

熊谷組 正 矢木康照

○京大 正 太田秀樹

1. はじめに

比較的新しい堆積岩から成る地山にトンネルを掘削する場合、土被り圧にくらべて岩の強度が小さいため地山が掘削断面内に侵入してくる現象が発生しやすい。このような地山は膨張性地山とよばれ、古くから種々の対策工法が用いられてきたが、最近新オーストリア工法が注目されてきた動きと共に、ロックボルト工が対策の1つとしてとりあげられてきている。ここでは上越新幹線中山トンネルで試みられたロックボルト工を解析し、ロックボルトの効果を定量的に算定してみた結果を報告する。

なお、このような試みを行なうにあたって、日本鉄道建設公団東京新幹線建設局のみなさんに多大の助力をいただいたことを付記し、謝意を表する。

2. 解析の対象（中山トンネル）

中山トンネルは凝灰岩を中心とした地山に掘削され、その断面は図-1のようなものである。ここで報告する解析の対象は側壁導坑であるが、計算には双設トンネルとしての考慮を払わず、単設と仮定して解析した。対象とする区間は図-2に示される区間でそれをA、B、C、Dの4区間にわけている。4区間で用いた施工法が表-1に示してあるが、大別するとA、Bがロックボルトを用いない工法、C、Dがロックボルトを用いた工法である。なお、ロックボルトの配置は原則的には図-1に示されるようなものであり、緩和材とはオガクズをつめた袋のことを意味する。計算した断面は図-2に示されるように、NO1～NO6であり、1～3まではロックボルトのない区間、4～6はロックボルトのある区間である。図-2の下半分に実測された変形量が示してあるが、これによればロックボルト工が変形阻止の役割をよく果たしているように感じられる。

3. 解析方法

解析には双曲線型カーブすみ関係とダイレイタンス

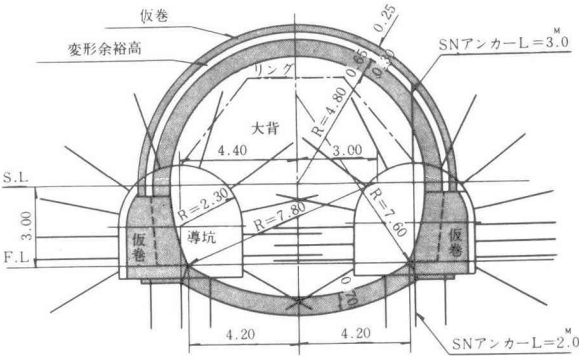


図-1 掘削断面とロックボルト配置図

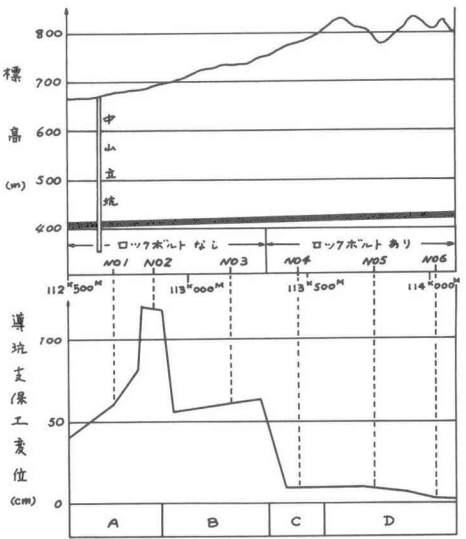


図-2 解析区間と実測変形量

表-1 施工法

|              |   |              |         |
|--------------|---|--------------|---------|
| ロックボルト<br>なし | A | 縫地工法         | NO 1, 2 |
|              | B | 縫地工法+緩和材     | NO 3    |
| ロックボルト<br>あり | C | ロックボルト試験施工   | NO 4    |
|              | D | ロックボルト+可縮支保工 | NO 5, 6 |

一特性を考慮した方法(太田, 益田: トンネル掘削にともなう地山内圧力と変形, 13回土質工学研究発表会, 昭53年6月)を用いた。それによると, トンネル支保工にかかる荷重を平均的圧力 $p$ に換算したものが, トンネル壁の変位をトンネル半径で割った値と次のような関係で与えられる。

$$p = \frac{1}{b(k+1)} \ln \left[ \frac{2a(1-y)^{k+1}}{2a(1-y)^{k+1} + by(k+1)} \right] + \sigma_0$$

ただし  $k = \frac{2a-B}{2a+B} > 0$

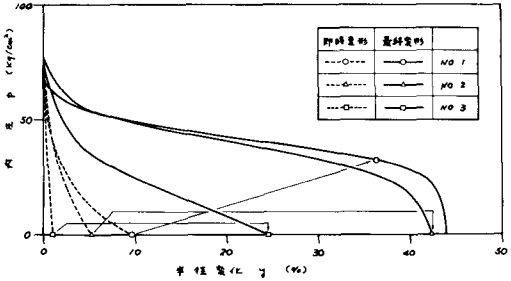
式中  $B$  は  $B = \alpha/\sigma_0$  とあたえられるもので $\alpha$ がダイレイタンスを表す係数で,  $\sigma_0$ が上載土がかり圧である。また  $a, b$  はそれぞれ初期接線変形係数および1軸強度の逆数で, 即時変形の計算には  $1/a = E_0, 1/b = q_u$  とし, 最終変形量は強く過圧密にされた軟岩に対応する値として  $1/a = E_0/3, 1/b = q_u/3$  を用いて計算した。ここでは具体的に測定されたパラメータが1軸強度だけしかなかったので,  $E_0/q_u$  を250 と仮定し, また $\alpha$ は強く過圧密された軟岩に対してありうる値として $-0.5\%$ をとった。このように計算に用いた値は土被り圧と1軸強度以外は他の軟岩からの類推にすぎないものばかりであるが, 類推による値の影響は結果の値と30%程度かえるのが最も悲観的な変形量とみられ, したがって, 数値的な信頼性はともかく, 傾向としては十分議論の対象になりうると思われる。表-2に用いたパラメータを示した。

