

わが国におけるめがねトンネルの現状

STATE OF THE ART OF TWIN TUNNEL WITH CENTER PILLAR IN JAPAN

青木 宏一¹⁾・上村 正人²⁾・河原 幸弘³⁾・中川 浩二⁴⁾

Koichi AOKI, Masato KAMIMURA, Yukihiro KAWAHARA and Koji NAKAGAWA

In Japan, we have only constructed a limited number of twin tunnels with center pillar. So the design and construction manuals have not been established.

The discussions were concentrated in the number of heading tunnels, the shape and scale of the center pillar and connecting system between secondary lining and invert concrete.

The Authors collected papers and reports concerning the projects and reported the state of the art of this type of tunnels.

Key Words : twin tunnel, center pillar, heading tunnel, secondary lining

1. はじめに

わが国におけるめがねトンネルは、現在までその施工実績はあまり多くなく、設計・施工法に関しては技術的な考え方や基準は確立されておらず、個々のトンネルで対応しているのが現状である。

近年、市街地でのトンネル工事の増加と土地利用上の制約や文化財保護あるいは環境問題等により、めがねトンネルを採用せざるを得ない状況が増えており、その設計・施工は必然的に地質・土被り・地上構造物等により厳しい制約条件下にあると考えられる。

一方、最近の山岳トンネル工法は、補助工法の多様化によってより厳しい条件下でも施工可能となり、同様にめがねトンネルもそれ特有の問題点に加え、より困難な条件での施工が増えているように思える。

筆者らは、このような近年のめがねトンネルの現状を踏まえ、調査・研究を行っている。本報告は、今までのめがねトンネルの施工実績を公表されている資料より調査し、技術的傾向と課題をまとめたものである。

2 事例調査

めがねトンネルの施工事例調査は、各種報告書・論文等広くに公表されている文献を中心に行った。これによりわが国における主なめがねトンネルは概ね把握されているものと考えているが、資料として公表されていないものも考えられる。この点に関しては、今回の調査では省略し、検討対象から省くものとする。

調査対象としたトンネルは、以下に示す条件のものである。

- ① 現在、施工が完了し供用中、または工事発注が既になされた道路トンネル
- ② 先進坑・後進坑の中央部にセンターピラーを有するトンネル

-
- | | |
|-------------|--------------------------|
| 1) 学生会員 | 山口大学大学院 理工学研究科 |
| 2) 正会員 | 前田建設工業(株) 九州支店 下津トンネル作業所 |
| 3) 正会員 工学修士 | 山口大学 工学部 社会建設工学科 |
| 4) 正会員 工学博士 | 山口大学 工学部 社会建設工学科 |

③ 機械掘削により施工されたトンネル

文献調査の結果、めがねトンネルの施工事例は27事例(33文獻)を収集した。収集した資料を基に、めがねトンネル特有の設計・施工上の技術的傾向と課題をまとめた。

3. めがねトンネルの採用環境

年代別の施工着手数について図-1に示す。1980年以降の着手数は年間平均1～2本程度であり、最近5年間に於ける施工着手数は8件である。

施工延長について図-2に示す。平均施工延長は約220mであり、300m未満のトンネルが20事例と全体の70%以上を占めており、一般に短い区間で採用されているといえる。

めがねトンネルが採用される背景としては、計画予定地の地理的条件や土地利用条件が影響を及ぼしている事例が多くみられる。代表的な採用理由としては、坑口に接近して交差点計画があり、十分な上下線の隔離距離を確保できないために採用された事例¹⁾や開削予定区間において、遺跡等の文化財の存在が確認され、さらなる用地確保も困難なためにめがねトンネルを採用された事例²⁾等がある。

最大土被りについて図-3に示す。最大土被り25m未満のトンネルが70%以上(17/23件)を占める。また、地表部には文化財・住宅等の地表沈下の抑制を必要とする構造物が多く存在する場合が多く、施工条件が厳しく、都市部での採用が多いといえる。

