

ナットを用いないロックボルトの開発

三河内 永康¹・末松 幸人²・井本 厚³・真壁 雄貴⁴

¹正会員 (株)フジタ 土木本部 土木エンジニアリングセンター 技術部 (トンネルグループ)
(〒151-8570 東京都渋谷区千駄ヶ谷 4-25-2)

E-mail: mitugochi@fujita.co.jp

²(株)フジタ 土木本部 土木エンジニアリングセンター 技術部長
(〒151-8570 東京都渋谷区千駄ヶ谷 4-25-2)

E-mail: suematsu@fujita.co.jp

³(株)ケー・エフ・シー 技術研究所長 (〒347-0010 埼玉県加須市大桑 1-19)

E-mail: imoto.atsushi@kfc-net.co.jp

⁴(株)ケー・エフ・シー 土木資材事業部 (〒105-0011 東京都港区芝公園 2-4-1)

E-mail: makabe.yuuki@kfc-net.co.jp

ロックボルトは、山岳トンネルの重要な支保部材の一部であり、芯材、ベアリングプレートおよびナットで構成されている。ロックボルト工の施工は、多くの手順による施工サイクルの低下や切羽直下での長時間作業による労働災害発生リスクの増加が危惧される。また、ロックボルトの耐力は、一般的に断面欠損となっているねじ部の強度に依存している。そこで、筆者らは、ロックボルトの施工手順の簡略化による省力化と、施工時間の短縮による安全性・施工性の向上を目指して、ナットを用いることなくベアリングプレートを吹付けコンクリート面に密着させることができ、素材部の降伏荷重を最大限に発揮させる構造の新型ロックボルトを開発した。本稿では、新型ロックボルトの開発経緯と試験施工による施工性・品質の確認について、その詳細を報告する。

Key Words: tunnel, rock bolt, without nut, development, mushroom

1. はじめに

ロックボルトは、NATMにおける山岳トンネルの重要な支保部材の一部である。ロックボルトは、芯材、ベアリングプレートおよびナットで構成されている。

ロックボルト工の施工は、一般的に手順①：ロックボルト孔の穿孔、手順②：定着材の充填、手順③：芯材の挿入、手順④：ベアリングプレートを芯材に挿入、手順⑤：ナットで固定、という手順となっている。ロックボルト工の施工は前述の5つの手順が必要となり、トンネル工の施工サイクルが低下する。また、これらの作業を切羽直下で行い、特に手順③から⑤には時間がかかるため、作業員への労働災害の発生リスクが増加する。

さらに、ロックボルトの芯材の頭部には、ベアリングプレートを掘削面や吹付けコンクリート面に密着・固定するために、ナットを回転・締付けさせるためのねじ切り加工が施してある。一般的なロックボルトの耐力は、素材部の降伏荷重ではなく、断面欠損が生じるねじ部の降伏荷重で評価されている。

そこで、筆者らは、ロックボルトの施工手順を簡略化し、省力化と安全性・施工性の向上を目指して、ナットを用いることなくベアリングプレートを吹付けコンクリート面に密着させることができ、素材部の降伏荷重を最大限に発揮させる構造の新型ロックボルトを開発した。

2. 日本におけるロックボルト

日本におけるトンネル工事でのロックボルトは、初期の頃から芯材、ベアリングプレートおよびナットで構成されている。

(1) トンネル工事

日本では、昭和25年(1950年)頃に鉱山へロックボルトが導入され、トンネル工事では昭和33年(1958年)に国鉄岩日線第3高野トンネルで試験的に使用されたのが初めてではないかと言われている¹⁾。しかし、鉄道や道路のトンネル工事では、ロックボルトを本格的に使用

した実例はほとんどなかった²⁾。

昭和40年代前半(1965～1970)頃からは、吹付けコンクリートとロックボルトがトンネルに使用されるようになった³⁾。山陽新幹線では、広島県内の13か所のトンネルの総延長68kmのうち16%にあたる11km間において、当初からロックボルト工で発注された。当時のロックボルト標準図には、トンネル内空側頭部にワッシャーとナットが図示されている⁴⁾。支保工には、吹付けコンクリートとロックボルトではなく、鋼製支保工とロックボルトが使用された。

昭和47～48年(1972～1973年)には、高速道路調査会から「ロックボルト工設計指針」が出版された。ロックボルトは、締め付け式、全面接着式、併用式に分類されている。試験結果によると、全面接着式は、締め付け式に比べて定着能力が地質を問わず優れている、とされている。また、締め付けは締め付け式および併用式のロックボルトに対して行い、全面接着式ロックボルトに対しては孔口付近の岩盤表層部のゆるみを押さえる意から、ベアリングプレートと岩盤に押し付ける程度の締め付けを行う、と示されている⁵⁾。

その後、昭和51年(1976年)に上越新幹線中山トンネルで吹付けコンクリートとロックボルトを併用した支保工が採用され、成功してから、日本でNATMという言葉が広く知られるようになり⁶⁾、ロックボルトが多く使われるようになった。

現在ではロックボルトの種類は多くなり、支保パターンのロックボルトには、異形棒鋼、ねじり棒鋼およびねじり棒鋼型異形棒鋼高耐力ボルトが一般的に使用されている。なお、その他としては、高い耐力、FRP製、鋼管膨張型、ベアリングプレートとナットを一体化したもの⁷⁾や光ファイバを実装したもの⁸⁾、等が開発されている。

表-1は、日本国内におけるロックボルトの主な出来事をまとめたものである。

表-1 日本国内におけるロックボルトの主な出来事

西暦(年)	主な出来事
1950	・ 釜山へ導入 ・ 第3高野トンネル(岩日線)で試験的に使用
1960	・ 吹付けコンクリートとロックボルトがトンネルで使用
1970	・ 山陽新幹線(広島県内)で積極的に使用 ・ 「ロックボルト工施工指針」出版 ・ 中山トンネル(上越新幹線)で採用 ・ NATMの普及
1980	・ NATMの標準化

(2) トンネル標準示方書

土木学会のトンネル標準示方書は、昭和39年(1964年)に初めて制定された。この時点では、ロックボルトに関する記述はなく、鋼アーチ支保工と木製支柱式支保工について述べられている。

