

# FEM 解析によるめがねトンネル施工法の検討

## A STUDY ON TUNNELING METHOD FOR TWIN-BORED TUNNEL USING FEM ANALYSIS

宮野前俊<sup>1)</sup>・森田 篤<sup>1)</sup>・梨本 裕<sup>1)</sup>・関 順一<sup>1)</sup>・高森貞彦<sup>1)</sup>

Shunichi MIYANOMAE, Atsushi MORITA, Yutaka NASHIMOTO, Jhunichi SEKI, Sadahiko TAKAMORI

In the construction of twin-bored tunnel, the selection of tunneling method at an early stage is very important. The choices will be among three-drift method, center-drift method, and with no drift method. However, there are no recognized ways of selection yet. In this report, the strengths and weaknesses of those different tunneling methods are compared using FEM analysis as an initial step for establishing the selection procedure.

**Key Words** : twin-bored tunnel , selection of construction method , FEM analysis

### 1. はじめに

都市 NATM によるめがねトンネルの施工実績や計画が増加しつつある。また、めがねトンネルの対抗案として離隔距離が極めて小さい超近接トンネルの可能性も注目を集めている。しかし、これらのトンネルの設計法や施工法が確立されているとは言えないのが現状である。

これらのトンネルの設計において最初の重要な検討課題となるのが掘削工法の選定である。中央(1本)導坑方式、3本導坑方式(以上めがねトンネル)、導坑なし方式(超近接トンネル)などの中から選定することになる。地山強度が高い場合は導坑なし方式、地山強度が少し低い場合には中央導坑方式、さらに低い場合には3本導坑方式と言われることもあるが、明確な選定基準があるわけではない。特に、地山強度が低い場合における3本導坑方式の中央導坑方式に対する優位性は、最近の事例より、ますます曖昧なものになってきた。また、導坑なし方式はどの程度の地山強度があれば採用できるのか、あるいはどのような地山補強工法を併用すれば可能になるのか等、大きな検討課題が残されている。

