

岩手トンネルにおけるロックボルト効果の検討

A study on reinforcement effect of rockbolt on Iwate tunnel

北川 修三*

Syuzo Kitagawa

1. はじめに

近年、施工機械や建設材料の進歩、あるいは岩盤力学的視点からの種々の研究によって、トンネル施工の高度化が図られてきた。他方、国内の経済情勢からは、インフラストラクチャーの整備に要する費用を軽減することが求められており、施工のさらなる高速化や情報化施工の徹底によるコストダウンの努力が重ねられている。トンネル工事のコストダウンを実現し、同時に施工の安全性やトンネルの安定性を確保するためには、多くの問題に取り組んでいく必要があるが、その中の一つに、地山と支保工の力学的相互作用の定量化を挙げることができる。特に、NATMにおける重要な支保メンバーであるロックボルトについては、数多くの研究によって基本的な補強効果は明らかになっているものの、その効果の定量化には至っておらず、過去の経験に基づくパターン化に頼っているのが現状である。

本報告では、このような観点から、岩手トンネルでの施工を例にとりて、ロックボルトの補強効果やその定量化の方向を検討する。

2. ロックボルトの効果について

トンネル掘削とはほぼ同時に施工される支保工のうち、地山の変形を抑制する効果が大きいものは、吹付けコンクリートと鋼製支保工である。しかしながら、地山に生じている土圧のうち、これらが負担できるものは、一般的な施工ではたかだかその1割程度である場合が多い。これは、

1) トンネル切羽前方で、土圧の5～6割は解放されてしまう

2) 吹付けコンクリートや鋼製支保工が地山に密着し、変形抑制効果を発揮するまでに、さらに2～3割が解放される

からであると考えられる。

したがって、土圧の大部分はトンネル周囲の地山が負担し、トンネル近傍の地山は相応の変形を生ずる。土圧が地山強度に比べ大きい場合には、トンネル近傍で地山が弾性領域を超えた変形をする可能性もある。このような場合に効果を発揮するのが、ロックボルトであると考ええる。

このときのロックボルトの効果を一言でいえば、地山の靱性を高めることにある。ロックボルトの剛性は、それがかなりの密度で打設されたとしても、地山の剛性に比較すれば小さい場合が多い。したがって、地山が弾性的に挙動している範囲においては、ロックボルトの変形抑制効果は他の支保メンバーに比べ小さいと考えられる。しかし、トンネル近傍で地山が弾性領域を超えた変形をする場合には、

1) せん断応力により発生するクラックが、大きく成長することを抑制する

2) クラックが成長しても地山の連続性を保持し、巨視的な破断や崩落を抑制するなどの効果により、結果的には地山の变形抑制に寄与する。

これらの効果を最大限に活用するためには、

- 1) ロックボルトを高密度に、かつ連続的に打設し、トンネル全周にわたり地山の連続性を保持するとともに、局所的な応力集中を低減する
 - 2) 短めのロックボルトをトンネル近傍に密に配し、地山の破壊に備えるとともに、施工性を向上させる
- ことなどが重要であると考えられる。

岩手トンネルにおいては、これらの対策によって地山の安定が図られた経緯があり、これを例にとってロックボルトの効果を検討する。

2. 天端でのクラック発生対策

2. 1 クラックの発生原因とロックボルトパターンの変更

岩手トンネル女鹿工区は、全長約 25.8km の岩手トンネルのうち、本坑延長 3,720m を施工するものであり、現在までに本坑約 1,700m を掘削完了している。この間、天端付近の吹付けコンクリートにクラックが発生する現象が多発し、ロックボルトの打設パターンが変更された。クラックが発生したのは、四ツ役層と呼ばれる、新第三紀の凝灰岩および砂質凝灰岩を主体としたほぼ水平の地層である。

