

(株) 熊谷組技術研究所 正会員 大坂 孝夫

同 同 上野 正高

同 同 堀内 孝雄

1. はじめに

上越新幹線中ノ山ずい道における地質は、新第三紀沖世のいわゆる緑色凝灰岩層“グリーンタブ”を基盤とし、特に地山の主破りに対して一軸圧縮強度が小さいために地山強度比が0.6~1.5であり、トンネル周辺の地山は塑性化され、押し出しが大きく非常に膨張性に富んだ地山である。今回実施した物理探査試験は、こうした現状における地山の物理量を直接的に計測できるということから“NATM”計測の一環として実施し、掘削後のゆるみ領域の経時変化を求め計測結果を施工にフィードバックして、塑性地山へのロックボルトおよび吹付けコンクリートの施工性の適否を検討するものである。以下上越新幹線中ノ山トンネルにて実施した弾性波探査の結果を報告する。

2. 物理探査試験概要

坑道周辺の岩盤はトンネル掘削によってゆるみ領域が発生し、地山の物性値を低下させ同時に弾性波伝播速度も低下する。本調査は弾性波のこのような性質を利用したもので、サイロット区間では川側先進導坑にて実施し掘削直後から、天端、山側川側側壁の肩部と下部および中央インパートの計6測線、NATM区間では、天端、山側川側壁および中央インパートの計4測線を設定した。測定時期はサイロット区間では掘削直後と後進の山側導坑が通過してその内定断面の变形が落ち着いた後、同地点で2回目の試験を行った。一方NATM区間では特に経時的な地山の、ゆるみの変化を調べるため掘削後、1, 2, 4, 12週間後にそれぞれ実施した。

起振方法は少量の火薬(10~30g)あるいは瞬発雷管のみで弾性波(縦波)を発生させ受振点に達する時間を測定し、伝播速度の厚さや平均伝播速度とその塑性領域の経時変化をも調べる。ゆるみ領域の境界は漸移的と考えられるが比較的明瞭な結果が得られた。

3. 測定結果

Fig-1~Fig-3は弾性波探査試験トンネル横断面図である。Fig-1, Fig-2は1次および2次試験区間で実施し、吹付けコンクリートは行わずに特にロックボルトの施工効果を試いたものである。1次試験区間では主に2mのロックボルト工のパターン別比較検討したものでその塑性領域はFig-1のハンチ部で経時変化に伴い山側壁部の緩み領域が増大し2m程度である。その後同区間の他の計測結果も考慮して、2次試験区間では、3mのS/Aアンカーを全面にシステムティックに、本数を増し打設することとした。Fig-2は2次試験区間の測定結果であるが、ゆるみ領域の経時変化も殆んどみられず、その領域も小さく1~1.5mで、静水圧分布に等しいと思われる。これらはロックボルトをシステムティックに打設したことが大きく影響したものと考える。以上2つの試験区間の結果から、名胡桃駅工区をNATMで施工することになり、Fig-3は、その試験結果である。これによると大断面にも拘わらずゆるみ領域は小さく約1m程度で12週間後におけるゆるみ領域の経時変化も殆んどないよう思える。(K&Lインパートは、数回利を行うので多少変動している。)これもNATMにおける大きな特徴であり、掘削後のロックボルトおよび吹付けコンクリートが如何にゆるみ領域を拡大せず地山を締め固めるかを裏付けていると云えよう。

以上3つの試験結果より全面に渡るシステムティックなロックボルト工、吹付けコンクリートは、いち早くアブソクソンを形成し塑性領域も小さく経時変化による変動もあまり見られず非進行性である。しかし一層目の経時変化に伴う速度低下より、塑性領域内では、壁面から徐々に逐次破壊により地山の劣化現象が進行すると想定される。

4. 塑性領域とトンネル周辺応力

岩盤が破壊するのに最も弱い方向に破壊する条件を考慮すると破壊条件式は(1)式で示される。

$$\sigma_{\theta p} = 2C \tan \alpha + \sigma_{rp} \tan^2 \alpha \quad (1)$$

$\sigma_{\theta p}$: 塑性体の接線方向応力

σ_{rp} : 塑性体の半径方向応力

α : $(\pi/4 + \phi/2)$ ϕ : 内部摩擦角

応力が軸対称な場合の塑性体地山の応

力方程式は(2)式で示される。

$$\frac{d\sigma_{rp}}{dr} + \frac{\sigma_{rp} - \sigma_{\theta p}}{r} = 0 \quad (2)$$

(1)式にて $\tan \alpha = \lambda$ とおいて(2)式に代入し

その解を求めれば

$$\sigma_{rp} = \frac{2C\lambda}{1-\lambda^2} + A r^{\lambda^2-1} \quad (3)$$

トンネル半径を a とし $r=a$ における境

界条件を考慮すると

$$\sigma_{rp} = \frac{2C\lambda}{1-\lambda^2} - \frac{2C\lambda}{1-\lambda^2} \left(\frac{r}{a} \right)^{\lambda^2-1}, \quad \sigma_{\theta p} = \frac{2C\lambda}{1-\lambda^2} - \frac{2C\lambda^3}{1-\lambda^2} \left(\frac{r}{a} \right)^{\lambda^2-1} \quad (4)$$

