

技術論文

山岳トンネル補助工法の作業負荷軽減・品質向上に貢献する 鋼管技術

Steel Pipe Products and Mechanical Connections for Improving the Productivity and Quality of Auxiliary Methods in Mountain Tunnel Construction

阿形 淳*	伊奈 正樹	門脇 和也
Jun AGATA	Masaki INA	Kazuya KADOWAKI
茂手木 優輝	西澤 正士	津留 英司
Yuuki MOTEGI	Masashi NISHIZAWA	Eiji TSURU

抄 録

山岳トンネルの建設において、トンネル掘削中に地山の安定性を確保できない場合に様々な補助工法が適用される。日本製鉄(株)は補助工法で使用される鋼管製品として軽量ハイテン鋼管、付着性に優れたNS-SUPERGLIP®(ディンプル鋼管)を開発し、山岳トンネルの施工における作業負荷低減、品質向上に貢献してきた。これらの製品の専用の継手技術を併せて開発しており、本報では鋼管および継手の開発内容を紹介する。

Abstract

In mountain tunnel construction, various auxiliary methods are applied for improving the instability of ground conditions. Nippon Steel Corporation has contributed to improving the productivity and quality of mountain tunnel construction by developing pipe products—lightweight pipes with high strength, dimpled pipes for high bond strength. In addition, thread connections for new pipe products have been developed. This paper introduces details of the pipe products and thread connections for the auxiliary method in mountain tunnel construction.

1. 緒 言

日本において山岳部、および一部都市部におけるトンネルの施工方法としては、NATM (New Austrian Tunneling Method) が多く適用されている。NATMは1970年代に日本に導入されたトンネル工法であり、地山を掘削した後、吹き付けコンクリートとロックボルトなどの支保工により掘削先端面(切羽)の安定性を確保しながら施工していくことが特徴である。この際、支保工のみで切羽の安定性を確保できない場合にさらに補助工法が適用される場合がある。日本製鉄(株)は山岳トンネル補助工法において補強部材として使用される鋼管およびその利用技術を提供することで、山岳トンネル工法の作業負荷軽減および品質向上に貢献している。本報では日本製鉄における山岳トンネル補助工法向けの鋼管技術開発の一端を紹介したい。

2. 長尺フォアパイリング工法向けハイテン鋼管の開発

長尺フォアパイリング工法は図1に示すように、トンネル天端面に斜め上方に補強部材を打ち込み、さらに補強部

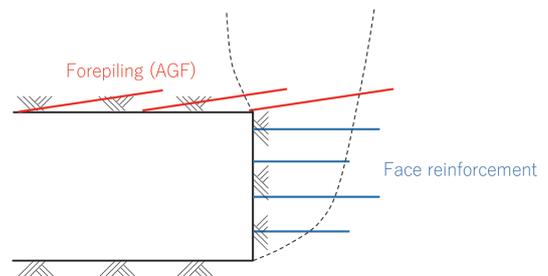


図1 長尺フォアパイリング工法、鏡補強工法の模式図
Schematic drawings of forepiling method and face reinforcement method

材を介してウレタン系やセメント系の薬液を地山に注入し、直後に掘削する切羽を含む地山の安定を確保する工法である。補強部材としては、日本産業規格 (JIS) G3444 に規定された直径 100mm 前後の一般構造用炭素鋼鋼管 (STK400) が多く使用されている。長尺鋼管フォアパイリング工法のうち、AGF (All Ground Fasten) 工法は補強部材を掘削用のドリルジャンボを用いて地山に打ち込む工法であり、1本あたり 3m 前後の鋼管を 4 本程度連結して施工することが多い。このとき、補強部材は人力でドリルジャンボに積載するが、1本あたりの重量は人力で運搬可能な限界重量に近く、負荷の高い作業となっている。日本製鉄では (株) 大林組、(株) 亀山の協力をいただき本工法向けに薄肉軽量かつ高強度なハイテン鋼管および鋼管を接続する継手技術を共同開発し、工法の品質と作業負荷軽減の両立を目指した。

2.1 ハイテン鋼管の詳細

図 2 に従来 AGF 工法向けに使用されている STK400 と開発鋼管の比較写真を示す。また、表 1 には断面性能や構造性能の比較を示す。開発したハイテン鋼管は熱間圧延鋼板を素材として製造された冷間仕上電縫管であり、外径 114.3mm、肉厚 6.0mm の従来鋼管に対して外径はそのまま肉厚を 3.5mm とした。これにより、フォアパイリング工法でよく用いられる長さ 3.0m あたりの重量は 48.0kg から 28.7kg に約 40% 軽量化された。ハイテン鋼管の最低降伏強度は 600MPa、最低引張強度は 730MPa に設定した。これにより、最低降伏・引張強度から理論的に計算される管体の引張強さおよび降伏曲げモーメントはいずれも従来

