

III-221 塑性体地山におけるNATMの適用とグラウンドアーチの形成について

(株)熊谷組技術研究所 正会員 北原 正一
〃 〃 上野 正高
〃 〃 ○垣内 幸雄

1 はじめに 塑性体地山においてNATMを適用した場合に、トンネル周辺にどのようなグラウンドアーチが形成されるかについては、非常に興味のある問題である。われわれは、これらの問題に対して、トンネル周辺に弾性波探査を実施することにより、グラウンドアーチの形成の存在を確認すると同時に、塑性体地山におけるNATMの適用性について検討を加えたものである。

2 弾性波探査

場 所： 鍋立山トンネル西工区
掘削 - S.55 12/26 PM.7:00 ~ 12/27 AM 5:00
φ 70 × 12^m (川側) , φ 70 × 14^m (山側)
位 置： 34^K875^M 付近 (切羽後方 約45^m)
方 法： Fig-1
結 果： Table-1 は測定結果, Fig-2 は走時曲線, Fig-3
はトンネル周辺の速度帯の分布を示すものである。

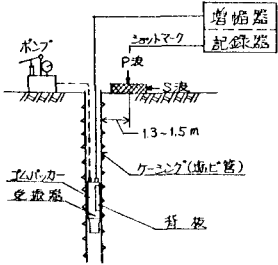


Fig-1 弾性波探査測定方法

3. 地山物性試験 地山の物性値は、次のとおりである。

$\sigma_c = 30 \text{ kg/cm}^2$, $C = 9.7 \text{ kg/cm}^2$
 $\phi = 24^\circ$, $\gamma = 2.0 \text{ t/m}^3$
 $P_v = 50 \text{ kg/cm}^2$

以上の物性値を用いて、検討を行う。

4 トンネル周辺応力および塑性領域

塑性条件式

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi + C \cos \phi \quad \text{---(1)}$$

$$\sigma_1 = K_p \sigma_3 + \sigma_c \quad \text{---(2)}$$

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r (1 - K_p) - \sigma_c = 0 \quad \text{---(3)}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\sigma_c}{K_p - 1} \left\{ \left(\frac{r}{a} \right)^{K_p - 1} - 1 \right\} \quad \text{---(4)} \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_c}{K_p - 1} \left\{ \left(\frac{r}{a} \right)^{K_p - 1} - 1 \right\} \quad \text{---(5)} \end{aligned} \right.$$

$$r_p = a \left\{ \frac{2}{K_p + 1} \frac{\sigma_c (K_p - 1) + \sigma_c}{\sigma_c} \right\}^{\frac{1}{K_p - 1}} \quad \text{---(6)}$$

Table-1 測定データ

山側	川側	山側	川側
深度(m)	時間(sec)	深度(m)	時間(sec)
1.60	0.300	2.39	0.375
2.50	0.350	4.20	0.450
3.35	0.400	5.65	0.600
3.81	0.450	8.10	0.800
5.22	0.600	10.08	0.900
6.18	0.650	12.07	1.025
7.15	0.700		
8.14	0.725		
9.12	0.625		
10.11	0.875		
12.09	1.000		
14.08	1.150		

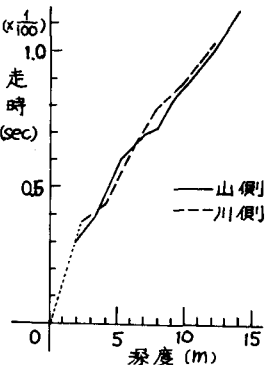


Fig-2 走時曲線

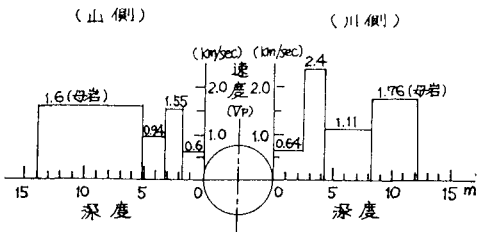


Fig-3 トンネル周辺の弾性波速度分布

ただし、 σ_1 :主応力(1), σ_3 :主応力(2), ϕ :内部摩擦角, σ_c :地山圧縮応力, C :粘着力,
 a :トンネル半径, r :動径, K_p :係数 $\left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right)$ である。

