

な場所や、地山の変位速度が大きく早期定着が必要な場所において、断面を折り畳んだ鋼管を膨張させて孔壁に押付けることにより地山に拘束力を与える、鋼管膨張型ロックボルト^{2),3)}が採用されている。しかしながら、従来の鋼管膨張型ロックボルトは防錆機能を有していないことから、長期にわたってロックボルトとしての機能を期待される用途には使用できないという問題があり、湧水地山等での応急的な使用にとどまっていた。

このような現状を鑑み、鋼管膨張型ロックボルトに高耐食めっき鋼板“ZAM”を適用することにより、従来のモルタル定着型ロックボルトに相当する耐久性を備えた、鋼管膨張型ロックボルト（以下RPE（Rust Proofing Expansive）ロックボルトと称す）、およびその打設システムを開発した。さらに日本道路公団試験研究所トンネル研究室との共同研究により、その優れた耐久性、施工性を確認した。本報では、その概要を報告する。

2. ロックボルト

2.1 異形管

鋼管膨張型ロックボルトは、図1に示すように異形管と、異形管の両端の密封および注水のためのスリーブよりなる。まず、ZAMを適用した異形管について説明する。異形管は、外径φ54mm、肉厚2mm程度の丸管の一部を凹形状にして、外径φ36mm程度に折り畳んだ断面形状を有するものである。このような異形管を成形する方法としては、丸管を素材とする専用のロール成形機を使用する方法と、造管ライン出側のサイジング工程で異形管に成形する方法の二通りが考えられる。前者は成形段数に自由度があり、目標とする断面形状を得ることが比較的容易である反面、このような断面形状が非対称な異形管を成形する場合は、先後端の形状不良による歩留低下、真直度の悪化が懸念される。後者は、高い生産性、歩留および真直度が得られる半面、造管ラインの限られたロール段数で異形管の成形を行なうことが必要となる。

異形管を低コストで生産するためには後者が有利との判断から、オフライン成形実験によって造管ライン出側の既設サイジングスタンド数に収まる4段の成形フラワーを探索した。その結果、図2に示すようなパススケジュールであれば、目標とする品質の異形管を得られることがわかった。鋼管の溶接部は、異形管成形およびロックボルト膨張時の変形が少ないと考えられる場所に位置させた。本ロールフラワーを造管ラインのサイジングセクションに適用したところ、丸鋼管と同等の速度で異形管を製造することが可能であった。

今回開発した鋼管膨張型ロックボルトは110kN耐力と

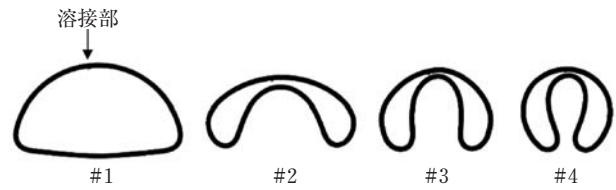


図2 RPEロックボルト用異形管の成形過程

Fig.2 Forming process of shape tube for RPE rock bolt.

170kN耐力の2種類の強度区分のものである。ロックボルト本体の異形管には、規定の耐力を満足する強度特性と共に、水圧による膨張変形はもとより、トンネルに打設された後の地山の変位にも破断せずに追従できるような変形性能も求められる。従来の鋼管膨張型ロックボルトの場合、110kN耐力品はSS400相当鋼のφ54×肉厚2mmの鋼管を、また170kN耐力品は同じくSS400相当鋼のφ54×肉厚3mmの鋼管を用いることで、必要とされる特性を得ていた。そのため170kN耐力品では長さ6mのロックボルトの場合、質量が23kg程度（肉厚2mmの場合は約15kg）となり、トンネル内で人手によって扱うにはかなりの負担となっていた。そこで、異形管へのZAM適用にあたり、170kN耐力品の素材として、強度－延性バランスに優れたSS490相当鋼の肉厚2.2mm材を選定した。これにより、従来品と同等の特性を有しながら約30%の軽量化を達成することができた。それぞれの素材の化学成分値、機械的性質（目標値）を表1、表2に示す。

2.2 ロックボルト組立て

鋼管膨張型ロックボルトは、図1に示すように異形

Table 1 Specifications of steel sheet for shape tube of RPE rock bolt.