昭和44年(1969年)改版では、木製支柱式支保工は削除され、ロックボルトと吹付けコンクリートの節が新設された。当時、ロックボルトの使用実績が少なく、ロックボルトに関する規格は作られておらず、棒鋼または異形棒鋼から制作するものとされている。炭鉱のロックボルトの材質の規格例として、普通強度ボルト(降伏点:21 kg/mm²=210N/mm²)と高張力ボルト(降伏点:28 kg/mm²=280N/mm²)が示されている。ロックボルトの形式は、ウェッジ型、エクспанション型、接着型となっている。いずれにおいても、ロックボルトのトンネル内空側頭部はねじ切り加工され、ベアリングプレートとナットで地山と密着させることとなっている⁹⁾。ロックボルトは、そう入後ただちに締め付けなければならないが、接着型のうち、ボルト全長にわたって接着する場合は、ごく表面の限られた範囲にしか応力が導入されないため、締め付けの必要はない、とされている。また、ロックボルトの張力は、発破による振動、アンカーのクリープ、ベアリングプレート下の岩石の局所的な破碎、等により次第に減少するため、ゆるんでいる場合は再締め付けを行うこととされている¹⁰⁾。

昭和52年(1977年)版のトンネル標準示方書(山岳編)・同解説においてもロックボルトに関する規格は作られておらず、実際に使用されている材質として、SR30(降伏点:30 kg/mm²=300N/mm²以上)、SD35(降伏点:35 kg/mm²=350N/mm²以上)、SS41BDが示されている¹¹⁾。ロックボルトの形式、締め付けおよび再締め付けについては、昭和44年(1969年)改版と同様のことが記載されている。

昭和61年(1986年)版では、標準とするトンネル工法がロックボルトと吹付けコンクリートを主体とする工法となった。この頃には、軟岩地山のみならず硬岩地山においてもほとんど全面接着方式が採用され、全面接着方式が適用される地質は多岐にわたってきた。全面接着方式のロックボルトは、異形棒鋼(SD30, SD35)、ツイスト棒鋼(STD52)および全ねじ棒鋼(SD30, SD35)が示され、ねじ部と素材部毎の降伏耐力等が記述された¹²⁾。先端定着方式では、ナットを締め付けて定着が十分に行われたかどうかを確認しなければならない¹³⁾、とある。機械式定着方式では、発破による振動、等で緩むことがあるため、必要な場合は再締め付け、等の対策をとらなければならない¹⁴⁾、とされている。

平成8年(1996年)版のトンネル標準示方書・同解説は、(山岳編)から(山岳工法編)に改訂された。ロックボルトの定着方式は、先端定着方式は用いられなくな

り、全面定着方式が一般的とされ、摩擦定着方式が新たに追加された。ロックボルトの種類は、異形棒鋼 (SD345)，ねじり棒鋼 (STD510)，全ねじ棒鋼 (SD295)，および鋼管膨張型 (SAE1008) が示されている。また、再締付けについては、記述されなくなった¹⁵⁾。

2006年版では、全面定着方式の中に定着材式と摩擦式が定義され、併用方式は記述されなくなった。定着材式のロックボルトの種類は、異形棒鋼 (SD345, SD390)，ねじり棒鋼 (STD510) およびねじ節異形棒鋼 (SD295A, SD345, SD490, SD585, SD700) が示されている¹⁶⁾。

平成24年(2012年)7月には、各高速道路会社が高規格支保構造を標準化した。これにより、最新の2016年版における定着材式のロックボルトの種類は、異形棒鋼とねじり棒鋼は2006年版と同様となっているが、ねじ節異形棒鋼 (SD295A, SD345) は種類が減り、ねじり棒鋼型異形棒鋼高耐力ボルト (SD685, SD700) とねじ節PC鋼棒 (SBPD930/1080) が追加された。異形棒鋼、ねじり棒鋼とねじり棒鋼型異形棒鋼高耐力ボルト (SD700) は、ねじ部の降伏荷重がロックボルトの耐力とされている。なお、ねじ節異形棒鋼、ねじり棒鋼型異形棒鋼高耐力ボルト (SD685) およびねじ節PC鋼棒は、ねじ部の断面欠損がないため、素材部の降伏荷重がロックボルトの耐力とされている¹⁷⁾。

表-2 トンネル標準示方書におけるロックボルトの主な材料に関する記述 (文献9)(11)(12)(15)(16)(17)を加筆修正)

昭和44年 (1969年)	ボルトの種類		機械的性質				
			降伏強度(最小)	引張強度(最小)			
	普通強度		21kg/mf	42kg/mf			
	高強度		28kg/mf	56kg/mf			
昭和52年 (1977年)	材質		機械的性質				
			降伏点(kg/mf) 引張強さ(kg/mf)				
			SR30	30以上 49~63			
			SS41BD	- 51以上			
	SD35		35以上 50以上				
昭和61年 (1986年)	ボルトの種類	材質	ボルト呼び径	ねじ部		素材部	
				降伏耐力(t)	破断耐力(t)	降伏耐力(t)	破断耐力(t)
				異形棒鋼	SD30 D25	10.6 17.3	15.2 24.8
					SD30 D29	13.8 22.5	18.7 30.6
					SD35 D25	12.3 17.6	17.7 25.3
					SD35 D29	16.0 23.0	22.4 32.1
	ツイスト棒鋼	STD52 TD24	18.3 24.7	23.1 31.2			
平成8年 (1996年)	ロックボルトの種類	種類の記号	ボルト呼び径	ねじ部の機械的性質		素材部の機械的性質	
				降伏荷重(kN)	破断荷重(kN)	降伏荷重(kN)	破断荷重(kN)
				異形棒鋼	SD345 D25	120.5 172.5	173.5 247.9
				ねじり棒鋼	STD510 TD21	153.9 207.8	188.2 252.8
		STD511 TD24	179.3 242.1	226.4 305.8			
2006年	種類	種類の記号	ボルト呼び径	ねじ部の機械的性質		素材部の機械的性質	
				降伏荷重(kN)	破断荷重(kN)	降伏荷重(kN)	破断荷重(kN)
				異形棒鋼	SD345 D25	121.8 173.0	174.9 248.4
					SD390 D22	117.7 169.7	151.0 216.7
				ねじり棒鋼	STD510 TD21	154.5 209.1	188.2 254.6
					STD511 TD24	180.0 243.6	227.5 3,087.7
				ねじ節異形棒鋼	SD585 D25	素材部と同じ	296.6 405.6
					SD295A D22	素材部と同じ	114.2 170.3
					SD345 D25	素材部と同じ	174.9 248.4
					SD490 D22	素材部と同じ	189.6 239.9
	SD490 D29	素材部と同じ	314.6 398.0				
	SD700 D19	素材部と同じ	196.3 236.4				
2016年	種類	種類の記号	ボルト呼び径	ねじ部の機械的性質		素材部の機械的性質	
				降伏荷重(kN)	破断荷重(kN)	降伏荷重(kN)	破断荷重(kN)
				異形棒鋼	SD345 D25	122 172	175 248
					SD390 D22	118 170	151 217
				ねじり棒鋼	STD510 TD24	180 244	228 308
				ねじり棒鋼型異形棒鋼	SD685 D24	素材部と同じ	297 372
	SD700 M27	297 372	371 465				