5 NATMの適用性の検討 地山物性値と塑性条件式を用いて

計算すると、トンネル半径を4.0mとすれば、地山の圧縮強度が完全に保たれた場合には、トンネル半径より2.5mの位置まで塑性化する。しかし、地山物性値は、破壊後の挙動として材料劣化、あるいは残留強度が低下することを考慮しなければならない。地山の弾性速度帯に対応して、母岩に対して強度劣化するものと考え、圧縮強度30 kg/cm²が10 kg/cm²程度に低下することが考えられる。

塑性領域は、拡大してトンネル壁面より8.3mとなる。しかしながら、 $\ell = 4.0$ mのロックボルトを施工することによって、実質的に塑性領域を2m程度にとどめていいると考える。

G. Seeber と S. Kellerの論文で、Fig-4 に示すような塑性領域とロックボルトの関係が示されている。

Fig-4 の(a)は、ロックボルトが施工されていないもので、塑性領域は大きくなり、しかもトンネル壁面の変形も大きい。

Fig-4 の(b)は、ロックボルトの施工が遅れて、しかもロックボルトが短い場合に相当する。

Fig-4 の(c)は、ロックボルトの施工期間とロックボルト長が適切な場合で、塑性領域も小さく、変形量も小さいものとなる。

これらの考え方を判定結果にあてはめると、トンネル壁面より約2m間は低速帯があり、山側については約5m、川側については約8mの塑性領域が存在し、ロックボルト長が4mに相当する領域が、明らかにグラウンドアーチを形成して、ロックボルトの施工効果を示している。

判定結果をモデル化すると、Fig-5 のようになる。

6 結論

塑性体地山のNATMの適用性としては、ロックボルトおよび収付コンクリートを施工することにより、地山の物性値の残留強度を最大限に保つ効果があることが推定される。

しかも、これらの施工効果により、トンネル周辺に、もとの地山より強度の増加したグラウンドアーチを形成する効果があるものと思われる。

当錦立山断面区の弾性速度帯の分布を判定した結果、明らかに施工速度より地山の劣化速度が著しく速く、ロックボルト長が不足という結果になって、トンネル半径の10%を越えるものがある。

施工技術や削岩機の能力的制限が考えられるが、理想的には7~8m程度のロックボルト長が望ましい。

参考文献 G. Seeber & S. Keller : Rock Mechanics, Suppl. 8, 59~74 (1979), P59~74

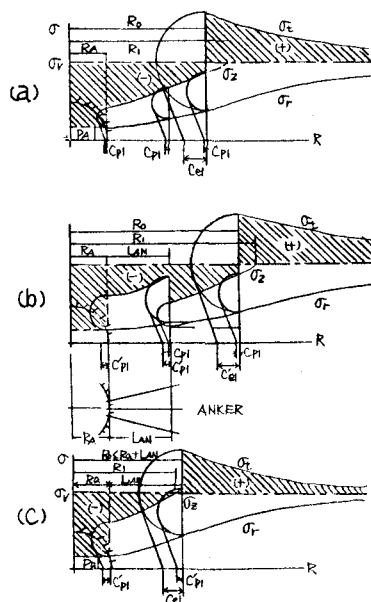


Fig-4 G. Seeber & S. Keller によるロックボルトの施工時期と適性長および塑性領域の関係

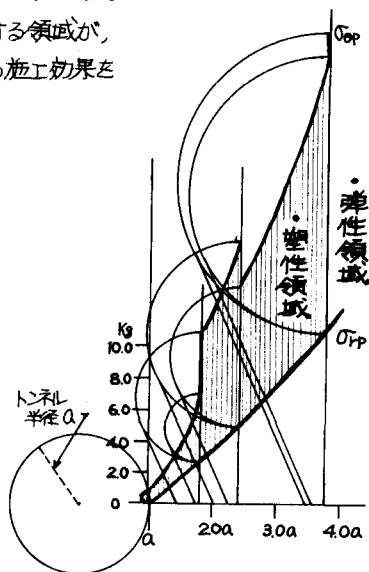


Fig-5 トンネル周辺の速度分布より推定したトンネル周辺応力