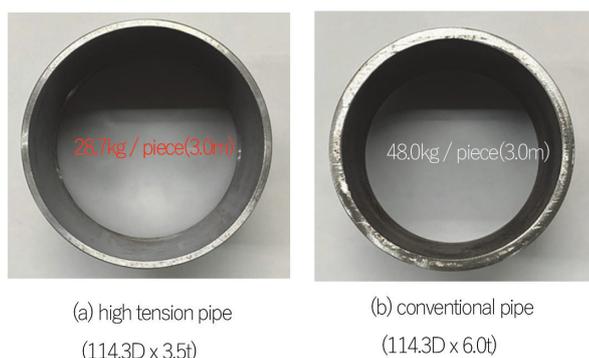


図 2 従来鋼管と開発鋼管の比較写真
Comparison between cross sections of conventional and high-tension pipes

鋼管を上回り、作業負荷の軽減と補強部材としての構造性能を両立した鋼管の開発を達成した。

2.2 専用ねじ継手の開発

AGF 工法に用いられる鋼管は多くの場合、人力でねじ継手を締結することで連結しながら施工されるが、開発鋼管は薄肉のため、従来使用されてきたねじ継手をそのまま適用すると十分な構造性能を確保できない。そのため、専用のねじ継手を開発した。ねじ継手で素管が薄肉の場合、カプラーなどを介するか、あるいは素管管端に拡張・縮径加工を施すことで構造性能を確保することが多いが、日本製鉄では独自の継手設計により素管に直接雄ねじ・雌ねじを加工するのみ (図 3) で表 1 に示す従来鋼管母材と同等以上の構造性能を確保した。構造性能は図 4 に示すような曲げ試験・引張試験、あるいは構造解析などを駆使して十分な検証を行った。図 4 には一例としてねじ継手の曲げ試験の結果を示す。同一仕様のねじ継手 6 体の曲げ試験を行い、最大曲げモーメントが目標である 12.3kN・m (従来鋼管の管体降伏曲げモーメント) を安定して超える結果を示した。

2.3 施工実績等

開発したハイテン鋼管はトンネル施工現場での試験施工を経たのち実用化し、すでに複数の現場で実適用を完了し

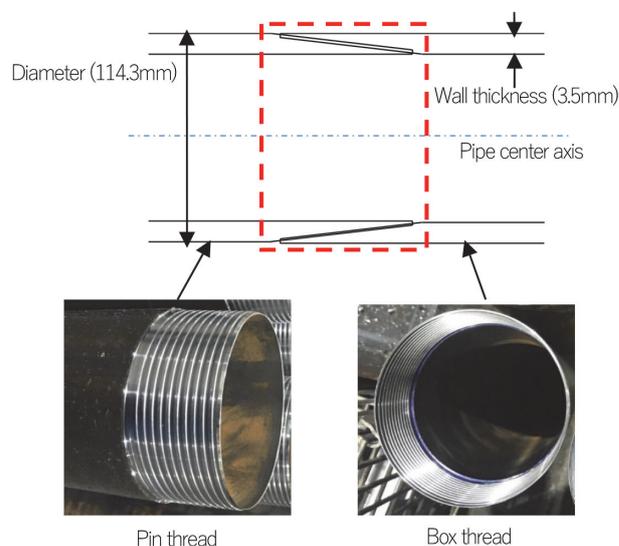


図 3 開発したねじ継手
Schematic drawings and pictures of thread connection for high-tension pipe

表 1 従来鋼管と開発鋼管の性能比較
Comparison between structural performance of conventional and high-tension pipes

Pipe	Diameter	Thickness	Weight	Specified minimum strength		Strength of pipe body	
				Yield	Tensile	Tensile strength	Yield bending moment
	mm	mm	kg/m	N/mm ²	N/mm ²	kN	kN・m
Conventional	114.3	6.0	9.56	235	400	480	12.3
High-tension	114.3	3.5	16.0	600	730	731	19.6