表-2 は、土木学会における昭和44年(1969年)以降のトンネル標準示方書において、ロックボルトの主な材料についての記述を抜粋したものである。

3. 開発した新型ロックボルト

(1) 形状の選定

新型ロックボルトの頭部は、5種類のタイプの形状を選定した。

タイプ1の形状は、写真-1に示すとおり棒鋼に孔を開けて割りピンでベアリングプレートを固定させるものである(以下、割りピン方式とする)。

タイプ2の形状は、くさび状の中空治具で固定させるものである(以下、くさび方式とする)。くさび方式は、テーパ加工した中空構造の治具の太い径側から細い径側に向かって縦断方向にスリットを施すとともに、中空構造の治具の中にはのこぎりの歯のような形状を施した(写真-2参照)。

タイプ3の形状は、棒鋼に溝を形成させたものである(以下、スリット方式とする)。スリット方式は、写真-3に示すとおり棒鋼を切削して溝を形成させ、その溝にベアリングプレートをはめ込んで岩盤や吹付けコンクリート面に密着させようというものである。また、岩盤や吹付けコンクリート面からロックボルトが突出する長さは一定でないため、ベアリングプレートをはめ込む溝は複数形成させることとした。

タイプ4と5の形状は、金型を用いて芯材自体を鍛造して頭部を膨らませたものである。また、膨らませた頭部で引抜き試験ができるように、タイプ4は写真-4に示すとおり内側にねじ加工を施し(以下、内ねじ方式とする)、タイプ5は写真-5に示すとおり外側にみぞ加工を施した(以下、外みぞ方式とする)。

(2) 材質の選定

5つのタイプの新型ロックボルトは、現在標準的に使用されている材質を基本とし、以下の種類を選定した。

割りピン方式は、ロックボルトの素材をねじり棒鋼 (STD510, TD24) とし、割りピンにはクロムモリブデン鋼 SCM440 材を使用した。ねじり棒鋼の断面欠損と割ピンのせん断耐力を考慮して、ねじり棒鋼にはφ10.8 mmの孔を開けてφ10.5 mmの割りピンとした。ベアリングプレートは、通常使用するSS400 (t=9mm) とした。

くさび方式は、異形棒鋼 (SD345, D25) とねじり棒鋼 (STD510, TD24) とし、中空構造の治具にはS45Cを選定した。ベアリングプレートは通常使用するSS400ではなくS45C (t=9mm) を使用した。

スリット方式では溝を形成させるため、ねじ加工と同



写真-1 割りピン方式



写真-2 くさび方式



写真-3 スリット方式

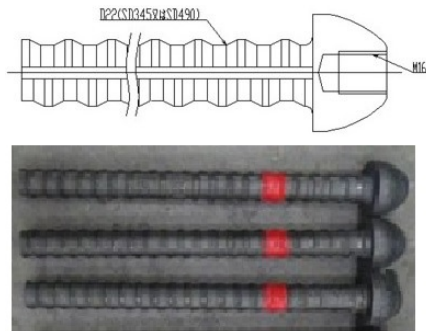


写真-4 内ねじ方式

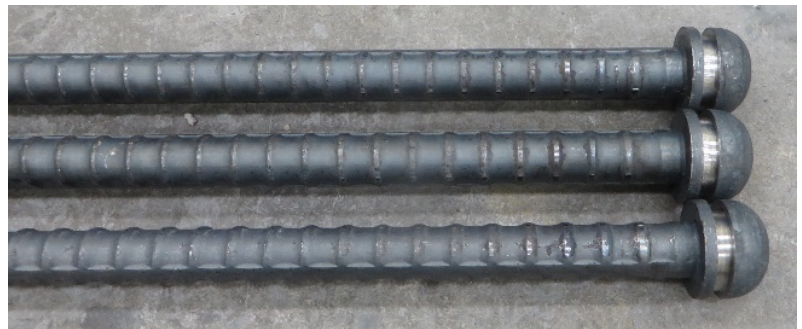


写真-5 外みぞ方式

様に鋼棒の断面欠損となり、溝が深いと降伏荷重の減少度合いが増加する。ロックボルトに軸力が作用すると、岩盤や吹付けコンクリート面に密着させたベアリングプレートを通して溝部にせん断力が発生する。また、溝が深いと発生したせん断力には対抗できるが降伏荷重が低下し、溝が浅いと降伏荷重の低下は限定的となるがせん断力に対抗できなくなる。そこで、ベアリングプレートの材質、厚さおよび溝の深さを数種類選定した。これらをふまえ、スリット方式の新型ロックボルトの素材は異形棒鋼 (SD345, D25) とねじり棒鋼 (STD510, TD24) とし、溝の深さは 3.8 mm, 5.2 mm と変化させた。ベアリングプレートは、通常使用されている SS400 (t=9 mm) とともに、SM490 (t=12 mm), S45C (t=9 mm) および S50C (t=12 mm, 16 mm) の数種類を選定した。

内ねじ方式は、異形棒鋼 (SD345, D25) および異形棒鋼 (SD490, D22) とした。ベアリングプレートは、通常使用する SS400 (t=9 mm) とした。

外みぞ方式は、異形棒鋼 (SD345, D22), 異形棒鋼 (SD345, D25), 異形棒鋼 (SD490, D22), 異形棒鋼 (SD490, D25), ねじり棒鋼 (STD510, TD24), ねじり加工前のねじり棒鋼 (STD510, TD24) およびねじり棒鋼型異形棒鋼高耐力ボルト (SD685, SP24) を選定した。ベアリングプレートは、通常使用する SS400 (t=9 mm) とした。