4. 設計・施工上の技術的傾向

めがねトンネル特有の問題点の中で導坑とセンターピラー及び計測工と数値解析に着目し、その技術的傾向についてまとめた。

4.1 導坑数について

めがねトンネルにおける導坑の主な役割は、本坑施工前に導坑内にピラーコンクリートを構築するため、導坑数がピラーコンクリートの数と一致する。

導坑数は、図-4に示すように中央導坑のみ施工する「1本導坑方式」と、さらに両本坑の外側にも側壁導坑を施工する「3本導坑方式」に分類した。

導坑数の年代別採用数について図-6に示す。

3本導坑方式が18件と1本導坑方式の9件を上回っている。また、年代別による採用傾向は見られない。

この理由として、導坑数は基本的に地質条件(特に上半脚部付近)や荷重条件(土被りや上載荷重)によって決定されるところが大きく、比較的硬質な地山では1本導坑方式、軟質な地山では3本導坑方式が採用されるためであると考えられる。しかし、両方式の適用に際し、地質条件や荷重条件の基準や適用限界等は明確ではない。

また、地質や荷重条件によっては、中央導坑を施工せず、センターピラーに代わる構造体の構築を行う「無導坑方式」も考えられる。

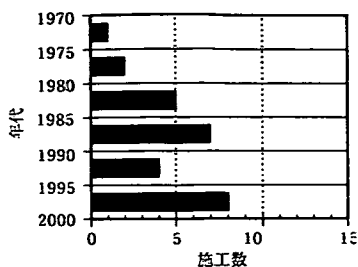


図-1 施工着手数

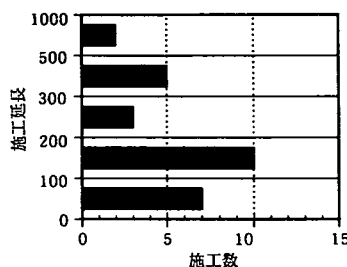


図-2 施工延長

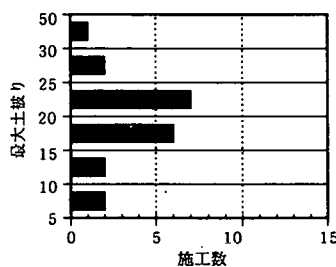


図-3 最大土被り

4.2 センターピラー断面形状について

めがねトンネルにおいて中央導坑内に構築されるセンターピラーは、両本坑施工時に種々の方向から繰り返し力を受け、アーチ部に作用している荷重を支持する等の役割を担う最も重要で、めがねトンネル特有の構造体である。

事例調査では、その形状に着目し、図-5に示すように両本坑に対し左右対称な断面を有するものを「対称断面形」とし、中央導坑側壁部の片側を利用し、左右非対称な断面を有するものを「非対称断面」として分類した。

センターピラー断面形状の年代別採用数について図-7に示す。

1990年以降、対称断面形を採用した事例が増加していることがわかる。

対称断面形は、施工性やトンネル完成時の安定性、さらに設計や解析上のアプローチが容易である等で有利と思われる。しかし、センターピラー両側に空洞が生じるため、地山条件によっては、傾斜や沈下への対策（エアームタル等による仮充填）が必要になる。また、対称断面形と分類したなかでも、ピラーが本坑断面と同じくらい高いものやピラー底盤幅が高さに比べて大きい逆T型がみられた。

一方、非対称断面形は、施工中の安定性や中央導坑掘削断面が小さくできる点では優れているが、形状的に局部的な応力集中や不等沈下が生じ易い点、さらに後進坑センターピラー側の覆工コンクリートの形状が悪くなることから、完成後にクラック等の変状の原因となることも考えられる。

ここで、導坑数別のセンターピラー断面形状の採用数について図-8に示す。

1本導坑方式においては、対称断面形を採用している事例が9件中8件と多く、逆に3本導坑方式においては、非対称断面形を採用している事例が18件中12件と多い傾向となっている。しかし、最近では3本導坑方式においても対称断面形を採用した事例が増加している。