表1 異形管に適用した素材の化学成分およびめっき処理の仕様

ロックボルト 耐力(kN)	鋼種	めっき処理	
		めっき種	付着量(g/m ²)
110	SS400相当鋼	ZAM [†]	≥140
170	SS490相当鋼	ZAM	≥140

†：溶融Zn-6%Al-3%Mg合金めっき鋼板

Table 2 Mechanical specifications of material of shape tube and rock bolt

表2 素材の機械的性質およびロックボルトの強度目標値

ロックボルト 耐力 (kN)	素材規格					ロックボルト(膨張後の)機械的性質			
	JIS規格	呼称板厚 (mm)	機械的性質			耐力 (kN)	引張強度 (kN) ^{†2}	伸び ^{†3} (%)	スリーブ 引抜強度 (kN)
			耐力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び ^{†3} (%)				
110	SS400	2.0	≥295	≥400	≥18	≥110	≥140	≥35	≥110
170	SS490	2.2	≥365	≥490	≥16	≥170	≥190	≥20	≥170

†2, †3：参考値

管の両端にスリーブを被せた構造であり、その組立工程を図3に示す。まず異径管の両端をスリーブの内径と等しいφ33mmにスエージ加工する。次に異径管の両管端をスリーブに圧入すると共に、異径管をスリーブの内側に押し広げて密着させる。最後に、水密性と接

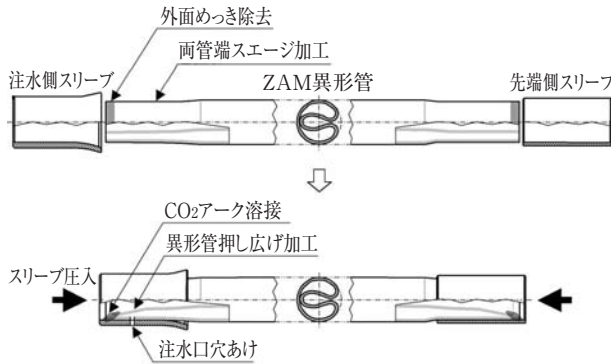


図3 RPEロックボルトの組立て工程
Fig. 3 Assembling process of RPE rock bolt.

合強度を確保するためにスリーブと異径管をCO₂アーク溶接で接合する。溶接に際し、めっき層の影響により図4に示すようなブローホールが溶接金属中に発生し、水密性と強度を損なうことが懸念された。そこで、異

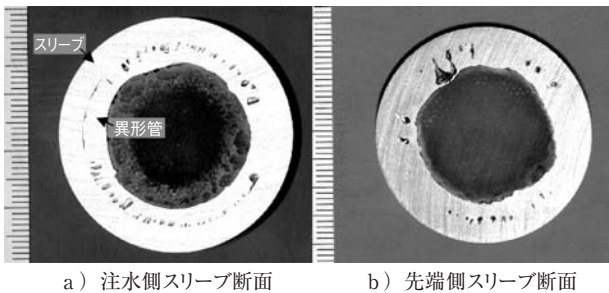


図4 溶接部に生じたブローホール
Fig. 4 Blow hole caused in weld metal.

