

小口径中尺鋼管システムを用いる 変位低減工法の提案

The proposal of the displacement reduction method using the bolting system with smaller-diameter and middle-length steel pipes

蛭子清二¹・清水智明¹・橘高豊明²・後藤靖彦³・栗田猛志³

Seiji Ebisu, Tomoaki Shimizu, Toyoaki Kitsutaka, Yasuhiko Goto and Takeshi Kurita

¹正会員 株式会社奥村組 技術研究所 (〒300-2612 茨城県つくば市大砂387)

E-mail:seiji.ebisu@okumuragumi.jp

²正会員 株式会社奥村組 土木部 (〒108-8381 東京都港区芝5-6-1)

³株式会社奥村組 東京支社 土木部 (〒108-8381 東京都港区芝5-6-1)

The bolting system using steel pipes has been developed for the purpose of the displacement reduction in the mountain tunnel. The system consists of a middle-length steel pipe (D=76.3mm, L=6m) and a short-length steel bar (D=25mm, L=1.5m) inserted from the rear end of the steel pipe. This composite structure makes it with high bearing capacity and high toughness as a support member. Setting the steel pipe to be the inclined arrangement toward ahead of a face, it is possible to form the thick and high strength reinforcement zone surrounding a tunnel. In addition, it can be easily fixed steel pipe on a surface of a tunnel wall as same as a rock bolt. The functions and the effects of displacement reduction of this system have been verified from in situ experimental construction.

Key Words : displacement reduction, supporting structure, steel pipe type rockbolt

1. まえがき

大きな土被りと軟質で低強度の地形・地質条件下においてトンネルを掘削すると、地山の塑性化とその深部への進行性破壊を主たる原因として、トンネルの壁面に大きな変位が生じる^{1), 2)}。いわゆる膨張性と呼ばれる現象であり、トンネルの壁面は内空側に押し出してくる。トンネルに作用する地圧(荷重)が大きくて継続的に増加するため、長期間に渡りトンネルに悪影響を及ぼすことが多い。朝倉ら³⁾は、鉄道複線トンネル断面で150mmを超える内空変位が生じる地圧現象を「膨張性地圧」と呼び、この現象の生じる地山を「膨張性地山」と定義している。このような大変形が予想される地山では、一般に変形に対する余裕(変形余裕量)を見込み、掘削断面積を少し大きくした支保パターンを設定するとともに対策工も加えて構造物としての建築限界を確保する。

一方、最近のトンネル工事では、補助工法の性能アップと相まって、大きな切羽を大型の機械で掘削

することにより、施工の効率化が図られている。これに伴い、膨張性に代表される軟質な地山条件下では、標準的な支保パターンを採用すると通常の変形余裕量である150~200mmを上回る変位が生じる事例が多くなってきた。

このとき行われる対策については、実績や経験則から上半仮インバート等の早期仮閉合が基本的な工法として位置付けられている。しかし、仮閉合は緊急避難的な対策工法であるとともに切羽後方での仮構造物の撤去が伴われ、必ずしも効率的な施工法とは言い難い面がある。変位低減の対策工法に対して大きなニーズがあるにもかかわらず、その選択肢が少く、また、選定基準等も明確にされていないのが実情である。そこで、変形余裕量を上回る変位が予想されるトンネルを対象に、より合理的な対策工法の開発に取り組んだ。ここでは、新工法として提案した「小口径中尺鋼管システムを用いる変位低減工法」のコンセプトと北陸新幹線峰山トンネル東工事で行った同工法の性能照査の概要を報告する。

2. 新しい変位低減工法の開発方針

大変形が生じるトンネルの変位低減対策は、矢板工法の時代から掘削断面の早期閉合が有効であることが知られており、そのための掘削方式として、ショートベンチカット工法が定着してきた。すなわち、必要に応じて切羽安定化の補助工法も併用して切羽の分割数を最小限とし、上下半のベンチ長を極力短くして断面の早期閉合が図られる⁴⁾。地山を剛に受ける考え方⁵⁾であるが、地山の変位を過小に見積ると、支保部材の破壊や変位の増大から縫返しを余儀なくされる場面が生じる。

その一方において、予め大変形が見込まれる場合には、本坑の断面内に導坑を先進させて一旦変位を発生させ、その後の本坑掘削時の変位と支保工に作用する荷重の低減を図る「いなし工法」の考え方がある。こちらの方は地山を柔らかく受ける考え方⁵⁾であり、その実績と効果が認められている。しかし、掘削前の変位予想が難しいこと、また、同じ位置で2度の掘削作業が必要になることなど、この工法の性能向上には解決の難しい課題が多く残されているように思われる。

