

支保のマルチ化に関する研究 STUDY ON MULTIPLICITY OF SUPPORT SYSTEM IN TUNNELLING

佐野 信夫*・佐藤 淳**・中野 清人*
Nobuo SANO, Jhun SATO, Kiyoto NAKANO

At present, the standard support system in tunnelling of Japan Highway Public Corporation basically consists of five patterns. In practice, tunnelling support is adopted among them. But, adapting only five patterns is not rational because of complicated geological structures. As a result, displacements is numerically almost small in a monitoring, so probably oversupport is adopted. For these reasons, the authors made a plan about reduction of support systems, and detail monitoring and observation of rock mass are executed in several tunnels.

In this paper, the authors report results concerning effectiveness of support system, the effect of each support and several classification systems of estimating quantitative rock mass.

Keywords: support system, monitoring, quantitative rock mass classification

1. まえがき

従来、トンネル掘削時の支保構造の選定は、切羽状況や計測工の結果から、千差万別の性状を持つ地山を一般的にB～DⅡの5つの地山等級に大きく分類し、それぞれの地山等級に応じて必要とされる支保の量に対して、段階的に変化する標準支保パターンを適用させるという方法で行われている。この方法は、設計要領において事前調査の精度などを考慮して当初設計に用いるものであり、施工時の観察・計測の結果に基づき必要に応じて実際の地山条件に応じて修正されることを期待している¹⁾。しかし、実績を調べると施工時に当初設計の地山等級の見直しは行われるものの、支保構造については変更された地山等級に対応する標準支保パターンの中から選定され、施工が行われているものがほとんどである²⁾。性状がいろいろと変化する地山に対して、5種類の標準支保パターンのみを画一的に適用することは、合理的かつ経済的とは言えない。地山性状の変化に適合するように、吹付けコンクリートの厚さや強度、ロックボルトの本数、長さや種類および鋼アーチ支保工といった支保構造を増減したり、あるいは一掘進長を延進するなど、支保をマルチ化することは重要であり、そのための観察・計測だと考える。

ところが、支保構造と地山は相互に作用し合い複雑な挙動を示すことや、切羽の安定とトンネル構造全体

* 正会員 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室

** 正会員 (財) 高速道路技術センター 建設技術部

の安定の区別が付きにくく、さらに地山性状が複雑に変化するなどの理由から、いまだに地山分類や地山に適合した支保構造の判断は難しく、試行錯誤の現状にある。

筆者らは、安全で経済的な支保構造の選定のため、切羽観察や計測データの分析、さらに比較的同じ地山の区間で異なる剛性の支保構造を設置し、個々の支保部材や地山の挙動を比較することで、支保規模の妥当性の検証、支保構造の作用効果、切羽評価手法の検討を行ったので報告するものである。

2. 支保構造選定の現状

支保構造は、通常、前述のように地山等級に対応する標準支保パターンが選定され、施工される。図-1に地山分類毎の内空変位量の分布を示す。これまで収集したデータではCⅡとDⅠが最も多く、地山が悪くなるほど内空変位量の分布範囲の大きいことがわかる。このことは、地山を評価する際、本来、切羽の自立性の確保が必要な地山なのか、あるいは作用する土圧に対応することが必要な地山なのか、いずれに主体を置いて対応するのかの見極めが現状では十分にできていないことに起因していると思われる。

図-2に地山分類毎の最大ロックボルト軸力の分布を示す。良い地山ほどロックボルトの耐力に対して軸力に余裕があり、悪い地山ほど余裕がなく、耐力を超える計測データも多くなる傾向にあることがわかる。このことは、清水ら³⁾の変位計測結果と支保工の変状との関係とも一致する。

これらから、地山の良し悪しにかかわらず剛性の高い支保パターンを選定したと思われるケースとその逆のケースがある一方、B～CⅡといった比較的良い地山では支保を軽減できる可能性が高く、逆にDⅠ、DⅡといった比較的悪い地山では支保を増強すべきであったと思われる。