4.3 導坑とセンターピラーの大きさについて

前節までは導坑数とセンターピラーの形状に着目し分類と技術的傾向をまとめた。本節では、対称断面形・非対称断面形における導坑とセンターピラーの大きさに着目し、技術的傾向をまとめる。

中央導坑とセンターピラーの大きさ（幅と高さ）の関係について図-9に示す。

非対称断面形では、中央導坑・センターピラーとも比較的同じ大きさの事例が多く、ピラー底盤幅と高さもほぼ同じ大きさの事例が多い。

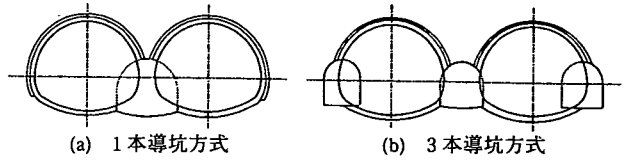


図-4 各導坑方式

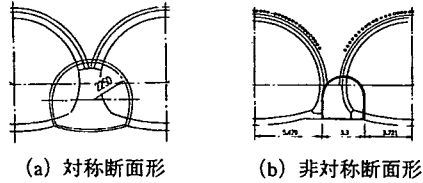


図-5 センターピラー断面形状

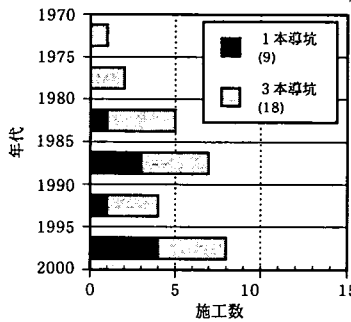


図-6 導坑数の年代別採用数

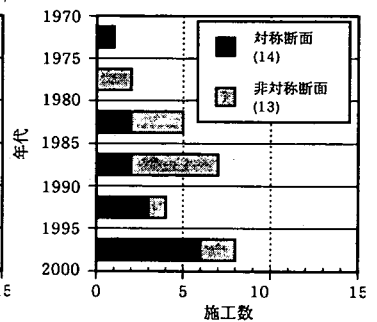


図-7 センターピラー断面形状の年代別採用数

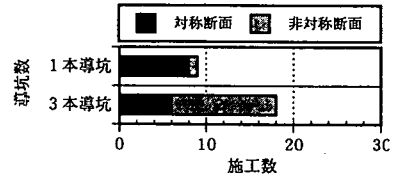


図-8 導坑数別のセンターピラー断面形状の採用数

一方、対称断面形では、中央導坑・センターピラーとも個々のトンネルによってその大きさが異なるものも多く、非対称断面形に比べてやや大きい断面のものが多い。また、センターピラーでは底盤幅に対し高さの方が大きくなる傾向にあり、特にその比率が2倍近くなる事例も2事例みられる。

導坑断面が小さい場合、導坑掘削による地山の緩みを増大させる可能性は低くなるが、掘削やピラー構築の際の施工機械が限定されたり、補助工法の適用等に問題が生じやすいと思われる。

さらに、年代別にセンターピラーの大きさについて整理した結果を図-10に示す。

対称断面形・非対称断面形とも年代別による傾向は見られず、ピラー底盤幅・高さとも2～6mの事例が多い。

各センターピラー断面形状の平均的な大きさについて表-1、図-11に示す。

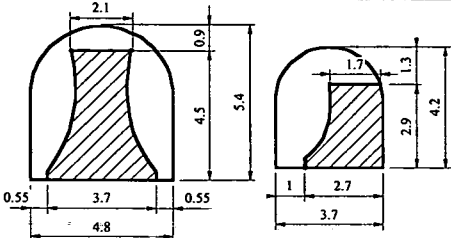
導坑断面では、対称断面形が非対称断面形より幅・高さとも1m程度大きく、また断面積で比較すると1.7倍となっている。