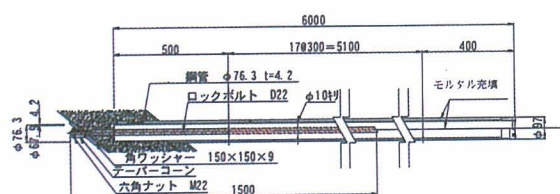
ここでは、切羽後方の手戻り作業の回避を第一義において、新しい変位低減工法の開発方針を次のように定めた。

- ① 通常の支保パターンで掘削すれば、変形余裕を上回る変形が予想されるトンネルを対象とし、地山の変位を変形余裕以内に低減できる性能とする
- ② ショートベンチカット工法による掘削を基本とし、上半切羽位置において地山を剛に受ける変位低減工法とする
- ③ 剛性と耐力が大きくてじん性を有する支保構造とする。ここで、じん性とは、大きな地山変形に追従できて耐荷力の低減が少ない支保構造としての特性を意味する

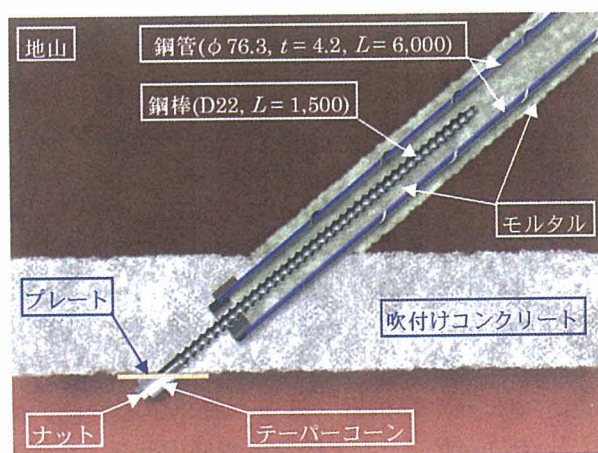
3. 新しい支保構造の提案

内巻タイプの吹付けコンクリートや鋼製支保工は、常に最大の変形が生じる壁面位置に設置され、大きな荷重が作用する。したがって、このタイプの支保は耐力に対する余裕が少なくなるため、構造に工夫を加えても大変形に対する追従性能が向上する余地は少ないと考えられる。そこで、トンネル壁面と地山深部との変位差から変位低減効果を発揮するロックボルトに着目し、その構造を工夫することによって、支保構造としてのじん性の向上を試みた。