今回は、めがねトンネルおよび超近接トンネルの掘削工法の選定基準を得るための第一歩として、各掘削工法の長所・短所を FEM 解析により比較検討した。

## 2. 解析条件

### (1) 解析ケース

3本導坑方式(図-1参照)、中央導坑方式(図-2参照)、導坑なし方式(図-3参照)のそれぞれについて、線形弾性FEM解析および線形弾塑性FEM解析を行った。

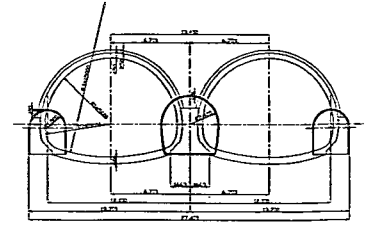


図-1 3本導坑方式

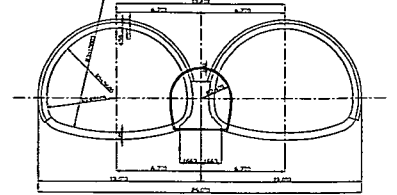


図-2 中央導坑方式

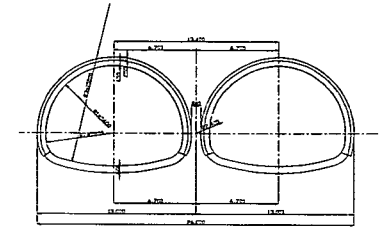


図-3 導坑なし方式

### (2) 物性値

表-1に解析に用いた物性値を示す。

表-1 物性値

項目	弾性係数 (tf/m <sup>2</sup> )	ポアソン比	単位体積重量 (tf/m <sup>3</sup> )	内部摩擦角 (°)	粘着力 (tf/m <sup>2</sup> )	備考
地山 <sup>※</sup>	20000	0.35	2.1	35	5.0	
センタービター	2.2×10 <sup>6</sup>	0.2	2.5	—	—	線形弾性
側壁コンクリート	2.2×10 <sup>6</sup>	0.2	2.5	—	—	線形弾性
支保部材	弾性係数 (tf/m <sup>2</sup> )	断面積 (m <sup>2</sup> )	単位体積重量 (tf/m <sup>3</sup> )	断面2次 (m <sup>4</sup> )	要素	備考
導坑						
吹付コンクリート	4.0×10 <sup>5</sup>	0.1	2.35	—	トラス	t=10cm
鋼製支保工	2.1×10 <sup>7</sup>	21.59×10 <sup>-4</sup>	7.8	3.78×10 <sup>-6</sup>	ビーム	H-100
本坑						
吹付コンクリート	4.0×10 <sup>5</sup>	0.25	2.35	—	トラス	t=25cm
鋼製支保工	2.1×10 <sup>7</sup>	63.53×10 <sup>-4</sup>	7.8	4.72×10 <sup>-5</sup>	ビーム	H-200
イバート	2.2×10 <sup>6</sup>	0.6	2.5	1.8×10 <sup>-2</sup>	ビーム	t=60cm

※第三紀～第四紀洪積層の砂礫層程度の地山を想定した。

### (3) 解析モデル

解析メッシュを図-4に、解析ステップを表-2に示す。

解析ステップは、3つの掘削工法(3本導坑方式、中央導坑方式、導坑なし方式)においてそれぞれ異なるが、ここでは3本導坑方式の解析ステップのみを示す。なお、比較の公正を図るため、3つの掘削工法の施工過程を出来るだけ忠実にモデル化し、各掘削工法に対して同じ要素分割の解析モデルを作成した。

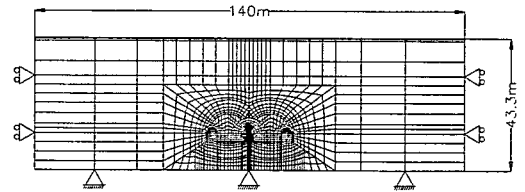


図-4 解析メッシュ

表-2 解析ステップ(3本導坑方式)

解析ステップ	内容	備考
STEP1 初期応力算出		地山の自重より算出
STEP2 導坑掘削		掘削相当外力 40%
STEP3 導坑支保工		掘削相当外力 60%
STEP4 センタービター 側壁コンクリート 打設		
STEP5 センタービター 上部コンクリート 充填		
STEP6 先進坑上半 掘削		掘削相当外力 40%
STEP7 先進坑上半 支保工		掘削相当外力 60%
STEP8 先進坑下半 掘削		掘削相当外力 100%
STEP9 先進坑 イバート打設		
STEP10 後進坑上半 掘削		掘削相当外力 40%
STEP11 後進坑上半 支保工		掘削相当外力 60%
STEP12 後進坑下半 掘削		掘削相当外力 100%

### 3. FEM 解析結果

図-5に、比較のための着目点を示す。

#### (1) センターピラー（地山）上載荷重

センターピラー（3本導坑方式、中央導坑方式）および地山（導坑なし方式）の上載荷重は、図-6に示す要素に着目し、内部に発生する鉛直応力と断面積より、次式により算定した。

センターピラー上載荷重（3本導坑方式、中央導坑方式）

$$\sum_{i=1381}^{1390} P_i = \sum_{i=1381}^{1390} (\sigma_{yi} \times A_i)$$

$P_i$  : 各要素の上載荷重(tf)

$\sigma_{yi}$  : 各要素の鉛直応力(tf/m<sup>2</sup>)

$A$  : 各要素の断面積(m<sup>2</sup>)

地山上載荷重（導坑なし方式）

$$\sum_{i=1381}^{1390} P_i = \sum_{i=1381}^{1390} (\sigma_{yi} \times A_i) + N_1 + N_2$$

$P_i$  : 各要素の上載荷重(tf)

$\sigma_{yi}$  : 各要素の鉛直応力(tf/m<sup>2</sup>)

$A$  : 各要素の断面積(m<sup>2</sup>)

$N_1, N_2$  : 吹付け軸力と鋼製支保工軸力の合計(tf)