地山強度比とセンターピラーの大きさの関係について図-12に示す。尚、地山強度比は、 $q_u/\gamma H$ により求めるものであるが、事例調査では一軸圧縮強度の記載事例が少ないため、解析に用いられている弾性係数(E)から $q_u=E/200$ と仮定し一軸圧縮強度を算出した。また、単位体積重量も $\gamma=2.0\text{tf/m}^3$ と仮定した。

地山強度比が小さくなるにつれて、ピラー底盤幅は大きくなる傾向があると考えられたが、そのような傾向は見られなかった。これは、めがねトンネルが採用される道路線形等の制約条件により、ピラー底盤

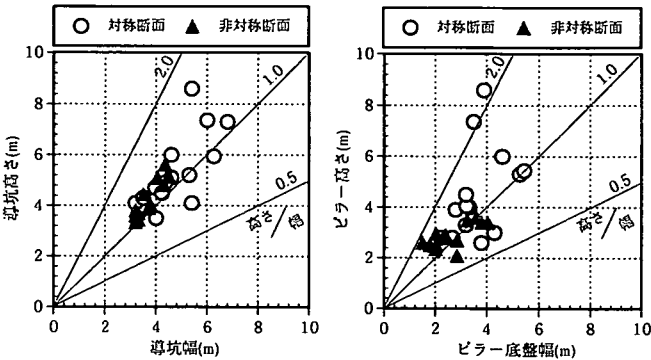
表-1 導坑とピラーの大きさ（平均値）

CP形状	中央導坑		センターピラー		
	幅(m)	高さ(m)	底盤幅(m)	上部幅(m)	高さ(m)
対称断面形	4.8	5.4	3.7	2.1	4.5
非対称断面形	3.7	4.2	2.7	1.7	2.9



(a) 対称断面形 (b) 非対称断面形

図-11 中央導坑とセンターピラーの平均的な大きさ



(a) 中央導坑 (b) センターピラー
図-9 中央導坑とセンターピラーの大きさの関係

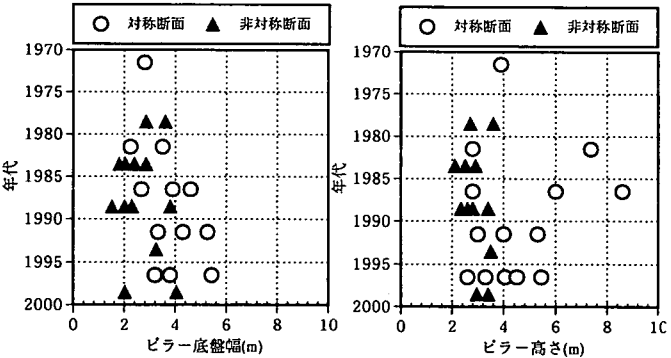


図-10 センターピラーの大きさの年代別採用数

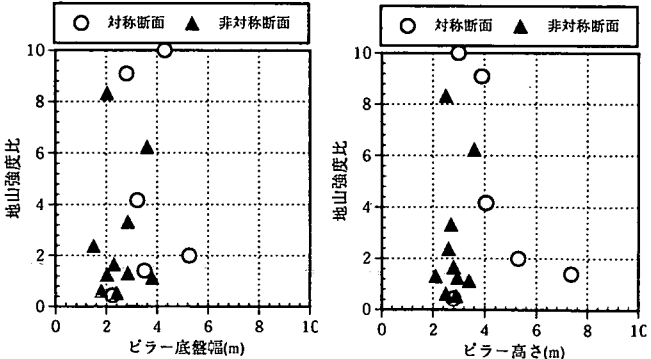


図-12 地山強度比とセンターピラーの大きさ

幅が限定されるものと考えられる。

ピラー高さについては、対称断面形において地山強度比が小さくなるにつれて、高さが大きくなる傾向がみられる。しかし、ピラーが高くなると導坑断面が必然的に大きくなり、本坑施工前に緩みを増大させる可能性や本坑施工時にピラーの安定性等の問題が生じる可能性が考えられるため、その採用には検討が必要と思われる。