新たに考案した支保構造を図-1に示す。この構造では、ロックボルトの芯材に鋼管（直径：76.3mm、肉厚：4.2mm、長さ：6m、材質：STK400）を用い

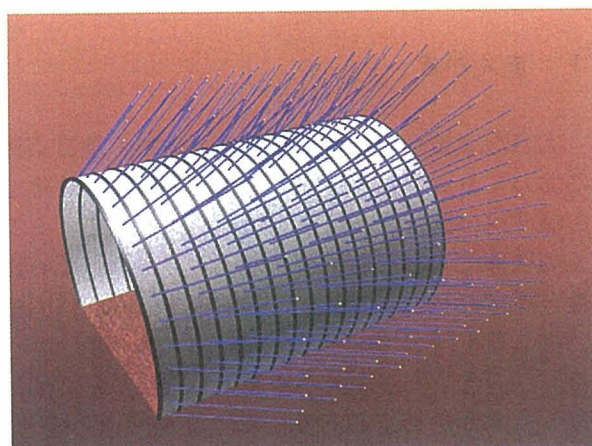


(a) 全体図

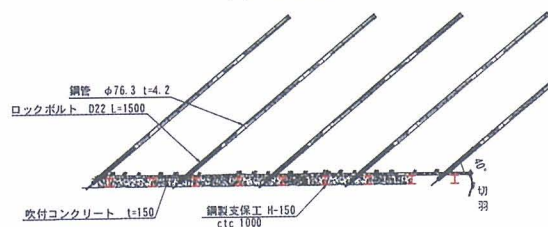


(b) 端部詳細図

図-1 提案した支保構造



(a) 鳥瞰図



(b) 縦断図

図-2 提案支保構造の鋼管配置例

る。また、鋼管のトンネル内空側端部からは短尺の異形鋼棒（直径：22mm、長さ：1.5m）を挿入し、注入材で鋼管と一体化して複合構造とする。

鋼管の配置例を図-2に示す。トンネル横断には、通常のパターンボルトの場合と同様に、鋼管を半径方向に配置し周方向には等間隔とする。ただし、トンネル縦断には、切羽斜め前方に45°程度傾斜させた配置とする。なお、鋼管は先端に超硬チップから成るビットを付加した自穿孔タイプとし、鋼管の配置精度と施工速度の向上を図った^{6),7)}。鋼管には適当な配置で吐出孔を空けておき、定着材（急硬性モルタル）を後注入で充填して地山との確実な定着を図る。

このような構造と配置とした考え方は次のとおりである。

(1) 鋼管の採用

芯材の剛性と耐力の向上には、芯材の材料強度を大きくする方法と芯材の径を大きくして芯材周面における定着材とのせん断抵抗および定着材周面における地山とのせん断抵抗を大きくする方法の2種類がある。ここでは、芯材の径を太くするとともに、芯材周面のせん断抵抗力が芯材の材料耐力とバランスするように、鋼管を採用した。

(2) 鋼管の傾斜配置

鋼管は切羽前方に傾斜させて配置した。これから、鋼管先端位置までの厚みを持った弱点の無い様な補強ゾーンが、縦断方向に連続して形成される。また、切羽前方の先行変位の低減や支保の早期設置の効果も見込まれる。

図-3は軸対称有限要素法解析から求めた応力解放率曲線の一例であり、切羽前後の半径方向壁面変位の分布モードを示している。鋼管の変形は地山の変形モードに追随すると仮定すると、鋼管には同図の曲線と同様な形状のたわみが発生する。すなわち、

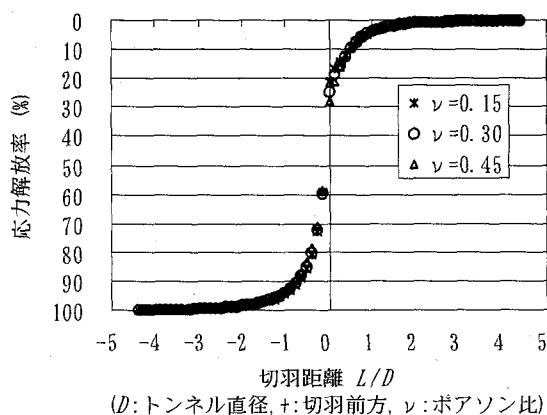


図-3 応力解放率曲線の例

鋼管の先端が片持ち梁の固定端となり、口元がトンネル中心に向かってたわんだ状態である。鋼管軸方向の剛性に軸直角方向の曲げ剛性も加わり、通常方向の打設よりも大きな剛性が発揮されることになる。

(3) 鋼棒と鋼管を組合せた端部複合構造

定着長が6mあるので、極端に軟質な地山の場合を除き、大変形が生じると鋼管は変位が最大となるトンネル壁面の端部で破断する。ロックボルトと同様にプレートを紹介して鋼管の端部を壁面にナットで固定する構造にすると、鋼管の外側にねじを切る必要がある。しかし、薄肉となる鋼管端部の耐力が大きく低下して、目標とする剛性やじん性の向上を期待できなくなる。そこで、図-1に示したように、鋼管の口元側は鋼棒を鋼管内に挿入して両者を定着材で一体化した後に、プレートを介して内側の鋼棒を壁面にナットで固定した。このような複合構造とすることで、鋼管口元部分の耐力の低下が防がれるとともに、ロックボルトと同様な施工性も確保できる。

鋼棒が剛性の大きな鋼管の内側に定着され、さらに、鋼管が地山に定着されているので、掘削に伴い鋼管軸方向に変位が発生すると、鋼棒は端部に引抜き荷重のみが作用するような状態になる。ロックボルトの場合には、軸方向の地山変形に対して鋼棒の周面にせん断力が誘起されるが、全長の奥側がアンカー部、手前側が引張部となる自己釣合い状態が形成される。しかし、今回の複合構造ではほぼ全長がアンカー部となるため、定着長が短くても鋼棒の破断荷重を上回る引抜き抵抗力を得ることができる。