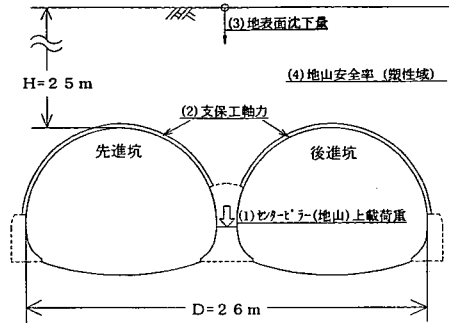


図-5 着目点

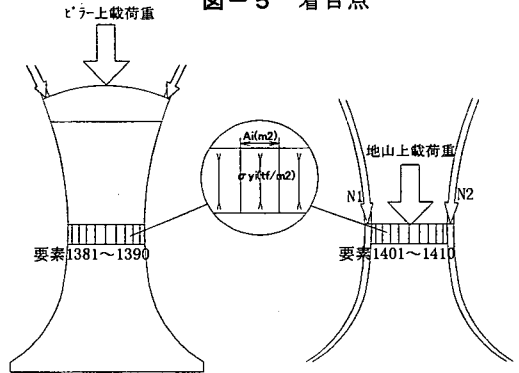


図-6 着目要素

センターピラーおよび地山の上載荷重算定結果を表-3に示す。

また、センターピラーおよび地山内部の発生応力  $\sigma_{yi}$  を平均化した応力 ( $\sigma_{ave}$ ) を、それぞれ一軸圧縮強度  $q_u$  で除したものを求めると、表-4の様になる。

なお、センターピラーの一軸圧縮強度は  $q_u=1800\text{tf}/\text{m}^2(=180\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 、地山の一軸圧縮強度は  $q_u=19\text{tf}/\text{m}^2(=2C\cos\phi/(1-\sin\phi))$  とした。

表-3 センターピラー(地山)上載荷重算定結果

	弾性解析 (単位: tf)			弾塑性解析 (単位: tf)		
	3本導坑	中央導坑	導坑なし	3本導坑	中央導坑	導坑なし
先進坑上半掘削後	255	256	206	249	255	175
下半掘削後	250	254	164	244	256	110
後進坑上半掘削後	559	571	514	543	575	431
下半掘削後	552	569	480	529	568	334

表-4  $\sigma_{ave}/q_u$

	弾性解析			弾塑性解析		
	3本導坑	中央導坑	導坑なし	3本導坑	中央導坑	導坑なし
先進坑上半掘削後	0.10	0.10	7.34	0.10	0.10	6.54
下半掘削後	0.10	0.10	6.92	0.10	0.10	2.45
後進坑上半掘削後	0.23	0.23	11.51	0.22	0.23	5.67
下半掘削後	0.23	0.23	10.96	0.21	0.23	2.17

結果より、 $\sigma_{ave}/q_u$  (3本、中央)  $<$   $\sigma_{ave}/q_u$  (導坑なし) となっており、めがねトンネルの有利性は大きい。しかし、センターピラー上載荷重に関しては、3本導坑方式  $\approx$  中央導坑方式となっており、中央導坑方式に対する3本導坑方式の有利性は大きくないと考えられる。

(2) 支保工軸力

後進坑上半掘削後の支保工軸力分布を、図-7 (弾性解析結果) および図-8 (弾塑性解析結果) に示す。着色箇所は、最大軸力発生箇所である。



図-7 支保工軸力分布 (弾性解析)

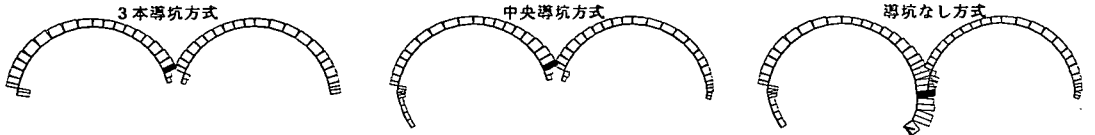


図-8 支保工軸力分布 (弾塑性解析)