また、導坑数やその大きさは、めがねトンネルにとって経済性や工期に大きな影響を与えるものであり、施工時の計測データの蓄積や数値解析技術による研究が今後必要と考えられる。

4.4 センターピラーと覆工の関係について

事例調査では、センターピラーと覆工の関係について、図-13に示すように「上部支持型」・「脚部支持型」・「インバート支持型」の3タイプの支持構造形式に分類した。

覆工支持構造の年代別採用数について図-14に示す。

各覆工支持構造の採用数に大差はないが、年代別に見ると、80年代前半は上部支持型が8件中7件と大半を占めていたが、80年代後半から脚部支持型やインバート支持型の採用数が多くなり、特に最近の5年間ではインバート支持型の採用事例が多くなっている。

上部支持型は、センターピラーに一次支保工と覆工の両者を支持させる構造であり、センターピラーも覆工の役割を担うため、万一変状が生じた場合の対応が難しく、またアーチコンクリートとの目地部の防水・排水処理方法に難点がある。

脚部支持型は、上部支持型と比較し、防水・排水処理を含めた覆工コンクリートの施工品質確保の面では有利と考えられるが、センターピラー脚部にせん断応力が発生するため、応力照査等の検討が必要となる。

インバート支持型は、覆工アーチ部とインバート部が一体構造であるため、覆工完了後のセンターピラー沈下等の変状による影響の軽減、さらに耐震性等トンネルの安定性は優れていると考えられるが、ピラーの底盤幅が小さくなるため、施工時にセンターピラーに変状が生じる可能性が大きくなると考えられる。

今後は、覆工の施工品質の確保や漏水等による耐久性を重視し、脚部支持型やインバート支持型が多くなると考えられるが、その際、センターピラーと覆工との荷重分担の設計上の考え方等を整理していくことも必要と思われる。

4.5 計測工について

めがねトンネルは、都市部の低土被りで軟質な地質に採用されることが多く、また形状が特殊である上、同じ断面を複数回掘削するため、計測工の役割はより重要なものとなる。

本坑に対する計測工Bの採用数について図-15(a)に示す。尚、事例調査により計測工について記述があったものは24事例である。

各計測項目とも半数以上のトンネルで実施され、特に地中変位測定と鋼製支保工応力及び吹付け応力測定の計測は、70%以上の施工事例で実施されている。また、センターピラーに関する計測は60% (15/24事例) 以上の事例で行われており、さらに詳しく分類すると、図-15(b)のに示すように4項目に分けられる。その中でも、底盤土圧測定 (12/15件) と傾斜測定 (11/15件) は多く行われている。

センターピラーが本坑施工時に傾斜・沈下等の変状を生じた場合、トンネル全体の安定性に大きな影響を及ぼし、その対策も困難である。そのため、導坑施工時の地質や計測結果からセンターピラーに作用する荷

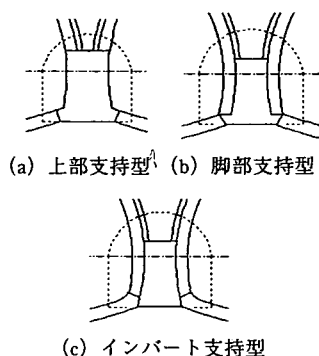


図-13 覆工支持構造

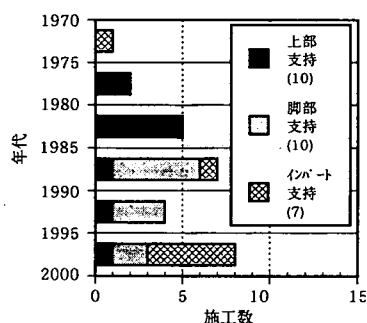


図-14 覆工支持構造の年代別採用数

重を予測・検討した上で断面形状を決定するとともに、本坑施工時には計測により挙動を確認することが重要と思われる。

めがねトンネルでは、先進坑の地質状況や計測結果を後進坑の設計・施工にフィードバックできる利点がある。そのため、先進坑施工段階で出来るだけ精度のよい計測データを収集するとともに、切羽観察を重視し、切羽の安定や卓越する割れ目の方向や傾斜を記録し、数値解析結果とともに総合的に検討・判断していくことが必要と考える。

