

## 事例紹介

## 高耐久鋼管膨張型ロックボルトシステムの開発とトンネルへの適用

仲 子 武 文\* 吉 田 剛 之\*\* 松 原 茂 雄\*\*\* 西 畑 三 鶴\*\*\*\*

## Development of a Long Life Expansive Steel Tube Rock Bolt System and Its Applications to Tunnels

Takefumi Nakako, Takeyuki Yoshida, Shigeo Matsubara, Mitsuru Nishihata

## 1. 緒 言

当社は、これまでの溶融亜鉛めっき処理（浸漬めっき）に代替可能な溶融 Zn-6%Al-3%Mg 合金めっき鋼板（以下、ZAM と記す）を開発し、拡販を目的に土木分野への適用を検討している。その一環として、トンネル工事における支保部材の一つである、摩擦定着式鋼管膨張型ロックボルトシステム（表 1、図 1）を開発した<sup>1)</sup>。

Table1 Specifications of RPE rock bolt

表 1 開発した RPE ロックボルトの仕様

ロックボルト 呼称耐力 (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)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	めっき処理		耐力 (kN)	スリーブ 引抜強度 (kN)
				めっき 種	付着量 <sup>*2</sup> (g/m <sup>2</sup> )		
120	SS400	2.0	≥ 400	ZAM*	≥ 140	≥ 120	≥ 100
180	SS540	2.3	≥ 540	ZAM	≥ 140	≥ 180	≥ 150

\* : 溶融 Zn-6%Al-3%Mg 合金めっき鋼板

\* 2 : 両面三点平均最小付着量

近年のトンネル工事では、「NATM」(The New Austrian Tunneling Method)<sup>2)</sup> 工法が広く用いられている。NATM では、図 1 に示すように掘削したトンネルの内壁に吹き付けられたコンクリートをロックボルトで支持する方法が採られており、吹き付けコンクリートおよびロックボルトのいずれも主要な支保部材として位置付けられている。多量の湧水により従来のモルタル定着式ロックボルトの使用が困難な場所や、地山の変位速度が大きく早期定着が必要な場所に適用可能な、かつ従来品と同等の耐久性を備えた摩擦定着式鋼管膨張型ロックボルト {以下 RPE (Rust Proofing Expansive) ロックボ



図 1 開発した鋼管膨張型ロックボルトおよび NATM 工法  
Fig.1 Developed expansive rock bolt and the NATM method.

ルトと記す}、およびその打設システムを開発した。さらに (旧) 日本道路公団試験研究所トンネル研究室 (現 株式会社高速道路総合技術研究所) との共同研究により、その優れた耐久性と施工性を確認し、実用化した。本報では、その概要を紹介する。

## 2. 開発したロックボルトシステム

## 2.1 ロックボルト

RPE ロックボルトは、図 1 に示すように凹形状の異形管と、異形管の両端の密封および注水のためのスリーブより構成されている。ZAM を適用した異形管は、外径  $\phi 54$ 、肉厚 2mm 程度の丸管の一方を窪ませて外径

\* 技術研究所 加工第一研究チーム 主任研究員

\*\* 技術研究所 加工第一研究チーム

\*\*\* 技術研究所 研究企画チーム 主任部員 (現 技術研究所 F-Tech. Plaza チームリーダー)

\*\*\*\* 日新鋼管株式会社 営業部 専門課長

φ 36 程度に折り畳んだ断面形状を有するものである。本異形管を高周波溶接鋼管製造ラインで連続的に製造することにより、高い生産性と歩留、および安定した品質を得ることができる。

開発した RPE ロックボルトは、長さ 2m ～ 6m、耐力 120kN と 180kN の 2 種類である。120kN 耐力品は SS400 相当鋼の素材を用いた φ 54 × 肉厚 2.0mm の鋼管を、また 180kN 耐力品は、強度－延性バランスに優れた SS540 相当鋼の素材を用いた φ 54 × 肉厚 2.3mm の鋼管を採用した。

## 2.2 関連機器

### 2.2.1 注水システム

RPE ロックボルトを膨張するためには、20 ～ 30MPa 程度の高圧水が必要となる。現場での作業性や安全性を考慮し、図 2 に示す圧縮空気を動力源とするエアコンバータ式の注水システムを開発した。本注水システムの RPE ロックボルト膨張に要する時間は、長さ 3 m のロックボルト 1 本あたり 1 分以下である<sup>1)</sup>。



図 2 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.2 Outline of high pressure water pump system in which air converter and water pressure control valve are installed.