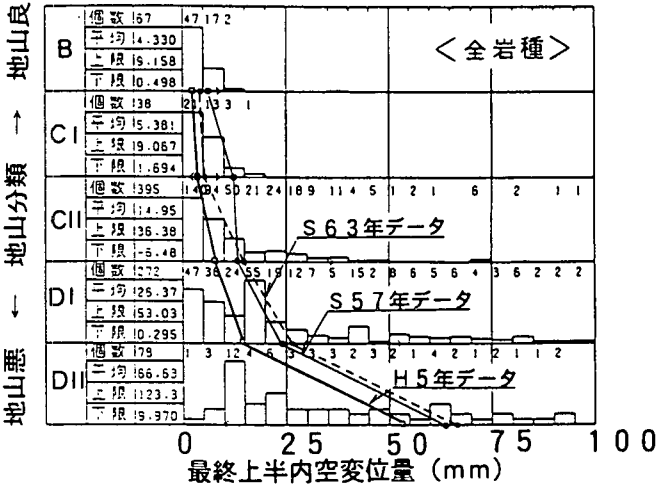


図-1 地山分類毎の最終上半内空変位量

3. 支保のマルチ化に関する現地試験

支保規模の妥当性を検証するにあたり、実際に現地で標準支保パターンとマルチ支保を施工し、それぞれの計測結果を比較し、評価することとした。支保構造の異なる隣接する区間の影響を除去するために、それぞれ30m以上の区間を施工し、そのほぼ中央の計測値を比較することとした。そこで、発注時の地山分類において同一地質が60m以上連続すると予想される

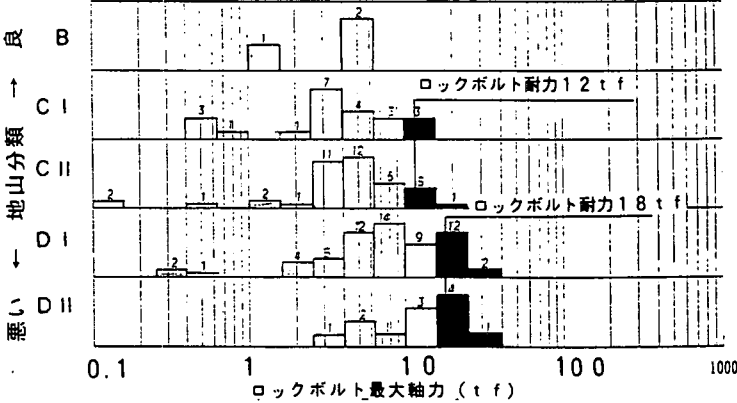


図-2 平成5年度までの計測データによる最終上半最大ロックボルト軸力分布

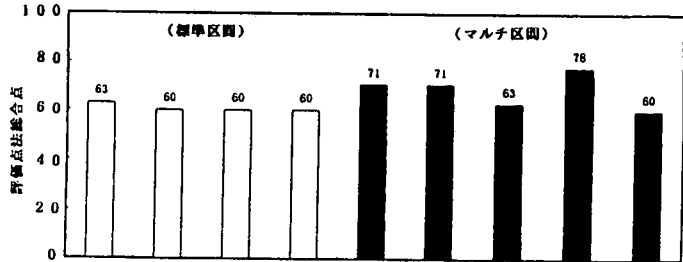
条件を満足する6建設局13本のトンネルを全国から抽出した。表-1に、支保のマルチ化に関する試験実施トンネルを示す。地山等級はほとんどのトンネルがCⅡであった。ここで、マルチ支保は、地質状況を熟知した現地においてこれまでの施工経験から安全で経済的な支保構造という観点からの選定してもらった支保構造である。下半ボルトの削減が5トンネルから提案されており、次いで鋼アーチ支保工の削除、一掘進長の延進、ロックボルト本数の削減などである。なお、計測工は、それぞれの区間にA計測3断面とB計測1断面を設置することとした。また、同一地質であることを確認するために、切羽評価点法（切羽観察の各項目に配点し、その集計点で評価する方法⁴⁾）、RMR法⁵⁾、Q値法⁶⁾、ポイントロード試験、坑内弾性波試験などを実施している。