各方式において選定した新型ロックボルトの芯材、ベ

表-3 各方式における材質の選定一覧

方式	ロックボルト本体		ベアリングプレート		備考	想定耐力 (kN以上)
	材質	呼び径	材質	厚さ		
割りピン	①	STD510	TD24	SS400	t=9mm	120
くさび	①	SD345	D25	S45C	t=9mm	120
	②	STD510	TD24	S45C	t=9mm	180
スリット	①	SD345	D25	S45C	t=9mm	溝深さ5.3mm 120
	②	SD345	D25	SM490A	t=12mm	溝深さ5.3mm 120
	③	STD510	TD24	SS400	t=9mm	溝深さ3.8mm 180
	④	STD510	TD24	S50C	t=16mm	溝深さ3.8mm 180
	⑤	STD510	TD24	S50C	t=12mm	溝深さ5.2mm 180
	⑥	STD510	TD24	S50C	t=16mm	溝深さ5.2mm 180
内ねじ	①	SD345	D22	SS400	t=9mm	120
	②	SD490	D22	SS400	t=9mm	180
外みぞ	①	SD345	D22	SS400	t=9mm	120
	②	SD345	D25	SS400	t=9mm	120
	③	SD490	D22	SS400	t=9mm	120
	④	SD490	D25	SS400	t=9mm	120
	⑤	STD510	TD24	SS400	t=9mm	ねじりあり 180
	⑥	STD510	TD24	SS400	t=9mm	ねじりなし 180
	⑦	SD685	D24	SS400	t=9mm	290

アリングプレートおよび想定した耐力は、表-3に示すとおりとした。

4. 室内試験

新型ロックボルトは、材料メーカーの技術研究所において、万能試験機 (島津製作所 UH-F1000kNX) を用いて引張試験 (JIS Z 2241) を実施した (図-1 参照)。

(1) 割りピン方式

割りピン方式は、従来品の耐力 120kN 以上を目標とした。引張試験では、割りピンがベアリングプレートからせん断力が作用して折れてしまい、3 回の平均最大荷重が 103.3kN (a : 102.4kN, b : 103.3kN, c : 104.1kN) という結果となった (写真-6, 図-2 参照)。

割りピンをさらに強固な材質で太くすれば降伏荷重が

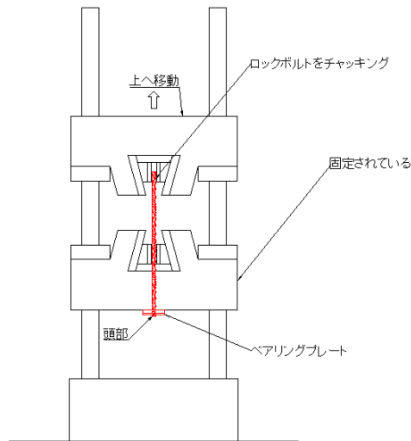


図-1 引張試験概要図



写真-6 割りピン方式における代表的な破壊状況

上昇するが、芯材の断面欠損が大きくなるとともに割りピンの材料単価も高価になるため、割りピン方式は断念した。

(2) くさび方式

くさび方式では、従来品の耐力 120kN 以上と 180kN 以上を目標とした。引張試験の結果は図-3 および図-4 に示すが、3 回の平均最大荷重が表-3 に示すくさび① (想定耐力 : 120kN 以上) では 136.0kN (a : 180.1kN, b : 136.5kN, c : 91.3kN) となり、くさび② (想定耐力 : 180kN 以上) では 99.9kN (a : 117.4kN, b : 121.1kN, c : 61.1kN) となり、いずれも想定した耐力を下回った。くさび①では、写真-7 に示すとおり異形棒鋼で表面に凹凸の節があり、この節がくさび内に施したのこぎり形状に噛みこんでいた。しかし、くさび②はねじり棒鋼 (STD510, TD24) に節が縦断方向に施されていたため、くさび①よりも小さな荷重で降伏した (写真-8 参照)。

しかし、噛みこみが甘くぬけてしまうため、中空構造の治具の材質を強固にしたり、くさび内ののこぎり形状を深くすれば噛みこむ力が大きくなると考えられたが、材料単価が高価になること、ロックボルトの芯材の表面加工による節の深さが限られていること、引張試験用の

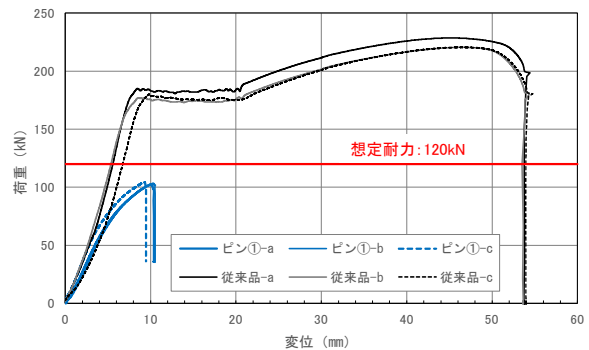


図-2 割りピン方式での引張試験 (想定耐力 : 120kN)

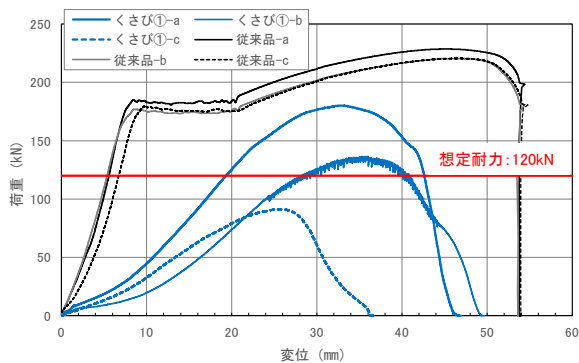


図-3 くさび方式での引張試験 (想定耐力 : 120kN)

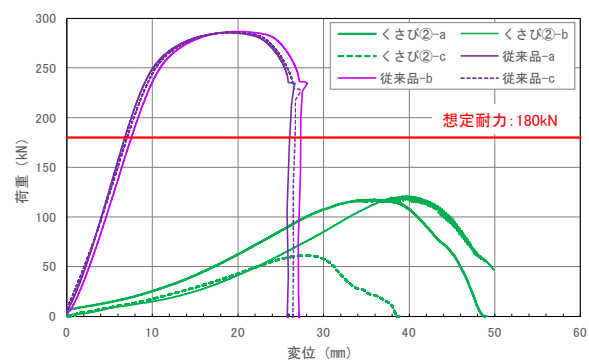


図-4 くさび方式での引張試験 (想定耐力 : 180kN)