この原因を検討するため、切羽近傍にてロックボルト用の穿孔機で上半天端と側壁に 2 m の穿孔を行い、これに変位計を埋設し壁面と 2 m 奥の地山の相対変位を計測した(図-1)。計測結果によれば、側壁部は掘削を開始すると押し出し変位を続けるが、天端部は最初突き上げ変位を生じ、その後押し出しへと変化する。この結果、天端の変位は掘削前後であり変化しない(図-2)。このことは、鋼製支保工や吹付けコンクリートが側方からの偏った地山変位によって曲げ変形を生じていることを示している。

また、同区間では吹付けコンクリートの軸応力計測も実施された(図-3)。計測結果からは、トンネルの天端で約 150kgf/cm^2 の圧縮応力が発生しており、この部分でコンクリートの圧壊が発生していると判断できた。

計測結果よりトンネル周囲の地山挙動を推測するため、FEM による掘削のシミュレーションを行った。シミュレーションは、切羽の進

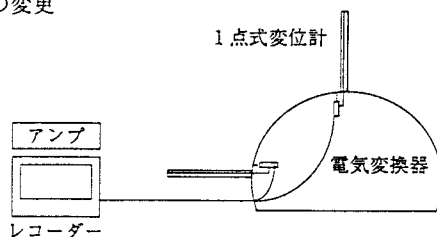


図-1 地山内変位計測のレイアウト

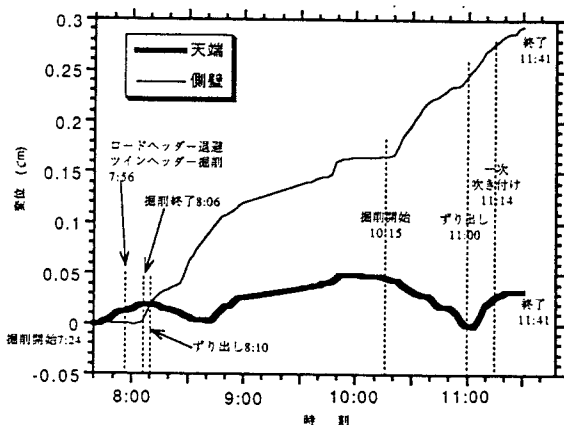


図-2 地山内変位の計測結果

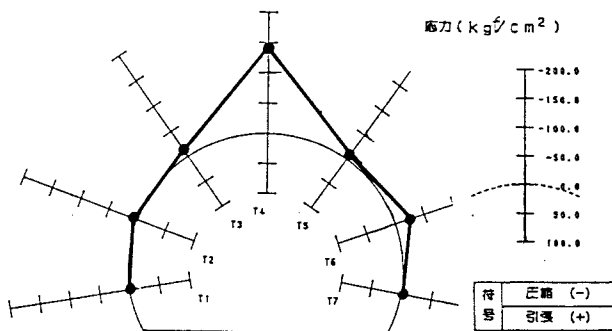


図-3 吹付けコンクリートの応力計測結果

行を考慮した平面ひずみ弾性解析で行い、次の物性値などを用いた（図－４）。

土被り 100m
単位体積重量 2.5tf/m³
ヤング率 地山 2.5x10³kgf/cm²
支保工 1.0x10⁵kgf/cm²
ポアソン比 地山 0.4
支保工 0.2

解析では、掘削解放力を50%作用させ切羽前方での応力解放を模擬した後、支保工を付加して残りの50%を作用させた。変位は、残りの50%を作用させた際のものが実際に計測可能であることから、これを考察の対象とした。

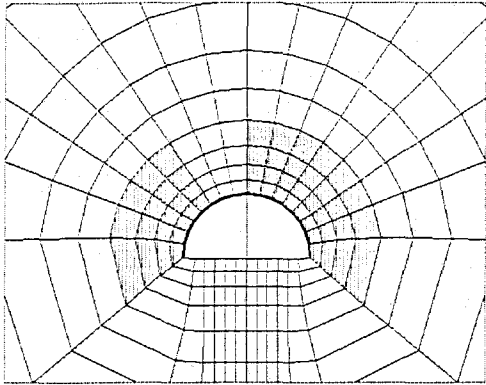
最初に、地山応力を等方的であると仮定して掘削解析を行った。この場合、支保工の変位は天端部で大きくなることがわかる（図－５右）。他方、鉛直に対し水平方向が3倍の応力が発生していると仮定した場合には、計測結果に近い変位モードが得られることがわかった（図－５左）。このときの支保工の応力は、側壁で小さく天端で大きな値となる分布をしており、これも計測結果と一致している。