4. 切羽評価手法の検討

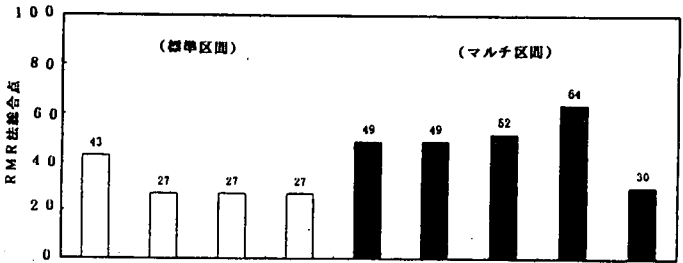
支保規模の妥当性、支保構造の作用効果を検討する上で、切羽の状態を正確に把握することが重要である。各種の切羽評価手法の適用性を検討する目的で、前述の切羽評価点法などいくつかの方法を適用している。そのなかで、Q値法は実施切羽が少なく、今回の試験では評価できていない。図-3は、切羽評価点法とRMR法についてCトンネルの切羽に出現する岩種の比率の差（頁岩と砂岩）で総合点に変化する例である。両者の方法ともその値が大きいほど良質な地山であることを示す。図より、RMR法の方が変位量の変化を明確に表現していることがわかる。ただし、切羽評価点法とRMR法の総合点を比較できる他の3本の中国地方のトンネルについては、これほど明確な違いは見られ

表-1 支保のマルチ化に関する試験トンネル一覧

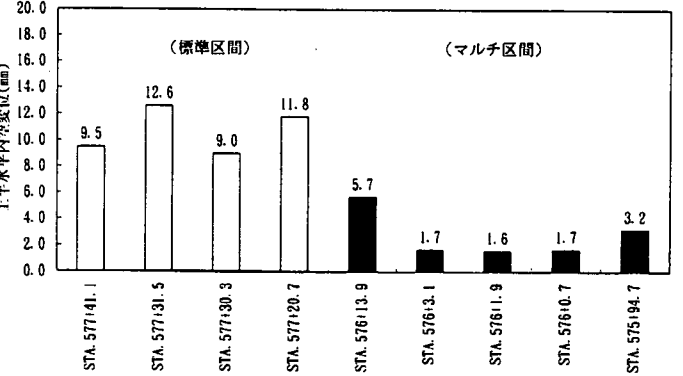
トンネル名	地質・岩質	基本支保	採用マルチ支保
A	砂岩、礫岩	CⅡ	下半ボルトの削減
B	石英安山岩	CⅡ	①一掘進長1.2m→1.35m ②下半ボルトの削減
C	頁岩砂岩	CⅡ	下半ボルトの削減
D	頁岩	CⅡ	H鋼無、SWボルト使用
E	頁岩砂岩	CⅡ	H鋼無
F	頁岩	CⅡ	H鋼無
G	粘板岩	CⅡ	掘進長1.2m→1.5m
H	砂岩頁岩	B	R/B12本→8本
I	花崗岩	CⅠ	下半ボルトの削減
J	花崗岩	CⅡ	掘進長1.2m→1.5m
K	砂岩頁岩	CⅡ CⅡ	①H鋼無、 $\sigma_{ck}=180\rightarrow270$ ②H鋼無、 $\sigma_{ck}=180\rightarrow360$ (吹付け厚7cm)
L	頁岩	CⅡ	下半ボルトの削減
M	砂岩頁岩	DⅠ DⅠ	①ボルト長4m→3m ②R/B18本→12本



(a) 切羽評価法



(b) RMR法



(c) 上半水平内空変位

図-3 切羽評価と変位量の比較

なかった。

5. 支保規模の妥当性の検討

支保規模の妥当性を評価する方法には、既施工区間の観察により支保の変状の有無や程度を確認する方法、変位の収束や変位速度あるいは変位量の大きさにより確認する方法、ならびに軸力や応力の測定により、その値が許容値以下であるかどうかによって、支保としての耐力、剛性の良否を判断する方法などがある。ここでは、特に支保部材の耐力