形管の管端の外面側については長さ10mm程度めっきを除去し、スリーブについてもめっきのないものを使用した。スリーブ付試験片(110kN耐力品)の引張試験結果を図5に示すが、管端のめっきを除去せずにスリーブを溶接したものは、溶接金属から破断して強度が低下する場合があるのに対して、めっきを除去した場合はいずれも異径管からの破断で強度も安定した値を示している。めっきを除去しなかった場合に、溶接金属から破断したサンプルの例を図6に示すが、破断面にブローホールが多数観察されることから、図5の結果はブローホールの影響によるものと考えられる。以上

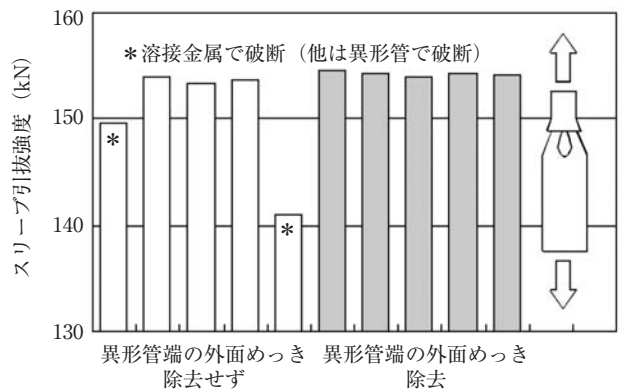


図5 スリーブ付き引張試験片による引抜試験結果
Fig. 5 Result of tensile test of test-piece with sleeve.

の結果より、管端外面側のめっきを除去することにより、ブローホールに起因する問題は回避できたものと判断した。スリーブおよび溶接部の防錆対策としては、ZnおよびAlの粉末を主成分とする補修塗料(三井金属

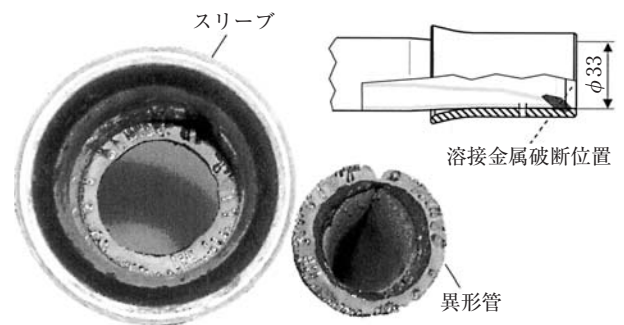


図6 溶接部に生じたブローホール (スリーブ付試験片の引張試験において溶接部で破断したサンプル)
Fig. 6 Blow hole caused in weld metal. (Specimen broken at weld metal in tensile test.)

塗料化学(株製)を塗布することにより、耐食性を確保した。

3. 打設関連機器

3.1 注水システム

鋼管膨張型ロックボルトを膨張するためには20~30MPa程度の高水圧が必要となる。膨張後のロックボルトの内容積は長さ1mあたり2L程度あり、効率よく打設するためには毎分5~10L程度の流量が必要となる。また、水の飛散する環境で使用されることが多いことから、注水システムには悪環境下でも安定かつ安全に使用できるような配慮も求められる。

以上の点を考慮した上で、図7に示す注水システムを開発した。注水システムの核となる高水圧発生装置には、圧縮空気を動力源とするエアコンバータを採用した。エアコンバータは図7に示すように、エア用ピストンと水用ピストンを直結して、双方の面積比により水を加圧して送り出す装置である。

本注水システムの特徴は、エアコンバータに水圧制

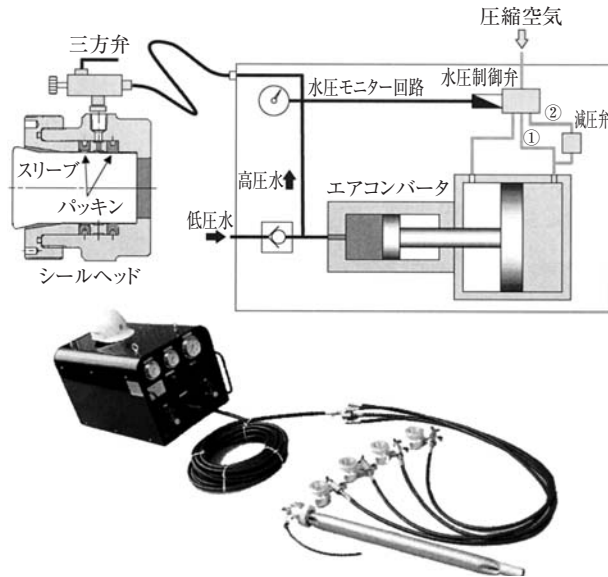


図7 エアコンバータと水圧制御弁を組合わせた注水システムの概要

Fig. 7 Outline of high pressure water pump system in which air converter and water pressure control valve are installed.

