

めがねトンネル施工における地表面への影響評価

INFLUENCE OF EYE-GLASS-FRAME TUNNEL CONSTRUCTIONS ON GROUND SURFACE SETTLEMENT

若狭紘也¹⁾・上村正人²⁾・青木宏一³⁾・進士正人⁴⁾・中川浩二⁵⁾

Hiroya WAKASA, Masato KAMIMURA, Koichi AOKI, 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 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 center pillar. In design and construction stage of this tunnel type; it is needed to understand sufficiently the characteristic such as displacement action of the periphery natural ground. This paper used measurement data for statistical analysis to study the influence on ground surface settlement during the construction stages.

Key Words : eye-glass-frame tunnel, measurement data, surface settlement

1. はじめに

市街地におけるトンネル施工の増加や、文化財保護などの理由から、めがねトンネルを採用せざるを得ないケースが増加している。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近接して施工され、センターピラーを共有する特殊な断面形状を有している。施工に際しては、同一断面を複数回切羽が通過することとなり、緩み領域の相互干渉生じる可能性があり、それゆえ周辺地山への影響が問題となる。

施工実績は、現在までに40件程度とあまり多くなく、そのためめがねトンネル特有の問題に対しても個々のトンネルで対応している状況であり、設計・施工の両面における統一的な考え方や基準などは確立されていないのが現状である¹⁾。

このような背景のもと、著者らのグループは過去に施工され入手が可能であった現場計測データを整理・分析することにより、めがねトンネルにおける設計・施工法に対する研究を行ってきた²⁾。過去の事例をみると、トンネル直上の地表には文化財や住宅などが存在することが多く、地表面沈下に対する制約条件が課されていることが多い³⁾。また、周辺地山に対する影響が大きい場合には、補助工法の採用や施工法の変更を余儀なくされるため、事前に地表面沈下量や傾向を把握し、その対策を検討しておく必要がある。

本研究では、現場計測データからめがねトンネル施工に伴う地表面沈下の評価を行い、また数値解析を用いてその力学的な側面からの検証を行う。このことにより、今後のめがねトンネルにおける設計時の基礎資料として活用されることを目的とするものである。

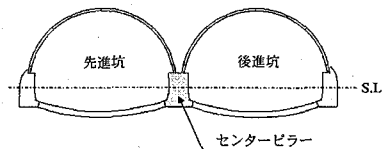


図-1 代表的なめがねトンネルの構造

- | | | |
|-------------|---------|-------------|
| 1)学生会員 | 山口大学大学院 | 理工学研究科 |
| 2)正会員 | 山口大学大学院 | 理工学研究科 |
| 3)学生会員 修(工) | 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)JER-会員 工博 | 山口大学教授 | 臨床トンネル工学研究所 |

