

2. 小東山トンネル概要

図-2に、地質縦断面図を示す。地質は大阪層群で大きく2つの区間に分類され、STA74～STA77間の砂礫層とSTA77～STA80間の砂・粘土の互層区間に分けられる。土被り高さは、5～35m（約0.2D～1.5D）。ただし、本論文では特別にメガネトンネルの全幅をDとする。D=25m）である。

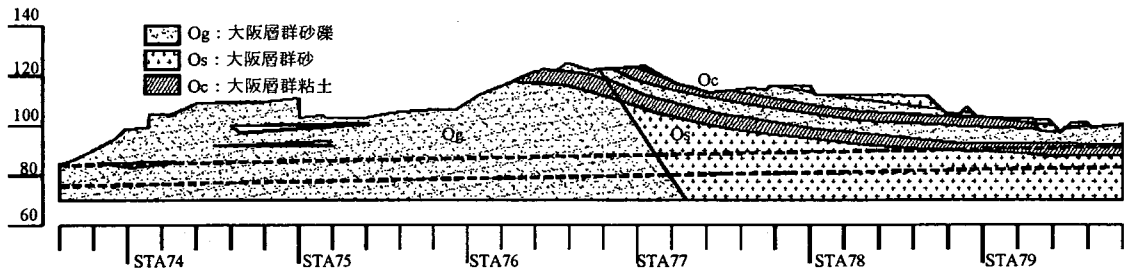


図-2 地質縦断面図

図-3に施工順序を示す。中央導坑を掘削し、センターピラーを構築してから、先進坑上半・下半・インバートを施工した後、同様の手順で後進坑の施工を行い、最後に覆工コンクリートを打設する。メガネトンネルの問題点は、後進坑掘削時にその影響を受けて、先進側の支保工およびセンターピラーの荷重が増加することである。また、それらは既に施工された状態であるので、後で補強することは非常に困難となる。そのため、先進側の支保工はH-200@1.0m、吹付厚25cmからH-250@1.0m、吹付厚30cmにランクアップした。