御弁を組み合わせた点にある。水圧制御弁を組込んだ場合、動力源である圧縮空気は、まず水圧制御弁を介して減圧弁の無い管路①を通じて、減圧されない状態でエアコンバータに供給され、設定した水圧まで加圧が行なわれる。設定水圧に到達すると、水圧制御弁によって圧縮空気の供給管路が減圧弁側②に切替えられ、目標到達水圧をエアコンバータの増圧比によって除した圧力まで減圧された圧縮空気と水圧が釣り合ってピストンが停止し、作業が完了する。水圧制御弁を使用しない場合、減圧弁②により、加圧開始時から、目標到達水圧とエアコンバータの増圧比より求められる圧力に減圧された圧縮空気によってエアコンバータが駆動され、目標水圧に近づくにつれてエアコンバータの動作が緩慢になり、水圧が目標に達した時点でピストンが停止する。水圧制御弁を使用することにより、加圧開始から終了までの間、供給される圧縮空気源の最大空気圧でエアコンバータを駆動させることが可能と

なる。

3.2 引抜試験機

ロックボルト施工にあたっては、打設後に定着力を確認するための引抜試験を行う必要がある。異形棒鋼型のロックボルトでは、吹付けコンクリート表面から突出した部分にネジが切られており、このネジを利用してロックボルトを掴むことが可能で、比較的容易に引抜試験を行うことが出来る。一方、鋼管膨張型ロックボルトでは、吹き付けコンクリート表面より突出している部分は円筒状のスリーブであり、これまではスリーブに食い込ませる歯付きチャックを用いた引抜試験機が用いられていた。しかしながら、本方式によるスリーブの把持は人力作業となるため、作業員への負荷が大きい上に、引抜試験時にチャックが滑り易いという問題があった。RPEロックボルトシステムでは、引抜試験の改善も合わせて検討し、コレットチャック式の専用の引抜試験機を開発した。これは図8に示すように、内径側に突起の付いたコレットチャックを外

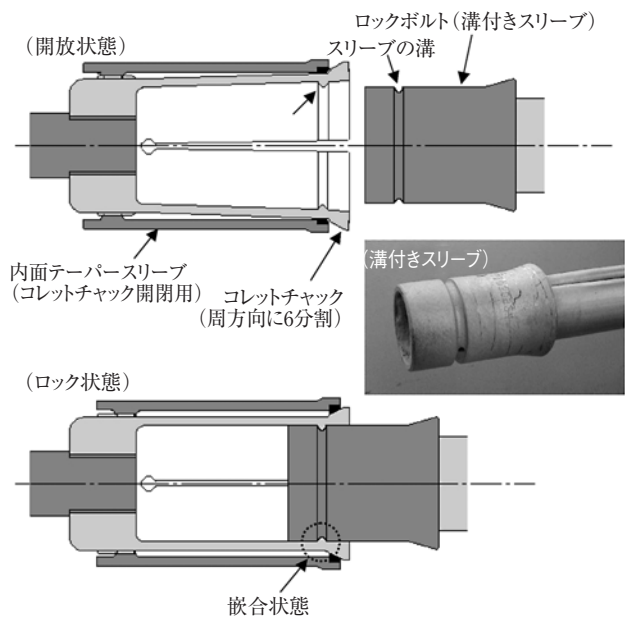


図8 開発した引抜試験機のRPEロックボルトスリーブ把持機構
Fig. 8 Mechanism of gripping cylindrical head of RPE rock bolt.