に着目し検討した。

図-4は、3箇所のトンネルで標準支保パターンを適用した場合と下半ボルトを削減した場合の上半脚部の最終段階のロックボルト軸力をRMR値の関係で示す。RMRの値が50程度以上では、ロックボルト軸力が降伏耐力12tfに対して比較的小さい値となっており、他の支保部材の応力も特に増加することはなかったことから、RMRの値がある程度大きい場合には下半ボルト削減の可能性があることがわかる。

つぎに、今回調査対象のトンネルにおける切羽評価点と吹付けコンクリート応力、鋼アーチ支保工応力の関係を図-5、図-6に示す。吹付けコンクリート応力は切羽評価点が60点程度以下になると発生する応力が大きくなる傾向が見え、一点を除いて最大60kgf/cm²程度（吹付け厚10cmの場合、60tf/m）であり、設計基準強度180kgf/cm²の約30%となっている。一方、H-125の鋼アーチ支保工は、降伏点強度2,400kgf/cm²のときの軸力約79tfに対して最大80%の65tf程度発生しており、吹付けコンクリートと比較してそれぞれの耐力に対する余裕度合いが異なっている。これらのことから切羽評価点が大き

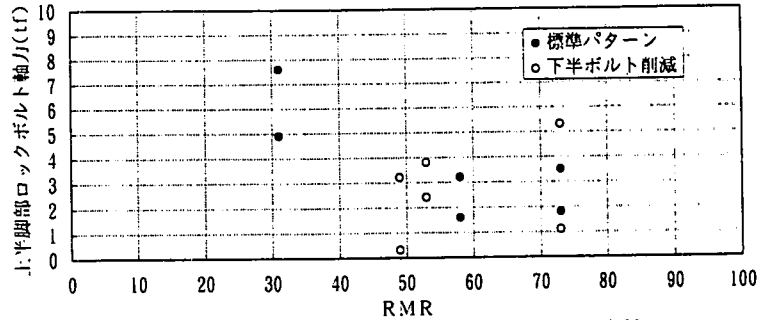


図-4 上半脚部ロックボルト軸力比較

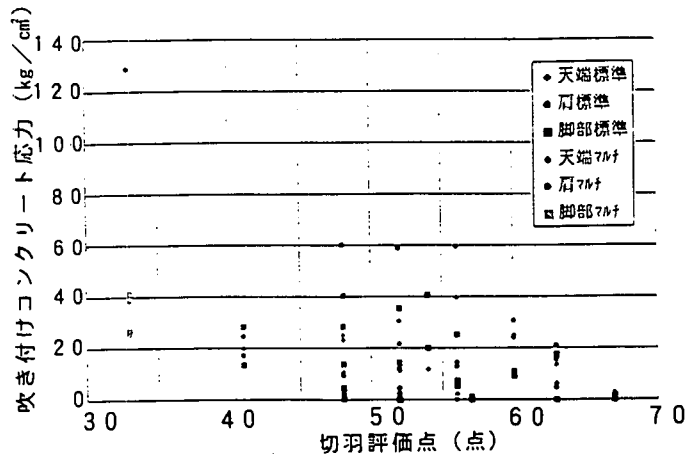


図-5 切羽評価点と吹付けコンクリートの関係

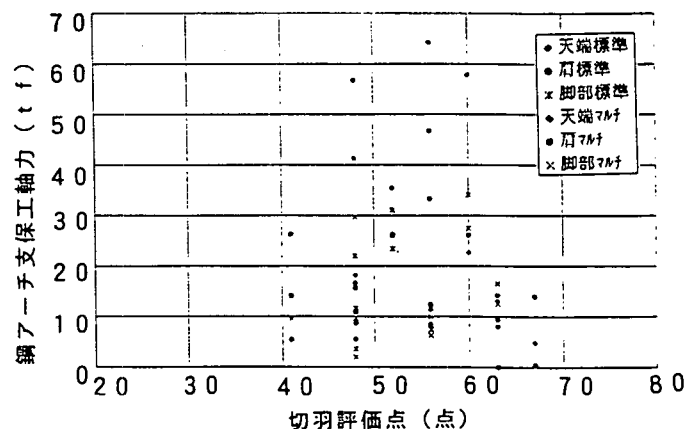
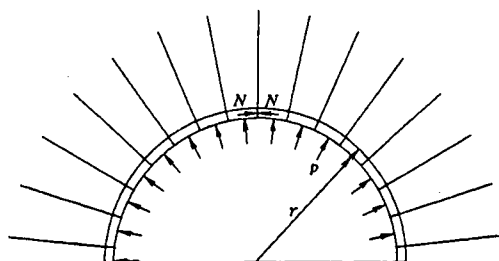