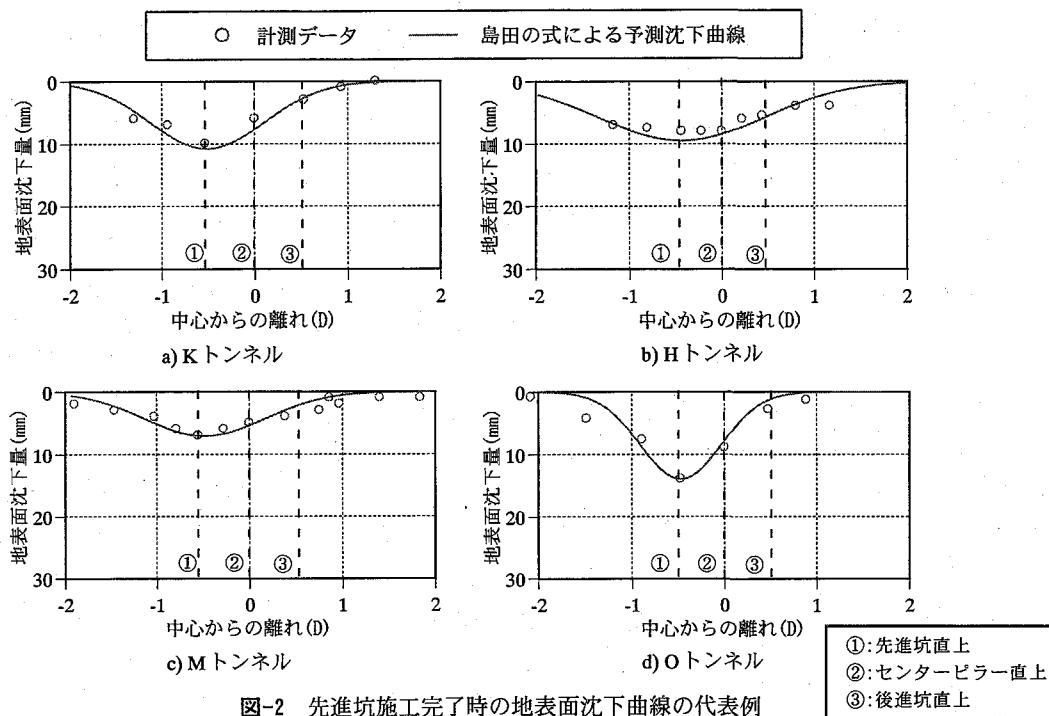


図-2 先進坑施工完了時の地表面沈下曲線の代表例

2. 設計・施工上の問題点と検討方法

前述のようにめがねトンネルは都市部でかつ、比較的土被りが薄いこと、また2本のトンネルが近接する構造であることから、地表面に対する影響については以下の特徴が挙げられる。

- ① 導坑の施工も含めると、同一断面を3～5回ほど切羽が通過するため、その都度、変位が累積される。
- ② 低土被り・低強度の地山におけるトンネル施工のため、グランドアーチが形成されにくく沈下量が増大する。また、掘削の影響が地表面まで達する。掘削による緩み領域が拡大し地山が不安定になりやすい。
- ③ 近接施工が行われるため、トンネル掘削による周辺地山への影響が干渉しあい、地山が不安定になりやすい。

以上の点を考慮し、本研究では特に地表面沈下の経時的な増減に着目し、各施工段階での特徴の把握を行った。検討対象は7トンネル35断面における現場計測データである。

3. 現場計測データに基づく地表面沈下挙動の把握

(1) 先進坑施工完了時の地表面沈下量

図-2に、代表的な4トンネルを例にあげ、先進坑施工完了時のトンネル横断方向の地表面沈下を示す。また、島田によって提案されている単一トンネル施工時の沈下予測式⁴⁾を用いて、算出した沈下予測曲線を合わせて示す。

島田は、模型実験から式(1)に示す土被り・地質などの諸条件を考慮した横断方向の地表面沈下形状の予測式を提案している。またこの式は、現場計測データとの比較がなされており、特に土被りの薄い都市部のトンネルにおいて適用できることが示されている。

表-1 島田による地質分類

地質分類		a	B	a
A	風化岩 しまった洪積砂	6	0.45	1.88
B	ゆるんだ洪積砂 シルト	4	0.25	1.54
C	粘土 膨張性地質	2	0.15	1.39

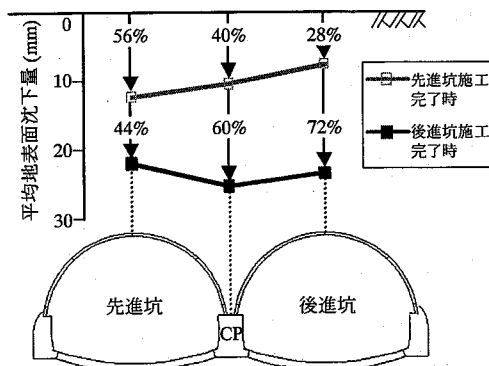


図-4 各測点における地表面沈下の推移

ることとした。すなわち両者が一致することは、めがねトンネルにおける地表面沈下の最終値は、単一トンネル施工による沈下量を重ね合わせたものとなる。図-3より、両者を比較した結果は、いずれのトンネルにおいても計測データが予測沈下曲線を上回る結果となっている。これは、最終変位量は先進坑施工完了時の変位量を単純に重ね合わせただけでなく、後進坑の施工は先進坑とは異なり単一トンネル施工とみなすことはできないことを示している。