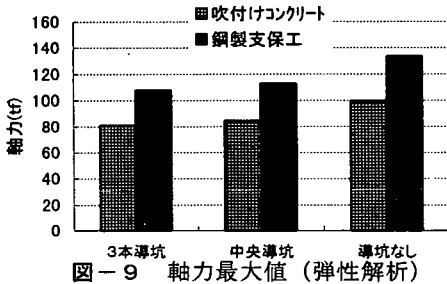


図-9 軸力最大値 (弾性解析)

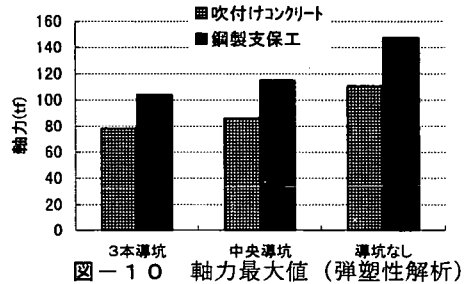


図-10 軸力最大値 (弾塑性解析)

軸力最大値を図-9 (弾性解析) および図-10 (弾塑性解析) に示す。

結果より、支保工軸力 (先進坑最大値) に関して、

$$3\text{本導坑方式} \approx \text{中央導坑方式} < \text{導坑なし方式}$$

の関係が成り立っていると考えられる。

また、導坑なし方式に関しては、先進坑の支保工軸力が後進坑の支保工軸力よりも大きくなる。

よって、導坑なし方式を採用する場合には、先進坑の支保工を後進側に比べて1ランクアップする等の検討も必要であると考えられる。

(3) 地表面沈下量

地表面中央部の沈下量経時変化を図-11 (弾性解析) および図-12 (弾塑性解析) に示す。

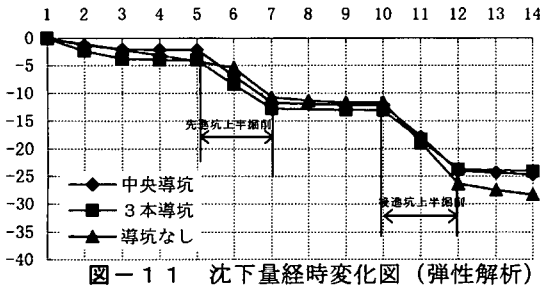


図-11 沈下量経時変化図 (弾性解析)

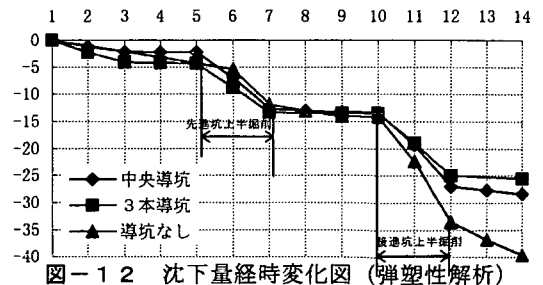


図-12 沈下量経時変化図 (弾塑性解析)

結果より、沈下量に関して

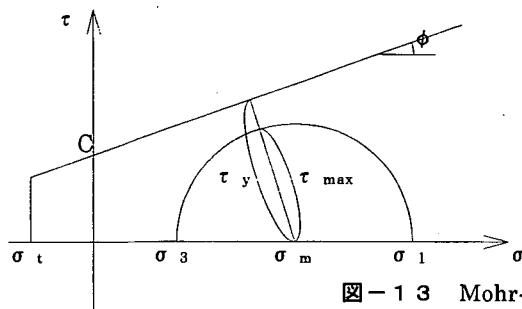
$$3\text{本導坑方式} \approx \text{中央導坑方式} < \text{導坑なし方式}$$

の関係が成り立っており、地表の沈下量が制限される場合にはめがねトンネルが望ましいと考えられる。

(4) 地山安全率 (地山塑性域)

Mohr-Coulomb 基準 (図-13 参照) にしたがう、地山の安全率 (弾性解析) を図-14 に、地山の塑性域 (弾塑性解析) を図-15 に示す。着色部分は安全率  $f \leq 1.0$  の領域を示している。

