

京都大学工学部 正員 島 昭治郎
同 工 正員 ○谷 本 親伯
同 工 学生員 荻 谷 敬三

1. まえがき

岩盤の支保力をできるだけ有効に使い、合理的なトンネルの設計と施工を実施してゆく上で、支保工の作用をトンネル壁面に作用する内圧に置き換えれば、応力と変形との関係が明瞭となり、最大許容ひずみ量を決定すれば、コンバージェンスの限界と岩盤の安定度を決定できることを示した。^{1), 2)} 吹付コンクリートや鋼製支保などは、その効果を内圧で表現することは容易であるが、岩盤中に挿入されるボルトの効果も内圧に置き換えるためにはボルトと岩盤との相互作用を考察せねばならない。ここに、軟岩中に打設された全面接着式ロックボルトについて、その軸力とせん断力の分布および拘束圧付加効果から等価な内圧への換算方法を考察した。

2. ロックボルト軸力測定結果の解釈

全面接着式ロックボルトについて、軸力を測定し、その支保効果を確認することがかなり広く行われている。いくつかの現場測定結果と数値解析から、ひずみ軟化挙動の認められる軟岩については、その軸力とせん断力・分布モードから、図-1に示す5つの典型的なモードに分類できる。すなわち、ボルトが壁面付近の岩盤のトンネルへの変位を拘束している区間 a (作用区間) とボルトが岩盤をトンネルの方向に引き出そうという区間 b (定着区間) との大小によりロックボルトの支保効果が判定できる。まず、トンネル周辺の岩盤が弾性・ひずみ軟化・流動の順に変化してゆくと考え、弾性および軟化域にある場合は、図-1の(A)型、(B)型の2通りのモードが認められる。 $a \approx b$ となる場合は、ボルトをさらに長くすると支保効果は増大し、 $a < b$ となる場合は、ロックボルト長は十分に長く、長さを増しても軸力のピーク値は変化せず、それ以上の効果は見込めない。全面接着式ボルトでは、ボンドの付着が完全であれば、ボルトの両端部では軸力は零となるが、測定結果では、一定の軸力(またはひずみ)分布を示す領域がしばしば観察される。せん断力の分布から考察すると、壁面付近で最大値を示すので、壁面付近で滑りを生じ、部分的に先端接着式(アリストレス型)に変化しているものと考えられよう。(太い矢印部分) つぎに、流動状態が生じている場合については、図-1(C), (D), (E)に示す3つのモードが認められる。流動域のみに打設されたボルトは概ね(C)型、軟化域まで打設されたものが(D)型、弾性域まで打

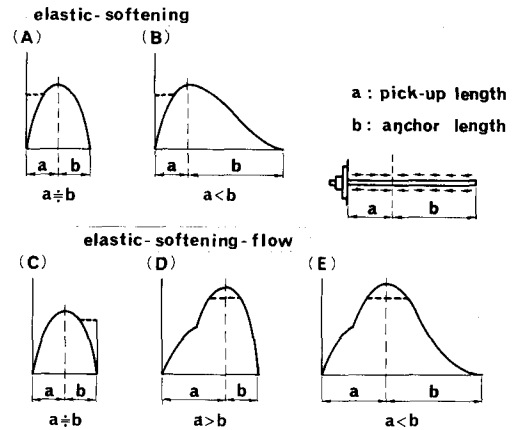


図-1 軸力分布モード

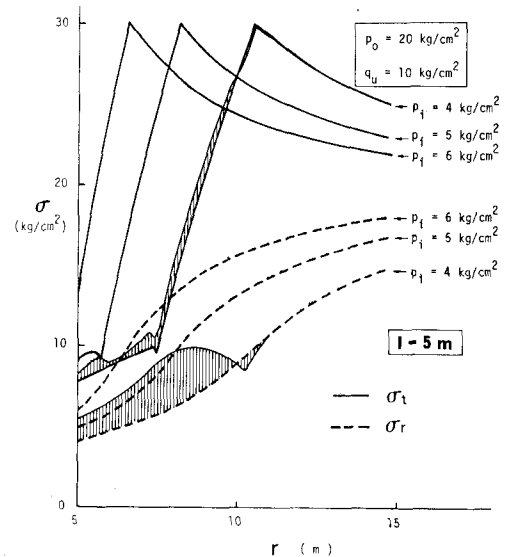


図-2 ボルトによる岩盤内応力変化

設され、ボルトの効果も十分に発揮しているのが図型である。これらの場合で滑りが発生するとすれば、せん断力が最大値を示す位置から判断すると、太い実線で示すように岩盤内部の弾塑性域境界付近である。ロックボルトの軸力がピークを示す位置と弾塑性域境界が一致するのは、 $a < b$ の認められた場合であり、計測により塑性域あるいはゆるみ域を確認するためには、十分に長いものを用いて、これを確認せねばならない。その長さは、塑性域(ゆるみ域)の2倍以上必要である。