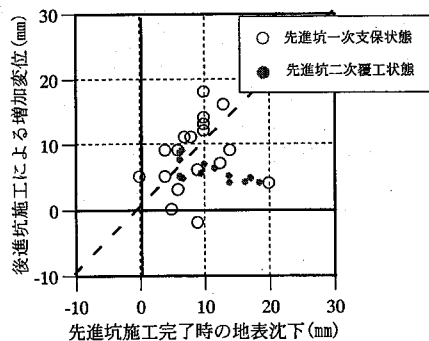
b) 各施工段階での沈下量の比較

図-4に各測点における各施工段階での地表面沈下量と沈下発生率の平均値を示す。沈下発生率とは、測点毎の最終変位量に対する各施工段階での沈下量を百分率で表したものである。この図から、先進坑施工時には、やはり先進坑上の地表面沈下量が最大となるが、後進坑の施工完了時にはセンターピラー上の地表面でその沈下量が最大となり、他の2測点と比べて5mm程度大きくなっていることがわかる。各測点の沈下発生率を見ると、先進坑施工完了時には先進坑上の地表面で最終変位量の56%の変位が発生しているのに対し、後進坑施工により発生した後進坑上の地表面沈下は72%となっており、先進坑施工完了時と比べて大きい値となっている。また、両本坑上の中間に位置するセンターピラー上の地表面においても、後進坑施工による割合が20%大きくなっている。

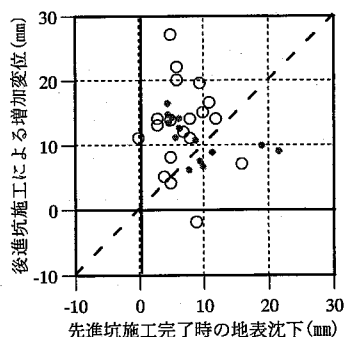
以上のことから、両本坑施工による地表面への影響は、先進坑施工に比べて後進坑施工による影響の方が大きいといえる。

(3) 先進坑の支保状態による沈下量の違いに関する検討

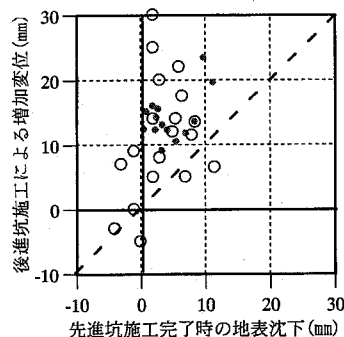
めがねトンネルの施工手順は、先進坑を二次覆工まで施



(a) 先進坑上



(b) CP 上



(c) 後進坑上

図-5 後進坑施工による増加地表面沈下量の分布(先進坑の支保状態により分類)

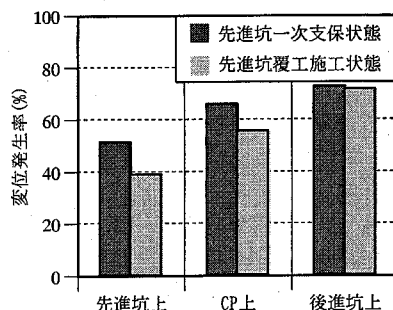


図-6 後進坑施工完了時の変位発生率の比較

工したのち後進坑の施工を行う場合（以下、先進坑二次覆工状態）と、先進坑の支保工が吹付けコンクリートやロックボルト等の一次支保状態で後進坑の施工を行う場合（以下、先進坑一次支保状態）に大きく二分される。そこで、先進坑の支保状態の違いに着目し、地表面沈下量についての検討を行う。