写真7 くさび方式での破壊状況（異形棒鋼）



写真8 くさび方式での破壊状況（ねじり棒鋼）

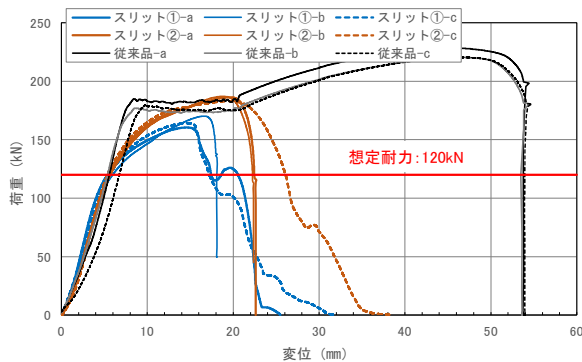


図5 スリット方式での引張試験（想定耐力：120kN）

治具の取付けが困難であること、等から、くさび方式は断念した。

(3) スリット方式

スリット方式では、従来品の耐力 120kN 以上と 180kN 以上を目標とした。120kN 以上の耐力を目標とした異形棒鋼での引張試験は、ベアリングプレートの材質と厚さを変えて 2 種類実施した。結果は図-5 に示すとおり、3 回の平均最大荷重がスリット①では 165.0kN (a : 160.5kN, b : 170.3kN, c : 164.2kN), スリット②では 185.5kN (a : 186.3kN, b : 187.1kN, c : 183.1kN) となった。想定耐力は超過することができたが、弾性領域は従来品のような降伏荷重までは期待できず想定耐力程度に留まった。また、従来品のような降伏荷重後からの変位の伸びがなく、これは最大荷重時に異形棒鋼に形成した溝が破損したことが原因と考えられた (写真-9 参照)。

ねじり棒鋼での試験体は、ねじり棒鋼の溝の深さとベアリングプレートの材質、厚さを変化させて 4 種類とし、耐力は 180kN 以上を目標として引張試験を実施した。スリット③およびスリット④は、ねじり棒鋼の溝の深さを

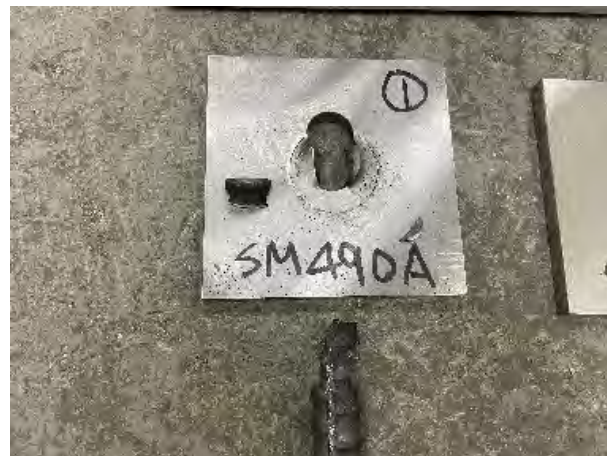


写真9 スリット方式での破壊状況（異形棒鋼）

3.8 mmと浅く形成したが、図-6 に示すとおりスリット③で 185.6kN (a : 183.8kN, b : 181.2kN, c : 191.8kN), スリット④で 180.7kN (a : 189.4kN, b : 163.1kN, c : 189.6kN) と、想定耐力を満足することができなかった。一方、溝の深さを 5.2 mmと深く形成したねじり棒鋼における引張試験結果は、スリット⑤では 233.6kN (a : 227.6kN, b : 237.2kN, c : 236.1kN), スリット⑥では 249.6kN (a : 251.3kN, b : 253.0kN, c : 244.6kN) となり、写真-10 に示すとおり異形棒鋼と同様に溝が破壊されたが、想定耐力は満足した (図-6 参照)。

しかし、棒鋼を切削して溝を形成させるにあたり溝の深さを一定の精度に保つことが困難なこと、複数の溝を形成させるには追加の加工コストが生じること、引張試験用の治具の開発が困難であること、等から、スリット方式での開発は断念した。

(4) 内ねじ方式

内ねじ式では、従来品の耐力 120kN 以上を目標とした

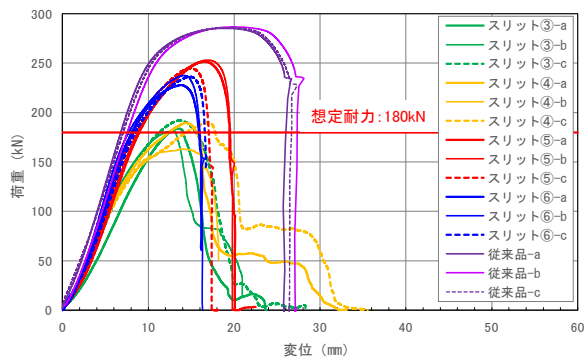


図-6 スリット方式での引張試験 (想定耐力: 180kN)



写真-10 スリット方式での破壊状況 (ねじり棒鋼)

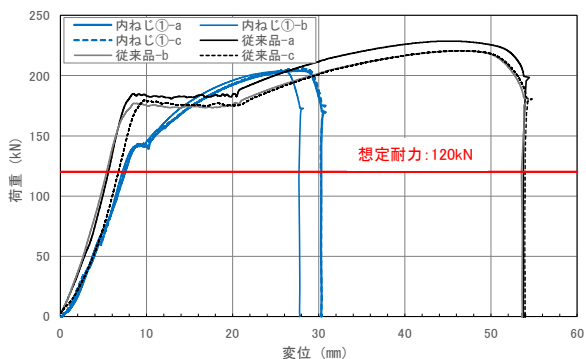


図-7 内ねじ方式での引張試験 (想定耐力: 120kN)



写真-11 内ねじ方式での破断状況 (ねじり棒鋼)

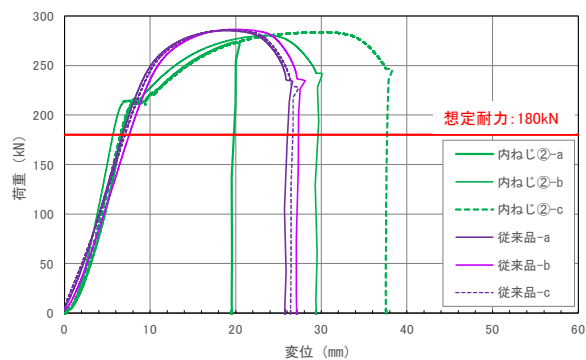


図-8 内ねじ方式での引張試験 (想定耐力: 180kN)

