

## めがねトンネルの設計に関する一考察

### CONSIDERATION TO DESIGN OF TWIN TUNNEL

若月和人\*・桜沢雅志\*・高取博道\*・杉本光隆\*\*

Kazuhiro WAKATSUKI, Masashi SAKURAZAWA, Hiromichi TAKATORI  
and Mitsutaka SUGIMOTO

In the twin tunnel, the tunnel are designed individual by an analytical method, based on the design condition. In this report, the design of the twin tunnel with the center-drift and center-pillar was examined by using FEM analysis. As a result, the following were obtained: 1) the construction method to excavate the right and left tunnel at the same time has advantage, from the viewpoint of the load acted on center-pillar and the sectional forces in support than the sequential construction method. On the other hand, the simultaneous excavation method has disadvantage on the ground surface settlement. 2) the temporary support in the upper part of center-pillar and the center-drift perform the important role as a structure.

Keywords : twin tunnel , Construction order , the center-drift , center-pillar

#### 1. はじめに

トンネル坑口部の土地利用状況や前後の線形から、双設トンネルとしての離隔が確保できない場合には、2本のトンネルを左右に連続した、いわゆるめがねトンネルとして計画される。

これまでに幾つかのめがねトンネルが建設されているが、中央部を連結した特殊な構造で標準的な施工法がないこと、土かぶりが小さい事例が多いため、経験的な設計手法（標準的な支保パターン）が適用できないことから、めがねトンネルは過去の事例を参考にしながら数値解析手法によって個々に検討されているのが実状である。<sup>1)2)</sup>

めがねトンネルの設計においては、以下のような検討が必要となる。

- ① 地山を極力破壊させないこと
- ② 支保工によって緩み荷重を支持できること
- ③ センターピラーによって荷重が支持できること
- ④ 地表面沈下が制限される場合には許容値におさまること

そこで、2次元弾塑性FEM解析によって、めがねトンネルの構造および施工法について検討を行った。

---

\* (株) 福田組 建設本部 技術部

\*\* 長岡技術科学大学建設系助教授

## 2. 検討方法

### 2.1 検討項目

図-2.1 に示す中央1本導坑型式のめがねトンネルを想定し、2次元弾塑性FEM解析によって、

- ① 地山補強工の必要性
- ② 掘削順序（片側先進と左右併進）
- ③ 中央導坑の構造

について検討した。

### 2.2 解析モデル

解析メッシュを図-2.2 に、解析条件を表-2.1 に示す。土かぶりを1.0D（D：めがねトンネル掘削幅）と仮定し、解析領域は横方向に1.5D、縦方向にトンネル底部より1.0Dを確保した。また、初期応力は自重解析によって求め、側圧係数は地山のポアソン比より  $K=0.54$  とした。

### 2.3 物性値

地山物性値を表-2.2 に、解析に用いた支保部材の材料物性値を表-2.3 に示す。ここでは、めがねトンネルは比較的土かぶりが薄く、地質条件の良いくない地山に計画されることが多いことから、土砂～軟岩クラスの地山を想定した。

また、地山強度が小さいことから地山補強工としては、センターピラー脚部には注入式フットボルトを、導坑上部にはセメント系の薬液注入を想定した。

### 2.4 解析手順

解析手順を表-2.4 に示す。片側先進工法（左側先進、右側後進）および左右併進工法を想定し、掘削過程にあわせて解析ステップを設定した。初期応力の開放は、全ての加背で切羽到達時40%、支保工施工後に残り60%とした。

また、二次覆工コンクリートには支保効果を期待せず、一次支保工のみにより最終安定を確保することとし、インバート施工完了までを解析対象とした。

## 3. 解析結果

### 3.1. 地山補強の必要性

地山補強を実施しないケースの降伏基準値の分布を図-3.1 に示す。ここで、降伏基準値は次式により定義した。

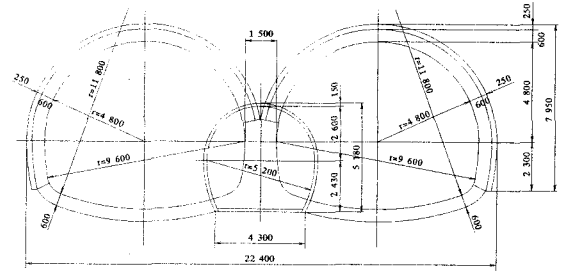


図-2.1 モデルトンネル

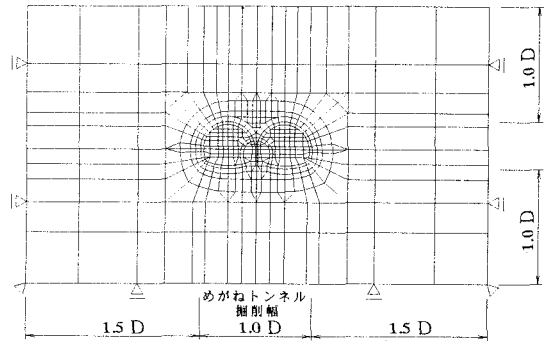


図-2.2 解析メッシュ図

表-2.1 解析条件

解析条件		2次元弾塑性解析
破壊条件		Mohr-Coulomb
要素モデル	地山	平面要素（弾塑性）
	吹付け	トラス要素（線形弾性）
	鋼製支保工	ビーム要素（ " ）
	ロックボルト	トラス要素（ " ）

