時の応力の2倍程度発生している。このことより、先進坑は後進坑施工による影響を考慮し、後進坑より剛な支保構造、すなわち先進坑の後進坑側の支保工のみ剛性を高めるなどの対策をとることが基本方針として考えられる。

また、今後のめがねトンネルの最適な設計・施工のために本研究が活用されれば幸いである。

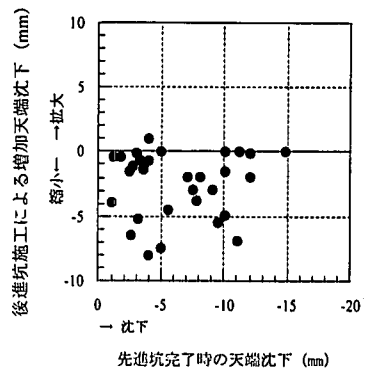
謝辞：本研究を行うにあたり、計測データを御提供頂いた関係各位、ならびに貴重なご意見を頂いためがねトンネル勉強会会員の皆様に心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 羽田忠彦, 中島和雄, 湯浅正己: わが国はじめてのめがねトンネル 伊祖トンネルの計画と施工, トンネルと地下, 第6巻8号, pp.29～35, 1975.8.
- 2) 土木学会: トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説
- 3) 青木宏一, 上村正人, 相山孝司, 中川浩二: わが国におけるめがねトンネルの現状と課題, トンネルと地下, 第32巻9号, pp.53～62, 2001.9.
- 4) 松田哲夫, 豊里栄吉, 岩島保, 五十嵐瑞穂, 梨本裕, 相山孝司: 1本導坑センターピラー共有型メガネトンネルの設計法と検証, トンネル工学研究論文・報告集, 第7巻, pp.1～6, 1997.11.
- 5) 豊里栄吉, 岩島保, 五十嵐瑞穂, 梨本裕: 土被りの薄いメガネトンネルを掘る 第二神明道路(改築) 小東山トンネル, トンネルと地下, 第28巻9号, pp.27～40, 1997.9.



(a) 内空変位



(b) 天端沈下

図-13 後進坑施工による先進坑の増加内空変位（一次支保状態のみ）