このような鋼棒の引抜きに際して、鋼棒の表面にリブが付いているため、周囲の定着材は外側に体積膨張しようとする。しかし、外側の鋼管によって定着材の体積膨張が抑制され、大きな拘束圧力効果が発揮される。そのため、鋼棒が単独でロックボルトとして使用される場合に比較して、鋼棒の周面には非常に大きなせん断抵抗力が誘起され、剛性と耐力が向上する。鋼棒周面のせん断応力は鋼管による拘束圧力が大きいと、上端部に極端に集中した分布形状を示す。したがって、鋼棒が短尺であっても破壊モードは鋼棒周面の拔出ではなく、鋼棒の破断になる。このときの鋼棒の定着長さについては、後述する原位置引抜き実験結果から、1m程度あれば十分であることを確認した。この定着長さと破壊モードの関係は、ロックアンカーが中硬岩に定着された場合のそれに整合しており^{8),9)}、外側の鋼管から非常に大きな拘束圧力効果が発揮されていることが示唆される。

地山変位の増大に伴い鋼棒が破断した後、鋼管は

表-1 峰山トンネル東工事の概要

項目	内容
延長	東工事：3300m, (全長：7090m)
標準掘削断面積	80m ² (上半：43, 下半：30, インバート：7)
掘削工法	上半先進ショートベンチカット
掘削方式	機械掘削 (240kW級自由断面掘削機)
最大土被り	400m
推定地山強度比	0.1~2.5
地質	新第三紀鮮新世名立層泥岩

鋼棒が分担していた荷重を負担するとともに、ロックボルトの場合と同様に、鋼管軸方向の周面せん断力の分布は自己釣合いの形状に移行する。その結果、軸方向の引張抵抗による変位抑制機能が發揮され、さらに、鋼管を傾斜打設しているので、軸直角方向の曲げ抵抗による変位抑制機能も發揮されることになる。

このような複合構造としての特性が順次に發揮されることにより、支保部材としての大きな剛性と耐力、さらに変形追随性も実現すると考えた。

4. 新しい支保構造の性能評価

新しく提案した複合支保構造の性能評価を北陸新幹線峰山トンネル東工事で行った。

(1) 峰山トンネル東工事の概要

峰山トンネルは北陸新幹線長野以北ルートの新潟県西頸城郡名立町と能生町に位置する長大トンネルである。表-1に概要を示すように、この内の名立町側が峰山トンネル東工事であり山岳トンネル工法で施工した。

当工事では、坑口部等の一部区間を除いて、新第三紀鮮新世名立層泥岩が基盤岩として分布する。事前の地山試料試験結果によると、名立層泥岩の膨張

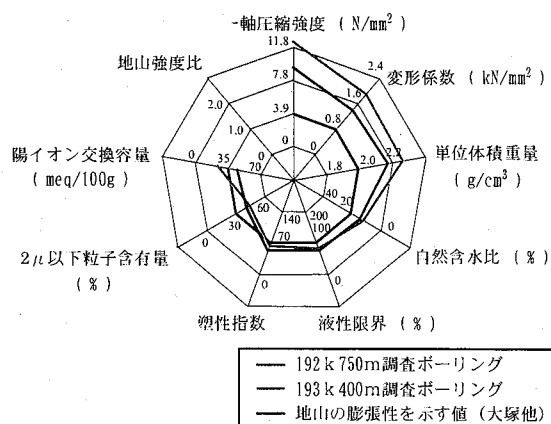


図-4 名立層泥岩の膨張性評価例

表-2 原位置引抜き実験で調査した要因

調査した要因	水準
定着材	①ウレタン ②シリカレジン ③急硬性モルタル (Pモルタル)
鋼管表面形状	①無垢 (加工なし) ②円形リブ加工 (@150) ③円形リブ加工 (@300) ④らせんリブ加工 (@150) ⑤らせんリブ加工 (@300) ⑥サンドブラスト加工
芯材の種類と端部の構造	①鋼管 ②鋼棒 ③鋼管と鋼棒の組合わせ

性の有無については、図-4に示すように、膨張性判定指標の境界線付近に位置付けられていた。また、同じ新幹線ルートにある類似地質のトンネルにおいて、数百mmに及ぶ大変形が生じており、変位の発生に対して慎重な対応が求められた。

(2) 原位置引抜き実験

峰山トンネルの坑内で引抜き実験を行い、複合支保構造の適応性を評価した。引抜き実験は、トンネルの側壁において、鋼製支保工に反力を取る専用の載荷治具を用いて行った。また、試験体の破壊モードを見るために、鋼管や鋼棒の定着長さを1.2mとした。