### 2.2.2 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なう必要がある。現場での作業性、測定精度の向上に配慮した、コレットチャック式の専用の引抜試験機を開発した(図 3)。短時間で引抜試験機を設置することが可能であり、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を行うことができる。

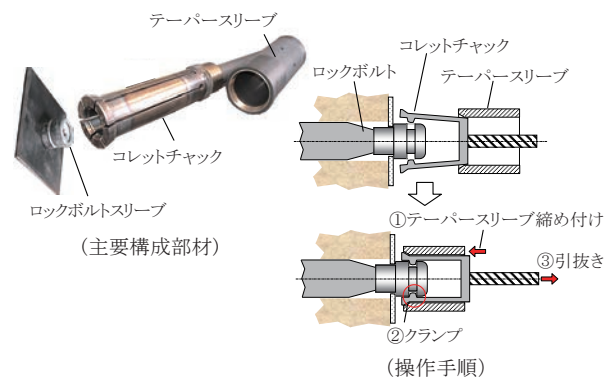


図 3 引抜試験機

Fig.3 Equipment for pull out test of RPE rock bolt.

## 3. 実用化のための性能評価

RPE ロックボルトの特性を評価するために、実際のトンネルで施工テストを行った。主な検討結果を以下に述べる。

### 3.1 定着性

RPE ロックボルトのトンネルへの定着性を確認するため、長さ 2m ～ 6m の 120kN および 180kN 耐力の RPE ロックボルトを実際のトンネルに打設し、開発した引抜試験機を用いて引抜試験を行った。ロックボルトの定着性とは、ロックボルトが摩擦力によって削孔内壁に固定され、所定の軸力に耐える性能を表すものである。図 4 にトンネルでの引抜試験の実施状況と、引抜試験結果の例を示す。変位については、トンネル中に確保した不動点(図 4 (a) の測定器)に設置した変位計により、ロックボルトの注水スリーブをクランプしているコレットチャックの変位を直接測定した。

開発したコレットチャック方式の引抜試験機は、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作業負荷が軽く、かつ滑りのない確実なスリーブの把持が可能であった。図 4 (b) に示すいずれ

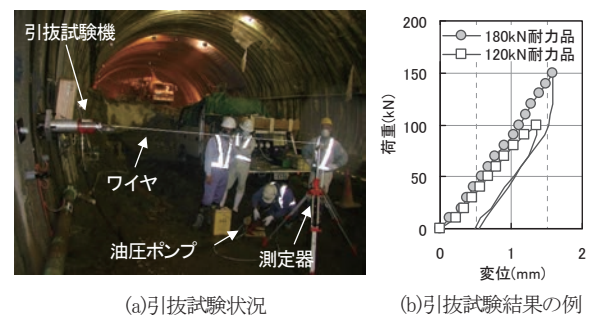


図 4 トンネルでの引抜試験の実施状況と試験結果

Fig.4 Pull out test of RPE rock bolt in actual tunnel and results.

の結果も、降伏現象（変位が増大しても荷重が上昇しない現象）がなく、確実に定着していることが確認できた。種々の地山条件のトンネルを対象に上述のような引抜試験を実施し、RPE ロックボルトが十分な定着性を発揮することを確認した<sup>3,4)</sup>。

### 3.2 耐久性

耐久性（耐食性）の観点より、めっきのない従来の鋼管膨張型ロックボルトに対する RPE ロックボルトの優位性を検討する目的で、実際のトンネルにおいて耐久性評価を実施した。試験場所は試験開始から数年間ロックボルトの回収調査が可能であり、かつトンネル内壁より湧水が認められる腐食環境として比較的厳しい場所を選定した。具体的には 2003 年 1 月当時建設中であった、東海北陸自動車道の飛騨トンネルの本坑白川方坑口から約 200m の地点とした。試験場所の地山地質は白川花崗岩類で、湧水はトンネル壁面から連続的に流出あるいは断続的に滴下している状況で、pH7.8 であった<sup>5)</sup>。試験場所の内壁に 120kN 耐力・長さ 3m の REP ロックボルトを 24 本、比較材としてめっきのない従来の鋼管膨張型ロックボルト（異形管の材質、寸法は 120kN 耐力の RPE ロックボルトと同等）20 本を打設し、3 年間にわたり試験サンプルを採取して腐食状況を調査した。図 5 に、飛騨トンネルにおいて実施した、オーバーコアリング作業による試験片採取の状況を示す。