た²⁾。図5²⁾には試験施工の写真を示す。ハイテン鋼管の適用により大きく2つのメリットが得られた。

①作業員の負荷軽減

図2に示した通り、施工する鋼管1本あたりの重量が40%軽減され、現場作業員の負荷が軽減したとのヒアリング結果が報告されている²⁾。

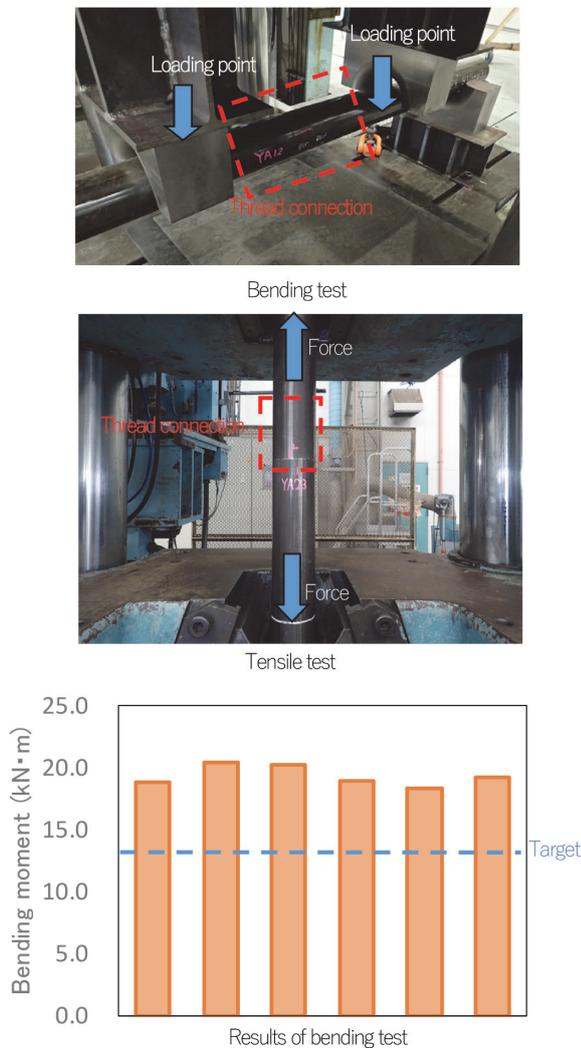


図4 開発ねじ継手の性能試験写真および曲げ試験結果
Pictures of mechanical test of thread connection and the results of bending test



図5 ハイテン鋼管試験施工状況²⁾
Picture of AGF method with high-tension pipe²⁾

②サイクルタイムの短縮

鋼管が軽量化したことにより、施工機械への部材の積み込みと地盤の穿孔を同時に進行できるようになり、施工に必要なサイクルタイムが減少した。実際の施工実績として、サイクルタイムがハイテン鋼管の使用により約10%減少した例(部材1本(12.5m)あたり150分⇒135分)が報告されている²⁾。

3. 鏡補強工法向けNS-SUPERGLIP®(ディンプル鋼管)の開発

山岳トンネル掘削時に鏡面の安定を確保するため、補助工法として補強ボルトを鏡面に打設する必要がある(図1)。鏡補強ボルト工法のうち、長尺鏡ボルトは長さ3.0m~5.0mの補強ボルトを地山に打設するとともに、多くの場合はモルタル系や樹脂系の薬液注入を併用し、掘削によって緩んだ鏡面を地山に定着させる。この際、打設したボルトはいずれ地山とともに掘削されるため、掘削が容易になるよう折損しやすい樹脂系材料が使用されることもあるが、近年は掘削後に固化した薬液と補強ボルト、土砂等の分別を容易にするため折損性を高めたスリット式鋼管が用いられるケースも増えている³⁾。

鏡補強ボルトとして使用される鋼管は、地山の安定性確保のため注入した薬液との付着性能が必要となり、通常の鋼管で付着が不足する場合は穴あけや突起加工などで補うことになるが、日本製鉄では製造時に鋼管表面にくぼみ加工を施すことで素管の状態が付着性能を高めたNS-SUPERGLIP®(ディンプル鋼管)(以下、ディンプル鋼管)を鏡補強ボルトとして提供している。

3.1 ディンプル鋼管の詳細

日本製鉄は熱間仕上電縫管として熱間圧延鋼板から成形・電縫溶接されたのち、突起を設けた成形ロールを通過させることで鋼管表面にくぼみを加工する(図6³⁾)各種くぼみ付き鋼管を提供している。本報で紹介するディンプル鋼管(図7³⁾(a)の他、図7(b),(c)に示す各種段付鋼管も製造可能であり、山岳トンネル補助工法のうちフットパイル工法への適用実績がある⁴⁾。ディンプル鋼管の付着強度を示す一例として図8³⁾に表面が平滑な通常鋼管、ディンプル鋼管、鉄筋D51の3種類の材料について、同条件でモルタルとの付着強度試験を実施した際の写真および試験結果を示す。ディンプル鋼管の付着強度は通常鋼管と比較して7倍程度の高い値を示し、また鉄筋と比較すると最大付着強度は劣るもののピーク値後の付着強度低下が小さいことが特徴である。