調査した要因を表-2に示す。最初の要因である定着材は、注入後直ちに所定の強度が発現する樹脂系の2種類 (ウレタン、シリカレジン) とこれらよりも強度発現に時間を要するが24時間強度の大きな急硬性モルタルの合計3種類の水準とした。次に、変位抑制の機能は、鋼管が地山に堅固に定着され周面に大きなせん断抵抗力が誘起されることによって有効に發揮される。そのためには、鋼管の表面形状が極めて重要である。ここでは、表面形状の水準として、加工なしの無垢、高さ5mmのリブ付加 (軸方向に同心円配置とらせん配置、間隔：150mmと300mm) およびサンドブラスト加工を選んだ。また、複合支保構造の他に、これを分解した異形鋼棒 (ロックボルト) 単体、鋼管単体の引抜き実験も行い、性能評価の比較材料とした。なお、鋼管単体の場合には、その端部にねじを切り接続治具を介して引抜き荷重を加えた。

試験結果から、定着材は急硬性モルタル、鋼管の表面形状はピッチ150mmのらせんリブ付加の場合に引抜き荷重に対する剛性と耐力が大きいことが分かった。図-5は、鋼管単体、異形鋼棒単体および複合支保構造の引抜き荷重～引抜き変位曲線を比較した

表-3 壁面変位の比較

	上半収束変位 (mm)			下半収束変位 (mm)		
	天端沈下	肩内空変位	側壁内空変位	天端沈下	肩内空変位	側壁内空変位
標準区間 (手前)	2.0	36.5	51.0	-0.7	44.0	60.5
標準区間 (奥)	10.1	24.6	38.5	17.6	32.1	48.4
標準区間 (平均)	6.1	30.6	44.8	8.5	38.1	54.5
複合支保区間	15.8	15.2	21.3	30.6	17.6	21.3
複合支保区間／標準区間		0.50	0.48		0.46	0.39

ものである。同図から、引抜き荷重に対する剛性と耐力は、鋼管単体、複合支保構造、異形鋼棒単体の順に小さくなるのが分かる。また、異形鋼棒単体、鋼管単体、複合支保構造のエネルギー吸収性能は、1:3.9:11.1となり、複合支保構造のじん性が大きいことが分かる。

試験体の破壊モードは、異形鋼棒単体が鋼棒の抜出しであるのに対し、複合支保構造は鋼棒の破断、鋼管単体はねじ部の破断と異なった。したがって、複合支保構造の場合には、周囲の鋼管から大きな拘束圧力効果が発揮されて周面のせん断抵抗力が大きくなり、破壊モードが鋼棒の破断になったと考えられる。

(3) 複合支保構造の試験施工

複合支保構造の支保パターンとしての性能を把握するために、一定区間長 (20m) の試験施工を行う

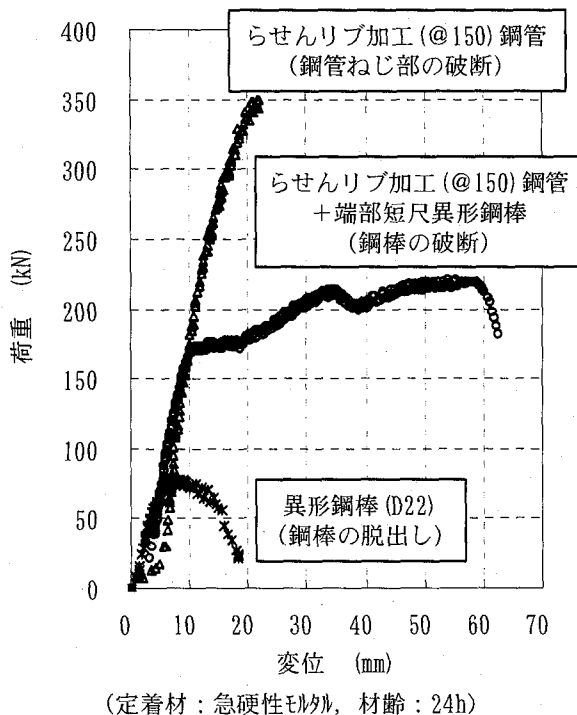


図-5 引抜き荷重～引抜き変位曲線の比較

た。上記の引抜き実験や施工性を確認するための鋼管打設実験から得られた知見、さらに類似した鋼管を使用する小口径中尺先受け工法^{10)~12)}の実績等も踏まえて鋼管の配置を設定した。また、試験施工区間を挟んで前後の1D (D:掘削幅, 約10m) は本来の設計支保パターンである標準区間とし、両側区間のA計測結果の平均と試験施工区間 (複合支保区間) のそれを比較した。また、それぞれの区間にB計測断面を設けた。

