

湧水のある山岳トンネル地山における 鋼管膨張型ロックボルトの耐久性

Durability of Hydraulically Expansion-type Rock bolt in Borehole of
Mountain Tunnel with Spring Water

清水 雅之¹・海瀬 忍¹・仲子 武文²・松原 茂雄³・橘高 敏晴⁴

Masayuki Shimizu, Shinobu Kaise, Takefumi Nakako,
Shigeo Matsubara and Toshiharu Kittaka

¹正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

E-mail:m.shimizu.ac@ri-nexco.co.jp

²非会員 日新製鋼株式会社 技術研究所 (〒662-0092 兵庫県尼崎市鶴町1番地)

³非会員 工博 日新製鋼株式会社 技術研究所 (〒100-8366 東京都千代田区丸の内三丁目4-1)

⁴非会員 工修 日新鋼管株式会社 (〒100-8366 東京都千代田区丸の内三丁目4-1)

Hydraulically expansion-type rock bolts made of steel pipe have often been used for the construction of tunnels in the natural ground with plentiful spring water or areas where the natural ground is readily displaced by tunnel excavation. Rock bolts hot-dip coated with Zn-6%Al-3%Mg alloy and without coating have been installed in Hida Tunnel on the Tokai Hokuriku Expressway to evaluate the durability under spring water conditions. These rock bolts were collected annually by over-coring method, one, two and three years after the installation and their corrosion behavior was examined.

Key Words :durability, fresh water corrosion, zinc silicate layer, corrosion prevention effect, mountain tunnel

1. はじめに

トンネル工事で用いられているロックボルトは、鋼棒等をモルタルなどで充填被覆し地山と一体化する方式(全面定着方式ロックボルト)が一般的であり、長期的使用を前提としたロックボルトとして使用されている。一方、多量の湧水区間でモルタルを使用する全面定着方式では、施工が困難な場所や変位速度が大きく早期定着が必要な箇所において、鋼管を拡張して孔壁に押し付け地山に拘束力を与える方式(鋼管膨張型ロックボルト)が採用されている。鋼管膨張型ロックボルトは、防錆処理が施されていないため発錆が懸念されることにより、長期的使用を前提としたロックボルトとして使用するに至っていない。このような背景のなかで、めっきを施し、長期耐久性を確保した鋼管膨張型ロックボルトの開発が望まれた。図-1にめっき有りとなしの鋼管膨張

型ロックボルト打設後半年経過した状態の外観を示すが、写真上段のめっき無しの鋼管膨張型ロックボルトは、発錆が認められる。



図-1 半年後に回収したロックボルトの外観状況
(下段がめっき有り、上段がめっき無し)

近年、溶融亜鉛-6%アルミニウム-3%マグネシウム合金めっき^{1)・2)}による防錆処理が施された鋼管膨張型ロックボルトが新たに開発された³⁾ことから、湧水地山における耐久性を評価すべく、湧水の多いことで知られていた工事の東海北陸自動車道飛騨トンネ

ル（図-2）にて、3年間に及び試験打設後の状態を確認した。

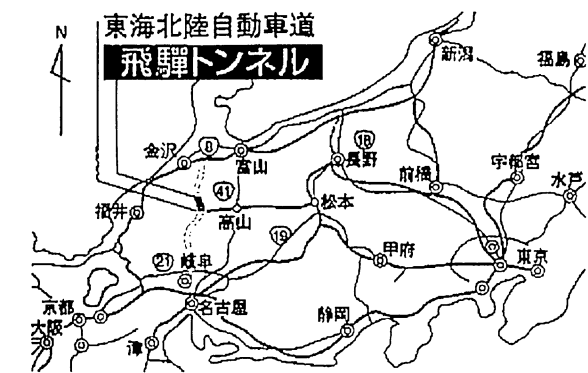


図-2 飛驒トンネル位置図

打設場所の地質は、花崗岩の地山である。また、湧水の水質試験もあわせて行い、p h 値の状態を観察した。値は平均で8.8の中性からややアルカリ側という状態であった。試験場所は、湧水の状況や採取性を考慮して飛驒トンネル白川方抗口から200m地点の本坑側壁部とした。試験材料は、長さが3mの溶融亜鉛-6%アルミニウム-3%マグネシウム合金めっき製鋼管膨張型ロックボルト、および比較として防錆処理を施していない鋼管膨張型ロックボルト（表-1）を2003年1月にあわせて約50本打設した。