図-6 切羽評価点と鋼アーチ支保工応力の関係

く、地山の崩落の懸念のない場合、鋼アーチ支保工を削減した支保構造を試行できる可能性がある。また、切羽評価点が50～60点程度でも吹付けコンクリートに荷重を持たせるべく、吹付け厚を削減した支保構造を試行できる可能性がある。

6. 支保効果の検討

計測工で測定した各支保部材の軸力を図-7に示すように半径方向（トンネル壁面に法線方向）の力に換算して地山に与える内圧力 p を算定した。図-8に今回調査対象のトンネルにおける一軸圧縮強度と各支保部材の内圧力の和（総内圧力）の関係を示す。内圧力の考え方は、比較的軟質な地山で亀裂が地山の挙動を支配しない場合に適用できると考えられるので、一軸圧縮強度400 kgf/cm²程度以下のデータをプロットしてみた。これは、各支保部材の効果を同一の場で評価できることから試みたものである。図より、総内圧力は一軸圧縮強度の増加とともに減少する傾向にあることがわかる。



吹付け、鋼アーチ支保工の内圧力

$$P = N / r$$

図-7 内圧力と軸力との関係

図-9は、標準支保パターンにおける切羽進行に伴う内圧負担率の変化を示す。ここで、内圧負担率とは、各支保部材の内圧力の総和に対する各部材の内圧力が占める割合のことである。その大きさは、鋼アーチ支保工>吹付けコンクリート>ロックボルトという傾向にある。また、鋼アーチ支保工の負担率は、切羽の進行とともに減少する傾向にあり、吹付けコンクリートの負担率は逆に増加する傾向にあることがわかる。鋼アーチ支保工は、まだ変位が小さく、吹付けコンクリートが硬化するまでの間、主体的な支保の役目をしているのでかなり軸力が発生しているが、吹付けコンクリートの硬化に従い支保の分担が変化することを示している。

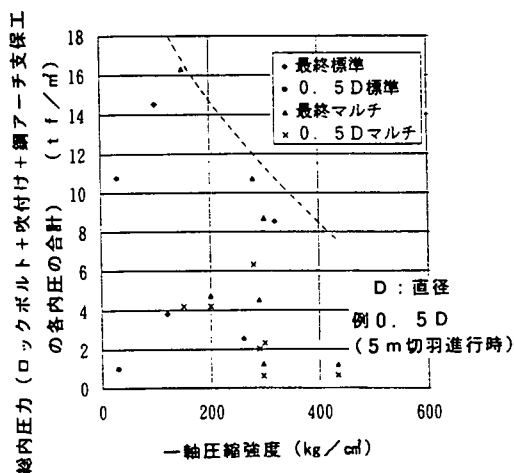


図-8 一軸圧縮強度と総内圧力の関係

図-10は、各支保部材の最終内圧力を示す。各支保部材が有する強度から決まる最大内圧力の限界値と比較すると、吹付けコンクリートは他の支保部材に比べ余裕があることがわかる。

今後の研究の中で、いまここで試みた内圧力と内圧負担率のように、どのような評価法がどのような地山条件の場合に適用できるかについてわかれば、対費用・効果のよりバランスのとれた支保構造を選定できる指標ができるものと考えられる。

