

POWERボルト工法の開発（その1）

－工法開発のコンセプトと性能評価の概要－

蛭子清二* 清水智明* 橋高豊明**
中村英樹** 後藤靖彦*** 栗田猛志***

1. まえがき

大きな土被りと軟質で低強度の地形・地質条件下で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、トンネルの掘削壁面は内空側に一様に狭められる。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、トンネルに対して長期間に渡り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ような地圧現象を「膨張性地圧」と呼び、このような現象の生じる地山を「膨張性地山」と定義している。

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、最近では、切羽を大きくして大型機械の導入から施工の合理化を図る方法が標準的に行われている。これに伴い、一般的な変形余裕量である150～200mmを上回る変位が生じる施工事例が数多く見受けられる。しかし、このとき行われる対策工法について、変位低減の機能と効果、選定基準等が必ずしも明確にされていない。そのため、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対策工法として位置付けられている。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、その選択肢が少ないのが実情である。そこで、変形余裕量を上回る地山変位が予想されるトンネルを対象に、より合理的な変位低減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「POWERボルト工法」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新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の考え方は、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の採用が定着してきた⁴⁾。掘削解放の早い時期から一般に耐力の大きな支保部材が建て込まれる。地山を剛に受ける考え方⁵⁾であるが、地山変位の見積もりを小さな方に誤ると、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地山では、本坑の断面内に導坑を先進させて変位を発生させ、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、同じ位置で2度の掘削作業を避けられないので、設備や掘削機械も含めてこの工法に施工の合理化を追求しても得られる成果は少ないように思われる。

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、変形余裕を上回る大変形が生じ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

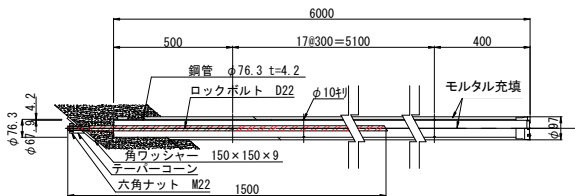
*技術研究所 **技術本部土木部 ***東京支社土木部

3. 新しい支保構造の提案

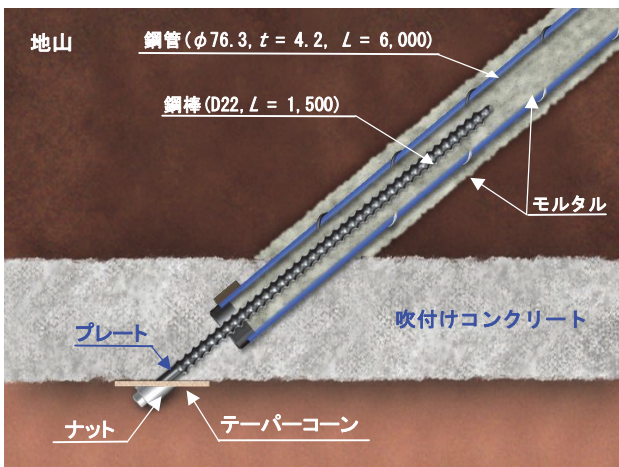
内巻タイプの吹付けコンクリートや鋼製支保工は、常に最も大きな地山変位が生じる壁面位置に設置される。したがって、このタイプの支保構造に工夫を加えても、大変形に対する追随性能の向上を期待することが難しいと考えられる。そこで、トンネル壁面と地山深部との変位差から変位低減効果を発揮するロックボルトに着目し、その構造を工夫することによって、目標の性能確保を試みた。

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。トンネル横断方向には、通常のパターンボルトの場合と同様に、半径方向に配置し周方向には等間隔とする。ただし、トンネル縦断方向には、切羽斜め前方に45°程度傾斜させた配置とする。このような支保部材と構造を考案した。その考え方は次のとおりである。