計測結果から複合支保構造の機能と効果を分析した。その概要を以下に述べる。

a) 変位低減効果

複合支保区間の壁面変位と前後に隣接する標準区間のそれを比較し、表-3に示す。両区間の吹付けコンクリートと鋼製支保工は同じ仕様である。複合支保区間の上半収束時内空変位は、標準区間に比較して最大48%に押えられた。また、複合支保区間の下半内空変位増分は、標準区間の約10 mmに対してほぼ0 mmに押えられた。図-6に示すように、複合支保区間の切羽進行に対する変位発生勾配は、標準区間に比較して小さく、同区間の鋼管打設範囲において地山の見かけ剛性が大きくなったと解釈できる。

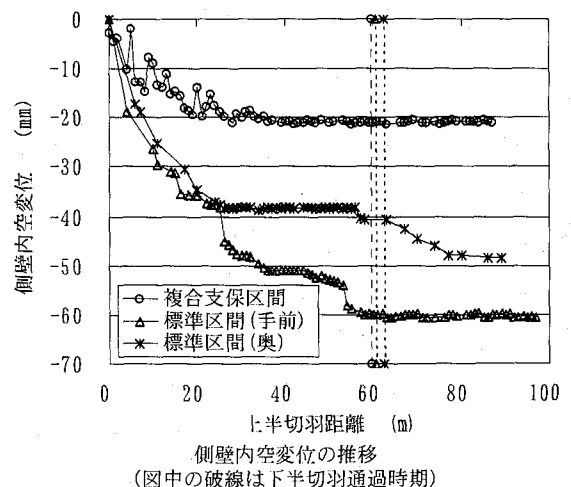


図-6 A計測結果の一例

標準区間では、下半切羽到達前から下半掘削の影響が側壁内空変位に現れている。おそらく、下半切羽の前方に設けられた上半への斜路の影響が現れたものと考えられる。これに対して、複合支保区間の側壁内空変位は、下半が掘削されてもほとんど変化しなかった。このことは、複合支保によって斜路や下半掘削による先行変位が低減された可能性を示している。

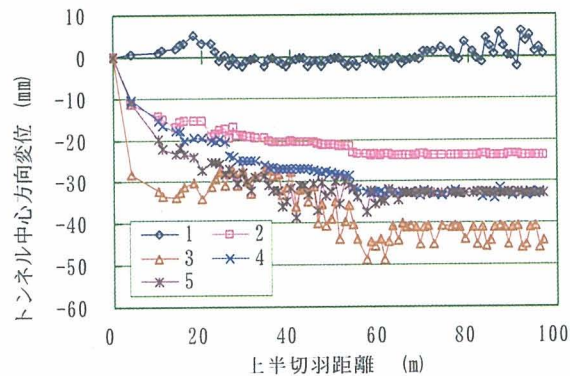
b) アーチ形成の促進効果

標準区間では、両側壁が左右から押出されて天端が上方に押し上げられる変形モードであるのに対し、複合支保区間では天端も内空側に変形するモードが現れた。図-7に示すように、複合支保区間では、標準区間とは異なり、壁面変位がトンネル中心に向かって一様に発生した。すなわち、複合支保構造の場合にアーチ形成効果が促進され、鋼管から大きな安定化効果が発揮されたと解釈できる。

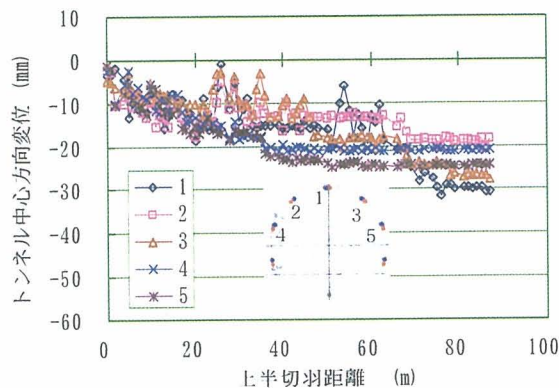
c) 複合支保構造の機能と効果の分析

最初に、図-8、図-9に示す鋼管および内部鋼棒のひずみ計測結果(B計測)を分析する。ここで、平均軸ひずみ分布と差ひずみ分布のモード、さらにこれらから想像される両部材の抵抗機能を表-4に整理した。