内ねじ①と、耐力 180kN 以上を目標とした内ねじ②で引張試験を行った。

内ねじ①での引張試験結果は、図-7 に示すとおり 3 回の平均降伏荷重が 142.0kN (a : 142.9kN, b : 140.6kN, c : 142.5kN) となり目標耐力を満足する結果となった。図-7 の内ねじ①では、変位が 30 mm 程度の時点で荷重が約 200kN から急激に降下しているが、これは試験体自体ではなく引張治具が 3 回とも破断したためであり、試験体自体は従来品と同様な変位の伸びが期待できると考えられた。

内ねじ②においては、引張試験における 3 回の平均降伏荷重が 214.1kN (a : 212.0kN, b : 214.1kN, c : 216.2kN) と、目標耐力以上の結果となった (図-8 参照)。図-8 の内ねじ②-a において変位 20 mm 程度で荷重が降下しているが、こちらも前述のとおり引張治具の破断によるものである (写真-11 参照)。

内ねじ式は、目標耐力が 120kN と 180kN のどちらも満足する結果となった。しかし、内ねじ式は膨らませた頭部の内側にねじ加工を施しているため、芯材よりもねじ径が小さくなり、引抜試験をするためには試験用治具のねじ部が破断しないように超高耐力の専用治具が必要となるため、開発を断念した。

(5) 外みぞ方式

外みぞ方式では、従来品の耐力 120kN 以上と 180kN 以上を目標とした他、290kN 以上の耐力も目標として設定した。

120kN 以上の耐力を目標とした異形棒鋼での引張試験は、芯材の材質と径を変えて 4 種類実施した。4 種類の試験結果は図-9 に示すが、3 回の平均降伏荷重としては、外みぞ①が 143.8kN (a : 143.5kN, b : 144.1kN, c : 明確な降伏荷重は認められなかった)、外みぞ②が 193.0kN

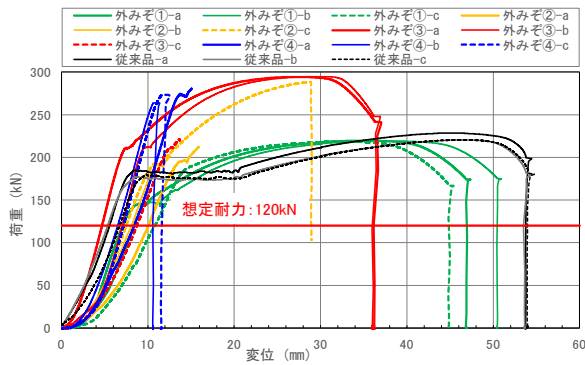


図-9 外みぞ方式での引張試験 (想定耐力: 120kN)



写真-12 外みぞ方式での破断状況 (異形棒鋼)



写真-13 外みぞ方式での破断状況 (ねじり無しねじり棒鋼)

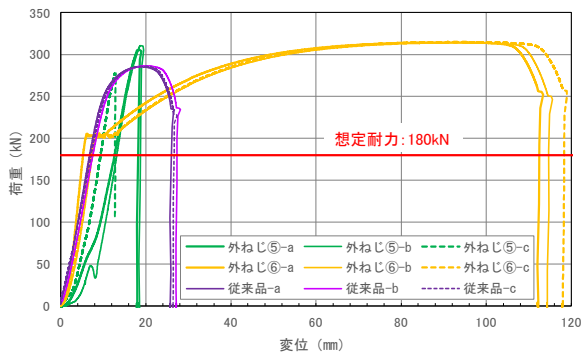


図-10 外みぞ方式での引張試験 (想定耐力: 180kN)



写真-14 外みぞ方式での破断状況 (ねじり棒鋼型異形棒鋼 高耐力ボルト)

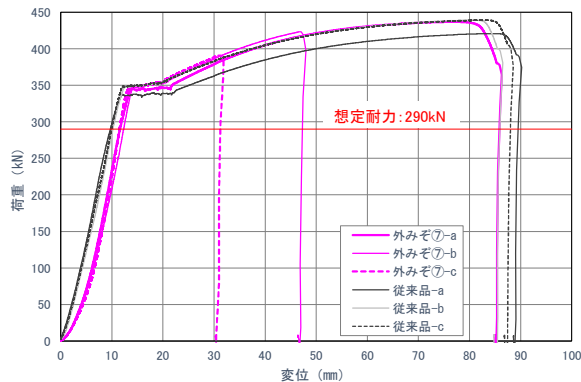


図-11 外みぞ方式での引張試験 (想定耐力: 290kN)

(a : 195.0kN, b : 191.9kN, c : 192.2kN) , 外みぞ③が 211.0kN (a : 210.5kN, b : 211.9kN, c : 210.5kN) , 外みぞ④が 270.4kN (a : 274.4kN, b : 263.4kN, c : 273.3kN) となった。引張試験における 4 種類の降伏荷重は、それぞれ異形棒鋼の材質における降伏点と径 (公称断面積) とから求められる降伏荷重 (外みぞ①: 134kN, 外みぞ②: 175kN, 外みぞ③: 190kN, 外みぞ④: 248kN) 以上の試験値となった。外みぞ①および外みぞ③-a, ③-b は、芯材である素材の途中で破断した (写真-12 参照)。なお、図-9 のうち、外みぞ②-a, ③-c および④-a は降伏荷

重を確認後に引張試験を終了し、外みぞ②-b, ②-c, ④-b および④-c は引張治具が破断した結果を示している。また、4 種類の外みぞ方式における降伏荷重は、目標とした耐力の約 1.1 倍以上 ($120\text{kN} \times 1.1 = 132\text{kN}$ 以上) という水準に達している。