表-2.2 地山物性値

項目	物性値
単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	20
変形係数 E (MPa)	75
粘着力 c (MPa)	0.05
内部摩擦角 $\phi$ (deg.)	30
ポアソン比 $\nu$	0.35
引張強度 $\sigma_t$ (MPa)	0.02

表-2.3 材料物性値

項目	E (GPa)	A (m <sup>2</sup> )	I (m <sup>4</sup> )	備考
吹付けコンクリート 導坑	3.4	0.15	—	t=15cm
" 本坑	3.4	0.25	—	t=25cm
鋼製支保工 導坑	210	$4.01 \times 10^{-3}$	$1.64 \times 10^{-5}$	H-150
" 本坑	210	$6.35 \times 10^{-3}$	$4.72 \times 10^{-5}$	H-200
ロックボルト	210	$5.10 \times 10^{-4}$	—	D25

項目	E (GPa)	$\nu$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_t$ (MPa)	備考
センターピラー	23	0.2	25.0	2.1	
インバート	23	0.2	25.0	2.1	

$$f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} - \left( \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} \sin \phi + c \cdot \cos \phi \right)$$

$f \leq 0$  : 弾性  
 $f > 0$  : 塑性

地山が塑性化した箇所は、センターピラー脚部、導坑周辺、左右坑の干渉部分（センターピラー直上部）および本坑側壁部である。塑性化がトンネルの安定性に影響を及ぼすと考えられる範囲で地山補強を考慮した。なお、側壁部では支保工が降伏にまで至らなかったため、ここでは補強を考慮していないが、地山状況によっては支保工断面力の低減を目的とした補強も必要であるとする。

### 3.2. 掘削工法

片側先進工法（以後、先進工法と呼ぶ）および左右併進工法（以後、併進工法と呼ぶ）において、1)センターピラー作用荷重および反力、2)地表面沈下、および3)鋼製支保工断面力について検討した。

#### 1) ピラー作用荷重および反力

センターピラーに作用する鉛直荷重の算定結果を図-3.2に示す。両工法ともに、作用荷重は全土かぶり荷重のおおよそ95%で、この値は、既往の解析結果<sup>1)</sup>や実測結果<sup>3)</sup>と同程度である。また、片側先進工法と左右併進工法ともに、ほぼ同程度の荷重が作用していることがわかる。これは、センターピラーと導坑天端に仮受けのためのコンクリートを施工したために、開放した初期応力の大部分が、この仮受けを通じてセンターピラーに作用したためである。

センターピラー脚部の地盤反力を図-3.3に示す。先進工法および併進工法では、導坑天端仮受けを介して切羽到達以前の開放力もセンターピラーに伝達されるため、地盤反力の最大値は同程度であるが、併進工法では左右均等に反力が分布しているのに対して、先進工法では左右の分布が施工過程ごとに変化する。

#### 2) 地表面沈下

最大地表面沈下量を表-3.1に示す。先進工法では先進坑および後進坑の直上で8~9mmであるが、併進工法では中央導坑の直上で約19mmと2倍以上の沈下が発生している。

これは、先進工法では後進坑掘削時に先進坑側支保は完了しており、後進坑掘削による沈下を抑制しているのに対して、併進工法では左右切羽が同一位置にあり、先行変位が抑制できないためである。このため、先進工法では、単独のトンネルを施工した場

表-2.4 解析手順

解析 Step	片側先進	左右併進
Step. 0	初期応力状態	
Step. 1	導坑掘削	
Step. 2	導坑支保工	
Step. 3	地山補強工、センターピラー構築	
Step. 4	先進坑上半掘削	上半掘削
Step. 5	" 上半支保工	上半支保工
Step. 6	" 下半・インバート掘削	下半・インバート掘削
Step. 7	" 下半支保工、インバート打設	下半支保工、インバート打設
Step. 8	後進坑上半掘削	-----
Step. 9	" 上半支保工	
Step.10	" 下半・インバート掘削	
Step.11	" 下半支保工、インバート打設	