図-5に各支保状態の後進坑施工により増加した地表面沈下量の分布を示す。この図は、横軸に先進坑施工完了時の地表面沈下量を、縦軸に後進坑施工に伴い増加した地表面沈下量をプロットし、先進坑の支保状態により分類を行ったものである。図-5より、特に先進坑上において、支保状態の違いにより、増加地表面沈下量に違いがみられ、先進坑一次支保状態の事例では、後進坑施工により先進坑施工完了時とほぼ同程度の沈下が発生しているのに対し、先進坑二次覆工状態では先進坑施工完了時の沈下量に関わらず、後進坑施工により増加する沈下量は10mm未満に抑えられている。また、図-6に示す後進坑施工完了による増加地表面沈下の発生率の比較においても、先進坑一次支保状態では全体の50%程度の沈下が生じているのに対し、先進坑二次覆工状態では40%程度に抑えられていることがわかる。同様にセンターピラー上においても先進坑二次覆工状態のトンネルは、比較的増加沈下量が抑えられる傾向が得られている。

以上のことから、先進坑二次覆工状態のトンネルは全体的に後進坑施工による増加変位が抑制されていることがわかった。これは、後進坑の施工以前に先進坑を覆工とインバートで閉合したことにより、先進坑の剛性が高まり後進坑施工による周辺地山への影響が抑制されたものと推測される。

4. 数値解析を用いた検証

先進坑支保状態と地表面沈下量の関係について、線形弾性解析によりこれまでの推測の検証を行う。解析ケースは、先進坑の支保工をめぐねトンネルで採用されることが多いDⅢパターンとし、先進坑一次支保状態と先進坑二次覆工状態についてそれぞれ行った。また、比較のために支保工をモデル化しない解析を1ケース行った。地山の弾性係数は50MPa、土被りはめぐねトンネルでは平均的な値である2Dとした。図-7に解析モデルを示す。

図-8に各3ケースの解析結果を示す。この図は先進坑施工完了時における地表面沈下量と、後進坑施工により増加した変位量を、それぞれ横断方向について示している。

結果より、まず支保工をモデル化しない解析結果に着目すると、後進坑の施工による増加変位量は、先進坑施工完了時の地表面沈下量と比較して、最大沈下量・影響範囲ともに非常に大きいことがわかる。

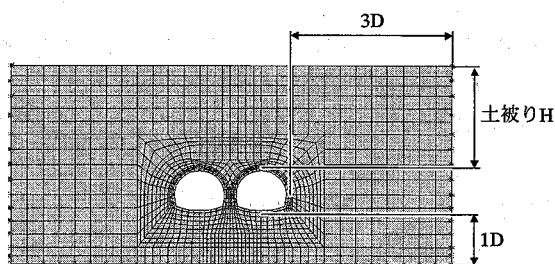


図-7 解析モデル (D: トンネル掘削径)