耐力 180kN 以上を目標とした試験体はさまざまな材質を検討したが、いずれも材料費が高価となるため、現在標準的に使用されているねじり棒鋼とした。なお、外みぞ⑤は従来のねじり棒鋼とし、外みぞ⑥はねじり棒鋼と同じ材質と径 (STD510, TD24) ではあるがねじり加工をしていないものを使用した。外みぞ⑤および⑥の引張試験結果は図-10 に示すとおりである。外みぞ⑤においては、従来品の試験結果と同様に降伏点が表れずに、引張治具が破断してしまった (写真-13 参照)。外みぞ⑥では、3 回の平均降伏荷重が 205.8kN (a : 205.4kN, b : 206.2kN, c : 205.9kN) と、耐力 180kN 以上および目標水準 ($180\text{kN} \times 1.1 = 198\text{kN}$ 以上) を満足した。

さらに、290kN 以上の耐力も目標とした外みぞ⑦は、現在標準的に使用されているねじり棒鋼型異形棒鋼高耐力ボルトの頭部を加工して引張試験を実施し、従来品と

同様に目標耐力を満足する結果となった（図-11 参照）。しかし、3本の試験体のうち2本は、写真-14に示すとおり、加工した頭部の根元で破断する結果となり、降伏点を超えてロックボルトが伸びている最中に試験体自体が破断した1本（外みぞ⑦-a）と比べて、小さい変位と荷重で突然破断してしまった。これは、SD685相当の高強度材質のため熱間加工による脆化した可能性、頭部を膨らませる加工をした時の熱の影響や、頭部を膨らませる加工をした際の元々の表面形状の違いの影響等が考えられた。

これらの室内試験により、引張試験結果は新型ロックボルトの形状として外みぞ方式が最も良く、材質としては耐力120kN以上では異形棒鋼（SD345，D22）、耐力180kN以上ではねじり加工を施していないねじり棒鋼（STD510，TD24）が望ましいと考えられる。なお、耐力290kN以上においては、現在標準的に使用されているねじり棒鋼異形棒鋼高耐力ボルトの頭部を膨らませた外みぞ方式でも問題は無いとも思われるが、突然の頭部破断の危険性があるため改良の必要性があると考えられる。

5. 現場試験施工

試験施工は、道路トンネル現場のD I-bパターン区間で実施した。現状のロックボルトは支保パターンであるねじり棒鋼（STD510，TD24）を、新型ロックボルトは外みぞ方式の形状で120kN以上の耐力が期待できる異形棒鋼（SD345，D22）を用いて、長さはどちらもL=4.0mを使用した。

(1) 施工性

試験施工では、施工性について検証した。現状のロックボルト工の施工では、ロックボルト孔の穿孔と定着材の充填が終わった後に、芯材の挿入、ベアリングプレートを芯材に挿入、ナットで固定という手順が必要となる。しかし、新型ロックボルトでは、芯材の挿入のみでベアリングプレートを岩盤や吹付けコンクリート面に密着させることが可能となる。表4は、現在標準的に使用されているねじり棒鋼（STD510，TD24）におけるベアリン

表4 口元への定着材の充填から新型の芯材固定時間と従来品のベアリングプレート芯材挿入・ナット固定時間

ロックボルト	試験体			平均
	①	②	③	
新型	8秒	10秒	7秒	8.33秒
従来品	22秒	18秒	17秒	19.00秒
差				10.67秒

グプレート芯材への挿入から口元への定着材の充填、ナットでの固定までの時間と、新型ロックボルトである異形棒鋼（SD345，D22）におけるベアリングプレートをあらかじめ挿入した芯材を口元への定着材の充填から吹付けコンクリート面に密着させる時間を比較したものである。新型ロックボルトは、従来品と比較して1本あたり約11秒の施工時間の短縮につながった。例えば、上半断面でロックボルトを15本打設する支保パターンの場合、1サイクル当たり2.7分間の施工時間の短縮となり、切羽直下での作業時間が短縮されるため作業員への労働災害の危険性が低減し安全性が向上する（写真-15参照）。

耐力120kN対応においては、従来のロックボルトが異形棒鋼（SD345，D25）であるのに対して、新型ロックボルトでは室内試験結果より異形棒鋼（SD345，D22）で同じ耐力を確保できるためにロックボルト自体の軽量化が図れ、現場作業員からは取り扱いやすいと好評であった。特に、トンネル天端のロックボルトでは、上方へロックボルトを挿入する作業労力の軽減が図れると期待できる。また、新型ロックボルトは、同じ耐力であった場合にロックボルトの穿孔径も小さくできるため、更なる施工サイクルの向上が期待できる。

さらに、新型ロックボルトは、ロックボルト孔の穿孔から打設完了までを現場作業員が切羽に近づかずに1台の機械で行うことができるロックボルト自動打設装置（ロックボルト遠隔打設装置）に搭載して試験施工を行ったが、非常に相性が良く問題なく施工できた。

(2) 品質

試験施工後には、ロックボルトの品質管理として引抜試験を行った。引抜試験は、従来品のねじり棒鋼（STD510，TD24）と新型ロックボルトである異形棒鋼（SD345，D22）を用いて実施し、新型ロックボルトは

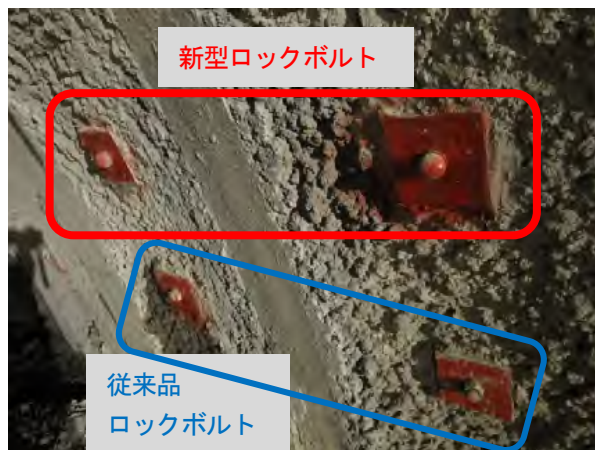


写真-15 従来品と新型ロックボルトの設置状況



写真-16 新型ロックボルト引抜試験用の治具

別途写真-16 に示す専用治具を使用して従来の引抜試験器具で行った。新型ロックボルトは耐力 120kN 用にもかかわらず、耐力 180kN 用の従来品と同等の性能を示した（図-12 参照）。なお、図-12 において、新型および従来品の平均値は、変位 1.0 mm を初期値として図示している。これより、新型ロックボルトは従来品と比較して、変位量が約 5% 減少してロックボルト自体の伸びが少ないことが確認できた。