(a) POWERボルトの構造



(b) POWERボルト後端部の構造

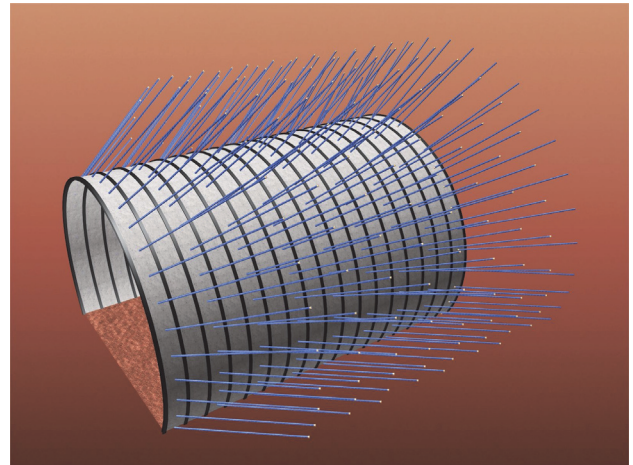
図-1 POWERボルトの構造

3.1 鋼管の採用

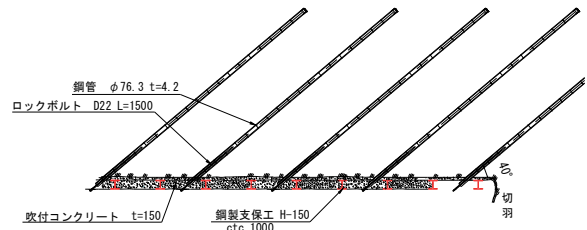
芯材の剛性と耐力の向上には、芯材の材料強度を大きくする方法と芯材の径を大きくして定着材とのせん断抵抗および定着材と地山のせん断抵抗を大きくする方法の2種類がある。ここでは、芯材の径を太くするとともに、芯材周囲のせん断抵抗力が芯材の材料耐力とバランスするように、鋼管を採用した。

3.2 鋼管の傾斜配置

鋼管を切羽方向に傾斜した配置とすることにより、縦断方向に鋼管先端位置までの厚みを持った補強ゾー



(a) POWERボルトの鋼管配置例 (鳥瞰図)



(b) POWERボルトの鋼管配置例 (縦断方向)

図-2 POWERボルトの鋼管配置例

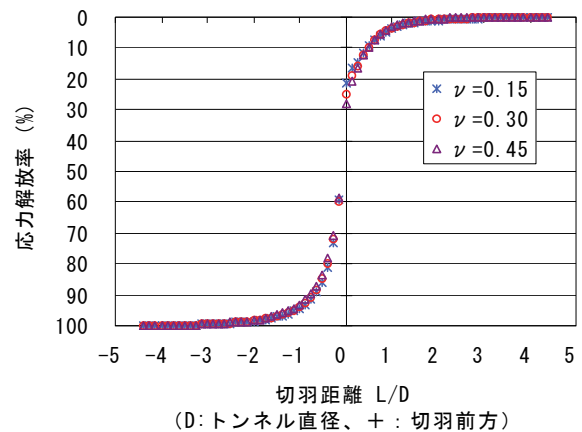


図-3 応力解放率曲線の例

ンが形成され、弱点の無い様な変位低減効果が発揮されると考えた。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ので、鋼管には同図の曲線と同様な形状のたわみが発生すると考えられる。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を期待した。

3.3 鋼棒と鋼管を組合せた端部複合構造

ロックボルトの場合と同様に、鋼管の破壊モードもトンネル壁面位置の芯材（鋼管）の破断になると考えられる。ここで、鋼管の口元を壁面位置のプレートに固定するために薄肉の鋼管にねじ切り加工を加えると、この位置の耐力が大きく低下して、薄肉円筒構造であるための弱点になる。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する複合構造とし、内側の鋼棒をプレートにナットで固定した。このような構造とすることで、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と考えた。

掘削に伴う鋼管軸方向の変位発生に応じて、鋼棒と鋼管を組合せた複合構造から、以下のような機能と効果が発揮されると考えた。

鋼棒が鋼管の中に挿入されており、その先端は変位が最も大きくなる壁面に固定されているので、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。通常のロックボルトの場合には、軸方向の荷重に対して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、鋼棒の定着長を短くすることができる。

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、周囲の鋼管によって軸直角方向の変位が拘束されるので、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る。その結果、短尺の鋼棒であっても破壊モードは鋼棒周面の抜出しではなく、鋼棒の破断になる。変位の増大に伴い鋼棒が破断した