図-8に示した内部鋼棒の軸ひずみは、ロックボ



(a) 通常区間 (手前)



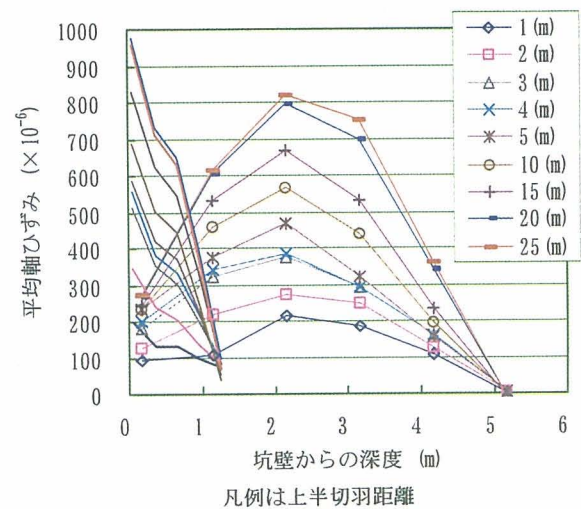
(b) 複合支保区間

図-7 壁面変位発生過程の比較

表-4 鋼管、内部鋼棒のひずみ分布モードと機能

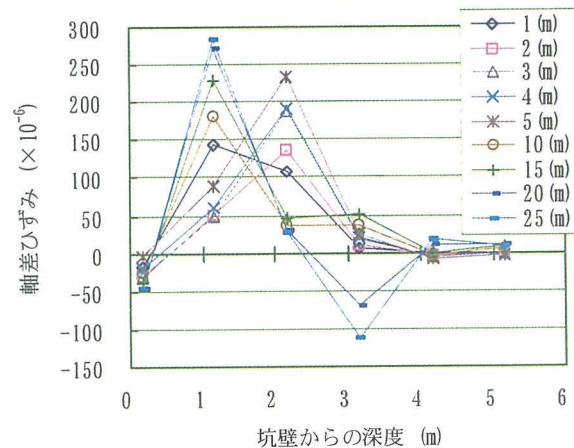
	鋼管	内部鋼棒
平均軸ひずみの分布形	定着長が適当な場合のロックボルトの軸力分布形	ロックボルト引抜き試験の軸力分布形
差ひずみの分布形	弾性床上の片持ち梁を想像させる分布形	—
部材の抵抗機能	① 軸方向剛性による引張抵抗機能 ② 曲げ剛性、せん断剛性による鋼管直角方向の抵抗機能	① 軸方向剛性による引張抵抗機能

トに引抜き荷重が作用する場合の分布モードを示し、その絶対値は鋼管のそれよりも大きかった。すなわち、ロックボルトが自己釣合い状態にある場合と異なり、内部鋼棒の軸方向の引張抵抗機能が全長に渡って発揮されるので、内部鋼棒は芯材の材料耐力を上回る長さに短くできる。一方、鋼管の軸ひずみは、ロックボルトが自己釣合い状態にある場合の軸力分



凡例は上半切羽距離

図-8 鋼管および内部鋼棒の軸ひずみ分布



—: 内空側へのたわみ
凡例は上半切羽距離

図-9 鋼管の差ひずみ分布

布を示し、前方の2m程度が引張部、後方の4m程度がアンカーになっている。

図-9に示した鋼管の差ひずみ分布からは、先端固定の弾性床土上の片持ち梁に上方から分布荷重が作用し、鋼管が地山側にたわんだ状態が想像される。すなわち、鋼管を切羽前方に傾斜打設することでその曲げ剛性による鋼管直角方向抵抗機能が有効に発揮されていると考えられる。

次に、複合支保区間と標準区間で、ロックボルトや鋼管に生じたひずみと内空変位の関係を比較した。結果は、図-10のようであり、例えば、複合支保区間の最大変位である内空変位：20mm付近のひずみに着目すると、標準区間のロックボルトは既に降伏挙動を示している。これに対して複合支保区間では、内部鋼棒のひずみは小さく、弾性状態にあることが窺われる。また、鋼管のひずみはさらに小さく、内空変位に対する増加勾配も内部鋼棒のそれよりも小さかった。したがって、標準的な支保で50mm程度の内空変位が生じるトンネル条件であっても、複合支保構造を適用すれば、鋼管に十分な耐力余裕を見込めることが分かる。