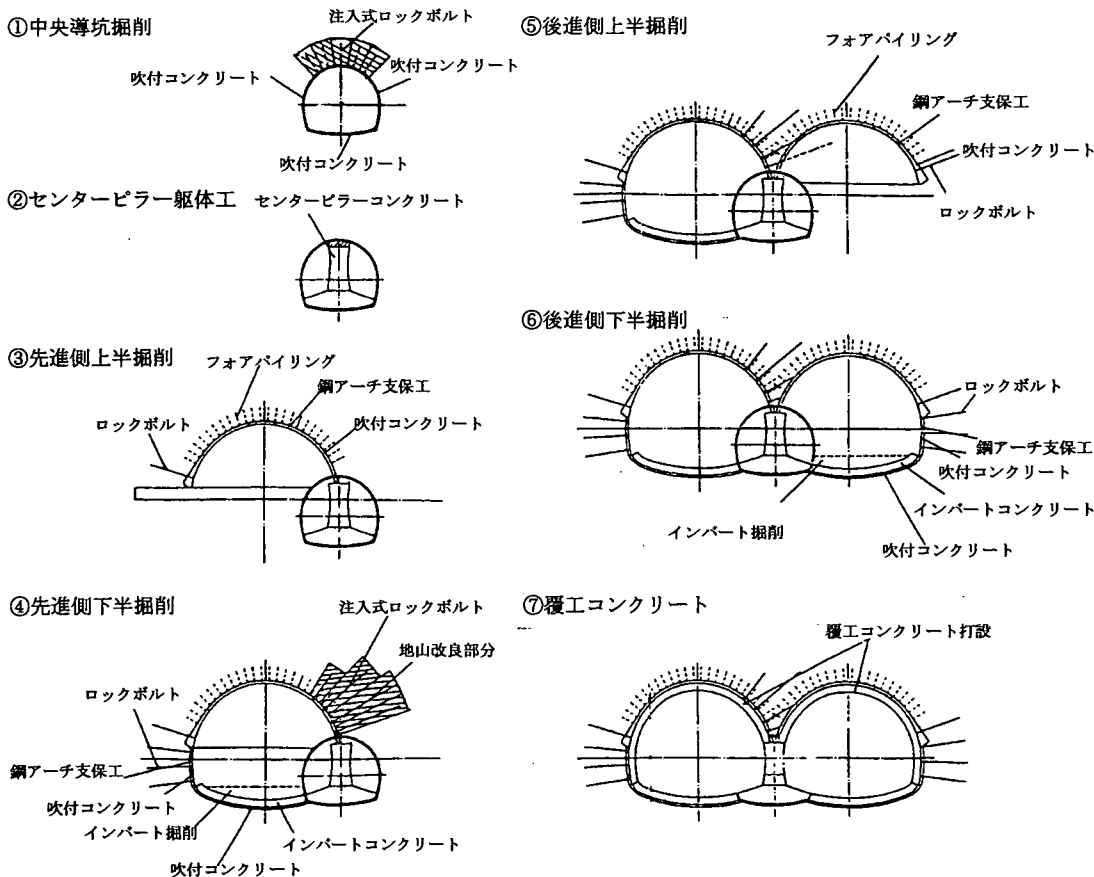


図-3 施工順序

3. ピラー作用荷重の検討

3-1 検討方法

山岳トンネルの設計手法には、①標準設計の適用、②類似条件での設計の適用、③解析的手法があり、これら単独か組合わせにより設計を行う。通常は、①および②の実績を重視した設計手法を採用するケースが多い。③の解析的手法は、設計条件が標準的でなく、類似条件の施工事例がない場合や、地表面沈下等の地山の挙動を検討する時に採用される。本トンネルは、土砂地山に建設される土被りの小さいメガネトンネルである。しかも、2次覆工アーチコンクリートが先進・後進坑掘削の終了後に打設されセンターピラーに足付けされるなど、類例を見ない施工順序および構造となっている。したがって、③の解析的手法（ここではFEM）を中心に設計せざるを得なかった。

解析的手法は、定量的な検討が可能という点では有効であるが、地山の力学特性値や初期地山応力および応力解放率などの適切な評価が必要であり、入力値が解析結果に大きく影響する。そこで、地山の弾性係数、応力解放率などの入力値を変化させ、それらに対応してピラー作用荷重がどのように変化するか調べてみた。それらの因果関係を把握した上でピラー作用荷重の設計値を定めた。

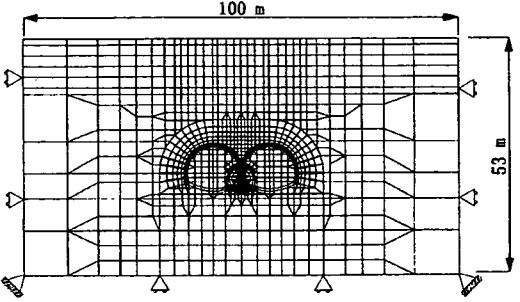


図-4 解析メッシュおよび境界条件

表-1 解析に用いた入力値

項目	弾性係数 (MN/m ²)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)	内部摩擦角 (°)	粘着力 (kN/m ²)	備考
地 山	2.0×10^{28}	0.37 [*]	20.6	35	49.1	弾塑性
センターピラー	2.4×10^4	0.2	24.5	-----	-----	線形弾性
支保部材	弾性係数 (MN/m ²)	断面積 (m ²)	単位体積重量 (kN/m ³)	断面2次 (m ⁴)	要素	備考
導坑 吹付コンクリート	3.9×10^3	0.15	22.6	-----	トラス	t=15cm
坑 鋼製支保工	2.1×10^5	4.0×10^{-3}	76.5	1.6×10^{-5}	ビーム	H-150
先 吹付コンクリート	3.9×10^3	0.3	22.6	-----	トラス	t=30cm
進 鋼製支保工	2.1×10^5	9.1×10^{-3}	76.5	10.7×10^{-4}	ビーム	H-250
後 吹付コンクリート	3.9×10^3	0.25	22.6	-----	トラス	t=25cm
進 鋼製支保工	2.1×10^5	6.4×10^{-3}	76.5	4.7×10^{-5}	ビーム	H-200
ロックボルト	2.1×10^5	5.1×10^{-4}	76.5	-----	トラス	D25
応力解放率(%)	40 [*] (どの掘削ステージにおいても応力解放率は同じ値とした。)					

*パラメータとする。

3-2 FEM解析条件

図-4に、土被り1D(=25m)の場合の解析メッシュ、解析領域および境界条件を示す。解析は、図-3に示す施工過程通りの逐次掘削解析とし、解析ステップ数は11ステップとなる。表-1に、解析に用いた入力値を示す。地山はMohr-Coulombの降伏基準に従う弾塑性ソリッド要素、支保工は線形弾性の線材とし、鋼製支保工はビーム要素、吹付コンクリート、ロックボルトはトラス要素で表現した。