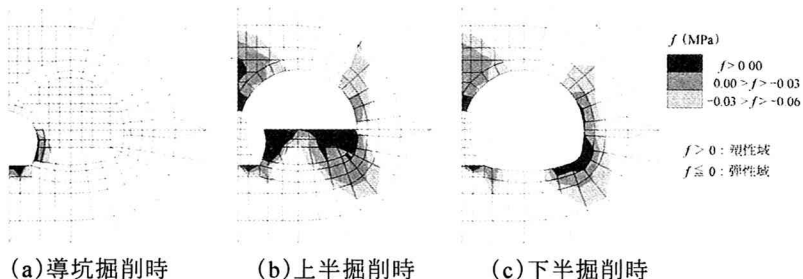


図-3.1 降伏基準値分布（地山補強工なし）

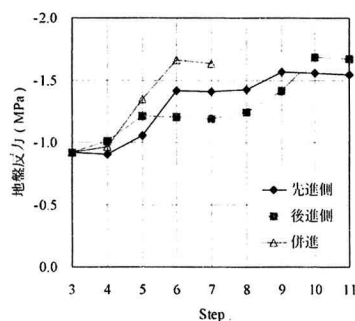
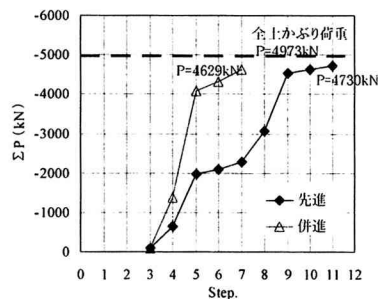


図-3.3 センターピラー脚部の地盤反力

合の沈下を若干上回る沈下量となるが、併進工法では2本のトンネルの開放力が重ね合わせられるために、地表面の沈下も約2倍となる。

### 3) 支保工断面力

本坑の鋼製支保工に作用する断面力を図-3.4 および表-3.2 に示す。曲げモーメントは両工法の間大きな差はないが、センターピラー付近での軸力に顕著な差が見られる。

片側先進工法では、先進側鋼製支保工の軸力が後進側の1.6倍となり、支保工応力度は270MPaと降伏点(240MPa)を越えるが、併進工法では215MPaと比較的低い値となる。これは、片側先進工法の先進坑側支保工が、後進坑掘削の影響を強く受けるのに対して、併進工法では、支保工が切羽到達以前の開放力を負担していないこと、左右で均等に荷重を負担することによる。

通常、片側先進工法では、先進坑側支保工の規模を大きくして対処しているが、左右併進工法とすることで同一の支保構造で対処することが可能になると考えられる。

### 3.3. 導坑の構造

ここでは左右併進工法の場合の、1)導坑天端仮受けの効果、および2)導坑支保工の撤去時期について検討した。

#### 1) 導坑天端仮受け

これまでの施工事例では、導坑天端に仮受けを設ける場合と設けない場合がある。ここでは、仮受けのない場合と、比較的剛な仮受けを設けた場合を比較し表-3.3 に示す。

仮受けのない場合は、本坑支保工を通してセンターピラーに荷重が作用するため、本坑切羽到達以前の荷重はセンターピラーに作用しないが、剛な仮受けを設けた場合は、切羽到達以前の荷重も仮受けを通してセンターピラーに作用する。逆に、本坑鋼製支保工断面力は、仮受けを設けてセンターピラーの負担を大きくすることで低減される。

地盤耐力が十分に確保できる場合には、仮受けを行うことで支保工に対する負担の軽減が可能である。地耐力の確保が困難な場合には、仮受けを行わないことで、支保工に対する負担が増加するもののセンターピラー荷重の軽減が可能である。

表-3.1 地表面沈下量

工法	地表面沈下	発生位置
先進	8.2mm	先進坑直上
	8.7mm	後進坑直上
併進	18.8mm	導坑直上

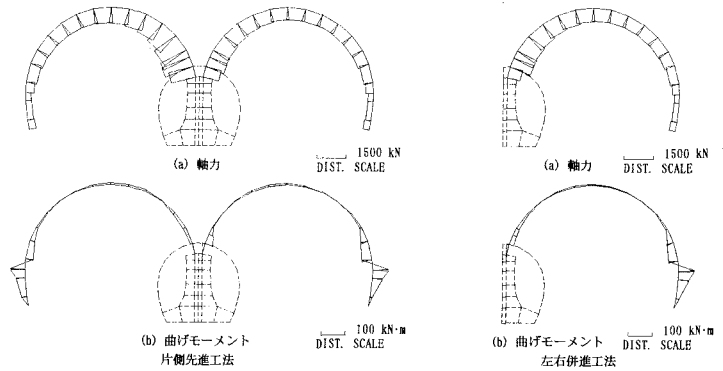


図-3.4 本坑支保工断面力 (最終ステップ)

表-3.2 鋼製支保工断面力 (最終ステップ)