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：42、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	名立層泥岩、新第三紀鮮新世

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 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鋼管と鋼棒の組合せ

後、鋼管は鋼棒が分担していた荷重を負担するとともに、通常のロックボルトと同様に自己釣合い状態を形成して変位に抵抗する。

このような構造特性が発揮されることにより、支保部材としての耐力の低下が防がれ、変形追随性が実現すると考えた。

4. 新しい支保構造の性能評価

新しい支保構造の性能評価を当社が施工を担当している北陸新幹線峰山トンネル東工事で行った。

4.1 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延長7090mの長大トンネルである。この内の名立町側3300mを峰山トンネル東工事として当社企業が担当し、山岳トンネル工法で施工した。工事の概要を表-1に示す。

当工事では、坑口部等の一部区間を除いた工区全線にわたって、基盤岩としての新第三紀鮮新世名立層泥岩が分布する。事前の地山試料試験結果によると、峰山トンネルの泥岩の特性は、膨張性有無の境界線付近

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
標準支保区間(手前)	2.0	36.5	51.0	-0.7	44.0	60.5
標準支保区間(奥)	10.1	24.6	38.5	17.6	32.1	48.4
標準支保区間(平均)	6.1	30.6	44.8	8.5	38.1	54.5
POWERボルト区間	15.8	15.2	21.3	30.6	17.6	21.3
POWERボルト区間/ 標準区間		0.50	0.48		0.46	0.39

にあった。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施工が求められた。

4.2 原位置引抜き実験

図-1 に示した新しい支保構造の適応性を原位置の引抜き実験から評価した。調査した要因を表-2 に示す。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、鋼管の破壊モードを見るために、試験体の定着長さを 1.2m とした。

試験結果から、定着材は急硬性モルタル、鋼管の表面はピッチ 150mm のらせん加工の性能が良いことが分かった。また、図-4 は鋼管、異形鋼棒および今回提案した鋼管と鋼棒の複合構造の引抜き荷重～引抜き変位曲線を比較したものである。同図から、鋼管の剛性と耐力が大きいことを確認できた。さらに、ロックボルト単体、鋼管単体、複合構造のエネルギー吸収性能は、1 : 3.9 : 11.1 となり鋼管と鋼棒の複合構造のじん性が大きいことを確認できた。

4.4 POWERボルト工法の試験施工

POWERボルト工法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) の試験施工を行った。これまでの引抜き実験や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MS先受け工法^{6)~8)}の実績等も踏まえて支保パターンを設定した。また、試験施工区間を挟んで前後 1D (D : 掘削幅、約 10m) に標準支保パターン区間を設け、両側区間のA計測結果の平均と試験施工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 POWERボルト工法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

試験施工区間の壁面変位と前後に隣接する標準支保

パターン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。POWERボルト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、POWERボルト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-5 に示すように、POWERボルト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。標準支保区間では、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、下半切羽よりも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、POWERボルト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、鋼管

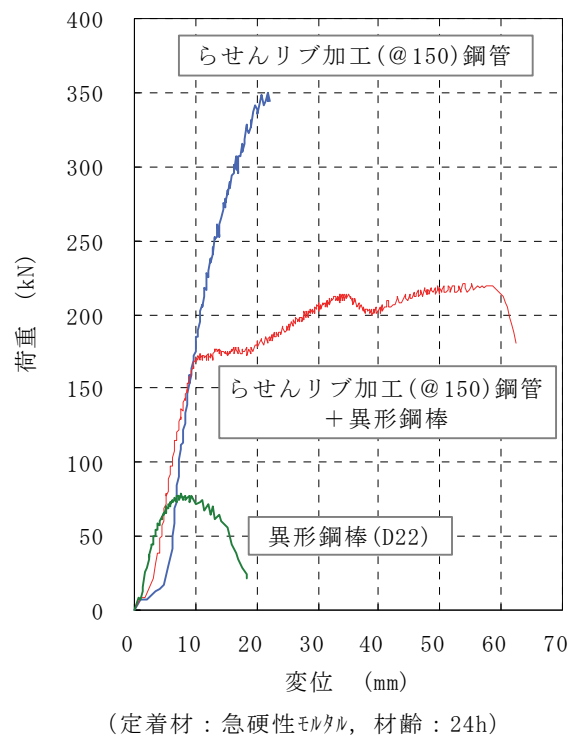
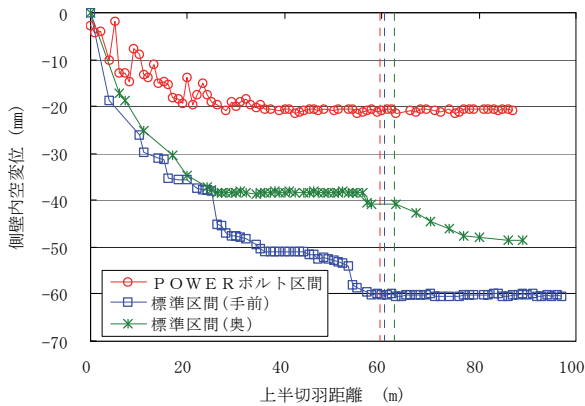