周に溝を設けたロックボルトのスリーブに被せた後、テーパースリーブによりコレットチャックを締め込んで、チャックの突起をスリーブの溝に嵌合させるものである。コレットチャック、テーパースリーブ及び使用状態の引抜試験機の外観を図9に示す。この方式では、ロックボルトのスリーブに溝を設ける必要があるものの、これまで2人で行なっていた引抜試験機の鋼管



(コレットチャック外観および内面テーパースリーブ)



(引抜試験機外観)

図9 引抜試験機

Fig.9 Equipment for pull out test of RPE rock bolt.

膨張型ロックボルトへの取付け作業が大幅に簡略化され、さらにチャックの滑りの懸念もなく、確実かつ効率的な引抜試験が可能である。

4. 性能評価

4.1 強度特性

ロックボルトの機能は軸力によって発揮されることから、引張強度特性が重要である。異形管の耐力とスリーブと異形管の溶接部の強度の調査結果を表3に示す。異形管の耐力は設定した仕様を十分満足している。スリーブと異形管の溶接部についてもブローホールが低減されたことにより、異形管の強度に見合う十分な強度を有している。

4.2 耐久性

異形管にZAMを適用したRPEロックボルトと、従来のめっきのない鋼管膨張型ロックボルトについて耐食性を比較した。試験方法は、亜鉛系めっき鋼板の耐食性評価方法として一般的に用いられている、SST（塩水噴霧

Table 3 Actual results of mechanical properties of RPE rock bolt.

表3 RPEロックボルトの機械的性質の実績値の例

耐力区分 (kN)	ロックボルト仕様		耐力 (kN)	引張強度 (kN)	伸び (%)	スリーブ引抜強度 (kN)
	肉厚 (mm)	鋼種				
110	2.0	SS400	158.2 (8.0)	169.9 (6.3)	42.9 (3.1)	168 (0.6)
170	2.2	SS490	192.3 (3.4)	203.3 (1.5)	22.3 (1.1)	189 (3.8)

上段：平均値，下段(内)：標準偏差σ

試験，JIS Z 2371に準拠），およびCCT（複合サイクル試験，JIS H 8502に準拠）の2種類の促進試験による。供試材は、従来のめっきなし材とZAM（めっき付着量 $\geq 140g/m^2$ ）の他、比較材としてZAMとめっき付着量を揃えた亜鉛めっき材の3種類である。これらの鋼管を一旦ロックボルトに組み立てた後、外面に拘束のない状態で圧力25MPaの水圧で膨張した異形管を、耐食試験に供した。

図10にSSTおよびCCTによる促進腐食試験後の供試材の外観を示すが、めっきのない従来材はSST265hおよびCCT30サイクルで全面に赤錆が発生し著しく腐食され

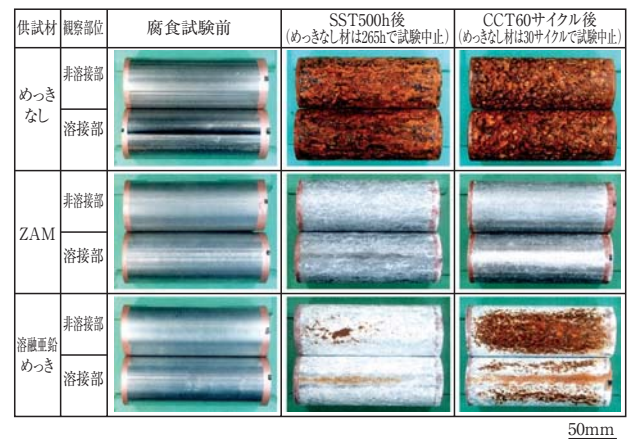


図10 SST及びCCT後のテストピースの外観

Fig.10 Results of salt splay test and combined cycle test.