採取したサンプルの外観を図 6（めっきなし材）、および図 7（RPE ロックボルト）に示す。図 6 に示すめっきなし材では、異形管の外表面に腐食による侵食（減肉）が認められた。一方、図 7 に示す RPE ロックボルトでは、鋼素地の減肉は認められない。図 8 にそれぞれのロックボルトについて腐食状況を調査した結果を示す。めっきなし材においては、図 8 (a) に示すように平均減肉量は 0.026mm/年、最大減肉量は 0.15mm/年である。鋼管の肉厚が 2.0mm であることから、それぞれの減肉

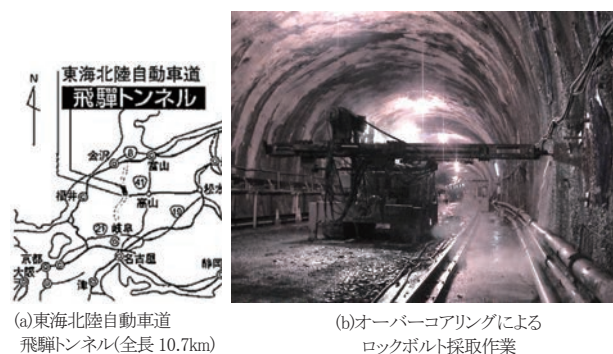


図 5 飛騨トンネルでの耐久性試験

Fig.5 Durability test at Hida tunnel of Tokai-Hokuriku highway.

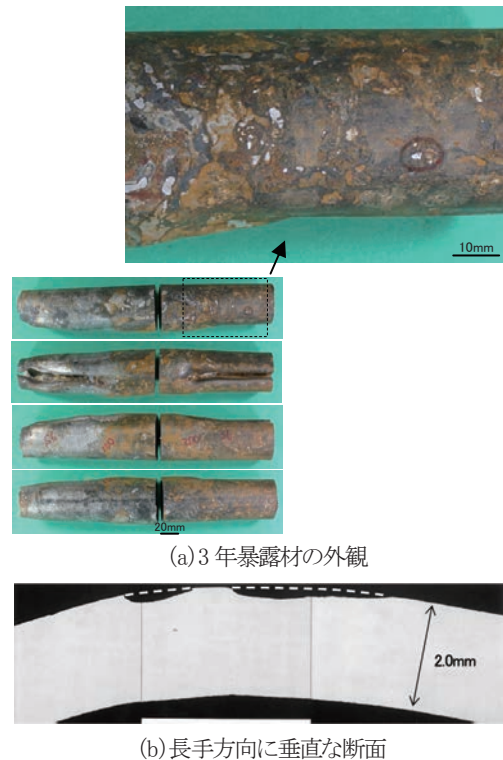


図 6 飛騨トンネルにおいて湧水中に 3 年間暴露された鋼管膨張型ロックボルト（めっきなし材）の外観

Fig.6 Appearance of expansive rock bolt without plating in three years exposure under spring water in Hida tunnel.

量より、約 8 年での 10% の強度低下、ならびに約 13 年での穴あきが推定された。これに対して、図 8 (b) に示すように RPE ロックボルトの異形管外面の ZAM めっき層は、打設後 1 年間で時間経過と共に腐食により減量するものの、2 年以降は腐食減量 45g/m<sup>2</sup> 程度からの変化はほとんど認められず、鋼素地の健全性は維持されている。両面のめっき付着量が 140g/m<sup>2</sup> 以上であることから、10 年程度以内に鋼素地表面が露出することはないと予測される。

以上の結果と、別途検討した促進腐食試験の結果<sup>5)</sup>も考慮すると、めっきのない従来の鋼管膨張型ロックボルトが打設後 10 年以内にその機能を失う（断面減少による 10% 以上の強度低下）のに対して、開発した RPE ロックボルトは、打設後 20 年程度以上はその強度を維持することが可能であると推定された<sup>3,6)</sup>。

以上、一連の検討結果を受けて、RPE ロックボルトがシステムボルト（恒久構造物ボルト）として 2006 年 7 月に日本土木学会「トンネル標準示方書」に記載された<sup>7)</sup>。これにより国内すべてのトンネル標準設計に適用することが可能となった。