3-3 FEM解析結果

図-5は、土被りと地山弾性係数(E_{soil})の変化によって、ピラー作用荷重がどのように変化するかを示したものである。地山の弾性係数以外の入力値は、表-1に示す通りである。横軸に弾性係数比、縦軸に荷重比をとっており、これらは式(1)、(2)で定義した。

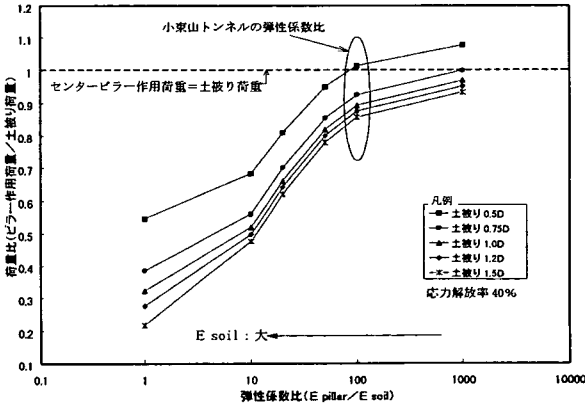


図-5 弾性係数比と荷重比の関係

弾性係数比 = $\frac{E_{pillar}}{E_{soil}}$ ---- (1)

荷重比 = $\frac{\text{ピラー作用荷重}}{\text{土被り荷重}}$ ---- (2)

ここに、

E_{pillar} : センターピラーの弾性係数 ($=2.4 \times 10^4 \text{ MN/m}^2$: 一定値)

E_{soil} : 地山の弾性係数 (パラメータ)

ピラー作用荷重 : 図-6 の A-A 断面上の要素の鉛直荷重の合計 (最終ステップ)

土被り荷重 : 先進・後進坑中心軸に挟まれた地山の自重 (図-6 の着色部の地山の自重)

弾性係数比は、センターピラーの弾性係数を一定にしているため、地山の弾性係数が大きくなるほど弾性係数比は小さくなる。荷重比が 1 の時は、ピラーには土被り荷重と等しい荷重が作用していることになる。なお、ピラーに作用する土被り荷重の領域は、図-6 の着色部のような領域になるとは限らないが、ピラー作用荷重の指標として便宜的にその領域をとった。図-5 より以下のことがわかる。

- ①弾性係数比が大きくなれば、荷重比も大きくなる。(地山の弾性係数が小さいとピラー作用荷重は土被り荷重に近づく。)
- ②弾性係数比 10~100 の間で、荷重比の変化が顕著である。
- ③弾性係数比が 100 以上となると、荷重比の変化は小さい。
- ④土被りが小さくなるほど荷重比は大きくなる。

図-7 (a)および(b)は、弾性係数比が 1 および 100 の場合の主応力分布を示したもので、センターピラー部の要素は省略してある。両図を比較すると、 E_{soil} の大きい弾性係数比=1 の方は、最大主応力の方向が先進・後進坑 2 つのトンネルをアーチ状に包絡するように分布している。図-7 および図-5 より、地山の弾性係数が大きい場合には、アーチ効果によりピラー作用荷重は小さくなることがわかる。

表-2 は、応力解放率およびポアソン比をパラメータにとった時の荷重比の変化を示したものである。土被りが 1D、弾性係数比=100 で他の物性値は表-1 に示す通りである。表-2 より、応力解放率およびポアソン比の変化が荷重比に及ぼす影響は小さい。よって、ピラー作用荷重は地山の弾性係数が支配的であることがわかる。

当地山の弾性係数は $E_{soil}=1.0 \sim 2.0 \times 10^2 \text{ (MN/m}^2\text{)}$ (弾性係数比 : 240~120) と評価されている。小東山トンネルにおいては、全土被り荷重の 100%~85%に相当する荷重がセンターピラーに作用するという結果になった。

3-4 ピラー作用荷重の設計値

シールド工法の鉛直土圧の考え方では、良質地盤で土被りが $1 \sim 2D_0$ (D_0 :セグメントリング外径) の場合には、地山自身のアーチ効果に比較的信頼がおけるようになるため、全土圧 ($=\gamma \cdot H$, H :土被り) を設計土圧としない場合が多い²⁾。その考え方を踏襲し、土被り 1D を境にして、ピラー作用荷重を検討することにした。