3. 等価内圧の換算方法 地山強度比が0.5である地山中に直径10mの内形トンネルを掘削した場合を想定し、切羽より後方1mの位置に打設された1~8m長のシステムロックボルトに關し、切羽が1m前進することによって生ずる応力と変位の変化を求めた。この計算条件の詳細は、文献(2)に示している。5m長のロックボルトの近く近傍の応力変化は、図-2に示すように半径方向の応力 σ_r の増大が認められ、 σ_t のわずかな増大を考慮すると、ボルトによりせん断応力が減少したことが理解できる。しかし、このような効果は図-3に示すように特に軟岩ではボルト近傍に限られ、ボルト1本の負担する領域に対する効果としては、かなり小さいものとなる。そこで、応力・変位ともボルト1本の負担面積での平均値により等価内圧に換算するとすれば、次のような式が提案できる。

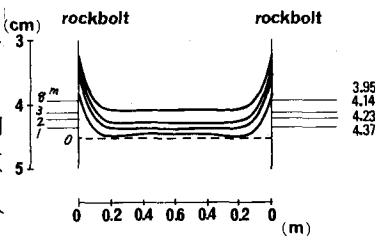


図-3 ボルト間の変位状態

1) 応力増大に対して、

$$\Delta p_i = (\Delta T / T_0) \cdot p_e \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 Δp_i 、 T_0 、 ΔT 、 T および p_e は、等価内圧、ボルトのない時の $(\sigma_t - \sigma_r)$ 、応力増大 $(T - T_0)$ 、ボルト使用時の $(\sigma_t - \sigma_r)$ および切羽進行に伴う壁面に作用する掘削外力である。

2) 変位増大に対して、

$$\Delta p_i = (u_0 - u) \Delta p_e / u_0 \quad \text{----- (2)}$$

ここに u_0 および u は、ボルトのない場合およびボルトを使用した場合の壁面での変位である。

そこで、(1)、(2)式を比較し、壁面付近の応力状態(図-2)と変位状態(図-4)を考慮すると、その簡単さから変位増大について、内圧換算を行った方がよいと考えられる。たとえば、内圧 $p_i = 5 \text{ kg/cm}^2$ 相当の支保工を施すものと想定すると、軟化挙動を示す真の変形係数が、 $\omega = 0.4 E$ なる関係と有する泥岩については、三軸試験結果より拘束圧 5 kg/cm^2 の作用下で、軟化域・流動域の境界での軸ひずみ (ϵ_1) は、2.4%であったので、これを許容ひずみ限界値とし、ボルトの効果を検討すると、図-5のような結果を得た。許容ひずみ限界線の勾配に比べ、ボルトによる内圧付加効果を示す勾配が小さく、壁面での変位により等価内圧換算を行う(2)式の妥当性が説明できる。今後は、さらにベアリングプレートなどの効果を検討する必要がある。

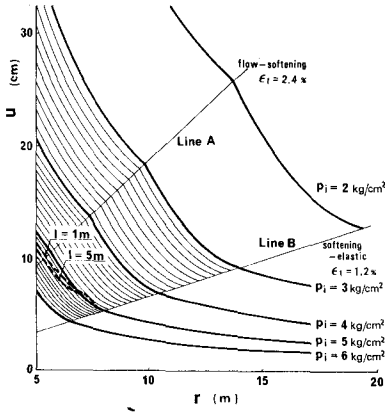


図-4 内圧と岩盤内変位

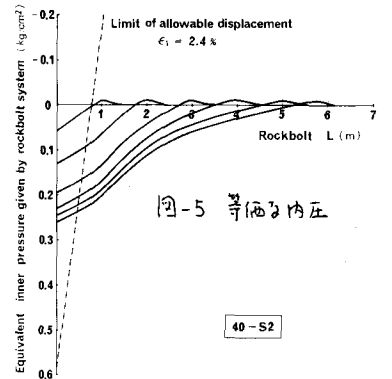


図-5 等価内圧

文献: 1) 島谷本・木村・西原: 北陸地方の泥岩中のトンネルにおけるロックボルト吹付コンクリートの設計, 2) 日本道路会議論文集, p18-170, 1979
2) 島谷本・西原・島谷: 塑性域におけるロックボルトの効果, 3) 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, p101-105, 1980