ているのに対して、RPEロックボルトはSST500hおよびCCT60サイクル後においても白錆のみが発生し、鋼素地の腐食は観察されなかった。亜鉛めっき材はSST500hおよびCCT60サイクルにおいて既に赤錆を生じている。腐食による肉厚減少はロックボルトの強度低下の原因となることから、従来材（めっきなし材）のCCT30サイクル試験後のサンプルの肉厚分布を測定した。肉厚はポイントマイクロメータによって周方向に5mm間隔で測定

し、耐食試験前後の肉厚差より肉厚減少量を求めた。結果は図11に示すように、平均減少量0.13mm、最大減少量0.27mmであった。RPEロックボルトについては、従来の鋼管膨張型ロックボルトの場合、平均で0.26mm(元板厚2mmの場合約13%)の肉厚減少を生じると考えられる、CCT60サイクル後においても赤錆を生じておら

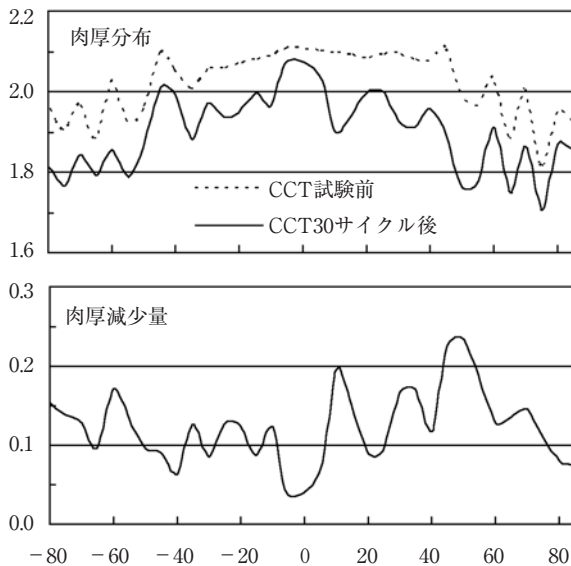


図11 従来のロックボルトのCCT30サイクル後の肉厚減少量測定結果

Fig.11 Decrease in thickness of former expansive rock bolt after 30 cycles in combined cycle test.

ず、鋼素地は初期の肉厚を維持していると判断された。

以上の促進試験の結果より、RPEロックボルトは、従来品に対して優れた耐久性を有していることが確認できた。さらに実環境での耐久性評価を目的に、建設中の東海北陸自動車道飛騨トンネルにおいて、平成15年1月にRPEロックボルトと従来の鋼管膨張型ロックボルトを打設し、一定期間を経た後に回収して調査を行なう計画である。1年経過後の調査によれば、RPEロックボルトは、めっき層の厚みに目立った変化はなく、健全な状態を維持していること、めっきが施されていないロックボルトは腐食で1.5～4%減肉していることが、それぞれ判明している。ここで得られた知見は、前述の促進試験の結果と合わせてRPEロックボルトの耐久性の予測に活用する予定である。

4.3 注水システムのロックボルト加圧・膨張特性

開発したエアコンバータ方式の注水システムの性能評価および最適機器構成の検討を行なった。長さ3mのRPEロックボルトを、実際の削孔(内径φ50mm弱)を模した内径φ49.4mm(外径φ54mm, 肉厚2.3mm)の鋼

管中で膨張させて、目標水圧(25MPa)に到達するまでの時間を測定した。実際のトンネルでの種々の使用条件を想定して、1ショットあたりの吐き出し量の異なるエアコンバータ2種類と、水圧制御弁の有無による4種類の注水システムについて、動力源となる圧縮空気源2種類(流量5および3.7m³/min.)およびロックボルト2種類(110kN及び170kN耐力)を組み合わせた、全10種類の条件について検討した。実験結果を表4に示す。十分な能力の圧縮空気源(流量5m³/min.)のもとで、170kN

Table 4 Result of expanding test of RPE rock bolt by developed high pressure water pump.