表-1 試験材料

種別	溶融亜鉛合金めっき	めっき無し(普通鋼裸材)
寸法(mm)	φ36×t2.0×3,000 (素管φ54)	φ36× t2.0×3,000 (素管φ54)
異形管素材	STKM14A	SS1232
めっき付着量(g/m ²)	両面で140以上	—

2. 鋼管膨張型ロックボルトの回収方法、調査方法

打設後、1年後、2年後および3年後に、地山より、鋼管膨張型ロックボルトに損傷を与えず回収することを考慮し、図-3 に示すボーリングマシン（ビット内径100mm）によるオーバーコアリングを試み、破碎状の地山とともに1～2m程度のロックボルトを回収した。

調査は、ロックボルト外観、めっき層および鋼素地の損傷程度の観察、めっき層の腐食により形成される腐食生成物の定性、湧水の成分分析などについて行った。



図-3 試験打設におけるオーバーコアリングの状況

3. 調査結果

(1) 湧水水質調査

湧水水質調査の結果を表-2に示す。調査の結果からは、一般に強酸性などの耐久性に影響を与える数値は認められなかった。

表-2 湧水水質調査結果

項目	分析値	単位
濁度	2	度
pH	8.8/21℃	—
電気伝導率	90	μ S/cm
Mアルカリ度	40	mgCaCO ₃ /L
総硬度	38	mgCaCO ₃ /L
重炭酸イオン	40	mgHCO ₃ ⁻ /L
塩素イオン	2.4	mg/L
硫酸イオン	1.3	mg/L
硝酸イオン	ND	mg/L
アンモニウムイオン	ND	mg/L
カルシウム	11	mg/L
マグネシウム	2.3	mg/L
ナトリウム	2.5	mg/L
総鉄	0.63	mg/L
総ケイ素	11	mg/L
遊離炭酸	ND	mgCO ₂ /L
溶存酸素	8.8	mg/L
マンガン	0.066	mg/L
アルミニウム	ND	mg/L
全シリカ	—	mg/L
採取年月日	2003/1/29	
採取位置	白川側200m	

(2) 防錆処理を施したロックボルト

3 年後回収の溶融亜鉛-6%アルミニウム-3%マグネシウム合金めっき品の外観写真を図-4 に示す。図は90 度ずつ回転させながら撮影した全周の外観である。灰色の色調を呈する領域（以下、灰色部という）と灰色部よりやや強い黒色を呈する領域（以下、黒変色部という）が混在している状況であった。