表-2 計算に用いた数値

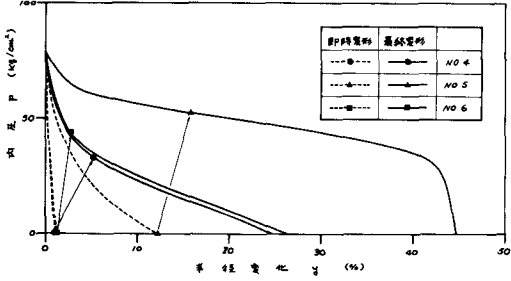
| 断面   | 即時変形                        |           |                |                       | 最終変形                                                |       |               |               | 実測                    |                            |
|------|-----------------------------|-----------|----------------|-----------------------|-----------------------------------------------------|-------|---------------|---------------|-----------------------|----------------------------|
|      | $q_u$<br>Kg/cm <sup>2</sup> | $E_0/q_u$ | $q_u/\sigma_0$ | $y$<br>( $p=0$ )<br>% | $\frac{1}{b} = \frac{q_u}{3}$<br>Kg/cm <sup>2</sup> | $b/a$ | $1/b\sigma_0$ | $\alpha$<br>% | $y$<br>( $p=0$ )<br>% | $y$<br>( $p \neq 0$ )<br>% |
| NO 1 | 40.3                        | 250       | 0.58           | 9.79                  | 13.4                                                | 250   | 0.19          | -0.5          | 44.0                  | 26.5                       |
| NO 2 | 56.5                        | "         | 0.73           | 5.19                  | 18.8                                                | "     | 0.24          | "             | 42.2                  | 52.3                       |
| NO 3 | 120.2                       | "         | 1.54           | 1.04                  | 40.1                                                | "     | 0.51          | "             | 24.4                  | 26.5                       |
| NO 4 | 112.9                       | "         | 1.53           | 1.06                  | 37.6                                                | "     | 0.51          | "             | 24.4                  | 4.0                        |
| NO 5 | 42.7                        | "         | 0.54           | 12.03                 | 14.2                                                | "     | 0.18          | "             | 44.5                  | 3.7                        |
| NO 6 | 107.3                       | "         | 1.44           | 1.18                  | 35.8                                                | "     | 0.48          | "             | 26.4                  | 1.4                        |

#### 4. 解析結果

図-3に解析結果をまとめて示してある。上の図はロックボルトのない断面に対するものであり, 下の図はロックボルト工を施した断面に対するものである。図中実線は掘削直後の様子を示しており, おおざっぱにみて素掘りに近い状態であるから $p=0$ と考え, その時の変形量 $y$ を $\Delta$ の記号で示してある。ここで示されている掘削直後の変形は掘削前とくらべての変形量であるから現実には計測できない量である。図中実線と示されているのは最終変形量であり, これは支保工でささえられる内圧 $p$ によって変化する。現実には計測される変形量は掘削直後からの変形量であるから, 掘削直後の変形量として計算上出された値に実測変形量を加えた変形量が全変形量であろう。このような仮定で全変形量を出したものが, 実線上の記号である。上の図ではNO1を除いてすべて $p=0$ になっており, 地山の押し出しに対して支保工その他はほとんど有効な抵抗をしていなかったことになる。これに対して下の図では内圧が30kg/cm<sup>2</sup>~50kg/cm<sup>2</sup>がけられたことになっている。これは, もしロックボルトなしで支保工だけで支えたとすれば, その支保工で実測された変形量にあさえるためには平均300t/m<sup>2</sup>~500t/m<sup>2</sup>の荷重に耐えうる支保工が必要であったということの意味する。このような大きな耐荷力をロックボルトが全体として持つ理由は不明であるが, 1つの参考資料として今後の検討に値すると思われる。



(a) ロックボルトなしの区間



(b) ロックボルト施工区間

図-3 解析結果(即時変形および最終変形)

図-3 解析結果(即時変形および最終変形) 図-3に解析結果をまとめて示してある。上の図はロックボルトのない断面に対するものであり, 下の図はロックボルト工を施した断面に対するものである。図中実線は掘削直後の様子を示しており, おおざっぱにみて素掘りに近い状態であるから $p=0$ と考え, その時の変形量 $y$ を $\Delta$ の記号で示してある。ここで示されている掘削直後の変形は掘削前とくらべての変形量であるから現実には計測できない量である。図中実線と示されているのは最終変形量であり, これは支保工でささえられる内圧 $p$ によって変化する。現実には計測される変形量は掘削直後からの変形量であるから, 掘削直後の変形量として計算上出された値に実測変形量を加えた変形量が全変形量であろう。このような仮定で全変形量を出したものが, 実線上の記号である。上の図ではNO1を除いてすべて $p=0$ になっており, 地山の押し出しに対して支保工その他はほとんど有効な抵抗をしていなかったことになる。これに対して下の図では内圧が30kg/cm<sup>2</sup>~50kg/cm<sup>2</sup>がけられたことになっている。これは, もしロックボルトなしで支保工だけで支えたとすれば, その支保工で実測された変形量にあさえるためには平均300t/m<sup>2</sup>~500t/m<sup>2</sup>の荷重に耐えうる支保工が必要であったということの意味する。このような大きな耐荷力をロックボルトが全体として持つ理由は不明であるが, 1つの参考資料として今後の検討に値すると思われる。