6. まとめ

本報告は、新たに開発したナットを回転させることなくベアリングプレートを吹付けコンクリート面に密着させることができる、ナットを用いずに素材部の降伏荷重を最大限に発揮させる構造の新型ロックボルトについて述べた。

本開発にあたり、得られた知見を以下に示す。

- ① ナットを用いずにベアリングプレートを吹付けコンクリート面に密着させるためには、ロックボルト頭部を膨らませ、引張試験用に頭部の外側にみぞ加工を施した外みぞ方式が有効である。
- ② 耐力 120kN 用の新型ロックボルトは、異形棒鋼（SD345, D22）を用いれば良く、芯材の材料コストの削減、材料の軽量化による作業労力の軽減と、穿孔径の縮小化による施工サイクルの向上が期待できる。
- ③ 耐力 180kN 用の新型ロックボルトは、ねじり加工を施していないねじり棒鋼（STD510, TD24）が望ましく、ねじり加工に伴う加工コストが削減でき、頭部加工に伴う材料単価の上昇を最小限に抑制することができる。
- ④ 290kN 以上の耐力が必要な新型ロックボルトでは、現在標準的に使用されているねじり棒鋼型異形棒鋼高耐

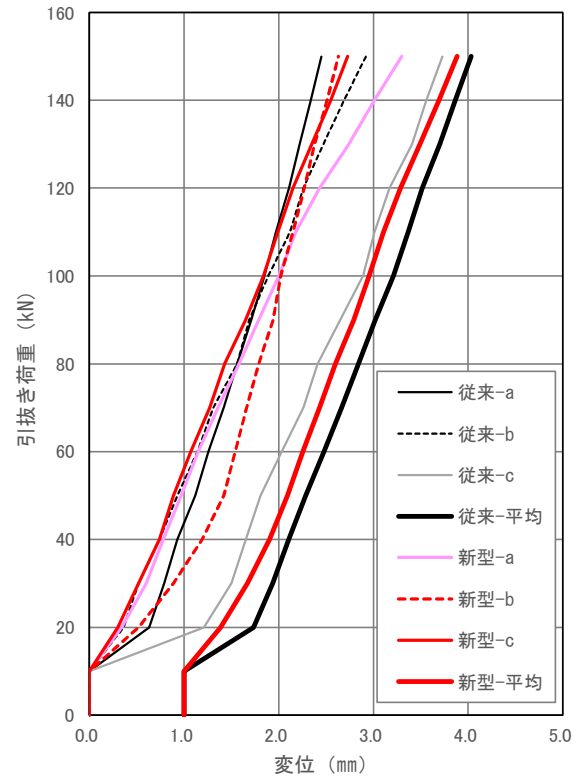


図-12 外みぞ方式での引抜試験結果

力ボルトにおいて頭部破断が発生するため、更なる改良が必要であると考えられる。

- ⑤ 新型ロックボルトを用いることで、1本あたり約10秒の施工時間の短縮により省力化となり、施工性と安全性の向上が期待できる。
- ⑥ 新型ロックボルトは、ロックボルト自動打設装置（ロックボルト遠隔打設装置）による打設に対しても、問題なく施工ができる。

参考文献

- 1) 今田徹, 白井慶治, 永島鉄郎: ロックボルト工入門 (1), トンネルと地下, vol.9, no.2, p.54, 1978.
- 2) 斎藤徹: ロックボルトの現状と方向, トンネルと地下, vol.3, no.10, p.3, 1972.
- 3) NATM 工法の調査・設計から施工まで編集委員会: NATM 工法の調査・設計から施工まで, 土質工学会, p8, 1986.
- 4) 斎藤徹: ロックボルトの現状と方向, トンネルと地下, vol.3, no.10, pp.4-6, 1972.
- 5) 山本稔: 「ロックボルト工設計指針」について, トンネルと地下, vol.5, no.9, p.9-12, 1974.
- 6) NATM 工法の調査・設計から施工まで編集委員会: NATM 工法の調査・設計から施工まで, 土質工学会, p9, 1986.
- 7) 中林雅昭, 中藤英樹, 田中徹: 『突起レスロックボルト』の開発, 土木学会第71回年次学術講演会, VI-448, pp895-896, 2016
- 8) 荒木信博, 鈴木誠, 中島拓巳, 永谷英基, 平陽兵:

- 光ファイバ実装ロックボルトの開発, 土木学会第 76 回年次学術講演会, VI-72, 2021
- 9) 土木学会：トンネル標準示方書 解説【昭和 44 年改訂版】，pp.68-73, 1969.
- 10) 土木学会：トンネル標準示方書 解説【昭和 44 年改訂版】，pp.123-124, 1969.
- 11) 土木学会：トンネル標準示方書（山岳編）・同解説【昭和 52 年版】，p.67, 1977.
- 12) 土木学会：トンネル標準示方書（山岳編）・同解説【昭和 61 年版】，pp.58-63, 1986.
- 13) 土木学会：トンネル標準示方書（山岳編）・同解説【昭和 61 年版】，pp.123-124, 1986.
- 14) 土木学会：トンネル標準示方書（山岳編）・同解説【昭和 61 年版】，pp.141-142, 1986.
- 15) 土木学会：トンネル標準示方書（山岳工法編）・同解説【平成 8 年版】，pp.81-84, 1996.
- 16) 土木学会：2006 年制定トンネル標準示方書（山岳工法）・同解説，pp.81-86, 2006.
- 17) 土木学会：2016 年制定トンネル標準示方書〔山岳工法〕・同解説，pp.88-96, 2016.
- (2022. 8. 26 受付)

DEVELOPMENT OF ROCK BOLTS WITHOUT NUTS

Nagayasu MITSUGOCHI, Yukito SUEMATSU, Atsushi IMOTO and Yuuki MAKABE

Rock bolts are an important support members of mountain tunnels, consisting of a core material, bearing plate, and nut. The rock bolt works is concerned about both increases the cycle time and the risk of accidents due to many procedures and long hours of work just below the face of the tunnel. In addition, the bearing capacity of a rock bolt generally depends on the yield load of the threaded part without sufficient evaluation of the mechanical properties of the material part. Therefore, the authors have developed a new type of rock bolt without a nut structure that enables the bearing plate to adhere to the shotcrete surface without rotating the nut, aiming to save labor by simplifying the rock bolt installation procedure and to improve safety and workability by reducing installation time. In this paper, we describe the details of the development process of the new rock bolt, especially the confirmation of its workability and quality through test construction.