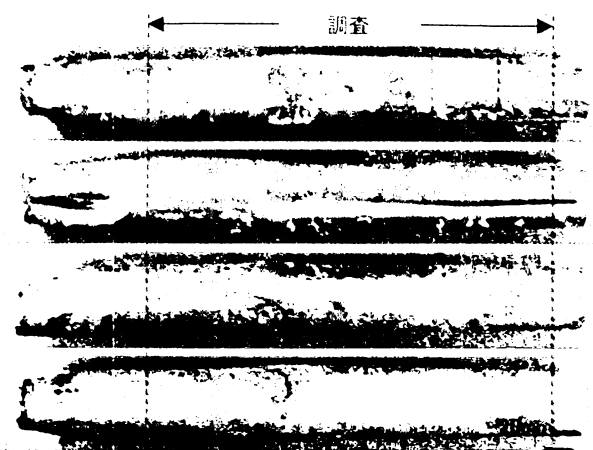


図-4 3年後回収品の外観

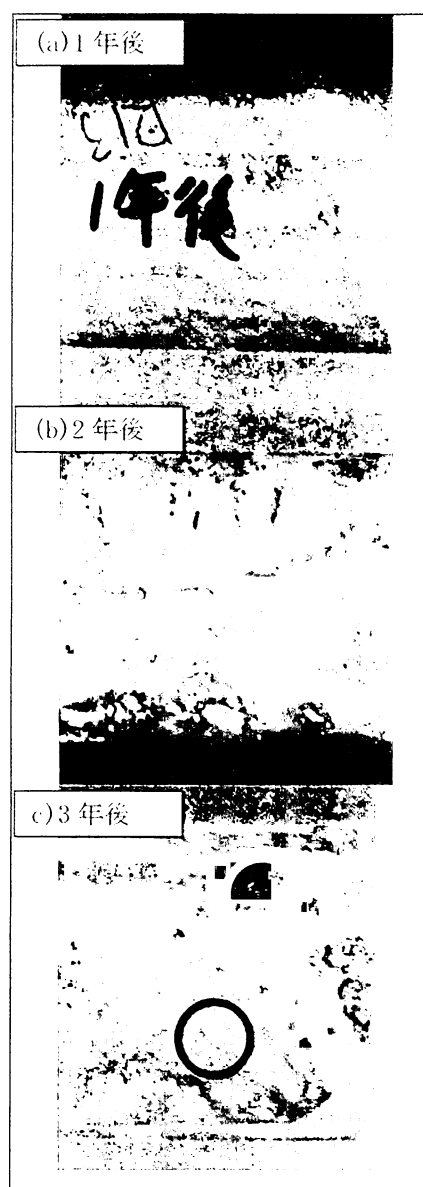


図-5 回収品の外観

図-4 中の四角の点線枠で囲った部位の拡大写真を1年後、2年後のものとあわせて図-5に示す。白丸が灰色部を、黒丸が黒変色部を表す。2年後、3年後回収品では、1年後回収品にはみられない黒変色部での白さび発生が認められ、めっき層の腐食進行が予想されたが、2年目と3年目の比較からは黒変色部の占める面積率（約40%）を含め、外観ではほとんど差が認められなかった。外観からは鋼素地の腐食を示す赤さびは全く認められなかった。

図-5 (c)の白丸、黒丸でマークした点の円周方向断面組織が図-6である。灰色部はめっき層表層がわずかに腐食しているだけである。黒変色部ではめっき層表層からの腐食が局部的に進行し、腐食生成物に変化しているように観察され、これらの腐食生成物が黒変色の原因と思われる。いずれの断面組織からも、鋼素地の腐食は観察されなかった。