表4 高水圧ポンプ性能試験結果

実験No	エアコンバータ	水圧制御弁		エア圧設定(MPa)	到達圧(MPa)	コンバータ駆動用エア源	ロックボルト		膨張時間(sec)
		有○ 無-	設定圧(MPa)				長さ(m)	耐力(kN)	
1	A†4	○	25	(0.7)†6	25	40kWコンプレッサ(流量5m ³ /min)を直結	3	170	35.4
2	B†5	○	25	(0.7)	25		3	170	35.7
3	A	○	25	(0.7)	25		3	110	32.7
4	B	○	25	(0.7)	25		3	110	35.6
5	A	-	-	0.38	25		3	170	42.8
6	B	-	-	0.38	25		3	170	48.8
7	A	○	25	(0.7)	25	22kWコンプレッサ(流量3.7m ³ /min)を工場配管経由で接続	3	170	63.3
8	B	○	25	(0.7)	25		3	170	67.3
9	A	-	-	0.38	25		3	170	66.7
10	B	-	-	0.38	25		3	170	67.5

†4: コンバータA: ワンショットあたりの吐出し量27cc / 26.5cc (押し/引き), 増圧比65

†5: コンバータB: ワンショットあたりの吐出し量16cc / 15.7cc (押し/引き), 増圧比65

†6: 減圧前圧力0.7MPa

耐力のロックボルトを最も短時間で膨張できたのは、大容量のエアコンバータと水圧制御弁を組合せた実験No.1で、所要時間は35.4秒であった。No.1に対してエアコンバータ容量の小さいNo.2も、35.7秒とほぼ同等の性能を示した。水圧制御弁を使用しない場合(実験No.5とNo.6)は、エアコンバータの容量による膨張時間の差が6秒に拡大した。図12にこれらの実験における水圧の推移を示す。この図より、水圧制御弁を使用した場合は、膨張時間の短縮以外に、膨張完了の判定が容易に行なえるという利点があることがわかる。表の実験No.1,2群と、No.3,4群を比較すると、170kN耐力のロックボルトに対して110kN耐力のロックボルトは、最大8%程度短い時間で膨張できることがわかる。圧縮空気源の能力が低いNo.7～No.10では、機器構成に関わらず65秒前後の時間を要した。以上、注水システムのコストに占めるエアコンバータの割合は大きいものの、水圧制御弁を使

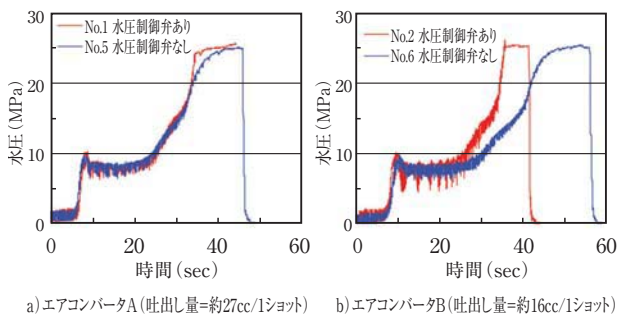


図12 膨張時間に及ぼす水圧制御弁の効果

Fig.12 Effect of water pressure control valve on expanding time.

用により、エアコンバータの容量差が拡張時間に及ぼす影響がほとんどなくなることが明らかとなった。

以上の結果より、注水システムの機器構成としては、膨張に要する時間も比較的短く、膨張完了の判定が容易でコストパフォーマンスにも優れる、エアコンバータBに水圧制御弁を組合せたもの（実験No.2, No.4, No.8で使用）が最適と判断した。

4.4 引抜試験における変位の発生機構

トンネルでの引抜試験に先立って、実験室にて模擬試験を行った。実際のトンネルでは、表面が平坦でない吹き付けコンクリート表面に試験機の脚を置いて荷重を受けるため、試験機自体が動く場合がある。さらに試験機自体の弾性変形も考えられる。本試験では、ロックボルト変位を油圧シリンダーの変位で代用する方法を採っているため、これらはすべて変位として検出される。したがって、これらの影響を排除あるいは定量化して試験を行った。試験方法および結果を図13に示す。変位は通常のシリンダーストローク（変位A）に加えて、ロック