図-4 引抜き荷重～引抜き変位曲線の比較

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。

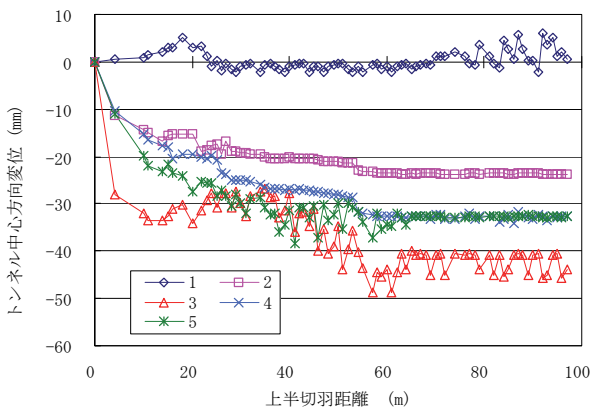
b. アーチ形成の促進効果

標準支保区間では、両側壁が左右外側から押されて天端が上方に押出される変形モードであるのに対し、POWERボルト区間では天端も内空側に変形するモードが現れた。図-6に示すように、POWERボルト区間では、標準支保区間とは異なり、壁面変位がトンネル中心に向かって一様に発生した。鋼管によ

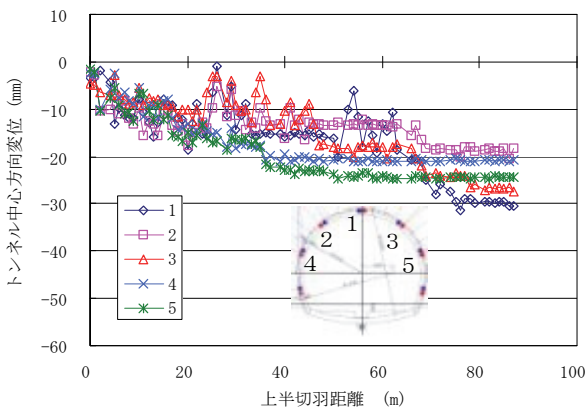


側壁内空変位の推移 (図中の破線は下半切羽通過時期)

図-5 A計測結果の一例



(a) 標準支保パターン区間 (手前)



(b) POWERボルト区間

図-6 壁面変位発生過程の比較

表-4 鋼管、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	弾性床土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