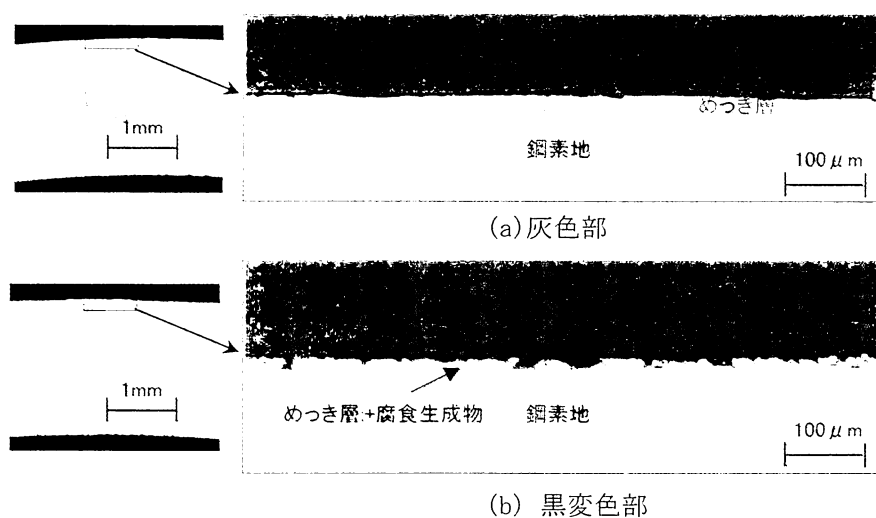


図-6 灰色部、黒変色部の断面組織

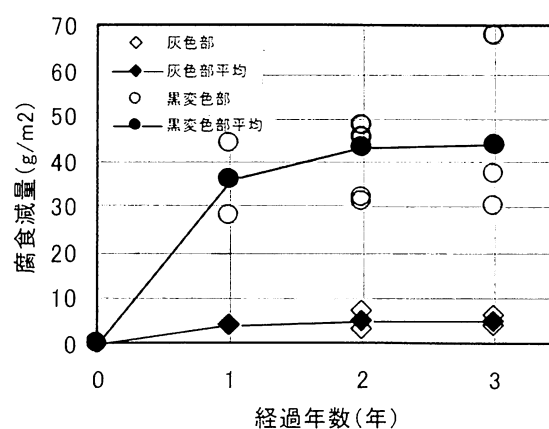


図-7 めっき層の腐食減量
(腐食減量×0.16 がほぼ厚み μm に相当)

めっき層の腐食量を定量的に把握するために、回収後の溶融亜鉛-6%アルミニウム-3%マグネシウム合金めっき品のめっき層腐食減量を測定した。図-7に示すように、灰色部の平均腐食減量は1年経過品で 4g/m^2 、2年、3年経過品で 5g/m^2 と極めて微小であり、1年経過後ではほぼ飽和している。また、めっき層の断面観察結果ともよく対応しており、これ以降の腐食速度は極めて小さいものと推定された。黒変色部については、1年経過品で 36g/m^2 とかなり大きな腐食減量があったが、2年経過品で 43g/m^2 、3年経過品で 44g/m^2 と、2年経過以降は極めて小さな変化率となった。

これらの考察のため、図-6に示しためっき層の一部についてEPMA分析を実施した。灰色部においてはめっき層の最表層に存在する化合物層は主にZn、SiおよびOから成っており、表層から溶出した亜鉛イオンと溶性ケイ酸が反応して生成した非晶質のケイ酸亜鉛層であると推定され、めっき層の腐食減量曲線（図-7）から1年経過後には反応がほぼ完了したものと考えられる。

一方、黒変色部はZn-Al-Mg系のめっき金属部、Zn-Al-O(S)系の腐食生成物部および最表層にほぼ均一に分布するZn-Si-O系層で構成されている。同様にめっき層の腐食減量曲線から、2年経過後には反応がほぼ完了したものと考えられる。灰色部、黒変色部いずれの腐食生成物に覆われている場合でも、めっきとしての保護機能が働くため、鋼素地が腐食するまでには相当の年数が必要である。