4.6 数値解析について

ほとんどの事例において事前予測解析（最も代表的なものとして2次元FEM解析が挙げられる）が行われ、その結果を用いて設計・施工時の問題に対して様々な検討が行われている。

事例調査から数値解析による検討項目について図-16に示す。

数値解析により地山挙動の把握や支保構造の妥当性の検討が行われている。これは、めがねトンネルは施工実績が少なく、先進坑と後進坑の掘削過程において複雑な相互干渉があると考えられるため、数値解析を行い力学的な現象把握を行っているものと考えられる。

事例調査からは、地表沈下量や内空変位量等について解析結果を活用して事前検討し、さらに実際の計測結果との比較を行っている報告が多いが、今後は支保部材やセンターピラーに作用している応力等についての検討や評価も重視していく必要があると考える。

数値解析結果は入力する地山定数により結果がかなり異なる

ことから、今後は事前予測解析に加え、導坑や先進坑掘削時の計測データ等から逆解析による地山定数の見直しを行い、先進坑の覆工や後進坑の支保工等の設計・施工に反映させていくことが必要と考えられる。

5. おわりに

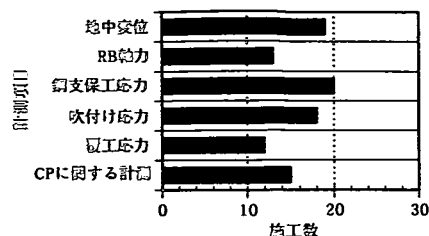
本報告では、めがねトンネル特有の問題点の中で特に導坑とセンターピラーに着目して、技術的傾向をまとめたが、めがねトンネル本坑の設計・施工に関わる課題、例えば後進坑掘削時の先進坑の支保状態や中間地山の補強方法等多くの検討課題がある。

特に、市街地での適用が多いめがねトンネルでは、低土被りで比較的軟質な地山条件下の設計・施工が多いため、その適用性や課題を検討していくためには、地形・地質条件との関係について整理していくことが不可欠と思われる。本報告でも地形・地質条件について詳細に文献調査を行ったが、共通して比較できるデータは少なかった。

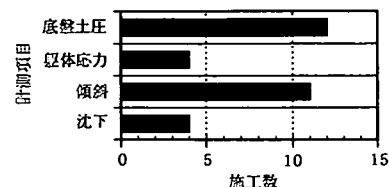
今後、本報告以外のめがねトンネル特有の課題や計測結果について整理し、まとめていく予定である。

【参考文献】

- 1) 近内・小野・菅野：NATMのよる眼鏡トンネルの施工，トンネルと地下，第16巻2号，pp.17～23，1985.2
- 2) 佐々木・廣谷・山田：遺跡の下にめがねトンネルをつくる，トンネルと地下，第23巻7号，pp.19～26，1992.7



(a) 本坑に関する計測項目



(b) センターピラーに関する計測項目

図-15 計測工

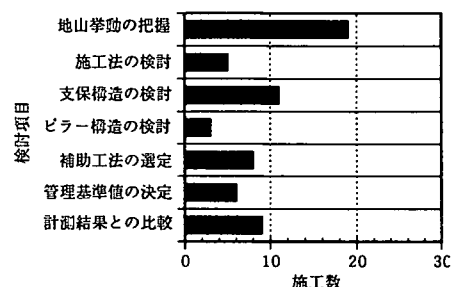


図-16 数値解析による検討項目