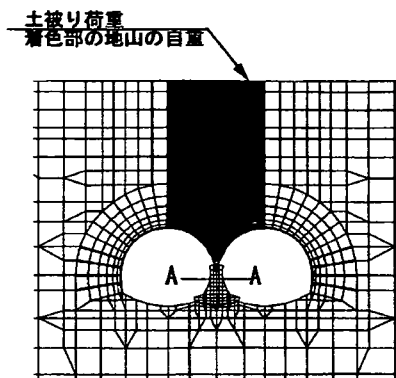
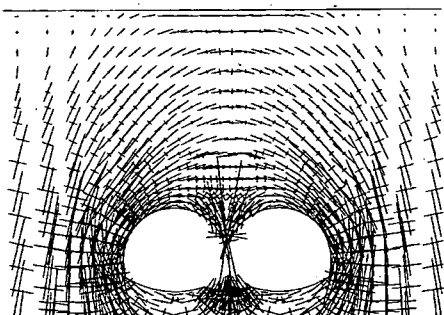
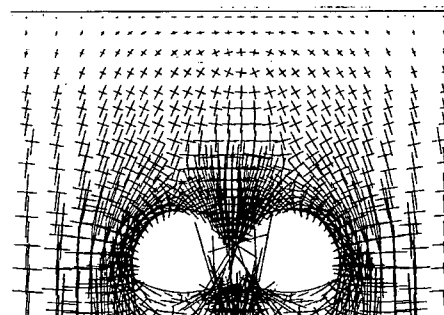


図-6 土被り荷重の定義



(a) 弾性係数比=1



(b) 弾性係数比=100

図-7 主応力図

表-2 応力開放率、ポアソン比と荷重比

応力解放率	荷重比	ポアソン比	荷重比
30	0.929	0.30	0.869
50	0.880	0.35	0.890
70	0.809	0.40	0.901

(1) 土被りが 1D 以下の場合

① 3－3 節での解析結果より、荷重比は 0.9 以上（全土被り荷重の 90%以上）となっている。

② シールドトンネルにおいては全土圧を設計土圧としている。

③ 施工順序、ピラー形状は本トンネルと異なるが、常磐自動車道十王トンネル³⁾では土被りが 1D 以下の場合には、全土被り荷重の 77～96%が作用していた。

この場合、計測事例の最大値と解析結果がほぼ一致している。両者とも荷重比が 1 前後になっているので、全土被り荷重をピラー作用荷重（図－6 の着色部の地山の自重）とした。

(2) 土被りが 1D 以上の場合

⑤ FEM 解析によれば、1D 相当の土被り荷重よりも大きな荷重が作用する。例えば、土被りが 1.5D の場合、1D 相当の土被り荷重の約 1.3 倍の荷重が作用することになる。

⑥ シールドトンネルにおいては、良質地盤であれば全土圧ではなく緩み土圧等を設計土圧とする場合が多い。

⑦ 十王トンネルでは、1D 相当の土被り荷重の 81%が作用していた。

この場合、解析結果は計測事例よりも大きくなっているが、ここでは両者の中間をとり、1D 相当の土被り荷重をピラー作用荷重（図－8 の着色部の地山の自重）とした。

表－3 に、ピラー作用荷重の設計値についてまとめたものを示す。この条件下で、センターピラーの形状・配筋などを検討し、構造計算を行った。また、センターピラー下部の地山については、中央導坑掘削時に平板荷試験を実施し、地耐力を確認した。

4. ピラー作用荷重の計測値

計測結果からのピラー作用荷重（以下、ピラー計測荷重）は、以下の 3 つの計測項目（図－9）から求めた。

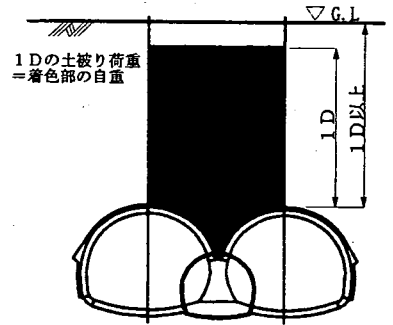
① 支保工の計測（鋼製支保工軸力＋吹付軸力）（以下、支保工軸力）

② センターピラーコンクリート応力計（以下、ピラー応力計）

③ センターピラー底盤土圧計（以下、ピラー土圧計）

① は、センターピラー天端から約 1.5m 上方の位置で計測した軸力値の合計をピラー計測荷重とし、② および③ は平均値をとり幅を乗じてピラー計測荷重とした。表－4 にセンターピラーに関する計測項目と計測断面を示す。