表2に鏡補強工法向けに提供しているディンプル鋼管仕様の一例を示す。外径76.3mm、肉厚4.5mmであり、材料の最低降伏強度は235MPa、最低引張強度は400MPaと一般構造用炭素鋼鋼管STK400に準じた材料強度を確保し

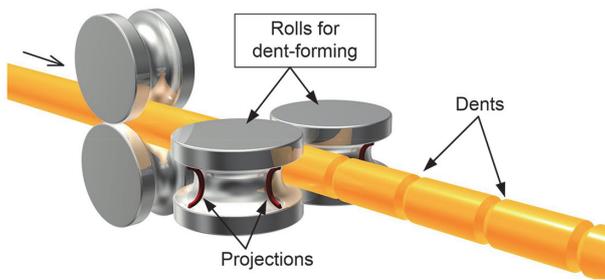


図6 鋼管表面へのくぼみ成形プロセス³⁾
Schematic drawing of dent forming process on pipe surface³⁾

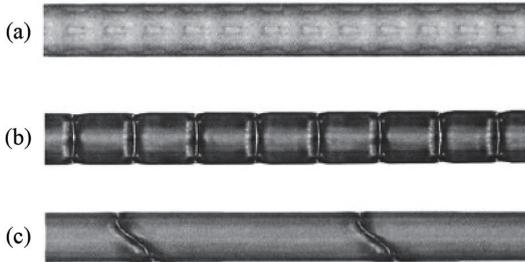


図7 くぼみ付き鋼管の例³⁾
(a) デンプル鋼管, (b) 段付鋼管, (c) 斜め段付鋼管
Examples of dent-formed pipe³⁾
(a) Dimpled pipe, (b) Grooved pipe, (c) Oblique grooved pipe

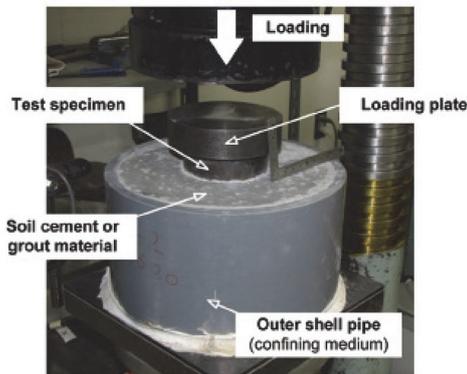


図8 付着試験の状況と試験結果³⁾
Picture and results of bonding test³⁾

た。円周方向および管軸方向のくぼみの個数や間隔は必要な付着力に応じて調整することも可能となっている。

3.2 専用ねじ継手の開発

長尺の鏡補強ボルトは多くの場合ねじ継手等の機械式継手で複数本を連結して施工するが、デンプル鋼管は表面のくぼみ部分にねじ山を形成できないため、直接鋼管にねじを加工すると必要な構造性能を確保できない可能性がある。これを補うため、デンプル鋼管の管端に雌ねじを加工し、短い通常鋼管 (STK400) の両端に雄ねじを加工したニップルを介してデンプル鋼管どうしを連結する専用ねじ継手を開発した (図9)。これにより、デンプル鋼管側ねじ継手の肉厚を厚くし、鏡補強部材に必要な引張強さを確保した。図9にはねじ継手の引張試験結果を示す。試験

表2 鏡補強向けデンプル鋼管の仕様
Specification of dimpled pipe for face reinforcement method

Pipe	Diameter mm	Thickness mm	Specified minimum strength	
			Yield N/mm ²	Tensile N/mm ²
Dimpled pipe	76.3	4.5	235	400