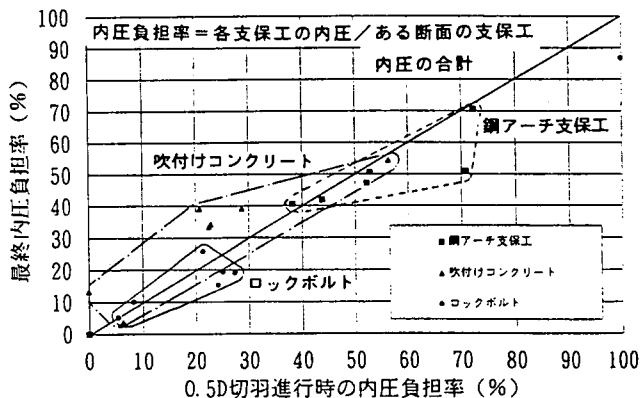


図-9 切羽進行に伴う内圧負担率の変化

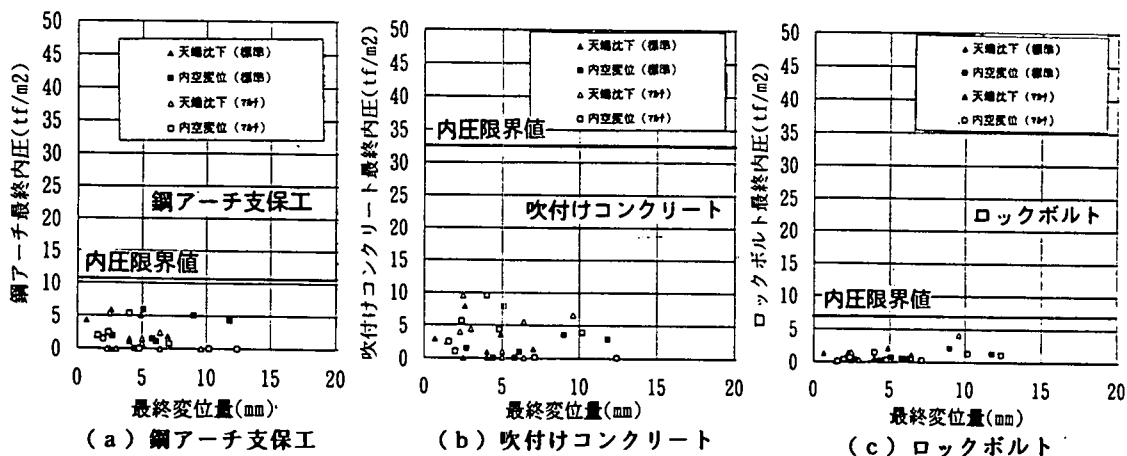


図-10 各部材の最終内圧と限界値

7. まとめ

- ①切羽評価の良い地山では、下半のロックボルトを削減できる可能性がある。
- ②同様に応力の出方の少ない場合、さらに経済的な支保構造とする可能性がある。
- ③比較的地山強度に依存する軟質地山には、各支保部材の応力を内圧力に換算することで支保構造を評価できる可能性がある。
- ④切羽観察手法として、切羽評価点法とRMR法は有効な切羽評価指標である。

8. あとがき

今後、各支保部材の効果や岩種に適合した切羽観察の手法の研究を進め、対費用・効果のよりバランスのとれた支保構造を選定できる指標の検討を行うとともに、支保構造を選定する一般的な方法として支保構造の増減を現場にて試行する方法を定着させる必要があると考える。

9. 参考文献

- 1) 日本道路公団：設計要領 第三集 トンネル, pp. 79 ~ 87, 1985. 10.
- 2) 鈴木・古川・井上・中川：NATM施工実績に基づく事前設計の評価に関する一考察, 土木学会論文集, 第427号, pp. 261 ~ 270, 1991. 3.
- 3) 清水・有本・古川・中川・佐藤・中田：山岳道路トンネルにおける変位計測結果と支保工の変状, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第3部(B), pp. 1136 ~ 1137, 1994. 9.
- 4) (社)日本トンネル技術協会：トンネル計測工の活用に関する調査検討(その2)報告書(日本道路公団本社委託), pp. 239, 1994. 2.
- 5) Z. T. Bieniawski: Engineering Rock Mass Classifications, pp. 51 ~ 90, John Wiley & Sons, 1989.
- 6) 谷本親伯：NATM-1, 森北出版, pp. 70 ~ 81, 1984.