前述の原位置引抜き実験から得られた知見も合わせると、鋼管と短尺鋼棒から成る複合支保構造の機能と効果が実用可能なレベルまで検証できたと考えられる。さらに大きな地山変形に対しても、このような複合支保構造から大きなじん性が期待通りに発揮されると予想できる。

5. あとがき

膨張性地山に代表される大変形地山の変位低減対策として、小口径中尺鋼管システムを用いる変位低

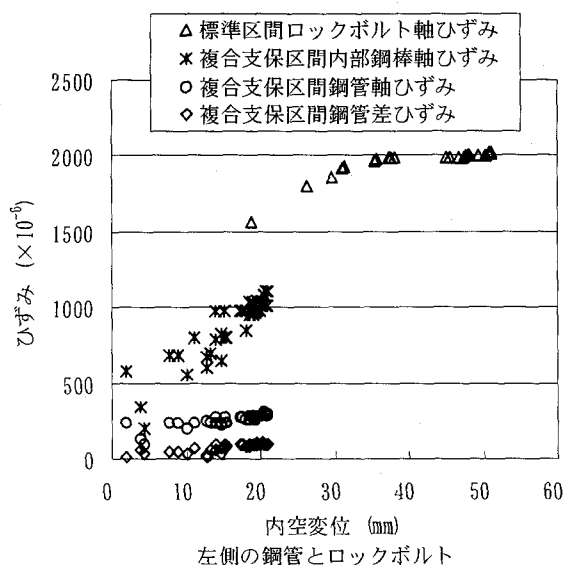


図-10 鋼管、鋼棒のひずみと内空変位の関係

減工法を提案し、北陸新幹線峰山トンネル東工事においてその性能を実証した。その後、同トンネルの断面拡大区間に本工法が採用され、良好な変位低減効果が確認された。

本工法の開発にあたり、鉄道建設・運輸施設整備支援機構鉄道建設本部北陸新幹線建設局の方々に多大なご支援とご協力を頂戴した。また、京都大学教授 朝倉俊弘博士、山口大学名誉教授 中川浩二博士、応用地質株式会社技術参与 下河内稔氏、村崎建設株式会社社長 井上堯之氏からは貴重なご指導とご助言を頂戴した。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 仲野良紀：軟岩をめぐる諸問題－泥岩の力学特性－，土と基礎，Vol.28-7，pp.1-10，1980。
- 2) 仲野良紀：泥岩の力学特性と膨張性トンネルおよびフィルダム，土と基礎，Vol.28-7，pp.37-43，1980。
- 3) 朝倉俊弘・小島芳之：膨張性地山の調査・試験・解析，地質と調査，1995年第1号，pp.7-14
- 4) 土木学会：トンネル標準示方書 [山岳工法]・同解説，pp.205-208，2006。
- 5) 高橋浩・進士正人・中川浩二「事例に基づく押出し性地山におけるトンネルの設計・施工法の提案」，土木学会論文集No.777/VI-65，pp.83-96，2004。
- 6) 蛭子清二・阿久津秋秀・高橋信行・中村英樹・栗田猛志：小口径中尺先受け工法の開発，奥村組技術研究年報 No.26，pp.7～12，2000。
- 7) 野間豊志・蛭子清二・中村英樹・石原基嗣：近接トンネル工事における小口径中尺先受け工法の開発，土木学会土木建設技術シンポジウム2002，pp.129-136，2002。
- 8) アイダン・オメル・蛭子清二・河村精一：引抜き実験におけるロックアンカーの破壊モード，土木学会第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.331-335，1993。
- 9) 蛭子清二・アイダン・オメル・河村精一・川本眺万：ロックアンカーの引抜き破壊モード，土木学会論文集No.504/VI-25，pp.157-166，1994。
- 10) 蛭子清二・浜田修・高橋信行・竹山信喜・斎藤敏明「トンネル先受け工法(中尺AGF工法)の地山支持機構について」，第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.509～514，1998。
- 11) 蛭子清二・阿久津秋秀・高橋信行・中村英樹・栗田猛志「小口径中尺先受け工法の開発」，奥村組技術研究年報，No.26，pp.7～12，2000。
- 12) 蛭子清二・浅野剛・斎藤敏明「鋼管注入式トンネル先受け工法の簡易設計法の提案」，第11回岩の力学国内シンポジウム，F12，2002。