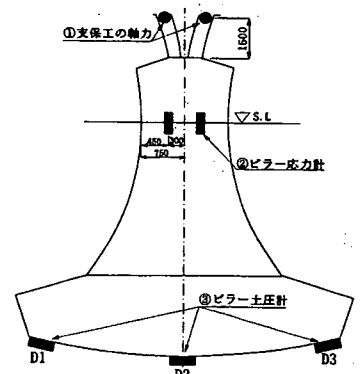
図－10 は、上記①、②、③の計測結果と解析結果を土被り別にまとめたものである。縦軸の荷重比は土被り $\leq 1D$ の場合 式(2)、土被り $> 1D$ の場合 式(3)により求めた。式(2)の分母は全土被り荷重（図－6 の着色部の地山の自重）、式(3)の分母は 1D 相当の土被り荷重（図－8 の着色部の地山の自重）である。横軸の土被り比は H/D (H ：土被り)である。荷重比=1 の線上がピラー作用荷重の設計値となる。計測値は計測項目および地質別にプロットしており、解析値は応力解放率 40%、弾性



図－8 1D の土被り荷重の定義

表－3 ピラー作用荷重

土被り高さ (H)	設計荷重
$H \leq 1D$	土被り荷重
$H > 1D$	1D の土被り荷重



図－9 ピラー計測項目

表－4 ピラー計測項目と計測断面

station	土被り高さ	①支保工軸力	②ピラー応力計	③ピラー土圧計
75+42	21.5 m	○	○	○
76+30	33.5 m	△	○	
76+91	37.0 m	△	○	○
77+80	28.0 m		○	
78+76	18.0 m	○	○	○
79+20	14.0 m	○		

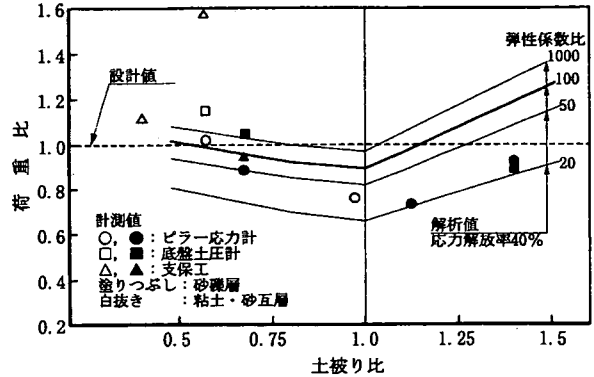
△：先進坑側だけ設置

係数比 20～1000（図中実線）、その他表－1 に示す条件の下で求めたものである。

$H \leq 1D$ の場合、計測結果は設計値とほぼ一致しており、解析結果と計測事例に従って全土被り荷重をピラー作用荷重とした設計方針の妥当性が確認できた。

$H > 1D$ の場合、計測結果は設計値よりもやや小さいが、解析結果と計測事例の間をとって 1D 相当の土被り荷重をピラー作用荷重とした設計方針の妥当性が確認できた。

以上のように、土被り 1D を境にしてピラー作用荷重の設定を変えたことが合理的な設計に結びついたと考えられる。



図－10 土被り比と荷重比の関係
（設計値、解析値および計測値の比較）

土被り $> 1D$ の場合

5. おわりに

$$\text{荷重比} = \frac{\text{ピラー作用荷重}}{1D \text{ の土被り荷重}} \quad \text{-----} \quad (3)$$

センターピラーは、メガネトンネルの主要構造物である。特に、本トンネルのようなピラー形式、施工順序を採るとき、その役目は大きい。しかし、その作用荷重の考え方は確立されておらず、そのため、事前より慎重に検討した。そして、表－3 に示すピラー作用荷重を設計値としたが、掘削が無事に完了するまではその妥当性を懸念しながら施工していたのが現状であった。今では、合理的な設計ができたと判断している。ただし、地山条件が本トンネルと異なる時は別途検討が必要である。

本トンネルのようなメガネトンネルは、土地利用上の制約や環境問題等により、今後ますます増加すると考えられる。しかも、それらは本トンネルと同様に土被りが小さく、未固結地山といった厳しい条件になると思われる。本論文が今後のメガネトンネルの設計・施工に役立てば幸いである。

〔謝辞〕

本工事の遂行および本論文の作成にあたり、小東山トンネル検討委員会（委員長桜井春輔 神戸大学教授）の委員および関係各位の皆様には、あたたかいご支援、ご指導をいただきました。心からお礼申し上げます。

＜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) 土木学会：トンネル標準示方書〔シールド工法編〕・同解説、1996. 4, pp. 42～43
- 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、1986. 11, pp. 45～56