て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. 鋼管および内部鋼棒の機能分析

図-7、図-8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

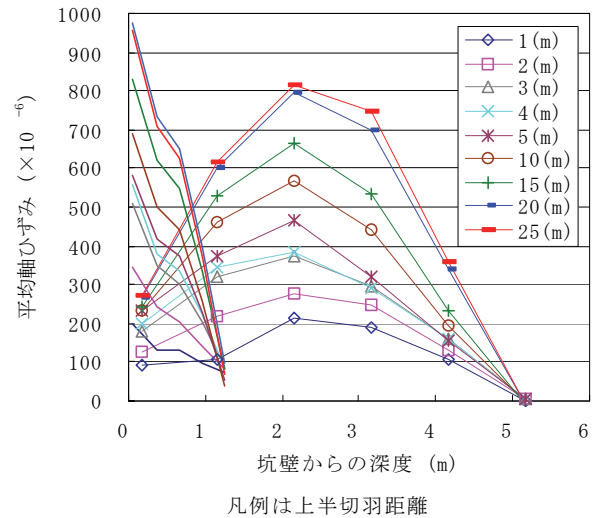


図-7 鋼管および内部鋼棒の軸ひずみ分布

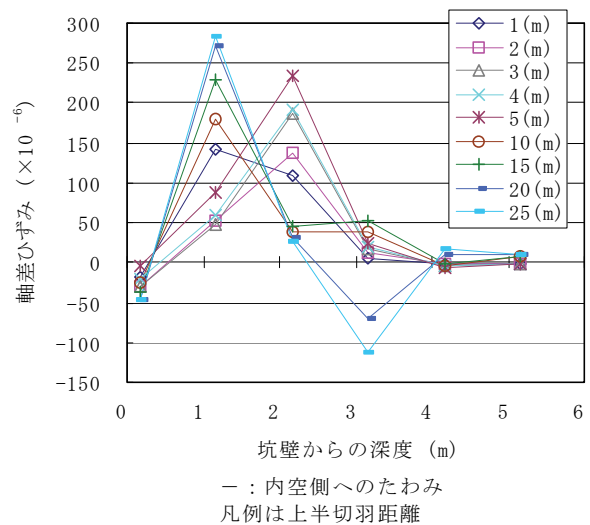


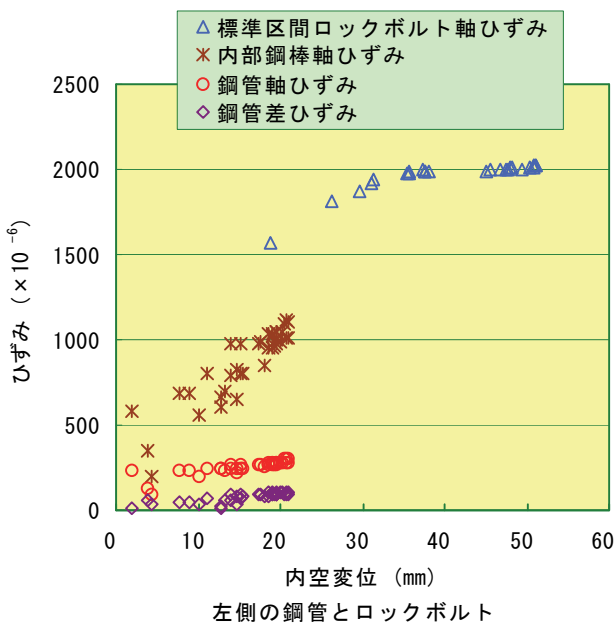
図-8 鋼管の差ひずみ分布

像される両部材の抵抗機能を表一4に整理した。このような鋼管および内部鋼棒の抵抗機能から、地山の変位を低減する効果が発揮され、また、鋼管を傾斜打設することで鋼管の曲げ剛性による抵抗機能が誘起され、同様な変位低減効果が発揮されると考えられる。

d. 鋼管端部の複合構造の性能

試験施工時の内部鋼棒軸ひずみは、ロックボルトの引抜き実験の場合に認められる分布モードを示しており、軸ひずみの絶対値は鋼管のそれよりも大きかった。すなわち、最初に内部鋼棒の引張抵抗機能が発揮され、その次に鋼管の抵抗機能が発揮される。その結果、今回提案した鋼管と短尺鋼棒から成る複合構造は、実際の支保構造としても複合的に機能し、期待どおりの効果を発揮することが検証された。

POWERボルト区間と標準支保区間で、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、図一9のようであり、例えば、内空変位が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、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い。これらのことから、鋼管と短尺鋼棒から成る複合構造の機能と効果が検証された。さらに大きな地山変形に対して、このような複合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。



図一9 鋼管、鋼棒のひずみと内空変位の関係

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、POWERボルト工法を提案し、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。それらの詳細と具体的な施工法等は、次回に報告したい。

POWERボルト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 [山岳工法編]・同解説」、pp. 251-255、1996.
- 5) 高橋浩・進士正人・中川浩二「事例に基づく押し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・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.
- 7) 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.
- 8) 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.