(3) 防錆処理を施していないロックボルト

比較として防錆処理を施していない鋼管膨張型ロックボルトの3年後の典型的な外観を図-8に示す。



図-8 3年後回収品の外観

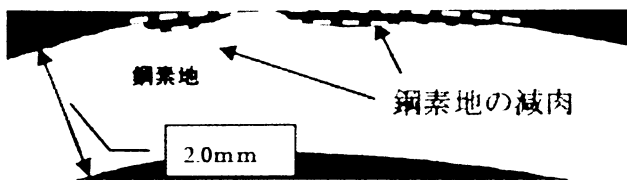


図-9 防錆処理を施していないロックボルトの減肉状況

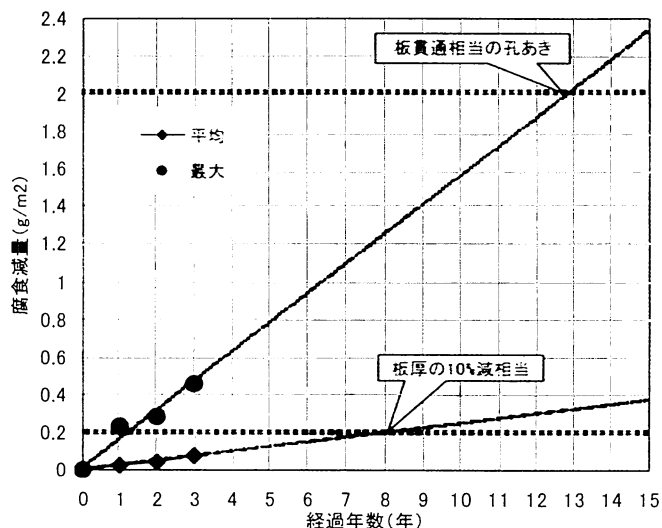


図-10 鋼素地の板厚減量量

あまり腐食していない部位とさびこぶが脱落して窪んだ部位が混在しており、図-9に示した断面からもその様子が窺える。

各経過年の回収品について、各断面の平均板厚減少量から回収年次毎の板厚減少量の平均値を、各断面の最大板厚減少量から回収年次毎の最大板厚減少量をそれぞれ求め図-10に示した。防錆処理を施していない鋼管膨張型ロックボルトの場合は、平均で 0.026mm/年 、最大で 0.155mm/年 の板厚減少が確認された。一般に許容範囲とされる10%の平均板厚減少までは約8年、および最初の孔あきまでは約13年と推定される。なお、溶在酸素を含む中性自然水環境において、鉄上にさび層が存在する場合の腐食速度は 0.1mm/年 程度とされており⁴⁾、今回試験を行った場所の腐食環境は、概ね標準的な環境と言える。

4. 考察

湧水のある地山に打設した溶融亜鉛-6%アルミニウム-3%マグネシウム合金めっき鋼管膨張型ロックボルトを定期的に回収して調査した結果、2年経過までは灰色の色調を呈しほとんど腐食の認められない領域（灰色部）と、灰色部よりやや強い黒色を呈

しめつき層が局部的に腐食した領域（黒変色部）とが混在した状態で腐食が進行することが確認された。それ以降は、腐食の進行が実質的に停止した状態となっており、鋼素地は健全に保たれたままである。防錆処理を施していない鋼管膨張型ロックボルトが13年で孔あき発生が予想されることと比較すると、明らかに両者の防錆性能には差があると言える。

5. まとめ

鋼管膨張型ロックボルトの長期耐久性を確認するため、3年間の経過観察を行った結果、めつき無しでは鋼素地の腐食が認められ、ロックボルトに求める耐力性能が低下すると推察し、長期的使用を前提とした材料としては不適であると判断される。次にめつきを施した材料は、めつき層が確保されていること、2年目から3年目の減量が少ないこと、鋼素地まで腐食が及んでいないことを確認したことにより、水質や地質などの条件が今回試験を行った地山と同様な、自然由来成分が中性からアルカリ質の山岳トンネルにおいては、3年間の耐久性が実証できたことにより、長期的な品質確保が可能な材料であると考えられる。

参考文献

- 1) 小松厚志, 泉谷秀房, 辻村太佳夫, 安藤敦司, 橘高敏晴: 溶融 Zn-Al-Mg 系合金めつき鋼板の促進腐食環境下における耐食性と防食機構, 鉄と鋼, 86, pp. 534-541, 2000.
- 2) 清水 剛, 吉崎布貴男, 三吉泰史, 安藤敦司: 溶融 Zn-6%Al-3%Mg 合金めつき鋼板(ZAM) の大気腐食挙動, 日新製鋼技報, Vol. 85, pp.11-22, 2004.
- 3) 仲子武文, 吉田剛之, 松原茂雄, 橘高敏晴: RPE ロックボルトシステムの開発, 日新製鋼技報, Vol. 85, pp.49-56, 2004.
- 4) 金属の腐食・防食 Q&A 腐食防食協会編, 丸善, p.5, 1988.