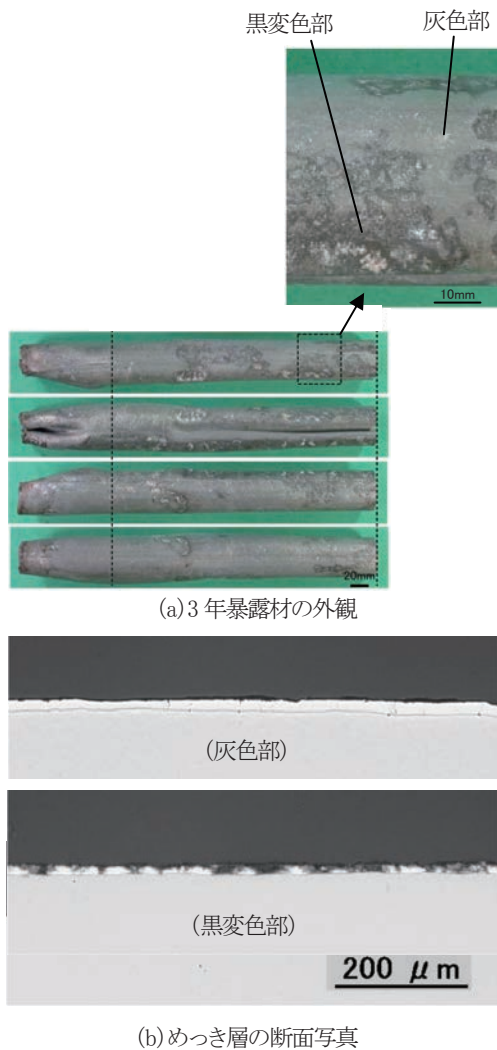


図7 飛騨トンネルにおいて湧水中に3年間暴露されたRPEロックボルトの外観

Fig.7 Appearance of RPE rock bolt in three years exposure under spring water in Hida tunnel.

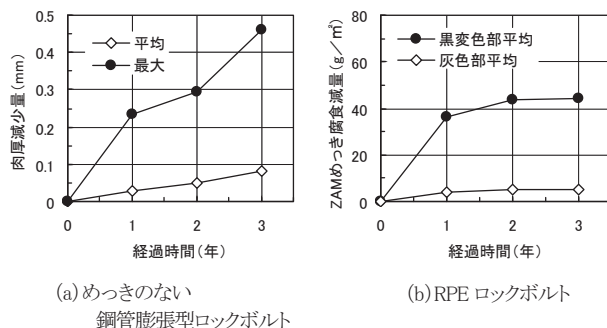


図8 飛騨トンネルでの鋼管膨張型ロックボルトの耐久性試験結果

Fig.8 Result of the durability test of expansive rock bolt at Hida tunnel.

#### 4. 適用事例

開発したRPEロックボルトについては、2003年から前述の飛騨トンネルに採用されたのに引き続き、全国的高速道路トンネル、JR北海道、九州新幹線および国土交通省道路トンネルなどに適用範囲を拡大し、さらに2009年よりJR東海超伝導リニア中央新幹線トンネルにも採用された。また、2004年には、海水による腐食が問題となる海底トンネル（倉敷LPガス国家備蓄基地トンネル連絡坑）にも適用された。これらにより、2011年9月に累計販売数量20万本（約2,000トン）を達成した。

#### 5. 結 言

鋼管膨張型ロックボルトに高耐食溶融めっき鋼板“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定着式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) 仲子武文, 吉田剛之, 松原茂雄, 橋高敏晴: 日新製鋼技報 No.85 (2004), 49-56.
- 2) 谷本親伯: 土木特殊工法シリーズ 4NATM\_1, 森北出版株式会社, 東京, (1986), 1-6.
- 3) 中田雅博, 城間博通, 伊藤哲男, 大嶋健二, 井上正二, 朝田博, 仲子武文, 松原茂雄: 日本道路公団試験研究所トンネル研究室・日新製鋼株式会社共同研究報告書「鋼管膨張型ロックボルトの適用性に関する共同研究報告書」(2004.3), 13-19.
- 4) 関茂和, 海瀬忍, 仲子武文, 松原茂雄: 土木学会第62回年次総会学術講演 第VI部門, No.6-150 (2007.9), 299-300
- 5) 橋高敏晴, 西畑三鶴, 関茂和, 海瀬忍, 田名瀬寛之, 仲子武文, 松原茂雄: 材料と環境, 56-10 (2007.10), 464-471.
- 6) 清水雅之, 海瀬忍, 仲子武文, 松原茂雄, 橋高敏晴: トンネル工学報告集第18巻 (2008.10), 9-13.
- 7) 土木学会: トンネル標準示方書 (2006.7), 79-86, 165-167.