塑性領域の半径を R とするとその範囲は(5)式で示される。

$$\frac{R}{a} = \left\{ \frac{P(\lambda^2-1) + 2C\lambda}{\lambda C(1-\lambda^2)} \right\}^{\frac{1}{\lambda^2-1}} \quad (5)$$

塑性領域 R 内で地山の物性値が劣化する場合に新しく物性値が

変化する領域を $R_1 \cdots R_n$ とするとその領域で応力が連続するという

条件にて逐次破壊の条件と逐次破壊による必要なトンネル支保力を計算すること

が出来る。(3)式にて R_1 領域の半径方向応力を P_1 とすると $P_1 = \frac{2C\lambda}{1-\lambda^2} + A R_1^{\lambda^2-1}$

積分定数 A は $A = \{P_1(\lambda^2-1) + 2C\lambda\} / (\lambda^2-1) R_1^{\lambda^2-1}$ 、トンネル周辺応力は、

$$\sigma_{rp} = \frac{2C\lambda}{1-\lambda^2} + \left(\frac{r}{R_1} \right)^{\lambda^2-1} \cdot \left(P_1 + \frac{2C\lambda}{\lambda^2-1} \right), \quad \sigma_{\theta p} = 2C\lambda + \lambda^2 \left[\frac{2C\lambda}{1-\lambda^2} + \left(\frac{r}{R_1} \right)^{\lambda^2-1} \cdot \left(P_1 + \frac{2C\lambda}{\lambda^2-1} \right) \right] - (6)$$

例えば2次試験区間(Fig-2)では弾性波の結果から塑性領域の範囲はトンネル壁面

より1.0m程度と思われる。(5)式にて計算条件を $a=2.3m$, $P=60\% \sigma_c$, $\phi=30^\circ$ ($\lambda=1.732$) と

し $R=3.3m$ の時 $C=11.1\% \sigma_c$, $\sigma_{ga}=39.5\% \sigma_c$ (圧縮強度)を得る。Fig-4はこの時の

地山の強度劣化とその範囲によってトンネル壁面に作用する半径方向応力をそれ

ぞれの場合について計算したものである。

つまり強度劣化が進むに従い、その劣化領域が大きくなるほどトンネル荷重は増大する

ことがわかる。この事からNATMにおけるロックボルトや吹付けコンクリートは

地山の強度劣化を防止する作用があり、トンネル荷重を軽減していることがわかる。

5. まとめ

・トンネル坑内における物理探査試験は、地山の物理量を直接測定できるという
利便からNATM測定の一種として非常に有用な測定である。

・システムアップなロックボルトおよび吹付けコンクリートは、地山を締め、いち早くアーチアクションを形成
し、経時変化に対する塑性領域の増大もわすれであった。

・弾性波探査による塑性領域とトンネル荷重の相関について考察した結果、塑性領域内の物性値が劣化す
るほど、そして劣化領域が増大するほどトンネル荷重は増大する事が考えられる。

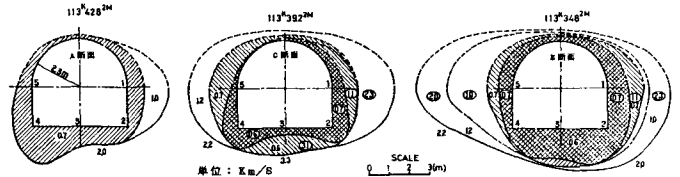


Fig 1 導坑内弾性波探査横断面図(サイロット区間)

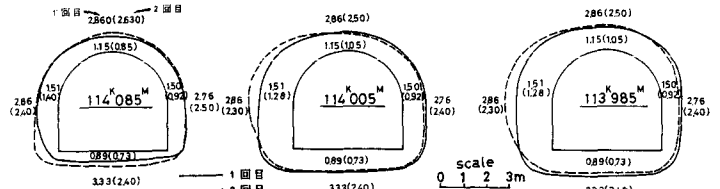


Fig 2 導坑内弾性波探査横断面図(サイロット区間)

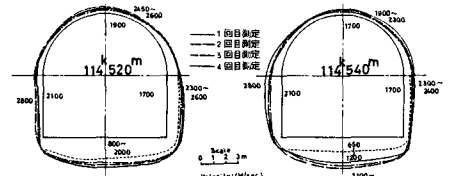


Fig 3 名胡桃弾性波探査横断面図(NATM)

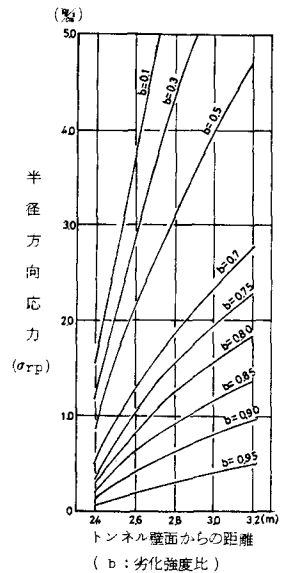


Fig 4 強度劣化によるトンネル壁面の半径方向応力(σ_{rp})