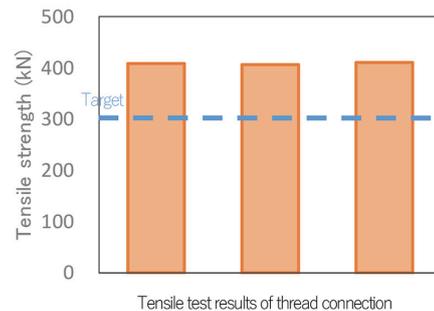
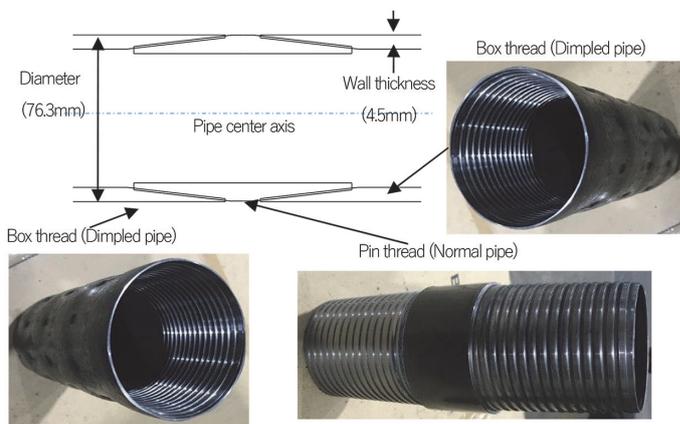
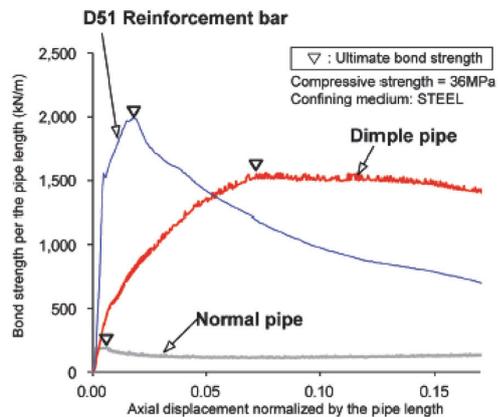


図9 デンプル鋼管用ニップル継手の外観および引張試験結果
Picture and tensile test results of nipple thread connection for dimpled pipe

は図4に示す引張試験装置を用いて行った。同一仕様のねじ継手3体の引張試験を行い、引張強さは目標強度の300kN(鋼管管体の引張強さ)を安定的に上回ることを確認できた。

3.3 施工実績等

開発したディンプル鋼管および継手は、実際のトンネル施工に供する前に亀山の協力のもと、図10に示す模擬施工試験を行った。コンクリートブロックを地山に見立て、施工機械にて継手で連結したディンプル鋼管部材の貫入を行い施工性その他に問題ないことを確認した。さらに現場施工試験を行ったうえで商品化を完了し、これまでに複数の山岳トンネル施工現場で採用されている。

4. おわりに

日本製鉄では山岳トンネル補助工法で用いられる補強部材について、人力作業の負荷軽減、注入材との付着性確保と構造性能の両立といった課題に対してハイテン鋼管やディンプル鋼管、およびその継手技術を開発し課題解決に貢献してきた。今後も山岳トンネルに限らず、構造管が使用される様々な建設分野において、高機能商品および周辺技術開発により顧客ニーズに応えていきたい。

謝辞

本報で紹介した商品開発にあたっては、(株)大林組、(株)

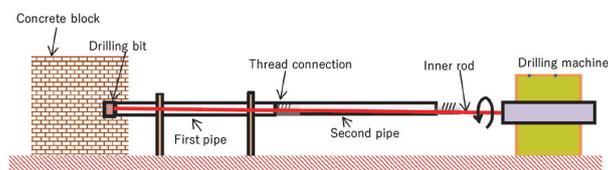


図10 ディンプル鋼管の模擬施工試験
Simulated construction test for dimpled pipe

亀山の両社に多大なるご協力をいただきました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会トンネル工学委員会 ほか編：トンネルライブラリー 20 - 山岳トンネルの補助工法. 東京, 丸善, 2009, 364p
- 2) 伊藤哲 ほか：トンネル工学報告集, 30, 1-43 (2020)
- 3) 妙中真治 ほか：新日鉄住金技報. (397), 99 (2013)
- 4) 神谷信毅 ほか：トンネル工学報告集, 18, 1-8 (2008)



阿形 淳 Jun AGATA
鉄鋼研究所 鋼構造研究部
鋼構造研究第一室 研究第二課長
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



茂手木優輝 Yuuki MOTEGI
東日本製鉄所 品質管理部
君津小径管管理室長



伊奈正樹 Masaki INA
名古屋製鉄所 品質管理部
品質保証室 品質保証課 主幹



西澤正士 Masashi NISHIZAWA
鋼管事業部 鋼管技術部
鋼管商品技術課



門脇和也 Kazuya KADOWAKI
東日本製鉄所 品質管理部
鹿島小径管管理室



津留英司 Eiji TSURU
日鉄テクノロジー(株)
研究試験事業所 材料特性評価部 強度室
博士(工学)