なお今回の検討では、 $C=5.0\text{tf/m}^2$ 、 $\phi=35^\circ$ 、 $\sigma_t=0\text{tf/m}^2$  である。



引張破壊に対する安全率  $f_t$

$$f_t = \frac{\sigma_m - \sigma_t}{\tau_{\max}}$$

せん断破壊に対する安全率  $f_s$

$$f_s = \frac{\tau_y}{\tau_{\max}}$$

図-13 Mohr-Coulomb 基準

	3本導坑方式	中央導坑方式	導坑なし方式
先進坑上半掘削後			
後進坑上半掘削後			

図-14 地山安全率 (弾性解析)

	3本導坑方式	中央導坑方式	導坑なし方式
先進坑上半掘削後			
後進坑上半掘削後			

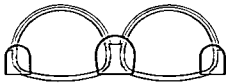
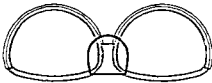
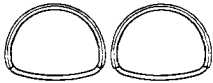
図-15 地山塑性域 (弾塑性解析)

結果より、導坑なし方式の場合には両トンネル間及び脚部地山の、中央導坑方式の場合には脚部地山の補強の必要性を検討する必要があると考えられる。

#### 4. まとめ

掘削工法比較を表-5に示す。

表-5 掘削工法比較

	3本導坑方式	中央導坑方式	導坑なし方式
断面図			
工法特徴	過去の施工実績は多数ある。導坑掘削とコンクリート打設で工期が非常に長くなる。導坑の断面が小さいために、作業性が悪い。	中央導坑のみであるため、3本導坑方式よりも経済的である。通常は中央導坑を掘削機械が離合できるような断面とするのが理想であるが、今回の検討では3本導坑方式の中央導坑と同じ断面積とした。	過去の施工実績が少ない。工期が最も短くできる可能性があるが、補助工法の施工性や効果の確実性、安全性に不安が残るため、採用に際しては十分な検討が必要である。
上載荷重	3本導坑方式	≒ 中央導坑方式	> 導坑なし方式
支保工軸力(先進坑最大値)	3本導坑方式	≒ 中央導坑方式	< 導坑なし方式
沈下量	3本導坑方式	≒ 中央導坑方式	< 導坑なし方式
備考	地山が悪い場合に適していると考えられる。足付け部分は側壁コンクリートで固められているので、上半アーチ部分の先受け工が有効であると考えられる。	今回の検討では、3本導坑方式とほとんど差のない工法であると考えられる。しかし、これは地山がある程度良い場合か、有効な脚部沈下対策が実施された場合に限られると考えられる。	地表沈下量が制限される場合には、採用が難しいと考えられる。センターピラー部分に相当する地山の改良が必要である。脚部沈下が予想される場合には、対策工が必要である。

今回の検討では、

上載荷重 : 3本導坑方式 ≒ 中央導坑方式 > 導坑なし方式

支保工軸力 : 3本導坑方式 ≒ 中央導坑方式 < 導坑なし方式

(先進坑最大値)

沈下量 : 3本導坑方式 ≒ 中央導坑方式 < 導坑なし方式

という結果が出たが、補助工法の必要性を全く考慮していないことや、加背割、掘削順序等、まだまだ検討の余地があると考えられる。

なお、地山の弾性係数を  $E=1000\text{tf/m}^2$ (一軸圧縮強度  $q_u=1\text{kgf/cm}^2$ 程度)とした場合についても検討したが、ほぼ同様の結果が得られた。

本報告のような検討は、土地利用上の制約や環境保全、コストダウンの要求等により、今後ますます増加すると考えられる。本報告が今後のめがねトンネルおよび超近接トンネルの掘削工法の選定基準を得るための第一歩となれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 小林隆幸、山口学、音喜多勇：市街地直下のメガネトンネル 第二神明道路（改築）小東山トンネル、トンネルと地下、1994.8、pp.49～59
- 2) 豊里栄吉、岩島保、五十嵐瑞穂、梨本裕：土かぶ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、1997.9、pp.27～40
- 3) 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、1997.11、pp.1～6