本トンネルでは、側壁部を中心にロックボルトが施工されていることから、これを表現するために側壁近傍の地山のヤング率を2倍として同じ解析を行った。この結果、側壁部の押し出し変位や側壁部の吹付けコンクリート応力は小さくなるものの、天端部の吹付けコンクリート応力の値はあまり変化しないことがわかった。側壁近傍の地山のヤング率をさらに2倍にしても、この傾向が強くなるだけで天端部の吹付けコンクリートの応力はあまり変化しない。

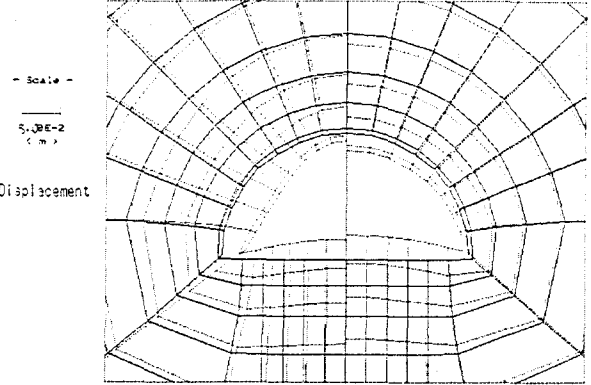
他方、天端近傍の地山のヤング率を側壁部と同様に2倍とすると、側壁部の押し出し変形に対しては効果が小さいものの、トンネル全体の変形が抑制され天端部の支保工の応力も小さくなる。これは、トンネル周囲に均等に応力が分散される効果と考えられる（表－１、図－６）。

2. 2 施工後の計測結果について

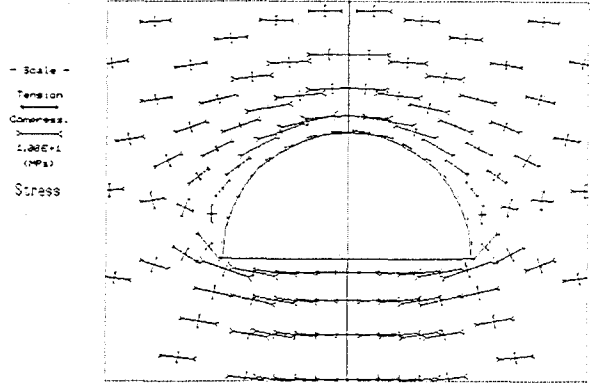
検討結果に基づき、支保パターンの変更を行ない天端部にロックボルトを施工した（図－７、



図－４ 解析に用いたメッシュ図（斜線部の剛性を変化）



図－５ 変位分布（左：測方3倍、右：等方応力）



図－６ 主応力分布（左：天端も補強、右：側壁のみ補強）

表－１ 数値解析結果一覧

解析ケース	吹付け 天端応力 (kgf/cm ²)	内空変位 (mm)
地山を補強しない場合	132(1.0)	104
側壁近傍の地山のヤング率を2倍	128(0.97)	78
側壁近傍の地山のヤング率を4倍	115(0.87)	64
天端近傍の地山のヤング率を2倍 (側壁部は2倍のまま)	91.9(0.69)	72

8)。この後、天端のクラックは見られなくなった。

ロックボルトが実際に地山の変形を抑制していることを確認するため、いわゆるB計測が実施された。計測結果をまとめると、次のとおりである。

(1) 吹付けコンクリートの軸応力は天端付近で最大値を示しており、これは、横方向からの変形が大きいために天端部が押し上げ方向の変形となることに起因していると考えられる(図-9)。