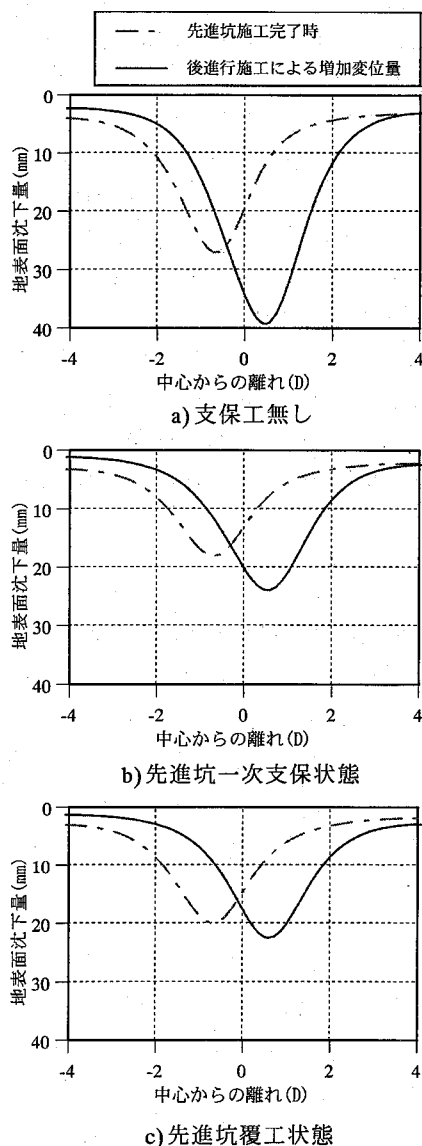


図-8 各施工段階毎の地表面沈下量の比較

ここで、線形弾性解析においても解析結果が計測データと同様に後進坑施工による増加変位が比較的卓越する原因については、既設の先進坑の存在による見かけ上の地山全体の剛性の低下が最も大きな要因ではないかと推測される。つまり、後進坑を施工する際に先進坑が隣接することにより単一トンネルの施工と異なる条件が発生し、その結果、沈下の卓越が起こったと考えられる。

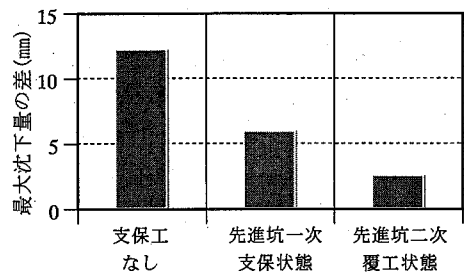


図-9 先進坑施工による地表面沈下量と後進坑の施工による増加変位量の最大沈下量の差の比較

次に先進坑パターンの違いと地表面沈下量の関係に着目すると、先進坑一次支保状態では後進坑の施工による増加変位量が、先進坑施工完了時と比較してやはり若干大きくなって

いるのに対し、先進坑覆工状態では、両者がほぼ同程度にまで抑えられていることがわかる。また、図-9に示す先進坑施工時の地表面沈下量と後進坑の施工による増加変位量の最大値の差においても、支保工無し・先進坑一次支保状態・先進坑覆工状態の順に差が小さくなる傾向がみられる。特に先進坑覆工状態では、両者の差が2mm程度と非常に小さい。これは、先進坑に覆工を施工し支保剛性を上げたことで、先に述べた全体的な地山剛性の低下を抑制したものと考える。ただし、先進坑二次覆工状態で後進坑の施工を行う場合、後進坑施工による応力再配分により、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、設計時においてはコンクリート強度や補助鉄筋などの検討を行い、しかるべき対策を講じる必要があると考える。

以上より、地表面沈下の抑制という観点からいえば、先進坑二次覆工状態のように後進坑の施工以前に先進坑の支保剛性を高めることが有効であると考えられる。

5. まとめ

複数のめがねトンネルの計測データの整理、および数値解析を用いてめがねトンネル施工時の地表面沈下の把握を行った結果、以下に示す知見を得た。

- ① 先進坑施工完了時の地表面沈下は、単一トンネル施工時とほぼ変わらない。
- ② 後進坑施工は、先進坑施工時と比較して沈下量が増大し、単一トンネルと捉えることはできない。これは、隣接する先進坑の存在により、見かけ上の地山剛性の低下に起因するものと考えられる。
- ③ 後進坑施工以前に、先進坑に覆工を施工するなど、より剛な支保構造にすることで沈下の抑制を行うことが可能であることがわかった。

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ご提供いただいた関係各位、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) 青木宏一，上村正人，楢山孝司，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.
- 2) 青木宏一，若狭紘也，上村正人，進士正人，中川浩二：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，トンネル工学研究論文・報告集，Vol.12，pp.371-376，2002.11.
- 3) 上岡裕之，大本英輝，武藤修資，石川恭義：小土かぶり地山に大断面メガトンネルを貫く 四国横断自動車道大代古墳トンネル，トンネルと地下，第33巻7号，pp.539-549，2002.7
- 4) 島田隆夫：土被りの浅い鉄道山岳トンネルにおける地表沈下の形状および発生機構に関する研究，鉄道技術研究報告書，No.1162（施設編第509号），1981.2.