		N (kN)	M (kN·m)	$\sigma_s$ (MPa)
先進	側壁部	430	-62	199
	天端部	843	-6	145
	ピラー付近	1,588	9	270
後進	側壁部	381	-67	202
	天端部	623	-6	111
	ピラー付近	968	41	239
併進	側壁部	401	-67	205
	天端部	697	-5	120
	ピラー付近	1,094	20	215

軸力 N (+): 圧縮, (-): 引張

曲げモーメント M (+): 内空側凸, (-): 地山側凸

表-3.3 導坑天端の仮受け効果

	ピラー荷重 (kN)	本坑支保工断面力		
		N (kN)	M (kN·m)	$\sigma_s$ (MPa)
仮受けあり	4,708	1,094	20	215
仮受けなし	3,430	1,119	35	250

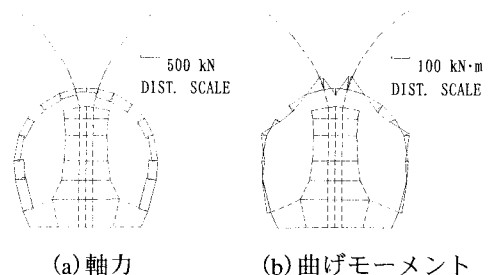


図-3.5 導坑支保工断面力

## 2) 導坑支保工

導坑支保工に発生する鋼製支保工の断面力を図-3.5 に示す。本坑掘削開始より曲げモーメントが卓越するため、降伏点を越える状態である。ここでは、線形弾性体と仮定しているため、導坑支保工は降伏点を越えても荷重を負担しているが、本来ならば導坑の形状保持が困難な状況と考えられる。

表-3.4 導坑支保工の効果

	ピラー荷重 (kN)	本坑支保工断面力		
		N (kN)	M (kN・m)	$\sigma_s$ (MPa)
導坑支保工を残す	4,708	1,094	20	215
導坑支保工を撤去	4,981	1,081	11	193

導坑支保工を残す場合と、本坑掘削に併せて撤去した場合<sup>4)</sup>を比較し表-3.4 に示す。本坑掘削時に導坑支保工を柱として荷重の伝達を期待する場合には、破壊せずに機能を果たすだけの支保工規模とする必要がある。しかしながら、小断面の導坑では支保工のランクアップや補強にはおのずと限界もある。一方、導坑支保工を撤去する場合には、導坑の形状を保持する必要はなくなるが、導坑支保工の負担分をセンターピラーが負担するため、センターピラー荷重が増加する。センターピラー脚部地耐力が十分確保されていない場合、センターピラーの沈下や傾斜に対して注意が必要である。

## 4 おわりに

今回の解析からは、以下の結果が得られた。

- ① 地山強度が小さく、センターピラー脚部、導坑周辺、導坑上部の左右干渉部分が塑性化する場合には、地山補強が必要である。本坑側壁部でも地山状況によって補強を必要とすることもある。
- ② 左右併進工法は片側先進工法に比べ地表面沈下に対して不利であるが、センターピラー反力や支保工断面力では有利である。
- ③ 導坑天端の仮受けによって、本坑支保工の負担を低減できるが、センターピラーに作用する荷重は増加する。
- ④ 導坑支保工に荷重伝達を期待する場合には、破壊しない支保工規模が必要であり、荷重伝達を期待せず本坑掘削時に撤去する場合には、センターピラーに作用する荷重は増加する。

左右併進工法の場合、坑内仮設の二重投資や、機械の入れ替えが煩雑となることなどが想定される。しかしながら、めがねトンネルは比較的施工延長の短いものが大半であり、これらが大きな問題となることは少ないと考えられる。

片側先進工法では、先進坑掘削時に後進坑の影響を予測することは難しく、先進坑支保工が過大であったり、逆に後進坑施工時に先進坑に変状が発生することも考えられる。従って、完成したトンネルにおいても、先進坑と後進坑トンネルが同等の安全性とはならない。一方、併進工法では、左右のトンネルを同一の構造とし、同時に施工することで、同等の安全性とすることができる。また、両トンネルでの計測結果を設計・施工に反映することも容易である。

本論文が、今後のめがねトンネルの設計・施工に役立てば幸いである。

## 参考文献

- 1) 松田哲夫,豊里栄吉,五十嵐瑞穂,梨本裕,梶山孝司: 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
- 2) 宮野前俊一,森田篤,梨本裕,関順一,高森貞彦: FEM解析によるめがねトンネル施工法の検討,トンネル工学研究論文・報告集第8巻,pp.151~156,1998.11
- 3) 藤波督,前田稔,日下良巳: 真砂土にメガネトンネルをNATMで掘る 常磐自動車道十王トンネル,トンネルと地下,pp.45~56,1986.11
- 4) 近内克夫,小野幸男,菅野嘉元: NATMによる眼鏡トンネルの施工 幹線臨港道路2号線小名浜港トンネル,トンネルと地下,pp.17~23,1985.2