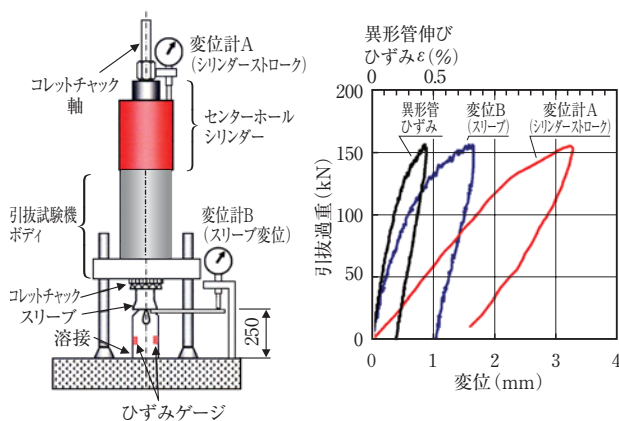


図13 厚鋼板に固定したロックボルトの引抜試験結果

Fig.13 Results of pull out test of RPE rock bolt fixed on thick steel plate.

ボルトのスリーブの変位（変位B）も測定した。また、ロックボルトの異形管にひずみゲージを貼り付けて、伸びひずみを測定した。試験機の変形量は各部の寸法と弾性係数より概算したが、荷重150kNで約1.3mmである。実験の結果より、シリンダーストロークとスリーブの変位には、最大荷重150kN時において2mm程度の差が認められた。これは主に試験機の弾性変形量1.3mmによるものと考えられるが、残りの0.6mmについては試験機の変形量概算時の誤差の他に、荷重の作用しているスリーブの溝付近の永久変形の影響なども含まれているものと推定される。

4.5 定着性

トンネルに打設したロックボルトについて、開発した引抜試験機を用いて引抜試験を行った。供試材は長さ3mの110kN耐力のロックボルトであり、通常の定着性確認のための引抜試験における最大荷重は100kNであるが、本試験では最大120kNまで荷重を付加した。作業面では、従来のチャックの爪をロックボルトのスリーブに食込ませる方法に比べて、コレットチャックによるチャッキングは作業負荷も軽く、かつ滑りのない確実なスリーブの把持が可能であった。引抜試験の結果、降伏現象（変位が増大しても荷重が上昇しない現象）も認められず、確実に定着していることが確認できた。

負荷時の荷重と変位はほぼ直線関係であり、除荷後の永久変形量も前述の予備実験と同様1mm程度であったことから、ロックボルト自体には抜けも含めて問題となる永久変位は生じていないと考えられる。しかしながら、120kN付加時の変位は約8.5mmと、予備実験の150kNにおける変位量約3mmに比べて大きな値である。これについては、トンネル内壁のモルタル吹付け面と試験機の接点である荷重支持部が、見かけ上の変位増大に影響している可能性がある。この問題については、今後詳細に検討する予定である。

5. 実用化

開発したRPEロックボルト（図14）については、平成15年4月に日新鋼管株式会社蒲郡工場に生産設備を設置



図14 開発したRPEロックボルトシステムの商品イメージ写真
Fig.14 Appearances of RPE rock bolt system.

し、同年7月より110kN耐力品の製造、販売を開始した。170kN耐力品についても平成16年1月より営業生産を開始した。これまでに、道路トンネルを中心に、鉄道トンネル、水路用トンネルなどで主に湧水の多い場所への適用が拡大している。

6. 結 言

鋼管膨張型ロックボルトに高耐食めっき“ZAM”を適用したRPEロックボルト、および打設関連機器を開発した。RPEロックボルトはモルタル充填型棒鋼ロックボルトにない施工性・早期定着性を有し、さらに従来の鋼管膨張型ロックボルトの欠点である耐食性を大きく改善し、長期にわたってロックボルトの機能を維持できる製品である。また、同時に開発した注水システムおよび引抜試験機も優れた操作性を有しており、ロックボルト施工作業の効率化に寄与できるものである。

参考文献

- 1) 谷本親伯：土木特殊工法シリーズ4 NATM_1, 森北出版株式会社, 東京, (1986), 1.
- 2) 公告特許公報：特公平 2-520
- 3) 公告特許公報：特公平 2-5238