(2) 軸応力は、天端部のロックボルトを施工しなかった場合に比べ小さくなっており(最大値で約 $150\text{kgf/cm}^2 \rightarrow$ 約 60kgf/cm^2)、コンクリートの圧壊が抑制されていることがわかる。

これらのことから、天端部のロックボルトは地山の変形に抵抗し、地山の剛性を幾分なりとも高めており、この結果吹付けコンクリートの応力負担が軽減され、クラック発生が見られなくなったものと考えられる。

なお、大部分のロックボルトは、2.5～3.5m 付近で軸力の最大値が生じており、この部分で地山の変形に最も抵抗していることがわかる。また、天端部のロックボルトにおいても、壁面近傍を除いては、大部分のロックボルトに引張力が発生しており、上半部全周にわたって地山変形に抵抗している。天端部の圧縮力は、H鋼と吹付けコンクリートが地山を押し上げる方向の変形をしていることに起因すると考えられる(図-10)

3. おわりに

岩手トンネルで実施した支保パターンの変更は、ロックボルトが地山の靱性を向上させ、地山の巨視的な剛性を保持させることで、吹付けコンクリートの荷重分担率が軽減されるとの予測のもとで行われ、一応の成果を上げた。このことは、ロックボルトの効果を考える上で貴重な資料となるものと考えられる。

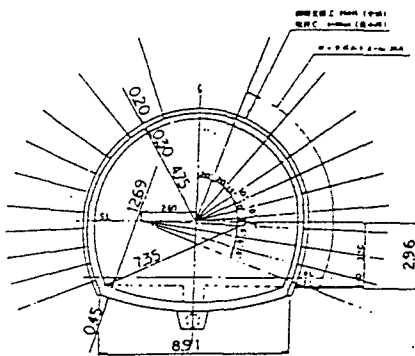


図-7 変更前の支保パターン

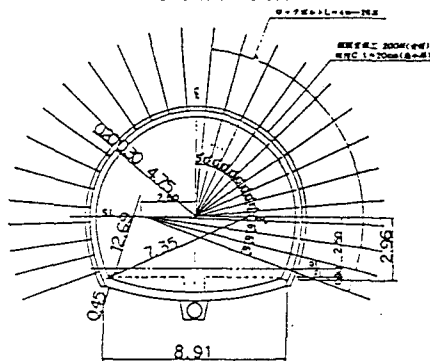


図-8 変更後の支保パターン

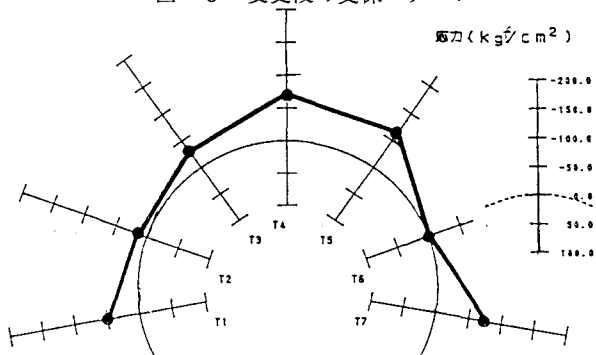


図-9 吹付けコンクリートの応力計測結果

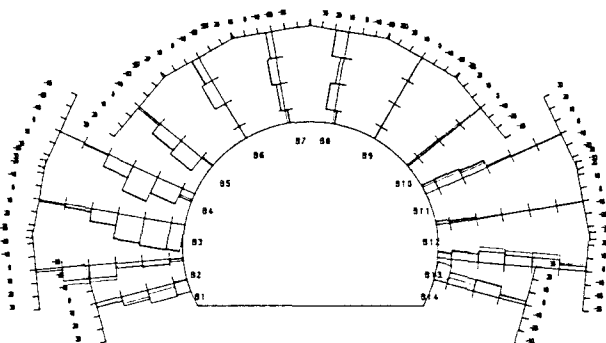


図-10 ロックボルト軸力計測結果